

愛知工科大学紀要

工学部・愛知工科大学自動車短期大学

第 22 卷

2024

Bulletin of Aichi University of Technology

A U T

愛知工科大学紀要 第 22 卷

目 次

研究論文

液体金属の機能化

..... 大谷 修, 西澤 孝次, 藤下 彰啓 1

1 inch サイズの自律移動型マイクロロボットの開発（国際マイクロロボットメイズコンテストカテゴリー2a 出場を目指したロボットの試作と実験）

..... 磯貝 正弘, 杉山 太一 5

音声対話システムにおけるゲシュタルトパターンマッチングによる質問種別推定

..... 古木 淳也, 實廣 貴敏 15

背景音が緊急避難メッセージの印象評価に及ぼす影響

..... 山高 正烈 22

結合自結合自己組織化臨界モデルで探る太陽フレアの統計則の起源

..... 田代 徹, 黒石 萌香 28

研究ノート

高濃度メタノール燃料使用におけるエンジン冷機始動の課題解明

..... 大平 哲也 34

拡張カルマンフィルタによる自己位置推定法の評価

..... 栗田 寛樹 37

解説・総説

有理関数のモジュロ演算を用いた定数係数線形微分方程式の微分演算子法

..... 大迫 尚行 40

電磁気学の教科書に直線電流のつくる電場の記述がないのは何故？

..... 石川 雄二郎, 石川 雄俊 47

報告

専門科目学修に向けた初年次向け数学と物理学の基礎教育の試み

..... 中谷 淳 51

Google Apps Script を活用した欠席回数通知の自動化：実装方法と学生アンケートによる評価

..... 寺井 雅人 61

留学生に対する自動車整備教育への導入教育について

..... 掛布 知仁, 巨藤 誠 68

2023 年度「電音部」と「音響同好会」, 「照明同好会」の活動報告

..... 鵜飼 達也 73

業績リスト(2024.1~2024.12)

研究論文

液体金属の機能化

大谷 修*, 西澤 孝次*, 藤下 彰啓**

(2024年9月30日受理)

Functionalization of liquid metals

Osamu OTANI*, Atsushi NISHIZAWA* and Akihiro YABUSHITA**

(Received September 30, 2024)

Abstract

In this study, we have investigated the basic characteristics of liquid metals and their functionalization. Liquid metals were prepared using gallium, indium and tin, and their properties such as electrical conductivity were evaluated. Self-healing flexible wiring was fabricated by embedding liquid metal in silicone resin. We prepared a liquid metal in which a filler with magnetic properties was dispersed and confirmed that this liquid metal could be moved freely by using a permanent magnet.

キーワード: 液体金属, 磁石, フレキシブルデバイス

Keywords: Liquid Metal, Magnet, Flexible Device

1. はじめに

金属は、その優れた機械的特性および電気伝導性や熱伝導性などの特性により、構造材料や電子部材として広く利用されている[1]。金属を望ましい形状に加工するためには、金属を溶融し、延伸やプレスなどの複雑な工程を経る必要があり、これには大量のエネルギーを要する。金属材料は弾性率が高いため、加工に際して課題が多く、新素材であるフレキシブルなソフトマテリアルやデバイスとの相性は必ずしも良好ではなかった。このような課題に対する解決策として、液体金属が注目されている。液体金属は常温に近い低融点を有し、多様な分野での応用が期待されている。

液体金属としては、水銀が広く知られているが、その毒性により用途が限定される[2]。一方、近年注目されているガリウム(Ga)ベースの液体金属は、室温での流動性、低粘度、無毒性という性質と金属の電気伝導性および熱伝導性を併せ持つため、環境にも優しい魅力的な材料である。このような特性の組み合わせにより、Gaベースの液体金属は、エレクトロニクス、ウェアラブルデバイス、ソフトロボティクス、放熱材料、化学触媒および生物医学的ヘルスケアといった多岐にわたるアプリケーションに適している。

実際に製品化されている例としては、ドイツのゲーラ

テルム・メディカル株式会社(Geratherm Medical AG)から、Gaベースの液体金属を利用した水銀フリーの体温計が販売されている[3]。また、鳳らはゲーム機に使用されるIC用放熱材として液体金属を利用している[4]。

このように、応用範囲の広いGaベースの液体金属であるが、その性質によりいくつかの制限が存在する[5]。例えば、磁性がないため磁場に反応しない。市販されている液体金属は融点や位相挙動が固定されていることが多い。また、多くの液体金属とポリマーの複合材料は液体金属をポリマー中に分散させたものであり、典型的には絶縁性を示す。さらに、粘性が低いため、デバイスからの漏洩の可能性がある。これらの課題の克服やさらなる高機能化に向けて、現在も研究開発が進められている。

例えば、Gaベースの液体金属に金属元素を添加することにより、形態、表面エネルギー、レオロジー、電気導電性および熱伝導性、化学反応性などの特性を変化させ、機能化することが可能である[5]。これにより、磁場、温度、力などの外部刺激に応答できるようになる。これらの特徴や用途に基づき、電気導電性、熱伝導性、磁気特性、触媒・エネルギー分野、バイオメディカル分野への応用が期待されている[6]。例えば、Gaベースの液体金属に鉄微粒子を添加した磁

* オムロン株式会社, 〒703-8261 岡山県岡山市中区海吉 2075

OMRON Corporation, 2075 Miyoshi, Naka-ku, Okayama 703-8261, Japan

** 愛知工科大学工学部電子ロボット工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Electronic Robot Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

性液体金属を用いたソフトロボットの開発が進められている[7].

今回、我々は Ga ベースの液体金属を利用し、エレクトロニクス分野における伸縮デバイスの検討を実施した。さらに、Ga ベースの液体金属にフィラーを加えることによる新たな機能付与についても検討を行った。具体的には、フィラーとして磁性粒子を加えることで、磁力により動作する液体金属を用いたスイッチングデバイスの開発を試みた。以下に、これらの実施内容について紹介する。

2. 実験

2.1. Ga ベース液体金属の調整

Ga, インジウム(In)とスズ(Sn)の固体を 7:2:1 の重量比でそれぞれ採取した。採取した固体をサンプル管に入れ、60°Cで加熱をしながら攪拌子を用いて混合し、金属固溶体(GaInSn)を得た。通称、ガリンスタン(Galinstan)と呼ばれている。

2.2. 磁性粒子入り液体金属(Magenet@GaInSn)の調整

2.1.で調整した液体金属と磁性粒子をそれぞれ 10:1 の重量比でサンプル管に採取し、10 分間激しく攪拌し、液体金属中に磁性粒子を分散させた。

2.3. フレキシブルデバイスの作製

フレキシブルデバイスは 2 段階のシリコーン型を作製することで得た。はじめに、3×5 cm のポリスチレン容器に、液体金属を流し込みたい部分にポリエチレンの型を配置して、2 液性シリコーン樹脂を流し込んだ。2 液性シリコーン樹脂が硬化後に、ポリエチレンの型を取り外し、その部分に液体金属を流し込んだ。さらに上部に 2 液性シリコーン樹脂を塗布し、1 日間放置後に伸

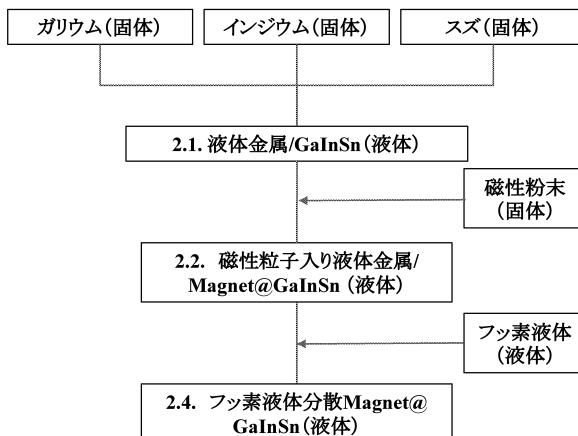


Fig. 1 Flowchart of experimental procedure

縮可能なデバイス配線を得た。

2.4. フッ素含有液体金属の作製

2.2.で調整した Magenet@ GaInSn をフッ素溶媒に分散させて、フッ素液体中に自由に液体金属が浮遊する混合溶媒を作製した。

3. 結果と考察

3.1. GaInSn の作製とその特性

In(融点 156.6°C), Sn(231.9°C), および Ga(29.76°C)は、常温において固体である。これらの金属を溶融混合すると、共晶点において液体となることが広く知られている[8]。

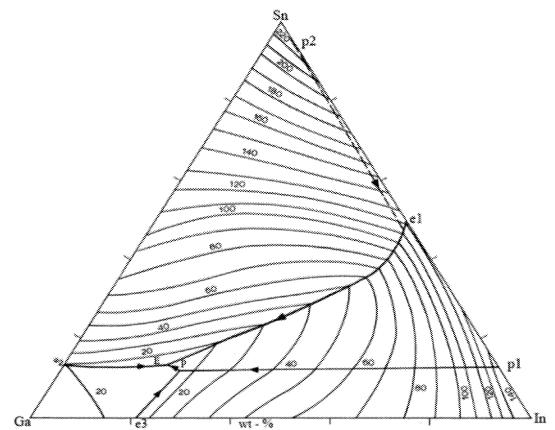


Fig. 2 Eutectic gallium-indium-tin phase diagram [8]

これら 3 種類の金属をサンプル管に入れ、60°Cに加熱後、スターラーで混合した。しばらく混合を続けると、これらの金属は液体に変化した(図 3(d))。その後、この溶液を室温に戻し、1 年以上放置しても 3 つの元素が相分離することなく、液体の状態を保つことが確認された。

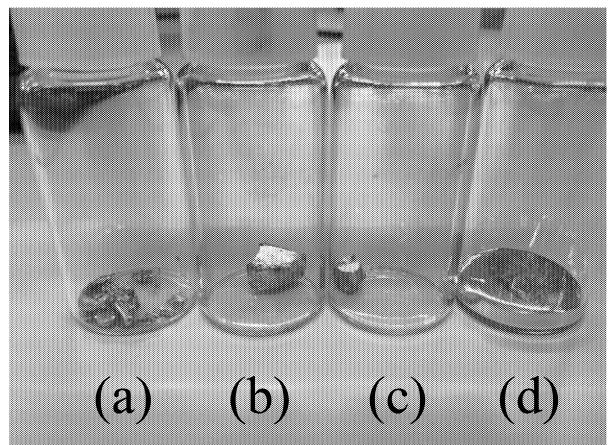


Fig. 3 Gallium (a), Indium (b), Tin (c) and GaInSn (d)

3.2. フレキシブルデバイスの作製とその特性

シリコーン樹脂中に GaInSn を流し込んだフレキシブルデバイスの写真を図 4 に示す。GaInSn はシリコーン樹脂中に埋め込まれている。4 端子法により抵抗を測定したところ、 $10^{-5}\Omega$ 以下であることが確認された。また、シリコーン中の配線は液体金属であるため、折り曲げても断線しないという利点がある。言い換えれば、自己修復性を有するフレキシブルデバイスと言うことができる。

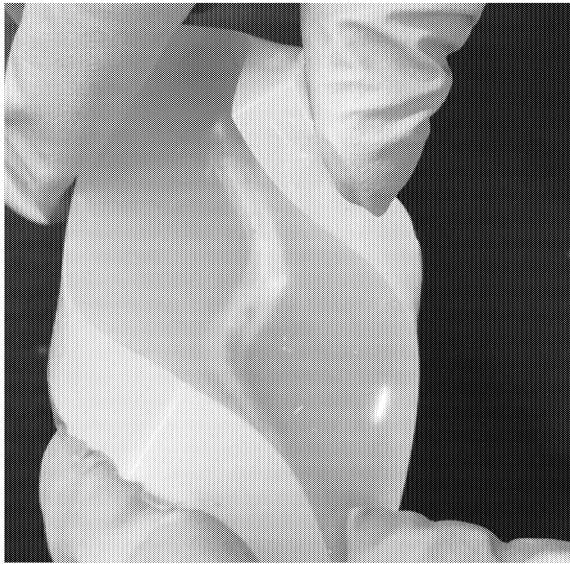


Fig. 4 Flexible device with GaInSn embedded in silicon resin

3.3. Magnet@GaInSn の作製とその特性

次に、磁性粒子を GaInSn に混合した。目視による観察では、液体中に磁性粒子が分散している様子が確認された。さらに詳細な観察を行うため、SEM を用いて GaInSn の内部状態を観察した(図 5)。その結果、GaInSn 中に磁性粒子が分散している様子が確認された(図 5(b))。また、4 端子法による抵抗率測定の結果、磁性粒子を分散させる前と同様に $10^{-5}\Omega$ 以下であることが確認された (Table 1)。

Table 1 Resistance of each sample

サンプル	抵抗
GaInSn	$< 10^{-5}$
Magnet@GaInSn	$< 10^{-5}$

続いて、Magnet@GaInSn の動的特性試験を実施した。しかし、Magnet@GaInSn に含まれる Ga がガラスに対して高いぬれ性を示したため、Magnet@GaInSn がガラスに付着してしまった。そこで、ぬれ性が低いフッ素溶液を用い、GaInSn とともに Magnet@GaInSn を

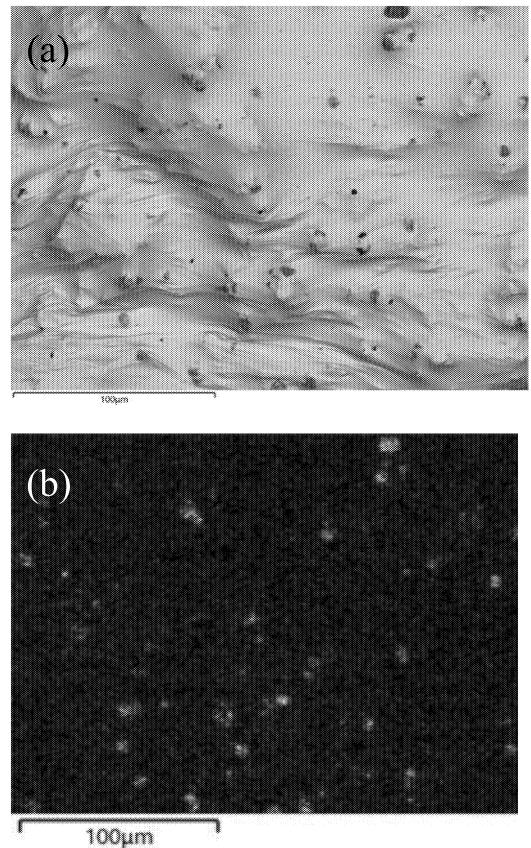


Fig. 5 SEM-EDS image of Magnet@GaInSn (a) and FeK α (b)

サンプル管に入れ、その動的特性を以下の手順で確認した。

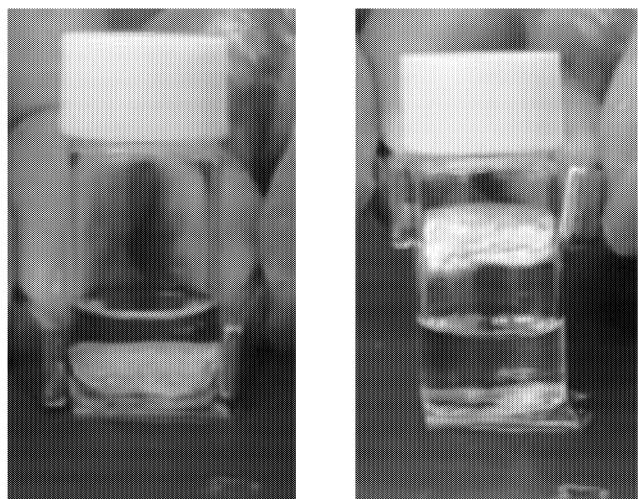
サンプル管の両端に永久磁石を配置し、下部から上部へ磁石を移動させたところ、磁石とともに Magnet@GaInSn が移動する様子が確認された(図 6(a))。その後、磁石を取り除くと Magnet@GaInSn は元の位置に戻った。この結果、磁性により Magnet@GaInSn を自由に動かすことに成功した。

この結果は、GaInSn 中の磁性フィラーが磁場によって配列し、GaInSn とともに移動したことを示唆している(図 6(b))。今後、電子顕微鏡等を用いて詳細を明らかにする予定である。また、基礎物性のデータを取得し、この素材の応用展開を検討していく。特に、ソフトロボット開発のための材料への適用を考えている。

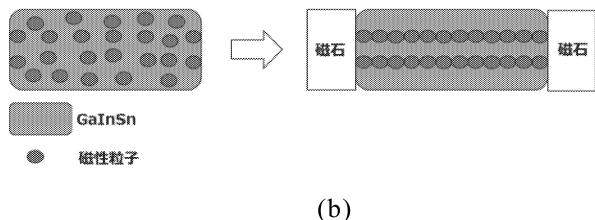
4. おわりに

今回、GaInSn の基本的な物性の評価と、それを用いた機能化について検討した。
以下に主要な成果を示す。

- Ga, In, および Sn を用いて液体金属を作製し、その導電特性などの基本特性を評価した。



Magnetic field (bottom) Magnetic field (top)
(a)



(b)

Fig. 6 Magnet@ GaInSn migration when a magnetic field is applied (a). Schematic diagram of magnetic particles aligned by magnetic field (b)

- シリコーン樹脂に GaInSn を埋め込むことで、修復可能なフレキシブル配線を作製した。
- GaInSn 中に磁性を持つフィラーを混合した液体を作製し、磁石を用いることで Magnet@GaInSn を自由に移動させることができることを確認した。

今後は、上記の材料の基本物性の取得とともに、さらなる機能化の実現を目指す。

参考文献

- [1] 橋口隆吉, "金属学ハンドブック," 朝倉書店, 1958.
- [2] L. E. Murr, Interfacial Phenomena in Metals and Alloys, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Massachusetts, p.167, 1975.
- [3] Geratherm Group HP, (参照日:2024年7月23日, <https://www.geratherm.com/>).
- [4] 根津 稔, "PS5 に覚悟の「液体金属」採用、真の狙いはコスト削減," 日経 XTech, (参照日:2024年7月23日, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/04707/>).

[5] Y. Peng, Y. Xin, J. Zhang, M. D. Dickey, Q. Li, "Functional heterophasic liquid metals," Responsive Materials, vol.1, issue 1, e20230010, 2023.

[6] T. Daeneke, K. Khoshmanesh, N. Mahmood, I. A. de Castro, D. Esrafilzadeh, S. J. Barrow, M. D. Dickey, K. Kalantar-zadeh, "Liquid metals: fundamentals and applications in chemistry." Chemical Society Reviews, vol.47, issue 11, pp.4073-4111, 2018.

[7] Y. Zhang, S. Jiang, Y. Hu, T. Wu, Y. Zhang, H. Li, An Li, Y. Zhang, H. Wu, Y. Ding, E. Li, J. Li, D. Wu, Y. Song, J. Chu, "Reconfigurable Magnetic Liquid Metal Robot for High-Performance Droplet Manipulation," Nano Letters, vol. 22, issue 7, pp.2923-2933, 2022.

[8] G. Bo, L. Ren, X. Xu, Y. Du, S. Dou, "Recent progress on liquid metals and their applications," Advances in Physics: X, vol. 3, issue 1, Article: 1446359, 2018.

研究論文

1inch サイズの自律移動型マイクロロボットの開発 (国際マイクロロボットメイズコンテストカテゴリー2a 出場を 目指したロボットの試作と実験)

磯貝 正弘*, 杉山 太一*

(2024年9月30日受理)

Development of 1inch size Autonomous Moving Microrobot (Fabrication of and Experiments on the Prototype Microrobots to Participate in the International Microrobot Maze Contest Category 2a)

Masahiro ISOGAI* and Taichi SUGIYAMA*

(Received September 30, 2024)

Abstract

Recently, there have been a considerable number of studies on microrobots, which can enter confined spaces that are not accessible by humans or larger robots. Moreover, yearly contests have been held in order to develop microrobot technologies. These activities have increased the significance of microrobots. Here, in this study, we fabricate and performe the experiments concerning the prototype microrobots that can move autonomously along the test course to participate in the International Microrobot Maze Contest Category 2a. Our aim is to fabricate the 1inch³ size microrobot referring the microrobot that was developed before at the authors' laboratory and had a size of 10cm×10cm×7cm. The principle of the moving microrobot proposed is that the sensors, which are mounted on the microrobot, can measure the difference between the microrobot and the wall of the course, and the microrobot can turn at the corner of the course detecting it. We use the photo reflectors as the sensors. We performed some experiments to confirm the effectiveness of the microrobot proposed. Unfortunately, the experimental results show that the microrobot fabricated in this study has some problems and thus is incapable of running through the test course of the contest.

キーワード:マイクロロボット, コンテスト, 自律移動型, フォトリフレクタ

Keywords : Microrobot, Contest, Autonomous moving type, Photo reflector

1. はじめに

マイクロロボットは、大きさが1mm以下のロボット、または、 μm 単位の物体を扱えるロボットを指していることが多い。しかし、現状では単に小さいロボットを総称してマイクロロボットと呼ばれている。

マイクロという言葉が小さいことを表すため、具体的な大きさによってさらに分類されている。ナノロボットは、大きさが1 μm 以下のロボットであるか、または1000nm未満の大きさの物体を扱えるロボットである。また、ミリロボットは大きさが1cm以下のロボット、ミニロボットは大きさが10cm以下、小型ロボットは大きさが100cm以

下とされる。

マイクロロボットは体内に薬を届けたり、環境毒素を浄化したりするなど、ヒトが直接触れることが難しい特定の仕事をすることが期待されている。

マイクロロボットの最も重要な特徴の一つは小ささであり、これによって限られた場所で機能し、手の届きにくい場所にアクセスすることができる。ロボットは、金属、ポリマー、DNAなどのさまざまな材料から製作されている。

著者らの研究室では、これまでに 10cm×10cm×7cm のサイズの完全自律型ロボットの製作がされており、テストコースを完走することができている[1]。本研

* 愛知工科大学工学部電子ロボット工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Electronic Robot Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihamasama-cho, Gamagori-shii
443-0047, Japan

究ではこの方式を利用して体積が 1inch³以内になるように縮小し、毎年名古屋大学で開催される国際マイクロロボットマイズコンテストのカテゴリー2a の規格に対応させたマイクロロボットを製作する。しかし、近年はコロナ禍の影響でコンテストが開催されていないため過去に同研究室に所属していた学生が製作したカテゴリー2 のコースを用いたテスト走行の完走を目的とする。

本研究では、試作機を3台製作し、試作3号機を用いてコース走行の実験を行った。実験ではコースを完走することができなかったため、試作機の問題点と今後の課題を示す。

2. ロボットの動作原理

図 1 にカテゴリー2a のコースレイアウトを示す[2]。コースの外周を走行する場合は1つのセンサがコースの壁を検出し、2つのモータを駆動させて直進走行させる。本研究ではセンサとしてフォトリフレクタを使用した。フォトリフレクタは発光素子から照射した赤外線光が検出対象に反射し、反射した赤外線光を受光素子が検出する原理となっている。そのため、プログラムで閾値を設定する。コースの壁に囲まれた部分を走行する場合は、2つのセンサが同時に左右両側のコースの壁を検出して、2つのモータを駆動させて直進走行を行う。図 2 にモータと車輪の配置図を示す。センサを動作させるタイミングでコースの壁を検出できない場合は機体を停止させる。

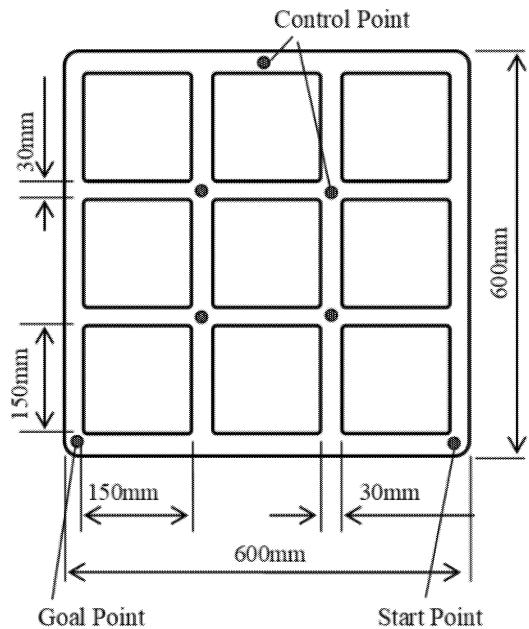


Fig.1 Course layout of category 2a.

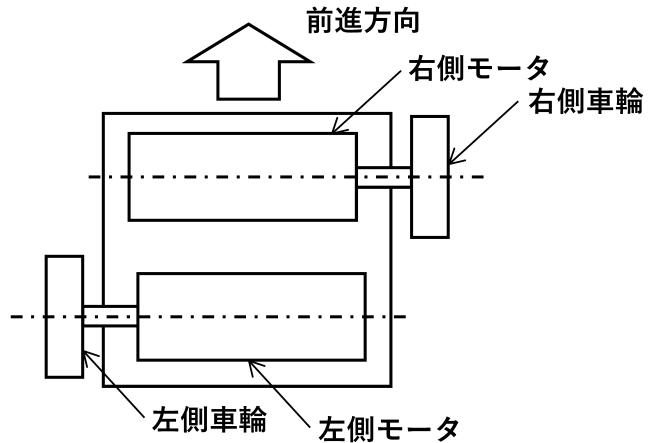


Fig.2 Layout of the motors and the wheels.

機体の方向転回に関しては回転のポイントごとにセンサでコースの壁の有無を検出させ、コースの壁がないことを確認したとき、1つのモータを動作させて回転動作を行う。テストコースの寸法違いやセンサの動作タイミングについてはプログラム上で調整を行う。

コースの走行方法は以下のとおりである。

- Start Point をスタート位置としてスタートさせ、Control Point を経由させるように走行させる。
- Start Point から Goal Point までの到達時間ができるだけ短くなるようにして走行タイムを競う。

3. 予備実験

3.1 実験目的

機体製作ではマイコンやモータ等の部品に直接はんだ付けを行うため、機体完成後の回路調整が困難である。そのため、本予備実験では機体の製作を始める準備として、ブレッドボード上で実装予定の回路を組み立て動作確認を行った。

3.2 実験回路

回路を製作する前にモータドライバをDIP 変換基板にはんだ付けを行った。図 3 の回路は文献[3]を参考にして製作した。図 4 にブレッドボード上で製作した回路の写真を示す。

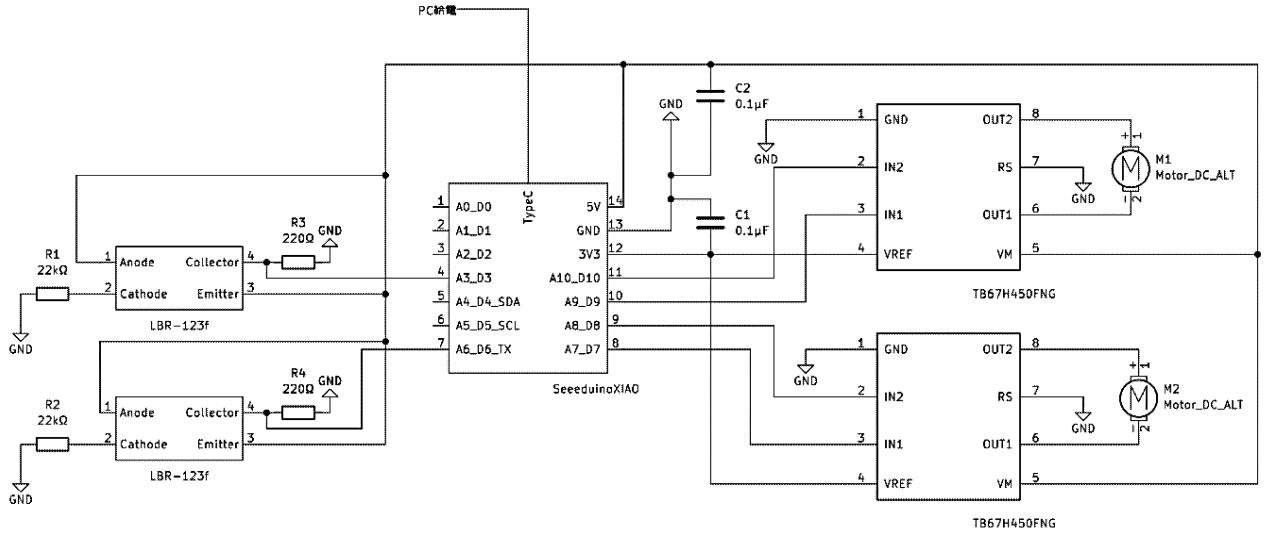


Fig.3 Electronic circuit diagram for a preliminary experiment.

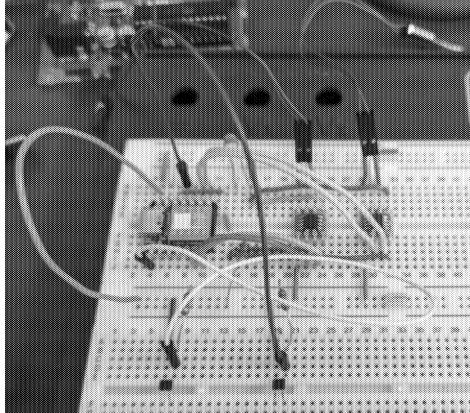


Fig.4 Photograph of the electronic circuit fabricated on the bread board.

3.3 実験方法

回路上に設置したフォトリフレクタに物体を接近させ、パソコン上のシリアルモニタでフォトリフレクタの数値が変化することを確認した。また、センサごとに異なったモータの回転の方向がプログラムされているため、モータの正逆転の確認も行った。プログラムは文献[4]を参考にして作成した。

3.4 実験結果

パソコンからマイコン電源を供給した場合、完成した回路のフォトリフレクタに物体を接近させる前後で図5のように、フォトリフレクタの出力電圧が変化した。フォトリフレクタに物体を接近させる前は、出力電圧の平均値が0.062Vであり、接近させた後は、4.6Vであった。このことから、フォトリフレクタにより物体を認識できることが確認できた。モータもセンサごとに正常動作することを確認した。

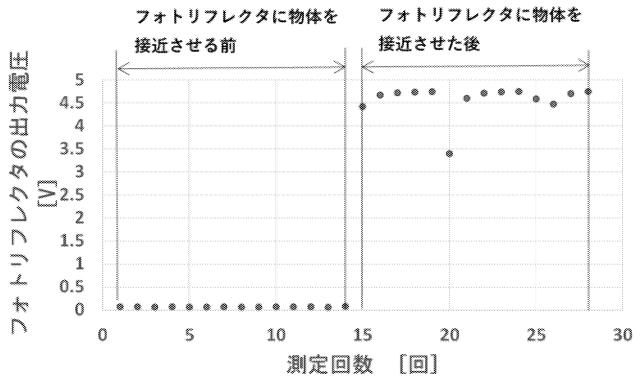


Fig.5 Output signals from the photo reflector.

4. 試作機の製作

4.1 1号機の製作

4.1.1 回路基板の製作

予備実験ではパソコンから電源を供給していたが、本回路ではリチウムイオンポリマー電池から電源を供給している。それ以外は、予備実験の回路と同じである。次の手順で回路基板を製作した。

- (1) モータドライバをDIP変換基板にはんだ付けしたものを2個製作した。
- (2) ユニバーサル基板の穴の数が8個×4個の大きさとなるように切断した。
- (3) (1), (2)で製作したユニバーサル基板とモータドライバを接着剤で接着した。
- (4) (3)で製作した基板に抵抗、コンデンサ、フォトリフレクタを図6のように配置してはんだ付けを行った。
- (5) 基板裏を電子ワイヤーとスズメッキ線で図7のように配線した。電子ワイヤーははんだ付け部分

の被覆を外して使用した。

- (6) マイコンと接続する端子(モータドライバの IN1, IN2, 5V, 3.3V, GND)と、リチウムイオンポリマー電池と接続する5VとGNDの端子から電子ワイヤーを伸ばしておいた。
- (7) 1号機回路基板の完成である。

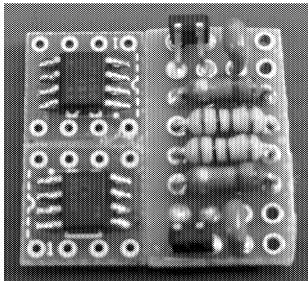


Fig.6 Fabricated electronic circuit of 1st prototype (Top side).

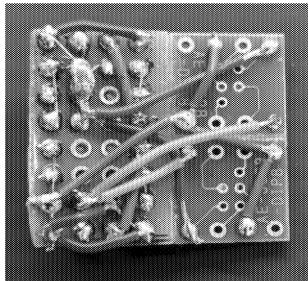


Fig.7 Fabricated electronic circuit of 1st prototype (Reverse side).

4.1.2 機体の組み立て

- (1) パソコンとマイコン(Seeeduino XIAO)に予備実験と同様のプログラムを書き込んだ。
- (2) 回路基板から伸ばしておいた電子ワイヤーをマイコンの上に基板が載るようにはんだ付けを行った。
- (3) モータのシャフトの部分に3Dプリンタで作成したホイールを接着剤で取り付けた。このとき、シャフトの根元内部に接着剤が入り込まないように注意した。これを2個製作した。
- (4) モータ2個をそれぞれのモータドライバの OUT1, OUT2に接続した。
- (5) ホイールが固定されていた端材を軸とし、(3)で製作したモータをこの軸に取り付けた。
- (6) モータの軸をマイコンの裏側に固定した。
- (7) 基板の上に電池を載せ、基板の5VとGNDを電池に接続した。
- (8) 図8に完成した試作1号機の写真を示す。

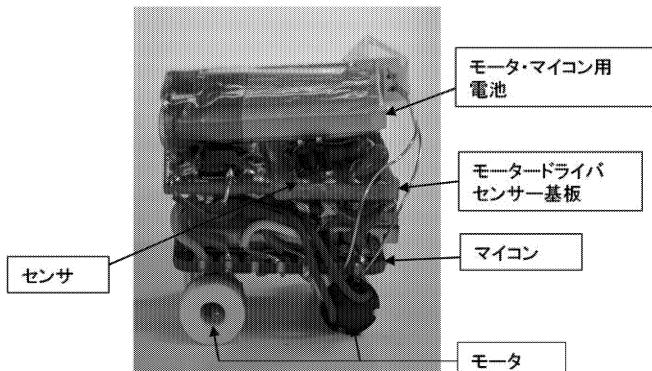


Fig.8 Completed 1st prototype micro-robot.

4.1.3 完成した機体のまとめ

機体完成後のプログラムの改変が容易なためとArduino言語での開発ができるため、今回マイコンにSeeed Studio(シードスタジオ)社の Seeeduino XIAOを採用した。電源については大きさとして乾電池を搭載することは難しく、ボタン電池も出力電圧の関係で複数個必要になり、サイズが大きくなってしまうと考えた。そのため、様々な大きさのものが市販されている点や再利用が可能なことを考慮してリチウムイオンポリマー電池を今回電源として選定した。

1号機に搭載したリチウムイオンポリマー電池で電源供給を行ったところ、マイコンの動作確認ランプを点灯させることができたが、センサに物体を接近させてもモータを回転させることができなかった。パソコンから機体に電源を供給できてもモータを正常動作をさせることができず、シリアルモニタではセンサ値が1023で固定されていたため、回路の配線の誤り、はんだ付け不良、はんだ付けの短絡など、回路に問題があると考える。完成した機体サイズは縦×横×高さが23mm×24mm×27mmとなっており、1inch³の大きさに収めることができなかった。これは、基板の裏側の配線が想定していたよりも複雑化してしまい、電子ワイヤーが重なる部分が多くなり、厚さが肥大化してしまったのが原因であると考える。

4.2 2号機の製作

4.2.1 回路基板の製作

1号機の回路との変更点は、コンデンサを除去したこと、スライドスイッチを搭載したこと、マイコンとモータドライバのそれぞれの電源にリチウムイオンポリマー電池を使用したことである。次の手順で回路基板を製作した。

- (1) モータドライバをDIP変換基板にはんだ付けしたものを作成した。
- (2) 穴の数が4個×4個の大きさのユニバーサル基板を2個と(1)で製作したモータドライバ2個を接着した。
- (3) (2)で製作した基板に抵抗、スライドスイッチ、フォトリフレクタを図9のように配置してはんだ付けを行った。
- (4) 基板裏をスズメッキ線とポリウレタン線で図10のように配線した。ポリウレタン線は配線の前にはんだで被覆を除去しておいた。
- (5) スライドスイッチの5V端子と、モータドライバのIN1, IN2, GNDの端子と、マイコンとを接続するためにポリウレタン線を伸ばしておいた。

- (6) マイコンの端子と基板のはんだ部分の接触を防ぐため、基板の裏配線にカプトンテープを貼り付け絶縁させた。
- (7) 2号機回路基板の完成である。

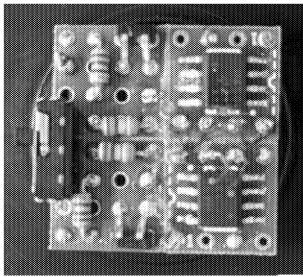


Fig.9 Fabricated electronic circuit of 2nd prototype (Top side).

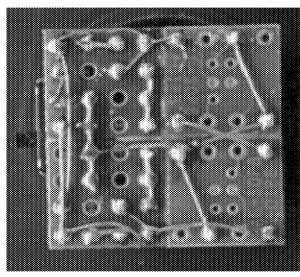


Fig.10 Fabricated electronic circuit of 2nd prototype (Reverse side).

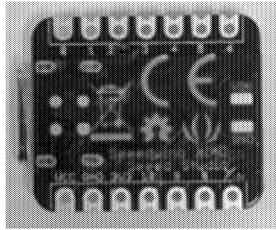


Fig.11 Microcontroller supported by kapton tape.

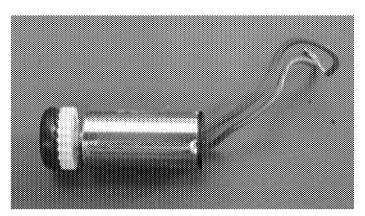


Fig.12 Motor with a gear and an O ring.

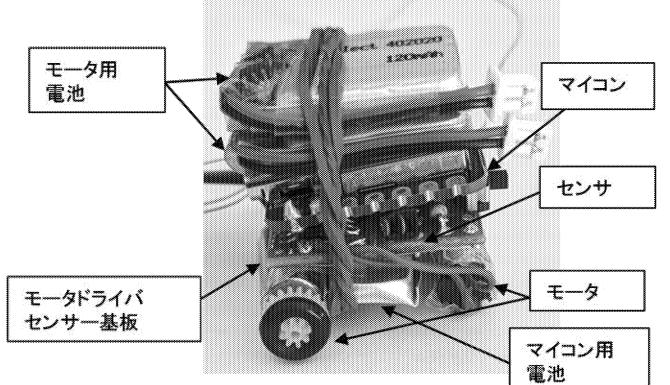


Fig.13 Completed 2nd prototype microrobot.

4.2.2 機体の組み立て

- (1) 4.2.1 の回路基板の製作で製作した回路基板とマイコンの Seeeduino XIAO をブレッドボード上で接続して基板の動作確認を行った。スズメッキ線は細いためワニロクリップ等で仮接続した。
- (2) 基板の正常動作の確認後パソコンとマイコンを接続し予備実験と同様のプログラムを書き込んだ。
- (3) 回路基板から伸ばしておいたポリウレタン線を基板の上にマイコンが載るようにはんだ付けを行った。この際、マイコンの背面に設置されている電力供給用の Vin と GND 端子と基板とが接触しないように、カプトンテープを貼り付けて保護した。図 11 にカプトンテープで保護したマイコンの写真を示す。
- (4) モータのシャフトにギヤを取り付け、滑り止めとしてギヤの寸法に合うような O リングを図 12 のように取り付けた。このとき、シャフトの根元内部に接着剤が入り込まないように注意した。これを2個製作した。
- (5) モータ2個をそれぞれのモータドライバの OUT1, OUT2 に接続した。
- (6) ホイールが固定されていた端材を軸とし、(4)で製作したモータをこの軸に取り付けた。
- (7) モータ2個の間にマイコン駆動用のリチウムイオンポリマー電池を設置した。
- (8) マイコンの上にリチウムイオンポリマー電池を載せ、リチウムイオンポリマー電池、マイコン、基板を固定した。
- (9) 図 13 に完成した試作2号機の写真を示す。

4.2.3 完成した機体のまとめ

1号機では配線を電子ワイヤーで行っていたが、機体の厚さの縮小や配線の容易さを考慮し、配線材料をポリウレタン線に変更した。1号機では機体の電源を基板からスズメッキ線で直接リチウムイオンポリマー電池に接続して、電源供給を行っていたが、2号機ではスライドスイッチを用いて機体電源の ON/OFF 制御を可能とした。また、電圧不足を補うため、電源は、モータドライバのそれぞれ駆動用に 120mAh のリチウムイオンポリマー電池、マイコン動作用に 40mAh のリチウムイオンポリマー電池を用いた。ノイズ除去用に 0.1 μF のコンデンサを2個搭載していたが、回路を簡素化するために2号機には搭載しなかった。抵抗もスライドスイッチのスペースを確保するため 1/6W の抵抗を用いた。

それぞれのリチウムイオンポリマー電池とマイコン、モータドライバを接続したとき、マイコンの確認用電源ランプを点灯させることができた。また、スライドスイッチを OFF にしたときはセンサに物体を接近させてもモータが回転せず、スライドスイッチを ON にしたときにセンサに物体を接近させるとモータが回転したため回路が正常動作していることが確認できた。しかし、モータの回転速度が低く機体の走行速度はデューティー比 100%で 2.35cm/sec となり、非常に低速であった。これは、モータドライバの推奨電圧が 4.5V に対してリチウムイオンポリマー電池の出力電圧が 3.7~4.0V 程度と

推奨電圧を下回っていることが原因であると考える。機体の大きさに関してはポリウレタン線を使用することにより回路の厚さは縮小することができたが、リチウムイオンポリマー電池を2個に増加させたため機体の高さが25.5mmとなり、1inchに収めることができなかった。機体の全体の大きさは、縦×横×高さが23.5mm×23.5mm×25.5mmとなった。

4.3 3号機の製作

4.3.1 回路基板の製作

2号機からの変更点は、推奨電圧が低い(0~11V)モータドライバを採用した点である。次の手順で回路基板を製作した。

- (1) 穴の数が4個×4個の大きさのユニバーサル基板2個とモータドライバ基板を接着した。
- (2) 製作した基板に抵抗、スライドスイッチ、フォトリフレクタを図14のように配置してはんだ付けを行った。
- (3) 基板裏をスズメッキ線とポリウレタン線で図15のように配線した。ポリウレタン線は配線の前にはんだで、はんだ付け部分の被覆を除去しておいた。
- (4) 基板の5VとGNDの端子にJST2pinコネクタ(電池接続用メス型コネクタ)を接続し、モータドライバの図16の部分に接着剤で取り付けた。
- (5) スライドスイッチの5V端子、モータドライバのIN1, IN2, GNDの端子とマイコンとの接続用のポリウレタン線を伸ばしておいた。
- (6) マイコンの端子と基板のはんだ部分の接触を防ぐため、基板の裏配線とモータドライバにカプトンテープを貼り付けて絶縁させた。
- (7) 3号機回路基板の完成である。

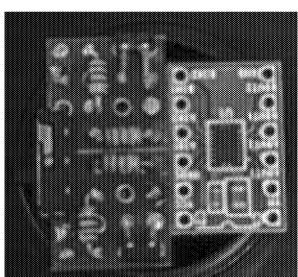


Fig.14 Fabricated electronic circuit of 3rd prototype (Top side).

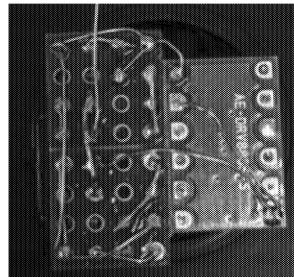


Fig.15 Fabricated electronic circuit of 3rd prototype (Reverse side).

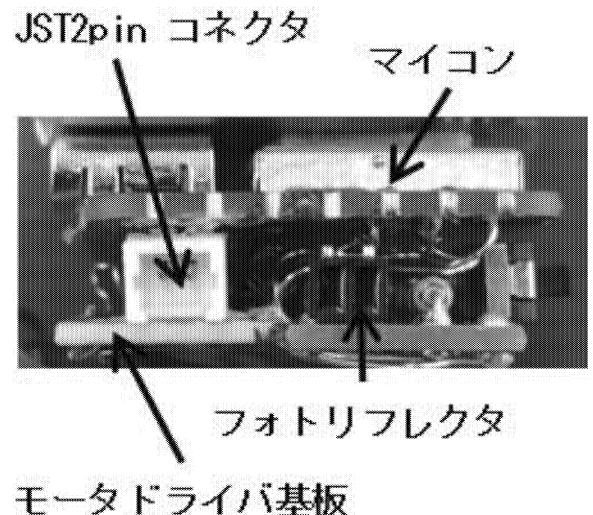


Fig.16 JST2pin conector alignment.

4.3.2 機体の組み立て

- (1) 4.3.1回路基板の製作で製作した回路基板とマイコンのSeeeduino XIAOをブレッドボード上で接続して基板の動作確認を行った。ポリウレタン線は細いためワニロクリップ等で接続した。
- (2) 基板の正常動作の確認後、パソコンとマイコンを接続して予備実験と同様のプログラムを書き込んだ。
- (3) 回路基板から伸ばしておいたポリウレタン線を基板の上にマイコンに載るようにはんだ付けを行った。この際、マイコンの背面に電力供給用のVinとGND端子があるため基板との接触を防ぐためカプトンテープで保護した。
- (4) ギヤに滑り止めとしてギヤに合うようなOリングを取り付けた。このとき、シャフトの根元内部に接着剤が入り込まないように注意してモータのシャフトをギヤに取り付けた。これを2個製作した。
- (5)-(8) 本工程は2号機と同様である。
- (9) 図18に完成した試作3号機の写真を示す。

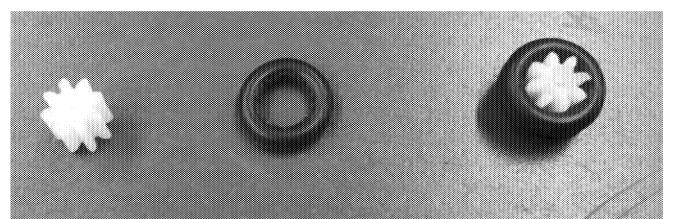


Fig.17 Gears and O rings.

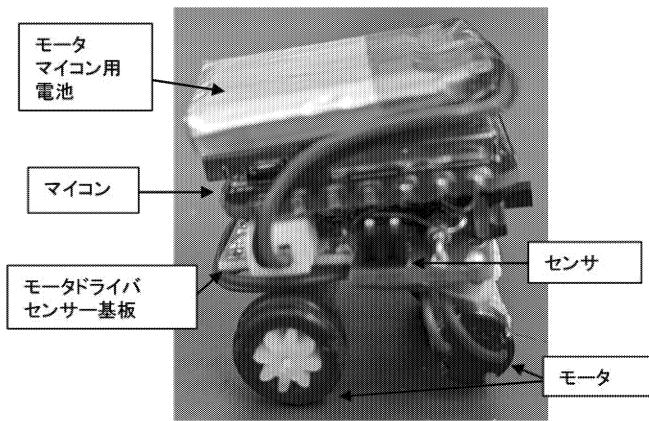


Fig.18 Completed 3rd prototype microrobot.

4.3.3 完成した機体のまとめ

2号機の電源をパソコンから供給すると、モータの回転速度が非常に速くなることがわかったため、モータドライバの推奨電圧がより低いもの(0~11V)を採用することにした。今回採用したモータドライバはデュアルチャネルのため、1個のモータドライバで2個のモータ制御が可能となっておりモータドライバの数を削減することができた。

3号機で採用したモータドライバが正常動作すると、1個のリチウムイオンポリマー電池でマイコンとモータドライバの電源を貯えることとなり、機体の高さを大幅に縮小することができた。

JST2pin コネクタを基板に搭載しリチウムイオンポリマー電池のケーブルを用いてマイコンと回路への電源供給を行った。これにより、機体外にリチウムイオンポリマー電池接続用のスズメッキ線が飛び出すことを防ぐことができた。

リチウムイオンポリマー電池のケーブルコネクタを基板に取り付けたJST2pinコネクタに接続しライドスイッチで機体のON/OFFを制御した。OFFの状態ではマイコンの電源が入らないためセンサは反応せず、ONの状態で物体をセンサに接近させるとモータが回転することを確認できた。3号機で使用したモータドライバは電源電圧が0~11Vとなっており、リチウムイオンポリマー電池の電圧でも動作が可能になり、推奨電圧が3.7Vのモータの性能を十分に発揮することができた。

動作確認中にセンサから物体を離してもモータが停止しない不安定な現象が多発した。原因はセンサの足がマイコンの端子に接触してしまうことであったことがわかった。マイコンの端子部分をカプトンテープで絶縁することで不安定性は改善した。

機体の大きさは、縦×横×高さが22.5mm×24.5mm×25mmとなり、1辺の長さを1inch(約25.4mm)以内にして、体積を1inch³以内に収めることができた。

4.4 まとめ

製作した機体それぞれの特徴と改善点、結果を表1に示す。

Table 1 Features, improvement and results of 1st, 2nd and 3rd prototype microrobots.

	特徴	改善点 / 結果
1号機	・ノイズ除去用コンデンサー	・サイズ：23mm×24mm×27mm ・動作しない←電圧不足
2号機	・リチウムイオンポリマー電池3個 ・ポリウレタン線による配線 ・ライドスイッチによる電源制御 ・モーターにOリング取付	・サイズ：23.5mm×23.5mm×25.5mm ・動作速度が低速 ・モータドライバの最低必要電圧がリチウムイオンポリマー電池の電圧と同じ
3号機	・モータドライバの推奨電圧が1,2号機のものより低電圧なものに変更 ・JST2pinコネクタでリチウムイオンポリマー電池と基板に直接接続可能	・サイズ：22.5mm×24.5mm×25mm ・動作速度が高速 ・リチウムイオンポリマー電池1個で動作可能

Table 2 Duty ratio and running time.

デューティー比 [%] (走行距離)	完走時間 [sec]									
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
10% (10cm)	3.58	3.32	3.64	3.44	3.41	3.46	3.61	3.57	3.54	3.20
20% (50cm)	1.40	1.51	1.43	1.37	1.44	1.42	1.5	1.41	1.43	1.39
30% (50cm)	0.87	×	1.12	0.92	0.99	0.83	0.79	×	0.91	×
40% (50cm)	×	×	×	0.73	×	×	×	×	×	×
50%～ (50cm)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Table 3 Running velocity and success ratio of complete running.

デューティー比 [%](走行距離)	平均完走時間 [sec]	完走回数 [回]	平均速度 [cm/sec]	完走成功率 [%]
10% (10cm)	3.48	10	2.87	100
20% (50cm)	1.43	10	34.97	100
30% (50cm)	0.919	7	54.41	70
40% (50cm)	0.73	1	63.29	10
50%～ (50cm)	記録なし	0	記録なし	0

5. 実験

5.1 PWM によるモータ制御

5.1.1 実験目的

本研究で使用したマイコンの Seeeduino XIAO は PWM 制御が可能となっており、モータのデューティー比を変化させることによってモータの回転速度が変化し、機体の走行速度を調整することができる。モータのデューティー比と走行速度との関係、走行安定性について調べることを実験の目的とする。

5.1.2 実験方法

本研究では試作3号機を用いて PWM による走行実験を行った。テストコースの隙間を埋めた直線コースを作成した。デューティー比を 100%まで 10%ごとに、変化させた直進走行のプログラムを作成した。各デューティー比で 10 回直線コースを走行させ、完走にかかる時間を計測し、完走した回数を記録して、走行速度と完走成功率を求めた。

5.1.3 実験結果

表 2 にデューティー比と完走時間とを示す。表中の「×」は完走できなかったことを示す。デューティー比が 40%以上の場合には、ほとんど完走することができなかった。40%の場合には、10 回中 1 回しか完走することができなかった。

表 3 に平均速度と平均完走時間を示す。表 3 からデューティー比が 20%以下のときは一度も機体が転倒することがなく、10 回すべて完走することができた。10%では速度が低かったため走行距離を 10cm として計測した。デューティー比が 30%のときには 70%の確率で完走し、デューティー比が 40%のときには 10%の確率しか完走することができなかつた。デューティー比が 50%以上のときには一度も完走することができず、機体がコース面に接触した瞬間に横転してしまつた。

図 19 にデューティー比と走行速度、完走成功率の関係を表したグラフを示す。デューティー比が大きくなるにしたがって、走行速度は速くなるが、完走成功率が低くなることがわかった。成功率を 100%に維持しようとすると、デューティー比を 20%以下にしなければならず、このときの走行速度は 35cm/sec であることがわかつた。

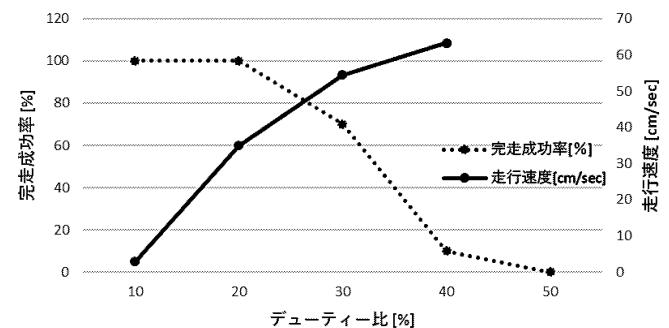


Fig.19 Relationship between duty ratio, running time, and success ratio of running completion.

5.1.4 考察

デューティー比を大きくすると、走行速度が速くなるが、完走成功率が低くなってしまうことがわかった。これは、デューティー比を大きくすると、発進時に急激にモータに電流が流れるために加速度が大きくなり、転倒してしまうからだと考える。そのため、今後の課題として、発進時と停止時にデューティー比を調整して加速度が大きくならないように制御することが必要である。

5.2 テストコース走行実験

5.2.1 実験目的

国際マイクロロボットマイズコンテストのカテゴリー2aのコースを完走させることが最終目的である。今回は、過去の著者らの研究室の卒業研究生が製作したコンテストを模したテストコースを用いて実験を行う。

5.2.2 カテゴリー2a の競技の概要

図 20 に今回実験に使用したテストコースの写真を示す。図 20 の右下の Start Point からスタートし、コース内の Control Point 5か所を通過した後、Goal Point に到達した時間で競う。ロボットのサイズは $25.4 \times 25.4 \times 25.4$ mm (アンテナやその他のインターフェースは寸法に含まれない) である。完全自律型のロボットの競技である。

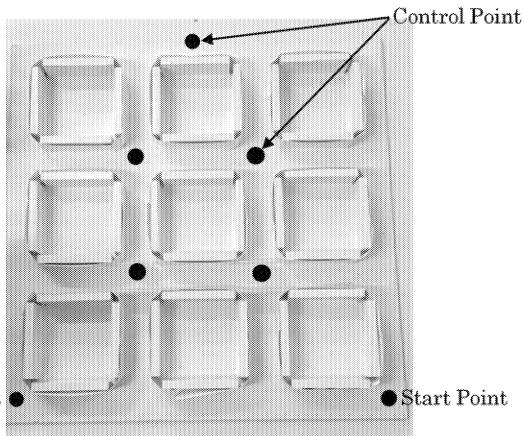


Fig.20 Test course.

5.2.3 実験方法

- (1) Start Point の位置には壁がないため、初めにスライドスイッチを ON にした後 0.5 秒間前進させ、右側のセンサでコースの壁を検知できる位置まで到達させた。
- (2) 右側のセンサがコースの壁を検出した後、右側のセンサが反応しなくなる位置まで前進させた後、 90° 機体を右回転させた。
- (3) 10 秒間前進させ左右両側のセンサが反応しないことを確認したら 90° 左回転させた。

- (4) 左側のセンサが反応しなくなるまで前進させ、反応しなくなったら 90° 左回転させた。
- (5) 10 秒間前進させ左右両側のセンサが反応しないことを確認したら 90° 右回転させて 2 秒間前進させた。

5.2.4 実験結果

PWM の実験結果から機体を停止させる際の横転を避けるため、デューティー比を 16 %にしてモータを回転させた。機体が直線的でなく弧を描くような走行になってしまった。様々なデューティー比のプログラムで走行させたが第 1 コーナーを回転した後に機体が壁に寄ってしまった。その結果、直線的に走行することが困難となり、機体が停止してしまったためコースを完走することができなかった。

5.2.5 考察

プログラムで左右のモータのデューティー比を調整し、機体が旋回してしまう方向のモータのデューティー比を増加させ、直進性が向上するように試みたが結果は変わらず、直進的ではなく弧を描くような走行となってしまった。機体の直進性が悪い原因として、モータの固定軸が不安定な状態であったことが考えられる。そのため、左右のモータへ均等な重量がかからず、一方のホイールが浮いてしまい空転していると考えた。解決策として、3D プリンタでモータの固定部品を製作し、左右のモータが一定した同じ角度と高さを保てるようになることが考えられる。

6. おわりに

フォトリフレクタを 2 個搭載した、モータ駆動型の機体を体積が 1inch³ 以内の大きさで製作することができた。しかし、直進性が悪くコースを完走することができなかった。

直進性を向上させてコースを完走させるためには機体の 2 つのモータを同じ高さと角度にする必要があると考える。解決策として、3D プリンタでモータを固定する部品を製作することやモータのシャフトの反対側にキヤスタ等を設置する方法が考えられる。

本研究では電子ワイヤーやスズメッキ線、ポリウレタン線を使用して基板の配線を行ったが、プリント基板を使用することにより配線分の厚さを縮小し、ロボットの機体の大きさを小さくすることが可能になると見える。また、抵抗やコンデンサなどの電子部品を表面実装用のチップ部品にすることにより、さらに機体の大きさを小さくできると考える。これによって、モータ固定部品を装着しても 1inch 以内におさめることができ

きるようになることが期待できる。

今回はモータ駆動型を採用したがほかにも振動駆動型などの選択肢もあるため様々な駆動型での機体の製作を考えられる。

これまでに、各種の小型移動ロボットが開発されている。例えば、制御用マイコンとして PIC マイコンを搭載した 1inch サイズのライントレースロボット[5]や、Arduino を搭載した 60×39×39mm のサイズの自律型移動ロボット[6]が開発されている。本研究の新規性については、1inch サイズの自律型マイクロ移動ロボットの制御用マイコンとして Arduino マイコン互換の超小型マイコンを新たに採用した点である。新たに採用した超小型マイコンは、Seeed Studio(シードスタジオ)社の Seeeduino XIAO である。このマイコンは、従来、マイクロ移動ロボット用に使用されていた制御用マイコンである PIC マイコンに比べて、以下のような特徴と優位性を持っている。

- (1) マイコンモジュール自体にパソコンからのプログラム転送(書き込み)機能が備わっており、PIC マイコンのように新たに書き込み器を用意する必要がなかった。パソコンと USB ケーブルさえあれば、パソコンで開発したプログラムを容易にマイコンに書き込むことができた。マイコンのプログラム開発のための費用を低く抑えることができた。若い世代の生徒や学生が本論文を参考にして 1inch サイズの自律型マイクロ移動ロボットを製作する場合、経済的な負担を大幅に軽減することができる。そのため、マイクロ移動ロボットに興味を持った若い世代の生徒や学生が、その開発に容易に取り組むことが期待できる。
- (2) Arduino 互換のため、標準的な Arduino 系のマイコンである Arduino UNO などで基本的な取り扱い方法、C 言語ライクのプログラム言語を習得しておいたため、その際に学習したことを Seeeduino XIAO を使用する際に十分に活用することができた。C 言語を用いたプログラミング技術を容易に習得することができた。
- (3) PIC マイコンの場合には、プログラム書き込み器のハードウェアとソフトウェアは最新の Windows のバージョンをサポートしていない。それに対して、Seeeduino XIAO は、最新の Windows のバージョンに対応している。そのため、Windows のバージョンを気にすることなく、マイクロ移動ロボットの開発に集中して取り組むことができた。
- (4) Seeeduino XIAO は、プログラム書き込み機能が内蔵されているため、PIC マイコンのようにマイコンのプログラムの改変を行うたびに、電子回路

基板から、いちいち、マイコンの取り付け取り外しをする必要がなかった。そのため、非常に迅速で効率的にプログラムの開発(プログラム内で設定するパラメータの改変など)と実験を行うことができた。これにより、プログラム開発期間と実験期間を短縮することができ、よりいっそう、マイクロ移動ロボットの開発に意欲的に取り組むことができるようになった。

- (5) プログラム開発言語は、C/C++言語だけでなく、Python にも対応しており、より高度の処理を行うことができる。これにより、AI 技術をふんだんに取り入れた 1inch サイズの自律型マイクロ移動ロボットの研究開発の発展を促進させることができると期待できる。

将来、ロボット研究開発技術の業務に携わっていきたいという若い世代の生徒や学生に、本論文で報告した自律型マイクロ移動ロボットの試作方法を参考にしてマイクロ移動ロボットを製作してもらい、マイクロ移動ロボットに対する関心を高めてもらえば幸いである。このとき、本研究で行ったマイクロ移動ロボットの試作と実験に、「ロボット教育用教材」の技術開発としての価値があると見なせば、本論文はその技術開発の参考文献であると考えることができる。これにより、本研究は、ロボットの研究開発技術者的人材育成において大いに貢献できるものと考える。

参考文献

- [1] 平石学大，“自律型マイクロ移動ロボットに関する研究(通常サイズのロボットによる基本方式の検討)”，卒業論文, pp.2-3, 2012.
- [2] マイクロロボットマイズコンテスト実行委員会，“カテゴリー2,”マイクロロボットマイズコンテスト, 2023.
<https://www.microrobotmazecontest.org/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0/%E3%82%AB%E3%83%86%E3%82%B4%E3%83%AA%E3%83%BC2>,
(参照日:2024年12月3日).
- [3] 後閑哲也，“PIC マイコンで始める 作って遊べる ロボット工作，”技術評論社, pp.160-184, 2003.
- [4] 福田和宏，“Arduino 電子工作 実践講座，”ソーテック社, pp.132-140, 2020.
- [5] 園部機械電子技術研究所，“ライントレースマイクロロボット，”
<http://www.sonobe-kiden.jp/page009.html#MR-LT-1406>(参照日:2024年12月3日).
- [6] Arduino や ROS、組み込み C などが学べる小型移動ロボット「Pi:Co V2」，先行予約開始，
https://fabcross.jp/news/2023/20231215_picov2.html?utm_source=chatgpt.com(参照日:2024年12月3日).

研究論文

音声対話システムにおける ゲシュタルトパターンマッチングによる質問種別推定

古木 淳也*, 實廣 貴敏*

(2024年9月9日受理)

Estimation Method of Question Types by Gestalt Pattern Matching in Speech Dialog System

Junya FURUKI* and Takatoshi JITSUHIRO*

(Received September 9, 2024)

Abstract

In this study, we consider a conventional scenario-based spoken dialogue on-campus guidance system that also uses a large language model (LLM) to enable natural question-answering. We propose methods for automatically determining whether a question is scenario-based or a general question that does not apply to scenario-based systems by identifying the question type from the text of the speech recognition results. As a degree of similarity, the proposed method uses Gestalt pattern matching, a BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) language model, or the combination of these methods to identify the question type. Experimental results showed that Gestalt matching provides the best accuracy.

キーワード: 音声対話システム, 大規模言語モデル, 質問種別, ゲシュタルトパターンマッチング, BERT

Keywords: Speech dialog system, Large language model, Question types, Gestalt pattern matching, BERT

1. はじめに

これまでの音声対話システムでは、あらかじめ決められたシナリオ(文法など)に縛られており、事前に用意した質間に合うものでしか受け答えができなかった。例えば、本研究室で開発、学内で実際に運用している音声対話学内案内システム「さぶろー」[1]では、MMDAgent[2][3]を利用しておらず、シナリオファイルに応答可能な質問とそれに対応する返答が定義されている。音声認識された質問文からどの質間に相当するかの推定方法は、質問文中に定義されているキーワードが検出されるかどうかに依存する。したがって、指定されたキーワードが含まれていなければ、質問内容を推定できず、応答できない。逆に、キーワードさえ含まれていれば意味が違う文章であっても認識してしまうという問題がある。

対話内容はシナリオファイルに記述されているため、内容を増やせば解決するのかもしれない。しかし、対話内容というのは日常生活の対話なども含まれており、ほぼ無限大に存在する。また、発話者の話し方により、シナリオの会話には似ているが関係ない内容である可

能性も考えられる。

近年のディープラーニングと呼ばれるニューラルネットワーク技術の発展により、自然言語処理分野において、この数年で大規模言語モデル、あるいは生成AIと呼ばれる、テキストによる自然な応答が可能な技術が実現してきた。代表的にはChatGPT[4]が挙げられる。次章でも説明するが、これは利用者がこれに質問を投げかけると自動で回答文を自動生成する。生成する回答は、公開されているデータを学習して生成されている。

本研究室で運用している「さぶろー」では、愛知工科大学に特化し、学内の主に施設の場所を音声と画像で案内できる。質問文のパターンは決して多くはないが、音声認識すべき単語としては、特別なものになっている。大規模言語モデルによる対話システムでは、一般的な話題を扱えるが、逆に、特化したものそのまま扱うことは難しい。

本研究では、音声対話システムにおいて、従来型のシナリオで人手により記述された回答を行うものと、大規模言語モデルにより、自由に回答をおこなうものを併用する方法の実現を目指す。そのためには、音

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

声認識結果から、その質問内容が、シナリオに設定された質問であるか、そうでない自由な対話内容なのかを自動推定することが必要になる。種類を識別できれば、シナリオに設定された質問であれば、従来型のシナリオに記述された回答を返し、そうでない場合は、大規模言語モデルにより、自動生成された文を返す。

2 節では、提案する音声対話システムの内容及び様々な音声対話システムについて取り上げる。3 節で対話内容の推定方法について説明する。4 節で実験及び結果を提示し、検討を行う。5 節では追加実験として 3 節で使用した手法を同時に用いて実験を行った結果を提示する。最後に 6 節で本研究の内容のまとめを述べる。

2. 本研究で想定している音声対話システム

この節では、本研究で基盤となる想定している音声対話システムについて、概要を説明する。

2.1 従来の音声対話システム

これまでよく利用されてきた代表的な音声対話システムとして、MMDAgent[2]などによる音声対話システムの概要を説明する。本研究室では、MMDAgent を使用した音声対話学内案内システム「さぶろー」[1]を開発し、学内で毎日稼働している。さぶろーは、本大学のキャラクターの愛称を示している。MMDAgent のシナリオファイルに定義されているキーワードを含んだ質問文や会話を音声で入力すると、それに対応した返答文を返すようなシステムになっている。

2.2 近年の生成 AI による対話システム

近年、生成 AI と呼ばれる、深層学習により、大規模なテキストデータベースを学習し、人間の自由な質問文に対して、適切な文章を生成し、自然な文章で返信できる技術やサービスが現れてきた。例えば ChatGPT[4]が挙げられる。これは、OpenAI が提供しているチャットサービスのことである。2022 年 11 月に公開され、回答精度の高さが話題となり、利用者が急増している。2023 年 9 月 25 日にスマホアプリ版 ChatGPT に音声会話機能の追加が発表され、本研究で求めている対話内容がほぼ無限大に存在するシステムに近いものになってきている。

2.3 本研究で提案する音声対話システム

上記の状況を踏まえ、2.1 節と 2.2 節で説明した技術を合わせて利用する音声対話システムを提案する。Fig. 1 にその流れ図を示す。生成 AI による返答生成ですべて解決できればよいが、そのシステムに特有な内容の受け答えをするには現状では難しい。従来型

の音声対話システムのように、人手により、シナリオなどで指定する方が簡単であり、確実である。そこで、入力される音声がシナリオに関係する質問文であるか、そうでないかを判定し、前者の場合はシナリオでの返答を行う。後者の場合は、生成 AI を用いて質問文の返答を生成し、返答を行うものを提案する。

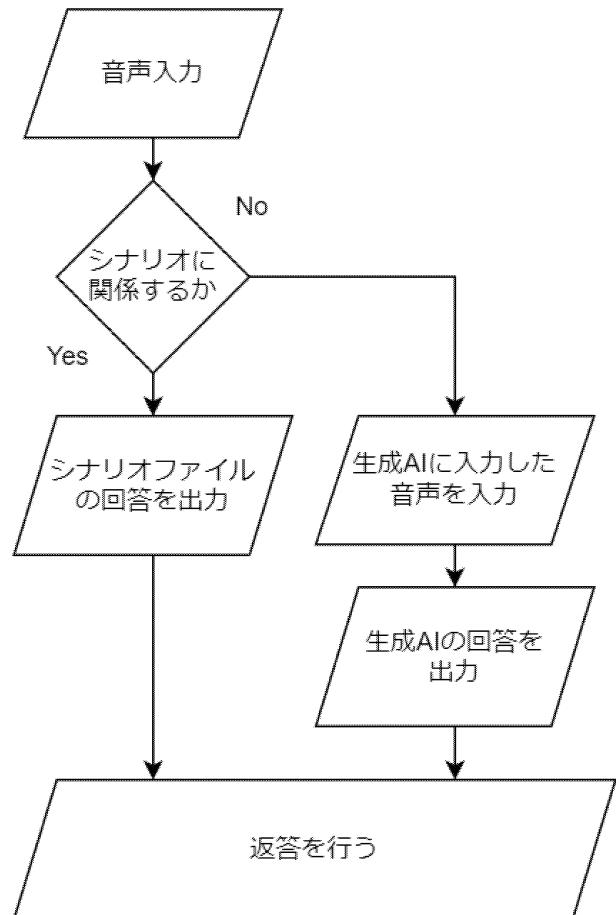


Fig. 1 The flow of proposed speech dialog system.

3. 質問種類の判定方法

3.1 例文と評価文の類似度算出

本研究では、2.3 節で提案する音声対話システムにおいて、入力される質問種類を識別する方法を検討する。すなわち、シナリオに沿った質問であるか、一般的な質問であるかを識別する。音声対話システムとして MMDAgent を対象とする。シナリオファイルに定義された音声を入力すると、それに対応する返答文が返ってくる。今回は、入力する音声を文章での文字入力に変更して実験を行う。実際に愛知工科大学内で使用されている音声対話学内案内システムのシナリオファイルに定義されているキーワードとそれに対応した返

答文を抽出する。これに追加でキーワードが含まれている例文を作成する。

Fig. 2 に入力質問を得た後の質問種類を識別する流れを示す。まず、質問文を入力した後にその評価文にキーワードが含まれているかどうかを判別する。含まれていない場合、一般的な質問文として処理を行う。次に、用意した例文と評価文の比較を行い、類似度を算出する。類似度が閾値を超えていた場合はシナリオの質問文として処理を行い、類似度が閾値以下である場合は一般的な質問文として処理を行う。本研究では、類似度計算の手法を複数検討することとし、ゲシュタルトパターンマッチング[5]による類似度計算と BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)[6]による類似度計算の2種類の手法を評価する。

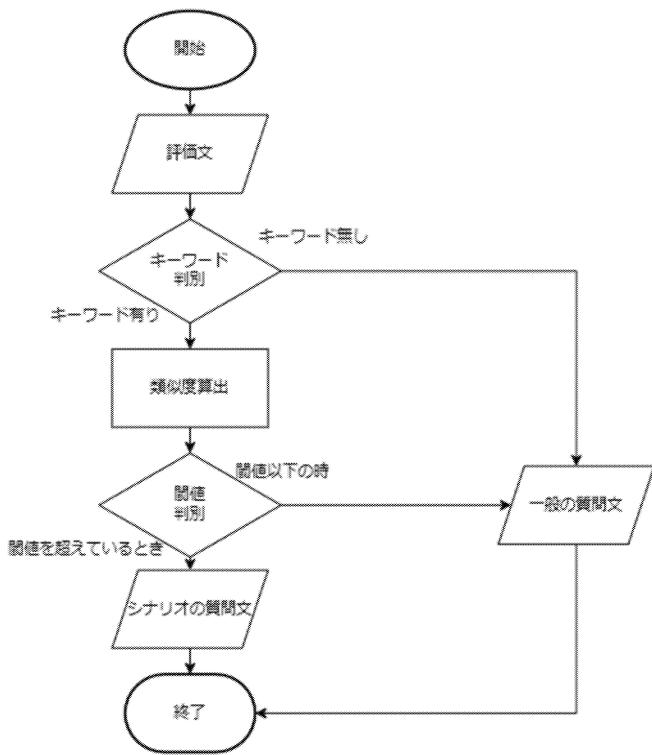


Fig. 2 The flow of question identification by similarity discrimination.

3.2 手法 1. ゲシュタルトパターンマッチングによる類似度算出

一つ目の手法としてゲシュタルトパターンマッチング[5]を使用する。この手法は、1983年に Ratcliff, Obershelp によって考案されたアルゴリズムである。2つの文字列に共通している文字数

の2倍を、2つの文字列を合計した長さで割ることで類似度を算出するアルゴリズムである。ゲシュタルトパターンマッチングによる類似度算出は、一致している文字数の割合を示している。計算式は以下の通りになる。

$$D_{ro}(S_1, S_2) = \frac{2K_m}{|S_1| + |S_2|} \quad (1)$$

ここで、 K_m : 共通する文字数、 $|S_{1,2}|$: 文字列の長さである。シナリオとの関係性がある例として、「自販機はどこですか」と「自販機はどこ」の二つの文章を比較すると、共通する文字数が6文字、文字列の合計の長さが15文字となる。共通する文字数を2倍して、文字数の合計の長さを割ると0.8という結果が出力される。

また、シナリオとの関係性がない例として、「自販機はどこですか」と「自販機では何を売ってる」の二つの文章を比較する。共通する文字数は4文字、文字数の合計の長さが20文字となる。同じように共通する文字数を二倍し、文字数の合計の長さを割ると0.4という関係性がある例で行ったものとは低い結果が出力される。

このように、ゲシュタルトパターンマッチングは、文字列に重みを置いた類似度算出アルゴリズムということがわかる。

3.3 手法 2. BERT による類似度算出

もう一つの手法として、BERT[6]を使用した類似度算出を検討する。BERTは、Google社 Jacob Devlin 氏らが発表した自然言語処理モデルである。Transformer[7]エンコーダーを双方向、前向きおよび後ろ向き予測を行ったものである。大量のテキストで学習し、文脈を扱えるようになったといえる。手法1との違いとしては、ゲシュタルトパターンマッチングのような文字列に重みを置いた類似度算出ではなく、言葉の意味に重みを置いた類似度算出になっている。文章をベクトル化し、cos類似度による算出を用いることで、-1.0から1.0の間で類似度を算出することができる。cos類似度を算出する計算式は以下のものになる。

$$a \cdot b = \|a\| \|b\| \cos(a, b) \quad (2)$$

また、BERTには、大規模なデータベースで学習された言語モデルが公開されている。今回は、それを使用して類似度算出を行う。

4. 質問種類の識別評価実験

4.1. 実験内容

前節で説明した類似度による質問種類の識別性能の評価を行う。なお、キーワードが含まれない場合はあきらかにシナリオが想定していない質問であるので、一般の質問文と判定できる。そのため、キーワード検出に関する検討は行わない。しかし、キーワードが検出された場合、文章によつては、シナリオに沿つた質問であつたり、そうでない一般的な質問であつたりすることがある。そこで、この評価実験では、シナリオに関する質問文と、あえて同じキーワードが含まれた一般的な質問文を用意し、それらの識別性能を評価する。

本実験では、現在愛知工科大学内で使用している学内案内音声対話システムのシナリオに含まれているキーワード数 117 文の例文を用意した。また、同じくキーワードを含んでいるシナリオの返答文と関係がある評価文と、キーワードを含んでいるシナリオの返答文には関係がない評価文をそれぞれ 79 文用意した。今回は、キーワードの重複を考えるものとするため、最終的な文は 107 文となる。Table 1 に評価文の例を示す。

Table 1 The examples of evaluation sentences.

評価文 1 (シナリオ質問文)	
1 号館はどこにありますか	
2 号館ってどこにありますか	
3 号館はどこにあるの	
4 号館ってどこにあるの	
5 号館ってどこ	
6 号館はどこ	
7 号館の場所はどこ	
8 号館という場所はどこ	
4301 はどこにありますか	
4301 教室ってどこにありますか	
4301 号室はどこ	
評価文 2 (一般的質問文)	
1 号館とはなんですか	
2 号館とはなんですか	
3 号館ってなんですか	
4 号館ってなんですか	
5 号館についてどう思いますか	
6 号館についてどう思いますか	
これは 7 号館にありますか	
これは 8 号館にありますか	
4301+1 はいくつですか	
4301 教室には何がありますか	
4301 号室には何がありましたか	

例文の中には「おはよう」や「こんにちは」などのキーワードのみの例文や、間違えることがないであろう例文が含まれてるため除外した。また、BERT の学習済み使用モデルは東北大学のものを使用した[8][9]。Table 2 に実験条件を示す。閾値は 0.0 から 1.0 までの数値で 0.01 ごとに変更を行う。本来 BERT で類似度を算出する場合は、前節で説明した cos 類似度を使用し、範囲は -1.0 から 1.0 となる。しかし、実験を行つた際では範囲が 0.0 から 1.0 の間であり、負の数値が含まれていないため、上記で示した閾値で変更を行う。

Table 2 Experimental conditions.

例文数(使用するもののみ)	79 文
評価文 1	79 文
評価文 2	79 文
閾値	0.0~1.0
閾値の単位	0.01

4.2. 実験結果

まず、上記の条件でそれぞれの類似度を算出した。Table 3, 4 に評価文 1, 2 の例に対する類似度を示す。

Table 3 The degree of similarity for evaluation sentences 1.

	ゲシュタルトパターンマッチング	BERT
1 号館はどこにありますか	0.761905	0.936763
2 号館ってどこにありますか	0.636364	0.932117
3 号館はどこにあるの	0.631579	0.891784
4 号館ってどこにあるの	0.5	0.887664
5 号館ってどこ	0.625	0.854791
6 号館はどこ	0.8	0.89008
7 号館の場所はどこ	0.666667	0.890014
8 号館という場所はどこ	0.6	0.881053
4301 はどこにありますか	0.782609	0.93113
4301 教室ってどこにありますか	0.615385	0.909626

Table 4 The degree of similarity for evaluation sentences 2.

	ゲシュタルトパターンマッチング	BERT
1号館とはなんですか	0.736842	0.939929
2号館とはなんですか	0.736842	0.942446
3号館ってなんですか	0.631579	0.879445
4号館ってなんですか	0.631579	0.884725
5号館についてどう思いますか	0.521739	0.891297
6号館についてどう思いますか	0.521739	0.881651
これは7号館にありますか	0.47619	0.896666
これは8号館にありますか	0.47619	0.893151
4301+1はいくつですか	0.695652	0.874007
4301教室には何がありますか	0.56	0.907215

Table 3, 4 から、全体的に BERT の類似度が高いことが分かる。類似度算出の結果から閾値を 0.01 ずつ変更し、誤棄却率 (FRR: False Rejection Rate) と誤受理率 (FAR: False Acceptance Rate) を求める。以下の(3)式が誤棄却率、(4)式が誤受理率の算出式である。

$$FRR = \frac{FN}{n} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{FP}{n} \quad (4)$$

ここで、 FN : 偽陰性の数、 FN : 偽陽性の数、 n : 評価文の総数である。

上記で求めた誤棄却率と誤受理率を用いて ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic) を描く。Fig. 3 に実験結果を示す。ROC 曲線は 45 度の直線から離れれば離れるほど有効性が高いとされている。Fig. 3 では、横軸と縦軸が、それぞれ FRR と FAR であるので、左下の原点に近くなるほど、精度が高いことになる。つまり今回の結果からは、ゲシュタルトパターンマッチングの手法では有効性が高いが、BERT の手法では有効性が低いことが分かった。

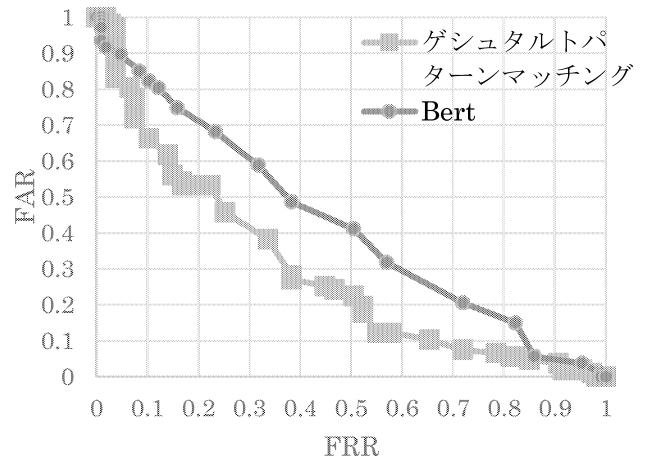


Fig. 3 The ROC curves by the two methods.

数値による結果としては、誤棄却率 + 誤受理率が最小になる閾値が一番良いため、その結果を算出すると、ゲシュタルトパターンマッチングでは閾値が 0.71、BERT では閾値が 0.91 という値が一番良い結果が得られた。この時の誤棄却率と誤受理率を見てみると、ゲシュタルトパターンマッチングでは誤棄却率が約 0.3832、誤受理率が約 0.2710 となったが、BERT では誤棄却率が約 0.3832、誤受理率が約 0.4860 とゲシュタルトパターンマッチングと比べて誤受理率が高くなる結果となった。

これらの問題が起ってしまった原因として考えられるのは、例文とシナリオに関係しない評価文が似すぎていたという点だ。例えば例として、今回使用した例文「テクノゆめトピア館はどこですか」と関係のない評価文「テクノゆめトピア館は何ですか」を BERT による類似度算出を行った場合、結果は約 0.9854 と異常に高い数値が output された。例を見てもらえばわかる通り、文章の違いが「どこ」と「何」しか存在しない。また、この二つの単語についても類似度算出を行い、結果は約 0.7092 となった。つまり、文章を単語で分けたときの文字がほぼ共通していることが今回の結果に繋がったと考えられる。

しかしながら、音声対話において言葉の意味というのは重要な点であると考える。そこで、新たな手法としてゲシュタルトパターンマッチングと BERT の二つを掛け合わせた方法を提案する。

5. 手法 3. 複数類似度を同時に用いた方法

5.1. 手法内容

前節で、BERT を使用した類似度判定実験の誤受理率が著しく悪い結果になったことが分かった。しかし、別の文でも同じ意味である場合が存在するため重要である。そこで、手法 1, 2 で算出した 2 つの類似度を乗算することでより精度が良くなるのではないかと考えた。

方法として、ゲシュタルトパターンマッチングと BERT の類似度を乗算し、先ほどの実験と同じ方法で一番良い閾値を求める。

5.2. 手法 3 の実験

実験は 3 節で行った実験と同様の条件で行った。同じように、誤棄却率と誤受理率を求め、ROC 曲線を描いた。Fig. 4 に得られた ROC 曲線を示す。確かに BERT より正確な結果が得られている。しかし、それでもゲシュタルトパターンマッチングによる結果には劣るものとなった。数値としてのデータを詳しく見ていくと、閾値は 0.66 が一番良い結果であることがわかり、誤棄却率が約 0.4299、誤受理率が 0.2710 となった。ゲシュタルトパターンマッチングによる結果と見比べてみると、誤受理率が同様の数値であるが、誤棄却率に約 0.0467 の差が生じているのがわかる。

複数類似度を掛け合わせることでゲシュタルトパターンマッチングのみの結果より、より良い結果が得られると期待した。しかし、今回の結果について検討を行うと、ゲシュタルトパターンマッチングのみで類似度算出を行う方が間違うことが少なく、精度が高いため、わざわざ BERT による類似度算出を使用する必要はないと考えられる。使用した BERT モデルは一般的な日本語文章で学習されており、そのまま使うだけでは、適切な日本語文章であれば、高い類似度を出す。シナリオに沿った質問とそれ以外の質問を識別できるよう、学習することができれば、言語モデルを用いて精度高く識別できると考えられる。

6. おわりに

本研究では、今回実験の対象とした音声対話システムのオープンソース、MMDAgent をベースに、シナリオに沿った質問応答と、大規模言語モデル、つまり生成 AI による質問応答の両方を扱えるようにするために、質問の種類識別を行う手法を検討した。

そこで、キーワードが含まれている例文を用意し、話者との会話・質問文と比較を行い、類似度を算出する

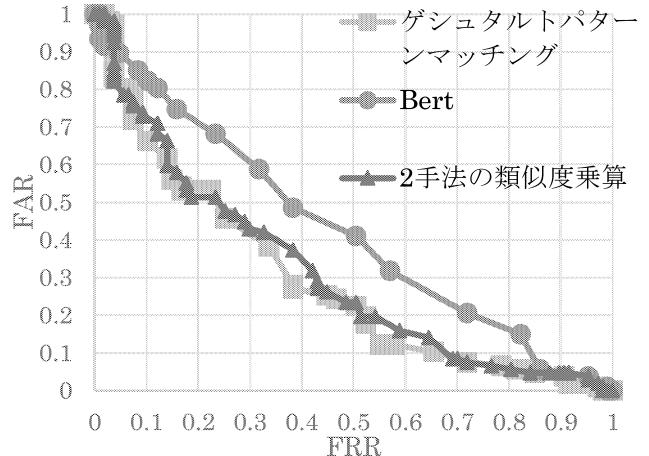


Fig. 4 The ROC curve by the combination method.

ことで多少の文章の誤りや、類似している文であっても対話を可能にすることを目指した。その上で、類似度の結果によってシナリオでの受け答えと生成 AI での返答自動生成が出来るようなものを目指した。本学の学内案内音声対話システムを想定としたものであるため、例文などのサンプル内容も現在使用されているものを研究の対象とした。作成した質問文も本学に関係しているもの且つキーワードを含んでいるものを条件とした。

類似度としては、ゲシュタルトパターンマッチング、または、BERT を用いた手法を提案した。前者は文字列全体のまとまりに重きを置くもので、2 つの文字列を合計した長さで割ることで類似度を算出する。後者は言葉の関連性に重きを置くものである。文章のベクトル化を行い、cos 類似度による算出を行った。BERT には大規模なデータベースで学習された言語モデルが公開されており、今回は東北大学のモデルを使用した。この 2 つの手法と両方を組み合わせた手法を提案し、類似度の算出及び誤棄却率と誤受理率の算出を行い、評価した。

結果として、BERT による類似度よりゲシュタルトパターンマッチングによる類似度が、遥かに優れており予想していた結果とはかけ離れたものとなった。原因としては、用意した評価文が、例文にかなり類似していたという点が大きいだろう。これにより類似度が異常なまでに高くなり、このような結果となった。

しかし、類似はしていても意味は違うものを用意しているため、BERT での判定も必要であると考えた。そこで、追加の実験として双方の類似度を同時に用いる実験を行った。双方の類似度を掛け合わせることで、意味の判定も含んだ精度の高い結果が得られると考えた。

その結果、確かに精度自体は良いものにはなったが、

ゲシュタルトパターンマッチングのみの結果を超えることはなかった。BERT を使用せずにゲシュタルトパターンマッチングのみでこれらのシステムを作成した方が精度として十分という結果となった。しかしながら、言葉の意味を考慮したものが必要であるため、より改善を検討していく必要がある。

今後の課題としては、より言葉の意味に重きを置いた精度の高い類似度計算方法を検討することが挙げられる。というのも、文字列全体のまとまりに重きを置いたとしても、文章が類似していて意味が違う場合に認識誤りを起こしてしまう可能性があると考える。これがより良い方法で実現できると、シナリオを参照した対話の精度が向上する。大量にテキストデータを用意できれば、識別的に学習させることも可能と考えられる。ただし、一般的な質問文をどのように定義するか、学習データとして与えられるのかは簡単ではなく、より厳密な検討が必要である。

参考文献

- [1] 清野貴史, “MMDAgent を用いた愛知工科大学専用モデルでの音声案内システムの制作”, 愛知工科大学, 卒業論文, 2020 年 2 月.
- [2] 李 晃伸, 大浦圭一郎, 徳田恵一, “魅力ある音声インタラクションシステムを構築するためのオープンソースツールキット MMDAgent”, 電子情報通信学会技術研究報告, NLC2011-51, SP2011-96, pp. 159-164, 2011 年 12 月.
- [3] MMDAgent, <https://www.mmdagent.jp/>, (参照 2024-01-15).
- [4] ChatGPT, <https://chatgpt.com/>, (参照 2024-01-29).
- [5] John W. Ratcliff, David E. Metzener, “Pattern Matching: The Gestalt Approach,” Dr. Dobb’s Journal, page 46, July 1988.
- [6] Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, Kristina Toutanova, “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding,” Proc. Of NAACL-HLT2019, pp.4171-4186, June 2019.
- [7] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Łukasz Kaiser, Illia Polosukhin, “Attention is all you need,” In Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), pp.6000-6010, Dec. 2017.
- [8] cl-tohoku/bert-japanese,
<https://github.com/cl-tohoku/bert-japanese/>,
(参照 2024-02-05).
- [9] cl-tohoku/bert-base-japanese-whole-word-masking,

<https://github.com/cl-tohoku/bert-japanese>,
(参照 2024-02-05).

研究論文

背景音が緊急避難メッセージの印象評価に及ぼす影響

山高 正烈*

(2024年9月4日受理)

Effect in the impression of urgency-inducing message due to added background sounds

Masahiro YAMATAKA*

(Received September 4, 2024)

Abstract

We hypothesized that addition of background sounds to the emergency warning announcements could increase urgency and inducing evacuation behavior and thus investigated the changes in subject impressions of the announcements due to added background sounds. As a result, the factor scores with added background sounds are higher than those without background sounds, when added background sounds were well-known warning sounds and buzzer alarms. This suggests that appropriate background sounds added to emergency warning announcements can effectively enhance urgency.

キーワード：背景音, 緊急避難メッセージ, 因子分析, 正常性バイアス

Keywords : Background sounds, Urgency-inducing message, Factor analysis, Normalcy bias

1. はじめに

地震や津波、豪雨による土砂災害等の自然災害に直面しても、事態を楽観的に判断し、逃げなかつたり逃げ遅れたりして被害が拡大したという事実が数多く報告されている。例えば、東日本大震災のビッグデータによる動線解析によると、実際に津波を目撃してからはじめて避難行動に移ったため避難が遅れた市民が多数に上ることが明らかとなった[1]。2018年の西日本豪雨でも、テレビやラジオ、地域防災行政無線放送からの避難の呼びかけに対して、直ちに避難した人は5%に留まったことが問題点として挙げられている[2]。これには、事態の切迫度を認識せずに楽観的な情報のみを受け入れ、危険を警告する情報を拒否する人間の心理特性のひとつである正常性バイアス[3]が一要因として考えられる。

このような現状を踏まえ、「特別警報」という、数十年に一度の重大な災害の起こる恐れが著しく高まった場合に発表する警報レベルを新たに設けたり[4]、緊迫感を強調するために放送時に命令口調で避難を呼

びかけたり、呼びかけ音声のピッチを上げたりする等の工夫がなされている[5]。避難呼びかけ音声の話す内容や話し方に着目した先行研究[6]では、話速やピッチを適切に操作することにより緊迫感が上昇すること、また、危険性が高いと認知した場合には避難意思が喚起されやすいことが示唆された。

しかし、このような「命令口調」は一時的な避難行動の喚起は期待できるものの、ある程度の限界までは「正常の範囲」「過剰な反応は控える」といった人間の「心的メカニズム」である正常性バイアスの働きにより、何度も耳にするうちにその効果も自然に弱まると考えられる[3]。緊急避難勧告に対して、「自分は大丈夫だ」という正常性バイアスを打破し避難行動を喚起させるためには、現在差し迫っている状況を正しく認識させる必要がある。

我々は、差し迫った心理的状況を抱かせることが、現状を正しく認識し「思わず逃げたくなる」という避難行動につながると考えた。例えば、喧騒音や雑踏音等は、災害時に逃げ出す人込みを連想させる可能性を有し、NTTドコモが提供しているエアメールのブザー

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科、〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

音は、地震の発生をイメージさせる。これらのイメージ音が背景音として音声に重畠された場合、両者から想起される緊急性の相乗効果により緊急性の効果を更に高めることはできないだろうか。

このような仮説に基づき、本研究では、様々な背景音の付加による避難喚起音声の印象変化、および、背景音の特徴がもたらす効果について検討した。実験は計2つ実施した。実験1では、既存の津波警報音声のピッチと話速をパラメータとし、そこに異なる種類の背景音を付加した場合の印象変化を調べた。実験2では、事前教示により背景音が持つイメージがどのように誘導した場合の印象変化を調べ、事前教示による効果の有無を検討した。

2. 実験1(背景音の付加効果)

2.1 聴取者および実験環境

聴取者は正常な聴力を有する20代(20~24歳)の大学生および大学院生20名(うち女性8名)であった。実験は東北大学電気通信研究所に設置された視聴室で行い、被験者から1.5m離したひとつのスピーカ(FOSTEX PM0.5 MKII)から音刺激を提示した。

2.2 実験刺激

本研究では、大分県臼杵市で実際に使用されている津波警報音声[7]を用いた。この警報は、男性が「津波警報が発表されました。海岸付近の方は高台に避難してください」と発声したものである。この音声のピッチを0.75倍、1.0倍、1.25倍、話速を100ms/mora, 150ms/mora, 200ms/moraに変化させ、それぞれピッチ条件(low, normal, high条件)、話速条件(fast, normal, slow条件)と命名した。背景音は、セミが鳴いている音情景(セミの声)、雜踏音、波打ち際の波の音(波の音)、ホワイトノイズ(WN)、我々の先行研究で作成した津波警報用サイン音(サイン音)[8]、NTTドコモが提供しているエリアメールの緊急地震速報専用ブザー音(ブザー音)の合計6種類を用意した。

実験に用いた刺激はこれらを組み合わせて作成され、最終的に音声のみのものが9条件(ピッチ3種類×話速3種類)、背景音のみが6条件、音声と背景音を合成したものが54条件(音声9種類×背景音6種類)の計69条件となった。これらの音刺激は、聴取点で等価騒音レベル60dBで提示した。また、音声と背景音とのS/Nは10dBとなるように設定した。

2.3 実験手続き

実験ではSD(Semantic Differential)法を使用し

Tab.1 Adjective pairs used for impression evaluation

快い	不快な	眠くなる	目が覚める
落ち着いた	甲高い	注意を引く	注意をそらす
金属性の	深みのある	緊迫感がある	緊迫感がない
迫力のある	物足りない	危険な	安全な
騒々しい	静かな	緊張した	くつろいだ
鋭い	鈍い	目立つ	目立たない
柔らかい	硬い	慌ただしい	ゆっくりとした
明るい	暗い	必死な	淡々とした
音量感のある	音量感のない	臨場感がある	臨場感がない
あたたかい	冷たい	差し迫った感じがする	差し迫った感じがない
安心する	不安になる	本物らしい感じがある	本物らしい感じがない
気が楽になる	気が重くなる	リアリティのある	リアリティのない
この場にいたい	この場にいたくない	動きたくなる	動きたくない
気になる	気にならない	自分に関係ある	自分に関係ない
聞き続けたい	聞き続けたくない	動的な	静的な
焦りを感じる	ホッとする	重い	軽い
落ち着く	イライラする		

表1に示す33個の形容詞対を用いて刺激全体の印を7段階で評価させた。形容詞対は、音に対して抱く印象を調べた先行研究[9]で使用した形容詞をもとに、「動きたくなる」や「自分に関係ある」、「差し迫った感じがする」等の形容詞を追加して作成した。

2.4 実験結果

表1に示す33個の形容詞対について、因子分析(主因子法、プロマックス回転)を行った。その結果3因子が抽出され、第1因子は「切迫性因子」、第2因子は「不快因子」、第3因子は「金属性因子」と解釈した。因子の数は、固有値が1.0以上、累積負荷量が65%までを基準にして決めた。

表2に、抽出された因子の負荷量と寄与率を示す。正の数値は「非常にそう思う」方向であり、負は「そう思わない」方向である。表中の切迫性因子の得点が高いほど、危険性の認知が高まると考えられる。図1に、背景音のみ場合と音声のみの場合の切迫性因子の得点を示す。音声のみの場合、横軸は音声の話速、縦軸は音声のピッチを表す。図中の数値は因子得点を表す。図から、背景音のみの場合は、セミの音の因子得点が一番小さく、続いてホワイトノイズ(WN)、雜踏音、サイン音、波の音、ブザー音の順に因子得点が高いことが分かる。音声のみの場合は、ピッチが高く話速が速いほど得点が高くなる傾向にあり、特に話速が切迫感に大きな影響を及ぼす傾向にあった。

図2に、セミの音、ホワイトノイズ、雜踏音、および波の音を背景音とした場合の切迫性因子の得点を示す。図から、音声のピッチと話速がノーマル若しくは低い場合は、背景音を元の音声に付加しても切迫性因子の得点がノーマル音声の場合とほとんど変わらないことが分かる。また、切迫性因子の得点は、背景音のみの場合よりも低い傾向であった。一方、音声のピッチが

Tab.2 Results for factor analysis

因子	評定項目	因子負荷量		
		1	2	3
切迫性因子	リアリティのある本物らしい感じがする	0.98	-0.19	-0.11
	臨場感がある	0.98	-0.15	-0.13
	迫力のある	0.95	-0.14	-0.01
	緊迫感がある	0.94	-0.09	-0.06
	自分に関係ある	0.80	0.04	0.09
	差し迫った感じがする	0.77	0.09	-0.03
	注意を引く	0.76	0.01	0.13
	必死な	0.67	0.10	0.08
	音量感のある	0.67	-0.16	0.24
	目立つ	0.66	0.05	0.14
	気になる	0.56	0.24	0.11
	動きたくなる	0.50	0.17	0.20
	目が覚める	0.49	0.10	0.37
	緊張した	0.45	0.25	0.30
	焦りを感じる	0.42	0.34	0.23
不快因子	快い	0.21	-0.83	-0.18
	気が重くなる	0.10	0.79	-0.15
	聞き続けたくない	-0.17	0.77	0.17
	明るい	0.18	-0.72	0.36
	この場にいたくない	0.11	0.64	0.10
	不安になる	0.27	0.59	0.10
	イライラする	-0.23	0.58	0.42
	あたたかい	0.06	-0.54	-0.20
	柔らかい	0.04	-0.51	-0.29
	危険な	0.41	0.46	0.09
金属性因子	甲高い	0.11	-0.04	0.75
	金属性の	-0.16	0.14	0.71
	重い	0.48	0.54	-0.69
	鋭い	0.41	-0.12	0.58
	慌ただしい	0.35	-0.05	0.57
	騒々しい	0.18	0.12	0.47
	動的な	0.41	-0.14	0.45
寄与率 (%)		49.38	7.32	4.36

高く話速も早い条件の場合は、これらの背景音を付加することにより音声のみの場合と比べて切迫性因子の得点が逆に下がることが見て取れる。

図3に、サイン音とブザー音を背景音として場合の切迫性因子の得点を示す。図から、「音声+サイン音」や「音声+ブザー音」の場合は、すべてのピッチ＆話速条件で得点が高く、音声のみの場合より因子得点が上昇していることが見て取れる。特にピッチと話速がノーマル若しくは低い場合は、これらサイン音やブザー音の付加により因子得点が顕著に向上了した。ただし、この向上効果は、音声のみ条件における話速＆ピッチが最大である場合までには及ばなかった。

2.5 考察

背景音のみ条件の結果から(図1の上方参照)、緊急地震速報として使われているブザー音の因子得点が一番高いことが分かった。一方、我々の先行研究[8]において津波警報音として作成したサイン音単体の切迫性因子の得点は、波の音よりも低かった。ブザー音は、災害時に何度も聞いた経験がある音であり、緊急性を表す音である認知度が高いと言える。一方サイン音は、認知度が低く、すべての聴取者が初めて

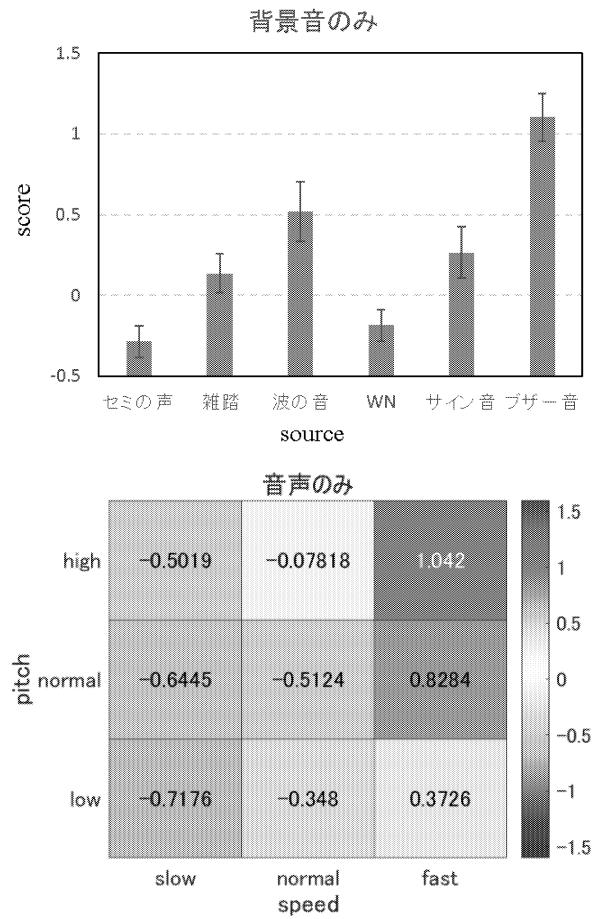


Fig.1 Urgency factor scores (Background sound only and audio only conditions)

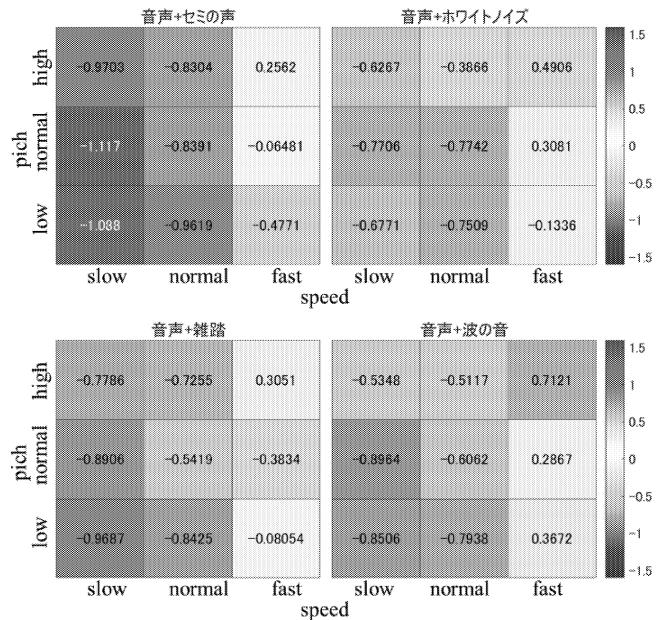


Fig.2 Urgency factor scores (Added the sounds of cicadas, white noise, crowd noise, and waves)

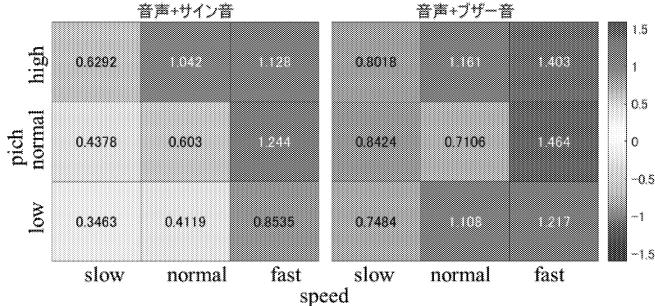


Fig.3 Urgency factor score (Added the signal sound and buzzer sound)

聞く音であった。そのため、ブザー音の高得点は災害時に何度も聞いた経験がある音だからこそ得られる学習効果とも考えられ、事前学習により音が持つ緊迫感が強調できる可能性を示唆する。

また、波の音がサイン音よりも高い切迫感が得られたことは、波の音から「津波のイメージ」が喚起された可能性があるとも考えられる。音声のみの場合、先行研究の結果[6]と同様に、ピッチが高いほどまた話速が早いほど緊迫感を伝えやすい結果となった。この結果は一方で、話者の技量によって切迫感が左右される可能性のあることも示唆する。

音声にセミの音、ホワイトノイズ、雑踏音、および波の音を付加した場合(図2参照)、切迫性因子の得点は元の音声のみの場合と同じ程度か逆に下がる場合があった。特に、音声のみで高い切迫感が得られたピッチが高く話速も早い場合、背景音の付加により因子得点が顕著に低下した。これは背景音によって音声のイメージが影響を受けることを意味し、不適切な背景音を付加すると切迫感が低下することを示唆する。

図3の結果から、サイン音やブザー音を背景音として付加することで緊迫感を強調できることが分かった。特にブザー音の場合、すべての条件で元の音声、若しくはブザー音単体を用いた場合より高い切迫感が得られた。このことから、2つの音の相乗効果が得られたと考えられる。サイン音の場合も、ブザー音ほどではないが、すべての条件で元の音声と同程度か高い切迫感が得られた。その効果は、ピッチと話速がノーマル若しくは低い場合に顕著に表れた。

実験1の結果から、音声に背景音を付加することでどんな情景が想起されるかが、切迫感の喚起に重要であると考えられる。今回の実験の内省報告から、聴取者間で雑踏音やホワイトノイズに対する認識のずれがあることが確認された。例えば、雑踏音に対しては、「商店街で人々が話している音情景」という意見がある一方、「駅を人々が歩いている様子」という意見も挙が

り、災害や避難とは結びつきの弱いものではあるが浮かぶ情景には違いが見られた。雑踏音に対して、「これは災害時に逃げ出す人々の足音である」と陽に情景を想起させることで背景音の効果が強くならないだろうか。そこで実験2では、背景音が持っている意味合いを事前教示した場合の印象変化を調べた。

3. 実験2(付加する背景音の事前教示の効果)

3.1 実験内容

実験2では、事前教示(表3参照)によって背景音が持つイメージがそろうように誘導した場合、避難呼びかけ音声の印象がどのように変化するかを調べた。聴取者は、実験1と異なる正常な聴力を有する20代(20~24歳)の大学生および大学院生20名(うち女性5名)であった。実験手続きは、背景音のみのセクションにおいて表3に示す教示を行う以外は、実験1と同様であった。

3.2 実験結果

表1の形容詞対について因子分析を行った結果、実験1と同様に3因子が抽出され、第1因子は「切迫性因子」、第2因子は「不快因子」、第3因子は「金属性因子」と解釈した。

図4に、背景音のみ場合と音声のみの場合の切迫性因子の得点を示す。背景音のみの場合は、実験1と同じ順番で、セミの音の因子得点が一番小さく、ブザー音の因子得点が一番高かった。図5に、セミの音、ホワイトノイズ、雑踏音、および波の音を背景音とした場合の切迫性因子の得点を示す。音声のピッチが高く話速も早い場合は、これら背景音を付加することにより切迫性因子の得点が全体的に下がる傾向にあった。

また、音声のピッチと話速がノーマル若しくは低い場合は、実験1と異なり、切迫性因子の得点が背景音の種類によって異なる傾向を示した。例えば、「音声+WN」と「音声+雑踏音」の場合は切迫性因子の得点がほとんど変わらなかったが、「音声+セミの音」

Tab. 3 Instruction contents

背景音	教示内容
セミの音	セミが鳴いている音
雑踏音	人々が避難している音
波の音	波が押し寄せてくる音
ホワイトノイズ	ホワイトノイズという音で、イメージはアナログテレビの砂嵐
サイン音	先行研究で作成した津波警報音
ブザー音	緊急地震速報を受信したときに流れる音

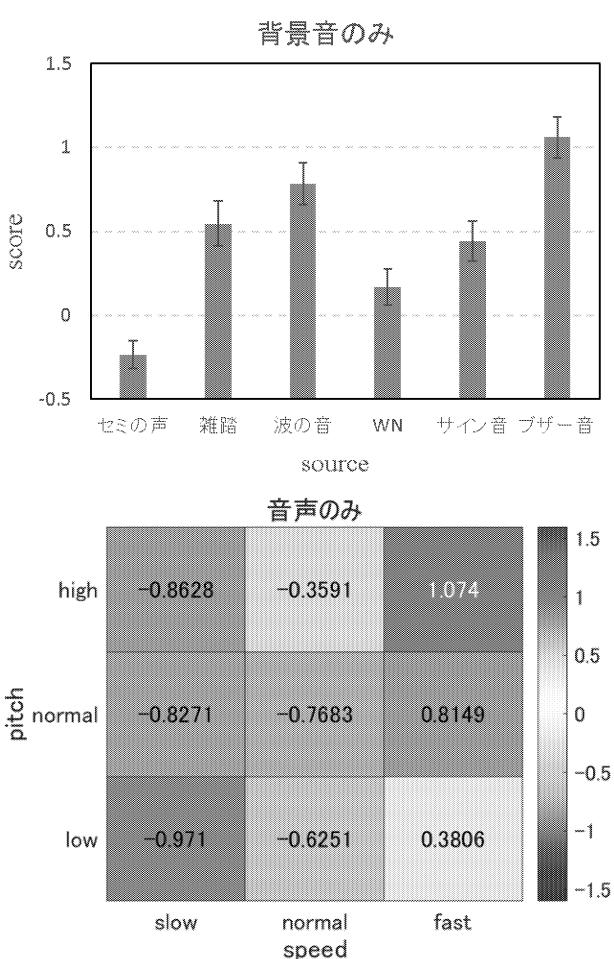


Fig.4 Urgency factor scores (Background sound only and audio only conditions)

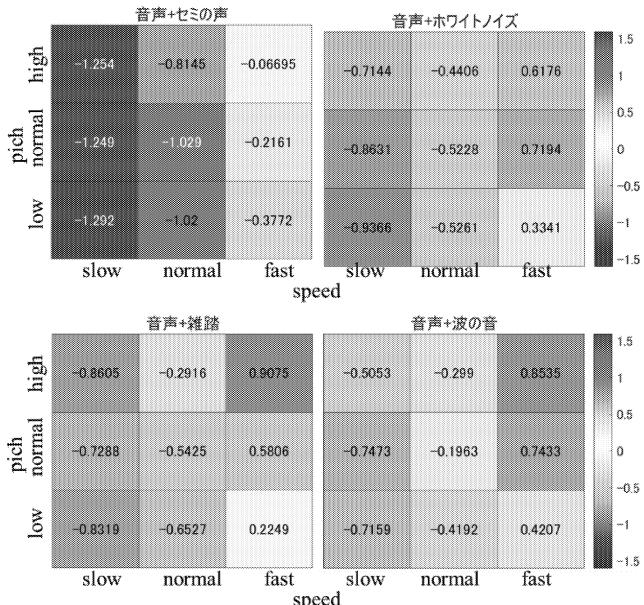


Fig.5 Urgency factor scores (Added the sounds of cicadas, white noise, crowd noise, and waves)

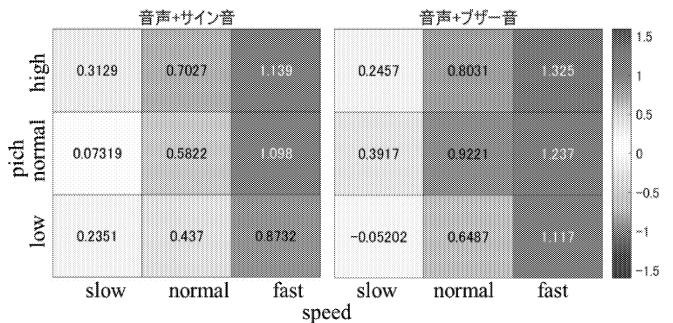


Fig.6 Urgency factor score (Added the signal sound and buzzer sound)

の場合は、背景音の付加により切迫性因子の得点が著しく低下した。一方、「音声+波の音」の場合は、全体的に切迫性因子の得点が上昇する傾向であった。

図6に、サイン音とブザー音を背景音とした場合の切迫性因子の得点を示す。実験1と同様に、「音声+サイン音」や「音声+ブザー音」の場合は、すべてのピッチ&話速条件で得点が高く、音声のみの場合より因子得点が上昇していることが見て取れる。ただし、「音声+サイン音」の場合の因子得点の上昇幅が、「音声+ブザー音」よりも著しく大きかった。

3.3 考察

音声のピッチと話速がノーマル若しくは低い場合は、切迫性因子の得点が背景音の種類によって異なる傾向を示した。即ち、「音声+WN」と「音声+雑踏音」の場合は、背景音を付加しても切迫性因子の得点が音声のみの場合とほとんど変わらなかつたが、「音声+波の音」の場合は、全体的に因子得点が上昇する傾向を示した。これは、「波が押し寄せてくる音」と事前教示をして、背景音から浮かぶ情景を誘導したことによる効果であると考えられる。波の音から津波が押し寄せてくる様子を想起し、より危険を感じた可能性がある。

「音声+サイン音」の場合も、すべてのピッチ&話速条件で因子得点が大幅に上昇され、同様の事前教示の効果が表れた。サイン音を「津波警報音である」と教示することにより、人々が避難している情景がイメージしやすく、切迫性感が向上したと考えられる。これは、例え同じ音でも、イメージする情景によって危険性の認知に差が生じることを示唆する。このように、教示によって音を聞いた際に浮かぶ情景を変えることもでき、それが緊迫感の喚起にもつながると考えられる。

4. 総合考察

本研究では、背景音の付加によって音声の印象がどのように変化するかについて、音声のピッチと話速、

および付加する背景音の種類をパラメータとして検討した。その結果、サイン音やブザー音を背景音として用いることで、より危険性を強調できることが明らかとなつた。その効果は、ピッチと話速がノーマル若しくは低い場合に特に顕著に表れた。ピッチや話速を変えなくても、適切な背景音を付加するだけで高い緊迫感が得られると考えられる。これら、イメージ音が背景音として音声に重畠された場合の相乗効果が得られたことを意味する。

サイン音の場合は、その音単体では決して高い切迫感が得られなかつたが、背景音として用いることで高い相乗効果が得られた。このことから、背景音のイメージと提示音声の内容が合致する場合にその相乗効果が得られやすい可能性が考えられる。波の音を用いた場合の緊迫感の上昇も、背景音が持っている「津波」と関連性のあるイメージと、今回用いた音声における「津波警報が発表された」というイメージの合致が比較的高い相乗効果をもたらしたと言えるかも知れない。背景音が持っているイメージと音声内容との一致性の効果とその関係性については、今後更なる検討を進めたいと考えている。

実験 2においては、事前教示を行い背景音から浮かぶ情景を統一させたことによる効果を調べた。その結果、サイン音を「津波警報音である」と教示することにより、切迫感が著しく向上した。これは、背景音によってどんな情景が想起されるかが切迫感の喚起に重要であることを示唆する。逆に、例え同じ音でも、イメージする情景によって危険性の認知に差が生じることを示唆する。しかし、同じく「人々が避難している音」と定義した雑踏音の場合は、狙った事前教示の効果は得られなかつた。このことから、ただ単に「逃げろ」「危険だ」という言葉を伝えるだけでなく、発生している事象（例えは今回の場合は「津波」）を明確にさせることが重要かも知れない。例えは、雑踏音に対して、「津波が発生した時の逃げ出す人々の足音である」と教示をした場合、印象変化はどのように変わるだろうか。逆に、音声を「駅から火災が発生した」と教示した場合、雑踏音付加による緊迫感の更なる向上は得られないだろうか。更に、これら場面の説明の結果、状況判断が冷静に行われ切迫感が逆に下がる可能性はないだろうか。これらについては大変興味深く、今後更に検討を進めたい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費JS17K19990の助成を受けた。

参考文献

- [1] NHKスペシャル, <http://www6.nhk.or.jp/special/detail/index.html?aid=20130303> (参照日: 2024年8月16日).
- [2] NHK NEWS WEB, <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20180823/k10011587431000.html> (参照日: 2024年8月16日)
- [3] 広井修, 自然災害と人間行動, 行動医学研究, 5, 1-4, 1999.
- [4] 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/tokubetsu-keiho/> (参照日: 2024年8月16日)
- [5] 井上裕之, 命令調を使った津波警報の呼びかけ, 大震災で防災無線に使われた事例と, その後の導入検討の試み(東日本大震災から1年), 放送研究と調査, NHK出版, 18(6), 22-31, 2012.
- [6] 小林まおり, 赤木正人, 避難呼びかけ音声の心理的評価, 日本音響学会誌, 74(12), 633-640, 2018.
- [7] 大分県臼杵市防災・災害情報ページ, <http://www.city.usuki.oita.jp/bousai.html> (参照日: 2024年8月16日).
- [8] 崔正烈, 増見洋治, 岩谷幸雄, 勝本道哲, 坂本修一, 鈴木陽一, 長距離伝搬に頑健な津波警報候補音の作成, 日本感性工学会論文誌, 13(3), 459-469, 2014.
- [9] 曾根敏夫, 城戸健一, 二村忠元, 音の評価に使われることばの分析音の評価に使われることばの分析, 日本音響学会誌, 18(6), 320-326, 1962.

研究論文

結合自己組織化臨界モデルで探る太陽フレアの統計則の起源

田代 徹*, 黒石 萌香**

(2024年9月9日受理)

Investigation of the Origin of the Statistics of Solar Flares by using a Coupled Self-Organized Critical Model

Tohru TASHIRO* and Moeka KUROISHI**

(Received September 9, 2024)

Abstract

We propose a mathematical model that accurately replicates the statistical properties of solar flares. Rooted in the physics of magnetic reconnection, the fundamental process driving energy release in solar flares, our model comprises two sheets: a magnetic energy sheet and a trigger sheet. The trigger sheet undergoes a self-organized criticality evolution.

キーワード:自己組織化臨界現象, 太陽フレア, ベキ乗則

Keywords: Self-organized critical phenomena, Solar flares, Power laws

1. はじめに

太陽フレアとは太陽表面で発生する爆発現象である。そのエネルギーは $10^{22} \sim 10^{25}$ J にも及ぶことがあり、この膨大なエネルギーによって加速されたプラズマが地球に飛来すると、衛星通信等に不具合を引き起こすことが知られている。したがって、太陽フレアの発生メカニズムを明らかにすることは、私たちの生活の安全を守る上で非常に重要である。

これまでの太陽観測衛星の観測によって、太陽フレアに関する様々な統計則の詳細が明らかになってきている。また、個々の太陽フレアの発生の起源は、太陽観測衛星「ようこう」の観測結果等[1]と数値シミュレーション[2]から、磁気リコネクション（磁力線のつなぎかえ）であることが確実なものとなった。つまり、個々の太陽フレアの発生メカニズムは明らかになっているが、その一方で、磁気リコネクションがどのようにして開始するかというトリガーの問題や、いつどのくらいの規模の太陽フレアが発生するのかという統計則を支配する物理等、未だ解決されていない問題も多い。

本研究において、太陽フレアの観測結果とそれに類似した他の自然現象、磁気リコネクションの物理を基にした、太陽フレアを再現するトイモデルを構築した。空間と時間を離散化したこのモデルでは、磁気リコネクションのトリガーが臨界状態にあると仮定、そのダイナミク

スを自己組織化臨界モデルで表現する。

2. 太陽フレア

2.1 磁気リコネクション

ここでは、太陽フレアの起源と考えられている磁気リコネクションについて概説する。反平行の磁力線が対峙している模式図を Fig.1(a)に示した。抵抗率が小さい場合はこの状態が安定で、磁力線の境界には電流シートと呼ばれる層状の電流が発生する。ここでなんら

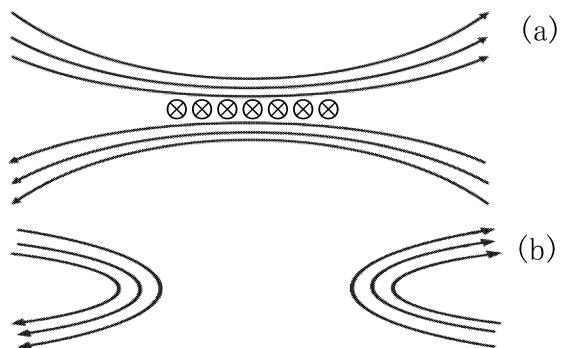


Fig.1 (a) The configuration of magnetic field lines before the magnetic reconnection. The symbols at the center represent the current sheet. (b) The configuration of magnetic field lines after the magnetic reconnection.

* 愛知工科大学工学部基礎教育, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乘 50-2

Comprehensive Education Center, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

** お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科, 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University, 2-1-1 Ohtuka, Bunkyo, Tokyo 112-8610, Japan

かの原因で抵抗率が非常に大きくなると、磁力線のつなぎかえが起こり、Fig.1(b)の様に磁力線が短絡する。その結果、変化前の伸びた磁力線に蓄えられた磁場エネルギーが解放されることになる。これが磁気リコネクションであり、このエネルギーの解放が太陽フレアのエネルギーの源となっている。

以上の物理を、運動方程式を用いて見ていく。磁場の時間変化を支配する運動方程式は、磁場の誘導方程式と呼ばれ以下で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} + \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} \quad (1)$$

ここで \mathbf{B} は磁場、 \mathbf{u} はプラズマの速度場、 η は磁気拡散係数で、抵抗率に比例する。磁場の誘導方程式の右辺第1項は磁場がプラズマと一緒に運動する効果(磁場の凍結)、右辺第2項が磁場を変化させる効果を表す。これら相反する効果の比を表現するのが以下に示す磁気レイノルズ数である。

$$R_m = \frac{L\bar{u}}{\eta} \quad (2)$$

ここで、 L は系の典型的な大きさ、 \bar{u} はプラズマの典型的な速度の大きさを表す。通常太陽表面では $R_m \approx 10^{12}$ なので、磁場の凍結の効果が強く、磁場が変化することはない。しかし、なんらかの原因で抵抗率が異常に大きくなると、磁場は変化し、磁力線のつなぎかえが起こるのである。

2.2 太陽フレアの統計則

次に太陽フレアの統計則を見ていく。本研究では、太陽フレアのデータとして、NASA によって打ち上げられた静止気象人工衛星、GOES による観測結果を用いた。GOES には、太陽を X 線で観測する機器として XRS-A と XRS-B の 2 種類が搭載されており、それぞれの観測する波長帯は、0.05~0.4nm, 0.1~0.8nm となっている。観測結果は NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI) によって公開されている。GOES は複数存在するが、本研究では、13 号、14 号、15 号による、2013 年 6 月から 2020 年 1 月までの観測データを用いた。

以下に GOES の観測データから解析した太陽フレアの統計則を図示する。Fig.2(a), (b) はそれぞれ、太陽フレアの単位面積当たりのエネルギー(以下積分強度)と、ピークの単位面積当たりのエネルギー(以下ピーク強度)の分布を表している。これらの図にある直線は、それぞれ指数が -1.97, -2.05 のベキ関数を意味している。Fig.2(c) には、太陽フレア間の待ち時間の分布を、GOES13(四角)、GOES14(三角)、GOES15(丸)別で示した。積分強度とピーク強度は、どちらも強度が低い

ところで、分布がほぼ一定になっており、強度が大きいところではベキ的な振る舞い(しかもベキ指数がほぼ等しい)を示していることがわかる。一方待ち時間の分布は、待ち時間が短いところで頻度がほぼ一定となっている。

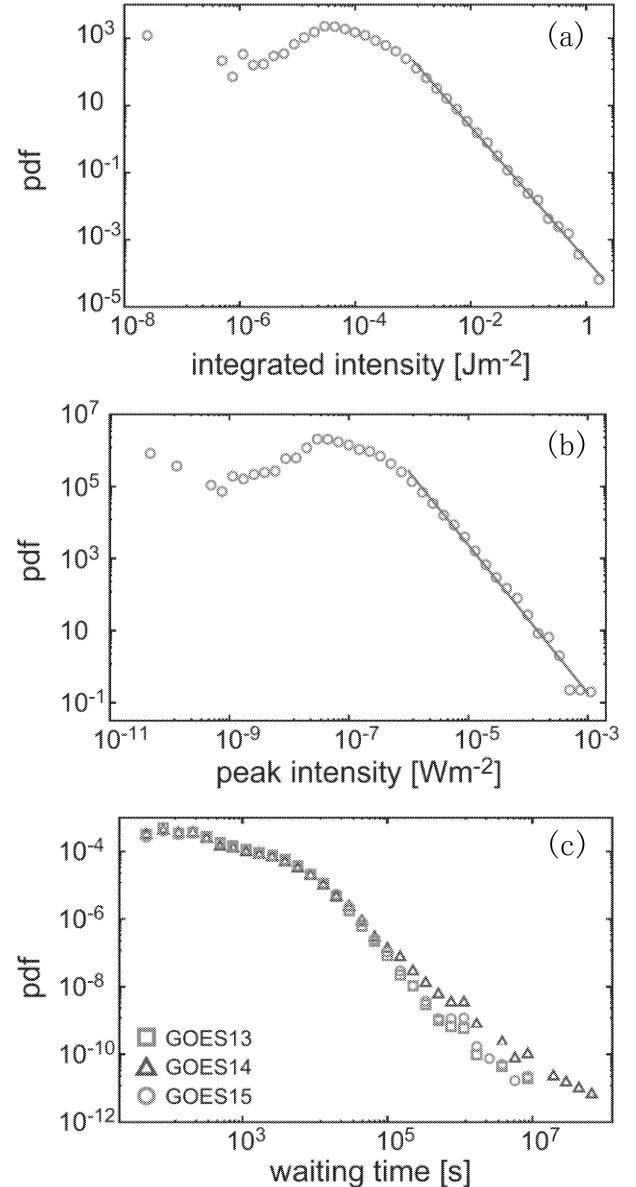


Fig.2 (a) The distribution of the integrated intensity of solar flares in log-log scale. The line represents the -1.97 power of the integrated intensity. (b) The distribution of the peak intensity of solar flares in log-log scale. The line represents the -2.05 power of the peak intensity. (c) The distribution of the waiting time between solar flares in log-log scale for the datasets observed by GOES13 (squares), GOES14 (triangles), and GOES15 (circles).

3. 自己組織化臨界モデル

太陽フレアの統計則の特徴としては、エネルギーの分布がべき的であることが挙げられる。べき乗則では、指數関数分布のように特徴的な大きさの量(太陽フレアの場合は特徴的なエネルギー)が存在しない。つまり、大きな量を伴う現象の発生確率が大きいことになる。

べき乗則を導出する概念の一つに自己組織化臨界がある[3]。非平衡なシステムの中には、その構成要素が臨界状態にあるため、どの要素でもちょっとしたきっかけで物理量の解放(以下「なだれ」と呼ぶ)を誘発しそれが他の要素に伝搬し、結果として、系の状態を安定に保ち、自己組織化するものがある。このシステムではどんなスケールのなだれも起き得るので、なだれの分布はべき的となる。

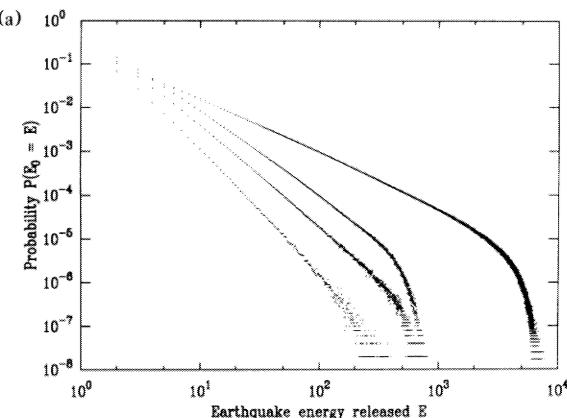


Fig.3 The distribution of the number of cells where the avalanches occur that is recognized as the magnitude. Taken from [4].

この思想を地震に応用したモデルが Olami- Feder- Christensen モデル(以下 OFC モデル)である[4]。このモデルは 2 次元格子から成る。全ての格子は、蓄えられるひずみに共通の閾値を持つ。初期条件として、各格子に閾値以下のひずみを分配する。そこに一定の割合でひずみを加えていく。最初に閾値に到達した格子では、ひずみの一部を四方の格子に分配する(なだれが起きる)。分配を受けた格子でひずみが閾値以上である場合は、そこでもなだれが発生する。なだれを起こす格子が無くなれば、なだれを起こした総格子数をその時刻でのマグニチュードとし、再び一定の割合でひずみを加える。この一連を繰り返すことで、マグニチュードの分布が得られるが、その結果を Fig.3 に[4]から転載した。両対数グラフで描いて直線の箇所があるので、べき乗則であることがわかる。複数の曲線が存在するが、閾値に達したセルの分配の割合が異なる。割合を適切に選ぶことで、実際の地震のマグニチュードの分布が再現できる。

4. 結合自己組織化臨界モデル

前節で、地震のマグニチュードの分布が、自己組織化臨界モデルで再現できることに触れた。同様なモデルを太陽フレアにも適用できそうだが、太陽フレアと地震などの現象で決定的に異なるところがある。それは 2.1 で触れたとおり、解放する物理量に閾値が存在しない点である。つまり太陽フレアにおいては、抵抗率が異常に上昇しない限り、磁場エネルギーはいくらでも蓄えられるのである。

そこで我々は、この相違点を考慮した数理モデル、結合自己組織化臨界モデルを構築した。この数理モデルには $L \times L$ 個の格子からなるシートが 2 枚存在し、それぞれ、磁場エネルギーシート、トリガーシート(Fig.4)と呼び、トリガーシートが OFC モデルのような振る舞いをする。これらのシートに対して以下のように時間発展させていく(Fig.4 参照)。

- i) $stp=0$ で、それぞれのシートのセルにランダムに値を振る。
- ii) 一定の割合で、磁場エネルギーシートとトリガーシートに $K:1$ の比で物理量の供給をする。
- iii) トリガーシートで閾値 (=1) に達したセルから「なだれ」を発生させる。その際、セルにある物理量の α を四方に分配していく。なだれ起こすセルが無くなったら、それらのセルに対応する磁場エネルギーシートのセルの磁場エネルギーを解放する。
- iv) 磁場エネルギーの β 倍をトリガーセルのどこかに分配する。
- v) stp を 1 増加させて i) に戻る。

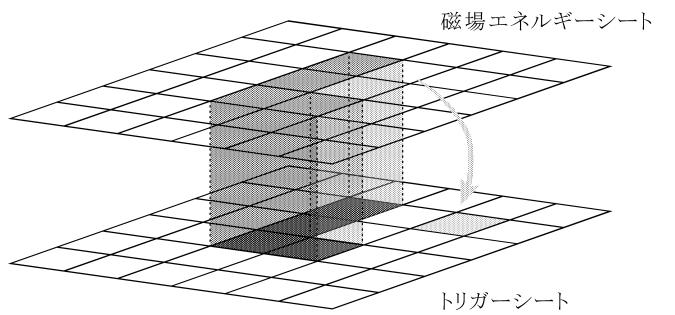


Fig.4 Schematic diagram of the coupled self-organized critical model. The upper and lower sheets represent the magnetic energy sheet and the trigger sheet, respectively. Cells in the magnetic energy sheet corresponding to cells where the avalanches have occurred in the trigger sheet is released, and a portion of it is randomly distributed to a cell in the trigger sheet.

5. シミュレーション結果

前節で導入した結合自己組織化臨界モデルのシミュレーションの結果を本節で見ていく。

5.1 積分強度

$\alpha=0.95$, $K=700$, $L=35$ の時の積分強度の分布を, β を変えて Fig.5(a)に示した。太陽フレアの観測結果と同様に, 強度が小さいところで分布がほぼ一定で, 強度が大きくなるとベキ的な振る舞いをしているのがわかる。また, β を大きくした方が, 分布が一定の度合いは顕著になることもわかる。

Fig.5(b)は, $\alpha=0.95$, $\beta=0.005$, $L=35$ での, 積分強度の分布の K 依存性を示している。分布の変化は見にくいが, K が大きい方が, 分布が一定である強度の範囲は大きくなる傾向にある。

Fig.6 に, $\alpha=0.95$, $L=35$ における積分強度のベキ指数の絶対値の β 依存性を, K を変えてプロットした。全体的に β が小さくなるとベキ指数の絶対値は大きくなる傾向にある。また, K を大きくすると, ベキ指数の絶対値は減少することもわかる。

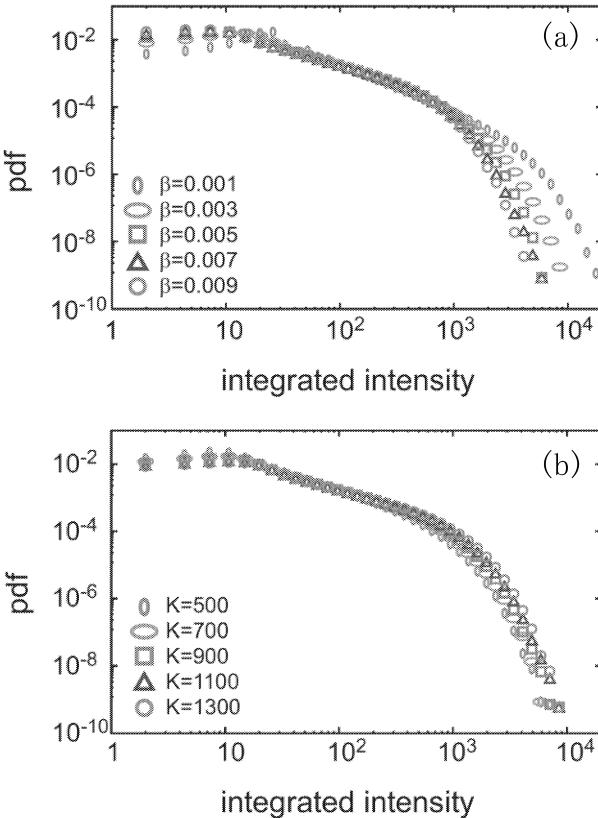


Fig.5 The probability density distribution (PDF) of the integrated intensity in a log-log scale for (a) $\alpha=0.95$, $K=700$, and $L=35$ with varying β and (b) $\alpha=0.95$, $\beta=0.005$, and $L=35$ with varying K .

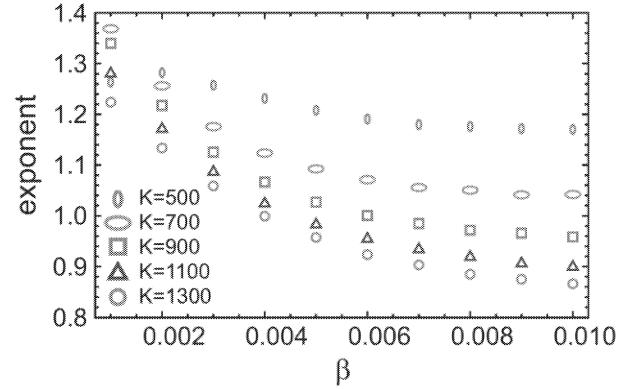


Fig.6 The dependence of the absolute value of the exponent of pdf of the integrated intensity on β for $\alpha=0.95$ and $L=35$ with varying K .

Fig.7(a)は, $\beta=0.005$, $K=500$, $L=35$ での, 積分強度の分布の α 依存性を示している。 α が小さくなると, 分布のベキ的振る舞いが無くなることがわかる。

Fig.7(b)に, $\alpha=0.95$, $\beta=0.005$, $K=500$ での積分強度の L 依存性をプロットした。 L が大きくなると, ベキ的振る舞いをする強度の範囲が広がる。

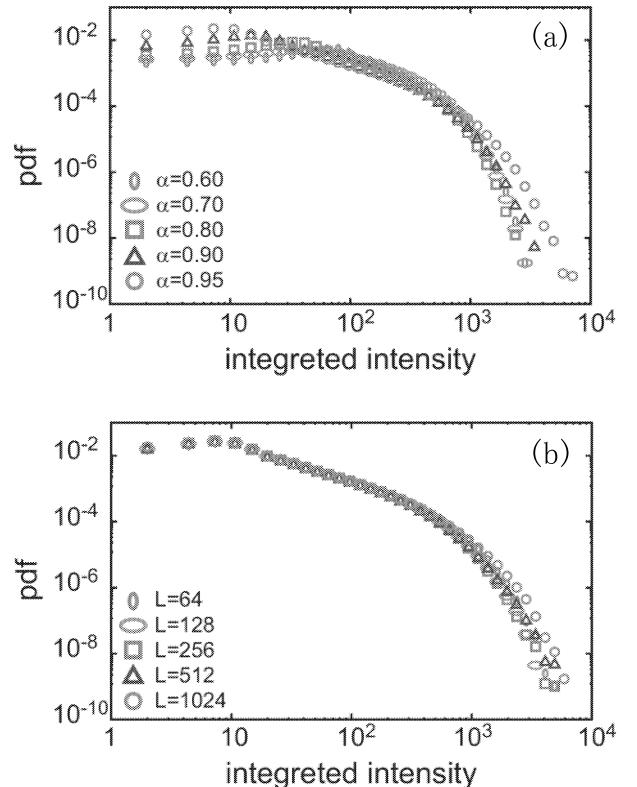


Fig.7 PDF of the integrated intensity in a log-log scale for (a) $\beta=0.005$, $K=500$, and $L=35$ with varying α and (b) $\alpha=0.95$, $\beta=0.005$, and $K=500$ with varying L .

5.2 ピーク強度分布

$\alpha=0.95$, $K=700$, $L=35$ の時のピーク強度の分布を, β を変えて Fig.8 に示した. 分布が一定の領域は存在するが, 積分強度とは異なり, ベキ的振る舞いをする範囲が小さい. また, β が小さくなると, 太陽フレアの観測結果とは相いれない分布となっていくことがわかる. ピーク強度の分布の, 他のパラメータ依存性は小さかった.

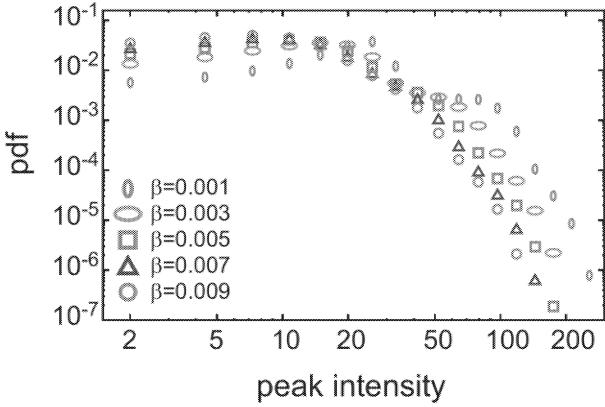


Fig.8 PDF of the peak intensity in a log-log scale for $\alpha=0.95$, $K=700$, and $L=35$ with varying β .

5.3 待ち時間

Fig.9 に, $\alpha=0.95$, $\beta=0.005$, $K=500$ での待ち時間の L 依存性をプロットした. L が大きくなると, 実際の観測結果の振る舞いに近づくことがわかる. 待ち時間の分布の, 他のパラメータ依存性は小さかった.

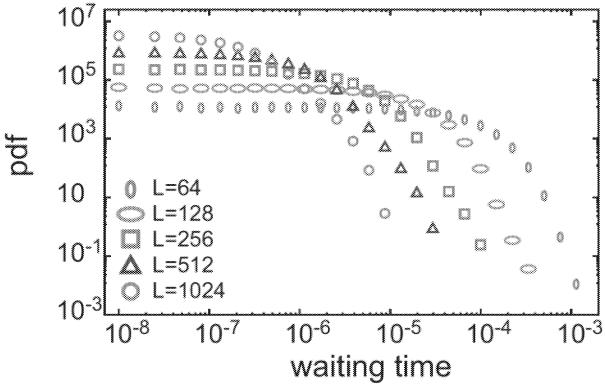


Fig.9 PDF of the waiting time in a log-log scale for $\alpha=0.95$, $\beta=0.005$, and $K=500$ with varying L .

6. モデルの妥当性の検証

ここでは, 数理モデルで仮定されているメカニズムの中で特に, 磁場エネルギーとトリガーとの相互作用の妥当性について検証する. もしこの仮定が正しいので

あれば, 積分強度が大きいフレアの後の待ち時間は小さくなるはずである. そこで, 積分強度でデータを並べてサンプル数 n が等しくなるように分割し, 積分強度の平均と待ち時間の平均の関係を調べた. 結果を Fig.10 に示した. GOES13 と 15 では, 平均積分強度が大きくなると, 次のフレアの発生時間の平均が減少していることがわかる. GOES14 ではサンプル数が少ないためゆらぎが大きく, 他と比べてエネルギーの最大値が小さいのでそのような振る舞いは見られないが, 少なくとも GOES13 と 15 の観測結果からは, 仮定したメカニズムがフレアの発生に存在しているといえそうである.

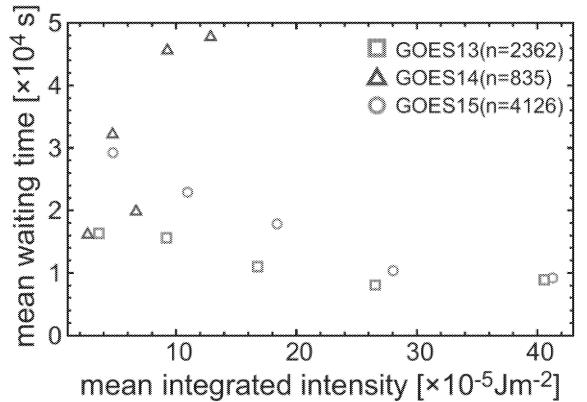


Fig.10 The mean waiting time vs. the mean integrated intensity made from the datasets observed by GOES13 (squares), GOES14 (triangles), and GOES15 (circles).

7. おわりに

本論文では, 太陽フレアの発生メカニズムを反映した数理モデルの紹介と, 数値計算の結果を示した. パラメータを適切に選ぶことで, 観測結果を再現することが出来た. つまり, 磁気リコネクションのきっかけとなる抵抗率の異常上昇に自己組織化臨界現象としての性質があることを示唆しており, それが太陽フレアの統計則の起源となっているようである. ただし, 数値計算の結果におけるピーク強度において, ベキ的振る舞いの範囲が小さいことが, 実際の観測結果を再現できていない. また, 積分強度のベキ指数が観測結果のそれと比べて小さくとも問題点として挙げられる. これらを解消することが今後の課題である.

自己組織化臨界現象として太陽フレアを扱った研究は存在する[4]. そこでは, トリガーセルは考慮されておらず, 磁場エネルギーにエネルギー解放のための閾値を設けている. 解放するエネルギーの分布はOFC モデルと同様なものになり, 分布が一定の範囲は存在せず, ベキ的振る舞いだけとなる. これは, 実際の太陽フレアの観測結果に反するし, 2.1 で概説した通り, 蕁え

られる磁場のエネルギーに限界値が存在するという設定は、そもそも磁気リコネクションの発生メカニズムにも反する。そのため、我々の数値計算の結果によって、エネルギーの分布が一定の領域を出現出来たこと(そしてベキ的な振る舞いが現れたこと)は、太陽フレアの物理に即してモデル化したことが起因となっていることを強調しておく。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、有益な議論をして頂いたお茶の水女子大学の森川雅博教授に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] S. Tsuneta et al., “Observation of a solar flare at the limb with the YOHKOH Soft X-ray Telescope”, Publications of the Astronomical Society of Japan, vol.44, pp.L63-L69, 1992.
- [2] T. Yokoyama and K. Shibata, “A two-dimensional magnetohydrodynamic simulation of chromospheric evaporation in a solar flare based on a magnetic reconnection model”, The Astrophysical Journal, vol.494, pp.L113-L116, 1998.
- [3] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, “Self-organized criticality: An explanation of the $1/f$ noise”, Physical Review Letters, vol.59, pp.381-384, 1987.
- [4] Z. Olami, H. J. S. Feder, and K. Christensen, “Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes”, Physical Review Letters, vol.68, pp.1244-1247, 1992.
- [5] E. T. Lu and R. J. Hamilton, “Avalanches and the distribution of solar flares”, Astrophys. J, vol. 380, pp.L89-L92, 1991.

研究ノート

高濃度メタノール燃料使用におけるエンジン冷機始動の課題解明

大平 哲也*

(2024年9月13日受理)

Study on Engine Combustion with Methanol Blended Fuel in Cold-Start

Tetsuya OHIRA*

(Received September 13, 2024)

Abstract

The purpose of this experimental study is to make clear root factors related to combustion instability in cold start of spark-ignited engine fueled with rich methanol blended fuel. Using a production motorcycle with single cylinder, temperature measurement from intake side, cylinder head, cylinder bore to exhaust side, and exhaust gas analysis are conducted additionally to ordinary combustion analysis over different methanol blend ratios from zero to 100%. High latent heat of vaporization of methanol causes difficulty in cold start, additionally to its poor vaporization.

キーワード:火花点火エンジン, メタノール混合燃料, 筒内圧力, 排出ガス成分濃度, 温度分布

Keywords :Spark-Ignited Engine, Methanol Blended Fuel, In-Cylinder Pressure, Exhaust Emissions, Temperature Distribution

1. はじめに

地球温暖化防止において二酸化炭素(CO₂)排出削減は必須であり、化石燃料由来のエネルギーからの転換が求められている[1]。自動車の部品材料製造、燃料の採取/精製まで含むCO₂排出のライフサイクルアセスメントによると、発電に化石燃料を使用している多くの国や地域では電気自動車が最良策にならない。エンジンを動力源としながら、化石燃料からカーボンニュートラル(CN)燃料への転換がCO₂削減効果が高いことが周知されつつある[2]。CN燃料の中でもメタノールは、食料競合のない原料から製造される液体燃料で、従来のエンジンシステムが踏襲できると期待される。一方、自動車使用上においてはエンジン冷機時の燃焼が非常に困難であるといった課題がある。

これまで、メタノール燃料エンジンについては、暖機定常運転での性能に関する報告はあるが[3～5]、冷機始動時における、燃焼の分析などを実機ベースで詳細に調べた研究報告はない。

そこで本研究では、冷機始動時の燃焼解析に加え、エンジン内温度分布、燃焼ガス成分濃度の測定などから、課題の深掘り、および改善案を示唆することを目的として進めている。

2. 実験設備、実験条件の考え方**2.1 供試燃料**

エンジン用燃料としてのメタノールの性状をガソリンと比較する(表1)と、①常温以下の蒸発圧が小さい、②蒸発潜熱が大きい、③質量当たりの発熱量が小さい特性があり、これらによって、エンジン燃焼の面では冷機時の混合気形成が不十分となり、燃焼安定性が低下する傾向となる。

Table 1. Properties of Methanol and Gasoline

	メタノール	ガソリン
密度 kg/L	0.79	0.715～0.765
粘度 mm ² /s	0.75	0.6
C/H/O 質量比	C 38 H 12 O 50 ←含酸素	C 86 H 14 O 0
初留点 °C	65 低温では蒸発しにくい	25
終留点 °C	65	190～215
蒸気圧 kPa@20°C	13	44～78
気化潜熱 kJ/kg	1110 蒸発する際に熱を奪う	380～500
低位発熱量 MJ/kg	19.7 質量当たりの発熱量が低い	42.7～43.5
理論空燃比 kg/kg	6.4	14.7
可燃範囲 %gas体積	6～36	1.0～7.6
自着火温度 °C	450	300～400
オクタン値 RON	112	98(プレミアム)

* 愛知工科大学工学部機械システム工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

メタノール混合割合の増加による燃焼特性の傾向を解析するために、メタノールとガソリンの混合比違いで4種，“M0”ガソリン100%, “M25”ガソリン75%メタノール25%, “M50”ガソリン50%メタノール50%, および“M100”メタノール100%と設定し試験を進めている。

2.2 試験車両

センサ取り付けなどの加工が容易である単気筒空冷エンジンを搭載した二輪車を供試車両に選択している。始動試験開始の温度を実用上の始動温度と試験燃料の初留温度を意識し、0°C, 20°C, 50°C, 80°Cを設定する。まずは、制御系は市販のままとしてデータを取得した後に、燃料噴射量や噴射時間、噴射タイミング、点火時期などの適合を変更して、燃焼安定性に対する感度を確認する予定である。

2.3 測定項目と装置概要

冷機始動時の燃焼不安定さの要因を調べるためにあたり、通常の燃焼による筒内圧力の解析に加え、エンジン内温度分布、燃焼ガス成分濃度の測定を行うことで、課題の深掘りから改善案を示唆することを目的として進めている。

(1) 筒内圧力測定(燃焼解析)

実車エンジンのスパークプラグ近傍に小型のピエゾ素子圧力センサーを取り付け、筒内圧力を測定し燃焼解析を行う。

始動後の燃焼安定性は、図示平均有効圧力の標準偏差を平均で割った、変動係数(COV)と、最低のIMEPを平均値比のパーセント(LNV)で評価する。

(2) エンジン各所の温度

吸気系からエンジン本体、排気系まで、計36ヶ所に、 $\phi 0.5\text{ mm}$ シースタイプ素線径 $\phi 75\mu\text{m}$ (MIN)の熱電対を配置し、時系列測定をする。

(3) ガス成分濃度分析

赤外線吸光スペクトル分析によって、多成分のガスの濃度を同時に高速で測定できる、ガス分析装置を用い、完全燃焼物であるCO₂や水、不完全燃焼物の一酸化炭素、大気汚染物質であるSO_x、NO_x、未燃生成物であるメタノール、メタン、エチレンやベンゼン等の炭化水素、計18種類を対象として分析する。

燃焼状態を分析するため、排出ガスを排気ポート下流で排ガス浄化触媒前からサンプリングし、シリンダからクランクケースに漏れる未燃成分を分析するため、プローバイガスをクランクケースからサンプリングする。

3. 実験と考察の進め方

3.1 燃料噴射量、滴下量の測定

表1のとおり燃料によって、動粘度、常温での蒸気圧が異なるため、実際にインジェクタで噴射して消費した燃料量から、噴射時間/回数に対する噴射量を計算する。また、シリンダヘッド吸気ポートに燃料噴射して飛散・蒸発せず滴下する量(燃焼に利用されにくい)をメスシリンダーで測定する。これらから、燃料の違い、温度の違いで、噴射量に対する飛散・蒸発せず滴下した量の割合を求めて比較考察する。ポート壁面の付着量算出は参考文献[6]に従う。

3.2 エンジン始動時の燃焼安定性

始動時のクランクングから始動後約10秒間のエンジン回転数と図示平均有効圧力の推移を調べる。始動温度違い、および燃料違いの各条件で10回の有効データが得られるように実験し、始動後の燃焼変動係数COVの平均値、LNV最低値を導く予定である。

3.3 始動後のエンジン各所の温度

クランクングから始動後数分にわたり、エンジン各所の温度を調べ、温度上昇の違いや燃料による蒸発潜熱違いの影響を調べる。特に、混合気形成の要点となる吸気系温度については、複数の測定点を設けて分析する。燃料の初留温度が異なることを考察に加え、冷機始動からの暖機過程で何をどのように昇温させれば良いかなどの評価に結びつけていく予定である。

3.4 始動後の排出ガス成分濃度

排出ガスの成分、濃度から燃焼状態が推察できる。多成分の濃度がほぼ同時に計測できることから、初爆でのCO₂濃度の立ち上がりを起点に、他の未燃成分や、不完全燃焼で発生する成分を時系列で分析する。メタノール含有割合によるそれらの変化が主な分析ポイントである。

また、燃焼ガスがピストンリングでシールできず、シリンダからクランクケースにリークするガスを、クランクケースからサンプリングして分析することで、混合気や燃焼ガスの状態を推察する際の補足を行う。

4. おわりに

高濃度メタノール燃料の冷機始動の難しさを深掘りしているが、実機実験を重ねることで、吸気系温度など課題点が徐々に具体的になってきている。引き続き、さらに冷機始動が困難なメタノール100%燃料や0°C

での始動試験にトライし、改善策の検討につなげていく。

実車試験では少しの条件違いでデータの再現性が損なわれる。特に、燃焼状態が直接反映される排出ガスデータは敏感であり、試験後から次の試験までの手順を細かく決めて取り組んでいる。

謝辞

本研究はスズキ株式会社との共同研究契約に基づき進めている。スズキ株式会社の関係各位の他、数多くの実験データを工夫して取得している研究室の学生、部品の製作を助けてくださる工作センター深谷先生、事務局など、多くの方々からのサポートをいただきしており、感謝申し上げる。本学ならではの協力体制のありがたさを実感しているところである。

参考文献

- [1] 国土交通省気象庁，“大気中二酸化炭素濃度の変動とその要因”，気象庁ホームページ、知識・解説－温室効果ガス Web 科学館-展示室3から、(参照日 2024 年 8 月 30 日, https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/tour/tour_a3.html) .
- [2] 一般社団法人日本自動車工業会，“カーボンニュートラルの基礎知識”，自動車工業会ホームページ、自工会の活動から、(参照日 2024 年 8 月 30 日, https://www.jama.or.jp/operation/ecology/carbon_neutral_data/pdf/CNData_12.pdf) .
- [3] 一宮徹, 伊藤純雄, 高橋和夫, 成岡孝夫, 佐藤康夫, 古屋末広, ”メタノール燃料自動車 エンジン性能解析, エミッション評価および二, 三の検討”, トヨタ技術, 第 31 卷第 2 号, p.171. 1981.
- [4] G.P. Batalha, S. Schmidt, R. Kirchberger, “Impacts of methanol blended fuels in emissions and operating performance of two-wheelers,” SAE Paper 2022-32-0021, 2022.
- [5] 燃料の相違によるガソリンエンジンの燃焼状態(メタノール 100%の場合), 中山英夫, 橋場博道, 中日本自動車短期大学論, 第 26 号, 1996.
- [6] 高橋幸宏, 中瀬善博, 加藤雄一, “ポート噴射エンジンにおける付着燃料の液膜厚さ解析”, デンソーテクニカルレビュー, Vol.13 No.1, 2008.

研究ノート

拡張カルマンフィルタによる自己位置推定法の評価

栗田 寛樹*

(2024年9月30日受理)

Evaluation of Self-localisation Method using Extended Kalman Filter

Hiroki KURITA*

(Received September 30, 2024)

Abstract

This paper describes a landmark-based localisation method using extended Kalman filter for GNSS-denied environment. The method is evaluated through simulation based on actual field data. The results show that the method has enough accuracy for autonomous traveling in field environment. The limitation of this method is also discussed.

キーワード: 果樹園, 自律走行, LiDAR, GNSS, ランドマーク

Keywords : Orchard, Autonomous traveling, LiDAR, GNSS, Landmark

1. はじめに

従来の日本における農業機械の研究開発は、農作業の軽労化を主たる目的として進められてきた。その結果、水田作や畑作などの土地利用型作物を中心に効率的な機械化体系が構築され、これらの作物においてはほぼ機械化が確立されている。

一方で農業従事者の減少および高齢化の傾向は続いている。我が国の農業における持続可能性・競争力維持における深刻な課題となっている。5年ごとに行われる農林業センサスによると、2010年から2015年までに農業従事者数(自営農業に1日以上従事した者)で114万人(25.1%)、基幹的農業従事者(仕事として自営農業に主として従事した者)で30万人(14.5%)の減少と報告されており、販売農家の農業就業人口(自営農業に主として従事した者)の平均年齢は66.4歳となっている。新規就農者数に関しては2010年以降5万人台で推移しているが、減少数を補うに足る水準には至っていない。このような状況に対して、今後本邦農業の持続的発展のためには、作業者1人当たりの作業効率を高め、より高効率・省力化された農業を志向するべきであると考えられる。

これを実現する手段として、農業機械の自動化に関する研究の重要性が近年ますます高まっている。とりわけ、コメ・ムギ・ダイズなどの土地利用型作物では、農業機械の自動化による農作業の効率化・省力化の

研究開発が行われており、農業機械自動化の試みとして、トラクタ[1, 2]、田植え機[3, 4]、自脱コンバイン[5, 6]などが報告されている。

これら土地利用型作物を対象とした機械の自動化においては、自己位置の計測にGNSS(Global Navigation Satellite System)、すなわち衛星測位システムが用いられている。RTK(Real-time Kinematic)測位を利用することによって、誤差数センチメートルの精度で計測が可能であるため、上空の開けた圃場ではGNSSが最も信頼性の高い手法と考えられる。しかしながら、屋根がある場合や近くに高い建物・木々等がある環境では衛星測位の信頼性が低下するか、または利用することができない。

そこで本報告では、衛星測位が利用できない屋外環境を想定し、2D-LiDAR(Light Detection and Ranging)で検出したランドマークに基づく拡張カルマンフィルタを用いた自己位置推定法の精度をシミュレーション実験を通して検証する。

2. 想定する状況とデータ取得

我が国の耕地利用では歴史的に、農耕に適した平地がコメを主とする土地利用型作物の生産に充てられ、それ以外の作物はコメ生産に不適な平地や中山間地において生産してきた。とりわけ果樹はその傾向が強く、2015年の栽培面積のうち約40%を中山間

* 愛知工科大学工学部機械システム学科、〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2

Department of Mechanical System Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

地が占めている。そのため果樹園圃場 (orchard) では近傍に樹木がある場合が多く、衛星測位の利用可能性は十分ではない。また、果樹生産の機械化・自動化の研究は今後の果樹生産における効率化・省力化を図る上で重要性が増している。そこで Fig. 1 に示すような果樹園圃場で作業用車両が自律走行を行う状況を想定した。

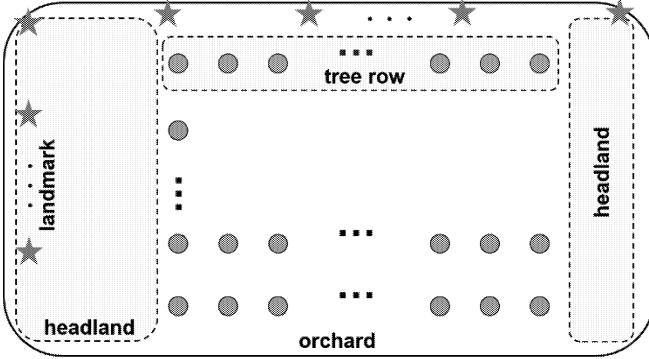


Fig. 1 Orchard and landmarks.

機械を用いた作業を前提とした果樹園では通常、圃場の端に枕地 (headland) が設けられる。これは機械の旋回等に用いられるスペースであり、栽培は行われない。Fig. 1 中の星印で示したもののがランドマーク (landmark) であり、自律走行や作業者の邪魔にならない場所に設置されているとする。また、ランドマークの相対的な位置関係は既知とする。

このような果樹園を想定した平地において、ランドマークを設置し、2D-LiDAR (UXM-30, Hokuyo) を用いて距離情報を取得した。同時に GNSS と IMU を用いて位置・方位データを取得した。

3. シミュレーション実験

3.1 自己位置推定法

Fig. 2 に、車両座標系と世界座標系の関係を示す。

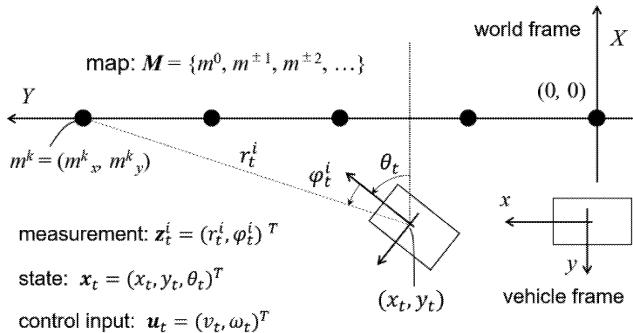


Fig. 2 World frame and vehicle frame.

図中に使用した記号は Table 1 の通りである。添字の t は時刻 t における値であることを示す。

Table 1 Nomenclature

x_t, y_t, θ_t	車両の位置、方位
m^k	k 番目のランドマーク座標
M	ランドマーク座標の集合
v_t	入力速度
ω_t	入力角速度
r_t^i	i 番目のランドマークまでの距離
ϕ_t^i	i 番目のランドマークの方向

時刻 $t-1$ における事後推定値、車両モデル及び制御入力 (control input) に基づき、時刻 t における予測更新を行う。次に 2D-LiDAR のデータからランドマークを検出し、観測更新を行って事後推定値 (x_t, y_t, θ_t) を得る。これが時刻 t における推定された状態となる[7]。

3.2 結果及び考察

3. 1節の手法を実装し、パラメータのチューニングを行って自己位置の推定値を得た。同時に取得していた GNSS 及び IMU の値を真値とみなし、これらとの二乗平均平方根誤差を求めたところ、 (x, y, θ) の各値について、 $(0.05\text{m}, 0.06\text{m}, 0.05\text{rad})$ という結果を得た。これらは果樹園内での自律走行を想定した場合、十分な精度であると考えられる。

4. おわりに

本報告では、衛星測位が不適または使用できない環境を想定し、ランドマークに基づく拡張カルマンフィルタを用いた自己位置推定法の精度を検証した。実際に取得した LiDAR データを用いたシミュレーション実験の結果、自律走行に十分な精度が得られた。

今回は Fig. 1 に示すようなレイアウトの果樹園を想定した。一方で実際の果樹園は様々な形態が存在する。同様に、果樹が樹列 (tree row) として植樹されていない場合も多い。果樹の栽培方法・仕立て法は様々であり、同一品種でも植樹・栽培・仕立てが異なれば全く違う樹種であるかのような外観を呈する。そのため、ランドマークの設置場所によっては車両からランドマークが検出できない場合が生じると考えられる。したがって本手法は自律走行のために十分な精度を有するものの、有効に活用するためにはランドマークの設置方法に加えて、植樹・栽培・仕立てに対するアプローチも必要になると考えられる。

参考文献

- [1] 石田 三佳, 莊生 憲司, 岡戸 敦史, 竹永 博, 本田 善文, 糸川 信弘, 濵谷 幸憲, “飼料生産圃場における自律走行トラクタに関する研究,” 農業機械学会誌, vol.60, no.2, pp.59-66, 1998.
- [2] R. Takai, O. Barawid, Jr., K. Ishii and N. Noguchi, “Development of crawler-type robot tractor based on GPS and IMU,” Proceedings of the 3rd IFAC International Conference AGRICONTROL 2010, A3-5, December 2010.
- [3] Y. Nagasaka, N. Umeda, Y. Kanetani, K. Taniwaki and Y. Sasaki, “Automated rice transplanter using global positioning and gyroscopes,” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 43, no. 3, pp.223-234, 2004.
- [4] Y. Nagasaka, H. Saito, K. Tamaki, M. Seki, K. Kobayashi and K. Taniwaki, “An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit,” Journal of Field Robotics, vol. 26, no. 6-7, pp.537-548, 2009.
- [5] 飯田 訓久, 山田 裕介, “GPS とジャイロを用いた無人コンバインによる稲収穫,” 農業機械学会誌, vol.68, no.6, pp.138-143, 2006.
- [6] H. Kurita, M. Iida, W. Cho, and M. Suguri, “Operation framework,” Journal of Field Robotics, vol. 34, no. 6, pp.1084-1099, 2017.
- [7] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox, “Probabilistic Robotics”, The MIT Press, Massachusetts, 2006.

解説・総説

有理関数のモジュロ演算を用いた定数係数線形微分方程式の 微分演算子法

大迫 尚行*

(2024年9月30日受理)

Differential Operator Methods for Constant Coefficient Linear Differential Equations Using Modulo Operations on Rational Functions

Naoyuki OHSAKO*

(Received September 30, 2024)

This paper describes a method for finding particular solutions to constant coefficient linear differential equations of non-homogeneous form described by the differential operator D , using modulo operations on rational functions[2]. Specifically, we will discuss examples in which the function on the right-hand side of the nonhomogeneous equation is or is not a solution of a certain homogeneous form.

キーワード: 微分演算子, 多項式, 有理関数, 非同次方程式, 特殊解, Leibniz の公式, シフト則, モジュロ演算

Keywords : Differential operator, Polynomial, Rational function, Nonhomogeneous equation, Particular solution, Leibniz's formula, Shift rule, Modulo operation

1. はじめに

定数係数線形微分方程式の解を求める方法の1つに微分演算子法がある。方程式の右辺が0の場合を同次方程式、そうでない場合を非同次方程式とよぶこととする。同次方程式の場合は、多項式の因数分解ができれば容易に解くことができる。一方、非同次方程式の特殊解を求める場合は、右辺の関数に応じて、公式を選択して解く必要があり[1]、筆者は学生のときに、公式の選択に戸惑い、スムーズに解くことができなかつた苦い記憶がある。あるとき、複数の学生から質問を受けたことがきっかけとなり、解法を整理して、スムーズに解くことができる方法を考えてみようと思い立った。

本論文では、非同次方程式の右辺が、ある同次方程式の解である場合と、そうでない場合に分けて、有理関数のモジュロ演算[2]を用いて、特殊解を求める方法について説明し、具体的な計算例も示す。

2. 定数係数線形微分方程式と微分演算子

まず、本論文で用いる有理関数のモジュロ演算[2]に関する定義や計算式を改めて示しておく。

正の整数(自然数)全体を \mathbb{N} 、実数全体を \mathbb{R} 、複素数

全体を \mathbb{C} とする。係数が \mathbb{R} または \mathbb{C} の元で、変数 $x \in \mathbb{R}$ の多項式全体をそれぞれ $\mathbb{R}[x]$, $\mathbb{C}[x]$ と表す。以下、係数が \mathbb{R} の場合の定義を示すが、 \mathbb{C} の場合も同様に定義される。 $P \in \mathbb{R}[x]$ に対して、 P の x に関する次数を $\deg P$ と表す。特に、 $P = 0$ のとき、 $\deg P = -\infty$ とする。また、 x の最高次の係数を主係数という。

$F, G \in \mathbb{R}[x] \setminus \{0\}$ に対して、 F と G の最大公約因子で、主係数が1のものを $\gcd(F, G)$ と表す。特に、 $\gcd(F, G) = 1$ のとき、 F と G は互いに素であるという。

$P, M \in \mathbb{R}[x] \setminus \{0\}$ に対して、 P を M で割ったときの余り R を $P \bmod M$ と表す。このとき、 $\deg R < \deg M$ となる。また、 $P, \tilde{P} \in \mathbb{R}[x]$ が、ともに M で割ったときの余りが等しいとき、 $P \equiv \tilde{P} \pmod{M}$ と表し、 P と \tilde{P} は M を法として合同であるという。

$P, M \in \mathbb{R}[x] \setminus \{0\}$, $\gcd(P, M) = 1$ のとき、 $AP + BM = 1$, $\deg A < \deg M$, $\deg B < \deg P$ を満たす $A, B \in \mathbb{R}[x]$ が一意に存在する。このとき、 $AP \equiv 1 \pmod{M}$ となり、 M を法とした P の乗法逆元を $\frac{1}{P} \pmod{M} := A$ と定義する。

$P_1 \equiv \tilde{P}_1 \pmod{M}$, $P_2 \equiv \tilde{P}_2 \pmod{M}$ のとき、 $P_1 \pm P_2 \equiv \tilde{P}_1 \pm \tilde{P}_2 \pmod{M}$, $P_1 P_2 \equiv \tilde{P}_1 \tilde{P}_2 \pmod{M}$ が成り立ち、これより、和、差、積に関するモジュラ演算の計算式 $(P_1 \pm P_2) \bmod M = (P_1 \bmod M \pm P_2 \bmod M) \bmod M$, $(P_1 P_2) \bmod M = \{(P_1 \bmod M)(P_2 \bmod M)\} \bmod M$ が得られる。さらに、 $\gcd(P_1, M) = 1$ のとき、 $\gcd(\tilde{P}_1, M) = 1$,

* 愛知工科大学総合教育センター, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乘 50-2
General Education Center, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

$\frac{P_2}{P_1} \equiv \frac{\widetilde{P}_2}{\widetilde{P}_1} \pmod{M}$ が成り立つ。また、 $C \in \mathbb{R}[x] \setminus \{0\}$, $\gcd(C, M) = 1$ のとき、 $\frac{P_2}{P_1} \equiv \frac{CP_2}{CP_1} \pmod{M}$ が成り立ち、特に $CP_1 \equiv 1 \pmod{M}$ のとき、 $\frac{P_2}{P_1} \equiv CP_2 \pmod{M}$ となる。商に関するモジュラ演算の計算式も和、差、積と同様に $\frac{P_2}{P_1} \pmod{M} = \frac{P_2 \pmod{M}}{P_1 \pmod{M}} \pmod{M}$ が得られる。

微分演算子 D を $D := \frac{d}{dx}$ とする。変数 x の多項式全体も変数 x の場合と同様に係数 \mathbb{R} , \mathbb{C} に応じて $\mathbb{R}[D]$, $\mathbb{C}[D]$ と表すことにする。 y の x に関する高階微分を微分演算子 D で表すと、 $y^{(1)} := \frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx}y = Dy$, $y^{(2)} := \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d}{dx}\left(\frac{dy}{dx}\right) = D(Dy) = D^2y, \dots$, $y^{(n)} := \frac{d^n y}{dx^n} = \frac{d}{dx}\left(\frac{d^{n-1}y}{dx^{n-1}}\right) = D(D^{n-1}y) = D^n y$ ($n \in \mathbb{N}$) となる。

定数係数線形微分方程式

$y^{(n)} + a_1y^{(n-1)} + \dots + a_ny = f(x)$, $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{C}$ において、 $P(D) = D^n + a_1D^{n-1} + \dots + a_n$ とおくと、

$$P(D)y = f(x), P(D) \in \mathbb{C}[D] \quad (2.1)$$

と簡潔に表すことができる。右辺 $f(x)$ が恒等的に 0 となる関数のとき、(2.1) は同次方程式といい、そうでないとき、非同次方程式といい。非同次方程式の解の 1 つを特殊解という。本論文では、 $\mathbb{C}[D]$ におけるモジュラ演算 [2] を用いて、(2.1) の特殊解を求める。まずは、議論に必要な事項を述べる。特に誤解が生じない限り、記号の簡略化のために、例えば変数 D の多項式 $P(D)$ の D を省略して、 P と表記する。

定義 2.1. $P \in \mathbb{C}[D]$ に対して、同次方程式 $P(D)y = 0$ の解全体を $\text{Ker } P = \{y \mid P(D)y = 0\}$ と定義する。

$y \in \text{Ker } P$ を $f(x) \neq 0$ のときの非同次方程式 (2.1) の余関数という。

定義 2.2. $P \in \mathbb{C}[D]$ において、 $y_1 - y_2 \in \text{Ker } P$ が成り立つとき、 $y_1 \equiv y_2 \pmod{\text{Ker } P}$ と表し、 y_1 と y_2 は $\text{Ker } P$ を法として等しいといふ。

命題 2.1. $P \in \mathbb{C}[D]$ に対して、 y_1, y_2 をそれぞれ同じ非同次方程式 $P(D)y = f(x)$ の特殊解とすると、 $y_1 \equiv y_2 \pmod{\text{Ker } P}$ すなわち、特殊解は $\text{Ker } P$ を法として、一意的である。

[証明] 仮定より、 $P(D)y_j = f(x)$ ($j = 1, 2$) となるから、これらの差をとると、 $P(D)(y_1 - y_2) = 0$ すなわち、 $y_1 - y_2 \in \text{Ker } P$ より、 $y_1 \equiv y_2 \pmod{\text{Ker } P}$ (証明終)

命題 2.1 より、非同次方程式の特殊解を求めるときは、余関数は 0 とみなして考える。

補題 2.1. $P \in \mathbb{C}[D]$ が互いに素な多項式 P_j ($1 \leq j \leq t$) で $P = P_1P_2 \cdots P_t$ と因数分解されるとき、

$$\overline{P}_j := \frac{P}{P_j} \in \mathbb{C}[D] \quad (1 \leq j \leq t) \quad (2.2)$$

$$A_j := \frac{1}{\overline{P}_j} \pmod{P_j} \in \mathbb{C}[D] \quad (1 \leq j \leq t) \quad (2.3)$$

とおけば、

$$\sum_{j=1}^t A_j \overline{P}_j = 1 \quad (2.4)$$

が成り立つ。

[証明] 仮定と (2.2) より、各 j について、 \overline{P}_j と P_j は互いに素となるから $A_j \overline{P}_j + B_j P_j = 1$, $\deg A_j < \deg P_j$, $\deg B_j < \deg \overline{P}_j$ を満たす $A_j, B_j \in \mathbb{C}[D]$ が一意に存在する。これより、 $A_j \overline{P}_j \equiv 1 \pmod{P_j}$ すなわち、(2.3) を満たす A_j が定義される。ここで、(2.4) の左辺を X とおけば、 $X \equiv 1 \pmod{P_j}$ ($1 \leq j \leq t$) となる。また、各 P_j は互いに素であるから、 $X \equiv 1 \pmod{P}$ すなわち $X - 1 \equiv 0 \pmod{P}$ となり、 $X - 1$ は P を因数に持つ。さらに、 X の (2.4) 左辺による各項は、 $\deg A_j < \deg P_j$, $P_j \overline{P}_j = P$ より、 P の次数より小さくなるから、 $\deg X < \deg P$ となる。したがって、 $X - 1$ は恒等的に 0 となり、(2.4) が成り立つ。(証明終)

命題 2.2. $P \in \mathbb{C}[D]$ が補題 2.1 の条件を満たすとき、 $\text{Ker } P = \bigoplus_{j=1}^t \text{Ker } P_j$ と直和分解される。

[証明] まず、 $\text{Ker } P = \sum_{j=1}^t \text{Ker } P_j$ を示す。 $y \in \text{Ker } P$ を任意にとると、(2.4) より、 $y = 1y = \sum_{j=1}^t A_j \overline{P}_j y$ となる。ここで、 $y_j := A_j \overline{P}_j y$ ($1 \leq j \leq t$) とおくと、 $y = \sum_{j=1}^t y_j$ となる。また、 $P_j y_j = A_j P_j y = 0$ ($1 \leq j \leq t$) より、 $y_j \in \text{Ker } P_j$ ($1 \leq j \leq t$) となる。したがって、 $y \in \sum_{j=1}^t \text{Ker } P_j$ より、 $\text{Ker } P \subset \sum_{j=1}^t \text{Ker } P_j$ がいえる。逆の包含関係は、 $\text{Ker } P_j \subset \text{Ker } P$ ($1 \leq j \leq t$) よりいえる。

次に、 $\text{Ker } P_j \cap (\sum_{k \neq j} \text{Ker } P_k) = \{0\}$ ($1 \leq j \leq t$) を示す。 $y \in \text{Ker } P_j \cap (\sum_{k \neq j} \text{Ker } P_k)$ を任意にとり、 $y = 0$ を示せばよい。(2.4) を用いて y を表すと、 $y = \sum_{k=1}^t A_k \overline{P}_k y$ となる。ここで、 $P_j y = 0$ より $\overline{P}_k y = 0$ ($k \neq j$) となるから、 $y = A_j \overline{P}_j y$ となる。また、 $y \in \sum_{k \neq j} \text{Ker } P_k$ より、 $y = \sum_{k \neq j} y_k$, $y_k \in \text{Ker } P_k$ ($k \neq j$) と表されるから、 $y = A_j \overline{P}_j (\sum_{k \neq j} y_k) = \sum_{k \neq j} A_j \overline{P}_j y_k = 0$ となる。(証明終)

命題 2.3.(シフト則) $P \in \mathbb{C}[D]$ に対して、2 つの関数 $e^{\alpha x}$ ($\alpha \in \mathbb{C}$), $f(x)$ の積 $e^{\alpha x}f(x)$ について、

$$P(D)e^{\alpha x}f(x) = e^{\alpha x}P(D + \alpha)f(x) \quad (2.5)$$

が成り立つ。これをシフト則とよぶことにする。

[証明] $P(D) = \sum_{j=0}^n a_j D^j$ とする。関数の積 $e^{\alpha x}f(x)$ について、Leibniz の公式により、

$$\begin{aligned} D^j e^{\alpha x}f(x) &= \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} D^k e^{\alpha x} \cdot D^{j-k} f(x) \\ &= \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} \alpha^k e^{\alpha x} \cdot D^{j-k} f(x) \\ &= e^{\alpha x} \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} \alpha^k \cdot D^{j-k} f(x) \\ &= e^{\alpha x} (D + \alpha)^j f(x) \end{aligned}$$

となる。したがって、

$$P(D)e^{\alpha x}f(x) = \sum_{j=0}^n a_j D^j e^{\alpha x}f(x)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{j=0}^n a_j e^{\alpha x} (D + \alpha)^j f(x) \\
&= e^{\alpha x} \sum_{j=0}^n a_j (D + \alpha)^j f(x) \\
&= e^{\alpha x} P(D + \alpha) f(x)
\end{aligned}$$

(証明終)

$n \in \mathbb{N}$ に対して, $\text{Ker } D^n = \{y \mid D^n y = 0\} = \{y \in \mathbb{C}[x] \mid \deg y < n\}$ となるから, 同次方程式 $(D - \alpha)^n y = 0$ ($\alpha \in \mathbb{C}$) の解は, 左辺に対して, 命題 2.3(シフト則)より, $(D - \alpha)^n y = (D - \alpha)^n e^{\alpha x} e^{-\alpha x} y = e^{\alpha x} D^n e^{-\alpha x} y$ となり, $e^{-\alpha x} y \in \text{Ker } D^n$ となる. すなわち,

$$y = e^{\alpha x} w(x), w(x) \in \mathbb{C}[x], \deg w < n \quad (2.6)$$

と表される. したがって, $\text{Ker } (D - \alpha)^n = \{e^{\alpha x} w \mid w \in \mathbb{C}[x], \deg w < n\}$ となる. よって, 次の系を得る.

系 2.1. 命題 2.2 において, $P_j(D) = (D - \alpha_j)^{v_j}, \alpha_j \in \mathbb{C}, v_j \in \mathbb{N}, \alpha_j \neq \alpha_k (j \neq k) (1 \leq j \leq t)$ のとき,

$$\text{Ker } P = \bigoplus_{j=1}^t \{e^{\alpha_j x} w_j \mid w_j \in \mathbb{C}[x], \deg w_j < v_j\} \quad (2.7)$$

すなわち, 同次方程式 $P(D)y = 0$ の解 y は,

$$\begin{aligned}
y &= \sum_{j=1}^t e^{\alpha_j x} w_j, \\
w_j &\in \mathbb{C}[x], \deg w_j < v_j (1 \leq j \leq t)
\end{aligned} \quad (2.8)$$

の形に表される.

3. 非同次方程式の特殊解の求め方

$P \in \mathbb{C}[D], f(x) \neq 0$ として, 非同次方程式

$$P(D)y = f(x) \quad (3.1)$$

の右辺 $f(x)$ が, ある同次方程式の解, すなわち

$$M \in \mathbb{C}[D], M(D)f(x) = 0 \quad (3.2)$$

の場合を考える. このとき, (3.1)の特殊解は有理関数のモジュロ演算を用いて得られることを示す.

補題 3.1. $M, M_o \in \mathbb{C}[D]$ が (3.2) を満たすとき, $G := \gcd(M, M_o)$ とおけば, $G \neq 1$ となり, G も (3.2) を満たす.

[証明] $M, M_o \in \mathbb{C}[D]$ が (3.2) を満たすとする.

まず, $G \neq 1$ を示す. $G = 1$ と仮定すると, $AM + BM_o = 1$ を満たす $A, B \in \mathbb{C}[D]$ が存在する. このとき,

$$\begin{aligned}
f(x) &= (A(D)M(D) + B(D)M_o(D))f(x) \\
&= A(D)M(D)f(x) + B(D)M_o(D)f(x) = 0
\end{aligned}$$

となる. これは, $f(x) \neq 0$ に矛盾する. したがって, $G \neq 1$ となる.

次に, G が (3.2) を満たすことを示す. $G \neq 1$ が M と M_o の最大公約因子であることから, M と M_o は, 互いに素な \tilde{M}, \tilde{M}_o と G で, $M = \tilde{M}G, M_o = \tilde{M}_oG$ と表される. \tilde{M} と \tilde{M}_o は互いに素であるから, $\tilde{A}\tilde{M} + \tilde{B}\tilde{M}_o = 1$ を満たす $\tilde{A}, \tilde{B} \in \mathbb{C}[D]$ が存在する. したがって,

$$G(D)f(x) = G(D)(\tilde{A}(D)\tilde{M}(D) + \tilde{B}(D)\tilde{M}_o(D))f(x)$$

$= \tilde{A}(D)M(D)f(x) + \tilde{B}(D)M_o(D)f(x) = 0$ となり, G が (3.2) を満たすことが示された. (証明終)

命題 3.1. 非同次方程式 (3.1) の右辺 $f(x)$ が (3.2) を満たし, P と M が互いに素であるとき, (3.1) の特殊解 y は

$$y = \left(\frac{1}{P(D)} \bmod M(D) \right) f(x) \quad (3.3)$$

で与えられ, $\text{Ker } P$ を法として一意的である.

[証明] まず, (3.1) と (3.2) から

$$\begin{aligned}
P(D)M(D)y &= M(D)P(D)y = M(D)f(x) = 0 \\
\text{すなわち, }
\end{aligned}$$

$$M(D)y \equiv 0 \pmod{\text{Ker } P} \quad (3.4)$$

また, P と M が互いに素であるから,

$$\begin{aligned}
A(D)P(D) + B(D)M(D) &= 1 \\
\deg A < \deg M, \deg B < \deg P
\end{aligned} \quad (3.5)$$

を満たす $A, B \in \mathbb{C}[x]$ が一意に存在する. ここで, $A(D) = \frac{1}{P(D)} \bmod M(D)$ である. このとき, (3.1) の両辺に左から $A(D)$ を作用させ, $A(D)P(D)y = A(D)f(x)$ として, これと (3.4), (3.5) より,

$$\begin{aligned}
y - A(D)f(x) &= y - A(D)P(D)y = (1 - A(D)P(D))y \\
&= B(D)M(D)y \equiv 0 \pmod{\text{Ker } P}
\end{aligned}$$

すなわち, $y \equiv A(D)f(x) \pmod{\text{Ker } P}$ となり, (3.1) の特殊解は (3.3) で与えられる.

次に, (3.3) で与えられる特殊解 y は, (3.2) を満たす M の取り方によらずに $\text{Ker } P$ を法として一意的であることを示す. $M_o \in \mathbb{C}[D], M_o(D)f(x) = 0$ とし, P と互いに素であるとすると, (3.5) と同様に,

$$\begin{aligned}
A_o(D)P(D) + B_o(D)M_o(D) &= 1, \\
\deg A_o < \deg M_o, \deg B_o < \deg P
\end{aligned} \quad (3.6)$$

を満たす $A_o, B_o \in \mathbb{C}[D]$ が一意に存在し, $A_o(D) = \frac{1}{P(D)} \bmod M_o(D)$ である. 一方, 補題 3.1 より, $\gcd(M, M_o) \neq 1$ となり, これを G とすると, G も (3.2) を満たし, P と互いに素である. このとき, (3.5) と (3.6) より,

$A(D)P(D) \equiv 1 \pmod{G(D)}, A_o(D)P(D) \equiv 1 \pmod{G(D)}$ から, $A(D)P(D) \equiv A_o(D)P(D) \pmod{G(D)}$ となる. ここで, G と P は互いに素であるから, $A(D) \equiv A_o(D) \pmod{G(D)}$ となる. これより, A, A_o をそれぞれ G で割ったときの余りは等しいことになり, そのときの余りを R, Q, Q_o とすると, $A = QG + R, A_o = Q_oG + R$ と表される. これらの関係式と $G(D)f(x) = 0$ より, M と M_o に対して, (3.3) の右辺を比較すると,

$$\begin{aligned}
A(D)f(x) &= (Q(D)G(D) + R(D))f(x) = R(D)f(x), \\
A_o(D)f(x) &= (Q_o(D)G(D) + R(D))f(x) = R(D)f(x)
\end{aligned}$$

となり, 両者は一致する. (証明終)

非同次方程式 (3.1) の右辺 $f(x)$ が複数の項 $f_j(x)$ の和で, $f(x) = \sum_{j=1}^t f_j(x)$ と表されているとき, $P(D)y_j = f_j(x)$ の特殊解を y_j として, $y := \sum_{j=1}^t y_j$ とおけば, $P(D)y = \sum_{j=1}^t P(D)y_j = \sum_{j=1}^t f_j(x) = f(x)$ となり, y は $P(D)y = f(x)$ の特殊解となることが容易に確認できる. $f(x) \neq 0$ に対して, (3.2) を満たす M が

$$M = M_1 M_2 \cdots M_t, M_j(D) = (D - \alpha_j)^{v_j}, \alpha_j \in \mathbb{C}, v_j \in \mathbb{N},$$

$$\alpha_j \neq \alpha_k (j \neq k) (1 \leq j \leq t)$$

と因数分解されるととき、系 2.1 の(2.8)右辺より、 $f(x)$ は、 $e^{\alpha x} x^{n-1}, \alpha \in \mathbb{C}, n \in \mathbb{N}$ の形の項の一次結合で表されるから、 $P(D)y = e^{\alpha x} x^{n-1}$ の特殊解を求めることが本質的である。この場合の特殊解を次の命題で与える。

命題 3.2. $P \in \mathbb{C}[D]$ として、非同次方程式

$$P(D)y = e^{\alpha x} x^{n-1}, \alpha \in \mathbb{C}, n \in \mathbb{N} \quad (3.7)$$

は、シフト則より、

$$P(D + \alpha)e^{-\alpha x}y = x^{n-1} \quad (3.8)$$

に帰着される。したがって、 $P(D + \alpha)$ と D^n が互いに素であるとき、(3.7)の特殊解は、

$$y = e^{\alpha x} \left(\frac{1}{P(D + \alpha)} \bmod D^n \right) x^{n-1} \quad (3.9)$$

で与えられる。

[証明] まず、シフト則を使って(3.7)から(3.8)を示す。
(3.7)の左辺は、

$$P(D)y = P(D)e^{\alpha x}e^{-\alpha x}y = e^{\alpha x}P(D + \alpha)e^{-\alpha x}y$$

となるから、(3.8)が得られる。

次に、(3.7)の特殊解が(3.9)で与えられることを示す。
(3.8)において、右辺 x^{n-1} が $D^n x^{n-1} = 0$ を満たしているから、 $P(D + \alpha)$ と D^n が互いに素であるとき、命題 3.1 より、 $e^{-\alpha x}y \equiv \left(\frac{1}{P(D + \alpha)} \bmod D^n \right) x^{n-1} (\bmod \text{Ker } P(D + \alpha))$ となる。ここで、 $A(D) := \frac{1}{P(D + \alpha)} \bmod D^n$ とおくと、上式の両辺に左から $P(D + \alpha)$ を作用させると等号が成立する。すなわち、 $P(D + \alpha)e^{-\alpha x}y = P(D + \alpha)A(D)x^{n-1}$ となる。このとき、左辺は、 $P(D + \alpha)e^{-\alpha x}y = e^{-\alpha x}P(D)y$ 、右辺は、

$$\begin{aligned} P(D + \alpha)A(D)x^{n-1} &= P(D + \alpha)e^{-\alpha x}e^{\alpha x}A(D)x^{n-1} \\ &= e^{-\alpha x}P(D)e^{\alpha x}A(D)x^{n-1} \end{aligned}$$

となるから、 $P(D)y = P(D)e^{\alpha x}A(D)x^{n-1}$ が得られ、
 $\text{Ker } P(D)$ を法として、(3.9)が成り立つ。(証明終)

$P \in \mathbb{C}[D]$ の次数が m のとき、 $P(D + \alpha)$ は Taylor 展開によって、 $P(D + \alpha) = \sum_{k=0}^m \frac{P^{(k)}(\alpha)}{k!} D^k$ と表され、展開係数 $\frac{P^{(k)}(\alpha)}{k!}$ は、 m が低次の場合は多項式の展開計算、高次の場合は組立除法などを使って求めることができる。

$P \in \mathbb{R}[D], n \in \mathbb{N}, \lambda, \mu \in \mathbb{R}$ のとき、非同次方程式 $P(D)y = x^{n-1}e^{\lambda x} \cos \mu x$ は、 $\alpha := \lambda + \mu i$ として、(3.7)の形の非同次方程式 $P(D)z = x^{n-1}e^{\alpha x}$ に帰着して考える。両辺複素共役をとれば、 $P(D)\bar{z} = x^{n-1}e^{\bar{\alpha}x}$ となるから、 $y := \frac{1}{2}(z + \bar{z})$ とおけば、

$$\begin{aligned} P(D)y &= \frac{1}{2}(P(D)z + P(D)\bar{z}) \\ &= x^{n-1}e^{\lambda x} \frac{e^{i\mu x} + e^{-i\mu x}}{2} = x^{n-1}e^{\lambda x} \cos \mu x \end{aligned}$$

となり、 $y = \frac{1}{2}(z + \bar{z})$ は $P(D)y = x^{n-1}e^{\lambda x} \cos \mu x$ の特殊解となる。同様に、 $P(D)y = x^{n-1}e^{\lambda x} \sin \mu x$ の特殊解は、 $y = \frac{1}{2i}(z - \bar{z})$ で与えられる。

次に、非同次方程式(3.1)の $P(D)$ と $f(x)$ を具体的に

与えて、特殊解を求める例をいくつかあげる。

例 3.1. $P(D) = D^2 + 1, f(x) = e^x$

$P(D)y = e^x$ はシフト則より、 $P(D + 1)e^{-x}y = 1$ となる。このとき、 $P(D + 1) = D^2 + 2D + 2$ と D は互いに素であるから、(3.9)より、特殊解 y は、

$$\begin{aligned} y &= e^x \left(\frac{1}{D^2 + 2D + 2} \bmod D \right) 1 \\ &= e^x \left\{ \frac{1}{(D^2 + 2D + 2) \bmod D} \right\} 1 \\ &= e^x \left(\frac{1}{2} \bmod D \right) 1 = e^x \frac{1}{2} = \frac{1}{2}e^x \end{aligned}$$

となる。

例 3.2. $P(D) = (D - 3)^2, f(x) = x^2 e^{2x}$

$P(D)y = x^2 e^{2x}$ はシフト則より、 $P(D + 2)e^{-2x}y = x^2$ となる。このとき、 $P(D + 2) = (D - 1)^2$ と D^3 は互いに素であるから、(3.9)より、特殊解 y は、

$$y = e^{2x} \left(\frac{1}{(D - 1)^2} \bmod D^3 \right) x^2$$

と表される。ここで $\frac{1}{(D - 1)^2} \bmod D^3$ は、分母 $(D - 1)^2$ を $1 - 2D + D^2$ と展開して、分子1と分母 $1 - 2D + D^2$ から筆算の要領で、低次の項から順に D^2 の項まで消去し、 D^3 以降の項は無視して計算する。

$$\begin{array}{r} 1 + 2D + 3D^2 \\ \hline 1 - 2D + D^2 \end{array} \left(\begin{array}{r} 1 \\ \hline 1 - 2D + D^2 \end{array} \right) \begin{array}{r} 1 \\ \hline 2D - D^2 \end{array} \left(\begin{array}{r} 1 \\ \hline 2D - 4D^2 \end{array} \right) \begin{array}{r} 3D^2 \\ \hline 3D^2 \end{array} \left(\begin{array}{r} 1 \\ \hline 0 \end{array} \right)$$

$$1 \equiv (1 + 2D + 3D^2)(1 - 2D + D^2) (\bmod D^3)$$

よって、

$$\begin{aligned} &\frac{1}{1 - 2D + D^2} \bmod D^3 \\ &= \frac{1 + 2D + 3D^2}{(1 + 2D + 3D^2)(1 - 2D + D^2) \bmod D^3} \bmod D^3 \\ &= \frac{1 + 2D + 3D^2}{1} \bmod D^3 = 1 + 2D + 3D^2 \end{aligned}$$

となるから、特殊解 y は、

$$y = e^{2x}(1 + 2D + 3D^2)x^2 = e^{2x}(x^2 + 4x + 6)$$

となる。

例 3.3. $P(D) = D^2 - 3D + 2, f(x) = \sin x$

$P(D)z = e^{ix}$ の特殊解 z に対して、 $P(D)y = \sin x$ の特殊解 y は、 $y = \frac{z - \bar{z}}{2i}$ で与えられる。 $P(D)z = e^{ix}$ はシフト則より、 $P(D + i)e^{-ix}z = 1$ となる。このとき、 $P(D + i)$ と D は互いに素であるから、(3.9)より、

$$\begin{aligned} z &= e^{ix} \left(\frac{1}{P(D + i)} \bmod D \right) 1 \\ &= e^{ix} \left(\frac{1}{P(D + i) \bmod D} \right) 1 \end{aligned}$$

$$= e^{ix} \frac{1}{P(i)} = \frac{1+3i}{10} e^{ix}$$

となる。これと $\bar{z} = \frac{1-3i}{10} e^{-ix}$ より、特殊解 y は、

$$y = \frac{z - \bar{z}}{2i} = \frac{1}{10} (\sin x + 3 \cos x)$$

となる。

別解として、複素数を使わない方法も示しておく。
 $(D^2 + 1)f(x) = (D^2 + 1)\sin x = 0$ で、 $P(D)$ と $D^2 + 1$ は互いに素であるから、(3.3)より、特殊解 y は

$$y = \left(\frac{1}{P(D)} \bmod (D^2 + 1) \right) \sin x$$

と表される。ここで、 $D^2 \equiv -1 \pmod{(D^2 + 1)}$ を用いて、
 $\frac{1}{P(D)} \bmod (D^2 + 1)$ を計算すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{P(D)} &= \frac{1}{2 - 3D + D^2} \equiv \frac{1}{1 - 3D} = \frac{1+3D}{1-9D^2} \\ &\equiv \frac{1+3D}{10} \pmod{(D^2 + 1)} \end{aligned}$$

より、

$$y = \frac{1}{10} (1+3D) \sin x = \frac{1}{10} (\sin x + 3 \cos x)$$

となる。

例 3.4. $P(D) = D^2 + 5, f(x) = x \cos 2x$

$P(D)z = xe^{i2x}$ の特殊解 z に対して、 $P(D)y = x \cos 2x$ の特殊解 y は、 $y = \frac{1}{2}(z + \bar{z})$ で与えられる。 $P(D)z = xe^{i2x}$ はシフト則より、 $P(D+2i)e^{-i2x}z = x$ となる。このとき、 $P(D+2i) = 1 + 4iD + D^2$ と D^2 は互いに素であるから、(3.9)より、 $z = e^{i2x} \left(\frac{1}{1+4iD+D^2} \bmod D^2 \right) x$ となる。ここで、 $P(D+2i) \equiv 1 + 4iD \pmod{D^2}$ より、 $\frac{1}{1+4iD} \bmod D^2$ を計算すると、

$$\begin{array}{r} 1 - 4iD \\ \hline 1 + 4iD \quad \left(\begin{array}{r} 1 \\ 1 \end{array} \right) \\ \hline 1 + 4iD \\ \hline -4iD \\ \hline -4iD \\ \hline 0 \end{array}$$

$$1 \equiv (1 - 4iD)(1 + 4iD) \pmod{D^2}$$

よって、

$$\begin{aligned} \frac{1}{P(D+2i)} \bmod D^2 &= \frac{1}{P(D+2i) \bmod D^2} \bmod D^2 \\ &= \frac{1}{1+4iD} \bmod D^2 \\ &= \frac{1-4iD}{(1-4iD)(1+4iD) \bmod D^2} \bmod D^2 \\ &= \frac{1-4iD}{1} \bmod D^2 = 1 - 4iD \end{aligned}$$

となる。したがって、 $z = e^{i2x}(1 - 4iD)x = e^{i2x}(x - 4i)$ となる。これと $\bar{z} = e^{-i2x}(x + 4i)$ より、特殊解 y は、

$$y = \frac{1}{2}(z + \bar{z}) = x \cos 2x + 4 \sin 2x$$

となる。

命題 3.2 では、非同次方程式 $P(D)y = e^{\alpha x}x^{n-1}$ をシ

フト則により、 $P(D+\alpha)e^{-\alpha x}y = x^{n-1}$ に帰着させ、 $P(D+\alpha)$ と D^n が互いに素であるときの特殊解 y を示した。今度は、 $P(D+\alpha)$ と D^n が互いに素でない場合、すなわち、最大公約因子 D^ν ($\nu \in \mathbb{N}$) を持つ場合について考える。

微分演算子 $D = \frac{d}{dx}$ の逆演算子 $\frac{1}{D}$ を $\frac{1}{D}f(x) = \int f(x)dx$ として、積分と考える。このとき、 $D \frac{1}{D}f(x) = f(x)$ 、
 $\frac{1}{D}Df(x) \equiv f(x) \pmod{\text{Ker } D}$ が成り立つ。また、 $n \in \mathbb{N}$ として、 $\frac{1}{D^n}1 \equiv \frac{1}{D^{n-1}}x \equiv \dots \equiv \frac{x^n}{n!} \pmod{\text{Ker } D^n}$ も成り立つ。
 $P(D+\alpha)$ と D^n が最大公約因子 D^ν を持つ場合は、特殊解を求めるために、有理関数のモジュロ演算の他に、 D^ν の逆演算子 $\frac{1}{D^\nu}$ 、すなわち、 ν 回の積分が必要である。そのことを次の命題で示す。

命題 3.3. 命題 3.2 の(3.8)において、 $P(D+\alpha)$ と D^n が最大公約因子 D^ν ($\nu \in \mathbb{N}$) を持つとき、すなわち、

$P(D+\alpha) = Q(D+\alpha)D^\nu, Q \in \mathbb{C}[D], Q(\alpha) \neq 0$ と表されるとき、(3.7) の特殊解 y は、

$$y = e^{\alpha x} \left(\frac{1}{Q(D+\alpha)} \bmod D^n \right) \frac{1}{D^\nu} x^{n-1} \quad (3.10)$$

で与えられる。また、(3.10) 右辺の $\frac{1}{Q(D+\alpha)} \bmod D^n$ と $\frac{1}{D^\nu}$ は $\text{Ker } P(D)$ を法として可換である。

[証明] 仮定より、(3.8) は、 $Q(D+\alpha)D^\nu e^{-\alpha x}y = x^{n-1}$ となる。ここで、 $Q(D+\alpha)$ と D^n は互いに素であるから、

命題 3.2 より、

$$\begin{aligned} D^\nu e^{-\alpha x}y &\equiv \left(\frac{1}{Q(D+\alpha)} \bmod D^n \right) x^{n-1} \\ &\quad (\pmod{\text{Ker } Q(D+\alpha)}) \end{aligned}$$

となる。さらに、両辺左から $\frac{1}{D^\nu}$ を作用させると、

$$e^{-\alpha x}y \equiv \frac{1}{D^\nu} \left(\frac{1}{Q(D+\alpha)} \bmod D^n \right) x^{n-1} \quad (\pmod{\text{Ker } D^\nu Q(D+\alpha)})$$

となる。ここで、 $A(D) := \frac{1}{Q(D+\alpha)} \bmod D^n$ とおくと、 $D^\nu Q(D+\alpha) = P(D+\alpha)$ より、上式両辺に左から $P(D+\alpha)$ を作用させると、等号が成り立つ。すなわち、

$$P(D+\alpha)e^{-\alpha x}y = P(D+\alpha) \frac{1}{D^\nu} A(D)x^{n-1}$$

となる。このときの左辺は、シフト則より、 $e^{-\alpha x}P(D)y$ となる。同様に右辺についても、

$$\begin{aligned} P(D+\alpha)e^{-\alpha x}e^{\alpha x} &\frac{1}{D^\nu} A(D)x^{n-1} \\ &= e^{-\alpha x}P(D)e^{\alpha x} \frac{1}{D^\nu} A(D)x^{n-1} \end{aligned}$$

より、 $P(D)y = P(D)e^{\alpha x} \frac{1}{D^\nu} A(D)x^{n-1}$ が成り立つ。さらに、右辺を変形すると、

$$\begin{aligned} P(D)e^{\alpha x} \frac{1}{D^\nu} A(D)x^{n-1} &= e^{\alpha x}P(D+\alpha) \frac{1}{D^\nu} A(D)x^{n-1} \\ &= e^{\alpha x}Q(D+\alpha)D^\nu \frac{1}{D^\nu} A(D)x^{n-1} \\ &= e^{\alpha x}Q(D+\alpha)A(D)x^{n-1} \\ &= e^{\alpha x}Q(D+\alpha)A(D)D^\nu \frac{1}{D^\nu} x^{n-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= e^{\alpha x} Q(D + \alpha) D^\nu A(D) \frac{1}{D^\nu} x^{n-1} \\
&= Q(D)(D - \alpha)^\nu e^{\alpha x} A(D) \frac{1}{D^\nu} x^{n-1} \\
&= P(D) e^{\alpha x} A(D) \frac{1}{D^\nu} x^{n-1}
\end{aligned}$$

となるから、

$$e^{\alpha x} \frac{1}{D^\nu} A(D) x^{n-1} \equiv e^{\alpha x} A(D) \frac{1}{D^\nu} x^{n-1} (\text{mod Ker } P(D))$$

がいえる。よって、非同次方程式(3.7)の特殊解 y は、(3.10)で与えられる。(証明終)

命題 3.2 の(3.9)と**命題 3.3** の(3.10)との違いは、 $P(D + \alpha)$ の箇所が最大公約因子 D^ν を除いた $Q(D + \alpha)$ に変わり、 D^ν を除いた分は、 $\frac{1}{D^\nu}$ (ν 回積分)となる。(3.10)において、 $\nu = 0$ とおけば、(3.10)は(3.9)と一致するので、 ν を0以上の整数にすれば、(3.10)は(3.9)も含み、1つの公式としてまとめることができる。

実際に、(3.10)を用いて、 $P(D + \alpha)$ と D^ν が最大公約因子 D^ν を持つ場合の特殊解を求める例をいくつかあげる。

例 3.5. $P(D) = (D + 1)(D - 2), f(x) = e^{2x}$

$P(D)y = e^{2x}$ はシフト則より、 $P(D + 2)e^{-2x}y = 1$ となる。このとき、 $P(D + 2) = (D + 3)D$ と D の最大公約因子は D であるから、(3.10)より、特殊解 y は、

$$\begin{aligned}
y &= e^{2x} \left(\frac{1}{D + 3} \text{mod } D \right) \frac{1}{D} 1 \\
&= e^{2x} \left(\frac{1}{(D + 3) \text{mod } D} \text{mod } D \right) x = e^{2x} \frac{1}{3} x = \frac{1}{3} x e^{2x}
\end{aligned}$$

となる。

例 3.6. $P(D) = (D - 4)^2(D - 3), f(x) = xe^{4x}$

$P(D)y = xe^{4x}$ はシフト則より、 $P(D + 4)e^{-4x}y = x$ となる。このとき、 $P(D + 4) = D^2(D + 1)$ と D^2 の最大公約因子は D^2 で、 $D + 1$ と D^2 は互いに素であるから、(3.10)より、特殊解 y は、 $y = e^{4x} \left(\frac{1}{D + 1} \text{mod } D^2 \right) \frac{1}{D^2} x$ と表される。ここで、 $\frac{1}{D + 1} = \frac{D-1}{D^2-1} \equiv \frac{D-1}{-1} = 1 - D \text{ (mod } D^2)$ 、 $\frac{1}{D^2} x = \frac{1}{D^2} x^2 = \frac{x^3}{6}$ より、特殊解 y は、

$$y = e^{4x} (1 - D) \frac{x^3}{6} = \frac{1}{6} e^{4x} (x^3 - 3x^2) = \frac{1}{6} e^{4x} x^2 (x - 3)$$

となる。

例 3.7. $P(D) = D^2 + 9, f(x) = \cos 3x$

$P(D)z = e^{i3x}$ の特殊解 z から、 $P(D)y = \cos 3x$ の特殊解

y は、 $y = \frac{z + \bar{z}}{2}$ で与えられる。 $P(D)z = e^{i3x}$ はシフト則より、

$P(D + 3i)e^{-i3x}z = 1$ となる。このとき、 $P(D + 3i) = D(D + 6i)$ と D の最大公約因子は D で、 $D + 6i$ と D は互いに素であるから、(3.10)より、

$$\begin{aligned}
z &= e^{i3x} \left(\frac{1}{D + 6i} \text{mod } D \right) \frac{1}{D} 1 \\
&= e^{i3x} \left(\frac{1}{(D + 6i) \text{mod } D} \text{mod } D \right) x = e^{i3x} \frac{1}{6i} x
\end{aligned}$$

となり、これと $\bar{z} = e^{-i3x} \left(-\frac{1}{6i} \right) x$ より、特殊解 y は、

$$y = \frac{z + \bar{z}}{2} = \frac{1}{6} x \sin 3x$$

となる。

非同次方程式(3.1)の右辺 $f(x)$ が(3.2)を満たす場合は、 $f(x)$ が $e^{\alpha x} x^{n-1}, \alpha \in \mathbb{C}, n \in \mathbb{N}$ の形の項の一次結合になっているため、特殊解を求めるために必要な計算は、(3.9)、(3.10)より、有理関数のモジュロ演算の他に、 $x^{n-1}(n \in \mathbb{N})$ の微分または積分のみで済んだ。

一方、右辺 $f(x)$ が(3.2)を満たさない場合は、特殊解を求める計算過程で、 $x^{n-1}(n \in \mathbb{N})$ 以外の関数の積分が現われ、積分が初等関数で表すことができない場合も起こりえる。最後に、この場合の特殊解について示す。

命題 3.4. 非同次方程式(3.1)において、 $P \in \mathbb{C}[D]$ が、**補題 2.1** の条件を満たすとき、特殊解 y は、次の非同次方程式

$$P_j(D)y_j = \left(\frac{1}{P_j} \text{mod } P_j \right) f(x) \quad (1 \leq j \leq t) \quad (3.11)$$

の特殊解 $y_j(1 \leq j \leq t)$ の総和 $y = \sum_{j=1}^t y_j$ で与えられる。ここで、 $\bar{P}_j(1 \leq j \leq t)$ は、(2.2)で定義された多項式である。さらに各 P_j が $P_j(D) = (D - \alpha_j)^{\nu_j}, \alpha_j \in \mathbb{C}, \nu_j \in \mathbb{N}, \alpha_j \neq \alpha_k(j \neq k)$ のとき、 A_j を(2.3)で定義された多項式として、(3.11)の特殊解 y_j は、

$$y_j = e^{\alpha_j x} \frac{1}{D^{\nu_j}} e^{-\alpha_j x} A_j(D) f(x) \quad (3.12)$$

で与えられる。

[証明] **補題 2.1** より、 $\sum_{j=1}^t A_j(D) \bar{P}_j(D) = 1$ が成り立つから、各 $j(1 \leq j \leq t)$ に対して、(3.11)の特殊解 y_j から、 $y := \sum_{j=1}^t y_j$ とおけば、

$$\begin{aligned}
P(D)y &= \sum_{j=1}^t P(D)y_j = \sum_{j=1}^t \bar{P}_j(D) P_j(D) y_j \\
&= \sum_{j=1}^t \bar{P}_j(D) A_j(D) f(x) = f(x)
\end{aligned}$$

となり、 y は $P(D)y = f(x)$ の特殊解となる。

次に、(3.11)の特殊解 y_j が(3.12)で与えられることを示す。 $P_j(D) = (D - \alpha_j)^{\nu_j}$ より、(3.11)にシフト則を用いると、 $e^{\alpha_j x} D^{\nu_j} e^{-\alpha_j x} y_j = A_j(D) f(x)$ となる。したがって、 $D^{\nu_j} e^{-\alpha_j x} y_j = e^{-\alpha_j x} A_j(D) f(x)$ となり、両辺左から $\frac{1}{D^{\nu_j}}$ を作用させると、 $e^{-\alpha_j x} y_j \equiv \frac{1}{D^{\nu_j}} e^{-\alpha_j x} A_j(D) f(x) \text{ (mod Ker } D^{\nu_j})$ となる。このときの右辺を $e^{-\alpha_j x} e^{\alpha_j x} \frac{1}{D^{\nu_j}} e^{-\alpha_j x} A_j(D) f(x)$ と変形して、両辺左から D^{ν_j} を作用させると、 $D^{\nu_j} e^{-\alpha_j x} y_j = D^{\nu_j} e^{-\alpha_j x} e^{\alpha_j x} \frac{1}{D^{\nu_j}} e^{-\alpha_j x} A_j(D) f(x)$ となる。この両辺について、シフト則を使うと、左辺は $e^{-\alpha_j x} (D - \alpha_j)^{\nu_j} y_j = e^{-\alpha_j x} P_j(D) y_j$ 、右辺は $e^{-\alpha_j x} P_j(D) e^{\alpha_j x} \frac{1}{D^{\nu_j}} e^{-\alpha_j x} A_j(D) f(x)$ となるから、 $P_j(D) y_j = P_j(D) e^{\alpha_j x} \frac{1}{D^{\nu_j}} e^{-\alpha_j x} A_j(D) f(x)$ が成り立つ。すなわち、 $\text{Ker } P_j(D)$ を法として、(3.11)の特殊解 y_j は、(3.12)で与えられることが示せた。(証明終)

命題 3.4 は、非同次方程式(3.1)の右辺 $f(x)$ が一般的な場合の特殊解を与えるが、(3.12)で与えられる y_j は、右辺の $e^{-\alpha_j x} A_j(D)f(x)$ の v_j 回積分が必要であり、この積分が初等関数で表すことができない場合もある。一方、 $f(x)$ が(3.2)の条件を満たす場合でも、(3.12)を用いて特殊解を求めることは可能であるが、関数 $e^{-\alpha_j x} A_j(D)f(x)$ を v_j 回積分するより、(3.9)または(3.10)を用いて、べき関数の微分または積分だけで求める方が簡単である。

最後に**命題 3.4** を使って特殊解を求める例をあげる。

例 3.8. $P(D) = (D + 1)(D - 1), f(x) = \frac{1}{e^x + e^{-x}}$

$P(D)$ が互いに素な 2 つの積に因数分解されているから、(3.11)の 2 つの非同次方程式は、

$$(D + 1)y_1 = \left(\frac{1}{D - 1} \bmod (D + 1) \right) f(x),$$

$$(D - 1)y_2 = \left(\frac{1}{D + 1} \bmod (D - 1) \right) f(x)$$

となる。これらの特殊解 y_1, y_2 から、 $P(D)y = f(x)$ の特殊解 y は、 $y = y_1 + y_2$ で与えられる。まず、特殊解 y_1 を求める。

$(D + 1)y_1 = -\frac{1}{2}f(x)$ は、シフト則を用いると、

$D e^x y_1 = -\frac{1}{2} e^x f(x)$ となる。このとき、両辺に左から $\frac{1}{D}$ を作用させると、 $e^x y_1 = \frac{1}{D} \left(-\frac{1}{2} e^x f(x) \right)$ すなわち、

$$y_1 = -\frac{1}{2} e^{-x} \int \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} dx = -\frac{1}{4} e^{-x} (x + \ln(e^x + e^{-x}))$$

となる。同様に、 $(D - 1)y_2 = \frac{1}{2}f(x)$ についても、シフト則から、 $D e^{-x} y_2 = \frac{1}{2} e^{-x} f(x)$ となり、両辺に左から $\frac{1}{D}$ を作成させると、 $e^{-x} y_2 = \frac{1}{D} \left(\frac{1}{2} e^{-x} f(x) \right)$ すなわち、

$$y_2 = \frac{1}{2} e^x \int \frac{e^{-x}}{e^x + e^{-x}} dx = \frac{1}{4} e^x (x - \ln(e^x + e^{-x}))$$

となる。よって、特殊解 y は、

$$y = y_1 + y_2 = \frac{x(e^x - e^{-x})}{4} - \frac{e^x + e^{-x}}{4} \ln(e^x + e^{-x})$$

となる。

3. おわりに

定数係数線形微分方程式において、微分演算子を D として、変数 D に関する有理関数のモジュロ演算を用いて、非同次方程式の特殊解を求める方法を述べた。特に右辺の関数 $f(x)$ について、 $f(x)$ が、ある同次方程式の解になっている場合とそうでない場合の特殊解の求め方を示し、前者の場合には、 $f(x)$ が $e^{\alpha x} x^{n-1}, \alpha \in \mathbb{C}, n \in \mathbb{N}$ の形の項の一次結合で表されるので、特殊解も、(3.7)の形の非同次方程式の特殊解の一次結合となり、この方程式の特殊解は、シフト則を用いれば、(3.9)または(3.10)の形で、指數関数を含まないべき関

数の微分または積分の計算で求められることを示した。 $f(x)$ が前者以外の一般的な関数の場合については、(3.11)の形の非同次方程式に分け、これらの方程式について、シフト則を用いて、複数回の積分計算に帰着させて、特殊解が(3.12)の形で求められることを示した。(3.10)は $v = 0$ とすれば、(3.9)と一致するので、(3.10)または(3.12)の 2 つのみで対応できる。計算例もいくつかあげ、筆者自身も公式の選択に戸惑うことなくスムーズに解くことができた。本論文の執筆のきっかけを作ってくれた質問に来た学生のみなさんに感謝申し上げる。

参考文献

- [1] 中井三留, 微分方程式の解き方, 学術図書出版社, pp.137–150, 東京, 2001.
- [2] 大迫尚行, “有理関数のモジュロ演算による部分分数分解,”愛知工科大学紀要(2023 年度), 第 21 卷, pp.75–82, 2024.

解説・総説

電磁気学の教科書に直線電流のつくる電場の記述がないのは何故？

石川 雄二郎*, 石川 雄俊**

(2024年8月23日受理)

Why the Electric Field Around the Straight Line-current Is Not Written in the Textbooks of Electromagnetism?

Yujiro ISHIKAWA*, Taketoshi ISHIKAWA**

(Received August 23, 2024)

Abstract

The magnetic field around the straight line carrying charges (straight line-current) is written in almost every textbook of electromagnetism. But, strangely enough, we can hardly find the description of the associated electric field of the straight line-current together. Why not? This paper considers this question and attempts to answer it. The magnetic field around the straight line-current is one of the simple examples to study the way how to calculate the magnetic field, and so is written in almost every textbook of electromagnetism. On the other hand, we can know that the associated electric field around this straight line-current is the same one of the straight static line-charges. However, the actual (experimental) electric field around the straight conductor-wire carrying charges is zero. This contradiction can be supposed to be the main reason why authors cannot write the electric field around the straight line-current in their textbooks of electromagnetism.

キーワード：線電流、磁場、電場

Keywords : Straight line-current, Magnetic field, Electric field

1. はじめに



図 1 A straight line-current model

本文では図 1 のような線電荷密度 $-\lambda$ の直線電荷の速度 v の流れを直線電流 I とよぶ。直線電流のつくる磁場(磁界)について、高校物理の教科書では「右ねじの進む向きに電流が流れると、それによって生じる磁場は、右ねじのまわる向きと一致する」とのように記述されている[1]。直線電流の回りに磁場が生じることは、その回りに磁石をおけば磁場(磁力線)に沿って磁針が円周方向に向くので実際に確認できる[2]。大学等の電磁気学の教科書では、同じ内容が Ampère の回路定理として周回積分を用いて記述されている[3]。

電磁気学の教科書では、この直線電流のつくる磁場について必ず記述されている。しかし磁場に加えて同時に

電場(電界)についても記述している教科書は皆無である。何故？ この素朴な疑問に答えることが本文の目的である。電磁気学の基礎コースでは磁場より先に電場について学習する。直線電流のつくる磁場についての講義中、好奇心旺盛な学生が直線電流のつくる電場について質問した場合担当教員はどういうふうに答えるのだろうか？

2. 本文の電磁気学 4 基本事項

電磁気学で必ず学習する Coulomb の法則は、長い歴史の検証に耐え、最も信頼できる法則の 1 つであるので

(a) Coulomb の法則とその法則を適用して得られる結果は正しい。

また磁気モノポールが将来発見される可能性は極めて低く、磁場をつくるのは運動する電荷のみであるとしてよい。

逆に

(b) すべての電荷が静止していれば、磁場はゼロである。

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科、定年退職、〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

** 国土交通省 中部地方整備局、〒460-8514 名古屋市中区三の丸 2-5-1

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Chubu Regional Development Bureau 2-5-1, Sannomaru, Naka-ku, Nagoya, Aichi 460-8514, Japan

電荷の流れが電流であるから。

(c) すべての電荷が静止していれば電流(密度)はゼロである。1905年発表から100年以上反例は見つかっていない。

(d) 特殊相対性理論は電磁気学の満たすべき基本原理である。

以上の(a)～(d)は正しいものとして、直線電流のつくる電場について考察する。

3. 直線電荷がつくる電磁場

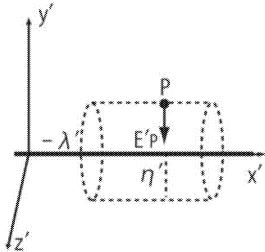


図 2 Electric field due to the straight line-charges

最初に図 2 のように x', y', z' 座標系をとり、 x' 軸上に分布する線電荷密度 $-\lambda'$ ($\lambda' > 0$) の静止した直線電荷がつくる電場を求める。電荷分布の対称性より直線電荷のつくる電場は x 軸に垂直で放射状になる。図 2 の様な x' 軸を中心には半径 $\eta' = \sqrt{y'^2 + z'^2}$ の単位長さの円柱領域に Gauss の定理を適用すると、 x 軸から距離 η' の点 $P(x', y', z')$ の電場 E'_P は

$$2\pi\eta' E'_P = \frac{-\lambda'}{\epsilon_0} \quad (1)$$

を満たすから

$$E'_P = \frac{-\lambda'}{2\pi\epsilon_0\eta'} \quad (2)$$

である[5]。これより電場 (E'_x, E'_y, E'_z) は

$$\begin{aligned} E'_x &= 0 \\ E'_y &= \frac{-\lambda'}{2\pi\epsilon_0} \frac{y'}{(y'^2 + z'^2)} \\ E'_z &= \frac{-\lambda'}{2\pi\epsilon_0} \frac{z'}{(y'^2 + z'^2)} \end{aligned} \quad (3)$$

である。電荷分布の対称性より電場の x' 成分はゼロになる。磁場 (B'_x, B'_y, B'_z) は(b)より

$$B'_x = B'_y = B'_z = 0 \quad (4)$$

である。電流密度 \mathbf{J}' ((c)参照)と線電荷密度 ρ' は

$$\begin{aligned} \mathbf{J}' &= \mathbf{0} \\ \rho' &= -\lambda' \delta(y') \delta(z') \end{aligned} \quad (5)$$

である。電磁場(3)～(5)は(a)～(c)に基づいているので、電磁場(3)～(5)を本文では正当な電磁場とする。

4. 特殊相対性理論による電磁場の変換

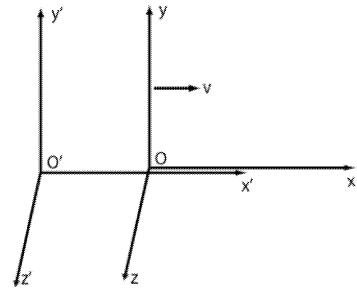


図 3 Two inertial reference frames

3 次元空間に図 3 のように 2 つの慣性系 $S(x, y, z)$ 系と $S'(x', y', z')$ 系を考える。 S 系と S' 系の 3 座標軸は平行で、時刻 $t=t'=0$ のとき 2 つの座標系の原点は一致しており、 S 系は S' 系から見て x' 軸上を相対速度 v にて図 3 のように正方向に移動して(遠ざかって)いるとする。

S 系と S' 系で観測される電場、磁場、電流密度、および電荷密度を

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= (E_x, E_y, E_z), \mathbf{E}' = (E'_x, E'_y, E'_z) \\ \mathbf{B} &= (B_x, B_y, B_z), \mathbf{B}' = (B'_x, B'_y, B'_z) \\ \mathbf{J} &= (J_x, J_y, J_z), \mathbf{J}' = (J'_x, J'_y, J'_z) \\ \rho, & \rho' \end{aligned} \quad (6)$$

とする。このとき特殊相対性理論に基づく電磁場の変換は

$$\begin{aligned} E_x &= E'_x \\ E_y &= \gamma(E'_y - vB'_z) \\ E_z &= \gamma(E'_z + vB'_y) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B_x &= B'_x \\ B_y &= \gamma(B'_y + \frac{v}{c^2} E'_z) \\ B_z &= \gamma(B'_z - \frac{v}{c^2} E'_y) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} J_x &= \gamma(J'_x - v\rho') \\ J_y &= J'_y \\ J_z &= J'_z \\ \rho &= \gamma(\rho' - \frac{vJ}{c^2}) \end{aligned} \quad (9)$$

と書ける。ここで、 c は光速

$$x = \gamma(x' - vt'), \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \gamma(t' - \frac{v}{c^2}x'),$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$
(10)

である。

5. 直線電流のつくる電磁場

S' 系の電磁場から S 系電磁場を得るために、電磁場(3)～(5)を電磁場の変換式(7)～(9)に代入して変換すると

$$E_x = 0$$

$$E_y = \frac{-\gamma\lambda'}{2\pi\epsilon_0 c^2} \frac{y'}{y'^2 + z'^2} = \frac{-\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{y'}{y'^2 + z'^2}$$
(11)

$$E_z = \frac{-\gamma\lambda'}{2\pi\epsilon_0 c^2} \frac{z'}{y'^2 + z'^2} = \frac{-\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{z'}{y'^2 + z'^2}$$

$$B_x = 0$$

$$B_y = \frac{-\gamma\lambda' v}{2\pi\epsilon_0 c^2} \frac{z'}{y'^2 + z'^2} = \frac{-\lambda v}{2\pi\epsilon_0 c^2} \frac{z'}{y'^2 + z'^2}$$
(12)

$$B_z = \frac{\gamma\lambda' v}{2\pi\epsilon_0 c^2} \frac{y'}{y'^2 + z'^2} = \frac{\lambda v}{2\pi\epsilon_0 c^2} \frac{y'}{y'^2 + z'^2}$$

$$J_x = \gamma\lambda' v \delta(y') \delta(z') = \lambda v \delta(y') \delta(z')$$

$$J_y = 0$$
(13)

$$J_z = 0$$

$$\rho = -\gamma\lambda' \delta(y') \delta(z') = -\lambda \delta(y') \delta(z')$$

を得る。ここで $\lambda \equiv \gamma\lambda'$ とした。

電磁場(11)～(13)は電磁場(3)～(5)に(d)を適用して得られた電磁場であるから正当な電磁場である。

ここで電場(11)は、(10)を用いると

$$E_x = 0$$

$$E_y = \frac{-\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{y}{y^2 + z^2}$$
(14)

$$E_z = \frac{-\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{z}{y^2 + z^2}$$

と書ける。



図 4 Line charge at rest

さて S' 系の x' 軸上に線電荷密度 $-\lambda'$ の直線電荷が静止しているとする（図 4 参照）。4 節の設定では S' 系で静止している直線電荷は S 系で観測すると x 軸上を負方向に相対速度 v で移動する線電荷密度 $-\lambda = -\gamma\lambda'$ の直線電荷の x 軸負方向への移動、すなわち x 軸上を正方向に流れる直線電流 I として観測される（図 1 参照）。電

流は x 軸方向にのみ流れ、その大きさ I は以下の様に定まる。

$$I = \iint J_x dy dz = \iint \lambda v \delta(y) \delta(z) dy dz = \lambda v$$
(15)

また真空の誘電率 ϵ_0 と透磁率 μ_0 について MKSA 単位系では関係式

$$\frac{1}{\epsilon_0 c^2} = \mu_0$$
(16)

が成立する。

ここで磁場(12)は、(10), (15), (16)を用いると

$$B_x = 0$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{-z}{y^2 + z^2}$$
(17)

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y}{y^2 + z^2}$$

と書ける（磁場(17)については図 5 参照）。

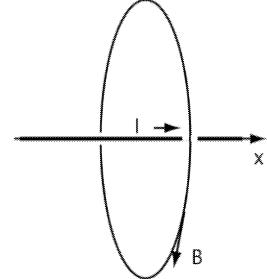


図 5 Magnetic field caused by a straight line-current

磁場(17)は Ampère の回路定理を直線電流 I に適用して得られる磁場である。したがって磁場(17)に付随する電場(14)が本文で求める直線電流のつくる電場である。

結論 1: 図 1 のモデルの直線電流 I のつくる電場は(14)である（ゼロではない）。

$-\lambda' \rightarrow -\lambda, y' \rightarrow y, z' \rightarrow z$ とした(3)より電場(14)は線電荷密度 $-\lambda$ の静止した直線電荷のつくる電場である。

結論 2: 図 1 のモデルの直線電流 I のつくる電場は、線電荷密度 $-\lambda$ の静止した直線電荷のつくる電場に等しい。

しかし問題は直線電流のつくる電場(14)の大きさは Coulomb の法則のオーダーであり、この電場が実験などで観測できるものであれば、誰かが Biot-Savart の法則の電場版として必ず発見しているはずである。その発見が無かったことは、直線電流のつくる電場を考えるときには、図 1 のモデルでは不十分で、電流の流れる導線の物性を考慮する必要性を示唆している。

6. 電流の流れる導線の物性を考慮した電磁場

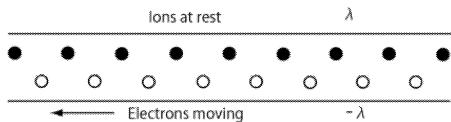


图 6 Practical use model of the straight line-current

電流の流れる導体の物性を考慮に入れたモデルとして Purcell による図 6 の導線モデルについて考察する[5]. ● は静止した線電荷密度 λ の正電荷(イオン)(例えば銅線ならば銅イオン)で左右に無限に伸びている. ○は線電荷密度 $-\lambda$ の負電荷(電子)で、図 1 と同様にすべて x 軸負方向へ速度 v で一様に移動している。図 6 のモデルでは、新たに追加された線電荷密度 λ の静止した直線正電荷のつくる電場は $-\lambda' \rightarrow \lambda, y' \rightarrow y, z' \rightarrow z$ とおいた(3)より

$$\begin{aligned} E_x &= 0 \\ E_y &= \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{y}{y^2 + z^2} \\ E_z &= \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{z}{y^2 + z^2} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

である。したがって、電流の流れる導線の物性を考慮した図 6 のモデルに基づく直線電流のつくる電場は、電場(14)と電場(18)の和であり、ゼロであることが判明した。

結論 3: 直線電流の流れる導線の物性を考慮した図 6 のモデルに基づく直線電流のつくる電場はゼロである。

7. おわりに

磁気モノポールが存在しないとすれば、磁場の起源は電荷の運動のみである。電流のつくる磁場計算の簡単なモデルの1つは図1のモデルに基づく直線電流 I のつくる磁場である。したがって電磁気学の教科書ではこの直線電流のまわりの磁場は必ず記述されている。

それにも関わらず電磁気学の教科書に図 1 のモデルの直線電流に付随する電場の記述のない理由について本文の総括をする。図1のモデルに基づく直線電流は思考実験的な電流であり、このモデルから得られる電場(14)は、実際に導線を流れる直線電流のつくる電場(ゼロ)とかけ離れている(結論 1 と結論 3 を参照)。このため電磁気学の教科書ではこのモデルの電場を解析することに意味がないので記述がない、これが第 1 の理由である。

結論 2 を認めてしまえば、図 1 のモデルの直線電流 I のつくる電場は、図 6 のモデルにおいて追加された線電荷密度 λ の中和電荷（イオン）のつくる電場により相殺されてゼロになる。すなわち図 6 のモデルに基づく直線電流のつく

る電場はゼロになり、磁場のみならず電場も含めて、導線を流れる直線電流のつくる電磁場の計算ができる。しかし、電磁気学の基礎コースでは**結論 2**を理論的に扱うことはその範囲を超えており、そのため図 6 のモデルに代えて図 1 のモデルに基づく直線電流がつくる磁場のみ記述し、電場は記述しない方が教科書レベルとしての統一性が保たれる。加えて導線を流れる直線電流のつくる電場はゼロであるから記述しなくとも特に問題はないと考えることができる。これが第 2 の理由である。

参考文献

- [1] 力武常次, 北村良夫, “チャート式 新物理”, 数研出版, 東京都, 1990.
 - [2] 大野秀樹 他, “基礎物理 下 熱・電磁気・原子”, 森北出版, 東京都, 2013.
 - [3] 太田浩一, “電磁気学の基礎 I”, 東京大学出版会, 東京都, 2012.
 - [4] 太田浩一, “電磁気学の基礎 II”, 東京大学出版会, 東京都, 2012.
 - [5] E. M. Purcell and D. J. Morin, “Electricity and Magnetism”, Cambridge University Press, United Kingdom, Massachusetts, 2013.

報告

専門科目学修に向けた初年次向け数学と物理学の基礎教育の試み

中谷 淳*

(2024年9月30日受理)

An Attempt to Provide Basic Education in Mathematics and Physics for First-year Students in Preparation for the Study of Specialized Subjects

Jun NAKAYA*

(Received September 30, 2024)

Abstract

Although mathematics and physics are indispensable for learning specialized subjects in the School of Engineering, some students have extremely low abilities in mathematics and physics. Therefore, we established a new course to help students with low abilities in mathematics and mechanics understand mathematics and physics through hands-on experience. In the hands-on experience, a model rocket, which is used internationally as a science teaching material, is employed, and the extent to which the model rocket is effective in helping students understand is verified.

キーワード: 工学教育, モデルロケット, 初年次教育

Keywords : Engineering education, Modelrocket, Freshman Education

1. はじめに

工学という学問の解釈は工学に携わる者であっても大なり小なり差異はあると思われるが、著者は『工学とは物理法則を理解、そして応用し、人類や社会に役立つモノや仕組みを創る学問』であると解釈している。

例えば、人工衛星を設計する場合、ロケット打ち上げ時の振動や衝撃に耐えられるか、そして宇宙の熱真空環境下で正常に動作するなどを証明する必要がある。即ち、打ち上げ時の振動や衝撃、宇宙環境下の温度などを具体的な数値として提示し、設計した人工衛星が制約条件を定量的に満足しているかどうかを実験や解析により評価する。当然ながら評価は主観的、感覚的なものではなく、数字や式を用いた客観的なものとなる。これは衛星設計に限らず、あらゆる工業製品の設計に言えることである。

以上のことから工学部での学びには、数学や物理学は欠かすことのできない極めて重要なツールであることは言うまでもない。特に微分積分は設計の基盤となる力学系科目の履修には不可欠である。

一方、2000年頃より大学生の基礎学力低下が課題となっている[1]-[5]。特に偏差値が低い学生を多く受け入れている本学では、1年生向けの教養科目お

よび専門科目の教授法改善により多くの時間と労力を割かざるを得ない状況にある。

そのような状況の中、電子ロボット工学科では2024年度入学生から1年生向けの数物基礎・同演習と称する座学と演習・実験を組み合わせた科目を開講することとなった。本科目の狙いは、中等教育までの数学および力学の修得が十分ではない学生に対しても、身近な例を交えながら数学や物理学の基礎から専門科目修得に必要な微分積分の概念を体験的に理解して貰うことである。体験的手法としては、著者が2009年頃より理工学教育に活用[6], [7]しているモデルロケットを採用する。

以上の取り組みを通じて、数物基礎・同演習の授業効果がどの程度効果があるのか、或いは学生の理解を阻んでいる根本的要因はどこにあるのかを学生に対するアンケートを通じて分析する。

2. 専門科目の教育方法について

本来、初等教育、中等教育において身に付けるべき基礎学力を備えていない学生が大学工学部に入學し、勉学に臨むことは極めて非現実的であり決して推奨されるべきことではない。しかしながら、入学後早期

* 愛知工科大学工学部電子ロボット学科、〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2

Department of Electronic Robot Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihamasama-cho, Gamagori-shi, Aichi 443-0047, Japan

に基礎学力を身に付け、教養科目や専門科目の学習に十分対応できる教育手法を検討し、教育課程を取り入れていくことは、高等教育における教育力向上に大きく貢献できるものと考える。ここでは、著者が2005年高専教員に採用されてから今日に至るまでの教育経験から学生の理解度向上に資すると考えている認識について触れる。

著者が考える重要な認識は下記2点に集約される。

- ① 日常の世界と当該科目の世界は全くの別物であること
- ② 教えるという感覚以上に一種のサイエンスコミュニケーション的な素養が必要であること

①について、例えば大学の学びの中で当然のように専門用語が登場する。当該分野の専門家にとっては当たり前の用語であっても、初学者にとっては極めて難解であり、その背景にある概念でさえ全く馴染みがないことがしばしば見受けられる。よって、初学者がその用語を理解するためには、単に用語の意味を説明すれば済む話ではなく、より根幹に関わる概念を如何に伝えられるかが鍵となる。しかしながら、前述の説明とは矛盾するが、このような概念を的確に言語化することは非常に困難であり、学習者自身が自分で内容をかみ砕いて落とし込まない限り本質的な理解に到達したとは言い難い。即ち、自分自身で内容をかみ砕いて落としめる者が大学での学習に適用できる者である一方で、この能力（或いは先天的な資質と言えるもの）を備えていない者はそもそも大学での学習に適さない可能性があるのではとも感じている。

②については、初学者に対して①で挙げた専門用語の背景にある概念を上手に伝えるためには、科学技術的な内容を一般の人に分かりやすく伝えられる術を持ち合わせているかも重要なポイントになるとを考えている。最終的には、学習者自身が内容をかみ砕いて落とし込む必要はあるが、そのためのサポート的な位置づけとして有用である。本稿冒頭でも述べた通り、工学は幸いにも自然法則を根幹として成立している學問であり、学生は大学入学までの生活の中で様々な自然現象に直接的或いは間接的に触れていることが期待される。よって、身近な自然現象を引き合いに出しながら、伝えるべき本質を損なうことなく上手に伝えることは高等教育には不可欠である。

3. 数物基礎・同演習の実施

3.1 本授業の狙いと構成

数物基礎・同演習の狙いは、初等・中等教育において数学、物理学の修得が不十分な学生が数学や

物理学の基礎から専門科目修得に必要な微分積分の概念を体験的に理解して貰うことである。また、前年度までに実施してきたロボット基礎・同実験の内容も一部踏襲することで後期の授業運営に支障が出ないように配慮している。本授業の構成をTable 1に示す。本授業は3単位科目であり90分2コマ／週の計30回で構成されている。本稿では第2回および第15回～第30回のうち、著者が特に注力した内容にポイントを絞って述べる。

Table 1 Schedule of basic physics and mathematics and practice

授業回	主たる内容
第1回	ガイダンス
第2回	数学、物理の基礎トレーニング
第3回	計測と平均値と有効数字
第4回	計測の実験とデータ整理
第5回	実験報告書の書き方
第6回	実験報告書を書いてみよう
第7回	確率とサイコロ
第8回	サイコロを振って実験しよう
第9回	電気回路の基礎
第10回	抵抗の測定実験
第11回	精度と標準偏差
第12回	標準偏差による結果の評価
第13回	前半まとめ
第14回	前半まとめ
第15回	力学の基礎と数学との関係性
第16回	運動方程式を考えてみよう
第17回	三角関数と三角測量
第18回	三角関数に慣れよう
第19回	モデルロケットの説明
第20回	モデルロケットの確認テスト
第21回	モデルロケットの打ち上げ
第22回	モデルロケットの打ち上げ実習
第23回	表計算(Excel)の使い方
第24回	Excelを使って高度を計算しよう
第25回	実習報告書の作成
第26回	実習報告書を作成しよう
第27回	技術プレゼンテーションとは
第28回	プレゼンテーションを作成しよう
第29回	プレゼンテーション最終確認
第30回	プレゼンテーションとアンケート

3.2 アンケート調査

本授業では、授業の効果を分析・評価するため、大学が実施する授業アンケートとは別に独自のアンケートを実施する。アンケート項目として、(1)高校までに学習した内容で本授業や電子ロボット工学科での学

習に関係がある項目に対する自身の理解度、(2)工学を学ぶための素養に関する内容、(3)授業後の理解度、そして、(4)授業の狙いを達成できたかに対する自己評価を設定している。

(1)については、数学に関しては、四則演算、分数、対数、指数、複素数、三角関数、三平方の定理、余弦定理、行列、ベクトル、円の式、数列、極限、文字式、解の公式、一次関数、二次関数、連立方程式を挙げた。また、物理に関しては、質点、速度、加速度、運動方程式、力積、自由落下、ニュートンの運動の法則第一法則～第三法則、万有引力の法則、円運動、遠心力、向心力、単振動、フックの法則、質量保存の法則、エネルギー保存の法則、オームの法則、SI単位を挙げた。

(2)については、創造的思考力を備えていること、加えて学校生活以外で電子工作やプログラミングといったモノづくり的要素との接点を有することは、工学や広い意味で理系を学ぶために極めて重要なファクターであると考えており、これらを問う内容としている。実際に実施したアンケート結果については第4章で述べる。

3.3 第2回授業の内容と狙い

第2回授業は数学、物理の基礎トレーニングと称し、第2章で述べた観点を踏まえて、数式や定理の説明ではなく、身近な自然現象や話題を足掛かりに概念を捉えて貰うことを念頭に実施した。具体的な項目として、

- ①気温変化と微積分
- ②土地の面積と微積分
- ③綱引きとベクトル量
- ④キャッチボールと運動量

を取り上げた。以下、それぞれのポイントを述べる。

3.3.1 気温変化と微積分

気温変化は天気予報で話題に挙がる極めて身近な事例であり、学生にも受け入れ易い内容であると考えて取り入れた。一般的に気温はFig. 1 [8]に示す通り朝から昼に向かって上昇し、13時くらいから夜にかけて下降していくことが知られている。

授業ではFig. 2に示す適当な気温変化の一部をスライドで提示し、この後気温はどうなるかを正解は問わない形で質問した。結果、授業に出席した20名全員が上昇すると回答した。基本的に曲線を推定する行為は微積分そのものであるため、学生がある程度理系の感性を有していることが推測されるが、本項目に対して詳細なアンケートを実施するには至らなかったためあくまでも推測の域は出ない。

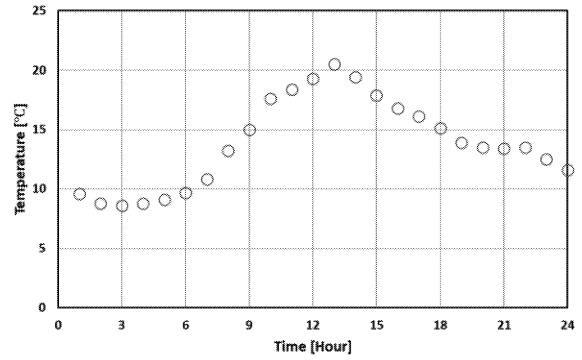


Fig. 1 Temperature history in Gamagori City on April 2 [8]

身近なところから気温の変化

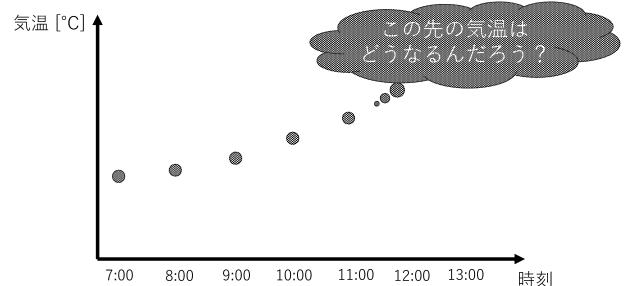


Fig. 2 Slides presented to students

3.3.2 土地の面積と微積分

大学における力学の計算では微分方程式を扱うことが一般的であるが、この際に dt や dx といった微小の概念を捉えることは非常に重要である。微小の概念は非常に抽象的であり容易に捉えることは難しいと考えている。しかしながら、著者は宇宙工学を専攻しており、土地を地球表面の一部であるという観点を切り口として、微小の概念を学生に伝えることを試みた。

単に土地の面積を求めたい場合、正方形や長方形といった矩形を抽出して縦の長さ×横の長さを計算することで容易に求められる。仮に複雑な形であっても矩形で得られた面積の足し算や引き算で求めることができる。

ここで、土地というのは地球表面の極めて小さな一部分であり、Fig. 3 [9]に示す通り球体であることが知られている。仮に地球を完全球体と仮定した場合、球の表面積を求める公式は、球の半径を r とすれば、 $4\pi r^2$ で表すことが出来るということは中等教育卒業までに学習する機会は有ろう。球の表面積を求める式は本来、微積分を用いることで導出されるが、導出について触れない。

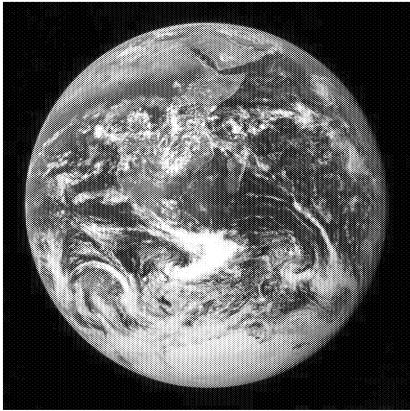


Fig. 3 Image of the Earth from Apollo 17 [9]

さて、先の土地の話を振り返ると、地球の土地を $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形で区切り、それを地球表面全体に対して足し算すれば、同様に地球の表面積になる。この考え方は微積分そのものである。

微分については、その名の通り、“微”小に“分”けていくことであるが、地球は半径約 6400 km の球体である。我々人間のスケールの基準を 1 m と置いた場合、人間の視点では地面は球体の一部ではなく、正方形平面として捉えることが一般的であろう。よって、微小という概念に明確な数値基準は存在しないが、地球で例えると $(1\text{ m})/(6400000\text{ m})$ のスケールの違いは十分に微小の扱いが可能になると捉えることができる。

以上の解説が学生の理解に役立っているかを確認するため、Fig. 4 に示すグラフを提示し、赤色で示した部分を求めるための考え方を問う課題を出題した。課題を提出した 21 名中、理解している学生が 4 名、多少は理解している学生が 6 名、考え方ではなく積分計算を試みた学生が 6 名、積分計算による求め方を説明した学生が 2 名、理解していない学生が 2 名、白紙の学生が 1 名であった。積分計算を行った、或いは求め方を説明した学生は、積分の計算方法が分かっていても積分の意味を理解できていない可能性がある。

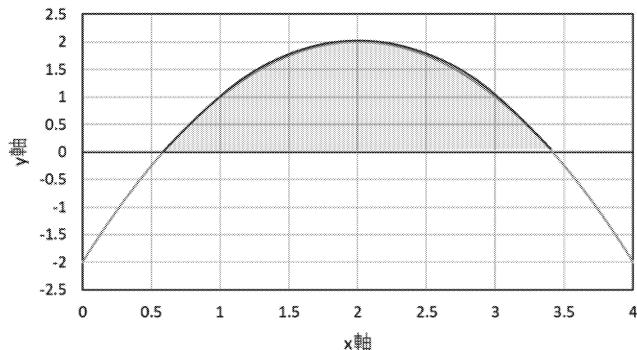


Fig. 4 Graph asking if the student understands the concept of integration

3.3.3 綱引きとベクトル量

ベクトル量は力学を学ぶ上で常識として知っておく必要があり、本授業で付隨的に取り扱った。綱引きは中等教育までの体育や運動会、体育祭などで実施されており、誰しもが体験している取り組みである。力学的には、互いのチームが正反対に力を掛けことで綱を引っ張り合い、より強い力で相手チームを引っ張った方が勝利する。また、同じ方向に引っ張っても勝負にならないことは学生にとっても自明である。このことは力には大きさと向きがあることを示す身近な例であり、模式図となる Fig. 5 を授業で提示して学生にベクトル量を解説した。

綱引き

- ・小学校～高校の体育や運動会で綱引きをやったことある人はいますか？

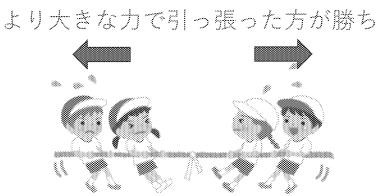


Fig. 5 Slide showing a schematic of a tug-of-war

3.3.4 キャッチボールと運動量

力学の学習においてニュートンの運動法則を抑えておくことは不可避であり、特に運動量の概念を理解することは絶対条件である。運動量を説明するための身近な例として本授業ではキャッチボールを題材として説明した。キャッチボールは、実体験も多いことが推測され、仮に実体験が無くとも多くの学生にとって容易にイメージできるものとして採用した。

キャッチボールで運動量の概念を捉えて貰えるように、学生には「一般の人がキャッチボールをするときの球速はおよそ 50km/h です。皆さんは 50km/h で飛んできたボールを受け止めることができますね？では、 50km/h で飛んできた車を受け止めることはできますか？」と聞いたところ、学生全員がそれは無理だという反応を示した。理由も的確に回答できており、ボールよりも車が重いからということも理解していた。続けて、質量と速度を掛け合わせたものが運動量であると言うことを説明しても良好な反応を得ることはできなかった。このことは、運動量を実体験として経験していても、改めて用語・物理量としてすぐに飲み込む、或いは式としてモデル化する能力があまり高くないためと推測できる。よって、新しく登場した用語については、現象を式としてモデル化する訓練も多く必要である。

3.4 モデルロケットの活用

モデルロケットを利用してニュートンの運動の法則を実体験して貰うことにより、どの程度数学や物理学の力学の素養が身に付くのかを検証した。

3.4.1 モデルロケットについて

モデルロケット[10]は、1957年のスプートニク1号の打ち上げに伴うスプートニクショックを背景として、アメリカで誕生した安全性に配慮して規格化された教育用ロケットである。当時、ロケット打ち上げに憧れた青少年が知識もないまま火薬を用いた自作のロケットを打ち上げて事故が多発したという状況を改善するため、安全性に配慮した青少年向けのモデルロケットが開発された。そこから国際的なルールとともに世界に波及することで、モデルロケットは理科学教材として高い評価が得られている。発祥のアメリカでは高校生の授業に一般的に取り入れられている一方で、日本ではペットボトルロケット(水ロケット)と比較して、その認知度は低い水準にある。これは、日本の政治的背景が一因となっており、モデルロケットが普及し始めた当時は、学生闘争真っ只中であり、火薬=過激派が扱う危険なものとして認識され、長らく教育現場で火薬を用いたロケットを利用することが忌避されてきた。そのような状況を乗り越えて、現在では国内の科学教室や競技会などでモデルロケットの活用が普及しつつある。

モデルロケットは、水ロケットと比較して火薬によるエンジン推力が規格化されているため、理論的な設計、製作が可能となっており、工学設計の題材としても最適である。

本授業で利用するモデルロケットは入門キットであるアメリカ ESTES 社の Alpha III (Fig. 6) および同様に入門用に使用される ESTES 社のモデルロケットエンジン A8-3(Fig. 7)とする。また、モデルロケットの安全な取り扱いのため、指導者はモデルロケット従事者資格を有することが望ましい。著者は、モデルロケット指導講師資格兼第3級従事者資格を有しており、これまでに多数のモデルロケット教室における講師経験がある。



Fig. 6 Modelrocket Alpha III



Fig. 7 Modelrocket Engine A8-3

3.4.2 モデルロケット導入の狙い

モデルロケットを利用して体験的に数学、物理学の素養の身に付けていく上で重視した具体的項目を以下に示す。

- ① モノづくりと数学と物理学に密接な関連性がある点を知って貰うこと。
- ② ニュートンの運動の法則(第一法則～第三法則)を理解して貰うこと。
- ③ ニュートンの運動の法則を通じて、質量、加速度、力の概念を理解して貰うこと。
- ④ ニュートンの運動の法則を通じて、微分積分との関係性を理解して貰うこと。
- ⑤ 三角関数を理解して貰うこと。
- ⑥ モデルロケットの高度計測を通じて、三角関数を道具として活用できること。

また、①～⑥に共通する狙いとして、学生には数学や物理学を学ぶ先にモノづくりがあるということを意識して貰いたいと考えており、言い換えると、「数学や物理学は何のために学ぶのか?」の動機付けとなることを目指している。

3.4.3 学生へのモデルロケット解説

第19回授業において、学生がモデルロケットを安全に扱って貰えるように日本モデルロケット協会発行の第4級講習テキストに準拠した授業用スライド資料を作成し、モデルロケットの基本構造、モデルロケットエンジンの基本構造、モデルロケットの飛行原理、モデルロケットの打ち上げ方法、火薬類取締法に基づく安全な取り扱いといった重要な項目を解説した。

また、第20回授業において、Google Forms を用いてモデルロケットに関する確認テストを実施した。この際、学生には100点を取れるまで何度も挑戦するように働きかけた。結果21名中19名が100点獲得まで取り組み、1名が100点に到達しないまま終了し、1名が未実施であった。

3.4.4 飛行原理理解に向けた物理法則の解説

第19回授業に先立ち、モデルロケットの飛行原理の理解および実験後の考察を一層深めて貰うこと狙いとして、第15回、第16回授業でニュートンの運動法則を解説し、理解度を確認するための課題とアンケート調査を実施した。説明に際しては、高校物理の内容をボールを投げるとどうなるか、アトラクションのフ

リーフォール、エレベータ始動や電車発車・停車に伴う加速の感覚といった身近と思われる事例を交えながら可能な限り平易に説明した。また、微分方程式表現の運動方程式についても併せて説明した。

課題については、加速度や力の計算は 21 名中正解は 14 名に留まっている。一方、物体が自由落下する際の自由体図(Free Body Diagram)を描く設問に対しても、21 名中正解が 7 名、空気抵抗を無視して良いと記述しているのにも関わらず空気抵抗も示した学生が 4 名、自由体図ではなく自由落下による位置変化を示した学生が 1 名、授業で説明したボールを投げる際の自由体図をそのまま写した学生が 5 名、同様に授業で説明した相対的静止の図を写した学生が 2 名、白紙が 1 名、未提出が 1 名であった。

モノが落ちるという非常に単純かつ極めて身近な現象を模式的に捉えることができない、若しくはモノが落ちることと自由落下を関連付けられていないと思われる学生が 38%を占めている点は特筆すべきことである。

3.4.5 高度計測に向けた三角関数の導入

三角関数を理解していないと思われる学生が一定数在籍していることは、従来より電子ロボット工学科で懸案となっていましたが、電子ロボット工学科の主要科目である電気回路や制御工学などを学習するためにも三角関数は必須である。

そこで、第 17 回授業では教育系 Youtube の動画 [11]を参考にし、非常に丁寧に三角関数を説明するための授業スライドを作成し、学生に解説した。そして、第 18 回授業において、理解度を確認するための課題と授業アンケートを実施した。課題の内容は、直交座標系と極座標系との関係を問う内容を 2 問出題した。一つは、円を三角関数を利用してグラフにプロットする内容、もう一つは三次元座標系における直交座標と極座標を変換する式を導出する内容である。

円の問題については 21 名中 12 名が正解であった。一方、三次元の座標変換については正解は僅か 2 名であった。多くの学生がネット記事にある変換式のみを写しているだけで、途中の導出が記述されていなかった。これは多くの学生が三次元空間に対する空間認識が未熟な状態にあるか、或いは三角関数の理解度が不十分であるものと推測される。

一方、Fig. 8 に示すような三角関数を利用した高度測定については、モデルロケットの打ち上げ実験の様子から測定および計算方法は理解できたものと考える。

ロケットの高度を知るには？

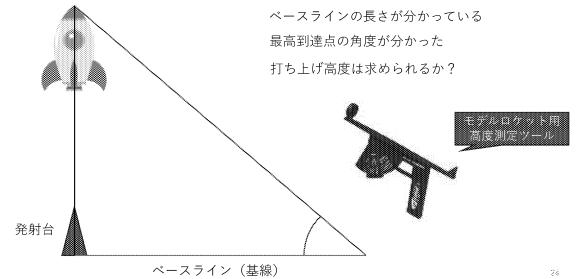


Fig. 8 Slide explaining the principle of altitude measurement by trigonometric functions

3.4.6 モデルロケットの打ち上げ実験

第 21 回、第 22 回では実際に本校グランドにてモデルロケットの打ち上げ実験を実施した。第 21 回では、4 人 1 組のグループ分けを行った後、発射ボタンを押す学生、打ち上げ時の動画を撮影する学生、高度測定を行う学生などの役割分担を行った。また、保安距離など打ち上げ時の最終確認を行った。

グラウンドでは、5 グループがそれぞれ順番に打ち上げ、指導講師資格を有する著者の指導、立ち合いの下で安全な打ち上げおよび回収を実施した。安全な打ち上げとは不点火を起こさずに打ち上げられることであり、安全な回収とはパラシュートが正常に展開して地表へ降下することである。発射台にセットされたモデルロケットを Fig. 9 に示す。

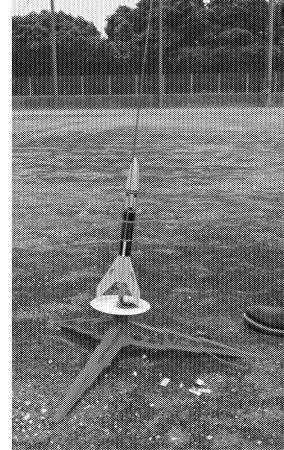


Fig.9 Modelrocket on the launch pad

3.4.7 高度シミュレーション

モデルロケットの書籍 [12] に記載されている Microsoft Excel を用いた逐次計算法に基づく高度シミュレーションを参考に、学生用のエクセルシートを作成した。ここではモデルロケットの質量、形状(抗力係数)、エンジン推力といったパラメータを変更することで、到達高度がどのように変化するかを体験して貰うに留めた。

当初、自由体図などを用いつつ重力、空気力、推力の影響が飛行にどのような影響を与えるかを物理的な視点で解説した後、シミュレーションを行うことを計画していた。しかしながら、3.4.4 節で解説した物理法則を理解していない学生が多いことが課題やアンケート結果より分かっていたため、今回は体験的な取り扱いに留めた。

3.4.8 モデルロケットの実験報告書

実験報告書の作成については、第 5 回、第 6 回のみならず AUT 教育入門など多方面から既に書き方の指導がなされている。特に基本的な書式、考査は時間を掛けて指導している。しかしながら、同じことを何度も指摘されるケースが目立ち、指導の限界を感じている。そもそも、学生のモチベーションとして実験報告書の書き方を本気で習得したいと考えているのかが疑わしい報告書となっていることが少なくない。また、実験報告書や論文といった技術文書を書く場合、緻密さ、神経質さが要求されるため、良い報告書を書くためには性格的な面も少なからず影響することも考えられる。

加えて、適切な考査と記述するためには、学生が備えている科学技術に対するリテラシーや教養のみならず専門的知識の深さが極めて重要であり、この点において学力の影響が大きく左右すると思われる。モデルロケット打ち上げ実験では、「(1)高度シミュレーションと比較して実際の打上げ高度はどの程度になったかを述べよ。」、「(2)打ち上げ結果に合うように高度シミュレーションの入力条件(物理パラメータ)を変更する場合どのようにすると良いか検討せよ。」と 2 問出題した。学生の考査を採点したところ、適切な記述ができる学生が、(1)で 24%、(2)で 33%と低い水準に留まっている。

4. アンケート結果と考察

本授業を通じて実施したアンケート結果とその考査について述べる。アンケート内容は 3.2 節で述べたとおりである。

4.1 授業前の状態について

まず、学生に数学や物理が得意かどうかを調査した結果を Fig. 10, Fig. 11 に示す。数学を苦手とする学生は 45%，物理を苦手とする学生は、関わりたくない感じている学生を含め 70% に上っており、大学工学部としては非常に由々しき状況にあることがわかる。

また、数学、物理においてそれぞれの単元の理解度を調査したところ Fig. 12, Fig. 13 に示す結果を得

た。殆どの項目に対して理解している学生の割合は 5 割以下に留まっており、専門科目を学習するための素養が乏しい状況にあることがわかる。

数学は得意ですか？

20 件の回答

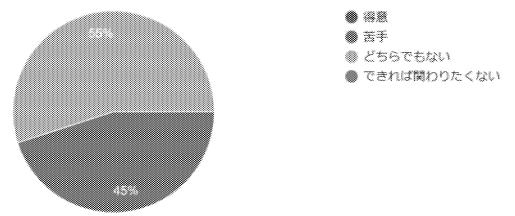


Fig. 10 Weakness in mathematics

物理は得意ですか？

20 件の回答

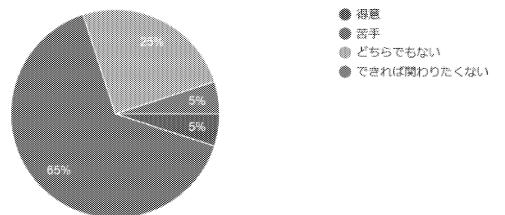


Fig. 11 Weakness in physics

数学に関する以下の内容でわかっているものにチェックを入れてください
20 件の回答

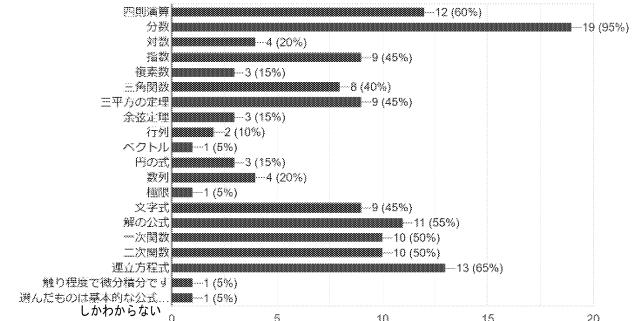


Fig. 12 Understanding each unit in mathematics

物理に関する以下の内容でわかっているものにチェックを入れてください
20 件の回答

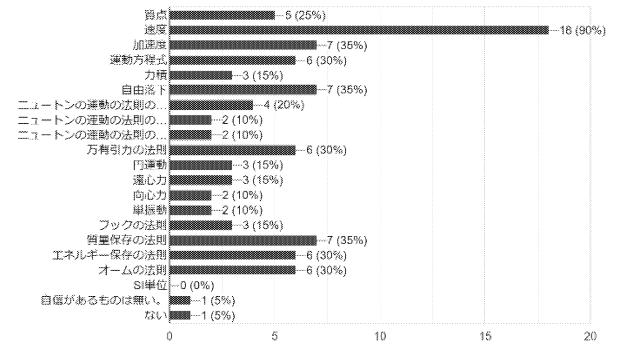


Fig. 13 Understanding each unit in physics

4.2 勉学および理系に関する素養

大学で単位を修得するためには、授業外での学習が求められるため学生のこれまでの学習習慣は極めて重要であり、アンケート調査を行った。Fig. 14 より 40% の学生が家ではほとんど勉強しなかったと回答している。また、35%の学生が家で 1~2 時間勉強していたと回答している。学習習慣が身に付いていない学生は課題提出に支障をきたす懸念があるため留意が必要である。

以前の学校にいたときに家で 1 日に平均値でおおよそ何時間くらい勉強してきましたか？（大学では 1 科目に対して、予習と復習を 2 時間くらい実施することが求められています）
20 件の回答

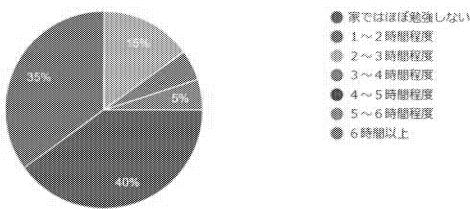


Fig. 14 Study time before admission

また、最近では学習に動画を利用する学生が増えていると聞き及んでおり、動画を用いた学習状況も調査した。結果を Fig. 15 に示す。何回か見たことはあると回答した学生が 80% であり、動画を主として利用している学生はいないことがわかった。

Youtubeなどで教育系の動画は見ますか？
20 件の回答

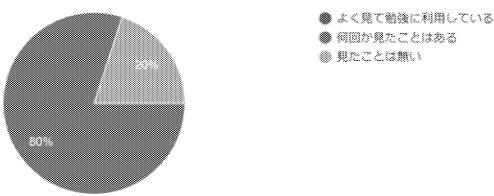


Fig. 15 Viewing status of educational videos

そして、授業以外で自宅で取り組んでいる事項について調査したところ、Fig. 16 の結果が得られた。プラモデルの組み立て、DIY、CAD ソフトを使った設計を行っている学生が見受けられ、機械系の授業に興味を持って貰うことを期待したい。また、電子工作、プログラミング、パソコンの自作にも取り組んでいる学生も 2, 3 名いることがわかり、電気系、情報系の授業に興味を持って貰うことを期待したい。

家でも取り組んでいることを教えてください
20 件の回答

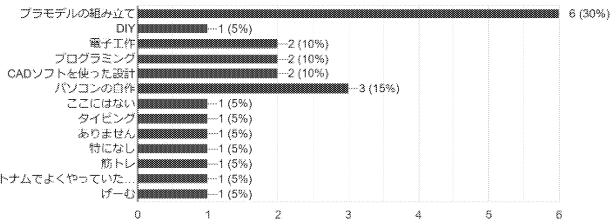


Fig. 16 Survey on hobbies related to science

4.3 授業後の理解度

授業で扱った数学や物理の単元に関して、学生が本授業を受講することでどの程度理解したかを調査した結果をそれぞれ Fig. 17, Fig. 18 に示す。Fig. 17 は第 17 回、18 回で三角関数を解説した後に行ったアンケート結果である。全員がしっかりと理解して貰うには至っていないが、三平方の定理では約 1.6 倍、三角関数では約 1.3 倍、余弦定理では約 1.7 倍、円の式については約 2 倍の理解度上昇が見られている。一方、どれも理解が進んでいないという回答が 2 件あつた。

また、Fig. 18 は第 15 回、第 16 回で力学の基礎について解説した後に行ったアンケート結果である。ニュートンの運動の法則以外、殆どの項目で変化が見られなかった。また、速度と自由落下については授業前より理解している数の学生が減少した。物理学については、身近な事例を挙げて説明するなど、教員側で最大限工夫しているが、それでも理解を深めて貰うには至っていない。この点は、3.3.4 節でも述べているが、現象としては捉えることが出来ていても、それを数字や式、或いは図としてモデル化したときに同一の事象を表現していることを理解できていないことが考えられる。よって、人間が物事を理解するという認知のプロセスも含めて教授法を検討する必要性があると感じている。

下記項目のうち授業を受ける前より理解できた項目はどれですか？（複数選択可）
17 件の回答

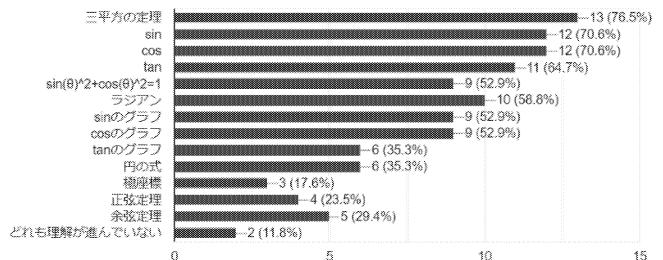


Fig. 17 Post-class understanding of mathematics

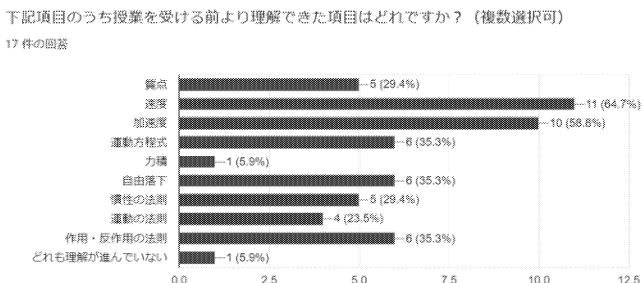


Fig. 18 Post-class understanding of physics

4.4 授業の到達度

最後に、この授業を通じてモノづくりで数学や物理学が重要なツールであることを理解できたかどうかについて、学生に 10 段階で自己評価して貰った。その結果を Fig. 19 に示す。本結果はあくまでも学生の自己評価であるため、学生によっては過大評価、或いは過小評価している側面も見受けられる。いずれにせよ自己評価が 6 以上の学生は有効回答数の 61%であり、座学のみならずモデルロケットによる体験を経ることにより一定の効果が得られたものと考えられる。

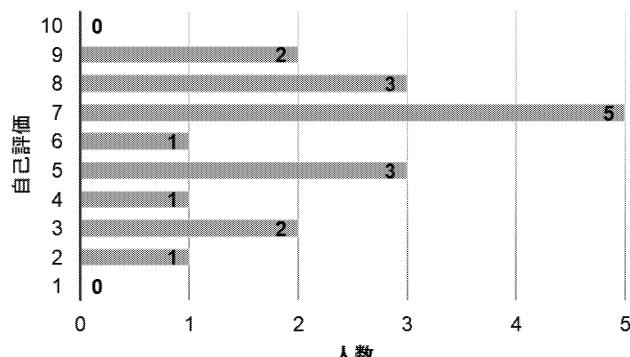


Fig. 19 Self-assessment of achievement

4.5 分析とまとめ

ここまで授業実践とアンケート結果から得られた事項を分析してまとめる。

まず、当初の狙いの一つであった「専門科目修得に必要な微分積分の概念を体験的に理解して貰うこと」に関しては、目的を達したとは言い難い状況であった。ただし、「数学や物理学が工学において重要なツールである」と言うことは 4.4 節のアンケート結果から 6 割の学生には理解して貰うことができたと考える。

次に、式などを平易な表現で説明することは、ある程度の学力を有している学生には効果はあるが、特に学力が低い学生に対しては効果は期待できない。

次に、身近な事例などを挙げて物理現象を説明することや体験的な学習は多くの学生にとって効果はある。一方で、実現象を数式や図などでモデル化する

際に理解が追い付いていないケースが見受けられる。

このため、実際の現象を式や図を用いてモデル化する認知プロセスを繰り返して訓練する取り組みを行うことで学生の理解度が改善できる可能性がある。一方、大学の授業では抽象的な概念を扱うことも多いため、実体験として捉えることができない事柄を扱う場合、学生が全く理解できないというケースが多数生じる恐れがある。

5. おわりに

本稿では、中等教育までの数学および物理学の修得が十分ではない学生に対しても、身近な事例を交えながら数学や物理学の基礎から専門科目修得に必要な微分積分の概念を体験的に理解して貰うこと狙いとして、2024 年度から新規に開設した数物基礎・同演習の実践内容について述べてきた。

授業実践および学生の課題やアンケートから得られた結論として、数学と物理学が工学において重要なツールであると言うことは 6 割の学生に理解して貰うことができた。一方、微積分の概念までも含め工学で重要であることを理解できた学生は限られたものであった。

また、身近な事例などを挙げて物理現象を説明することやモデルロケットを活用した体験的な学習は多くの学生にとって効果はある。一方で、実現象を数式や図などでモデル化する際に理解が追い付いていないケースが見受けられ、この点を訓練する機会を増やすことで理解度の改善が図れる可能性があることがわかった。

謝辞

数物基礎・同演習の実施に際して、愛知工科大学 2024 年度教育改革・特別研究推進プロジェクト「モデルロケットを活用した初年次向け数物基礎教育の試み」の採択を受けた、ここに記し謝意を表す。

数物基礎・同演習におけるモデルロケットの打ち上げ実験に際して、授業担当教員である本学電子ロボット工学科小川和輝助教には、多大なるご協力を頂いた、ここに記し謝意を表す。

参考文献

- [1] 岡部恒治, 戸瀬信之, 西村和雄, 分数ができるない大学生, 東洋経済新聞社, 1999.
- [2] 岡部恒治, 戸瀬信之, 西村和雄, 小数ができるない大学生, 東洋経済新聞社, 2000.
- [3] 岡部恒治, 戸瀬信之, 西村和雄, 算数ができるない大学生, 東洋経済新聞社, 2001.

い大学生, 東洋経済新聞社, 2001.

[4] 西森敏之, “大学における数学基礎教育で今何が起きているか”, 数学通信, 7(1), pp.20-34, 2002.

[5] 樋口勝一, 川崎美保, 石田敦英, 村上亨, “文科系大学生就職支援のための数学教育の必要性”, 追手門学院大学教育研究所紀要第 32 号, pp.141-150, 2014.

[6] 中谷淳, 村澤杏樹, 野村真成, “岐阜高専におけるモデルロケットを用いた宇宙教育の実践例”, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 3L08, 2013.

[7] 面谷駿介, 中谷淳, 野村真成, “モデルロケット教材用小型高度計の設計と試作”, 第 50 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2013.

[8] “過去の気象データ検索”, 気象庁, (参照日: 2024 年 4 月 5 日, <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>)

[9] “Blue Marble - Image of the Earth from Apollo 17”, NASA, (参照日: 2024 年 9 月 5 日, <https://www.nasa.gov/image-article/blue-marble-image-of-earth-from-apollo-17/>)

[10] “協会の理念”, 日本モデルロケット協会, (参照日 : 2024 年 9 月 5 日, <https://www.jar.net/philosophy2.html>)

[11] ヨビノリたくみ, “中学数学からはじめる三角関数”, 予備校のノリで学ぶ「大学の数学・物理」, (参照日 : 2024 年 5 月 22 日, <https://www.youtube.com/watch?v=OLqgs4fJI7Y>)

[12] 日本モデルロケット協会, 新版 手作りロケット入門, 誠文堂新光社, 2013.

報告

Google Apps Script を活用した欠席回数通知の自動化: 実装方法と学生アンケートによる評価

寺井 雅人*

(2024年8月28日受理)

Automating Absence Notifications Using Google Apps Script: Implementation and Evaluation

Masato TERAI*

(Received August 28, 2024)

Abstract

This paper presents a step-by-step method for implementing automatic absence notifications using Gmail, facilitated by Google Apps Script (GAS). GAS is an easy and useful computer language for extending the functions of Google applications. The approach automates the process of notifying students about their number of absences. Additionally, the paper reports findings from a survey conducted to evaluate the effectiveness of these notifications. The survey respondents were 84 students from six classes. The results suggest that the majority of students agreed on the effectiveness of the notifications. This method may help students avoid failing due to excessive absences.

キーワード:学生支援, プログラミング, 大学生, スプレッドシート

Keywords: Student Support, Programming, University Students, Spreadsheet

1. はじめに

大学は、高校に比べ講義選択の自由度が高くなるため、スケジュール管理により注意が必要がある。しかし、それは特に大学1年生にとって難しい場合がある。その例として、自身の欠席回数の勘違いにより欠席超過で単位を取得できなかった学生が過去に存在した。よって、学生に対し出席回数をリマインドしておくことで、教員と学生の双方が欠席回数を確認でき、公欠申請を忘れたり、出席回数を勘違っていたなどのトラブルを回避できる。1年生の講義を主に担当する著者は、このような背景を理由に、欠席者に対しメールを送ることにした。しかし、手動でメールを送る場合、受講者や担当クラスが多いとメールの送り忘れなどミスを誘発しやすくなる。著者は、自身の研究活動でプログラム言語を使用するため、プログラム言語を用いてメール送信を自動化することにした。その中で、Google Apps Scriptという比較的容易に自動化の処理を行うことができる開発手段を知った。この手法により、現在では学生への欠席回数のメール送信を自動化することに

成功している。必要だが面倒なことは、コンピュータにやらせればよいのである。本稿では、初めに GAS を用いて欠席回数を伝えるメールを自動化する方法を説明する。そして、メールを送信していたクラスの学生を対象にしたアンケート結果を紹介し、学生が欠席回数に関するメールの有益性をどのように評価していたのかを報告する。

2. Google Apps Script とは

Google が提供するアプリケーションは教育現場の様々な場面で活用されており、例えば、学生への連絡には Gmail、講義資料の配布などには Google Classroom が用いられている。本学においても、教職員並びに学生全員が Google アプリケーションの恩恵を受けているといつても過言ではない。これらのアプリケーションは既存のモノでも十分に活用できるが、使用者の用途によってその機能を拡張することも可能である。それを可能にするのが Google が提供するアプリケーションの開発プラットフォームである Google Apps

* 愛知工科大学工学部基礎教育, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Comprehensive Education Center, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

Script(GAS)である。GAS は、ブラウザ上のコードエディタを使用し、最新の JavaScript でコードを記述し、Google Workspace アプリケーションのライブラリにアクセスできる[1]。例えば、アンケートや出席管理などで活用されるアプリケーションとして Google Forms が挙げられる。Google Forms には、初期設定では回答の開始や締め切りの設定を自動で行うことができず、管理者が手動でそれらを実行する必要がある。しかし、GAS を使用すれば、Google Forms に自動での受付開始、そしてその終了を管理者が設定した時刻に行うという機能を追加したり、受付開始や終了を実行したことを管理者に対してメールで通知することも可能である[2]。

GAS が行うような Google のアプリケーションと連携したプログラム言語の処理は、Python など他の言語でも実装が可能である[3]。しかし、GAS を使う利点として、プログラム言語に不慣れな初心者でも比較的実装が容易であることが挙げられる。GAS は Google のアカウントがあればだれでも無料で使用でき、なおかつ開発環境のセットアップが不要である[4]。つまり、ある処理を可能にするライブラリやパッケージのインストールを行う必要がなく、Google アプリケーション内での開発を行うため、認証などのプロセスも容易に行うことができる。また、GAS は JavaScript でコードを記述する。JavaScript は広く普及したプログラム言語であり、その人気も高い[5]。

GAS を使用する際の注意点として以下の点が挙げられる[4]。初めに、ローカルのファイルへの操作を行うことができない。例えば、自身のコンピュータにインストールした Excel ファイルをもとにした処理は行えず、Google のサーバーに保存されたものしか連携がない。また、機能の制限もあり、例えば、一般ユーザー向けのアカウント(無料版)は 1 日 100 件、Google Workspace のアカウントは 1 日 1500 件となっている[6]。しかし、Microsoft Office に対応するツールは Google のアプリケーションにも存在しており、Excel であれば Google Spreadsheet, Word であれば Google Docs など、以上の点は大きな制約とはならない。また、メール送信に関しても、大学機関などは Google Workplace のアカウントを持っていることが多く、本学でも 1500 件まで 1 日に送信可能である(2024 年 7 月現在)。以上のように、プログラム言語に不慣れであっても、Google アプリケーションの機能を拡張し自由にカスタマイズすることができるため、GAS は大きな利用価値があると筆者は考えている。以下のセクションでは、実際に著者が行っている欠席回数のリマインドメールの実装方法について述べる。

2.1 事前準備

上述のように、GAS の処理では、ローカルファイルを使用することができない。そのため、表計算ソフトの機能を使用したい場合、Excel ではなく Google Spreadsheet を準備する必要がある。今回は、簡易版として以下の Fig.1 のようなシートを用意した。名前の列には、学生の名前、メールアドレスの列には、学生の大学ドメインのメール(塗りつぶし隠している)、3 行目から 7 行目はある講義が 5 回開講されたと仮定し 9 月 2 日から 1 週間間隔の日付を列名とし、セルには出席していれば 1、欠席した場合は 0 を入力している。注意点として、「欠席数」、「メール通知回数」、「残り欠席可能数」の列には、常に何らかの数値が入力されている必要がある。

- 「欠席数」のセルには、countif 関数などで、欠席数をあらかじめ入力(countif(セルの範囲, "0"))
- 「メール通知回数」には 0 を入力しておく。メールを送るたびに自動で 1 が足されていく。
- 4 回欠席で単位不認定のため、「残り欠席可能数」には、4-(欠席数のセル)のように指定しておくといい。

講義	メールアドレス	9/2	9/9	9/16	9/23	9/30	欠席数	メール通知回数	残り欠席可能数
さん		1	1	1	1	1	0	0	4
さん		1	0	0	1	1	2	0	2
さん		0	0	1	0	1	3	1	1
さん	sample@gmail.com	1	0	0	0	0	4	2	0

Fig. 1 Example of Spreadsheet

2.2 コードの解説

ツールバーの「拡張機能」から「Apps Script」を選択し、「コード.gs」に以下のコードを貼り、保存ボタン押す。

```
function
SendEmailsBasedOnCondition() {
  var sheet =
  SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet()
    .getActiveSheet();
  var data =
  sheet.getDataRange().getValues();

  for (var i = 1; i < data.length;
  i++) { // ヘッダー行をスキップ
    var row = data[i];
    if (row[8] > 4) { // 欠席数が4以上なら
      var message = "You have been absent for more than 4 days." +
      "Please attend the class as soon as possible." +
      "Thank you for your cooperation.";
      MailApp.sendEmail(row[1], "Absent Notice", message);
    }
  }
}
```

```

var email = row[1]; // B 列「メールアドレス」

var statusCell =
sheet.getRange(i + 1, 8); // H 列「欠席数」*この指定方法では 0 からではなく 1 から数える

var status =
statusCell.getValue();
var rest = row[9]; // J 列「残りの欠席回数」

var numcell = sheet.getRange(i + 1, 9); // I 列「メール通知回数」*この指定方法では 0 からではなく 1 から数える

// ↓ セルの値を取得し、それらを数値に変換してから引き算する。
var statusValue =
parseFloat(status);
var numCellValue =
parseFloat(numcell.getValue());

// 結果数 - メールの通知数が 2 のセルのみ、メール送信の手続きへ(重複して送信しないように)
var count = statusValue - numCellValue;

// ↓ 回数によって、メッセージを分ける
if (count == 2) {
    if (statusValue == 2 || statusValue == 3){
        var subject = "欠席について";
        var message = "あと" + rest + "回欠席すると欠席超過です";
    } else if (statusValue == 4){
        var subject = "欠席について";
        var message = "本日 4 回目の欠席されましたので、単位不認定となりました。";
    }
    // メールを送信
    MailApp.sendEmail(email, subject, message);
}

```

```

// I 列「メール通知回数」のセルに、メールを送信するたびに 1 を加算
var numcellValue =
numcell.getValue();
numcell.setValue(numcellValue + 1);
}
}
}

```

以上の全体のコードをブロックごとに説明する。以下の処理では、メール送信に必要なセルの中身を変数に投入している。記録するデータの数(e.g., 講義数)が今回示したデータの数とは異なる場合、適宜変更する必要がある。この場合、コメントアウトされている内容にもあるように、セルの列数の指定には注意されたい。出席回数は 1 学期で最大 15 回記録することになる。今回は簡易版であるため、5 回講義が実施されたと仮定しているが、15 回の講義の場合は、列数がさらに増えるため、列の指定を対象のデータに合わせて変更する必要がある。

```

var sheet =
SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet()
.getActiveSheet();
var data =
sheet.getDataRange().getValues();

for (var i = 1; i < data.length; i++) { // ヘッダー行をスキップ
    var row = data[i];
    var email = row[1]; // B 列「メールアドレス」

    var statusCell =
sheet.getRange(i + 1, 8); // H 列「欠席数」*この指定方法では 0 からではなく 1 から数える

    var status =
statusCell.getValue();
    var rest = row[9]; // J 列「残りの欠席回数」

    var numcell = sheet.getRange(i + 1, 9); // I 列「メール通知回数」*この指定方法では 0 からではなく 1 から数える
}

```

本学では、4回欠席をすると単位不認定となる。今は、2回目の欠席から通知を行うため、欠席回数とメールを送る回数には以下の関係がある。

Table 1 The Relationship Between the Number of Absences and the Number of Emails Sent

(1)欠席回数	(2)送信回数	(1)-(2)
0	0	0
1	0	1
2	0	2
3	1	2
4	2	2

注。送信回数は、これまでにメールを送信した回数を指す。

よって、「欠席回数 - 送信回数」が 2 となっている学生だけメールを送ればよい。4回以上欠席した学生の出席表にも、0を引き続き入力する場合もある。この場合、欠席数(0)の数が4を超えると、合致する条件分岐がなく、空メールが送信されてしまう。そのため、4より大きい数値が含まれている場合、メール送信の処理に進まないように、設定を行っている。

```
// ↓ セルの値を取得し、それらを数値に変換
var statusValue =
parseFloat(status);
var numCellValue =
parseFloat(numcell.getValue());

var count = statusValue -
numCellValue;

// 欠課数が4以上となった学生(単位を落とした学生)へメールを送らないように設定
if(statusValue >= 5){return}

// ↓ 回数によって、メッセージを分ける
if (count == 2) {
```

この処理により、欠席回数に応じて、メールの内容を変更することができる。具体的に、2回、3回目の欠席では、あと何回欠席すると欠席超過になるかを伝える。4回欠席した学生には、単位不認定となったことを伝えるメールを送信している。送信するメールの内容は、“subject”や“message”に代入する内容を設定することで自由に編集できる。

```
if (statusValue == 2 || statusValue
== 3){
    var subject = "欠席について";
    var message = "あと" + rest + "回
欠席すると欠席超過です";
} else if (statusValue == 4){
    var subject = "欠席について";
    var message = "本日4回目の欠席され
ましたので、単位不認定となりました。";
}
// メールを送信
MailApp.sendEmail(email,
subject, message);
```

メールを送った直後に、「リマインダーメールを送った回数」を記録するセルに、1をカウントしていく処理を追加している。

```
var numcellValue =
numcell.getValue();
numcell.setValue(numcellValue +
1);
```

2.3 実行方法

上記の処理をどのタイミングで実行したいのかを、トリガーの設定を行うことで事前に登録することができる。

1. 目覚まし時計のマークをクリックし、「+ トリガーを追加」をクリックする。
2. 「実行する関数を選択」で、上で定義したコードの名前を入力する(自動で選択されている)。
3. 「実行するデプロイを選択」では Head、「イベントのソースを選択」は、「スプレッドシートから」を選択する。
4. 「イベントの種類を選択」では、定義した処理を実行したいタイミングを選択する。Spreadsheetには4種類のトリガーが存在する。今回のように、出席の記録の際に、その数値に応じてメールを送信する場合、「編集時」を選択するとよい。
5. 「保存」をクリックする。
6. Google アカウントへのアクセス要求を承認する。

3. 質問紙調査

3.1 対象者と質問項目

2024年度前期に、著者のクラスの受講者を対象に、欠席通知のメールに関する質問紙調査を実施した。この質問紙は、講義の最終回に実施しているため、途

中で出席超過になった学生などのデータは含まれていないことに注意されたい。調査対象としたクラスは 6 クラスであり内訳は、TOEIC ($n = 2$)、初級英語コミュニケーション ($n = 1$)、英語 1 初級 ($n = 1$)、基礎英語 1 ($n = 1$)、基礎英語 2 再履修 ($n = 1$) であった。質問紙を配布する前に、学生に対し調査理由や、データ管理・公表の方法を事前に伝えた。本調査の結果は著者の講義運営改善にも活用したいという趣旨を伝え、本稿執筆のためのデータ提供へ同意しない場合であっても、必ず回答するように伝えた。質問紙への回答者は 84 名で、データの使用に許可をした学生は 81 名で、分析対象は全回答者のおよそ 96.43% であった。分析対象者に占める学年の割合は 2 年生が最も多く (48.2%)、1 年生 (40.7%)、4 年生 (6.17%)、そして 3 年生 (4.94%) の順に割合が大きかった。

学生は Google Forms 上で以下の質問項目へ回答した。匿名による調査のため、名前と学籍番号は収集していない。

Table 2 Question Items and Response Options

質問項目	選択肢
欠席回数を自分で記録していますか	している していない
どのようなツールで欠席回数を記録していますか *欠席回数を自分で記録していると答えた学生のみ回答させた	手書きのノートや手帳 パソコンのアプリ スマートフォンのアプリ 自作のプログラムやスクリプト その他(自由記述)
大学メール (@g.aut.ac.jp) の受信ボックスをどのくらいの頻度で確認していますか	毎日 週に 2 回以上 週に 1 回 2 週間に 1 回 月に 1 回以下 その他(自由記述)
AUT ポータルの出席簿をどのくらいの頻度で確認していますか	毎日 週に 2 回以上 週に 1 回 2 週間に 1 回 月に 1 回以下 その他(自由記述)
毎日確認する連絡ツールを教えてください(複数選択可)	LINE Instagram X(旧 Twitter) メール(大学メールも含む) その他(自由記述)
欠席回数を通知するメールは、欠席回数の確認の役に立ちました	まったくそう思わない そう思わない どちらとも言えない

か？	そう思う 強くそう思う 欠席回数を通知するメールを受信していない
----	--

3.2 分析結果

分析はすべて、統計解析向けのプログラム言語である R version 4.3.2 (R core Team, 2023) で行った [7]。初めに、「欠席回数を自分で記録していますか」という問い合わせに関して、記録している学生の割合は 65.43% であり、記録していない学生 (34.57%) よりも高かった。記録媒体とその利用者の数は Table 3 のとおりである。

Table 3 The Medium Used for Recording the Number of Absences and the Number of Users

媒体名	人数	割合
スマートフォンアプリ	29	61.7
手書きノートや手帳	9	19.15
パソコンのアプリ	4	8.51
大学ポータルサイト	4	8.51
自作のプログラム	1	2.13

本学では、学生が大学のポータルサイト上で出席回数を確認することができるが、Table 4 が示す通り、大学のポータルサイト上で出欠表を高い頻度で確認している学生の割合は比較的多かった。

Table 4 The Frequency and Proportion of Checking the Attendance Register on the Portal Site

頻度	人数	割合
週に 1 回	18	33.96
週に 2 回以上	12	22.64
月に 1 回以上	9	16.98
2 週間に 1 回	8	15.09
毎日	5	9.43
その他	1	1.89

最後に、「欠席回数を通知するメールは、欠席回数の確認の役に立ちましたか？」への回答結果のまとめは Fig. 2 の通りである。

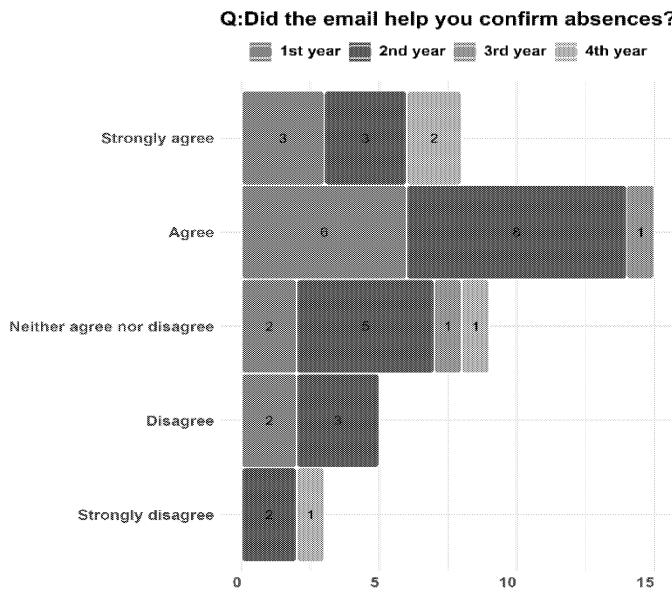


Fig. 2 The Results of Responses to Questions About the Usefulness of Absence Notifications.

役に立つと回答した学生は過半数を占めていることが明らかとなった。また、グラフには含めていないが、81名のうち、「受信していない」(=1回以上欠席していない)と答えた割合は全体の32.1%であった。有益でないと答えた回答者も見られるが、これは回答者自身で出席回数を把握・記録しているためであり、実際に「まったくそう思わない」と「そう思わない」と回答した学生は全て「欠席回数を自分で記録していますか」という問い合わせに対し、「している」と回答した。

近年、スマートフォンアプリの普及により、連絡の手段はメールだけではなくなった。しかし、大学メールの受信ボックスを確認する頻度は高く、依然としてメールでの出席通知は有効であると考えられる(Table 5)。

Table 5 The Frequency of Checking Email

頻度	人数	割合
毎日	27	33.33
週に2回以上	26	32.10
週に1回	17	20.99
2週間に1回	7	8.64
月に1回以下	4	4.94

4. おわりに

教職員が学生に対し欠席回数をメールで連絡することが必ず必要であるとは思わない。むしろ、大学を卒業した後を考えれば、教職員に頼らず、学生自身が欠席回数を把握しておくべきである。しかし、大学生活をスタートしたばかりの1年生の中には、スケジュー

ル管理に慣れていない学生がいる可能性が高いことも事実である。大学という新しい環境に適応するまでに、教職員からのサポートが必要な場合もある。本調査のアンケート結果が示すように、欠席回数のリマインドの需要は比較的高い。サポートを行うことは労力を必要とするが、自動化させるシステムを構築することで、これまでと同じ労力で、より大きなサポートを行うことも可能である。今回紹介したGASのような言語であれば、プログラミングに対する経験が浅くとも、様々な機能を実装できる。それぞれの需要にあった簡単なシステムを担当者が実装できれば、費用の掛かる大規模なシステムを導入する必要はない。例えば、宿題の提出状況をSpreadsheetに記録していれば、本稿で紹介したコードを応用し、宿題の提出状況をメールでリマインドすることもできる。

最後に、この報告は2023年9月2日にコンピュータ・ソフトウェア関連の技術に関する情報共有のサービスであるQiitaにて公開した、「【GAS】学生への、欠席回数のリマインドメールを自動化する」を加筆・修正したものである。したがって、QiitaでもGASのコードを閲覧できる[8]。

参考文献

- [1] Google, “Google Apps Script の概要”, Google Workspace, 2024, (参照日: 2024年8月5日), <https://developers.google.com/apps-script/overview?hl=ja>.
- [2] 寺井雅人, “【GAS】Google フォームの回答受付開始と締め切りを自動で行う”, Qiita, 2022, (参照日: 2024年8月5日), <https://qiita.com/masato-terai/items/d33b28af235414925057>.
- [3] 寺井雅人, “Gmail の受信フォルダから情報を抽出し、集計する—ゆうちょデビットを例に—”, Qiita, 2023, (参照日: 2024年8月5日), <https://qiita.com/masato-terai/items/8110455168a3b8163321>.
- [4] 丸の内とら, “【入門】GASとは? できること&活用法を解説(サンプルコード付き)”, 2024, (参照日: 2024年8月5日), <https://satori.marketing/marketing-blog/gas-introduction/>.
- [5] Stackscale, “Most popular programming languages in 2023”, Stackscale, 2023, (参照日: 2024年8月5日), <https://www.stackscale.com/blog/most-popular-programming-languages/>.
- [6] Google, “Google サービスの割り当て”, Google Workspace, 2024, (参照日: 2024年8月5日), <https://developers.google.com/apps-script/guides/services/quotas?hl=ja>.

- [7] R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.3.2) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- [8] 寺井雅人, “【GAS】学生への、欠席回数のリマインドメールを自動化する”, Qiita , 2024, (参照日: 2024 年 8 月 5 日, <https://qiita.com/masato-terai/items/94abbf20d5c78db1b6fc>).

報告

留学生に対する自動車整備教育への導入教育について

掛布 知仁*, 巨藤 誠*

(2024年9月30日受理)

Regarding Introductory Education to Automobile Maintenance Education for International Students

Tomohito KAKENO* and Makoto KOTO*

(Received September 30, 2024)

Abstract

Due to the impact of the COVID-19, our university accepted many international students in 2024. Most international students enroll at our university after studying Japanese in their home countries and Japan. But international students generally do not speak Japanese well, so they have trouble understanding engineering class content. In particular, the term used in automobile maintenance is specialized, making it even more difficult to understand. Therefore, we conducted introductory education before and immediately after admission, and reported on its effects.

キーワード：導入教育, 留学生, 入学前ワークブック, 日本語自動車整備講座

Keywords : Introductory education, International students, Pre-admission workbook, Lecture of car maintenance by Japanese

1. はじめに

愛知工科大学自動車短期大学では2013年度(平成25年度)より留学生の募集要項を開示し、留学生受け入れを本格化させた。2023年度(令和5年度)までの過去10年の留学生受け入れ人数は合計で31人であり、他の自動車整備士養成機関と比較して少ない値であった[1][2]。しかし2024年度(令和6年度)は新型コロナウイルスに関する入国規制が緩和された影響を受け、本学でも一度に32名の留学生を受け入れることとなった。全入学生の3割が留学生である状態でのクラスの授業運営や学習指導または生活指導は、今まで本学教職員が経験したことのない未知の領域であり、不安が極めて大きいものであった。この不安要素を払拭し、自動車を志して入学してきた留学生が入学当初から出来るだけ円滑に学校生活を送れるようにするため、留学生のための自動車整備への導入教育についての取り組みを報告する。

2. 留学生とコロナ禍の関係

文部科学省が2024年5月24日に公表した「『外国人留学生在籍状況調査』及び『日本人の海外留学

者数』について」[3]をFig.1に示す。これによると、2022年3月以降のコロナ禍に対する水際対策の段階的緩和及び同年10月からの入国情報の上限撤廃により留学生の新規入国が進み、2023年5月1日現在の外国人留学生数は279,274人で前年度の231,146人と比較して20.8%増加し、コロナ禍以降初めて上昇に転じた。留学生数の多い国は、中国115,493人(前年度比11.2%増)、ネパール37,878人(同56.2%増)、ベトナム36,339人(同2.8%減)でありネパール人の増加が際立っている。この傾向は本学にも反映されてお

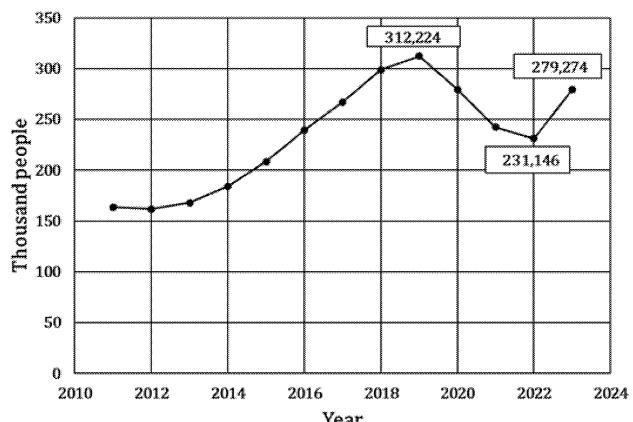


Fig.1 Number of international students

* 愛知工科大学自動車短期大学自動車工業学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2

Department of Automotive Engineering, Aichi University of Technology Automotive Junior College,
50-2 Manori,Nishihasama-cho,Gamagori,Aichi 443-0047, Japan

り、2024年度に入学した学生の32人のうち24人がネパール人、6人がスリランカ人、2人がベトナム人であった。なお、スリランカ人の留学生数は全体で7位であるが前年度比では77%増であった。

3. 入学前の教育プログラム

学生が入学前に在籍している日本語学校では、主に日本語（文法・語彙）、読解・聴解を3つの大きな柱として教育を行っている。この日本語学校ではクラスの中に日本人は在籍せず、日本語能力の際立った大きな違いはない状況下で学習成果の優劣評価がなされていたのに対し、本学では日本人と留学生が混在することに加え、整備実技を含む実務学習の成果が示されることになり、これが留学生の最大の不安要素にもなっている。また、本学では卒業後に整備士の国家資格を取得して自動車業界に貢献することが第一義となるので、留学生は入学後、日常的な日本語の習得に加え、自動車に関する整備技術用語の習得手法を速やかに確立する必要がある。そのため、留学生には「整備で用いられる日本語は自動車専用の用語であり特殊性がある」ということをいち早く伝える必要があり、この対策としてFig.2に示す「留学生のための入学前ワークブック」を作成し、入学半年前に配布して入学直後に提出することを義務付けた。このワークブックは独立行政法人国際協力機構が発行する外国人技術者向けの「見て学ぶ自動車整備の日本語」[4]と「自動車整備の日本語イラスト集」[5]を参考とした。またFig.3とFig.4に示すように、入学予定者の多い愛知工科大学外国語学校に出向し、このワークブックを使用して事前学習指導を1か月に一度ずつ計4回

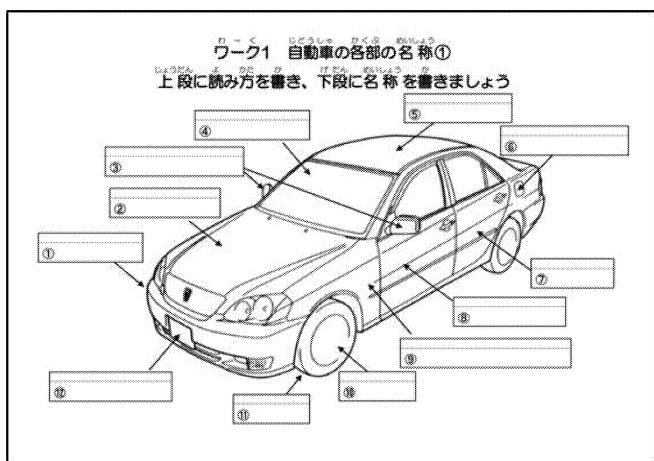


Fig.2 Pre-admission workbook for international students

行って自動車用語の特殊性を説明した。なお、この姉妹校からの留学生は全32名のうち26名を占めており、事前教育としては大きな成果が期待できる取り組みであると考えた。



Fig.3 Pre-admission learning scene (No.1)



Fig.4 Pre-admission learning scene (No.2)

4. 留学生に対する授業の運営方法

本学では、留学生の受け入れを始めてから最も多い年次でも7名（全員ベトナム人）であった。今回はそれをはるかに上回る数で、クラス編成に関しても本学教員より下に示すような様々な案が出た。

①全入学者数103名の中で留学生が32名なので3クラス編成とし、日本人のみのクラスを2クラス、留学生は1クラスにまとめる。実習もこのクラス分けで行う。
②座学のみ留学生と日本人を分離し、実習は日本人と留学生を混成させて行う。

③すべてのクラスに均等に留学生を割り振り、従来通り授業を運営する。

逡巡したのは、留学生の日本語能力を高めるためには日本人との混成クラスで多くの日本語に触れさせることが望ましいが、逆に日本人からは授業の質的保証について強く求められる可能性があるという点であった。

留学生実績が極めて多い中日本自動車短期大学を授業参観して意見交換をするなどした上で、本学では1クラス34名前後、その中に留学生が10人前後在籍する混成クラスとし、習熟度別クラスによって運営される数学Iと工学基礎は従来通りのクラス分けを行い、座学授業と実習授業は共にクラス単位で行うことを決定して2024年度をスタートさせた。出席番号も通常の五十音順とし、留学生がクラス内で均等に分散するように配慮した。ただし、実習のグループ分けでは作業の進捗に大きな差が発生しないように留学生のみが集まってしまわないよう配慮を施した。従来まで授業中のスマートフォンなどの情報端末の使用は禁止していたが、留学生に限り、スマートフォンの使用をふりがなや翻訳機能のみと限定して使用可とした。授業に使用する配布プリントについては留学生のみルビ付きの資料にした。

5. 日本語レベル試験について

留学生の選択必修科目である、1年生前期の「日本語1」と後期に設定される「日本語2」のクラスを習熟度別クラス編成とするため、入学時のガイダンス内で日本語レベル試験(以下、日本語試験)を行った。これは「筑波大学日本語・日本事情遠隔教育拠点のTTBJ(筑波日本語テスト集)」[6]を使用し、その結果を利用している。また、同じオリエンテーション内で基礎的な数学の素養試験(以下、基礎数学)と工学基礎的な内容を含む素養試験(以下、工学基礎)の2種類の試験を行っているので以下にこれらの相関性を示す。基礎数学と工学基礎では両科目において計算が主になることから強い相関を持つことが予想されたが、Fig.5に示されるように相関係数は $r=0.62$ で、予想通り「強い正の相関がある」ことが確認された。次に日本語試験と基礎数学の関係をFig.6に示す。基礎数学は設問の問題文章が短く、示された数式から直感的に解答に向かうことができるので日本語との相関は認められないのではないかと想像されたが、相関係数は $r=0.23$ で「弱い相関がある」という評価範囲となり当初の予想に反した。次に日本語試験と工学基礎の関係をFig.7に示す。工学基礎ではルビが付いていない日本語で書かれた問題文章を読み解かねばならないので、日本語試験との相関が基礎数学よりも強く出るのではないかと予想したが、相関係数は $r=0.14$ で「ほとんど相関はない」という評価範囲となり、その値も基礎数学よりも低く表れた。これらのことより入学ガイダンスで行われている工学的な素養試験と日本語能力の優劣はそれほど強く影響しないことが確認できた。

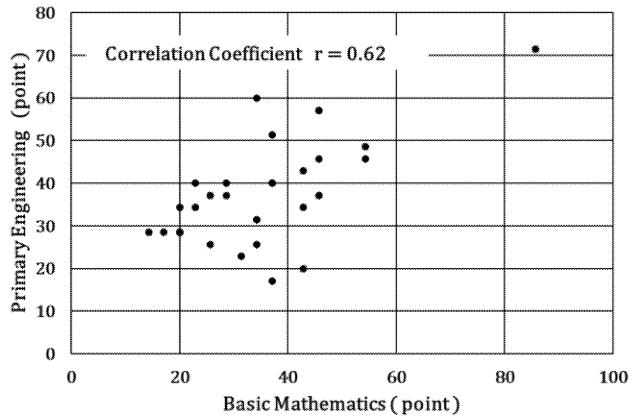


Fig.5 Dispersion Diagram
(Basic Mathematics — Primary Engineering)

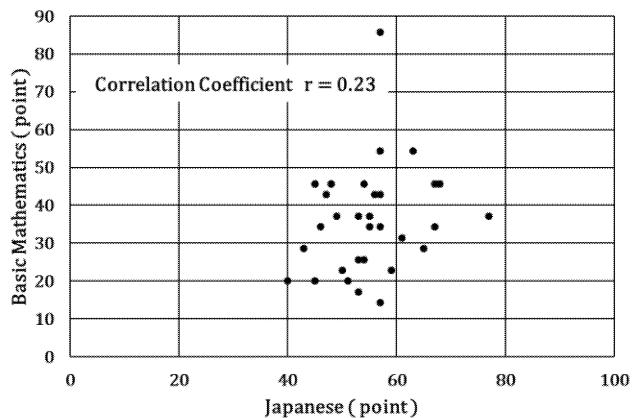


Fig.6 Dispersion Diagram
(Japanese — Basic Mathematics)

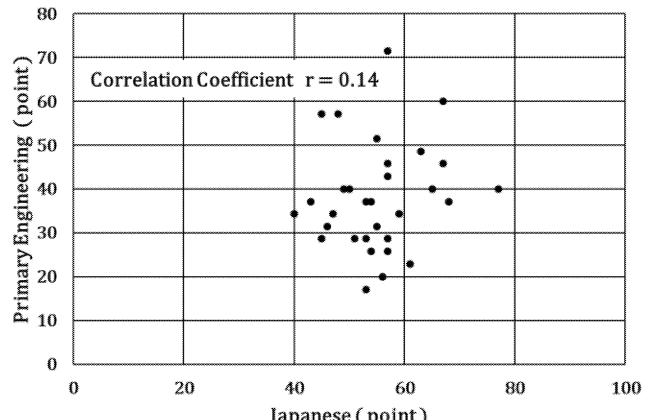


Fig.7 Dispersion Diagram
(Japanese — Primary Engineering)

6. 日本語自動車整備講座の開設

自動車整備に用いられる用語は類似性が高く且つ特殊なものが多く、日本人であっても自動車を初めて学ぶ者にとって用語の構成で躊躇ことが多い。更に

留学生は日本語能力の脆弱さから用語理解の壁は高い。これに対応するため入学直後の1年生前期に、留学生に対する導入学習としての「日本語自動車整備講座」を新設した。授業の基軸として用いるのは本学が独自に作成した「留学生のための自動車整備用語集」であり、一部抜粋をFig.8に示す。この用語集は過去の国家試験から約540語の二文字熟語を取り出し、その出現回数から重要度を4段階に分け、ローマ字表記とその単語の簡単な意味を付記したものである。授業は留学生32人を6グループに分け、グループワークで協力をしながら日本語能力を高めあう形態とした。具体的な授業内容は、まずFig.9に示すような四択問題を提示する。学生は与えられた4つの単語について用語集を用いて熟語の読み方と意味を書き出し、設問の文章に最も適する語句をグループワークにて検討して解答するというようにした。設問は文章の前後の意味と単語の語句の意味から、整備内容や自動車に関する現象を想像しなければ解答できないような問題とし、グループ単位で解答を作成させ、挙手制で発表させた。また、最初に正解にたどり着いたグループから加点されていくというシステムを採用したので、授業は大変活気があり積極性が感じられる授業となつた[7]。また他の課題として、教科書の中からプリントに示された図や文章を探し出し、部品名称を記入したり教科書にルビを付けるということも併せて行った。教科書内の図や文章の内容は授業進度とは全く関係ない内容であるが、教科書を開く機会を多くすることで視覚的印象にも残りやすいのではと考えて行った取り組みであった。

重要度	熟語	ひらがな	ローマ字	意 味
★★★	赤色	あかいろ	Akairo	色の一種でリンゴの色。テール・ランプの色。「せきしょく」
★★	圧延	あつえん	Atsuem	金属を力を加えて伸ばすこと。
★★★★	圧縮	あっしゅく	Assyuku	圧力をかけて体積を小さくすること。
★★★	圧送	あっそう	Assou	圧力をかけて空気や油を送ること。
★★	圧着	あっちやく	Attyaku	変形させて固定すること。
★★★★★	圧力	あつりょく	aturyoku	押さえつける力と、加わる面積の関係のこと。
★	安全	あんぜん	Anzen	危険がなく安心なこと。
★★	安定	あんてい	Antei	落ち着いて動きがないこと。
★★	硫黄	いおう	Iou	軽油などの燃料に多く含まれる成分。化学記号はS。
★	異音	いおん	Ion	機械などが壊れるときに出る異常な音。
★	以下	いか	Ika	その値などよりも下。
★★	維持	いじ	Izi	そのままの様子や働きを保つこと。
★★★★	異常	いじょう	Ijo	機械などが正しく作動しない様子。
★★★	以上	いじょう	Ijo	その値などよりも上。
★	位相	いそう	Isov	カムなどの形状のこと。
★★★	位置	いち	Ichi	その物が置かれている場所。
★	一部	いちぶ	Ichibu	全体のうちの少しの部分。
★	一気	いっき	Ikki	途中で休まない様子。
★★	一体	いったい	Ittai	ばらばらであった物が全部一緒になること。
★	一端	いったん	Ittan	その物の端の部分。
★★★	一定	いってい	Ittei	ある決まった量のこと。

Fig.8 Automotive maintenance glossary for international students

グループ() 確認印()	
第1回目 クラス() 番号() 氏名()	
問:カッコ内に最も適した語句を選びなさい。	
★ブレーキによって車両の速度を()させる。	
加速():	_____
減速():	_____
高速():	_____
低速():	_____
★安全や夜間の照明のために()装置が取り付けられている。	
着火():	_____
保護():	_____
灯火():	_____

Fig.9 Exercises used in class

7. 学習成績結果の分析

授業最終日に授業評価アンケートを採集し、その後、前期定期試験を行った。授業評価の集計結果をTable1とFig.10に示す。なお、Table1は敢えて本学教員がアンケート結果として見慣れた日本語表記とした。この結果よりすべての質問キーにおいて全学平均を上回り、懸念していた「分かりやすさ」は4.60、「考え方」は4.70と高得点であり、提供した授業が留学生に受け入れられたことが伺えた。また「満足度」も4.70で授業運営については順当に進んだと思われる。次に日本語自動車整備講座の試験結果と日本語レベル試験の関係をFig.11に示す。なお、日本語自動車整備講座の試験結果は筆記による定期試験の素点を示しており最終の評価成績ではない。両者の関係性を示す相関係数は $r=0.41$ で「やや相関がある」ということになり、日本語の習熟度と自動車用語の理解には何らかの関係性があることが確認できた。これより、自動車用語の理解を促すためには日本語教育に連動して展開する必要があると思われる。また授業最終回に行った独自のアンケートからは入学前に行なった事前学習指導について好意的な意見が多く見られ、座学や実習において自動車用語に対して恐怖感を持たずして学習に臨めたように感じた。また留学生からは「楽しく授業をすることができた」「留学生同士で教えあうことができて良かった」という意見が多く見られた。最後に前期定期試験の結果において、日本人の必修科目平均点が80.7点で留学生の必修科目平均点は79.7点であり、今回の留学生に対する導入教育の取り組みは全体を通して順調に進んでいると感じられた。

Table1 Compilation of questionnaires
regarding class evaluation

No		質問キー	ア	イ	ウ	エ	オ	未答	平均	全学平均
学生自身の評価	1	出席率	27	3	0	0	0	0	4.90	4.44
	2	予習復習	20	10	0	0	0	0	4.67	3.66
	3	授業への取り組み	17	10	2	1	0	0	4.43	4.08
	4	理解度	17	13	0	0	0	0	4.57	4.07
	5	自己向上	19	10	0	0	0	1	4.66	4.14
担当者の評価	6	分かりやすさ	20	8	2	0	0	0	4.60	4.21
	7	板書・パワーポイント	22	7	1	0	0	0	4.70	4.30
	8	質問対応	19	9	2	0	0	0	4.57	4.27
	9	教え方	22	7	1	0	0	0	4.70	4.30
	10	教員熱意	22	8	0	0	0	0	4.73	4.31
授業全体の評価	11	学習意欲の向上	22	7	1	0	0	0	4.70	4.16
	12	授業準備	20	10	0	0	0	0	4.67	4.33
	13	授業環境	17	12	1	0	0	0	4.53	4.25
	14	良い授業か	14	12	4	0	0	0	4.33	4.27
	15	満足度	21	9	0	0	0	0	4.70	4.25

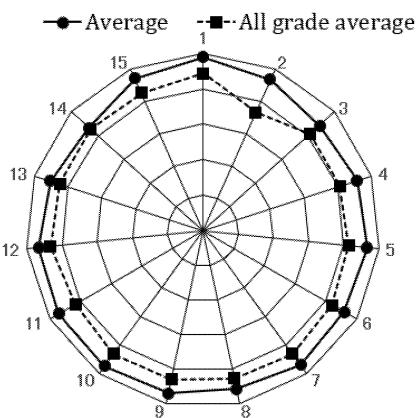


Fig.10 Question radar chart

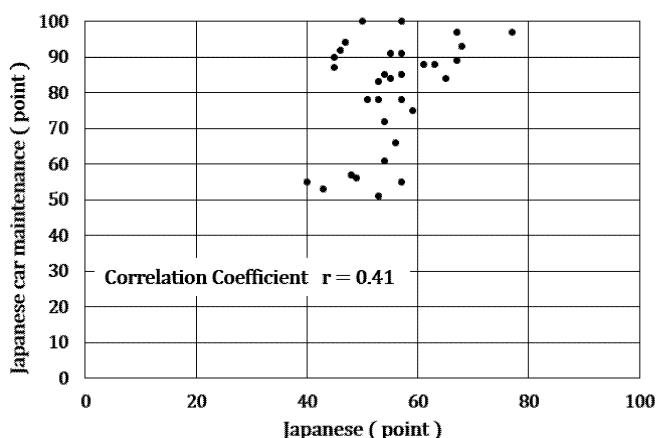


Fig.11 Dispersion Diagram
(Japanese — Japanese car maintenance)

8.まとめ

今回、多くの留学生を受け入れることに対して様々な取り組みを行った。入学前の事前学習指導において

は自動車に対する基礎単語の理解ということよりも留学生一人ひとりに対して本学教員と良好な人間関係を構築することができたことが大きな収穫であった。入学後の日本語自動車整備講座では、留学生のみのクラス編成なので入学前に所属していたそれぞれの日本語学校で授業を受けているような雰囲気となり、比較的の安心感が得られていたように感じる。今後は留学生の成長度を注視し、個々の能力を涵養させるような教育を開拓したいと考えている。

参考文献

- [1] 林文明, 桜山一倉, 高瀬利恵子, 及川浩和, 古川竜治, 清水勝昭, 吉川せつ, 謝珉, “留学生センター設立経緯とその意義－留学生教育における不可欠な役割－”, 中日本自動車短期大学 論叢 第 41 号 2011 年
- [2] 川崎信隆, 市野瀬和正, 鈴木真人, “新潟工業短期大学における留学生教育に関する取り組み”, 日本工学教育協会, 工学教育 2024 年 72 卷 1 号 pp26-31, https://doi.org/10.4307/jsee.72.1_26
- [3] 文部科学省, “「外国人留学生在籍状況調査」及び「日本人の海外留学者数」等について”, 令和 6 年 5 月 24 日, https://www.mext.go.jp/content/20240524-mext_kotokoku02-000027891.pdf
- [4] 独立行政法人国際協力機構, “見て学ぶ自動車整備の日本語”, 令和 6 年 4 月 1 日, https://www.jica.go.jp/activities/issues/transport/mechanic/health_safety_text/n_files/seibi.pdf
- [5] 独立行政法人国際協力機構, “自動車整備の日本語イラスト集”, 令和 6 年 4 月 1 日, https://www.jica.go.jp/activities/issues/transport/mechanic/health_safety_text/n_files/illust.pdf
- [6] 筑波大学, “筑波大学日本語・日本事情遠隔教育拠点の TTBJ(筑波日本語テスト集)”, <https://ttbj.cegloc.tsukuba.ac.jp/>
- [7] 愛知工科大学自動車短期大学, “留学生のための日本語整備士講座の様子(TikTok)”, <https://www.tiktok.com/@autjc681135/video/7374738532335652103>

報告

2023年度「電音部」と「音響同好会」、「照明同好会」の活動報告

鵜飼 達也*

(2024年9月30日受理)

2023 Activity Report for the "De N oN Boo ! ", "Public Address Club", and "Illumination engineering Club"

Tatsuya UKAI*

(Received September 30, 2024)

Abstract

The club "De N oN Boo!", which I founded, has been running for about 20 years. I will not go into the details of how the club was founded, as I have already published it in the 19th issue of the Journal of Our University, but I will explain the background and current situation of the " Public Address Club " and " Illumination engineering Club " accompanying the event. In 2023, COVID-19 was transferred to the 5th category and the situation has calmed down for the time being, so the club president and other members were very motivated to hold a live event as before. For this activity, we used funds selected under the 2023 project research item for extracurricular activity support. We will report on the status of our activities.

キーワード: 課外活動, ライブイベント, 音響, 照明技術

Keywords: Extracurricular Activities, Live Events, Acoustics, Illumination

1. はじめに

筆者が創部した『電音部』は約20年活動を続けている。創部の経緯については本学紀要大学19号に投稿したので割愛するが、イベント実施時に『音響同好会』と『照明同好会』が付随している状況について問われることが多いので、その設立の経緯と現状を説明しつつ2023年度の活動の様子を報告する。

2023年度はCOVID-19も第5類へと移行し、行動規制も一先ず収まった。そこで部長以下部員たちの強い意欲から以前のようなライブイベントを実施すると共に学外にも積極的に出向いて活動し、少しでも本学の知名度を上げることに繋げようとの目標を立てた。

この活動を行うにあたりに課外活動援助費では貰いきれないため2023年度のプロジェクト研究に申請、課外活動支援の項目で採択された資金を活用した。掛かった費用は主にライブハウスのホール・レンタル料、楽譜の購入(著作権料・編曲料含む)、備品の購入、備品・楽器等の機材修理メンテナンス代などで、これらに充てさせて頂いた。

2. 電音部 2023年度の活動方針

当初、予定では筆者が2028年度に定年を迎えるため2023年度の新入部員の募集を停止し、定年前には廃部して機材の処分を考えていた。本学では実際に指導できる教職員が顧問1人であるため筆者が定年後に、顧問を失った部員が混乱しないように配慮が必要であると考えていた。従ってこの年度は残った二年生から四年生の部員で活動することにした。とは言ってもいい加減な運営や活動をするつもりは全く無く、2022年度に引き続き毎週金曜日には外部指導者へレッスンをお願いして合奏技術の向上を図ると共に他の曜日には個人練習の日を各自で設定して貰い、演奏技術の向上を図ることと、観客動員数の向上を目標に充実した活動を目指した。特に学外でのライブ活動は本学の宣伝にも寄与し、電音独自の大学祭での電音ライブへの動員数を増やす効果を期待した。

* 愛知工科大学自動車短期大学自動車工業学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2
Department of Automotive Engineering, Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2
Manori, Gamagori 443-0047, Japan

3. 2023 年度顧問の状況

顧問である筆者は昨年度から姉妹校の東海工業専門学校熱田校へ出向しており、2023 年度は週に三日間熱田校に出向くことになっていた。この年度では出向先に於いて新しい授業内容を担当することになった。そのため資料作りに追われ、また実習授業で使用する教材のエンジンのメンテナンスをしたり、実習教材の破損をさせたり生徒たちが怪我をしないようにするために、作業方法が分かり易い説明することを目的とした Power Point の作成等を行っていた。この資料の作成は、その都度問題点を改善しながら完成度を高めたため膨大な時間を掛けている。当然ながら姉妹校間の移動時の電車内や徒歩で移動している間は資料作成をすることが出来ないので、筆者は始発の電車を利用し直接出向先へ赴き資料の作成を行うという状況が続いた。短期大学での授業は実習こそ出向の日と重なり受け持てなかつたが、学科授業は従来の通り担当し、必要なものを自宅に持ち帰って作成するなど大変厳しい状況であった。更に教務委員会、入試広報委員会、図書委員会を掛け持ちしており、委員会開催日には出先の授業が終わってから毎回提出されるレポートを添削した後本学に急ぎ戻り、開催されている委員会に間に合えば参加するという状況だった。しかし、急いでも委員会の開催時間に間に合わないことも多く、それらの仕事を抱えながら部活指導は厳しかった。合奏指導を外部指導者に頼り、楽曲のアレンジを業者に任せなければ筆者は間違いなく倒れていた。

4. 電音部の演奏形態について

『電音部』という名称から照明や音響も含めた部活動として捉えられるが実はそうではない。

元々は管楽器が主体となって合奏する吹奏楽、管楽器アンサンブルが出発点である。近年は少子化の影響もあってか中学校、高等学校の吹奏楽部では、圧倒的に女性の占める割合が多い。一方、愛知工科大学や愛知工科大学自動車短期大学では男子学生の割合が圧倒的に多く管楽器経験者が進学して來ることは非常に珍しい。管楽器経験者が進学して來ても必ず部活動に参加するとも限らない。そのような状況の中でも今まで楽器など触ったことが無く音楽経験が乏しい学生が楽器に興味を持って入部して來る場合も珍しくない。しかし、管楽器の演奏技術は簡単に身に付けることは出来ず、満足に演奏出来るようになるにはかなり時間を掛けて練習をする必要がある。またなかなか独学で技術を習得できるものでもない。本来なら専門の先生の技術指導が必要である。顧問は金

管楽器が専門なので全てを一人で指導することは不可能である。そこで楽器や音楽経験が浅い者たちでも合奏を成立させるために Disc Top Music (以下、DTM と略す)を活用する方法を思い付いた。楽譜に記載されている全ての音符を学生が演奏するのではなく、演奏出来る部分のみを演奏し、技術的に難しくて演奏出来ない部分をパーソナル・コンピュータに演奏を任せてしまおうという手法である。「演奏する」という観点からすれば誠に邪道であるが、この方法を用いれば好みの楽曲を少人数で演奏することが可能になる。電音部では DTM ソフトは、カワイ社製のスコア・メーカー 9 Pro[1]を使用している。(Fig. 1)

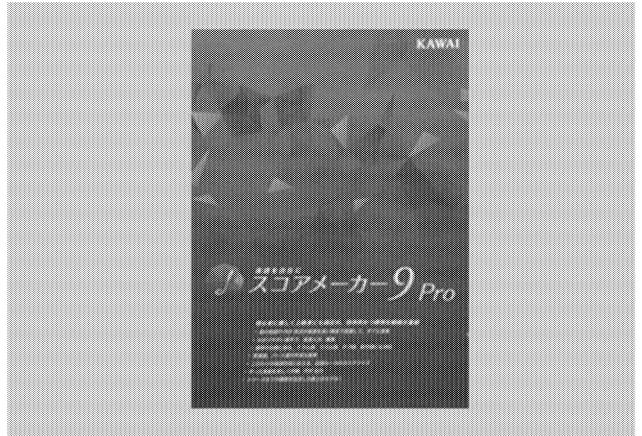


Fig. 1 カワイ社製のスコア・メーカー 9 Pro

このソフトはスキャナを用いて楽譜を取り込み画面上での編集が可能である。そのため部員数に合わせてパート譜を作成することが比較的容易に行え、楽譜を作成するだけではなく作成した楽譜を音源として Wav 形式にして保存が出来る。この機能を活用して楽譜の読み方を学んで自力で演奏し、自分の技術で演奏出来ない部分や人数が足りないパートを打ち込んだ音源で音響機器のスピーカから音を出して学生の演奏を被せる『電気仕掛けで音楽をする』と言う演奏の形を作った。その手法が『電音部』と言う名称の根源である。『吹奏楽部』から『電音部』と改称したのもその時期である。これによって楽器に対する敷居が低くなり、初心者でも取り組み易いのが電音部の特色でもある。ただし、現在は幸いにも管楽器経験者が何人か在籍しているため DTM での演奏部分は最小限に抑え、基本的には楽器で演奏する楽譜を作成している。楽譜は編成を自由に変えることが出来るミュージックエイト社製のマジックコンボ譜[2]を主に活用している。また、本学の図書館には合奏研究のための楽譜が何冊か蔵書されており、その蔵書を使用する場合もある。使用している楽譜の一例を Fig. 2 に示す。

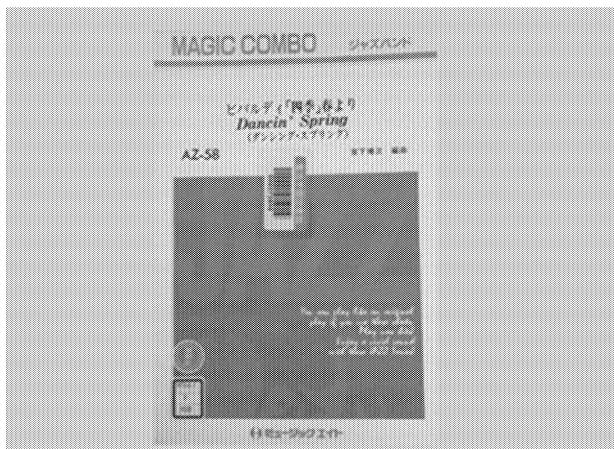


Fig. 2 主に使用している楽譜の例

2023 年度は部員数が減ったことや顧問が本学に 1 週間のうち 2 日しか出てこれらないため一部の楽曲を除いて業者委託で楽譜を作成して貰った。業者委託であれば基本的に著作権の問題は発生しないので多少費用は掛かるが煩わしさが無い。

5. 音響同好会

DTM で作った楽曲を基に演奏をしていた時代では音響機器を組み合わせる必要があった。そのために音響同好会を立ち上げたと良く誤解されるが、事情は多少異なる。2010 年頃、当時の学長の指示で入学式と卒業式の前後で演奏をしていた。当時は部員数も少なく打楽器も充実していない状況であったため「DJ マシーン」を音源の再生機器と打楽器の代わりに活用することを考えた。このとき使用した DENON 社製 DJ マシーン[3]を Fig. 3 に示す。



Fig. 3 DJ マシーン

この DJ マシーンは複数台の音楽用コンパクトディスク(以下 CD と略す)を当時に再生することが出来る装置で、楽曲の必要な部分のみを DJ ミキサーで取り出しひで音を出すことが出来る。CD の再生速度を変化させたり、楽曲の終わりから前へと逆向き再生も可

能であることから、これらをリズミカルに組み合わせて打楽器のようなリズムを作り出し再生音源に載せることが可能である。筆者が打楽器の代わりに DJ マシーンを用いて入学式で演奏したところ、新入生の一人が高校生のころから「CLUB」で DJ を行っていたため、大学でも同好会としてやりたいと申し出て来た。当時は同好会を発足させるに必要な人数が集まらず、また顧問になってくれる教職員もいなかったとのことで筆者が相談に乗ることになった。機材も電音部の物があるので電音部の部員の中から DJ マシーンに興味を示した者数名と一緒に活動することを条件に筆者が顧問を引き受けた。その年度に 4301 講義室にて DJ イベントを開催した。その様子を Fig. 4 に示す。



Fig. 4 DJ マシーンを用いたイベントの様子

2023 度は高校時代に部活動で DJ として活動をしていた学生が在籍していたので、各種イベントではその学生が中心になって音響管理を行った。因みに大学祭では 4 号館 3 階のエントランスで飲み物とお菓子の販売を行なながらの DJ プレーを披露してくれている。また、4301 講義室での電音部のライブの前半と後半の入れ替え時に 4301 講義室内で DJ プレーを披露した。この時使用した PCDJ マシーンは、学生の私物である。スピーカはバッテリ内蔵で音を出すことができ、照明装置が内蔵されている物を使用している。その様子を Fig. 5 に示す。



Fig. 5 4 号館エントランスでの DJ プレー

6. 照明同好会

電音部が4号館4301講義室で演奏を行うようになった当初、照明の演出はなかったが、2012年の学祭ライブに於いて、工事現場で使用するLED投光器と組立式のラックに磁石で張り付けることの出来るLEDバーを取り付けてライブを行った。正面からの光は天井の照明に頼り、準備した照明機器は後方からの装飾を使ったが、この時スモークマシーンも併せて導入したことでライブ感が高まり良い雰囲気が出た。このライブに訪れた方々は、この演出にかなり驚いた様子であった。その時の様子をFig. 6に示す。



Fig. 6 照明演出を初めて行った当時の様子

このライブを見に来てくれた学生が照明の効果に興味を持ち、演奏より照明の活動がしたいとの申し出があった。学内にあるスタジオには本格的な機器が揃っていると聞いたが、残念ながらそれらは教育用の機材であるため部活動では使用できないということだった。今後は照明担当も必要と考え電音部と兼部することを条件に同好会の顧問を引き受けたことにした。

2023年度の活動ではDMX512の通信規格を備えた照明機器が揃って来たこと、新たに購入したコントローラを導入することでムービングヘッドを駆動し、壁や天井に動く幾何学模様を投影できるようになった。2022年度より部員が減ってしまって兼部が当たり前になってしまった状況の中でも機材が充実してきたことで光の演出の幅が広がっていた。そのため同好会員達は非常に努力してくれた。この新しい機器類はアメリカ製でマニュアルも全て英語で書かれていたが、彼らは自ら勉強会を開き機器の取り扱いや種類の異なる照明機器の接続、照明の色の設定、それらを組み合わせて作る照明場面のプログラムまでを短期間で完璧に使いこなすまで取り扱いを習得してしまった。彼らの意欲と熱意に敬意を表したい。最新の機器を用いての演出の様子をFig. 7に示す。



Fig. 7 最新の機器を用いての演出の様子

7. 2023年度 電音部のライブ

従来は入学式の朝、体育館前の階段付近での演奏を行っていたが、2023年度は先の理由より新たに部員募集をしない予定であったため入学式当日の演奏を実施しなかった。更にこの年の課外活動の紹介にも参加せず、新入生歓迎ライブも実施しなかった。

2022年度に七名が卒部し、残った部員も休部や退部する者が出てしまったため、合奏体系の立て直しが非常に難しい状況となった。この状態での合奏は不可能に近く体制を作り直す時間も無かった。しかし幸いにも吹奏楽経験者や卒業研究などで忙しいはずの4年生が頑張ってくれたおかげで何とか合奏体系が整って行った。勿論外部指導の先生や電音部OB会の支援無しには成し得なかった作業である。学生達の頑張りの甲斐もあって6月10日曜日に何とかライブを実施出来る状態になった。この時の来場者は主に部員のご家族が中心で本学教職員の姿は無かった。その様子をFig. 8に示す。



Fig. 8 6月10日 学内ライブの様子

工学部では夏休み明け直前の9月14日木曜日にこの年度では初めての学外でのライブを行った。集客も考えて以前から電音部との付き合いがあり名古屋のライブハウスでも比較的人気なMadoromiさんをゲストに迎え名古屋今池Imagoでの開催である。定員30名ほどのライブハウスであったが卒業生や一般の方々の来場で満席となった。その時の様子をFig. 9に示す。



Fig. 9 今池イマゴでの様子

電音部では、主にライブハウスを音楽パーティーの会場として貸し切りで使用している。通常は会場を借りた上でチケットの販売ノルマが課せられ、客席を埋めるために演者はチケットを販売し、割り当てられた目標枚数以上の売り上げがあれば何割かが演者の収入になるという仕組みである。しかし、学生バンドで有料のライブとなると集客はほとんど見込めず自己負担になる場合が多い。学内を会場として実施しても本学の教職員ですら観覧することが無いので、本学と全く関係のない一般の方たちを集めるのは到底無理である。そこでこの方法を用いることで来場者にミュージックチャージ料を負担させることが無く部員にも重いチケットノルマを課すことが無くなる訳である。電音部のライブの来場者の中心は出演者の家族や友人、知人であり、その方々の繋がりで本学に馴染みのない人たちを連れて来て頂けている。ホール利用料以外に個人で掛かる費用は会場での飲食代のみとなる。それであれば演奏者も来場者も皆で食事をするという感覚でライブイベントに参加出来ることがこの方法の最大のメリットである。部員への金銭的な負担を抑えるのも重要なことである。残念だったのは、このイベントに一般で来場された方の中に本学を愛知工業大学と勘違いされていた方も見えた。今回のライブで改めて本学を認識して頂き所在地が蒲郡であるということも知って頂いたので、このような学外での活動は非常に大切であり地道に活動を続けて行く必要性があると感じた。

10月7日土曜日には大学祭での「電音Live」を実施した。毎年大学祭でのライブは可能な限りの照明機器と音響設備を使用して4号館4301講義室をライブハウスに仕立てたイベントを実施している。本年度も事前の準備から会場設営、当日の運営までを卒業年度生を中心に全ての部員で行い、例年以上に華やかなステージを作り出すことが出来た。来場者は部員のご家族、友人・知人から、蒲郡Jazz協会の方々、地元音楽イベントのイベントナーの方々に加え、今まで電音部を卒部して行った多くの卒業生たちが集まってくれて非常に盛会であった。毎度のことではあるが教職員の姿をほとんど見ることが無かったのは残念であった。

来場された部員のご家族の方々から、この部で活動出来たことが大変励みになっていると聞き、顧問としては大変嬉しく顧問冥利に尽きたと思った。Fig. 9に大学祭ライブの様子を示す。



Fig. 9 10月7日 学祭ライブの様子

翌週の10月15日の日曜日には蒲郡Jazz協会からの出演依頼で、海陽洋ヨットハーバーで行われた蒲郡市音楽祭へ前年度に引き続き2年連続の参加をした。この年度の音楽祭は愛知工科大学電音部に比較的長い時間を割いて頂けた。貴船幼稚園のマーチングバンドも出演したこともあり、その関係者がかなり多数来場されたため部員たちも緊張の中での演奏となつた。学祭より更に質の高い演奏ができた好評であった。音響同好会は現地スタッフの手伝いとして参加している。照明同好会に関しては昼間の屋外でのステージであったため参加はしていない。電音部では従来から卒業研究の発表会や自動車整備士試験に備えるため10月の大学祭を卒業年度生の最後の舞台に設定し簡単な卒部式を行って4年間、又は2年間の活動を終わらせていたが、2023年度の卒部生は、今の部員数が少ないため自主的に12月ギリギリまで活動をできるように計画を立てて頑張ってくれていた。

そこまでして母校のことやこの部のことを真剣に考えてくれていたとは感謝の気持ちで一杯である. Fig. 10 に海陽ヨットハーバーでのライブの様子を示す.



Fig. 10 10月15日 学祭ライブの様子

11月26日日曜日には豊橋のライブハウス パズルバンチにて、鍵盤ハーモニカバンドのアミティーさん、豊橋で人気を誇るM&Msさん、orange blossomさんとのジョイントライブを実施した。色々な場所で活躍している大人たちとのライブは卒業して社会人になってからも工夫と努力で音楽活動を続けて行けることを知ることが出来て非常に良い刺激となった。また、地元東三河であるにもかかわらず、来場者の中で蒲郡にある本学を全く知らない方が数名いたのは非常に寂しいことだったが、このライブを通して改めて認知して頂けたのはこの活動の副産物である。また、ライブハウスの従業員の方には部員が礼儀正しく、終演後は客席の清掃とテーブルの整頓を行いお礼の挨拶まできちんとして帰って行くなど、このライブハウスを利用する最近の大学生では見られないほどしっかりしているとの褒めの言葉を頂き大変嬉しく思った。本学に於ける躾教育の成果でもある。このときの様子を Fig. 11 に示す。



Fig. 11 11月26日 豊橋でのライブの様子

12月3日日曜日年内最後で卒業年度生が最後のライブは本学で行った。準備から本番撤収まで要領良くこなし完成度の高いライブであった。今回大西正敏学長にご多忙なところご来場賜り来場者へのご挨拶と卒業年度生への労いのお言葉を頂いた。電音部の活動にご理解とご支援頂き感謝の気持ちで一杯である。2023年ラストライブに関わった方々を Fig. 12 に示す。



Fig. 12 2023年ラストライブに関わった方々

次年度は更に部員数が減るため、一人一人の演奏技術の向上を図らないと 2024 年度の活動は難しい。そこで再び DTM 等の打ち込み音源をバックに、各々が一人で演奏をする学外でのライブを企画した。2月3日土曜日に豊橋のライブハウス 輪でのライブを実施。このライブには地元大手有名企業で働きながら会社の吹奏楽団でも活躍している有名な方をゲストお迎えした。社会人になってもこのような活動が出来るという姿を感じてもらおうという狙いでいる。残念なことに筆者は 1 月に事故で左足を骨折、ライブ当日自宅で絶対安静という状況であった。このライブの指導は外部指導の先生にお願いし、顧問はリモートで自宅のベッド上から観覧・参加した。このような形で顧問を務める部の活動をスマートホンでのライブを観覧することになるとは思ってもみなかった。ゲストの方々やご来場頂いたお客様とも交流が出来て良い活動が出来たと感じた。このときの様子を Fig. 13 に示す。



Fig. 13 2月3日 豊橋「輪」でのライブの様子

8. 観客動員について

電音部のライブでは必ず事前に Flyer を作成しカラー版を学内にある3か所の学生掲示板に掲示している。本学では部活動への関心度はとても低く、掲示板を見て来場する学生・教職員は皆無である。以前に年内最後の教職員連絡会の日と重なるようにクリスマスコンサートを企画したときは、当時の学長が観覧を促されたのだが僅か数名が数分間来場された程度であった。

当時の学長は都合が付く限り毎回来場して下さり頭が下がる思いだった。その他 Flyer は卒業年度生が地元の公民館や中学校、小学校へ持つて行き、本学電音部の宣伝をしてくれた。特に公民館への Flyer は都合の付く元気なお年寄りに来場して頂けるという効果があるが、電音部の学内ライブの会場は階段のみの 4 号館 3 階であるためお年寄りへの積極的な宣伝は避けている。Flyer は白黒での印刷した物も若干用意した。この年は基本的に SNS を利用したデジタルデータでの宣伝を行った。部員の関係者に直接 SNS を通じて広報活動が出来るのは良い面もある。この Flyer は基本的に部員が持ち回りで作成している。限られた枠の中で分かり易く正確な開催情報と、ライブの雰囲気が伝わるものを作成するのは意外に難しく、このようなものを作成することも学生には良い経験となっている。本年度の Flyer の一例を Fig. 14 に示す。



Fig. 14 Flyer の一例

9. まとめ

2023 年度は予想以上に部員たちが頑張ってライブを計画し実行してくれたおかげで学祭ライブの来場者数も昨年より増えた。これを足掛かりに 2024 年度の部長が部の継続を求め 2024 年度入学生の部員を募集して活動する意欲を示してくれた。それならば 2024 年度も活動を継続することを決めた。活動継続に伴いプロジェクト研究を申請したところ昨年度に引き続き学生

の活動支援を認めて頂けたので新たに楽器を購入することができた。

その楽器を活用することで 2024 年度は地域の複数の吹奏楽関係者と共に合奏イベントを行うことを計画している。地域の問題として中学校部活動の地域完全移行が 2026 年に完了することが既に決まっている [4] が、地域移行と共に大学の部活動も同時に消滅させるのか、既に他大学で積極的に地域移行に関わりを持ち積極的に地域の中学生・高校生の囲い込みを図つて行くのかの分水嶺でもある。筆者には定年という期限があるため関われる期間は短いが、今後について地域ぐるみで検討したいと考えている。

10. おわりに

出向や新しい科目を担当するための準備で忙しい中、「部活指導は業務ではない」ということで仕事としては扱われないにも関わらず、夜間・休日をこれらに使ってまで顧問として関わって来たのは何故か。「単純に遊んでいるだけだ！」と批判を浴びることも多かつた。そうかも知れない。本学にはクラブ推薦やクラブ特待制度は無く、学生は遊び感覚で入部して来る。当然部活動に対する意識も様々である。故に名前だけ貸す顧問で良かったのかも知れない。しかし、筆者を頼って入部した学生や真剣にやろうとしている学生を他って置くことは出来なかった。また、「人の成長は遊びの中にある。」と顧問は確信している。人は生まれて親と遊びながら言葉や文化を学ぶ。遊びの中から興味を持ったものについての知識や技術を深めたり高めたりするものである。そのようにこの部活動を通じて彼らが成長して行く姿を見るのが筆者の活力になった。

最後に大西正敏学長の部活動に対するご理解とご配慮に感謝致します。

参考文献

- [1] ハイブリッド認識による認識精度・新音源搭載による演奏表現力を向上させた『スコア・メーカ 9』
<https://www.kawai.co.jp/news/20141008/>
- [2] ミュージックエイト AZco ジャズ マジックコンボ
<https://www.music8.com/products/category16.php>
- [3] Denon DJ
<https://www.denondj.com/jp/sc5000m-prime-sc5000mprimexjp.html>
- [4] 文化部活動改革～部活動の地域連携や地域クラブ活動への移行に向けた環境の一体的な整備～
<https://www.bunka.go.jp/seisaku/geijutsubunka/sobunsai/93972201.html>

●業績リスト(2024.1～2024.12)

[著書]

豊吉巧也: 少ないデータによる AI・機械学習の進め方と精度向上、説明可能な AI の開発（第 4 章、第 2 節、深層学習を活用した応力場予測に関するデータ拡張の仕方）、技術情報協会、8 ページ (2024.10.31).

長谷部信行、内藤雅之、清水創太: 宇宙の水を求めて 水探査から始まる宇宙大航海、恒星社厚生閣、ISBN:9784769917144, A5, 192 pages (2024.9.2).

八谷寛、安井謙 他共著: 佐藤祐三監修・柴田英治、松原達昭、八谷寛編集・テキスト健康科学改訂第3版・南江堂 (2024.9.15).

中島守、吉田昌央、小野秀文、高田富男、平野博敏、川村貴裕: 安全のこころえ（令和 7 年度版）学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2024.3).

中島守、河合末利、森勝行、永田英雄、服部幸廣、高田浩充: 新編 工学基礎（令和 7 年度版），学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2024.3).

中島守、掛布知仁、高田浩充、森勝行、吉田昌央: 基礎数学（令和 7 年度版）学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2024.3).

[論文/国際会議]

阿部己和: 制御理論を用いた電動車いすの自車角制御、愛知工科大学紀要、第 21 卷, pp.1-4 (2024.3.25).

村岡元気、豊吉巧也、泰地隆平、和田義孝: 少量データセットにおける物理量を考慮した機械学習による複数き裂進展予測の高精度化、日本計算工学会論文集, Vol.2024, 7 ページ (2024.5.24).

Hiroshi Matsuura, Hiromitsu Furukawa, Atsushi Kondo, Hiroki Kurita, Takuya Toyoshi, Yoshinori Watanabe, Tamio Tanikawa and Hideki Hashimoto: A selective separation method for microplastics using ultrasonic jet atomization, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.63, 066502 (2024.6.21).

豊吉巧也、和田義孝: 深層学習技術と相対度数均等化データ拡張による二次元応力場予測、日本機械学会論文集, Vol.90, No.935, 11 ページ (2024.7.19).

Takashi Yanagishita, Shota Ueno, Toshiaki Kondo, Hideki Masuda: Fabrication of Porous Metal Particles with Controlled Surface Structures by Barrel Anode Etching, Journal of The Electrochemical Society, 171, 093501 (2024.9.4).

Takuya Toyoshi: Displacement and strain field prediction using efficient data augmentation technique, The 4th International Workshops on Advances in Computational Mechanics (2024.9.20).

Toshiaki Kondo: Nanohole formation behavior of anodic porous Ga oxide, PRiME 2024 Hawaii, C04-1660 (2024.10.8).

Atsushi Kondo and Hiroshi Matsuura: Numerical Analyses of Ultrasonic Atomization Utilizing Acoustic Effects of a Beam Diaphragm, Applied Sciences, Vol.14, 9542 (2024.10.19).

Toshiaki Kondo, Atsushi Ono: Fabrication of Coaxial Nanocable Applicable to Biosensing Applications, The 9th International Symposium on Biomedical Engineering, P1-18, Hamamatsu (2024.12.3).

加藤亭: 適職信仰を有する工学部学生の初級キャリア教育の検討, 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.83–89 (2024.3.25).

永野佳孝, 楠見涼, 野秋匡平, 忠内洋樹: カーテルシェイピング装置の開発, 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.33–36 (2024.3.25).

磯貝正弘: マイクロ波ドップラーセンサを用いたローバ誘導(窪地回避機能を備えた試作 2 号機の製作と実験), 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.41–49 (2024.3.25).

Kazuki Ogawa, Yamato Uchida, Ikkei Kobayashi, Jumpei Kuroda, Keigo Ikeda, Taro Kato, Ayato Endo, Hideaki Kato, Takayoshi Narita: Simulation of Vibration Characteristics of Magnetically Levitated Steel Plate under Disturbance Condition, The 27th International Conference on Electrical Machines and Systems, PS3-1–5 (2024.11.28).

糸山凜太朗, 遠藤文人, 黒田純平, 内野大悟, 小川和輝, 池田圭吾, 加藤太朗, 成田正敬, 加藤英晃: 吸引式磁気浮上による薄鋼板の非接触把持(一端のみに電磁石を配置するシステムの浮上特性に関する検討), 日本 AEM 学会誌, Vol.32, No.3, pp.546–551 (2024.9.10).

内田大日, 小川和輝, 小林一景, 黒田純平, 内野大悟, 池田圭吾, 加藤太朗, 遠藤文人, 成田

正敬, 加藤英晃: 柔軟鋼板の湾曲磁気浮上システム(正弦波状の外乱が入力された際における浮上鋼板の動的挙動に関する基礎的検討), 日本 AEM 学会誌, Vol.32, No.2 pp.270–275 (2024.6.10).

川島和磨, 遠藤文人, 黒田純平, 内野大悟, 小川和輝, 池田圭吾, 加藤太朗, 成田正敬, 加藤英晃: 柔軟鋼板のエッジ支持型磁気浮上システム(板厚と浮上中の振動特性の関係性に関する実験的検討), 日本 AEM 学会誌, Vol.32, No.2, pp.294–299 (2024.6.10).

市川優介, 長吉竜也, 小林一景, 内野大悟, 黒田純平, 小川和輝, 池田圭吾, 加藤太朗, 遠藤文人, 成田正敬, 加藤英晃: 電磁石と永久磁石による薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システム(浮上鋼板の振動特性に関する実験的検討), 日本 AEM 学会誌, Vol.32, No.2, pp.276–281 (2024.6.10).

鬼塚晴大, 遠藤文人, 黒田純平, 内野大悟, 小川和輝, 池田圭吾, 加藤太朗, 成田正敬, 加藤英晃: 柔軟鋼板のエッジ支持型磁気浮上システム—(2 自由度アクティブ制御に関する実験的考察), 日本 AEM 学会誌, Vol.32, No.1, pp.57–63 (2024.6.10).

H. Nosaka, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato, K. Ikeda, A. Endo, T. Narita, H. Kato: Development of Cylindrical Linear Actuator for Vertical Transfer: Fundamental Consideration of Effect of Shape on Thrust Characteristics, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.48, No.1, pp.5–10 (2024.1.1).

忠内洋樹, 永野佳孝: 3D プリンタの造形手法の研究, 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.37–40 (2024.3.25).

忠内洋樹, 永野佳孝, 宮地茂, 川口礼雄, 大島共貴, 松尾直樹: 脳血管内治療用挿入力センサの開発(改良された挿入力センサの構造とその性能), 設計工学, Vol.59, No.5, pp.223–236 (2024.5).

T. Okada and M. Yamataka: Study of the Optimal Reproduction Method for Living Environment Sources Recorded using Ambisonics, International Conference on Artificial Reality and Telexistence & Eurographics Symposium on Virtual Environments (ICAT-EGVE), (2024.12.2).

手塚一佳: 六角竿ジョイントの進化と退化。金属フェルールから竹フェルールへ, 第 46 回日本民具学会大会要旨集, 日本民具学会, pp.24–25 (2024.11.30).

Yuya Ozaki, Daisuke Deguchi, Haruya Kyutoku, Hiroshi Murase: Early Detection of At-Risk Students Through Learning-Activity Forecasting, The 32nd International Conference on Computers in Education (ICCE 2024), 32P (2024.11.27).

Bolin Zhang, Haruya Kyutoku, Keisuke Doman, Takahiro Komamizu, Ichiro Ide, Jiangbo Qian: Cross-modal recipe retrieval based on unified text encoder with fine-grained contrastive learning, Knowledge-Based Systems, Vol.305, No.3, p.112641 (2024.10.30).

V. Belcamino, M. Takase, M. Kilina, A. Carfi, F. Mastrogiovanni, A. Shimada, S. Shimizu: Gaze-Based Intention Recognition for Human-Robot Collaboration, Proceeding series of International Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI), 36, 5 pages (2024.6).

金田涼吾, 實廣貴敏: ポピュラー音楽におけるピアノ伴奏の Music Transformer による自動生成, 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.11–18 (2024.3.25).

山高正烈, 岡田拓真: ヘッドフォン聴取における単一及び複数音源再生時の最適再生方法, 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.25–32 (2024.3.25).

岡田拓真, 山高正烈: Ambisonics 録音方式を用いた単一音源の最適再生方法の検討～ヘッドフォンとスピーカアレイ聴取時の比較～, 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.19–24 (2024.3.25).

寺井雅人, 三上綾介: 工学を専門とする大学生の英語学習への動機づけ—探索的因子分析と心理ネットワーク分析を用いて—, 外国語教育メディア学会中部支部研究紀要 (2024.10.1).

Kohei NAKASHIMA, Masao YOSHIDA and Yuki KONDO: Performance Characteristics of a Free-Breathing Polymer Electrolyte Fuel Cell with Various Channel Shapes, ECS Transactions, Vol.114, No.5, pp.605–614 (2024.9.28).

鈴木拓也, 吉田昌央, 小野秀文, 巨藤誠: 整備実習におけるタブレット等を利用した ICT 教育手法の試み, 自動車整備技術に関する研究報告誌, Vol.53 (2024.12.20).

服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠: スラスト荷重とラジアル荷重が付与されて回転する大型車用ホイール・ボルトの軸力(第 2 報:ISO 規格のホイール・ナットと座金が著しく劣化している場合), 自動車整備技術に関する研究報告誌, Vol.53 (2024.12.20).

[解説・総説]

石原裕二: プラズマアクチュエータを用いた簡易自動車モデル周り流れの流体制御, 自動車技術 Vol.78, No.4 (2024.4).

永野佳孝: 医療のデジタル化に必要なセンサ技術とその実例(第 2 報), BIO Clinica, Vol.39, No.1, pp.71–73 (2024.1).

永野佳孝: 医療のデジタル化に必要なセンサ技術とその実例(第 3 報), Precision Medicine, Vol.7, No.9, pp.77–79 (2024.8).

米田守重: 昔の学生実験の教育効果と磁性体の簡易シミュレータの導入, 日本材料科学会 学会誌「材料の科学と工学」, Vol.61, No.4, pp.142–145 (2024.8.20).

大迫尚行: 有理関数のモジュロ演算による部分分数分解, 愛知工科大学紀要, 第 21 卷, pp.75–82 (2024.3.25).

[口頭発表]

松原浩志, 村上新: 弓型案内面と粘性流体を利用した転がり球体型ダイナミックダンパの研究, 日本機械学会東海学生会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2024 (TEC24) 第 55 回学生会卒業研究発表講演会講演前刷集, pp.117–118 (2024.3.4).

豊吉巧也, 篠田正宗: 深層学習を用いた応力場予測における相対度数の均等化によるデータ拡張の有効性について, 第 29 回計算工学講演会 (2024.6.12).

渡部吉規, 大平哲也, 浅野玲史朗, 川本光史郎: 果実収穫残渣の堆肥化および堆肥化熱の利用, 日本食品科学工学会・第 71 回大会 (2024.8.31).

一宮光悦, 宮川大輝, 近藤敏彰, 荒川俊也: 機械学習を用いたガリウム結晶方位の予測, 日本知能情報ファジィ学会, 第 40 回ファジィシステムシンポジウム, 1F2-2, 名古屋 (2024.9.2).

近藤敏彰, 小早川徹, 三石真大: 二段階アノード酸化プロセスによる高規則性ポーラス酸化ガリウムの形成, 表面技術協会 第 150 回講演大会, 13D-10, 北見 (2024.9.13).

近藤敏彰, 荒川俊也: アノード酸化によるポーラス酸化ガリウムの形成と半導体特性, ARS 第 39 回 ARS 蒲郡コンファレンス, 蒲郡 (2024.11.15). (招待講演)

豊吉巧也: データ拡張技術を用いた変位場およびひずみ場の予測精度向上に関する研究, 第 37

回計算力学講演会 (2024.11.19).

秋田和哉, 遠藤正樹, 榊原洋子, 鈴木宏昌: 円形先細ノズルから噴出される噴流の放射音に関する研究, 日本機械学会 第 102 期 流体工学部門 講演会 (2024.11.19 – 2024.11.20).

杉山宏明, 大川一, 遠藤玄, 門脇裕司, 西口直浩, 加藤亨: 3 次元運動に対応した NC 工作機械の送り軸運動精度測定装置の試作, 機械学会・第 15 回生産加工・工作機械部門講演会 (2024.10.04).

永野佳孝, 杉森順子: 360 度プロジェクションマッピング, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2024.9.12).

石川恵理, 永野佳孝, 杉森順子: スマートフォンを用いたプロジェクションマッピングシステムの開発, 映像情報メディア学会 2024 年冬季大会 (2024.12.24).

櫻井健人, 永野佳孝, 杉森順子: FPGA ボードの SDRAM 帯域と映像の幾何変換時間との関係, 映像情報メディア学会 2024 年冬季大会 (2024.12.24).

永野佳孝, 杉森順子: 360 度プロジェクションマッピングの実装手法, 映像情報メディア学会 2024 年冬季大会 (2024.12.25).

大谷修, 西澤孝次, 葪下彰啓: 磁性を有した液体金属の特性評価, 日本化学会中国四国支部大会 (2024.11.17).

徳光政弘, 平社信人, 今井一雅, 中谷淳, 田所敬一, 北村健太郎, 村上幸一, 今井雅文, 高田拓, 辻正敏, 西尾正則, KOSEN-2R チーム: 高専連携技術実証衛星3号機「KOSEN-2R」の軌道上実証と宇宙工学技術者育成(2), 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2L02 (2024.11.6).

村上幸一, 梶村好宏, 徳光政弘, 今井一雅, 平社信人, 若林誠, 池田光優, 片山光亮, 高田拓, 西尾正則, 中谷淳, 北村健太郎: 高専連携技術実証衛星 4 号機「KOSEN-3」の軌道上実証と次世代宇宙人材育成(2), 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2L09 (2024.11.6).

今井一雅, 平社信人, 西尾正則, 村上幸一, 中谷淳, 徳光正弘, 今井雅文, 北村健太郎, 高田拓, 深井貫, KOSEN-1 チーム: 高専連携技術実証衛星 KOSEN-1 について(6), 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2L16 (2024.11.6).

中谷淳, 梶村好宏, 平社信人, 村上幸一, 西尾正則: KOSEN-3 に搭載する PPT による軌道高度維持の実現可能性, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 3B12 (2024.11.7).

宮元一匡, 中谷淳: パルス型プラズマスラスターを搭載した CubeSat の軌道解析, 第 61 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, C8 (2024.11.9).

川口泰明, 中谷淳: 空気力を利用する軌道制御のための人工衛星形状の設計と軌道解析, 第 61 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, C9 (2024.11.9).

木村陽, 裴艶玲: 関節可動が可能な対麻痺者用単一駆動型下肢アシスト装具の研究開発, 第 42 回日本ロボット学会学術講演会 (2024.9).

李国秀, 裴艶玲, 大日方五郎: ビジョンベース触覚センサによる複数箇所接触時の力計測, 第 42 回日本ロボット学会学術講演会 (2024.9).

木村陽, 裴艶玲: 対麻痺者向け歩行アシストロボットの開発, 日本設計工学会 2024 年度春季大会 (2024.5).

佐藤拓海, 裴艶玲: 触覚センサを用いた袋状食品パッケージ検査のシステムの開発, 日本機械学会東海支部 第 55 回学生員卒業研究発表講演会 (2024.3).

忠内洋樹, 永野佳孝, 宮地茂, 川口礼雄, 大島共貴, 松尾直樹: 脳血管内治療におけるワイヤ先端の挿入力推定, 第 33 回日本コンピュータ外科学会大会特集号 (2024.11.9).

忠内洋樹, 永野佳孝, 宮地茂, 川口礼雄, 松尾直樹: 脳血管内治療における振動の有効性, 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2024.12.18).

木村秀星, 久徳遙矢, 道満恵介, 目加田慶人: チアリーディング演技動画からの集団ジャンプの動作解析, 第 22 回情報学ワークショップ (WiNF2024), P1A-9 (2024.12.7).

樋江井捷, 川西康友, 久徳遙矢: 画像中で特徴的な佇まいをした人の検出に関する初期検討, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2024 (ViEW2024) 講演論文集, IS3-22 (2024.12.6).

矢神充祐, 道満恵介, 久徳遙矢: 歩行者検出に適したシーン適応型画素毎カメラ選択の初期検討, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2024 (ViEW2024) 講演論文集, IS3-19 (2024.12.6).

村川稔一, 川西康友, 久徳遙矢: 繼続的な観察による人物ごとの外見の変化検出に関する初期検討, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2024 (ViEW2024) 講演論文集, IS3-18 (2024.12.6).

上田蒼太, 久徳遙矢, 道満恵介, 目加田慶人: 高解像度ミリ波レーダを用いた特徴点マッチングによる自車位置推定の検討, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2024(ViEW2024)講演論文集, IS2-23 (2024.12.5).

尾崎亜依里, 川西康友, 德田一起, 島尻芳人, 久徳遙矢: フィラメント構造抽出に向けたセマンティックセグメンテーションの試行, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2024(ViEW2024)講演論文集, IS1-22 (2024.12.5).

手塚一佳: 六角竿ジョイントの進化と退化。金属フェルールから竹フェルールへ, 日本民具学会第46回大会, 民具をつくる (2024.12.1).

手塚一佳: 和式六角竹竿の丸継改良, 芸術環境学会第7回全国大会 (2024.10.26).

清水創太, 竹脇僚哉: モビリティを考慮した小型空撮用広角中心窓レンズの開発, 令和6年産業計測制御研究会技術資料, IIC-24-013 (2024.10.4).

竹脇僚哉, 小林穂乃香, 斎藤穂, 河村希典, 清水創太: 有機導電性膜を用いた液晶レンズの画像システム, 令和6年産業計測制御研究会技術資料, IIC-24-012 (2024.10.4).

山高正烈, 荒川俊也, 早見武人: なぜ無意識なおり運転行動が起きるのか? ヒューマンインターフェースシンポジウム (2024.9.18).

松井研輔, 漆畠卓朗, 松下健治, 國立忠秀: 工場環境における 60 GHz 帯の通信特性解析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-18-1 (2024.9.13).

岡田拓真, 山高正烈: ヘッドフォン聴取時の Ambisonics 録音方式を用いた複数音源の最適再生方法の検討, 第29回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3B2-11 (2024.9.11).

岡田拓真, 山高正烈: 24ch スピーカアレイを用いた生活環境音の最適再生法の一検討, 日本音響学会 2024 年秋季研究発表会講演論文集, 1-R-8 (2024.9.4).

尾崎亜依里, 川西康友, 德田一起, 島尻芳人, 久徳遙矢: フィラメント構造抽出に向けたセマンティックセグメンテーションの試行, 星間データサイエンス研究会 2024 (2024.8.29).

千葉一輝, 鈴木陽一, 山高正烈: VR 空間のオブジェクト探査に及ぼす聴覚情報の効果, 電気関係学会東北支部連合大会, 秋田県立大 (2024.8.29).

尾崎優也, 出口大輔, 久徳遙矢, 村瀬洋: 学習活動ログを用いた At-risk 学生の早期検出:学習活動予測ネットワークの活用, 第 27 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2024)論文集, IS-3-055 (2024.8.9).

渡辺茉里香, 久徳遙矢, 道満恵介, 駒水孝裕, 井手一郎: 複数食材の大きさを統合利用した弁当画像の縮尺推定に関する検討, メディアエクスペリエンス・バーチャル環境基礎研究会 (MVE) , MVE2023-103, pp.330-335 (2024.3.15).

高木七海, 久徳遙矢, 道満恵介, 駒水孝裕, 井手一郎: タイトル重畠料理サムネイル画像における魅力的なフォントスタイルの分析, メディアエクスペリエンス・バーチャル環境基礎研究会 (MVE) , MVE2023-69, pp.154-158 (2024.3.14).

天木開士, 道満恵介, 久徳遙矢: 高信頼度歩行者検出システムのための入力シーンに応じた領域毎カメラ切り替え手法の検討, 動的画像処理実用化ワークショップ(DIA2024)講演論文集, IS3-28, pp.533-538 (2024.3.5).

高津悠生, 谷本樹希, 道満恵介, 秋田時彦, 久徳遙矢: 高精度自車位置推定のための LiDAR 点群に基づく反射強度画像とカメラ画像間の局所特徴照合に関する検討, 動的画像処理実用化ワークショップ(DIA2024)講演論文集, IS1-30, pp.150-157 (2024.3.4).

加納直行, 道満恵介, 川西康友, 久徳遙矢: しいたけ選別作業負荷軽減のためのサイズ区分推定器および品質区分推定器構築に関する検討, 動的画像処理実用化ワークショップ(DIA2024)講演論文集, IS1-28, pp.138-145 (2024.3.4).

梅谷太紀, 道満恵介, 久徳遙矢, 目加田慶人: 姿勢変換を用いた理想的試技動画の生成に向けた予備的検討, 動的画像処理実用化ワークショップ(DIA2024)講演論文集, IS1-15, pp.66-72 (2024.3.4).

深谷拓也, 岡田拓真, 山高正烈: Ambisonics 録音方式を用いた複数音源の最適再生法の検討, 電子情報通信学会全国大会 (2024.3.4).

早見武人, 森本由吾, 山高正烈, 荒川俊也: ドライビングシミュレータを活用した妨害運転によるストレス再現の試み, 日本生体医工学会九州支部学術講演会 (2024.3.2).

山高正烈: VR 野球スイング時の接触時間および聴覚刺激の提示が高次感性に及ぼす影響, 映

像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会, Vol.48, No.7, HI2024-2, pp.6-9 (2024.3.2).

米田守重: 変形 Villain 定式化による双対変換とフラクトン系への応用, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」-TQFT 2024 (2024.9.09).

田代徹, 輿石めぐみ, 出口哲生: 動的トイモデルで探るジップ則の普遍性の起源, 日本物理学会第 79 回年次大会 (2024.9.17).

Akira Murakami, Masato Terai, Yu Tamura, Junya Fukuta: Proficiency-dependent factors influencing L2 dative alternation, 7th Learner Corpus Research Conference (2024.9.26).

寺井雅人, 三上綾介: 学習開始時の英語力と動機づけが学習成果に及ぼす影響, 全国英語教育学会第 49 回福岡研究大会 (2024.8.24).

Masato Terai: Activation of Color in First and Second Language Vocabulary Processing, 言語学会第 25 回年次国際大会 (2024.7.13).

中嶋恭佑, 西井健人, 中島公平, 吉田昌央: フィン表面にくぼみを有する空冷シリンダの冷却特性(熱流体解析), 日本設計工学会 東海支部令和 5 年度研究発表講演会講演論文集, pp.15-16 (2024.3.2).

鈴木拓也、吉田昌央、小野秀文、巨藤誠: 整備実習におけるタブレット等を利用した ICT 教育手法の試み, 第 56 回全国自動車短期大学協会研究発表会 (2024.8.8).

服部幸廣、甲村一貴、巨藤誠: スラスト荷重とラジアル荷重が付与されて回転する大型車用ホイール・ボルトの軸力(第 2 報: ISO 規格のホイール・ナットと座金が著しく劣化している場合), 第 56 回全国自動車短期大学協会研究発表会 (2024.8.8).

[その他(受賞・セミナー・講師・作品出展など)]

大平哲也: 第 473 回東三河産学官交流サロン「エンジンがつくるカーボンニュートラル社会」ホテルアークリッシュ豊橋 (2024.3.19).

近藤敏彰: 令和 6 年度 中小企業技術者研修 表面機能化技術研修「陽極酸化」 (2024.9.6).

近藤敏彰: 愛知工科大学・蒲郡市立図書館コラボイベント「花火を科学しよう！」 (2024.10.26).

薮下彰啓: 光を用いた分析装置の研究開発, ものづくり博 2024 in 東三河 (2024.6.14).

薮下彰啓: 光を利用した計測装置の開発と大気環境化学、宇宙化学への展開, 関西テクノサークル 21 (2024.7.19).

薮下彰啓: 実験を通して大気環境問題について考えてみよう!, 蒲郡市図書館 × 愛知工科大学コラボイベント (2024.11.4).

中谷淳: 愛知県立愛知総合工科高等学校キャリアデザインプログラム講演会「大学での衛星開発 -皆さんと進路を考える-」 (2024.6.7).

中谷淳: 光ヶ丘女子高等学校 SDGs 教養講座 光ヶ丘リベラルアーツ・カフェ 七タスペシャル「宇宙 × SDGs -宇宙開発・宇宙利用の今-」 (2024.7.6).

佐藤拓海: 触覚センサを用いた袋状食品パッケージ検査のシステムの開発, 第 30 回地域関連研究発表会 (2024.3).

LI GUOXIU: ビジョンベース触覚センサに関する研究, 第 30 回地域関連研究発表会 (2024.3).

裴艶玲: 第 30 回地域関連研究発表会講評者の担当 (2024.3).

上原雅行, 田中俊行: 岐阜大学主催「岐阜大学アントレプレナーシップ・サイエンス～生命科学教室～」 (2024.8.20).

小川和輝: 夢ナビ講義・夢ナビライブ「ここにもエネルギーが? 磁力で作るウェルビーイング社会」 (2024.10.19).

中山智喜, 長濱智生, 竹谷文一, 入江仁士, 薮下彰啓, 江口菜穂, 原圭一郎, 石戸谷重之, 江波進一: 第 28 回大気化学討論会開催報告, 大気化学研究, 第 50 号, Article No.050N06 (2024.1.31).

手塚一佳, 井坂弥生, 福寿美佐, 中山咲: 「アタラシイアタリマエノカタチ 2024 超帳芸術学会作品展」 図録, 超帳芸術学会刊 (2024.12.1).

手塚一佳: 愛知工科大学エンターインメント向け就職セミナー「業界就職セミナー」 (2024.11.19).

Xin Jin, Mehrdad Teratani: Draft Call for Proposals for Lenlset Video Coding, MPEG-I WG 02 MPEG Technical requirements, m70087, Kemer, Turkey (2024.11).

Mehrdad Teratani, Xin Jin: Draft Call for Proposals for Lenlet Video Coding, MPEG-I WG 04 MPEG Video coding, m70089, Kemer, Turkey (2024.11).

Zhuo Tan, Sarah Fachade, Daniele Bonatto, Ruibo Zhao, Yuqing Yang, Gauthier Lafruit, Xin Jin, Mehrdad Teratani: Release of Reference Lenslet content Convertor (RLC4.0) for Lenslet Video Coding Activities, MPEG-I WG 04 MPEG Video coding, m70094, Kemer, Turkey (2024.11).

Mehrdad Teratani, Xin Jin: Report of the AHG on Lenslet Video Coding (LVC), MPEG-I WG 04 MPEG Video coding, m70479, Kemer, Turkey (2024.11).

Mehrdad Teratani, Xin Jin: Report of the BoGs on Lenslet Video Coding (LVC), MPEG-I WG 04 MPEG Video coding, m70541, Kemer, Turkey (2024.11).

清水創太: 注目することが可能な広視野センサの開発～眼球運動から読み取る人間の意識と液晶広角中心窓センサへ～, 金沢大学高度モビリティ研究所, 「計測制御研究室セミナー」2A626, 金沢 (2024.11.1).

加藤高明, 三浦玄, 水谷魁斗, 三好明日翔: あいち情報専門学校高等課程学校祭 プロジェクションマッピング制作と投影 (2024.10.31).

加藤高明: 東三河懇話会産学官交流サロン 講演「デジタルで、地域や社会を元気に！」 (2024.9.24).

久徳遙矢: 自動運転における車載外界センサと車両周辺環境理解技術動向, 星間データサイエンス研究会 2024 招待講演 (2024.8.29).

加藤高明, 三浦玄, 水谷魁斗: 名古屋市南区笠寺夏祭り「笠寺盆フェス」プロジェクションマッピング制作と投影 (2024.8.8-9).

山高正烈: ドライバーの空間知覚の特性から見たあおり運転, 公益社団法人自動車技術会第1回エレクトロニクス部門委員会招待講演 (2024.4.19).

加藤奨, 山高正烈: VR 野球バッティング時の時間伸縮・音刺激による高次感性への影響, 電子情報通信学会東海支部大会卒研発表会 (2024.2.16).

北川晴也, 山高正烈: 構造物によるインフラサウンド伝搬特性に関する基礎的検討, 電子情報通信学会東海支部大会卒研発表会 (2024.2.16).

加藤高明: 愛知県高等学校視聴覚教育研究協議会東三河地区研究大会, 研修「プロジェクトマッピングを活用したアニメーションの制作」(2024.1.17).

寺井雅人: Japan.R 「ioslides で web スライド作成」(2024.12.7).

寺井雅人: 外国語教育メディア学会 (LET) 第 63 回 (2024) 年次研究大会 ワークショップ「外国语教育研究者ためのオープンサイエンス入門—R Markdown を用いた実践編—」(2024.8.6).

橋本孝明, 長谷川康和: 幸田町理科教室(かんたんコイルモータを作って、電気と磁気を学ぼう), 幸田町立図書館 (2024.8.18).

愛知工科大学紀要 第22巻 令和7年3月25日

紀要編集委員会

委員長 田代 徹
委 員 近藤敏彰 磯貝正弘
山高正烈 服部幸廣
松本吉生

発行者

学校法人 電波学園 愛知工科大学
愛知工科大学自動車短期大学
〒443-0047
愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2
TEL : 0533-68-1135
FAX : 0533-68-0352
URL : <https://www.aut.ac.jp/>