

千葉工業大学

プロジェクト研究年報

2020年

千葉工業大学
プロジェクト研究年報
2020年度

〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅰ）〕

リチウム含有アルミニウム合金に関する研究	永井 崇 …………… 1
パワー半導体デバイスの実動作下でのナノスケール評価と故障解析への応用	佐藤 宣夫 …………… 3

〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）〕

インフルエンザウイルス薬剤耐性化の分子機構についての理論的研究	山本 典史 …………… 5
希土類永久磁石材料の研究開発	齋藤 哲治 …………… 7
児童の主体性を主眼とした地域コミュニティ活動は健全育成に寄与するか ー1年間の追跡調査からー	引原 有輝 …………… 9

〔若手教員研究支援助成金〕

太陽熱を利用する蒸留システムのための機能性表面の開発	亀谷 雄樹 …………… 11
強度可変酸化剤旋回流型ハイブリッドロケットエンジンの局所後退速度測定に向けた基礎研究	和田 豊 …………… 13
制御システムを不要とする高周波高効率ワイヤレス給電システムの開発	魏 秀欽 …………… 15
イリジウム-アルミニウムハイブリッド触媒の創製と医薬品合成研究への応用	原口 亮介 …………… 17
ベイジアンネットワーク分析と加重平均法を用いたプログラム事業支援基盤の研究開発	田隈 広紀 …………… 19

〔科研費採択者助成金〕

デジタル画像相関法を用いた有限要素解析モデルのデータ同化に関する研究	秋田 剛 …………… 21
AFM スクラッチ加工による研磨加工特性評価	松井 伸介 …………… 23
ホットスポットと量子効果の増強を起源とする新原理磁気物質：センサ材料の新開発	安川 雪子 …………… 25
複数カメラを用いた可視光通信システムの高度化	木下 雅之 …………… 27
ミトコンドリアゲノムから探る樹木の形成層活動と二次木部形成	渡邊 宇外 …………… 29
コネクションストモデルを用いた消費者語彙における感性情報の抽出と共感構築	齊藤 史哲 …………… 31
確率的非分解型テンソル復元とその画像・信号処理への応用	宮田 高道 …………… 33
ヒトは水中環境で自身の身体動作をどの程度再現できるのか？単関節動作による検討	金田 晃一 …………… 35
ワークライフバランス支援のための技術・技能・健康のコミュニケーションデザイン	滝 聖子 …………… 37

目次

2020年千葉工業大学附属研究所 プロジェクト研究年報

タイおよびベトナムにおける現地採用人材のワークモチベーションに関する研究	鴻巣 努	39
マルチペリメータラインに基づく多層防御セキュリティシステムの研究開発	谷本 茂明	41

〔私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:エネルギー・航空運輸機器の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系の構築〕

CrMoV 鍛鋼の多軸応力下におけるクリープボイド成長シミュレーション手法の開発	緒方 隆志	43
直径 1mm の丸棒引張型ミニチュア試験片を用いたボイラ溶接部のクリープ強度評価法	緒方 隆志	45
金属クリープ変形挙動の解明に向けた原子スケール解析	原 祥太郎	47
電子顕微鏡その場観察のための計測要素技術の開発	菅 洋志	49
耐熱金属材料 CrMoV 鋼における疲労強度と加工面性状との関係	瀧野日出雄	51
回転式攪拌装置の流体力学的荷重と疲労強度評価	仁志 和彦	53
炭素繊維強化プラスチックの損傷評価	鈴木 浩治	55
炭素繊維複合材料の光ヘルスマonitoring方法の開発	長瀬 亮	57
画像計測を用いたデータ同化によるシステム同定技術の構築	秋田 剛	59

〔科学研究費助成事業〕

拡張可能な学習支援システムのための分散マルチプラットフォームアーキテクチャの研究	仲林 清	61
--	------	----

〔科学研究費助成事業一覧〕	63
---------------	----

〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅰ）〕



研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (I)
研究期間 : 2018/6/25 ~ 2020/2/29
研究課題名 (和文) : リチウム含有アルミニウム合金に関する研究

研究課題名 (英文) : Study of Aluminum Alloys Containing Lithium

研究者 : O永井 崇 千葉工業大学
NAGAI Takashi 工学部 先端材料工学科 准教授

小澤 俊平 千葉工業大学
OZAWA Shumpei 工学部 先端材料工学科 教授

1. はじめに

Al-Li 合金は、航空機構造材料として開発が進められた。アルミニウム(Al)にリチウム(Li)を添加すると密度が低下し、弾性率が向上する。そのため、航空機などに適用することで軽量化が図れる。実用合金は Al-Cu-Mg 合金に Li を添加して製造されることが多いため、多くの Al-Li 合金が Li の他にマグネシウム(Mg)も含んでいる。Al-Li 合金の航空機への適用例としては、エアバス社の A380 型機や A350 型機、ボーイング社の B787 型機、ボンバルディア社の C-Series などがある。また、多くの航空機メーカーで Al-Li 合金の新規または更なる適用が検討されている。そのため、今後 Al-Li 合金のスクラップが急激に増加することが予想される。

しかしながら、Al のリサイクルにおいては Li や Mg の混入が問題となる。リサイクル材に Li が僅かでも混入すると、製品の機械的性質に悪影響を与えるため全て不良となる。また、Li が炉内の耐火物を侵食し、設備にダメージを与える。そのため、リサイクル時には Li を取り除く必要があるが、現在は有効なリサイクルプロセスが確立されていない¹⁾。Mg が混入した場合は、二次製品の規格に応じて除去する必要がある。現在、脱 Mg には塩化処理法が効果的とされているが、塩素ガスを使用するため人体に極めて有害である。また、塩素ガスが炉内の水蒸気と反応してできる HCl ガスは、ダイオキシン発生の原因物質となるため環境への悪影響も大きい。近年、Al スクラップ中の Mg 含有量が増加傾向にあるため、益々除去プロセス改善の必要性が高まっている²⁾。こうした背景から、Al 合金から Li および Mg を効果的に除去できる方法の開発が強く求められている。そこで、本研究では Al 合金からの Li および Mg の効果的な除去方法開発を目的とした。

2. 研究の内容

図 1 に Al, Li および Mg の純金属の平衡蒸気圧の計算結果を示す。Li や Mg の蒸気圧は Al の蒸気圧に比べて非常に高い値となっている。そのため、Al 合金を加熱・保持した場合、Li および Mg が優先的に気化することが示唆される。1073 K における Al 合金中の Li および Mg の蒸気圧を計算したところ、Li が 4.95 Pa、Mg が 17.6 Pa となった。この温度における Al の蒸気圧はおおむね 1.15×10^{-4} Pa であり、Li および Mg の蒸気圧と大きな差があることから、蒸気圧差を利用した分離が可能だと考えた。活性の高い Li や Mg を大気中で加熱した場合、酸素や窒素、水分などと激しく反応し、爆発の危険性もある。真空中で加熱する場合は、試料と大気成分や水分との接触を避けることができる。また、真空中では揮発成分の蒸発に必要な蒸気圧が低下する³⁾ため、低い温度で除去することができる。そこで、本研究では真空雰囲気中で Al 合金を加熱・保持し、Li および Mg を蒸発させて除去を行う、真空精錬を採用した。

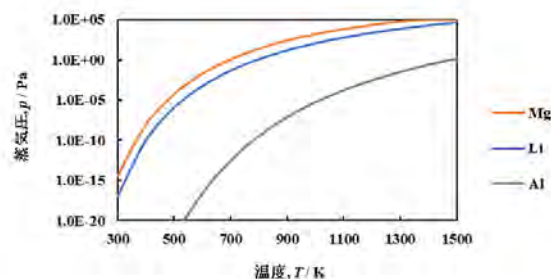


図1 Al, Li および Mg の平衡蒸気圧。

試料には Li および Mg を含有する Al-Li 合金(株式会社ニラコ、品番 514220)を用いた。これを約 1 g となるように切断し、黒鉛の台にのせ、SS400 製の円柱状の坩堝に入れて密閉した。坩堝には高さ 10~16 cm のものを用意した。これを真空炉に設置し、真空引きした後、精錬を行った。精錬条件は、精錬

温度 923~1123 K, 精錬時間 1~6 h とした。精錬後は試料表面を研磨した後、濃塩酸で全量溶解した。溶解後の溶液を ICP-OES で分析して、Li および Mg の濃度を測定した。得られた濃度から精錬後試料の Li および Mg の含有率 C を求め、除去率を算出した。

坩堝の高さと除去率の関係を調査するため、坩堝の高さを 10~16 cm に変更して精錬を行った。精錬条件は精錬温度 1023 K, 精錬時間 1 h とした。実験結果を図 2 に示す。Li の除去率は、坩堝の高さと除去率の間に明確な関係は見られなかった。Mg の除去率は、坩堝高 10~14 cm にかけては坩堝高にほぼ比例して上昇した。坩堝高 14~16 cm ではわずかに上昇した。次に、それぞれの坩堝の内部上面位置における、精錬中の温度変化を測定した。その結果、坩堝高が低いほど坩堝上部の温度が高く、坩堝高が高くなるにつれて上部の温度が低くなっていった。これは、発熱体が坩堝底面から約 10 cm の高さまでしかない真空炉の構造上、妥当な結果だといえる。温度測定の結果と除去率を対応させると、坩堝上部の温度が高いほど Mg 除去率が低く、坩堝上部の温度が低いほど Mg 除去率が高いという結果となった。試料中の Mg を蒸発させて低減するためには、坩堝内部の Mg 分圧を低く保つ必要がある。Mg が蒸発し、坩堝上部に付着すると、ここでも蒸発が起こる。この時、坩堝上部の温度が低いと、上部における蒸発を抑制することができる。これが坩堝内部の Mg 分圧低減に寄与したため、坩堝の上部温度が低いほど Mg 除去率が高いという結果につながったと考えられる。このことから、Mg の除去率向上には Mg ガスの凝集部分の温度を低く保つことが重要だと考えられる。

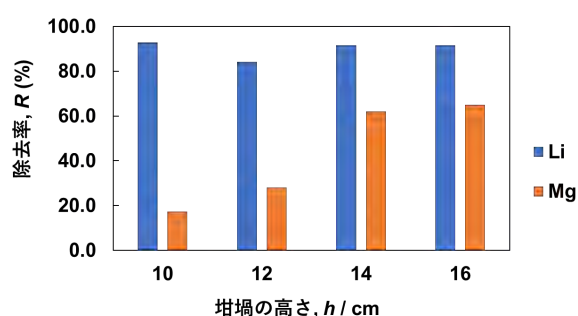


図 2 坩堝の高さと除去率の関係。

精錬温度および精錬時間と除去率の関係を調査するため、精錬温度を 943~1123 K, 精錬時間を 1~6 h に変更して精錬を行った。坩堝には高さ 14 cm のものを使用した。精錬時間 6 h における精錬温度と除去率の関係を図 3 に示す。実験の結果、精錬温度の範囲(973~1123 K)では、精錬時間を 6 h にすることで Li, Mg 共に 9 割以上除去できることがわかった。除去率は最大で、Li が 97.9%, Mg が 98.0% となった。

実験から得られた知見をもとに、以下の工程からなる Al 合金の新規リサイクルプロセスを考案した。

- ① Li の混入が疑われる Al スクラップを回収する。
- ② 真空炉に Al スクラップを投入し、真空雰囲気中で加熱・保持して Li および Mg を蒸発させて除去する。
- ③ Li および Mg のガスは融点の違いを利用して分離し、それぞれを金属状態で回収する。

精製の済んだ Al は既存のリサイクル設備に送りリサイクル可能だと考えられる。

3. まとめ

本研究では、Al 合金からの Li および Mg の効率的な除去方法の開発を目的とした。除去方法としては、真空中で Al 合金を加熱・保持し、Li や Mg を優先的に気化させることを考えた。実験の結果、除去率の向上には精錬容器内の揮発成分の分圧を低く保つことが効果的だと考えられること、精錬条件を適切に設定することで 100% 近く Li および Mg を除去できることなどが分かった。また、Al 合金の新規リサイクルプロセスを考案した。このプロセスは、①スクラップの回収工程、②真空精錬による Al の精製、Li および Mg の分離・回収工程からなる。このプロセスでは、これまで困難とされていた Li を含む Al スクラップのリサイクルが可能になるだけでなく、有価な Li および Mg を分離し、金属状態で回収することができると考えられる。

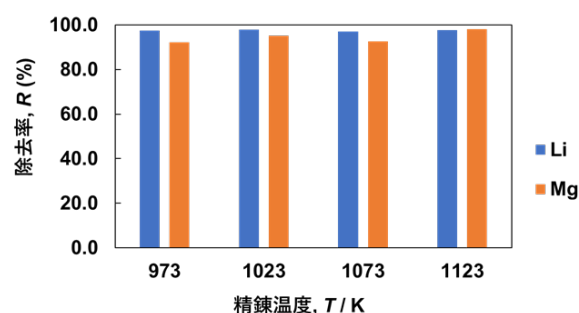


図 3 精錬時間 6 h における精錬温度と除去率の関係。

発表実績

Takaya Iwano and Shumpei Ozawa, “High temperature measurement of surface tension of liquid aluminum by electromagnetic levitation”, The 12th International Workshop on Subsecond Thermophysics (IWSSTP 2019), 2019 年, ケルン

小林悠人, 瀧口瑛介, 永井崇; “アルミニウム合金からの Li 除去”, 資源・素材学会 秋季大会, 2019, 福岡。

参考文献

- 1) 小島陽: Al-Li 系合金, 軽金属, 第 39 巻(1989). 他
- 2) 橋口智和, 末吉秀一: アルミニウムスクラップ溶湯からのマグネシウムの除去に及ぼすシラスの添加方法の影響, 軽金属, 第 59 巻(2009). 他
- 3) 阿座上竹四, 栗倉泰弘: 金属化学入門シリーズ 金属製錬工学, (日本金属学会, 1999). 他

研究項目：先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅰ）

研究期間：2018/6/25 ～ 2020/2/29

研究課題名（和文）：パワー半導体デバイスの実動作下でのナノスケール評価と故障解析への応用

研究課題名（英文）：Nanoscale evaluation and failure analysis of power semiconductor devices under actual operation

研究者：○佐藤 宣夫

SATO Nobuo

山本 秀和

YAMAMOTO Hidekazu

小田 昭紀

ODA Akinori

清水 邦康

SHIMIZU Kuniyasu

千葉工業大学

工学部 機械電子創成工学科 教授

千葉工業大学

工学部 電気電子工学科 教授

千葉工業大学

工学部 電気電子工学科 教授

千葉工業大学

工学部 情報通信システム工学科 教授

1. はじめに

半導体デバイスの稠密度が向上し、集積回路の発展が今日の情報技術(IT) 社会を支えている。半導体微細加工技術の展開の1つであるパワーエレクトロニクス分野では、デバイスの多並列化により大電流容量化が達成されている。但し、既存の Si 半導体による耐圧性能と低オン抵抗性能は、デバイス構造上のトレードオフの関係にあり、両立は容易ではない。一方で、物性的にトレードオフ特性の向上が可能であるシリコンカーバイド (SiC) やガリウムナイトライド (GaN) 等のワイドバンドギャップ半導体材料を用いたデバイス開発が活発となっている[1]。

電化製品内の電源回路の故障は特に回避すべきである。そのため、回路を構成する素子寿命の精査が重要となる。回路構成素子には、受動素子の抵抗/コイル/コンデンサ、さらに能動素子のダイオードやトランジスタなどの半導体デバイスがあり、最も脆弱な素子は、能動素子の半導体デバイスである。パワー半導体デバイスは、その内部の電位状態に基づいた動作として、整流作用やスイッチング作用を担うが、過電圧破壊（サージ電圧の発生および電界集中による絶縁破壊）や熱破壊（大電流通電に基づく過熱）によって、故障や破損に至ってしまう場合がある。

性能要求を充足し、故障を回避するように、パワー半導体デバイスは設計・製造される。しかし電源回路内では、寄生インピーダンス（配線が有するインダクタンス、配線同士の鎖交、配線数に応じたキャパシタンス）に起因した共振現象が現れる。そのような共振現象によるサージ電圧により、絶縁破壊電界を超える箇所がデバイス内に存在し故障に至る。そのため、電圧印加によるデバイス実動作状態時のナノスケール観測により、パワー半導体デバイス内部の電界集中箇所を、実空間において明らかにできる、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) に期待が寄せられる[2]。

絶縁破壊というデバイス内部事象は、瞬時的あるいは漸次的なのか、解明されていない。このことは、半導体デバイスの動作理論限界、さらには故障という技術的や産業的な課題に留まらず、学術としての根源的な「問い」の1つである物理現象としての故障メカニズムの解明に繋がる。

2. 研究の内容

パワー半導体デバイスは、ワイドバンドギャップ半導体材料の有する材料物性としての優位性に基づく高耐圧化のほか、微細加工による多並列化、多層配線構造化、大規模化、高速化、複合化へと発展しているが、それらは一方でデバイス動作や故障の評価・解析を困難にする要因ともなっている。そのため、特にパワー半導体デバイスの動作を可視化するためには、高い空間分解能と高い検出感度の両立が求められることになる。

電源回路内で最も脆弱な素子がパワー半導体デバイスである。そのため、必要な電圧を印加によって実動作しているパワー半導体デバイスの実空間でのナノスケール観測のほか、インピーダンス評価と電流通電経路を可視化できる複合装置の開発により、パワー半導体デバイスの理論的動作限界、それに付随する故障・不良解析に関する技術の確立を目的とする。

具体的に我々は、着目すべき半導体デバイス内部のナノスケールの同一領域において、表面形状 (AFM; Atomic Force Microscopy) / 表面電位 (KFM; Kelvin probe Force Microscopy) / 微分容量 (SCFM; Scanning Capacitance Force Microscopy) を同時にマッピングする多機能走査型プローブ顕微鏡を開発した (図1 参照)。

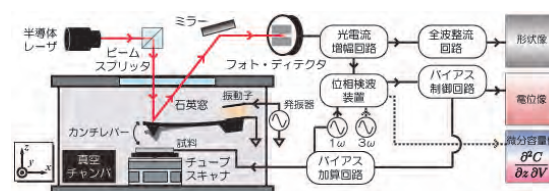


図1. ナノスケール評価装置の構成模式図。

半導体デバイスの動作において重要となる空乏層幅については、静電容量の計測によって解析されるのが一般的である。その際、我々が採用した手法では、特別なナノスケール観測のための治具を必要とせず、電圧および距離の変調成分から算出する手法を採用している。

図2において、観測対象とした市販の半導体デバイスの断面構造模式図と本装置による観測結果例を示す。それぞれ、(a) Si 製の深溝堀型 (別名：スーパージャンクション構造) MOSFET, (b) SiC 製プレーナ型 MOSFET, (c) SiC 製トレンチ型 MOSFET である。それらの観測結果において、特徴的な構造が確認されており、一方でここでの観測範囲が 50 μm 領域, 30 μm 領域, および 10 μm 領域と異なっていることに留意されたい。

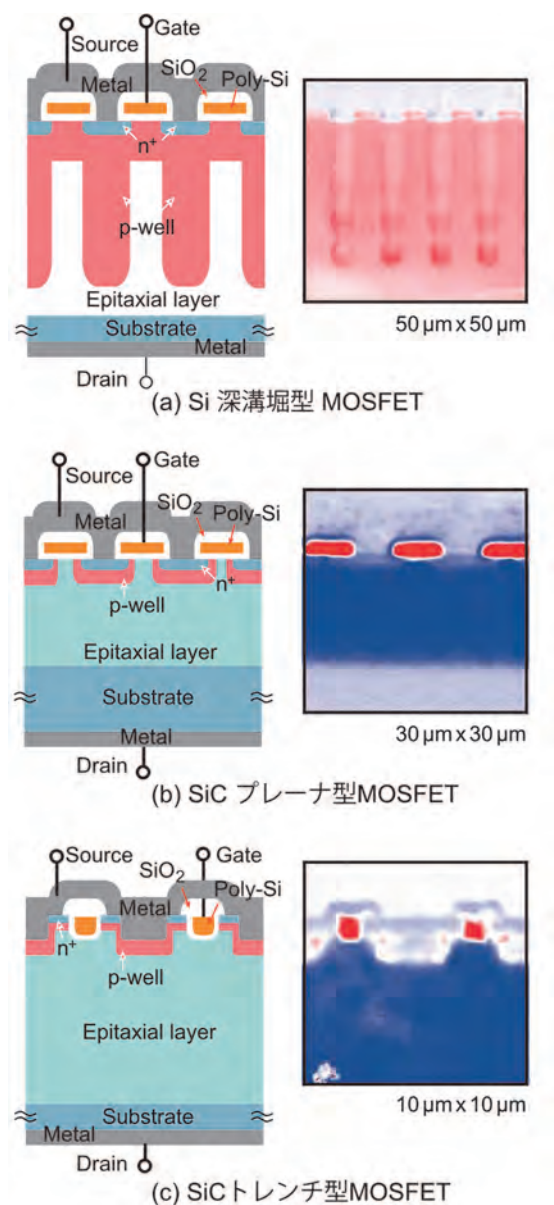


図2. パワー半導体デバイス断面構造図と観測例。

- (a) Si 深溝堀型 MOSFET, (b) SiC プレーナ型 MOSFET,
(c) SiC トレンチ型 MOSFET.

市販のワイドバンドギャップ半導体材料が採用されたディスクリット型のパワー半導体デバイスについて、真空圧力環境下において、デバイス動作に必要な電圧を印加させた状態でナノスケール領域における表面形状／表面電位／微分容量をマッピングできる走査型プローブ顕微鏡の開発が完了しており、デバイス実動作評価が可能であることが示されている。

3. まとめと今後の課題

あらゆる電化製品に必要な不可欠な電源回路、その内部で用いられるパワー半導体デバイスの通電状態におけるナノスケール評価装置の開発とその手法を確立した。整流素子あるいはスイッチング素子にワイドバンドギャップ材料により製作されたパワー半導体素子を用いることで、その高い耐電圧、大電流量、高耐熱性、低オン抵抗、高周波（高速スイッチング）特性の特長を活かした電力変換回路が実用化される。このように、高電圧・大電流を制御する高密度エネルギー電源回路において用いられるパワー半導体デバイスのナノスケール動作解析を通じて、そのデバイスの理論的限界、さらには不良箇所の特特定や解析に関する技術を確立していく。

そのような技術を確立していくためには、実際に故障してしまっているパワー半導体デバイスに対して、ナノスケール観測を行い、その故障箇所を明らかにした上で考証し、故障条件や状態をモデル化して、故障事象が模擬できるデバイスシミュレーションへの展開を図っていく必要がある。

本研究に関する主な発表論文

- [1]. T. Uruma, C. Tsunemitsu, K. Terao, K. Nakazawa, N. Satoh, H. Yamamoto, and F. Iwata, “Development of atomic force microscopy combined with scanning electron microscopy for investigating electronic devices”, *AIP Advances*, Vol. **9**, 115011 (2019).
- [2]. A. Doi, M. Nakajima, S. Masuda, N. Satoh and H. Yamamoto, “Cross-sectional observation in nanoscale for Si power MOSFET by atomic force microscopy/Kelvin probe force microscopy/scanning capacitance force microscopy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **58**, S11A04 (2019).
- [3]. T. Uruma, N. Satoh, H. Yamamoto, and F. Iwata, “Imaging of an n- layer in a silicon fast recovery diode under applied bias voltages using Kelvin probe force microscopy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **57**, 08NB11 (2018).
- [4]. M. Nakajima, Y. Uchida, N. Satoh, and H. Yamamoto, “Nanoscale investigation of the silicon carbide double-diffused MOSFET with scanning capacitance force microscopy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **57**, 08NB09 (2018).
- [5]. S. Mochizuki, N. Satoh, and S. Katori, “Nanoscale investigation on charge active/transport layer of organic solar cells by the scanning capacitance force microscopy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **57**, 08NB05 (2018).

参考文献

- (1) B. Jayant Baliga, “*Fundamentals of Power Semicond. Devices*”, Springer; 2nd ed, (2019).
- (2) 長康雄, 応用物理, **85**, pp. 560-567 (2016).

〔先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）〕



研究項目：先端研究推進プロジェクト助成金（Ⅱ）

研究期間：2019/6/5 ～ 2020/2/29

研究課題名（和文）：インフルエンザウイルスの薬剤耐性化の分子機構についての理論的研究

研究課題名（英文）：Computational Studies on the Drug-Resistance Mechanism in Influenza Virus

研究者：山本 典史

千葉工業大学

YAMOMOTO Norifumi

工学部 応用化学科 准教授

1. 背景

A型インフルエンザウイルスは、ヒトを含む哺乳動物・鳥類に感染する人獣共通感染症病原体である。インフルエンザウイルス表面には糖蛋白質ヘマグルチニン（HA）とノイラミニダーゼ（NA）が存在し、ウイルスの自己複製プロセスにおいて重要な役割を果たす。インフルエンザの治療では、NAの酵素反応を阻害する阻害剤（オセルタミビルやザナミビルなど）が治療に用いられているが、ウイルスの突然変異速度が速いために、NA阻害剤に耐性能をもつ変異体の出現が頻繁に報告されている。このような薬剤耐性ウイルスの出現は、インフルエンザの治療・予防の大きな障害となるために深刻な問題となっている。

インフルエンザウイルスがNA阻害剤に対する薬剤耐性を獲得する過程では、NAと薬剤の結合性が低下した形質集団が選択されるが、この場合、自己複製に必要な酵素活性は最低限保持される必要がある。すなわち、薬剤投与の影響下で選択されるアミノ酸置換は薬剤との結合性の低下と酵素反応が適切に制御されている必要がある。近年、北大・人獣共通感染症リサーチセンターの五十嵐らは、H5N1型高病原性鳥インフルエンザウイルスに見られたNAの変異がオセルタミビルへの感受性を低下させることを明らかにしている。興味深いことに、この変異はオセルタミビルとNAが直接結合する部位（活性部位）ではない。薬剤耐性株のNAでは、活性部位の構造変化がその周辺のアミノ酸残基の置換によって間接的に誘起されるために、酵素活性は維持しつつNA阻害剤の親和性は低下すると予想されている。このように、インフルエンザウイルスが薬剤耐性を獲得するメカニズムについては、解明の手がかりとなる知見は得られているが、その詳細は未だ明らかではない。

本研究では、分子シミュレーションを用いた理論的解析に基づき、インフルエンザウイルスの薬剤耐性獲得の分子機構の解明に取り組んでいる。具体的には、2019年度には、オセルタミビルへの感受性が低下したH5N1高病原性鳥インフルエンザウイルスの変異型NAについて、五十嵐らの先行研究に基づいて、その酵素反応を電子状態計算と分子動力学計算を組み合わせたマルチスケールな分子シミュレーションを用いて解析し、反応機構を詳細に解明した。今後は、野

生株NAと薬剤耐性株NAの酵素反応を詳細に比較することで、インフルエンザウイルスが薬剤耐性を獲得する過程で「阻害剤との結合親和性」と「酵素活性」が適切に制御されているメカニズムを分子レベルから明らかにすることを検討している。

2. 研究方法

インフルエンザノイラミニダーゼ（NA）と基質であるシアル酸（SA）の複合体について、量子力学（QM）と分子力場（MM）をハイブリッドしたQM/MM法に基づき、シアル酸の加水分解過程のメカニズムを解析した。具体的には、基質部分をQM、酵素部分をMMとするQM/MM基質・酵素複合体モデル（図1）を構築した。ここで、QM部分については自己無撞着電荷法に基づく密度汎関数強束縛（SCC-DFTB）モデル、MM部分はAmber力場で記述した。



図1. インフルエンザノイラミニダーゼ（NA）-シアル酸（SA）複合体のQM/MMモデル

今回、酵素反応を解析するための手段として、集団変数ストリング法を用いて、反応過程の最小自由エネルギー経路を決定した。ストリング法における最小自由エネルギー経路の概要図を図2に示す。

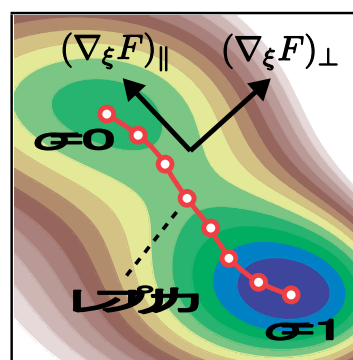


図2. 最小自由エネルギー経路の概要図

3. 研究結果

インフルエンザノイラミニダーゼ中で進行するシアル酸の加水分解過程について、最小自由エネルギー経路に沿った自由エネルギー変化を解析した。その結果、シアル酸の加水分解過程は、特徴的な4つの状態 (I, II, III, and IV) を伴って進行することが明らかとなった。このうち、状態 I から状態 III に変化する素過程については、25 kJ/mol 程度の活性化エネルギーを伴って進行し、状態 I から状態 III に至るまでのエネルギー変化は発熱的 (-20 kJ/mol) であることが明らかとなった。さらに、状態 III から状態 IV に至る素過程については、60 kJ/mol 程度の高い活性化エネルギーを伴う必要があること、状態 III から状態 IV への変化が吸熱的 ($+20$ kJ/mol) であることが明らかになった。

4. 結論

インフルエンザノイラミニダーゼの酵素反応過程について、QM/MM 法に基づいて、最小自由エネルギー経路を理論的に解析した。その結果、この反応過程については、2 つの反応素過程を伴って進行することが明らかになった。

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)
研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29
研究課題名 (和文) : 希土類永久磁石材料の研究開発

研究課題名 (英文) : Research of rare-earth permanent magnets

研究者 : 齋藤 哲治
SAITO Tetsuji
千葉工業大学
工学部 先端材料工学科 教授

1. はじめに

これまでに地球温暖化ガス削減のため、ハイブリッド自動車や電気自動車など環境にやさしい自動車が開発されてきた。この環境にやさしい自動車を支えているのがエンジンのモータとして使用される希土類金属のNd (ネオジム)を使用した高性能なNd-Fe-B磁石である。本研究の目的は、今後も増え続ける環境にやさしい自動車用の高性能な永久磁石を安定に使用できるようにすることである。

本研究では、希土類金属特有の問題である希土類金属のバランスを整え、現在過剰な供給となっている希土類金属のSm (サマリウム)を使用した新しいSm系希土類永久磁石を開発する⁽¹⁾。希土類金属と遷移金属の合金としてSm-Fe合金を選び、急冷凝固法により作製したSm-Fe合金の構造と磁気特性について調べたところ、急冷凝固法により5-17型の $\text{Sm}_5\text{Fe}_{17}$ 系磁石が作製できることがわかった⁽²⁾。また、急冷凝固法により1-12型の SmFe_{12} 系磁石も作製できることがわかってきた⁽³⁾。なお、本研究ではSm-Fe系磁石としてはNd-Fe-B磁石に匹敵する高い磁気特性が期待されている SmFe_{12} 系磁石をベースとした高性能な磁石の作製を試みた。

2. 実験方法

アルゴン雰囲気中高周波溶解法により SmFe_{12} 系合金を作製した。また、 SmFe_{12} 系合金のFeの一部をTiおよびVで置換した $\text{Sm}(\text{Fe}, \text{V}, \text{Ti})_{12}$ 系合金も作製した。得られた合金を底にノズルを有する石英管に入れた後アルゴン雰囲気中高周波溶解を行い溶湯とし、得られた溶湯をノズルから銅ロール上に噴射することにより急冷凝固した。得られた急冷薄帯は

タンタル箔に包み込んだ後、アルゴン雰囲気中773K-1273Kで1時間熱処理を行った。また、得られた急冷薄帯をアルゴン雰囲気中で粉砕した粉末の磁石化を放電プラズマ焼結法で試みた。焼結条件は圧力100MPa、温度773K-1073Kで真空中5分間行った。

得られた試料の結晶構造はX線回折装置(XRD)で、得られた試料の熱的性質は熱分析装置(DTA)で、得られた試料の組織は透過型電子顕微鏡(TEM)で調べた。また得られた試料の磁気特性は振動試料型磁力計(VSM)で調べた。

3. 結果および考察

急冷凝固法により SmFe_{12} 系合金急冷薄帯の作製を試みたところ、組成によらず SmFe_{12} 系合金急冷薄帯は作製することができることがわかった。そこで、まず急冷凝固法で作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯の構造をX線回折および熱分析で調べたところ、主にアモルファスからなり、 SmFe_{12} 相を含まないことがわかった。

次に、急冷凝固法で作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯の磁気特性を振動試料型磁力計で調べた。図1に急冷凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯のヒステリシス曲線を示す。急冷凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯はあまり大きな保磁力を示さないことがわかった。また急冷凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯の保磁力はVおよびTi量に依らないこともわかった。

これは、急冷凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯が主にアモルファスからなり、 SmFe_{12} 相を含まないためであると思われる。

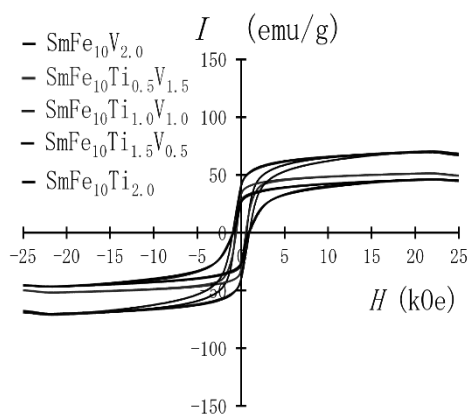


図1 急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯のヒステリシス曲線

そこで、急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯に熱処理を施して、その構造と磁気特性がどのように変化するかを調べた。急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯は主にアモルファスであるが、急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯に適切な熱処理を施すとアモルファスから結晶相 (SmFe_{12} 相) が析出することがわかった。

図2に急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯に1073Kで熱処理を施した試料のヒステリシス曲線を示す。急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯に熱処理を施すと保磁力が大きく向上することがわかった。得られた試料の保磁力は SmFe_{12} 系合金急冷薄帯の組成に大きく依存し、特に急凝固法で作製した $\text{SmFe}_{10}\text{V}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}$ 合金急冷薄帯に熱処理を施した試料の保磁力が高い保磁力を示すことがわかった。

次に、急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯の磁石化を放電プラズマ焼結法で試みたところ、高い保磁力を有する SmFe_{12} 系磁石が得られることがわかった。これは放電プラズマ焼結中に SmFe_{12} 系合金急冷薄帯が熱処理され、結晶相 (SmFe_{12} 相) が析出するためである。このことより、急冷

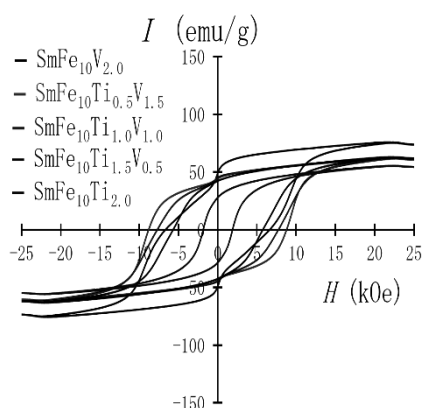


図2 急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯に熱処理を施した試料のヒステリシス曲線

凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯から放電プラズマ焼結法により高い保磁力を有する SmFe_{12} 系磁石が作製できることがわかった。現在は、 SmFe_{12} 系磁石の更なる高特性化に取り組んでいる。

4. まとめ

本研究では、 Sm-Fe 系磁石の高特性化を目標に SmFe_{12} 系合金のFeの一部をTiおよびVで置換した $\text{Sm}(\text{Fe}, \text{V}, \text{Ti})_{12}$ 系合金を作製し、その熱処理および固形成形を試みた。急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯に熱処理を施すと保磁力が大きく向上することがわかった。また急凝固法により作製した SmFe_{12} 系合金急冷薄帯より高い保磁力を有する SmFe_{12} 系磁石が放電プラズマ焼結法で作製できることもわかった。

本研究に関する主な発表論文

- (1) T. Saito, F. Watanabe, and D. N. Hamane, "Magnetic properties of SmFe_{12} magnets produced by spark plasma sintering", J. Alloys Compd., Vol. 773, pp. 1018–1022 (2019).

参考文献

- (1) 大橋正広, 「需給バランスから見る希土類資源の現状と将来予測」電気学会論文誌 A, 136 巻, 8 号, pp. 491–494 (2016).
- (2) T. Saito, "High coercivity in SmFe_{17} melt-spun ribbon", J. Alloys Compd., Vol. 440, pp. 315–318 (2007).
- (3) T. Saito, H. Miyoshi, and D. N. Hamane, "Structures and magnetic properties of Sm-Fe-Ti nanocomposite magnets with SmFe_{12} phase", J. Alloys Compd., Vol. 519, pp. 144–148 (2012).

研究項目 : 先端研究推進プロジェクト助成金 (Ⅱ)

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名 (和文) : 児童の主体性を主眼とした地域コミュニティ活動は健全育成に寄与するか—1 年間の追跡調査から—

研究課題名 (英文) : Do proactive activity with unique exercise play programs in children center contribute to social skills and regular lifestyle in elementary school children? -One year follow-up study-

研究者 : 引原 有輝
HIKIHARA Yuki

千葉工業大学
創造工学部 教育センター 教授

1. 研究の背景

近年の核家族や共働き世帯の増加に伴う家庭の教育力の低下や地域連携の希薄化などにより、子どもの健全育成環境を見直す声が高まっている。具体的には、地域の大人の協力を得て、学校等を活用し、緊急かつ計画的に子ども達の活動拠点 (居場所) を確保し、放課後や週末等における様々な体験活動や地域住民との交流活動等を支援する機会の創造である。それを受けて、平成 26 年に策定された文部科学省の「放課後子ども教室推進事業」と厚生労働省の「放課後児童健全育成事業」を一体型とした「放課後子どもプラン」がスタートしている。

この事業を推進する上で、児童厚生施設 (以下、児童館) や放課後児童クラブを拠点とする児童の地域コミュニティ活動は、ファシリテーター (児童厚生員や放課後児童支援員) が関わり合いを持ちながら、児童の主体的活動 (主に運動遊び) を支援するという点からも中核的な役割を担う。特に、子どもの主体的活動を重んじるという点では、民間スポーツクラブや学校部活動などの放課後活動の概念とは一線を画している。児童館や放課後児童クラブでの主体性を重んじた「遊び」を柱とする放課後活動は、児童の心身の健康や日常生活のアクティブ化が期待されるだけでなく、ライフスキルの獲得など社会性の発達も強く期待されるが、これまでに「遊び」を柱とした放課後活動の効果 (恩恵) については十分に明らかになっていない。そのため「遊び」を柱としたファシリテーター支援型の地域コミュニティ活動の効果を客観的に評価しておくことは、今後、健全育成を支援する環境を創造していく上で重要であると考えられる。

そこで本研究は、児童の主体性を重んじた運動遊びプログラムが社会性の発達や適切なライフスタイルの獲得に寄与するかについて追跡研究を用いて明らかにすることを目的とした。

2. 調査方法

1) 対象者

対象としたコミュニティは、東京都墨田区にある放課後児童クラブであった。対象者は、クラブに通う低学年 (1~3 年) 児童 102 名であった。調査を実施す

るに先立ち、保護者への事前説明を行った上で同意が得られた児童を本調査の対象とした。

2) 研究デザイン

調査の追跡期間は、2019 年 1 月から 2020 年 1 月の 1 年間とした。その間、指定の調査票を用いて児童館職員および保護者と児童にライフスタイルや運動への好意度および社会性の評価を 3 回 (初期評価、中間評価、最終評価) 依頼した。またパッケージ化された運動遊びプログラムは 1 回あたり約 60 分、平均週 2 回、11 ヶ月間にわたり放課後児童クラブにて実施した。祝休日には、運動遊びに関連した親子イベントを月 1 回程度開催した。この調査に先立ち、放課後児童クラブの放課後児童支援員 (以下、職員) は運動プログラムの趣旨や内容を把握するために、研究代表者が主催した研修会に少なくとも 2 回以上参加してもらった。

3) 運動遊びプログラム

運動能力の個人差を緩和し、学年が異なっても実施可能な 50 個の運動遊びプログラム (ロコモーター系遊び: 道具を必要としない移動系遊び・オブジェクトコントロール系遊び: 道具を必要とする操作系遊び) を提供し、児童が主体的に選択できるようにした。低学年など遊び内容の理解が困難な場合は、職員が支援した。

4) 調査項目

本調査では、保護者に児童の運動や外遊びの実施状況調査 (平日および休日の 1 日あたりのスポーツ・外遊び時間、平日および休日 1 日あたりの TV・ゲームの視聴時間) について 5 件法にて回答を依頼した。また同様に、社会的責任目標尺度評価 (以下、SRG) について回答を計 3 回 (初期評価: 1-2 月、中間評価: 7-8 月、最終評価: 翌年 1-2 月) 依頼した。なお SRG には、①規範遵守目標および②向社会的目標の 2 つの下位尺度が設定されている (中谷, 1996)。また、放課後児童クラブに勤務する職員に各児童の日常的な行動 (ふるまい) を踏まえながら、幼児の自己主張および自己抑制評価 (以下、SAR) について回答を計 3

回（ベースライン：1-2月，中間評価：10-11月，最終評価：翌年1-2月）依頼した。なおSARには、①自己主張および②自己抑制の2つの下位尺度（首藤，1995）設定されている。これらの質問票はいずれも5件法により回答を依頼した。

3. 調査結果

計3回のいずれの評価時期においてSRGの調査票ならびにスポーツや外遊びの実施状況の調査票を回収できた対象者は32名であった。また，SARの調査票を回収できた対象者は43名であった。

SRGでは，規律遵守において1回目と比較して2，3回目は有意に向上していた（図1； $P<0.01$ ）が，向社会的行動において有意性は認められなかった。SARでは，自己主張（ $P<0.05$ ）および自己抑制（ $P<0.01$ ）において1回目と比較して2，3回目は有意に向上していた（図2）。

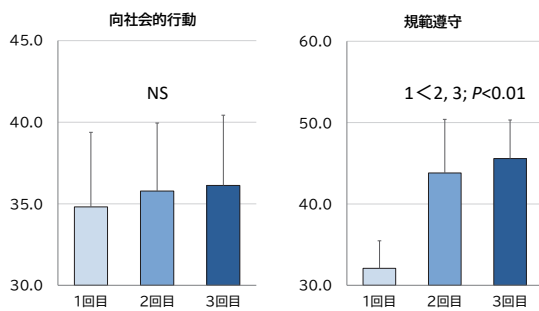


図1：社会的責任目標尺度評価（SRG）の変化

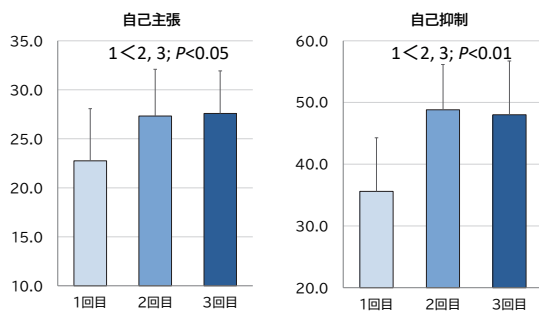


図2：自己主張および自己抑制評価（SAR）の変化

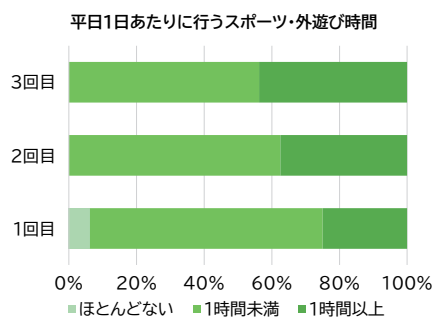


図3：平日1日あたりのスポーツ・外遊び時間

一方，運動や外遊びの実施状況調査においては，平日の1日あたりのスポーツや外遊びの時間の割合が増加する傾向にあった（図3）が，休日では特に変化はみられなかった（図4）。また，1日あたりのTV・ゲー

ムの視聴時間では，平日において変化はみられなかった（図5）が，休日において2時間以上の視聴時間の割合が増加する傾向にあった（図6）。

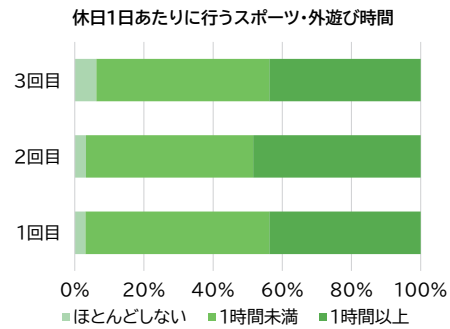


図4：休日1日あたりのスポーツ・外遊び時間

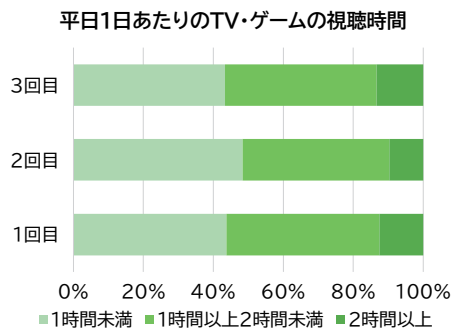


図5：平日1日あたりのTV・ゲームの視聴時間

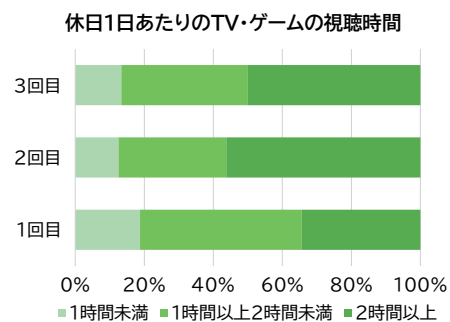


図6：休日1日あたりのTV・ゲームの視聴時間

4. まとめ

放課後児童クラブの活動において，児童が主体となって行う運動遊びプログラムの長期的な実施は，児童の社会性や運動習慣（アクティブ化）に寄与する可能性が示唆された。特に，集団活動に必要な規範遵守や自己の欲求を制御する力である自己抑制などにおいて著しい変化が認められた。ただし，本研究では対照群を設定できなかったことから，これらの結果が自然発生的な成長に伴うものである可能性もあり，今後は，対照群を設定したクラスター無作為化比較試験を用いた検証が必要である。

5. 参考文献

- 中谷素之（1996）児童の社会的責任目標が学業達成に影響を及ぼすプロセス，教育心理学研究，44，389-399。
- 首藤敏元（1995）幼児の向社会的行動と自己主張・自己抑制，筑波大学発達臨床心理学研究，7，77-86。

〔若手教員研究支援助成金〕



研究項目 : 若手教員研究支援助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : 太陽熱を利用する蒸留システムのための機能性表面の開発

研究課題名(英文) : Development of functional surface for solar thermal distillation system

研究者 : 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を目指していく上で重要である^①。

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^②。日射の光熱変換は先行研究も多く、近年では蒸発器について理論的上限である $1.6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ に近い蒸発量が実証されている^③。一方、コンデンサでの凝縮速度は、蒸発速度の25%程度にとどまることが報告されており^④、現在はコンデンサ性能の向上が課題となっている。

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^⑤。放熱面の工夫を試みた実験報告では、十分な性能向上には未だ至っていない^⑥。よって、放熱面と凝縮面とを併せて検討することにより、コンデンサ性能を決定する因子の包括的な解明を行い、周囲環境条件に応じて性能を引き出すコンデンサ設計手法の体系的な確立ができると考えられる。

そこで本研究では、コンデンサを構成する凝縮面と放熱面の検討を進めることとした。本稿では、放熱面に関する取組みについて報告する。放熱面が放射冷却機能を備えるため安価で大面積へ展開可能な手法の確立を目的とした。放射冷却とは、大気中の二酸化炭素や水蒸気による熱放射の吸収・放射に伴う影響を受けない大気の窓と呼ばれる波長域(8~13 μm)において積極的に熱放射を行うことで実現される。さらに、日射環境下でのコンデンサ利用を考えると、太陽光を構成する可視・近赤外光の吸収を抑制することも要求される。したがって、太陽光を反射し、大気の窓を中心とした赤外光を高い放射率で熱放射するような放熱面の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ため、実験および解析による検討を実施した。

2. 放射冷却面の実験的検討

放射冷却機能を有する表面の形成に関しては、希少金属を使用した多層膜構造の形成による光学特性制御を行った研究などがこれまでに報告されているが、製作プロセスが高コストであることや大面積に拡張することに難がある^⑦。本研究で用いる赤外域に選択放射特性を有する高分子膜の利用は、その製作プロセスの簡易さや低コストであることから大きな利点が得られる。

本研究で使用する PDMS は可視光領域において透過率が高く、大気の窓と言われる赤外線波長域(8~13 μm)において放射率が高い。厚さ 30 μm および 85 μm の2種類の PDMS に関して、大気の窓を含む赤外域における単色放射率を図1に示す。膜が薄いと波長選択性は高くなるが、熱放射量は低下することになる。

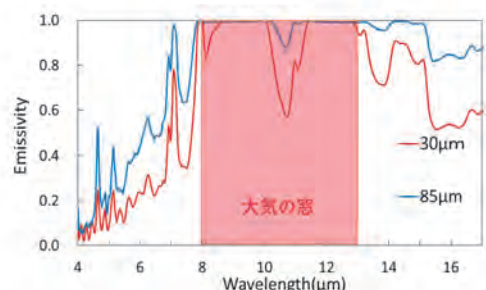


図1. PDMS 膜の赤外域における単色放射率

機能面の構成としては反射層であるアルミ箔の上に放射層である PDMS を積層する。アルミ箔は可視光の反射率が高く、PDMS を透過した可視光はアルミ箔によって反射されるため、太陽光エネルギーによる機能面の温度上昇を抑制することができる。スピンコーティングによりアルミ箔上に PDMS 膜を形成した。

機能面の冷却性能評価のため、日照下で温度計測を行うことが可能な実験装置を製作した。機能面は地面からの放射の影響を受けないように高さ 0.3 m の台を準備し、その上に傾斜 30° の木製台座、発泡ポリスチレンの台座、機能面の順に設置した。台や木製台座、発泡ポリスチレンの台座は日射による温度上昇を防ぐためにアルミテープで覆うこととした。これらの台座は機能面を太陽が存在する方向である南に向けた。発泡ポリスチレンの台座と機能面の間に熱電対を挿入し、データロガーにて温

度測定を行った。機能面と性能を比較するため、太陽光の吸収しやすいサンプルも準備して温度測定を実施した。さらに、キャスター付きの棚に1.2 mのアンクルを取付け、日射の影響を除外して大気温度計測を実施することが可能な強制通風筒を気温測定部が1.5 mの位置になるように設置した。棚の最上段には機能面と同様に傾斜30°の台座の上に日射計を設置した。

また、可視光の反射機能面の冷却性能を評価するため、正確な大気温度を測定する必要がある。しかし、精度の高い市販の気温計は非常に高価である。そこで、低コストで製作が容易である強制通風筒という気温計を作製する。強制通風筒は装置内部に熱電対が設置されており、二重の塩ビ管によって太陽光や放射を防ぎ、ファンの送風によって温度測定部を外気にさらすことで、通風筒内面からの放射や対流の熱の影響を受けづらくした。

計測結果の一例を図2に示す。機能面を構成するアルミ背面で計測された温度 T_{Al} と比較用の日射を吸収しやすい表面の温度 T_b を比較すると、大きな温度差を確認することができた。実験を進める過程において、機能面の製作上の課題も抽出できており、さらなる性能向上のための改良を進めていく計画である。

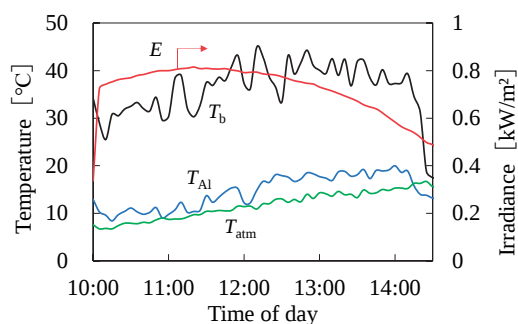


図2. 日射下における表面温度の変化

3. 放熱能力の解析的検討

本研究では実験に加えて解析的にも検討を進めた。熱輸送をモデル化することより、実験では直接計測することができない熱放射量を算出することや、機能面の改善のための定量的な試算が可能になる。

機能面の熱の移動は図3に示した通りである。機能面の放射を q_{rad} 、大気放射を q_{atm} 、太陽光の入射量 E_s 、空気の対流熱伝達による熱輸送量を q_{conv} と設定した。さらにPDMSとアルミ箔のそれぞれから熱が放射されるためことも考慮に加え、機能性表面における熱伝達率を仮定した上で、機能面の冷却能力を試算した。

大気温度ごとの冷却能力と機能面温度の関係を計算した結果を図4に示す。放射冷却機能を発現する冷却量が正の値を示す領域が広い温度条件下で存在することが確認された。今回の対象としたPDMSとアルミを組み合わせた機能面は優れた放射冷却能力を実現し得ることが示された。

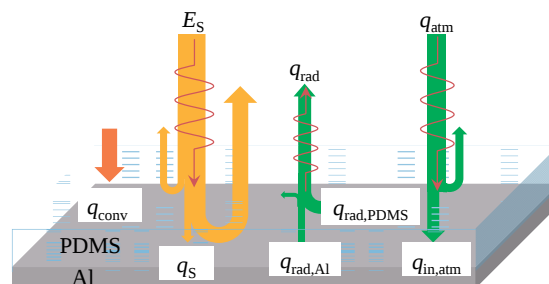


図3. 伝熱解析モデルの概要

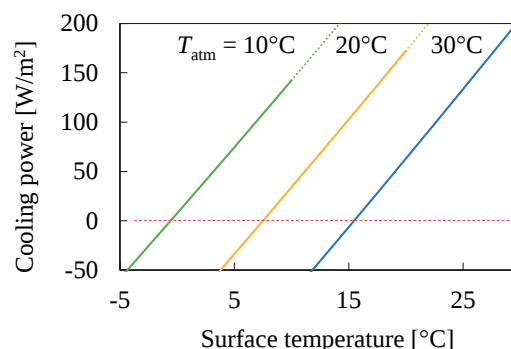


図4. 機能面の冷却能力に関する解析結果

4. まとめ

本研究では、提案した機能面の放射冷却性能に関して、実験と解析の両面から確認することができた。今回の実験を進める中で、大気温度の計測技術などの今後の検討において必要となる研究基盤を構築することができた。さらに、機能面の周辺要素における太陽光吸収による温度上昇が計測結果へ与える影響など、これからの改善点についても明らかにすることができた。今後は反射層の反射率の向上を図り、さらに機能面周辺の要素の温度の測定や物性を調査し、材料の変更や装置の改善をすることで冷却性能のさらなる向上へ向けて取り組む予定である。

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。我が国が Society 5.0 で目指す脱炭素社会の実現へ向かう中、再生可能エネルギー利用の可能性を示す技術として波及効果が期待される。

参考文献

- (1) Sacco et al., *J Clean Prod* 175 (2018) 38.
- (2) Pang, et al., *ACS Energy Lett* 5 (2020) 437.
- (3) Ni et al. *Nature Energy* 1 (2016) 16126.
- (4) Gupta et al. *Am J Eng Res* 2 (2013) 203.
- (5) Ni et al., *Energy Environ Sci* 11 (2018) 1510.
- (6) Zhou et al. arXiv:1804.10736v3 (2018).
- (7) Raman, et al., *Nature* 515 (2014) 540.

研究項目 : 若手教員研究支援助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : 強度可変酸化剤旋回流型ハイブリッドロケットエンジンの局所後退速度測定に向けた基礎研究

研究課題名(英文) : Basic Study for Local Regression Rate Measurement of Variable Oxidizer Flow Swirling Hybrid Rocket Engine

研究者 : 和田 豊
WADA Yutaka

千葉工業大学
工学部 機械電子創成工学科 准教授

1. はじめに

ハイブリッドロケット(HR)は、安全性に優れた非火薬の将来の宇宙推進系として注目を浴びているが、最適な推力と酸燃比(O/F)を同時に維持できないという技術課題がある。本研究では燃料流量と酸化剤流量を独立に制御できる強度可変酸化剤旋回流型HRE(A-SOFT HR)¹の実用化に向け、局所燃料後退速度の計測を行うために必要となる基礎データの蓄積を図った。本方式による、フィードバック(FB)制御の実現には、瞬時後退速度計測手法の確立や、燃料燃焼時の燃焼メカニズムの解明、燃料後退速度の酸化剤旋回流強度依存性の解明が技術課題として残っているため、それらを解決するために必要となる基礎実験を実施した。

2. 研究の内容

(1)燃料内局所温度場計測による燃焼メカニズムの推定

HR燃料の局所燃料後退速度の取得に向け、燃料の相変化、熱分解、酸化剤と燃料の混合・拡散・反応を調査する必要がある。本実験では、熱可塑性樹脂(LT)燃料、従来の燃料であるパラフィンワックスや末端水酸基ポリブタジエンゴム(HTPB)を用いて、燃料表面に形成される相構造を調査する目的で、燃焼中の燃料内部から火炎近傍までの温度場の直接計測及び光学観測による火炎温度の測定を実施した。本実験ではHRの内部環境を模擬するため、酸化剤質量流束 G_{ox} 50及び100 kg m⁻² s⁻¹、燃焼室圧力が2 MPa環境で実施した。実験には、図1に示す観察窓付き二次元燃焼器を使用した。燃料は図2に示すスラブ状のLTを使用した。燃焼器内部の両側面に燃焼表面が対になるように設置した。温度場の直接計測には、熱電対(25 µm-R型, 100 µm-C型熱電対)を使用した。熱電対は燃料表面より1 mmの所に埋め込まれている。火炎の観察にはハイスピードカメラを使用した。

結果として、先行研究のTG-DTA結果²と温度場の直接計測によりLT燃料内の相構造を推定し、熔融相、凝縮相の厚みを明らかにした。図3にLT燃料内部の代表的な温度場履歴を示す。実験条件は G_{ox} 50 kg m⁻² s⁻¹である。熔融相厚さは0.73 mm、凝縮相厚さは0.55 mmであった。実験2回目では、熔融相厚さは0.60 mm、凝縮相厚さは0.71 mmであった。実験3回目では、熔融相厚さは0.63 mm、凝縮相厚さは0.58 mmであった。

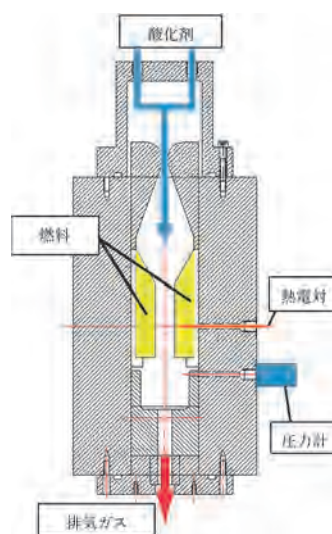


図1 観察窓付き二次元燃焼器の正面図



図2 燃料 (LT, HTPB, パラフィンワックス)

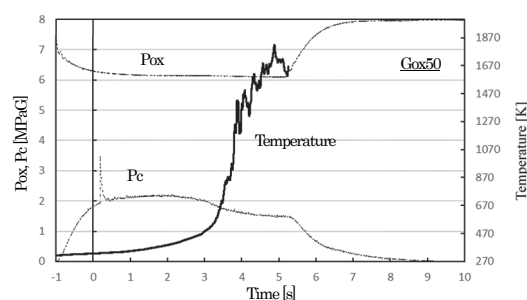


図3 LT燃料内部の温度場履歴取得例

LT燃料の特徴的な温度場履歴として、温度の立ち上がり後に、上下の小刻みな振動が観察されることである。これは凝縮相内で気化したLT燃料気化ガスによるバブルが生じているためであると考えられる。LTは多成分系の燃料であるため、LT内部の沸点が低い成分が気化することでバブルを凝縮相内に形成する。そして、凝縮相内のバブルが、熱

電対先端のジャンクションに接することで温度場が上下に小刻みに振動していると考えられる。

ハイスピードカメラにおける光学観測においては、C型熱電対の露出を確認することができ、時間と温度の整合性も確認することができた。この時、取得した温度はC型熱電対の取得限界温度である 2588 K を上回っており、火災温度は 2588 K 以上に達することが明らかになった。

(2) 燃料後退速度の酸化剤旋回流強度依存性

LT 燃料とガス酸素を用いたハイブリッドロケットに対して、形状スワール数 9.7, 19.4 を付与する酸化剤旋回流型燃焼実験を実施し、酸化剤旋回流強度変化が燃料後退速度に与える影響を調査した。先行研究より酸化剤に旋回流を付与することで燃焼表面に形成される境界層火災が遠心力により燃料表面に漸近し、燃料表面への熱のフィードバック量を増加させることで、燃料後退速度の向上が図られることが明らかとなっている³。さらにLT燃料の場合は熔融相が吹き飛ばされることにより高い燃料後退速度を得るエントレインメント現象⁴の効果による後退速度の向上が図られている。そこで、酸化剤に旋回流を付与することでより高い後退速度の獲得が期待できる。しかし、旋回流強度に対する後退速度変化は明らかになっていないため、ここでは、複数の酸化剤旋回流強度における後退速度の変化を測定した。旋回流強度は形状スワール数 S_g として以下の式から導出した。

$$S_g \equiv \frac{\text{各運動量流束}}{\text{軸方向運動量流束} \times \text{半径}} \approx \frac{\dot{m}_{ox} u_{\theta ox} R}{\dot{m}_{ox} u_{x ox} \cdot R} = \frac{u_{\theta ox}}{u_{x ox}}$$

ここで、 $\dot{m}_{ox}$ は酸化剤質量流量 kg s^{-1} 、 $u_{\theta ox}$ はインジェクタ出口における半径方向酸化剤流速 m s^{-1} 、 $u_{x ox}$ はインジェクタ出口における軸方向酸化剤流速 m s^{-1} 、 R は半径 m である。本実験では、 S_g に 9.7, 19.4, 37.3 の 3 種類を用いた。燃焼圧力は 2 MPa、酸化剤質量流束は 40, 60, 70 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、燃焼時間 5 秒、燃料長さは、80, 140, 200, 300 mm とした。図 4 に実験結果を示す。白丸が旋回流無しでの実験結果であり、全ての条件で旋回流を付与したほうが高い後退速度を獲得していることが分かる。また、燃焼後の燃料を解析し、燃料長さ方向の局所燃料後退速度を計測したところ、酸化剤に旋回流を強く付与するほど、インジェクタに近い部分の局所燃料後退速度が高くなっていることが分かった。

3. まとめ

LT 燃料内部の温度場履歴の測定から、燃料が燃焼する際に生じる凝縮相中において、燃料成分の一部が気化し、バブルとなって存在していることが明らかとなった。

酸化剤に旋回流を付与し旋回流を強めるほど、インジェクタ付近の局所燃料後退速度が速くなる傾向が判明した。温度場計測の結果から熔融相内部にもバブル（気相）が存在することから、旋回流によって生じる酸化剤の早い流れが燃料へのせん断力を高め、バブルの発生による相乗効果

を伴いエントレインメントの効果が強まったためであると考えられる。以上の結果は、強度可変酸化剤旋回流型を適用した際の燃料後退速度挙動を明らかとしたと言える。

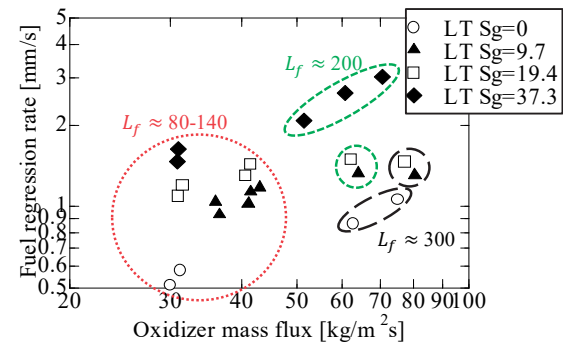


図 4 旋回流付与による燃料後退速度変化

本研究に関する主な発表論文

- (1) 三橋悠一郎, 坂野文菜, 和田豊, 加藤信治, 堀 恵一, “線径 25 μm R 型熱電対を使用した低融点系燃料温度場計測”, 平成 30 年宇宙輸送シンポジウム, 2019 年
- (2) 藤原 克昭, 坂野 文菜, 和田 豊, 三島 有二, 津越 敬寿, 加藤 信治, 堀 恵一, “ハイブリッドロケット燃料に用いる低融点熱可塑性樹脂の熱的挙動”, 火薬学会第 80 回通常総会並びに 2020 年度春季研究発表会, 2020 年
- (3) 川端 洋, 小長野 一成, 和田 豊, 加藤 信治, 堀 恵一, 長瀬 亮, “燃料長さ形状スワール数が LT 燃料を用いた酸化剤旋回流型ハイブリッドロケットの局所燃料後退速度に与える影響”, 日本機械学会 2019 年度年次大会, 2019 年

参考文献

- (1) Ozawa and Shimada, “A theoretical study on throttle ranges of O/F controllable hybrid rocket propulsion systems”, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.13, No.4 (2018)
- (2) 坂野文菜, 藤原克昭, 和田豊, 西山佳利, 津越敬寿, 三島有二, 加藤信治, 堀恵一, 長瀬亮, “ロケット固体燃料の表面における熱的挙動の直接観察”, 火薬学会 2019 年度秋季研究発表会, 2019 年
- (3) Yuasa, Ide, Masugi, Sakurai, Shiraishi, and Shimada, “Visualization of Flames in Combustion Chamber of Swirling-Oxidizer-Flow-Type Hybrid Rocket Engines”, Journal of Thermal Science and Technology vol.6, pp.268–277, (2011)
- (4) Karabeyoglu, M. A. et al., “Development and testing of paraffin-based hybrid rocket fuels”, AIAA2001-4503, (2001)

研究項目 : 若手教員研究支援助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : 制御システムを不要とする高周波高効率ワイヤレス給電システムの開発

研究課題名(英文) : Development of high-frequency and high-efficiency wireless power transfer system without applying any control systems

研究者 : 魏 秀欽
WEI Xiuqin

千葉工業大学
工学部 電気電子工学科 准教授

1. はじめに

ワイヤレス給電の開発は劇的に変化し、実用化を見据えた研究開発が進められている。例えば電気自動車(EV)用の給電においては85 kHz帯を用いることが決まり、特にこの周波数帯での開発が加速している。一方で、MHz帯、ISMバンドにおける高周波帯におけるワイヤレス給電システムの開発も、システムの小型、軽量化、送電距離の延伸が望めることから、重要な研究開発目標となっている。この周波数はGaN、SiC等の次世代ワイドギャップ半導体の応用先としての注目度も高い。ワイヤレス給電システムにはまだ解決すべき課題が山積している。特に、送受電コイルの位置ずれ、さらに負荷変動による電力伝送特性の低下に対する対応は最重要な課題となる。この対応策として、負荷変動、位置ずれの情報を検知し、送電側にその情報をフィードバックすることで出力を調整する制御システムを構築するアプローチが常識的かつ一般的である。しかしながら、情報のフィードバックには無線通信を用いなければならず、その送信遅延に対する対応が容易ではない。さらに、出力を調整することで、コイル間の伝送効率やスイッチング素子で生じる損失が増大する等の問題が発生してしまう。このためにさらなる対応が必要となり、制御システムは複雑化の一途を辿っている。この流れはMHz帯のワイヤレス給電システムの特徴である小型化の利点を帳消しにしかねない。

ところで、約30年前に高周波増幅器の分野で、負荷変動に依らず出力電圧、低スイッチング損失を達成する負荷非依存モードが提案されている[1]。このモードは、制御システムの設計を不要とできるという大きな利点があるにも関わらず、提案以降ほとんど注目されてこなかった。なぜならば、通常の増幅器であれば、フィードバック制御システムの設計は複雑化せず、簡易に制御システムを設計できるためであると想像する。しかし、ワイヤレス給電システムは前述の通り、通常の増幅器やコンバータと異なる独特な問題を有しており、制御システムを不要とするという、負荷非依存モードの特徴を最大限に活かせるという意味で非常に相性がよいと考える。

本研究では、負荷非依存モードに光を当て、高周波磁界共鳴ワイヤレス給電システムにおいて、制御システムなしに一定出力、高電力伝送効率を達成することを目指す。本年度では、超スイッチング技術[2]を適用した高周波高効率ワイヤレス給電システムを提案する。また、定常解析技術をコア技術に据え、提案したワイヤレス給電システムの解析に基づいた設計手法を確立する。解析より、このワイヤレス給電の波形式や設計式を導出する。導出された設計式を用い、具体的な回路を設計する。回路実験を行い、送電部と受電部における全てのスイッチ電圧波形はスイッチング時に電圧が零かつその傾きも零にするZVS/ZDS動作条件を満足し、スイッチ電圧ストレスが大幅に低減される。また、解析的に求めた波形は回路実験によって得られる波形と定量的に一致することを示すことにより提案したシステムとその解析手法の妥当性を確認する。

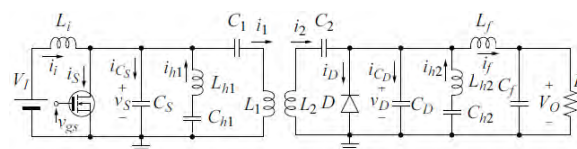


図1 超高周波高効率ワイヤレス給電システムの回路構成

2. 超高周波高効率ワイヤレス給電システムとその解析

2.1 回路構成および動作

図1に提案した超高周波高効率ワイヤレス給電システムの回路構成を示す。このシステムは送電部、結合部、および受電部より構成される。送電部は、供給電圧源 V_I 、入力インダクタ L_i 、スイッチ素子として動作する MOSFET S 、シャントキャパシタ C_s 、出力共振キャパシタ C_l 、および高調波直列共振フィルタ $L_{h1} - C_{h1}$ から構成される。また、受電部は入力共振キャパシタ C_2 、スイッチとしてのダイオード D 、シャントキャパシタ C_D 、高調波直列共振フィルタ $L_{h2} - C_{h2}$ から構成される。結合部は送電コイル L_1 と受電コイル L_2 で構成される。図2に提案した超高周波高効率ワイヤレス給電システムの最適動作波形を示す。この超高周波高効率ワイヤレス給電システムでは、出力直列共振

キャパシタ C_1 と送電コイル L_1 より理想的な共振フィルタを構成し、動作周波数に同調する。高調波共振フィルタ $L_{h1} - C_{h1}$ と $L_{h2} - C_{h2}$ は両方とも 2 倍の基本動作周波数に同調する。また、スイッチ S は図 2 に示しているように駆動信号 v_{gs} によりオン/オフの切り替えを行う。スイッチがオフの期間では、入力インダクタ L_i と、2 つの直列共振フィルタ $L_1 - C_1$ と $L_{h1} - C_{h2}$ に流れる電流の差がシャントキャパシタ C_S に流れ込み、その電流がスイッチ電圧 v_S を発生させる。スイッチがオンになる瞬間に、スイッチ電圧 v_S は ZVS/ZDS 動作条件を満たす。また、共振フィルタ $L_{h1} - C_{h1}$ により、スイッチに 2 次高調波成分を持つ電流が注入されるため、スイッチ電圧ストレスが 2 倍の供給電圧まで低減される。さらに、ダイオード D はそれに流れる電流が零になる際にオフとなり、かかる電圧が順方向電圧降下になる際にオンとなる。ダイオードの順方向電圧降下は微小な電位であるため、零と見なすことができる。そのため、送電部のダイオードにかかる電圧も ZVS/ZDS 動作条件を満足していると言える。送電部も共振フィルタ $L_{h2} - C_{h2}$ により、ダイオードに 2 次高調波成分を持つ電流が注入されるため、ダイオードの電圧ストレスも約 2 倍の出力電圧まで低減される。これらのことにより、このワイヤレス給電システムを超高周波化・超高電力密度化を高電力変換効率のもと達成する。

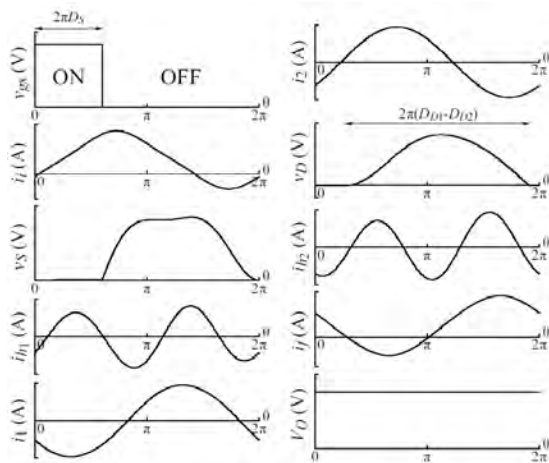


図2 最適状態における動作波形

2.2 解析

本解析では、超高周波高効率ワイヤレス給電システム内の高調波の扱いがポイントとなる。そのため、よく用いられている基本周波数解析でなく、電流・電圧に高調波成分を含むと仮定した上で回路の応答と各素子の関係を解析的に導出する。電力変換回路のスイッチへ外部から高調波電流を注入することによりスイッチ電圧と電流の連続性を担保される電源回路の定常解析技術を確立した[3]。[3]で提案した高調波解析技術をここに適用しながら解析を進める。解析より、電源回路の波形式や設計式を導出する。

2.3 設計例

本章では、回路実験を行い、提案システムとその解析の妥当性を確認する。設計仕様として、供給電圧 $V_I = 20$ V、出力電圧 $V_O = 19$ V、動作周波数 $f = 1$ MHz、および負荷抵抗 $R_L = 50 \Omega$ を与える。また、スイッチングデバイスとして、SUD06N10 MOSFET とショットキーダイオード C10T06QH を用いた。さらに、空芯ソレノイドコイルを送電コイルとして使用する。送受電コイルの仕様として、直径 15.2 cm、巻き数 8、層数 1 を与える。以上の設計仕様により、超高周波高効率ワイヤレス給電システムの各設計値

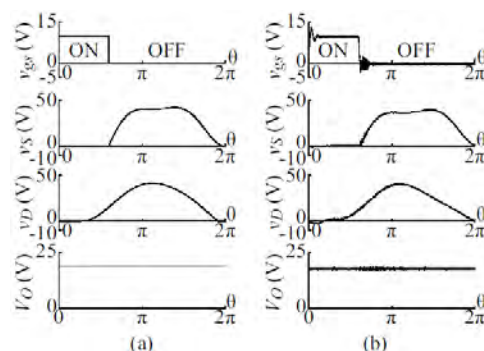


図3 超高周波高効率ワイヤレス給電システムの波形。(a) 解析波形。(b) 実験波形。

が導出される。図 3 に解析および回路実験の波形を示す。この図では、スイッチ電圧はすべて ZVS/ZDS 動作条件を満足している。また、送電部のスイッチ電圧のピーク値はそれぞれ供給電圧と出力電圧の約 2 倍まで抑えられる。これらの結果より、提案システムとその解析の妥当性を示している。

3. まとめ

本研究では、超高周波高効率ワイヤレス給電システムとその解析に基づいた設計手法を提案した。回路実験を行い、スイッチ電圧波形は全て ZVS/ZDS 動作条件を満足し、スイッチ電圧ストレスが大幅に低減された。また、解析的に求めた波形は実験によって得られる波形と定量的に一致することを示すことにより提案したシステムとその解析手法の妥当性を確認した。今後、提案したワイヤレス給電システムに負荷非依存モードを適用し、その設計手法を確立する。

参考文献

- [1] R. E. Zulinski and K. J. Grady, "Load-independent class E power inverters: part I-theoretical development," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, no. 8, pp. 1010-1018, Aug. 1990.
- [2] J. W. Phinney, D. J. Perreault, and J. H. Lang, "Radio-frequency inverters with transmission-line input network," *IEEE Trans. Power Elect.*, vol. 22, no. 4, pp. 1154-1161, 2007.
- [3] X. Wei, T. Nagashima, M. K. Kazimierczuk, H. Sekiya, and T. Suetsugu, "Analysis and design of class-E_M power amplifier," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 61, no. 4, pp. 976-986, 2014.

研究項目：若手教員研究支援助成金

研究期間：2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文)：イリジウム-アルミニウムハイブリッド触媒の創製と医薬品合成研究への応用

研究課題名(英文)：Development of Iridium-Aluminium Hybrid Catalysts and Application to Synthesis of Biologically Active Compounds

研究者：原口 亮介

HARAGUCHI Ryosuke

千葉工業大学

工学部 応用化学科 助教

1. はじめに

トリアゾリリデン配位子はNHC配位子の中でも近年注目を集めている配位子群である。イミダゾリリデンなどの従来用いられてきたNHC配位子に比べ、(1)強力な電子供与能と(2)合成容易性のため、これまで錯体化学および触媒化学の分野の進展に大きく貢献してきた。しかし、これまで報告されてきたトリアゾリリデン金属錯体の多くは、単一の金属のみ有するものであり、二種類の異なる金属を有するトリアゾリリデン金属錯体の合成例は極めて少ない。このような複数の金属元素を含むトリアゾリリデン錯体を簡便に合成する手法を開発することができれば、2つの金属が協働的に作用する新たな触媒反応の開発につながる可能性を秘めている。このような背景のもと著者らは、イリジウムとルイス酸部位(鉄やアルミニウム)を分子内に有するトリアゾリリデン金属錯体を新たに設計した。イリジウム錯体はC-H活性化反応に有効であることが数多く報告されている一方で、触媒活性および位置選択性の向上が今後の課題とされてきた。そこで、アルミニウムや鉄のようなルイス酸を基質認識部位として導入したイリジウムトリアゾリリデン錯体が合成できれば、位置選択性の大幅な向上が期待される。また、トリアゾリリデン配位子の強力な電子供与能により、C-H結合への酸化的付加が促進されることで、従来の触媒よりも高い活性が発現しないかと期待した。

2. 研究の内容

(1) イリジウムとアルミニウムを有するトリアゾリリデン金属錯体の合成

まず始めにイリジウムとアルミニウムを有するトリアゾリリデン金属錯体の合成を検討した。これまで報告されているアルミニウム錯体の合成法を様々検討したものの、イリジウムとアルミニウムを有するトリアゾリリデン錯体の合成は達成できなかった。この原因としては、アルミニウムの高過ぎるルイス酸性により、設計した錯体が空気下で不安定なためではないかと考えられる。

(2) イリジウムと鉄を有するトリアゾリリデン金属錯体の合成

次に、イリジウムと鉄を有するトリアゾリリデン金属錯体の合成を検討した。鉄は空気下でも安定に存在できながら、高いルイス酸性を示すことが知られている。また、シクロペンタジエニル骨格によりサンドイッチされたフェロセン化合物群は、このシクロペンタジエニル部位に置換基を2つ以上有する場合面不斉が発現するため、イリジウムと鉄を有するトリアゾリリデン金属錯体は光学活性体として合成することが可能となる。これは不斉C-H官能基化触媒としての利用も期待される。そこで様々検討した結果、図1に示す合成スキームによりイリジウム-鉄トリアゾリリデン金属錯体の合成に成功した。

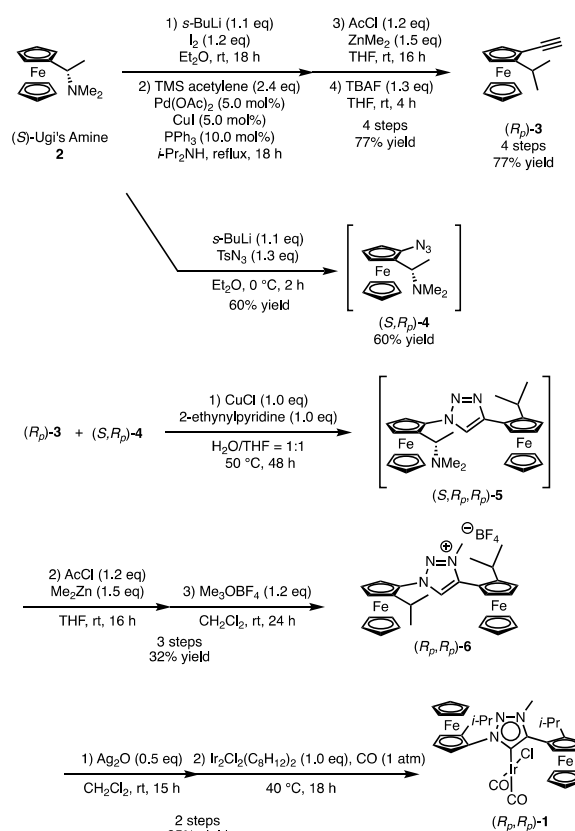


図1 イリジウム-鉄金属錯体の合成

まず、市販の Ugi アミンに対してブチルリチウムを作用させることでリチオ化し、これをヨウ素分子と反応させることでヨウ素化体を得た。このヨウ素化体に対して、TMS アセチレンとの菌頭カップリングを行った後に、アシルクロリドとジメチル亜鉛と反応させることでメチル化生成物を得た。その後、TBAF を用いてシリル基を脱保護することで、面不斉アルキン **3** を高収率で得た。また、市販の Ugi アミンをリチオ化した後、トシルアジドと反応させると面不斉アジド **4** が得られた。続いて、塩化銅とエチニルピリジン存在下、**3** と **4** との環化付加反応を行い、面不斉トリアゾール **5** を得た。次に、**5** に対してアセチルクロリドとジメチル亜鉛を作用させて、トリメチルオキシニウムテトラフルオロボレートと反応させることで、面不斉トリアゾリウム塩 **6** を得た。最後に、この **6** を酸化銀と反応させ銀錯体を形成させた後に、一酸化炭素一気圧下でイリジウム塩と反応させることで、最終目的物であるイリジウム-鉄トリアゾリリデン錯体 **1** を得た。なお、錯体 **1** の生成は ^1H NMR および ^{13}C NMR により確認した。

Complex	$\nu(\text{CO}) (\text{cm}^{-1})$	$\nu_{\text{av}}(\text{CO}) (\text{cm}^{-1})$	TEP (cm^{-1})
$[\text{Ir}(\text{IMes})(\text{CO})_2\text{Cl}]$ 11	2066, 1980 ^b	2023	2050
$[\text{Ir}(\text{IPr})(\text{CO})_2\text{Cl}]$ 12	2067, 1981 ^b	2024	2050
$[\text{Ir}(\text{IPr}^*)(\text{CO})_2\text{Cl}]$ 13	2068 1984 ^c	2026	2052
$[\text{Ir}(\text{TMs})(\text{CO})_2\text{Cl}]$ 14	2062, 1976 ^d	2019	2046
$[\text{Ir}(\text{TfC})(\text{CO})_2\text{Cl}]$ 15	2060, 1977 ^e	2018	2045
$[\text{Ir}(\text{TfC}^*)(\text{CO})_2\text{Cl}]$ 16	2058, 1976	2017	2044

^a Using the linear regression from ref. 13a. ^b From ref. 13a. ^c From ref. 12b. ^d From ref. 9d. ^e From ref. 13b.

図2 トリアゾリリデン配位子の電子供与能の評価

(3) トリアゾリリデン配位子の電子供与能の評価

C-H 官能基化反応において金属錯体触媒を構成する電子供与能は極めて重要である。そこで、本錯体のトリアゾリリデン配位子の電子供与能を赤外分光法を用いて評価することとした。金属カルボニル錯体の赤外分光法では、カルボニル伸縮振動の値が小さいほど、金属中心の電子密度が大きいことを示す。図2には様々なイリジウムカルボニル金属錯体のカルボニル伸縮振動の値を比較した結果を示している。この結果、本錯体がこれまでに報告されたトリアゾリリデン配位子の中でも、最高レベルの電子供与能を示すことを見出した。このため、本錯体を C-H 官能基化に適用することで、高い触媒活性を示すこと可能性がある。また、本錯体は面不斉フェロセニル基にもとづく光学活性金属錯体であるため、不斉 C-H 官能基化への展開も期待される。

3. まとめ

本研究では、イリジウムと鉄を含む新たなトリアゾリリデン金属錯体を新たに設計し、その合成法を開発した。また、赤外分光法を用いることでトリアゾリリデン配位子の電子的性質を明らかにすることに成功した。これらの知見は、C-H 官能基化反応への展開を大いに期待させるものである。今後は生物活性物質の C-H 官能基化反応へ適用し、本錯体の触媒活性評価を行っていく。また、本錯体は面不斉フェロセニル基を有しているため、光学活性トリアゾリリデン

金属錯体であるため、不斉 C-H 活性化への展開も期待できる。

参考文献

- (1) Frenking, R. H. Grubbs and G. Bertrand, *Organometallics*, 2011, 30, 2617; (b) B. K. Keitz, J. Bouffard, G. Bertrand and R. H. Grubbs, *J. Am. Chem. Soc.*, 2011, 133, 8498; (c) E. C. Keske, O. V. Zenkina, R. Wang and C. M. Crudden, *Organometallics*, 2012, 31, 6215; (d) J. Huang, J.-T. Hong and S. H. Hong, *Eur. J. Org. Chem.*, 2012, 6630; (e) A. Bolje and J. Kos $\check{\text{m}}$ rlj, *Org. Lett.*, 2013, 15, 5084; (f) M. Gazvoda, M. Virant, A. Pevec, D. Urankar, A. Bolje, M. Koc $\check{\text{e}}$ var and J. Kos $\check{\text{m}}$ rlj, *Chem. Commun.*, 2016, 52, 1571;
- (2) (a) A. Poater, B. Cosenza, A. Correa, S. Giudice, F. Ragone, V. Scarano and L. Cavallo, *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2009, 1759; (b) A. Chartoire, X. Frogneux, A. Boreux, A. M. Z. Slawin and S. P. Nolan, *Organometallics*, 2012, 31, 6947.

(2) 基幹的 KPI の抽出とそのマネジメント方法の検討

上記のモデルを基に、KGI に特に関連深い基幹的 KPI を抽出し、そのマネジメント方法を下記の通り検討した。

① 売上向上に貢献する人材育成マネジメント

製品開発の直接的な経済価値である「A1. 3年間の売上(万円)」及びそれに連なる「A2. 利益」「D4. 販売数」のノードと全ての KPIs の間に「E1. 人材育成の状況」が介在している。Figure 1 は A1 と E1 のスコアの相関関係を示しており、人材育成状況における Rank 3 (少し育った) までに売上のスコアが急上昇し、それ以降は伸びが鈍化している。従って人材育成に力を注ぐほど売上が伸びるのではなく、育成の仕組みを構築して効果を実感できる程度の取り組みが効果的と判断できる。さらに E1 に接続されたノードの関係から、要求の明確さ、管理の強度、環境や社会への貢献、社内コミュニティの活性度が人材育成にプラスの影響を与えることがわかる。こうした情報から、利益に変重しない価値を啓発しつつ、社内コミュニティを介在させた人材育成の仕組みを、計画的・明示的に実装することが効果的といえる。これらを踏まえ、実際の製品開発の成功・失敗例から具体的方策を研究していくことが求められる。

② 市場シェア向上に貢献する知的財産マネジメント

製品開発における「D5. 3年間の市場シェア(%)」は、「D6. 3年間の不具合発生件数」を経由して「D8. 社内論文の表彰件数」が影響を与え、さらにそれに対して「D7. 学术论文の発表件数」、そしてクラスターノードを中継して(つまり企業属性によって関連の有無が変化して)「D9. 特許登録の成功率(%)」が影響を与えていた。このことから、まず特許が重要な役割を果たす分野の企業については、特許登録が可能なレベルまで知的財産を洗練させ、外部の学術機関での研究発表を行い、それを中核技術として多少のトラブル発生を想定して製品化していくことが、シェアの獲得につながる。製品開発チーム内の知的財産創出において「アイデアの量を増やして質を向上させる」アプローチが有効であることは広く知られているが、全社レベルの知的財産の創出戦略としては、特許登録や学术论文の発表が可能なレベルまでアイデアの質を高めることを念頭に置いた施策を実施する方が市場シェア獲得につながりやすいと言える。これらを踏まえた具体的方策を研究することが求められる。

③ 売上と市場シェアに貢献する外部連携マネジメント

C51, 52, と D61, 62 及びその隣接ノードの関係性をみると、売上・利益等の経済的価値を重視する場合は外部組織の「貢献度」に注視し、要求を明確にして取り組むこと、市場シェアや学術成果の創出を重視する場合は外部組織の「多様性」に注視し、その成果を積極的に顧客へアピールしていくことが良い結果につながりやすいと言える。また連携する外部機関がベンチャー企業であるか否かは、KGI の成否に対してほとんど影響しないと言える。これらを踏まえた具体的方

策を研究していくことが求められる。

(3) 分析アルゴリズム・データを基に開発したプロトタイプ

分析対象企業の年商・業種と KGI を指定することで、上記の分析アルゴリズムと 1,000 件の事業開発の実データを基に、その KGI・KPI の確率伝播モデルと相関グラフを表示する Figure 2 のようなプロトタイプを開発・公開した。



Figure 2 研究成果を用いた「EBPM アナライザ」の画面⁽²⁾

3. まとめ

研究期間中の成果は有審査の国際会議プロシーディングス及び論文誌に計 4 件掲載され、ビジネス・マネジメントの研究領域において高い評価を受けることができた。今後は上記のプロトタイプを活用した実証実験と改良を重ね、ビジネス、経済、健康科学等の幅広い分野におけるエビデンスベースのマネジメントを支援する基盤的技術として社会実装を図る所存である。

本研究に関する主な発表論文

- (1) Hironori TAKUMA, Yutaka IWAKAMI "Extraction of Fundamental KPIs in New Product Development Using Bayesian Network Analysis", Journal of International Association of P2M Vol.14, No.1, 2019
- (2) Hironori TAKUMA, Yutaka IWAKAMI "Consideration of Fundamental KPIs and Their Relationship with Environmental Protection in New Product Development Using Bayesian Network Analysis", Proceedings of ICIMTech 2019 (IEEE Xplore), 2019
- (3) Naoki ISHIKAWA, Atsushi SHIMODA, Hironori TAKUMA "Designing of a Network Infrastructure to Promote Active Participation of Youth in Local Community Revitalization", Proceedings of IIAI-AAI 2019 (IEEE Xplore), 2019

参考文献

- (1) Pearl J. "From Bayesian Networks to Causal Networks", Mathematical Models for Handling Partial Knowledge in Artificial Intelligence, 1995
- (2) 田隈広紀「EBPM アナライザ (Web アプリケーション)」
<https://innolabebpm.shinyapps.io/EBPMAnalyzer/>
(2020 年 6 月 30 日現在アクセス可)

〔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 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : デジタル画像相関法を用いた有限要素解析モデルのデータ同化に関する研究

研究課題名(英文) : A study on data assimilation of finite element model by using digital image correlation method

研究者 : 秋田 剛
AKITA Takeshi

千葉工業大学
工学部 機械電子創成工学科 准教授

1. はじめに

構造部材の損傷は、機械や構造物を安全に運用するための妨げになる。損傷検出の方法として、センサ情報などを直接用いる方法と解析モデルパラメータ推定問題として損傷の同定を行う方法がある⁽¹⁻³⁾。このうち、後者の方法は推定されたモデルパラメータを用いて損傷後の挙動予測や非測定箇所の状態把握に適用することが可能となるなど利点も多いが、推定可能なモデルパラメータは利用するセンサの数や精度に依存するためパラメータの設定法や使用するセンサの選定が重要となる。

近年、デジタル画像相関法を代表とする画像計測法の発展により、高解像度のデジタルカメラを用いることで、物体の撮影領域に対する膨大な数の2次元的な変位計測データを容易に取得することができるようになってきている。膨大な数の変位計測データを利用することで、多数のモデルパラメータを推定することが可能になると考えられる。本研究では、2次元の有限要素解析モデルに対して画像計測から多数の節点変位が計測可能であると想定し、各要素の剛性をモデルパラメータとし、構造的部分的な損傷を要素剛性の低下として損傷同定を行うことが可能であるかを検証した。本研究では、まず非線形有限要素解析ソフトウェア MSC.Marc を用いて切り欠きを有する平板モデルを作成し、数値シミュレーションによる損傷部材の擬似的な引張試験データを作成する。次に切り欠きのない平板の有限要素モデルを作成し、擬似的な引張試験データを使って各要素の剛性をモデルパラメータとしたデータ同化実験を行う。ここにデータ同化とは、数値シミュレーションと計測データを統計的に融合する技術⁽⁴⁾であり、様々なセンサ情報を取り入れたモデルパラメータ推定や不適切問題への対処が容易なことが知られている。

2. 研究の内容

(1) 平板モデル

図1に示すように全長75 mm、幅20 mmの板材に対して左下部から30 mmの位置に三角形の切り欠きを設定して損

傷部材とした。図1のモデルを縦方向に7分割、横方向に5分割した有限要素メッシュを基本モデルとした。切り欠きを含む要素に対して、図2に示すように切り込み深さを0.5 mm、0.8 mm、1.0 mm、2.0 mm、3.0 mmとして5つのモデルを作成した。

MSC.Marc を用いて図1の下部を完全固定、上部を2 mm 強制変位させて変位増分法により解析を行った。増分ステップは100とした。解析結果から求められる基本モデルの節点変位座標を抽出して擬似的な計測データを作成した。

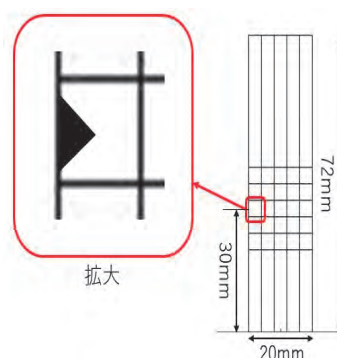


図1 基本モデルと切り欠き部

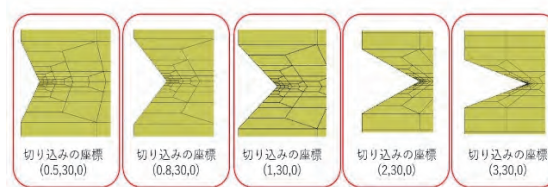


図2 切り欠き部の有限要素メッシュ

(2) データ同化実験

図1の基本モデルを使ってデータ同化を行う。データ同化では、各要素の剛性をモデルパラメータとして、疑似計測データを使って増分ステップごとに各要素の剛性を推定する。データ同化法として拡張カルマンフィルタを適用し、実験手順は、文献5と同様とした。

図3に要素剛性の推定結果を増分ステップの初期段階(10ステップ)、中期段階(50ステップ)、最終段階(100

ステップ) でそれぞれ示す。コンター図は、要素剛性の初期値で正規化している。図中の赤枠で囲った部分が、切り欠き部に対応する要素である。図から初期段階(10 ステップ)では、どのケースでも推定された要素剛性がほとんど変化せず、損傷部の同定は困難であった。中段階(50 ステップ)では、推定された要素剛性が損傷部で低下することが明確に確認できた。切り込み深さが大きくなるほど、基本モデルの切り欠き部に対応する要素の変形が大きくなるため、要素剛性が低下して推定されると考えられる。ただし切り欠き部の存在は、周辺の要素の変形にも影響を与えるため、切り欠き部に対応する要素以外にも要素剛性が低下して推定されている。最終段階(100 ステップ)では、切り欠き部による変形の影響で複数の要素剛性が低下して推定されることがわかる。

3. まとめ

本研究では、2次元の有限要素解析モデルに対して各要素の剛性をモデルパラメータとし、構造的部分的な損傷を要素剛性の低下として損傷同定を行うことが可能であることを数値実験により検証した。推定法として、拡張カルマンフィルタを用いたデータ同化法を適用した。数値実験の結果、推定される要素剛性が損傷部で低下することが確認できたが、損傷部の影響で変形が大きくなる他の部分でも推定される要素剛性が低下することがわかった。今後は、推定される要素剛性の分布と様々な損傷形態との関係を検討していきたい。

謝辞

本報告の解析結果は、千葉工業大学機械電子創成工学科に所属していた舘脇綾乃氏が著者の指導の下で令和元年度卒業研究の中で行ったものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 矢代 茂樹, 村井 一恵, 岡部 朋永, 武田 展雄, 埋め込み FBG センサを用いた有孔積層板の損傷同定に関する数値解析および実験結果への適用, 日本複合材料学会誌, Vol. 32, No. 5, pp. 208-217 (2006).
- (2) 遠藤 龍司, 塩田 寿美子, 登坂 宣好, フィルタ理論に基づくアルゴリズムを用いたフレーム構造モデルの損傷同定解析, 日本計算工学会論文集, 2001, Vol. 2001, pp. 20010028 (2001).
- (3) 村上章, 登坂宣好, 堀宗朗, 鈴木誠, 有限要素法・境界要素法による逆問題解析, コロナ社, 東京 (2002).
- (4) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮, データ同化入門一次世代のシミュレーション技術一, 朝倉書店 (2011).
- (5) 秋田剛, アンサンブルカルマンフィルタを用いた要素剛性の逐次推定と損傷同定への適用, JCOSAR 2019 論文集 (A 論文), Vol. 9, pp. 494-499 (2019).

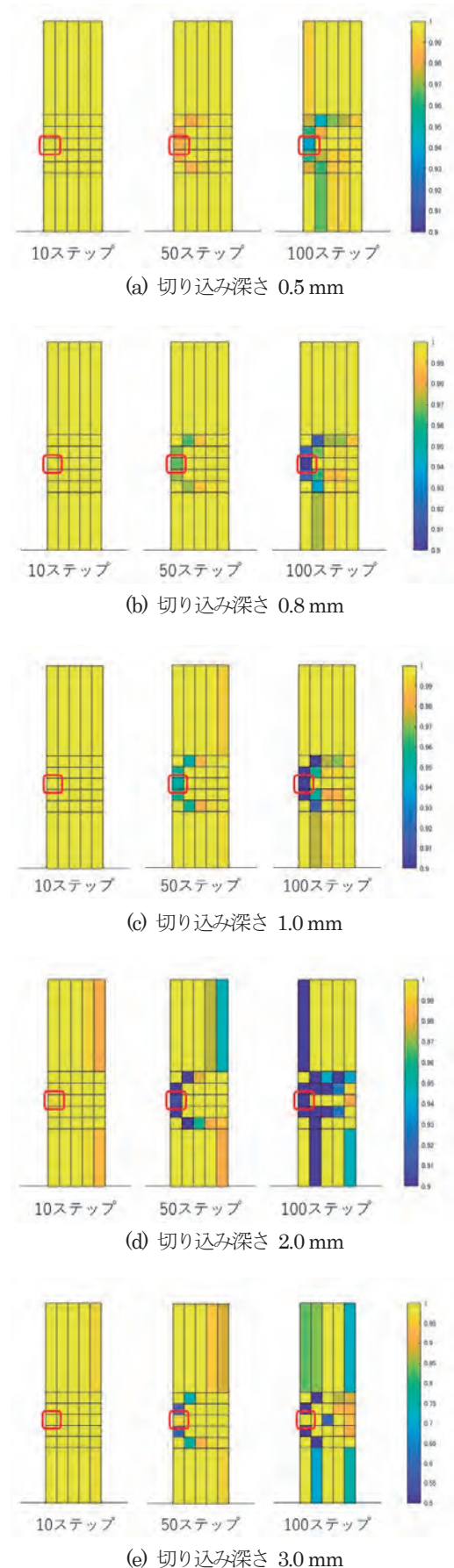


図3 要素剛性の推定結果

研究項目 : 科研費採択者助成金
研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29
研究課題名(和文) : AFM スクラッチ加工による研磨加工特性評価

研究課題名(英文) : Polishing characteristics evaluation by AFM scratch machining

研究者 : ○松井伸介 千葉工業大学
MATSUI Shinsuke 工学部 機械電子創成工学科 教授

赤坂孝幸 千葉工業大学
AKASAKA Takayuki 工学研究科 機械サイエンス専攻

1. はじめに

近年, 研磨技術の高度化が求められている. そこで AFM 触針を研磨加工における砥粒の切れ刃と考え, 石英製光ファイバ端面に対して液中でスクラッチ加工を行い, 触針の材質, 加工雰囲気及び加工荷重を変化させたときの加工特性に及ぼす影響について評価を行っている. 本検討では切れ刃としてアルミナ触針, ダイヤモンド触針を用い, 加工雰囲気としてアルカリ性溶液を用いてスクラッチ加工を行い, 研磨加工特性に及ぼす影響について検討を行った.

2. 実験方法

図1にスクラッチ加工の概略図を示す. 光ファイバ端面にある直径10 μm のコア部を含む20 μm 四方の範囲にスクラッチ加工を行った. その際, 液中でスクラッチ加工を行うことでスラリーを用いた加工を模擬した. 表1に実験条件を示す. 試料の光ファイバは反射減衰量が55 dB 以上の加工ダメージがほとんどないものを使用した. 光ファイバの反射減衰量を測定することによって加工ダメージの評価を行うことができる1). 加工荷重は50 μN で行い, 液雰囲気には純水, および KOH で調整したアルカリ溶液 (pH 10.0, pH 11.0) を用いた. スクラッチ加工後に AFM を用いて大気中にて加工痕の深さを測定した. また, 加工に用いた AFM 触針の先端部分を FE-SEM を用いて観察し, 画像データより触針先端の磨耗量の概算を行い, 光ファイバ端面のスクラッチ加工量と比較した.

3. 実験結果および考察

表2に純水中における各種触針の加工特性を示す.

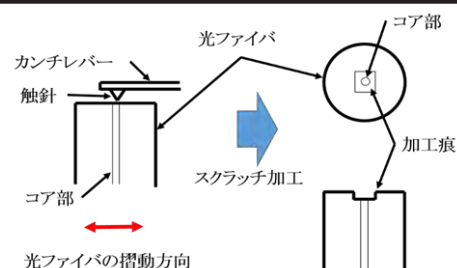


図1 スクラッチ加工の概略図

表1 実験条件

カンチレバー	材質: ステンレス
触針	ダイヤモンド, アルミナ 先端曲率半径 0.1, 0.2 μm
スクラッチ加工	速度 : 1.0 sec/line ライン数 : 512×2 走査範囲 : 20 μm 四方 加工荷重 : 50 μN
試料	石英製シングルモード光ファイバ
加工雰囲気	純水 アルカリ溶液 (pH 10.0, pH 11.0)

表2 純水中における各種触針の加工特性

触針材料	加工深さ [nm]	反射減衰量 [dB]	スラブ硬度 [kg/mm ²]
ダイヤモンド	2.4	44	>7000
アルミナ	0.1	56	2100-2500

ダイヤモンドによるスクラッチ加工では、2.4 nm の加工深さが得られた。反射減衰量が低下していることから、加工ダメージが発生していることがわかった。一方アルミナ触針の場合では、非常に小さい加工深さが得られ、反射減衰量の低下は認められなかった。表 3 に各 pH におけるダイヤモンド触針の加工深さと反射減衰量を示す。pH が上昇するに従い加工深さが増加することがわかった。一方で反射減衰量に大きな変化は見られなかった。液雰囲気 pH の上昇によりシリカの溶解速度が増加することが報告されており 2), 3), これが原因で加工量が増加しても、加工ダメージは増加しなかったと考えられる。図 2 に各溶液中における加工後のアルミナ触針の FE-SEM 像を示す。図より、pH が増加するに従い、触針先端部分の磨耗量は多くなることがわかる。図 3 にアルミナ触針の加工量、触針磨耗量および反射減衰量の比較を示す。加工量および磨耗量はそれぞれ、光ファイバ端面の加工体積および触針先端の磨耗体積を mol へ換算したものである。pH 7.0 から pH 10.0 にかけては加工量、触針磨耗量ともにほとんど増加しなかった。pH 11.0 では加工量、触針磨耗量ともに増加しているが、加工量が触針磨耗量を上回った。これはより少ない触針磨耗でより多くの加工が行えたものと考えられる。反射減衰量については、いずれの場合も 55 dB を上回っており、加工ダメージは非常に少ないと考えられる。

4. まとめ

スラリーを用いた研磨加工を模擬して、AFM 触針を用いて石英製光ファイバ端面に対して各 pH の溶液中でスクラッチ加工を行った結果以下のことがわかった。ダイヤモンド触針の場合 pH が上昇するに従い加工深さが増加したが、加工ダメージは増加しなかった。アルミナ触針の場合 pH 7.0 から pH 10.0 にかけては加工量および触針磨耗量はほとんど増加しなかったが、pH が 11.0 に上昇したとき加工量が大きく増加し、触針磨耗量を上回った。加工ダメージはどの pH においてもほとんどないことがわかった。

5. 外部発表

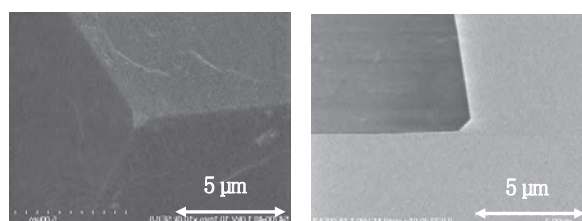
赤坂孝幸, 松井伸介, 2020 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集

6. 参考文献

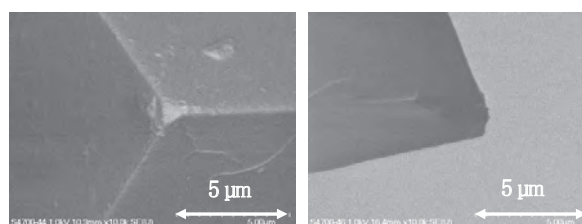
- 1) 松井伸介, 大平文和, 小藪国男, 松永和夫: 光ファイバの端面研磨と加工変質層, 精密工学会誌, 64, 10, p. 1467-1469 (1998)
- 2) 白 淑琴, 占部 真示, 岡上 吉広, 横山 拓史: 水溶液中における非晶質シリカの溶解に及ぼす亜硫酸ナトリウムの影響, 分析化学, 54, 9, p. 767-773 (2005)
- 3) R. K. Iler: The chemistry of silica, John Wiley & Sons, Inc. p. 366 (1979)

表 3 各 pH におけるダイヤモンド触針の加工特性

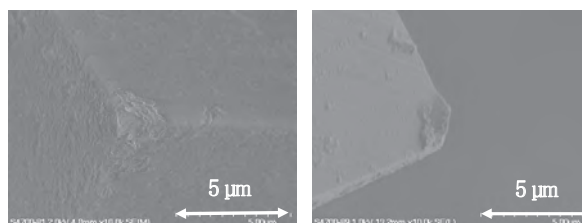
pH	加工深さ [nm]	反射減衰量 [dB]
7.0	2.4	44
10.0	2.8	44
11.0	3.2	44



(a) pH 7.0 (正面,側面)



(b) pH 10.0 (正面,側面)



(c) pH 11.0 (正面,側面)

図 2 各溶液中における加工後のアルミナ触針のFE-SEM 像

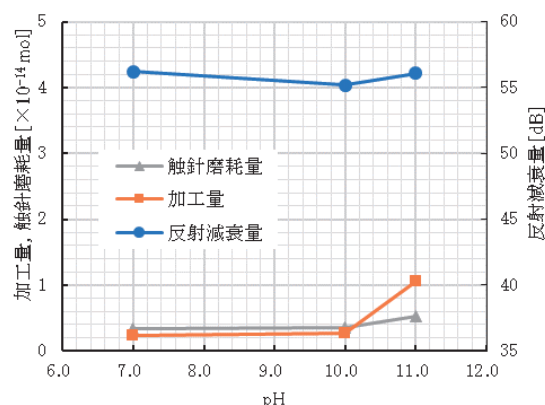


図 3 アルミナ触針の pH 変化に対する加工特性

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : ホットスポットと量子効果の増強を起源とする新原理磁気物質: センサ材料の新開発

研究課題名(英文) : Novel-theorized magnetic materials originated from hotspots and enhanced-quantum effects: new development of sensor materials

研究者 : 安川 雪子

YASUKAWA Yukiko

千葉工業大学

工学部 電気電子工学科 准教授

我々はTbFeCo磁性膜と貴金属ナノ粒子、誘電膜を複合した磁気プラズモニック物質を作製し、これを研究対象としている。この磁気プラズモニック物質を磁気光学効果型・磁気センサ用基盤材料として実現するには、磁気光学効果の飛躍的な増強が必須である。これを実現するために以下の3点よりアプローチを試みている。(1) 貴金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴によって励起されるホットスポット電場(均一で増強された電場のこと)と、TbFeCoの磁気光学効果を相互作用させ、磁気光学効果を増強する。(2) 光を物質内部で版ささせる光干渉効果により磁気光学効果を増強する。(3) ホットスポット電場でTbFeCo磁性膜のスピン軌道相互作用を増強し、これによって磁気光学効果の増強を試みる。ホットスポット電場でスピン軌道相互作用を増強すると電子スピンの回転量が增大すると期待され、従ってスピン回転量の増大を介した磁気光学効果の増強を目指している。以上(1)~(3)の組み合わせにより、磁気プラズモニック物質の磁気光学効果を増大する、すなわち磁気プラズモニック物質のKerr回転角を増大するのが狙いである。

2019年度は磁気プラズモニック物質の構造最適化を目指して研究を行った。磁性膜、貴金属ナノ粒子、誘電膜、酸化防止膜等、磁気プラズモニック物質の積層構造、作製方法、光の吸収率から貴金属ナノ粒子を起源とする局在表面プラズモン共鳴を評価し、目的とする磁気プラズモニック物質の基本構造を決定した。本研究において、磁気プラズモニック物質の基本構造は最も中核となる重要ポイントである。

具体的には、マグネトロンスパッタ法により貴金属の成膜条件を変化させて試料を作製し、最適な磁気プラズモニック物質の積層構造、成膜条件最適化、極大Kerr回転角の増大を目指した。

マグネトロンスパッタ法で貴金属を成膜する際には

DCスパッタ法とRFスパッタ法を用いて成膜した。RFスパッタ法では有意な結果を得られなかったため、貴金属自己組織化ナノ粒子構造が形成し、局在表面プラズモン共鳴の励起が確認されたDCスパッタ法により高温で基板加熱を施しながら貴金属ナノ粒子を作製した。またこの貴金属自己組織化ナノ粒子構造上に成膜したTbFeCo磁性膜において、優れた垂直磁気異方性を確認した。

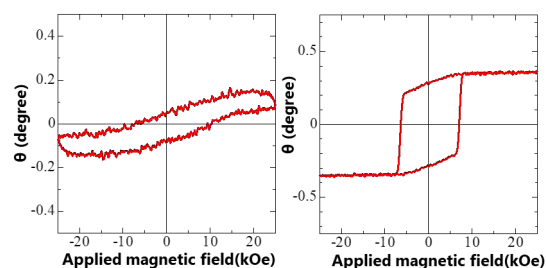


図1 同一の磁気プラズモニック物質構造において異なる実験条件下で作製した際のKerr回転角への影響

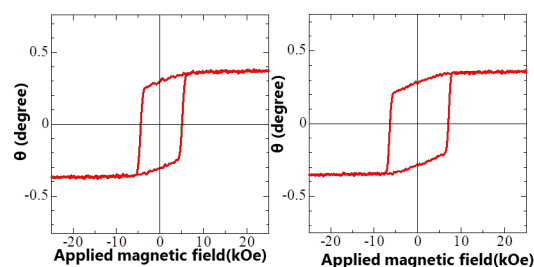


図2 僅かに異なる積層構造を有する磁気プラズモニック物質同士を同一の実験条件下において作製した際のKerr回転角への影響

磁気プラズモニック物質の極 Kerr 回転角は、TbFeCo 磁性膜だけでなく貴金属自己組織化ナノ粒子構造に大きく依存することが明らかになった。また貴金属自己組織化ナノ粒子構造と TbFeCo 磁性膜の間に誘電膜を薄く積層することによって Kerr 回転角が向上することも明らかにした。

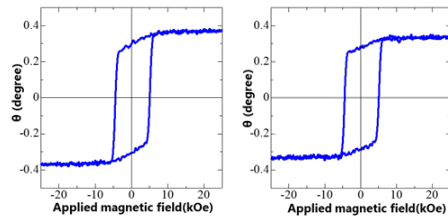


図3 同一の磁気プラズモニック物質に対して異なる波長の光を入射した際の Kerr 回転角への影響

今後の研究展開としては、スピン軌道相互作用に重点を置いた実験に着手する。TbFeCo 磁性膜に希土類元素をドーブし、TbFeCo のスピンの、ドーブした元素の 4f 電子の軌道の相互作用を調整する。ドーパント種や濃度の制御によりスピン軌道相互作用の強度を系統的に変調した一連の磁気プラズモニック物質を作製する。スピン軌道相互作用が弱い場合は、試料に印加する磁場の増加に伴い磁気伝導度が増加し、逆にスピン軌道相互作用が強いと印加磁場に伴い試料の磁気伝導度が減少する。従って磁気伝導度の測定からスピン軌道相互作用長を算出し、スピン軌道相互作用長からそれぞれの磁気プラズモニック物質のスピン軌道相互作用強度を評価することを予定している。

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : 複数カメラを用いた可視光通信システムの高度化

研究課題名(英文) : Performance Improvement of Visible Light Communication System Using Multiple Cameras

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 助教

1. はじめに

可視光通信は、LEDをはじめとする光源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などの情報付加、交通信号機や車両ライト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、情報伝送にも利用することができる。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や、車載カメラなどを受信機に利用し、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 (Internet-of-Things) に適した通信技術として期待できる。スマートフォンカメラを用いた可視光通信には、既に実用化された例もあるが、さらなる用途の拡大や普及促進のためには、通信距離やデータレートなどの通信性能の向上が必要である。

従来のイメージセンサ可視光通信では、単眼カメラを受信機に利用することが一般的であった。近年、スマートフォンには、デュアルカメラ・トリプルカメラといった複数のカメラが搭載されつつある。また、高度道路交通システムの分野においても、ステレオカメラを利用した衝突回避システムが実用化されている。しかしながら、これらの複数カメラを可視光通信に利用した受信手法は検討されていない。そこで本研究では、複数カメラを受信機に用いたイメージセンサ可視光通信について検討し、以下に掲げる項目を目的とする。

- A) 複数カメラから同時刻に得られる複数画像を利用したダイバーシティ受信(受信信号の選択/合成)を検討し、通信性能(ビット誤り率特性、通信可能距離)の向上を図る。
- B) 複数カメラから取得可能な奥行情報を利用した変復調方式を検討し、データレートの向上を図る。

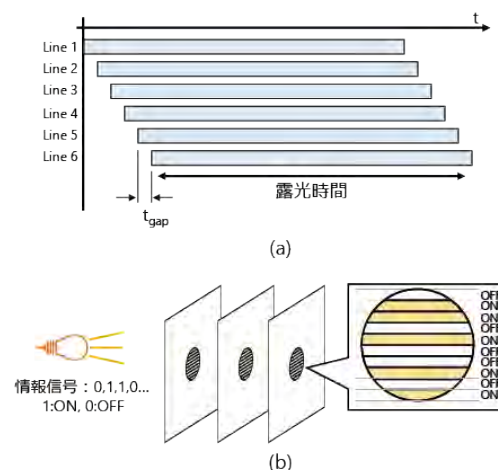


図1 ローリングシャッター方式による、(a) 撮像メカニズム、(b) LED送信機の撮影画像

2. 研究内容

今年度の進捗状況は、次の通りである。

A) カメラの撮像方法は、グローバルシャッター方式とローリングシャッター方式の2種類に大別される。グローバルシャッター方式では、全画素を同時タイミングで露光することで画像を生成。ローリングシャッター方式では、行ごとに順次露光していくことで画像を生成する(図1(a))。グローバルシャッター方式で、可視光通信を行う場合、LEDを撮影速度に合わせて変調する必要があり、1画像で伝送できる情報量は1bitとなる。これに対し、ローリングシャッター方式では、行の露光タイミングのずれに合わせてLEDを変調すれば、画像上では、その変調パターンが図1(b)に示す様な縞状に撮像される。よって、その縞を順次読み出していくことで、情報の復調が可能となり、1画像で多数の情報量が伝送可能となる。そのため、本研究では、ローリングシャッター方式を用いた可視光通信[1]に注目し、複数カメラを利用することで通信性能の改善を目指す。

ローリングシャッター方式で可視光通信を行う場合の課題の1つとして、不均一な輝度分布が挙げられる。例えば、LEDの撮像領域において、中心部分の輝度が飽和してしまう、あるいは、LED撮像領域の端部の輝度が微弱となるといったことから、変調信号が読み取れず、誤りの原因となってしまう。こうした問題を、複数カメラ

を利用することで改善を図る。さらに配置した複数カメラで、同一の LED を撮影した場合、各画像上で、LED の位置がずれた画像が得られる。ローリングシャッター方式において、同一の LED を捉えていても、異なる位置に撮像されていることは、異なる露光時間に撮像されたことを意味する。つまり、同一時刻に送信した信号は、あるカメラでは、飽和が発生するような中心部で捉えていたとしても、別のカメラでは、飽和していない領域で捉えられる可能性があるといったように、カメラごとの通信路の相関が低くなることが考えられる。これにより、複数カメラにより得られた受信信号を選択あるいは合成して復調することで、通信の誤りを低減し、受信可能領域が拡大されることが期待される。上記、提案手法は速やかに実機実験に移行できるように準備が整っている。

B) 二眼カメラにおいて、奥行を推定するためには、ステレオ画像における対応点間の距離(視差)を推定する必要がある。つまり、高精度な奥行推定を実現するためには、正確な視差推定が重要となる。可視光通信用の LED 送信機は、高輝度かつ高速点滅をするという明確な特徴をもっているため、画像上における検出を容易に行うことができる。こうした特徴を利用した LED 送信機の検出手法が提案されており、これらの LED 送信機検出手法を二眼カメラの各画像に利用し、高精度な視差推定を実現するアルゴリズムを提案する。

提案アルゴリズムは、ピクセル精度とサブピクセル精度の視差推定から構成される。ピクセル精度視差推定では、時空間勾配を特徴量に用いた LED 送信機検出手法[2]を利用する。画像上で LED 送信機の存在する領域を時間方向に観測すると、高い時間勾配をもち、空間方向に観測すると比較的小さい空間勾配をもつことが知られている。この特徴量を基に、条件を満たす画素を見つけ出すことで、LED 送信機が存在する領域が検出される。この手法をステレオ画像に適用し、得られた検出領域を対応点としてピクセル精度の視差を推定する。次に、対応点として判定された画素に対して、等角直線フィッティングを適用することで、サブピクセル精度の視差が推定される。これにより得られた視差から奥行情報が計算される。

提案手法の奥行推定精度を実験により評価した。屋内静止環境で撮影された LED のステレオ画像に対して、視差推定によく用いられるブロックマッチング法と、提案視差推定手法により、奥行を推定し、比較した。実験結果を図 2 に示す。この結果から、LED の送信機検出を利用した視差推定は、ブロックマッチング法に比べて 0.5 ピクセルの推定精度の改善が確認できる。また、サブピクセル推定を導入することで、LED の飽和の影響を受けなければ、視差推定誤差は 0.02 ピクセルまで改善され、 $60\text{m} \pm 0.1\text{m}$ の奥行推定精度を示した。

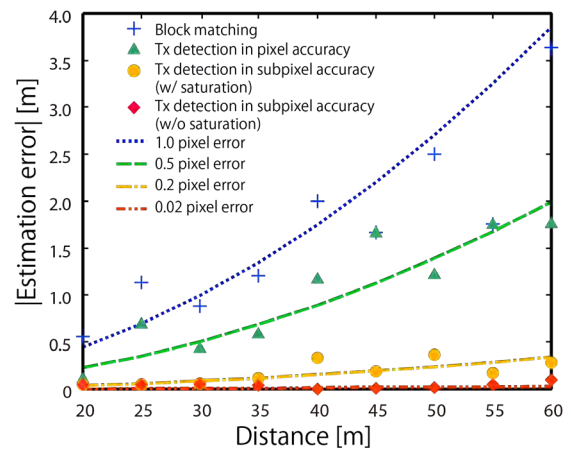


図 2 奥行推定の実験結果

3. まとめ

本研究では、複数カメラを用いたダイバーシティ受信による通信性能改善に関して、実験環境の構築として、LED アレイ送信装置および複数カメラ受信装置の開発を行った。関連研究の調査を通じて、基本的な理論やアルゴリズムの検討を進めており、次年度以降、速やかに実機実験に移行できるように準備を行った。また、二眼カメラから取得可能な奥行情報を利用した変復調方式に関して、その第一ステップとして、二眼カメラと可視光通信用 LED 送信装置を用いた奥行情報の推定アルゴリズムを検討した。奥行情報の取得に関しては、可視光通信用 LED 送信装置の高輝度・高速点滅の特徴を利用することで、高精度な距離推定が可能であることを実験により確認した。次年度以降、提案したアルゴリズムを基に、奥行情報を活用した変調方式の検討を進める。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 木下他, “二眼カメラと可視光通信用 LED 送信機を用いた距離推定手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2019-37, vol. 119, no. 268, pp. 71-76, 2019 年 11 月.
- (2) M. Kinoshita et al., “Stereo Ranging Method Using LED Transmitter for Visible Light Communication,” 2019 IEEE GLOBECOM, pp. 1-6, Dec. 2019.

参考文献

- [1] H. Aoyama and M. Oshima, “Visible light communication using a conventional image sensor,” 2015 12th Annual IEEE CCNC, pp. 103-108, Jan. 2015.
- [2] 臼井他, “路車間可視光通信のための時空間勾配を特徴量とした LED アレイ捕捉手法”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J97-B, no. 7, pp. 536-545, 2014 年 7 月.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : ミトコンドリアゲノムから探る樹木の形成層活動と二次木部形成

研究課題名(英文) : Exploring cambial activity and secondary xylem formation in trees through mitochondrial genomics

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、呼吸反応によりアデノシン三リン酸(ATP)を産生する。ミトコンドリアの状態の変化は細胞の活動に大きな影響を与え、たとえば、プログラム細胞死はミトコンドリアの構造変化と活性低下により引き起こされる。植物細胞では、ミトコンドリアはタンパク質や酵素、DNA、RNA、クロロフィルなど主要な分子の代謝にも関わる。植物のミトコンドリアが持つ独自のゲノムに変異や再編成が生じると、葉緑体の光合成反応¹⁾や茎の伸長成長²⁾などが影響を受ける。

樹木は主要な木質バイオマス資源である木材を生産し、その形成層の代謝活性は木材となる二次木部の形質発現に大きく影響する。ミトコンドリアの特徴・機能を考慮すると、ミトコンドリアは形成層細胞の活性レベルを制御し、樹木の伸長・肥大成長と二次木部形成に大きく関与すると考えられる。しかしながら、樹木成長とミトコンドリアに関する研究事例は極めて少なく、二次木部の形成プロセスにおけるミトコンドリアの機能や役割などは未解明である。本研究は、樹木のゲノム情報が成長を制御し二次木部の形質を決定する仕組みを明らかにすることを大きな目標とし、「樹木におけるミトコンドリアゲノムと形成層活動、二次木部形成の関係」を明らかにすることを目的とする。本研究は、令和元年度から科学研究費補助金の助成を受け(課題番号:19H03021)、本格的に開始された。また、令和元年度に本学附属研究所科研費採択者助成金による支援を受けた。ここでは、本研究の内容を説明し、これまでに得られた成果を報告する。

2. 研究の内容

本研究では以下の内容が計画され、実行されている。

① 樹木ミトコンドリアゲノム解析

ここでは、樹木のミトコンドリアゲノムについて、その構造の決定と特徴の抽出を行う。針葉樹の葉試料から誘導されたカルスから、密度勾配遠心法によりミトコンドリアを分画・精製し、さらに抽出されたゲノムDNAについて次世代シーケンシング解析(NGS解析)を行う。得られたリード・データを基に、遺伝子等のアノテーションや、複製開始点やリピート配列について詳しく解析する。

② ミトコンドリア遺伝子の発現定量解析

ここでは、得られた樹木ミトコンドリアゲノムの情報を基に、NGS解析を行った個体について呼吸反応の関わる遺伝子の発現量を定量解析する。解析結果から、形成層細胞におけるATP産生や物質代謝などの活性レベルとミトコンドリアゲノムの関係を明らかにする。

③ 樹木試料の年輪解析

ここでは、NGS解析を行った個体について、軟X線デンストメトリーにより二次木部の年輪幅や密度の変動を解析する。これにより、供試個体の二次木部形成の特性とミトコンドリアゲノムの関係について考察する。

④ 形成層および二次木部の顕微鏡観察

ここでは、NGS解析を行った個体の形成層細胞の分裂状態や細胞形態、ミトコンドリアの分布状態、また二次木部の細胞形態などについて、各種光学顕微鏡

を用いて観察・解析する。得られた結果から、木材の組織構造の形成とミトコンドリアゲノムの関係を明らかにする。

令和元年度は、これらのうち、おもに①および④を中心に実験を行った。つぎに、これまでに得られた成果について説明する。

3. これまでに得られた成果

3.1 カラマツ・ミトコンドリアゲノムのNGS解析

本研究では、試料として信州大学手良沢山演習林（長野県伊那市）に生育するカラマツ（*Larix kaempferi*）を選定し、その葉試料からカルスを誘導した。カルス誘導は、プラスチドから葉緑体への分化を抑制しミトコンドリアを効率的に分画する目的で行い、約4ヶ月かけて増殖させた。この誘導カルスを用いて、プロトコル³⁾に従いミトコンドリアを分画・精製し、DNAを抽出した。抽出DNAに対してPCRによるチェックを行い、ミトコンドリアとプラスチド両方のゲノムDNAが含まれていることが確認され、現時点ではミトコンドリアの完全な分画は困難であると判断された。この crude な抽出DNAを用いて、NGS（Sequel, Pacific Biosciences）によりリード・データを取得した。なお、抽出DNAが少量であったため、データ取得の前に市販のキット（TruePrime WGA Kit, 4basebio S.L.U）を用いてDNAの増幅を行った。表1に、取得されたリード・データの概要を示す。これらの結果から、現時点では、核由来のDNAは含まれていないこと、およびデータ取得は概ね良好に行われたことが判断された。現在、既知のカラマツ・プラスチドゲノム配列を参照しながら、リード・データからミトコンドリアゲノムの配列解析を実施している。

3.2 カラマツ形成層におけるミトコンドリアの分布

NGS解析に用いたカラマツ個体の形成層を観察・解析するため、化学固定試料を調製し、特に形成層組織におけるミトコンドリアの分布等を観察する方法について検討を行った。化学固定試料から50μm厚の切片を作製し、MITO-ID Red Detection kit (Enzo)でミトコンドリアを染色した。染色切片の観察は、共焦点レーザー顕微鏡（A1RMP+, Nikon）を用いて行った。ミトコンドリアは、形成層組織全体において観察された（図1）。また仮道管レベルで見ると、ミトコンドリアは原形質中に一様かつ比較的高い密度で存在していた。一方で、分裂後に拡大過程に入った仮道管では、その密度がやや減少する傾向が見られた。今後は、ミトコンドリアの存在状態の定量的な評価方法について検討する。

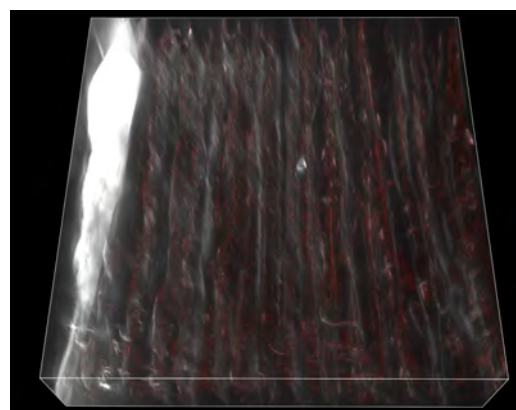


図1. カラマツ形成層におけるミトコンドリアの分布

4. 今後の研究

本研究は、3年間の予定で行われている。このあと研究期間の後半においては、ミトコンドリアゲノムの構造とその特徴を詳しく解析する。また、樹木の当年成長時期におけるミトコンドリア遺伝子の発現プロファイルを明らかにし、形成層活動との関連を明らかにしていく。二次木部形成は木質形成の本質であり、二次木部形成に対するゲノム情報の関与は、木質科学における重要な学術的「問い」である。樹木ミトコンドリアのゲノム解析は、この「問い」に対する極めて重要な「答え」を出すと考ええる。本研究により、ゲノム情報と形質発現機構に基づく新しい木材識別・材質特性評価のシステムを構築でき、木質バイオマスの効率的生産に寄与できると考える。

本研究に関する発表

- 1) 渡辺宇外ほか：樹木形成層におけるミトコンドリアの分布と変動、第70回日本木材学会大会、2020年3月。

参考文献

- 1) Jiao S, et al., Plant Mol. Biol., 57, 303-313 (2005).
- 2) Albert B, et al., Genetica, 117, 17-25 (2003).
- 3) Murcha MW, et al., Plant Mitochondria, Methods and Protocols, 1-12, Humana Press, Springer (2015).

表1. NGS解析リード・データの概要

Total Bases (Gb)	Subread Length Mean (kb)	Subread Length N50 (kb)
19.7	9.36	11.7

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : コネクショニストモデルを用いた消費者語彙における感性情報の抽出と共感構築

研究課題名(英文) : Extracting *Kansei* Information and Building Empathy in Customers Vocabulary Using Connectionist Models

研究者 : 齊藤 史哲

SAITOH Fumiaki

千葉工業大学

先進工学部 知能メディア工学科 准教授

1. はじめに

データの蓄積や収集が容易になった昨今において、顧客の特性や満足度に関するデータの製品開発等への有効活用が望まれている。データに内在する規則性や構造を獲得する人工知能の要素技術である機械学習は、このような大規模なデータを解析するためのツールとして注目を集めている。

本研究は、これらの技術をカスタマーレビューならびにアンケートデータの解析に適用することで、顧客がサービス・製品に対して抱く満足や不満といった感性的な要因の抽出を目指すものである。中でも、顧客の属性や価値観、行動特性を理解する上ではアンケートデータがこれらの情報を多分に含むことから、顧客満足度に関する調査データに着目した。

これらのデータには年齢や性別、収入、家族構成といったデモグラフィクスの情報ならびに、商品・サービスに対する価値観やニーズといったサイコグラフィクス情報も掲載されている。顧客や市場の解析を試みる上ではマーケットのセグメントを抽出する必要があるわけだが、デモグラフィクスの情報のみで市場の構造を把握することは難しく、サイコグラフィクスの情報とデモグラフィクスの情報を統合的に扱うことが重要になる。

特にベネフィット、すなわち顧客の商品やサービスに対する効用はサイコグラフィクスの中でも市場の構造を表す要因として重要なものと考えられており、ベネフィットに基づいたマーケットセグメンテーションが重要視されている。本研究ではベネフィットセグメンテーションに対して機械学習適用することでマーケットに内在する顧客ニーズの構造抽出を試みる。

サイコグラフィクスは心的な要因であるがゆえに、データ解析においては非線形性を仮定した柔軟なモデルが解析において有効と考えられる。そこで、我々はデータに内在する構造の抽出ならびに柔軟な知識抽出が期待できる先進的な教師なし学習モデルを用いて市場のデータ解析を試みた。

2. 研究の内容

2.1 研究の全体像

アンケートやカスタマーレビューなどの顧客情報に

基づいた市場セグメントの抽出ならびに可視化を通じてデータに内在する市場構造要因の抽出を目指している。本研究では、非負値行列因子分解という機械学習手法を用い、多くの質問項目やキーワードから構成され、多次元データとして扱われるデータを低次元の因子データとして抽出し、その因子データに内在するセグメント構造の抽出を試みた。

顧客のセグメントの抽出には、教師あり自己組織化マップならびに、t-SNE を用いることで市場の構造を反映した低次元マッピングを獲得した。これらにより、市場の特性を視覚的に把握できる新たなアプローチを提案した。以下、2.2~2.4にて各方法について述べる。

2.2 セグメントのラベルがある場合の解析

それぞれの顧客の特性において、あらかじめ何らかのセグメントにラベルが割り当てられており、そのラベルと各属性の関連性の理解を目指す上では、ラベルを教師信号とした学習モデルを構築することによって、属性とセグメントの対応関係を抽出することが期待できる。そこで、ここでは教師あり学習モデルの学習結果からの知識抽出を視覚的に把握可能とするモデルとして教師あり自己組織化マップを用いることによって、これらの関係を可視化した。

さらに、別のアプローチとして、ランダムフォレストの変数重要度の中から、真に有益といえる属性を抽出するためのアルゴリズムである Boruta アルゴリズムをセグメントとアンケートの質問項目の関連性データに適用することによって、真に重要な質問項目の検出を試みた。

2.3 セグメントの教師ラベルがない場合の解析

ラベル付けがなされていないデータの解析手法として、先述の t-SNE と非負値行列因子分解の併用によるセグメントの可視化とその要因の表示方法を新たに提案した。図1~2は旅行サイトの利用者アンケートを用いて旅行に対する顧客の効用を可視化したものの一例である。これは、多数の質問項目からなる多次元データを2次元平面上にプロットし可視化した結果を表している。ここでは、PCA などの方法では分布が重なり合っ

い、表示しきれないものをt-SNEにより適切な配置で可視化できている。さらに、各因子の特徴と対応付けることで、セグメントの特性を把握できるように工夫している。

図1は非負値行列因子分解によって抽出された因子の係数行列を、図2はt-SNEによって可視化されたマーケットセグメントの一例を表している。多数の質問項目を統合し、新たに抽出された図1の結果を、2次元平面上に配置して可視化したものが図2である。

図中ではドットの大きさにより各因子の反応の強さを対応付けており、この例では第一因子として抽出された「既婚・60代・女性・リフレッシュ目的・夫婦旅行」に当てはまる客層の特徴のマップの一例を表している。黒い点は効用が「ビジネス」に対応するものであり、この客層と「ビジネス」の効用は対応しないことが視認できる。

2. 4 地理的要因とロイヤルティの関連性

サービス業において、店舗の立地条件やその地域特性が顧客満足やニーズ、ロイヤルティに直結することがある。例えば、都心部のヘアサロン業界では店舗立地やその地域特性が顧客の特性に直結する。代表的な地域として、渋谷や原宿といった若者への支持が高い地域や、銀座などの中老年や比較的收入が高い層に支持される地域などが挙げられる。

ここでは、店舗の地域特性がどのように顧客ニーズにどのような影響を及ぼすかをカスタマーレビューの文書データと店舗データを紐づけて解析することによって、その特性を可視化した。レビューの内容を低次元の

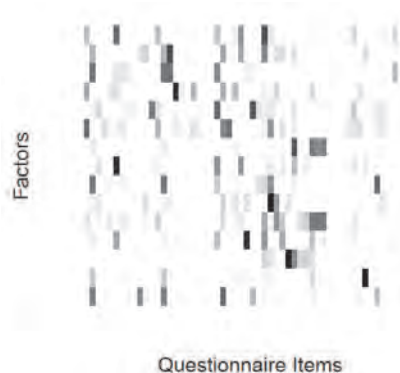


図1 抽出された因子の係数行列

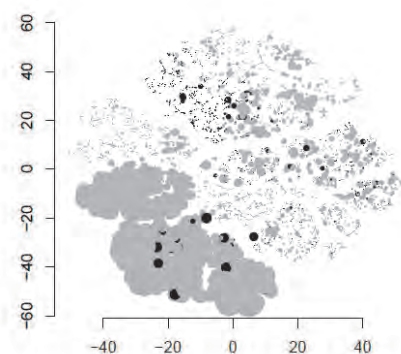


図2 t-SNEによる因子の可視化の一例

データとして抽出するために、潜在ディリクレ配分法を用いてトピックを抽出し、そのトピックと店舗の地域性との関連性を確認した。

3. まとめ

本研究課題では、消費者が製品に対して抱く満足や不満、評価などの情報のマーケティング課題への有効活用を目指して、機械学習に代表されるAIの要素技術を用いて多量に存在するデータの解析方法を提案するものである。まずは科研費採択者助成初年度として、さまざまなデータセットに内在する課題に対して多くの機械学習手法を適用し、課題解決の可能性を示唆してきた。

今後は、さらなる大規模データの解析や、人間の感性的な要因にまで踏み込んだ解析、解析手法自体が抱える問題の解決を進めていきたい。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 齊藤史哲, “t-SNEを用いたベネフィットセグメンテーションによる顧客の分析,” 信学技法, 人工知能と知識処理研究会(2020)
- (2) Fumiaki SAITOH, “Knowledge Reuse of Learning Agent Based on Factor Information of Behavioral Rules,” 26th International Conference on Neural Information Processing, ICONIP2019, part.4, pp.371-379 (2019)
- (3) Fumiaki SAITOH, “Visualized Benefit Segmentation Using Supervised Self-organizing Maps: Support Tools for Persona Design and Market Analysis,” 12th Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, ACIIDS2020, part.2, pp.437-450 (2020)
- (4) 齊藤史哲, “Boruta アルゴリズムを用いたアンケートデータの判別に対する影響要因の検出,” 日本経営工学会 2019 年春季全国大会予稿集

参考文献

- (1) オリコン顧客満足度：学術データ提供, [https://cs.oricon.co.jp/data/academic/\(2020/6/30閲覧\)](https://cs.oricon.co.jp/data/academic/(2020/6/30閲覧))
- (2) L. Maaten and G. Hinton, “Visualizing Data using t-SNE,” Journal of Machine Learning Research, vol. 9, pp. 2579-2605 (2008)
- (3) H. Zhang, TWS. Chow, QMJ. Wu, “Organizing Books and Authors by Multi-layer SOM,” IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 27, no. 12, pp.2537-2550 (2016)
- (4) J. M. Arevalillo, “A machine learning approach to assess price sensitivity with application to automobile loan segmentation,” Applied Soft Computing, vol. 76 pp.390-399 (2019)

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : 確率的非分解型テンソル復元とその画像・信号処理への応用

研究課題名(英文) : Stochastic non-decomposition based tensor restoration and its application to image and signal processing

研究者 : 宮田 高道

千葉工業大学

MIYATA Takamichi

先進工学部 知能メディア工学科 教授

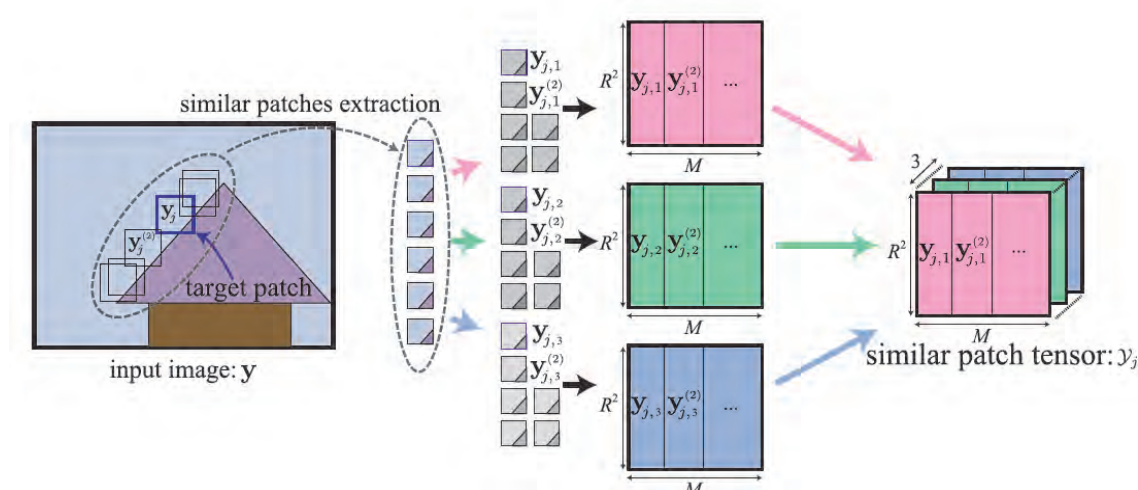


図1 非局所的自己相関の概要と、類似パッチテンソルの構成

1. はじめに

画像・映像信号やインターネットのトラフィックデータ、センサーアレイによって取得した信号などは、一般に高次元配列として記述される。近年、このような高次元配列のデータをテンソルとみなし、観測時に強いノイズが付加されたり、センサの故障などでデータの一部が観測できなかったりするような劣悪な条件下においても、後段の信号処理によって本来観測しなかった多次元情報を復元する手法が数多く提案されている。

これらの手法は一般に、所望のテンソルが低ランク性とよばれる性質をもつという仮定に基づいており、観測したテンソルと近く、かつ低ランク性を満たすようなテンソルを、陽に「低ランクテンソルの和」として記述することによって得るものである。これらの手法(分解型テンソル復元)は一般に計算量やメモリ使用量が大きく、また、解の安定性にも課題があることが多い。

これに対して近年、テンソルを陽に分解することなく、低ランクテンソル近似を実現する新しいフレームワーク(非分解型テンソル復元)が数多く提案されている(例えば [1])。分解型テンソル復元と比較すればその計算量は一般に小さいが、近年信号処理で扱うデータ量が膨大になるにつれ、これらの手法でも計算量の増加が問題となってきたのが現状である。

本課題では、非分解型テンソル復元に必要な計算量やメモリ使用量を大幅に改善する新規のアルゴリズムを開発することを目的としている。これにより、少数のデータからの認識や知識発見が可能となる。また、本研究課題の一部として、一般の画像復元問題に低ランクテンソル復元を応用することで大幅な性能向上を図ることについても検討を行った。

本報告書では、前述の課題のうち、主に後者について得られた成果について述べる。

2. テンソル復元による一般画像復元

一般画像復元問題とは、ノイズやボケ、画素の欠損などにより劣化した観測画像から、原画像を推定する問題であり、現在までに様々な手法が提案されている。自然画像の事前情報を用いた一般画像復元手法は、現在までに様々なものが提案されているが、そのなかでも非局所自己相似性(non-local self-similarity, NLSS)を用いた手法は、高い復元性能を発揮することが知られている。

NLSSの概要を図1に示す。この図に示すように、画像内には注目するパッチ(画像内の矩形の少領域)と画素値が類似するパッチが多く存在することが知られている。この性質はNLSSとよばれており、画像復元において非常によく利用されている。これを利用したノイズ除去の既存手法の一例として、CBM3D(color block

matching 3D) [2] が挙げられる。

本研究では、この類似パッチをノイズやボケなどで劣化した画像内から探索し、類似パッチテンソル (図1 最右端) を構成する。

さらに「それらの類似パッチが (劣化が起きる前には) 互いに類似していた」ことを「類似パッチテンソルが低ランクであった」と置き換えることにより、画像復元問題とテンソルの低ランク近似とを結びつけることに成功した。

なお、類似パッチテンソルの低ランク近似による画像ノイズ復元については、著者らが提案した既存手法 (weighted tensor nuclear norm for denoising, WTNN-D) が存在する [3]。また、ノイズ復元問題を解くアルゴリズムを一般画像復元に応用する手法としては、Plug-and-play alternating direction method of multipliers (PnPADMM) と呼ばれる手法 [4] が知られている。

しかしながら、WTNN-D をそのまま PnPADMM に適用することは、計算時間の観点から現実的ではない。そこで本研究では、

- ・WTNN-D を簡略化した Simple WTNN-D を提案
- ・Simple WTNN-D を PnPADMM に適用

により、テンソル復元を用いた一般画像復元を実現した。

3. 実験結果

提案手法の有効性を確認するために、 256×256 [pixel] の自然画像 12 枚を用いて、CBM3D (に対して PnPADMM を適用して一般画像復元に適用できるようにした手法) との性能比較を行った。

一般画像復元は様々な画像復元問題を含むが、ここでは画素値補完をその一例として実験を行った。観測画像としては、原画像の画素のうち、20% または 40% をランダムに欠損させたものを用い、提案手法によって欠損した画素値を補完する。

PSNR (peak signal-to-noise ratio) を評価尺度として用いたときの比較結果を表1に示す。この表より、提案手法はほぼすべての画像において既存手法を上回る画像復元性能を発揮することが確認できた。

Missing rate	20		40	
Method	CBM3D	WTNNM	CBM3D	WTNNM
Aerial	37.13	37.95	32.90	33.34
Airplane	42.81	45.39	38.18	39.88
Baloon	46.41	47.84	42.85	43.45
Earth	46.21	48.79	41.79	43.14
Girl	40.59	41.17	37.30	37.52
Lenna	43.87	45.00	39.54	40.16
Mandrill	35.79	36.44	31.35	31.61
Parrots	47.08	46.75	41.38	40.98
Pepper	42.12	43.01	37.94	38.58
Sailboat	43.44	44.70	38.55	39.36
Couple	42.31	43.31	38.87	39.42
Milkdrop	46.37	48.82	42.39	44.49
Average	42.84	44.10	38.59	39.33

表1 画素値補間の性能比較

4. まとめ

本報告書では、確率的非分解型テンソル復元とその画像・信号処理の一環として行った、テンソルの低ランク近似を応用した一般画像復元手法について解説を行った。既存手法であるCBM3D との比較実験により、提案した手法の有効性が確認された。

5. 関連する研究成果

- 細野海人, 小野峻佑, 宮田高道, “Weighted tensor nuclear norm 最小化を用いた色画像ノイズ除去,” in 2016 年映像メディア処理シンポジウム, pp. 144~145, 2016.
- K. Hosono, S. Ono and T. Miyata, “Weighted Tensor Nuclear Norm Minimization for Color Image Restoration,” in IEEE Access, vol. 7, pp. 88768–88776, 2019.

6. 参考文献

- [1] J. Liu, P. Musialski, P. Wonka, J. Ye, “Tensor completion for estimating missing values in visual data,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013.
- [2] D. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, K. Egiazarian, “Color image denoising via sparse 3D collaborative Filtering,” Proc. IEEE ICIP, 2007.
- [3] K. Hosono, S. Ono, T. Miyata, “Weighted tensor nuclear norm minimization for color image denoising,” in Proc. IEEE ICIP, 2016.
- [4] S. H. Chan, X. Wang, O. A. Elgendy, “Plug-and-play ADMM for image restoration: Fixed-point convergence and applications,” IEEE Transactions of Computational Imaging, 2017.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : ヒトは水中環境で自身の身体動作をどの程度再現できるのか? 単関節動作による検討

研究課題名(英文) : How much human can reproduce his/her motion in water environment? An investigation by monarticular motion

研究者 : 金田 晃一
KANEDA Koichi

千葉工業大学
先進工学部 教育センター 准教授

1. はじめに

水の密度は空気の約800倍と大きく、水中環境で運動を行う際、水の物理的特性が呼吸・循環機能や筋・骨格系に対して作用する(Becker, 2009)。特に、ヒトが浸水すると、水中環境では重力と反対向きの浮力と、移動に伴って水の抵抗力が大きくかかることから、浮力や抵抗は水中環境での動作に直接的に影響する。

これまで行われた多くの研究では、歩行を中心に水中環境での動作や筋活動、床半力などが調査され、空気環境との違いについて報告されてきた(Barelaら, 2006)。水中環境を用いた運動の利点として、日常生活環境で困難となった動作を行うことができるといった、目的とする動作そのものを行うことができることが挙げられ、これに基づいた運動介入効果を検討した研究も行われている(Satoら, 2011)。また、Kanedaら(2012)は、水中環境と陸上環境での歩行時の動作がどの程度類似しているのかに関する研究を行ない、二つの環境間における類似部分と非類似部分について検討した。このことから、水中環境では目的とする陸上環境における動作を再現することができる可能性があることが伺える。しかし、現段階でどの程度水中環境における動作が目的となる動作を再現できるのかについては明らかになっておらず、これに関する基礎資料を得る必要がある。このことは、水中環境を用いたリハビリテーショントレーニングや運動学習などの場面において有益な情報となると考えられる。

これまで、動作に関わる身体感覚に関連する研究の多くは、肘関節の屈曲動作などの単関節動作を対象として行われている(Walsh2005)。また、水中環境を用いた先行研究においても肘関節動作を用いて研究が行われている(Bock1994)。これらのことから、本研究は、ヒトが水中環境で自身の身体動作をどの程度再現できるのかについて、肘関節を対象とし、動作、関節角度、筋活動の観点から検討することを目的とした。

なお、本研究は、平成31年度(令和元年度)から科学研究費助成事業の基盤研究(C)に採択されたものであり、本報告では初年度に当たる平成31年度(令和元年度)に実施した内容の一部を紹介する。

2. 方法

本報告では、平成31年度(令和元年度)に実施した内容の一部として、実験を行うための準備および方法論について報告する。

2-1. 対象者

本研究では、大学生以上の年齢の健康な男性を対象者とすることを想定し、平成31年度(令和元年度)では千葉工業大学の『人を対象とする研究』に関する倫理審査委員会」の承諾を得た。

2-2. 対象動作、測定項目、実験環境

本研究では、これまでの先行研究において多く用いられてきた(Bock1994, Walsh2005)、肘関節の屈曲動作を対象の動作とした。肘関節の伸展状態から肘関節のみを屈曲させるため、専用の実験用水槽(特注品、株式会社ジャパンアクアテック社製)(図1)を準備した。

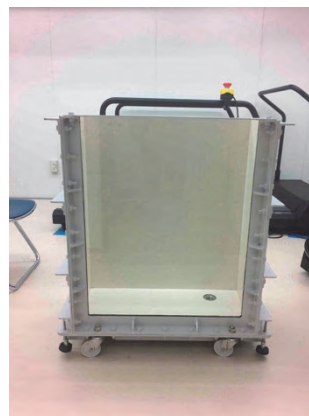


図1. 実験用水槽

対象者は座位姿勢で右腕を実験用水槽に入れ、本研究の実験者によって指定された角度(図2)への肘関節の屈曲動作を行うこととし、その際の動作をモーションキャプチャーシステム(VENUS3D, 株式会社ノビテック社製)を用いて計測し、同時に上腕二頭筋・上腕三頭筋・三角筋前部・橈側手根屈筋の筋活動を筋電図センサ(DL-141, S&ME社製)、前腕・上腕の皮膚温を体表用温度センサ(DL-240, S&ME社製)、心電図を心電図センサ(DL-150, S&ME社製)を用いてそれぞれ計測することとした。実験時の様子を模擬したものを図3に示す。

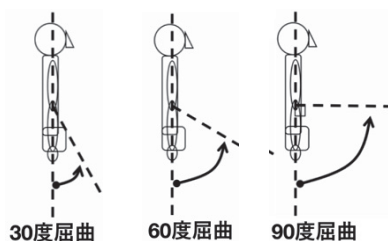


図2. 指定する屈曲角度



図3. 実験の様子 (模擬)

実験の際は、対象者は上半身を裸または指定したノースリーブ型のシャツを着用し、ノイズキャンセリング機能を搭載したヘッドホンと視覚障害の体験用アイマスクを装着した上で実施することとした。

肘関節の屈曲角度は、伸展位を基準に 30 度、60 度、90 度とし、ランダムに 5 回ずつ合計 15 回に設定することとした。

実験は千葉工業大学の実験用環境制御室（富士医科産業株式会社製）にて実施し、水中環境と陸上環境での比較を行うため、水中環境として水温は 34℃付近（安静時中立水温程度）、陸上環境として 25℃、湿度は 50%になるように設定することとした。なお、水中環境と陸上環境は異なる 2 日間で実施する。

3. 学会発表

平成 31 年度（令和元年度）には、本研究の内容について、特に実験方法のプロトコルに関して学会発表を実施した（図4）。学会発表は、2019 ASICS SMA CONFERENCE (2019 ASICS Sports Medicine Australia) で、2019 年 10 月 23 日から 26 日の間に Australia の Sunshine Coast にある Novotel Twin Waters にて開催された学会にてポスター発表として行い、参加者との専門的ディスカッションによって、本実験を実施するために有益な示唆を得た。

4. 今後の見通し

金田ら（2010）は、過去にも同様の実験を水泳競技者を対象に実施し、陸上環境と比較して水中環境では約 10 度程度、屈曲角度を過小評価することを報告した。このことから、本研究においても屈曲角度は過小評価すると考えられる。またさらに、本研究では筋活動、皮膚温、心電図における解析を加えることで、水中環境での関節



位置感覚におけるこれまで以上に詳細な検討を行うことができると思われる。本研究の結果は、最終的に水中環境での健康増進やリハビリテーション、あるいは運動学習の場面における有益な情報として活用できることを目指している。

5. 参考文献

- 1) Becker BE. Aquatic therapy: scientific foundations and clinical rehabilitation applications. PM R, 1(9): 859-72, 2009.
- 2) Barela AM, et al. Biomechanical characteristics of adults walking in shallow water and on land. J Electromyogr Kinesiol, 16(3): 250-56, 2006.
- 3) Sato D, et al. Comparison of once and twice weekly water exercise on various bodily functions in community-dwelling frail elderly requiring nursing care. Arch Gerontol Geriatr, 52, 331-5, 2011.
- 4) Kaneda K, et al. A comparison of lower limb joints angular displacement between land and water-walking using dynamic time warping. Scientific Proceedings of the 30th International Conference on Biomechanics in Sports, 7, 331-4, 2012.
- 5) Walsh LD, et al. Effect of eccentric exercise on position sense at the human forearm in different postures. J Appl Physiol, 100(4): 1109-16, 2005.
- 6) Bock O. Joint position sense in simulated changed-gravity environments. Aviat Space Environ Med, 65(7), 621-6, 1994.
- 7) 金田晃一ら. 肘関節屈曲動作を用いた大学男子競泳選手の水中での関節位置覚. 2010 年日本水泳・水中運動学会年次大会, 11, 2010. (学会発表)

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : ワークライフバランス支援のための技術・技能・健康のコミュニケーションデザイン

研究課題名(英文) : Communication Design to Support Work-life Balance

研究者 : 滝 聖子

TAKI Seiko

千葉工業大学

社会システム科学部 経営情報科学科 教授

1. はじめに

現在、日本政府は「ワークライフバランス実現」を掲げており、子育て支援として待機児童問題や金銭的支援については検討が進められているが、『労働経済白書(厚生労働省, 2018)』によると、共働き世帯が仕事と家庭の両立にストレスを感じる割合は男女ともに約7割を占めている[1]。他方、政府が「働き方改革」として女性の活用や雇用延長を推奨する一方で、核家族化と高齢化の進む現代では、育児や介護のために離職する人も増えており、家族単位のワークライフバランス実現のための支援は不可欠である。

そこで、IoTやビッグデータなどの技術を活用しながら、仕事および家庭での生活(家事や育児等)における技術・技能(コツ)の伝承と情報共有による家事・育児などの作業の効率化と生活の質(QOL)の向上のために、ワークライフバランスを支援するコツのデータ科学、すなわち技術・技能・健康のコミュニケーション手法を構築し、各家族が心身において健康な状態でコミュニケーションを行うことができるような支援を目指すことを考えた。

本稿では、2つの作業を並行して行う並行作業と1つの作業のみを行う単純作業について、2つの作業間での作業負荷の傾向について明らかにすることを目的とし、2つの作業間の負担度や作業前後でのストレス値の変化を主観的評価と生体情報の計測を行い、分析した結果について示す。

2. 実験および分析方法

本研究では、介護や育児において、洗い物などの作業をしながら高齢者や乳幼児の様子を見守るような並行作業の負荷と単独の作業の負荷を比較するため、介護業務を想定した実験を行った。

2.1 使用機器および手法

本研究では、各作業時の作業負担を評価するためにNASA-TLX(主観的メンタルワークロード評価手法)[2]、作業中の生体情報として心拍数と心拍変動からストレス値(LF/HF値)を測定するために貼付型心拍計(TDK製Silme Bar Type Lite)、アミラーゼ濃度からストレスを計測するために唾液アミラーゼモニター(ニプロ製)を使用した。また、並行作業の実験中の被験者の発声内容を記録するためにビデオカメラ、実験時に映像を提示するためのモニターとPCを使用した。なお、NASA-TLXでは、6つの尺度(精

神的要求、身体的要求、時間的圧迫感、作業達成感、努力、不満)を100点満点で評価し、作業負荷を数値化してWWL得点を求める。

2.2 実験条件および被験者

本研究では、表1に示す2つの実験条件で実験を行った。図1に並行作業の実験の様子を示す。単純作業は、図1の映像視聴モニターとビデオカメラを使用しない表1の主作業(シール貼り作業)のみである。

本研究の被験者は、各条件で大学生・大学院生24名(男性12名、女性12名)ずつの計48名とした。

2.3 作業内容

並行作業の実験では、各条件5分間ずつ、被験者に映像を観ながらシール貼り用紙の枠内の中に利き手で可能な限り早く、正確に貼ってもらった。なお、貼り直しは不可とし、枚数の目標値(予備実験により求めた枚数)を設定して示した。「映像視聴」では、要介護者の行動を想定して作成した映像を用いて、被験者には映像の中で起こった変化(要介護者の異常)に気付いた瞬間に発言して回答してもらった。各被験者には条件A、Bの順で行ってもらった。実験手順として、①唾液アミラーゼ測定、②実験条件A実施、③唾液アミラーゼ測定、④NASA-TLX実施、⑤実験条件B実施、⑥唾液アミラーゼ測定、⑦NASA-TLX実施とした。心拍数は唾液アミラーゼ測定前からNASA-TLX実施後までを連続して計測した。

表1 実験条件

	主作業(シール貼り)	副作業(映像視聴)
条件A	シールの大きさ15mm	要介護者のドアの開閉と移動の映像
条件B	シールの大きさ8mm	要介護者の食事風景の映像



図1 実験の様子(並行作業)

また、単純作業の実験では、「シール貼り」のみを並行作業と同じ条件で行い、心拍数計測および唾液アミラーゼ計測、NASA-TLXは並行作業と同様に実施した。

2.4 分析方法

各実験条件における心拍変動によるストレス値（LF/HF 値）、心拍数、ストレス値（アミラーゼ）、作業負荷として負荷仕事量（NASA-TLX の WWL 得点）、作業能力としてシールの枚数とズレの最大値などを求めて分析した。

3. 結果および考察

3.1 主観的な負荷仕事量（NASA-TLX の WWL 得点）

各作業の負荷仕事量を比較するために NASA-TLX の WWL 得点を求め、各条件の被験者の平均を図 2 に示す。図 2 より、条件 B では単純作業よりも並行作業の方が作業負荷は高いという視覚的な傾向が見られたが、統計的な差は認められなかった。符号検定（有意水準 5%）を行ったところ、並行作業では条件間で統計的有意差が認められた。つまり、並行作業では、条件 A に比べて条件 B では作業負荷が統計的有意に増加したことが示された。

3.2 生体情報から得られたストレス値

実験で得られた心拍変動を用いたストレス値（LF/HF 値）の平均を条件ごとに図 3 に表す。作業間の比較のために t 検定（有意水準 5%）を行ったところ、条件 B では統計的有意差が認められたことから、条件 B では並行作業よりも単純作業でよりストレスを感じていることが示された。しかし、この結果は、NASA-TLX の WWL 得点の傾向とは異なっており、主観的評価では並行作業に作業負荷を感じやすいと考えられる。

次に、t 検定（有意水準 5%）により、並行作業では統計的有意差が認められた。つまり、心拍変動から得られたストレス値（LF/HF 値）についても、NASA-TLX の WWL 得点と同様に、並行作業では、条件 A に比べて条件 B で統計的有意に減少したことが示された。

なお、唾液アミラーゼによるストレス値および心拍数については、作業間および条件間で明確な差が見られなかったため、紙面の制約上、結果は省略する。

3.3 計測データ間の関連

本研究で得られたデータ間の関連を調べるためにスパイアマンの相関分析を行った結果、単純作業で最も強く相関がみられたのは、条件 B の「LF 値（交感神経と副交感神経の活動を反映する低周波数帯域の値）」と「身体的要求（NASA-TLX の評価項目）」の項目間で相関係数 0.60 であり、並行作業で最も相関が強くみられたのは、条件 A の「心拍数」と「アミラーゼ値」の項目間で相関係数 0.59 であった。なお、並行作業の作業結果として、副作業の映像視聴の正答率の平均は、条件 A では 93.0%、条件 B では 86.5% といずれも高めの結果となり、主作業のシール貼りの結果との間に関連はみられなかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、介護業務を想定した並行作業と単純作業の

作業負荷について、主観評価法（NASA-TLX）と生体情報の計測により調べたところ、条件 B では、心拍変動から得られたストレス値（LF/HF 値）は並行作業よりも単純作業の方が大きい値を示していたが、主観評価（NASA-TLX の WWL 得点）では並行作業の方が大きい値を示していたことから、並行作業では生体反応としてのストレス値が低くても主観的には作業負荷を強く感じる傾向があると考えられる。しかし、主観評価では作業間に統計的な差は見られなかったことから、さらに検証が必要である。

今後の課題は、実務者（介護職従事者）や家庭で介護や育児を行う人を対象に実験を行った上で、作業負担を軽減するための具体的な支援策を提案したいと考えている。

最後に、本研究の実施にあたり、ご協力いただいた被験者の皆様に感謝する。

本研究に関する主な発表論文

- 1) 滝 聖子, 西村 峻, 富澤佑介, 高野倉雅人, 川上 勝: 主観評価法 (NASA-TLX) および生体情報を用いた平行・単純作業の作業ストレスに関する研究, 2020 年度日本設備管理学会春季研究発表大会予稿集, pp.110-112, 2020.

参考文献

- [1] 厚生労働省:労働経済白書 平成 30 年版, 勝見印刷, 2018.
- [2] 三宅晋司, 神代雅晴: メンタルワークロードの主観的評価法 NASA-TLX と SWAT の紹介および簡便法の提案, 人間工学, Vol.29, No.6, pp.399-408, 1993.

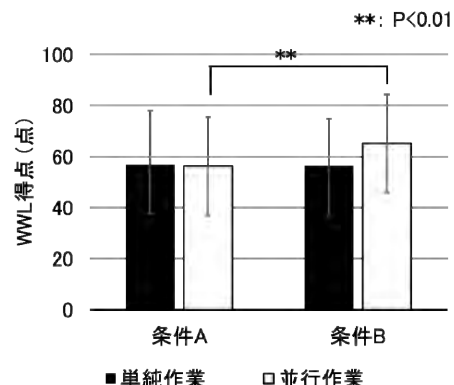


図2 作業負荷（WWL 得点）の平均

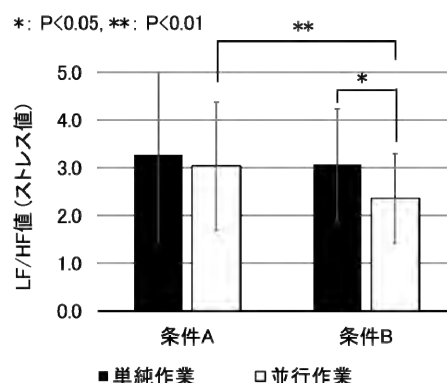


図3 ストレス値（LF/HF 値）の平均

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : タイおよびベトナムにおける現地採用人材のワークモチベーションに関する研究

研究課題名(英文) : A Study on Employees Work Motivation in Thailand and Vietnam

研究者 : 鴻巣 努

KONOSU Tsutomu

千葉工業大学

社会システム科学部 プロジェクトマネジメント学科 教授

1. はじめに

日本の産業界にとってアセアン地域は生産拠点および消費市場としてその重要性が高まっている。今後日本の産業は人口減少に伴って国内市場の縮小が避けられない状況にあり、アセアンや中東等の成長が見込まれる生産市場および消費市場を開拓する必要がある。本研究では、アセアンにおける経済活動の中心的役割を担っているタイおよびベトナムを対象とする。日本企業が海外に進出する場合、文化や国民性のギャップから現地採用の労働者に対して、日本人と同じ人材教育を施すことに限界があり、多くの日系企業が適切な人材の育成に苦勞している。本研究では、人材開発という視点から、ワークモチベーションおよび組織コミットメントの観点からタイ人およびベトナム人労働者に特徴的な点を明らかにする。また、当該地域における人材育成の問題点を探り、プロジェクトを成功に導くことができる人材調達および育成方法を提案する。

2. 研究の内容

科学研究費採択課題としての研究目的は、ワークモチベーションおよび組織コミットメントの観点から、タイおよびベトナムの人材に特徴的な点を明らかにすることである。また、当該地域における人材育成の問題点を探り、プロジェクトを成功に導く人材調達および育成に関する提案を行う。2019年度は主として「課題① 組織コミットメントに関するタイ人およびベトナム人労働者に関する研究」を実施した。バンコク、チェンマイ、タンヤブリ、ランブーン、ナコンサワン、スラタニー、ホーチミンシティ、ハノイにおける製造業およびICT従事者およびこれらの業種への就業を希望する学生に対する調査を研究協力者とともに実施した。また、必要な要件を含むタイ語版およびベトナム語版の質問紙を作成した。さらに2020年度に予定していた「課題② タイ人およびベトナム人労働者のワークモチベーションに関する研究」を一部先行して実施した。バンコクおよ

びハノイにおける調査をはじめ、タイ南部における予備調査を完了した。本調査はWebベースシステムを中心に行うことを予定しており、要件定義および開発を終え、システムを利用した調査を開始した。しかし2019年度の調査ではタイ北部では紙ベースの調査票を要求される事が多く、調査計画を一部変更して郵送による回答を可能とした。また、タイ中部では口頭による調査を実施したが、工場労働者には標準タイ語以外の話者が多く、日常の使用言語が標準タイ語とはかなり異なることが分かった。この特徴が調査地域および企業に特有のものであるか、調査協力者とともに検討することとした。また、「課題③ 人的資源の特性をふまえたプロジェクト成功のための人材調達および育成に関する研究」に関連して、現地の大学における説明会を開催した。バンコクにおける起業家を対象に、人材開発における組織コミットメント、中間管理職の育成、日本企業の成功事例の導入などについて意見交換を行った。

本助成により、上記の研究課題のうち特に①に関連して、相互協調的自己感とアサーションを中心とした社会的スキルに関する調査を実施した。アサーションとは自身の信念をその場にふさわしい方法で表現し、同時に相手の意見を受け入れる対人関係の構築方法である。こうした自己表現には文化的自己観が関与していると考えられている。文化的自己観は、欧米文化に代表される「相互独立的自己(interdependent self-construal)」と日本を含む東洋に代表される「相互協調的自己観(interdependent self-construal)」がある。そこで、文化的自己観により、自己表現の方法が異なると考えタイおよび日本の自己観の特徴を調査した。また、因子分析により文化的自己感に関わる潜在因子を特定し、ワークモチベーションとの関連を調べた。文化的自己感に関わる因子は職務経験より低い評価尺度を用いて調査し、学生を被験者として実施した。千葉工業大学社会システム科学部プロジェクトマネジメント学科30名、泰日工業大学(バンコク)62名を対象に調査した。

相互独立的自己観, 相互協調的自己観の分類は, Self-Construct Scale(SCS):高田ら(1995)によるものとし, 相互協調的自己観を測定する12項目(INTER)と相互独立的自己観12項目(INDE)の計24項目を用意した. アサーティブなタイプの分類には清水ら(2003)による日本語版 Rathus Assertiveness Schedule (RAS) を用いた. 尺度は6下位尺度(正当な権利の主張(5項目), 自己信頼(5項目), 自己開示(5項目), 受容性(5項目), 断る力(5項目), 対決(5項目))計30項目から構成されており, 関連を χ^2 乗検定および因子分析により分析した.

3. 研究結果

日本人に対する調査では, χ^2 乗検定によりアサーションと相互独立的自己観の関連, 相互協調的自己観はいずれも関連が認められなかった. また, アサーションに関する因子分析では十分な KMO が得られなかった. 相互独立的自己観では「自己主張」「自己解決」「自己尊重」「自身」の4因子が得られた. 相互協調的自己観では「共感」「関係重視」「対立回避」「他社評価懸念」の4因子が得られた.

タイ人に対する調査では, アサーションと相互独立的自己感に有意水準1%で関連が認められた. アサーションと相互協調的自己感には関連が認められなかった. アサーションでは「自己主張」「関係調整」「交渉」「配慮」「内気」「躊躇」「我慢」の7因子が得られた. 相互独立的自己観では「自身」「自己主張」「自己尊重」の3因子が得られた. 相互協調的自己観では「他社尊重」「他社配慮」「他社評価懸念」の3因子が得られた.

本調査により, タイ人におけるアサーションと相互独立的自己観に有意な関係が認められた. これは, 相互的自己感に関する先行研究でも認められており, 因子分析の結果とあわせて考察すると, タイでは相互独立的自己観に基づいて自己主張することで, 自身を独自性のある個人としてとらえ自尊心を高めていることが考えられる. 一方, 日本ではアサーティブなタイプは相互協調的自己観をもつ被験者に多く, 相手の立場や態度を気遣いながら自己主張もしている傾向がみられた.

3. まとめ

2019年度は主として「課題① 組織コミットメントに関するタイ人およびベトナム人労働者に関する研究」を実施したが, 当初予定していたバンコク, スラタニー, タンヤブリ, ホーチミンシティ, ハノイに加え, チェンマイ, ナコンサワン, ランブーンにおける調査を実施した. 予定していた製造業およびICT従事者に加え, 地域情報を理解している公務員からの意見聴取ができた点が研究の進捗に大きく寄与したものと考えている. また, これらの業種への就業を希望する学生への調査にスコープを拡大し, 都市部における学生の就職に関する意識調査をすることができた. アサーションと自己感に関する調査では, タイにおいて相互独立的自己感に有意な関

係が認められた. この結果から, タイにおけるワークモチベーションの構成には日本人とは異なる背景があることが推察され, 今後の調査項目に反映させることとした.

また, タイでは大企業に就職するよりも自身の起業を目標としている学生が非常に多く, 起業した社会人に対する評価が高い傾向がある. そこで, 課題③の遂行に関連して, 起業家との意見交換会を実施し, 人材開発における組織コミットメント, 中間管理職の育成, 日本企業の成功事例の導入などについて調査した. これにより得られた知見は先の質問紙の作成およびデータ解析に反映させており, 当初予定していた内容よりも計画が進展したと評価している. 今後は新型コロナウイルスによる渡航制限が予想されるため調査計画の変更を含め, 検討する必要がある.

本研究に関する主な発表論文

- (1) T.K.Nguyen, S.Okazaki, T. Konosu: The Effect of Differences in Cognitive Strategies on Self-Conscious Emotional Characteristics, 13th International Conference on Project Management, 2019.
- (2) M.Mori, A.Saito, T.K.Nguyen, T.Konosu: The Influence of Critical Thinking Attitudes in Inference Process on Consensus Building, 13th International Conference on Project Management, 2019.
- (3) P.Wilairatana, S. Okazaki, M.Yokoyama, K. Asakura, P. Ngamjarussrivichai, R.Wongsawad, T.Konosu: The Study on Factors Affecting of Work Motivation in Thai Organizations, 13th International Conference on Project Management, 2019.
- (4) T.K.Nguyen, P.Wilairatana, T.Dhonden, P. Ngamjarussrivichai T. Konosu: Job Satisfaction and Organizational Commitment amongst Vietnamese: An Influential Relationship, 5th International Conference on Enterprise Architecture and Information Systems (EAIS 2020), 2020. (予定)

参考文献

- (1) 高田利武;大本美千恵;清家美紀:相互独立的-相互協調的自己観尺度(改訂版)の作成, 奈良大学紀要 No. 24, pp. 157-173, 1995.
- (2) 清水隆司;森田汐生;竹沢昌子;赤築綾子;久保田進也;三島徳雄;永田頌史:日本語版 Rathus Assertiveness Schedule (RAS) の作成と信頼性・妥当性の検討 産業医科大学雑誌, Vol. 25, No. 1, pp. 35-42, 2003.
- (3) L. D. Nguyen, L. T. Do and S. Ogunlana, "A study on project success factors in large construction projects in Vietnam," Engineering Construction & Architectural Management, vol. 11, pp. 404-413, 2004.

研究項目 : 科研費採択者助成金

研究期間 : 2019/6/5 ~ 2020/2/29

研究課題名(和文) : マルチペリメータラインに基づく多層防御セキュリティシステムの研究開発

研究課題名(英文) : Research and Development of a Multi-layered Defense Security System Based on Multi-Perimeter Lines

研究者 : ○谷本 茂明

千葉工業大学

TANIMOTO Shigeaki

社会システム科学部 プロジェクトマネジメント学科 教授

佐藤 周行

東京大学

SATO Hiroyuki

情報基盤センター 准教授

金井 敦

法政大学

KANAI Atsushi

理工学部 応用情報工学科 教授

1. 研究の概要

一般に、企業においては、ISMS (Information Security Management System) などのセキュリティポリシーに基づく情報セキュリティシステムを構築し、様々な施策がなされているが、セキュリティインシデントは未だ顕在化している。この要因として、IPA (情報処理推進機構) では、ポリシーの形骸化、情報セキュリティ人員不足の常態化などを挙げており (IPA, IT 人材白書など, 2015)、これらの解決は重要かつ喫緊の課題である。

前者のポリシー形骸化は、例えば、パスワードの使いまわしなどのセキュリティポリシー軽視行為につながり、セキュリティインシデントを引き起こす恐れが指摘されている。一方、セキュリティを意識し過ぎることによって却ってユーザがストレスを感じ、安全対策を怠る場合も指摘されている。このように心理面の検討も重要な課題であり、例えば、NIST (米国国立標準技術研究所) の B. Stanton らによりセキュリティ疲れが提案されている (Stanton, B., Security Fatigue, 2016) がシステム化の提案は未だ十分でない。

後者のセキュリティ人員不足に関しては、経営層のセキュリティ投資不足に対する解決が重要となる。今後の進展が期待されるデジタルトランスフォーメーション時代においても、経営層に訴求する情報セキュリティ対策の投資対効果の検討は重要な課題であるが、このような検討は十分でない。

さらに、上記に加えデータセンターなどの高セキュリティ環境に見られるように、セキュリティインシデント対策には物理面の検討も重要である (他に、ISO/IEC 27001 ISMS 規格, A.11 物理的及び環境的セキュリティなどがある)。また、一般に、企業のオフィス環境では、社員以外の来訪者が頻繁に訪れる環境にある。このような環境では、机上の書類や PC 画面などの情報を第三者に見られる脅威が顕在化している。これに対し、社員教育や来訪者の行動範囲の制限や、来訪者カードを色分けするなど運用面の対策が行われているが、例えば、ショルダーハッキングやトラッシングなどのソーシャルエンジニアリングなどの脅威に対するシステムの対策は未だ十分ではない。

これらの背景に鑑み、本研究では、図 1 に示すように、前述した心理面、経済面、物理面の非サイバー環境を加味した新たなセキュリティ対策を提案する。

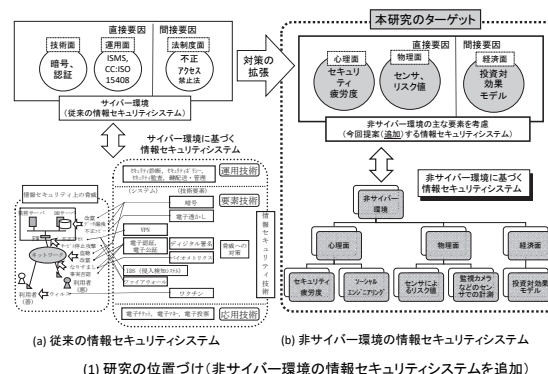


図 1. 研究の位置づけ

心理面では人の内的要因、特にセキュリティに関わるストレスをセキュリティ疲労度と定義し、数値化することで、この値に応じたセキュリティ対策 (ストレス軽減策) を提案する。これにより、企業における内部不正などのセキュリティインシデント発生を未然に防ぐ。

経済面では、経営層でも容易に判断可能なセキュリティ投資対効果モデルを開発し、適切なセキュリティ投資を促することでセキュリティ対策の強化に寄与する。

物理面では、IoT の進展に基づき低コストの各種センサ技術の活用が容易になってきている。このセンサ技術により物理的な外的要因を自動検知・分析し、サイバー環境と連携したセキュリティ防御機能を開発する。

最終的に、これら非サイバー環境の心理面、経済面、物理面に対応した防御ラインを効率よく連動させる動的再構成ペリメータラインを特徴とする多層防御セキュリティ対策を考案し、既存のセキュリティシステムとも連携した多層防御セキュリティシステムを開発する。

2. 心理面のセキュリティ対策

セキュリティ疲労度を数値化した値をもとに、配置転換などのストレス軽減策 (コーピング) を検討した。具体的には、セキュリティ疲労度を可視化し、常にチームのセキュリティ疲労度を平準化する手法として動的チ

ームビルディング手法を検討した。表1に示すように、セキュリティ疲労度に応じてチーム内メンバのセキュアな業務と一般業務を動的に変更可能とした。これにより、チーム内のセキュリティ疲労度に基づくタスクの平準化を可能とするストレス軽減策を提案した。

表1 机上シミュレーション例（疲労度は数値に比例）

メンバ	セキュリティ疲労度とタスク割合	チーム形成（形成期）			チーム形成（混乱期）		
		セキュアな業務	セキュアなタスク	一般タスク	セキュアな業務	セキュアなタスク	一般タスク
A	4	7	3	1	10	0	
B	1	10	0	4	7	3	
C	5a	5	5	5a	5	5	
個別タスク量		22	8	—	22	8	
総タスク量		30			30		

3. 経済面のセキュリティ対策

経済面の投資効果モデルとして、間接効果の検討を行った。秘匿性の高い個人情報を扱う業務における情報漏洩の主要原因とされるヒューマンエラーに対するリスクアセスメントを行った。具体的には、情報漏えいを対象に、秘匿性の高い個人情報を取り扱う業務を例にとり、リスク要因の特定と分類を行った。表2に示すように、スキルベースにおけるヒューマンエラーの失敗モードによりリスク要因を体系的に特定・分類し、リスク低減策を提案し、国際会議等で発表した [1]。

表2. リスク低減策

発生しうるエラー	失敗モードの分類	提案するリスク低減策
1.1 判断違いによる許可	二重補足スリップ	・業務ルーチンの見直し ・複数人によるマルチチェックの徹底
1.2 受取人の取違ひ	二重補足スリップ	・確認事項の追加 ・複数人によるマルチチェックの徹底
2.1 被送付者の取違ひ	意図の鮮度低下	・業務の重要度の見直し ・作成手順の変更
2.2 被送付者情報の入力違ひ	干渉によるエラー	・類似業務の分配
2.3 被送付者情報の未更新	中断に伴う抜け落ち	・業務の重要度見直し ・業務ルーチンの見直し
2.4 被送付者以外の情報誤入力	二重補足スリップ	・別業務のルーチンとの分離 ・予測変換等の利用の停止
3.1 受取人の取違ひ	意図の鮮度低下	・業務の重要度の見直し ・作成手順の変更
3.2 受取人情報の入力違ひ	干渉によるエラー	・類似業務の分配
3.3 受取人情報の未更新	中断に伴う抜け落ち	・業務の重要度見直し ・業務ルーチンの見直し
3.4 受取人以外の情報誤入力	二重補足スリップ	・別業務のルーチンとの分離 ・予測変換等の利用の停止
4.1 受取人情報の誤認	知覚の混同	・類似確認業務の分配
4.2 受取人情報の確認漏れ	オMISSION	・確認順序の統一 ・複数人によるマルチチェックの徹底
4.3 受取人以外の情報確認漏れ	オMISSION	・確認順序の統一 ・複数人によるマルチチェックの徹底
4.4 被送付者情報の誤認	知覚の混同	・類似確認業務の分配
4.5 被送付者情報の確認漏れ	オMISSION	・確認順序の統一 ・複数人によるマルチチェックの徹底
4.6 被送付者以外の情報確認漏れ	オMISSION	・確認順序の統一 ・複数人によるマルチチェックの徹底

4. 物理面のセキュリティ対策

物理面では、センサなどによる物理環境の検知とサイバー環境との連携システムとして、クラウドへのフォグ・エッジコンピューティングの適用を検討した。図2に示すように、最初に、センサ群から得られるデータをエッジ層によりリアルタイム性の有無によりフォグを選定する。次に、フォグ層において、プライバシーポリシーに基づきプライバシーを判定し、プライベートクラウドかパブリッククラウドをセキュアに使い分けるフィルタリング手法を考案し、国際会議において発表した [2]。

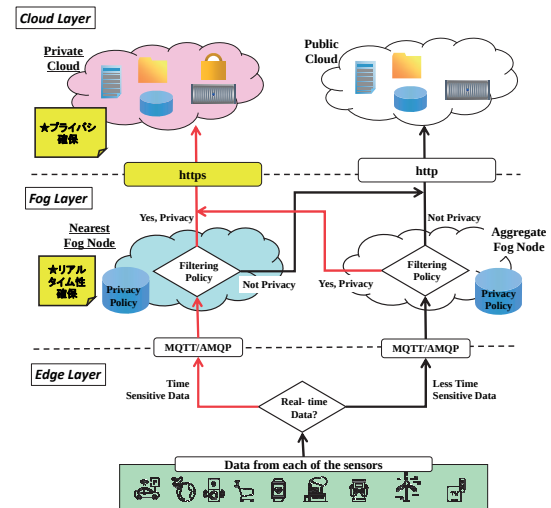


図2. フォグ・エッジにおけるフィルタリング手法

5. 動的マルチペリメータラインのコンセプトモデル

動的マルチペリメータラインに基づく多層防御セキュリティ対策のコンセプトモデルを提案した。さらに、TP0 条件に基づく机上シミュレーションによりその有効性を明らかにし、国際会議で発表した [3]。

6. 今後の予定

今後の予定として、引き続き、非サイバー環境におけるセキュリティ対策の検討を進める。心理面では、新たに認知的方略に基づく対策案などの検討を進め、情報漏洩や内部不正などの心理面に関わるインシデント発生防止に寄与する。経済面では、セキュリティ教育においてアクティブラーニングなどの能動的学習により効率的なセキュリティ知識の定着手法について検討する。物理面では、単純なセンサから IoT 機器へ検討を広げるとともにサイバー環境との連携方式として、引き続きフォグ・エッジコンピューティング、さらにブロックチェーンの適用についても検討する予定である。動的マルチペリメータラインの検討においては、SDP(Software Defined Perimeter)の動向も踏まえ検討を進めていく。

・本研究に関する主な発表論文

- [1] H. Uekusa, et al., A Study of Risk Management for Public Business with Highly Confidential Personal Information, ProMAC2019, pp. 307-319
- [2] P. Chertchom, et al., Data Management Portfolio for Improvement of Privacy in Fog-to-cloud Computing Systems, AAI2019, pp. 884-889
- [3] S. Tanimoto, et al., Concept Proposal of Multi-layer Defense Security Countermeasures Based on Dynamic Reconfiguration Multi-perimeter Lines, NBIS-2019 (ADPNA2019), AISC 1036, pp. 413-422

〔私立大学戦略的研究基盤形成支援事業：
エネルギー・航空運輸機器の安全性向上に資する
高精度マルチスケール損傷評価体系の構築〕



研究項目 : 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研究期間 : 2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文) : CrMoV 鍛鋼の多軸応力下におけるクリープボイド成長シミュレーション手法の開発

研究課題名(英文) : Development of a creep void growth simulation method for CrMoV forging steel under multiaxial stress state

研究者 : 緒方 隆志
OGATA Takashi

千葉工業大学
工学部 機械工学科 教授

1. はじめに

我が国のエネルギー、航空宇宙・運輸関連産業等では設備機器の長期使用による経年化が進行しており、維持管理における安全性の確保や有効活用のための寿命延伸が重要な課題とされている。設備機器の維持管理において安全性を確保し、さらには信頼性のある寿命延伸を実現するためには、より高精度で定量的に損傷の進行や寿命を予測できる評価体系の構築が必要不可欠である。そこで、これまでの損傷・寿命評価法の概念を刷新し、マルチスケールでの評価を視野に入れ、精度を格段に向上させる定量的な損傷評価法の構築を目的とし、「エネルギー・航空運輸機器の安全性向上に資する高精度マルチスケール損傷評価体系の構築」を5か年のプロジェクトとして実施した。本プロジェクトでは、多くの設備機器に使用されている金属材料と複合材料のそれぞれを対象に、以下の2研究テーマを遂行した。

- ・「耐熱金属材料の損傷劣化機構の解明とマイクロ損傷定量評価法の開発」
- ・「高分子基複合材料のマルチスケール損傷評価手法の開発とその構造ヘルスマonitoringへの応用」

網羅的にはなるが、これらの研究テーマにおける主な成果を本研究年報にて紹介する。

本稿では、耐熱金属材料が高温機器等において長期間使用される過程で進行するクリープ損傷の新たな評価法として開発したボイド成長シミュレーション手法に関する研究成果について述べる。

2. 試験および解析方法

CrMoV 鍛鋼素材から平滑試験片および平滑試験片中央部に先端半径 0.5mm(R0.5)および 2.0mm(R2.0)をそれぞれ導入した2種の切欠き試験片を加工した。試験はレバー式単軸クリープ試験機を用い、試験温度はすべて 600℃とした。平滑材の試験応力は 147MPa で、破断までの試験(2996 時間)と、損傷度合の異なる損傷材を作製するため、1200 時間(クリープ損傷 40%)、1800 時間(クリープ損傷 60%)、2400 時間(クリープ損傷 80%)で試験を中断する、損傷中断試験を実施した。クリープ損傷は、“(中断時間)/(破断時間) × 100% ”と定義する。切欠き材では、切欠き底最小断面での公称応力が 300MPa

～195MPa で破断までの試験を実施した。また、公称応力 195MPa において、R0.5 では 430 時間(クリープ損傷 25%)、860 時間(クリープ損傷 50%)、1200 時間(クリープ損傷 70%)、1580 時間(クリープ損傷 92%)で、R2.0 では 900 時間(クリープ損傷 38%)、1423 時間(クリープ損傷 60%)、1898 時間(クリープ損傷 80%)で試験を停止した損傷中断試験を実施した。損傷材は、ボイド最大長さ等を計測するため走査型電子顕微鏡(SEM)によって 500～1000 倍程度で試験片軸方向に平行な縦断面内のボイドの観察を行った。

切欠き試験片の応力、クリープひずみ分布を明らかにするため、3次元有限要素弾塑性クリープ解析を実施した。クリープ試験の初期の荷重負荷に対する弾塑性解析では、応力ひずみ関係は2直線近似とし、クリープ構成式は、Bailey-Norton 則を用いた。

3. 試験および解析結果

平滑試験片損傷材の観察から、損傷材のボイド最大長さおよびボイド個数密度は、それぞれ 40%で 4.5μm, 19(個/mm²), 60%で 5.6μm, 32(個/mm²), 80%で 7.2μm, 45(個/mm²)であった。切欠き底表面からの距離を l とすると、R0.5 では $l=0.5\text{mm}$ 近傍でのボイド個数が $l=2.0\text{mm}$ より多く、R2.0 では逆に $l=2.0\text{mm}$ で $l=0.5\text{mm}$ よりボイド個数が多かった。代表例として、R0.5 の $l=0.5\text{mm}$ 近傍で観察されたボイドの損傷に伴う変化を図1に示す。25%損傷材で擬球状に加え 4μm 程度のき裂状ボイドも観察され、50%、70%と損傷が進むにつれてボイド最大長さおよびボイド個数が増大し、92%損傷材では約 10μm のき裂状ボイドも観察された。これより、切欠き試験片においても定性的にはボイド最大長さ、ボイド個数密度は損傷とともに増大することがわかる。ボイド個数密度を計測した結果、R0.5 では切欠き底表面より約 0.5mm においてボイド個数密度が最大値を示すのに対し、R2.0 では

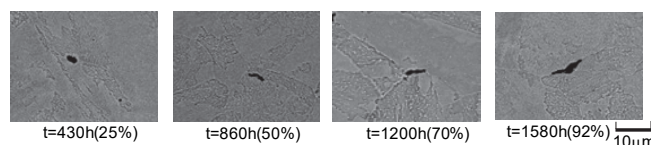


図1 R0.5 試験片の切欠き底表面近傍のボイド観察結果

表面から試験片中心部に向かうにつれてボイド個数が増大する傾向が認められた。また、いずれの切欠き試験片においても最も多い部位でのボイド個数密度は、平滑試験片の10倍を超え、多数のボイドが粒界に発生・成長することが新たに確認された。

両切欠き試験片の有限要素解析の結果、R0.5では切欠き底端部からの距離 l が0.5mm近傍で各応力成分が応力値のピークを示し、軸方向応力に加え周方向および径方向応力も引張となる3軸引張応力状態を呈していた。一方、R2.0では切欠き底端部から徐々に応力値が上昇し、 $l=2.0$ mm近傍から中心部にかけて最も大きい値を示し、同様な3軸引張応力状態となっていた。このように切欠き底断面の応力状態は勾配を有する多軸応力状態となっており、切欠き半径の違いによってその分布傾向が大きく異なることが明らかとなった。

4. ボイド成長シミュレーションによる損傷評価

(1) シミュレーション手法の概要

クリープ条件下におけるボイド成長過程の観察とそのメカニズムに関する理論的考察に基づき、ボイドが結晶粒のクリープ変形と、ボイドが発生していない結晶粒からの拘束の影響を受けながら拡散成長する場合の擬球状ボイドおよびび裂状ボイドの成長速度式を導出した。これらのボイド成長速度式を用いて粒界上のボイド成長挙動を予測するボイド成長シミュレーションプログラムを作成した。同プログラムでは、対象材料の微視組織を模擬した結晶粒の集合体を作成し、外部からの負荷に対する3次元結晶粒の粒界上の法線方向応力を求め、この応力とボイド成長速度式から逐次計算によってボイドの成長が計算される。

(2) ボイド成長シミュレーション結果

代表例として図2にR0.5の $l=0.3\sim0.6$ mmでの最大軸方向応力(239MPa)位置での軸方向、周方向、径方向応力に対するボイド成長シミュレーション結果を示す。粒界を緑、ボイドを黒で表している。25%損傷で既に平滑試験片に比べ多数のボイドが発生しており、50%損傷ではボイド長さおよび個数密度が増大している。92%損傷では軸方向に垂直に近い粒界の多くにボイドが発生しており、軸方向に近い粒界に発生しているボイドもみられ、多軸応力による影響が顕著に表れている。

シミュレーションで得られたR0.5のボイド最大長さと時間との関係を図3に示す。 $l=0.3\sim0.6$ mmでは軸方向応力値が変動するため、観察面内の軸方向応力の最大値および最小値に対するシミュレーション結果を実線および破線で示している。最大軸方向応力値を用いたボ

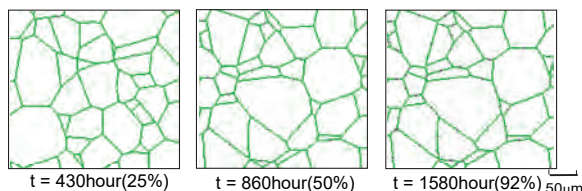


図2 R0.5試験片のボイド成長シミュレーション結果

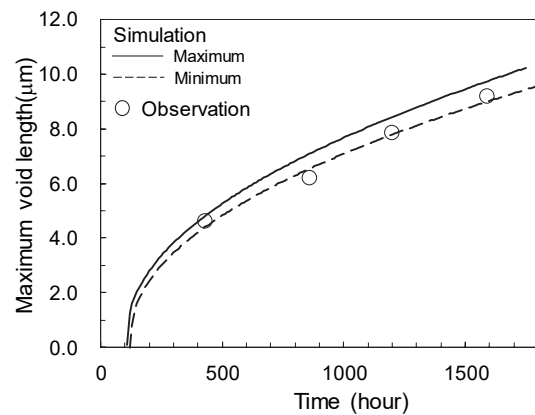


図3 R0.5試験片のボイド長さとシミュレーションの比較

イド成長シミュレーション結果は、損傷材において観察されたボイド最大長さより若干長い値となっているが、おおよそ定量的にも各損傷時点でのボイド最大長さを予測できている。R2.0に対しても同様な結果が得られることを確認した。さらに、シミュレーションによって最大応力 σ_{max} と多軸応力の度合いを示す多軸係数 TF を変化させたパラメータ解析を実施し、観察結果との比較から、ボイド個数密度 N_V の時間に伴う変化(t_i はボイド発生時間)を簡便に予測する以下の式を導出した。

$$N_V = 1.9 \times 10^{-6} \exp(-0.42TF) \sigma_{max}^{(0.185TF+1.78)} (t-t_i) \quad (1)$$

式(1)によって予測したR0.5損傷材のボイド個数密度と観察結果を比較して図4に示す。多軸応力下のボイド個数密度は式(1)によって良好に推定された。

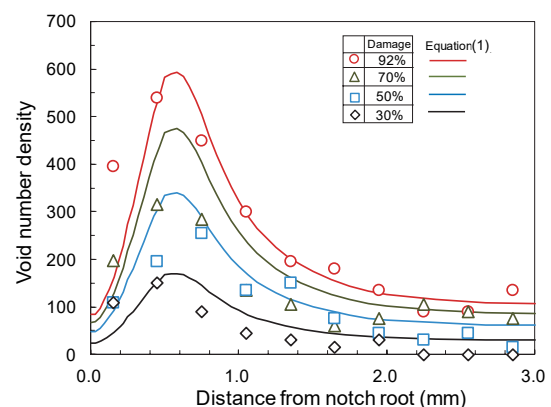


図4 R0.5試験片の簡便予測式によるボイド個数密度予測結果観察結果の比較

5. まとめ

多軸応力勾配下でクリープ負荷を受けるCrMoV鍛鋼のボイド損傷状態を明らかにするとともに、ボイド成長シミュレーション手法を用いて、微視的な損傷を定量的に予測できることを示した。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 「CrMoV鍛鋼環状切欠き試験片のボイド成長シミュレーションに基づくクリープ損傷評価」、緒方隆志、池田直人、日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 844, JSME-D-16-00259 (2017)。

研究項目 : 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研究期間 : 2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文) : 直径1mmの丸棒引張型ミニチュア試験片を用いたボイラ溶接部のクリープ強度評価法

研究課題名(英文) : Creep deformation and strength evaluation method for boiler weldment parts by using a solid bar miniature specimen with 1mm diameter.

研究者 : 緒方 隆志
OGATA Takashi

千葉工業大学
工学部 機械工学科 教授

1. はじめに

蒸気温度が600℃を超える超々臨界圧火力発電所の高温蒸気配管には、高温強度に優れる改良9Cr-1Mo鋼が使用されている。近年、同鋼の溶接熱影響部(HAZ)の細粒域においてクリープボイドが発生するなどType IV損傷と呼ばれるクリープ損傷事例が報告されている。そのため、高温で内圧負荷を受ける蒸気配管溶接部に対するクリープ損傷および寿命予測法の開発が喫緊の課題とされている。母材、溶接金属、熱影響部(HAZ)からなる溶接部の応力状態やクリープ損傷の進行を有限要素解析によって評価するには、これらの部位のクリープ変形・破断特性が必要となる。しかしながら、HAZや溶接金属では、標準的な試験片を採取できないため、微小な試験片を用いた強度特性の把握が必要となる。

本研究では改良9Cr-1Mo鋼MAG狭間先溶接継手のHAZ、母材、溶接金属から丸棒引張型クリープ試験片としてはこれまでで最小の直径1mmのミニチュアクリープ試験片を採取し、各部位のクリープ特性を取得するとともに、ミニチュア溶接継手試験片を用いたクリープ損傷評価法を提案する。

2. 試験方法

供試材料は改良9Cr-1Mo鋼狭間先MAG(metal active gas)溶接を施した溶接継手であり、温度745℃、150minの条件で溶接後熱処理を行った。母材、HAZ、溶接金属それぞれの部位から図1に示す平行部直径1mm、平行部長さ5mmの丸棒引張負荷型ミニチュアクリープ試験片採取し試験に供した。また、HAZが試験片の中央部に位置するようにミニチュア溶接継手試験片を加工した。さらに、片側のHAZが溶接継手中央部に位置するよう平行部直径10mm、標点間距離50mmの標準サイズ溶接継手クリープ試験片を加工した。

ミニチュア試験片のクリープ試験に用いた試験機は(株)神戸工業試験場によって開発されたものであり、最

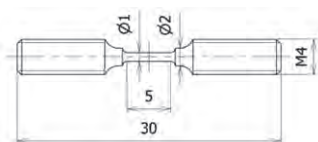


図1 直径1mmの丸棒引張型ミニチュア試験片形状

大荷重1kN、最高使用温度1000℃で、支点から負荷ロッドと荷重までのてこ比を5としたレバー式単軸クリープ試験機である。標準サイズ溶接継手試験片のクリープ試験には、最大荷重30kN、最高使用温度1000℃でてこ比1:10のレバー式単軸クリープ試験機を用いて試験温度650℃で実施した。

3. 試験結果および考察

母材、溶接金属、HAZの応力と最小クリープひずみ速度の関係を図2に示す。図中には、標準試験片から得られた母材の結果も示している。ミニチュア試験片から得られた母材の応力と最小クリープひずみ速度の関係は、標準試験片で得られたそれとほぼ同等の結果であった。溶接金属は母材の最小クリープひずみ速度と同等であるが、これらに比べHAZの最小クリープひずみ速度が明らかに速いことがわかる。同図の応力と最小クリープひずみ速度の関係からNorton則の係数および指数が決定できる。また、ミニチュア溶接継手試験片は、いずれの単一材料よりも短時間で破断し、破断部位はすべて母材近傍のHAZであった。標準サイズ溶接継手試験片も、すべて母材近傍のHAZで、ミニチュア溶接継手試験片より長時間で破断した。このことは、ミニチュア溶接継手試験片を用いた試験によって、標準サイズ溶接継手試験片の破断時間を予測できないことを意味している。

この要因を考察するため、標準およびミニチュア溶接

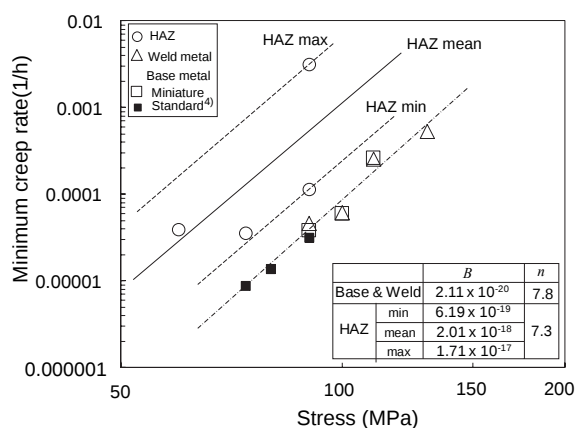


図2 ミニチュア試験片を用いたクリープ試験で得られた最小クリープひずみ速度と応力の関係

継手試験片の3次元有限要素クリープ解析を実施した。その結果、ミニチュア溶接継手試験片のHAZ部は単軸引張状態であるのに対し、標準溶接継手では同部が3軸引張状態となっていることが明らかとなった。クリープ変形速度は多軸応力の影響を受けるため、標準溶接継手試験片のHAZのクリープ変形速度に比べ、ミニチュア溶接継手試験片のHAZのそれが速くなり、ミニチュア溶接継手試験片の破断時間が標準溶接継手試験片より短時間となったことが示唆された。

4. ミニチュア試験片を用いた寿命評価

ミニチュア試験片を用いた実機溶接部のクリープ特性の把握には、部材表面より微小な試料をサンプリングする必要があるが、表面から深さ方向に試験片軸を持つ試験片の採取は困難であり、表面に沿った方向から採取せざるを得ない。そこで、表面に沿って採取したミニチュア溶接継手試験片を用いたクリープ試験によって、HAZのクリープ特性ならびに標準溶接継手試験片のクリープ破断寿命を推定する方法を以下に考察する。

ミニチュア溶接継手試験片の平行部長さ L_G における母材、溶接金属、HAZそれぞれの占める長さを L_B, L_W, L_H とし、Norton則($\dot{\epsilon}_c = B\sigma^n$)における係数 B および指数 n を、それぞれ B_B, B_W, B_H および n_B, n_W, n_H とする。負荷応力 σ のミニチュア溶接継手の試験から得られる平行部の最小クリープひずみ速度を $\dot{\epsilon}_{GL}$ とすると、均一な単軸応力状態を仮定すれば、HAZの最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_H$ は次式によって表される。

$$\dot{\epsilon}_H = \frac{\dot{\epsilon}_{GL}L_{GL} - B_B\sigma^{n_B}L_B - B_W\sigma^{n_W}L_W}{L_H} \quad (1)$$

HAZ幅内においてクリープ特性が異なるため、上式によって得られる最小クリープひずみ速度は、HAZの平均的な最小クリープひずみ速度であると解釈される。式(1)で得られた $\dot{\epsilon}_H$ と σ の関係($\dot{\epsilon}_H = B_H\sigma^{n_H}$)はHAZ単一試験片のばらつきの範囲に入っており、HAZ単一材の平均値をやや上回る概ね妥当な結果であると判断される。

次に、ミニチュア溶接継手のクリープ試験によってHAZの平均的なクリープ特性が既知となった場合に、標準溶接継手試験片のクリープ破断時間を推定する方法を、有限要素解析を援用することによって考える。HAZ単一試験片と標準継手試験片のHAZの傾きが同一であるとみなすと、HAZ単一試験片の最小クリープひずみ速度と標準継手試験片のHAZのクリープ速度の比の値は、一定である。その比の値は B 値に依存することから、Norton則から計算される $\dot{\epsilon}_{HN}$ と標準溶接継手試験片HAZのクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{HS}$ の比の値に対する B 値の依存性を求め、 $\dot{\epsilon}_{HS}$ と $\dot{\epsilon}_{HN}$ の関係に書き直すと、次式のようになる。

$$\dot{\epsilon}_{HS} = 2.77 \times 10^{-7} B^{-0.336} \dot{\epsilon}_{HN} \quad (2)$$

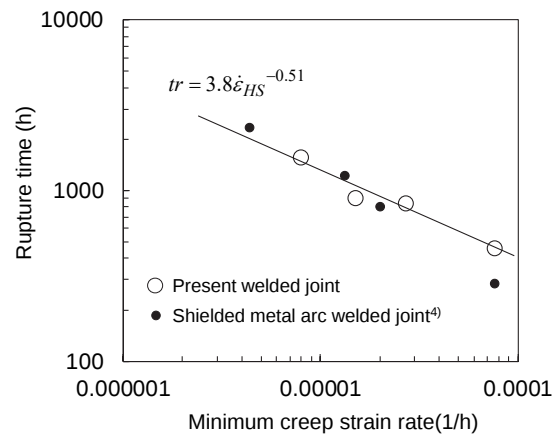


図3 標準溶接継手試験片のクリープ破断時間と最小クリープひずみ速度の関係

これより、解析を行わずに、任意の負荷応力 σ に対する $\dot{\epsilon}_{HN}$ から $\dot{\epsilon}_{HS}$ を求めることができる。上述したようにミニチュア溶接継手試験片のクリープ試験から式(1)に基づいて $\dot{\epsilon}_H$ を求め、その結果から B 値を決定して、式(2)を用いることにより、標準溶接継手試験片HAZの $\dot{\epsilon}_{HS}$ を決定できる。

有限要素解析で得られた標準溶接継手試験片のHAZの $\dot{\epsilon}_{HS}$ と破断時間 t_r の関係を図3に示す。実線で示すこれらの関係は、

$$t_r = 3.81 \dot{\epsilon}_{HS}^{-0.51} \quad (3)$$

で表される。上式を用いて、 $\dot{\epsilon}_{HS}$ から破断時間を推定することが可能となる。図中には、被覆アーク溶接継手の単軸クリープ試験の破断時間に対する有限要素解析で得られたHAZの最小クリープひずみ速度もプロットしている。溶接方法の違いによらず概ね同様な傾向を示していることから、式(3)を標準溶接継手試験片のクリープ破断時間の推定式として用いることができると考えられる。

5. まとめ

改良9Cr-1Mo鋼狭間開MAG溶接継手の母材、溶接金属、熱影響部(HAZ)各部位から採取した直径1mmの丸棒引張型ミニチュア試験片、HAZを中心に採取したミニチュア溶接継手試験片および直径10mmの標準サイズ溶接継手試験片を用いて、クリープ試験を実施した。その結果、各部位のクリープ特性を取得し、ミニチュア溶接継手試験片の破断時間は標準試験片のそれより短時間になることが明らかとなった。ミニチュア溶接継手試験片の試験結果から標準試験片の破断時間を予測する方法を提案し、提案法により予測できることが示された。

本研究に関する主な発表論文

(1) 「ミニチュア試験片を用いた改良9Cr鋼溶接部のクリープ強度特性評価」, 緒方隆志, 知脇圭祐, 材料, Vol.66, No.2, pp.93-100(2017).

研究項目 : 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研究期間 : 2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文) : 金属クリープ変形挙動の解明に向けた原子スケール解析

研究課題名(英文) : Atomistic simulations toward the understanding of creep deformation mechanisms in metals

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

1. はじめに

火力発電・航空用タービンといったエネルギー機器の高効率化を実現するためには作動温度の更なる上昇が必要であり、金属構造材料には、一層過酷な条件下におけるクリープ損傷耐性が求められる。こうした中、高温運転時に発生するクリープボイドは、材料の損傷機構と密接な関係があることが知られ、その挙動解明が大きな課題となっている。

クリープボイドは成長が進むと、ボイド同士の合体を経て、き裂の形成、機器破損へとつながる。そのため、ボイド成長メカニズムを明らかにすることを目的とし、塑性変形の影響、応力多軸度の影響、粒界特性との関係など、連続体解析や実験観測による様々な検討がなされている。しかしながら、ミクロなボイドの成長は、空孔拡散に伴う物質輸送、応力勾配、欠陥との相互作用等が関与する原子スケールの複雑な現象であり、その場観察実験も難しく、その基礎的機構は十分に明らかでない。

そこで本研究では、分子動力学法を用いて結晶粒界に生ずるボイド生成メカニズムの解明を試みた。また、原子スケールで固体内の物質輸送問題を取り扱えるdiffusive molecular dynamics (DMD)法を、金属中のボイド成長プロセスへと適用し、その成長メカニズムの基礎解明を行った。

2. ナノボイド生成シミュレーション

本研究では解析対象をアルミニウム(Al)とし、Al原子の挙動を良く再現できるEAM型の原子間ポテンシャルを採用した。解析モデルとして、初期構造がランダムな純Alの粒界三重点を含む結晶を用意した。まず試料を500 Kで安定化させた後、任意のAl原子を消去して、空孔を設置した。ここでは、粒界三重点近傍の6つの原子を順次1つずつ消去するごとに100ps間アニールした。100 ps間アニールすると、空孔が移動し、図1(b)中の赤点線で示す位置(z軸に2, 3個奥行方向)に凝集した。さらに、y軸方向に5%の引張ひずみ($\epsilon_y = 0.05$)を付加すると、粒界上で新たに構造変化が起こり、そこに空孔クラスターが形成されることがわかった。

粒界三重点近傍の空孔の安定性を評価するため、粒界三重点近傍での空孔形成エネルギーを求めた。対象とす

る原子は、粒界三重点部から半径30 Å内に存在する原子とした。また、ひずみゼロの場合($\epsilon_y = 0$)に加え、試料のy軸方向に引張ひずみを3%($\epsilon_y = 0.03$)与えたときの空孔形成エネルギーも求めた。 $\epsilon_y = 0$ の空孔形成エネルギー分布を図2(a)に、 $\epsilon_y = 0.03$ のそれを図2(b)に示す。空孔クラスターが形成される位置は、主に空孔形成エネルギー値の低い部分である。(a)図の $\epsilon_y = 0$ では粒界上の空孔形成エネルギーは大小様々であるものの、粒界三重点に隣接する原子は0 eV以下の深青色で表され、空孔が存在しやすいことが分かる。また(b)図の $\epsilon_y = 0.03$ では、結晶粒内の空孔形成エネルギーが全般的に高いものの(暖色系)、結晶粒界では深青色～水色で表される位置が多く、空孔が粒界上に集まる可能性が高まることがわかった。

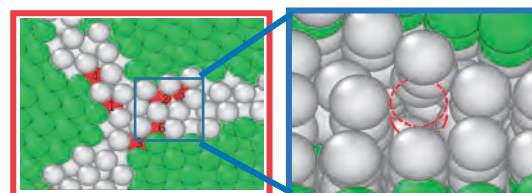


図1. 粒界三重点における空孔クラスター生成の様子

つづいて、Nudged Elastic Band (NEB) 法を用いて、空孔移動の活性化エネルギーを算出した。ここでは図3に示すように、1番の位置に空孔を設けた後、2番、3番・・・8番まで順次移動させた。これとは別に14番に空孔を設け、上記と同様に8番まで移動させた。このように13箇所の位置で、空孔が隣接する原子と置換する際の空孔移動に要する活性化エネルギーを求めた。解析時の引張ひずみは $\epsilon_y = 0$ と0.05とした。 $\epsilon_y = 0.05$ (○)では、結晶粒内(-15 Å~-7 Å, 6 Å~15 Å)の活性化エネルギーは0.5 eV程度であり、-4 Å~4 Åの粒界三重点近傍でのそれ(#7, #9)は0.2 eV以下となった。一方、 $\epsilon_y = 0$ (●)での活性化エネルギーは空孔を設置した位置に依存した。また、 $\epsilon_y = 0$ (●)の他の活性化エネルギーと比べて、非常に小さくなった。これは、この2箇所の空孔が周囲から粒界三重点(#8)方向に大きな力を受けており、空孔移動が容易に生じる位置に存在したためと考えられる。

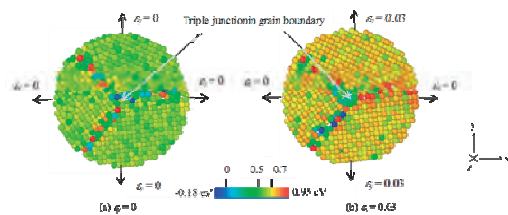


図2. 粒界三重点近傍における空孔形成エネルギー分布

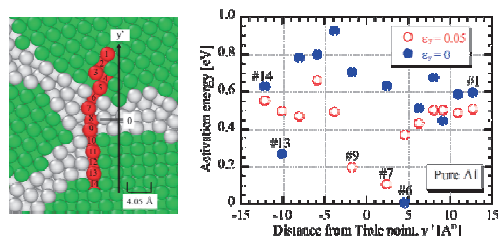


図3. 粒界三重点近傍での空孔移動の活性化エネルギー

3. ナノボイド成長シミュレーション

DMD 法では原子の熱ゆらぎを陽に取り扱わず、平均場近似を適用し、各原子サイト i に $\{\mathbf{x}_i, \alpha_i, c_i\}$ で示される自由度を与える [1]。ここで $\mathbf{x}_i$ は時間平均化された原子位置、 α_i は熱ゆらぎの度合いを表現するガウシアン幅、 c_i は原子の濃度である。よって、原子サイト i での空孔濃度 c^v は $c^v = 1 - c_i$ となる。原子間の相互作用は、2 体ポテンシャル項と電子密度項をガウシアン平均化することを得られ、ここでは、EAM 型ポテンシャルを用いた。

本研究では、Cu を対象とし、バルク中におけるボイド成長解析を行った。解析セルの x, y, z 方向はそれぞれ $[100], [010], [100]$ 方向とした。セル中央部に原子 13 個で構成される初期ボイドを配置した。本解析では、 μ (化学ポテンシャル)、 V (体積)、 T (温度) 一定のアンサンブルを適用した。セルサイズを調整し、 $\sigma_z = 5.6$ GPa の単軸の引張り応力を与えた。また、系の温度 T は 900 K (Cu 融点のおよそ 70%) とした。

図4に $C_0 = 10^3$ の条件でのボイド成長の様子を示す。図中、サイト濃度が 0.5 以下のもの空孔と判別した。 $C_0 = 10^3$ の条件での成長過程を見ると、ボイドサイズが小さい成長初期(a)-(b)においては、比較的球状に近い形を保ち成長した。その後、 $t = 50$ 以降においては、結晶面がボイド表面として出現し、ボイドは正八面体形状を呈しながら成長した。これは高温下では原子拡散が活発なため、最も表面エネルギーの低い結晶面が現れたためと考えられる。この過程におけるボイドの成長様式は、 $\{111\}$ 面上における二次元的なレイヤー・バイ・レイヤー成長であることもわかる。ただし、 $\{111\}$ 面上での成長出発点は、図中の点線で示された $\{111\}$ 結晶面の交差部であり、その成長方向は、図中の実線で示された z 方向 (あるいは $-z$ 方向) となった。これは、 z 方向に対する単軸引張りによって、成長出発点においてわずかな応力集中が生

じ、成長出発点が局所的に空孔の集まりやすい場になったためと考えられる。

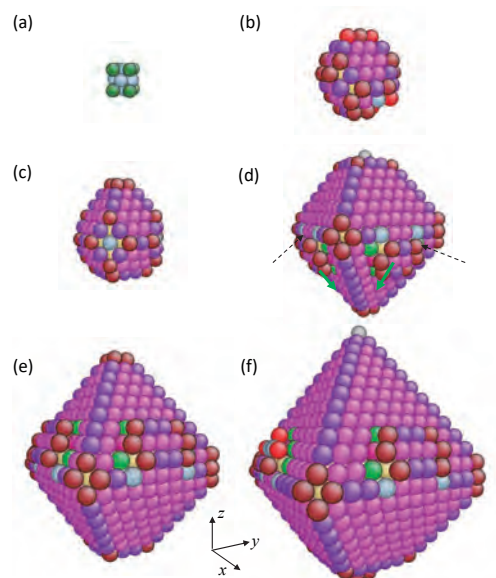


図4. ナノボイド成長の様子

上記のように、応力負荷方向の影響を反映し、ボイド表面部において空孔の拡散方向の異方性は生じたものの、ボイドの全体形状に大きな異方性は見られなかった。これは、ボイドの極表面近傍を除き、ほぼ応力場が均質であること、また周囲の外浴もすべて均一な空孔濃度場を仮定していること、さらに粒界といった高速拡散経路が存在しておらず、空孔拡散速度も系内で均一であることが要因と考えられる。よって、実験で観測されているような異形状のボイドは、化学ポテンシャル勾配や拡散速度がより複雑で不均質な状況下で成長した結果であるものと推測される。

4. まとめ

分子動力学 (MD) 法を用いて、粒界三重点における空孔移動過程を解析し、空孔は粒界上に集積し空孔クラスタを形成しやすいこと、また、引張りずみを与えると粒界構造は変化し、新たな空孔クラスタが粒界上で生成されることを明らかにした。

拡散型分子動力学法 (DMD) 法を用いて Cu 中のボイド成長解析を実施し、高温での原子拡散によるボイド成長が、 $\{111\}$ 面上における二次元的なレイヤー・バイ・レイヤー成長で進行することを明らかにした。

5. 参考文献/発表論文等

- [1] J. Li, et al., Phys. Rev. B 84, 054103 (2011)
- [2] Q. J. Li, B. Xin, S. Hara, J. Li and E. Ma, Acta Mater., 145, (2018) 19-29.
- [3] 原 祥太郎, アンサンブル, 19, (2017) 165-170.
- [4] Z. Yan, S. Hara and N. Shikazono, Scripta Mater., 146, (2018) 31-35.

研究項目 : 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研究期間 : 2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文) : 電子顕微鏡その場観察のための計測要素技術の開発

研究課題名(英文) : Development of Scanning Electron Microscope with Thermal Electron Trap

研究者 : 菅 洋志
SUGA Hiroshi

千葉工業大学
工学部 機械電子創成工学科 准教授

1. はじめに

一般的なクリープ試験は高温環境で試験片に一定荷重を与え続けて、歪みや応力を計測する。ひずみの進行度合いから相対的に寿命を評価できるが、試験片の損傷量を直接的に評価することはできない。電子顕微鏡法は試験片の損傷量を直接評価する方法の一つで、クリープ損傷の要因となる結晶粒界の微小なボイドや欠陥、またそれらがつながった亀裂を直接観察することができる。近年では、原子の拡散からクリープ損傷を明らかにする試みもなされているが、原子に比べてサイズの大きな結晶粒界の欠陥とその欠陥による亀裂の進展とクリープ損傷との因果関係を明らかにする取り組みもなされている。クリープ損傷における関心の対象の結晶粒界の大きさは、およそ粒径数 μm から数 $100\mu\text{m}$ 程度であるため、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: 以下、SEM)が用いられている。クリープ損傷のSEM観察はクリープ試験機での試験後に、切り出した試料小片をSEMで観察する手法が一般的であるが、クリープ損傷の進展を観察するためには、顕微鏡観察下でクリープ現象を行う必要がある。クリープ試験その場観察ができる電子顕微鏡法の必要性は知られていたが、高温環境における電子光学系への悪影響から、電子顕微鏡でのクリープ試験その場観察の実施例は限られていた(1)、(2)。SEMによるクリープ損傷のその場観察は、クリープ損傷の進展と微細構造関係を明らかにする上で欠かすことができない技術であるが、SEMの高温試料観察能力の制約が問題点となっている。特に、次世代の火力発電所に用いられるニッケル基合金は、使用温度は 650°C を越えるため、現状のSEMその場観察技術では対応できない。

そこで、本研究では、高温引張試験のその場観察に対応できる電子光学系の基盤を形成するため、簡易高温引張試験を搭載した卓上電子顕微鏡の開発を実施した。反射電子検出器と組み合わせた2分割円筒形状の熱電子除去フィルタと可換式反射電子検出器、および簡易高温引張試験を開発した。これらの要素技術を総合して電子顕微鏡を構築し、熱電子除去フィルタを用いた高温試料の観察を行った。

2. 熱電子除去フィルタを用いた高温試料の観察

本研究では、卓上サイズの走査型電子顕微鏡(テクネックス工務、Tiny-SEM510改)に開発した要素技術を導入した。卓上SEMの電子源は、熱電子放出フィラメントであり、対

物レンズは永久磁石型電子レンズと二次電子検出器から構成される。加速電圧は 17 kV 、ワーキングディスタンス 10 mm 、 $2\times 10^{-2}\text{ Pa}$ 以下の真空環境で実験を行った。

図1に電子光学要素部品および、クリープ試験機要素の配置概略図を示す。クリープその場試験を行う上で、放射熱による検出器の損傷は避けられない。今回、一般的に入手できる市販のPINフォトダイオードをセンサーとして利用することで、反射電子検出器を消耗部品として設計した。この可換式反射電子検出器を対物レンズ直下に配置する。検出器の信号は2段のアンプを介してSEM鏡筒外の信号処理用ワンチップマイコンに接続する。ワンチップマイコンから出力される偏向コイルの走査信号と統合し、パーソナルコンピュータ上でSEM像を合成する。対物レンズ直下に引張・加熱機構を備えた試料ステージが配置される。ワイヤ試料には、通電加熱するための電源と、抵抗値を4端子計測するための電流源と電圧計が接続されている。ワイヤ試料の近傍に熱電子除去のための2分割円筒形状静電フィルタを設置した。

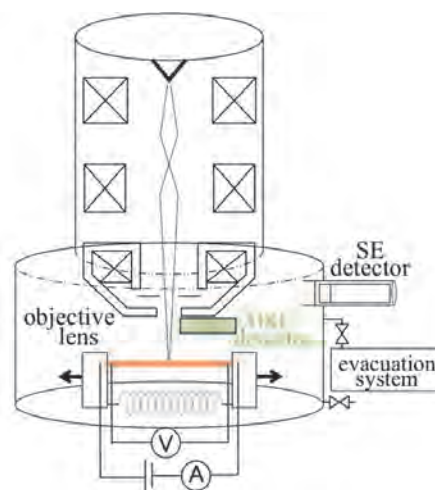


図1 高温引張その場観察用SEMの概略図

3. 2分割円筒形状静電フィルタの開発

本研究ではワイヤ試料の近傍に偏向電極を配置することで、熱電子を吸収できるように、2分割円筒形状の静電フィルタを考案した。図2に2分割円筒形状電極の概略図と電子軌道のシミュレーションの典型例を示す。ワイヤ試料の左右近傍に配置された電極それぞれに電位を印加すること

で片側の電極方向に向けて電場が形成される。電子はこの電場から力を受け、電子軌道が変化する。50 eVのエネルギーを持つ熱電子は陽極方向に軌道を取り、陽極に全て吸収される。平板静電フィルタに比べ、低い電位差で熱電子を分離することができるため、17 keVの反射電子は偏向の影響を受けず、検出器に向かう軌道となる。また、ワイヤ試料の輻射熱を電極内に留める効果も期待できる。

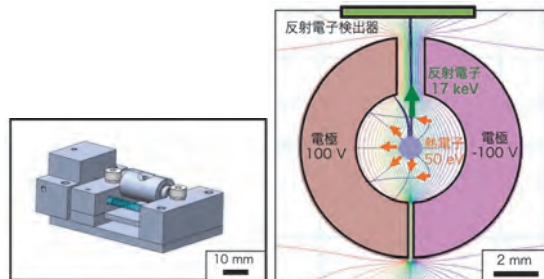


図2 二分割円筒形状静電フィルタの概略図と電子軌道

4. ニッケルワイヤのクリープ試験その場観察

製作した小型の加熱・引張機構、可換性反射電子検出器と二分割円筒形状熱電子除去フィルタを用い、クリープ損傷進行過程をSEMその場観察可能であることを確認した。試料としてニッケルワイヤを用いて、クリープ損傷過程のSEMその場観察実験を行った。加熱条件は四端子測定法によりワイヤ試料の抵抗値を計測し、抵抗率の熱係数を用いてワイヤの温度を計測し、約700℃に加熱した状態を保った。直径0.2 mmのニッケルワイヤに30 MPaの引張応力を印加した。分割されている円筒形状電極の片側に100 V、もう一方に-100 Vの電圧を印加した。以上の条件でニッケルワイヤのクリープ損傷進行過程をSEMその場観察した。

図3にニッケルワイヤクリープ損傷過程のその場観察結果を示す。図3(a), (c), (e)は30 MPa引張応力と約700℃の加熱を負荷してからそれぞれ、9時間、46時間、89時間経過したニッケルワイヤ表面の反射電子像である。図3(b), (d), (f)はそれぞれ、図3(a), (c), (e)中の破線で囲んだ箇所を拡大した図である。図3(a), (b)から負荷印加から9時間経過後もニッケルワイヤの表面に変化は確認できない。図3(c), (d)より負荷印加から46時間経過後のニッケルワイヤ表面には初期亀裂と思われる微小な亀裂の発生が確認できる。図3(e), (f)より負荷印加から89時間経過後のニッケルワイヤ表面には、図3(c), (d)で確認された初期亀裂が進展し、開口長が増加した亀裂が認められる。以上のことから、製作した加熱・引張機構および二分割円筒形状電子線フィルタを用いることで700℃のクリープ損傷進行過程をSEMその場観察可能であることを確認した。

5. おわりに

高温引張試験のその場観察に対応できる電子光学系として、可換性反射電子検出器と、可換性反射電子検出器のための信号処理システム、二分割円筒形状電子線フィルタの有限要素解析を開発した。二分割円筒形状の静電フィルタを電子顕微鏡に導入し、熱電子除去効果を確認、ニッケル

ルワイヤ試料を700℃に加熱しながら応力を与え、電子顕微鏡その場観察を行いクリープ損傷の成長過程をSEM像で観察した。

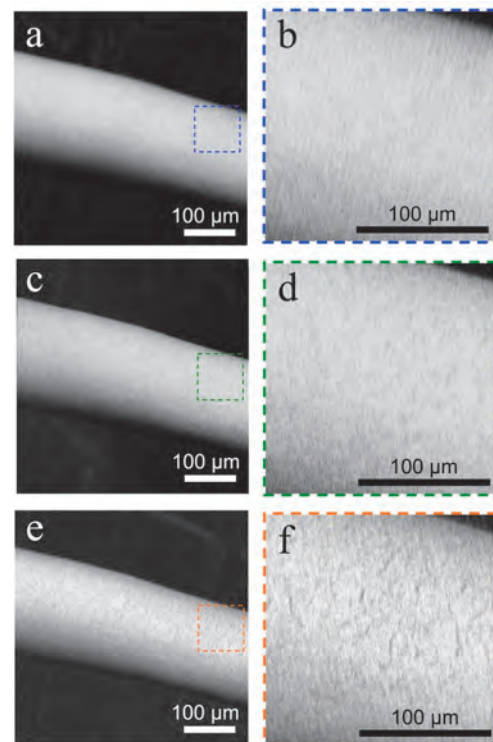


図3 ニッケルワイヤクリープ損傷過程のその場観察結果, (a) 9時間経過, (b) (a)中の破線部の拡大, (c) 46時間経過, (d) (c)中の破線部の拡大, (e) 89時間経過, (f) (e)中の破線部の拡大

本研究に関する主な発表論文

- (1) R. Kanou, H. Suga *et al.*, *Journal of the Vacuum Society of Japan* **60**, 148 (2016).
- (2) Q. Wei, H. Suga I. Ikeda *et al.*, *Organic Electronics* **38**, 264 (2016).
- (3) H. Suga, H. Suzuki, Y. Shinomura, S. Kashiwabara *et al.*, *Scientific Reports* **6**, 34961 (2016).
- (4) R. Kanou, H. Suga, H. Utsumi, S. Petit, *et al.*, *Japanese Journal of Applied Physics* **56**, 086201 (2017).
- (5) 狩野 諒, 菅 洋志, 宮脇 淳 他, *Journal of the Vacuum Society of Japan* **60**, 148 (2017).
- (6) Y. Naitoh, H. Suga, T. Abe, K. Otsu, Y. Umeta, *et al.*, *Appl. Phys. Express* **11**, 085202 (2018).
- (7) K. Hashiguchi, K. Suzuki, H. Suga *et al.*, *Journal of Photopolymer Science and Technology* **31**, 227 (2018).
- (8) K. Hashiguchi, K. Suzuki, H. Hiroshima, H. Suga, *IEEE Transactions on Nanotechnology* **17**, 1094 (2018).

参考文献

- (1) 緒方隆志, 溶接学会誌 **67**, 151 (1998).
- (2) 鳥坂泰憲, 原口修一, 鉄と鋼 **77**, 715 (1991).

研究項目：私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研究期間：2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名（和文）：耐熱金属材料CrMoV鋼における疲労強度と加工面性状との関係

研究課題名（英文）：Relationship between Fatigue Strength and Surface Characteristics for Mechanical Parts of Heat-Resistant Alloys of CrMoV Steel

研究者：瀧野 日出雄
TAKINO Hideo

千葉工業大学
工学部 機械工学科 教授

1. はじめに

CrMoV 鍛鋼は、高温高压環境下で使用される機械部品の材料として有効である。たとえば、火力発電のタービンロータやバルブなどに用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。CrMoV 鍛鋼製の部品は、製造の最終工程において切削加工によって表面仕上げされることが多い。

一般に、表面性状は疲労強度に影響を及ぼすことが知られている。このため、高温高压の厳しい環境下で使用されるCrMoV 鍛鋼製の部品の製造には、その切削特性を解明することが重要である。しかし、CrMoV 鍛鋼の切削特性に関する報告はほとんどない。そこで切削特性を実験的に調べた結果を「本研究に関する主な発表論文 (1) および (3)」で報告した。

またCrMoV 鍛鋼については、疲労強度に及ぼす表面性状の影響を調べた研究はほとんどない。これについては、「同 (2)」において研究結果を報告したので、本稿ではその概要を述べる。本研究では、CrMoV 鍛鋼をさまざまな条件で旋削して、表面粗さや加工変質層を調べた。また比較のために、耐熱金属 SUS304 についても同様の実験を行った。さらに、表面粗さと疲労強度との関係を調べた。

2. 研究の内容

(1) 供試材

図1に示すように、実際のタービンロータ素材の端部（ハッチング部）から材料を切り出して、実験に使用した。SUS304は押し出し材を使用した。

(2) 加工硬化層深さの測定方法

図2に、加工硬化層の測定手順を示す。普通旋盤によって種々の条件（付表）で試料を旋削した。試料を切斷・研

磨したのち、生成した加工硬化層の深さをビッカース硬度計で測定した。

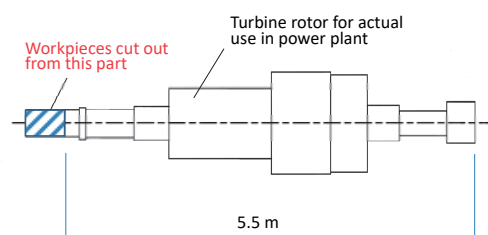
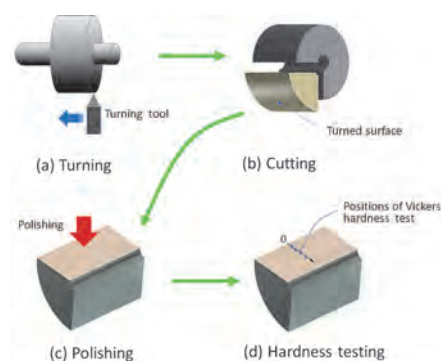


図1 CrMoV 鍛鋼試験片の切り出し位置



付表 旋削条件と試験片番号

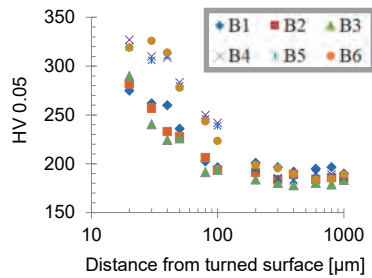
Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]		
	0.3	0.5	1.0
0.08	B1	B2	B3
0.20	B4	B5	B6
0.31	B7	B8	B9

Cutting speed: 50 m/min

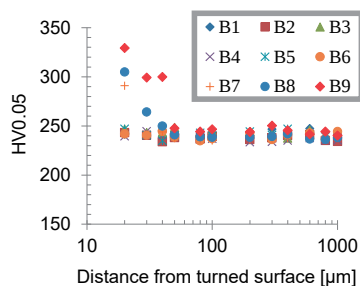
図2 ビッカース硬度測定の手順

(3) 加工硬化層深さの測定結果

図3に示すように、SUS304の場合には深さ100 μm 程度の硬化層が存在することがわかる(試験片 B1~B6)。一方、CrMoV 鍛鋼の場合、送り0.2 mm/rev以下(試験片 B1~B6)では、硬化層はほとんど見られない。さらに、送り0.31 mm/revでも(試験片 B7~B9)、硬化層深さは40 μm 程度である。CrMoV 鍛鋼の組織観察の結果、送り0.31 mm/revにおいて、40 μm 程度の深さまで塑性変形が見られた。したがって、CrMoV 鍛鋼の硬化層は、旋削で生じた塑性変形によるものと考えられる。



(a) Stainless steel SUS304



(b) Cr-Mo-V steel

図3 ビッカース硬度計で測定された加工硬化層深さ

(4) 疲労試験方法

CrMoV 鍛鋼について、普通旋盤によって送り0.08, 0.12, and 0.16 mm/revにて、疲労試験片を製作した。この場合、試験片の表面粗さRaは、それぞれ0.90, 1.31, 2.25 μm であった。なおこの条件では、図3に示したように硬化層はほとんど生じない。

製作した試験片を用いて、図4に示すように応力振幅200~400 MPaにて部分片振りの疲労試験を実施した。

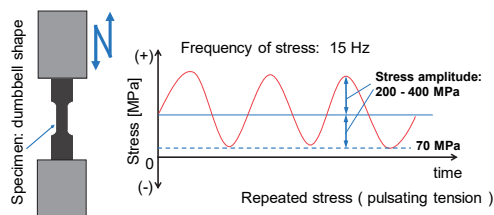


図4 疲労試験方法

(5) 疲労試験結果

図5に疲労試験の結果を示す。応力振幅400 MPaの場合、

疲労強度は表面粗さに依存しない。しかし、応力振幅が低くなるに従って、疲労強度は表面粗さに依存するようになることがわかる。なお応力振幅が低い場合、表面粗さの凹部から破壊が進行していた。これは凹部の応力集中によるものと考えられる。

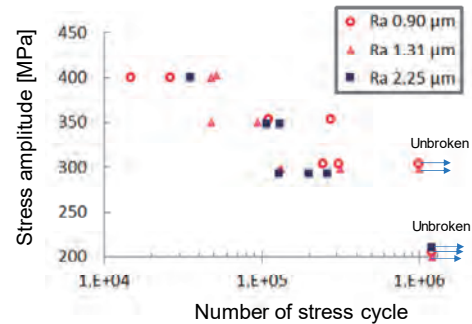


図5 CrMoV 鍛鋼における表面粗さと応力振幅を変えた場合の疲労強度

3. まとめ

CrMoV 鍛鋼と SUS304 をさまざまな条件で旋削した。CrMoV 鍛鋼は、SUS304 に比べて加工硬化層が生じにくいことがわかった。CrMoV 鍛鋼を片振り疲労試験(応力振幅: 200-400 MPa)した結果、応力振幅が低い場合には、試験表面が平滑なほど疲労寿命が長いことがわかった。また疲労破壊は、表面粗さの凹部から生じており、これは応力集中によるものと考えられる。

本研究に関する主な発表論文

- (1) Hideo Takino, Masashi Ota, and Atsushi Yamanaka, "CUTTING CHARACTERISTICS IN TURNING OF Cr-Mo-V FORGED STEEL," Proc. 31st American Society for Precision Engineering (ASPE) Annual Meeting, (2016.10), pp. 562-565.
- (2) Thang Van Tran, Hideo Takino, and Takashi Ogata, "Relationship between Fatigue Strength and Surface Characteristics for Machined Parts of Heat-resistant Alloy of Cr-Mo-V steel," Proc. 18th International Conference of European Society of Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), (2018, 6), pp. 337-338.
- (3) You Kawamura, and Hideo Takino, "TOOL WEAR AND CHIP FORMATION IN TURNING OF HEAT-RESISTANT ALLOY OF Cr-Mo-V FORGED STEEL," Proc. 33rd American Society for Precision Engineering (ASPE) Annual Meeting, (2018.11) pp. 297-300.

参考文献

- (1) Viswanathan R, Jaffee R I. J Eng Mater Technol. 1983; 105: 286-294.
- (2) Masuyama F. ISIJ International, 2001; 41: 612-625.

研究項目 : 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業
研究期間 : 2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文) : 回転式攪拌装置の流体力学的荷重と疲労強度評価

研究課題名(英文) : Estimation of the fatigue limit based on the hydrodynamic load of stirred vessel

研究者 : 仁志 和彦
NISHI Kazuhiko
千葉工業大学
工学部 機械工学科 教授

1. はじめに

攪拌用の翼を回転させ、内容物の混合を行う回転式攪拌槽装置は、多くの産業分野で見られる最も汎用される装置の一つである。エネルギー、石油精製、化学等のプラントにおいては、反応、物質移動を促進する目的で高温、高圧のタンク内で攪拌混合を行うことも少なくない。これらの攪拌軸、翼にはタンク内の流動状態に対応したトルク、ラジアル荷重が作用するため、攪拌条件(翼形状、軸長、翼回転数、流体粘度等)に応じた装置の強度設計が求められる。不適切な設計は装置の破損、内容物の漏洩、火災、爆発等の甚大事故につながる。当然のことながら強度設計の基本となるのは、装置に付与される荷重であり、回転式攪拌装置では、一般に攪拌翼を回転させるためのモーメントであるトルクに基づき設計がなされてきた。また、トルクとともに発生する、攪拌翼に水平方向から作用するラジアル荷重については、トルクに比例するという経験則に基づき設計が行われてきた。このような設計は従来型の攪拌装置、手法では問題ないが、攪拌混合操作の高度化を目的に種々開発される新しい攪拌翼、攪拌手法にそのまま適用することはできない。また、近年、既存設備の老朽化もあり、より高いレベルの安全・安心設計が求められている。

本研究では回転式攪拌装置に作用する荷重として、回転モーメントであるトルクと回転軸の水平方向からの力であるラジアル荷重が疲労を含む強度設計に重要と考えた。また、これらは流体との相互作用や装置構造と関連し時間的に変動する。変動は疲労強度における繰返し応力として作用すると考えられ、その振幅、周波数を明らかにするとともに、発生メカニズムの解明を目標とした。さらにトルクに関しては定常運転時のトルク(定常トルク)とともに定常トルクに比べ大きな値を示す回転開始時のトルク(起動トルク)¹⁾の大きさ、発生メカニズムについても検討した。

具体的な検討としては、従来翼に加え、近年、高性能翼として開発が進む大型特殊翼²⁾、偏心攪拌を含む新しい攪拌手法³⁾を対象に、定常トルク、起動トルク、ラジアル荷重を実測し、回転数、液粘度や翼形状、設置条件などの攪拌条件と各種荷重の関係を相関式として整理した。また、攪拌槽内流動の数値シミュレーションや荷重の周波数解析

を行うことで、それぞれの荷重の発生メカニズムを明らかにした。本稿ではこれらの知見に基づく疲労強度予測についての検討内容を示す。

2. 定常トルク、起動トルク、ラジアル荷重に基づく疲労強度評価

回転式攪拌装置で発生する流体力学的な荷重である起動トルク、定常トルク、ラジアル荷重に基づく疲労強度の評価について検討する。攪拌翼には2枚パドル翼を用い、その偏心攪拌を対象に検討を行った。実験値に基づくFEM応力解析を行い、回転曲げのS-N線図に基づく疲労寿命の予測を行うとともに、実際に疲労破壊実験を行い、妥当性等について検討した。

(1) 実験方法

攪拌槽には槽径 $D = 0.2$ mの邪魔板無しの円筒平底槽を用いた。攪拌翼には翼径 $d = 0.11$ m、翼幅 $b = 0.06$ mの2枚垂直パドル翼を用いた。攪拌方式は偏心攪拌とし、翼は偏心距離 $L_E = 0.03$ mの位置に設置し、回転数 $n = 2.0$ s⁻¹で攪拌を行った。攪拌軸には直径0.008 m、肉厚0.001 mのアルミ引抜丸パイプ(A6063)を用いた。また、モータとの接続はドリルチャックを用いて行い、ドリルチャックから攪拌翼中心までの長さを0.35 mとした。攪拌液には水を用い、攪拌レイノルズ数 $Re = 24200$ の乱流攪拌条件とした。まず、起動トルクおよび定常状態におけるトルク、ラジアル荷重の測定を行った。その後、連続運転を行い、疲労により破損するまでの時間を測定した。有限要素法(FEM)による応力解析はInventor 2018(Autodesk社)を用いて行い、解析対象は攪拌軸のみとし、実験値に基づきモーメント(トルク)、荷重(ラジアル荷重)を付与して応力分布、ファンミーゼス応力、最大主応力を算出した。

(2) 結果

(2-1) 起動、定常トルク、ラジアル荷重および疲労破壊

起動トルクとしては第1起動トルクと第2起動トルクが観測された。第1起動トルクは0.32 Nmであり、第2起動トルクは0.14 Nmであった。

図1には、定常状態におけるトルクとラジアル荷重の経時変化を示す。ラジアル荷重については、2枚パドル翼であるため攪拌翼に垂直な成分である F_y が支配的な状況で

あった。また、偏心撹拌であるため、 $f/n=1$ の周期的な挙動を示した。また、トルクも周期的 ($f/n=2$)、規則的に変動しており、ラジアル荷重が極大、極小を示す時刻で極大、極小を示すことが分かった。

連続運転による疲労破壊は、147 日で起こり、トルクの周期に基づけば 5.08×10^7 回、ラジアル荷重の周期に基づけば 2.54×10^7 回の繰り返し荷重が破壊したこととなる。

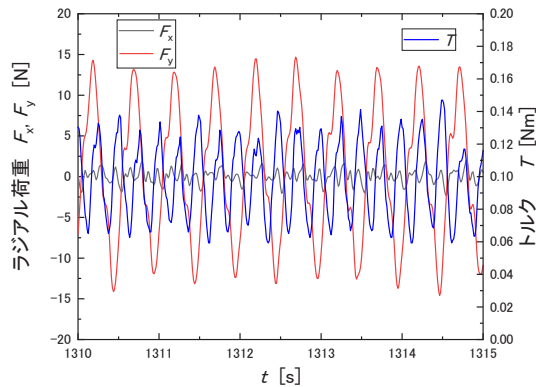


図1 定常状態におけるトルク、ラジアル荷重の経時変化

(2-2) 疲労強度評価

起動トルクに基づく評価 起動トルクに基づく応力解析では固定端である撹拌軸上部で大きな応力が観測された。起動トルクの最大値は第1 起動トルクの 0.32 Nm であり、応力解析で得られたファンミーゼス応力、最大主応力は、それぞれ 8.42 MPa , 4.86 MPa であった。アルミニウム A6031 の回転曲げ試験による S-N 線図⁴⁾に基づき評価すれば、本研究の装置における起動トルクでは 10^9 回以上の装置の起動一停止を行っても疲労破壊は起こらないと推定された。

定常状態のトルク、ラジアル荷重に基づく評価 図1に基づき、定常トルクの最大値を 0.10 Nm 、ラジアル荷重の最大値を 13.5 N とし、応力解析を行った結果を図2 および表1 に示す。表中には定常トルクのみ、ラジアル荷重のみ、および定常トルクとラジアル荷重を同時に作用させた場合の応力値を示した。定常トルクにより発生する応力はラジアル荷重の数%程度と小さく、疲労強度においてはラジアル荷重の影響が極めて大きいものと考えられる。またラジアル荷重は軸長が大きくなった場合、同時に大きくなり工業規模の実機においては、疲労強度を決める決定的な因子になると考えられる。

図3 には、S-N 線図上に応力解析結果および実験により得られた疲労破壊に要したラジアル荷重の繰り返し回数を示した。ファンミーゼス応力に基づき推定される繰返し回数と、実験により得られた繰返し回数は、よく一致していた。すなわち、流体力学的荷重である定常トルク、ラジアル荷重を明らかにし、応力解析によりファンミーゼス応力を求めることで、撹拌軸材の S-N 線図 (回転曲げ) より撹拌軸の破断繰返し数が得られ、さらには荷重の発生周波数を考慮することで、回転式撹拌装置の疲労寿命を一定の精度で推定できることを明らかにした。

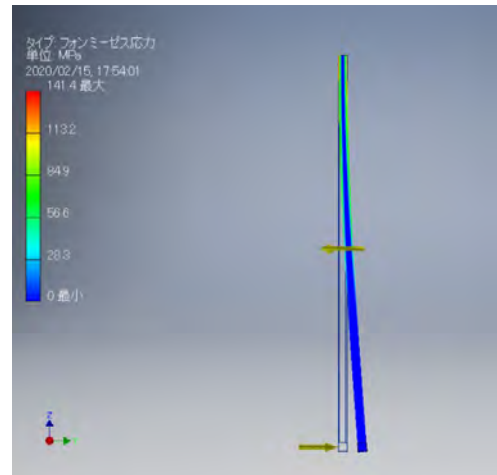


図2 定常トルクとラジアル荷重に基づく応力解析結果

表1 定常トルク、ラジアル荷重による応力

	ファンミーゼス 応力 [MPa]	最大主応力 [MPa]
定常トルク	2.63	1.52
ラジアル荷重	137	163
定常トルク +ラジアル荷重	141	178

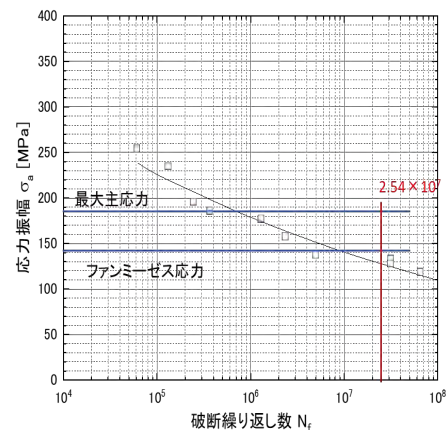


図3 定常トルク、ラジアル荷重に基づく疲労強度の評価

参考文献

- 1) Nishi, K., Y. Bando, R. Misumi, M. Kaminoyama; "Starting Torque of Vertical Paddle Impellers," J. Chem. Eng. Japan, 50, 677-683 (2017)
- 2) Nishi, K., N. Enya, Y. Tanaka, R. Misumi and M. Kaminoyama; "Mixing of Eccentrically Located Hi-F Mixer," J. Chem. Eng. Japan, 44, 859-867 (2011)
- 3) Nishi, K., N. Enya, R. Misumi and M. Kaminoyama; "Power Consumption and Mixing Performance of an Eccentrically Located Mixer," J. Chem. Eng. Japan, 44, 859-867 (2011)
- 4) 中村孝, "金属疲労の基礎知識", 鋳造工学, 79, 58-69 (2007)
- 5) 布班成具, "アルミニウムおよびアルミニウム合金の疲労", 軽金属, 28, 568-574 (1978)

研究項目 : 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業
研究期間 : 2015/4/1 ~ 2020/3/31
研究課題名(和文) : 炭素繊維強化プラスチックの損傷評価

研究課題名(英文) : Damage evaluations of carbon fiber reinforced plastics

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
斉藤 博嗣 SAITO Hiroshi	金沢工業大学 工学部 機械工学科 教授
金原 勲 KINPARA Isao	金沢工業大学 顧問

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)は一般的に用いられている金属材料と同程度の強度、剛性を持ち、かつ軽量であるという特徴がある。それにより、近年、航空・宇宙分野を中心に自動車やスポーツ用品などにも広く適用されている。しかし、CFRPは積層構造であるため、異方性などアルミ合金などの金属材料にはない特性を有している。さらに、発生する損傷は、層内樹脂割れ、層間はく離、繊維破断など多様であり、特に目視による外からの検出が困難な内部損傷については、現在有効とされている非破壊検査手法である超音波探傷などが適用されているが、損傷量の定量評価および信頼のおける損傷指標の提案にまでは至っておらず、新たな手法を用いた非破壊検査の確立が期待されている。そこで本研究では、多様な損傷の中でも特に初期の損傷として発生する層内樹脂割れに注目し、CFRP直交対称積層材に対して引張負荷によって導入した層内樹脂割れ損傷をマイクロフォーカスX線CT撮像によって検出を試み、X線CT撮像による損傷検出の有効性を検討する。

2. 供試体および試験方法

(1) 供試体

本研究ではCFRP素材として三菱ケミカル製パイロフィルTR350C150Sを使用した。供試体は24plyで構成され、積層構成 $[0_2/90_{10}]_s$ の直交対称積層板とし、寸法は長さ240mm、幅18mm、1ply当たりの厚さが0.125mmのため総厚さ3mmとした。供試体の本数は10本とした。

(2) 静的引張試験

予損傷試験における負荷荷重範囲の決定および層内樹脂割れの発生と進展の様子を観察するため、静的引張試験およびアコースティック・エミッション(AE)による損傷イベント検出を実施した。静的引張試験に用いた試

験機はインストロン製5587型ねじ式万能試験機(秤量250kN)で、AE測定にはエヌエフ回路設計ブロック製のAE信号処理モジュールAs-712およびディスクリミネータAE9922を用いた。チャック間距離100mm、試験速度は1.0mm/minとし、チャック間中央に評点間距離50mmの伸び計を取り付けた。またひずみゲージも軸方向に裏表2枚貼った。AEの周波数域は20kHz~100kHzとした。

(3) 与損傷試験

続いて、供試体に層内樹脂割れ損傷を導入するために引張負荷による与損傷試験を行う。その時、同時にデジタルマイクロスコープを用いて供試体の側面観察を行い、損傷の導入された状態を記録した。引張負荷に用いた試験機は静的引張試験と同様にインストロン製5587型ねじ式万能試験機で、側面観察用のデジタルマイクロスコープはマイクロ・スクエア製のDS-300を用いた。試験条件は静的引張試験の実施時に測定したAEの結果により損傷の入り始める荷重を取得したため、その荷重である4kNから5kN、6kN、7kN、8kN、9kN、10kN、12kN、14kN、16kNの10種類をそれぞれの供試体に負荷した。側面観察については各供試体に対して荷重負荷前の0kNの状態と荷重負荷後の状態を観察した。観察した範囲は引張負荷による損傷の入り方が供試体中心から対称であると仮定し、チャック間距離100mmの上側50mmに生じた樹脂割れの個数を数え、単位当たりに換算した損傷密度を測定した。

(4) CT撮像

前節で述べた供試体に対してマイクロフォーカスX線CT撮像を実施した。撮像は損傷を導入する前の未損傷状態と損傷を導入した後の与損傷状態の2回実施した。本研究におけるCT装置(カルツァイス株METROTOM800)は、最大管電圧130kV、最大出力39W、デテクタ $245 \times 195 \text{mm}$ 、 $1,920 \times 1,536 \text{pixel}$ 、ロータリーテーブルの面振れ0.1 μm 、軸ぶれ0.2 μm 、撮影範囲 $\Phi 125 \text{mm} \times 150 \text{mm}$ および測定精度

が 4.0 $\mu\text{L}/100\mu\text{m}$ のである。撮像条件は、空間解像度については損傷前が 34 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、損傷後が 30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、管電圧は損傷前が 130kV、損傷後が 90kV、管電流は損傷前が 60 μA 、損傷後が 90 μA 、以下はどちらも同様で投影枚数 1550、再構成アルゴリズムには Feldkamp 法を用いた。

3. 結果および考察

(1) 静的引張試験結果

Fig. 1 に応力-ひずみ線図を示す。線図中に示したカウントは AE による測定結果で、損傷時のイベントのみを検出するためのしきい値となるディスクレベルを越えた回数を示している。線図中ひずみ 2500 $\mu\epsilon$ 付近で AE イベント検出が開始され、それと同時に応力-ひずみ線図に折れ曲がりが見察された。この時点で層内樹脂割れの本格的な発生が始まったことがわかる。また、ひずみ 16000 $\mu\epsilon$ を超えたあたりの応力値の下がる部分については、0° 層の部分的な繊維破断が生じたためと考えられ、その後、最終的な全体破断に至った。

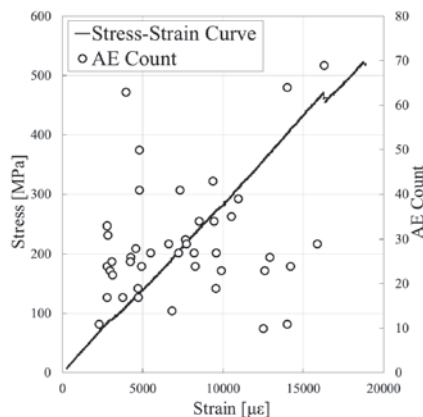


Fig.1 Stress-strain curve and AE count.

(2) 予損傷試験結果

Fig. 2 に 90° 層応力とき裂密度の関係を示す。グラフからばらつきはあるものの近似曲線を引くことにより予損傷試験によって 90° 層応力の増加に伴いき裂密度も大きくなっていくことがわかる。

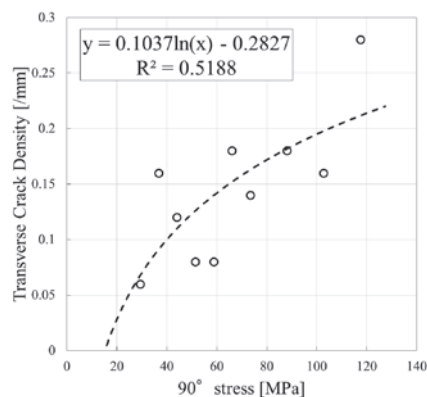


Fig.2 Transverse crack density and 90° stress.

(3) CT 撮像結果

Fig. 3 は、画像解析ソフト (GOM Inspect) を用いて、

CT 撮像した供試体の損傷導入前の状態と損傷導入後の形状を重ね合わせ、損傷導入前に対しての損傷導入後の表面偏差を検査した結果の中から与損傷試験と同様の負荷荷重のものを示す。この結果から、重ね合わせた範囲のおおよその範囲において 0.1mm 以内の偏差となった。

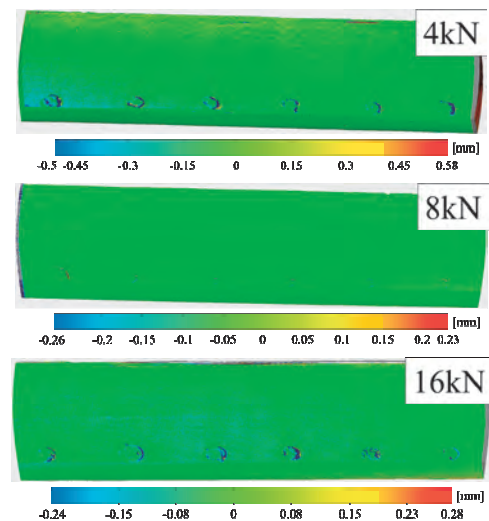


Fig.3 Surface deviation.

4. おわりに

本研究は損傷様式が特殊で損傷による影響や損傷自体を評価することが非常に困難な CFRP 積層材の損傷様式の中でも初期の損傷とされる層内樹脂割れ損傷に着目し、その発生・進展挙動を観察することで評価を行った。CFRP 直交積層材に対して引張試験および AE 測定を実施することで損傷の発生を観察した。また、与損傷試験を実施することで層内樹脂割れ損傷の発生・進展を評価した。さらに、X 線 CT 撮像技術を適用し、新たな非破壊検査・損傷指標の提案に向けた基礎データを得た。

参考文献

- (1) Nairn, J.A., The Strain Energy Release Rate of Composite Microcracking: A Variational Approach, *Journal of Composite Materials*, Vol. 23, (1989), 1106-24.
- (2) 元木信弥, 安田哲, 福田武人, FRP 直交積層板におけるマトリックスき裂損傷の発達(第 1 報, き裂発生によるエネルギー解放率の理論解析), 日本機械学会論文集(A 編), 63 巻, 615 号, (1997-11).
- (3) 元木信弥, 安田哲, 福田武人, FRP 直交積層板におけるマトリックスき裂損傷の発達(第 2 報, エネルギー解放率の測定), 日本機械学会論文集(A 編), 63 巻, 615 号, (1997-11).
- (4) 東郷敬一郎, 秋月健司, 杉山祐次, CFRP 直交積層板の層内樹脂割れ損傷理論と損傷挙動, 日本機械学会論文集(A 編), 64 巻, 621 号, (1998-5).

研究項目：私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研究期間：2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文)：炭素繊維複合材料の光ヘルスマニタリング方法の開発

研究課題名(英文)：Optical health monitoring technique of carbon fiber reinforced plastics

研究者：○長瀬 亮
NAGASE Ryo

千葉工業大学大学院
工学研究科 工学専攻 教授

松田 健太郎
MATSUDA Kentaro

千葉工業大学大学院
工学研究科 工学専攻

1. はじめに

微弱な変化を捉えるセンサを広い面積に配置するためには、電磁ノイズの影響を受けない光ファイバセンシング技術が適している。本研究では、炭素繊維複合材料のヘルスマニタリングを行う方法として、(1)広域の監視を可能とする分岐光線路を用いた損失検出、(2)光ひずみゲージによるひずみ測定、および(3)光ファイバ端面に構成した誘電体多層膜フィルタ(BOF)によるAE波検出を用いることにより、長期信頼性の確保が期待できる構造、かつ全体を安価に構成できるシステムの確立を目指す。

2. 研究の内容

(1) 光ヘルスマニタリングの構成

ひずみの測定とAE波の測定にはそれぞれ別の光ファイバセンサを使用する。ひずみには光ファイバの曲げを利用した光ひずみゲージを新たに作製し、AE波の検出にはBOF(Band-pass filter On Fiber-end)センサを用いる方法を検討した。全体構成の概略を図1に示す。

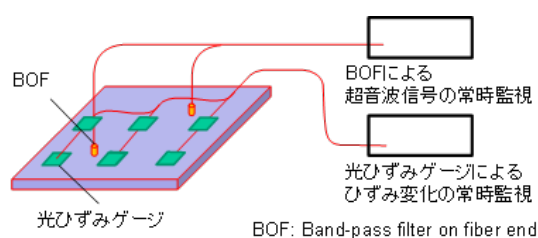


図1 炭素繊維複合材料の
光ヘルスマニタリング方法の構成

(2) 分岐光ファイバにおける損失変動検出方法

これまで用いられているFBGセンサはシリーズに接続したセンサアレイとして配置され、BOTDRを用いた分布型ひずみセンサの場合は1本の光ファイバに発生する部分的なひずみを計測するものであり、橋梁などの1次元的に長い配置に適していた。一方、広い面積を有する構造物のヘルスマニタリングを行うためには、センサを2

次的に配置する必要がある、光ファイバセンサでこれを実施するためには、光ファイバを分岐したツリー構造の配置が望ましい。

OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)と分岐光線路による監視網のモデルを図2に示す。OTDRは光通信システムにおいて線路監視に用いられる測定器であり、広く普及していることから安価に入手することができる。図2において局所的に損失が発生した場合にOTDRで観測した結果の例を図3に示す¹⁾。分岐された場合でも1か所のOTDRにより、損失発生箇所を特定できることを確かめた。

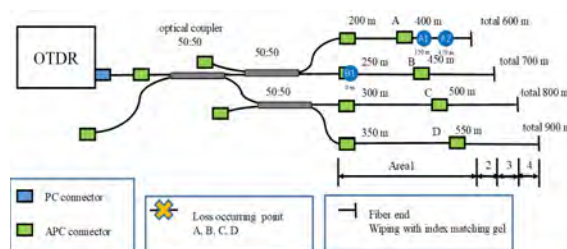


図2 分岐光線路の例

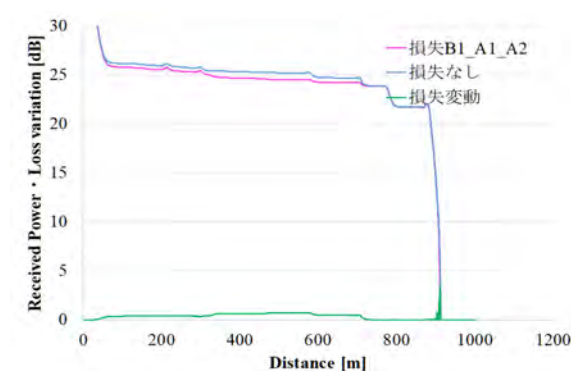


図3 損失が発生した分岐光線路の応答

(3) 光ひずみゲージによるひずみ測定

光ファイバによるひずみ測定としてFBGセンサが知られている。FBGセンサはひずみが加わったときに反射スペクトルが変化するため、広帯域光源の反射光を光スペクトラ

ムアナライザで検出することによりひずみ量を測定できる。しかしながら、波長の差を測定するために装置が高価になること、FBG を製造する際に光ファイバの被覆をいったん除去する必要性から光ファイバ表面にマイクロクラックが発生する確率を 0 にすることができず、長期信頼性が失われる短所を有していた。

本研究で作成した光ひずみセンサは、図 4 に示すように光通信に使われる通常のシングルモード光ファイバを用い、被覆を除去せずにセンサを作成することにより、極めて安価であるとともに本来光ファイバが有している長期信頼性が期待できる。

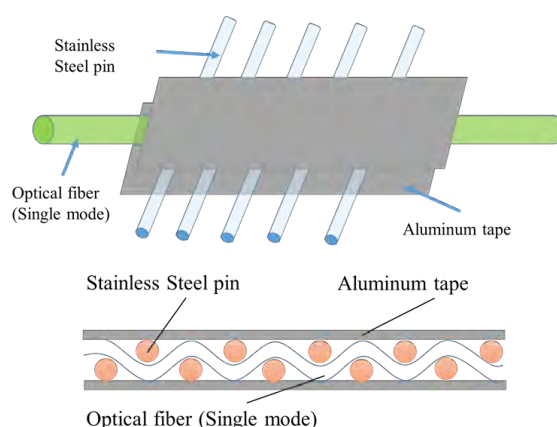


図 4 光ひずみゲージ

本光ひずみセンサと通常のひずみゲージを 0.5 mm 厚のステンレス板に貼り付け、引張り試験を行った結果を図 5 に示す。100 $\mu\epsilon$ のひずみにに対して約 0.3 dB の損失増大が観測された²⁾。

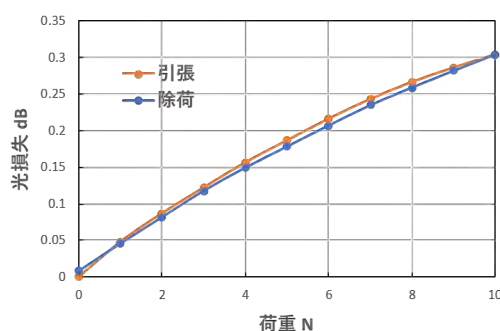


図 5 光ひずみゲージの特性

(4) BOF センサによる AE 波検出

炭素繊維複合材 (CFRP) は非常に軽く、強度が高いことから、航空、宇宙分野などで広く使用されているが、衝撃が加わると強度が低下するため、損傷初期の段階で発見する手法が有効である。その検出方法として Acoustic Emission (AE) 法が挙げられる³⁾。本研究ではファイバ端面に誘電体多層膜フィルタを直接形成した BOF (Band-pass Filter On Fiber-end)⁴⁾を用いて炭素繊維複合材の AE 波の検出を試みた。

図 6 に示す測定系を用い、CFRP に 3 点曲げの荷重をかけている間に発生した AE 波の例を図 7 に示す。損傷初期の AE 波を捉えることに成功した⁵⁾。

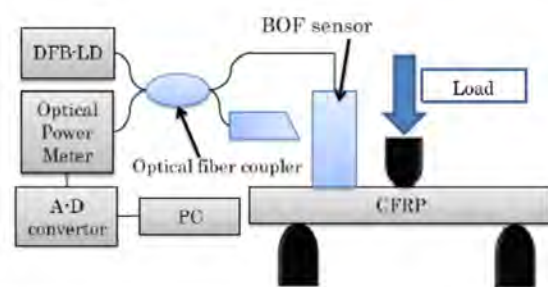


図 6 BOF センサによる AE 波検出

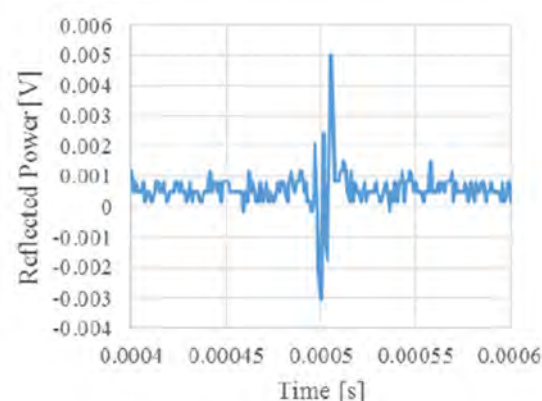


図 7 検出された AE 波の例

3. まとめ

炭素繊維複合材の光ヘルスマモニタリングを可能とする以下 3 点の技術を新たに提案し、実験により有効性を確認した。

- (1) 分岐光線路による損失変動検出
- (2) 光ファイバの曲げを利用した光ひずみゲージ
- (3) BOF による AE 波検出

技術(1)は 2 次元的に広い範囲にセンサを設置するのに適したトポロジであるとともに、一部の光ファイバが破断した場合でも残りのセンサの情報を取り続けることが可能となる。技術(2)は他の光ファイバセンサに比較して安価に製作することが可能であるとともに、被覆除去が必要ないことから光ファイバが本来持っている長期信頼性を維持することが可能である。技術(3)は被測定対象周りに電気ケーブルを設置する必要が無いことから、水素タンク等、防爆性を求められる測定対象に適している。

[参考文献]

- 1) 遠藤他, 信学技報, EMD2016-37, 2016.
- 2) 倉持他, 信学技報, EMD2018-62, 2019.
- 3) 成澤, マテリアルライフ, vol13No. 1, pp. 22-31, 1991.
- 4) 斧田他, 信学技報, EMD2007-31, 2007.
- 5) 末永他, 信学技報, EMD2018-21, 2018.

研究項目 : 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研究期間 : 2015/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文) : 画像計測を用いたデータ同化によるシステム同定技術の構築

研究課題名(英文) : A study on system identification technique based on data assimilation by using image measurement

研究者 : 秋田 剛

千葉工業大学

AKITA Takeshi

工学部 機械電子創成工学科 准教授

1. はじめに

近年、炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)に象徴される高分子基複合材料の使用量が急増しており、その多形態な損傷の発生・進展メカニズムの解明や損傷同定技術の確立が強く求められている。詳細な数値解析を用いたCFRPの損傷発生・進展メカニズムに関する研究^(1,2)や、種々のセンサ情報を用いたCFRPの損傷同定技術に関する研究⁽³⁻⁵⁾が数多くなされている。CFRPの損傷発生・進展メカニズムは複雑であり、その損傷同定では解析モデルを用いずに、センサ情報から逆問題として損傷を評価することが多い。一方、通常の建築構造物では、解析モデルのモデルパラメータ推定問題として建築部材の損傷同定する技術が考案されている⁽⁶⁾。解析モデルを利用して損傷同定を行う場合、推定されたモデルパラメータを用いて損傷後の挙動予測や非測定箇所の状態把握に適用することが可能となる。ただし推定可能なモデルパラメータは利用するセンサの数や精度に依存しており、不適切問題⁽⁷⁾の対処が容易でない場合も多い。解析モデルのモデルパラメータ推定問題としてCFRPの損傷同定を考えた場合、建築構造におけるトラスやフレーム等の1次元的な部材の損傷同定と比べて、クラックや剥離等の2, 3次元的な場における損傷に対応したモデルパラメータを設定する必要があり、推定手法や使用するセンサの選定が重要となる。

本研究ではCFRPの損傷同定への適用を目標に、2次元的な場における損傷を解析モデルのモデルパラメータ推定として同定する方法を構築した。近年、デジタル画像相関法を代表とする画像計測法の発展により、高解像度のデジタルカメラを用いることで、物体の撮影領域に対する膨大な数の2次元的な変位計測データを容易に取得することができるようになってきている。膨大な数の変位計測データを利用することで、多数のモデルパラメータを推定することが可能になると考えられる。本研究では、2次元の有限要素解析モデルに対して画像計測から多数の節点変位が計測可能であると想定し、各要素の剛性をモデルパラメータとして構造の部分的な損傷を要素剛性の低下として損傷同定を行うことを考えた。モデルパラメータの推定方法として、数値シミュレーションと計測データを統計的に融合するデータ同化⁽⁸⁾を適用

した。データ同化法として、拡張カルマンフィルタ(Extended Kalman Filter, EKF)およびアンサンブルカルマンフィルタ(Ensemble Kalman Filter, EnKF)を用いて有限要素モデルの要素剛性をモデルパラメータとしたデータ同化を行った。き裂損傷を有する部材を対象に、データ同化による損傷同定の有効性を検証した。

2. 研究の内容

(1) 拡張カルマンフィルタによるデータ同化

二次元有限要素モデルの要素剛性をモデルパラメータとした拡張カルマンフィルタによるデータ同化実験を行った。図1に示すような、き裂を有する損傷部材の引張試験を行い、デジタル画像相関法による画像計測を行った。図2の有限要素メッシュにおける各要素の剛性をモデルパラメータとして、画像計測データを使ったデータ同化実験を行い、き裂箇所と推定される要素剛性の関係について検証した。

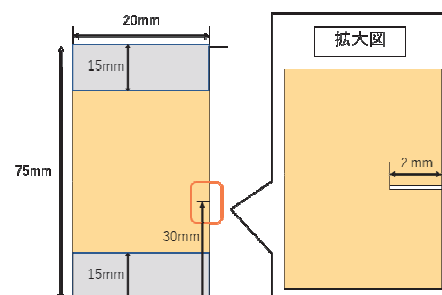


図1 き裂を有する損傷部材

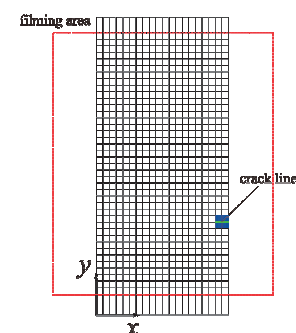


図2 有限要素メッシュと損傷部

本実験では、デジタル画像相関法による861点の面内変位を観測量として、839個の要素剛性を推定した。図3に拡張カルマンフィルタによって推定された要素剛性のコンター図を示す。図の推定剛性は、初期値により正

規化している。図から損傷部の要素剛性が顕著に低下して推定されることがわかり、局所的な損傷を要素の剛性低下として検出可能なことを示した。

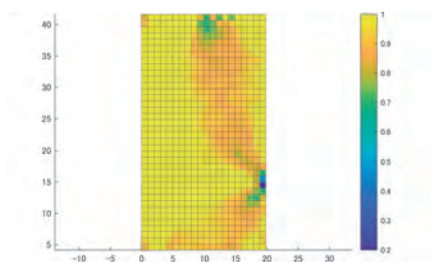


図3 要素剛性の推定結果コンター図

(2) アンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化

EKFによるデータ同化は、線形に近い問題に有効である。CFRPの複雑な損傷の発生・進展メカニズムを解析モデルに取り入れる場合、非線形有限要素法に対応したデータ同化も重要となる。本研究では非線形有限要素解析への適用性の高いEnKFを用いて非線形有限要素解析モデルの要素剛性をモデルパラメータとしたデータ同化を行い、その有効性を数値実験により検証した。図4に示すような板材モデルに対して、左下部（緑色の部分）に時間変動する剛性低下を与え、節点変位データを計測データ、要素剛性をモデルパラメータとしたデータ同化を行った。本実験では、EnKFにおけるモンテカルロ計算の粒子数が推定精度に与える影響を検証した。要素剛性の推定結果の一例を図5に示す。Mが粒子数を表す。粒子数を多くするほど損傷箇所を精度良く推定可能であることを確認した。

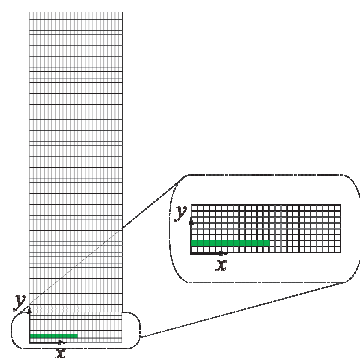


図4 数値実験モデル

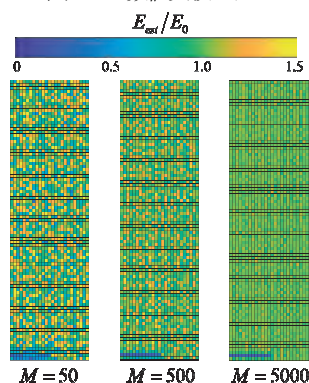


図5 EnKFによる要素剛性の推定結果コンター図

3. まとめ

本研究ではCFRPの損傷同定への適用を目標に、2次元の場における損傷をデータ同化により同定する方法を構築した。拡張カルマンフィルタおよびアンサンブルカルマンフィルタを用いて二次元有限要素モデルの要素剛性をモデルパラメータとしたデータ同化を行い、損傷箇所の同定問題での有効性を示した。

本研究に関する主な発表論文

- (1) 秋田剛, 谷村昭彦, 画像計測による変位データを用いた有限要素解析モデルのデータ同化に関する一考察, 日本機械学会関東支部 第25期総会・講演会 講演論文集, (2019).
- (2) 秋田剛, アンサンブルカルマンフィルタを用いた片持ちばりの逐次データ同化実験, 航空宇宙技術, Vol. 18, pp. 101-107 (2019).
- (3) 秋田剛, アンサンブルカルマンフィルタを用いた要素剛性の逐次推定と損傷同定への適用, JCOSAR 2019 論文集 (A論文), Vol. 9, pp. 494-499 (2019).

参考文献

- (1) 間島 理, 末益 博志, 複合材料積層板中の多重層間剥離伝播挙動の非線形有限要素解析, 日本複合材料学会誌, Vol. 26, No. 6, pp. 219-226 (2000).
- (2) 市来 誠, 末益 博志, 青木 雄一郎, 衝撃損傷を有するCFRP積層板の圧縮挙動と破壊現象に関する考察, 日本複合材料学会誌, Vol. 38, No. 6, pp. 254-261 (2012).
- (3) 岩崎 篤, 轟 章, 電気抵抗変化を用いたCFRP層間にはく離検出の診断手法の検討, 日本複合材料学会誌, Vol. 27, No. 4, pp. 194-200 (2001).
- (4) 矢代 茂樹, 村井 一恵, 岡部 朋永, 武田 展雄, 埋め込みFBGセンサを用いた有孔積層板の損傷同定に関する数値解析および実験結果への適用, 日本複合材料学会誌, Vol. 32, No. 5, pp. 208-217 (2006).
- (5) 田島 賢典, 三浦 裕樹, 杉本 直, 亀山 正樹, 胡寧, 福永 久雄, 衝撃荷重同定によるCFRP積層板の衝撃損傷モニタリング, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 57, No. 666, pp. 295-300 (2009).
- (6) 遠藤 龍司, 塩田 寿美子, 登坂 宣好, フィルタ理論に基づくアルゴリズムを用いたフレーム構造モデルの損傷同定解析, 日本計算工学会論文集, 2001, Vol. 2001, pp. 20010028 (2001).
- (7) 村上章, 登坂宣好, 堀宗朗, 鈴木誠, 有限要素法・境界要素法による逆問題解析, コロナ社, 東京 (2002).
- (8) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮, データ同化入門一次世代のシミュレーション技術一, 朝倉書店 (2011).

〔科学研究費助成事業〕



研究項目 : 科学研究費助成事業

研究期間 : 2019/4/1 ~ 2020/3/31

研究課題名(和文): 拡張可能な学習支援システムのための分散マルチプラットフォームアーキテクチャの研究

研究課題名(英文): A Study on a Distributed Multi-Platform Architecture for Extensible Learning Support System

研究者: ○仲林 清 NAKABAYASHI Kiyoshi	千葉工業大学 情報科学部 情報ネットワーク学科 教授
森本容介 MORIMOTO Yosuke	放送大学 教養学部 准教授
池田 満 IKEDA Mitsuru	北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 教授
瀬田和久 SETA Kazuhisa	大阪府立大学 人間社会システム科学研究科 教授
田中孝治 TANAKA Kouji	金沢工業大学 情報フロンティア学部 講師
田村恭久 TAMURA Yasuhisa	上智大学 理工学部 教授

1. はじめに

教育品質向上や内容豊富化のために、学習コンテンツや学習方略記述の流通再利用性が不可欠である。一方、学習支援システムには機能拡張性が求められる。しかし、流通再利用性と機能拡張性の両立は一般に困難である。そこで、報告者は「教材オブジェクト」と呼ぶ概念を導入した学習支援システムアーキテクチャ ELECOA (Extensible Learning Environment with Courseware Object Architecture) を提案した。機能追加の際は新規の教材オブジェクトを追加する。既存コンテンツは既存教材オブジェクトを使用して動作するため機能追加の影響を受けず、機能拡張性を向上できる。これを活用し、SCORM 規格準拠の独習環境、グループ型作問学習環境などを実装した。さらに、各種学習制御に共通する教材オブジェクト間の基本通信パターンを見出した。これによって、個別に開発された独習用コンテンツをグループ学習で再利用できること、グループ型作問学習など実用的な学習環境が実現できることを示した[1]。

以上を踏まえ、本研究では、再利用可能な教材オブジェクトが、Web サーバやスマートフォンなどの複数プラットフォームに分散・連携するマルチプラットフォーム学習環境の検討・開発を行う[2]。

2. 教材オブジェクトのデザインパターン

対象とする学習制御構造は木構造型で、各ノードに教材オブジェクトを配置する。サブツリーの再利用を可能とするため、教材オブジェクトの通信は、親子間に限定する。親子間通信を組み合わせ、「シーケンシング処理」、「ロールアップ処理」、「ポストコンディショニング処理」、「学習コマンドリスト生成処理」に対応する4つの共通的な通信パターンを定義する[1]。これを実装した教材オブジェクトは自由に組み合わせることができ、新たな学習制御機能を容易に追加できる。

この通信パターンを満たすための教材オブジェクトのデザインパターンを図1に示す[1]。Leaf, Block, Root は木構造の各ノードの教材オブジェクトである。各ノードは、親子間通信を行う隣接通信層、4つの通信パターンを実装する基本通信層、教材オブジェクト固有の学習制御機能を実装するアプリケーション層からなり、全体としてレイヤ型のデザインパターンを構成する。隣接通信層のインスタンスは通信の内容には関知しない。学習者のコマンドを左端の Command Entry が受け取り、4つの通信パターンを起動する。学習制御処理は、4つの通信パターンに対応した基本通信層から起動されるアプリケーション層のメソッドで実行される。

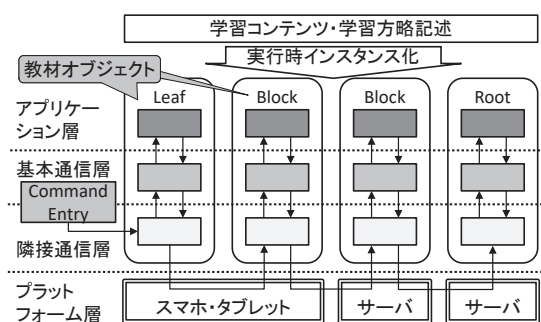


図1 レイヤーデザインパターンによる教材オブジェクト間通信

3. 分散マルチプラットフォーム学習環境

図1のデザインパターンでは、隣接通信層と各教材オブジェクトの学習制御を実装する基本通信層、アプリケーション層が明確に分かれている。従って、物理的な通信手段を上位層から隠ぺいすれば、教材オブジェクトの学習制御機能がサーバ、スマートフォン、電子教科書など、複数プラットフォームで再利用可能な分散マルチプラットフォーム学習環境を実現できる[2]。この学習環境の構成イメージを図2に示す。コンテンツツリーは、サーバとスマートフォンなどにまたがって配置される。通常は、端末がサーバと通信してグループ学習のための学習制御が行われ、端末がオフラインになった場合も、端末上の教材オブジェクトによって独習が可能である。

このような分散マルチプラットフォーム学習環境を実現するうえで検討すべき課題を挙げる。

- (1) 分散プラットフォームアーキテクチャ
- (2) 教材オブジェクト間通信方式
- (3) 教材オブジェクト動的再配置方式
- (4) 実用的学習支援環境への適用

2019年度は、「(2) 教材オブジェクト間通信方式」および「(4) 実用的学習支援環境への適用」について検討・実装を進めた。前者の課題は、教材オブジェクトが複数プラットフォームに分散配置されるための通信オーバーヘッドである。例えば、サーバ上のノードにポストコンディションルールが設定されていると、端末上の独習教材のページを移動するごとに、サーバ・端末間の通信が発生する。そこで、教材オブジェクト間の通信パターンが定型化されていることを活用して通信オーバーヘッドを抑制できる通信方式を検討した。具体的には、以下の組合せによる方式の検討を進めた。

方式1) シーケンシング処理やポストコンディションルール処理など、学習状態に依存する処理は、ロールアップ処理での学習状態変化に影響を受けるが、ルートに近いノードほど学習状態変化は起きにくいことを利用して、キャッシュにより通信を省略する方式

方式2) 学習状態を上位に伝搬させるロールアップルールやポストコンディションルールを学習実行前に評価して、ルール実行の条件を洗い出しておくル

ールプリコンパイル方式

方式3) 他学習者の学習状態変化や、作問学習での新たな問題教材オブジェクトの追加などの状態変化を、学習コマンド入力前に先行伝搬させてコマンド入力時の応答を改善する方式

方式1については、2018年度に実施したロールアップ処理の通信削減方式に加え、2019年度は、ポストコンディションルール処理、シーケンシング処理に関して、ルール評価の要否や評価結果のキャッシュによって通信量を抑制する方式を実装した。現在、最適化効果の定量的な評価を進めている。また、方式2、3についても、現在、効果の見極めを進めている。

「(4) 実用的学習支援環境への適用」は、基本通信層の上位層として、実際の学習制御を行うアプリケーション層を実装するものである。今期は、グループ学習機能としてジグソー法・グループ型作問学習機能を実装した。これらはすべて Javascript で実装されており、上位層から下位層の実装が隠ぺいされている。複数サーバと端末に分散したマルチプラットフォーム環境で、同じ教材オブジェクトが通信・連携動作することを確認した。

今後、「(3) 教材オブジェクト動的再配置方式」の検討を進める。また、2018年度に実装した cmi5 環境[3]での各種学習機能の開発検討も行う。

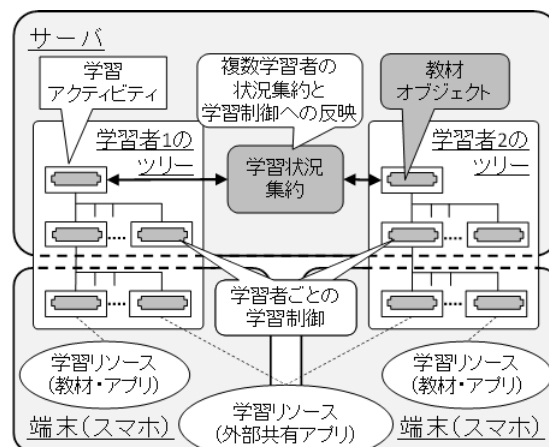


図2 分散マルチプラットフォーム学習環境

参考文献

- [1] 仲林 清, 森本容介 (2018) 拡張性を有する学習支援システムにおける再利用性向上のための教材オブジェクトデザインパターンの設計と実装, 教育システム情報学会誌, 35(3), 248-259.
- [2] 仲林 清, 森本容介, 池田 満, 瀬田 和久, 田村 恭久 (2019) 拡張性を有する学習支援システムアーキテクチャに基づく分散マルチプラットフォーム学習環境の検討と試作, 教育システム情報学会研究報告, 33(5), 59-66
- [3] 森本容介, 仲林 清, 星野忠明, 前田 宏 (2020) ELECOAを用いた cmi5 対応学習管理システムの設計と実装, 教育システム情報学会誌, 36(1), 19-31

〔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
2	基盤研究(A)	仲林 清	拡張可能な学習支援システムのための分散マルチプラットフォームアーキテクチャの研究
3	基盤研究(B)	渡邊 宇外	ミトコンドリアゲノムから探る樹木の形成層活動と二次木部形成
4	基盤研究(B)	谷本 茂明	マルチペリメータラインに基づく多層防御セキュリティシステムの研究開発
5	基盤研究(B)	國宗 永佳	教育実践研究と教授・学習支援システム研究とのマッチングプラットフォームの開発
6	基盤研究(B)	原 祥太郎	固体酸化物形燃料電池の電極電解質一体焼成プロセスの解明と制御
7	基盤研究(B)	枚田 明彦	機能性誘電体層集積導波管スロットアレーアンテナとその近接テラヘルツ無線応用の研究
8	基盤研究(B)	小澤 俊平	Al合金のフラックスフリーロウ付に対する雰囲気酸素分圧と添加元素の影響
9	基盤研究(C)	浜野 志保	近代ドイツにおけるダウジングの流行
10	基盤研究(C)	徐 春暉	投資時間の不確実性を取り入れたポートフォリオ選択問題に関する研究
11	基盤研究(C)	松井 伸介	AFM触針スクラッチ加工による加工現象の研究
12	基盤研究(C)	宮田 高道	確率的非分解型テンソル復元とその画像・信号処理への応用
13	基盤研究(C)	鎌倉 浩嗣	イメージセンサ型可視光通信のための通信範囲拡大技術
14	基盤研究(C)	中静 真	結合量み込み型辞書学習によるクロスモーダル信号確定と非接触センシングへの応用
15	基盤研究(C)	安川 雪子	ホットスポットと量子効果の増強を起源とする新原理磁気物質：センサ材料の新開発
16	基盤研究(C)	鴻巣 努	タイおよびベトナムにおける現地採用人材のワークモチベーションに関する研究
17	基盤研究(C)	齊藤 史哲	コネクションストモデルを用いた消費者語彙における感性情報の抽出と共感構築
18	基盤研究(C)	秋葉 知昭	多次元多状態に拡張した多目的ネットワークの統一的最適設計方法の研究
19	基盤研究(C)	滝 聖子	ワークライフバランス支援のための技術・技能・健康のコミュニケーションデザイン
20	基盤研究(C)	世木 秀明	音声知覚特性を考慮した聞き取りやすく情報伝達に優れた放送方式に関する研究
21	基盤研究(C)	金田 晃一	ヒトは水中環境で自身の身体動作をどの程度再現できるのか？単関節動作による検討
22	基盤研究(C)	秋田 剛	デジタル画像相関法を用いた有限要素解析モデルのデータ同化に関する研究
23	基盤研究(C)	竹本 浩典	オペラ歌唱における音道と横隔膜の制御に関する研究
24	基盤研究(C)	飯田 一博	音の高精度バーチャルリアリティを実現するための個人化頭部伝達関数の生成
25	基盤研究(C)	五明美智男	地域環境リテラシーと社会人基礎力を高める環境調査手法の開発・活用に関する実践研究
26	基盤研究(C)	瀧野日出雄	光学面精密創成用小径イオンビーム加工技術の開発
27	基盤研究(C)	青木 岳史	災害救助活動の支援を目的とした柔軟変形ロボットの開発
28	基盤研究(C)	佐波 孝彦	移動体通信における通信路情報に基づくポーラ符号化法とその応用
29	基盤研究(C)	熱海 武憲	可視化されたロバスト機構・制御系統化設計法の確立と次世代HDDへの応用
30	基盤研究(C)	藤田 茂	軽量Nパーティ秘匿関数計算の一般化に基づくセキュアなIoTモデルの提案
31	基盤研究(C)	八島 由幸	画像圧縮符号化への機械学習応用に関する研究
32	基盤研究(C)	清水 邦康	振動モード間の共鳴を基礎とした結合振動子系にみられる波動解析への新たな展開
33	基盤研究(C)	王 志東	生物の群逃避行動を模倣する群ロボットの反射的振る舞いの高速伝播メカニズムの実現
34	基盤研究(C)	亀田 豊	河川、内湾水中マイクロプラスチック挙動解明と代替物質利用による将来濃度予測
35	基盤研究(C)	菅原 真司	複数ユーザによるmulti-cloud型コンテンツストレージシステムの設計と実装
36	基盤研究(C)	藤原 明広	長期近接遭遇特性を反映する標準移動モデルの開発と遅延耐性通信の安定性評価
37	基盤研究(C)	上田 隆一	実世界を行動するエージェントの空間認識能力と行動決定則の同時学習
38	基盤研究(C)	米田 完	慣性アシスト付き2足ロボットおよび人の歩行のスムーズな補助
39	基盤研究(C)	熊本 忠彦	個々の書き手・読み手を意識した統合的な感性情報マイニング技術に関する研究
40	基盤研究(C)	東山 幸司	二重ベータ崩壊の半減期評価のための原子核構造の精密計算
41	基盤研究(C)	脇田 和樹	タリウム系化合物の構造相転移によるナノドメインの直接観察
42	基盤研究(C)	鈴木比呂子	間隙水圧の変動を考慮した直接基礎構造物の液状化被害予測手法の提案
43	基盤研究(C)	望月 悦子	建築ストックの健康寿命延命のための照明レトロフィットに関する指針提案
44	基盤研究(C)	齋藤 哲治	新しいSm-F e系磁性相の探求

No.	種目	氏名	研究課題名
45	基盤研究(C)	山本 典史	凝集誘起発光イメージングで「観る」プリオンタンパク質オリゴマーの形成・伝播機構
46	若手研究	大貫 俊彦	明治二〇年代の元禄文学復興における内田不知庵の芭蕉及び蕉門俳諧の評価に関する研究
47	若手研究	高木 彩	萌芽技術に対するリスクの認知機構の解明
48	若手研究	蛭子 彰仁	超幾何級数の値
49	若手研究	石原 沙織	ムーブメント発生時の応力状態を踏まえたシーリング材の耐久性設計法の検討
50	若手研究	佐藤 和	運動学習効率の向上に高圧酸素曝露は貢献するか
51	若手研究	川西 範明	免疫系に着目した運動トレーニングによる熱産生機能向上のメカニズムの解明
52	若手研究	信川 創	神経ネットワークダイナミクスに着目した認知症の早期診断システムの構築
53	若手研究	藤井 浩光	緊急災害対応における無人化施工のためのオペレータ支援システム
54	若手研究(B)	田隈 広紀	事業に適した業績評価指標を抽出するデータ分析手法及び格納形式の研究
55	若手研究(B)	福嶋 尚子	学校財務評価制度・実践モデルの構築
56	若手研究(B)	菅 洋志	ナノギャップNEMSを利用した高耐久エレクトロニクス素子基盤技術の開発
57	若手研究(B)	魏 秀欽	世界最高水準の超高周波小型電源における理論の体系化とその開発
58	挑戦的研究(開拓)	安藤 昌也	人間中心設計と人類学の対話によるシステム設計思想：HCDを多元化する挑戦的試み
59	挑戦的研究(萌芽)	國宗 永佳	プログラム動作の理解を表出する課題における誤答原因推定手法の開発
60	研究成果公開促進費	高木 彩	社会規範はどのように迷惑行為に影響を及ぼすのか -記述的規範と命令的規範の相違と注目からのアプローチ-
61	研究成果公開促進費	福嶋 尚子	占領期日本における学校評価政策に関する研究
62	国際共同研究強化(A)	安川 雪子	局在表面プラズモン共鳴から励起されるホットスポット電界による磁気物性の操作
63	研究活動スタート支援	木下 雅之	複数カメラを用いた可視光通信システムの高度化

*各センター除く

*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 2020年
Vol.17

令和2年9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