

Fundamentals Review

2025 January Vol.18 No.

3

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

ごあいさつ

191 論文誌の現状と今後の編集方針 岡田 実

解説論文

193 超音波による物体の非接触操作 小山大介

204 複雑ネットワーク上の感染伝播モデルの解析と制御 足立亮介

213 現場での高度な ECPR を可能とした
「移動型緊急手術室ドクターカー V3」の開発とその症例等
浅川拓克, 吉村有矢, 今 明秀, 安部信行

218 車両挙動情報を用いたオートエンコーダによる
路上障害物検知に関する研究 藤井雅弘, 山根惇秀

その他

226 ESS ニュース

226 NOLTA, IEICE 特集号 青森 久

227 研究会に行こう!

227 バイオメトリクス研究会 (BioX) 高野博史

228 高度交通システム研究会 (ITS) 高取祐介

228 回路とシステム研究会 (CAS) 笠松大佑

228 システム数理と応用研究会 (MSS) 劉 健全

229 思考と言語研究会 (TL) 坪田 康

230 安全・安心な生活と ICT 研究会 (ICTSSL) 大塚 晃

230 ハードウェアセキュリティ研究会 (HWS) 坂本純一

231 VLSI 設計技術研究会 (VLD) 桜井祐市

232 イメージ・メディア・クオリティ (IMQ) 研究専門委員会 工藤博章

233 国際会議開催報告

235 International Workshop on Security 佐竹翔平

East Asian School of Information Theory 開催報告 渡辺 峻, 安永憲司

237 だより

237 我らが東京都市大学 林 正博 (東京都市大学)

241 受賞者の声

241 令和 5 年度 Fundamentals Review ベストオーサー賞

243 開催案内

245 論文募集

Review

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内
電話 (03) 3433-6691 (代) FAX (03) 3433-6659
E-mail:office@ieice.org 振替口座: 00120-0-35300

IEICE 電子情報通信学会
基礎・境界ソサイエティ / NOLTA ソサイエティ

Preface

191 The Past and Future of the Editorial Board Minoru Okada

Review Papers

193 Noncontact Manipulation of Objects Using Ultrasound
Daisuke KOYAMA

204 Analysis and Control of Epidemic Spreading Model over Complex
Networks Ryosuke ADACHI

213 Development of Doctor Car V3 as Mobile Operating Room for
Emergency Surgery and Prehospital Extracorporeal Cardiopulmo-
nary Resuscitation

Takukatsu ASAKAWA, Yuya YOSHIMURA, Akihide KONN, Nobuyuki ABE

218 Road Obstacle Detection by AutoEncoder Using Vehicle Driving
Information Masahiro FUJII, Atsuhide YAMANE

Miscellaneous Articles

226 ESS News

227 Let's go to IEICE Workshops!

233 International Conference Report

237 Campus Report

241 Winners' Voice

243 Call for Participations

245 Call for Papers



論文誌の現状と今後の編集方針

The Past and Future of the Editorial Board

論文誌編集委員長 岡田 実

1. はじめに

2024年より基礎・境界ソサイエティの論文誌編集委員長を仰せつかっております。基礎・境界ソサイエティの論文誌は、1968年に電子通信学会論文誌A第1号の発行以来、電子・通信・情報科学の基礎的な研究から他分野との境界領域研究まで、幅広い分野の研究成果を公表し、学术界における情報共有のプラットフォームとして機能してきました。現在では、英文論文誌A(EA誌)と和文論文誌A(JA誌)の2誌を発行し、国内外の研究者に質の高い研究成果を発信する機会を提供しています。しかし、この分野を取り巻く環境が変化しており、論文投稿件数の減少が続いている状況です。本稿では、論文誌の活性化を行い、持続可能な活動を行うため、論文編集委員会の活動と今後について議論します。

2. 論文誌の現状

論文誌としての価値にとって、掲載論文の質が最も重要であることは言うまでもありません。本誌の編集委員、査読委員の皆様には、これまで多大なる尽力により、高水準の論文を安定的に掲載して頂いており、深く感謝申し上げます。

しかしながら、本論文誌の参照性とインパクトファクタが低いことが課題として挙げられます。図1に電子情報通信学会英文論文誌の最近のインパクトファクタの推移を示します⁽¹⁾。現在まで、論文誌の早期公開等インパクトファクタ向上の対策にかかわらず、4誌とも0.4~0.7の範囲で推移しており、同分野のトップジャーナルに比べると見劣りするといわざるを得ません。特にEA誌は2023年度0.4と落ち込んでおり、深刻な状況です。

海外研究者、特にアジア圏の研究者からは、インパクトファクタ及びそれをもとに算出される四分位(Quartile)指標が低い論文誌への投稿は、研究費獲得に不利であるとの声が届いています。更に、図書館やオンラインでのEA誌掲載論文が容易にアクセスできる状態にないこと、論文誌の国際的な研究コミュニティ内での認知度が低いことも相まっ

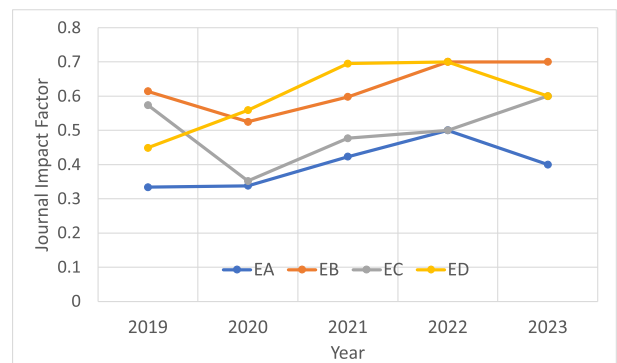


図1 英文論文誌インパクトファクタの推移

て、特に海外からの論文投稿数を増やす上でインパクトファクタの低迷は大きな障害となっています。

他方、JA誌については、投稿数の減少は更に深刻で2024年1月から発行期間を隔月にすることとしています。減少傾向は続いており、このままでは、隔月化しても論文誌としての体裁を保つことが難しい状況に追い込まれます。JA誌低迷の一端は、日本の大学における業績評価が国際的な学会誌への論文掲載を重視しており、大学に所属する研究者は英語論文の投稿を選択する傾向にあることにあります。更に、若手研究者の減少がそれに拍車をかけています。

3. 編集委員会の方針

インパクトファクタ向上による論文誌のブランド力向上は、一朝一夕に実現することが困難です。ソサイエティや各研究専門委員会と協力しつつ、(1)注目度の高い分野の解説論文を掲載し、引用数を増やす、(2)掲載論文のオープンアクセス化やプリプリントサーバとの連携強化などの取り組みにより、研究コミュニティへのアクセス性を高める、(3) X (旧 twitter) や LinkedIn などの SNS を活用し、論文情報を積極的に発信する、といった取り組みを進めていきます。

編集委員会は、迅速な査読処理を強みとしてきましたが、近年、研究分野の多様化に伴い、査読者の確保が困難なケー

スも発生しています。一部の論文は、査読期間が長期化し、かつ、処理が不確実になっています。この問題に対処するため、短期の対策として、査読期間超過論文の確認と関係編集委員、査読委員へのリマインドの連絡を編集委員会ごとから原則 1 週間ごとに行うこととしました。この対策により、大幅に査読期間を超過した論文数の削減ができています。

査読期間短縮の更なる対策として、(1) 研究専門委員会と連携した新規分野に対応できる専門家ネットワークの構築、(2) 「特急査読」制度や査読者への報酬制度の導入といった査読期間の短縮方法の検討、(3) 盗用・剽窃チェッカーや生成 AI 活用による査読者の負荷軽減といった新しい取り組みについて検討を進めていきます。

これらの取り組みを通じて、インパクトファクタを引き上げ、同分野におけるトップジャーナルとの差を縮めることを目標とします。定期的に KPI を評価し、必要に応じて施策を修正することで、持続的な成長を目指します。

文 献

- (1) Clarivate, "Journal Citation Reports," <https://jcr.clarivate.com/jcr/home>, (参照 2024-10-14).

著者紹介

岡田 実 (正員)

1990 電通大通信工学科卒。1992 阪大院工学研究科通信工学専攻修士了。1993 同大学工学部電気工学科助手。1999 Southampton Univ. Visiting Researcher。2000 奈良先端大情報科学研究科助教授。2006 同教授。無線通信、デジタル放送、ワイヤレス給電の研究に従事。

超音波による物体の非接触操作

Noncontact Manipulation of Objects Using Ultrasound

小山大介 Daisuke KOYAMA

アブストラクト 超音波の放射力を利用すると空中で物体を非接触で浮揚・操作することができる。本稿では超音波による非接触操作技術とその応用例を紹介する。固体中及び閉空間内の媒質中に発生する超音波の共振モードを利用することにより、効率的に物体を浮揚・操作することができる。有限要素法による数値シミュレーションによって、装置内の音場、物体に作用する音響放射力、物体の捕捉位置を予測可能であり、装置の開発に活用することができる。時間的・空間的に装置の振動分布と音場を変化させることにより、物体の浮揚位置を様々な軌道上で制御することができる。

キーワード 音響浮揚, 音響放射力, 音響定在波, 共振モード

Abstract It is possible to levitate and manipulate objects without contact by utilizing the radiation force of ultrasound. In this paper, I introduce the concept of a noncontact manipulation device utilizing ultrasound. The generation of resonant modes in solids and enclosed media enables the efficient levitation of objects. The acoustic fields, the acoustic radiation forces acting on objects, and the positions at which the objects are trapped can be predicted by numerical simulations using the finite element method, thereby providing crucial insights for the design of the device. The positions of trapped objects can be controlled on various trajectories by adjusting the acoustic fields in a timely and spatially precise manner.

Key words Acoustic levitation, Acoustic radiation force, Acoustic standing wave, Resonant mode

1. はじめに

現在産業分野で活用されている超音波技術は、主にエコー診断やソナーのような通信的応用と超音波洗浄やホモジナイザのような動力的応用、SAW (Surface acoustic wave, 表面弾性波) フィルタのような電子デバイス応用に大別できる。この中でも特に、超音波の動力的応用では比較的音圧振幅の大きい超音波が用いられる。高音圧を伴う音波では、飛行中のジェット機から発せられる衝撃波のように、音波の圧力振幅が大きくなるにつれ音波の非線形効果が顕著になり、音波の波形がひずむことはよく知られている。このような波形ひずみのほかにも現在様々な音波の非線形現象が活用されており、その一つとして“音波が押す力”を利用した技術が挙げられる。そもそも単一周波数からなる連続超音波では時間平均しても正圧と負圧が相殺され0となるはずであるが、二次の微小量を含めた非線形領域まで考慮した場合、時間平均すると直流成分が発生する⁽¹⁾。この音波の直流成分、すなわち

音波が押す力は音響放射力 (若しくは単位面積当たりの放射力として音響放射圧) と呼ばれる。実際に空气中を伝搬する強い集束超音波を指先に当てると、指先の表面が僅かに変形し音響放射力を感じることができる。この現象を利用して、空中タッチディスプレイのようにあたかも物体に触れているかのように指先に触覚を提示させる超音波ハプティクス技術も開発されている⁽²⁾。そのほかにも音響放射力は現在様々な分野で用いられており、例えば医療分野では瞬間的に生体内に音響放射力を作用させ、生体組織のかたさを診断・計測する超音波エラストグラフィとして活用されている⁽³⁾。

この音響放射力を用いることにより、物体を空中に非接触で浮揚させることができる。読者諸氏もどこかで一度は目にしたことがあるかもしれない。更に超音波で物体の浮揚状態を保ったまま、超音波の空間分布を変化させることにより、物体を非接触で操作・搬送させることも可能である。集光したレーザー光によって細胞などの微小物体を非接触で捕捉・操作できる光ピンセット (optical tweezers)⁽⁴⁾と同様に、音波 (超音波) を使った非接触操作技術は音響ピンセット (acoustic tweezers) と呼ばれる。空气中における超音波非接触操作技術については、現在その浮揚力の改善が課題であるが、これを解決することによりベルトコンベアなどが用いられている精密電子部品や錠剤など、振動、破損、汚染を嫌う大規模製造ラインへの応用も期待できる。本稿では特に、筆者らのグループがこれまでに開発した超音波による物体の

小山大介 正員 同志社大学理工学部電気工学科
E-mail dkoyama@mail.doshisha.ac.jp
Daisuke KOYAMA, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.18 No.3 pp.193-203 2025年1月
©電子情報通信学会 2025

非接触操作技術を中心に解説する。

2. 空中非接触搬送

2.1 音響定在波による物体の浮揚

超音波による非接触操作技術には、超音波振動子と反射板を用いる方法⁽⁵⁾や、比較的小さな超音波素子を平面、もしくは立体的にアレー化したアレー型振動子を用いる方法⁽⁶⁾が一般的であるが、いずれの手法においても音響的に安定な位置に物体を捕捉するという点では共通している。簡単に超音波による非接触浮揚を体験する方法としては、図1に示すように空中に超音波振動子と反射板を平行に設置して、その間の距離が超音波の半波長の整数倍となるように設置すればよい。例えば、振動子から周波数 27 kHz の平面波が送波される場合、空気中の音速を 340 m/s とすると半波長は約 6.3 mm ($=340/(27 \times 10^3)/2$) と計算できるので、およその間隔が予測できる。このとき振動子・反射板間には音響定在波が発生し、径数 mm のポリスチレン球のような波長に対してある程度小さく軽い物体であれば、定在波の音圧の節の位置（音圧が常に 0 となる位置）に捕捉され浮揚する（文字どおり音波によって「捕捉」されるため、同じ条件下であれば基本的には何度行っても物体は同じ位置に安定して浮揚する）。定在波中に存在する物体に作用する音響放射力は音場の空間勾配の大きさに依存するため、一般的には音圧の腹と節とを繰り返す波面に対して垂直方向（図1では紙面上下方向）の成分が大きい。実際に実験してみると、物体は波面の平行方向に対しても安定して捕捉されるが、平行方向の音圧勾配が小さいため垂直方向の捕捉力に比べると平行方向のそれは幾分小さい⁽⁷⁾。また鉛直方向に定在波を発生させた場

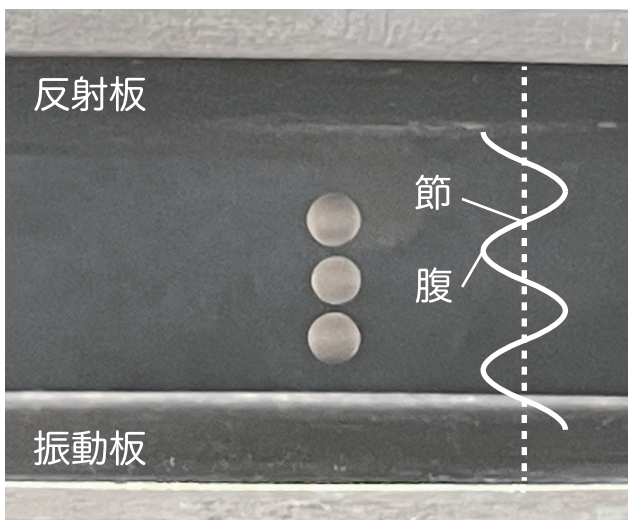


図1 超音波によって浮揚するポリスチレン球の様子 超音波振動板と反射板間の距離を調整し、板間に音響定在波を発生させることによって、その音圧節部に物体を非接触で浮揚させることができる。

合、実際に物体が捕捉される位置は定在波の音圧節部よりも僅かに下の位置であり、音響放射力の鉛直方向成分と物体の重力が釣り合う位置となる。ちなみに、媒質が液体の場合においても同様に物体を捕捉することが可能であるが、物体が剛体ではなく、超音波洗浄や医用超音波で用いられるような気泡の場合は様相が異なる。すなわち、音響定在中の気泡は音波に同期して膨張・収縮を繰り返すため、気泡の大きさによって捕捉される位置が音圧腹部と節部に別れる。これは、音波に対する共振気泡径を境に音圧に対する気泡振動の位相が逆転するためであり、これにより大きな気泡は音圧節部に、小さな気泡は腹部に捕捉される⁽⁸⁾。

2.2 非接触搬送装置の構成

超音波非接触操作に用いられる超音波周波数は、被操作物体のサイズ、操作範囲、物体周囲の媒質、超音波振動子の個数、サイズ、配置などによって決定される。一般的に空気中における非接触操作の場合は、超音波の伝搬減衰を考慮して、いわゆる低周波超音波領域（およそ 20~40 kHz）が用いられることが多い。より重い物体を浮揚・搬送させるためには、音圧振幅のより大きい音響定在波を発生させる必要があり、そのためには超音波振動子の振動速度をより大きくする必要がある。ただし、大きな振動速度は振動子に大きな応力が発生することを意味し、振動子に用いる部材と構造によって決定される応力限界も発生させる音圧振幅の限界の一因となる。図2(a)は筆者らのグループが開発した超音波非接触操作装置の構造⁽⁷⁾である。低周波超音波用に広く用いられる二つのランジュバン型超音波振動子を、振幅拡大用ホーンを介してジュラルミン製の超音波振動板にねじで締結した構造である。振動板と平行に反射板を設置し、振動板と反射板間の空中に音響定在波を発生させることにより物体を浮揚させる。一般的に小さい消費電力でより大きな音圧振幅を実現するためには共振現象を利用する。図2(a)の装置の場合、まずホーン付きのランジュバン型振動子に 1.5 波長の縦振動モード（すなわちホーン付き振動子が長手方向に伸び縮みし、全長がその波長の 1.5 倍に相当する共振モード）が発生する共振周波数で電氣的に駆動する。この共振周波数と、振動板に発生するたわみ振動（板が厚み方向にたわむ振動）の共振周波数が一致するように振動板の外形と二つの振動子設置位置を決定すると、振動子への入力電気信号が効率的に振動板から放射される超音波へと変換される。更に、振動板と反射板の距離を調整して音響定在波を発生させることは、この空間に共振現象を発生させることを意味することから、本装置を設計する際には複数個の共振周波数を一致させる必要がある。ただしこのようなたわみ振動する板から放射される超音波は、板に対して斜め方向に放射されるため、単純に媒質中の音速と周波数から算出される半波長の整数倍と、板間の距離とは一致しないので注意が必要である。図2(b)には板間に浮揚する径数 mm のポリスチレン球が浮揚する様子が示されており、鉛直方向及び水平方向のそれぞれに等間隔

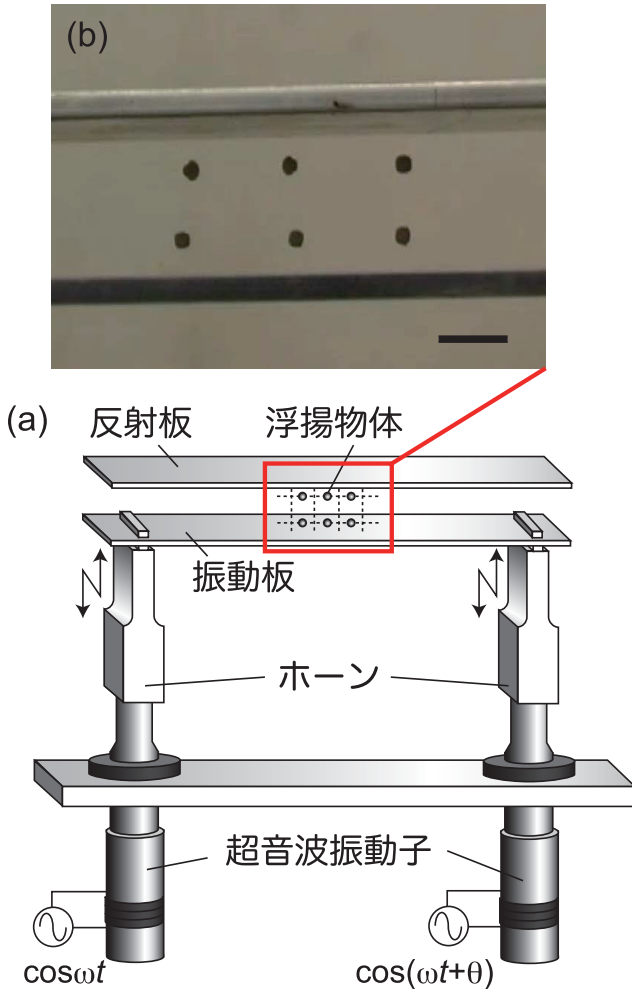


図2 (a) 超音波非接触操作装置の構造と(b)装置内で浮揚するポリスチレン球の様子(図中棒は10 mmを示す) 二つの超音波振動子の縦振動が板のたわみ振動に変換され、振動板・反射板間には格子状の音響定在が発生し、物体が捕捉される。

で微小球が非接触で浮揚することが確認できる。

2.3 音場及び音響放射力分布の計算

板の振動分布や振動板・反射板間の音圧分布、物体に働く音響放射力分布は有限要素法 (Finite Element Method (FEM)) などによる数値シミュレーションによって計算することができる。このような圧電デバイスを有限要素法の構造音響連成解析 (すなわち振動体から媒質中に放射される音波伝搬の解析) で計算する場合は、通常その初期条件として圧電材料への印加電圧を設定することが多いが、ここでは簡単のため、二次元の平面モデルを用いて、振動板上の振動子取り付け位置に対し、調和的な強制駆動力を設定している。音響定在波中において超音波の波長に対して十分小さい微小剛体球に働く音響放射力 F は以下の式で与えられる⁹⁾。

$$F = VD \nabla \overline{K_E} - V(1-\gamma) \nabla \overline{P_E} \quad (1)$$

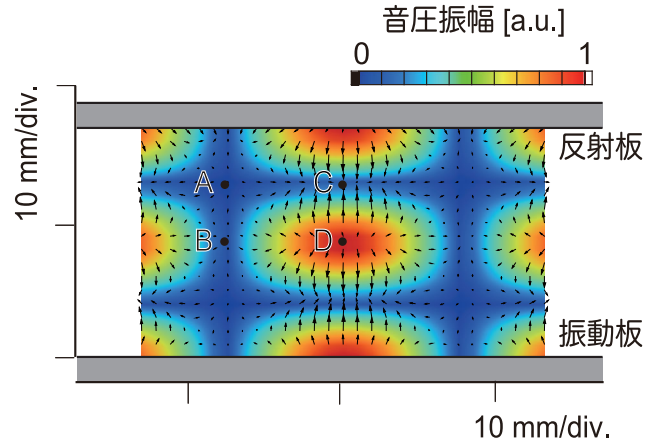


図3 振動板・反射板間の音圧振幅 (カラーマップ) 及び微小球に作用する音響放射力分布 (ベクトル) FEMによるシミュレーション結果。板間には格子状の音響定在波が発生し、音圧節部の点CとBの位置に向かって放射力が作用する。

$$D = \frac{3(\rho - \rho_0)}{2\rho + \rho_0} \quad (2)$$

ここで V は微小剛体球の体積、 ρ は微小剛体球の密度、 ρ_0 は周囲媒質 (ここでは空気) の密度、 γ は周囲媒質と剛体球の圧縮率の比、 $\overline{K_E}$ は運動エネルギー密度の時間平均、 $\overline{P_E}$ はポテンシャルエネルギー密度の時間平均、 ∇ は勾配を表す演算子である。また $\overline{K_E}$ 及び $\overline{P_E}$ は次式で与えられる。

$$K_E = \frac{1}{2} \rho_0 v^2 \quad (3)$$

$$P_E = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \quad (4)$$

ただし、 $v (=j/\omega\rho_0 \cdot \text{grad } p)$ は粒子速度、 c は媒質中の音速、 p は音圧振幅、 j は虚数単位、 ω は音波の角周波数である。すなわち FEM によって計算した定常状態の音圧分布より、式(3)、(4)の各エネルギー密度を計算し、これらを式(1)、(2)に代入することにより定在波場中の微小球に働く放射力を計算することができる。図3は二次元モデルによる FEM によって計算した振動板・反射板間中央部の音圧振幅分布 (カラーマップ) と音響放射力分布 (ベクトル) を表しており、板間の空気中には格子状の音響定在波が発生することが分かる。放射力のベクトルは格子状定在波の音圧の腹である点Dと、板に対してそれぞれ平行及び垂直方向の音圧節線が交わる点Aから湧き出し、点Aからそれぞれ水平及び鉛直方向に1/4波長の距離にある点C及び点Bの位置に向かう方向に分布している。また、定在波の腹の位置の直上に位置する点Cに向かう放射力の大きさは、点Bのそれと比較して大きいことから、物体に働く重力を考えると、定在波腹部の点Dからの鉛直方向の斥力が大きいため、物体の捕捉には点Cの方が安定している。

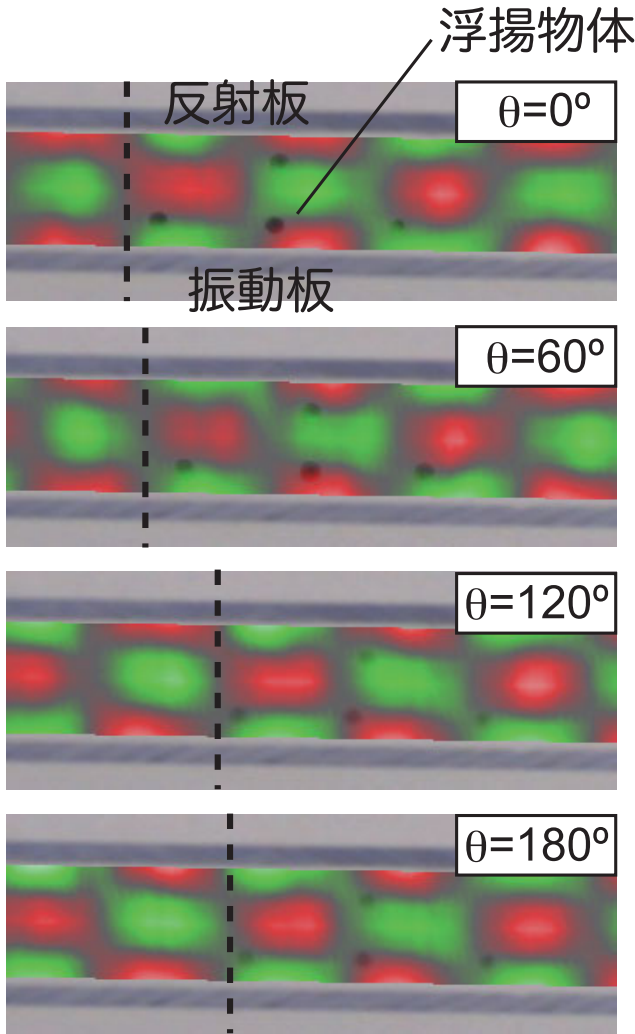


図4 振動板・反射板間の音圧分布と浮揚物体の様子 水平方向の音圧節線に沿って等間隔に物体は浮揚する。振動子間駆動位相差 θ の変化に伴い音響定在波が図中右方向に移動し、粒子は同方向に非接触で搬送される（破線は鉛直方向の音圧節線の一つを表す）。

2.4 非接触直線搬送

物体の浮揚状態を保ったまま空気中の定在波を空間的に制御することにより、物体を非接触操作することができる。図4は二つの振動子間の駆動位相差 θ を変化させたときの板間の音場と浮揚する粒子の様子を表している。なお、市販のレーザドップラー振動計は、本来光のドップラー効果を利用することにより物体表面の振動速度を測定する光学装置であり、光路中の媒質の圧力変動に伴う屈折率変動を可視化することができるが、詳細については他誌⁽¹⁰⁾を参考されたい。同図は、瞬時的な板間の音圧分布を表しており、赤色と緑色の部分はそれぞれお互いに音圧が逆相であることを意味している。板間には鉛直方向と水平方向にそれぞれ波長の異なる格子状の音響定在波が発生していることが分かり、水平方向の波長は振動板のたわみ振動の波長に、鉛直方向の波長は斜

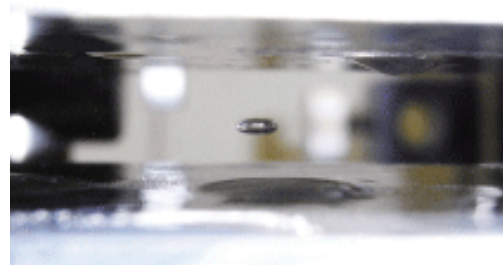


図5 定在波中に浮揚する液滴の様子 音響放射力と重力、表面張力の関係より扁平形状を保った状態で浮揚する。

め方向に放射された音波の鉛直方向成分の波長に一致する。同図より、粒子は鉛直及び水平方向に半波長ごとに捕捉されており、格子状定在波の音圧腹部の直上の水平節線上に捕捉されていることが分かる。またこれらの結果は、FEMによる数値シミュレーション結果（図3）に一致している。

二つの振動子間の板の振動分布は、振動子間の空間的位相差（すなわち振動子間の距離から決定される位相差）と時間的位相差（駆動位相差）によって決定され、本装置の場合は駆動位相差 θ を変化させることで板に発生するたわみ振動の位置を長手方向（紙面左右方向）に移動させることができる。図4に示すとおり、二つの振動子間の駆動位相差 θ を変化させた場合、板のたわみ振動の位置が紙面右方向に移動することによって、板間空中の音響定在波も同方向移動し、それに伴い空中に捕捉されている物体も非接触で移動する。図中破線は鉛直方向の音圧節線の一つを表しており、駆動位相差を360度変化させると物体は半波長だけ水平方向に移動する。物体の捕捉位置は水平方向の音響定在波の位置、すなわち振動子間の駆動位相差によって決定されるため、位相差を細かく調整することによって物体の捕捉位置も細かく制御することができる。物体を浮揚させるためには物体に働く重力に対して大きな鉛直方向の音響放射力を発生させればよいことから、音響定在波を用いることにより固体のみならず液体も浮揚させることができる（図5）^{(7), (11), (12)}。

3. 様々な搬送経路、搬送対象への応用

3.1 非接触周回搬送

板の振動分布を空間的に制御する手法を用いれば、直線搬送のみならず、例えば物体を円軌道上で非接触搬送することも可能である。図6はその装置の一例^{(13), (14)}であり、円形の振動板にアニュラ型の超音波圧電素子を接着し、その電極を周方向に細かく分割している。円板に発生するたわみ振動の半波長に相当する範囲の電極に同相の信号を入力することにより、円板全体にたわみ共振モードを励振することが可能となる。先の直線搬送と同様に、円形振動板に対して平行となるように円形の反射板を設置することにより、板間の空中に音響定在波が発生し、物体を捕捉することができる。また、

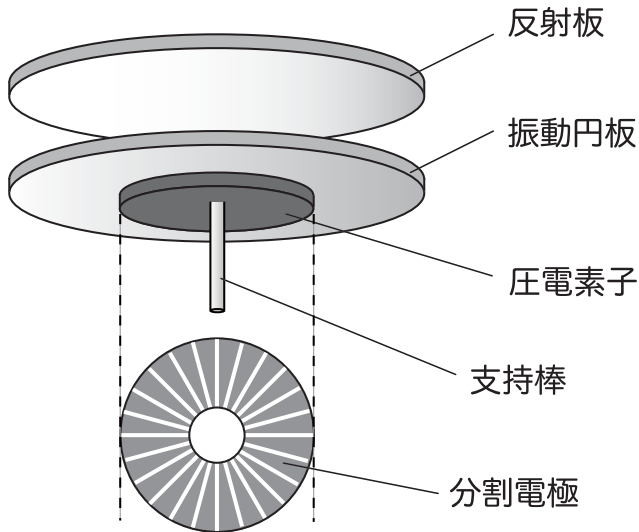


図6 周回搬送用超音波非接触操作装置 アニユラ型超音波圧電素子の電極を周方向に分割し、各電極への信号位相差を変化することで円板のたわみ定在波を周方向に回転できる。

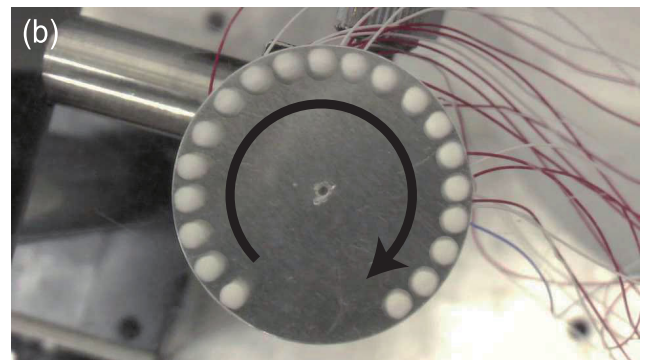
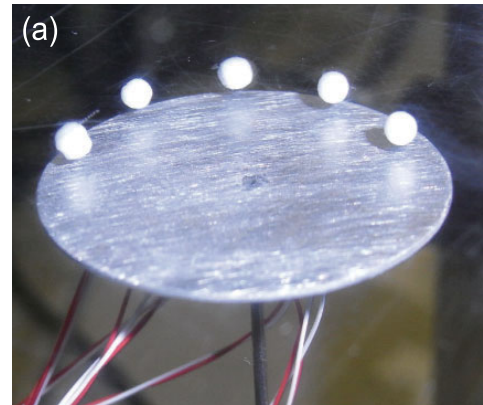


図8 (a)板間で周方向に等間隔で浮揚するポリスチレン球の様子(見やすいように透明反射板を用いている)。(b)ステップ的に周方向に非接触搬送される物体の様子(ステップごとの写真を重ね合わせて表示している)

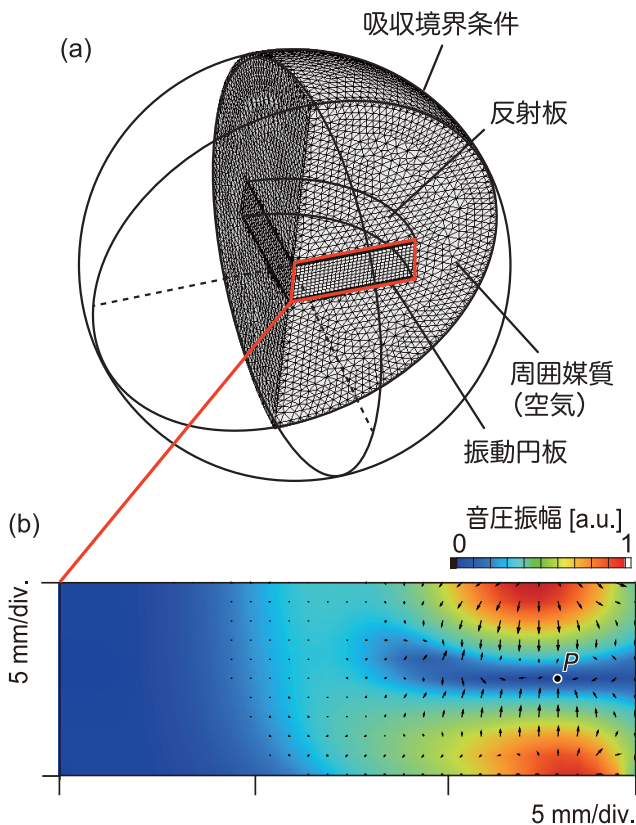


図7 (a)周回搬送用装置のシミュレーションモデルと(b)振動円板・反射板間の音圧振幅及び音響放射力分布 装置全体をその表面に音波の吸収境界条件を設定した空気の世界で取り囲んだ1/4対称モデル。板間には鉛直方向に半波長の音響定在波が発生し、物体は点Pの位置に捕捉される。

直線搬送の場合と同様に、FEMによる数値シミュレーションによって、物体の捕捉位置を予測することが可能である。図7(a)はその計算モデルであり、振動円板と反射板の周囲

を、その表面に音波の吸収境界条件を適用した空気球で囲んでいる。また計算コストを考慮し、1/4対称モデルとしている。図7(b)はそのシミュレーション結果であり、円板のたわみ振動によって板間には鉛直方向に半波長の音響定在波が発生し、物体に音響放射力が作用することによって図中点Pの位置に物体は捕捉される。先ほどの直線搬送とは異なり、同相駆動する電極を周方向に一つずつシフトさせることにより捕捉された物体を周方向にステップ的に非接触移動することができる。図8(a)は周方向に等間隔に捕捉される粒子の様子を、図8(b)はステップ的に周方向に非接触搬送される粒子の様子を表しており、いずれも透明な反射板を用いて観測した例である((b)ではステップごとの写真を重ね合わせて表示している)。

3.2 進行波による高速搬送

定在波によるステップ搬送のみならず、音響進行波を利用することにより、物体を高速に非接触搬送することができる。図9は超音波による高速非接触搬送装置⁽¹⁵⁾を表しており、基本的な構成は直線搬送装置(図2)と同じであるが、振動板に進行波を発生させる点で異なる。振動板に進行波を発生させる手法としては、複数の超音波振動子(若しくは電極を複数個に分割した振動子)の位相差駆動⁽¹⁶⁾がよく

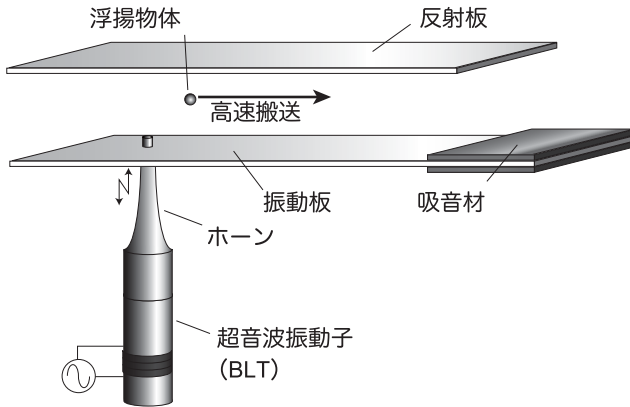


図9 高速搬送装置の構造 振動板の片側に超音波振動子を接続し、もう片側に吸音材を設置することで振動板にたわみ進行波を、板間の空気中の水平方向に進行波音場を発生させることができる。

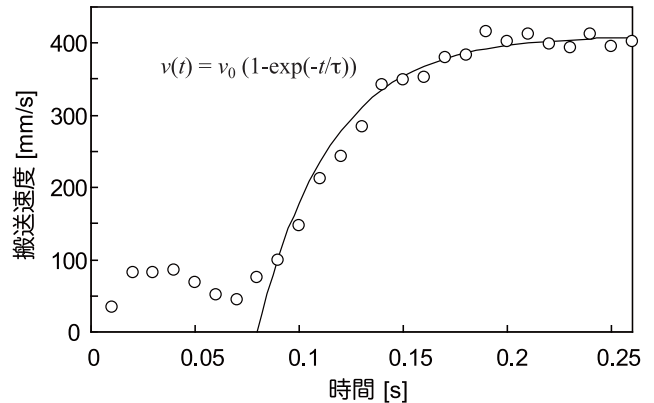


図11 ポリスチレン球の搬送速度の時間変化 球の速度は指数関数的に0.2sで終端速度(410 mm/s)に漸近する。

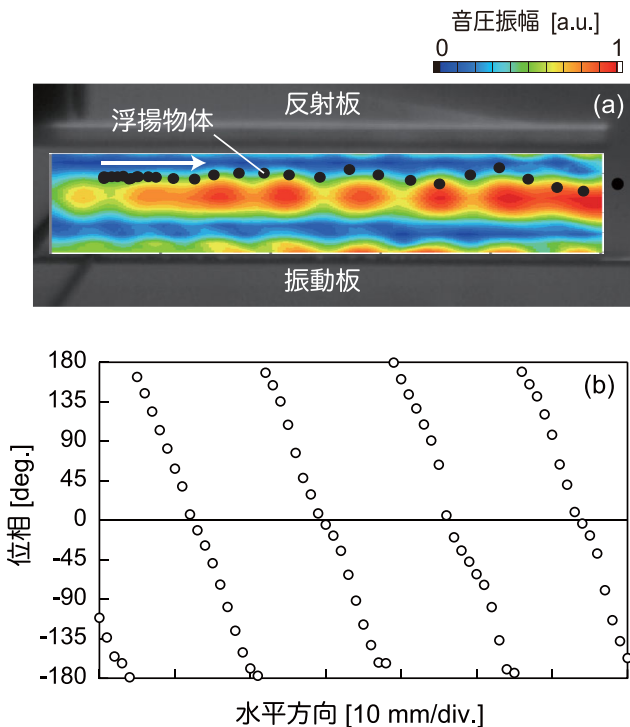


図10 (a)振動板・反射板間の音圧振幅分布(カラーマップ)と高速搬送されるポリスチレン球の軌道(黒丸)。10msごとの球の位置を表示しており、音圧の水平節線に沿って球は高速搬送される。(b)水平節線上の音圧位相分布。位相が直線的に変化することは水平方向に音響進行波が伝搬していることを意味する

用いられる手法であるが、ここでは振動板の一端に取り付けた超音波振動子によって板に発生するたわみ振動を、板の另一端に取り付けたゴムなどの吸音材によって吸収する手法を紹介する。よく知られるように、定在波は片側から発せられた波がもう片側で反射し、これらの二つの波が干渉することによって形成されるため、このように片側で波を吸収する

ことによって進行波を実現することができる。この場合、板に発生するたわみ進行波は板間の空中の斜め方向に向かって音波を放射し、鉛直方向には定在波を、水平方向には進行波を発生する。図10(a)は本装置によって非接触で高速搬送されるポリスチレン球の様子を高速カメラで撮影した様子であり、理解しやすいように音圧振幅分布(カラーマップ)と重ね合わせて表示している(図中黒丸は10msごとの球の位置を示す)。また図10(b)は板間空中の音圧位相の空間分布を示している。同図(b)では、音圧位相が水平方向に線形に変化しており、このことは板間の水平方向(図中右方向)に音響進行波が発生していることを意味している。すなわち、鉛直方向の音響定在波によって物体は重力に対して支えられ、水平方向の音響進行波によって推力を得て高速搬送されることが分かる。図11は高速搬送される球の移動速度の時間変化を表しており、移動速度は約0.2sで空気抵抗によって決定される終端速度(410 mm/s)に指数関数的に近づく。

3.3 二次元搬送

このような超音波非接触搬送装置は同じ設計コンセプトを元に二次元に拡大することができる。図12は非接触二次元搬送装置の構造⁽¹⁷⁾を表しており、四つのランジュバン型振動子(BLT 1~BLT 4)と1枚の矩形振動板で構成される。四つの振動子を同相で駆動することにより、板には格子状の共振たわみ振動モードが励振され、板間にも同様に音響定在波が発生し物体は捕捉される。物体を水平方向のx方向に移動させる場合、BLT 1と3、BLT 2と4とをそれぞれ二つ1組として、これらの2組間の駆動位相差を変化させることによって振動板のたわみ振動と空中の音響定在波及び浮揚物体を移動させる。図13はx及びy方向に移動する物体を、透明反射板を介して振動板上方から撮影した様子であり、2組の振動子の駆動位相差を30度ずつ変化させた場合の写真を重ね合わせて表示している。格子状のたわみ振動が直線的に移動しないため些か蛇行しているものの、一次元の直線搬送装置と同様に、物体を浮揚状態を保ったまま直線的にx

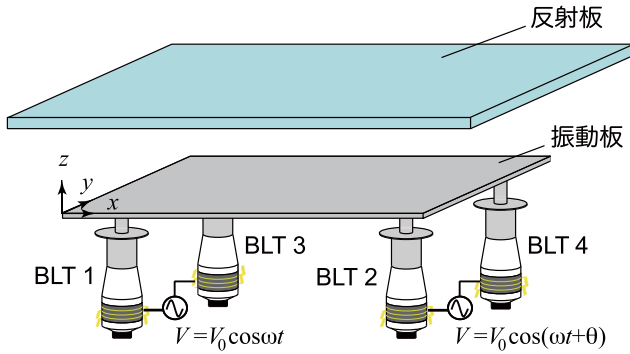


図 12 二次元搬送装置の構造 四つの超音波振動子 (BLT) を取り付けた矩形振動板と反射板間に音響定在波を発生させ、振動子間駆動位相差 θ を変化させることで物体を xy 平面内で操作する。

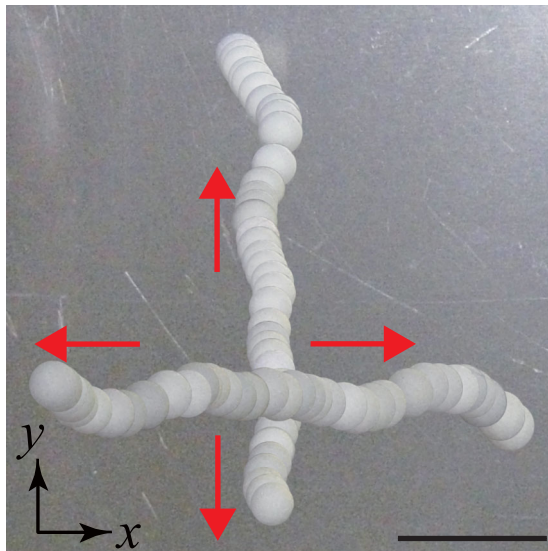


図 13 二次元搬送される物体の様子 2組の振動子駆動位相差を調整することで1方向に搬送することができる。図は30度ごとの写真を重ね合わせて表示している。図中棒は10 mmを示す。

及び y 方向に搬送することができる。また、四つの振動子の組合せを「BLT 1」, 「BLT 2 と 3」, 「BLT 4」の3組とし、これらの駆動位相差を調整することによって、図 14 のように x 軸に対して斜め方向に直接搬送することも可能である。

3.4 板の非接触搬送

超音波による非接触操作についてはこれまでに紹介したような超音波の波長よりも小さい粒子などを対象にした報告例が多いが、図 2 のような振動板と反射板を用いた装置においても波長よりも大きいサイズの物体、例えば板状の物体でも非接触操作を実現できる⁽¹⁸⁾。図 15 はポリスチレン板 ($25 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$) が振動板と反射板間の空中に浮揚する様子であり、ポリスチレン球の場合と同様に、二つの振動子の駆動位相差を調整することによって、板を水平方向に非接触

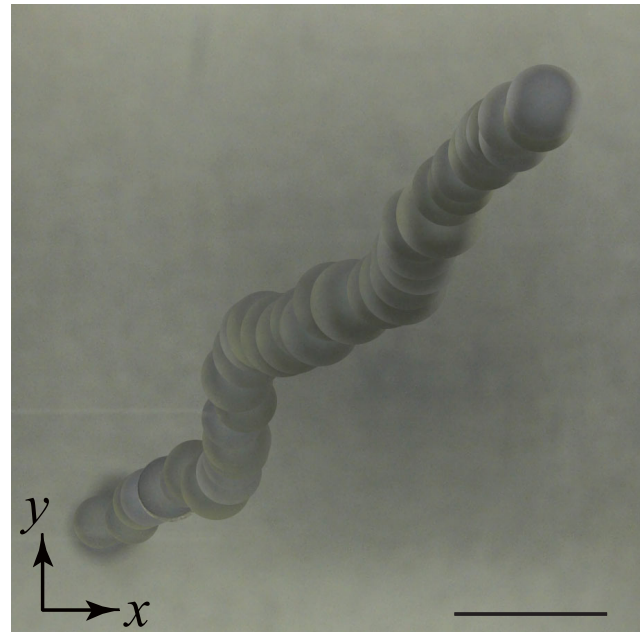


図 14 xy 平面の斜め方向に搬送される物体の様子 3組の振動子駆動位相差を調整することで、直接斜め方向に搬送できる。図中棒は10 mmを示す。

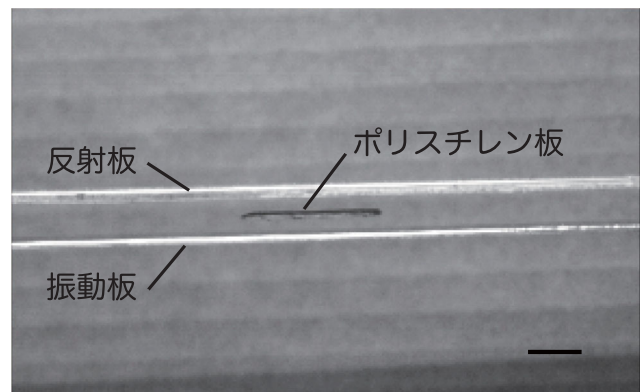


図 15 超音波によってポリスチレン板が浮揚する様子 振動板・反射板間には半波長の音響定在波が発生し、板はその中央の音圧節線に沿って浮揚する。図中棒は10 mmを示す。

移動することが可能である。ただし板状の浮揚物体の場合、浮揚物体の存在によって振動板反射板間の音場が変化し、物体に作用する浮揚力に影響を及ぼす。図 16(a) は浮揚物体である板の長さが異なる場合の板間全体の音場のシミュレーション結果を表しており、音波の水平方向の波長が浮揚板の上下部分とそれ以外の部分で大きく異なることが分かる。すなわち、浮揚物体が音波の波長（この場合は水平方向の波長）に対して十分小さい場合は、物体が何も存在しない場合と同様に板間の水平方向の波長は振動板のたわみ振動の波長と一致するが、浮揚する板による音波の反射が無視できない場合、振動板と浮揚板、及び反射板と浮揚板の間の空間において共振モードが発生する場合がある。図 16(b) は浮揚板の

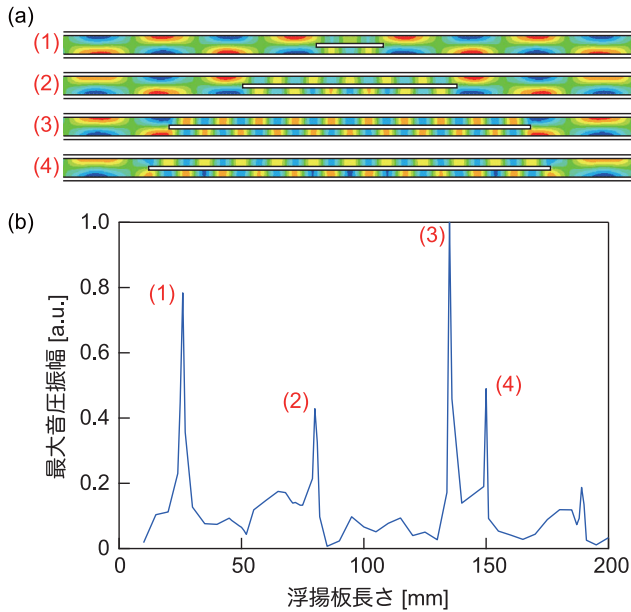


図 16 (a) 振動板・反射板間の音圧分布 (FEM によるシミュレーション結果)。赤色部分と青色部分は互いに逆相の音圧腹部、緑部分は音圧節部を意味する。(b) 浮揚する板と振動板・反射板間の最大音圧振幅の関係。図中番号は (a) の番号に対応し、各板間の空中に共振モードが発生することにより音圧振幅は増加する

長さで浮揚板・振動板・反射間に発生する最大音圧振幅の関係を表しているが、浮揚板がある特定の長さの場合 (同図 1~4 の場合) において空気中に共振モードが発生し、音圧振幅は劇的に増加することが分かる。このことは、振動板が同じように振動したとしても浮揚板のサイズによって浮揚力が異なることを意味する。そのほか、板の超音波浮揚としては、スキーズ膜効果による近距離場音波浮揚^{(19), (20)}が知られており、極めて大きな浮揚力を得ることができる (はがき大の大きさで 100 kgf 程度)。しかしながら、振動板からの浮揚距離は波長に対して極めて小さい (数十~数百 μm) ため、完全な非接触浮揚を実現するためには浮揚板と振動板の平面度と互いの平行度を高くする必要がある。

4. 液体中の非接触操作とその応用

4.1 水中におけるマイクロ粒子操作

超音波による非接触操作技術は、媒質は空気に限らず液体の場合にも応用することができる。一般的に液体の場合は気体の場合と比較して超音波伝搬に伴う減衰が小さいため、同じ周波数を用いた場合より広範囲で物体を操作できる。また、超音波浮揚可能な物体の大きさは、超音波の周波数にも依存し、周波数が高い、すなわち波長が短いほどより小さいサイズの物体を操作することができる。このことから、一般的な媒質中では周波数とともに超音波の伝搬減衰も増加するが、水中では空気中と比べて 2 桁程度高い MHz 帯域の周波

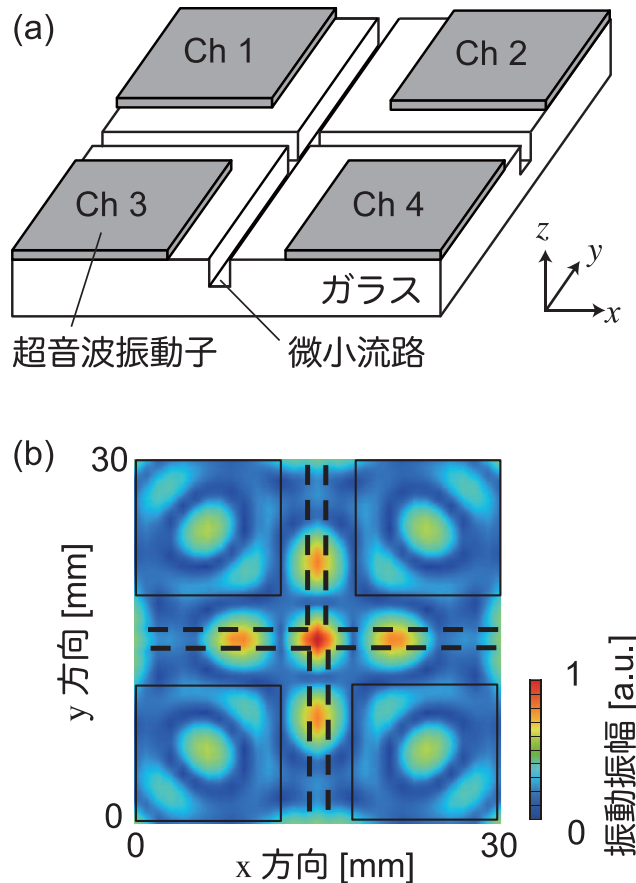


図 17 (a) マイクロ粒子操作用の超音波チップと (b) その共振モード。十字型微細流路を設けたガラス板に四つの超音波振動子 (Ch 1~4) を接着している。共振モードにおいて、流路に沿ってたわみ振動が発生する。

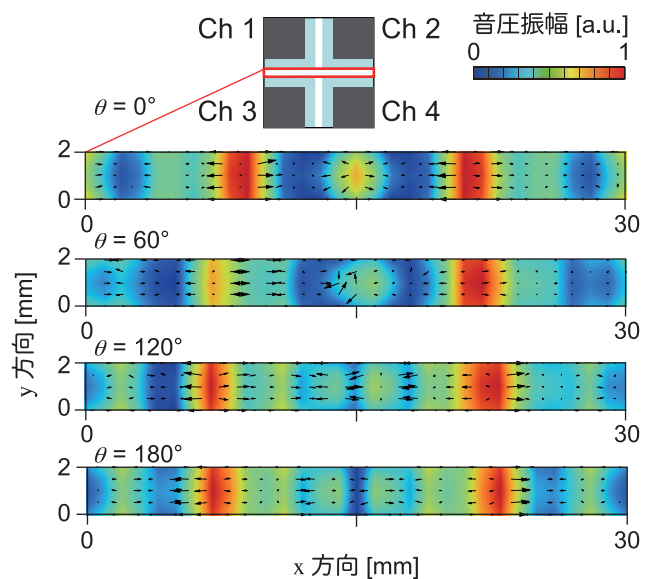


図 18 超音波チップ流路内の音圧振幅及び音響放射力分布。物体は流路中の音響定在波の音圧節部に捕捉され、2 組の振動子駆動位相差を変化させると、流路方向 (図中右方向) に移動する。

数を選択できるため、マイクロメートルサイズの微小物体の操作も可能である。図 17(a)は径数 mm の十字型微小流路を有する微小粒子操作の超音波チップの構造⁽²¹⁾を表している。その表面は微小流路を加工したガラス板と四つの超音波振動子で構成されており、それぞれの振動子は電氣的に独立している。同図(b)は共振周波数 273 kHz におけるチップ厚み方向の振動分布 (FEM によるシミュレーション結果) を表しており、流路交差部の振動振幅が最も大きく、流路に沿ってたわみ振動が発生する共振モードである。図 18 はこの共振モードによって流路内の液体中に発生する音圧振幅 (カラーマップ) 及び音響放射力分布 (ベクトル) を示しており、空気中の非接触操作の場合と同様に、水中においても音響定在波の音圧節部に向かって放射力のベクトルが集まる。また、前節で紹介した空中二次元搬送と同様に、四つの

超音波振動子を 2 組に分け、それぞれの駆動位相差 θ を変化させることによって、流路の振動分布と音圧分布を流路長手方向 (この場合図中右方向) に移動させることができる。図 19 は流路中で直径 50 μm の炭化ケイ素製マイクロ粒子を操作した様子を表しており、2 組の振動子の駆動位相差を二度ずつ変化させた際の写真を重ね合わせて表示している。同図 (a) のように、Ch 1 と 3、Ch 2 と 4 を組合せとした場合は図中 x 方向に物体を操作することが可能で、Ch 1 と 2、Ch 3 と 4 に組合せを切り替えることにより同図(b)に示すように y 方向に操作方向を切り替えることが可能となる。このような液体中の非接触搬送技術は固体粒子に限らず、微小気泡 (マイクロバブル) や血栓を操作対象とした医用デバイスにも応用することができる^{(22), (23)}。

4.2 細胞の非接触操作と応用

光波による非接触操作である光ピンセットと同様に、液体中で高周波超音波を用いることにより、細胞などの生体を非接触で操作することが可能となる⁽²⁴⁾。図 20 は同じくガラス板上に設けた微細流路中に存在する複数個の細胞 (HeLa 細胞) が、超音波の放射力によって流路に沿って移動する様子を表しており、流路の長手方向にほぼ等間隔で音響定在波の節の位置に集まって捕捉されることが分かる。このとき、細胞が移動する速度は細胞の大きさや種類、状態に依存する。図 21 は細胞の大きさ (顕微鏡画像から測定した断面積) と流路中の細胞の移動速度の関係を示しており、MC3T3-E1 細胞、PC12 細胞、HeLa 細胞 (生細胞)、HeLa 細胞 (死細胞) の四つの場合の結果を併せてプロットしている。同図が示すように、細胞の移動速度は細胞の種類と状態によって異なることから、細胞の音響特性の差を利用した細胞の選別や検査技術への応用展開が期待される。

また、細胞の非接触操作は細胞培養技術にも応用できる。細胞・組織培養の分野において、細胞単体若しくは細胞群を評価・解析する際に、培養ディッシュ上の任意の位置・形状に細胞を配置・接着させる技術 (細胞パターンニング) が求め

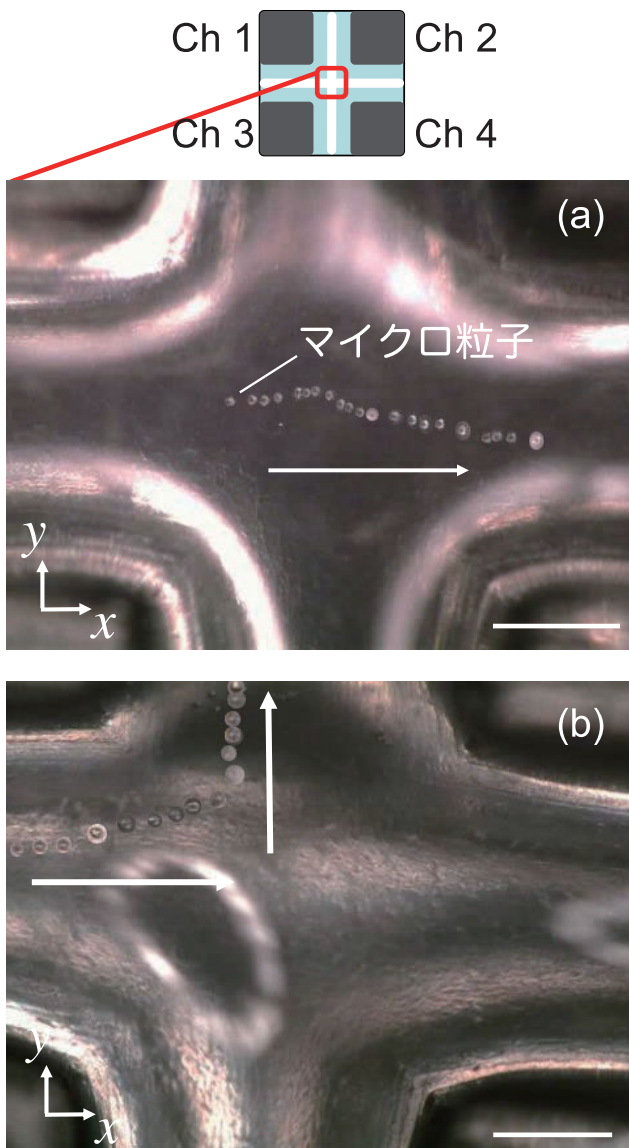


図 19 (a) 微細流路中を移動する径 50 μm の粒子の様子。図中棒は 1 mm を示し、位相差を 2 度ずつ変化させたときの画像を重ね合わせている。(b) 振動子の組合せを変えることにより、交差点において搬送方向を切り替えることができる

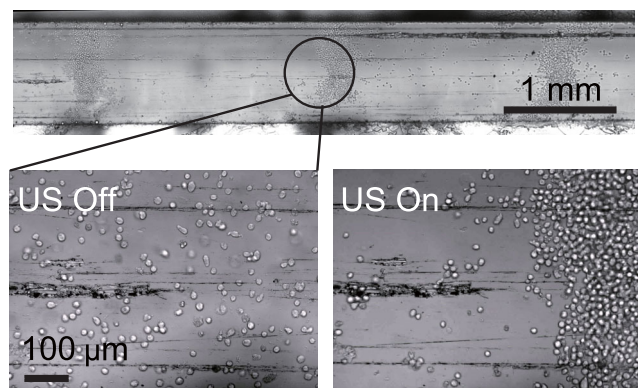


図 20 微細流路内に捕捉される細胞群 (HeLa 細胞) の様子。超音波チップを駆動することで一斉に流路内音圧節部へと移動する。

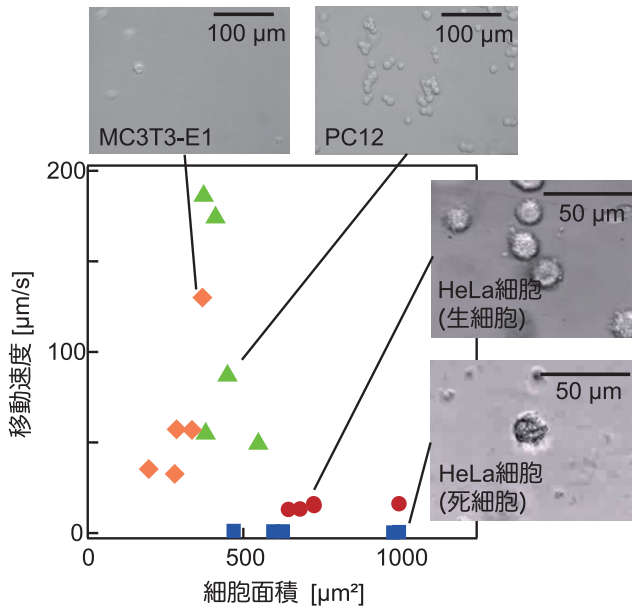


図 21 細胞面積と流路内移動速度の関係 四つの異なる細胞 (MC3T3-E1 細胞 (黄), PC12 細胞 (緑), HeLa 細胞 (生細胞) (赤), HeLa 細胞 (死細胞) (青)) をプロットしている。細胞の移動速度は細胞種類と状態に依存する。

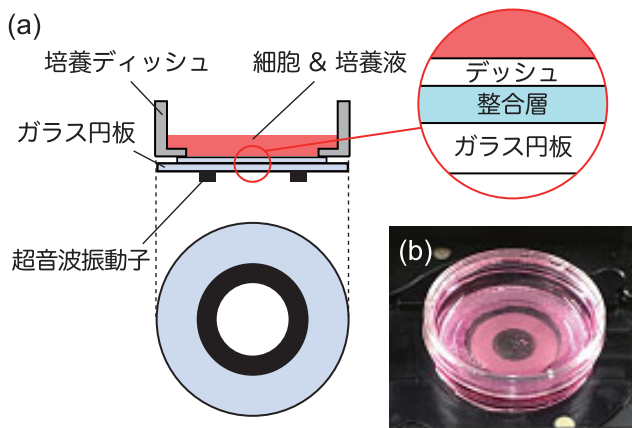


図 22 (a) 超音波培養ディッシュの構造と (b) 写真。水などの音響整合層を介して、汎用培養ディッシュの底部に超音波振動子付ガラス円板を設置することにより、細胞や培養液に直接接触することなく超音波振動を与えることができる

られる。図 22 は超音波を利用した細胞培養ディッシュ⁽²⁵⁾であり、アニユラ型の圧電超音波振動子を接着したガラス円板を、市販の培養ディッシュの底面に音響整合層 (水などの液体) を介して接触させている。このようにすることでディスプレイポザブルな培養ディッシュとは異なり、超音波振動子付円板は直接培養液と細胞に接触することなくクリーンな環境下で繰り返し使用することができる。図 23 はディッシュ内の培養液を想定した液体中の音圧及び音響放射力分布とディッシュ底面の振動分布を表しており、音響放射力によって細胞はディッシュ底面にリング状に接触する。図 24 は細胞 (HeLa 細胞) が接着・分裂・成長する様子を観測した例で

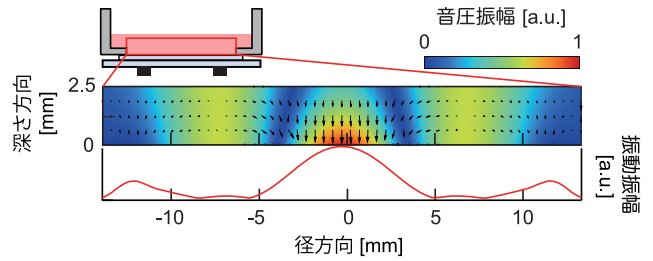


図 23 培養液中の音圧振幅 (カラーマップ) と音響放射力 (ベクトル), およびディッシュ底面の振動分布 (赤線) 培養液中の細胞はディッシュ底面に向かってリング状に捕捉される。

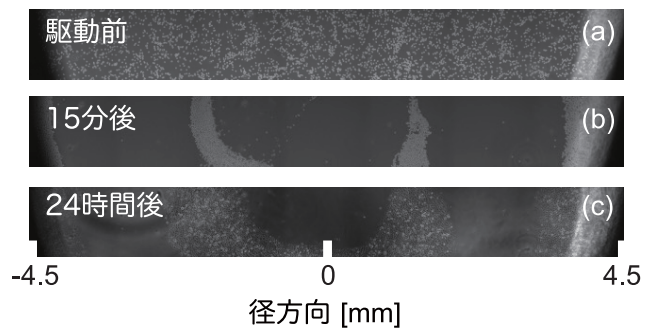


図 24 培養ディッシュ上の細胞 (HeLa 細胞) の様子 (a) 超音波駆動前, (b) 駆動開始から 15 分後と (c) 24 時間後。駆動前はランダムに播種された細胞は、超音波駆動によりリング状に集合し、その後径方向外側に向かって分裂・成長する。

ある。超音波駆動前はディッシュ全体にわたってほぼ均一に分布している細胞 (同図(a)) が、超音波駆動開始から 15 分後にはリング状に分布しており (同図(b)), 24 時間後にはディッシュ中心から離れる方向に向かって分裂・成長することから、中心部分のみ細胞成長を抑制することができる。

5. おわりに

本稿では超音波を利用した非接触物体操作技術について紹介した。いずれの開発例においても、音波の共振条件をいかに効率的に組み合わせるかが設計の鍵になるといえる。音波の直流成分である音響放射力は、空気圧や磁気などほかの非接触操作技術と比較して大きな力は期待できず、例えば大規模生産ラインへの応用を考えた場合、最大浮揚力や時間当たりの搬送量の増加など解決すべき課題は残る。しかしながら一方で、装置全体が簡素な構成で実現できることや、静音、不要な周囲磁場を発生しない、非磁性体も搬送可能などの利点を有することから今後様々な産業分野への応用が期待できる。

- (1) 鎌倉友男, 非線形音響学の基礎, 愛智出版, 1996.
- (2) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, July 2010.
- (3) T. Shiina, "JSUM ultrasound elastography practice guidelines: basics and terminology," *J. Med. Ultrasonic.*, vol. 40, pp. 309-323, 2013.
- (4) H. Zhang and K. Liu, "Optical tweezers for single cells," *J.R. Soc. Interface*, vol. 5, no. 24, pp. 671-690, April 2008.
- (5) M.A.B. Andrade, N. Pérez, and J.C. Adamowski, "Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 1, 014101, Jan. 2015.
- (6) Y. Ochiai, T. Hoshi, and J. Rekimoto, "Three-dimensional mid-air acoustic manipulation by ultrasonic phased arrays," *PLOS ONE*, vol. 9, no. 5, e97590, May 2014.
- (7) D. Koyama and K. Nakamura, "Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 57, no. 5, pp. 1152-1159, May 2010.
- (8) D. Koyama, H. Kotera, N. Kitazawa, K. Yoshida, K. Nakamura, and Y. Watanabe, "Vibration of a single microcapsule with a hard plastic shell in an acoustic standing wave field," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 58, no. 4, pp. 737-743, April 2011.
- (9) W.L. Nyborg, "Physical principles of ultrasound," in *Ultrasound: Its Applications in Medicine and Biology* p.52, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1978.
- (10) K. Nakamura, "Sound field measurements through the acousto-optic effect of air using laser doppler velocimeter," *Proc. 4th Pacific Rim Conf. Lasers and Electro-Optics*, vol. 1, pp. 154-155, July 2001.
- (11) M. Ding, D. Koyama, and K. Nakamura, "Noncontact ultrasonic transport of liquid using a flexural vibration plate," *Appl. Phys. Express*, vol. 5, no. 9, 097301, Aug. 2012.
- (12) H. Tanaka, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Ejection of small droplet from microplate using focused ultrasound," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 56, no. 8, 087202, July 2017.
- (13) D. Koyama and K. Nakamura, "Noncontact ultrasonic transportation of small objects in a circular trajectory in air by flexural vibrations of a circular disc," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 57, no. 6, pp. 1434-1442, June 2010.
- (14) R. Kashima, S. Murakami, D. Koyama, K. Nakamura, and M. Matsukawa, "Design of a junction for a noncontact ultrasonic transportation system," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 61, no. 6, pp. 1024-1032, June 2014.
- (15) Y. Ito, D. Koyama, and K. Nakamura, "High-speed noncontact ultrasonic transport of small objects using an acoustic traveling wave field," *Acoust. Sci. & Tech.*, vol. 31, no. 6, pp. 420-422, Nov. 2010.
- (16) D. Koyama, T. Ide, J.R. Friend, K. Nakamura, and S. Ueha, "An ultrasonically levitated non-contact stage using traveling vibrations on precision ceramic guide rails," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 54, no. 3, pp. 597-604, March 2007.
- (17) R. Kashima, D. Koyama, and M. Matsukawa, "Two-dimensional noncontact transportation of small objects in air using flexural vibration of a plate," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 62, no. 12, pp. 2161-2168, Dec. 2015.
- (18) K. Masuda, D. Koyama, and M. Matsukawa, "Noncontact transportation of planar object in an ultrasound waveguide," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 65, no. 11, pp. 2160-2166, Nov. 2018.
- (19) D. Koyama, K. Nakamura, and S. Ueha, "A stator for a self-running ultrasonically levitated sliding stage," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 54, no. 11, pp. 2337-2343, Nov. 2007.
- (20) D. Koyama, H. Takei, K. Nakamura, and S. Ueha, "A self-running standing wave-type bidirectional slider for the ultrasonically levitated thin linear stage," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 55, no. 8, pp. 1823-1830, Aug. 2008.
- (21) R. Yamamoto, D. Koyama, and M. Matsukawa, "On-chip ultrasonic manipulation of microparticles by using the flexural vibration of a glass substrate," *Ultrasonics*, vol. 79, no. 8, pp. 81-86, Aug. 2017.
- (22) K. Mino, M. Kataoka, K. Yoshida, D. Koyama, K. Nakamura, M. Omori, S. Kawarabata, M. Sato, and Y. Watanabe, "Ultrasound bubble filter using the flexural vibration of a cylinder for an extracorporeal circulation circuit," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 199, pp. 202-208, Sept. 2013.
- (23) K. Mino, M. Imura, D. Koyama, M. Omori, S. Kawarabata, M. Sato, and Y. Watanabe, "Meshless bubble filter using ultrasound for extracorporeal circulation and its effect on blood," *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 41, no. 2, pp. 465-471, Feb. 2015.
- (24) T. Otsuka, D. Koyama, and M. Matsukawa, "Transportation and discrimination of cells using ultrasound flexural vibration of a glass substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, SGGD10, June 2019.
- (25) K. Tani, K. Fujiwara, and D. Koyama, "Adhesive cell patterning technique using ultrasound vibrations," *Ultrasonics*, vol. 96, no. 7, pp. 18-23, July 2019.

(US研究会提案, 2024年9月10日受付,
2024年9月30日再受付)



小山大介 (正員)

2000 同志社大・工・電子卒。2005 同大学院博士課程了 (博士 (工学))。同年東工大精密工学研究所助手, 2011 同准教授, 2012 同志社大・理工・准教授, 2018 同教授。これまで超音波と光を用いた波動応用デバイス, 超音波アクチュエータ, 医用デバイスに関する研究に従事。2008 年日本音響学会栗屋潔学術奨励賞, 2012 年度エヌエフ基金研究開発奨励賞優秀賞, 平成 24 年度ユニカムノルタ画像科学奨励賞, 2016 年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。

複雑ネットワーク上の感染伝播モデルの解析と制御

Analysis and Control of Epidemic Spreading Model over Complex Networks

足立亮介 Ryosuke ADACHI

アブストラクト 本稿では、感染伝播モデルの解析と制御手法を紹介する。感染伝播モデルでは、感受性者 (susceptible)、感染者 (infected)、回復者 (recovered) の状態に基づいたモデルがよく用いられる。本稿では上記の状態に基づいた、SIR、SIS、SIRS モデルを「均質モデル」及び複雑ネットワーク上の「エージェントベースモデル」に分けて紹介する。また、理論解析から得られる結果の解釈を説明する。これまでに提案されている制御手法などを著者の研究を踏まえて紹介した後、今後の展望を述べる。

キーワード SIR モデル, SIS モデル, SIRS モデル, 複雑ネットワーク

Abstract This paper introduces the analysis and control methods of the epidemic spreading model, which is denoted by three states: Susceptible, infected, and Recovered individuals. Based on these states, the SIR, SIS, and SIRS models are introduced and categorized into population- and agent-based models. The theoretical results of these models, which determine the behavior of the epidemic models, are explained, and various control methods, including the authors' research on epidemic spreading models, are introduced. Finally, we discuss future perspectives.

Key words SIR model, SIS model, SIRS model, Complex networks

1. はじめに

感染症の数理モデルは、パンデミックや流行病の予測と管理を目的に研究が進められている。感染症の数理モデルの代表例として、感染者の状態を疫学的に感受性保持者 (susceptible)、感染者 (infected)、回復者 (recovered) に分けその遷移を表した SIR モデルが知られている。SIR モデルは 1927 年に A.G. McKendrick と W.O. Kermack によって提案された⁽¹⁾。SIR モデルは簡便なモデルながら現実の流行曲線をよく再現する。また、理論解析から基本再生産数、実行再生産数による流行曲線の特性の予測、集団免疫に必要な回復者数の導出など疫学的に重要となる概念を導くこともできる。そのため、現代でも感染症の伝播を理解する際の最も基本的で広く使われるモデルとなっている。

筆者の専門はシステム制御理論とその応用であるため、感染症の数理モデルの解析と応用を専門とする立場ではない。本稿の読者も感染症の数理モデルに明るくはないと予想する。一方で、「SIR モデル」、「基本再生産数」、「実行再生産数」、「集団免疫」などの言葉に聞き覚えがある読者も多いのではないだろうか。理由は明確であり、2019 年 12 月から始まった COVID-19

による世界的なパンデミックである。

COVID-19 の感染拡大において懸念されたことは、感染爆発に伴う医療崩壊の可能性である。そのため、世界的にはロックダウンが、日本国内では緊急事態宣言が発令され、その是非が問われた。mRNA ワクチンの登場以降では、接種者の優先順位が議論された。このような背景から、筆者を含め感染症の数理モデルの解析やその応用である医療資源の最適配置に興味を示した読者も多いのではないだろうか。

一方で、感染症の数理モデルの解析と応用では SIR モデル以降、様々な発展を遂げ今日に至っていることからその全容を把握するのは困難である。SARS、新型インフルエンザ、エボラ出血熱などの様々なパンデミックを経験する中で、SIR モデルから派生した SIS モデル、SIRS モデルなどの多くのモデルが提案された⁽²⁾。また、従来の系全体を均質に扱う考え方から人口の分布や個人間のインタラクションを表現したモデルなども提案されている⁽³⁾。モデルの表現能力が増すことで感染症の伝播を正確に捉えることができるようになった反面、医療資源の最適配置への応用や事前知識を得るハードルも上がっているように思う。

そこで、本稿ではこれまでに筆者なりに理解した感染症の伝播モデルの構築方針と解析結果の解釈を中心に紹介することで、感染症の数理モデルを利用するハードルを下げるを試みる。具体的には、2. 章でモデルの作成指針を、3. 章では理論解析の結果の解釈を説明する。2. 章では、感染症の数理モデルを構成する大枠となる、「感染状態の遷移」、「人口集合の定義」、「動特性の記述方法」を説明する。モデル化の方針を理解することで、数理モデルが表現する幅の理解や必要に応じたモデル選択、

足立亮介 正員 山口大学大学院創成科学研究科

E-mail r-adachi@yamaguchi-u.ac.jp

Ryosuke ADACHI, Member (Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ

Fundamentals Review Vol.18 No.3 pp.204-212 2025 年 1 月

©電子情報通信学会 2025

修正に役立てば幸いである。3. 章では、微分方程式で記述される感染伝播モデルとその解析結果を紹介する。感染伝播モデルの解析結果は、感染能力と回復能力の力関係が感染症の動特性を決めると解釈できることが示される。また、個人間のインタラクションを考慮した複雑ネットワーク上のエージェントベースモデルでは、感染能力にネットワークが有する伝播能力が影響を与えることが示唆される。上記を踏まえて、4. 章では3. 章で紹介したモデルを利用した感染症の伝播モデルの制御手法を簡単に紹介する。より詳しいモデルの紹介や解析、制御手法に関しては文献(3), (4)などを参考にされたい。

記法：行列 A に対して、 $\lambda_{\max}(A)$ は $\lambda_{\max}(A) = \max(\Re(\lambda(A)))$ で定義される。 $\lambda(A)$ は行列 A の固有値、 $\Re(\cdot)$ は引数の実部を返す。 $\max(\cdot)$ は引数の中から最大値を返す。 $[A]_{i,j}$ は行列 A の (i, j) 成分を表す。ベクトル a に対して $[a]_i$ はベクトル a の i 成分を表す。ベクトル a, b の間の不等式 $a \leq b$ は各要素ごとの不等式 $[a]_i \leq [b]_i$ を表す。ベクトル 0_N 及び 1_N はそれぞれ要素の全てが 0 及び 1 のベクトルを表す。

2. 感染伝播のモデル化

感染症の数理モデルは、疫学的知見に基づく「状態遷移」を表したモデルである。状態遷移は人口集団内の各グループにおいて、各感染状態に分類される人口の推移によって記述される。人口集団のグループ決定では、人口集団をどの程度の「スケール」のグループに区切るのかによりモデル動特性が変化する。また、各グループに含まれる人口を離散若しくは連続変数で取り扱うかによっても、モデルの表現方法が異なる。

2.1 感染状態と遷移

感染状態は感染者の感染状況を表し、表現したい感染症の特徴に応じて定義される。また、状態間の遷移は時間経過や感染者への接触などの事象に基づき表現したい感染症の特徴に応じて定義される。感染状態の分類としてよく用いられるのが、

感受性がある状態・感受性者 (Susceptible, S)

まだ感染しておらず、感染する可能性がある状態

感染状態・感染者 (Infected, I)

感染しており、ほかの個体に感染を広げる可能性がある状態

回復状態・回復者 (Recovered, R)

感染から回復・ワクチン接種などで免疫を獲得した状態

である。図 1 には感受性者、感染者、回復者間の代表的な遷移を示す。

最も代表的な遷移モデルが、Susceptible-Infected-Recovered (SIR) モデルである。SIR モデルでは感受性者は感染者と接触し一定確率で感染者へと遷移する。また、感染者は一定割合で回復者へ遷移する。SIR モデルは単純なモデルなため解析しやすく、基礎的・短期的な予測や制御に有効である。しかし免疫獲得が永続するため、SIR モデルはインフルエンザや COVID-19 のような感染を繰り返す感染症を完璧には表現できない。

感染が繰り返し発生する慢性的な感染症を表すモデルとして、

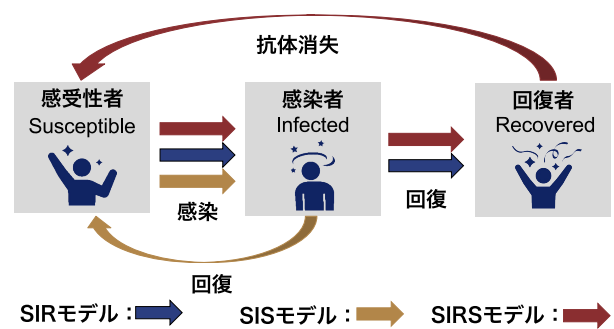


図 1 SIR, SIS, SIRS モデルの状態遷移の概略

SIS モデルや SIRS モデルなどがある。SIS モデルでは、感染状態と感受性がある状態を繰り返すことで、感染の繰り返しを表現できる。一方で、免疫獲得の影響を受ける感染症の表現には適切ではない。回復状態を静的モデルとして導入することで、ワクチン接種などをモデルに含めることは可能である⁽⁵⁾。しかし、感染による抗体獲得や時間経過による抗体消失はモデル化できない。SIRS モデルでは、一定の割合で回復者を感受性者へと遷移させることで、免疫獲得を含む恒常的な感染症を表している。しかし、SIR モデルや SIS モデルと比べてモデルの解析・応用が複雑になる。

感染状態を感受性者、感染者、回復者よりも複雑に分けるモデルも存在する。文献(2)では感染してから感染性をもつまでの待ち時間を考慮して、感染者と回復者の間に 1 状態追加されたモデルが紹介されている。また、隔離による感染防止効果を予測するために隔離状態が追加されたモデルなども存在する。詳細は文献(2), (3)などを参考にされたい。

2.2 人口集合の定義

具体的な感染状態と遷移の定義は、人口集合とその内部でのインタラクションの定義に依存する。人口集合の定義に応じて感染伝播モデルは「均質モデル」, 「メタ個体群モデル」, 「エージェントベースモデル」の三つに分けられる。例として、人口集団全体が N 人で構成される系を感受性者・感染者・回復者の 3 状態で表現することを考える。

最も単純なモデルは $N = N^S + N^I + N^R$ 人を一つの集団として扱う「均質モデル」である。均質モデルにおいて、全ての個体と同じ条件下で行動することが仮定される。感染状態は (N^S, N^I, N^R) で表され、 N^S, N^I, N^R はそれぞれ感受性者、感染者、回復者の人数を表す。

対照的に、 N 人の各個人を独立して扱うモデルが「エージェントベースモデル」である。エージェントベースモデルでは、人口集団が無向グラフ $G := (V, E)$ で与えられる。ここで、 $i \in V := \{1, \dots, N\}$ は人口集合の各個人を識別するためのインデックスである。人口集団内部における個人間のインタラクションは $(j, i) \in E \subseteq V \times V$ で表される。エージェント i と隣接するエージェントは $\mathcal{N}_i := \{j \mid (j, i) \in E\}$ で与えられる。エージェント i の感染状態は (N_i^S, N_i^I, N_i^R) で表され、 $N_i^S + N_i^I + N_i^R = 1$ を満たす。ここで、 $N_i^S, N_i^I, N_i^R \in \{0, 1\}$

であり、 $N_i^S, N_i^I, N_i^R = 1$ はそれぞれエージェント i が感受性者、感染者、回復者であることを意味する。

「均質モデル」と「エージェントベースモデル」の中間スケールが「メタ個体群モデル」である。メタ個体群モデルでは、人口集団を地域や都市などを元に $N = \sum_{i=1}^M N_i$ となる M 個のグループに分割し、エージェントベースモデルと同様にグラフを用いて表現する。グループ i の感染状態は (N_i^S, N_i^I, N_i^R) で表される。ここで、 N_i^S, N_i^I, N_i^R はそれぞれ感受性者、感染者、回復者の人数を表し、 $N_i^S + N_i^I + N_i^R = N_i$ となる。

「均質モデル」、「メタ個体群モデル」、「エージェントベースモデル」は人口集団を地域や都市などの幾何学的な関係性や、社会的な距離に基づいて分類している。一方で、人口を分類する手法としては年齢での分類も考えられる。年齢による感染リスクを考慮した解析や、乳児期の予防接種の影響を解析するときなど、人口集団を年齢ごとに分割したモデルを考える必要がある。人口に依存した人口集団の定義は文献(2)を参考にされたい。

2.3 動特性の記述

感染状態と遷移の定義、人口集合とその内部インタラクションの定義を決めることで、感染状態の動特性を数理モデルで表現できる。感染状態は定義に基づくと離散変数として表されるべきである。一方で、離散変数で定義された動的システムの解析は計算コストの観点で困難である。本稿では、離散システムを平均場近似した連続変数システムで表現された感染伝播モデルを中心に紹介する。

「均質モデル」の (N^S, N^I, N^R) 及び「メタ個体群モデル」の (N_i^S, N_i^I, N_i^R) の各要素は人口を表すため、定義に従えば整数で表される。「エージェントベースモデル」における (N_i^S, N_i^I, N_i^R) の各要素は、感染状態に応じて 0 若しくは 1 となるバイナリ変数である。また、状態遷移は感染者との接触や時間変化などの確率的な事象に応じて発生する。そのため、離散的な状態の確率的な遷移として感染症の伝播が記述できることから、感染症の状態遷移をマルコフ過程で記述する研究が報告されている。詳細は文献(3)にまとめられているので参考にされたい。

マルコフ過程によるモデル化は定義に基づき感染症を正確に記述できている。また、感染者との接触や時間経過に応じて感染状態が遷移するさまは、我々の想像する感染症の遷移に対する直感とも矛盾しない。そのため、マルコフ過程によるモデル化は正確で直感的に理解しやすいように感じる。しかし、マルコフ過程の状態数は人口規模に応じて指数関数的に増大することから、解析に必要な計算機リソースは爆発的に大きくなることが懸念される。

本稿では、解析の簡便さに着目して感染状態を平均場近似し得られる微分方程式による感染伝播モデルを紹介する。マルコフ過程において感染状態は時間経過や感染者との遷移に基づき確率的に遷移することから、感染状態も確率変数となる。平均場近似モデルでは離散的な確率変数で記述されたモデルから、期待値を用いた連続変数モデルを導出する。マルコフ過程から平均場近似に基づく微分方程式の導出は文献(3)にまとめられて

いるので、参照されたい。

平均場近似における均質モデルの感染状態は

$$p = [p^S, p^I, p^R]^T = \frac{1}{N} E \left([N^S, N^I, N^R]^T \right) \quad (1)$$

で定義される。ここで、 p は系全体に占める各状態の割合の期待値を表している。メタ個体群モデルの各グループの感染状態は

$$p_i = [p_i^S, p_i^I, p_i^R]^T = \frac{1}{N_i} E \left([N_i^S, N_i^I, N_i^R]^T \right) \quad (2)$$

で定義される。ここで、 p_i は各グループに占める各状態の割合の期待値を表している。エージェントベースモデルの各エージェントの感染状態は

$$p_i = [p_i^S, p_i^I, p_i^R]^T = E \left([N_i^S, N_i^I, N_i^R]^T \right) \quad (3)$$

で定義される。ここで、 p_i はエージェント i が各状態をとる確率を表している。

平均場近似により状態を離散変数から連続変数に近似することで、動特性をマルコフ過程から簡便な常微分方程式に書き換えることができる。マルコフ過程の状態数は、人口規模に応じて指数関数的に増大する。例えば、エージェントベースの SIS モデルをマルコフ過程でモデル化すると 2^N 個の状態がモデル化に必要である。文献(4)では、比較的小さい空手ネットワークをエージェントベースの SIS モデルで表すのに、 $2^{23} \approx 10^{13}$ 個の状態が必要であることに言及している。一方で、常微分方程式で記述されたエージェントベースの SIS モデルの状態数は N 個であることから、マルコフ過程と比べて扱いやすい。

3. 感染伝播モデルの解析

3.1 均質モデル

本節では、均質モデルで表現される SIR, SIS, SIRS モデルの紹介と平衡点の性質を解析する。均質モデルの記述に必要なパラメータは感染率 $\beta > 0$ 、回復率 $\delta > 0$ 、抗体消失率 $\gamma > 0$ である。感染率 β は感染者と感受性者が接触することによりどの程度感染者に移行するのかを表す。回復率 δ は感染状態の個体が単位時間あたりどの程度回復するのかを表している。抗体消失率 γ は回復状態の個体が単位時間あたりどの程度抗体を失うのかを表している。

平衡点は Disease-Free Equilibrium と Endemic Equilibrium の二つが存在する。Disease-Free Equilibrium は $p^I = 0$ となる平衡点、つまり十分時間が経つと感染者数が 0 になる平衡点を意味する。逆に Endemic Equilibrium は、定常的に $p^I \neq 0$ となる平衡点を指す。SIR, SIS, SIRS モデルは互いに状態遷移の定義が異なることから、平衡点に関係する性質も異なる。しかし、いずれのモデルにおいても基本再生産数

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \quad (4)$$

をしきい値とした p^S による条件により、感染者数の増減が決まる。特に、それぞれのモデルにおいて

$$R_0 \leq 1 \Leftrightarrow \beta \leq \delta \quad (5)$$

が満たされるとき、後述する条件を満たす初期状態から始まる任意の軌道において感染者数が単調減少することが示される。SIS モデル及び SIRS モデルにおいては (5) は Disease-Free Equilibrium に到達するための必要十分条件となる。(5) は感受性者から感染者への遷移よりも感染者が回復する遷移の方が優位であることを意味する。

3.1.1 モデル化

SIR モデルは β, δ, γ を用いることで

$$\dot{p}^S = -\beta p^S p^I \quad (6a)$$

$$\dot{p}^I = \beta p^S p^I - \delta p^I \quad (6b)$$

$$\dot{p}^R = \delta p^I \quad (6c)$$

で表すことができる。(6a)において、感染による感受性者割合の減少は $\beta p^S p^I$ で表されている。SIR モデルでは、感受性者割合の減少と新規感染者数は等しい。よって、(6b)において $\beta p^S p^I$ が増量として現れる。感染者から回復者への遷移は (6b) 及び (6c) 内の δp^I によって表されている。

SIS モデルでは、感受性者 → 感染者への遷移は SIR モデルと同じである。一方で、SIR モデルと異なり、感染者 → 感受性者と遷移することから、動特性が

$$\dot{p}^S = -\beta p^S p^I + \delta p^I \quad (7a)$$

$$\dot{p}^I = \beta p^S p^I - \delta p^I \quad (7b)$$

$$\dot{p}^R = 0 \quad (7c)$$

と修正される。一般的な SIS モデルに (7c) は含まれない。しかし、ワクチンによる免疫獲得者を考慮するために p^R が静的状態として定義される場合がある⁽⁵⁾。

SIRS モデルは感受性者 → 感染者 → 回復者までの遷移は SIR モデルと同じである。異なる点は、回復者 → 感受性者の遷移が存在することである。よって、動特性は

$$\dot{p}^S = -\beta p^S p^I + \gamma p^R \quad (8a)$$

$$\dot{p}^I = \beta p^S p^I - \delta p^I \quad (8b)$$

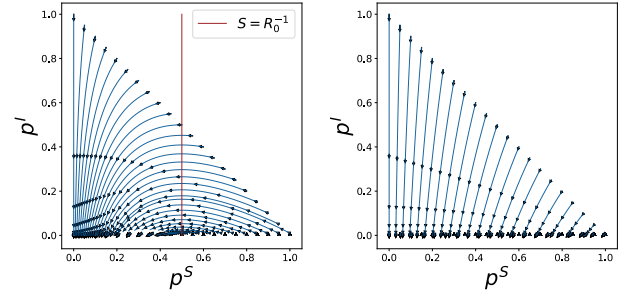
$$\dot{p}^R = \delta p^I - \gamma p^R \quad (8c)$$

と修正される。ここで、抗体消失の遷移は (8c) 及び (8a) の γp^R で表される。

SIR (6), SIS (7), SIRS (8) モデルはいずれも平均場近似モデルに対する感染状態の定義 (1) に従った p の動特性を記述している。(1) は p の各要素が対応する感染状態が人口集合内に占める割合の期待値を表していることから、

$$p^S + p^I + p^R = 1, 0_3 \leq p \leq 1_3 \quad (9)$$

が満たされることを示唆する。条件 (9) は SIR (6), SIS (7), SIRS (8) モデルに従う p においても成り立つ。(6), (7), (8) に対して、



(a) $\beta = 0.2, \delta = 0.1$
 $R_0 = 2$

(b) $\beta = 0.05, \delta = 0.1$
 $R_0 = 0.5$

図2 R_0 による SIR モデルの相図の比較 R_0 によらず全ての軌道は $p^I = 0$ へと漸近する。しかし、 $R_0 \geq 1$ のとき $p^S \geq R_0^{-1}$ の点のみが安定平衡点となる。

$$\dot{p}^S + \dot{p}^I + \dot{p}^R = 0 \quad (10)$$

が成り立つ。(10) は感染状態の総和が保存されることを意味することから、 $p^S(0) + p^I(0) + p^R(0) = 1$ 及び $0_3 \leq p(0)$ を満たす初期状態から始まる軌道は (9) を満たす。ここで、 $p^S(0), p^I(0), p^R(0), p(0)$ はそれぞれ p^S, p^I, p^R, p の初期状態を表す。

3.1.2 平衡点

図2は R_0 を変化させたときの SIR モデルに対する相図を表している。SIR モデルは回復者から感受性者への遷移が存在しないため Endemic Equilibrium は存在しない。 R_0 によらず (9) を満たす初期状態から始まった任意の軌道はいずれ $p^I = 0$ となる状態に収束する。しかし、 $p^I = 0$ へと至る軌道の性質は R_0 によって異なる。

SIR モデル (6) において $R_0 \geq 1$ のとき、図2(a) が示すとおり

$$p^S \leq R_0^{-1} \quad (11)$$

を満たす状態を始点とする軌道は、感染者数の増加を伴いながら $p^I = 0$ へと到達する。上記の特性は SIR モデルの動特性 (6) からも説明ができる。 p が非負であることから、(6) は

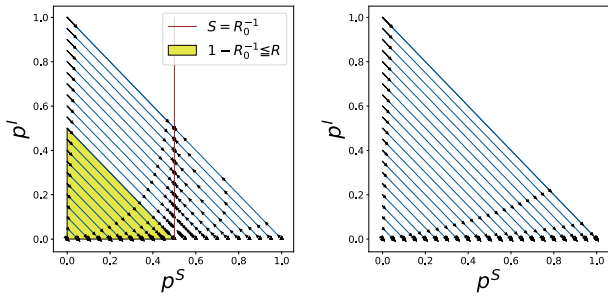
$$\dot{p}^I \begin{cases} \leq 0 & \text{if } \beta p^S - \gamma \leq 0 \Leftrightarrow (11) \\ > 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$\dot{p}^S < 0 \text{ if } p^I \neq 0 \quad (13)$$

を満たす。初期状態付近では $p^S \simeq p^S(0)$ と定数に近似できることから、(6b) より p^I は $t \simeq 0$ にて

$$p^I \simeq e^{(\beta p^S(0) - \gamma)t} p^I(0) \quad (14)$$

と近似できる。(12) 及び (14) より、(11) を満たす初期状態付近では、指数関数的に感染者数が増大することが分かる。一方で、(13) は感染者が存在する間は p^S が単調減少することを意味する。(12) は p^S が増加するにつれて p^I の増加量が減少し、い



(a) $\beta = 0.2, \delta = 0.1$
 $R_0 = 2$

(b) $\beta = 0.05, \delta = 0.1$
 $R_0 = 0.5$

図3 R_0 による SIS モデルの相図の比較 $R_0 > 1$ のとき, $p^I \neq 0$ となる安定平衡点が存在するが初期状態によっては $p^I = 0$ に至る. $R_0 \leq 1$ のとき, 任意の軌道は $p^I = 0$ へ到達する.

れ負に転じることを意味している. よって, p^I は $p^S = R_0^{-1}$ に達するまでは増加するが, 以降は $p^I = 0$ へと漸近する. 図 2(a) においても $p^S = R_0^{-1}$ よりも右側に初期値をもつ軌道は p^I を増加させながら $p^S = R_0^{-1}$ に近づくことが確認できる. また, $p^S = R_0^{-1}$ から左側に来ると $p^I = 0$ へ漸近を始める.

一方で, 図 2(b) が示すとおり (5) が満たされるとき, (9) を満たす初期状態から始まる軌道は p^I を単調減少させながら $p^I = 0$ へ漸近する. $0 \leq p^S \leq 1$ となることから, (5) が満たされる場合, (9) を満たす初期状態から始まる軌道において $\dot{p}^I \leq 0$ が満たされる. よって, 図 2(b) が示すように任意の軌道において感染者数が増加することはないため, いずれの初期状態においても指数関数的な感染者数の増加は見られない.

SIS モデルは SIR モデルと異なり感染からの回復により抗体が獲得されない. そのため, 図 3(a) が示すように R_0 が (5) を満たさないとき, Endemic Equilibrium が存在する. つまり $R_0 > 1$ のとき,

$$p^S = R_0^{-1}, p^I = 1 - R_0^{-1} - p^R \quad (15)$$

が安定な Endemic Equilibrium となる. ここで, $p^R = p^R(0)$ は

$$p^R < 1 - R_0^{-1} \quad (16)$$

を満たす. 一方で, 全ての軌道が Endemic Equilibrium に到達するわけではない. ワクチン接種により回復者の割合が

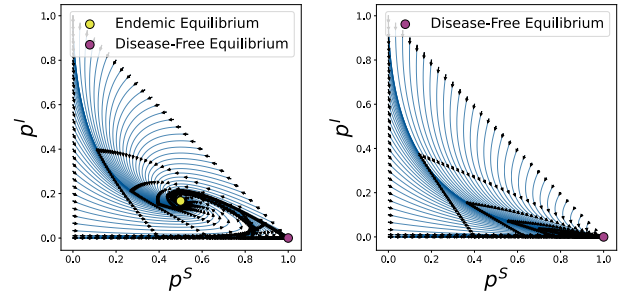
$$1 - R_0^{-1} \leq p^R \quad (17)$$

を満たす軌道を考える. このとき, (10) から

$$p^S \leq p^S + p^I = 1 - p^R \leq R_0^{-1} \quad (18)$$

となり (11) と同様の条件が導かれる. SIR モデル (6) と SIS モデル (7) において, p^I の動特性は等しいことから (11) が満たされるとき, 感染者の割合は単調減少する. よって, 図 3(a) が示すように (17) を満たす初期状態から始まる軌道は Disease-Free Equilibrium に到達する.

逆に, (5) が満たされれば, SIS モデルにおいても (9) を満た



(a) $\beta = 0.2, \delta = 0.1$,
 $\gamma = 0.05, R_0 = 2$

(b) $\beta = 0.05, \delta = 0.1$,
 $\gamma = 0.05, R_0 = 0.5$

図4 R_0 による SIRS モデルの相図の比較 $R_0 > 1$ のとき, $p^I \neq 0$ から始まる軌道は全て Endemic Equilibrium に達する. $R_0 \leq 1$ のとき, 任意の軌道は $p^I = 0$ へ到達する.

す任意の軌道が $p^I = 0$ に収束する. SIS モデルと SIR モデルにおいて p^I の動特性は等しいことから, (5) は (9) を満たす p に対して $\dot{p}^I < 0$ を意味する. よって, 図 3(b) が示すように任意の軌道が $p^I = 0$ へ収束する.

SIRS モデルも図 4(a) が示すとおり, 抗体消失の影響から $R_0 > 1$ のときに

$$p^S = R_0^{-1}, p^I = \frac{\gamma}{\gamma + \delta}(1 - R_0^{-1})$$

$$p^R = \frac{\delta}{\gamma + \delta}(1 - R_0^{-1}) \quad (19)$$

となる安定な Endemic Equilibrium が存在する. SIS モデルにおいても $R_0 > 1$ で Endemic Equilibrium に到達する軌道が存在したが, 初期状態によっては Disease-Free Equilibrium に到達する軌道も存在する. しかし, SIRS モデルにおいては抗体消失の影響から $R_0 > 1$ のとき, $p^I = 0$ から始まる軌道を除いて全ての軌道は (19) へ到達する.

$p^I = 0$ から始まる軌道は $p^I = 0$ の直線上を移動して $p^S = 1$ へ到達する. 感染者がいな場合, 感受性者から感染者への遷移は起こらない. 一方で, 回復者から感受性者へは遷移することから, $p^S = 1$ へ到達する. $R_0 > 1$ のとき, $p^S = 1$ かつ $p^I = 0$ は不安定極と安定極を双方有する鞍点である. $p^I = 0$ 上の軌道は安定極の動特性に起因しているため $p^S = 1$ へ収束しようとするが, 外的要因による感染などの p^I 方向の摂動により (19) へと収束点が変わる.

SIRS モデルにおける p^I の動特性もまた SIR モデルの (6b) と等しい. よって, 図 4(b) が示すように (5) が満たされるとき, SIR モデルと同様の理由から (9) を満たす軌道は全て $p^I = 0$ へ収束する. SIR モデル (6) や SIS モデル (7) では $p^I \rightarrow 0$ のとき, p^R の動特性が $\dot{p}^R = 0$ へと近似される. よって, $p^R \neq 0$ を満たす Disease-Free Equilibrium が存在する. 一方で, SIRS モデル (8) は抗体が消失することから

$$\dot{p}^R = -\gamma p^R \quad (20)$$

に近似される. よって, $p^I \rightarrow 0$ に伴い $p^R \rightarrow 0$ となることから $p^R = 0, p^I = 0, p^S = 1$ のみが安定な Disease-Free

Equilibrium となる。

SIR モデル, SIS モデル, SIRS モデルいずれにおいても Disease-Free Equilibrium が安定となるための必要十分条件は,

$$\dot{p}^I < 0 \quad (21)$$

が定常的に満たされることである。(5) が満たされるとき, (21) は常に満たされる。一方で, (5) が満たされないときは, 一定割合以上の回復者を定常的に保つことで感染者数の増加を抑えることができる。

つまり, (17) は集団免疫を達成するための条件である。SIR モデル及び SIS モデルにおいて (21) が定常的に満たされるためには, (12) から (17) を満たす必要がある。よって, R_0^{-1} は Disease-Free Equilibrium が安定平衡点となるために得るべき集団での免疫獲得割合のしきい値となることを意味する。SIRS モデルにおいては, 回復者から感受性者への遷移が存在するため $p^I = 0$ において定常的に $p^R \neq 0$ を保つことができない。よって, ワクチン接種などにより感受性者 → 回復者への遷移させることで集団免疫を達成できると考えられる。

3.2 エージェントベースモデル

前節では均質モデルで表現される SIR モデル, SIS モデル, SIRS モデルの紹介と平衡点の性質を示した。均質モデルでは, 全ての個体がよく混合され同じ回復率, 感染率, 抗体消失率をもつことが仮定されている。しかし, 実際は個体が有するパラメータには個人差があり, 個々の行動や接触パターンも異なる。エージェントモデルではエージェントごとに感染症のパラメータや個々の行動や接触パターンを定義した上で, 感染伝播をモデル化できる。

エージェントベースモデルではエージェントごとに感染率 β_i , 回復率 δ_i , 抗体消失率 γ_i が割り振られる。またエージェント i と隣接するエージェント $j \in \mathcal{N}_i$ との間の接触率を $\alpha_{(j,i)} = \alpha_{(i,j)} > 0$ で定義する。上記のパラメータをもとに, エージェントベースの SIR, SIS, SIRS モデルを記述することができる。本稿ではスペースの都合で SIS モデルの紹介をする。

3.2.1 モデル化

ネットワーク \mathcal{G} 上で伝播する SIS モデルは $\delta_i, \beta_i, \alpha_{(j,i)}$ を用いて

$$\dot{p}_i^S = +\delta_i p_i^I - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \beta_i \alpha_{(j,i)} p_i^S p_j^I \quad (22a)$$

$$\dot{p}_i^I = -\delta_i p_i^I + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \beta_i \alpha_{(j,i)} p_i^S p_j^I \quad (22b)$$

$$\dot{p}_i^R = 0 \quad (22c)$$

で表される。感染者から感受性者への遷移は時間経過に応じてエージェントごとに独立して発生する。そのため, (22) でも隣接ノードに依存することなく $\delta_i p_i^I$ によって記述される。一方で, 感受性者から感染者への遷移は隣接ノードとのインタラクションに依存して発生する。エージェント i が感受性者であり,

感染者であるエージェント $j \in \mathcal{N}_i$ と接触して感染する遷移は $\beta_i \alpha_{(j,i)} p_i^S p_j^I$ で表されている。

エージェントベースの SIS モデル (22) も均質モデルの SIS モデル (7) と同様に保存系である。(22) から

$$\dot{p}_i^S + \dot{p}_i^I + \dot{p}_i^R = 0 \quad (23)$$

が成り立つ。よって, $p_i^S(0) + p_i^I(0) + p_i^R(0) = 1, 0_3 \leq p_i(0) \leq 1_3$ を満たす初期状態から始まる軌道は

$$p_i^S + p_i^I + p_i^R = 1, 0_3 \leq p_i \leq 1_3 \quad (24)$$

を満たす。よって, エージェントベースの SIS モデル (22) は

$$\dot{p}_i^I = -\delta_i p_i^I + \beta_i (1 - p_i^R - p_i^I) \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{(j,i)} p_j^I \quad (25)$$

と書き直すことができる。

3.2.2 平衡点

均質モデルに基づく SIS モデルでは, 基本再生産数 R_0 が 1 未満のときに (9) を満たす任意の状態を始点とする軌道は Disease-Free Equilibrium に収束する。仮に $R_0 \geq 1$ であったとしても, (17) を満たす状態を始点とする軌道は Disease-Free Equilibrium へと到達する。エージェントベースの SIS モデルにおいても上記の条件を拡張した Disease-Free Equilibrium への収束条件を導くことができる。均質モデルと異なり, エージェントベースモデルはグラフ \mathcal{G} 上の感染伝播を表現している。そのため, Disease-Free Equilibrium への収束には感染能力, 回復能力以外にグラフ \mathcal{G} 上の伝播能力が影響を与える。

ベクトル I を $I = [p_1^I, \dots, p_N^I]^T$ と定義する。 I の動特性を表す微分方程式は (25) から

$$\dot{I} = (RBA - D)I - h \quad (26)$$

と表すことができる。ここで D, R, B, A 及び h は $D = \text{diag}(\delta_1, \dots, \delta_N)$, $B = \text{diag}(\beta_1, \dots, \beta_N)$, $R = \text{diag}(1 - p_1^R, \dots, 1 - p_N^R)$ 及び

$$[A]_{j,i} = \begin{cases} \alpha_{(i,j)} & \text{if } (i,j) \in \mathcal{E} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

$$[h]_i = p_i^I \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{(j,i)} p_j^I$$

で与えられる。 I, h の非負性と (24) から, 比較原理⁽⁶⁾に基づき (25) の解軌道は任意の $t \geq 0$ に対して

$$0_N \leq I \leq e^{(RBA-D)t} I(0) \leq e^{(BA-D)t} I(0) \quad (27)$$

を満たす。

不等式 (27) は行列 $RBA - D$ 及び $BA - D$ の安定性が Disease-Free Equilibrium への収束条件となることを示唆している。 $BA - D$ の行列に対して,

$$\lambda_{\max}(BA - D) \leq 0 \quad (28)$$

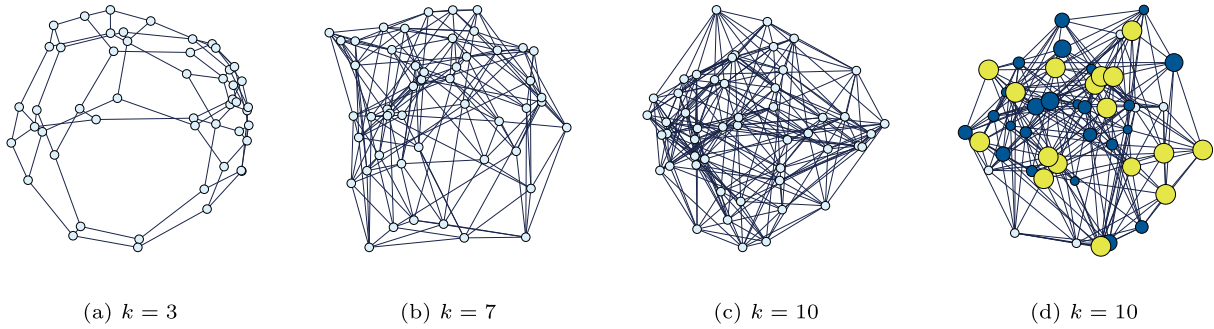


図5 k 次-正則グラフ 白いノードは $p_i^R = 0$, 青いノードは $0 < p_i^R < 0.9$, 黄色いノードは $0.9 \leq p_i^R \leq 1$ を表す.

が成り立つことを仮定する. (28) は (27) の右辺が

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{(BA-D)t} I(0) = 0 \quad (29)$$

へ収束することを意味する. よって, (28) が満たされる時, (24) を満たす感染状態から始まる I は Disease-Free Equilibrium へと収束する.

均質モデルにおける (5) は, 感染能力と回復能力の力関係が平衡点の性質を決めることを示唆した. エージェントベースの SIS モデルにおける (28) は, 平衡点の性質が個々の感染能力及びネットワーク上の伝播能力と回復能力の力関係で決まることを示している. ネットワーク上の伝播能力は行列 A によって決まる. 感染能力及びネットワーク上の伝播能力と回復能力の対比を強調するために, $\delta_1 = \dots = \delta_N = \delta$ を仮定する. このとき, (28) は

$$\frac{\lambda_{\max}(BA)}{\delta} \leq 1 \Leftrightarrow \lambda_{\max}(BA) \leq \delta \quad (30)$$

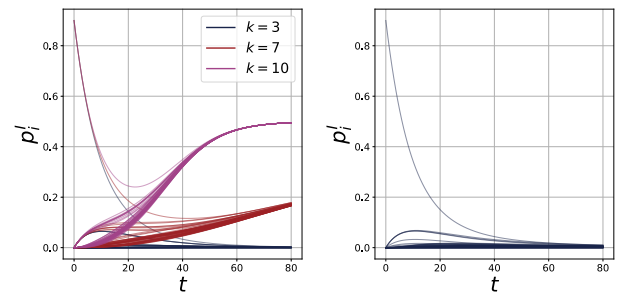
と書き換えることができる. (30) は (5) の β を $\lambda_{\max}(BA)$ と置き換えることで得られる. よって, エージェントベースモデルでは BA の固有値が系全体における感染能力を定量評価する指標になると考えられる.

(30) は, エージェントベースモデルでは感染能力にネットワーク上の伝播能力が影響を与えることも示している. エージェントベースモデルでは, エージェントからほかのエージェントへと感染が伝播するさまをモデル化している. そのため, (5) と異なり (28) は伝播経路となる \mathcal{G} の構造や接触率 $\alpha_{(j,i)}$ の影響を受ける. 感染経路による伝播の影響を強調するために, (30) に対して更に $\beta_1 = \dots = \beta_N = \beta$, $\alpha_{(j,i)} = 1$ を仮定する. このとき, (30) は

$$\lambda_{\max}(\mathcal{A}_{\mathcal{G}}) R_0 \leq 1 \Leftrightarrow \lambda_{\max}(\mathcal{A}_{\mathcal{G}}) \beta \leq \delta \quad (31)$$

と書き換えることができる. ここで, $\mathcal{A}_{\mathcal{G}}$ はネットワーク \mathcal{G} に対する隣接行列である. エージェントベースモデルにおいて β は個人から個人に感染症を移す能力を意味する. よって (31) から, 隣接行列 $\mathcal{A}_{\mathcal{G}}$ の固有値は感染症が \mathcal{G} 上で伝播する能力を表すと解釈できる.

(31) から, 感染症が有する感染率や回復率が変わらなくとも \mathcal{G} が有する伝播能力により Disease-Free Equilibrium が不安定化する可能性がある. 例として図5で表される k -正則グラフ上



(a) $p_i^R = 0$ (b) $p_i^R \neq 0$

図6 $\beta = 0.02$, $\delta = 0.1$ における k -正則グラフ上での感染症の伝播 $k \geq 5$ より $I \neq 0$ へ漸近する. $k \geq 5$ においても p_i^R が (32) を満たすとき $I = 0$ に漸近する.

の SIS モデルを考える. 図5で与えられたグラフ上の SIS モデルの時間応答を図6に示す. k -正則グラフは各エージェントに接続されるエッジの数が k 本となるグラフであり, 隣接行列の最大固有値が k となることが知られている. よって, 図6(b)が示すように, $R_0 \leq 1/k$ を満たすネットワークでは I が 0 へと漸近するが, 次数が大きくなるにつれて $I \neq 0$ となる平衡点へ収束先が変化する.

不等式 (27) は仮に (28) が満たされなくとも,

$$\lambda_{\max}(RBA - D) \leq 0 \quad (32)$$

を満たす p_i^R から始まる局所的な軌道は Disease-Free Equilibrium に到達することを表している. 例として, 図6に示される k -正則グラフ上の SIS モデルを考える. 図6(a)に示されるように $k = 10$ では (31) が満たされなため, $p_i^R = 0$ から始まる軌道は Disease-Free Equilibrium に収束しない. 一方で, 図5(d)には $k = 10$ における (32) を満たす p_i^R を示している. 図6(b)から図5(d)を満たす p_i^R から始まる軌道は $I = 0$ へ漸近することが分かる.

(32) は均質モデルにおける (17) の拡張である. 問題の簡略化のために $\delta_1 = \dots = \delta_N = \delta$, $\beta_1 = \dots = \beta_N = \beta$, $p_1^R = \dots, p_N^R = p^R$, $\alpha_{(j,i)} = 1$ を仮定すると, (32) は

$$1 - (\lambda_{\max}(\mathcal{A}_{\mathcal{G}}) R_0)^{-1} \leq p^R \quad (33)$$

と書き換えられる. エージェントモデルが表現する \mathcal{G} 上の伝播

により, (17)に含まれる R_0 が (33) では伝播能力に依存する $\lambda_{\max}(\mathcal{A}_G)R_0$ へ置き換えられている. また, 均質モデルにおける (17) は集団免疫の獲得条件と解釈できることから, (32) はエージェントベースモデルでの集団免疫獲得と解釈できる.

(32) は集団免疫獲得には, 免疫獲得者の割合以外に \mathcal{G} 上の配置が影響を与えることを示唆している. 免疫獲得率が $T \in [0, 1]$ で与えられたときの R を要素としてもつ集合を

$$\mathcal{R}_T = \left\{ R \mid \frac{1}{N} \sum_{i \in \mathcal{V}} p_i^R = T \right\} \quad (34)$$

で定義する. $\frac{1}{N} \sum_{i \in \mathcal{V}} p_i^R = T$ を満たす p_i^R は $T = 1, 0$ を除いて一意には決まらないことから, \mathcal{R}_T はほとんどの場合複数の要素をもつ. \mathcal{R}_T に含まれるある R が (32) を満たしたとしても, ほかの R が (32) を満たすとは限らない. つまり, 免疫獲得率以外にネットワーク \mathcal{G} 上のどのエージェントが免疫を保持しているのが集団免疫の獲得に影響を与える.

4. 感染伝播の制御

前章においてエージェントベースの SIS モデルが Disease-Free Equilibrium に到達するための条件が (28), (32) で与えられることを示した. (28) は感染力, 回復力, ネットワーク上の伝播能力が Disease-Free Equilibrium の安定性を決めることを示している. (32) は Disease-Free Equilibrium へ到達するための回復者の分布が満たすべき条件を示している. 本節では, (28) 及び (32) に基づいて感染力, 回復力, ネットワーク構造, 回復者の分布の設計により感染伝播を制御して Disease-Free Equilibrium を安定化する方法を紹介する.

文献(3), (4) では幾何計画問題に基づく医療資源の配置を考えている. 幾何計画問題における資源配置の目的は感染力, 回復力の操作による Disease-Free Equilibrium の安定化である. 各エージェントは治療薬やワクチンにより感染率と治癒率を

$$\underline{\beta}_i \leq \beta_i \leq \bar{\beta}_i \quad (35a)$$

$$\underline{\delta}_i \leq \delta_i \leq \bar{\delta}_i \quad (35b)$$

の範囲で操作できると仮定する. 感染率を β_i へ回復率を δ_i に変更するのに必要なコストはそれぞれ $f_i(\beta_i)$, $g_i(\delta_i)$ であると仮定する. コスト制約に基づく医療資源配置問題は

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad \lambda_{\max}(BA - D) \\ & \text{subject to} \quad \sum_{i=1}^N (f_i(\beta_i) + g_i(\delta_i)) \leq C, \end{aligned} \quad (36)$$

によって定式化される. ここで C は投下可能なコストの上限である.

(36) は幾何計画問題に帰着させることができるため, 凸計画問題として解くことができる. 一般的に, 最大固有値は凸な目的関数ではない. しかし, $BA - D$ が Metzler 行列となることと $f(\cdot)$, $g(\cdot)$ を posynomial とすると (36) は対数変換により凸最適化問題に変更できる. Metzler 行列の性質, posynomial の定義, 幾何計画問題への帰着の詳細に関しては文

献(4)を参照されたい. 凸最適化問題は, 大域的な最適解を内点法に代表される多項式時間アルゴリズムを用いて求めることができる. また, CVX や CPLEX などの Python や MATLAB にて動く凸最適化用ソルバーが無償, 有償問わず提供されている. よって, 比較的大きなネットワークに対しても現実的に (36) を解き Disease-Free Equilibrium を安定化させる医療資源の配置を決定できる.

(36) は, (28) に基づいて医療資源によって Disease-Free Equilibrium の安定化を試みている. 一方で, (32) を利用して集団免疫によって Disease-Free Equilibrium を安定化することも考えられる. 筆者らはネットワーク中心性の概念を動的なシステムに拡張して (32) を満たす回復者の分布を設計する手法を提案している⁽⁷⁾. 文献(7)では, (32) の代わりに

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \alpha_{(i,j)} \beta_j (1 - p_j^R) \leq \gamma_i \quad (37)$$

を用いて行列の固有値の大きさを評価している. (37) の左辺は RBA を重みつき隣接行列と考えたときのエージェント i の次数を示している. (32) と異なり (37) に基づいた設計問題は, 分散最適化アルゴリズムを用いて解くことができる. ネットワーク内の各エージェントが隣接エージェントを把握することは, ネットワーク構造を完全に把握するよりも容易である. そのため, 集中的な設計よりも簡易的に回復者の分布を設計できると考えられる.

筆者らの結果と比較して, よりネットワーク構造やその伝播能力に着目した設計手法も研究が進められており, 今後の発展が期待される. 文献(8)では, 隣接行列の固有値を次数やサブグラフの数から推定することを試みている. 隣接行列の固有値は (31) が示すように感染の伝播能力を示す指標である. 図 6 (a) が例示するように, 隣接行列の固有値とネットワーク構造の関係を明らかにすることでノードやエッジの除去による Disease-Free Equilibrium を設計できる可能性がある.

フィードバック頂点集合に着目した動的システムの解析^{(9), (10)} も非常に興味深い. 感染症の伝播制御に利用するには今後の発展が必要である. フィードバック頂点集合は, ネットワーク上からその頂点を取り除くことにより有向閉路が消失する頂点の集合を指す. 文献(9), (10)の結果に基づいてフィードバック頂点集合の状態を $p_i^R = 1 \Rightarrow p_i^I = 0$ とすることで $\lim_{t \rightarrow \infty} I = 0$ を保証できる. フィードバック頂点集合が保証する原点への収束性はネットワーク構造のみで決まる. よって, 感染率や回復率などのパラメータの大きさやほかのエージェントとの関係に依存しない非常に頑強な制御手法といえる. しかし, 感染伝播で考えるネットワークは無向グラフになることから, フィードバック頂点集合の数は膨大になる. そのため実用上有効とはいえないことから, 今後の発展に期待したい.

5. おわりに

本稿ではこれまでに筆者なりに理解した感染症の伝播モデルの構築方針と解析結果の解釈を中心に紹介した. また, 紹介したモデルを利用した感染症の伝播モデルの制御手法を簡単に紹

介した。本解説を通じて、感染伝播モデルの理解や解析結果の理解、解釈の助けになれば幸いである。

本稿では感染伝播モデルとその解析結果を紹介したが、紹介した結果の応用は感染症の伝播に留まらない。数理モデルは、現実の現象を理解、説明するために、その本質的な要素や関係性を簡略化・抽象化したものである。数理モデル化するために、感染症は事象に依存した状態遷移として抽象化された。また、状態を遷移させる事象はほかの個体とのインタラクションを中心に励起される。同様の性質をもつ SNS 上での情報の伝播、社会ネットワークによる意思の伝播、コンピュータウイルスの伝播、故障の伝播などにも本稿で紹介した結果が応用できると信じている。特に上記の現象は有向グラフにて記述可能なモデルを含むことから、感染症の制御には実用上有効ではなかったフィードバック頂点集合が果たす役割は大きいと考えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたり数多くの助言を頂いた山口大学の若佐裕治教授、田口泰成君に感謝致します。



足立亮介 (正員)

2014 北海道大学工学部卒業。2016 同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2019 同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。同年山口大学大学院創成科学研究科助教となり、現在に至る。システム制御理論とその応用の研究に従事。博士(情報科学)。IEEE、システム制御情報学会、計測自動制御学会の会員。

文 献

- (1) W.O. Kermack and A.G. McKendrick, "A contribution to the mathematical theory of epidemics," *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, vol.115, no.772, pp.700–721, 1927.
- (2) T. Kuniya, "Structure of epidemic models: toward further applications in economics," *The Japanese Economic Review*, vol.72, no.4, pp.581–607, 2021.
- (3) C. Nowzari, V.M. Preciado, and G.J. Pappas, "Analysis and control of epidemics: A survey of spreading processes on complex networks," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol.36, no.1, pp.26–46, 2016.
- (4) 小蔵正輝, "複雑ネットワークにおける最適資源配置—geometric program によるアプローチ—," *信学 FR 誌*, vol.12, no.3, pp.191–200, 2019.
- (5) T. Taguchi, R. Adachi, and Y. Wakasa, "Resource allocation for epidemic spreading processes based on minimax strategy," *2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp.566–567, 2022.
- (6) M. Kirkilionis and S. Walcher, "On comparison systems for ordinary differential equations," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol.299, no.1, pp.157–173, 2004.
- (7) R. Adachi, Y. Yamashita, and K. Kobayashi, "Block sparse design of distributed controllers for dynamical network systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol.33, no.1, pp.49–66, 2023.
- (8) X. Chen, M. Ogura, and V.M. Preciado, "Bounds on the spectral radius of digraphs from subgraph counts," *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, vol.41, no.2, pp.525–553, 2020.
- (9) B. Fiedler, A. Mochizuki, G. Kurosawa, and D. Saito, "Dynamics and control at feedback vertex sets. i: Informative and determining nodes in regulatory networks," *Journal of Dynamics and Differential Equations*, vol.25, pp.563–604, 2013.
- (10) A. Mochizuki, B. Fiedler, G. Kurosawa, and D. Saito, "Dynamics and control at feedback vertex sets. ii: A faithful monitor to determine the diversity of molecular activities in regulatory networks," *Journal of Theoretical Biology*, vol.335, pp.130–146, 2013.

(RCC 研究会提案, 2024 年 9 月 3 日受付,
2024 年 9 月 30 日再受付)

現場での高度な ECPR を可能とした「移動型緊急手術室ドクターカー V3」の開発とその症例等

Development of Doctor Car V3 as Mobile Operating Room for Emergency Surgery and Prehospital Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation

浅川拓克 Takukatsu ASAKAWA

今 明秀 Akihide KONN

吉村有矢 Yuya YOSHIMURA

安部信行 Nobuyuki ABE

アブストラクト 都会では助かったかもしれない命が、遠隔地では失われてきた。高次医療機関までの搬送に時間を要するからだ。八戸も例外ではなかった。患者の良好な予後を望むには、心肺停止発生から体外循環式心肺蘇生（ECPR）開始までの時間は、60分以内が有効である。現在、この条件を満たす地域は、都市部の救命救急センターのみである。医療過疎地での成功は困難であった。本研究では、院外に出動して ECMO を使用した ECPR を行うことに救命の大きな可能性があると考えた。そこで我々は、傷病者発生現場で ECMO 装着手術を行うことのできる「移動型緊急手術室ドクターカー V3」を開発した。本報では、移動型緊急手術室で傷病者発生現場近くまで出動し、現場での ECMO による救命率と社会復帰率を向上した症例などを紹介する。

キーワード ドクターカー、手術室、ECPR、ECMO、自動車

Abstract The number of lives lost in rural areas could have been reduced had the same care been provided in urban areas, given that patients in rural areas require long-distance and time-consuming transportation to specialized facilities, to receive advanced care. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation (ECPR) has been demonstrated to be an effective intervention when initiated within 60 minutes of cardiac arrest. Only large hospitals in urban areas are equipped to provide such advanced treatment to patients. The implementation of ECPR outside a hospital setting has the potential to significantly enhance the survival rates of patients who have experienced cardiac arrest in rural areas, where the likelihood of survival was previously limited. The mobile operating room (Doctor Car V3) for emergency surgery represents a novel vehicle that can be utilized to initiate ECPR in a prehospital setting. This vehicle has the potential to be an effective means of saving the lives of cardiac arrests and improving their prognoses.

Key words Doctor car, Operating room, ECPR, ECMO, Car

1. はじめに

1-1 ドクターカーの種類⁽¹⁾

ドクターカーの種類は多岐にわたり、使用する車両や車両の所属、その目的などにより名称が異なる。日本病院前救急診療医学会の「ドクターカーの定義と分類」によると、表1のように分類される。

浅川拓克 非会員 八戸工業大学

E-mail takukatsu@hi-tech.ac.jp

吉村有矢 非会員 八戸市立市民病院

E-mail yoshimura.yuya@gmail.com

今 明秀 非会員 八戸市立市民病院

E-mail hotate1@nifty.com

安部信行 非会員 八戸工業大学

E-mail abe@hi-tech.ac.jp

Takukatsu ASAKAWA, Nonmember (Department of Engineering, Hachinohe Institute of Technology, Japan)

Yuya YOSHIMURA, Nonmember (Department of Emergency and Critical Care Medicine, Hachinohe City Hospital, Japan)

Akihide KONN, Nonmember (Department of Emergency and Critical Care Medicine, Hachinohe City Hospital, Japan)

Nobuyuki ABE, Nonmember (Department of Engineering, Hachinohe Institute of Technology, Japan)

電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ

Fundamentals Review Vol.18 No.3 pp.213-217 2025年1月

©電子情報通信学会 2025

I-①ドクターカー（患者搬送機能付き）は、医療機関に所属し医師や看護師らが必要資器材とともに現場に搬送する高規格救急車をベースとした緊急自動車である。

I-②ラピッド・ドクターカー（通称：ラピッド・カー）は、医療機関に所属する緊急自動車であり、医師や看護師らが必要資器材とともに現場に搬送することを目的とするが、患者搬送機能をもたないものをラピッド・カーと分類する。

II在宅ドクターカーは、乗用車を用いて、主に在宅診療支援を目的として医師若しくは看護師らを患者のもとまで搬送するもの（患者搬送機能を有さない）を在宅ドクターカーと分類する。

IIIワークステーション型ドクターカーは、高規格救急車を利用する点は前述のI-①ドクターカーと同様であるが、ワークステーション型ドクターカーは車両の所属が消防機関である点で異なる。ワークステーション型ドクターカーは、運用人員が病院職員ではなく消防職員となる点も、前述のI-①ドクターカーやI-②ラピッド・ドクターカーと異なる。

1.2 ドクターカーの目的⁽¹⁾

一般的なドクターカー活動の目的は、①「医療介入・決定

表1 ドクターカーの定義と分類

類型	名称	車両の所属	患者搬送	医師派遣	主な機能
I-①	(搬送機能付き) ドクターカー	医療機関	○	○	現場出動 施設間搬送 その他
I-②	ラピッド・ドクターカー (ドクターカー V3 含む)	医療機関	×	○	現場出動 その他
II	在宅ドクターカー	医療機関	×	○	往診 訪問診療
III	ワークステーション型 ドクターカー	消防機関	○	○	現場出動 施設間搬送 その他

的治療までの時間短縮」, ②「救急隊では不可能な高度な医療の提供」, ③「治療方針決定の前倒し」の三つである。

病院前の段階で傷病者に接触し、搬送中に可能な限りの処置を行い、収容医療機関に適切な患者情報を提供することによって、医療機関到着後、速やかに根本的治療を開始することが可能となる。

2. ラピッド・ドクターカー

2.1 ドクターカーの運行

八戸市立市民病院では、2010年3月よりラピッド・ドクターカーの運行が開始され、出動要請は年々増加し、2010年10月から2台体制となり、2016年7月には、筆者らによって開発された全国初の移動型緊急手術室ドクターカーV3が、厚生労働省の許可を得て運行を始めた。なお、近年の八戸圏域（八戸市・三戸町・五戸町・田子町・南部町・階上町・新郷村・おいらせ町の8市町村で構成）のドクターカー出動回数は年に1,200件程であり最遠出動距離は50km以上となっている。

2.2 ドクターカーの救命効果

2010年3月から2013年3月までのドクターカー出動事案1,561例（キャンセルを除く3年間の総数）を対象とした救命結果は次のとおりである。ドクターカー未導入の場合の推定死亡数が456件であることに對し、ドクターカーによる救命数は88件増加し、死亡数は368件に減少している。このことから、早期治療開始の重要性が分かる。なお、ドクターカー未導入の場合の推定死亡数は救命医2名で導き出した数値である。

3. 院外ECPRにおける救命及び社会復帰率向上の可能性

3.1 出血性ショックや心肺停止における根本的治療開始までの時間が社会復帰率

へき地で発生した重症患者は、高次医療機関まで長距離搬送されて治療を受ける。出血性ショックや心肺停止では根本

的治療開始までの時間が社会復帰率に直結する。

近年、対外循環式心肺蘇生（ECPR）による有効性が認められたが、SAVE-Jが発表した経皮的な心肺補助装置（ECMO）を用いたECPRには、手術を行う医師の熟練した技術と高額な機器が必要である。

良好な予後を望むには、心肺停止発生からECPRを開始までの時間を60分以内⁽²⁾とすることが望ましい。この条件を満たす実行可能な地域は、救急救命センターがある都市部のみということになる。へき地発生では、成功が困難であるのは明白であった。そのため、院外に出動し酸素化させた血液を循環させるECMOを使用したECPRを行うことに救命及び社会復帰率向上の可能性があると考えた。

3.2 経皮的な心肺補助装置

ECMOとは、一般的に遠心ポンプと膜型人工肺を用いた閉鎖回路の人工心肺装置により、機械的補助循環装置の一つである。遠心ポンプと膜型人工肺を用いた閉鎖式回路の人工心肺装置によって、大腿動静脈経路により、心肺補助を行う。血液ポンプを使用し、心臓ポンプ機能を代行することで、酸素化された血液循環補助を確実に行うことができる。

4. 救命率と社会復帰率

4.1 救命率と社会復帰率の相違点

救命率という言葉は耳にすることはあるが、医療従事者以外で社会復帰率という言葉は聞くことはあまりない。ここでは、救命率と社会復帰率の違いについて説明をする。

- (1) 救命率とは、心肺停止患者が救命処置を受けて、意識回復の有無を問わず、1か月間の生存できた患者の割合をいう。図1に心肺停止からの経過時間と救命率の関係を示す。
- (2) 社会復帰率とは、患者が救命処置を受けて命を取り留め、かつ日常生活を良好に行える状態まで回復できた、患者の割合をいう。

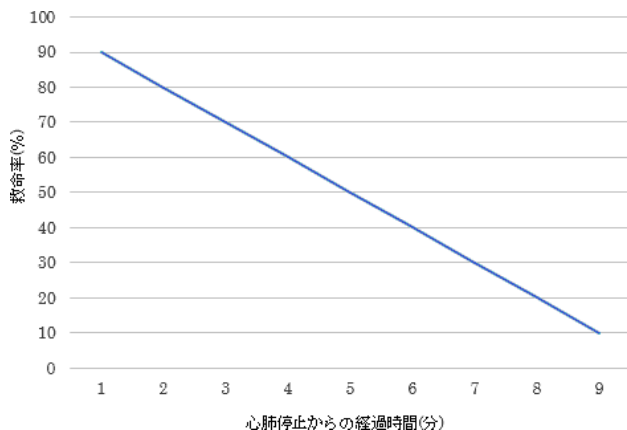


図1 心肺停止からの経過時間と救命率の関係

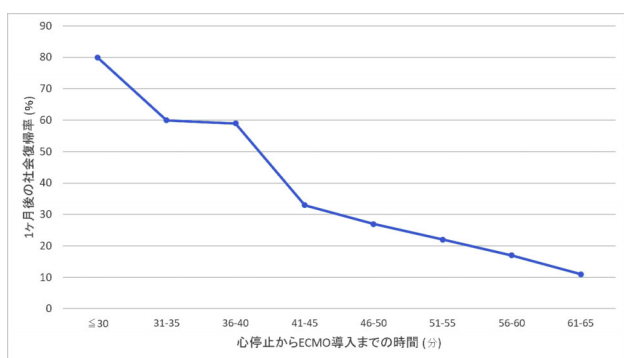


図2 心肺停止から ECMO 導入までの時間と1ヶ月後の社会復帰率の関係

4.2 ECPR 開始時間と社会復帰率の関係

CPA（心肺停止）による救命率と社会復帰率は、発見から CPR（心肺蘇生）開始までの時間に大きく影響される。2022 年中に一般市民が心原性心肺停止の時点を目撃した傷病者の1か月後社会復帰率は6.6%であった。しかし、救急隊が心肺蘇生を開始するまで15分以上を経過すると、1か月後社会復帰率は2.6%まで低下する⁽²⁾。一方、ECMOの適応になるような通常心肺蘇生に反応しない電気ショック適応の心肺停止の場合であっても、適切な蘇生が行われて40分以内にECMOを装着できれば、1か月後の社会復帰率は59%（図2）まで上昇する⁽³⁾。したがって、傷病者発生現場近くにおける高度な救命処置を早期に開始することが、患者のQOLを向上させる上で大変重要であると考えられる。

5. 理想的な移動型緊急手術室を目指す

5.1 開発における留意点

災害時に出動する、スーパーアンビュランスと称される、広い空間を有した大型の車両は存在する。しかし、大型ゆえに機動性は劣り、要請から数分での出動は困難である。ハイ

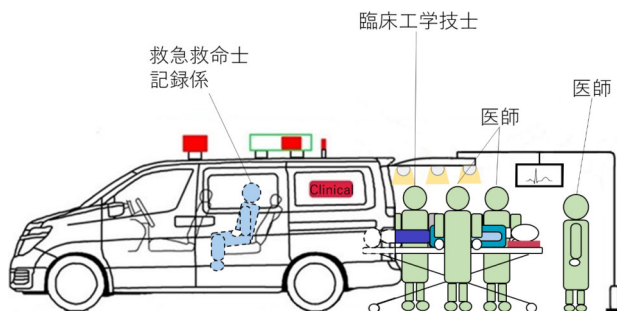


図3 移動型緊急手術室ドクターカー V3 の概略図

メディックと称される高規格救急車内での手術は、車内が狭く医師が患者の両脇に立ち手術を行うには制限がかかる。また車両が、数千万円から1億円と大変高価であるため、地方自治体での所有は現実的ではない。

そこで、筆者らは八戸市立市民病院救命救急センターの助言を受け、下記の点に留意して、院外における ECMO を使用した ECPR を可能とする移動型緊急手術室（以下ドクターカー V3）を開発した。

- (1) 患者の社会復帰率の向上には、現地での ECMO 装着手術を含めた高度な救命処置が必要不可欠であり、安全かつ迅速に手術を行えるよう、医師が患者の頭部と両側に立つことのできる広さをもつこと。
- (2) 医療機器を作動させる電力を確保できること。
- (3) 機動性に優れ、安全に緊急走行が可能であること。
- (4) 廉価かつ汎用性があり、地方病院や地方自治体への配備が可能であること。
- (5) 運転手に普通自動車運転免許のほか、特別な資格を必要としないこと。
- (6) 若い医師が憧れるような格好の良さがあること。

傷病者発生現場での ECMO 使用にはマンパワーが必要である。ECMO を使用した高度な ECPR を実行するためには、若く優秀な医師達を八戸へ呼ぶ必要があり、デザイン性とじゅうぶんな手術空間を安価に確保することは難題であった。

5.2 ドクターカー V3 の開発

ドクターカー V3 は、最寄りの消防署はもちろん、コンビニエンスストアの駐車場など、屋外での手術も想定している。ミニバンの後部にテントを展開し、手術室とする構造とした。テント部は、車両天井に装着した収納ボックスに収納される。テント部材は、ナイロンハイバロン加工を施し軽量で防水性に優れたものを使用した。床面は簡単に交換が可能なビニールシートを使用することで清潔空間とした。手術室面積は約 4.24 m² であり、医師による患者に対する 3 方向からの処置が可能となった。図 3⁽⁴⁾ に移動型緊急手術室の概略図を示す。手術室内部には ECMO や人工呼吸器をはじめとした、心肺停止事案に必要な医療機器が装備される（図 4）。

5.3 八戸ドクターカーのサイレン音の変更

「ラピッド・ドクターカーは救急車よりも全高が低いため、一般ドライバーから視覚認識されにくくサイレン音も届いておらず、安全な緊急走行に支障をきたすことがある」との相談が、全国ドクターカー協議会を通じ、筆者らへ寄せられた。ドクターカーの遅延は患者の命に直結する。現場到着時間をより短縮する必要がある。全国のドクターカーのサイレン音はピーポー音（高低反復音）である。我々の研究により、自動車の遮音性能が向上した車内においてピーポー音は、一般ドライバーから聴こえにくい音であることが分かった。そこで我々は、海外の緊急車両に採用されている YELP サイレン音に着目した。YELP サイレン音はピーポー音に比べ、人の耳に聴こえやすい周波数であることを導き出した。



図4 ドクターカー V3 に搭載の医療機器

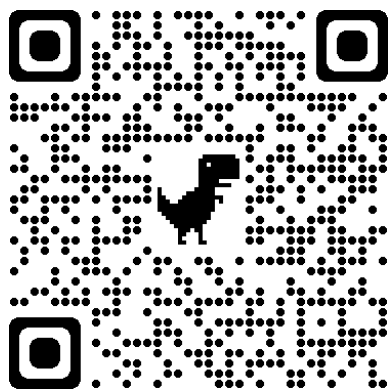


図5 YELP サイレン音の QR コード

この比較データを国土交通省と警察庁へ示しサイレン音変更の許可を得て、2023年9月9日に八戸ドクターカーのサイレン音を全国で初めてピーポー音から YELP 音へと変更した。図5は YELP サイレン音の QR コードである。

6. ドクターカー V3 の成果

6.1 45 歳女性⁽⁵⁾

真冬の八戸市内において水難事故が発生した。119 番入電からドクターカー V3 による手術に至る経緯は以下のとおりである。

- ・ 11:35 女性が川に流されているとの入電
- ・ 11:42 従来のドクターカー出動
- ・ 11:47 ドクターカー V3 出動
- ・ 12:08 ドクターカー V3 現地到着、手術室展開
- ・ 12:15 患者への手術開始
- ・ 12:27 ECMO 起動
- ・ 12:39 患者を救急車へ搬入し、現場出発（体温 26℃）
- ・ 12:57 八戸市立市民病院救命救急センター到着
- ・ 13:22 心拍再開

翌日昼には、ECMO 取り外し手術を実施した。血圧低下などの症状もなく、鎮静剤を終了した結果、夕方に開眼し意識が戻り人工呼吸器を離脱した。2日後には、会話が成り立ち、経口で食事を始めた。3日後には、食事が増え、同日夕方には歩行ができるまでに回復した。そして、約2か月後、後遺症もなく元気に退院することができた。図6は現場における ECMO 装着手術の様子である。

八戸市立市民病院救命救急センターからの距離は 10 km であった。

6.2 52 歳男性

52 歳男性、心原生の心室細動によりドクターカー V3 が出動し、現場で ECMO 装着手術を実施した。5日間の集中治



図6 水難事発生現場におけるドクターカー V3 内での ECMO 装着手術の様子

療室での治療を経て予後良好で社会復帰した。

八戸市立市民病院救命救急センターからの距離は 7 km であった。

6.3 60 歳男性

60 歳男性、心原生の心室細動によりドクターカー V3 が出動し、最寄りの消防署で救急車とドッキングし ECMO 装着手術を実施した。3 日間の集中治療室での治療を経て予後良好で社会復帰した。

八戸市立市民病院救命救急センターからの距離は 45 km であった。

7. 考 察

八戸市立市民病院救命救急センターカンファレンス室でドクターカー V3 での手術後に症例検討会が行われる。この検討会には救急医、看護師、臨床工学技士及び救急救命士、同病院の管理課職員や消防署員など 20 名程が出席をする。どの症例においても従来の救急法での予測救命率は 0% であり、ドクターカー V3 での緊急手術を実施しなかった場合、患者の社会復帰はおろか救命すら絶望的であったと結論づけられた。

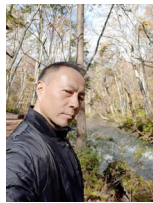
8. ま と め

ドクターカー V3 導入以前の遠隔地での心肺停止事案における社会復帰可能距離は 10 km 以内であった。ドクターカー V3 による現場での ECMO 装着手術により社会復帰可能距離は 45 km と大幅に向上した。

文 献

- (1) 日本病院前救急診療医学会, ドクターカーの定義と分類, http://square.umin.ac.jp/jsppm/dokuta-car_teigi.pdf (最終アクセス: 2024.8.6)
- (2) 総務省消防庁, 令和 5 年版 救急救助の現況, p. 108, 2023.
- (3) 鹿野恒, 長間将樹, 坂東敬介, 遠藤晃生, 安武祐貴, 大西広一, 吉原秀明, 難治性院外心原性心停止に対する初期心電図による percutaneous cardiopulmonary support 導入時間の検討, 日救急医学会誌, vol. 34, pp. 83-91, March, 2023.
- (4) 浅川拓克, 大黒正敏, 今明秀, ほか 3 名, 地域医療の課題解決に向けた移動型緊急手術室の開発とその成果の検証, 日本機械学会東北支部第 53 期秋季講演会講演論文集, 305, Sept., 2017.
- (5) 今明秀, 吉村有矢, 丸山尊, 村田信也, 軽米寿之, 浅川拓克, 移動緊急手術室の有効性の推測, 月刊新医療, vol. 42, no. 11, pp. 122-125, 2015.

(CSS 研究会提案, 2024 年 8 月 23 日受付,
2024 年 10 月 1 日再受付)



浅川拓克

1989 北海道自動車短期大学卒業, 2011 盛岡中央高等学校学科長・室長, 現在, 八戸工業大学工学部准教授として医工連携の研究に従事。現場での手術を可能とする移動型緊急手術室ドクターカー V3 の開発や, ドクターカーの安全運航および現場到着時間短縮のため, YELP サイレン音の科学的有効性を自動車行政などへ示し, 日本で初めてとなるドクターカーへのイエルプサイレンの社会実装を実現させた。また, コロナ禍には医師会からの依頼により, 医療者を感染から守るための陽圧および陰圧化を可能とする PCR 検体採取 BOX などを開発し, 八戸圏域 20 以上の病院で採用される。青森県工業技術教育振興会奨励賞受賞 (平成 26 年度)「移動型緊急手術室の開発」, 八戸工業大学教育業績賞受賞 (平成 26, 27 年度), 八戸工業大学教育論文賞受賞 (平成 26 年度), 八戸工業大学産学官連携活動貢献賞受賞 (平成 27 年度), 化学工学会粒子・流体プロセス部会フロンティア賞受賞 (平成 27 年度), 令和 3 年度文部科学大臣表彰科学技術賞 (開発分野), 令和 5 年度 G7 科学大臣会合において災害医療及び CN に関するポスター発表など。



吉村有矢

2008 広島大学医学部医学科卒。2022 埼玉医科大学大学院博士課程修了。八戸市立市民病院, 防衛医科大学校病院救急部を経て, 現在, 八戸市立市民病院救命救急センター所長。日本救急医学会救急指導医, 八戸ドクターヘリフライトドクター, 医学博士。



今 明秀

1983 自治医科大学卒業, 日本医大救急医学教室と川口市立医療センターを経て 2004 八戸市立市民病院救命救急センターに赴任。2017 病院長。2023 事業管理者。全国ドクターカー協議会代表理事, 日本病院前救急診療医学会理事長, JPTEC 日本病院前外傷救急協議会理事, 日本航空医療学会理事。第 74 回保健文化賞, 住友生命福祉文化財団第 15 回地域医療貢献奨励賞, 集中医療大賞・高久史磨特別賞など受賞。



安部信行

2001 八戸工業大・工・建築工学卒。2006 同大学院博士後期課程了。同年同大学感性デザイン学部助教。以来, ユニバーサルデザイン関連や環境バリアフリー, 建築音響などの研究に従事。現在, 同大学院工学研究科准教授。博士 (工学)。

車両挙動情報を用いたオートエンコーダによる路上障害物検知に関する研究

Road Obstacle Detection by AutoEncoder Using Vehicle Driving Information

藤井雅弘 Masahiro FUJII

山根惇秀 Atsuhide YAMANE

アブストラクト 本論文では、車両挙動情報を用いたオートエンコーダによる路上障害物検知に関する研究について概説する。車両に搭載された ETC (Electronic Toll Collection system) 2.0 車載機で計測された車両挙動情報をプローブデータとして ITS (Intelligent Transport Systems) スポットを通じて集約し、機械学習アルゴリズムの一つである AutoEncoder を用いて、路上障害物の発生とその位置の検出手法について説明する。AutoEncoder では、路上障害物発生前の正常な道路交通流での車両挙動情報を学習しモデルを時系列的に構築し、そのモデルへの適合性が悪い出力が得られたときに路上障害物が発生したと検出する。この方針は時々刻々と変化する交通流への適用性が高く、また様々な道路環境への適用性も高いと考えられる。数値計算実験により、AutoEncoder を用いた検出手法が、教師あり学習である SVC (Support Vector Classifier) を用いた場合より検出精度が上回ることを示す。

キーワード ITS スポット, 車両挙動情報, 路上障害物検知, AutoEncoder

Abstract In this paper, we present a study on road obstacle detection using an autoencoder with vehicle driving information. We describe a method for detecting the occurrence and location of a road obstacle using the autoencoder, a machine learning algorithm that aggregates vehicle driving information measured by the electronic toll collection system 2.0 on-board units installed in vehicles as probe data via intelligent transport systems spots. The autoencoder continuously builds a model by learning information on vehicle behavior in a normal traffic flow before the occurrence of a road obstacle, and it detects the ofstacle of it when the output from the model shows a poor fit. This approach is highly applicable to ever-changing traffic flows and to a variety of roadway environments. By computer simulations, we show that the detection method using the autoencoder outperforms the supervised learning method using a support vector classifier.

Key words ITS spot, Vehicle driving information, Road obstacle, AutoEncoder

1. はじめに

近年、ETC (Electronic Toll Collection system) 2.0 と、道路上に設置される ITS (Intelligent Transport Systems) スポットを用いた様々な道路交通情報サービスを提供するシステムが普及している。ETC2.0 は従来の ETC の料金収受の効率化だけでなく VICS (Vehicle information and Communication System) の機能や性能を拡充したシステムである。ETC2.0 車載機で車両の位置や加速度、車線変更情報などの車両挙動情報を取得し、高速道路上の ITS スポットに送信し、その情報を集約することで円滑な道路交通に活用されている。ITS スポットは道路交通情報を提供するサービスであり、従来使用されて

きた光ビーコンや電波ビーコンに代わる路側機である⁽¹⁾。これは主に日本全国の高速道路に設置されており⁽²⁾、都市内の高速道路では約 4 km 間隔、都市間の高速道路では約 10~15 km 間隔で設置されている。ETC2.0 車載機と ITS スポットは双方向で情報交換を行い、道路交通の状況を把握し、ドライバーに運転支援のための様々なサービスを提供する。

一方で、2018 年の高速道路での落下物処理件数は 31.6 万件⁽³⁾であり、これは約 1 分間に 1 件発生している計算となり、多くのドライバーの運転の支障となっている。路上障害物の撤去にはその位置情報が必要になり、現在はドライバーやパトロールの通報によって情報が提供されているため検知のリアルタイム性の確保が課題になっている。検知の自動化を行うため、車載カメラ映像と道路面の差分により障害物検知を行う手法⁽⁴⁾や、物体検知モデルを用いて障害物の位置や種類を特定する手法⁽⁵⁾などが検討されている。しかし、これらの手法はカメラを使用しており悪天候時や夜間では検知性能が低下することが懸念される。一方で、車両挙動情報は周辺環境や天候などに依存しないため、検知性能の低下を防ぐことができると考えられる。そこで、本研究では車両で収集した車両挙動情報を ETC2.0 車載機を通じ ITS スポットに送信し、それを集約して障害物検知を

藤井雅弘 正員：シニア会員 宇都宮大学工学部基盤工学科

E-mail fuji@is.utsunomiya-u.ac.jp

山根惇秀 宇都宮大学工学部基盤工学科

E-mail XXXX@is.utsunomiya-u.ac.jp

Masahiro FUJII, Senior Member and Atsuhide YAMANE, Nonmember (Dept. of Fundamental Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Utsunomiya-shi, 321-8585 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ

Fundamentals Review Vol.18 No.3 pp.218-225 2025 年 1 月

©電子情報通信学会 2025

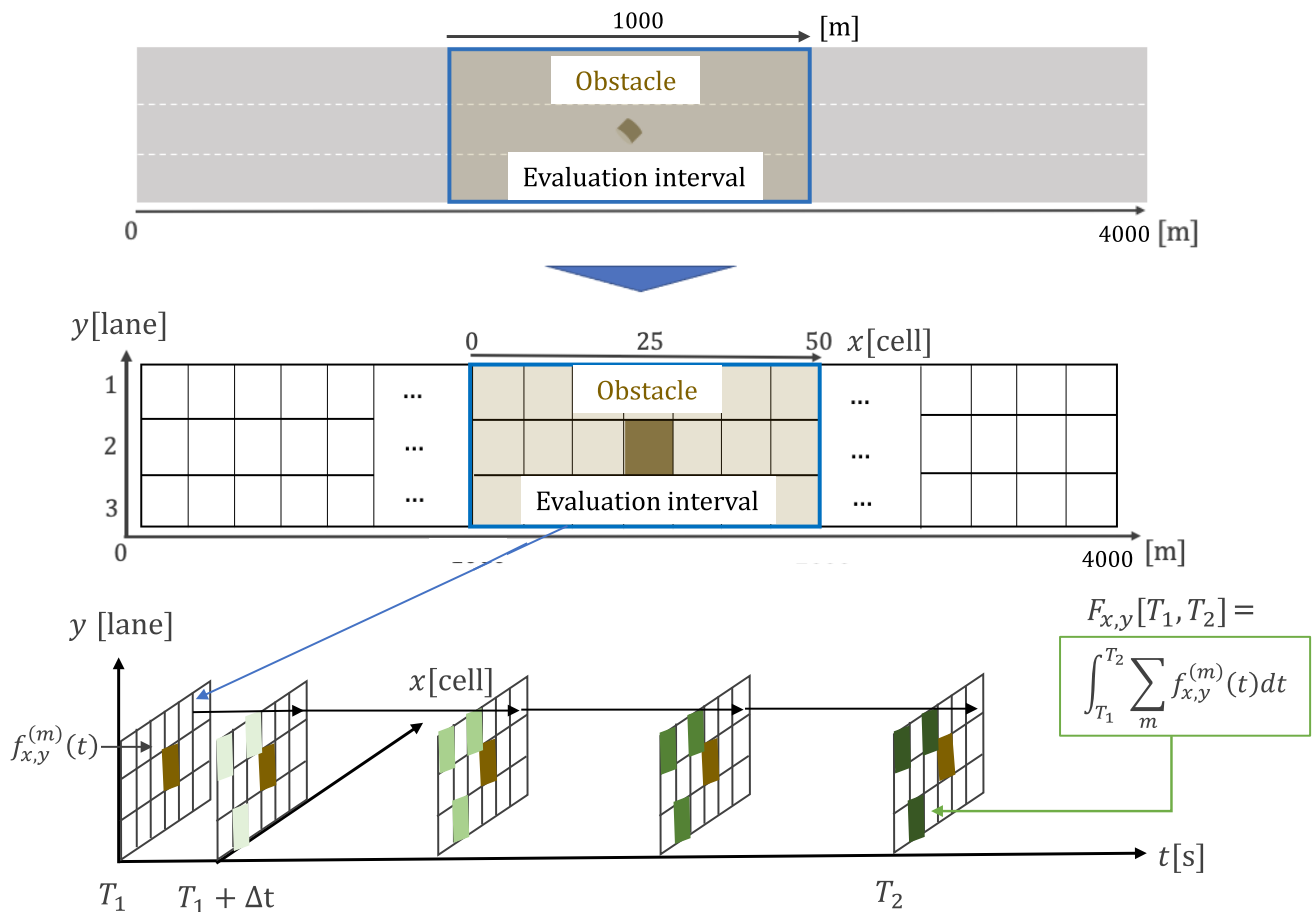


図 1 車両挙動情報の処理の流れ

行う手法を検討する。

2. システムモデル

障害物検知のシステムの実用化のためには、実環境での検証が必要であるが、路上障害物を実道路上に放置することを想定する実証検証は実験のための場所や設備の確保、費用が多くなり、実現が困難である。そこで、本研究では交通流シミュレータ SUMO (Simulation of Urban Mobility) を使用して検証を行う。SUMO とはドイツ航空宇宙センターの輸送システム研究所で作成されたオープンソースの交通流シミュレータであり、各車両の加減速値や車線変更などの車両挙動情報を取得できる。

路上障害物を検知するためには、特徴量としてその発生の有無と相関の高い車両挙動情報を選択する必要がある。本節では、路上障害物の発生による様々な車両挙動情報の変化を示すヒートマップを作成することで、その特徴量を検証する。

2.1 道路モデル

本研究では、図 1 の上図に示すような ITS スポットが設置されている高速道路を想定し、道路全長を 4000 m、片側 3 車線の一方通行のモデルとし、その間の 1000 m を評価区間とする。現実の環境に近い検証を行うため、道路幅は車線ごとに 3.5 m、制限速度を 80~100 km/h とし、左車線を最優先走行車線とした⁽⁶⁾。

2.2 車両モデル

車両モデルは、主に ITS スポットが設置されている高速道路の車種区分に基づいて設定する。全車両を全長 3.5 m、幅 1.4 m、最高速度 100 km/h と設定し、道路の 0 m 地点から毎秒 1 台、任意の車線から発生するとする。また、全ての車両は ETC2.0 車載器を搭載し、評価区間内の全ての車両は個別に車両挙動情報を取得できるものとする。

2.3 車両挙動情報の概要

ETC2.0 車載器から取得できる車両挙動情報は一般財団法人道路新産業開発機構で規定されている車載器仕様に従う。この仕様では、車両挙動情報は基本情報 (車載器などの固有情報)、走行履歴、挙動履歴で構成される。

走行履歴は、車両の位置 (緯度・経度)、時刻、道路種別などのデータであり、前回記録した地点から 200 m 走行時または進行方位が 45 度以上変動した時点で記録される。挙動履歴は、車両の位置、方位、道路種別、前後加速度、左右加速度、ヨー角速度のデータであり、前後加速度、左右加速度、ヨー角速度のいずれかがしきい値を超えたときに記録される。本研究における車両挙動情報は、走行履歴と挙動履歴から取得されるとする。

2.4 車両挙動情報の特徴

本研究では以下の車両挙動情報に着目して、路上障害物発生時の車両の挙動の傾向を検証する。

- 加速度 (m/s²) : a
- 減速度 (m/s²) : d
- 車線変更回数 (回) : l

各車両の加速度、減速度、車線変更回数を計算するために必要な情報は、車両の通過時刻、車両の位置である。これらの情報は、走行履歴、挙動履歴に含まれており算出可能である。本研究では、車両挙動情報を図1の中下段に示す手順で計算する。まず、車両挙動情報の扱いを簡単にするため、道路を20m単位のセルに分割する。ここで、時刻 t における、第 y 車線、第 x 番めのセルを通過した第 m 番めの車両挙動情報を $f_{x,y}^{(m)}(t) \in \{a_{x,y}^{(m)}(t), d_{x,y}^{(m)}(t), l_{x,y}^{(m)}(t)\}$ と表す。続いて、セル (x,y) を通過した車両の車両挙動情報を、時刻 T_1 から時刻 T_2 において積分した各セルの車両挙動情報を $F_{x,y}[T_1, T_2]$ とし、以下の式で定義する。

$$F_{x,y}[T_1, T_2] = \int_{T_1}^{T_2} \sum_m f_{x,y}^{(m)}(t) dt \quad (1)$$

また、本研究では加速度 $a_{x,y}^{(m)}(t)$ 、減速度 $d_{x,y}^{(m)}(t)$ 、車線変更回数 $l_{x,y}^{(m)}(t)$ を以下に示す手順で算出する。まず、車両の位置から車両の速度を算出し⁽⁷⁾、それに基づき車両の加速度、減速度を算出する。車両 m が第 y 車線、第 x 番めのセルに存在するとき、時刻 $t - \Delta t$ と t の間の速度の変化量を $\Delta v_{x,y}^{(m)}(t)$ とし以下の式で定義する。

$$\Delta v_{x,y}^{(m)}(t) = \frac{v_{x,y}^{(m)}(t) - v_{x,y}^{(m)}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

Δt は交通流シミュレータのサンプル時刻間隔と一致する。また、このときの加速度 $a_{x,y}^{(m)}(t)$ と減速度 $d_{x,y}^{(m)}(t)$ を、以下の式で定義する。

$$a_{x,y}^{(m)}(t) = \begin{cases} \Delta v_{x,y}^{(m)}(t), & (\Delta v_{x,y}^{(m)}(t) \geq 0) \\ 0, & (\Delta v_{x,y}^{(m)}(t) < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$d_{x,y}^{(m)}(t) = \begin{cases} 0, & (\Delta v_{x,y}^{(m)}(t) \geq 0) \\ \Delta v_{x,y}^{(m)}(t), & (\Delta v_{x,y}^{(m)}(t) < 0) \end{cases} \quad (4)$$

同様に車両の位置から、車両の走行車線を求めることで⁽⁸⁾、車線変更回数 $l_{x,y}^{(m)}(t)$ を算出する。車両 m が第 y 車線、第 x 番めのセルに存在するとき、時刻 $t - \Delta t$ と t での走行車線をそれぞれ y と y' とすると、車線変更回数 $l_{x,y}^{(m)}(t)$ を以下の式で定義する。

$$l_{x,y}^{(m)}(t) = \begin{cases} 1, & (y \neq y') \\ 0, & (y = y') \end{cases} \quad (5)$$

車線変更回数 $l_{x,y}^{(m)}(t)$ は時刻 t において車両 m がセル位置 (x,y) において車線変更を行ったか否かを示し、これが式(1)により

時間と車両で累積されることでセル位置 (x,y) での車線変更回数として機能することに注意する。また、式(5)から車線変更回数は $y \neq y'$ と車線が変更された事象の係数のみとしており、その方向(例えば右車線への変更や左車線への変更)は考慮していないことにも注意する。図1の下段の図中の茶色は障害物を示し、緑色は車両挙動情報の積分値 $F_{x,y}[T_1, T_2]$ を示す。緑色の濃淡は積分値の大きさを示し、濃い方が積分値が大きい。すなわち、時刻とともに車両挙動情報の積分値が大きくなり特徴が明確になる。

2.5 車両挙動情報の傾向

図2は路上障害物が $x = 25, y = 2$ セルにあり、式(1)に基づき、加速度、減速度、車線変更回数を計算し、ヒートマップで表示したものである。同図の上段の図の加速度のヒートマップより、路上障害物があるセルの近隣の車線において加速度が増加する傾向が確認できる。また、同図の中段、下段より、路上障害物の手前のセルで減速度と車線変更回数が増加する傾向が確認できる。車両は中央車線の路上障害物を回避するために図中段のように同車線上手前で減速を行う。その後、車線変更を行うが、車線変更先の車線を走行する車両の流れに同調するために、加速が発生する。

本稿では、障害物検知に使用する特徴量として、減速度に着目する。これは、減速度が障害物が発生している車線と同一の車線上の手前のセルで増加する特徴があることから、障害物の発生箇所をよく表現する特徴量であると考えられる。また、車線変更回数も減速度と同様に障害物と同様の特徴をもっているが、その傾向に相関性が高いためデータが冗長になり、学習に影響を与える可能性があると考え減速度のみを使用することとする。また、図2は単一の路上障害物発生時の車両挙動情報の一例であるが、合流や渋滞などの複合的な要因による車両挙動に関しては更なる検証が必要である。

3. 障害物検知

本節では、ITS スポットを通して各セルに集積された車両挙動情報を用いた路上障害物検知を行う手法について説明する。

3.1 障害物検知のシナリオ

ETC2.0 車載機と ITS スポットを用いた路上障害物検知の流れについて説明する。ここでは、ある高速道路に ITS スポットが2台設置されており、その間に路上障害物が存在する環境を想定する。ETC2.0 車載機は各時刻において車両挙動情報を記録可能であり、各車両が路側に設置されている ITS スポットの通信可能範囲に侵入すると、自動的に ITS スポットに自車両の走行情報を送信する⁽⁹⁾。これらの想定に基づき、車両挙動情報を用いた路上障害物の検知の流れについて図3を用いて説明する。まず、高速道路を走行する車両は路上障害物や事故車などの突発的な事象の発生、急カーブ、自車両の前での急な車線変更

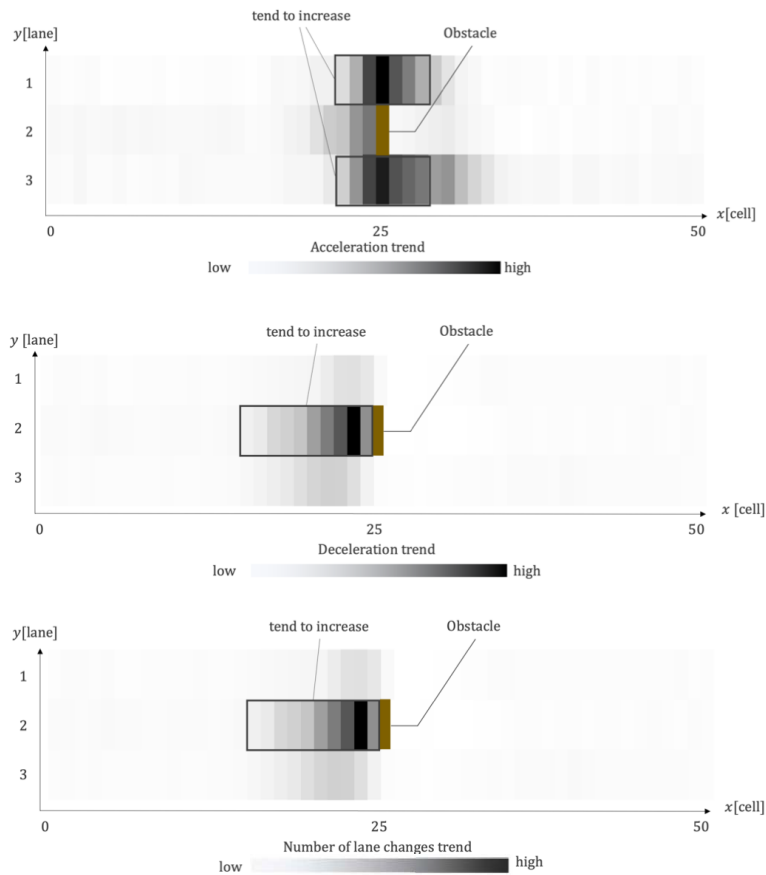


図2 車両挙動情報のヒートマップ

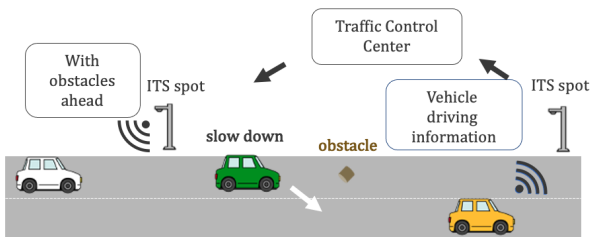


図3 路上障害物検知シナリオ

などが無い限り、急激に減速しないと考えられる。ここで、ある時刻において路上障害物が発生したとする。このとき、路上障害物と同一の車線を走行している車両は路上障害物を回避するため、その手前で減速や車線変更を行う。これらの障害物回避の車両挙動情報がITSスポットに送信される。一定期間ITSスポットに蓄積された各車両の走行情報は交通管制センターに送信され、交通管制センターで送信された車両挙動情報を解析し、後続車に路上障害物情報を提供する。

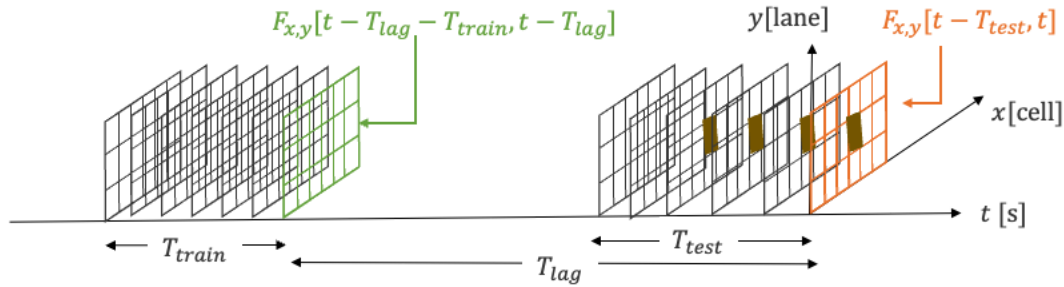
3.2 機械学習を用いた路上障害物検知

車両挙動情報を利用して障害物検知を行う手法の一つに、教師あり学習の機械学習アルゴリズムを用いた手法がある⁽¹⁰⁾。この手法は、2.4節で述べた手順に基づき、道路をセル上に分割し各セルに累積された車両挙動情報を用いて検知を行う。各セルに路上障害物の有無について正解ラベルをつけ、学習を行いモ

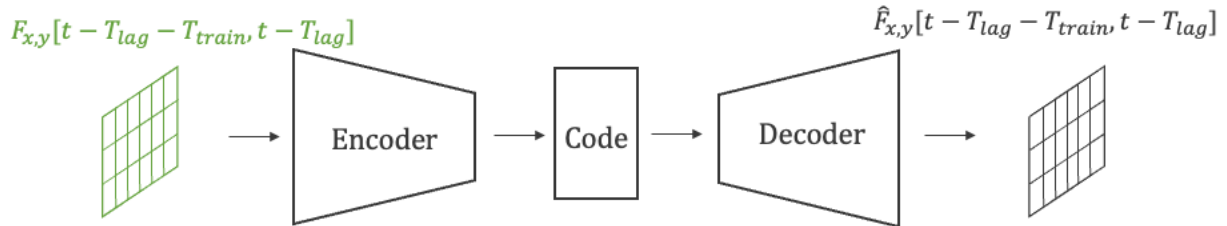
デルを作成する。作成したモデルに、ラベルが与えられていないセルに累積されている車両挙動情報を入力として与え、障害物を検知する手法である。この手法は、教師あり学習のため正常時の車両挙動情報と障害物発生時のラベル付きの車両挙動情報を必要とする。しかし、障害物発生時の車両挙動情報はその事象発生頻度が小さいため、正常時と比較して収集が困難である。また、車両の挙動は道路の環境によって変化するため、様々な環境下における車両挙動情報を収集する必要がある⁽¹¹⁾。これらの理由から、教師あり学習を用いた手法は、十分な学習データの確保が難しいという問題がある。

そこで本稿では、上記の問題点を解決するために、教師なし学習を用いた障害物検知手法を検討する。教師なし異常検知のアルゴリズムに、One Class SVM⁽¹²⁾や Isolation Forest⁽¹³⁾、AutoEncoder⁽¹⁴⁾など様々な手法が提案されている。AutoEncoderは、入力されたデータを出力先のノードの数を減らすことによって、データを一度次元圧縮し、重要な特徴量だけを残した後、再度、元の次元に復元処理をするアルゴリズムである。この性質から、AutoEncoderはデータのノイズ除去や異常検知に用いられている。異常検知として用いる場合には、正常時のデータのみを用いて学習を行う。そのため、学習データを集めるのが容易である。その後、学習したモデルに対して、異常時のデータを入力された場合、異常時のデータは正常時のデータとは異なる特徴をもつため、モデルによって異常と判定される。このように、AutoEncoderは、正常時のデータのみを用いて学習を行うため、障害物発生時の異常時の車両挙動情報を用いる必

Data



Training



Test

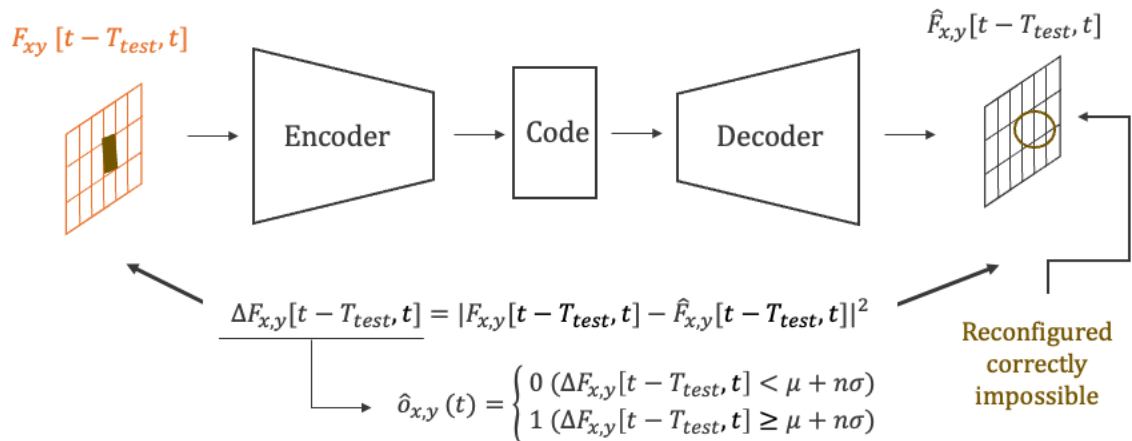


図4 異常検出の流れ

要がない。また、AutoEncoder を用いてモデルを構築すれば、現在のデータが学習データと一致しているか判定することができる。もし、相違がある場合は現在のデータをよりよく表したデータを用いて再学習することで、様々な環境の変化に適応できる。よって、AutoEncoder を用いることで、教師あり学習を用いた手法よりも障害物発生時のデータが集められない場合や様々な道路環境に対応でき、実用的であると考えられる。ほかの研究事例として、宇宙機の異常検知⁽¹⁵⁾や災害時の被害状況を把握するシステム⁽¹⁶⁾も AutoEncoder を用いて提案されている。このような理由から本稿では、AutoEncoder を用いた路上障害物検知手法を検討する。

3.2.1 提案手法

AutoEncoder を用いた、障害物検知モデル作成の手順について説明する⁽¹⁷⁾。AutoEncoder に入力されるデータは式 (1) で定義された車両挙動情報 $F_{x,y}[T_1, T_2]$ である。なお、本手法では減速度 d を用いた車両挙動情報 $F_{x,y}[T_1, T_2]$ を用いるが、ほかの車両挙動情報においても同様な議論が可能である。AutoEncoder は入力 $F_{x,y}[T_1, T_2]$ をエンコーダを通して一度

圧縮し、デコーダを通して復元し、出力 $\hat{F}_{x,y}[T_1, T_2]$ を得る。Enc をエンコーダ、Dec をデコーダとすると、AutoEncoder の出力は以下の式で表される。

$$\hat{F}_{x,y}[T_1, T_2] = \text{Dec}(\text{Enc}(F_{x,y}[T_1, T_2])) \quad (6)$$

このとき、AutoEncoder の入力 $F_{x,y}[T_1, T_2]$ と出力 $\hat{F}_{x,y}[T_1, T_2]$ の差分を損失関数として用いる。この損失関数を最小化するように重みパラメータを更新することで、モデルを構築する。

図4に AutoEncoder による学習と検知の流れを示す。今、時刻 t において検知を行うことを考え、 T_{train} を学習、 T_{test} を検知のための計測時間、 T_{lag} を学習期間と検知期間の調整を行うためのパラメータとする。 T_{train} と T_{test} は学習と検知のための絶対時間であるのに対し、 T_{lag} は現時刻から学習終了までの相対時間であることに注意する。まず、時間区間 $[t - T_{lag} - T_{train}, t - T_{lag}]$ における車両挙動情報 $F_{x,y}[t - T_{lag} - T_{train}, t - T_{lag}]$ を用いて、AutoEncoder の学習を行う。ここで、 $F_{x,y}[t - T_{lag} - T_{train}, t - T_{lag}]$ を正常時の車両挙動情報と仮定する。AutoEncoder は正常時の車両挙

動情報により学習されるため、モデルは正常時の車両挙動情報に基づくものを出力する。入力 $F_{x,y}[t - T_{test}, t]$ が正常時の車両挙動情報と異なる振る舞いを示す場合、正しく復元できないセルが発生する。よって、AutoEncoder の出力 $\hat{F}_{x,y}[t - T_{test}, t]$ と入力 $F_{x,y}[t - T_{test}, t]$ の差分が大きいセルを障害物が発生しているセルと判断できる。AutoEncoder の入力と出力の差を再構成誤差 $\Delta F_{x,y}[T_1, T_2]$ とし、以下の式で定義する。

$$\Delta F_{x,y}[T_1, T_2] = |F_{x,y}[T_1, T_2] - \hat{F}_{x,y}[T_1, T_2]|^2 \quad (7)$$

障害物を検知する閾値の設定には、以下の式を用いる。

$$\mu[T_1, T_2] = E_{x,y} \{ \Delta F_{x,y}[T_1, T_2] \} \quad (8)$$

$$\sigma[T_1, T_2] = SD_{x,y} \{ \Delta F_{x,y}[T_1, T_2] \} \quad (9)$$

ここで、 $E\{\cdot\}$ は期待値、 $SD\{\cdot\}$ は標準偏差を意味する。これは、学習データは正常時の車両挙動情報であるため、出力は学習データの平均と標準偏差によって決定される信頼区間において信頼度を規定可能である。時刻 t において、第 y 車線、第 x 番目のセルに真に障害物が存在する場合を $o_{x,y}(t) = 1$ 、存在しない場合を $o_{x,y}(t) = 0$ と表す。また、再構成誤差の平均 $\mu[T_1, T_2]$ 、標準偏差 $\sigma[T_1, T_2]$ と、しきい値の決定するパラメータ n を導入し、時刻 t で障害物の有無の判別を行う方法を以下の式で定義する。

$$\hat{o}_{x,y}(t) = \begin{cases} 0, & (\Delta F_{x,y}[t - T_{test}, t] < \mu[t - T_{test}, t] \\ & + n\sigma[t - T_{test}, t]) \\ 1, & (\Delta F_{x,y}[t - T_{test}, t] \geq \mu[t - T_{test}, t] \\ & + n\sigma[t - T_{test}, t]) \end{cases} \quad (10)$$

4. 数値計算例

本節では、交通流シミュレータ SUMO から得られた車両挙動情報を用いて障害物検知実験を行った結果を説明する。

4.1 数値計算環境

本実験では、2.2 節で説明した、車両モデルを用いた。また、様々な道路環境での検知性能を評価するため、図 5 に示す通常の道路に加えて、合流区間を含む道路、サグ道を含む道路の 3 種類の道路モデルを用いた。

4.2 実験諸元

本実験で用いた、学習データとテストデータについて説明する。既存手法である教師あり学習との比較のために、どのセルにも障害物が発生していないデータと、障害物がいずれかのセルに一つ発生しているデータを各 100 セット用意した。これらのデータには、障害物の有無に応じた正解ラベルが付与されてい

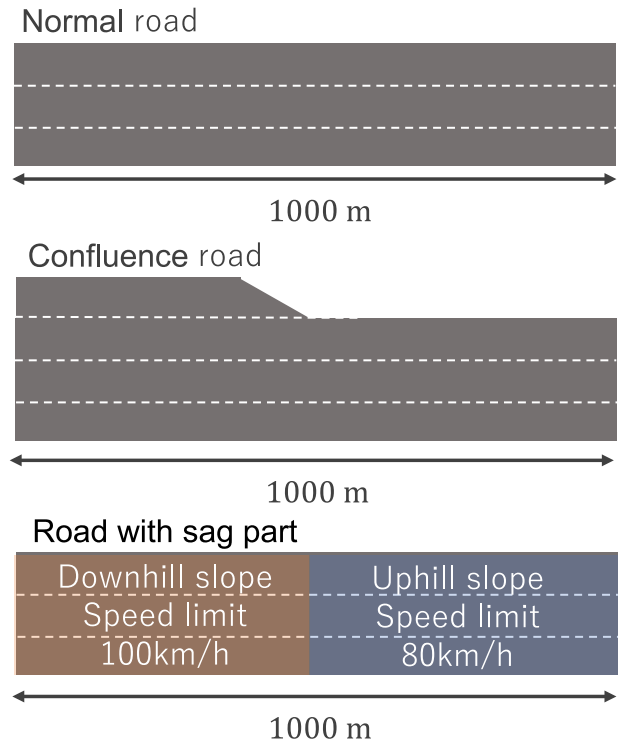


図 5 道路モデル

る。提案手法は、検知する時刻よりも T_{lag} 秒前の状況をもとに学習を行う。これらのデータには、障害物の有無に応じた正解ラベルが付与されていない。テストデータは、既存手法、提案手法ともに、障害物が発生してから T_{test} 秒後の状況をもとに検知を行う。本検証では、例として $T_{rain} = 100$ 秒、 $T_{lag} = 100$ 秒、 $T_{test} = 100$ 秒として検証を行う。また、学習、テストに用いるデータセットは交通流シミュレータにおいて、定常状態で取得したものをを用いる。

4.3 評価指標

評価指標には、AUC (Area Under the Curve) を用いる。AUC は ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線に囲まれた部分の面積であり、0 から 1 までの値をとり、値が 1 に近いほど判別性能が高い。ROC 曲線は、各しきい値について、縦軸に True Positive Rate、横軸に False Positive Rate をとるグラフである。True Positive Rate は、障害物がある場合に検知できた割合、False Positive Rate は、障害物がない場合に誤検知した割合である。

4.4 実験結果

路上障害物検知実験の評価結果について説明する。既存手法では、SVC (Support Vector Classifier) を用いた場合の検知精度が良好であることが示されているため⁽¹⁰⁾、SVC を用いた場合と比較して提案手法の検知精度を評価する。通常の道路、合流区間を含む道路、サグ部を含む道路の三つの道路モデルについて、既存手法と提案手法の評価結果を図 6、図 7、図 8 に示

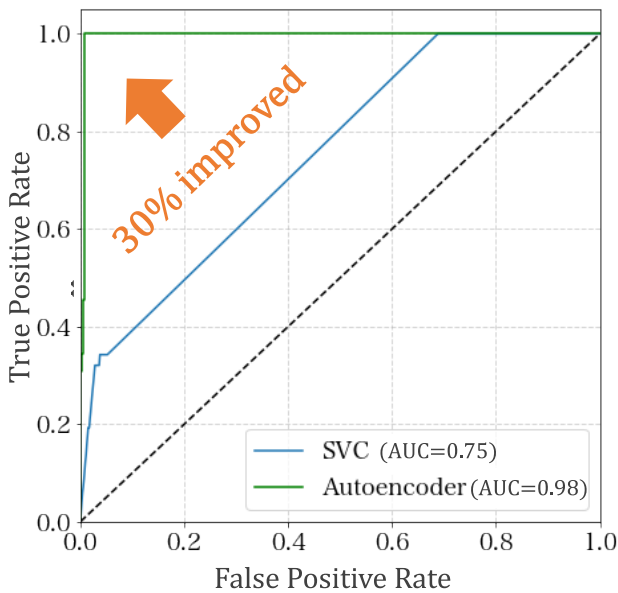


図6 通常の道路での ROC 特性

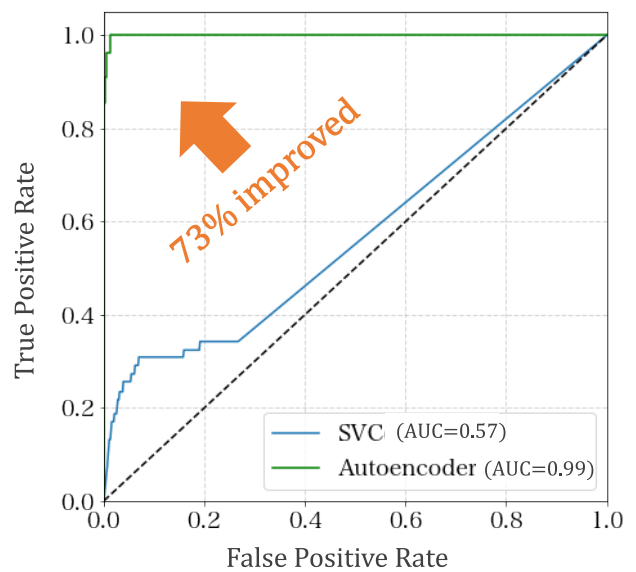


図8 サグ部を含む道路での ROC 特性

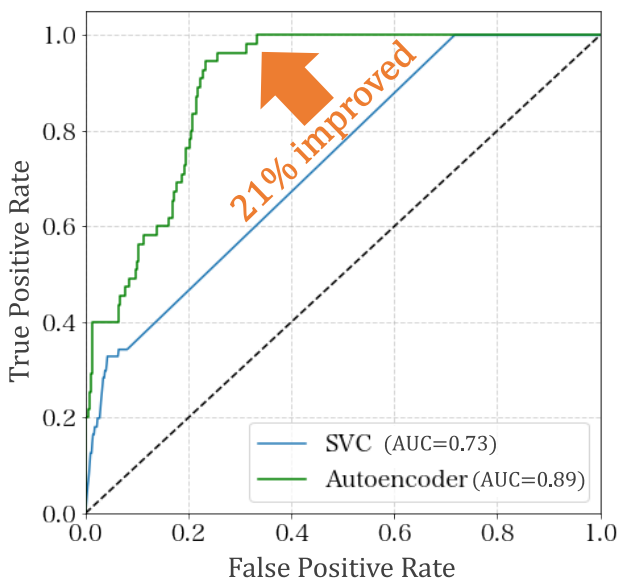


図7 合流区間を含む道路での ROC 特性

す。結果より、全ての道路モデルで、提案手法の検知精度が既存手法の検知精度を上回っていることが分かる。既存手法は、既知の車両挙動情報を学習して障害物を検知するため、類似した走行パターンに対しては高い精度を示すことができる。しかし、未知の車両挙動情報に対しては検知精度が低くなる。一方、提案手法は車両走行方法の時間変化を考慮することで、未知の走行パターンに対しても高い検知精度を示すことができる。また、提案手法において合流区間を含む道路ではほかの道路モデルと比較して検知精度が低くなっている。これは、AutoEncoderが合流区間を含む道路の車両走行方法の特徴を十分に学習できないためであると考えられる。合流区間では、車両の減速度が大きく変化することが多く、車両走行方法の時間変化が複雑になる⁽¹⁸⁾。そのため、AutoEncoderの入力層や隠れ層の次元数を増やすことで、合流区間の車両走行方法の特徴をより正確に表現できる可能性がある。

5. まとめと今後の課題

本稿では、ITS スポットを通じて取得した車両挙動情報を用いて、路上障害物を検知する手法を検討した。既存手法として、教師あり学習の機械学習アルゴリズムである SVC では、正常時、異常時両者の学習データが必要である。しかし、これは、様々な環境下における障害物発生時の車両挙動情報を十分に収集することが困難であるという問題がある。そこで、本研究では、異常発生時の学習データを必要としない教師なし学習の一つである AutoEncoder を用いて、車両挙動情報の構造を把握し、路上障害物を検知する手法を検討した。交通流シミュレータを用いて車両挙動情報を取得し、通常の道路、合流区間を含む道路、サグ部を含む道路の三つの環境下において、AUC を用いて、既存の手法との検知精度の比較実験を行った。実験結果として、いずれの道路環境下でも提案手法の検知精度が既存の手法より 20%以上向上しており、提案手法の有効性を確認した。

今後の課題として、提案手法の検知精度を更に高めるために、車両挙動情報の変動を考慮したデータセットの作成が必要である。AutoEncoder の構造の変更を行うことや、提案手法の現実世界への適用について検討するため、ETC2.0 の通信規格を踏まえた車両挙動情報の取得方法を検討することも必要である。

文 献

- (1) 国土交通省, “ITS スポット～次世代の ITS の展開～,” 2020.
- (2) 国土交通省, “全国の etc2.0 路側機設置箇所,” 2020.
- (3) エヌエスサービス, “高速道路上の落下物,” 2018.
- (4) 久徳遙矢, 出口大輔, 高橋友和, 目加田慶人, 井手一郎, 村瀬洋, “過去の車載カメラ映像との道路面差分による不特定障害物の検出,” IEICE Technical Report, vol.109, no.470, pp.235-240, 2010.
- (5) C. Wang, Y. Huang, and B. Shi, “Front obstacle detection system based on yolov3,” Journal of Physics: Conference Series, vol.1732, no.1, 012112, 2021.
- (6) 内閣府, “自動車の走行速度と道路の設計速度・最高速度規制

- との関係,” 2020.
- (7) 原木司, 横山昌平, 福田直樹, 石川博, “Gps ログと web 情報を用いた移動情報タグの生成,” DEIM2023, pp.1-6, 2011.
 - (8) 渋谷奈保, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, 小島祥子, 高橋新, “距離データ系列の照合による自転車位置推定と走行車線認識,” IEICE Technical Report, vol.107, no.206, pp.17-22, 2007.
 - (9) 柳内洋一, 中村順一, 太刀川喜久男, 坂本敏幸, “Etc を支える無線通信方式 dsrc,” J. Inst. Image Inform. TV. Engrn., vol.63, no.2, pp.179-184, 2009.
 - (10) 田所和樹, 藤井雅弘, 羽多野裕之, 伊藤篤, 渡辺裕, “機械学習を用いた路上障害物検知に関する一検討,” IEICE Technical Report, vol.115, no.365, pp.1-6, 2015.
 - (11) 関達也, 森本章倫, 古池寛, “大規模開発に伴う交通影響評価の空間的・時間的变化に関する研究,” JSCE2002, pp.463-466, 2002.
 - (12) Y. Chen, X.S. Zhou, and T.S. Huang, “One class svm for learning in image retrieval,” Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing, vol.1, pp.34-37, 2001.
 - (13) T. Barbariol and G.A. Susto, “Tiws-iforest: Isolation forest in weakly supervised and tiny ml scenarios,” 2021.
 - (14) D. Bank, N. Koenigstein, and R. Giryes, “Autoencoders,” arXiv preprint arXiv:2003.05991, 2020.
 - (15) 櫻田麻由, 矢入健久, “オートエンコーダを用いた次元削減による宇宙機の異常検知,” JSAI2014, pp.1-3, 2014.
 - (16) 木南優希, 澁谷長史, 取出新吾, 遠藤靖典, “人流データを用いた機械学習による社会的混乱検知システムの基礎的検討,” FSS2020, pp.431-436, 2020.
 - (17) 山根惇秀, 藤井雅弘, “車両走行情報を用いた機械学習による路上障害物検知に関する一検討,” IEICE Technical Report, vol.122, no.115, pp.1-4, 2022.
 - (18) T. Doh, H. Kim, K. Kang, and W. Kook, “Analysis of speed-density traffic flow models on a merge influence section in uninterrupted facility,” Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, pp.1764-1779, 2010.

(ITS 研究会提案, 2024 年 6 月 3 日受付,
2024 年 11 月 15 日再受付)



藤井雅弘 (正員: シニア会員)

1998 東京理科大学基礎工学部電子応用工学科卒。
2000 東京理科大学大学院基礎工学研究科電子応用
工学専攻修士課程修了。2003 東京理科大学大学院
基礎工学研究科電子応用工学専攻博士後期課程修了。
2003 東京理科大学基礎工学部電子応用工学科助手。
2006 宇都宮大学工学部情報工学科助手。2010 宇都
宮大学工学部情報工学科准教授。無線通信システム、

高度交通システム、位置情報システムの研究に従事。



山根惇秀

2021 宇都宮大学工学部情報工学科卒。2023 宇都
宮大学大学院地域創生科学研究科工農総合科学専攻
情報電気電子システム工学プログラム修了。在学中、
高度交通システムの研究に従事。

ESS ニュース

NOLTA, IEICE 特集号

Guest Secretary 青森 久

特集タイトル

Special Section on Recent Advances in Nonlinear Problems

掲載号

NOLTA IEICE, Vol. 16, No. 1 (2025 年 1 月発行)

非線形問題研究専門委員会 (NLP) は、電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティの第 1 種研究専門委員会として、非線形現象の基礎理論から応用に関する成果発表の場を提供しています。

本特集は、非線形問題に関する最新の研究成果を国内外に発信することを目的に、非線形問題研究専門委員会が企画したものです。投稿された論文は NOLTA, IEICE の通常の査読プロセスに従って審査され、13 件の論文が掲載されることとなりました。掲載論文は、非線形問題に関する独創的な研究成果をまとめたものです。J-STAGE (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/nolta/list/-char/ja>) にて公開しておりますので、是非ご覧頂きたく存じます。

最後に、貴重な研究成果をご投稿頂いた著者の皆様、ご多忙にもかかわらず査読頂いた査読者の皆様、本特集の企画並びに編集作業にあたり、多大なご協力を頂きました Guest Associate Editors の皆様、IEICE 事務局の皆様に深く感謝申し上げます。



青森 久 (正員：シニア会員)

2002 上智大・理工・電気電子卒。2007 同大学院博士後期課程了。博士 (工学)。同年同大学工学部嘱託助教。2009 東京理科大学工学部嘱託助教。2012 中京大学情報理工学部講師を経て 2022 より同大学工学部電気電子工学科教授。現在に至る。ニューラルネットワークを用いた知的画像処理、画像符号化の研究に従事。2010 年度学術奨励賞、映像情報メディア学会、IEEE 各会員。

研究会に行こう！

「研究会に行こう！」では基礎・境界ソサイエティの研究会などの様子を御紹介しています。情報交換や懇親、新たな研究との出会いの場としてはいかがですか？

■バイオメトリクス研究会 (BioX)

バイオメトリクスは、ヒトやモノを認識・認証する様々な技術に関連する研究分野であり、生体認証はパーソナルユースから社会インフラに至るまで、実社会において必要不可欠な技術になりつつあります。

バイオメトリクス研究会では、センサ、デバイス、生体計測、信号処理、パターン認識、機械学習、セキュリティ、システム運用や社会科学的な諸問題までといった、バイオメトリクス及び関連する認識・認証技術を広範に扱っています。複合領域の研究分野のため、多岐にわたる研究会との共同開催を行っています。今後の活動は以下のようになっています。

開催月	開催地	テーマ	共催/併催
2025年3月	八丈島	バイオメトリクスとコミュニケーション	クラウドネットワークロボット研究会 (CNR)
2025年5月(予定)	未定	映像・信号の処理・解析・AI技術とその多分野応用	画像工学研究会 (IE), 信号処理研究会 (SIP), 医用画像研究会 (MI), メディア工学研究会 (ITE-ME), 情報センシング研究会 (ITE-IST)
2025年7月	北海道	セキュリティ, 一般 (セキュリティサマーサミット2022)	情報セキュリティ研究会 (ISEC), 技術と社会・倫理研究会 (SITE), 情報通信システムセキュリティ研究会 (ICSS), マルチメディア情報ハイディング・エンリッチメント研究会 (EMM), ハードウェアセキュリティ研究会 (HWS), コンピュータセキュリティ研究会 (IPSJ-CSEC), セキュリティ心理学とトラスト研究会 (IPSJ-SPT)
2025年9月(予定)	大阪(予定)	バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム (SBRA)	
2025年10月(予定)	宮古島 or 石垣島(予定)	バイオメトリクス一般	

本年度から、ムーンショット型研究開発事業のうち、目標1に設定されたプロジェクトの一部とコラボレーションがスタートしました。研究会では、ムーンショットセッションを企画し、7月及び10月の研究会で合わせて14件の成果発表がありました。いずれも活発な議論が行われています。

更に、毎年11月には、バイオメトリクス研究者が一堂に会する「バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム (SBRA)」が開催されています。SBRAでは、招待講演、一般発表、ポスター発表に加えて企業講演 (展示) があり、企業の研究者も多数参加頂いています。2023年は成蹊大学で開催し、久しぶりの首都圏開催ということもあり、コロナ禍以前よりも多くの発表件数となりました。2024年は伊香保温泉で開催する予定あり、時間を気にせずにディープな議論が展開されることを期待しています。

バイオメトリクス研究は、異分野との接点が多いため、思いもよらない視点からコメントをもらえることが多々あります。様々な研究分野の方々のご参加を心よりお待ちしております。



高野博史 (正員)

2002 金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。現在、富山県立大学情報工学部データサイエンス学科准教授。博士 (工学)。生体認証、ヒューマンセンシングに関する研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、日本生体医工学会、日本神経回路学会各会員。

■高度交通システム研究会 (ITS)

高度交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS) は最先端の情報通信技術を用いて人と道路と車両とを一体のシステムとして構築することにより、渋滞の緩和、輸送効率の向上、安全性の向上、環境の保全を図る情報通信ネットワークと交通ネットワークの統合システムです。ITS 研究会では ITS の実現に必要な情報通信、航行エレクトロニクス、測位測距、ネットワーク制御、情報セキュリティ、画像処理など諸技術の有機的な融合と体系化を行う場を各分野の研究者に提供し、情報交換・交流を促進して ITS 技術の進展に寄与することを目指しています。

高度交通システム (ITS) 研究会では毎年5回の研究会を開催しております。第1回研究会 (6~7月開催) は単独開催です。

が、第2回研究会（8月下旬～9月上旬開催）は情報処理学会、電気学会のITS研究会と連催で研究会を開催しております。第3回研究会（12月開催）では高信頼制御研究会、ワイドバンドシステム研究会と共催で、通信や制御をメインテーマとして、ITS技術の議論を広く行っております。第4回研究会（2月開催）では、画像工学研究会及び映像情報メディア学会の三つの研究会と共同で研究会を開催しております。この研究会ではITSにおける画像処理をメインテーマとしております。第5回研究会（3月開催）は電気学会ITS研究会と連催で開催しております。また、本研究会では学生や若手研究者に対する奨励賞、及び年間を通じて多くの発表を行って頂いた講演者に対する研究活動奨励賞をそれぞれ設けております（2023年度実績：奨励賞（口頭発表）1件、研究活動奨励賞1件）。

研究会開催案内や選奨規定などにつきましては本研究会のホームページにてご確認ください。皆様のご参加をお待ちしております。

ホームページ：http://www.ieice.org/ess/its/



高取祐介（正員）

平14 埼玉大・工・電気電子システム工卒。平16 同大大学院理工学研究科博士前期課程了。平19 同大大学院理工学研究科博士後期課程了。平成19年4月から平成24年3月まで東京理科大学工学部助教、平成24年4月から神奈川工科大学工学部助教、平成24年4月から同大准教授を経て現在に至る。主として高度交通システムに関する研究に

従事。

■回路とシステム研究会（CAS）

CASは、1955年5月に回路網理論研究会として発足し、1967年4月に回路とシステム理論研究会、1980年4月に現在の回路とシステム研究会に名称が変更されました。専門委員は大学と企業の関係者の割合がほぼ半数の構成になっており、様々なバックグラウンドをもつ参加者間の交流が活発に行われています。また、未来を担う学生の育成にも力を入れており、研究会で優れた発表を行った学生を学生優秀賞として表彰する制度を用意しています。

CASの研究会は、研究会、ソサイエティ、学会の垣根を超えて幅広く研究交流・意見交換ができるのが魅力の一つです。6月はシステム数理と応用研究会（MSS）とVLSI設計技術研究会（VLD）、10月は非線形問題研究会（NLP）、11月はMSS研と情報処理学会アルゴリズム研究会（SIGAL）、12月は集積回路研究会（ICD）、1月は安全・安心な生活とICT研究会（ICTSSL）、3月はコミュニケーションシステム研究会（CS）、との共催です。2024年度総合大会では「宇宙技術における回路とシステム」の企画セッションを予定しています。

皆様のご参加を心よりお待ちしております。



笠松大佑（正員）

2004 創価大・工学部・情報システム工学科卒。2009 同大大学院博士後期課程了。博士（工学）。2009 創価大・工学部・情報システム工学科助教。2012 西ミシガン大学、パデュー大学、ロチェスター工科大学博士研究員。2016 富士通研究所研究員。2020 創価大・理工学部・情報システム工学科准教授。データ工学に関する研究に従事。2024 回路とシステム研究会幹事。

回路とシステム研究会幹事。

■システム数理と応用研究会（MSS）

システム数理と応用研究会（MSS）は、電子情報通信分野の発展に貢献することを目指し、数理的な手法を用いてシステムを設計・解析・検証する研究を幅広く行っています。グラフ理論からゲーム理論、システムバイオロジーまで、多岐にわたる分野の研究者が集まり、活発な交流を通じて新たな知見やアイデアを生み出しています。従来のコンカレントシステムに加え、サイバーフィジカルシステム、ヒューマンファクター、ビッグデータ解析など、現代社会が抱える様々な問題に対して数理的なアプローチを適用し、より複雑で高度なシステムの設計・開発を目指しています。特に、システムの信頼性向上、大規模システムの最適化、人間と機械の協調、新たな数理モデルの構築といった分野において、具体的な成果を上げています。数理的な手法に興味のある研究者や技術者にとって、MSS研究会は、最先端の研究に触れ、自身の研究を深めることができる魅力的な場です。

2025年1月以降の研究会は以下のように開催予定です。

2024年度

2025年1月12日（日）～13日（月）：ソフトウェアサイエンス研究会（SS）共催

2025年3月13日(木)~14日(金):非線形問題研究会(NLP)共催
2025年度(予定)

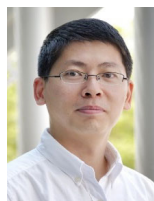
2025年6月:信号処理研究会(SIP),回路とシステム研究会(CAS),VLSI設計技術研究会(VLD)共催

2025年11月:回路とシステム研究会(CAS)共催,情報処理学会アルゴリズム研究会(IPSJ-AL)連催

2026年1月:ソフトウェアサイエンス研究会(SS)共催

2026年3月:非線形問題研究会(NLP)共催

これらの研究会活動に加え、「International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications」(ITC-CSCC)に参画し、英文論文誌Aでは「システム数理科学と応用小特集」を企画しています。MSSではシステム数理科学の基礎理論から各種応用までの幅広い分野を扱っており、分野横断型でオープンな研究会を目指しています。ぜひ一度、研究会にご参加ください。なお、MSSの詳しい活動の情報は<https://www.ieice.org/~mss/>をご参照ください。



劉健全(正員)

筑波大学博士(工学)。2012年NEC入社。入社後は映像解析技術とデータベース技術の融合に関する研究開発に従事し、継続的に研究成果の製品化を実現。現在、NECのマルチモーダル生成AIの研究開発と実用化をけん引。主要国際会議や論文誌にて70本以上の論文発表、意匠・特許出願100件以上。ACM MM 2024とIEEE ICIP 2023の産業委員長やIEEE MIPR 2021の実行委員長を含む多数の委員長を歴任。2023年度電子情報通信学会業績賞など計30以上の賞を受賞。名古屋大学客員教授、法政大学兼任講師。2021年度よりMSS研究会幹事。

■思考と言語研究会(TL)

本研究会では、人間の知能の根幹に深く関わる「思考と言語」の本質や、それらの運用を探求しています。また、教育・学習・福祉との関係性を追求しつつ、工学的応用の可能性も検討しています。常に新しいテーマを掲げ、探究の幅を広げています。

2019年度からは「芸術と言語」をテーマとした研究会を開始し、2021年度には「言語景観・言語接触・言語変化」をテーマに、NLP(自然言語処理)との関連を取り上げたセッションも行いました。更に2022年度からは「メタバース」を中心に据えた研究会を始めました。2022年度から2023年度前半にかけての研究会を通して「エージェントと環境との意味的インタラクション」が全てのテーマを貫く視点であるという認識が共有されました。

2020年度以降は主にオンラインでの開催が中心でしたが、2021年度から対面形式の研究会も再開し、オンラインやハイブリッド形式での開催も続けています。今年度のテーマも「省察を通じた学び」、「メタバース」、「人間の心的特性に寄り添った学習環境のデザイン」、「芸術と言語」、「場の共創」、「創発とイノベーション」、「言語と学習」、「言語の学習」、「人間の言語処理と学習」、「ELF」、「会話分析」、「マルチモーダルインタラクション」、「異文化間コミュニケーション」、「assistive language tools」、「generative AI」、「知識・概念・語彙とその構造」、「言語景観」、「言語接触」、「通訳翻訳」、「異文化対話」など、非常に多彩です。皆様のご発表・ご参加を心よりお待ちしております。

開催スケジュール

- ・第1回:2024年7月20日(土)オンライン開催
テーマ:「芸術と言語」、「場の共創・創発とイノベーション」、「言語と学習・言語の学習」
- ・第2回:2024年8月10日(土)~11日(日)関西学院大学上ヶ原キャンパス
テーマ:「人間の心的特性に寄り添った学習環境のデザイン」
- ・第3回:2024年10月11日(金)ハイブリッド開催(主:オンライン,副:愛媛大学)
テーマ:「省察を通じた学び」、「メタバース」、「人間の心的特性に寄り添った学習環境デザイン」
- ・第4回:2024年12月14日(土)ハイブリッド開催(主:オンライン,副:立命館大学大いばらきキャンパス)
テーマ:「ELF・会話分析・マルチモーダルインタラクション・異文化間コミュニケーション」、「Assistive language tools・generative AI・知識・概念・語彙とその構造」、「言語景観・言語接触・通訳翻訳・異文化対話・言語と学習・言語の学習」
- ・第5回:2024年3月7日(金)ハイブリッド開催(主:オンライン,副:国立清華大学(台湾))予定
テーマ:「ELF・会話分析・マルチモーダルインタラクション・異文化間コミュニケーション」、「Assistive language tools・generative AI・知識・概念・語彙とその構造」、「言語景観・言語接触・通訳翻訳・異文化対話・言語と学習・言語の学習」



坪田 康 (正員)

1999 京都大学工学部情報学科卒業。2002 京都大学大学院情報学研究所知能情報学専攻博士後期課程中退。2002 より京都大学学術情報メディアセンター助手を務め、2015 より京都工芸繊維大学基盤科学系准教授。コンピュータを用いた外国語学習に関する研究に従事。

■安全・安心な生活と ICT 研究会 (ICTSSL)

安全・安心な社会の実現に向けて ICT 技術がどのように役立つのかを深く議論する場として、ICTSSL 研究会は重要な役割を果たしています。研究会のテーマは「安全・安心な生活を支える技術」から「社会科学的アプローチ」、「インフラ設備の保全・管理技術」まで幅広く、学際的な交流が可能です。

2024 年度は、計 4 回の研究会を開催します。5 月には東京（ネクスコ東日本エンジニアリング）、7 月には伊勢市（シンフォニアテクノロジー響ホール伊勢）、10 月には広島市（県立広島大学サテライトキャンパスひろしま：IN、NWS 研究会、電気学会 SMF 研究会との連催）で開催しました。そして、2025 年 1 月には東京（機械振興会館：CAS 研究会と共催）での開催を予定しています。

今年度の研究会では、ICT を活用した防災対策やインフラの保全、地域の安全を守るための技術的アプローチに関する発表が多数行われました。更に、異常気象や災害リスクの高まる中で、AI やデータ分析技術がどのように貢献できるかについての議論も展開されました。また、5 月の研究会では、ネクスコ東日本エンジニアリング様のご協力により、東京湾アクアラインの見学会を実施し、道路設備の安全性についての説明を受ける機会も得ました。

これらの発表や見学会を通じて、ICT 技術が私たちの安全で安心な生活にどのように役立つのかについて、多くのインスピレーションを得ることができました。2025 年度も引き続き、多様な視点からの研究発表が行われることを期待しています。皆様のご参加と新たな知見の共有を心よりお待ちしております。



大塚 晃 (正員)

1987 新潟大学大学院自然科学研究科修了。博士（工学）。三菱電機（株）情報技術総合研究所にて、無線通信技術など研究開発、及び情報通信技術によるソリューション開発に従事。2018 事業創造大学院大学教授。ICT 技術の研究、及び事業戦略立案を進めている。

■ハードウェアセキュリティ研究会 (HWS)

ハードウェアセキュリティ研究専門委員会 (HWS) は、2018 年 4 月から常設の研究専門委員会となり、前身の時限研専・特別研専を含めて約 8 年半にわたり研究会及びフォーラムを開催してきました。HWS では、ハードウェアセキュリティに関する最新の幅広い研究内容（例えば、各種暗号の設計・実装、ハードウェアやシステムへのサイドチャネル攻撃・耐タンパ性、ハードウェアの真贋性判定・トロイ検出、計測機器への攻撃と対策）の議論を行っています。また、次世代を担う若手研究者・学生の育成を目指し、若手優秀賞などの選定を行い、研究分野の活性化に努めています。更に、合同研究会も多く開催しており、情報セキュリティ研究専門委員会 (ISEC)、情報通信システムセキュリティ研究専門委員会 (ICSS)、VLSI 設計技術研究専門委員会 (VLD)、集積回路研究専門委員会 (ICD) などとの連携活動を通じて、融合領域であるハードウェアセキュリティ分野において関連分野の専門家からの意見を取り入れる仕組みを作っています。

2024 年度の活動は次のとおりです。

2024 年

- 4 月 HWS 研究会（東京都／三菱電機）
- 5 月 LSI とシステムのワークショップ 2024（ICD・VLD 等と共催）
- 7 月 セキュリティサマーサミット 2024（北海道）ISEC・ICSS 等と共催
- 9 月 電子情報通信学会・ソサイエティ大会
- 10 月 HWS 研究会（青森／弘前大学）ICD と共催
- 12 月 ハードウェアセキュリティフォーラム 2024（神戸ポートアイランド）
- 12 月 IEEE Asian Hardware Oriented Security and Trust Symposium 協力予定

2025 年

- 1月 暗号と情報セキュリティシンポジウム 2025 協力予定
- 3月 HWS 研究会（沖縄県）ICD・VLD と共催
- 3月 電子情報通信学会・総合大会

最新の情報は研究会の Web (<https://www.ieice.org/ess/hws/>) で発信していきます。多くの皆様のご発表とご参加をお待ちしております。

【HWS 研専 問い合わせ先・連絡先】 hws-sec@mail.ieice.org



坂本純一（非会員）

2020 横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程後期過程修了、博士（情報学）。現在（国研）産業技術総合研究所サイバーフィジカルセキュリティ研究センター研究員及び横浜国立大学先端科学高等研究院客員助教。サイドチャネル攻撃、レーザフォールト攻撃、暗号実装などの研究に従事。

■ VLSI 設計技術研究会（VLD）

VLSI 設計技術研究会（VLD）では、集積回路の設計手法やアーキテクチャ、自動設計や検証に関連するアルゴリズムの基礎理論、実際の設計適用に至るまで、幅広い研究を推進しております。対象は広く、システムレベル設計からアナログ回路合成、レイアウト設計に至る各種設計自動化手法及び CAD 手法、更にそれらを支えるアルゴリズムまで広範囲にわたるテーマを対象としております。また、大規模化・複雑化や性能・消費電力・信頼性の問題に関連した研究のみならず、ポストムーア時代における、Artificial Intelligence (AI)、量子計算機、Digital Transformation (DX) などに関連した設計事例・設計技術・アルゴリズムに関連した研究も発表されております。VLD 研究会では、企業と大学が密接に協力し、産業界と学術界の両方の視点から研究の方向性を議論する場を提供しています。

VLSI 設計技術研究会では、単独開催及びほかの研究会との共催を含め、年 4 回の研究会を開催しており、多数の一般講演と充実した招待講演などで活発な討論や交流が行われております。2025 年 3 月 5 日から 8 日まで、沖縄県那覇市で HWS 研究会、ICD 研究会と共催で研究会を開催する予定です。この研究会では、学生による卒業論文や修士論文のテーマが多数発表され、毎年多くの参加者で賑わいます。このほか、アジア・南太平洋地域最大の LSI 設計技術関連国際会議であるアジア南太平洋設計自動化会議（ASP-DAC）の開催への参画や、英文論文誌 A 小特集“VLSI 設計と CAD アルゴリズム（Special Section on VLSI Design and CAD Algorithms）”（例年 3 月号）の企画と編集を行うなど、海外への情報発信と情報交流を活性化しつつ、活動を進めております。

2024 年度の VLSI 設計技術研究会の開催スケジュールは以下のとおりです。

- 7月（7/18～19） 弘前大学 50 周年記念会館「システムと信号処理および一般」（CAS, MSS, SIP 共催）
- 11月（11/12～14） 大分コンパルホール「デザインガイア～VLSI 設計の新しい大地～」(DC, ICD, RECONF 共催, IPSJ-SLDM 連催)
- 1月（1/16～17） キオクシア 横浜テクノロジーキャンパス「FPGA 応用および一般」（RECONF 共催）
- 3月（3/～8） 沖縄「システムオンシリコンを支える設計技術、ハードウェアセキュリティ、一般」（HWS, ICD 共催）

技法電子化に伴う参加手続きを行って頂ければ、どなたでも聴講可能です。スケジュールの詳細、発表の申込みは VLD のホームページ (<https://www.ieice.org/~vld/>) をご覧ください。皆様のご参加をお待ちしております。



桜井祐市（正員）

2000 武蔵工大・電気電子卒、2002 同大学大学院電気工学専攻博士前期課程修了。修士（工学）。2002（株）日立製作所入社。電子回路、モノづくりに関する研究に従事。

■イメージ・メディア・クオリティ (IMQ) 研究専門委員会

イメージ・メディア・クオリティ (IMQ) 研究専門委員会は、2004年に時限研究専門委員会として発足し、2011年に専門委員会設立となりました。この間、メディアは、質・量ともに加速的に発展し、社会変化に応じて、利用の形態も多様化いたしました。現在、仮想空間の利用の拡大やAI技術の発展が見られ、かつて聞いたことのある技術は昇華して、今日の社会に大きな効果を与えています。その中で、人間にもたらす情報の価値、イメージメディアに対する評価の重要性も増しています。

本委員会は、イメージの取得、伝送、蓄積、表示、生成などの様々な分野で扱われているイメージメディアについて、横断的な議論を行う場として活動を行っており、その評価に関して、先人の知見を継承し、人材の交流・育成を進めています。

具体的な活動として、毎年、約5回の研究会を開催しています。2024年度では、首都圏で1回、他地域で4回開催を予定しています。ヒューマン情報処理研究会 (HIP) と共催で7月研究会を、メディアエクスペリエンス・バーチャル環境基礎研究会 (MVE)、画像工学研究会 (IE) との共催、コミュニケーションクオリティ研究会との併催として3月研究会を開催します。また、およそ1年半の間隔で国際ワークショップを開催しています。多数の発表、参加を頂き、活発な議論の場を提供できることを願っています。

2024年度の予定は、以下のとおりです。

研究会

- 2024年5月24日 名古屋大学
- 2024年7月12日 札幌市立大学 (HIP 共催)
- 2024年10月18日 湘南工科大学
- 2023年12月20日 国際高等専門学校
- 2024年3月5日から7日 沖縄 (MVE, IE 共催, CQ 併催)

最新の情報は、Webページをご参照ください。

<https://www.ieice.org/~imq/>



工藤博章 (正員)

1991 名大・工・電気卒、1996 同大学院工学研究科博士課程後期課程了。同年名大・工・助手。現在、同大学院情報学研究科准教授。視覚情報処理、コンピュータビジョンなどの研究に従事。博士 (工学)。

国際会議開催報告

International Workshop on Security

(IWSEC2024, セキュリティに関する国際ワークショップ, <https://www.iwsec.org/2024>)

国立京都国際会館, 京都府京都市

2024年9月17日~9月19日

2024年9月17日から9月19日までの3日間、電子情報通信学会情報セキュリティ研究会 (ISEC)、情報処理学会コンピュータセキュリティ研究会 (CSEC) の共同主催による国際ワークショップ 19th International Workshop on Security (略称 IWSEC2024) が開催されました。今回は京都府京都市の国立京都国際会館を会場とし、完全対面形式による開催となりました。今年にはアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) による耐量子計算機暗号の標準化プロセスにおいて連邦情報処理標準 (FIPS) が決定されるなどの大きな動きがあり、今後の更なる研究が望まれています。一方で、AI 技術などがもたらす新たなセキュリティ脅威への対処も求められるなど、情報セキュリティ研究の重要性は高まり続けています。ISEC と CSEC では、本ワークショップを通じて日本における情報セキュリティ研究の一層の発展と国際化、及び、国際貢献に向けた活動を行っています。今回のワークショップはシングルセッションで行われ、国内外から情報セキュリティに関し、基礎となる理論研究から実用研究まで多種多様な成果が報告されました。全体のタイムテ

表1 IWSEC2024 タイムテーブル

9/17 09:30~09:45	Opening
09:45~10:45	Keynote Talk (Dustin Moody 氏)
11:05~11:55	Session: Authenticated Encryption (2件)
13:30~14:30	Keynote Talk (Thomas Peyrin 教授)
14:40~15:30	Session: Vulnerability (2件)
15:40~16:30	Session: Symmetric-key Cryptanalysis
16:30~16:50	Poster & Break
18:00~20:00	Welcome Reception
9/18 09:00~09:50	Session 4: Protocols (2件)
10:20~11:25	Session: Malware Countermeasure (3件)
11:30~12:30	Keynote Talk (Andreas Rauber 教授)
12:30~	Lunch & Excursion
19:00~21:30	Banquet
9/19 09:00~10:20	Session: Analysis of Public-key Cryptosystems (3件)
10:20~11:00	SCIS & CSS Session (2件)
11:20~12:30	Session: Network Security and Privacy (3件)
12:30~12:45	Closing
9/20 10:00~14:00	Session: iPWS Cup 2024

ブルは表1のとおりです。3日間を通じて計17本の論文(採択率36.1%)、計21件のポスターが発表されました。発表テーマは、認証つき暗号、脆弱性、共通鍵暗号、プロトコル、マルウェア対策、公開鍵暗号、ネットワークセキュリティなど多岐にわたります。その中で特に優秀な論文が一般の部と学生の部から選出されベストペーパー賞として表彰されました(表2, 図1)。また、ポスターセッションでは多彩なテーマの研究に関して発表者と参加者の間で白熱した議論が行われ、参加者の投票で3件のポスターがベストポスター賞として表彰されました(表3, 図2)。

また、日本を含め11か国から計128名の参加があり、国際色豊かな会議となりました。なお、本会議で発表された

表2 優秀論文 (Best Paper Award, Best Student Paper Award)

一般の部 (Best Paper Award)
-Yoshiaki Honda and Kazumasa Shinagawa: "Efficient Card-Based Protocols with a Standard Deck of Playing Cards Using Partial Opening"
-Tristan Bilot, Nour El Madhoun, Khaldoun Al Agha and Anis Zouaoui: "Few Edges Are Enough: Few-Shot Network Attack Detection with Graph Neural Networks"
学生の部 (Best Student Paper Award)
-Rin Miyachi, Konan Nagashima and Taiichi Saito: "Race condition vulnerabilities in WordPress plug-ins"



写真1 Best Paper 表彰

表 3 優秀ポスター (Best Poster Awards)

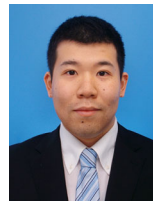
ポスターセッション (Best Poster Award)
-Dmitry Prokhorenkov: "Reference Model for Differential Privacy (RMDP)"
-Yuki Seto, Hiroki Furue and Atsushi Takayasu: "Partial Key Exposure Attacks on UOV and Its Variants"
-Takumi Nishimura and Atsushi Takayasu: "Efficient Revocable Identity-Based Encryption from Middle-Product LWE"



写真 2 Best Poster 表彰

表 4 IWSEC2024 実行委員会の構成

General Co-Chairs	四方 順司 千田 浩司	横浜国立大学 群馬大学
Program Co-Chairs	峯松 一彦 三村 守	NEC 防衛大学校
Poster Chair	矢内 直人	パナソニック
Publication Chair	伊藤 竜馬	情報通信研究機構
Secretary	渡邊 洋平	電気通信大学
Local Organizing Committee	井上 明子 岩花 一輝 神橋 基博 Gu Yujie 佐竹 翔平 佐藤 慎悟 新水美代子 Sven Wohlgemuth 中林 美郷 宮原 大輝 山岸 伶 山下 恭祐	NEC NTT 三井住友銀行 九州大学 熊本大学 横浜国立大学 NTT 電気通信大学 日立製作所 大阪大学



佐竹翔平 (非会員)

平 27 名大・情文卒、令 2 神大大学院博士後期課程了、令 5 熊大准教授に着任。離散数学、及び暗号的ハッシュ関数の構築などの数理的研究に従事。博士(学術)、日本応用数理学会 2019 年度若手優秀講演賞、日本数学会 2020 年度応用数学研究奨励賞受賞。

論文は Springer 社から Lecture Notes in Computer Science シリーズとして発行されています。

初日は最初の基調講演としてアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) の Dustin Moody 氏による "The First PQC Standards" と題した、耐量子計算機暗号の標準化に関する最新の研究動向についての講演が行われました。Nanyang Technological University の Thomas Peyrin 教授による 2 番めの基調講演 "Automated Analysis for Pushing Performance Limits in Symmetric-Key Cryptography" では、自動化された cryptanalysis を踏まえた、共通鍵暗号のパフォーマンス限界の改善に関する研究紹介がありました。2 日めには、Vienna University of Technology の Andreas Rauber 教授による基調講演 "Working with Confidential Data: Threats and Mitigations across Layers from Infrastructure to AI Models" が行われ、深層ニューラルネットワーク型の機械学習モデルによる攻撃に対する保護手法についての研究紹介がありました。

IWSEC2024 を運営する実行委員会は、表 4 に示す産学からの計 19 名により構成されています。

IWSEC は、情報セキュリティ分野の国内研究の一層の発展と国際貢献を目指し、毎年日本で開催されています。2025 年は 11 月に福岡で開催予定です。皆様の論文のご投稿、ご参加をお願い申し上げます。

国際会議開催報告

East Asian School of Information Theory 開催報告

開催場所：湘南国際村センター

開催期間：2024年7月30日(火)～8月2日(金)

2024年7月30日(火)から8月2日(金)にかけて、湘南国際村センターにおいて East Asian School of Information Theory (EASIT2024) が開催されました。実行委員会を代表して開催報告をいたします。

EASIT は IEEE Information Theory Society が主催するアジア地域における国際スクールで、アジア地域における情報理論関連分野の若手研究者の参入を促進するためのイベントとして2021年から不定期に開催されています。2021年に韓国でのオンライン開催、2022年に中国広州でのハイブリッド開催につづき、今回は初めての対面での開催となりました。

今回のスクールでは情報理論と暗号理論の研究者の交流を促進するというのを主要目的として掲げ、チュートリアル講演の講師陣も情報理論、暗号理論、計算量理論、量子情報と幅広い分野の方々をお願いしました。スクールの主要部は7件のチュートリアル講演(各2.5時間)からなり、プログラムは以下のとおりです。

- ・ Francesco Buscemi (Nagoya University): "The Theory of Statistical Comparison : From Majorization to the Quantum Blackwell Theorem and Beyond."
- ・ Amin Gohari (Chinese University of Hong Kong): "The Auxiliary Receiver Approach in Network Information Theory."
- ・ Iftach Haitner (Stellar Development Foundation and Tel Aviv University): "Computational Analogues of Entropy."
- ・ Shuichi Hirahara (National Institute of Informatics): "Meta-complexity and average-case complexity."
- ・ Tianren Liu (Peking University): "Information-

theoretic cryptography."

- ・ Arpita Patra (Indian Institute of Science, Bangalore): "Communication Complexity Landscape of Information-theoretic MPC."
- ・ Mary Wootters (Stanford University): "List-Decoding and List-Recovery of Algebraic Codes, and Applications."

また、参加者によるポスターセッションでは(図1)、2日間にかけて計45件の発表が行われ、優秀ポスター(3件)の表彰も行いました。8月1日の午後には、エクスカーションとして、鎌倉に半日観光に出かけました。

参加者は60名ほど(実行委員と講師陣を含む)で、半数弱が海外からの参加者でした(図2)。また、参加者の研究分野も情報理論関係と暗号理論関係がおおむね半々で、両分野の交流を促進するという当初の目的をある程度達成できたのではないかと思います。

今回のスクール開催にあたって、会計委員を担って頂いた葛岡成晃先生(和歌山大学)、広報委員を担って頂いた Yujie Gu 先生(九州大学)には大変お世話になりました。また、暗号分野の講師の打診には、プログラム委員を担って頂いた山田翔太博士(産業技術総合研究所)にご尽力頂きました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

そして最後になりましたが、ご参加・ご講演頂いた皆様、並びに金銭的な支援をしてくださった IEEE Information Theory Society, 情報通信研究機構(NICT), 栢森財団, HUAWEI, 科学研究費(23H00468, 23K17455, 24H00071)にお礼を申し上げて、開催報告とさせていただきます。



図1 ポスターセッションの様子



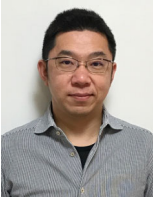
図2 スクール参加者の集合写真



渡辺 峻 (正員)

平 17 東工大・工・情報卒. 平 19 同大学院修士課程了, 平 21 同大学院博士課程了. 同年, 徳島大学助教. 平 25~27 学術振興会海外特別研究員, メリーランド大客員助教. 現在, 東京農工大・工・情報・准教授. 情報理論, 暗号理論の研究に従事. 博士 (学術). 平 22 年度本会論文賞.

2023-2024 IEEE Information Theory Society Distinguished Lecturer 選出. 著書に *Information-theoretic Cryptography*.



安永憲司 (正員)

平 15 阪大・基礎工・情報卒. 平 20 同大情報科学研究科博士後期課程修了. 博士 (情報科学). 平 25 金沢大助教, 平 30 阪大准教授. 今 3 東工大准教授. 符号理論や暗号理論の研究に従事. 平 20 第 2 回嵩賞受賞. GameSec 2018 Outstanding Paper Award 受賞. 著書『暗号理論入門』.

我らが東京都市大学

林 正博（東京都市大学）

1. 概要

東京都市大学は、世田谷に本部を置く、文字どおり都市の大学です。

横浜、王禅寺にもキャンパスがあります。2009年に、武蔵工業大学と東横学園女子短期大学が統合し、理工系を軸としながらも総合大学として新たな一歩を踏み出しました。建学の精神は「公正・自由・自治」です。

2. 各キャンパス



世田谷キャンパス

世田谷キャンパスは東京 23 区内の私立理工学部系キャンパスの中では最も広く、キャンパス内には多くの樹木が生い茂っています。田園調布、尾山台、上野毛といった閑静な住宅街に囲まれています。



横浜キャンパス

横浜キャンパスは、21 世紀の新しい街づくりが進む港北ニュータウンの一角にあります。日本の（大学を含む）教育機関として初めて〈ISO14001〉の認証を取得しました。



王禅寺キャンパス

王禅寺キャンパスには原子力研究所があります。安心安全な原子力運用のための研究が行われています。

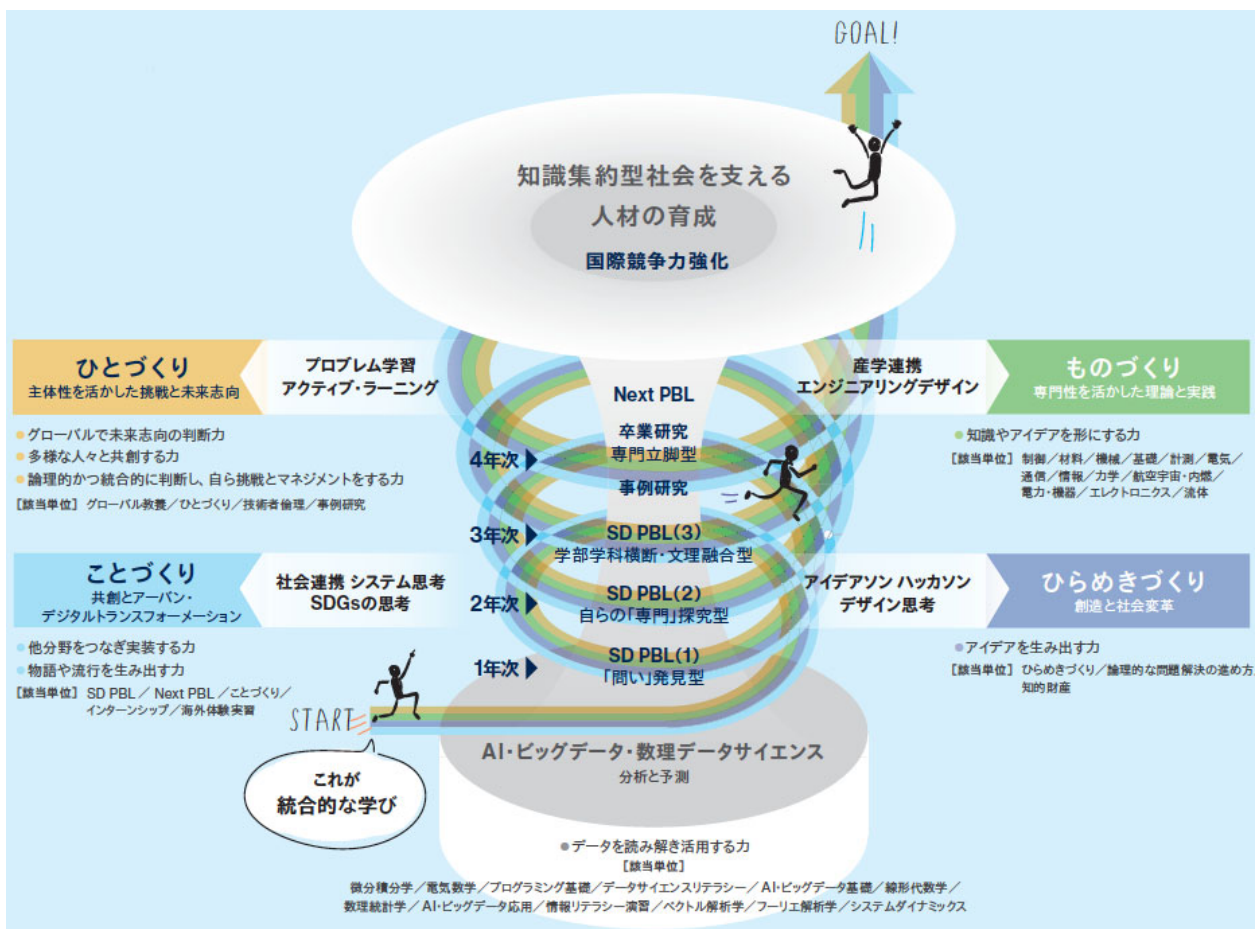
3. 東京都市大学の歴史

1929年に、「学びたい」という一心のもとに学生自らが支援者、教えてくれる人と校地・校舎を探究し、武蔵高等工科学校が発足しました。このエピソードは、東京都市大学の掲げる「公正」「自由」「自治」に相応しいエピソードといえるでしょう。1944年に武蔵工業専門学校と改称し、1949年には学制改革により武蔵工業大学に昇格しました。その後、学科を漸次増設するとともに、大学院も開設しました。そして、2009年に、武蔵工業大学と東横学園女子短期大学が統合し、「東京都市大学」に校名変更され、現在に至ります。

4. 東京都市大学の教育と「ひらめき・こと・もの・ひと」づくりプログラム

東京都市大学の教育理念は「ボーダーを超えて、学生と教職員が共に考え、学び、行動することで社会に貢献できる人材を育てる」です。この教育理念に沿って「公正・誠実さと自己研鑽力を持ち、『都市』に集約されるような複合的課題に取り組むことができ、多種多様なボーダーを超えて新たな価値を見出すことで持続可能な社会の発展に貢献できる人材を育成する」ことを教育目標として掲げています。学生が主体的に学ぶ能力、そして、高い専門力と人間力を涵養することで、社会の発展に対する強い使命感や、他者と協調することのできる人材の輩出を目指します。

学部・学科の垣根を超えた取り組みである「ひらめき・こと・もの・ひと」づくりプログラムは、このような東京都市大学の教育理念を実現するための独自のプログラムです。このプログラムでは、「製品が価値の中心であった資本集約型社会」から「サービスが価値の中心となる知識集約型社会」への転換を踏まえ、複雑な状況を見定め、本質的な問題を見つける力、解決に辿り着くために知識・スキルを学ぶ力、多様なバックグラウンドの人と協働する力、そして、自らの価値観や社会が目指す未来を見つめ直す力を身に付けることを目指します。このプログラム遂行にあたり、重要になるのがコーディネーターと学修アドバイザーの存在です。コーディネーターは企業などでの実務経験のある方が担当し、本プログラムの教育課程の編成、提案、実行を行います。また、各科目の授業運営に関する適切なサポートや融合を図り、統合的な学びの機会を提供できるような調整も



「ひらめき・こと・もの・ひと」づくりプログラム

行っていきます。一方の学修アドバイザーは、本プログラムに関して学生たちからの相談を受けもつ役割を担います。履修指導や相談対応を適切に行うことで学生が不安なく学ぶことをサポートします。



「ひらめき・こと・もの・ひと」づくりプログラム授業風景

この「ひらめき・こと・もの・ひと」づくりプログラムは、2020年に、文部科学省の「知的集約型社会を支える人材育成事業」に採択されています。

5. 世田谷キャンパスのリニューアル

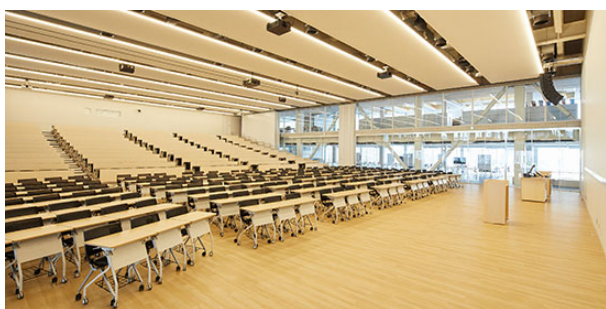
東京都市大学では、2019年から、本学のメインキャンパスである世田谷キャンパスにおいて敷地面積の約三分の一をリニューアルする「東京都市大学キャンパス再整備事業」を始めました。

本事業は、本学が創立100周年（2029年）に向けた中長期計画「アクションプラン2030」の一環であり、新棟2棟（7号館・10号館）を順次建設し、良質な学修環境を整えます。

これまで、2018年に新6号館、2019年には国際学生寮を竣工するなど、計画的に施設更新を行ってきましたが、今回のリニューアルにより更なる教育研究環境の充実と同時に、防災や交流の面における地域の拠点としても機能を強化し、地域社会へのより一層の貢献を目指します。



新7号館



新7号館多目的ホール



新10号館



新10号館ガラス張り研究室（オープンラボ）や充実した共有空間

本稿は、東京都市大学が公開している様々な情報を筆者が適宜引用・加筆修正して作成しています。



林 正博（正員：シニア会員）

1986 名大・理卒、同年 NTT 入社。博士（工学）。2011 年に東京都市大学知識工学部情報通信工学科准教授。2019 年より東京都市大学理工学部准教授。現在に至る。通信ネットワークの信頼性評価・設計法、及びセキュリティの研究に従事。IEEE シニア会員、日本建築学会員、日本信頼性学会員、比較文明学会員。平 25 年テレコムシステム技術賞（奨励賞）受賞、著書『通信ネットワークの信頼性』ほか。

電子情報通信学会に関連する賞を受賞された方を御紹介します。

令和5年度 Fundamentals Review ベストオーサー賞

令和5年度 Fundamentals Review ベストオーサー賞を受賞されました赤穂昭太郎様にお伺いしました。

「少量のデータに対する機械学習」(16巻4号, pp.247-256, 2023年4月)

赤穂 昭太郎 (産業技術総合研究所)

Q. Fundamentals Review ベストオーサー賞を受賞された御感想をお聞かせください。

このたびは栄えある賞をいただき大変光栄に存じます。Fundamentals Review 誌は第一線の先生方が旬のトピックを分かりやすく解説されているということで、かねてより知ってはいましたが、まさか自分が執筆して賞まで頂けるとは思っていませんでした。この執筆のきっかけとなったのは、コロナ禍前の2019年に島根大学の坂野鋭先生のところへ訪問して研究紹介をさせて頂いた折、同席されていた白井匡人先生が私のことを覚えてくださっていて、本誌への執筆依頼を頂きました。世の中生成AIやビッグデータを用いた深層学習全盛の中で、日頃企業や自然科学の研究者と接しているとむしろデータが少ないことの方が多いというような感覚もあり、ビッグデータ解析へのアンチテーゼの意味も含めて執筆をお引き受けしました。この場をお借りして、白井先生をはじめ、閲読頂いた先生方、賞を選定して頂いた先生方に感謝申し上げます。



Q. 受賞論説について、簡単にご説明ください。

執筆するにあたり、実際に少量データ解析をされている方の参考になるような幾つかのレシピを示すとともに、基礎理論を研究されている方に対しても興味をもって頂けるような内容を目指しました。この論説では、「少量」というのを次元(属性値)に対して相対的に少ないものとして考えています。つまり、深層学習であっても、データ数よりはるかに多いパラメータをもつモデルで学習する際にはこの範疇に入ります。そのような設定は、古典的な数理統計学では十分扱われなかったもので、理論的に解くべき問題がたくさんころがっています。一方、実用面ではデータが少量しかないという状況下において、四つの大まかなアプローチで対処する方法を説明しています。

Q. 現在、御興味をもたれている研究テーマを教えてください。

学習データ一つが確率分布のパラメータとして与えられる場合の機械学習に興味をもって研究しています。この問題は情報幾何学と多変量解析を合わせたような範疇にあり、理論的にもシンプルで見通しのよい枠組みとなっています。主な応用先は、本論説の中でも紹介している転移学習あるいはメタ学習と呼ばれる分野が該当します。最近はガウス過程のような無限次元への拡張について考えています。

Q. 今後の抱負をお聞かせください。

これまで機械学習を中心に数理的に興味深いトピックを勉強していく中で、たまに面白いことを思いついて研究をしてきました。今後も基礎から応用まで広い方々と交流する中で楽しく研究が続けられるといいなと思っています。

Q. 若い研究者の方へのメッセージをどうぞ！

独創的で面白い研究というのはある種の「遊び」の中から生まれてくるものだと思います。

しかし、最近は研究所でも大学でもコンプライアンスだのKPIだのといったものに縛られたり、無駄な雑用に忙殺されたりして、なかなか自由に楽しく研究することが難しくなってきたように感じます。高い倫理観をもつのは大前提ですが、基本的に雑事はスルーするくらいの気持ちで研究するとよいのではないかと思います。私も微力ながら若い方の盾となれるように尽力したいと思います。

開催案内

ASP-DAC 2025: The 30th Asia and South Pacific Design Automation Conference

日程 2025年1月20日(月)～23日(木)

場所 東京お台場 日本科学未来館 7階

Web サイト <https://www.aspdac.com>

1 概要

ASP-DAC は、VLSI とシステムの設計技術に関するアジア・南太平洋地区最大の国際会議です。電子設計自動化 (EDA) に関連する技術の最新の成果を発表する機会と、将来の方向性を議論する場を提供することを目的としています。EDA の研究者/開発者とシステム/回路/デバイス設計者の間で、有益な意見交換を促進することも目的としています。今回で記念すべき **30 回目** を迎える ASP-DAC 2025 は、例年通り充実したプログラムを用意しています。一般論文には 578 件もの投稿があり、168 件の論文が採択されました (採択率 29.1%)。VLSI 設計技術、メモリ、センサ、AI ハードウェア、ハードウェアセキュリティ、量子計算技術など、活発に議論される予定です。そのほか、基調講演、チュートリアル、特別セッション、デザイナーズ・フォーラム、デザインコンテストなど、多くのイベントが予定されています。イベントの詳細は下記をご覧ください。最先端の技術動向や研究成果を知る良い機会ですので参加をお勧めいたします。

2 基調講演

以下の 3 件が予定されています。集積システムの将来を考える良い機会となります。

- Kazunari Ishimaru (Rapidus, Japan), “Design Innovation and Collaboration with Foundries: Towards a Sustainable Semiconductor Industry”
- Jason Cong (UCLA, USA), “Compilation and Architecture Optimization for Quantum Computing”
- Abu Sebastian (IBM Research Europe - Zurich, Switzerland), “In-Memory Computing-based Deep Learning Accelerators: An Overview and Future Prospects”

3 チュートリアル

エキスパートによる 4 件のチュートリアルが予定されています。新しい分野の知識獲得に有効です。

- Automation of Standard Cell Layout Generation and Design-Technology Co-optimization
- AHS: An EDA toolbox for Agile Chip Front-end Design (including Hands-on)
- MBIST: Advanced Techniques for SoC Design and Verification
- Efficient Deployment of Large Language Models on Resource-Constrained Edge Computing Platforms

4 特別セッション

以下の 9 セッションが企画されています。ホットトピックに対して最先端の研究成果をまとめて知る良い機会です。

- Machine Learning Based Physical Simulation and Physics-Aware Optimization

- Advances in 3D-IC and Ultra-Large-Scale Integration
- LLM Acceleration and Specialization for Circuit Design and Edge Applications
- ML for IC Design and Manufacturing: When Is It Real?
- Beyond Digital: Advancing Design Automation for Physical Computing Systems
- Rapidus' Initiatives to Half Semiconductor Development Time
- Hardware Authenticity towards a Trustworthy Society
- Innovations and Challenges on Cryo-CMOS Devices, Circuits and Design Platforms
- CEDA/CASS/SSCS Joint session on Silicon Photonics

5 デザイナーズ・フォーラム

設計に関する経験と現実の製品設計に関するソリューションを共有するためのプログラムです。今回は、4トピックス「量子計算技術」「先端センサ技術」「エマージングデバイスと回路技術を用いた最先端コンピューティング」「設計手法」に関する計12件のオーラル発表が予定されています。

6 デザインコンテスト

大学での最先端LSI/システムの設計事例を完成度の高さで競い合います。実LSI/システムの実証を含んだ論文が17件、デザインコンテストセッションにて発表されます。

7 参加申込

上記Webサイトよりお申し込みください。参加形態として「基調講演+デザイナーズ・フォーラム」もご選択いただけます。

8 運営体制

General Chair	Yuichi Nakamura (NEC)
Technical Program Chair	Yu Wang (Tsinghua University)
TPC Vice Co-Chairs	Takashi Sato (Kyoto University) Tsung-Yi Ho (The Chinese University of Hong Kong)
Tutorial Co-Chairs	Shiho Hagiwara (TSMC Design Technology Japan) Yasuhiro Takashima (The University of Kitakyushu)
Designers' Forum Co-Chairs	Chihiro Yoshimura (Hitachi) Takatsugu Ono (Kyushu University)
Design Contest Co-Chairs	Mahfuzul Islam (Institute of Science Tokyo) Shinya Takamaeda-Yamazaki (The University of Tokyo)

主催：ACM/SIGDA, IEEE CASS, IEEE CEDA, IEICE ESS, IPSJ SIGSLDM

9 問い合わせ

ASP-DAC 2025 事務局 (aspdac2025@aspdac.com)

論文募集

NOLTA2025

Oct. 28-31, 2025, Okinawa, Japan



First Call for Papers

The 2025 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2025) will be held at Jichikaikan-Hall, Okinawa, Japan, Oct. 28-31, 2025. The objective of the symposium is to provide a forum for exchange of the latest results related to nonlinear theory and its applications. Papers describing original results in all aspects of nonlinear theory and its applications are invited. Topics include, but are not limited to:

Nonlinear Phenomena	Computational Intelligence	Engineering Applications	Complex Networks/Systems
- Chaos and Bifurcation	- Neural Networks	- Nonlinear Circuits and Systems	- Large-Scale Networks
- Oscillations and Synchronization	- Deep Learning and Artificial Intelligence	- Control Systems	- Social Dynamics
- Chemical Reactions	- Evolutionary Computation	- Communication Networks and Systems	- Neuro Dynamics
- Fussy Systems		- Signal Processing	- Mathematical Economics
		- Applied Mathematics	

Symposium Committee

GENERAL CHAIRS

Hiroyuki Torikai (Hosei Univ)

TECHNICAL PROGRAM CHAIRS

Kenya Jinno (Tokyo City Univ)

TECHNICAL PROGRAM CO-SECRETARIES

Hideyuki Kato (Oita Univ)

Yutaka Shimada (Saitama Univ)

SPECIAL SESSION CO-CHAIRS

Mikio Hasegawa (Tokyo Univ Science)

SPECIAL SESSION SECRETARY

Shoma Ohara (Tokyo Univ Tech)

FINANCE CHAIRS

Hidehiro Nakano (Tokyo City Univ)

FINANCE SECRETARY

Tomoyuki Sasaki (Tokyo City Univ)

PUBLICATION CHAIR

Tadashi Tsubone (Nagaoka Univ Tech)

PUBLICATION SECRETARY

Daisuke Ito (Gifu Univ)

PUBLICITY CHAIRS

Kunihiro Mitsubori (Takushoku Univ)

PUBLICITY SECRETARY

Yusuke Matsuoka (National Institute of Tech, Yonago College)

GENERAL CO-SECRETARIES

Kentaro Takeda (Kagawa Univ)

Yoshikazu Yamanaka (Utsunomiya Univ)

Takashi Matsubara (Hokkaido Univ)

ORGANIZER

IEICE NOLTA Society



PAPER SUBMISSION

Authors are invited to submit papers (4-page in maximum) in PDF format via the website: <https://nolta2025.org>

Only electronic submissions will be accepted. Corresponding authors of accepted papers will be requested to submit camera-ready papers (4-page in maximum)

SPECIAL SESSIONS

NOLTA2025 welcomes proposals for special sessions. Proposals will be evaluated based on the timeliness and the scientific quality of the topic. Notification of acceptance will be sent to the organizers by Mar 1, 2025. Please submit proposals via email by Feb 1, 2025 to NOLTA2025 Special Session Proposal E-mail: ss@nolta2025.org.

AUTHOR'S SCHEDULE

Deadline for Special Session proposals:

Feb 1, 2025

Notification of acceptance for Special Sessions:

Mar 1, 2025

Deadline for submission of papers for Regular and Special Sessions:

Apr 1, 2025

Notification of acceptance for Regular and Special Session papers:

Jun 1, 2025

Deadline for submission of all camera-ready papers:

Jul 1, 2025

Deadline for Early Registration:

Jul 1, 2025

STUDENT PAPER AWARD

The NOLTA2025 Symposium Committee will present student paper awards. The award candidates should be a full student, and the first author and the presenter of the NOLTA2025 paper. The award candidates should indicate their nomination and submit 4-page papers at the initial submission. The selections of the awards will be made by anonymous reviewers based on the quality, originality, and clarity of the paper and the presentation.

IN COOPERATION WITH

Technical Committee on Nonlinear Problems, IEICE NOLTA Society
Technical Committee on Complex Communication Sciences, IEICE NOLTA Society

©Okinawa Convention & Visitors Bureau

For more information, please visit the web site: <https://nolta2025.org>

2025年 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会

2025年6月14日(土)
於: 岡山県岡山市 能楽堂ホールtenjin9

2025年電子情報通信学会NOLTAソサイエティ大会を岡山市の能楽堂ホールtenjin9にて開催いたします。本大会がカバーする学問領域は、非線形系や複雑系の理論とそれらの応用から、実在する非線形システムや複雑システムの解析や制御に至るまで広範に及んでおり、特に電気・電子・通信や情報処理に関する非線形理論・応用に特徴を持っています。皆様からの積極的な論文投稿をお願い申し上げます。

《大会組織》

委員長

荒井 伸太郎 (岡山理科大学)

会計

木村 貴幸 (日本工業大学)
井岡 恵理 (芝浦工業大学)

投稿システム・広報・出版

伊藤 大輔 (岐阜大学)

and more!

【主催】

電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ



【投稿分野】

発表はNOLTAソサイエティが対象とするテーマに関連する研究、調査、設計、開発、工事報告、現地試験報告などで、学術的価値があるものに限ります。

テーマ例 (これに限るものではありません)

「カオス」「フラクタル」「ファジー」「ニューロダイナミクス」
「カオスニューラルネットワーク」「セルラニューラルネットワーク」
「バイオサイバネティクス」「複雑系」「非線形回路とシステム」
「結合発振器」「モデリングとシミュレーション」「精度保証数値解析」
「進化論的計算」「予測とシステム同定」「最適化問題」の他、
非線形理論の「同期」「ネットワーク」「通信」「信号処理」「制御」
「電力システム」への応用、さらに「情報科学」「物理学」「応用数学」
「化学」「神経科学」「光学」「生態学」「経済学」など

【大会Webサイト】

http://www.ieice.org/~nolta/society_conf/2025/



【発表概要】

講演はポスター発表となります。原稿は邦文又は英文のA4版1ページでご執筆ください。査読の上、採否通知を行います。また、原稿の作成が不適切な場合、不採択となることがあります。

【スケジュール】

投稿受付: 2月15日より受付開始
投稿締切: 3月31日
採否通知: 4月10日
最終原稿締切: 4月24日
事前参加登録期間: 4月24日～5月9日(発表者は登録必須)
～6月5日(聴講者)

【お問い合わせ】

info@nls2025.jpn.org

【奨励賞】

大会においてソサイエティの発展に貢献しうる講演論文を発表した35歳以下の著者に対し、NOLTAソサイエティ大会奨励賞を贈呈します。

基礎・境界ソサイエティ運営委員会

会長	和中山 正	(名古屋工業大学)
次期会長	尾上 孝雄	(大阪大学)
ソサイエティ編集長	大橋 正良	(国際電気通信基礎技術研究所)
副会長 (事業担当)	澁谷 智治	(上智大学)
副会長 (システムと信号処理)	田中 聡久	(東京農工大学)
副会長 (音響・超音波)	小野 順貴	(東京都立大学)
副会長 (情報理論とその応用)	小嶋 徹也	(東京工業高等専門学校)
庶務幹事	葛岡 成晃	(和歌山大学)
庶務幹事	傘 昊	(東京都市大学)
会計幹事	小林健太郎	(名城大学)
会計幹事	筒井 弘	(北海道大学)
事業担当幹事	三村 和史	(広島市立大学)
事業担当幹事	黒崎 正行	(九州工業大学)
大会担当幹事	大東 俊博	(東海大学)
大会担当幹事	伊藤 大輔	(岐阜大学)
電子広報担当幹事	西川 広記	(大阪大学)
電子広報担当幹事	古賀 崇了	(近畿大学)
論文誌編集委員長	岡田 実	(奈良先端科学技術大学院大学)
論文誌編集幹事	林 和則	(京都大学)
ソサイエティ誌編集委員長	高島 康裕	(北九州市立大学)
ソサイエティ誌担当幹事	松田 哲直	(埼玉大学)
ソサイエティ誌担当幹事	松井健太郎	(日本放送協会)
特別委員 (ソサイエティ誌多言語化)	鎌部 浩	(岐阜大学)
編集特別幹事 (オブザーバ)	山脇 大造	(日立製作所)
出版委員会委員 (オブザーバ)	藤沢 匡哉	(東京理科大学)
研究会連絡会幹事 (オブザーバ)	高島 康裕	(北九州市立大学)
ハンドブック/知識ベース委員 (オブザーバ)	太田 隆博	(専修大学)
男女共同参画委員会 (オブザーバ)	小西 かつ美	(愛知工業大学)
プラチナクラブ運営委員会 (オブザーバ)	前田 義信	(新潟大学)
事務局	永井 宏	中嶋 彩乃 (電子情報通信学会)

基礎・境界ソサイエティサブソ・研専会議

副会長 (事業担当)	澁谷 智治	(上智大学)
副会長 (システムと信号処理)	田中 聡久	(東京農工大学)
副会長 (音響・超音波)	小野 順貴	(東京都立大学)
副会長 (情報理論とその応用)	小嶋 徹也	(東京工業高等専門学校)
事業担当幹事	三村 和史	(広島市立大学)
事業担当幹事	黒崎 正行	(九州工業大学)
回路とシステム (CAS)	篠宮 紀彦	(創価大学)
情報理論 (IT)	野上 保之	(岡山大学)
信頼性 (R)	門田 靖	(リコー先端研究所)
超音波 (US)	工藤すばる	(東京都立大学)
応用音響 (EA)	小野 順貴	(東京都立大学)
VLSI設計技術 (VLD)	桜井 祐司	(日立製作所)
情報セキュリティ (ISEC)	四方 順司	(横浜国立大学)
信号処理 (SIP)	市毛 弘一	(横浜国立大学)
ワイドバンドシステム (WBS)	落合 秀樹	(大阪大学)
システム数理と応用 (MSS)	山口 真樹	(山口大学)
思考と言語 (TL)	坪田 康	(京都工芸繊維大学)
技術と社会・倫理 (SITE)	辰巳 丈夫	(放送大学)
ITS (高度交通システム) (ITS)	高取 祐介	(神奈川工科大学)
スマートインフォメディアシステム (SIS)	笹岡 直人	(鳥取大学)
イメージメディアアクセシビリティ (IMQ)	工藤 博章	(名古屋大学)
高信頼制御通信 (RCC)	石井 光治	(香川大学)
バイオメトリクス (BioX)	高野 博史	(富山県立大学)
安全・安心な生活と ICT (ICTSSL)	大塚 晃	(事業創造大学院大学)
ハードウェアセキュリティ (HWS)	林 優一	(奈良先端科学技術大学院大学)
光輝会 (SSA) (オブザーバ)	宮地 充子	(大阪大学大学院)
技術の歴史 (オブザーバ)	篠田 庄司	(中央大学)
技術者教育と優良実践 (オブザーバ)	横田 光広	(宮崎大学)
ヒューマンコミュニケーション G (オブザーバ)	松田 昌史	(NTTコミュニケーション科学基礎研究所)
会長 (オブザーバ)	和中山 正	(名古屋工業大学)
次期会長 (オブザーバ)	尾上 孝雄	(大阪大学)
庶務幹事 (オブザーバ)	葛岡 成晃	(和歌山大学)
庶務幹事 (オブザーバ)	傘 昊	(東京都市大学)
研究会連絡会幹事 (オブザーバ)	高島 康裕	(北九州市立大学)
事務局	永井 宏	中嶋 彩乃 (電子情報通信学会)

NOLTA ソサイエティ運営委員会

ソサイエティ会長	夏目 季代久	(九州工業大学)
ソサイエティ次期会長	関屋 大雄	(千葉大学)
庶務幹事	立野 勝巳	(九州工業大学)
庶務幹事	荒井 伸太郎	(岡山理科大学)
会計幹事	木村 貴幸	(日本工業大学)
電子広報担当幹事	加藤 秀行	(大分大学)
大会担当幹事	伊藤 大輔	(岐阜大学)
運営委員	小西 啓治	(大阪府立大学)
運営委員	鳥飼 弘幸	(法政大学)
運営委員	上田 哲史	(徳島大学)
運営委員	清水 邦康	(千葉工業大学)
運営委員	丹治 裕一	(香川大学)
運営委員	長谷川 幹雄	(東京理科大学)
運営委員	青森 久	(中京大学)
運営委員	保坂 亮介	(芝浦工業大学)
運営委員	中野 秀洋	(東京都市大学)
運営委員	内田 淳史	(埼玉大学)
運営委員	上山 憲昭	(立命館大学)
運営委員	佐々木 智志	(湘南工科大学)
運営委員	斎藤 利通	(法政大学)
運営委員	浅井 哲也	(北海道大学)
運営委員	井岡 恵理	(芝浦工業大学)

Fundamentals Review 編集委員会

編集委員長	高島 康裕 (北九州市立大学)
編集委員会幹事 (正)	松田 哲直 (埼玉大学)
編集委員会幹事 (副)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集委員会幹事補佐	宮北 和之 (新潟大学)
編集委員	
編集委員 (CAS)	越田 俊介 (八戸工業大学)
編集委員 (VLD)	新谷 道広 (京都工芸繊維大学)
編集委員 (SIP)	小西 克巳 (法政大学)
編集委員 (MSS)	野村 雅司 (三菱電機株式会社)
編集委員 (IT)	金子 晴彦 (東京科学大学)
編集委員 (ISEC)	海上 勇二 (パナソニックホールディングス)
編集委員 (WBS)	孫 冉 (茨城大学)
編集委員 (US)	大久保 寛 (東京都立大学)
編集委員 (EA)	加古 達也 (日本電信電話株式会社)
編集委員 (NLP)	伊藤 大輔 (岐阜大学)
編集委員 (R)	吉川 隆英 (富士通研究所)
編集委員 (TL)	神長 伸幸 (ミイダス)
編集委員 (SITE)	山肩 大祐 (IGDA 日本)
編集委員 (ITS)	金 帝演 (鶴岡工業高等専門学校)
編集委員 (SIS)	二神 拓也 (愛知学院大学)
編集委員 (IMQ)	山添 崇 (湘南工科大学)
編集委員 (BioX)	河原 智一 (東芝インフラシステムズ株式会社)
編集委員 (RCC)	鍋谷 寿久 (株式会社東芝)
編集委員 (CCS)	眞田 耕輔 (三重大学)
編集委員 (ICTSSL)	宇津 圭祐 (東海大学)
編集委員 (HWS)	矢嶋 純 (富士通株式会社富士通研究所)

(上記に含まれない右側の編集幹事会の委員も編集委員として含む)

学会事務局

永井 宏, 中嶋 彩乃
(電子情報通信学会)

Fundamentals Review 編集幹事会

編集委員長	高島 康裕 (北九州市立大学)
編集幹事会幹事 (正)	松田 哲直 (埼玉大学)
編集幹事会幹事 (副)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集幹事会幹事補佐	宮北 和之 (新潟大学)
編集幹事	
幹事 (総務)	八木 秀樹 (電気通信大学)
幹事 (渉外)	傘 昊 (東京都市大学)
幹事 (企画)	山岸 昌夫 (法政大学)
幹事 (Web: 正)	西川 広記 (大阪大学)
幹事 (Web: 副)	古賀 崇了 (近畿大学)
特別編集幹事 (Vol.18 No.1)	孫 冉 (WBS) (茨城大学)
特別編集幹事 (Vol.18 No.2)	山肩 大祐 (SITE) (IGDA 日本)
特別編集幹事 (Vol.18 No.3)	越田 俊介 (CAS) (八戸工業大学)
特別編集幹事 (Vol.18 No.4)	金子 晴彦 (IT) (東京科学大学)
顧問	貴家 仁志 (東京都立大学)
顧問	白井 宏 (中央大学)
顧問	今井 浩 (東京大学)
顧問	牧野 光則 (中央大学)
顧問	高橋 篤司 (東京科学大学)
顧問	國廣 昇 (筑波大学)
顧問	関屋 大雄 (千葉大学)

編集後記

Vol.18 No. 3をお送りいたします。この号は2025年1月発行ということで、新年最初の発行となります。2024年はいろいろありましたが、2025年が皆様にとって、素敵な年になりますように願っております。今後ともFR誌をよろしくお願いいたします。(高島康裕)

2025年の最初の号を無事に発行することができました。寒さが厳しい季節となりますが、皆様どうかご自愛ください。2025年もFR誌が皆様の知識と交流の場としてお役に立てることを願っております。本年もどうぞよろしくお願ひ申し上げます。(松田哲直)

開催案内をはじめとする「やわらかい記事」の編集を担当しました。ご執筆頂いた皆様並びにご担当頂いた事務局・出版社の皆様にお礼申し上げます。今号が発行されるのは2025年の1月です。21世紀に入って早くも四半世紀です。私が学生会員になったのは更にもう少し前だったでしょうか。ちなみに、3年間の編集幹事会の任期も今号で折り返しです。(松井健太郎)

今号の「受賞者の声 (FR ベストオーサー賞)」の編集を担当いたしました。改めまして、受賞された赤穂様に心よりお祝い申し上げます。FR誌の解説論文は、その分野の第一人者が、他分野の方々を含め幅広い読者に興味をもってもらえるよう執筆されたものです。その中でも、FR ベストオーサー賞の対象となった受賞論説は、特に技術の高さや魅力が高く評価されたものです。この機会に、これまでの受賞論説も併せてぜひご覧頂ければ幸いです。(宮北和之)

今号にて、「研究会に行こう!」の特別編集幹事を担当いたしました。いろいろと至らない点が多く、関係者の皆様にはご迷惑をおかけしてばかりだったと思いますが、その都度サポートを頂き心より感謝申し上げます。ぜひ、それぞれの研究会の記事をご覧頂き、まだ参加したことのない研究会にもご参加を検討頂けますと幸いです。引き続き、どうぞよろしくお願いいたします。(越田俊介)

Fundamentals Review へのお問い合わせ

- ・本誌への御意見、御要望。入手など：fr-ess@ieice.org
- ・Fundamentals Review Homepage：https://www.ieice.org/ess/ESS/Fundam-Review.html

複写される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は、本誌に掲載された著作物の複写複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複写複製を御希望の方は、一般社団法人学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

なお、複写以外の許諾（著作物の転載、翻訳等）に関しては、委託致しておりませんので、直接本会へお問い合わせ下さい。

<問合せ先> 一般社団法人電子情報通信学会
TEL [03] 3433-6691 FAX [03] 3433-6659
著作物利用許諾申請：<https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

Reprographic Reproduction outside Japan

Making a copy of this publication

The IEICE authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights of copyrighted works. If you wish to obtain permission of these rights, please refer to the homepage of JAC (<https://www.jaacc.org/en/>) and confirm appropriate organizations to request permission.

Obtaining permission to quote, reproduce; translate, etc.

Please contact the copyright holder directly.

IEICE Secretariat Office,

E-mail: permission@ieice.org

Permission request form: <https://db.ieice.org/chosaku/sinsei/index-e.php>

Fundamentals Review 第十八巻 第三号

令和七年一月一日発行

発行人	白石 智
発行所	一般社団法人 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ 〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館内) 電話 03-3433-6691(代) FAX 03-3433-6659
WEB化担当	山岡影光
WEB化担当会社	三美印刷株式会社 東京都荒川区西日暮里 6-28-1