

Fundamentals Review

2023 April Vol.16 No.

4

技術の原点

位相的パッキング表現研究の原点

<https://www.ieice.org/ess/ESS/Fundam-Review.html>

ごあいさつ

237

コロナ禍の情報理論とその応用サブソサイエティの活動を振り返って

桑門秀典

技術の原点

239

位相的パッキング表現研究の原点

村田 洋

解説論文

247

少量のデータに対する機械学習

赤穂昭太郎

257

音源分離技術の基礎と動向

——確率モデル / 深層学習に基づく方法の概観

戸上真人

272

半導体論理開発における検証技術の発展と標準化の動向

三橋明城男, 吉川隆英

289

自然言語処理×教育における説明能力

——説明できるライティング評価技術への新しい展開

乾健太郎, 石井雄隆, 松林優一郎, 井之上直也, 内藤昭一, 磯部順子, 舟山弘晃, 菊地正弥

301

モバイル環境における情報指向型ネットワーク

塩川茂樹

310

電子情報通信学会と倫理綱領

——電子情報通信学会倫理綱領策定から現在まで

大谷卓史

その他

325

ESS ニュース

325

NOLTA, IEICE 特集号

木村真之

326

研究会に行こう！

326

特別企画 非線形問題研究会（NLP）とニューロコンピューティング研究会（NC）の合同研究会の開催報告

松下春奈

328

国際会議報告

328

2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications

薄 良彦

331

受賞者の声

331

令和 4 年度 基礎・境界ソサイエティ表彰

335

令和 4 年度 NOLTA ソサイエティ表彰

336

2021 年 SITA 若手論文賞

338

論文募集

Preface

237

Reflecting on the Activities of Subsociety of Information Theory and Its Applications during the COVID-19 Pandemic

Hidenori KUWAKADO

Origins of Technology

239

The Origin of Packing Representation Research

Hiroshi MURATA

Review Papers

247

Machine Learning for Small Data

Shotaro AKAHO

257

Fundamentals and Trends on Sound Source Separation

: Overview of Approaches with Probabilistic Model and Deep Learning

Masahito TOGAMI

272

Advancement and Standardization of Logic Verification Technologies in Semiconductor Development

Akio MITSUHASHI, Takahide YOSHIKAWA

289

Frontiers in Explainable Automated Writing Evaluation

Kentaro INUI, Yutaka ISHII, Yuichiro MATSUBAYASHI, Naoya INOUE,
Shoichi NAITO, Yoriko ISOBE, Hiroaki FUNAYAMA, Seiya KIKUCHI

301

Information Centric Networking in Mobile Environments

Shigeki SHIOKAWA

310

The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) and its Code of Ethics

: From the Formation of the IEICE's Code of Ethics to the Present

Takushi OTANI

Miscellaneous Articles

325

ESS News

326

Let's go to IEICE Workshops!

328

International Conference Report

331

Winners' Voice

338

Call for Papers



コロナ禍の情報理論とその応用 サブソサイエティの活動を振り返って

Reflecting on the Activities of Subsociety of Information Theory and Its Applications during the COVID-19 Pandemic

SITA 担 当 副 会 長 桑 門 秀 典

基礎・境界ソサイエティの規程により、サブソサイエティ長の任期は最長2年と決められています。情報理論とその応用サブソサイエティ長としての私の任期は2023年6月までで、奇しくも、任期とコロナ禍がちょうど重なりました。退任を前に、コロナ禍中の情報理論とその応用サブソサイエティ（SITA サブソ）の活動を振り返りたいと思います。

SITA サブソは、国内会議「情報理論とその応用シンポジウム（SITA）」を年1回、国際会議「The International Symposium on Information Theory and Its Applications（ISITA）」を2年に1回主催しています。コロナ禍が始まった2020年8月のISITA2020は、ハワイでの開催を前提に準備を進めていましたが、急遽オンライン開催に変更し、同年12月に北海道登別市で計画していたSITA2020は、開催を中止しました。ISITA2020のオンライン開催もSITA2020の開催中止も、形式的にはSITA サブソの判断としてESSに承認頂きましたが、これらには各シンポジウム実行委員会の判断が強く反映されています。ISITAのオンライン開催は初めてのことであり、シンポジウム実行委員会には、会場や旅行者との折衝、発表者・参加者への気遣いなど大変な苦労があったことがうかがえます。2020年は、SITA サブソに限らず、本学会において、シンポジウム・研究会の多くがオンライン開催になったので、学会全体で同様の苦労があったと思います。SITA2020の開催中止においては、阪神・淡路大震災や東日本大震災でも開催を継続した本シンポジウムの開催中止を提案することは、シンポジウム実行委員会にとって苦渋の決断であったと察します。結果として、不確定要素が多い中にもかかわらず、各シンポジウム実行委員会が下した判断は適切だったと考えています。2021年11月のSITA2021では、規模縮小と慣例変更により対面開催の準備を進めたところ、開催期間が感染の波の狭間になり、無事に開催することができました。2022年10月のISITA2022は、懇親会は開催できませんでしたが、国外からの発表を除いて対面開催し、そして、同年11月のSITA2022では、コロナ禍以前のほぼ同じ形式・規模で開催することができました。2020年、

2021年と比較すれば、新型コロナ感染時の症状や世間の心理的印象などが変わったとはいえ、各シンポジウム実行委員会にはコロナ禍以前にはない労力と気力が必要だったことは想像に難くありません。また、対面開催を2021年から再開できたことは、シンポジウムの対面開催のノウハウの継承の観点からもよかったと思いますし、ISITA2020でオンライン開催のノウハウも蓄積することができました。

一方、2020年以来、SITA サブソの委員会は、すべてオンラインで開催しました。コロナ禍以前からオンライン会議のサービスはありましたが、あえて使おうという雰囲気はなく、2020年当初はやむを得ずオンラインで開催を始めたのが実情です。しかし、振り返ってみれば、シンポジウムの対面開催を望む声は多くお聞きしましたが、それと比較すれば、委員会の対面開催の再開を望む声は多くありませんでした。コロナ禍で移動制限があったとはいえ、全国各地に委員が散在していますので、今となっては、むしろ、以前はよく集まれたな、と思います。また、オンライン会議はやりようと思えばできるだろう、とコロナ禍以前に個人的には考えていましたが、実際にしてみて初めて分かったこともあります。無線LAN接続時の不安定さ、本人確認法の貧弱さなどの「オンライン会議への慣れの問題」ではない技術的課題は解決済みとは言い難い状況で、より快適なオンライン会議環境の実現の可能性を感じました。これらの課題解決はSITA サブソの研究対象に含まれる事項が多くありますが、それはさておき、オンライン会議参加者のカメラ、マイク、環境へのこだわりを垣間見ることができ、その人のオンライン対応への気配りのようなものも思いがけず知ることができました。

2023年5月から新型コロナは季節性インフルエンザと同じ扱いになります。つまり、新型コロナによる活動制限がなくなることになり、コロナ禍以前と全く同じ状況で学会活動ができることになります。しかし、コロナ禍以前と同じ活動状態に戻せばよい、というものでないでしょう。コロナ禍中にシンポジウムの対面開催を望む声があった一方、オンライン発表・オンライン参加にも長所はあり、コロナ禍後は多様な発表・参加形態を望む声があがることが予想されま

す。シンポジウム運営の一部は以前から旅行業者に委託していますが、運営の大半はシンポジウム実行委員会委員のボランティアですので、多様な発表・参加形態の実現は委員の更なる負担増になります。

ご存じのように、シンポジウム運営に限らず、本来、研究者の研究を支援するための学会運営が、若手研究者の負担となり、研究の妨げになっていることが昨今危惧されています。本学会はこの問題に対して、研究専門委員会の会計処理を学会本部が代行することにより、研究専門委員会の負担軽減を図ることを始めており、研究専門委員会から好意的な評価を得ています。会計処理に限らず、学会活動の様々な場面において、外部業者を更に活用することがこの問題の直接的な解決になることは自明ですが、先立つものが必要です。しかし、先立つものに深く関係する会員数も本学会・本ソサイエティの心配の種です。結局のところ、これらの問題の原因を突き詰めれば、研究者人数の減少、ひいては日本の人口減少という身も蓋もない結論になります。研究者人数が増えることは一般論としては好ましいことですが、ある分野の「独り勝ち」は必ずしも良い状態とはいえません。それぞれの研究分野の特性を考慮して、適切な規模のコミュニティを少なくとも維持し、若手研究者が研究時間を確保できる方策が必要であると考えています。

著者紹介

桑門秀典（正員：シニア会員）

1990 神戸大・工・電気卒。1992 同大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。1996 神戸大・工・助手。2002 神戸大・工・助教授。2007 同大学院・工・准教授。2013 関西大・総合情報・教授。現在に至る。暗号理論と情報セキュリティに関する研究に従事。1993 年 SCIS 論文賞、1994 年 SCIS 論文賞、2003 年度情報処理学会論文賞受賞。情報処理学会、IEEE、IACR 各会員。

位相的パッキング表現研究の原点

The Origin of Packing Representation Research

村田 洋 Hiroshi MURATA

アブストラクト LSI の配置設計に応用される位相的パッキング表現法としてシーケンスペア (sequence-pair) は一つのスタンダードな技術になっている。本稿では、シーケンスペアが生まれたときの状況、実用化は進んだのか、現在残された課題は何か、筆者はどのように関わることができたのかについて筆者の経験と意見を述べる。産業界における実用化は道まだ半ばであり、ベンチャー企業による挑戦は続いている。筆者がこの研究に参加できたのは社会人学生だったからこそと思う。本稿がかつての筆者のような「30 代半ばで日々充実して仕事している企業エンジニア」のアカデミックリフレッシュの背中を押す手助けになれば幸いである。

キーワード 位相的表現, パッキング表現, シーケンスペア, BSG, 矩形パッキング, ブロック配置, フロアプラン, EDA, 物理設計, チップ設計

Abstract Sequence-Pair, which is a topological representation for packing rectangles, was invented in Japan and has become one of the standard electronic design automation (EDA) techniques used in the physical designs of integrated circuits. In this article, I try to share how people started this unique research in a new university in 1994, what efforts were taken later in the industry to apply the idea in chip designs, and what challenges still remain today. If I contributed some parts in this history, it was mostly because I was happened to be a student with some work experience in the original research team. Thus, I hope that this article motivates young engineers in the industry, and refreshes them academically.

Key words Topological representation, Packing representation, Sequence-pair, BSG, Packing, Block placement, Floorplanning, EDA, Physical design, Chip design

1. はじめに

LSI の配置設計に応用される位相的パッキング表現法としてシーケンスペア (sequence-pair) は一つのスタンダードな技術になっている。シーケンスペアの最初の IEEE 論文⁽¹⁾だけでも、本稿執筆時点において IEEE Xplore 調べでは 472 件、Scopus 調べでは 559 件の論文から、参照されており、教科書などへの掲載も進んでいるようだ。多くの大学・大学院での講義でも取り上げられているとも聞く。YouTube で検索したところインドの若い先生が一般向けにシーケンスペアの解説動画を提供している例などもある⁽²⁾。

筆者は社会人学生としてそのような研究の重要な論文に第一著者として参加することができ大変に幸せであった。本稿では、シーケンスペアが生まれたときの状況、実用化は進んだのか、現在残された課題は何か、筆者はどのように関わることができたのかについて筆者の経験と意見を述べる。

一方位相的パッキング表現研究の技術自体に関しては、そ

の後の派生研究まで俯瞰して成果を整理する小特集が本学会誌 2015 年 9 月号に掲載されているので、そちらを参照されたい^{(3)~(8)}。

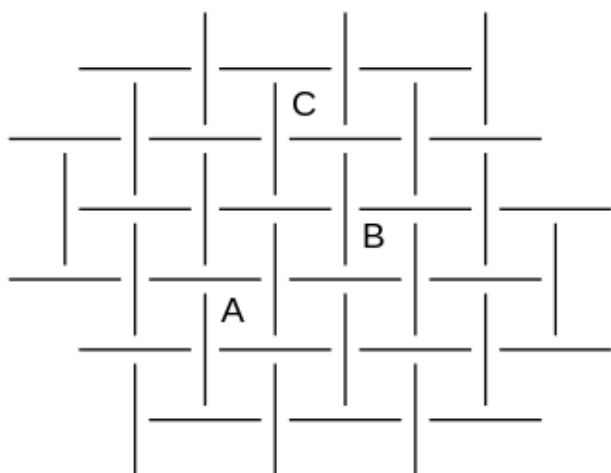
2. 位相的パッキング表現研究の誕生

2.1 BSG の誕生

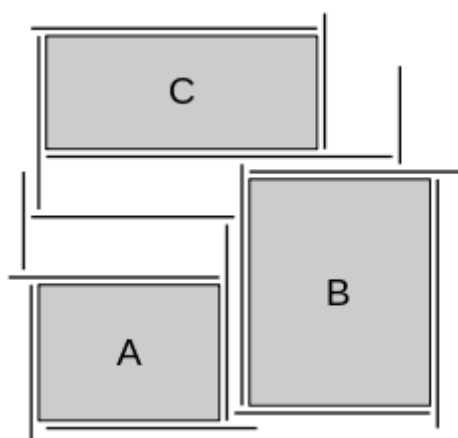
1994 年春、筆者は村田製作所グループの中で回路製品の設計・製造を担当していた小松村田製作所において厚膜ハイブリッド IC 技術を用いた音声帯域フィルタ製品やプリント配線基板を用いた TV チューナなどの高周波製品の設計に関する社内 EDA 環境整備を 10 年あまり担当したあと、通勤路の途中に新しく建設された北陸先端科学技術大学にリフレッシュのために第 1 期生として入学し、2 年間の博士前期課程を終えて後期課程に進学したところであった。実務経験から、ハイブリッド IC やプリント配線基板の配置設計の自動化を阻んでいる問題の核の一つは、様々な大きさの部品を狭い基板上に重ならないように並べることの難しさではないか、と感じていた。そこで、矩形パッキングという問題提起を行い、それを解く新しいアイデアがほしいと、先生や同級生の参加を呼びかけた。

それから確か僅か数日のうちに、年齢が筆者よりちょうど

村田 洋 非会員 株式会社ジェム・デザイン・テクノロジーズ
E-mail murata@gemdt.com
Hiroshi MURATA, Nonmember (Gem Design Technologies, Inc., Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ
Fundamentals Review Vol.16 No.4 pp.239-246 2023 年 4 月
©電子情報通信学会 2023



(a) BSGによる3矩形A, B, Cの配置表現例



(b) 配置実現例

図1 BSGのアイデア

一回り若い同級生であった中武氏（中武繁寿，現・北九州市立大学教授）が，壁がスライドするテンプレートを利用した解法を考案し，研究室の面々に披露した．彼のアイデアは図1のようなものであった．

T字型に組み合わせられた壁による二次元平面の領域分割を考え，分割された部屋に配置したい矩形を任意に割り当てる（図1(a)）．壁はT字型接続を保つ限り自由にスライドしたり伸縮したりできると考えて，割り当てた部屋に実際の大きさの矩形を置き，上下及び左右から全体を挟み，潰すように変形して配置を求める（図1(b)），というアイデアであった．中武氏はすぐにシミュレーテッド・アニーリング（simulated annealing, SA）の枠組みに基づいて，様々な割当を乱数を用いて発生し配置を求める工程を繰り返すことで，配置面積の最小化をはかる実験を始め，比較的短い計算時間のうちに多数の矩形を一見して極めて密に配置できることをデモして見せた．

積年の大問題がこれほど簡単に解決してしまったことに筆者は大いに驚いた．これは画期的な技術に違いない，と研究室は盛り上がった．研究室の教授であった梶谷先生（梶谷洋

司，現・東京工業大学名誉教授）は代表的な従来手法であるスライス構造に対比してスライス線を途中で止めた点が特徴的であるとして限定スライス構造（bounded sliceline grid, BSG）と命名した．そして中武氏を筆頭著者として我々は最初の論文を発表した⁽⁹⁾．

従来手法としてスライス構造があったことから分かるように，位相的表現は以前から知られている技術であった．しかし「なんでも表せる」ことを重視して出発した我々の研究は，従来手法とは一線を画す斬新なアプローチであると確信し，皆で高揚した気分を味わった．

2.2 シーケンスペアの誕生

BSGは画期的だ，というのは研究室全員の思いだったが，なぜうまくいくのかはあまりよく分からなかった．準備する部屋数はどのくらいが適当なのか，BSGはどんな配置でも表せるのか，という点が不明で落ち着かない感じが残っていた．そこで筆者はこの点——BSGで表される配置はどの程度一般的なのか——を集中して考えることにした．図2は，図1(a)のBSG割当例に，説明のための着色を加えたものである．

図2のBSG割当を上下あるいは左右に挟んで押しつぶす思考実験を行ってみると，各矩形がいかなる大きさであっても，また左右のどちらから先に押しつぶしたとしても，配置結果においてAとBは左右に分かれることに気付く．ここでAとBが左右に分かれるとは，必ずしもAのすぐ横にBが並ぶという意味ではなく，配置結果においてAとBの間に垂直な直線を描くことができる，という意味である．なぜAとBが左右に分かれるかといえは，BSG上でAとBの間には垂直な限定スライス線が障害物として存在するため押しつぶし変形の度合いに限界が生じているからである．この事情はBが同色のほかの部屋に割当変更されても変わらないことに気付く．そこでBが割り当てられている部屋と同色の領域をAの右の領域と呼ぶことにしよう．同様の観察により，Aの周りはAの上，下，左，右の領域に分けられることに気付く．そして，A以外の矩形はAの上，下，左，右のどの領域に割り当てられているかによって，配置結果において必ずAのそれぞれ上，下，左，右に存在することが保証される．いいかえれば，BSG上にAを置いた瞬間，まだ置いていないほかの矩形の将来の配置位置が上下左右に4分類されるのである．このことをより簡明に表現できる図はないか，と考えて図3を得た．

図3では，Aを平面上に置きAを通る斜め線を2本描くことでいわば世界の中心が宣言され，ほかの矩形の将来の配置位置が上下左右に4分類されている．Aをどこに配置するにせよこの図は変化しないしAをBに変えてもなんら状況は変わらないことから今のところ一般性は全く失われていない，と気をよくした．次にBを配置して図4を得た．

図4ではBをAの右の領域に置いているが，右でなくほかのどの領域に置いても回転すれば同じ状況になるから一般

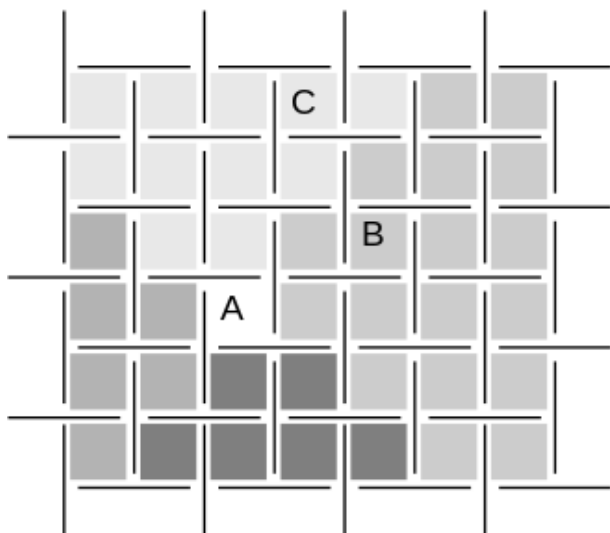


図2 BSG上でのAの上下左右領域

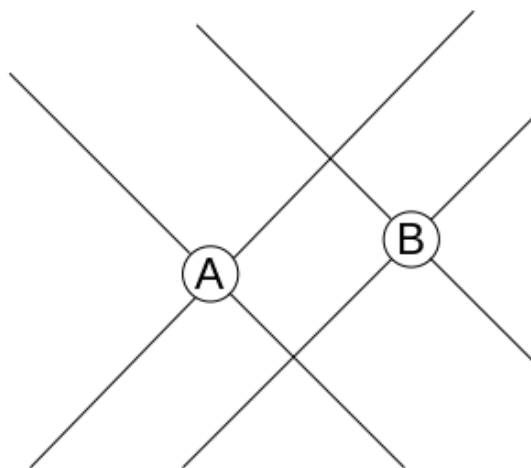


図4 平面上にAとBを配置

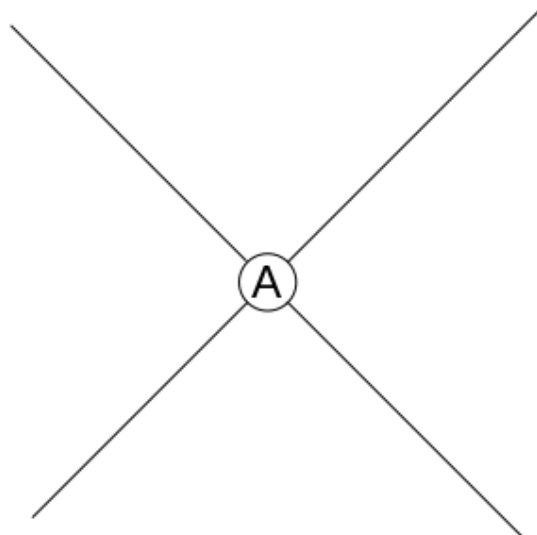


図3 平面上にAを配置

性は失われないだろう。Aと同様にBからも平面を四つに分ける斜めに交差した直線2本が引かれる。これら直線を導いたのはBSGであることを考えると、Aから発する直線とBから発する直線は、右上がり直線同士／右下がり直線同士では、交差することがない。そして、Aから見て右にBを置くと自動的にBから見て左にAが位置づけられる、という対称性があることが分かる。

次にCを置くことを考える。AとBが置かれた時点で平面は九つの領域に分けられておりそれぞれCの配置可能場所を意味している。例えば、図5中C1の位置はAの上でかつBの左という位置であり、C2の位置はAの上でかつBの上の位置である。このように、九つの置き場所はそれぞれAにとってもBにとっても無理のなさそうな場所が自動的に組み合わせられて表現されているようであり、素晴らしいと感じた。しかし一方で、Cの置き場所はこれら九つの可能性だけで尽くされているのか、という疑問が湧き上がった。

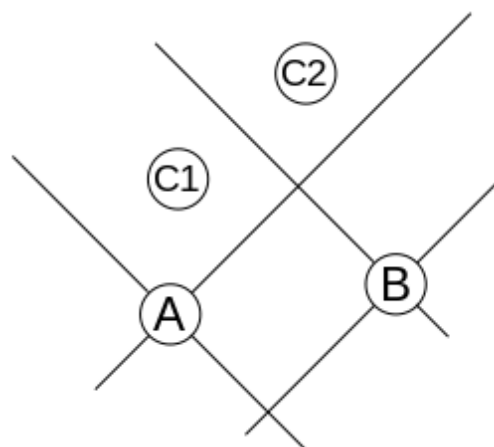


図5 AとBを配置したあとにCを配置し得る場所の選択肢

例えばAの右にBを配置しCをAの上に配置すると決めた場合、図5によればCはBの左(C1)か上(C2)にしか配置できない。一方、同じ場合の回路配置設計の局面を考える。Aの右にBを置く決めたからそのように配置するが、別の何らかの事情でAとBは上下にも離れた位置に置くことがあるだろう。例えば図6ではAの右にBを置いているが、許される範囲ですっと上のほうに置いている。このとき図6上では、CをAの上に置く決めたのでそのように配置するとしても、CはBの周りのどこにでも置ける状況にある。例えば設計の課長に「CはBの左(C1の位置)か上(C2の位置)にしか置けない」といわれても、設計担当者は配線の接続を考えてBの右(C3の位置)や下(C4の位置)に置きたい、ということは幾らでもありそうだ。BSGはこのような配置を取り逃がしている可能性はないのか、という疑問が湧き上がった。疑問というより不安に近い。後述するようにこの不安は最後には払拭されることになるのだが、しばらくは不安を抱えたまま研究を進めていった。

まずは図に従ってCを配置することにした。例えばC2の位置に配置して図7の状況を得る。得られた配置はもちろん一般性を失っている。例えば図7はA、B、Cを横1列に並

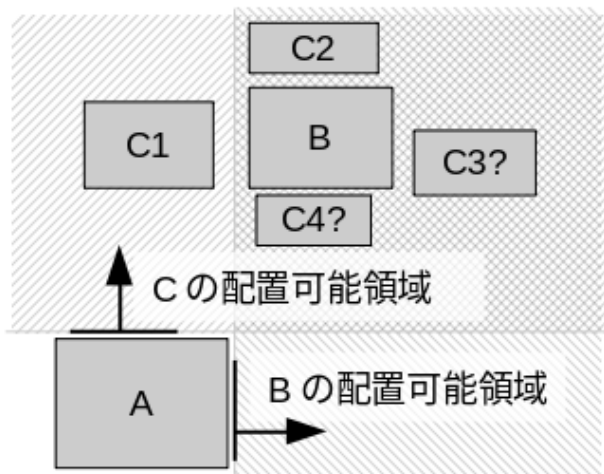


図6 取り逃がしているかもしれないCの配置場所

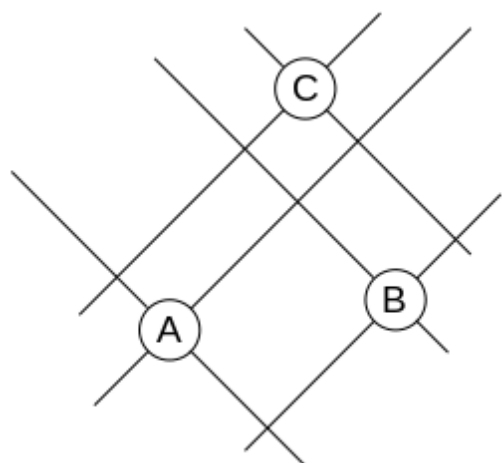


図7 斜め格子による配置表現

べた配置は表していない。しかしそのような配置は図8により表されそう。ここで、この二つの図の間になにか一般性はないのか、という疑問が生じる。

観察すると、図7でも図8でも45度傾いた 3×3 の格子図が描かれているという点が同じである。思考実験によれば、実際どのような順番でどの位置に矩形を置いたとしても $N \times N$ の正方格子が得られる(N は矩形数)。そこでこのような図を斜め格子(oblique grid)による配置表現と呼ぶことにした。

筆者はこのような検討を確か1~2週間ほどで行い、研究室の面々に紹介した。梶谷先生は、斜め格子による配置表現は矩形名の順列対と等価であることを指摘した。例えば図9の上部に描かれた斜め格子からは、右上がり直線上の矩形名を順に読んで第1の順列(C, A, B)が得られ、右下がり直線上の矩形名を順に読んで第2の順列(A, B, C)が得られる。逆に、順列対((C, A, B), (A, B, C))が先に描かれたとき、斜め直線を引いて元の斜め格子を再現することも同図から観察できる。そこで梶谷先生はこの技術をシーケンスペア(sequence-pair)と命名した。

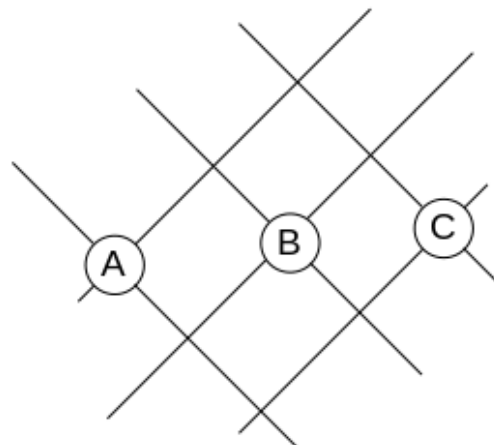


図8 横1列配置の斜め格子表現

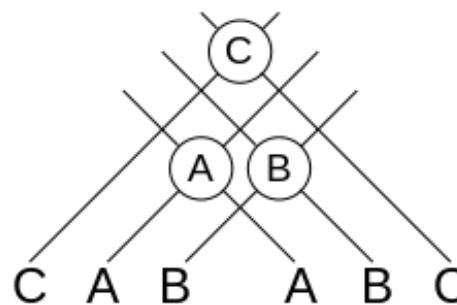


図9 シーケンスペアの誕生

BSGとシーケンスペアは、実用的には違う性質があるかもしれないが、理論的には等価なものであろうと我々は考えた。そして中武氏が進めていたBSGによる計算機実験と平行して、筆者はシーケンスペアによる理論研究を進めることになった。研究スタイルとしては、主に斜め格子の記法を用いて図的・直感的な考察を行い、論文を書く段階になって初めて順列対を用いた記述に落とし込んでいった。

斜め格子上で考えると、任意の2矩形は上下あるいは左右の必ずどちらかの関係があり、両方の関係を同時に持つことはない、という性質が理解できた。そして関係を満たした最小面積の配置が高速に($O(N^2)$ の時間で)計算できると分かった。大きな関心事は解空間の性質であった。ここで解とはシーケンスペアの一つのインスタンスを意味し、解空間とは表現可能な解の集合という意味である。

最初に配置実現不可能な解が存在しないか(フィージビリティ, feasibility)について検討した。例えば、一つの解の中でAの右にB, Bの右にCと表現されているにもかかわらず、同じ解の中でAの左にCと表現されているならばその解は実現不可能である。だが実際にはそのような解は作成し得ない。Aの右にB, Bの右にCという斜め格子を描くと、自動的にAの右にCという実現可能な制約が生成されてしまうからである。実際全ての解は実現可能である。このことはシーケンスペアをBSGに変換し、BSG割当を上下/左右から潰す思考実験をすることでも直感的に理解できる。これ

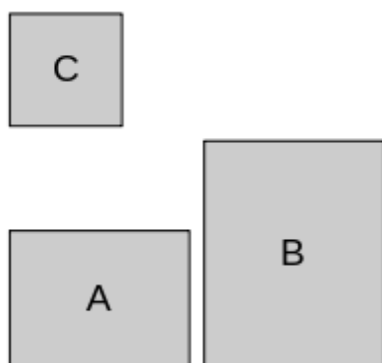
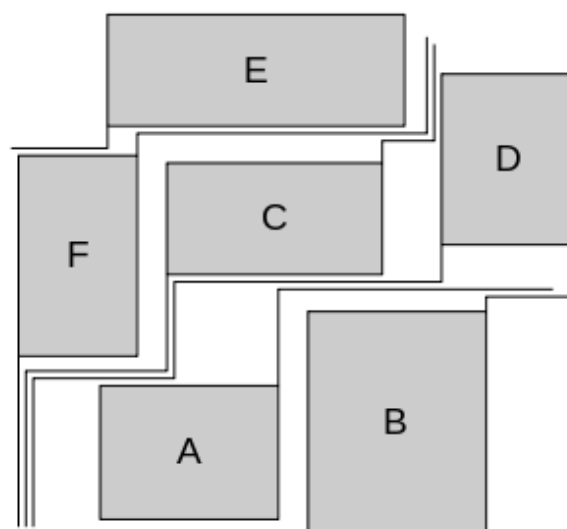


図 10 一見無駄な配置解

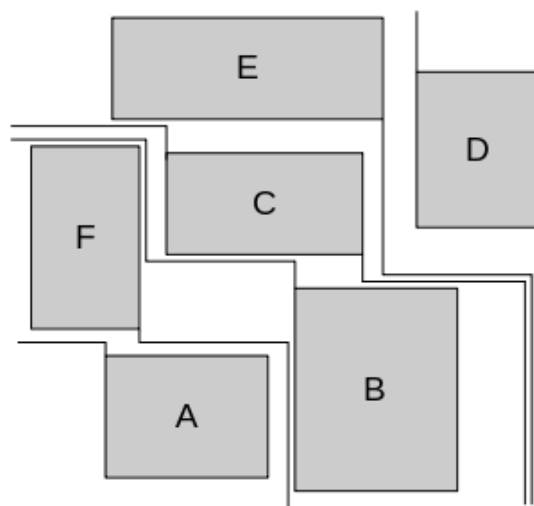
は非常に美しいことであると感じた。応用段階では配線に関する制約も加わるのでそれら全ての制約を満たすことは容易でなくなるだろうが、配置表現という基礎的なレベルで実現不可能な解が含まれないことはとても素性がよさそうだ、と喜んだ。

次に、無駄な表現が存在しないか（コンサイスさ、conciseness）ということも気になった。こちらについては、矩形の寸法次第では無駄に見える解が存在することが分かってきた。例えば図 9 の割当は矩形 C の寸法が小さいと図 10 のような配置となり、矩形 C が宙に浮かんでいるので一見無駄である。実際、多項式時間でコンパクションする後処理を加えた応用ではより省面積にできるだろう。しかし、矩形の寸法まで言及しないレベルでの活用が将来開けるかもしれないこと、及び、パッキング問題が NP 困難であることが別途証明できたので無駄が全くない解空間は望みすぎだろうと考えたことから、当面これ以上のコンサイスさについては求めないことにした。

当初から気になっていて最後まで解決できずに残っていた懸案は、どのような配置でも表現し得るかという性質であった。ここで「どのような配置でも」とはいつでも、例えば BSG を上下／左右から押しつぶした結果において、ある矩形が入る部屋は必要以上に大きくなる場合があり、そのような場合に部屋内の正確な位置まで表現し尽くしたいわけではなかったから、パッキングとしての最適解すなわち面積最小解を表現し得るか（到達可能性、reachability）ということが関心事であった。もし、配置表現のような基礎的なレベルで一般性を失ってしまっているとすれば、実用の局面で様々な応用されたときには最適どころかそこそこの性能も得られなくなってしまいそうだ、という不安が強かった。そのため、到達可能性をぜひ証明したい、という思いが強まった。前述した図 6 の C3 や C4 のケースは別のシーケンスペアで表現されることを示す、という方針で、筆者は怪しい証明を考えては当時研究室の助手であった藤吉先生（藤吉邦洋、現・東京農工大学准教授）にぶつけた。藤吉先生は、そのたびに渾身の努力で明快な反例を幾つも作成し、筆者を打ちのめすのだった。それが藤吉先生の学生への指導スタイルだった。筆者はたび重なる証明失敗にもめげず、北陸先端大の周



(a)



(b)

図 11 グリッディングによる任意の配置に対する (a) 第 1 のシーケンスの抽出と (b) 第 2 のシーケンスの抽出

りに多く存在した温泉に研究室全員でかけた折などに、浴槽のタイルの模様などを利用して藤吉先生や梶谷先生や中武氏との議論を楽しんだ。梶谷研究室は輪講、テニス、日帰り温泉をワンセットとして研究室全員で行動するという、一昔前の青春ドラマのような研究室であった。そうするうちに筆者はグリッディング（gridding）と名付けられることになる証明法に行き着いた。

グリッディングを用いた到達性の証明は、任意の配置から出発してその配置に適合するシーケンスペアの一つを作成する手順を与えることで行う。例えば図 11(a) の矩形配置が与えられ、任意の順序で各矩形に注目し、矩形の右上隅から上に向かって線を描き出す。線が別の矩形にぶつかるかあるいは既に描いた線にぶつかったら右に曲がる。再度別の矩形にぶつかるか既に描いた線にぶつかったら上に曲がる。以下同様に上、右、上、右、とジグザグな線を描いていく。各矩形の左下隅からも同様に下、左、…に線を描く。各矩形の右上

と左下の折れ線を矩形内の対角線でつなげて一本にする。これらの線は互いに重ならないので左から右に順番づけることができる。描いた線を左から注目し対応する矩形の名前を読んで第1のシーケンスとする。図11(a)の例ではE, F, C, D, A, Bというシーケンスが得られる。同様に矩形左上から上, 左, …と引いた線と矩形右下から下, 右, …と引いた線からつなげた折れ線から第2のシーケンスを作る。図11(b)の例ではA, F, B, C, E, Dというシーケンスが得られる。例えば矩形CとDは両方の順列でその順で並んでいるから、斜め格子状ではCの右にDを置くとされているが、グリッディングの構成上元の配置においてもCの右にDがあることが保証される。このように与えられた配置はグリッディングで得られたシーケンスペアが課す上下左右の制約を満たしている。したがって、グリッディングにより得られたシーケンスペアから改めて上下左右の制約を守った配置を作成すれば、元の配置と同じかそれ以上の省面積を達成できる。元の配置は最適配置であっても構わないから最適解への到達性が証明される。

この証明を示された藤吉先生は、とても残念そうに、自分には反例を作れないとだけいわれた。ずっと心配していた一般性が約束された瞬間であった。もちろん配線やほかの関心事を含めると実用的な尺度で最適解が含まれるとは限らないが、少なくとも面積基準で最適解に到達するほどの解の多様性が保証されていることは実用的に見て大変心強い結果と思えた。我々はここまでの結果をまとめてシーケンスペアとして最初の論文の発表を行った⁽⁴⁰⁾。

3. 実用化への道

筆者は北陸先端大を卒業したあと、シーケンスペアの実用化に向けて起業することにした。最初の取り組みとして、卒業間際に北陸先端大で行われたビジネスプラン発表会に応募した。その結果ベンチャーキャピタルからコンタクトをもらい、約1年間の準備期間を経て、1998年に東京で株式会社マイクロアークとして起業した。ハードIPの流行を予測し、既存ハードIPを組み合わせて新LSIを手早く実現するブロック配置ツールの開発を目指した。北陸先端大・東工大の研究室や元の職場などから多くの方に開発参加頂き、約4年間でツールは完成した。しかし販売数は少数にとどまった。顧客は十分に実証テストをしてから購入するのが普通なので、販売数は実用化の達成度を測るよい目安になる。販売数が少数にとどまった主な原因は、IP化は予測どおり進行的だったがハードIPだけを組み合わせる設計ニーズは少なかったこと、ツールの制御性が不十分で使いにくさが残ったこと、の2点であった。設計ニーズの予測がうまく当たらなかったことはやむを得ない面があるかもしれないが、ツールの制御性については純粋に技術的な問題であり、課題が残った。ここでツールの制御性が悪いとは、一つの設計プロジェクトのために配置ツールの入力を小変更して何度も実行する場合、過去の実行結果からよかれと思って変更した場合でも

予測したとおりの改善が得られない、というユーザから見た傾向をいう。

筆者以外の取り組みについては、商用化の常として一般に内部技術の詳細は公開しない慣習があるため、分らない。しかし自分でやっている「似たことをしているな」という感覚は得られるものである。その意味で、同時期に米国において似た目標をもつベンチャー企業が前後して現れ、その中で自分達と似ていると感じたのはAristo Technology Inc.であった。彼らは筆者らより一歩早く起業してブロック配置ツールを提供した。複数の配置結果を平行提示するツールを提供していたので遺伝的アルゴリズムを使っていたのかもしれない。しかし彼らも大きな成功を収めることはできないまま後述のMonterey社に吸収されたように見受けられる。恐らく同じような問題にぶつかったのではないかと想像している。

従来の自動配置ツールでは標準セルなど粒度が揃った要素をフラットに配置することを前提として、解析的な算法を採用することでツールの制御性を一定程度担保している。そのような従来手法を応用することでも似た目標を追える、と示したのがMonterey Design Systems Inc.とSilicon Perspective Corp.ではなかったかと思う。彼らはブロック配置ではなくフロアプランを目標としていた。ここでフロアプランとは設計初期段階において設計階層を可視化しタイミングなど各種の情報提供をすることである。ブロック配置とフロアプランは少し似ているが、大きく異なるのは彼らの実現手段であった。彼らは基本的に従来型のフラット配置技術を従来より早い段階に使うことで設計者に対して各種の予測情報を提供するというようなアプローチを採っていたようである。いわば、より控えめな目標をより慎重に実現するものであり、恐らく位相的パッキング手法は使っていないか、使っていても非常に限定的な利用法であろう。彼らはそれぞれ後に大手EDAに買収された。大手EDAがベンチャー企業を買収するのは、相当の販売数が達成された後の場合が普通であるから、彼らは（別の技術についてではあるが）実用化を達成したといえるだろう。

4. 今後の課題

位相的パッキング手法が今後実用化されるとすればどのようなストーリーがあり得るか改めて考えてみたい。位相的パッキングではアルゴリズム中の小さな挙動で大きな回路ブロックの左右が入れ替わるなど大きな変化が容易に発生するから、制御性の面で不利があるのは当然であろう。それを押して実用化を達成できるとすれば、次の二つのシナリオが考えられる。

- ・意図的に多くの制約を課すことで大きな変化・安易な変化が起きにくくして制御性を改善する、その前提として、そのような制約が必然的に求められる適用分野を発見する必要がある
- ・制御性があまり問われない設計のごく初期段階に特化し

て高速にざっくりとした最適化を行う、その前提として、それが適合する後段の設計フローと合わせて提案する必要がある

第1の方向性で取り組み中と思われるのは株式会社ジグダットのSX-Meister ACCと呼ばれる製品である⁽¹¹⁾。こちらはアナログLSIの配置設計という従来自動化が遅れていた分野に的を絞り、左右対称配置など多種多様な配置制約を扱えるようにすることで、実用化を狙ったものと思われる。中武氏が研究協力しているようであり今後の成果が大いに期待される。

第2の方向性で取り組んでいると思われるのは、台湾のベンチャー企業MAXEDA社のMaxPlaceと呼ばれる製品である⁽¹²⁾。こちらは高速デジタルチップなどより大きな市場に正面から取り組んだ野心的なプロジェクトのようである。筆者らの北陸先端大における研究の後に台湾大学のYao-Wen Chang教授の研究室で派生研究が行われたのだが、そのときに博士課程学生であったTung-Chieh Chen氏がその後二つのEDA企業で経験を積んだ上で最近起業したもので、Yao-Wen Chang教授も研究協力しているという。台湾大学の研究では位相的パッキングベースの配置技術に加えて階層的パーティショニング／クラスタリング技術にも取り組んでいたから、筆者らが取り組んだときより更に増大した回路規模への対応やフロアプランニーズへの対応も視野に入っているだろう。一方で、後段の設計フローと合わせて提案するには大手EDAの協力が欠かせない。大手EDAはMonte-ray社やSilicon Perspective社の技術を既にもっていることを考えると、先端のチップでそれら既存技術では解決できない課題を見つけて性能を示すことが成功の鍵となるだろう。

5. 社会人学生の貢献

北陸先端大で筆者が所属した研究室の4人が行った位相的パッキングの研究は、4人がそれぞれもち味を出した共同作業だった。一番の貢献者は斬新なBSGのアイデアで積年の問題をあっさり解いた中武氏であった。藤吉先生は筆者の無理矢理で間違った証明を正しい証明に矯正した。前述の経緯では割愛したが藤吉先生はパッキング問題のNP困難性の証明でも大きく貢献した。梶谷先生はいち早く本質を見抜き技術に名前を付け、青春ドラマのような研究室運営で研究を力強く推し進めた。筆者の貢献は、従来研究の追従でない新しい問題を提起したことと、中武氏のアイデアを理論へと昇華することができたことだと思う。後者の原動力は「実用的たるには美しくなければ」という思いだった。そしてその思いをもてたのは現場を経験したエンジニアだったからだと思う。

現場を経験したエンジニアであったのは北陸先端大に入学する前からだったが、入学した時点で上に述べた研究貢献ができる素養は全くなかった。入学当時は直感に基づく主張ばかりが強くあらゆる面で非論理的な人間だった。それは多分に性格的なもので現在でも直っていないが、梶谷先生は博士

前期課程の丸々2年間を費やして、根気よく議論して矯正してくれた。それによってなんとか最小限のアカデミズム——論理的な思考方法と議論を楽しむ姿勢——を身につけることができた。大変感謝している。アカデミズムはエンジニアにとって得難い武器であり、その武器がなければ強いモチベーションは空回りするだけで、シーケンスペアは生まれなかったはずである。

振り返れば筆者が大学に戻ったのは、30代も半ばとなり日々充実して仕事しながらも技術職を極めるか管理職の道に転ずるかを迷いはじめたからだった。職場には筆者が大学に戻ることに関心を示してくれた同僚や上司が少なくなかった。迷っていた筆者が踏み出せたのは所属企業の支援が得られて生活を維持することができたからであった。筆者の唐突な希望を聞き入れてくれた株式会社小松村田製作所とその親会社の株式会社村田製作所に大変感謝している。現在は社会情勢が当時から少し変化しており「30代半ばで日々充実して仕事しているエンジニア」の数が若干減っているかもしれないが、一方で人生の選択肢が広がっておりアカデミックリフレッシュを求める人の割合は増えていて、当時の筆者と似た状況の中で多くの人が踏み出せずにいるのではないかと感じる。世に多くいるはずの踏み出せない若き企業エンジニアたちに、大学院生活5年程度の生活費を保障することでアカデミックリフレッシュの背を押すという制度があれば、技術立国を目指す礎になるのではないだろうか。

6. おわりに

1994年北陸先端大の4人で始まった位相的パッキング表現の研究は、今日ではLSI配置設計の基礎技術の一つとして標準的な地位を占めるようになった。当時良い研究成果が得られたのは、中武氏の斬新なアイデアと、梶谷先生・藤吉先生のアカデミズムと、社会人学生だった筆者の実用化へのこだわりがうまく協奏した結果であった。本稿ではシーケンスペア考案の経緯、研究室の風景、各自の横顔など研究の原点風景を紹介した。また、その後の産業界における実用化の状況について推測を交えて紹介した。産業界における実用化は道まだ半ばであるが、ベンチャー企業による挑戦は続いており、今後の成果が期待される。

本稿がかつての筆者のような「30代半ばで日々充実して仕事している企業エンジニア」のアカデミックリフレッシュの背を押す手助けになれば幸いである。今回の記事を執筆する機会を与えて頂いたのは、博士後期課程最後の年の恩師である北陸先端科学技術大学院大学 金子峰雄教授である。金子先生は推敲も手伝ってくれた。本稿を書くことは、その後長く研究の世界を離れていた筆者にとって2度めのアカデミックリフレッシュになった。金子先生に深謝の意を表する。

- (1) H. Murata, K. Fujiyoshi, S. Nakatake, and Y. Kajitani, "VLSI module placement based on rectangle-packing by the sequence-pair," IEEE Trans. Comput.-Aided Design Integr. Circuits Syst., vol. 17, no. 6, pp. 519-530, 1998.
- (2) J. Reuben, "Sequence pair for VLSI placement," <https://www.youtube.com/watch?v=I32J8YUqjy8>
- (3) 高橋篤司, "小特集編集にあたって," 信学誌, vol. 98, no. 9, p. 777, 2015.
- (4) 高橋俊彦, "方形パッキングの位相的表現," 信学誌, vol. 98, no. 9, pp. 778-783, 2015.
- (5) 坂主圭史, "確率的探索法による位相的表現の最適化," 信学誌, vol. 98, no. 9, pp. 784-787, 2015.
- (6) 高橋康裕, "位相的パッキング表現と非線形最適化手法," 信学誌, vol. 98, no. 9, pp. 788-792, 2015.
- (7) 藤吉邦洋, "様々なパッキングの位相表現," 信学誌, vol. 98, no. 9, pp. 793-797, 2015.
- (8) 中武繁寿, "パッキングの集積回路への応用," 信学誌, vol. 98, no. 9, pp. 798-802, 2015.
- (9) 中武繁寿, 村田洋, 藤吉邦洋, 梶谷洋司, "モジュール配置問題を解く限定スライス構造の提案," 信学技報, VLD94-66, FTS94-47, vol. 94-DA-72-4, pp. 19-24, Oct. 1994.
- (10) H. Murata, K. Fujiyoshi, S. Nakatake, and Y. Kajitani, "A solution space of size $(n!)^2$ for optimal rectangle packings," 回路とシステム軽井沢ワークショップ, vol. 8, pp. 109-114, 1995.
- (11) 株式会社ジーダット, "SX-Meister ACC," https://www.jedat.co.jp/products/semi_design/auto_pr/
- (12) MAXEDA Technology, "MaxPlace," <https://www.maxeda.tech/maxplace.html>

(幹事団提案, 2022 年 12 月 2 日受付, 2023 年 1 月 4 日再受付)



村田 洋 (非会員)

1980 金沢大学工学部電気科卒. 1980 から 1984 まで(株)コンピュータアプリケーションズにて受託ソフトウェア開発. 1984 から 1997 まで(株)小松村田製作所にてアクティブフィルタ・TV チューナ・DC-DC コンバータなどに関する回路設計とレイアウト設計の自動化技術開発. 1994 から北陸先端科学技術大学院大学に学び, 1995「連続変形に

基づくアナログレイアウトエディタ」にて修士号取得, 1997「矩形パッキングとその VLSI 配置への応用」にて博士号取得. 1997 から 1998 まで米国カリフォルニア大学バークレー校客員研究員としてチップフロアプランアルゴリズム研究. 1998 から 2000 まで北陸先端科学技術大学院大学客員助教授. 1998 から 2002 までマイクロアーク(株)において社長として VLSI ブロック配置ツール開発を指揮. 2002 に矩形パッキングの論文が IEEE the Best of ICCAD に採録. 2003 から 2008 まで北九州市立大学特任教授. これまでに 20 数本の学術論文を発表. 2002 から 2008 まで個人事業村田洋デザインテクノロジーとして IC パッケージ設計ツール開発. 2008(株)ジェム・デザイン・テクノロジーを設立. 現在に至る.

少量のデータに対する機械学習

Machine Learning for Small Data

赤穂昭太郎 Shotaro AKAHO

アブストラクト 近年の人工知能・機械学習の成功には大量のデータを前提として技術開発が進んできたという背景がある。一方、機械学習の適用分野が広がるとともに、コストをかけて収集された少量のデータに対しても機械学習を適用したいというニーズが高まっている。本稿では、スパースモデリングやベイズモデリングといった、少量データに向けた機械学習の枠組みを紹介する。また、深層学習に対して少量データの学習を行うための転移学習や、効率的なデータ取得を行うための能動学習やベイズ最適化などの手法についても述べる。更に、これらの枠組みをユーザとして適用する際の注意点のみならず基礎境界の研究分野として解決すべき数理的課題についても概説する。

キーワード 次元の呪い、スパースモデリング、ベイズモデリング、転移学習、能動学習、ベイズ最適化

Abstract The recent success of AI and machine learning has been based on the background that big data are available. On the other hand, as spreading application fields of machine learning, there is a growing need to apply machine learning to small data collected at a high cost. In this paper, we introduce machine learning frameworks such as sparse modeling and Bayesian modeling, which are suitable for small data. In addition, we introduce transfer learning for deep neural networks to deal with small data, and active learning and Bayesian optimization for efficient data acquisition. We discuss not only user aspects of machine learning but also some mathematical problems.

Key words Curse of dimensionality, Sparse modeling, Bayes modeling, Transfer learning, Active learning, Bayes optimization

1. はじめに

機械学習技術が社会に浸透するとともに、応用分野も裾野をどんどん広げている。その際に問題となるのが本稿で扱う「データ量の少なさ」である。画像認識や言語翻訳など、機械学習で成功している応用分野は、ビッグデータと呼ばれる大量のデータをインターネットなどを使って集めることで高い精度を実現している。その一方、データを得るために製造や実験を行う必要がある製造業や自然科学など、データを取得するのが難しく、また従来熟練の技術者や研究者の勘や経験で解決してきた分野においても機械学習の適用が期待されている。

このような問題に対して、大量データと同じアプローチをとっていたのでは、データ数の少なさによる精度低下は免れ得ない。そこで、データの少なさを補ういろいろな手段が研究されている。大まかに分けると以下の四つが主なアプローチである。

- 少ないデータに適したモデルを選ぶ技術
- 対象に対する知識をモデル化に反映させる技術
- 既にあるデータを活用して学習精度を向上させる技術

- 機械学習の精度が向上するようなデータ取得技術

本稿では、これらの点について具体的にどのような手法があるかを幅広く紹介し、また、数理的に解決すべき課題についても触れていく。あらかじめ注意しておく、数式を使った詳細な説明は参考文献に譲り、本質的に重要な考え方を中心に解説していく。

2. データ数と次元の呪い

ここでは、データ数が少ない状況で何が起きるのかについて考えていこう。通常データは数値を表形式に並べたデータセットとして与えられる。表の縦方向のサイズがデータ数を表し、それぞれのデータが1行に配置され、データの属性値が列方向に並ぶ^(注1)。データ数を N 、属性値の数(次元数)を P と表すと、表は $N \times P$ の行列のサイズとなる。つまり、見かけのデータの量は $N \times P$ となり、 N が増えても P が増えてもデータが増えるように思えるが、一般的には、機械学習の精度は N が大きくなるにつれて向上するが、次元数 P については逆に低下してしまうということが起きる。

このように、次元数が増えると機械学習の精度が低下してしまう現象を「次元の呪い」と呼ぶ。また、計算量理論における NP 問題にかけて、データ分析における NP 問題といわれることもある⁽¹⁾。見かけのデータ量は増えるのに、機械学習の精度

赤穂昭太郎 正員 産業技術総合研究所人間情報インタラクション研究部門
E-mail s.akaho@aist.go.jp
Shotaro AKAHO, Member (Human Informatics and Interaction Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba-shi, 305-8568 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ
Fundamentals Review Vol.16 No.4 pp.247-256 2023 年 4 月
©電子情報通信学会 2023

(注1)：属性値は、特性値・記述子など分野によって呼ばれ方が異なる。

は下がるというのは一見パラドックスのように感じるかもしれない。実際、筆者が企業との共同研究で経験した話だが、非常に高価な材料を対象とした機械学習課題に対して、 N 数が足りないから増やしたいという話をしたときに、試料を増やすことは難しいが、代わりにいろいろ異なる計測方法で属性数を増やしてはという提案を受けたことがある。もちろん、それらをうまく使って精度向上を図るような工夫は可能であるが、単純には機械学習をより難しくするということを理解してもらうのに少し苦労した。

我々は三次元空間で生活しているので、高次元で何が起きているかを想像するのは難しい。そこで具体的な数値を通してその感覚を想像してみよう。まず、高次元空間中の超立方体の頂点の数を考える。例えば三次元では立方体の頂点だから $2^3 = 8$ 個となり、一般には P 次元超立方体の頂点の数は 2^P 個となる。これは P が数十を超えると天文学的に爆発する値となる。機械学習では空間全体に関する識別や回帰といった推論を行うのに、空間中の有限のデータ点からの学習を行う。いい換えれば、データとデータの間を埋めるのが機械学習の役割で、データ間がスカスカであればあるほど難しくなるということになる。超立方体は各座標軸方向に二つの値しか取らないのでかなりスカスカな状態であるといえるが、実際に用意できるデータ数は更にそれよりはるかにスカスカになっていることが想像できるだろう。

これとは別に我々の三次元的直感に反する例として、球面集中現象がある。これは、高次元の球体を考えるとほとんどの体積が球面付近に集中するという現象である。実際、半径 1 の球の表面から ϵ の厚さの部分の体積の割合は $1 - (1 - \epsilon)^P$ となり、 ϵ がかなり小さくても P が大きければあっという間に 1 に近づいてしまう。

これと同様に、空間中にランダムに点を配置すると、 P が大きくなるにつれて点と点との間の距離は（どんどん増えていくとともに）全て一定の値に近づくという現象が起きる（より正確に言えば距離の比が全て 1 に近づく、図 1 参照）⁽²⁾。これによ

り、機械学習の基本的な手法である最近傍識別の精度が次元とともに低下することが分かる。最近傍識別は新規にデータ点が与えられたときに、最も近いデータ点を参照してそのラベルを出力するものであるが、どの点との間の距離も等しくなってしまう、識別の精度が下がってしまう。

このように、データ数が少ないという問題は次元数との相対的な関係で見るとべきものである。以下では、次元の呪いをどのように避けていくかを考察する。

3. 次元削減とモデル選択

次元の呪いを避けるための最も素朴な方法は次元を下げるというものであり、機械学習研究では次元削減というのが一つの大きな柱となっている。

3.1 汎化能力と次元

次元削減について詳しく説明する前に、機械学習の精度を測る汎化能力について触れておく。汎化能力は、学習データだけでない全てのデータに対するあてはまりの能力のことを指す。例えば、入力 x から出力 y への関数 $f(x)$ をデータ $(x^{(1)}, y^{(1)}), \dots, (x^{(N)}, y^{(N)})$ を用いて学習する際に、通常は学習データに対する平均 2 乗誤差 $R_N(f) = (1/N) \sum_{i=1}^N (y^{(i)} - f(x^{(i)}))^2$ を最小にする関数 f を選ぶ。ただし、実際に最小にしたいのは全てのデータに対する平均 2 乗誤差 $R(f) = \int (y - f(x))^2 p(x, y) dx dy$ となる（ここで、 x, y のデータの出力に関する未知の確率密度 $p(x, y)$ を仮定する）。 $R(f)$ と $R_N(f)$ は一般に異なるから、 $R(f)$ を最小にする f と $R_N(f)$ を最小にする f も異なる。この違いを議論するのが機械学習における汎化能力に関する研究の主題である。

$R(f)$ と $R_N(f)$ の差のことを汎化バイアスと呼び、理論的な評価が数多く研究されている。最も有名なのは AIC (Akaike's information criterion) に代表される情報量基準で、統計的推定において、ゆう度の汎化バイアスの期待値が漸近的に「モデルのパラメータ数/データ数」となる⁽³⁾。これは汎化バイアスの振る舞いを理解するのに非常に分かりやすい尺度で、データ数が増えれば増えるほど汎化バイアスが小さくなり、汎化能力が高くなることを表している。また、モデルのパラメータ数が増えるとモデルが複雑になり、学習データに過度に適合した過学習という状態になり、汎化バイアスが増えていくことを表す。一方、パラメータ数が少なくなりすぎると、汎化バイアスは減少するが同時に $R(f)$ 自体が増えてしまうため、適切なパラメータ数のモデルを選ぶ必要がある。これが機械学習におけるモデル選択と呼ばれる手続きとなり、例えば AIC では $R_N(f)$ と汎化バイアスの期待値の和を小さくするようにモデルが選ばれる。

関数 $f(x)$ のモデルが x の一次式で表現される重回帰モデルの場合、パラメータ数は次元数と一致するため、次元の増加が汎化能力の低下を招くことになる。データ数が少ないという状況では、次元を適切に削減することによってモデル選択を行う必要がある。

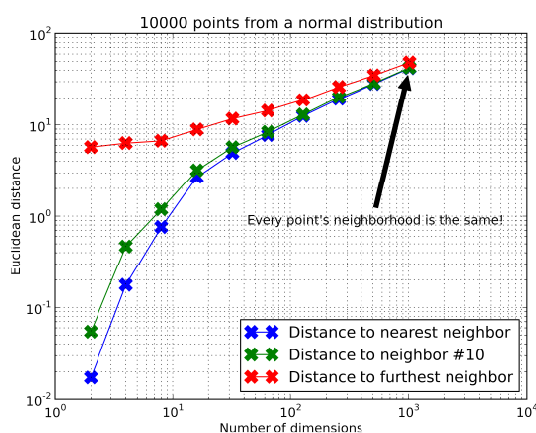


図 1 ランダムに生成した点の最も近い点と最も遠い点への距離 横軸：次元、縦軸：距離。
<https://erikbern.com/2015/10/20/nearest-neighbors-and-vector-models-epilogue-curse-of-dimensionality.html> より引用。

汎化能力については一般的にこのように理解されているが、幾つか注意点を挙げておく。一つめは、AIC に代表される汎化バイアスの評価は、データ数 N が大きいという漸近的な振る舞いを表しているため、データ数が少ない場合には理論評価と実際との乖離が大きくなる可能性がある。また、汎化バイアスの期待値を考えることが多いが、実際にはデータによるばらつきも非常に大きいことに注意する。少数データに対する汎化バイアスの補正についても多くの研究がなされている⁽⁴⁾。

汎化能力に関する理論は、ディープニューラルネットワークの登場によって新たな考え方が必要となってきた。もともと、AIC のような情報量規準はパラメータに関する冗長性がないモデルを仮定していたが、ニューラルネットワークでは、入出力関係を変化させないようなパラメータが連続的に存在していて、情報量規準の導出において仮定される正則性を満たさない。そのような特異モデルと呼ばれる学習モデルについては代数幾何学的手法によって汎化バイアスの解析が試みられている^{(5)・(6)}。また、ディープニューラルネットワークにおいては、パラメータ数を増やせば増やすほど汎化能力が高くなるという、これまで汎化能力についての理解と矛盾するような現象が報告されている。より正確にいうと、データ数に比べてパラメータ数が相対的に少ないときは、通常の学習モデルと同様に、パラメータ数が増えていくにつれて汎化バイアスはいったん減少した後増加に転じるのだが、更にパラメータ数ある程度以上に増やしていくと逆にまた汎化バイアスが減少していくということが起きる⁽⁷⁾。これを、汎化バイアスの減少が 2 回起きるという意味で二重降下現象 (double descent) と呼ぶ。この現象については数値実験や一部の理論解析により、ある程度の理解は進んでいるものの、完全に解明されているわけではない。

3.2 次元削減の手法と問題点

さて、話を次元削減に戻そう。次元削減と一口に言ってもいろいろなアプローチがある。大まかに分けると、

- (1) 高次元のうち一部の次元だけを選ぶ
 - (2) 高次元中の低次元部分空間 (あるいは多様体) をあてはめる
 - (3) 高次元データの低次元表現を求める
- (1) については一般に変数選択と呼ばれる問題で次節で述べる。(2) と (3) のアプローチの違いは少し分かりにくい。(3) は高次元から一方通行的に低次元化を行うのに対し、(2) は元の高次元の中での低次元構造を考えているため、低次元化した後で元の高次元での表現に戻ることが容易であるという特長をもつ。次元削減の最も基本的な方法である主成分分析は (2) と (3) の両方の性質をもっているが、非線形な手法になると、必ずしも (2) の性質をもっているとは限らないことに注意する。機械学習の応用でよく用いられている tSNE や UMAP という非線形の低次元化手法も同様である。本稿では個々の手法の説明は省略するので適宜参考文献⁽⁸⁾を参照されたい。

一方、単純な線形の主成分分析に関してもデータ数が次元数に比べて極めて小さい場合は問題が生じることがある。高次元

のデータが低次元構造をもっている、高次元空間内でノイズの影響を受けると前節で紹介した球面集中現象により、その低次元構造が埋もれてしまうという状況が起きやすい。そこで、ノイズの等方性を仮定することで固有値の補正を行って高次元空間での主成分分析を安定化させる方法が提案されている^{(9)・(10)}。

4. 少量データに適したモデル選択

4.1 正則化と変数選択

次元を削減する最も素朴な手法は必要な次元だけを選ぶことで低次元化を行うことである。これは、変数選択の問題と呼ばれ、古くから研究されてきた。変数選択の問題を理解するために、正則化という手法を導入する。正則化というのは、一般に

$$L(f) = R(f, \mathcal{D}) + \lambda \Omega(f) \quad (1)$$

という形の目的関数を最小化する関数 f を求めるアプローチである。ここで、 $R(f, \mathcal{D})$ は、データ $\mathcal{D}$ に対するあてはめの損失を表し、2 乗誤差や負の対数尤度など、機械学習で通常最小化するものである。汎化能力に関する説明で述べたように、これだけを最小化するとモデルが複雑になるにつれて (二重降下現象のような場合を除き) 過学習が起きるので、モデルの複雑さを表現する正則化項 $\Omega(f)$ を重み $\lambda > 0$ で足し合わせたものが $L(f)$ である。 λ のことを正則化パラメータと呼ぶ。正則化の定式化としては $\Omega(f) \leq C$ という制約下で $R(f, \mathcal{D})$ を最小化するという制約付き最適化問題として定式化をすることもあるが、 C と λ を適切にとれば両者は等価となる⁽¹¹⁾。

さて、ここで関数モデルとして線形モデル

$$f(x; a) = \sum_{i=1}^d a_i x_i \quad (2)$$

をデータにあてはめることを考える。できるだけ少ない変数を使ってあてはめを行うということを正則化を使って定式化すると

$$L_0(f) = R(f, \mathcal{D}) + \lambda \sum_{i=1}^d I[a_i \neq 0] \quad (3)$$

と書ける。ここで、 $I[A]$ は定義関数 (または指示関数) と呼ばれるもので、命題 A が真であれば 1、そうでなければ 0 となる関数である。 $a_i = 0$ であれば、実質的に変数 x_i はモデルに寄与せず、 $a_i \neq 0$ となる x_i のみがモデルに現れるため、上記の正則化により、できるだけ少ない変数であてはめを行うことが実現できる。

しかしながら、定義関数は階段状の関数で凸関数ではないため、最急降下法のような通常用いられる機械学習の最適化アルゴリズムによる大域的な最適化が難しい。実際、厳密な最適化を行うための計算量が次元数に対して NP 困難であることが知られている⁽¹²⁾。素朴な方法としては全ての場合について線形回帰を行うことが考えられるが、場合の数が各変数を選ぶか選ばないかの 2 通りで全部で 2^d 通りの場合の数があり、変数の数が 20 個程度までが現実的には限界である。逆にいえば、その程度

までは現在の計算機の能力をもってすれば全数探索も可能である⁽¹³⁾。

変数選択の問題に対して古くから用いられてきた準最適解を見つける方法は、ステップワイズ法と呼ばれるもので、変数が0の状態あるいは全ての変数を使った状態からスタートして、一つずつ変数を増減させる方法である。しかしながら、変数の数が多い場合はステップワイズ法も相当な計算量を要する上に準最適解しか見つからないという問題点がある。準最適解を求めるアルゴリズムは古典的なステップワイズ法のほか、直交マッチング追跡法 (OMP) と呼ぶ貪欲アルゴリズムなど新たな手法の開発も行われている⁽¹⁴⁾。

4.2 LASSO によるスパースモデリング

以下では、 $L_0(f)$ そのものを変えることで解きやすい問題にするというアプローチについて述べる。まず L_p 正則化を導入する。これは

$$L_p(f) = R(f, \mathcal{D}) + \lambda \sum_{i=1}^d |a_i|^p \quad (4)$$

という正則化を行う方法であり、 $p \rightarrow 0$ の極限が L_0 正則化に相当する。 L_p の名前の由来は、正則化項がベクトル a の L_p ノルムの p 乗になっていることに由来する（ただし $p < 1$ ではノルムの満たすべき条件は満たさない）。

L_p 正則化は、 $p \geq 1$ のとき凸関数となり、大域解を求めることが容易となる。特に $p = 1$ の場合、すなわち、 L_1 正則化で線形回帰を行う手法を LASSO 回帰と呼ぶ⁽¹⁵⁾・⁽¹⁶⁾。正則化は必ずしも用いる変数の数を減らすとは限らないが、 $p \leq 1$ の L_p 正則化は変数の数を減らす解（スパースな解）が得られることが知られており、LASSO 回帰は凸でありかつスパースな解が得られるという都合のよい性質をもっていることが分かる。

もちろんスパースな解といっても、通常は L_0 正則化と L_1 正則化の解は異なるため、 L_1 正則化はもともとの L_0 正則化の代用品にすぎない。ところが、実はある条件を満たすと L_0 の解と L_1 の解が一致することが数学的に証明されたことで L_1 正則化が一気にポピュラーになっていった。一致のための条件は厳密に述べると複雑になり、またいろいろな定式化が存在するため、理論の詳細は参考文献⁽¹⁷⁾・⁽¹⁸⁾を参照して頂きたいが、Candès や Donoho らによって 2003 年頃に理論構築が始められた。もともと信号処理や情報理論の分野で注目を集め、圧縮センシングと呼ばれている。圧縮センシングとは、少ない（＝圧縮された）観測（＝センシング）をもとに高次元の未知パラメータを推測するという意味である。最近では、スパースな解を見つけるモデル化手法という意味で、機械学習の文脈ではスパースモデリングと呼ばれることも多い。

スパースモデリングの最も目を引く応用例は電波望遠鏡を用いたブラックホールの撮像 (図 2)⁽¹⁹⁾であり、大きなニュースとしても取り上げられた。一見すると機械学習とは無関係に見えるので、その関係性について簡単に説明しておく。ブラックホールの例では、知りたいものが画像データであり、それが線形モデルのパラメータベクトル a となる。電波望遠鏡を使った



図 2 ブラックホールの撮像 <https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eh1.html> より引用。

電波干渉計という計測系で観測されるのは、画像の（一部の）周波数成分 y である。したがって a にフーリエ行列 X をかけて y が得られるという線形方程式の形をしており、線形回帰でのスパースモデリングと同じ定式化が得られる。ブラックホールが撮像できるほどの解像度を保つためには望遠鏡間の距離を大きくする必要があり、国際プロジェクトである EHT (Event Horizon Telescope) では、世界にある電波望遠鏡を連携させて計測を行った。とはいえ、地球上にある電波望遠鏡の数はそれほど多くないし、昼間や天気が悪いときには観測ができないため、ブラックホールを撮像するためには本来必要な周波数成分よりかなり少ない数しか観測できないという意味で少数データにおける機械学習問題になっている。天体画像では、基本的に背景は黒なので、値としては 0 となるはずである。それを利用すると、 a の成分が少ないというスパースモデリングの定式化に合致する。こうして、少ないデータ数でも、報道されたようなブラックホールの画像がスパースモデリングにより構成できたのである。

なお、このような科学的な発見に機械学習を用いたときに、どのようにしてその正しさを保証するのかというような質問を受けることがある。仮説検定のような考え方や、次節で述べるベイズモデリングを導入することによりある程度それは可能である。しかしそれらを含めて、あくまでスパース性の仮定、観測系の仮定、分布の仮定など種々の仮定のもとで得られた結果であり、それ単体で完全な保証を与えることは難しい。科学的な結果は常に批判的な検証と改善を繰り返すことで変化・発展するものであり、何か絶対的な正しさを示すものではないことは留意する必要がある。

さて、正則化において現れる正則化パラメータについて述べておく。正則化パラメータ λ が 0 になれば正則化を行わないのと同じなので、全ての変数を使った過学習になりやすいモデルとなる。逆に λ を大きくしていくと、変数選択の場合は一つも変数を選ばないモデルとなり、関数としての記述能力が低いモデルとなる。すなわち、モデルを選ぶ問題が λ の大きさを選ぶ問題に置き換えられただけという見方もできる。したがって、実際には λ を適切に選ぶことが重要となるが、実用上最もよく用いられている手法がホールドアウト法や交差検証法であり、与えられたデータを学習用とテスト用に分けて、テスト用でのパ

パフォーマンスが最もよいものを選ぶというものである（交差検証法では更に分け方を変えて何度も評価を行う）。ただし、交差検証法では、一つの正則化パラメータの候補ごとに学習を何度も行う必要があるため、合計の計算時間が非常に大きくなるという問題点がある。その問題に対して、近似的に交差検証法の誤差を評価するための手法が研究されている⁽²⁰⁾。また、AICなどの情報量規準は、見かけ上正則化パラメータの値が定数で決まっている（AICは負の対数尤度を誤差関数とした場合の L_0 正則化で $\lambda = 1$ にしたものとみなせる）。これは、対数尤度の汎化バイアスの期待値に関する漸近評価という特殊な状況設定に由来する。そのため、情報量規準を用いれば L_0 正則化に由来するモデル候補の数を減らすことはできないものの、正則化パラメータを選ぶこと自体は交差検証法なしで可能となる。

スパースモデリングでは L_0 や L_1 といった正則化が中心として用いられるが、少数の変数に絞り込むという観点でいえば、 L_2 正則化（回帰で用いられる場合リッジ回帰という）も非常によく用いられる。 L_2 正則化は二次関数の正則化項なので、2乗誤差と組み合わせた場合には、極値問題が線形方程式となり、正則化がない場合とほとんど同じ計算量で解を求めることができる。 L_1 と L_2 の振る舞いの違いについて簡単に触れておこう。変数間の独立性が高く、必要な変数と不要な変数が明確な場合には L_1 でも L_2 でもそれほど大きな違いはない。 L_2 ではスパースになることはないが、不要な変数に対する係数は厳密には0にならないものの0に近い値を取る場合が多い。しかしながら、相関性の高い変数が存在するような、いわゆる多重共線性という現象が起きている場合は大きく振る舞いが異なる。多重共線性の極端な場合として、全く同じ変数 x_1 と x_2 があるとすると、モデルの $a_1x_1 + a_2x_2$ は任意の b に対して $(a_1 - b)x_1 + (a_2 + b)x_2$ と同じものを与える。そのため、例えば $a_1 = a_2 = 1$ のような場合であっても、正則化が全くない状態では $102x_1 - 100x_2$ のような極端な係数のモデルが得られてしまう可能性がある。このようなモデルでは、 x_2 に関して強い負の効果があるというような間違った推論をする危険性があるため、多重共線性がある場合はモデルの解釈に注意が必要となる。では、正則化を用いた場合にどうなるかを考えると、 L_1 正則化の場合はどちらかの変数を選び $(a_1 + a_2)x_1$ あるいは $(a_1 + a_2)x_2$ のどちらかが選ばれるというのが最適解となる。一方 L_2 正則化ではそれぞれの係数の値を等しくするように $(a_1 + a_2)(x_1 + x_2)/2$ という解が選ばれる。このように、 L_1 がどちらかの変数だけを選ぶのに対して、 L_2 は均等に変数を用いるという、かなり異なる解を与えることが分かる。 L_1 正則化は変数を絞り込むため、高次元で大量の変数があったときに人間が理解しやすい少数の変数を選ぶことができる。一方 L_2 正則化は解釈性という意味では難しくなるが、変数に責任を分担させるので予測として安定的になりやすいという性質があり、それぞれの性質を理解した上で使用することが必要となる。また、この例を見れば分かるように、多重共線性がある場合には L_1 正則化でどちらかの変数が選ばれてしまうので、選ばれた変数が重要な変数であることには違いないが、削除された変数が重要でない変数とはいえないということには留意する必要がある。

5. 対象に対する知識の活用

5.1 バイズモデリング

スパースモデリングや次元圧縮の技術は、少ないデータに適したモデルを選ぶための手法であったが、対象に対する人間の知識を活用することでデータの少なさを補う手法としてバイズモデリングがある^{(21), (22)}。

バイズモデリングはモデリングと推論という二つの段階から構成される。まず、通常機械学習で区別されることの多い「入力変数」「出力変数」「パラメータ」を全て対等な確率変数として扱う。それらの確率変数の間の確率的な因果関係を知識を使って確率モデルとして構築するのが「モデリング」の段階である。次の「推論」の段階では、確率変数のうち観測されたもので条件づけた未観測の確率変数に対する条件付確率を（ほぼ機械的な計算により）計算する。

モデリングの段階は確率モデルを構築することしか規定しないので、あまりにも漠然としているが、逆にいえばバイズモデリングの汎用性や拡張性の高さともとらえられる。また、後で少し触れるように、機械学習の学習モデルや枠組みの多くはバイズモデリングの特殊な場合として理解することができる。具体的な問題に対してモデリングを行う際には、ベイジアンネットワークなどのツールを使って対象の因果関係に沿ったモデルを構築する。これを生成モデルとか順モデルと呼ぶ。基本的なものごとは因果に従って順番に起きていくため、そのようなモデル化は容易な場合が多い。一方、推論の段階はそれを逆にたどる必要があるため（いわゆる逆問題）、モデル化が難しいのでそこはモデリングとは切り離して機械的な計算にゆだねるというのがバイズモデリングの考え方である。

バイズモデリングのもう一つの特徴は得られるものが確率分布であるという点である。通常の機械学習では何か最適なパラメータ値を一つだけ求めてそれが学習結果となるが、それだとその一つがどれだけ確からしいものなのかが分からない。一方、バイズモデリングでは一つの値ではなくて、その不確実性も含んだ確率分布として答が得られるので、機械学習の結果の確からしさを評価できるというメリットもある。後で述べるバイズ最適化などでは、この確からしさを利用する。ただし、バイズモデリングの事後分布がもつ推定の確からしさは、モデリングで設定した確率モデルが正しいと仮定した上での確からしさなのでその点には注意する必要がある。

5.2 ベイジアンネットワーク

モデリングの有用なツールであるベイジアンネットワークは、確率変数をノードとし、因果関係をノードからノードへのリンクとして表現したグラフ構造であり、それによって確率モデルを記述する^{(23), (24)}。

例えば図3のベイジアンネットワークは

$$P(A, B, C, D, E) =$$

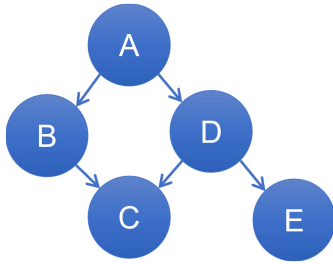


図 3 ベイジアンネットワークの例

$$P(A)P(B|A)P(C|B,D)P(D|A)P(E|D) \quad (5)$$

というように同時確率が右辺のように分解できることを意味している。つまり、各ノードの親ノードに対する条件付確率の積となる。これはより広いグラフィカルモデルと呼ばれるものの一種であり、矢印が因果関係の向きを表現していると考えれば、生成モデルのモデル化を視覚的に行うことができる便利なツールである。上記のような分解ができるためにはサイクル（つまりあるノードを出発してリンクをたどってまた自分自身に戻る）が存在してはならない。そのためベイジアンネットワークを非循環有効グラフ (DAG: Directed Acyclic Graph) とも呼ぶ。

ベイジアンネットワークによる確率の分解は、次元の呪いの回避にもつながっている。ベイジアンネットワークでは因果の向きのみならずそこに現れる確率値も与えなければ推論の段階に進むことはできない。確率値は対象に対する知識から決まることもあるが、別のデータを用いて事前に推定することで決める場合も多い。そのとき多くの確率変数の確率分布を直接推定するのは次元の呪いによって非常に困難な問題となる。一方、分解された確率分布は少ない変数の関数になるので比較的推定がやさしくなる。

ベイジアンネットワークのネットワークの構造は人間が因果関係に関する知識を使って行うことが多いが、実用上幾つか注意すべき点がある。第1の点は、ノードの親ノードの数はあまり多くしない方がよいということである。親ノードは条件付確率の条件部分に置かれるものなので、親ノードの数が多いと一つの条件付確率に関係する変数が多くなり、次元を削減した意味が薄くなってしまう。もう一つは、モデリングの後の推論計算に関係するものであるが、ネットワークが木構造をしていることで厳密計算にかかる計算量を削減できる。実際には複雑な対象に関して木構造に限定することは難しいが、リンクは最低限必要なものに限定する方が汎化能力の点でも計算量の点でも望ましい。

ベイジアンネットワークの構造そのものをデータから学習させる研究もあるが、幾つかの困難がある。一つはスパースモデリングで選ぶよりもはるかに多くのモデル候補からモデルを選ぶ必要があり、更に L_0 正則化同様に大域的に最適解を求めることが極めて難しい。そのため、通常行われるアプローチは、変数間の関係性の尺度を定義し（例えば相互情報量）、その関係性が強いものを順に枝でつないでいく貪欲算法により局所解を求めるという手法である。

もう一つの問題点は、全く同じ確率分布を表す異なるネット

ワーク構造が存在することで、得られた構造が因果的に意味があるかどうか明白ではないことである。

これらの問題点に加え、データ量が少ない場合には複雑な構造を精度よく求めることは難しい。そこで、完全に自由に構造を学習するのではなく、木構造や親ノード数に制限を設けたりする制約下で最適化を行うことが実用的には行われているが、少ないデータ数から精度の高い構造を学習する問題を解決することは実用上重要な課題である。

5.3 シミュレーションの利用

さて、ベイズモデリングでは、モデリングの段階で確率分布を与える必要があり、ここまではデータから学習することを軸に説明してきたが、知識として与える一つの有力な方法としてシミュレーションを利用することが考えられる。シミュレーションは因果関係に基づいて実世界の現象を模擬するコンピュータプログラムであり、生成モデルとしての要件を満たしている。ベイズ推論の計算の段階では、生成モデルによる確率値が必要となるので、そのたびにシミュレーションを回すことで確率値を推定する必要がある。そのため、シミュレーションをベイズモデリングに組み込む際には、ベイズ推論を現実的に回せるだけの計算機資源が必要であったり、粒度を粗くすることによって高速に実行できるシミュレーションを使うなどの工夫が必要になる。

このようにシミュレーションなど複雑な生成モデルと、実際の観測値をベイズモデリングで融合してベイズ推論を行うアプローチをデータ同化 (data assimilation) と呼ぶ⁽²⁵⁾。データ同化が用いられている最も身近な例は気象予測であり、気象シミュレーションと各地の気象観測や衛星画像などを融合して、降水確率や台風の進路予想などの予測を行っている。台風の進路予想が予報円という形で範囲の予測になっているのはベイズ推論で確率的な予測をしていることの表れである。

5.4 ベイズモデリングに関わる理論研究

ベイズモデリングは対象に対する知識をモデルに反映させるのに適したモデルであるという説明をしてきたが、一方でベイズモデリングは多くの機械学習モデルを統一的に理解することができる枠組みであるという側面ももつ。実際、前節で紹介した正則化の正則化項はベイズモデリングにおける事前分布と対応し、正則化の解はベイズモデリングの MAP 推定 (Maximum a posteriori)、すなわち事後確率が最も大きくなるものを選ぶことに相当している。理論的な解析としては1点だけを推定する前提よりも分布として扱う方が数学的な取り扱いが容易になることも多いので、汎化バイアスの解析についてもベイズモデリングでの定式化に基づくことが多い。本稿では内容の説明は割愛するが、PAC-ベイズ⁽²⁶⁾という汎化バイアスの信頼区間に関する解析や、既に述べた冗長で正則性の仮定を満たさないニューラルネットワークのような特異モデルについても、ベイズモデリングの定式化の上で代数幾何学的手法によって汎化バイアスの理論解析が行われている⁽⁵⁾。

もう一つの理論解析の対象は、ベイズ推論の計算に関するものである。本稿は少数データの学習をメインに説明しているので、詳細は省略するが、複雑なベイジアンネットワークではベイズ推論の計算を素朴に行おうとすると計算量が膨大になるという問題点がある。具体的には、ベイズモデリングでは $P(Y | X) = P(Y, X) / \sum_{X'} P(Y, X')$ の分母に現れるような周辺化の計算が必要となり、変数の次元に対して組合せ的な和の計算が必要となる。ベイジアンネットワークが木構造という特別な場合には組合せ的な和が各変数での和の形に分解できるため計算量が抑えられるが、一般には近似アルゴリズムが必要である。

ベイズモデリングにおける代表的な近似計算の方法として、確率伝播法（木構造の場合は厳密計算）、ラプラス近似、変分ベイズ法、マルコフ連鎖モンテカルロ法などが知られている^{(27), (28)}。特に、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC: Markov Chain Monte Carlo) は、汎用性が高くパッケージなどを使って簡単にベイズ推論を実行することができる⁽²⁹⁾。MCMC は近似とはいえ、時間をかければかけるほど正確な事後分布に収束する。また MCMC を含めいろいろな手法の近似精度や収束の速さの解析、またはそれらがよくなるような手法の改善の方法などが様々な研究されている。

6. 既存のデータの活用

6.1 転移学習とドメイン適応

データ数が少ないときのもう一つの対処法として、過去に集めたデータや類似のデータを活用するということが考えられる。ただし、そのようなデータは必ずしも今現在解きたい問題そのもののデータではないため、そのまま用いることができない。このような学習の枠組みは転移学習と呼ばれ、少数データの学習における有望なアプローチとして数多く研究されている⁽³⁰⁾。ここで、解きたい学習課題をターゲットタスク、過去データや類似データの学習課題をソースタスクと呼び、ソースタスクをターゲットタスクに転移して精度向上を図るのが転移学習のねらいである。

転移学習と一口で言っても問題設定は多岐にわたる。転移学習の典型的な問題設定はドメイン適応と呼ばれているもので、ディープニューラルネットワークの画像認識に広く応用されている。画像認識では、いわゆる一般物体認識などの課題で大量データを学習させることでディープラーニングの精度が向上し、これがディープラーニングのブームの端緒ともなった。一方、画像認識は医療画像診断や工業製品の画像検査など社会に数多く存在するが、それらの多くは必ずしも大量データを利用することができず、そのままではディープラーニングの精度を高くすることはできない。そこで、一般物体認識課題をソースタスクとし、医療画像の認識課題をターゲットタスクとするような転移学習が試みられ、良好な結果が報告されている⁽³¹⁾。この場合の転移学習の方法としては、大量データで学習させたニューラルネットワークを初期ネットワークとして、ターゲットタスク

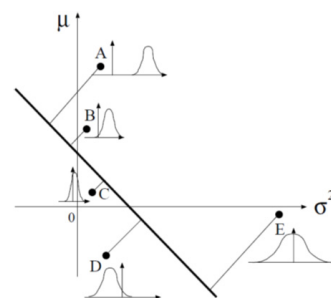


図4 一つ一つのガウス分布をタスクと考え、タスク間の共通部分空間を見つけるという転移学習の枠組み 文献(33)より抜粋。

のデータを追加学習させる方法がよく用いられている。ただし、追加学習を過剰に行ってしまうと、大量データで学習した構造も破壊されてしまうため、一般的な画像特徴抽出が行われている構造は変えずに、出力層に近い層のみを学習させるといった工夫がいろいろと考えられている。

6.2 転移学習の一般的な定式化

転移学習ではタスク間の共通性の抽出とタスクごとの独自性のバランスをどう取るかということがポイントとなる。これを幾何学的に説明すると、一つのタスクが1点で表現されるような空間があったとき、複数の点 (= タスク) を通るような部分空間があるとすると、その部分空間はタスクの共通性を表現していると考えることができる。ただし、各タスクは部分空間の中で異なった点に配置されることでタスクの独自性を表現すると考えられる。また、ターゲットタスクはデータ数が少なくて推定精度が低いなどの理由で必ずしもその部分空間の上にはのっていない場合もあるが、部分空間への射影を考えることによってタスク間の共通性を反映させた精度向上が見込まれる。これは本稿の最初の方で説明した次元圧縮を転移学習に応用したやり方である⁽³²⁾ (図4参照)。タスクの空間を情報幾何学で扱われるような確率分布の空間にすることで機械学習で用いる確率分布の構造を自然に導入することができ、転移学習に拡張する研究も進んでいる^{(33)~(35)}。

6.3 転移学習のバリエーションと課題

転移学習の特殊ケースとみなせる場合として重要なものの一つが半教師あり学習である⁽³⁶⁾。半教師あり学習は、ラベル付きの少量データとラベルなしの大量データがあるときに、ラベルなしの大量データをうまく利用して分類精度を上げるのが目的である。ラベル付けが難しい音声認識やそれと関連性の高い自然言語処理などで長い歴史をもつ応用課題である。これはベイズモデリングの考え方でうまく理解できる。つまり、入力 x に対する出力ラベル y の生成モデルがパラメータ θ に対して $p(x | y, \theta)p(y | \theta)p(\theta)$ と書けるとすると、これは x, y がデータとして与えられていれば教師あり学習であり、 x のみが与えられていれば教師なし学習とみなすことができる。具体的には

y が離散値 $1, 2, \dots, K$ のとき, $p(x | y, \theta)$ をガウス分布でモデル化すれば, 教師あり学習としては多変量解析の 1 手法である判別分析と同様の定式化になっているし, 教師なし学習としてはガウス混合分布とみなせる. バイズモデリングでは, どれをデータとして与えるかどうかによらず推論は可能なので, 半教師あり学習についても同じ生成モデルで単に一部の入力 x のみに y が与えられているという設定でもバイズ推論の計算自体は可能である. もちろんラベル付きのデータが少なければそれだけ精度自体は下がっていくのでそうした場合の汎化能力の評価もなされている⁽³⁷⁾.

次に共変量シフトと呼ばれる転移学習の枠組みについて述べる. 入力 x から出力 y を出力する関数 $f(x)$ の転移学習で, f はタスク間で共通である一方, 入力 x の分布が変化するという状況を考える. 例えば, 学習時に集めたデータと, 実際に学習したシステムを適用する現場では入力の性質が変化するというケースである. 共変量シフトでは, 学習時のデータにフィットさせるだけではなく, 実際に適用されるデータの分布に適応した学習方法によって精度を高める. 基本的なやり方としては学習データに重みをつけて学習させることによって適応させるという方法が用いられるが, 密度比推定などの関連技術や理論解析も進んでいる対象である⁽³⁸⁾.

7. 効率的なデータ収集

ここでは実験などを使ったデータ収集を効率的に行う能動学習とバイズ最適化という二つの方法について説明する. 能動学習は機械学習の精度が向上するような効率的なデータ収集を目的とし, バイズ最適化はできるだけ少ない回数で最適な実験条件を見つけることが目的となる. これらの問題は古くから研究されてきた実験計画法を機械学習の観点から発展させたものとみなすこともできる.

7.1 能動学習

入力 x から出力 y への関数 f を学習させるのに, 通常の機械学習では与えられたデータを使う. 一方, 能動学習 (active learning)⁽³⁹⁾ では, どの x に対するデータを取得するかが選べるという設定で, できるだけ f の精度が高くなるように x を選ぶ. これによって少数のデータだけから高いパフォーマンスを得ることが期待される. x を質問して答 y を教えてもらうという意味で質問あり学習などとも呼ばれる. 入力を選ぶというのは, 古くは作物の要因をうまく決めて効率的な実験方法を設計することから始まった実験計画法と本質的に同じ問題である.

単純な例を考えよう. x に上限と下限があると, f が直線であると分かっていると. このとき最も直線を精度高くするには上限・下限の 2 点をデータ点として選ぶのが最適である. y に多少のノイズがのったとしても, 直線のパラメータを高い精度で推定できる. 一方中央付近にある 2 点の x をデータ点として選ぶと, ノイズの付加によって推定される直線は非常に不安定なものとなる.

ただし, 前提として直線であるという最初の仮定が崩れていたらこのようなやり方では必ずしも精度の高い学習結果が得られるとは限らない. 直線 (あるいは別の関数クラス) を同定するには幅広い範囲でのデータの取得も必要となる.

このように, 能動学習では f が属する関数クラスがどのようなものであるかを同定するためのデータ取得と, 同定されたもとで最も精度を高くするようなデータ取得という二つの必ずしも両立しない要請を満たすように実験計画を行う必要がある.

いろいろな範囲でデータを取得するということを「探索」 (exploration), 一方本来の目的に応じてデータを取得することを「活用」 (exploitation) と呼び, この探索と活用のトレードオフ (exploration exploitation trade-off) が問題となる. これは, 能動学習のみならず, 強化学習やバンディット問題と呼ばれる機械学習の枠組みや後で述べるバイズ最適化で非常に重要となる一般的な問題である.

能動学習の基本的な考え方は, 関数に関して最も情報が得られる度合いが高い x を選ぶということである. x を選んだときの情報の得られる度合いを一般に獲得関数 (acquisition function) と呼ぶが, 情報理論の立場からは情報量 (エントロピー) で測ることができる. 関数 f のパラメータを θ とおき, $p(y, \theta | x) = p(y | x, \theta)p(\theta)$ という生成モデルを仮定すれば, x を選んだときの θ に関するエントロピーはこの生成モデルから計算される

$$- \int p(\theta | x) \log p(\theta | x) d\theta \quad (6)$$

であり, これは θ に関するあいまいさが高いほど大きな値を取る. 逆にこれを小さくするような x を選ぶことで最も情報量の高い x を選ぶことができる.

ただし, これには幾つかの問題点がある. 生成モデルはあくまで事前知識に基づいて作成されるものなので本当にどうなっているかは分からないことが多い. 誤った生成モデルから得られる結果の信頼性は低い. 最初に説明した直線を仮定したという話に通じる問題点である. これについては, 取得データが増えていくごとに生成モデルをモデル選択によって選ぶことである程度対処できる. すると, モデル選択をするために有利なデータ取得も行う必要が出てきて探索と活用のトレードオフを決める必要が出てくる. このように突き詰めて考えていくと, 鶏が先か卵が先かに似たような循環論法に陥ってしまうが, 現実的にはある程度割り切って, 適当に定めたモデルの仮定のもとで能動学習を実行することが多い.

能動学習や次項のバイズ最適化でよく用いられている学習モデルにガウス過程回帰がある^{(40), (41)}. まずガウス過程回帰について簡単に説明しておく. ガウス過程というのは, 関数の確率モデル (正確には確率過程) の最も基本的なものの一つで, 平均関数 $m(x)$ と共分散関数 $v(x, x')$ で任意 2 点 x, x' の二次元ガウス分布で関数値が決まる. ガウス分布は 2 点の間の関係だけで確率分布が決められるため, 入力空間の任意の n 個の点の関数値確率分布が決められるというものである. $v(x, x')$ はカーネル法⁽⁴²⁾で用いられる正定値カーネルと呼ばれる関数 (代表例として動径基底カーネル $v(x, x') = \exp(-\beta \|x - x'\|^2)$) などが

ある)を使う。

ガウス過程回帰はガウス過程を事前分布とし、データに基づいて関数の事後分布を計算するベイズモデリングでの学習モデルである。事後分布もやはりガウス過程になるため、計算の容易さもあって非線形で複雑な関数の学習に広く用いられている。能動学習では、先に述べたようにベイズモデリングであればエントロピーなどの指標によって x を選ぶことができる。ただし、実際にはエントロピーの計算を厳密に行って最適な x を選ぶのは計算量が膨大に必要なため難しい。そこで、例えば x ごとの分散 $v(x, x)$ を関数に対するあいまいさの指標として簡易的に $v(x, x)$ が最大となる x を選ぶというような手法が用いられることも多い。また、そもそもガウス過程回帰で想定している生成モデルが正しいかどうかにか結果が依存するため、モデル選択（具体的には動径基底関数の中のハイパーパラメータ β の選択など）をやりながら能動学習を進めることになる。

このように、モデル選択との組合せや得られる情報の量として用いる尺度に様々なバリエーションがあり、実用的に有効な能動学習のいろいろな手法が提案されている。

7.2 ベイズ最適化

能動学習が機械学習モデルの精度を大きくするように入力（実験条件）を選ぶのに対し、ベイズ最適化ではある目的関数の値ができるだけ大きくなるように入力を選ぶ⁽⁴³⁾。例えば材料科学などの応用で、材料を作成する温度によって材料の特性値が変化する場合、温度と特性値の関係を精度高く求めたいというのが能動学習で、関係性を知ることは二の次で、とにかく特性値が高くなる温度を求めたいというのがベイズ最適化である。どちらもできるだけ少ない回数で求めたいということは共通しているがその目標が異なる。

ベイズ最適化では入出力関数を求めることは目標としていないが、目的関数についての情報がなければ最大化もできないため、ある程度は目的関数の情報も集める必要がある。これも探索と活用のトレードオフの一例である。

基本的には能動学習で用いられていた獲得関数をベイズ最適化に合うように設計することで問題は解ける。能動学習同様、学習モデルとしてはガウス過程回帰を用いることが多い。学習モデルを直線のようなしぼりの強いものでなく、データが増えるとともに複雑な形状を実現できるガウス過程はモデル同定にかかる負担がある程度回避できる（それでもハイパーパラメータ推定は必要となる）。

ベイズ最適化で用いられる獲得関数には様々なものが提案されているが、代表的なものとして、probability of improvement

$$PI(x) = Pr[y > y_{\max} | x, \text{Data}] \quad (7)$$

が挙げられる。これはこれまで観測されたデータ (Data) が与えられたもとでの入力 x に対する予測分布 $p(y | x, \text{Data})$ を考えたとき、出力 y の値がこれまで得られた目的関数の最大値 $y_{\max}$ を超える確率を表す。これによって、予測値がこれまでの最高値を超える度合いが高い x を選ぶことによって探索と活用のバ

ランスを取っている。獲得関数を最大にする x を選ぶのは一般に計算量を必要とするが、 y を取得するための実験のコストが非常に高い場合には、計算機上の計算だけで済むので相対的には問題にならないケースもある。

能動学習やベイズ最適化は、実世界で時間的・金銭的なコストが非常に高い実験をできるだけ少なくすることで、効率的に機械学習を行う方法を提示している。これは単純な試行錯誤やラテン超方格法などの実験計画法よりも効率的である可能性をもっていると考えられ、応用研究も進んでいるが、解決すべき問題は幾つも残っている。

既に述べたように、モデルを同定しながら探索も行うというのは現実的には探索効率を下げることも多く、ベイズ最適化でいえば、単純な勾配法のような最適化法の方が効率がよいこともある。ガウス過程回帰は勾配法などでは問題となる局所解の問題を避けることはできるが、ガウス過程であてはめられる関数自体は比較的なめらかな関数（特にデータ数が少ないとき）であることが多いため、不連続性のあるような問題にはあまり向いていない。また、それとも関連するが、少数データでの機械学習は次元の呪いを受けやすいため、実用的には数次元程度の最適化が限界であると考えられている。この辺りも理論や実用面でのブレークスルーが必要な点である。

8. ま と め

本稿では、少ないデータ数に対する機械学習という点にフォーカスしてきた。データの少なさは、絶対的なものではなく、次元数との相対的な関係で決まり、より一般的には関数の複雑さ、言い方を変えれば解いている問題に依存して決まる。そのうえで、次元圧縮を行ったり、スパースモデリングによる変数選択の方法で、少ないデータ数でも汎化能力の向上を測ることができることを示した。また、対象に対する知識をモデルに反映させるベイズモデリングや、類似のタスクの情報を取り込む転移学習など、データの少なさを補う手法を紹介した。そして、データの取得が難しい場合に、機械学習や最適化がうまくいくようなデータの取得方法として能動学習やベイズ最適化といった方法を紹介した。基礎・境界の研究者の方にも役立つようそれぞれの理論的な課題もできるだけ織り交ぜながら説明した。

一方、現実でのデータ解析を行う際には、本稿で述べたようないろいろな角度から試行錯誤をくりかえして少ないデータという問題に取り組む必要がある。試行錯誤をうまく回すこととしては、できるだけシンプルなモデルや設定からスタートすることが重要で、少数データに対していきなり複雑なことをやろうとしてもうまくいかないことに注意する。データ駆動科学における解析の進め方については文献(44)も参考になる。理論面・実用面で本稿が今後の研究のヒントとなれば幸いである。

文 献

- (1) 統計関連学会連合理事会および有志, “我が国の統計科学振興への提言,” <http://www.jfssa.jp/TokeiKagakuShinkou0702.pdf>, 2007.

- (2) C.C. Aggarwal, A. Hinneburg, and D.A. Keim, “On the surprising behavior of distance metrics in high dimensional space,” International Conference on Database Theory, 2001.
- (3) 小西貞則, 情報量規準 (予測と発見の科学), 朝倉書店, 2004.
- (4) C.M. Hurvich, R. Shumway, and C.-L. Tsai, “Improved estimators of Kullback–Leibler information for autoregressive model selection in small samples,” Biometrika, vol.77, no.4, pp.709–719, 1990.
- (5) S. Watanabe, “A widely applicable Bayesian information criterion,” J. Mach. Learn. Res., vol.14, no.27, pp.867–897, 2013.
- (6) 渡辺澄夫, ベイズ統計の理論と方法, コロナ社, 2012.
- (7) P. Nakkiran, et al., “Deep double descent: Where bigger models and more data hurt,” Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, vol.2021, no.12, 124003, 2021.
- (8) Y. Wang, et al., “Understanding how dimension reduction tools work: An empirical approach to deciphering t-SNE, UMAP, TriMap, and PaCMAP for data visualization,” J. Mach. Learn. Res., vol.22, no.201, pp.1–73, 2021.
- (9) 青嶋誠, 矢田和善, 高次元の統計学, 共立出版, 2019.
- (10) M. Aoshima and K. Yata, “Two-stage procedures for high-dimensional data,” Sequential Analysis, vol.30, no.4, pp.356–399, 2011.
- (11) L. Oneto, S. Ridella, and D. Anguita, “Tikhonov, Ivanov and Morozov regularization for support vector machine learning,” Machine Learning, vol.103, no.1, pp.103–136, 2016.
- (12) B.K. Natarajan, “Sparse approximate solutions to linear systems,” SIAM Journal on Computing, vol.24, no.2, pp.227–234, 1995.
- (13) K. Nagata, et al., “An exhaustive search and stability of sparse estimation for feature selection problem,” IPSJ Online Transactions, vol.8, pp.25–32, 2015.
- (14) B. Żogała-Siudem and S. Jaroszewicz, “Fast stepwise regression based on multidimensional indexes,” Information Sciences, vol.549, pp.288–309, 2021.
- (15) R. Tibshirani, “Regression shrinkage and selection via the lasso,” Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), vol.58, no.1, pp.267–288, 1996.
- (16) 富岡亮太, スパース性に基づく機械学習 (機械学習プロフェッショナルシリーズ), 講談社, 2015.
- (17) M. Elad, スパースモデリング: l_1/l_0 ノルム最小化の基礎理論と画像処理への応用, 玉木徹 (訳), 共立出版, 2016.
- (18) 田中利幸, “圧縮センシングの数理,” 信学FR誌, vol.4, no.1, pp.39–47, 2010.
- (19) K. Akiyama, et al., “First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole,” The Astrophysical Journal Letters, vol.875, no.1, L1, 2019.
- (20) T. Obuchi and Y. Kabashima, “Cross validation in LASSO and its acceleration,” Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, vol.2016, no.5, 053304, 2016.
- (21) C.M. Bishop, パターン認識と機械学習, 元田ほか (監訳), 丸善出版, 2008.
- (22) 須山敦志, ベイズ推論による機械学習入門 (機械学習スタートアップシリーズ), 講談社, 2017.
- (23) 渡辺有祐, グラフィカルモデル (機械学習プロフェッショナルシリーズ), 講談社, 2016.
- (24) D. Koller and N. Friedman, Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques, MIT Press, 2009.
- (25) 樋口知之, データ同化入門—次世代のシミュレーション技術— (予測と発見の科学), 朝倉書店, 2011.
- (26) J. Langford and J. Shawe-Taylor, “PAC-Bayes & margins,” Advances in Neural Information Processing Systems, vol.15, pp.439–446, 2002.
- (27) 汪金芳, 手塚集, 上田修功, 田栗正章, 樺島祥介, 計算統計 I —確率計算の新しい手法 (統計科学のフロンティア 11), 岩波書店, 2003.
- (28) 伊庭幸人, 種村正美, 大森裕浩, 和合肇, 佐藤整尚, 計算統計 II —マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺 (統計科学のフロンティア 12), 岩波書店, 2005.
- (29) 松浦健太郎, Stan と R でベイズ統計モデリング (Wonderful R), 共立出版, 2016.
- (30) K. Weiss, T.M. Khoshgoftaar, and D.D. Wang, “A survey of transfer learning,” Journal of Big Data, vol.3, no.1, pp.1–40, 2016.
- (31) H.-C. Shin, et al., “Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning,” IEEE Trans. Med. Imag., vol.35, no.5, pp.1285–1298, 2016.
- (32) S.J. Pan, J.T. Kwok, Q. Yang, et al., “Transfer learning via dimensionality reduction,” AAAI, vol.8, pp.677–682, 2008.
- (33) S. Akaho, “The e-PCA and m-PCA: Dimension reduction of parameters by information geometry,” 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No. 04CH37541), vol.1, pp.129–134, 2004.
- (34) K. Takano, H. Hino, S. Akaho, and N. Murata, “Non-parametric e-mixture estimation,” Neural Comput., vol.28, no.12, pp.2687–2725, 2016.
- (35) H. Ishibashi and S. Akaho, “Principal component analysis for Gaussian process posteriors,” Neural Computation, vol.34, no.5, pp.1189–1219, 2022.
- (36) J.E. Van Engelen and Holger H. Hoos, “A survey on semi-supervised learning,” Machine Learning, vol.109, no.2, pp.373–440, 2020.
- (37) H. Shimodaira, “A new criterion for selecting models from partially observed data,” in Selecting Models from Data, pp.21–29, Springer, New York, NY, 1994.
- (38) M. Sugiyama, M. Krauledat, and K.-R. Müller, “Covariate shift adaptation by importance weighted cross validation,” J. Mach. Learn. Res., vol.8, no.5, pp.985–1005, 2007.
- (39) 日野英逸, “能動学習: 問題設定と最近の話題,” 日本統計学会誌, vol.50, no.2, pp.317–342, 2021.
- (40) 持橋大地, 大羽成征, ガウス過程と機械学習 (機械学習プロフェッショナルシリーズ), 講談社, 2019.
- (41) 赤穂昭太郎, “ガウス過程回帰の基礎,” システム/制御/情報, vol.62, no.10, pp.390–395, 2018.
- (42) 赤穂昭太郎, カーネル多変量解析—非線形データ解析の新しい展開 (シリーズ確率と情報の科学), 岩波書店, 2008.
- (43) B. Shahriari, et al., “Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization,” Proc. IEEE, vol.104, no.1, pp.148–175, 2015.
- (44) Y. Igarashi, et al., “Three levels of data-driven science,” Journal of Physics: Conference Series, vol.699, no.1, IOP Publishing, 2016.

(MSS 研究会提案, 2022 年 12 月 2 日受付,
2022 年 12 月 27 日再受付)



赤穂昭太郎 (正員)

1988 東京大・工・計数卒。1990 同大学院修士課程了。同年電子技術総合研究所入所。以来、統計的機械学習の理論やアルゴリズムの研究に従事。現在、産業技術総合研究所人間情報インタラクション研究部門上級主任研究員。博士 (工学)。著書『カーネル多変量解析』など。

音源分離技術の基礎と動向

—確率モデル/深層学習に基づく方法の概観—

Fundamentals and Trends on Sound Source Separation :
Overview of Approaches with Probabilistic Model and Deep Learning

戸上真人 Masahito TOGAMI

アブストラクト 複数の音が混ざった音を音源ごとに分離する音源分離技術は、無線通信のビームフォーミング技術、確率モデルに基づく信号処理及び最適化に関する技術、そして深層学習に関する技術を取り込みつつ進化を続けてきている。本稿では、空間モデルと音源の確率モデルに基づく複数マイクロホンの音源分離技術、深層学習を用いた単一マイクロホンの音源分離技術、そして深層学習ベースの音源モデルと空間モデルを用いた複数マイクロホンの音源分離技術の概観を示す。

キーワード ビームフォーミング、確率モデル、空間モデル、深層学習

Abstract Sound source separation, which separates multiple sound sources from a mixture, has continued to evolve by incorporating beamforming techniques in wireless communication, signal processing, optimization techniques based on probabilistic models, and deep learning techniques. This paper prondes an overview of sound source separation techniques for multiple microphones based on a spatial model and a probabilistic sound source model, for a single microphone with deep learning, and for multiple microphones using a deep-learning-based sound source model and a spatial model.

Key words Beamforming, Probabilistic model, Spatial model, Deep learning

1. はじめに

様々な人に同時に情報を届けられることができる音声メディアにおいては、マイクロホンで様々な音が混ざって受音される現象は避け難く、マイクロホンで収録した音声を利用する機器・システムにおいて様々な問題が生じる。例えば、近年、人が話した音声を理解する音声認識システムが、AI スピーカをはじめ様々なシーンで使われるようになってきているが、音声認識システムは1人の音声（目的音声）を聞き取ることを想定して作られていることが多く、目的音声以外の音がマイクロホンに混入すると認識率が低下することが問題となる。また、補聴器やテレビ会議システムなどの人が音声聞き取るための機器・システムにおいても、様々な音が混ざることによって聞きたい音が聞き取りにくくなるという問題が生じる。このような問題の解決を目的に、複数の音が混ざった音を音源ごとに分離する音源分離技術の検討が進んでいる。

音源分離技術の技術体系は様々な観点から整理することができるが、よく用いられる観点の一つは分離に用いるマイクロホン数の観点である。用いるマイクロホンが一つか複数かで技術体系が大きく異なる。複数マイクロホンをを用いることで、音源

の到来方向などの空間的な情報を得ることができ、無線通信にルーツを有するビームフォーミングを応用した空間モデルに基づく音源分離技術⁽¹⁾を適用することができる。ビームフォーミングでは聞きたい音に関する到来方向などの事前情報を必要とするが、この事前情報を用いる代わりに音源信号の特徴に関する確率モデル（音源モデル）を導入することで、複数のマイクロホン入力信号のみから音源ごとの信号を分離することが可能となるブラインド音源分離技術⁽²⁾、⁽³⁾の検討が進んでいる。一方で単一マイクロホンの音源分離は空間に関するモデルを用いることができず、音源モデルのみから分離を行う必要がある。定常な背景雑音と音声のような非定常な信号が混ざった入力信号から背景雑音を除去する技術が盛んに検討されてきている⁽⁴⁾。一方、複数の非定常な信号が混ざった入力信号を入力信号の情報のみから音源ごとに分離することは難しく、事前に得られる学習データを用いたアプローチの検討が進んでいる。特に深層学習が進展し精緻な音源モデルを学習することが可能になったことで、学習ベースの音源分離技術が急速に進展した⁽⁵⁾。本稿では、このような音源分離技術について、用いるマイクロホン数と深層学習の活用の有無の観点で技術を分類し、ビームフォーミングを用いた方法から近年の深層学習を用いた方法まで広く基礎と動向を紹介する。本来音源分離技術は全ての音源を分離する技術として定義されることが一般的であるが、本稿ではこの定義を緩め一部の音源のみを抽出する音源強調技術や音源を分離するだけでなく不要な残響や背景雑音の除去を音源分離と同時に技術も解説対象に加える。

戸上真人 正員 Amazon Web Services, Inc. This work does not relate to his position at Amazon.

E-mail mtogami@amazon.com

Masahito TOGAMI, Member (Principal Applied Scientist, Amazon Chime SDK, Amazon Web Services, Inc., East Palo Alto, California, 94303 U.S.A.).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ

Fundamentals Review Vol.16 No.4 pp.257–271 2023 年 4 月

©電子情報通信学会 2023

2. モデルベースの複数マイクロホンの音源分離

2.1 複数マイクロホンの音源分離問題

複数センサからなるセンサレーを用いたアレー信号処理技術⁽⁶⁾に基づき、様々な信号が混ざった複数マイクロホンの信号から特定の信号を抽出する技術が、無線通信分野中心に検討されてきた。音源分離においても、このアレー信号処理技術を応用した複数マイクロホンを用いた音源分離技術⁽¹⁾が検討されてきている。

音源に関連する成分以外がマイクロホン入力信号に混入せず、発話中に音源もマイクロホンも場所が変化せず各音源からマイクロホンまでのインパルス応答 $\mathbf{h}$ が一定と仮定すると、複数マイクロホンの入力信号 $\mathbf{x}_t$ (t は時間インデックスで、 $\mathbf{x}_t$ は要素数がマイクロホン数 M と等しいベクトル) は次式のように畳み込み混合の形で書くことができる。

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{h} * \mathbf{s}_t \quad (1)$$

$\mathbf{s}_t$ は各音源の原信号を並べたベクトルであり、このベクトルを入力信号 $\mathbf{x}_t$ から推定することが音源分離の目的ということになるが、畳み込み混合の形で表される入力信号のモデルを直接を用いた音源分離法が時間領域の音源分離法として提案されてきている^{(7)~(14)}。しかし、畳み込み混合を直接扱うことは計算量の大きさから問題となることが多い。そこで、インパルス応答 $\mathbf{h}$ の長さが短時間フーリエ変換のフレームサイズよりも十分に短ければ、時間領域から時間周波数領域に信号表現を変換することで、畳み込み混合よりもシンプルな瞬時混合として入力信号を表現できることを利用した時間周波数領域の音源分離法が提案されてきている⁽¹⁵⁾。時間周波数領域での瞬時混合が時間領域の畳み込み混合の近似表現であることから、時間領域での音源分離法の上限性能は時間周波数領域の手法の上限性能を上回ると考えられるが、計算コストは時間周波数領域の手法の方が低いため、実用性の高い手法として盛んに検討されてきている。そこで本章では、複数マイクロホンを用いた音源分離技術として時間周波数領域の手法に焦点を絞り解説を進める。

ここで、短時間フーリエ変換により時間領域の信号を時間周波数領域に変換した信号を $\mathbf{x}_{lk}$ とする。 l は短時間フーリエ変換の時間 (フレーム) インデックス、 k は周波数インデックスとする。 $\mathbf{x}_{lk}$ はマイクロホン数 M の複素数の要素をもつベクトルとする。以降、特別な理由がない限り、簡単のため l と k は省略して表記する。入力信号 $\mathbf{x}$ は以下のような瞬時混合で表すことができる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{s}$ は各音源の原信号を要素にもつ N 次元のベクトルであり、 $\mathbf{A}$ はインパルス応答 $\mathbf{h}$ の周波数領域での表現であり $M \times N$ の行列となる。式 (2) を混合過程の式と呼び、時間周波数領域での音源分離問題はマイクロホン入力信号 $\mathbf{x}$ から混合過程の式

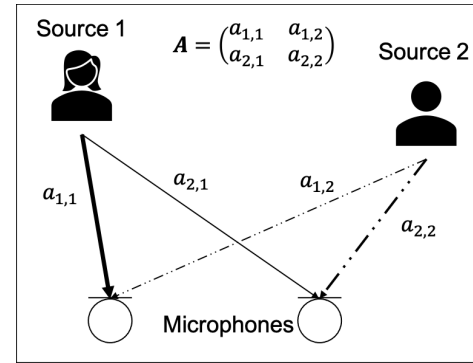


図 1 音源からマイクロホンまでの音の伝搬過程

を満たすような $\mathbf{s}$ を推定する問題ということになる。ここで、もし $\mathbf{A}$ が既知であり正則行列であれば、音源分離問題は $\mathbf{A}$ の逆行列 $\mathbf{A}^{-1}$ を用いて、次式で示すように容易に解くことができる。

$$\mathbf{s} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{x} \quad (3)$$

式 (3) はマイクロホン入力信号から $\mathbf{A}^{-1}$ を用いて音源を分離する分離過程を表しているといえることができる。ここで、 $\mathbf{A}$ が既知であるという仮定がはたして現実的な仮定であるかを考える。まず、そもそも $\mathbf{A}$ とは何かを考えることにする。 $\mathbf{A}$ とは図 1 に示すように音源からマイクロホンまで音が伝搬する際の減衰や時間遅れからなる伝搬係数に相当する。この伝搬係数は音源とマイクロホンまでの距離に依存して変化するため、 $\mathbf{A}$ は音源やマイクロホンの空間的な場所に依存して決まる係数ということになる。もし音源の位置とマイクロホンの位置が分かれば、音響的なシミュレーションや音源からマイクロホンまでのインパルス応答を計測することで $\mathbf{A}$ を推定することができると考えられる。このような音源やマイクロホンについての空間的な事前情報を得ることができるかどうかは音源分離を用いるアプリケーションに大きく依存するが、現実には $\mathbf{A}$ を決めるために必要な情報が完全に得られるアプリケーションは多くはない。そこで、 $\mathbf{A}$ に関する事前情報が限定的であったり、全く情報が手に入らない中で音源を分離することが求められる。

2.2 ビームフォーミングによる目的音源強調技術

部分的に $\mathbf{A}$ に関する事前情報が得られている場合に一部の音源 (目的音源) のみを強調して抽出する技術として、アレー信号処理のビームフォーミングを音声処理に応用した複数マイクロホンの音源強調技術が検討されてきている。具体的に $\mathbf{A}$ に関する事前情報としてマイクロホンからみた目的音源の到来方向が与えられている場合を想定する。人と会話するロボットでは会話相手がロボットの正面にいないことを前提とすることができたり、カメラを有するテレビ会議システムなどでもカメラから得た画像情報を用いて顔画像認識を行うことで、マイクロホンからみた目的音源の空間的な場所を知ることができたりすると考えられ、このようなアプリケーションにおいては目的音源の到来方向が与えられるという仮定は現実的な仮定と考えられる。

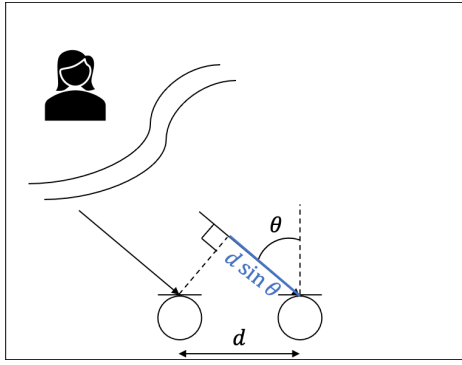


図2 マイクロホン間の目的音の経路差

ビームフォーミングによる音源強調技術の詳細に踏み込む前に、まず式 (2) で示した音源分離の混合過程の式を以下のように変形する。

$$\mathbf{x} = \mathbf{s}_1 \mathbf{a}_1 + \mathbf{n} \quad (4)$$

ここで $\mathbf{a}_i$ は $\mathbf{A}$ の i 列めの列ベクトル、 $\mathbf{s}_i$ は $\mathbf{s}$ の i 番めの成分とする。目的音源の数を一つと仮定し、一つめの音源が目的音源であるとする。 $\mathbf{n}$ は $\mathbf{As}$ から一つめの音源に相当する成分 $\mathbf{s}_1 \mathbf{a}_1$ を除いた残りの成分ということになり、目的音源のみを抽出したいという文脈においては不要な成分ということになる。表記を簡略化する目的で以降 $\mathbf{s}_1$ を $\mathbf{s}$ 、 $\mathbf{a}_1$ を $\mathbf{a}$ と表記する。 $\mathbf{a}$ はステアリングベクトルと呼ばれている。マイクロホンからみた目的音源の到来方向 θ が分かる場合にステアリングベクトルがどのように記述できるかについて考える。音源とマイクロホンとの間の距離に対してマイクロホン間の距離 d が十分短いと仮定する。ステアリングベクトル中の任意の二つの要素の比率は音源から対応する二つのマイクロホンまでの経路差から決まると考えられるが、図2に示すように目的音の二つのマイクロホン間の遅延時間の差は音源とマイクロホン間の距離に依存せず、方位角 θ のみに依存し $d \sin \theta$ となることが分かる。また、音源とマイクロホンとの間の距離に対してマイクロホン間の距離 d は十分短いことから、近似的に二つのマイクロホン間での音の減衰率に違いはない。つまり、ステアリングベクトル $\mathbf{a}$ の要素の比率 (RTF: relative transfer function^{(16), (17)}) がマイクロホンからみた目的音源の到来方向 θ のみから決まることになる。しかし、絶対的な減衰率や経路長は到来方向のみからでは決まらないため、ステアリングベクトル $\mathbf{a}$ 自体ではなく $\mathbf{a}$ に未知の係数 β をかけた $\beta \mathbf{a}$ が決まることになる。音源分離ではマイクロホン入力信号を表現するような分離信号を推定することになるが、入力信号は $\mathbf{x} = \frac{\mathbf{s}}{\beta} \beta \mathbf{a} + \mathbf{n}$ と書くことができるため、実際のステアリングベクトルの β 倍のベクトルを用いて入力信号に適合するような分離信号を求めたときの分離信号は実際の分離信号の $\frac{1}{\beta}$ 倍の信号となる。このような分離信号の大きさの不定性の問題を避けるために、 $\mathbf{s}$ そのものを推定するのではなくマイクロホン入力信号中の目的音源の成分 $\mathbf{c} = \mathbf{s} \mathbf{a}$ を推定するように音源分離問題自体を置き換えることが多い。ステアリングベクトルに β 倍の不定性があっても入力信号を表現する $\mathbf{c}$ には不定性が生じないことが分かる。

ビームフォーミングでは、フィルタ $\mathbf{w}$ を用いて分離信号 $\mathbf{y}$ を

表1 代表的なビームフォーミングの分類

手法	設計規範	フィルタ計算に必要な入力信号
遅延和ビームフォーマ	目的音信号はひずみなく抽出し、マイクロホン間で無相関な不要音の音量を最小化	なし
最小分散無歪ビームフォーマ	目的音信号はひずみなく抽出し、入力信号に含まれる不要音の音量を最小化	不要音が含まれる区間の入力信号
最ようビームフォーマ	目的音信号はひずみなく抽出し、不要音のみが含まれる区間の入力信号に含まれる不要音の音量を最小化	不要音のみが含まれる区間の入力信号
最大 SNR ビームフォーマ	分離信号中の目的音と不要音の音量の比率を最大化	目的音が含まれる区間の入力信号と不要音のみが含まれる区間の入力信号

以下のように求める。

$$\mathbf{y} = \mathbf{w} \mathbf{x} \quad (5)$$

$\mathbf{y}$ は $\frac{\mathbf{s}}{\beta}$ に相当するため、 $\mathbf{c} = \mathbf{y} \mathbf{a}$ とすることで、大きさの不定性の問題が生じない分離信号を得ることができる。 $\mathbf{w}$ は目的音信号はそのまま取り出し、不要音 $\mathbf{n}$ をできるだけ小さくするように設計することが求められる。ステアリングベクトル $\mathbf{a}$ が得られている場合の $\mathbf{w}$ の設計法は、フィルタ設計規範とともに、各信号の統計量を得るためにどのようなマイクロホン入力信号を用いるかで手法が分かれ、表1に示すような様々な手法が提案されている^{(6), (18)}。遅延和ビームフォーマはフィルタ設計のために不要音が含まれる入力信号を必要としない方法であり、必要とする情報が少ないが、十分な目的音源の強調性能を得るために、一般的に非常に多くのマイクロホンが必要となる。一方で不要音が含まれる入力信号を用いて、不要音を効率的に抑圧するようにフィルタ設計する適応フィルタを用いることで、遅延和ビームフォーマと比較して少ないマイクロホンで高い性能を得ることができる。本節では、適応フィルタとして代表的な最小分散無歪ビームフォーマ (MVDR: minimum variance distortionless beamformer)⁽¹⁹⁾を中心に解説する。MVDRは目的音成分をひずみなく抽出するという条件の下、入力信号に含まれる不要音の音量を最小化するように $\mathbf{w}$ を最適化する。

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= \arg \min_{\mathbf{w}} E[|\mathbf{w} \mathbf{x}|^2] \\ \text{subject to } \mathbf{w} \mathbf{a} &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 E は期待値計算の演算子とする。この条件付きの最適化問題はラグランジュの未定乗数法を用いて解くことができ、その解は次式で求めることができる。

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1}}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}} \quad (7)$$

ここで H はエルミート転置とし、 $\mathbf{R} = E[\mathbf{x} \mathbf{x}^H]$ で入力信号の

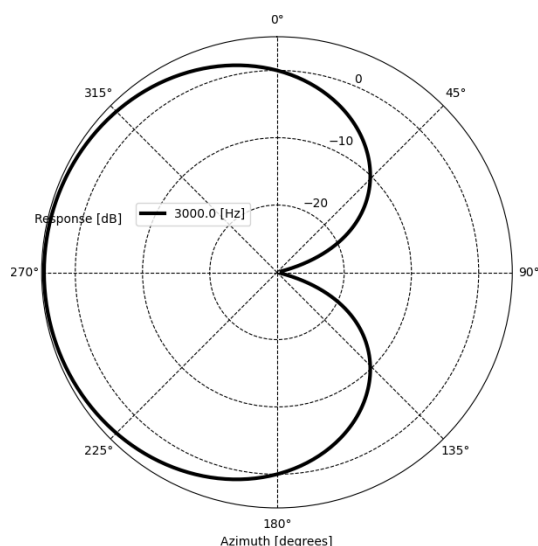


図3 MVDRの指向特性 0°方向に目的音, 90°方向に不要音を配置, マイクロホン間隔は2 cm, 周波数3000 Hz.

共分散行列とする。実際には期待値計算を平均処理に置き換えて共分散行列を計算する。MVDRのフィルタは不要音に関してマイクロホン間の経路差を打ち消すような係数を各マイクロホン入力信号に掛けた上で差分を取ることで不要音を除去するフィルタとなっており、入力信号に含まれる不要音の到来方向に空間的な死角を形成し不要音を除去するようなフィルタと解釈することができる。MVDRのフィルタは不要音の到来方向に応じて抑圧性能が変化するフィルタになっている。方向ごとの抑圧性能の特性を指向特性というが、図3に M が2で、0°方向に目的音、90°方向に不要音を配置した場合のMVDRの指向特性の一例を示す。不要音の存在する90°方向に急しゅんな死角ができていことが分かる。このようにMVDRのフィルタは死角を制御することで不要音を除去する。形成可能な死角の数が不要音の除去性能と密接に関連することになるが、その数はフィルタと直交する線型独立なベクトルの数と等しく、 $M-1$ となる。MVDRは限られた死角を入力信号に含まれる不要音の到来方向に向けることで、効率的に不要音を抑圧し目的音を強調する手法と捉えることができる。また、MVDRと本質的に同じフィルタ設計規範の下、時々刻々入力信号に合わせフィルタの形状を変化させていくgeneralized sidelobe canceller (GSC)という方式が提案されている⁽²⁰⁾。GSCでは目的音のステアリングベクトルを用いて目的音をブロックし不要音のみの信号を予測し、その不要音のみの信号を目的音を遅延和ビームフォーマで強調した信号から適応フィルタで除去することで、目的音のみを強調して抽出することができる。しかし、ステアリングベクトル算出の際に仮定した目的音の到来方向と実際の目的音の到来方向がずれたり、床や壁、天井などでの音の反射の影響を受け事前に求めたステアリングベクトルと実際のステアリングベクトルとの間にずれが生じる場合に目的音のブロックが上手く働かず、実際の目的音が不要音と見なされ出力信号中の目的音にひずみが生じるといった問題（シグナルキャンセレーション問題）が起こる。これに対して、フィルタの抑圧性能を制限するこ

とでシグナルキャンセレーション問題を起こりにくくするようなロバストビームフォーマの検討がなされてきている^{(21)~(28)}。マルチチャネルウィナーフィルタ(MWF)はこのようなロバストビームフォーマの代表的な手法であり不要音の抑圧量と目的音のひずみとの間のトレードオフパラメータをもち、トレードオフパラメータを変化させることで不要音の抑圧量と目的音のひずみをコントロールすることができる^{(22)~(28)}。またMVDRにおいてもシグナルキャンセレーション問題は起こるが、例えば方位角 -30° から 30° といったように目的音の到来方向に範囲を設定し、その範囲に入らない時間周波数成分を抽出するような時間周波数マスクを入力信号に重畳した上で不要音の共分散行列を推定することで、シグナルキャンセレーション問題を防ぐような方法が提案されている⁽²⁹⁾。

2.3 ブラインド音源分離

音源の方向などの事前情報を用いずに、入力信号のみを用いて各音源の信号を分離する音源分離手法はブラインド音源分離と呼ばれており、これまで様々な手法が検討されてきている⁽²⁾。ブラインド音源分離では、ビームフォーミングで既知としていた目的音源のステアリングベクトルが事前に得られることを仮定することなく、全ての音源を分離抽出することを目的とする。混合過程の式(2)に再度注目する。ブラインド音源分離の問題設定においては、 $\mathbf{s}$ を知りたいが $\mathbf{A}$ も分からないということになる。このままでは式(2)を満たす $\mathbf{s}$ と $\mathbf{A}$ のペアが無限に存在することになる。これは、解を絞るには情報が足りないということ意味する。そこで、ブラインド音源分離では、混合過程の式に加えて追加の情報として音源に関する確率モデル(音源モデル)を導入することで、無限に存在する解候補の良し悪しを判断できるようにし、音源モデルの観点から妥当な分離信号を出力するように $\mathbf{A}$ （一般的には $\mathbf{A}$ の代わりに $\mathbf{A}$ の逆行列に相当する分離フィルタ $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$ ）を最適化する。ブラインド音源分離における分離処理は本質的にビームフォーミングにおける死角を利用した分離処理と同じものと解釈することができる⁽³⁰⁾。そこで、音源モデルを用いて分離フィルタ $\mathbf{W}$ を最適化するという意味合いを、ビームフォーミングの観点から説明する。簡単のため、 $N = M = 2$ とする。 $\mathbf{W}$ の i 行めの行ベクトル $\mathbf{w}_i$ は i 番めの音源 s_i を分離するための分離フィルタということになる。音源 s_1 を分離する際には、 s_2 が不要音ということになるが、分離フィルタ $\mathbf{w}_1$ の死角の位置が悪いと分離信号には s_1 だけでなく s_2 も混ざることになる。一方で、分離フィルタ $\mathbf{w}_1$ が上手く s_2 の到来方向に死角を当てることでできれば分離信号には s_1 だけが含まれることになり、理想的な分離信号が得られることになる。直感的には、分離信号がこのような1音源のみが含まれるような理想的な状態になっているかどうかを音源モデルを用いて調べることで、適切な分離信号を出力するように分離フィルタ $\mathbf{W}$ を最適化していると解釈することができる。

具体的に、ブラインド音源分離の基本的な手法として知られる独立成分分析^{(31), (32)}を示す。独立成分分析では各音源が相

互に独立であるという仮定をおく。独立成分分析は様々な観点から導出することができるが、ここではほかのブラインド音源分離法との関連性を明らかにする意味で、最ゆう推定に基づく導出法を示す。最ゆう推定においてゆう度関数を最大化するパラメータはゆう度関数の対数値も最大化するため、実際には次式のように対数ゆう度関数を最大化するようなパラメータを求める（確率分布がいわゆる指数型分布族に属する場合、確率分布が指数関数を含むため、対数をとった方が計算上都合がよいことが背景にある）。

$$\mathbf{W} = \arg \max_{\mathbf{W}} \sum_l \log p(\mathbf{x}_l | \mathbf{W}) \quad (8)$$

このゆう度関数は音源の確率モデル $p(\mathbf{s}_l)$ を利用して書き下すことができる。 $p(\mathbf{s}_l)$ を用いて入力信号の確率密度関数 $p(\mathbf{x}_l | \mathbf{W})$ を $p(\mathbf{x}_l | \mathbf{W}) = |\det \mathbf{W}|^2 p(\mathbf{s}_l)$ と変換することができる（時間周波数領域での音源分離では全ての変数が複素数になることを前提としている）。更に各音源が独立であり $p(\mathbf{s}_l) = \prod_i p(s_{il})$ とできることから、対数ゆう度関数は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \sum_l \log p(\mathbf{x}_l | \mathbf{W}) \\ = \sum_l \left(\sum_i \log p(s_{il}) \right) + 2L \log |\det \mathbf{W}| \end{aligned} \quad (9)$$

ここで L は入力信号のフレーム数とする。音声信号のような信号はガウス分布よりもピークが尖り裾野が広いスーパーガウス分布に従うことが知られており、具体的な各音源の確率密度関数 $p(s_i)$ としては、ラプラス分布などのスーパーガウス分布がよく用いられる。このようにして書き下したゆう度関数を用いて式 (8) に基づき分離フィルタ $\mathbf{W}$ を最適化することができるが、時間周波数領域の独立成分分析では分離フィルタ最適化だけでは十分ではなく、音源のインデックスの不定性の問題への対処が必要となる。複数の音声を分離するというような同じクラスに属する音源の分離を目的とする場合、確率密度関数 $p(s_{il})$ を音源のインデックスによらない形で定義することが自然であるが、この場合、式 (9) において音源のインデックスが入れ替わったとしてもゆう度関数が増減せず、どの順番がよいかについては優劣がないことということになる。時間周波数領域の独立成分分析は周波数ごとに独立に音源分離フィルタ $\mathbf{W}$ を最適化するため、周波数ごとに音源のインデックスがランダムに変わることになる。つまり、ある周波数でインデックス i の分離信号として出力された音源が別の周波数でもインデックス i の分離信号として出力されるとは限らない。したがって、同じインデックスとして出力された周波数ごとの分離信号に対して短時間逆フーリエ変換を施したとすると、様々な音源が混ざった時間領域の信号が出力されてしまう。つまり、分離フィルタの最適化に加えて、周波数間で音源のインデックスの対応関係を揃えるという追加の問題（周波数間のパーミューテーション問題）を解くことが必要となる。この周波数間のパーミューテーション問題に対して、同じ音源であれば周波数が異なっても同じ時間帯に同時に大きくなったり小さくなったりする可能性が高いことを利用し、時間方向の音量（若しくは振幅）の相関が高

くなるように周波数間の音源のインデックスの対応関係を揃えるという方法⁽³³⁾や同じ音源であれば到来方向が同じであることを利用した方法⁽³⁴⁾、⁽³⁵⁾などが検討されてきている。

一方で、周波数ごとに分離を行った後で周波数間のパーミューテーション問題を解くのではなく、分離フィルタ $\mathbf{W}$ を最適化する段階で周波数間のパーミューテーション問題を同時に解くような方法が、独立ベクトル分析⁽³⁶⁾、⁽³⁷⁾として提案されている。独立ベクトル分析では音源ごとに全周波数成分をまとめたベクトルに対して確率モデルを定義する。全周波数が同じ分散をもち複数の周波数成分が同時に大きくなったり、同時に小さくなったりすることを表現する確率モデルとして、球状ラプラス分布⁽³⁶⁾、⁽³⁷⁾などが提案されている。このように時間周波数領域の音源分離では、周波数ごとの音量のモデル化が周波数間のパーミューテーション問題を解くために非常に重要な要素となる。独立ベクトル分析では、周波数ごとの音量の変化のパターンは周波数によらず一定としたことになるが、例えば音声では、音素に応じて高い周波数と低い周波数で音量の変化のパターンが異なるようなことが起こるため複数の音量の変化のパターンを取り扱うことができるモデルが望ましいと考えられる。これに対して、音量の変化のパターンを複数の有するモデルとして独立低ランク行列分析 (ILRMA: independent low rank matrix analysis) が提案されている⁽³⁸⁾。ILRMA では各音源の音量を非負行列分解 (NMF: nonnegative matrix factorization)^{(39)~(41)}を使って以下のようにモデリングする。

$$v_{ilk} = \sum_{j=1}^J a_{ijl} b_{ijk} \quad (10)$$

ここで b_{ijk} を周波数方向に並べたベクトル $\mathbf{b}_{ij}$ を基底ベクトルと呼び、 a_{ijl} は各基底ベクトルの時間ごとのアクティブさを表す係数となる。ILRMA では時間周波数ごとの音量を複数の基底ベクトルの線形和として表すことで、複数の音量変化のパターンに柔軟に対応可能なモデルとなっている。そして、確率分布としてはガウス分布ではあるものの、分散が時間変化する時変ガウス分布を用いた方法を採用する。時変ガウス分布の確率密度関数の対数は次式で書くことができる。

$$\log p(s_{ilk}) = -\frac{|s_{ilk}|^2}{v_{ilk}} - \log |v_{ilk}| + \text{const.} \quad (11)$$

ILRMA では分離フィルタ $\mathbf{W}_k$ のほかに a_{ijl} や b_{ijk} が最適化すべきパラメータとなる。これらのパラメータを $\Theta = \{\{\mathbf{W}_k\}, \{a_{ijl}\}_{ijl}, \{b_{ijk}\}_{ijk}\}$ とし、以下の最適化問題を解くことで Θ を求めることができる。

$$\Theta = \arg \min_{\Theta} \sum_k \sum_l -\log p(\mathbf{x}_{lk} | \Theta) \quad (12)$$

独立成分分析、独立ベクトル分析、ILRMA などでは独立な分離信号を求めることだけにフォーカスしているので分離フィルタが定数倍大きさが異なっていようがゆう度関数は変化しないことになる。これは、ビームフォーミングの問題設定の中で述べたステアリングベクトルの大きさの不定性の問題と本質的に同じ問題である。この問題に対してビームフォーミングと同じく真の分離信号を求める代わりに、マイクロホン位置での分

離信号を求めるという方針がよく取られる．分離フィルタを求めた後 $\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1}$ で各音源のステアリングベクトルを列ベクトルとしてもつ行列 $\mathbf{A}$ を求めることができる．このようにして求めた $\mathbf{A}$ と分離フィルタ $\mathbf{w}_i$ を用いてマイクロホン位置での分離信号 $\mathbf{c}_i$ は $\mathbf{c}_i = (\mathbf{w}_i \mathbf{x}) \mathbf{a}_i$ で求めることができる．このほか、 $\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1}$ とせず、 $\mathbf{c}_i$ がマイクロホン入力信号 $\mathbf{x}$ との間の差の 12 ノルムの期待値が最小化されるように $\mathbf{A}$ を求める minimum distortion principle (MDP) ⁽⁴²⁾ により $\mathbf{c}_i$ を推定する方法も知られている．

ここまで音源数 N とマイクロホン数 M が等しいという前提（決定条件）をおいたが、必ずしもこの前提が成立するとは限らず、 N が M よりも大きい場合（劣決定条件）や逆に N が M よりも小さい場合（優決定条件若しくは過決定条件、 $N = M$ を含む条件を優決定条件と呼ぶこともあるが本稿では $N = M$ を含まないものとする）も多く、このような場合に適用可能なアルゴリズムも必要となる．以降、劣決定条件及び優決定条件向けの音源分離アルゴリズムについて解説する．

劣決定条件では、仮に $\mathbf{A}$ が与えられたとしても $\mathbf{s}$ の解が一つに定まらず、複数の解の候補が存在することになる．一方で、入力信号全体として N が M を上回っているとしても、短時間ごとには N が M を下回るならば、時間ごとに分離フィルタを変えることで分離信号 $\mathbf{s}$ の解を一つに定めることができそうだということが分かる．実際に音声信号や楽器音などは短時間で見ると同時に存在する音源の数はさほど多くないスパースな信号であり、短時間ごとに N が M を下回るという仮定は妥当な仮定となる．例えば、各時間周波数成分中の音源数が多くとも一つであると仮定すると、各時間周波数成分がどの音源に属するかを決定することで音源分離が可能になる．このような時間周波数ごとに音源数が多くとも一つであるという仮定（時間周波数領域のスパース性 ⁽⁴³⁾）に基づく音源分離として、SAFIA ⁽⁴⁴⁾ や DUET ^{(45)~(47)} と呼ばれる手法が提案されている．また、時間周波数ごとに推定したステアリングベクトル（方向統計量）をクラスタリングして音源分離を行う方法として、方向統計量が球状分布に従うことを仮定した複素ワトソン分布を用いた方法 ⁽⁴⁸⁾ や、用いるマイクロホンアレーの形状に応じて方向統計量が円形状に従うように拡張した方法 ⁽⁴⁹⁾ が提案されている．このように時間周波数領域のスパース性に基づく様々な方法が提案されているが、複数の音源が同時に存在する時間周波数成分において、音量が小さい音源の分離信号が欠損しひずむことが問題になる．これに対して、クラスタリング法を用いて求めた各音源の時間周波数ごとの事後確率を時間周波数ごとのマスクとみなし、時間周波数マスクを用いて音源ごとの共分散行列を求めてビームフォーミングにより最終的な分離信号を求める方法が提案されている ⁽⁵⁰⁾．

更に、各時間周波数で複数の音源が混ざること許したモデルとして、複数マイクロホンの時変ガウスモデル (LGM) に基づく方法が提案されている ⁽⁵¹⁾．LGM では、各音源のマイクロホン位置での信号 $\mathbf{c}_{il}$ が時変の共分散行列 $v_{il} \mathbf{R}_i$ をもつゼロ平均の時変のガウス分布に従うものとする．ここで v_{il} は音源の原信号 $\mathbf{s}_i$ の分散に相当し i 番めの音源が存在する時間では v_{il} が

大きい値を取り逆に i 番めの音源が存在しない時間では v_{il} が小さい値を取ることを想定しており、音声信号のような非定常な音源の非定常性を v_{il} を通してモデリングしていることになる． $\mathbf{R}_i$ は i 番めのステアリングベクトル $\mathbf{a}_i$ の分散に相当し、LGM はステアリングベクトルについても時変であることを許容したモデルになっている．ガウス分布の再生性により入力信号も時変の共分散行列をもつガウス分布に従うことになり、対数ゆう度関数は以下のように書くことができる．

$$\begin{aligned} & \sum_l -\log p(\mathbf{x}_l | \Theta) \\ &= \sum_l -\mathbf{x}_l^H \left(\sum_i v_{il} \mathbf{R}_i \right)^{-1} \mathbf{x}_l - \log \left| \sum_i v_{il} \mathbf{R}_i \right| \quad (13) \end{aligned}$$

ここで、 $\Theta = \{\{v_{il}\}_{il}, \{\mathbf{R}_i\}_i\}$ は最適化対象のパラメータでありゆう度が最大化されるように最適化される．入力信号の分散を上手く表現できているのであれば、 v_{il} は無駄に大きくしない方がゆう度関数を最大化するという観点では望ましいため、 v_{il} が 0 に近いスパースな分離信号が得られることが期待できる．LGM でも周波数間のパーミューテーション問題が生じるが、ILRMA と同様に v_{il} を NMF を使ってモデリングすることで周波数間のパーミューテーション問題を解く方法が、マルチチャネル非負行列分解 (MNMF: multi-channel nonnegative matrix factorization) ^{(52), (53)} として知られている．ここで、正定値行列かつ行列のランクが行列の次数と等しくなるような共分散行列 $\mathbf{R}_i$ を用いるモデルをフルランクモデルと呼ぶ．一方、 $\mathbf{R}_i$ のランクを 1 とするとステアリングベクトルが時間によらず不変と仮定したことになり、更に $N = M$ とすると MNMF のゆう度関数は ILRMA のゆう度関数と等しくなる．このことから MNMF は ILRMA を含むようなモデルとなっており、ILRMA と比較してより多くの音源を扱えることやステアリングベクトルが時変と仮定していることから、より自由度が大きいモデルといえる．しかし、この自由度の高さから、最適化の際にパラメータを安定的に求めることが困難であったり最適化に要する計算コストが大きかったりすることが問題となってきた．これに対して各音源の共分散行列 $\mathbf{R}_i$ が同じ行列 $\mathbf{Q}$ で同時対角化可能であるという条件を課し自由度を下げることで、最適化の際の計算コストを減らすことができる FastMNMF のフレームワークが提案されている ^{(54), (55)}．

優決定条件は、分離に必要なマイクロホン数よりも実際に使用可能なマイクロホン数が多い冗長な条件ということになる．この冗長な情報を元に音源分離に加えて背景に存在する雑音（背景雑音）を抑圧するような方法が検討されている ^{(56)~(59)}．入力信号の共分散行列を固有値分解した際に、背景雑音成分の影響は全ての固有値に及ぶと考えられるが、各音源の共分散行列がランク 1 だとすると、各音源の影響は音源数分の固有値に対してのみ及ぶと考えられる．このような性質に基づき、主成分分析を入力信号に対して適用し N 次元のベクトルに次元削減し決定条件に変換してから音源分離を行う方法が提案されている ⁽⁵⁶⁾．しかし実際には主成分分析で音源成分と背景雑音成分の空間を分離できるとは限らず、次元削減により音源成分を誤って除去してしまうリスクが存在する．これに対して、背景雑音

成分をランク $M - N$ の時不変の共分散行列を有するゼロ平均の定常ガウス分布に従うとして、音源分離に関するパラメータと背景雑音のパラメータを最尤推定に基づき推定することで、音源分離と背景雑音除去を同時に最適化する方法が提案されている^{(57)~(59)}。また、優決定条件では部分空間 $M - N$ をどのように利用するかに設計の自由度があり、この空間に定常ガウス分布を割り当てて背景雑音除去を行うだけでなく、スピーカから発生する音響エコー成分と定常な背景雑音成分の混ざった信号を割り当てることで、音響エコー成分の除去と背景雑音除去を音源分離とともに行うような方法も提案されている⁽⁶⁰⁾。

2.4 ブラインド音源分離とそのほかの不要音除去の同時最適化

音源分離を用いるアプリケーションにおいては、音源分離に加えて背景雑音除去、残響除去、音響エコー成分除去のような音源分離以外の不要音除去を合わせて実行することを求められることが多い。これらのニーズに対する一つの解は個別最適化された処理をカスケード構成で組み合わせることであるが、それぞれの処理で生じるひずみが蓄積するなど必ずしも最終的な音質がよくなるとは限らない。前節にて優決定条件において共分散行列を工夫することにより、音源分離以外の不要音除去処理を音源分離とともに同時に最適化できることを示した。一方、音源やスピーカからマイクロホンまでのインパルス応答が時不変であれば、共分散行列ではなく確率モデルの平均成分を工夫することにより、音源分離と残響除去、音響エコー成分除去が同時に最適化可能となる^{(61)~(63)}。ここで以下のような統合的な最尤推定問題として、音源分離と不要音除去の同時最適化問題を捉え直す。

$$\Theta = \arg \max_{\Theta} \log p(\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_L | \mathbf{d}_1 \cdots \mathbf{d}_L) \quad (14)$$

入力信号のモデルとして、ここまで時間周波数領域の瞬時混合問題を扱ってきたが、インパルス応答 $\mathbf{h}$ の長さが短時間フーリエ変換のフレームサイズよりも長いとすると過去の実信号が現在の入力信号に混入することになり、時間周波数領域であっても畳み込み混合の音源分離問題を解く必要がでてくる。入力信号中の各音源の信号は残響の影響を受けているが、原信号は残響の影響のない信号ということになるため、この音源分離問題は音源分離問題と残響除去問題を同時に解く問題と位置付けることができる。複数マイクロホンの伝達関数の逆フィルタ⁽⁶⁴⁾が存在するとすると、入力信号は以下の自己回帰モデルとして表現することができる。

$$\mathbf{x}_l = \mathbf{A}\mathbf{s}_l + \mathbf{G}\tilde{\mathbf{x}}_l \quad (15)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{x}}_l = [\mathbf{x}_{l-1}^H \cdots \mathbf{x}_{l-L_x}^H]^H$ とする。更に、実際には背景雑音など音源以外の成分 $\mathbf{v}$ が入力信号に混入することもあることや、テレビ会議システムなどではスピーカからの出力音が入力信号に混入する（音響エコー）ことが問題となる。これらの影響を加味した入力信号は以下のように書くことができる。

$$\mathbf{x}_l = \mathbf{A}\mathbf{s}_l + \mathbf{G}\tilde{\mathbf{x}}_l + \mathbf{B}\mathbf{d}_l + \mathbf{v}_l \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{B}$ は音響エコーの伝達関数、 $\mathbf{d}_l = [d_l \cdots d_{l-L_d}]$ とし d_l はスピーカから出力する信号であり、音源分離システムがあらかじめ知ることができる信号（参照信号）とする。式 (16) では現在の入力信号が過去の入力信号に依存していることから、尤度関数は

$$\begin{aligned} \log p(\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_L | \mathbf{d}_1 \cdots \mathbf{d}_L) \\ = \sum_l \log p(\mathbf{x}_l | \mathbf{x}_{l-1} \cdots \mathbf{x}_{l-L_x}, \mathbf{d}_l) \end{aligned} \quad (17)$$

と書き直すことができる。各時間の入力信号の確率分布がガウス分布に従うとすると、その分布は $p(\mathbf{x}_l | \mathbf{x}_{l-1} \cdots \mathbf{x}_{l-L_x}, \mathbf{d}_l) = \mathcal{N}(\mathbf{G}\tilde{\mathbf{x}}_l + \mathbf{B}\mathbf{d}_l, \mathbf{R}_x)$ となる ($\mathbf{R}_x$ は入力信号の共分散行列)。このような確率モデルを導入しモデルパラメータを式 (14) に基づき最適化することで、音源分離と不要音除去の同時最適化を実現することができる。ここで $\tilde{\mathbf{x}}_l$ にフレーム l に近いフレームの入力信号を含めると、尤度を最大化するように最適化された $\mathbf{G}$ は原信号自体の時間方向の相関も予測してしまい、これにより、分離信号が過度に無相関化されるといった問題が起こる。そこで $\tilde{\mathbf{x}}_l = [\mathbf{x}_{l-D}^H \cdots \mathbf{x}_{l-L_x}^H]^H$ といったようにフレーム l に近いフレームの入力信号を含めない信号を過去の入力信号として用いることで、分離信号が過度に無相関化される問題を軽減する方法がマルチステップ線形予測法^{(65), (66)}として提案されている。また、入力信号の平均成分を入力信号から引いた後の信号を $\mathbf{e}_l = \mathbf{x}_l - \mathbf{G}\tilde{\mathbf{x}}_l - \mathbf{B}\mathbf{d}_l$ とすると、 $\mathbf{G}$ と $\mathbf{B}$ を固定したときのパラメータの最適化問題は $\mathbf{e}_l$ に関する瞬時混合のパラメータ最適化問題と捉えることができ、これは前述した決定条件、劣決定条件、優決定条件のそれぞれのパラメータ最適化のアルゴリズムを流用し実現できる。したがって、式 (14) に基づくパラメータ最適化は瞬時混合のパラメータ最適化と $\mathbf{G}$ と $\mathbf{B}$ の最適化を組み合わせることで実現できる^{(67)~(69)}。また、決定条件の音源分離問題において、 $\mathbf{G}$ と $\mathbf{B}$ 及び $\mathbf{W}$ とを統合したフィルタ $\mathbf{P}$ の最適化問題として式 (14) に基づくパラメータ最適化問題を捉え直して解くようなアルゴリズムが ILRMA-T として提案されており⁽⁷⁰⁾、更に ILRMA-T を優決定条件に応用したアルゴリズムが提案されている⁽⁷¹⁾。また、時間方向の相関を考えるに加えて、入力信号の周波数方向の独立性に関する仮定を取り除き周波数方向の音源信号の相関を考慮したアルゴリズムが提案されている^{(72), (73)}。

2.5 パラメータの最適化

ここまで、具体的にどのようにパラメータを最適化するのかについては触れてこなかった。負の対数尤度関数を各パラメータで偏微分しその値を 0 とおいた方程式が閉形式で解ける形になれば最適化は容易であるが、残念ながら一般的にこの方程式は閉形式で解ける方程式とはならない。そこで何かしらの繰り返し計算によるパラメータ最適化法が必要となる。ブラインド音源分離のこれまでの歴史の中で様々なパラメータ最適化のアルゴリズムが提案されている。勾配法に基づく分離フィルタの更新法として、各軸のスケールが異なっていたり相関がある場合に有効な自然勾配法が提案されている⁽⁷⁴⁾。近年、尤度関

数が必ず向上するようにパラメータを更新する, majorization minimization (MM) 法^{(75), (76)}と呼ばれる方法に基づいたパラメータ更新法が用いられてきている. MM 法では負の対数ゆう関数を $f(\Theta)$ とし, 加えて以下の関係を満たす関数 $g(\Theta, \Phi)$ が存在するとする.

$$f(\Theta) \leq g(\Theta, \Phi) \quad (18)$$

$$f(\Theta) = \min_{\Phi} g(\Theta, \Phi) \quad (19)$$

ここで $g(\Theta, \Phi)$ はいわゆる凸関数であり, 最小値を与えるような変数が容易に求まるような関数, つまり変数 Θ や Φ で偏微分してその値を 0 としたときの変数を容易に求めることができるような関数 (補助関数) とする. MM 法は f の代わりに補助関数 g を以下のような手順で繰り返し最小化することで, パラメータを最適化していく.

$$(1) \quad \Phi^{t+1} = \arg \min_{\Phi} g(\Theta^t, \Phi)$$

$$(2) \quad \Theta^{t+1} = \arg \min_{\Theta} g(\Theta, \Phi^{t+1})$$

ここで t は更新関数を表すインデックスとする. このような更新により, 以下のように必ず元のゆう度関数が向上 (負の対数ゆう度関数が減少) することが分かる.

$$\begin{aligned} f(\Theta^{t+1}) &\leq g(\Theta^{t+1}, \Phi^{t+1}) \\ &\leq g(\Theta^t, \Phi^{t+1}) \\ &= \min_{\Phi} g(\Theta^t, \Phi) \\ &= f(\Theta^t) \end{aligned} \quad (20)$$

最ゆう推定の文脈でよく知られている expectation-maximization (EM) アルゴリズム⁽⁷⁷⁾もパラメータ更新のたびに必ずゆう度が向上するアルゴリズムとなるが, EM アルゴリズムは MM 法に基づくパラメータ最適化法の一種とみなすことができる. 音源分離と近い研究分野である音源方向推定問題の研究分野でも MM 法に基づくアルゴリズムが用いられており^{(78)~(80)}, 広範囲に適用可能な最適化のフレームワークとなっている. とはいえ, 実際に式 (18) と式 (19) を満たすような補助関数 g が存在しなければ MM 法を適用することはできない. これに対して, 音源分離で用いられる様々な関数に対する補助関数が知られている⁽³⁾. また, 決定条件において, 分離フィルタを最適化する際には, 筆者の知る限り現時点では分離フィルタ全体を一括で更新する方法は知られておらず, 各音源を分離する分離フィルタごとに段階的に更新する iterative projection (IP) 法^{(81), (82)}が知られている. 更に, IP 法ではフィルタ更新の際に逆行行列計算が必要となるが, 逆行行列計算が不要なく, 分離フィルタからランク 1 の行列を引き算したものを次の分離フィルタとするように更新を進める iterative source steering (ISS) 法が提案されている⁽⁸³⁾. ISS は分離フィルタの逆行列に相当する $\mathbf{A}$ の列ベクトルごと (ステアリングベクトルごと) に更新を行う方法と考えることができる. ISS 法は ILRMA-T のように音源分離と残響除去の同時最適化問題にも適用されている⁽⁸⁴⁾. また, IP 法では二つの分離フィルタを同時に更新する方法が知られているが, 同様に ISS においても二つのステアリングベクトルを同時に更新するような拡張法が提案されている⁽⁸⁵⁾.

2.6 そのほかの複数マイクロホンの音源分離に関するトピック

ここまで示した音源分離アルゴリズムでは各時間のマイクロホン信号をサンプリングする analog/digital (A/D) 変換器がマイクロホン間で同期されていることを前提としていた. しかし, 複数のスマートフォンを同じ部屋において収録した信号を用いて音源分離を行うような場合には, 各時間のマイクロホン入力信号が完全に同期して収録されているという前提は成立しない. このような非同期サンプリングのケースでも音源分離を実行するための方法が提案されている. 複数マイクロホンの音源分離では, マイクロホン間での減衰率の比 (振幅比) と経路時間の差 (時間差) を用いて音源分離を行うが, 非同期サンプリングのケースでは, サンプリングレートをマイクロホン間で完全に合わせることができないため, たとえ音源位置が固定だったとしてもマイクロホン間の時間差は時間変化することになる. これに対して, 時間差の情報を用いずマイクロホン間の振幅比のみを用いた手法^{(86)~(88)}や, マイクロホン間での時間差の時間変化を推定し同期された状態を作り出した上で, 同期されたマイクロホン信号を前提とする従来の音源分離アルゴリズムを適用するような方法が提案されている^{(89)~(92)}.

また, 音源が動くときに, 追跡しながら分離するアルゴリズム⁽⁹³⁾や, 時々刻々入力される信号に合わせてパラメータを変化させていくオンラインの音源分離アルゴリズムが提案されている^{(94)~(96)}. 特にロボットやドローンに設置されたマイクロホンを使って音源分離を行う場合のようにマイクロホン自体が動くようなシーンではこれらのアルゴリズムが重要となる.

3. 単一マイクロホンの音源分離

複数マイクロホンを用いた音源分離と異なり, 単一マイクロホンを用いた音源分離では空間モデルを用いることができず, 音源モデルのみを用いて分離を行うことが必要となる. 単一マイクロホンを用いた処理として, 音声信号のような非定常な信号と背景雑音のような定常的な雑音が混ざった信号から非定常な信号を抽出するような確率モデルを用いた雑音除去の手法⁽⁴⁾が検討されてきている. 一方で, 非定常な複数の音源が混ざった信号を, 入力信号のみを用いてそれぞれの信号に分離することは難しく, 事前に得られる学習データを用いた学習ベースのアプローチ (独立成分分析の基底ベクトルを学習データから学習するアプローチ⁽⁹⁷⁾など) の検討がなされてきた. 特に深層学習⁽⁹⁸⁾が音声処理に取り込まれて以降, 深層学習を用いて事前に学習した音源モデルを用いた方式が盛んに検討されてきている⁽⁵⁾. 深層学習に基づく単一マイクロホンを用いた音源分離の初期段階においては, 音声時間が時間周波数領域でスパースであることを利用し入力信号に時間周波数マスクをかけた信号を時間周波数領域における分離信号として出力するようなマスクベースの手法⁽⁹⁹⁾が主流であった. 入力信号中の各音源がスパースであるとする, 時間周波数領域における音源分離問題は, 時間

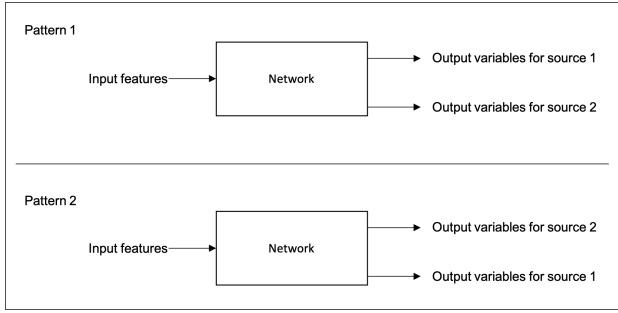


図 4 出力信号のパーミュテーション問題

周波数ごとにアクティブな音源を推定する問題と捉えることができ、各音源の時間周波数マスク $\mathcal{M}_i$ を用いて次式で分離信号を得ることができる。

$$s_i = \mathcal{M}_i x \quad (21)$$

時間周波数領域では入力信号は複素数であるが、 $\mathcal{M}_i$ を実数値のマスクとして推定し、分離信号の位相はマイクロホン入力信号の位相を用いることが多い。マイクロホン入力信号の振幅や対数振幅といった特徴量をニューラルネットワークに入力し、ニューラルネットワークの出力として時間周波数マスク $\mathcal{M}_i$ を得るような構成を取ることが多い。学習時にはニューラルネットワークが出力したマスクが理想的なマスクに似るようにニューラルネットワークのパラメータを学習する。ニューラルネットワーク学習時の損失関数の設計において考慮すべき一つのポイントは、複数マイクロホンのブラインド音源分離と同様の出力信号におけるインデックスの不定性の問題である。簡単のため、音源数 2 とする。二つの音源がどちらも音声の場合など、同じクラスに属する二つの音源が混ざった信号を分離する際には、時間周波数マスクなどの各音源の変数を出力する順番に任意性が生じ、図 4 に示すような二つの出力パターンのどちらも正しいということになる。このような出力する変数の順番の不定性の問題に対して、ニューラルネットワークが各音源の変数をどのような順番で出力したとしても正しい出力とみなすように（損失は変わらないように）損失関数を設計するようなアプローチが提案されている^{(100)~(102)}。ディープクラスタリングに基づく方法^{(100), (103)}では、出力する変数の順番によらず損失が不変となるように、時間周波数ごとにどの音源がアクティブであるかを表す埋め込みベクトルの全ての時間周波数ペアに対する類似度に対して損失を計算している。パーミュテーションインバリエントトレーニング (PIT)^{(101), (102), (104)}では、音源のインデックスの全ての順列に対して損失を計算し、損失が最小となる順列の損失を用いて学習を進めることで、出力する変数の順番によらない損失を得ることができる。

ここまで、短時間フーリエ変換後の時間周波数領域での単一マイクロホンの音源分離法を見てきた。短時間フーリエ変換及び逆短時間フーリエ変換といった前処理と後処理はニューラルネットワークとは無関係の信号処理ブロックであるが、前処理と後処理についてもニューラルネットワークを用いて表現し、マスク推定と合わせて学習するような時間領域の手法が盛んに検討されてきている⁽¹⁰⁵⁾。時間領域の手法では、時間領域の波形

に対する損失関数を用いることになるが、時間領域の代表的な手法である ConvTasNet⁽¹⁰⁵⁾では、以下に示す SI-SNR (scale invariant source-to-noise ratio) を用いている。

$$\text{SI-SNR} = 10 \log_{10} \frac{\|\tilde{\mathbf{s}}\|^2}{\|\tilde{\mathbf{n}}\|^2} \quad (22)$$

ここで $\tilde{\mathbf{s}} = [s_{l=1} \ \cdots \ s_{l=L}]^T$ 。また、 $\tilde{\mathbf{n}} = [\tilde{n}_{l=1} \ \cdots \ \tilde{n}_{l=L}]^T$, $\tilde{n}_l = \hat{s}_l - \alpha s_l$, $\alpha = \frac{\langle \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\mathbf{s}} \rangle}{\|\tilde{\mathbf{s}}\|^2}$ とする。SI-SNR は音源分離法の評価尺度として用いられることも多く、SI-SNR 基準で ConvTasNet は時間周波数領域の音源分離法よりも高い性能を示している⁽¹⁰⁵⁾。

また、ニューラルネットワークを用いた音源分離において音源数をどのように扱うかは考慮すべき一つのポイントとなる。例えば音源数を 2 として二つの音源に関する情報を出力するように学習したニューラルネットワークでは、学習したニューラルネットワークを用いて、音源数が 3 や 4 の場合の音源分離を行うことは困難となる。一つの単純な方法は最大の音源数を定義してニューラルネットワークを学習するという方法となるが、実際の音源数が最大の音源数よりも少ない場合、ニューラルネットワークは必要以上に大きいものとなるということがデメリットとなる。これに対して主要な音源から段階的に分離していき、音源がなくなったら分離を終了するという方法が提案されている^{(106), (107)}。これであればニューラルネットワークとしては主要な音源とそれ以外を分離するだけということになるので、コンパクトなネットワークとなることが期待できる。ただし実行時にはニューラルネットワークの推論を複数回走らせる必要があり、推論時間は増える可能性がある。

単一マイクロホンの音源分離から派生した技術として、抽出したい目的音の補助情報を用いて、様々な音が混ざった中から目的音のみを抽出する目的音抽出技術^{(108)~(110)}が注目を集めている。目的音抽出技術では分離対象の様々な音が混ざった混合音とは別に、目的音のみが含まれている音をニューラルネットワークに入力する。目的音のみが含まれている音からニューラルネットワークを介して該当の目的音に関する埋め込みベクトルを推定してその埋め込みベクトルを補助材料に目的音の信号のみを抽出することを可能としている。補助情報を利用した音源分離という観点でカメラ画像を併用した音源分離⁽¹¹¹⁾もテレビ会議システムなどマイクロホンとともにカメラを有するシステムで有望な技術である。

4. 深層学習を用いた複数マイクロホンの音源分離

2010 年代中盤から後半にかけて深層学習の複数マイクロホンの音源分離への導入が進んだ。前々章で学習データを用いずに音源分離実行時に得られる入力信号のみを利用して音源分離を行う方式を示した。一方で深層学習を用いた音源分離では分離対象の信号に関連する学習データを利用し、音源分離に必要な補助情報を推論するニューラルネットワークを学習し、音源分離実行時に利用する。深層学習を用いた複数マイクロホンの音源分離では、以下に示すような音源の空間モデルと深層学習と

の様々な組み合わせ方が検討されている。

- (1) 音源分離における空間フィルタをニューラルネットワークによって推論^{(112), (113)}
- (2) ブラインド音源分離の音源モデルへの深層学習の導入^{(114)~(120)}
- (3) 位相差などの複数マイクロホンの信号から得た情報をニューラルネットワークの特徴量として利用^{(103), (121)}
- (4) ビームフォーミングで用いる共分散行列をニューラルネットワークを介して求めた時間周波数マスクを用いて推定^{(122)~(124)}

前述したとおり、ブラインド音源分離ではフィルタを最適化したり周波数方向のパーミューテーション問題を解いたりするために、音源モデルが重要な役割を演じる。分離対象の音源の時間周波数領域のスペクトル形状の特徴を上手く捉えるような音源モデルを選択することが重要である。例えば NMF は時間周波数領域におけるスペクトルのパターンが複数存在するという特徴を表現したモデルであるが、音声スペクトルのような複雑な構造を表現するモデルとしては十分とは言い難い。(2) のカテゴリに属する手法は、事前に得られる学習データを用いて対象となる音源の特徴をより正確に表現する音源モデルを学習する。一般的に正確に表現された音源モデルを用いることにより周波数方向のパーミューテーション問題をより正確に解けるようになるほか、フィルタ最適化に要する更新回数を減らすことができる。(4) のカテゴリに属する技術はニューラルネットワークを介して共分散行列を求め、最終的な出力信号を繰り返し計算を必要としない MVDR などのビームフォーミングにより得る構成となっている。具体的には、共分散行列 $\mathbf{R}$ を時間周波数マスク $\mathcal{M}_l$ を使って以下のように算出するような方法が提案されている⁽¹²²⁾。

$$\mathbf{R}_k = \sum_l \mathcal{M}_{lk} \mathbf{x}_{lk} \mathbf{x}_{lk}^H \quad (23)$$

深層学習を用いた単一マイクロホンの音源分離と同様に時間周波数マスク $\mathcal{M}_l$ はニューラルネットワークにより推論される。ニューラルネットワークのパラメータは $\mathcal{M}_l$ が教師データを用いて計算できる理想的なバイナリマスク (IBM) に似るように学習される。MVDR のフィルタを最適化する際に、不要音の共分散行列のほかに目的音のステアリングベクトルが必要となる。ステアリングベクトルは目的音の共分散行列に主成分分析を施すことで求めることが可能であるが、代替法として、目的音の共分散行列から直接 MVDR のフィルタを最適化する方法が提案されている⁽¹²⁵⁾。MVDR に基づくビームフォーミングの出力信号 $\mathbf{c}$ に再度注目し、以下のような変更を施す。

$$\begin{aligned} \mathbf{c} &= (\mathbf{w}\mathbf{x})\mathbf{a} \\ &= \frac{\mathbf{a}\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1}}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}} \mathbf{x} \\ &= \frac{\mathbf{R}_a \mathbf{R}^{-1}}{\text{tr}(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}_a)} \mathbf{x} \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、 $\mathbf{R}_a = \mathbf{a}\mathbf{a}^H$ としている。この $\mathbf{R}_a$ をニューラルネットワークにより推定された時間周波数マスクを用いて式 (23) で推定する。これにより、推定した時間周波数マスクから求めた

共分散行列を直接用いて MVDR に基づくビームフォーミングを簡易的に実行可能となる。

深層学習を用いた複数マイクロホンの音源分離においても、学習に用いる損失関数は重要な設計項目の一つとなる。損失関数の設計指針は大きく以下の三つに分類される。

- (1) 各音源の時間周波数マスクなど中間変数に対する正解値を定義し、その正解値と中間変数との差を損失関数として定義^{(100), (122)}
- (2) ニューラルネットワークを通して推定した中間変数を用いて音源分離を行った後の分離信号と真の音声波形との差を損失関数として定義^{(120), (126)}
- (3) 音源分離と音声認識などの後段の処理とを接続し、後段処理の損失関数を全てのニューラルネットワークを学習するための損失関数として利用⁽¹²⁷⁾

中間変数に対して損失関数を定義するよりも、音源分離後の出力信号や後段処理の損失関数を用いることで、音源分離の使用目的により適合した分離信号を得ることができる。

最後に学習データにおける教師情報を得ることの困難さとその対処法としての教師なし学習の可能性について触れる。深層学習を用いた複数マイクロホンの音源分離における正解信号は、ほかの音を含まない各音源のクリーンな信号ということになるが、そのような信号を入手することは一般的に困難であることが多い。そこで正解信号がなくとも学習ができる、教師なし学習のフレームワークが望まれている。こういった教師なし学習のフレームワークは単一マイクロホンの音源分離でも必要とされる。単一マイクロホンの音源分離では、ニューラルネットワークを用いない複数マイクロホンのブラインド音源分離で推定した時間周波数マスクに似るような時間周波数マスクを、単一マイクロホンの特徴量を入力したニューラルネットワークが出力するように学習を進めることで、教師信号がなくともニューラルネットワークを学習可能としている^{(128), (129)}。筆者らはニューラルネットワークを用いない複数マイクロホンのブラインド音源分離で推定した分離信号に似た分離信号を、ニューラルネットワークを通した複数マイクロホンの音源分離が出力するように学習を進める方法を提案している⁽¹³⁰⁾。また、周波数に依存せず音源ごとに独立な潜在変数を仮定し、変分オートエンコーダのデコーダとして定義される生成モデルに基づき、ゆう度の変分下限を最大化するように、ニューラルネットワークのパラメータを教師なし学習する手法が提案されている⁽¹³¹⁾。

5. おわりに

本稿では複数の音が混ざった信号を音源ごとに分離する音源分離技術についてマイクロホン数の観点と深層学習の使用の有無の観点から分類し示した。音源分離の歴史は四半世紀を超えており、ビームフォーミングを含めると半世紀を超えている。近年、深層学習が導入されたことにより、より一層音源分離の研究が加速的に進んでいるが、古典的なビームフォーミングの技術や確率モデルの音源分離と深層学習とを統合的に用いる方法も増えてきている。このようなことから古典的な方法も含めて本

稿を執筆した。紹介しきれていない観点も数知れないが、ビームフォーミングや確率モデルベースの音源分離については日本語書籍⁽¹⁾、⁽¹³²⁾も出版されており、これらの書籍とともに本稿が音源分離を理解する上で一助になるのであれば幸いと考えている。

文 献

- (1) 浅野太, 音のアレイ信号処理—音源の定位・追跡と分離, 伊勢友彦 (編), 68 巻, コロナ社, 2012.
- (2) S. Makino, H. Sawada, and T.-W. Lee, eds., *Blind Speech Separation*, Springer, 2007.
- (3) H. Sawada, N. Ono, H. Kameoka, D. Kitamura, and H. Saruwatari, “A review of blind source separation methods: two converging routes to ilrma originating from ica and nmf,” *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, vol.8, p.e12, 2019.
- (4) P.C. Loizou, *Speech Enhancement: Theory and Practice*, Second Edition, CRC Press, 2013.
- (5) D. Wang and J. Chen, “Supervised speech separation based on deep learning: An overview,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.26, no.10, pp.1702–1726, 2018.
- (6) D.H. Johnson and D.E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, P T R Prentice Hall, 1993.
- (7) K. Torkkola, “Blind separation of convolved sources based on information maximization,” *Proceedings of the 1996 IEEE Signal Processing Society Workshop*, pp.423–432, 1996.
- (8) Z. Koldovsky and P. Tichavský, “Time-domain blind separation of audio sources on the basis of a complete ica decomposition of an observation space,” *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.19, no.2, pp.406–416, 2011.
- (9) H. Buchner, R. Aichner, and W. Kellermann, “Trinicon: a versatile framework for multichannel blind signal processing,” *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol.3, pp.iii–889, 2004.
- (10) H. Buchner, R. Aichner, and W. Kellermann, “A generalization of blind source separation algorithms for convolutive mixtures based on second-order statistics,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol.13, no.1, pp.120–134, 2005.
- (11) R. Aichner, H. Buchner, F. Yan, and W. Kellermann, “A real-time blind source separation scheme and its application to reverberant and noisy acoustic environments,” *Signal Processing*, vol.86, no.6, pp.1260–1277, 2006.
- (12) S.C. Douglas, M. Gupta, H. Sawada, and S. Makino, “Spatio-temporal fastica algorithms for the blind separation of convolutive mixtures,” *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.15, no.5, pp.1511–1520, 2007.
- (13) T. Takatani, T. Nishikawa, H. Saruwatari, and K. Shikano, “High-fidelity blind separation for convolutive mixture of acoustic signals using SIMO-model-based independent component analysis,” *Proc. Seventh International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, vol.2, pp.77–80, 2003.
- (14) H. Saruwatari, T. Takatani, and K. Shikano, “SIMO-model-based blind source separation — principle and its applications,” in *Blind Speech Separation*, pp.149–168, Springer Netherlands, Dordrecht, 2007.
- (15) P. Smaragdis, “Blind separation of convolved mixtures in the frequency domain,” *Neurocomputing*, vol.22, no.1, pp.21–34, 1998.
- (16) S. Gannot, D. Burshtein, and E. Weinstein, “Signal enhancement using beamforming and nonstationarity with applications to speech,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.49, no.8, pp.1614–1626, 2001.
- (17) I. Cohen, “Relative transfer function identification using speech signals,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol.12, no.5, pp.451–459, 2004.
- (18) H.L.V. Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Wiley, 2002.
- (19) O.L. Frost, “An algorithm for linearly constrained adaptive array processing,” *Proc. IEEE*, vol.60, no.8, pp.926–935, 1972.
- (20) L. Griffiths and C. Jim, “An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.30, no.1, pp.27–34, 1982.
- (21) O. Hoshuyama, A. Sugiyama, and A. Hirano, “A robust adaptive beamformer for microphone arrays with a blocking matrix using constrained adaptive filters,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.47, no.10, pp.2677–2684, 1999.
- (22) A. Spriet, M. Moonen, and J. Wouters, “Spatially pre-processed speech distortion weighted multichannel wiener filtering for noise reduction,” *Signal Processing*, vol.84, no.12, pp.2367–2387, 2004.
- (23) S. Doclo, A. Spriet, J. Wouters, and M. Moonen, “Frequency-domain criterion for the speech distortion weighted multichannel wiener filter for robust noise reduction,” *Speech Communication*, vol.49, no.7, pp.636–656, 2007.
- (24) A. Spriet, M. Moonen, and J. Wouters, “Stochastic gradient-based implementation of spatially pre-processed speech distortion weighted multichannel wiener filtering for noise reduction in hearing aids,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.53, no.3, pp.911–925, 2005.
- (25) A. Spriet, M. Moonen, and J. Wouters, “Robustness analysis of multichannel wiener filtering and generalized sidelobe cancellation for multimicrophone noise reduction in hearing aid applications,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol.13, no.4, pp.487–503, 2005.
- (26) A. Spriet, M. Moonen, and J. Wouters, “The impact of speech detection errors on the noise reduction performance of multi-channel wiener filtering and generalized sidelobe cancellation,” *Signal Processing*, vol.85, no.6, pp.1073–1088, 2005.
- (27) S. Doclo, A. Spriet, and M. Moonen, “Efficient frequency-domain implementation of speech distortion weighted multi-channel wiener filtering for noise reduction,” *2004 12th European Signal Processing Conference*, pp.2007–2010, 2004.
- (28) S. Doclo, A. Spriet, J. Wouters, and M. Moonen, “Speech distortion weighted multichannel wiener filtering techniques for noise reduction,” in *Speech Enhancement*, pp.199–228, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.
- (29) 戸上真人, “人間共生ロボット EMIEW の聴覚機能,” 第 22 回 AI-Challenge 研究会, pp.59–64, 2005.
- (30) S. Araki, R. Mukai, S. Makino, T. Nishikawa, and H. Saruwatari, “The fundamental limitation of frequency domain blind source separation for convolutive mixtures of speech,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol.11, no.2, pp.109–116, 2003.
- (31) C. Jutten and J. Herault, “Blind separation of sources, part i: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture,” *Signal Processing*, vol.24, no.1, pp.1–10, 1991.
- (32) P. Comon, “Independent component analysis, a new concept?,” *Signal Processing*, vol.36, pp.287–314, April 1994.
- (33) N. Murata, S. Ikeda, and A. Ziehe, “An approach to

- blind source separation based on temporal structure of speech signals,” *Neurocomputing*, vol.41, no.1, pp.1–24, 2001.
- (34) H. Sawada, R. Mukai, S. Araki, and S. Makino, “A robust approach to the permutation problem of frequency-domain blind source separation,” *Proc. 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP ’03)*, vol.5, pp.V–381, 2003.
 - (35) H. Sawada, R. Mukai, S. Araki, and S. Makino, “A robust and precise method for solving the permutation problem of frequency-domain blind source separation,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol.12, no.5, pp.530–538, 2004.
 - (36) T. Kim, T. Eltoft, and T.-W. Lee, “Independent vector analysis: An extension of ica to multivariate components,” in *Independent Component Analysis and Blind Signal Separation*, ed. J. Rosca, D. Erdogmus, J.C. Príncipe, and S. Haykin, pp.165–172, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.
 - (37) A. Hiroe, “Solution of permutation problem in frequency domain ica, using multivariate probability density functions,” in *Independent Component Analysis and Blind Signal Separation*, ed. J. Rosca, D. Erdogmus, J.C. Príncipe, and S. Haykin, pp.601–608, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.
 - (38) D. Kitamura, N. Ono, H. Sawada, H. Kameoka, and H. Saruwatari, “Determined blind source separation unifying independent vector analysis and nonnegative matrix factorization,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.24, no.9, pp.1626–1641, 2016.
 - (39) D. Lee and H. Seung, “Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization,” *Nature*, vol.401, no.6755, pp.788–791, Oct. 1999.
 - (40) D. Lee and H.S. Seung, “Algorithms for non-negative matrix factorization,” *Proc. 13th Int. Conf. Neural Information Processing Systems*, vol.13, pp.556–562, 2000.
 - (41) A. Cichocki, R. Zdunek, and S. Amari, “Nonnegative matrix and tensor factorization,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol.25, no.1, pp.142–145, 2008.
 - (42) K. Matsuoka, “Minimal distortion principle for blind source separation,” *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, vol.4, pp.2138–2143, 2002.
 - (43) S. Rickard and O. Yilmaz, “On the approximate w-disjoint orthogonality of speech,” *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol.1, pp.I–529–I–532, 2002.
 - (44) M. Aoki, M. Okamoto, S. Aoki, H. Matsui, T. Sakurai, and Y. Kaneda, “Sound source segregation based on estimating incident angle of each frequency component of input signals acquired by multiple microphones,” *Acoustical Science and Technology*, vol.22, no.2, pp.149–157, 2001.
 - (45) S. Rickard and F. Dietrich, “Doa estimation of many w-disjoint orthogonal sources from two mixtures using duet,” *Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing (Cat. No.00TH8496)*, pp.311–314, 2000.
 - (46) A. Jourjine, S. Rickard, and O. Yilmaz, “Blind separation of disjoint orthogonal signals: demixing n sources from 2 mixtures,” *2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (Cat. No.00CH37100)*, vol.5, pp.2985–2988, 2000.
 - (47) O. Yilmaz and S. Rickard, “Blind separation of speech mixtures via time-frequency masking,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.52, no.7, pp.1830–1847, 2004.
 - (48) D.H. Tran Vu and R. Haeb-Umbach, “Blind speech separation employing directional statistics in an expectation maximization framework,” *2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp.241–244, 2010.
 - (49) N. Ito, S. Araki, and T. Nakatani, “Complex angular central gaussian mixture model for directional statistics in mask-based microphone array signal processing,” *2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp.1153–1157, 2016.
 - (50) T. Higuchi, N. Ito, T. Yoshioka, and T. Nakatani, “Robust mvdr beamforming using time-frequency masks for online/offline asr in noise,” *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp.5210–5214, 2016.
 - (51) N.Q.K. Duong, E. Vincent, and R. Gribonval, “Under-determined reverberant audio source separation using a full-rank spatial covariance model,” *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.18, no.7, pp.1830–1840, 2010.
 - (52) A. Ozerov and C. Fevotte, “Multichannel nonnegative matrix factorization in convolutive mixtures for audio source separation,” *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.18, no.3, pp.550–563, 2010.
 - (53) H. Sawada, H. Kameoka, S. Araki, and N. Ueda, “Multichannel extensions of non-negative matrix factorization with complex-valued data,” *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.21, no.5, pp.971–982, 2013.
 - (54) K. Sekiguchi, A.A. Nugraha, Y. Bando, and K. Yoshii, “Fast multichannel source separation based on jointly diagonalizable spatial covariance matrices,” *2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp.1–5, 2019.
 - (55) K. Sekiguchi, Y. Bando, A.A. Nugraha, K. Yoshii, and T. Kawahara, “Fast multichannel nonnegative matrix factorization with directivity-aware jointly-diagonalizable spatial covariance matrices for blind source separation,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.28, pp.2610–2625, 2020.
 - (56) M. Joho, H. Mathis, and R.H. Lambert, “Overdetermined blind source separation: Using more sensors than source signals in a noisy mixture,” *Proc. ICA*, pp.81–86, 2000.
 - (57) Z. Koldovský and P. Tichavský, “Gradient algorithms for complex non-gaussian independent component/vector extraction, question of convergence,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.67, no.4, pp.1050–1064, 2019.
 - (58) R. Scheibler and N. Ono, “Independent vector analysis with more microphones than sources,” *2019 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)*, pp.185–189, 2019.
 - (59) Y. Du, R. Scheibler, M. Togami, K. Yoshii, and T. Kawahara, “Computationally-efficient overdetermined blind source separation based on iterative source steering,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol.29, pp.927–931, 2022.
 - (60) M. Togami and R. Scheibler, “Over-determined semi-blind speech source separation,” *2021 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, pp.640–645, 2021.
 - (61) T. Yoshioka, T. Nakatani, M. Miyoshi, and H.G. Okuno, “Blind separation and dereverberation of speech mixtures by joint optimization,” *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.19, no.1, pp.69–84, 2011.
 - (62) R. Takeda, K. Nakadai, K. Komatani, T. Ogata, and H.G. Okuno, “Barge-in-able robot audition based on ica and missing feature theory under semi-blind situation,” *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1718–1723, 2008.

- (63) M. Togami and K. Hori, "Multichannel semi-blind source separation via local gaussian modeling for acoustic echo reduction," 2011 19th European Signal Processing Conference, pp.496–500, 2011.
- (64) M. Miyoshi and Y. Kaneda, "Inverse filtering of room acoustics," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Process.*, vol.36, no.2, pp.145–152, 1988.
- (65) K. Kinoshita, M. Delcroix, T. Nakatani, and M. Miyoshi, "Suppression of late reverberation effect on speech signal using long-term multiple-step linear prediction," *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.17, no.4, pp.534–545, 2009.
- (66) T. Nakatani, T. Yoshioka, K. Kinoshita, M. Miyoshi, and B.-H. Juang, "Speech dereverberation based on variance-normalized delayed linear prediction," *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.18, no.7, pp.1717–1731, 2010.
- (67) M. Togami, Y. Kawaguchi, R. Takeda, Y. Obuchi, and N. Nukaga, "Optimized speech dereverberation from probabilistic perspective for time varying acoustic transfer function," *IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.21, no.7, pp.1369–1380, 2013.
- (68) M. Togami and Y. Kawaguchi, "Simultaneous optimization of acoustic echo reduction, speech dereverberation, and noise reduction against mutual interference," *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.22, no.11, pp.1612–1623, 2014.
- (69) H. Kagami, H. Kameoka, and M. Yukawa, "Joint separation and dereverberation of reverberant mixtures with determined multichannel non-negative matrix factorization," 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.31–35, 2018.
- (70) R. Ikeshita, N. Ito, T. Nakatani, and H. Sawada, "Independent low-rank matrix analysis with decorrelation learning," 2019 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), pp.288–292, 2019.
- (71) M. Togami and R. Scheibler, "Over-determined speech source separation and dereverberation," 2020 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), pp.705–710, 2020.
- (72) R. Ikeshita, "Independent positive semidefinite tensor analysis in blind source separation," 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.1652–1656, 2018.
- (73) R. Ikeshita, N. Ito, T. Nakatani, and H. Sawada, "Independent low-rank matrix analysis with decorrelation learning," 2019 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), pp.288–292, 2019.
- (74) S. Amari, "Natural gradient works efficiently in learning," *Neural Computation*, vol.10, no.2, pp.251–276, 1998.
- (75) K. Lange, *MM Optimization Algorithms*, SIAM-Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 2016.
- (76) Y. Sun, P. Babu, and D.P. Palomar, "Majorization-minimization algorithms in signal processing, communications, and machine learning," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.65, no.3, pp.794–816, 2017.
- (77) A.P. Dempster, N.M. Laird, and D.B. Rubin, "Maximum likelihood from incomplete data via the em algorithm," *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol.39, no.1, pp.1–22, 1977.
- (78) K. Yamaoka, R. Scheibler, N. Ono, and Y. Wakabayashi, "Sub-sample time delay estimation via auxiliary-function-based iterative updates," 2019 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), pp.130–134, 2019.
- (79) M. Togami and R. Scheibler, "Sparseness-aware DOA estimation with majorization minimization," *Proc. Interspeech 2020*, pp.5046–5050, 2020.
- (80) M. Togami and R. Scheibler, "Sound source localization with majorization minimization," *Proc. Interspeech 2021*, pp.2122–2126, 2021.
- (81) N. Ono and S. Miyabe, "Auxiliary-function-based independent component analysis for super-gaussian sources," in *Latent Variable Analysis and Signal Separation*, ed. V. Vigneron, V. Zarzoso, E. Moreau, R. Gribonval, and E. Vincent, pp.165–172, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- (82) N. Ono, "Stable and fast update rules for independent vector analysis based on auxiliary function technique," 2011 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), pp.189–192, 2011.
- (83) R. Scheibler and N. Ono, "Fast and stable blind source separation with rank-1 updates," 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.236–240, 2020.
- (84) T. Nakashima, R. Scheibler, M. Togami, and N. Ono, "Joint dereverberation and separation with iterative source steering," 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.216–220, 2021.
- (85) R. Ikeshita and T. Nakatani, "ISS2: An extension of iterative source steering algorithm for majorization-minimization-based independent vector analysis," 2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.65–69, 2022.
- (86) M. Togami, Y. Kawaguchi, H. Kokubo, and Y. Obuchi, "Acoustic echo suppressor with multichannel semi-blind non-negative matrix factorization," *Proc. APSIPA*, pp.522–525, Dec. 2010.
- (87) Y. Matsui, S. Makino, N. Ono, and T. Yamada, "Multiple far noise suppression in a real environment using transfer-function-gain nmf," 2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.2314–2318, 2017.
- (88) Y. Matsui, S. Makino, N. Ono, and T. Yamada, "Noise suppression using beamformer and transfer-function-gain nonnegative matrix factorization with distributed stereo microphones," *Journal of Signal Processing*, vol.27, no.1, pp.1–6, 2023.
- (89) S. Miyabe, N. Ono, and S. Makino, "Blind compensation of inter-channel sampling frequency mismatch with maximum likelihood estimation in stft domain," 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.674–678, 2013.
- (90) S. Miyabe, N. Ono, and S. Makino, "Blind compensation of interchannel sampling frequency mismatch for ad hoc microphone array based on maximum likelihood estimation," *Signal Processing*, vol.107, pp.185–196, 2015.
- (91) S. Araki, N. Ono, K. Kinoshita, and M. Delcroix, "Meeting recognition with asynchronous distributed microphone array," 2017 IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU), pp.32–39, 2017.
- (92) S. Araki, N. Ono, K. Kinoshita, and M. Delcroix, "Estimation of sampling frequency mismatch between distributed asynchronous microphones under existence of source movements with stationary time periods detection," 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.785–789, 2019.
- (93) K. Nakadai, H. Nakajima, Y. Hasegawa, and H. Tsujino, "Sound source separation of moving speakers for robot audition," 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Process-

- ing, pp.3685–3688, 2009.
- (94) M. Togami, “Online speech source separation based on maximum likelihood of local gaussian modeling,” 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.213–216, 2011.
 - (95) L.S.R. Simon and E. Vincent, “A general framework for online audio source separation,” Proceedings of the 10th International Conference on Latent Variable Analysis and Signal Separation, pp.397–404, 2012.
 - (96) M. Sunohara, C. Haruta, and N. Ono, “Low-latency real-time blind source separation for hearing aids based on time-domain implementation of online independent vector analysis with truncation of non-causal components,” 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.216–220, 2017.
 - (97) G.-J. Jang and T.-W. Lee, “Monaural source separation,” in *Blind Speech Separation*, pp.339–364, Springer Netherlands, Dordrecht, 2007.
 - (98) Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol.521, pp.436–44, 05 2015.
 - (99) H. Erdogan, J.R. Hershey, S. Watanabe, and J. Le Roux, “Phase-sensitive and recognition-boosted speech separation using deep recurrent neural networks,” 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.708–712, 2015.
 - (100) J. Hershey, Z. Chen, J. Le Roux, and S. Watanabe, “Deep clustering: Discriminative embeddings for segmentation and separation,” 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.31–35, 03 2016.
 - (101) D. Yu, M. Kolbæk, Z.-H. Tan, and J. Jensen, “Permutation invariant training of deep models for speaker-independent multi-talker speech separation,” 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.241–245, 03 2017.
 - (102) M. Kolbæk, D. Yu, Z.-H. Tan, and J. Jensen, “Multitalker speech separation with utterance-level permutation invariant training of deep recurrent neural networks,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech Language Process.*, vol.25, no.10, pp.1901–1913, Oct. 2017.
 - (103) Z.-Q. Wang, J. Le Roux, and J.R. Hershey, “Multichannel deep clustering: Discriminative spectral and spatial embeddings for speaker-independent speech separation,” 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.1–5, 2018.
 - (104) T. Yoshioka, H. Erdogan, Z. Chen, and F. Alleva, “Multi-microphone neural speech separation for far-field multi-talker speech recognition,” 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.5739–5743, 2018.
 - (105) Y. Luo and N. Mesgarani, “Conv-tasnet: Surpassing ideal time-frequency magnitude masking for speech separation,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.27, no.8, pp.1256–1266, 2019.
 - (106) K. Kinoshita, L. Drude, M. Delcroix, and T. Nakatani, “Listening to each speaker one by one with recurrent selective hearing networks,” 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.5064–5068, 2018.
 - (107) N. Takahashi, S. Parthasarathy, N. Goswami, and Y. Mitsufuji, “Recursive speech separation for unknown number of speakers,” *Interspeech*, pp.1348–1352, 2019.
 - (108) K. Žmolíková, M. Delcroix, K. Kinoshita, T. Ochiai, T. Nakatani, L. Burget, and J. Černocký, “Speaker-beam: Speaker aware neural network for target speaker extraction in speech mixtures,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol.13, no.4, pp.800–814, 2019.
 - (109) Q. Wang, H. Muckenhirn, K. Wilson, P. Sridhar, Z. Wu, J.R. Hershey, R.A. Saurous, R.J. Weiss, Y. Jia, and I.L. Moreno, “VoiceFilter: Targeted voice separation by speaker-conditioned spectrogram masking,” *Proc. Interspeech 2019*, pp.2728–2732, 2019.
 - (110) R. Giri, S. Venkataramani, J.-M. Valin, U. Isik, and A. Krishnaswamy, “Personalized PercepNet: Real-time, low-complexity target voice separation and enhancement,” *Proc. Interspeech 2021*, pp.1124–1128, 2021.
 - (111) A. Ephrat, I. Mosseri, O. Lang, T. Dekel, K. Wilson, A. Hassidim, W.T. Freeman, and M. Rubinstein, “Looking to listen at the cocktail party: A speaker-independent audio-visual model for speech separation,” *ACM Trans. Graph.*, vol.37, no.4, pp.1–11, July 2018.
 - (112) T.N. Sainath, R.J. Weiss, K.W. Wilson, B. Li, A. Narayanan, E. Variani, M. Bacchiani, I. Shafran, A. Senior, K. Chin, A. Misra, and C. Kim, “Multichannel signal processing with deep neural networks for automatic speech recognition,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.25, no.5, pp.965–979, 2017.
 - (113) Y. Luo, C. Han, N. Mesgarani, E. Ceolini, and S.-C. Liu, “Fasnet: Low-latency adaptive beamforming for multi-microphone audio processing,” 2019 IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU), pp.260–267, 2019.
 - (114) S. Mogami, H. Sumino, D. Kitamura, N. Takamune, S. Takamichi, H. Saruwatari, and N. Ono, “Independent deeply learned matrix analysis for multichannel audio source separation,” 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.1557–1561, 2018.
 - (115) N. Makishima, S. Mogami, N. Takamune, D. Kitamura, H. Sumino, S. Takamichi, H. Saruwatari, and N. Ono, “Independent deeply learned matrix analysis for determined audio source separation,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.27, no.10, pp.1601–1615, 2019.
 - (116) H. Kameoka, L. Li, S. Inoue, and S. Makino, “Supervised determined source separation with multichannel variational autoencoder,” *Neural Computation*, vol.31, no.9, pp.1891–1914, 2019.
 - (117) A.A. Nugraha, A. Liutkus, and E. Vincent, “Multichannel audio source separation with deep neural networks,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.24, no.9, pp.1652–1664, 2016.
 - (118) K. Sekiguchi, Y. Bando, A.A. Nugraha, K. Yoshii, and T. Kawahara, “Semi-supervised multichannel speech enhancement with a deep speech prior,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.27, no.12, pp.2197–2212, 2019.
 - (119) S. Seki, H. Kameoka, L. Li, T. Toda, and K. Takeda, “Generalized multichannel variational autoencoder for underdetermined source separation,” 2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.1–5, 2019.
 - (120) R. Scheibler and M. Togami, “Surrogate source model learning for determined source separation,” 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.176–180, 2021.
 - (121) Z.-Q. Wang and D. Wang, “Combining spectral and spatial features for deep learning based blind speaker separation,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Language Process.*, vol.27, no.2, pp.457–468, 2019.
 - (122) J. Heymann, L. Drude, and R. Haeb-Umbach, “Neural network based spectral mask estimation for acoustic beamforming,” 2016 IEEE International Confer-

- ence on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.196–200, 2016.
- (123) C. Boeddeker, P. Hanebrink, L. Drude, J. Heymann, and R. Haeb-Umbach, “Optimizing neural-network supported acoustic beamforming by algorithmic differentiation,” 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.171–175, 2017.
 - (124) C. Boeddeker, H. Erdogan, T. Yoshioka, and R. Haeb-Umbach, “Exploring practical aspects of neural mask-based beamforming for far-field speech recognition,” 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.6697–6701, 2018.
 - (125) T. Higuchi, K. Kinoshita, N. Ito, S. Karita, and T. Nakatani, “Frame-by-frame closed-form update for mask-based adaptive mvdr beamforming,” 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.531–535, 2018.
 - (126) M. Togami, “Multi-channel itakura saito distance minimization with deep neural network,” 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.536–540, 2019.
 - (127) X. Chang, W. Zhang, Y. Qian, J.L. Roux, and S. Watanabe, “Mimo-speech: End-to-end multi-channel multi-speaker speech recognition,” 2019 IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU), pp.237–244, 2019.
 - (128) L. Drude, D. Hasenklever, and R. Haeb-Umbach, “Unsupervised training of a deep clustering model for multichannel blind source separation,” 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.695–699, 2019.
 - (129) E. Tzinis, S. Venkataramani, and P. Smaragdis, “Unsupervised deep clustering for source separation: Direct learning from mixtures using spatial information,” 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.81–85, 2019.
 - (130) M. Togami, Y. Masuyama, T. Komatsu, and Y. Nakagome, “Unsupervised training for deep speech source separation with kullback-leibler divergence based probabilistic loss function,” 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.56–60, 2020.
 - (131) Y. Bando, K. Sekiguchi, Y. Masuyama, A.A. Nugraha, M. Fontaine, and K. Yoshii, “Neural full-rank spatial covariance analysis for blind source separation,” IEEE Signal Process. Lett., vol.28, pp.1670–1674, 2021.
 - (132) 戸上真人, Python で学ぶ音源分離, 機械学習実践シリーズ, インプレス, 東京, Aug. 2020.

(EA 研究会提案, 2023 年 1 月 10 日受付,
2023 年 1 月 25 日再受付)



戸上真人 (正員)

2002 東京大学・工学系研究科航空宇宙工学専攻修士課程修了, 2011 同博士後期課程修了, 博士 (工学)。みずほコーポレート銀行, 日立製作所中央研究所, Hitachi America Ltd., Stanford Data Science Initiative (SDSI) Visiting Scholar, LINE (株) を経て 2021 Amazon Web Services (AWS), Principal Applied Scientist, 2022 米国カリフォルニア州 East Palo Alto オフィスに拠点を移し現在に至る。音源分離・音響分析に関する研究開発に従事。インプレス社「Python で学ぶ音源分離」執筆。2003 人工知能学会全国大会優秀発表賞, 2010 日本音響学会独創研究奨励賞板倉記念, 日本音響学会栗屋潔学術奨励賞, 2012 ISSPA Best Poster Presentation/Paper Award, 2013 関東地方発明表彰発明奨励賞, 2014 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞, などを受賞。2019~2021 人工知能学会理事。IEEE Senior Member。

半導体論理開発における検証技術の発展と標準化の動向

Advancement and Standardization of Logic Verification Technologies in Semiconductor Development

三橋明城男 Akio MITSUHASHI

吉川隆英 Takahide YOSHIKAWA

アブストラクト 半導体のチップあたりのトランジスタ数は過去 50 年間、一貫して指数関数的に増加しており、搭載可能な論理的な機能の大規模化、複雑化をもたらしている。この動きに対応するため、論理設計手法も回路図ベースから言語ベースへと進化し、更に設計資産の再利用や標準バスインタフェースの採用などにより設計生産性を上げてきた。同様に、論理機能検証においても主に多様化する機能の検証網羅性と検証作業の生産性の課題が顕在化し、従来の手法では立ち行かなくなっている。そこで、本稿ではこのような検証の課題を解決するための検証技術や検証メソッドロジ（検証の方法論、手順、やり方）、標準化の歴史などについて解説する。更に機能やその組み合わせの検証の範囲を越えて、近年重要性が増している非同期回路設計や低消費電力回路設計に伴って発生する新たな論理・回路検証項目や、セキュリティ対応や機能安全標準への準拠など、検証を更に複雑化する検証対象と、その対策についても解説する。また、これまでハードウェアの開発技術がソフトウェア開発技術の進化に追従する形で発展してきた歴史を振り返り、今後の検証技術の発展可能性についても展望する。

キーワード 半導体論理開発、機能検証、試作機試験、省電力、非同期、セキュリティ

Abstract The number of transistors per semiconductor chip has consistently and exponentially increased over the past 50 years. Therefore, a larger amount and more complex functions can be implemented in the chip. In order to tackle this trend, design methodologies have evolved from being schematic-based to being more abstract language-based, and design productivity has been increased through the reuse of design assets and the adoption of standard bus interfaces. Similarly, functional verification can no longer keep up with conventional verification methods, mainly because verification coverage and productivity issues have become critical. In this paper, verification techniques, methodologies, and the history of standardization to resolve these verification issues are described. On top of these, new verification items that arise with asynchronous and low-power consumption designs, as well as issues that require more functional verification effort, such as security measures and compliance with functional safety standards and their countermeasures, are discussed. Verification technologies that have been developed in line with leading software development technologies and look ahead to the possibilities for future advancements in verification technologies.

Key words Semiconductor development, Functional verification, Post-silicon validation, Low power, Asynchronous circuit, Security

1. はじめに

半導体は近年、その性能や周波数は伸びなくなってきたが、チップ 1 個あたりのトランジスタ数はこの約 50 年間一貫して指数関数的に増加し、例えば図 1⁽¹⁾によると 1971 年には Intel 4004 のトランジスタ数が 2300 個であったのに対し、2023 年に登場する Intel Sapphire Rapids は約 1 兆個

以上のトランジスタを搭載するといわれている。すなわちこの 52 年間でトランジスタ数は 10^8 倍に増加している。

この大規模複雑なハードウェアの開発は、当初は回路図入

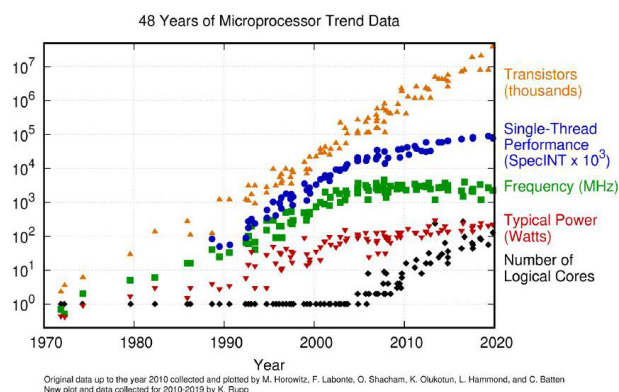


図 1 この 40 年のトランジスタ数の伸び⁽¹⁾

三橋明城男 非会員 EE Tech Focus 合同会社
E-mail akio_mitsuhashi@eetechfocus.com
吉川隆英 正員 富士通株式会社コンピューティング研究所先端コンピューティングPJ
E-mail yoshikawa.takah@fujitsu.com
Akio MITSUHASHI, Nonmember (EE Tech Focus, LLC, Chigasaki-shi, 253-0027 Japan) and Takahide YOSHIKAWA, Member (Advanced Computing Project, Computing Laboratory, Fujitsu Ltd., Kawasaki-shi, 211-8588 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ
Fundamentals Review Vol.16 No.4 pp.272-288 2023 年 4 月
©電子情報通信学会 2023

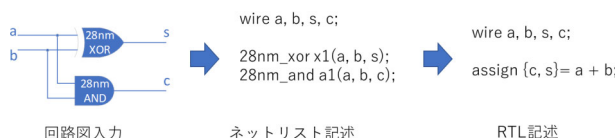


図2 ハードウェア記述の変遷（半加算器の例）

力に依存していたが、1981年にVHDL（Very High speed integrated circuits Hardware Description Language, 1987年にIEEE Std. 1076標準化）⁽²⁾が、1984年にVerilog HDL（VERification LOGic Hardware Description Language, 1995年にIEEE Std. 1364標準化）⁽³⁾というハードウェア開発向けの標準的な設計言語が登場し、トランジスタの物理配置を行う回路の設計と動作を規定する論理の設計が分離することで、生産性が飛躍的に向上した。当初はこれら記述言語に直接セルライブラリと呼ばれるトランジスタの機能ブロックをつなぐネットリストを記述することで、論理的な動作の見通しを向上させるまでであったが、更に1990年代には商用の論理合成ツール⁽⁴⁾が出現し、設計言語による記述がトランジスタや機能ブロック単位からレジスタ間の論理をより抽象的に表現できるRTL（register transfer level）記述が主流となった（図2）。

このRTL記述が可能になったことにより、大規模で複雑な論理でも見通しよく設計ができるようになり、言語によるハードウェア設計が大きく普及する時代を迎えることになった。また、ネットリストや回路図記述においては半導体製造プロセスの変更（例えば28nmの製造プロセスを想定して記述した回路図やネットリスト記述を14nmの製造プロセスに対応させるなど）の際には、半導体製造プロセスが提供する機能ライブラリの名前（28nm_ANDや28nm_XORなど）を逐一人手で変換する必要があったが、RTL記述においては抽象的な論理しか記述されておらず、半導体製造プロセスとは独立であるため、使用する半導体製造プロセスのライブラリを変更するだけで、論理合成によって異なる半導体製造プロセスへと移行することができるようになり、RTL記述は過去の設計資産を容易に再利用できる点でも大きな生産性向上に寄与した。

しかしながら1990年代後半には、この設計言語による生産性向上だけではチップ1個あたりのトランジスタ数の指数関数的な向上には十分に追従できなくなってきた。実際、1987年に米国において設立されたコンソーシアムであるSEMATECH（Semiconductor Manufacturing Technology）は1997年、シリコンのキャパシティが年率40%で指数関数的に増加しているのに対し、設計能力は年率20%しか伸びていないという、設計生産性のギャップについて警鐘を鳴らした（図3）⁽⁵⁾。

この警鐘は半導体開発ツールを提供しているEDA（electronic design automation）業界における「Call to Action」となった。そして、更なる開發生産性の向上に向けて、第三者が記述したコードや過去のコードを再利用して次の新機種や

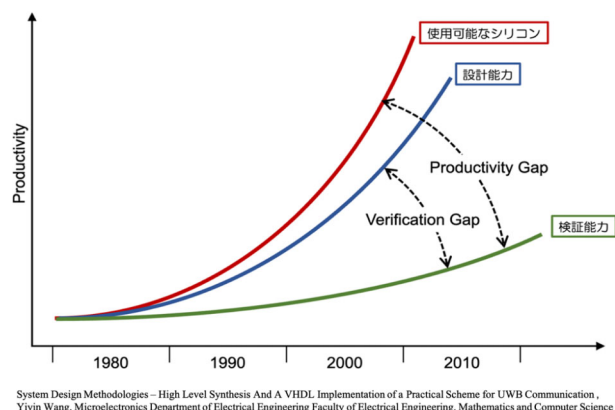


図3 設計生産性と検証生産性のギャップ⁽⁵⁾

ほかの機種に適用するために可読性・可搬性を高めるコーディングスタイルのガイドラインが、例えばRMM（reuse methodology manual）のような形で提示されるようになった。そしてコードがガイドラインを満たしているかどうかを自動でチェックする静的解析（Lint）ツール⁽⁶⁾も登場してきた。また、多くの機種に共通する論理、例えばI/OであるPCIやUSBなどに向けては標準規格準拠の既製設計IPと、その設計IPと接続するための内部標準I/F AMBA（advanced microcontroller bus architecture）⁽⁷⁾などが、IPサプライヤやEDAツールベンダから提供されたことにより、更に飛躍的に設計生産性が向上した。これらの取り組みを受けて、2012年にWilson Research Groupが行った世界規模のリサーチ結果に対するHarry D. Foster氏の分析⁽⁸⁾によれば、設計生産性を大きな課題とするプロジェクトはほぼ存在しなくなっている。

しかし、その一方で、近年では大規模複雑な設計論理が正しく期待どおりに動作するかを確認する検証の生産性ギャップが次の大きな課題であることが明らかになってきた（図3）。

本稿では、以下、第2章で大規模複雑化した設計論理の動作確認に向けた機能検証の課題（検証網羅性と生産性）を述べ、第3章で網羅性に対する強化技術、第4章で生産性に対する向上技術の紹介をする。そして第5章では近年生じつつある新たな検証対象項目を述べ、第6章で将来に向けた更なる取り組みの紹介を行う。

2. 機能検証の課題

半導体論理開発における機能検証^{(9),(10)}とは、半導体製品の動作を規定した設計仕様（例えば1+1を入力したら2を出力するなど）を動作期待値（ゴールデン・モデル）として、RTLによる論理記述が仕様どおりに動作することを確認する作業である。論理検証では一般的に、回路の信号が徐々に伝搬していく半導体回路のアナログ的な振る舞いに目をつぶり、論理的な動作のみをコンピュータ上で再現する論理シミュレータ⁽¹¹⁾の上で、設計論理に入力信号を入れ、仕

様どおりの信号が出力されるかの確認を行う。なお、検証（バリフィケーション）と類似の用語としてバリデーションがあるが、ISO 9000 による定義では、前者のバリフィケーションは網羅的に要求仕様を全て満たされていることを確認する工程であるのに対し、後者のバリデーション（妥当性確認）は特定の用途に対して期待どおりの動作を確認する工程であるという違いがある。機能検証は図4に示すように、検証エンジニアが例えば「整数の足し算を行う」という設計仕様を受けて、 $1+1$ 、 $1+2$ などを入力して2、3などが出力されることを確認する検証シナリオと、設計論理の入力信号（ $1+1$ 、 $1+2$ ）を生成したり、出力信号（2、3）を確認したりする検証環境（テストベンチ）を作成し、論理シミュレータ上で設計論理を動作させて実行結果を確認することで実施される。

単純で小規模の設計論理では、検証エンジニアが仕様書を精査して検証シナリオを記述し、シミュレーション結果の出力信号を検証エンジニアが目視確認することで動作の確認を行えるが、設計が複雑化、大規模化することで非常に多くの機能が半導体論理上に組み込まれるようになると、この手法では立ち行かなくなる。これは、検証において、各機能の「組み合わせ」の動作確認を行うことで、検証項目の組み合わせ爆発が発生してしまうためである。シンプルな回路の例では、例えば「整数の四則演算を行う」という仕様では、確認すべき項目は加算・減算・乗算・除算の4項目であるが、「二つの整数四則演算を同時に行う」という仕様になると、今度は加算・加算、加算・減算、加算・乗算、加算・除算など、 $4 \times 4 = 16$ 通りの項目を確認しなければならなくなる。実際の開発現場においては、機能の組み合わせだけでなく、タイミングの組み合わせも発生する。例えばメモリの読み出しタイミングで別の読み出しリクエストと衝突が発生させたり、通信で送信するタイミングでメモリ読み出しエラーが発生させたり、などである。これら膨大な数の組み合わせを全て網羅しなければならないという課題は、検証組み合わせを数え上げる網羅性に対処するための課題と、その組み合わせを発生させて、動作確認を行うための検証環境開発作業の生産性向上のための課題の二つに分けられる。以下の2.1節と2.2節でその課題の詳細を述べる。

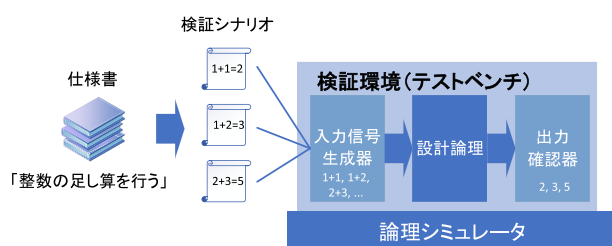


図4 論理シミュレーションの環境

2.1 検証網羅性の課題

検証対象の設計論理には多数の機能が含まれ、それらの機能同士が複雑にデータをやり取りしたり、時には一時的に処理を止めてほかの処理を優先したりといった動作が発生する。そして、これらの動作の発生タイミングの組み合わせは膨大な数になる。また正常動作だけでなく、外部から想定外のデータが入力されたり、想定外のタイミングでデータが入力されたりすることもある。更に、連続する多数の入力を受けて設計論理内部のバッファがあふれることもある。このような例外処理も含めて、検証ではありとあらゆる機能・動作の組み合わせを入力しても設計論理が期待どおりの動作をすることを確認しなければならない。

実際に起こり得る全ての事象が活性化したかどうかはカバレッジという概念を用いて測定される。カバレッジにはコードカバレッジと機能カバレッジ⁽¹²⁾の2種類がある。コードカバレッジは設計記述のコードが全て活性化されたかを確認する statement coverage、条件分岐の全てのケースを網羅したことを確認する branch coverage、全ての条件分岐の組み合わせを網羅したことを確認する path coverage がある。機能カバレッジは仕様に定義される様々な機能が期待どおりに動作したかを確認するための指標となる。コードカバレッジによって、全ての実装されている設計論理記述の動作が確認され、機能カバレッジによって設計仕様の全てが実装されていることの確認が行われる。このカバレッジを確認するための仕組みと、その網羅性をいかに短時間で効率的に引き上げるかが検証網羅性の課題となる。

2.2 検証生産性の課題

検証環境と検証シナリオは設計論理（design under verification, DUV）が大規模複雑化するにつれて、その開発にかかる期間と作業量が増加してきている。一般的な検証環境は図5に示すように設計論理の周囲に入力信号生成器（test stimulus）と出力確認器（simulation result）を付加し、検証シナリオによって期待された動作が発生（活性化）され、それが出力信号として確認できたかを見るカバレッジ機構からなる。膨大な数の検証シナリオによってありとあらゆる機能の組み合わせが全て網羅できたか、その出力結果が期待どお

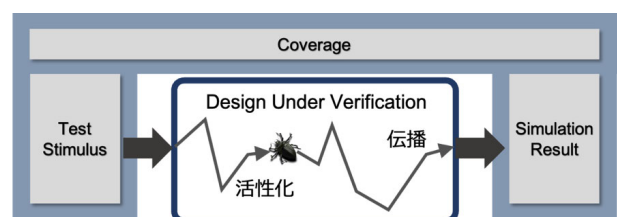


図5 テストスティミュラスによる活性化と伝搬

りのものかを効率的に確認するには、多くの機能の自動化が望まれるが、このような高機能な検証環境の構築には膨大な工数を要してしまう。この検証環境をいかに効率よく開発できるようにするかの開発生産性の向上が、機能検証の二つめの課題である。

3. 検証網羅性の課題解決に向けた検証技術の向上

本章では検証の課題の一方の検証網羅性向上に向けた技術を三つ紹介する。一つめは機能検証のカバレッジを確認するための機構であるアサーション技術、二つめは検証シナリオを逐一開発、調整しなくても期待動作を活性化できるフォーマル検証技術、三つめは効率的に様々な機能組み合わせを網羅するためのランダム検証強化（制約付きランダム）技術となる。以下、各節でその技術の詳細を示す。

3.1 アサーションベース検証

機能検証の網羅性を確認するために、近年ではアサーションという技術が活用されている。アサーションとは、設計論理に付与する別の論理で、特定の条件がその対象論理で発生したかどうかを確認する機構である。アサーション記述方式には PSL (property specification language)⁽¹³⁾と SystemVerilog assertions⁽¹⁴⁾とがある。このアサーションは「プロパティ」をベースに構成されるため、最初にプロパティとは何かを説明する。プロパティはアサーション記述方式の一つである PSL において、設計論理の様々な論理的、時間的な変化を定義するための論理式の集合と定義される。そしてアサーションとは、プロパティによって表現された様々な動作に対して、設計論理の動作が一致しているかを検証し、一致していなければその場でエラーメッセージを出力するなどのアクションを起こすことができるメカニズムである。

例として自然言語による仕様及びタイミングチャート、ブロック図などによって指定される仕様を図 6 に示す。この仕様の対象は Block_A と Block_B との連係動作部分である。この仕様を SystemVerilog assertions を使って記述した例を図 7 に示す。この記述において property～endproperty で囲まれた部分がプロパティであり、p_req_ack はプロパティの名称である。このプロパティでは、clk がハードウェアのクロック信号を指し、Block A からの要求信号 req が入力されたら、その時刻から数え始めてクロック 1～3 サイクル経過した後に Block B から応答信号 ack が返される動作が記述されている。

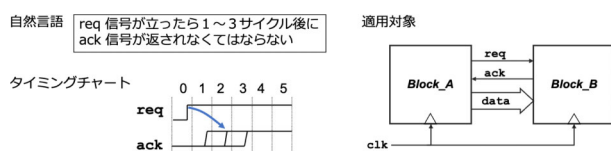


図 6 Block A と B の連係動作の仕様

その下の a_req_ack はアサーションの名称であり、assert property では先ほど定義されたプロパティ p_req_ack を指定している。ここでは、プロパティとして期待されていること（この場合は Block A から要求信号が出された 1～3 クロックサイクル後に Block B から応答信号が戻る）に合致する動作が検出されれば、論理シミュレータがもつ機能によって当該アサーションの発火回数がカウントされ、違反する動作（要求信号の 3 サイクル後までに応答信号が返らない）が検出されれば、\$error 以下で指定されたエラーメッセージ（“request was not acknowledged”）が出力される。すなわち、この機能によって Block A と Block B の連係動作が発生したかどうか、連係動作の仕様に反する動作が発生していないかの確認ができる。

図 8 に示すように、機能検証において、このアサーション機能がもたらす価値は、期待動作が発生したかどうかをカウントするカバレッジ観測性の向上、並びに違反動作が発生した現場をすぐに検出できるデバッグ作業の容易化である。アサーションを活用していなかった従来の検証では、必要な動作が発生したかどうかは、設計論理中に記述した \$display 文によってシミュレーション時にメッセージを表示したり、発生回数をカウントする論理を設計論理中に埋め込んだりなどで対応していた。これは設計論理をリリースする際には取り外す必要があるなど、生産性への影響が大きかった。また、このほかにアサーションには設計論理の異常動作をすぐに検出できるという長所がある。大規模デザインの長いシミュレーション中に期待される動作（要求信号の後に応答信号が返る）に違反する動作が発生したとしても、その影響が観測されるのは出力信号に異常動作が伝搬するまでは検出がされない。一般的にハードウェアの論理シミュレーションは時間がかかり、かつ、その動作のログも膨大な量となるため、異常動作が発生したタイミングを捉えることはデバッグの生産性向上に非常に有益である。

このアサーション技術を活用した機能検証においては、検

```
property p_req_ack;
  @(posedge clk) $rose(req) |-> ##[1:3] $rose(ack);
endproperty

a_req_ack: assert property(p_req_ack) else
  $error("request was not acknowledged");
```

図 7 連係動作部のアサーションの記述例

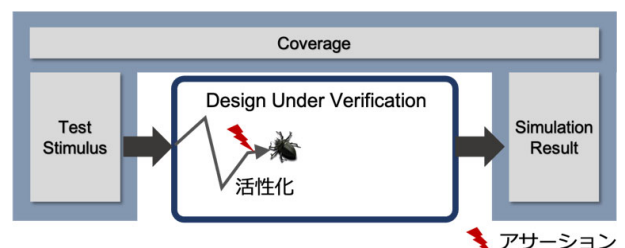


図 8 アサーションを用いたシミュレーション

証対象デザインのどこにアサーションを埋め込むかが課題となる。この課題に対しては、設計検証技術に関する国際会議 2005 年の DVCon US において、検証ホットスポット⁽¹⁵⁾という解決案が示されている。検証ホットスポットとは誤った設計をしやすく、かつ検証に膨大な時間がかかる設計上の特徴を抽出している。例えば、同時に発生し得る様々なリクエストの処理優先度を規定する調停器、機能モジュール間インタフェースの状態（応答待ちやタイムアウトなど）を記録するステートマシン、異なる種類のクロック（例えば 1 GHz で動作するモジュールと 500 MHz で動作するモジュール）をまたいだ非同期データ転送におけるクロック乗せ替え、メモリ読み書きの同時発生に伴うデータ破壊などである。アサーションベース検証を導入する際には、このような一般的な検証ホットスポットに加えて、過去の類似機種で検出されたバグの特徴を考察し、開発機種固有の検証ホットスポットを追加することが望ましいとされている。

3.2 フォーマル検証

アサーションを記述したとしても、様々な機能を活性化するための入力信号の組み合わせを検証シナリオで逐一記述することは非常に難しい。そこで、アサーションごとに、そこで記述された状態を発生し得る入力信号の組み合わせが存在するかどうかを、当該事象から時間的に逆方向に網羅的に確認するフォーマル検証⁽¹⁶⁾という技術が出てきた。

入力信号を人手で作成して設計論理上でシミュレーション動作をさせる従来のシミュレーション検証との違いを図 9 に示す。一つ一つの○印は設計論理の内部状態を示し、横軸は時間遷移を示している。シミュレーションでは 2 サイクル後に検証対象の事象（ここではパケット受信エラー）を発生させるために様々なタイミングを調整する必要がある。一方、フォーマル検証でパケット受信エラーが発生する 1 サイクル前の状態、2 サイクル前の状態を網羅的に数え上げ、パケット受信エラーを発生させる入力信号のパターン全てを数え上げることができる。

図 9 は単純な事例を示したが、より大規模複雑な論理においては、ハードウェアの状態を示す○印の数が縦軸の状態数方向と、横軸の時間遷移方向で非常に大きくなる（図 10）。そして、シミュレーション検証では、一つの検証シナリオは各サイクルにおいて一つの状態しか網羅できないのに対し、フォーマル検証では全ての可能性を網羅できるという特徴がある。

フォーマル検証は全ての状態を網羅できるという長所があ

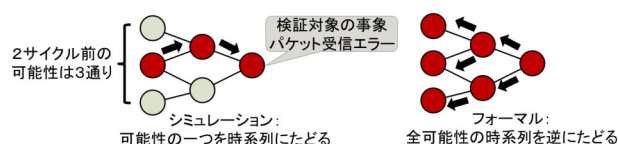


図 9 シミュレーション検証とフォーマル検証

るが、一方で設計論理が取り得る全ての状態を数え上げるため、大規模な設計論理ではその数が天文学的な数字になり、計算機資源によってはメモリ枯渇を起こしてしまう。そのため、開発現場においては、単体検証と一部の結合検証まででフォーマル検証技術を用い、大規模結合検証やシステム検証ではシミュレーション検証や、後述する制約付きランダム検証を適用するのが一般的となっている。また、より大規模な設計論理にもフォーマル検証を適用できるような工夫も幾つか提案されている。以下ではその中の二つの手法、Assume-Guarantee⁽¹⁷⁾と過制約によるバグハンティング⁽¹⁸⁾を紹介する。

3.2.1 Assume-Guarantee による大規模論理のフォーマル検証

フォーマル検証においては一般的に、3 種類の条件が与えられる。一つめが入力制約（assume）で例えばリセット信号のように動作途中で操作されることが想定されていない信号を定義する。二つめが網羅性確認（cover）で検証時に発生させたい事象を定義する。そして、三つめは発生してはいけない異常動作を示す論理式（assert）である。フォーマル検証による「完全証明」では設計論理の入力制約だけを与え、設計論理の期待の状態からリセット直後の初期値まで遡って入力制約を満たす入力信号の組み合わせを網羅的に確認する。

しかし、大規模な設計論理でリセット直後の初期値まで遡ろうとすると、網羅すべき状態数が天文学的な数となり、メモリ枯渇を起こしてしまう。そのような場合には、図 11 に示すような論理を分割する手法がとられる。例えば Block A の全ての状態を網羅的に検証（guarantee）すると、その Block A が取り得る全ての出力を後段の Block B の入力制約（assume）として Block B の動作を網羅的に検証する。この手法は Assume-Guarantee と呼ばれ、このセッションを繰り返すことでデザイン全体に対する完全証明を実現する（図 12）。

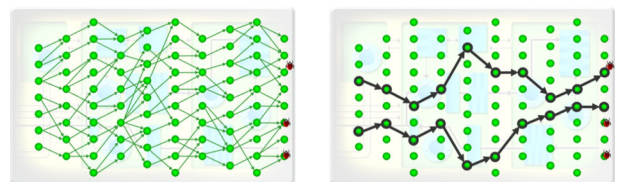


図 10 フォーマル検証での網羅的検証（左）とシミュレーションによる検証（右）

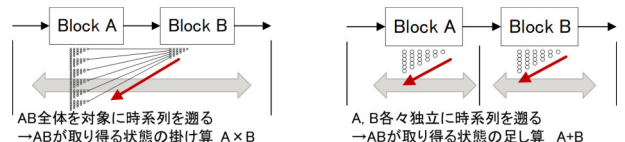


図 11 フォーマル検証による論理の分割

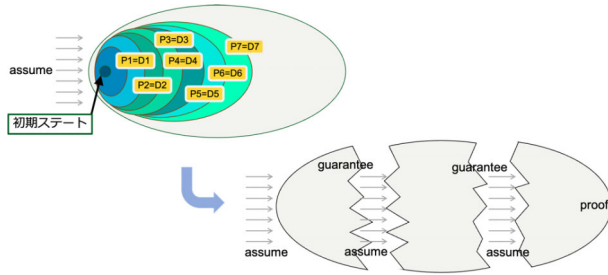


図 12 フォーマル検証における Assume-Guarantee 手法

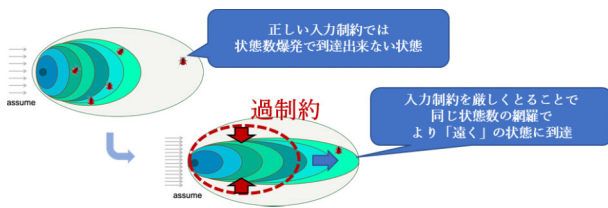


図 13 フォーマル検証におけるバグハンティング手法

なお、Assume-Guarantee では入力制約条件を厳しくしすぎて (over constraint), 後段 Block B で本来取り得る状態を網羅できなくなって、バグを流出させてしまうという問題が発生し得る。そのため、入力制約条件を適切に設定することが極めて重要になってくる。

3.2.2 過制約によるバグハンティング

完全証明ではメモリ枯渇を引き起こす大規模複雑論理に対しては Assume-Guarantee のほかに、敢えて入力制約を厳しくして、後段 Block が取り得る状態空間を狭くして、その代わりにより「深い」論理の動作確認を行うバグハンティングと呼ばれる手法がある (図 13)。

バグハンティングではアサーションで規定された動作が発生し得ることの確認はできるが、完全証明ではない。すなわち、与えられた過剰な入力制約下で「ある異常状態が発生し得ない」ことが示されたとしても、制約条件を適切に設定すれば発生し得るかもしれないという可能性が残る。そのため、この手法は網羅的な検証の前段の、動作確認のフェーズにおいてよく用いられる。

3.3 制約付きランダム検証

シミュレーションをベースとした機能検証においては、様々な機能を網羅する検証シナリオを直接作り込む Directed 検証シナリオと、様々な機能をランダムに発生させる Random 検証シナリオ⁽¹⁹⁾とがある。全ての機能組み合わせを Directed 検証シナリオで網羅するのが理想であるが、実際の開発現場においては全てを網羅するシナリオを作りきることは困難である。そのため、Random 検証シナリオがよく使われる。しかし、全ての機能、全ての命令を一律にランダムに

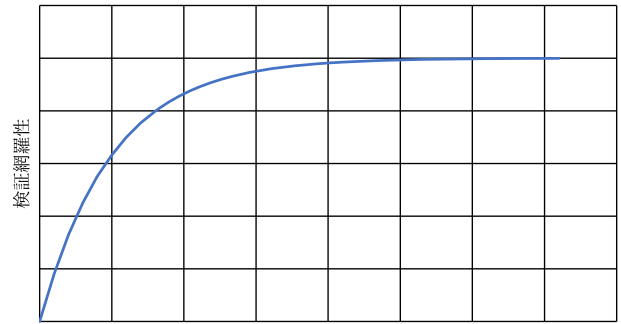


図 14 ランダム検証における網羅性

表 1 制約付きランダムの重みの例

	信号の取り得る値とその発生確率		
	0	1-254	255
一般的なランダム	0.4%	99.2%	0.4%
制約付きランダム	10%	80%	10%

```

module command_analysis;
  input bit clk, decode,
  input logic [2:0] opcode,
  input logic [1:0] mode );
  ...
  covergroup opcode_mode_cg @(posedge clk iff decode) ;
    coverpoint opcode;
    coverpoint mode;
    x_opcode_mode: cross opcode, mode;
  endgroup: opcode_mode_cg
  ...
endmodule

```

図 15 SystemVerilog によるクロスカバレッジ (covergroup) 記述例

発生させてしまうと、生成数が増えるとともに、検証網羅性は上がらなくなってきてしまう (図 14)。

このような網羅性収束の問題に対処する技術が制約付きランダム技術⁽²⁰⁾である。これはランダムに事象が発生する際に、様々な値や幅に制約 (重み) をつけることで、重複を減らして、できる限り少ない検証シナリオで高い検証網羅性を達成するための技術である。重みとしては例えば表 1 のような 0 から 255 までの値をとる入力に対して最小値である 0 と最大値である 255 とを多めに発生させるような制約が付けられることが多い。このような重み制約を設定すると、コーナーケースと呼ばれる極端な値をとりやすくなり、効率的に検証網羅性を引き上げることができる。

一般的な検証においては、ランダム化する項目は、信号入力のタイミング、設計論理の設定値、例外発生の有無など、設計論理の特徴に沿ったものが指定される。そしてランダム化によって、実際にどのような組み合わせが発生したのかを測る指標としてはクロスカバレッジという技術が利用される。図 15 に SystemVerilog⁽¹⁴⁾におけるクロスカバレッジ指

定の記述例を示す。この例では設計論理の命令（opcode）と実行モード（mode）の組み合わせの網羅性確認を行っている。

クロスカバレッジの収集ポイント opcode_mode_cg では、opcode、mode それぞれの取り得る値（opcode は $2^3=8$ 種、mode は $2^2=4$ 種）が定義され、その掛け合わせ（クロス）である $8 \times 4=32$ 個の bin と呼ばれる観測ポイントが生成される。そして、ランダム検証シナリオを入力して設計論理のシミュレーションを実行させると、図 16 のような結果が得られる。この事例では opcode=3' b000^(注1) の事象は 35 回発生しているが、mode=2' b01 の条件下では一度も実行されていないことが分かる。同様に、opcode=3' b101 も 8 回発生しているが mode=2' b11 の条件下では全く発生していない。制約付きランダムは、このような発生しにくい事象をクロスカバレッジによって検出し、その事象の発生確率（重み）を底上げすることで、検証網羅性を向上させる技術である。

なお、制約付きランダム検証においては、各機能の発生確率を途中で変更、調整することが多い。これは、ランダムの発生確率を一定にしたままだと、新たに検証シナリオを生成しても検証網羅性が上がりにくくなるポイントがあるためである。

一般的な検証では制約付きランダム検証と人手で組み合わ

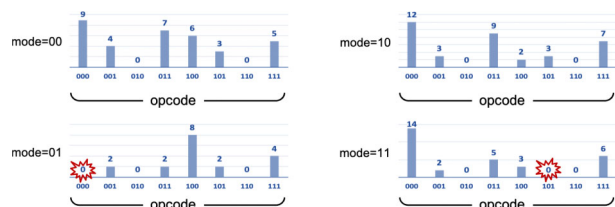


図 16 opcode と mode のクロスカバレッジ収集結果の例

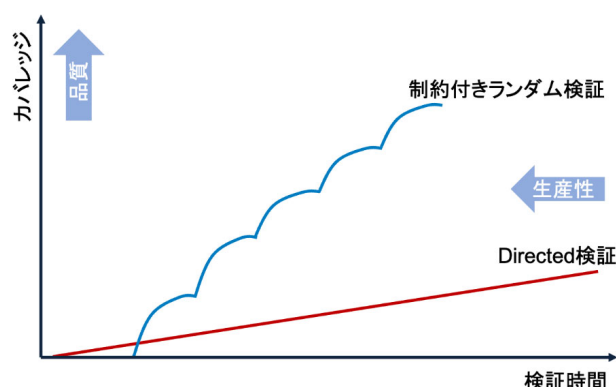


図 17 制約付きランダムテスト（検証）と Directed テスト（検証）

(注 1)：Verilog の数値表現で 3 ビット 2 進数、値 0 を示す。冒頭の 3 はビット幅、b は 2 進数であることを示す。

せを作り込む Directed 検証が併用される。それぞれの特徴を図 17 に示す。縦軸は検証網羅性（カバレッジ）で横軸が検証シナリオ数、検証時間となる。様々な機能の組み合わせを自動的に生成する制約付きランダム検証は、高機能であるために、開発に時間がかかる。そのため、検証の初期は制約付きランダムシナリオ生成器の開発と並行して、設計論理を Directed 検証で検証をすることが多い。そして、制約付きランダムシナリオ生成器が完成すると、大量の組み合わせをランダムに網羅することで、一気に検証網羅性が上がる。そして、ランダムシナリオの網羅性が上がりにくくなると、重みの調整を行って、再度新たなランダムシナリオを生成することで、再度検証網羅性を引き上げることができる。

しかし、ランダム検証は、広く浅く様々な組み合わせを網羅することはできても、具体的にある特定の機能の組み合わせをピンポイントで発生させることは難しい。そのため、ある程度のカバレッジまでを制約付きランダムテストで網羅した後、個別のポイントについてはフォーマル検証や Directed 検証によって網羅することが一般的である。

また、ランダム検証においては、検証シナリオの再現性も重要となってくる。過去のランダム検証シナリオをいつでも再現できるように、ランダムの各機能の制約並びにランダムのシード値は常に記録しておく必要がある。

4. 生産性向上に向けた標準化の動向

半導体の論理設計において標準設計言語や I/F 標準化、標準 IP 提供などの取り組みによって生産性向上が果たされてきたが、それらの活動は IEEE のもとで行われてきている。そして同様の取り組みは検証技術においても行われている。図 18 に、半導体設計・検証における技術標準化の歴史における重要なマイルストーンをまとめた⁽²¹⁾。

1980 年代から 2000 年代にかけて IEEE 標準化には多くの時間が費やされていた。例えば設計記述言語である VHDL と Verilog とはどちらも同時期に活用され、その主導権を争っていたが、1987 年に VHDL は標準化されたのに対して、Verilog の標準化は 1995 年で 7 年以上を要している。しかし 1990 年代後半には、このペースでは半導体プロセスの進化や設計対象論理の大規模複雑化に設計・検証技術の標準化が追従できなくなる懸念が広がってきた。そして 2000 年に当時設計記述言語 VHDL と Verilog のユーザグループを

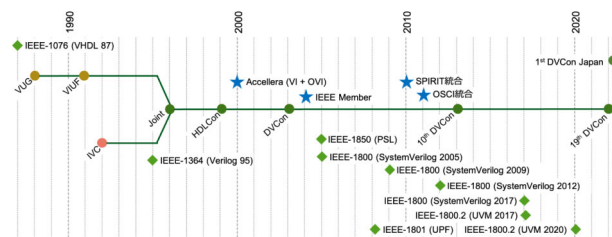


図 18 IEEE 標準化と Accellera の歴史⁽²¹⁾

運営し言語の普及に努めてきた二つの団体 VI (VHDL International) と OVI (Open Verilog International) が統合され、Accellera という非営利の標準化団体が設立された。Accellera という名称は標準化の加速 (acceleration) から採ったとされており、現在は更に設計 IP の仕様を XML で記述する IP-XACT⁽²²⁾ を規定して IEEE 標準とした SPIRIT、並びに、VHDL や Verilog よりも抽象度の高い C プログラムに似たハードウェア設計記述言語 SystemC⁽²³⁾ の普及団体 OSCI (Open SystemC Initiative) を統合して Accellera Systems Initiative となっている。Accellera で標準化された成果は LRM (language reference manual) として IEEE に寄贈されることで、その標準化が加速化され、現在では多くの新規標準化や既存標準の更新が Accellera を中心に行われている。本章では検証生産性の向上に向けた標準化の取り組みとして、検証環境の標準化である UVM⁽²⁴⁾ とランダム検証シナリオ生成の標準化である PSS⁽²⁵⁾ とを紹介する。

4.1 UVM (Universal Verification Methodology)

検証環境構築の標準化を目指した検証メソッドロジ (検証環境における様々なモジュール・部品の標準仕様の定義) の歴史は長く、1995 年にイスラエルで設立された InSpec 社 (後の Verisity 社) が開発した e 言語にまで遡る。この e 言語による検証メソッドロジは、市場で多く使われている論理シミュレータと連携することで制約付きランダム検証やアサーションベース検証などの高度な検証機能とも連携していた。しかし e 言語は特定企業の独自言語であったことから、e 言語が提供する機能を実現しつつ、既存の設計言語との親和性が高い言語を目指して SystemVerilog の標準化が進んだ。

図 19 に様々な EDA ベンダや標準化団体による検証メソッドロジの出現と標準化の歴史を示す。前出の Verisity 社は Cadence 社に買収されたため、e 言語による検証メソッドロジは eRM (e Reuse Methodology)⁽²⁶⁾ と名前を変えて 2002 年に Cadence 社より改めてリリースされた。しかし、Cadence 社は 2007 年に設計記述言語を SystemVerilog に乗り換えた URM (Universal Reuse Methodology) をリリースしている。Synopsys 社も 2003 年に独自言語である Vera 言語をベースに RVM (Reference Verification Methodology) という検証メソッドロジをリリースしたが、2005 年後に設計記述言語を SystemVerilog に乗り換え、VMM (Verification Methodology Manual for System Verilog)⁽²⁷⁾ という検証メソッドロジをリリースした。Mentor Graphics は独自言語による検証メソッドロジを開発せず、後発ではあったが 2006 年に最初から SystemVerilog をベースに AVM (Advanced Verification Methodology)⁽²⁸⁾ という検証メソッドロジをオープンソースとしてリリースし、その実装ライブラリも公開した。

この検証メソッドロジのオープンソース化は産業界に広く受け入れられ、2008 年に Mentor Graphics と Cadence とが共同で OVM (Open Verification Methodology) をリリースした。半導体の検証 IP を提供する多くの企業は、OVM をサ

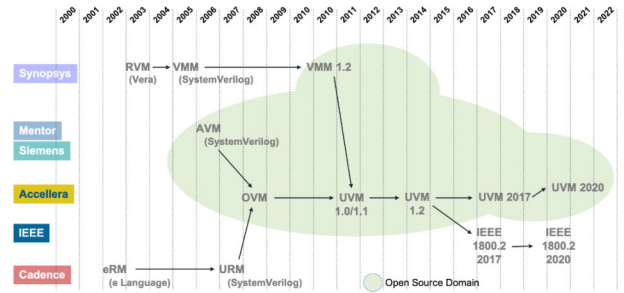


図 19 検証メソッドロジの歴史

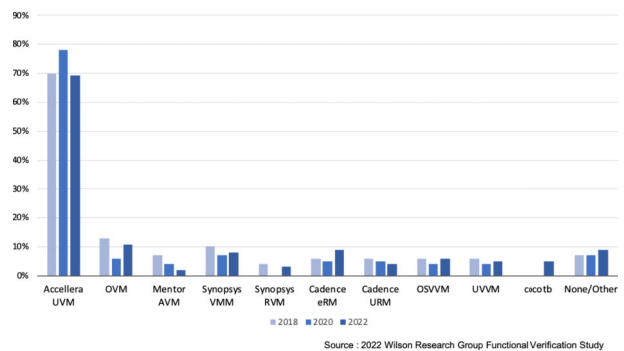
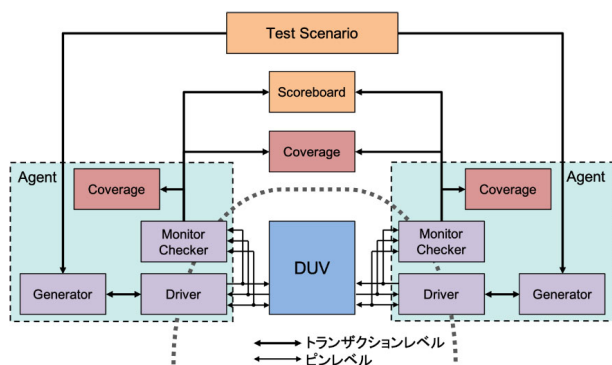


図 20 ASIC 機能検証で採用されている検証メソッドロジの分布⁽³⁰⁾

ポートすれば一つのライブラリで Mentor Graphics 社と Cadence 社の 2 社のシミュレータをサポートすることができるため、OVM ベースの検証 IP の普及にもつながった。そして OVM は Accellera における標準化作業の土台として選ばれ、その後 Synopsys も加わり、2011 年に SystemVerilog をベースとしたオープンソースの検証メソッドロジ UVM (Universal Verification Methodology) としてリリースされた⁽²⁹⁾。UVM は Accellera から寄贈された LRM をベースに IEEE で API 仕様が整備され、現在では IEEE Std. 1800.2 として標準化されている。そして Accellera は LRM に規定されている標準 API を SystemVerilog で実装し、リファレンスライブラリとして提供している。

Wilson Research Group が 2022 年に調査した Functional Verification Study⁽³⁰⁾ によれば、図 20 に示すとおり、産業界においては UVM の採用が最も進んでおり、本調査対象者の約 7 割を占めている。また調査結果の分析を進める Siemens EDA の Harry D. Foster 氏によれば、UVM 以外の言語による検証メソッドロジは、過去のプロジェクト資産を活用する場合など、限定的であるとのことである。

図 21 に UVM で規定される標準検証環境のアーキテクチャの一例を示す。図 21 において DUV (design under verification) は検証対象の設計論理であり、検証環境とのインタフェースはピンレベルである。これに対して検証環境はより抽象的なトランザクションレベルのデータをやりとりするコンポーネントで構成される。トランザクションとは例えばメモリの読み出しや書き込みなど一連の動作の固まりを指す。そしてピンレベルとは例えばメモリの読み出しに必要な



個々の信号のやりとりを指す。テストベンチと DUV の間ではテスト（検証）シナリオで規定されたトランザクションをピンレベルの信号の一連の受け渡しに変換する必要がある。入力側のトランザクションからピンレベル信号への変換は Driver モジュールが担い、出力側のピンレベルをトランザクションレベルに変換する役割は Monitor モジュールが担う。Monitor は同時に I/F 仕様で決められた動作ルール（プロトコル）に違反していないかどうかをアサーションでチェックする Checker の役割も担う。Driver/Monitor を含むモジュール群は Agent と呼ばれ、これが標準 I/F の検証 IP を構成する基盤となる。標準 I/F 規格である USB、PCI Express、DDR などの検証 IP は様々な検証 IP ベンダから入手することができるため、これらを活用することで検証環境構築の生産性を向上させることができる。

検証網羅性を確認する機能カバレッジも Agent (検証 IP) に実装されている Coverage コンポーネントによって測定され、更に必要に応じてクロスカバレッジも採取できる。また DUV の出力が期待される結果と一致するかを自動的に照合するモジュールとして Scoreboard も配置することができる。この Scoreboard には、テスト (検証) シナリオから渡された期待出力と実際に DUV の出力とを比較する単純な比較器と、テスト (検証) シナリオの入力を受けて、DUV の期待出力を自動生成する高度な比較器とが必要に応じて使い分けられる。

最上部にある Test Scenario モジュールでは、複数の Agent を操作して、DUV 全体にわたる検証シナリオを調整する。1 本の UVM テスト（検証）シナリオには検証対象ハードウェアのある特定の一連の動作の固まりを示すトランザクションが記述されている。そして、トランザクションは Agent 内の複数の Sequencer（例えばメモリモジュールの Sequencer や PCIe の Sequencer など）若しくは Virtual Sequencer（オブジェクト指向で複数の Sequencer をまとめた仮想的な Sequencer）と接続される。そして Sequencer はそれぞれ Driver（メモリモジュールに対する Driver や PCIe に対する Driver）と接続されて、DUV へのピンレベルの入力信号へとつながる。ここに検証環境である Agent や Scoreboard、Sequencer などのモジュールは「How—どのよ

うに検証するか、シナリオで規定された動きをどう設計論理上で実現するか」の部分に焦点を当てているのに対し、テスト（検証）シナリオは「What—何を検証するか、どのような動作を確認するか」にあたるとされている。

UVMは標準化されてから12年になるが、近年の大規模な SoC や FPSoC (field-programmable system-on-chip, 再構成可能な SoC) では、ブロック単体検証や小規模な結合ブロック検証においてはテスト (検証) シナリオを UVM のトランザクションで表現できるものの、大規模結合検証やシステム検証においては、トランザクションのような細粒度記述では設計論理の大規模複雑な動作を表現しきれず、組み込みソフトウェアの C コードと UVM を組み合わせた検証が行われている。この組み合わせは機種によってそれぞれ個別の検証環境が必要となるため、再利用性向上に向けた障壁となっていると指摘されている。

また、半導体チップを製造する前に、FPGA でプロトタイプを構築して検証を行う開発プロジェクトにおいては、UVM による検証環境の開発とは別に、FPGA プロトタイプの環境に合わせた検証環境並びにテスト（検証）シナリオを準備する必要がある。このように UVM は大規模 SoC 検証への適用には課題があり、その解決に向けた次の標準化の取り組みが次節で紹介する PSS である。

4.2 PSS (Portable Test and Stimulus Standard)

半導体論理検証はモジュール単体検証から結合検証、システム検証と工程を進むに従って、シミュレーションの規模が大きくなって1台のワークステーションでは扱いきれなくなるため、専用アクセラレータやFPGAプロトタイプ、試作機（実機）などの様々な検証プラットフォームを活用することになる⁽³¹⁾。そして、UVMは異なる品種、機種との間で検証環境・テスト（検証）シナリオを共通化するための取り組みであったが、PSSは、一つの品種の単体検証から大規模システム検証、実機試験までの検証環境・テスト（検証）シナリオを共通化する取り組みであり、Accellera内に組織化されたPortable Stimulus Working Groupが標準化を進めている。PSSはUVMとは異なり、論理シミュレータだけでなく、エミュレータ、FPGAプロトタイプ、試作機・実機などターゲットとなる検証プラットフォームも幅広い。しかし論理シミュレータ上ではSystemVerilogが設計記述言語であったが、エミュレータ、FPGAプロトタイプ、試作機・実機の全てのプラットフォームを一律に網羅できる言語は現時点では存在しない。そこで、Accelleraのワーキンググループでは、各検証プラットフォーム上での言語の上位レイヤに、「テスト（検証）インテント」を表現するためのDSL（domain specific language, 領域特化型言語）を規定し、そのDSLやC++で書かれたテスト（検証）インテント記述を各検証プラットフォーム上で解釈、実行するためのC++のクラスライブラリを策定している。

DVCon US 2020 で行われた PSS Tutorial⁽³²⁾では、図 22 に

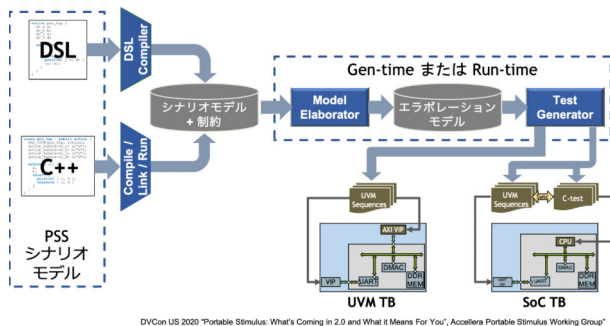


図 22 PSS 標準が想定するツールフロー (32)

示すような EDA ツールフローが提示されている。この図ではどのような動作を検証するかを記述した「テスト（検証）インテント」=PSS シナリオモデルを各検証プラットフォームに対応した検証ツールが解釈し、各検証環境下の様々な制約に基づいて走行可能なシナリオ空間を構築し、そこからランダムにテストシナリオを生成する。PSS では何をテストするかを「テスト（検証）インテント」と呼んでおり、どのような手段でテストを生成するかを「リアライゼーション」と呼んでいる。図 22 ではプロセッサ、CPU をもたない DUV に対しては UVM 検証環境に対してトランザクション表記のテストシナリオを供給し、設計が進みプロセッサ、CPU を組み込んだ SoC システムレベル環境に対しては、トランザクション表記の UVM テストシナリオを UVM 検証環境に、CPU を動作させる C コードを DUV 上のプロセッサ、CPU に流し込む。そして UVM テストシナリオと C コードとが同期して動作するための機構を C++ のクラスライブラリとして提供している。

なお、PSS は UVM の置き換えではない。論理シミュレータ上での検証において UVM は確かな実績があり、多くの検証 IP や教育材料などが既に流通している。PSS は UVM では表現が難しかった「What—何をテストするか、数多くの検証 IP が取り得るシーケンスの膨大な組み合わせシナリオ」を DSL によって表現し C コードによるテストシナリオと UVM テストシナリオとを組み合わせた形で実現することを想定している。

ここから PSS におけるテストインテントの記述方法について詳細を見てみる（図 23）。PSS シナリオモデルは動作を表現する「action」、及び「dataflow」、「resource」などのオブジェクトにより構成される。例えば以下では UART（universal asynchronous receiver/transmitter）と呼ばれる I/O の動作シナリオの記述となる。この中では送信側の動作が mem2tx_a というアクション、受信側の動作が rx2mem_a というアクションで記述され、その中で入力と出力がそれぞれ定義されている。そして、input/output のところにある data_ref_b はバッファ型のデータフロー、data_ref_s はストリーム型のデータフローを示している。

このコードを読み解くと、入力を生成するパケット生成器

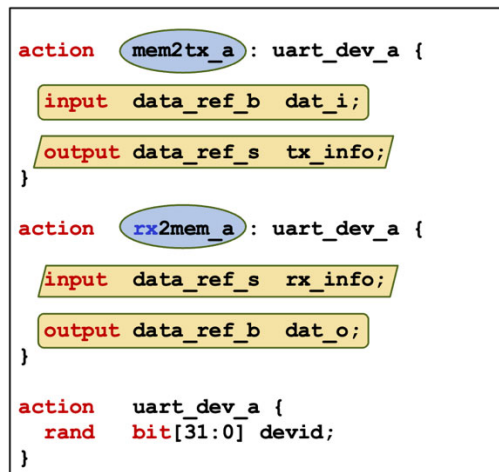


図 23 単純な送受信回路動作に向けた PSS テストインテント記述例

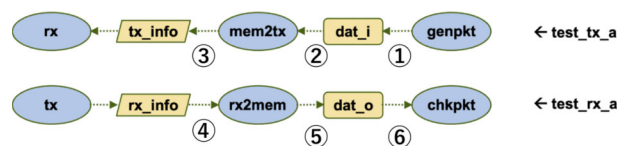


図 24 PSS インテント記述から推定される動作

genpkt と出力を受けて内容確認をするチェッカ chkpkt を追加して、図 24 に示すような動作とデータの流が推定される。すなわち

- ① パケット生成器（genpkt）で送信データが生成され、バッファに書き出される。
- ② mem2tx という処理で送信データがバッファから読み出される。
- ③ 送信データが受信モジュール（rx）に Stream として送られる。
- ④ 受信モジュール（rx）に送られてきたデータが Stream として rx2mem に渡される。
- ⑤ rx2mem という処理でデータをバッファに書き出される。
- ⑥ バッファに書き出されたデータをチェッカ（chkpkt）が読み出して確認する

となる。なお、Stream としてやりとりされる動作③④は同時動作が可能であるが、バッファの読み書きが発生する動作①②⑤⑥は書き込み後に読み込む必要があるために、「スケジューリング」が自動的に行われる（図 25）。

このようにテストインテントでは、どのようなデータを受け渡すかだけを記述しているが、実シナリオを生成する際には、それぞれのデータオブジェクトのタイプにより、スケジューリングが決定される。

スケジューリングはユーザが指定することも可能である。重要なテストシナリオはユーザが activity グラフと呼ばれる記述によってスケジューリングを指定する。図 26 はその記述例と生成されるテストシナリオのスケジューリングの様子

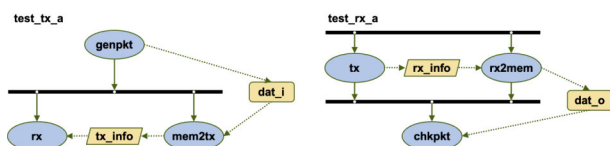


図 25 生成されるテストシナリオのスケジューリング

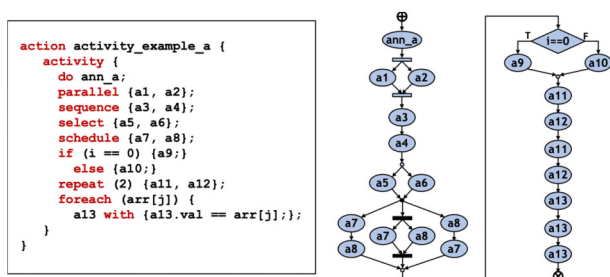


図 26 activity グラフ記述とテストシナリオのスケジューリング

である。この例では a1 から a13 までの処理をどのような順序で行うかが詳細に規定されている (a1 と a2 が同時、a3 と a4 は逐次など)。

PSS の基本的な考え方は、重要な箇所のみ詳細に明示的に記述し、そのほかの部分は PSS ツールがリーガル (仕様で規定された範囲内) 動作を行うテスト空間を推定し、数多くのテストシナリオを自動的に生成するようにしたことで、大規模複雑環境におけるテストシナリオの生産性を大幅に向上させるというものである。もちろん PSS 記述内でもカバレッジを取得したり制約付きランダムシナリオを生成したりすることもできる。PSS と UVM は非常に親和性の高い検証環境の標準ソリューションとして期待されている。

5. 機能検証以外の検証項目

ここまで機能を設計言語で記述し、その機能検証網羅性を向上させる技術と、大規模複雑化する設計論理の動作確認を向上させるための検証環境標準化の取り組みについて紹介してきた。しかし近年、半導体の機能は更なる複雑化を遂げており、新たな検証対象項目が現れてきている。本章では近年重要になってきている新たな検証の対象五つ (非同期転送、非同期リセット、省電力、セキュリティ、機能安全) の紹介を行う。

5.1 非同期データ転送機能の検証

近年の SoC では演算部は 1 GHz、I/O 部は 500 MHz というように複数のクロック周波数で動くモジュールが一つのチップ、SoC の中に混在している。それぞれ同一のクロックで駆動される領域をクロックドメインという。そして、一つのクロックドメインからほかのクロックドメインにデータの受け渡しをすることを、データの非同期転送 (clock do-

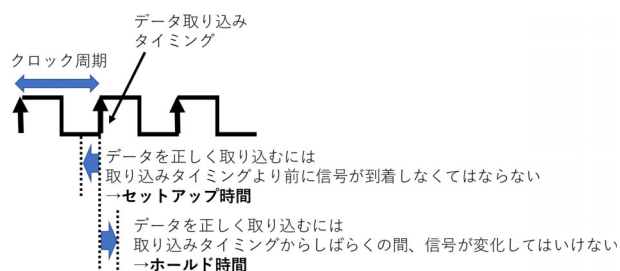


図 27 非同期伝送のデータ取り込みタイミング

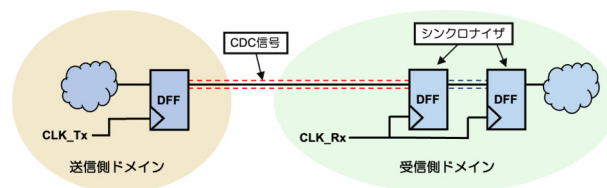


図 28 クロックドメイン・クロッシングにおけるシンクロナイザの挿入例

main crossing, CDC) と呼ぶ⁽³³⁾。通常、ハードウェアでデータを保持する Flip-Flop は、クロックの刻みに応じて電荷をチャージしてデータを記憶する。しかし瞬間的に電荷をチャージして値を取り込むことは物理的に不可能であるため、クロック刻みのある一定の間、信号の値が安定している必要がある (図 27)。

例えば図 27 を例にすると、flip-flop がデータを取り込むタイミングはクロック信号の立ち上がり時刻となるが、その時間から入力信号を取り込むにはそれよりも「セットアップ時間」だけ前に既に信号が届いて電荷がたまっている必要がある。また、取り込みにかかる時間の間、「ホールド時間」の間、入力信号は一定でなければ値は正確に取り込めない。

単一クロックドメインの回路では全ての回路が同じクロック周期で動作するために、送信側と受信側の動作は 1 通りに決まり、シンプルなタイミング解析によってこの問題は解消される。しかし、非同期データ転送においては、送信側と受信側でクロック周期が異なるため、クロック周期の組み合わせにより、受信側のデータ取り込みタイミングとは無関係なタイミングでデータが到着してしまうため、セットアップ違反 (データの延着) やホールド違反 (データの早着) が頻繁に発生する。この違反が発生した状態をメタスタビリティと呼ぶ。非同期転送を正しく行うためにはメタスタビリティが発生しても正しくデータを受け取ることができるように受信側にシンクロナイザ (同期化回路) を挿入し、かつ送信側はシンクロナイザ固有の転送プロトコルを守る設計にする必要がある。

図 28 にシンクロナイザを挿入した非同期回路の事例を示す。この例では受信側ドメインに 2 段の flip-flop を入れることで同期化を成功させている。すなわち、受信側 1 段め flip-flop のある時刻で信号値が不安定になるメタスタビリティが発生しても、しばらくすると flip-flop の保持値は 0

か1に収束する。そのため、受信側の flop-flop を2段にすることで安定したデータを取ることができるメカニズムとなる。同時に送信側の設計論理では受信側クロック換算で2サイクル分はデータが安定していることを保証しなくてはならない。

非同期データ転送における検証項目は以下の3点となる。

- ① 適切なシンクロナイザが挿入されているかどうか
- ② シンクロナイザに固有な転送プロトコルが守られているかどうか（例えば受信側のクロック2サイクルの間、送信側の出力信号が一定の値を保持しているかの確認）
- ③ メタスタビリティが発生した際にも正しくデータが転送されているかどうか

開発現場においては①は CDC 検証ツールの構造解析によって確認することが多い。そして②③については、この動作に該当するアサーション記述を行い、フォーマル検証技術によってどのようなタイミングで信号が変化しても誤動作が起きないかを確認する手法や、シミュレーションでランダムに信号を変化させても誤動作が起きないかを確認する手法が実施されている。CDC 検証ツールによってはプロトコル検証のアサーションを自動生成したり、メタスタビリティ状態を再現したりするモデルを自動挿入するものもある。

5.2 非同期リセット機能の検証

近年の大規模 SoC においては、USB デバイスのように動作中に一部モジュールのホットプラグインを実現するためなどに、チップの中の一部のモジュールだけをリセットする機能が実装されている。そして、同一のリセット信号で制御される範囲のことをリセットドメインと呼ぶ（図 29）。リセットドメインをまたぐデータ転送においては CDC と同様に、RDC（reset domain crossing）と呼ばれる検証上の課題がある⁽³⁴⁾。RDC においても非同期データ転送 CDC と同様のメタスタビリティが発生する可能性があり、これを回避するためには特別な機構を実装する必要がある。

RDC によるメタスタビリティ問題を回避するには、CDC 同様に RDC 信号に対してシンクロナイザを挿入する対策以外にも、リセットの発生タイミングを調整したり、クロックやデータを分離したりする設計上の対策もある。

リセットのタイミング調整（リセット・オーダリング）ではデータ送受信回路の送信側と受信側とで独立にリセットを掛ける場合において、①最初に受信側のリセット信号を上げ、②送信側のリセットを上げ、③送信側のリセット信号を下げ、④送信側の回路が安定したタイミングで受信側のリセットを下げるという順序を守ることによって RDC 信号が不安定な状態を受信側に伝搬させることを防ぐことができる（図 30）。

また、クロックとデータを分離するアイソレーションの例としては図 31 の左図に示すように、クロックゲーティングにより、送信側がリセットを掛けて不安定になっている間、Isolation_Enable 信号を制御して受信側 flop-flop のクロック

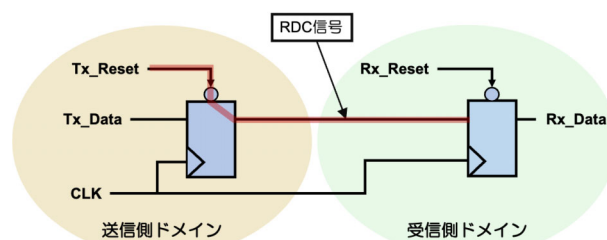


図 29 リセットドメイン・クロッシング

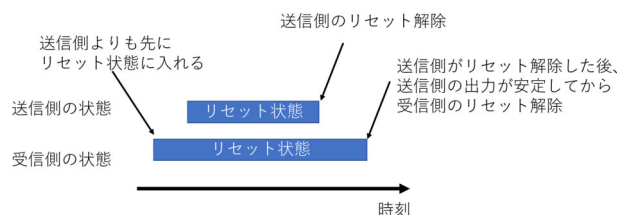


図 30 RDC におけるリセット・オーダリング

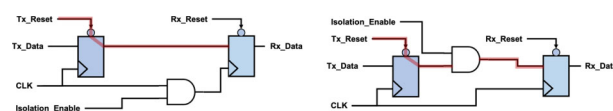


図 31 クロックやデータのアイソレーションによる RDC 対策

を停止する手法である。また、同様に送信側がリセット状態で不安定な間、クロックではなくデータ信号の伝搬を止める手法もある（図 31 右図）。

CDC と同様に、このような設計上の対策は Lint チェックによる構造解析並びに、フォーマル検証やシミュレーション検証によって検証する必要がある。なお、RDC については動作確認を行うためのアサーションを自動的に生成する技術もある。

5.3 省電力機能の検証

近年の半導体チップの大規模化に伴い、その消費電力はサーバでも組み込み機器でも大きな課題となっている。電力削減のためには一部モジュールのクロック信号供給を停止したり、電源供給を停止したりする手法が用いられている。この省電力論理は、バグによってクロックや電源供給を全く停止しなかった場合は、設計論理の動作自体に影響はないが、消費電力が想定よりも大きくなってしまふ。一方、バグによって仕様とは異なるタイミングで一部モジュールのクロックや電源供給を止めてしまった場合には異常動作を引き起こしてしまうことがある。

まず、バグによって全く停止しないケースは、クロックや電源を停止させる論理が期待どおりに動作しているかのカバレッジ記述によって検証を行うことができる。一方、動作途中に一部モジュールの電源を停止しても誤動作をしないかの

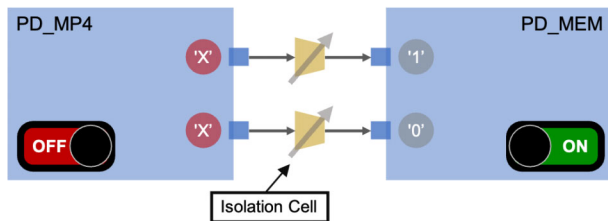


図 32 二つの異なるパワードメインと中間の分離用アイソレーションセル

検証については、従来の機能検証環境では実施できない、省電力機能検証用の専用の機構が必要となる⁽³⁵⁾。以下ではこの省電力機構の中の代表的な三つの事例（アイソレーションセル、リテンションセル、レベルシフタ）の検証技術の紹介を行う。

例えばチップ自体は動作しているが、スリープモードでは使用しない機能モジュールがあり、そのモジュールの電源供給を停止して消費電力を抑制する事例を取り上げる。ここで問題となるのが、電源を落とすという振る舞いは VHDL や Verilog HDL などの設計記述言語では表現できないということである。設計記述言語上では“1”や“0”は存在するが、それは論理的な値であり、電圧や電荷の量を表現はしていない。そこで、電源の振る舞いに関する記述を行うための拡張として UPF (unified power format)⁽³⁶⁾ や CPF (common power format) が提案されている。UPF ではパワーインテントと呼ばれる消費電力対策の意図を表現することができ、検証時には設計論理に付加されて検証対象 DUV の一部となる。

図 32 は二つの異なる電源が供給されている領域（パワードメイン）の例である。この例では左側のパワードメイン PD_MP4 は電源が遮断されており、右側のパワードメイン PD_MEM には電源が供給されている。このときにオフ状態のドメインから不安定な信号が伝搬してきても、通常動作している PD_MEM の動作に影響が出ないようにするためには、中間に信号を分離するための「アイソレーションセル」が必要になる。このアイソレーションセルは、一方のパワードメインの電源が切断されている際に、他方に不安定な信号が伝搬しないように信号を遮断する素子である。適切なアイソレーションセルが挿入されているかどうかは、Lint ツールによる構造解析で検証することができる。また、電源オフ、オンの過渡状態においても不安定にならないかどうかは CDC と同様の検証技術が適用できる。

二つめの事例はリテンションセルである。近年の SoC では電源切断前の状態を保持しておいて、電源復帰後に元の動作に戻るようにする回路も存在する。この電源切断中に値を保持し続ける素子をリテンションセルという。このリテンションセルに値を保持し続けるためには、電源切断中であってもリテンションセルにだけは電源が供給できていなければならない。このリテンションセルも UPF によって記述することができ、そして、これが電源切断中であっても値の保持

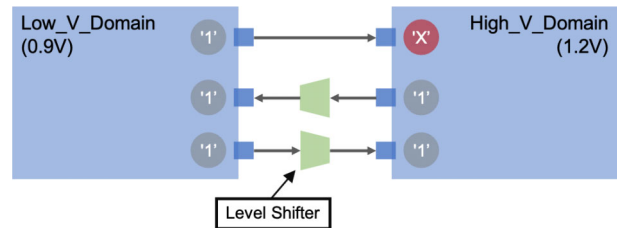


図 33 複数の電圧ドメインの設計とレベルシフタ

ができることは Lint ツールによって検証される。また、こちらの例でも過渡状態は CDC と同様の検証技術によって確認ができる。

三つめの事例はレベルシフタである。近年の SoC ではモジュールによって動作電圧が異なる場合がある。図 33 は 0.9 V と 1.2 V の二つのドメインが接続されるマルチボルトドメインの設計の事例である。それぞれのモジュールの動作電圧が異なる（すなわち、論理的に“1”になる際に必要な電荷の量が異なる）ため、1.2 V のモジュールから 0.9 V のモジュールへのデータ転送ではレベルシフタによる電圧レベル低下、0.9 V から 1.2 V へのデータ転送ではレベルシフタによる電圧レベル上昇が必要となる。ここで、レベルシフタを挿入せずに直接信号線を接続してしまうと、動作が不安定になってしまう。この動作も UPF を使用することで検証を行うことができる。これも前の例二つと同様にレベルシフタが適切に配置されているかを確認する Lint チェックと、どのような状態でもデータ転送で異常動作が発生しないことを確認するフォーマル検証とシミュレーション検証となる。

5.4 セキュリティ要件の検証

今日のコンピューティングシステムや半導体は重要な社会基盤にも導入されるようになってきており、個人情報なども扱う必要から、セキュリティが大きな関心事となってきている。従来、悪意ある攻撃の対象はアプリケーションソフトウェアのレベルであったが、近年ではアプリケーションからミドルウェア、OS、ファームウェアへと、いわゆるセキュリティの「信頼の起点」—Root of Trust⁽³⁷⁾へと遡るように攻撃対象が変わってきており、現在はハードウェアにおけるセキュリティが大きな課題となっている。ハードウェアのセキュリティには、サイドチャネル攻撃（外部からの物理的観測によるデータ不正入手）、サプライチェーンセキュリティ（他社の製造過程での論理不正改ざん）、IP セキュリティ（他社製 IP での不正論理実装）など、様々な攻撃の形態がある。

セキュリティも機能検証の重要な課題の一つとなっている。例えば設計論理の内部に暗号鍵を保持している場合、その鍵の内容が外部からのアクセスによって盗まれないことを検証する必要がある。

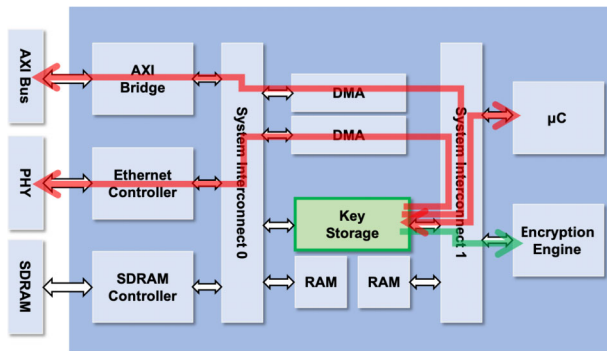


図 34 チップ外部からの暗号鍵へのアクセス経路（赤が不正な経路、緑が正当な経路）

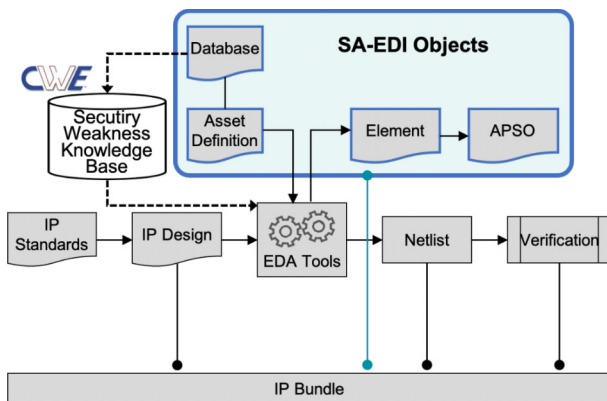


図 35 IP-SA が策定する IP 開発・提供者のワークフロー⁽³⁹⁾

図 34 で示すチップは内部バスによってメモリ、I/O デバイス、マイクロコントローラ（CPU）とつながっている。その中の緑の四角で示されたモジュールが暗号鍵を保持している Key Storage⁽³⁸⁾である。この暗号鍵は Encryption Engine によって秘匿すべきデータの暗号化・復号化に利用される。この中で緑色の Key Storage と Encryption Engine を結ぶ経路は問題ないアクセスであるが、それ以外の赤い線で示された経路は、暗号鍵が通ってはならないことを示す。この暗号鍵が想定外の経路を通らないことの検証に向いているのはフォーマル検証である。

セキュリティ機能を専門に扱うフォーマル検証ツールでは正当な経路と不正な経路とを規定のフォーマットで記述するだけで、不正な経路を経由したアクセスが発生し得ないことを証明してくれる。若しくは不正な経路を経由したアクセス手順が存在する場合には、どのような条件でアクセスできてしまうかの事例（反例）を示してくれる。

第三者から提供される PCIe や USB などの設計 IP についてもセキュリティ上の懸念が拭えない。このような他社から提供される、自分自身が記述していないコードに含まれる脆弱性については、これまでのところ適切な対策方法がない。そのため、現在、Accellera の IP-SA（IP Security Assurance）ワーキンググループで対策技術標準化の議論が進んでいる。IP-SA では、IP 開発・提供者と IP ユーザそれぞれのワークフローを定義している⁽³⁹⁾。

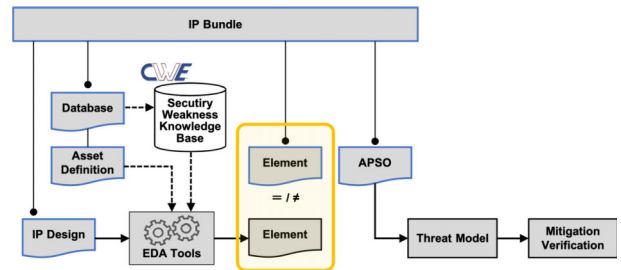


図 36 IP-SA が策定する IP ユーザのワークフロー⁽³⁹⁾

図 35 が IP-SA が定める、IP 開発・提供者がセキュリティ脆弱性に関する情報を含めて設計 IP をユーザに提供するためのワークフローである。青で囲まれた部分は SA-EDI（security annotation for electronic design integration）オブジェクトと呼ばれるもので、最終的に提供する IP Bundle と呼ばれるユーザへの提供物に含まれる対象である。多くの標準規格の IP に対する攻撃の詳細は、既知の脆弱性情報として CWE（common weakness enumeration）⁽⁴⁰⁾のデータベースに登録されている。これは米国 MITRE 社が米国政府の委託を受けて保守しているものである。もともとはミドルウェアなどソフトウェアの脆弱性が対象だったが、近年ではハードウェア IP の脆弱性も対象としている。この脆弱性の情報に照らし合わせ、IP 開発・提供者が「Asset Definition」として守るべきアセット、情報を定義する。更にそのアセット、情報へのアクセス経路の全て（例えばテスト・デバッグ用の入出力ポートなど）を網羅的にフォーマル検証ツールなどを用いて抽出し、「Element」として列挙する。そしてこれらの潜在的な脆弱性のある要素は「APSO」（attack points security objective）と呼ばれ、C.I.A.（confidentiality（秘匿性）/integrity（完全性）/availability（可用性））の三つの基準によって評価される。Confidentiality（秘匿性）は対象データの重要度で、流出した場合の被害の大きさによって評価、分類される。Integrity（完全性）では守るべき情報がデータ処理の過程で漏洩したり、改ざんされたりしないことの保証、そして availability（可用性）は、許可されたプロセスが秘密データへのアクセスを正当な手段で要求したときに確実にアクセスできる特性を示す。

次に、このような SA-EDI Object を含む IP Bundle を受け取った IP ユーザが実施すべきワークフローを図 36 に示す。基本的には IP Bundle として提供された「Asset Definition」や最新の CWE データベース、IP デザインに基づいて、IP ユーザ自身がフォーマル検証ツールなどによって、秘匿情報へのアクセス経路である「Element」を再生成し、その結果と IP 開発・提供者から示された「Element」との等価性を検証する。また APSO で示された C.I.A. に照らし合わせて、それを攻撃するための既知の手法を取り込んだ「Threat Model」を作成し、既知の脆弱性が回避されているかどうかを検証することで、既知の脆弱性を利用した秘匿情報への不正アクセスが不可能なことの検証を行う。

このワークフローは標準化に向け、現在も IP-SA ワーキ

ンググループの活動が継続中であるため、今後の方向性についても注目したい。

5.5 機能安全要件の検証

半導体の機能安全とは、自動車、航空宇宙、医療、鉄道、産業機械など様々な領域に取り入れられた機器が故障や論理バグによって誤動作しても、人間、財産、環境などに及ぼす被害をできる限り低減するための機構である。この機構には、自動車、医療など産業分野によって異なる国際標準があり、それぞれの製品はその対象分野で定められた機能安全標準に準拠した設計、検証を行う必要がある。一般的な機能安全の標準では、設計・検証プロセスのドキュメント化、要求仕様から設計、検証項目に落とし込む際の各仕様項目のトレーサビリティの確保（要求仕様の各項目が設計論理に実装されているか、その機能が検証されているかを確認すること）⁽⁴¹⁾などが含まれる。

自動車の場合は車載エレクトロニクス製品のハードウェア、ソフトウェアを含むシステム機能安全標準規格としてISO 26262が定められ、車載半導体のサプライヤは全てこの基準に則った設計検証を行っている⁽⁴²⁾。この基準の中で機能検証の分野で取り扱われるのが、故障によるフェイルセーフ動作の確認である。ISO 26262では装置の不具合をシステムティック故障とランダム故障とに分けている。システムティック故障とは仕様の誤り、設計や検証のバグ、製造の欠陥などに起因する故障のことである。

システムティック故障のうち仕様の誤り、設計バグ、検証バグ（検証環境のバグによる設計論理のバグ見落とし）は、本稿で解説してきた様々な検証技術によって正当性が保証される。なお、製造欠陥は半導体テストという別の技術になるが本稿では詳細は割愛する。

一方、ランダム故障とは予測不可能な故障である。その原因としては半導体の経年劣化や摩耗による誤動作（ハードエラー）と、宇宙空間から飛来した中性子線や半導体パッケージ内に不純物として含まれるトリウムなどの線源から発生する α 線がもつ強力なエネルギーによって、半導体回路内の信号の値が0から1や、1から0に変化してしまう誤動作（ソフトエラー）などがある。なお、ソフトエラーは一時的なもので、確率的にどのチップにも発生し得るが、恒常的な故障ではない。このようなランダム故障は防ぐことはできないものの、このような故障が発生することを事前に想定し、危険な状況に陥らない設計がなされていることを、検証する必要がある。

ランダム故障が発生した場合には、その故障を検知し、安全な状態へと移行する手段が必要とされる。一般的に採用されている設計手法は、機能の多重化である。自動車では安全が要求される機能部分を二重化して（dual lock step）並行動作させ、その両者に差分がある場合には故障として検出し、ユーザに知らせる、自動的に止めるといった安全な状態へと移行できることが求められる（図37）。宇宙関係では物理的

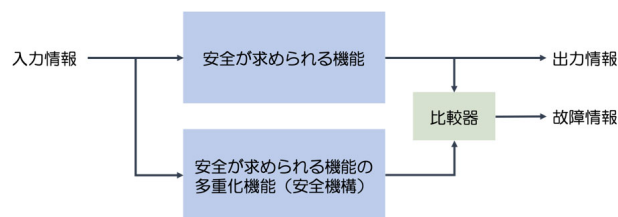


図 37 Dual Lock Step 回路構成

に距離を離れた三つのレジスタによる三重化（triplet modular redundancy）⁽⁴³⁾と多数決回路を導入している。例えば高エネルギーの宇宙放射線によって回路内の一部の記憶回路の値が反転、破壊されたとしても、物理的に離れたレジスタ間での多数決によるデータ訂正によって機能を正しく継続させることができる。

このような設計手法に対して求められる検証は、設計論理にランダムに故障を注入し、それが適切なサイクル時間内に検出できる、そして訂正若しくは期待される回避動作が取られるかどうかを検証する。しかし設計の大規模化、複雑化に伴って、注入すべき故障リストは膨大になり、全てに対して故障のシミュレーションを実施することは現実的ではない。そこでフォーマル検証の技術であるCOI（cone of influence, ある状態から時間的に遡れる状態の集合）⁽⁴⁴⁾の解析を行うことで、①重複した故障ポイントの削除、②外部出力に影響を与えない故障ポイントの除外、③独立した故障ポイントの同時検証など、故障検証の最適化を行う手法がある。

6. 将来に向けた更なる取り組み

半導体機能検証においては、これまでに述べたように機能確認の網羅性を上げるという観点と、生産性を上げるという検証する観点以外にも様々な課題が複雑に絡まって存在している。更に、この課題は半導体設計論理の大規模複雑化に応じて指数関数的に難易度を増加させている。そのため、機能検証の生産性もこの複雑さの増加に合わせ生産性を継続的に向上させる必要がある。そのためのヒントとして学べるのが、ソフトウェアの開発・検証手法である。

図38⁽⁴⁵⁾に示すように、一般的にはハードウェアの設計や機能検証技術の革新は、ソフトウェアのそれに比べると10年から20年ほど遅れて導入、展開されることが知られている。例えばCI（continuous integration）⁽⁴⁶⁾であればオープンソースのCI環境であるJenkins⁽⁴⁷⁾などは既に広く採用されている。そのような環境では例えば設計初期段階からLintチェックや自動フォーマル検証、CDCの構造解析などが夜中に自動的に、更に週末にはより包括的な検証項目が自動的に実行される。更にテストシナリオ走行によって得られる検証網羅性確認のためのカバレッジデータも全て自動で統合され、月曜日の朝には前週的设计変更やテストシナリオ強化の結果が誰でもすぐに参照できるようになっている。このCI統合環境はアジャイル開発⁽⁴⁸⁾やDevOps開発⁽⁴⁹⁾に移行する

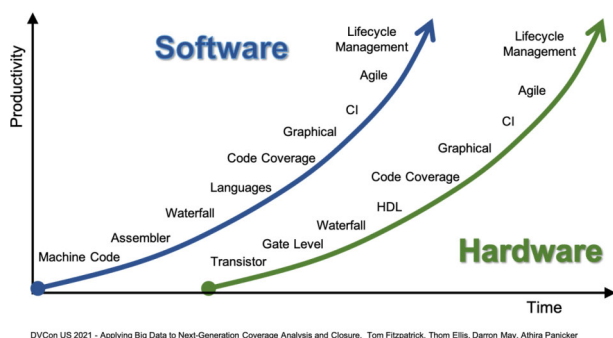


図 38 ソフトウェアとハードウェアの開発，検証技術の革新⁽⁴⁵⁾

上では必須となる技術である。

また，ソフトウェア開発の現場で近年導入されてきているアジャイル開発は，要件定義，設計，実装，検証，リリースといった開発工程が，機能単位でスプリントと呼ばれる短期間のサイクルで行われ，これが数多く繰り返されることである。ウォーターフォール型では最終的に製品として使えるのは開発終了後となるが，アジャイル開発では毎週，毎月といった短期間で，その時点で実装されている機能については製品としても使えるレベルになっているという違いがある。アジャイル開発手法はソフトウェア開発の現場では 20 年以上の実績があり，要件変更への対応，顧客とのコミュニケーションの改善，開発生産性の向上，設計論理品質や開発スケジュールの予測可能性を高めることに成功してきている。ハードウェア開発の現場におけるアジャイル開発手法導入は，ソフトウェアの実績に比べると少数であるが，採用が始まっていることは事実である。大手 IP プロバイダにおけるアジャイルや DevOps の成功事例も，DVCOn などで開催され始めてきている⁽⁵⁰⁾。

現行のソフトウェア開発のように，開発プロセスの全てがアジャイル手法に移行していなくても，そのメリットが出せる部分から徐々にアジャイル手法の採用は進めることは可能である。今後もアジャイル手法，DevOps，ライフサイクル管理⁽⁵¹⁾など，ソフトウェア開発現場での実践を手本にハードウェア開発現場でも新たな手法の導入を模索していくことは重要である。

7. ま と め

本稿では大規模化，複雑化する半導体の機能検証技術の二つの課題，検証網羅性の向上と検証生産性の向上を挙げ，網羅性向上に対してはアサーションベース検証，フォーマル検証，制約付きランダム検証という三つの技術を紹介した。次いで，生産性向上に対しては検証環境とテストシナリオを，次機種の開発時に再利用できるようにする検証メソッドロジ UVM (Universal Verification Methodology) 並びに，同一機種の異なる検証フェーズ (シミュレーション，FPGA プロトタイプ，試作機・実機) 間で再利用できるようにする技術である PSS (Portable Test and Stimulus Standard) につい

て述べた。

また，近年新たに重要性が増している新たな検証対象項目である非同期データ転送，非同期リセット，省電力機能の検証に向けて Lint ツールによる構造解析，フォーマル検証やシミュレーション検証による過渡状態の検証手法の適用，そしてセキュリティや機能安全の保証に向けた様々な取り組みについても紹介した。更に，ハードウェア開発手法に先行しているソフトウェア開発手法についても少し触れた。

半導体設計開発において Moore 則の終焉に伴う性能向上ペースの鈍化が始まって久しいが，半導体チップ内のトランジスタ数は現在でも指数関数的に伸びており，今後も半導体の三次元実装技術によって引き続き伸び続けることが予測される。そのため，設計論理の大規模複雑化に合わせて，機能検証技術の網羅性・生産性向上の取り組みは継続して行われる必要がある。本稿が，様々な読者が半導体ハードウェア機能検証の課題や業界の動向を理解し，関心をもって接して頂く一助になれば誠に幸いである。

文 献

- (1) R. Urquhart, "Scaling is Failing," CodaSIP Whitepaper, 2022.
- (2) Design Automation Standards Committee, "IEEE Standard for VHDL Language Reference Manual," IEEE Std 1076-2019, Dec. 2019, doi : 10.1109/IEEESTD.2019.8938196.
- (3) Design Automation Standards Committee, "IEEE Standard for Verilog Hardware Description Language," IEEE Std 1364-2005 (Revision of IEEE Std 1364-2001), April 2006, doi : 10.1109/IEEESTD.2006.99495.
- (4) J.H. Jiang and S. Devadas, "Logic synthesis in a nutshell," in Electronic Design Automation, Elsevier, pp. 299-404, 2009.
- (5) Y. Wang and R. Nouta, "System design methodologies-High level synthesis and a VHDL implementation of a practical scheme for UWB communication," Master's thesis, Delft University of Technology, 2004.
- (6) D. Hansson, "Continuous Linting with automatic debug," 2014 15th International Microprocessor Test and Verification Workshop, pp. 70-72, 2014, doi : 10.1109/MTV.2014.25.
- (7) ARM Ltd., "ARM AMBA specification (rev 2.0)," ARM IHI 0011A, 1999.
- (8) H.D. Foster, "Why the design productivity gap never happened," 2013 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), pp. 581-584, 2013.
- (9) A.B. Mehta, "ASIC/SoC Functional Design Verification," Springer, 2017.
- (10) B. Wile, J. Goss, and W. Roesner, Comprehensive Functional Verification : The Complete Industry Cycle, Morgan Kaufmann Publishers, 2005.
- (11) M. Gunes, M.A. Thornton, F. Kocan, and S.A. Szygenda, "A survey and comparison of digital logic simulators," 48th Midwest Symposium on Circuits and Systems, vol. 1, pp. 744-749, 2005.
- (12) A.B. Mehta, "Functional coverage," in SystemVerilog Assertions and Functional Coverage, pp. 313-318, Springer, 2014.
- (13) Design Automation Standards Committee, "IEEE Standard for Property Specification Language (PSL)," IEEE Std 1850-2010 (Revision of IEEE Std 1850-2005), April 2010.
- (14) "IEEE Standard for SystemVerilog—Unified Hardware Design, Specification, and Verification Language," IEEE Std 1800-2017 (Revision of IEEE Std 1800-2012), Feb. 2018.
- (15) P. Yeung, "Five hot spots for assertion-based verification," DVCOn US, 2005.
- (16) P. Bjesse, "What is formal verification?," SIGDA Newsletter.

- vol. 35, issue. 24, 2005.
- (17) C. Blundell, D. Giannakopoulou, and C.S. Păsăreanu, "Assume-guarantee testing," SIGSOFT Softw. Eng. Notes, vol. 31, issue. 2, 2005.
 - (18) P.K. Nalla, R.K. Gajavelly, J. Baumgartner, H. Mony, R. Kanzelman, and A. Ivrii, "The art of semi-formal bug hunting," 2016 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), pp. 1-8, 2016.
 - (19) M. Chen, X. Qin, H.-M. Koo, and P. Mishra, System-Level Validation : High-Level Modeling and Directed Test Generation Techniques, Springer Science & Business Media, 2012.
 - (20) J. Yuan, K. Shultz, C. Pixley, H. Miller, and A. Aziz, "Modeling design constraints and biasing in simulation using BDDs," 1999 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, Dig. Tech. Papers (Cat. no. 99CH37051), 1999.
 - (21) Accellera Systems Initiative, <https://www.accellera.org/>.
 - (22) SPIRIT Consortium, "IP-XACT v1.4 : A specification for XML meta-data and tool interfaces," www.spiritconsortium.org, 2008.
 - (23) "IEEE Standard for Standard SystemC Language Reference Manual," IEEE Std 1666-2011 (Revision of IEEE Std 1666-2005), 2012.
 - (24) S. Rosenberg and K. Meade, A Practical Guide to Adopting the Universal Verification Methodology (UVM), 2nd ed., Cadence Design Systems, 2013.
 - (25) Accellera Systems Initiative, "Portable Test and Stimulus Standard, Version 1.0," http://www.accellera.org/images/downloads/standards/pss/Portable_Test_Stimulus_Standard_v1.0.pdf, June 2018.
 - (26) Sasan Iman and Sunita Joshi, "e Reuse Methodology," in The e Hardware Verification Language. pp. 267-278, Springer, 2004.
 - (27) J. Bergeron, E. Cerny, A. Hunter, and A. Nightingale, Verification Methodology Manual for SystemVerilog, Springer, 2006.
 - (28) A. Rose, T. Fitzpatrick, D. Rich, and H. Foster, Advanced Verification Methodology Cookbook, Mentor Graphics Corporation, 2008.
 - (29) M. Peryer, "Celebrating 10 Years of UVM," Verification Academy, <https://verificationacademy.com/verification-horizons/march-2021-volume-17-issue-1/celebrating-10-years-of-the-uvm>.
 - (30) H.D. Foster, "2022 Wilson Research Group, functional verification study," 2022, <https://blogs.sw.siemens.com/verificationhorizons/2022/10/10/prologue-the-2022-wilson-research-group-functional-verification-study/>
 - (31) 吉川隆英, 松井宣幸, 丸山大輔, 福永尚美, 大嶋修, 梅松三三雄, "スーパーコンピュータ「富岳」の品質保証技術," 信学FR誌, vol. 15, no. 3, pp. 168-180, 2022.
 - (32) Tom Fitzpatrick, "Portable stimulus : What's coming in 1.1 and what it means for you," DVCon US, 2022.
 - (33) Cadence Design Systems, "Clock domain crossing : Closing the loop on clock domain functional implementation problems," Technical Paper, 2005.
 - (34) I. Ahmed, K. Nounh, and A. Abbas, "Multiple reset domains verification using assertion based verification," 2017 IFIP/IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), pp. 1-6, 2017.
 - (35) M. Bhargava and A. Kumar, "A new approach to low-power verification : Power aware apps," Siemens Verification Academy Technical Paper, 2018.
 - (36) "IEEE Standard for Design and Verification of Low-Power, Energy-Aware Electronic Systems," IEEE Std 1801-2018, March 2019, doi : 10.1109/IEEESTD.2019.8686430.
 - (37) W.D. Casper and S.M. Papa, "Root of Trust," in Encyclopedia of Cryptography and Security, pp. 1057-1060, Springer, 2011.
 - (38) R. Gallo, H. Kawakami, and R. Dahab, "Case study : On the security of key storage on PCs," 2013 12th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, pp. 1645-1651, 2013.
 - (39) Accellera IP-SA Working Group, "Security Annotation for Electronics Design Integration Standard v1.0," 2021, https://www.accellera.org/images/downloads/standards/Accellera_SA-EDI_Standard_v10.pdf.
 - (40) Mitre, "Common weakness enumeration—A community-developed list of software & hardware weakness types," <https://cwe.mitre.org/>.
 - (41) S. Maro, A. Anjorin, R. Wohlrab, and J.-P. Steghöfer, "Traceability maintenance : Factors and guidelines," 2016 31st IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE), pp. 414-425, 2016.
 - (42) "ISO 26262 : Road Vehicles—Functional Safety—," <https://www.iso.org/home.html>, 2011.
 - (43) F.L. Kastensmidt, L. Sterpone, L. Carro, and M.S. Reorda, "On the optimal design of triple modular redundancy logic for SRAM-based FPGAs," Design, Automation and Test in Europe, vol. 2, pp. 1290-1295, 2005.
 - (44) S. Elmansori, "Cone of influence and constants propagation reduction techniques for MDG model checker," 2013 World Congress on Computer and Information Technology (WCCIT), pp. 1-6, 2013.
 - (45) T. Fitzpatrick, T. Ellis, D. May, and A. Panicker, "Applying big data to next-generation coverage analysis and closure," DVCon US, 2021.
 - (46) P. Duvall, S. Matyas, and A. Glover, Continuous Integration : Improving Software Quality and Reducing Risk, 1st ed., Addison-Wesley Professional, 2007.
 - (47) Jenkins, <https://www.jenkins.io>
 - (48) R.C. Martin, Agile Software Development : Principles, Patterns, and Practices, Prentice Hall, USA, 2003.
 - (49) M. Httermann, DevOps for Developers, 1st. ed., Apress, USA, 2012.
 - (50) V. Mitchell, "The benefits of hardware DevOps," DVCon Europe 2020 Keynote, 2020.
 - (51) T. Kohlborn, A. Korthaus, and M. Rosemann, "Business and software service lifecycle management," 2009 IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference, pp. 87-96, 2009.
- (R 研究会提案, 2022 年 12 月 2 日受付,
2023 年 1 月 4 日再受付)



三橋明城男

半導体設計および組込みソフトウェアの開発を経て、1989 年からメンター・グラフィックス・ジャパン(株)に勤務。機能検証のエンジニアリングマネージャーやテクニカルマーケティングディレクターを務める。2016 年に EE Tech Focus 合同会社を設立し、エレクトロニクス業界でコンサルティング業務を展開している。共著に丸善出版の『SystemVerilog アサーション・ハンドブック』がある。



吉川隆英 (正員)

2002 年 3 月東京大学工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年 4 月(株)富士通研究所入社。Java JIT コンパイラに関わる研究及び「京」コンピュータの開発(検証・テスト・量産)を経て 2015 年 4 月より富士通(株)に異動し、スーパーコンピュータ「富岳」開発に従事。現在、同社先端コンピューティングPJでコンピュータシステムに関わる研究に携わる。

自然言語処理×教育における説明能力 —説明できるライティング評価技術への新しい展開—

Frontiers in Explainable Automated Writing Evaluation

乾健太郎 Kentaro INUI^{1, 2, a)}

石井雄隆 Yutaka ISHII^{3, 2, b)}

松林優一郎 Yuichiro MATSUBAYASHI^{1, 2, c)}

井之上直也 Naoya INOUE^{4, 2, d)}

内藤昭一 Shoichi NAITO^{5, 1, e)}

磯部順子 Yoriko ISOBE^{2, f)}

舟山弘晃 Hiroaki FUNAYAMA^{1, g)}

菊地正弥 Seiya KIKUCHI^{1, h)}

アブストラクト 自らの判断を説明できる能力は自然言語処理システムに期待される重要な要件である。説明はコミュニケーションであるから、説明できる能力についても、説明の目的や受け手との共通基盤化といったコミュニケーションの概念とリンクさせて研究することが望ましい。ライティング評価はそのような研究を進める格好の応用領域である。ライティング評価は、教育シーンにおいて学習者が産出するテキスト（記述式答案や論述文など）の質を評価・診断し、学習者にフィードバックすることによって学習を支援するタスク群を指す。教育目的の評価では説明は本質的に重要であり、したがってそこには説明の目的や手段など、教育学的な研究や実践の蓄積がある。ライティング評価ではそうした蓄積とリンクさせながら「説明できる自然言語処理システム」の研究を進めることができる。本稿では、ライティング評価における説明に焦点を当て、どのような評価タスクにどのような説明方法が考えられるか、どのような技術的実現手段が考えられるか、を論じる。近年の研究動向を概観しながら、内容選択、言語産出各レイヤの評価における説明生成の可能性を論じ、研究者のこの領域への参入を呼びかけたい。

キーワード 自然言語処理、ライティング自動評価、説明能力

Abstract Explainability is a crucial component of natural language processing (NLP) systems. Explanation is communication, and research on explainability is expected to address notions such as communicative goals and common grounding. Automated Writing Evaluation (AWE) is an ideal field to contribute to such research. AWE refers to NLP tasks designed to support human learners by evaluating the quality of text produced in educational contexts, such as written answers to questions and argumentative essays, and providing constructive feedback. Since explanations are vital in educational assessment, pedagogical literature is rich with insights that can facilitate research on explainability in AWE systems. In this paper, what style of explanations are pedagogically suitable and technologically feasible at each layer of language production, ranging from content planning to surface realization, is explored and open research issues are identified to encourage researchers to enter this emerging field.

Key words Natural language processing, Automated writing evaluation, Explainability

1. はじめに

人工知能の社会応用が進むにともない、自らの予測・判断を説明できる能力（説明能力；explainability）をもつ人工知能システムの構築に対する期待が社会的に高まっており、説明能力をもつ人工知能（explainable AI；XAI）に関する研究

に注目が集まっている。状況は自然言語処理（natural language processing；NLP）でも同様で、幅広い領域で説明能力への関心が高まっている。

説明という営みは、説明をする側と説明を受ける側の間のコミュニケーションと捉えることができる。したがって、説明能力の研究は「説明のコミュニケーション」の目的（どのような知識・能力をもった相手に何のために説明するか）に照らしてどのような説明を提供すべきかの理解に基づいて進められることが望ましい。どのような相手にどのような説明を提供すべきかは AI/NLP システムの応用領域によって大きく異なると予想されるので、説明能力の研究ではまずは具体的な応用領域を仮定した上で、求められる説明能力を実現し、想定される説明相手（システムのユーザ）を入れた説明コミュニケーションの実証実験を行う、といったサイクルを積み重ねる必要があると考えられる。

本稿では、そうした「説明できる自然言語処理（explainable NLP；ExNLP）」の研究を進めるための格好の応用領域の一つとして教育、特に自動ライティング評価を取り上げ、

1 東北大学 (Tohoku University)

2 理化学研究所 (RIKEN)

3 千葉大学 (Chiba University)

4 北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST)

5 株式会社リコー (Ricoh Company, Ltd.)

a) E-mail kentaro.inui@tohoku.ac.jp

b) E-mail yishii@chiba-u.jp

c) E-mail y.m@tohoku.ac.jp

d) E-mail naoya-i@jaist.ac.jp

e) E-mail shohichi.naitoh@jp.ricoh.com

f) E-mail yoriko.isobe@riken.jp

g) E-mail h.funa@dc.tohoku.ac.jp

h) E-mail seiya.kikuchi.t3@dc.tohoku.ac.jp

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス

Fundamentals Review Vol.16 No.4 pp.289-300 2023 年 4 月

©電子情報通信学会 2023

近年の研究動向を概観しながら、我々の研究グループの取り組みを紹介する。

自動ライティング評価 (automated writing evaluation ; AWE) は、教育シーンにおいて学習者が産出するテキスト (記述式答案や論述文など) の質を評価・診断し、学習者にフィードバックすることによって学習を支援する技術である。AWE は少なくとも次の二つの理由から ExNLP の研究にとって魅力的な応用領域になると期待できる。第 1 の理由は社会的需要の大きさである。学習者が書いたものを評価するという骨の折れる作業を技術でサポートできれば、教師の負担を減らし、人間のノイズや潜在的なバイアスを軽減しながら、学習者の学びを支援することができる。第 2 の (より重要な) 理由は教育における説明能力の重要性にある。教育目的の評価では「説明できること」は必要不可欠な要件である。したがって、この応用領域には、説明の目的や手段とその効果に関する専門家 (教育学の研究者や教育事業者、教員など) の研究や実践の蓄積がある。AWE ではそうした蓄積の上に領域の専門家と連携しながら説明能力の研究を進めることができる。説明を AWE につなげることによって、「説明できる AWE (ExAWE)」という実際の応用につながる興味深いフロンティアが出現するのである。

こうした背景から我々の研究グループでは、ExAWE に関する研究をいくつかの方向に展開し、教育に関わる様々な専門家との連携を拓いてきた。本稿では、そうした活動から得られた経験や知見を説明能力に焦点を当てながら紹介する。以下、まず 2 節で上記の背景について少し詳しく述べた後、3 節から 5 節で ExAWE の研究事例として我々の進行中の研究を紹介し、最後に興味深い未解決課題のいくつかを論じる。

2. 背景

2.1 説明できる NLP (ExNLP)

人工知能の社会応用が進むにともない、説明能力をもつ XAI に対する期待が社会的に高まっており、人工知能の様々な領域で XAI の研究が進んできた⁽¹⁾。NLP でも、含意関係認識、機械読解、感情分析などのタスクを中心として、50 個以上の説明付きデータセットが作られ、広く ExNLP の研究が展開されている⁽²⁾。

現在の ExNLP 研究の主な関心は、人工知能システムの予測が主としてまずあり、そこにどのように説明を付けるかという点である。ExNLP の研究は、おおむね二つの軸で整理できる。第 1 の軸は「説明の形態」である。最も単純な説明形態の一つはハイライト型の説明、すなわち NLP システムが入力テキストのどの部分に着目して予測を行ったかを入力テキストに対するハイライトの形で説明するものである⁽³⁾。近年では、グラフなどの構造化情報⁽⁴⁾、自然言語文⁽⁵⁾などの、より抽象的な説明も検討されている。更に、予測に強い

影響を与えた訓練事例による説明⁽⁶⁾、二つの予測を対比させた対比的説明⁽⁷⁾、予測を覆すための入力編集の提示による反実仮想的な説明⁽⁸⁾など、説明の形態そのものに切り込む検討もなされている。

第 2 の軸は「説明生成の方法」である。まず、NLP システムは所与のものとして、そのシステムが出力する予測を事後的に説明しようとする post-hoc 法がある。入力を微小に変化させることによって出力ラベルに対する個々の入力単語の重要度を推定する方法⁽⁹⁾、予測関数を入力について微分することによって入力単語の重要度を見積もる方法⁽⁹⁾など、様々な手法が提案されている。二つめの方向性は、初めから解釈可能なシステムを設計する self-explain 法である。入力の重要箇所を同定するモジュールを明示的に組み込み、そこからパイプライン的に予測を行う方式^{(10),(11)}、予測モデルの隠れ層から言語生成器を用いて説明を生成する方式⁽⁵⁾など、モデルを解釈可能にする様々なアプローチが検討されている。

「説明」とは本来、相手の知識に合わせて、目的をもって何かを教えることである。しかし、現状の ExNLP の研究は、そのほとんどが実応用を想定した説明の設計をしていないのが実情である。このような現実に対して、AWE は、ExNLP の研究を実応用と深く結びつけるためのよい研究課題になると考えられる。なぜなら、第 1 に、AWE の最終目標はエンドユーザである学習者の成長であり、これが明確な説明の設計指針を与えてくれるからである。ExNLP の研究者は、学習者のどのような弱点を説明で指摘すべきか、学習効果の高い説明の仕方は何か、といった明確な基準から説明の仕様を検討できる。更に幸運なことに、教育学の分野には、学習者に対するフィードバックに関する膨大な蓄積があり、こうしたドメインの専門家と協力することで、説明の仕様を磨くことができる。第 2 に、AWE は後述するように、記述式答案自動採点、英作文診断、論述診断といった異なるタイプの説明を要求するタスクを含んでおり、そこには多様な興味深い技術的チャレンジを見いだすことができる。採点根拠となる句のハイライトから、要検討文のラベリング、自然言語によるフィードバックに至るまで、様々な技術的工夫が活きるフィールドが広がっている。

2.2 自動ライティング評価 (AWE)

自動ライティング評価の主要なタスクは大きくは図 1 の三つに分類される。これらのタスクは、内容や論理といった「what-to-say」レベルの評価から、文法や言い回しのような「how-to-say」レベルの評価まで多岐にわたる。評価の対象となる入力も文から段落やもう少し長い文章まで幅がある。

AWE で最もよく研究されているタスクは、文法誤り訂正 (grammatical error correction ; GEC) である。学習者の誤りを自動で検出するタスクや学習者の誤りに対する解説文の生成など様々なシェアドタスクが国際会議で実施されており、多くの商用製品も開発されている。

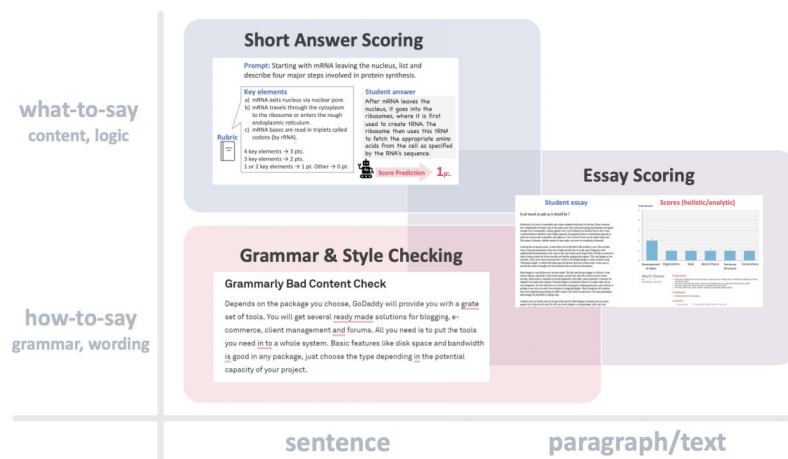


図1 自動ライティング評価 (AWE) タスクの分類

小論文の自動採点 (automated essay scoring) に関する研究も盛んである。このタスクはその名の通り、学習者の小論文を入力として与え、それらを自動的に採点するものである。初期の研究は一つの小論文に一つのスコアを割り当てる全体的な採点 (holistic scoring) を対象とするものが支配的だったが、近年は、文章の構造、スタイル、単語の選択など、複数の評価基準による分析的な採点 (analytic scoring) に関心が移ってきている。このタスクにおいても、実社会で大規模に利用されている商用製品が多数存在する。

記述式答案採点 (short answer scoring; SAS) も AWE でよく研究されているタスクの一つである。プロンプトに対する学習者の回答が与えられた場合、事前に定義されたルーブリックに従って、その回答のスコアを予測するタスクとなっている。文法チェックやエッセイの採点が主に文章の質を評価するのに対して、記述問題の採点は主として学習者の答案の内容を評価する。

AWE は、実世界のアプリケーションに根ざした説明可能な NLP 研究を促進するためのよい研究領域になる。NLP 研究者にとって、この研究領域が重要な理由としては、AWE が NLP にとって重要な技術的課題を課すという点がある。具体例としては、低リソース環境において、学習者からの不正な入力に対してモデルが十分に堅牢でなければならない点などが挙げられる。

説明可能性は教育において非常に重要だが、AWE ではまだ十分に検討されていない。社会における明確な潜在的アプリケーションであるということも重要だが、最も重要なのは、教育学で一緒に働くことができるドメインの専門家があり、そうした専門家との協働である。特に英語教育における自動採点を検討したものとしては文献(12)などが存在する。

2.3 第二言語ライティング研究における「説明」

ライティング評価における「説明」のあり方について教育的な研究が最も精力的に行われているのは第二言語ライ

ティングであろう。第二言語あるいは外国語としてのライティングの教育・学習・評価を研究する第二言語ライティング研究では、教師から学習者へのフィードバックのあり方が多角的に検討されてきた。ライティング・フィードバックの効果については、様々な研究が存在し、その効果の有無の論争^{(13), (14)}やこれまでの研究結果を統合的に分析したメタ分析などが存在する⁽¹⁵⁾。

ライティングにおける訂正的フィードバック (written corrective feedback) は、直接訂正、間接訂正、メタ言語的説明、フィードバックの焦点化、電子フィードバック、再構成など、様々な種類が存在する⁽¹⁶⁾。直接訂正とは、教師が学習者に正しい形式を示すものを指し、間接訂正は、教師は間違いがあることを示すが、訂正は行わないものを指す。メタ言語的説明では、教師は誤りの性質について何らかのメタ言語的な手がかりを示す。例えば、a を an のように明示的に訂正するのではなく、「冠詞の間違い」として、学習者に説明する場合が挙げられる。フィードバックの焦点化は、教師が学習者のエラーの全て (またはほとんど) を訂正しようとするか、一つまたは二つの特定のタイプのエラーを選択して訂正するかを決めることを指す。電子フィードバックは、教師は間違いを指摘し、正しい使用例を示すコーパスへのハイパーリンクを示す。再構成は、学習者が書いたテキスト全体をネイティブスピーカーが手直しし、原文の内容をそのままに、できるだけネイティブに近い表現にする作業である。このようにライティングにおける説明は多様な種類が存在する。

近年ではフィードバックの効果の有無だけでなく、学習者がフィードバックをどのように感じているか⁽¹⁷⁾、フィードバックにどのように関わっているか⁽¹⁸⁾、また学習者に自分が教師から受け取りたいフィードバックを選択させるようなアプローチ⁽¹⁹⁾などについての研究も存在し、ライティング・フィードバックの研究は多様な展開を見せている。

こうした第二言語ライティング研究の知見は、自動ライティング評価における説明をデザインする際の理論的な柱となる。自動ライティング評価におけるフィードバック研究で

は、どのような訂正を行うかという視点だけではなく、システムが生成する誤りを学習者がどのように感じるかという視点も、教育における説明を検討する際には重要となり、商用システムを用いた研究も幾つか存在する。例えば、Koltovskaia は、商用の自動ライティング評価システムのフィードバックが学習者の学びをどの程度サポートするかについて、エンゲージメントという観点から調査を行った⁽²⁰⁾。エンゲージメントとは、学習者が学習にどの程度関与しているかということを示し、学習者のテキストへの反応や作文・回答態度など、様々な要素を含んでいる⁽¹⁸⁾。この研究においては、自動ライティング評価システムのフィードバックに対する学習者への行動、認知、感情の3側面のエンゲージメントを分析した。効果的に自動ライティング評価システムのフィードバックを利用するには、学習者側の言語能力がある程度高い必要があることなどを示唆している。Ranalli も同様に商用自動ライティング評価システムが提案するフィードバックの学習者への影響を調査し、自動ライティング評価システムのフィードバックに対する学習者の信頼度が重要であることなどを明らかにしている⁽²¹⁾。このように学習者が自然言語処理を用いた自動ライティング評価システムを実際に用いた学習を行い、どのように感じたかを実証的に明らかにしていくことが ExAWE においては重要となる。

3. 記述式答案採点の説明能力

記述式答案採点 (SAS) は、問題 (prompt) と採点基準 (rubric) に基づいて学習者の解答に点数を付けるタスクである。SAS では特に内容、つまり学習者が読解、科学、歴史などの特定の教科で何を知っているか、何を学んだか、何ができるかということに焦点を合わせて採点する。スペルミスや文法の間違ひは、求められている特定の情報が答案に含まれている限り許容される場合が多い。図2上側に採点基準の例を示す。採点基準はしばしば採点項目 (key element) と呼ばれる複数の構成要素からなり、各採点項目は答案が得点するためにどのような情報を含むべきかを規定する。答案

採点基準

A	言葉は他者との意思疎通を可能にする媒体となるということが書けている … 6点
B	言語には個別の経験を抽象化する作用があるということが書けている … 3点
C	世界との一体感が失われるということが書けている … 6点

答案

言葉は様々な人とやりとりを行う際の媒体となるが、その一方で言葉は抽象的な記号でもあるので、世界との直接的な関わりを遮断してしまうということ。

は採点項目ごとに評価され、個々の採点項目の評価結果の組み合わせで総合得点が決まる。一般に SAS は、学習者が記述した答案に対し、その得点を推定するような回帰または順序分類問題として定式化される。採点基準は問題に依存するため、問題ごとにモデルを訓練するのが一般的である。

近年、深層学習を用いた SAS モデルの登場により、予測精度が飛躍的に向上し^{(22), (23)}、人間の採点者に匹敵するような精度を示すモデルも登場している⁽²⁴⁾。昨今では、ほかの NLP 分野と同様に、SAS においても Transformer を用いたモデルの開発が盛んに行われている^{(25), (26)}。このように、長らくこの分野における研究の中心的な課題は専らモデルの予測精度の改善であり⁽²⁷⁾、そのモデルの説明能力についてはほとんど研究がないのが現状である。また、この領域ではわずかなデータセットしか研究用に公開されたものが存在しない。代表的なデータセットとして、Kaggle のコンペティションによって導入された ASAP-SAS^(注1)と Semeval-2013 にて導入された SRA データセット⁽²⁸⁾が挙げられる。このようなデータセットの欠乏は、SAS モデルの説明能力をはじめとする多様な研究開発を行う上で大きな妨げとなっている。

これに対し我々は、図2下側に示すように学習者の答案のどの部分が採点基準中の各採点項目に一致するかを判断し、その結果を学習者に返す新しいタスクに取り組んでいる。この例では、学習者の答案の青色、黄色、緑色の部分がそれぞれ採点項目 A, B, C と一致している。このような一致した部分を「根拠箇所」(justification cues) と呼ぶ。根拠箇所は採点に対する説明として働くことが期待できる。採点基準は一般に出題者の出題意図に基づいて明確に規定される。また、答案に対する得点への説明として根拠箇所を色付けして学習者に返す営みも教育シーンではめずらしくない。したがって、ここで考えるような根拠箇所を特定するタスクは教室での学習に自然に受け入れられると期待できる。

この新しいタスクに取り組むために、我々は日本語の SAS データセットを新たに構築した。図2に前掲した答案と採点基準は、この新たに構築したデータセットに含まれる一例である。ここで扱う問題は、文章を読んでその内容を説明するような一般的に見られる読解問題である。例えば、この学習者の答案は、採点項目 A で部分点6点を獲得し、前述したように、その根拠箇所として答案の一部が青色付けされている。各採点項目について答案の根拠箇所と部分点の両方を付与したデータセットを構築したのはこの研究が初めてである。本データセットは NII の情報学研究データレポジトリから学術研究用途に限定して配布されている^(注2)。以下では、このデータセットを使った我々のグループの研究例⁽²⁹⁾を紹介する。

この研究では、SAS の応用という側面から、いくつかの手法を用いて根拠箇所を推定し、その性能を Plausibility と

図2 採点基準および答案例 理研記述問題採点データセットより。

(注1) : <https://www.kaggle.com/c/asap-sas>

(注2) : <https://www.nii.ac.jp/dsc/idr/rdata/RIKEN-SAA/>

Faithfulness の二つの観点から評価した。Plausibility は、ユーザから見たときに出力された根拠箇所がどれくらい妥当であるか表す評価指標である。本研究では、人間の採点者が付与した根拠箇所と推定された根拠箇所との一致率として評価した。Faithfulness は、出力された根拠箇所がモデルの予測の判断の根拠としてどれだけ忠実かを示す指標である。Faithfulness についてはいくつかの評価方法があるが、この研究では Remove Ratio^{(30), (31)}を用いた。

SAS モデルが出力する根拠箇所を利用するユーザとしてまず想定されるのは、対象の答案を提出した学習者本人である。学習者が根拠箇所の情報を問題の理解に活用するには、根拠箇所が採点基準に従った理解しやすい説明になっていることが求められる (Plausibility)。根拠箇所はまた、教育従事者や開発者にとっても有用な情報を提供できる可能性がある。採点モデルが出力する根拠箇所を調べれば、モデルが採点基準に沿った手がかりを学習できているか (点数と疑似的に相関している誤った手がかりを学習していないか)を確認することができる。この場合、根拠箇所がモデルの点数予測に対して忠実な説明になっている (Faithfulness、例えば、疑似相関を学習していればそのことを忠実に説明に反映できる) ことも Plausibility と同様に重要である。このように SAS では、ExNLP 研究で標準的な二つの評価軸 Plausibility と Faithfulness がいずれも現実の必要性に根ざしており、したがって、説明の良さに関する研究を実際の応用に接続しながら展開することができる。

実験では、一般的な SAS モデルに対して、Attention Weight, Input X Gradient, Integrated Gradient, Saliency Map の四つの手法を用いて根拠箇所の推定を行った。その結果を表 1 に示す。詳細は省くが、人間が付与した根拠箇所を点数の情報とともに教師信号として用いるモデル学習 (表の attn, igrad, attn & igrad) を行うことによって、Plausibility と Faithfulness の両方が大幅に改善された。一方で、Plausibility と Faithfulness の両方を同時に最大化するような手法は存在しないことが示唆された。したがって、根拠箇所を参照するユーザの立場に応じて根拠箇所推定手法を使い分けることが重要である。また、表 2 に示すように、根拠箇所を教師あり学習することで、モデルの採点精度も大幅に向上することが分かった。ExAWE の観点から SAS を考えると、こうした説明に関する技術的研究を実際の応用につながる形で進めることができる。

我々の研究を嚆矢として、自然言語によるフィードバックの生成⁽³²⁾や反実仮想的な正答の生成⁽³³⁾、予測の信頼性を表す確信度の活用⁽³⁴⁾など、SAS の文脈でも様々な形態の説明の模索が始まっている。1 節でも述べたように、説明はコミュニケーションである。今後は、説明の受け手である学習者や教育事業者を系に入れたシステム全体の設計にスコープを広げ、コミュニケーションとしての説明に関するユーザ中心の研究を自然言語処理と教育の連携によって展開していくことが重要である。

実際に我々のグループでは、その一歩として、国内教育事

表 1 Attention Weight, Input X Gradient, Integrated Gradient, Saliency Map をそれぞれ用いて根拠箇所を推定したときの Plausibility と Faithfulness

Feature Attribution	Plausibility (Validity) model-gold agreement (↑)				Faithfulness (Fidelity) remove ratio (↑)			
	unsup	attn	igrad	attn& igrad	unsup	attn	igrad	attn& igrad
Attention Weight	0.477	0.793	0.549	0.788	0.226	0.230	0.158	0.163
Input X Gradient	0.462	0.629	0.692	0.724	0.257	0.230	0.177	0.192
Integrated Gradient	0.462	0.558	0.753	0.753	0.196	0.170	0.144	0.140
Saliency Map	0.469	0.642	0.672	0.698	0.297	0.300	0.201	0.240

表 2 根拠箇所を教師あり学習したときの採点精度の変化

Score prediction (QWK↑)			
unsup	attention	igrad	attn& igrad
0.739	0.774	0.771	0.782

業者の高宮学園代々木ゼミナールと共同で自動採点システムを商用の問題集 (科目は高校の「現代国語」) として実用化するところまで進めている。このように、SAS 技術は使い方を工夫すれば商用化できる水準に既に達しており、エンドユーザが実際に利用できる実用環境の構築を考えることができる段階にある。今後は、教育学の専門家らと連携し、学習者や教育従事者からのフィードバックを得るための実証研究を進める予定である。

4. 英作文診断

国内の英語教育では、短い和文に対する自由記述形式の英訳問題 (以降、短文和文英訳問題と呼ぶ) が盛んに使われている。本節では、高校の学習課程における運用実態を参考に設計した短文和文英訳の自動添削に関する我々の取り組みを紹介する。

学習者が記述した英作文を診断する技術としては、2.2 節で紹介したように、自由記述された英文の文法的正しさを評価する GEC や、文章の構造やスタイルなどに総合的な評価を下すエッセイ自動採点 (automated essay scoring; AES) がある。我々の取り組みが GEC や AES と異なるのは、これらが自由記述の文に対して広く問題を指摘するのに対して、短文和文英訳問題の場合は教育者側があらかじめ定めた出題の意図、つまり、評価の対象となる項目や定められた学習目標に対して評価やフィードバックを与えることができる点である。短文和文英訳問題は一般にこの評価項目 (ループリック) に従って評価が行われることで、特定の文法や語彙知識の確認・訓練方法として有効に機能する。本節で述べる技術は、この問題形式において自動添削を導入することで教育者側の評価負担を軽減しつつ、学習者の試行機会を向上させることをねらうものである。

図3は我々が作成した短文和文英訳問題の自動添削システムのデモ画面である。はじめに、画面上部に問題文と翻訳元の和文が示される。次に、和文の下にあるテキストボックスの中に学習者が英文答案を入力し、提出ボタンを押すと、あらかじめ定められている採点項目と採点基準に従って、下部に採点項目ごとの評価値（○・△・×）、その根拠となる答案の部分（画面中央に、答案に対する下線部で表現される）、及び改善のためのアドバイス文が即座に提示される。採点項目は問題単位で個別に設計されており、学習者は問題ごとのねらいに応じたフィードバックを受けることができるようになっている。また、個別の採点項目を細かく点数化することせず、学習者にとってその項目に改善点があるかないかが端的に分かるように3段階の評価としている。一方で、単に誤り箇所が指摘されるだけでなく、その問題の採点項目のうち正しく書けている項目の数についても確認できるため、出題者のねらいに対して自分がどの程度の項目をクリアできているかという全体のできばえに関する指標も受け取ることができる。学習者はまた、評価の結果やアドバイスをしながら反復的に答案を訂正して再提出することもでき、インタラクティブな過程の中で順をおって誤りを訂正していくことが可能である。

答案の誤り箇所に対してどのようなアドバイス文を提示するかについては、教育学のなかでこれまで様々な方略が検討されており⁽¹⁶⁾、それらの効果が文法項目や学習者自身の背景によって異なることも示唆されてきた^{(35), (36)}。我々のねらいはこうした研究の蓄積を技術に織り込むことによって実践的なExAWEの研究を展開することである。研究の初期段階では、採点項目ごとに固定のメッセージを使い、訂正の方

図3 和文英訳問題の自動添削システム概観図 上から問題文、翻訳元和文、答案入力欄、添削位置表示欄、項目別添削コメント表示欄。答案入力欄右の提出ボタンを押すことで添削内容が表示される。各添削項目は答案に対し記号付き下線で位置が示され、コメント表示欄には対応する記号がふられる。答案は修正の後、繰り返し提出できる。

法を直接的に教示する直接フィードバック方略を採用しているが、今後様々な方略について検証し、より効果的なフィードバック手法を検討していく予定である。

4.1 自動採点モデルの構築

次に、本システムの添削モデルを構築する手法について説明する。この研究では、短文和文英訳問題の添削を、作題者が確認したい複数の評価項目を採点項目として設定した項目別のSASの問題（3節を参照）として定式化し、ニューラルネットワーク・ベースのモデルにより自動採点を実現する。この目的に必要な学術利用可能な日本人学習者の和文英訳文採点データは存在しないため、我々はまず、和文英訳問題に対する採点モデルの学習と評価を可能にするデータを設計し、答案の収集と採点アノテーションを行い、小規模の問題からなるデータセットを構築した。データセットは専門家により作成された問題文7問と対応する採点基準を含んでいる。収集・アノテーションがなされた答案数、採点項目数、評価値の分布は表3に示すとおりである。

この採点アノテーションでは、前述のループリックに基づき、明確な複数の採点項目ごとに答案の採点が行われる。また、3節で説明した採点根拠箇所の概念を導入しており、採点項目と答案の間に対応関係が示される。図4に答案に対する採点アノテーションの例と、採点に用いるループリックの例を示す。

構築した採点モデルの概観を図5に示す。採点モデルはMizumoto et al. によるアテンション層付きLSTM (long short term memory)⁽²⁴⁾を用いている。システムは採点項目ごとに採点根拠箇所の推定と、○・△・×の3値分類を行う。入力答案はまず単語ごとに単語ベクトルに変換されたのち、encoderと呼ばれる機構によって文脈を考慮したベクトル表現へと変換される。その後、attention機構によって各単語位置が対象採点項目の採点の根拠となるかどうか为重み付けされ、一定の重みを超えた部分が根拠箇所として出力される。採点項目のスコアは、encoderが計算した文ベクトルを元に3値分類を行うことで実現する。採点済み答案とword forms^(注3)を用いて生成した疑似誤り答案を利用し、採点項目

表3 和文英訳問題各問の答案数、採点項目数、評価値分布

	答案数	項目数	○	△	×
問1	159	9	923	114	235
問2	172	8	652	98	454
問3	77	8	357	40	142
問4	69	9	356	76	120
問5	102	9	387	161	268
問6	79	12	701	14	154
問7	90	10	534	72	204

(注3) : https://github.com/gutfeeling/word_forms

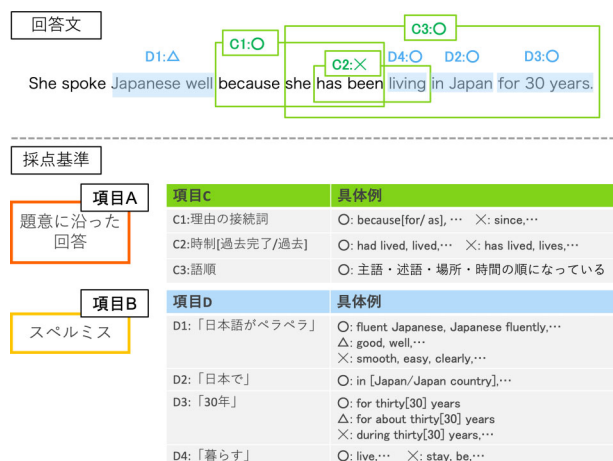


図4 採点データ及びルーブリックの例 答案ごとに個別の採点基準（ルーブリック、図下）が設定され、この記号を用いて回答文が○・△・×の3段階で採点される（図上）。各採点項目に対して、答案内の採点位置も付与される（図上の緑枠、青枠）。ルーブリックには○・△・×の具体例が記述されている。ルーブリックは採点アノテーションの過程で協議により更新される。

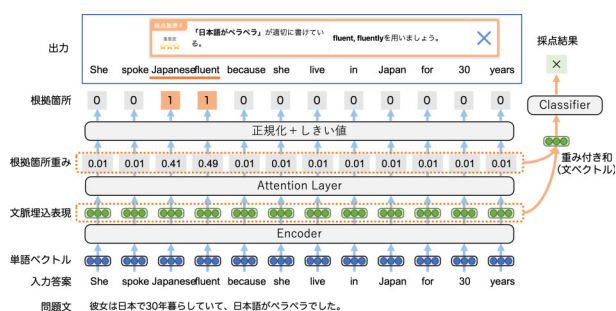


図5 採点モデルの概観 入力答案の各単語はベクトルに変換され、更に encoder と呼ばれる機構によって文脈を考慮したベクトルへ変換される。その後、attention 機構によって各単語が対象採点項目のスコアの根拠となるかどうかの重み付けされ、一定の重みを越えた部分が根拠箇所として出力される。採点項目のスコアは、encoder の出力に対し採点根拠の重み付きで和をとった文ベクトルを元に3値分類を行って得る。

表4 自動採点の精度（正解率）

	問題 1	問題 2	問題 3
NN Model	0.915	0.736	0.892
+ 疑似データ	0.931	0.903	0.902

	問題 4	問題 5	問題 6	問題 7
NN Model	0.914	0.841	0.906	0.834
+ 疑似データ	0.906	0.881	0.921	0.920

ごとに個別の採点モデルを学習した。

表4に実験の結果を示す。疑似誤り答案を利用することでいずれの問題においてもおおむねF値90%前後の性能で採点可能であることを確認した。この性能は、広く一般の文法誤りを指摘する必要があるGECタスクの性能と比べて高い。特定の問題における特定の採点項目ごとに個別に採点モデルを作成することで、少量の学習データでも比較的正確な添削を行うことができることが示された。

4.2 ユーザ実験による予備的検証

開発したシステムによるフィードバックが学習者にどのような影響を与えているかを検証するため、日本人英語学習者を対象として実証研究を行った⁽³⁷⁾。実証研究では、システムを用いて実際に問題を解いている様子をビデオ録画し、問題解答後に、そのビデオを実験参加者と一緒に見ながら、そのときに何を考えていたかを口頭で表現してもらう刺激再生法と事前に大まかな質問を用意しておく半構造化インタビューを用いた。刺激再生法の結果からは、実験参加者はシステムのフィードバックを基に同じように修正をしている場合もシステムのフィードバックに納得しながら行っている場合とそうでない場合があることが明らかとなり、システムの説明を学習者がどのように受け入れるかは、個人差があることが明らかになった。また半構造化インタビューからは、実験参加者の言語能力によっては、フィードバックの意味を理解できない場合が存在することが示され、説明をどのようにデザインするかという点についての示唆があった。

4.3 今後の課題・展開

本研究では、特定の問題に対して採点項目ごとに個別の自動採点技術を構築することで、答案に対し高精度かつ詳細なフィードバックの返却が可能であることを確かめた。一方で、このシステムを用いたユーザ実験の結果からは、フィードバックが学習者に受け入れられない場面や、理解に個人差が出る場面が観察された。この結果が示唆することは、従来の人間の教師と学習者を対象にしたフィードバック研究で指摘されてきたのと同様に、自動フィードバックを用いた学習の場面においても、学習者が説明への理解を深めるためにはその学習者の特性や到達度、文化的背景などに応じてフィードバックの内容を個別最適化することで、より優れた学習効果を生む可能性があるということである。既存のGEC技術を用いて自動訂正フィードバックを行う技術は存在するものの、いずれも個別最適化はなされていないのが現状である。ユーザ指向のフィードバックの例としては、答案中の間違いの分量に合わせて重要な点から段階的にフィードバックを返却したり、文法項目ごとに定められた習熟レベルに応じて適切な教示法を選定したり、学習者が自身の選好に合わせて直接教示と間接教示を選択できたりするなど、様々な方法が考えられる。いずれの場合にも、単純な訂正の枠を超え、人の

理解や学習といった領域に踏み込む形で手法の探求・効果検証を行うためには、教授者と学習者のインタラクションについてより深く考慮しなければならない。また、自動添削技術の開発やその教育効果の検証を個別の研究分野として切り出すのではなく、設計から教育効果の評価までを一元的に計画する必要がある、言語教育研究者と言語処理研究者の分野を超えた連携がこれまで以上に求められる。

5. 論述診断

本節では、論述を対象とした AWE に関する近年の研究に触れながら、我々の取り組みについて説明する。論述の自動評価に関する代表的な研究として、小論文を採点する automated essay scoring⁽³⁸⁾が存在する。総合的なスコア^{(39)~(41)}による採点をはじめとして、近年では「明確さ」や「意見の正当化」といった特定の観点についてのスコア^{(42)~(48)}を与える研究へと発展している。しかし、なぜそのスコアが与えられたのか、具体的にどのように改善すべきかの情報は学習者に与えられず、ユーザに向けた説明という点では検討の余地がある。

我々の研究グループでは、学習者が与えられた立論に対して反論を作成するという課題設定を想定し、学習者の反論の質を診断し、自然言語による診断コメントの形式で学習者にフィードバックする論述診断技術の構築を目指している（図 6）。このタスクも、(1)立論と反論の論証構造についての解釈を説明し、(2)その解釈に基づいた具体的な指摘を与える、という点で ExAWE に向けた取り組みと位置づけることができる。具体的な診断コメントがどのような理由で与えられたかを学習者に説明できる仕組みを作ることが目標である。

既存の論述評価の研究の多くが与えられたトピック（問

い）に対する論述（立論）を対象としているのに対し、この研究では診断の対象として「反論」を選んだ。これには幾つかの理由がある。まず、教育的な観点から、反論を作文するという課題が批判的思考のプロセスを訓練する題材として適している点が挙げられる。反論するためには元となる論述（立論）の論理構成を分析した上でサポートの薄い点を見極める必要があり、これは「明確化」や「推論の土台の検討」といった批判的思考のプロセス⁽⁴⁹⁾に該当する。また、技術的実現性の観点からも反論の診断は立論の診断に比べて取り組みやすい可能性がある。与えられたトピックに対する立論は論点も論証のパターン⁽⁵⁰⁾もしばしば多岐にわたり、それらを深く解析して診断するのは現在の自然言語処理技術でも容易ではない。一方、反論の内容は立論の内容に大きく制約されるため、技術的なハードルは下がる可能性が高い。

論述診断は難しい課題であるが、AWE のユースケースを考えると全く歯が立たない課題ではない。というのも、教育目的の論述診断では、毎年同じトピックの課題を学習者に与えることが一般的に行われており、そうした状況ではオープンなトピック（領域）をカバーする一般的な診断モデルを構築する必要は必ずしもない。同じ診断モデルが毎年繰り返し使われるとなれば、特定のトピック（微細な領域）ごとに診断モデルを用意するアプローチでも十分に構築コストに見合う利用効果を得られる可能性がある。例えば、十数個のトピックとトピックごとの診断モデルを用意だけでも十分に利用価値がある演習課題集になるだろう。これは AWE という応用領域がもつ魅力的な特性で、こうした特性をうまく利用すれば、論述診断のような深い言語理解を要する野心的な研究であっても実用化が手に届く設定の中で進めることができる。

我々のグループではこれまでのところ、論述診断を論述ロ



図 6 論述診断：反論のロジック解析とそれに基づく診断 論述診断では、学習者が作成した反論に対して具体的な診断コメントを与える。診断コメントは、立論と反論の論証構造の解釈、及びその解釈に基づく弱点から構成され、学習者により精緻なフィードバックを与えることを目指す。論述診断は二つのサブタスクのパイプラインからなり、論証構造の解釈は argument logic parsing、解釈に基づく診断コメントの生成は template-based diagnosis で行われる。

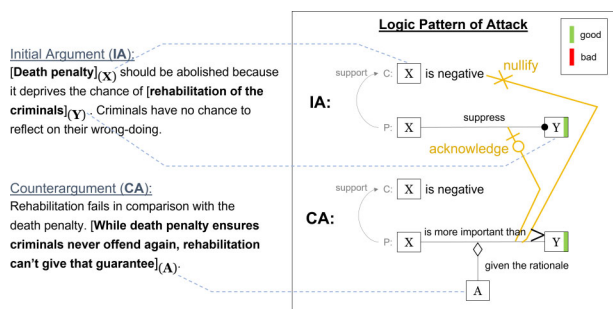


図7 論証構造のアノテーション LPAttack⁽⁵¹⁾では、反論が立論のどこをどのように攻撃しているかをアノテーションしている。本図の例は、立論（死刑制度に反対の立場）の「死刑は更生の機会を奪う」という主張に対し、反論（死刑制度に肯定の立場）は再犯可能性という別の観点を上げ、そちらの方がより深刻であることを前提に攻撃しているケースである。

ジック解析とテンプレートベース診断という二つの部分タスクのパイプラインにより実現することを考えて研究を進めている。

論述ロジック解析では立論と反論の精緻な論証構造を解析する。具体的で有用な診断を与えるためには、従来研究の論述関係解析（論述のどの論拠がどの主張を支持（support）あるいは攻撃（attack）しているかなどの関係の解析）だけでは十分でなく、どのようなロジックで支持／攻撃しようとしているかまで解析することが不可欠である。例えば、図6の例の場合、①の診断を与えるためには、

「自由時間を得る」手段として、「宿題の廃止」のほかに「タイムマネジメント能力の育成」が考えられ、暗に後者を優先すべきだと主張している

という精緻な論証の構造を認識する必要がある。

こうした論述ロジック解析の実現に向けて、我々は立論と反論の論証構造をアノテートしたデータセット LPAttack⁽⁵¹⁾を構築している。反論はしばしば、相手の論を単純に否定するだけではなく、ある部分には同意しながら別の部分を攻撃するといった複雑な修辞技法をとまってなされる。また、相手の論点とは別の論点を提供し、そちらの方がより重要性をもつことを前提に攻撃することもある。LPAttack は、このような論証構造をアノテートする枠組みになっており、現在約 250 件の反論にアノテートしている（図7）。現在進行中の研究では、こうした複雑な論証構造のアノテーションをクラウドソースできる可能性も出てきており、今後はそうした試みとも並行しながら解析モデルを構築する研究を進める予定である。

テンプレートベース診断では、まず表5のように人手で管理できる程度のテンプレート集合を用意する。立論・反論ペアが入力として与えられると、テンプレート集合から適切なテンプレートを選択し（テンプレート選択）、そのスロット（表5の x や y など）に適当な語句を代入する（スロットフィリング）ことによって診断コメントを生成する。テンプレート選択もスロットフィリングも分類／選択問題として定

表5 反論に対する診断用テンプレートセット（一部を抜粋） TYPIC⁽⁵²⁾で整理した診断コメントのテンプレートセットから一部を抜粋したものである。テンプレートセットは、収集した自由記述の診断コメントから、人手により類型を見出すことで作成されている。それぞれのテンプレートは、⁽⁴⁶⁾らが広範な文献調査の末にまとめた評価観点のカテゴリに対応している。

評価観点	弱点の説明テンプレート
Local Acceptability	なぜ X によって Y という悪い結果が起こるのかが不明確である
	なぜ Y にとって X が良いことなのか不明確である
Local Sufficiency	X というのは限定的な状況である
	Y を実現するのに、なぜ Z ではなく X という方法が良いのかの説明が不足している
Local Relevance	なぜ X という理由が Y という結論を支持するのかが不明確である
Global Relevance	肯定側の X という主張に Y というのは直接的な反論になっていない

式化できるため、自由記述コメントを生成する問題設定に比べて自動評価や誤り分析が容易になるという利点がある。ただし、このアプローチが意味をなすためには「多様な診断コメントを十分にカバーできる表現能力をテンプレート集合もっている必要がある」という条件をクリアする必要がある。

以上を背景に、我々のグループでは、前述の LPAttack に加えて、反論に対する診断コメントを収集したデータセット TYPIC⁽⁵²⁾を構築した。TYPIC は二つの論題について 10 件の立論と 1000 件の反論を含み、うち 200 件の反論に対して約 1000 件の診断コメントが付与されている。診断コメントは(1)立論との関連性、(2)正当化、(3)例の適切さなどの観点から、4 人のディベート経験者が自由記述で与えた。また、前述の表現能力に関する条件を検証するために、自由記述の診断コメントのサブセットを分析し、24 種のテンプレート形式の類型を作成した（表5に一部を抜粋）。これらのテンプレートは、広範な文献調査の末にまとめられた評価観点⁽⁴⁶⁾と対応している。作成したテンプレートセットを使用し、自由記述の診断コメントをテンプレート形式に人手で変換した結果、自由記述の診断コメントの 92% をカバーすることができた。典型的な診断を与えるには、テンプレート形式で十分な表現力があるといえる。

本節では、論述を対象とした ExAWE の例として自動論述診断への取り組みを紹介した。論述診断は、論述のロジックを深いレベルで捉える論証構造の解析を必要とする極めて挑戦的な課題であり、我々はまだその途についたばかりである。ただし、トピックごとのモデル構築が十分に「ペイする」という教育応用の特性をうまく利用すれば、解決の糸口

が見つかる可能性は十分にある。その意味で論述診断は、ExNLP の研究者だけでなく、深い言語理解に迫ろうとする研究者にとっても興味深い課題設定といえる。

6. おわりに

自らの判断を説明できる NLP システムの研究が加速度的に広がる中、コミュニケーションとしての説明に期待される要件を確認することが改めて求められている。説明には目的があり、受け手に応じた適切な形式がある。ExNLP の研究は今後、どのような内容でどのような形式の説明がどのような目的に照らして適当かを理解しながら進めることがより重要になってくると予想される。その意味で AWE は ExNLP 研究の格好のテストベッドとなりうる、というのが本稿のメインメッセージである。AWE の潜在的な有用性は誰も疑わないだろう。AWE における説明の重要性も、教育応用であることに照らせば明らかである。また、この分野には説明の目的と方法に関する専門家、教育の場で実践する専門家がいて、ユーザ中心の AWE デザインを構築していくための協力関係を作ることもできる。それでいて、AWE における説明の研究はまだ始まったばかりであり、眼前に広がるのはブルーオーシャンだ。NLP/AI、教育学、心理学、インタラクションの専門家、教育機関、教育事業者、教員、教育行政など、様々なプレーヤの連携による人間中心の研究を展開できるとおもしろい。

課題は無数にある。まず、現状の最大のボトルネックはデータの不足である。伝統的な AWE タスクのデータセットはたくさんあるが、ExAWE 研究のためのデータは著しく不足している。これは研究者にとっては必ずしも悪いことではない。新しいインパクトのあるデータセットを作ることができれば、あなたもパイオニアになれる。興味深い動きも既に幾つか見られる。Filighera ら^{(32), (33)}は記述式答案採点にフリーテキストの説明を付与したデータセットを、また Kane-ko ら⁽⁵³⁾は文法誤り訂正に事例ベースの説明を付与したデータセットを構築・公開している。また、対話形式の説明にフォーカスしたデータセットも出てきている⁽⁵⁴⁾。こうしたデータセットが今後も次々に生まれることを期待したい。

コミュニケーションとしての説明に着目するならば、説明の作り手と受け手がなしうるインタラクションにも注意を向けるべきであろう。例えば、学習者が AWE システムとインタラクティブにやり取りしながら理解・学習を進めるような環境を考えると、インタラクティブなコミュニケーションとしての説明はどうあるべきか。あるいは、AWE システムが教師を含む教育従事者から信頼を得るための説明にインタラクションが入る余地はあるか。幾つもの興味深い問いが浮かび上がる。

パーソナライゼーションの問題に取り組む必要も遅かれ早かれ出てくるだろう。教育学の知見によれば、単一の説明が必ずしも全ての学習者に評価される（あるいは有益である）とは限らない。どのような説明をどのように行うべきかは、学

習者の能力や特性やその時々々の認知的状態など、個人の差異に依存する可能性がある。近年の Learning Analytics の研究動向とも密接に関連する問題である。

品質管理、品質保証も重要な課題である。説明のような知的な作業を機械が担うとき、その挙動を完全に予測することは本質的に難しいと予想できる。それでも、そのような機械を実世界に展開したい。そのために機械の振る舞いの質をどのように制御し保証するか。多様な専門家が学際的に議論すべき大きな課題である。

謝辞 思考と言語研究会幹事会の諸氏には、本論文の執筆の機会を頂き、また有益なコメントを多数頂戴した。記して深く感謝する。

文 献

- (1) N. Burkart and M.F. Huber, "A survey on the explainability of supervised machine learning," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 70, pp. 245-317, May 2021.
- (2) S. Wiegrefe and A. Marasović, "Teach me to explain: A review of datasets for explainable natural language processing," *Proc. the Neural Information Processing Systems Track on Datasets and Benchmarks*, online, Dec. 2021.
- (3) M.T. Ribeiro, S. Singh, and C. Guestrin, "Why should I trust you?: Explaining the predictions of any classifier," *Proc. 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 1135-1144, New York, USA, Aug. 2016.
- (4) P. Jansen, E. Wainwright, S. Marmorstein, and C. Morrison, "WorldTree: A corpus of explanation graphs for elementary science questions supporting multi-hop inference," *Proc. 11th International Conference on Language Resources and Evaluation*, pp. 2732-2740, Miyazaki, Japan, May 2018.
- (5) O.-M. Camburu, T. Rocktäschel, T. Lukasiewicz, and P. Blunsom, "e-SNLI: Natural language inference with natural language explanations," *Proc. Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 9539-9549, Montreal, Canada, Dec. 2018.
- (6) P.W. Koh and P. Liang, "Understanding black-box predictions via influence functions," *Proc. 34th International Conference on Machine Learning*, pp. 1885-1894, Sydney, Australia, Aug. 2017.
- (7) A. Ross, A. Marasović, and M. Peters, "Explaining NLP models via minimal contrastive editing (MiCE)," *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL-IJCNLP*, pp. 3840-3852, online, Aug. 2021.
- (8) T. Wu, M.T. Ribeiro, J. Heer, and D. Weld, "Polyjuice: Generating counterfactuals for explaining, evaluating, and improving models," *Proc. the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing*, vol. 1, pp. 6707-6723, online, Aug. 2021.
- (9) K. Simonyan, A. Vedaldi, and A. Zisserman, "Deep inside convolutional networks: Visualising image classification models and saliency maps," *Proc. International Conference on Learning Representations Workshop*, Banff, Canada, April 2014.
- (10) B. Paranjape, M. Joshi, J. Thickstun, H. Hajishirzi, and L. Zettlemoyer, "An information bottleneck approach for controlling conciseness in rationale extraction," *Proc. the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, pp. 1938-1952, online, Nov. 2020.
- (11) N. Inoue, H. Trivedi, S. Sinha, N. Balasubramanian, and K. Inui, "Summarize-then-answer: Generating concise explanations for multi-hop reading comprehension," *Proc. the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language*

- Processing, pp. 6064-6080, Punta Cana, Dominican Republic, Nov. 2021.
- (12) 石井雄隆, 近藤悠介, 英語教育における自動採点—現状と課題, ひつじ書房, 東京, 2020.
 - (13) D. Ferris, "The case for grammar correction in L2 writing classes: A response to Truscott (1996)," *Journal of Second Language Writing*, vol. 8, no. 3, pp. 1-11, Jan. 1999.
 - (14) J. Truscott, "The case for 'The case against grammar correction in L2 writing classes': A response to Ferris," *Journal of Second Language Writing*, vol. 8, no. 2, pp. 111-122, May 1999.
 - (15) D. Biber, T. Nekrasova, and B. Horn, "The effectiveness of feedback for L1-English and L2-writing development: A meta-analysis," *ETS Research Report Series*, pp. 1-99, Feb. 2011.
 - (16) R. Ellis, "A typology of written corrective feedback types," *ELT Journal*, vol. 63, no. 2, pp. 97-107, May 2009.
 - (17) Y. Han and F. Hyland, "Academic emotions in written corrective feedback situations," *Journal of English for Academic Purposes*, vol. 38, pp. 1-13, March 2019.
 - (18) Z.V. Zhang and K. Hyland, "Student engagement with teacher and automated feedback on L2 writing," *Assessing Writing*, vol. 36, pp. 90-102, April 2018.
 - (19) S. Amano, "Students' choices of types of written teacher feedback in EFL writing instruction," *Journal of the Chubu English Language Education Society*, vol. 47, pp. 103-110, Jan. 2018.
 - (20) S. Koltovskaia, "Student engagement with automated written corrective feedback (AWCF) provided by Grammarly: A multiple case study," *Assessing Writing*, vol. 44, 100450, April 2020.
 - (21) J. Ranalli, "L2 student engagement with automated feedback on writing: Potential for learning and issues of trust," *Journal of Second Language Writing*, vol. 52, 100816, June 2021.
 - (22) B. Riordan, A. Horbach, A. Cahill, T. Zesch, and C.M. Lee, "Investigating neural architectures for short answer scoring," *Proc. 12th Workshop on Innovative Use of NLP for Building Educational Applications*, pp. 159-168, Copenhagen, Denmark, Sept. 2017.
 - (23) Y. Kumar, S. Aggarwal, D. Mahata, R. R. Shah, P. Kumaraguru, and R. Zimmermann, "Get IT scored using AutoSAS: An automated system for scoring short answers," *Proc. the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 33 (01), pp. 9662-9669, Honolulu, USA, Jan. 2019.
 - (24) T. Mizumoto, H. Ouchi, Y. Isobe, P. Reisert, R. Nagata, S. Sekine, and K. Inui, "Analytic score prediction and justification identification in automated short answer scoring," *Proc. 14th Workshop on Innovative Use of NLP for Building Educational Applications*, pp. 316-325, Florence, Italy, Aug. 2019.
 - (25) C. Sung, T.I. Dhamecha, and N. Mukhi, "Improving short answer grading using Transformer-based pre-training," *Artificial Intelligence in Education (AIED) 2019, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11625, June 2019.
 - (26) L. Camus and A. Filighera, "Investigating Transformers for automatic short answer grading," *Artificial Intelligence in Education (AIED) 2020*, vol. 12164, pp. 43-48, June 2020.
 - (27) S. Burrows, I. Gurevych, and B. Stein, "The eras and trends of automatic short answer grading," *International Journal of Artificial Intelligence in Education* vol. 25, pp. 60-117, March 2015.
 - (28) M. Dzikovska, R. Nielsen, C. Brew, C. Leacock, D. Giampiccolo, L. Bentivogli, P. Clark, I. Dagan, and H.T. Dang, "SemEval-2013 task 7: The joint student response analysis and 8th recognizing textual entailment challenge," *2nd Joint Conference on Lexical and Computational Semantics*, vol. 2, pp. 263-274, Atlanta, USA, June 2013.
 - (29) T. Sato, H. Funayama, K. Hanawa, and K. Inui, "Plausibility and faithfulness of feature attribution-based explanations in automated short answer scoring," *Artificial Intelligence in Education (AIED) 2022, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13355, June 2022.
 - (30) S. Serrano and N.A. Smith, "Is attention interpretable?," *Proc. 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp. 2931-2951, Florence, Italy, July 2019.
 - (31) A.K. Mohankumar, P. Nema, S. Narasimhan, M.M. Khapra, B.V. Srinivasan, and B. Ravindran, "Towards transparent and explainable attention models," *Proc. 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp. 4206-4216, online, July 2020.
 - (32) A. Filighera, S. Parihar, T. Steuer, T. Meuser, and S. Ochs, "Your answer is incorrect... would you like to know why? Introducing a bilingual short answer feedback dataset," *Proc. 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, vol. 1, pp. 8577-8591, Dublin, May 2022.
 - (33) A. Filighera, J. Tschesche, T. Steuer, T. Tregel and L. Wernet, "Towards generating counterfactual examples as automatic short answer feedback," *Artificial Intelligence in Education (AIED) 2022, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13355, June 2022b.
 - (34) H. Funayama, T. Sato, Y. Matsubayashi, T. Mizumoto, J. Suzuki, and K. Inui, "Balancing cost and quality: An exploration of human-in-the-loop frameworks for automated short answer scoring," *Proc. 23rd International Conference on Artificial Intelligence in Education*, pp. 465-476, Durham, UK, July 2022.
 - (35) C.G. Van Beuningen, N.H. De Jong, and F. Kuiken, "Evidence on the effectiveness of comprehensive error correction in second language writing," *Language Learning*, vol. 62, no. 1, pp. 1-41, March 2012.
 - (36) N. Shintani and R. Ellis, "Does language analytical ability mediate the effect of written feedback on grammatical accuracy in second language writing?," *System*, vol. 49, no. April, pp. 110-19, 2015.
 - (37) 石井雄隆, 菊地正弥, 舟山弘晃, 松林優一郎, 乾健太郎, "説明可能な AI を指向した和文英訳自動採点システムの開発と評価," *日本教育工学会研究報告集*, vol. 2022, no. 4, pp. 1-7, Nov. 2022.
 - (38) Z. Ke and V. Ng, "Automated essay scoring: A survey of the state of the art," *Proc. 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 6300-6308, Macao, China, July 2019.
 - (39) S. Dikli, "An overview of automated scoring of essays," *The Journal of Technology, Learning and Assessment*, vol. 5, no. 1, pp. 1-36, Aug. 2006.
 - (40) H. Yannakoudakis, T. Briscoe, and B. Medlock, "A new dataset and method for automatically grading ESOL texts," *Proc. 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, pp. 180-189, Portland, USA, June 2011.
 - (41) D. Blanchard, J. Tetreault, D. Higgins, A. Cahill, and M. Chodorow, "TOEFL11: A corpus of non-native English," *ETS Research Report Series*, vol. 2013, no. 2, pp. i-15, 2013.
 - (42) I. Persing, A. Davis, and V. Ng, "Modeling organization in student essays," *Proc. 2010 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, pp. 229-239, Cambridge, MA, Oct. 2010.
 - (43) I. Persing and V. Ng, "Modeling thesis clarity in student essays," *Proc. 51st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp. 260-269, Sofia, Bulgaria, Aug. 2013.
 - (44) I. Persing and V. Ng, "Modeling prompt adherence in student essays," *Proc. 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp. 1534-1543, Baltimore, Maryland, June 2014.
 - (45) I. Persing and V. Ng, "Modeling argument strength in student essays," *Proc. 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing*, pp. 543-552, Beijing, China, July 2015.
 - (46) H. Wachsmuth, N. Naderi, Y. Hou, Y. Bilu, V. Prabhakaran, T.A. Thijm, G. Hirst, and B. Stein, "Computational

argumentation quality assessment in natural language,” Proc. 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, pp. 176-187, Valencia, Spain, April 2017.

- (47) W. Carille, N. Gurrapadi, Z. Ke, and V. Ng, “Give me more feedback : Annotating argument persuasiveness and related attributes in student essays,” Proc. 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, pp. 621-631, Melbourne, Australia, July 2018.
- (48) Z. Ke, H. Inamdar, H. Lin, and V. Ng, “Give me more feedback II : Annotating thesis strength and related attributes in student essays,” Proc. 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, pp. 3994-4004, Florence, Italy, July 2019.
- (49) 楠見孝, “批判的思考への認知科学からのアプローチ,” 認知科学, vol. 25, no. 4, pp. 461-474, 2018.
- (50) D. Walton, C. Reed, and F. Macagno., Argumentation Schemes, Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- (51) F. Sultana Mim, N. Inoue, S. Naito, K. Singh, and K. Inui, “LPAttack : A feasible annotation scheme for capturing logic pattern of attacks in arguments,” Proc. 13th Language Resources and Evaluation Conference, pp. 2446-2459, Marseille, France, June 2022.
- (52) S. Naito, S. Sawada, C. Nakagawa, N. Inoue, K. Yamaguchi, I. Shimizu, F. Sultana Mim, K. Singh, and K. Inui, “TYPIC : A corpus of template-based diagnostic comments on argumentation,” Proc. 13th Language Resources and Evaluation Conference, pp. 5916-5928, Marseille, France, June 2022.
- (53) M. Kaneko, S. Takase, A. Niwa and N. Okazaki, “Interpretability for Language Learners Using Example-Based Grammatical Error Correction,” Proc. 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, vol. 1, pp. 7176-7187, Dublin, May 2022.
- (54) H. Wachsmuth and M. Alshomary, ““Mama Always Had a Way of Explaining Things So I Could Understand”: A Dialogue Corpus for Learning to Construct Explanations,” Proc. 29th International Conference on Computational Linguistics, pp. 344-354, Gyeongju, Korea, Oct. 2022.

(TL 研究会提案, 2022 年 12 月 19 日受付,
2023 年 1 月 9 日再受付)



乾健太郎 (正員)

東北大学大学院情報科学研究科教授。1995 東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程修了。同大学助手, 九州工業大学助教授, 奈良先端科学技術大学院大学助教授を経て, 2010 より現職。2016 より理化学研究所 AIP センター自然言語理解チームリーダー兼任。文部科学大臣表彰科学技術賞等受賞。情報処理学会論文誌編集委員長, 同会

自然言語処理研究会主査などを歴任, 2022 より言語処理学会会長。



石井雄隆

2011 早稲田大・教育・英語英文学科卒。2020 東京学芸大学院博士課程了。博士(教育学)。専修大学附属高等学校, 早稲田大学大学総合研究センター, 千葉大・教育・助教を経て, 現在同准教授。研究は英語ライティングの指導と評価, 英語教育における効果的な ICT 活用に従事。2016 年度外国語教育メディア学会 (LET) 新人奨励賞。著書『英語教育における自動採点: 現状と課題』など。



松林優一郎

2004 九州大・理・物理卒。2010 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程了。NII, 東北大学情報科学研究科, 理研 AIP を経て, 現在, 東北大学教育学研究科准教授。自然言語処理の研究に従事。博士(情報理工学)。言語処理学会 2010 年度, 2014 年度最優秀論文賞, 情報処理学会 2014 年度山下記念研究賞などを受賞。



井之上直也

2013 東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程終了。同年(株)デンソー基礎研究所入社。東北大学大学院情報科学研究科助教, ストーンブルック大学研究員を経て, 現在北陸先端科学技術大学院大学准教授。博士(情報科学)。自然言語処理の研究に従事。船井情報科学振興財団第 17 回船井研究奨励賞, 言語資源協会 2020 年言語資源賞等受賞。著書『コミュニケーション場のメカニズムデザイン』など。



内藤昭一

2010 千葉大学大学院修士課程修了。同年(株)リコー入社。以来, ソフトウェア開発及び自然言語処理の研究開発に従事。現在, 東北大学大学院博士課程に在学中。



磯部順子

1997 お茶の水女子大・文教育・外国文学科卒。出版社, 教育事業関連会社などの勤務を経て, 2017 より理化学研究所。現在は革新知能統合研究センター (AIP) 自然言語理解チームの一員として, 自然言語処理の教育応用分野に関する研究推進業務に従事。



舟山弘晃

2020 東北大・工・電気情報物理工学科卒, 2022 東北大学大学院修士課程修了。現在は同大学院・情報科学研究科博士課程に在学。記述式答案の自動評価に関する研究に従事。修士(情報科学)。AI の教育応用に関する国際会議 AIED2022 で Best Paper Nominee に選出。



菊地正弥

2021 東北大・教育科学科卒, 現在は同大学院・教育学研究科博士前期課程に在学。英語科目記述式答案の自動採点に関する研究に従事。第 27 回言語処理学会 (NLP2021) にて委員特別賞を受賞。

モバイル環境における 情報指向型ネットワーク

Information Centric Networking in Mobile Environments

塩川茂樹 Shigeki SHIOKAWA

アブストラクト IP（インターネットプロトコル）に基づくホスト指向型ネットワークに代わって送受信コンテンツに着目した情報指向型ネットワーク ICN（information centric networking）が注目されている。ICN の実用化に向けて多くのプロトコルが提案され、有線ネットワークでは実装化も始まっている。一方、ICN のモバイルネットワーク環境への適用については、端末の移動や消費電力の制限といったモバイルネットワーク固有の特徴からまだ多くの課題が残っており、課題解決のための研究が盛んに行われている。そこで本稿では、ICN の概要と基本的な特徴について解説したあと、モバイルネットワーク環境に適用した際の問題点や解決策について述べるとともに、これまで提案されてきた手法を紹介し、性能評価をもとにそれらの有効性について考察する。

キーワード 情報指向型ネットワーク、モバイルネットワーク、コンテンツ取得

Abstract Information Centric Networking (ICN), an information-oriented network that focuses on transmitted and received contents, has been attracting attention as an alternative to the host-oriented network based on Internet Protocol (IP). Many protocols have been proposed for the practical use of ICN, and the implementation of ICN in wired networks has begun. On the other hand, many problems still remain in applying ICN to the mobile network environment because of the unique characteristics of mobile networks, such as terminal mobility and power consumption limitations. In this paper, we provide an overview of ICN and its basic features, and discuss the problems and solutions related to its application to mobile network environments. We also introduce methods that have been proposed so far and discuss their effectiveness determined on the basis of the results of performance evaluations.

Key words Information centric networking, Mobile networks, Contents acquisition

1. はじめに

近年、次世代ネットワークのアーキテクチャとして、インターネットなどで広く用いられている IP アドレスに基づくホスト指向型ネットワークに代わり、送受信データに着目して設計された情報指向型ネットワーク（ICN；information-centric networking）⁽¹⁾が注目を集めている。これは、インターネットの利用形態がホスト間の通信ではなく、情報の配信・流通システムへ変化してきている流れを受けてのものである。

コンテンツ指向型ネットワークの基本的なアイデアは、特定のホストでなく情報識別子によってネットワークが機能する点にある。また、ネットワーク内キャッシングによる効率的なデータ取得が行えるという特徴を有する。この研究領域での有名な研究プロジェクトとしては NDN⁽²⁾、CCN⁽³⁾等などが挙げられる。

これらの研究は有線環境でのものが主であったが、近年では、モバイルアドホックネットワーク（MANET）などのモバイル環境に適用した研究も行われている。本稿ではモバイル環境における ICN について、モバイル環境ならではの課題とともに、既存の方式をいくつか紹介する。そして、それらの方式に関する性能評価により考察をしていく。

2. I C N

2.1 概要

従来用いられてきたホスト指向型ネットワークと情報指向型ネットワークの基本的な概念の違いを図 1 に示す。

図 1(a)のホスト指向型ネットワークにおいてあるユーザ A が情報取得を所望したとする。図では概念をイメージしやすいように、情報を画像としているが、画像に限る必要はない。ホスト指向型ネットワークではこの情報をもつ対象を特定する必要がある。ここでは仮にサーバ A とすると、ユーザはサーバ A の識別子（例えばインターネットでは IP アドレス）をヘッダに含めた情報要求パケットをネットワークに送信する。ネットワーク内ではパケットヘッダに書き込まれたサーバ A の識別子という宛先を基に要求をサーバ A へ届

塩川茂樹 正員：フェロー 神奈川工科大学
E-mail shiokawa@nw.kanagawa-it.ac.jp
Shigeki SHIOKAWA, Fellow (Kanagawa Institute of Technology, Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ
Fundamentals Review Vol.16 No.4 pp.301-309 2023 年 4 月
©電子情報通信学会 2023

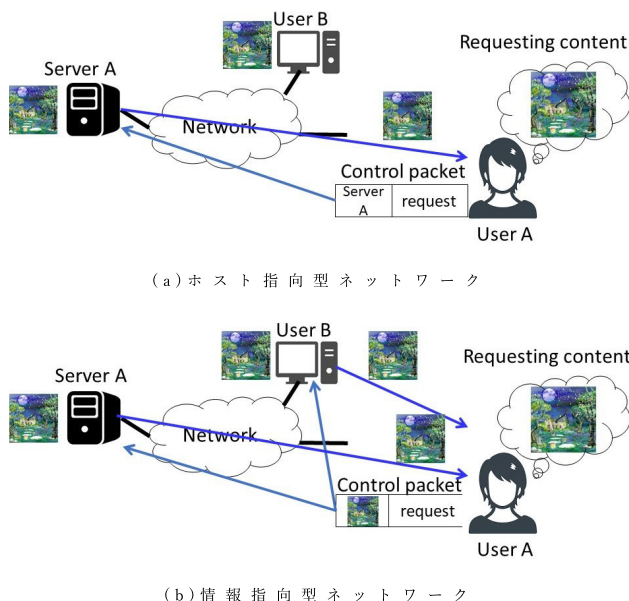


図1 ホスト指向型ネットワークと情報指向型ネットワークの違い ホスト指向型ネットワークでは情報取得対象を特定して要求を送るのに対し、情報指向型ネットワークでは対象を特定する必要はなく情報識別子のみを載せて要求を送る。

け、サーバ A は要求された情報をユーザ A へ送信する。この一連の過程において、サーバ A 以外の端末は中継処理以外一切関わらない。

次に図 1(b) の情報指向型ネットワークにおいて同様にあるユーザ A が情報取得を所望したとする。このとき、ユーザ A は情報要求パケットをネットワークに送信するが、ホスト指向型ネットワークと異なり、送信相手特定せず、ヘッダには要求する情報の識別子のみを記載する。ネットワーク内では必要に応じて要求パケットを複製しながら不特定の端末へ届ける。そして要求パケットを受信した端末のうち要求情報を所持しているならその情報をユーザ A へ送信する。

以上のように情報指向型ネットワークでは要求された情報をもつ全ての端末（図ではサーバ A 及びユーザ B）が情報提供元となることが可能なため、多数のユーザが同一の情報を所望するような環境において効率のよい情報送信を行うことが可能となる。

2.2 基本動作

改めて ICN の基本的な動作について述べる。初めに幾つかの用語の定義をする。まず ICN で扱う情報のことをコンテンツと呼び、コンテンツを所有する行為をキャッシングと呼ぶ。そしてコンテンツの要求、キャッシング及びパケットの送受信を行う主体をノードと定義する。ノードはキャッシングリストをもっており、そこにはキャッシングしているコンテンツの識別子が記載してある。

まず、あるコンテンツを取得したい端末（以降リクエスタ

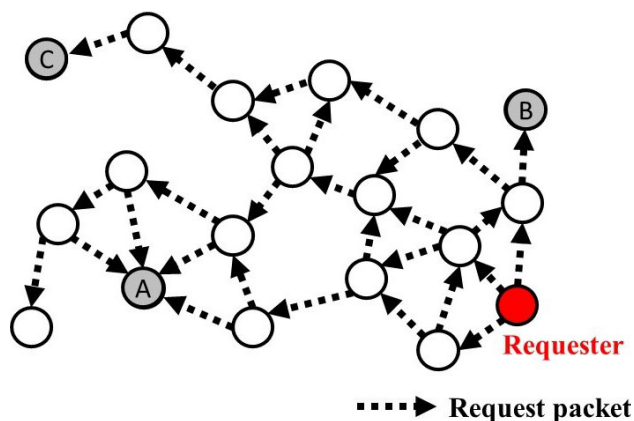


図2 コンテンツ要求 コンテンツ要求パケットのブロードキャストが繰り返されることでコンテンツ所持ノードまで要求が届く。

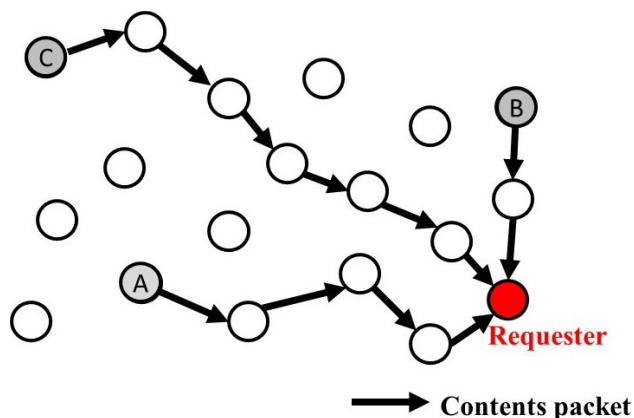


図3 コンテンツ送信 コンテンツ所持ノードはプロバイダとなり要求パケットの経路ノードを逆にたどってリクエスタへ該当コンテンツを送信する。

と呼ぶ) は図 2 に示すようにコンテンツ要求パケット^(注1)を隣接ノードにブロードキャストする。この要求パケットを受信したノードは、自身のコンテンツキャッシングリストを参照する。もしも、リストに要求コンテンツが記載されている場合、すなわち要求されたコンテンツをキャッシングしている場合（図 2 におけるノード A、B、C）はプロバイダとなり、図 3 に示すように要求パケットの経路ノードを逆にたどってリクエスタへ該当コンテンツを送信する。

リストに要求コンテンツの記載がなくキャッシングしていない場合は、要求パケットの再ブロードキャストを行う。一般にこの再ブロードキャストの回数には上限を設けるなど、広範囲に要求パケットが蔓延しないような工夫がされている。

コンテンツがリクエスタに送信される際、途中のノードがコンテンツの中継を担うが、これらのノードは中継するコンテンツをキャッシングすることが可能である。もしもキャッ

(注1)：ICN の分野では interest と呼ばれるが読者のイメージしやすさとほかの制御パケットの名称に合わせるために本稿では要求パケットと呼ぶことにする。

シングする場合にはキャッシングリストに該当コンテンツ識別子を記載する。これは ICN の特徴の一つで、中継ノードのコンテンツキャッシングにより、要求頻度の高いコンテンツは多くのノードでキャッシングされるようになるため、コンテンツの取得効率を高めることが可能になる。

2.3 MANET への適用

ICN は前述した NDN, CCN など有線環境を対象としたものが主であるが、近年になって、モバイル環境であるモバイルアドホックネットワーク (MANET) に適用した研究も多く行われるようになってきている。MANET とは、複数の移動体無線端末が自律分散的に構成するネットワークである。無線通信技術の発展と無線端末の普及、利便性の向上、また災害時対策への期待に伴い研究が盛んに行われている。MANET では無線端末同士が相互接続され、自身の電波が届く通信可能範囲から外れた端末に対しても、他端末を経由してパケットを転送することが可能である。

MANET における ICN (IC-MANET と呼ぶ) では、ノードとしてスマートフォンなどの小型の移動体無線端末を想定する機会が多いため、利用できる電力が限られている場合が多い。一般的な ICN では、コンテンツ要求パケットの送信にブロードキャスト送信を繰り返すフラッディングを用いるため、これを単純に IC-MANET に適用すると、制御パケットによるネットワーク負荷及び消費電力が大きくなる傾向にある。

また有線環境の ICN ではノードが不動であることからキャッシングリストを周囲に公告することで、コンテンツ要求のフラッディングを回避させることも可能であるのに対し、MANET 環境ではノードが移動するため、キャッシングリストの広告が有効に機能しない場合が多い。

以上のように、IC-MANET では有線環境の ICN ではなかった固有の課題があり、コンテンツの取得やキャッシングに関して多くの解決策が提案されている。次節ではコンテンツ取得に焦点を合わせて、その課題に関する解決策について解説する。

3. IC-MANET におけるコンテンツ取得の課題への解決策

3.1 要求パケットの削減

要求パケットを削減する基本的な方法は、要求コンテンツをキャッシングしていないノードによる要求パケットの再ブロードキャストを抑制することである。

例えば TOP-CCN⁽⁴⁾ではアドホックネットワークのルーティングプロトコル OLSR⁽⁵⁾で用いられている MPR 集合を用いている。MPR 集合とはパケット再送信を担うノード集合のことであり、近隣のノード間でハローパケットのやり取りをすることで決定される。

E-CHANET⁽⁶⁾ではノードがパケット送信数をカウントし、

そのカウンタの値に応じてパケット転送の抑制判断を行っている。REMIF⁽⁷⁾では周囲のノードによるパケットの送信状況を用いて重複送信をチェックすることで、要求パケットやコンテンツパケット送信数を削減している。

これらの方式では要求パケット抑制についての改善は行われている。しかし、要求パケットをフラッディング送信することには変わらないため、要求したコンテンツを複数のノードがキャッシングしていた場合、要求パケットを受信したこれらのノードが全てプロバイダとなりコンテンツを送信するという重複コンテンツ送信が発生する。これはネットワークの負荷を著しく増加させるという問題につながる。

また、TOP-CCN ではハローパケットによるパケット送信数の増加、E-CHANET や REMIF では要求パケット送信抑制による要求不達から、プロバイダが見つからずにコンテンツ取得率が低下することも課題となっている。

3.2 キャッシング情報の一元管理

要求パケットをフラッディングする理由は、どのノードが要求コンテンツをキャッシングしているか不明なためである。したがって、各ノードのキャッシング情報を一元的に管理できれば、フラッディングを行う必要がなくなる。IC-MANET でこれを実現するために、モバイルエージェント⁽⁸⁾を活用する手法が提案されている^{(9),(10)}。

この手法では、キャッシング情報の一元管理をモバイルエージェントに任せる。リクエストはエージェントにコンテンツ要求をユニキャスト送信し、エージェントがプロバイダを決定してリクエストにコンテンツ送信するように要求する。したがって要求パケットのフラッディングが一切行われないため、要求パケット送信回数を削減できるだけでなく重複コンテンツ送信も回避できる。

ただし、全てのノードが自身の位置情報を正確に把握できるという前提が必要となるため、限られた環境でしか適用できないという問題がある。また位置情報の共有やキャッシング情報の管理のための制御パケットが新たに必要になることや、位置情報取得のために電力を消費するという課題もある。

3.3 探索パケットの利用

位置情報を利用することなく重複コンテンツ送信の問題を解決するために、コンテンツ探索パケットを利用する方式が提案されている^{(11)~(13)}。

これらの方式では、リクエストはすぐに要求パケットを送信するのではなく、まずコンテンツ所持ノードを探すための探索パケットをフラッディング送信する。そして、探索パケット受信ノードが要求コンテンツをキャッシングしていた場合、プロバイダ候補として応答パケットをリクエストに返信する。リクエストは受信した応答パケットを基にプロバイダを決定した後、改めて要求パケットをプロバイダに送信す

る。プロバイダは要求パケット受信後にコンテンツパケットをリクエストに送信する。

探索パケット利用方式ではコンテンツの重複送信は生じないが、探索パケットのフラッディングを必要とするのに加えて、応答パケット、要求パケットのやり取りが必要となるため、制御パケットの増加及びコンテンツ取得までの遅延が大きくなるという課題が存在する。

4. 具体的なコンテンツ取得方式の紹介

ここでは **3.** で述べた、IC-MANET のコンテンツ取得に関する課題の具体的な解決手法として、要求パケット削減方式から REMIF を紹介し、探索パケット利用方式として 2 台プロバイダ選択方式⁽¹²⁾を紹介する。

4.1 REMIF

REMIF (robust and efficient multipath interest forwarding) は送信パケット量削減を目的とした要求パケットのフラッディング方式である。REMIF では各ノードは要求パケットの受信履歴をもつ。具体的な動作について述べる。

まず、リクエストは要求パケットをブロードキャストする。要求パケットを受信したノードは要求コンテンツをキャッシングしているならランダムに設定された時間だけ待機する。その間にほかのノードにより送信された同一コンテンツを受信した場合には、自身を送信元としたコンテンツ送信を中止する。同一コンテンツを受信することなく待機時間が経過した場合には、リクエストに向かってコンテンツを送信する。

要求されたコンテンツをキャッシングしていない場合には、以下の方法で要求パケットの転送判断を行う。まず自身の要求パケット受信履歴を確認し、同じ要求パケットの登録があった場合は、これを中継せず破棄する。送信履歴に要求パケットの登録がなかった場合はランダムに設定された時間だけ待機する。この間にほかのノードによる同じ要求パケットか要求コンテンツの送信を受信した場合には、受信履歴に該当する要求パケットの登録をし、自身がコンテンツパケットの中継ノードに指定されたときを除き、これらのパケットの転送は行わずに破棄する。そして待機時間経過後受信履歴を確認し、該当する要求パケットの登録がない場合にのみ要求パケットを中継する。REMIF ではこのような仕組みを用いて、重複した要求パケットやコンテンツの送信を削減している。

4.2 2 台プロバイダ選択方式

探索パケット利用方式ではリクエストがプロバイダを決定できるが、その際に 1 台ではなく 2 台のプロバイダを決定するのがこの方式である。以下に具体的な手順を述べる。

あるノードがリクエストとなると、リクエストはコンテン

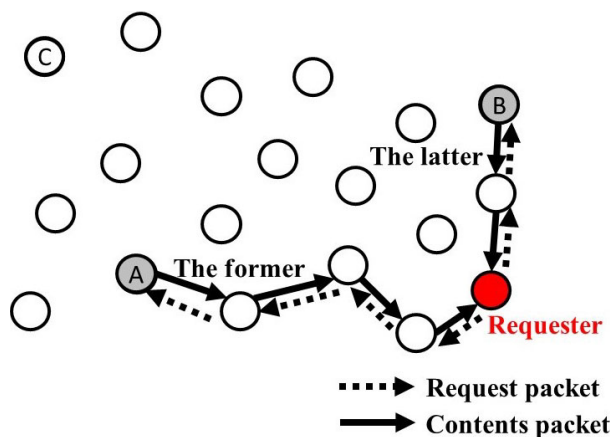


図 4 2 台プロバイダ方式のコンテンツ送信 リクエストはプロバイダを 2 台選んで要求パケットを送信し、各プロバイダはコンテンツの前半、後半を分担して送信する。

ツ識別子を含む探索パケットをブロードキャストする。それと同時に一定時間応答受信を待機するためのタイマをセットする。

探索パケットを受信したノードが要求コンテンツをキャッシングしていた場合、プロバイダ候補となって応答パケットをリクエストへ返信する。要求コンテンツをキャッシングしていない場合には要求パケットを再ブロードキャストする。

リクエストは、早い順に到着した二つの応答パケットの送信元をプロバイダとして決定する。ただし受信待機タイマが切れた時点で応答パケットの受信数が 1 だった場合には、その送信元のみをプロバイダとして決定する。またタイマが切れた時点で応答パケットの受信がない場合には探索パケット送信から繰り返す。

リクエストがプロバイダを決定すると、要求パケットをそのプロバイダへ送信する。要求パケットを受信したプロバイダは対応するコンテンツパケットをリクエストへ送信する。ただし、プロバイダが 2 台の場合には両者から同じコンテンツパケットを送信してもらうのではなく、コンテンツを 2 分割しそれぞれを分担して送信してもらう。そのため要求パケットにはコンテンツのシーケンス番号を書き込み、各プロバイダはリクエストパケットに書かれたシーケンス番号を基に該当するコンテンツ部分を送信する。

図 4 の例では、応答パケットのリクエストへの到達順序が、A、B、C からと仮定している。この場合 B からの応答パケットを受信した段階で、リクエストはノード A 及び B をプロバイダとして決定し、C からの応答パケットは無視する。そしてノード A にコンテンツの前半、ノード B に対してコンテンツの後半を要求する要求パケットを送信している。要求パケットを受信した A と B は該当するコンテンツ部分をプロバイダに送信する。

なお、これらのコンテンツを中継した端末はそのコンテンツ部分を一時的にキャッシングする。そして、前半・後半が完全に揃った場合のみ完全なコンテンツとしてキャッシング

し、後の探索パケットに対して応答パケットを返信できるようになる。一定時間経過後に全てが揃わなかったコンテンツ部分はキャッシングされることなく破棄される。

したがって図4の例では、リクエスト以外の全ての中継ノードは一時的にキャッシングしていたコンテンツ部分を破棄することになり、リクエストは一つのパケットもかけることなく受信できた場合にのみキャッシングして今後そのコンテンツのプロバイダ候補となる。

5. コンテンツ取得方式の性能評価

5.1 性能評価の概要

4.で説明したREMIFと2台プロバイダ選択方式（以下Dualと呼ぶ）に加え、2.2で説明した、基本的な動作に従う方式（以下Pure）及び探索パケット利用方式で単純に1台のプロバイダを選択する方式（以下Single）の4方式の基本的性能について計算機シミュレーションによる評価を行う。

一般に無線ネットワークの性能は物理層やデータリンク層のプロトコルに大きく依存するが、本シミュレーションではこれらの影響を排除した環境での評価を行うため、以下のとおり理想的な通信環境を仮定する。

1. パケットの衝突やビット誤りは一切発生せず、これらに伴うパケットの棄却も起こらない
2. 通信範囲として定めた距離以内のノードに対しては確実にパケットを送信できる
3. 中継に伴う遅延は非常に小さく、制御パケットやコンテンツパケット転送中に中継ノードが通信範囲外に移動して無線リンク切断を引き起こすことはない

以上の仮定のもとで、送信パケット数や送信ホップ数などのコンテンツ取得に関わる指標について各方式の比較を行う。

5.2 ネットワークモデル

ネットワークモデルとして1000m四方のエリアを想定し、そこに400台のノードをランダムに配置する。それぞれのノードは速度1~9m/sのrandom way pointモデルに従い移動するものと仮定する。これらのノードモデルは特定のアプリケーションや環境を想定したものではなく、孤立ノードが存在しない程度の密な配置において低速~中速のノードがまんべんなく存在する状況を模擬している。通信範囲は100mとする。

シミュレーション時間を50000sとし、この期間に平均0.1/sのポアソン過程に従いランダムに選ばれたノードが次々とリクエストとなる。リクエストはあらかじめ用意された80種類のコンテンツの中から一つを選び要求する。このとき、既に自身がキャッシングしているコンテンツも要求候補からは除外しない。従って、キャッシングしているコンテ

ンツを要求した場合には、即座にコンテンツ取得ができたものとみなす。自身がキャッシングしていないコンテンツを要求した場合は、各方式の手順に従ってコンテンツ取得を行う。この際、5.1で述べたとおり制御パケットやコンテンツパケットの棄却は一切生じないものとする。

また今回のシミュレーションでは、リクエストによる要求パケットあるいは探索パケットのブロードキャストは1回のみとし、これによりプロバイダが見つからなかった場合にはコンテンツ取得失敗として扱う。

各コンテンツに対しては、対応する一つのノードがオリジナルを所持していると仮定する。加えて、全てのノードはオリジナル以外のコンテンツをキャッシング用バッファサイズだけキャッシングできるものとする。キャッシング時にバッファに空きがない場合は、キャッシングした時間が一番古いものを削除して新しいコンテンツに置き換えるFIFOを適用する。

5.3 コンテンツキャッシング及び要求条件

ICNのコンテンツ取得に関わる性能は、各コンテンツをどの程度のノードがキャッシングしているかに影響を受け、これはノード数やコンテンツ種類の数及びキャッシング容量に依存する。そこで、1コンテンツ当たりの平均キャッシングノード数 n を次式のように定義する。

$$n = \frac{Nb}{c} \quad (1)$$

N はネットワーク内のノード数、 b はキャッシングバッファサイズ、 c はコンテンツ種類数を表す。シミュレーションでは先に述べたとおり $N=400$ 、 $c=80$ と固定し、 b を変化させることによって n の値を調整する。

また、どのコンテンツを要求するかに関して、均一・不均一の2パターンを用意する。均一要求では用意された全種類のコンテンツの中から等確率でランダムに一つを選択する。そして不均一要求では次式に従い要求コンテンツを決定する。

$$p_i = \frac{i}{\sum_{k=1}^c k} \quad (i=1, 2, \dots, c) \quad (2)$$

ここで p_i はコンテンツ i が要求コンテンツとして選ばれる確率である。以上の平均キャッシングノード数とコンテンツ要求の条件を変化させた場合の性能を評価する。

6. 性能評価及び考察

6.1 制御パケット送信回数

図5及び図6に平均キャッシングノード数 n に対する制御パケット送信回数を示す。図5はコンテンツ要求が均一パターンのときであり、図6は不均一パターンのときである。制御パケットは、Pure、REMIFでは要求パケットのみで、Single、Dualでは探索、応答、要求パケットの3種類であ

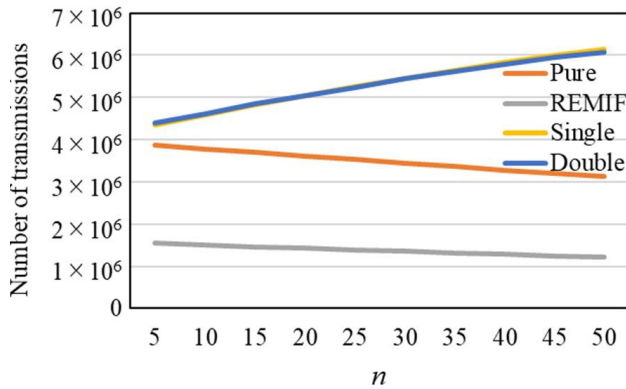


図5 均一要求パターンでの制御パケット送信回数 REMIFが最も少なくSingleやDualは他方式に比べ多い。またPureやREMIFでは n の増加に伴って回数は減少しているが、SingleやDualでは逆に増加している。

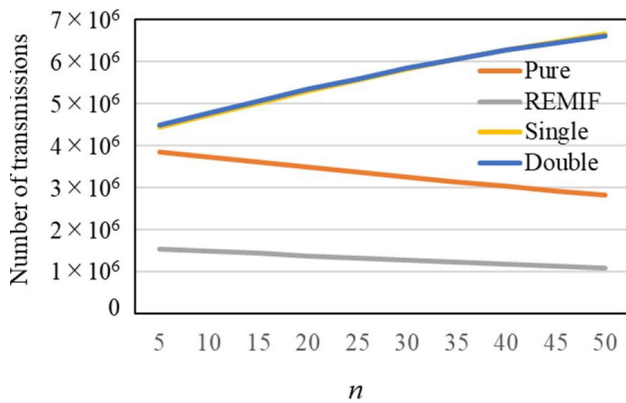


図6 不均一要求パターンでの制御パケット送信回数 方式の優位性については均一パターンと変わらない。 n が大きくなるとPure, REMIFの削減量及びSingle, Dualの増加量が均一パターンに比べて大きくなる。

る。送信回数は中継パケットを含む全てのノードが該当パケットを送信した回数の総和と定義する。ユニキャスト、マルチキャストの違いにかかわらず、パケットを一つ送信すれば送信回数1回としてカウントする。

図5及び図6よりコンテンツ要求パターンに関係なく制御パケット送信回数が一番少ないのはREMIFであり、続いてPureが少ない。Single, Dualはこれら2方式と比べて制御パケット送信回数が多いことが分かる。Pure, REMIFでは制御パケットが要求パケットのみであり、更にREMIFでは要求パケットの送信を抑制していることから制御パケット送信回数を少なくできていることが分かる。

そして、平均キャッシングノード数 n の増加につれて、Pure, REMIFの送信回数が減少するのに対して、Single, Dualのそれは増加している。 n が増加すると、要求されたコンテンツをキャッシングしているノード数の期待値が大きくなる。この場合、Pure, REMIFではこれらのノードが要求パケットを受信すると、これ以上の中継をせずにコンテンツ送信を行うため、要求パケット送信回数は減少する。一

方、Single, Dualでは、要求されたコンテンツをキャッシングしているノード全てが応答パケットを送信するため、制御パケットの送信回数は逆に増加する。

なお、SingleとDualを比較すると差は僅かではあるが、 n が小さい場合にはSingleの送信回数が小さく、 n が大きい場合にはDualの送信回数が小さい。 n が小さい場合には遠方のノードがプロバイダとして選択される可能性が高くなり、2台のプロバイダを選択するDualでは要求パケットの送信回数が大幅に増加する。一方 n が大きい場合には、近傍のノードがプロバイダとなる可能性が高くなるため、要求パケットの送信回数の差が小さくなるのに加えて、Dualではコンテンツキャッシングの機会がSingleより少ないことから、応答パケットを送信するノード数が減る結果、制御パケットの送信回数がSingleよりも小さくなる。

パターンの違いによる観点からすると、方式間の優位性についてはどちらのパターンも同じであった。ただし、 n が大きくなると不均一におけるPure, REMIFの削減量及びSingle, Dualの増加量が均一に比べ大きくなることが分かる。これは、不均一パターンでは多くのノードがキャッシングしているコンテンツを要求する確率が高くなることから、Pure, REMIFではより多くのノードが要求の中継をせずにコンテンツを送信し、Single, Dualはより多くのノードが応答パケットを送信ようになるためである。

6.2 コンテンツパケット送信回数

均一要求パターン、不均一要求パターンにおける平均キャッシングノード数 n に対するコンテンツパケット送信回数を図7及び図8に示す。要求パケット送信回数同様に、中継パケットを含む全てのノードがコンテンツパケットを送信した回数の総和と定義する。ただし、Dual方式だけは、プロバイダがコンテンツの前半若しくは後半のみを送信する場合、中継ノードも含め1回の送信でコンテンツパケット送信回数を0.5としてカウントする。

図7及び図8より、コンテンツ要求パターンに関係なく、重複コンテンツ送信が生じるPure, REMIFはコンテンツパケット送信回数が非常に多い。特にコンテンツ送信抑制をしないPureは最も送信回数が多い。これらの方式に比べてSingleとDualはコンテンツ送信回数を100分の1程度に削減できていることが分かる。SingleとDualで比較すると、Dualのほうが多い。これは両方式がリクエストにより近いノードをプロバイダとして決定しやすいために、Dualで決定した2台のプロバイダのうちどちらかはもう一方のプロバイダよりも遠方になる可能性が高くなるためである。

パターンによる違いをみると、Single, Dualはプロバイダの数に違いが出ないため、コンテンツ送信パケット数も変わらない。一方、Pure, REMIFでは不均一パターンの場合 n が増加するにつれてプロバイダも増えることから値も大きくなっていくことが分かる。

ここで、制御パケット送信回数とコンテンツパケット送信

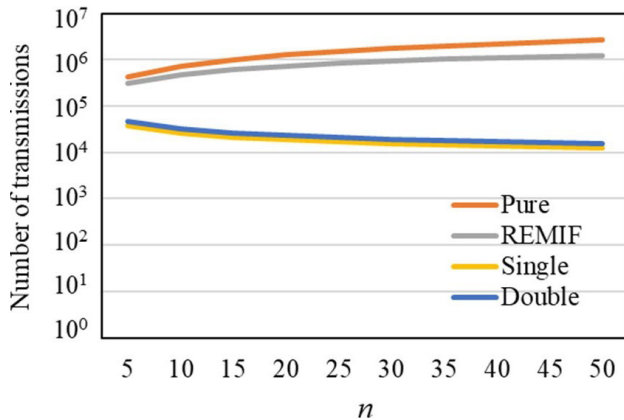


図7 均一要求パターンでのコンテンツパッケージ送信回数 重複コンテンツ送信が生じる Pure, REMIF はコンテンツパッケージ送信回数が非常に多い。これらの方式に比べて Single と Dual はコンテンツ送信回数を 100 分の 1 程度に削減できている。

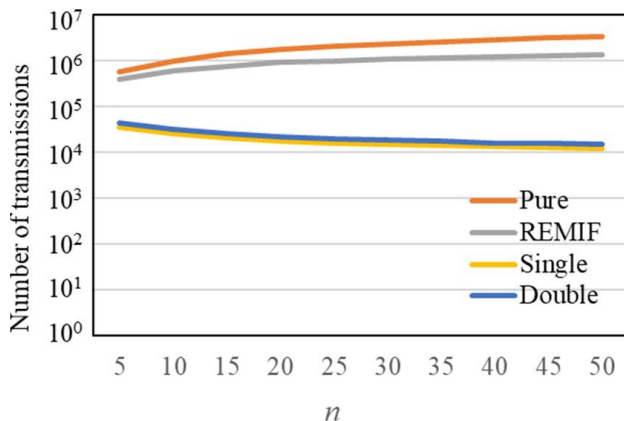


図8 不均一要求パターンでのコンテンツパッケージ送信回数 Single, Dual は均一と比べて値が変わらない。Pure, REMIF では n が増加するにつれて均一よりも値が大きくなっていく。

回数の総和を見てみると、特に Single と Dual で制御パッケージ送信回数が多いことから総和も Pure, REMIF より大きくなっている。ただしここではコンテンツサイズを考慮しておらず、一つのパッケージで送信できるという前提を設けている。したがって、コンテンツサイズが大きくなり、複数のパッケージに分割する必要がある場合には、その分割回数に比例して送信回数も増加することから、コンテンツ送信回数の少ない Single と Dual の制御パッケージも含めた総送信回数のほうが少なくなる。

6.3 コンテンツ取得率

均一要求パターン、不均一要求パターンにおける平均キャッシングノード数に対するコンテンツ取得率を図9及び図10に示す。コンテンツ取得率はコンテンツの総要求数に

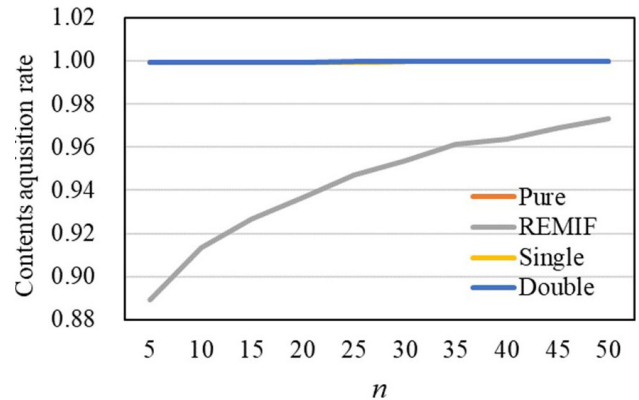


図9 均一要求パターンでのコンテンツ取得率 REMIF 以外は n の値にかかわらず 100% のコンテンツ取得成功を達成している。REMIF では取得率が 100% とならず、 n が小さくなるにつれて減少している。

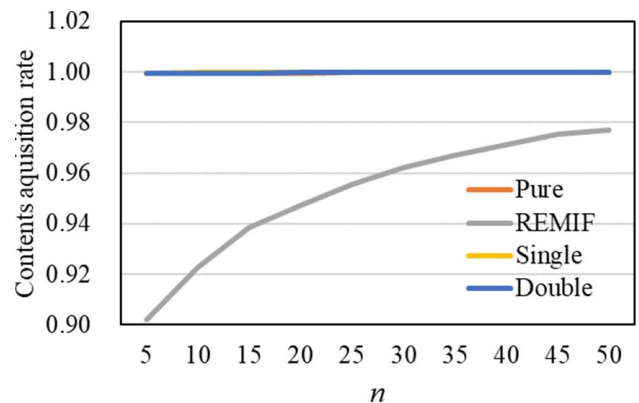


図10 不均一要求パターンでのコンテンツ取得率 不均一要求パターンでの REMIF のコンテンツ取得率は均一要求パターンと比較して大きい。

に対するコンテンツ取得の総成功数の比で表される。今回のシミュレーションではパッケージの棄却が発生しないため、コンテンツ取得失敗の原因は、Pure, REMIF では1回の要求パッケージ送信でプロバイダを発見できなかった場合、Single と、Dual では1回の探索パッケージ送信でプロバイダを発見できなかった場合に限られる。

図9及び図10より、REMIF 以外は n の値にかかわらず 100% のコンテンツ取得成功を達成しているのに対して、REMIF では n が 50 の場合でも取得率が 100% とならず、 n が小さくなるにつれて取得率が減少していることが分かる。また、不均一要求パターンよりも均一要求パターンのほうが取得率は小さい。

REMIF では要求パッケージの送信制限をすることによって、要求コンテンツをキャッシングしているどのノードにも要求パッケージが届かない可能性がある。特にこの可能性は、上記のノード数が少なくなるほど高くなる。したがって、小さい n やキャッシングに偏りのない均一要求パターンにおいて取得率が小さくなる。

ただし、今回は要求パッケージのフラッディングを1回のみ

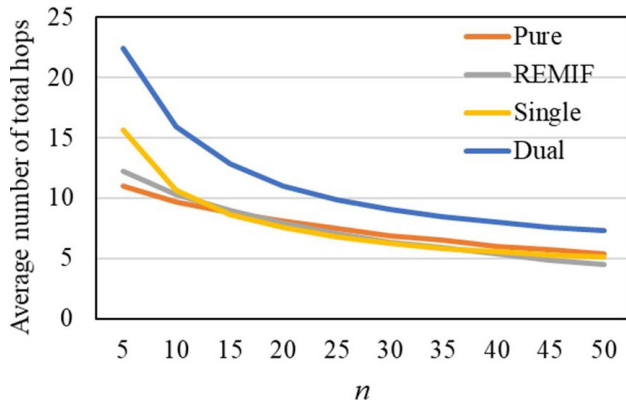


図 11 均一要求パターンでのコンテンツ取得までの平均ホップ数
Dual のホップ数がほかの方式に比べて大きい。

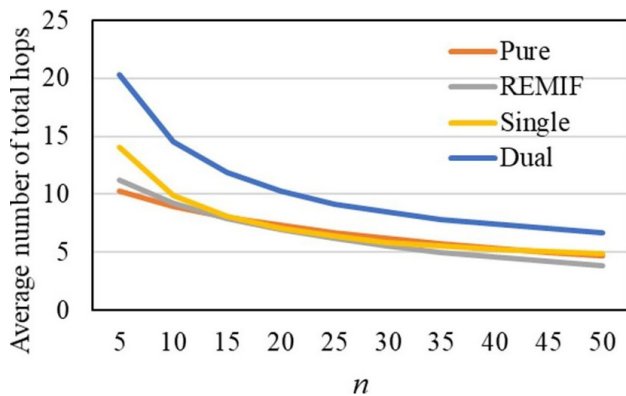


図 12 不均一要求パターンでのコンテンツ取得までの平均ホップ数
均一と比較して方式間の優位性には変わりはないが、ホップ数が小さくなる。

と限定しているため、再フラッディングを許可することで、REMIF でも送信パケット数は増加するもののコンテンツ取得を 100% 近くまで向上させることは可能である。

6.4 コンテンツ取得までの平均ホップ数

均一要求パターン、不均一要求パターンにおける平均キャッシングノード数に対するコンテンツ取得までの平均ホップ数を図 11 及び図 12 に示す。

ホップ数とはパケットを宛先に届けるまでに宛先も含めて経由するノード数である。例えば図 4 ではリクエストから見るとノード A は 4 ホップでノード B は 2 ホップとなる。コンテンツ取得までのホップ数とは、コンテンツの要求時点から取得完了時点までに送信した一連のパケットの合計ホップ数である。Pure, REMIF では、最も少ないホップ数で到達するプロバイダまでのホップ数の 2 倍で定義され、Single ではプロバイダまでのホップ数の 4 倍、Dual ではホップ数が多いほうのプロバイダまでのホップ数の 4 倍で定義される。ここで 2 倍や 4 倍としているのは、探索、応答、要求、コンテンツの全てのパケットが同じ経路を使って送信されるため

である。

図 11 及び図 12 より Dual のホップ数はほかの方式に比べて大きい。これは、Pure, REMIF では最も近いプロバイダから全てのコンテンツパケットを受信でき、Dual では Single でプロバイダとなる 1 台めよりホップ数が多い傾向にある 2 台めのプロバイダからのパケットもコンテンツ取得に不可欠なためである。

ただし、Dual ではプロバイダが 2 台存在する場合、各プロバイダから送信されるコンテンツ量は他方式の半分である。このため、コンテンツサイズが大きい場合には、各プロバイダがコンテンツパケットを送信開始してから終了するまでの時間を大幅に短縮できるため、実時間としての遅延を小さくできる可能性がある。

パターンによる違いを見ると、方式間の優位性には変わりはないものの、不均一のほうが均一よりもホップ数が小さくなる。不均一パターンではプロバイダ候補が多く存在するコンテンツが要求される確率が高くなり、リクエストにより近いノードがプロバイダとなるためである。

7. む す び

本稿では、ICN をモバイルネットワーク環境に適用した際の問題点や解決策について述べるとともに、これまで提案されてきた手法を紹介し、簡単な性能評価を行った。その結果、コンテンツ要求に関する偏りの有無は今回の方式間の優位性には影響を与えないことが示された。またコンテンツサイズが小さい場合には、要求パケット削減型のほうが送信パケット量を抑えることができ、コンテンツサイズが大きい場合には、探索パケット利用型のほうが送信パケット量を抑えられることが分かった。コンテンツの取得率や取得までの経由ホップ数も方式による優位性の違いは見られたが、やはりコンテンツサイズの違いなど状況に応じて優位性にも変化が生じることが分かった。

ただし、今回は物理層やデータリンク層の振る舞いを理想的なものと仮定しているため、実際の無線通信環境が各方式に及ぼす影響については検証が必要である。

また、今回は紹介しなかったが、IC-MANET の研究分野ではキャッシング手法に関する研究も多く行われている。それらのキャッシング手法によっては、更に効果的なコンテンツ取得手法が存在するかもしれない。以上は今後の大きな検討課題である。

文 献

- (1) B. Ahlgren, C. Dannewitz, C. Imbrenda, D. Kutscher, and B. Ohlman, "A survey of information-centric networking," *Communications Magazine*, vol. 50, no. 7, pp. 26-36, July 2012.
- (2) L. Zhang, A. Afanasyev, J. Burke, V. Jacobson, P. Crowley, C. Papadopoulos, L. Wang, and B. Zhang, "Named data networking," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 3, pp. 66-73, July 2014.

- (3) V. Jacobson, D.K. Smetters, J.D. Thornton, M.F. Plass, N.H. Briggs, and R.L. Braynard, "Networking named content," Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, pp. 1-12, Dec. 2009.
- (4) J. Kim, D. Shin, and Y.B. Ko, "TOP-CCN : Topology aware content centric networking for mobile ad hoc networks," 19th IEEE International Conference on Networks (ICON), Dec. 2013.
DOI : 10.1109/ICON.2013.6781983
- (5) T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol," IETF RFC, 3626, 2003.
- (6) M. Amadeo, A. Molinaro, and G. Ruggeri, "E-CHANET : Routing, forwarding and transport in information-centric multihop wireless networks," Computer Communications, vol. 36, no. 7, pp. 792-803, April 2013.
- (7) R.A. Rehman, T.D. Hieu, H. Bae, S. Mah, and B. Kim, "Robust and efficient multipath interest forwarding for NDN-based MANETs," Wireless and Mobile Networking Conference, July 2016.
DOI : 10.1109/WMNC.2016.7543988
- (8) 松下拓也, 藤川丈自, 塩川茂樹 "無線マルチホップネットワークにおけるモバイルエージェントを用いた位置情報利用型ルーティングプロトコル," 信学論 (B), vol. J95-B, no. 2, pp. 208-218, Feb. 2012
- (9) J. Fujikawa and S. Shiokawa, "Information-centric architecture using mobile agent for MANET," Journal of Signal Processing, vol. 22, no. 4, pp. 179-183, July 2018.
- (10) 藤川丈自, 塩川茂樹, "コンテンツ指向型 MANET におけるモバイルエージェントを利用したコンテンツ取得方法の改善," 信学技報, vol. 118, no. 282, pp. 81-86, Nov. 2018.
- (11) 藤川丈自, 塩川茂樹, "情報指向型ネットワークにおけるマルチパスを利用したコンテンツ取得手法," 信学技報, vol. 119, no. 157, pp. 19-22, Aug. 2019.
- (12) K. Shinohara and S. Shiokawa, "Multipath content acquisition method using overhearing in ICN," Journal of Signal Processing, vol. 24, no. 4, pp. 159-162, July 2020.
- (13) 篠原楓, 塩川茂樹, "ICN におけるオーバヒアを利用したマルチパスコンテンツ取得方法のキャッシュ制御の改良," 信学技報, vol. 120, no. 438, pp. 25-30, March 2021.

(CCS 研究会提案, 2022 年 12 月 26 日受付,
2023 年 1 月 12 日再受付)



塩川茂樹 (正員: フェロー)

平 10 慶大大学院博士後期課程修了。同年名古屋工科大学・電気情報工学科助手。平 13 神奈川工科大学・情報ネットワーク工学科助手, 助教授を経て教授。現在に至る。無線マルチホップネットワークの研究に従事。博士 (工学)。平 8 本会交換システム研究会優秀論文賞。平 12 電気通信普及財団テレコムシステム技術学生賞。平 20・平 26・平 28・令 4 本会通信ソサイエティ活動功労賞。令元本会通信ソサイエティ活動功労顕彰。令 2 本会通信ソサイエティ教育功労賞。

電子情報通信学会と倫理綱領

—電子情報通信学会倫理綱領策定から現在まで—

The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) and its Code of Ethics :

From the Formation of the IEICE's Code of Ethics to the Present

大谷卓史 Takushi OTANI

アブストラクト 本稿においては、電子情報通信学会倫理綱領の策定に至るまでの前史から、同倫理綱領の策定及び、その後の展開を記述する。倫理綱領の策定・改定に関わる議論では、本会を取り巻く社会や技術、思想などの環境変化との関わりから、倫理綱領のあり方・内容が検討されている。本稿も、より大きな本会を取り巻く環境の変化の中で、倫理綱領がどのように策定・改定されてきたかに着目し、時代区分を行う。1998年電子ネットワークの倫理として策定された倫理綱領は、2011年改定によって、電子情報通信技術者の倫理として形を整え、2023年3月現在、多様性と対話の時代に向けての再改定作業が進められている。

キーワード 倫理綱領、情報倫理、技術者倫理、技術倫理、科学技術史

Abstract In this paper, we describe the history and background of the Code of Ethics of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE), which is the largest society for electronics, information and communication engineers in Japan. The IEICE members who established and revised this code did so after examining what a code of ethics should be and considering the social, technological, and ideological aspects of the institute's goals and operations. In this work, the history of the Code of Ethics of the IEICE is divided into three periods focusing on the development of the character of the ethical code and its relationship to the milieu of the institute: the *foundation period* when the code reflected the ethics of electronic networks; the *2011 revision period*, when the code was made to reflect engineering ethics instead; and the *2023 re-revision period* when ethics for an age of diversity and communication among various actors were added to the code.

Key words Code of ethics, Information ethics, Engineering ethics, Ethics of technology, History of science and technology

1. はじめに

本稿においては、電子情報通信学会倫理綱領の策定に至るまでの前史から、同倫理綱領の策定、その後の展開について記述する。倫理綱領の策定・改定に関わる議論では、電子情報通信学会（以下、本会）を取り巻く社会や技術、思想などの環境変化との関わりから、倫理綱領のあり方・内容が検討されている。本稿においても、倫理綱領の策定プロセス自体のみならず、より大きな本会を取り巻く環境の変化も併せて記述することとする。

本稿においては、1998年に策定された本会倫理綱領を第1版とし、2011年改訂版を第2版、2022年12月現在改訂が進み、2023年に正式に公表予定の再改訂版を第3版と呼ぶ。

本稿においては、本会倫理綱領の策定の前史から現在までを次のように時代区分する。

前史 IFIP (International Federation of Information Processing) における倫理綱領作成勧告とその影響

第1期 電子ネットワークの倫理としての倫理綱領の形成：電子情報通信学会倫理綱領第1版の形成

第2期 電子情報通信技術者の倫理としての倫理綱領の形成と展開：電子情報通信学会倫理綱領第2版の形成

第3期 多様性と対話の時代に向けての倫理綱領の改定：電子情報通信学会倫理綱領第3版の形成

なお、本稿においては、第3版に関しては、その改訂の意義と展望を説明するにとどめ、形成プロセスの記述については、電子情報通信学会誌 2023年3月号小特集における倫理綱領検討小委員会（委員長：小川賢神戸学院大学教授）の「倫理綱領・行動指針改定について」に委ねる。

本稿においては、倫理綱領が専門家集団としての学会にとってどのような意義を有するか述べたうえで、本会倫理綱領にも大きな影響を与えている IEEE と ACM の倫理綱領の作成と発展について、社会的・技術的背景も交えて説明する（1, 2 節）。そのうえで、本学会倫理綱領策定の前史として、IFIP (International Federation of Information Processing) における加盟各国学（協）会に対する倫理綱領作成勧告について説明し（3 節）、第1版倫理綱領の策定（4 節）、第2版の作成と「倫理事例集B」のとりまとめ（5 節）について述べ

大谷卓史 正員 吉備国際大学アニメーション文化学部
E-mail ootani@kiui.ac.jp
Takushi OTANI, Member (Faculty of Animation Culture, Kibi International University, Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.16 No.4 pp.310-324 2023年4月
©電子情報通信学会 2023

る。最後に、新しい時代に向けての倫理綱領改定（第3版）の意義を述べて、将来への展望を示すことで本稿を終える（6節）。

なお、電子情報通信学会倫理綱領および関連情報については、下記のURLを参照していただきたい。

https://www.ieice.org/jpn_r/about/rinrikoryo/index.html

2. 原理：学会にとって倫理綱領とは何か

Johnson（2008：168-170）によれば、専門職（profession）は一般的に次の五つの特徴を有する。中世以来の伝統的専門職である医師・法律家はこれらの五つの特徴を備える⁽¹⁾。

- ①**高度な体系的知識の修得**：専門職を特徴づける体系的かつ抽象的な知識がある。専門職は高度な知識の探究を行う研究者と職業的实践者に分かれることが多い。
- ②**自律性**：高度な知識に基づき、職業上自分自身で判断を行う自律性を有する。同時に、専門職集団の成員資格・教育内容・職業上の能力の基準などを決定する集団としての自律性を有する。
- ③**フォーマルな組織**：政府・自治体などに承認されたフォーマルな専門職団体を形成する。
- ④**倫理綱領**：公衆・クライアント・雇用主が専門職に何を期待しうるかを示す倫理綱領を有する。ときに、倫理綱領は専門職の「社会契約」（social contract）とも呼ばれる。
- ⑤**実践的文化**：専門職特有の文化・価値を有する。医師であれば科学に価値を置くと同時に患者に共感的である、エンジニアであれば効率と客観性を重んじるなど。

専門職は高度な知識（Johnson⁽²⁾は適切な訓練を受けない者が理解困難な「秘教的知識」と表現する）を有し、その職業上の判断の評価は、最終的には同僚の専門職でなければ困難である。医療過誤裁判や製品事故などの裁判においても、専門家証人の知見が過失や危害意図の有無を決めるのに重要である。専門職の判断のよりどころはその高度な知識であるから、自律的判断を下さざるをえない。専門職として遵守すべき規範を有し、その規範に従って専門的な自律的判断を下し、その仕事と成果について同僚専門家の評価を受ける構造を有する点で、専門家は自律性を有する。

このように専門職は、自律性を有し、非専門職からは画然と区別される集団を成しているから、自らの誇り⁽³⁾を含むアイデンティティのよりどころともなりうる価値観と併せて、それぞれに独特の文化が育つ傾向がある。

倫理綱領（code of ethics, code of conducts）は社会に対して自らの専門職としての価値と責任を宣言するとともに、新規参入者が専門職としての自覚と誇りのもと育つのを助け、専門職が職業人として活動や判断する際に倫理的に考え振舞うことを支援することも同時に期待される^{(4)～(7)、(註1)}。

高橋（1996）は、「専門職とは、何らかの倫理綱領を定め

た団体に所属するプロフェッショナルである」と規定し、その集団の自律性に応じて、ある種の連帯責任を有するとする⁽⁸⁾。

既に見たように、専門職の専門的知識や専門的实践に対する評価は専門職集団にしかできないことから、少なくとも、同僚専門職が専門職としてふさわしい専門的知識を身に着け、専門的实践をするように支援する役割を有する。上記の連帯責任といった場合にはこの「支援」が一つの責任に相当するものと考えられるが、恐らくはこれに限られない。多くの倫理綱領に、同僚会員や専門職が倫理綱領に合致した行動をとれるよう支援する旨が記されるのは上記の連帯責任の表明である。

3. 歴史的背景：IEEEとACMにおける倫理綱領の成立と展開

3.1 IEEEにおける倫理綱領の成立と展開

世界最大の電子・電気工学の学協会であるIEEE（Institute for Electrical and Electronics Engineers）は、1963年に米国の電気技術者の学協会であるAIEE（American Institute of Electrical Engineers）と無線・電子工学技術者の団体であるIRE（Institute of Radio Engineers）の合併で誕生した。

AIEEは、1906年当時の会長であるSchuyler S. Wheelerの講演「技術者の名誉」（Engineering Honor）をきっかけに最初の倫理綱領を制定し（1907年）、1912年は上記の倫理綱領を改定して、「専門的行動原則規範」（Code of Principles of Professional Conduct）を制定した。同規範の主要な論点は、「一般原則」「エンジニアの顧客・雇用者との関係」「工学的記録・データの所有権」「エンジニアの公衆との関係」「エンジニアの専門家同僚との関係」であった⁽⁹⁾。

1963年にAIEEとIREの合併でIEEEが創設されて以後、「専門職技術者倫理基本原則」（Fundamental Principles of Professional Engineering Ethics）の採択を経て、1974年にはボランティアベースで開発されたIEEE倫理綱領が理事会で採択され、1975年2月IEEE Spectrumに掲載された。この倫理綱領は、前文及び4条から構成される。第1条は技術者（engineers）が「高い水準の勤勉さ・創造性・生産性を維持する」ことを要請する。第2条は職務における責任を定め、差別禁止・自由闊達な議論・同僚の綱領遵守の支援・率直な批判の歓迎・専門職団体への参加・同僚の専門知識及び技能の開発の支援を義務づける。第3条は、顧客と雇用者に対する忠実義務を求める。第4条は、「コミュニティ（地域社会）」への責任を果たすよう義務づけ、「公衆の安全・健康・福祉を守り、公益に影響ある領域に対する濫用を防ぐよう発言する」などのことを求める^(註2)。

（注1）：電子情報通信技術者の専門職としての責任から見た倫理綱領の意義に関しては、川口（2021）⁽⁶⁾が具体例を挙げて分かりやすく解説しているので参考になる。また、倫理綱領に関する哲学的・倫理学的考察として川口（2009）⁽⁷⁾も参照（なお、川口は電子情報通信学会倫理綱領第2版改訂の幹事補佐を務めた）。

1979年には同学会の性格を反映して、前文における宣言において、「技術者」(engineers)と科学者(scientists)・テクノロジスト(technologists)を併置する改訂が行われた。1987年には、IEEE内部での対立も背景として、学会や学会に対する誹謗中傷を禁じる条文が追加された⁽⁹⁾。

上記条文追加過程で、IEEE会長となったEmerson W. Pughは倫理綱領をよりシンプルに改定する決定をし、591語から238語まで圧縮した。同倫理綱領案は、1990年2月にIEEE Spectrumに掲載され、同年8月の理事会での承認を経て、1991年1月施行された⁽⁹⁾。

この改定案においては、従来第4章(最終章)に置かれていた「公衆の安全・健康・福利(welfare)」の保護が、これらを最優先するという文言の変更とともに、第1条におかれたことが特に注目される。専門職としての知的・道徳的水準の維持・向上を第1章に置いた従来の倫理綱領からの大きな転換である。

その後自分は科学者・技術者・テクノロジストのいずれでもないという規定する学会員が増えたことから、2006年改訂では「公衆の安全・健康・福祉」が問題となる場合の意思決定は「技術的意思決定」(engineering decisions)に限らないと判断し、「技術的」という語を外すに至った⁽⁹⁾。

最新版(2021年)では、公益保護及び公衆への危害防止に加え環境やプライバシーの保護、差別禁止対象として「性的指向、性的表現」などが加わっている。これらは、社会的ダイバシティや環境への配慮の広がりを含む、近年の社会・技術の変化を踏まえたものである。

3.2 ACMにおける倫理綱領の成立と展開

一方、アメリカ計算機学会(ACM: Association for Computing Machinery)が倫理綱領を制定した背景には、1960年代欧米における、コンピュータ専門職の犯罪や逸脱行動への懸念があった。企業や政府における大型計算機利用が拡大する一方で、プライバシー侵害の懸念やコンピュータを悪用する詐欺行為、財産的価値をもつコンピュータプログラムの窃盗などが心配されるようになった。

1967年には、法学者Westinによるプライバシーと新技術について論じた古典Privacy and Freedom⁽¹⁰⁾が出版され、1972年には米国保健教育福祉省(U. S. Department of Health, Education and Welfare)が、コンピュータシステムによる情報処理におけるプライバシー保護について検討する「自動化個人データシステムに関する長官諮問委員会」を設置し、翌年7月に報告書⁽¹¹⁾を公表した。この報告書では、その後永く米国における個人データ・プライバシー保護の原則となる公正情報慣行原則(Fair Information Practice Principles)が示された⁽¹¹⁾。このように、1960年代後半から1970年代前半にかけては、情報処理におけるプライバシー

問題が社会的な関心の的であった。

スタンフォード研究所(SRI)のコンピュータ科学者Donn Parkerは、コンピュータ犯罪の事例収集を開始するとともに、ACMにコンピュータ専門職の倫理綱領の作成を促した⁽¹²⁾。1966年ACM理事会は、「情報処理における専門職行動ガイドライン」を採択した。同学会はコンピュータ専門職の逸脱行動や倫理問題に対応することで社会への責任を表明し、社会から信頼を得ることを期待していた⁽¹²⁾。

このガイドラインは、前文と、「公衆との関係」、「雇用者・クライアントとの関係」、「同僚専門職との関係」の三つの章から構成される。前文では、AIEE倫理綱領と同様に情報処理専門職の高水準の遂行能力と倫理的行動の維持と併せて、それに見合うだけの「情報処理科学・技術における専門職の名誉及び尊厳、実効性を維持・向上させる」ことなどを宣言する。

同時期のIEEEの倫理綱領と比較した場合、専門職としての能力及び道徳的振る舞いに関わる章・条文ではなく、公衆との関係に関わる章を第一に掲げている点が注目される。第1条は、「ACM会員は、専門職責務の遂行における公衆の健康・プライバシー・安全・全般的福利に対し適切に配慮するものとする」と述べ、公衆の健康・プライバシー・安全・福利の尊重をうたう。特に注目されるのは、プライバシー保護への言及である。これは、前述のように、同倫理綱領が社会における情報処理専門職によるコンピュータ犯罪の懸念に対応して作成されたことを背景とすると考えられる。

その後同ガイドラインは改定され、1972年に同学会倫理綱領となった。同倫理綱領は、1992年に改定され、倫理綱領を現実の場面でどのように適用すべきかを示す仮想事例集もつくられた。現行のACM倫理綱領は2018年に改定されたもので、社会の関心を反映して、IEEEと同様に環境や社会のダイバシティへの配慮が取り入れられた。

3.3 現代的な倫理綱領の性格の成立

このように、電子情報通信学会と関係が深い二つの国際学会であるIEEEとACMの倫理綱領は、多数の共通点をもつと同時に、その成立・展開過程を追うと、成立時期の相違によって、その過程においては会員の責任や価値観に関して力点の位置が大きく違っていたことがわかる。公衆の健康・安全・福利に対する配慮が最優先事項となるのは、新しく倫理綱領が設けられたACMのほうが早かった。また、1966年に登場した時点で、ACMの倫理綱領は公衆のプライバシーの尊重もコンピュータ専門職の重要な責任と宣言している。

専門職の学協会倫理綱領は、その会員が誇りある専門職としてのアイデンティティを身に付け、高潔に振る舞うための規範となると同時に、学会に対する社会の信頼と敬意を維持・向上させることを重要な目的・動機としている。歴史的に見ると、一般的に、技術者倫理及び科学技術系学会の倫理綱領は、顧客・クライアントに対する忠誠から、公衆・社会・環境に対する責任へとその力点の置き方が変わってきた

(注2): Pugh (2009) に引用された IEEE Spectrum, 1975 年 2 月 2 日号 p. 65 掲載の "IEEE Code of Ethics For Engineers" より⁽⁹⁾。

と指摘されている⁽¹³⁾。ACMの専門職行動ガイドライン及び倫理綱領が成立した時期（1960年代から1970年代）は、科学技術の社会に与えるインパクトが必ずしも好ましいものばかりではないという認識の広がりによって、科学技術と現代文明批判が高まり⁽¹⁴⁾、同時に、コンピュータ専門職の逸脱行為や違法行為に対する社会的警戒が広まりつつあった時代だった。IEEEとACMの倫理綱領はその成立時から上記のように専門職としての誇りあるアイデンティティの確立及び社会的信頼の獲得という大きな目的は当然共通である一方で、その成立時期の歴史的背景によって成立時の性格が大きく変わったものと考えられる。学会の倫理綱領の成立と展開を追うにあたっては、このように学会を取り囲む社会や技術の状況にも目を向ける必要がある。

4. 前史：IFIP (International Federation of Information Processing) における倫理綱領作成勧告の形成 (1979~1990)

4.1 IFIP と日本

電子情報通信学会倫理綱領が制定されたきっかけとして、国際情報処理連合 (IFIP: International Federation of Information Processing) による加盟国代表学会に対する倫理綱領制定の勧告があったことは、よく知られている。電子情報通信学会倫理綱領成立の前史として、IFIPの倫理綱領制定勧告の公表までの経緯を記述する。

IFIPは、1959年6月15~20日UNESCOがパリで開催した国際情報処理会議 (International Conference on Information Processing) をきっかけに、情報処理に関わる国際会議を定期的に開催する国際機関として設立されたものである (UNESCOは定期的な国際会議を開催できない)⁽¹⁵⁾。早くも1959年7月6日に新組織の定款 (Statutes of the International Federation of Information Processing Societies)⁽¹⁶⁾が作成され、1960年にIFIPが発足した⁽¹⁷⁾。同定款によれば、初期のIFIPは情報処理分野の国際会議の開催及び、各国学会が協力できる国際委員会の設立・運用、及び学術・教育における国際協力推進を目的としている。

当時日本には情報処理・コンピュータ科学を主要分野とする学会が存在せず⁽¹⁸⁾、多数の学会の意思調整を行いながらIFIPに参加することは難しいとの判断から、新学会の設立計画が起こり、日本国内のコンピュータ関連分野の学術、技術の進歩を図ることを重要な目的として、1960年4月情報処理学会が設立された (初代会長：山下英男)⁽¹⁹⁾。その後、

情報処理学会が日本を代表しIFIPに参加する機関となった。

4.2 IFIP による倫理綱領制定勧告への展開

1979年欧州評議会は、「データ処理の倫理と結びついた法的問題」 (Legal Problems Connected with the Ethics of Data Processing) に関する検討を開始した^{(20)~(22)}。1980年頃、IFIP理事会は、これをきっかけにTC-9 WG9.2^{(23)~(24)}の研究課題に「情報倫理」 (information ethics) を追加し、同ワーキンググループのchairmanだったHarold Sackmanに「情報化社会におけるcode of ethics」を作成するよう個人的に要請したとされる⁽²⁵⁾。

1988年にSackmanは“Preliminary IFIP Code of Ethics”を起草し、1990年7月14日開催のIFIP TC-9で、同案について議論が行われた。「文化、伝統、法制的異なる世界で普遍的な倫理綱領などの成文化には疑問を抱く者や、IFIPのような国際機関はいかなるcodeもそのメンバーである各国学 (協) 会に強制できないと主張する者」⁽²⁶⁾も登場したとされる。多様な意見が見られたことから、1992年世界コンピュータ会議 (WCC: World Computer Congress) で本課題に関するパネル討論の開催が企画された⁽²⁷⁾。

その後、SOST91 (アデレード) 及びCREIS92 (パリ) での議論を経て⁽²⁸⁾、1992年9月7~11日の第12回世界コンピュータ会議 (WCC) (マドリッド) のStream5 “The Vulnerability of the Information Society: Social, Legal and Security Aspects” で、“Ethics of Computing: Information Technology and Responsibility”をテーマにパネル討論が開催された (モデレータ: E. Sendov, IFIP chairman)⁽²⁹⁾。黒川 (1995)⁽³⁰⁾は、「IFIPのセンドフ会長が自らモデレータとなり、アメリカ、EC主要国の専門家がパネリストとして参加し、活発な討議が行われ、情報倫理の問題に世界中が大きな関心を寄せていることが強く感じられた」と記している。

同パネル討論では、WG 9.2のvice-chairman Jan Holvast作成の小冊子が配布された。これは、IFIP加盟各国学 (協) 会でのcode of ethicsに関する討議推進を目的とするもので、その後IFIP加盟国の関係学会のTC及びWG議長に今後の討議資料として送付された。同冊子は、「情報技術倫理の必要性」を強調し、「倫理規範の表現形式」として専門職の倫

(注3) : UNESCO, Document code NS/ICIP/FED/2, WS/069.121, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000153720?posInSet=1&queryId=ca9edef0-732b-4595-a353-7da2f1ade88b>

(注4) : IFIP, “About IFIP,” https://www.ifip.org/index.php?option=com_content&task=view&id=124&Itemid=439

(注5) : 前註のIFIPの定款には当初会員として、電気学会・電気通信学会 (現、電子情報通信学会)・日本数学会・日本物理学会・日本応用物理学会が掲載されている。

(注6) : 欧州評議会における議論は1982年まで継続し、報告書 (Maisl 1982) が公開される⁽¹⁷⁾。なお、Maisl (1979)⁽¹⁸⁾及びMaisl (1982)⁽¹⁹⁾は未見。

(注7) : IFIP TC-9 Relationship between Computers and Society は、コンピュータの利用が個人・グループ・社会に対する影響を研究するため、1976年に設立された⁽²⁰⁾。WG9.2は「社会的アカウンタビリティ」 (social accountability) を課題とし、コンピュータ利用の倫理的問題やデータ保護、教育などの問題を扱う⁽²¹⁾。

(注8) : 情報倫理 (information ethics) の用語が、情報処理・コンピュータインテグレーションに関わる倫理を指す語として本時期から使用されていた事実は重要な検討課題だが⁽²⁴⁾、現在手持ちの検討材料を有さない。

(注9) : 本会議予稿集⁽²⁶⁾の目次が下記にあるものの、予稿集自体は未見。
<https://dblp.org/db/conf/ifip/ifip92-2.html>

理“code of conduct”を取ることが「実際には最も一般的な取扱いであろう」としていた^(注10)。

上記 WCC 後、IFIP 専門会議（TA：Technical Assembly）がトレドで開催され、下記が決定された^{(23), (27)}。

- ・“Development of IFIP Guidelines for Codes of Ethics and Professional Conduct”に関するドキュメント準備を“Mission”とする Task Group を設置すること。
- ・同 Task Group は TC-9 で運営すること。
- ・18 か月以内に codes of ethics に関する IFIP の最終案を提出すること。

同 Task Group の報告書作成責任者は Klaus Brunnstein が任命された^{(27), (注11)}。3 回の会合後、1994 年 3 月、同 Task Group は IFIP 総会（GA：General Assembly）及び TA に対して勧告書を提出した。同報告書は、情報技術の発展に対応する情報倫理の必要性を指摘し、IFIP は全世界共通の倫理綱領を作成するのではなく、「加盟国が codes of ethics を作成するとき配慮、考慮すべき原則（certain principles）を勧告（recommendations）という形で取りまとめる役割を果たしたい」とする提言を行った^{(23), (27)}。

また、「コンピュータ科学者の法律知識の生涯教育や社会的責任等」に加え、コンピュータ技術の発展の中にある技術者への呼びかけ、「人間、文化、コンピュータリゼーション、エコロジーなど倫理問題が発生する周辺的环境条件」への配慮に関する事項を盛り込むことを提言した。同時に、行動規範への展開手順の慎重な検討の必要性も指摘する。同時に、IFIP に対して“Spaces for discussion”の設置も提言した⁽²³⁾。

28 の学協会が倫理綱領を検討して得た本成果は、1996 年書籍として公刊された⁽¹⁷⁾。また、上記の Task Group は、1994 年の IFIP 総会で、SIG 9.2.2 ‘IFIP Framework for Ethics of Computing’ として常設組織に編成された⁽²⁸⁾。

このように、1980 年代初めには欧州を中心にコンピュータ利用に関わる倫理と法制度の整備の必要性が認識され、その後国際的な議論を経て、1992 年の WCC パネル討論における加盟国学協会配布の小冊子及び、IFIP Ethics Task Group の IFIP GA/TA 提出の報告書における各加盟国学協会の倫理綱領制定勧告が出され、これらが情報処理学会及び電子情報通信学会倫理綱領の制定の重要なきっかけとなる。

情報処理学会は、同会国際委員会を通してこの勧告を受けとり、法情報学者名和小太郎（関西大学）を委員長、及び当時上記国際委員会に属した米田英一（東芝）を幹事として、倫理綱領調査委員会を設置した^(注12)。

5. 第 1 期：電子ネットワークの倫理としての倫理綱領の形成：電子情報通信学会倫理綱領第 1 版の形成（1991～2004）

電子情報通信学会倫理綱領は、1998 年 7 月 21 日電子情報通信学会理事会において承認され、制定された。現代の目から見ると、その大きな特徴は、電子ネットワーク利用に関する倫理が前面に押し出されている点である。

すなわち、無権限アクセスの禁止や真正な情報提供の義務、ネットワーク上の行動を支える「共創の精神」の重要性などを述べる「ネットワークアクセス」に関する項目（第 6 条）及び、ネットワーク上の節度ある広報・発表を求める第 8 条（実施基準）1 項が、極めて印象的である。

一般的に工学系学会の倫理綱領は技術者倫理の重要な一部を構成すると考えられているものの、本会倫理綱領第 1 版は、「電子ネットワークの倫理」、すなわち電子ネットワーク利用者の倫理としての情報倫理（information ethics）・コンピュータ倫理（computer ethics）としての性格が強かった事実にもまず着目する必要がある。

5.1 情報通信倫理研究専門委員会の誕生

本会倫理綱領第 1 版策定を担ったのは、1995 年 5 月に設置された第 1 種研究会^(注13)である情報通信倫理研究専門委員会のもとに置かれた情報通信倫理綱領私案策定 WG（主査・上園忠弘（城西国際大学））である。上記の本会倫理綱領第 1 版の特徴を理解するには、この WG の設置された情報通信倫理研究専門委員会の形成過程が重要である。

笠原（1995）⁽²⁹⁾によれば、情報通信倫理研究会の形成のきっかけは 1991 年にさかのぼる。同年春頃から、笠原正雄（当時：京都工芸繊維大学）、辻井重男（当時：東京工業大学）、平澤茂一（当時：早稲田大学）らと会うたびに、情報通信倫理研究の重要性及び、研究討論グループの組織化が話題になったとされる。翌年には、通信・放送機構（現、情報通信研究機構（NICT））関係の委員会席上で、原島博（当時：東京大学）も加え非公式に議論し、「情報通信倫理研究専門委員会」発足が「火急の問題」とであると認識が示された。

1992 年秋、「情報通信倫理研究専門委員会」の「電子情報

（注 12）：米田と同時期同学会国際委員会に属した後藤滋樹（早稲田大学名誉教授）からの私信（2023 年 1 月 20 日付）、および寛捷彦（早稲田大学名誉教授）の私信による。なお、寛の私信は三木哲也（電気通信大学名誉教授）宛に送られたものを、三木からの私信（2023 年 2 月 10 日付）にて、大谷に知らされたものである。

（注 13）：本学会「第 1 種研究会」に関しては、研究会規程（平成 29 年 2 月 20 日制定）（<https://www.ieice.org/jpn/about/kitei/kenkyukaikitei.pdf>）を参照。常設の学会研究分科会で、年間を通して定期的に研究会を開催することが義務づけられ、その際には「技術研究報告」と呼ばれるフルペーパーの予稿集を発行できるとされる。なお、後述の「第 3 種研究会」は、新テーマ・課題の探索的調査を行う時限的に設置される研究会のことをいう。なお、現在の本学会 Web サイトでは 1995 年当時の規程を見ることはできない。

（注 10）：黒川（1995）⁽²³⁾における要約を参照。

（注 11）：Klaus Brunnstein, “TC-9 Charged by TA/GA to Report on Ethics,” IFIP-TA and GA Decision, Toledo, Sept. 1992.

通信学会第三種研究〔会〕^(注14)設立趣意書」が起草された。第3種研究会は課題探索的な時限研究会で、当初の提案設置期間は「平成5年10月～平成7年5月」とされた。発起人は、前述の4名に加え、石田晴久（東京大学）・今井秀樹（東京大学）・長尾真（京都大学）など、電子ネットワークや暗号、人工知能（機械翻訳）など幅広い分野の研究者17名が名前を連ねた⁽²⁹⁾（所属はすべて当時のもの）。

同趣意書は、「メモリの超大容量化、低廉化」が21世紀重要な鍵となるコンピューティングの要素であると指摘したうえで、当時「広帯域情報通信ネットワークの構築が国内外に進められている」と状況認識を示す。このネットワークの重要性を見るに、電話ネットワークと同様に「国家的事業として、堅実な基盤のもとに、構築されるべきものと思われる」と指摘する。更に、ハードウェアが「様々な配慮（ソフトウェア、アフタケア）を欠いたために、技術者が当初予期した形とは若干ずれた形で一般社会に普及した例は枚挙にいとまがない」とも指摘する^(注15)。

さらに、上記趣意書では、同文書が「広帯域情報通信ネットワーク」と呼ぶインターネットの普及を前にして、「このような大規模情報ネットワークを動植物を含めた地球社会に真に福祉をもたらす形で実現するための努力」が必要であり、広く情報技術の「一般社会への急速な普及がもたらす既存文化への影響等を慎重にシミュレートすることも必要である」とされる。こうした状況においては「工学倫理〔技術者倫理〕といった分野の必要性が痛感される」ものの、「まずは情報通信関係の研究に携わる電子情報通信学会の会員が、身近にある専門分野内で、上述のような問題をもう少し明確に議論し、果して情報通信倫理といったような問題が存在するか否かといった基本的な問題を議論してみることが必要と思われる」と述べる。

研究会の発起人は広く基礎・境界、通信、エレクトロニクス、情報システムの各グループに所属するものの、研究会は「テーマ自体は基本的かつ境界的であるため、基礎境界に属することが望ましい」。調査研究項目は、「情報化社会における諸問題」「マルチメディアと文化の接点」「超マルチチャネル時代と放送文化」「『最良シート・システム』に伴う情報偏食化への対応」「知的通信、VR、その影響について」「情報通信応用機器（例えばファミコン）と子供の世界」「Eメールとそのインパクト」⁽²⁹⁾。技術者及び研究者の実践に関わる技術者倫理（engineering ethics）・研究倫理（research ethics）よりも、電子情報通信技術、特にインターネットの社会的・経済的・文化的インパクトを考察する技術倫理（ethics of technology）が主要関心だったことがうかがわれる。

1993年5月には、第3種研究会として情報通信倫理研究専門委員会（委員長：笠原正雄）が発足する。同年8月9日

第1回研究専門委員会が開催され、今後の方針、本会におけるパネル討論会企画などに関する意見交換が行われる。同年12月に第2回研究会が実施され、土屋俊（当時：千葉大学）がコンピュータ倫理について特別講演を行う⁽²⁹⁾。

土屋は、同研究会までに1988年に起こったインターネットワーム事件の報告とそれを基礎とする専門知識に関する考察⁽³⁰⁾、及び「高度情報化社会の倫理的諸問題」に関する論考⁽³¹⁾を発表していた⁽³²⁾、⁽³³⁾、^(注16)。後者の倫理的諸問題は、「計算機の専門家の社会的責任」「計算機の責任能力」「プライバシー・セキュリティ・集権化」「財としてのソフトウェア」の四つが指摘された。

この研究会後も、1994年1月情報セキュリティ研究専門委員会シンポジウム（ラフォーレ琵琶湖）及び、1994年3月電子情報通信学会1994年春季大会パネル討論会（慶應義塾大学）、1994年6月情報通信倫理研究専門委員会平成6年度第1回研究会（京都グランドホテル）、1994年11月平成6年度第2回研究会（機械振興会館）と、研究会やシンポジウム、パネルディスカッションを通じて、情報セキュリティと哲学、倫理、文化、社会に関わる話題について、哲学者・倫理学者を招き、技術者倫理・コンピュータ倫理に強い関心を有する工学研究者が発表・議論を行った⁽²⁹⁾。

1995年5月には、上記第3種研究会としての調査研究を踏まえて、情報通信倫理研究専門委員会が第1種研究会として常設化され、委員長に辻井重男が就任した（略称FACE：Forum on Advanced Communication Ethics⁽³⁴⁾、^(注17)）。この研究会のもと、1995年7月13日に情報通信倫理綱領試案策定ワーキンググループ（以下、試案WG）の初会合が開催された。WG構成メンバーは、下記のように、工学者を中心に哲学者・法学者が参加するものだった⁽³⁵⁾（所属はいずれも当時のもの）。

辻井重男（中央大学）
笠原正雄（京都工芸繊維大学）
坂庭好一（東京工業大学）
黒川恒雄（國學院大学）
土屋 俊（千葉大学）
苗村憲司（慶應義塾大学）
平澤茂一（早稲田大学）
多賀谷一照（千葉大学）
別府庸子（山形県立米沢女子短期大学）
上園忠弘（城西国際大学）（主査）
満保雅浩（東北大学）（幹事）^(注18)

（注16）：なお、応用倫理学としてのコンピュータ倫理（学）は1970年代に始まったものの、1985年に同分野の重要な教科書⁽³²⁾と、同分野の問題意識を明示化する重要論文⁽³³⁾が発表されている⁽²⁴⁾。

（注17）：この略称の由来などは、辻井（1998）⁽³⁴⁾を参照。

（注18）：満保が幹事を務めた事実は、旧倫理綱領規程に付属の「電子情報通信学会倫理綱領について（解説）」に示されていた。現在同解説はWebで公開されていない。なお、満保は、本会倫理綱領第2版の技術者倫理検討WG（SGW2）にも委員として加わる。

（注14）：〔 〕内は引用者が補った。以下、〔 〕内は引用者が引用原文の一部を補う文字・語、または註記である。

（注15）：笠原（1995）⁽²⁹⁾の付録「電子情報通信学会第三種研究〔会〕設立趣意書」より。

5.2 試案策定 WG の活動と倫理綱領の誕生

1995 年 9 月には第 3 回試案 WG 委員会（以下、委員会）が開催され、倫理綱領のスケルトンの構成及び内容を討議し、原案を採択した。1995 年 10 月 31 日の第 4 回委員会で、試案草案第 1 版を作成した⁽³⁶⁾。1995 年 12 月 6 日の FACE 研究会で上園が同試案を発表したところ⁽³⁷⁾、「当たり前のことをいっているにすぎない」との批判があった一方、積極的賛成もあったとされる⁽³⁶⁾。

翌年 2 月 22 日には、第 6 回試案 WG 委員会が開催（中央大学）され、専門委員会及びアドバイザーコミッティ委員からの助言をもとに草案第 1 版修正（案）を作成・審議、第 2 版が作成された。同案は 3 月末に専門委員及びアドバイザーコミッティ委員に送付され、そのコメントをもとに、1996 年 4 月 23 日第 7 回試案 WG 委員会（中央大学）で草案第 3 版（案）を作成し、審議した。1996 年 5 月 1 日第 8 回試案 WG 委員会（中央大学）での審議を経て、第 3 版が完成した⁽³⁶⁾。

この第 3 版に関する議論では、情報／通信に携わる職業人のための倫理綱領・規定や産業界の自主的な行動規定に対して、「学会のメンバーを対象とする倫理綱領」は新しいものと位置づけ、ACM Code of Ethics and Professional Conduct の構成・内容を検討、「日本に特有の事情」を考慮して、倫理綱領試案を作成したとされる。特に、日本に特有の事情としては、「i. 日本的背景 日本文化、社会、組織……[原文ママ]」の特質を綱領の中にどのように盛り込むか/ii. 法的関連 電気事業者雇用されている者の義務との抵触など/iii. 通信、放送の問題との関連」が示されている⁽³⁵⁾。

1996 年 9 月 20 日午前中電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会で「情報通信倫理綱領試案とその解説」（座長：上園忠弘）と題するパネルディスカッションが開催され、第 3 版が本学会員に公開された^{(38)~(46)}、^(注19)。会員に対する試案の公表後も、試案 WG で第 3 版についての検討が継続され、1997 年 1 月末専門委員会及びアドバイザーコミッティ委員に対して草案第 3 版に対するコメントを依頼し、1997 年 2 月 10 日試案 WG 委員会（中央大学）で各委員からのコメント／助言をもとに草案第 4 版（案）を作成・審議した⁽³⁶⁾。

1997 年 3 月 5 日試案 WG は第 4 版を完成し、最終名称を「電子情報通信学会倫理綱領試案」と決定した。この名称の「理由は、WG 発足時に作業の目標を」、「『電子情報通信技術のプロフェッショナルとしてのあり方を明確にすること』においた経緯を踏まえたもの」とされた。また、「『情報通信倫理』そのものの構築は、今回発表に至った試案を習作として、更に検討が進められなければならない」とした。この試

案は、1997 年 5 月 FACE 研究会で、上園らが解説とともに公表した⁽³⁶⁾。

1998 年 7 月 21 日本会理事会において電子情報通信学会倫理綱領が承認され、『電子情報通信学会誌』1999 年 2 月号に同倫理綱領とその解説が掲載された⁽⁴⁷⁾。

なお、理事会での倫理綱領承認後、FACE 研究会は、略称をそのままに「情報文化と倫理研究専門委員会（研究会）」（Forum for Advanced Communications Environments and Ethics, 略称：FACE）と変更した⁽⁴⁸⁾。ここで、1995 年開始の FACE を第 1 期、1998 年日本語名称を変更した FACE を第 2 期と名づけることができる。

本学会倫理綱領第 1 版の意義と性格を考えるうえでは、次の 2 点にも注目する必要がある。第一に、情報通信倫理綱領試案の検討が続く中で、同試案を基礎としてどのような課題が考察されたかという論点がある。第二に、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業として推進され、情報倫理の理論的考究と日本における情報倫理の研究基盤整備を進めた「情報倫理の構築」（FINE: Foundation of Information Ethics, プロジェクトリーダー：水谷雅彦京都大学助教授（当時））と、情報通信倫理研究会及び試案との関わりである。後者は次の小節で扱う。

前者に関しては、試案第 4 版または倫理綱領第 1 版を基礎として、試案 WG 主査の上園による大学内ネットワークの利用者規程を作成・検討する試みがあったことが興味深い⁽⁴⁹⁾、⁽⁵⁰⁾、^(注20)。

また、綱領第 1 版において、第 6 条「ネットワークアクセス」及び第 8 条 1 項（ネットワーク上の節度ある広報）が電子ネットワーク利用の心得・規範を示すのみならず、綱領第 1 版の解説を読むと、第 9 条の「管理者基準」も電子ネットワーク利用者の管理を強く意識した条文であることが分かる。

第 9 条は、倫理綱領の遵守を管理下の者に促すこと（第 1 項）、組織体制の合理的整備と人・資材の合理的配分の考慮（第 2 項）の義務（恐らくは努力義務）を示す。坂庭好一（当時：東京工業大学）によるこの条文の解説⁽⁵¹⁾においては、専ら学内ネットワーク利用に関わるトラブルへのネットワーク管理者の対処を事例として提示し、東京工業大学におけるネットワーク利用規程の内容を紹介する。

上記のように、本会倫理綱領第 1 版は、技術者がその専門職業業務を遂行する中で福利全般の向上を心がけることや個人・社会に対する危害防止など、技術者倫理に関わる内容に加え、当時普及が本格化していたインターネットと組織内ネットワークのガバナンスと電子ネットワーク利用にともなう危害の防止を強く意識していた点が重要である。本会倫理

（注 19）：当日の同大会のプログラムに関しては、下記を参照のこと。1996 年基礎・境界ソサイエティ大会プログラム <https://www.ieice.org/jpn/event/pro/soc-con-pro/1996/pro-a.txt>

（注 20）：上園・三島（1997）⁽⁴⁹⁾は、電子情報通信学会倫理綱領試案に基づき、大学の研究室内計算機システムの運用規範試案を策定した」と述べる。南雲・上園・三島（1998）⁽⁵⁰⁾は、「計算機の運用規則を実効あるものとする罰則規定の問題点について検討する。規定は、電子情報通信学会倫理綱領試案に基づいて策定することが現実的であろう」とする。

綱領第1版は、第1期FACE設立当時の問題関心に沿って、「電子ネットワークの倫理としての倫理綱領」としての性格を色濃く有する。

5.3 本会倫理綱領を補完する「万人の倫理としての情報倫理」概念の登場

本会情報倫理研究会の活動と倫理綱領第1版の制定と併せて、同倫理綱領試案の検討が進む中で、上記「情報倫理の構築」プロジェクトが開始され、応用倫理学の観点からの電子ネットワークの倫理に関する理論的考究と、日本における情報倫理の研究基盤整備が進められる。

同プロジェクトは、日本学術振興会が「未来開拓学術研究推進事業」(平成8年度(1996年)～平成16年度(2004年))^(注21)の一つとして、平成10年度(1998～1999年)に開始された「電子社会システム」プロジェクトの4プロジェクトのうちの一つである。電子社会システムは、「コンピュータや情報通信等の技術的シーズと様々な社会的ニーズに基づいて実現されつつある、……電子社会システムを……学際的に、また、……総合的に考察し、社会システム構築の指針、戦略及び具体的手法を探索する」ことを目的として、辻井重男(当時：中央大学、前電子情報通信学会会長(1995年5月～1997年5月))を研究推進委員長として開始された^(注22)。大きく、電子商取引関連法・著作物市場・金融や公的部門などへの取引電子化の影響・情報倫理の四つのテーマでの研究が推進された^(注23)。FINEは四つめの情報倫理をテーマとするプロジェクトだった。

FINEは京都大学(情報倫理学の理論的基礎 リーダー：水谷雅彦)・千葉大学(応用倫理学 リーダー：土屋俊)・広島大学(情報倫理教育 リーダー：越智貢)の3拠点で実施された。土屋によれば、辻井から加藤尚武京都大学倫理学講座教授に情報倫理に関するプロジェクトの相談があり、当時同講座の助教授だった水谷がプロジェクトリーダーに着任した^(注24)。また、京都大学にプロジェクトの中心的な拠点を置くにあたっては、長尾眞(プロジェクト発足当時、京都大学総長(1997年12月16日～2003年12月)、電子情報通信学会会長(1997年5月～1998年5月))の尽力も大きかったとされる^(注25)。加藤・土屋は、加藤が千葉大学に在籍した時代から、21世紀の応用倫理学の重要課題として、環境・生命・

情報の三つを強調しており^{(57), (58), (注26)}、FINEは最後の「情報」に関する応用倫理的課題の探究に当たる。

FINEには、アドバイザーとして第1期FACE初代委員長の辻井が就任したほか、試案WGの土屋、苗村が研究組織に参加した^(注27)。また、情報処理学会の倫理綱領(1996年5月20日制定)を作成した倫理綱領調査委員会委員長名和小太郎(当時：関西大学)も苗村とともに「法律的観点からの検討」でFINEに参加している。名和は、FACE研究会で情報処理学会倫理綱領について発表し、本学会試案作成WGとの情報・意見交換機会があった^{(59), (注28)}。

プロジェクトリーダーの水谷は、FINEの紹介文の中で、「コンピュータ・サイエンスの急速な進歩、更にはインターネットに代表される世界的なコンピュータ・ネットワークの発達をもたらした倫理的問題の解決は、その緊急度の点においても最大級の課題」と述べる。水谷は、FINEの研究を通じて誕生した著書⁽⁶⁰⁾で、従来専門職倫理としてとらえられてきた情報倫理が、インターネットの社会的普及により「万人の倫理」となったとその著書で強く主張するに至った^{(61), (注29)}。

本会倫理綱領第1版が、専門職倫理の観点から電子ネットワークの倫理を重要な要素として取り込んだ一方、応用倫理学の研究プロジェクトとして推進されたFINEにおいては、情報通信技術(ICT: Information and Communication Technology)とその後呼ばれることになるインターネットを重要要素とする技術の倫理が社会全体に浸透する中で、「万人の倫理」として情報倫理が位置づけられることになる。こゝまで、1980年のIPIF TC-9における「情報倫理」の着目から約20年が経過している。

本会倫理綱領第1版とFINEにおける情報倫理の探究は、日本における情報倫理研究の基礎を相互に補完し築いたものと位置づけられる。

(注21)：日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業、<https://www.jsps.go.jp/j-rftf/main.htm>

(注22)：「電子社会システム」(研究推進委員長：辻井重男 中央大学理工学部教授)、https://www.jsps.go.jp/j-rftf/integrated_i.htm

(注23)：「電子社会システム」(委員長：辻井重男)、https://www.jsps.go.jp/j-rftf/integrated_i.htm。なお、本事業の成果は、「ライブラリ 電子社会システム」^{(52)～(56)}としてまとめられている。

(注24)：2021年12月24日開催の「CAPE主催シンポジウム「京大応用倫理の25年—水谷雅彦教授退職記念シンポジウム—」(於、京都大学文学部及びオンライン)における土屋の発言に基づく。

(注25)：水谷からの私信(2022年12月15日付電子メール)より。

(注26)：加藤・土屋を含む千葉大学哲学教室での座談で筆者が聞いたもの。千葉大学在籍中に書かれた、加藤(1987)⁽⁵⁷⁾は副題を「情報・技術・生命と倫理」とする一方、環境倫理学を主テーマとする加藤(1992:v)⁽⁵⁸⁾には1990年以前に環境倫理学に関する調査研究を進めていたことが記されている。

(注27)：情報倫理の構築プロジェクト研究組織、Foundations of Information Ethics (kyoto-u.ac.jp)

(注28)：また、情報処理学会倫理綱領調査委員会には、試案WG委員だった土屋も参加している。

(注29)：FINE開始時期に、同プロジェクトと同様の認識があったことは、多くの論者の関心が「一般の利用者」の倫理問題に向いていたことを示す証左だろう。北原(1997)⁽⁶¹⁾は、次のように述べる。「コンピュータ専門家集団にはコンピュータ倫理があるが、それが一般の利用者には適用されない。そこで、一般利用者のための情報通信、ネットワーク利用の根本原理を考え、それを周知する必要がある」(「あらまし」)。「……情報通信倫理とは、情報事故を防止するための情報通信利用上の根本原理であるといえよう。」これを「万人の倫理としての情報倫理」と包括的に位置づけ、情報倫理学の学術的蓄積を踏まえ、情報倫理に関する一般向けに書かれた書籍として水谷(2003)⁽⁶⁰⁾は重要である。

6.1 技術者倫理検討WGの発足

本会倫理綱領第2版に関する検討は、2008年に始まった。この背景には、競争の激しい分野におけるデータねつ造・改ざん問題の頻発^{(62)～(67)}や、二重投稿・盗用を疑われる多数の論文の存在⁽⁶⁸⁾など、この時期研究不正問題に対する学術界における関心の高まりがあったとされる⁽⁶⁹⁾、^(注30)。

同年9月26日、機械振興会館で「技術者・研究者倫理検討WG」準備会合が開催された。同WGの主査は三木哲也（当時：電気通信大学）、幹事は鶴原稔也（当時：ドコモ・テクノロジー、SITE 研専委員長⁽⁷⁰⁾、^(注31)）が務め、第1版の策定に参加した土屋もこの準備会合から委員として参加している。そのほか、基礎・境界ソサイエティを中心とする工学者（暗号、符号処理など）や法律実務家が参加している。同WGで倫理綱領改定案作成を担うサブワーキンググループ（SWG）のリーダーとなる稲葉宏幸（京都工芸繊維大学）もこの準備会合に参加している^(注32)。

同会合の議事録^(注33)から、8月22日本学会企画室でWG設置に向けての審議が行われ、承認された。三木と鶴原が連名で提出した、同日付の「『技術者・研究者倫理検討WG（仮称）』の発足について」文書がこの審議で討議された^(注34)。

同文書は、次のような情勢認識を示す。すなわち、第1版制定後約10年が経過し、「インターネットの爆発的な発展をはじめとしたICT技術の急速な進歩」によって本会会員が取り扱う技術が大きく変化した一方で、「学会の位置付け」の変化によって「電子情報通信技術に関する専門家集団としての本会に対する社会的な期待も高まっている」。一方で、情報セキュリティに対する社会的関心の高まりと文部科学省

による学会の「内部統制システムの確立」の強い要請への対応が必要との認識も示される。そして、これらの個々の事項への対応が必要なものの、「学会としての基本的考え方をまず定めることが必要である」とし、「技術者や研究者が立脚すべき倫理綱領の改定と啓発・普及促進などを目的としたWGを企画室内に設置したい」との提案を行う。同時に、2008年12月を目標に、上記の内部統制システムの確立を目指し、学会内に常設機関として「倫理委員会（仮称）」を早急に設置することも提案される^(注35)。

同文書は、WGでの「検討内容」として、①倫理綱領改定、②倫理綱領行動指針・ガイドライン策定、③事例集作成、④恒常委員会「倫理委員会（仮称）」設置の検討（通報対応を含む）、⑤啓発・教育活動（教育プログラム策定を含む）の五つを挙げる。更に、同文書は、このWGは前出のように企画室内に設け、上記の検討内容に対応するSWGの設置を提案する^(注36)。

準備会合では、三木と鶴原の作成した「『技術者・研究者倫理検討WG（仮称）』の発足について」に基づき、サブワーキンググループの設置、メンバーの検討、「倫理委員会（仮称）」の骨格などについて検討が行われた。注目すべきは、WGでの資料及び議事録を学会ホームページに掲載することが検討されたことである^(注37)。倫理綱領改定及び内部統制担当部門設置の議論の透明性の実現が検討されていたことが分かる。

透明性と意見聴取機会の確保については、倫理綱領改定作業の実施中、次のような配慮が行われた。まず、総合大会において、倫理委員会設置と倫理綱領改訂に関する報告と意見聴取の機会が設けられた。2009年3月18日の本会総合大会（於、愛媛大学）で企画パネルディスカッション「技術者倫理に関する現状と今後の課題」^{(71)～(75)}、^(注38)、及び2010年の同大会（於、東北大学）で企画パネルディスカッション「技術者倫理について考える～電子情報通信学会「倫理綱領」の改定状況紹介と今後の課題」^{(76)～(79)}、^(注39)が開催された。更に、意見聴取期間（2010年10月22日～11月30日）も設けられた^(注40)。

第1回WGは、2008年10月29日に機械振興会館で開催され、下記の事項が決定された。①WGの名称を「技術者倫理検討WG」とすること、②検討範囲（スコープ）を「電子情報通信学会に係る技術者倫理」とし、検討期間を2008年5月～2010年5月とすること、③（学会）理念の検

（注30）：三木哲也・鶴原稔也（2008）「『技術者・研究者倫理検討WG（仮称）』の発足について」2008年8月22日。なお、鶴原（2007）⁽⁶⁹⁾はこの論点について正面から取り組む発表で、本会倫理綱領改定に向けて重要なものと考えられる。

（注31）：平成13年度に「情報文化と倫理研究専門委員会」は、「技術と社会・倫理研究専門委員会」（SITE: Social Implications of Technology and Information Ethics）と名称を変更した。以下を参照。「研究会名称変更について（平成13年度）」<https://www.ieice.org/site/#H13>。なお、新しい名称の研究会は翌年度から発足した⁽⁷⁰⁾。

（注32）：同準備会合の議事録によれば、同会合の参加者は下記のとおりである。このうち、持田以外がWG委員となる（なお、所属はすべて当時のもの）。三木哲也（電気通信大学）（主査）、鶴原稔也（ドコモ・テクノロジー）（幹事）、稲葉宏幸（京都工芸繊維大学）、小川賢（神戸学院大学）、金谷吉成（東北大学）、土屋俊（千葉大学）、酒井善則（東京工業大学）（電子情報通信学会誌編集長）、富士原裕文（富士通）、川口由起子（植草学園大学）（幹事補佐）、持田侑宏（電子情報通信学会企画室長）。

（注33）：鶴原稔也（2008）「『技術者・研究者倫理検討WG』準備会合について」2008年9月26日。

（注34）：企画室審議の日付については、WG幹事を務めた鶴原稔也氏（現、仁ラボ）から頂いた私家版年表にも教えられた。

（注35）：前出（注29）三木・鶴原（2008）。

（注36）：（注35）に同じ。

（注37）：前出（注28）鶴原（2008）参照。

（注38）：「大会委員会企画」、2009総合大会講演論文集、https://www.ieice.org/jpn/event/program/2009G/html/program/t_index.html。また、文献^{(71)～(75)}も参照（いずれも筆者は未見）。

（注39）：「大会委員会企画」、2009総合大会講演論文集、https://www.ieice.org/jpn/event/program/2010G/html/program/t_index.html。また、文献^{(76)～(79)}も参照（いずれも筆者は未見）。

（注40）：鶴原氏作成年表より。

討については本 WG のミッションではないものの、倫理綱領改定との関連から実施する、④内部統制システムの確立に関する検討は行わない、⑤ SWG は「倫理委員会設置検討 SWG」及び「倫理綱領改定及び行動指針策定 SWG」、事例収集（アンケート調査を含む）SGW の三つを設置すること、⑥議事録・資料・委員名簿の学会ホームページへの掲載などが決定された。上記の「倫理委員会」の理事会への付議は延期され、2009 年 2 月 15 日開催の理事会に向けて準備が進められることも決定されている^(注41)。

同会議で注目すべきは、倫理綱領違反に対する「ペナルティ条項」の導入が検討された点であろう^(注42)。その後倫理は自律的なものであるという観点から、「ペナルティ条項」の導入は見送られる^{(80), (81), (注43)}ことになるものの、規範とサンクションとの関係が検討された事実は倫理綱領の規範としての性質や社会的位置づけを考えるうえで興味深い。

6.2 倫理委員会の設置

「倫理委員会（仮称）」の設置は、SWG1（主査：小松尚久（早稲田大学））で議論が行われた。2009 年 3 月 30 日の第 4 回 WG で、発信者を企画室名とする、理事会付議資料の「『（仮称）倫理委員会の設置』について（案）」及び別紙として「倫理委員会規程（案）」が提出された。上記の WG 会議で規程案は一部修正され、上記の二つの案は 4 月 13 日の本会理事会で承認された。更に、規程案は改定が加えられ、7 月 21 日の理事会で承認された^(注44)。倫理委員会の委員長は副会長とすることが定められた。2010 年 6 月 10 日第 1 回倫理委員会が開催された^(注45)。

6.3 倫理綱領第 2 版と行動指針の作成

倫理綱領改定を担当する SWG2（主査：稲葉宏幸（京都工芸繊維大学））は、2009 年 6 月 25 日までに 4 回の会議を行い、「倫理綱領改定案」を作成した。

WG 主査の三木は、3 月に公開された論文「技術者倫理と学会」⁽⁸²⁾及び、第 1 回 SWG（3 月 9 日）の議論で倫理綱領改定に当たっての基本的な考え方を示した。この議論の中では、「電子情報通信技術は無形の情報を対象とすることから、

直感的理解が極めて難しいことに特徴がある」という論点が強調された。また、電子情報通信技術、特にソフトウェアに関わる技術に関しては、学会に所属せずとも、高度な研究・イノベーションが可能であって、社会や人間、環境に危害を加えうる可能性がある。そのため、倫理綱領の遵守範囲が会員に限ってよいかという疑問も提示された^(注46)。

第 2 回 SWG（4 月 23 日）で三つの案が委員から提出され、メール審議を経て、2009 年 5 月 21 日付けで改定案がまとめられた。その後更に改定が進められ、7 月 29 日開催の第 5 回 WG に新倫理綱領案が提出された。新倫理綱領案の大きな特徴は以下のようにまとめられる。

- ①技術者倫理の統一的な観点から倫理綱領の前文と条文を大きく見直し、第 1 版倫理綱領の電子ネットワークの倫理の性格が消失する。
- ②その代わり、前文において、電子情報通信学会の対象とする技術の特徴を直感的理解が難しく、長期的な影響の展望・評価も難しいことと規定する。
- ③電子情報通信技術の研究・イノベーションの広がりを反映し、倫理綱領の名宛人を会員に限らず、電子情報通信技術者一般に広げる（前文）。
- ④「技術の目的」として、「人々の安全、健康、福利の向上と社会の発展」を明示的に示す（第 2 条）。技術による危害の防止を超え、積極的な技術の目的を明示したことは第 1 版と比較して大きな変化である。
- ⑤電子情報通信技術の「地球環境への影響」を明らかにすることを明示する。
- ⑥研究不正への対応のため、「オリジナリティの尊重」（第 1 版第 5 条改、新 7 条）に加え、データなどのねつ造・改ざんを禁止する「事実の尊重」（新設第 6 条）の項目を設ける^{(83), (注47)}。
- ⑦後進の育成や公衆への教育・啓発など、電子情報通信技術及び学会の将来に向けての条文を追加した（新設 9 条）。

更に特筆すべき点は、条文には明示的に表れていないものの、第 2 条の「技術の目的」は、「技術の適用によって新たな差別が生じることがないように留意すべきということも含意している」と、提案の「改訂箇所とその理由」^(注48)で示されている事実である。この思想は、行動指針が作成されると、（第 2 条ではなく）第 1 条「基本原則」の行動指針 1-4「電子情報通信が、差別や他者の権利侵害などを助長する特質があることを認識し、その防止に努める」に明示的に示される。データサイエンスや、ディープラーニングベースの人

(注 41)：「第 1 回技術者倫理検討 WG 議事録」。

(注 42)：(注 41) に同じ。

(注 43)：第 1 回 SWG2 会議（2009 年 3 月 9 日）で、「罰則規定は、倫理綱領の性質上なじまないもので綱領には含めない」として、見送られる。ただし、学会理事会・倫理委員会・編集委員会での会員処分の根拠となりうる可能性についても同時に確認されている。なお、川口（2009）⁽⁸⁰⁾は、Ladd（1991）⁽⁸¹⁾（本資料未見）の議論を引用し、倫理綱領として成文化すること自体が倫理を他律的なものとする意見に対して、倫理綱領から強制や他律の要素を排除すべきと指摘する。一方、倫理の問題が生じた際に助言する IEEE の「倫理ホットライン」制度（1998 年終了）を強制的でも他律的でもないと評価する。

(注 44)：「第 4 回技術者倫理検討 WG 議事録（案）」及び「前回 WG からの経過状況報告」（EE-5-3、2009 年 7 月 29 日技術者倫理検討 WG）による。

(注 45)：鶴原稔也氏作成年表に基づく。

(注 46)：「第 1 回 SWG-2（倫理綱領改訂&行動指針制定）議事録（案）」及び、第 2 回 SWG2 提出の「技術者倫理検討 SWG2 資料」を参照。

(注 47)：技術者倫理検討 WG 主査の三木は、倫理綱領制定後も研究不正に関心を継続し、文献(83)などの発表を行っている。

(注 48)：「改訂箇所とその理由」（EE-5-5、2009.7.29 技術者倫理検討 WG）。

工知能における差別問題がクローズアップされ、その規制が議論される現在^{(84)~(87)}においては、極めて先進的かつ先駆的な事実認識及び研究者・技術者に対する課題の指摘だったと評価できるだろう。

倫理綱領案が固まると、SWG2は、その条文がより具体的にどのような意図や目的、内容を有するかを説明する「行動指針」の検討に入った。SWG2は、2009年11月から2010年7月にかけて、メール審議と対面会議を実施し、行動指針を作成した。この間2010年2月5日、SWG2は、編集委員会の要請に応じて、工学分野における人を対象とする研究の登場に関連して、研究倫理におけるインフォームドコンセントについて検討した^{(88)~(93)}、^(注49)。SWG会議では、山肩大祐（当時：東京医科歯科大学）を招聘して、講演・議論を行った。技術者倫理検討WGは、研究におけるインフォームドコンセントの根拠となるよう、行動指針1-3を改訂し、「自由・自律などの他者の権利を尊重する」との文言に修正した。また、上記のように、同年3月の総合大会で倫理綱領改定案とその解説の公表と議論が行われている。

2010年6月2日には、企画室に「『技術者倫理検討WG』の検討状況について」と題する書類を提出し、中間報告を行った。10月21日の理事会で「倫理綱領改定案及び行動指針案」に対する意見募集の承認を受け、10月22日から11月30日にかけて、前出のように、学会として意見募集を実施した。2011年1月11日には、第7回WGで意見に対する回答案を作成した。この段階で、電子情報通信技術の基本的要素の性質（「この技術分野の基礎である電子や電波あるいは物理的実体のない情報」）に加筆修正が行われ（太字は加筆修正部分）、こうした性質を深く理解し、職業的实践・専門的活動を通じて、「全人類社会の健全な発展と地球環境の保全に貢献する責務がある」のは、本会会員に限らず、「電子情報通信技術に関わる者」とされた^(注50)。その他の加筆修正も取り入れ、1月20~27日の第9回WG（メール審議）での合意を受けて、同年2月21日理事会で、「倫理綱領改定案および行動指針案」が承認された^(注51)。

2011年7月には、『電子情報通信学会誌』上で、「電子情報通信学会『倫理綱領』の改定及び『行動指針』の新規策定について」と題する記事が公表され、第2版の作成作業は完了した⁽⁹⁴⁾、⁽⁹⁵⁾、^(注52)。

(注49)：工学系のインフォームドコンセントは、医工学研究に加えて、心理学実験や社会調査にも及ぶ。社会科学的研究と工学との学際分野における、人を対象とする研究の研究倫理における課題に関しては、田代（2014）⁽⁸⁸⁾及び眞嶋・奥田・河野（2015）⁽⁸⁹⁾、Ess and AoIR（2002）⁽⁹⁰⁾、franzke et al.（2020）⁽⁹¹⁾、Markham and Buchanan（2012）⁽⁹²⁾、人間中心設計推進機構（2022）⁽⁹³⁾などを参照。

(注50)：「倫理綱領（改定案）及び行動指針（案）に対するコメントと回答（案）」文書自体には日付がないものの、ファイル名に「20220111」とあることから、作成日を推測した。

(注51)：この段落の出来事の順序・日付などは、鶴原氏作成年表に基づく。

(注52)：日本機械学会2011年度年次大会「技術者倫理教育—工学系学会の取組み—」（企画・司会：堤正臣（東京農工大））でも、本会改訂倫理綱領について発表が行われている⁽⁹⁵⁾。

6.4 倫理事例集β版の作成へ

第2版作成にあたっては、SWG3（主査：中西通雄（大阪工業大学））が技術者倫理に関わる事例の収集・整理・解説を行う倫理事例集の作成に取り組んだ。これは、倫理綱領・行動指針の内容をより深く理解し、これらを実践的に活用できるよう支援すること、及び技術者倫理教育での活用⁽⁹⁶⁾、^(注53)を目的としたものである。電気学会は、技術者倫理教育のため、先行してこの事例集の作成を行い、2008年度全国大会（2008年3月19日、福岡工業大学）^(注54)で3000部余の配布を行ったうえで、講演・討論を行っていた⁽⁹⁷⁾、^(注55)。SWG3の作業に関しては、2009年3月、2010年3月の総合大会で技術者倫理と事例に関する発表が行われた⁽⁷⁶⁾、⁽⁷⁹⁾。その後第1回倫理委員会（2010年6月10日）で、事例集作成について、倫理委員会が取り組む事項として決定された^(注56)。

2014年7月14日開催の第2回倫理委員会で、倫理委員会に「事例集検討小委員会」を設置し、前出の三木（技術者倫理検討WG主査）を中心に「実行力のある体制を整えて今後継続して実施すること」とされた。

この計画は、2015年1月30日に倫理委員会がメール審議で承認し、2017年3月31日までの時限プロジェクトとして事例集検討小委員会（主査：吉開範章（日本大学）、幹事：宮田純子（神奈川大学）^(注57)）が設置された（所属は当時）。委員には、情報学・情報倫理・科学技術史・情報教育の研究者のほか、技術者教育機関（企業）経営者などが就任した。オブザーバーには、前出の三木及び鶴原が就任した^(注58)。

2015年3月31日に第1回小委員会（於、機械振興会館）が開催された。第1回小委員会には、本会倫理委員会委員長（当時本会副会長、安藤真（東京工業大学））が出席し、事例集の目指す方向性が確認された。「正解」を示すよりも、当事者が「自分の判断や行動に関する『説明責任』を果たす」支援を行う事例集の作成を目指すことが確認された。このように説明責任を果たすためには、「合法だが好ましくない事、違法だが好ましい事等、相矛盾する事例」を取りあげることが必要であると同時に、研究者・技術者の倫理的活動を鼓吹

(注53)：田中（克）（2009）⁽⁹⁶⁾は、国内ではあまり紹介されることがない非英米圏の技術者団体の倫理綱領を紹介した文献として注目される（ドイツ技術者協会（DVI）の倫理綱領「技術者の信条」を紹介）。また、技術者倫理教育での倫理綱領活用の不備について、技術者が多く所属する民間企業と大学との協力関係の不足も指摘している。

(注54)：「平成20年電気学会全国大会」、<https://www.iee.jp/blog/taikai2008/>

(注55)：その後、2010年7月20日一般に流通する出版物として公刊される。以下を参照。「『技術者倫理事例集』発行とご購入のご案内」、http://denki.iee.jp/?page_id=11159

(注56)：三木哲也（2015）「『事例集小委員会』の設置について」2015年1月30日。

(注57)：その後幹事には高橋寛幸（NTTソフトウェアイノベーションセンタ）が加わった。

(注58)：「平成26年度 第1回倫理委員会 事例集検討小委員会 議事録」。

するため、「あまり知られていないが、地道にやっていて、社会に恩恵を与えている事例も取り上げ、ICT 技術者の誇りを刺激する例も挙げる」とされた^(注59)。現在技術者倫理の中で、技術者を励ます事例として注目される“aspirational ethics”（志向倫理）^{(98), (99), (注60)}の思想が取り入れられていたことが注目される。

2016 年 10 月 19 日第 12 回小委員会までに、事例の選択と各事例の執筆に加え、委員同士の相互レビューが行われた。2018 年 4 月 16 日の理事会承認でパスワード認証による会員限定のβ版公開が決定され、翌日限定公開された^(注61)。2022 年 9 月には、十分な検討が行われたと判断し、パスワード認証をしない全面公開が行われた。

6.5 評価

筆者は本会倫理綱領第 2 版及び「倫理事例集」の作成に加わったことから、両者の完全に客観的評価は困難と考える。したがって、本稿は後世における評価のための資料という側面が強い。

しかし、両者の作成から時間経過を経た現在の目であえて評価すると、データサイエンスや AI の社会活用において顕在化した電子情報通信技術による差別の問題をいち早く指摘した点や、公衆との関わりに関する条項を含むこと、グローバル時代に対応し、多元的な倫理^(注62)を示していること（危害防止にとどまらず積極的に福利実現を目指すこと、プライバシー等義務論的価値の重視など、多面的な倫理的価値の重要性を指摘していること）など、極めて先進的な内容を含んでいたと評価できる。また、事例集において aspirational ethics に関する事例を取り上げた点も、技術者倫理の新しい研究動向などを十分に取り入れたものだった。

7. 第 3 期：多様性と対話の時代に向けての倫理綱領の改訂：電子情報通信学会倫理綱領第 3 版の形成（2021～）

2021 年 4 月から 5 月にかけて、倫理綱領改訂について、前出の三木（SITE 研専顧問、電気通信大学名誉教授）から倫理綱領改訂について相談を受けた吉開（SITE 研専顧問、日本大学）が、木下宏楊（SITE 研専顧問、神奈川大学）及び小川賢（SITE 研専委員長、神戸学院大学）らに諮り、倫理綱領改訂に取り組むこととなった。2021 年 6 月、小川が「倫理綱領検討小委員会の設置について」の文書をまとめ、倫理委員会・理事会の承認を受けて、小委員会（主査：小川賢）が発足し、同年 8 月 10 日に第 1 回倫理綱領検討小委員

会が開催された^(注63)。委員は、30～40 代を中心に、若い世代の研究者で構成された^(注64)。第 3 版の内容、及び作成過程については、電子情報通信学会倫理綱領検討小委員会（2023）⁽¹⁰⁰⁾に譲る。

8. まとめと展望

本稿においては、学（協）会と倫理綱領との関わりに関する原理（1 節）と背景（2 節：IEEE と ACM の倫理綱領の形成史）を踏まえ、本会倫理綱領の策定の前史である IFIP の倫理綱領整備勧告に至る議論（3 節）、および本会の倫理綱領第 1 版から第 3 版までの形成史を記述した。

前史から現在までは次のように時代区分できる。

前史 IFIP（International Federation of Information Processing）における倫理綱領作成勧告とその影響（1979～1990）

第 1 期 電子ネットワークの倫理としての倫理綱領の形成：電子情報通信学会倫理綱領第 1 版の形成（1991～2003）

第 2 期 電子情報通信技術者の倫理としての倫理綱領の形成と展開：電子情報通信学会倫理綱領第 2 版の形成（2004～2020）

第 3 期 多様性と対話の時代に向けての倫理綱領の改訂：電子情報通信学会倫理綱領第 3 版の形成（2021～）

前史の起点は、1979 年欧州評議会による「データ処理の倫理と結びついた法的問題」の検討の開始で、IFIP はこの検討を受けて、情報処理の専門職倫理として倫理綱領整備勧告を提起するに至った。

国内では、インターネットをはじめとする電子ネットワークの本格的普及を前にして、電子ネットワークの専門職の倫理綱領として本会の倫理綱領が構想され、第 1 版が形成された。それと並行して、学術振興会未来開拓学術研究推進事業のなかで、上記倫理綱領作成の母体となった情報通信倫理研究会（FACE）の委員長を務めた辻井・長尾の働きかけで「情報倫理の構築」プロジェクト（1998～2002）が開始され、「万人の倫理としての情報倫理」の構想⁽⁶⁰⁾が示された。これは、倫理綱領第 1 版の電子ネットワークの専門職倫理と合わせて、いわば車の両輪を形成するものであった。

その後、研究不正問題への注目と併せて、技術者倫理としての倫理綱領の本格的整備が行われ、電子情報通信技術による差別の防止などの先進的内容を含む、多元主義的な倫理に基づく倫理綱領（第 2 版）ができあがった。併せて、第 2 版制定時から開始された、倫理綱領を活用し倫理的判断を支援

（注 59）：「事例集小委員会メンバー表」, https://www.ieice.org/jpn_r/assets/pdf/about/rinrikoryo/jh2.pdf

（注 60）：中西（2022）⁽⁹⁹⁾の訳語では「元気が出る倫理」。

（注 61）：2018 年 4 月 17 日付けの吉開及び佐古和恵（当時：日本電気株式会社セキュリティ研究所）の小委員会メンバー宛てメールから。

（注 62）：グローバル時代における多元的倫理に関しては、franzke et al. (2020)⁽⁹¹⁾などを参照。

（注 63）：「第 1 回電子情報通信学会倫理綱領検討ワーキンググループ」。

（注 64）：「小委員会委員一覧」。倫理綱領第 2 版作成に加わった小川、辰己丈夫（放送大学）、大谷（筆者）に加え、事例集の幹事を務めた宮田、高橋（寛）が参加した。なお、2022 年には第 2 版幹事の川口由起子も委員に加わった。

する事例集の制作が継続され、会員限定公開による検討を経て、2022年に完全に公開された。

2021年には、その後のデータサイエンスや人工知能(AI)などの科学技術の発展や社会の変化を踏まえて、第3版の作成が始まった。第2版を基礎として、社会的なダイバシティへの配慮や、社会・公衆を含む非専門家と専門家の対話・相互理解の重視^{(101), (102), (注65)}、多元的価値の間の衝突・対立を意識したジレンマ概念の導入、関連法規の別表化(法改正への対応の容易化のため)などが大きな変化である⁽⁹⁸⁾。

2022年12月現在、社会の変化や工学研究の方法論・内容の高度化・多様化(人を対象とする研究やエスノグラフィ的な調査の増加)を踏まえて^(注66)、2022年に倫理綱領を更新した情報処理学会とともに、辰己丈夫(放送大学)・吉濱佐知子(アマゾンウェブサービスジャパン)を中心に、既存の事例集に対する事例追加とその普及手段の更新(映像化)が進められている。

本会倫理綱領がどうあるべきかに関する議論は、時代に応じての更新と併せて、継続して進める必要がある。今後も、本会倫理綱領が、本会及び会員と社会との間の信頼を構築・維持し、本会入会者が専門職としての責任を認識し、特に専門的活動における会員の倫理的行動を支援するという役割は変わらない。しかし、倫理綱領が空疎なルールの塊となることを避けるためには^(注67)、倫理綱領とは何であり、どうあるべきかという問いが今後も更新の機会などに問われるべきであろう^{(103), (104), (注68)}。

謝辞 本稿作成にあたっては、三木哲也電気通信大学名誉教授、鶴原稔也仁ラボ代表、稲葉宏幸京都工芸繊維大学教授から貴重な当時の資料をご提供頂いた。また、水谷雅彦京都大学名誉教授、土屋俊大学改革支援・学位授与機構特任教授・研究開発部長には、FINE発足時の経緯について貴重な情報を頂いた。後藤滋樹早稲田大学名誉教授には、情報処理

学会国際委員会とIPIFの関係について、寛捷彦早稲田大学名誉教授には、情報処理学会倫理綱領調査委員会の設置について有益な情報を頂いた。倫理委員会事例集検討小委員会の活動については、宮田純子芝浦工業大学准教授の整理・保管した資料がたいへん有用だった。本会倫理綱領第1版、第2版及び、第3版、事例集の主査・幹事など関係者の方々に閱讀頂いた。特に、三木哲也先生・鶴原稔也先生には丁寧に読んで頂き、コメントを頂いた。しかし、全ての文責は筆者にある。資料収集にあたっては、国立国会図書館及び福山大学附属図書館にお世話になった。記して謝意を示す。なお、所属・職位等は2022年3月6日現在のものである。

また、本研究はJSPS科研費JP 18H00608, JP19H00518の助成を受けたものである。

文 献

- (1) D.G. Johnson, Computer Ethics, 4th ed., pp. 168-170, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2008.
- (2) D.G. Johnson, Computer Ethics, 4th ed., p. 168, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2008.
- (3) 誇り高い技術者になろう：工学倫理ノススメ, 第2版, 黒田光太郎, 戸田山和久, 伊勢田哲治(編), 名古屋大学出版会, 名古屋, 2012.
- (4) S.H. Unger and D.N.S. Unger, Controlling Technology: Ethics & The Responsible Engineer, Ch. 4, D.N.S. Unger, 2017.
- (5) 札野順, 金光秀和, “技術者としての行動設計(2)—技術者が重視すべき価値—”, 新しい時代の技術者倫理, 札野順(編), pp. 107-126, 放送大学教育振興会, 東京, 2015.
- (6) 川口由起子, “情報技術者の責任”, 情報倫理入門, 第3版, 土屋俊(監), pp. 205-219, アイ・ケイコーポレーション, 東京, 2021.
- (7) 川口由起子, “倫理綱領についての再考察—専門職集団の倫理支援活動に関して—”, 信学技報, vol. SITE2009-06, pp. 67-69, 2009.
- (8) 高橋久一郎, “専門職の「倫理綱領」と制裁”, FACE, 情報通信倫理, vol. 96, no. 83, pp. 29-36, 1996.
- (9) E.W. Pugh, “Creating the IEEE code of ethics,” 2009 IEEE Conference on the History of Technical Societies, Philadelphia, PA, USA, Aug. 2009. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5337855>
- (10) A.F. Westin, Privacy and freedom, Atheneum, New York, 1967.
- (11) Secretary's Advisory Committee on Automated Personal Data Systems, Records, Computers, and the Rights of Citizens, Colonial Press, 1973.
- (12) D.B. Parker, “Rules of ethics in information processing,” Communications of the ACM, vol. 11, no. 3, pp. 198-201, March 1968.
- (13) 札野順, 金光秀和, “技術者としての行動設計(2)—技術者が重視すべき価値—”, 新しい時代の技術者倫理, 札野順(編), pp. 111-117, 放送大学教育振興会, 東京, 2015.
- (14) 神里達博, “ELSIの誕生—その前史と展開—”, 信学FR誌, vol. 15, no. 4, pp. 318-332, April 2022. https://doi.org/10.1587/essfr.15.4_318
- (15) 高橋茂, “海外での動きと日本の参加”, 日本のコンピュータの歴史, 情報処理学会歴史特別委員会(編), pp. 306-309, オーム社, 東京, 1985.
- (16) 高橋茂, “情報処理学会の発足”, 日本のコンピュータの歴史, 情報処理学会歴史特別委員会(編), pp. 310-312, オーム社, 東京, 1985.
- (17) Ethics of Computing: Codes, Spaces for Discussion and Law (IFIP Advances in Information and Communication Technology), J.J. Berleur and K. Brunnstein, eds., Springer, London,

(注65): Ess and AoIR (2002)⁽⁹⁰⁾などインターネット研究倫理の倫理ガイドラインにおいては、研究対象者と研究者との間の非対称的関係に注目するが、この非対称的関係を前提として、公衆(市民)と専門家との対話の中で倫理綱領を構築するというアイデアを提案する田中(沙)(2009)⁽¹⁰²⁾は極めて興味深い。

(注66): 田代(2014)⁽⁸⁸⁾及び眞嶋・奥田・河野(2015)⁽⁸⁹⁾、Ess and AoIR (2002)⁽⁹⁰⁾、franzke et al. (2020)⁽⁹¹⁾、Markham and Buchanan (2012)⁽⁹²⁾、人間中心設計推進機構(2022)⁽⁹³⁾などを参照。

(注67): 2023年改訂における倫理綱領解釈においてありうる多元的価値の衝突・対立を示唆する「ジレンマ」概念の導入には、こうした思想があると考えられる。なお、情報処理学会倫理綱領には、以下の注記がある。「本綱領は必ずしも会員個人が直面するすべての場面に適用できるとは限らず、研究領域における他の倫理規範との矛盾が生じることや、個々の場面においてどの条項に準拠すべきであるか不明確(具体的な行動に対して相互の条項が矛盾する場合を含む)であることもあり得る。したがって、具体的な場面における準拠条項の選択や優先度等の判断は、会員個人の責任に委ねられるものとする。」

(注68): 一方で、現代においては、人間がいちいち制御をせずとも動作する「自律的」と呼ばれる機械が登場し、近未来においては人間とともに様々な場面で活動することが予想される。こうした機械の従うべき倫理は機械倫理(machine ethics)や人工倫理(artificial ethics)と呼ばれる。久木田(2015)⁽¹⁰³⁾及びWallach and Allen (2009)⁽¹⁰⁴⁾参照。こうした機械倫理や人工倫理と、人間の倫理的責任との関わりは、ルール型の倫理綱領の位置づけや解釈とともに、今後重要な学術的・実践的課題となりうる。

- 1996.
- (18) H. Maisl, "Legal problems connected with the ethics of data processing," CJPD (79) 8, Strasbourg, Aug. 1979.
- (19) H. Maisl, "Drawing up of an analysis framework for rules of various kinds in the field of data processing management," Council of Europe (CJPD [82] 19), Strasbourg, Sept. 1982.
- (20) 魚住薫, "IFIP (情報処理国際連合) TC8 及び TC9 の活動について,"情処学情報システムと社会環境 (IS) 研報, vol. 13 (1984-IS-001), pp. 1-8, 1984.
- (21) D. Kreps and G. Fletcher, "The impact of Human Choice and Computers and Technical Committee 9 on ICTs and Society : A critical sociotechnical tale," Advancing Research in Information and Communication Technology, vol. AICT-600, pp. 363-380, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81701-5_15.
- (22) 魚住薫, "情報処理国際連合 (IFIP) における情報システム関連の研究活動について,"情処学情報システムと社会環境 (IS) 研報, vol. 67 (1987-IS-016), pp. 67-78, 1987.
- (23) 黒川恒雄, "情報倫理綱領をめぐる IFIP の動向,"信学技報, vol. FACE95-11 (1995-09), pp. 27-35, 1995.
- (24) 大谷卓史, "情報倫理学の3つの起源 サイバネティックス・倫理綱領・応用倫理学,"情報管理, vol. 58, no. 2, pp. 139-144, May 2015. <https://doi.org/10.1241/johokanri.58.139>
- (25) K. Brunnstein, "From TC9 (KL. Brunstein) to IFIP-TA and GA Toledo Sept. 1992 : Status Report on 'IFIP Code of Ethics Project.'" (文献(23)の付録として収録)
- (26) Education and Society : Information Processing '92, vol. 2, R.M. Aiken, ed., Proceedings of the IFIP 12th World Computer Congress, Madrid, Spain, Sept. 1992, IFIP Transactions A-13, North-Holland 1992.
- (27) K. Brunnstein, "TC-9 Charged By TA/GA Report on Ethics (IFIP-TA and GA Decision, Toledo September 1992)." (文献(23)の付録として収録)
- (28) "Annex to the Preface : IFIP Technical Assembly Resolution on the 'Codes of Ethics' Project : Technical Assembly, Hamburg, September 4th, 1994," J. Berleur and K. Brunnstein eds., Ethics of Coputing : Codes, Spaces for Discussion and Law, xix, Chapman & Hall, London, 1996.
- (29) 笠原正雄, "情報通信倫理研究の動向—第3種研究会活動を中心に—,"信学技報, vol. FACE95-6, pp. 33-40, June 1995.
- (30) 土屋俊, "知識と犯罪,"現代思想, vol. 17, no. 4, pp. 191-197, April 1989.
- (31) 土屋俊, "情報は誰のものか—知識への権利,"交換と所有, 市川浩ほか(編), pp. 197-256, 岩波書店, 東京, 1990.
- (32) D.G. Johnson, Computer Ethics, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1985.
- (33) J. Moor, "What is computer ethics?," Metaphilosophy, vol. 16, no. 4, pp. 266-275, Aug. 2007.
- (34) 辻井重男, "巻頭言 自分のFACEと出会う,"情報・システムソサイエティ誌, vol. 3, no. 2, p. 3, July 1998.
- (35) 上園忠弘, "情報通信倫理綱領試案について,"信学技報, vol. FACE96-17, pp. 19-24, 1996.
- (36) 上園忠弘, 笠原正雄, 黒川恒雄, 坂庭好一, 多賀谷一照, 田崎三郎, 苗村憲司, 平澤茂一, 別府庸子, "電子情報通信倫理綱領試案—その解説と策定の経過—,"信学技報, vol. FACE97-5, pp. 25-44, 1997.
- (37) 上園忠弘, "情報通信倫理綱領試案策定に向けて,"信学技報 FACE, vol. 95, pp. 1-5, 1995.
- (38) 上園忠弘, "情報通信倫理綱領試案とその解説—総括—,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 172, 1996.
- (39) 笠原正雄, "情報通信倫理綱領試案とその解説 : 基本的方針について,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 173, 1996.
- (40) 別府庸子, "「情報通信倫理綱領試案」とその解説 : 社会的責任,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 174, 1996.
- (41) 多賀谷一照, "情報通信倫理綱領第3条 : 社会的信頼について,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 175, 1996.
- (42) 平澤茂一, "情報通信倫理綱領試案とその解説 : 品質保証について,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 176, 1996.
- (43) 苗村憲司, "情報通信倫理綱領試案とその解説 : 第5条 [知的財産権] について,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 177, 1996.
- (44) 田崎三郎, "研究開発に関する倫理,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 179, 1996.
- (45) 黒川恒雄, "「情報通信倫理綱領試案とその解説」 : 実施基準について,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 180, 1996.
- (46) 坂庭好一, "「情報通信倫理綱領試案とその解説」 : 管理的立場にある者の務め,"1996 信学ソ大 (基礎・境界), p. 181, 1996.
- (47) 情報通信倫理研究専門委員会倫理綱領試案策定 WG, "電子情報通信学会倫理綱領解説,"信学誌, vol. 82, no. 2, pp. 161-174, Feb. 1999.
- (48) 笠原正雄, "研究会名称変更について (平成10年度)," <https://www.ieice.org/~site/#H10>
- (49) 上園忠弘・三島健稔, "研究室内計算機システム運用規範試案,"信学技報, vol. FACE-97, no. 450, pp. 1-5, 1997.
- (50) 南雲浩二, 上園忠弘, 三島健稔, "電子計算機運用規則における罰則規定の問題点について,"信学技報, vol. FACE-97, no. 607, pp. 27-32, 1998.
- (51) 情報通信倫理研究専門委員会倫理綱領試案策定 WG, "電子情報通信学会倫理綱領解説,"信学誌, vol. 82, no. 2, pp. 171-173, Feb. 1999.
- (52) 辻井重男(編著), 電子社会のパラダイム, 新世社, 東京, 2002.
- (53) 奥野正寛, 竹村彰通, 新宅純二郎(編著), 電子社会と市場経済 : 情報化と経済システムの変容, 新世社, 東京, 2002.
- (54) 中里実, 石黒一憲(編著), 電子社会と法システム, 新世社, 東京, 2002.
- (55) インターネットにおける著作権取引市場コピーマート, 北川善太郎(監), 新世社, 東京, 2003.
- (56) 水谷雅彦, 越智貢, 土屋俊(編著), 情報倫理の構築, 新世社, 東京, 2003.
- (57) 加藤尚武, 21世紀への知的戦略 情報・技術・生命と倫理, 筑摩書房, 東京, 1987.
- (58) 加藤尚武, 環境倫理学のすめ, p. v, 丸善, 東京, 1992.
- (59) 名和小太郎, "情報処理学会の倫理綱領について,"信学技報, vol. FACE-96, no. 289, pp. 15-18, 1996.
- (60) 水谷雅彦, 情報の倫理学, 丸善, 東京, 2003.
- (61) 北原宗律, "情報通信倫理とコンピュータ倫理,"信学技報, vol. FACE-97, no. 84, pp. 1-6, 1997.
- (62) 村松秀, 論文捏造, 中央公論新社, 東京, 2006.
- (63) 日本学術協力財団(編), 科学のミスコンダクト—科学者コミュニティの自律をめざして, 日本学術協力財団, 東京, 2006.
- (64) 石黒武彦, 科学の社会化シンドローム, 岩波書店, 東京, 2007.
- (65) 吉川弘之, "『研究の病理』を考える : 研究ミスコンダクトを研究者自身の手で追放する 前編,"産総研 TODAY, vol. 7, no. 4, pp. 2-13, April 2007.
- (66) 吉川弘之, "『研究の病理』を考える : 研究ミスコンダクトを研究者自身の手で追放する 前編,"産総研 TODAY, vol. 7, no. 5, pp. 2-7, May 2007.
- (67) 榎木英介, "研究倫理問題 現状と課題 : 科学研究の不正行為を中心に,"神戸大学医学部神緑会学術誌, no. 23, pp. 118-121, 2007.
- (68) M. Errami and H. Garner, "A tale of two citations," Nature, vol. 451, pp. 397-399, 2008. <https://www.nature.com/articles/451397a>
- (69) 鶴原稔也, "技術倫理と学会との関わり,"信学技報, vol. 106, no. 526, pp. 51-56, 2007.
- (70) 鶴原稔也, "研究会にこう! 技術と社会・倫理研究会 (SITE),"信学 FR 誌, vol. 2, no. 3, 85, 2009.
- (71) 大来雄二, "TK-5-3 電気学会における倫理への取り組みと課題,"2009 信学総大, pp. SSS-31-SSS-32, 2009.
- (72) 大輪武司, "TK-5-2 日本機械学会における技術者倫理に関する取り組み内容と今後の課題,"2009 信学総大, pp. SSS-29-SSS-30, 2009.
- (73) 小林直人, "TK-5-1 産業技術総合研究所における研究者倫理の取り組みと今後の課題,"2009 信学総大, pp. SSS-27-SSS-28, 2009.

- (74) 小松尚久, “TK-5-4 電子情報通信学会における技術者倫理に関する取り組み内容と今後の課題,” 2009 信学総大, p. SSS-33, 2009.
- (75) 中西通雄, “TK-5-5 大学における技術者倫理に関する教育の現状と今後の課題,” 2009 信学総大, pp. SSS-34-SSS-35, 2009.
- (76) 稲葉宏幸, “TK-6-2 倫理綱領の改定と行動指針の策定について,” 2010 信学総大, pp. SSS-22-SSS-23, 2010.
- (77) 小松尚久, “TK-6-1 電子情報通信学会の技術者倫理に関する体制整備について,” 2010 信学総大, pp. SSS-20-SSS-21, 2010.
- (78) 鹿田實, “TK-6-4 企業における技術者倫理問題について,” 2010 信学総大, pp. SSS-25-SSS-26, 2010.
- (79) 中西通雄, “TK-6-3 技術者倫理に関する事例集の作成,” 2010 信学総大, p. SSS-24, 2010.
- (80) 川口由起子, “倫理綱領についての再考察—専門職集団の倫理支援活動に関して,” 信学技報, vol. 109, no. 74, pp. 67-69, 2009.
- (81) J. Ladd, “The quest for a code of professional ethics: An intellectual and moral confusion,” D. G. Johnson ed., Ethical Issues in Engineering, Prentice Hall, Englewood cltits, N. J., pp. 130-136, 1991.
- (82) 三木哲也, “技術者倫理と学会,” 信学 FR 誌, vol. 2, no. 3, pp. 53-58, 2009.
- (83) 三木哲也, “大学における不正・疑惑な研究発表の背景,” 2011 信学総大, p. SSS-65, 2011.
- (84) 久木田水生, “人を評価する人工知能が人間同士の関係に与える影響とその倫理的含意,” 三田評論, vol. 1230, pp. 40-46, 2019. <https://www.mita-hyoron.keio.ac.jp/features/2019/02-4.html>
- (85) 成原慧, “『AI による差別』にいかに向き合うか—プロフェイリングに関する規制を中心に,” テクノロジーと差別 ネットヘイトから「AI による差別」まで, pp. 172-189, 宮下萌(編), 解放出版社, 大阪, 2022.
- (86) 中川裕志, 裏側から見る AI 脅威・歴史・倫理, pp. 149-157, 近代科学社, 東京, 2019.
- (87) 村上祐子, “デジタル版悪という凡庸—AI/データサイエンス社会における差別と社会的偏見—,” 技術と社会・倫理研究会, 京都, 2022.
- (88) 田代志門, “研究規制政策のなかの社会調査—「研究者の自治」から「行政指導」へ?—,” 社会と調査, vol. 12, pp. 5-12, 2014. https://jasr.or.jp/wp/asr/asrpdf/asr12/asr12_020.pdf
- (89) 人文・社会科学のための研究倫理ガイドブック, 眞嶋俊造, 奥田太郎, 河野哲也(編), 慶應義塾大学出版会, 東京, 2015.
- (90) C. Ess and the AoIR ethics working committee, “Ethical decision-making and internet research: Recommendations from the aoir ethics working committee,” <https://aoir.org/reports/ethics.pdf>, 2002.
- (91) a. s. franzke, A. Bechmann, M. Zimmer, C. Ess, and Association of Internet Researchers, “Internet Research: Ethical Guidelines 3.0,” <https://aoir.org/reports/ethics3.pdf>, 2020.
- (92) A. Markham and E. Buchanan, “Ethical decision-making and internet research: Recommendations from the AoIR Ethics Working Committee (Version 2.0),” <https://aoir.org/reports/ethics2.pdf>, 2012.
- (93) 人間中心推進機構, “HCD 専門家倫理規範とは,” <https://www.hcdnet.org/hcd/event/entry-1879.html>, 2022.
- (94) 企画室技術者倫理検討 WG, “電子情報通信学会『倫理綱領』の改定及び『行動指針』の新規策定について,” 信学誌, vol. 94, no. 7, pp. 565-572, 2011.
- (95) 三木哲也, “電子情報通信学会の取組み,” 日本機械学会 2011 年度年次大会, 東京, 2011.
- (96) 田中克範, “ドイツにおける技術者倫理について—ドイツ技術者協会 (VDI) の倫理綱領をめぐって,” 信学技報, vol. SITE200-10, pp. 1-6, 2009.
- (97) 川村隆, “電気技術者のあるべき姿 倫理委員会の活動について,” 電学誌, vol. 129, no. 2, pp. 114-115, 2009.
- (98) 札野順, “新しい時代の技術者倫理とは何か,” 新しい時代の技術者倫理, 札野順(編), pp. 19-22, 放送大学教育振興会, 東京, 2015.
- (99) 中西通雄, “技術倫理オンラインセミナー『技術者倫理教育の一事例』,” <https://www.youtube.com/watch?v=CRcMSvYf8>, 2022.
- (100) 電子情報通信学会倫理綱領検討小委員会委員, “倫理綱領・行動指針の改正について 信学誌, vol. 106, no. 3, pp. 220-223, 2023.
- (101) 中園長新, “専門家と非専門家の対話に倫理綱領はどのように貢献できるか,” 信学技報, vol. SITE2022-53, pp. 9-14, 2022.
- (102) 田中沙織, “学際的な学術団体における倫理綱領の意義—手話学研究を事例として—,” 信学技報, vol. SITE2009-10, pp. 7-10, 2009.
- (103) 久木田水生, “人工知能は道徳的になりうるか, あるいはなるべきか,” 2015 第 29 回人工知能学会全国大会論文集, 2015. <https://www.ai-gakkai.or.jp/jsai2015/webprogram/2015/pdf/2I5-OS-17b-3.pdf>
- (104) W. Wallack and C. Allen, Moral Machines: Teaching Robots Right from Wrong, Oxford University Press, New York, NY, 2009 [ロボットに倫理を教える, 岡本新平, 久木田水生(訳), 名古屋大学出版会, 名古屋, 2019].

(SITE 研究会提案, 2023 年 1 月 16 日受付,
2023 年 2 月 4 日再受付)



大谷卓史 (正員)

1993 千葉大・院・文修士課程修了。吉備国際大准教授。主要関心領域は、情報倫理・科学技術史。2022 年度 SITE 研委員長。[写真撮影：今村俊介]

ESS ニュース

NOLTA, IEICE 特集号

Guest Secretary 木村真之

特集タイトル：

Special Section on Recent Progress on Nonlinear Theory and Its Applications

掲載誌：

NOLTA, IEICE, vol. 14, no. 2 (2023 年 4 月発行)

2022 年の国際会議 NOLTA2022 は完全オンラインで 2022 年 12 月 12 日～15 日の 4 日間で開催されました。200 件を超える投稿があり非線形問題の理論と応用について幅広く議論が行われました。本特集は、国際会議 NOLTA との連携企画として、NOLTA ソサイエティおよび NOLTA, IEICE が協働して実施されたものです。国際会議 NOLTA の投稿論文として一度査読を経て採録されたものを対象とし、会議開催日までに初査読を完了することで、発表時の質疑や議論の結果を修正論文に盛り込むことを可能としていることが特徴です。

本特集の Guest Co-Editors は、NOLTA2022 の Technical Program Co-Chairs の Prof. Marko Budišić (Clarkson University)、及び Guest Secretary の薄良彦先生（京都大学）が務められました。Guest Associate Editors としては、NOLTA2022 で Technical Program Co-Chairs や Special Session Co-Chairs、及び各種 Secretary の先生方にご参加頂きました。また、Guest Advisory として、NOLTA2022 の General Co-Chairs 及び NOLTA, IEICE 編集長の堀尾喜彦先生（東北大学）、NOLTA, IEICE Secretary の安達雅春先生（東京電機大学）にご協力頂きました。

国際会議との連携企画は昨年の “Special Section on Nonlinear Science Workshop on the Journal,” NOLTA, IEICE, vol. 13, no. 2 に引き続き 2 回目となります。投稿された論文は通常の NOLTA, IEICE と同様のプロセスで査読が行われ、結果として 32 件の論文が採択されました。採択された論文は J-Stage (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/nolta/>) に掲載され、全て無料でアクセスできます。是非ご覧ください。

本特集では、予想を超えて多くの方々に貴重な研究結果をご投稿頂くことができました。ここに厚くお礼申し上げます。また、年末年始の厳しいスケジュールの中でご協力頂いた査読者の皆様、及び Editorial Committee の皆様には大変お世話になりました。無事に出版できる運びとなったことはひとえに皆様のご協力の賜です。誠にありがとうございました。



木村真之（正員）

2004 京大・工・電気電子卒、2009 同大学院博士後期課程了、博士（工学）。2009～2014 滋賀県大・工・電子システム工・助教、2014～2022 京大院工/ILAS・助教/特定講師を経て現在は摂南大理工の電気電子工学科・准教授。非線形な結合振動子系に生じる振動・波動・局在現象の数理と工学への応用に関する研究に従事。応用物理学会、システム制御情報学会、IEEE 各会員。

研究会に行こう！

特別企画

非線形問題研究会（NLP）とニューロコンピューティング研究会（NC）の合同研究会の開催報告 （2023年1月 ハイブリッド開催）

非線形問題研究会（NLP）とニューロコンピューティング研究会（NC）は、少なくとも1997年より前から合同研究会を開催しており、長年にわたって研究交流を行ってきました。しかし、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の流行により、2020年1月に沖縄で開催したものを最後に、オンラインでの開催が続くこととなりました。そのような中、今回2023年1月にハイブリッドで開催された合同研究会は、3年ぶりの現地発表を含む開催となりました。本稿では、現地での研究会の様子を写真を添えて報告します。

2023年1月28日（土）～29日（日）に2日間にわたって開催されたNLP-NC合同研究会は、公立はこだて未来大学（図1）とオンラインでのハイブリッドで実施されました。全発表件数は26件（うちNLP 20件、NC 6件）であり、現地開催での研究会を待ち望んだ皆様の気持ちが発表件数に表れたように思います。

実際に、研究会当日の現地参加者は、1日目は33名、2日目は31名であり、会場は活気に満ちていました（図2）。質疑応答でも活発な議論がなされ、また、休憩時間においてもあちらこちらでディスカッションをする様子が見受けられました。2日を通しての現地発表件数は23件であり、その中には初めて現地発表をする学生も多かったようです。オンライン発表とは異なり、会場の緊張感や活気を感じ取ることで、現地開催研究会の面白さが伝わったのではないかと思います。一方で、オンラインでの発表者も3件、参加者も1日目は22名、2日目は23名おり、現地に来ずとも研究会に参加できるという、ハイブリッド開催の利点が活かされていると感じました。アフターコロナの新しい研究会のあり方として、今後もハイブリッド開催が続いていく予感がする研究会となりました。



図1 公立はこだて未来大学



図2 会場の様子

内容としては、NLPとNC両研究会の特色あふれる研究が発表されました。特に、スパイクニューラルネットワークやリザバーコンピュータに関する研究は、両研究会にとって興味を中心とする研究テーマであり、両研究会参加者間において活発な議論がなされました。普段とは別の視点からのコメントは、今後の研究発展に大いに寄与することでしょう。今後も両研究会の強みを生かし、連携を続けていくことで、両研究会がより一層盛り上がると思います。本稿をきっかけにNLP、NCの信学技報をご一読頂き、両研究会に興味をもって頂いた後には、来年度もきっと開催されるであろうNLP-NC合同研究会にご参加頂ければ幸いです。

最後になりましたが、今回の研究会のハイブリッド開催にご尽力頂いたNLP、NC両研究会の幹事団の皆様、また、現地世話人の公立はこだて未来大学・香取勇一先生、及び、ご参加頂いた方々に感謝の意を表します。



松下春奈 (正員)

2008年9月徳島大学大学院博士後期課程修了。
2007～2010年日本学術振興会特別研究員。
2011年1月香川大学工学部助教。2015年4月
同講師を経て、2020年4月同創造工学部准教授、
現在に至る。計算知能による最適化手法とその応用
に関する研究に従事。博士（工学）。IEEE、信号処
理学会の会員。

国際会議開催報告

2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications

(NOLTA2022, 非線形理論とその応用国際シンポジウム)

Online

2022 年 12 月 12 日～15 日

1. 開催概要

International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA) は、毎年開催される非線形理論とその応用に関する学際的な国際シンポジウムであり、2022 年は以下のようにオンラインで開催されました。

日時：2022 年 12 月 12 日～15 日

場所：オンライン (図 1)

主催：電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ

協催：電子情報通信学会 非線形問題研究会

電子情報通信学会 回路とシステム研究会

2. 運営体制

NOLTA2022 の Organizing Committee は、General Co-Chairs の Igor Mezić 教授 (UC Santa Barbara) 及び堀尾嘉彦教授 (東北大学) を中心に 23 名で構成されました (表 1 を参照)。また、Technical Program Committee は Technical Program Co-Chair の Marko Budišić 先生 (Clarkson University) を中心に 12 名で構成されました (内訳は日本 7 名、海外 5 名)。

3. 開催状況

NOLTA2022 への出席者は 277 名 (招待講演者を含む) でした。地域別の参加者の内訳を表 2 に示します。オンライン開催となったため、日本も含む多くの地域からの参加者を得ました。従来の NOLTA と同様 Regular Session 及び Special Session が多数開催され、非線形理論とその応用に関する新しい方向性を議論するシンポジウムとなりました。

NOLTA2022 の開催スケジュールは以下のとおりです。12 月 12 日の午前 9 時より Opening Session が催され、続いて Predrag Cvitanović 教授 (Georgia Institute of Technology ; US) による “Exact coherent structures and dynamics of turbulent flows” の招待講演が行われました (図 2)。13 日は午後に Johan Åkerman 教授 (University of Gothenburg ; SE) による “Spin Hall nano-oscillator based Ising machines for combinatorial optimization” の招待講演が行われました (図 2)。14 日は午前中に引原隆士教授 (京都大学) による “Phenomena and boundary in nonlinear dynamical system” の招待講演が行われました (図 2)。最終日 15 日に Closing Session が催されました。

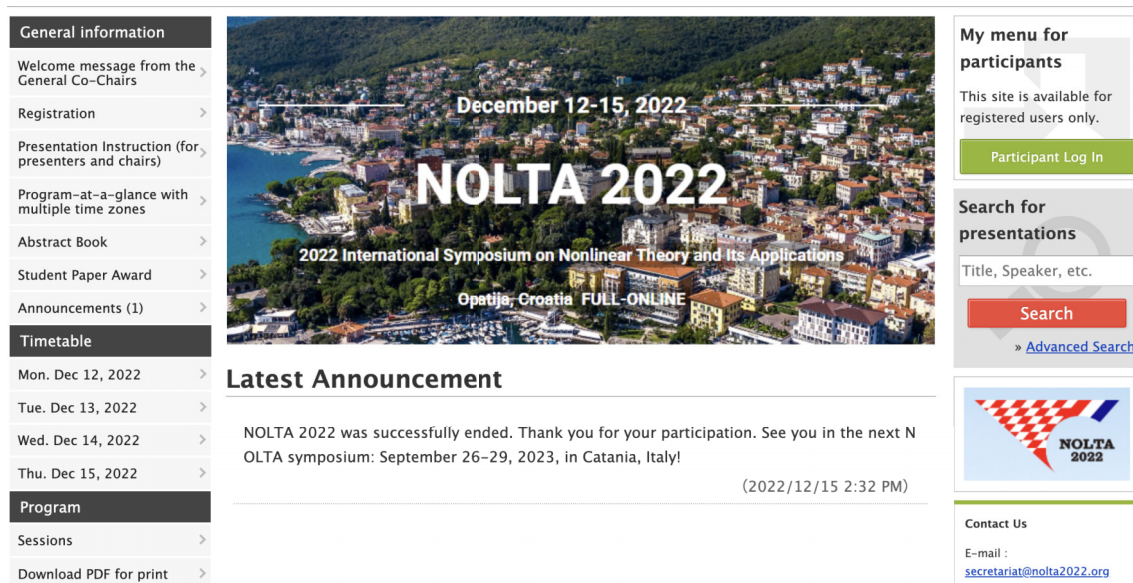


図 1 NOLTA2022 のオンラインプラットフォーム

表 1 NOLTA2022 Organizing Committee の構成

General Co-Chairs	Igor Mezić	UC Santa Barbara ; US
	Yoshihiko Horio	Tohoku University ; JP
Technical Program Co-Chairs	Marko Budišić	Clarkson University ; US
	Shigeki Shikawa	Kanagawa Institute of Technology ; JP
	Hiroya Nakao	Tokyo Institute of Technology ; JP
Special Session Co-Chairs	Alexandre Mauroy	University of Namur ; BE
	Milan Korda	LAAS-CNRS ; FR
	Yueheng Lan	Beijing University of Posts and Telecommunications ; CH
	Tetsuya Asai	Hokkaido University ; JP
	Makoto Naruse	University of Tokyo ; JP
Technical Program/ Special Session Secretaries	Masayuki Kimura	Setsunan University ; JP
	Yuichi Yokoi	Nagasaki University ; JP
Finance Chair	Yuichi Tanji	Kagawa University ; JP
Finance Secretary	Yuu Miino	Naruto University of Education ; JP
Publication Chair	Keiji Konishi	Osaka Metropolitan University ; JP
Publication Secretary	Hiroki Sugitani	Ibaraki University ; JP
Publicity Chair	Ryo Takahashi	Kyoto University of Advanced Science ; JP
Publicity Co-Secretaries	Hikaru Hoshino	University of Hyogo ; JP
	Shiu Mochiyama	Kyoto University ; JP
Local Arrangement Co-Chairs	Zlatko Drmač	University of Zagreb ; HR
	Senka Maćešić	University of Rijeka ; HR
	Nelida Čmijarić-Zić	University of Rijeka ; HR
General Secretary	Yoshihiko Susuki	Kyoto University ; JP

表 2 NOLTA2022 参加者の地域別一覧

Japan	221
China	14
USA	14
France	5
Spain	3
Taiwan	3
Belgium	2
Netherlands	2
Cameroon	1
Canada	1
Croatia	1
Germany	1
Hong Kong	1
Italy	1
Latvia	1
Mexico	1
Poland	1
Sweden	1
UK	1
合計	277



図 2 NOLTA2023 の招待講演者（上から Prof. Cvitanović, Prof. Åkerman, 引原教授）

4. NOLTA Student Paper Award

NOLTA では、将来を担う若い学生の研究を奨励するため、2008 年より NOLTA Student Paper Award を贈呈しています。NOLTA2022 においても厳正な審査の結果、表 3 に示す 11 名の学生に対して NOLTA Student Paper Award が授与されました。Best Student Paper Award の受賞者 2 名には副賞として来年イタリアで開催される予定の NOLTA2023 の参加費が無料となる権利が贈られます。受賞された皆さん、おめでとうございます。今後のます

表 3 2022 NOLTA Student Paper Award の受賞者

Best Student Paper Award

Honoka Shiratori	University of Tokyo	Asymmetric Collective Decision Making Through Quantum Interference
Yoshiki Yasuda	Chiba Institute of Technology	Analysis of Functional Connectivity of EEG Reflecting Circadian Rhythm Using Phase Lag Index

Student Paper Award

Yuhan Chen	Kobe University	Variational Integrator for Hamiltonian Neural Networks
Atsuhiko Hada	Osaka University	Efficient Hessian Vector Products Calculation of Neural ODE Based on Second-Order Adjoint Method
Kenta Hama	Osaka University	Common Space Learning with Gaussian Embedding for Multi-Modal Entity Alignment
Daiki Hozumi	Okayama University of Science	Study of Nonlinear Phenomena in Current-Mode Controlled DC-DC Converter with TEM via a Closed-Form Mapping Without Approximation
Ryuya Kawano	Ibaraki University	Stability Analysis of Partial Amplitude Death in Delay-Coupled Star Networks
Ibuki Matsumoto	Chiba Institute of Technology	Long-Tailed Distribution of Excitatory Postsynaptic Potentials Enhances Learning Performance of Liquid State Machine
Ibuki Nakamura	Hiroshima City University	Comparison Between Spatiotemporally Discrete LCR Circuit Model and a Quantum Counterpart
Kaiji Sekimoto	Yamagata University	Spatial Monte Carlo Integration for Learning Restricted Boltzmann Machines
Tomoki Yamagami	University of Tokyo	Skeleton Structure Inherent in Quantum Walks

ますのご活躍を心より期待いたします。

5. おわりに

今回の NOLTA はオンライン開催となり、盛会のうちに終了することができました。Organizing Committee の先生各位をはじめ、関係各位の皆様には厚く御礼申し上げます。

次回の NOLTA は 2023 年 9 月にイタリアで開催される予定です。奮ってご参加下さい。

最後になりましたが原稿のチェックにご協力頂きました木村真之先生、星野光先生に御礼申し上げます。



薄 良彦 (正員)

平成 12 京大・工・電気電子卒。平成 17 同博士後期課程了。同年同大学助手となり、現在准教授。博士(工学)。非線形力学系の理論と応用、エネルギー工学、形式的制御系設計などの研究に従事。

受賞者の声

電子情報通信学会に関連する賞を受賞された方を御紹介します。

令和4年度 基礎・境界ソサイエティ表彰

令和4年度は功労賞1名、貢献賞34名の合計35名が表彰されました。功労賞を受けられた方にインタビューしました。また、貢献賞を受けられた方を御紹介します。

宮地充子（大阪大学大学院工学研究科）

「2022年暗号と情報セキュリティシンポジウム実行委員長としての貢献」（功労賞）

Q. 会議の準備・開催を通して、特に印象に残っている点をお聞かせ下さい。

暗号と情報セキュリティシンポジウム（SCIS）は暗号と情報セキュリティに関する研究及び技術成果などを発表する国内最大のセキュリティシンポジウムです。2022年で39回目を迎えます。SCIS2012も私が委員長をさせて頂いており、10年ぶりの委員長となります。準備当初から、コロナが社会活動に大きな変化を与えており、前年のSCIS2021は完全オンラインでした。しかし当初から、ハイブリッド開催で進める準備を進め、関係するIEICE ISEC 専門委員会にも広報しました。こうして参加者947人、362件の発表というSCIS史上初の900人超えの参加者を記録する初のハイブリッド開催となりました。また、ハイブリッド開催の利点を生かし、北川勝浩（大阪大学）「ムーンショット目標6—2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」、Serge Vaudenay（EPFL, Switzerland）, “Security And Privacy Compromises in COVID Time,” Juan Garay（Texas A & M University, USA）, “Cryptography in the Proof-of-Work Era”と日本、欧州、米国からのリアルタイムの招待講演を実現しました。開催に向けた実行委員の皆様との定期的なネットMTGはコロナで少し疎遠になっていた人と人との繋がりから協働の暖かい繋がりを感じることができました。そして、何よりも参加者の皆さまから「久しぶりに研究仲間に出会えました。開催してくれてありがとう」という御礼を頂けたことが印象に残っています。



Q. 会議開催にあたって、御苦労された点をお聞かせ下さい。

国内最大のシンポジウムなので、開催の2年前にあたる2020年から、緊急事態宣言の発令に伴う会合の禁止が発生しない限り、初のハイブリッド開催を実施するという方針で進めていました。私は2007年から大学間連携による全国の大学生、大学院

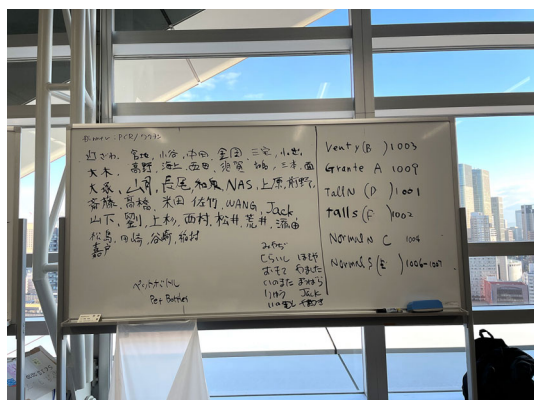


図1 事務局のPCR検査表



図2 ハイブリッド開催の様子



図3 展示会のセキュリティゲームの様様



図4 コーヒーブレイクの様子



図5 懇親会後の様子



図6 懇親会のたこ焼き風シュークリーム

生向けの実践的セキュリティ教育（SecCap, Basic SecCap）に携わらせて頂き、ハイブリッド講義を実施していました。このため、ハイブリッド開催の障壁はそれほど高くなかったことも、初のハイブリッド開催を進める原動力となりました。しかし、ハイブリッド講義はNW環境などの安定した教室が利用でき、受講者人数もわかっていますが、学会となると状況が違います。国際会議場もハイブリッドの経験が少なく、with コロナ禍では参加人数の予測が難しいなど、難問が多数ありました。しかし、実行委員の皆様の強いご協力と、高い技術力のおかげで、ハイブリッドで開催できました。一方、会議開催の技術的難問のみならず、講演者も聴講者も座長の皆様もコロナ禍でテレワーク、巣ごもりが定着しており、ハイブリッド学会の参加に慣れてないという問題もありました。そこで、質疑応答のプロシージャなど、学会開催前に座長セミナー、講演者セミナーをオンラインで実施させて頂きました。このような様々な開催に向けての工夫は実行委員の皆様のご発案・ご協力のもとに進められ、初のハイブリッド開催も無事に盛会にて終了できたと思います。

Q. 会議中のイベント（バンケットの催し物やツアーなど）があれば、お聞かせ下さい。

従来、SCIS では懇親会とナイトセッションを実施しています。ナイトセッションとは夜に開催されるセッションで、軽食を食べながら、軽いセキュリティトークを見る催しです。2022年のSCISでも大阪府の基準に沿った安全対策の下で、懇親会、ナイトセッションを実施しました。懇親会は人数制限に合わせるため、2日間に分けて実施しました。懇親会では両日ともに、SCISの特徴を生かしたイベントを開催しました。初日は多民族芸能楽団「わたら」の演奏です。セキュリティの分野では多くの

海外からの研究者を受け入れています。SCIS にも韓国の大学からの発表もあるなど、国内で開催される学会ですが、多様な学会です。わたらは多様性のコンセプトに合致する他民族芸能で、懇親会の参加者の皆様もコロナ禍の中で久々に生演奏を楽しみました。2 日目は桂三幸さんの落語です。SCIS では初の落語のイベントになります。プロジェクトを用いた最新の落語で、出席者の皆様と笑いを共有できました。さらに SCIS2022 年は初の大阪開催ですので、大阪らしい懇親会のメニューをリーガロイヤルホテルにお願いしました。天王寺蕪のクリームスープや、ピスタチオを青のりに見せたたこ焼き仕立てのシュークリームのデザートなど、コロナ禍で外食と疎遠になっていた参加者の皆様にも笑顔が広がりました。

Q. 会議がカバーする研究分野について一言お願いします。

SCIS は暗号と情報セキュリティに関するあらゆる技術、研究を幅広く扱っています。具体的には、暗号技術、プライバシー、AI セキュリティ、IoT セキュリティ、Web セキュリティ、クラウドセキュリティ、ブロックチェーン、自動車セキュリティ、セキュリティの教育・心理学などです。

貢献賞

- 藤吉 正明 基礎・境界ソサイエティ「庶務幹事」としての貢献
- 小平 行秀 基礎・境界ソサイエティ「会計幹事」としての貢献
- 多和田雅師 基礎・境界ソサイエティ「事業担当幹事」としての貢献
- 和田 昌浩 基礎・境界ソサイエティ「大会担当幹事」としての貢献
- 谷口 一徹 基礎・境界ソサイエティ「電子広報担当幹事」としての貢献
- サントソ バグス 基礎・境界ソサイエティ「和文論文誌編集幹事」としての貢献
- 山肩 大祐 基礎・境界ソサイエティ「ソサイエティ誌担当幹事」としての貢献
- 小林 学 情報理論とその応用サブソサイエティの運営及び活動に対する貢献
- 下田 真二 システムと信号処理サブソサイエティの運営及び活動に対する貢献
- 松田 哲直 FR 誌編集委員としての貢献
- 荒川 元孝 超音波研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 遠藤 邦夫 安全・安心な生活と ICT 研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 大橋 剛介 イメージ・メディア・クォリティ研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 奥井 宣広 バイオメトリクス研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 加古 達也 応用音響研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 兼本 大輔 VLSI 設計技術研究専門委員会の運営および活動に対する貢献
- 下田 真二 回路とシステム研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 杉本憲治郎 信号処理研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 高橋 順子 ハードウェアセキュリティ研究専門委員会の運営および活動に対する貢献
- 中村 僚兵 ワイドバンドシステム研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 橋浦康一郎 高度交通システム (ITS) 研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 林 直樹 高信頼制御通信研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 廣友 雅徳 情報理論研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 三澤 秀明 スマートインフォメディアシステム研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 山本 大 情報セキュリティ研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 吉永 敦征 技術と社会・倫理研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献
- 伊豆 哲也 国際会議 IWSEC2021 の運営に対する貢献
- 筒井 弘 国際会議 SISA2021 の運営に対する貢献
- 中口 俊哉 国際会議 IMQA2022 Publication Chair, 広報委員としての貢献
- 井坂 元彦 第 44 回情報理論とその応用シンポジウムの運営に対する貢献
- 伊藤 康一 バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム 2021 の運営に対する貢献
- 佐藤 隆英 第 34 回回路とシステムワークショップの運営に対する貢献
- 山田 功 第 36 回信号処理シンポジウムの運営に対する貢献
- 野崎 隆之 「2020 年 12 月号情報理論とその応用小特集」編集幹事及び「2022 年 3 月号情報理論とその応用小特集」編集幹事としての貢献

令和 4 年度 NOLTA ソサイエティ表彰

令和 4 年度は特別功労賞が 1 名，功労賞が 1 名，貢献賞が 3 名表彰されました。各賞を受けられた方を御紹介します。

特別功労賞

堀内 和夫 NOLTA ソサイエティへの多大なる貢献

功労賞

神野 健哉 コロナ禍における NOLTA ソサイエティの運営への多大なる貢献

貢献賞（会議運営）

神野 健哉 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Application (NOLTA2019) 実行委員長

貢献賞（研究専門委員会運営）

松下 春奈 非線形問題研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献

貢献賞（研究専門委員会運営）

中田 一紀 複雑コミュニケーションサイエンス研究専門委員会の運営及び活動に対する貢献

2021 年 SITA 若手論文賞

情報理論とその応用シンポジウム若手研究者論文賞（SITA 若手論文賞）は、情報理論に関する分野の優秀な若手研究者を育成することで、情報理論とその応用サブソサイエティを活性化することを目的として制定されました。例年、晩秋から初冬に開催される SITA シンポジウムにおいて筆頭著者として論文を発表した正員または学生のうち、35 歳以下で過去に SITA 若手論文賞または SITA 奨励賞を受賞していない方が有資格者であり、SITA 若手論文賞選考委員会による審査によって、有資格者の 3% をめどに受賞者が決定されます。今年は、第 43 回 SITA シンポジウムが中止になったことを勘案して有資格者の年齢制限を 1 年延ばした上で、第 44 回情報理論とその応用シンポジウム（2021 年 12 月 8 日から 10 日まで開催）にて発表された対象論文 54 編の中から選考の結果、岡凌平氏及び横山健人氏の論文 2 編が選ばれました。授賞式は、2022 年 12 月に北海道登別市で行われた第 45 回 SITA シンポジウム懇親会の会場で行われ、桑門 SITA サブソサイエティ長から賞状及び副賞の賞金が授与されました。（文責：SITA 若手論文賞選考委員会幹事西新幹彦）

岡 凌平
(早稲田大学
(現：企業に就職))



“二次元離散ウェーブレットパケット変換の基底が未知の場合のベイズ基準のもと最適なノイズ除去アルゴリズム”⁽¹⁾

このたびは SITA 若手研究者論文賞に選出して頂き、誠にありがとうございます。指導教員である松嶋先生、中原先生及び松嶋研究室の皆様、家族に心から感謝いたします。

本研究では、二次元離散ウェーブレットパケット変換における基底を確率変数とみなした確率モデルを仮定し、統計的決定理論に基づいて定式化したノイズ処理問題のベイズ最適解を導出しました。また、ベイズ最適性を損なうことなく計算量を削減したアルゴリズムも導出しました。私が学生時代に世に出した最初で最後の研究ということもあり、非常に思い入れ深いものです。なかなか結果が出ずに思い悩むこともある修士課程 2 年間でしたが、諦めずに頑張ったよかったと思います。

授賞式では多くの方に歓迎して頂き、とても素晴らしい時間を過ごすことができました。ありがとうございました。私は研究室を離れましたが、この研究がどなたかの目に留まって、情報理論とその応用技術の発展に少しでも貢献できれば幸いです。

横山 健人
(名古屋工業大学
(現：企業に就職))



“多変量複素ガウスベクトル再現のための観測行列の最適構成”⁽²⁾

このたびは、SITA 若手研究者論文賞という名誉ある賞を受賞できたことを非常に光栄に感じております。今回の受賞にあたり、日頃から多大なるご指導頂いた和田山正先生をはじめとする和田山・中井研究室の皆様や高邊賢史先生に深く感謝いたします。また、本論文賞の審査員の方々をはじめとする SITA 関係者の皆様にも厚く御礼申し上げます。

本受賞研究では、5G の普及に伴う IoT ネットワークの大規模化を念頭におき、多変量ガウスベクトル再現問題における観測行列の最適構成法を提案いたしました。提案法の特徴は、MMSE 関数を特異値表現することでより簡素な形で定式化した点、ラグランジュの未定定数決定法による観測行列の最適化を行う点にあります。従来法と比べて提案法は優れた推定性能をもつことを確認いたしました。

現在私は、ネットワーク関連の企業に就き、実際に企業などで用いられるネットワーク環境について学んでおります。今回の受賞を励みにして、これからも精進を重ねてまいります。

SITA 若手論文賞対象論文

- (1) 岡凌平, 中原悠太, 松嶋敏泰, “二次元離散ウェーブレットパケット変換の基底が未知の場合のベイズ基準のもと最適なノイズ除去アルゴリズム”, 第 44 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2021), pp. 86-91, 2021.
- (2) 横山健人, 和田山正, “多変量複素ガウスベクトル再現のための観測行列の最適構成”, 第 44 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2021), pp. 174-179, 2021.



左から、松嶋智子選考委員長、岡凌平氏、桑門秀典 SITA サブソ長
(横山健人氏のご都合によりご欠席)

論文募集

2023年 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会

於: 東京都市大学 世田谷キャンパス
2023年6月10日(土)

2023年電子情報通信学会NOLTAソサイエティ大会を東京都の「東京都市大学 世田谷キャンパス」にて開催いたします。本大会がカバーする学問領域は、非線形系や複雑系の理論とそれらの応用から、実在する非線形システムや複雑システムの解析や制御に至るまで広範に及んでおり、特に電気・電子・通信や情報処理に関する非線形理論・応用に特徴を持っています。皆様からの積極的な論文投稿をお願い申し上げます。

《大会組織》

委員長

中野 秀洋 (東京都市大学)

会計

黒川 弘章 (東京工科大学)

木村 貴幸 (日本工業大学)

庶務

島田 裕 (埼玉大学)

佐々木 智志 (湘南工科大学)

広報

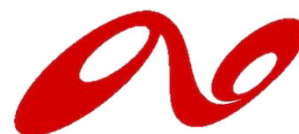
松浦 隆文 (日本工業大学)

出版

青森 久 (中京大学)

【主催】

電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ



【投稿分野】

発表はNOLTAソサイエティが対象とするテーマに関連する研究、調査、設計、開発、工事報告、現地試験報告などで、学術的価値があるものに限り、

テーマ例 (これに限るものではありません)

「カオス」「フラクタル」「ファジー」「ニューロダイナミクス」
「カオスニューラルネットワーク」「セルラニューラルネットワーク」
「バイオサイバネティクス」「複雑系」「非線形回路とシステム」
「結合発振器」「モデリングとシミュレーション」「精度保証数値解析」
「進化論的計算」「予測とシステム同定」「最適化問題」の他、
非線形理論の「同期」「ネットワーク」「通信」「信号処理」「制御」
「電力システム」への応用、さらに「情報科学」「物理学」「応用数学」
「化学」「神経科学」「光学」「生態学」「経済学」など

【大会Webサイト】

https://www.ieice.org/nolta/society_conf/2023/



【お問い合わせ】

info@nlsc2023.org

【発表概要】

講演はポスター発表となります。原稿は邦文又は英文のA4版1ページでご執筆ください。査読の上、採否通知を行います。また、原稿の作成が不適切な場合、不採択となることがあります。

※COVID-19の状況によってはハイブリッドもしくは完全オンラインで開催する可能性があります。

【スケジュール】

投稿受付: 2月15日より受付開始
投稿締切: 3月31日
採否通知: 4月10日
最終原稿締切: 4月24日
事前参加登録期間: 4月11日～4月28日 (発表者は登録必須)

【奨励賞】

大会においてソサイエティの発展に貢献しうる講演論文を発表した35歳以下の著者に対し、NOLTAソサイエティ大会奨励賞を贈呈します。

論文募集

2023 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2023)

31 August - 1st September 2023

Hybrid Conference

On-site: Okinawa Prefectural Museum and Art Museum, Naha, Okinawa, Japan

Organizing Committee

General Chair

Takayuki Nakachi

University of the Ryukyus, Japan

Technical Program Chair

Naoto Sasaoka

Tottori University, Japan

Special Session Chair

Noriaki Suetake

Yamaguchi University, Japan

Publicity Chair

Yosuke Sugiura

Saitama University, Japan

Publication Chair

Takashi Suzuki

Micro-Technica Corporation, Japan

Finance & Registration Chair

Soh Yoshida

Kansai University, Japan

Information System Chair

Shingo Yoshizawa

Kitami Institute of Technology, Japan

Local Arrangement Chair

Keiichi Funaki

University of the Ryukyus, Japan

Advisory Board Liaison

Tomoaki Kimura

Kanagawa Institute of Technology, Japan

IPSJ-AVM Liaison

Kenji Kanai

Waseda University, Japan

General Secretary

Yoshiaki Ueda

Fukuoka University, Japan

International Steering Committee

Chair:

Tomoaki Kimura, *Japan*

Members:

Naoto Sasaoka, *Japan*

Hakaru Tamukoh, *Japan*

Yukihiro Bandoh, *Japan*

Soh Yoshida, *Japan*

Yoshiaki Makabe, *Japan*

Yosuke Sugiura, *Japan*



Call for Papers

The 2023 International Workshop on Smart Info-Media System in Asia (SISA2023) will be held in a hybrid format from 31 August to 1st September 2023. The on-site venue is Okinawa Prefectural Museum and Art Museum, in Okinawa, Japan. The SISA2023 presents every possibility on new information technologies and its smart systems.

The SISA2023 is aiming at promoting young researchers in the fields of multimedia system and wireless communications. We plan to organize short oral presentations with poster discussion for regular sessions as well as a keynote talk and special sessions. Prospective authors are invited to submit their papers reporting original works in these fields.

The topics in SISA2023 include the following but not limited to:

1. Communication Systems

- 1.1 Smart Wireless Systems, Smart Mobile Systems
- 1.2 Cognitive Systems, Intelligent Soft-Wireless Systems
- 1.3 Multi-Media over Wireless
- 1.4 Signal Processing for Communication Systems
- 1.5 Intelligent Communication Systems
- 1.6 MIMO Systems
- 1.7 NFC, RFID, Sensor Network Systems, Mesh Network
- 1.8 WAM/MAN/LAN/PAN/BAN
- 1.9 Emerging Technologies for Communications

2. Multimedia and Systems

- 2.1 Speech Processing and Coding
- 2.2 Video Processing and Coding
- 2.3 Video and Multimedia Technology & Communications
- 2.4 Audio/Acoustic Signal Processing
- 2.5 Signal Processing for Medical Technologies
- 2.6 Intelligent Signal Processing for Multimedia & Systems
- 2.7 Security Signal Processing for Multimedia & Systems
- 2.8 Parallel Implementation for Multimedia & Systems
- 2.9 Emerging Technologies for Multimedia & Systems

3. Information Science and Technologies

- 3.1 Intelligent Transport Systems
- 3.2 Bioinformatics, Neural Networks and Fuzzy Systems
- 3.3 Informatics for Green Earth & Environmental Technologies

Authors are invited to submit a full paper in accordance with posted guidelines. For more information please refer to our website:

<http://www.ieice-sisa.org/>

Author's Schedule:

Deadline for special session proposals:	April 14, 2023
Deadline for Submission of Regular Paper:	May 12, 2023
Notification of Acceptance:	June 30, 2023
Deadline for Submission of Camera Ready Paper:	July 28, 2023

SISA 2023 Student Paper Awards

Paper presented in regular sessions can be nominated for the Student Paper Awards, provided that the first author is a full time undergraduate, Masters or Ph.D. student.

We plan to publish a **Special Section on IEICE Trans. Fundamentals** on November 2024. Authors who presented their original works in SISA 2023 are solicited to submit papers to this special section.

基礎・境界ソサイエティ運営委員会

会長	鎌部 浩	(岐阜大学)
次期会長	梶川 嘉延	(関西大学)
ソサイエティ編集長	田口 亮	(東京都市大学)
副会長 (事業担当)	野村 重昌	(早稲田大学)
副会長 (システムと信号処理)	高井 賢一	(大阪大学)
副会長 (音響・超音波)	古家 秀典	(大分大学)
副会長 (情報理論とその応用)	桑門 成晃	(関西大学)
庶務幹事	葛岡 隆博	(専修大学)
庶務幹事	新田 敬信	(立命館大学)
会計幹事	西浦 雅徳	(佐賀大学)
事業担当幹事	廣友 崇了	(近畿大学)
事業担当幹事	古賀 成晃	(和歌山大学)
大会担当幹事	高庸一	(会津大学)
大会担当幹事	松井 知	(豊田工業大学)
電子広報担当幹事	高野 知佐	(広島市立大学)
電子広報担当幹事	森井 佑	(東北学院大学)
英文論文誌編集委員長	荒井 伸太郎	(岡山理科大学)
英文論文誌編集幹事	奥田 正浩	(同志社大学)
和文論文誌編集委員長	川村 新	(京都産業大学)
和文論文誌編集幹事	岩本 真	(電気通信大学)
ソサイエティ誌編集委員長	渡邊 洋平	(電気通信大学)
ソサイエティ誌担当幹事	関屋 大雄	(千葉大学)
ソサイエティ誌担当幹事	八巻 俊輔	(東北工業大学)
特別委員 (国外活性化担当)	小林 孝一	(北海道大学)
特別委員 (国際会議コンテンツ担当)	尾知 博	(九州工業大学)
編集特別幹事 (オブザーバ)	平 行秀	(会津大学)
出版委員会委員 (オブザーバ)	澤島 康仁	(日本放送協会)
研究会連絡会幹事 (オブザーバ)	古川 機	(東北学院大学)
ハンドブック／知識ベース委員 (オブザーバ)	高島 康裕	(北九州市立大学)
男女共同参画委員会 (オブザーバ)	笹岡 直人	(鳥取大学)
ブラチナクラブ運営委員会 (オブザーバ)	野崎 隆之	(山口大学)
事務局	金子 美博	(岐阜大学)
	水橋 慶	(電子情報通信学会)

基礎・境界ソサイエティサブソ・研専会議

副会長 (事業担当)	野村 亮	(早稲田大学)
副会長 (システムと信号処理)	高井 重昌	(大阪大学)
副会長 (音響・超音波)	古家 賢一	(大分大学)
副会長 (情報理論とその応用)	桑門 秀典	(関西大学)
事業担当幹事	葛岡 成晃	(和歌山大学)
事業担当幹事	新田 高庸	(会津大学)
回路とシステム (CAS)	前田 義信	(新潟大学)
情報理論 (IT)	小嶋 徹也	(東京工業高等専門学校)
信頼性 (R)	土肥 正	(広島大学)
超音波 (US)	中村 健太郎	(東京工業大学)
応用音響 (EA)	古家 賢一	(大分大学)
VLSI 設計技術 (VLD)	池田 奈美	(日本電信電話)
情報セキュリティ (ISEC)	國廣 昇	(筑波大学)
信号処理 (SIP)	田中 聡久	(東京農工大学)
ワイドバンドシステム (WBS)	庄納 崇	(インテル)
システム数理と応用 (MSS)	尾崎 敦夫	(大阪工業大学)
思考と言語 (TL)	森下 美和	(神戸学院大学)
技術と社会・倫理 (SITE)	大谷 卓史	(吉備国際大学)
ITS (高度交通システム) (ITS)	藤井 雅弘	(宇都宮大学)
スマートインフォメディアシステム (SIS)	木村 誠聡	(神奈川工科大学)
イメージメディアクオリティ (IMQ)	魚森 謙也	(大阪大学)
高信頼制御通信 (RCC)	東 俊一	(名古屋大学)
バイオメトリクス (BioX)	今岡 仁	(日本電気)
安全・安心な生活と ICT (ICTSSL)	和田 友孝	(関西大学)
ハードウェアセキュリティ (HWS)	永田 真	(神戸大学)
光輝会 (SSA) (オブザーバ)	春日 正男	(作新学院大学)
技術の歴史 (オブザーバ)	篠田 庄司	(中央大学)
技術者教育と優良実践 (オブザーバ)	横田 光広	(宮崎大学)
ヒューマンコミュニケーション G (オブザーバ)	吉田 寛	(日本電信電話)
会長 (オブザーバ)	鎌部 浩	(岐阜大学)
次期会長 (オブザーバ)	梶川 嘉延	(関西大学)
庶務幹事 (オブザーバ)	太田 隆博	(専修大学)
庶務幹事 (オブザーバ)	西浦 敬信	(立命館大学)
研究会連絡会幹事 (オブザーバ)	高島 康裕	(北九州市立大学)
事務局	水橋 慶	(電子情報通信学会)

NOLTA ソサイエティ運営委員会

ソサイエティ会長	潮 俊光	(大阪大学)
ソサイエティ次期会長	長谷川 幹雄	(東京理科大学)
庶務幹事 (22N ソ大会実行委員長)	松原 崇	(大阪大学)
庶務幹事 (CCS 副委員長)	中野 秀洋	(東京都市大学)
会計幹事	黒川 弘章	(東京工科大学)
電子広報担当幹事 (Webinar 企画 WG)	松浦 隆文	(日本工業大学)
大会担当幹事	高野 知佐	(広島市立大学)
運営委員	堀尾 喜彦	(東北大学)
運営委員	小西 啓治	(大阪公立大学)
運営委員	神野 健哉	(東京都市大学)
運営委員	常田 明夫	(熊本大学)
運営委員	鳥飼 弘幸	(法政大学)
運営委員	吉岡 大	(崇城大学)
運営委員	伊藤 大輔	(岐阜大学)
運営委員	赤井 恵	(北海道大学／大阪大学)
運営委員	会田 雅樹	(東京都立大学)
運営委員	眞田 耕輔	(三重大学)
運営委員	安達 雅春	(東京電機大学)
運営委員	加藤 秀行	(大分大学)
事務局	坪根 正	(長岡技術科学大学)
	水橋 慶	(電子情報通信学会)

Fundamentals Review 編集委員会

編集委員長	関屋 大雄 (千葉大学)
編集委員会幹事 (正)	八巻 俊輔 (東北工業大学)
編集委員会幹事 (副)	小林 孝一 (北海道大学)
編集委員会幹事補佐	松田 哲直 (埼玉大学)
編集委員	
編集委員 (CAS)	金子 美博 (岐阜大学)
編集委員 (VLD)	新田 高庸 (会津大学)
編集委員 (SIP)	中本 昌由 (広島大学)
編集委員 (MSS)	白井 匡人 (島根大学)
編集委員 (IT)	眞田亜紀子 (長岡技術科学大学)
編集委員 (ISEC)	吉野 雅之 (日立製作所)
編集委員 (WBS)	Duong Quang Thang (奈良先端科学技術大学院大学)
編集委員 (US)	平田慎之介 (千葉大学)
編集委員 (EA)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集委員 (NLP)	松下 春奈 (香川大学)
編集委員 (R)	吉川 隆英 (富士通研究所)
編集委員 (TL)	神長 伸幸 (ミイダス)
編集委員 (SITE)	山肩 大祐 (IGDA 日本)
編集委員 (ITS)	小野晋太郎 (福岡大学)
編集委員 (SIS)	二神 拓也 (愛知学院大学)
編集委員 (IMQ)	前田 充 (キャノン)
編集委員 (BioX)	鈴木 裕之 (群馬大学)
編集委員 (RCC)	李 還幫 (国立研究開発法人情報通信研究機構)
編集委員 (CCS)	松原 崇 (大阪大学)
編集委員 (ICTSSL)	宮北 和之 (新潟国際情報大学)
編集委員 (HWS)	大和田 徹 (ITS サービス高度化機構)

(上記に含まれない右側の編集幹事会の委員も編集委員として含む)

学会事務局

水橋 慶, 永井 宏
(電子情報通信学会)

Fundamentals Review 編集幹事会

編集委員長	関屋 大雄 (千葉大学)
編集幹事会幹事 (正)	八巻 俊輔 (東北工業大学)
編集幹事会幹事 (副)	小林 孝一 (北海道大学)
編集幹事会幹事補佐	松田 哲直 (埼玉大学)
編集幹事	
編集幹事 (総務)	八木 秀樹 (電気通信大学)
編集幹事 (渉外)	傘 昊 (東京都市大学)
編集幹事 (企画)	山岸 昌夫 (東京工業大学)
編集幹事 (Web: 正)	森島 佑 (東北学院大学)
編集幹事 (Web: 副)	荒井伸太郎 (岡山理科大学)
特別編集幹事 (Vol.16, No.1)	中本 昌由 (SIP) (広島大学)
特別編集幹事 (Vol.16, No.2)	新田 高庸 (VLD) (会津大学)
特別編集幹事 (Vol.16, No.3)	宮北 和之 (ICTSSL) (新潟国際情報大学)
特別編集幹事 (Vol.16, No.4)	松下 春奈 (NLP) (香川大学)
編集顧問	貴家 仁志 (東京都立大学)
編集顧問	白井 宏 (中央大学)
編集顧問	今井 浩 (東京大学)
編集顧問	牧野 光則 (中央大学)
編集顧問	高橋 篤司 (東京工業大学)
編集顧問	國廣 昇 (筑波大学)

編集後記

編集委員長として2年間、8号にわたりFR誌を発行してきましたが、本号をもってお役御免となります。編集委員長として、すべて論説を拝読させて頂きました。FR誌には電子情報通信学会基礎境界・NOLTA ソサイエティを代表する、つまり国内トップレベルの充実した執筆陣による超一流の論説が並んでいます。どの論説も本当に面白く、また、たいへん勉強となり自分の視野が広がった気がします。今後も一読者として、FR誌のファンであり続けます。皆様におかれましても、今後のFR誌にぜひご期待ください。(関屋大雄)

今号をもちまして、FR誌編集正幹事を退任させて頂くこととなりました。2018年度よりSIS研編集委員として2年間、編集幹事補佐として1年間、編集副幹事として1年間、そして編集正幹事として1年間、計5年間FR誌の編集活動に携わらせて頂きました。この期間を通して、ご執筆者の皆様方及び編集委員会・事務局・出版社の皆様方の多大なるご協力のもとにFR誌が創刊されていることを改めて実感いたしました。FR誌に関わる全ての皆様に改めて感謝申し上げますとともに、今後のFR誌のますますの発展を楽しみにしております。(八巻俊輔)

開催案内、論文募集などのやさしい記事を担当しました。多くの国際会議や研究会が対面開催(ハイブリッド開催を含む)になってきました。FR誌を国際会議や研究会などの広報の場として活用して頂けると幸いです。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。(小林孝一)

今号の「受賞者の声」を担当しました。今号では基礎・境界ソサイエティ表彰とNOLTA ソサイエティ表彰に加えて、2年ぶりに再開されたSITA 若手論文賞の記事をお届けすることができました。記事をご執筆頂いた受賞者の皆様には、改めて御礼申し上げます。今後ともどうぞよろしくお願い申し上げます。(松田哲直)

「研究会に行こう!」の特別編集幹事を担当いたしました。今号では、3年ぶりの現地開催での合同研究会の様子を紹介いたしました。研究会間の交流により、両研究会がより一層盛り上がるような大変活気ある研究会となりました。また、休憩時間に交わされるちょっとした雑談こそが、現地開催研究会の醍醐味であると感じました。関連技報とともにぜひお読み頂き、来年度の研究会投稿のモチベーションにして頂ければと存じます。(松下春奈)

Fundamentals Review へのお問い合わせ

- ・本誌への御意見、御要望、入手など: fr-ess@ieice.org
- ・Fundamentals Review Homepage: <https://www.ieice.org/ess/ESS/Fundam-Review.html>

複写される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は、本誌に掲載された著作物の複写複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複写複製を御希望の方は、一般社団法人学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

なお、複写以外の許諾（著作物の転載、翻訳等）に関しては、委託致しておりませんので、直接本会へお問い合わせ下さい。

<問合せ先> 一般社団法人電子情報通信学会

TEL [03] 3433-6691 FAX [03] 3433-6659

著作物利用許諾申請：<https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

Reprographic Reproduction outside Japan

Making a copy of this publication

The IEICE authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights of copyrighted works. If you wish to obtain permission of these rights, please refer to the homepage of JAC (<https://www.jaacc.org/en/>) and confirm appropriate organizations to request permission.

Obtaining permission to quote, reproduce; translate, etc.

Please contact the copyright holder directly.

IEICE Secretariat Office,

E-mail: permission@ieice.org

Permission request form: <https://db.ieice.org/chosaku/sinsei/index-e.php>

Fundamentals Review 第十六巻 第四号

令和五年四月一日発行

発行人	白石 智
発行所	一般社団法人 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ 〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館内) 電話 03-3433-6691(代) FAX 03-3433-6659
WEB化担当	山岡影光
WEB化担当会社	三美印刷株式会社 東京都荒川区西日暮里 6-28-1