

千葉工業大学

プロジェクト研究年報

2025年



千葉工業大学  
プロジェクト研究年報  
2025年度



## 〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅰ）〕

特殊環境向け先進的半導体デバイス用評価システムの開発	佐藤 宣夫 …………… 1
----------------------------	---------------

## 〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）〕

負荷非依存技術による革新的バッテリー充電システムの開発	魏 秀欽 …………… 3
光電融合をめざす磁気光学と増強場・光局在の戦略的協奏	安川 雪子 …………… 5
次世代型光学レーザー材料の創出を指向した $\pi$ 拡張キラルピリリウム塩の開発	原口 亮介 …………… 7
障害物のある水中環境に適合するヘビ型ロボットの移動様式の構築	青木 岳史 …………… 9
乾燥耐性をもつクマムシの細胞膜保護機構の解明	近藤 小雪 …………… 11
リボソームの翻訳機能に着目したサルコペニアの発症機序の解明	川西 範明 …………… 13
言葉と感情の相互変換を可能にする基盤技術の研究開発	熊本 忠彦 …………… 15
日本企業の財務情報と非財務情報（ROESG モデル）に関する実証研究	東 壯一郎 …………… 17

## 〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅲ）〕

ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)の海洋生分解性の調査	菅根 海人 …………… 19
スパイクニューラルネットワークへのNeural Circuit Architectural Prior の適用とその影響の解明	三木 大輔 …………… 21
二液相分離型合金を用いた新規潜熱蓄熱材の開発に関する研究	清宮 優作 …………… 23

## 〔科研費採択者助成金〕

次世代型メタルサポート SOFC の電極損傷解明と制御モデル構築	原 祥太郎 …………… 25
初期ひずみをモデルパラメータとした構造物の高速逐次データ同化法に関する研究	秋田 剛 …………… 27
宇宙機を対象とした亜酸化窒素の連鎖的発熱反応による事故防止技術	和田 豊 …………… 29
QCM への自然吸着を制御した排気ガス中の親水性・疎水性微粒子のリアルタイム分離計測	安藤 毅 …………… 31
PO <sub>4</sub> 鎖を鋳型とした結晶水の配列制御による超広域温度作動型プロトン導電体の創成	松田 泰明 …………… 33
半乾燥草原のプラヤに注目したダストストーム発生条件の推定	松島 大 …………… 35
インパクト型慣性アシストによるロボットと人間の運動能力向上の研究	米田 完 …………… 37
人工塩基を含むアプタマーの立体構造と作用機序の解明およびアプタマーの改良	坂本 泰一 …………… 39

# 目次

2025年千葉工業大学附属研究所 プロジェクト研究年報

単細胞アメーバの多細胞化における祖先的細胞間コミュニケーションの分子機構解明	成田 隆明	41
高度好熱菌の細胞膜を構成する特異な脂質分子種および生成遺伝子の解明と進化の道筋	根本 直樹	43
プログラム動作への意識付けを指向した TDD 支援システムと理解状況分析手法の開発	國宗 永佳	45
フィジカル物理特性に基づき安全性と処理効率を両立するセキュリティ技術	駒野 雄一	47
色分子動力学の長時間大規模計算による高密度熱力学的諸量の導出	安武 伸俊	49
AI と輸送のモーダルシフトを統合した持続可能な物流システムの開発に関する研究	白井 裕	51

〔科学研究費助成事業一覧〕	53
---------------	----

# 〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅰ）〕





研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (I)  
 研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30  
 研究課題名 (和文) : 特殊環境向け先進的半導体デバイス用評価システムの開発  
 研究課題名 (英文) : Development of an Evaluation System for Advanced Semiconductor Devices Used in Severe Environments  
 研究者 : ○佐藤 宣夫 千葉工業大学  
 SATOH Nobuo 工学部 機械電子創成工学科 教授  
 小田 昭紀 千葉工業大学  
 ODA Akinori 工学部 電気電子工学科 教授  
 魏 秀欽 千葉工業大学  
 WEI Xiuqin 工学部 電気電子工学科 教授  
 林 真一郎 千葉工業大学  
 HAYASHI Shin-Ichiro 工学部 電気電子工学科 助教

## 1. はじめに

集積回路と半導体微細加工技術の進歩により、情報技術が発展している。またパワーエレクトロニクス分野では、半導体デバイスの多並列化によって大電流対応が可能になっている。しかしながら、Si 半導体では耐圧性能と低オン抵抗の両立が難しいため、SiC や GaN などワイドギャップ半導体材料の研究開発が進んでいる[1][2]。

電化製品の電源回路は故障を避ける必要があり、構成回路素子の寿命評価は重要である。主な回路素子は電気抵抗のほか、インダクタ、キャパシタ、ダイオード、トランジスタなどである。ここで特に半導体デバイスは故障しやすく、具体的には過電圧や熱による破損が起こることが想定される。

パワー半導体デバイスは故障を避けるべく設計・製造されている(図1参照)が、電源回路では設計者が予期しない寄生インピーダンスによる共振現象が発生する。その結果、サージ電圧で絶縁破壊が起こると、デバイスが故障に至ることになる。そこで、走査型プローブ顕微鏡によるナノスケール観測が、内部の電界集中箇所を特定する手法として注目されている[3]。

以上を踏まえ、SiC, GaN, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などのワイドバンドギャップ半導体材料を使ったデバイスが実用化されつつある。これらの劣化や故障を根本的に防ぐため、故障現象の物理的説明が重要となる。本研究では、電圧印加下でナノスケール観測できる多機能走査型プローブ顕微鏡を新たに開発し、熱

加速試験で劣化・故障したデバイスを観測する。さらにシミュレーションでデバイス動作を再現し、半導体デバイスの限界を評価する方法を確立することを目的とする。

## 2. 研究内容

具体的な取り組みは、4項目に分けて、それぞれの主担当と副担当を決めて実施している旨、以下に述べる。

### ドーパント濃度の定量化(主担当:佐藤)

先端半導体材料の物性把握のため、C-V特性からドーパント濃度を測定する。独自手法でカンチレバー・センサの2次共振モードを使用して、キャリア濃度と極性を高感度で検出を試みている。

### 劣化・故障デバイスの評価(主担当:林/副担当:佐藤)

ジュール熱発生箇所をカンチレバー振動減衰量で取得し、さらに、磁界検出による逆解析で電流経路を明らかにすることで、評価データを蓄積している。

### パワーデバイス回路設計(主担当:魏/副担当:佐藤・林)

SiC, GaNなどの半導体デバイスを採用し、特殊環境対応やソフトスイッチング技術を活用、低損失回路設計に取り組んでいる。

### デバイスシミュレーション解析(主担当:小田/副担当:佐藤)

ナノスケール観測結果をもとにして、「ポアソン方程式」「電流連続の式」で数値シミュレーション解析を行い、劣化・故障の事象の解析のための基盤準備を行っている。

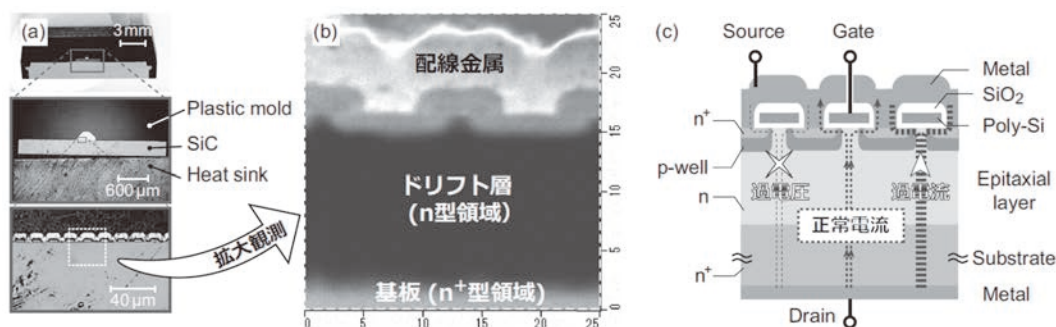


図1. 市販のSiC製パワーMOSFET(耐圧1200V/電流容量40A) (a) デバイス研磨処理した際の光学顕微鏡像、(b) 観測した微分容量像(観測走査領域25 $\mu$ m角)、(c) デバイス構造断面模式図。

### 3. 研究成果

これまでに表面形状像、表面電位像、微分容量像の3つの情報を同時かつ同一領域でマッピングできる多機能型プローブ顕微鏡を独自に開発済みである。当該装置特徴の1つは、半導体デバイスにおいて重要となる「空乏層」、それはキャリアがない領域であることから、本来においては計測が困難である。しかしながら、カンチレバー・センサによる静電気力の高感度検出として高次振動モードを採用することによって、可視化を実現している点にある。さらには、エネルギー散逸画像で発熱箇所の特定、さらには磁界解析で電流経路も明らかにする装置へと改良を実施している。

本研究の独自性については、電圧を印加した状態、つまり動作しているパワー半導体デバイスの形状、電位、キャリア濃度、発熱箇所、電流導通経路、それら5つの情報を取得できるナノスケール観測、実測に基づいたデバイスシミュレーション解析を組み合わせていることである。こうした解析手法の確立によって、パワー半導体デバイスの動作理論限界(許容電流量、スイッチング速度)を定量化する取り組みにある。

研究課題における新規性を示す一例は、図2に示すように金属細線に直流電流を導通させた際のナノスケール観測に成功していることにある。ここで図 2(a)は表面形状像、(b)は+30mA 導通時の磁界強度像、(c)は得られた観測結果についての考察模式図、(d)は磁界強度の逆解析にて得られた電流分布像である。さらには、ここで(e)においては、電流の逆方向(-30mA)導通により、磁界強度が反転している様子を示している。

この電流導通経路を可視化するための要素技術は、特許申請中【特願 2022-202557, 「交番磁気力顕微鏡用試料台」】であることを付記する。

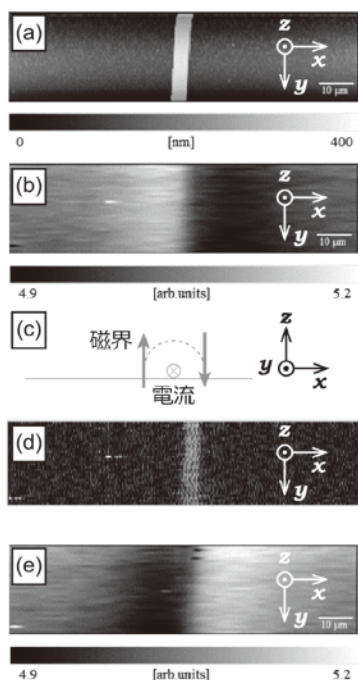


図2. 金属細線の観測結果。(a) 形状像、(b) 磁界強度像@+30 mA、(c) 模式図、(d) 電流導通経路、(e) 磁界強度像@-30 mA。

### 4. まとめと今後の課題

電化製品の電源回路に不可欠なパワー半導体デバイスの通電時のナノスケール評価装置の開発、その手法について述べた。観測対象はSiC製パワーMOSFETなどの先端半導体材料であり、走査型プローブ顕微鏡を使ったナノスケール観測による評価解析の一例について報告した。

今後について、先端半導体材料によって高電圧・大電流制御を可能としたパワー半導体デバイスのナノスケール動作解析を通じ、理論限界や不良箇所の特定・解析技術の確立を目指していく。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 岩井 光太, 鶴岡 智彦, 浅倉 聡, 川本 裕之, 吉田 勝正, 佐藤 宣夫, 「水溶液中でのプラズマ生成によるオゾンを使ったヨウ素の酸化現象」, 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), 144 巻, 10 号, p. 392-398, (2024).
- (2) Masaki Sumi, Kazusana Nagashima, Tomoyuki Tamura, Nobuo Satoh, “A Nondestructive Method to Evaluate of DC-DC Converters Using Subsurface Magnetic Field Imaging with Pulse Width Modulation”, *IEEE Journal of Industry Applications*, 13 巻, 3 号, p. 301-307, (2024).
- (3) 角 真輝, 大山 祐生, 佐藤 宣夫, 「交番磁気力顕微鏡を用いた直流電流路周囲の磁場勾配観測」, 電気学会論文誌E (センサ・マイクロマシン部門誌), 2024, 144 巻, 4 号, p. 62-67, (2024).
- (4) 塩野 友也, 田村 知孝, 仲野 陽, 佐藤 宣夫, 「絶縁型 $\Phi_{2n}$ 級 DC-DC コンバータの開発とその評価」, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), 144 巻, 3 号, p. 149-155, (2024).

参考文献

- [1] 松波弘之ら, 「半導体 SiC 技術と応用」, 日刊工業新聞社 (2003).
- [2] B. J. Baliga, “Fundamentals of Power Semiconductor Devices”, Springer (2008).
- [3] 長康雄, 応用物理, Vol.85, pp. 560-567, (2016).

# 〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）〕





研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 負荷非依存技術による革新的バッテリー充電システムの開発

研究課題名 (英文) : Development of an Innovative Battery Charging System Based on Load-Independent Technology

研究者 : 魏 秀欽

千葉工業大学

WEI Xiuqin

工学部 電気電子工学科 教授

## 1. はじめに

リチウムイオン電池やスーパーキャパシタに代表される次世代蓄電デバイスは、電気自動車、IoT 機器、モバイル機器など Society 5.0 を支える基盤技術であり、それらに対応する充電システムにはさらなる小型化・高効率化・高信頼化が強く求められている。特にバッテリー充電では、安全性を確保しつつ高速充電を実現するため、充電初期には定電流 (Constant Current: CC) で充電し、端子電圧が許容値に達した後は定電圧 (Constant Voltage: CV) に切り替える CC/CV 充電方式が広く用いられている。従来、この CC/CV 制御はフィードバック制御系を用いて実現されてきたが、MHz 帯以上の高周波電源では制御系の設計が困難となり、回路の複雑化やコスト増加、さらにはスイッチング損失の増大を招くという課題があった。これに対し、本研究では「負荷非依存 (Load-Independent: LI) 技術」に着目し、制御系を用いずに負荷変動に対して定電流または定電圧特性を本質的に実現できる高周波電力変換技術を、バッテリー充電システムへ応用することを目的としている。

## 2. 研究内容

### (1) 負荷非依存 1 入力多出力ワイヤレス給電システムにおける寄生成分モデルの高度化

本研究ではまず、MHz 帯で動作する負荷非依存単入力多出力 (Single-Input Multiple-Output: SIMO) ワイヤレス給電 (Wireless Power Transfer: WPT) システムを対象とし、スパイラル空芯コイルに内在する寄生成分を高精度にモデル化する手法を検討した。従来の解析では、コイルのインダクタンス成分とその一部の寄生抵抗のみを考慮することが多く、高周波領域における実際の動作との乖離が問題となっていた。

これに対し、研究成果りでは、図 1 に示すようにコイルのインダクタンスに加え、寄生容量、並列抵抗 (誘電損失)、直列抵抗 (導体損失) を含む包括的な等価回路モデルを導入した。このモデルを用いることで、自己共振周波数近傍における位相ずれや損失要因を設計段階で定量的に評価することが可能となり、負荷変動によらずゼロ電圧スイッチング (Zero-Voltage-Switching: ZVS) 条件と一定な出力を維持するという負荷非依存動作を満足する設計精度が大幅に向上した。さらに、図 2 に示す提案モデルを負荷非依存 EF 級インバータと複数の D 級整流器からなる SIMO-WPT システムに適用した。図 3 に実験セットアップを示しており、受電部を赤線で、送電部を青線で囲んでいる。

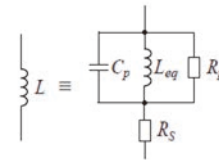


図 1 提案したコイルの等価回路モデル

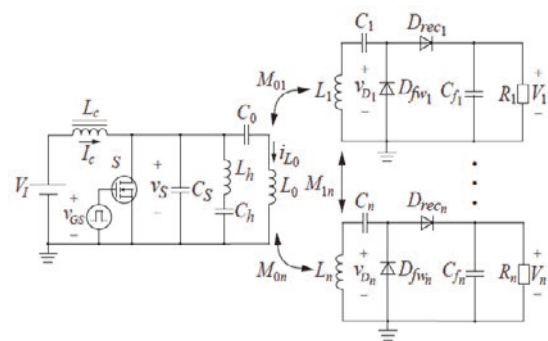


図 2 負荷非依存 SIMO-WPT システム

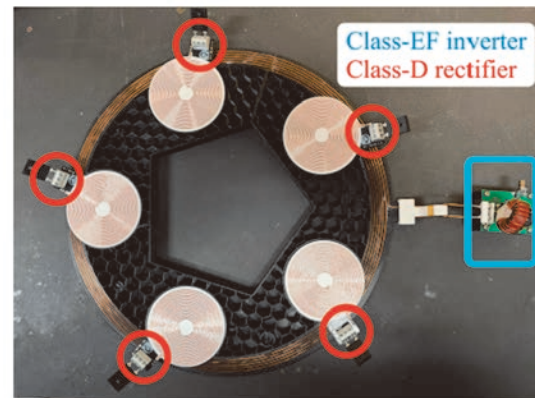


図 3 試作した負荷非依存 SIMO-WPT システム

図 4 に理論および実験から得られた波形を示している。図 4 より、理論解析と実験結果の良好な一致を確認した。また、負荷変動に対して各受電側の出力電圧が一定に保たれること、ならびに送電側で ZVS が維持されることを確認した。

### (2) CC/CV 切替可能な負荷非依存 WPT 充電システムの検討

次に、本研究では負荷非依存技術を応用した CC/CV 切替型ワイヤレス給電充電システムの検討を行った。従来の負荷非依存回路では、回路トポロジーにより CC 特性または CV 特性のいずれか一方のみが実現可能であり、両者を単一回路で切り替えることは困難であった。

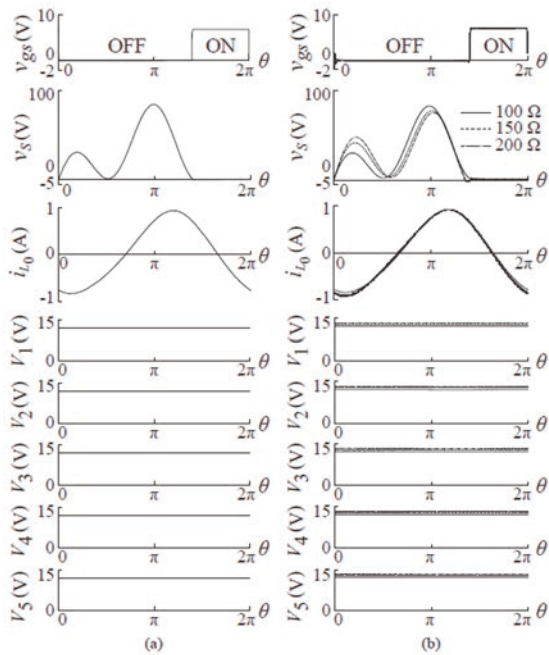


図4 比較。(a) 理論波形。(b) 実験波形

研究成果<sup>2)</sup>では、図5に示す負荷非依存E/F級インバータと電流駆動型D級整流器に加え、受電側に降圧型DC-DCコンバータを組み合わせる新しい構成を検討した。この構成により、送受電間には一切のフィードバック通信を設けることなく、受電側のデューティ比制御のみでCCモードおよびCVモードの切替を実現できることを示した。すなわち、制御を受電側で完結している。

図6にCC/CVモード動作時における解析結果(破線)および実験結果(実線)の波形を示している。ここで、 $d$ はコイル位置ずれ、 $R_l/R_L$ は抵抗値と定格抵抗値の比を表す。図7には $d=0$  mmにおける $R_l/R_L$ の変動時の出力電流 $I_o$ 、出力電圧 $V_o$ 、および電力伝送効率 $\eta$ の解析結果と実験結果を示す。これらの結果より、理論解析に基づき設計した回路についてMHz帯(6.78 MHz)での実験を行った結果、コイル位置ずれおよび負荷変動が生じた場合でも、CC/CV各モードにおいてZVSが維持され、高い電力変換効率が得られることを確認した。これらの成果は、将来のバッテリー充電用WPTシステムにおいて、制御簡素化と高効率化を同時に達成する有力な技術基盤となる。

### 3. まとめ

本研究では、負荷非依存技術を基盤として、制御系を用いずに高周波動作下でCC/CV充電特性とZVSを同時に実現可能な革新的なバッテリー充電システムの確立を目指し、理論解析および実験検証を行った。まず、MHz帯で動作する負荷非依存SIMO-WPTシステムを対象として、スパイラル空芯コイルに内在する寄生容量および寄生抵抗を含めた包括的な等価回路モデルを構築した。提案モデルを用いることで、高周波領域における損失要因や位相特性を設計段階で定量的に評価可能となり、負荷変動下においてもZVS条件および一定出力を維持できることを理論お

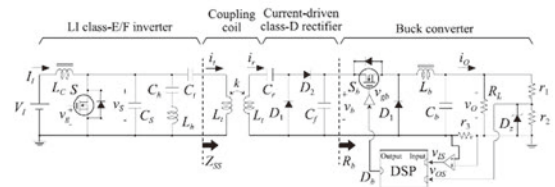


図5 CC/CV切替型ワイヤレス給電充電システム

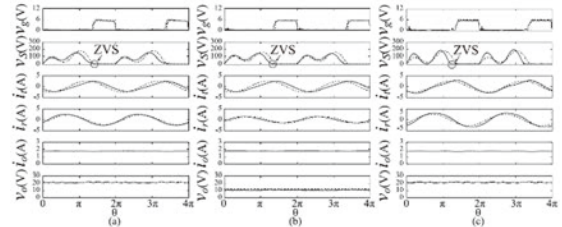


図6 CC/CVモード動作時における解析結果(破線)および実験結果(実線)の波形。(a)  $d=0$  mmかつ $R_l/R_L=1$ の場合。(b)  $d=0$  mmかつ $R_l/R_L=5$ の場合。(c)  $d=20$  mmかつ $R_l/R_L=1$ の場合。

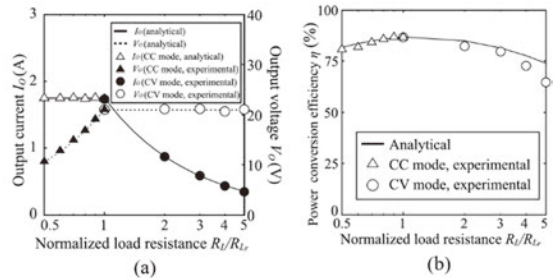


図7  $d=0$  mmにおける $R_l/R_L$ の変動時の解析結果と実験結果。(a) 出力電流 $I_o$ と出力電圧 $V_o$ 。(b) 電力伝送効率 $\eta$

よび実験の両面から確認した。さらに、負荷非依存技術を応用したCC/CV切替型ワイヤレス給電充電システムを提案し、送受電間のフィードバック通信を必要とせず、受電側の動作のみでCC/CVモード切替を実現できることを示した。MHz帯(6.78 MHz)における実験結果から、コイル位置ずれおよび負荷変動が生じた場合でも、CCおよびCV各モードにおいてZVSが維持され、高い電力変換効率が得られることを確認した。

以上より、本研究で得られた成果は、制御簡素化、小型・高効率化を同時に達成可能な次世代バッテリー充電用ワイヤレス給電システムの有力な基盤技術を提供するものであり、今後のさらなる高周波化および実用展開に向けた重要な研究成果である。

### 本研究に関する主な発表論文

- (1) T. Yasuda et al., "A comprehensive parasitic component model for spiral air-core coils in MHz load-independent single-input multiple-output wireless power transfer system," in *Proc. IEEE ISCAS2025*, London, UK, May 2025, 5 pages.
- (2) A. Komanaka et al., "CC/CV ZVS WPT system without any feedback from receiver to transmitter," in *Proc. IEEE ISCAS2025*, London, UK, May 2025, 5 pages.

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)  
 研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 光電融合をめざす磁気光学と増強場・光局在の戦略的協奏

研究課題名 (英文) : Strategies for Magneto-Optics and Enhanced Fields/Light Localization aiming for Optoelectronic Integration

研究者 : ○安川 雪子 千葉工業大学  
 YASUKAWA Yukiko 工学部 電気電子工学科 教授

はじめに

磁気光学効果の増幅は、光アイソレータ、光検知式バイオ化学センサをはじめ「光トランジスタ」や「光オペアンプ」など光機能デバイスの性能向上を利用した光電融合素子につながるかと期待されている。

本研究では磁気光学効果の増幅を目指し、シミュレーションによる磁気光学材料の設計および解析、マグネトロンスパッタ法と電子線描画装置を利用した設計材料の作製について研究した。本研究では (1) 光干渉を使用した磁気光学キャビティ (2) ナノ粒子を導入した磁気光学キャビティ (3) フォトニクス結晶の光制御を利用した磁気ナノフォトニクスの構造をもつ3種類の磁気光学材料を研究対象とした。垂直磁化積層膜を利用した磁気光学キャビティ効果について、有限要素法 (FEM) に基づきシミュレーションを利用して理論解析を行った。

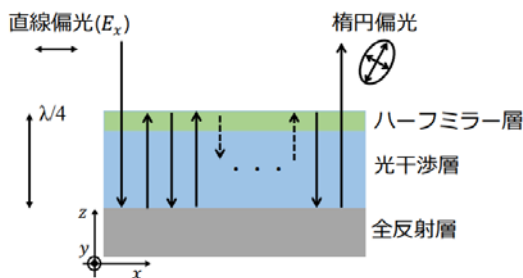


図1 基本となる磁気光学キャビティ構造。ハーフミラー層、光干渉層、全反射層のいずれかに磁性層を挿入する。

1. 光干渉を使用した磁気光学キャビティ

磁気光学キャビティは(ハーフミラー層/光干渉層/全反射層)積層構造を基本とし、いずれかの層に磁性膜を導入することで構成される。磁性層の厚さが十分に厚い場合には、磁性層は磁気光学全反射層として機能する。

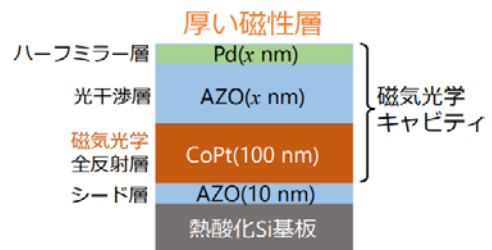


図2 厚い磁性層を内包する磁気光学キャビティ構造

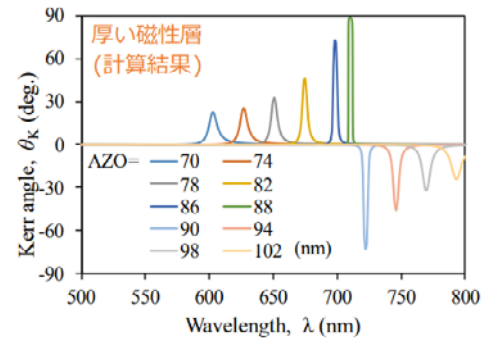


図3 図2の磁気光学キャビティ構造が示す磁気光学効果

一方、薄い磁性膜を光干渉層に用いた場合、磁性層は磁気光学干渉層として機能する。どちらの構造においても、上限まで磁気光学効果の増大が可能であることを明らかにした。また測定系の揺らぎを加味することにより、シミュレーションと実験結果は一致した。このことより、シミュレーションは磁気光学材料の設計や解析に有用であることを確認した。

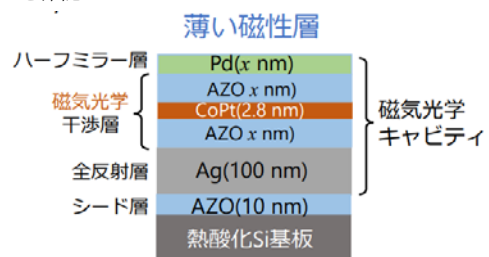


図4 薄い磁性層を内包する磁気光学キャビティ構造

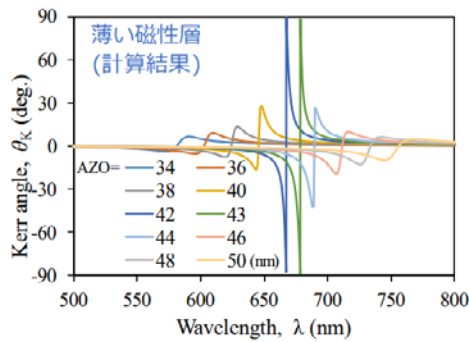


図5 図4の磁気光学キャビティ構造が示す磁気光学効果

また光干渉を使用した磁気光学キャビティのバイオ化学センサへの応用についても検討した。測定系の揺らぎを考慮した磁気光学キャビティを利用したセンサは、現在汎用されているバイオ化学センサである表面プラズモン (SP) センサの7倍程度の感度を有することが明らかとなった。なお測定系の揺らぎの最大要因は入射光の波長分散であり、波長分散の小さなレーザを用いることでさらなるバイオ化学センサの高感度化が可能であろう。SPセンサとは異なり磁気光学キャビティは入射光に依存しないため、高いロバスト性と耐ノイズ性を持つ。よって磁気光学キャビティをバイオ化学センサに応用することで、SPセンサより高感度なセンサの実現を期待できる。

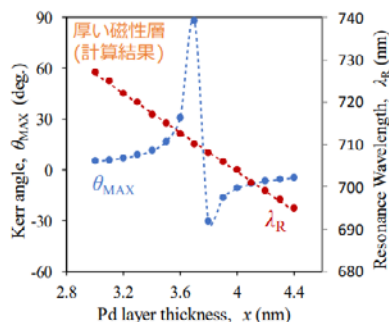


図6 図2の磁気光学キャビティ構造を利用した水素センサ。

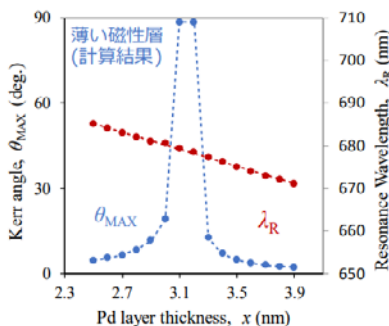


図7 図4の磁気光学キャビティ構造を利用した水素センサ。

## 2. ナノ粒子を導入した磁気光学キャビティ

本研究ではナノ粒子の局在表面プラズモン (LSP) とキャビティの強結合により、広波長域にわたる磁気光学効果の増大を目指した。ここでは Ag 薄膜をスパッタ時に加熱成

膜することにより、Ag ナノ粒子を得た。この Ag ナノ粒子の LSP を利用する。

スパッタ時の加熱温度が上がるにつれ Ag の凝縮が進み、Ag は自己組織的に 2 次元粒子を形成し、粒子の高さが高くなった。実験結果では磁気光学効果の増大の広帯域化を実現することはできなかったが、通常では見られない特異な極 Kerr ループを観測した。特異な極 Kerr ループとは、磁気光学極性および磁気光学効果による保磁力が異なる 2 つの領域で構成されたループである。この 2 つの領域は、Ag ナノ粒子の有/無に起因する。この 2 つの領域それぞれは、キャビティとして機能していることが明らかとなった。今後は膜厚や加熱温度を検討し、ナノ粒子のサイズと高さ・隣接粒子間距離や粒子密度を制御することで、LSP とキャビティの強結合を活かした広帯域にわたる磁気光学効果の増大を目指す。

## 3. フォトニクス結晶の光制御を利用した磁気ナノフォトニクス

シミュレーションにより、磁気ナノフォトニクスは光を局在化させることによって磁気光学効果を増大できることを明らかにした。さらに磁気光学効果を上限まで増大できる構造も探索した。

実際に成膜と微細加工で磁気ナノフォトニクスを作製し磁気光学効果を測定したところ、効果の増大を確認できた。しかしながら作製した磁気ナノフォトニクスはシミュレーションと同程度の磁気光学効果を発現するに至っていない。この主たる原因は、磁気ナノフォトニクスのエッチングを設計通りにできていない点にあると考えている。

## 4. まとめ

本研究では、磁気光学キャビティをベースとする様々な構造において磁気光学効果の増大が可能であることを、シミュレーションによる理論研究からも実際の試料からも実証することができた。

### 本研究に関する主な発表

- (1) 劉家祥, 安川雪子, 山根治起, 磁気光学キャビティにおける磁気光学効果の増大とバイオ化学センサへの応用, 電気学会論文誌 A, **145**, 258-264 (2025).
- (2) 劉家祥, 安川雪子, 長谷川崇, 山根治起, ナノ粒子を導入した磁気光学キャビティの磁気光学特性, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-K506-2 (2025).
- (3) 劉家祥, 安川雪子, 山根治起, 磁気光学キャビティのバイオ化学センサへの応用, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 19a-P06-3 (2024).
- (4) 劉家祥, 安川雪子, 長谷川崇, 山根治起, 磁性ナノ構造を導入した磁気光学キャビティの磁気光学特性, 第 48 回日本磁気学会学術講演会, 27aA-6 (2024).

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 次世代型光学レーザー材料の創出を指向した $\pi$ 拡張キラルピリリウム塩の開発

研究課題名 (英文) : Development of  $\pi$ -Extended Chiral Perylium Salts Aiming at the Creation of Next-Generation Optical Laser Materials

研究者 : O原口 亮介 千葉工業大学  
HARAGUCHI Ryosuke 工学部 応用化学科 准教授

## 1. はじめに

ピリリウムイオンは、正電荷を有する酸素含有イオン性芳香族化合物であり、高強度で長波長の蛍光特性を示す (図1)。そのため、光学レーザーや生体蛍光イメージングなど、様々な分野で応用可能な化合物群である。また、HOMO-LUMO ギャップが小さいことから光レドックス触媒としての利用や、<sup>1</sup> 低い LUMO を活かして反応中間体としても広く利用されてきた (図2)。<sup>2</sup> 一方、分子の“利き腕”の性質であるキラル特性は、蛍光特性の情報が2倍に増えるため、光通信などの高度な光情報プロセッシングへの応用に重宝される。しかし、「キラルピリリウムイオン」は、その合成報告すらこれまでほとんどなかった。これは、従来の合成法は利用可能な原料が限定的であり、キラル特性を導入することが困難なためであると考えられる (図3)。



図1 ピリリウムイオンの性質

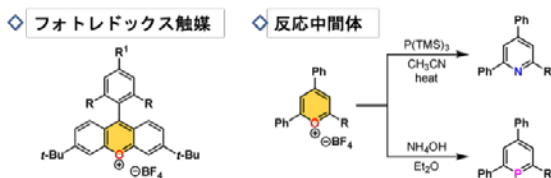


図2 ピリリウムイオンの有用性

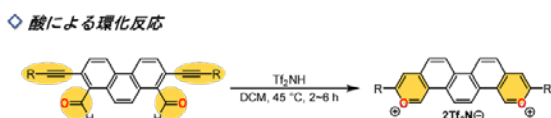


図3 代表的なピリリウムイオンの合成法

このような背景のもと申請者は、フェノール性水酸基を酸素環構築に必要な唯一の官能基とする新規なピリリウムイオン合成法を考案した (図4)。本手法では、フェノール類のプロパルギル化、分子内ヒドロアリール化、および酸化的芳香族化の3段階を経てピリリウム骨格を構築する。本研究では、新規ピリリウムイオンの合成法を開発するとともに、キラルなフェノール類であるBINOLを本手法に適用することで、キラルピリリウムイオンの合成およびその光学特性評価を目的とする。

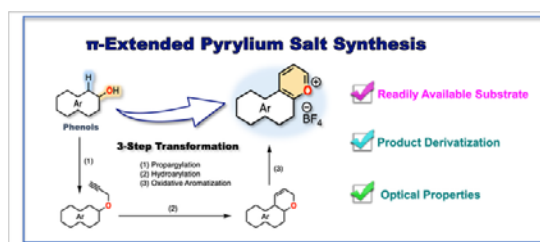


図4 ピリリウムイオンの性質

## 2. 研究の内容

まず始めに、フェノール類のプロパルギル化の最適の反応条件を図5に示す。反応条件を様々検討した結果、フェノール類に対して、プロパルギルブロミドを1.1当量、炭酸カリウムを2当量用いて、アセトン溶媒中、室温、24時間反応させたところ、様々なプロパルギルエーテルを良好な収率で得た。構造決定には<sup>1</sup>Hおよび<sup>13</sup>C NMRにより行った。

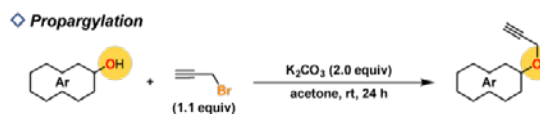


図5 フェノール類のプロパルギル化

次に、プロパルギルエーテル類の分子内ヒドロアリール化の最適の反応条件を図6に示す。反応条件を様々検討した結果、プロパルギルエーテル類に対して、カチオン性ホス

フィン配位子を 5 mol %, 塩化白金を 5 mol %用いて,1,2-ジクロロエタン中, 30 °C, 18 時間反応させたところ, 様々なクロメン類を良好な収率で得た. 構造決定には  $^1\text{H}$  および  $^{13}\text{C}$ NMR により行った.

#### ◆ Intramolecular Hydroarylation

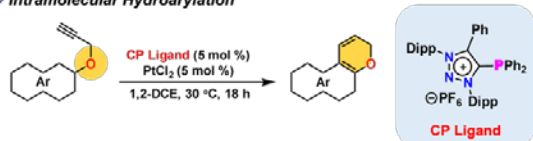


図6 分子内ヒドロアリール化

なお, 本反応における配位子効果は非常に大きい. 図7には, 分子内ヒドロアリール化反応において, 用いる配位子を変えた際の生成物の収率を記載している.  $\pi$ アクセプター性が高いカチオン性ホスフィン配位子を用いると生成物は88%で得られるのに対して, トリフェニルホスフィンやトリフェニルホスファイトを用いると, 生成物の収率は大きく低下した. また配位子を用いない場合も収率は34%まで低下した.

#### ◆ Intramolecular Hydroarylation

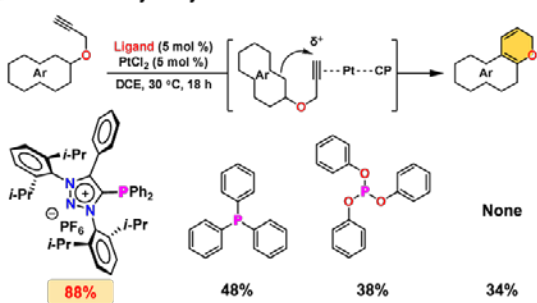


図7 配位子効果

#### ◆ Synthesis of Pyrylium Salts

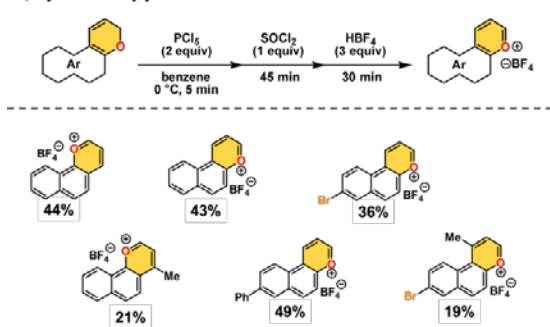


図8 配位子効果

次に, クロメン類の酸化的芳香族化反応の最適の反応条件を図8に示す. 反応条件を様々検討した結果, クロメン類に対して, 五塩化リンを2当量, ベンゼン溶媒中, 0 °C, 5分反応させた後, 塩化チオニルを1当量加え, 45分間攪拌し, 最後に  $\text{HB}_4$  を3当量加え, 30分間反応させることで, ピリリウムイオンを合成した. 図8の下部に示すように, 様々な置換形式のピリリウムイオンが本手法により合成可能

であった. 構造決定には  $^1\text{H}$  および  $^{13}\text{C}$ NMR により行った.

#### ◆ ピリリウムイオン ( $\text{O}^+$ ) $\rightarrow$ ピリジニウム ( $\text{N}^+$ )

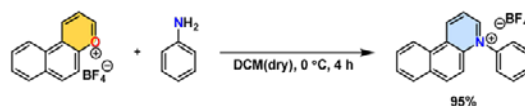


図9 ピリリウムイオンの変換反応

ピリリウムイオンの高い反応性を活かして, ピリジニウムイオンへの変換反応を達成した (図9). 具体的には, ピリリウムイオンに対してアニリンを加えて, 無水ジクロロメタン溶媒中, 0 °C, 4時間反応させたところ, 対応するピリジニウムイオンが95%収率で得られた.

最後に, 合成したピリリウムイオンの光学特性を調べるために, 紫外可視吸収スペクトルを測定した (図10). その結果, 酸素の位置が異なるだけのピリリウムイオンの2つの異性体において, 吸収スペクトルが明確に異なることを明らかにした. 特に, 長波長領域では1-ナフトール由来のピリリウムイオン1のみが吸収を示し, これは見た目の色としての違いにも反映されていた.

#### ◆ UV-vis スペクトル ( $1 \times 10^{-3}$ M DCM)

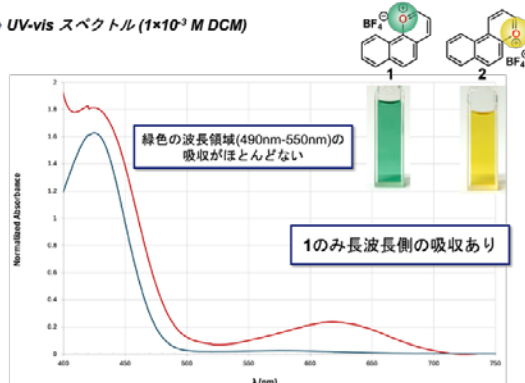


図10 ピリリウムイオンの変換反応

### 3. まとめ

本研究では, フェノール類を出発物とするピリリウムイオンの新規合成法を確立した. 本手法によって, 様々なフェノール類からピリリウムイオンの合成が可能であることを示した. 今後は, 光学活性なフェノール類であるBINOLを出発物に用いることで, キラルなピリリウムイオンを合成し, そのキラルな光学特性を明らかにしていくことを目指す.

#### 参考文献

- (1) Pistritto, V. A. *et al. J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 17187–17194.
- (2) Van der Velde, N. A. *et al. Tetrahedron Lett.* **2012**, *53*, 5742–5744.

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 障害物のある水中環境に適合するヘビ型ロボットの移動様式の構築

研究課題名 (英文) : Generation of Adaptive Locomotion for Snake Robots in Underwater Environments Containing Obstacles

研究者 : ○青木 岳史 千葉工業大学  
AKI Takeshi 先進工学部 未来ロボティクス学科 教授

## 1. はじめに

近年、農業従事者の高齢化や後継者の不足が問題となっている。特に農作業の中でも水田内の除草作業は多くの作業時間と身体的負担を伴う為、この課題を解決する除草ロボットの開発が求められている。本研究では除草方法として、泥を攪拌し光合成を阻害するアイガモ農法に着目する。しかし、従来研究の水田除草ロボットはスクリュエやクローラ等の無限回転機構を移動に使用するため、水草や泥などが浮遊している水中環境などでの使用は難しい。水草などの絡まり易い浮遊物のある水中環境では魚や海へびのような往復運動によって推進する移動方法が有効であり、劣悪な環境下での作業にはヘビ型ロボット必要であると考える。

本研究では、水田内を遊泳により移動するヘビ型ロボットの開発を目的とし、水田内での自律移動を行う試作機の開発と、障害物のある環境下での移動に適した推進方法の検討を行う。さらに水田内での実証実験に向けた試作機の動作の確認について行った。

## 2. 水田除草ヘビ型ロボットの試作

先行研究で開発したヘビ型ロボットを基礎として、より効率の良い推進を可能とするために新たな試作機の開発を行った。試作したヘビ型ロボットは11個の単位節で構成し、上部と下部パーツでスタイルフォームと防水サーボモータを挟み込む構成とした。上部、下部パーツは全て3Dプリンタで造形しており、材料はPLA (Poly Lactic Acid) を使用した。今回試作したヘビ型ロボットを図1に示す。試作機の仕様は、全長:1390mm、全幅:67mm、全高:93.5mm、重量:6.3kgである。



図1 試作した水田除草ヘビ型ロボット



図2 再設計した単位節

図2に再設計を行った単位節を示す。先行機体からの主な改良点としては、単位節の再設計を行ったことである。単位節の横幅を140mmから67mmに縮小し、浮力を最適化することによって外形の突起物を廃し、流線形の外形へ変更した。これにより推進効率が向上し、ヘビ型ロボットの効率の良い推進方法について検討できるようになった。

## 3. 推進方法の検討

ウナギやウミヘビは種の種類は異なるが、長い胴体とヒレ状の尾を持ち、波状運動と呼ばれる胴体の連続的な屈曲動作によって水を後方へ押し出し推進する。特に長い胴体を持つ魚の運動はウナギ型 (Anguilliform) と呼ばれる。しかしウナギやウミヘビなどでも効率よく速く泳ぐ場合はアジ型 (Carangiform) に近い運動を行う。また陸上を移動するヘビは鱗と地面との摩擦の異方性を用いて、蛇行運動によって移動を行う。陸上では水中と比べて胴体を拘束する地面との摩擦力が強い為、頭部から尾部まで胴体全てが同じ軌跡を通過することができ、障害物を回避しながらの移動に適している。魚の波状運動は移動効率に優れるが、障害物と干渉する環境では運動の生成が難しく、蛇行運動による移動は障害物回避には優れるが、胴体周りの水が逃げ難いため移動効率は低くなる。本研究では水田内の環境に適した蛇行運動を採用し、効率の良い波形と動作周期を求めた。

## 4. 水田での移動実験

水田内の水面でヘビ型ロボットを蛇行推進で移動させ、先行機との比較実験を行った。今回の実験では、移動速度、

水深、稲の長さを計測し移動性能の評価を行った。

田植えから1週間目の実験について図3に示す。水深は100[mm]、稲の高さは100mmであり、稲に影響を与える事無く、泥の攪拌は正常に行う事が出来た。また、水田内での速度は190[mm/s]であった。

図4に2週目の実験を示す。水深は120mm、稲の高さは310mmであり、泥の攪拌は正常に行う事が出来た。また、水田内での速度は最大で220mm/s、水深が浅い場所や稲の多い場所では150mm/sであった。

今回の実験と先行研究の1号機と2号機の比較を行った。本試作機は先行研究と比較して移動速度が上昇し、動作時間の短縮にも成功した。また単位節の再設計により推進効率が向上し、低周期の動作でも推進が可能となった。さらに稲が成長した3週目以降でも、稲株との接触により速度の低下は見られたが、稲間を移動できることを確認した。



図2 水田での動作実験 (1週目)



図3 水田での動作実験 (2週目)

表1 移動速度の比較

	Water depth	Rice plant height	Speed
1st week	100mm	100mm	190mm/s
2nd week	120mm	310mm	220mm/s
2022	130mm	135mm	40mm/s
2023	90mm	340mm	160mm/s

### 5. 旋回性能の検証

単位節の再設計により、各関節の最大屈曲角が±60度から±90度まで拡大した。これにより稲株間の移動に必要な旋回性能が向上した。本研究では今後の自律移動に向けた旋回性能の検証実験を行った。旋回動作は通常の蛇行推進の指令値にバイアスを加えて生成する。蛇行軌跡を定義するくねり角とバイアス値の組み合わせによって旋回性能

を比較した。

図5に検証実験の様子を示し、表2に実験結果を示す。本研究の試作機はくねり角が60度、バイアスが0.4で動作させると、最小旋回半径450mmの円軌道を描き旋回可能であることを確認した。その際の移動軌跡を図6左図に示す。実験結果より、ヘビ型ロボットの頭部と尾部の節同士が接触する問題が発生することも分かった。これは図6右図に示す軌跡のように実際には蛇行運動を行わず、旋回時に横滑りをしていたことが原因だと考えられる。横滑りが発生すると、実際の水田では稲株に干渉し旋回が出来なくなり、また稲株へ接触することで損害を与える恐れがあるため、今後は横滑りを最小限に抑える移動軌跡の生成が必要となる。



図5 旋回性能の検証実験

Curvature angle	60°	60°	30°
Bias	0.4	0.3	0.4
Turning radius	450mm	1100mm	1200mm

表2 旋回性能の比較

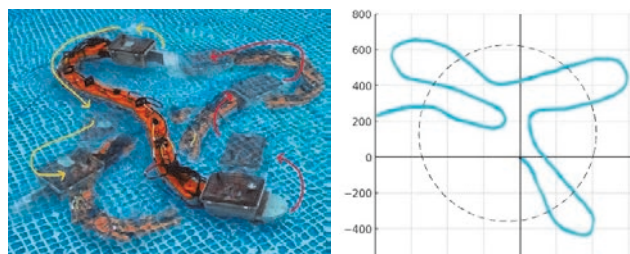


図6 旋回時の移動軌跡

### 6. まとめ

本研究では、水田内を移動して除草効果を得るヘビ型ロボットの開発を目的とし、単位節を再設計したヘビ型ロボットの試作機の開発を行い、稲間の移動に適した適した推進方法の検討を行った。また、水田内での動作実験より試作機の移動性能の向上を確認した。さらに自律移動に向けた旋回動作の動作実験を行い、旋回時の横滑りについて知見を得た。

稲田, 清水, 青木: "水田除草用ヘビ型ロボットの開発-推進方法の検討と推力の比較", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024, 2A2-A09, 2024

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 乾燥耐性をもつクマムシの細胞膜保護機構の解明

研究課題名 (英文) : Molecular mechanisms of cell membrane protection in an extremotolerant tardigrade.

研究者 : 近藤 小雪 千葉工業大学・先進工学部・生命科学科・助教

## 概要

クマムシは、ほぼ完全な脱水にも耐えられる、高い乾燥耐性をもつ。クマムシの細胞は、乾燥ストレスによる損傷を防ぐ仕組みをもつと考えられ、現在までに、核DNA、ミトコンドリアおよび細胞の全体構造の保護に寄与するクマムシ固有タンパク質が見つかった。しかし、細胞膜の保護に関わるタンパク質は未だに見つかっていない。本研究では、乾燥耐性をもつクマムシの細胞膜タンパク質の網羅的な探索・同定を行った。さらに、同定したタンパク質の中から候補タンパク質を選別し、それらのタンパク質の遺伝子を機能喪失させた変異体を複数系統作製し、ストレス耐性の検証を行った。その結果、乾燥耐性および酸化ストレス耐性に寄与するクマムシ固有の細胞膜タンパク質を同定した。

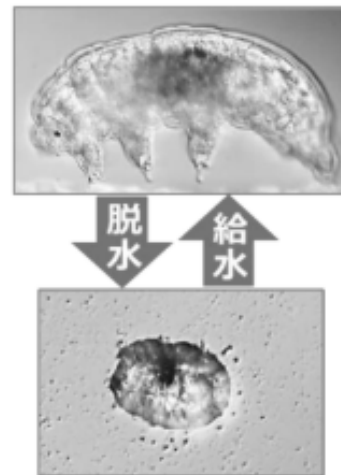


図1 乾眠能力をもつクマムシ  
(上) 水和 (活動) 状態  
(下) 脱水 (乾眠) 状態

### 1. はじめに

近年の気候変動や様々な人間活動による乾燥地の拡大が大きな問題となっており、生態系の変化や農作物の収穫量の低下が懸念されている。クマムシは**乾眠**と呼ばれる高い乾燥耐性をもつため (図1)、その仕組みの解明は、これらの問題の解決に有用であることが期待されている。

乾燥耐性をもつ生物は、乾燥によるダメージから細胞を保護する仕組みをもつ。クマムシではこれまでに、細胞中の核DNAやミトコンドリア、細胞の全体構造を保護するクマムシ固有タンパク質が見つかったが、細胞膜の保護に関わるタンパク質は、未だに同定されていない。細胞膜は乾燥に対して脆弱で破れやすいため、細胞膜の保護は乾燥耐性に必須である。

そこで、本研究ではまず、乾燥耐性をもつクマムシの細胞膜タンパク質を質量分析により網羅的に探索・同定した。その結果およびその後の変異体解析について報告する。

### 2. 質量分析による細胞膜タンパク質の同定

高い乾燥耐性をもつヨコヅナクマムシ (*Ramazzottius varieornatus*) から細胞膜タンパク質を含むサンプルを調製し、質量分析によってサンプル中に含まれるタンパク質を解析した。その結果、約4,000個のタンパク質が同定された。定量基準に達しなかったタンパク質を除外したリストの中から、変異体解析を行う候補タンパク質 (遺伝子) を決定した。

### 3. 変異体の作出

上記のタンパク質リストの中から、クマムシ固有かつ機能未知のタンパク質を複数種類選別した。そのうちの2つの遺伝子について、ゲノム編集技術 (CRISPR-Cas9系) により、機能喪失型変異体 (ノックアウト個体) の系統を作出した。著者らは、昆虫で最初に開発されたDIPA-CRISPR法 (Shirai et al., 2022) をクマムシに応用することにより、世界で初めて、生殖細胞のゲノムに変異が入ったクマムシの変異個体の作出に成功した。

(図2、Kondo et al., 2024) .ゲノム編集クマムシの作出には、この技術を用いた。2種類の遺伝子のノックアウト変異体系統のうち、これまでに *tmp1* と名付けた遺伝子の変異系統について、ストレス耐性の検証を行った。



図2 クマムシへのゲノム編集ツールの顕微注入

(上) 模式図

(下) 写真 (撮影: 西郷永希子)

#### 4. 変異体のストレス耐性の検証

*tmp1* のノックアウト変異体について、乾燥ストレス (湿度 10% の環境に 2 日間曝露)、酸化ストレス (過酸化水素)、凍結ストレス (マイナス 80°C に 1 週間曝露) に対する耐性を検討し、変異の入っていないヨコヅナクマムシ (野生型) と耐性を比較した。興味深いことに、変異体では、乾燥ストレスおよび酸化ストレスに対して、野生型と比較して、耐性の有意な低下が観察された。しかしその一方で、凍結ストレス耐性は、野生型と有意な差は検出されなかった。乾燥ストレスは、酸化ストレスを誘導することが知られていることから、変異体で乾燥耐性の低下がみられたのは、酸化ストレス耐性の低下が原因である可能性が考えられる。凍結ストレス耐性には影響が見られなかったことから、*tmp1* は凍結ストレスに対しては重要な役割を果たしていない、もしくは他の遺伝子によって役割が補償されているのかもしれない。また、これらの結果は、乾燥ストレスおよび酸化スト

スに対する耐性メカニズムと、凍結ストレスに対するメカニズムの違いがあることを示唆している。

#### 5. まとめ

本研究では、乾燥耐性をもつクマムシの細胞膜タンパク質を網羅的に同定した。それらの中から見つけたクマムシ固有タンパク質 (遺伝子) TMP1 (*tmp1*) のノックアウト変異体の解析から、*tmp1* が乾燥ストレス耐性および酸化ストレス耐性に寄与することを示した。今後は、*tmp1* の詳細な作用メカニズムを解析することで、クマムシが乾燥ストレスから細胞膜を保護する仕組みの一端を明らかにする。

#### 参考文献

Shirai Y, Piulachs MD, Belles X, Daimon T. DIPA-CRISPR is a simple and accessible method for insect gene editing. Cell Rep Methods. 2022; 2: 100215. pmid:35637909

Kondo K, Tanaka A, Kunieda T. Single-step generation of homozygous knockout/knock-in individuals in an extremotolerant parthenogenetic tardigrade using DIPA-CRISPR. PLOS Genet. 2024; <https://journals.plos.org/plosgenetics/article?id=10.1371/journal.pgen.1011298>

#### 研究成果

##### 【学会発表】

1. 近藤小雪, 第 48 回日本分子生物学会年会 2025.
2. 近藤小雪, 16<sup>th</sup> International Symposium on Tardigrada, 2025.

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : リボソームの翻訳機能に着目したサルコペニアの発症機序の解明

研究課題名 (英文) : Elucidation of the pathogenesis of sarcopenia focusing on the translation function of ribosomes

研究者 : 〇川西 範明 千葉工業大学  
Kawanishi Noraaki 先進工学部 教育センター 教授

## 1. はじめに

加齢は骨格筋量が低下するサルコペニアの発症を引き起こし、その末期には生活の質を著しく低下させる。したがって、サルコペニアの発症の分子機構の解明はサルコペニアの治療法の技術開発に重要と言える。

加齢は筋タンパク質の合成の減少および分解の増加により筋線維直径の減少が生じる。また、骨格筋に局在するサテライト細胞は損傷後の再生を制御しているが、加齢に伴いサテライト細胞の数や機能が低下することが知られている。しかしながら、筋タンパク質バランスおよびサテライト細胞の機能の制御機構と加齢による影響は未だ不明瞭な点が多く残されている。

タンパク質の翻訳機能を有するリボソームは細胞内の状態変化に応答して機敏に遺伝子発現を制御することで様々な生命現象に重要な役割を担う。リボソームでのタンパク質の効率的な翻訳は組織を構成する細胞の増殖および分化や機能維持に重要であるが、翻訳が停滞することによりタンパク質の機能欠陥が引き起こされることで細胞の機能障害が生じる。また、翻訳停滞によるリボソームの衝突 (ダイソーム) が蓄積することで、細胞死や炎症応答などのストレス応答が誘導されることで疾病の発症に関与することが解明されている (1)。重要なことに、後天的な RNA 修飾の変化はリボソームでのタンパク質の翻訳制御を介して様々な生理機能を調節するとともに、疾病の発症や進展に関与することが明らかにされてきた (2)。したがって、RNA の修飾状態の変化を介して骨格筋でのリボソームの翻訳停滞を生じさせ、加齢による骨格筋の慢性炎症や筋サテライト細胞の機能障害を引き起こす可能性が考えられる。

本研究では、加齢が骨格筋での mRNA 翻訳動態の変化に及ぼす影響を検討した。さらに、加齢が骨格筋のメチル化 mRNA の変化に及ぼす影響についても検討した。

## 2. 実験方法

実験には、C57BL/6J 雄マウスを使用した。4 カ月齢の若齢マウス (n=3) および 27 カ月齢の高齢マウス (n=3) から下腿の骨格筋を採取した。

ダイソームプロファイル解析用の骨格筋 (腓腹筋) は、RNA 上のリボソームを固定化する活性を有するシクロ

ヘキシミドを含む Lysis Buffer で溶解した。ヌクレアーゼにより RNA を切断した後に、リボソーム結合ビーズを用いてリボソーム結合 RNA を精製した。断片化 RNA から RNA 吸着カラムを用いて Small RNA (200 塩基長以下の RNA) を抽出した。Ion Total RNA-Seq Kit (Thermo) を用いて、RNA シーケンス Library を作製した。シーケンス Library は Pippin Prep を用いて 140 塩基~170 塩基の DNA 領域を抽出した。また、網羅的なメチル化 RNA 解析用の骨格筋 (腓腹筋) から RNA を抽出した後に、poly (A) 結合 mRNA を精製した。ヌクレアーゼにより RNA を切断した後に、メチル化 (m6A) RNA 抗体を用いて m6A RNA を精製した。Ion Total RNA-Seq Kit (Thermo) を用いて、RNA シーケンス Library を作製した。大規模並列シーケンサー GeneStudio S5 を用いて塩基配列情報を取得した。塩基配列情報は *mus musculus* のリファレンスに基づいてマッピングを行った。ピーク検出を行った後に、群間のピーク比較を実施した。

## 3. 結果

骨格筋のダイソームプロファイリング解析の結果として、mRNA のダイソーム領域のピーク数は若齢マウスでは 1,238 個、高齢マウスでは 1,224 個であった。また、共通のピーク数は 1,215 個、若齢マウスで特異的なピーク数は 23 個、高齢マウスで特異的なピーク数は 9 個であった。アノテーション解析により、若齢マウスで特異的な mRNA 数は 22 種、高齢マウスで特異的な mRNA 数は 8 種であることが示された (図 1)。

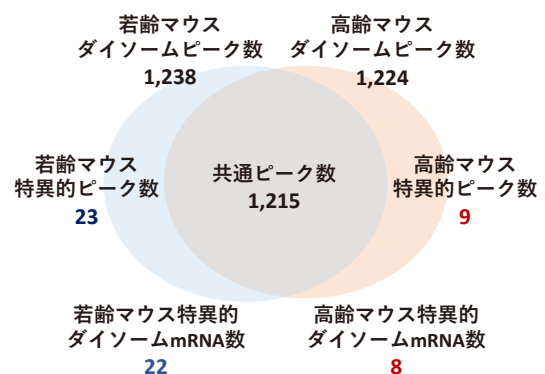


図 1 若齢マウスおよび高齢マウスの骨格筋におけるダイソーム特異的ピーク数および mRNA 数

ダイソーム領域の mRNA を対象とした Gene Ontology 解析により、若齢マウス特異的な mRNA では Negative regulation of cellular process などの機能に関連することが示された (図 2)。また、高齢マウス特異的な mRNA では Regulation of DNA-templated transcription などの機能に関連することが示された (図 3)。

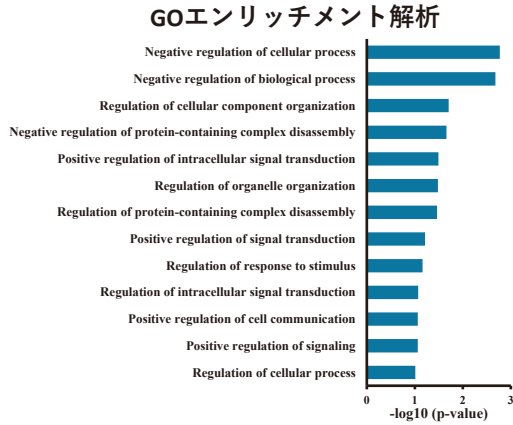


図 2 若齢マウスの骨格筋における特異的なダイソーム mRNA の GO 解析

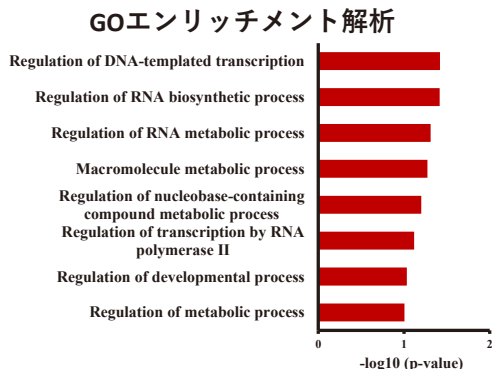


図 3 高齢マウスの骨格筋における特異的なダイソーム mRNA の GO 解析

骨格筋のメチル化 RNA 解析の結果として、mRNA の m6A 領域のピーク数は若齢マウスでは 1,225 個、高齢マウスでは 1,576 個であった。また、共通のピーク数は 1,205 個、若齢マウスで特異的なピーク数は 35 個、高齢マウスで特異的なピーク数は 371 個であった。アノテーション解析により、若齢マウスで特異的な m6A mRNA 数は 45 種、高齢マウスで特異的な m6A mRNA 数は 262 種であることが示された (図 4)。

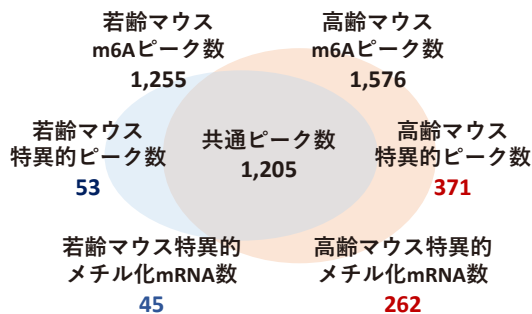


図 4 若齢マウスおよび高齢マウスの骨格筋におけるメチル化特異的のピーク数および mRNA 数

メチル化 (m6A) 領域の mRNA を対象とした GO 解析により、若齢マウスの特異的な mRNA では Sarcomere organization などの機能に関連することが示された (図 5)。また、高齢マウスの特異的な mRNA では Metabolic process などの機能に関連することが示された (図 6)。

### GO Enrichment Analysis

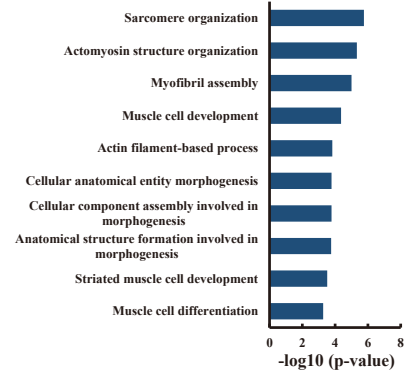


図 5 若齢マウスの骨格筋における特異的なメチル化 mRNA の GO 解析の上位 10

### GO Enrichment Analysis

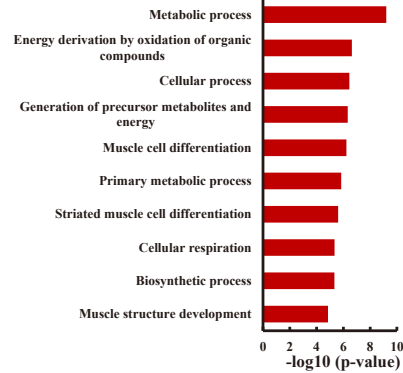


図 6 高齢マウスの骨格筋における特異的なメチル化 mRNA の GO 解析の上位 10

#### 4. まとめ

加齢は骨格筋のダイソームを形成する mRNA のプロファイルを変化させることが示唆された。また、加齢は骨格筋のメチル化 mRNA プロファイルを変化させることが示唆された。今後は、遺伝子編集技術を使用して、加齢により変動した mRNA に特異的にメチル化を導入して、リボソーム翻訳動態および骨格筋機能に及ぼす影響を検証することが必要となる。

#### 5. 本研究に関する主な発表

特になし

#### 6. 参考文献

- (1) McGirr T et al. Dysregulated ribosome quality control in human diseases. *FEBS J.* 292: 936-959. 2025.
- (2) Murakami S et al. m6A alters ribosome dynamics to initiate mRNA degradation. *Cell.* 188: 3728-3743. 2025.

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 言葉と感情の相互変換を可能にする基盤技術の研究開発

研究課題名 (英文) : Research on Mutual Transformation between Language and Affective States

研究者 : 熊本 忠彦 千葉工業大学  
KUMAMOTO Tadahiko 情報変革科学部 高度応用情報科学科 教授

### 1. はじめに

近年、様々なタイプの生成AIの出現により、人間社会は変革期を迎えている。特に、ChatGPT[1]や Gemini [2]といった対話のできるテキスト生成AIの影響は大きく、人の自然言語による様々な要求を正確に理解し、膨大な量のテキストデータの中から最適な応答を生成してくれることから、ビジネスや教育、医療から日常生活に至るまで、多岐にわたる分野で利用されている。

しかしながら、人間の感情の取り扱いについてはまだ十分でなく、ポジティブ/ネガティブといった感情極性の判定や基本感情への分類ことどまっておらず、基本感情以外の感情の把握や感情強度の推定も十分でないし、感情の機微を相手にわからせるようなテキストの生成もできていない。

そこで本研究では、様々な感情分析研究や発達心理学で取り扱われている34種類の感情に焦点を当て、感情どうしの関係やテキストと感情の関係を分析するために必要な感情データセットを構築する。

### 2. SNS 模擬投稿データの取得

本研究では、著作権やプライバシー等の問題を回避するために、X (旧 Twitter) [3]上で実際に収集したポスト (旧ツイート) ではなく、アンケート調査によって得られる模擬的なポストを用いる。

まず、インターネット上のアンケート調査会社である Fastask[4]に登録している20代~50代のインターネットユーザ17,300人 (男性8,587人、女性8,713人) を対象に、Xアカウントの有無やXへの投稿頻度を尋ね、「たまにつぶやいている」以上の頻度で投稿しているXユーザ5,178人 (男性2,684人、女性2,494人) を本研究ではヘビー投稿ユーザとして抽出した。

次に、この5,178人のヘビー投稿ユーザからランダムに抽出した4,056人 (男性2,104人、女性1,952人) に対し、Fastaskのアンケートサイト上で「あなたが普段しているようなポスト (旧ツイート) (140字以内) を今、投稿するようなイメージで入力してください。」という設問文を提示し、一人あたり1~2件のポストを創作してもらった。その結果、合計で6,884件のポストを得ることができた。

しかしながら、アンケート調査により取得したポストには、不自然なものや不適切なものが含まれることもあ

る。そこで、表1に示したデータクリーニング基準に従い、6,884件のポスト内容を精査し、該当するポストを削除した。その結果、最終的には2,384件のポストを得ることができた。なお、このデータクリーニング作業には、クラウドワークス[5]というクラウドソーシング会社を介して雇用した作業員4名が従事し、4名全員が問題なしと判断したポストのみを残し、残りのすべてのポストを削除した。

表1 データクリーニング基準

140字超	文字数が140字を超えている
URL	http/httpsで始まる文字列を含む
意味不明	意味不明な内容
回答なし	設問に対する回答がない旨を記述
画像引用	画像や写真の引用を前提としている
空白のみ	半角/全角スペースのみ
投稿内容	普段投稿するポストの内容を説明
ハッシュタグ	#で始まる文字列を含む
非日本語	固有名詞以外の非日本語を含む
伏せ字	伏せ字がある
文字化け	文字化け (主に??と表記) がある
顔文字	顔文字を含む
重複	完全に同一のポストが他にある

### 3. SNS 模擬投稿データの感情評価

本研究では、全ポストの感情を評価し、感情データセットを構築するために、27人が参加するクラウドソーシングを実施する。

まず、2節で得た2,384件のポストを均等に3分割し、795件、795件、794件からなる3つのデータセットを作成した。

次に、各データセットを9人の作業員に読んでもらい、それぞれのポストから感じるポスト投稿者の感情を評価してもらった。このとき、作業員に提示した指示は「それぞれの文章を読み、以下の34種類の感情のそれぞれについて、どの程度の感情を感じるかを直観的に判断してください。」というものであり、34種類の感情として、中村明が提唱した10種類の感情分類「喜, 好, 安, 哀, 厭, 怖, 怒, 恥, 昂, 驚」[6], Plutchikが提唱した8種類の基本感情「喜び, 信頼, 恐れ, 驚き, 悲しみ, 嫌悪, 怒り, 期待」とその混合感情のうち1次ダ

イアドである「愛、服従、畏怖、拒絶、後悔、軽蔑、攻撃、楽観」の8種類と2次ダイアドである「好奇心、罪悪感、嫉妬、自尊心、絶望、不信、皮肉、希望」の8種類[7]、発達心理学で乳幼児が6歳頃までに獲得すると言われている「快、不快、悲しみ、嫌悪、安心感、恐れ、興奮、好き、喜び、驚き、怒り、恥ずかしい、信頼感、期待、得意、愛、好奇心、罪悪感、嫉妬、誇り、照れ、共感、羨望」の23種類[8]を同義語/類義語関係に基づいて整理したものを採用した。その結果を表2に示す。また、感情評価に際して各感情の強さ(程度)を定量化するために、「感じる(3点)、少し感じる(2点)、あまり感じない(1点)、全く感じない(0点)」という4段階のリッカート尺度を採用した。なお、作業者は、クラウドワークスを介して集められた27名であり、表2において「A/B」という表記がAとBの感情のいずれか一方あるいは両方を意味することを事前に伝えた。

表2 調査対象とする感情(全34種類)

快、不快、悲しみ、嫌悪、安心感、恐れ、興奮、好き、喜び、驚き、怒り、恥、信頼、期待、得意、愛、服従、畏怖、失望/拒絶、後悔/自責、軽蔑/侮辱、攻撃/積極、楽観、好奇心、罪悪感、嫉妬、誇り、絶望、不信、皮肉、希望、照れ、共感、羨望
--

以上の作業の結果構築された3つのデータセットを統合することで、2,384件のポスト×34種類の感情×9人による感情評価の結果からなる感情データセットを構築することができた。また、各ポスト・各感情における平均を求め、感情データセットに加えた。各感情における各ポストの平均の分布を表3にまとめる。

#### 4. まとめ

本研究では、様々な感情分析研究や発達心理学で取り扱われている34種類の感情に焦点を当て、感情どうしに関係やテキストと感情の関係を分析するために必要な感情データセットを構築した。

今後の課題として、強い感情があまり観測されなかった「恥、信頼、得意、服従、畏怖、攻撃/積極、楽観、罪悪感、嫉妬、誇り、皮肉、照れ、共感、羨望」に関するデータを補充できるようなポストを作成し、同様の感情評価を行うことで、分析に資するデータの拡充を図りたい。

#### 参考文献

- [1] ChatGPT, <https://chatgpt.com/>
- [2] Google Gemini, <https://gemini.google.com/>
- [3] X, <https://x.com/>
- [4] Fastask, <https://monitor.fast-ask.com/>
- [5] クラウドワークス, <https://crowdworks.jp/>
- [6] 中村明, 感情表現辞典, 東京堂出版, 東京, 1993.
- [7] R. Plutchik, The Emotions: Facts, Theories, and a New Model, New York, Random House, 1962.
- [8] 小野寺敦子, 手にとるように発達心理学がわかる本, かんき出版, 東京, 2009.

表3 各感情における各ポストの平均の分布

平均の範囲	$2.5 \leq x$	$2.0 \leq x < 2.5$	$1.5 \leq x < 2.0$	$1.0 \leq x < 1.5$	$0.5 \leq x < 1.0$	$0.0 \leq x < 0.5$
快	82	317	269	317	272	1127
不快	208	300	206	240	147	1283
悲しみ	16	73	137	309	337	1512
嫌悪	32	122	144	325	272	1489
安心感	9	28	82	261	478	1526
恐れ	13	31	40	144	345	1811
興奮	49	160	166	358	527	1124
好き	168	206	167	240	281	1322
喜び	240	304	158	215	250	1217
驚き	8	39	53	184	494	1606
怒り	30	51	42	109	205	1947
恥	1	1	1	20	140	2221
信頼	1	5	21	120	488	1749
期待	88	149	214	344	449	1140
得意	1	7	30	155	444	1747
愛	26	47	48	151	328	1784
服従	0	0	0	2	19	2363
畏怖	0	2	3	29	229	2121
失望/拒絶	7	64	133	319	310	1551
後悔/自責	4	11	36	61	162	2110
軽蔑/侮辱	4	22	26	59	73	2200
攻撃/積極	0	13	32	171	453	1715
楽観	0	0	4	112	481	1787
好奇心	16	69	141	331	567	1260
罪悪感	0	3	18	36	140	2187
嫉妬	0	0	0	2	16	2366
誇り	0	21	27	70	228	2038
絶望	8	43	87	235	286	1725
不信	7	22	38	115	332	1870
皮肉	0	9	28	76	215	2056
希望	19	112	152	330	550	1221
照れ	0	0	2	5	58	2319
共感	1	5	22	163	706	1487
羨望	0	1	3	49	360	1971

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 日本企業の財務情報と非財務情報 (ROESG モデル) に関する実証研究

研究課題名 (英文) : Empirical Study on the "ROESG" Model for Japanese Information and Communications Technology and Transportation Equipment Companies

研究者 : 東 壯一郎 千葉工業大学  
HIGASHI Soichiro 未来変革科学部 経営デザイン科学科 教授

## 1. はじめに

近年、企業の持続的成長において、ESG (環境・社会・ガバナンス) への取り組みが不可欠な要素となっている。2014 年の「伊藤レポート」は、日本企業の課題として「短期志向」と「低収益性」を挙げ、長期的な企業価値向上のために ROE 8.0%の達成を提言した。さらに伊藤 (2021) は、財務指標である ROE と非財務指標である ESG を対立させるのではなく、相互に融合させる「ROESG」経営モデルを提唱した。これは、資本効率の追求と ESG 活動を同期化させ、持続的な価値創造を目指している。

本研究では、このモデルに基づき、対照的な市場評価を受けている「情報・通信業」と「輸送用機器」の2業種を分析対象とする。2020年3月時点の東証業種別PBR (株価純資産倍率)を見ると、「情報・通信業」は平均2.1倍と高く評価されている一方、「輸送用機器」は平均0.6倍と解散価値である1.0倍を大きく割り込んでいる。PBR 1.0倍以上は、市場が企業の将来性や無形資産 (非財務資本) を評価していることを示唆し、1.0倍未満はその逆を示唆する。

本研究の目的は、これら2業種において、東洋経済「CSR調査」データを非財務情報の代理変数として用い、企業価値 (PBR) や企業規模 (総資産) との関係性を検証することにある。特に、財務的な余裕 (規模) が ESG 活動を促進するという仮説に基づき、企業規模との相関についても焦点を当てる。

## 2. 先行研究のレビューと仮説の設定

### 2.1 「ROESG」に関する先行研究と理論的背景

現代の資本市場において、財務情報の投資判断に対する説明力は低下傾向にある。Lev and Gu (2016) は、米国市場において財務情報の重要性が低下し、特許やブランド等の非財務情報の重要性が高まっていることを実証した。日本でも GPIF の ESG 投資拡大などを受け、非財務情報の開示は喫緊の経営課題となっている。

本研究が依拠する柳・伊藤 (2019) の「ROESG」モデルは、以下の3つの理論を統合した概念フレームワークである。

第一は、ESG がブランド価値や評判を通じてキャッシュ・フロー向上や資本コスト低減に寄与する「Intrinsic Value

モデル」である。第二は、IIRC (国際統合報告評議会) が定義する非財務資本 (知的・人的・社会関係資本等) が PBR 1.0 倍超の部分 (市場付加価値) を説明する「IIRC-PBR モデル」である。第三は、ROE と ESG の同期化を示す「残余利益モデル」である。

先行研究の冨塚 (2017) は製薬企業において非財務資本と PBR の正の相関を明らかにしたが、本研究はこれを PBR 水準の異なる業種間比較へと拡張する点に新規性がある。

### 2.2 仮説の設定

本研究では、以下の4つの仮説を設定する。

- ・仮説1: ROE と PBR の高い企業は、4つの ESG 項目を合わせた指標 (ESG 評価項目合計) と企業価値 (PBR) との間に関係性を有する。
- ・仮説2: ROE と PBR の高い企業は、人材活用 (H)、環境 (E)、社会性 (S)、企業統治 (G) が、それぞれ企業価値 (PBR) との間に関係性を有する。
- ・仮説3: 企業規模の大きい企業は、4つの ESG 項目を合わせた指標 (ESG 評価項目合計) と総資産との間に関係性を有する。
- ・仮説4: 企業規模の大きい企業は、人材活用 (H)、環境 (E)、社会性 (S)、企業統治 (G) が、それぞれ総資産との間に関係性を有する。

## 3. リサーチデザイン

### 3.1 分析対象とグループ化

分析対象は、「第2回 ROESG ランキング (2020 年度版)」関連企業を含む、日本の「情報・通信業」および「輸送用機器」企業である。これらを PBR 1.0 倍を基準に以下の2グループに分類し比較する。

- ・PBR 1.0 倍以上の業種 (情報・通信業): 平均 PBR 2.1 倍。市場付加価値が正であり、非財務資本の価値が市場から評価されていると考えられるグループ。
- ・PBR 1.0 倍未満の業種 (輸送用機器): 平均 PBR 0.6 倍。市場付加価値が負であり、将来性が厳しく評価されているグループ。

### 3.2 変数の定義とデータ

- ・非財務情報 (独立変数): 東洋経済「CSR 企業総覧」のデータをを用い、以下の4分野をスコア化する。

**人材活用(H)** : 女性社員比率、離職率、有給取得率などの人的資本指標。

**環境(E)** : 環境担当部署、CO2 排出量など自然資本指標。

**社会性(S)** : 社会貢献支出、ステークホルダー対話などの社会関係資本指標。

**企業統治(G)** : 内部統制、コンプライアンスなどの社会関係資本指標。

・**企業価値(従属変数)** : 市場の将来期待値を反映する「PBR(株価純資産倍率)」を用いる。

・**企業規模(従属変数)** : 過去からの財務資本の蓄積であり、ESG 投資への余力を示す「総資産」を用いる。

#### 4. 実証分析の結果

分析の結果、業種間で ESG と企業価値・規模との関係に明確な構造的差異が確認された。

##### 4.1 情報・通信業 (PBR 1.0 倍以上)

本業種においては、企業規模(総資産)と ESG 評価項目の間に極めて強い正の相関が認められた(仮説 3・4 の支持)。総資産が大きい企業ほど、人材活用、環境、社会性、ガバナンスの全分野で取り組みが進んでおり、非財務情報の開示が充実している。

通信キャリアや大手 SIer など、盤石な財務基盤を持つ大企業が積極的に ESG 投資を行い、その成果を統合報告書等で開示している実態が示された。財務的成功(規模拡大)が非財務的価値の向上を可能にするメカニズムが働いているといえる。

一方で、企業価値(PBR)と ESG スコアとの直接的な相関は、規模との関係ほど強くはなかった。これは株価がマクロ経済や短期的業績にも左右されるためと考えられるが、規模を通じた間接的な影響力の存在は否定できない。

##### 4.2 輸送用機器 (PBR 1.0 倍未満)

本業種においては、非財務情報の開示(ESG スコア)と企業価値(PBR)の間に明確な有意な相関は見出せなかった(仮説 1・2 の棄却)。

また、企業規模と ESG スコアの関係についても、情報・通信業のような一貫した傾向は確認されなかった。

さらに、ROE 8.0%以上かつ PBR 1.0 倍以上の「優良企業群」に限定した分析でも、企業統治(G)を除き、ESG 項目と PBR の間に負の相関が見られるなど、複雑な結果となった。輸送用機器業界全体で PBR が 1.0 倍を割り込んでいる現状は、市場が企業の成長性を評価しておらず、市場付加価値がマイナスの状態であることを示す。この状況下では、ESG 活動が直接的な企業価値向上に結びつきにくい構造的要因が存在する。

#### 5. 考察と結論

##### 5.1 考察

本研究により、業種と PBR 水準の違いが「ROESG」モデルの適合性に影響を与えることが明らかになった。

情報・通信業で見られた「企業規模と ESG 活動の正の相関」は、ESG 経営の実践に「規模の経済」や「財務的余裕

(スラック)」が重要であることを示している。大企業は豊富な資源を非財務資本へ投資し、情報の可視化を進めることで、正の循環を生み出している。

また、輸送用機器業界では PBR 1.0 倍割れが常態化しており、市場は非財務資本を価値創造の源泉として十分に織り込んでいない。伊藤レポート等の指摘から、まずは資本効率や収益性の改善が最優先課題であり、達成されて初めて ESG 評価が株価に反映される段階に入ると考えられ、収益なき ESG は市場の評価を得られないものと推察される。

##### 5.2 結論と今後の課題

結論として以下の 2 点があげられる。

第一に、情報・通信業では規模の大きな企業が ESG 活動を主導し、財務資本の蓄積が非財務情報の拡充に寄与している。これは財務的成功が非財務的価値向上をもたらす好循環の証左といえる。

第二に、輸送用機器業では ESG 情報開示が企業価値や規模と連動しておらず、PBR 1.0 倍割れ解消に向けた収益性向上が急務である。単なる情報開示にとどまらず、事業構造転換を含む抜本的な戦略再構築が必要である。

今後の課題として、分析対象を東証 33 業種全体に拡張し、「見えない価値」と企業価値の関係性をより広範に検証する必要がある。業種ごとの特性に応じた ROESG 経営の精緻化により、日本企業全体の価値向上に資する知見が得られるものと期待される。

#### 本研究に関する主な発表論文

- (1) 東壯一郎 (2024) 「日本の情報・通信業および輸送用機器企業の「ROESG」モデルに関する実証研究」『商学論究』第 71 巻 3 号, 105-122 頁。
- (2) 東壯一郎 (2023) 「日本の機械製造企業の「ROESG」モデルに関する実証研究」『生産管理』第 30 巻 1 号, 41-49 頁。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省 (2014) 「伊藤レポート持続的成長への競争力とインセンティブ～企業と投資家の望ましい関係構築～プロジェクト」, [https://www.meti.go.jp/policy/economy/keiei\\_innovation/kigyokaikei/pdf/itoreport.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/economy/keiei_innovation/kigyokaikei/pdf/itoreport.pdf) (2023/11/01 閲覧)。
- [2] 伊藤邦雄 (2021) 『企業価値経営』日本経済新聞出版。
- [3] Lev, B. and Gu, F. (2016), *The End of Accounting and the Path Forward for Investors and Managers*. John Wiley & Sons. (伊藤邦雄監訳 (2018) 『会計の再生 21 世紀の投資家・経営者のための革命』中央経済社)。
- [4] 柳良平・伊藤桂一 (2019) 「「ROESG」モデルと「自然資本」のエビデンス」『資本市場』2019 (9), 36-46 頁。
- [5] 富塚嘉一 (2017) 「非財務資本は企業価値に結び付くか?—医薬品企業の統合報告書に基づく実証分析」『企業会計』69 (7), 116-122 頁。

〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅲ）〕





研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅲ)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : ポリ(ε-デカラクトン)の海洋生分解性の調査

研究課題名 (英文) : Investigation of marine biodegradability of poly(ε-decalactone)

研究者 : 菅根 海人 千葉工業大学  
SUGANE Kaito 工学部 応用化学科 助教

### 1. はじめに

海洋に流出する廃プラスチック類による海洋汚染が地球規模で広がっており、またマイクロプラスチックによる海洋生態系への影響が懸念されている。このような中、海洋中でも微生物の働きによって二酸化炭素と水に分解される海洋生分解性プラスチックが注目を集めている<sup>1)</sup>。

ポリ(ε-カプロラクトン) (PCL)は環状モノマーであるε-カプロラクトン(ε-CL)の開環重合によって得られるポリマーであり、海洋中で生分解することが知られている(図1)。しかし、ε-カプロラクトンは石油由来化合物であり、循環型社会の実現の観点からは再生可能資源由来の化合物に代替されることが望ましい。

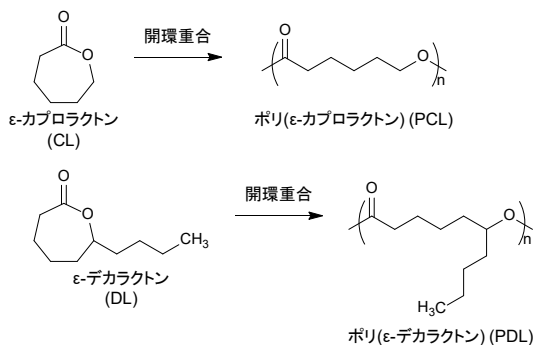


図1 ポリ(ε-カプロラクトン)およびポリ(ε-デカラクトン)の合成

ε-デカラクトン(ε-DL)は植物油であるヒマシ油から微生物発酵によって誘導される七員環状エステルであり、ε-カプロラクトンと同様に開環重合することでポリ(ε-デカラクトン) (PDL)を形成することが知られている<sup>2)</sup>。植物由来の原料から合成されるPDLは石油由来のPCLの代替としてポリ乳酸とのコポリマー化などにおいて注目されている。一方、PDLの海洋生分解性についてはこれまで調査されてこなかった。PDLの海洋生分解性を調査することができれば、バイオベースかつ海洋生分解性を有するポリマーの開発につながる可能性がある。

本研究では、線状および架橋PDLとPCLを合成し、熱・力学物性の調査を行うことを目的とした。

### 2. 研究の内容

#### 2.1. 線状ポリ(ε-カプロラクトン-co-ε-デカラクトン)の合成

ベンジルアルコール(BnOH)を開始剤、オクチル酸スズ(Sn(Oct)<sub>2</sub>)を触媒としてε-CLおよびε-DLを開環重合させることで線状ポリ(ε-カプロラクトン-co-ε-デカラクトン) (r-PC/D)を合成した(図2)。このとき、ε-CL/ε-DLの仕込みモル比を100/0、95/5、90/10、85/15、80/20、70/30、0/100として合成を行った。

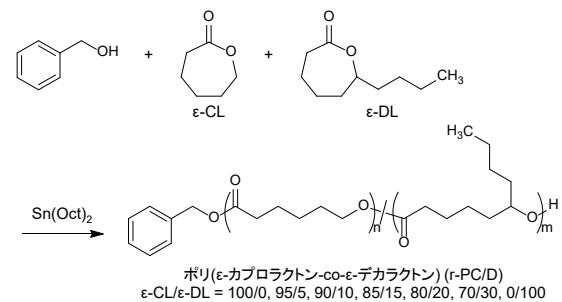


図2 線状ポリ(ε-カプロラクトン-co-ε-デカラクトン)合成の反応スキーム

核磁気共鳴分光法(H-NMR)から、得られたr-PC/D中のPCL成分とPDL成分の比率は、すべての組成において合成の際の仕込みモル比と近い値となり、目的の構造が得られていることが確認できた。またε-DLの割合の増加にしたがってr-PC/Dの重合度が低下する傾向がみられた。

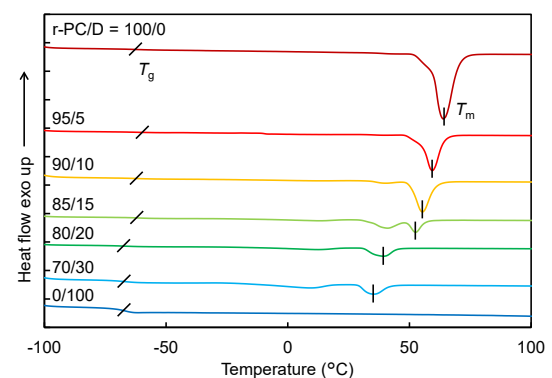


図3 r-PC/DのDSC曲線

r-PC/D について示差走査熱量測定(DSC)を行ったところ、 $\epsilon$ -DLの割合の増加にしたがってPCL成分の融点が低下し、結晶化度が低下する傾向がみられた(図3)。これは、r-PC/D中のPDL部分は側鎖のブチル基の存在により非晶性であり、このPDL成分の増加に伴いPCLの結晶化を阻害したためであると考えられる。

## 2. 2. 架橋ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)の合成

四官能アルコールであるペンタエリスリトールを開始剤として、 $\epsilon$ -DLを開環重合させることでヒドロキシ基末端四本腕星型ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)オリゴマー(H4DLOn)を合成した(図4)。このとき、星型オリゴマーの腕1本あたりの重合度(n)がn=3, 5, 7, 10, 15となるように設定した。合成したH4DLOnをヘキサメチレンジイソシアネート(HDI)とのウレタン化反応により架橋し、架橋ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)(PUN-4DLOn)を作製した。さらに、同様の方法によりヒドロキシ基末端四本腕星型ポリ( $\epsilon$ -カプロラクトン)オリゴマー(H4CLOn)を架橋させることで架橋ポリ( $\epsilon$ -カプロラクトン)(PUN-4CLOn)を作製した。

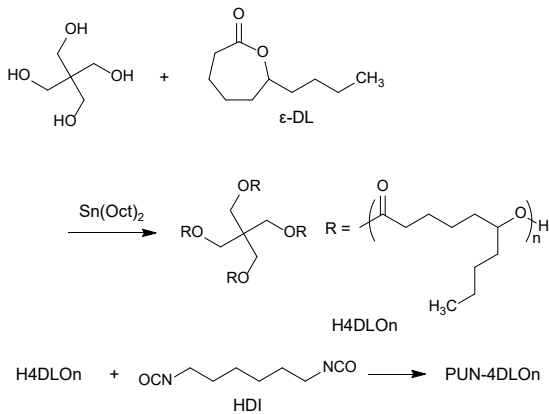


図4 架橋ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)合成の反応スキーム

得られたPUN-4DLOnおよびPUN-4CLOnについて、赤外分光法(FT-IR)からウレタン化反応の進行を確認した。膨潤試験より、PUN-4DLOnとPUN-4CLOnにおいて重合度nが大きくなるほど膨潤度が上昇し、架橋密度が低下する傾向がみられた。また、重合度n=3, 5, 7, 10のフィルムは80%以上の高いゲル分率を示したが、n=15のフィルムはゲル分率が低く、架橋が不十分であることを確認した。

PUN-4DLOnおよびPUN-4CLOnについてDSC測定を行ったところ、PUN-4DLOnでは融点がみられず非晶性であったのに対し、PUN-4CLOnではn=5, 7, 10, 15においてPCL成分の融点が確認でき、結晶性を有することが確認できた。PUN-4DLOnとPUN-4CLOnのいずれにおいてもガラス転移点( $T_g$ )が $-57^{\circ}\text{C}$ ~ $-21^{\circ}\text{C}$ の範囲にみられ、重合度nの値が大きくなるほど $T_g$ の値が低くなる傾向がみられた。動的粘弾性測定(DMA)から、重合度nの値が大きくなるほど $\tan \delta$ のピークトップ温度が低下す

る傾向がみられ、これはDSC測定の結果と一致した。DMA測定における貯蔵弾性率( $E'$ )の曲線ではすべてのサンプルにおいてゴム状平坦領域がみられた。

引張試験より、PUN-4DLOnにおいて重合度nが大きくなるにつれて引張強度と引張弾性率が低下し、破断伸びが上昇した。PUN-4CLOnにおいて、重合度nが大きくなるにつれて引張強度が上昇する傾向がみられ、これはPCL成分の結晶化に由来すると考えられる。

## 3. まとめ

本研究では線状ポリ( $\epsilon$ -カプロラクトン-co- $\epsilon$ -デカラクトン)の合成および架橋ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)の合成を行い、それらの熱・力学物性の調査を行った。線状ポリ( $\epsilon$ -カプロラクトン-co- $\epsilon$ -デカラクトン)の合成において、PDL成分の含有量によって共重合体の結晶性の制御に成功した。架橋ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)の合成では、重合度の異なる星型ポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)オリゴマーおよび星型ポリ( $\epsilon$ -カプロラクトン)オリゴマーの架橋により架橋密度の異なるネットワークポリマーの合成に成功し、特にポリ( $\epsilon$ -デカラクトン)ネットワークではポリマーの結晶化を抑制しつつ架橋密度の制御に成功した。本研究の成果をもとに、今後はこれらのポリマーの生分解性試験を行い、結晶性および架橋密度が生分解性に与える影響を調査する。

## 参考文献

- 1) M. Suzuki et al., *Polym. J.*, **53**, 47-66, 2021
- 2) P. Olsén et al., *Biomacromolecules*, **14**, 2883-2890, 2013

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅲ)  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : スパイキングニューラルネットワークへのNeural Circuit Architectural Prior の適用と  
その影響の解明

研究課題名 (英文) : Applying Neural Circuit Architectural Priors to Spiking Neural Networks and Analysis of  
their effects

研究者 : 三木 大輔 千葉工業大学  
Daisuke Miki 情報変革科学部 情報工学科 助教

## 1. 研究の背景

近年、スパイキングニューラルネットワーク (Spiking Neural Network, SNN) を用いた深層強化学習 (Deep Reinforcement Learning, DRL) はロボット制御タスクにおいて顕著な可能性を示し、多様な環境下で頑健な行動を学習可能とした[1]. 行動制御のためのニューラルネットワークは通常 Multi-Layer Perceptron (MLP) のような汎用的な構造を採用するが、特にモデルフリー学習においては大量の経験を必要とし、その経験を異なるロボットへ転移することは容易ではなかった. Bhattasali らは適当なハイパパラメータにより初期化された全結合ニューラルネットワークの DRL に膨大な経験をさせる必要があることについて指摘し、これを Neural Circuit Architectural Prior (NCAP) [2] のように生物学的妥当性を制約としてモデル化し、学習効率の向上が可能であることを示した. Bhattasali らの用いたニューラルネットワークは一般的な人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network, ANN) であり、SNN にも同様に適用できることを解明できれば、学習時間の短縮に応用可能と考えられたため、研究代表者らは NCAP の構造を取り入れた SNN への適用を試みたが、学習が困難であることが判明した. 一方で SNN はその構造に再帰構造を持ち、その膜電位を潜在状態とすると、再帰型ニューラルネットワークとみなすことができる. 再帰型ニューラルネットワークは Experience Replay との相性が悪く、TD3 のような連続値制御型 DRL アルゴリズムへの適用時に Experience Replay からのロードで隠れ状態が陳腐化することが課題であった. この解決策として Kapturowski らは bum-in [3] と呼ばれる手法により、潜在変数ベクトルを更新し、学習品質を向上した. そこで、この潜在状態を SNN における膜電位として置き換え、それらを bum-in に適用することで、学習品質の向上を目指すこととした. 特に、本研究では、Recurrent Experience Replay in Distributed Reinforcement Learning (R2D2) [3] に着想を得た Bum-in を組み込むことで TD ターゲットの推定精度を向上させ、学習を安定化する手法を提案した.

## 2. 方法

Bum-in では、リプレイバッファから取り出した膜電位を再度スパイキングアクターネットワーク (Spiking Actor Network, SAN) に入力し、SNN の内部状態 (膜電位) を現在のネットワークパラメータに合わせて更新した. 再計算された膜電位  $m'_{t+1}$  は、次式のように得られる

$$m'_{t+1} \leftarrow \pi(s_t, m_t | \theta_{now}).$$

ここで、 $\theta_{now}$  は現在の SAN のパラメータである. Bum-in により、常に最新の SAN によって得られる内部状態に近い情報が学習に利用されるため、TD ターゲットの精度向上と学習の安定性改善が期待できる. 膜電位の量子化では、動の演算後に得られる膜電位  $m$  をリプレイバッファへ保存する直前に、以下の式を用いて量子化を行う

$$\hat{m}_i = \text{round}\left(\frac{m_{clip,i}}{\Delta_i}\right)\Delta_i.$$

ここで、 $m_{clip,i}$  は

$$m_{clip,i} = \begin{cases} -2\sigma, & m_i < -2\sigma, \\ m_i, & -2\sigma \leq m_i \leq 2\sigma, \\ 2\sigma, & m_i > 2\sigma. \end{cases}$$

であり、 $\Delta_i$  は

$$\Delta_i = \begin{cases} 1.0, & |m_{clip,i}| \leq \sigma \\ 2.0, & |m_{clip,i}| > \sigma. \end{cases}$$

とした. 得られた量子化膜電位  $\hat{m}$  をリプレイバッファに保存し、学習時には  $\hat{m}$  を用いることで、探索範囲を縮小しつつ性能劣化を抑制することを目指した. 提案手法の評価には、MuJoCo 連続値制御ベンチマークタスク (Ant-v4, Walker2d-v4, Hopper-v4, HalfCheetah-v4) を使用した. 実験は、それぞれの手法ごとに独立した 10 試行 (それぞれ 100 エポックからなり、1 エポックは 1 万ステップの学習と 10 回のテストから構成される) を実施し、これらのテスト時の平均報酬を記録した. Bum-in は学習時のみ適用した. 実験では、まず、先行研究 [1] と、Bum-in のみを適用した提案手法を比較した. 次に、Bum-in を適用した提案手法において、膜電位の量子化の有無による性能を比較した.

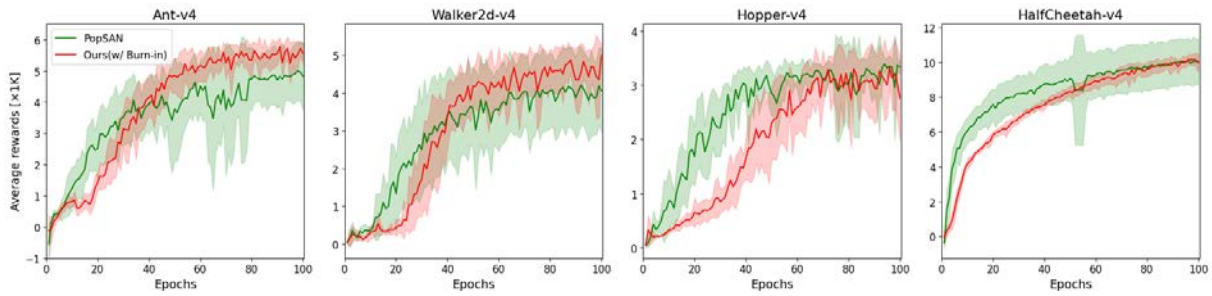


図1 先行研究による手法 [1] と Bum-in を適用した提案手法の平均報酬の推移

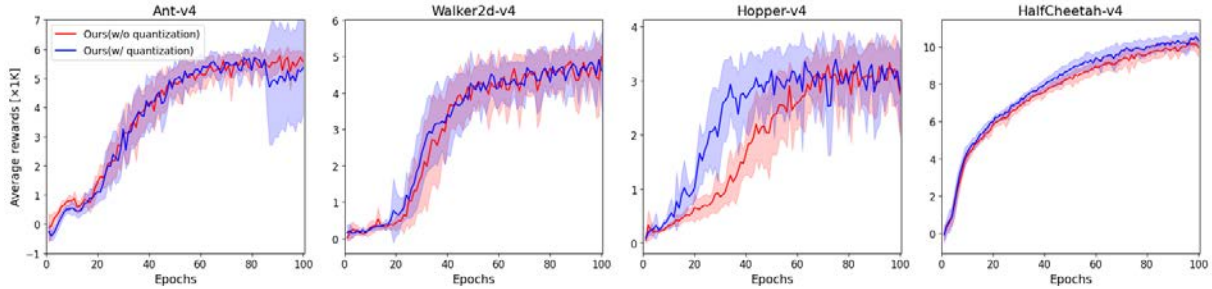


図2 提案手法における膜電位の量子化の有無による平均報酬の推移

表1 ベンチマークタスクを用いた膜電位の量子化の有無による平均最大報酬の比較

Task	PopSAN (TD3)[1]	Ours (Bum-in)	Ours (Bum-in+Quantization)
Ant-v4	5234±865	5997±107	6103±87
Walker2d-v4	4456±895	5187±258	5188±492
Hopper-v4	3439±105	3509±180	3697±97
HalfCheetah-v4	10208±1359	10257±338	10650±249

### 3. 結果および考察

表1に、MuJoCo ベンチマークを用いた膜電位の量子化の有無による平均最大報酬の比較を示す。また、平均報酬の推移を図1 および図2 に示す。図1 から、提案手法では学習後期において先行研究を上回る結果を得られたことが分かる。また、図2 から、Bum-in に加えて膜電位の量子化を併用すると、特に Hopper-v4 において、報酬の収束までに要するステップ数が短縮される結果を得られたことが分かる。結果から、保存された膜電位を現在の SAN のパラメータで再計算することで、リプレイバッファ利用時に生じやすい膜電位の陳腐化が緩和され、行動価値推定誤差が減少し、学習後期においても比較的安定したと考えられる。膜電位の量子化を Bum-in と併用することで、Hopper-v4 においては、報酬の収束までに要するステップ数が削減された。量子化によりリプレイバッファに格納される膜電位の離散化が進み、探索範囲が適度に縮小された結果、リプレイバッファから取り出した膜電位を利用する際の計算コストを抑制しつつ、最終的な学習性能への影響を最小限に保てたと考えられる。一方で、Ant-v4, Walker2d-v4, HalfCheetah-v4 では、膜電位の量子化による報酬の収束までに要するステップ数に目立った改善は認められなかった。観測次元数の多いタスクでは、膜電位の量子化

による探索範囲の縮小が状態表現全体にほとんど影響を与えず、学習初期の探索効率改善が十分に確認できなかったと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、TD3 アルゴリズムにおけるアクターネットワークを SNN で実装し、リプレイバッファを拡張して膜電位を格納・再利用できる仕組みを提案した。さらに、R2D2 に着想を得た Bum-in を導入し、リプレイバッファ保存前の膜電位に量子化を適用することで、探索範囲を適度に制限し、学習効率の向上を目指したベンチマークタスクを対象とした比較実験の結果、提案手法は既存手法を上回る性能と学習の安定性を示し、平均最大報酬および学習の安定性の両面で一定の改善が得られた。

### 参考文献

- [1] Tang et al., Deep reinforcement learning with population-coded spiking neural network for continuous control, Proceedings of the Conference on Robot Learning, pp. 2016–2029, 2021
- [2] Bhattasali et al., Neural circuit architectural priors for embodied control, Proceedings of the Advances in neural information processing systems, pp.12744–12759, 2022
- [3] Kapturovski et al., Recurrent experience replay in distributed reinforcement learning, Proceedings of the international conference on learning representations, 2018

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅲ)

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2024/9/30

研究課題名 (和文) : 二液相分離型合金を用いた新規潜熱蓄熱材の開発に関する研究

研究課題名 (英文) : Development of Novel Latent-Heat Thermal Energy Storage Materials Using Immiscible Alloys

研究者 : 清宮 優作 千葉工業大学附属研究所  
Seimiya Yusaku 共同研究員

## 1. 緒言

再生可能エネルギーの利用拡大のためには、余剰電力を貯蔵し、需要に応じて供給するエネルギー貯蔵技術の確立が不可欠である。中でも、物質の相変態に伴う潜熱を利用した潜熱蓄熱材料 (PCM) は、高いエネルギー密度を有することから有望視されている。しかし、従来の高温 PCM は、融解時の体積変化による容器の破損や、高温腐食による劣化といった問題があり、実用化への障壁となっていた。これらの課題に対し、準安定状態で二液相分離を示す Fe-Cu 合金の利用が提案されている[1]。

この系において、高い機械的特性を有する Fe 相 (高温安定相) が外殻を、大きな熱容量を持つ Cu 相 (蓄熱相) が内部を構成するコアシェル構造を自己形成できれば、Fe 相自体が容器の役割を果たし、容器不要かつ高耐久な画期的な蓄熱材料となり得る。

本研究では、二相分離構造形成に必要な基礎熱物性データを取得することを目的とし、国際宇宙ステーションに搭載された静電浮遊炉 (ISS-ELF) [2] を用いて Fe-Cu 合金融体の密度、表面張力、粘性を測定した。また、電磁浮遊炉 (EML) を用いて表面張力の比較測定を行った。

## 2. 実験方法

質量純度 99.99% 以上の Fe, Cu から、コールドクルーシブル炉により目標組成の Fe-Cu 合金を溶製した。試料表面は、ナイトール液中で化学エッチングした後、アセトンで洗浄し、静電浮遊炉にセットした。チャンバ内部を真空引きした後、0.2 MPa の Ar-H<sub>2</sub> 混合ガスで置換した。試料をチャンバ内に配置した電極により静電浮上させ、4 方向から半導体レーザーを照射して溶融させた。試料温度は、単色放射温度計で測定した。放射率の設定値は、融解時に見られる屈曲点が各組成の液相線温度と一致するように決定した。試料の温度が一定になった後、電極に正弦波電圧を印加することで強制振動させ、これを切ることで減衰振動を記録した。この減衰挙動から、表面振動周波数と減衰時間を同定し、表面張力と粘性を計算した。減衰が完全に終わった後、レーザーを遮断して冷却した。この時の試料の輪郭画像を取得することで密度を算出した。

## 3. 結果および考察

図 1 は、ISS-ELF を用いて測定した溶融 Fe-25at%Cu 合金および Fe-50at%Cu 合金の密度の温度依存性を、文献値[3]と比較したものである。いずれの組成においても、密度は温度の上昇に伴い直線的に減少した。また、Cu 濃度の増加に伴い密度が低下する傾向が確認された。これらの測定プロットを最小二乗法により一次近似し、Fe-Cu 合金融体の密度について以下の式を得た。

$$\rho_{\text{Fe}25\text{Cu}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3} = 8140 - 0.5904(T - 1726) \quad (1)$$

$$\rho_{\text{Fe}50\text{Cu}}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3} = 7283 - 0.4098(T - 1714) \quad (2)$$

ここで、 $T$  は温度 (K)、式の切片は各組成の液相線温度における合金の密度に対応する。

図 2 に、溶融 Fe-25at%Cu 合金の表面張力の温度依存性を示す。比較のため、地上の電磁浮遊法を用いて測定した純鉄、純銅および Fe-Cu 合金の結果も併せて示す。

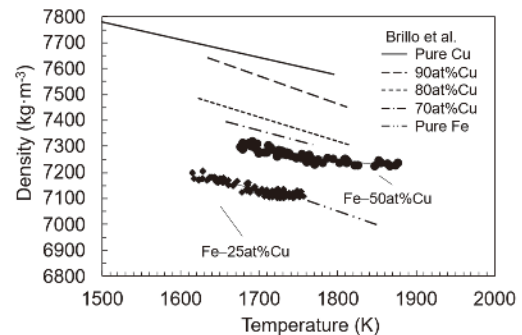


Figure 1 Density of molten Fe-Cu alloy measured by the ISS-ELF with together literature data [3].

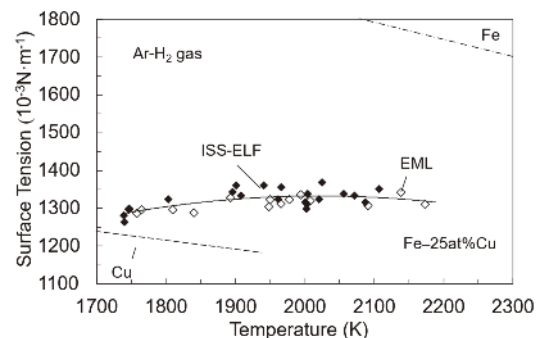


Figure 2 Surface tension of molten Fe-25at%Cu alloy measured by ISS-ELF and EML.

純鉄および純銅の表面張力は温度上昇に伴い線形に減少するのに対して、Fe-25at%Cu 合金融体では2000 K付近を極大として上に凸となる特異な温度依存性を示した。この挙動は微小重力下の ISS-ELF と地上の EML でよく一致しており、測定の妥当性が示唆される。熔融 Fe-50at%Cu 合金においても同様の傾向が見られた。

このような表面張力の非線形挙動は他系でも報告されており[4]、融体表面における表面偏析、ならびにそれに伴う表面モル分率の変化が関与する可能性が指摘されている。

図3に、ISS-ELFを用いて測定したFe-Cu合金融体の粘性の温度依存性を文献値[5,6]と共に示す。粘性は温度上昇に対して指数関数的に減少した。また、Cu濃度の増加に伴い粘性が低下する傾向が確認された。各組成の粘性についてアレニウス則に基づく最小二乗近似を行い、以下の式を得た。

$$\eta_{\text{Fe25Cu}}/10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.1218 \exp\left(\frac{53508}{RT}\right) \quad (3)$$

$$\eta_{\text{Fe50Cu}}/10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.1807 \exp\left(\frac{43673}{RT}\right) \quad (4)$$

ここで、 $R$  ( $8.314 \text{ J K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ )は気体定数である。

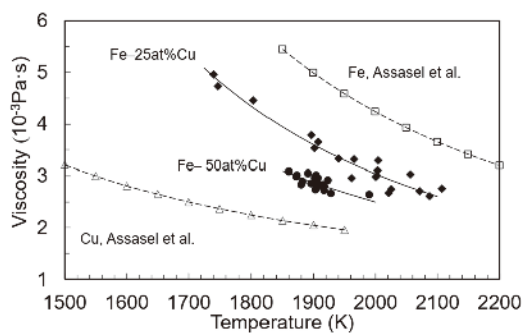


Figure 3 Viscosity of molten Fe-Cu alloy and its temperature dependence measured by the ISS-ELF with together literature data [5,6].

#### 4. まとめ

本研究では、Fe-Cu 合金融体を用いた新規蓄熱材料の創成に向け、二液相分離現象の制御に不可欠な熱物性値を国際宇宙ステーション搭載静電浮遊炉 (ISS-ELF) により測定した。また、表面張力については地上の電磁浮遊炉 (EML) を用いた比較測定を実施した。

熔融 Fe-Cu 合金の密度は組成によらず温度上昇に伴って線形に低下し、Cu 濃度の増加に伴い密度が低下する傾向が確認された。表面張力は2000 K付近で極大を示す非線形の温度依存性を示し、Fe-50at%Cu は Fe-25at%Cu と比較して低い値となった。粘性は温度に対して指数関数的に減少し、Cu 濃度の増加に伴って低下した。表面張力について ISS-ELF と EML の結果が極めてよく一致したことから、本実験で得られたデータの信頼性は十分に担保されたと判断できる。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、有益なご助言およびご討論をいただいた先端材料工学科 小澤俊平 先生、同志社大学 小嶋秀和 先生、東京都市大学 白鳥英 先生、富山県立大学 杉岡健一 先生、ならびに JAXA 石川武彦 先生、渡辺勇樹 先生に深く感謝いたします。

#### 本研究に関連する発表論文

Y. SEIMIYA, H. KOBATAKE, S. SHIRATORI, K. SUGIOKA, K. TONO-OKA, R. SUGAHARA, S. KUROSAWA, T. ISHIKAWA, Y. WATANABE, R. SHIMONISHI and S. OZAWA, Thermophysical Properties of Molten Fe-Cu Alloy Measured Using the Electrostatic Levitation Furnace Aboard the International Space Station (ISS-ELF) under Microgravity Conditions, ISIJ International, Vol. 64 (2024), No. 15, pp. 1-9.

#### 参考文献

- [1] K. Sugioka, Y. Tsutsui, and H. Kobatake, "Numerical Investigation for Measuring Interfacial Tension of Undercooled CuFe Alloy by an Oscillating Droplet Method in the International Space Station" Int. J. Microgravity Sci. Appl., 39, (2022), 390401.
- [2] T. Ishikawa, C. Koyama, H. Oda, H. Saruwatari, P.-F. Paradis, "Status of the Electrostatic Levitation Furnace in the ISS -Surface Tension and Viscosity Measurements", Int. J. Microgravity. Sci. Appl., 39, (2022) 390101.
- [3] J. Brillo, I. Egry, "Density and excess volume of liquid copper, nickel, iron, and their binary alloys" Int. J. Mater. Res., 95 (2004)128.
- [4] J. Lee, W. Shimoda, T. Tanaka, "Surface Tension and its Temperature Coefficient of Liquid Sn-X (X=Ag, Cu) Alloy" Mater. Trans., 45, (2004), 2864.
- [5] M. J. Assael, A. E. Kalyva, K. D. Antoniadis, R. M. Banish, I. Egry, J. Wu, E. Kaschnitz, and W. A. Wakeham, "Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Copper and Liquid Tin" J. Phys. Chem. Ref. Data, 39, (2010), 033105.
- [6] M. J. Assael, K. Kakosimos, R. M. Banish, J. Brillo, I. Egry, R. Brooks, P. N. Quested, K. C. Mills, A. Nagashima, Y. Sato, and W. A. Wakeham, "Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Aluminum and Liquid Iron" J. Phys. Chem. Ref. Data, 35, (2006), 285.

[科研費採択者助成金]





研究項目 : 科研費採択者助成金  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 次世代型メタルサポート SOFC の電極損傷解明と制御モデル構築

研究課題名 (英文) : Understanding and Modeling Electrode Damage for Control in Next-Generation Metal-Supported SOFCs

研究者 : 原 祥太郎 千葉工業大学  
HARA Shotaro 工学部 機械工学科 教授

## 1. はじめに

SOFC (固体酸化物形燃料電池) は環境負荷が少なく、高い発電効率を有するエネルギー変換機器として注目されているが、電極に用いられるセラミックスが脆性材料であるため、モビリティへの運用が困難であった。そこで近年、振動や熱衝撃が生じる環境下でも効果的な運用が見込まれる金属支持型 SOFC が注目されている。金属支持型 SOFC の課題として、高温長時間運転環境下における金属支持材料の酸化が挙げられる。酸化に伴う皮膜の成長は、電気導電性の低下や、ガス拡散性の低下といった電極性能の劣化につながる事が知られている。

酸化に伴う劣化率が低い多孔質金属を、微細構造レベルで設計するためには、長時間運転時の金属支持材の酸化状態を明らかにし、酸化前の微細構造の特徴と劣化特性との関係性を見出す必要がある。こうした評価を実験的に明らかにするには時間と労力が要することから、現在、数値シミュレーションを用いた多孔質金属の設計手法の確立が求められている。

そこで本研究では、酸化前の二次元金属多孔体断面像から、長時間運転後の酸化した三次元微細構造を予測し、その構造特性を導出する。具体的には、金属支持型 SOFC に使用される Fe-22Cr 合金を対象に、微細構造スケールの酸化シミュレーションを行った。この時、深層学習技術を用いて酸化後の二次元像から三次元構造を再構築した。得られた三次元モデルに対して構造解析を実施し、酸化進行に伴う空隙量減少が屈曲度ファクターに及ぼす影響を評価した。

## 2. 解析方法

本研究では、高温腐食理論を多孔体酸化に適用した Reiss らの数値アルゴリズムを用いた[1]。本アルゴリズムでは、酸化皮膜の成長を Wagner の理論より式(1)を基に算出し、得られた皮膜厚さから図1に示す腐食モデルにより酸化をモデル化する。

$$x_{corr}^2 = k_p t \quad (1)$$

ここで式(1)について、皮膜厚さ  $x_{con}(m)$  の 2 乗が時間  $t(s)$  に比例する放物線的な重量増加則を示しており、 $k_p(m^2s^{-1})$  は放物線酸化定数である。

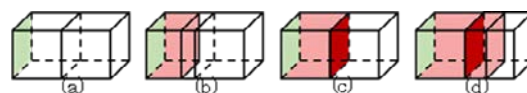


図1 腐食モデルの基本原則

図1に、腐食モデルの基本的なメカニズムを示す。初めに、元の腐食面 (緑色の面) が決定され (図1(a))、酸化物が成長すると算出された皮膜厚さが元の腐食面を持つセルに反映され、セル内の空隙率が変化する (薄い赤色の部分) (図1(b))。ある時点で最初のセルが完全に充填されると、新しい腐食可能な面が決定され (濃い赤色の面) (図1(c))、次のセルでの酸化物の成長が引き続き行われる (薄い赤色の部分) (図1(d))。本研究では、Fe-22Cr 合金上のクロム酸化物の形成を対象とした。

## 3. 主な解析結果

まず、1400°C・保持時間なしで焼結させた酸化前の Fe-22Cr 金属多孔体の実断面像を、走査型電子顕微鏡を用いて準備した。画像は実長 150×150μm とし、画像サイズは 250×250 ピクセルとした。次に、700°Cでの酸化環境と仮定し、上記のアルゴリズムに従い酸化シミュレーションを行った。この時、Koszelow らの実験値を用いて放物線酸化速度定数を  $4.40 \times 10^{-20} m^2 s^{-1}$  とした[2]。図2に、酸化に伴う微細構造変化を示す。ここでは、金属層を白色、ガス層を黒色、酸化物層を灰色で表現した。長時間の酸化に伴い、酸化皮膜が成長するとともに、金属粒子同士の連結が進行し、空隙が減少していることがわかる。

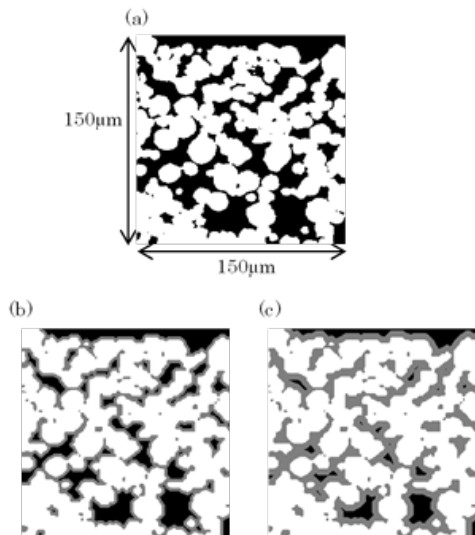


図2 二次元酸化解析から得られた微細構造変化の様子 (a)0時間後, (b)  $1 \times 10^5$  時間後, (c)  $5 \times 10^5$  時間後.

作成した酸化後の二次元画像を基に、深層学習技術 SliceGAN [3] を用いて三次元構造モデルを再構築した. SliceGAN における学習の際には、任意の各時間において三枚の酸化モデル画像を教師データとして用いた. 再構築されたモデルは実長  $150 \times 150 \times 150 \mu\text{m}$  とした (図3). 得られた三次元構造に対して空隙の屈曲度ファクターを算出した.

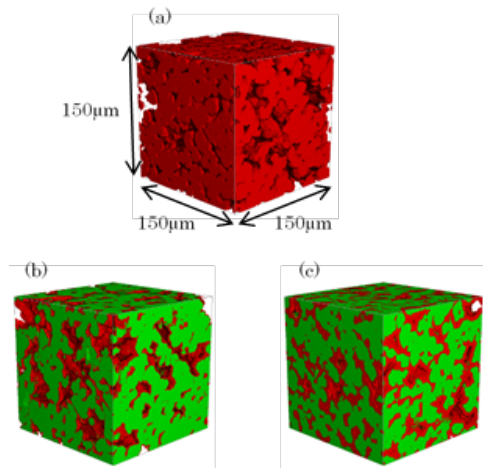


図3 三次元再構築された微細構造図 (a)0時間 (酸化前), (b)  $1 \times 10^5$  時間後, (c)  $5 \times 10^5$  時間後の様子

図4に、 $700^\circ\text{C}$ で50万時間運転時の金属支持体の空隙率と皮膜厚さの時刻歴変化を示す. 皮膜厚さの時間変化は、高温腐食理論に基づく理論解と比較しても、概ね同一の解が得られていることがわかる. よって、本研究で採用した酸化アルゴリズムを用いれば、多孔質体金属材料においても、高温環境下での長時間運転時の酸化プロセスの予測が可能となることがわかる. また酸化前に35%程度であった空隙率は、運転後の10万時間で15%

程度にまで減少した. その後は、酸化被膜の成長が放物線状となることに対応して、空隙量の減少率は緩やかとなり、50万時間後には空隙率は10%以下にまで達した.

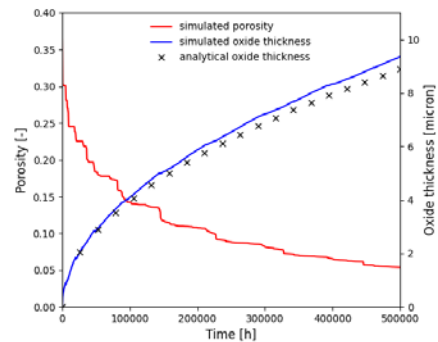


図4 酸化中の空隙率と酸化膜厚さの時刻歴変化

図5に、三次元構造に対する構造解析から得られた屈曲度ファクターの時刻歴変化を示す. 酸化の進行に伴い、屈曲度ファクターは増加しており、酸化物の生成によって多孔質構造が変化し、生成された酸化物によって空隙量が減少し、多孔体のガス輸送性能を低下させていることがわかる. その程度は、10万時間後におよそ2.5倍、50万時間後におよそ5倍程度増加することがわかった.

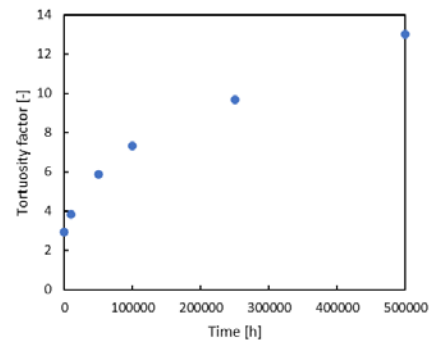


図5 酸化に伴う屈曲度ファクターの時刻歴変化

#### 4. 今後の予定

高温酸化実験を行い、本シミュレーションの妥当性を検証する. さらに、有限要素法といった別のシミュレーション技術と本解析を組み合わせることで、酸化後の力学的特性や損傷機構を明らかにする. また、分子動力学解析を用いて、酸化の活性化エネルギーを求めるとともに、酸化のミクロメカニズムを明らかにする. 最後に、機械学習技術を用いて長時間酸化状態の微細構造予測を可能にする.

#### 参考文献

- [1] G. Reiss et al, J. Power Sources (2015) 388-399.
- [2] D. Koszelow, et. al, Corrosion Science (2024) 112129.
- [3] S. Kench et. al, Nature machine intelligence. (2021) 299-305.

研究項目 : 科研費採択者助成金  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 初期ひずみをモデルパラメータとした構造物の高速逐次データ同化法に関する研究

研究課題名 (英文) : A Fast Sequential Data Assimilation Method for Structures with Initial Strain as Model Parameters

研究者 : ○秋田 剛 千葉工業大学  
AKITA Takeshi 工学部 機械電子創成工学科 教授

## 1. はじめに

逐次データ同化<sup>1)</sup>では、対象とする解析モデルのモデルパラメータを状態量として推定することで、現時点の計測データに適合した数値シミュレーションを逐次的に実行することができる。この技術は、計測のみでは評価できない様々な物理量を数値シミュレーション結果として評価できるので、構造物の状態監視や異常検知の高度化など様々な応用が考えられている。一方で、計測データと状態量の関係は非線形となることが多く、逐次データ同化をリアルタイムに高速で実行することが困難であった。本研究では、構造物の仮想的な初期ひずみを状態量とすることで計測データと状態量の関係を線形化し、簡便な高速逐次データ同化法を構築することを考える。これにより、逐次データ同化を用いた構造物の状態監視や異常検知の効率化・高度化に貢献することを目的とする。

具体的な応用対象として、軽量で収納性の高い膜材を利用した膜面構造物を取り上げる。膜面構造物の設計では、膜面に発生するしわの影響を考慮した上で変形状態や応力状態を評価することが重要となる。近年、デジタル画像相関法などの画像計測法の発展により、しわを生じる膜面の形状評価が可能となっているが、座屈による面外変形の影響から、計測された変位場を適切なひずみ場に変換することは容易ではなく、応力評価も困難である。本研究では、張力場モデルの収縮ひずみ<sup>2)</sup>を要素の初期ひずみとみなし、二次元的な面内変位場計測から線形問題として逐次データ同化を行うことで、しわを生じる膜面の応力場を簡易的に評価する方法を検討した。

## 2. 定式化

張力場モデルでは、しわを生じた領域の構成則を以下のように表す<sup>2)</sup>。

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{2w}, \mathbf{s}_2) \quad (1)$$

ここに  $\mathbf{C}$  は平面応力の弾性行列、 $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$  はそれぞれ平面の応力成分、ひずみ成分から構成されるベクトル、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{2w}$  はしわの発生による面内収縮に対応するひずみ、 $\mathbf{s}_2$  はしわの方向を表すベクトルである。張力場モデルを用いた解析ではし

わを生じた領域に式(1)を、しわの生じない二軸張力状態の領域には通常の平面応力の構成則を適用することでしわを含む膜面の解析を行う。

逆問題として、しわを生じる膜面の二次元変位場計測を用いて式(1)からひずみ場や応力場を求める場合、複雑な非線形計算が必要となる。本研究では式(1)に対応して以下のような初期ひずみをもつ平面応力の構成則を考え、二次元変位場から初期ひずみを推定することで、簡便に応力場を求める方法を考える。

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{e}_0) \quad (2)$$

ここに  $\mathbf{e}_0$  は初期ひずみベクトルを表すとする。いま、初期ひずみを要素内で一定として一般的な有限要素法の定式化を行うと剛性方程式が以下のように表される。

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} + \mathbf{h}\mathbf{e}_{all} \quad (3)$$

ここに  $\mathbf{K}$  は剛性行列、 $\mathbf{u}$  は節点変位ベクトル、 $\mathbf{f}$  は外力ベクトルを表し、 $\mathbf{e}_{all}$  は  $i$  番目要素の初期ひずみを  $\mathbf{e}_i$ 、要素数を  $n$  として以下のように定義される。

$$\mathbf{e}_{all}^T = [\mathbf{e}_0^{1T} \quad \cdots \quad \mathbf{e}_0^{nT}] \quad (4)$$

式(3)の右辺第2項は各要素の初期ひずみに起因する荷重となり、定数行列  $\mathbf{h}$  とベクトル  $\mathbf{e}_{all}$  の積で表される。

本研究では状態変数を  $\mathbf{e}_{all}$ 、観測量を  $\mathbf{u}$  とした状態空間モデルに対して逐次データ同化を実行する。いま、時間ステップを  $t$  として状態変数の時間更新式を

$$\mathbf{e}_{g,t+1} = \mathbf{e}_{g,t} + \mathbf{w}_t \quad (5)$$

と定義し、観測方程式を

$$\mathbf{u}_{t+1} = \mathbf{H}\mathbf{e}_{all,t+1} + \mathbf{a}_{t+1} + \mathbf{v}_{t+1}, \mathbf{H} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{h}, \mathbf{a}_{t+1} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{f}_{t+1} \quad (6)$$

と定義する。ただし、 $\mathbf{w}_t$  はシステムノイズベクトルであり、 $\mathbf{v}_t$  は観測ノイズベクトルである。式(5)、(6)は線形の状態空間モデルとなるため、計算負荷の小さい線形カルマンフィルタを用いて逐次データ同化を行うことができる。しわを生じた膜面の面内変位場を計測した場合、推定される初期ひずみ  $\mathbf{e}_0$  は、張力場モデルの収縮ひずみ  $\boldsymbol{\varepsilon}_{2w}$  に近づくことが期待され、そのとき、式(2)から張力場モデルに近い応力

を評価することが可能になると考えられる。

### 3. 数値実験

本研究ではまずシェル要素を用いた数値解析によりしわを生じる膜面の変位場計測データを数値的に作成した。図1に上部に解析モデルを、下部に解析結果を示す。長さ  $a=150$  mm, 幅  $b=300$  mm の矩形膜の下端は完全固定とし, 左右端は自由とする。解析では, まず上端の節点に対して  $dy=1.0$  mm の強制変位を 10 ステップに分割して作用させ膜面を引張する。その後  $dx=2.0$  mm の強制変位を 100 ステップに分割して作用させ, 膜面をせん断変形させて膜面全体にしわを発生させた。膜面を長さ方向に 50 分割, 幅方向に 50 分割, 合計 2500 個のシェル要素で離散化している。シェル要素を用いた数値解析では三次元のしわ形状が求められるが, 面内の節点変位のみを式(6)の計測データとする。

解析の増分ステップをタイムステップとして式(5), (6)を用いて逐次データ同化により全要素の初期ひずみの推定を行った。図2に推定された初期ひずみより式(2)から求めた最終ステップにおける中央部要素(膜面の下部から 25 番目の要素)の最大主応力と最小主応力をそれぞれ示す。図にはシェル要素による座屈解析から求めた主応力値と面内変位計測量から変位・ひずみ関係式と通常の平面応力の構成則を用いて計算した主応力値をあわせて示している。図2より逐次データ同化によって求めた最大主応力は, しわ波の影響で変動が大きいものの, 平均的にはシェル要素による座屈解析の値と近くなるのがわかる。一方で計測量から評価した値はシェル要素による座屈解析の値よりも小さくなっている。また, 座屈解析から求めた最小主応力はほぼ0となっており, しわの発生に伴う面外座屈によって圧縮応力が解放されているのがわかる。計測量から評価した最小主応力はしわの発生に伴う面内収縮に対応して非常に大きな値となるのがわかる。一方で逐次データ同化によって求めた最小主応力は, 膜の左右端付近ではほぼ0となり, それ以外の領域でも圧縮応力が小さな値となっているので, 完全ではないもののしわの発生に伴う圧縮応力の解放がある程度は再現されていると考えられる。

### 4. おわりに

本研究では, 平面応力要素の初期ひずみをモデルパラメータとして, 変位場計測を用いた逐次データ同化を考えた。数値実験から推定された要素の初期ひずみを用いて評価される応力は, 計測データのみから評価した応力よりも実際の応力状態に近い値となるのがわかった。なお, この原稿は日本航空宇宙学会第66回構造強度に関する講演会に発表した内容をまとめたものである。

### 参考文献

- (1) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田 亮 “データ同化入門一次世代のシミュレーション技術

—”, 朝倉書店, 2011.

- (2) Akita, Takeshi and Natori, M. C.: Sensitivity Analysis Method for Membrane Wrinkling Based on the Tension-Field Theory, AIAA Journal, Vol. 46, pp. 1516–1527, 2008.

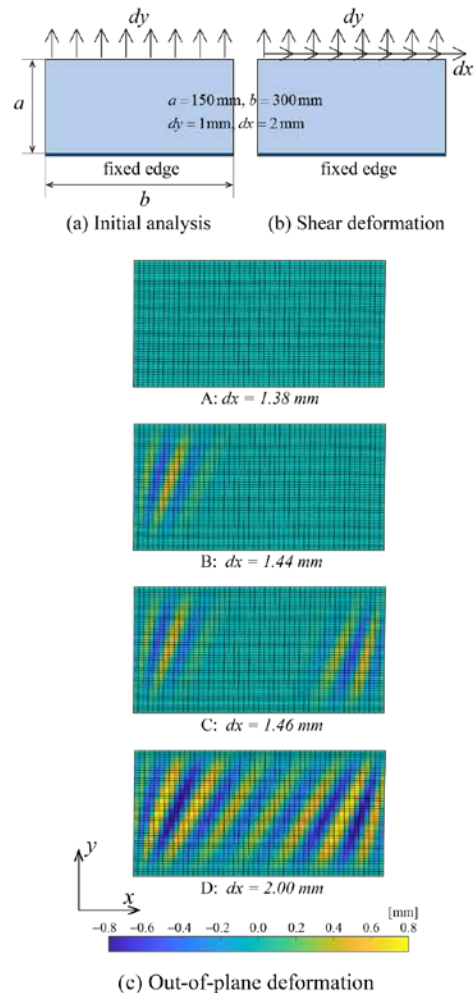


図1 シェル要素を使ったしわ解析

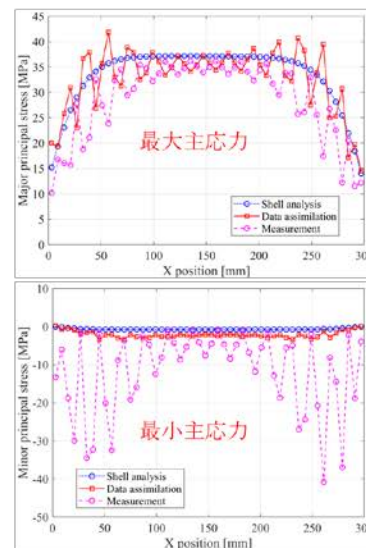


図2 推定された初期ひずみから求めた応力場

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 宇宙機を対象とした亜酸化窒素の連鎖的発熱反応による事故防止技術

研究課題名 (英文) : Accident Prevention Technology for Spacecraft Against Chain Exothermic Reactions of Nitrous Oxide

研究者 : 和田 豊  
WADA Yutaka

千葉工業大学  
工学部 機械電子創成工学科 教授

## 1. はじめに

亜酸化窒素 (Nitrous Oxide :  $N_2O$ ) は医療用途では全身麻酔として用いられるほか、食品等に用いられる人体への毒性が低い物質である。また、温度により密度や蒸気圧が大きく変化する性質を持つ。図 1.1. に NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) <sup>(1)</sup> から引用した温度に対する圧力の関係を示す。

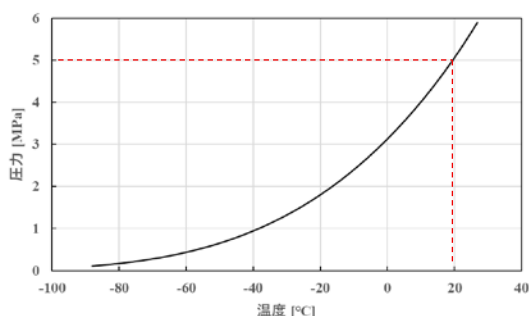
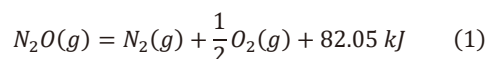


図 1.1.  $N_2O$  の温度と圧力の関係

室温 (20 °C) 付近では、 $N_2O$  は約 5.0 MPa と高い蒸気圧を有している。そのため、ロケットエンジンの酸化剤として使用する際に自らの蒸気圧で燃焼器への供給を行うことが可能であり、システム全体の簡素化を行うことが可能となる。

上記の通り、 $N_2O$  は安定しており、取扱いも容易であることからハイブリッドロケットの酸化剤として広く利用されている。

また、 $N_2O$  の特徴として自己発熱分解が生じることが挙げられる。 $N_2O$  の分解反応は以下の式で表され、単体で 600 °C から 650 °C、触媒を用いた際には約 350 °C で反応が生じることが知られている<sup>(2)</sup>。



式 1 より、 $N_2O$  の分解反応は発熱反応であり、分解により反応熱が発生する。この反応熱が周囲の  $N_2O$  分子の分解を促進することで、連鎖的に分解が進行する。

2001 年に発生したオランダでのタンク間の圧送中に発生した爆発事故等、 $N_2O$  の自己発熱分解挙動が原因とされる事故が世界中で報告されている<sup>(3)</sup>。日本国内でも、ハイブリッドロケットの燃焼実験時に酸化剤タンクや供給ラ

インなどで自己発熱分解挙動が原因とされる事故が報告されている<sup>(4)</sup>。

先行研究として、電気着火を用いて亜酸化窒素の分解反応を調査した研究は存在する<sup>(5)</sup>。しかし、ハイブリッドロケットの運用環境下のような高温かつ高圧を想定した熱エネルギーによる分解挙動を評価した例は少なく、詳細な自己発熱分解挙動への遷移条件は明らかにはなっていない<sup>(6)</sup>。本研究では気相の  $N_2O$  に対して、ハイブリッドロケットのような高圧、高温の環境下での自己発熱分解挙動の解明を最終目的として、試験装置内の初期圧力を変化させた際の自己発熱分解の挙動について調査を行った。

## 2. 研究の内容

本実験では、 $N_2O$  の自己発熱分解時の挙動を確認するために図 2.1. に示すような試験装置を使用した。

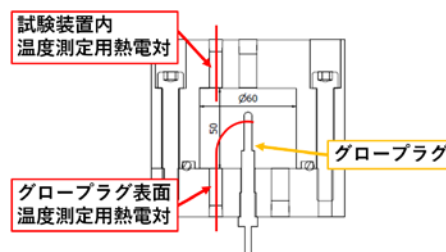


図 2.1. 試験装置内概略図

試験装置はステンレス製の円筒型の容器となっており、内部の反応空間は直径 60 mm、長さ 50 mm である。熱エネルギーの投入を行うための熱源として、装置内にディーゼルエンジンの始動等に使用するグロープラグ (HKT 製 PI-42) を設置した。グロープラグには、安定化電源を用いて 13 V を印加することで昇温を行う。

装置内を気相の  $N_2O$  を用いて十分に置換した後に酸素検知管を用いて十分に置換が出来ていることを確認した後、装置内の圧力の調整を行った。装置内の初期圧力は 0.5 MPa から 3 MPa の範囲内で 0.5 MPa 刻みで変化させた。その後、装置内に設置したグロープラグへ 120 秒の間電圧を印加することで昇温を行い、 $N_2O$  の自己発熱分解挙動に関して評価を行った。

装置には、K型シーチ管熱電対及び圧力計を設置している。グローブラグ表面及び試験装置内の2箇所の温度と装置上部及び下部の2箇所の圧力を計測した。また、試験後に酸素検知管を用いて装置内の気体を採取し、酸素濃度の測定を行うことで $N_2O$ の分解反応の有無を評価した。表2.1に試験結果を示す。

表 2.1. 試験結果

試験圧力 [MPa]	圧力比 [-]	投入エネルギー量 [J]
0.5	1.23 ~ 1.52	45 ~ 110
1.0	1.66 ~ 1.84	85 ~ 177
1.5	2.12	246
2.0	2.21 ~ 2.96	235 ~ 380
2.5	2.58 ~ 4.20	360 ~ 400
3.0	4.14	480

図 2.2. に試験装置内初期圧力 2.0 MPa で試験を実施した際の圧力及び温度の履歴を示す。昇温を開始し、グローブラグ表面の温度が約 650 °C、装置内の温度が 132 °C まで上昇した際に突発的な圧力及び温度の上昇がみられた。圧力は 2.38 MPa から 6.12 MPa に変化し、約 2.6 倍増加している。

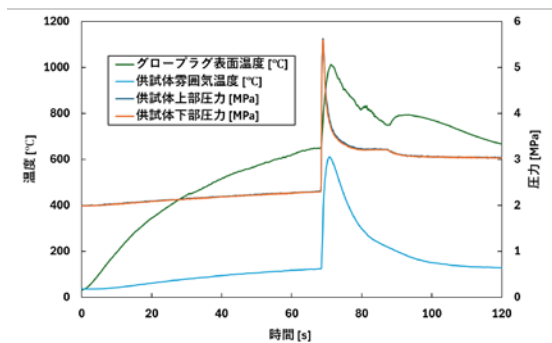


図 2.2. 試験中の温度及び圧力の推移

今回実施した試験では、全ての試験において図 2.2 に示すような $N_2O$ の自己発熱分解起因すると思われる急激な圧力及び温度の上昇が確認できた。

反応直前の圧力と反応後の圧力のピーク値との比を圧力比と定義し、各試験圧力での圧力比の評価を行った。

今回実施した実験の結果より、圧力比が試験圧力に応じて線形に上昇していく傾向が確認できた。

また、 $N_2O$ の急激な自己発熱分解を引き起こすために必要なエネルギー量を推定するために、今回の実験で $N_2O$ に投入したエネルギー量の計算を以下の式を用いて行った。

$$Q = m \times C_v \times \Delta T \quad (2)$$

Q: 投入エネルギー量 [J], m: 亜酸化窒素質量 [kg]

$C_v$ : 定積比熱[kJ/kg・K],  $\Delta T$ : 温度変化[K]

今回実施した試験の投入エネルギーと物質量との関係を表したグラフを図 2.3. に示す。投入エネルギーQ [kJ]と物質量M[mol]との間には以下の関係が見られた。

$$Q = 2.24M + 0.0199 \quad (3)$$

また、単位モル当たりの投入エネルギーを考えると、最低投入エネルギー量は 1.39 [kJ/mol] であり、平均投入エネルギーは 2.45 [kJ/mol] であることが確認できた。

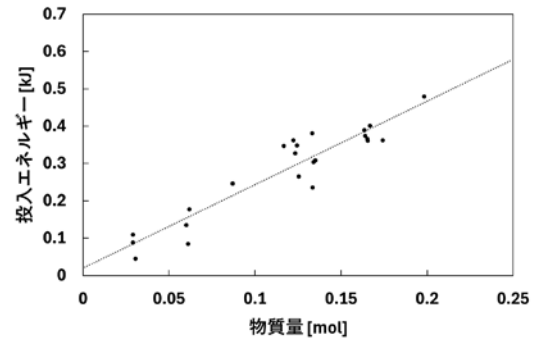


図 2.3. 物質量と投入エネルギーとの関係

### 3. まとめ

高圧環境下での $N_2O$ の分解試験を実施し、自己発熱分解時の圧力の影響に関して以下の知見を得た。

- ・反応時の圧力比が初期圧力に比例して増加する傾向が確認できた。
- ・外部熱源を用いてエネルギーを供給した際の、 $N_2O$ の突発的な自己発熱分解を引き起こすために必要な単位物質質量当たりのエネルギー量の推定を実施した。

#### 本研究に関する主な発表論文

[1] 大川 亮介, 田邊 秀一, 和田 豊, 「外部熱源を用いた亜酸化窒素の自己発熱分解時の圧力変化に関する評価」, 第 69 回宇宙科学技術連合講演会, 2025

#### 参考文献

- (1) NIST, "Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties- REFPROP DLL Ver. 10.0".
- (2) M. Galle, D. W. Agar, O. Watzenberger: "Thermal NO decomposition in regenerative heat exchanger reactors", Chemical Engineering Science, 56, 1587-1595, 2001.
- (3) 平岩徹夫, 竹腰正雄, 小野文衛, 齋藤俊二, 川口淳一郎: "1500N クラス  $N_2O$ /EA エンジン試験と供給系安全対策について", JSASS 北部支部 2015 年講演会, p11.
- (4) 五十嵐裕貴, 高野敦, 喜多村竜太, 船尾祐揮: "亜酸化窒素によるハイブリッドロケットエンジンの破裂事例と対策", 10th UNISEC Space Takumi Conference, 2020.
- (5) A. A. Borisov, K. Ya. Troshin, Yu. S. Biryulin: "Critical Conditions for Nitrous Oxide Ignition", Russian Journal of Physical Chemistry B, Vol. 3, No. 4, pp. 610-614, 2009.
- (6) 永井佑弥, 渡辺謙太郎, 和田豊: "異物混入による亜酸化窒素ガスに対する触媒効果の調査", 機械学会 2020 年度年次大会 講演論文集, 2020.

研究項目 : 科研費採択者助成金  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : QCM への自然吸着を制御した排気ガス中の親水性・疎水性微粒子の  
リアルタイム分離計測

研究課題名 (英文) : Real-time selective measurement of hydrophilic and hydrophobic nanoparticles  
in exhaust gas with controlling natural adsorption to QCMs.

研究者 : ○安藤 毅 千葉工業大学  
ANDO Ki 工学部 電気電子工学科 准教授

## 1. はじめに

内燃機関から排出される粒子状物質 (PM : Particulate Matter) は、炭素と灰分などから成るススが主体である。さらに、ススの表面上に未燃焼料や潤滑油、不完全燃焼生成物、熱分解生成物、水分などが凝集し吸着する。このことを踏まえて、我々はスス表面に親水基を有する物質が多く凝集した親水性 PM、疎水基を有する物質が多く凝集した疎水性 PM に分類した。親水性 PM に限らず、湿度をはじめとする親水性物質に着目した研究は数多く行われている。しかし、疎水性物質に着目した研究報告は我々が調べた限りまだ見当たらない。

そのため本研究では、官能基同士に働く吸着作用の検討を、PM 表面性状、特に疎水性物質の選択的測定の実現を目的として実験を行った。水晶振動子微量天秤 (QCM : Quartz Crystal Microbalance) の感応膜成膜により、親水性及び疎水性物質の測定に選択性を得られるとする先行研究がある。各性状の物質が有する官能基に更に着目し、異なる材料にて感応膜を成膜した QCM にて、PM の測定に先立ち揮発性有機ガスを対象とした測定を行った。その応答を比較し、選択的測定のために用いる感応膜と測定対象の官能基同士の吸着原理を検討した。

## 2. 研究の内容

### (1) 実験内容

本研究で使用した QCM は、スピコーティング法により感応膜が成膜されている。感応膜成膜材料は、親水基であるヒドロキシ基 (-OH) を有するポリビニルアルコール (PVA) と酢酸セルロース (CA)、疎水基であるフェニル基 (-C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>) を有するポリスチレン (PS)、疎水基であるフェニル基 (-C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>) とメチル基 (-CH<sub>3</sub>) を有するシリコーンレジン (SI) である。これらの成膜材料を選択した理由は、親水基

または疎水基を有する揮発性有機ガスの選択的測定を可能とする成膜材料であることが示唆されているためである。また、感応膜材料の溶液濃度を変化させ、感応膜の膜厚を変化させた。これまでに感応膜の膜厚増加により測定対象の選択性が向上する知見が得られていることから、感応膜と測定対象に吸着の相互作用が発生しているかを確認するためである。

本研究での測定対象は、親水基であるヒドロキシ基 (-OH) を有する水蒸気 (H<sub>2</sub>O)、メタノール (CH<sub>3</sub>OH) とエタノール (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) と 2-プロパノール (C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH)、疎水基であるメチル基 (-CH<sub>3</sub>) を有する n-ペンタン (C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>CH<sub>3</sub>) と 2,2,4-トリメチルペンタン (C<sub>7</sub>H<sub>15</sub>CH<sub>3</sub>)、疎水基であるフェニル基 (-C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>) を有するベンゼン (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) とトルエン (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>) である。これらの測定対象は、DEP に凝集する可能性がある物質であるとともに、吸着原理を検討するために、同じ官能基を有する物質として選定を行った。

図 1 に実験系を示す。QCM はその表面に物質が吸着することにより、その吸着質量に比例して発振周波数が低下する素子である。そのため、発振周波数をモニタリングすることにより吸着した物質の検出が可能である。セパラブルフラスコ (ガラス製、容積約 1.8L) 内部に QCM と発振回路を設置した。そして、発振回路に周波数カウンタ (岩崎通信機, SC-7205C) を接続することで QCM の発振周波数変化を PC に記録した。測定対象は、試験層内におけるガス密度 100 g/m<sup>3</sup> となるように投入した。

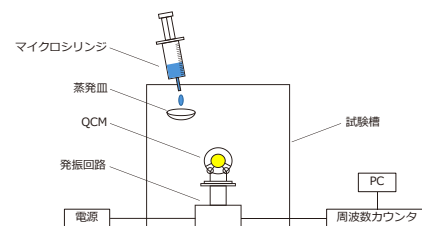


図 1 揮発性有機ガス測定実験の実験系

## (2)実験結果

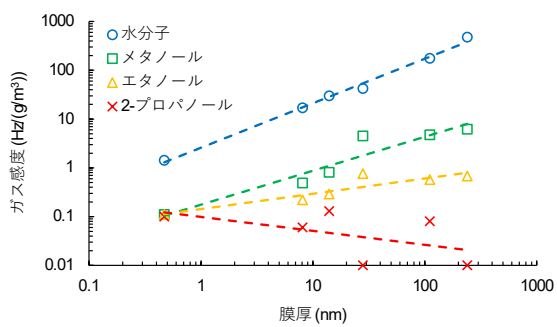
本報告では、本研究で得られた成果の一部分を抜粋して述べる。図2は親水性のPVA感応膜、図3は疎水性のSI感応膜を成膜したQCMの、膜厚に対する各ガス感度である。グラフの横軸は各感応膜における推定膜厚を示している。縦軸は、周波数変化量 $\Delta f_{res}$  (Hz)を、ガス密度で割ることにより得られるガス感度 ( $\text{Hz}/(\text{g}/\text{m}^3)$ )を示している。図2(a)を見ると、水分子は膜厚の増加に伴いガス感度が増加している。メタノールとエタノール、プロパノールとなるにしたがって、ガス感度の増加が得られなくなっている。これは、ガスの官能基全体に対する親水基の割合が減少するため、吸着の相互作用が減少しているためだと考えられた。他のガスでは膜厚の増加に伴う感度増加は見られず、相互作用が働いていないものと思われる。

図3の各グラフを図2と比較すると(a)では、水分子に対する感度増加が得られなくなっている一方で、アルコール類への感度増加は著しい。また、(b)、(c)でも図2と比べ、膜厚増加に伴い感度が増加しており、感応膜とガスに吸着の相互作用があり、CH- $\pi$ 相互作用と報告される吸着

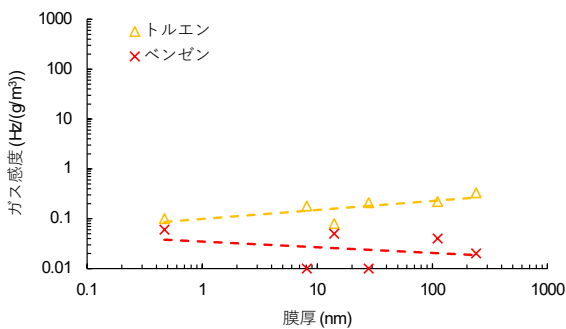
作用が働いているものと思われる。

このように、本研究では、複数の感応膜とガス間での吸着の相互作用を確認し、また、同じ官能基を持つ同族体ガスに対しては類似した結果を得ることにより、その確認を強める結果を得た。今後はこの結果を応用し、親水性・疎水性PMのリアルタイムな分離測定を実現してゆく。

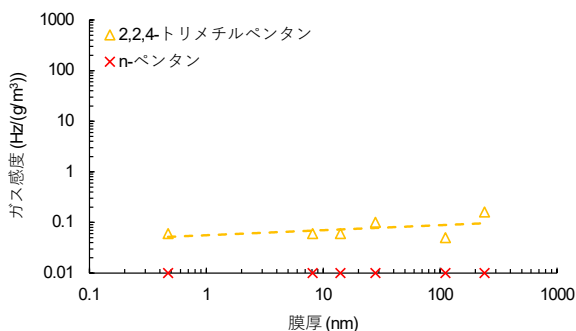
この成果は、電気学会の令和7年E部門総合研究会にて発表を行ったものであり、本報告書はその予稿を再編、加筆したものである。



(a) Water, Methanol, Ethanol, 2-Propanol

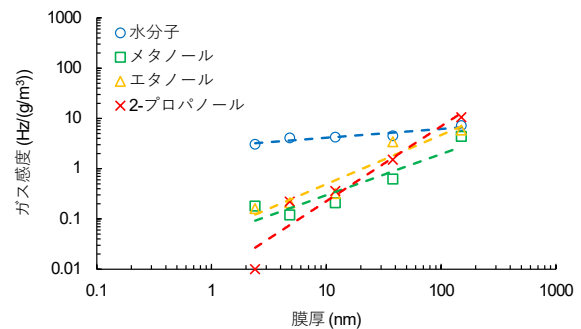


(b) Toluene, Benzene

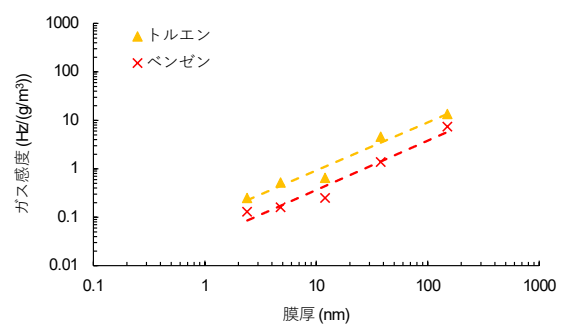


(c) 2,2,4-Trimethylpentane, n-Pentane

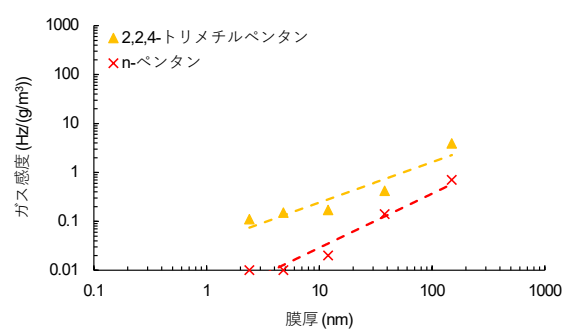
図2 PVA感応膜QCMにおける膜厚对各ガス感度



(a) Water, Methanol, Ethanol, 2-Propanol



(b) Toluene, Benzene



(c) 2,2,4-Trimethylpentane, n-Pentane

図3 SI感応膜QCMにおける膜厚对各ガス感度

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : PO<sub>4</sub>鎖を鋳型とした結晶水の配列制御による超広域温度作動型プロトン導電体の創成

研究課題名 (英文) : Design of Ultra-Wide-Temperature-Range Proton Conductors through PO<sub>4</sub>-Chain-Templated Arrangement of Crystallization Water

研究者 : 松田 泰明 千葉工業大学 工学部 応用化学科 准教授

## 1. はじめに

プロトン導電体は、燃料電池などの発電デバイスの開発や水素を用いた新規レドックス反応場の構築に向けて、触媒反応に適する 150-300°C を含む、室温から 500°C の広域温度帯で作動する物質の開発が急務となっている。しかし、この温度域で耐熱性と高プロトン導電特性を発現する既存の物質は存在しないことから、既存の材料開発から脱却した新たな指針に基づく物質開発が必要である。

本研究では、リン酸塩の強固なトンネル骨格で耐熱性を確保し、PO<sub>4</sub>四面体と水素結合で連結する結晶水を鎖状配列させることでプロトン拡散系路を構築する独自の手法で上記の特性を両有する新規物質を開発したので、その成果について報告する。

## 2. 研究内容

一価と二価のカチオンを組み合わせた複合カチオンリン酸塩は、構成元素によって、安定な骨格が大きく変化する。K<sup>+</sup>やRb<sup>+</sup>などの比較的大きなカチオンを含むリン酸塩は、PO<sub>4</sub>四面体が環状構造を形成する骨格が安定となる傾向があるのに対して、ナトリウムを含むリン酸塩はPO<sub>4</sub>四面体鎖をもつ骨格が安定となる傾向が確認された。Na<sup>+</sup>含有リン酸塩では、Ca<sup>2+</sup>およびNi<sup>2+</sup>でプロトン導電体として未知の骨格を持つ物質が出現し、Mg<sup>2+</sup>と類似のイオン半径をもつ Zn<sup>2+</sup>や Co<sup>2+</sup>を置換した物質で、高プロトン導電体 NaMg<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>・yH<sub>2</sub>O と同型の新規物質が得られた。

これらの物質は、固体の合成によりプロトンの導入が可能であった。これらのリン酸塩は、プロトンの導入とともに、吸湿性が向上し、プロトンの拡散媒体となる結晶水量が増加する傾向がある。その一方で、吸湿性が高すぎると、ペレットの形状保持が困難となるため、結晶水量の適切な制御が重要となる。本研究では、Ca<sup>2+</sup>含有系およびZn<sup>2+</sup>やCo<sup>2+</sup>含有リン酸塩は、Mg<sup>2+</sup>と比べて、吸湿性が低く、含水量が少なくなる傾向が確認された。これは、骨格の酸性度を低下させるために中和反応として結晶水が取り込まれると考えた際、骨格の酸性度の制御が重要と解釈できる。本研究から、これまで認識されていたプロトン量だけでなく、骨格を形成するカチオンの電子吸引力により、PO<sub>4</sub>四面体と結合したH<sup>+</sup>の安定性が変化するため、骨格の酸性度が変化する可能性が示唆された。

本研究では、複合カチオンリン酸塩に着目し、新規な構造をもつプロトン導電体を開発し、そのうち、NaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2x</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>・yH<sub>2</sub>O が特に優れたプロトン導電体であることを明らかにした。図1にNaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2x</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>・yH<sub>2</sub>Oの結晶構造、図2にプロトン導電率の温度依存性を示す。

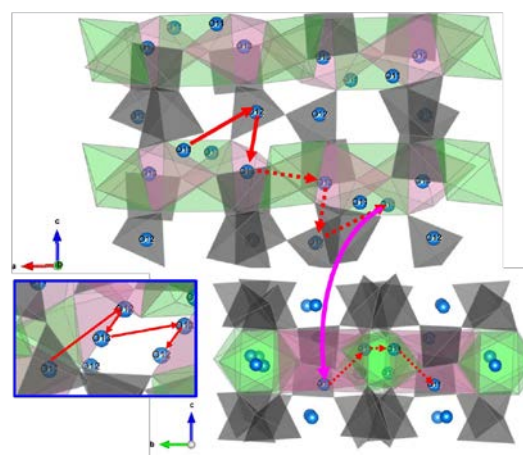


図1 NaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2x</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>・yH<sub>2</sub>Oの結晶構造。緑の八面体をNa<sup>+</sup>、桃色の八面体をNi<sup>2+</sup>が占有し、灰色で示したPO<sub>4</sub>四面体に隣接して青球で示した結晶水が鎖状配列する。

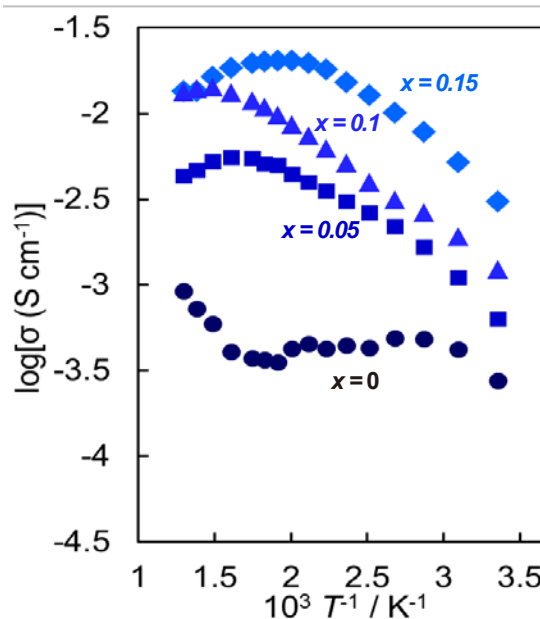


図2 NaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2x</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>・yH<sub>2</sub>O プロトン導電率の温度依存性

NaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oは、面共有で連結した(NaO<sub>6</sub>)(NiO<sub>6</sub>)鎖とPO<sub>4</sub>四面体鎖が一次結合のみで連結した熱的に安定なトンネル骨格中に、ジクザクに配列したPO<sub>4</sub>四面体鎖と水素結合を介して、結晶水が鎖状配列することを明らかにした。この新たに見出した結晶水鎖が形成する水素結合ネットワークは、結晶内のプロトン拡散系路となる可能性が高い。そのため、NaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成によるプロトンを導入した試料の合成を試みたところ、元素置換によりx=0.15までプロトンを導入することができた。この物質は、プロトンの増加に伴い、導電率が大きく向上し、x=0.15の組成で、100–600°Cの超広域温度帯で固体電解質として実用レベルの値である10<sup>2</sup> Scm<sup>-1</sup>mを超える導電率を示し、225°Cで2.0 × 10<sup>2</sup> Scm<sup>-1</sup>の高い値を示すことを明らかにした。NaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oは、この温度域で10<sup>2</sup> Scm<sup>-1</sup>を発現した世界初の物質である。

この物質のプロトン導電率は、Benitoite型リン酸塩やトンネル型リン酸塩KNi<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>O, NaMg<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oと同等のプロトン導電率を発現した。そして、NaMg<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oと同様に、K<sup>+</sup>を含むリン酸塩よりも中温の広域温度帯での保水力にやや優れる傾向が確認された。これらリン酸塩の結晶水は、アルカリ金属と配位結合を形成することで、骨格中に高温で保持されると考えられる。アルカリカチオンの価数はいずれも一価だが、イオン半径が小さいほど、カチオンの表面電荷密度は高くなる。この差により、Na<sup>+</sup>を含むリン酸塩は、結晶水の酸素とより強固な配位結合を形成し、中温域でより優れた保水力を示すのだと考えられる。

#### 本研究に関する主な発表論文 論文(査読あり)

K. Hirose and Y. Matsuda, High Proton Conductivity over a Wide Intermediate Temperature Range in Benitoite-type KMg<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>O with Three-Dimensional Water Network within a Rigid Open Framework, *ACS Applied Energy Materials*, 8(24), 17688-17695,(2025).

#### 解説記事

松田 泰明, 複合カチオンリン酸塩におけるプロトン導電体の開発, 電気化学, 93 巻 2 号 pp.100 - 104 (2025).

#### 学会発表(国際学会)

Y. Matsuda, Crystal Structures and Proton Conductivity of Mixed-Cation Phosphates, Materials Research Meeting, 12/8-12, 2025, Yokohama (Invited).

S. Ishikawa and Y. Matsuda, Synthesis, Thermal Stability and Proton Conductivity of NaNi<sub>1-x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>O, Materials Research Meeting, 12/8-12, 2025, Yokohama.

S. Ishikawa, H. Takahashi, K. Otsuka, N. Ueta and Y. Matsuda, Synthesis, Thermal Stability, and Proton Conductivity of NaM<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>O (M : Ni<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>), PRiME 2024, 2024/10/6-11, Honolulu.

K. Hirose and Y. Matsuda, Synthesis, Thermal Stability, and Proton-Conductivity of the Mixed-Cation Phosphate with One-Dimensional Tunnels Formed by PO<sub>4</sub> Tetrahedral Rings, PRiME 2024, 2024/10/6-11, Honolulu.

#### 学会発表(国内学会)

相澤光羽, 松田泰明, トンネル型リン酸塩 KNi<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成と熱安定性およびプロトン導電特性, 材料技術研究協会討論会 2025, 2025/12/5-6, 松江  
勝亦勇氣, 松田泰明, 複合カチオンリン酸塩 NaZn<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成およびプロトン導電特性, 材料技術研究協会討論会 2025, 2025/12/5-6, 松江

廣瀬 和彦, 黄 友香, 松田 泰明, PO<sub>4</sub>環状構造をもつプロトン導電体の合成, 構造および電気化学特性, 第51回固体イオニクス討論会, 2025/11/25-27, 東京.

廣瀬 和彦, 黄 友香, 松田 泰明, Benitoite型リン酸塩の合成, 結晶構造とプロトン導電特性, 第15回CSJ化学フェスタ 2025, 2025/10/22-24, 東京.

相澤光羽, 松田泰明, トンネル型リン酸塩 KNi<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成と熱安定性および電気化学特性, 第15回CSJ化学フェスタ 2025, 2025/10/22-24, 東京.

高橋遥也, 大塚啓太, 松田泰明, NaMg<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成および中温域における熱安定性とプロトン導電特性, International Student Symposium 2025, 2025/8/24, 横浜.

大塚啓太, 松田泰明, 複合カチオンリン酸塩 NaCa<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの熱安定性とプロトン導電特性, International Student Symposium 2025, 2025/8/24, 横浜.

石川翔太, 松田泰明, NaNi<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成および熱安定性とプロトン導電特性, 日本セラミックス協会 2025 年年会, 2025/3/7-9, 浜松.

高橋 遥也, 大塚 啓太, 松田 泰明, NaMg<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成および中温域における熱安定性とプロトン導電特性, 日本セラミックス協会 2025 年年会, 2025/3/7-9, 浜松.

石川翔太, 松田 泰明, 結晶内PO<sub>4</sub>鎖を鋳型とした新規プロトン導電体 NaNi<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成と電気化学特性, 第15回CSJ化学フェスタ 2024, 2024/10/22-24, 東京.  
大塚啓太, 松田泰明, 新規プロトン導電体 NaCa<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成と電気化学測定, 第15回CSJ化学フェスタ 2024, 2024/10/22-24, 東京.

廣瀬 和彦, 黄 友香, 松田泰明, Benitoite-type KCa<sub>1-x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成, 熱安定性およびプロトン導電特性, 第15回CSJ化学フェスタ 2024, 2024/10/22-24, 東京.

廣瀬 和彦, 松田泰明, Benitoite型リン酸塩 KMg<sub>1-x</sub>Li<sub>x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの熱安定性とプロトン導電特性, 粉体粉末冶 2024 年度春季大会(第133回講演大会), 2024/5/21-23, 横浜.

松田 泰明, 黄 友香, 廣瀬 和彦, ベニトアイト型リン酸塩 KCa<sub>1-x</sub>H<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·yH<sub>2</sub>Oの合成と電気化学特性, 粉体粉末冶 2024 年度春季大会(第133回講演大会), 2024/5/21-23, 横浜.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 半乾燥草原のプラヤに注目したダストストーム発生条件の推定

研究課題名 (英文) : Estimating conditions of dust-storm occurrence over a semi-arid grassland focusing on playas

研究者 : 松島 大

MATSUSHIMA DAI

千葉工業大学

創造工学部 都市環境工学科 教授

## 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (Inter-governmental Panel on Climate Change, IPCC) 第6次報告書に、現状の地球温暖化が人間活動に依ることが「疑いようがない」ことが記述された。同報告書には、温暖化の進行のみならず、温暖化の進行に伴うさまざまな現象 (例えば、氷河の後退) が顕著になっていることが強調されている<sup>1)</sup>。干ばつの頻度増加とこれに付随する砂漠化の進行も地球規模で影響が大きな現象として挙げられている。地球の陸面全体のうち乾燥地は4分の1を占め、この乾燥地を中心に、干ばつに伴って森林火災、砂塵嵐とダスト発生が大規模化しており、これらが頻発することによって砂漠化する地域が増大することが懸念されている。

モンゴル国は国土全体が半乾燥地域と乾燥地域で占められ、特に降水量が少ない中南部では気候条件が農業に不適であることから、放牧による畜産業が主要な産業の一つである。国土は北部の森林地域を除けば草原に占められていて、この草原において放牧が安定して行われるためには、草原が健全に維持されること、少なくとも砂漠化への移行を食い止めることが必須となる。ところが、モンゴル国は世界中の乾燥地域の中でも比較的高緯度に位置することから、気温の高低や大雨と干ばつの交代が季節内変動から経年変化までのさまざまな時間スケールで見られる。このような気象の大きな変動が高温、低温、干ばつ、大雨等による自然災害を度々もたらしている。特にゾドと呼ばれる家畜の大量死がモンゴル国全体では5~10年に1度発生し、異なる地域の小規模な事象も含めると毎年国土のどこかで発生している。ゾドは主に干ばつ、低温、大雪、またはそれらの複合によって発生しやすい。干ばつによって植生が乏しくなると、家畜の餌資源の減少を通じて冬季を経て翌年の春季に至るまで影響を及ぼすことがあり、2009-10年に生じた大規模なゾドはこのような特徴を示している<sup>2)</sup>。

干ばつの頻発によって砂塵嵐やダスト発生が促されるが、逆に砂塵嵐やダスト発生の頻発が砂漠化の進行を促す面も指摘されている<sup>3)</sup>。こうしたことから、乾燥地域における砂塵嵐に関する諸条件を明らかにすることは、この現象自体についてのみならず、砂漠化進行の要因を明らかにすることに繋がると考えられる。

砂塵嵐の発生条件は、主に大気条件(erosivity)と地

表面条件(erodibility)に大別される。大気条件のうち最も重要なのは強風であり、ついで蒸発散がテンシタルを増大させる空気の乾燥が挙げられる。一方、地表面条件については、1) 土壌水分の欠乏、2) 植生量の欠乏、3) 土性の種類が挙げられる。この他に大小さまざまなスケールの地形 (起伏) は強風や降雨の空間分布に影響を与え、地形に伴う河川流等の水文学的な条件が地表面条件の1)~3)に間接的に影響を与えると考えられる。

モンゴル国で特に砂塵嵐が発生しやすい地域として3つの地域が指摘されており、このうちの一つは本研究が対象にする湖沼谷 (Gobi Lakes Valley) である<sup>4)</sup>。湖沼谷は中国とモンゴルにまたがるゴビ砂漠の北縁に位置し、東西に延びる二つの長さ500 km程度の山脈 (ハンガイ山脈、ゴビアルタイ山脈) に挟まれた谷で、谷幅は約100 kmである。谷底には大小さまざまな湖沼が点在し、主に谷の北側に位置するハンガイ山脈から流れ出す河川がこれらの湖沼に流れ込んでいる。湖沼や河川は常時水を蓄え、もしくは水流があるもののほか、大雨の際だけ水面もしくは水流が現れるものも多い。植生はまばらな草原であり、水面や水流の近傍を除くと植生量は正規化植生指数 (NDVI) で最高0.2程度にしかならない。一方、そのような水流によって山地から土砂が運ばれ、河川沿いや湖沼に堆積する。水流が間欠的な河川や水面面積の消長が大きな湖沼では堆積物を乾燥させるが、このような場所はプラヤ(playa)と呼ばれ、強風が起きた際に堆積物が風下方向に飛散する<sup>5)</sup>。飛散した土砂の多くは近傍への移動にとどまるが、一部は黄砂として国境を越えて日本まで到達する。このような水流に伴う土砂の堆積と強風による飛散は高空間解像度を持つ衛星センサーによる観測によっても捉えられ、例えば欧州宇宙機関 (European Space Agency, ESA) が運用する Sentinel-2 (空間解像度10 m) によって捉えることができる<sup>6)</sup>。

著者はモンゴル国のゴビ地域を対象として、土壌水分の広域推定や砂塵嵐発生に関する研究を続けてきており、2022年以降はプラヤが多数存在し砂塵嵐が発生しやすいことが指摘されているモンゴル国ゴビ地域の湖沼谷において気象・水文観測を行っている。本稿では、この観測や他のデータを用いて得られた結果の一部を報告する。

## 2. 方法

本研究では湖沼谷の谷底に存在する2地点で気象・水文観測（以下、「現地観測」と称する）を行った。このうち本稿の解析に用いたデータはPM<sub>10</sub>と風速である。観測に関する詳細はMatsushima et al. (2023)に示されている<sup>7)</sup>。

米国海洋大気局(NOAA)が収集している地上気象観測データ(SYNOP)を用いた。SYNOPは世界気象機関に登録された気象観測点において観測され、規定の方法で通報されたデータである。本研究が対象とするのは湖沼谷とその周辺に存在する9地点である。解析に用いたデータは降水量と現在天気であり、現在天気のうち砂塵嵐発生に関連深いデータを用いた。観測データの記録間隔は3時間である。詳細はMatsushima et al. (2023)に示されている<sup>7)</sup>。

解析の対象とした期間は現地観測及びSYNOPともに2023~2025年であるが、2025年は8月までである。

## 3. 結果と考察

図1は湖沼谷とその周辺における月別の降水量と砂塵嵐発生日数を比較したものである。砂塵嵐発生日数は、現地観測については日平均PM<sub>10</sub>濃度が0.1 mg m<sup>-3</sup>を上回った日、SYNOPについては1日のうち1回でも砂塵嵐に関する現在天気(09, 30, 31, 32, 33, 34, 35)を観測した場合とした。

図に示されるように、砂塵嵐発生日数が1ヶ月のうち10日を越える月は限られていて、多くの場合、月降水量は10 mm以下である。また、多くの場合、1ヶ月に5日以上であるのは月降水量が30 mm以下の場合である。以上のように月降水量が少ないのはどの地点でも夏季以外であるが、夏季でも30 mm以下である地点も少ないながらも。月降水量が50 mmを超えると砂塵嵐発生日数は多くの場合2-3日以下である。このような場合は夏季に集中しており、夏季にはどの地点でも植生量が他の季節より多い傾向にあるため(NDVI $\geq$ 0.15、図省略)、土壌水分量が多いことだけでなく、植生量が増えることで砂塵嵐を抑えている可能性がある。

本稿において、現地観測ではSYNOP地点のような現在天気の目視観測により砂塵嵐の判別を行っていないため、図1ではPM<sub>10</sub>濃度のデータによって代えたが、グラフの分布の傾向は現地観測とSYNOPで大きな相違は見られなかった。ただ、現地観測の方がSYNOPに比べて日数がやや多い傾向が見られた。したがって、SYNOP地点で砂塵嵐が観測されるのは、PM<sub>10</sub>濃度の日平均値が0.1 mg m<sup>-3</sup>より多い場合である可能性がある。

### 参考文献

1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Climate change 2021: The physical science basis, summary for policymakers. IPCC, Switzerland, 31pp.

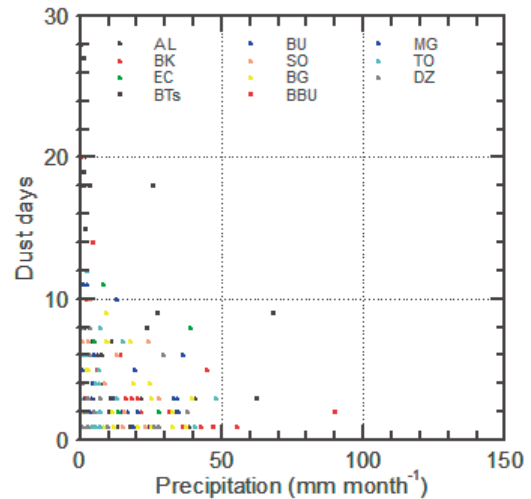


図1 湖沼谷とその周辺における月別の降水量(Precipitation)と砂塵嵐発生日数(Dust days)を比較した散布図。

2) Shinoda, M., 2017: Evolving a multi-hazard focused approach for arid Eurasia. In Sternberg, T. (ed) "Climate hazard crises in Asian societies and environments", Routledge, New York, USA, 217pp.

3) United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), 2022: Sand and dust storms compendium :Summary for decision makers. Bonn, Germany. 37pp.

4) Mandakh, N., Tsogtbaatar, J., Dash, D., and Khudulmur, S., 2016: Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia. Journal of Geographical Sciences, 26(4), 473-483.

5) Zucca, C., Middleton, N., Kang, U., and Liniger, H. 2021: Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management. Catena, 207, 105669. doi:10.1016/j.catena.2021.105669.

6) European Space Agency (ESA): Sentinel-2. [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2). (Accessed on 14 Dec 2025)

7) Matsushima, D., Ganzorig U., and Batkhishig, O., 2023: Preliminary results of estimating erodibility and erosivity over the Lake Valley, Mongolia. Batdelger et al. (eds.), Proceedings of the Fourth International Conference on Environmental Science and Technology (EST 2023), 223-232. doi:10.2991/978-94-6463-278-1\_22.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : インパクト型慣性アシストによるロボットと人間の運動能力向上の研究

研究課題名 (英文) : Study on impact-type inertial assist for enhancing motion of robots and human

研究者 : 米田 完  
YONEDA Kan

千葉工業大学  
先進工学部 未来ロボティクス学科 教授

## 1. はじめに

本研究ではロボットや人間の運動を補助する際にモータや筋肉の出す力に加える形で関節回転を直接アシストするのではなく、装着したおもりなどの加減速運動による反力でアシストする慣性アシストを探索している。中でも、おもりの並進や回転運動を衝突などによって瞬時に変える手法は、短時間に大きなアシスト力を発生させることができ、歩行などの運動中の瞬発力の不足を補うことができると考える。本報告ではこのようなインパクト型慣性アシストの方法や機構を複数提案し、それらの効果の検証内容を紹介する。

## 2. 足踏み運動における左右揺動型インパクトアシスト

図1左のように左右の足先を交互に上げながら足踏み運動をするものに、図1右のように上部で揺動し、左右端で衝突を起こして瞬時に運動量を下の脚部に伝える手法を考案した。これはインパクトによる力発生に加えて、おもりの左右移動による重心の移動の効果もあり、足踏み運動を小刻みでなく長周期に誘導し、足先を上げている時間を長くするようにアシストする効果をもつ。図2の試作機は、足先部の地面からの高さを測るレーザーセンサ情報にもとづいて足先の蹴り出しソレノイドを制御することによるオリジナルの足踏み運動ができる。これに対して上部のアシスト機構は、揺動が左右端部に達したことを検知するリミットスイッチの情報に時間遅れと定時間パルス発生処理をしておもりを揺動させるソレノイドを駆動している。この方法の特徴は、下部の足踏み運動の情報を直接使わず、上部おもり運動を独立して制御していることである。これは人間のアシストに適用する際に、足先や筋肉の動きをセンシングすることなく、装着したアシスト装置内部の制御ができることにつながる。

試作機による実験では、左右運動のロール角は図3のように変化している。アシストの無い2脚足踏み機構では通常、ロール角変化はサインカーブ状で、支持脚切り替えが瞬時に行われて2脚支持期間が無い。しかし本機構では下部足踏み機構のロール角がゼロのところまで休止期間があり、2脚支持期間が生じている。そしてその分、全体の足踏み周期が長くなっている。これはロール角最大値を増やさず、すなわち足上げ高さを通常と同程度に保ちながら上部の運動が長時間

化できることを示しており、遊脚の前振り出しを速くしなくても歩幅を大きくできる可能性を持っている。

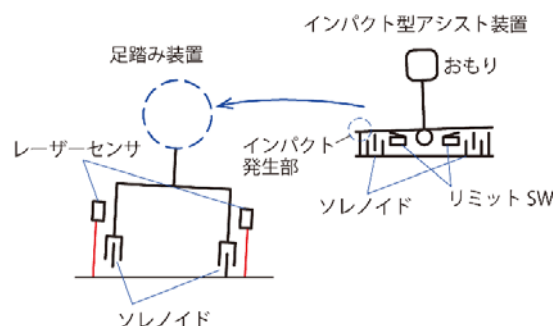


図1 足踏み装置にインパクト型アシストを付加



図2 足踏み実験装置

(上部アシスト装置は下部本体の信号を利用しない)

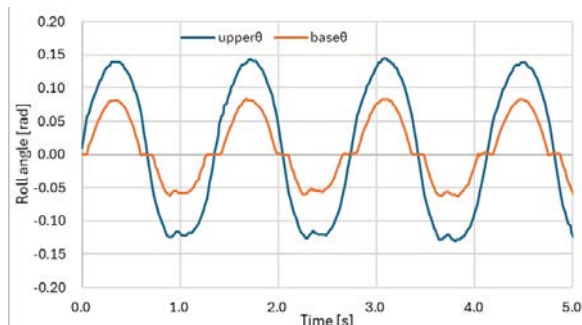


図3 足踏み装置(赤)とアシスト部(青)の角度

### 3. 平面2足歩行モデルのインパクト型角運動量アシスト

図4のような平面内の2足歩行運動を行うヒザ付き円弧足先の機構は斜面を下りる受動歩行ロボットとして多く研究されている。本研究ではこの受動歩行ロボットを平坦面上で歩行させるため、腰関節部に図4のように回転ホイールのアシスト機構を付加した。ホイールは遊脚中に徐々に回転を速め、脚切り替えの瞬間にその角運動量をインパクト的に前脚（これから支持脚になる脚）の大腿部に伝えて次の一步を生成させる角運動量を得るように制御する。シミュレーションでは図5のように平地での運動が継続でき、その脚切り替え時の大腿部角度を1ステップごとにプロットしたポアンカレマップは図6となった。横軸は図4の $\theta$ 、縦軸が $\phi$ である。このアシスト付き歩行は、受動歩行のような強い収束性のある引き込み現象は示さないものの、図6の範囲内から逸脱することなく継続して運動できることを示している。現在、図7の実験機による検証を進めている。

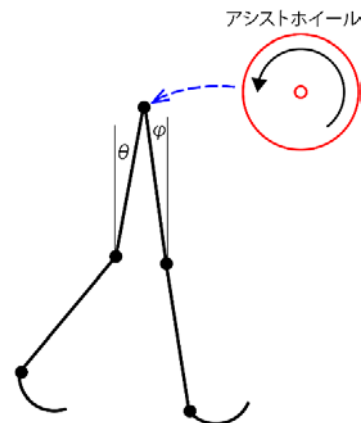


図4 平面歩行モデルにアシストホイールを追加

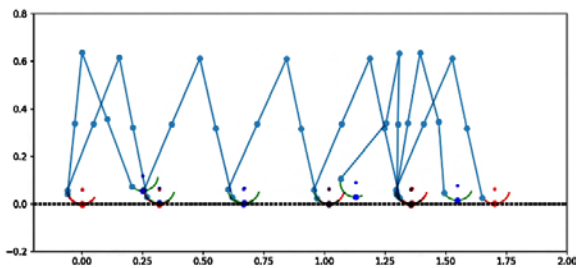


図5 平面歩行シミュレーション

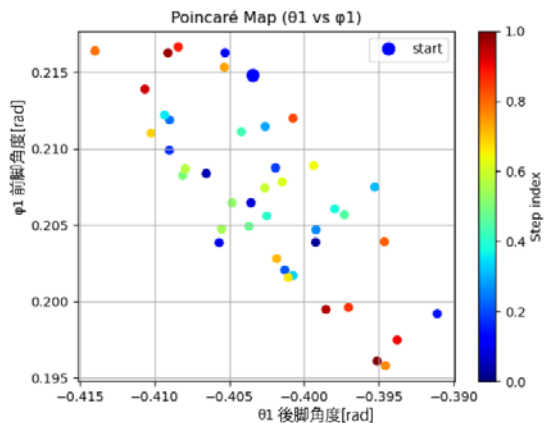


図6 シミュレーションの脚切り替え時の大腿角度マップ

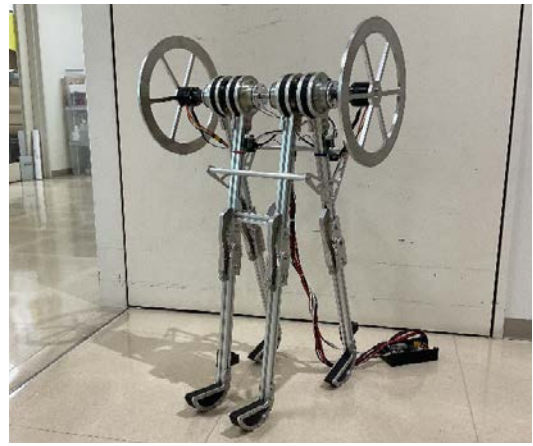


図7 インパクト型ホイール付き平面歩行機

### 4. 左右揺動2足歩行のインパクト型アシスト

図8の2足歩行ロボットに図1右と同様の揺動型インパクトアシスト装置を付けて歩行を試みた。図9にロール角の変化のようすを示す。アシスト部分は左右脚より大きな角度で振れ、脚角度が最大になるタイミングで衝突現象が起き、ロボット本体へ運動量を伝えている。



図8 2足歩行ロボット

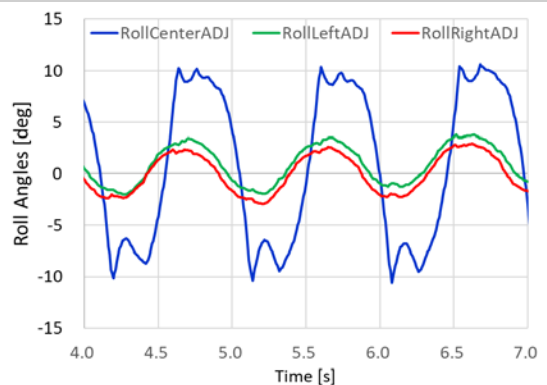


図9 アシスト装置(青)と左右脚(緑・赤)の揺動

### 5. まとめ

本研究ではインパクト型慣性アシストを足踏み運動、平面内2足歩行、3次元2足歩行に適用して実験を行い、効果を示した。歩行周期を長くできること、受動関節のみの2足歩行でもアシストによって平地で歩行が継続できることなどが明らかになった。

研究項目 : 科研費採択者助成金  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 人工塩基を含むアプタマーの立体構造と作用機序の解明およびアプタマーの改良

研究課題名 (英文) : Analysis of the three-dimensional structure and binding mechanism of an aptamer containing an artificial base and improvement of the aptamer

研究者 : 坂本 泰一 千葉工業大学  
SAKAMOTO Taiichi 先進工学部 生命科学科 教授

### 1. はじめに

アプタマーは、「適合する」という意味と「オリゴマー」の意味からなる造語であり、一般に特徴的な立体構造を形成して標的分子に結合する人工核酸のことを指す。標的分子が病因タンパク質の場合、アプタマーはその病気の治療薬となり得るので、次世代の分子標的薬として期待されている。これまで、Pegaptanib (Macugen) とよばれるアプタマーが、加齢黄斑変性症の治療薬として、2004年にアメリカ食品医薬品局 (FDA) により認可され、2008年には厚生労働省でも認可されている。そして、2024年8月に第二のアプタマー医薬品として地図状萎縮を伴う加齢黄斑変性症の治療薬である avacincaptad pegol (IZERVAY) がFDAによって認可されたが、認可された数は少ない。

アプタマー創薬においてコアとなる技術は、創薬ターゲットに強く結合するアプタマーを取得する技術 (SELEX法あるいは試験管内人工進化法とよばれる) と、取得したアプタマーを臨床開発品として最適化する技術である。SELEX法ではランダムな核酸プールを調製し、そこからアプタマーをスクリーニングする実験を繰り返すが、様々なスクリーニング法が開発されている。一方、アプタマーの最適化ではアプタマーの短鎖化と化学修飾を行うが、現在のところ定石はなく、研究報告もほとんどない。そのため、一般的には最適化は経験と試行錯誤により行われる。この背景には、アプタマーの立体構造情報、アプタマーと標的タンパク質の相互作用における原子座標レベルの情報、立体構造や相互作用への化学修飾の影響についての物理化学的情報などが極めて少ないことが原因としてある。化学修飾の相互作用に対する効果について多くの情報が蓄積し、それらを予測することができるようになれば、世界的にアプタマー創薬のスピードは大きく加速することが期待される。

また、アプタマーの弱点として、アプタマーを構成するヌクレオチドの多様性の低さがあげられる。アプタマーは、抗体医薬品と同様に標的タンパク質に結合して作用するが、抗体は20種類のアミノ酸からつくられており、核酸は4種類のヌクレオチドからつくられることから、アプタマーの構造や物性の多様性が少ない。そこで、アプタマーに様々な非天然型の塩基を導入し、天然塩基とは異なる物

性を付与すれば、高機能なアプタマーの作製が可能となり、有用なアプタマー医薬品の開発に寄与すると考えられる。このような背景の中、平尾らのグループは、非天然型の塩基 7-(2-thienyl) imidazo[4,5-b]pyridine (Ds ; 図1) をアプタマーに2つ導入することを試みた。その結果、天然塩基からなる既報のアプタマーに比べて血管内皮細胞増殖因子 VEGF に対して約 100 倍高い結合能を持つ 47 残基の DNA アプタマー (抗 VEGF アプタマー ; 図1, 解離定数  $K_d = 0.65 \text{ pM}$ ) の作製に成功した(1)。このアプタマーは、VEGF に非常に強く結合することが明らかとなっているが (図2), その相互作用機序については明らかになっていない。

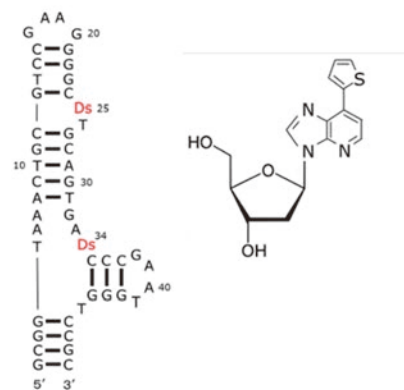


図1 抗 VEGF アプタマーの二次構造と非天然型塩基 Ds の化学構造

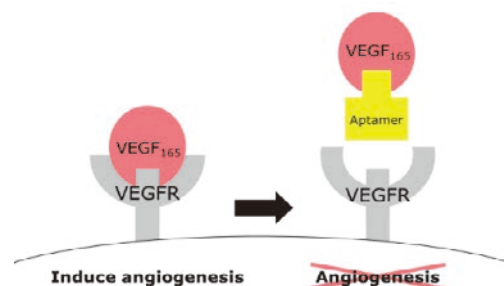


図2 アプタマーによる VEGF165 の VEGFR への結合の阻害

本研究では、非天然型の塩基 Ds をもつ抗 VEGF165 アプタマーと VEGF との相互作用機序を明らかにし、アプタマーと VEGF の強い結合における Ds のはたらきを明らかにすることにより、非天然型のヌクレオチドが標的タンパク質との相互作用に及ぼす影響についての情報を得ることを目的としている。さらに、その情報を用いてアプタマーを高機能化する方法を確立することを目的とした。

## 2. 研究の内容

### (1) 人工塩基を含むアプタマーの NMR 解析

人工塩基を含むアプタマー単体の軽水中・重水中の NMR 解析を行った。塩基数の多いアプタマーの NMR スペクトルでは、シグナルが重なってしまうため、短縮型アプタマー T-00221 を設計した (図 3)。さらに、T-00221 を 3 つのステムループ DNA に断片化し、解析を行った。溶媒としてリン酸緩衝生理食塩水 (PBS; 1.1 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 155 mM NaCl, 3.0 mM Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, pH 7.4) を用いた。600 MHz の NMR 分光計 (AVANCE600, Bruker Biospin 社) で測定を行った。測定温度は 283 K あるいは 298 K とした。

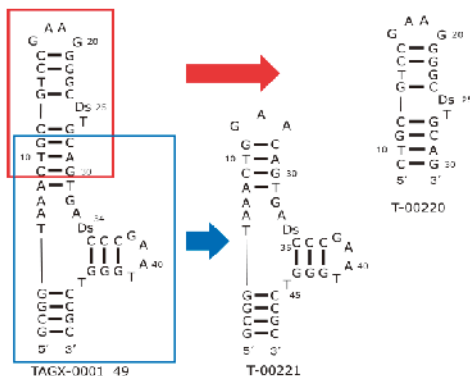


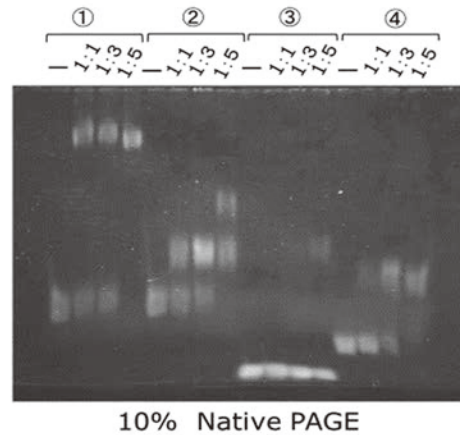
図 3 短縮型アプタマー T-00220 と T-00221 の設計

### (2) VEGF の調製

Ds の HBD への影響を調べるために HBD の NMR 解析を行う。HBD の調製のために、大腸菌の発現系を用いた。宿主大腸菌に BL21 (DE3) 株、プラスミドには pET システムで構築したプラスミド (Kanamycin 耐性) を用いた。エレクトロポレーション法により形質転換を行い、3.5 L の LB 培地で培養した。IPTG により 14 時間発現誘導させ、集菌した。大腸菌を超音波破碎した後、Ni<sup>2+</sup>アフィニティーカラムクロマトグラフィーと Heparin アフィニティーカラムクロマトグラフィーにより精製し、SDS-PAGE で確認した。さらにアプタマーとの結合を確認するため、Electrophoretic mobility shift assay (EMSA) 法を用いた。アプタマーは TAGX-0001\_49 と短鎖化した T-00220, T-00221 を用いた (図 4)。アプタマーとの比が 1:1, 1:3, 1:5 になるように濃度を調製し 10% Native PAGE で確認した。

集菌した結果、約 17 g の湿菌を得た。このうち半分の湿菌を超音波破碎した。その上清を Ni<sup>2+</sup>アフィニティーカラムクロマトグラフィーと Heparin アフィニティーカラム

クロマトグラフィーで精製し、20% SDS-PAGE により確認した。その結果、HBD (7.5 kDa) と考えられるバンドが確認された。収量は、約 40 μM の HBD 溶液 8 mL (約 320 nmol) であった。さらに EMSA にて TAGX-0001\_49 と短鎖化した T-00220, T-00221 との結合を確認した結果、HBD を加えたレーンにはバンドのシフトが見られたことから、HBD が調製できたことが示唆された (図 4)。さらに T-00220 は HBD との結合が弱いことが示唆された。



10% Native PAGE

図 4 EMSA による結合の確認

① TAGX-0001\_49 と VEGF, ② TAGX-0001\_49 と HBD, ③ T-00220 と HBD, ④ T-00221 と HBD の相互作用

### 3. まとめ

人工塩基を含むアプタマーの NMR 解析では予測した構造をとることが示唆された。複合体の NMR 解析では、HBD の添加により 34 番目の Ds 周辺の構造が変化することが示唆された。HBD の調製では EMSA 法で結合確認を行った結果、シフトが見られたことから HBD を調製できたと考えた。現在、安定同位体標識した HBD を調製し、詳細な NMR 解析を実施している。

### 参考文献

(1) Kimoto, M., et al. Nat. Biotechnol., 31, 453-457

研究項目 : 科研費採択者助成金  
研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 単細胞アメーバの多細胞化における祖先的細胞間コミュニケーションの分子機構解明

研究課題名 (英文) : Elucidation of the molecular mechanism for ancestral cell-cell communication to acquire multicellularity in Dictyostelia amoebae

研究者 : 成田 隆明 千葉工業大学  
NARITA Takaaki 先進工学部 生命科学科 准教授

## 1. はじめに

我々ヒトを含む多細胞生物は、どのようにして地球上に誕生したのだろうか? この問いに回答すべく、単細胞生物であった共通祖先による“多細胞化”という大進化の仕組みを解明することは、進化生物学における極めて重要な課題である。多細胞化には細胞間コミュニケーションが必須であり、単細胞アメーバによる細胞間コミュニケーションシステムの進化の変遷を分子レベルで理解することは、多細胞生物誕生をもたらした大進化の謎の解明に迫る一つの手段となる。

細胞性粘菌は、単細胞アメーバとして土壤中に生息する原生物(真核微生物)である。しかし、饑餓状態に陥ると約10万個の単細胞アメーバが集合して多細胞化する。細胞性粘菌は系統的に4つの主要なグループに分けられており、グループ4の種はcAMPを、*Polysphondylium violaceum*を含むグループ4以外の種の多くはグロリンというジペプチドを走化性物質として用いて多細胞化する<sup>1</sup>。また、グループ4以外の種で見られるグロリンを介した多細胞化メカニズムは、細胞性粘菌の中でも祖先的な細胞間コミュニケーションシステムであり、細胞性粘菌に限定した進化の歴史の中でも「単細胞アメーバによる多細胞化メカニズム」は変化してきたと考えられる<sup>1,3</sup>。そこで本研究では、細胞性粘菌の中でも祖先的な(グロリンを介した)細胞間コミュニケーションシステムによる多細胞化メカニズムを分子レベルで解明することを目指している。

## 2. 研究の内容

(1) *P. violaceum*の多細胞化における必須遺伝子の同定  
*P. violaceum*の多細胞化に必須と予想される遺伝子(グロリン合成酵素、グロリン受容体などを含む)は全く不明である。したがって、長年の研究によって蓄積されたモデル生物*Dictyostelium discoideum*の(cAMPを走化性物質として用いた)多細胞化メカニズムの知見を基に、*P. violaceum*の多細胞化に関連する遺伝子やシグナリング経路を明らかにするには限界がある。そこで、REMI法(Restriction enzyme-mediated integration)を用いることで、*P. violaceum*の多細胞化における必須遺伝子の同定を試みた。REMI法とは、薬剤耐性遺伝子カセットを含む線

状化プラスミドを制限酵素認識配列依存的にゲノム中へランダムに挿入し、薬剤耐性遺伝子カセットの挿入部位を確認することで、目的的生命現象に関与する遺伝子を同定する方法である。*P. violaceum*におけるREMI法はこれまで未確立であったが、*P. violaceum*で使用可能なREMI用プラスミドの作製および使用する制限酵素の検討を行なうことで、*P. violaceum*におけるREMI法のプロトコルを確立した(図1)。その後、実際に*P. violaceum*野生株に対してREMIによるランダム変異挿入を何度か試みたところ、複数のREMI変異体を取得することができ、多細胞化する際の細胞集合に欠損がみられる変異体は2クローン取得できた(図2)。

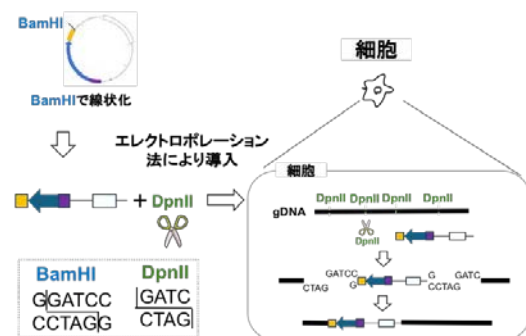


図1. REMI法の概略図

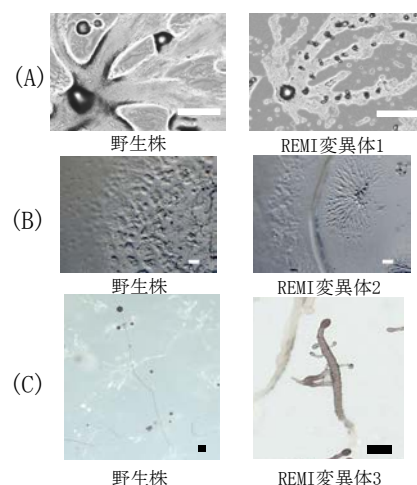


図2. REMI法により得られた変異体

(A), (B): 細胞集合に欠損がみられる変異体  
(C): 子実体形成に欠損がみられる変異体

## (2) *P. violaceum*におけるSt1AとPKAの関連性の検証

我々はこれまでに、細胞性粘菌の主要グループ間で保存された酵素 (St1A) に着目し、*P. violaceum*において *st1A* 遺伝子を破壊したところ、この遺伝子破壊株 (*Pv-st1A*株) は多細胞化できないことを明らかにした。この結果は、*Pv-st1A*株はグルリンを介した細胞間コミュニケーションシステムに欠損があることを示しており、現在のところ *Pv-st1A*株は *P. violaceum*における唯一の多細胞化不全株である。そこで *Pv-st1A*株を用いて、グルリンを介した細胞間コミュニケーションシステムの一部を明らかにし、*P. violaceum*と *D. discoideum*の (異なる細胞間コミュニケーションシステムを用いた) 多細胞化メカニズムを比較することで、細胞性粘菌における多細胞化メカニズムの進化の変遷を分子レベルで明らかにすることを試みている。

本研究では、St1AとプロテインキナーゼA (PKA)の関連性を検証するため、PufA (PKA 翻訳抑制因子) をコードする遺伝子を *Pv-st1A*株において破壊し、*Pv-st1A*株の多細胞化不全が回復するかを検証した。その結果、*Pv-st1A/pufA*株も多細胞化不全を示したことから (図3)、*P. violaceum*のSt1Aによる多細胞化誘導メカニズムは、PKAシグナル経路とは独立していることが強く示唆された。

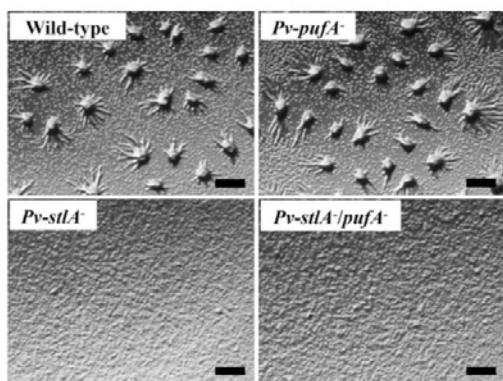


図3. *Pv-st1A*株における *PufA* 遺伝子破壊の影響

野生株 (Wild-type) および *Pv-st1A*株における *pufA* 遺伝子を破壊し、各変異体の細胞集合の様子を顕微鏡により観察した。

## (3) *Pv-st1A*株のサプレッサー変異体の取得

*Pv-st1A*株に対して REMI を行ない、*Pv-st1A*株のサプレッサー変異体の取得を試みた。サプレッサー変異とは、ある遺伝子の変異によって生じた表現型異常を打ち消す第二の遺伝子変異のことである。REMIによって得られた変異体を「多細胞化できる」という表現型を指標としてスクリーニングしたところ、*Pv-st1A*株のサプレッサー変異体を3クローン取得することができた (図4)。これら3クローンで破壊されている遺伝子は、*P. violaceum*のSt1Aによる多細胞化誘導シグナルにおいて、St1Aの下流に位置している遺伝子である可能性が極めて高いと考えられる。したがって、今回得られた *Pv-st1A*株のサプレッサー変異体のゲノム中に挿入されている薬剤耐性遺伝子カセットの部位を確認することで、*P. violaceum*のSt1Aシグナル経路に関与する遺伝子を同定することができるはずである。

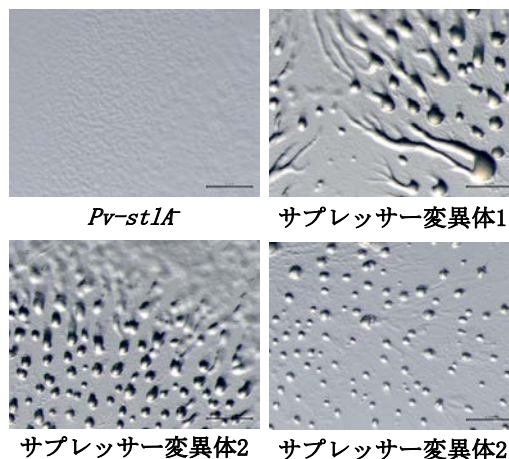


図4. REMI法により得られた *Pv-st1A*株のサプレッサー変異体

*Pv-st1A*株およびそのサプレッサー変異体の細胞集合の様子を顕微鏡により観察した。

## 3. まとめ

本研究では、*P. violaceum*におけるグルリンを介した細胞間コミュニケーションシステムを分子レベルで明らかにするため、REMI法を用いて *P. violaceum*の多細胞化に関与する遺伝子の探索を試みた。その結果、細胞集合に欠損がみられる REMI 変異体や、*Pv-st1A*株のサプレッサー変異体を取得することができた。また、*Pv-st1A*株を用いて St1AとPKAシグナル経路の関連性を検証したところ、St1AはPKAシグナル経路とは独立して作用していることが強く示唆された。今後は、REMIによって得られた各変異体のゲノム中における薬剤耐性遺伝子カセットの挿入部位を特定し、各変異体で破壊されている遺伝子を明らかにすることで、*P. violaceum*の多細胞化に関連する遺伝子を同定してゆきたい。

本研究に関する主な発表論文

- [1] Yamasaki DT and Narita TB (2024), Evidence that the St1A polyketide synthase is required for the transition of growth to development in *Polysphondylium violaceum*, *Biosci Biotechnol Biochem*, 88(11):1362-1369.

参考文献

- (1) Schaap P (2011), Evolution of developmental cyclic adenosine monophosphate signaling in the Dictyostelia from an amoebozoan stress response, *Dev Growth Differ*, 53(4):452-462.
- (2) Schilde C et al. (2019), A well supported multi gene phylogeny of 52 dictyostelia, *Mol Phylogenet Evol*, 134:66-73.
- (3) Asghar A et al. (2012). Developmental gene regulation by an ancient intercellular communication system in social amoebae, *Protist*, 163(1):25-37.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 高度好熱菌の細胞膜を構成する特異な脂質分子種および生合成遺伝子の解明と進化の道筋

研究課題名 (英文) : Elucidation of the unique lipid molecules constituting the cell membrane of thermophilic bacterium, their biosynthetic genes, and the evolutionary pathway

研究者 : 根本 直樹 千葉工業大学  
NEMOTO Naoki 先進工学部 生命科学科 教授

## 1. はじめに

*Thermus thermophilus* HB8 株 (基準株) は、1968 年に伊豆の峰温泉から単離された 70°C 付近に至適生育温度をもつ高度好熱性の真正細菌である。HB8 株は、培養の容易さと遺伝子操作系が確立されたこと、さらに採取者である大島泰郎博士が世界中の研究者に分与したことから、様々な生化学研究の材料として用いられている。熱安定な HB8 株のタンパク質は、その扱いやすさから構造生物学の主要なターゲットとなり、リボソームの立体構造解明などノーベル賞につながる研究の材料にもなった。また、HB8 株をターゲットとした各種オミクス解析により丸ごと一匹の理解を目指したプロジェクトが 2000 年代に実施された。これらのことから HB8 株は、生物学的な情報が数多く蓄積されたモデル生物のうちのひとつとなっている。

細胞膜を構成する脂質分子は、一般的にリン酸基が結合したリン脂質と糖が結合した糖脂質に大別される。研究対象とする *T. thermophilus* は、脂質 1 分子にリン酸基と糖が結合した「リン糖脂質」を主要な細胞膜脂質分子の一つとしてもつ (図 1)。また、脂肪酸鎖は通常の脂質でみられる 2 本ではなく 3 本で構成され、末端が分岐した分岐鎖脂肪酸である。高温で安定な細胞膜を形成するために特徴的な点をもつと考えられている。しかしながら、2022 年まで主要な 3 種の脂質分子種のみ、分子構造が報告されており、また、これらを含むすべての脂質分子種の生合成経路は未解明のままであった。

本研究者は、*T. thermophilus* が産生するすべての細胞膜脂質分子種を同定すると共に、その生合成経路を明らかにする研究に取り組んでいる。これまでに 4 番目となる脂質分子種の同定を行い、論文発表した (1)。また、*T. thermophilus* が産生する脂質分子種を TLC で分離・検出を行い、31 種の脂質スポットを見出した。官能基を発色させる方法で、これら脂質のプロファイルを作成し、論文発表した (2)。

また、HB8 株の単離から 50 年後の 2018 年に、同じ採取地から HB5018 株を単離し、全ゲノム配列の比較解析から HB8 株とごく近縁であることを論文発表した (3)。

本研究課題では、HB8 株の未同定の脂質分子種を同定し、生合成経路の全体像を明らかにすることおよび HB5018 株の有する脂質分子種と比較解析を行うことで、*T. thermophilus* が特徴的な細胞膜脂質分子種をもつに至った進化の道筋を解明することを目的として研究を行った。

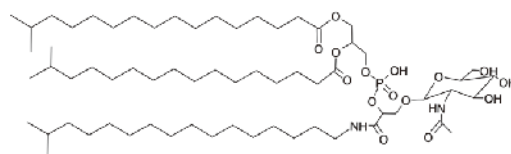


図 1. *T. thermophilus* HB8 株のリン糖脂質

## 2. 研究の内容

### (1) 脂質合成酵素の候補遺伝子の選定

遺伝子破壊を行うにあたり、脂質合成酵素の候補遺伝子の選定を行った。本研究者は *T. thermophilus* の細胞内で起こる代謝反応の全貌解明を目指す ThermusQ プロジェクト (<https://thermusq.net>) に参画しており、共同研究者と共に推定脂質合成経路を作成し、web (<https://thermusq.net/pathway/PWBA0005PW/>) 上で公開している。その経路上に記載された反応に関与すると推定される遺伝子を、*T. thermophilus* のゲノムのアノテーション情報や既知遺伝子との相同性から探索した。理化学研究所遺伝子材料開発室 (BRC) が提供する遺伝子破壊用のベクターを購入・使用し、入手不可な候補遺伝子については遺伝子破壊ベクター作製を試みた。

### (2) 遺伝子破壊ベクターの作製

BRC から入手ができなかった候補遺伝子について、遺伝子破壊ベクターの作製を行った。破壊対象遺伝子の上流と下流の各 1000 bp の断片を PCR で調製し、約 1000 bp の抗生物質カナマイシン耐性遺伝子の両端に PCR を利用して結合した、計 3000 bp の断片を調製し、ベクターへクローニングすることで遺伝子破壊ベクターを作

成した。これまでに10種以上の遺伝子に対するベクターが完成した。

### (3) 遺伝子破壊株の作製

BRCから購入した20種と研究室で作成した10種の遺伝子破壊ベクターを用いて *T. thermophilus* 遺伝子破壊株を作製した。*T. thermophilus* を遺伝子破壊ベクターを用いて自然形質転換させ、細胞内で起こる相同組み換えを利用して、カナマイシン耐性を得た株を遺伝子破壊株として選択した。選択された遺伝子破壊株候補は、ゲノム上に起きた遺伝子長の変化をPCRと電気泳動法で確認することで同定した。その結果、計20種以上の遺伝子破壊株を取得することができた。

### (4) 遺伝子破壊株の脂質パターン変化の解析

得られた遺伝子破壊株を培養・集菌して脂質画分を抽出し、合成された脂質分子種をHPTLCで解析した。

糖転移反応酵素遺伝子破壊株は、主要糖脂質GL2が消失するという変化がみられた(図2)。質量分析の結果から、GL2は合成されず、その前駆体であるGL1の蓄積が認められた。このことから、破壊した遺伝子は、GL1に糖を転移する酵素の遺伝子であることが示唆された。

アセチル基転移酵素遺伝子破壊株は、主要脂質スポットのうち2つが消失し、異なる2つの脂質スポットが出現するという大きな変化がみられた(図3)。質量分析の結果から、GL1とGL2の疎水鎖部分がアセチル基に変化した脂質であると推定され、破壊した遺伝子は、脱アセチル化酵素であると示唆された。

## 3. まとめ

本研究課題の遂行により、*T. thermophilus* の脂質合成に関連すると予想される遺伝子候補を2つ見出すことができた。これらは、未報告の遺伝子であるため、新規遺伝子の発見となる。また、HB5018株の脂質解析とHB8との比較解析は、進行中である。

科研費採択者助成金の支援により、採択された2024年度科学研究費基盤(C)(課題番号24K08689)での研究課題の実験を円滑に開始することができた。*T. thermophilus* の脂質合成経路解明には、さらなる遺伝子同定と脂質分子種の同定が必要となるため、引き続き研究を行う。

### 本研究に関する主な発表論文

- (1) Naoki Nemoto *et al.*, PGLN: A newly identified amino phosphoglycolipid species in *Thermus thermophilus* HB8. *Biochem. Biophys. Res.* **32**, 101377, (2022).
- (2) Masahiko Kawaguchi *et al.*, Profiling of lipids in *Thermus thermophilus* HB8 grown under various conditions. *J. Gen. Appl. Microb.* **69**, 79–90, (2023).
- (3) Kentaro Miyazaki *et al.*, Complete genome sequence of *Thermus thermophilus* strain HB5018,

isolated from Mine Hot Spring in Japan. *Microbiol. Resour. Announc.* **10**: e00039–21, (2021).

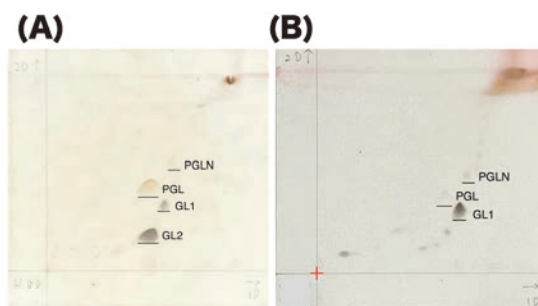


図2 糖転移遺伝子破壊株の脂質分子種変化の解析  
(A) *T. thermophilus* 野生株 (HB8 株) のHPTLC分析結果、  
(B) *T. thermophilus* 糖転移遺伝子破壊株のHPTLC分析結果。いずれの株も栄養培地、70℃で培養し、抽出した脂質画分の全脂質を検出した。遺伝子破壊株において、主要糖脂質GL2の脂質スポットが消失した。PGLNは、研究者らが同定し、発表論文(1)で報告した新規アミノ糖脂質。

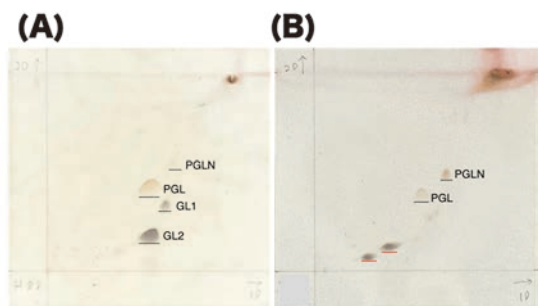


図3 アセチル基転移酵素遺伝子破壊株の脂質分子種変化の解析  
(A) *T. thermophilus* 野生株 (HB8 株) のHPTLC分析結果、  
(B) *T. thermophilus* アセチル基転移遺伝子破壊株のHPTLC分析結果。いずれの株も栄養培地、70℃で培養し、抽出した脂質画分の全脂質を検出した。遺伝子破壊によって2つの主要脂質スポットGL1とGL2が消失し、赤線の2つの脂質スポットが新たに検出された。

---

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : プログラム動作への意識付けを指向した TDD 支援システムと理解状況分析手法の開発

研究課題名 (英文) : Development of a Test Driven Development support system focused on program behavior awareness and a method for analyzing understanding status of learners

研究者 : 國宗 永佳

KUNIMUNE Hisayoshi

千葉工業大学

情報変革科学部 認知情報科学科 教授

---

## 1. はじめに

筆者は、これまで高等教育機関においてプログラミングの導入的な教育を行ってきた。なお、ここで述べるプログラミングの導入段階とは、関数やクラスを用いてモジュール化されたプログラムを作成するのではなく、基本的な概念・操作を用いて単体のプログラムを作成する段階を想定している。

その中で、学習者が作成したプログラムの動作について十分に確認せずに完成したとみなすケースを多く見ている。いくつかの入力パターンにおける実行例を示した上でプログラムの動作を確認することを促しても、例示されたパターンについての動作確認を行わずにプログラムを提出する事例が多くある。プログラムを作成する上で、様々な状況を想定した上で適切な処理を記述することは重要である。しかし、学習者が動作確認を行わない場合、様々な状況を想定し適切な処理を記述できているかについて、学習者自身が気付くことができない。

また、筆者は従前よりプログラミングの導入的な演習で提示する課題について S-P 表を用いた分析などを行い、特異な課題については表現を分かりやすくするなどの改善を行っている。それでも、課題の内容を誤解してプログラムを作成することがある。このような誤解は、プログラムを作成するという課題においては非本質的な誤りであり、未然に防ぐ必要がある。実行例などを参照して動作確認を行えば誤りに気付くことができるが、十分に動作を確認しないために誤解したままプログラムを作成し続けることがある。

上述したものも含めて、導入的な教育を実施する中で、初学者が演習問題などでプログラムを作成する際に困難となる要因を以下の(a)~(f)に分類した。

- (a) 文法的な誤り
- (b) 個々の操作や制御構造の動作の理解誤り
- (c) 演習問題の理解誤り
- (d) 処理を適切に分割できない
- (e) 処理手順 (アルゴリズム) の想起
- (f) 作成したプログラムの動作確認

(a)については、初学者向けのビジュアルプログラミング環境 AT を開発して解決を図った。ビジュアルプログラミングを用いることで、画面上に配置された図形要素 (ブロック) の組み合わせによってプログラムを作成できる。学習者は数値や文字列などのデータを記入することはあるが、プログラミング言語の文法に関わるキーワードや記号類を記入することはないため、文法的な誤りが起こらない。

(b)については、プログラム実行中の変数の値の変化や論理演算の真偽を実行順序とあわせて記述することで、プログラムの動作についての理解を表出する形式の課題 (トレース課題) を提案した。また、この課題の出題・採点機能と、解答から学習者のプログラム動作に対する理解誤りの要因を分析する機能を AT 上に実装し、(b)の解決を図った。

残る(c)~(f)のうち(d)と(f)については、テスト駆動開発 (Test driven development; TDD) を導入することによって解決できると考えた。TDD はソフトウェア開発手法の1つで、仕様を部分的に満たすソフトウェアから開発をはじめ、漸進的に仕様を追加しながら開発を進める手法である。また、部分的な仕様を満たすソフトウェアを開発できたことを確認するために、ソフトウェアの開発とその動作の検査 (テスト) を一体化して実施する。具体的には以下の過程を、仕様を追加しながら繰り返す。

- (1) 部分的な仕様を満たすことを確認するためのテストを作成する
- (2) 現状のソフトウェアでは(1)のテストに失敗することを確認する
- (3) 失敗したテストが成功するようにソフトウェアを修正する
- (4) (1)で作成したテストが成功することを確認する

(d)については、TDD の導入により漸進的にプログラムを作成するため、演習問題を小さい問題に分割してプログラムを作成することを意識づけることができる。また、小さい問題に分割することで、(e)についても比較的容易にすることができる。

(f)については、プログラムの作成前にテストを作成し、テストが成功するまで修正を行うという TDD の特性によって解決できる。しかし(c)の問題がある場合には、演習問

題（仕様にあたる）の誤った理解に基づいた不適切なテストを行ってしまうため、(c)と(f)を合わせて解決する必要がある。

一般的なソフトウェア開発では、与えられた仕様を満たすソフトウェアを開発するため、開発したものが仕様に沿っていることを確認するためにテストを作成する。しかし初学者にとっては、与えられた演習問題から適切なテストを作成することや、テストが適切であることを確認すること自体が難しい。そこで筆者は、初学者が作成したテストの妥当性を教授者が予め作成した模範解答となるプログラムによって確認することで(c)を解決し、さらにそのテストで学習者自身が作成したプログラムの妥当性を確認することで(f)を解決するという方法論を提案した。また、初学者がこの方法論を容易に実現するために、ビジュアルプログラミング環境でこれらを実現する機能を提供する。さらに、様々な学習者が作成したテストを集約することで、学習者が演習問題をどのように理解しているかを確認することができるため、演習問題の改善に資すると考えた。

本研究課題では、プログラミングの導入的な演習にテスト駆動開発を導入し、学習者が自ら作成したプログラムの動作確認を行うための環境を提供する。また、学習者が作成したテストケースから学習者の理解状況を抽出し、理解の誤りが生じる原因や考慮から漏れやすい状況を分析する手法を開発する。

## 2. ATにおけるTDD支援機能

ATは初学者向けのビジュアルプログラミング環境であり、Webアプリケーションとして実装されている。本研究課題では、以下の流れでATにおけるテスト駆動開発を用いた学習を実現する（図1）。

- (1) 教授者は演習問題と、その模範解答となるプログラム（以下、模範解答プログラム）、学習者のプログラム動作を確認するためのテストケース（以下、教授者テストケース）を作成する。

テストケースはプログラムに与える入力と、この入力を与えた際に想定される出力のことを指す。

- (2) 学習者は演習問題から想定される状況を示すテストケース（以下、学習者テストケース）を作成し、模範解答プログラムをテストする。

模範解答プログラムは演習問題に対して正しい結果を示すが、学習者テストケースの想定が誤っている場合、テストが失敗する。そのため、(c)の誤りを検出できる。また、テストケースでプログラムの動作をどの程度検証できているか（以下、網羅性）についても示すことで、状況を十分に想定できているかを確認できる。

- (3) 学習者は演習問題の解答となるプログラム（以下、学習者プログラム）を作成し、学習者テストケースでテストする。

このテストが成功することで、学習者が(2)で想定

した状況について適切に動作するプログラムを作成できたことを確認できる。

- (4) 学習者が学習者プログラムを教授者テストケースでテストする。

このテストが成功することで、教授者が想定した様々な状況について適切に動作するプログラムを作成できたことを確認できる。

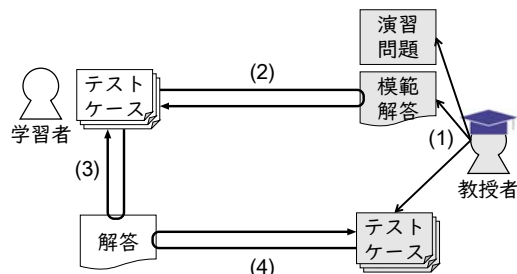


図1 TDDを用いた学習の流れ

このような流れによる学習を実現するために、本研究課題ではATにTDDを支援するための機能（以下、TDD支援機能）を追加した。教授者・学習者による演習問題ごとのテストケースの管理機能によって、テストケースの一覧表示、追加、修正、削除を実現した。また、テスト機能によって、学習者・教授者テストケースによる模範解答・学習者プログラムのテスト実行を実現した。

学習者はAT上で単体のプログラムを作成するが、TDD支援機能ではプログラムをモジュール化された形に変換する。そのため、初学者には難しいテスト可能な形のプログラムを、学習者が意識することなく生成することができる。また、テストを実行する際にはそれぞれのテストを独立したコンテナ（仮想的なコンピュータ）で実行できる。

## 3. おわりに

本研究課題では、前章に述べたようにAT上でのTDD支援機能を開発し、想定した流れによる学習を実現した。学習者がTDD支援機能を使用して学習者プログラムを作成することによって、プログラムを作成する過程における様々な段階で生じた誤りを、作成したテストケースから抽出できる。上述したように、テストケースで想定している動作が誤っている場合には、課題内容を誤解していることが分かる。また、プログラムの動作を検証すべきテストケースが不十分である場合、プログラムの仕様となる演習問題の内容から状況を適切に想定できていないことや、どのような状況を想定できなかったかを判別することができる。そこで本研究課題では、学習者が作成したテストケースの網羅性やその内容から理解状況を抽出し、理解の誤りが生じる原因や考慮から漏れやすい状況を分析する手法を開発することを計画している。

今後は、TDD支援機能を使用して学習者プログラムとテストケースを収集した上でこれらの内容を確認し、上述した分析手法の開発を行う。

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : フィジカル物理特性に基づき安全性と処理効率を両立するセキュリティ技術

研究課題名 (英文) : Secure and Efficient Techniques in Considering Physical Characteristics

研究者 : 駒野 雄一  
KOMANO Yuichi

千葉工業大学  
情報変革科学部 高度応用情報科学科 教授

## 1. はじめに

近年、サイバー空間とフィジカル空間とを融合したサイバー・フィジカルシステムが実現されつつある。サイバー・フィジカルシステムでは、フィジカル空間で収集したデータをサイバー空間で解析し、その結果をフィジカル空間にフィードバックして機器を制御するなどして、より便利な社会を実現しようとしている。

フィジカル空間で扱われる情報は、金融や情報ビジネスに関連する資産に直結する情報や、個人の行動や思想に伴うプライバシー情報、人と人とのコミュニケーションを図る上で支えとなる感情の情報など、多種多様にわたる。これらの情報が窃取あるいは改ざんされると、そこで暮らす人々に損害や支障がもたらされる。

さらに、サイバー空間からフィジカル空間にフィードバックされる情報は、機器の制御情報を含むことが多い。この制御情報が改ざんされて機器が不意の動作を行うと、人々を傷つけたり周囲の機器を壊したりする可能性がある。

これまで、暗号技術やネットワークセキュリティ技術など、サイバー空間を中心としたセキュリティ技術の研究開発が進められてきた。しかし、上述のとおり、フィジカル空間のセキュリティの確保も課題となっている。特に、フィジカル空間には数多くの、かつ、計算資源の制約からセキュリティ機能の実装が十分とはいえない機器が遍在し、悪意ある攻撃者に攻撃の起点として狙われうる。さらに、このような機器が挙動する際に外部から観測される物理的な特性を利用した攻撃(サイドチャネル攻撃など)も存在する。

本研究は、サイバー空間との連携を前提としつつ、フィジカル空間の機器の物理的特性を悪用した攻撃への対策技術や、フィジカル空間の物理的特性を活用した処理効率の高いセキュリティ技術の確立を目指しており、本科研費採択者助成金を活用して研究を加速することができた。本稿では、そこで得られた研究成果について報告する。

## 2. 研究の内容

本節では、本助成に関連する二つのテーマの成果を紹介

する。

### 2.1 Rust 言語で開発された暗号処理へのサイドチャネル攻撃と対策に関する基礎評価

近年、組み込み機器向けの開発言語として速度と安全性を両立した Rust が注目されている。Rust は 2015 年にバージョン 1.0 がリリースされた比較的新しい言語であり、高いメモリ安全性をもつことが特徴である。

組み込み機器に対しては、機器が暗号処理を実行している最中の消費電力を外部から観測して統計処理し、暗号の秘密鍵を推定するサイドチャネル攻撃が脅威とされている。これまで、C 言語やアセンブラで実装された暗号に対する攻撃の脅威は報告されているが、Rust を用いた場合の脅威は不明であった。

本研究では、まず、多くの機器で一般的に使用されている共通鍵暗号 AES を Rust で実装した。そして、それをコンパイルして得られるアセンブラコードを利用し、機器が暗号処理を実行する際に消費する電力の情報を擬似的に生成した。その後、生成した擬似的な消費電力を用いてサイドチャネル攻撃を追試して、攻撃の可能性を評価した。

実験により、(1)アセンブラコードを分析したところ、配列の未定義の番地を参照していないかをチェックするなど、メモリ安全性の機能が有効になっていること、(2)アセンブラコードを分析した限りにおいては、秘密鍵やそれに起因する情報を扱う処理は、従来の C 言語実装と同様に処理されており、サイドチャネル攻撃が成功する可能性があること、(3)擬似的に生成した消費電力の情報を用いてサイドチャネル攻撃を追試したところ、秘密鍵を特定できること、が確認できた。

サイドチャネル攻撃の対策手法としては、乱数を利用するランダムマスク法が最も一般的である。本研究では、ランダムマスク法を適用した AES を Rust で実装して、前述と同様の評価を行った。その結果、アセンブラコードにおいて乱数が秘密鍵を隠蔽していることが確認でき、擬似的な消費電力に対してサイドチャネル攻撃を実施しても秘密鍵を特定することができなかった。

すなわち、Rust を用いた場合にもサイドチャネル攻撃に対する従来の対策手法が有効となり、フィジカル

空間におかれた機器の安全性の基幹となる暗号技術を機器の物理的特性を利用した攻撃から保護できる可能性を見出した。本成果の実機レベルでの検証と、Rust の特性を踏まえた高速実装の研究は今後の課題である。本成果は文献[1]で発表した。

## 2.2 多角的なテキスト特徴を利用したフェイク動画検出に向けた基礎検討

生成AIの進展により、動画などの新たなコンテンツの作成が容易になっている。そのため、コンテンツの作成にかかるコストを下げるができるなどのメリットもあるが、視聴者を騙すことを目的としたフェイク動画とよばれるコンテンツの作成も容易とする負の側面も問題となっている。

フェイク動画は、政治的な駆け引きに利用されたり、著名人を騙った投資勧誘に利用されたりしている。本来、ある人物がそれまでの発言や振る舞いとは異なる趣旨の発言を行えば、その差異を捉えられる可能性がある。しかし、近年の生成AIの進展は目覚ましく、精巧なフェイク動画が作られるようになっており、人の目ではフェイク動画を見抜くことが困難になっている。

本研究では、フィジカル世界で生活する人間の口癖（言語的特徴）や感情起伏（感情軌跡）の特性などに基づき、フェイク動画の検出の可能性を見出す基礎評価を実施した。

提案する手法では、発言者ごとに発言内容をテキストで分析し、多角的な特徴量として、言語的特徴と感情軌跡の特性をそれぞれ機械学習させる。その後、本来は発言内容を改ざんしたテキストを利用して機械学習の識別処理により改ざんを識別できるか否かを評価すべきである、本研究では、まず、基礎評価として発言者の識別が可能となるか否かを評価した。

実験用のデータとして、国会議事録システムから8名の政治家の発言内容をテキスト情報として抽出した。その発言内容のテキストに含まれる言語的特徴と感情軌跡を用いて発言者の識別を行ったところ、発言者の一部ではあるが、言語的特徴単体よりも二つの特徴量を統合して多角的に評価することで識別精度が向上することが確認できた。

言語的特徴や感情軌跡に加えて、政治家の例では所属政党の公約などの発言の裏にある思想をさらに加えて評価すること、発言者の識別だけでなくフェイク動画の検出に向けて改ざんされた発言内容を識別できるか検証することなどが今後の課題である。本成果は文献[2]で発表した。

## 3. まとめ

科研費採択者助成金を活用し、フィジカル物理特性に基づき安全性と処理効率を両立するセキュリティ技術を確立するという研究課題への取り組みを加速すること

ができた。本課題に対しては、本稿で紹介した技術のほかにも、サイバー空間を介することなく物理的な道具の実を利用して暗号技術を実装する理論研究([3][4]など)や、複数のサーバでデータを複製保管する際のデータ漏洩耐性を向上するための技術[5]などの研究に取り組んでいる。サイバー・フィジカルシステムのセキュリティを確保するためには、サイバー空間とフィジカル空間それぞれのセキュリティ技術を開発し、融合させてゆく必要がある。これまでに得られている成果を活用し、研究を進めてゆく。

## 参考文献

- [1] 杉原 耕太, 駒野 雄一, “Rust 実装へのサイドチャネル攻撃のシミュレーション評価,” 電子情報通信学会総合大会, A-7-21, 2025. 03
- [2] 古川 雄太, 駒野 雄一, “多角的なテキスト特徴量に基づくフェイク動画検出,” コンピュータセキュリティシンポジウム2025 (CSS 2025), 3A3-3, 2025. 10
- [3] Shun Odaka, Yuichi Komano, “Card-based Arithmetic Operations using Integer Commitments and Their Application to Statistical Data Aggregation,” IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci., vol. E109-A, no. 3, pp. 349-361, 2026. 3
- [4] Ren Igari, Yuichi Komano, Takaaki Mizuki, “Suken BINGO: An Application of Card-based Cryptography to Psychological Board Games,” SecITC 2025, 2025. 11
- [5] 永見 拓人, 駒野 雄一, “PLP-Raft: 部分的漏洩耐性を持つ合意アルゴリズム,” コンピュータセキュリティシンポジウム2025 (CSS 2025), 3B2-3, 2025. 10

---

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : 色分子動力学の長時間大規模計算による高密度熱力学的諸量の導出

研究課題名 (英文) : Derivation of Thermodynamic Quantities at High Density by Large-Scale and Long-Time Simulations of Color Molecular Dynamics

研究者 :

○ 安武 伸俊 千葉工業大学  
YASUTAKE Nobutoshi 情報変革科学部 教育センター 教授

---

## 1. はじめに

まず、本研究の課題名にある「色」分子動力学について説明したい。

一般によく知られる分子動力学(色なし)は、製薬やDNAの研究等で幅広く使われている手法である。近年であれば、コロナウィルスの性質を探るなど、今や最先端の研究には欠かせない手法と言って良い。この分子動力学においては、各々の構成粒子が位置と運動量といった変数を有しており、それらの粒子相関の時間変化が系全体の最終的な最適な構造や性質を決定している。

しかしながら、我々が開発している分子動力学においては、各粒子は位置と運動量の合計6変数に加えて、「色」と「スピン」(色は3種類、スピンは2種類)を持ち、それらが相関を持ちながら時間発展をしている。さらに3種類の「フレーバー(クォークの種類)」の変化も考慮にいれている。突拍子もないように聞こえるかもしれないが、これら「色」「スピン」「フレーバー」は、素粒子物理学において粒子の特徴や相関を決める重要な要因となっている。

近年、量子コンピュータなどが知られるようになってきたおかげで、「スピン」も世間的に認知されるようになってきたように思う。古典コンピュータは2進法に従っているわけであるが、量子コンピュータはONとOFFの二者択一ではなく、その間の中間状態も考慮に入れるといったことを聞いたことがある人は多いかと思う。「スピン」の言葉で言うならば、右回りと左回りとその間の状態(つまり回転軸が傾いた状態)を考慮に入れるということである。現実の素粒子であるクォークは、「スピン」だけではなく、さらにその拡張とも言える「色」や「フレーバー」を持っており、それらが複雑に絡み合って物質の性質を決めているのである。我々の計算手法は、これらの自由度を分子動力学という実用計算に取り入れたものである。

科研費を申請した時点においては、「色」の時間発展と相関のみを取り入れていたために、保守的に「色分子動力学」と名付けていたが、今となっては「色・スピン・フレーバー分子動力学」と呼ぶべきものに計算コードを

拡張できている。申請時に弱気になって、保守的な課題名にした自分が悔まれてならない。

ともあれ、我々はこの計算コード駆使し、高密度天体内部や原子核実験などで実現され得る様々な高密度物質の性質を計算から導き出そうとしているわけだ。

## 2. 現状の研究成果について

我々の計算コードは、GPUを搭載したスーパーコンピュータ(日本原子力研究開発機構所有)に最適化されたものにすでになっており、主だった計算はそちらで行なっている。ゆえに本プロジェクト(科研費採択者助成金)の予算は、研究成果を公表するためのノートPCのみを大部分の費用として計上していた。ここでは、その研究成果を一部紹介する。

前述したように、「スピン」を新たに導入したことによって「色」と「スピン」の同時相関として知られる「色磁気相互作用」を計算に取り入れることができるようになった。つまり、より現実的なクォーク間相関が分子動力学に取り入れられるようになったわけである。ちなみに、この色磁気相互作用を取り入れた分子動力学計算を行なっているのは、今のところ世界で我々のみである。

これまで、中性子や陽子といったバリオン(クォーク3つの塊)が高密度になるとクォークが分かれて個別に存在するようなクォーク物質へと崩壊すると思われていた。しかし、我々の計算結果によると、実はそれほど単純な描像ではなく、バリオン物質が高密度になると、クォーク3つ以上の塊、すなわち「エキゾチックハドロン」が現れることが示唆されることとなった[図1参照]。

図1を詳しく見ると、密度が大きくなるにつれてクラスター(塊)のサイズが大きくなっているのが分かる。ここで注意すべきは、“クラスターサイズが3の倍数になっているので、バリオン間の距離が単純に短くなっているせいで1つの塊に見えるのではないか?”という懸念である。

しかし、実際に各クラスター内部に着目すると、色とスピンの量子的にもつれて存在していることが確認できた。つまり、 $N_{cl}=6$ のクォーククラスターは2つのバリオンが近くにあるわけではなく、あくまでも6つのクォ

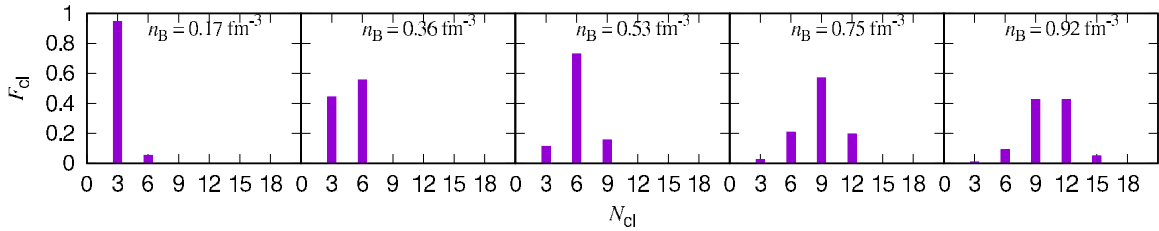


図1: 各密度ごとのクォーククラスター(塊)の粒子数( $N_{cl}$ )とその割合の分布。密度  $n_B$  はバリオンの密度である。つまり、クォーク密度に換算するためには3倍する必要がある。我々の計算によると、これ以上の密度をもった星は、ブラックホールへと崩壊する。 $N_{cl}=1$ であればクォーク単独で存在していることを意味するが、どの密度においてもクォークは  $N_{cl} \geq 3$  のクラスター内部に存在していることがわかる。

クォーククラスターとして存在するのである。

図2を見ると、このことが視覚的に理解できる。この図は、先ほどの図1における最高密度 ( $n_B = 0.92 \text{ fm}^{-3}$ ) に対応した最安定配位を表している。図中の丸がクォークを表しており、棒はスピンの向き(回転軸)を表している。また「色」は文字通り色づけされて表現されている。これを見ると、各塊からは少なくとも3つ以上の棒が出ていることが確認できる。また、色に着目すると白(無色)以外の色が見える。この図では近傍の3つの粒子で無色になる場合は、白として表現する視覚効果を設定しているため、この計算結果は多くの粒子が3つでは無色になっていないということを示している。これが、バリオン同士で近くにある状態ではないことの視覚的証拠になっている(バリオンは3つのクォークの色がもつれあって全体として無色になるため)。

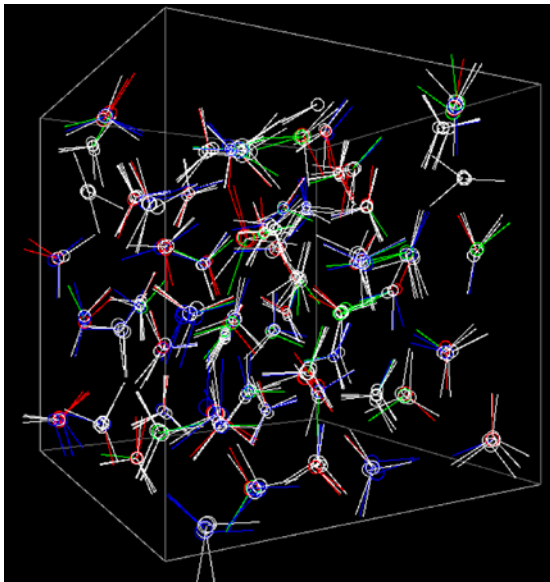


図2:  $n_B = 0.92 \text{ fm}^{-3}$ におけるクォーク配位。棒はスピンの向き、色は各粒子の色を表す。詳しくは本文で説明している。

### 3. まとめと今後の展開について

本研究では物質の状態を、クォークの観点から「色」「スピン」「フレーバー」の自由度を分子動力学へ取り込むことで再現した。結果は、現状の原子核実験や天文観測の結果と無矛盾であることもすでに確認している。今後は、さらにこの物質の熱力学的性質(比熱など)を算出する予定である。

本報に述べた我々の研究成果については、オーストラリアで行われた国際会議“The XVIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum Conference (QCHSC24)”にて招待講演を行い、一部は proceeding にまとめられている[1]。このときの渡航費も、学内の海外出張助成金の援助を賜ったことを申しあげるとともに、深く謝意を表したい。また、関連する内容も国際論文に複数受理されていることも報告しておく[2-6]。

最後に、科研費採択者助成金を採択して下さった附属研究所、並びに日頃よりご支援いただいている千葉工業大学およびスタッフに深く感謝したい。

#### 参考文献

- [1] Nobutoshi Yasutake, Toshiki Maruyama, Proceedings of Science (PoS), “The XVIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum Conference (QCHSC24)”, 221. (2025)
- [2] Toshiki Maruyama, Nobutoshi Yasutake, Nuclear Physics Review 41, 806, (2025)
- [3] Nobutoshi Yasutake, Toshiki Maruyama, Nuclear Physics Review 41, 801, (2025)
- [4] Cheng-Jun Xia, Toshiki Maruyama, Nobutoshi Yasutake, Toshitaka Tatsumi, Ying-Xun Zhang, Nuclear Physics Review 41, 818, (2025)
- [5] Cheng-Jun Xia, Toshiki Maruyama, Nobutoshi Yasutake, Toshitaka Tatsumi, Physical Review D 110, 114024, (2024)
- [6] Yamamoto Y, Yasutake N, Rijken Th. A., Physical Review C 110, 025805, (2024)

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2024/4/8 ~ 2025/2/28

研究課題名 (和文) : AI と輸送のモーダルシフトを統合した持続可能な物流システムの開発に関する研究

研究課題名 (英文) : Study on Development of Sustainable Logistics System Integrating AI and Modal Shift in Transportation

研究者 : ○白井 裕 千葉工業大学  
SHIRAI Yutaka 未来変革科学部 経営デザイン科学科 教授

小野 浩之 千葉工業大学  
ONO Hiroyuki 未来変革科学部 経営デザイン科学科 教授

## 1. はじめに

日本では2024年4月より、働き方改革関連法に基づき、自動車運送事業における時間外労働に年 960 時間の上限規制が適用された。これに併せて、厚生労働省がトラックドライバーの拘束時間を定めた「改善基準告示」が改められ、拘束時間が強化された。この2つの要因によって日本の物流の停滞の可能性が指摘されている。具体的な対策が行われなかった場合、2030年には輸送能力の約34%が不足するという試算が出ていて、物流の効率化が必要である。

昨今の日本の物流は、大きく分けて3つの問題を抱えている。1つ目はトラックドライバーの不足に関する問題である(労働力不足)。トラックドライバーにおける労働時間の多さや賃金の低さから若い担い手が減少している傾向にある。2つ目はトラックによる二酸化炭素の排出量に関する環境問題である。地球温暖化対策として温室効果ガス排出量を削減する世界的な動向から、物流業界において環境負荷低減が強く求められる[1]。国内物流の輸送モードにあるトラック輸送・鉄道輸送・船舶輸送のうち、最も環境に負荷を与えている輸送モードはトラック輸送である。3つ目はEC(Electronic Commerce)市場の拡大による宅配サービスの急激な増加に関する問題である。EC市場はインターネットやスマートフォンの普及、テレワークの普及や感染症対策を背景に多くの人々のライフスタイルが変化し、ECサイトの利用率が大きく上昇し物流量が大幅に増加傾向にある。

これらの問題に対して、トラックによる幹線貨物輸送を鉄道輸送や船舶輸送に転換するモーダルシフトの活用が重要である。モーダルシフトは、トラック輸送を鉄道や船舶といった環境負荷の少ない輸送モードに置き換える取り組みであり、持続可能な物流の実現に向けた重要な手段として注目されている。日本における船舶輸送を行っている事業体は数多くあるが、日本における全国ネットワークで鉄道輸送を行っている唯一の事業体は、日本貨物鉄道株式会社である。鉄道輸送と船舶輸送の特徴は、コンテナに

積載された荷物をトラック輸送と組合せ、輸送経路の最も長い幹線区間を低コストで効率的(大量性)かつ高い定時運行率(安定性)で輸送することに加え、環境に優れた輸送モード(環境性)として多くの人々の暮らしを支えることである。トラック輸送、鉄道輸送、船舶輸送の特性を踏まえ、それぞれの利点と欠点を整理し、条件ごとに最適な輸送モードを明らかにすることは、モーダルシフトの促進において不可欠である。

研究の第一段階として本研究では、日本の物流(総貨物量)に対して、都市間輸送における「トラック輸送」、「鉄道輸送」、「船舶輸送」の特性を、3つの要素である「距離」「所要時間」「運賃」の観点から比較分析を行い、効果的な輸送モード(モーダルシフト)の検討をすることである。

## 2. 3要素算定分析

3要素算定分析とは、トラック輸送、鉄道輸送、船舶輸送の3つの輸送モードにおける「現在、実際に輸送するにあたり必要とされている要素の実態を把握すること」である。必要とされる要素は、輸送区間における「距離」「所要時間」「運賃」の概念である。これら3つの概念を3要素とし、輸送モード別に3要素を導くことを3要素算定とする。しかし、輸送モード別・都市区間別のトラック輸送、鉄道輸送、船舶輸送の3要素は公表されておらず、これら3要素を導き出し、予め設定した区間において算定された3要素を比較することが必要である。また、モーダルシフトの推進により物流の効率化と最適化に大きな効果をもたらす都市間に特化した分析を行うため「都市間における輸送量の実態を把握すること」が求められる。

本研究では、「東日本エリアの各都市(13都市)と東京の間」について算出を行う。

## 3. 分析結果

2023年のデータ[2]を用いて、東日本エリアから東京に輸送するときの輸送シェア(トラック輸送、鉄道輸送、船

船舶輸送の割合)とトラック輸送・鉄道輸送・船舶輸送の3要素算定(距離, 所要時間, 運賃)の結果を表1に示す。

東日本エリアでは、北海道エリアから東京に輸送する貨物輸送シェアの特徴として、北見発・旭川発に関しては、鉄道輸送の割合が高いがトラック輸送も一定の割合がある。釧路発・室蘭発・函館発に関しては、船舶輸送の割合が非常に高い。帯広発に関しては、鉄道輸送の割合が非常に高い。札幌発に関しては、鉄道輸送とトラック輸送の割合が拮抗している。東北エリアから東京に輸送する貨物輸送シェアの特徴として、基本的に東京からの距離が近くなるほどトラック輸送が優位であるが、太平洋側の地域(青森発・岩手発・宮城発・福島発)では船舶輸送の割合も高い傾向にある。

全体の結果から、地域によって輸送モードに特徴があることがわかる。また「距離」「所要時間」「運賃」の3要素の関係では、「距離」と「所要時間」はトラック輸送、「運賃」は鉄道輸送が優れていることがわかり、短距離区間は「トラック輸送」、中距離区間は「トラック輸送」「鉄道輸送」、長距離区間は「鉄道輸送」「船舶輸送」が総合して効果的な輸送モードと考えることができる。現状では「距離」と「所要時間」が優先された輸送モードが使用されている。「所要時間」に影響を受ける品目(生鮮食品関係など)の輸送に関してはトラック輸送が主要になるが、「所要時間」に影響を受けない品目(生鮮食品関係以外)の輸送に関しては、運賃や環境の面から見てできるだけトラック輸送から鉄道輸送や船舶輸送にモーダルシフトすることを提案する。

#### 4. まとめ

本研究では、日本の物流(総貨物量)に対して、都市間輸送における「トラック輸送」「鉄道輸送」「船舶輸送」の特性を、3つの要素である「距離」「所要時間」「運賃」の観点から比較分析を行い、効果的な輸送モード(モーダルシフト)を検討した。検討の結果から、日本の物流(総貨物)では「距離」「所要時間」の観点から「トラック輸送」が主流である一方、「運賃」および環境面を考慮すると、「鉄道輸送」や「船舶輸送」へのモーダルシフトの必要性があ

る。モーダルシフトを加速させるために、中小規模のトラック運送会社と輸送された商品を手に取る最終消費者の観点からモーダルシフトのもたらすメリットの明示が重要である。

今後の課題として、物量は日々変化するため車両の積載率は低くなり、積載率の向上が課題になる。この課題を解決するため、天候や季節などによる物量の変動データなどを調査し、そのデータを学習させたAIにより、ある一定期間の物量の予測精度の向上を図る。また、集荷場での荷の積み降ろし作業に対して、物量によっては小ロットで効率が悪く場合がある。そのため、AIによる物量の予測の結果を用いて、荷の積み降ろし作業方法の効率化を検討するとともに、適切なサイズの車両による積載率の向上も検討する。

本研究に関する主な発表論文

- [1] Yutaka Shirai and Hiroyuki Ono, Examination of Truck and Rail Container Transportation in Japan's Food Logistics, Proceedings of The XXXVIth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference (ISOES 2024), pp.115-123, 2024.
- [2] Yohei Hara, Hiroyuki Ono and Yutaka Shirai, Study on Environmental Load Emissions of Transportation, Proceedings of 18th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI 2025), pp.580-585, 2025.

参考文献

- [1] Pelopidas Siskos and Yannis Moysoglou, Assessing the impacts of setting CO2 emission targets on truck manufacturers: A model implementation and application for the EU, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol.125, pp.123-138, 2019.
- [2] 日本の政府統計の総合窓口「貨物地域流動調査・旅客地域流動調査」における「統計表2/府県相互間輸送トン数表(総貨物及び9品目分類)」, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00600460>

表1 東日本エリアから東京に輸送するときの輸送シェアと3要素算定の結果

都市	輸送シェア			距離			所要時間			料金(トンあたり)		
	トラック輸送 (%)	鉄道輸送 (%)	船舶輸送 (%)	トラック輸送 (km)	鉄道輸送 (km)	船舶輸送 (km)	トラック輸送 (時間)	鉄道輸送 (時間)	船舶輸送 (時間)	トラック輸送 (円)	鉄道輸送 (円)	船舶輸送 (円)
北見	39.3%	51.9%	8.8%	1351.30	1581.00	0.00	19.25	49.00	0.00	32,865	20,256	0
旭川	30.9%	69.1%	0.0%	1233.30	1403.00	0.00	17.50	45.75	0.00	30,737	18,356	0
釧路	0.0%	2.2%	97.8%	1324.30	1545.00	1322.65	18.75	52.75	40.60	32,717	20,256	23,199
帯広	0.0%	94.1%	5.9%	1210.30	1419.00	0.00	17.25	45.75	0.00	29,927	18,356	0
札幌	52.7%	47.3%	0.0%	1089.30	1287.00	0.00	15.75	23.75	0.00	27,663	17,356	0
室蘭	4.3%	1.2%	94.5%	968.30	1167.00	1178.35	14.00	41.25	45.75	25,423	16,356	21,201
函館	16.1%	7.9%	76.0%	788.30	981.00	1143.20	11.75	20.75	25.25	21,904	13,956	20,535
青森	51.3%	3.0%	45.7%	713.30	729.00	1219.05	10.00	32.50	35.80	16,929	11,316	21,201
岩手	28.6%	3.0%	68.4%	594.00	613.00	773.20	8.50	18.00	23.80	13,888	10,316	15,873
秋田	94.1%	5.9%	0.0%	640.90	680.00	1559.45	10.00	23.75	45.40	14,956	10,816	25,863
宮城	56.8%	14.2%	29.0%	414.30	390.00	647.40	7.00	10.50	21.40	10,158	7,716	13,875
山形	99.6%	0.4%	0.0%	426.40	501.00	1542.80	7.25	18.00	45.40	10,532	9,016	25,863
福島	88.7%	0.5%	10.8%	300.30	310.00	514.20	5.75	15.50	16.60	8,056	6,916	11,877

# 〔科学研究費助成事業一覽〕





## 科学研究費助成事業一覧

No.	種目	氏名	研究課題名
1	基盤研究(A)	水津 光司	周波数シフトテラヘルツ波による建築物非破壊診断の応用展開
2	基盤研究(B)	原 祥太郎	次世代型メタルサポート SOFC の電極損傷解明と制御モデル構築
3	基盤研究(B)	枚田 明彦	誘電体を媒体とするテラヘルツ帯シート LAN 通信の多重伝送技術による高速化の研究
4	基盤研究(B)	薄井 宏行	複雑な市街地形態を考慮した物的な密度指標による住環境性能の簡便な評価方法の開発
5	基盤研究(B)	金田 一広	地盤非線形構成モデルによる既存杭撤去後の地盤の乱れの解明と実務設計への展開
6	基盤研究(B)	渡邊 宇外	形成層細胞のミトコンドリアが司る樹木の二次木部形成メカニズムの解明
7	基盤研究(B)	川西 範明	細胞間コミュニケーション因子であるエクソソームによるサルコペニアの発症機序の解明
8	基盤研究(B)	滝 聖子	ポストコロナ新時代のワークライフバランス実現のためのストレスコーピングデザイン
9	基盤研究(B)	小澤 俊平	二元系合金融体の表面張力に及ぼす組成および酸素吸着の影響解明
10	基盤研究(C)	三村 尚央	EU 離脱後の英国におけるカリブ系移民の記憶変容の研究
11	基盤研究(C)	木島 愛	日常会話で用いられる慣用表現の日仏対照研究
12	基盤研究(C)	福嶋 尚子	公立学校の私費負担に対する財務モデル標準化に関する研究
13	基盤研究(C)	軍司 圭一	アイゼンシュタイン級数の数論的性質の研究
14	基盤研究(C)	安武 伸俊	色分子動力学の長時間大規模計算による高密度熱力学的諸量の導出
15	基盤研究(C)	米田 完	インパクト型慣性アシストによるロボットと人間の運動能力向上の研究
16	基盤研究(C)	安藤 毅	QCM への自然吸着を制御した排気ガス中の親水性・疎水性微粒子のリアルタイム分離計測
17	基盤研究(C)	藤井 浩光	自機搭載型センシングシステムを用いた複数建機の協調による建設現場の自律運用
18	基盤研究(C)	亀田 豊	アジア諸国からのマイクロプラスチックの海洋排出実態調査と黒潮海域への影響評価
19	基盤研究(C)	望月 悦子	異空間機能をシームレスにつなぐアクティブな照明制御の提案
20	基盤研究(C)	和田 豊	宇宙機を対象とした亜酸化窒素の連鎖的発熱反応による事故防止技術
21	基盤研究(C)	白井 裕	AI と輸送のモーダルシフトを統合した持続可能な物流システムの開発に関する研究
22	基盤研究(C)	寺田 大将	微細粒アルミニウムの加工硬化における逆応力の影響とその結晶粒径依存性
23	基盤研究(C)	松田 泰明	PO4 鎖を鋳型とした結晶水の配列制御による超広域温度作動型プロトン導電体の創成
24	基盤研究(C)	根本 直樹	高度好熱菌の細胞膜を構成する特異な脂質分子種および生合成遺伝子の解明と進化の道筋
25	基盤研究(C)	坂本 泰一	人工塩基を含むアプタマーの立体構造と作用機序の解明およびアプタマーの改良
26	基盤研究(C)	成田 隆明	単細胞アメーバの多細胞化における祖先的細胞間コミュニケーションの分子機構解明
27	基盤研究(C)	水本 旭洋	自動設定に基づく多様かつ現実的なスマートスペースシミュレーションの実現
28	基盤研究(C)	駒野 雄一	フィジカル物理特性に基づき安全性と処理効率を両立するセキュリティ技術
29	基盤研究(C)	秋田 剛	初期ひずみをモデルパラメータとした構造物の高速逐次データ同化法に関する研究
30	基盤研究(C)	飯田 一博	音の高精度バーチャルリアリティのための全天空個人化頭部伝達関数の生成
31	基盤研究(C)	上田 隆一	位置情報の不足や誤りに強い自律移動ロボット用次世代ナビゲーションソフトウェア群
32	基盤研究(C)	國宗 永佳	プログラム動作への意識付けを指向した TDD 支援システムと理解状況分析手法の開発
33	基盤研究(C)	松島 大	半乾燥草原のブラヤに注目したダストストーム発生条件の推定
34	基盤研究(C)	大貫 俊彦	江戸文化との持続と断絶から捉えた近代日本の文芸批評に関する総合的研究
35	基盤研究(C)	関根 晃太	関数方程式の解に対する効率的な計算機援用「非」存在証明法の開発
36	基盤研究(C)	宮田 高道	深層展開による確率的テンソル復元の高効率・高性能化と画像・信号復元への応用
37	基盤研究(C)	鈴木比呂子	地盤定数の空間分布を考慮した基礎構造の信頼性設計の確立のための知見の収集
38	基盤研究(C)	田村 洋介	新奇な電磁分離現象を利用した革新的凝固プロセスによるアルミニウム合金の精製と創製
39	基盤研究(C)	亀谷 雄樹	自立した太陽熱蒸留システム構築へ向けた大気放熱マイクロ構造層の創製
40	基盤研究(C)	原口 亮介	フッ素とカチオンのハイブリッド骨格を基盤とする二酸化炭素固定化有機触媒の開発
41	基盤研究(C)	藤原 明広	超相互運用型ブロックチェーンに向けた階層型並列合意プロトコルの研究
42	基盤研究(C)	竹本 浩典	リアルタイム MRI 動画の統計的な分析に基づく歌唱技術に関する研究
43	基盤研究(C)	砂井 紫里	現代ハラル産業における制度化・サービス・消費の人類学的研究
44	基盤研究(C)	杉山 和成	概均質ゼータ関数と保型形式の関連
45	基盤研究(C)	東山 幸司	重い原子核構造の精密計算による二重ベータ崩壊半減期の理論予測
46	基盤研究(C)	松井 伸介	パワーデバイス用難研磨材料のための AFM スクラッチ等による研磨加工現象の究明
47	基盤研究(C)	鎌倉 浩嗣	物理層セキュリティを用いたイメージセンサ型可視光通信システム
48	基盤研究(C)	中静 真	低精度数値表現による画像処理ネットワークの構築
49	基盤研究(C)	熱海 武憲	機構・制御系統統合設計の高度化と次世代 HDD への応用
50	基盤研究(C)	内田 史朗	異種材料間接合の低抵抗化とそのデバイス応用
51	基盤研究(C)	石原 沙織	水槽に用いられるポリマーセメント塗膜防水層のふくれメカニズムの解明とその評価方法
52	基盤研究(C)	秋葉 知昭	相似形を考慮した多次元多状態多目的ネットワークの高効率な統一的最適設計方法の研究
53	基盤研究(C)	菖木 禎史	緊急情報サービスを住民が継続利用する情報伝達方法の検討
54	基盤研究(C)	工藤 翔慈	オゾン処理と過飽和操作の工夫の組み合わせは結晶特性の制御と作り分けに有効か？

55	基盤研究(C)	山本 典史	凝集誘起発光において非断熱遷移ダイナミクスが巧みに制御されるメカニズムを捉える
56	基盤研究(C)	遠藤伸太郎	ジュニア選手の謙虚さを向上させる介入方策の確立：挫折経験による QOL、競技力向上
57	基盤研究(C)	信川 創	統合失調症の早期診断に向けた大域的な神経ネットワークダイナミクス障害の解明
58	基盤研究(C)	三浦 元喜	高次の言語化活動を促すプログラミング学習環境
59	基盤研究(C)	東本 崇仁	プログラミング的思考育成のための機能・振舞い・構造の観点の部品拡張支援環境の開発
60	基盤研究(C)	小山 勇也	知覚衣服によるヘルスケア基盤技術の構築
61	基盤研究(C)	高橋 暁子	高等教育における授業の課題発見を促進する事例データベースの構築：類推力に着目して
62	基盤研究(C)	市川 洋子	原因スキーマを手がかりとした教員志望学生の省察深化の解明と支援プログラムの開発
63	基盤研究(C)	森 信一郎	管理農業の普及に向けた情報活用手法に関する研究
64	基盤研究(C)	中山 昇	ロボットおよび介護機器等のセンサに利用可能な新たな導電性材料の開発
65	挑戦的研究(萌芽)	滝 聖子	身体的インタラクション特性に基づく介助動作の技能教育システムの構築
66	挑戦的研究(萌芽)	有本 泰子	Speech-laugh の発生機序の解明
67	若手研究	東 壯一郎	日本の受注産業の設備投資モデルに関する実証研究
68	若手研究	林 真一郎	パワー半導体デバイスの寿命と性能を最大限活かせる駆動回路設計手法の確立
69	若手研究	木下 雅之	複数 LED 送信機を用いた空間並列伝送によるローリングシャッタ型可視光通信の性能改善
70	若手研究	野村 由実	産後の日常生活活動を高めるオンライン身体活動促進プログラムの開発と検証
71	若手研究	三木 大輔	手指動作の識別と定量を目的としたミリ波レーダ信号の解析
72	研究活動スタート支援	清宮 優作	急冷凝固による二液相分離型合金を用いた新規潜熱蓄熱材の開発に関する研究
73	研究活動スタート支援	青木 友希	CUD 教育ツール開発に関する研究
74	研究活動スタート支援	小橋 知季	複数の薄板軽量形鋼をねじ接合した組立部材を対象とする設計法の構築
75	国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化)	亀谷 雄樹	大気放熱促進のための多孔性メタサーフェスによる複合冷却メカニズムの制御
76	特別研究員奨励費	樋口 洋子	顕在・潜在学習の協調と競合を決定づける脳メカニズムの解明
77	ひらめき☆ときめきサイエンス	山本 典史	かたちで決まるタンパク質のはたらき：タンパク質が活躍するマイクロな世界を見てみよう

\*各センターを除く

\*プロジェクト研究年報への掲載は任意である

---

---

千葉工業大学 プロジェクト研究年報 2025年  
Vol.22

令和8年3月発行

編集発行：千葉工業大学 附属研究所

---

---



千葉工業大学

CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1

2-17-1, Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

Tel:047-478-0325

Fax:047-478-0434