



[小特集]

数学は工学の未来を支える 知の道具

- 円の交差グラフ: 数理とアルゴリズム
- 人の内面状態の推定と拡散モデルの応用 ——自己と他者を理解し支援することを目指して——
- 5GC環境における、ネットワークデジタルツインを用いたAIモデル構築手法の検討
- トラヒックデータの分析による情報通信ネットワークの異常検知
- 通信障害対処をクラスタリング分析によって
自動化するネットワーク運用保守管理支援技術





論文の書き方講座開催のお知らせ

一般社団法人 電子情報通信学会
通信ソサイエティ

通信ソサイエティでは、論文の書き方について会員の皆様に広く深く御理解頂くために、2026年総合大会において、論文の書き方講座を下記のとおり開催致します。

論文の書き方講座は、2009年3月以来、総合大会／ソサイエティ大会において継続的に開催され、数多くの方に御参加頂き、大変御好評を頂いております。

通信ソサイエティ和文論文誌・英文論文誌の委員長／副委員長経験者が講師を務める講座ですので、論文執筆のポイントを聞ける貴重な機会となっております。大学あるいは企業において論文執筆に御興味をお持ちの方は是非御参加下さい。

論文の書き方について御質問をお持ちの方は、次のフォームから御質問の事前登録をお願い致します。なお、過去に開催された論文の書き方講座の動画・講義資料はこちらのフォームに記載されたリンクから御覧頂けます。

御質問事前登録フォーム：<https://forms.office.com/r/pBX0yMjPsl>



『論文の書き方講座』

① 日時：2026年3月11日(水) 9:00～10:30

② 場所：九州産業大学 1号館 2階 N201

③ プログラム：

(1) 論文の書き方

鈴木 一哉 (秋田県立大学)

(2) 英文論文の書き方のポイント

網嶋 武 (明治大学)

(3) 回答文の書き方・レターの書き方

タン ザカン (東京科学大学)

④ 定員：219名

数学は工学の未来を支える知の道具

大学や大学院で工学を学ぶ学生や工学分野の技術者の皆さんにとって、数学は避けて通れない存在です。しかし、「数学は抽象的で難しい」という声を耳にすることがあります。確かに、数式は一見すると無機質で、複雑な記号の羅列に見えます。しかし、視点を変えれば、数学は工学を支える強力な道具であり、数式は万国共通で通用する言語と捉えることもできます。これらの道具や言語を活用することで、創造力を広げることができると考えられないでしょうか？

例えば、通信工学における信号処理は、フーリエ変換という数学的概念なしには語れません。複雑な時間領域の波形を周波数領域の波形に変換するこの手法は、電波の世界のみならず、音声や画像の世界まで広く応用が可能です。行列や固有値は、アンテナのビームフォーミングやネットワーク解析を語る上で不可欠です。これらは単なる計算ではなく、現象を理解し、設計を最適化する上で強い味方となる「レンズ」にも成り得るのです。

数学を味方にする第一歩は、「公式を覚える」ことから「意味を理解する」への転換だと考えます。数式は自然やシステムの構造を簡潔に表現する手段であり、その背後には必ず「なぜそうなるのか」という物語があります。例えば、微分方程式は変化の法則を記述するものです。電気回路の過渡現象や熱伝導の解析に登場する数式は、現象のダイナミズムを映し出しています。

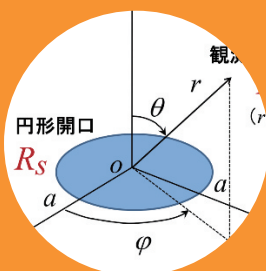
もう一つのポイントは、数学を「便利な道具」として使う意識です。複雑な問題に直面したとき、数学は解決への近道を提供してくれます。最適化理論は、資源配分やネットワーク設計において、膨大な選択肢から最良の解を導きます。確率・統計は、通信品質の評価やAIの学習に欠かせません。これらは、現代工学の課題を解くための強力な武器なのです。

本小特集では、工学分野で数学を活用していらっしゃる専門家の解説記事をそろえました。どうか、数学を楽しむ心を忘れないで下さい。美しい定理やエレガントな証明に触れたとき、そこには芸術に似た感動があります。数学は「難しい敵」ではなく、「頼れる仲間」です。是非、数式を恐れず、その意味を味わい、工学の未来を切り開く力にして下さい。

最後に、本小特集の発行にあたり、御執筆頂いた皆様、査読や校閲に御協力頂いた皆様、編集作業に御協力頂いた皆様に感謝申し上げます。

小特集編集チーム

沢田健介、飯田大輔、飯田裕之、金友 大、
羽多野一磨、早馬道也、東野武史



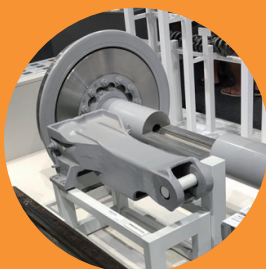
342



350



363



384

【小特集】

数学は工学の未来を支える 知の道具

291

巻頭言

編集チームリーダー

沢田健介

298

— 解説論文 —

円の交差グラフ: 数理とアルゴリズム

岡本吉央

305

— 解説論文 —

人の内面状態の推定と拡散モデルの応用 —— 自己と他者を理解し

支援することを目指して ——

幸島匡宏 / 南部優太

315

— 解説論文 —

5G 環境における, ネットワークデジタルツインを用いた FI モデル構築手法の検討

小山大輝 / 桜庭皆人 / 河崎純一 / 宮坂拓也

326

— 解説 —

トラフィックデータの分析による 情報通信ネットワークの異常検知

鎌村星平

333

— 解説論文 —

通信障害対処をクラスタリング分析によって 自動化するネットワーク運用保守管理支援技術

三宅裕士 / 角 武憲 / 末廣 雄

294

— 子どもに教えたい通信のしくみ: ジュニア会員向けページ — 統計の基礎. 平均, 標準偏差, 95% 信頼区間 —— あなたの測定結果は偶然なのか? ——

山口実靖

342

私の研究者歴

マトリクスに魅せられて

菊間信良

350

—開発物語—

未来を実装する——TRONプロジェクトのこれまでとこれから

坂村 健

357

—開発物語—

SoftEther（後編）

登 大遊

363

—街 plus 探訪—

何度も訪れたい「マレーシア・ペナン」

山本 嶺

367

—こんなツール、使っています—

オープンソース電磁界シミュレータ OpenFDTD

大賀明夫

373

—解説論文—

ファラデーのパラドックスを考える
——回転する棒磁石の磁力線は回転するか——

唐沢好男

382

—若者よ、世界に出よう！—

私の留学論：留学の意味と成功への道

王 港帰

384

—科学館・博物館めぐり—

大阪市立科学館

東野武史

387

—巻末言—

編集という名の冒険

——挑戦し続ける雑誌づくりのために——

和文マガジン編集委員長

山口実靖

388

編集後記



統計の基礎. 平均, 標準偏差, 95% 信頼区間 ——あなたの測定結果は偶然なのか?——

工学院大学 山口実靖
Saneyasu Yamaguchi

1. 君の測定結果は偶然ではないのか?

先生に叱られていないだろうか。調査や測定の結果を報告したとき「この結果は再現するのか? 偶然ではないのか?」とか、「測定回数が少ないのでは?」と。そんなときに役立つのが 95% 信頼区間 である。本稿では、平均 → 標準偏差 → 正規分布 → 95% 信頼区間 (95% Confidence Interval) の順に統計の基礎を学ぶ。

単に 95% 信頼区間の求め方を知りたいだけなら、5. 2. 3 の Excel による求め方を先に参照してもよい。

2. 平均: データの代表値

複数の値がある場合、「値の合計を、値の個数で割っ

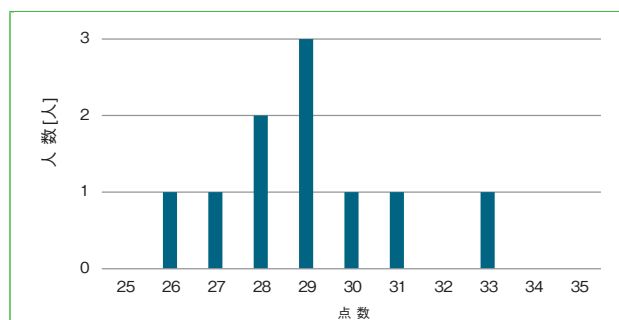


図1 点数分布例1 (ばらつき大)

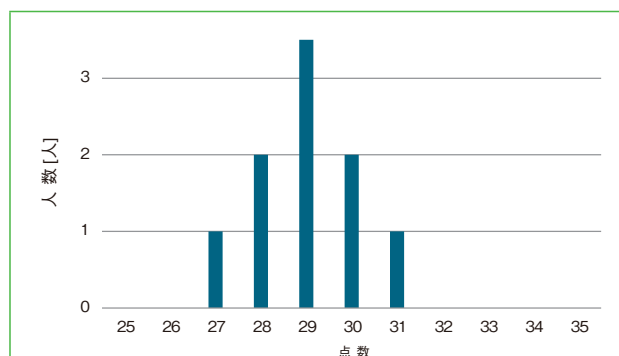


図2 点数分布例2 (ばらつき小)

たもの」が平均である。 n 個の値 $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$ があった場合、平均 $\bar{x}$ は $(x_0 + x_1 + \dots + x_{n-1})/n$ で求められる。

試験を行い、点数と人数の関係が図1の分布(「ヒストグラム」と呼ぶ。)であった場合、平均は $(26 \times 1 + 27 \times 1 + 28 \times 2 + 29 \times 3 + 30 \times 1 + 31 \times 1 + 33 \times 1)/10 = 29$ である。

平均はデータ全体の代表として役立つ。上の例では「いろいろな点数があるが、多くの点数は29点程度」と考えられる^{*1}。

3. 標準偏差: データのばらつき

次に、データ全体のばらつきを表す 分散 と 標準偏差 を説明する。

図1と図2の分布を比較すると、いずれも平均点は29であるが、図1の方が点数のばらつきが大きい。(分布が広い。)図1は最小値から最大値の幅が広く、図2は平均点付近に多くの人が集まっている。このように、平均は(値の代表として便利だが)データ全体の「ばらつき」の大小を表せない。

標準偏差 と 分散 の計算方法は図3のとおりである。図1の10個の点数の例を用いている。

偏差は、各値の平均からの「ずれ」を表し、平均から遠い値ほど偏差の絶対値が大きくなる。ただし、偏差の合計は0になり、偏差の合計はばらつきの指標として使えない。

偏差²も各値の平均からのずれを表し、平均から大きく外れるデータの偏差²は大きくなる。

分散と標準偏差はデータ全体のばらつきを表し、これらが大きいほど、全体のばらつきが大きい。分散と標準偏差のどちらを用いてもよいが、標準偏差が好まれることが多い。標準偏差と元データの単位は同じであるが、

*1 有名な代表としてほかにも中央値や最頻値があるが、本稿では取り上げない。

	点数	偏差	偏差 ²
1人目	26	-3	9
2人目	27	-2	4
3人目	28	-1	1
4人目	28	-1	1
5人目	29	0	0
6人目	29	0	0
7人目	29	0	0
8人目	30	1	1
9人目	31	2	4
10人目	33	4	16
平均	29	0	3.6

標準偏差
 $= \sqrt{\text{分散}}$
 $= \sqrt{3.6}$
 $= 1.897 \dots$

分散
 $= 3.6$

- (1) 各データの偏差(各データ - 平均)を求める。上表の「偏差」の列のようになる。
- (2) 各偏差の二乗を計算する。表の「偏差²」の列のようになる。
- (3) 「偏差²」の平均を計算する。表の例では、3.6となる。これが分散である。
- (4) 分散の平方根(ルート)をとったものが標準偏差である。この例では1.897...となる。

図3 分散と標準偏差の求め方

分散の単位は、元データの単位の二乗となる。元のデータの単位が「点」なら、標準偏差の単位も「点」であり、分散の単位は「点²」である。



4. 正規分布（ガウス分布）

テストを行うと、いろいろな点数の人が出る。多くの場合、(図2のように)平均点に近い点の人数が多く、平均点から離れていくとその人数が減っていく。

また、「正規分布（ガウス分布）」と呼ばれる図4の形（釣鐘型）の分布があり、非常に多くの事例がこの分布に近似的に（あるいは完全に）従う。試験の点数や、生物の身長や、コインを n 回投げたときに表が出る回数*2

などが近似的に従う。

正規分布の形は、左右対称であり、対称軸のところでピークになる。平均はピークの数値である。ここで言う平均は、(図1や図2と同様に)横軸を点数、縦軸をその点数の人数としたときの平均点と考えると分かりやすい。

正規分布と標準偏差の関係は必ず覚えてほしい。図4の場合、標準偏差を計算すると図中の σ の長さになる。正規分布では「(平均)から(平均+標準偏差)」の範囲(図のDの範囲)に約1/3(約34.1%)が入る。もしテストの点数分布が、平均が60点、標準偏差が15点の正規分布に従っていたら、60点から75点の範囲に全体の約1/3の人が入る。左右対称なので「(平均-標準偏差)から(平均)」の範囲(図のC)にも全体の約1/3が入り、「平均±標準偏差」の範囲(図のCとD)の範囲に全体の約2/3が入る。

「平均±2×標準偏差」の範囲(図のB、C、D、E)の範囲に約95.5%が入る。よって「平均-2×標準偏差」以下の範囲(図のA)には約2.275%、図のFの範囲にも約2.275%が入る。

いろいろな正規分布をしてみる。図5(a)は平均0で、標準偏差1の正規分布である。全ての値に2を加えたら(全ての点数に+2点したら)、図5(b)のようになる。分布が平行移動して、2がピークになっている。左右への広がり(ばらつき)は変わっていない。これは、平均2、標準偏差1の正規分布である。「ばらつきの大きさが同じ」と「標準偏差が同じ」は同じことである。

図5(a)の全ての値を2倍にしたら(全ての点数を2倍にしたら)、(c)のようになる。-1点は-2点になり、+2点は+4点になる。平均は変わらず0点であるが、ばらつきが大きくなる。これは、平均0、標準偏差2の正規分布である。値を n 倍にすると、標準偏差も

*2 「二項分布」と呼ばれる。

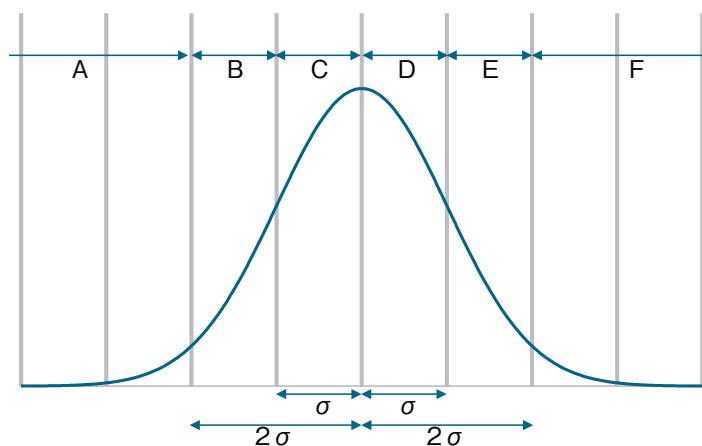


図4 正規分布

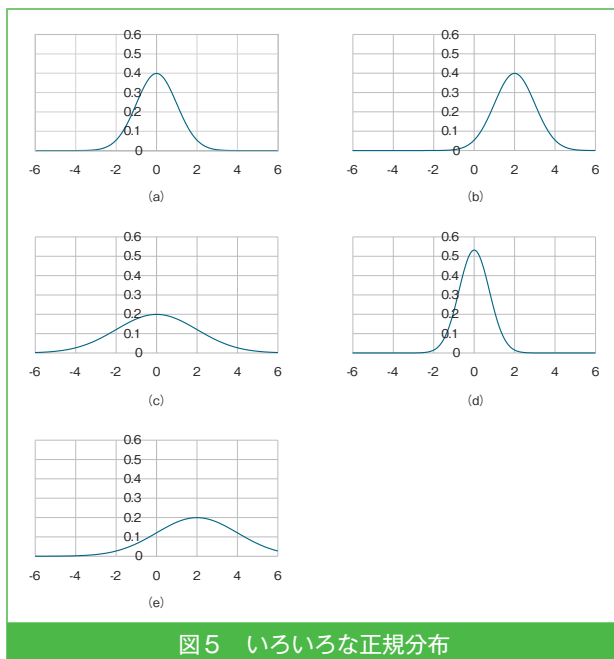


図5 いろいろな正規分布

n 倍になる。

それぞれの値（点数）を 0.75 倍にすると、図 5 の (d) のようになる。点数のばらつきは小さくなり、標準偏差も 0.75 倍になる。平均 0、標準偏差 0.75 である。

平均 2 で標準偏差 2 の分布は図 5(e) のようになる。標準偏差を 2 倍にしたら横に 2 倍に広がり、平均を 2 増やしたら全体が 2 だけ右に移動したと思えばよい。

5. 95% 信頼区間

5. 1 平均の 95% 信頼区間とは何か

あなたが日本人の身長を知りたいとする。母集団は全ての日本人で、真の平均（母集団の平均）を知るには、全日本人の身長を調べなくてはならない。しかし、これは難しいので、 n 人だけ抽出して（これらを「標本」と呼ぶ。）、これら標本の平均を求めて代用することが多い。当然、真の平均（母集団の平均＝全日本人の平均）と、あなたが調べた標本の平均は、完全には一致しない。ただ、 n が大きいほど両者が近いと期待できることを、皆、何となく知っている。

平均の 95% 信頼区間は、「真の平均（母集団の平均）は、高確率で（95% の確率で）、 X 以上 Y 以下の値」と、真の平均を範囲で予想するものであり、この「 X 以上 Y 以下」が 95% 信頼区間である。予想が外れる確率の 5% は「有意水準」と呼ばれる。

5. 2 「母集団の平均」の 95% 信頼区間の求め方

測定値（標本）から母集団の平均の 95% 信頼区間を求める方法を説明する。大切なので 3 回説明する。次の 3 点を前提としている。① n 個の測定値（標本の値）

は知っている。② 母集団全体の平均を知りたい。③ 母集団の値が正規分布に従うことは知っている。

5. 2. 1 母集団平均の 95% 信頼区間の計算方法（一般）

以下の手順で計算できる。 n 個の測定値（標本）を $(x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ とする。

①「全測定値の平均」を計算する^{*3}。それを $\bar{x}$ とする。

②「全測定値の標準偏差」を計算する^{*4}。それを S とする。

③自由度 $n-1$ の t 分布（後述）の 95% 区間を求める。その範囲を $-\alpha$ から α とする。

④ $\bar{x} - \alpha S / \sqrt{n-1}$ から $\bar{x} + \alpha S / \sqrt{n-1}$ が 95% 信頼区間である。

ここで自由度、 t 分布というやや難しい言葉が登場してしまうが、本記事では説明せず、Excel で計算するのみとする。

5. 2. 2 母集団平均の 95% 信頼区間の計算方法（計算例）

10 回測定したら、測定値が 68, 71, 67, 69, 73, 70, 72, 67, 68, 65 であった。測定値が正規分布に従うと仮定して、真の平均（十分な回数測定したときの平均、母集団の平均）の 95% 信頼区間を 10 個の測定値から求める。計測値が 10 個なので $n=10$ である。

①「全測定値の平均」である $\bar{x}$ を計算する。

$\bar{x}$

$$= \frac{68 + 71 + 67 + 69 + 73 + 70 + 72 + 67 + 68 + 65}{10} = 69$$

②「全測定値の標準偏差」である S を計算する。

標準偏差 S の前に、分散 S^2 を計算する。

$$S^2 = ((68-69)^2 + (71-69)^2 + (67-69)^2 + (69-69)^2 + (73-69)^2 + (70-69)^2 + (72-69)^2 + (67-69)^2 + (68-69)^2 + (65-69)^2) / 10 = 5.6$$

分散 S^2 の平方根が、標準偏差 S である。 $S = \sqrt{5.6} = 2.366 \dots$

③自由度 $n-1$ の t 分布の 95% 区間を求める。

今回は $n=10$ なので、自由度 9 の t 分布の 95% 区間を求める。これは Excel を使わないと難しい。Excel で $=TINV(\text{確率}, \text{自由度})$ を使う。今回は $=TINV(0.05, 9) = 2.262157163 \dots$ と求め、 $\alpha = 2.262 \dots$ とする。

④ 95% 信頼区間を求める。

$\bar{x} - \alpha S / \sqrt{n-1}$ から $\bar{x} + \alpha S / \sqrt{n-1}$ が 95% 信頼区間である。 $\bar{x}=69$, $\alpha=2.262 \dots$, $S=2.366 \dots$, $n=10$

*3 これは「標本平均」と呼ばれる。

*4 これは「標本標準偏差」と呼ばれる。

であるので、95% 信頼区間は 67.21 から 70.78 となる。

5. 2. 3 母集団平均の 95% 信頼区間の計算方法 (Excel)

Excel を用いて、測定値から、真の平均（母集団の平均）の 95% 信頼区間を求める。使用するファイルは図 6 のようになっており、文献 (1) のサイトから入手可能である。前項と同じ数字の例を用いる。

- ① 全てのデータを A 列に入力する。
- ② C4 セルに信頼区間の確率を入力する。95% 信頼区間なら 95 と入力。99% 信頼区間なら 99 と入力。
- ③ データ数（標本数） n を求める。これは $=\text{COUNT}(A:A)$ で可能であり、このファイルでは C11 に入る。
- ④ 全測定値の平均（標本平均） $\bar{x}$ を求める。これは $=\text{AVERAGE}(A:A)$ で可能であり、C12 に入る。
- ⑤ 全測定値の標準偏差（標本標準偏差） S を求める。これは $=\text{STDEV.P}(A:A)$ で可能であり*5、C13 に入る。
- ⑥ 自由度 $n-1$ の t 分布の 95% 区間を求める。これは $=\text{TINV}(1-C4/100, C11-1)$ で可能であり、C14 に入る。この例では C4 が 95 で、C11 が 10 である。

- ⑦ 区間幅の半分である $\alpha S / \sqrt{n-1}$ を求める。これは $=C14 * C13 / \text{SQRT}(C11-1)$ で可能であり、C15 に入る。 $=\text{SQRT}(\text{値})$ は平方根である。

- ⑧ 信頼区間を求める。信頼区間は「標本平均 $\bar{x}$ - 区間幅の半分」から「標本平均 $\bar{x}$ + 区間幅の半分」である。これらは、D6 から D9 に入る。

まとめると、あなたが緑色部 (A 列と C4) に入力すれば、信頼区間 (95% 信頼区間など) が水色部 (D7 と D9) に表示される。



6. 信頼区間を使う上での注意

本稿で述べた「平均の 95% 信頼区間」は、「真の平均（母集団の平均）」が高確率 (95%) でこの区間に入る」という区間である。「測定値が高確率 (95%) でこの区間に入る」というものではない。

有意水準を幾つにするかは重要な話題であるが、有意水準 5% である 95% 信頼区間を用いることが多い。特別な意図なく別の有意水準を使うよりは、慣例に従い 5% を用いた方が無難かもしれない。ほかにも 99% 信

*5 標準偏差は、Excel で $=\text{stdev.p}(\dots)$ と計算できる。 $=\text{stdev}(\dots)$ で計算できるのは、母標準偏差で厳密には少しだけ違う。

	A	B	C	D
1	68	← A 列に全ての計測値を入力		
2	71			
3	67			
4	69		95	
5	73			
6	70			↓ 95% 信頼区間
7	72			67.21558637
8	67			から
9	68			70.78441363
10	65			
11			10	← n (標本数)
12			69	← $\bar{x}$ 平均 (標本平均)
13			2.366432	← S (標本標準偏差)
14			2.262157	← 自由度 9 の t 分布の 95% 区間
15			1.784414	← 区間幅の半分
16				

図 6 Excel による 95% 信頼区間の計算

頼区間を使うことも多い。

95% 信頼区間が広すぎて困った場合は、データ数（計測回数）を増やせば狭められる。データ数を増やせない場合は、統計上は意味のある改善と主張できない。



7. おわりに

本稿では、統計の基礎として、平均、標準偏差、95% 信頼区間を学んだ。測定値の平均を他人に見せるときは、その信頼区間を付けるようにしてほしい。更に深く勉強したい方は、参考文献 (2) や (3) の教科書などを参考にして頂きたい。

参考文献

- (1) Saneyasu Y. "95CI." <https://github.com/saneyasu-y/95ci> <<accessed 2026/01/01>>
- (2) 小島寛之, 完全独習 統計学入門, ダイヤモンド社, 東京, 2006.
- (3) 東京大学教養学部統計学教室, 統計学入門 (基礎統計学 I), 東京大学出版会, 東京, 1991.

山口実靖 (正員)

2002 東大大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程了。博士 (工学)。同年から東大生産技術研究所学術研究支援員、産学官連携研究員、日本学術振興会特別研究員。2006 工学院大・工・講師。2007 准教授。2016 同情報学部准教授。2021 同教授。専門はオペレーティングシステム、通信プロトコル。教育で「信頼区間」を説きながら、多忙のミスで「心配不安」を招く日々を送る。自身の信頼向上が課題。情報処理学会、日本データベース学会、IEEE、ACM 各会員。



円の交差グラフ: 数理とアルゴリズム

Intersection Graphs of Disks: Mathematical Properties and Algorithms

岡本吉央 Yoshio Okamoto[†]

Summary

円の交差グラフは、無線ネットワークのトポロジーを抽象化する際によく現れる。本稿では、円の交差グラフと単位円の交差グラフに関する基礎的な性質を短くまとめる。まず、ほかのグラフクラスとの関係として、平面的グラフが円の交差グラフであり、格子グラフが単位円の交差グラフであることを説明する。そして、最大独立集合問題と最小彩色問題に対して近似保証のあるアルゴリズムを説明する。最後に、最大クリーク問題が単位円の交差グラフに対しては多項式時間で解けることを説明する。最大クリーク問題が円の交差グラフに対して多項式時間で解けるかどうかは大きな未解決問題である。

Key Words

円グラフ, 単位円グラフ, 交差グラフ, 独立集合, 彩色, クリーク, 近似アルゴリズム, NP-困難性

1 はじめに

無線ネットワークにおける多くの問題では、次のように構成されるグラフを考える。その頂点は平面上の1点に対応し、無線ネットワークにおいて通信を行いたい主体を表す。そして、2頂点が辺で結ばれるのは、対応する2点間で通信が可能であるときとする。

シミュレーション等によく用いられる単純なケースは、各点が通信可能な範囲を、その点を中心とする円で表すものである。そのときに得られるグラフは「円の交差グラフ」(intersection graph of disks)として離散数学ではよく研究されている。これは単に「円グラフ」(disk graph)と呼ばれることの方が多い。しかし、全く別の用語である pie chart に対しても同じ「円グラフ」という日本語が使われ、しかも、後者の方が広く使われているので、本稿では「円の交差グラフ」という呼び方を一貫して用いることにする。

より単純なケースとして、各円の半径が全て同一である場合を考えることも多い。拡大・縮小することで、その半径は1であると仮定して(数学的には)一般性を失わない。そのときに得られるグラフは「単位円の交差グラフ」(intersection graph of unit disks)と呼ばれる。短く「単位円グラフ」(unit disk graph)ともよく呼ばれるが、本稿では

一貫して「単位円の交差グラフ」と呼ぶことにする。離散数学において「ランダム幾何グラフ」(random geometric graph)と呼ばれる研究対象があるが、それは多くの場合、ランダムに得られた単位円の集合に対する交差グラフを意味する。

本稿の主目的は、円の交差グラフと単位円の交差グラフに対して、離散数学とアルゴリズム理論において知られていることの中で、特に基礎的なものを概観することである。次の章で円の交差グラフと単位円の交差グラフを定義した後、**3.**では、それらが成すクラスや他のグラフのクラスとの関係を考察する。続く三つの章では、最大独立集合問題、最大クリーク問題、最小彩色問題という典型的なグラフ最適化問題を考察対象とする。特に、近似アルゴリズムと近似比の考え方を導入し、定数近似比を達成するアルゴリズムの設計法を解説する。

2 円の交差グラフと単位円の交差グラフ

本稿において、「グラフ」とは二つの集合の対 (V, E) で、 E が「 V の部分集合で要素数が2のものをいくつか集めてできたものである」という性質を満たすもののことである。集合 V の要素を「頂点」と呼び、集合 E の要素を「辺」と呼ぶ。本稿では、 V は必ず有限集合であるとするが、一般に V は無限集合であっても構わない。頂点 u, v が辺 $\{u, v\} \in E$ を成すとき、 u, v は「隣接」という。

グラフを図で表すとき、頂点を平面上の点として、辺を平面上の曲線とすることが多い。このとき、辺 $\{u, v\}$ は頂点 u, v を表す点を結ぶようにしな

[†] 電気通信大学, 調布市
The University of Electro-Communications,
Chofu-shi, 182-8585 Japan

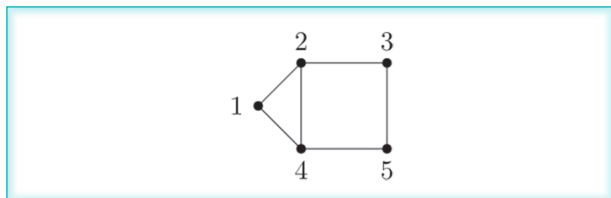


図1 グラフの例

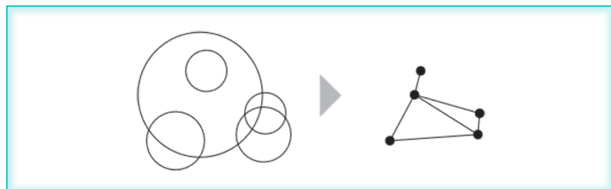


図2 円の交差グラフの例

くてはならない。辺を表す曲線同士が交わってもよい。図1が表すグラフでは1, 2, 3, 4, 5がそれぞれ頂点であり, $\{1, 2\}, \{1, 4\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}, \{3, 5\}, \{4, 5\}$ がそれぞれ辺である。

円の交差グラフとは次のように構成されるグラフである。各頂点は平面上の円一つに対応する。また、二つの頂点が辺を成すのは、対応する二つの円が交わる（共有点を持つ）とき、そして、そのときに限る。ここで「円」と呼んでいるものは中身の詰まった閉円板を意味し、その境界である円周を指しているわけではないことに注意する。図2に例を挙げる。

単位円の交差グラフとは、各頂点に対応する円がどれも単位円であるような場合に得られる、円の交差グラフである。つまり、単位円の交差グラフは特殊な円の交差グラフである。標語的に書けば、「単位円の交差グラフ $\Rightarrow$ 円の交差グラフ $\Rightarrow$ グラフ」という関係が成り立つ。これらの逆が成り立たないことは次の章で説明する。

以下、円の交差グラフや単位円の交差グラフに対するアルゴリズムを考える際には、それらがどのようにして入力されるのかということをしっかりと考える必要がある。（その理由は後述する。）入力の方法として最も自然なものは円の集合を与えるというものである。このとき、各円はその中心の座標と半径という三つの実数値で与えられると思えばよい。一方で、少し不自然かもしれないが、交差グラフとして構成されたグラフ $G = (V, E)$ を入力として与えるという方法もある。これは座標や半径という数値を考えないため、より組合せ的な方法である。

次の意味で、円の集合を与える方が、交差グラフを与えるよりも、多くの情報をアルゴリズムに与えている。まず、円の集合が与えられれば、その中の

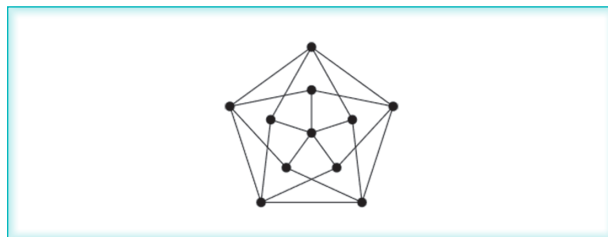


図3 Grötsch グラフ

二つの円が交わるかどうかは容易に分かるので、その交差グラフを構成することは容易にできる。ここで「容易に」というのは「多項式時間で」という意味である。一方で、交差グラフを与えても、各頂点に対応する円の中心座標や半径を復元することは難しい。ここで「難しい」というのは計算複雑性の意味での困難性を指す。例えば、与えられたグラフが円の交差グラフとして構成可能であるか、単位円の交差グラフとして構成可能であるかを問う判定問題は NP- 困難である^{(1), (2)}。NP- 困難であることの定義は省略するが、その帰結として、 $P \neq NP$ であるならば）NP- 困難である問題に対して多項式時間アルゴリズムが存在しないことが導ける。イメージで言えば、円の集合を交差グラフの設計図だと思ったとき、設計図からグラフという製品を作るのは簡単だが、製品から設計図を復元するのは難しい、ということである。

つまり、直感に訴える言い方をすれば、「円の集合を与える場合のアルゴリズムの方が、交差グラフを与える場合よりも設計しやすい」ことになる。

3 円の交差グラフの性質

円の交差グラフとして構成できないグラフはあるのだろうか？ 答えは Yes である。そのようなグラフを構成する方法はいろいろとあるが、それが本当に円の交差グラフではないことを証明しようとする、幾何学的に少し込み入った議論か、グラフ理論的な前提知識か、どちらかを必要とするので、本稿では証明しないことにする。ただ、構成の一つは紹介する。これは Grötsch グラフ（図3）と呼ばれるもので、グラフ理論においてある種の反例としてよく使われるものである。

単位円の交差グラフとして構成できないが、円の交差グラフとして構成できるグラフの存在も知られている。これについては構成の一つを証明付きで紹介する。図4にあるグラフを見てもらいたい。このグラフはよく $K_{1,6}$ と表記されるもので、一つの頂点に隣接する六つの頂点が、互いに隣接していな

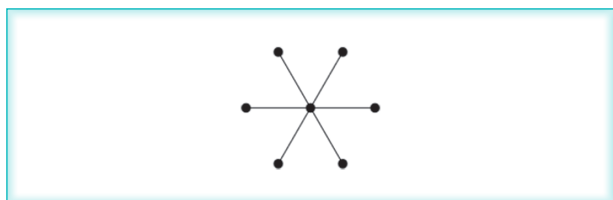


図4 単位円の交差グラフとして構成できないグラフの例 ($K_{1,6}$)

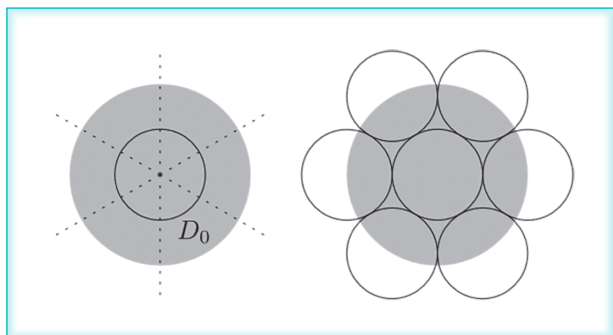


図5 $K_{1,6}$ が単位円の交差グラフとして構成できないことの説明

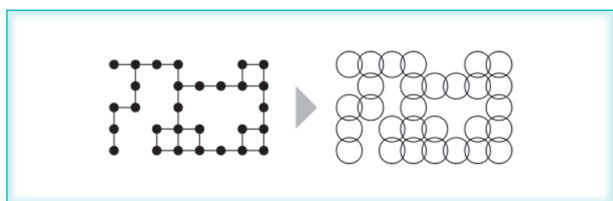


図6 格子グラフは単位円の交差グラフである

い。

これが単位円の交差グラフとして構成できると仮定しよう。中央の頂点に対応する単位円を D_0 とする。ほかの六つの頂点に対応する単位円は D_0 と交差しないといけないので、それらの中心は D_0 の中心を中心とする半径2の円の中（または境界上）になければならない。その円を頂角 60° の扇形で六等分すると、一つの扇形に中心を持つ二つの単位円は必ず交差することが分かる（図5左）。そのため、 D_0 に交差する単位円で互いに隣接しないものはそれぞれ別の扇形に含まなければならない。しかし、図5右に示すようにそれは不可能である。したがって、 $K_{1,6}$ は単位円の交差グラフとして構成できない。

格子グラフは単位円の交差グラフとして実現できる。ここで、格子グラフとは次のように構成されるグラフのことである。その頂点集合は二次元整数格子 $\mathbb{Z}^2$ の有限部分集合であり、二つの頂点が辺を成すのは、その距離が1であるとき、そして、そのときに限る。図6は格子グラフの例であるが、それを単位円の交差グラフとして実現した様子も描い

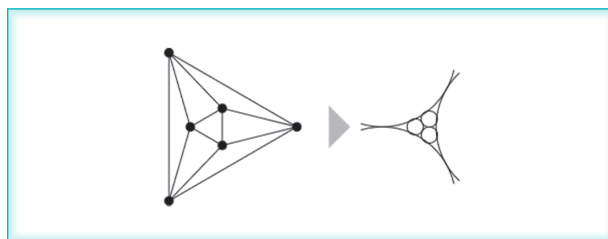


図7 平面的グラフは円の交差グラフとして実現できる

ている。つまり、標語的に書けば「格子グラフ $\Rightarrow$ 単位円の交差グラフ」という関係の成立が分かる。一方で、その逆は一般に成り立たず、単位円の交差グラフであるが、格子グラフとして実現できないものは簡単に構成できる。

平面的グラフは円の交差グラフとして実現できる。ここで、平面的グラフとは、図として表すときに、辺を表す曲線同士が交わらないようにできるもののことである。つまり、標語的に書けば「平面的グラフ $\Rightarrow$ 円の交差グラフ」という関係が成立するわけである。この事実は「Koebe-Andreiev-Thurston の定理⁽³⁾」と呼ばれるものの帰結であるが、その定理の証明は本稿の目的を逸脱する（そのため、行わない）。例を図7に示す。

ここまで述べてきたことを鑑みると、次の帰結が得られる。

- ・格子グラフに対して解くのが難しい問題は、単位円の交差グラフに対しても解くのが難しい。ただし、単位円の交差グラフは「円の集合」として与えられるものとしても、「グラフ」として与えられるものとしてもよい。
- ・平面的グラフに対して解くのが難しい問題は、円の交差グラフに対しても解くのが難しい。ただし、円の交差グラフは「グラフ」として与えられるものとする。

4 最大独立集合問題

グラフ $G = (V, E)$ の「独立集合」とは、頂点の集合 $S \subseteq V$ で、その中のどの2頂点も辺を成していないもののことである。つまり、任意の $u, v \in S$ に対して、 $\{u, v\} \notin E$ が成り立つことである。グラフ G の独立集合の中で、要素数が最大のものを G の「最大独立集合」と呼ぶ。グラフ G の最大独立集合の要素数を $\alpha(G)$ で表すことが多く、これを G の「安定数」と呼ぶことがある。

最大独立集合問題とは、入力として与えられたグラフ G に対して、 G の最大独立集合を出力することを要求する問題である。

最大独立集合問題は、単位円の交差グラフに対して、それが「円の集合」として与えられる場合であっても NP- 困難であることが知られている⁽⁴⁾。つまり、多項式時間で厳密に最大独立集合を出力するアルゴリズムを設計することは困難であると思われる。そのため、厳密に最大独立集合を出力するのではなく、最大独立集合に近い独立集合を出力するアルゴリズムを設計する試みが多くなされている。

この「近さ」を定量化するために、近似比という概念がよく使われている。あるアルゴリズム A が、入力されたグラフ G の独立集合 S を出力するとする。このとき、A が近似比 c を達成するとは、任意の G に対して $\alpha(G) \leq c \cdot |S|$ が成り立つことである。ここで、 $|S|$ は独立集合 S の要素数を表す。最大独立集合の要素数を $\alpha(G)$ と定義したので、 $\alpha(G) \geq |S|$ が必ず成り立つことに注意する。つまり、近似比 c は必ず 1 以上の実数であり、それが 1 に近ければ近いほど、近似の精度が良いと言える。近似アルゴリズムを設計する際に重要となるのは、計算量が小さいことに加えて、近似比が小さいことである。

単位円の交差グラフがグラフによって与えられるとき、次の貪欲アルゴリズム 1 を考える。

〈アルゴリズム 1〉

- (1) $S = \emptyset$ とする。
- (2) 頂点 $v \in V$ を一つ任意に選び、 S に追加する。
- (3) v と v に隣接する全ての頂点を G から（すなわち V から）削除する。
- (4) $V = \emptyset$ になったら、 S を出力して終了する。そうでなければ、ステップ 2 に戻る。

アルゴリズム 1 は近似比 5 を達成する⁽⁵⁾。その理由を説明する。与えられた単位円の交差グラフ G の最大独立集合の一つを S^* とし、アルゴリズム 1 の出力を S とする。アルゴリズム 1 において、 S に頂点 v が追加されたとき（つまり、ステップ 2）を考える。このとき、次のステップ 3 で v と v に隣接する全ての頂点を G から削除するが、その中には、 S^* の頂点が高々 5 個しか存在しない。これは次のように分かる。頂点 v が S^* の要素であるとき、 v に隣接する頂点はどれも S^* の要素ではないので（要素であるとするとき S^* が独立集合であることに矛盾する）、削除した頂点の中で S^* の頂点であるのは一つである。一方、 v が S^* の要素でないとき、 v の隣接頂点の中に S^* の頂点が 6 個あると、それらと v が $K_{1,6}$ を作ってしまい、これは単位円の交差グラフではないので、矛盾が導いてしまうのである。したが

って、 S の頂点一つに S^* の頂点が高々五つ対応するので、 $5|S| \geq |S^*| = \alpha(G)$ の成立が分かる。

アルゴリズム 1 の達成する近似比を導出する際には、「任意の頂点 v に対して、 v に隣接する頂点の中には S^* の頂点が高々五つしか存在しない」という性質が重要であった。実を言うと、単位円の交差グラフにおいては「ある頂点 v に対して、 v に隣接する頂点の中には S^* の頂点が高々三つしか存在しない」ことが成り立つ。（単位円の集合の中で、中心の x 座標が最小のものを考えればよい。）そのような頂点は多項式時間で見つけれられるので、アルゴリズム 1 のステップ 1 において「任意に選ぶ」ところを上で存在を保証した頂点を選ぶように変えると、同じ導出によって、近似比 3 を達成できることが分かる⁽⁵⁾。

単位円であるとは限らない円の交差グラフに対しては、ステップ 2 で頂点 v を「半径最小の円に対応する頂点」とすることで、近似比 5 を達成できる。証明は単位円の場合と同様である。しかし、そのような円を見つけるためには、交差グラフが「円の集合」として与えられる必要がある。一方で、円の集合として与えられなくても、半径最小の円に対応する頂点は「その隣接頂点に制限すると、頂点数が 6 以上の独立集合を持たない」という性質を持ち、そのような頂点を見つけることは多項式時間で行うことができる。このとき、ステップ 2 における v をそのような頂点とすると、同じ証明によって、近似比 5 を達成できることが分かる⁽⁵⁾。

実を言うと、もっと小さな近似を多項式時間で達成するアルゴリズムが知られている。それは究極とも言えるもので、つまり、任意の実定数 $\epsilon > 0$ に対して、近似比 $1 + \epsilon$ を達成する多項式時間アルゴリズムである。そのようなアルゴリズムは「多項式時間近似スキーム」(PTAS: Polynomial-Time Approximation Scheme, ピータス) と呼ばれることもある。ただし、「多項式時間」の多項式の次数は ϵ に依存してもよいので、その点には注意が必要である。典型的には、 ϵ が小さいほど多項式時間近似スキームの計算量は大きくなる。

円の交差グラフにおける最大独立集合問題に対して、円の集合を入力とするとき多項式時間近似スキームの存在が知られている⁽⁶⁾。アルゴリズムは少し複雑であるため、紹介しない。単位円の交差グラフの場合は、グラフを入力とするときでさえ多項式時間近似スキームが存在する⁽⁷⁾。円の交差グラフにおいて、グラフを入力とするときに多項式時間近似スキームが存在するのか、筆者は知らない。

5 最大クリーク問題

グラフ $G = (V, E)$ の「クリーク」とは、頂点の集合 $S \subseteq V$ で、その中のどの 2 頂点も辺を成しているもののことである。つまり、任意の $u, v \in S$ に対して、 $\{u, v\} \in E$ が成り立つことである。グラフ G のクリークの中で、要素数が最大のものを G の「最大クリーク」と呼ぶ。グラフ G の最大クリークの要素数を $\omega(G)$ で表すことが多く、これを「 G のクリーク数」と呼ぶことがある。

最大クリーク問題とは、入力として与えられたグラフ G に対して、 G の最大クリークを出力することを要求する問題である。

最大クリーク問題は、単位円の交差グラフに対して、それがグラフとして与えられる場合であっても、多項式時間で厳密に解けることが知られている⁽⁴⁾。一方で、円の交差グラフにおいて最大クリーク問題が（円の集合として与えられる場合でも、グラフとして与えられる場合でも、）多項式時間で解けるか、NP- 困難であるか、ということは大きな未解決問題である。

単位円の交差グラフにおいて最大クリーク問題を厳密に解くアルゴリズムを短く紹介する。アルゴリズムには単位円の交差グラフがグラフ $G = (V, E)$ として与えられる。まず、グラフの各辺 $\{u, v\} \in E$ を考えて「 u, v を含むクリークの中で最大のもの」を見つける手順を考える。そして、それを全ての辺に対して行い、その中で最大のものを出力すれば、グラフ G の最大クリークが見つけれられるのである。各辺に対する手順が多項式時間で実行できれば、辺の数は多くても二つの頂点を選ぶ組合せの総数しかないので、アルゴリズム全体の計算量も多項式となる。

ここで、辺 $\{u, v\} \in E$ を任意に一つ固定する。頂点 u, v に対応する単位円を D_u, D_v とすると、この二つの円は交わっていることになる。頂点 u, v を含むクリークに含まれる頂点に対応する単位円は D_u, D_v の両方と交わらないとならないため、そのような単位円の中心は図 8 の灰色で示される領域にしか存在できない。

灰色の領域を図 8 のように二等分すると、上の領域に中心を持つ単位円は互いに交差し、下の領域に中心を持つ単位円も互いに交差することが分かる。（各領域における 2 点の距離の最大値が 2 以下であるため。）したがって、 u, v の両方と隣接する頂点全体に制限すると、グラフは「二部グラフの補グラフである」という性質を持つ。二部グラフや補グラフの定義や説明は省くが、重要なことは、「二

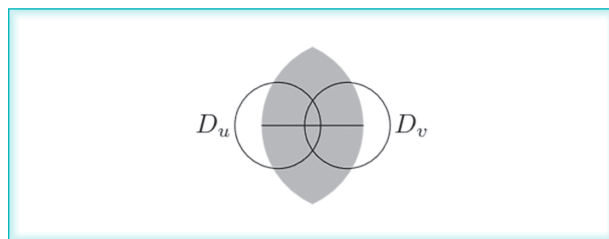


図8 最大クリーク問題を解くアルゴリズムの説明

部グラフの補グラフにおいて、最大クリーク問題は多項式時間で解ける」ということである。実際、二部グラフの補グラフにおける最大クリーク問題は、二部グラフの最大マッチング問題に帰着できるのだが、二部グラフの最大マッチング問題は増加道法というアルゴリズムによって多項式時間で解けることが知られているのである。（増加道法の説明はグラフ理論の教科書に大抵載っている。）これによって、単位円の交差グラフにおいて最大クリーク問題が多項式時間で解けることが分かった。

以下、増加道法を知る人に対して、その帰着を説明する。二部グラフの最大マッチング問題に対する増加道法を実行すると、その出力として、最大マッチングだけでなく、その双対に対応する最小頂点被覆も得られる。最小頂点被覆の補集合は最大独立集合であるので、最大独立集合も得られる。二部グラフの最大独立集合はその補グラフの最大クリークである。つまり、二部グラフの補グラフの最大クリークが増加道法から得られるのである。

円の交差グラフに対しては、最大クリーク問題が多項式時間で解けるかどうか分かっていない。最近の研究によって、乱択多項式時間近似スキームが存在すること⁽⁸⁾ や、異なる半径の種類が定数であるときには多項式時間で解けること⁽⁹⁾ が分かっている。

6 最小彩色問題

グラフ $G = (V, E)$ の「彩色（さいしょく）」とは、頂点への色の割当 $f: V \rightarrow C$ で（ただし、 C は色の集合）、任意の辺 $\{u, v\} \in E$ に対して、 $f(u) \neq f(v)$ を満たすもの、つまり、辺の両端点の色が必ず異なるもののことである。使う色の数、つまり、像 $f(V)$ の要素数が最小である彩色 f を G の「最小彩色」と呼ぶ。最小彩色が使う色数を $\chi(G)$ で表し、「 G の染色数」と呼ぶことがある。彩色において、同じ色が割り当てられている頂点の集合は独立集合であることに注意する。

最小彩色問題とは、入力として与えられたグラフ G に対して、 G の最小彩色を出力することを要求す

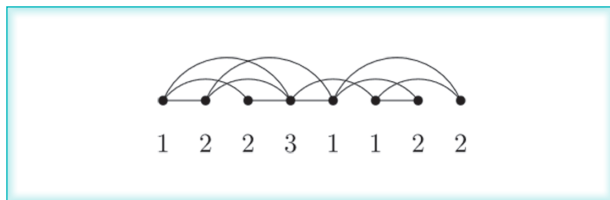


図9 アルゴリズム2の実例 左から右に向かって頂点が並んでいると見る。

る問題である。

最小彩色問題は、単位円の交差グラフに対して、それが単位円の集合として与えられる場合であってもNP-困難であることが知られている⁽⁴⁾。そのため、多項式時間近似アルゴリズムが研究されている。ここで、グラフの彩色を出力するアルゴリズムAが近似比 c を達成するとは、任意のグラフ G に対して、使う色数が $c \cdot \chi(G)$ 以下の彩色を出力することである。

まず、交差グラフとは限らず、グラフ一般に対して、彩色を得る手順をアルゴリズム2として説明する。このアルゴリズム2は最小彩色を出力するわけではないことに注意する。ここで、記述を簡単にするため、色の集合は正整数全体の集合、つまり、 $C = \{1, 2, 3, \dots\}$ であるとする。

〈アルゴリズム2〉

- (1) 頂点を一列に並べて、 $v_1, v_2, \dots, v_n$ とする。
- (2) 全ての $i = 1, 2, \dots, n$ について、順に $f(v_i) = \min(C \setminus \{f(v_j) \mid j < i, \{v_j, v_i\} \in E\})$ とする。
- (3) 彩色 f を出力する。

ステップ2で行っていることを言葉で述べると、頂点 v_i の色を決めるとき、 v_i の隣接頂点で既に使われた色以外で最も（数値として）小さい色を v_i の色、つまり、 $f(v_i)$ とするのである。アルゴリズム2で彩色を行った例を図9に示す。

アルゴリズム2が彩色を必ず出力することは次のように分かる。辺 $\{v_j, v_i\} \in E$ に着目する。（ただし、 $j < i$ とする。）頂点 v_i の色 $f(v_i)$ を決めるとき、 v_j の色 $f(v_j)$ は既に決まっている。ステップ2で $f(v_i)$ には $f(v_j)$ と異なる色が割り当てられるので、 $f(v_i) \neq f(v_j)$ となる。つまり、アルゴリズム2の出力 f は彩色である。

アルゴリズム2では、ステップ1で頂点を一列に並べる。この並べ方によって出力する彩色が使う色数が変わる。実を言うと、ある並べ方に対してアルゴリズム2を実行すると最小彩色が得られる。つまり、最小彩色問題の難しさは、そのような並べ

方を見つけることの難しさと同じなのである。

アルゴリズム2が出力する彩色 f が使う色数を評価するために、グラフにおける頂点の次数を定義する。グラフ $G = (V, E)$ の頂点 $v \in V$ の次数とは、 v に隣接する頂点の総数であり、ここでは $d(v)$ で表す。グラフ G の最大次数とは $\max\{d(v) \mid v \in V\}$ のことであり、ここでは $\Delta(G)$ で表す。例えば、図9のグラフにおいて、最大次数は5である。

アルゴリズム2の出力が使う色数は必ず $\Delta(G) + 1$ 以下であることが次のように分かる。頂点 v_i の色を決めるとき、使えない色数は高々 $d(v_i)$ である。したがって、 $f(v_i) \leq d(v_i) + 1 \leq \Delta(G) + 1$ が成り立つ。

アルゴリズム2を G が単位円の交差グラフであるときに適用すると、出力する彩色の使う色数が $5\chi(G) - 4$ 以下になることを証明する⁽⁵⁾。すなわち、アルゴリズム2は単位円の交差グラフに対して近似比5を達成する。

証明のための補題として、 G が単位円の交差グラフであるとき、 $\chi(G) \geq \Delta(G)/5 + 1$ が成立することを示す。これが証明できると、先に説明したとおり、アルゴリズム2の使う色数が高々 $\Delta(G) + 1$ であることから、それが高々 $\Delta(G) + 1 \leq 5\chi(G) - 4$ であることが導ける。

では、補題を証明する。単位円の交差グラフ G において、 f^* を最小彩色として、 v^* を次数が最大の頂点（つまり、 $d(v^*) = \Delta(G)$ ）とする。頂点 v^* に対応する単位円を D^* とすると、 D^* と交わる単位円の色が $\Delta(G)$ である。彩色において、同じ色が割り当てられる頂点の集合は独立集合であるので、それら $\Delta(G)$ 個の頂点の中で同じ色を持つ頂点の数は高々5である。（そうでないと、 $K_{1,6}$ を単位円の交差グラフとして構成できてしまう。）つまり、 v^* に使う色と合わせて、 $\chi(G) \geq \Delta(G)/5 + 1$ が得られる。

並べ方を工夫することで、近似比を下げるができる。頂点を並べるとき、対応する単位円の中心の x 座標が小さい方から順に並べるとする。こうすると、近似比3を達成できる。ただ、この並べ方を実現するためには、単位円の交差グラフが単位円の集合として与えられる必要がある。

近似比3を達成できる理由を説明する⁽⁵⁾。頂点 v_i の色を決めるとき、それよりも中心が左にあるものには既に色が割り当てられていることになるが、 v_i に対応する単位円と交わり、中心がそれより左にあるものは頂角が 60° の三つの扇形の中に中心を持つことになる。一つの扇形に中心を持つ単位円同士は交わるので、そこには高々 $\omega(G) - 1$ 個の単位円

しか存在しないことになる。($\omega(G)$ は G のクリーク数である.) したがって, v_i に隣接し, 既に色が割り当てられている頂点の数は高々 $3\omega(G) - 3$ であり, アルゴリズム 2 が v_i に割り当てる色は $3\omega(G) - 2$ 以下である. どんな彩色においてもクリーク数だけは色を使う必要があるので, $\omega(G) \leq \chi(G)$ が成り立ち, したがって, アルゴリズム 2 が使う色数は高々 $3\chi(G) - 2$ であることが導ける.

今, この証明から, G が単位円の交差グラフであるとき, $\chi(G) \leq 3\omega(G) - 2$ が成立することが分かる. このように, $\chi(G)$ を $\omega(G)$ の関数として上から抑えることは様々なグラフクラスに対して研究対象となっている. 単位円の交差グラフに対してはその関数が $3\omega(G) - 2$ であるわけだが, ここに現れる $\omega(G)$ の前の係数を 3 より小さくできるかということとはよく分かっていない. 大きな未解決問題であると認識されている.

単位円であるとは限らない円の交差グラフを考える. 頂点の並べ方として「半径の大きな円から順に並べる」というものを考えると, 単位円の交差グラフのときと同じ考え方で, 近似比 5 を達成できることが分かる⁽⁵⁾. この並べ方でアルゴリズム 2 を実行するためには, 円の集合として交差グラフが与えられる必要がある. 筆者の知る限り, 5 が多項式時間で今のところ達成できる最も良い近似比である.

7 最後に

単位円の交差グラフと円の交差グラフについて, 基礎的な事項を概観した. その中で, このように簡単な幾何学的対象についても未解決問題が幾つかあることも紹介した.

本稿では扱わなかったが, 円の集合と点の集合が与えられて, それらに対して最適化問題を解くという設定もよく考えられている. 例えば, 与えられた点を全て覆うように円を選ぶとき, 選ばれた円の総数を最小化する, といった問題である. (「円による点の最小被覆問題」と呼ばれる.) 多くの問題は NP- 困難であるため, 近似アルゴリズムがよく研究されている.

現実問題の抽象化として, 円や単位円を用いることは過度な理想化であると思われるかもしれない. 実際そうであると思う. しかし, そうであっても, 円や単位円を使って得られた成果を足掛かりにし

て, もっと複雑な状況に対する考察を行うことができるようになる. そのためには, 円や単位円という単純な場合に, 強固な数学的知見を得ることが重要であり, そのために離散数学が役立つことを強調したい.

謝辞 通信ソサイエティマガジン編集委員会の方々には本稿の執筆を御推薦頂いた. 査読委員, 校閲委員の方には改善・修正案を頂いた. ここに感謝する.

文献

- (1) H. Breu and D. Kirkpatrick, “Unit disk graph recognition is NP-hard,” *Comput. Geometry*, vol. 9, no. 1-2, pp. 3-24, Jan. 1998.
- (2) P. Hlineny and J. Kratochvil, “Representing graphs by disks and balls,” *Discrete Math.*, vol. 229, no. 1-3, pp. 101-124, Feb. 2001.
- (3) P. Koebe, “Kontaktprobleme der konformen abbildung,” *Ber. Verh. Sächs. Akad. Leipzig*, vol. 88, pp. 141-164, 1936.
- (4) B. Clark, C. Colbourn, and D. Johnson, “Unit disk graphs,” *Discrete Math.*, vol. 86, pp. 165-177, 1990.
- (5) M. Marathe, H. Breu, H. Hunt III, S. Ravi, and D. Rosenkrantz, “Simple heuristics for unit disk graphs,” *Networks*, vol. 25, pp. 59-68, 1995.
- (6) T. Erlebach, K. Jansen, and E. Seidel, “Polynomial-time approximation schemes for geometric intersection graphs,” *SIAM J. Comput.*, vol. 34, no. 6, pp. 1302-1323, 2005.
- (7) T. Nieberg, J. Hurink, and W. Kern, “Approximation schemes for wireless networks,” *ACM Trans. Algorithms*, vol. 4, no. 4, pp. 49:1-49:17, Aug. 2008.
- (8) M. Bonamy, E. Bonnet, N. Bousquet, P. Charbit, P. Giannopoulos, E. Kim, P. Rzazewski, F. Sikora, and S. Thomasse, “EPTAS and subexponential algorithm for maximum clique on disk and unit ball graphs,” *J. ACM*, vol. 68, no. 2, pp. 9:1-9:38, Jan. 2021.
- (9) J. Keil and D. Mondal, “The maximum clique problem in a disk graph made easy,” *SoCG 2025*, pp. 63:1-63:16, June 2025.

(2025 年 8 月 22 日受付, 11 月 5 日再受付)

岡本吉央 (正員)

2005 スイス連邦工科大チューリッヒ校了. Ph.D.. 同年豊橋技科大工・情報工学系助手. 2007 同助教. 2007 東工大大学院情報理工学研究科特任准教授. 2010 北陸先端大大学院教育イニシアティブセンター特任准教授. 2012 電通大学院情報理工学研究科情報・通信工学専攻准教授. 2016 同情報・ネットワーク工学専攻准教授. 2017 同教授. 現在に至る



人の内面状態の推定と拡散モデルの応用 ——自己と他者を理解し支援することを目指して——

Estimation of Human Internal States and Application of Diffusion Models

——Toward Understanding and Supporting the Self and Others——

幸島匡宏 Masahiro Kohjima[†] 南部優太 Yuta Nambu[†]

Summary

人の感情やストレス・健康状態といった「内面状態」は、行動・意思決定・生活の質に深く関係しており、ヘルスケアや教育、マーケティングなどの様々な分野で内面状態を推定する技術の発展が期待されている。本稿では、機械学習を用いて人の内面状態を推定する技術に関心を持つ読者を対象に、基本的な問題設定及び代表的なデータと応用事例について概観するとともに、画像生成で注目を集める拡散モデルを用いたアプローチに焦点を当てる。拡散モデルの基礎的な原理を平易に解説した上で、それが内面状態推定の文脈でどのように応用されているかについて、筆者らが取り組む生体信号のデータ生成への適用事例とともに紹介する。

Key Words

内面状態、機械学習、深層生成モデル、拡散モデル

1 まえがき

人の感情やストレス、心や体の健康状態といった「内面状態」は、人の行動や意思決定・生活の質に深く関わりとされている。表情や声、チャット、行動パターン、心拍数の変化などから推定した内面状態を用いることで、安全の確保（運転者の眠気を検出）やメンタルヘルスの支援（従業員のストレスや抑うつ傾向を検出）、教育効果向上（学生の授業中の集中度や理解度を把握）やマーケティング（顧客の広告や商品、イベントへの関心度を把握）など様々な場面で、人に寄り添い支援する手段として活用することが期待されている^{(1), (2)}。

内面状態の推定に関する研究は学際的な領域であり、心理学・人工知能・生体センシング・HCIなどの分野と深く関連している。本稿では筆者の専門分野である機械学習（人工知能の一分野）の観点に注目する。

機械学習の観点から見ると、内面状態推定は、人が表現した何らかの情報（画像、音声、テキスト、行動ログ、生体信号など）から内面状態を表すラベルを推定する分類問題、あるいは回帰問題として定式化できる。ただし、本質的に対象が人間であるということに起因して、内面状態を推定するモデルを学習するためのデータの収集は困難であることが多

い。例えば、計測対象とする人のプライバシー配慮及び負担軽減のために収集期間が制限されることや、センシングのための専用機器を個別に用意する金銭的コストの問題で、対象者の数が制限される場合がある。

上記の困難さに対処するための有望なアプローチとして、深層生成モデル、特に高品質でリアルな画像を多様に生成できることで大きな注目を集める拡散モデル^{(3), (4)}及びフローモデル^{(5)~(7)}を用いるものがある。具体的には、拡散モデルの代表例である Denoising Diffusion Probabilistic Models (DDPM)⁽³⁾とその発展手法^{(8)~(13)}や、DDPMの代替として Stable Diffusion 3^{*1}に採用された Rectified Flow (RF)^{(6), (7), (14), (15)}が挙げられる。DDPM・RFを用いることで、これ以前に存在した深層生成モデルと比較して、高品質かつ多様性に富んだデータの生成が可能となることから、内面状態を推定するモデルの学習に必要なデータの生成（データ拡張）や、人の負担が少なく、かつ安価な機器で計測された情報の別の情報への変換（モダリティ変換）に応用する試みが活発化しつつある。

本稿では、内面状態の推定及び拡散モデルを用いた応用事例について焦点を当てた解説を行う。まず **2.**で内面状態推定の基本的な問題設定と課題について述べる。**3.**からは内面状態推定の課題解決に有望なアプローチである DDPM⁽³⁾と RF⁽⁶⁾を用い

[†] NTT 株式会社人間情報研究所、横須賀市
Human Informatics Laboratories, NTT Inc.,
Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

* 1 <https://stability.ai/news/stable-diffusion-3-research-paper>

表 1 内面推定技術に用いる計測情報の例

データ	主な特徴	具体例	各具体例の利点や欠点
画像／映像	表情や声量などの内面状態に直結する情報が得られるがプライバシー懸念が大きい	表情	FACS 理論など心理学の知見も豊富（FACS は画像認識でも活用） ^{(18), (19)}
		姿勢	会議に退屈しているなど表情には出ない無意識な反応を捉えられる ⁽²⁰⁾
音声		会話	会話内容に加え、発話の交代回数や沈黙時間なども特徴量として利用できる
		非言語発話	声帯振動等の一部病態（パーキンソン病や ALS 等）と相関指標が計算可能
テキスト	価値観など書き手の深い内面が反映される	SNS 投稿	瞬間的な感情が反映されたものなど不特定多数の人の大量の投稿が集まる
		ブログ・日記	長期的な内面状態の変化を追える可能性があるが記述されない日もある
行動ログ	センサを用いない計測が可能（自己評価も可）	PC ／スマホログ	タイピング数や起動中のアプリなどリアルタイムな計測も可能 ⁽²¹⁾
		アンケート	外出有無など自由に回答項目を設定可能（内面状態ラベルも一緒に収集可）
生体信号	表情や声に現れない微細な変化を捉えられる	心電位（ECG）	知見が豊富で様々な特徴量も算出可能だがベルト型デバイス等の装着が必要
		脈波（PPG）	腕時計型デバイス等で容易に常時計測可能だが心電位と比較して知見が不足

たデータ生成について説明し、これらを生体信号のモダリティ変換に適用した応用例^{(16), (17)}について紹介する。最後に 4. で今後の展望について述べる。

2 内面状態推定の基礎

まず初めに、内面状態推定において利用されるデータ及び基本的な問題設定について説明する。

2.1 データの作成

機械学習による内面状態推定を行うためには、まず“内面状態に関するラベル付きのデータ”を準備する必要がある。これは、人間が表現した何らかの情報（画像、音声、テキスト、行動ログ、生体信号など）を表す計測情報 x と、感情やストレス、健康状態などの内面状態を表すラベル y を対応付けたペアの集合 $\mathcal{D} = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ として表現される。ただし、 (x_i, y_i) は i 番目のペア、 n はペアの総数を表す。

計測情報：上記の計測情報 x の代表例を表 1^{(18)~(21)} に示す。内面状態との関連が強いと考えられる表情や声を計測できる画像・音声のみでなく、PC やスマートフォンを通して比較的手軽に計測できるテキストや行動ログ、表情や声に現れない微細な変化を捉えられる生体信号など、様々なものが利用される。推定対象とする内面状態や計測対象者の環境、収集期間などに応じて、これらの情報の一つまたは複数（後述する MERR⁽²²⁾ のように映像・音声・テキストの組合せなど）が利用される。

内面状態ラベル：内面状態に関するラベル y が感情に関わる場合には、心理学者 P. Ekman の基本 6 感情（喜び、悲しみ、怒り、驚き、恐れ、嫌悪）⁽²³⁾ を基に一部の感情を抜き出す／粒度を細かくして作成した離散値ラベル⁽²⁴⁾ や、Valence（快－不快）×Arousal（興奮－沈静）⁽²⁵⁾ のそれぞれの強度を表す二次元空間上の連続値のラベルが利用される⁽²⁶⁾。後者は感情の微妙な違いを表現するのに適しており、複雑な感情状態を扱う研究において広く採用されている。感情以外の、例えばストレスや健康状態に関するラベルを用いる場合、低ストレス／軽症・高ストレス／重症などの強度別の離散値、または連続値が用いられることが多い。

アノテーション：データの計測情報に内面状態ラベルを付与すること（「アノテーション」と呼ぶ。）により作成される。表 2 に代表的なデータの作成方法について示す。アノテーションはラベルを付与する主体者が誰であるかにより、大きく以下の三つに分類される。

- ・自己評価 当事者が自らの内面状態を回答する方法であり、微細な感情変化など外からの判定が困難なラベルの取得に用いられる。表 2 の WESAD⁽²⁷⁾ など映像を提示される環境下で行う場合もある。DeepMood⁽²⁸⁾ や StudentLife⁽²⁹⁾ のように長期間にわたる報告を行う場合には、「経験サンプリング法」と呼ばれる心理学・社会科学分野の手法が用いられる。この方法では、記憶の曖昧さの影響を小さくするため、ランダムまたは事前に決めたタイミン

表2 内面推定に関する研究で用いられるデータの例及び初期分析で利用された手法

データ / 手法名	規模	計測データおよび収集法 / 作成法	ラベル及び アノテーション	推定手法
Affectnet ⁽²⁶⁾	45 万画像	感情語（多言語）を用いた検索で収集した顔画像	複数熟練者による離散／連続感情	CNN 等
Parkinsons ⁽³⁰⁾	5,875 録音	被験者の持続発声” ahhh・・・”を自宅から遠隔収録	医師の観察による重症度評価	線形回帰, CART
GoEmotions ⁽²⁴⁾	58,000 件	米国の掲示板型 SNS (Reddit) のコメント文を収集	複数人合意に基づく感情ラベル	BERT [†] 等
MERR ⁽²²⁾	28k (+4.5k)	感情認識コンテスト用の映画やドラマの動画画像	OpenFace, MiniGPT 等の自動評価	LLaMA [†] 等
DeepMood ⁽²⁸⁾	2,382 人	行動ログ（起床時刻や外出有無等）をスマホ申告	気分（良好、憂鬱等）の自己評価	LSTM
StudentLife ⁽²⁹⁾	48 人	行動ログ（GPS, 加速度, 睡眠データ等）を自動収集	感情の自己評価や学業成績等	線形回帰等
WESAD ⁽²⁷⁾	15 人	生体信号や加速度等を手首と胸のデバイスで取得	中立／ストレス／喜びの自己評価	Random Forest

† BERT と LLaMA は、それぞれ Google と Meta が開発した Transformer ベースのモデルで、BERT は主に自然言語理解、LLaMA は文生成に特化した大規模言語モデルである。

グごとに内面状態を回答させる。

・他者評価 当事者以外の第三者の人間がラベルを付与する方法である。Affectnet⁽²⁶⁾やGoEmotions⁽²⁴⁾などの表情画像やSNS投稿文に用いられ、一貫性を保つために複数人で意見を照合することが多い。ここで言う第三者とは、Parkinsons⁽³⁰⁾のように医師などの専門家である場合もあれば、クラウドソーシングにより募った不特定多数のワーカー⁽³¹⁾である場合もある。

・自動評価 各分野の知見（例えば、感情語辞書）や大規模言語モデルなどを用いる方法である。手動での評価が必要な先の二つと比べると大きく労力を減らせるが、知見や技術の性能に大きく左右され、人の判断と整合しないこともある。近年 MERR⁽²²⁾のように、画像処理や言語モデルを組み合わせた成功事例も生まれている。ラベルの品質はモデルの性能に大きく関わり、いずれの方法を用いる場合でも品質管理は重要となる。

2.2 内面状態推定の定式化

上記の手続きにより得られたラベル付きデータのを用いて計測値 x と内面状態のラベル y の関係を学習する。これは、条件付き確率分布 $p(y|x;w)$ をパラメータ w を持つモデルで表現し、パラメータを推定する問題として定式化される。ラベル y が連続値の場合には正規分布 $\mathcal{N}$ 、ラベル y が離散値（0が良好、1が高ストレス等）の場合にはシグモイド関数 S を用いた以下の形式のモデルを利用することが多い。

$$\text{回帰 } (y \in \mathbb{R}) : p(y|x;w) = \mathcal{N}(y; h_w(x), \sigma^2), \quad (1)$$

$$\text{識別 } (y \in \{0, 1\}) : p(y=1|x;w) = S(h_w(x)). \quad (2)$$

パラメータに依存する項 $h_w(x)$ には、古典的な線形モデル $h_w^{\text{LM}}(x) = w^T x$ やConvolutional Neural Network (CNN), Recurrent Neural Network (RNN), Long Short Term Memory (LSTM), Transformerなどをベースとした深層学習モデルが用いられる^{(19), (28), (32)}。モデルのパラメータ w は、データ $\mathcal{D}$ を用いて定義される対数ゆう度関数 $\mathcal{L}$ の最大化により得ることができる。

$$\hat{w} = \arg \max_w \mathcal{L}(w), \quad \mathcal{L}(w) = \sum_{i=1}^N \log p(y_i | x_i; w). \quad (3)$$

対数ゆう度関数(式(3))の最大化は、式(1)の場合は二乗誤差の最小化、式(2)の場合はクロスエントロピー損失の最小化と等価である。最適化手法には、最小二乗法や確率的勾配降下法など、利用するデータの量やモデルの種類に適した手法が採用される。

2.3 内面状態推定の難しさ

ここまで説明した流れで、内面状態推定のためのモデルを構築できる。しかし、本質的に対象が人間であることに起因した下記の課題などから、十分な性能が得られなかったり、実用の現場に適用するのが困難になる。

課題1 正確なアノテーションが困難：内面状態は主観的であり、自己評価による方法は時間や文脈に依存して一貫性に欠けた回答となる可能性がある。複数人の他者評価であったとしても判断が割れることもあり、ラベルを付与する評価者のバイア

スを考慮して取り扱う必要がある。

課題2 計測情報の収集が困難：Web や SNS 上のものが利用できる一部の場合を除き、計測情報の取得にはプライバシーや倫理的な配慮の上、計測対象者の協力を仰ぐ必要があり、大規模・長期間のデータ計測は難しい。一部の行動ログや生体信号は、スマートフォンや腕時計型などのウェアラブルデバイスの普及により、比較的少ないユーザ負荷で常時計測可能となったが、心電位や脳波のように専用機器を使って計測される情報と比べると、取得できる情報の粒度や品質に課題がある⁽³³⁾。

課題3 個人差の存在：人の内面状態は極めて個人差が大きく、例えばある人にとってはストレスレベルの高い行動ログ上のパターンが、ほかの人には当てはまらないことがある。また、複数人に全く同じ映像を提示しデータを収集する場合にも、誘発される感情が人ごとに異なり得ることから、ある感情状態のラベルが一部の人からは集められないこともある。このような計測情報と内面状態の関係性や、内面状態のラベル分布に存在する個人差がモデルの性能を高める上での障壁となる。

課題1 に対しては、研究領域ごとに関連する様々な試みがある。例えば、HCI やヒューマンコンピューターションの分野では、経験サンプリング法における自己評価の時間変化の調査⁽³⁴⁾や、複数人のクラウドワーカーによるアノテーションを評価・管理するための研究が進められている⁽³¹⁾。ほかにも感情計算論の文脈で、回答バイアスを除去する手法^{(35), (36)}やランキング回答（一対比較）を用いたアプローチの検討が進められている⁽³⁷⁾。

課題2 と課題3 に対して有望なアプローチが、次章で述べる拡散モデルを用いる方法である。拡散モデルが持つ高いデータ生成能力を活用し、スマートウォッチで計測可能なデータを専用デバイスが必要なデータに変換するモダリティ変換や、量が不足する特定の内面状態ラベルに関するデータを生成し、量を増やすデータ拡張により課題に対処できる可能性がある。

3 内面状態推定における拡散モデル

この章からは内面状態推定における拡散モデルの応用について紹介する。まず、拡散モデルの深層生成モデルにおける位置付けと、データ拡張・モダリティ変換への応用事例について紹介した後、代表的な拡散モデルである DDPM⁽³⁾ と注目のフローモデルである RF⁽⁶⁾ について説明する。最後に脈波から

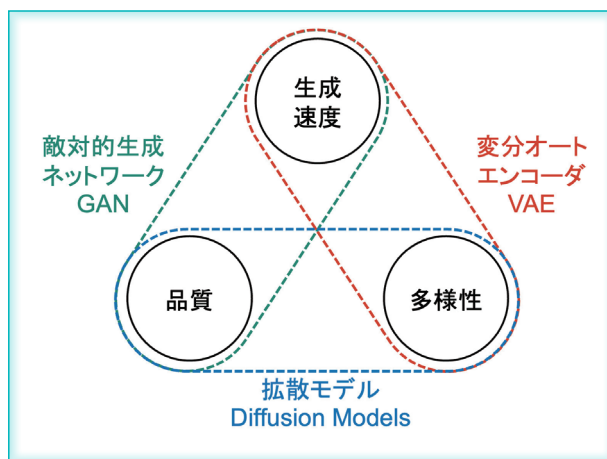


図1 代表的な深層生成モデルの比較図^{(41), (42)}

心電位を生成するモダリティ変換への適用例^{(16), (17)}について示す。

拡散モデルの位置付け：拡散モデルは、Variational Autoencoders (VAE)⁽³⁸⁾ と Generative Adversarial Nets (GAN)⁽³⁹⁾ に並ぶ深層生成モデルの一つとして位置付けられる。VAE と GAN の解説はほかの記事（例えば、文献⁽⁴²⁾, ⁽⁴⁰⁾）に譲るが、各手法の特徴・利点は図1^{(41), (42)}のとおりである。VAE は確率的な潜在変数を利用し多様性に富んだ生成が可能である一方、画像のシャープさに欠けるなど生成されるデータの品質が高くない傾向にある。GAN は生成器と識別器が対戦することで高品質な画像を生成可能だが、学習が安定せず「モード崩壊」と呼ばれる、一部の典型的なデータしか生成できない問題が知られている。これに対し、拡散モデルは生成速度に難点はある（後述する）が、高品質かつ多様性に富んだ生成が可能であり、1. で述べた画像生成などに広く利用されている。なお、図1に示した各手法の欠点については、これを改善する様々な研究が行われていることを明記しておく。例えば、拡散モデルと GAN を組み合わせて欠点を補う手法が提案されている⁽⁴¹⁾。

拡散モデルを用いたデータ拡張：量の不足する学習データを生成することで、内面状態推定モデルの性能を向上させるアプローチである。感情に関するデータを収集する場合は、減多に怒ることのない穏和な人から怒りを感じた際の情報を計測することが難しいなど、計測が困難なラベルが存在する。そこで、拡散モデルを用いて計測が困難なラベルに関する多様なデータを生成し、データセットの質と量を向上させることで、分類モデルの汎化性能や雑音（ノイズ）に対する頑健性が向上することが示されている⁽⁴³⁾。同様に、ある疾患に関するデータを集

める場合にも、疾患を持つ患者や症状が現れる期間が希少なことがあり、拡散モデルによるデータ拡張を用いた推定性能の向上が報告されている^{(44), (45)}。

拡散モデルを用いたモダリティ変換：内面状態との関連は弱い計測が容易なモダリティを、計測は難しいが内面状態との関連が強いモダリティへと変換することで、データ計測の容易さと内面状態推定の性能を両立するアプローチである。例えば、専用機器を使って計測する心電位や脳波は、計測コストが高い代わりに内面状態をよく反映しているとされており、脈波やチャネル数の少ない脳波は、容易に計測可能な代わりにノイズの影響を受けやすく、内面状態の推定に寄与しにくいことが知られている。そこで、脈波から心電位を生成する手法^{(16), (17)}や、チャネル数の少ない脳波計で計測した脳波をチャネル数の多い脳波に変換する手法⁽⁴⁶⁾などの研究が進められている。

3.1 DDPM の定義

ここからは上記事例で利用される DDPM⁽³⁾ の基礎的な原理について説明する。DDPM は、データの生成を「ランダムなノイズから元のデータを段階的に復元する逆変換の問題」として捉えることで実現された手法であり、ノイズを付与する「拡散過程」とノイズを除去する「逆拡散過程」と呼ばれる二つのプロセスから成る。以後、これらのプロセスの説明に利用する画像や心電位などに対応する観測変数 x_0 と潜在変数 $x_{1:T} = \{x_1 \cdots, x_T\}$ をまとめて $x_{0:T}$ と書く。

拡散過程：拡散過程は、観測変数 x_0 に対して時刻 $t = 1, \dots, T$ にわたり逐次的にノイズを加えることで $x_{0:T}$ を生成するマルコフ過程として定義される。

$$q(x_{0:T}) = q(x_0) \prod_{t=1}^T q(x_t | x_{t-1}), \quad (4)$$

$$q(x_t | x_{t-1}) = \mathcal{N}(x_t; \sqrt{1 - \beta_t} x_{t-1}, \beta_t I).$$

2 行目の式は $x_t = \sqrt{1 - \beta_t} x_{t-1} + \sqrt{\beta_t} \epsilon$ (ϵ は標準正規分布に従うノイズ $\epsilon \sim \mathcal{N}(\epsilon; 0, I)$) と表現できることから、 β_t はノイズの大きさを定める値と解釈できる ($0 < \beta_t < 1$)。式 (4) 及び正規分布の再生性から、潜在変数 x_t の従う確率分布の閉形式表現を以下のように導くことができる。

$$q(x_t | x_0) = \mathcal{N}(x_t; \sqrt{\bar{\alpha}_t} x_0, (1 - \bar{\alpha}_t) I). \quad (5)$$

ただし、 $\alpha_t = 1 - \beta_t$, $\bar{\alpha}_t = \prod_{s=1}^t \alpha_s$ と定義した。式 (5) は、時刻 T のときに $\bar{\alpha}_T \approx 0$ となるように $\{\beta_t\}_{t=1}^T$ を設定することで $q(x_T | x_0) \approx \mathcal{N}(x_T; 0, I)$ となり、標準正規分布と同一視できる。これにより、潜在変数 x_T

を正規分布から生成されたノイズとみなすことができる。また、この後の導出で潜在変数 x_{t-1} に関する下記の条件付き確率も、正規分布で表現できることを利用する。

$$q(x_{t-1} | x_t, x_0) = \mathcal{N}(x_{t-1}; \tilde{\mu}(x_t, x_0), \sigma_t^2 I). \quad (6)$$

$$\text{ただし, } \tilde{\mu}(x_t, x_0) = \frac{\sqrt{\alpha_t}(1 - \bar{\alpha}_{t-1})x_t + \sqrt{\bar{\alpha}_{t-1}}(1 - \alpha_t)x_0}{1 - \bar{\alpha}_t}, \sigma_t^2 =$$

$(1 - \alpha_t)(1 - \bar{\alpha}_{t-1})/(1 - \bar{\alpha}_t)$ である。

逆拡散過程：次に逆拡散過程では、先ほどとは逆の方向、すなわち標準正規分布からサンプリングされた潜在変数 x_T をスタートとして、ニューラルネットワークを用いたノイズ除去を繰り返すマルコフ過程を考える。

$$p_\theta(x_{0:T}) = p(x_T) \prod_{t=1}^T p_\theta(x_{t-1} | x_t), \quad (7)$$

$$p_\theta(x_{t-1} | x_t) = \mathcal{N}(x_{t-1}; \mu_\theta(x_t, t), \sigma_t^2 I)$$

2 行目中の平均 μ_θ は、パラメータ θ を持つニューラルネットワークの出力を用いて計算される項であり、詳細については後述する。分散については、導出の都合上、式 (6) と同じ値が通常用いられる。式 (7) から潜在変数 $x_{1:T}$ を周辺消去することで、逆拡散過程の導く観測データ x_0 の生成確率が得られる。

$$p_\theta(x_0) = \int p_\theta(x_{0:T}) dx_{1:T}. \quad (8)$$

図 2 (a) に DDPM のグラフィカルモデルを示す。式 (8) の積分は解析的に計算できないことから、パラメータ θ の推定には次節の変分推論の枠組みを利用する。

3.2 DDPM の損失関数の導出

DDPM のパラメータ推定には、以下の「変分下限」(ELBO: Evidence Lower Bound) と呼ばれる量を用いる。

$$\text{ELBO}(\theta; x_0) = \mathbb{E}_{q(x_{1:T}|x_0)} \left[\log \frac{p_\theta(x_{0:T})}{q(x_{1:T} | x_0)} \right] \quad (9)$$

$$= \sum_{t=1}^T \mathbb{E}_{q(x_t, x_{t-1} | x_0)} \left[\log p_\theta(x_{t-1} | x_t) \right] + \text{Const.}$$

ただし、 $\mathbb{E}_q[\cdot]$ は確率分布 q による期待値操作を表す。変分下限は、式 (8) の対数 (対数ゆう度) $\log p_\theta(x_0)$ の下限であり (イエンセンの不等式により確かめられる)、これを最大化することでパラメータが推定できる。

変分下限を目的関数として利用するため、より単純かつ計算に適した表現を求める。式 (9) の最終行の $t(>1)$ 番目の項に、パラメータ θ に依存しない項 $\mathbb{E}_{q(x_t, x_{t-1} | x_0)} [-\log q(x_{t-1} | x_t, x_0)]$ を加えた関数を

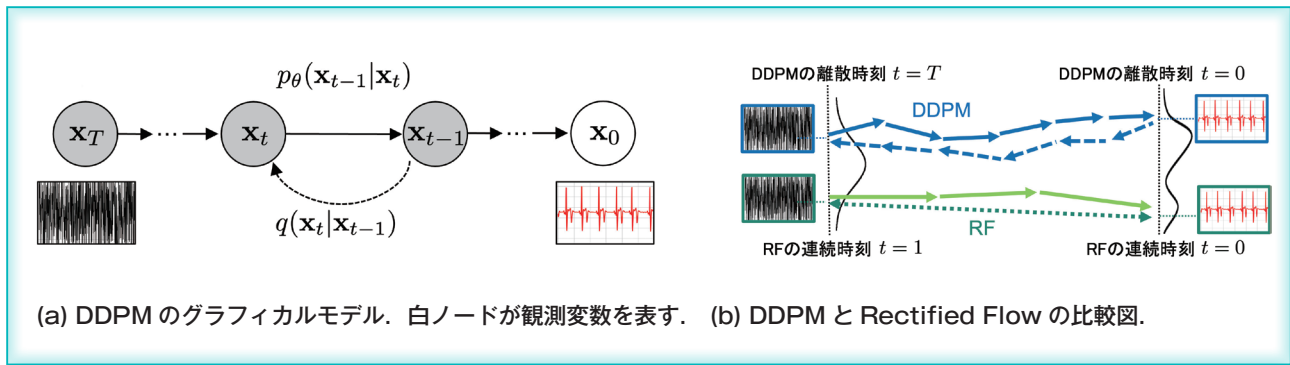


図2 DDPM のグラフィカルモデルと Rectified Flow の比較図

$\mathcal{J}_t(\theta)$ と書く. これは以下のように表現できる.

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_t(\theta) &= \mathbb{E}_{q(x_t|x_0)q(x_{t-1}|x_t,x_0)} \left[\log \frac{p_\theta(x_{t-1}|x_t)}{q(x_{t-1}|x_t,x_0)} \right] \\ &= -\mathbb{E}_{q(x_t|x_0)} [\|\mu_\theta(x_t,t) - \tilde{\mu}(x_t,x_0)\|^2] / 2\sigma_t^2 + \text{Const.} \end{aligned} \quad (10)$$

ただし, 最終行の式変形では, 期待値の中の項が分散の等しい正規分布である式 (6) と式 (7) の KL ダイバージェンスとして表せることを利用した. 更に式 (10) の期待値項のノイズ $\epsilon \sim \mathcal{N}(\epsilon; 0, I)$ を用いた表現を導く^{*2}. 式 (5) から, 潜在変数 $x_t \sim q(x_t|x_0)$ は $x_t = \sqrt{\tilde{\alpha}_t}x_0 + \sqrt{1-\tilde{\alpha}_t}\epsilon \Leftrightarrow x_0 = (x_t - \sqrt{1-\tilde{\alpha}_t}\epsilon)/\sqrt{\tilde{\alpha}_t}$ と書ける. これを $\tilde{\mu}(x_t,x_0)$ (式 (6)) に代入し整理すると, ノイズ ϵ を用いた表現が得られる.

$$\tilde{\mu}(x_t,x_0) = \frac{1}{\sqrt{\tilde{\alpha}_t}} \left(x_t - \frac{\beta_t}{\sqrt{1-\tilde{\alpha}_t}} \epsilon \right). \quad (11)$$

この式の形に対応するように $\mu_\theta(x_t,t)$ (式 (7)) を

$$\mu_\theta(x_t,t) = \frac{1}{\sqrt{\tilde{\alpha}_t}} \left(x_t - \frac{\beta_t}{\sqrt{1-\tilde{\alpha}_t}} \epsilon_\theta(x_t,t) \right) \quad (12)$$

と設計する. ただし, ϵ_θ はニューラルネットワークの出力を表し, U-Net⁽⁴⁷⁾ がベースとされること

*2 再パラメータ化トリック (reparametrization trick) と呼ばれる.

が多い. 式 (11), (12) を用いると, 関数 $\mathcal{J}_t(\theta)$ (式 (10)) の期待値項を以下のように変形できる.

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2\sigma_t^2} \mathbb{E}_{q(x_t|x_0)} [\|\mu_\theta(x_t,t) - \tilde{\mu}(x_t,x_0)\|^2] \\ &= w_t \mathbb{E}_{\epsilon \sim \mathcal{N}(\epsilon; 0, I)} [\|\epsilon_\theta(\sqrt{\tilde{\alpha}_t}x_0 + \sqrt{1-\tilde{\alpha}_t}\epsilon, t) - \epsilon\|^2]. \end{aligned} \quad (13)$$

ただし, $w_t = \beta_t^2 / \{2\sigma_t^2 \alpha_t (1 - \tilde{\alpha}_t)\}$ である. 上記の導出に基づき, DDPM は関数 $\mathcal{L}_{\text{DDPM}}(\theta)$ をパラメータ推定において最小化する損失関数として利用する.

$$\mathcal{L}_{\text{DDPM}}(\theta) = \mathbb{E}_{x_0, \epsilon, t} [\|\epsilon_\theta(\sqrt{\tilde{\alpha}_t}x_0 + \sqrt{1-\tilde{\alpha}_t}\epsilon, t) - \epsilon\|^2]. \quad (14)$$

ただし, $\mathbb{E}_{\epsilon, t, x_0}[\cdot]$ はノイズ $\epsilon \sim \mathcal{N}(\epsilon; 0, I)$, 離散の一樣分布に従う時刻 $t \sim \text{Uniform}(\{1, \dots, T\})$, データからランダム選択する x_0 の出方に関する期待値を表す. また, 式 (13) における係数 w_t は無視しても同等の結果が得られたとの報告⁽³⁾に基づき $w_t = 1$ と設定される.

3.3 DDPM の学習とデータ生成

学習: 変分下限から導いた上記の損失関数 (式 (14)) は, x_0 から x_t を作る時に使うノイズ ϵ の値を予測する, ノイズ予測問題の損失関数として解釈できるものである. したがって, Algorithm 1 (図 3) に示す擬似コードのように, 勾配法ベースの最適化手法を用いて DDPM の学習 (パラメータ

Algorithm 1 DDPM と RF の学習アルゴリズム

Input: 学習データ $\mathcal{D}_U$, モデル ϵ_θ (or v_θ) **Output:** パラメータ θ

- 1: **while** 終了条件を満たさない **do**
- 2: /* データとノイズ, 時刻 t のサンプリング */
- 3: $(x_0, c) \sim \mathcal{D}_U$, $\epsilon \sim \mathcal{N}(\epsilon; 0, I)$, $t \sim \text{Uniform}([0, 1])$
- 4: $t' = \lfloor t(T-1) \rfloor + 1$ /* 時刻を離散化 */
- 5: /* データ x_0 にノイズを付与し $x_{t'}$ を作成 */
- 6: (DDPM) $x_{t'} \leftarrow \sqrt{\tilde{\alpha}_{t'}}x_0 + \sqrt{1-\tilde{\alpha}_{t'}}\epsilon$
- 7: (RF) $x_t \leftarrow (1-t)x_0 + t\epsilon$
- 8: /* ノイズ予測/ベクトル場帰帰の誤差を最小化 */
- 9: (DDPM) 勾配 $\frac{\partial}{\partial \theta} \|\epsilon_\theta(x_{t'}, t', c) - \epsilon\|^2$ を使い θ を更新
- 10: (RF) 勾配 $\frac{\partial}{\partial \theta} \|v_\theta(x_t, t, c) - (\epsilon - x_0)\|^2$ を使い θ を更新
- 11: **end while**

図3 DDPM と RF の学習アルゴリズム

Algorithm 2 生成アルゴリズム

Input: 条件 c , 生成ステップ数 T **Output:** 生成した心電位 x_0

```

1:  $x_T \leftarrow \epsilon \sim N(\epsilon; 0, I)$  /* 初期値をサンプリング */
2: for  $t = T, \dots, 1$  do
3:   /*  $z$  でランダム性を持たせながらノイズ除去 */
4:    $z \leftarrow N(z; 0, I)$  if  $t \neq 1$ , else  $z = 0$ 
5:   (DDPM):  $x_{t-1} \leftarrow \frac{1}{\sqrt{\alpha_t}} (x_t - \frac{\beta_t}{\sqrt{1-\alpha_t}} \epsilon_\theta(x_t, t, c)) + \sigma_t z$ 
6:   /* 所望のデータに至る勾配を推定して遷移 */
7:   (RF):  $x_{t-1} \leftarrow x_t - \frac{1}{T} v_\theta(x_t, \frac{t}{T}, c)$ 
8: end for
```

図4 生成アルゴリズム

θ の推定)が可能となる。

データ生成: DDPMによるデータ生成には逆拡散過程(式(7))を利用する。Algorithm 2(図4)に示すとおり、正規分布からサンプリングした初期値のノイズ ϵ に対して、各ステップ t ごとに $p_\theta(x_{t-1}|x_t)$ に従うノイズ除去、すなわち平均が μ_θ (式(12))の正規分布からのサンプリングを繰り返すことでデータを生成する。各ステップでサンプリング操作を行うことから、同じ初期値に対しても出力が異なる多様なデータが生成できる。

DDPMによるデータ生成は前述のとおり画像生成で大きな成功をもたらしたものの、生成時にノイズ除去の操作を複数回(通常 $T=200 \sim 1000$ 回程度)行う必要がある。そのため、データの生成には通常の深層学習モデルの推論時間の数百倍の時間が掛かるという課題が広く認識され、研究が進められている^{(6), (8), (9)}。

3.4 Rectified Flow

DDPMのデータ生成に関する課題に対応する手法として注目されているのが、フローモデルのRF⁽⁶⁾である。RFは、ノイズを初期値としてデータを生成する点はDDPMと共通である。しかし、離散時間上の確率的な拡散過程を利用するDDPMとは異なり、RFは連続時間上の決定的な常微分方程式(ODE)を利用しノイズからデータへ変換するベクトル場を学習する手法である。以下で具体的に説明する。

時刻 $t=0$ のデータ x_0 とそれに対応する時刻 $t=1$ のノイズ x_1 の2点を結ぶ直線 $x_t=(1-t)x_0+tx_1$ ($t \in [0, 1]$)を考える。RFは、これがノイズからデータ(及びデータからノイズ)への変換の軌道を表すものであると仮定する(図2(b)の緑点線)。この直線の傾き v は時刻 t によらず一定値 $v=x_1-x_0$ となることを利用し、RFでは、直線上の任意の点 x_t から、この傾き v を予測するベクトル場モデル $v_\theta(x_t, t)$ を

学習する。損失関数には以下の関数 $\mathcal{L}_{\text{RF}}$ が利用される。

$$\mathcal{L}_{\text{RF}}(\theta) = \mathbb{E}_{x_0, \epsilon, t} [\|v_\theta((1-t)x_0 + t\epsilon, t) - v\|^2], \quad (15)$$

この損失関数(式(15))は、変分下限から導かれたDDPMのノイズ予測損失関数(式(14))とは異なり、ベクトル場(フロー)を推定するための損失関数として直接導入されている。DDPMと同様に(連続値の)時刻 t とノイズ ϵ のサンプリング及び勾配ペースの最適化を行うアルゴリズム1でパラメータを推定することができる。

RFにおけるデータ生成は、ノイズからデータへの変換が直線で表現できるとした仮定に基づけば、理想的には1ステップで実行できるが、学習されたモデルの出力 $v_\theta(x_t, t)$ が任意の時刻 t で v と等しくなる(変換が直線となる)ことは保証されない。そこでデータ生成の際には、常微分方程式(ODE)の初期値問題

$$\dot{x}_0 = x_1 - \int_0^1 v_\theta(x_1, t) dt, \quad (16)$$

をオイラー法などのODEソルバにより解くことでデータ $\hat{x}_0$ を生成する(図2(b)の黄緑実線)。訓練時に設定したステップ数と推論時のステップ数が同一となる必要があるDDPMと異なり、RFではデータ生成時に離散化するステップ数 T を適応的に設定することが可能である(Algorithm 2, 図2)。これによりDDPMの課題であったステップ数の削減を可能としている。実用上は $T=5 \sim 50$ 設定されることが多い^{(14), (15)}。これまでの説明を踏まえ、DDPMとRFの典型的な設定の違いは表3にまとめた。

3.5 脈波から心電位へのモダリティ変換

条件付き拡散モデル: DDPMやRFなど多くの生成モデルでは、モデルの入力に条件付け(クラスラベルやテキストなど)を与えることで、生成するデータを指定することができる^{(13), (14)}。例えば、条件

表3 DDPM と RF の比較表

比較項目	DDPM	RF
目的関数	$\ \epsilon_{\theta}(x_t, t, c) - \epsilon\ ^2$	$\ v_{\theta}(x_t, t, c) - (\epsilon - x_0)\ ^2$
生成の確率性	確率的	決定的
ステップ数	200 ~ 1000 程度	5 ~ 50 程度
典型事例	初期検討として適用	既存拡散モデルの高速化

付けとしてテキストを与えることで、テキストに合致した画像の生成が可能でありサービスの普及が進んでいる。この条件付けとして、心電位と同時刻に計測された脈波を与えることで、脈波から心電位を生成するモデル変換が実現できる。具体的には、時刻同期された脈波と心電位のペアのデータセット $\mathcal{D}_U = \{x_{0,i}, c_i\}_{i=1}^n$ が与えられたとき、Algorithm 1, 2 に示したようにモデル $\epsilon_{\theta}, v_{\theta}$ の入力に脈波 c_i を追加することで、脈波で条件付けられた心電位 $\hat{x}_{0,i}$ の生成が可能となる。

心電位生成への特化：DDPM と RF は汎用的な生成モデルであり、脈波から心電位を生成することに特化したモデルではない。そこで、脈波から心電位を生成することにそれぞれを特化させた手法として、RDDM⁽¹⁶⁾ と我々の取り組みである CardioFlow⁽¹⁷⁾ がある。いずれの手法も、心電波形の重要な特徴であるピーク（R 波）領域を詳細に再現することに焦点を当てている。

DDPM の拡張手法である RDDM⁽¹⁶⁾ では、心電位全体にノイズを加える拡散過程と、R 波の近傍領域にのみノイズを加える拡散過程の二つのプロセスを考える。そして、それぞれの拡散過程に対する逆拡散過程を実現する異なる二つのニューラルネットを学習する。

RF を拡張した手法である CardioFlow⁽¹⁷⁾ では、R 波領域の生成を促すために毎エポックごとに一定の確率で、心電位の R 波の近傍領域以外と脈波のピークの近傍領域以外をマスクする処理を追加する。

$$x_{0,i} \leftarrow x_{0,i} \cdot m_i^{\text{ECG}}, \quad c_i \leftarrow c_i \cdot m_i^{\text{PPG}}.$$

ここで、 $m_i^{\text{ECG}}, m_i^{\text{PPG}}$ はそれぞれ i 番目の心電位と脈

波のピーク領域を 1、それ以外を 0 としたマスクデータである。これは、脈波と心電位に現れるピークには相関があり、心電位のピークから遅れて脈波にピークが現れるという医学的知識を活用して、ピーク領域のみを持つ脈波から、R 波領域のみを持つ心電位の生成を期待するものである。いずれの手法も、モデルを訓練する前に既知の脈波・心電位のピーク検出アルゴリズムを適用することでピーク位置を算出して、ノイズ付加やマスクを施している。

心電位の生成例：図 5 に DDPM, RDDM, RF, CardioFlow により生成した心電位を示す。これらの心電位は、WESAD データセット⁽²⁷⁾ に含まれる 15 名の脈波・心電位データのうち、9 名のデータで訓練、3 名のデータで検証したモデルを、残りの 3 名に適用した結果の一部である。心電位生成品質の評価指標には、平均二乗誤差や Fréchet distance、1 分当りの心拍数の絶対誤差が用いられることが多い。図 5 から、心電位生成に特化した RDDM と CardioFlow の方がピークの数が正確であり、高い生成品質を持つことが分かる。更に、RDDM や CardioFlow により生成した心電位を訓練データとして感情認識モデルを学習することで、変換前の脈波を用いたモデルよりも高い性能となることが確認されており、定性面・定量面の両方でモデル変換手法としての有用性が示されている^{(16), (17)}。

4 まとめ

本稿では、主に機械学習の観点から内面状態推定の基礎、及び DDPM・RF によるデータ生成の原理



図5 脈波から生成した心電位の例 各行は異なる三つの生成例を示す。入力データには、128 Hz にリサンプリングした脈波と心電位を 4 秒単位で分割したのち、min-max 正規化を施したものをを用いた。

と応用事例について解説した。今後、実環境への適用や高精度なパーソナライズ化を進める上では、拡散モデルを含む生成的アプローチを活用することが、課題を乗り越える鍵となることが予想される。適用先のデータやモダリティによっては、既存の手法をそのまま適用するだけでは十分な品質のデータ生成が困難な場合もあると考えられるが、心電位へのモダリティ変換の例で示したように、適用先のドメイン知識やデータ固有の特徴を活用することで対応可能である、と筆者らは考える。本稿が内面状態推定に関心を持つ読者の研究や応用の一助となれば幸いである。拡散モデルを含む深層生成モデルや機械学習とは異なる観点等に興味がある読者は、本文中で引用したサーベイ論文・書籍（日本語の文献(4)、(31)、(36)、(40)、(42)）についても参照されたい。

■文献

- (1) 三菱総合研究所, “体の情報から感情を推定するデジタル技術が進展,” Jan. 2024. <https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20240124.html>
- (2) NTT 人間情報研究所共生知能研究プロジェクト, “NTT SYMBIOTICINTELLIGENCE LABORATORY White Paper,” 2025. <https://www.rd.ntt/hil/category/emotion/>
- (3) J. Ho, A. Jain, and P. Abbeel, “Denoising diffusion probabilistic models,” *Advances in neural inf. Process. Syst.*, vol. 33, pp. 6840-6851, 2020.
- (4) 岡野原大輔, 拡散モデル: データ生成技術の数理, 岩波書店, 東京, 2023.
- (5) I. Kobyzev, S. J. Prince, and M. A. Brubaker, “Normalizing flows: An introduction and review of current methods,” *IEEE trans. pattern analysis and mach. Intel.*, vol. 43, no. 11, pp. 3964-3979, May 2020.
- (6) X. Liu, C. Gong, and Q. Liu, “Flow straight and fast: Learning to generate and transfer data with rectified flow,” *International Conf. Learning Representations*, 2023.
- (7) Y. Lipman, R. T. Chen, H. Ben-Hamu, M. Nickel, and M. Le, “Flow matching for generative modeling,” *International Conf. Learning Representations*, 2023.
- (8) J. Song, C. Meng, and S. Ermon, “Denoising diffusion implicit models,” *International Conf. Learning Representations*, 2021.
- (9) C. Lu, Y. Zhou, F. Bao, J. Chen, C. Li, and J. Zhu, “Dpm-solver: A fast ode solver for diffusion probabilistic model sampling in around 10 steps,” *Advances in neural inf. Process. syst.*, vol. 35, pp. 5775-5787, Nov. 2022.
- (10) C. Saharia, W. Chan, S. Saxena, L. Li, J. Whang, E. L. Denton, K. Ghasemipour, R. Gontijo Lopes, B. Karagol Ayan, T. Salimans, J. Ho, D. J. Fleet, and M. Norouzi, “Photorealistic text-to-image diffusion models with deep language understanding,” *Advances in neural inf. processing syst.*, vol. 35, pp. 36479-36494, Nov. 2022.
- (11) A. Ramesh, P. Dhariwal, A. Nichol, C. Chu, and M. Chen, “Hierarchical text-conditional image generation with clip latents,” *arXiv preprint arXiv:2204.06125*, vol. 1, no. 2, p. 3, April 2022.
- (12) O. Avrahami, D. Lischinski, and O. Fried, “Blended diffusion for text-driven editing of natural images,” *IEEE/CVF conf. comput. vision and pattern recognition*, pp. 18208-18218, June 2022.
- (13) R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz, P. Esser, and B. Ommer, “High-resolution image synthesis with latent diffusion models,” *IEEE/CVF Conf. Comput. Vision and Pattern Recognition*, pp. 10684-10695, June 2022.
- (14) P. Esser, S. Kulal, A. Blattmann, R. Entezari, J. Müller, H. Saini, Y. Levi, D. Lorenz, A. Sauer, F. Boesel, D. Podell, T. Dockhorn, Z. English, and R. Rombach, “Scaling rectified flow transformers for high-resolution image synthesis,” *International conf. machine learning*, July 2024.
- (15) B. Kim, Y.-G. Hsieh, M. Klein, M. Cuturi, J. C. YE, B. Kavar, and J. Thornton, “Simple reflow: Improved techniques for fast flow models,” *International Conf. Representation Learning*, pp. 67740-67766, 2025.
- (16) D. Shome, P. Sarkar, and A. Etemad, “Region-disentangled diffusion model for high-fidelity ppg-to-ecg translation,” *AAAI conf. artificial intel.*, vol. 38, pp. 15009-15019, 2024.
- (17) Y. Nambu, M. Kohjima, and R. Yamamoto, “Cardioflow: Learning to generate ecg from ppg with rectified flow,” *IEEE International Conf. Acoustics, Speech and Signal Process.*, pp. 1-5, 2025.
- (18) Y.-L. Tian, T. Kanade, and J. F. Cohn, “Recognizing action units for facial expression analysis,” *IEEE trans. pattern analysis and machine intel.*, vol. 23, no. 2, pp. 97-115, 2001.
- (19) S. Li and W. Deng, “Deep facial expression recognition: A survey,” *IEEE trans. affective comput.*, vol. 13, no. 3, pp. 1195-1215, 2020.
- (20) D. Avola, L. Cinque, A. Fagioli, G. L. Foresti, and C. Massaroni, “Deep temporal analysis for non-acted body affect recognition,” *IEEE Trans. Affective Comput.*, vol. 13, no. 3, pp. 1366-1377, 2020.
- (21) Y. Fukazawa, T. Ito, T. Okimura, Y. Yamashita, T. Maeda, and J. Ota, “Predicting anxiety state using smartphone-based passive sensing,” *J. biomedical informatics*, vol. 93, p. 103151, 2019.
- (22) Z. Cheng, Z.-Q. Cheng, J.-Y. He, K. Wang, Y. Lin, Z. Lian, X. Peng, and A. Hauptmann, “Emotion-llama: Multimodal emotion recognition and reasoning with instruction tuning,” *Advances in Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 37, pp. 110805-110853, 2024.
- (23) P. Ekman, “An argument for basic emotions,” *Cognition & emotion*, vol. 6, no. 3-4, pp. 169-200, 1992.
- (24) D. Demszky, D. Movshovitz-Attias, J. Ko, A. Cowen, G. Nemade, and S. Ravi, “Goemotions: A dataset of fine-grained emotions,” *Annual Meeting of the Association for Computational*

- Linguistics, pp. 4040-4054, 2020.
- (25) H. Schlosberg, "Three dimensions of emotion," Psychological review, vol. 61, no. 2, p. 81, 1954.
 - (26) A. Mollahosseini, B. Hasani, and M. H. Mahoor, "Affectnet: A database for facial expression, valence, and arousal computing in the wild," IEEE Trans. Affective Computing, vol. 10, no. 1, pp. 18-31, 2017.
 - (27) P. Schmidt, A. Reiss, R. Duerichen, C. Marberger, and K. Van Laerhoven, "Introducing wesad, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection," ACM international conf. multimodal interaction, pp. 400-408, 2018.
 - (28) Y. Suhara, Y. Xu, and A. Pentland, "Deepmood: Forecasting depressed mood based on self-reported histories via recurrent neural networks," International Conf. World Wide Web, pp. 715-724, 2017.
 - (29) R. Wang, F. Chen, Z. Chen, T. Li, G. Harari, S. Tignor, X. Zhou, D. Ben-Zeev, and A.T. Campbell, "Studentlife: assessing mental health, academic performance and behavioral trends of college students using smartphones," ACM international joint conf. pervasive and ubiquitous computing, pp. 3-14, 2014.
 - (30) A. Tsanas, M. Little, P. McSharry, and L. Ramig, "Accurate telemonitoring of parkinson's disease progression by non-invasive speech tests," Nature Precedings, pp. 1-1, 2009.
 - (31) R.M. Monarch, 上田隼也, 角野為耶, 伊藤寛祥, Human-in-the-Loop 機械学習: 人間参加型 AI のための能動学習とアノテーション, 共立出版, 2023.
 - (32) J. Wagner, A. Triantafyllopoulos, H. Wierstorf, M. Schmitt, F. Burkhardt, F. Eyben, and B. W. Schuller, "Dawn of the transformer era in speech emotion recognition: closing the valence gap," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell., vol. 45, no. 9, pp. 10745-10759, Sept. 2023.
 - (33) S. Huhn, M. Axt, H.-C. Gunga, M.A. Maggioni, S. Munga, D. Obor, A. Si'e, V. Boudo, A. Bunker, R. Sauerborn, et al., "The impact of wearable technologies in health research: scoping review," JMIR mHealth and uHealth, vol.10, no.1, p. e34384, 2022.
 - (34) T. Tominaga, S. Yamamoto, T. Kurashima, and H. Toda, "Effects of personal characteristics on temporal response patterns in ecological momentary assessments," IFIP Conf. Human-Computer Interaction, pp. 3-22, 2021.
 - (35) S. Kumano and K. Nomura, "Multitask item response models for response bias removal from affective ratings," IEEE Conf. Affective Computing and Intell. Interaction, pp. 1-7, 2019.
 - (36) 熊野史朗, "主観感情推定の研究動向," 人工知能, vol. 36, no. 1, pp. 13-20, 2021.
 - (37) G. N. Yannakakis and H. P. Martínez, "Ratings are overrated!," Frontiers in ICT, vol. 2, p. 13, 2015.
 - (38) D. P. Kingma and M. Welling, "Auto-encoding variational bayes," International Conf. Learning Representations, 2014.
 - (39) I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, "Generative adversarial nets," Advances in neural inf. processing syst., vol. 27, 2014.
 - (40) 岩田具治, "確率的潜在変数モデルに基づくデータマインニング," 日本オペレーションズ・リサーチ学会機関誌, vol. 64, no. 5, pp. 272-277, 2019.
 - (41) Z. Xiao, K. Kreis, and A. Vahdat, "Tackling the generative learning trilemma with denoising diffusion gans," International Conf. Representations, 2022.
 - (42) 金子卓弘, "基礎から一歩進んだ深層学習トピックス—ii—gan の基礎・発展・応用," システム／制御／情報, vol. 68, no. 4, pp. 154-159, 2024.
 - (43) M. I. Malik, S. Latif, R. Jurdak, and B. W. Schuller, "A preliminary study on augmenting speech emotion recognition using a diffusion model," Interspeech, pp. 646-650, 2023.
 - (44) Y. Wang, S. Zhao, H. Jiang, S. Li, B. Luo, T. Li, and G. Pan, "Diffmdd: A diffusion-based deep learning framework for mdd diagnosis using eeg," IEEE Trans. Neural Syst. and Rehabilitation Eng., vol. 32, pp. 728-738, 2024.
 - (45) N. Neifar, A. Ben-Hamadou, A. Mdhaffar, and M. Jmaiel, "Diffecg: A versatile probabilistic diffusion model for ecg signals synthesis," IEEE/ACIS Int. Conf. Software Eng. Res., Management and Appl., pp. 182-188, 2024.
 - (46) S. Wang, T. Zhou, Y. Shen, Y. Li, G. Huang, and Y. Hu, "Generative ai enables eeg super-resolution via spatio-temporal adaptive diffusion learning," IEEE Trans. Consumer Electron., vol. 71, no. 1, pp. 1034-1045, 2025.
 - (47) O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," Medical Image Comput. and Computer-Assisted InterventionSpringer, pp. 234-241, 2015.

(2025 年 8 月 1 日受付, 10 月 1 日再受付)

幸島匡宏 (正員)

2009 東工大・工・情報卒。2012 同大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻修士課程了。同年 NTT 入社。2019 東工大情報理工学院数理・計算科学系博士課程了。博士(理学)。現在, NTT 人間情報研究所主任研究員。機械学習, 特に確率モデル・不完全データ分析の研究に従事。



南部優太

2019 はこだて未来大・システム情報科学卒。2021 同大学院システム情報科学研究科システム情報科学専攻修士課程了。同年 NTT 入社。2025 はこだて未来大システム情報科学研究科博士課程了。博士(情報科学)。現在, NTT 人間情報研究所研究員。機械学習, 特に生成モデル・不完全データ分析の研究に従事。



5GC環境における、ネットワークデジタルツインを用いたAIモデル構築手法の検討

Study of AI Model Training Method Using Network Digital Twin in 5GC Environment

小山大輝 Daiki Koyama[†] 桜庭皆人 Minato Sakuraba[†]
河崎純一 Junichi Kawasaki[†] 宮坂拓也 Takuya Miyasaka[†]

Summary

本稿では、5GC 環境におけるネットワークデジタルツインを活用した、ネットワーク運用のための AI モデル構築手法に関して報告する。ネットワークデジタルツイン環境において、AI モデル構築のために最低限のスケールアウトされた 5GC NF を構築することで、ネットワークデジタルツインに必要な設備リソース量を抑えつつ、商用ネットワーク上では実施が困難な試験を実施し、試験を通じて得られるデータセットを基に AI モデルを構築する。free5GC と Kubernetes を用いたスケールアウト 5GC 環境において、異なるネットワーク規模 (pod 数) 間の AI モデル適用に関する評価を実施し、その結果について報告する。

Key Words

AI Ops, Autoencoder, 障害検知, 5GC, ネットワークデジタルツイン

1 はじめに

ネットワーク障害への早急な対処は、高品質な通信サービスを継続的にユーザへ提供するために、ネットワーク運用において欠かせない要素である。そのようなネットワーク運用を実現するためには、人間の運用者を介さずに、ネットワーク障害へ対処する自律的なネットワーク運用が求められ、近年技術革新の目覚ましい AI/ML 技術を活用したネットワーク運用の研究開発が進められている⁽¹⁾。そのような中で、我々はモバイルネットワーク (例: 5G, 6G) における AI/ML 技術を用いた自律的なネットワーク運用を目指している。

その上で、人間の運用者と同等以上のネットワーク運用を実現するためには、高精度な AI モデル構築が必要不可欠となり、実際に商用ネットワーク上で構築されている各ネットワーク機器から収集される運用データを用いて、AI モデルが訓練されている。また、そのような運用データには様々な種類があり、時系列数値データ (例: CPU 利用率) や、イベントデータ (例: Syslog) などがある。

しかしながら、AI モデルの利用用途 (例: 障害検知, 原因分析, 将来予測) によっては、商用ネットワーク上で収集が困難なデータが求められる場合

がある。例えば、発生したネットワーク障害種別 (例: CPU 障害, メモリ障害, ネットワーク障害) の特定を行う AI モデルを訓練するためには、各ネットワーク障害時における運用データが、ある程度数必要となるが、商用ネットワーク上でネットワーク障害は頻繁に発生しないため、各ネットワーク障害時における運用データを十分に収集できないことが考えられ、その結果 AI モデルの精度が劣化してしまう恐れがある。

このような問題を解決するために、商用ネットワークを仮想環境上で模擬したネットワークデジタルツイン (NDT: Network Digital Twin) の適用が検討されている^{(2), (3)}。上記の例においては、商用ネットワークを模擬した NDT 上で、各種ネットワーク障害を意図的に発生させ、商用ネットワークでは収集が困難な運用データを多量かつ迅速に収集し、高精度な AI モデルの訓練が可能となる。しかしながら、商用と完全に同規模の NDT を構築するためには、商用ネットワークと同規模の設備 (例: サーバ, ルータ) を準備する必要があるが、これは単純に通信事業者の設備コストが倍になるという課題がある。

その問題を解決するために、我々はモバイルネットワーク環境 (5GC: 5G Core Network) において、図 1 で示されるような、商用環境上で利用されるスケールアウトされた 5GC Network Function (NF) において、単体の NF 当りのトラヒック負荷 (例: 単位時間当りのリクエスト量) を

[†] (株) KDDI 総合研究所, ふじみ野市
KDDI Research, Inc., Fujimino-shi, 356-8502
Japan

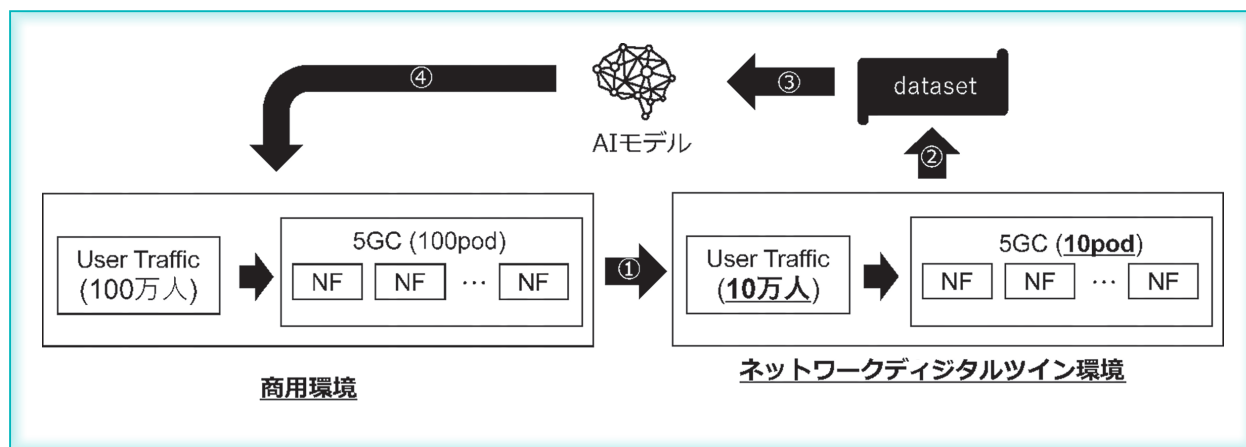


図1 ネットワークデジタルツインを用いた AI モデル構築

同一とする、最低限の数だけNFをスケールアウトした環境をNDTとして利用することで、NDTに要する設備コストを最低限にしながら、高精度なAIモデルの構築が可能となるAIモデル構築手法を提案している。

本手法は、5Gから導入されたService-Based Architecture (SBA) というクラウドネイティブなアーキテクチャに依存している。SBAにおいては、多数のユーザリクエストを処理するために、均一なネットワークインスタンスを並列に多数並べ、ユーザリクエストをそれらインスタンスへ均一に負荷分散させるという、スケールアウト構成が検討されている^{(4)~(7)}。スケールアウト構成が5GCに導入されることにより、図1のようにNFを横並びとする構成が可能となる。NDTにおいて商用ネットワークと完全に同じソフトウェアイメージを用いながら、スケールアウトする要素数を削減し（例：1/10のコンテナ数で構築）、その環境に流れるユーザトラフィックを同様のスケールで低下させることで（例：トラフィック量を全体的に1/10とする。）、単一のノード単位レベルでは商用ネットワークと同様な環境が再現できる。

提案手法の有効性の評価のために、評価用のスケールアウト5GC環境の構築を進めている。本評価環境においては、5GCとしてfree5GC⁽⁸⁾を用い、スケールアウト環境構築のためにKubernetesを用いている。本稿では、初期評価として、本評価環境においてNFのPod数を1~9個まで変更した5GC環境を構築し、それぞれの環境で構築したAIモデルを、各環境に適用した場合のネットワーク障害の検知に関する精度を評価し、その結果を報告する。

2 関連研究：AIによるネットワーク運用

2.1 AIによるネットワーク運用

通信事業者が高品質な通信サービスを顧客に提供するためには、高品質なネットワーク運用が求められる。

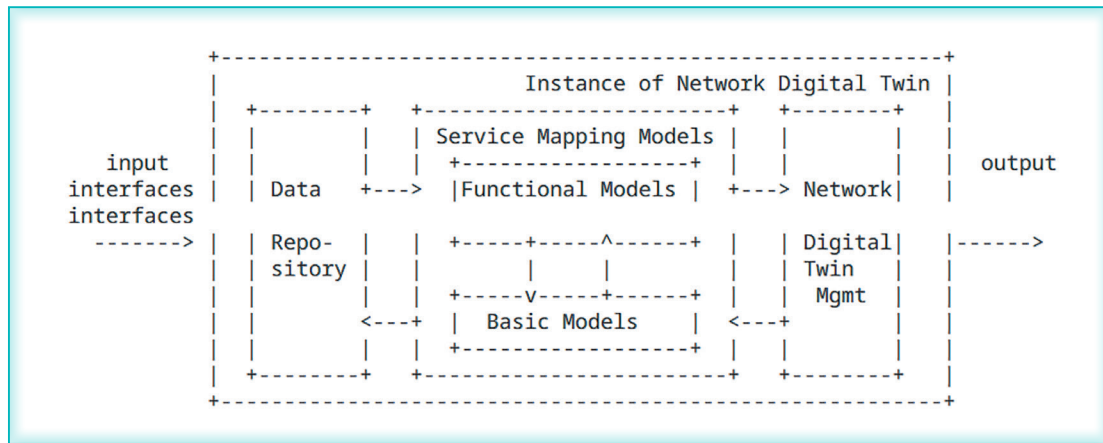
そのために、AI技術をネットワーク運用へ適用する試みが広く進められており^{(1)・(9)~(11)}、一部の運用手順（例：障害検知）に対する商用化も開始されている⁽¹²⁾。

特に、ネットワーク上で発生するネットワーク障害への高精度かつ迅速な対応のために、AI技術の適用が検討されている。ネットワーク障害への対応は①障害検知⁽⁹⁾、②原因分析⁽¹¹⁾、③復旧⁽¹⁰⁾という三つのステップで一般的には構築されており、それぞれのステップに対して機械学習、深層学習、強化学習等のAI技術の適用が検討されている。

2.2 ネットワークデジタルツインとAIモデル構築

近年、通信事業者が運用する商用ネットワークを、仮想環境上で仮想的に構築するNDTに関する研究開発や、標準化の活動が盛んに進められている^{(2)・(3)・(13)~(15)}。NDTは、図2で示されるように、商用ネットワークの運用データをインプットとして構築され、仮想環境上で構築されたNDT上で、商用ネットワーク上では実施が困難なオペレーション（例：障害試験、品質分析、作業手順確認）が可能となる。

特に、NDTのユースケースの一つとして、AIモデルの構築が挙げられる^{(2)・(3)}。ネットワーク運用へのAI技術の適用が注目される一方で、そのAIモデルを構築するプラットフォームは欠かせない要素であり、NDT上でAIモデル構築に必要となる各

図2 NDT アーキテクチャの標準例⁽²⁾

操作（例：擬似障害の発生，統計情報の取得）を行うことで，商用ネットワークに影響を与えずに AI モデルの構築が可能となる。

3 関連研究：5G モバイルネットワーク

3.1 5G モバイルネットワーク

第5世代移動通信システム（5G）⁽¹⁶⁾ は，図3で表されるように，全国に分散された基地局ネットワーク（RAN: Radio Access Network）と，RANが接続を行うモバイルコア（Mobile Core）で構築される。

RANにおいては，5Gを利用するUser Equipment（UE）と電波による通信を行うRadio Unit（RU），RUと送受信を行い無線信号の信号処理を行うDistributed Unit（DU），DUとRUの制御を行いモバイルコアと接続するCentral Unit（CU）で構成される⁽¹⁷⁾。

次に，モバイルコア，特に5Gのモバイルコアである5G Core Network（5GC）は，UEの接続要求，認証，モビリティ管理といったControl-plane

（C-Plane）に関する処理と，実際にUEが外部ネットワーク（例：インターネット，Multi-access Edge Computing(MEC)）と通信するIPパケット／Ethernetフレームの転送処理，課金管理といったUser-plane（U-Plane）に関する処理を行う⁽¹⁶⁾。更に，5Gから採用されたService-Based Architecture（SBA）⁽¹⁶⁾では，クラウドネイティブ⁽¹⁸⁾なアーキテクチャを目指し，5GCにおいて必要となる役割ごとにNetwork Function（NF）として分割されており，C-Plane/U-Planeに関して必要となる各処理（例：移動管理，セッション管理，認証，加入者情報管理）ごとにNFが構築され，NF間をAPIで接続することで，スケーラブルな構成を採用している。

3.2 5GCにおけるスケールアウトの取組み

特に，全国のUEからの接続要求が集中する5GCにおいては，大規模な処理能力が求められる。一般的に，計算基盤において大規模な処理能力を持つために，単体の計算インスタンスの規模を増大するスケールアップと，同一の計算インスタンスを並列で配置するスケールアウトが採用される⁽¹⁹⁾が，

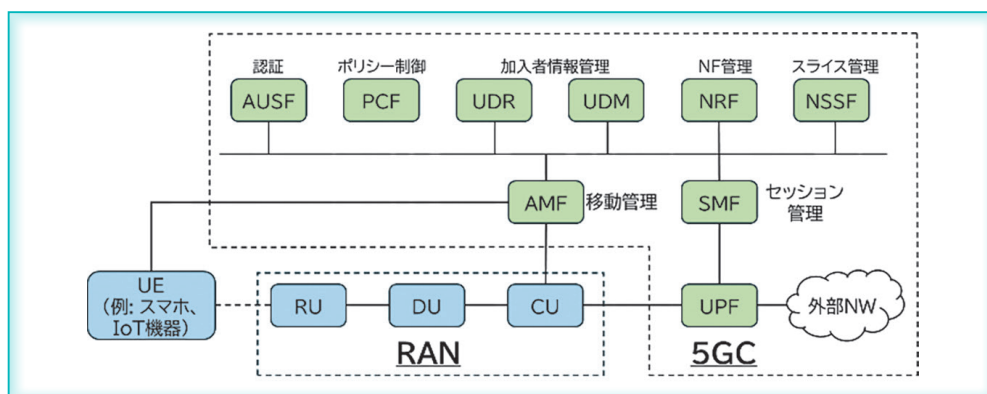


図3 5G モバイルコア構成

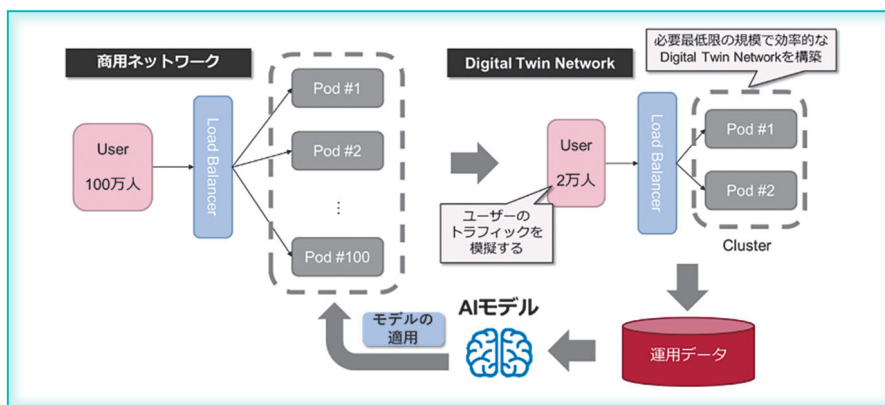


図4 スケールアウト構成を用いた NDT

5GC においては近年スケールアウトの適用に関する検討が広く進められている^{(4)~(7)}。

5GC においてスケールアウトの採用に関する検討が加速している要因としては、5G から採用された Service-Based Architecture (SBA) にある⁽¹⁶⁾。SBA においては、5GC 内部 NF を必要な性能に即して、仮想 VM / コンテナとして構築することで、需要に合わせた柔軟な 5GC の構築が可能となる。

近年、コンテナ化アプリケーションの大規模運用において Kubernetes⁽²⁰⁾ が広く用いられている。Kubernetes は、所望の状態（例：レプリカ数や計算資源量）を宣言し、コントローラがクラスタの状態を継続的に監視・調整して、その状態を維持するオーケストレーション基盤である。スケールアウトは、レプリカ数の動的調整（更新制御や自動スケールリング機構）によって達成され、外部からの到達点は Kubernetes Service が複数の実行単位を単一の仮想エンドポイントに集約することで到達可能となる。Kubernetes Service はクラスタ内の名前解決機構と連携して宛先を解決し、外部からのトラフィックを各 Pod へ分配する。これにより、例えば 5GC における各 NF 内において Pod を並列に構成した場合でも、一貫したエンドポイントを保ちながら、需要に応じて処理能力をスケラブルに拡張することが可能となる。

4 スケールアウト構成のネットワークデジタルツインを用いた AI モデル構築

4.1 提案手法概要

ネットワーク運用に用いられる AI モデルを訓練するためには、①ネットワーク構成と②トラフィックの二つの要素の検討が必要となる。初めに、①のネットワーク構成とは、ネットワークを構成する各ノ

ードの CPU/Memory の規模、接続されたネットワーク帯域量といったインフラに関する情報である。また、②のトラフィックとは、そのネットワークを利用するユーザが、ネットワークに対してリクエスト（例：Web 閲覧、5GC への接続・ハンドオーバ）を実施することで発生する IP パケットの集合である。

商用ネットワークに対して適用可能な高精度な AI モデルを訓練するためには、上記 2 要素に関して商用ネットワークと同じ環境を用意し、障害試験等の必要となる各種試験を実施し、ネットワークから得られた運用データ（例：時系列データ、Syslog）を収集し、そのデータを入力とした AI モデルの訓練を行う必要がある。

しかしながら、**2.**で述べたように、商用ネットワークと完全に等しいネットワーク構成・トラフィックの構築には、商用ネットワークと完全に同規模の設備を持つ必要があり、設備コストが倍増してしまう課題が存在する。そこで本研究では、スケールアウトの技術を活用し、「スケールアウト構成の最小構成要素」のみを NDT 上で構築することで、必要最低限の NDT で商用に適用可能な精度の AI モデルの訓練を目指す。

4.2 提案手法詳細

ここで、スケールアウト構成を用いた NDT 環境の構成図を図 4 に示す。スケールアウト構成では、均一なネットワークインスタンスを並列に多数並べ、多数のユーザからのリクエストをその並列化されたネットワークインスタンスに、均一にロードバランスさせるアーキテクチャとなる⁽¹⁹⁾。そのため、例えば商用ネットワークが 100 個のコンテナから構成されており、それらを用いて 100 万人のユーザを処理している場合、NDT 環境においてはコンテナ 1 個に対し $100 \text{ 万} \div 100 \text{ コンテナ} = 1 \text{ 万人分}$

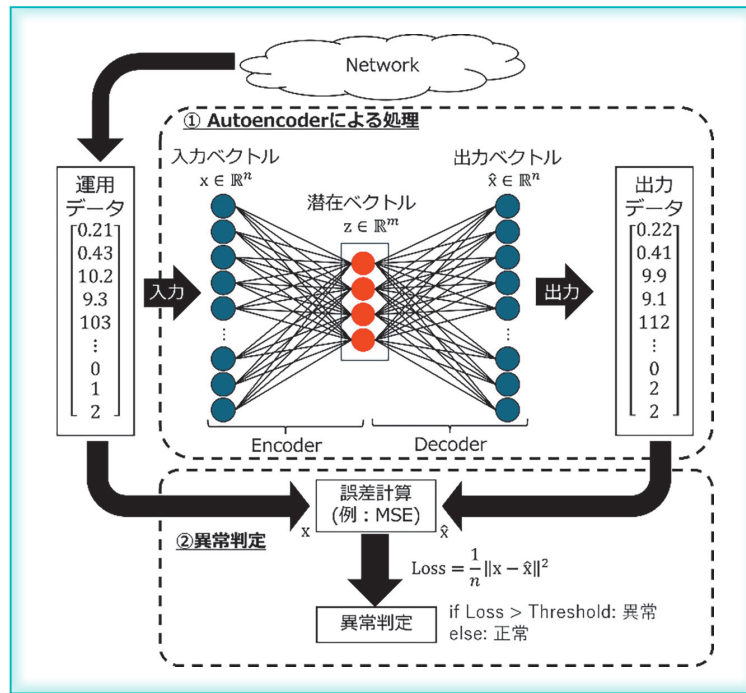


図5 Autoencoder による障害検知

のユーザの模擬トラフィックをかけることで、商用ネットワークと同等の環境を再現することができる。このようにして、単一のネットワークインスタンスに収容されるユーザ規模を同等にするように、トラフィックを調整することで、最低限の規模で、大規模な商用ネットワークと同等の環境が構築可能となる。

その後、NDT 環境にて運用データの収集を行い、インスタンス単位で AI モデルの学習・構築を行う。各インスタンスの規模は商用ネットワークと NDT 環境で同等のため、作成した AI モデルは商用ネットワークの各インスタンスに反映することが可能となる。このように、スケールアウト構成を活用することで、大規模な商用環境の全てを再現せずに、小規模な検証環境で AI モデルを構築することが可能となる。

5 Autoencoder による障害検知

5.1 Autoencoder 概要

2. で述べたように、AI によるネットワーク運用では様々なユースケースが検討されているが、特に本稿では、「障害検知」に関する観点で以降の評価を実施する。評価に当たり、ニューラルネットワークを用いた次元圧縮・復号のアルゴリズムである Autoencoder⁽²¹⁾ を用いて評価を行う。

Autoencoder は図5で示されるように、

Encoder 層と Decoder 層によって表現され、入力ベクトル $x \in \mathbb{R}^n$ を Encoder 層へ入力し、低次元の潜在ベクトルである $z \in \mathbb{R}^m$ に次元圧縮する。 z と x の関係は以下式で表現される。

$$z = f_{enc}(x) = \sigma(W_{enc}x + b_{enc})$$

ただし、 $W_{enc} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は Encoder 層における重み行列、 $b_{enc} \in \mathbb{R}^m$ は Encoder 層におけるバイアスベクトル、 $\sigma(\cdot)$ は ReLU や tanh などの活性化関数である。このようにして、 n 次元の入力ベクトルを m 次元の潜在ベクトル z に次元圧縮することができる。

次に、Decoder 層では、逆に m 次元の潜在ベクトルを n 次元のベクトルである $\hat{x}$ に復元する。 z と $\hat{x}$ の関係は以下の式で表現される。

$$\hat{x} = f_{dec}(z) = \sigma(W_{dec}z + b_{dec})$$

ただし、 $W_{dec} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ は Decoder 層における重み行列、 $b_{dec} \in \mathbb{R}^n$ は Decoder 層におけるバイアスベクトルである。このようにして、 m 次元の潜在ベクトルを n 次元のベクトル $\hat{x}$ に復元することができる。

Autoencoder 学習の目的は入力 (x) と出力 ($\hat{x}$) の差を最小化することであり、学習ステップにおいては、損失関数として、以下のような x と $\hat{x}$ の平均二乗誤差 (MSE) などが用いられる。

$$\frac{1}{n} \|x - \hat{x}\|^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - \hat{x}_i)^2$$

上記のようなモデル、損失関数を基に、大量の学

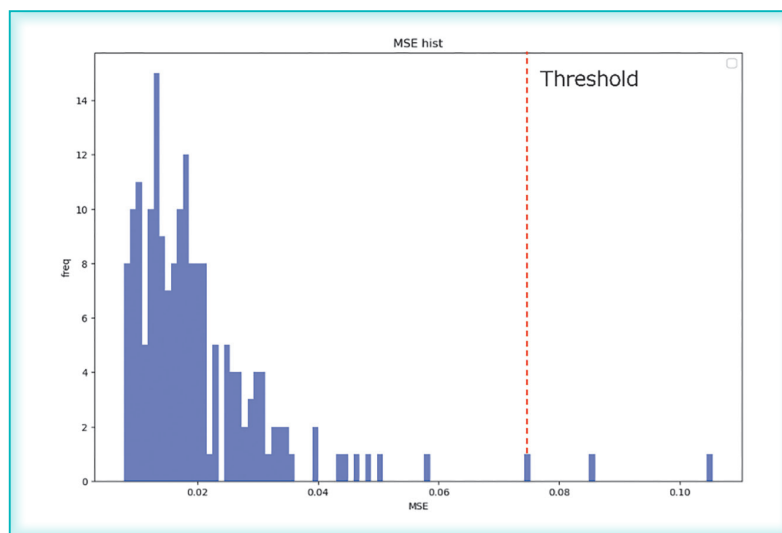


図6 しきい値決定方法の例

習データを用いて、誤差逆伝搬法や勾配降下法などを用いて学習が行われ、各パラメータの最適値が決定され、Autoencoderの学習が完了する。

次に、学習が完了したAutoencoderモデルを用いた異常判定方法について記述する。上記で記したように、AutoencoderのEncoder/Decoder層を通すことで、出力ベクトルとしては入力ベクトルと近いものが出力されることとなる。しかしながら、学習に用いたデータと異なる傾向の入力ベクトルを入力した場合、その傾向のベクトルが学習されていないため、入力ベクトルと出力ベクトルの誤差が大きくなる。この特性を用いることでAutoencoderによる異常判定を実現することができる。

例えば、入力ベクトル x と出力ベクトル $\hat{x}$ の平均二乗誤差(MSE)を用いた異常判定を実施する場合、図6に示されるように、学習時のデータセットにおける x と $\hat{x}$ のMSEの集合値からしきい値を決定する。図6の例においては、MSEの集合における95パーセンタイル値をしきい値としている。(例えば、以下で記述する評価環境においては、UDR1個の環境におけるAIモデルのしきい値は、0.008であった。)本しきい値の値は異常検知の精度に影響があり、例えばしきい値を下げることで、「見逃し数」を低下させるが「誤検知数」が上昇する恐れがあり、反対にしきい値を上げることで、「誤検知」を低下させるが、「見逃し数」が上昇する恐れがあり、各データセットにおいて最適なしきい値を設定する必要がある。

5.2 AIモデルの評価指標

次に、一般的なAIモデルの精度を評価するための数値指標として、適合率(Precision)、再現率

(Recall)、F1スコアについて説明する。全体のデータセット数の中でAIモデルの結果としては、以下の四つに分類される：TP(True Positive, AIモデルが「正」と予測し、実際も正だった件数)、FP(False Positive, AIモデルが「正」と予測したが、実際は「負」だった件数、誤検出)、FN(False Negative, AIモデルが「負」と予測したが、実際は正だった件数、見逃した数)、TN(True Negative, AIモデルが「負」と予測し、実際も「負」だった件数)。

その上で、適合率(Precision)は、AIモデルが「正」と判定したもののうち実際に正であった割合であり、 $Precision = TP / (TP + FP)$ と定義される。これは誤検出(FP)をどれだけ抑えられているかを測る指標であり、誤検出を減らすことを重視するユースケースで有用な評価指標である。一方、Precisionを高めるために判定を厳しくすると見逃し(FN)が増え、Recallとのトレードオフが生じる。

一方で、再現率(Recall)は、実際に正である対象のうちAIモデルが正と判定できた割合で、 $Recall = TP / (TP + FN)$ と定義される。これは見逃し(FN)をどれだけ抑えられているかを表し、見逃しを減らすことが重要な場面で重視される。ただし、判定を緩くしてRecallを上げると誤検出(FP)が増え、Precisionが低下し得る。

最後に、F1スコアは適合率と再現率の調和平均であり、 $F1 = 2 \times Precision \times Recall / (Precision + Recall)$ と定義される。調和平均であるため、PrecisionかRecallのどちらか一方が低いと全体も低く評価され、誤検出(FP)と見逃し(FN)の双方をバランス良く表現した評価指標となる。F1ス

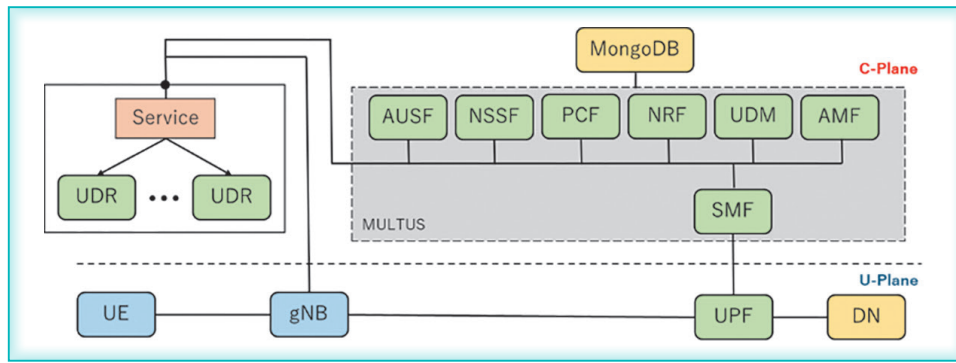


図7 モバイルコアのスケールアウト構成

コアの最大値は1であり、1に近い方が良いAIモデルであると言える。

6 評価環境

6.1 評価対象となるスケールアウト5GCの構築

初めに、本提案手法の初期評価のために、スケールアウトされた5GC環境を構築する必要がある。近年、free5GC⁽⁸⁾といったOSSな5GCソフトウェアが盛んに開発されており、本研究では、スケールアウト構成の基盤としてコンテナオーケストレーションツールであるKubernetes⁽²⁰⁾を用いて、free5GCの環境を構築する。また、free5GCにおいてユーザーデータの管理を行うUDR (Unified Data Repository) コンテナをスケールアウトした環境を構築する。

より詳細には、まずはUDRのNetwork Function (NF) を並列に並べる構成を検討する。free5GCの実装では、各コンテナインタフェースの接続先情報は構成ファイル上で静的に定義されている。したがって、NFを複数構築し並列に並べた

場合、インタフェースのIPアドレスが重複してしまう。それを回避するためにはDHCPサーバや負荷分散のためのDNSサーバの設置が必要となり、ネットワーク構成が複雑となる。

そのため、Kubernetes Serviceを用いたスケールアウト構成を構築する。Kubernetes Serviceは複数のPodへの接続ポリシーを定義し、Pod集合に対してアクセスするためのエンドポイントを提供する。各Serviceには一意のIPアドレスが割り当てられ、配下のPod群に対して負荷分散と名前解決が行えるため、Serviceを用いて並列にNFを構築することで、スケールアウトなNF構成を実現することができる(図7)。

6.2 評価環境の構成

評価環境の全体構成を図8に示す。評価環境として、図7に示したスケールアウト構成となる5GC構成をKubernetes上でfree5GCを用いて構築する。その上で、UDRの配置数を変化させることで、規模の異なる環境におけるAIモデルの訓練・評価が可能となる。

また、インフラ基盤からのデータ収集にはeBPF

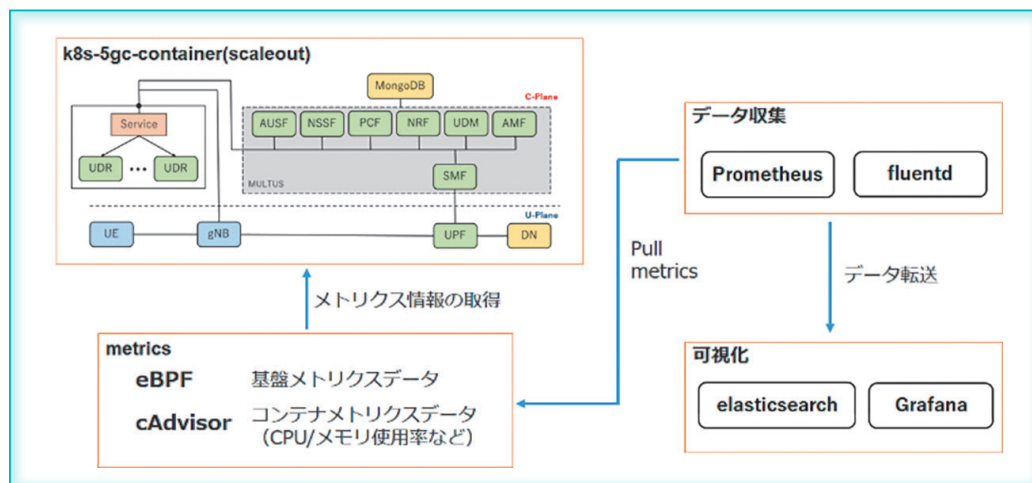


図8 評価環境

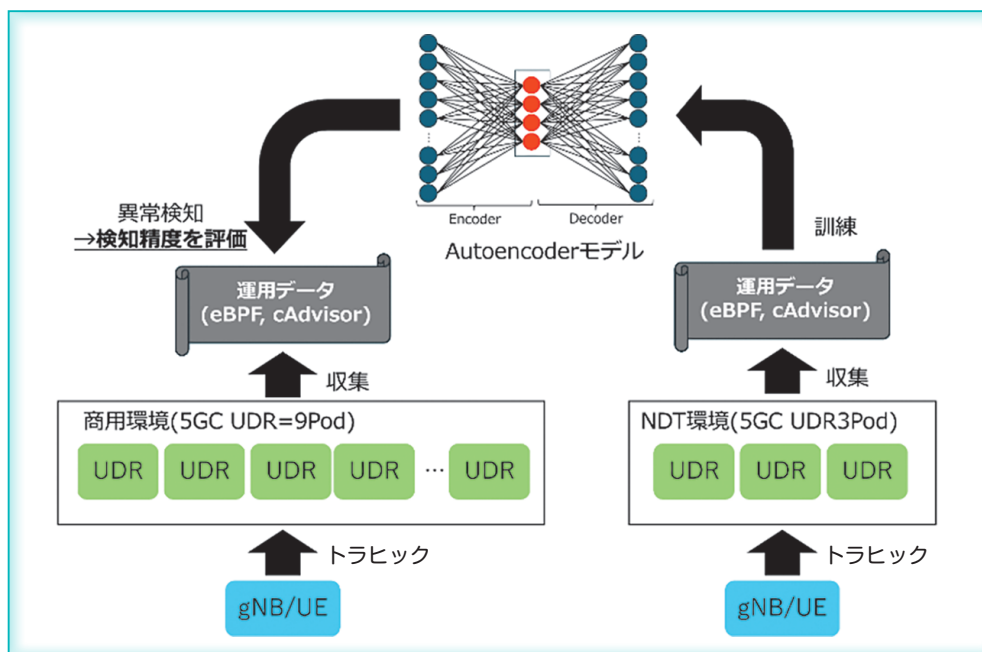


図9 異なる環境下の障害検知精度評価方法

(extended Berkeley Packet Filter)⁽²²⁾ と cAdvisor⁽²³⁾ を利用している。eBPF は Linux kernel 3.15 以降のモニタリング機能であり、各プロセスにおける Kernel 空間上で発生するイベント（例：TCP 再送発生数）に関する詳細モニタリングデータが取得できる。cAdvisor は Kubernetes 環境におけるオープンソースモニタリングツールであり、実行中の各コンテナの基本的なメトリクス（例：CPU 使用率、トラフィック量）の収集が可能となる。そのほか、メトリクス情報の取得には OSS である Prometheus⁽²⁴⁾ と Fluentd⁽²⁵⁾ を利用し、メトリクス情報の可視化には Elasticsearch⁽²⁶⁾ と Grafana⁽²⁷⁾ を利用した。

6.3 評価方法

スケールアウト環境における AI モデル構築手法の初期評価を行うために、上述のスケールアウト構成の 5GC において、規模の異なる環境に対して AI モデルを適用した際の精度評価を行う。本評価においてはネットワーク障害検知のために Autoencoder を用い、その障害検知精度に関して評価を実施する。本評価では、Autoencoder の各パラメータとして、入出力ベクトルはいずれも 129 次元であり、Encoder 側に 8 ユニットの隠れ層を 1 層持ち、その出力（潜在ベクトル）は 8 次元であり、Decoder 側において 8 次元から 129 次元へ再構成している。最適化手法としては Adam を利用し、損失は MSE、学習はエポック 200、バッチサイズ 32 で実施している。

図9は、異なるスケールアウト構成間における障害検知精度の評価方法を表している。図9に示されるように、はじめに、NFの規模が異なるスケールアウト構成の5GCを用意し、各環境でAIモデルの訓練を行う。ここで異なる規模の環境はNFのPod数を変化させることで構築するものとし、NFのPod数がそれぞれ1, 3, 5, 7, 9個の合計5環境を用意する。図9の例では、NDT環境模擬として、3個のUDRで構成された環境となる。

その後、各環境で訓練した Autoencoder モデルをほかの環境に適用し、ネットワーク障害が発生した場合の障害検知精度を評価する。図9の例では、商用環境模擬として、9個のUDRで構成された環境となる。

また、今回の評価においては、5GC内で発生するネットワーク障害シナリオとしては、Kubernetes ネットワーク内においてネットワーク遅延の増大を想定し、その結果、各環境において各NF間のTCP通信の遅延時間が増大するものとする。

ここで、ネットワークに遅延をかける手段として Linux TC コマンド (traffic control コマンド) を利用した。正常時の遅延時間として、各NF間の遅延時間を 10 ms として設定し、ネットワーク障害時においては、この遅延時間を 50 ms に増加させることで、遅延時間を増大させている。

また、データセットの取得方法として、各五つの環境において、ネットワーク遅延の障害発生を想定したテストシナリオとして、計2時間の擬似呼の

表 1 ネットワーク障害の検知精度評価結果

一列目：NDT 環境として用いた構成の Pod 数（訓練）
 一行目：商用環境として用いた構成の Pod 数（評価）

	1	3	5	7	9
1	0.667	0.817	0.8282	0.816	0.829
3	0.809	0.819	0.842	0.828	0.835
5	0.807	0.820	0.857	0.824	0.840
7	0.810	0.820	0.840	0.820	0.830
9	0.808	0.820	0.852	0.823	0.842

生成を行い、その間 UE が attach/detach を繰り返す動作を実行させている。この 2 時間のうち、前半 1 時間を正常な状態（遅延時間 10 ms）とし、その後遅延時間を 50 ms に増大させることで後半 1 時間をネットワーク遅延障害が発生している期間とした。その後正常データ 1 時間のうち、初めの 30 分を学習データとして利用し、残りの正常期間 30 分＋障害発生期間 1 時間半を検証データとして利用した。

7 評価結果

7.1 異なるネットワーク規模間の障害検知精度比較

前章で構築した評価環境にて AI モデルを訓練し、Pod 数が異なるほかの環境へその AI モデルを適用し、各環境のネットワーク障害の検知精度に関して F1 Score を算出することで精度評価を実施した。各環境に対して算出した F1 Score の結果を表 1 に示す。ちなみに、F1 Score は、適合率（Precision）と再現率（Recall）の調和平均であり、分類問題における総合的なモデル性能評価指標となり、0～1

の値を取り 1 に近い方が良い結果となる。

表 1 の一列目は図 9 における NDT 環境となり、Autoencoder モデルを訓練するために利用した Pod 数を示しており、一行目は図 9 における商用環境となり、訓練した Autoencoder モデルを適用し、ネットワーク障害が検知できるか評価するために利用した Pod 数を示す。例えば、図 9 の環境では、Autoencoder モデルを訓練するための NDT 環境としては UDR の Pod が 3 個、その Autoencoder モデルを適用する商用環境として UDR の Pod が 9 個となるため、その場合の F1 Score としては表 1 でハイライトされている 0.835 となる。

評価結果から、Autoencoder モデルを訓練する NDT 環境の Pod 数が 1 個と少ない場合でも、Pod 数が 3 個と NDT 環境よりも大きい規模の商用環境に対して高い F1 Score が得られている。このように、NDT 環境の Pod 数にかかわらず、規模の異なる商用環境でネットワーク障害の検知が可能となると言える。ただし、Pod 数 1 個同士での F1 Score (0.667) がほかと比べて低くなっている要因としては、Pod 数 1 個の場合は、全ての通信が同一 Pod に流入し、トラヒックの絶対量が増加し、障害発生時の変化が相対的に小さくなってしまったことが考えられる。

また、評価環境に AI モデルを適用した際の時系列の異常検知結果を図 10 に示す。図 10 では、NDT 環境の Pod 数が 1 個で Autoencoder モデルを構築し、Pod 数を 3 個にスケールアウトした構成の商用環境に Autoencoder モデル適用している。図 10 にて実施した評価試験では、時系列データの後半部分（図 10 の 22:00 以降）にネットワーク障

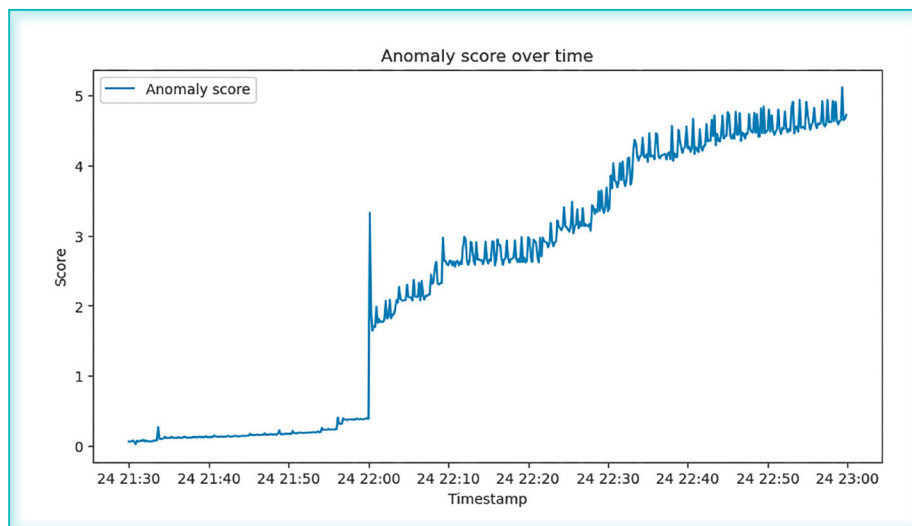


図 10 ネットワーク障害発生時の異常スコア変動

表2 Pod 数 9 個環境における各 Pod ごとの障害検知精度 (F1 Score)

	Pod#1	Pod#2	Pod#3	Pod#4	Pod#5	Pod#6	Pod#7	Pod#8	Pod#9
1	0.808	0.840	0.892	0.802	0.820	0.844	0.837	0.809	0.820
3	0.829	0.827	0.837	0.840	0.815	0.838	0.841	0.822	0.839
5	0.817	0.827	0.830	0.816	0.821	0.819	0.818	0.818	0.828
7	0.818	0.838	0.857	0.818	0.819	0.836	0.846	0.829	0.845

害（通信遅延増大）を発生させており、ネットワーク障害が発生したタイミングを境に異常スコアの上昇が見られ、NDT 環境で構築した Autoencoder モデルの動作の様子が確認できる。障害発生後、異常スコアが時間経過とともに上昇している要因としては、5GC 内部にて障害発生に伴い、UE のタイムアウトや再接続などのイベントが徐々に発生し、今回の対象である UDR への接続数が通常時に比べて徐々に増加することが原因であると考えられる。また、障害発生直後に急激に異常スコアが上昇している要因としては、その時点において、急激に通信遅延が増大（10 ms → 50 ms）し、通信遅延量などのメトリクスが急激に変化したためと考えられる。

7.2 スケールアウト構成における負荷分散に関する考察

次に、スケールアウト構成において、並列に構築された Pod ごとのネットワーク障害検知精度の評価を実施する。本評価においては、Pod 数が 1, 3, 5, 7 個の各 NDT 環境で訓練した Autoencoder モデルを、Pod 数が 9 個の商用環境における各 9 個の UDR Pod に対して適用した場合の各 Pod におけるネットワーク障害の検知精度に関して評価を実施しており、表 2 がその結果となる。

表 2 から各 Pod におけるネットワーク障害の検知精度にある程度の差が見られるが、全ての Pod において高い精度でネットワーク障害を検知できていることが分かる。Pod 間でネットワーク障害の検知精度に差がある理由としては、スケールアウト構成において UE からリクエストする接続先 Pod が完全に分散されておらず、ばらつきが存在することが原因と考えられる。本構成のように、Kubernetes Service を利用したスケールアウト構成を用いる場合、Service は Pod 集合に対してアクセスするためのエンドポイントを提供し、そのエンドポイントへ一意の IP アドレスが割り当てられるため、配下の Pod 群に対して負荷分散と名前解決が可能となる。仮に、Kubernetes における各 Pod への負荷分散にばらつきが存在する場合、Pod に流入するリクエスト数が不均一となり、各 Pod 上

で動作するプロセスの振る舞いやリソース（CPU/Memory/Network）の消費の傾向に違いが出る。その結果として、eBPF と cAdvisor で得られるデータの傾向に Pod 間差分が生じることにより、障害検知の精度に差が生じたと考えられる。このことにより、スケールアウト構成における負荷分散が均一に実施されることが、本手法が有効となる前提であると言える。

8 おわりに

本稿では、スケールアウトされた 5GC 環境においてネットワークデジタルツインの技術を活用し、ネットワーク運用のための AI モデル構築手法を提案した。本手法により、大規模な商用環境を最小構成の設備で再現可能となり、商用ネットワーク上では実現困難な、各ネットワーク障害の試験をネットワークデジタルツイン環境において実施が可能となる。また、試験を通じて得られる運用データセットを基に AI モデルを構築することで、作成した AI モデルを商用ネットワーク環境へ反映することが可能となることを示した。今後は、本手法が必要となるネットワークデジタルツインの動的な構築手法を検討し、完全に自律的なネットワーク運用を目指す。

文献

- (1) P. Notaro, J. Cardoso, and M. Gerndt, "A survey of aiops methods for failure management," ACM Trans. Intell. Syst. Technol., vol. 12, no. 6, pp. 1-45, Nov. 2021.
- (2) C. Zhou, H. Yang, X. Duan, D. Lopez, A. Pastor, Q. Wu, M. Boucadair, and C. Jacquenet, "Digital twin network: concepts and reference architecture," Internet-Draft draft-irtf-nmrg-networkdigital-twin-arch-04, Internet Engineering Task Force, Oct. 2023.
- (3) ITU-T, "Architectural framework for artificial intelligence-based network automation for resource and fault management in future networks including IMT-2020," Recommendation Y.3177, Feb. 2021.
- (4) V. Nagendra, A. Bhattacharya, A. Gandhi, and S. R. Das. Mmlite, "A scalable and resource

- efficient control plane for next generation cellular packet core,” Proc. 2019 ACM Symposium on SDN Research, SOSR, pp. 69–83, April 2019.
- (5) D. Kumar, S. Chakrabarti, A. S. Rajan, and J. Huang, “Scaling telecom core network functions in public cloud infrastructure,” IEEE Int. Conf. Cloud Comput. Technol. and Sci. (CloudCom), pp. 9–16, Dec. 2020.
 - (6) C. Rotter and T. Van Do, “A queueing model for threshold-based scaling of upf instances in 5g core,” IEEE Access, vol. 9, pp. 81443–81453, June 2021.
 - (7) D. Harutyunyan, R. Behraves, and N. S. Kriještorac, “Cost-efficient placement and scaling of 5g core network and mec-enabled application vnfs,” 2021 IFIP/IEEE Int. Symposium Integrated Netw. Management(IM), pp. 241–249, May 2021.
 - (8) free5GC. <https://www.free5gc.org/>
 - (9) J. Kawasaki, D. Koyama, T. Miyasaka, and T. Otani, “Failure prediction in cloud native 5g core with ebpf-based observability,” 2023 IEEE 97th Vehicular Technol. Conf. (VTC2023-Spring), pp. 1–6, June 2023.
 - (10) T. Miyamoto, G. Mori, Y. Suzuki, and T. Otani, “Network topology-traceable fault recovery framework with reinforcement learning,” Adv. Inf. Netw. and Appl., pp. 393–402, Cham, 2021, Springer International Publishing.
 - (11) J. Kawasaki, G. Mouri, and Y. Suzuki, “Comparative analysis of network fault classification using machine learning,” 2020 IEEE/IFIP Netw. Oper. Manag. Symposium, pp. 1–6, April 2020.
 - (12) KDDI, “ニュースリリース AIを活用した障害検知システムの運用を開始,” Jan. 2024. <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2024/01/25/7194.html>
 - (13) Y. Wu, K. Zhang, and Y. Zhang, “Digital twin networks: A survey,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 18, pp. 13789–13804, Sept. 2021.
 - (14) H. X. Nguyen, R. Trestian, D. To, and M. Tatipamula, “Digital twin for 5G and beyond. IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 2, pp. 10–15, March 2021.
 - (15) H. Hong, Q. Wu, F. Dong, W. Song, R. Sun, T. Han, C. Zhou, and H. Yang, “Netgraph: An intelligent operated digital twin platform for data center networks,” Proc. ACM SIGCOMM 2021 Workshop Netw.-Appl. Integration, pp. 26–32, Aug. 2021. Association for Computing Machinery.
 - (16) 3GPP, “System architecture for the 5G System (5GS),” Technical Specification (TS) 23.501, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 12 2023. Version 18.4.0.
 - (17) 3GPP, “NG-RAN; Architecture description. Technical Specification (TS) 38.401, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 01 2024. Version 18.0.0.

- (18) CNCF Cloud Native Definition v1.0. <https://github.com/cncf/toc/blob/main/DEFINITION.md>
- (19) K. Hwang, Y. Shi, and X. Bai, “Scale-out vs. scale-up techniques for cloud performance and productivity,” IEEE 6th International Conf. Cloud Comput. Technol. and Sci., pp. 763–768, Dec. 2014.
- (20) Kubernetes. <https://kubernetes.io/>
- (21) G. E. Hinton and R. R. Salakhutdinov, “Reducing the dimensionality of data with neural networks,” Science 313, pp. 504–507, Aug. 2006.
- (22) eBPF. <https://ebpf.io/>
- (23) cAdvisor. <https://github.com/google/cadvisor>
- (24) Prometheus. <https://prometheus.io/>
- (25) Fluentd. <https://www.fluentd.org/>
- (26) Elasticsearch. <https://www.elastic.co/>
- (27) Grafana. <https://grafana.com/>

(2025年8月9日受付, 11月10日再受付)

小山大輝

2017中大・院・修士課程了。同年KDDI入社。2021～KDDI総合研究所でネットワーク運用自動化、ネットワーク障害の予兆検知に関する研究開発に従事。2024に帰任後、通信品質改善に向けたビッグデータ解析業務に従事。



桜庭皆人 (正員)

2014科学大・院・修士課程了。同年KDDI入社。モバイルIP網のバックホール収容ネットワーク開発に従事。2022KDDI総合研究所に出向し、現在まで自律型ネットワークにおけるオーケストレーションに関する研究に従事。



河崎純一 (正員)

2011慶大・院・修士課程了。同年KDDI入社。運用部門においてグローバルネットワークのオペレーション業務に従事。現在、KDDI総合研究所においてAIを活用した運用自動化として障害検知・原因解析等の研究及び実用化に従事。



宮坂拓也 (正員：シニア会員)

2011東大・院・修士課程了。同年KDDI入社。国内バックボーンネットワークの開発業務に従事。2018KDDI総合研究所に出向し、現在までネットワーク運用に関する研究開発や標準化に従事。



トラフィックデータの分析による 情報通信ネットワークの異常検知

鎌村星平 Shohei Kamamura 成蹊大学

1 はじめに

Society 5.0 と呼ばれる、サイバー空間と現実空間が高度に融合した超スマート社会の実現に向けて、情報通信ネットワークは社会基盤としてこれまで以上に重要な役割を担っている。例えば、IoT 機器や AI を活用した多様なサービスやアプリケーションは、一般的には互いにネットワークを介して連携して動作する。よって、これらを結ぶ情報通信ネットワークの安定性や信頼性の確保が重要となる。

安定した情報通信ネットワークを構築して運用するためには、トラフィック情報が必要不可欠である。トラフィックとはインターネットなどの情報通信ネットワーク上で送受信されるデータの量や頻度、そのパターンを指す言葉である(図 1)。通信事業者はこのトラフィック情報のトレンドを分析し、過不足のない適切なネットワーク設備設計を行う⁽¹⁾、また、トラフィックの日常からの変化を分析することで、サイバー攻撃や設備故障といったリアルタイムでの異常検知も可能となる⁽²⁾。更に、トラフィックから人間の行動や思考を抽出することで、Society 5.0 に直接結び付く新たな価値の創造も期待されている⁽³⁾。

本稿では、トラフィック情報を活用した事例として、ト

ラフィックの変化を数学的に解析することで情報通信ネットワークの異常検知を行う方法を解説する。以降、まず **2.**でトラフィックの観測方法を体系的に解説する。**3.**では時系列データとして観測されたトラフィック情報の自己相関分析によって異常検知を行う方法を解説する。**4.**では複数のトラフィック情報の相関を空間的に分析し、異常箇所を推定する方法を解説する。最後に**5.**で総括し、今後の展望を述べる。

2 トラフィックの観測方法

トラフィックの観測方法を分類したものを図 2 に示す。トラフィックの観測方法は主に従来から使われる SNMP (Simple Network Management Protocol) やネットワークテレメトリー⁽⁴⁾といったルータが保有するパケットカウンタ値を取得する方法、すなわちリンクトラフィックを観測する方法と、「通信フロー」と呼ばれるパケットの集合体を、サンプリングや確率的データ構造を用いて観測する方法とに分類される。ここで通信フローとは、送信元 IP アドレス、宛先 IP アドレス、送信元ポート番号、宛先ポート番号、プロトコルタイプの五つの識別子 (5-tuple) を用いて識別されるパケットの集

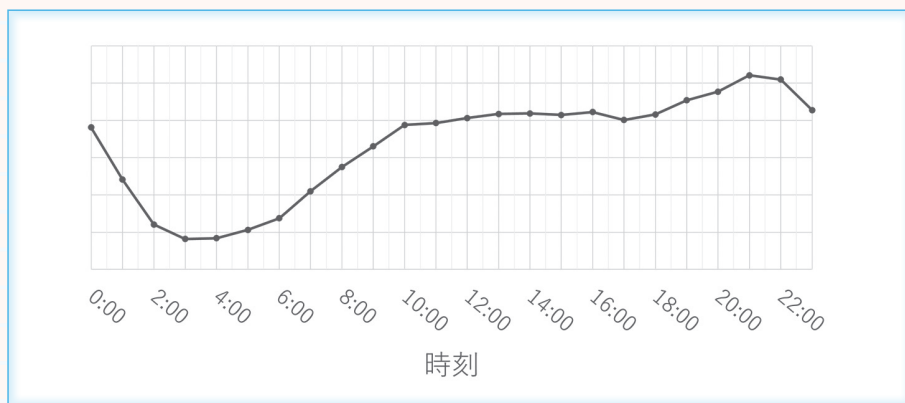


図 1 時系列トラフィック (昼夜変動) の例

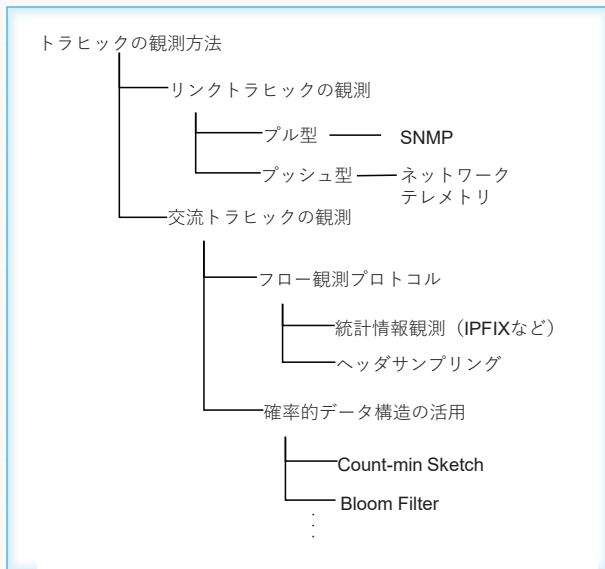


図2 トラヒック観測方法の分類

合体である。リンクトラヒックは観測が容易であるが、その量はリンクを通過する合算値として粗い粒度で情報が得られる。一方で通信フローは、通信フロー観測プロトコル⁽⁵⁾をルータに実装する必要があるが、ルータ上で一定の負荷が発生するが、ルータ間やユーザ間といった特定の対地間のトラヒック発生状況を精緻に把握することが可能となる。これら特定の対地間のトラヒックを

「交流トラヒック」と呼ぶ。リンクトラヒックと交流トラヒックを図3に示す。リンクトラヒックの量は、そのリンクを通過する交流トラヒックの和となる線形の関係がある。

次に、通信フロー観測プロトコルを用いてトラヒックを観測する方法を説明する(図4)。まず、(1) IP ルータ上で一定のルール及びサンプリング周期で IP パケットのヘッダ情報を観測する。次に、(2) IP パケットのヘッダ情報に基づいて定義される通信フローごとの出現量をカウントする。最後に、(3) サンプリングレートに基づきサンプリング前のトラヒック出現量を演算で求め、単位時間に発生しているトラヒックの量を推定する。図4の例では IP ルータを経由するトラヒックの内訳として APL1 から APL4 が存在し、通信フローの観測によりそれぞれの流量が可視化される。

大規模通信網における観測データ量を削減するためには、サンプリング周期をある程度長く設定する必要があるが、この場合観測精度が低下するため、通信フローのカウントに代わる新たな観測方法が研究されている。これらの新たなフロー観測法の基本的な発想は、確率的データ構造を用いて通信フローの情報量を削減する点にある。例えば、Liu らは確率的データ構造である Count-min-sketch 構造を用いた通信フロー観測法を提

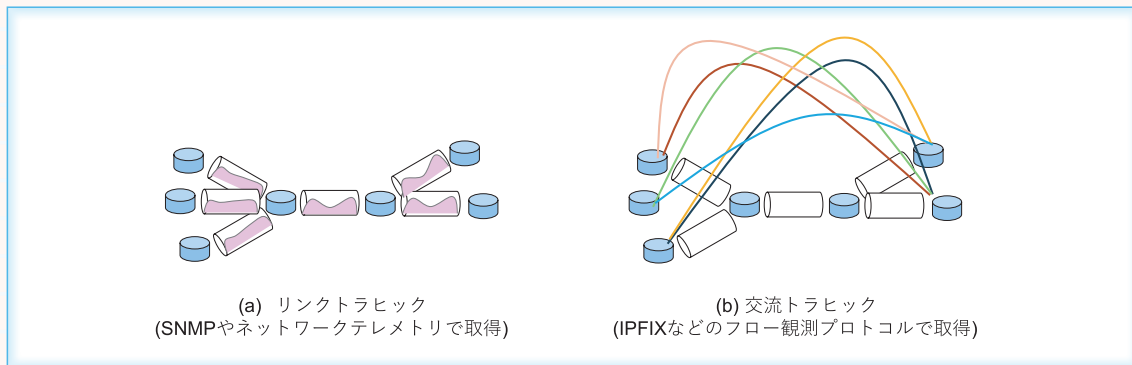


図3 リンクトラヒックと交流トラヒックの違い

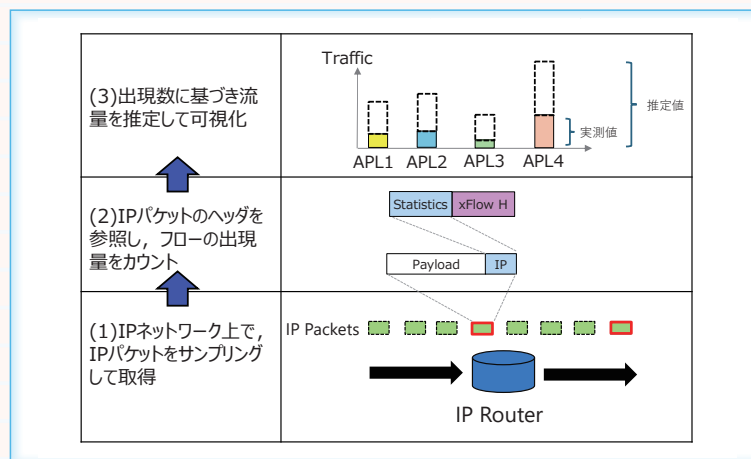


図4 通信フロー観測プロトコルの動作例

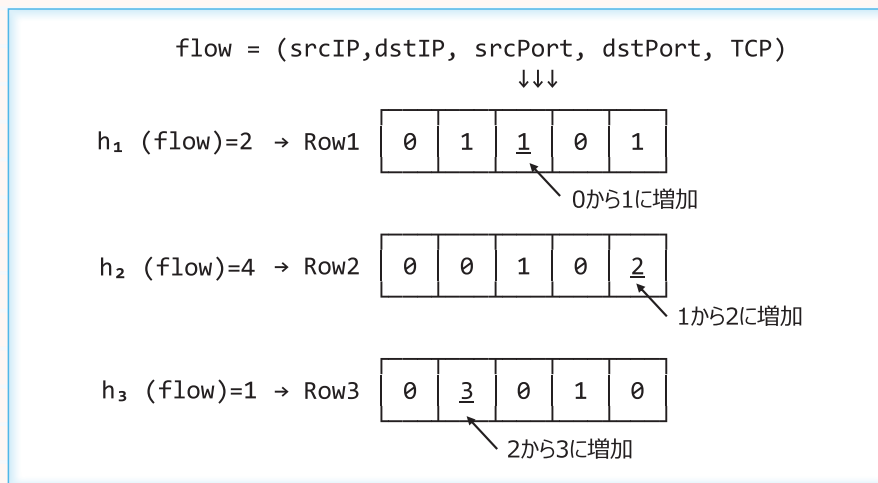


図5 Count-min-sketch の動作例

案している⁽⁶⁾。Count-min-sketch は高次元データをハッシュにより、より小さな空間である確率的データ構造へと射影するデータ構造である。

図5に例を示すように、複数のハッシュ関数 (h_1 , h_2 , h_3) とそれぞれに対応する配列 (Row1, Row2, Row3) から構成される。まずハッシュ関数 h_1 , h_2 , h_3 を用いて、通信フロー情報から異なる三つのハッシュ値 ($h_1=2$, $h_2=4$, $h_3=1$) を計算する。次に、このハッシュ値を添え字として、Row1[2], Row2[4], Row3[1] の値をそれぞれ1増加させることで、フローの出現量を各配列上に記憶する。ただしこの例では、Row2[4] と Row3[1] はハッシュ値の衝突、すなわち既存のフローの出現がカウントされている想定であり、それぞれ Row2[4]=2, Row3[1]=3 となる。Count-min-sketch ではこの衝突の影響を最小限とするために、各配列の値から最小値を取得する。図5の例では、最小値であり衝突の発生していない Row1[2]=1 が該当フローの出現量として採用される。こうして、通信フロー情報を格納するために、本来必要となるデータサイズを削減しつつ、衝突の影響を抑え精度高く情報を保持する工夫を行っている。

3

時系列トラフィックデータを用いた異常検知

本章ではトラフィック活用の事例として、ネットワークにおける異常検知を目的とした時系列データ分析手法の分類について述べる。次に過去のデータとの相関分析に基づく異常検知手法について解説する。

3.1 時系列データ分析手法の分類

時系列データを用いた異常検知手法として、時系列データをモデル化し、モデルから予測された値と実際に

観測される値とを比較して異常を検知していく方法が提案されている。例えば、過去のデータの自己相関やトレンドをモデル化し、その関係式から統計的な予測を行う ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)⁽⁷⁾ や、時系列データの依存や非線形なパターンをニューラルネットワークによって学習し、複雑なデータの動きを柔軟に予測する LSTM (Long Short-Term Memory)⁽⁸⁾、また局所的な時系列パターンを畳込みで捉えて値を予測し、その予測誤差から異常を検出する CNN (Convolutional Neural Network)⁽⁹⁾ を用いた方法などがある。

一方、将来の値を予測するのではなく、過去の傾向から正常なトラフィックパターンの特徴量を抽出し、観測された値を含む特徴量と比較して、大きく差異があれば異常と判定する方法も提案されている。データの扱いを容易にするために、特徴量は元のデータと比較して次元削減などの工夫が行われ、例えば主成分分析 (PCA) や、スペクトル変換などの方法が利用される⁽¹⁰⁾。

一般的に、多くのユーザ通信が重畳される大規模キャリアネットワークにおいては、故障などの外部要因が作用しない限りは、トラフィックの時系列パターンは単調増加しつつも周期的な変動傾向を有すると考えられる。そこで我々は、将来の値を予測することなく、シンプルな相関値解析によって高速かつ精度良く異常検知を行う方法を提案してきた⁽²⁾。次節ではこの方法を紹介する。

3.2 相関分析による異常検知の例⁽²⁾

大規模な広域 IP ネットワークにおいては、トラフィックの時系列パターンは周期的な変動傾向を有しており、その傾向が変化した場合に異常が発生したものと想定される。この想定の下で、異常検知をシンプルに実現する方法を紹介する。

紹介する異常検知手順では、分析対象の通信フローの

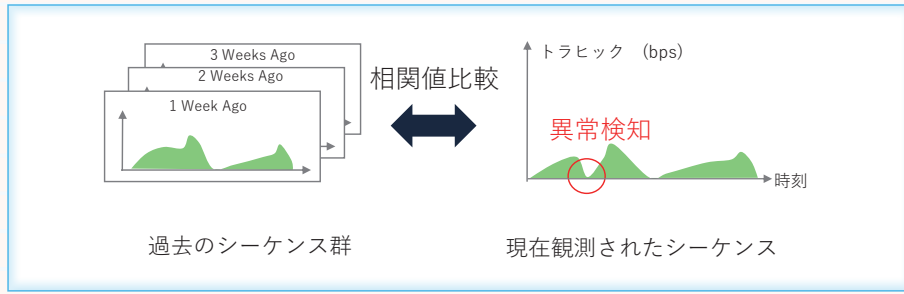


図6 相関値を用いた異常検知の概要

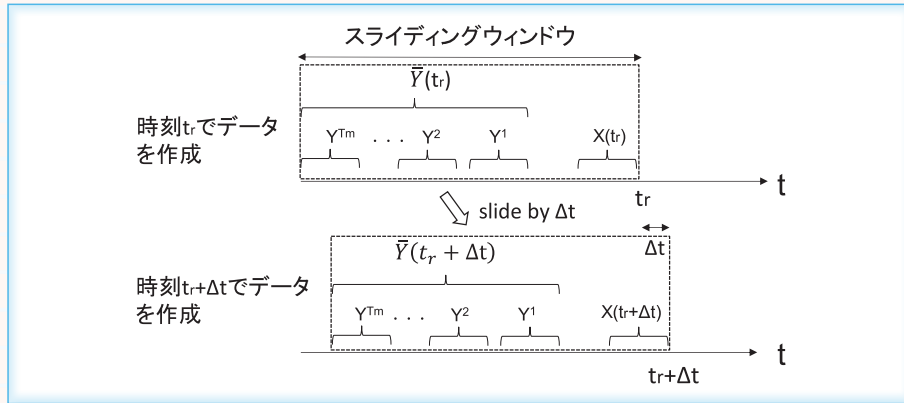


図7 スライディングウィンドウ

観測時点における形と、その通信フローの過去の形との相関値を計算することで異常発生の有無を判断する（図6）。ここで時系列データのある範囲で区切ったものを「シーケンス」と呼び、分析対象とするシーケンス X を以下のとおり作成する。

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

各要素は観測する通信フローの流量で、単位は bit/s である。例えば、通信フローの1日の変動を分析する場合、1時間に1回通信フローを観測できるものとする、シーケンスのサイズ n は24となる。次に、分析対象の T 週間前のシーケンス Y を以下のとおり作成する。

$$Y = (y_1^T, y_n^T, \dots, y_n^T) \in \mathbb{R}^n, \quad T = 1, 2, \dots, T_m \quad (2)$$

ここで、過去の観測データが特異点である影響を抑えるために、 T_m 個の過去の観測データを用いて、平均値 $\bar{Y}$ を計算する。

$$\bar{Y} = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n) \in \mathbb{R}^n \quad (3)$$

ここで $\bar{y}_l$ は以下のとおりである。

$$\bar{y}_l = \frac{1}{T_m} \sum_{k=1}^{T_m} y_l^k \quad (4)$$

シーケンス X とシーケンス $\bar{Y}$ の次元は同じであるから次式により相関値 $\rho_{X, \bar{Y}}$ を計算可能である。

$$\rho_{X, \bar{Y}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ はそれぞれ X 、 $\bar{Y}$ の平均で σ_x 、 σ_y はそ

れぞれ X 、 $\bar{Y}$ の標準偏差である。 $\rho_{X, \bar{Y}}$ は標準化された値であるから、二つのシーケンスが連動しているほど+1に近い値をとり、連動がない場合は0に近い値となる。 $\rho_{X, \bar{Y}}$ があらかじめ決定したしきい値以下となった場合は、シーケンス X において何かしらの異常が発生したものと判断される。

この異常検知手順はシーケンス X 及び $\bar{Y}$ が与えられた上で計算を行う方法であるため、準リアルタイムに異常検知を行うためにスライディングウィンドウを利用する。スライディングウィンドウは図7に示すように、最新のトラヒック観測時刻 t_r を終点としたシーケンス $X(t_r)$ 及び $\bar{Y}(t_r)$ を上記の手順で作成し、相関値 $\rho_{X(t_r), \bar{Y}(t_r)}$ を計算する。次に観測時間 Δt 経過後の時刻 $t_r + \Delta t$ におけるシーケンス $X(t_r + \Delta t)$ 及び $\bar{Y}(t_r + \Delta t)$ を作成し、同様に相関値 $\rho_{X(t_r + \Delta t), \bar{Y}(t_r + \Delta t)}$ を計算する。このように Δt の時間間隔で分析データを用意し相関値を計算することで、 Δt の間隔で異常検知の判定が可能となる。 Δt を小さくすることで、より短い間隔での異常検知が可能となるが、その分、データの記録や計算のオーバーヘッドが増加する。

文献(2)では、急激なトラヒック増加やサービス故障などのユースケースにおいて、通信フローの流量の変化に対する異常検知の精度が議論されている。通信フローの流量の変化の大きさはユースケースによって異なるため、常に固定のしきい値で正確な異常検知を行うことは難しい。そこで、しきい値を外部条件に応じて動的に変

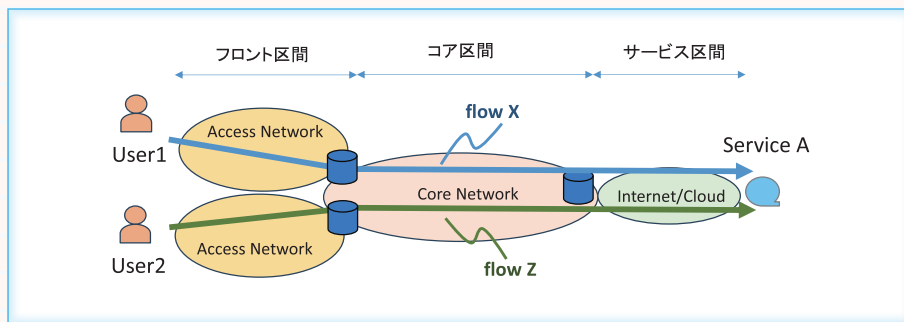


図8 対象とするネットワーク

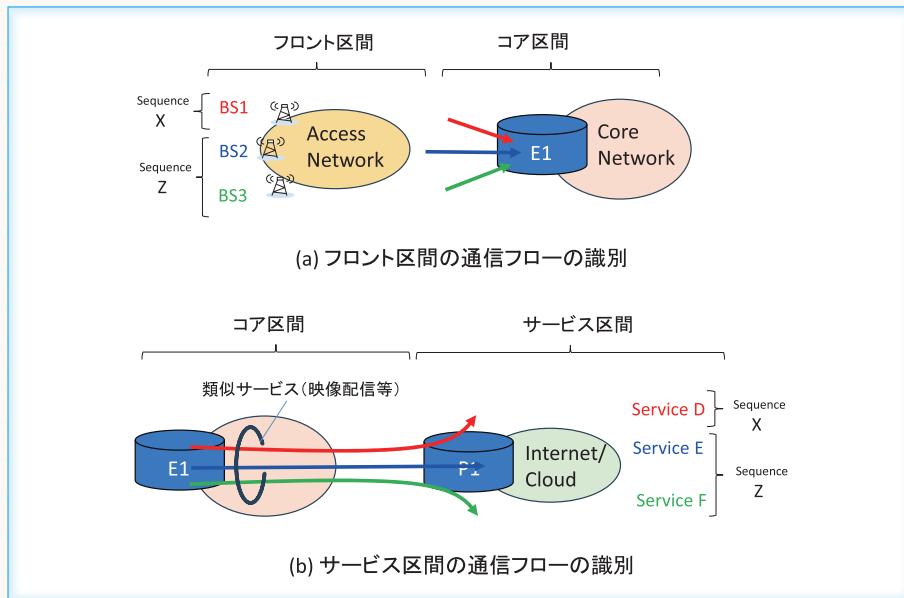


図9 ネットワークと通信フローのモデル

化させる方法を提案し、その有効性が報告されている。

4 異常箇所推定への応用

3. で解説した異常検知方法は、分析対象の通信フローに異常が起きたかどうかのみを判定しており、その原因となる障害箇所は特定できない。一般的に大規模なキャリアネットワークを介したインターネットアクセスは、ユーザと基地局や通信局舎を結ぶアクセスネットワーク、日本全域を接続するコアネットワーク、及びインターネット事業者やクラウド事業者が提供するネットワークから構成される(図8)。素早い故障対応オペレーションを行うためには、上記のいずれのポイントで障害が発生しているかを検知することが重要である。

本章では通信フローを観測して分析することで、異常の有無を検知するとともに、上記のネットワークを (i) フロント区間, (ii) コア区間, 及び (iii) サービス区間と定義したときに、どの区間において異常が発生しているかを推定する方法について解説する。

4.1 ネットワークモデルの定義

図9を用いてネットワークモデルを説明する。図9(a)ではフロント区間とコア区間が定義されており、基地局BS1からコアルータE1へ流入する通信フローが分析対象のシーケンスXとなる。このとき、空間分析を行うためにBS1以外(図ではBS2とBS3)からの通信フローも観測し、それぞれシーケンスZとして次式で定義する。

$$Z^S = (z_1^S, z_2^S, \dots, z_n^S) \in \mathbb{R}^n, S = 1, 2, \dots, S_m. \quad (6)$$

シーケンスZは S_m 個の基地局から発生しているフローの数だけ観測されるため、次式のとおりに平均値 $\bar{Z}$ を求める。

$$\bar{Z} = (\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_n) \in \mathbb{R}^n, \quad (7)$$

ここで $\bar{z}_l$ は次式で与えられる。

$$\bar{z}_l = \frac{1}{S_m} \sum_{k=1}^{S_m} z_l^k. \quad (8)$$

コア区間とサービス区間においても同様に、分析対象のシーケンスXとは別に、異なるサービスを利用する通信フロー群をシーケンスZとして観測する。ただし、

```

01: For incoming stream X
02:   Create  $\bar{Y} = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n) \in \mathbb{R}^n$ 
03:   Create  $\bar{Z} = (\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_n) \in \mathbb{R}^n$ 
04:   IF  $s1 := \text{Similarity}(X, \bar{Y}) < Th1$ 
05:     X-Y_Error := true
06:   IF  $s2 := \text{Similarity}(X, \bar{Z}) < Th2$ 
07:     X-Z_Error := true
08:   SetAlert(X-Y_Error, X-Z_Error, s1, s2)
09: Exit()

```

図 10 異常箇所推定のアルゴリズム

X と Z は、例えばいずれも映像配信サービスであるといった、同様のトラフィック変動傾向を有する類似のサービスであることを想定している。

異なる複数の基地局から特定のコアルータに流入する通信フローや、特定の送信元から異なるサービスへ向かう通信フローは、全て通過するコアルータ上で観測可能である。なお、一般的なキャリアネットワーク上では、発生している通信フローの数が膨大であり、更に諸般の事情により特殊なカプセル化 (TCP/IP ヘッド情報の隠蔽) が行われることがあるが、筆者らが開発した装置⁽¹¹⁾により、通信フローは詳細に観測可能であるものとする。

4.2 時空間分析による異常箇所推定アルゴリズム

図 10 に異常箇所を推定するアルゴリズムの擬似コードを示す。アルゴリズムの目的は、分析対象の通信フローの自己相関に差異があるかどうかを示す $X-Y_Error$ 及び、分析対象の通信フローと類似のサービスによる通信フロー群との間に差異があるかどうかを示す $X-Z_Error$ の状態を決定することである。図 10 では分析対象のシーケンス X に対し、まずシーケンス Y と Z を作成する (line 2-3)。次に X と Y の類似度を取得し、それがしきい値以下であれば $X-Y_Error$ を真とする (lines 4-5)。類似度の計算を行う $\text{Similarity}()$ 関数は 3. の式 (5) を利用可能である。同様に X と Z の類似度を取得し、しきい値未満であれば $X-Z_Error$ を真とする (lines 6-7)。最後に $X-Y_Error$ 及び $X-Z_Error$ の値を用いて $\text{SetAlert}()$ 関数によって障害の有無、及び障害位置を判定する (line 8)。

続いて $\text{SetAlert}()$ 関数の仕様を図 11 を用いて説明する。 $\text{SetAlert}()$ 関数には $X-Y_Error$ 及び $X-Z_Error$ の値が入力される。どちらも False の場

Case	入力		出力		
	X-Y Error	X-Z Error	コア区間異常	X の異常	X 以外の異常
(i)					
(ii)	X		被疑箇所		
(iii)	X	X		被疑箇所	
(iv)		X			被疑箇所

図 11 $\text{SetAlert}()$ 関数の動作

合 (case (ii)) は、 X 自身の振る舞いは過去と相違がなく、また、ほかの通信フローと同様の振る舞いを行っていることから、異常区間は「なし」と判定される。 $X-Y_Error$ のみがある場合 (case(ii)) は、 X 自身の振る舞いは過去と相違があるものの、同時刻のほかの通信フローとは相関がある状態を意味している。つまり、分析対象時刻においては、ほかの通信フローも含めて異常が発生していると類推されるため、コア区間において障害が発生していると判断する。次に $X-Y_Error$ と $X-Z_Error$ の両方が発生している場合を考える (case(iii))。このケースでは X 自身の振る舞いは過去と相違があり、かつ同時刻の通信フローとも相関が低いことから、 X 自身異常が発生していると判断する。最後に $X-Z_Error$ のみが発生している場合を考える (case(iv))。このケースでは、 X 自身の振る舞いは過去と相違がないが、ほかの通信フローとの相関が低いことから、ほかの通信フロー群のいずれかの通信フローにおいて異常が発生していると判断される。この場合は、ほかの通信フロー群に同様のアルゴリズムを順次適用することで、被疑フローを特定可能である⁽¹¹⁾。なお、 $\text{SetAlert}()$ 関数は式 (5) で得られる相関値 $s1, s2$ を受け取ることで、被疑箇所の推定確率を示すように拡張も可能である。

この方法を用いて、監視するフローを切り換えることでネットワーク全体の故障箇所判定が可能となる。例えば、図 9(a) のようにフロント区間のフローを監視する場合は、異常区間がコア区間であるのか、基地局 (若しくは有線網の局舎ビル) であるのかが判定される。図 9(b) のようにサービス区間のフローを監視する場合は、異常区間がコア区間であるのか、サービス区間であるのかが判定される。これらのフロー情報はいずれもコア区間に設置されるコアルータ (図 9 の E1) で観測可能である。よって、コア区間を運用する通信事業者は自身の

管理下にあるルータ上の通信フローを観測するだけで、フロント区間、コア区間、サービス区間のどこで異常が発生しているのかを一元的に判定することが可能となる。

5 おわりに

本稿ではトラフィック情報の観測方法を述べた後に、その活用事例として、トラフィックの時間的及び空間的な変化を解析することで、情報通信ネットワークにおける異常発生の有無や、異常発生を位置を推定する方法について解説してきた。これまで述べたとおり、トラフィックは安定した情報通信ネットワークの運用のために重要な情報である一方で、その観測自体が困難な場合もある。例えば、インターネットトラフィックは年々指数関数的に増加している一方で、その観測容量は様々な制約により十分な容量を確保できないケースも存在する。このため、確率的データ構造を活用した方法⁽⁶⁾や、収集する位置や種別の最適化⁽¹²⁾など、今後もトラフィック観測手法の改善を行っていくことが重要である。

文献

- (1) 植松芳彦, 鎌村星平, 杉山隆太, 武田知典, 宮村崇, 笹山浩二, “交流トラフィック推定技術の大規模サービス統合IP網への適用性,” 信学論(B), vol. J98-B, no. 3, pp. 255-265, March 2015.
- (2) S. Kamamura, Y. Takai, M. Nishimura, Y. Hayashi, and T. Fujiwara, “Network anomaly detection through IP traffic analysis with variable granularity,” IEEE Access, vol. 11, pp. 129818-129828, Nov. 2023.
- (3) 吉田友哉, 鈴木崇史, 松崎光成, “大会期間中のイベントがインターネットトラフィックに及ぼした影響の一考察——トラフィックとテレビ視聴率相反関係について,” 信学誌, vol. 105, no. 8, pp. 956-960, Aug. 2022.
- (4) M. Yu, “Network telemetry: towards a top-down approach,” ACM SIGCOMM Comput. Commun., vol. 49, no. 1, pp. 11-17, Feb. 2019.
- (5) B. Claise, B. Trammel, and P. Aitken, “Specification of the IP flow information export (IPFIX) protocol for the exchange of flow information,” IETF RFC7011, Sept. 2013.
- (6) Z. Liu, A. Manousis, G. Versaeger, V. Sekar, and V. Braverman, “One sketch to rule them all: rethinking network flow monitoring with univMon,” Proc. SIGCOMM, pp. 101-114, Aug. 2016.
- (7) F. Wang, M. Li, Y. Mei, and W. Li, “Time series data mining: A case study with big data analytics approach,” IEEE Access, vol. 8, pp. 14322-14328, Jan. 2020.
- (8) P. Malhotra, L. Vig, G. Shroff, and P. Agarwal, “Long short term memory networks for anomaly detection in time series,” Proc. ESANN April 2015.
- (9) M. Munir, S. A. Siddiqui, A. Dengel, and S. Ahmed, “Deep-AnT: A deep learning approach for unsupervised anomaly detection in time series,” IEEE Access, vol. 7, pp. 1991-2005, Dec. 2018.
- (10) H. Huang et al., “Network traffic anomaly detection based on principal component analysis and clustering,” Proc. INCoS 2014.
- (11) S. Kamamura, Y. Hayashi, Y. Miyoshi, T. Nishioka, C. Morioka, and H. Ohnishi, “Fast xFlow proxy: exploring and visualizing deep inside of carrier traffic,” IEICE Trans. Commun., vol. E105.B, no. 5, pp. 512-521, May 2022.
- (12) 鎌村星平, 平田孝志, “通信網の状態に応じた適応型トラフィック監視法に関する検討,” 信学技報, NS2024-124, pp.13-18, Nov. 2024.

鎌村星平 (正員: シニア会員)

平 16 早大・理工・電子・情報通信卒。
平 18 同大学院国際情報通信研究科修士課程了。平 25 同大学院博士課程了。
平 18 日本電信電話株式会社入社。令 3 成蹊大准教授。令 7 同大学教授。
現在、情報通信ネットワークの研究に従事。博士 (国際情報通信学)。



通信障害対処をクラスタリング分析によって自動化するネットワーク運用保守管理支援技術

Network Operation and Maintenance Support Technology for Automating Countermeasures against Communication Failures Using Clustering Analysis

三宅裕士 Yuji Miyake[†] 角 武憲 Takenori Sumi[†] 末廣 雄 Takeshi Suehiro[†]

Summary

無線ネットワークシステムの複雑化に伴い、ネットワークの運用・保守管理の自動化が求められている。特に、通信障害対処においては、従来、複数の機器にまたがる運用データを収集し、無線通信・ネットワークに関する有識者が分析を行い、障害要因の特定及び対策の検討を行っていた。通信障害対処を自動化するためには、運用データの収集、障害要因分析、対処案の検討及び実行のそれぞれの機能の自動化を図る必要がある。そこで、本稿では、通信障害対処に関する運用データの収集・分析・対処の自動化に資する技術及び実証システム試作について解説する。

Key Words

通信障害、クラスタリング分析、ネットワークテレメトリー、ネットワーク運用・保守管理

1 はじめに

無線ネットワークシステムを用いてサービスを提供するアプリケーションが多様化し、また、無線ネットワークシステムに適用される技術が高度化するにつれ、構成する機能要素や装置が多くなり、無線ネットワークシステムは複雑化する傾向にある。そのため、近年ネットワーク分野における運用や保守に関する自動化・最適化技術に関する研究開発が行われている^{(1)~(3)}。

特に、無線ネットワークシステムのサービス継続性を担保するためには、無線ネットワークの通信障害時の障害検知から対処実行までの過程への対応が重要である。無線ネットワークシステムで通信障害が発生した際は、複数の装置からログなどの運用データを収集し、無線通信はもちろん、ネットワークに関する知見を有する熟練者が分析を行い、障害要因について切り分け、更に障害対策を検討する、というように、障害対処は時間を有するフローであると言える。今後、様々なユースケースにおいて無線ネットワークシステムが活用されること、無線ネットワークシステムが単一アプリケーションで使用される専用システムではなく、複数のアプリケーションを柔軟に収容すること、更に通信・ネットワークに関する熟練者不足への対策、あるいは運用・保守

管理の省力・省人化を実現するために、通信障害対処に関するフローを自動化または半自動化する必要があると考える。

本稿では、ネットワークの運用・保守管理の自動化技術の中でも、通信障害時の障害検知から対処実行までのフローを半自動化するために必要となる技術要素について説明し、実験室レベルで通信障害から復旧までの実証を行った結果を示す。

本稿の構成は以下のとおりである。**2.**では通信障害発生時に対策を自動化するための技術要素を説明する。**3.**では通信ネットワーク及びその構成機器の状況をモニタリングするネットワークテレメトリーについて説明する。**4.**では通信障害の要因分析を行うクラスタリング分析について説明する。**5.**では、実験室レベルでの実証システム構築及び実証結果を説明する。最後に**6.**でまとめを述べる。

2

ネットワーク運用・保守管理の自動化のための技術要素

ネットワークに関する自動化・自律化については、3GPP (3rd Generation Partnership Project) や ETSI (European Telecommunications Standards Institute) の標準化グループ (ISG: Industry Specification Group) である ENI (Experimental Networked Intelligence) など様々な標準化団体において議論されている。表1は、通信分野全体にわたる国際標準化団体である TM Forum にて定義されている自動化の実現レベルと、

[†] 三菱電機、鎌倉市
Mitsubishi Electric Corp., Kamakura-shi, 247-0056 Japan

表1 TM Forum における Autonomous Networks Levels

レベル 定義	L0: Manual Operation & Maintenance	L1: Assisted Operation & Maintenance	L2: Partial Autonomous Network	L3: Conditional Autonomous Network	L4: High Autonomous Network	L5: Full Autonomous Network
実行	P	P/S	S	S	S	S
認知	P	P	P/S	P/S	S	S
分析	P	P	P	P/S	S	S
決定	P	P	P	P	P/S	S

ネットワーク運用において必要となる要素との関係を示したものである⁽⁴⁾。表中の P (Personal) は人手によって、S (System) は自動化システムによって対処が行われることを表しており、これまで人手で行ってきた「実行・認知・分析・決定」のプロセスの段階的な自動化が想定されている。よって、そのための仕組み・技術が求められている。

表1中の認知、分析及び決定に着目すると、通信障害対策の場合のフローは、検知、障害箇所特定、要因分析、対策立案、判断となる。本稿では、これらのうち、判断以外を自動化することで、運用者の効率的な障害対処を実現することを想定する。以下に本稿で解説する通信障害対処を実現する技術要素を示す。

① ネットワークテレメトリー

ネットワークの状態やパフォーマンスの監視・分析のために生成・収集・蓄積・分析されるデータ、あるいはそのプロセスである。

② 障害要因分析

テレメトリーなどによって無線ネットワークシステムの各機能・各装置から収集した運用データを用い、自律的に通信障害・品質劣化の要因分析を行う。本稿では、クラスタリング分析を用いた障害要因分析手法について紹介する。

③ ネットワーク運用・保守管理基盤

無線ネットワークシステムの運用者に対して、稼働状況や運用状況を提示する、また、障害要因分析結果の提示及び障害要因分析結果に基づく対策案を提示し、無線ネットワークシステムの運用を支援する。

3 ネットワークテレメトリー

ネットワークテレメトリーとは、ネットワークの状態やパフォーマンスの監視・分析を目的として、ネットワーク機器において生成し、収集・蓄積・分析されるデータ、あるいはそのプロセスである。従来、特定のアプリケーション向けに設計・構築され

た準静的なネットワークを人間が手動で運用することを前提として、SNMP (Simple Network Management Protocol) や Syslog に代表される、必要時にネットワーク機器にアクセスして機器やネットワークの情報を取得したり、人間の運用者が読むためのログ／イベント情報を収集したりする方式が用いられてきた。しかし、近年、5G (5th Generation Mobile Communication System) をはじめとして、多様な要件のサービスを収容可能なネットワークシステムが登場し、また、SDN (Software Defined Networking, ソフトウェア定義ネットワーク) の導入が進み、柔軟かつ動的なネットワーク制御が可能となってきたことから、その監視・分析及び制御自動化／効率化／最適化のために、より詳細かつリアルタイムなテレメトリーデータの取得と解析が求められるようになった。

その結果、解析は機械学習によるビッグデータ処理での実現が期待される一方で、取得についても新たなテレメトリー技術が提案されている。従来のテレメトリー技術と異なる特徴として、大量のテレメトリーデータを高速に取得するためにプッシュ型若しくはストリーミング型で送信されること、多様な機器からのデータを統合的に分析できるようにモデル化・正規化されていること、ネットワーク運用の一部として効率化・最適化するために取得の頻度や対象とする情報を動的かつ対話的に制御できることなどが挙げられる。ここでは、通信ネットワークの経路上でアプリケーションのデータパケットにメタデータを付加することで、パケット単位でリアルタイムにネットワークや機器の状態に関する情報を取得する INT (In-band Network Telemetry)⁽⁵⁾を紹介する。

図1にINTの動作概要を示す。アプリケーションのデータパケットを送信する sender から受信する receiver までのネットワーク経路上の INT に対応する各ノードにおいて、テレメトリーの対象とするアプリケーションの通信フローの各パケットに対し、通常のパケット転送処理と並行して、タイムス

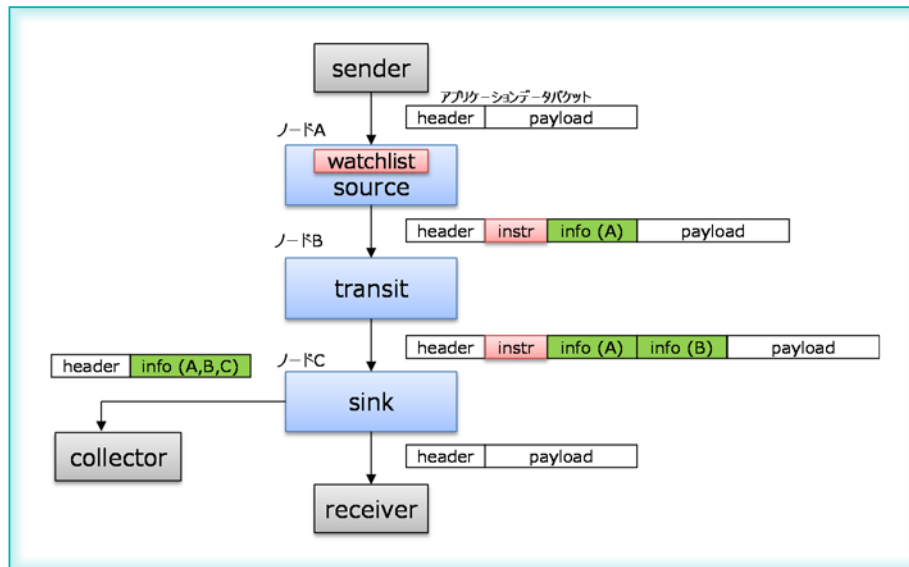


図1 ネットワークテレメトリの概要

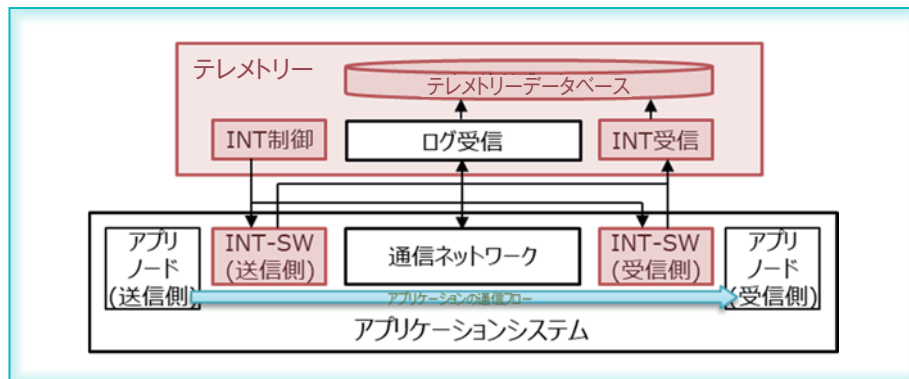


図2 テレメトリシステムの構成例

タンプ、転送処理に要した時間、バッファ使用量、リンク使用率などの情報を取得し、メタデータ（図1中のinfo(A)など）としてパケットに付加していき、「sink」と呼ばれるネットワークの出口に位置するノードで、アプリケーションパケットから取り外したメタデータをテレメトリコレクタ（図1中のcollector）に送信する。どのフローに対して何のデータを取得するかは、「source」と呼ばれるネットワークの入口に位置するノードでsource instruction（図1中のinstr）としてパケット内に埋め込むか、または、各ノードにwatchlistとして設定する方法がある。

現在、広く一般に用いられているネットワーク機器は上述のような処理を行うINT機能をサポートしていないが、スクラッチで設計・実装することが必須ということはない。ネットワーク機能のデータプレーン処理を記述するプログラミング言語として策定されているP4⁽⁶⁾は、INTを代表的なアプリケーションの一つとして想定しており⁽⁷⁾、P4対応デバイスであれば、P4言語で記述したINT機能を各

デバイス向けにコンパイルしてロードすることでINTを実現可能である。（ただしP4対応デバイスが全てのP4規定をサポートするわけではない点には注意が必要。）P4は、当初は限定されたスイッチ装置のみが対応していたが、スマートNICやソフトウェアスイッチに広がっており、今後、更なる普及が期待される。

図2に通信ネットワーク全体にわたるテレメトリを取得するテレメトリシステムの例を示す。通信ネットワークの両端にINT機能を持つスイッチが配置され、アプリケーションの通信フローごとに、例えば、シーケンス番号、タイムスタンプ、累積バイト数をINTデータとして埋め込むようにすれば、アプリケーションレベルで通信ネットワークにおいて発生するパケットロスや、各パケットの到達時間の揺らぎによる並び替えの検出、遅延、スループットをリアルタイムに計測可能である。

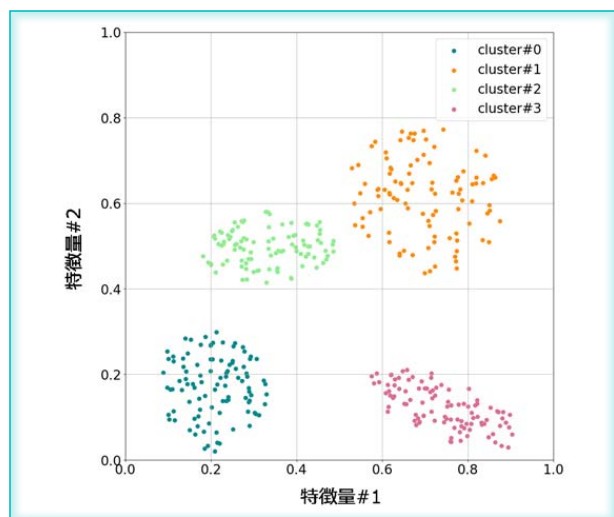


図3 k-means によるクラスタリング例

4 クラスタリングによる障害要因分析

本章では、無線ネットワークシステムで発生した障害要因を推定するための分析技術について説明する。

機械学習の適用により障害検知を行う技術としては、サポートベクターマシンや、クラスタリング、ニューラルネットワークなどの手法が用いられる^{(8)~(11)}。様々な無線ネットワークシステムや環境に適用することを想定すると、サポートベクターマシンのような「教師あり学習」を用いた機械学習手法の場合、ほかの無線ネットワークシステムへの適用時に学習データへのラベル付け作業（アノテーション）が必要であり、学習データの事前処理にコストが掛かる。そのため、本稿では「教師なし学習」が可能なクラスタリング手法を用いた障害要因分析に着目し、教師なしでデータのクラスタリングを行う k-means を用いた事例を解説する。

k-means は、データを複数のクラスタに分類するための代表的な手法である⁽¹²⁾。この手法は、各クラスタの中心点を計算によって決定し、各データに対して、決定したクラスタの中心点までの距離を算出し、最小距離を示すクラスタに分類する。k-means は、そのシンプルさと計算効率の高さから、広く利用されている機械学習手法である。以下にその手順を示す。

① 初期化

複数のデータの中からランダムに k 個のデータを選択し、クラスタの中心点とする。この初期化ステップは、アルゴリズムの結果に大きな影響を与えるため、適切な方法で行うことが重要である。

② 割当てステップ

表2 障害要因分析に用いた運用データ

項目	取得方法
所望信号受信電力	無線装置ログ
干渉電力	無線装置ログ
遅延時間	テレメトリ
送信スループット	テレメトリ
受信スループット	テレメトリ

表3 クラスタ分類

Cluster	状態	判定
#0	正常状態	正常状態
#1	ほかのトラヒック入力により受信スループット低下は大きくないが、遅延時間が増加	アプリレイヤでのトラヒックふくそう（影響小）
#2	ほかのトラヒック入力による受信スループットの低下と、遅延時間の増加	アプリレイヤでのトラヒックふくそう（影響大）
#3	干渉信号による、フレーム誤りの発生	無線区間での干渉

次に、各データを最も近い中心点のクラスタに割り当てる。このプロセスにより、データは k 個のクラスタに分類される。

③ 更新ステップ

各クラスタに割り当てられたデータの平均位置を計算し、各クラスタの中心点を更新する。この更新ステップにより、中心点はクラスタの適切な中心点に近づく。

④ 手順②、③を繰り返す

割当てステップと更新ステップを繰り返し実行する。中心点の位置が変わらなくなるか、事前に設定された最大回数に達するまでこの処理を続ける。

k-means を用いることで、図3に示すように、教師なしで特徴量に基づいて、各データがどのクラスタに属するかを判定することができる。図3は二つの特徴量を考慮したクラスタリングの例である。これらのクラスタがどういった意味を持つかは、各クラスタにおける特徴量を基に決定することができる。クラスタリングによる障害要因分析では、各クラスタを作成するときの特徴量を通信ログから決定し、それぞれがどういった意味を持つクラスタかをクラスタリング結果を確認し決定する。

本稿では、アンライセンズバンドを用いる無線ネットワークシステムを想定し、表2に示す無線装置における無線通信に関する運用データ及びテレメトリにより取得したトラヒック情報から特徴量を

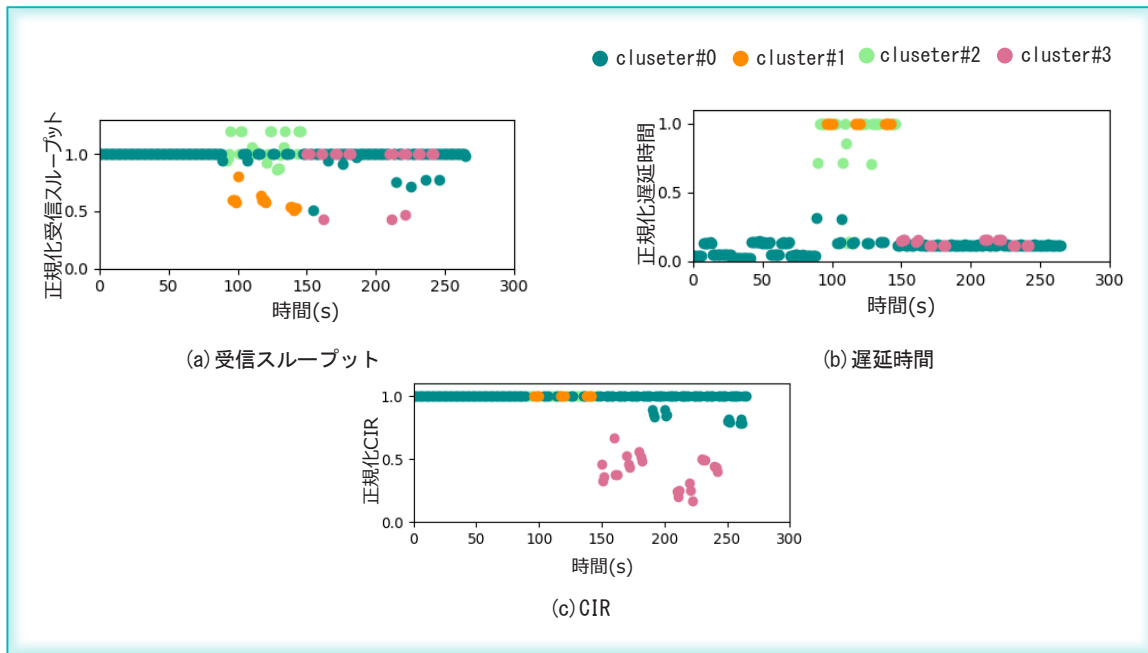


図4 無線ネットワークシステムの運用データのクラスタリング分析結果

決定し、k-means によるクラスタリングを試行した結果を示す。また、k-means では、各データのユークリッド距離を基にクラスタを決定した。そのため、特定の特徴量のみ、大きな値を取るようなことがあれば、正常にクラスタが形成されなくなってしまう。これを避けるために、各データの値は正規化しておく必要がある。例えば、干渉の場合は、所望信号受信電力から CIR (Carrier to Interference Ratio) を算出し、規定の BER (Bit Error Rate, ビット誤り率) を得ることができる CIR を 1 と設定し、規定の BER を超え、通信できない状態となる CIR を 0 となるように各データの値を調整する。表 3 に分類したクラスタの内容を示す。

無線ネットワークシステムの障害要因として、無線区間の受信信号電力の低下によるスループットの低下やアプリケーションでのトラヒックふくそうに加え、アンライセンスバンドを用いる無線ネットワークシステムの場合、同一周波数を用いるほかの無線ネットワークシステムからの干渉を受けることによる通信障害も考えられる。図 4 に無線ネットワークにおける無線装置及びテレメトリーで収集した運用データのうち、正規化した受信スループット及び遅延時間、CIR の時系列データを示す。受信スループットは、送信スループットに対する受信スループットの割合を示している。遅延時間は、対象とする無線ネットワークシステムの許容時間を 1 となるように正規化した。また、CIR は、無線ネットワークシステムの通信性能を満足する CIR が 1 となるように正規化している。図中の各色のマッピングは、

障害要因分析を行った結果である。

各グラフの横軸は時間を示す。運用データの変化点・特徴量に対してクラスタリング分類が動作していることが確認できる。例えば、ネットワークテレメトリーにより計測された遅延時間が大きくなった場合（横軸：100～150 秒）において、CIR が低下していないことから無線区間の干渉 (cluster #3) に分類されず、アプリケーションでのトラヒックふくそう (cluster #1, #2) に分類されていることが確認できる。また、受信スループットの低下度合いに応じ、トラヒックふくそうの影響度が異なる二つのクラスタに分類されていることが確認できる。このように多角的な運用データを用いたクラスタリング分析により、無線ネットワークシステムにおける障害要因分析を行うことが可能となる。

5

通信障害の対処に関する実証システム試作

本章では、これまで説明した運用データを収集するテレメトリーシステム及び障害要因分析を実現するクラスタリング分析に加え、無線ネットワークシステムの運用状況の可視化及び障害対策提案を行うネットワーク運用・保守管理基盤を試作し、実証した結果について説明する。試作したネットワーク運用・保守管理基盤は「NW (Network) エンジニアリングツール」と呼ぶ。図 5 に試作した実証システムの構成を示す。実証システムでは、無線ネットワークシステムを用いた監視カメラシステムを模擬

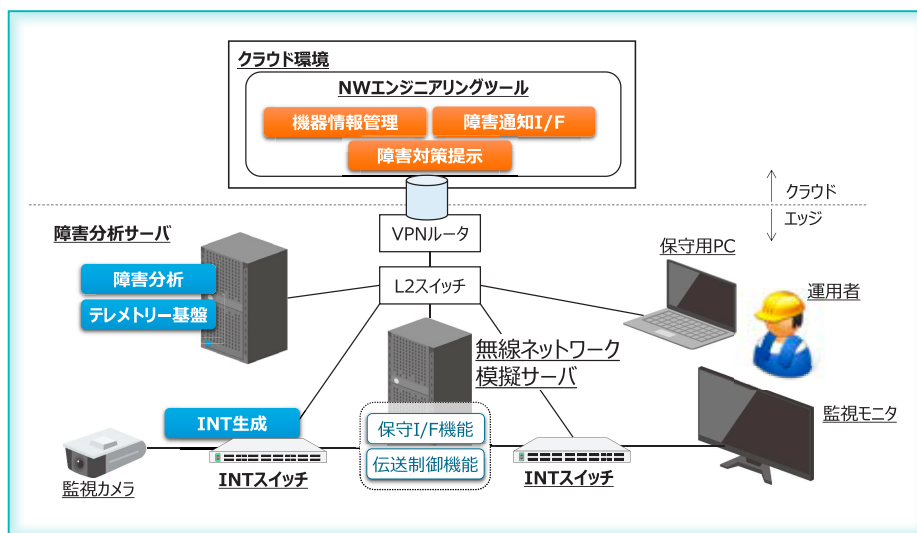


図5 試作した実証システム

NWエンジニアリングツール			
■ 装置状態情報			
装置ID	装置種別	属性情報	説明
1000	高信頼無線	高信頼無線装置（親）	基地局(生産エリアA)
1001	高信頼無線	高信頼無線装置（子）	固定カメラ(植立ラインA監視)接続無線装置
2000	高信頼無線	高信頼無線装置（親）	基地局(生産エリアB)
2001	高信頼無線	高信頼無線装置（子）	移動カメラ(生産状況監視)接続無線装置
2002	高信頼無線	高信頼無線装置（子）	貨物運搬AGV#1接続無線装置
2003	高信頼無線	高信頼無線装置（子）	植立AGV#1接続無線装置
追加 削除			
■ 障害通知			
日時	装置ID	属性種別	障害内容
2025-02-20 17:04:22	1001	高信頼無線装置（子）	アプリレイヤでのトラヒック経路が発生しました

図6 NW エンジニアリングツール GUI

した。無線ネットワークシステムを介して、監視カメラ映像トラヒックを伝送し、運用者に監視カメラ映像を提供する。本試作では、無線ネットワークは、汎用サーバ内の仮想環境にて送受信装置の伝送制御動作及び各保守 I/F を模擬した。保守 I/F は無線装置の運用データを障害分析サーバ上に構築したテレメトリー基盤及び NW エンジニアリングツールに送信する。NW エンジニアリングツールは遠隔監視や他拠点での監視を想定し、クラウド環境上に試作した。NW エンジニアリングツールには、運用者に対して図 6 のような GUI（Graphical User Interface）を実装した。図 6 は GUI のトップページを示しており、各無線装置の稼働状態及び障害通知結果を運用者に提示する。「稼働状態情報」

一覧に示す無線装置のうち、障害が発生している装置には黄色ハッチングにより運用者に通知する。

次に、障害分析サーバ及び INT スイッチについて説明する。INT スイッチでは **3.** にて説明したテレメトリーデータを生成し、障害分析サーバ上に構築したテレメトリー基盤にテレメトリーデータを送信する。テレメトリーデータ及び無線ネットワーク模擬機能の保守 I/F によって収集した無線装置の運用データを用い、**4.** にて説明したクラスタリング分析を用い、障害要因分析を行う。障害要因分析結果は、NW エンジニアリングツールに送信し、運用者に提示する。

試作した実証システムを用いた障害発生から障害対処フローに関する実証について説明する。図 7

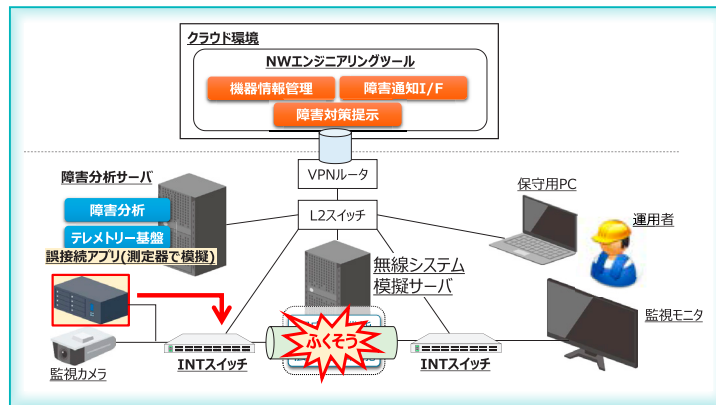


図7 実証シナリオ

に実証シナリオを示す。今回は、アプリケーションのふくそうによる品質劣化を模擬した。具体的には、監視カメラを接続しているネットワークスイッチに、運用者が誤ってトラヒックを発生させるアプリケーションの装置を接続してしまったことを想定する。誤接続アプリケーションのトラヒックは、ネ

ットワークアナライザによってトラヒックを注入することで模擬した。無線システムで伝送できる帯域を超過するトラヒックを注入することにより、無線システムがふくそうし、監視カメラトラヒックに遅延やパケット紛失が発生することで監視映像が乱れる、停止するといった障害が発生する。

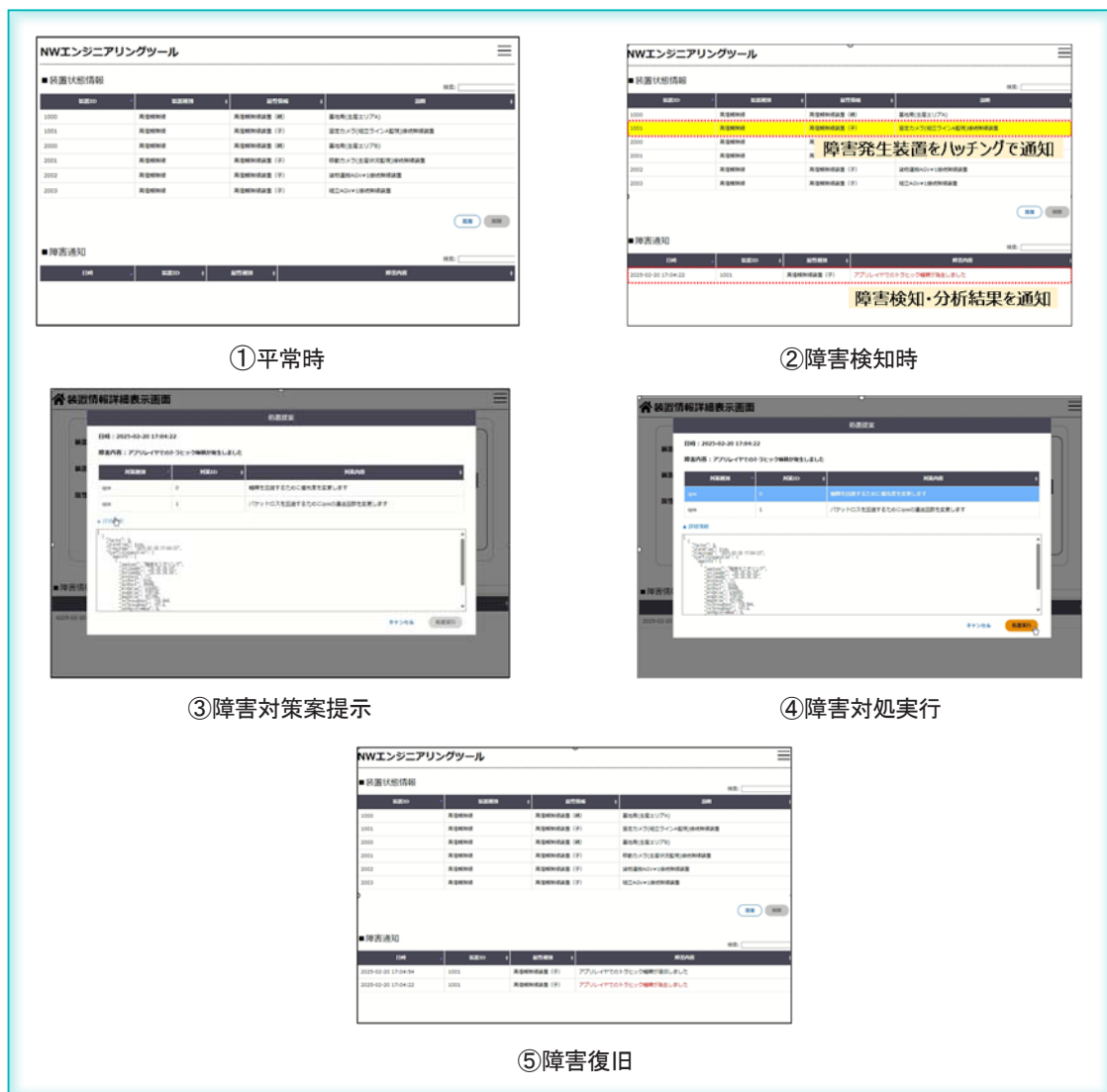


図8 実証中のNWエンジニアリングツールのGUI遷移

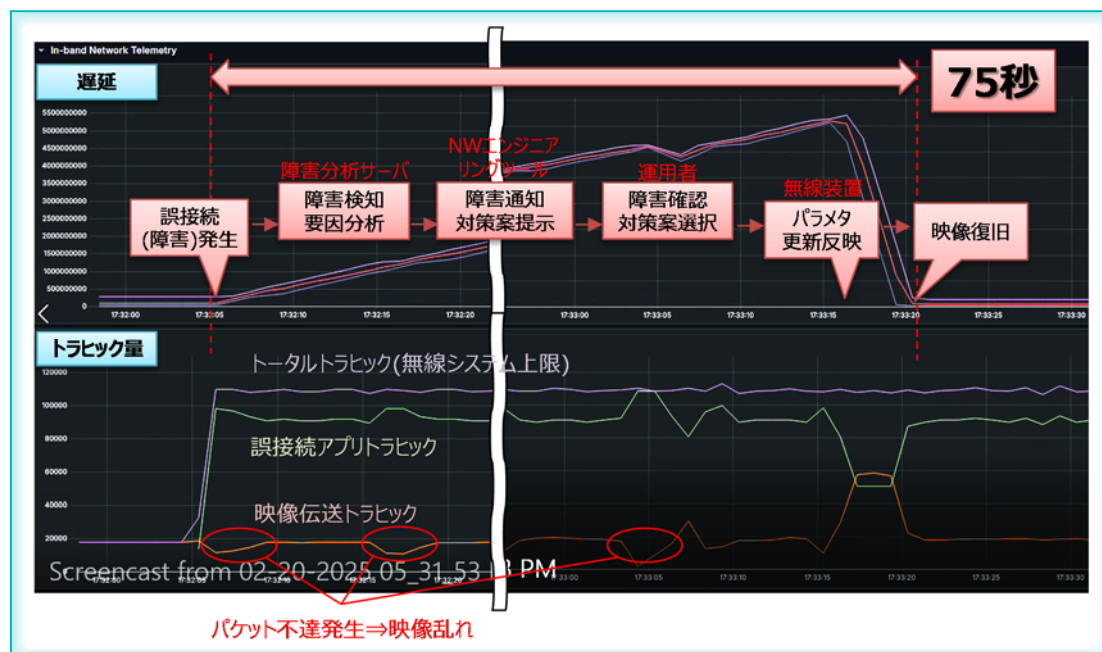


図9 実証中のテレメトリー情報（遅延・帯域）の変化

図8に実証中のNWエンジニアリングツールのGUI遷移を示す。また、図9に実証中のテレメトリー情報の変化を示す。横軸は時間を表しており、上段のグラフはINTスイッチ間の映像トラフィックの遅延時間を示す。下段のグラフは、無線システムを伝送するアプリケーションごとのトラフィック量を示す。

障害発生→障害検知

誤接続アプリケーションを模擬したネットワークアナライザによって、トラフィックを注入すると、図9中の映像トラフィックの遅延が大きくなり、監視カメラアプリケーションとしての障害が発生する（映像停止）。

障害要因分析→障害情報通知

GUIでは図8①→②に遷移し、対象の無線装置に障害が発生したことを、障害分析サーバ内の障害分析機能によって検知し、通知できたことが確認できる。障害要因分析によって、「アプリレイヤでのトラフィックふくそう」が障害要因であることを分析できていることが分かる。

障害情報確認→障害対処方法提示

運用者は、障害通知を選択することで、障害の詳細情報が確認することができる。詳細情報は、障害分析機能が障害検知に使用した根拠となる情報を障害要因分析結果と併せて通知する。NWエンジニアリングツールは、障害要因分析に対応する対策方法を事前にマッピング・管理している。今回は、送信側無線装置から送信するパケットを適切に優先付

けするように、QoS（Quality of Service）パラメータを変更することによって障害に対処する案が運用者に対して提示されている（図8③）。監視カメラトラフィックを高優先伝送するようなQoSパラメータ変更を行うことにより、誤接続アプリケーションのトラフィックの影響を抑制し、本来無線ネットワークシステムで伝送している監視カメラ映像トラフィックに遅延が発生しないようにする。運用者は障害対策案を選択し、実行を判断する。

障害対処実行→障害復旧通知

図8④で示す障害対処実行を行うことで、NWエンジニアリングツールが提示したQoSパラメータ変更を無線システムに反映する。反映後、図9中の遅延時間が小さくなり、障害が復旧したことが分かる。また、図8⑤に示すように障害分析サーバにて障害復旧を検知し、NWエンジニアリングツールにて運用者に対し、障害復旧を通知した。本実証では、ネットワークふくそうという障害に対して、運用者の判断・操作を含め約75秒で障害対処を完了することができた。

6 まとめ

本稿では、無線ネットワークシステムにおける通信障害の対処フローを自動化するために必要となる技術として、運用データを収集するネットワークテレメトリー及び障害要因分析を行うクラスタリング分析について解説した。このような技術を活用することで、無線ネットワークシステムの保守・運用を

部分的に自動化し、省力・省人化を実現することができる。

また、ネットワークテレメトリー・障害要因分析に加え、ネットワーク運用を支援する運用・保守基盤による実証システムを試作し、通信障害発生時の対処フローを実証した結果を紹介した。

■文献

- (1) ETSI GS ZSM 003 v1.1.1 (2021-06) Zero-touch network and Service Management (ZSM); End-to-end management and orchestration of network slicing
- (2) A. Giannopoulos, S. Stantideas, N. Kapsalis, P. Gkonis, L. Sarakis, C. Capsalis, M. Vecchio, and P. Trakadas, "Supporting intelligence in disaggregated open radio access networks: architectural principles, AI/ML workflow, and use cases," IEEE Access, vol. 10, pp. 39580–39595, April 2022.
- (3) TM Forum, "TM Forum Introductory Guide Autonomous Networks Technical Architecture," IG1230 Version 1.1.1, Dec. 2022.
- (4) TM Forum, "A white paper of Autonomous Networks: Empowering Digital Transformation For The Telecoms Industry," Release 1.0, May 2019.
- (5) TM Forum(5), C. Kim, A. Sivaraman, N. Katta, A. Bas, A. Dixit, L.J. Wobker, "In-band network telemetry via programmable dataplanes," Proc. ACM SIGCOMM 2015 Conf. Posters and Demos, 2015.
- (6) P. Bosshart, D. Daly, G. Gibb, M. Izzard, N. McKeown, J. Rexford, C. Schlesinger, D. Talayco, A. Vahdat, G. Varghese, and D. Walker, "P4: Programming protocol-independent packet processors," ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 44, no. 3, pp. 87-95, July 2014.
- (7) In-band network telemetry (INT) dataplane specification v2.1, 2020.
<https://github.com/p4lang/p4- applications/blob/master/docs>
- (8) K. S. Mayer, J. A. Soares, R. P. Pinto, C. E. Rothenberg, D. S. Arantes, and D. A. A. Mellom, "Machine-learning-based soft-failure localization with partial software-defined networking telemetry," J. Opt. Commun. and Netw., July 2021.
- (9) J. Surendiran, B. Mary Nathisiya, A. RadhaKrishnan, J. Mary Stella, M. Marimuthu, and N. Balaji, "Elimination of data modification in sensor nodes of WSN using deep learning model," 2022 Int. Conf. Comput., Power and Commun. (ICCCPC), Dec. 2022.
- (10) L. Anand, Padmalal S, J. Seetha, R. Juliana, PS Naveen Kumar, Gayatri Parasa, "Evaluation of wireless sensor networks module using IoT approach," 2023 Third Int. Conf. Artif. Intell. and Smart Energy (ICAIS), Feb. 2023.
- (11) F. Yang, W. Quan, N. Cheng, Z. Xu, X. Zhang, and D. Gao, "Fast-INT: light-weight and efficient in-band network telemetry in programmable data plane," IEEE 92nd Vehicular Technol. Conf., Nov. 2020.
- (12) J. B. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," Proc. 5th Berkeley Symposium Mathematical Statistics and Probability, vol. 1, pp. 281–297, University of California Press.

(2025年8月1日, 10月28日再受付)

三宅裕士 (正員)

2015 東北大学院工学研究科通信工学専攻博士課程後期了。2015 三菱電機株式会社入社。以来、無線ネットワーク制御技術、無線システム運用管理技術の研究開発に従事。博士(工学)。IEEE 会員。



角 武憲 (正員)

2007 同志社大学院工学研究科電気工学専攻修士課程了。2007 三菱電機株式会社入社。以来、無線ネットワーク制御技術、無線共存技術の研究開発に従事。IEEE シニア会員、情報処理学会正会員。



末廣 雄 (正員)

2009 慶大学院理工学研究科修士課程了。2009 三菱電機株式会社入社。以来、光アクセスシステム、通信ネットワーク運用管理技術の研究開発に従事。



マトリクスに 魅せられて

菊間信良(名誉員：フェロー)

1982名工大・工・電子卒。1987京大大学院博士課程了。同年同大学助手。1988名工大助手。1990同講師。1992同助教授。2001同教授。2025同大学名誉教授。現在に至る。工博。適応アレー信号処理。電波源推定。MIMO通信。MIMOレーダ。移動伝搬解析に関する研究に従事。1989電気通信普及財団賞(テレコムシステム技術賞)。2006本会論文賞。2016本会教育功労賞受賞。2020～2021本会通信ソサイエティ会長(理事)。2021～2023本会総務理事。著書「アレーアンテナによる適応信号処理」。「アダプティブアンテナ技術」など。



名古屋工業大学名誉教授

菊間信良

Nobuyoshi Kikuma



1. はじめに

このたび「私の研究者歴」の執筆依頼を頂き、まずは過去の記事を改めて拝読した。どの方も余りに偉大であり、正直なところ「私にはこのような記事は書けないのではないか」と感じ、執筆をためらっていた。しかし、締切が近づくにつれ、拙いながらも自分の歩みや思いを記録として残すことは、残さないよりも意義があるのではないかと思ひ至り、まずはこの率直な気持ちから書き始めることにした。

かつて宮本武蔵が巖流島の決戦の後に『五輪書』を著し、兵法の奥義をまとめたことはよく知られている。私もまた、定年という大きな節目を迎え、これまで歩んできた道、多くの経験や出会いを振り返りながら、記憶を掘り起こして、ここに書き留めていこうと思う。もちろん『五輪書』と比べるべくもないが、私なりに歩んできた「研究道」である。



2. 初めての研究発表

生まれて初めての研究発表は小学校5年生のときであった。私は能登半島の七尾市の出身で、5年生の担任の先生から、「こんど能登島大橋(図1)ができるから、橋の研究をやってみよう」と私と友人の2人に依頼(命令)が来た。断る理由もなかったのので、引き受けて、夏休みに友人と2人、私の自宅で研究の進め方などを相談した。しかし、研究や実験をやろうにも、どのようにやってよいか全

く見当がつかず夏休みが終わろうとしていた。夏休みの終わり頃に担任の先生に途中報告をしたところ、「これでは駄目だ」と厳しく言われたことを覚えている。素直に反省をした後、先生と3人で職員室の片隅で実験をした。やはり研究スピードは格段に上がり、「こんな風に研究を進めるのだな」と初めて知った。結果を手書きでポスターにまとめ、七尾市のとある会館の会議室でプレゼンを行った。発表内容は「記憶の彼方」であるが、成果については今でも印象深く覚えている。「橋の鉄骨は円柱構造が最も強い」というものである。おかげ様で、奨励賞を頂いた。(当時は奨励賞の意味が分からなかった。)

これが後の研究生活に影響したかどうかはよく分からないが、今でも実験の光景、プレゼンの反復



図1 初めての研究テーマ、能登島大橋

(石川県観光公式サイト https://www.hot-shikawa.jp/spot/detail_6107.html から)

練習、そして発表本番の景色が記憶に残っていることからすれば、研究人生のスタート、原点と言えるかもしれない。

一方で、私の趣味は歌うことであるが、歌との出会いも小学校5年生で、合唱クラブに誘われ、6年生までの2年間、合唱に親しんだ。(6年生の担任の先生が合唱クラブの顧問でもあったためである。)研究の道において、私は厳しい日々の中にも必ず潤いが必要であると信念を持ってきたが、この合唱との出会いは、私にとって歌うことがその潤いの一つとなると同時に、仲間を広げる手段ともなった。(成人後にはお酒も同様の役割を果たした。)



3. 受験勉強の始まり

中学生になると変声期を迎え、歌うことが恥ずかしくなった。そのため歌からは離れ、軟式野球や剣道などの運動系に少しのめり込んだ。中学3年間は受験勉強に追われ、研究とは無縁であったが、私の人生において大きな出会いがあった。中学1年生から個人塾に通っていたのであるが、その塾の先生がとても个性的で、将来に向けて大きな夢を抱かせてくれた。例えば、現役の京大生の先輩を紹介して頂き、大学生活の楽しさを直接聞くことができた。また、普通ならなかなか接する機会のない、百人一首競技かるたの名人の方を紹介して頂き、名人から指導を受け、百人一首に夢中になった。全ては先生の幅広い人脈のおかげであった。このときから先輩に憧れ、いつか自分も京大へ進みたいと思うようになった。こうして、中学時代に塾の先生を通じて貴重な出会いがあり、大きな影響を受けたことは、その後の人生にとって大きな糧となった。

高校時代はそのまま受験生活が続き、特に研究に関わることはなかったが、理数科に所属していたことから、コンピュータを使った自由研究に取り組む機会があった。確か、平面上の二つの直線が交わるかどうかを判別するプログラムを作成した記憶がある。使用したプログラミング言語は覚えていない。一方、部活動では合唱部に所属し、声変わりした声で合唱を楽しんだ。受験勉強の疲れを癒してくれる、大切な時間であった。



4. 名工大における学生生活と卒業研究

1978年4月、大学は残念ながら京大ではなく、名古屋工業大学に入学することになった。国立大学

の入試が一期校、二期校制度の最後の年であったので、これ以上の冒険はせず、名古屋に来ることになった。

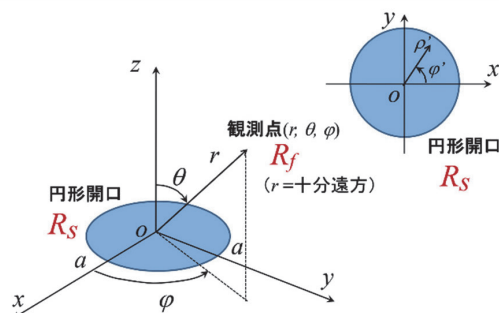
私の大学生生活は、部活動としては相も変わらず合唱団に所属していたために、コーラスのことばかり考える毎日であった。特に男声グリークラブであったので、男声の力強い響きに魅せられ、歌とお酒(合唱団仲間と飲むお酒)が潤いを与える毎日であった。それゆえ、電子工学科所属であったが、しばらくは電子工学に強く興味を持つことができないでいた。そうした中で、恩師の稲垣直樹先生(当時、助教授)の電磁波工学(3年次)の授業を受け、マクスウェルの方程式を中心とした、数学的にきれいな理論で電磁波を説明できることに感銘を受けた。これが稲垣先生との出会いである。このとき「自分の道はこれだ!」と思い、4年次の卒業研究には迷わず稲垣研究室を希望した。以後、電磁気学・電磁波工学の世界にどっぷりつかることになったのである。電磁気学・電磁波工学の世界に入るもう一つきっかけを挙げるとすると、4年生のときに大学院入試のために苦手な電磁気学をもう一度徹底的に勉強し直したことである。この時間が電磁気学の面白さを教えてくれたと言える。

卒業研究は、稲垣先生の御指導の下「円形開口の固有波源と固有パターン」について解析した⁽¹⁾。1981~1982年当時は、計算機環境はよろしくなく、円形開口面の波源分布を表すための球ベッセル関数などはFORTRANで自作していた。もちろん、卒論は手書きで、図面も自在定規や雲形定規などを利用してペン書きで描いていた。その卒論は初めて自分で書いた論文であったので、定年の際に自宅に持ち帰って大事に保管してある。

当時は卒業研究の内容を十分に理解していたわけではなかったが、稲垣先生が2010年に南山大学を御退職される際の記念講演で、「円形開口の固有波源と固有パターン2010」というタイトルの下、もう一度卒業研究発表を行う機会を頂いた。準備期間は約1週間であったが、卒論を読み返し、式変形も全てやり直し、今回はMATLABを用いて波源分布や指向性パターンを描いた。その結果をパワーポイントにまとめ、講演会当日、稲垣先生の前で発表を行った(図2)。

大学での業務を終えた後、毎晩自宅で取り組んだそのときの1週間は、とても楽しく、結果が出るたびに胸が高鳴る時間であった。また、大学4年生当時には十分に理解できていなかった自分の卒業研究を、改めて深く理解する機会を得られたこと

円形開口の電界分布と放射ベクトル



(a) その1：円形開口の座標

むすび

波源
円形開口上に平面波的に分布する電磁界の電界

観測場
無限遠球面上の放射ベクトル

固有波源と固有パターン
波源と場の関係を洞察するための便利な手段

解析的表現が可能！

電波工学の幅広い分野に有用な固有波源・固有場の研究の進展に役立つ。

(b) その2：むすび

図2 「円形開口の固有波源と固有パターン 2010」の発表スライドから

は、大きな喜びであった。28年前と同じ結果が得られたことに安堵し、更に稲垣先生から「間違っていないくてよかった」とのコメントを頂いた。（その一言だけであったが。）まさに、私にとっての卒業研究が本当に完結した瞬間であった。

卒業から28年後、僅か1週間で卒業研究をやり遂げたことによる自分自身の成長と集中力の実感、コンピュータ環境の進化に対する驚き、そして爽快感は、一生忘れられないものである。時間をおいて学び直す「二度学」の意義を体感した出来事であった。

5. 京大における研究生生活

1982年、大学院は学部のリベンジを果たしたかのように京都大学に入学した。指導教授は木村磐根先生で、直接指導して下さったのは助教授の鷹尾和昭先生だった。鷹尾先生は日本におけるアダプティブアレイのパイオニアの一人で、これが私とアダプティブアレイとの出会いとなった。アダプティブア



図3 2025年2月のアンテナ・伝播研究会で同期三人組。左から筆者、新井宏之氏、庄木裕樹氏。

レーとは、複数のアンテナで受信した信号に対して、適応的に重み付け合成することにより、アレーアンテナとしての指向性を自在に制御できるアンテナシステムである^{(2), (3)}。これまでに、応用分野に応じて多くのアルゴリズムを考案され、移動通信における基地局制御、端末制御技術等の基盤となっている。

当時、鷹尾先生のグループは、M2が1名（現在、龍谷大教授である石崎俊雄氏）、M1が1名（私）、そしてB4が2名であった。週1回のペースで鷹尾先生の部屋に集まり、ディスカッションをし、研究を進めた。研究室の学生室は木村先生のグループ（KG）、鷹尾先生のグループ（TG）、深尾昌一郎先生のグループ（FG）の学生が同居していたので、大変にぎやかで楽しい雰囲気であった。先輩方も優しく丁寧に教えて下さり、大変有り難かった。昼御飯、晩御飯と、いつも一緒にいた印象があり、研究するにはとても良い環境であった。

M1からの新研究スタートであったため、私の初めての研究会発表は同期と比べてやや遅く、M2の6月のアンテナ・伝播研究会であった⁽⁴⁾。「干渉性妨害波に対するアダプティブアレイの動作」という題目で、所望波と相関のある干渉波がDCMP (Directionally Constrained Minimization of Power)⁽⁵⁾などの拘束付き電力最小化を原理とするアダプティブアレイに入射すると所望波が相殺されてしまう、という厄介な現象を示したものである。（鷹尾先生は「アレー」ではなく「アレイ」を使用していた。）発表については、ほとんど記憶はないが、その研究会で、生涯の友となる新井宏之氏（当時、東工大M2）、庄木裕樹氏（当時、北大M2）と出会った。図3の2025年2月の研究会での写真のように、3人は今でも元気で会うことができている。約40年もの間、互いに良い刺激を与え合ってきた、私の研究人生において、かけがえのない友

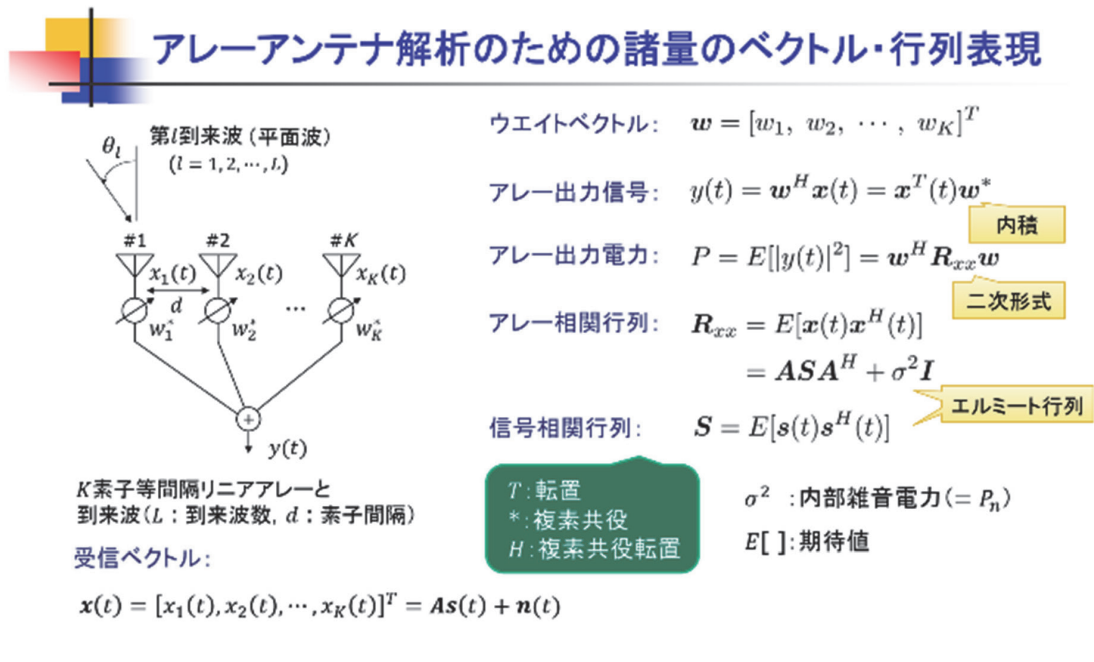


図4 アレーアンテナ解析のためのベクトル・行列表現

である。

修士課程の2年間は早いもので、「擬似雑音によるアダプティブアレーの特性改善」という題目で修士論文をまとめることになった。マルチパス波のように所望波と相関のある干渉波から DCMP アダプティブアレーの特性劣化を防ぐために、擬似雑音を信号処理ソフトウェアの中で加えるものである⁽⁶⁾。雑音により干渉波を制するこのシステムを「タイムドアダプティブアレー (Tamed Adaptive Array)」と鷹尾先生が名付けて下さった。修論公聴会で副査をして下さった池上文夫先生からは「この手法は、毒をもって毒を制すのですね」と講評して頂いたことを覚えており、言い得て妙と思った。

その後、博士課程に進学し、博士論文は「Study toward Wider Application of Adaptive Arrays (アダプティブアレーの汎用化に向けた研究)」であった。これは、修論の延長である、擬似雑音によるアダプティブアレーの改善^{(6), (7)}、位相制御のみのアダプティブアレー⁽⁸⁾、到来波間の相互相関を完全に抑圧するための適応型空間平均法^{(9), (10)}、相関拘束電力最小化法⁽¹¹⁾、アダプティブアレーの初期値の影響⁽¹²⁾などをまとめた論文である。特に空間平均法については、従来法では複数のサブアレーの相関行列を一樣平均したのであるが、提案法である適応型空間平均法は、それらを重み付け平均する手法で、この部分にアダプティブアレーと同じ条件付最小化を導入し、完全に相互相関値をゼロにすることができた。これは、1学年下の後輩であった矢野

達朗君の助けがなければ達成できなかった研究である。大変感謝している。

アダプティブアレーの研究では、図4のように、アレー重みをベクトル表記したり、受信信号の相関行列を扱ったりして、ベクトルの内積演算、行列の固有値分解など複素数の線形代数が不可欠なものであった。M1のときから、ツルミール著の「マトリクスの理論と応用」という専門書(訳本)で行列理論を勉強するようになり、アダプティブアレーにおけるベクトル・行列の有り難みが身にしみて分かってきた。そして、徐々にマトリクスに魅せられていくこととなった。

博士課程を終えた後、1年間だけ池上文夫先生の研究室の助手として働くことになった。たった1年間であったが、当時の助教授の吉田進先生、先輩助手の竹内勉先生には移動通信及び移動伝搬を教えて頂き、大変お世話になった。当時のM2の学生とは昼も夜も一緒に、先生には聞きにくいこと、例えば、移動通信の電波伝搬に関するシミュレーションの仕方などをM2の学生は優しく教えてくれた。今でもその学生たちとは1年に一度程度、友達みたいにして同窓会をしている。池上研究室は屋外伝搬測定車と呼ばれるマイクロバスを所有していて、測定機材を車に積み込み、ルーフに受信アンテナを設置して、頻繁に京都市内で伝搬測定を行っていた。その測定実験を通して、伝搬測定の仕方なども教わり、今ある私の電波伝搬に関する知識の基礎となった。



6. 教員としての研究生活

京大での博士課程3年次のときに、名工大の恩師である稲垣直樹先生から「名工大に来ませんか？」とお誘いを受けた。当時、就職活動をしており、一般企業の見学をしていたが、稲垣先生からのお誘いで、一気に大学教員としての未来像が私の中に芽生えた。そして、D3修了後の1年後（池上研究室での1年間を経て）、無事に名工大に助手として着任した。

名工大では、アダプティブアレーの研究に加えて、アレーアンテナを利用した電波到来方向推定技術、電波源位置推定技術にも取り組んだ。到来方向推定法としては、Beamformer法、Capon法⁽¹³⁾が古くからあり、それらはそれぞれアレーアンテナで言えば、フェーズドアレー、DCMPアダプティブアレーのビーム走査に相当する。1980年代に入ると、更にアレー受信信号の相関行列の固有値・固有ベクトルを利用したMUSIC (Multiple Signal Classification) 法⁽¹⁴⁾、ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 法⁽¹⁵⁾が提案され、高分解能アルゴリズムとして注目を浴びた。

私は1990年頃から、とりわけESPRIT法を用いた到来方向推定に力を注いできた。その一つのきっかけとなったのは、1989年に考案者であるRichard Roy氏に会うためにスタンフォード大を訪問したことである。対面でお話しを伺い、数式処理のみで直接、到来方向推定値が求められることに、ESPRIT法のきれいさを感じた。ただ、

ESPRIT法は行列の固有値分解を数回繰り返すので、「計算負荷は高くないですか」と質問したところ、「専用ICがやってくれるから問題ない」とあっさりと答えられ、「なるほど、余り問題にしていないのだな」と感じたことが思い出に残っている。このように直接お話しを聞く機会を持つことはモチベーションを上げるためには大切であると思った。

1990年代後半になると、アダプティブアレーと到来方向推定法への期待が高まり、本会アンテナ・伝播研究会主催の第9回と第10回「アンテナ・伝搬における設計解析 手法ワークショップ」で、「アレーアンテナによる適応信号処理技術と高分解能到来波推定入門コース」という講演タイトルで講師を務めた。テキスト作成では多くの実行委員の皆様から、貴重で時には厳しい御助言を頂いた。議論で熱くなることもあったが、本音で意見交換をすることができた良い経験である。このおかげで「アレーアンテナによる適応信号処理」(科学技術出版、1998年)、「アダプティブアンテナ技術」(オーム社、2003年)の著書を出版できた。

その後、アダプティブアレー技術を取り込んだ伝送技術が登場することになる。送信と受信の双方にマルチアンテナを用いることにより空間的に通信を多重化するMIMO (Multiple Input and Multiple Output) 伝送技術⁽¹⁶⁾である。更に、複数ユーザに対してMIMO伝送を行うマルチユーザMIMO (MU-MIMO: Multi-User MIMO) 技術⁽¹⁷⁾が考案された。MU-MIMOはSDMA (Space Division Multiple Access) を原理とするもので、代表的な制御アルゴリズムの一つとして、ブロック対角化法

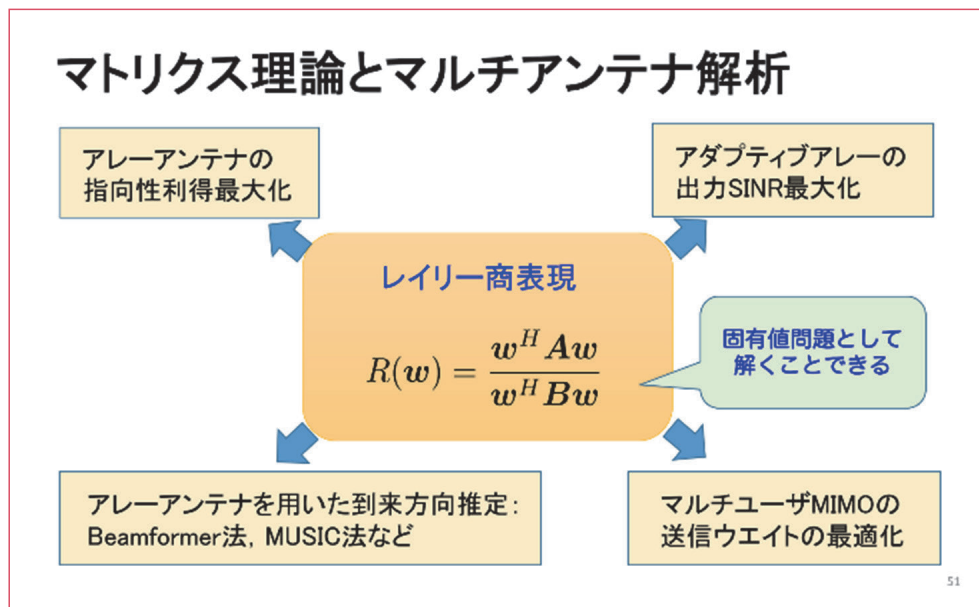


図5 レイリー商とマルチアンテナ解析 (マトリクスに魅せられて歩んだゴール)

がある⁽¹⁷⁾。このブロック対角化法がアダプティブアレーのパワーインバージョン (Power Inversion) 方式⁽¹⁸⁾と似ていることに着目して、ブロック SN 比 (Signal-to-Noise Ratio) 最大化法を提案した^{(19), (20)}。解析の結果、ブロック対角化法よりも性能が高いことを示した。アナロジーを利用した研究成果である。

以上のように、アダプティブアレー、到来方向推定、MIMO/MU-MIMO の研究を定年間際まで行ってきた、これらは全て行列のレイリー商で説明できることに気づいた。幾つかの特別講演では、講演最後のまとめに、アレーアンテナによる適応信号処理は全て、レイリー商で統一的に説明できることを話させて頂いた。まとめのスライドを図5に示す。このようにマトリクスに魅せられた結果、一つの大きなゴールに行き着いた。自分の最終講義でもお話しができたので、時間的にも間に合った感がある。私の場合、「石の上にも三年」ではなく、「石の上にも三十年」であった。



7. 学会を通しての横断的な研究活動

本会においては、アンテナ・伝播研究専門委員会委員／幹事／副委員長、革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA) 委員長、和文論文誌 B 編集委員長、ComEX 編集委員長、通信ソサイエティ副会長／会長 (理事)、東海支部長、総務理事等を担当してきた。ComEX は通信ソサイエティの英文レター誌で、立ち上げから関わった。委員会後はい

つも浜松町大門の居酒屋 (「ComEX の館」と呼んでいた。) で御苦労さん会を行っていたのが思い出深い。研究と関係の深いコミュニティはアンテナ・伝播研究会 (AP 研) と MIKA 研究会であった。

AP 研での思い出はたくさんあるが、ここでは、副委員長時代に毎月、技報の最終ページに掲載していた「アンテナ・伝播研究専門委員会からのお知らせ」⁽²¹⁾の執筆を紹介したい。私の担当は 2011 年 7 月号から 2013 年 5 月号までであったが、毎回、編集後記を自分の言葉で締めくくっていた。このコーナーの中では、シリーズとして「ユニタリな夜」から「マルコフな夕べ」まで (「本当にやさしいマルチユーザ MIMO」も番外編としてあった。), AP 研に登場する専門用語の幾つかと普段の研究生活を独断的に関係付けて、お届けしてきた。その全体の流れが図6である。また一例として、「ユニタリな夜」の説明スライドを図7に示す。このような調子で

よく使うが概念や説明が難しい言葉

ユニタリ (Unitary) な夜
エルゴード (Ergodic) な朝
エルミート (Hermite) な昼
レイリー (Rayleigh) な午後
マルコフ (Markov) な夕べ

繰り返す

図6 AP 研のお知らせの編集後記から

ユニタリ (Unitary) な夜

- ・ ユニタリとは「一体の」という意味。数学や物理の世界ではユニタリ性、ユニタリ変換、ユニタリ行列などの単語を耳にすることが多い。実数系では「直交」となる。
- ・ ユニタリ変換行列とは、内積が定義された複素ベクトル空間で内積を保つ変換 (内積値不変) を言う。アンテナの世界では内積でアレーアンテナ等の送受信電力を表すことが多々ある。従って、ユニタリ性は**電力不変 (無損失)**の変換性質とも言える。
- ・ ユニタリ行列の各列 (または各行) は正規直交基底ベクトル (大きさが全て同じ1で、異なるものは互いに直交するベクトル群) を成し、どの構成ベクトルも同等の役割を果たす。どれが欠けても全空間を表せない。
- ・ 皆さんと「**ユニタリな夜を過ごす**」という表現には、**共に過ごしたい方が一人でも欠ければ楽しさが半減し、その場自体が成立しない**という思いが込められている。つまり、**皆が一体となり、有意義な (無損失な) 夜を共に過ごす**ことを意味する。

図7 「ユニタリな夜」の説明

ほかの言葉についても解説をした。(異論はあるかと思うが。)このコーナーを毎月書くようになると、難解な専門用語のイメージ作りができるようになることから、AP研究会の中では話題となり、交流の潤滑油となったと思っている。

一方、MIKAは2018年に産声を上げた若い横断型研究会(第三種研究会)で、最初のMIKA2018は参加者200名規模の大研究会となった。温泉ホテル宿泊だったので、朝、昼、夜を通して、分野の垣根を越えた交流、情報交換ができた。当初、MIKAの進むべき方向については技術交流会等を開催しながら模索中ではあったが、学会内の関連研究会での発表の敷居を低くし、技術交流及び人的交流の活性化を目指してきた。更に既成概念に捕われず、問題の境界条件/課題の設定を様々な視点から試行錯誤することによって、新たな研究の取組みを思いがけないところから考えることができることも期待された。私にとって、MIKA研究会はもう一つのオアシスであり、MIKA2022を終えた後、委員長を退任したが、今でも専門委員として企画等に加わっている。実際に、MIKA研究会は楽しい会であり、幅広い年齢層からとても良い刺激を頂くことができた。また、人脈が分野の垣根を越えて広がっていくことを実感した。MIKA研究会には定年後も現役のつもりで関わってゆくつもりでいる。このような自分に合ったコミュニティを見つけることは重要なことであり、学会はその目的にはベストな場である。



8. おわりに

以上のように、進んでは立ち止まりながらの歩みであったが、振り返れば悔いのない充実した研究生生活を送ることができたと思う。多くの方々との出会いがあり、御理解と御助言を賜ったおかげである。また、研究室の学生の皆さんは、研究生生活を楽しみ、そして有意義なものにしてくれた。特に最後の年度のM2の学生たちには、1年間にわたり研究室の片付けを手伝って頂き、大変ありがたく思っている。今となっては、学生の姿がないことを時に寂しく感じるほどである。卒業生全員には心から感謝するとともに、共に過ごした研究生生活はかけがえのない思い出となっている。更に、家族(妻と子供たち)の理解と日々の支えがなければ、とても歩むことのできなかった研究の道であった。ここに改めて深く感謝したい。

技術の進歩に伴い、知らないこと・分からないこ

とはますます増えていくが、それに向き合おうとする知識欲と向上心は今もお衰えていないと思う。これからは少し歩みを緩めながらも、もうしばらく研究の道を進んでいきたいと考えている。

末筆ながら、本会の更なる発展と、皆様の御健勝、御活躍を心からお祈り申し上げる。

文献

- (1) 稲垣直樹, 菊間信良, “円形開口の固有波源と固有パターン,” 信学技報, AP82-34, June 1982.
- (2) B. Widrow, P. E. Mantey, L. J. Griffiths, and B. B. Goode, “Adaptive antenna systems,” Proc. IEEE, vol. 55, no. 12, pp. 2143-2159, Dec. 1967.
- (3) R. A. Monzingo, R. L. Haupt, and T. W. Miller, Introduction to Adaptive Arrays (2nd Edition), Scitech Publishing, June 2011.
- (4) 菊間信良, 鷹尾和昭, “干渉性妨害波に対するアダプティブアレイに対する動作,” 信学技報, AP83-20, June 1983.
- (5) K. Takao, M. Fujita, and T. Nishi, “An adaptive antenna array under directional constraint,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-24, no. 5, pp. 662-669, Sept. 1976.
- (6) K. Takao and N. Kikuma, “Tamed adaptive antenna array,” IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. AP-34, no. 3, pp. 388-394, May 1986.
- (7) N. Kikuma and K. Takao, “The tamed adaptive array for imperfect constraint due to mutual coupling or random input errors,” IEICE Trans. actions of IECE of Japan, Vol. E70, No.4, pp.430-434, April. 1987.
- (8) N. Kikuma and K. Takao, “A directionally constrained adaptive array with phase-only control,” IEICE Trans., vol. E86, no. 5, pp. 325-330, May 1985.
- (9) K. Takao and N. Kikuma, “An adaptive array utilizing an adaptive spatial averaging technique for multipath environments,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-35, no. 12, pp. 1389-1396, Dec. 1987.
- (10) 菊間信良, 鷹尾和昭, “アダプティブアレイ用適応型空間平均法に必要な自由度,” 信学論B, vol. J71-B, no. 12, pp. 1716-1718, Dec. 1988.
- (11) N. Kikuma and K. Takao, “Broadband and robust adaptive antenna under correlation constraint,” IEE Proc. Part H - Microw., Antennas and Propag., vol. 136, no. 2, pp. 85-89 April 1989.
- (12) N. Kikuma and K. Takao, “Effect of initial values of adaptive arrays,” IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst., vol. AES-22, no. 6, pp. 688-694, Nov. 1986.
- (13) J. Capon, “High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis,” Proc. IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.
- (14) R. O. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986.
- (15) R. Roy and T. Kailath, “ESPRIT - estimation of

- signal parameters via rotational invariance techniques,” IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proces., vol. 37, no. 7, pp. 984-995, July 1989.
- (16) 大鐘武雄, 小川恭孝, わかりやすい MIMO システム技術, オーム社, 東京, 2009.
- (17) 西森健太郎, マルチユーザ MIMO の基礎, コロナ社, 東京, 2014.
- (18) R. L. Riegler and R. T. Compton, Jr., “An adaptive array for interference rejection,” Proc. IEEE, vol. 61, no. 6, pp. 748-758, June 1973.
- (19) N. Kikuma, K. Nishimori, and T. Hiraguri, “Effect of user antenna selection on block beamforming algorithms for suppressing inter-user interference in multiuser MIMO system,” IEICE Trans. Commun., vol. E101-B, no. 7, pp. 1523-1535, July 2018.
- (20) N. Kikuma, K. Yonezu, and K. Sakakibara, “Performance analysis of block MSN algorithm with pseudo-noise control in multi-user MIMO system,” IEICE Trans. Commun., vol. E102-B, no. 2, pp. 224-232, Feb. 2019.
- (21) AP 研からのお便り . https://www.ieice.org/cs/ap/tcap/ap_news/
-

未来を実装する

——TRONプロジェクトのこれまでとこれから

東洋大学 INIAD cHUB 坂村 健 Ken Sakamura

1. プロジェクト前夜

TRON プロジェクトの「TRON」は、The Real-time Operating System Nucleus の頭文字を取ったものであり、1984年にスタートし2024年に40周年を迎えた。その名のとおり、組み込み機器や現在でいうIoTの「エッジノード」と呼ばれる機器に搭載するリアルタイムOSを開発するところから始まった。

私は1951年生まれだが、奇しくもこの年は、軍事研究から生まれたコンピュータの民間転用の第1号として米UNIVAC社が設立され、コンピュータが商用化された年でもある。私はコンピュータとの深い縁を感じ、学生時代から半世紀にわたりコンピュータの研究を続けてきた。

日本では、国内の電機メーカー各社が1960年代から大型コンピュータ（メインフレーム）の研究開発に乗り出した。当時、米IBM社の歴史的名機「System/360」が8割ものシェアを占めており、日本のメーカーもそのソフトウェアがそのまま動作する「IBM互換機」を開発することで成功を取っていた。

しかし、私が20代だった頃、半導体技術の進歩により「マイクロコンピュータ（マイコン）」という新しい波が生まれつつあった。米国では、いずれこのマイクロコンピュータが世界を席巻するだろうと予見されていたが、日本の産業界は依然として大型コンピュータに注力していた。やがて、この米国製の大型コンピュータの互換機を作って売るといふ、日本の戦略が米国の強い警戒を招き、様々な技術摩擦が表面化し始めた。

こうした時代に私は、大型機の路線を追い掛けるのではなく、これから生まれる新しいマイクロコンピュータを中心とした世界を創るべきだと考えた。そして1984年、日本で開かれた国際会議IMAC

(Conference) の場で、マイクロコンピュータのための全く新しいアーキテクチャを構築する「TRONプロジェクト」の立ち上げを発表した⁽¹⁾。

当時から、日本の中だけで閉じた研究をしていては良い結果につながらず、世界に打って出なければならぬと痛感していた。そこで、論文はできる限り米国のIEEEをはじめとした世界的な学会で発表し、書籍はシュプリンガー社から出版するなど、積極的に海外への情報発信を行った^{(2)~(4)}。こうした初期段階からの国際的な活動が、その後のプロジェクト発展に大きく寄与することになった。

海外のアカデミックな世界でTRONの名を広めたのは、1987年4月に発行されたIEEE Micro誌のTRONプロジェクト特集号だ。後述するITRON/BTRON/CTRON/TRONチップの各サブプロジェクトを詳細に解説した⁽⁵⁾ (図1)。

2. リアルタイムOS—ITRONからIEEE標準規格μT-Kernelへ

TRONプロジェクトは、リアルタイムOS「ITRON (Industrial TRON)」仕様の策定から始まった。当時、海外のリアルタイムOSは「産業用コンピュータ」と言われるハードウェア向けで、例えば航空機に使われるなど潤沢な電源やハードウェア資源を前提としたものが主流だった。一方、日本の産業界に



図1 IEEE Micro誌TRONプロジェクト特集(1987年)

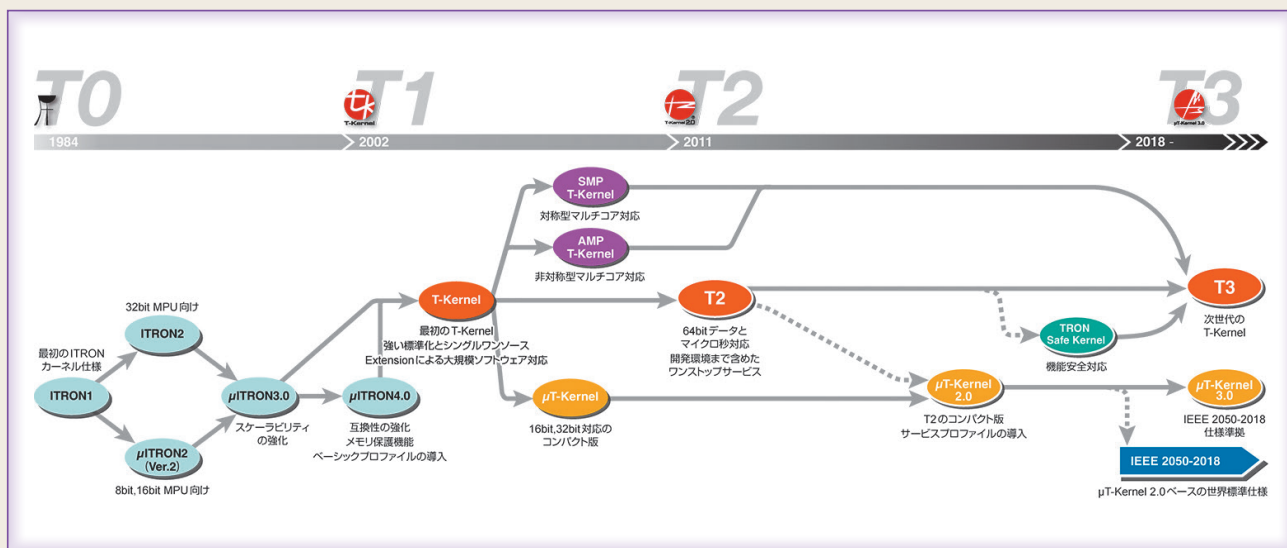


図2 TRON リアルタイム OS ロードマップ

求められたのは、小型の家電製品や電子機器で使えるマイコン用 OS だった。そこで ITRON は、限られたハードウェア資源でも高速なリアルタイム処理とマルチタスクを実現することに特化した。

ITRON の独自性は、その設計思想と標準化のアプローチにあった。当時の多くの OS が特定の企業による「製品」であったのに対し、ITRON は誰でも自由に実装できるオープンな「仕様書」として提供した。これは「緩やかな標準化」と呼ばれるアプローチで、OS の性能に直結する実装部分はあえて標準化せず、各メーカーが自社のハードウェア性能を最大限に引き出せるよう OS 実装の自由度を残したのだ。当時、コンピュータアーキテクチャ設計とはマイクロプロセッサの ISP (Instruction Set Processor) を定めることであり、それは私の専門分野であった。OS においても API (Application Programming Interface) という「仕様」とその「実装」を分離し、仕様を標準化し実装の自由度を確保する。この考え方は、私の専門分野から導き出される自然な結論だった。こうして ITRON は、省資源のハードウェアに徹底的に最適化しつつも高性能を引き出すリアルタイム OS を実現したことが、ほかの OS にはない大きな利点となった。

また、OS 仕様はオープンかつロイヤリティフリーとした。このため多くの企業が参画するエコシステムが形成され、特定企業の製品に依存するリスクがなく、日本の産業界全体で技術を発展させることができた。こうして多くの企業が ITRON 準拠の OS を開発し、自動車のエンジン制御、デジタルカメラ、電子楽器、そして小惑星探査機「はやぶ

さ」の制御コンピュータに至るまで、社会の目に見えない場所で幅広く利用されるデファクトスタンダードとなった。

その後、組込みシステムが高機能化・ネットワーク化するにつれて、より大規模なソフトウェアに対応できる次世代の OS として「T-Kernel」が開発され、T-Kernel からは IoT エッジノード向けの「μT-Kernel」へと、小型化の系統も進化を続けてきた (図 2)。これらの仕様は、現在もトロンフォーラムにおいてメンテナンスが続けられている⁽⁶⁾。

こうした長年の活動と普及が国際的に認められ、2018 年に μT-Kernel 2.0 に準拠した仕様が「IEEE 2050-2018」として IEEE の国際標準規格に採用された⁽⁷⁾。現在、IEEE が定める OS の標準は二つだけだ。一つは、クラウドやサーバといった情報処理システム向けの Unix に準拠した「POSIX (IEEE 1003.1)」であり、そしてもう一つが組込みシステム向けのこの μT-Kernel だ。TRON リアルタイム OS は、現代社会を支える無数の「もの」(Things)の頭脳をつかさどる世界標準 OS として認められることになった。

3. TRONサブプロジェクトの展開

TRON プロジェクトは、組込み用 OS だけでなく、コンピュータシステムを構成する各階層において、それぞれ目的の異なる OS や、それを動かすための CPU まで含めた包括的なアーキテクチャとして進められた。

BTRON (Business TRON) は、パーソナルコン

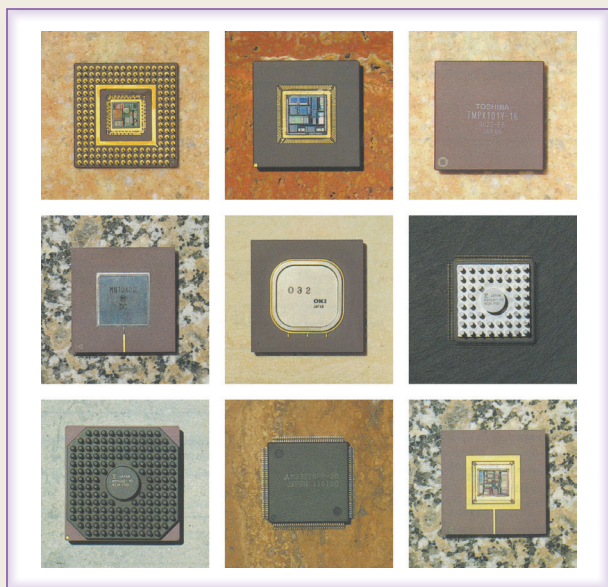


図3 TRON チップ

コンピュータ向けの OS 仕様だ。1985 年に最初の構想を発表し、キーボード入力が主流だった時代に、電子ペンといったポインティングデバイスでの操作を前提とした、先進的なヒューマン・マシン・インタフェースを提案した。ITRON と同様に仕様をオープンにし、緩やかな標準化に基づき各社が自由に実装する方式を採った。そして文部省と通商産業省（いずれも当時）は、BTRON を教育用パソコンとして採用するという計画を進める。しかし、当時激化していた日米貿易摩擦のあおりを受け、1989 年に米通商代表部（USTR）がまとめた不公正な貿易障壁に関する数百の候補の一つとして、BTRON の名前が挙げられた。このことが日本では「日本の教育用パソコンとして BTRON の採用が困難になる」と報道された。オープンに進めていたプロジェクトであり、BTRON の開発試作機を米 IBM 社も作っていたことなどから、後に候補からは外されたが、日米貿易摩擦の騒動に巻き込まれるという経験もした。後に明らかになったことだが、候補リストに加えられたのは、米国製ソフトウェアの国内販売を手掛ける、ある日本の（！）会社の米国法人が USTR に訴えたためであった。日本の独自技術開発の困難さを改めて思い知らされる出来事であった。

CTRON（Central and Communication TRON）は、通信制御や大規模な情報処理を担う OS であり、社会インフラに求められる高い信頼性とリアルタイム性能を実現した。その構成は、OS の核となるカーネル部分を TRON 仕様で標準化し、その上で動作する上位層のシステムを日本電信電話公社（当

時）が担うというもので、同社の電子交換機に全面的に採用された。長年にわたり日本の通信網を支えるだけでなく、海外の通信装置にも採用されるという成功を収めた。

TRON チップは、これらの OS を効率的に動かすための CPU 仕様だ。命令セット（ISP）を標準化し、オープン仕様として公開された。様々な半導体メーカーが互換チップを製造できるようにすることで、ソフトウェア資産が蓄積されるエコシステムの構築を目指した。その結果、各社から多種多様な CPU が出荷され、多くの製品やシステムに搭載された（図 3）。また、独自のアーキテクチャに基づきゼロから 32 ビット CPU を開発したこの経験は、日本の半導体メーカー各社が高性能 CPU を自社開発する技術力を高める上で、大きな貢献を果たした。

4. HFDS(Highly Functionally Distributed System, 超機能分散システム)

前述のように、TRON プロジェクトは大型コンピュータが主流であった時代に、その対極にある新しいコンピュータの潮流である「マイクロコンピュータ」の将来性に着目したところから始まった。しかし、単にマイクロコンピュータの将来性を唱えるだけではなく、プロジェクトが目指す未来像を広く理解してもらうため、マイクロコンピュータが可能にする新しいビジョンを提示することにした。それが「HFDS（Highly Functionally Distributed System, 超機能分散システム）」という構想だ（図 4）。

これは、1 台の巨大なコンピュータが全てを中央集権的に制御するのではなく、例えば生活空間に存在するあらゆる‘もの’にマイクロコンピュータが組み込まれ、それらが協調して自律的に動作するという未来像を示したものだ。HFDS の世界では、住宅、家電、家具といった‘もの’にコンピュータ、センサ、アクチュエータが内蔵され知能化する。TRON プロジェクトでは、これを「インテリジェント・オブジェクト」と呼び、無数のインテリジェント・オブジェクトをネットワークで相互に接続させ、協調動作させる。

当時、私が「どこでもコンピュータ」と言っていた、この HFDS の構想は後に「ユビキタス・コンピューティング」や「IoT」といった言葉で呼ばれるようになり、現代の IoT エッジノードの概念の先駆けとなった。

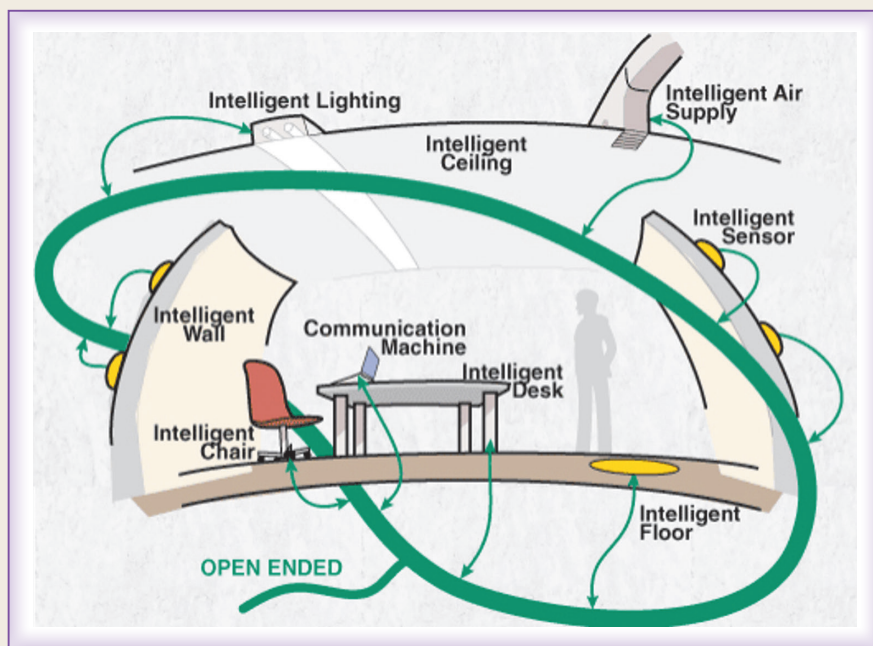


図4 HFDS (Highly Functionally Distributed System) (1987 年)

5. 「TRON 电脑住宅」とそれに続く系譜

HFDS の考え方を初めて具体化したのが、1989 年 12 月、東京・六本木に建設した「TRON 电脑住宅」である (図 5)。この住宅では、キッチン、トイレ、窓、照明、空調といった住宅設備の中にコンピュータ、センサ、アクチュエータが組み込まれ、それらがネットワークで相互に接続されていた。

例えば、屋根に設置された気象センサが外の温湿度や風を検知すると、その情報が窓のシステムに伝わり、居住者にとって最も快適な環境になるよう自動で窓を開閉する。もし雨が降ってくれば、窓は自動で閉まり、今度は空調システムに室内の環境調整を引き継ぐよう連携する。ほかにも、ピアノを弾こうとすれば、隣家の状況を確認し、迷惑にならないよう自動で窓を閉めてからピアノに音を出す許可を伝えるといった、きめ細やかな協調動作を実験した。こうして住宅機器同士が連携することで、住宅全体で居住者の快適な生活を支援するという実験を繰り返した。

この実証住宅は、日本国内だけでなく海外のメディアからも関心を集めた。米国の科学誌「Popular Science」で特集が組まれたほか、英 BBC でもその内容が報じられるなど、国際的にも広く紹介された。

この TRON 电脑住宅で得られた知見は、より汎用的な「ハウジング OS」や「ビルディング OS」という概念へと引き継がれた。これらは、メーカーの垣根を越えて様々な設備機器をオープンな API



図5 TRON 电脑住宅 (1989 年)

で連携させ、住宅やビル全体を一つのコンピュータシステムとして機能させるためのソフトウェア基盤である。2004 年には、トヨタ自動車との共同研究により、未来住宅「トヨタ夢の住宅 PAPI」を建てた。まだスマートフォンが登場する前のことであり、TRON プロジェクトで開発したユビキタス・コミュニケーター (UC) を使って、家電・住宅設備機器を制御した。2010 年には台湾で、それまでのアイデアを実用的なコストで提供することに重点を置いたモデルルーム「u-home」が建築された。これは、ハウジング OS を使って快適性と省エネルギーの両立を目指したものであった。

更に、このコンセプトを個人住宅から大規模な建築物へと応用していった。2014 年に東大内に建設した「ダイウユビキタス学術研究館」は、建物自体が TRON の技術を結集したインテリジェントビル



図6 INIAD HUB-1（東洋大情報連携学部）

ディングであり、主要な設備機器がネットワークに接続され、オープンな API を通じて制御可能な「プログラマブル建築」として設計した。この技術は、2017 年に筆者が創設した東洋大情報連携学部 (INIAD) のキャンパス「INIAD HUB-1」へと発展した (図 6)。INIAD の校舎には約 5,000 個の IoT デバイスが設置され、建物全体が IoT の教材として機能する環境を実現した。これらの建物では、学生自身が API を使ってアプリケーションを開発し、例えば、実習中の教室の照明を音声で制御したり、スマートフォンで開閉できる自分専用のロッカーシステムをプログラミングしたり、といった実践的な教育や研究が行われている。

現在は、UR 都市機構との連携による「Open Smart UR」プロジェクトを進めている。2019 年の「スタートアップモデル住戸」、2022 年の「生活モニタリング住戸」など、既存の団地をリノベーションし、IoT と AI 技術を活用して、高齢者を

はじめ多様な居住者の生活を支援する研究開発を続けている。

6. IEEEマイルストーン

このように TRON プロジェクトを振り返ると、TRON が達成した技術開発は、ソフトウェア階層における「上端」と「下端」にあったと言える (図 7)。そしてこの上端と下端の両輪でプロジェクトを進めてきたという独自性が評価され、2023 年、2024 年と 2 年連続で二つの技術が IEEE マイルストーンに認定された。

IEEE マイルストーンは、学術的な成果だけでなく、その技術が産業界で広く利用されているという、実績が条件となる歴史的技術遺産を認定する制度である。TRON プロジェクト開始時から数多くの英語情報を海外に発信し続けたことが、認定において重要な役割を果たした。

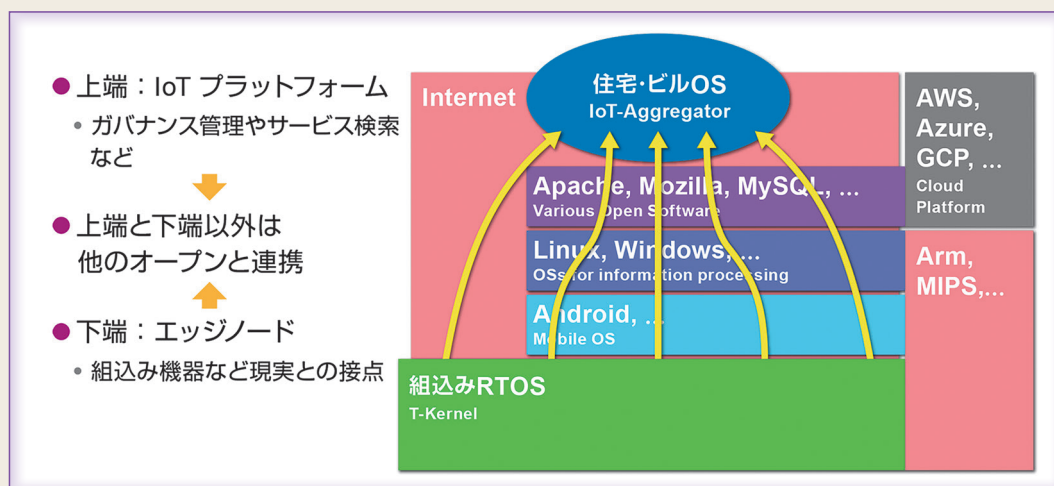


図7 TRONのターゲットは「上端」と「下端」

2023年に、まずプロジェクトの基盤技術である「TRON リアルタイム OS ファミリー」が認定された。TRON のリアルタイム OS が自動車のエンジン制御、人工衛星やロケット、デジタルカメラといった、国内外の多様な組込みシステムに長年にわたり採用され、社会基盤として貢献してきた実績を評価するものだった。

翌2024年には、TRON プロジェクトの応用展開の一つである「TRON 電腦住宅」が認定された。これは、IoT やユビキタス・コンピューティングといった概念を実用レベルで示した初期の事例として、その先進性と後続の技術への影響力が評価されたものである。

7. オープンアーキテクチャ

TRON プロジェクト、そして私の研究キャリアを貫く最も重要な思想は「オープン」である。今でこそ GNU プロジェクトや Linux の成功により、オープンソースという考え方は世界の技術開発の主流となったが、TRON プロジェクトを始めた1984年当時、技術を無償で公開するという理念は、産業界からなかなか理解されなかった。

この発想の原点は、私が20代の頃に経験した米国での体験にある。当時訪れた AT&T ベル研究所では、開発途中の Unix のソースコードや B 言語 (C 言語の前身) のコンパイラのソースコードを土産に渡してくれるような、オープンでおおらかな文化が息づいていた。誰かの成果に感化されて新しいものが生まれ、それが更に共有されて発展していく。この「知の連鎖」を目の当たりにし、未来の社会基盤となるコンピュータは、独占されることなく皆で協力して発展させるべきだと強く確信した。

この考え方は現代において、より一層重要性を増している。例えば、現在の AI 分野における目覚ましい発展は、Google 社がその基本技術の特許で独占せず、論文として公開したことに大きく支えられている。

現代の複雑なテクノロジーは、もはや1社で閉鎖的に開発できるほど単純なものではない。ビジネスの核となる「競争領域」とイノベーションの基盤となる「協調領域」を明確に区別し、協調領域については積極的にオープンにする。そうすれば、世界中の誰かがその技術を使い、不具合を報告し改良してくれる。自分たちだけで開発するよりも早く機能

や性能を高め、システムの信頼性を向上させることができる。

残念ながら、日本ではこのオープンイノベーションという基本的な考え方が根付かなかった。「技術を囲い込め」という発想が強く、自社の製品は自社のアプリケーションでしか制御できない、といった閉鎖的なシステムを作り続けた。結果として、あらゆる‘もの’が API を通じて連携する IoT の時代から取り残され、かつては世界を席巻した多くの家電メーカーが凋落してしまったのは残念なことである。

8. これからのTRONプロジェクト

今 TRON プロジェクトは、エッジノードにおける AI の実装に注力している。近年の AI 技術、特に LLM (大規模言語モデル) の発展は著しいが、それをそのままリソースの限られたエッジノードに搭載しようとすれば、コストや消費電力の増大を招き、組込みシステムの利点を損なってしまう。一方、全ての AI 処理をクラウドに依存する手法は、EU (欧州連合) のデータ法に代表されるプライバシー保護の潮流に逆行するだけでなく、ネットワーク切断時に機能不全に陥るという信頼性の課題を抱えることになる。

こうした課題に対し、TRON プロジェクトが進めるのが、人間の「反射」と「獲得知性 (LLM に相当)」の中間に位置する「本能モデル」をエッジノードに組み込むというアプローチである。これは、単純な条件反射 (従来のリアルタイムシステム) を超え、しかし LLM ほど大掛かりではない、効率的で賢い判断能力をエッジデバイス自身に持たせることを目指すものである。

エッジノードらしく、省電力かつリアルタイムに応答しつつも、自律的な判断能力を持つ新しいインテリジェンス——これこそが、これからの時代、真に競争力のある製品開発の鍵になると考えている。

9. おわりに

TRON プロジェクトは、発足当初から国のプロジェクトではなく、純粋な民間プロジェクトとして歩んできた。2024年に40周年という大きな節目を迎えることができたのも、ひとえに長きにわたり活動を支えて下さった全世界1,000以上にのぼる企業や団体の皆様の御支援の賜物であり、この場を



図8 武田賞受賞 (2001 年)

借りて改めて感謝を申し上げたい。

幸いにも、TRON プロジェクトの活動は国際的にも評価を頂く機会があった。2000 年には日本の独自技術の発展に貢献したことが認められ、市村学術賞特別賞を受賞。2001 年にはオープンアーキテクチャの推進という活動の功績により、GNU プロジェクトのリチャード・ストールマン氏と Linux のリーナス・トーバルズ氏とともに武田賞を受賞した (図 8)。2015 年には、TRON が IoT を世界に先駆けて提唱した功績で、国際電気通信連合 (ITU) から「ITU150 Awards」を受賞した。2023 年には、家電技術の貢献に対して、IEEE Masaru Ibuka Consumer Technology Award を受賞した。過去にはリーナス・トーバルズ氏や Apple 共同創業者のスティーブ・ウォズニアク氏も受賞している賞だ。

これらの栄誉は、私個人に与えられたものではなく、これまでプロジェクトに関わって下さった全ての皆様を代表して頂いたものだと思っている。

TRON プロジェクトは、これからもオープンアーキテクチャの理念に基づき、来たるべき社会の基盤となる技術開発を進めていきたいと考えている。

文献

- (1) K. Sakamura, "TRON PROJECT," Proc. 4th Int. Micro Comput. Appl. Conf.(IMAC), Japan Electron. Industry Dev. Assoc., May 1984.
<https://dblp.org/db/journals/micro/micro7.html>
- (2) K. Sakamura (Ed.), "TRON Project 1987-TRON Project 1990," Springer-Verlag, 1987-1990.
<https://link.springer.com/search?new-search=true&advancedSearch=true&sortBy=relevance&query=&title=TRON+Project&contributor=Ken+Sakamura>
- (3) "Proceedings of the TRON Project International Symposium," IEEE Comput. Soc. Press, 1991-1996.
<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/1000768/all-proceedings>
- (4) "μITRON 3.0—An Open and Portable Real-Time Operating System for Embedded Systems—Concept and Specifications," IEEE Computer Society Press, 1997.
<https://dl.acm.org/doi/10.5555/523534>
- (5) "Japan's TRON project tantalizes the international computer industry," IEEE Micro, vol. 7, no. 2, April 1987.
<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=4089802&punumber=40>
- (6) TRON Forum. <https://www.tron.org/>
- (7) "IEEE 2050-2018, IEEE Standard for a Real-Time Operating System (RTOS) for Small-Scale Embedded Systems," 2018.
<https://standards.ieee.org/ieee/2050/7178/>

坂村 健

東京大学・東洋大学名誉教授。1974 慶大・工・電気工卒、1979 同大学院工学研究科電気工学専攻博士課程了、工博。1979 東大・理・情報科学助手を経て、2000 東大大学院・情報学環・学際情報学府教授、2017 東大名誉教授。INIAD (東洋大学情報連携学部) 創設者、同 cHUB (学術実業連携機構) 機構長。IEEE Life Fellow, IEEE Golden Core Member。

2000 市村学術賞特別賞、2001 武田賞各受賞、2003 紫綬褒章受賞、2006 日本学士院賞、2015 ITU150 Awards、2023 IEEE Masaru Ibuka Consumer Technology Award 受賞、2024 瑞宝中綬章受章。



筑波大学 登 大遊 Daiyuu Nobori

1. 技術の問題の解決

SoftEther VPN の開発においては、前編で説明したような方法で、IPA（独立行政法人情報処理推進機構）の予算のほか、中古機器や廃棄物品などを拾い集め、失敗許容性が高い装置群を安価に入手し、設計・開発・テストは自ら行い、外注しない方針にして、⑦コストの問題を解決することにした。そして、いきなり④技術研究をするのではなく、本来目的のプログラミングをすることをしばらく懈怠（＝なまけること）し、まず、自宅データセンタの自作などをして単に遊んでいた。このことが、結果的に、短期間での④技術形成につながったと考える。以下、当時の状況について詳述する。

当時、筑波大の学生の間では「Winny」⁽¹⁾ というファイル交換システムが大いにはやっていた。だが、大学当局によって WiFi のファイアウォールでポートが制限されていたので、学生は授業中にノートパソコンの WiFi で Winny ができず、誠に困っていた。そこで、周囲の学生たちは、「登の家には、IPA のグローバル IP アドレスがたくさんあり、IPA のサーバも数台あるのだから、それで、共有



図1 周囲の学生たちの熱心な要望によって構築した Winny サーバ（左側）

Winny サーバを作ればいい」と言い出した。そこで、筆者らは、筆者が IPA の予算で調達した DELL のサーバのうち、結構体格のいい 1 台（SoftEther VPN の開発はさぼっていたので、DELL のサーバ・マシンが使われず余っていた。）に、「Winny サーバ」というラベルを貼り、これを勢いよくセットアップした（図 1）。何とそのサーバは RAID 5 のエンタープライズ的なストレージ機能も付いていたので、大容量ストレージを作ることもできたのである。

ついでに、IPA の予算で契約したソフトウェアのシンクライアント（今で言う VDI）機能を用いて、多数の同級生や先輩などの大学生に、実験的にアカウントを発行した。学内 LAN からであれば Winny サーバのアカウントを自動で発行するオンライン・サインアップ・システム等も自作した。この Winny サーバを構築・運用する過程で、ネットワークやセキュリティに関する知識、OS に関する知識、プログラミングに関する知識、すなわち④技術研究の前提として必要な知識全般を、極めて短期間に、効率的に、高品質に習得することができたのである。これらの知識は、Winny サーバを運営する前には全く持ち合わせていなかった。一時期は、SoftEther VPN の開発を放ったらかしにして、何週間か、こういうことばかりやっていたのである。しかし、今から考えれば、SoftEther VPN の開発をいきなり開始するのではなく、こういう無関係な「Winny サーバ」のような遊びシステムの構築を開始したことが、技術的必須知識の習得行為として、非常に重要であった。もし、このような言わば「インチキ・プロセス」を怠っていたならば、OS、ネットワーク、セキュリティ、コード開発、デバッグの知識が不十分なまま、すなわち④技術形成が不十分なまま、SoftEther VPN の開発に着手せざるを得ず、僅か 6 か月間でそれなりの品質の開発は、決して成功しなかったであろう。

さて、本件 Winny サーバのユーザたち（同級学

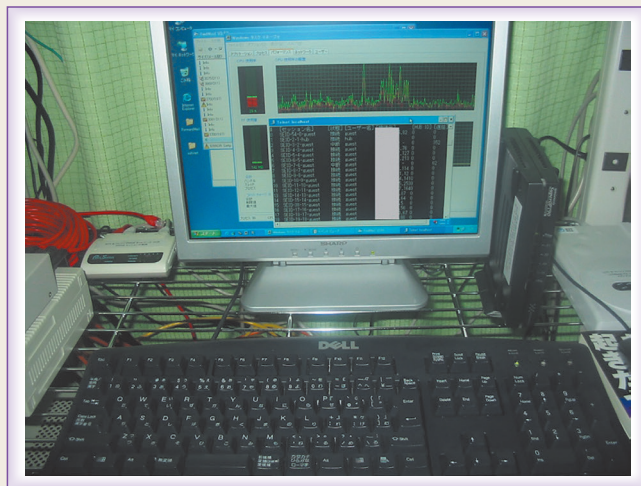


図2 多数の筑波大の学生が同時に開発中の SoftEther VPN サーバにアクセスしている様子
(右側の黒い装置がルータで、この実験環境専用の固定グローバル IPv4 アドレス 8 個が割り当てられている)

生等)は、筆者の自宅データセンタに置かれた、官給品と官給プロバイダ契約の「不謹慎的共用 Winny サーバ」にログインし、筆者が未踏ソフトの予算で契約したグローバル IP アドレス回線に、毎日、大量のトラフィック負荷を掛けるのである。今から考えると何と不謹慎なことであろうか、とも思われるのである。更に、この Winny サーバは筆者のプログラミングに使用していた機のすぐ横にあり、24 時間、大変な熱とハードディスク騒音を放っていた。電源を落とすとすぐにユーザから苦情が出るので、常時稼働させなければならない。前編で触れたとおり、電子レンジは廃止になったが、ドライヤーすら使いづらくなった。

そして、当時の未踏予算で契約したグローバル IP 8 個×2 本のうち、1 個の IP アドレスは、何かセキュリティ・インシデントで問題になったときにも、大変分かりやすいようにするため、DNS 逆引きを正しく設定するようになっていた。具体的には、DNS 名に「winny.softether.com」と出てくるようにしていた。その名のとおりである。ところで、あるテレビニュースで Winny の画面が放映されたとき、専門家が出演して、Winny 通信の分析結果のノード一覧という画面を出した。その画面は大変よくできていて、DNS 逆引き結果が大きなゴシック体太字の文字で表示されていた。その中で、我々のこの IP アドレスと「winny.softether.com」と明記した DNS ホスト名が、大変目立って映ったこともあったのである。

更に、利用学生たちはその Winny サーバへ、大学 WiFi からスムーズに接続・通信するために、まさに、筆者が開発中のアルファ版（ベータ版よりも

前の、一般公開前の試作版のことであり、当時の筑波大の情報学類の知人などに、是非使って下さいと言って、配布していた。)の SoftEther VPN を使い始めたのである。学生たちが授業中に Winny サーバの画面に遠隔ログインしようとするとき、大学の WiFi のファイアウォールのポート制限により、HTTP/HTTPS という Web 通信のポートしか開いていないので、大学 WiFi から Winny を使うには、筆者が開発中の SoftEther VPN を用いて、トンネリング通信してアクセスすることが必要であったためである。

加えて、利用学生が Windows ファイル共有というプロトコルで接続する際にも、開発中の SoftEther VPN が多用されていた。すなわち、利用学生が Winny で何らかの数 GByte もの巨大なファイルをダウンロードしたら、それはまだサーバ上の共有ディスクのホームディレクトリに保管されているにすぎないから、それだけではまだ、ファイルを手元で楽しめない。そこで、利用学生は最終的に、自分の手元のパソコンのローカルディスクにダウンロードする必要がある。Winny サーバでは、FTP と Windows ファイル共有が利用できるようになっていたが、いずれも大学の WiFi のファイアウォールで遮断されてしまう。そこで、利用学生は、Winny サーバとの間で、大学のファイアウォールを超えて Windows ファイル共有を接続する必要があった。

このような理由で、利用学生は Winny サーバへの SoftEther VPN の接続の際に、様々なコンピュータから、様々なクライアント OS の様々なバージョンから、接続をしてくるのである (図 2)。



図3 2003年7月から12月頃に SoftEther VPN の開発中ベータ版を利用していた複数の学生がたむろしていた大学の学生室（WORD 編集部屋）



図4 2003年秋頃から、複数のコンピュータを大学の学生ラウンジに置いて自由に使えるようにし、自宅の SoftEther VPN Server に接続して負荷を掛けて試していた。写真はそのうちの1台で、なぜか Microsoft 社から無償で貸与されたコンピュータである。

彼らは、学内の WiFi から接続することも、大学院の研究室の有線 LAN から接続することも、自宅から接続することもあった（図3, 4）。この際、2003年7月末には非常に低い品質であった SoftEther VPN の試作版に含まれるバグは、前述のような多数の利用学生のコンピュータを、ひんぱんにブルースクリーンにし、クラッシュさせたのである。当時のパソコンは、長期記憶装置はハードディスクしかなく、とても遅かったので、ブルースクリーンが発生すると、ダンプファイルを書き込むために数分間待たされた。利用学生の一人が、筆者のコードが原因でブルースクリーンになると、MSN Messenger というメッセージアプリ（今で言う LINE や Slack のようなものである。）で、オンラインであったその者が突然オフラインになる。そし



図5 SoftEther VPN の開発に使用していたマシン。なお、右上に載っているのが当時の自宅の光ファイバ回線の B フレッツの ONU と、図2とは別の固定 IPv4 アドレス8個の国産 PPPoE のルータ。

て、数分たつてまたオンラインに戻ると、「こらバグでまたクラッシュしたぞ」というように、チャット画面でいろいろ文句を言ってくるのである。そういう場合には「MEMORY.DMP」という名前のダンプファイルを送ってもらうのであるが、数百 MByte あるので、やはり、先ほどの Winny サーバの共有フォルダを経由して送付してもらうことになるのである。（それにも開発中の SoftEther VPN が使われるのである。）それを筆者は開発用マシン（図5）で windbg というプログラムを用いてデバッグをし、アセンブラレベルでクラッシュ箇所を特定して、その部位のコードを目を皿のようにして分析し、リビルドして、先ほど苦情を言ってきた利用者に最新版を送付し、試してもらう。利用者も、その最新版でバグが直っていれば、Winny サーバとの通信中にひんぱんにクラッシュする問題から解放されるという明確な利益があるから、かなり真剣に、最優先でテストをしてくれるのである。

このような過程の繰り返しで、SoftEther VPN の開発中のアルファ版の品質は、数か月間を掛けてどんどん向上していったのである。SoftEther VPN の最初の一般公開ベータ版は、2003年12月17日にリリースされたが、そのときには、既に随分とアルファ版のテストによる品質向上を経た後だったので、それなりに不具合は少なく、高評価を得ることができ、SoftEther VPN の開発は、結果的に成功したのである。

このように、ある一定程度以上に高度・複雑なソフトウェアの誕生、品質の向上には、その過程において、前述のような「少し変な目的」における面白

さを優先した「熱中の試行錯誤」が極めて重要であることは、歴史が証明していることでもある。著名な例をみると、UNIX が誕生した AT&T ベル研究所では、UNIX の開発者たちの開発契機は、「スペース・トラベル」という惑星間宇宙飛行ゲームを、会社のコンピュータで自作して遊んでいたことにある⁽²⁾。1969 年に AT&T が、仮に社員たちが「スペース・トラベル」で遊んでいることをうさく見とがめて抑制をしていれば、UNIX は誕生しなかった。その場合、現代社会には C 言語すら存在せず、もちろん、Windows も Java も Python も、Google も AWS も出現せず、現代の豊かな IT 時代は実現できなかったはずである。

自前でインターネット基盤やパブリッククラウド基盤を開発することに成功している、日本有数のプラットホームであるさくらインターネット社の田中邦裕氏も、その成功要因として「高専在学中に研究室にあったサーバを勝手に Web サーバにして、友だちにサーバをレンタルすることが起源」であると述べている⁽³⁾。ネットワークに関連するソフトウェアを作るときには、既存のネットワークを活用できる環境を手に入れ、その上で同輩がログインしていろいろと遊べるような負荷がかかる環境を作り、次に、その負荷を支えることができるシステムを自ら開発することが重要である。

技術問題の解決手法をまとめると、次のようになる。2003 年に筆者が IPA 未踏ソフトに応募し、契約により課せられた課題は SoftEther VPN の開発であったが、いきなりその開発を開始するのではなく、むしろ、前記のような、余り計画的とは言えない試行錯誤手法で、IPA の予算で自宅データセンタ、自宅サーバ群を構築・運営することで、逆に、高品質な通信システムソフトウェアの開発を行う環境が自然に形成されたのである。そして、その環境を用いて、そのソフトウェアの開発中のバージョンの品質向上のプロセスを自然に進行させることができたのである。

仮に、IPA が開発プロセスのスケジュールや進捗について、「ガントチャート」等を要求し、いちいち細かく管理してきたならば、あるいは、これらの官給サーバやソフトウェア、回線、グローバル IPv4 アドレスの用途について、いちいち細部を検査してコントロールしてきたならば、筆者は SoftEther VPN の開発には絶対に成功しなかったのである。IPA 未踏事業に関して、経済産業省や

IPA の懐は誠に深いものである。高度、複雑なソフトウェアの開発プロセスには、米国 IT 発展史の歴史上の事実を基礎としてみても、このような「遊びの要素」が必要不可欠であることは、20 余年も前から、日本の政府関係者によって十分に認識・理解されていたのである。

2. まとめ

本稿では、SoftEther VPN 開発物語として、黎明期、特に最初のベータ版を開発・初公開するよりも以前において行なった、2003 年 7 月から 12 月の間の問題解決の過程を述べた。

SoftEther VPN のような、システムに密接に関連した、ある程度高度複雑で、品質を要求される通信ソフトウェアの開発においては、大企業的な正攻法ではコストが掛かり過ぎ、また、品質の高いものがなかなか作れない。特に、個人開発においては、コストを低減し、必要な予算を確保すると同時に、自らの技術力を形成・蓄積する必要がある。同時に、個人として利用可能な各種の資源を最大限に活用する必要がある。良質なソフトウェアを作るためには、開発・試験環境を整える必要がある。

特に、ネットワークに関連するシステムソフトウェアを開発する際には、自由な実験用ネットワークが必要である。SoftEther VPN の開発において行った、特に重要な工夫は、いきなり目的ソフトウェアの開発を開始するのではなく、言わば遊び目的のサーバやシステム、ネットワークを組んでみて、それを使って楽しんでみることで技術力を自然に形成するとともに、その過程で必要なソフトウェアを作るという流れで開発を行う点である。これには、自宅サーバ置き場や、固定のグローバル IP アドレス、少数のある程度の品質のサーバコンピュータと、多数の「ジャンク品」的なコンピュータや部品群を手元に置いておき、思い立ったらいつでもそれらを組み上げて、実験できる状態を維持することが効果的である。

筆者は、SoftEther VPN の最初のベータ版の開発までは、大学や IPA の資源を活用しつつ、自宅に作った「データセンタもどき」で開発を完了させることができた。こういうことは以前はむしろ学生でなければ難しいかもしれない。社会人になってからこれをまねすることは困難と思われるかもしれない。

だが、それは過去のことである。近時みられるす

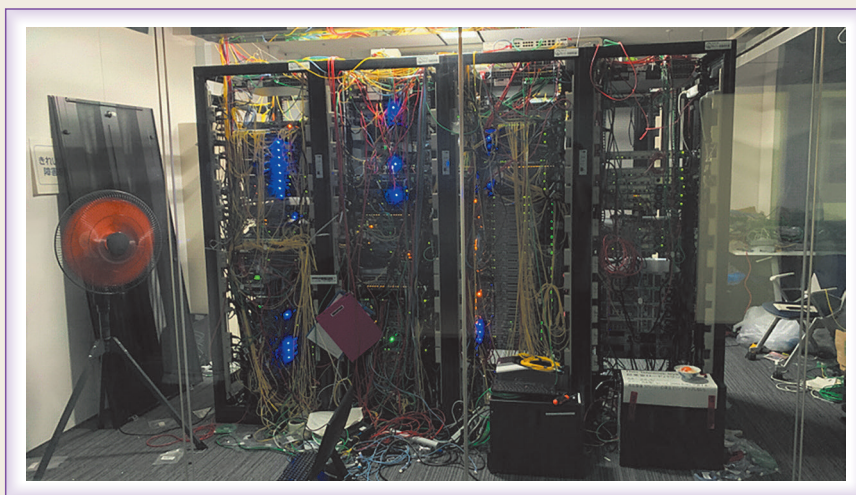


図6 例えば、独立行政法人情報処理推進機構（IPA）は、2017年頃から行政事務とは別に自由な「サーバ試行錯誤スペース」を構築している。



図7 行政主体の中において、職員たちで電話局の中に自前の通信ラックを立ち上げ、ダークファイバ等を借り受けて通信キャリアと対等にネットワークを内製化する動きがある。（写真はIPAの内製通信架）

ばらしい傾向がある。それは、日本の企業・大学・行政主体（国及び地方自治体）の中において、真に価値がある（見掛け上ではない）高度なIT人材育成を目的として、社員・職員のために、業務系のITシステムやネットワーク（「厳格なシステム」と呼ぶべきであろう。）とは完全に独立した、試行錯誤・技術革新用のサーバ置き場やネットワークが自然形成される現象の発生である（図6）。「自由なシ

ステム」とも呼ぶべき、それら技術革新用の環境やネットワークの構築・運用・セキュリティ管理も、外注ではなく、メンバーたちが自前で実施するという傾向にある。それによりますます職員・社員のIT技術力が組織的に向上するのである。一部の行政主体や大企業でも、自組織の中に閉じた試行錯誤環境を作るだけでなく、ほかのユーザをホスティングすることができるような、ISPやクラウド事業者と等格なBGPインターネット・バックボーンや通信設備群まで、ダークファイバ等を活用し、職員・社員による内製で自作している（図7）。

そして、興味深いのは、そういった活動が決して単一の組織に閉じることなく、複数の組織、場合によっては競合同士で協力し合い、あるいは通信キャリアとも連携して、これが盛大に行われ始めているという点にある。それは、組織経営者の側が、そのような活動がDXやイノベーションを引き起こす上で非常に重要であると考え、健全な黙認・奨励を行うようになってきていることも原因であろう。他人、特に外資企業の作ったクラウドやネットワーク等のソフトウェア基盤の「監房」の中に入れられて、単に被收容ユーザとしてそれらを利用しているにすぎないITユーザ的行為は、誰でもそれができるから、優位性も得られず、リテラシーを低下させ組織をぜい弱にさせる問題がある。そして、他人構築のプラットフォームは、コスト削減効果も低いどころか、むしろコストが増加することが社会問題となっている⁽⁴⁾。

加えて、仮にこういった外来基盤を活用するビジネスを立ち上げたところで、一番おいしい部分がまるで「税金」のように外国に吸い上げられ、十分な

利益も生じない。そして、扱うデータが外国の私的 IT 技術者勢力によるコントロールを受け、傍受及び改変され、統治や安全保障上の問題をも発生させるリスクが増大する「現実的危険」が生じている。日本以外の先進国では、同様のセキュリティ意識から、外国人の作るクラウド基盤を無規範に利用することを避ける対策を講じること⁽⁵⁾、また、自国で IT 基盤を作ることを推進する方針が、政府組織や首脳から、ひんぱんに表明されている^{(6), (7)}。日本でも、同様に、官庁や大企業の有能な政治家・経営者たちも、このことに気付いているようである。日本の各組織のトップ層が若手人材よりもむしろ先に、このことに気付き始めているのである。そこで、日本の各組織では同時並行的に、この問題の根本的解決のために、前記のような IT 技術革新を自然に引き起こす環境を形成しようと、努力が開始されたのである。IT 技術立国という目標に目を向け始めている若手たちが、これからこの基盤を活用すると、すばらしい結果になる。

現代 IT 技術の発展の歴史に基づき、過度な目的指向や計画主義に陥ることなく、楽しみと知性を尊重する精神を持った一見迂遠な試行錯誤の繰り返しにより、組織内個人の基礎的・基本的なコンピュータやインターネットシステムに関わる IT 能力を高めることが、最も収益力の高い IT プラットホーム基盤における技術開発につながる。最近のこの自然な流れにより、日本型組織が長年蓄積・温存してきた、豊富な人材、資源、施設、環境を、最大限に活用した IT イノベーションが、いよいよ全国で並行多発的に引き起こることが期待できる。これは型にはまった思考をしがちな東京都心部だけでなく、むしろ、自由で優秀な人材が点在している地方の支店や地方自治体等で発生するのではないかと思われる。そして、職業研究者や工学的思考をしがちな情報系人材のみならず、むしろ、人文社会系人材からも、特に、事務目的でコンピュータを使う人材からも、発達すると思われる。ノイマン型コンピュータも、インターネット (ARPANET) も、COBOL も、行政機関における効率的な事務処理を目的として、公的研究者や公務員たちによって、発明・発展されてきたのである。

システムソフトウェアは、日本がいまだ切っていない最大級の「切り札」である。前記のとおり、

様々な日本型組織内に自由な実験環境が形成され始めてきたが、これは、コンピュータとネットワークの両方の本質的部分を理解し、必要なソフトウェアを自ら作れる人材が充実するために絶大な効果を発揮する。日本は、20 世紀に既に成功した多種多様な技術産業と同様に、システムソフトウェア分野でも、世界一になることができる。この部分を日本が自立的に確立すれば、様々な技術産業がその上で栄えることになる。日本は、21 世紀前半中に、再び世界の技術革新の中心的な名誉ある地位を果たすことになるであろう。

文 献

- (1) 金子 勇, Winny の技術, アスキー, 東京, 2005.
- (2) D. M. Ritchie, "The evolution of the unix time-sharing system," AT&T Bell Laboratories Tech. J., vol. 63, no. 8, pp. 1577-1593, Oct. 1984.
- (3) ログミー Tech, "未踏会議 2022: やはりインフラ作りは楽しくてしょうがない 村井純×登大遊×田中邦裕が語る, 日本の ICT の課題と期待," March 2022. <https://logmi.jp/tech/articles/326896> (2022/3/10)
- (4) 長倉克枝, "自治体システム標準化, ガバクラ移行で運用コスト 2~4 倍に悲鳴「議会に通らない」," 日経クロステック, Oct. 2023. <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/08519/> (2023/10/16)
- (5) S. Vaughan-Nichols, "EU turns from American public clouds to Nextcloud private clouds," ZDNet. <https://www.zdnet.com/article/eu-turns-from-american-public-clouds-to-nextcloud-private-clouds/> (2019/9/3) .
- (6) J. Hilden, "Mitigating the risk of US surveillance for public sector services in the cloud," Internet Policy Rev., vol. 10, no. 3, Sept. 2021. <https://policyreview.info/articles/analysis/mitigating-risk-us-surveillance-public-sector-services-cloud> (2021/9/30) .
- (7) European Union Agency for Cybersecurity, "Cybersecurity Research Directions for the EU's Digital Strategic Autonomy," April 2021. <https://www.enisa.europa.eu/publications/cybersecurity-research-directions-for-the-eu2019s-digital-strategic-autonomy/> (2021/4/23).

登 大遊

1984 兵庫県生まれ。ソフトウェア技術者兼経営者。ソフトイース株式会社代表取締役。専門は VPN (仮想プライベートネットワーク) などの通信技術を含めたシステムソフトウェア。2017-03 筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程了。博士 (工学)。2022-04 筑波大客員教授。



何度も訪れたい 「マレーシア・ペナン」

街plus
探訪

電気通信大学 山本 嶺 Ryo Yamamoto

1 はじめに

マレーシアのペナンは、マレー半島西海岸の沖合に位置する島と、本土側の地域からなる州です。古くから貿易の要衝として栄え、「東洋の真珠」とも称されてきました。特に、島にある州都ジョージタウンは、独自の歴史的・文化的な景観が評価され、2008年にユネスコ世界遺産に登録されています。また、多様な民族の食文化が融合した独自のグルメは国内外から高く評価されており、「美食の都」としても世界的に有名です。

一方、ペナンは歴史や文化だけでなく、現代のテクノロジーにおいても重要な役割を担っています。ペナン島南東部には広大な工業団地があり、半導体や電子機器の製造拠点として「シリコンバレー・オブ・ザ・イースト」の異名を持つほど、エレクトロニクス産業が盛んな地域です。

本稿では、知れば知るほど、奥深い魅力を持つ地であることをお伝えしたいと思います。特に、多文化が織り成す歴史、街の活気、そして何よりも世界的に名

高い食文化に焦点を当てて、ペナンの奥深い魅力を皆様に御紹介します。本稿が、皆様のペナン訪問の一步を踏み出すきっかけとなれば幸いです。

2 アクセスと地理

日本からペナンへのアクセスは、クアラルンプール国際空港（KUL）を経由するのが一般的です。KULからは国内線で約1時間でペナン国際空港に到着します。ペナン州は、マレー半島西海岸沖に浮かぶペナン島（Pulau Pinang）と、本土側のセベラン・ペライ（Seberang Perai）の二つの主要地域から成り立っています（図1）。ペナン島の州都ジョージタウンが主要な観光地であり、国際会議やイベントが開催されるコンベンションセンターも、多くがこの島に位置します。島と本土の間は、マレー半島でも特に長いペナン・ブリッジと、更に南に位置する第2ペナン・ブリッジという、二つの長大な橋で結ばれています。交通渋滞は課題の一つですが、バスやライドシェアを利用するこ



図1 ペナン島の位置



図2 ジョージタウンの街並み

とで、比較的容易に島内移動が可能となっています。

3 歴史と文化を歩く

ペナンの最大の魅力は、その州都であるジョージタウンに凝縮されています。2008年に「マラッカ海峡の歴史的都市群」の一つとしてユネスコ世界遺産に登録されたこの街は、18世紀末のイギリス植民地時代から貿易拠点として栄え、マレー系、中華系、インド系、そしてヨーロッパ系など、多様な民族が共生してきた歴史を持ちます。

ジョージタウンの街を歩くと、その多文化性は一目瞭然です（図2）。古いコロニアル様式の建築物と、中国南部の伝統的な様式が融合したショップハウスが並ぶ中に、様々な宗族の建物が隣り合っています。異なる文化や宗教の象徴が一つの通りに混在する様は、まさにこの街の歴史と寛容さを物語っています。また、中華系移民と現地マレー文化が融合して生まれたプラナカン文化も、ペナンを特徴付ける要素の一つです。

また、ジョージタウンは、街全体が巨大なアートギャラリーの様相を呈しています。特に、リトアニア人アーティスト、アーネスト・ザハレビッチ氏が手掛けた壁画は世界的に有名です。「自転車に乗る姉弟」（図3）や「バイクに乗る少年」など、ユーモアにあふれた壁画を探して路地裏を回るストリートアート巡りは、この街の散策の醍醐味です。また、街の歴史をコミカルに表現した鉄の彫刻も各所にあり、これらのアートが訪れる人々に街の歴史を教え、活気を与えています。

島の中心地を離れると、ペナン島の豊かな自然と宗



図3 壁画（自転車に乗る姉弟）



図4 極楽寺

教的なランドマークに出会えます。極楽寺（図4）は、東南アジア最大級の仏教寺院の一つであり、その壮大さと色鮮やかな建築は圧巻です。ペナン・ヒルは、ケーブルカーで山頂まで登ることができ、ジョージタウンと本土側を見渡す、壮大な景色を楽しむことができます（図5）。この地にはペナン島全域をカバーする携帯通信網のタワーなど通信施設も設けられており、現代のペナンの情報インフラを支える役割も果たしています。

4 街の活気と現代のペナン

ジョージタウンの歴史的なエリアを歩き回るだけでなく、現代のペナンが持つ経済的な側面や、街の日常の活気にも注目することで、この街の多面的な魅力を



図5 ペナン・ヒルからの夜景

感じることができます。

ジョージタウンの中心部や、島の新市街地には、現代的なショッピングモールや活気あふれるウェットマーケットが混在しています。特にマーケットは、地元の新鮮な食材や香辛料、生活用品が並び、マレーシアらしいエネルギーに満ちた日常を垣間見ることができます。また、配車サービスが非常に普及しており、観光客にとっても移動しやすく、現代的な利便性が高いこともペナンの特徴です。

ペナンは、その歴史的な顔とは別に、アジアにおけるハイテク産業の重要な拠点としての顔を持っています。島の南東部、特にバヤン・レパス工業団地周辺は、半導体、電子部品、医療機器などの製造業が集積しており、前述のようにシリコンバレー・オブ・ザ・イーストとして世界に知られています。

ペナンのエレクトロニクス産業の歴史は古く、その起源は半世紀以上前にさかのぼります。1972年に米国の半導体大手Intelがペナンに製造拠点を設立したのが、この地のハイテク産業発展の始まりとされています。Intelの進出を皮切りに、ほかの米系企業も追随し、一挙に多くの外国企業がペナンに進出しました。これにより、ペナンは製造業から集積回路の組立・テストのハブとして急速に発展しました。この戦略的な投資が、現在のペナンを支える強固な産業基盤を築き上げました。



図6 屋台での食事・地元の名物料理

バヤン・レパス工業団地には、半導体製造の世界的なリーダーが多数進出しています。米国系企業では、Intel、AMD、Micron、Hewlett-Packardなど、世界的な半導体及びエレクトロニクス大手が大規模な製造・開発拠点を構えています。また、日本の主要な半導体・電子部品メーカーも早くから進出し、現在もルネサスや東芝などが生産・開発活動を行っています。これらの企業は、単なる製造工場だけでなく、研究開発（R & D）センターやグローバルなサプライチェーンの重



要な結節点としての役割も担っています。

この産業集積が、ペナンの急速な発展を支え、国際会議の開催地としても選ばれる、現代的な基盤となっています。歴史的な街並みと、未来を見据えたハイテク産業が共存しているのが、現代のペナンの姿なのです。

5 美食の都を味わう

ペナンは東洋の真珠であると同時に、「美食の都」として世界中の食通を魅了し続けています。その食文化の多様性は、まさにこの街の歴史と多文化共生の賜物です。

ペナンの食文化の中心にあるのが、活気あふれる屋台です。ジョージタウンの各地には大規模なホーカーセンター（屋台街）があり、夕方になると多くの地元住民や観光客でにぎわいます（図6）。ここでは、安価で質の高い料理が提供され、その種類はマレー系、中華系、インド系、そしてこれらの文化が融合した独自の料理まで、多岐にわたります。ペナンでは、豪華なレストランよりも、屋台での食事こそが最もおいしい体験だと言われるほどです。

6 おわりに

本稿では、マレーシア・ペナンの多面的な魅力を、筆者の体験を交えながら御紹介しました。

ペナンは、東南アジアの海上交易の歴史が凝縮され

たユネスコ世界遺産のジョージタウンを持ち、その街並みを歩けば、まるで生きた歴史博物館の中にいるかのような感覚を覚えます。多様な民族が共生する文化は、カラフルな建築物やストリートアートとして目を楽しませてくれるだけでなく、世界的に評価される美食の都としての豊かな食文化を育みました。

また、ペナンは歴史と伝統を守りながらも、島の南東部を中心にシリコンバレー・オブ・ザ・イーストと呼ばれるハイテク産業の集積地として、現代の技術と経済をけん引しています。この二つの顔を持つペナンは、学会やビジネスで訪れる方々にとっても、歴史、文化、そして最先端の技術動向に触れることができる稀有な場所です。

皆様がペナンを訪れる機会がありましたら、是非会議室から一歩外に出て、路地裏に潜むアートを探し、多文化が織り成す歴史を感じ、そして何よりも世界に誇る屋台グルメに舌鼓を打ってみてください。本稿が、そのすばらしい体験への手助けとなれば幸いです。

山本 嶺（正員・シニア会員）

平 19 芝浦工大・システム工学・電子情報システム卒、平 21 同大学院修士課程了。平 24 早大・博士後期課程退学、同研究科助手。平 26 電通大大学院情報システム学研究科助教、平 31 同准教授。通信ネットワークに関する研究に従事。博士（国際情報通信学）。





こんなツール, 使っています

オープンソース電磁界シミュレータ OpenFDTD

大賀明夫 Akio Oga

1 はじめに

電磁界はマクスウェル方程式に支配されていることはよく知られているが、マクスウェル方程式は式が簡単な割に解析的に解けるケースは非常に限られている。例えば、適当に考えたアンテナの放射パターンはどうなるだろうか、という問題に対して解析的な手法は無効である。このようなときにシミュレータが役に立つ。OpenFDTD⁽¹⁾は現在広く使われているFDTD法 (Finite Difference Time Domain, 時間領域差分法)⁽²⁾を用いて筆者が開発・公開しているオープンソース電磁界シミュレータである。

OpenFDTDの特徴は以下のとおりである。

- (1) オープンソースのフリーソフト (ユーザ登録不要)
- (2) FDTD法の基本的な機能を全て実装し、いろいろな用途に使用することができる
- (3) CPUとGPU, PCからスパコンまでそれぞれの計算機的能力を最大限発揮できる

2 FDTD法

図1にFDTD法の計算イメージを示す。任意の数の完全導体と誘電体を置き、それを囲む適当な広さの計算領域を考える。無限に広がる電磁波を有限の領域で正しく計算するために、領域の境界には吸収境界条件を設定する。アンテナの場合は給電点を置く。給電点に電圧を加えることによって電磁波が発生し、計算領域全体に広がる。

FDTD法は差分法であり、計算領域を多数の直交メッシュに分割する。単位領域を「セル」と呼ぶ。電磁界はベクトルであり、電界と磁界のX, Y, Z方向の3成分を持つ。図2に単位セル (i, j, k) における電磁界成分の位置と向きを示す。Yee格子では電界を稜線の中央の接線方向にとり、磁界を面の中央の法線方向にとる。複雑な格子であるが、これがマクスウェル方程式と

相性が良いことが知られている。FDTD法はYee格子上で計算されているということは、データ入力時に大切になる。

3 OpenFDTDの使い方

3.1 OS

OpenFDTDはWindowsまたはLinuxで動作する。

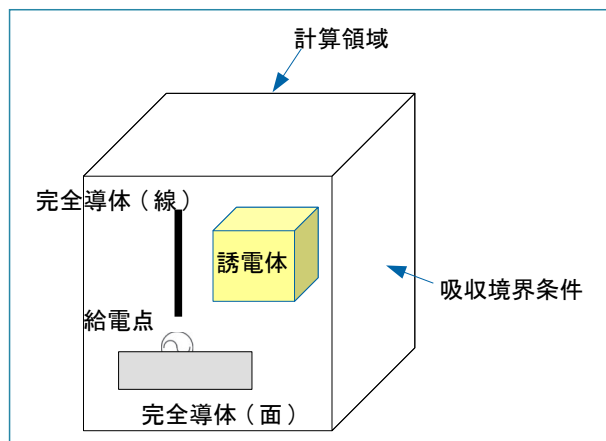


図1 FDTD法の計算イメージ

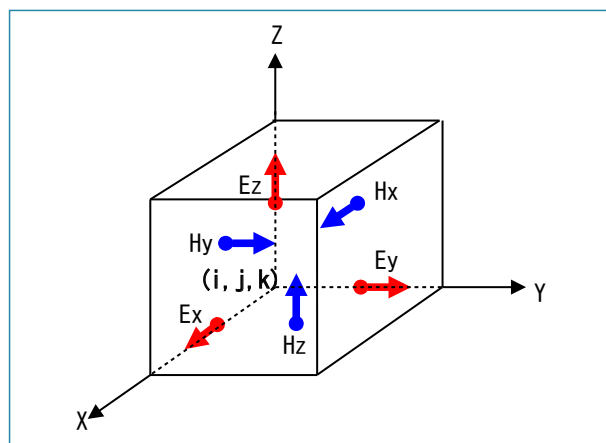


図2 Yee格子



図3 OpenFDTDの主ウィンドウ（一部）

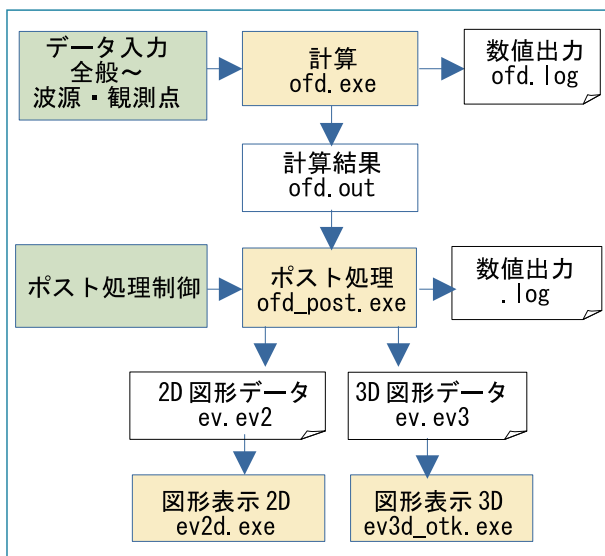


図4 操作手順



図5 【全般】タブ

Windows 環境では簡易 GUI (Graphical User Interface) と実行プログラムが付属している。C/C++ コンパイラがあれば、ソースコードを自分でコンパイルして実行プログラムを作ることできる。

Linux 環境ではソースコードを自分でコンパイルする。GUI は付属していないので、通常はデータ作成を Windows で行い、計算を Linux で行う。

以下では Windows 環境について説明する。

3.2 インストール

OpenFDTD のページから OpenFDTD.zip ファイルをダウンロードして展開し、OpenFDTD フォルダを適当な場所（例えば「ドキュメント」の下）に置く。OpenFDTD フォルダの OpenFDTD.exe ファイルをダブルクリックすると図3の OpenFDTD ウィンドウが起動される。

3.3 操作手順

図4に操作手順を示す。作業は以下の二つに分かれる。

- (1) 計算：データを入力して計算する
- (2) ポスト処理：図形出力項目を設定して図形出力する
計算結果はバイナリファイル ofd.out に保存されているので、(2) は繰り返し行うことができる。

図4の黄色がコマンドであり、図3の4個のボタンに対応している。図4の緑色がデータ入力であり、図3の7個のタブに対応している。

4 計算データの入力法

計算を行う前に、[全般] から [波源・観測点] までの5個のタブでデータを入力する（図5～9）。主な項目について入力上の注意点を述べる。ここで述べていない項目については OpenFDTD のページやほかの文献^{(3)～(5)}を参考のこと。

4.1 [全般] タブ (図5)

各種のデータを入力する。

[収束条件]：FDTD法では入射したパルスが完全に減衰するまで反復計算を行う。一般的には[収束判定条件]に $1e-3$ 程度の値を入力し、それ以下になるまで計算を行う。収束状況が悪いときは[最大反復回数]で強制的に終わらせる。[出力間隔]は収束状況を確認する間隔であり、計算結果には無関係である。

[吸収境界条件]：計算領域の周囲に設定する吸収境界条件を指定する。[Mur 一次]は簡易的なものである。[PML]は精度は良いが、計算時間と使用メモリが増える。目的に応じて使い分ける。

[周波数]：FDTD法は時間波形を計算するものであるが、実用上は周波数特性が必要であることが多い。ここでフーリエ変換するための周波数を指定する。[給電点・観測点]は点であるから計算時間と使用メモリに影響を与えないので、[分割数]に大きな値を入力して詳しい周波数特性を見ることができる。一方、[遠方界・近傍界]は全領域をフーリエ変換するため、多くの計算時間と使用メモリを必要とする。したがって、[分割数]は必要最小限を入力することが大切である。

4.2 [メッシュ] タブ (図6)

メッシュデータを入力する。X, Y, Z 方向別に入力する。

計算領域を1個以上の区間に分割し、順に区間区切りの座標とその区間の分割数を入力する。メッシュは実在しないものであるが、差分法では計算精度、計算時間、使用メモリを決める重要なものであり、最も経験が必要とされるところである。入力したメッシュは[物体形状]タブで確認することができる。

4.3 [物性値・集中定数] タブ (図7)

物性値（電気定数：誘電率と透磁率）を入力する。

多くの物質は非磁性体であるから、比透磁率=1、導磁率=0である。特殊なケースとして電気定数が周波数で変わる分散性媒質を定義することができる。

4.4 [物体形状] タブ (図8)

物体形状とその物性値を入力する。入力作業のほとんどはここで占められる。

計算対象を基本形状（ユニット）に分割して入力する。基本形状1個で1ページとなっている。[<], [<], [>], [>]でページ（ユニット番号）を変えることができる。

複数のユニットを入力するには以下をクリックする。

[追加]：最後のユニットの後にユニットを追加する。

図6 [メッシュ] タブ

図7 [物性値・集中定数] タブ

図8 [物体形状] タブ

[挿入]：現在のユニットの前にユニットを挿入する。

[削除]：現在のユニットを削除する。

現在のユニットの[物性値]をリストから選択する。このリストは[物性値]タブで入力されたものである。

現在のユニットの[形状]を[直方体]等から選択して、その下で座標を入力する。FDTD法は直交メッシュであるから[直方体]が基本的な形状である。長方形は厚さのない直方体と考え、線分は幅のない長方形と考える。

入力した物体形状は図8で確認することができる。現在の状態を再描画するには[プロット]をクリックする。任意のユニットをクリックするとそのユニットのページが表示される。図形表示部の使い方については[ヘルプ]を参考のこと。

FDTD法で効率良くデータを入力するにはなるべく均一メッシュをとり、物体形状の座標値をメッシュ座標

全般		メッシュ	物性値・集中定数	物体形状	波源・観測点	ポスト処理制御(1)	ポスト処理制御(2)
● 給電点							
No.	電界方向	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	電圧[V]	delay[sec]	Z0[Ω]
1	☒ Z	0	0	0	1	0	50
2	☐ X	0	0	0	1	0	50
3	☐ X	0	0	0	1	0	50
4	☐ X	0	0	0	1	0	50
5	☐ X	0	0	0	1	0	50

図9 「波源・観測点」タブ

に合わせることが望ましい。FDTD 法の安定性条件からタイムステップは最小セルサイズに比例し、計算時間に反比例する。

4.5 「波源・観測点」タブ (図9)

アンテナには1個以上の給電点が必要である。

給電点の「電界方向」とXYZ座標を入力する。給電点は入力された座標に最も近いYee格子の電界点に設定されるので、向きと座標を正しく入力する。給電点は「物体形状」タブで赤く表示される。

アンテナではなく、外部から平面波が入射する散乱モデルでは「平面波入射」を入力する。

「観測点」は主に線路のSパラメータを計算するとき使用する。

4.6 データ入力上の注意

データ入力時は安全のためにときどき「ファイル」→「保存」メニューでデータを保存する。OpenFDTD\dataフォルダに、課題ごとのサブフォルダを作って保存することを推奨する。データの拡張子は.ofdである。なお、OpenFDTD\data/sampleフォルダに多数のサンプルデータがある。それぞれテーマを持っているので、一通り開いて計算してみるとデータ作成上のヒントが得られる。

CPU/GPU		MPI	
☒ CPU	スレッド数: 8	☐ MPI	
☒ 省メモリ		☒ 1 localhost	プロセス数: 2
☐ GPU	デバイス番号: 0	☐ 2	1
☐ unified memory		☐ 3	1
☒ 省メモリ		☐ 4	1
		☐ 5	1
OK キャンセル		領域分割数	
初期化 ヘルプ		X方向: 1	
		Y方向: 1	
		Z方向: 1	
		MPIの使用方法	

図10 「計算設定」ウィンドウ

「MPI」: 複数台のコンピュータで並列計算するとき使用する。

そのほかについては「ヘルプ」を参考のこと。

5.2 計算

「計算」をクリックすると黒いウィンドウ（ターミナル）が現れて計算が始まる。計算条件の要約や、4.1で設定した「出力間隔」に応じて収束状況が表示されるので確認のこと。「収束判定条件」以下となるか、「最大反復回数」到達によって計算が終了したら、計算終了状況を含む画面の出力結果を確認する。Enterを入力するとターミナルが閉じる。

5 計算

5.1 計算設定

計算の前に、「ツール」→「計算設定」メニューで計算環境を設定する（図10）。

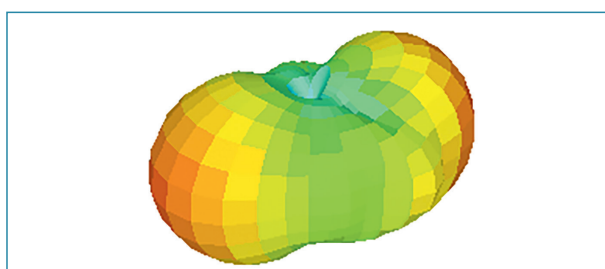
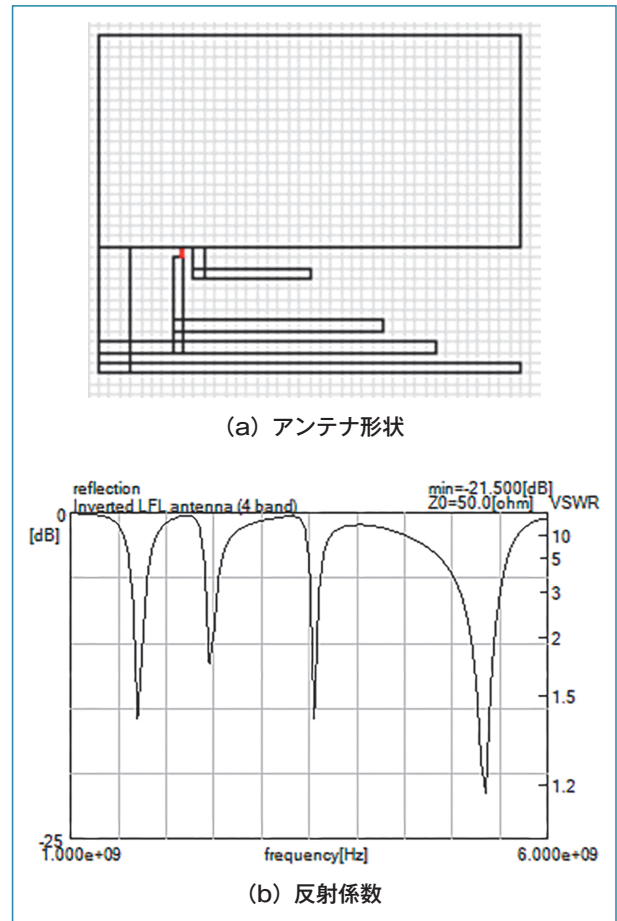
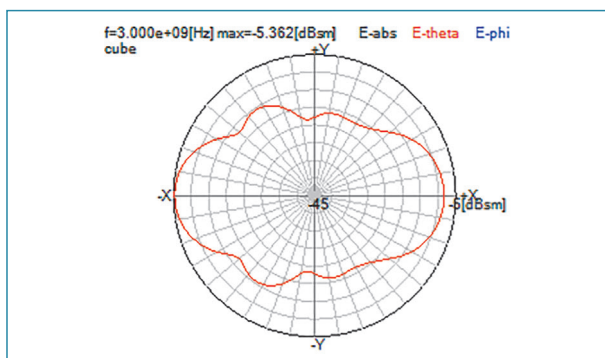
「CPU」: スレッド数を指定する。例えば、8コア16スレッドのCPUでは8から16の間の数字を入力する。最も速い設定は環境とデータによるので試行のこと。

「GPU」: NVIDIAのグラフィックスボードとグラフィックスドライバーが必要である。そのほかの設定は既定値でよい。

6 ポスト処理

計算終了後、「ポスト処理制御」タブでポスト処理の設定を行った後、「ポスト処理」をクリックし、その後「図形表示2D」または「図形表示3D」をクリックする。「ポスト処理制御(1)」タブで以下を設定する（図11）。

- ・「時間特性」: 時間波形を表示して計算結果を確認する。
- ・「周波数特性」: 周波数特性を表示する（2D）。
- ・「遠方界面上」: 指定した面内の遠方界パターン（2D）。



- ・[遠方界全方向]：全方向の遠方界パターン (3D).
[ポスト処理制御 (2)] タブで以下を設定する (図 12).
 - ・[近傍界線上]：指定した線上の近傍界 (2D).
 - ・[近傍界面上]：指定した面上の近傍界 (2D, 3D).
- 図 13, 14 に図形出力例を示す。

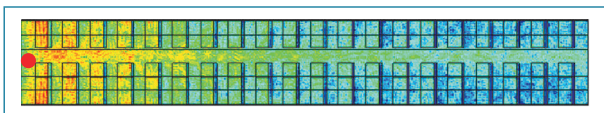


図 16 新幹線内の電界分布 (2.5 GHz, 床上 0.7 m)

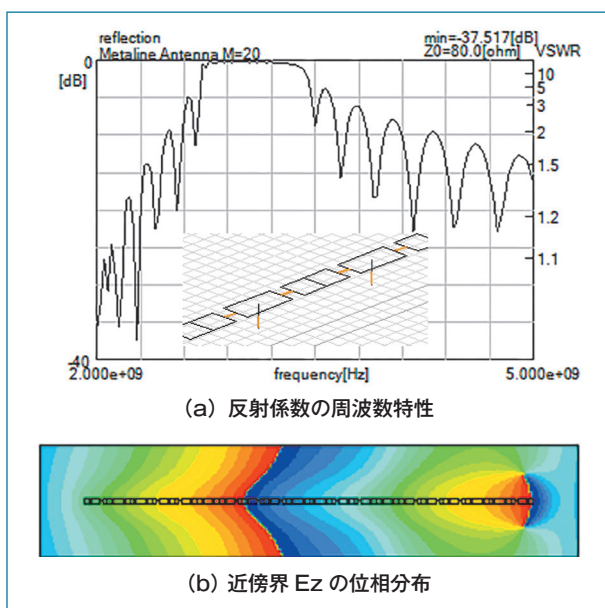


図 17 メタラインアンテナ

7 計算例

(1) 4 周波数小形アンテナ

図 15 は 4 周波数で動作する小形アンテナである⁽⁶⁾。L 素子と逆 F 素子を持っている。図 (b) のとおり四つの周波数で整合が取れている。

(2) 新幹線内電界分布

図 16 は新幹線内の電界分布である。赤い丸が送信アンテナである。

(3) メタラインアンテナ

図 17 はメタマテリアルを利用した線路型アンテナである⁽⁶⁾。図 (a) のように線路を切断して直列に C を挿入し、グラウンド板とのピアに L を挿入している。これによって特定の帯域で左手系となり遮断帯域 ($S_{11}=0$ dB) が生じる。図 (b) はそのとき位相の傾きが反転することを表している。

(4) フォトニック結晶光導波路

図 18 は二次元フォトニック結晶光導波路である⁽⁷⁾。多数のフォトニック結晶を周期的に並べ、その一部を欠落させると特定の周波数帯域で導波路として機能する。

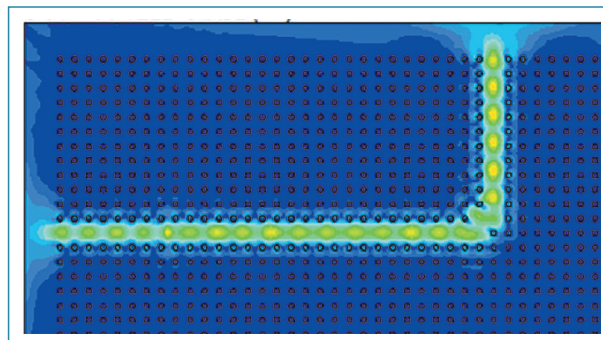


図 18 フォトニック結晶光導波路 ($\lambda = 1.58 \mu\text{m}$)

コーナーを設けると進路を変えることができる。

8 まとめ

オープンソース電磁界シミュレータ OpenFDTD について述べた。電磁界シミュレータを上手に使って開発・設計業務に大いに役に立ててほしい。

■文献

- (1) OpenFDTD. <https://ss023804.stars.ne.jp/OpenFDTD/>
- (2) 宇野 亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 東京, 1998.
- (3) 大賀明夫, FDTD 法の並列化技術とオープンソース化, 信学技報, AP2014-41, pp. 7-12, June 2014.
- (4) 大賀明夫, “OpenFDTD と OpenMOM で始めるはじめてのアンテナ・シミュレーション,” RF ワールド, no. 39, pp. 7-82, CQ 出版, Aug. 2017.
- (5) 大賀明夫, “HF/VHF 帯線状アンテナの特性シミュレーション,” RF ワールド, no. 42, pp. 61-81, CQ 出版, May 2018.
- (6) H. Nakano, Low-Profile Natural and Metamaterial Antennas, IEEE Press, Wiley, 2016.
- (7) 電気学会編, 計算電磁気学, 培風館, 東京, 2003.

大賀明夫 (正員)

1981 東大・工・物工卒。民間企業で電磁界シミュレータの開発と販売に従事。2022 退職。現在はオープンソース電磁界シミュレータの開発と保守を行っている。



ファラデーのパラドックスを考える ——回転する棒磁石の磁力線は回転するか——

Consideration on Faraday's Paradox:

Do the Magnetic Field Lines of a Rotating Bar Magnet Rotate?

唐沢好男 Yoshio Karasawa[†]

Summary

ワイヤレス通信の物理層技術はアンテナや電波伝搬といった電波工学に支えられている。更に、その電波工学は電磁気学、すなわち、マクスウェルの方程式が屋台骨をしっかりと固めている。そんな電磁気学にも、電界や磁界が我々の目に見えないがゆえに、いろいろな不思議に満ちている。本稿ではその一つ、単極誘導にまつわる謎「ファラデーのパラドックス」を取り上げてみたい。単極誘導とは、回転する導体板と磁石との関係において起電力が発生する現象で、電磁誘導現象の一つである。この単極誘導の起電力発生に関して、我々の直感と異なる様相を呈する動作が見られ、これがファラデーのパラドックスと呼ばれている。ファラデー以来、2世紀近くになっても議論が続いていて、現在においてもまだ完全決着とはなっていない。問題の本質を一言で言うなら「回転する棒磁石の磁力線は回転するか」である。本稿では、単極誘導に関するファラデーのパラドックスの歴史を振り返りつつ、筆者が抱く一つの描像を述べたいと思う。あくまで、磁力線という仮想的なものの動作に関する推論であるので正しさを実証するものではないが、辻褄が合う説明を試みる。読者の皆さんには、ここで述べる推論を一つの考え方と受け止め、更なる深い議論への入り口として頂ければ幸いである。

Key Words

電磁誘導、単極誘導、磁力線、ファラデーのパラドックス、磁力線切断則、磁力線回転説

1 ファラデーのパラドックスとは

本題に入る前に、議論のポイントを先に説明しておきたい。図1(左)の円筒棒磁石を考える。この磁石からは図に示すような磁力線が出ているとしよう。実際には磁力線は物理的に存在する線ではなく、磁界の動きを分かりやすく説明するためにファラデーが考え出したイメージである。この磁石を横に動かせば、磁力線も一緒に動くと思うのはよいであろう。では、棒磁石を軸を中心にして回転させたら、磁力線も一緒に回転するのか、あるいは磁力線は動かないのか、どちらなのだろう、というのがこれからの議論の核心になる。前者を「磁力線回転説」(図1右上)、後者を「磁力線静止説」(図1右下)と呼ぶ。どちらが理にかなっているのだろうか。

「単極誘導」と呼ばれる電磁現象がある。ファラデーがモータや発電機を考案する過程で発見した現象、その動作が我々の直観に反するように見えるので、ファラデーのパラドックスと呼ばれる。図2に示す円柱状の棒磁石と導体円板が中心軸を共通にして重ねられており、それぞれが独立に回転する機

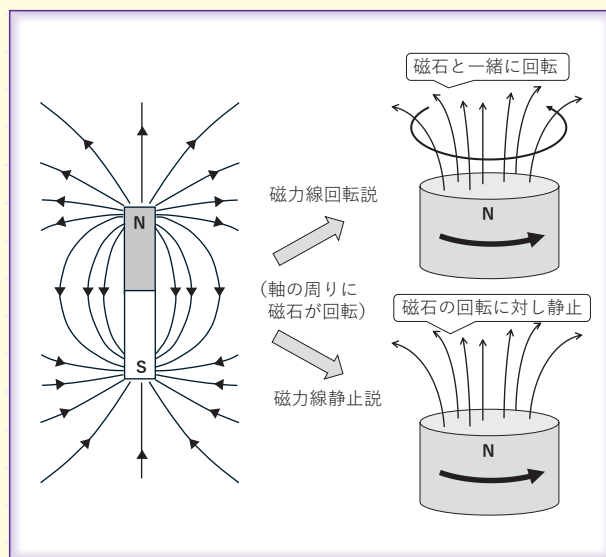


図1 棒磁石からの磁力線(左)と磁石の回転に伴う磁力線の動き(右上: 磁力線回転説, 右下: 磁力線静止説)

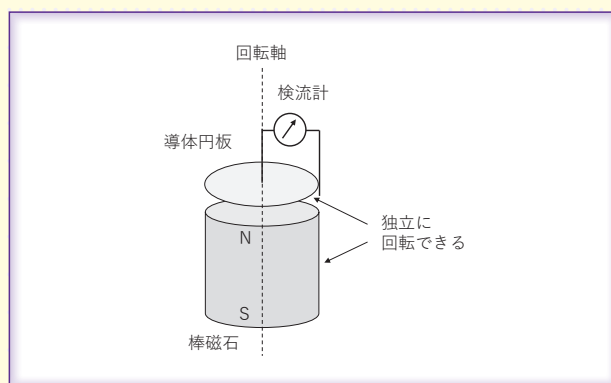


図2 単極誘導確認のための基本構成

[†] 電気通信大学, 調布市
Univ. Electro-Communications, Chofu-shi,
182-8585 Japan

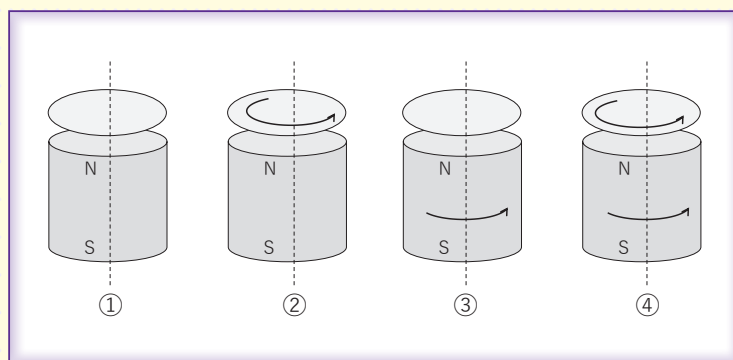


図3 起電力の有無を確認する四つのケース

能を持つ。棒磁石の端面と円板の大きさは同じとし、その範囲で磁力線は一樣の密度で図面上向きに出ているとしよう。導体円板上に、中心と縁の間の起電力を測る検流計をつなぐ導線が回転しないように（＝円板の縁と電気的接触を保つように）取り付けられている。

ここで、図3に示す四つのケースを見てみよう。

- ① 磁石も円板も静止している
- ② 磁石が静止し、円板が回転している
- ③ 磁石が回転し、円板が静止している
- ④ 磁石と円板が一緒に回転している

検流計に触れがある場合を○、振れない場合を×とすると、上記四つのケースではどうなるであろうか。以下の答えを見る前に、ここで立ち止まって、読者の皆さん自身で予想を立ててほしい。

では、結果を、順に、×，○，×，○である。（実際の動作は文献(1)のYou Tube 動画像で確認できる。）③，④の結果に「あれっ」と思わないだろうか。それがパラドックスと言われるゆえンであるが、以下、それを考えてみたい。これも、結果を見た今、次章を読む前に皆さん自身で、動作の仕組みを考えてほしい。

2 どう考えるか

後に議論となる二つの相対する考え方：「磁力線静止説」と「磁力線回転説」での説明を行う。冒頭でも説明したとおり、磁力線静止説とは、棒磁石から出ている磁力線は棒磁石が軸の周りに回転しても、空間に対して静止しているとする説、磁力線回転説とは、棒磁石の回転とともに磁力線も一緒に回転するという説である。両方とも③，④の結果をうまく説明ができるところに不思議がある。この説明に対する議論が今日まで続くのであるが、その歴史については3. にまとめる。

2.1 磁力線静止説

一つ一つ見てゆきたい。

① のケース

両方静止の場合で、これが何も起きなくて当然であろう。

② のケース

円板のみが回転している。円板は導体であるから、無数の金属原子で構成されていて、正の電荷を持つ陽子と負の電荷を持つ電子が同量あり、全体として電氣的に中性である。その電子の中に自由に動き回れる自由電子が一定数ある。棒磁石は磁界を生み出し、円板付近では図の上方向を向いている。円板が回転すると、回転軸と平行に向く磁界中を電荷が周方向に動くことになり、動く方向と磁界の方向のそれぞれに直交する方向、すなわち円板の径方向にローレンツ力が働く。（それが、縁方向か中心方向かは円板の回転方向と磁界の向きによって決まる。）このローレンツ力によって自由電子が押されて動いて縁（あるいは中心）に集まり、中心と縁で電位差が生まれる。これによって、検流計の針が振れるのである。起電力は円板上に生まれている。

③ のケース

今度は円板が止まっていて磁石が回転している。磁石とともに回転する人が円板を見れば、②のケースと同じで円板が回転しているように見え、ゆえに、検流計は振れると思うだろう。でも、結果はそうならない。磁力線の存在をイメージし、電磁誘導によって導線に現れる起電力を、導線が磁力線を切る量に比例すると説明したあのファラデーも、この場合については「磁力線は回転していない」と答えたい。「磁力線静止説」である。そうであれば、①と同じであり、検流計は振れない、が納得できる。でも、どうしてだろうという気持ちも残る。起電力はどこにも生まれない。

④ のケース

これも、磁石と円板の関係の相対性から①と同じ

に見え、検流計は振れなさそう。しかし、実際は触れるわけで、不思議に感じる（故にパラドックス）。でも、③で述べたファラデーの言葉に従うならば、磁力線は回転しておらず、それなら②と同じであり、検流計は振れる、のである。起電力は円板上に生まれている。

2.2 磁力線回転説

棒磁石からは無数の磁力線が出ている。棒磁石を横に動かせば磁力線も磁石に固定されて一緒に動くであろう。軸回転の場合も、磁力線は磁石と一緒に回転するというのが「磁力線回転説」である。棒磁石の回転に対して、ファラデーは磁力線静止説を唱えたが、電磁誘導によって導線に現れる起電力を「導線が磁力線を切る量に比例する」と説いたファラデーにしては首尾の一貫性に欠けるように思える。ここでは、棒磁石が回転する③と④のケースについて、磁力線回転説で現象を見てみよう。

③のケース

磁石とともに回転する磁力線が円板上の仮想導線を切っている。ゆえに、円板には起電力が生まれている。同じように、円板の2点を結ぶ導線（検流計をつないでいる線）も回転する磁力線を切っており、同じ大きさの起電力が発生している。ただし、回路上で起電力の極性は反対なので、打ち消されて、ループに起電力は発生しない。円板と導線の両方に起電力が生まれている。ただし、両起電力は打ち消されてしまうので、検流計は振れない。

④のケース

磁石と円板は一緒に回っていて、円板は磁力線を切らないので、円板に起電力は生まれない。一方、円板を結ぶ導線は、回転する磁力線を切るのので、この部分に起電力が生まれ、検流計が振れる。起電力が円板の2点を結ぶ導線に生まれている。

2.3 議論のポイント：棒磁石が回転したら電磁界は変わるか

相矛盾する磁力線静止説と回転説のどちらでも結果（検流計が振れるか振れないか、ということ）を合理的に説明できてしまう。一方、その起電力の発生場所については、円板かそれを結ぶ線かで異なっている。起電力の発生場所に違いが出ているのであるから、どちらの説でもよいと言うわけにはいかない。どちらが正しいかを決定するには、測定によって起電力の発生場所を特定できればよいのであるが、次章でも述べるように簡単にはできそうもない。そのことが、混乱状態が続いている原因になっ

ている。明確にすべきは以下の点にある。

- ・静止している棒磁石と回転している棒磁石で、電磁界に違いがあるのかどうか。（「違わない」というのが磁力線静止説、「違う」というのが磁力線回転説）

- ・「違う」と言う磁力線回転説の場合、静止する導線に起電力を生むが、それは、回転する磁石の周りに電界が生まれていると言い換えてよいか。

3 両説相剋の歴史

この問題が今日まで続いている歴史をおさらいしたい。多くの解説記事が出ているが、我が国においては、須藤等の解説論文^{(2), (3)}にその歴史が丁寧にまとめられている。文献(2)はファラデーの単極誘導の実験を中心に、文献(3)はその後（1980年頃まで）の磁力線静止説と磁力線回転説（文献(3)では「磁力線運動説」と呼んでいる。）との相剋についてである。この問題は21世紀に入っても続いていて、完全決着とはなっていないようである（例えば、文献(4), (5)）。以下、文献(2), (3)を参考に、この歴史を駆け足で見よう。

ファラデーは、電磁誘導の法則を発見する10年前、エルステッドが電流の磁気作用を発見した翌年の1821年、単極誘導回転機を発明した（文献(6)の第7章の図7.9参照）。そして、電磁誘導の法則を発見した直後の1831年、図2の原理による単極誘導発電機を発明した（文献(1)参照）。その動作の解釈において、誘導効果は磁石が静止しているか、回転しているかによらないと言う結果（図3の②と④）から、磁石の磁力線は、磁石の回転に伴わず空間に静止していると判断した。（それを「特異な独立性（singular independence）」と呼んだ。）これに対して、1841年、単極誘導（unipolar induction）の名付け親であるWeberは磁力線が磁石と一緒に回転するとしても、誘導電流生成の結果を矛盾なく説明でき、しかもその方が電気粒子の運動論からも妥当であるとして磁力線回転説を主張した。その後続く長い論争の出発点がここである⁽²⁾。

Weberの磁力線回転説が正しいと確信したPrestonは1891年の論文の中で、様々な実験を繰り返した。しかし、閉回路の実験では磁力線静止説と回転説の区別がつかないこと、開回路で帯電状況を調べるには、高度に鋭敏な検流計と高速回転できる強力な磁石が必要で、満足できる実験結果は得られなかった⁽³⁾。

その後の回路実験は、1912年、Kennard によって行われた⁽⁷⁾。回転する棒磁石を円筒コンデンサで覆い、磁石の回転時にコンデンサを短絡した後開放し、磁石の回転を止めたときに、コンデンサが帯電しているかどうかを調べるものであった。結果、コンデンサは帯電しておらず、これによって磁力線静止説が証明されたと主張した。しかし、同年、Barnett も類似の実験を行い、同様の結果を得たが、結果の解釈において、磁力線静止説も磁力線回転説も同じ結果になるはずということから、Kennard の磁力線静止説の判断は誤りであると主張した⁽⁸⁾。Kennard はこれに対して反論を行っているが⁽⁹⁾、当時はまだ、エーテルの概念が残っていて、これと磁力線の動きとの関連で議論されており、今日の日で見ると争点がすっきりしていないように感じる。(筆者は、Barnett の主張に理があると受け止めている。)

この論争は今日までも続いている、必ずしも決着がついたという状況にはないように見える。例えば、文献(4)、(5)などでは、歴史的経緯が詳しくまとめられ、かつ、論文導入部を読むと磁力線静止・回転説に決着をつけるとの意気込みは感じられるが、内容的にはその議論から逃げていて、肩透かしを食らった感がある。

4 電磁誘導の法則：磁束変化則と磁力線切断則

ファラデーのパラドックスの謎解きは5.で行う。その謎解き準備のために本章を置く。単極誘導は電磁誘導の一形態と捉えることができる。そこで、電磁誘導の法則を「磁束変化則」(マクスウェルの方程式)と「磁力線切断則」(ファラデー流)の二つの視点から要点をまとめる。(注：ここに登場した「磁束変化則」と「磁力線切断則」は、先に述べた「磁力線静止説」と「磁力線回転説」とは別物なので、混同しないようにしてほしい。)

4.1 磁束変化則 (マクスウェルの方程式)

ファラデーによって発見された電磁誘導の法則は次式で表される。

$$V = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1)$$

ここで、 V は導線ループに生まれる起電力(EMF、導線に電流を流す駆動力；ループを切断したときの両端に現れる電位差)、 Φ_m はループが作る面を貫通する磁束の総量であり、磁束密度 $\mathbf{B}$ を用いて次式で

表される。

$$\Phi_m = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS \quad (2)$$

面積分する曲面 S (その単位法線ベクトルを $\mathbf{n}$)は導線ループ c を縁とする任意の形状でよい。このように、「ループ面を貫く磁束の総量の時間変化が起電力を生む」という見方をここでは「磁束変化則」と呼ぶ。起電力 V は、物理的な実体としての導線がなくても、空間に任意に定められるループ c に対する電界の線積分値でもある。

式(1)は以下のように変形できる⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} V &= -\frac{d\Phi_m}{dt} \\ &= -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t} - \left(\frac{\partial \Phi_m}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \Phi_m}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \Phi_m}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) \\ &= V_1 + V_2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_1 &\equiv -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} dS = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \\ V_2 &\equiv -\left(\frac{\partial \Phi_m}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \Phi_m}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \Phi_m}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) \\ &= \oint_c \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} \end{aligned}$$

ここで、ベクトル $\mathbf{v}$ はループ c 上の点の移動速度を、 $\mathbf{E}$ は磁界の時間変化によって空間に生まれた電界を示す。

このように起電力 V を V_1 と V_2 に分けると、それぞれは以下のような意味を持つ。

V_1 : ループが空間に固定されている状態において、磁界が時間的に変化するとき生まれる起電力

V_2 : 磁界が空間に固定されている状態において、ループが時間的に変化する(=動く)ときに生まれる起電力

マクスウェルは、この V_1 に着目し、電磁誘導の法則を電界と磁界の関係として次式の方程式で表した。(ベクトル形式に整理したのはヘビサイド。)

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} dS \quad (\text{積分形表示}) \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{微分形表示}) \quad (5)$$

電磁誘導の法則を発見したファラデーは、電気力線や磁力線のイメージによって、近接作用の考え方(場の概念)を膨らませていった。マクスウェルは、ファラデーの場の概念を数式化し、電磁気学を作り上げたが、完成した方程式からは電気力線や磁力線が見えなくなり、場を表す物理量(電界 $\mathbf{E}$ 、磁界 $\mathbf{H}$ 、電束密度 $\mathbf{D}$ 、磁束密度 $\mathbf{B}$)の相互関係を表す理論になっている。場はそれぞれの位置において「時

間的に変化するものであって、空間を動くものではない」という捉え方である。

4.2 磁力線切断則（ファラデー流）

ファラデーは「磁石からは磁力線が出ていて、磁石を動かせば磁力線も一緒についてくる」というイメージを持っていた。磁界がある環境では、空間に磁力線が密に張り巡らされているという描像である。今の時代、細いひものような磁力線が本当にあると思う人はいないであろうが、物理の直観的理解に役立つ仮想的なものともみればよい。物理的実体はないのだから、磁力線の本数や太さなどを論じることが意味がない。故に、磁界には無数の磁力線があって、太さは極めて細い、という範囲でしか議論できない。それを踏まえた上で、以下、あたかもそれが実在するという前提で議論を進めてみたい。

磁力線には始まりや終わりがなく、一本一本が輪になっている。それぞれの磁力線の磁束は皆等しく Φ_{m0} であるとしよう。この値は無限に小さく、ゆえに、通常の磁界は無数の数の磁力線から成ると思っ
てほしい。式(1)で表されるように、導線ループが作る面を貫く磁束の総量、すなわち、磁力線の本数が時間的に増えるということは、導線のどこかににおいて、外部から磁力線が導線を越えて内部に入ってきたということになる。(減る場合はその逆。) ループの内部に、導線が気づかないところで勝手に発生することは $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ が許さないためである。ファラデーはこの動作を「導線が磁力線を切る」と表現した。そして、電磁誘導による起電力は導線が磁力線を切る時間密度に比例すると捉えた。(初期の1831年の論文では、導線が磁力線を切るとき電磁誘導が生じるという表現。) 導線が磁力線を切る際に「ガリッ」と音が出るとしたら、このガリガリ音の頻度が誘導起電力に比例すると考えたのである。電磁誘導をこのように捉えることを、ここでは、「磁力線切断則」と呼ぶ。磁力線から見れば導線が動いてきて切られることになるが、導線から見れば磁力線が動いて自ら切られてゆくということになり、どちらが動いているかは関係なく、相対的な動きだけで決まる。導線と磁力線の速度差を $\mathbf{v}$ で表せば、導線を切る頻度は $|\mathbf{v} \times \mathbf{B}|$ に比例する。これはまさに도체中の自由電子が受けるローレンツ力での説明になる。

磁力線切断則の理論的根拠を $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ で関係付けられるベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ を用いて説明する。図4に示すように、1本の磁力線の周りには、ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}_0$ の渦ができてい

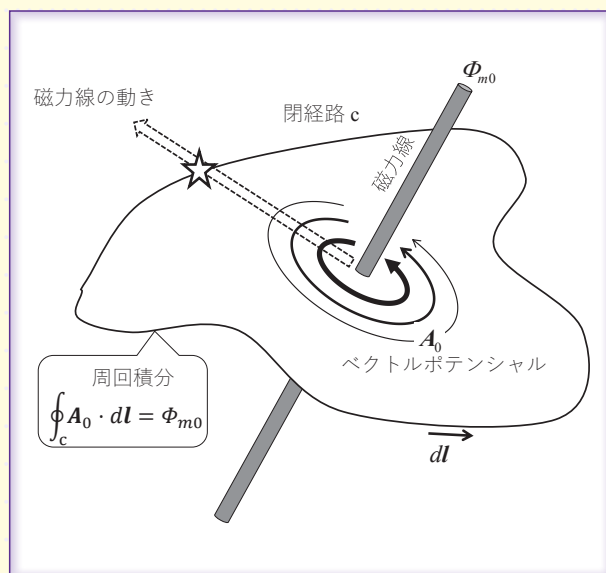


図4 誘導起電力（導線が磁力線を切るとき(☆)に生まれる）の説明図（無数に数き詰められた磁力線の1本に着目）。

線を任意の閉曲線（ループ） c で囲み、その線上のベクトルポテンシャルの経路方向成分の周回積分は、磁力線の場所によらず Φ_{m0} になる。一方、磁力線がループの外側にあるときはこの周回積分値は0になる。まとめると、

$$\oint_c \mathbf{A}_0 \cdot d\mathbf{l} = \begin{cases} \Phi_{m0} & (\text{磁力線がループ内にある}) \\ 0 & (\text{磁力線がループ外にある}) \end{cases} \quad (6)$$

更に、導線の場所に生まれる誘導電界を $\mathbf{E}_0$ とすると、起電力 V_0 は電界成分 $\mathbf{E}_0$ の周回積分で得られ、かつ、その電界とベクトルポテンシャルの関係 ($\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t$, ただし $\nabla \phi = 0$) から、以下のように表される。

$$V_0 = \oint_c \mathbf{E}_0 \cdot d\mathbf{l} = -\oint_c \frac{\partial \mathbf{A}_0}{\partial t} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \oint_c \mathbf{A}_0 \cdot d\mathbf{l} \quad (7)$$

空間積分と時間微分の順序を入れ替えた上式最終辺中の周回積分は、ループが磁力線を切ったとき (= 図の☆にきたとき)、すなわち、磁力線がループの外に出る、あるいは入るときに積分値が変わるので、その微分値、すなわち、起電力 V_0 は、この瞬間だけ値を持つ。「導線が磁力線を切る瞬間にだけ、起電力が生まれる」ということになる。一つ一つの磁力線が切られる瞬間によって生まれる起電力は離散的（デルタ関数的）ではあるが、磁力線に若干の太さを仮定して微分値を有限の値にし、かつ、多数のものに現れる統計多重効果を取り入れれば、式(1)、すなわち、磁束変化則と同じになることが導かれる。ベクトルポテンシャルの働きという視点で見れば、ファラデーの説明に納得がゆくであろう。(ファラデーの時代には、まだベクトルポテンシ

ルの概念はなかったが。) また、導線と磁力線の速度差を v で表せば、導線を切る頻度は $|v \times B|$ に比例することになるので、磁力線切断則は磁束変化則における起電力 V_1 と V_2 を区別せず、直接に V を求めていることになる。ファラデーの慧眼、さすがである。

4.3 例題解法に見る磁束変化則と磁力線切断則の整合性

ここでは、電磁誘導の典型的な例題を取り上げ、磁束変化則と磁力線切断則の整合性を見てみたい。図 5(a) のように、 xz 面上にあって x 軸方向に十分長い「コの字形」の導線 (間隔 l) の上を、電気的接触を保ちながら x 軸正方向 (図の右側) に一定速度 v で動いている导体棒がある。この空間には y 軸方向に向く静磁界 B (磁束密度) があり、電界はない。磁力線は y 軸正方向に向いて密集している。このとき、ループ ABCD に生まれる起電力 V とその発生場所を求める問題を考える。(電流を求めたい場合には回路中に抵抗素子等を入れるが、ここでは起電力のみを議論するので図では省いている。)

磁束変化則 (式 (1)) では、方形面積の時間変化から、起電力 $V=vIB$ を得る。(極性は無視。) 起電力が生まれている場所は、导体中の自由電子に働くローレンツ力より、動く棒 CD 部になる。磁力線切断則では、動く棒 CD が磁力線を切りつつ進んでいて、定量的な説明を省くが、 $V=vIB$ となって、両者による起電力の大きさと発生場所に矛盾はない。でも、見方を変えると不思議なことに気づく。

物理法則は、一定速度で直線上に動く系については、共通の式で表されるという共変性 (相対性原理) が求められる*¹。静止座標系を K 系、 x 軸方向に速度 v で動く系を K' 系としよう。図 5(a) の動作を K' 系で見るとどうなるだろうか。导体棒 CD は静止していて、「コの字型」線路全体が x 軸の負方向 (図の左側) に速度 v で動いている。図 5(b) は

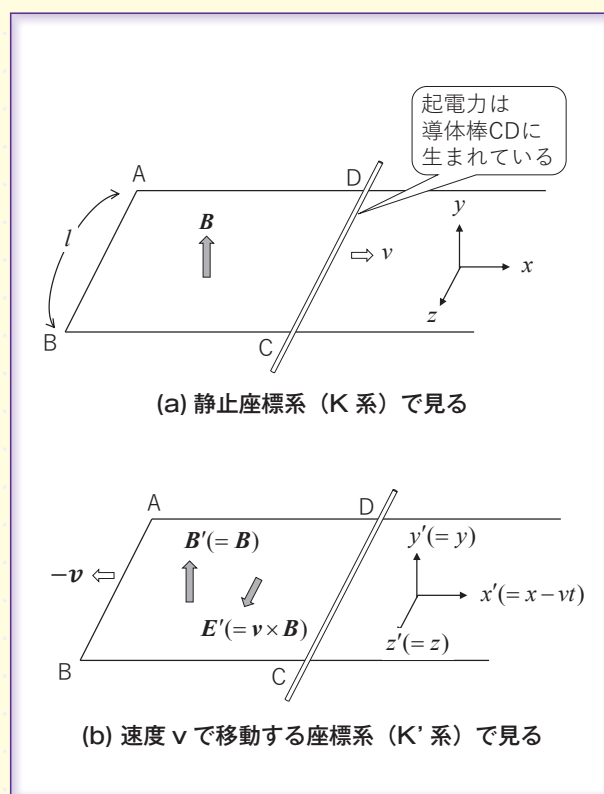


図 5 電磁誘導の典型的な例題

K' 系で見た回路構成を示している。この系で起電力を考えると、起電力の大きさは同じであるが、発生場所が辺 AB ということになる。起電力の向きは K 系での CD とは逆なので、流れる電流の向きは同じで、そこに問題はない。しかし、見る位置が変わっただけなのに、起電力の発生場所が異なるというのは、物理現象としてはおかしいということになる。

これは次のように考えると矛盾が解ける。磁界 B 中を速度 v で動くもの (人に例えて、観測者としよう) は磁界 B のほかに $v \times B$ の電界を感じるとするのである。 K' 系には磁界 $B' (= B)$ とともに電界 $E' (= v \times B)$ が存在しているのである。これは、電磁界の座標変換 ($v \ll c$ (光速) に適用されるガリレイ変換) により求められる (例えば文献 (11) の 1.3)。これで、 K' 系の動作 (図 5(b)) を見ると、辺 CD には電界 E' によって起電力 vIB が生まれ、辺 AB は電磁誘導によって生まれる起電力 (vIB) が電界 E' による起電力によって打ち消され、辺 AB での発生はなくなる。磁束変化則において、視点の違いによって起電力の発生場所が異なるという矛盾はこれで解消できる。

一方、磁力線切断則では、 K' 系の動作を次のように考える。 K 系 y 方向に向いて静止している磁力線は、 K' 系では x 軸の負の方向に速度 v で動いている。この動く磁力線が、静止している導線 CD によって切られ、 K 系と同じ向き同じ大きさの起電力

* 1 相対性原理と物理法則の共変性: ある座標系と一定速度で直線的に動いている系は慣性系と呼ばれる。ガリレオにより、どの慣性系においても物理法則は同一 (= それぞれの座標系の中で同じ式で表される) でなければならないという原則: 相対性原理、が建てられた。この性質を満たす物理法則は共変性と言われる。力学系において共変性を保つ座標変換には、移動速度が光速に比べて十分小さい場合は、ニュートン力学のベースであるガリレイ変換 (速度 v_1 で動いている電車の中で進行方向に速度 v_2 でボールを投げれば、外の人には速度 $v_1 + v_2$ になるという我々の直感に合致する変換) が適用でき、本稿の議論もその範ちゅうにある。一方、速度が光速に近い場合はアインシュタインが打ち立てた (特殊) 相対性理論に用いられているローレンツ変換が必要になる。

が生まれる。辺 AB は磁力線と一緒に動いているので、ここには起電力は生まれない。このようにして、磁束変化則と磁力線切断則が等価であること（＝整合性があること）が分かる。磁束変化則は場の説明に電磁界の相対性原理を持ち出したが、磁力線切断則は磁力線と導線の動きの相対関係だけで決まるので、直感的で分かりやすいと言えるのではないだろうか。

5 パラドックスの謎解き

4. での電磁誘導の考え方の整理を踏まえ、ファラデーのパラドックスに対する謎解きの準備ができたと思う。ただし、仮想的なもの（＝物理的実体のないもの）である磁力線の動作であるから、誰もそれを直接、見ることや測ることはできず、こう考えると辻褄が合うと言うレベルになる。磁界や磁性体の振舞いについては相対論や量子論にまで広がる難しい問題であるがゆえに、以下は、現象をざっくりと捉えた、あくまで筆者の推論である。

5.1 電磁界の相対性原理から

4.3 の例題で述べた慣性系（静止系 K と移動系 K'）での電磁界対応で考える。円筒形の棒磁石があり、観測者に対して十分大きいとする。十分に大きいとは、観測者がドラム缶の上にいる蟻のイメージ、いや、もっともっと大きな差。なぜなら、ここで扱う回転運動は加速度運動であり、相対論という共変性が成立する等速直線運動する系（慣性系）ではない。それでも、観測者の寸法を磁石のサイズに比べて十分小さいものとすれば、その周囲においては等速直線運動とみなす近似が成立する。ちょうど、自転する地球上においても、我々が見渡せる程度の範囲においては、物理法則の共変性が認められるように、その論理の手順は、

i) 棒磁石が静止している状態では、周囲に磁界 B のみが存在する。その端面上では磁力線は面のほぼ垂直方向を向いている。（K 系において磁界のみが存在する。）

ii) その磁界中を速度 v で動く観測者は、相対性原理（ガリレイ変換でよい）によって、 $v \times B$ の電界を感じるであろう。動く向きが磁石の軸に対して周方向（回転方向）であれば、磁石端面上での電界の向きは径方向になる。（K 系で磁界のみの環境において、K' 系には電界が現れる。）

iii) 一方、軸回転する棒磁石と一緒に動く（＝回転する）観測者には、磁石に対して静止状態なのだ

から磁界しか感じないであろう。（K' 系において磁界のみが存在する。）

iv) 回転している棒磁石上で、空間に静止している観測者は、ii) で $-v$ 方向に動く観測者と等価（K 系と K' 系の立場が入れ替わった）であるので、 $-v \times B$ の電界が見えていることになろう。ゆえに、回転する棒磁石では、磁界の変化はないが、それぞれの場所には $-v \times B$ の電界も存在するということである。（K' 系が磁界のみの環境であるならば、K 系には電界が存在している。）

この論理にのっとなって、図 3 の ③ と ④ を見てみよう。③ では磁石が回転してその周囲に電界が発生している。この電界が、円板と導線の両方に同じ大きさの起電力を生み出しているが、回路上では極性が反対なので打ち消され、ループ全体としての起電力は生まれない*2。④ では、導線に対する起電力は③と同じである。一方、円板に対しては、回転する円板上に現れるローレンツ力由来の電界と、回転する磁石が作る電界が打ち消されて起電力はない。ループ全体では導線部分の起電力が残り、「起電力あり」になる。

この推論は、4.1 で述べた電磁気学（マクスウェルの方程式とそのガリレイ変換）に基づいており、 $v \ll c$ の条件の下では、正しいものと思ってよいであろう*3。

5.2 磁力線切断則+磁力線回転説から

起電力発生に対する磁力線切断則と磁力線回転説を組み合わせることににより、2.2 でみてきたように、図 3 の ③ では起電力が円板に、④ では円板と導線の両方に生まれる（回路としては極性が逆なので打ち消されてしまう。）という結果を得た。これは、起電力の発生場所及びループ全体での起電力の有無に関して、5.1 と同じ結果になる。故に、「磁力線切断則+磁力線回転説」は、マクスウェルの方程式が示す電磁気学に矛盾しない。

これに対して、「磁力線切断則+磁力線静止説」

*2 この説明だけでは、ループ回路において、円板部分と導線部分に反対向きの起電力が誘起されることしか言えない。この環境では磁界の時間変化がなく、電磁誘導を表すマクスウェルの方程式では $\nabla \times E = 0$ なので、任意のループにおける電界接線成分の周回積分は 0 になり、円板と導線部分の起電力の大きさは等しいと言える。

*3 この推論が、一定速度で直線移動する慣性系に閉じていれば問題ないが、本稿のように、回転運動（非慣性系運動）に対しても、その微小領域の動きだけに着目すれば直線運動に近似できる（＝近似的に共変性が成り立つ）として、論を進めている。本稿の推論に何か問題があるとしたら、この部分になろう。

では、2.1でみてきたように、図3の③ではどこにも起電力は生まれず、④では円板に生まれるという結果になっている。これは、起電力発生場所に関して5.1の結果と異なり、ゆえに、「磁力線切断則+磁力線静止説」は誤りであろう。

5.3 棒磁石の磁力線は磁石の回転とともに回転するか

5.1, 5.2から、「磁力線切断則+磁力線回転説」はマクスウェルの方程式からの結論に一致し、「磁力線切断則+磁力線静止説」は異なる結果を示す。ゆえに、磁力線回転説が理にかなっているという結論になる。冒頭の問い「棒磁石の磁力線は磁石の回転とともに回転するか」を、ここでは「yes」と答えたい。ただし、電磁誘導現象を磁力線切断則で説明するという前提においてである。

6 おわりに

電磁誘導によって発生する起電力は、導線が磁力線を切る量に比例するというファラデーの主張の下では、棒磁石から出ている磁力線は、磁石とともに回転するという見方が、マクスウェルの方程式からの帰結に矛盾しないということを述べた。磁性体問題の本質は相対論や量子力学に及ぶ深いところがあり、本稿は、筆者がこの問題についてこう考えた、というレベルのまとめになっている。それでは、「電流が流れている円形ループを回転させれば、ループを貫く磁力線も回転しているのか」と問われれば、棒磁石と等価なのだから「同じはず」と答えたが勇気がいる。

3. でも述べたように、我が国では、この問題について、特にその歴史的経緯について、須藤喜久雄氏（等）の解説論文^{(2), (3)}が奥深いところまで行き届いており大変参考になる。また、この問題に対して、今井功氏がその著書^{(12), (13)}の中で積極的に発言している。今井氏の主張は、磁力線という仮想的なもの（＝物理的に存在が定かでないもの）を持ち出さなくても、場の理論である電磁気学（マクスウェルの方程式）で説明できるのであるからそれで十分であって、電磁誘導の法則を「導線が磁力線を切るとき起電力が生まれる」というような理論的根拠のない説明はやめよう、というものである。完成された電磁気学理論からは消えている磁力線を持ち出すのは、相対性理論によって消えたエーテルを持ち出しているようなものと言いたいのもかもしれない。それでも、「動く磁力線が電界を作る」、「動く

電気力線が磁界を作る」のイメージで電磁気学と相対論を結び付ける努力をされてきた江沢洋氏は自著⁽¹⁴⁾の中で、今井氏の批判に対して熱い持論を展開している。両氏（ともに故人）は高校生や大学生の物理教育の在り方に長く情熱を注がれてきた理論物理学者（大御所）であり、お二人の論争が問題点を白日にさらしてくれて大変面白い。本稿は、磁力線切断則+磁力線回転説により観測結果の合理的な説明（＝マクスウェルの方程式の結果に矛盾しない説明）ができ、かつ、明確なイメージによって物理現象理解が進むので、磁力線切断則も捨てたものではないとの立場である。

電磁誘導（単極誘導を含む）の重要性は回路（ループ）に発生する起電力を知ることにより、その起電力がどこに生まれているかは、発電機やモータに応用したいという実用的な意味において、どうでもよいことであろう。そのどうでもよいところにこだわるファラデーのパラドックスではあるが、電磁気学への知的好奇心を呼び起こす格好の材料ではあると思う。

■文献

- (1) 電気学会, “電気と磁気の力, 電気の知識シリーズ.” <https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=%e3%83%95%e3%82%a1%e3%83%a9%e3%83%87%e3%83%bc%e3%81%ae%e3%83%91%e3%83%a9%e3%83%89%e3%83%83%e3%82%af%e3%82%b9%25e3%2580%2580%e9%9b%bb%e6%b0%97%e5%ad%a6%e4%bc%9a&mid=C246A85D733EBEADCD05C246A85D733EBEADCD05&FORM=VIRE>
- (2) 須藤喜久雄, 清水孝一, Faradayにおける単極誘導の実験, 科学史研究, II期 24巻, pp. 106-113, 岩波書店, 東京, 1985 夏. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhsj/24/154/24_106/_pdf/-char/ja
- (3) 須藤喜久雄, 清水孝一, 高村泰雄, 単極誘導: 磁力線静止説と磁力線運動説との相克, 科学史研究, II期 24巻, pp. 155-163, 岩波書店, 東京, 1985 秋. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhsj/24/155/24_155/_pdf/-char/ja
- (4) H. Härtel, “Unipolar induction; A messy corner of electromagnetism,” Euro. Phys. Education, vol. 11, no. 1 1309-7202, pp. 47-59, 2020.
- (5) C. Baumgärtel, R. T. Smith, and S. Maher, “A novel model of unipolar induction phenomena based on direct interaction between conductor charges,” Progress in Electromag. Res., vol. 171, pp. 123-135, Jan. 2021.
- (6) 唐沢好男, 謎解き電磁気学, ネット公開私製本, 2023. http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-075_EM_Wonderland.pdf
- (7) E. H. Kennard, “Unipolar induction,” Philosophical mag., Series 6, vol. 23, pp. 937-941, 1912.

- (8) S. J. Barnett, “On electromagnetic induction and relative motion,” Phys. Rev., Series I, vol. 35, pp. 323-336, 1912.
- (9) E. H. Kennard, “The effect of dielectrics on unipolar induction,” Phys. Rev., Series I, vol. 5, pp. 355-359, 1913.
- (10) 宇野 亨, 白井 宏, 電磁気学, コロナ社, 東京, 2010.
- (11) 唐沢好男, 無線通信物理理想技術へのアプローチ, コロナ社, 東京, 2021.
- (12) 今井 功, 電磁気学を考える, pp. 236-251, サイエンス社, 東京, 1990.
- (13) パリティ編集委員会 (大槻義彦責任編集), 続 間違いだらけの物理概念, 丸善, 1995. (今井 功, 磁力線の運動に意味があるか?, p. 123-141) .
- (14) 江沢 洋, 上條隆志 (編), 相対論と電磁場 (江沢

洋選集 II), 日本評論社, 2019.

(2025 年 5 月 9 日受付, 10 月 30 日再受付)

唐沢好男 (正員: フェロー)

1950 長野県生まれ。電波の研究は偶然が導いてくれた道であったが、長く歩み続けてみると面白いことがいっぱい。研究者 (KDD), 研究マネージャー (ATR), 大学教員 (電通大) を経てフリーに。今は、次世代を担う若者に向け、電波関連の技術レポートをせっせと書いている。唐沢研究室 HP より公開中。



私の留学論： 留学の意味と成功への道

若者よ、
世界に
出よう！

電気通信大学 王 港帰 Ganggui Wang

1 はじめに



2019年6月、私は中国浙江省にある浙江大学城市学院を卒業した。学部4年間の授業や課外活動にそれなりに打ち込み、卒業研究にも力を注ぎ、平均的な成果を取めた。自分では「ごく普通の大学生」だったと思っている。

ただ、学部卒業後の進路は少し普通とは違っていた。就職もせず、進学先も未定のまま、学部3年次から温めてきた日本留学の計画を胸に、電気通信大学や早稲田大学などの志望大学の研究室訪問のために一人で何度か日本を訪れた。そして2019年9月、電気通信大学の修士課程入試に合格した。その後、2年間の修士課程と3年半の博士課程を経て（図1）、2025年4月に同大学の助教として着任した。

2 留学の意味



人は実体験を通じて成長する。留学は、しばしば「人生の引き出しを増やし、視野を広げる経験」と語られる



図1 電気通信大学博士課程の修了式

が、未経験者には、その具体的な価値が見えにくいかもしれない。語学力の向上や海外の友人作りなどにとどまらず、視野を広げ、筆者が重要だと考える「人としての基盤を底上げする」ポイントは大きく二つある。

2.1 情報源が増える

グローバル化が進んだ現代とはいえ、私たちは想像以上に暮らす地域と話す言葉に縛られている。母国語で受け取る情報、国や地域に固有の文脈や価値観—そうしたフィルタを通してのみ、世界を見ていると、情報源は意外なほど限られるし、その事実には自分では気づきにくいものである。

母国を離れて暮らすと、留学先のニュースや議論、その根拠となる公式資料に直接触れるようになる。同じ出来事でも、調べる手段や参照できる情報源が格段に増え、意思決定や学びの質が確実に高まる。留学は、現代社会で不可欠な「情報の入口」を飛躍的に広げてくれるのである。

2.2 考え方が増える

国が変われば、前提も常識も一変する。異なる社会に溶け込むとは、その国の思考様式に“寄せて”日々を営むことだと考える。それは自分の元々の考えを“上書き”することではなく、「思考回路を一つ増やす」ことに近い。場面に応じて回路を切り換えられるようになると、研究や仕事でも発想の選択肢が広がり、ほかの人が思い付かないアイデアにたどり着けるようになる。それはとても魅力的な変化だと言えよう。

国際会議（図2）での発表をはじめとする国際交流の意義も、まさにそこにある。自分とは異なる考え方を持つ人との交流は、新たなアイデアを得るための近道だと考えている。



図2 フィリピンの国際会議で発表したときに滞在したホテル

3 留学の成功への道



留学の「成功」を一つの物差しで測るのは難しい。語学力を鍛えたい人もいれば、研究で成果を出したい人もいるからである。とは言え、目的が異なっているとしても、共通して掲げられる重要な目標があるとすれば、それは「文化への理解」だと筆者は考える。むしろ明確な目標が定まっていない場合は、この「文化への理解」を留学の中心に据えるのがよいだろう。

なぜ、それほど大事なのか。留学生活のあらゆる場面では、文化への理解が前提として求められるからである。異国で現地の言葉を使って意思疎通し、人間関係を築くには、文法や語彙を覚えるだけでは足りない。母国で身に付けた思考の前提のままでは、言葉の意味は分かっても「なぜそうするのか」という理由や文脈が見えにくく、会話がかみ合わない場面が生じる。実際、日本で暮らす外国人が、一生懸命に日本語を学んでいることは伝わるのに、会話がかみ合わず苦勞する。その多くは、文化理解や「日本語で考える思考回路」がまだ十分に育っていないことに由来する。

では、どのようにして文化への理解を深めるべきか。筆者は次の二つを勧める。

3.1 「暗記」から「模倣」へ

基礎が固まったら、ネイティブの話し方を徹底的にまねる段階に移るべきである。日常会話の定番の切り返し、無意識の語彙選択（微妙なニュアンス）、イント

ネーションなど、こうした「言葉の使いこなしの勘どころ」は、教科書では身に付きにくい部分である。身近な人との会話はもちろん、YouTube やポッドキャストなども活用して、耳と口を慣らすことが重要である。これにより会話が自然になり、言語に潜む文化の細部が体に染み込んでくるのである。

3.2 「自分の話」より「相手の今」を話題に

留学先では、自分の生い立ちや母国の紹介を話す機会が多いものの、相手の関心を長く引きつけるのは、その国・地域の「いま」に関する話題である。流行している音楽や番組、スポーツ、社会のニュースなどに意識的に触れておくことが有効である。相手との会話がスムーズに進むことで、関係づくりが格段に楽になるのである。

結局のところ、私見では、留学を成功させる上で重要な要素とは、「その社会で通じる文脈を理解し、その思考回路で考え、振る舞えるようになったか」という問いに、どれだけ「はい」と答えられるかにかかっていると見える。文化への理解を軸に据えることが、どんな目的の留学であっても、確かな前進につながるのである。

4 むすび



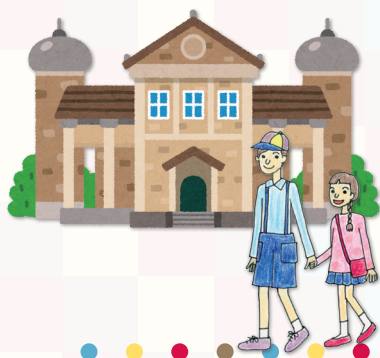
振り返れば、筆者にとっての留学は知識を身に付ける手段だけではなく、「情報の入口を増やす」「思考回路を広げる」という、人間としての基礎力を高める大きな機会だった。その上で、勉学と研究に励み、5年半を通して充実した留学生活を送ることができたと思う。

本稿が、皆さんにとって留学を新たな視点から考えるきっかけとなれば幸いである。

王 港帰

2019 Zhejiang University City College 学士課程卒。日本に留学。2021 電通大・情報理工学研究科・修士課程了。2025 に同研究科博士課程了。2025 電通大助教に着任、研究・教育活動に従事。主な研究分野は無線通信、車両ネットワーク、機械学習など。





大阪市立科学館

東野武史 Takeshi Higashino 奈良先端科学技術大学院大学

1 はじめに

2024年8月1日にリニューアルオープンし、35年ぶりに1階から4階までの展示場全体が改装された大阪市立科学館を訪れました。科学館のエントランス外壁(図1右)には、だまし絵やトリックアートが描かれており、入館前からワクワク感を高めてくれます。エントランス(図1左)で広報担当・主任の竹浦雅美様に科学館に関する案内をして頂いたあと、見学しました。

2 科学館について

エントランスでは、地下1階のプラネタリウムを含む4階建ての吹き抜け構造が視界に広がりました。各階にはテーマ別に実験装置や実物資料が展示されています。2025年8月現在、大阪市博物館機構の6館が選んだ「大阪の宝」を紹介する企画展が、館内及びWeb上(<https://osakahaku.ocm.osaka/>)で開催されています。館内では約20点の展示が各所に配置されており、来館者が自由に観覧できるようになっています。例を挙げる



図1 (左) 科学館内部は吹き抜け構造になっており、左側に見えるエレベータでエントランスから4階まで移動できます。(右) 外壁に設置された「だまし絵」では見た角度によって景色が変化します。

3 「科学の探究」展示場

このコーナーでは、宇宙、大阪と科学、科学の歴史をテーマに、多様な展示が行われていました。太陽系惑星の大きさや重さの比較、月の満ち欠けの仕組みなどが、来館者自身が地球になった視点で体験できるように工夫されています。火力・原子力・燃料電池などの発電の仕



図2 写真右下の霧箱は、大阪市立大(現・大阪公立大)宇宙線研究所が、岡山県備前市三石にある旧船坂トンネル(JR山陽本線)内の地下宇宙線観測所に設置し、高い透過性を持つ宇宙線(ミュー粒子など)の観測に用いていたと考えられています。

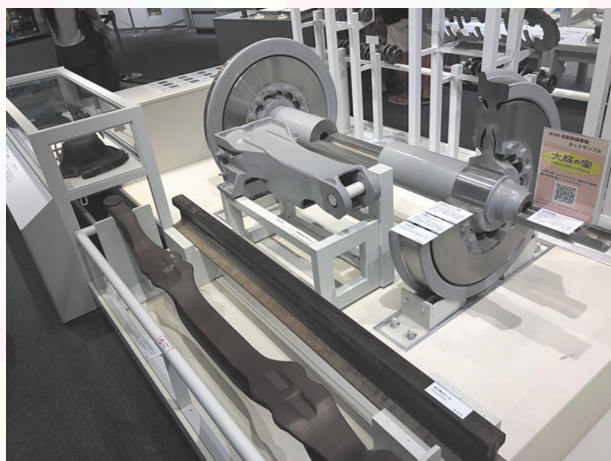


図3 時速 300 kmで走る N700 系新幹線の車軸です。両端に取り付けられた車輪は直径 860 mmで、鉄に約 0.7 %の炭素が含まれる「高炭素鋼」と呼ばれる材質です。炭素を含むことで純鉄よりも固くすることができます。強度を保つことができます。大阪の日本製鉄株式会社が製造しました。

組みや、宇宙線観測器、火花放電による電磁波の発生装置なども展示されています。「大阪と科学」のコーナーには、湯川秀樹博士や南部陽一郎博士の写真が飾られ、その間に「霧箱」が展示されていました（図2）。

4 「物質の探究」展示場

鉱物、プラスチック、セラミックなど、物質に関する多様な展示が行われていました。数多くの展示品がある中、「大阪の宝」に選定された N700 系新幹線で使用される車軸を紹介します（図3）。

5 「みんなでたのしむサイエンス」展示場

転がるボールや合わせ鏡、竜巻発生装置やパラボラに

よる集音、偏光ガラスの仕組み、音の共鳴、電磁石を使った釣り遊びなど、体験型展示が充実していました（図4）。

6 「ブラックホールと重力波」展示

筆者が訪問した際には、ちょうど重力波をテーマにした企画展が開催されていました。アインシュタインが一般相対性理論（1916 年）で予言した重力波は、物体の質量が作る空間のゆがみによって生じます。しかし、超新星爆発のように、莫大なエネルギーを放つ天体現象で発生した重力波であっても、地球に到達する頃にはごく僅かなゆがみしか残りません。東大宇宙線研究所の重力波望遠鏡「KAGRA（かぐら）」が観測しようとしているゆがみの大きさ（ 10^{-21} ）は、地球と太陽の距離が水素原子 1 個分だけ伸び縮みする程度という、想像を絶する小ささです。KAGRA では、1 辺 3 km の L 字形の装置の両腕を往復するレーザ光の干渉の変化を精密に測定することで、この極めて微細な長さの変化を捉えます。展示では、レーザ干渉計の原点とも言えるマイケルソン干渉計が紹介されており（図5）、重力波観測の基礎となる原理を理解することができました。

7 プラネタリウム

関西最大級、直径 26.5 m のドームでは、視界いっぱいに広がる星々の姿が投影され、圧巻の迫力でした。「いて座の楽しみ方」という番組では、天の川銀河の中心にある太陽の約 400 万倍の質量を持つブラックホール「いて座 A*（エー・スター）」の最新観測写真を交え、いて座の魅力と宇宙の壮大さが紹介されました。解説員によるディープな天文トークに引き込まれ、あっという間に 45 分間が過ぎました。



図4 （左）筒の入口付近で音を立てると、筒の内部で反射した残響音が聞こえます。
（右）偏光ガラスを通してエントラス上部に隠されたステンドグラスを見ることができました。



図5 マイケルソン干渉計。同じ振幅を持つ二つの光線が同じ場所から同時に出発し、西に向かう経路と南に向かう経路の終わりに反射鏡を置き、光線を干渉させると完全に振幅が2倍になる波と2倍にならない波が発生します。

8 おわりに

訪問日はお盆の中日だったため、館内は大変混雑していましたが、珠玉の展示が老若男女を引き付けていました。筆者はプラネタリウムを観覧した後、ミュージアムショップで天文関連の書籍とグッズを購入し、地下1階のカフェで宇宙にちなんだメニューを堪能しました。地下1階には、日本で最初のプラネタリウム投影機である「カール・ツァイスII型プラネタリウム」(大阪市指定文化財、日本天文遺産)も展示されています。更に

Access

大阪市立科学館

所在地：〒530-0005 大阪市北区中之島 4-2-1

交通アクセス：<https://www.sci-museum.jp/info/access/>

カフェ周辺では、期間限定の特別展示として、1946年(昭和21年)に発生した南海トラフ地震に関する、当時極秘扱いとされていた記録が公開されていました。

大阪市立科学館の公式サイトでは大阪駅などからのアクセス方法も詳細に案内されており、便利な立地にあります。是非、御家族や御友人と一緒に訪れてみて下さい。

東野武史 (正員)

平17 阪大大学院博士後期課程了。博士(工学)。平24 奈良先端大准教授。平26 Georgia Institute of Technology, Visiting Scholar。光ファイバ無線通信、屋内測位に関する研究に従事。



編集という名の冒険 ——挑戦し続ける雑誌づくりのために——

和文マガジン編集委員長 山口実靖
Saneyasu Yamaguchi

本誌 B-plus をお読み下さっている読者の皆様に、心より感謝を申し上げたい。しかも巻末言までお読み頂けるとは、編集委員長としてこの上ない喜びである。

多くの学会が多様な雑誌を発行しているが、B-plus はその中でも特に個性と魅力にあふれている。技術解説の特集から開発物語、街探訪記、若者鼓舞の海外渡航記、科学館・博物館めぐり、研究者歴、ツール解説、技術と制度の考察、通信技術写真、子ども向け技術紹介まで——ほかの学会誌では読めない強力な記事が並ぶ。魅力的な記事は、編集や校閲に携わっても痛快である。開発物語の原稿を読むと、心が躍る逸話に次々と出会える。「これは絶対に面白くなる！」と直感したときは、「もっと深掘りして書いて下さい」と著者をお願いしている。すると、技術を愛する著者が様々な持ちネタを披露してくれる。出版が楽しみになる。

2025 年 6 月から編集委員長を拝命したが、本誌の魅力は言うまでもなく、先輩編集委員の方々の御尽力の賜物である。この輝きを守り続けたい。創刊当時の記事を読むと、独自の企画が多く、新しいものを生み出そうとする強い意志が伝わってくる。今は見られなくなった特集も多く、試行錯誤と取捨選択を重ねた先輩方の研究者魂を感じる。創刊時の編集委員の方々からお話を伺うと、企画の主旨が単に「面白い記事」「有益な記事」にとどまらず、「日本の子どもたちの理系人気を高めたい」といった大きな志を持っていたことが分かる。私はこれまで、単に楽しんでもらえる記事を届けたいと考えていたが、これだけでは雑誌が小粒になってしまうことに気付かされた。そして、「先輩方の意思を継ぐ」とは、すばらしい過去の特集を守ることではなく、先輩たちのように（たとえ失敗しても）新しい企画を立ち上げ、挑戦し続けることだと考えるようになった。

新企画ではないが、かつて存在し、今は見なくなった特集の幾つかを復活させたいと考えている。第一に（連載ではないが）私が一読者として大変に参考にした「難関国際会議・論文誌チャレンジ」特集を再び実施したい。論文の書き方を扱う記事は多いが、「トップカンファレンスやトップジャーナルを通すための具体的な戦略」を解説する記事はほとんどない。Rebuttal（査読者への反論）の書き方を解説する記事など、他誌では見たことがない。また、これに関連して国際会議参加報告も再び充実させたい。多くの研究者が待ち望んでいる特集だと信じている。更に、著名論文の「簡易解説」も有用だろう。膨大な論文が日々生まれる現在、サーベイを助ける記事は大きな価値を持つと考える。今年度も新たな編集委員に加わって頂いた。20 代の若手も複数いる。新しい発想や取

組みが生まれ、大きく発展できると思う。

ここで、「良い編集・校閲」とは何かを考えてみたい。編集と校閲は厳密には異なるが、ここでは一体のものとして扱う。編集・校閲の目的は、記事を“自らの手で”良くすることである。査読の目的が「論文の評価」であるのに対し、編集・校閲の目的は「記事の改善」である。記事の問題点の指摘の際に非難する必要はない。著者の協力なくして改善は成し得ない。査読者や校閲者の指摘が攻撃的に見える場合は「編集委員がトーンを和らげる」配慮をするとよい。経験の浅い著者は、どんなに丁寧な表現の指摘でも不快に感じることもある。

記事を良くするには、主に二つのことが考えられる。一つは「分かりやすくすること」。記事が過度に専門的で、理解しづらいことが多々ある。専門外の人にも理解できるように、著者に協力をお願いする。特に解説記事ではこの努力の効果が大きい。もう一つは「魅力的な記述を増やす」こと。編集・校閲者や読者が知りたいこと、興味を持ちそうなことを積極的に書いてもらう。例えば「開発物語」では、Linux カーネルの話に Linus 氏との会話を加える、Mathematica 開発では Steve Jobs 氏とのやり取りを紹介する。このような工夫で記事がぐっと面白くなる。これは特に、非解説記事（開発物語や「若者よ、世界に出よう！」など）で効果が大きい。

テーマ選びでは、多くの読者が関心を持つ旬の話題と、時代を超えて意義のあるテーマが重要と思える。「接地（アース）」の解説記事は大人気で、後者の好例と言える。また、私は得意ではないが、多くの読者の目を引くキャッチーなタイトルにも挑戦したい。

最後に、編集・校閲者の理想とかけ離れた原稿に出会うことがある。例えば、過度に実装や技術に偏った記事や、専門外の読者に理解できない記事などである。そのような場合でも、読者にとって「分かりやすく、読みやすい」原稿になるよう、著者に大幅な修正や加筆をお願いしてほしい。もちろん著者は多忙である。可能な限り著者の負担を増やさないよう配慮しながら、編集委員の影響力は大きい。限界もある。過度に責任を感じず、ベストエフォートで臨めばよい。

良い雑誌づくりとは、読んで楽しい記事、役に立つ記事を発信し、日本の発展に資することである。そのためには、編集委員の皆さんが記事を楽しむことが必要であると信じている。

編集委員として活動できるのも、（出版時点）あと 1 年ほどとなる。残された時間で、少しでも本誌の発展に貢献したい。私は「話し掛けると執筆を頼まれてしまう人」と評判が立つかもしれない。多めに見て頂きたい。

NEXT ISSUE

2026 年夏号（第 77 号）2026 年 6 月 1 日発行

小特集 大規模言語モデルと 生成 AI 技術が開く未来

私の研究者歴：守倉正博 佐和橋 衛
開発物語：HDD の垂直磁気記録
街 plus 探訪：イランカラブテ！「札幌」へようこそ

子どもに教えたい通信の仕組み：ジュニア会員向けページ
液晶ディスプレイ

……他、御期待下さい

Editors Note

「数学は工学の未来を支える知の道具」の小特集を組みました。小特集外には「95% 信頼区間の求め方」の解説もあります。測定結果が意味のあるものか、雑音（ノイズ）かに悩んでいる学生の方々には、是非とも読んで頂きたいです。世界中を巻き込んだ TRON の開発物語も非常に魅力的です。巻末言では、良い校閲や良い編集とは何かが書かれています。よろしければ御一読下さい。（S. Y.）

春は私が大好きな桜の季節。読者の皆様の中には卒業や別れを控えている人もいらっしゃると思いますが、来月には新しい生活が始まります。本号が通信の世界で学び続け未来を切り開く皆様への小さなエールとなれば幸いです。（K. S.）

モバイルネットワークを対象とした大規模デジタルツイン技術を担当しました。アンテナ・無線技術のみならず、大規模ネットワーク運用における AI 技術にも興味を持って頂ければ幸いです。（T. H.）

小特集、余り貢献できずにすみません。統計学や数学は学生時代にもっと勉強しておけばよかった、と今から思う分野ですが、必要にならないと意義も分からないので、必要ときに勉強するしかないのかもしれません。（D. K.）



2026 年春号（第 76 号）
2026 年 3 月 1 日 発行

EDITORIAL COMMITTEE

編集委員長 山口実靖

編集副委員長 山本 嶺 橘 拓至

編集委員

飯田大輔	伊藤敬義	伊藤暢彦	上野貴弘
金友 大	木下雅之	古川剛志	小南大智
櫻井利昭	沢田健介	立神光洋	道後千尋
中西孝行	中野雄介	中村光貴	長谷川直輝
羽多野一磨	早馬道也	東野武史	干川尚人
松田一孝	松室亮之	水野 修	山下泰輝

本誌の愛称は「B-plus」、正式名称は「通信ソサイエティマガジン」、
「IEICE Communications Society Magazine」です。
本誌掲載論文を文献引用する際は、邦文略称「信学通誌」、英文略称
「IEICE Commun. Mag.」を用いて下さい。

通信ソサイエティマガジン B-plus へのお問い合わせ

- ☐ ご意見、ご要望：b-plus@ieice.org
- ☐ ホームページ ▶ <https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/index.html>
- ☐ B-plus 冊子体購入のお申込みはこちら ▶ https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/order_y.html.utf8

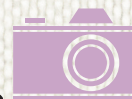
複写される方へ

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>

発行人／白石 智
発行所／一般社団法人 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館
Tel：03-3433-6691（代表） 振替：00120-0-35300
制 作／株式会社 太平印刷社
東京都品川区東品川 1-6-16
© Copyright 2026 IEICE. All rights reserved.



通信がみえる一枚の写真

共同溝 筑波大学
～茨城県つくば市天王台～

干川尚人（正員）



筑波大学の共同溝は、電力・通信・ガス・水道など複数のライフラインを一括して地下に収容するための構造物です。電柱や電線を地中化できることからキャンパス内の景観が向上し、また地面を掘り返さずに点検や修理が可能のため、保守性にも優れています。この共同溝は、1970年代のキャンパス造成と同時に、「地上を掘り返さずにライフラインを更新できる大学」を目指して整備され、完全無電柱化された筑波キャンパスのインフラを支えています。

キャンパス地下には総延長約 14 km の共同溝が敷設されており、幹線部は北地区から南・西地区まで

南北約 4 km を一直線に貫き、そこから枝線が各学系棟や病院に接続されています。なお、施設部の方によると、この溝路は 25 ～ 35 cm の厚みを持つコンクリートブロックモジュールを埋め立てて組み立てられており、そのモジュールの内部は幅 2.3 ～ 4.0 m、高さ 2.0 ～ 3.0 m で、溝路内の立地点は地上から 6.0 ～ 8.5 m くらいの深さになるのではないかとのことです。この溝路は非常に丈夫で、2011 年の東日本大震災の際にも、地上設備と比べて被害が非常に少なく、災害時にも強いインフラであることが実証されたそうです。



写真を募集致します

マガジン編集委員会では、「通信がみえる一枚の写真」をテーマに写真（電子ファイル（jpeg）あるいはプリント）、タイトル、説明文（約 300 字）を募集致します。詳細は、通信ソサイエティマガジン HP（<http://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/ieice/photo.html>）を御参照下さい。

送り先：

【郵 送】〒 105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン担当

【メール】b-plus@ieice.org までお送り下さい。

聴講
無料

～Vision60セッション:60年先の未来を語ろう～

未来60年賞チャレンジコンテスト

最終選考会

開催日時

2026年3月10日(火) 10:30～15:15

開催場所

九州産業大学 1号館 S201 (総合大会会場)

FINALISTS

8人のファイナリスト



山崎 雄大 (東京科学大学)

脳と世界を結ぶテラヘルツBMI: 侵襲・高容量インターフェースによる未来型コミュニケーション基盤



別府 翔平 (KDDI総合研究所)

量子で視て、量子で考える世界～地球規模の全量子分散処理に向けて～



井上 飛鳥 (NTT)

誰もが使える光量子チッププラットフォームの実現—光が照らす持続可能な情報社会への道—



鳴海 紘也 (慶應義塾大学)

折紙の自動変形により大量生産可能な立体回路



萩原 圭島 (中部大学)

生体・デジタル完全同期: 分子通信による「リアルタイム・バイオツイン」



山口 彪斗 (北海道大学)

痛みを知るアバター: 侵害受容フィードバックによる自己保護トレイグジスタンス



松浦 未来 (中部大学)

コグニションガイド～教える人の思考を冒険するクラス～



菊澤 百々菜 (中部大学)

HLE Floor: 歩くだけで健康寿命を貯金する都市床

【問合せ先】 電子情報通信学会未来60年賞事務局
mirai60@ml.ieice.org

