

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：The Role of Technical Education in the Process of State Building in Post-conflict Timor-Leste

研究代表者：マルケス・ルイス

小区分：地域研究一般

1. 研究計画の概要

技術教育システムによる遠隔教育を推進するには、学生の学習に対する低いモチベーションやインセンティブなどの課題が多い。そのためサレジオ高専とフィリピン国ドンボスコ工科大学を対象にした、学生ティーティングアシスタントを利用して国際職業人養成を目的とした【技術教育システムの理論研究調査】の1モデルを提示する。本研究は、短期目標としてサレジオ高専と、フィリピン国ドンボスコ工科大学との2校間における教育システムの構築を目指す。長期目標として、東ティモールなど海外に点在する日本留学のための予備教育プログラムへの波及を目指す。また本研究は、中央教育審議会分科会による報告である「高等教育の多様な機能と高等教育機関の機能別分化」としての【幅広い職業人養成】において、高専としての実践事例として提示するものである。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

本研究計画は、3年計画である。本年度は、2年度であり、下記の2項目の予備調査を実施した。

- 1) 2017年3月にフィリピンの教育システムを調査するため、ドン・ボスコマンダレイオン工科大学の教員および学生へのインタビューを行い、また、カリキュラムと学校の教育システムを調査。更にマニラの国際図書館でフィリピンにおけるポリテクニクの歴史と教育システムを調査した。
- 2) 2017年9月に東ティモールにて技術教育システムの調査のために、下記、調査と発表を実施した。

2019年2月13日2月～19日

Research Trip

2月13日

Donbosco Technical College と IUS 共同論文の論

文出版の打ち合わせ。

2月15日

Mandaluyong-Donbosco Technical College - 訪問

2月17日

Calauan Don Bosco TVET センター訪問、先生方のインタビュー。

2月18日

Mandaluyong-Donbosco Technical College で研究発表

話合い参加

早稲田大学・セミに参加 - 論文を書く - 参考論文を調べる

2018年4月2019年～2月

水曜日のゼミにて研究の進み具合や研究発表

場所：14号館10階1052室

時間：18：15～21：00

木曜日に図書館で調べる

論文を書く

博士の先生に相談、始動

早稲田大学・国際セミナー参加（司会担当）

場所：26号館多目的講義室、司会：マルケス、会場準備統括：田中

10:00 開会の辞：山田（5分）

10:10-11:40 パネル①

発表者：Mely、利根川、阿部（15-20分×3人）

13:30-15:00 パネル②

発表者：Elina、本多倫、金森（15-20分×3人）

討論者：坂部、花田（5分×2人） 質疑応答（20分）

15:20-16:50 パネル③

発表者：Rudi、峯田、宮下（15-20分×3人）

討論者：滝澤、島崎（5分×2人） 質疑応答（20分）

16:50 閉会の辞：山田（5分）

3. 代表的な研究成果

本研究の成果発表を、学会発表という形で口頭発表4本を行った。

〔学会発表〕（計4件）

1. Luis A. Marques, 「The State Building Process in Timor-Leste: A Study of the Theoretical Foundations of Technical Education」 (Complex Emergencies and Humanitarian Response, Union Press, Chapter 8, pp.147-160), ISBN 978-4-946428-90-6
2. Luis A. Marques, Tomohiro Kojima, sdb, 「Salesian Polytechnic (Salesio) Tokyo (Japan) and the IUS-EAO Project of partnership with Don Bosco Technical College Mandaluyong (Philippines)」 (IUS 20 Years Book 2018) pp.1-17, May,2018
3. Luis A. Marques, 「Theoretical Foundations of Technical Education and the Part They Play in its Development Process」 (2018 日工教第66回年次大会名古屋, pp.53 - 68, Aug.30.2018
4. Luis A. Marques, 「Human Rights in EAO (Youth and Human Rights – for an Ethic of Confidence)」 (V International Seminar – IUS Education Group), pp.1- 6, Sep.,2018

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：任意形状作成可能な色素増感太陽電池の開発検討

研究代表者：井組裕貴

小区分：地球資源工学およびエネルギー学関連

1. 研究計画の概要

現在、IoT化が多くのデバイスで進んでおり、身の回りの様々なエネルギーを獲得するエネルギーハーベスティングが注目されている。その中でも室内灯からでも発電できることや、有害物質を使わないことからDSC(Dye-Sensitized-Solar-Cell)への関心が高まっている。また、DSCは曲面への設置を目的としたフレキシブル化の研究が盛んであり、電気泳動法やバインダーフリーによる低温成膜法等の研究が発表されている。しかしながら、曲面への設置を考えた際に、TiO₂焼結後に曲面形状に合わせるとTiO₂及び導電プラスチックフィルムに過度のストレスが加わってしまい、剥離や破損が生じてしまう可能性が高い。本稿では、真空バギング法を用いてTiO₂の低温低真空での焼結を行い、結晶構造と表面構造の観察を行った。また、作成したDSCの発電特性を測定し、真空バギング法の妥当性を確認した。また、ITO(インジウム酸化スズ)フィルムを用いて曲面形状のDSCを作成し、平面形状と曲面形状の発電特性を比較した。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

本年度における進捗状況、達成度を以下に項目別に示す。

① 焼結方法

TiO₂ペーストをFTOガラスに塗布し、Fig.1の装置により真空処理を行う。真空度はゲージ圧で-40kPaと-80kPaの低真空とした。焼結温度は60℃、70℃、80℃、90℃、100℃、110℃、120℃とした。

② 結晶構造

Fig.2にTiO₂のXRD結果を示す。試験片は作製した中で、60℃及び70℃の試験片は焼結処理を行った後も粘性が残っており、焼結が十分に出来ていない結果となった。アナターゼ型の最大ピ

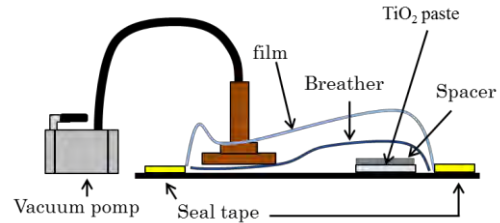


Fig.1 Vacuum bagging device

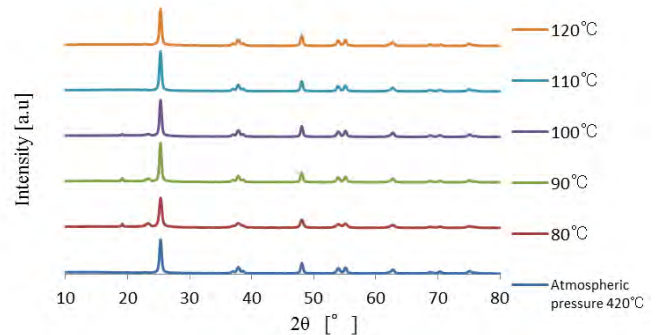


Fig.2 -80 kPa XRD result

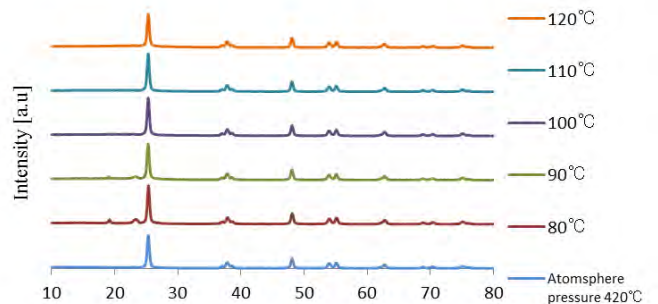


Fig.3 -40 kPa XRD result

ーク角は $2\theta = 25.28^\circ$ に対し、全ての試験片の最大ピーク角が $2\theta = 25.30^\circ \sim 25.32^\circ$ の範囲に見られた。その他のピーク角においてもアナターゼ型の結晶構造と一致していることから、アナターゼ型の結晶構造が確認できたと言える。しかしながら、-80kPaでの80℃、90℃、100℃、-40kPaでの80℃、90℃での試験片では、 $2\theta = 19.16^\circ$ でアナターゼ、ルチル、ブルカイトの結晶構造にもないピークが見られ、今後ピークの原因を特定する必要がある。

③ 表面構造

SEM での表面観察の結果を Fig.4 に示す。低温低真空下で焼結を行ったすべての試験片において従来の大気圧 420 °C の試験片に比べ、多孔質となっている事が確認できた。また焼結温度が上昇する事により、TiO₂ の粒径の肥大化が見られた。

80 °C では粒径が 0.5 ~ 1 μm に対し、100 °C では 1 μm を超える粒径となっているため焼結後の粒径は焼成温度に依存していると言える。今回作製した中で低温低真空下 -80kPa、80 °C で作製した試験片が最も多孔質になる結果が得られた。

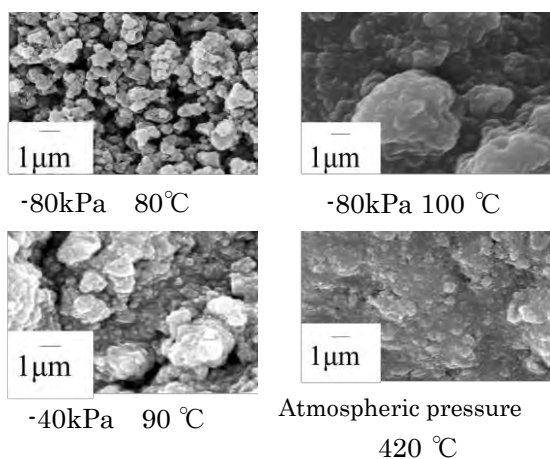


Fig.4 SEM result

④ 発電特性

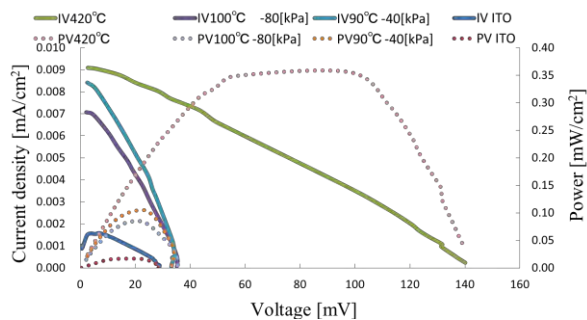


Fig.5 Characteristic of I-V and P-V

低温低真空下で作製した DSC において、IV 特性および PV 特性が得られた (Fig.5)。大気圧下で焼結を行ったセルと比較すると、J_{sc} において低温焼結 DSC は 10~20% の低下、曲面形状

DSC においては 10% ほどの値となった。また、V_{oc} では低温焼結 DSC は 25% ほどの値、曲面形状 DSC は 20% ほどの値となった。これらの値の差の要因としては、真空引きにより TiO₂ 焼結体とガラス電極との間に隙間が生じ、電子の移動を阻害したと考えられる。また、焼結後の色素吸着中

にガラス基板から TiO₂ の剥離が生じるケースが発生した。これは真空吸引によって電極と TiO₂ の間に空気層が生じ、その隙間に色素溶液が流れ込み剥離が発生した可能性が高いと思われる。

今年度は真空バギング法による低温焼結を試み、結晶構造、表面形状、発電特性から妥当性が確認できた。今後は真空度と温度の関係性を明確にし、低温焼結に最適な条件の断定および発電効率低下の原因を解明する予定である。

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- 1) 八木貫太, 井組裕貴, 「低温低真空下での TiO₂ 焼結による色素増感太陽電池の検討」, サレジオ工業高等専門学校研究紀要, 査読有り, 第 49 号 (投稿中)

〔学会発表〕 (計 2 件)

- 1) 八木貫太, 井組裕貴, 「真空バギング法における TiO₂ の低温焼結の提案」, 第 10 回大学コンソーシアム八王子学生発表会プログラム集, p.52 (2018-12)
- 2) 井組裕貴, 織田豊一, 「色素増感太陽電池一体型模型の実験教育への検討」, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 査読無し, 19a-PA1-1(2018-9)

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：パンチルトズームカメラに対するカメラキャリブレーション

研究代表者：宇都木修一

小区分：知覚情報処理関連

1. 研究計画の概要

本研究は、画像計測や画像認識にとって重要なカメラの向き、位置、焦点距離などのカメラパラメーターを求めるキャリブレーションにおいて、カメラパラメーターが連続的に変化する場合においても、その正確性を保証する手法の実現を目指す。具体的には、ズームなどによるカメラパラメーターの変化を多項式に当てはめ、カメラパラメーターが連続的に変化するような場合にも、対応することを目指している。

カメラパラメーターの変化を多項式にあてはめる際には、各パラメーターの独立性と誤差に気を配る必要がある。カメラパラメーターを求める際には、3次元座標が既知のサンプル点をカメラで実際に撮影した場合と、カメラパラメーターを用いて計算によって推定した場合の画像上のサンプル点の位置の差が最小となるように、カメラパラメーターを求める。この問題は非線形の最小二乗問題となるが、このとき、従来は複数のパラメーターをまとめて別の変数に置き換えることで、線形に近似して解くことが多い、しかし、その場合は、それぞれの誤差を合算して最小化するように最適化問題を解くことになり、全体としての誤差は最小であっても、関係のないパラメーターに誤差が吸収されてしまうことによって、個々のパラメーターの正確性が保証されない。したがって、それぞれのカメラの状態において求めたパラメーターは、そのカメラの状態において最適なパラメーターであっても、パラメーターの変化を多項式にあてはめる際には不適切となる恐れがある。

この問題に対しては、それぞれのパラメーターの性質を考慮してパラメーターを独立に求めることで、可能な限り各々の誤差の影響を限定して、多項式にあてはめることを試みる。具体的には消失点を用いてカメラの回転量を求めることで、非線形の最小二乗問題を簡略化し、できるだけ個別にパラメーターを求める方法を用いる。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

本研究ではパンチルトズーム機能を持つ Panasonic 製の BB-SC384B ネットワークカメラを用いてカメラキャリブレーションをおこなった。まず、ズームを用いない最も広角な状態においてカメラパラメーターを算出し、その正確性をステレオ視による距離計測によって評価した。計測対象までの距離を 1[m] から 5[m] まで 1[m] 単位で変化させたところ、いずれの場合においても相対誤差を 1～2[%]程度に抑えていることを確認した。これは、視差（画素）に換算すれば横幅 1280 画素の画像に対し、誤差を 1～2 画素程度に抑えていることを示している。しかしながら、レンズ歪みの大きい画像の四隅の部分では、距離 5[m] の物体に対し、視差のずれが最大で 4 画素、相対誤差が 15[%] 程度にまで及んだ。レンズ歪みに対する補正が十分でないことが明らかになったため、別途歪み補正用のサンプル点の取得をおこなうなどの対応を検討している。

次に、望遠（ズーム）機能を用いて焦点距離を変化させたときのカメラキャリブレーションについて、評価をおこなった。BB-SC384B は 32 倍までの光学ズームが可能であるが、望遠倍率が高いとキャリブレーションをおこなうことが困難となるため、現段階ではズームは最大で 9 倍程度とすることとした。実際にはズームパラメーターを、0.003, 0.009, 0.015, 0.021, 0.027 の 5 段階に変化させてカメラパラメーター算出し、こちら、ステレオ視による距離計測でその正確性を評価した。ズームパラメーターは 0.003 が最も広角（1 倍）、0.027 が最も望遠（約 9 倍）となっている。距離計測の例として物体までの距離が 1[m] のときと 5[m] のときの計測結果を表 1 および表 2 に示す。ズームパラメーターを 0.27 としたときには距離 1[m] の物体を両方の画像内に同時に捉えることができなかつたため、計測不能

表1 物体までの距離1[m]の時の計測結果

ズーム	計測距離 [mm]	相対誤差 [%]
0.003	998.63	0.137
0.009	1002.4	0.237
0.015	999.65	0.0349
0.021	992.21	0.779
0.027	計測不能	計測不能

表2 物体までの距離5[m]の時の計測結果

ズーム	計測距離 [mm]	相対誤差 [%]
0.003	4722.6	5.55
0.009	4982.0	0.360
0.015	5005.6	0.112
0.021	5004.6	0.0922
0.027	4963.9	0.723

とした。

今回の計測結果ではズームしない最も広角な状態で、距離5[m]の物体に対し相対誤差が5[%]となっているが、視差に換算すれば2画素程度であり、それほど大きなずれとはなっていない。これに対し、望遠した場合には誤差が大幅に小さくなっている。広角な場合は量子化誤差の影響が大きい、望遠することによってその影響を小さくできることがわかる。ただし、サンプル点の移動を手作業でおこなっているため、キャリブレーションをおこなう際の状況によって、結果が変化することが考えられる。今回の計測では偶然良い結果が出た可能性があるため、キャリブレーション作業をできるだけ自動化し、複数回試行して統計的に評価することが今後必要となってくる。

次に、ズームパラメーターの変化に伴うカメラパラメーターの変化について代表的なものを示す。

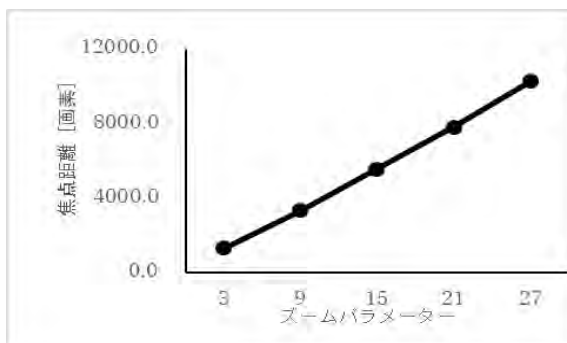


図1 焦点距離の変化

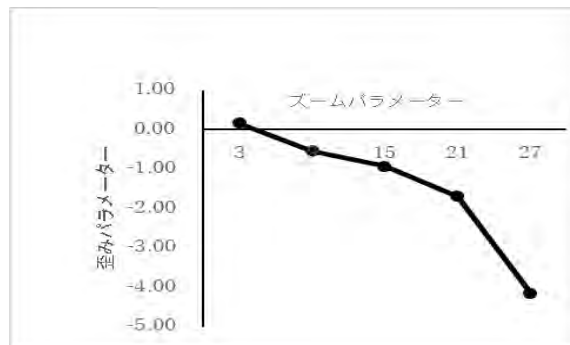


図2 歪みパラメーターの変化

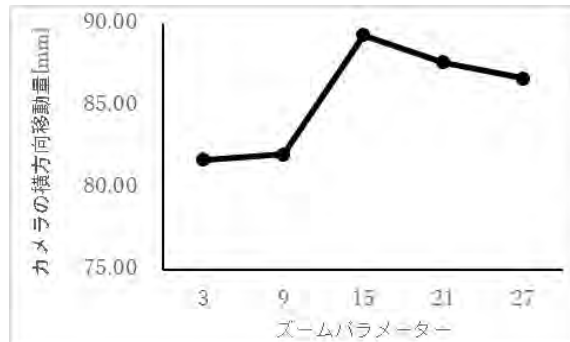


図3 カメラの横方向移動量の変化

焦点距離はズームパラメーターの変化に伴ってばらつくことなく変化しており、問題なく多項式へのあてはめをおこなうことができる。歪みパラメーターも比較的ばらつきを抑えて変化しているので同様に、こちらでも多項式へのあてはめを考えることができる。これらに対し、カメラの横方向の移動量はばらつきが大きく、多項式へのあてはめは適切でないと考えられる。ただし、このばらつきはサンプル点の撮影時の誤差の影響を受けていることも十分考えられる。あるいは、計測に影響のない範囲のばらつきである可能性もあるので、多項式のあてはめへの可否を検討する前に、こちらの場合も同様に、キャリブレーションを複数回おこない、統計的に評価する必要がある。

以上を踏まえ、今後本研究はカメラキャリブレーションを統計的な側面から評価する予定である。

3. 代表的な研究成果

〔学会発表〕 (計1件)

- [1] 宇都木修一, 鈴木寿, “消失点を利用した角度の算出に基づくカメラキャリブレーション” 電子情報通信学会 PRMU研究会, 技術研究報告, PRMU2018-132, pp.99-104.

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：ろう接によるシリサイド系熱電変換モジュールの作製と耐熱性の評価

研究代表者：加藤雅彦

小区分：複合材料および界面関連

1. 研究計画の概要

エネルギーハーベスティング技術の一つとして、廃熱を電気エネルギーに直接変換できる熱電発電が注目されている。本研究では、400～800℃程度の高温大気中で使用できる鉄シリサイド(FeSi₂)、マンガンシリサイド(MnSi_{1.73})、マグネシウムシリサイド(Mg₂Si)等の熱電素子に着目し、ろう接による熱電変換モジュールの工業的な製造方法を開発することを目的とする。従来のモジュールでは、絶縁基板上への電極形成としてメタライズ工程が必要であったが、本研究では絶縁基板上に活性金属ろう(東京ブレイズ製TB-608T)をパターンニングして素子を接合し、ろう材をそのまま電極として用いるモジュールを考案した。絶縁基板にはシリサイド系熱電素子と熱膨張係数の近いアルミナ(Al₂O₃)、マグネシア(MgO)を用い、接合界面の観察や熱電特性の測定によって最適な接合条件を検討する。また、長時間の耐熱試験や温度サイクル試験により熱安定性の評価を行う。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

昨年度の研究において、FeSi₂焼結体とAl₂O₃基板の接合体の耐熱試験を行ったところ、500℃では接合状態および内部抵抗の変化はほとんど見られなかったが、600℃では基板が剥離してしまった。そこで今年度は、Al₂O₃よりも熱膨張係数が若干大きいMgO基板を用いてFeSi₂焼結体との接合を試みた。Ar雰囲気中、820℃で接合した接合体の断面写真を図1に示す。接合界面は隙間なく接合されており、MgO基板、FeSi₂焼結体内部ともにクラックは観察されなかった。さらに600℃で耐熱試験を行ったところ、128h後も剥離しないことが確認され、MgOはFeSi₂モジュールの基板として有用であることがわかった。

接合直後に対する600℃耐熱試験後の内部抵抗の変化率を図2に示す。n型接合体は、128h後も

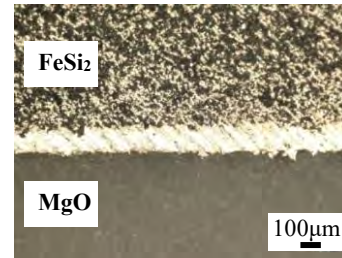


図1 活性金属ろうで接合したFeSi₂/MgOの断面

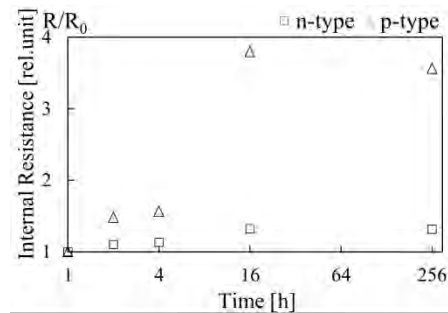


図2 600℃耐熱試験後のFeSi₂接合体の内部抵抗の変化率

内部抵抗に大きな変化は見られなかったが、p型接合体は、短時間で一旦増加し、その後は同程度の値に保たれた。この原因として、界面での拡散層の影響が考えられたため、SEM-EDX分析を行ったが、ろう材の成分(Ag, Cu, Ti)が過剰に拡散しているような有意なデータは得られなかった。

次に、p型とn型一対のπ型モジュールを作製し、500℃で16hまでの耐熱試験を行い、V-I特性を測定した。4h後まではほとんど変化がなかったが、8h後では出力が低下し内部抵抗も増加した。さらに耐熱試験を続けたところ、接合層付近において素子の破断が確認された。SEM観察の結果、図3に示すように、素子側面に液相のろう材が表面張力によって形成したエッジ部から破断していることがわかった。破断の要因として、V-I特性測定で素子の高さ方向につけた大きな温度差によ

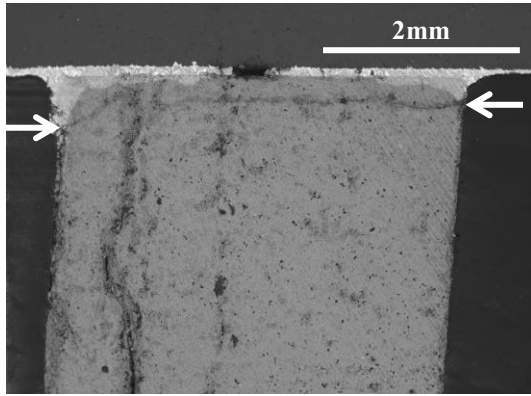


図3 500 °Cで16h耐熱試験後に破断したモジュールのSEM写真

り生じた熱応力が素子の強度を超えたことが考えられる。このことから、熱応力を緩和させるような素子の形状や複数対とすることによるモジュール全体の強度の向上が有効であると考えられる。

3. 代表的な研究成果

〔学会発表〕（計2件）

- (1) 大嶋俊一, 井上裕之, 加藤雅彦, 桑折仁, 小林隆秀, MgO 基板にろう接した FeSi_2 の熱安定性, 第15回日本熱電学会学術講演会予稿集 査読無, p.151
- (2) Hitoshi Kohri, Takuma Kurishima, Masahiko Kato, Synthesis of tungsten disilicide and its potential as a thermoelectric material, Abstracts of the 37th International Conference on Thermoelectrics, 査読無, [sciencesconf.org/ict2018:197287\(PDF\)](https://sciencesconf.org/ict2018:197287(PDF))

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：熱電素子の製造方法

発明者：小林隆秀, 井上裕之, 加藤雅彦

権利者：株式会社テックスイージー

学校法人育英学院

種類：特許出願

番号：特願 2018-218700

出願年月日：平成30年11月21日

国内外の別：国内

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 25 日現在

研究課題名：レジャーダイビングにおける減圧症予防に関する研究

研究代表者：吉田 慧一郎

小区分：計測工学関連

1. 研究計画の概要

近年、アクティビティの多様化により海におけるレジャー人気が高まりつつある。その中でも、日本の豊かな海の自然を生かしたスキューバダイビングやシュノーケリングなどの人気が高まっている。比較的浅い海面で実施されるシュノーケリングに対してスキューバダイビングでは、最大水深 40 [m] まで潜水を行う。そのため、ダイビング中はダイバーの身体に深度に応じた水圧がかかり、潜水病の発生リスクが高くなる。現在、減圧症予防には減圧表を用いた方法とダイビングコンピュータを用いた方法があるが、どちらも減圧症の発症リスクが少ない潜水時間（無減圧潜水時間：NDL）の算出は潜水時間と潜水深度より推定されるものであり、実際の体内窒素量を測定し反映したものではない。

そこで本研究では、潜水時における減圧症の早期発見を行い、減圧症の非侵襲的なリアルタイムモニタリング装置を開発することを目的とする。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

進捗および達成度は項目別に以下に示す。また、本研究では開発した機器の性能評価を行うために潜水の他に登山時における生理学的パラメータの取得も行った。登山時は潜水時と同様に血中の酸素量の変化が大きく、本研究で想定している潜水における生理学的パラメータ変化と関連が考えられる。

① 登山実験

登山時の標高の上昇に伴う生理学的パラメータの変化を調べるため、富士山 5 合目（標高 2305 [m]）～富士山頂（標高 3776 [m]）を吉田ルートで登山を行った（図 1）。実験では、試作機を被験者の上腕部に装着し、登山時における生理学的パラメータ（ SpO_2 、心拍数）の連続計測および、既製品のパルスオキシメータ（dretec 社、OX-101 および日本精密計測株式会社製、BO-600）、血圧計（オ

ムロン社製、HEM-6324T）を用いて、 SpO_2 と心拍数、血圧の取得を各ポイント（各合目）で行い、解析を実施した。



図 1 登山実験風景

図 2 に実験結果を示す。既製品での取得データでは 7 合目 (2740 [m]) から 8 合目 (3100 [m]) にかけて SpO_2 は徐々に低下し始め、8 合目～9 合目 (3600 [m]) にかけて急激に低下している。この時、心拍数は 7 合目から 8 合目にかけて上昇し、8 合目～9 合目にかけては一定の値を保っている。これは、高度上昇に伴う酸素濃度低下が関係していると考えられる。次に試作機での取得データでは、7 合目から 8 合目にかけて心拍数がゆるやかに上昇し、8 合目～9 合目にかけて心拍数は急激に上昇し、その後減少している。 SpO_2 での変化は、8 合目中盤以降、低い値が継続している。このように、既製品と試作機では 8 合目～9 合目において SpO_2 の変化が高度上昇に伴い低下する点で一致した。また、心拍数計測において、既製品と試作機とでは各ポイント良い一致が見られた。これにより、本研究で作製した試作機は良い精度で計測が可能であると考えられる。また、試作機では 8 合目～9 合目において心拍数の急激な増減が確認された。高度上昇に伴う心肺機能の動作が既製品と比較してより詳細な生理学的パラメータの取得の可能性が示された。

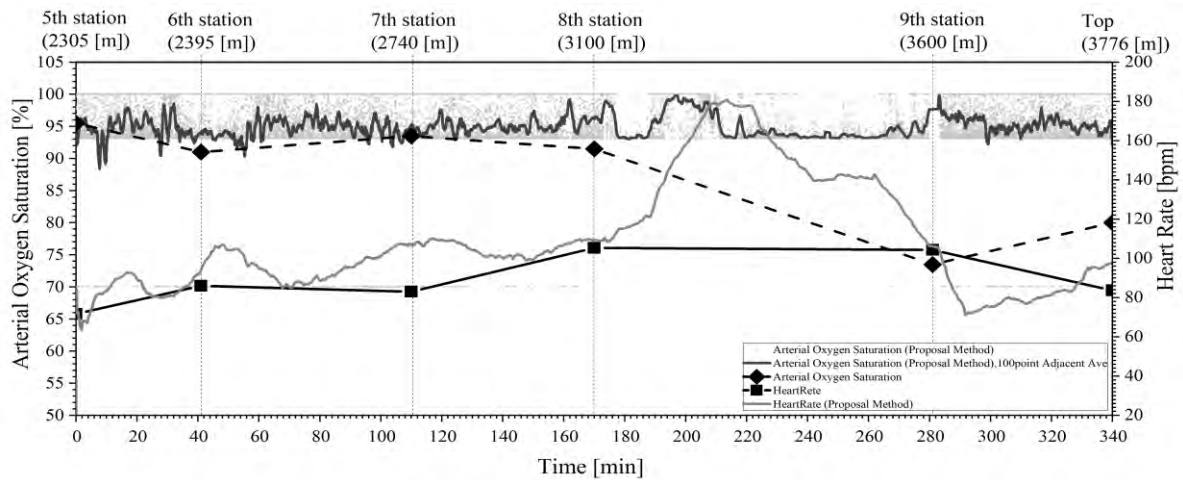


図2 登山における生理学的パラメータの変化

② 潜水実験

ダイビング時の水深の低下に伴う生理学的パラメータの変化を調べるため、沖縄県沖合ナガヌ島周辺でダイビングを行った。実験では、試作機を被験者2名の左手首部に装着し(図3)、ダイビング時における生理学的パラメータ(SpO₂, 心拍数)の連続計測および試作機器の性能評価を行うため比較として既製品のパルスオキシメータ(dretec社, OX-101 および日本精密計測株式会社製, BO-600), 血圧計(オムロン社製, HEM-6324T)を用い、SpO₂と心拍数、血圧の取得を潜水前後で行い、解析を実施した。

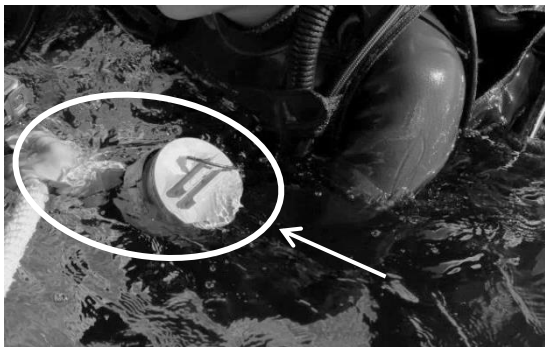


図3 潜水実験風景

本実験では、計4本のダイビングを行った。1本目(Dive.1)では、試作機を用いたダイビング時における生理学的パラメータの連続計測および試作機の性能評価を行ったが、試作機の防水性能不足により試作機内部に海水が侵入してしまい、試作機による潜水中の生理学的パラメータの連続計測は行えなかった。

2~4本目(Dive.2~4)では、既製品を用いたダイビング前後における生理学的パラメータの取得と

解析を行った。図4に本実験で得られた結果を示す。

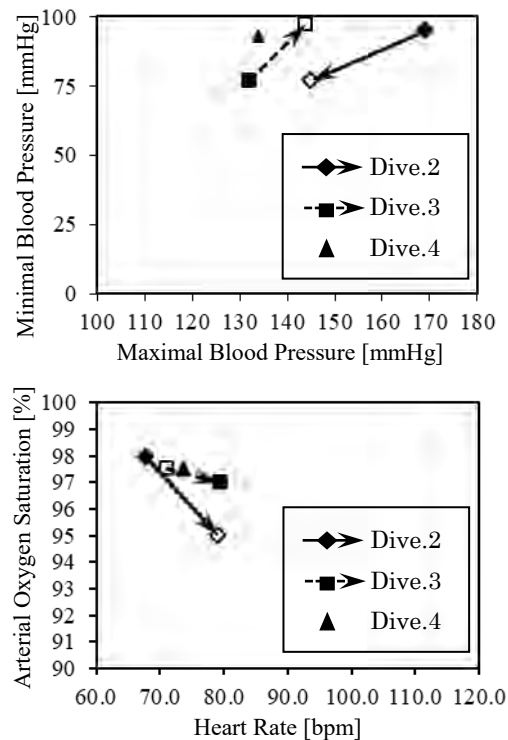


図4 ダイビング前後の変化

図4より、Dive.2においては潜水前後において最低・最高血圧ともに低下が確認される。一方、Dive.3においては潜水前後で最低・最高血圧ともに上昇がみられる。また、Dive.2-3の潜水後の最高血圧が140~150 [mmHg]周辺に収束していることが確認された。

③ 達成度および展望

本実験において、登山中における生理学的パラ

メータの取得が可能であることが確認された。これらの結果より、空気中での運動下における生理学的パラメータの取得より健康をより簡便にする機器の開発等の可能性が示された。

しかしながら、潜水試験においては機器の水没により潜水中の生理学的パラメータの取得が今回は出来なかった。試作機の防水性能向上が課題となる。

現在、防水性能を向上し小型化した測定機器を作製し(図5)、実験を行っている。改良型試作計測機器における実験では、水深18[m]における防水性能が確認され、潜水時における生理学的パラメータの取得を行うことが出来た。取得された実験結果の解析を行い、潜水時における生理学的パラメータ値の変化より身体における潜水病の予兆等の調査を実施している。また、回路の小型化およびモニタリング機能の実装を行っていく予定である。



図5 改良型試作計測機器

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕 (計1件)

- 1) 住吉佑基, 吉田慧一郎, 「レジャーダイビングにおける減圧症の予防に関する研究」, サレジオ工業高等専門学校研究紀要, 査読有り, 第49号(投稿中)

〔学会発表〕 (計1件)

- 1) 住吉佑基, 吉田慧一郎, 「レジャーダイビングにおける減圧症の予防に関する研究」, 日本福祉工学会第22回学術講演会, 査読無し

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名 : LPWA を活用した沿岸観測ネットワークによる港内の立体的な流向推定法の検討

研究代表者 : 吉田 将司

小区分 : 地理学関連

1. 研究計画の概要

港内の河口域近辺は、沖合からの潮汐の変動や、河川からの淡水の流入による特異な海流が形成されている。これら海流の解明は災害予測や漁業など、幅広い分野での貢献が期待されている。しかし、実時間的に変動する海流や潮流を詳細に把握するシステムは現在確立されていない。研究代表者らはこれまで沿岸域を多点多層観測する為に、富山新港内で沿岸センサネットワークの構築を行ってきた。昨年度はLPWA規格の無線モジュールを導入し、観測範囲の広域化を実現した。さらに多点多層での観測に成功し、沿岸域環境における表層別の水温変化を電子地図上でリアルタイム表示できる地理情報システムが構築できた。また水温変動と潮流変動の関係性も示唆された。そこで本研究は、さらなる広域化の基礎検討及び、港内海水温の時間変動の観測結果から付近海流の流向を推定する方法について検討する。

これまでの研究成果により、無線センサネットワークを用いて沿岸域の多点多層における海中情報の時間変動を観測する技術が得られた。本研究期間ではこの技術をさらに洗練・充実させつつ、以下の内容を実施する。

- ①富山新港における水温の多点多層での定期観測による季節変動特性の把握
- ②複数のLoRa-WANゲートウェイを用いた観測地点の広域化に関する検討
- ③新港内における水塊構造の把握と流向推定法の検討

まず①では、9月に富山新港において海水温の観測実験を実施する。昨年度の9月に実施した結果との再現性を検証するとともに、今年3月に実験した結果との比較から季節変動特性を把握する。次に②では、昨年度1か所だったLoRa-WANゲートウェイ（基地局）を複数個所設置し、インター

ネット回線を用いてさらに広域的な観測が可能か試験する。この実験は富山で実施できない可能性もあるが、学内での試験は可能である。最後に③では、観測した海水温データをもとに各地点・各層の水塊を立体的に可視化し、潮汐や風向データと合わせて流向推定を実施する。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

①富山新港における水温の多点多層での定期観測による季節変動特性の把握（達成度90%）

多点多層での定期観測をするために、実地での運用試験を富山高等専門学校臨海実習場の海上にて、2018年9月5日から9月7日の三日間実施した。基地局は臨海実習場に設置した。観測ノードは、河口付近から沖合にかけて4箇所（A～D）設置した。図2は観測を実施した場所をGoogle Earth上に表示したものである。Aノードは基地局から約1.9km付近の見通しでない一番遠方に配置されている。図1はノードの内部構成を示す。

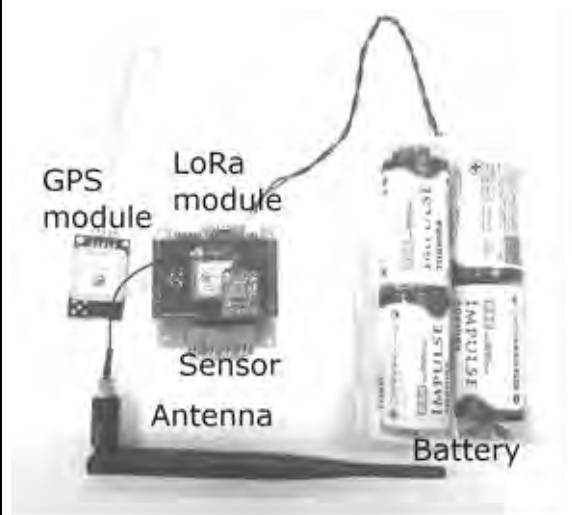


図1 ノードの内部構成



図2 設置したノードの配置

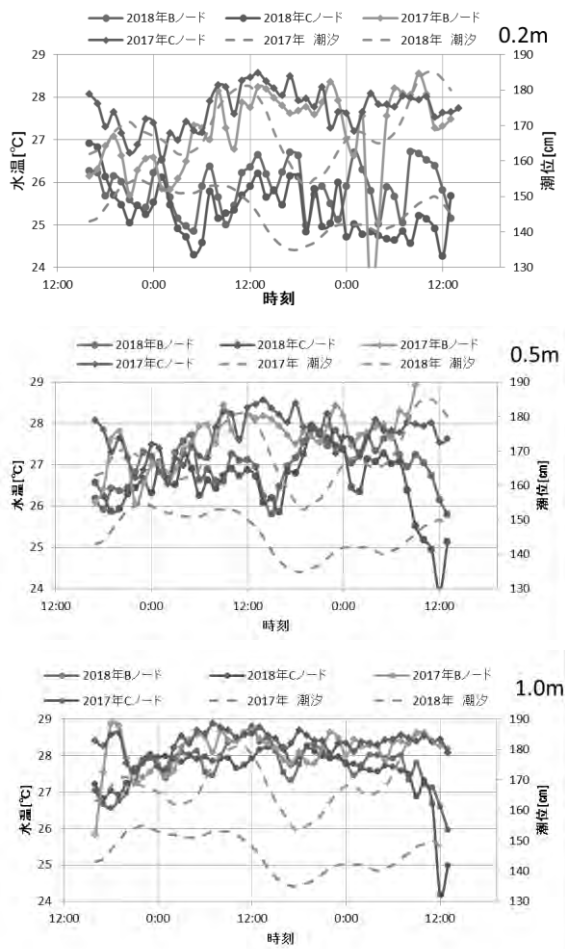


図3 2017年と2018年の水温変化
(上：0.2m、中：0.5m、下：1.0m)

図4は2017年と2018年の同日における、水温の時刻変動を示す。水深0.2mでは全体的に2017年の方が、気温は低い水温は高い傾向が見られた。水深0.5mでは気温ではなく潮位に沿った変動が多くみられた。兩年とも設置後潮位が

上がり始めると水温が徐々に上がった。水深1.0mでは兩年とも潮位にほとんど左右されることなく同じような水温分布となった。これは台風による大雨で表層に淡水が多く流入した影響が大きいことが要因と考えられる。兩年とも水深が深くなるほど水温が高くなり、深くなるほど水温の変動が穏やかになる傾向が見られた。
今回は2017年9月と2018年9月の観測結果のみ比較した。3月実験の観測場所や条件が若干異なっていたため、季節変動は比較できなかった。

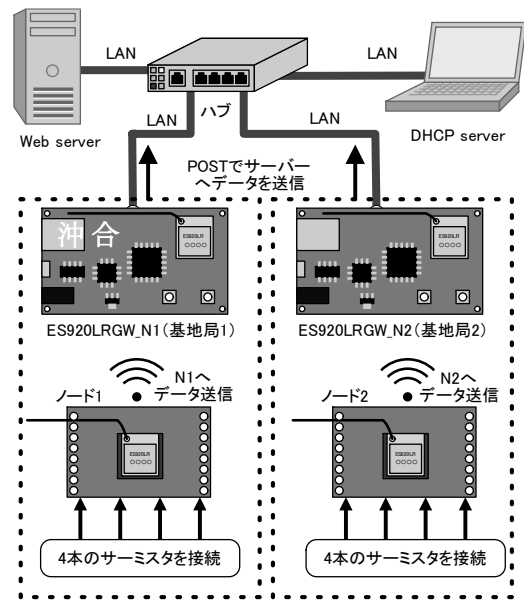


図4 ES920LRGW を活用したネットワーク構成

②複数のLoRa-WANゲートウェイを用いた観測地点の広域化に関する検討(達成度70%)

まずシステムの動作試験として、Local Area Networkを構築した。図3は実験に使用したネットワークの構成を示す。DHCP serverはWeb serverとゲートウェイモジュールに対してIPアドレスの割り当てに使用している。ノード1・2は各ゲートウェイ(ES920LRGW_N1及び_N2)に対応した通信帯域と帯域幅を設定していることとする。また、各ノードには4本のサーミスタから取得した温度データをゲートウェイへ送信する。ゲートウェイはノードから受信したデータをPOST通信にてWeb serverへ送信する。Web serverでは各ゲートウェイにて受信されたデータをIPアドレスごとに管理する。また、最新の受信データを画像ファイルにて保存することで、リアルタイムな観測データの可視化を実施した。ノ

ードに設置されているサーミスタ（4本）の温度分布をチャンネルごとに表示することに成功した。この結果から、LANによって複数台の基地局をWeb serverにより管理することが可能となった。

今後はLANだけでなく、インターネット上で利用できるように試験を実施する予定である。

③新港内における水塊構造の把握と流向推定法の検討（達成度30%）

研究協力者である千葉教授が昨年度実施した富山新港内全域でのCTDでの水塊構造観測結果から、海水と河川水から構成される港内の水塊構造は、河川に近い海域の上層では低塩分で低密度、下層では高塩分で高密度の異なった水質の水塊が存在していることが確認できた。次に同時期の港外の観測結果との比較を行い、港内の下層における水塊の水温・塩分・密度の値が、富山湾の中層とほぼ同一であり、双方の水塊が結合されていることが分かった。また、港内中央の海域でCTDとADCPを併用した観測を行った。CTD観測で確認された上層の低塩分水層と、下層の高塩分水層では、ADCP観測により流向流速が異なることが確認された。

ただし、今年度の実験ではADCPの不調により、観測結果との比較を行うことができず、観測システムを用いた構造把握及び流向推定方法の検討には至らなかった。

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕（計2件）

- [1] 内村哲也, 吉田将司, “LPWAを利用した海中空間情報取得システムの検討,” 電気学会次世代産業システム研究会, 査読無, IIS-18-064, Nov, 2018.
- [2] 吉田将司, 千葉元, “無線センサネットワークによる淡水と海水の混合海域の観測,” サレジオ高専紀要, 査読無, Vol.48,pp1-5, Feb, 2019.

〔学会発表〕（計4件）

- [1] 藤森拓哉, 吉田将司, 千葉元, “富山湾沿岸域における水温分布の季節変動特性の解析,” 第10回大学コンソーシアム八王子学生発表会要旨集, Dec, 2018.
- [2] 柴田健吾, 吉田将司, “LPWAを利用したセ

ンサネットワークにおける受信システムのGUI化に関する検討,” GPS/GNSS シンポジウム 2018 ビギナーズセッション, Nov, 2018.

- [3] 内村哲也, 吉田将司, “LPWAを用いた沿岸域環境観測の多点広域化についての検討,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p77, Mar, 2019.
- [4] 池畑裕太郎, 千葉元, 吉田将司, 島崎清寿, “富山新港（伏木富山港新湊区）内の海洋環境調査,” 日本航海学会第139回秋季講演会, K139-08, Oct, 2018.

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 25 日現在

研究課題名：IoT を活用したローカル内 AI 分析と土壌モニタリングによる根の可視化システム

研究代表者：吉野純一

小区分：情報ネットワーク関連

1. 研究計画の概要

本研究は、IoT を活用した農業支援を事例として、首都圏近隣に在住する農業従事者の知恵を活用して高専生との連携によって農業生産の担い手に対して生産性向上、圃場を管理するシステムを構築するものである。農家の継承で高齢化が進む中、口伝伝承による暗黙知の農業技術の伝達ではなく、形式知による農業技術の推進のため IoT 端末 (Sigfox) を使用した気温、日射量、土壌水分、土壌温度などを「見える化」し、技術習得に活用できるノウハウ構築を行う。またセンシング技術や過去のデータに基づくきめ細やかな栽培や営農者の有益な知見との融合等により、ローカル内

AI 分析と土壌モニタリングによる根の可視化を行い農作物のポテンシャルを最大限に引き出し、多収・高品質生産を実現する。

本研究は、首都圏近隣に在住する農業従事者の知恵を活用して高専生との連携によって農業生産の担い手に対して生産性を向上させるため、次の (1) ~ (3) が研究目的である。

- (1) 露地栽培を含めた屋外、屋内すべての圃場で、栽培に必要な土壌のデータを取得し、作物の育つ環境を可視化する。
- (2) 農家の継承で高齢化が進む中、口伝伝承による暗黙知の農業技術の伝達ではなく、形式知による農業技術の推進のため IoT 端末 (Sigfox) を使用した気温、日射量、土壌水分、土壌温度などを「見える化」し、技術習得に活用できるノウハウ構築を行う。
- (3) 土壌センサ開発

室内栽培では、データをもとにハウス内の温度調整や CO₂ 濃度のコントロール、灌水制御や養肥のコントロールを行なっている。しかし、未だに栽培技術の定量化及び最適化のための解析が進んでいないのが現状である。その理由は、土壌データに関する「土中の水分ムラ」、「土壌センサ

が高コスト」、「解析データ量が不十分」の 3 つが原因として挙げられる。そこで本研究では土壌センサの低コスト化を図り、解析・可視化方法を新たに構築し評価する。土壌センサの開発から期待できることは、次の 7 点である。

- ① 追肥の深さを制御できる。
- ② 生育中の根の範囲を推定できる。
- ③ 灌水量に対する水分分布がわかる。
- ④ 降雨に対する灌水量との置き換え推定
- ⑤ 節水できる灌水制御
- ⑥ 収穫時期の推定
- ⑦ 発芽時期の灌水タイミング

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

(1) 土壌について

土中の水分量の適正量は、作物、地域、季節ごとに異なり、農業従事者の経験則を頼りに行っていた。そのため、経験則を可視化するために、システムによって作物の育ち方をリアルタイムに把握する必要がある。従来は、誘電率法の土壌センサで 1 区画の畑及び 1 畝に数台使用し、水分変化を可視化、モニタリングできるシステムであった。この方法であると、データ量が足りず、解析に繋がる整合性が取れない。そこで、直流抵抗式のセンサを使用し、多数センサを一株ごとの根の周辺環境に対して配置することで、根の周辺の水分変化を可視化する仕組みを検討した。直流式土壌センサは、仕組みが安価であり、誘電率法と比較するとコストが 10 分の 1 以下であるため、一株の周辺に 10 倍以上の土壌センサを設置し細分化を行うことができる。この配置方法によって、一株単位で集中的に詳細なデータを出し、作物に対する栽培技術の定量化に繋がる。

(2) センサ評価

土壌センサの設置は、平均的に作物が根を生やす深さ 30cm までを想定する。設置しやすく、詳

細に多量実装するために、深さ方向に4cm間隔で8つ一体型で設計した。図1はそのセンサ設計図である。図2はセンサ配置想定図である。このセンサを図2のように畝間の方向に5cm間隔で4本設置することで32箇所水分データをもとに土中水分量を可視化することができる。データは、与えた水分量に対して土中水分量の分布をセンサデータから可視化することができる。

(3) まとめ

従来法である誘電率法の水分センサより直流抵抗式土壌センサを使用することで低コストかつ土中を詳細化した可視化が可能となる。細分化することで従来のように水分ムラで解析に至らない場合でもデータ解析ができ、降雨量に対する土中水分浸透率、蒸発散率など新たな知見を得られると考えられる。また、土中水分量の時系列変化を得ることができ、根が生えている箇所の推定にもつながる。さらに、地域ごとの地質の考慮をせずとも作物に対しての生育の傾向が見られる。

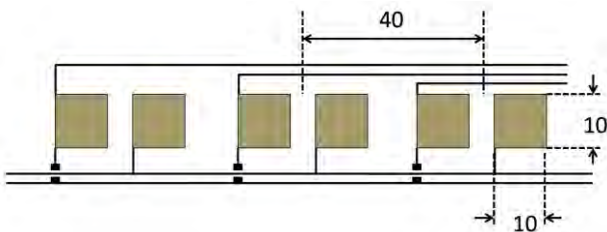


図1 直流抵抗式土壌水分センサ設計

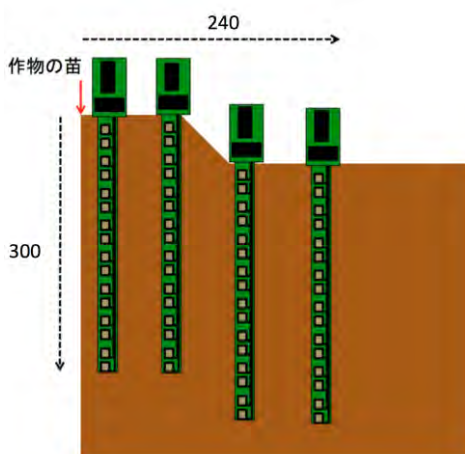


図2 土壌センサ配置想定図

3. 代表的な研究成果

〔学会発表〕（計8件）

- (1) 酒井 健瑠, 邊見 穰, 安永 寿, 吉野 純二, “Sigfox とローカル内分析による 土壌細分化センシングシステムの構築,” 電子情報通信学会総合大会「情報・システムソサイエティ特別企画 学生ポスターセッション予稿集」, ISS-P-008,p.65, March 2018. 査読無
- (2) 安永 寿, 吉野 純一, “同時多点観測可能な直流抵抗式土壌水分センサを活用した AI による灌水技術の定量化システム,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-18-23,p.307, September 2018. 査読無
- (3) 邊見 穰, 安永 寿, 吉野 純一, “同時多点観測可能な直流抵抗式土壌水分センサを活用した複数本設置による浸透傾向の可視化,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-18-24,p.308, September 2018. 査読無
- (4) 安永 寿, 吉野 純一, “同時多点観測可能な土壌水分センサを活用した土壌内水分の浸透および AI による根の伸長成長の可視化,” 日本生物環境工学会講演要旨集, P3-15,p.208-209, September 2018. 査読無
- (5) 渡辺 周, 吉野 純一, “温湿度センサによる農業支援システムの検討,” 第10回大学コンソーシアム八王子学生発表会要旨集, p.48-49, December 2018. 査読無
- (6) 露木 啓人, 吉野 純一, “露地栽培における直流土壌水分センサの検討,” 第10回大学コンソーシアム八王子学生発表会要旨集, p.50-51, December 2018. 査読無
- (7) 森 タケル, 吉野 純一, “Sigfox を用いた農業支援システムの一検討,” 第10回大学コンソーシアム八王子学生発表会要旨集, p.104-105, December 2018. 査読無
- (8) 宮田 凱人, 吉野 純一, “Sigfox を活用した見守りシステム,” 第10回大学コンソーシアム八王子学生発表会要旨集, p.106-107, December 2018. 査読無

研究課題名：機器への実装を考慮した阻止域可変 FIR フィルタの設計法に関する研究

研究代表者：宮田統馬

小区分：計測工学関連

1. 研究計画の概要

ベルトコンベアライン上を移動する物品の重量を、そのライン上で計測を行う動的重量計測機が広く用いられている。これまでに、申請者は計測精度を維持し高速な計測を実現するために、阻止域の特性が可変なデジタルフィルタの設計法を提案した。この設計法では 64 ビットといった大きな語長を用いるが、組み込み機器に実装するには小さなビット数に係数を丸める必要があるため、フィルタの特性劣化につながり高精度な計測が望めない。

本研究では、ヒューリスティック解法を用いた阻止域の複数要素が可変な直線位相 FIR フィルタの多項式係数の削減を考慮した有限語長設計法と実装法の開発を達成することを目標とする。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

本研究において多項式係数の削減を考慮した設計法の開発は、下記のとおり完了した。

本研究で扱った可変フィルタの理想特性を図 1 に示す。この可変フィルタは阻止域の一部に高い減衰量を持ち、可変パラメータ ϕ, γ によりその位置と大きさが可変である。タイプ I の直線位相 FIR フィルタの振幅応答は $2N$ をフィルタ次数とすると下式となる。

$$H(\omega, \phi, \gamma) = 2 \sum_{i=0}^N h(i, \phi, \gamma) \cos(i\omega) \quad (1)$$

このとき、フィルタ係数 h は可変パラメータの値に応じて変化させるために、

$$h(i, \phi, \gamma) = \sum_{l_\phi=0}^{L_\phi} \sum_{l_\gamma=0}^{L_\gamma} g(i, l_\phi, l_\gamma) \phi^{l_\phi} \gamma^{l_\gamma} \quad (2)$$

と定義する。ただし、 L_ϕ, L_γ は多項式次数である。次に多項式係数の低減法について述べる。

式(2)のフィルタ係数において、可変パラメータの値は、可変させる要素によって大きく異なるた

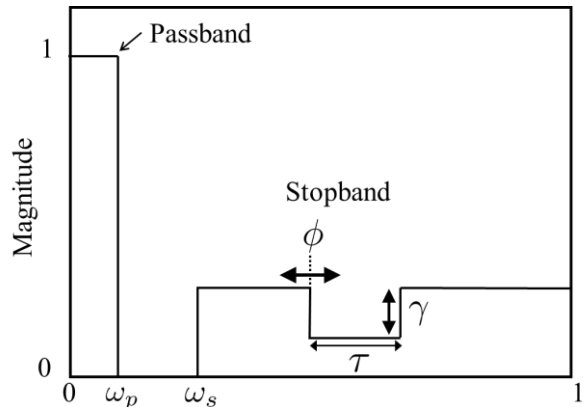


図 1 理想特性

めに、-1 から 1 の範囲で正規化を行い与える。故に、 $\phi^{l_\phi}, \gamma^{l_\gamma}$ の値は L_ϕ, L_γ が高次となった場合に小さくなる。また、式(2)より $\phi^{l_\phi}, \gamma^{l_\gamma}$ は積によって与えられているため、 $\phi^{l_\phi}, \gamma^{l_\gamma}$ の値はさらに小さくなる。従って、可変パラメータが多数かつ高次で構成される項がフィルタ係数全体に与える影響は小さいと考えられる。このことを利用して、式(2)のフィルタ係数を、

$$h(i, \phi, \gamma) = \sum_{y_1=0}^{Y_1} \sum_{y_2=0}^{Y_2} g(i, L_\phi, L_\gamma) \phi^{y_1} \gamma^{y_2} \quad (3)$$

$$Y_b = \begin{cases} K - \sum_{j=1}^{b-1} y_j & \text{if } K - \sum_{j=1}^{b-1} y_j \leq L_b \\ L_b & \text{if } K - \sum_{j=1}^{b-1} y_j > L_b \end{cases} \quad (4)$$

として与え直す。ただし、 B は可変パラメータの数であり、 $Y_b \leq 0$ の場合は $Y_b = 0$ とし、 $b-1=0$ のとき Σ の項は零値とする。また、 $L_1 = L_\phi, L_2 = L_\gamma$ である。このとき K は、

$$K \leq \sum_{b=1}^B L_b \quad (5)$$

であり、多項式次数の総和よりも K の値を小さくすることによって多項式係数の低減を行うことが

できる。本研究では、組込機器への実装を考慮するために多項式係数を 0,1 で表し加えて上記の削減法を適用し、遺伝的アルゴリズムを用いて可変フィルタの設計を行う。個体の適応度はフィルタの特性が等リプル特性(ミニマックス近似)となるように設定した。

実際に上記の手法を考慮した設計法を用いてフィルタの設計を行った。設計したフィルタの使用は、フィルタ次数 $2N=50$ 、通過域端正規化周波数 $\omega_p=0.1$ 、通阻止域端正規化周波数 $\omega_s=0.2$ 、多項式次数 $L_\phi=L_\gamma=2$ 、多項式係数を削減するパラメータを $K=2$ とした。また、高い減衰量部分を幅 $\tau=0.2$ とし、可変パラメータを変化させる範囲を $\gamma=10\sim 100$ 、 $\phi=0.36\sim 0.44$ とした。

図 2 と図 3 に、SDP 法を使用した無限語長設計法で得られたもの、SDP 法で得られたものを単純に 16bit で丸めたもの、提案法によって得られた可変フィルタの振幅特性を示す。これらの図よりパラメータの値に従って特性が変化していることがわかる。また、提案法を使用することで単純に係数を丸めたフィルタより阻止域の減衰量が改善できていることが確認できる。表 1 に設計時に評価点として設定した γ における最大誤差の値を示す。この表より明らかなように、数値的にも提案法を用いることで単純に係数を丸めたものと比較すると良好な結果が得られることがわかる。

また、実装方法に関して考察する。今回の設計法で得られるフィルタは、多項式係数の削減を行っていない場合と構造的には大きな変更は行っていない。その結果、farrow を用いることで乗算器を削減できることからリアルタイム性を考慮した実装ができるものと考えられる。

3. 代表的な研究成果

[学会発表] (計 1 件)

- [1] Toma Miyata, Hidehisa Asou, Naoyuki Aikawa, Design Method for FIR Filter with Variable Multiple Elements of Stopband Using Genetic Algorithm, 2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP), 査読有, 3Q-3

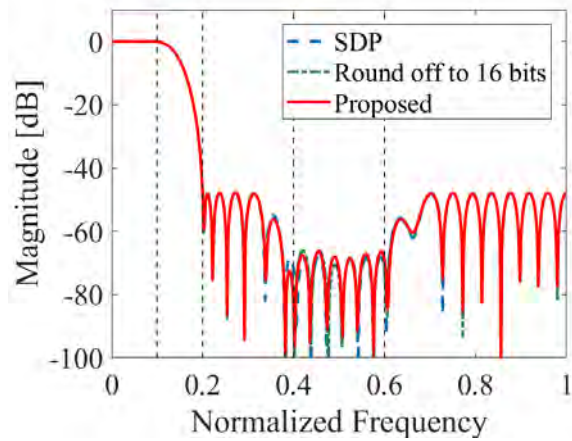


図 2 振幅特性 ($\phi=0.4$ 、 $\gamma=10$)

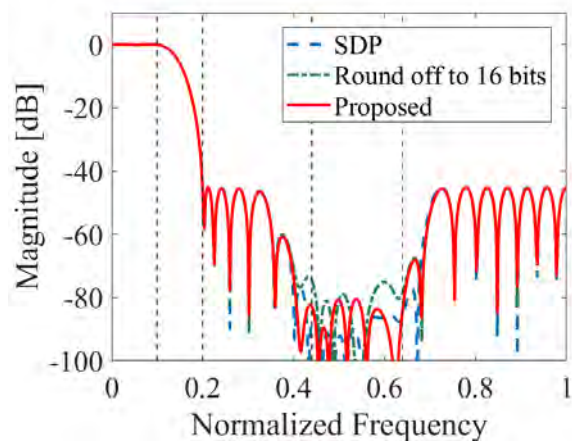


図 3 振幅特性 ($\phi=0.44$ 、 $\gamma=100$)

表 1 最大誤差の比較

	16bit に丸めたもの	提案法
$\gamma=10$	0.00620	0.00537
$\gamma=56$	0.01094	0.00903
$\gamma=100$	0.01866	0.00951

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：高校期の運動部員におけるキャリアチェンジに関する検討
－男子バレーボール部員を対象として－

研究代表者：高野 修

小区分：スポーツ心理学

キーワード：学校運動部活動、スポーツ・キャリアチェンジ

1. 研究計画の概要

本研究は、高校期の男子運動部員のうち、バレーボール部に所属している生徒・学生を対象とし、特に高校入学後に初めて同種目に取り組んだ部員に対して、それまでに取り組んできた競技を断念して新たな種目を始めたきっかけを明らかにするものである。研究代表者の勤務校近隣の中学・高校男子バレーボール部の登録数は現在高校の方が多く状況にあり、このことから高校期より新規にバレーボールを始めた者が多いことがわかる。これらの部員が自身の競技種目を変更する、いわゆるスポーツ・キャリアチェンジに至った経緯を調査することで、高校生の部活動選択における必要条件を確認することに繋がると考えている。

すでに多くの調査において、高校期より新しいスポーツ競技に取り組むきっかけとして「新しい事にチャレンジしたかった」という要因が挙げられているが、この点が競技意欲との相関において中学－高校期に同じスポーツ競技に取り組んだ運動部員と何らかの違いがあるのかを明らかにすることが本研究の主な目的となっている。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

本研究では以下①～③のプロセスを経ることにより、高校生および同年代の生徒・学生が新しいスポーツに取り組もうと考えたきっかけや要因を明らかにし、また、それらと競技意欲や競技志向性との相関を検証することによって同じ種目を継続した生徒・学生との違いを解明することを目指した。

【①競技非継続要因を明確にするための質問紙の作成】

先行研究を基に中学期から高校期に移行したタイミングで、運動部活動に所属しながらも新たな種目を始めた学生・生徒が何をきっかけにそれまで取り組んだ種目の継続を断念したのか、その要因を見い出す質問項目を設定した。その後、既存

の尺度であるスポーツ行動診断検査を追加し、被験者のスポーツ行動と対比してその要因を検討できる質問紙を作成することができた。

【②作成した質問項目の妥当性を検証するための予備調査の実施】

本校バレーボール部員を対象に作成した質問紙を用いて予備調査を実施した。対象者のうち半数以上は中学校在学時にサッカーや野球といった他の球技系運動部に在籍していたことから、今回の調査対象として望ましい学生である。質問項目の妥当性について統計学的な検証は実施できていないが、「中学校にバレーボール部がなかった」「高専入学を機に新しいことを始めてみたかった」などの記述が見られ、こちらの仮説通りの結果が得られた。

【③効果が検証された質問紙を用いての本調査】

明確な効果が検証できた訳ではないが、予備調査で用いた質問紙を使用して関東信越地区の高等専門学校 4 校ならびに東京・神奈川地区の高等学校 4 校の男子バレーボール部員に対し本調査を実施した。各校の協力により 100 名を超える調査データを収集することができた。

【④データ分析ならびに競技非継続要因の抽出】

ようやく本調査が終了したばかりで調査データの分析には着手できていない。次年度早々にはデータ分析を完了させ、運動部に所属する学生・生徒が中学期から高校期に移行する際に種目を継続もしくは変更する要因を明らかにしていく。

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- [1] 高野修, 庄司直人, 水野基樹: 「リーダーのリーダーシップ能力と運動部員の活動意欲との関連」, 働態研究のツール集, pp.79-83, 人類働態学会, 2019

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：欠陥エンジニアリングによる赤外発光チタニアの合成と発光メカニズムの解明

研究代表者：黒木 雄一郎

小区分：無機材料および物性関連

1. 研究計画の概要

酸化チタンは多様な用途に使われている代表的な機能性材料である。最近、クロムを添加した酸化チタンが紫外線励起により赤外発光を示すことが報告された。有機分子を用いた蛍光体では得られない超巨大なストークスシフトは、太陽電池用波長変換材料や不可視セキュリティインクとしての応用が期待できるが、発光強度の増大や波長チューニングが必要である。これまでの実験結果から、この赤外発光は、クロムイオンが形成するエネルギー準位ではなく、酸化チタンの真性欠陥によるものと予想している。本研究では、酸化チタン結晶における真性欠陥構造をラマン散乱測定、極低温フォトルミネッセンス測定および第一原理計算により解析するとともに、赤外発光メカニズムを解明することを目的とする。これまで述べてきた予想を元に、XRD およびリートベルド解析による結晶構造の精密化、電気伝導度・ラマン散乱・極低温PL測定による欠陥構造の推定、および電子状態計算を行い、赤外発光のメカニズムを解明する。欠陥構造を推定することで、欠陥に起因したエネルギー準位とその密度のコントロールが可能となる。また、より効率的な欠陥の導入方法に関する指針を得ることで、発光強度の増大や発光波長のチューニングなど実用化に資する試料の合成が可能になる。さらに、表面状態の制御により、インクとした場合の分散への安定性の制御なども期待できる。「欠陥エンジニアリング」により実用的な赤外発光を示す酸化チタンを合成するための指針を得るために本研究課題では様々なクロム濃度や処理条件で試料を合成し、XRD、リートベルド解析により試料の結晶構造の精密化を行うとともに、極低温での発光特性を調査し、局所的欠陥構造を推定する。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

添加したクロムは、酸化雰囲気などの特殊な環境下では6価クロムになる可能性があり、安全性において不安がある。従って、実用化には安全性の高い材料でセキュリティインクを作製する必要がある。昨年までの課題研究にて、図1に示すようにクロムを添加していない酸化チタン粉末やアルミニウムを添加したものを熱処理することでも赤外発光が得られることを明らかにした[1]。無添加の酸化チタンの発光強度は、クロムを添加したものよりも約5分の1で、アルミニウムを添加したものより2倍の発光強度であった。以上の結果より、クロム無添加試料でも赤外発光を示したことから安全性の高い無機セキュリティインクの可能性が示唆された。

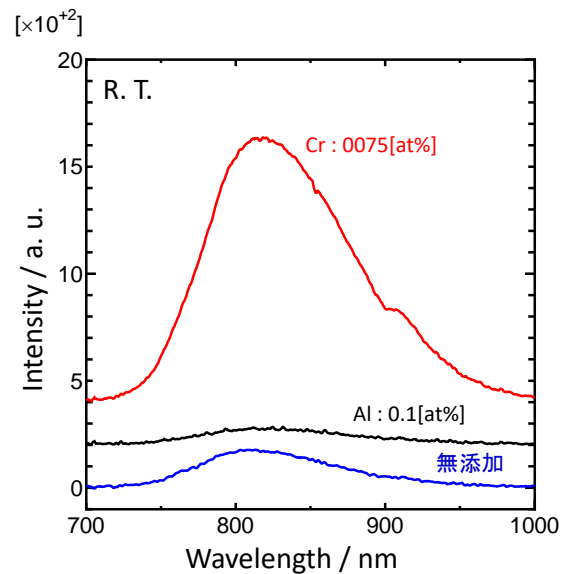


図1 室温における種々の試料の赤外発光

また、クロム添加、アルミニウム添加および無添加の全ての試料で同じスペクトル形状であった。従って、得られた発光はクロムイオン特有のものではなく、結晶内の真性欠陥が関係しているものと考察した。

次に、低温PL測定の結果からは、いずれの試料も250K～室温において発光強度が急激に低下することを明らかにした。作製した粉末試料の中で最も高い発光強度を示したクロム添加酸化チタンの30Kでのスペクトルを図2に示す。

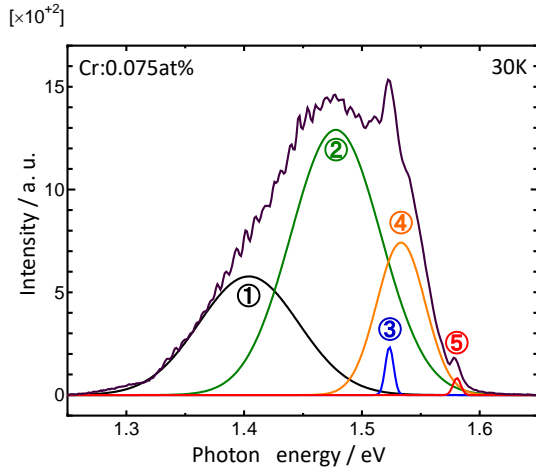


図2 クロム添加酸化チタンの30Kでの発光スペクトル

図2のスペクトルを5つのピークに分離した後、各ピーク強度のアレニウスプロットを行った。更に、(1)式をフィッティングすることで各発光ピークの活性化エネルギーを求めた。

$$I = \frac{I_0}{1 + A \exp \frac{-E_a}{k_B T}} \quad (1)$$

ここで I_0 は0[K]における発光強度、 A は任意定数、 E_a は発光の活性化エネルギー[eV]、 k_B はボルツマン定数 $1.38064852 \times 10^{-23} [\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}]$ 、 T は測定温度[K]を示す。図3にクロム添加酸化チタンの各発光ピーク強度のアレニウスプロットを示し、表1にそれらの活性化エネルギーをまとめた。図3より、発光強度が急激に変化しているグループ(ピーク1,2)と緩やかに変化しているグループ(ピーク3,4)があった。表1より、赤外発光強度が最も高いピーク2の活性化エネルギーは0.352[eV]であることがわかった。

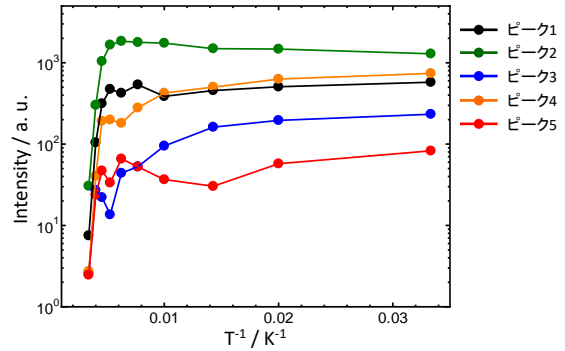


図3 クロム添加酸化チタンの各発光ピーク強度のアレニウスプロット

表1 クロム添加酸化チタンの各発光ピーク強度の活性化エネルギー

ピーク名	活性化エネルギー[eV]
ピーク1	0.313
ピーク2	0.352
ピーク3	0.043
ピーク4	0.026
ピーク5	0.332

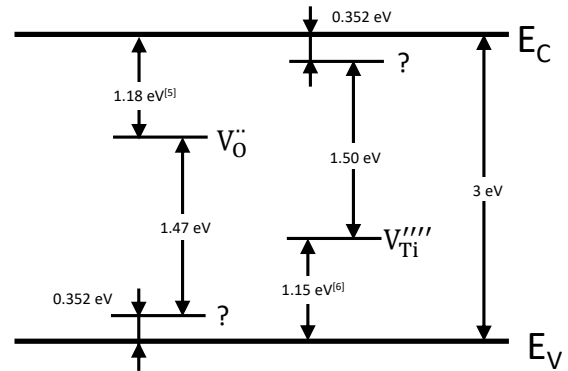


図4 発光に寄与する酸化チタンのエネルギー準位

Nowotny らのグループは、1000℃で熱処理した無添加酸化チタンにおいて最も高濃度の真性欠陥は2価の酸素空孔($V_O^{\cdot\cdot}$)と4価のチタン空孔($V_{Ti}^{\prime\prime\prime}$)であることを報告している[2]。また、4価のチタン空孔は価電子帯上1.15eVにアクセプター準位を形成すると報告している[3]。Cronemeyerらのグループは、2価の酸素空孔が伝導帯下端より1.18eV下にドナー準位を形成すると報告している[4]。以上の報告と本研究で得られた活性化エネルギーより予想した酸化チタンの真性欠陥のエン

ルギー準位を図4のように提案する。ここに示すように、本課題研究で得られた酸化チタンの赤外発光は、2価の酸素空孔と0.352[eV]の活性化エネルギーを有するアクセプター準位、もしくは4価のチタン空孔とドナー準位が関与した赤外発光である可能性が示唆された。

参考文献

- [1] 菊池 優宏, 黒木 雄一郎, 大学コンソーシアム八王子学生発表会, 要旨集 (2017) 172
- [2] J. Nowotny, Energy Environ. Sci., 1 (2008) 565
- [3] F. M. Hossain, G. E. Murch, L. R. Sheppard and J. Nowotny, Adv. Appl. Ceram., 106 (2007) 95
- [4] D. C. Cronemeyer, Phys. Rev., 113 (1959) 1222

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕 (計1件)

- [1] 黒木雄一郎, 澤蒔音, “近赤外発光を示す酸化チタンの合成とセキュリティインクへの応用”, セラミックス, 査読無し, **53** (2018), 88-888.

〔学会発表〕 (計1件)

- [1] 澤蒔音, 黒木雄一郎, “熱処理した無添加酸化チタンにおける赤外発光メカニズムの検討” 日本セラミックス協会第11回秋季シンポジウム講演予稿集, (2018), 1W08.

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 28 日現在

研究課題名：リン酸三カルシウム/ポリ乳酸複合材料の分子配向及び

力学的特性に及ぼす延伸の影響

研究代表者：坂口 雅人

小区分：材料力学および機械材料関連

1. 研究計画の概要

本研究では完全生体吸収性プラスチック複合材料 (PBPC: Perfectly Bioabsorbable Plastic

Composites) を用いた骨固定デバイスの適用領域拡大を目指した。PBPCとしてリン酸三カルシウム/ポリ乳酸(TCP/PLA)複合材料を対象として、押出延伸による分子配向によって力学的特性の向上を試みた。このために、延伸した粒子充填複合材料における母材分子配向挙動の解明と粒子充填複合材料の力学的特性に及ぼす延伸の影響を通して完全生体吸収性プラスチック (PBPC) の力学的特性に及ぼす延伸の影響を解明することを目的とした。このために、各条件で延伸した

TCP/PLA 複合材料の配向係数の測定によって母材分子配向挙動を調査した。そして、より短期間で成形条件を最適化するために延伸や配向制御によって生じる分子配向のシミュレーションを行った。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

本年度は卒研究生・サポート学生と研究協力者である小林先生、荻原先生及び当該研究室学生の手を借りて下記に示す調査を行った。

2-1. 延伸したポリ乳酸の力学的特性調査

本研究の基礎調査としてポリ乳酸単体に対して引張による延伸を行い、力学的特性を調査するために引張試験を行った。延伸条件として延伸温度に着目し、延伸温度を 50, 60, 70, 80 °C に変化させて延伸を行った。

延伸したポリ乳酸の引張試験において得られた応力 - 時間線図を Fig. 1 に示す。この結果、延伸温度とともに引張強度は低下し、延伸温度 80 °C では未延伸試験片よりも引張強度が低いことが示された。

延伸によって生じる分子配向を評価するためにフーリエ変換赤外線分光計 (FTIR) を用いて試験片

表面における配向係数の評価を行った。 Fig. 2 に FTIR によって評価した各延伸温度における配向係数を示す。ここで、0 ~ 10 %, 20 ~ 30 %, 40 ~ 50 % はそれぞれ Fig. 3 に示す試験片の長さを 100 % としたときの長手方向の測定位置 A, B, C に対応する。この結果、延伸温度 60 ~ 80 °C の配向係数は未延伸の -0.159 となっており、ほとんど配向していないことが示された。一方で、延伸温度 50 °C で延伸した試験片の測定位置 40 ~ 50 % において配向係数が 0.294 であることが示された。しかし、引張強度とは異なり、延伸温度との明確な相関は見られなかった。これは配向係数の評価が試験片表面のみであることが原因と考えられる。材料表面に生じる応力は平面応力状態となるため、材料内部よりも低くなる。このため、材料表面では加熱により軟化した部分への荷重が伝達されずに配向が低くなったと考えられる。

以上より、延伸によって引張強度を向上させることができ、延伸温度が低いほど配向係数が増加し、引張強度が向上した。しかし、配向係数は最も低い延伸温度 50 °C においてのみ増加したため、延伸温度との明確な相関はみられなかった。

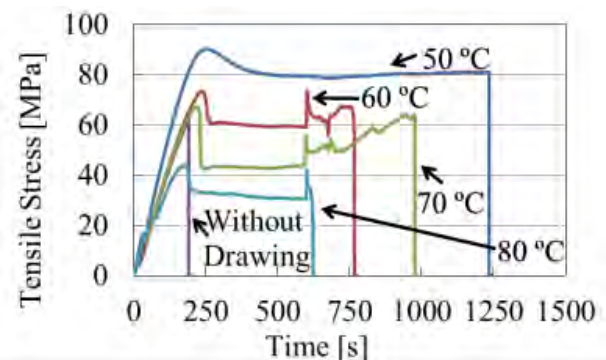


Fig. 1 Tensile stress - time curves of drawn PLA specimens which drawing at 50 to 80 °C.

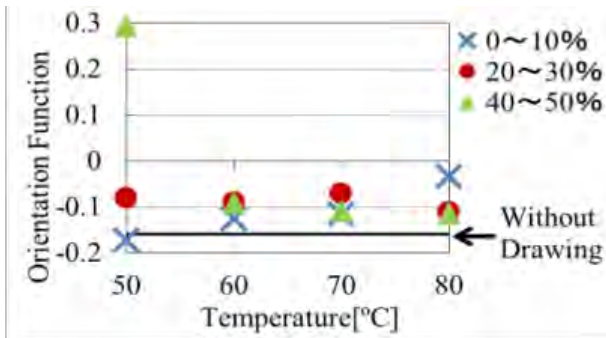


Fig. 2 Orientation function of drawn PLA specimens which drawing at 50 to 80 °C.

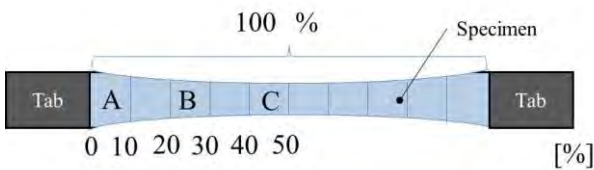


Fig. 3 Schematic view of drawn specimen.

2-2 . PLA と複合材の円筒形ビレットの押出延伸の解析結果を説明

2-1 において、延伸による分子配向によって強度が増加することが示された。そこで、骨固定デバイスの成形時の延伸手法である押出延伸における配向挙動をシミュレーションするために有限要素法 (FEM) と分子鎖ネットワークモデルの連成解析を行った。

(1) PLA 及びTCP/PLAビレットの高温下圧縮試験

連生解析に先立ち、押出延伸での材料物性を延伸温度下での圧縮試験により取得した。圧縮試験は押出延伸を行うことができた最も低い延伸温度である 130 °C で行った。試験片には PLA 単体と TCP の含有率 15 mass% の TCP/PLA 複合材料を直径 6 mm , 長さ 10 mm に成形した円筒形ビレットを使用した。この結果得られた真応力 - 真ひずみ線図を Fig. 4 に示し、ここから得られた力学的特性及び周方向と長手方向のひずみ測定から得られたポアソン比を Table 1 にまとめる。

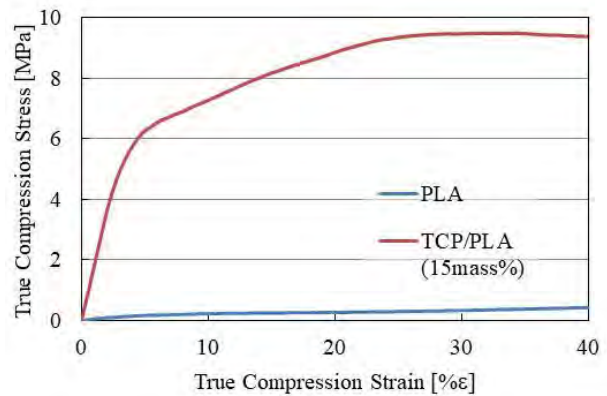


Fig. 4 True compression stress - strain curves of PLA and TCP/PLA billet.

Table 1 Mechanical properties of PLA and TCP/PLA billet which heated to 130 °C.

	PLA Billet	TCP/PLA Billet
Elastic Modulus [MPa]	5.22	181.9
Yield Stress [MPa]	0.0964	4.57
<i>n</i> Value	0.487	0.282
Poisson's Ratio	0.156	0.344

(2) FEM を用いた押出延伸における変形挙動シミュレーション

Table 1 の値を用いて FEM により押出延伸によって生じるひずみを求めた。押出延伸では円筒形ビレットを絞り出すように変形させることによって延伸を行う。そこで、Fig. 5 に示すように計算負荷を軽くするために軸対称モデルを用いて、弾塑性解析を行った。Fig. 5 のモデルの寸法は延伸比ごとに Table 2 に示す寸法に設定し、塑性領域における構成式は *n* 乗硬化則を用いた。

PLA 単体の押出延伸において FEM により得られた軸方向真ひずみのコンター図を Fig. 6 に示し、TCP/PLA 複合材料におけるコンター図を Fig. 7 に示す。また、各コンター図の軸方向中央部分の軸方向真ひずみの半径方向分布を Fig. 8 に示す。

Fig. 6 ~ 8 より、延伸比とともに延伸したビレットに生じるひずみが大きくなることが示された。また、半径方向のひずみ分布を比較すると延伸比 1.3 ~ 4 において半径方向位置 0 mm の中心軸付近よりも 2.5 mm の表面部分においてより大きなひずみを得られることが示された。これは押出延伸により延伸する際の材料の流動距離が中央部分よりも表面部分の方が長いために引き延ばされたた

めと考えられる。

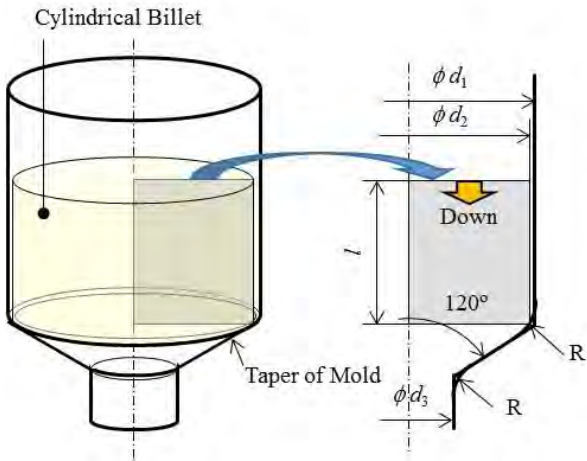


Fig. 5 Geometry of simulation model.

Table 2 Dimension of modeling for extrusion ratio 1.3 to 8.

Extrusion Ratio	l	d_1	d_2	d_3	R
	mm	mm	mm	mm	
1.3	30	7.5	7	6	0.5
2	21	9	8.5		
3	16	11	10.4		
4	13	13	12		
8	7	17.5	17		

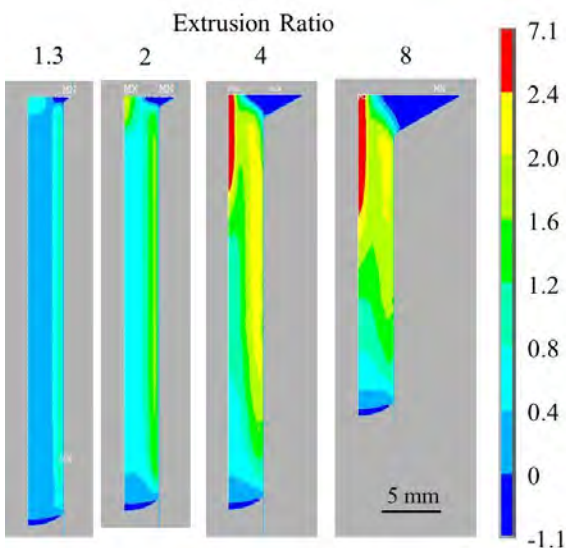


Fig. 6 Contour view of axial true strain in extruded PLA billets at extrusion ratio 1.3 to 8.

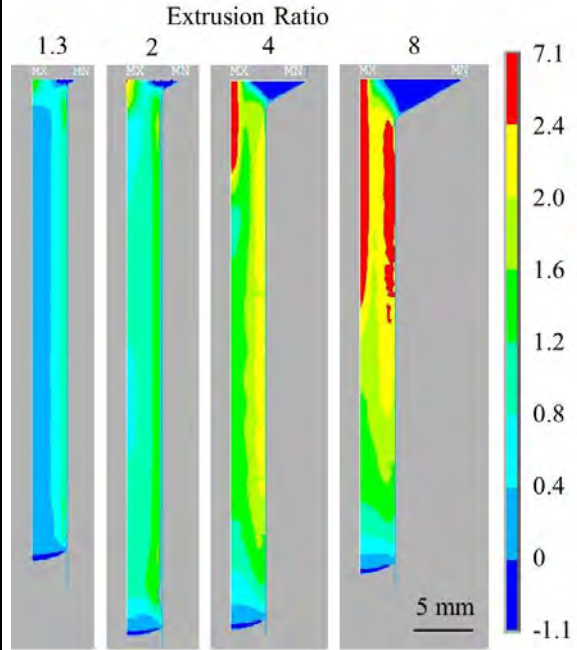


Fig. 7 Contour view of axial true strain in extruded TCP/PLA billets (15 mass%) at extrusion ratio 1.3 to 8.

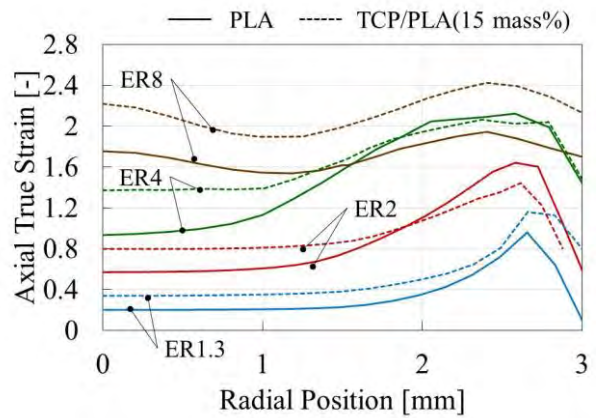


Fig. 8 Axial true strain distribution in extruded PLA and TCP/PLA billets.

(3) 分子鎖ネットワークモデルを用いた押出延伸における配向挙動シミュレーション

(2) において得られたひずみから分子鎖ネットワークモデルの一つである擬似アフィンモデルを用いて配向係数を算出した。 Fig. 8 のひずみ分布に対して擬似アフィンモデルを適用し、配向係数分布を算出した結果を Fig. 9 に示し、各成形条件での平均を取り、配向係数の測定値と比較した結果を Fig. 10 に示す。ここで、配向係数 1 は分子鎖がすべて延伸方向に配向した完全配向状態を示し、配向係数 0 は分子鎖がランダムな方向に配向した

無配向状態を示す。この結果、配向係数は延伸比とともに増加し、延伸比 8 において 0.8 以上と非常に高い配向状態を示した。また、Fig. 10 で延伸比 2 における配向係数の解析値と実験値と比較すると解析値は実験値よりも高い傾向が示された。これは配向緩和が原因と考えられる。高分子材料をガラス転位温度以上に加熱するとマイクロブラウン運動により分子鎖が動きやすくなり、延伸によって配向することができる。しかし、分子鎖を配向させるとエントロピーが減少するため、延伸後に荷重が除荷されると無配向状態に戻ろうとする。このために配向係数が減少したと考えられる。従って、今後は分子動力学解析によって配向緩和挙動を調査する必要があると考えられる。

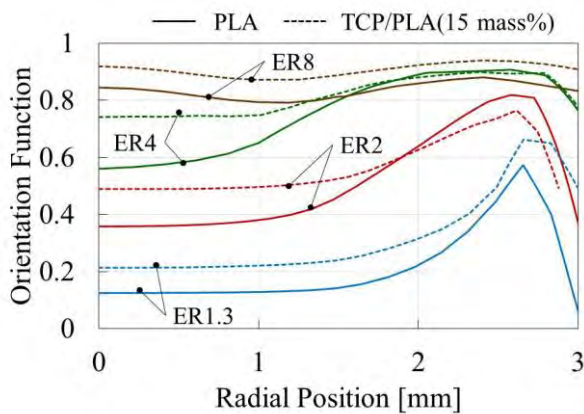


Fig. 9 Orientation distribution in extruded PLA and TCP/PLA billets.

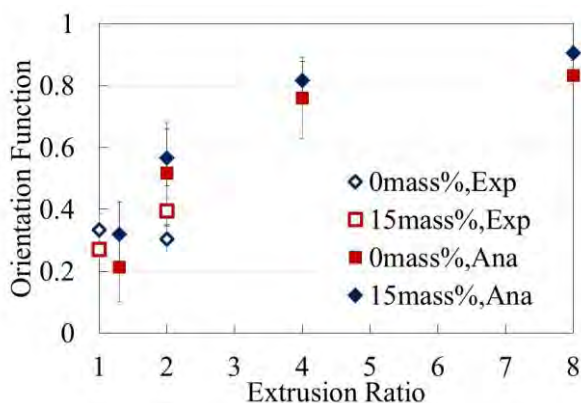


Fig. 10 Comparison between analytical and experimental orientation function.

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- (1) 畑健輔, 坂口雅人, 喜多村竜太, 小林訓史,

荻原慎二, 分子動力学法を用いたポリ-L-乳酸力学的特性に及ぼす分子鎖変形挙動の影響, 日本複合材料学会誌, 査読有, Vol. 45, pp. 34 - 40.

〔学会発表〕 (計 4 件)

- (1) 坂口雅人, 後藤広夢, 平織炭素繊維強化ポリ乳酸の力学的特性に及ぼす母材結晶化度の影響, 山梨講演会講演論文集, 査読無, DVDデータでの配布
- (2) 坂口雅人, 小林訓史, 自己強化ポリ乳酸スクリューの強度に及ぼす延伸前成形手法の影響, 日本機械学会 M&M材料力学カンファレンス講演論文集, 査読無, PDFデータでの配布
- (3) Masato Sakaguchi, Mao Otsu, Satoshi Kobayashi, Analytical Comparison of Orientation Behavior in Poly(lactic acid) Billet and β -tricalcium Phosphate/Poly(lactic acid) Composite Billet in Extrusion, Sixth International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials, 査読無, P1.033, Sitges, Spain, March 2019
- (4) 坂口雅人, 井田裕基, 小林訓史, エポキシ接着剤を用いた炭素繊維強化プラスチックと異種材料の接着特性における硬化剤の影響, 日本機械学会関東支部 第25期総会・講演会講演論文集, 査読無, PDFデータでの配布

※ (3) に関しては要項集等がないため、著者名、発表タイトル、学会名、査読の有無、講演番号、講演場所、講演年月を記載

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 26 日現在

研究課題名：ループ式多端子直流送電を用いた次世代洋上発電システムの研究

研究代表者：山下 健一郎

小区分：地球資源工学およびエネルギー学関連

1. 研究計画の概要

当該研究では次世代洋上風力発電システムとして期待されている直流直列接続方式の風力発電システムの一つとしてループ式多端子直流送電システムを提案し、同システムについて種々な検討を行っている。先行研究では提案システムの実現可能性調査のひとつとして、供試装置を製作し、基本的な定常特性を明らかにした。当該研究では①「システムの無効電力の調整範囲や動作可能範囲などに関する検討」、②「自励式同期発電機を用いた風力発電装置の過渡特性解析や制御系の設計」、及び③「マグナスタービンを用いた越波式波力発電装置の提案・開発」を行った。以下、詳細を説明する。

①システムの無効電力の調整範囲や動作可能範囲などに関する検討

本システムはサイリスタインバータを採用しているため、信頼性が高い反面、高調波が発生する問題や転流失敗による動作範囲の制限を受ける問題が生ずる。前者については先行研究で提案した特殊三巻線変圧器の働きにより、高調波を完全に除去することができる。当該研究では同変圧器の定常特性に及ぼす影響について実験だけでなく、理論を含め検討を行う。

②自励式同期発電機を用いた風力発電装置の過渡特性解析や制御系の設計

自励式同期発電機を用いた風力発電機について検討を行うため、供試装置を作製し、実験的な検討を行う。また、制御系の設計等についてはシミュレーションソフト PSIM を用いて検討を行う。

③マグナスタービンを用いた越波式波力発電装置の提案・開発

マグナス効果により駆動するマグナスタービンを用いた新しい波力発電装置として、越波式の波

力発電装置を提案する。本件等では同発電装置の構成や動作について検討を行い、実現可能性調査を行う。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

各研究計画についての進捗状況及び達成度は以下のとおりである。

① 達成度 100%

システムの動作範囲等について検討を行った結果、高調波除去のために採用した三巻線変圧器の巻数比を調整することにより、無効電力の供給範囲やシステムの動作可能範囲が拡大することなどが明らかとなった。また、同研究成果については国際会議（ICEMS 2018）で発表した。

② 達成度 50%

供試装置を製作し、実験を行った結果、自身で発電した電力の一部を用いて自己励磁することができた。しかしながら、低電圧、大電流時には発電機の漏れインダクタンスにより、ダイオード整流回路（発電機出力を直流電力に変換するために用いる）の転流が瞬時に行なわれない電流重なりが大きくなるため、これによる高調波ひずみによって励磁できる範囲が制限されることが分かった。同研究成果の一部は合同研究発表会にて発表した。このような致命的な問題が生じたため、制御系の設計等を行うことはできなかったが、同問題の改善法や本発電装置の特性解析については引き続き検討を行い、次年度の学会等で発表する予定である。

③ 達成度 30%

越波式波力発電装置の開発にあたり、本装置の主要部分であるマグナスタービンについて再検討を行った。先行研究で開発したマグナスタービンのブレードの自転には電氣的な動力が必要である

ことから、簡略化、信頼性の向上を目的に、簡易な機械式のブレード回転機構を提案した。同システムについては次年度の学会や展示会で発表する予定である。

3. 代表的な研究成果

本研究における主要な研究成果として、次の項目があげられる。①ではシステムの供試装置、変圧器の巻数比を変えた際のシステムの動作特性。②では発電システムの供試装置、同発電システムが低電圧時（低風速時）に動作困難になるという問題点の抽出。③マグナスブレードの新しい機械的な回転機構。

〔学会発表〕（計1件）

- [1] Ken-ichiro Yamashita, Gai Tsukamoto, and Shoji Nishikata, "Steady-State Characteristics of a Wind Farm Using a Line-Commutated Converter High-Voltage Direct Current Transmission System without AC Harmonic Filters," 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct 7-10, 2018

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：金ナノ粒子を用いた赤外レーザ表面改質によるオンデマンド成膜プロセスの開発

研究代表者：山口 貢

小区分：材料加工および組織制御関連

1. 研究計画の概要

携帯機器・自動車用のコネクタ，スイッチなどの電気接点部品上への表面処理について，金ナノ粒子を用いたインクジェット技術およびレーザ表面改質を組み合わせた新しい成膜プロセスの開発を目的とする．本年度は，「①赤外レーザによる電気接点材料上への金ナノ粒子焼結膜形成の検討」，「②レーザ焼結過程における金焼結膜の結晶構造変化と電気的特性との関連性の解明」の二点を追究する．本プロセスを実用化させることにより，電気接点部品の低コスト製造を実現させ，海外に対する価格競争力を強化する．

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

2. 1 赤外レーザによる電気接点材料上への金ナノ粒子焼結膜形成の検討（達成度60%）

本研究では，電子機器用のコネクタなどのばね材料として広く用いられているリン青銅板材

（JIS C5210， $25 \times 20 \times 0.25$ mm）を基材として用いた．基材表面には，金ナノ粒子膜への下地銅の拡散防止のために電気ニッケルめっき（厚さ $0.8 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ）を施した．

金ナノ粒子分散液には，ハリマ化成グループ株式会社製金ナノ粒子ペースト（NPG-J）を用いた．金ナノ粒子ペーストに含まれる金ナノ粒子の平均粒径は 7 nm ，含有率は 57 mass\% であり，粘度は $7.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ である．レーザ装置には，パッシブ冷却式ファイバカップリング型高出力半導体レーザを用いた．本装置は，最大出力 100 W ，波長 915 nm の赤外レーザ照射が可能である．

本研究では，まず基材に $4 \mu\text{L}$ の金ナノ粒子ペーストを塗布し，スピンコーター（ $2000 \text{ rpm} \times 1 \text{ min}$ ）を用いて薄膜を形成した．その後，ホットプレートを用いて仮乾燥（ $50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C} \times 5 \text{ min}$ ）を行った．仮乾燥は金ナノ粒子ペースト中の溶媒を除去することが目的である．仮乾燥後の金ナノ粒子ペーストに，出力 $20 \sim 50 \text{ W}$ ，照射

速度 5 mm/s ，デフォーカス 0 mm の条件でレーザ照射を行い，金ナノ粒子焼結膜を形成した．

レーザ焼結後の金ナノ粒子膜を顕微鏡で観察した後，曲げ戻し - ピール試験を行い，金ナノ粒子膜と基材との密着性を評価した．

図 1 に曲げ戻し - ピール試験後の焼結膜の拡大像を示す．図中の破線は曲げ戻し領域を示す．また，図は $50 \text{ }^\circ\text{C}$ で仮乾燥した後に各種条件でレーザ照射した時の結果である．レーザ出力 20 W で

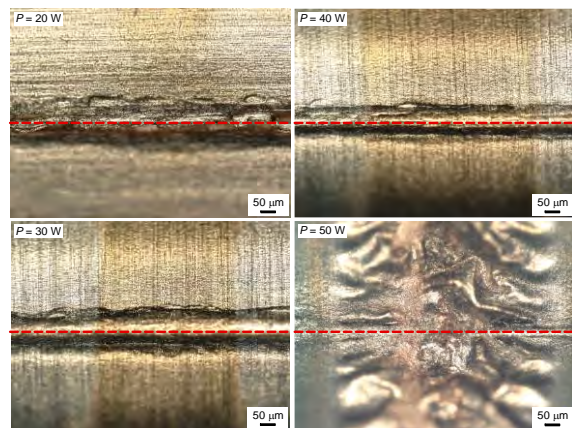


図 1 曲げ戻し - ピール試験後の焼結膜外観（仮乾燥温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ）

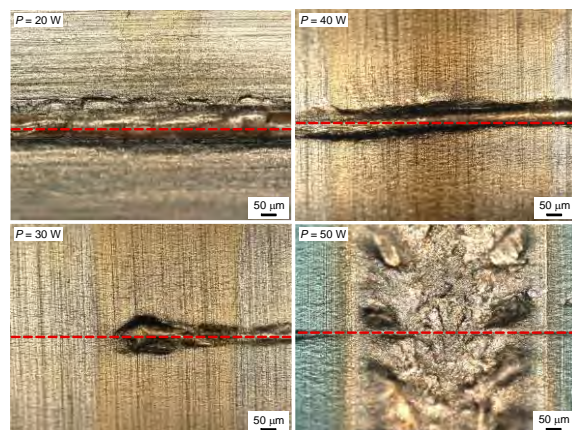


図 2 曲げ戻し - ピール試験後の焼結膜外観（仮乾燥温度 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ）

は、試験後に焼結膜は殆ど剥離し、密着性は劣悪であった。レーザ出力の増加に伴い試験後に残留する焼結膜の幅は広くなり、30 Wでは460 μm 、40 Wでは580 μm であった。50 Wでは、焼結膜は優れた密着性を有するものの、基材表面に熱影響が発生した。

図2に曲げ戻し-ピール試験後の焼結膜の拡大像を示す。図中の破線は曲げ戻し領域を示す。また、図は100 $^{\circ}\text{C}$ で仮乾燥した後に各種条件でレーザ照射した時の結果である。レーザ出力の増加に伴い、密着性は良好になる傾向にあり、30 Wでは480 μm 、40～50 Wでは750 μm の膜が残留した。しかし、40 W以上では焼結膜に変色が発生し、50 Wでは熱影響が顕著であった。

これらの結果から、レーザ出力30～40 Wの場合に外観および密着性に優れた焼結膜が得られることがわかった。また、仮乾燥温度が高い場合に、曲げ戻し-ピール試験後の残留膜の幅が大きくなった要因については、仮乾燥時に金ナノ粒子ペーストに含まれる溶媒成分が多く除去できることにより、レーザ照射時に金ナノ粒子同士の焼結の進行が促進されたと考えられる。

以上の結果に加えて、焼結膜のSEMおよび断面観察を行い、焼結状態、断面性状やピンホールの有無などを観察する予定であったが、達成できなかった。

2. 2 レーザ焼結過程における金焼結膜の結晶構造変化と電気的特性との関連性の解明 (達成度40%)

電子機器用のコネクタなどの電気接点用途に要求される性能は、種々の使用条件に対応する接触機能を満たすこと、またそれを長期間にわたり保持する信頼性にある。コネクタなどの接点部品では低接触抵抗、耐摩耗性および耐食性などの特性が要求される。したがって、焼結膜の各種評価を行い、電気接点としての実用性を検討した。

本研究では、まず焼結膜の耐摩耗性および電気的特性の評価を行った。耐摩耗性評価においては、往復運動摩耗試験、電子機器用コネクタ試験方法などを基にし、往復走行型の摩耗試験機を用い、電気接点部品の評価に用いられる挿抜試験を模した形式で評価を行った。また、耐摩耗性試験に併せて、四端子法を用いて接触抵抗の評価を行った。まず基材からオス型とメス型の二つの試料を作製

し、治具を用いて曲率半径 $R=1\text{ mm}$ のエンボス加工を施した試料をオス型、板状試料をメス型とした。エンボス加工試料では、基材上に下地ニッケルめっきを施し、その後0.3 wt%Co金めっき(0.1, 0.5 μm 厚)および金焼結膜を形成した。また板状試料では、下地ニッケルを施した基材上に0.3

wt%Co金めっき(0.5 μm 厚)を形成した。エンボス加工を施した試料を、もう一方の板材試料に一定荷重を加えて摺動することにより、コネクタのオスおよびメス端子が繰り返しはめあう状態を簡易的に再現できる。試験時に試料に加える荷重は20 gfとした。また、ステージの摺動速度は1 mm/s、摺動距離は1 mmとし、摺動回数500回まで評価を行った。接触抵抗の測定は四端子法を用い、測定電流は10 mA、開放電圧は60 mVの条件で評価を行った。摺動回数の増加に伴う金ナノ粒子膜の接触抵抗値の変化を測定し、電気金めっき膜との比較を行った。

図3に金焼結膜および電気金めっき膜の接触抵抗値の比較を示す。図は、焼結膜(0.3 μm)および電気金めっき膜(0.1 μm , 0.5 μm)が施されたエンボス加工試料を用いた場合の結果である。また、図中の破線は下地ニッケルめっきの接触抵抗値を示している。図より、下地ニッケルめっきの接触抵抗は43 m Ω と大きく、表面に酸化皮膜を形成しており、低荷重での電気接点として適していないことがわかる。摩耗試験初期段階では、焼結膜の接触抵抗値は20 m Ω 程度と大きいものの、往復回数の増加に伴い5 m Ω 程度と一定となり、電気金めっきと同程度となる。また、往復回数500回においても接触抵抗値は小さい。これらの

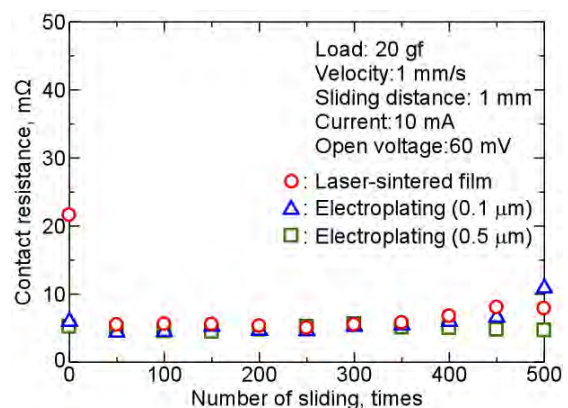


図3 焼結膜および電気めっき膜の接触抵抗の比較

結果より、焼結膜は電気金めっき膜と同程度の優れた電気特性を有することがわかる。

以上の結果に加えて、X線光電子分光法（XPS）およびX線回折法（XRD）により、焼結膜の元素分析、結晶構造解析を行い、各種レーザー照射条件が金ナノ粒子のバルク化過程におよぼす影響について明らかにし、接触抵抗などの電気的特性との関連性を解明する予定であったが、達成できなかった。

3. 代表的な研究成果

〔学会発表〕（計1件）

- [1] 橋本晴亀, 山口 貢, “金ナノ粒子を用いた電気接点材料へのレーザー焼結プロセスの検討”, 第10回大学コンソーシアム八王子学生発表会, D113.

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：異なった刺激を用いた自律神経活動制御方法の解明

研究代表者：森 幸男

小区分：感性情報学

1. 研究計画の概要

本課題研究は、人に癒しや快適さをもたらすとされている2つの方法（1/f ゆらぎ刺激、磁気刺激）を用いて、人の自律神経活動を制御する方法を明らかにすることを目的として3つの点に着目して実施した。本研究によって、自律神経活動の制御効果に学術的な意義を与え、人の健康維持や増進といった分野への貢献を可能とする。本年度の研究では、①生体リズムと同期した刺激によってLF/HF尺度を小さくすること明らかにした。②音刺激（1/f ゆらぎを含む）が自律神経活動を制御できるかについて、学校図書館において音刺激をBGMとして用いて、図書館利用の目的（読書、自習、休息）の促進効果を主観評価および実際の作業量の客観的データの視点から検討した。③交流電気磁気曝露によって、磁気曝露中と曝露後に副交感神経が優位になることを皮膚電位活動、心拍変動活動から明らかにした。以下これらについて簡単に紹介する。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

2.1 1/f ゆらぎ刺激が及ぼす自律神経活動

昨年度までに、1/f ゆらぎを有する音源による自律神経活動については検討してきており、その例として文献 [1] のような成果を発表した。しかしながら、可聴域の音源では音楽に対する嗜好の影響によって、1/f ゆらぎそのものの効果を明ら

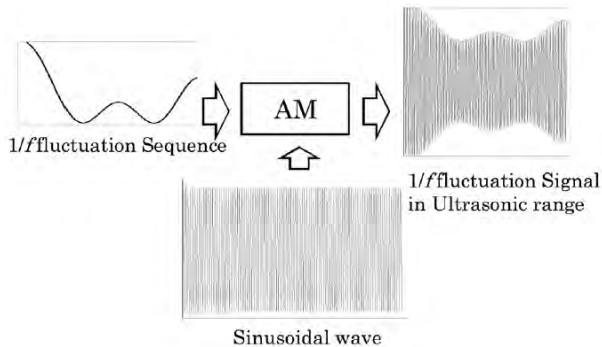


図1 1/f ゆらぎ刺激

かにすることはできないという問題点があった。そこで、先行研究として、非可聴領域（超音波領域）における1/f ゆらぎを刺激として用いて、刺激暴露時の自律神経活動を計測し検討を行った

[8]。ここでは、刺激音として、図1のように、40kHzの超音波正弦波を搬送波としたときの1/f ゆらぎを振幅変調して生成した。また、比較のため、白色雑音で振幅変調した刺激と変調なしの刺激を作成し、これらを各々120secずつ、休息を入れながら、平均の音圧100dB以上となるように被験者に提示した時の心拍変動を計測した。心拍変動データよりLF/HF尺度を算出し、自律神経活動を比較した。なお、被験者は19～22歳の男性30名である。また、順番の影響が出ないように被験者毎ランダムに提示順を変更した。結果を図2に示す。図から、1/f ゆらぎを刺激として用いた場合、被験者のLF/HF尺度が大きくばらついたことがわかる。このことは1/f ゆらぎが被験者に対して何らかの効果を与えることを示唆していると考えられた。しかしながら、自律神経活動が優勢になるようなゆらぎの与え方については未解明であり、さらなる検討が必要となった。

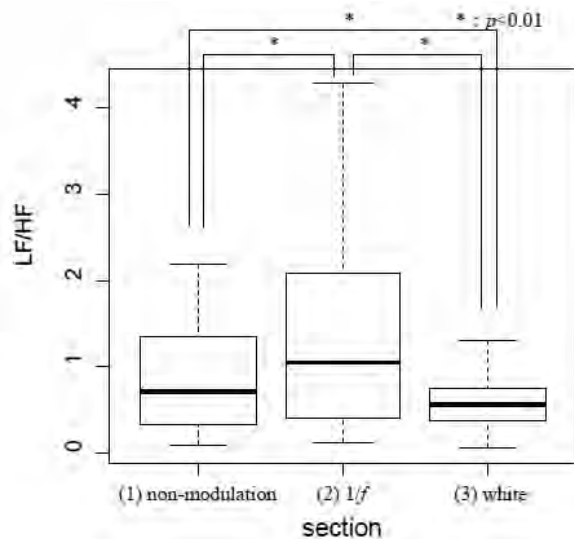


図2 刺激ごとのLF/HF尺度値

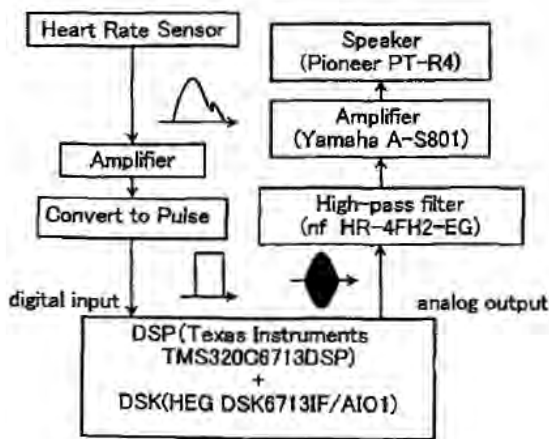


図3 被験者の心拍に同期した刺激音を生成するシステム

そこで、人の生体リズムに同期したゆらぎ信号を刺激音として用いることで、自律神経活動が制御できるのではないかと考え、その検証実験を行うことにした。図3に本研究で作成した実験システムを示す。被験者は心身ともに健康であると申告した19～22歳の男性20名である。無響音室内にある簡易ベッドの上で半座位の体勢になり、被験者の耳元において音圧レベルが100dB以上となるように刺激音を提示する。刺激音は次のようなシーケンスで提示する。

Synchronous ※→Rest→No-modulation ※
→Rest→synchronous

これらは各区間120secである。Restは休息区間、Synchronousは被験者の心拍と同期したトーンピップ信号を提示、Asynchronousは被験者以外の心拍に同期したトーンピップ信号を提示、No-modulationは一定間隔でトーンピップ信号を提

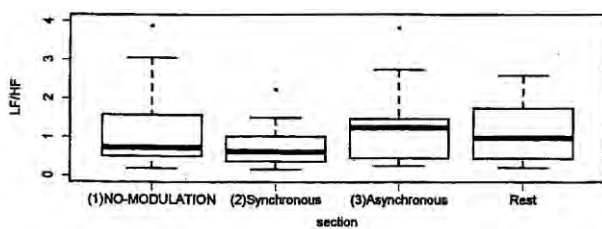


図3 刺激ごとのLF/HF尺度値

表1 各区間の中央値と四分位範囲

区間	中央値	四分位範囲
Synchronous	0.618	0.622
Asynchronous	1.245	0.983
Rest	0.975	1.212
No-modulation	0.719	0.996

示する。提示中による影響が出ないように、※印がつけられている区間をランダムに入れ替えて実験を行う。被験者の胸部に装着し他心拍センサから心拍変動を計測し、LF/HF尺度を算出する。

図4に各刺激に対するLF/HF尺度値を示す。また、表1に各区間の中央値と四分位範囲を示す。表から、Synchronous区間の中央値と四分位範囲が最も小さい値を示していることが分かる。これはこの区間の中央値と分散が他の区間よりも小さいことを表している。すなわち、心拍と同期したトーンピップ信号を提示するとLF/HF尺度が低くなる。また分散が小さいため、被験者全員のLF/HF尺度が小さくなることを明らかにした。

2.2 音刺激による自律神経活動

ここでは、学校図書館において音刺激をBGM (Background Music)として用いて、図書館利用の目的(読書、自習、休息)の促進効果を自律神経活動の計測と主観評価、および実際の作業量の客観データから検討する。ただし、自律神経活動の計測装置が数量的に不足していたため、本年度はまず主観評価と作業量のデータを基に検討を行った[2],[5],[6]。

被験者は、10代の男性8～12人を対象とした。条件をそろえるため、測定時間は15:00から行い、被験者の疲労を避けるため2日間に分けて行った。測定場所は、本校の図書館の窓側4人掛けの席とした。スピーカーは被験者に向けて設置し、音量を暗騒音より少し大きく調整した。使用したBGMは、先行研究で作業をしやすと感じたクラシック音楽に着目した。さらに、提示音源を単純な曲調(気分が高揚する音源)と複雑な曲調(気分が抑制される音源)という視点で分類した。この分類は谷口の提案した感情価測定尺度(AVSM: Affective Value Scale of Music)[9]を用いた。音源の提示時間は5分である。作業課題として読書と計算課題とした。図4、5に読書課題、計算課題の結果を示す。グラフの縦軸はばらつきの影響を防ぐために中央値を取る。図から、

BGMがない方が作業しやすいという結果になった。また、BGMがある場合では、高揚下位の音源においてそれぞれの作業量が促進される結果となった。これらの結果は先行研究[10]の結果を支持しておらず、現段階では特徴を明確にすることができていない。今後、さらなる検討を行う必要

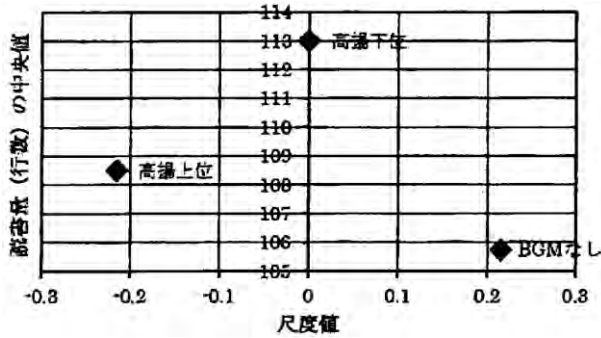


図4 読書課題時の尺度値と読書量の中央値の関係

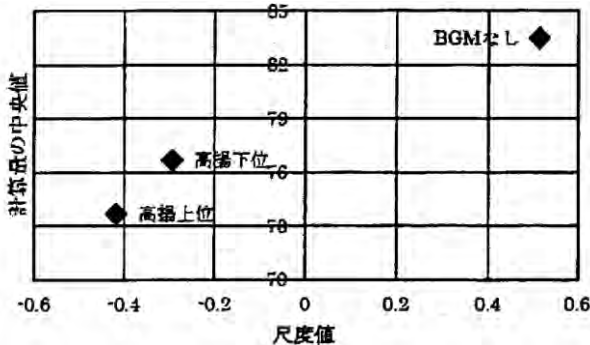


図5 計算課題時の尺度値と計算量の中央値の関係

がある。

2.3 磁気刺激と自律神経活動

本研究では、また、もう一つの刺激として磁気刺激（交流式電気磁気）に注目し自律神経活動について検討する[4]。交流式電気磁気には血流改善効果がある事が報告されている。しかし自律神経活動との関係は解明されておらず、検討が望まれている。そこで、本研究では、交流式電気磁気の曝露による副交感神経活動の測定を皮膚電位活動（SPL）と心拍変動解析（LF/HF尺度）との変化から検討した。

本研究では、交流式磁気治療器を用いて交流式電気磁気を曝露した時の、生体信号の変化を心拍センサと皮膚電位計を通して観測する実験を行っ

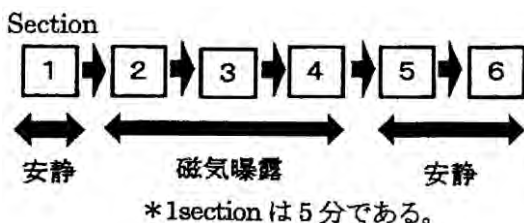


図6 磁気曝露の実験シーケンス

た。数人での被験者による測定を行った。被験者には仰向けになってもらい、腕に皮膚電位計を装着した。そして、胸部に心拍センサを取り付け、首の後ろに交流電気磁気治療器を設置する。実験シーケンスを図6に示す。実験開始と同時に心拍センサと皮膚電位計の測定を行う。図6に実験シーケンスを示す。なお、本実験では測定を安定させるため次のような実験条件を設けた。なお、被験者は7名である。

- (1) 被験者が心身共に健康体である事
- (2) 静かであるべく音が入らない部屋で行う
- (3) 実験中なるべく体を動かさないよう指示
- (4) 被験者には実験中眠らないよう指示
- (5) 実験前、実験中に磁気を曝露することを隠す

ここで、(2), (3)は被験者への刺激を防ぎ、刺激による数値への影響を抑えるための条件である。また、副交感神経は睡眠によって大きく影響するため、(4)の条件が必要となる。なお、先入観を排除するため(5)の条件を設けた。

図7にSPLの変化を示す。図から、最初の磁気曝露前の安静時間であるsection1ではSPLの中央値が3.68[mV]になっているが、磁気曝露中であるsection2,3,4に渡って徐々に低下していることがわかる。また、磁気曝露後も同様に低下していることが確認できる。すなわち磁気曝露を行ってからすぐに反応し、副交感神経が優位になっていることがわかる。また、図8にLF/HF尺度の変化を示す。図から、section1と磁気曝露中のsection2,3ではLF/HF尺度の中央値は比較的高値を示し、ばらつきも大きい。しかし、section4からはLF/HF尺度の値が低下し、ばらつきも少なくなった。同様に磁気曝露後のsection5,6でも中央値が低値で安定している。このことから、磁気曝露により時間差があるものの副交感神経が優位になることがわかる。

以上のことから、次のような知見を得た。

- (1) SPLの変化から、磁気曝露中と曝露後に副交感神経が優位になる。
- (2) LF/HF尺度の変化から、磁気曝露中から曝露後にかけて副交感神経が優位になる。

ただし、本実験からでは実際の自律神経活動がどのようなになっているのかが解明できていない。今後さらなる実験を行い、交流磁気曝露と自律神経活動を解明する必要がある。

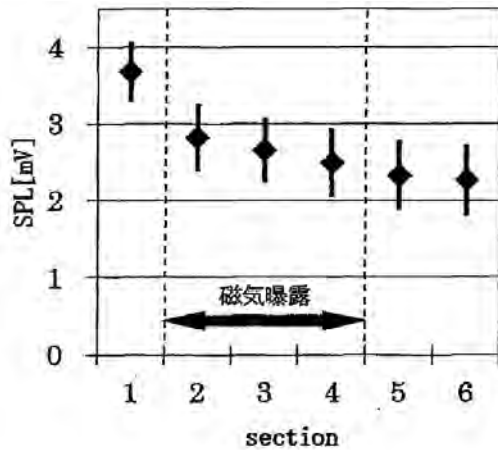


図7 SPL の変化

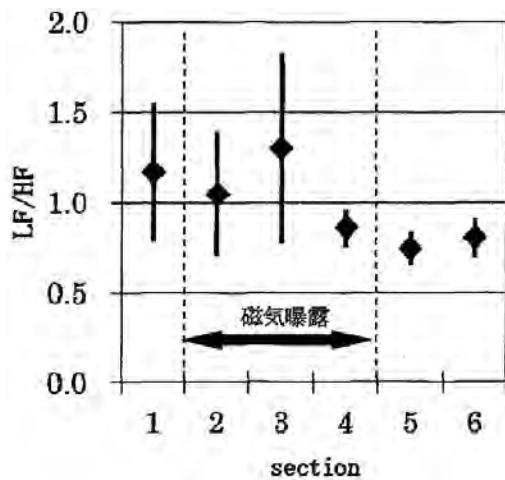


図8 LF/HF 尺度の変化

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- [1] Satoshi Watanabe, Ryouichi Takaue, Fenghui Yao, Yuji Matsumoto, Hiroyuki Tsukamoto, Naruki Shirahama, Naofumi Nakaya, Yukio Mori, "Effects of 1/f fluctuation music listening on autonomic nervous system activity", Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, 査読有, Vol.6, No.2, pp.86-91, 2018-04.

〔学会発表〕 (計 5 件)

- [1] Hatsue Wada, Riku Iida, Shuji Ogawa, Kazunori Miyamoto, Yukio Mori, "A consideration of effect of sound environments in libraries", Proceedings of the 6th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2018 (ICISIP2018), Matsue, Shimane, Japan, 査読有, SS2-2,

pp.183-186, 2018-09.

- [2] 多田大希, 中島竜馬, 渡邊 志, 白濱成希, 中谷直史, 富田雅史, 森 幸男, "生体リズムに同期した刺激音による自律神経活動の治療システム", 日本福祉工学会第22回学術講演会講演論文集, 査読無, 303, 熊本高専 (合志), pp.45-46, 2018-11.
- [3] 笠原淳一, 森 幸男, "交流式電気磁気曝露による自律神経活動の一考察", 日本福祉工学会第22回学術講演会講演論文集, 査読無, 304, 熊本高専 (合志), pp.46-47, 2018-11.
- [4] 飯田莉玖, 熊澤匠真, 宮本和典, 和田初枝, 森 幸男, "図書館における目的作業を促進する BGM の一検討", 日本福祉工学会第22回学術講演会講演論文集, 査読無, 606, 熊本高専 (合志), pp.115-116 (2018-11)
- [5] 和田初枝, 小川修二, 飯田莉玖, 宮本和典, 森 幸男, "図書館利用における教育効果を高める音環境に関する一検討", 平成30年度工学教育研究講演会講演論文集 (第66回年次大会), 査読無, 3E08, 名工大, pp.458-459, 2018-08.

〔その他〕 (計 4 件)

- [1] 第31回エイクレス研究会講演
物理的刺激 (1/f ゆらぎ音、磁気曝露) による自律神経活動について, アルカディア市ヶ谷, 2018-11.
- [2] Hiroki Tada, Yuta Samaki, Naruki Shirahama, Satoshi Watanabe, Yukio Mori, "Behavior of autonomic nervous system derived from 1/f fluctuation sound sources in ultrasonic range", Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2017 (ICISIP2017), Hawaii, USA, 査読有, SS1-2, pp.339-344 (2017-09)
- [3] 小川修二, 田村陸王, 和田初枝, 森 幸男, "BGM を利用した図書館における目的作業促進の検討", 第30回バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会講演論文集, 査読無, BMFSA2017-10, pp.33-36, 2017-11
- [4] 谷口高士, 音楽と感情, 第 5 章, 北大路書店, pp.89-117 (1999)

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：Eye Tracker を用いた日本語話者向け英語教材における効果的な日本語使用法の策定

研究代表者：真島顕子

小区分：外国語教育関連

1. 研究計画の概要

本研究は、本科 1～3 年生（高校課程）を対象に、英語教材（特にワークシート）における最も効果的な日本語使用方法（割合）を、Eye Tracking System を使用して策定することを目的とする。文部科学省は、高校課程における英語による英語の授業（All English）を推進しているが、実質的な英語力向上に顕著にはつながっておらず、授業内容や方法について議論の余地が未だ十分に残っている。高校では取り扱う内容や文法項目が高度になるため、高校教員は教材の使用法や授業の進め方について苦勞をしている。本研究では、日本語の使用を前提とした英語授業における日本語の使用割合ではなく、高校課程で求められている、All Englishに近い学習環境における、理解のサポートとしての日本語の効果的な使用について研究する。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

教材使用者の視線分析を行うため、FUJITSU の EyeExpert を使用し、実験を行った。現在授業で使用している日本語表記のないワークシート (a) と、日本語表記のある市販のワークシート (b) を用いて視線分析を行った。

EyeExpert は、ディスプレイ上の視線推移情報を収集する機器である。そのため、机上のワークシートを見ている視線の推移を追うことができない。そこで、紙媒体のワークシートを画面上に貼り付けた状態で実験を行った。画面上にワークシートデータを表示して実験することも可能であったが、紙媒体のワークシートから得る印象と異なった印象を得る危険性があったため、ワークシートを直接貼り付ける方法を採用した。また、ワークシートが画面に貼り付けられているため、解答を直接書き込むことができないので、被験者には口頭で解答してもらい、解答の正誤確認をした。また同時に、解答時の心理状態を確認しながら実

験を進めた。

結果として、被験者は (a)(b) どちらのワークシートにおいても、出題者の意図に沿った順で情報を得ることができていることが分かり、問題を指摘することができなかった。また、「効果的な日本語の使用法（割合）」という基準設定が不明瞭で、分析自体が困難であること、視線情報を蓄積されることが被験者にとって予想以上に抵抗があることだということが分かった。

そこで、文字の割合が多いワークシートだけでなく、筆者が所属する研究グループがこれまでに制作した ICT 教材も研究対象に含めることで、文字の割合が比較的少ない環境における使用言語の割合分析が可能かどうか模索した。しかし、EyeExpert は背景画が変化する環境での分析が難しいことが分かったため、データを蓄積することができなかった。

従って今後は、「効果的な日本語の使用法（割合）」の定義をより明確にすることを課題とすることとした。また、先述の ICT 教材についてまとめ、学会及び論文発表を行った。

3. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- [1] 真島顕子, 李盛姫, 川村春美, 大墨礼子, ICT教材デザインの一考察, 全国高等専門学校英語教育学会研究論集, 査読有, 第 38 号, 81-90, 2019

〔学会発表〕（計 1 件）

- [1] 真島顕子, 李盛姫, 川村春美, 大墨礼子, ICT教材デザインの一考察, 全国高等専門学校英語教育学会第 42 回研究大会要綱, 査読無, 10, 2018

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：開放量子系のダイナミクスにおける散逸とデコヒーレンスの制御

研究代表者：真島 裕樹

小区分：数理物理および物性基礎関連

1. 研究計画の概要

我々は、Celeghini-Rasetti-Vitiello (1992) の正準量子化の手法を拡張することで外力のある散逸系を量子化し、散逸系の不安定な基底状態の特徴づけを行った (2011)。これに対し、Galley (2013) は散逸系の量子化には自由度の倍化が本質であることを示し、我々の手法の正しさを裏付けた。また、近年の共振器量子電磁力学や回路量子電磁力学 (回路 QED) の理論・実験に関する発展により、超強結合領域の理解が大幅に進んでいる。そこでは、弱結合領域では無視できたカイラル項が本質的な役割を果たすが、このカイラル項こそが量子系の散逸を支配することを、申請者は以前の研究で指摘した。本研究では、古典散逸系を正準量子化し、エントロピー変化を見積もることで、ミクロなエネルギー損失 (熱) に対する直観的な描像を与えることを目指すとともに、回路 QED における強結合領域における量子系の基底状態に関する性質を明らかにする。

散逸系を正準形式で扱うためには、ラグランジアンを自由度を倍化し、仮想的な自由度は時間反転する必要がある。私たちはこのラグランジアンを正準量子化し、散逸系の量子論を求める一般的な枠組みを与えた。本研究では、このようにして得られた散逸系の量子ハミルトニアンに、我々が得た関係式 (entropy-Liouvillian relation) を適用し、エントロピー変化を見積もる。これにより、ミクロ系の熱 (エネルギー損失) に対する直観的な描像を与えることができる。また、強結合領域が現れる回路 QED の基底状態を考察し、その時間発展、その中でも最も重要な基底状態の安定性を明らかにする。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

自由減衰系では質量が有限な減衰振動子系と同様に、自由度を倍加することで、時間を陽に含まないラグランジアンを構成することが可能である。

仮想的な自由度は、減衰に対する増幅、あるいは元の系を時間反転した系と解釈することが可能である。我々は、自由減衰系の正準量子化の過程で以下の事実を示した。自由減衰系のラグランジアンをルジャンドル変換して得られるハミルトニアンは、減衰振動子系のハミルトニアンとは異なる。つまり、減衰振動子系のハミルトニアンにおいて質量ゼロの極限を取っても、自由減衰系のハミルトニアンは得られない。また、自由減衰系を正準量子化し、正準変換により振動子表示に移行することにより、減衰係数とバネ定数の比が直接的にハミルトニアンの係数に現れ、この比の大小が系の時間発展を支配する。さらに、量子化されたハミルトニアンの固有値を解析すると、その中に複素固有値が現れることが自然に導かれる。

この事実から、我々は次の結論を導いた。真空 (基底状態) が不安定となる。これは、有限系でも真空の非同値表現が存在することを示唆する。また、ハミルトニアンはエルミート共役に対して不変であるにも関わらず、非エルミートであることを許容する。このことから、量子散逸系では、ユニタリー変換と正準変換を区別する必要があることがわかった。

以上の結果の回路 QED への応用は、今後の課題である。

3. 代表的な研究成果

[学会発表] (計 1 件)

- [1] 真島裕樹, 質量ゼロの散逸系の量子化, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019), 査読無, 講演番号 16pS-PS-31

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 29 日現在

研究課題名：マルチ光源下画像における灰色仮説判定条件の検討

研究代表者：川村春美

小区分：知覚情報処理関連

1. 研究計画の概要

複数の光源が照射する環境下における画像から、灰色仮説に基づいて照明光色を推定する手法を検討する。従来より、画像を格子状に分割し、各小領域に対して一種類の照明光色推定法を適用する手法が主流であるが、適用条件が考慮されていないことが問題であった。昨年度までは、一種類のみ照明光色推定手法の中でアルゴリズムが単純な灰色仮説に着目し、この仮説を満たす小領域を対象に手法を適用する手法を提案してきた。今年度は、小領域のサイズや仮説の判定条件手法と推定精度への影響を明らかにすることを目標とすると同時に実画像に適用し推定精度を評価する。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

2.1 昨年度検討の課題

画像を小領域に分割する際のサイズを固定していたが、実際には適切なサイズは不明である。一般的には、小領域のサイズが大きいほど色数のバリエーションが豊富になり灰色仮説を満たすと判定される傾向が高くなる。しかしながら、小領域

のサイズが大きくても仮説を満たさない場合がある一方、サイズが小さくても仮説を満たす場合もある。即ち、小領域のサイズを固定にすることで灰色仮説を満たす小領域の数を減らしている可能性があると考えられる。

2.2 今年度の検討内容

小領域に分割する際のサイズを複数種類とし、分割サイズの異なる個々の画像から得られた照明光色を統合することで最終的な結果を求める。

提案手法の全体構成を図 1 に示す。提案手法は、全体で 5 つの処理、即ち、(a) 複数のサイズからなる小領域への分割、(b) 灰色仮説を満たす小領域の抽出、(c) 得られた各小領域からの局所照明光色の推定、(d) 局所照明光色のクラスタリング、および (e) 各画像から得られた照明光色の統合から構成される。

小領域に分割する際、画像内での小領域のサイズは固定とする。以下の処理では、異なるサイズに分割された画像毎に局所照明光色の推定からクラスタリングまでの処理を行う。各小領域の R 、

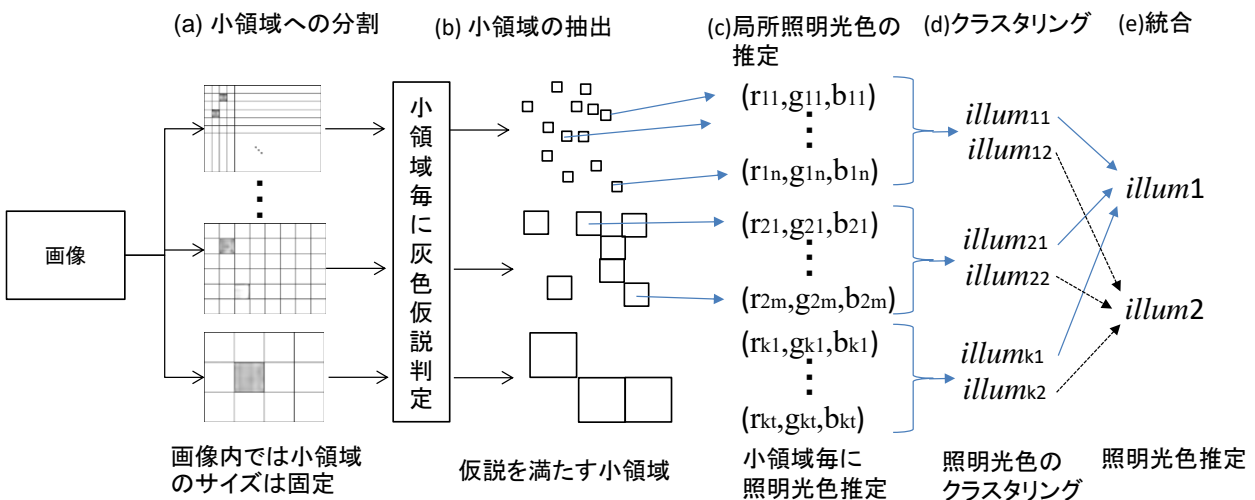


図 1：提案手法の構成

G, B成分毎の標準偏差に対し、少なくとも二つ以上が閾値よりも大きい場合に灰色仮説が適用可能であると判定する。局所照明光色は、上記判定で適用可能となった小領域の平均の色として求める。ここでは、二種類の光源を前提とするため、局所照明光色の結果をk-meansを用いて二つのクラスに分割する。この処理により、小領域のサイズが異なる画像毎に二種類ずつ照明光色が得られるので、対応する照明光色同士を平均し、最終的な結果が得られる。

提案手法の有効性を確認するため、モンドリアンパターンの画像を用いて照明光色の推定精度を評価する。モンドリアンパターンとは、様々なサイズの色紙を貼り合わせたようなパターンのことである。実験では、各領域の色（画素値）をSimon Fraser大学のサイト上の実験評価用データセットから表面反射率、照明光の分光特性、カメラの分光感度特性を取得し、式(1)に基づいて計算する。画像サイズは512×512画素とする。

$$C_i = \int_{\Omega} Cam_c(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \rho_i(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

上式では、 $\rho_i(\lambda)$ はシーン中のi番目の物体の表面反射率、 $E(\lambda)$ は照明光の分光分布、 $Cam_c(\lambda)$ はカメラの分光感度特性であり、右下のCはカラーチャネルR, G, Bを表す。なお、積分範囲 Ω は可視光範囲であり波長 λ での積分をした結果が画素値に対応する。

実験では、白色光源と赤系光源を図3に示す強度分布に従って、モンドリアンパターンに照射した画像を用いる(図2)。モンドリアンパターンは、平均すると灰色になるもの(ベース画像)に加え、平均が赤、緑、青、赤紫、シアン、黄になるようにバイアスをかけた画像(色偏り画像、計6種類)も用いる。なお、小領域は正方形とし、1辺は8, 16, 32, 64, 128, 256ピクセルとする。

推定誤差は、照明光の色を3次元空間のベクトルと見なし、推定値と真値とのなす角とする。

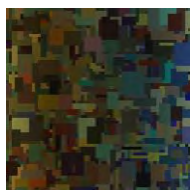


図2：実験画像

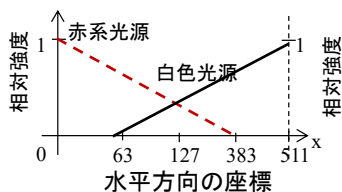


図3：光源の空間強度分布

式(2)は、推定照明光色 $illum_{est}$ と照明光色の真値 $illum_{cor}$ から推定誤差 θ の計算式である。 θ が小さいほど、推定精度が高いことを表す。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(illum_{est}, illum_{cor})}{|illum_{est}| \cdot |illum_{cor}|} \right) \quad (2)$$

実験結果を表1(白色光源)および表2(赤系光源)に示す。表中の各数値は推定誤差 θ であり、色偏り画像とは6種類の画像を適用した際の推定誤差の平均である。

表1 白色光源の推定誤差(角度°)

画像	従来手法	提案手法
ベース画像	1.7°	0.7°
色偏り画像	13.4°	11.2°
平均	11.7°	9.7°

表2 赤系光源の推定誤差(角度°)

画像	従来手法	提案手法
ベース画像	1.1°	4.3°
色偏り画像	16.3°	10.4°
平均	14.1°	9.5°

表1, 2より、従来手法では、モンドリアンパターンの色の偏りがあると、推定誤差が大幅に大きくなるが、提案手法では、従来手法と比較し誤差の増え方が小さい傾向が見られる。

2.3 今後の課題

従来手法よりも推定誤差は小さいもののまだ十分な精度とは言えない。今後は、仮説判定条件の改善と光源種類が未知の場合の手法の検討が必要である。

3. 代表的な研究成果

[学会発表] (計2件)

- [1] Harumi KAWAMURA, Multiple Illuminants' Color Estimation using Layered Gray-World Assumption, Proc. of IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2019, 査読有, 3066560, pp.94.1-94.5
- [2] 川村春美, 複数レイヤ型灰色仮説判定による複数光源下画像からの照明光色推定手法の提案, 画像電子学会研究会予稿集, 査読無, 1803, pp.103-109

課題研究費実績報告書

平成 31 年 3 月 31 日現在

研究課題名：コッククロフト-ウォルトン回路を用いたパワーLED 式人工太陽光の点灯回路に関する検討

研究代表者：米盛 弘信

小区分：電力工学関連

1. 研究計画の概要

本研究の最終目的は、室内における太陽光発電の実験で必須となる人工太陽光をパワーLEDによって実現することである。人工太陽光は、太陽光と近似したスペクトル成分を有し、かつ照射ムラを低減することが重要である。照射ムラを抑えるには、パワーLEDを直列接続することで各パワーLEDに同一の電流を流すことができるため、発光強度を一律にできる。しかし、直列接続はパワーLEDの個数に比例して順電圧が高いため、点灯させるには商用電源以上の電圧が必要となった。そこで、容易に直流高電圧が得られるコッククロフト-ウォルトン回路（Cockcroft - Walton Circuit：以下、CW回路）を応用して点灯回路が実現できないか検討した。一般的に、CW回路は $\mu\text{A} \sim \text{mA}$ オーダの電流しか出力できずパワーLEDを点灯させるには不十分である。すなわち、本研究を達成するためには、CW回路の高電流出力を実現する必要がある。本課題は、CW回路の出力電流増大に取り組み、光源を評価する。ここでは、CW回路の出力電圧・電流の目標値を 280V・600mA とする。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

研究目標を達成するために、本年度は以下に示す項目について取り組んだ。代表的な成果の中から重要なものを概説する。なお、詳細は研究成果の論文等を参照されたい。

【全波整流型 CW 回路の高周波駆動】

図 1 に CW 回路の周波数を変動させた際の電圧変動を示す。抵抗値を変化させたとき、全ての周波数で電圧が変動することがわかった。また、最大で 90V の出力が得られることがわかった。図 2 に CW 回路の周波数を変動させた際の出力電流を示す。抵抗値を変化させたとき、全ての周波数で出力電流が増加することがわかった。図 3 に CW

回路の周波数を変動させた際のリップル率を示す。抵抗値を変化させたとき、全ての周波数でリップルが増加することがわかった。さらに、出力電圧変動・最大出力電流・リップル率の 3 つの観点から 10kHz で駆動させた場合に最も優れた出力が得られると判明した。

【全波整流型 CW 回路の多段接続】

全波整流型 CW 回路を高周波駆動した結果、駆動周波数を 10kHz とした場合に低い電圧変動、低リップル率、高電流値の出力となることを明らかにした。しかし、目標値であるパワーLEDの駆動に必要な条件を満たしていない。そこで、出力電圧の増大を目標とし全波整流型 CW 回路を多段接続して目標値が達成できるか検討を行った。

図 4 に周波数が 10kHz の場合の電圧変動を示す。段数の増加に伴い電圧変動が大きくなることがわかった。また、段数を増やした場合、最大で 314V 出力されることがわかった。図 5 に周波数が 10kHz の場合の出力電流を示す。段数を増加させると出力電流の増大に伴い出力電圧の変動が大きくなる。図 6 に周波数が 10kHz の場合のリップル率を示す。3 段と 4 段の場合にリップルが抑えられていることがわかった。また、3 段と 4 段の結果から、段数が増加するとある程度の段階で飽和するのではないかと示唆される。

以上のように全波整流型 CW 回路を多段接続させ、周波数を 10kHz 一定として負荷抵抗を変化させた際の出力電圧変動、リップル率を明らかにした。実験結果より、全波整流型 CW 回路は段数を 4 段にしたときが高出力電圧、かつ低リップル率となり、最も良い結果が得られた。

今後は、実際にパワーLEDを接続して点灯実験を行い、フリッカ等の評価を行う予定である。

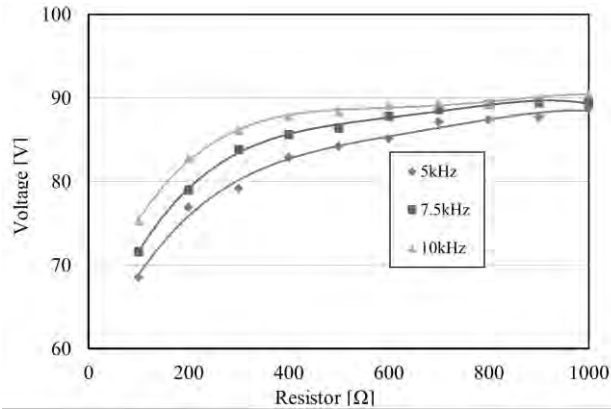


図1 CW回路の電圧変動

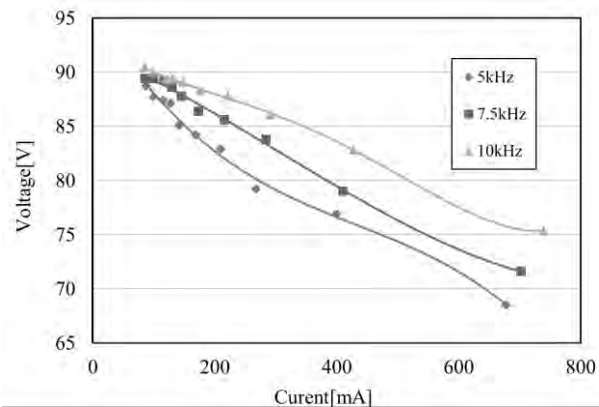


図2 CW回路の出力電流

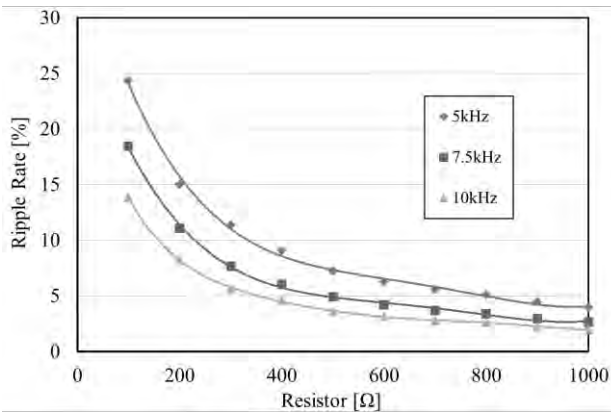


図3 CW回路のリップル率

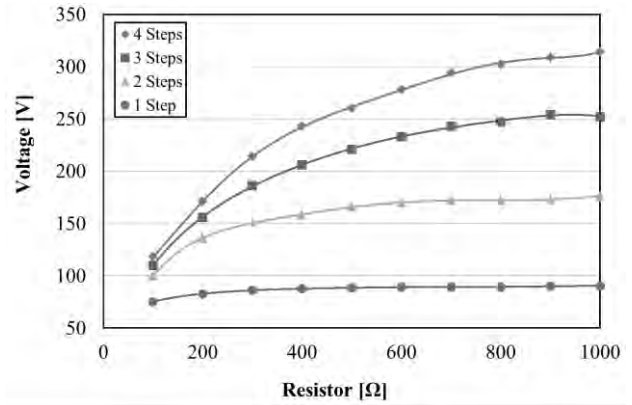


図4 周波数 10kHz 時の電圧変動

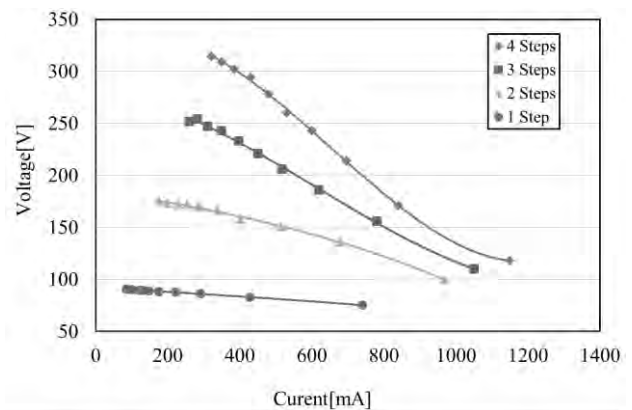


図5 周波数 10kHz 時の出力電流

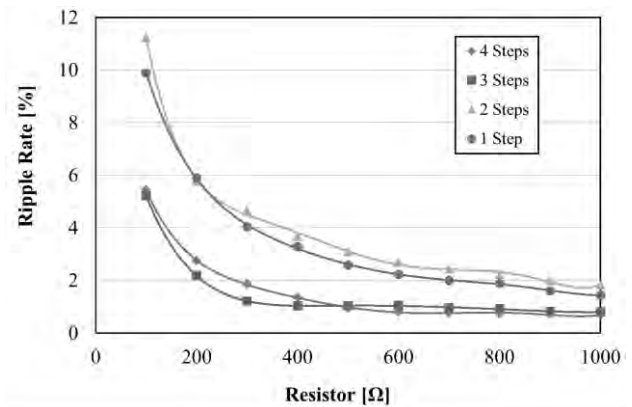


図6 周波数 10kHz 時のリップル率

3. 代表的な研究成果

[学会発表] (計2件)

1. 幅野岬太, 米盛弘信: “全波整流型コッククロフト-ウォルトン回路の高周波駆動に関する一検討”, 第10回大学コンソーシアム八王子学生発表会プログラム集, pp.90-91 (2018-12)
2. 幅野岬太, 米盛弘信: “全波整流型コッククロフト-ウォルトン回路の高周波駆動”, 2018年(第36回)電気設備学会全国大会講演論文集, p.431, 福井市地域交流プラザ (2018-09)

研究課題名：単精度浮動小数点数環境にも有効な Thick restart Lanczos 法の改良

研究代表者：木村 欣司

小区分：数値計算手法

1. 研究計画の概要

自然科学の問題や工学の問題は、大規模疎行列の指定した条件を満たす固有値と固有ベクトルのみを求める問題に帰着できる場合が多い。Thick restart Lanczos 法 (TRL 法) は、その目的を達成する計算法である。クリロフ部分空間の生成とリッツ値・リッツベクトルの計算を交互に行い、所望の固有値と固有ベクトルに収束させる。しかし、単精度浮動小数点数のような丸め誤差を多く含む環境では、収束が極端に遅くなるタイプの入力行列が存在する。その原因は、クリロフ部分空間の生成とリッツ値・リッツベクトルの計算の両方において誤差が混入し、それが悪影響を及ぼすためである。前者については、誤差を考慮した計算法が知られているが、後者については知られていないため、後者の計算法の改良を行う。単精度浮動小数点数における収束の履歴が、倍精度浮動小数点数における収束の履歴とほぼ一致する程に丸め誤差の影響を受け難くなる改良法をTRL法に導入し、多くのテスト行列を入力行列としたとき、収束が極端に遅くなるタイプの行列が存在しないようにする。

2. 課題研究の進捗状況及び達成度

得られた研究成果について、以下に紹介する。はじめに、Givens 回転に基づくQR 分解について、TRL法のリスタート時に適した方法を紹介する。石田らは、Householder リフレクタを用いたQR 分解を用いて部分特異値分解の計算結果を修正することで、AIRLB 法におけるリスタートを改良している。一方、本稿では、Givens 回転に基づくQR 分解を用いて、TRL法を改良する。提案法では、まず、Givens 回転に基づくQR 分解を用いて固有ベクトルを再直交化し、リスタートアルゴリズムで利用する。固有ベクトルの再直交化のために、対角優位行列の固有ベクトルに対する局在化の知識を用いて Givens 回転に基づく

QR 分解を適切に実装する。提案法の性能を調べるために、単精度浮動小数点演算における数値実験を行う。TRL法における三重対角化の際に、LAPACK のSLARTGを採用すると、収束しない場合がある。そこで、本稿で紹介した Givens 回転の複数の実装方法の中の最も適切な方法を三重対角化の際に採用する。これを従来法として比較実験を行う。Givens 回転に基づくQR 分解を導入することを考える。はじめに、Givens 回転という直交変換を導入する。

$$G_{k(i_k, j_k)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \cdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & \cos(\theta_k) & \cdots & \sin(\theta_k) & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & -\sin(\theta_k) & \cdots & \cos(\theta_k) & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ここで、 $\cos(\theta_k)$ は、第 (i_k, i_k) 成分と第 (j_k, j_k) 成分、 $\sin(\theta_k)$ は、第 (i_k, j_k) 成分、 $-\sin(\theta_k)$ は、第 (j_k, i_k) 成分に、それぞれ存在する。

$$G_k(i_k, j_k) = \begin{pmatrix} \vdots \\ x_{i_k} \\ \vdots \\ y_{j_k} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ \sqrt{x_{i_k}^2 + y_{j_k}^2} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix},$$

$$\cos(\theta_k) = \frac{x_{i_k}}{\sqrt{x_{i_k}^2 + y_{j_k}^2}}, \sin(\theta_k) = \frac{y_{j_k}}{\sqrt{x_{i_k}^2 + y_{j_k}^2}}$$

ここで、 $\cos(\theta_k), \sin(\theta_k)$ を計算する際には、LAPACK のxLARTGを用いる場合が多い。この変換を用いると、行列の中に任意の2つの行または列の特定の1つの成分を0に変換できる。このGivens 変換を行列A の左から複数回作用させることで、上三角行列R を手に入れることができる。R を得るまでに使った Givens 回転を逆の順番で合成することにより、直交行列Q を手に入れることができる。特定の1つの成分を0にする戦略に

は、さまざまな選択肢がある。ここで、TRL法における、収束の終盤に現れる S_m について考える。収束の終盤に現れる S_m は、対角成分以外の成分の値が絶対値の意味で非常に小さい行列である。 S_m に対する固有値分解は、 $S_m Y_l = Y_l D_l$ と表せる。ここで、 $D_l := [\gamma_1 \dots \gamma_l]$ と $Y_l := [\mathbf{y}_1 \dots \mathbf{y}_l]$ は、それぞれ固有値と固有ベクトルを並べた行列である。特に、TRL法においては、収束の終盤に現れる S_m は対角行列に近づく。さらに、後述の

Algorithm 2 の 5 行目「Extract the required eigenvalues $\gamma_1, \dots, \gamma_l$ and the eigenvectors $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_l$ 」のために、 Y_l の順序を適切に並び替える操作も行われる。この固有ベクトルを並べた行列 Y_l に対するQR分解の戦略は、収束の終盤では、 Y_l も対角成分以外の成分の値が絶対値の意味で非常に小さい行列になることを考慮すると、

$$G(n, n+1) \cdots G(m-2, m-1)G(m-1, m) \\ \times \cdots \\ \times G(2,3) \cdots G(m-2, m-1)G(m-1, m) \\ \times G(1,2) \cdots G(m-2, m-1)G(m-1, m)A = R$$

とする。ここでは、添え字 k を省略した。最下段の $G(1,2), \dots, G(m-2, m-1), G(m-1, m)$ は、第1列目の非対角成分を0にすることを目的としている。最下段から1つ上の $G(2,3), \dots, G(m-2, m-1), G(m-1, m)$ は、第2列目の非対角成分を0にすることを目的としている。最上段の $G(n, n+1), \dots, G(m-2, m-1), G(m-1, m)$ は、第 n 列目の非対角成分を0にすることを目的として計算する。この戦略では、 Q は次のように計算できる。

$$Q = G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \cdots G(1,2)^T \\ \times G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \cdots G(2,3)^T \\ \times \cdots \\ \times G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \cdots G(n, n+1)^T$$

TRL法における固有ベクトル Y_l は、 Y_l そのものではなく、Givens回転を並べた上式を Q として採用できる。計算機上でGivens回転を計算する場合、LAPACKのxLARTGを用いる戦略以外にも、オーバーフローやアンダーフローを考慮した

Algorithm 1を採用する場合もある。Algorithm 1の12行目と17行目の二重下線部分において、融合積和演算を採用することができる。

```

1:  $f \leftarrow |x_{ik}|$ 
2:  $g \leftarrow |y_{jk}|$ 
3:  $t \leftarrow \max(f, g)$ 
4: if  $t = 0$  then
5:    $\cos(\theta_k) \leftarrow 1$ 
6:    $\sin(\theta_k) \leftarrow 0$ 
7:    $\sqrt{x_{ik}^2 + y_{jk}^2} \leftarrow 0$ 
8: else
9:    $u \leftarrow f/t$ 
10:   $v \leftarrow g/t$ 
11:  if  $f \geq g$  then
12:     $r \leftarrow \sqrt{1+v^2}$ 
13:     $\cos(\theta_k) \leftarrow u/r$ 
14:     $\sin(\theta_k) \leftarrow v/r$ 
15:     $\sqrt{x_{ik}^2 + y_{jk}^2} \leftarrow r \times t$ 
16:  else
17:     $r \leftarrow \sqrt{1+u^2}$ 
18:     $\cos(\theta_k) \leftarrow u/r$ 
19:     $\sin(\theta_k) \leftarrow v/r$ 
20:     $\sqrt{x_{ik}^2 + y_{jk}^2} \leftarrow r \times t$ 
21:  end if
22: end if

```

図 1. Algorithm 1 : Givens回転の実装方法

LAPACKのxLARTGに対するAlgorithm 1の利点は、次の通りである。Algorithm 1によって計算される $\cos(\theta_k), \sin(\theta_k)$ ならびに $\sqrt{x_{ik}^2 + y_{jk}^2}$ は、下の不等式

$$0 \leq \cos(\theta_k) \leq 1, \\ 0 \leq \sin(\theta_k) \leq 1,$$

$$\max(|x_{ik}|, |y_{jk}|) \leq \sqrt{x_{ik}^2 + y_{jk}^2}$$

を満たす。よって、上記の性質を要求される演算、具体的には、TRL法における三重対角化において重要な役割を果たす。逆に、上記の性質を要求されない演算、具体的には、後述のAlgorithm 2の8行目においては、計算精度が高いLAPACKのxLARTGを選択する。下線部の内容は、「3. 代表的な研究成果」で紹介するAokiらのプロシードィングスの内容と異なっており、本稿のオリジナルの成果である。

次に、Givens回転に基づくQR分解の方法を利用した新しいTRL法のリスタート戦略について紹介する。固有値分解におけるレイリー商

$$\rho = \frac{\mathbf{x}_i^T A \mathbf{x}_i}{\|\mathbf{x}_i\|_2^2}$$

を定義する。

ρ は、計算された固有ベクトルを \mathbf{x}_i とする場合、

$$\rho = \arg \min_z \|\mathbf{A}\mathbf{x}_i - z \mathbf{x}_i\|_2^2$$

を満たす。この際、 ρ は A の固有値 $\lambda_i (i = 1, \dots, n)$ に非常に近い値となる。このレイリー商を利用した実装の詳細については、以下の通りである。

TRL法では、小さい行列 S_m の固有値分解が内部で実行され、その結果を用いて、リスタートが行われる。計算誤差を考慮しない限り、計算誤差によって得られる固有ベクトルは直交行列である。しかし、実際には、計算誤差が含まれるため、Lanczos 法における Lanczos ベクトルの直交性が悪化する。この問題を回避するために、小行列 S_m の固有ベクトルの再直交化を用いてリスタートする方法を提案する。本稿では、Givens 回転に基づく QR 分解によって、固有ベクトルを列直交行列と上三角行列に分解することにより、高い直交性を持つ S_m の固有ベクトルを計算する。Algorithm 2 は、その実装方法である。

```

1: Set  $m$  and  $l$ ;
2: Input Lanczos decomposition  $AV_m = V_m S_m + \beta_m v_{m+1} e_m^T$ ;
3: for  $i := 1, 2, \dots$  do
4:   Compute all eigenvalue  $\gamma_1, \dots, \gamma_m$  and the normalized
     eigen vectors  $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m$  corresponding to the eigenvalue
     in  $S_m$ ;
5:   Extract the required eigenvalues  $\gamma_1, \dots, \gamma_l$  and the eigen
     vectors  $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_l$ ;
6:    $D_l := \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_l)$ ;
7:    $Y_l := [\mathbf{y}_1 \dots \mathbf{y}_l]$ ;
8:   Compute the QR Decomposition using Givens rotation of
      $Y_l = QR$ 
9:    $Y_l \leftarrow Q$ 
10:   $[D_l]_{i,i} \leftarrow [Y_l^T S_m Y_l]_{i,i}$  for  $i = 1, \dots, l$ 
11:   $\tilde{V}_l := V_m Y_l$ ;
12:   $\boldsymbol{\eta} := e_m^T Y_l$ ;
13:   $\tilde{\mathbf{v}}_{l+1} := v_{m+1}$ ;
14:   $\tilde{\mathbf{r}}_{l+1} := A \tilde{\mathbf{v}}_{l+1}$ ;
15:   $\tilde{\alpha}_{l+1} := \tilde{\mathbf{v}}_{l+1}^T \tilde{\mathbf{r}}_{l+1}$ ;
16:   $\tilde{\mathbf{r}}_{l+1} := \tilde{\mathbf{r}}_{l+1} - \sum_{j=1}^l \beta_m \boldsymbol{\eta}(j) \tilde{\mathbf{v}}_j - \tilde{\alpha}_{l+1} \tilde{\mathbf{v}}_{l+1}$ ;
17:   $\tilde{\beta}_{l+1} := \|\tilde{\mathbf{r}}_{l+1}\|$ ;
18:   $\tilde{\mathbf{v}}_{l+2} := \tilde{\mathbf{r}}_{l+1} / \tilde{\beta}_{l+1}$ ;
19:   $\tilde{V}_{l+1} := [\tilde{V}_l \ \tilde{\mathbf{v}}_{l+1}]$ ;
20:   $\tilde{S}_{l+1} := \begin{bmatrix} D_l & \beta_m \boldsymbol{\eta}^T \\ \beta_m \boldsymbol{\eta} & \tilde{\alpha}_{l+1} \end{bmatrix}$ ;
21:  Adopt  $A \tilde{V}_{l+1} = \tilde{V}_{l+1} \tilde{S}_{l+1} + \tilde{\beta}_{l+1} \tilde{\mathbf{v}}_{l+2} e_{l+1}^T$  to the Lanczos
     method at  $m - l - 1$  times;
22: end for

```

図 2. Algorithm 2 : 新しいリスタート戦略による TRL 法の実装

従来の方法では、 l 本のベクトルが固有ベクトル $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_l$ から抽出され、それによって、行列 Y_l が

構成される。ここで、 Y_l は $m \times l$ の行列である。

新しい戦略では、 Y_l を直交化するために、 $Y_l = QR$ とする Givens 回転を用いた QR 分解を用いる。直交行列 Q を新しい Y_l とすると、

$$\begin{aligned} Y_l &\leftarrow [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_l], \\ Y_l &= QR, \\ Y_l &\leftarrow Q \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。 $S_m Y_l = Y_l D$ を満たすために、レイリー商をもちいて、 $[D_l]_{i,i}$ を計算する。

$$[D_l]_{i,i} \leftarrow [Y_l^T S_m Y_l]_{i,i} \quad (2)$$

$[D_l]_{i,i}$ をレイリー商を用いて再定義する理由は以下の通りである。直交性が改善された式 (1) の Y_l と Algorithm 2 の 5 行目で計算された固有値により定義される $D_l := [\gamma_1, \dots, \gamma_l]$ を用いて、

$$w := \|S_m Y_l - Y_l D_l\|_2^2$$

を定義する。 Y_l の直交性を改善することによって、固有値分解の精度の指標 w が大きくなる問題点がある。この問題を避けるために、 D_l を式 (2) のレイリー商を用いて再定義する。さらに、TRL法において成立する式

$$\begin{aligned} V_m^T A V_m &= S_m, \\ A V_m Y_l &= V_m S_m Y_l + \beta_m v_{m+1} e_m^T Y_l \\ &= V_m Y_l D_l + \beta_m v_{m+1} e_m^T Y_l, \end{aligned}$$

より、 $\tilde{V}_l := V_m Y_l$ を定義すると、

$$\tilde{V}_l^T A \tilde{V}_l = Y_l^T S_m Y_l = D_l$$

が導出される。ゆえに、 D_l は、 S_m の固有値であるという以外にも、 S_m の Y_l に対するレイリー商、または、 A の \tilde{V}_l に対するレイリー商と解釈できる。 S_m の Y_l に対するレイリー商を計算することは、数学的には、 A の \tilde{V}_l に対するレイリー商を計算することに相当するため、式 (2) をもちいて $[D_l]_{i,i}$ を計算することは、精度の向上に寄与する。

新しいリスタート戦略を用いた TRL 法の実装では、

$$\begin{aligned} \tilde{V}_l &:= V_m Y_l, \\ \boldsymbol{\eta} &:= e_m^T Y_l, \end{aligned}$$

の計算を以下のようにおこなう。 $\boldsymbol{\eta}$ の計算は、 \tilde{V}_l の計算の一部として解釈できるため、ここでは省略する。

$$\begin{aligned} \tilde{V}_l &:= V_m G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \dots G(1, 2)^T \\ &\quad \times G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \dots G(2, 3)^T \\ &\quad \times \dots \\ &\quad \times G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \dots G(l, l+1)^T \end{aligned}$$

によって実装される。 $G(a-1, a)$ の作用は、

LAPACK の xROT を利用して計算する。さらに、

$D_l \leftarrow Y_l^T S_m Y_l$ の計算は、
 $D_l \leftarrow G(l, l+1) \cdots G(m-2, m-1) G(m-1, m)$
 $\times \cdots$
 $\times G(2, 3) \cdots G(m-2, m-1) G(m-1, m)$
 $\times G(1, 2) \cdots G(m-2, m-1) G(m-1, m)$
 $\times S_m G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \cdots G(1, 2)^T$
 $\times G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \cdots G(2, 3)^T$
 $\times \cdots$
 $\times G(m-1, m)^T G(m-2, m-1)^T \cdots G(l, l+1)^T$
として実現する。漸化式として具体的に記述すると、

$$\begin{aligned} X^{(0)} &:= S_m, \\ X^{(1)} &:= G(m-1, m) X^{(0)} G(m-1, m)^T, \\ X^{(2)} &:= G(m-2, m-1) X^{(1)} G(m-2, m-1)^T, \\ &\vdots \end{aligned}$$

となる。上記の計算にも LAPACK の xROT を利用することができる。 $G(a-1, a)$ の $X^{(i)}$ に対する左右からの作用の計算で

は、 $X_{a-1,a}^{(i)}, X_{a,a-1}^{(i)}, X_{a-1,a-1}^{(i)}, X_{a,a}^{(i)}$ を除くすべての要素の計算に関しても、xROT を用いて実装できる。一方で、 $X^{(i)}$ は常に対称行列であるから、実装の際には、その対称性を維持するように計算しなければならない。以上の要求を考慮し、

$$\begin{aligned} pp &= X_{a-1,a-1}^{(i)}, \\ pq &= X_{a-1,a}^{(i)}, \\ qq &= X_{a,a}^{(i)}, \\ X_{a-1,a}^{(i)} &= \cos(\theta_k) \times \sin(\theta_k) \times (qq - pp) \\ &\quad + pq \times (\cos(\theta_k) - \sin(\theta_k)) \\ &\quad \times (\cos(\theta_k) + \sin(\theta_k)), \\ X_{a,a-1}^{(i)} &= X_{a-1,a}^{(i)}, \\ X_{a-1,a-1}^{(i)} &= \cos(\theta_k) \times \cos(\theta_k) \times pp \\ &\quad + 2 \cos(\theta_k) \times \sin(\theta_k) \times pq \\ &\quad + \sin(\theta_k) \times \sin(\theta_k) \times qq, \\ X_{a,a}^{(i)} &= \sin(\theta_k) \times \sin(\theta_k) \times pp \\ &\quad - 2 \cos(\theta_k) \times \sin(\theta_k) \times pq \\ &\quad + \cos(\theta_k) \times \cos(\theta_k) \times qq, \end{aligned}$$

を用いて計算をおこなう。

数値実験結果を紹介する。リスタート時に再直交化を行わない従来法と、 S_m の固有ベクトルを

並べた行列 Y_l の再直交化を行う新しいリスタート戦略を採用する方法との比較実験を、単精度浮動小数点演算環境において行った。両者とも、TRL法における三重対角化において、本稿の

Algorithm 1 の Givens 回転の実装を採用した。さらに、新しいリスタート戦略を採用する方法における QR 分解においては、Givens 回転の実装として LAPACK の SLARTG を選択した。実験環境として、CPU : Intel® Core™ i3-6100、RAM : 16GB、OS : Linux Fedora 31、ライブラリ : Intel Math Kernel Library 2020 を利用した。数値実験のために採用した大規模疎行列は、解き難い行列として有名な $n = 1000000$ 次元の 3 重対角行列である。対角成分を 0、上下の非対角成分を 1 とする。この行列の固有値は、

$2 \cos\left(\frac{i}{n+1} \pi\right) (i = 1, \dots, n)$ である。2 と -2 の付近に固有値のクラスタが存在する。問題の難度を上げるため、絶対値の大きいほうから l 個の固有値とそれに対応する固有ベクトルを求める問題とする。求める固有値の数は、 $l = 5$ 個とする。

Algorithm 2 に存在するパラメータ m は、 $m = 10$ と設定する。比較の項目として、計算時間、反復回数、固有値分解の精度 $\max_{i=1}^l \|Ax_i - \lambda_i x_i\|_2$ 、固有ベクトルを並べた行列 X の直交性 $\|X^T X - I\|_F$ を採用する。実験結果を表 1 に記載する。

表 1. 数値実験結果

	従来法	提案法
計算時間	2121.59 秒	349.13 秒
反復回数	29601	3930
$\max_{i=1}^l \ Ax_i - \lambda_i x_i\ _2$	5.79×10^{-4}	3.59×10^{-4}
$\ X^T X - I\ _F$	9.69×10^{-4}	3.26×10^{-4}

数値実験の結果から、すべての比較項目において、提案法が従来法に勝っていることがわかる。この理由として、 Y_l の再直交化と $[D_l]_{i,i}$ のレイリー商を利用した再定義が重要な役割を果たしていると考えられる。

最後に、本研究の成果についてまとめる。本稿では、大規模疎行列の部分固有値分解を計算するための TRL 法の改良法を提案した。改良法では、TRL 法の内部で生成された小行列 S_m の固有ベクトルに対して再直交化を行った後、リスタートを

行う。数値実験結果より、本稿の方法を用いることで、反復回数と計算時間が減少することを確認できた。以上より、本研究の目的は、達成できたと言えるだろう。

3. 代表的な研究成果

〔学会発表〕（計1件）

- [1] Masana Aoki, Masami Takata, Kinji Kimura, Yoshimasa Nakamura, Improvement of the Thick-Restart Lanczos Method in Single Precision Floating Point Arithmetic using Givens Rotation, Proceedings of International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, 2019, 149-155.