

千葉工業大学

プロジェクト研究年報

2024年

千葉工業大学
プロジェクト研究年報
2024年度

〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）〕

FDM方式3Dプリンタ成形CFRTP積層複合材の材料強度信頼性評価の研究	鈴木 浩治 ……	1
極限低温環境において単独稼働する遠隔監視装置用電源の開発とその実証	佐藤 宣夫 ……	3
加工硬化の結晶粒径依存性と内部応力評価に基づいた機構解明	寺田 大将 ……	5
センサへの自然吸着を制御した排気ガス中の親水・疎水性微粒子のリアルタイム分離計測	安藤 毅 ……	7
戦略的に近接場光を導入したハイブリッドプラズモン増強場と磁気光学の融合	安川 雪子 ……	9
誘電体を媒体とするテラヘルツ帯無線通信の軌道角運動量多重伝送による高速化の研究	枚田 明彦 ……	11
PO ₄ 四面体配列の制御による中温作動型プロトン導電体の創成	松田 泰明 ……	13
多官能性アルカノールアミン合成の新戦略:	原口 亮介 ……	17
二官能性化合物への求核付加反応における化学選択性の触媒制御とスイッチング		
マルチフレックス空間構築のための照明のアクティブ制御	望月 悦子 ……	19
跳躍を含む人とロボットの2足走行を補助する知能的慣性アシストの研究	米田 完 ……	21
遺伝子破壊による高度好熱菌サーマスの細胞膜脂質合成経路全貌の解明	根本 直樹 ……	23
ソーシャルメディアにおけるトピック細分類と感情ニュアンス分析に関する研究	熊本 忠彦 ……	25
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	滝 聖子 ……	27
身体感覚の客観的指標と主観的指標の計測およびその連関解析による	金田 晃一 ……	29
身体イメージ形成メカニズムの解明		
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 ……	31

〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅲ）〕

変動する熱負荷に対して安定的な熱輸送を実現する熱輸送デバイスの開発	三浦 正義 ……	33
企業の健康経営がイノベーション創出に与える効果の検証	新谷 幸弘 ……	35

〔科研費採択者助成金〕

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成	亀谷 雄樹 ……	37
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	田村 洋介 ……	39
アルミニウム合金の精製と創製		
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	林 真一郎 ……	41
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	藤原 明広 ……	43
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	木下 雅之 ……	45

目次

2024年千葉工業大学附属研究所 プロジェクト研究年報

フッ素とカチオンのハイブリット骨格を基盤とする二酸化炭素固定化有機触媒の開発	原口 亮介	47
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	金田 一広	49
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	宮田 高道	51
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	渡邊 宇外	53
日本の受注産業の設備投資モデルに関する実証研究	東 壮一郎	55
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	川西 範明	57

〔科学研究費助成事業一覧〕	59
---------------	----

〔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 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : FDM 方式 3D プリンタ成形 CFRTP 積層複合材の材料強度信頼性評価の研究

研究課題名 (英文) : Evaluation of Material Strength Reliability of CFRTP Laminated Composites Formed by FDM 3D Printing

研究者 : 鈴木 浩治

SUZUKI Kohji

千葉工業大学

工学部 機械工学科 教授

1. はじめに

近年、製造の現場に、付加製造 (Additive Manufacturing, AM) 技術いわゆる 3D プリンタが広く深く浸透し始めている。特に金属系 3D プリンタは試作品にとどまらず最終製品の量産に使われはじめ、その規模がますます拡大していることは周知の通りである。そして、本研究において対象とする樹脂系/繊維強化樹脂系 3D プリンタも金属系の後を追う形で着実に実用化の道を突き進んでいる。

ところで、多数の手法の中でも、金属系 3D プリンタの場合にはレーザー焼結方式、樹脂系/繊維強化樹脂系 3D プリンタの場合には熱溶解積層造形 (FDM) 方式がそれぞれ最も実用化に向けてのポテンシャルの高さが認められ、かつ技術も蓄積されている。いずれにせよ、AM 技術の中核である 3D プリンタによる製造では、あたかも“トックリパチの巣作り”のように 3 次元形状をスライス・パイ・スライスで積み上げて造形するため、必然的に隣接するスライス間にある種の積層層間低強度領域が残存することになる。それだけでなく、あるスライス層に着目すると、ノズルから吐出された溶融樹脂 (樹脂系 FDM 方式の場合) をノズル自体で押し付けることでできるビードの一笔書きでスライス内平面形状を造形するため、この隣接ビード間にも低強度線領域が残存する。

これら 3D プリンタ特有の製造方法が、材料レベルや製品レベルでのバラツキ、材料強度信頼性や品質にどのような影響 (おそらく悪い方向の影響) を与え、またそれらを向上させるにはどのような方策が考えられるのか、詳しく検討した例は本申請者の知る限り、ほとんどない。

そこで本研究では、① 短冊形クーポン試験片の引張・圧縮試験による弾性特性・強度特性評価、② モード I およびモード II 層間破壊靱性評価、③ 落錘衝撃試験による衝撃後残留圧縮強度評価、④ 円孔付き平板 (Open Hole, OH) の静的・疲労特性評価、⑤ トポロジー最適化構造/ラティス構造の弾性限度評価、などの各種評価項目の材料強度信頼性の評価を試みる。さらに、X 線 CT 撮像や走査電子顕微鏡 (SEM) 観察結果や、有限要素法 (FEM) 数値シミュレーション結果などを援用しながら、これらの FDM 方式 3D プリンタ成形 CFRTP 積層複合材料製品の信頼性や品質を深く追求していくことと最終目標に定める。

2. 研究の内容

本研究では、連続 CFRTP (continuous carbon fiber reinforced thermoplastic、以下 c-CFRTP、具体的には、東レ T700S 相当の PAN 系高強度・中弾性レンジの連続炭素繊維 (continuous carbon fiber、以下 c-CF) の 1k トウを、ポリマー鎖にベンゼン環が配された芳香族ナイロンの中でも特に機械的特性とガスバリア性に優れたアモルファスナイロン (DowDuPont™ Sellar® PA 3426、ポリアミド 6T/6I 共重合体、以下 PA6T6I) 中に引き抜き成形により体積含有率 30% でプリインプレグネートされた直径約 350 μm の c-CF/PA6T6I プリプレグフィラメント) を専用の FDM 方式 3D プリンタ (米国 Markforged 社 Mark Two™) にて成形したものの強度・剛性・靱性・耐衝撃特性・有孔疲労特性といった基礎的な機械的特性、さらには航空機構造認証のために必須の衝撃後圧縮強度特性 (compression after impact (CAI) strength) や層間・層内破壊靱性などを、実験と数値解析の両面から精力的に評価するとともに、X 線 CT 撮像、DIC ひずみ場測定、SEM、高精度 3 次元形状測定機などによる本 FDM 方式 3D-AM 成形 c-CF/PA6T6I 積層材の平板供試体および位相最適化形状供試体の表面性状・内部欠陥状態・破壊面フラクトグラフィに関する詳細な観察画像データを、統計解析が可能となるほど十分多数取得した上で、各種の推測統計解析を実施し、この新しい製造手法で作られた CFRTP 積層複合材のバラツキ・強度信頼性および品質に関する実用的な基礎データを取得した上で、統計解析 (各種記述統計量・適合する分布関数型の調査など) を実施していく。

さらに、近年では前述の c-CF/PA6T6I に加え、より成形性や形状表現力の高い短炭素繊維強化 PA6 (s-CF/PA6、東レ T-300 相当の連続炭素繊維を平均長 100 μm に粉碎した短繊維を汎用の nylon 6, PA6 に体積含有率 30% で混練後、3D プリンタ用に直径 1.78mm のフィラメント状に引抜成形されたもの。商品名は Onyx™) も研究対象に加え、特に PA6 が PA6T6I と比較して高い吸湿性を有していることを問題点として着目し、s-CF/PA6 積層材の乾燥時および湿潤時の強度・剛性および層間破壊靱性を、X 線 CT 撮像、DIC ひずみ場測定、SEM フラクトグラフィなどの各種評価手法を用いて、供試体の内部マイクロ構造や外表面性状に対するマル

チスケールな観測手法を適宜活用しながら、その材料強度信頼性の評価を実施する。さらには、s-CF/PA6t6I 材中にc-CF/PA6T6II 材を補強材として混在成形させた s-CF/PA6 + c-CF/PA6T6I ハイブリッド積層複合材も考案し、前述の各種材料強度信頼性評価を適宜実施し、ハイブリッド化による効果およびc-CF/PA6T6I 補強材の最適な混在・配置を実験計画および有限要素法(FEM)数値シミュレーションを援用したロバスト最適設計によって見出していく。

3. 研究期間中に得られた主な結果

本研究では、多数の実測・観測結果が多数得られるため、本稿ではその中でも特に学術的に重要な知見が得られたもののいくつかについて、それらの結果のみを報告する。

(1) c-CF/PA6T6I 積層材モード I 層間破壊靱性評価

図 1 は、双片持ち梁(DCB)試験で取得した R 曲線により c-CF/PA6T6I モード I 層間破壊靱性の層間配向角の影響を調べた結果の一部である。層間配向角により靱性値に違いがみられることと、大きなバラツキがあり、さらなる考察にはサンプルサイズを大きくしたうえで統計的な処理が今後必要であることが分かった。

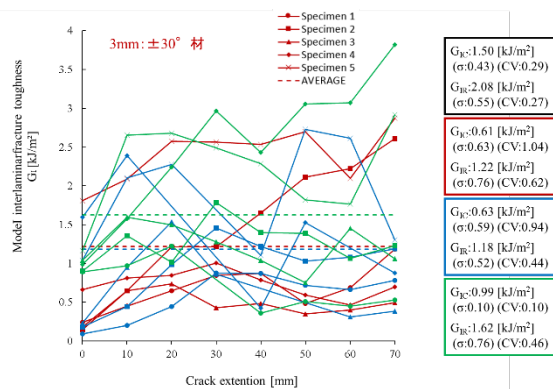


図 1 c-CF/PA6T6I 積層材 R 曲線の層間繊維配向依存性

(2) c-CF/PA6T6I 積層材 OHT 疲労破壊特性評価

図 2 は、円孔引張(OHT)疲労試験により得られた c-CF/PA6T6I の応力比 0.1 における時間強度を応力振幅(静強度比)毎にワイブル確率プロットしたものである。サンプル形状母数が 1 を切っており、母集団に大きなバラツキがあることが判明した。

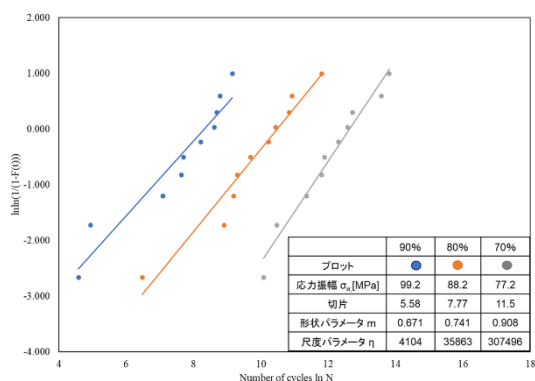


図 2 c-CF/PA6T6I 積層材 OHT 時間強度のワイブルプロット

(3) s-CF/PA6 積層材の吸水挙動評価

図 3 は、s-CF/PA6 積層材の吸水率の経時変化と配向角(ノズル走査方向)との関係を示したものである。パルク材に比べて 3D プリント成形したものは一般に吸水しやすいことと吸水特性に大きなバラツキがみられることが分かる。また配向角による違いは供試体表面の吸水口となる積層痕間ボイドの密度の差によるものと考えられる。

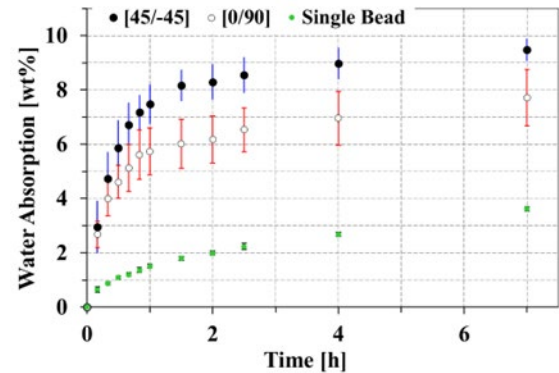


図 3 s-CF/PA6 積層材の吸水率の経時変化

(4) s-CF/PA6 + c-CF/PA6T6I ハイブリッド積層材の静的 OHT の DIC ひずみ分布測定

s-CF/PA6 積層材内部に c-CF/PA6T6I をハイブリッドに混在積層させた供試体の OHT 試験下での最大主ひずみ分布をデジタル画像相関法(DIC)で測定した結果の一部である。円孔周りへの c-CF/PA6T6I の混在積層の度合いより、円孔周りのひずみ集中の度合いが低下することが分かった。

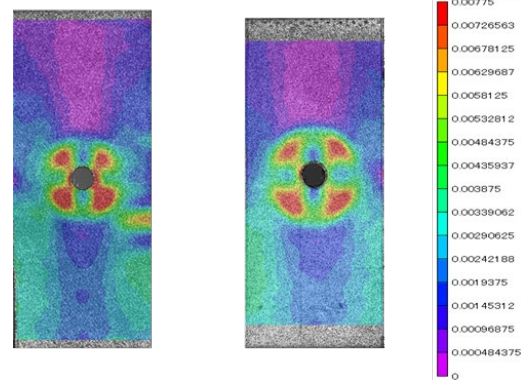


図 4 s-CF/PA6+c-CF/PA6T6I ハイブリッド積層材の DIC 測定により得られた最大主ひずみ分布

4. まとめ

熱溶解積層造形(Fused Deposition Modeling, FDM)方式 3D プリントにより成形された炭素繊維強化熱可塑性樹脂(Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic, CFRTP)積層複合材料の各種材料強度特性評価試験データを統計解析が可能となるほど十分多数取得した上で、各種の推測統計解析するための事前検討を実施した。おおむね計画通りに測定項目を消化できた。また、学術的にも興味深い結果や知見を得ることもできた。今後、サンプルのサイズと質を継続的に向上させて、材料強度信頼性評価を本格的に実施していく予定である。

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 極限低温環境において単独稼働する遠隔監視装置用電源の開発とその実証

研究課題名 (英文) : Development and Demonstration of a Power Source for Remote Monitoring Devices Operating Independently in Extreme Low-Temperature 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

1. はじめに

我が国は、自然災害と向き合って発展していく実情にあることから、災害発生予測地域に迅速および簡易に設置できる遠隔監視装置が必要である。また当該装置の存在意義から、災害発生場所に商用電源は無く、そして単体かつ独立で発電および蓄電ができる電源の確保が求められる。加えて、寒冷地想定 (-50°C 程度) の環境温度での完全稼働も求められる。以上のような仕様を満たす遠隔監視装置用の電源開発を研究目的とする。

農業用遠隔監視装置 (市販品) は、太陽光パネルおよびリチウムイオン電池 (LIB) による電源、そして遠隔監視用カメラが搭載されている。これを災害発生箇所でも適用することを想定した際、極寒地域ではLIBは大きく性能劣化するため実用性に課題がある。特に、我が国における国土とその自然環境に於いては、 -50°C という環境温度 (-41.0°C @1902年1月25日を北海道・旭川にて記録) の動作保証が必須となることは議論を待たない。

2. 提案手法

提案する電源は、3種類の蓄電素子から構成されるものであり、本報告では「複合蓄電システム」と呼称する。蓄電素子として、まずリチウムイオンポリマー電池 (Li-Po) は、高いエネルギー密度を有する蓄電素子として、幅広い用途で活用されている。ただし他の蓄電素子と比較すると、瞬時的な高出力用途には適していない。一方、電気二重層キャパシタ (EDLC) は、大きな電流導通による充放電が可能であり、瞬時的な出力動作に適した蓄電素子である。さらに蓄電動作が温度環境に依存しないことも特長である。ただし静電容量に対する体積が大きい。続いて、リチウムイオンキャパシタ (LIC) は、EDLCほどの出力特性 (瞬時および動作温度) は有していないが、エネルギー密度が高く、その中間的な性能を活かすべく、蓄電システムに採用した。

この複合蓄電システムにおいては、それぞれの蓄電素子の特徴を活かすことができる、援用効果について検証を試みた。それぞれの蓄電素子における個別の機能検証も同時に可能とするため、具体的には、各素子への接続スイッチを備えた検証のためのシステムを考案・構築した。当該蓄電システムの構成の模式図を図1に示す。

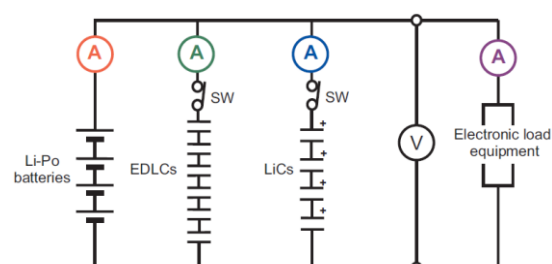


図1. 複合蓄電システムの構成模式図と放電特性評価

また当該蓄電システムの性能評価の際、電子負荷装置 (1W152-151D, テクニオ社製) により、20 Aの定電流放電時の測定を行った。また各蓄電素子には、それぞれ電流プローブ (TCPA300, Tektronix社製) を用いて電流値を計測した。測定箇所は、Li-Po、EDLC、LICおよび合算値である電子負荷装置前の計4ヶ所である。これらのデータ取得には、メモリハイコーダ (8861-50, HIOKI社製) を用いた。

3. 結果と考察

まずリチウムイオンポリマー電池 (Li-Po) の定電流 (5 A) 出力時の温度変化に応じた放電カーブを図2に示す。

ここで $+30^{\circ}\text{C}$ から $+10^{\circ}\text{C}$ までの温度範囲における放電電圧の変化に対して、 0°C から -20°C までの温度範囲での放電電圧の変化を比較すると、低温時には急峻な電圧変化となっていることがわかる。このことは周囲環境が低温になるにつれて、電解液の拡散抵抗および電極/電解液界面の電荷移動抵抗が上昇していることが示唆される⁽¹⁾。

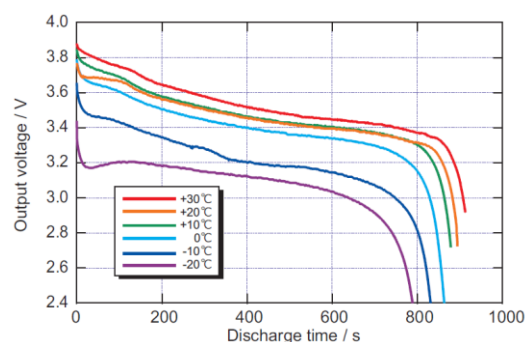


図2. Li イオン電池の放電カーブの温度依存特性

次に電気二重層キャパシタ (EDLC) の定電流 (1 A) 出力時における温度変化に応じた放電カーブを図3に示す。+30℃から-20℃までの温度変化に対して、電圧出力の特性変化が殆どないことがわかる。このような温度に依存しない放電特性は、EDLCの電荷保持メカニズムが、電極と電解液との界面での電荷の物理吸着⁽²⁾であることに起因する。

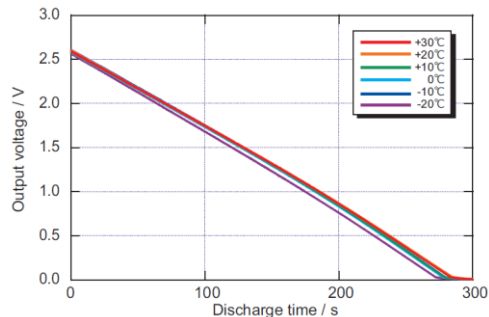


図3. EDLCの放電カーブの温度依存特性

さらに図4には、リチウムイオンキャパシタ (LIC) の定電流 (1 A) 出力による温度変化による放電カーブに示す。Li-Poと類似したような出力電圧変化、すなわち低温になるほど電圧変化が顕著になることが観測されている。

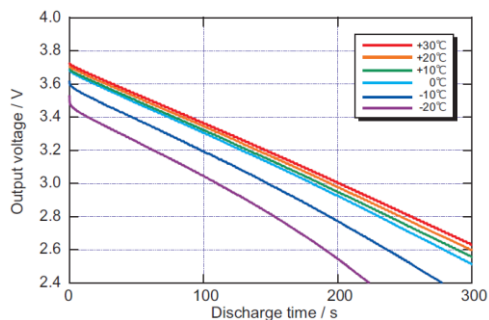


図4. LICの放電カーブの温度依存特性

最後に、これら3つの蓄電素子から構成された複合蓄電システムの放電カーブを図5に示す。ここで(a)は端子電圧、(b)は総電流値、そして(c)は各素子からの電流値である。

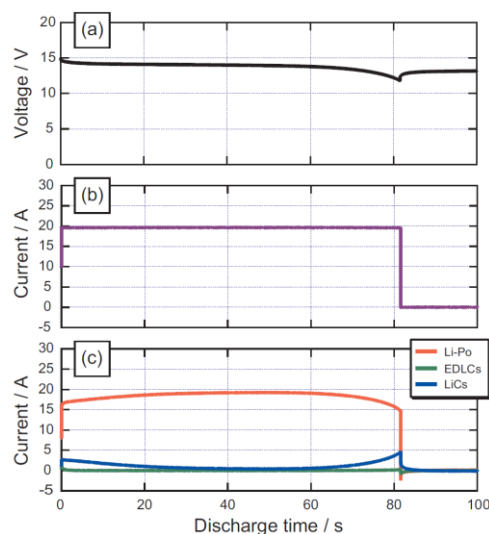


図5. 複合蓄電システム出力特性。(a) 端子電圧、(b) 総電流値、(c) 各蓄電素子からの電流値。

図5(a)および(b)から、20 Aの定電流放電が正常に出力され、約80秒後に下限電圧 (12 V) に到達し、電流導通を遮断したことがわかる。また図5(c)からは、放電開始から約20秒間は、期待通りの援用効果が発揮されていることが確認できる。この期間では、Li-Po素子よりもLIC素子の内部インピーダンスが低かったことが示唆される。

さらに放電開始から60秒後には、Li-Poの総電荷量の減少に伴いインピーダンスが増加し、再びLIC素子による援用効果が現れている。一方、EDLCによる援用効果は瞬時的な応答に限定され、その後はLICが追従できなかったため、その効果は明瞭には確認できなかった。これは、本実験で使用したEDLCの静電容量が5 Fで、LICの静電容量が200 Fであったことに起因する。つまり、EDLCの静電容量が不十分だったため、援用については静電容量の最適化が必要であることがわかった。

4. おわりに

3つの蓄電素子の特徴を活かした複合蓄電システムを考案・構築し、-20℃環境下にて、20 A放電 (一定) 時において、初動ではLIBは稼働できない中、EDLCが瞬時応答しつつ、LICが安定にシステムとして稼働するまで援用できることを実験的に確認できた。

今後は、-50℃環境での複合蓄電システムの適用とその実証を行っていく予定である。

本研究に関する主な発表論文

- (1) Tomoya Shiono, Tomoyuki Tamura, Akira Nakano, Nobuo Satoh: "Development and Evaluation of Isolated Class- Φ_{2n} DC-DC Converter", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 144, No. 3, pp. 149-155 (2024).
- (2) A. Kosugi, K. Iwai, N. Satoh: "A Study of High-Frequency Power Supply for Plasma Discharge in Liquid", 10th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2024), P1B-2 (2024/03/02).
- (3) S. Tomoya and N. Satoh: "Development and Evaluation of Isolated Class- Φ_{2n} DC-DC Converter", 10th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2024), P1B-1 (2024/03/02).

参考文献

- (1) 小久見善八, 「リチウムイオン電池」, オーム社 (2008).
- (2) 岡村勉夫, 「電気二重層キャパシタと蓄電システム」, 日刊工業新聞社, (1999).

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 加工硬化の結晶粒径依存性と内部応力評価に基づいた機構解明

研究課題名 (英文) : Relationship between grain size dependence of work hardening and internal stress

研究者 : ○寺田 大将 千葉工業大学
TERADA Daisuke 工学部 先端材料工学科 准教授

1. はじめに

金属材料では塑性加工によりその強度が増加し、加工硬化として古くから知られている。構造材料に求められる強度と延性の両立を叶えるためには、加工硬化の制御が重要となる。そのためには加工硬化に対する理解の深化が不可欠である。

加工硬化のメカニズムは転位論の発展とともに、多くの研究者により議論されてきた。そのメカニズムは、大きく二つに大別される。ひとつは転位の堆積による弾性応力場が新たな転位の動きを抑制するため強化が生じるとする長範囲応力場モデルである。もうひとつは、すべり面に交差する転位 (林立転位) をすべり転位が切り進むために応力が増加するとする林立転位モデルである。これらのモデルに対して多くの研究が示されたが、現在では林立転位モデルが広く受け入れられている¹⁻³⁾。

ところで、塑性変形を与えた材料に予変形とは逆方向の応力を加えると、その時の降伏応力や変形応力は予変形と同一方向に応力を加えた場合よりも低下する。この現象はバウシinger効果として知られている。バウシinger効果の発現メカニズムは、上述の長範囲応力場モデルと林立転位モデルに基づいて解明が試みられてきた。近年では、そのメカニズムとして長範囲応力場モデルが広く支持されている^{4,5)}。バウシinger効果は塑性加工後の応力方向に対する強度の差異であり、加工硬化の異方性とみることができる。したがって、バウシinger効果は加工硬化を説明するモデルに内包される必要があるが、前述の通り、加工硬化とバウシinger効果は異なるモデルに基づいて説明されている現状にある。

加工硬化は結晶粒径にも依存する。図1に種々の結晶粒径を持つアルミニウムの応力 - ひずみ曲線を示す。応力 - ひずみ曲線は結晶粒径により大きく変化し、結晶粒が微細になるほど加工硬化が増加している。粒径と転位密度の関係について報告があるものの⁶⁾、林立転位モデルでは加工硬化の増加を十分に説明できない。長範囲応力場モデルと林立転位モデルは、応力増加の原理が異なることから競合的に作用する必要はなく、同時に作用する可能性も十分考えられるがその検討は十分なされていない。

ところで、長範囲応力場モデルにおける応力場は、内部応力という形で実験により評価することができる。そこで

本研究では、最初の取り掛かりとして、種々の平均結晶粒径を有するアルミニウムを試料とし、加工硬化の粒径依存性と内部応力の関係について調べることを目的とした。

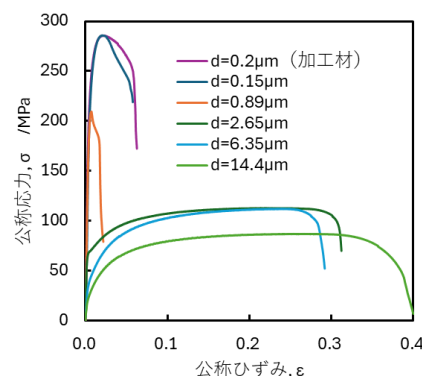


図1 種々の平均結晶粒径を有するアルミニウムの応力 - ひずみ曲線

2. 研究の内容

図1の応力 - ひずみ曲線から求めた 0.2%耐力における加工硬化率を平均結晶粒径に対してプロットしたグラフを図2に示す。図より、平均結晶粒径が6.35 μm から2.65 μm への減少では加工硬化率が減少し、それ以下では結晶粒系の減少に伴い増加していることがわかる。

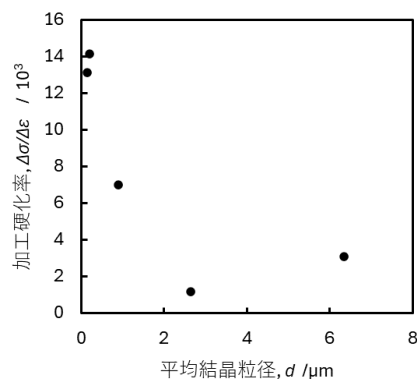


図2 平均結晶粒径に対する加工硬化率

引張変形中に生じる内部応力の相対的な変化を引張除荷試験の結果により推定した。引張除荷試験とは所定のひずみまで引張試験を実施し、その後の除荷時の変化を見る

試験で、今回は除荷後 30 分間における試験片の形状変化をひずみゲージを用いて測定した。図 3 は、種々の引張ひずみにおいて除荷試験を行い、得られたひずみ量を、引張ひずみに対してプロットした図である。図より、結晶粒径が、0.20 μm および、0.15 μm の場合は、著しい収縮がみられている。一方で、0.89 μm 以上の結晶粒径の試料では、収縮ひずみ量は小さい。除荷時にみられる試験片の収縮は、引張変形中に形成される内部応力に起因していると考えられることから、ひずみ量の結晶粒径に対する変化は、内部応力の変化と相関があると考えられる。

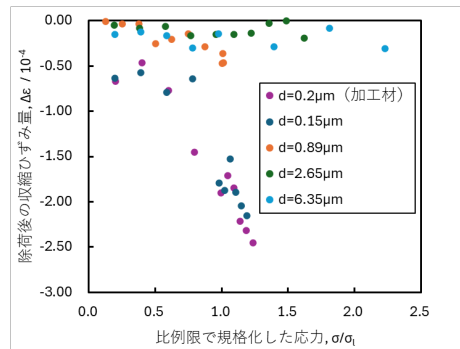


図 3 種々の平均結晶粒径の材料における引張除荷試験の結果

図 4 は、図 3 でのひずみ量を結晶粒径に対して整理したもので、ひずみ量が多いほど内部応力が大きいことを示す。

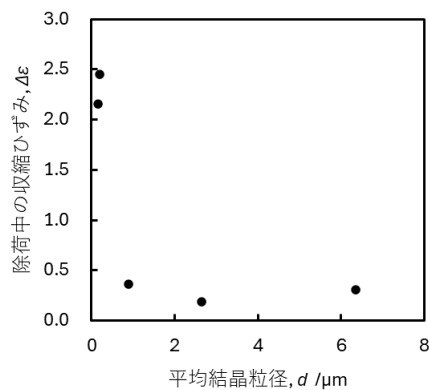


図 4 平均結晶粒径に対する引張除荷試験での収縮ひずみ量

図 2 と図 4 を比較すると、おおそ傾向は一致しており、加工硬化に対して内部応力が大きく寄与することを示唆している。しかしながら、完全に同じではないことから、加工硬化には内部応力以外の要素、すなわち、林立転位に起因する加工硬化も結晶粒径に対する依存性を示し、その影響が表れている可能性が高い。

3. まとめ

種々の平均結晶粒径を有するアルミニウムについて、引張試験および引張除荷試験を実施した。その結果、2 μm 程

度までは結晶粒径の減少で加工硬化率が低下し、それ以下の結晶粒径では、顕著な加工硬化の増加がみられた。

引張除荷試験の結果より、引張変形中に形成される内部応力は、結晶粒径の減少にともない増加することが示唆された。結晶粒径の減少による内部応力の増加が、加工硬化率の変化と一致がみられるため、加工硬化に対して内部応力が大きく影響していると考えられる。林立転位に起因する加工硬化率も粒径依存性を示し、加工硬化に同時に影響していると考えられる。したがって、加工硬化は、長範囲応力場に起因する要素と、林立転位に起因する要素を加算して考える必要があると考えられる。両者ともに粒径依存性を示すことから、粒径との関連についてさらなる研究を進めることが望まれる。

参考文献

- 1) 高木節雄, 鉄と鋼, 105(2019), pp. 941-956.
- 2) U.F. Kocks and H. Mecking, Prog. Mater. Sci., 48(2003), pp.171-273.
- 3) 丸川健三郎, まてりあ, 40(2001), pp. 655-659.
- 4) 八高隆雄, 長谷川正, 鉄と鋼, 70(1984), pp.1551-1558.
- 5) M. T. Ma, B. Z. Sun and Y. Tomota: ISIJ Int., 29 (1989), pp. 74-77.
- 6) H.Adachi, Y.Miyajima, M.Sato and N.Tsuji, Mater. Trans., 56(2015), pp. 671-678.

研究項目： 先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）

研究期間： 2023/4/3 ～ 2023/9/30

研究課題名（和文）： センサへの自然吸着を制御した排気ガス中の親水・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 with controlling natural adsorption in exhaust gas.

研究者： 〇安藤 毅
ANDO Ki

千葉工業大学
工学部 電気電子工学科 准教授

1. はじめに

粒子状物質（Particulate Matter: PM）は人体への幅広い影響が懸念されており^①，自動車や船舶などのディーゼルエンジンによるススの排出が主な発生源のひとつとなっている。炭素微粒子であるススは、スス単体としてだけでなく、水分などが凝集し親水性の表面性状を持つ親水性 PM、未燃焼燃料、潤滑油などが凝集し疎水性の表面性状を持つ疎水性 PM に大別される。これらはエンジンの負荷や回転数の変化に伴い、PM 性状ごとの排出量や割合が変動することが報告されている^②。PM を性状ごとに選択的かつリアルタイムに測定することで、エンジンの燃焼状態の予測や解析に有効活用できると考えられる。しかし、現在の PM 計測法は、フィルタまたはインパクタによる慣性力を用いて強制的にサンプリングする方式が主流となっており、表面性状に基づいた測定をリアルタイムに行うことが困難である。

この解決のため我々は、水晶振動子微量天秤（Quartz Crystal Microbalance: QCM）の表面へ親水性または疎水性の高分子材料による感応膜を修飾することによって、表面性状の異なる PM の自然吸着を制御し、PM の選択的かつリアルタイム測定が可能であることを報告している^③。また、疎水性物質に対する膜厚依存性の報告が見られないことから、本研究プロジェクトにおいては QCM 感応膜の膜厚による選択性及び感度の向上について検討を行った。

2. 研究の内容

(1)実験方法

QCM 表面の感応膜はスピンコート法を用いて、QCM 両面に成膜した。スピンコートに用いた溶液について Table 1 に示す。修飾材料が有するに親水基（-OH）または疎水基（フェニル基や-CH₃）によって変化する、測定対象の選択性について検討を行った。また、この溶液濃度によって QCM に成膜した際の膜厚が変化するため、感度との関係について検討を行った。

エンジンから排出される PM はガス同様の拡散挙動をとると考えられる。本プロジェクトでは、実験条件制御が容易なガス分子を用いて、感応膜に対して親水基（-OH）、疎水基（-CH₃）を有する測定対象ガスの各濃度における感度と性状選択性について検討した。使用した測定対象ガスを Table 2 に、実験系を Fig.1 に示す。有機ガスは揮発性が高いことから、マイクロシリンジを用いて試験槽内に任意の量の測定対象を滴下し揮発させた。水蒸気は揮発性が低いいため、飽和塩法を用いて相対湿度を変化させ実験を行った。

(2)実験結果

ポリビニルアルコールを感応膜に用いた QCM について、膜厚とガス感度の関係を検討した実験結果を Fig.2 に示す。膜厚は推定値である。親水性感応膜であるポリビニルアルコールの膜厚増加によって、疎水性物質に対する感度が抑制されている。一方で、吸着作用を持つ親水性物質に対する感度が増加しているために、選択性が向上したと言える。

Table 1. Properties of coating materials for QCM

Coating material	Solvent	Concentration (g/L)	Condensed formula	Purpose
Polyvinyl alcohol	Pure water	1, 14, 21, 33, 43, 100	(CH ₂ CHOH) _n	Hydrophilization
Polystyrene	Toluene	1, 5, 17, 42, 93, 100 g/L	[C ₆ H ₅ CHCH ₂] _n	Hydrophobization
Silicone resin	Toluene	$\frac{1}{1000}$, $\frac{1}{500}$, $\frac{1}{200}$, $\frac{1}{70}$, $\frac{1}{10}$ DIL	[SiO ₂ OH(CH ₃) _x SiO ₂ OH(C ₆ H ₅) _y] _n	Hydrophobization

Table 2. Properties of target gases

Label	Target gases	Condensed formula	Property
A	Water molecule	H ₂ O	Hydrophilization
B	Ethanol	CH ₃ CH ₂ OH	Hydrophilization
C	Toluene	C ₆ H ₅ CH ₃	Hydrophobization
D	Isooctane	CH ₃ C(CH ₃) ₂ CH ₂ CH(CH ₃) ₂	Hydrophobization

また、QCM 表面に感応膜が2分子層様に修飾される膜厚7.55 nm まで、親水性物質に対する感度増加は顕著である。感度増加が緩やかになった後、再度感度が増加に転じている。これは、QCM 感応膜の膜厚増大による感度低下や、さらなる膜厚増加によってクラックなどが生じ表面積の増加が起こったためではないかと考えている。

さらに、疎水性を示すポリスチレンとシリコーンレジン有感応膜に用いたQCM の膜厚と感度の関係を検討したものをFig. 3 に示す。膜厚の増加とともに疎水基を有するトルエンとエタノールに対し、感度が増す傾向が得られた。その一方で、水分子に対する感度向上は大きくなく、疎水性分子への選択性が得られていると考えている。さらに、イソオクタンへの感度特性が、ポリスチレンおよびシリコーンレジン感応膜の間で大きく異なった。これは、それぞれが有するフェニル基とメチル基の相互作用の違いが表れているといえ、疎水性物質間でも、測定の実効性が得られることを示唆している。

この成果は、第40回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム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。

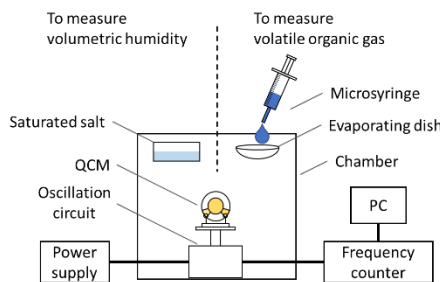


Fig. 1. Experimental system of QCM

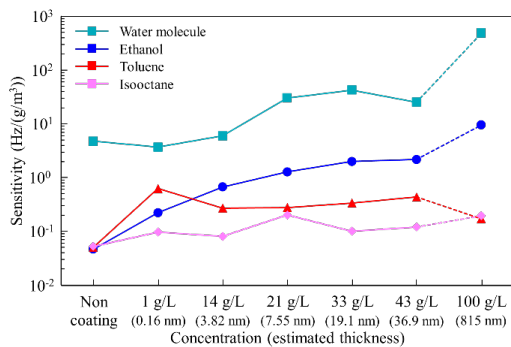
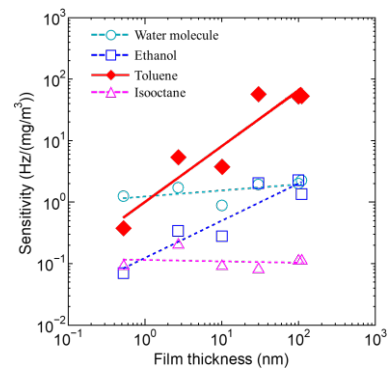


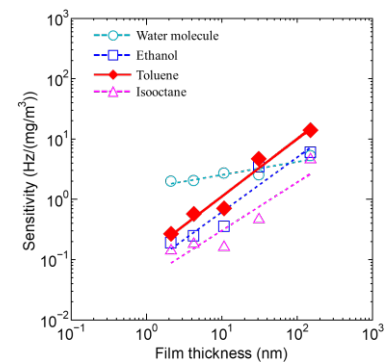
Fig. 2. Gas sensitivity and selectivity of Polyvinyl alcohol coated QCM

参考文献

- (1) Ki-Hyun Kim, Ehsanul Kabir, Shamin Kabir: "A review on the human health impact of airborne particulate matter", Environmental International, Vol.74, pp.136-143 (2015).
- (2) M. Sharma, A. K. Agrawal, and K. V. L. Bharathi: "Characterization of exhaust particulates from diesel engine", Atmospheric Environment, Vol.39, No.17, pp.3023-3028 (2005).
- (3) Masashi Saito, Ki Ando, Yoshihiro Kobayashi: "Study on Hydrophilic and Hydrophobic Surface Coating Materials of QCM for Particulate Matter Measurement and its Response Characteristics to Gas", IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.142, No.11, pp.293-299 (2022).



(a) Polystyrene



(b) Silicone resin

Fig. 3. Gas sensitivity and selectivity of hydrophobic coated QCMs

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 戦略的に近接場光を導入したハイブリッドプラズモン増強場と磁気光学の融合

研究課題名 (英文) : Combination of enhanced electric field originated from hybrid plasmons and magneto-optical effects through a material with near-field light

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

1. はじめに

本研究は、磁性材料が示す磁気光学効果と金属が示す局在表面プラズモンを組み合わせることで光電融合材料の作製をめざした研究である。今回は局在表面プラズモンによる増強電場が磁気光学層の磁気モーメントにどのような影響を及ぼすのかを解明することを目標に実験を行った。実験は高エネルギー加速器研究機構でビームライン BL-16A の X 線磁気円二色性を利用して行った (図 1)。

2. 研究の内容



図1 高エネルギー加速器研究機構のビームライン BL-16A

我々は図2に示す実験系で実験を行うため、実験セットアップを組むことから始めた。チャンパー中心に設置した試料 (図2, 橙色) の同位置に、X 線と、材料のプラズモンを励起するために装置外部から赤色レーザー光を照射するのがこのセットアップのポイントである。レーザー光はチャンパーのフランジ外部から照射した。その際、レーザー光の設置高さや、チャンパー内部に設置した屈折用ミラーの角度を調整することに非常に苦労した。数 mm 角の試料の中心にビーム径数 100 μm の X 線とレ

ーザ光を同位置に照射するためのセットアップの微調整であったが、位置調整には電気的な自動位置調整機構がなく、すべて物理的にレーザー光源を動かすことで位置調整を行ったため、非常に困難で苦労した。この調整で数時間以上を要した。

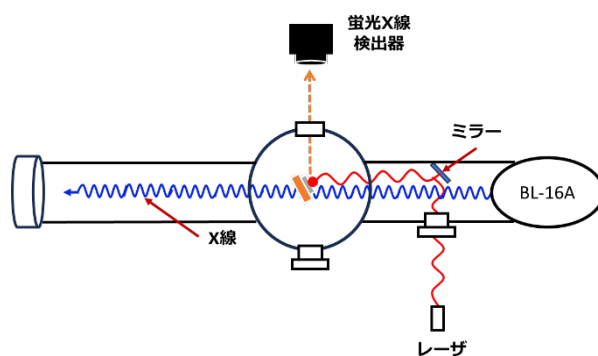


図2 今回の実験のために構築した実験系

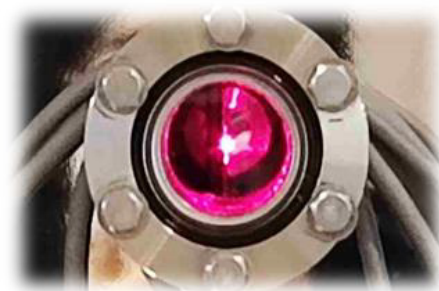


図3 装置外のフランジから真空チャンパー中の試料に照射した、プラズモン励起用赤色レーザー光

我々は既に X 線磁気円二色性の予備実験を済ませており、試料の軌道磁気モーメントとスピン磁気モーメントの検出・分離に成功していた。そこで今回の研究目的は、試料の局在表面プラズモンを励起した状態と非励起状態での比較を行い、局在表面プラズモンが試料中の各元素の軌道磁気モーメントとスピン磁気モーメントに

どのような影響を及ぼすかについて検証することである。

図4にプラズモン励起状態で測定した、リファレンス（黒：局在表面プラズモン共鳴を励起しない材料）と光電融合材料（赤）のX線磁気円二色性のスペクトルを示す。元素1および3については両試料にスペクトルの顕著な違いは見られなかった。他方で、元素2については両試料のスペクトルには明瞭な差異が見られた。これは光電融合材料を構成する「元素2」が局在表面プラズモンの増強電磁場の影響によって磁気モーメントが特に大きな影響を受けたことが示唆されると考えた。

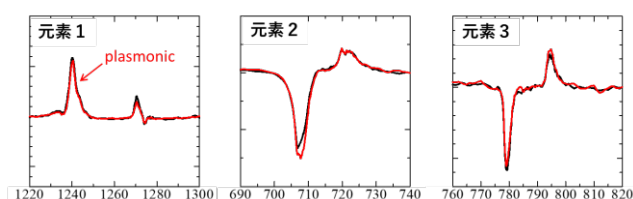


図4 プラズモン励起状態で測定した、リファレンス（黒）と光電融合材料（赤）のX線磁気円二色性の元素ごとのスペクトル。

さらに図5には光電融合材料において、プラズモン非励起状態（黒：レーザーOFF）と励起状態（赤：レーザーON）で測定したX線磁気円二色性のスペクトルを示す。プラズモン励起／非励起によって特に「元素2」のスペクトルが変化していることがわかる。これは図4と同様に「元素2」が局在表面プラズモンの増強電磁場の影響によって磁気モーメントが影響を受けたことを示すと考察している。

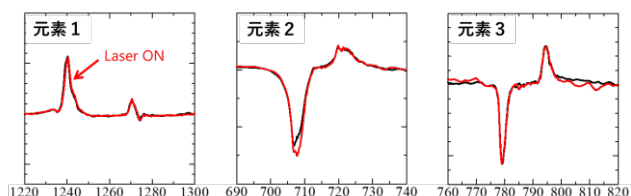


図5 プラズモン非励起状態（黒：レーザーOFF）および励起状態（赤：レーザーON）で測定した光電融合材料のX線磁気円二色性のスペクトル。

各元素の磁気モーメントを定量的に算出・評価する目的で図4、図5の結果を疑似フォークト関数でフィッティングし、各元素のピークスペクトルの面積を算出し、その面積から元素ごとの磁気モーメントの議論を試みた。表1に疑似フォークト関数でフィッティングした各元素のピークスペクトルの面積をまとめる。

表1 電磁場増強状態におけるリファレンスに対する光電融合材料の磁気モーメント（X線磁気円二色性のピークスペクトルの面積比から算出）

測定したX線吸収端	電磁場増強時における リファレンスのピーク面積に対する 光電融合材料のピーク面積(倍)
元素1 $M_{4,5}$	0.86
元素2 $L_{2,3}$	1.57
元素3 $L_{2,3}$	1.11

レーザー光照射で局在表面プラズモン共鳴の励起による電磁場の増強に起因して、光電融合材料を構成する「元素2」のピーク面積すなわち磁気モーメントが特にリファレンスより増大していると考えられることができた。

3. まとめ

磁気光学効果とプラズモン増強場の融合機序の解明を目的とした実験を行った。現状ではまだ定性的ではあるが、プラズモンによって特定元素の磁気モーメントが影響を受けることが実証された。すなわちプラズモン増強場で磁気モーメントが影響を受けることにより、磁気光学効果が制御できる可能性があると考えている。今後は得られた結果をより定量的に評価すべく実験を進める予定である。

本研究に関する主な発表

- (1) 花島颯介, 山根治起, 高橋龍之介, 中田勝, 和達大樹, 安川雪子, TbFeCo の磁気特性に対する局在表面プラズモン共鳴による増強電場の影響, 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-D903-7 (2023).

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 誘電体を媒体とするテラヘルツ帯無線通信の軌道角運動量多重伝送による高速化の研究

研究課題名 (英文) : Study of high-speed terahertz-band wireless communication using dielectric as a medium by orbital angular momentum multiplexing transmission

研究者 : ○枚田 明彦 千葉工業大学
HIRATA akihiro 工学部 情報通信システム工学科 教授

1. はじめに

近年、埋設管の効率的な検査法として、ロボットによる検査が注目されている。我々は、ロボットとの通信方式としてポリ塩化ビニル(PVC)管壁に沿って伝播するマイクロ波を使用した通信方法を検討している [1]。我々は、既に PVC 管壁の断面に複数のアンテナを設置した MIMO 通信により、チャンネル容量の増加が可能であることを示したが [2]、伝送距離が増加すると空間相関が増加し、チャンネル容量が低下するという課題があった。本論文では、軌道角運動量(OAM)多重伝送 [3] に向けて、PVC 管壁を伝搬するマイクロ波信号の OAM モードの生成の可否を検討した。

2. PVC 管に沿った OAM モード

OAM は電磁波の伝搬形態の一つで、波面が螺旋状に形成されたものであり、異なる OAM モードの螺旋波は互いに直交することを利用して、直交モードに異なるデータ信号を重畳することにより、データ多重伝送が可能となる。OAM モード 1 では、伝搬軸に対して 1 周あたり 2π だけ位相が変化する。空間を伝搬する電波で OAM 多重伝送については複数報告されているが [3]、パイプ管壁を伝搬するマイクロ波信号で OAM モードの発生が可能か、検討された例はなかった。本研究では、PVC 管壁断面に複数のアンテナを設置し、位相差を与えた信号を入力することにより、パイプ管壁を伝搬するマイクロ波信号に OAM モードでの伝搬が可能か、3 次元電磁界シミュレーションにより検討した。

シミュレーションに使用した PVC 管は、内径 130mm、外径 140mm、長さ 1000mm であり、使用するアンテナは、2.4GHz 帯と 5GHz 帯に対応したダイポールアンテナであり、45° 間隔で 8 個、管の両端の管壁の断面に取り付けている (図 1)。モード 1 の OAM モード発生には、隣接するアンテナに $2\pi/8$ の位相差をつけて 5 GHz 信号を入力した。

モード $l = 0, +1, +2$ の場合のパイプ表面の電界分布を図 2(a), 2(b), 2(c) に示す。モード $l = 0$ ではパイプの断面に対し、等位相で信号が伝搬した。モード $l = +1, +2$ では同一位相の軌跡が進行方向に対して螺旋形状に表れ、位相の回転は $l = +1$ で 2π , $l = +2$ で 4π となった。

また、モード $+1$ と -1 では位相の回転方向が反転して進行することが確認された。

PVC 管壁に沿って伝搬する 5GHz 帯信号で OAM モードでの伝搬が可能か、3 次元電磁界シミュレーションで検討を行った。PVC 管端の管壁断面に 45° 間隔で円環状に 8 つのアンテナを配置し、各アンテナに OAM モードに応じて位相差を与えた 5 GHz 信号を入力した場合の管壁表面での電界分布を求めた。その結果、各 OAM モードに応じて位相が回転して進行する伝搬モードが確認できた。

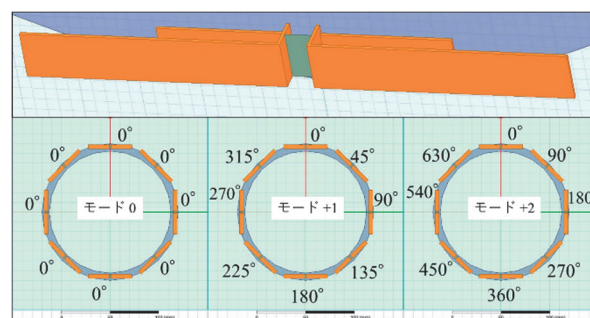


図 1 パイプ端でのシミュレーションモデル

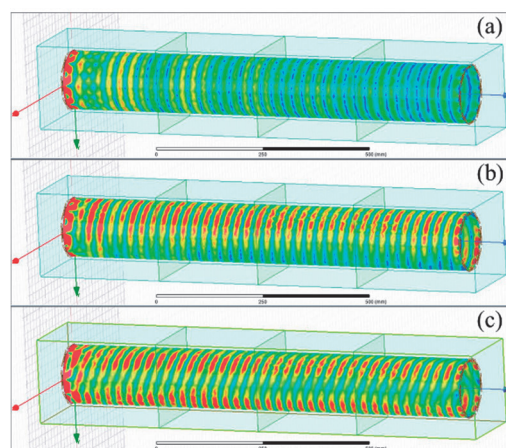


図 2 PVC 管壁の電界分布のシミュレーション結果

3. OAM 多重伝送による通信容量増加の検討

第 2 章では、OAM モードがパイプ壁に沿って伝搬するマイクロ波信号に生成できることを明らかにした。本章では、5 つの OAM モード ($l = -2, -1, 0, +1, +2$) を多重化する

ことで、パイプ壁に沿って OAM 伝送を使用するシステムの容量を向上させることの実現可能性を検証する。OAM システムの搬送波周波数は 5.0GHz、チャネル帯域幅は 20MHz、送信機の出力電力は 5mW/MHz である。

OAM モード $l = -L \sim +L$ を多重した場合、アンテナ T_{xm} の送信信号 x_m は次式で表される。

$$x_m = \sum_{l=-L}^{+L} s_l \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(j \frac{2\pi l}{N} m\right)$$

モード l と l' の間のモード間干渉信号 $z_{l,l'}$ は次式で表される。

$$z_{l,l'}$$

$$= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N h_{nm} \sum_{l=-L}^{+L} \sum_{l'=-L, l' \neq l}^{+L} \frac{s_{l'}}{N} \exp\left(-j \frac{2\pi l n}{N}\right) \exp\left(j \frac{2\pi l' m}{N}\right)$$

これらの結果から、モード l における信号対干渉・雑音電力比 (SINR) γ_l は次のように表すことができる。

$$\gamma_l = \frac{E[|z_{l,l}|^2]}{E[\sum_{l' \neq l} |z_{l,l'}|^2] + E[|\tilde{n}_l|^2]}$$

OAM 伝送のシステム容量 C_{sum} は次式で与えられる。

$$C_{sum} = \sum_{l=-L}^L \log_2(1 + \gamma_l)$$

図 3 は、伝送距離をパラメータとした SINR の OAM モード数依存性を示している。伝送距離が 1m の場合、SINR は 37.5dB から 43.5dB である。伝送距離が長くなると SINR は低下する。熱雑音は相互干渉電力よりもはるかに小さいため、伝送距離が長くなるにつれて SINR が低下するのは相互干渉が増加するためである。

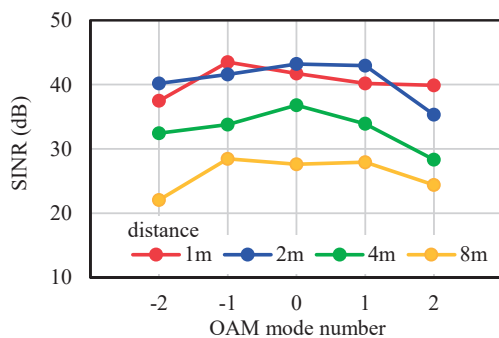


図 3 SINR の OAM モード数依存性

図 4 に OAM 多重伝送のシステム容量の伝送距離依存性を示す。比較のため、Tx1 と Rx1 のみをパイプの両端中央に配置した無線伝送システムのシステム容量を示す。伝送距離が 1m の場合、システムの容量は 67.4bps/Hz であり、伝送距離が 8m になると 43.4bps/Hz に減少する。この値は、1 対のダイポールアンテナで管内にマイクロ波信号を伝送するシステムと比較して、全ての距離で 2.5 倍以上の容量を達成しており、管壁に沿って OAM 多重伝送を行うことに

より、管沿いの通信システムの容量を向上できることを示している。

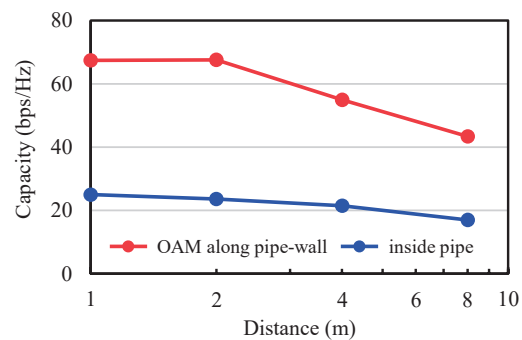


図 4 OAM 多重伝送のシステム容量の伝送距離依存性

4. まとめ

本研究では、埋設管検査ロボットの通信容量向上のために、管壁に沿った OAM 多重伝送について検討した。その結果、送信アンテナに位相回転を与えることにより、管壁に沿って伝搬するマイクロ波信号に OAM モードを生成できることがわかった。マイクロ波信号が管壁を伝搬する OAM 多重システムは、マイクロ波信号が管内を伝搬するシステムに比べて 2.5 倍のシステム容量を達成した。

本研究に関する主な発表論文

- (1) Akihiko Hirata, "OAM Multiplexing of 5 GHz Band Microwave Signal Propagating Along PVC Pipe Walls for a Buried Pipe Inspection Robot," IEEE IMS, pp. 486-489, 2023.
- (2) 鈴木眞史, 枚田明彦, 村田博司, 水上雅人, "PVC 管壁を伝搬するマイクロ波を使用した OAM モードの検討," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-2-39, 2023.

参考文献

- [1] 野間太桜, 大田垣祐衣, 村田博司, 枚田明彦, 水上雅人, "PVC 管壁伝搬マイクロ波導波モードを用いたビデオ映像伝送," The 2022 IEICE General Conference, C-14-5, 2022.
- [2] S. Matsukawa, K. Yoshida, T. Okuda, M. Hazama, S. Kurokawa and H. Murata, "Non-destructive Inspection for FRPM Pipeline Using Self-imaging Effect of Microwave on Cylindrical Dielectric Waveguide," 2021 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), 2021, pp. 70-73, doi: 10.1109/CAMA49227.2021.9703474.
- [3] Y. Yagi, et al., "200 Gbit/s Wireless Transmission Using Dual-Polarized OAM-MIMO Multiplexing on 28 GHz Band," 2019 IEEE Globecom Workshops, pp. 1-4, 2019.

研究項目 : 先進研究推進プロジェクト助成金(II)

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名(和文) : PO₄四面体配列の制御による中温作動型プロトン導電体の創成

研究課題名(英文) : Creation of new proton conductors operating at intermediate temperatures by controlling the arrangement of PO₄ tetrahedra

研究者 : 松田 泰明
MATSUDA Yasuaki

千葉工業大学
工学部 応用化学科 准教授

1.はじめに

次世代燃料電池や水素を用いた新規レドックス反応の反応場の構築のために、25 - 500℃の広域温度域で作動するプロトン導電体の開発が切望されている。しかし、150-500℃の中温を含む広域温度帯で耐熱性と高プロトン導電性の両立する物質の開発は、未だ困難となっている。

本研究で着目する複合カチオンリン酸塩は、一次結合で形成された強固なトンネル型の無機骨格が耐熱性の確保に寄与し、鎖状配列したPO₄四面体と水素結合で連結してトンネル内に隣接して並んだ結晶水がプロトンの高速拡散経路となるため、広域温度帯で高プロトン導電率の発現に寄与する¹²。しかし、このトンネル型リン酸塩は、300℃付近での不可逆な相転移が、プロトン導電体としての作動温度域を制約していた。本研究では、この相転移が、トンネル型骨格を形成するカチオン間の静電反発に由来すると考え、骨格を構成するカチオンの大きさと、結晶構造の熱安定性について系統的に調査し、室温から500℃で熱安定性と高プロトン導電性を両立する新規物質の開発を目指した。その結果、トンネル型 $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_{2x}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ や、 $\text{KMg}_{1-x}\text{H}_{2x}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ などのトンネル型リン酸塩の高温相である Benitoite 型リン酸塩で、上記の超広域温度帯で作動する新規プロトン導電体を見出したので報告する。

2. 研究内容

2.1 トンネル型プロトン導電体 $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_{2x}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$

トンネル型 $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_{2x}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の粉末X線回折図形では、 $x = 0 - 0.18$ の組成域で空間群R3のトンネル型構造で帰属される反射のみが観測され、固溶体の形成に対応するa軸、c軸の収縮が確認された。FTIR スペクトルでは、xの増加と共に、-OH や-POH に対応した吸収ピークの強度が増大し、結晶内へ導入されたプロトンによる水素結合の増加が示唆された。

トンネル型リン酸塩 $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_{2x}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ のTG/DTA 測定では、 $x=0$ では、室温および150℃からの脱水反応が観測され、 $x>0$ の組成では、これらに加えて600℃からトンネル型リン酸塩の部分的な分解を伴う脱水反応が確認された。定比の組成では、800℃までトンネル型リン酸塩の単一相が安定で、 $x>0$ では、600℃まで安定であることが確認され、過去に報告した同型の物質で観測された300℃付近での不可逆な相転移¹²は観測されなかった。TG 曲線

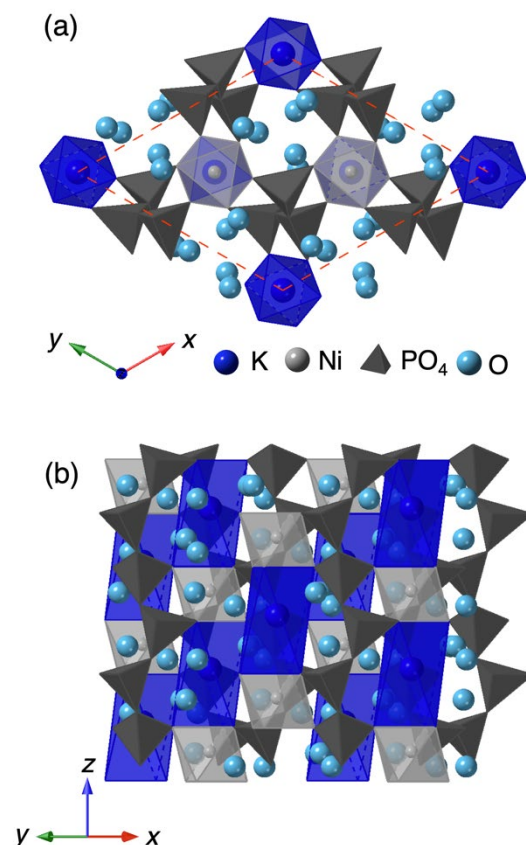


Fig.1 Crystal structure of $\text{KNi}_{0.82}\text{H}_{0.36}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ viewed along the [001] direction. (b) The framework structure viewed along the [110] direction.

から算出した含水量は、プロトン量の増加と共に増加する傾向が確認された。

Fig. 1 に X 線 Rietveld 解析で決定した $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_{2x}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の結晶構造を示す。差フーリエ合成で結晶水の酸素の位置を2つ抽出し、これらの占有率から算出した結晶水量は、TG 曲線から算出した含水量とほぼ一致した。FTIR スペクトルで観測された水素結合に関する吸収ピークは、主として結晶水と結晶内のPO₄四面体に関連すると考えられる。この物質のトンネル型骨格は、面共有で連結した(KO₆)(NiO₆)八面体鎖と螺旋状のPO₄四面体鎖が頂点共有で連結して形成される。このトンネル内には、水色で示した水分子の結晶水が、PO₄四面体に沿って、z 軸方向に鎖状配列する。水分子また

は H_3O^+ と PO_4 四面体が水分子が水素結合により連結するため、結晶水が鎖錠配列すると考えられる。この結晶水鎖は、結晶内の水分子に付随したプロトンの高速拡散に寄与すると考えられる¹²。

複合カチオンリン酸塩の熱的な安定相は、骨格を構成するカチオンのサイズに依存して変化し、比較的大きなカチオンで構成されるリン酸塩は、低温ではトンネル型構造、高温でカチオンが占有する八面体が稜共有で連結した構造へと不可逆に変化する。トンネル型構造が得られる最も小さなカチオンの組み合わせである K^+ と Ni^{2+} のみ、この相転移を抑止できた。骨格を構成するカチオン間の距離は、八面体が稜共有している方が長い。トンネル型構造の相転移が、面共有で連結した八面体位置のカチオン間の静電反発に由来しており、サイズの小さいカチオンでは、この反発が弱いいため、高温までトンネル型骨格が安定性になると考えられる。骨格を構成するカチオンのサイズと八面体の連結を制御することで、リン酸塩の相転移を抑止して、骨格の熱安定性を向上できると予想される。

トンネル型リン酸塩 $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ のプロトン導電率は、プロトン含有量の増加と共に向上し、 $x=0.18$ で最大の導電率が得られた。 $x=0.18$ は室温から 500°C の広域温度帯で高プロトン導電率を発現し、 150°C 以降では、熱によるプロトン拡散能の向上と結晶水の脱離による導電率の低下が競合した挙動が観測され、 275°C で導電率の最高値 $1.8 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$ の値が得られた。この物質は、デバイスの作動温度である 150°C において、一定の湿度下で、酸素分圧の影響を受けずに一定の導電率を示しており、中温作動型燃料電池の固体電解質として有望であると考えられる。

2.2 Benitoite 型プロトン導電体 $\text{KMg}_{1-x}\text{Li}_x\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$

トンネル型リン酸塩の結晶構造と熱安定性との相関を調査する過程で見出した Benitoite 型プロトン導電体 $\text{KMg}_{1-x}\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ は、カチオンが占有する八面体が稜共有で連結した層と環状に連結した PO_4 四面体が積層した構造をもち、中温域で熱安定性と高プロトン導電特性を発現する³。新規物質であるこの物質は、プロトン導電体としての研究がほとんど進んでおらず、局所構造をプロトン拡散に最適化することで更なる導電率の向上が期待される。本研究では、Benitoite 型リン酸塩 $\text{KMg}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の、 Mg^{2+} の一部を Li^+ で置換した際の電荷補償としてプロトンを導入した新規物質 $\text{KMg}_{1-x}\text{Li}_x\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の開発を試みた。

合成した試料の X 線回折図形では、 $x=0-0.3$ の組成域で、空間群 $P-6c2$ の Benitoite 型構造を有する $\text{KMg}(\text{PO}_3)_3$ の反射のみが観測され、目的物質の単一相の生成が確認された。この組成域では、 x の増加に対して、 a 軸と c 軸ともに収縮し、固溶体の形成が示唆された。 Mg^{2+} ($0.72 \text{ \AA}$) よりイオン半径の大きな Li^+ ($0.76 \text{ \AA}$) の置換による格子の収縮は、 x の増加に伴う結晶中の水素結合が増加に

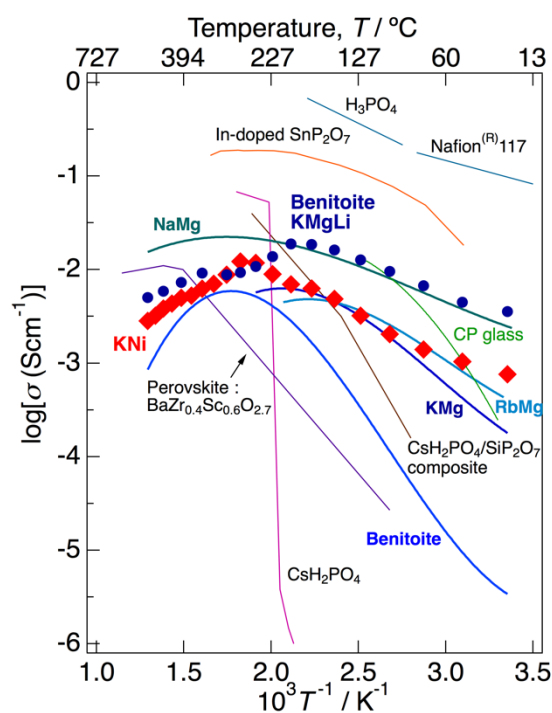


Figure 2 The proton conductivities of $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (KNi) and Benitoite-type $\text{KMg}_{1-x}\text{Li}_x\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (Benitoite KMgLi) compared with related proton conductors. H_3PO_4 ⁴⁾, Nafion^(R) 117⁴⁾, CP glass⁵⁾, CsH_2PO_4 ⁶⁾, In-doped SnP_2O_7 ⁷⁾, $\text{CsH}_2\text{PO}_4/\text{SiP}_2\text{O}_7$ composite⁸⁾, $\text{RbMg}_{1-x}\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (RbMg)¹⁾, $\text{KMg}_{1-x}\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (KMg)²⁾, Benitoite³⁾ and $\text{NaMg}_{1-x}\text{Li}_x\text{H}_x(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (NaMg)⁹⁾ are shown for comparison.

より、骨格を形成する酸化物イオン間距離が収縮したことが示唆している。FT-IR スペクトルでは、 POH と OH の振動モードに対応する吸収ピークが増大し、試料中のプロトン含有量の増加に対応する変化が観測された。TG/DTA 測定では、いずれの組成も室温と 150°C からの 2 段階の脱水反応が観測された。熱重量測定から算出した試料の含水量は、 x の増加とともに増加した。これは、導入されたプロトンによって骨格の酸性度が向上し、水分子がレイス塩基として結晶構造に取り込まれる傾向があることを示唆している。加湿窒素気流下 ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ kPa}$) で測定した試料の導電率はプロトン量の増加と共に向上し、 $x=0.10$ は室温から 500°C で 10^{-3} Scm^{-1} を超える高いプロトン導電率を示し、 200°C で $1.9 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$ の高プロトン導電率を発現した。Benitoite 型構造は、元素置換によるプロトンの導入により、中温を含む広域温度帯で高プロトン導電特性を発現する優れた結晶構造であることが確認された。

Fig. 2 に申請者らが見出した新規プロトン導電体と代表的なプロトン導電体とのプロトン導電率の比較を示す。既存の物質では、触媒反応に適すると言われる $150-300^\circ\text{C}$ の温度域や車載用燃料電池の固体電解質に要求される $150-500^\circ\text{C}$ 温度域をカバーする物質の開発が

困難であったが、複合カチオンリン酸塩は、室温から 500°C の広域温度帯で高プロトン導電率を発現する点が大きな特徴といえる。複合カチオンリン酸塩は、一次結合のみで形成された骨格が熱的安定性の確保、 PO_4 四面体との水素結合を介して隣接した配列をとる結晶水がプロトンの高速拡散に寄与し、プロトン固体電解質の結晶構造を要求される機能ごとに分割して最適な化学結合を活用することで、固体中の二次結合の制御に由来するプロトン導電体の作動温度の課題を克服できることを示唆している。本研究により、中温域で作動する新規構造を有するプロトン導電体を見出すとともに、複合カチオンリン酸塩の物性と結晶構造との相関性や共通点を明確化することで、中温作動型プロトン導電体の物質設計の自由度を拡張することができた。得られた知見を MOF や他のセラミックスに展開することで、リン酸塩に限らず、より優れたプロトン導電体開発の加速化が期待される。

3. まとめ

本研究では、複合カチオンリン酸塩の構成元素と結晶構造の結晶構造の熱安定性に着目してプロトン導電体の開発を行い、トンネル型 $\text{KNi}_{1-x}\text{H}_2\text{X}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ および Benitoite 型 $\text{KMg}_{1-x}\text{Li}_x\text{H}_2\text{X}(\text{PO}_3)_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ は、室温から 500°C の広域温度帯で熱安定性と高プロトン導電特性を両立する新規プロトン導電体であることを見出した。

本研究に関する主な論文

- 1) Y. Matsuda et al., *Inorg. Chem.*, **63**, 8108 (2024).

参考文献

- 1) Y. Matsuda, et al., *Mater. Chem. A*, **1**, 15544 (2013).
- 2) Y. Matsuda, et al., *RSC Adv.*, **10**, 7803 (2020).
- 3) Y. Matsuda, et al., *Dalton Trans.*, **50**, 7678 (2021).
- 4) T. Norby, *J. Solid State Chem.*, **125**, 1 (1999).
- 5) T. Ogawa, et al., *Chem. Sci.*, **11**, 5175 (2020).
- 6) A. I. Baranov, et al., *Ferroelectrics*, **81**, 183 (1988).
- 7) T. Hibino, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **199**, 677 (2011).
- 8) V. Ponomareva, et al., *J. Solid State Chem.*, **15**, 213 (2011).
- 9) N. Ueda, et al., *Mater. Adv.*, **2**, 6603 (2021).

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (II)
研究期間 : 2023/5/28 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 多官能性アルカノールアミン合成の新戦略: 二官能性化合物への求核付加反応における化学選択性の触媒制御とスイッチング

研究課題名 (英文) : A New Strategy for the Synthesis of Polyfunctional Alkanolamines: Catalytic Control and Switching of Chemoselectivity in the Nucleophilic Addition to Bifunctional Compounds

研究者 : ○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

ヒドロキシ基とアミノ基を同一分子内に有するアルカノールアミンは、抗腫瘍性やHIV プロテアーゼ阻害活性など多彩な生物活性を示すため、医薬品化学分野における重要な化合物群である(図1).¹ このため、アルカノールアミンの新規合成法の開発は現在でも多くの注目を浴びている。しかし、ヒドロキシ基とアミノ基以外の官能基をさらに含むアルカノールアミンの合成法は少なく、特に、複数の官能基を含む多官能性アルカノールアミンは、多官能性に基づく特異な生物活性の発現が期待される一方、有効な合成法はほとんど報告されていない。

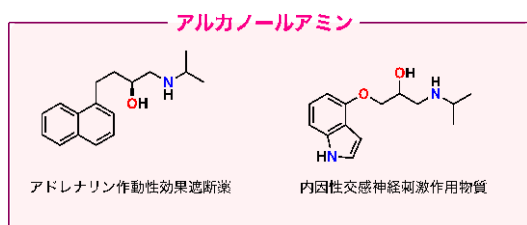


図1 アルカノールアミン

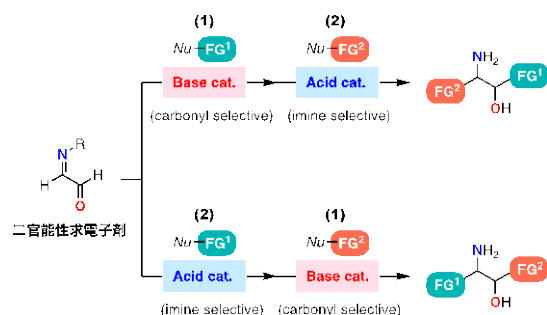


図2 多官能性アルカノールアミンの合成戦略

このような背景のもと申請者は、新たなアルカノールアミンの合成法として、カルボニル基とイミノ基が隣接している二官能性求電子剤に対して、触媒の求核付加反応を連続的に行う方法を着想した(図2)。この

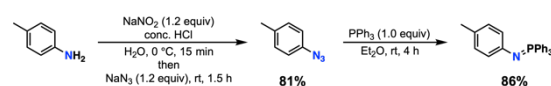
方法は、有機反応で最も汎用性の高い求核付加反応を2回行うだけのシンプルな合成戦略でありながら、二官能性求電子剤を選択的に反応させる高い化学選択性と、この選択性をスイッチングする手法を開発することで実現させるものである。これにより、構造多様性に富んだ多官能性アルカノールアミンの合成が達成される。

2. 研究の内容

まず始めに、カルボニル基とイミノ基を有する1,2-ケトイミンの合成法を図3に示す。パラトルイジンを亜硝酸ナトリウムと濃塩酸存在下、アジ化ナトリウムと反応させることで対応する芳香族アジドを収率81%で得た。次に、アジドとトリフェニルホスフィンと反応させることで、イミノホスホランを86%で得た。最後に、1,2-ジケトンとイミノホスホランを反応させることで、1,2-ケトイミンを98%で得た。構造決定には¹Hおよび¹³C NMRにより行った(図4)。

続いて、合成した1,2-ケトイミンとトリメチルシリルシアニド(TMSCN)との反応を行った。まず始めに、ルイス塩基触媒が本反応に及ぼす効果を調査した(図5)。その結果、本反応は様々なルイス塩基触媒において、ケトン選択的にシアノ化反応が進行することを見いだした。構造決定には¹Hおよび¹³C NMRにより行った(図6)。

◇ Iminophosphorane Synthesis



◇ Imine Formation

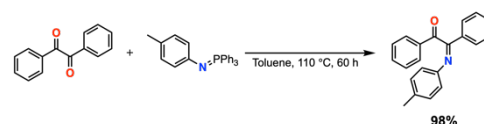


図3 1,2-ケトイミンの合成

◇ 13C NMR Result

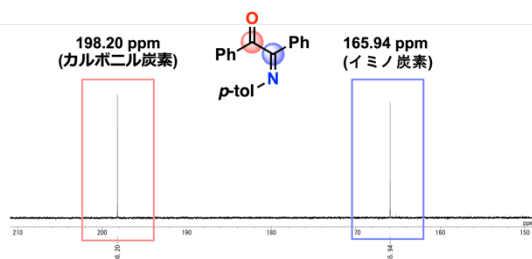
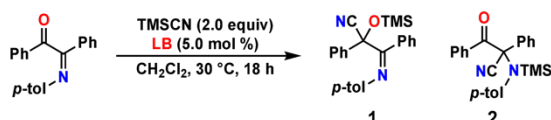


図4 1,2-ケトイミンの 13C NMR



LB	1 (%)	2 (%)
DBU	>99	0
Et ₃ N	22	0
NaOPh	0	0
TBAF	94	0
CsF	78	0

図5 ケトンシアノ化

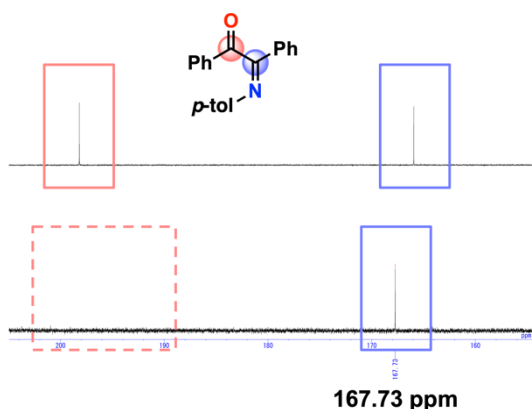
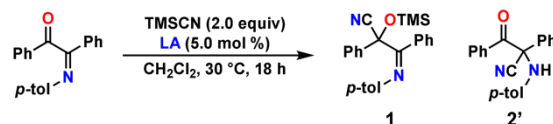


図6 ケトンシアノ化体の 13C NMR

次に、ルイス酸触媒が1,2-ケトイミンと TMSCN との反応に及ぼす効果を調査した (図7). その結果、本反応は銀触媒や銅触媒を用いたときに、イミン選択的にシアノ化反応が進行することを見いだした. 構造決定には ¹H および ¹³C NMR により行った (図8). このように選択性が発現した理由は、ルイス塩基触媒を用いたときには、求核剤である TMSCN が活性化されて反応が進行したため、イミノ基よりも本来の求電子性が高いカルボニル基がシアノ化された一方、ルイス酸触媒を用いたときには、カルボニル基よりもルイス塩基性が高いイミノ基が優先的に活性化されたため、イミン選択的にシアノ化が進行したと考えられる. 現在、計算化学によって反応機構解析を進めている.



LA	1 (%)	2' (%)
AgOTf	0	>99
Cu(OTf) ₂	0	72
Sc(OTf) ₃	50	0
AgPF ₆	0	21
AgCl	0	0

図7 イミンシアノ化

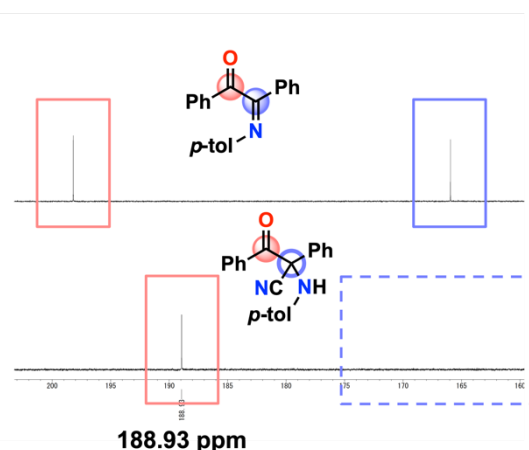


図8 イミンシアノ化体の 13C NMR

3. まとめ

本研究では、1,2-ケトイミンと TMSCN との反応において、ルイス塩基触媒を用いるとケトン選択的に、ルイス酸触媒を用いるとイミン選択的なシアノ化が進行することを見いだした. 今後は、計算化学による反応機構解析を進めるとともに、残されたカルボニル基およびイミノ基の変換反応を検討し、多官能性アルカノールアミンの合成を目指す.

参考文献

- (1) S. C Bergmeier, The Synthesis of Vicinal Amino Alcohols. *Tetrahedron* **2000**, 56, 2561.

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : マルチフレックス空間構築のための照明のアクティブ制御

研究課題名 (英文) : Active control of lighting for flexible multi-purpose space

研究者 : 望月 悦子 千葉工業大学
MOCHIZUKI Etsuko 創造工学部 建築学科 教授

1. はじめに

働き方改革ならびに新型コロナウイルスの感染拡大防止対策として、在宅勤務が加速的に普及した。多様かつ柔軟な働き方を許容する空間 (本研究ではマルチフレックス空間と称す) の構築が急務となっている。

従来のオフィスでは、ダイナミックな空間内移動が定期的に行われていたが、マルチフレックス空間では多種の行為を同じ場で、かつ並行して行うこともある。行為によって必要な明るさ等の照明要件、好ましい雰囲気は異なるが、常時一定の環境に曝されることとなり、空間体験の貧困化、惹いてはワーカーの疲労、生産性の低下を招く恐れもある。

本研究の目的は、多様な空間用途で使われるワークスペースにおいて相反する空間機能を両立させる光・照明環境の制御手法を示すことである。今回は、仕事と休憩の双方で VDT 画面を見続ける状況でも、作業領域周辺の照明条件によって視覚疲労を軽減できるか、被験者実験で検証した。

2. 実験方法

2.1 実験空間

図1に示す2つの実験ブース (W: 2700, D: 2000, H: 2500) を作成した。壁・天井は白色壁紙 (反射率 83%)、床は灰色カーペット (反射率 14%) で仕上げ、机両脇にはパーテーション (反射率 92%) を設置した。各実験ブースには机を2台ずつ設置した。各機の直上に天井照明 (SAD423X, 49 W) を配置し、作業中は 500 lx、5000K で机上面を照らすようにした。休憩時の照明条件を設定するため、片方のブースには調光・調色可能なスポットライト (SXS3028W, 13.6 W) を4台、もう一方のブースにはプロジェクタ機能付きシーリングライト (popIn Aladdin 2 Plus, 190 W) を天井中央に1台配置した。

2.2 実験条件

作業時の照明環境は、机上面照度 500 lx、相関色温度 5000K で常時一定とした。休憩時の照明条件を表1に示す。休憩中は被験者に音声付き動画を視聴させたが、作業時と比べ集中を必要としないため、被験者の机周辺の照明環境を変動させることで、視線が VDT 画面から外れ、視覚疲労を軽減できるのではないかと考えた。条件2の机上面照度、条件3の相関色温度は段階的に調光した。条件4と条件5では、スポットライトの出力を 30 秒周期で変化させ (机

上面照度は0~200 lx)、前方壁あるいは机両脇のパーテーションを照明した。実験中の机上面照度 (T&D TR-74Ui, 1 分間隔で計測) は図2のように設定された。

2.3 実験手順と測定・評価項目

被験者には、一般色覚の学生 8 名 (男女各 4 名、平均 22.6 歳) を用いた。被験者は2名一組で実験に参加した。一回の実験は約 160 分を要し、被験者は1日一回の実験に参加、6 日間で全条件を体験した。

図3に一回の実験手順を示す。被験者は10 分間の休憩を挟んで、60 分間の VDT 作業を2回行う。VDT 作業は、20

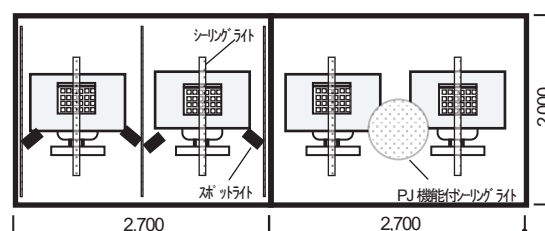


図1 実験室内の配置

表1 休憩時の照明条件

条件	机上面照度	相関色温度	周辺照明
1	500 lx	5000K	-
2	500→100→500 lx	5000K	-
3	500 lx	5000→3500→5000K	-
4	100 lx	5000K	前方壁(スポットライト)
5	100 lx	5000K	両脇(スポットライト)
6	100 lx	5000K	前方壁(PJ付シーリング)

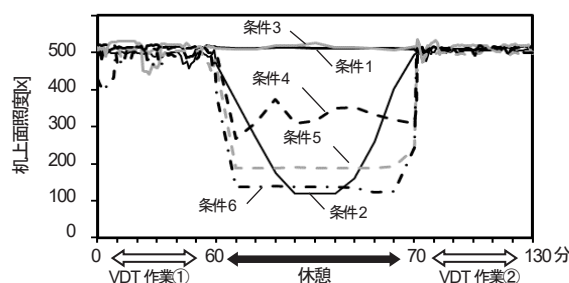


図2 実験中の机上面照度 (一部抜粋)

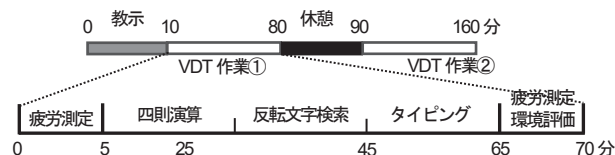


図3 一回の実験手順

分間ずつの四則演算（2桁）、反転文字検索、テキストタイピングである。60分間の作業開始前と作業終了後には、臨界融合頻度（Critical Fusion of Flicker, CFF）を5回（日本アルゴリズム株式会社、ヘルスビューワフリッカー）、焦点調節応答時間（Accommodation Response Time, ART）を42回連続で測定した。また、被験者は疲労自覚症調べに回答した。作業後と休憩後には、実験ブース内の光環境を評価した。被験者2名は、実験中の視線動向を連続で計測した（Tobii Pro Nano）。

3. 実験結果

3.1 視覚疲労

① 臨界融合頻度 CFF

被験者が5回測定したCFFのうち、2～4回目の中央値を代表値として求めた。図4にVDT作業によるCFF変化率（（作業後-作業前）/作業前）を被験者8名の中央値で示す。CFFは値が小さくなるほど、また、CFF変化率は値が小さいほど視覚疲労が生じていることを表す。条件1以外は、休憩後の方がVDT作業による視覚疲労の増加が緩和されている。特に、条件3～6では、休憩後のCFF変化率が正の値を示した。

② 焦点調節応答時間 ART

被験者が測定した11～42回目のARTのうち、焦点が遠点から近点に移動した際のART16回分のデータの中央値を代表値として求めた。ARTは値が大きくなるほど、また、ART変化率は値が大きいほど視覚疲労が生じていることを表す。図5にVDT作業によるART変化率（（作業後-作業前）/作業前）を被験者8名の中央値で示す。条件5のみ、休憩後のART変化率が休憩前よりも減少した。条件6は休憩中にVDT画面でなく、机前方の壁面に映される動画を視聴したが、休憩後のVDT作業でARTが著しく増加した。

③ 疲労自覚症しらべ

自覚症しらべの25の質問項目（5段階評価）は、5項目ずつ5つの群（I群：ねむけ感、II群：不安定感、III群：不快感、IV群：だるさ感、V群：ぼやけ感）の疲労に分類される。被験者8名の群ごとの評価点の合計値を総スコアとした。図6に例として、III群（不快感）とV群（ぼやけ感）の総スコアを示す。全ての群で、VDT作業後に総スコアは増える傾向にあり、特に、V群の増加が大きかった。しかし、条件1と条件4では、休憩後の作業による総スコアの増加が抑えられている。分散分析の結果、休憩後のIII群、V群の総スコアには休憩中の照明条件による有意差があり、多重比較検定（Bonferroni法）の結果、条件2と条件6で有意に総スコアが高く、条件1と条件4で有意に総スコアが低かった。

④ 視線動向

図7に視線動向を計測した被験者Aと被験者Tの作業中と休憩中のVDT画面注視時間割合を示す。VDT作業時は、両被験者とも約55%の時間でVDT画面を注視しており、休憩の前で差はなかった。被験者Aは、作業時よりも休憩時に画面を注視する時間割合が低く、特に条件1と条件5で低かった。被験者Tは休憩時の画面注視時間割合のばらつきが大きい、条件4以外は、作業時より休憩時の方が画面を注視する時

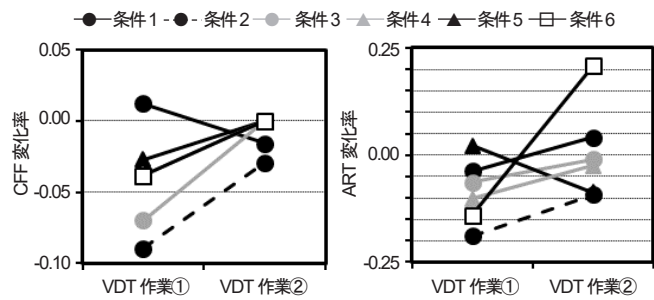


図4 CFF 変化率

図5 ART 変化率

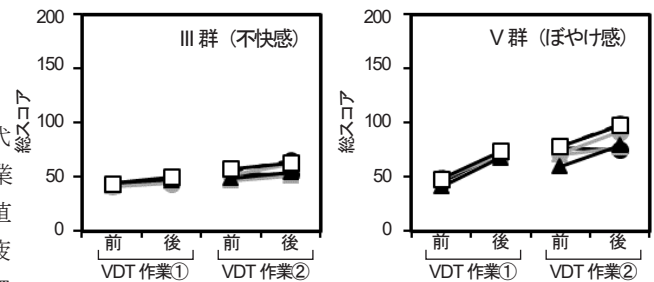


図6 疲労自覚症しらべ

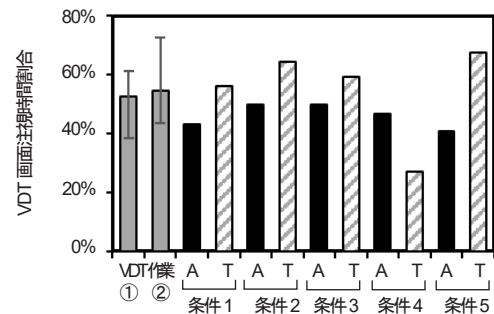


図7 VDT作業中と休憩中の画面注視時間割合

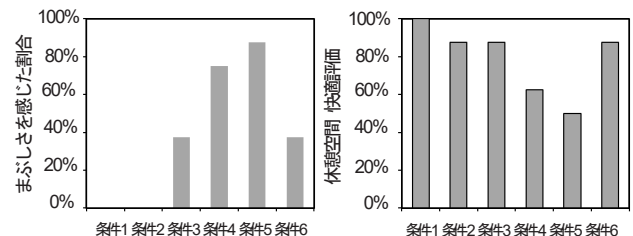


図8 休憩空間としての光環境評価

間割合が高かった。

3.2 休憩時の光環境評価

図8に休憩時の光環境評価の一部を示す。スポットライトを変動させた条件4と条件5は、まぶしさを感じ、不快と評価する割合が他の条件より高かった。

4. 今後の課題

休憩時にもVDT画面を注視し続けることによる視覚疲労を軽減する照明の動的制御について検討した。視覚疲労を軽減するだけでなく、視的快適性を担保する制御方法を検討する必要がある。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 望月：視覚疲労を軽減する休憩時の照明環境, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学I, pp. 441-442 (2023)

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

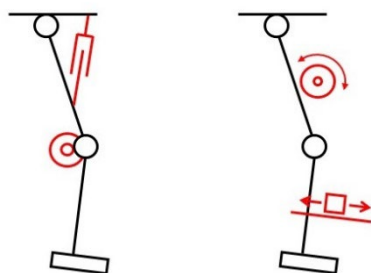
研究課題名 (和文) : 跳躍を含む人とロボットの2足歩行を補助する知的慣性アシストの研究

研究課題名 (英文) : Study on intelligent inertial assist for robot and human bipedal walk with jump

研究者 : 米田 完 千葉工業大学
YONEDA Kan 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歩行補助におもりの加減速の反力を利用する慣性アシストと呼ぶ手法を提唱している。これは、図1 (a)のようにジョイントの両側の節の一方ともう一方の間に力を作用させる筋肉と同じような形式ではなく、(b)のように1つの節にだけ力を作用させるものである。アクチュエータは通常、バックドライブに多少の力を必要とするため、直接アシストでは、もともと持っている筋肉による運動を妨げる傾向がある。慣性アシストはバックドライブの力がもとの運動を阻害しない特徴がある。しかし、慣性アシストは関節等の動きを直接制御しないため、行き過ぎによる転倒などの恐れがあり、安定性確保との両立が課題である。



(a) 直接アシスト (b) 慣性アシスト
図1 直接アシストと慣性アシスト

従来研究では、上体のおもりを動かして重心移動に加えて加減速の反力を利用して歩行を安定化させるもの¹⁾がある。これはあらかじめ計算した軌道で行うものであるが、本研究ではセンシングにもとづく状態に応じた制御を基本としている。

2. おもり並進によるアシスト

図2のようにおもりをスライドさせ、端部で衝突を起こし、その反力でアシストする装置を作成し、図3のように人間の跳躍のアシストを試みた。ただし、装置は小型でアシスト量は小さい。アシストのタイミングについて検討を継続中である。

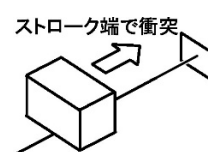


図2 並進型アシスト

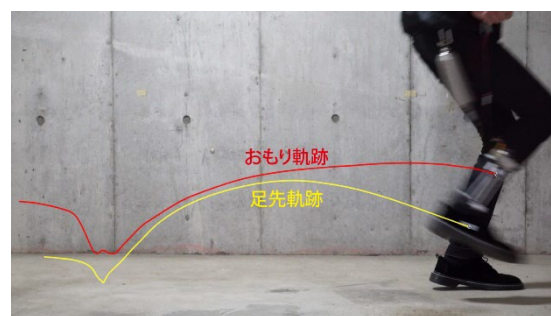


図3 縦方向並進型アシスト装置を装着した歩行実験

3. リアクションホイールによるアシスト

図4の2足歩行ロボットは足先のソレノイドで地面を蹴り、腰のピッチ軸にモータでトルクを加えて歩行する。これに図5のようにリアクションホイールを付け、足先のレーザセンサの高さ計測情報で切り替える制御を行い、左右揺動運動の安定化を実現した。

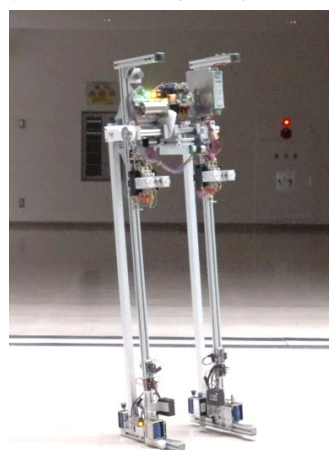


図4 リアクションホイール付き2足歩行ロボット

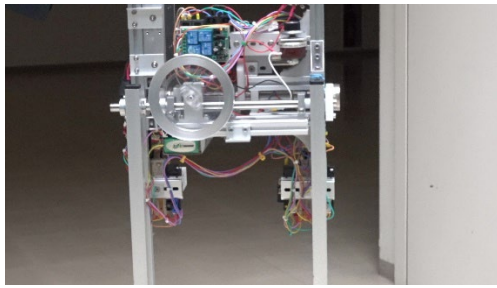


図5 ロボット背面のリアクションホイール

しかし、この実験ではアシスト量が小さいため、定常歩行の安定化をするにとどまり、非常時の転倒回避や跳躍のような大きな運動の生成はできていない。

4. ジャイロスタビライザによるアシスト

図6のロボットは4点接地型ではあるが、2足歩行と同様に左右の着地をくりかえすペース歩容を行うものである。市販されているKENYON社製KS-6(重量1.6kg)2台を胴体に直付けしてペース歩容をしているようすで、周期は0.57秒である。なお、ジャイロスタビライザは長手方向が横(左右)になるように胴体に固定したので、ペース歩容で主に生じるロール軸回転に加えてヨー軸回転も抑制している。

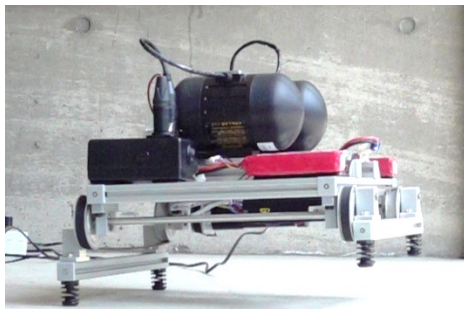


図6 ジャイロスタビライザによる左右足上げアシスト

5. コントロールモーメンタムジャイロによるアシスト

コントロールモーメンタムジャイロは図7のように回転する物体の軸方向を変えることで、ジャイロモーメントを発生するもので、リアクションホイールにくらべて、装置の質量の割に大きなモーメントを発生しやすい。



図7 コントロールモーメンタムジャイロ

図8の2足歩行ロボットは左右揺動を生み出すロール軸トルクと、遊脚振り出しを生み出すピッチ軸トルクの両方を発生できるようにコントロールモーメンタムジャイロを取り付けている。ジャイロの制御には足先レーザセンサの信号を用いた。



図8 コントロールモーメンタムジャイロ付ロボット

さらにアシスト量を大きくして、跳躍を含む歩行の実現を試みた。図9のロボットは全質量の20%ほどのコントロールモーメンタムジャイロを搭載し、4点接地型ではあるが、2足歩行と同様に左右の着地をくりかえすペース歩容を行うもので、写真右の軸足もわずかに浮いている。

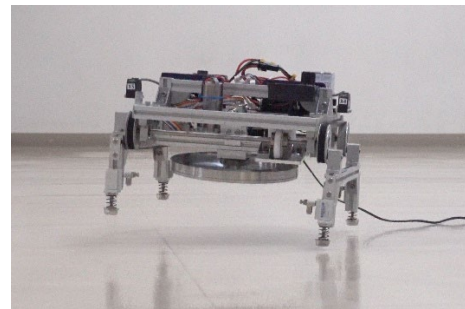


図9 コントロールモーメンタムジャイロによる小さな跳躍を含む歩行

6. まとめ

ロボットや人間の歩行を慣性でアシストする手法として、おもりの並進、リアクションホイール、ジャイロスタビライザ、コントロールモーメンタムジャイロを用いることを試みた。とくに大きなアシスト力を発生させやすいコントロールモーメンタムジャイロ方式について、アシストによって軸足が浮く跳躍を含む歩行が実現できることを示した。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 米田 完：慣性アシスト型2足歩行ロボットの安定制御, Robomech2022, 2A1-P02, 2022
- (2) 米田 完：4足歩行ロボットの慣性安定制御, Robomech2024, 1A1-G03, 2024

参考文献

- (1) 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎：上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 11-4, pp.581-586, 1993.

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 遺伝子破壊による高度好熱菌サーマスの細胞膜脂質合成経路全貌の解明

研究課題名 (英文) : Investigation of the entire cell membrane lipid biosynthetic pathway in the thermophilic Bacterium *Thermus thermophilus* using the gene disruption method

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。

本研究では、*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)。

そこで本研究課題では、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を目的として、

脂質合成酵素の候補遺伝子を破壊し、脂質分子種の変化を調べることで、遺伝子機能の同定を目指す研究を行った。

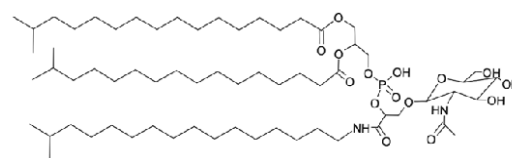


図 1. *T. thermophilus* HB8 株のリン糖脂質

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。本研究では *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。遺伝子破壊用のベクターが理化学研究所微生物材料開発室 (JCM) から購入可能な 20 種については、本研究助成金で購入した。入手不可な候補遺伝子のうち 6 種について遺伝子破壊ベクター作成を試みた。

(2) 遺伝子破壊ベクターの作成

JCM 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成を行った。破壊対象遺伝子上流と下流の各 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 6 種の遺伝子に対してベクター作成を試みており、そのうち 1 種について遺伝子破壊ベクターが完成した。

(3) 遺伝子破壊株の作成

JCM から購入した 20 種と研究室で作成した 1 種の遺伝子破壊ベクターを用いて *T. thermophilus* 遺伝子破壊株を作成した。*T. thermophilus* を調製した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のうち、10 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。8 株は遺伝子欠損の有無で変化が見られなかったが、2 株は遺伝子欠損により脂質パターンに変化が見られた。

糖転移反応酵素遺伝子破壊株は、HPTLC 上の極性が高い領域で脂質スポットが増加するという変化がみられた(図 2)。脂質極性頭部に結合する糖に変化がみられたか、あるいは結合する糖の長さに変化がみられたと考えられた。現在、増加した脂質分子種の分子構造を同定するための実験を進めている。

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)。現在、増加した脂質分子種の分子構造を同定するための実験を進めている。

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見出すことができた。これらは、未同定の遺伝子であるため、機能を明らかにできれば、新規遺伝子の発見となる。遺伝子破壊株が新たに生成した脂質分子種を同定することで、遺伝子機能の解明をすべく、実験を進めている。

先端研究推進プロジェクト助成金(II)の支援により、遺伝子破壊ベクターの購入と遺伝子破壊株の脂質解析の実験を行うことができた。また、本研究課題で 2024 年度科学研究費基盤(C)(課題番号 24K08689)に採択された。*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).

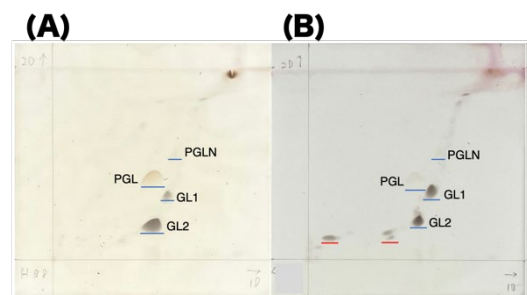


図 2 糖転移遺伝子破壊株の脂質分子種変化の解析

(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。青線の脂質スポットのうち、PGL, GL1, GL2 は、主要な 3 つの脂質スポット。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。赤線の 2 つのスポットが、糖転移酵素遺伝子破壊により検出された未同定の脂質スポット

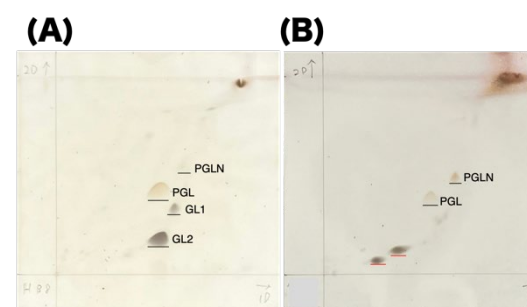


図 3 アセチル基転移酵素遺伝子破壊株の脂質分子種変化の解析

(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。赤線の 2 つのスポットが、遺伝子破壊により検出された未同定の脂質スポット。2 つの主要脂質スポット GL1 と GL2 が消失した。

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : ソーシャルメディアにおけるトピック細分類と感情ニュアンス分析に関する研究

研究課題名 (英文) : A Study on Fine-Grained Topic Classification and Emotion Analysis in Social Media

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、テキスト (文章) から書き手の感情や読み手の感情を抽出するために、様々な技術 [1] [2] [3] が研究開発されている。このような技術では、抽出対象となる感情として、すべての感情の基本的な構成要素となりうる基本感情が採用されることが多く、代表的なものとして中村明の 10 感情「喜, 好, 安, 哀, 厭, 怖, 怒, 恥, 昂, 驚」[4] や R. Plutchik の 8 感情「喜び, 信頼, 恐れ, 驚き, 悲しみ, 嫌悪, 怒り, 期待」[5] が挙げられる。

しかしながら、中村明の 10 感情は、近現代の小説において観察された登場人物の感情表現を著者の主観に基づいて分類した結果であり、感情の分け方に客観的な根拠があるわけでもなく、感情間の関係が明確に定式化されているわけでもない。一方、Plutchik の 8 感情は、感情の輪 (Wheel of Emotions) とも呼ばれており、感情の違いが基本感情の強度の違いや 2 つの基本感情の混合の仕方の違いによって生じることを示しているが、感情の違いは連続的ではなく離散的な扱いとなっているうえ、定式化もされていない。

そこで本研究では、大規模なアンケート調査による感情データの収集と分析に基づいて新たな基本感情を提案するとともに、様々な感情と基本感情との間の関係を関数により定式化することを目的とする。この研究目的に対し、本稿ではアンケート調査による感情データの収集と多変量解析 (具体的には因子分析) によるデータ分析の結果について報告する。

2. アンケート調査による感情データの取得

2.1 テキストデータ (ポスト) 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) [6] 上で実際に収集したポスト (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 [7] 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 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。

2.2 感情データの取得

本研究では、分析に資する感情データを取得するために、20 代~50 代の男女 36 人が参加するアンケート調査を行う。

まず、コスト削減のために、2.1 節で得た 6,884 件のポストから 943 件のポストをランダムに抽出した。次に、各ポストを 36 人の回答者らに読んでもらい、それぞれのポストから感じるポスト投稿者の感情を推測してもらった。このとき、回答者らに提示した感情は、中村明の 10 感情と Plutchik の 8 感情をベースに、生まれたての赤ん坊が 3 歳くらいまでに獲得すると言われている感情 [8] を考慮したものであり、表 1 に示した 23 種類の感情が用いられた。また、各感情の強さ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が採用された。なお、回答者らは、クラウドワークス [9] というクラウドソーシング会社を介して集められた 36 人の男女であった。

表 1 調査対象とする感情の種類 (23 種類)

快	興奮	信頼感	嫉妬
不快	好き	期待	誇り
悲しみ	喜び	得意	照れ
嫌悪	驚き	愛	共感
安心感	怒り	好奇心	羨望
恐れ	罪悪感	恥ずかしい	

以上の結果得られたデータに対し、各ポスト・各感情における平均を求め、感情データとした。結果、943 件のポスト×23 種類の感情からなる感情データを得ることができた。

3. 感情データの分析

本節では、前節で得た感情データに対し、因子分析を行うことで、感情データの背後にある共通性を明らかにする。

3.1 因子分析

前節で得た感情データ（943 件のポスト×23 種類の感情）に対し、因子分析（主因子法、プロマックス回転）を探索的に行った。因子分析は、データの背後にある共通性（すなわち因子）を見出すための分析手法であるが、その因子数を 5～10 の範囲で変えながら因子分析を行い、それぞれの結果を比較してみた。その結果、因子数が 6 のとき、最も良い結果が得られた。このときの固有値と寄与率、累積寄与率を表 2 に示し、各感情における因子負荷量を表 3 にまとめる。なお、表 3 では因子負荷量の絶対値が 0.5 以上となるセルを黄色にし、そのうち負の値であったものを赤字にした。

表 2 因子分析の結果（固有値・寄与率）

No.	固有値	寄与率	累積寄与率
1	11.12	48.33%	48.33%
2	1.98	8.59%	56.92%
3	1.74	7.55%	64.47%
4	1.60	6.97%	71.44%
5	1.13	4.93%	76.37%
6	0.89	3.87%	80.24%
7	0.71	3.09%	83.33%
8	0.61	2.66%	85.99%
9	0.59	2.57%	88.57%
10	0.47	2.03%	90.60%

3.2 因子分析の結果に対する考察

表 2 より、固有値が 11.12～0.89 となる因子が抽出され、そのときの累積寄与率が 80.24%であることがわかる。したがって、この 6 つの因子で感情データの持つ情報量の 80%強を表現できていると言える。

また、表 3 を見てみると、因子 1 として、「嫌悪・不快・怒り・悲しみ・恐れ ⇔ 好奇心・期待」という因子軸（同じ共通性を持った感情群）が抽出されており、これらの感情が 1 つの軸の強弱によって表されうることや嫌悪等と好奇心等が対立する感情であることを示している。一方、因子 2 には、「好き・愛・喜び・安心感・快・共感・信頼感」という因子軸が抽出されており、ポジティブな感情の多くが 1 つの軸によって表されうること示している。因子 3 には「誇り・得意」が、因子 4 には「恥ずかしい・照れ」が、因子 5 には「羨望・嫉妬」が、因子 6 には「興奮・驚き」が抽出されており、単純なポジティブ/ネガティブとは異なった共通性を持つ感情群があることを示している。なお、因子軸が他のどの感情とも共通性を有さなかった感情として「罪悪感」が残った。

表 3 因子分析の結果（因子負荷量）

	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6
嫌悪	0.925	-0.079	-0.050	-0.098	-0.021	0.220
不快	0.851	-0.159	-0.052	-0.073	0.000	0.136
怒り	0.832	-0.053	-0.009	-0.138	0.045	0.216
悲しみ	0.744	-0.077	-0.012	0.070	0.214	0.038
恐れ	0.600	-0.216	-0.057	0.050	-0.110	0.284
期待	-0.791	-0.047	0.022	-0.072	0.323	0.088
好奇心	-0.870	-0.201	-0.107	-0.002	0.106	0.459
好き	-0.100	0.924	-0.137	0.036	0.079	0.149
愛	0.105	0.823	0.039	0.164	0.168	0.073
喜び	-0.099	0.815	-0.017	0.013	-0.081	0.166
安心感	-0.077	0.764	0.034	-0.018	-0.100	-0.244
快	-0.250	0.761	-0.032	0.013	-0.064	0.057
共感	0.042	0.704	-0.071	-0.106	0.108	0.076
信頼感	-0.114	0.653	0.155	-0.072	0.088	-0.053
誇り	0.062	0.042	0.988	-0.021	0.057	0.159
得意	-0.271	-0.073	0.641	0.028	-0.102	0.070
恥ずかしい	0.042	-0.144	-0.021	0.886	-0.040	0.075
照れ	-0.121	0.186	0.016	0.715	0.006	-0.036
羨望	-0.137	0.179	-0.018	-0.016	0.938	-0.131
嫉妬	0.392	-0.110	0.066	0.005	0.616	-0.166
興奮	-0.044	0.419	0.148	0.045	-0.025	0.642
驚き	0.285	0.059	0.096	0.006	-0.150	0.589
罪悪感	0.372	-0.162	-0.014	0.341	0.099	-0.030

謝辞 本研究の一部は、千葉工業大学の研究助成制度の一つである「先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）」によって実施された。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 熊本忠彦, 河合由起子, 張建偉, ユーザ印象評価データの分析に基づく印象マイニング手法の設計と評価, 情報処理学会論文誌データベース, Vol. 6, No. 2, pp. 1-15, 2013.
- [2] 本間幸徳, 萩原将文, Twitter を用いたニュース記事における読み手の感情推定手法の提案とアクセス解析への応用, 日本感性工学会論文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 167-174, 2013.
- [3] 熊本忠彦, 蔣承志, 複数の感情分析ツールを統合したメタ感情分析手法の提案, 日本データベース学会和文論文誌, Vol. 20-J, Article No. 1, 9 pages, 2022.
- [4] 中村明, 感情表現辞典, 東京堂出版, 東京, 1993.
- [5] R. Plutchik, The Emotions: Facts, Theories, and a New Model, New York, Random House, 1962.
- [6] X, <https://x.com/home>
- [7] Fastask, <https://www.fast-ask.com/>
- [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, 2022.
- [9] クラウドワークス, <https://crowdworks.jp/>

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 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

研究課題名 (英文) : Development of skills training system for caregiving motions based on characteristics of embodied interaction

研究者 : 滝 聖子 千葉工業大学
TAKI Seiko 情報変革科学部 高度応用情報科学科 教授

1. はじめに

2020 年の内閣府の調査[1]によると、65 歳以上は 3,619 万人で日本の総人口の 28.8% を占めている。今後は総人口が減少する一方で 65 歳以上の人が増加することで高齢化率は上昇することが予測され、医療・介護需要がさらに高まると考えられる。また、日本における労働人口は減少傾向にあり、医療・介護分野の人材不足も大きな問題となっていることから、医療・介護分野でも福祉・介助機器やロボットが導入され始めているが、まだ一般的とは言い難い。これまでの福祉・介助機器は主に安全性・確実性が重視されており、被介助者の心理的影響を考慮した介助に関してはほとんど研究されておらず、熟練介助者が行うような心地よいロボットが求められる。他方、心地よい介助を行う人材の育成も急務である。

そこで、人同士の身体的インタラクション特性に基づく身体的リズムの同調に着目し、心地よい介助動作を生成する動作モデルを提案し、熟練者と同じような安心感のある介助動作を行うロボットを開発することを目的とする。また、介助者の人材育成のための教育システムとして、身体的リズムの同調に重要な発話や動作の開始タイミング等の介助技能を分かり易く可視化し、学習効果の高い活用方法を検討したいと考えている。

本稿では、起き上がり介助動作における熟練介助者の技能を明らかにするために、非熟練者と熟練者を対象として実験を行い、動作時間および動作軌跡・範囲を比較した結果について示す。

2. 実験方法

本研究では、介助者が高さ 500mm のベッド上の被介助者の右側から行う、仰臥位から長座位への起き上がり介助動作を対象に、声かけ有り・無し の 2 条件で実験を行った。実験協力者は非熟練者 (大学生) 24 名および熟練者 (実務経験者) 5 名とした。

本研究では、介助者の身体動作を計測するために、光学式モーションキャプチャ (Acuity 社製 Opti Track) を使用し、マーカ 25 個を用いて上半身 13 部位 (臀部、腹部、胸部、頸部、頭部、左肩、左上腕、左前腕、左手、右肩、右上腕、

右前腕、右手) の 3 次元座標位置を計測した。光学式モーションキャプチャでの計測値と実際の動作・発声内容を確認するために、ビデオカメラ 2 台 (JVC ケンウッド 社製 Everio GZ-EX270) およびマイクを使用した。マーカを装着した介助者と 3 次元座標軸方向を図 1 に示す。

本研究では、起き上がり介助動作の技能を動作時間および身体動作軌跡・範囲として、動作分析により定量化を行った。

3. 結果および考察

3.1 起き上がり介助の動作時間

計測した起き上がり介助動作を動作分析により「声かけ」「動作」に細分化して求めた動作時間の平均を声かけの有無で、熟練者と非熟練者の 2 群に分けて求め、統計的検定 (有意水準 5%) を行った結果を図 2 に示す。図 2 より、非熟練者に比べて、熟練者の動作時間の方が統計的に有意に短いことがわかった。「動作 (声かけなし)」では熟練者が 2.86 秒、非熟練者は 3.31 秒で熟練者が約 0.5 秒短く、「声かけ」では熟練者は 2.67 秒、非熟練者は 2.96 秒で熟練者が約 0.3 秒短く、「動作」の平均動作時間は熟練者が 2.25 秒、非熟練者が 2.89 秒で熟練者が約 0.6 秒短いという結果になった。なお、今回の分析対象は、計測データの欠損や異常値の無い非熟練者 10 名 (男性 7 名、女性 3 名)、熟練者 5 名 (男性 3 名、女性 2 名) とした。また、データ数は、熟練者 25 データ×5 名分 (ただし 1 名分はデータの一部欠損により 23 データ)、非熟練者は 13 データ×10 名分であった。

分析対象の起き上がり介助動作の動画の内容を確認すると、熟練者は起き上がり介助を行う体勢を整えてから動作までの時間が短い。非熟練者は体勢を整えるのに時間を要していた。よって、熟練者と非熟練者では、起き上がり介助動作の前の準備動作に時間差があると考えられる。しかし、準備動作の時間の違いについては、今後、詳細な動作分析と統計的検定を行う必要がある。

3.2 起き上がり介助における身体動作軌跡・範囲

声かけ有りの起き上がり介助動作時の介助者の各部

位の動作軌跡を熟練者と非熟練者と比較した結果、計測結果が視覚的に異なる部位は左手および臀部であった。

左手の動作軌跡は、熟練者はX-Z軸平面（矢状面）においてX軸方向に広く分布しているのに対し、非熟練者はX軸方向への変化が小さいという違いが見られた。しかし、Y-Z平面（前顔面）に関しては、熟練者と非熟練者で大きな違いはみられなかったことから、熟練者は左手を使用し、被介助者を自身の方へ引き寄せていると考えられる。被介助者を介助者自身に近づけることでより広い範囲で被介助者を支えることを可能にしていると考えられる。動画で動作内容を確認すると、熟練者は実験回数が多くなるにつれ、被介助者を起居する際に介助者の身体に引き寄せる動きが大きくなっていった。

臀部の動作軌跡は、熟練者はX,Y,Z軸方向ともに広く変化していたが、非熟練者はX,Y,Z軸方向の全ての範囲が小さい結果であった。このことから、熟練者は被介助者に近い位置まで臀部を移動させて起居動作を行っているが、非熟練者は被介助者から遠い位置で変化のない動作を行っていると考えられる。動画で動作内容を確認すると、熟練者の男性は肩幅以上に足を開脚しているが、非熟練者の足は肩幅程度にしか開いていないために、臀部の位置に違いが生じたと思われる。

身体動作軌跡の結果（2次元グラフ）より熟練者と非熟練者に違いが見られたため、さらに各軸の身体動作範囲を比較した。ただし、身体動作範囲の分析対象者は、計測データの欠損や異常値の無い非熟練者は男女各4名（各条件5回ずつ）、熟練者は男女各2名とした。なお、使用した各5回分のデータは、各条件で実験全回を時系列に5区分し、各区分から計測データの欠損や異常値の無い実験回をランダムに抽出した。

熟練者と非熟練者の2群に分け、仰臥位から長座位時の各部位の座標軸毎に動作範囲の平均を求め、統計的検定（有意水準5%）を行った結果を図3に示す。図3より、熟練者と非熟練者間では、熟練者の動作範囲が統計的に大きいことが示された。また、左手（X軸）および左前腕（X軸）、右手（X軸）、腹部（Y軸）、臀部（X、Z軸）の平均値は、熟練者は非熟練者の2倍以上の値であった。特に、熟練者の左手X軸の動作範囲は非熟練者の3.41倍になっている。つまり、どの部位においても、熟練者は非熟練者よりも動作範囲が広く、自身が大きく動くことで、被介助者に近づき、身体をより広い範囲で支えながら起き上がりの介助を行っていると考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、起き上がり介助動作における介助者の身体動作を計測し、熟練の有無での違いを明らかにすることを試みた。

動作時間の比較により、非熟練者に比べて熟練者の方が統計的に短いことが示された。また、モーションキャプチャで得られた身体動作軌跡・範囲の比較により、熟練者は非熟練者に比べて、身体動作範囲が大きくなる傾向が

あることがわかった。熟練者は全身を使用し、被介助者を自身に引き寄せ、重心移動が容易で安定した姿勢で起居動作を行っていると考えられる。

今後は、熟練者のデータを増やし、体格差や体重差、被介助者に想定される病気やけがの症状を考慮した実験を行い、同様の結果が得られるかを確認するとともに、被介助者の受ける印象についても調査する必要がある。そして、実験で得られた動作のタイミングや動作時間と動作軌跡を反映した技能教育支援システムを構築し、効果的な活用方法を検討したいと考えている。

最後に、本研究の実施にあたり、実験にご協力いただいた皆様に感謝する。

本研究に関する主な発表論文

- 1) 渡部誠人, 滝 聖子, 鈴木翔太, 杉山裕哉, 今井宏美, 神代 充, 介護支援のための起き上がり介助動作の基礎分析, 日本設備管理学会誌, Vol.36, No.3, pp.18-23, 2024.

参考文献

- [1] 内閣府 編:「令和3年版高齢社会白書」, 日経印刷, 2021.
- [2] 神代 充: 人とロボットとの接触を伴った身体的インタラクションの生成, 計測と制御, Vol.6, No.3, pp.188-192, 2022.



図1 機器装着時の介助者と3次元座標軸方向

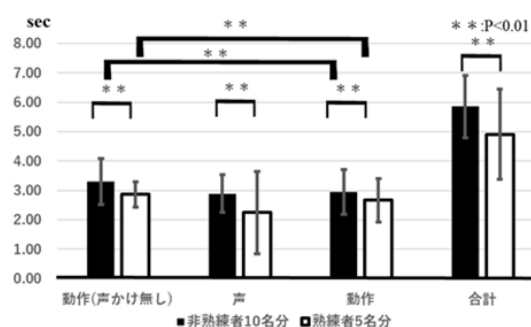


図2 熟練者と非熟練者の平均動作時間の比較

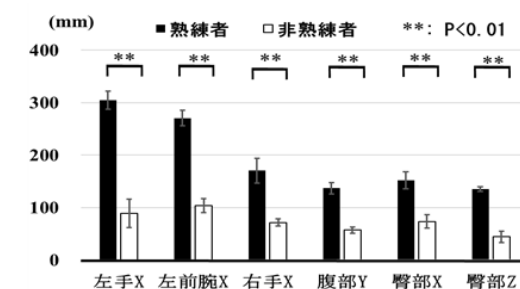


図3 各部位の動作範囲の平均値の比較（声かけ有り）

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 身体感覚の客観的指標と主観的指標の計測およびその連関解析による身体イメージ形成メカニズムの解明

研究課題名 (英文) : A mechanism of body image development by objective and subjective measurement and association analysis

研究者 : ○金田 晃一 千葉工業大学
KANEDA Koichi 先進工学部 教育センター 体育教室 教授

1. はじめに

ヒトは自身の身体感覚に基づいて様々な姿勢をとったり動作を展開したりしている。姿勢や動作を行う際、ヒトは常に身体の外部的環境から様々な刺激を感覚入力として受け、その刺激は感覚器から感覚神経を通じて中枢である脳に伝達される。刺激を受け取った脳はその情報を統合し、適正な姿勢や動作を生み出すための指令を生成する。その指令は脳から運動神経を通じて抹消の効果器に伝達されることで、結果として無駄のない効率的な姿勢や動作が展開される。では、ヒトは自分自身の姿勢や動作を様々な環境の中でどのように感じ、自身の身体イメージを形成し、姿勢や動作を展開しているのだろうか？これまでにも、ヒトの身体感覚や身体イメージに関する多くの研究が行われているが、身体感覚に関する客観的指標と主観的指標の連関について包括的に捉えたものはほとんどなく、ヒトの身体イメージの形成メカニズムについては、まだ十分に検討されているとは言い難い。

そこで本研究では、身体感覚について、姿勢の再現課題 (位置感覚評価) や動作の模倣課題 (運動感覚評価) を通して、実際の姿勢や動作とその際の脳波計測による客観的指標および姿勢や動作の主観的な出来栄の点数化や身体感覚の言語化を行い、これらの連関について検討していく。さらに、浸水などの特殊環境における身体感覚についての調査も行う。

2. 研究の内容

本報告では、浸水などの特殊環境における身体感覚についての調査について、予備実験として実施した、陸上環境および水中環境で肘関節の屈曲動作を行った際の脳波を計測・比較した一連の内容について紹介する。

(1) 対象者

1名の健常な成人男性 (年齢44歳) を対象とした。この男性は本報告の執筆者であり、本研究の代表者である。そのため、本実験に対してはその内容について方法および考えうるリスク等については十分に理解しており、全ての内容について本人の承諾のもと実験を行った。

(2) 実験試技

陸上環境での座位姿勢における右肘関節の屈曲動作および右腕のみ浸水させた水中環境における右肘関節の屈曲動作とした。対象者はアイマスク実験者の合図の後30秒間、座位、右腕の下方への伸展、手掌を前方に向けた状態で安静にし (図1)、実験者の合図の後、任意のタイミングで肘関節を90度屈曲した。また、対象者の主観による90度屈曲の姿勢で約5秒間その姿勢を保持した。

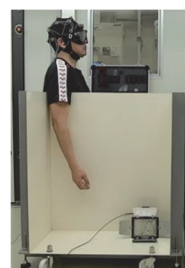


図1. 座位安静状態

(3) 測定項目

本実験では、8chウェアラブル脳波計 (Satellite, 株式会社クレアクト社製) を2機使用し、合計16chで実験試技中の脳波を計測した。脳波を導出する電極は、国際10-20法に従ったFp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, C3, Cz, C4, P7, P3, Pz, P4, O1, O2の16箇所であった (図2)。

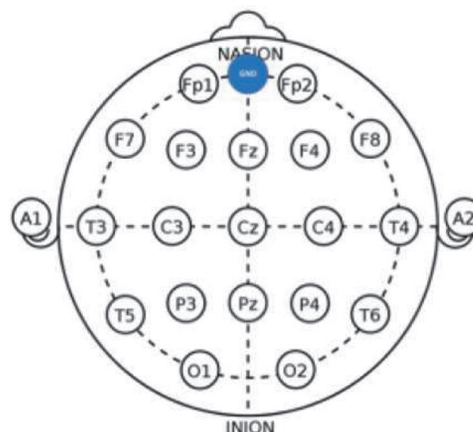


図2. 国際10-20法に基づいた脳波電極の位置
(株式会社クレアクト Satellite カタログより抜粋)

(3)解析方法

収録した脳波データは、Satellite 専用の脳波計測アプリケーションソフト (Cygnus, 株式会社クレクト社製) において眼球運動に関わるノイズを除去した後、csv 形式でデータをエクスポートし、MATLAB 上で動作するオープンソースソフトウェアである EEGLAB (v2023.1) を用いて解析を行った。

EEGLAB に csv ファイルを取り込んだ後、1Hz-40Hz の FIR バンドパスフィルタを掛けノイズを除去し、独立成分分析により眼球運動およびその他の成分が抽出された場合については、その成分の波形をノイズとして除去した。その後、Fp1, Fp2, F3, Fz, F4, P3, Pz, P4 における時間周波数解析を行った。それぞれ、解析対象とする周波数帯域を 3Hz-40Hz とし、ウェーブレットサイクルを 3Hz で 3 サイクル、40Hz で 8 サイクルに設定した。

(4)解析結果

図 3 に陸上環境、図 4 に水中環境での各電極における脳波の時間周波数解析の結果を示す。

全体として、陸上環境、水中環境ともに、いずれも 10Hz 周辺に高い脳活動が認められた。また、図の 0sec-30sec は安静時を示すが、特にその間の脳活動が目立った。30 秒から 35 秒の間は、陸上環境では 10Hz 付近に見られる脳活動が低下あるいはほぼ消失する傾向が見られたが、水中環境では脳活動が継続された。

(5)考察およびまとめ

試技開始後 0sec から 30sec は、陸上環境、水中環境ともに安静時であり、対象者はアイマスクをかけた閉眼状態である。一般に、覚醒時の閉眼状態では α 波が出現すると

言われている。 α 波は 8-13Hz 付近に見られる電位変動のことを指し、認知処理の中断あるいは待機状態を反映していると解釈や、刺激の予測や準備状態を反映していることが示唆されている。これは、本実験では 30 秒後の合図とともに開始する肘関節の屈曲動作試技の準備状態であったことが伺える。しかし、30 秒後に肘関節屈曲動作が開始されたにもかかわらず、水中環境では特に P3, Pz, P4 において活動が継続された。これらの部位は脳の大脳皮質の中でも体性感覚野に相当するため、右腕を浸水させていることによる体性感覚刺激が影響していると考えられる。また、 α 波は認知や運動における抑制機能を反映する指標であるとも言われており、水中環境でこれらの部位において活動が継続されたことは、体性感覚野を中心とした右腕の浸水に伴う身体への体性感覚刺激による認知や運動の抑制機能と関連を示している可能性が考えられる。

本実験では浸水による脳活動への影響が示唆されたが、今後対象者数を増やすことや、より詳細な分析を進めていくことにより、ヒトの身体感覚や身体イメージによる姿勢や動作メカニズムについて解明していくことが可能になると考えられる。また、本研究ではさらに主観による身体感覚や姿勢・動作の言語化を踏まえ、その連関について明らかにすることで、ヒトの運動技能やスキルの獲得に対して有益な示唆を与えることにつながると考えられる。

参考文献

開一夫ら(編)、河内山隆紀ら(著)。脳波解析入門 Windows10 対応版 EEGLAB と SPM を使いこなす。東京大学出版会。東京。2022。

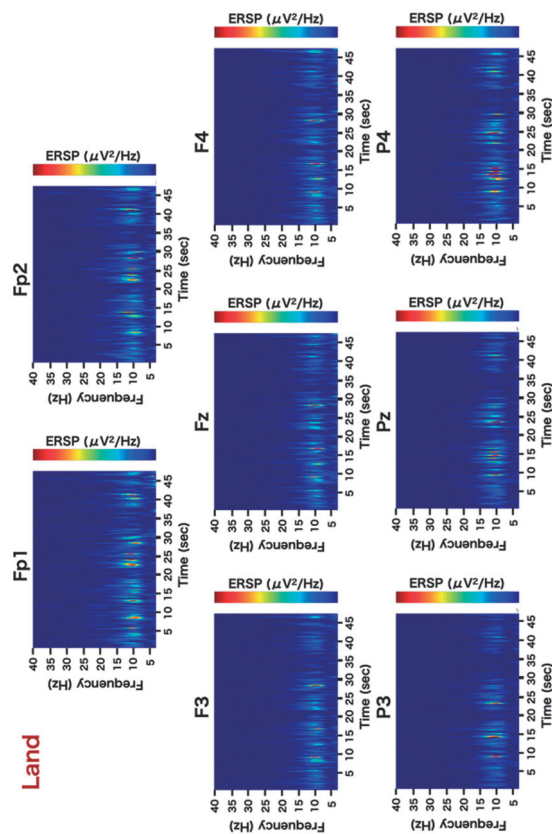


図 3. 陸上環境での各電極における脳波の時間周波数解析の結果

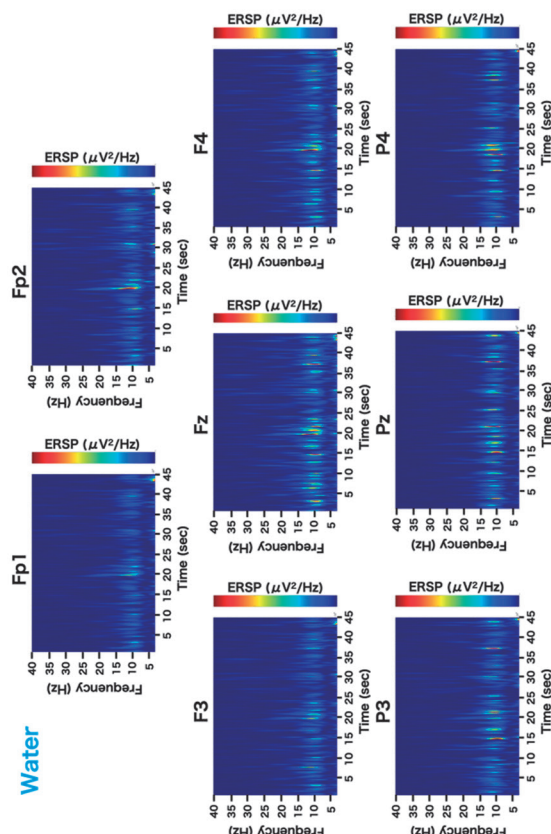


図 4. 水中環境での各電極における脳波の時間周波数解析の結果

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

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

重たい恒星の死である超新星爆発後に残される中性子星は、この世に安定に存在する物質として最高密度の状態にあり、その内部密度は通常の原子核密度の数倍から十倍程度に達する。これ以上の密度になると、ブラックホールが形成されるわけであるが、ブラックホールの内部情報は基本的には取り出せないために、その内部状態を知ろうとする試みは往々にして不毛になりがちである。むしろブラックホールになる直前の密度状態にある中性子星を調べることで、究極的な条件下における物質の特性が理解できるのではないかと期待され、そういった研究は近年とくに盛んに行われている。

このような背景を象徴するかのよう、近年、NASA は中性子星内部を調べることに特化したプロジェクトを立ち上げ、国際宇宙ステーションに Neutron star Interior Composition Explorer (NICER) という X 線観測機器を搭載し、現在も中性子星の観測を続けている。これに加えて、重力波干渉器 (特に LIGO や VIRGO) による星の衝突に伴う時空の揺らぎについての観測結果が照合されることで、様々な中性子星の質量や半径に関する統計的な情報が日々更新されている。その結果、高密度状態における物質の固さや音速などが次第に明らかになりつつある。一方でその他の、高密度物質の熱容量や熱伝導率などの物理的特性については、いまだに多くの不定性が残されている。

大袈裟な言い方をするならば、このような分野の研究は、「物質とは何か?」といった根源的な問いに直結しているとも言える。本研究では独自の色分子動力学を開発し、この問いに答えることを究極的には目指している。上述した研究背景を踏まえ、本研究では、まず上述した天文観測結果を再現しつつ、それによって得られた相互作用を用いることで最終的には熱容量や熱伝導率など高密度物質の物質の特性を明らかにすることを目的としている。このような研究を段階的に行うことによって、クォーク (素粒子) というミクロな描像から、中性子星というマクロな描像までを統一的に理解する道筋を与えることができる。

2. 色分子動力学について

我々が開発を進めている色分子動力学は、クォークの動

的挙動、および最安定状態をシミュレートするための理論的枠組みに基づいている [参考文献 1]。色分子動力学では、各クォーク粒子の位置と運動量、そして色の内部自由度の時間発展を追うことにより、物質の動的挙動を詳細に解析することが可能である。本研究では、色電荷を持つクォークが一つのグルーオン交換を通じて相互作用するものとしている。さらに、色の閉じ込め現象に特有である粒子間距離に比例するような相互作用も考慮されている。これらの相互作用によってクォーク 3 つの状態 (配位) で「無色 (白色)」となり、中性子や陽子といったバリオンが形成される様子が、我々の計算コードで自然と再現される。

その他にも考慮に入れるべき相互作用はあるが、何にせよ全ての相互作用の強度等は、最近の天文観測結果 (NICER や重力波観測器) から得られた制約条件と一致するように最適化を行う必要がある。さらに、それらの相互作用は、重イオン衝突器 (巨大加速器) から示唆される対称エネルギーや圧縮率などを再現するものでなければならない。

ひとえに最適化といっても、同じような分子動力学計算を何度も繰り返す必要があり計算量が膨大になる。我々は計算コードを並列化し、適切なジョブ管理の下、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) を用いることで、この計算量の困難を克服した。

計算コード開発時においては、スーパーコンピュータに繋ぐのではなく、ローカルな環境で試し計算を幾度となく行う必要があるために、それなりのスペックを持った計算機が自ずと必要となる。科研費や助成金を申請した理由は、主にこのためである。

3. 結果と今後の展開

我々は上述の色分子動力学計算によって、荷電中性およびベータ平衡条件下での圧力と音速の密度依存性を算出することに成功した。注目すべきは天文観測や加速器実験の結果を反映しつつ、図 1 に示しているような、各クォークの内部自由度に基づくクォーク非閉じ込めの様子が、再現されたことである。我々の計算によると、物質の密度が増加するにつれて、クロスオーバーを通じてクォーク非閉じ込めが起きる様子がこの図を見てもわかる。高密度物質の熱的特性 (熱容量や熱伝導率など) は物質の組成や相互

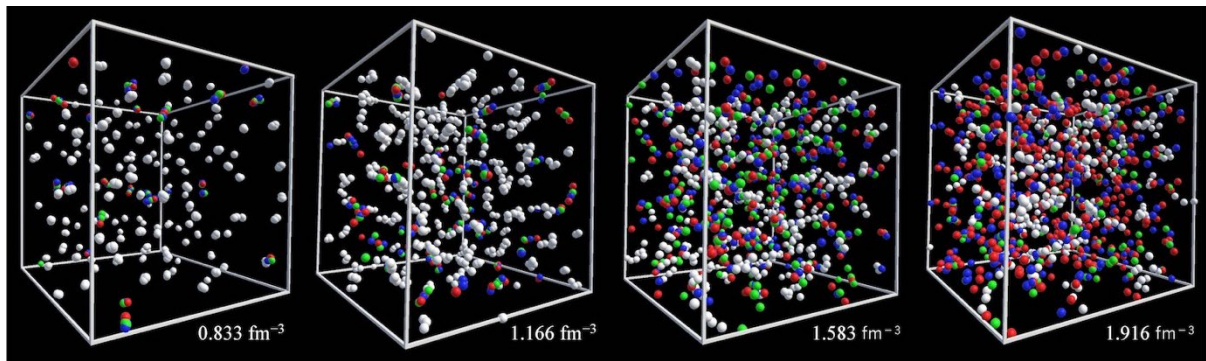


図1：各密度ごとにおけるクォークの色の閉じ込めが解ける様子。白色はクォーク3つがバリオンを構成している（色の閉じ込めが起きている）ことを意味する。その他の色をもつ粒子は、色の閉じ込めが解けた非閉じ込めの状態にある各クォーク状態を意味する。密度が増すにつれて非閉じ込めの状態がじわじわと増えている様子がわかる（クロスオーバー）。つまり、その変化は急激に変わるといった一次相転移ではない。

作用に大きく依存するため、このように相構造が変化するのであれば、おそらく物質の熱的特性が大きく変化するはずである。

しかしながら、熱力学的諸量を導出する前に考慮すべき点がまだいくつか残されている。高密度物質の特性を知る上でも本質的に重要と思われるカイラル対称性の破れや色磁気相互作用、ストレンジネスなどの影響などである。今後は、これらを考慮に入れた上で、最終的に熱容量や熱伝導率を導出する計画である。すでに色磁気相互作用に関しては、導入することに成功しているために本年度中にこれらに関する物理的な特性（状態方程式など）を算出し、まとめる予定である。

本報に述べた我々の研究成果は、助成金受託期間中（2024年2月）にPhysical Reviewに掲載された。また、本年度はおかげさまで科研費基盤研究Cにも採択された。先端研究推進プロジェクト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。

本研究に関する主な発表論文

- (1) “Crossover equation of state based on color-molecular-dynamics”, Nobutoshi Yasutake, Toshiki Maruyama, Phys. Rev. D **109**, 043056 (2024)

参考文献

- (1) “Color molecular dynamics for high density matter”, Toshiki Maruyama, Testsuo Hatsuda, Phys. Rev. C **61**, 062201 (2000).

〔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 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30

研究課題名 (和文) : 変動する熱負荷に対して安定的な熱輸送を実現する熱輸送デバイスの開発

研究課題名 (英文) : Development of heat transport device with stable heat transport for heat load fluctuation

研究者 : 三浦 正義 千葉工業大学
MIURA Masayoshi 工学部 機械工学科 助教

1. はじめに

再利用可能な熱の有効利用が強く望まれており、これには、時間的に変動する温度と熱負荷に対応できる高効率な熱輸送技術が必要である。そのなかで、自励振動ヒートパイプ (PHP) が今後の熱輸送デバイスとして注目される⁽¹⁾。本研究では、熱交換器におけるフィンとして PHP を適用することを考え、時間変動する熱負荷に対する PHP の熱輸送量の変動 (熱輸送特性) の詳細を明らかにすることを目的として、実験的研究をおこなった。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験装置概略を示す。供試 PHP は風洞を用いて冷却される。冷却空気は吸込みブローワーによって風洞内に送られる。この冷却空気は、風洞前に設置された熱交換器で 25°C 一定とした。冷却空気流速は、 5 m/s 一定とした。PHP の設置姿勢は、加熱部が鉛直下方となるボトムヒートであり、管群放熱部の上に冷却空気が当たるようになっている。PHP の加熱は、加熱ブロック底面に押し当てられたセラミックヒーターによって行った。PHP の詳細、および温度測定位置を図 2 に示す。PHP 流路 (管群放熱部) は、外径 3 mm 、内径 2 mm の銅管 (20 本) で構成されており、冷却空気の流れ方向に対して 2 層、流れ方向に対して垂直に 10 列で配置されている。PHP の外観の幾何形状は同一であるが、上部ブロック内部の溝形状を変更することで、非ループ型 2D-PDP (図 3(a))・ループ型 2D-PHP (図 3(b))・3D-PHP (図 3(c)) の流路パスを実現した。作動流体には、エタノールを用い、封入率は流路体積 50% 一定とした。

PHP に作動流体を封入したのち、加熱ブロックの底面に押し付けたセラミックヒーターで 100 W の熱入力を行うことで、PHP 内の作動流体を自励振動させ、作動流体を PHP 全体に行き渡らせた。そして、ヒーターによる熱入力を停止し、加熱部底面温度が冷却空気温度と等しくなったのちに、ヒーターによる熱入力 (熱負荷) Q を 10 W から段階的に増加させた。このとき熱負荷の変更は、各部温度が十分に定常状態になったことを確認したのちに行った。なお、実験装置保護のため、加熱部底面温度 T_h が 90°C を超える前に実験を終了した。本研究では、加熱部底面温度 T_h と冷却空気温度 T_{air} の温度差を用いた熱抵抗 R_h により PHP の熱輸送性能を評価した。

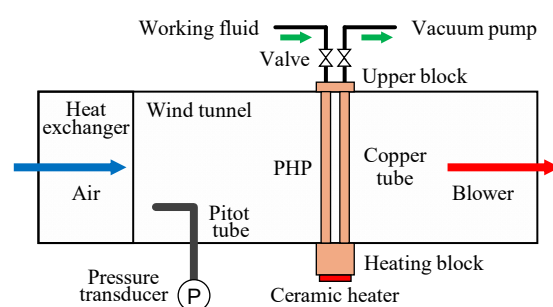


Fig. 1 Experimental setup.

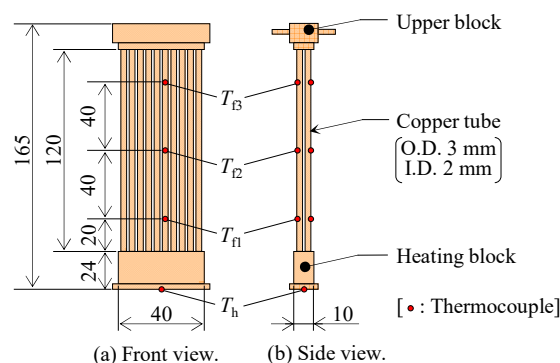


Fig. 2 Detail of pulsating heat pipe.

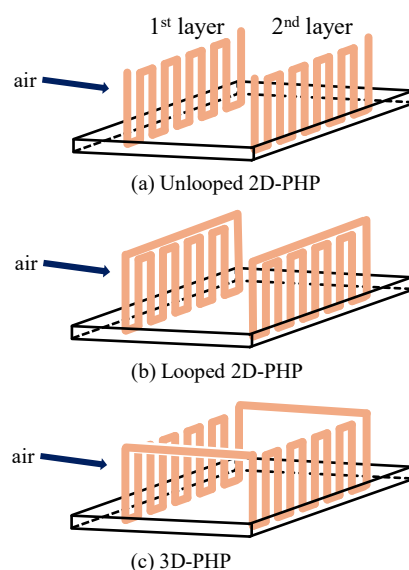


Fig. 3 Flow path.

3. 実験結果および考察

図4に非ループ型2D-PHP (図4(a)), ループ型2D-PHP (図4(b)), および3D-PHP (図4(c))の各部温度の時間変化を示す。図4では、熱負荷 Q を一定に保った区間を破線で示し、その Q の値をグラフ上部にあらわしている。図4(a)より、銅管表面温度(T_h , T_b , T_s)に注目すると、非ループ型2D-PHPでは、 $Q=40$ Wのときに定常的な温度振動がみられ、流路内で液柱が安定的な自励振動を開始している(スタートアップ)ことがわかる。また、ループ型2D-PHP (図4(b)) および3D-PHP (図4(c))では、1層目は $Q=40$ W (2層目は $Q=30$ W)でスタートアップした。このことから、流路形状の差異によってスタートアップ熱負荷に大きな差は生じないということがわかる。この理由は、つぎのとおりである。3つのPHPの流路形状の違いは、PHPの上部にループ形状が存在するかどうかであり、それより下部の管群放熱部や加熱部の構造は同じである。そのため、液柱自励振動が生じていない状況(スタートアップ前)では、PHPの下部の加熱ブロックにおいて作動流体が沸騰し、上部の管群放熱部で凝縮した作動流体が加熱ブロックへ流下するというサーモサイフォンと同様な動作をしているため、ループ形状の有無による差が生じず、3つのPHPは同様の挙動を示したものと考えられる。

非ループ型2D-PHP, ループ型2D-PHP, および3D-PHPにおける熱負荷 Q と熱抵抗 R_{th} の関係を図5に示す。同じ Q における R_{th} を比較すると、低熱負荷時($Q \leq 40$ W)では、非ループ型2D-PHP, ループ型2D-PHP, および3D-PHPにおいて差は生じなかった。これは前段落で議論したようにスタートアップ前ではサーモサイフォンと同様な動作をしているため、ループ形状の有無による熱輸送性能の差はほとんど生じなかったものと考えられる。また、スタートアップ後から $Q=60$ Wまでにおいても R_{th} に差が生じなかった理由は、スタートアップ後もしばらくの間はループ型2D-PHPや3D-PHPにおいても作動流体の循環は生じず、ループの形状の有無が R_{th} に影響を及ぼさなかったためであると考えられる。

$Q=60$ Wより大きい高熱負荷の場合では、非ループ型2D-PHPの R_{th} はわずかに増加し、 $Q=100$ Wからは、おおそ一定となった。これは、非ループ型2D-PHPにおいて Q の増加に伴い、加熱部への作動流体の供給が不足したことにより熱輸送性能が低下したものと考えられる。一方で、ループ型2D-PHPと3D-PHPの R_{th} は、 $Q=60$ W以降も Q の増加に伴い単調に減少した。これは、ループ型2D-PHPと3D-PHPでは、PHP上部のループ形状が存在することによって、流路内作動流体が循環流を形成するようになった結果、非ループ型2D-PHPの場合と比較して熱輸送性能が向上したものと考えられる。

ループ型2D-PHPと3D-PHPの熱輸送特性については、いずれの Q においても R_{th} は、おおそ等しかった。このことから、PHP上部のループ形状が存在すると、本実験の範囲内においては、1層目と2層目の流路の接続の有無によって熱輸送性能に差が生じないことが明らかになった。

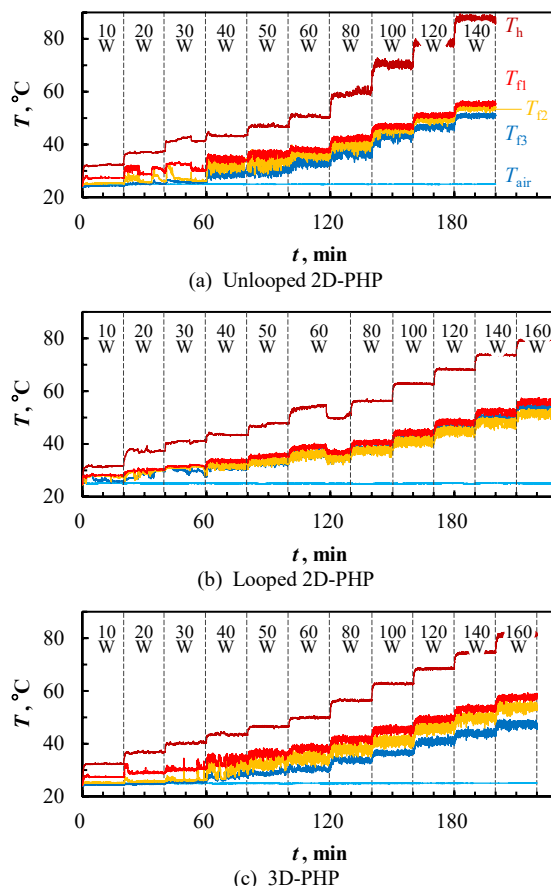


Fig. 4 Temperature fluctuations.

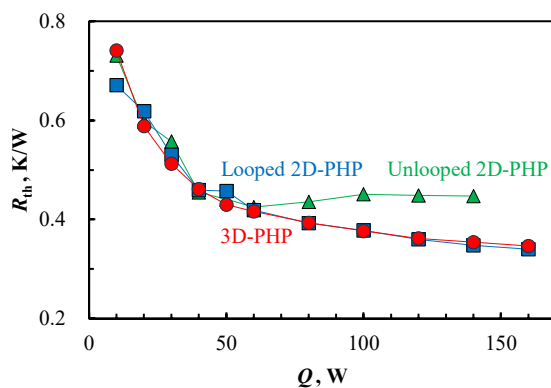


Fig. 5 Relationships between R_{th} and Q .

4. おわりに

管群放熱部を有するフィン型の自励振動ヒートパイプについて、時間変動する熱負荷に対する熱輸送性能の変化を実験的に調査した。さらに、流路の形状が熱輸送特性に及ぼす影響についても明らかにすることができた。本研究は、変動する熱負荷に対して安定的な熱輸送を実現する熱輸送デバイスの開発の基礎的知見を得ることができ、今後の研究開発につながる有益なものであると考えている。

参考文献

- (1) Akachi *et al.*, Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium, **5** (1996), pp. 208–217.
- (2) 増子ら, 熱工学コンファレンス講義集, I213, (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 : 2023/4/3 ~ 2023/9/30
研究課題名 (和文) : 企業の健康経営がイノベーション創出に与える効果の検証

研究課題名 (英文) : A study on how corporate health strategies affect innovation.

研究者 : 新谷幸弘 千葉工業大学
Yukihiro Shintani 未来変革科学部 経営デザイン科学科 教授

1. はじめに

現代の日本では、少子高齢化や生産年齢人口の減少といった社会問題が企業の存続や発展に大きな影響を与えている。このような背景から、企業の特続的成長を促す手段として「健康経営」という概念が注目を集めている。健康経営とは、従業員の健康管理を経営戦略の一環として捉えるものであり、従業員の健康を確保することが企業の生産性や競争力の向上につながると提唱されている。健康経営に期待される効果を図1に示す。



図1 健康経営の効果

健康意識の高まりにより従業員の幸福度を向上させることが組織の活力につながり、その結果事業活動の活性化やイノベーションの促進につながるという考え方が広まりつつある。しかし、健康経営が企業イノベーションに与える影響については、まだ明確になっていない。

本研究では、健康経営がイノベーションに与える影響を、特許出願件数や財務指標に反映される形で検証し、健康経営の有効性を検証する。

2. 研究方法

企業イノベーションに対する健康経営の効果を明らかにするために、本研究では2種類のアプローチ (特許分析、財務分析) を採用した。

2.1 特許分析によるイノベーションの測定

特許出願件数は企業の技術的創造性および研究開発 (R&D) 能力を示す指標となるため、特許出願件数をイノベーションの代理指標となる。本研究では2023年に健

康経営銘柄に選定された企業群よりプロダクトライフサイクル (PLC) が比較的短い企業と比較的長い企業を選定し、各企業の特許出願件数を健康経営認定前と認定後で比較した。特許データは特許情報プラットフォーム (J-PlatPat ; 特許庁) [1] から取得した。

2.2 財務指標を用いた分析

健康管理が企業の財務パフォーマンスに与える影響を評価した。財務指標の中で、特に営業利益率、自己資本利益率 (ROE)、総資産利益率 (ROA) に着目して検証することで、健康管理戦略の導入前と導入後の企業パフォーマンスを比較した。これらの財務指標は企業が自社のリソースをどの程度最適に活用しているか、また、その経済パフォーマンスがどの程度改善しているかを間接的に示している。財務指標データは EDINET (金融庁) を利用し、健康経営を導入した企業の業績の変化を分析した。

3. 結果および考察

3.1 特許分析の結果と考察

健康経営銘柄に選定された企業の中から、PLC が短い企業の代表例としてニチレイ (2016 年健康経営認定) と PLC の長い企業の代表例とニッポン高度紙工業 (2019 年健康経営認定) を比較した。ニチレイとニッポン高度紙工業における健康経営の特許出願件数への影響を図2に示す。ニチレイでは導入前と比較して件数は増加している。このことにより、健康経営が従業員の健康増進を通じて研究開発の生産性を高めることができ、それが比較的短期間のうちにイノベーション活動に反映されている可能性を示唆している。一方、PLC が比較的緩やかなニッポン高度紙工業の場合、健康経営導入前後で顕著な変化は見られない。PLC が長い企業では技術開発サイクルが長いので、健康経営の効果が直ちに顕在化していない可能性がある。したがって、長期的な時間軸で健康経営の影響を評価する必要性が示唆された。

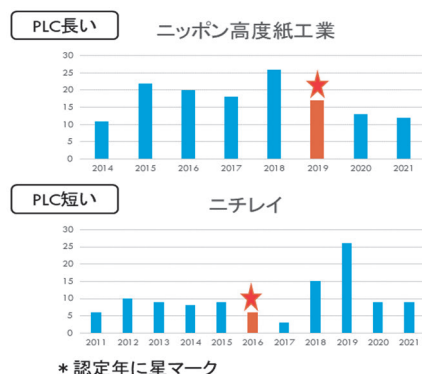


図2 PLCが短い企業とPLCが長い企業における健康経営の特許出願件数への影響

3.2 財務分析の結果と考察

PLCが短い企業であるニチレイは健康経営を導入して以来、営業利益率は一貫して上昇傾向にあり、自己資本利益率(ROE)は、前述の導入から2年間にわたって上昇傾向を示した。この結果は、PLCが短い組織では、健康経営が比較的短期間で財務指標に好影響を与え、企業の競争力を高めている可能性を示唆している。

一方、PLCが長い企業であるニッポン高度紙工業では健康経営認定前後で営業利益率の顕著な変化は見られず、ROEは認定後一時的に低下している。しかし、2021年にはROEの増加が確認され、営業利益率も回復し始めている。このことにより、PLCが長い組織では、健康経営の財務的影響がすぐに事業活動の結果に反映されにくい可能性があることを示している。

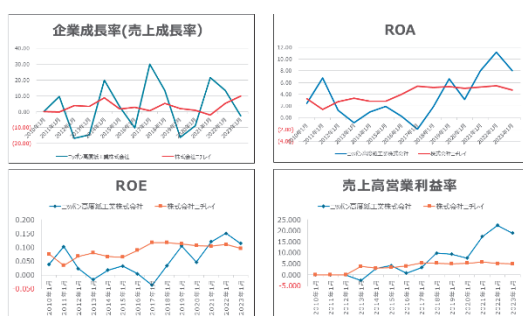


図3 PLCが短い企業と長い企業における健康経営の財務指標への影響

4. おわりに

本研究では特許申請と財務指標を用いて健康管理が企業のイノベーションに与える影響を検証した。その結果、PLCが短い企業では、健康管理を導入した後に特許申請件数と財務実績が改善しており、従業員の健康状態

の改善がR&Dおよび事業開発の成果に比較的早期に反映されている可能性が示唆された。一方、PLCが長い企業では成果が出るまでに時間がかかる傾向が見られた。これらの結果は、短期的な成果を求める企業にとっては、健康経営が即効性のある施策として期待できる一方で、PLCが長い企業にとっては長期的な視点が重要であることを示唆している。また、イノベーションの影響を正確に評価するためには、特許や財務指標だけでなく、従業員の創造性や社外との連携といった定性的な要素も含めた多面的な評価が必要である。今後、健康経営が企業成長に与える影響を定量的・定性的な両面から総合的に検証していく予定である。

本研究に関する主な書籍・論文 (selected)

1. Y. Shintani, Redefining Research and Development Strategy: Purpose-driven management and Evolutionary Organization Theory, IEE, (submitted)
2. 新谷幸弘, 出口戦略に基づく研究開発テーマの設定と事業化への繋げ方, ISBN:9784861049873, 2023

本研究に関する主な学会発表 (selected)

1. Y. Shintani et al, Business Resilience Through Early Agile Adoption: A Study on Starting Preconditions, ProMAC2023
2. 新谷幸弘, パーパス経営視点から見た技術経営に関する一考察, 研究・イノベーション学会 第38回年次学術大会

本研究に関するメディア報道および社会活動

1. 新井達也, 植木球太郎, 新谷幸弘, 健康経営訪問プロジェクト&大学生からの国際発信「健康経営」は日本発世界へ, 2023年12月16日
2. 植木球太郎, 新谷幸弘 他, 「SDGs Week EXPO 2023 動き出す未来」, 『健康経営』訪問プロジェクト報告会&国際提案2023, エコプロ2023, 2023年12月6日

参考文献

1. 特許庁, 特許情報プラットフォーム, <https://www.j-platpat.inpit.go.jp/>
2. 金融庁, 有価証券報告書などを開示閲覧するシステム(EDINET), <https://disclosure2.edinet-fsa.go.jp/week0010.aspx/>

〔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 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名 (和文) : 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成

研究課題名 (英文) : Microstructured Heat Releasing Interfaces for Solar Thermal Distillation System

研究者 : O亀谷 雄樹
KAMEYA Yuki

千葉工業大学
工学部 機械工学科 准教授

1. はじめに

エネルギーと水資源の確保は地球規模での課題であり、海水淡水化や蒸留水製造などの水処理プロセスにおいて化石燃料の消費量低減と再生可能エネルギーの導入を促進することは、持続可能な水利用システム構築のために重要である^(1,2)。さらに、太陽エネルギーで自立して駆動する技術が確立できれば、自然災害等によるインフラ機能停止時においても小型分散システムとして広く活用されることが期待できる。

太陽熱で駆動される蒸留システムは、太陽熱で水を蒸発させる蒸発器と、蒸気を凝縮させるコンデンサにて構成される。日射の光熱変換は申請者らの研究⁽³⁾を含め先行研究も多く、近年では蒸発器についての性能向上が報告されている⁽⁴⁻⁶⁾。一方、コンデンサでの凝縮速度は蒸発速度を大きく下回り、コンデンサの性能向上を実現するための基礎技術の構築が求められている⁽⁷⁾。

コンデンサの凝縮面は、凝縮水が連続的に生成し、同時に蒸気の凝縮熱で加熱されるため、背面（放熱面）から周囲環境への放熱を要する。コンデンサ凝縮面・放熱面の性能向上に関する検討は、それぞれの界面における水と熱の輸送現象の観点からアプローチできる。凝縮面と放熱面のそれぞれに関し、日照下においてコンデンサでの凝縮速度を低下させる要因として、凝縮水が凝縮面を覆うことで熱抵抗となり連続的な蒸気の凝縮が妨げられる点、および日射と大気温度上昇により周囲環境への放熱が阻害され凝縮面温度が上昇する点が考えられる。そこで、我々の研究では、コンデンサの凝縮面と放熱面の双方において機能的な界面の設計を行うことを提案し、以下の内容について取り組んでいる。

(A) 親疎水ハイブリッド表面の創製による凝縮水の微小水滴形成とパッシブ排水

凝縮水が滞留すると蒸気の凝縮面への接触が阻害されるため、凝縮水を滴状に形成させ速やかに凝縮面上から排出することが望ましい。そこで、親疎水ハイブリッド表面の形成により凝縮形態を制御し、かつ凝縮水を導く排水路の形成により水輸送を制御する。

(B) 光学的な表面設計に基づく放射冷却機能による周囲環境への放熱促進

可視・近赤外光を中心とする太陽光を反射し、大気窓

の波長域 (8~13 μm) を中心とした赤外光を熱放射するよう放熱面の光学特性を設計することで放射冷却機能を付与し、空気自然対流による徐熱だけでは達成できない放熱を実現する。

さらに、分光エネルギー表面設計に基づく放射冷却と、水の蒸発による熱輸送とを共存させた複合冷却メカニズムを新規に確立し、大気放熱の機能を増強させることを目指している。熱放射層と水輸送層から成るマイクロ構造層を形成することで、放射冷却を行いつつ、冷却水を毛管力で輸送して微小孔から蒸発させる自立的な放熱過程を実現する。マイクロ構造層の基礎特性を明らかにし、コンデンサへ実装して大気放熱を評価することで、先行技術に対する優位性を実証することを目指している。

今回の研究期間では、大気放熱マイクロ構造層の製作プロセス構築、および製作した試料に関する基礎特性の評価に取り組んだ。蒸発孔をもつ熱放射層の作製では、放射冷却に適した光学特性をもつ素材を用いて厚さ数百ミクロンの膜を多孔質状に成型するプロセスを検討した。さらに、マイクロ構造層の形成のため親水性ポリマー多孔質体を熱放射層と組み合わせる手法を構築した。このように製作された試料について、分光計測による放射冷却の機能性を評価した。具体的には、マイクロ構造層における拡散反射を定量評価すべく分光光度計へ積分球を導入して可視～近赤外光の半球反射率を測定するための実験環境を整備し、試料の拡散反射に関する特性を評価した。最後に、熱放射層における蒸発孔の流体透過性の基礎評価として、制御ガス（窒素・空気）を流通させる装置を作製して窒素ガス側での酸素濃度変化を計測することにより、ガス透過速度に関する知見を得た。以上の実施内容により、今後の研究を進めていくための基盤を構築することが可能になった。

以下に、上述の取組みに関する具体的な内容について報告する。

2. 研究の方法

(1) 凝縮面の製作プロセス構築および排水機能の評価
凝縮水滴のサイズ制御のため、サンドブラスト用マスクに200~500 μm の周期的パターンを作製し、銅板表面へのサンドブラストと疎水性コーティング剤の塗布により、マ

スクでデザインした親疎水パターンを得る。製作した凝縮面に水蒸気を吹き付け、滴状凝縮と排水の様子を観察し、界面制御による効果の検証と、排水路形状などの改良を行う。さらに性能の定量評価のため、温度・圧力の条件を制御した環境で、凝縮面における水回収速度の計測が可能なチャンバーを製作する。凝縮水の凝縮形態と排水の様子を観察できる計測系を構築する。太陽熱蒸留システムの蒸発器から供給される蒸気を想定して温度・圧力などの計測条件を設定し、計測を実施する。また、凝縮面に生成する水滴の様子を撮影し、水滴径のサイズ分布を画像解析から得る。実機における周囲環境条件の変化に対応できるよう、系統的なデータをまとめる。

(2) 放熱面の製作プロセス構築および分光エネルギー輸送特性の評価

アルミ板を鏡面研磨して可視光の高い反射率を維持した上で、大気窓を中心とする赤外域において高い放射率を有する高分子素材である PDMS をコーティングし、放射冷却機能を創出する。可視・近赤外・赤外域にわたる分光光度計測により表面の放射率スペクトルを計測することにより、分光エネルギー輸送についての特性を評価する。

(3) 蒸留システムにおけるコンデンサとしての性能評価、および設計指針の提示

蒸留システムへの適用を検討するため、放射冷却機能を備えたコンデンサを製作する。屋外の日照環境下で試験を実施することを想定した実験装置を準備し、湿り空気を供給することでコンデンサ性能を評価する。さらに、一連の実験により得られた結果をまとめ、周囲環境条件に応じて十分な性能を得るためのコンデンサおよび蒸留システムに関する設計指針を提示する。

3. 研究の状況

(1) 凝縮面の製作プロセス構築および排水機能の評価

金属面の親疎水ハイブリッドパターン形成により、凝縮形態および排水の制御が実現されることを示した。さらに、高分子素材による膜形成を用いて非金属面上に形成された高分子膜ハイブリッドパターンにおいても同様の効果が得られることを実証した。

(2) 放熱面の製作プロセス構築および分光エネルギー輸送特性の評価

放射冷却コンデンサは、蒸留システムの設置環境や構成に応じて、要求される機能や適する形態が考えられる。そのため、当初の計画としていた太陽光を金属面により鏡面反射させる方法に加え、光散乱性セラミクス粒子の放射層内分散により拡散反射させる方法、さらに可視光を透過させシステム内部で熱利用する方法、のそれぞれについて放射冷却面を試作して評価を行った。各機能面の作製プロセスを構築するとともに分光エネルギー輸送特性を明らかにした。

(3) 放射冷却コンデンサの性能試験

日照下において放射冷却コンデンサによる凝縮水回収を行う試験を実施し、その性能を評価した。取得した温度

データに加えて日射量や風速などの気象条件を考慮し、放射冷却による放熱量を推算することにより、本研究で作製した放射冷却コンデンサの放熱機能を実証した。

(4) 周辺技術の基礎検討

凝縮水回収を固体表面上で制御するために応用可能な手法として、親水性ナノ粒子コーティングを用いたパッシブな水輸送の基礎技術を構築している⁽⁸⁾。放射冷却コンデンサが屋外の低温環境にさらされた場合に予期される着氷の問題に関し、放射冷却コーティング材料へのマイクロ表面パターン加工により水滴の凝固遅延の効果が得られることを明らかにしている⁽⁹⁾。さらに、蒸発現象を高度に制御することが可能な蒸発面の実証を行った⁽¹⁰⁾。

4. おわりに

以上の検討により、本研究で提案した太陽熱蒸留システムのための放射冷却コンデンサについて、その応用に必要な各種の要素技術を提示することができた。また、各技術のさらなる展開に向けた指針を得ることができた。太陽熱利用の工学的な観点からは、高温場を形成する集熱だけでなく、周囲環境への放熱を制御する技術を確立することで、新たな太陽熱利用システムに関する展望が開ける。世界的に脱炭素社会の実現に向けた取り組みが加速する中、再生可能エネルギー利用の可能性を示す技術として今後の進展が期待される。

参考文献

- (1) Kameya & Hanamura, *Solar Energy* 85 (2011) 299.
- (2) Sacco et al., *J Clean Prod* 175 (2018) 38.
- (3) Pang, et al., *ACS Energy Lett* 5 (2020) 437.
- (4) Ni et al. *Nature Energy* 1 (2016) 16126.
- (5) Gupta et al. *Am J Eng Res* 2 (2013) 203.
- (6) Ni et al., *Energy Environ Sci* 11 (2018) 1510.
- (7) Zhou et al. arXiv:1804.10736v3 (2018).
- (8) Kameya & Yamada, *Colloid Surf A* 655 (2022) 130265.
- (9) Kameya & Takada, *Res Mater* 14 (2022) 100274.
- (10) Kameya, et al., *Int J Heat Mass Transf* 216 (2023) 124605.

研究項目： 科研費採択者助成金

研究期間： 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名(和文)： 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

研究課題名(英文)： Purification and Creation of Aluminum Alloys through an Innovative Solidification Process Utilizing Novel Electromagnetic Separation Phenomena

研究者： 田村 洋介
TAMURA Yosuke

千葉工業大学
工学部 先端材料工学科 教授

1. はじめに

循環アルミニウムの利用率は、現在、鋳造材がおおむね100%、一方、展伸材は10%程度に留まる。需要の大きい展伸材への利用率を高めるには、さらなる精製技術の進歩が必要である。著者らは、過共晶組成のAl-Fe合金あるいはAl-Si合金に直流電流と磁場を印加し、そのまま凝固させると、初晶が合金表層に分離する現象を発見した¹⁾。当該現象は、一般に報告されている電磁分離^{2,3)}とは異なり、凝固過程で生じる。そこで本稿では、当該現象を利用したプロセスを「電磁凝固プロセス」と記す。電磁凝固プロセスは、「材料の精製」と「材料の創製」の両方に応用可能な新しい技術として興味深い。

電磁凝固プロセスを用いると、初晶Siで覆われたAl-Si合金を作製できる。また初晶Siを含まない領域は微細な共晶組織となる⁴⁾。本研究では、材料の創製という観点から電磁凝固プロセスを適用したAl-Si合金の引張特性を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 試料および電磁凝固プロセスについて

Al-25Si合金とAl-13Si合金を研究に用いた。表1に各合金の組成、図1にAl-Siの二元系状態図を示す。Al-13Si合金は、おおむね共晶組成(12.6mass%Si)となっており、電磁分離プロセスにより作製した共晶合金と性質を比較検討するために用いている。

表1 Al-Si合金の化学分析値 (mass%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni
Al-13Si	12.7	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Al-25Si	25.0	0.20	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01

本研究では、はじめに電磁力印加機構を備えた実験装置を作製した(電磁凝固装置と記す)。図2に電磁凝固装置の模式図を示す。

表1に示す各合金をワイヤーカット放電加工によりφ18mm、長さ90mmの丸棒に加工し、φ20mm、長さ120mmのムライト管内に挿入した。その端部を耐熱性無機接着剤により黒鉛電極に接着し、図2のように装置へと固定した。試料を炉内で溶解し、所定の温度に達してから永久磁石の磁極間(磁束密度0.54T)に移動、電流を印加しながら室温にて自然凝固さ

せた。なお永久磁石としてはネオジム磁石を用いた。各合金の凝固条件は次に示すとおりである。

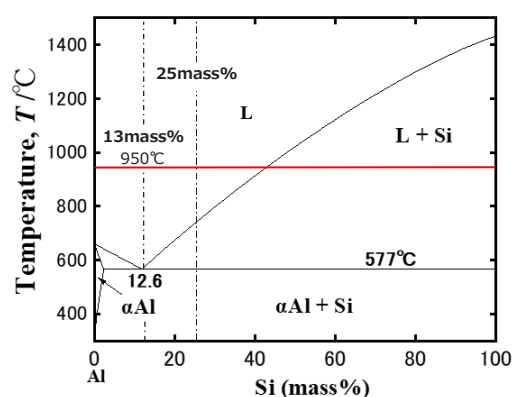


図1 Al-Si系二元状態図

【Al-13Si合金】

950°Cに達したことを確認し、室温にて自然凝固

【Al-25Si合金】

条件① 950°Cに達したことを確認し、室温にて自然凝固

条件② 950°Cに達したことを確認し、直流電流 100 A と磁場を印加しながら室温において自然凝固

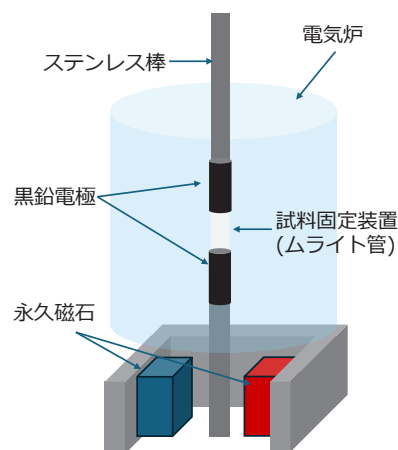


図2 電磁凝固装置の模式図

以下 Al-25Si 合金に関しては、各条件による試料を Al-25Si① および Al-25Si② と分けて記す。実験後、凝固した試料を装置から取り出し、精密切断機で所定のサイズに切断、粗研磨およびバフ研磨を行い、光学顕微鏡観察を行った。

2. 2 引張試験

引張試験片の作製に当たり、実験により得られた試料の全てに関し、X 線計算機トモグラフィー (X-ray computed tomography X 線 CT) により内部欠陥の有無を確認した。そして欠陥のない領域から図 3 に示す形状の引張試験片を採取した。Al-25Si② に関しては、鑄塊試料中央領域の共晶部から試験片を作製した。

引張試験の試験規格は JIS Z 2241 とし、初期ひずみ速度 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の条件で実施した。

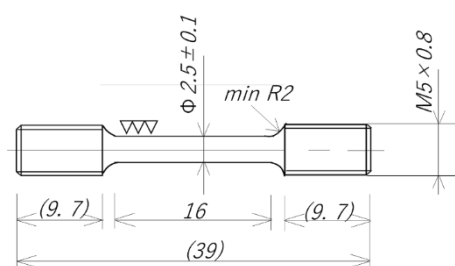


図 3 引張試験片の形状

3. 結果

図 4 に Al-13Si, Al-25Si①, Al-25Si② の試料断面の光学顕微鏡組織を示す。Al-13Si のマトリックスは共晶、その中に小さな初晶 Si がわずかに分散していた。Al-25Si① には粗大な初晶 Si が組織全体にわたり分散していた。一方、電磁凝固プロセスを経た Al-25Si② の場合、粗大な初晶 Si は鑄塊外周部このみ観察された。中央部は、微細な共晶と非平衡凝固により晶出した初晶 α Al デンドライトが確認された。引張試験片は試料中央から採取しており、それぞれ図 4 の中心部と同様の組織であることが確認された。

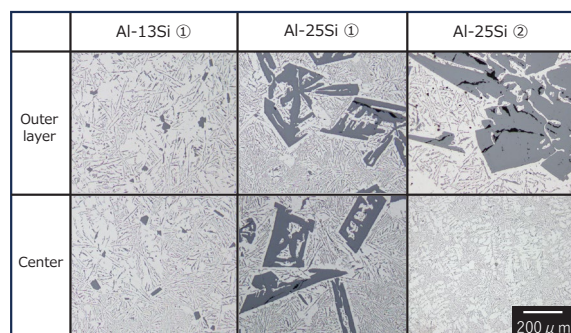


図 4 各条件により作製した試料の光学顕微鏡組織

次に引張試験結果を示す。降伏応力は Al-13Si が 61 MPa, Al-25Si① が 66 MPa, そして Al-25Si② が 93 MPa となった。引張強さは Al-13Si が 129 MPa, Al-25Si① が 66 MPa, そして Al-

25Si② が 169 MPa となった。電磁凝固プロセスを施すことによって降伏応力と引張強さは、共に著しく向上することが明らかとなった。

4. 結言

本研究では、従来の研究成果に基づいて電磁凝固装置を作製し、電磁凝固プロセスにより、初晶 Si を含まない微細共晶組織からなる試料を得た。また引張特性を明らかにし、材料創製における電磁凝固プロセスの有効性を示した。

参考文献

- 1) 田村洋介, 水野健太郎, 高橋謙三: 鑄造工学 **90** (2018) 508 - 514.
- 2) D. Leenov and A. Kolin: J. Chem. Phys., **22** (1954), 683-688.
- 3) 朴 煥杓, 佐々健介, 浅井滋生: 日本金属学会誌, **59** (1995), 312-318.
- 4) 田村洋介, 早田博, Alexander Mclean, 水野健太郎, 高橋謙三: 軽金属 **72** (2022) 115 - 121.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名 (和文) : 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

研究課題名 (英文) : Gate Drive Circuit Design Method to Achieve Both Long-Term Reliability and Performance of Power Semiconductor Devices

研究者 : 〇林 真一郎

HAYASHI Shin-Ichiro

千葉工業大学

工学部 電気電子工学科 助教

1. はじめに

電力を効率よく利用するためには、パワーエレクトロニクス技術が必要不可欠である。パワーエレクトロニクス技術とは、パワー半導体デバイスを用いて電力の形態を効率的に変換することができる技術である。そのため、省エネルギー化のキー技術として、家電から xEV、鉄道車両、工場に至るまで様々なアプリケーションの電源装置に使用されている (図 1)。さらに、研究開発レベルでは、航空機やロケット発射装置の電動化にも応用されている¹⁾。

こうした背景から、パワーエレクトロニクス技術を使用した電気機器には、幅広い期待寿命と性能が要求されつつある。そこで、本研究ではパワー半導体デバイスを対象に、要求される期待寿命と性能に合わせた使い方の確立を目指している。本助成の研究期間においては、パワー半導体デバイスの寿命をより正確に測定するための試験環境の構築や試験手法の検討を実施した。

2. 研究の内容

2. 1 試験環境の構築

一般的に、パワー半導体デバイスの寿命を評価するためには、加速劣化試験が用いられる。加速劣化試験とは、電圧や温度などパワー半導体の寿命にとってストレス (加速因子) となる値を高く設定することで寿命を加速させ、得られた結果から通常使用条件における寿命を推定する試験である。本研究を遂行するためにも、パワー半導体デバイスの加速劣化試験を実施する環境の構築

が必要となる。

図 2 は、本研究室に構築したパワー半導体デバイスの寿命評価試験環境を示している。パワー半導体デバイスの寿命を加速させるために、ケース温度を最大で 300℃ に設定できる仕様とした。また、様々な条件の駆動電圧に対応した寿命を評価できるよう、試験電圧は直流 (± 100 V) および矩形波交流 (± 50 V, ~ 300 kHz) に対応できる仕様とした。さらに、試験中に予期せぬ事態が発生した場合を考慮して、遠隔からの監視及び試験の緊急停止ができる仕様とした。このように安全性にも配慮をすることで、大学の研究室という制限された環境においてもパワー半導体デバイスの寿命評価試験の実施が可能となった。

2. 2 構築した試験環境の検証

構築した試験環境にて、パワー半導体デバイスの加速劣化試験を実施し、寿命を評価できることを検証した。実施した試験は、パワー半導体デバイスのゲート酸化膜を対象とした高温ゲートバイアス試験 (HTGB 試験) である。被試験デバイス (DUT) として、1.2kV 耐圧の SiC MOSFET (C2M0280120D, Wolfspeed 製) を使用した。

HTGB 試験条件として、DUT のケース温度を 150℃ (DUT の最大ジャンクション温度と等しい) とした。また、試験電圧は、42 V, 43 V, 44 V (DUT の最大定格ゲート電圧 25 V) とすることで、劣化を加速させた。各試験電圧でのサンプル数は、9 とした。

図 3 は、HTGB 試験の結果を示している。ワイブル確率紙上に試験電圧ごとの結果を示している。試験結果より、



パワー半導体デバイスを用いたパワエレ機器

図 1. パワーエレクトロニクス技術の応用例



図2. パワー半導体デバイスの寿命評価試験環境

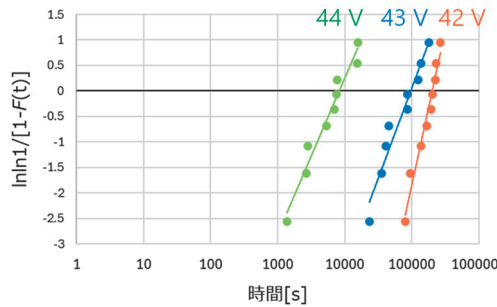


図3. 従来のHTGB試験結果

各試験電圧における形状パラメータは, 2.64 (@42V), 1.54 (@43V), 1.33 (@44V) となった. すべての条件において形状パラメータが1より大きいことから, 摩耗故障による寿命を評価できていることが検証できた.

2. 3 試験手法の検討

図4(a)は, パワー半導体デバイスにおける従来の寿命評価試験の試験波形を示している. 従来は, 試験電圧として直流電圧を用いる静的な寿命評価が行われている. 一方, 図4(b)は, パワー半導体デバイスにおけるパワエレ機器内での動作波形を示している. パワー半導体デバイスの実動作波形は矩形波であり動的な条件である. そこで, パワー半導体デバイスの寿命評価試験において矩形波を用いる「動的寿命評価試験⁽²⁾」を実施することで, より正確な寿命の評価試験を実施する.

図5は, 動的寿命評価試験を実施するために開発した試験回路を示している. 開発した試験回路は, 実動作時の定格電圧のおよそ2倍の電圧をパワー半導体デバイスに印加できる仕様である. これにより, 実動作に近い条件で加速劣化させることが可能である.

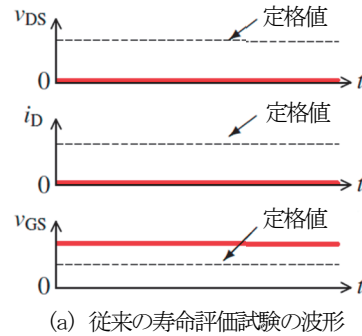
3. まとめ

以上の成果を活用して, パワー半導体デバイスのより正確な寿命評価に向けて, 継続的に試験を実施中である.

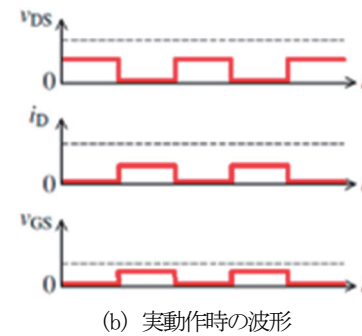
詳細な研究成果は, 今後学会発表を通して広く社会に還元していく予定である.

本研究に関する主な発表論文

なし



(a) 従来の寿命評価試験の波形



(b) 実動作時の波形

図4. パワー半導体デバイスの寿命評価試験と実動作波形の差異 (概念図)

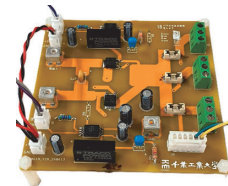


図5. 開発した試験回路

参考文献

- (1) A. Barzkar and M. Ghassemi, "Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 169314-169332, 2020.
- (2) S.-I. Hayashi and K. Wada, "Design a Continuous Switching Test Circuit for Power Devices to Evaluate Reliability," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 11, no. 1 pp. 108-116, 2022.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名 (和文) : 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

研究課題名 (英文) : Studies on multi-layer and parallel consensus protocols for hyper-interoperable blockchains

研究者 : 藤原 明広

FUJIHARA Akihiro

千葉工業大学

工学研究科情報通信システム工学専攻 教授

1. はじめに

ブロックチェーン (以降BCと省略) は、取引処理性能が低いことが知られている。ビットコインやイーサリアム等の初期のBCの取引処理性能は、クレジットカードのような従来の決済システムのそれに比べて極端に遅い[1, 2]。これはBCの拡張性(スケーラビリティ)問題として知られており、その改善方法について様々な研究者によって研究が行われている。この問題を解決する方法の一つに、複数のBCを用いて取引処理を並列化させるものがある。ただし、複数のBC間で暗号資産を安全に送金することも想定した設計にしなければ、真の意味で取引処理の並列化は実現できない。複数のBC間で通信を行い、互いにデータの読み書きを安全かつ高速に行うことができる特性のことをBCの相互運用性という。この相互運用性を高めることができれば、取引処理の並列化が実現され、BCのスケーラビリティ問題を解決できる可能性があると考えられている。

またイーサリアムという誰でも自由に暗号資産を発行可能なプラットフォームの登場により、暗号資産の数は1,000を超えるという指摘もあり、暗号資産の民主化と多様化も進んでいる。究極的には全人類の一人一人が自分の暗号資産を複数発行することも想定したBCの設計にする必要がある。また沢山の暗号資産をBCの相互運用性を利用して自由にBC間で送金することができれば、BCの更なる社会への普及も期待できる。

BCの相互運用性を実現する技術の一つにLight ClientとRelayerを導入することによるブロックチェーン間通信(Inter-Blockchain Communications, IBCs)がある。各BCがそれぞれ他のBCの情報を真偽検証できるようにLight Clientをオラクルとして利用し、オラクルに偽情報が含まれていなければRelayerでIBCsを実行する形態をとる。これにより複数の独立な(ただし互いに接続することを前提条件として設計された)BCを接続したエコシステムとしてのBCのインターネット(Internet of Blockchains)を構築する構想もある。一方、BC間には信頼関係を前提としないので、Light ClientやRelayerを接続するBCの数だけ設置する必要がある。このためBC間のIBCsの混雑も懸念される。またLight ClientやRelayerを設置して運用するにはコ

ストがかかり、このコストを支払うことが可能な独自のインセンティブ設計もない現状であった。

またIBCsの取引処理性能を評価するための基礎理論も存在していない。そもそもBCは一般に分岐するため、一度処理された取引が分岐によって無かったことになる可能性が存在する。このためIBCsを安全に実行するには、BC毎に取引の確定(finality)を確実に行う必要がなる。この確定が可能なBCの分散合意アルゴリズムにProof of Stake (PoS)がある。ビットコインのようなProof of Work (PoW)における取引処理性能の基礎理論は、待ち行列理論を用いた研究等、様々なものが存在する[3-9]。一方、PoSにおける取引処理性能の基礎理論は、十分に研究されていない。またPoSのBCには複数の種類がある。イーサリアムのように分岐することを想定して多数の検証ノード間で合意形成を行うもの、Cosmosのように短い時間でブロックの確定処理をするために、比較的少数の検証ノード間で合意形成を行うビザンチン障害耐性合意BC等が存在する。

2. 主要な研究成果

(1) Relayer Aggregationの提案と性能評価

本研究では、Relayerの数を減らすためにRelayer Aggregation (RA)を提案した。従来のIBCsは取引処理を直列接続で実施する。具体的には、BC1からBC2に暗号資産を送金する場合、まずBC1で取引を確定し、その情報がRelayerを介してBC2に転送される。次にBC2でその情報が正しいことをLight Clientで確認し、問題なければBC2で暗号資産を発行する。この発行した取引が確定したら、その情報がRelayerを介してBC1に転送される。そしてIBCsが完了する。これらの取引処理の速度を向上させるためには、この取引処理の直列接続を並列化する必要がある。

RAでは、BC1とBC2にそれぞれが共通して取引を記録できる共有セキュリティ部を導入することにより、並列化を実現する。RAでは複数のBCのRelayerを一つのRelayerに集約するため、Relayerの数を減らすことが可能となる。一方、取引処理を並列化の影響もあり、Relayer自体の並列処理性能を高くする必要がある。

既存の直列接続のIBCsの方式であるmulti-hop relayとRAを比較することで、性能評価も行った。

Python 言語を用いて独自に実装した BC ノードを用いて、100 を超える BCs に対して RA と multi-hop relay を比較した結果、その Relayer 数の削減と取引処理性能の向上が確認できた（主な研究成果(1)と(2)を参照）。

(2) PoS 型 BC における検証ノード間ブロードキャスト通信の確率過程とブロック時間分布の基礎理論の構築

本研究では、分散合意アルゴリズムに PoS を採用する BC におけるブロック伝搬と検証の過程を表現した確率モデルを提案した。このモデルを用いてブロックのブロードキャストや検証等にかかる時間の確率分布について理論解析した結果、ブロードキャスト時間はガンベル分布にしたがうことが分かった。またビザンチン障害耐性合意 BC においては、ブロック時間が3つの独立なガンベル分布の合成積の最大値分布として表現できることが分かった。これらの確率分布は一般に積分形式で表現されるが、この近似表現も導出することができた。これにより、実際のブロック時間データと比較することで、データと理論の間に矛盾のない結果が得られた（主な研究成果(3)と(4)を参照）。

3. まとめ

BC を社会に普及させるためには、スケーラビリティ問題を解決し、取引処理性能を向上させる必要がある。本研究では BC の相互運用性に焦点を当てて研究することで、取引処理を並列化することによる処理性能の向上に関する研究を行った。主な研究成果としては、RA の提案と性能評価、PoS ブロックチェーンのブロードキャスト時間やブロック時間の基礎理論の構築とデータ分析を行った。RA については、分権性や安全性の向上に課題がある。BC の基礎理論については、実際の IBCs 等の取引処理性能に対して、今回提案した基礎理論を用いて説明する課題がある。これらについて研究を継続していく。

本研究に関する主要な研究成果

- (1) 柳原貴明・藤原明広, 「[奨励講演] ブロックチェーン相互運用性技術の最新研究動向の紹介」
- (2) 柳原貴明・藤原明広, 「ブロックチェーン間通信時間における Multi-hop channels と Relayer Aggregation の比較実験」信学技報, vol. 123, no. 397, NS2023-220, pp. 282-287, 2024.
- (3) Akihiro Fujihara, “Investigating the probability distribution of average block time in proof-of-stake consensus algorithm using extreme value theory” in Proc. Of the International Workshop Blockchain Kaigi 2023 (BCK23), Kobe, Japan, 2023.
- (4) 藤原明広, 「ビザンチン障害耐性合意ブロックチェーンにおける検証ノード間ブロードキャスト通信の確率過程」 信学技報, vol. 123, no. 398, IN2023-82,

pp. 101-106, 2024.

参考文献

- [1] E. Georgiadis, “How many transactions per second can bitcoin really handle? Theoretically” . Accessed: Nov., 16, 2022. [Online]. Available: <https://eprint.iacr.org/2019/416.pdf>
- [2] “VISA Fact Sheet” , Accessed: Nov., 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.visa.co.uk/dam/VCOM/download/corporate/media/visanet-technology/aboutvisafactsheet.pdf>
- [3] S. Kasahara and J. Kawahara, “Effect of Bitcoin fee on transaction-confirmation process,” Journal of Industrial and Management Optimization, vol. 15, issue 1, pp. 365-386, 2019.
- [4] T. Yanagihara and A. Fujihara, “Considering Cross-Referencing Method for Scalable Public Blockchain,” in Proc. of the Advance in Internet, Data, and Web Technologies (EIDWT), Springer, 2021, pp. 220-231.
- [5] T. Yanagihara and A. Fujihara, “Cross-Referencing Method for Scalable Public Blockchain,” Internet of Things, vol. 15, no. 100419, pp. 1-14, 2021.
- [6] A. Fujihara, “Estimating the Relationship Between Block Size and Block Propagation Time in Bitcoin by Simulation,” in Proc. of the International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS), Springer, 2023, pp. 166-176.
- [7] A. Fujihara, “Theoretical Considerations on Bitcoin Scalability Problem and Block Size Distribution,” in Proc. of Blockchain Kaigi 2022 (BCK22), JPS Conf. Proc., vol. 40, no. 011007, pp. 1-21, 2023.
- [8] A. Fujihara, “Proposing a Blockchain-Based Open Data Platform and Its Decentralized Oracle,” in Proc. of the International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS), Springer, 2020, pp. 190-201.
- [9] A. Fujihara, “PoWaP: Proof of Work at Proximity for a crowdsensing system for collaborative traffic information gathering,” Internet of Things, vol. 10, no. 100046, pp. 1-17, 2020.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名 (和文) : 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

研究課題名 (英文) : Performance Improvement of Rolling Shutter Based Visible Light Communication through Spatial Parallel Transmission Using Multiple LED Transmitters

研究者 : 木下 雅之

Kinoshita Masayuki

千葉工業大学

工学部 情報通信システム工学科 准教授

1. はじめに

可視光通信は、LED の輝度や色を人の目には知覚されないように高速に変調することで情報を伝送する無線通信技術である。そのため、照明から無線 LAN アクセスの提供、デジタルサイネージ広告に多言語案内の付加、交通信号機から運転支援情報配信など、LED を単に照明や表示として利用するだけでなく、情報伝送にも利用できる。また、送信信号が見える可視光通信は、カメラでの受信が可能であり、イメージセンサ可視光通信とも呼ばれる。近年、普及が進むスマートフォンのカメラを受信機に利用し、遍在する LED 光源と組み合わせれば、至る所に通信機能を付加することができ、IoT に適した通信技術として期待できる。

イメージセンサ可視光通信の課題は、データレートの高速化が困難な点にある。一般的な商用カメラは、1 秒間に 30-60 枚程度の撮影速度で動作する。この場合、そのサンプリングレートは 30-60Hz となり、データレートは大きく制限されてしまう。これに対し、スマートフォンカメラが採用しているローリングシャッタ方式の撮像機構に注目することで、データレートの大幅な向上が可能となる。図 1 にローリングシャッタカメラを受信機に用いた可視光通信 (ローリングシャッタ型可視光通信) の動作原理を示す。ローリングシャッタカメラは、画素を行ごと順番に露光と読み出しを行うため、行ごとで撮像タイミングが異なる。故に、行ごとの撮像タイミング差に合わせた変調速度で信号を送ることで、その送信信号を“縞”として捉えることができる。受信画像から、明るい縞を“ON(1)”，暗い縞を“OFF(0)”として情報を

取り出せば、1 枚の画像で複数ビットの情報伝送が可能となる。Full HD 画像を例に考えると、解像度は 1920 列 × 1080 行程度であり、1 枚の画像で最大 1080 ビットの伝送が可能となる。

一方で、ローリングシャッタ型可視光通信の課題として、通信距離とデータレートのトレードオフが挙げられる。通信距離が延びるにつれて画像上での LED の投影面積が縮小するため、LED を捉える縞の数が減少しデータレートが低下してしまう。そのため、所望のデータレートを達成するために十分な縞の数を投影できる通信距離を保つ必要があることから、ローリングシャッタ型可視光通信は、近距離 (<5m) かつ静止環境に利用シーンが制限されてしまう。ローリングシャッタ型可視光通信のサービス用途拡大を考える上で通信距離の拡大が不可欠である。

上述の課題に対し、本研究では、送信機に複数の LED 光源を活用した空間並列伝送を行うことで、通信距離の拡大と通信誤りの改善を目的とする。具体的には、ある 1 つの送信信号に対して、異なる遅延を与えた信号を複数 LED で並列伝送する並列遅延伝送を用いることで、従来よりも少ない縞の数で所望のデータレートを達成する通信距離の拡大を目指す。

2. 研究内容

図 2 に並列遅延伝送による通信距離拡大手法のコンセプトを示す。ここでは、10 ビットで構成される送信信号と水平方向に配置した 2 つの LED 送信機を用いる場合を例に考える。単一 LED 送信機を用いる場合、この

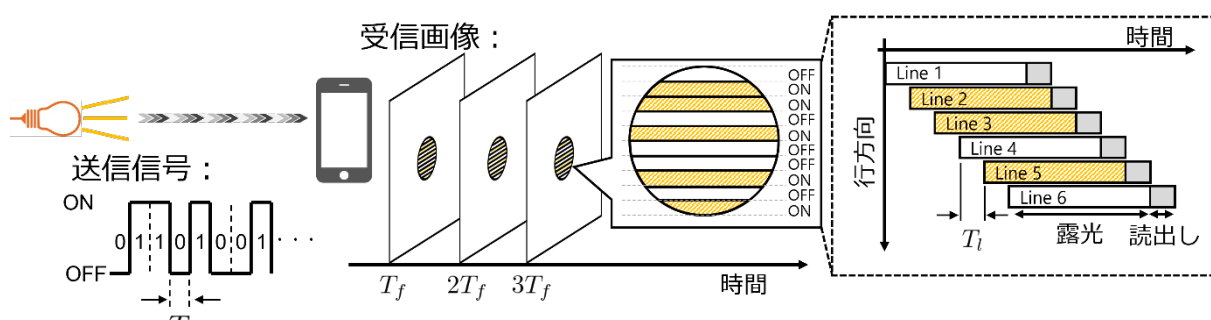


図 1 ローリングシャッタ型可視光通信の動作原理

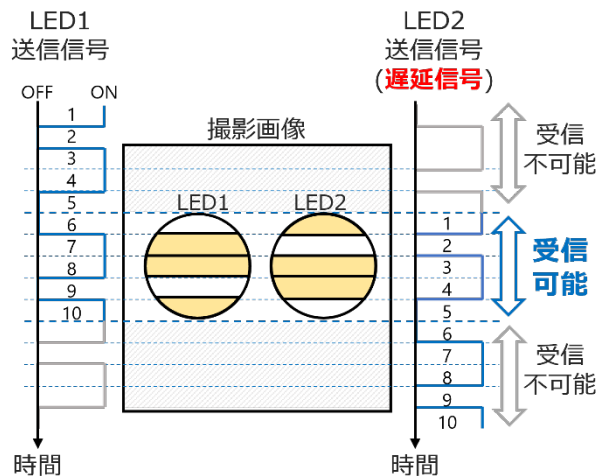


図 2 並列遅延伝送による通信距離の拡大手法

送信信号を受信するためには 10 本以上の縞で LED を撮影する必要がある。2 つの LED 送信機で並列遅延伝送を用いる場合、LED2 は LED1 と同一の送信信号に半周期分の遅延を加えて送信させる。このとき受信機では、図 2 のように 2 つの LED 送信機をそれぞれ 5 本の縞で捉えた撮影画像が得られたとする。LED1 では、送信信号の前半 5 ビットが欠損してしまうが、遅延信号により LED2 が欠損した前半 5 ビットを受信するため、元の送信信号を復調することが可能となる。そのため、単一 LED 送信機の場合に比べて、LED を捉える縞の数が半分となり通信距離を 2 倍に拡大できる。

3. 通信実験による性能評価

並列遅延伝送の有効性評価のため、屋内通信実験を行った。実験の様子を図 3 に示す。実験では、従来の単一 LED 送信機を用いた場合と 2 つの LED 送信機に並列遅延伝送を適用した場合におけるパケット損失率、ビット誤り率、スループットを測定し、比較評価を行った。ここで、パケット損失率は全受信フレーム数に対するパケット検出に失敗したフレーム数の割合とする。スループットは、(送信ビットレート) × (1 - パケット損失率) × (1 - ビット誤り率) として求める。



図 3 通信実験の様子

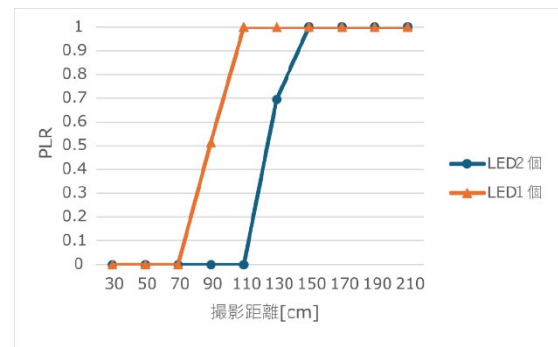


図 4 パケット損失率特性

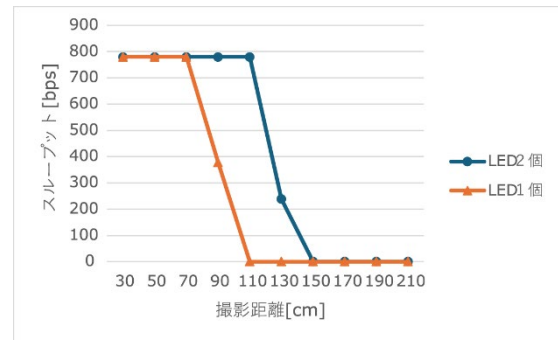


図 5 スループット特性

図 4 にパケット損失率の測定結果を示す。単一 LED の場合、通信距離 70cm まではパケット損失率 0% を維持するが、110cm 以降では 100% となり通信が不可能となる。一方、2 つの LED による並列遅延伝送を用いた場合、パケット損失率 0% を維持できる通信距離は 110cm まで拡大された。

ビット誤り率は、単一 LED の場合も並列遅延伝送の場合もパケット損失率が 0% となる全ての通信距離でエラーフリーを達成した。

図 5 にスループット特性の測定結果を示す。単一 LED の場合、通信距離 70cm まで達成可能な最大スループットを維持できるのに対し、並列遅延伝送を用いた場合、110cm まで拡大できることを示した。

上記の結果より、単一 LED におけるパケットの欠損を遅延信号が補うことによって提案手法は従来よりもより少ない縞の数で所望のデータレートを達成する通信距離の拡大が可能であることを示した。

4. まとめ

本研究では、ローリングシャッタ型可視光通信の課題である通信距離とデータレートのトレードオフに対し、2 つの LED を用いた並列遅延伝送を提案することで、通信距離の拡大を達成した。

本研究に関する主な発表論文

(1) 古賀耀, 木下雅之, 鎌倉浩嗣, 山里敬也, “並列遅延伝送を用いたローリングシャッタ型可視光通信の通信領域拡大”, 電子情報通信学会総合大会, 2024 年 3 月。

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名 (和文) : フッ素とカチオンのハイブリット骨格を基盤とする二酸化炭素固定化有機触媒の開発

研究課題名 (英文) : Development of Organocatalysts for Carbon Dioxide Fixation Based on Cationic Fluorinated Scaffold

研究者 : 〇原口 亮介

HARAGUCHI Ryosuke

千葉工業大学

工学部 応用化学科 准教授

1. はじめに

二酸化炭素 (CO_2) を機能性分子に変換する反応は、「 CO_2 削減」と「産業上重要な化合物の生産」を同時に行えるため、学術・産業の両面から注目されている。特に、環境面や持続可能性の観点から、貴金属を用いず、マイルドな反応条件 (1 気圧の CO_2 ・室温・少ない触媒量) で進行させられる有機触媒系の開発が望まれているが、金属触媒に比べると効率が悪く、上述した課題をクリアしている触媒系はほとんど報告されていない。^[1] この原因について我々は、従来の有機触媒では二酸化炭素を活性化する強さが不十分だったためではないかと考えた。

そこで今回、ルイス塩基性の低い二酸化炭素でも十分強く活性化することができる有機触媒として、高度にフッ素化されたカチオン性ヨウ素化合物を設計した (図 1)。本研究ではこの触媒の合成法を開発し、その性質や触媒機能を実験・計算の両面から明らかにする。具体的には、(A) 多数のトリフルオロメチル基を有するヨードトリアゾリウム塩の合成法確立、(B) ヨウ素のルイス酸性度に対するフッ素置換基効果の解明、(C) 触媒機能評価の 3 点に取り組み、有機触媒による高効率な二酸化炭素固定化プロセスを確立する。

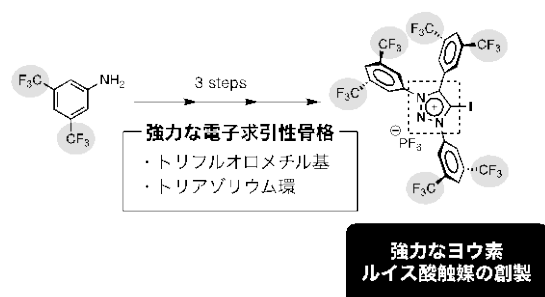


図 1 高度にフッ素化されたカチオン性ヨウ素触媒開発

2. 研究の内容

まず始めに、高度にフッ素化されたヨードトリアゾリウム塩の合成法を図 2-4 に示す。ビストリフルオロメチ

ルフェニルアニリン (**1a**) を塩酸溶液中、亜硝酸ナトリウムと酢酸ナトリウムと 0°C , 1 h 反応させることで、トリアゼン **2a** を 85% 収率で得た (図 2)。次に、合成したトリアゼン **2a** とビストリフルオロメチルフェニルアルキン **3a** を、アセトン溶媒中、*tert*-ブチルハイポクロライトとヘキサフルオロリン酸カリウムと、 -78°C から室温へ徐々に昇温する条件で、1 h 反応させることで、トリアゾリウム塩 **4a** を 55% 収率で得た (図 3)。最後に、トリアゾリウム塩 **4a** を *tert*-ブトキシカリウムによって、 0°C 条件下で脱プロトン化し、続いてヨウ素と -78°C から -45°C へ徐々に昇温する条件で、12 h 反応させることで、ヨードトリアゾリウム塩 **5a** を 42% 収率で得た (図 4)。構造決定には ^1H ・ ^{13}C ・ ^{19}F NMR により行った。本手法は様々な数・位置にトリフルオロメチル基を有するヨードトリアゾリウム塩が合成可能であり、合成したものを図 5 に示す。

Triazene Synthesis

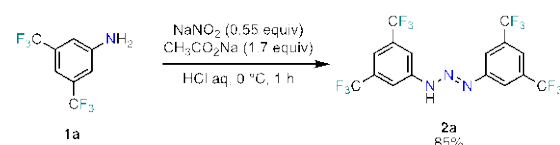


図 2 トリアゼン合成スキーム

Oxidative [3+2] Cycloaddition

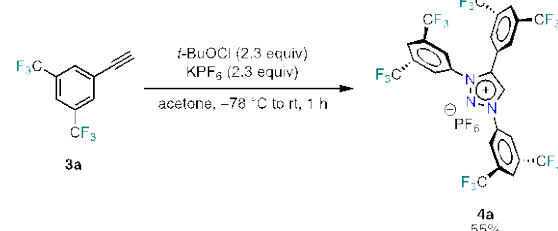


図 3 トリアゾリウム塩合成スキーム

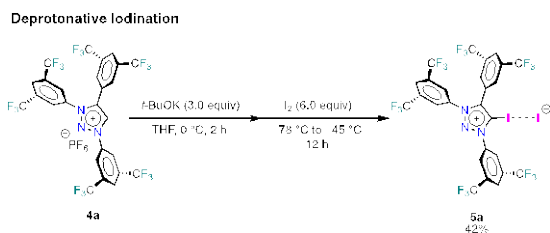


図4 ヨードトリアゾリウム塩合成スキーム

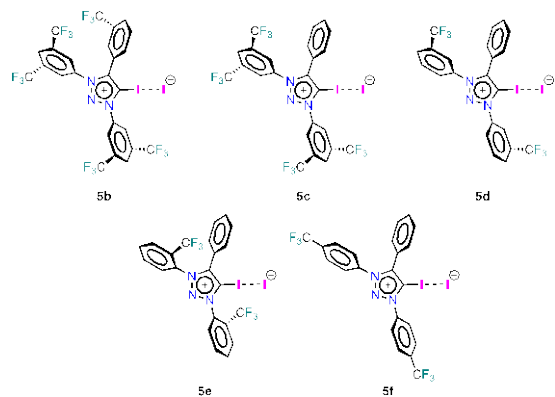


図5 合成可能なヨードトリアゾリウム塩

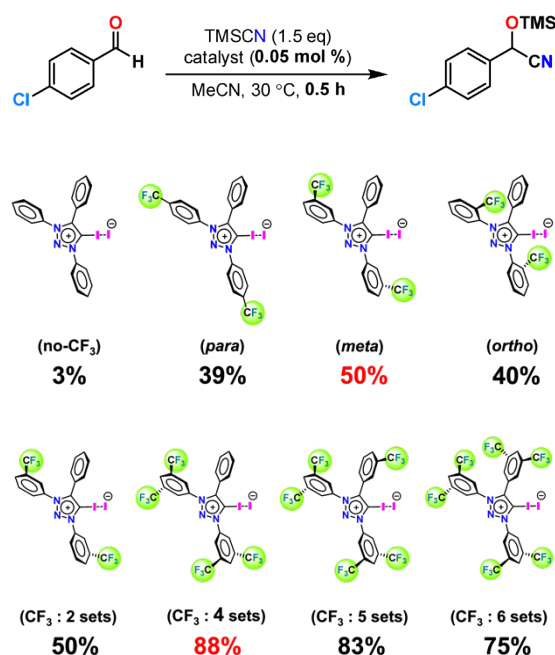


図6 触媒活性評価 (アルデヒドのシリルシアノ化)

次に、合成したヨードトリアゾリウム塩の触媒活性を評価するために、アルデヒドのシリルシアノ化反応に適用した (図 6)。まず、トリフルオロメチル基の置換する位置が及ぼす影響について調査した。具体的には、トリアゾリウム環上5位をPh基に固定し、1位・3位にPh基Nからみてp位・m位・o位にそれぞれ1つつトリフルオロメチル基を有しているものについて、同条件で反応を行った。その結果、この置換基の位置はパラ位よりもメタ位にあるときの方が収率良く生成物を与えるこ

とがわかった。一方、オルト位にトリフルオロメチルがある場合は、メタ位のものとは比べ収率は低下した。これらの結果は、トリフルオロメチル基がトリアゾリウム環から近いほど、誘起効果によってヨウ素部位のルイス酸性が向上する一方、オルト位にこの置換基があると、ヨウ素周りの立体障害が大きくなったため、メタ位のものとは比べ活性が低下したものと考えている。次に、トリフルオロメチル基の置換する数が及ぼす触媒活性への影響を調べた。こちらのスライドでは、トリアゾリウム環1位・3位・4位に置換するトリフルオロメチル基の数を覚えており、それら CF_3 の合計値をカッコ内に記している。その結果、トリフルオロメチル基が2つのものとは比べると、4つ有するものはより高い触媒活性を示し、この中で最も高い収率で目的生成物を得られた。一方で、この置換基の数を5つや最も多い6つに増やしたヨードトリアゾリウム塩を用いると、収率はどちらも低下した。 CF_3 の数が5つ以上の場合、4つのものよりも高い活性を示さなかったことについては、立体障害による効果やルイス酸性が高くなったことによる触媒の安定性の低下などが考えられるが、明確な理由はまだわかっておらず現在調査中である。

3. まとめ

本研究では、高度にフッ素化されたヨードトリアゾリウム塩を開発し、アルデヒドのシリルシアノ化反応に適用した。今回の結果から、トリフルオロメチル基の数や置換位置が触媒活性に大きく影響を及ぼすことがわかった。今後は、二酸化炭素とエポキシドとの反応に適用していく。

参考文献

- (1) Cokoja, M.; Wilhelm, M. E.; Anthofer, M. H.; Hermann, W. A.; Kühn, F. E. *ChemSusChem* **2015**, *8*, 2436.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2026/3/31

研究課題名(和文) : 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

研究課題名(英文) : Research of ground disturbances after removal of existing piles using a nonlinear constitutive soil model and its development to practical design

研究者 : ○金田 一広 千葉工業大学
Kaneda Kazuhiro 創造工学部 都市環境工学科 教授

中井 照夫 中部大学
Nakai Teruo 工学部 客員教授

鈴木 比呂子 千葉工業大学
Suzuki Hiroko 創造工学部 建築学科 教授

余川 弘至 中部大学
Yokawa Hiroshi 工学部 准教授

1. はじめに

1980年代以降に建設されたオフィスビルなどの建て替え工事が今後急増することが予想されている。建物自体の解体は技術開発がなされ多くの工法が現在あるが、基礎、特に杭に関してもいろいろな工法がある。基本的には杭自体を破砕するものと、杭と地盤の摩擦を切って杭を引き抜くものに2分される。杭を存置するか、それとも引き抜くかについては国交省が主体となって検討を行っているが、小規模建物に関して不動産売買がなされる場合は基本的には杭は撤去されることになる。現在、既存杭を破砕あるいは引き抜くことによって周辺地盤が乱れることについての懸念が多くある。もともと杭を打設する地盤であるため軟弱であることが多く、杭撤去後にその撤去孔に土相当の材料で埋め戻しを行うが、杭を引き抜いて埋め戻された地盤(周辺地盤)が現地盤よりさらに軟弱になる可能性も指摘されている¹⁾。既存杭が撤去された地盤の強度が低下すれば、地震時の水平耐力の検討などでさらに対策が必要となる。しかも、まだこの杭引き抜きに伴う周辺地盤の乱れ、強度低下の力学的なメカニズムが明らかになっていない。今後杭の引き抜き工事が多くなっていく中で、施工上どのようなことに注意すべきか、どのような地盤で発生するのかなど原因がわかれば対策もできない。安心・安全な建築基礎の根幹にかかわる問題である。そこで本研究は数値解析によってまずは現象の解明を行った。

2. 解析パラメータの設定

解析対象の地盤を図1に示す。詳細は参考文献¹⁾を参照していただきたい。ここではSubloading t_{ij} モデル(以下 t_{ij} モデル)を用いた弾塑性解析を行った。このモデルはSMPをベースとした変換応力 t_{ij} を用いた構成モデルで、密度の影響を含め3次元応力下の土の変形・強度特性を包括的に表現できるモデルである。このような弾塑性モデルでは圧密試験や三軸試験などから得られる間隙比～応力関係や応力～ひずみ関係からパラメータを同定する。 t_{ij} モデルの詳細は参考文献²⁾に詳しい。本稿ではパラメータの詳細は省略する。参考文献³⁾を参照されたい。杭の引抜きに直接関係しそうなAs2L, As2LおよびAs1のみ t_{ij} モデルを用いてその他は弾性体とした。

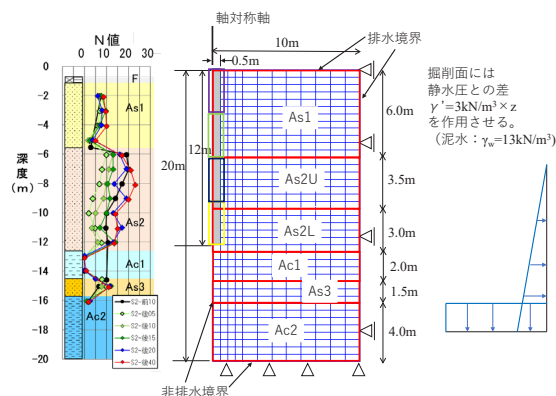


図1 現地状況解析メッシュ

3. 縁切り引抜き工法を想定して杭の引抜き解析

表1に縁切引抜工法の解析ステージを示す。Stage1は、ケーシング掘削工程で、自重解析を実施後、ケーシング内位置の要素を掘削した。本来は水中掘削であると考えられるが、孔壁の安全性の検討から水も土もこの解析は掘削した。解析上、掘削時間40分、その後24時間放置した。掘削後の孔内は泥水($\gamma_w=13\text{kN/m}^3$)と設定し、泥水圧と静水圧との差分を孔壁面に与えた。Stage2は、既存杭引抜き工程で、杭の引上げにより発生する負圧が孔壁を引張り、周辺地盤へ影響を与えると考え、解析では孔壁面を強制変位(50mm)させている。また、孔壁面の泥水圧と強制変位に伴う解放力の解除を行った。Stage3~4は埋戻し工程で、撤去孔下部より孔内の泥土を未固化流動化処理土に置換すると想定し要素置換を行った。27日放置後、Stage5で固化後の流動化処理土に置換し17日放置後解析を終了した。

表1 解析ステージの概要

Stage1: ケーシング掘削	Stage2: 既存杭撤去
- 初期条件(自重解析) - ケーシング(孔壁位置)はモデル化しない - ケーシング位置で泥水圧を作用(掘削後24時間放置)	- 杭の引抜き→孔壁に強制変位を下部から作用(4ステップ) - 泥水圧解除+強制変位に伴う解放力解除
Stage3, 4: 流動化処理土埋戻し	Stage5: 埋戻し完了, 固化
Stage3 - 孔壁に強制変位を与えた下部から流動化処理土に置換 Stage4 - 上部まで置換完了後に放置(27日)	Stage5 流動化処理土の物性を固化体に置換(17日放置)

図2にStage5終了時のせん断ひずみと平均有効応力のコンター図を示す。軸対称解析のためせん断ひずみの主な発生範囲は掘削孔壁面から1mに集中した。平均有効応力分布では、掘削孔壁面近傍0.5-1.0mでは孔壁近傍でのアーチ効果による平均有効応力の増加が見られるが、その外側の要素では低下が見られた。図3に、解析に伴う応力と間隙比の変化を考慮した要素の排水せん断試験時の偏差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)～軸ひずみ関係例を示す。要素は、図1中のGL-8.5m③要素(ケーシング端から1.0-1.5m)である。同図には撤去前の値(initialと記載)も示す。要素の偏差応力の最大値の低下が見られる。図4に、GL-4.0m(As1層)、GL-8.5m(As2層)のせん断応力最大値の変化割合($\tau_{max}/\tau_{max_ini}$)とケーシング端からの距離との関係を示す。別途検討していた破碎撤去工法の結果も示している。ケーシング端から0.25mの値は強制変位(50mm)のアーチ効果による影響で増加するが、0.5mより外側で低下が見られた。低下は、0.5~1.5m程度の範囲で、GL-4.0mでは1割程度、GL-8.5mでは2~3割程度であった。この低下傾向は、観測N値の低下分布¹⁾と類似していた。

4. おわりに

既存杭撤去・埋戻し時の周辺地盤の緩みに関して、除荷過程を模擬できるtjモデルを用いた弾塑性FEM解析を実施した。解析結果は、縁切引抜工法の緩みがある程度模擬できることが判った。今後さらに実験などを含

めて検討を進めていく。本研究は、(一社)建築基礎・地盤技術高度化推進協議会(ALLF)「既存杭撤去に伴う周辺地盤への影響検討委員会」の活動として行われたものである。また、本解析は、FEMtj-2Dプログラム(tj地盤解析研究会)を用いた。

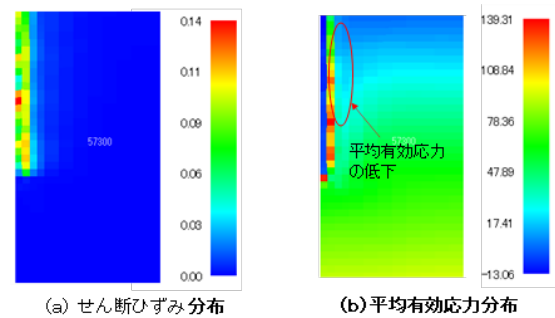


図2 解析結果のコンター図

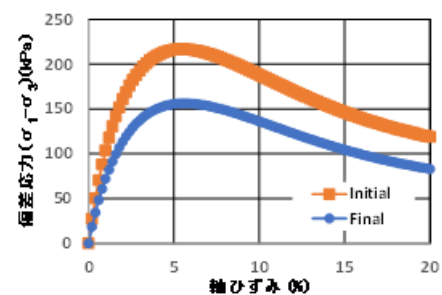


図3 解析後の要素の排水偏差応力～軸ひずみ関係

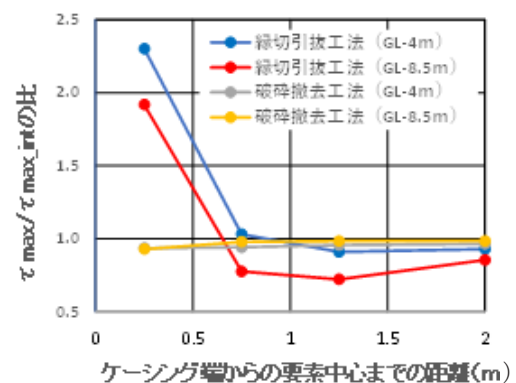


図4 せん断耐力の変化割合($\tau_{max}/\tau_{max_ini}$)とケーシング端からの距離

なお、この原稿は日本建築学会全国大会2023に発表したものをまとめたものである。

参考文献

- 1) 青木雅路, 森 利弘他: 既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響(緩み)に関する研究(その1~6), 日本建築学会学術講演梗概集, 2021
- 2) Nakai T. and Hinokio M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, **44**(2), 53-70, 2004.
- 3) 金田一広・青木雅路他: 既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響に関する研究(その15,16), 日本建築学会大会, 2023.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名 (和文) : 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

研究課題名 (英文) : Efficient Stochastic Tensor Recovery by Deep Unfolding and its Application to Image and Signal Recovery

研究者 : 宮田 高道 千葉工業大学
Takamichi Miyata 先進工学部 知能メディア工学科 教授

1. はじめに

本研究の目的は、既存のテンソル復元手法の課題である計算量・メモリ使用量コスト（計算コスト）を改善するため、確率的最適化と深層展開を組み合わせることにより、テンソル復元アルゴリズムの復元性能の向上ならびに計算コストの改善を同時に実現する手法を開発することである。このような手法により、莫大なデータ量を持つテンソルの復元処理を効率よく行うことが可能となり、劣化のあるテンソルデータからのデータ分析などの広範な分野に応用できる。

2. 研究の内容

本年度は、予定しているテンソル復元アルゴリズムの開発と、様々な現実の問題への応用とを同時に進めた。

(ア) テンソル補完に関する研究

テンソル復元の検討としては、ネットワーク上を流れる通信量データを要素とする行列（トラフィックマトリックス、以下 TM (図1)）を対象とし、ごく少数の観測データから残りのデータを補完 (図2) する手法について、既存手法の性能をさらに向上させる手法をいくつか提案し、国際会議 NoLTA2024 で発表（外部発表の[7]）するとともに、英文論文誌 Nonlinear Theory and Its Applications への投稿を行い、採録された（外部発表の[2]）。

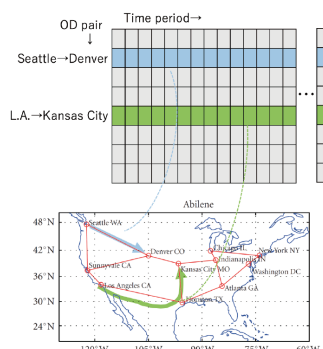


図1 トラフィックマトリックス (TM) の例

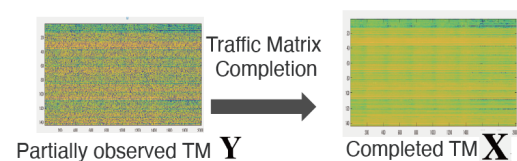


図2 TM 補完の目的

特に[2]では、TMを時間方向にスライスして積層するフォールディング操作によって構成した3階テンソルに対して、新たに提案したテンソル核ノルムマイナスフロベニウスノルム（以下、TMF）を正則化に使用した新たな復元手法を提案した。図3は、提案手法による復元性能を示している。この図の横軸はTMの欠損確率であり、縦軸は復元性能（数値が小さいほど高い復元性能を持つことを示す）である。この図からも分かるように、[2]で我々が提案した手法は、[a]を含む多くの従来手法を上回る高い復元性能を持つ。また、深層学習によるTM復元手法との比較結果を図4に示す。この図から、提案手法は機械学習を一切行っていないにもかかわらず、深層学習を用いた手法の多くと同程度あるいはそれより高い復元性能を持つことが示された。

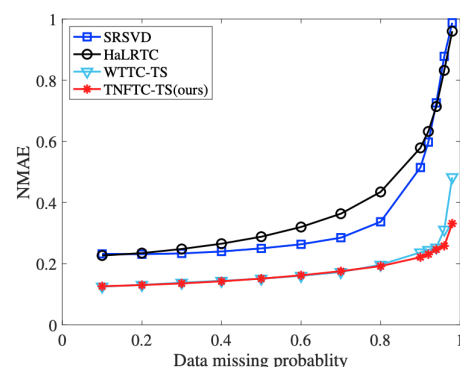


図3 提案手法の結果 (TNFTC-TSが提案手法)

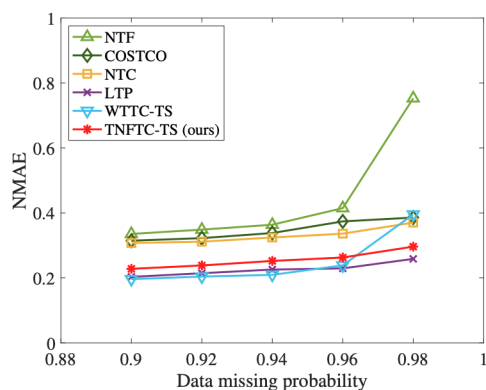


図 4 深層学習による TM 復元手法との比較

(イ) ビジョン言語モデルの応用に関する研究

本研究課題と関連する研究の一種として、ビジョン言語モデルの一種である Contrastive Language and Image Pretraining (CLIP) [b] を利用することにより、劣化した画像の知覚品質評価を行う手法に関する研究を行った。関連する研究成果は外部発表[6]および[8]であり、特に[6]は国内シンポジウムにおいてベストポスター賞を受賞するなど高く評価された。

(ウ) 画像復元を含む画像処理に関する研究

その他、観測できない欠損領域を含む単一の画像のみから、当該画像の持つ特徴を学習し、生成モデルを構築することで欠損補完を行う手法 [1]、深層学習を用いることで画像を構造-テクスチャ-ノイズの 3 成分に分離する手法 [3]、深層学習によって JPEG 圧縮された画像の知覚品質を向上させる研究[4]、カメラの撮像過程に起因するリアルノイズに模擬した形で秘密情報を画像に埋め込む画像ステガノグラフィ[5]に関する研究などを行い、得られた成果を国際会議等で活発に発表した。

3. まとめ

本年度は、テンソル復元アルゴリズムの開発と並行して、様々な分野での研究活動を行った。今後は、深層展開による確率的テンソル復元の高効率・高性能化に取り組んでいくことを計画している。

4. 本研究に関する主な外部発表

研究期間中に、雑誌論文 2 本が採録され、国際会議では 5 件の発表を行った。国内学会では多数の発表を行ったため、そのうち代表的な 1 件を掲載した。

[1] Takamichi Miyata, “PSinGAN: Single Image Inpainting by Generative Model Trained on Partial Observation,” Nonlinear Theory and Its Applications, Vol. E15-N, No. 3, 2024.

[2] Takamichi Miyata, “Traffic Matrix Completion by Weighted Tensor Nuclear Norm Minimization

and Time Slicing,” Nonlinear Theory and Its Applications, vol. E15-N, no. 2, 2024.

[3] Takamichi Miyata, “Structure-Texture-Noise Decomposition for Noisy Images with Two-Stage Network,” International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), 2024.

[4] Takamichi Miyata, Yuto Aoki, “Perceptual JPEG Artifact Removal using Sum of Weighted IQA as Loss Function,” Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS) 2024.

[5] Shinnosuke Toguchi, Takamichi Miyata, “Pseudo Real Image Noise Steganography with Image Denoising and Generative Adversarial Network,” Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS) 2024.

[6] 宮田高道, “ビジョン-言語モデルによる画像の知覚品質推定における記述的特徴の利用の一検討”, PCSJ/IMPS 2023. **[ベストポスター賞受賞]**

[7] Takamichi Miyata, “Completion of Traffic Matrix with Sequential Missing Values by Weighted Tensor Nuclear Norm Minimization,” International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA), Sep. 2023.

[8] Takamichi Miyata, “Interpretable Image Quality Assessment via CLIP with Multiple Antonym-Prompt Pairs,” IEEE International Conference on Consumer Technology (ICCE) Berlin, Aug. 2023.

5. 参考文献

- [a] T. Miyata “Completion of traffic matrix with sequential missing values by weighted tensor nuclear norm minimization,” in International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2023.
- [b] A. Radford, J. W. Kim, C. Hallacy, A. Ramesh, G. Goh, S. Agarwal, et al., “Learning transferable visual models from natural language supervision”, Proc. Int. Conf. Mach. Learn., vol. 139, pp. 8748-8763, 2021.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名(和文) : 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

研究課題名(英文) : Secondary xylem formation controlled by mitochondria in tree cambium cells

研究者 : 渡邊 宇外
WATANABE Ugai

千葉工業大学
先進工学部 生命科学科 教授

1. はじめに

ミトコンドリアは高等生物に共通に存在する細胞小器官で、呼吸反応を担い、その反応過程において生体エネルギー物質であるアデノシン三リン酸(ATP)を産生する。代謝が活発な細胞では、数百~数千個のミトコンドリアが存在する。細胞内におけるミトコンドリアの活性や存在状態などはプログラム細胞死などの細胞機能を誘導し、個体の活動に大きく影響する。また植物細胞のミトコンドリアは、アミノ酸や核酸など主要な生体物質の生合成の起点である。さらに、植物ミトコンドリアのゲノムに生じる変異や構造変化は、雄性不妊や光合成反応、伸張成長などに影響を与える。樹木はその形成層細胞の活動により二次木部を形成し、これは主要な木質バイオマス資源である木材として利用される。二次木部の形質は、木材の材質特性に強く影響する。細胞の木質化にはリグニンとよばれる物質の生合成と細胞外への輸送が必要であるが、この輸送にV-ATPaseが大きく関係すると考えられている¹⁾。V-ATPaseはそのATP分解により得られるエネルギーを用いて、物質の膜輸送を促進する。また、木質細胞の形成の一つである管状要素の形成に、ミトコンドリアが大きく関わるとされる²⁾。これらの知見から、ミトコンドリアは樹木の二次木部形成と密接に関わり、その活性レベルや寿命などが形成層活動に影響を与え、樹木の成長量や木材の材質特性に大きく反映されると考えられる。しかしこれまでのところ、これらについては具体的に明らかにされていない。

以上を踏まえ、樹木ミトコンドリアの構造や機能などが二次木部形成を制御するしくみを明らかにするため、当方では令和5年度から科学研究費補助金を獲得し(現在は学術研究助成基金助成金に移行)、研究を行っている。この研究では、具体的に次の3つの課題を設定している。

I. 二次木部細胞形成過程におけるミトコンドリアの構造と機能

II. ミトコンドリアのゲノム構造・遺伝子発現と二次木

部形成

III. 二次木部の組織構造・材質特性とミトコンドリアの関係

令和5年度については、上記IIを中心に研究を行った。これまでのところ十分な進捗は得られていないが、実施した内容について報告する。

2. 研究内容

2.1. 樹木ミトコンドリアゲノムの解析

この課題では、カラマツ(*Larix kaempferi*)およびアカエゾマツ(*Picea glehnii*)を実験試料としている。選定した個体から新葉を採取し、さらに既存の方法に従ってミトコンドリアの分画・精製を行った。続いてDNAの抽出・精製および増幅を行った後、次世代シーケンズ解析(NGS解析)により塩基配列のリードデータを得た。得られたリードデータから、GetOrganelleによりミトコンドリア由来のリードデータを抽出した。さらにProkkaにより、リードデータ内の遺伝子領域を推定した。得られたリードデータをみると、全体的にcontig長が短く、その全長も短かった。データベース上にあるゲノムデータと比較すると、今回得られた配列長さは、それらの約1/10程度であった。推定遺伝子領域の解析結果から、リボソームRNAや転移RNAについてはおおそアノテーションができたと考えられた。一方で、タンパク質遺伝子については想定される遺伝子数の約1/4程度しか同定できず、ほとんどが断片配列であった。推定遺伝子配列の大半については、その配列長さが短く、hypothetical proteinとして分類された。

これらの解析結果より、現状では葉試料から十分量のミトコンドリアゲノムDNAが回収できておらず、またDNAが断片化していると判断された。分画・精製の過程で損失・破壊されたミトコンドリアが多かったものと推測される。今後は、緩やかな細胞分画によりミトコンドリアとプラスチドの両方のゲノムDNAを抽出・精製し、ミトコンドリア由来のリードデータとプラスチド由

来のそれとを分離し、ミトコンドリアゲノム DNA の完全長配列を取得する。一方で、アノテーションにより部分的にでも特定された遺伝子配列を用いて、樹木形成層の細胞活動とミトコンドリア遺伝子の発現の関係を解析する。

2.2. 樹木細胞内の微量核酸の検出

樹木二次木部を構成する細胞は、仮道管や繊維細胞など大半が死細胞である。細胞生理活動を行っているのは、形成層帯や柔細胞など、ごく一部の組織である。これらにおいて発現する遺伝子や残存する核酸を解析することは、樹木の生理活動を分子レベルで明らかにする上で非常に重要である。これらは顕微鏡で観察することによって同定される非常に狭い組織領域であることから、これらから核酸を抽出し解析するための方法の確立が必要である。以上を踏まえて予備的な検討を目的として、レーザーマイクロダイセクション (LMD) による二次木部柔組織のサンプリングおよびデジタルPCR (dPCR) による残存 DNA の検出と定量解析を試みた。

図 1 に、LMD (LMD7000, Leica) を用いてスギ (*Cryptomeria japonica*) の放射柔組織を局所的に採取した様子を示す。この採取では、レーザーのパルス周波数を 800 Hz とした。この方法により、切片試料に大きな損傷を与えることなく、指定した領域を切断・回収することができた。続けて市販の植物 DNA 抽出キットを用いて残存する DNA を抽出・精製し、dPCR システム (QIAcuity One, Qiagen) によりプラスチド DNA の検出とその絶対定量を行った。このシステムでは、検出された DNA をマッピングにより直接見ることができ、そのコピー数をカウントすることができる (図 2)。約 7.3 mm² の放射柔組織から約 600 コピーのプラスチド DNA 断片を検出することができた。また複数者による測定

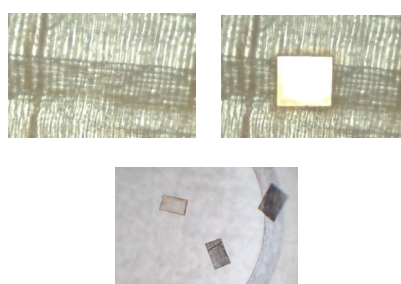


図 1. LMD による放射柔組織の局所採取。
上段左：採取前、上段右：採取後、下段：チューブ内回収組織

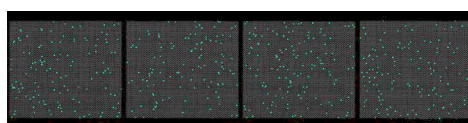


図 2. dPCR により検出された DNA のマッピングの例

結果を比較し、この方法によるコピー数測定の再現性について確認ができた。dPCR システムの検出感度の高さから、採取する組織面積をさらに小さくできると考えられ、LMD と dPCR の組み合わせにより樹木形成層帯内の発現遺伝子の検出と定量が十分に可能であると考えられる。

3. 今後の研究

葉緑体と異なり、ミトコンドリアを直接目で見て確認することが難しく、遠心分離後にどこに存在するのかを把握することが難しい。上述の通り、今後はゲノムサイズの大きい核を除き、それ以外のオルガネラゲノム DNA を確実に回収できるよう方法を検討し、ミトコンドリアゲノム DNA の配列解析を進める。比較的固い樹木組織でも LMD を利用することで局所的な組織の採取が可能であることから、これまでに凍結固定を行った形成層細胞試料を用いてミトコンドリアなどの遺伝子の発現解析を進める。

謝辞

本研究は、学術研究助成基金助成金 (課題番号：23K26972) および附属研究所令和 5 年度科研費採択者助成金 (初年度) の助成を受けて行われています。樹木試料の採取については、信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学教育研究センター (手良沢山ステーション)、および九州大学農学部附属演習林 (北海道演習林) に多くの支援をいただいています。研究室に在籍していた三小田歩未氏および小尾里穂氏には、実験において多くの協力をいただきました。この場をお借りして関係の皆様には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 津山 濯：化学と生物, 59, 59 (2021).
- 2) Yu X-H., et al.: Cell Death. Differ., 9, 189 (2002).

研究項目 : 科研費採択者助成金 (若手研究)
研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28
研究課題名 (和文) : 日本の受注産業の設備投資モデルに関する実証研究

研究課題名 (英文) : Empirical Study on the Capital Investment Model of the Order Receiving Industry in Japan

研究者 : 東 壮一郎 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

企業における設備投資は、巨額になることに加えて、長期的に資金を拘束し、設備の購入・取替の成否が企業の技術力や競争力に大きな影響を与えることから、経営の基本構造の変革を伴う戦略的意思決定のひとつとして、企業にとって重要な管理会計領域の問題とされている。設備投資は、企業の成長と安定にとって不可欠であり、その意思決定には、企業の戦略も深く関与しているものと推察される。筆者は、半導体企業の設備投資モデルおよび半導体製造装置企業の設備投資モデル (表 1) の構築により、半導体産業の状況を明らかにし、半導体製造装置企業における設備投資の意思決定の有用な方法について提示した[1] [6]。今後は半導体産業だけではなく、対象とする産業の範囲を拡張して、設備投資モデルの構築を試みる。

本稿では、半導体製造装置企業と同じく、顧客の指定する仕様に従い、製品等を受注・製造する産業である「受注産業」[4]のひとつである、幅広い業種に関連し、ものづくりに欠かすことの出来ない機械製造企業[5]における設備投資モデルの構築を、新たに試みる。

表1 半導体産業の設備投資モデル

半導体企業の設備投資モデル	
$I_{it} = b_0 + b_1 OCF_{it} + b_2 DR_{it-1} + b_3 BB_{t-1}$	
半導体製造装置企業の設備投資モデル	
$I_{it} = b_0 + b_1 OCF_{it-2} + b_2 DR_{it-2} + b_3 BB_{t-2}$	
I_{it}	: 企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期の設備投資額
OCF_{it}	: 企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期のキャッシュフロー (営業キャッシュ・フロー)
DR_{it}	: 企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期の負債比率 (負債÷自己資本)
BB_t	: <i>t</i> 期のBBレシオ (機械受注統計: 受注高÷売上高)
b_0	: 定数項、 b_1, b_2, b_3 : パラメータ

2. 研究の内容

2.1 設備投資の意思決定の現状と研究課題

企業の設備投資は、金額的に大きな設備に対する初期投資を行い、設備の稼働に伴い収益を獲得して、投資額や期待する利益の回収を図るというものである。このため投資計画の立案段階でその採算に関わる諸要素の予測を合理的に行えるよう、管理会計分野で今まで研究されてきた設備投資の意思決定は、設備投資毎にプロジェクトの収益性を分析するために、「経済性評価技法」が用いられ、その技法の精緻化や手続に関するものが多い

[2][3]。計算合理性を高めることで不確実性を除去し、その意思決定はより有効になるものと推察される。「経済性評価技法」の問題点としては、前提条件として投資に対する将来キャッシュインフローを常に見積ることができ、選択できる代替案も常に存在していることが挙げられる。

筆者の勤務先 (前職) でも技術革新を伴う設備投資については、将来キャッシュインフローを見積ること自体が難しく、仮に見積りができたとしても、その精度は極めて低いものであった。また前職では、技術革新を持続して実現するために、企業の戦略は戦略的投資決定と密接に関連しており、「経済性評価技法」による意思決定では、企業戦略とは異なる投資案件を選択してしまうことが散見された。また、設備投資に係る代替案は必ず2つ以上あるとは限らず、代替案がなければ「経済性評価技法」を用いるまでもなく、意思決定される。計算合理性を追求し精緻化された「経済性評価技法」が活用されるのは、投資決定プロセスの部分的な局面にすぎないと考えられることから、「経済性評価技法」を補完する、企業の実務に即した新たな投資決定プロセスおよび設備投資モデルの構築が必要と考えた。

2.2 機械製造企業の設備投資モデルの概要

東 [1] [6]を踏まえ、従属変数を設備投資額、独立変数をキャッシュフロー (営業キャッシュ・フロー)、負債比率およびBBレシオとする機械製造企業の設備投資モデルの構築を試みる。今回新たな独立変数として、「自己資本比率」の有用性についても検討を行う。

独立変数のひとつである「負債比率」は、企業の自己資本に対する負債 (他人資本) の割合を示す値のため、安全性の観点からは、この数値が低いほど安全性は高いといえる。一方、「自己資本比率」は企業の総資産に対する自己資本の割合を示す値のため、安全性の観点からは、この数値が高いほど安全性は高いといえる。

「自己資本比率」は、有価証券報告書のうち、第一部第1企業の概況 主要な経営指標等の推移に、決算短信および四半期決算短信のうち、1. 連結業績 (2) 連結財政状態に掲載されているため、当該比率の算定結果は開示されており、外部利害関係者にとっては、連結財務諸表より別途算定する必要のある「負債比率」に比べ

て、容易に入手しやすいという特徴もある。

分析対象会社の「負債比率」と「自己資本比率」の相関分析を行った結果、全ての業種分類において、かなり強い負の相関があることがわかる。このため、独立変数に「負債比率」と「自己資本比率」を同時に選択すると、独立変数間の多重共線性の影響があるため、独立変数に負債比率を用いるモデルAと自己資本比率を用いるモデルBを並立させて、重回帰モデル（線形回帰）による数量的分析を実施する（表2）。

2.3 機械製造企業の設備投資モデル

モデルA（独立変数：負債比率）およびモデルB（独立変数：自己資本比率）の重回帰分析の結果から、機械製造企業の設備投資に係る重回帰モデル（表2）と同様に、3つの独立変数（営業キャッシュ・フロー、負債比率または自己資本比率、BB レシオ）が全て組み込まれた設備投資モデルのうち、東証業種中分類：機械（123社）については、最も高い自由度調整済決定係数を選択した結果、モデルAでは、3つの独立変数のうち負債比率が除外され、モデルBでは、3つの独立変数の全てが選定されている。記述統計量のうち、負債比率と自己資本比率の標準偏差を比較すると、自己資本比率の標準偏差の方が、平均に対する数値の散らばり具合はかなり小さいことから、東証業種中分類：機械（123社）において、モデルBの自己資本比率が選定された一因として推察される。

このため本稿では、モデルBのうち、機械製造企業の設備投資に係る重回帰モデル（表2）と同様に、3つの独立変数（営業キャッシュ・フロー、自己資本比率、BB レシオ）全てが組み込まれた東証業種中分類：機械（123社）の業種分類を、機械製造企業の設備投資モデルとして選定する。

表2 機械製造企業の設備投資に係る重回帰モデル

機械製造企業の設備投資に係る重回帰モデル	
モデルA（独立変数：負債比率）	
$I_{it} = b_0 + b_1OCF_{it} + b_2DR_{it} + b_3BB_t$	
I_{it}	企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期の設備投資額
OCF_{it}	企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期のキャッシュフロー（営業キャッシュ・フロー）
DR_{it}	企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期の 負債比率 （負債÷自己資本）
BB_t	<i>t</i> 期のBBレシオ（機械受注統計：受注高÷売上高）
b_0	定数項、 b_1 、 b_2 、 b_3 ：パラメータ
モデルB（独立変数：自己資本比率）	
$I_{it} = b_0 + b_1OCF_{it} + b_2CAR_{it} + b_3BB_t$	
I_{it}	企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期の設備投資額
OCF_{it}	企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期のキャッシュフロー（営業キャッシュ・フロー）
CAR_{it}	企業 <i>i</i> の <i>t</i> 期の 自己資本比率 （自己資本÷負債純資産合計）
BB_t	<i>t</i> 期のBBレシオ（機械受注統計：受注高÷売上高）
b_0	定数項、 b_1 、 b_2 、 b_3 ：パラメータ

3. まとめ

本稿では、「受注産業」[4]のうち機械製造企業[5]に限定して、半導体製造装置企業の設備投資モデル（表1）と同様に、機械製造企業の設備投資に係る重回帰モデル（表2）の構築を試みた。この結果、以下を明らかにし

たことが、本稿の貢献としてあげれる。

独立変数に「負債比率」を用いるモデルAと「自己資本比率」を用いるモデルBを並立させて、各独立変数にタイムラグ（△1年および△2年）を設定し、重回帰分析を行うことにより、東証業種中分類：機械（123社）において、「自己資本比率」を独立変数として選定した機械製造企業の設備投資モデル（独立変数：営業キャッシュ・フロー・自己資本比率・BB レシオ）を構築できることを明らかにした。さらに、独立変数に「自己資本比率」を選定することにより、「負債比率」を選定した設備投資モデルに比べて、自由度調整済決定係数は高くなり、設備投資モデルの予測精度は向上する傾向を示唆した。

今後は、分析対象を日本の「受注産業」[4]に拡張して、独立変数に営業キャッシュ・フロー・BB レシオ・自己資本比率を選択した設備投資モデルの構築し、他業種でも利用できるように一般化を図り、企業実務における設備投資の意思決定方法のひとつとして提示したい。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 東壮一郎：「機械製造業におけるBB レシオに関する一考察」、生産管理、28(2)、pp.75-80 (2021)。
- (2) 東壮一郎：「日本の機械製造企業の設備投資モデルに関する実証研究」、生産管理、30(2)、pp.29-39 (2023)。

参考文献

- [1] Higashi, Soichiro.: “Strategic Investment Decision Processes in Semiconductor Production Equipment Companies,” Management Control Systems for Strategy Changes: Applying to Open Business and Innovations, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Japanese Management and International Studies, 17, pp.165-178 (2020)。
- [2] 篠田朝也：「資本予算実務の課題—管理会計の拡張と資本予算実務—」、管理会計学、26(2)、pp.63-75 (2018)。
- [3] 清水信匡・加登豊・梶原武久・坂口順也：「資本予算」『管理会計研究のフロンティア』中央経済社 (2010)。
- [4] 新日本有限責任監査法人：『受注産業の会計実務Q&A』、中央経済社 (2013)。
- [5] トーマツ マニユファクチャリング インダストリーグループ：『Q&A 業種別会計実務・5 機械製造』、中央経済社 (2013)。
- [6] 東壮一郎：「半導体製造装置企業における設備投資意思決定プロセスの考察」、管理会計学、27(1)、pp.3-18 (2019)。

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2023/4/3 ~ 2024/2/28

研究課題名 (和文) : 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

研究課題名 (英文) : Elucidation of the pathogenesis of sarcopenia by exosomes related to intercellular communication

研究者 : 〇川西 範明

KAWANISHI NORIAKI

千葉工業大学

先進工学部 教育センター 教授

1. 緒言

加齢は諸臓器の機能低下を生じさせることで、様々な疾患の発症リスクを増大させる。特に高齢者においては不活動や低栄養も寄与することにより骨格筋量が低下する加齢性筋肉減弱症“サルコペニア”と呼ばれる症候群も発症する危険が高くなり、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や運動による予防・改善の分子機構を解明することは国民の健康寿命の延伸を目指したサルコペニアの予防・治療法の技術開発に重要と言える。

骨格筋にはサテライト細胞と呼ばれる筋幹細胞が存在しており、損傷したとしても修復・再生する。重要な点として、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おり、怪我などによる筋損傷からの修復・再生の機能が障害されることがサルコペニア発症の要因との一つとして考えられている。しかしながら、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。

マクロファージや好中球などの免疫細胞はサイトカインなどの液性因子を分泌することにより、局在する組織の慢性炎症を生じさせるのみならず、各組織の主要な機能を担う実質細胞の細胞死や機能低下を引き起こすことで組織の機能障害を生じさせることが知られている。近年にはサイトカインに関連する遺伝子改変動物を用いて筋機能を制御する因子の同定が進められてきた。しかし、これらの液性因子のみではサルコペニアの分子機構の全容を解明するには至らず、マイオカイン以外の何らかのサルコペニア制御因子の存在が示唆される。

近年、エクソソームと呼ばれる顆粒状の物質が様々な生理作用を有することが明らかにされてきた。エクソソームは様々な細胞から分泌される細胞外小胞であり、表面には細胞膜由来のタンパク質や脂質を含み、内部にはマイクロ RNA や mRNA、タンパク質などを含むことが知られている。エクソソームは傍分泌 (パラクリン) として近接する細胞に取り込まれることにより、分泌組織内で様々な作用を発揮する。重要な点として、エクソソ-

ムには表面に発現する分子や含有するマイクロ RNA やタンパク質などの違いにより数多くのサブタイプが存在しているが、細胞の種類あるいは細胞の活性化状態の違いにより、作用の異なる種々のサブタイプのエクソソームが分泌され生体諸機能に異なる影響を及ぼすことが明らかにされてきた。

骨格筋には、実質細胞である筋細胞やサテライト細胞以外にもマクロファージや好中球、T 細胞などの免疫細胞が局在しており、これらの免疫細胞から分泌されるエクソソームがパラクリンとして作用することで、「骨格筋細胞-免疫細胞の細胞間コミュニケーション」を制御する因子として重要な役割を担うことが想定される。

従来の研究では、骨格筋量を制御する仕組みとしてサイトカインなどの液性因子の役割が議論されてきたが、今後は免疫細胞由来の分泌エクソソームを介した骨格筋組織内での細胞間コミュニケーションに着目してサルコペニア発症の分子機構を解明するための研究が必要である。そこで、本研究ではサルコペニアの発症や運動による予防効果の分子機構について、免疫細胞由来の分泌エクソソームによる細胞間コミュニケーションの役割に着眼して検証することを目的とする。

2. 研究結果

(1) 加齢による骨格筋由来の分泌エクソソームの miRNA の発現プロファイルの変化

3 カ月齢の若齢マウスおよび 27 カ月齢の高齢マウスから摘出した骨格筋 (腓腹筋) を 24 時間培養して、培養液を精製した。骨格筋培養液中に含まれるエクソソームはポリマー沈殿法を用いて回収した。エクソソームに含まれる RNA を抽出した後、小分子 RNA のシーケンス用ライブラリを作製した。マイクロ RNA の発現量を対象として次世代シーケンサーを用いて網羅的に解析した。その結果として、加齢マウスと若齢マウスの骨格筋由来の分泌エクソソームに含まれるマイクロ RNA の発現プロファイルが著しく変動することを見出した (図 1)。また、mRNA の網羅的な発現差異解析を実施して、加齢

マウスと若齢マウスでは370種類のmRNA発現量に違いがあることを見出した(図2)。

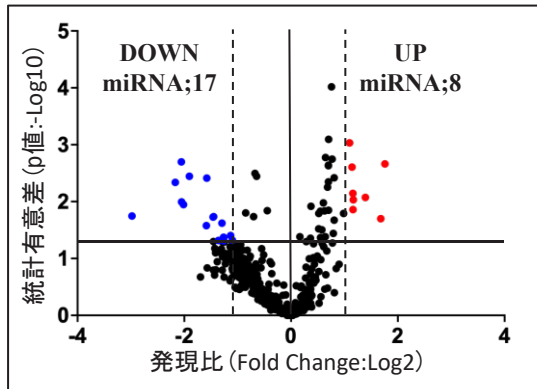


図 1. 加齢による骨格筋由来の分泌エクソソームの microRNA の発現プロファイルの変動

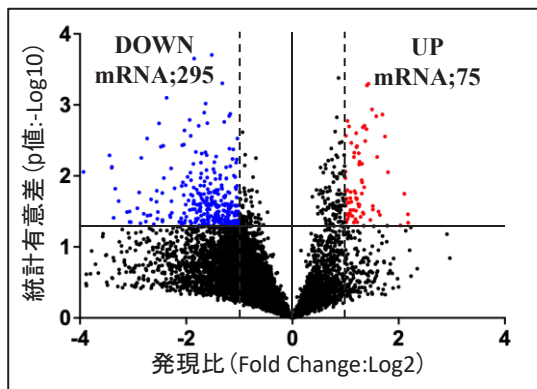


図 2. 加齢による骨格筋由来の分泌エクソソームの mRNA の発現プロファイルの変動

(2) 不活動による骨格筋由来の分泌エクソソームの miRNA の発現プロファイルの変化

マウスに下腿のギプス固定による不活動負荷を14日間行った。ギプス固定負荷マウスおよび対照マウスから摘出した骨格筋を24時間培養して、培養液中に分泌されるエクソソームを精製した。エクソソームに含まれるRNAを抽出した後、マイクロRNAの発現量を対象として次世代シーケンサーを用いて網羅的に解析した。その結果、不活動群と対照群での30種類のマイクロRNA発現量に違いがあることを見出した(図3)。

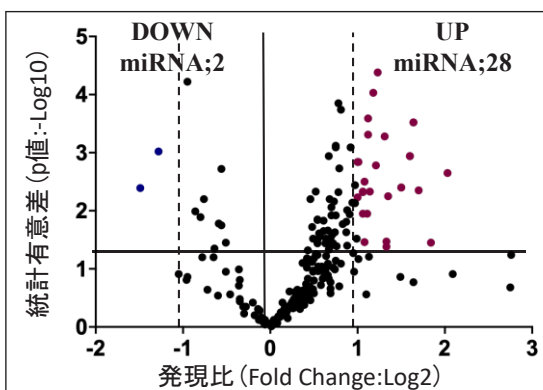


図 3. 不活動による骨格筋由来の分泌エクソソームの microRNA の発現プロファイルの変動

不活動群の骨格筋由来エクソソームでは28種類のマイクロRNAが増加、2種類のマイクロRNAが減少した。加えて、不活動群で増加したmiRNAに対するKEGGパスウェイ解析により、Adherens junctionやHippo signaling pathwayなどの代謝経路に影響を及ぼすことが示された(図4)。

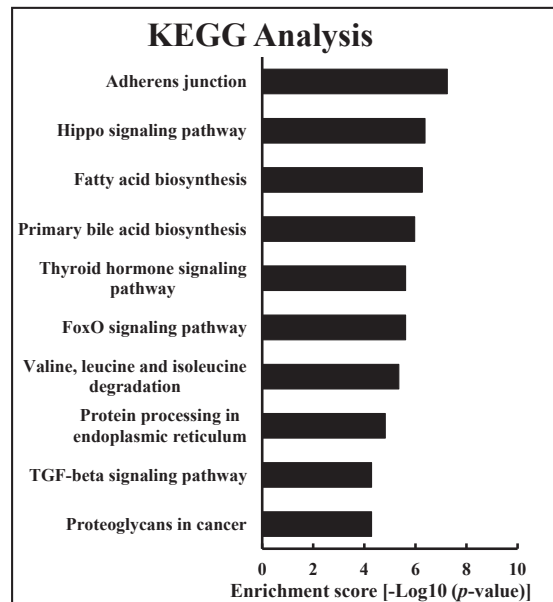


図 4 不活動により増加した骨格筋由来エクソソームの microRNA の KEGG 解析

さらに、不活動モデルマウスの骨格筋から酵素分散法により単核細胞を単離して、磁気分離法によりマクロファージなどの免疫細胞を回収した。免疫細胞を24時間培養した後、培養液中に分泌されるエクソソームを回収して、ナノ粒子トラッキング解析により粒子径を評価した。現在は、免疫細胞由来の分泌エクソソームに含まれるRNAの網羅的な発現解析を行っている。

本研究に関連する学会発表

- (1) 川西範明、町田修一、鈴木克彦、ギプス固定による骨格筋由来の分泌エクソソームのmiRNA発現プロファイルの変化 第78回日本体力医学会、2024年9月2日-4日。

〔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)	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
3	基盤研究(B)	枚田 明彦	異種誘電体層の電磁結合によるテラヘルツ波透過性制御とシートLAN通信への応用
4	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
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)	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
7	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
8	基盤研究(C)	喜多村正仁	提携影響力を考慮した複合的コンフリクト分析方法の開発
9	基盤研究(C)	坂本 泰一	繊維芽細胞増殖因子 FGF5 と受容体の相互作用およびアプタマーの阻害機序の解明
10	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
11	基盤研究(C)	木村 博子	省略構文の考察に基づく、焦点に関する言語間差異の解明と焦点理論の再構築
12	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
13	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
14	基盤研究(C)	高木 彩	情報分野の萌芽技術に対する認知と受容過程
15	基盤研究(C)	青木 岳史	長期間の調査・監視を目的としたクモヒトデ型水底移動体の開発
16	基盤研究(C)	魏 秀欽	負荷非依存モードを活用した一送電多受電高周波ワイヤレス給電システムの開発
17	基盤研究(C)	佐波 孝彦	IQ 結合ファクターグラフを導入した疎符号多元接続とその応用
18	基盤研究(C)	和田 豊	亜酸化窒素の連鎖的自己発熱分解反応開始メカニズムの解明による事故防止技術の提案
19	基盤研究(C)	松田 泰明	超広域温度帯で作動する新規プロトン固体電解質の創成と結晶構造の解明
20	基盤研究(C)	引原 有輝	児童の社会情動的スキルの形成をねらいとした発育・発達支援方略の提案
21	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
22	基盤研究(C)	菅原 真司	P2P 端末による動的 Fog を用いた仮想的三層構造コンテンツ共有システムの開発
23	基盤研究(C)	松島 大	山脈に挟まれた谷でダストストームが頻発する条件の推定
24	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
25	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
26	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
27	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
28	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
29	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
30	基盤研究(C)	熱海 武憲	機構・制御系統統合化設計の高度化と次世代HDDへの応用
31	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
32	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
33	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
34	基盤研究(C)	荻木 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
35	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？
36	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
37	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
38	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
39	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
40	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
41	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
42	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
43	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
44	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
45	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
46	基盤研究(C)	原口 亮介	フッ素とカチオンのハイブリット骨格を基盤とする二酸化炭素固定化有機触媒の開発
47	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
48	基盤研究(C)	齊藤 史哲	説明可能な人工知能による顧客の意思決定支援システムの内部状態空間の可視化
49	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
50	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
51	挑戦的研究(萌芽)	有本 泰子	Speech-laugh の発生機序の解明
52	若手研究	富山 豊	現代論理学に基づくフットサル数学論の再構築
53	若手研究	藤井 浩光	土木・建設現場の無人化のための複数建機の協調による遠隔作業システム
54	若手研究	福嶋 尚子	学校財務経営の法社会学的分析
55	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
56	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

57	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
58	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
59	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
60	研究活動スタート支援	菅根 海人	ポリカプロラクトンネットワークの海洋生分解における架橋密度の影響の調査
61	研究活動スタート支援	重 歩美	高等学校在学時に出産した生徒への支援のあり方についての研究
62	研究活動スタート支援	高松 佑介	19 世紀の緩徐楽章における「変奏反復」
63	研究活動スタート支援	中村 達	カリブ文学における雑種性の根源としての「遭遇」の偶然性の観点からの分析
64	研究活動スタート支援	青木 友希	CUD 教育ツールの開発に関する研究
65	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
66	ひらめき☆ときめきサイエンス	工藤 翔慈	なぜ変わる？実験して納得！作り方で変えられる結晶の大きさと形
67	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ミ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 2024年
Vol.21

令和6年12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