

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 20 卷

Bulletin of Aichi University of Technology

AUT

愛知工科大学紀要 第20巻

目次

研究論文

- 超音波霧化の発生メカニズムの解析 (8合目: 60年におよぶ研究登山)
…… 松浦 寛, 近藤 篤史, 深谷 兼光, 渡部 吉規, 村上新, 石原 裕二 …… 1
- 自己組織化プロセスにもとづいた金属ナノピラーアレイの形成
…………… 近藤 敏彰, 原田 柁真 …… 11
- 音声対話システム周辺での環境音に対するデータ拡張による識別精度の向上
…………… 神谷 俊樹, 實廣 貴敏 …… 15
- ノッチフィルタの中心周波数が広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響
…………… 山高 正烈, 坂本 修一, 鈴木 陽一 …… 23
- リハビリのための両側性転移に関する研究 ～両側性転移における視覚情報の効果を評価するロボットシステム～
…………… 裴 艶玲, 大日方 五郎 …… 29
- 蛍光磁性ナノ粒子を用いた迅速同時多項目免疫測定法の開発
…………… 田中 俊行 …… 35
- 研究ノート
- 廃棄ミカンの堆肥化温度に及ぼす供給空気量および処理量の影響
…………… 渡部 吉規 …… 43
- 授業中の自発的発言を促すスタンプカードシステムの試作
…………… 加藤 高明, 板橋 知生 …… 49

回転するダブル・ホイール外周部に軸方向荷重を付与したときのホイール・ボルト軸力の経時変化（実験装置の設計製作）	服部 幸廣, 甲村 一貴, 巨藤 誠, 深谷 兼光	53
------------------------------------------------------------------	---------------------------------	----

解説・総説

Maxwell 方程式の系譜	石川 雄二郎, 石川 雄俊	57
-------------------------	---------------------	----

報告

ブレンディッド型教育推進のための初学者向け講義デザインの検討	尾関 智恵, 小林 直美, 近藤 敏彰, 西口 直浩, 加藤 央昌	67
-----------------------------------------	-----------------------------------------	----

LED で光る極超小型人工衛星 AUTcube2 の開発	西尾 正則, 大西 正敏, 名和 靖彦, 花井 雅昭	75
---------------------------------------	----------------------------------	----

姉妹校連携事業における講師派遣の状況報告	鵜飼 達也	85
-------------------------------	-------------	----

業績リスト(2022.1~2022.12)

研究論文

超音波霧化の発生メカニズムの解析 (8合目: 60年におよぶ研究登山)

松浦 寛, 近藤 篤史, 深谷 兼光, 渡部 吉規, 村上 新, 石原 裕二

(2022年9月30日受理)

Analysis of the generation mechanism of ultrasonic atomization The 8th station: Research climbing over 60 years

Hiroshi MATSUURA, Atsushi KONDO, Kanemitsu FUKAYA, Yoshinori WATANABE,
Shin MURAKAMI, Yuji ISHIHARA

(Received September 30, 2022)

Abstract

This study aimed to elucidate the formation mechanism of nano- and micro-droplets generated by ultrasonic atomization. The technology of creating droplets using ultrasonic transducers is widely used as a familiar technique, however, the atomization mechanism has remained unexplored for more than 60 years. As one of the research targets of the AUT Research Groups, we addressed the unresolved problem of atomization mechanisms by developing a new atomization method called jet atomization. Jet atomization is a two-dimensional uniform atomization generated using a diaphragm. Ideal jet atomization was achieved when the diaphragm was highly hydrophilic (contact angle 9.8°) and the spring constant was approximately 1.27 N/m. Multiple experimental results in this study supported the idea that jet atomization was caused not by water boiling or cavitation, but by surface waves formed on the water film. In addition, a theoretical analysis of the resonance between the diaphragm and surface waves was performed using a simple vibration model. The jet atomization technique developed in this study provides an important fundamental technology to prevent aggregation of nano/micro particles by encapsulating them in water droplets and distributing them uniformly on the substrate. The results of this study are expected to make fundamental contributions to pharmacy, medicine, and environmental science, which require the uniform distribution and characterization of fine particles such as drugs, DNA, and microplastics.

キーワード: 超音波霧化, 霧化メカニズム, ジェット霧化, ナノ/マイクロ粒子,

Keywords : ultrasonic atomization, atomization mechanisms, Jet atomization, nano/micro particles

1. はじめに

我々の身の回りには、周知の事実として実験的には明らかであっても、そのメカニズムが不明な現象が多数存在する。

例えば、バイオ分野においては、生体の基本的構成要素であるアミノ酸は、対称性の観点からは鏡像異性体であるため、L型(左型)とD型(右型)が50%の割合で存在するはずである。ところが、地球上の生物を構成しているアミノ酸は、ほとんどがL型(左型)である。このアンバランスのナゾは、高名な日本人女性科学者が、研究者人生を掛けて取り組んでいる、未だ解明されていない神秘的な難問である。

また、天文分野において、太陽の表面温度は約 6000°C である事はよく知られているが、太陽表面から生じるコロナが、表面温度よりも遥かに高い温度まで上昇するメカニズムは分かっていない。

さらに、材料分野においては、エネルギーの貯蔵技術として注目されている高温超伝導体において、ある種の材料は50K以上の高温においても超伝導性を示す。この事実は実験的には確認されているが、理論的解明には至っていない。

上記は、数十年以上研究者を悩まし、魅了し続けてきた既知の未解明問題の一部である。本研究で我々が取り組む超音波霧化技術も、加湿器や薬剤投与に使われるネブライザーとして広く活用されているが、

そのメカニズムに関しては 60 年以上未解明な、謎多き研究対象である。

大学で行う研究は、学生向けの教育的研究や、社会貢献を重視した工学的応用研究が重要である事は言うまでもない。しかし、今回我々が取り組む“霧化メカニズムの解明”の様に、純粋な好奇心に基づく学術的基礎研究も同程度に重要なはずである。

過去 60 年間に及ぶ多数の霧化研究から、霧化の発生メカニズムとして、①表面波説[1-4]、②キャビテーション説[5-7]、③沸騰説[8-10]の3つの仮説が存在する。①の表面波説は、波の振動による液柱の伸長と表面張力による不安定性により液滴が形成される説である。②のキャビテーション説は、超音波照射により液体内に生じる負圧が、流体のベルヌーイの式に従い、飽和蒸気圧に達し低温で沸騰する際に生じるバブルの崩壊により液滴が発生する説である。③の沸騰説は、②のキャビテーション説と類似しているが、超音波振動により生じる、液体振動に伴う粘性損失により、大気圧下で沸騰する際に生じるバブルの崩壊により液滴が発生する説である。

本研究では、霧化メカニズムを解明するため、振動板を利用した新しい霧化方式を開発し、以下3項目にフォーカスを当て、実験的検証を行った。

1. 振動板の親水性および撥水性と霧化効率の関係
2. 振動板のばね定数と霧化効率の関係
3. 振動板上で計測した霧化直前・直後の温度および温度分布

上記の実験結果を、数学で利用される背理法的アプローチにより、表面波説が支持される事を示す。

2. 実験および結果

通常の超音波霧化では 3 次元方向に広がりが生じるのに対し、ジェット霧化では、Fig. 1a(白矢印)のように 2 次元方向に霧化が生じる。ジェット霧化は、超音波振動子の振動面に対して垂直に配置された振動板を用いることで実現される。振動板は片持ち梁構造で、上端は XYZ ステージに固定され(Fig. 1b)、下端は振動子表面から 2mm の距離に保たれている。

ジェット霧化は、以下 3 つの興味深い特性を備えている。

1. 振動子上の水は、振動板上を上昇しながら薄い水膜を形成し、この水膜からジェット霧化が発生する(Fig. 1b)。
2. ジェット霧化は振動板と垂直な方向に 2 次元方向に発生する(Fig. 1a)。

3. 霧化の方向は振動子の振動方向と垂直である(Fig. 1b)。

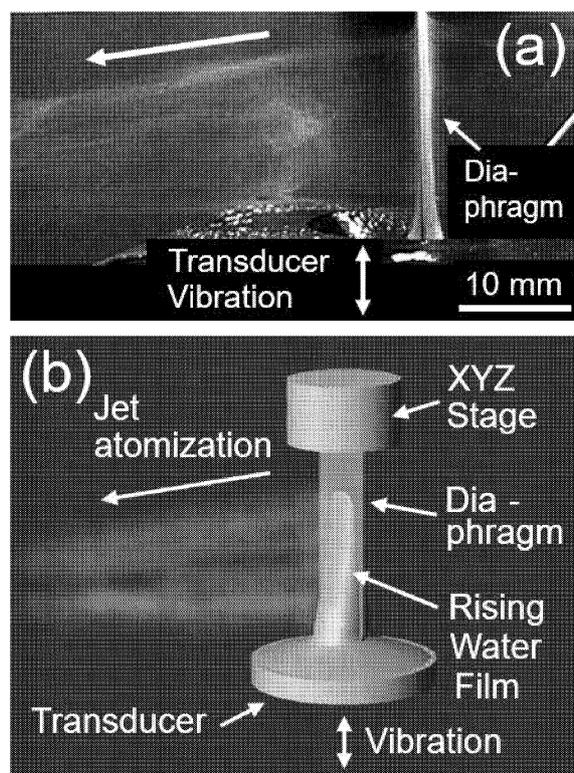


Fig. 1 Jet atomization achieved using a diaphragm installed above the ultrasonic transducer. (a) Jet atomization (white arrow) from the water film formed on the diaphragm. (b) Jet atomization from a cantilever diaphragm fixed to an XYZ stage.

(1) 振動板の表面特性

Fig. 1 のジェット霧化の特性は、振動板の表面性状と密接に関係しているはずである。そこで本研究では、振動板表面を親水化または疎水化することにより、表面性状が霧化特性に及ぼす影響を検証した。親水化する場合は、振動板を中性洗剤で洗浄後、エタノールで 2 分間超音波洗浄し、アルゴンプラズマを 30 秒間照射した。疎水化する場合は、上記洗浄後の振動板に Tofuma-ru (フジクラコンポジット社製) を塗布した。(Tofuma-ru は官能基としてトリアルコキシシリル基をもつコーティング剤である)。

上記 2 つの表面処理後の振動板の濡れ性を、接触角と濡れ面積から比較した(Fig. 2)。Fig. 2a, 2b は 19.86mg の水滴を振動板上に滴下したときの画像である。接触角は 9.8° (Fig. 2a)、濡れ面積は 50.24mm^2 (Fig. 2b) であり、振動板表面は超親水性

を示した。Fig. 2c と Fig. 2d は、19.86mg の水滴を Tofuma-ru を塗布した振動板上に滴下した画像である。接触角は 94° (Fig. 2c), 濡れ面積は 15.12mm^2 (Fig. 2d)となり, 表面は疎水性を示した。

親水化した振動板と疎水化した振動板 (Fig. 2) から誘起されるジェット霧化の特性を比較した (Fig. 3)。共振周波数 2.4MHz のセラミック超音波振動子 (HM-124, ホンダ電子) に高周波電源から 13W の入射電力を加えることにより, 霧化を発生させた。

振動板は長さ 60mm, 幅 12.5mm, 厚さ 0.1mm のステンレス製で, XYZ ステージに固定した (Fig. 1b)。振動子の中心に対して垂直に置き, 振動子の先端は振動子の表面から 2mm 離して設置した (Fig. 1b)。

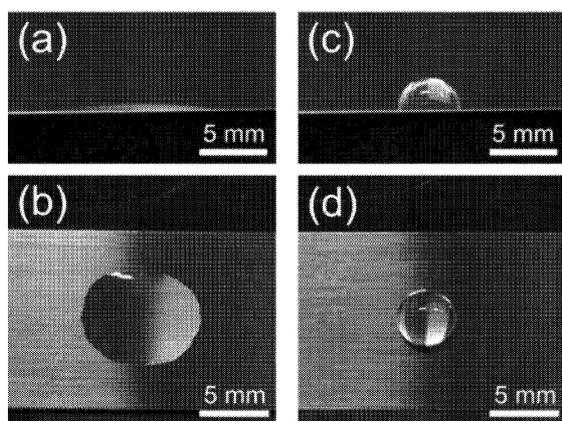


Fig. 2 Hydrophilization and hydrophobization of diaphragm surface. (a) Side view of a diaphragm hydrophilized with Argon plasma (contact angle: 9.8°). (b) Top view of the diaphragm hydrophilized with Argon plasma (wet area: 50.24mm^2). (c) Side view of the diaphragm hydrophobized with Tofuma-ru (contact angle: 94°). (d) Top view of the diaphragm hydrophobized with Tofuma-ru (wet area: 15.12mm^2). Distilled water: 19.86 mg, Wako Pure Chemicals.

この実験では, 初期量として 500mg の蒸留水を振動子に供給し, 霧化により減少した水量を補充することで霧化効率を測定した。実験は室温 (24°C), 湿度 55%で行った。

Fig. 3a, 3b は親水化された振動板から発生した, ジェット霧化の様子である。振動板を 45° の角度から観察した場合 (Fig. 3a) と正面から観察した場合 (Fig. 3b), 超音波振動子上の水は均一な薄膜として振動板表面を上昇し (Fig. 3b, 黒矢印), 振動板の全幅に広がっていることがわかる (Fig. 3a, 黒矢印)。振動板から垂直方向に連続的にジェット霧化が発生し

(Fig. 3a, 3b, 白矢印), ジェット霧化速度 (効率) は 3.37mg/s であった。

Fig. 3c, 3d は, 疎水化された振動板で発生した, 不安定な間欠的なジェット霧化を示している。振動板を 45° の角度で観察した場合 (Fig. 3c) と正面から観察した場合 (Fig. 3d), 振動板上の水は不安定な半円柱状の水柱として振動板表面を上昇し (Fig. 3c, 黒矢印), 不均一な厚みのこぶ状の水柱を形成した (Fig. 3d, 黒矢印)。この間欠的なジェット霧化は, 振動板に対して上向き (Fig. 3c, 白矢印) または下向き (Fig. 3d, 白矢印) に断続的に発生し, 霧化速度 (効率) は極めて低かった ($\sim 0.33\text{mg/s}$)。

(2) 振動板のばね定数の影響

ジェット霧化特性は振動板のばね定数とも密接な関係があるはずである。そこで本研究では (Fig. 4), 振動板の厚みを 0.3 mm (ばね定数: 100.29N/m) から 0.05 mm (ばね定数: 0.46N/m) まで変化させ, 霧化特性を比較することによりばね定数の影響を検証した。この実験では, 振動板を親水化した (Fig. 4, Fig. 5)。

振動板の厚みが 0.3mm (ばね定数 100.29N/m) \sim 0.06mm (ばね定数 0.8N/m) の場合, 通常のジェット霧化と同様に, 振動板上に形成された水膜から連続的かつ垂直に安定なジェット霧化が発生した (Fig. 1)。特に, 振動板の厚みが 0.3mm から 0.07mm に減少すると (Fig. 4a \sim 4d), ジェット霧化の状態が細かいシルク状のカーテン (Fig. 4a) から密なカーテン (Fig. 4d) に変化し, 霧化濃度も増加した。

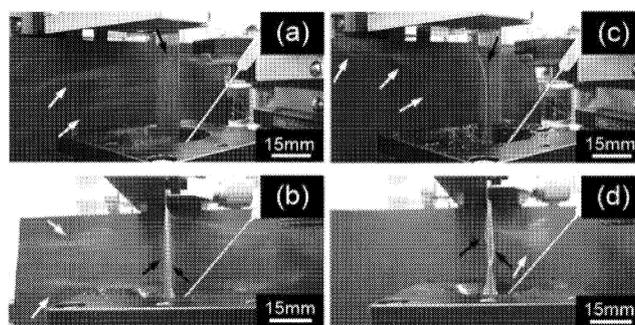


Fig. 3 Comparison of jet atomization induced from diaphragms with different wettability. (a) Jet atomization induced from a hydrophilized diaphragm (taken from an angle of 45°). (b) Front view of (a). (c) Pseudo jet atomization induced from a hydrophobized diaphragm (taken from an angle of 45°). (d) Front view of (c).

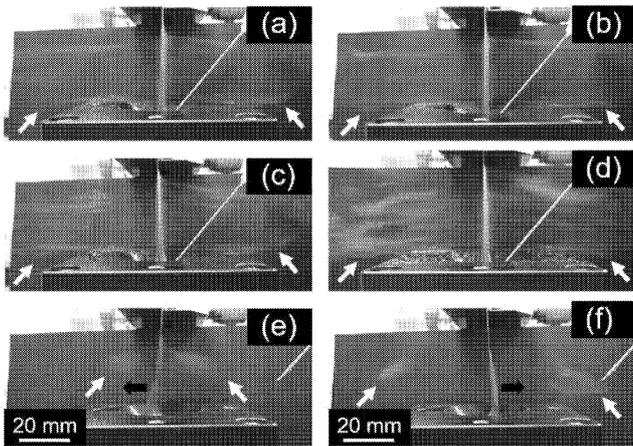


Fig. 4 Comparison of jet atomization achieved with hydrophilized diaphragms of different thicknesses (spring constants). (a) Thickness of the diaphragm: 0.3 mm, spring constant: 100.29 N/m, (b) Thickness of the diaphragm: 0.2 mm, spring constant: 29.72 N/m, (c) Thickness of the diaphragm: 0.1 mm, spring constant: 3.71 N/m, (d) Thickness of the diaphragm: 0.07 mm, spring constant: 1.27 N/m, (e) Thickness of the diaphragm: 0.05 mm, spring constant: 0.46 N/m (left wobbling, black arrow), (f) Same diaphragm as (e), but with right wobbling. Thickness of the diaphragm: 0.05 mm, spring constant: 0.46 N/m (right wobbling, black arrow). The white arrows in each figure indicate jet atomization from the water film formed on the diaphragm.

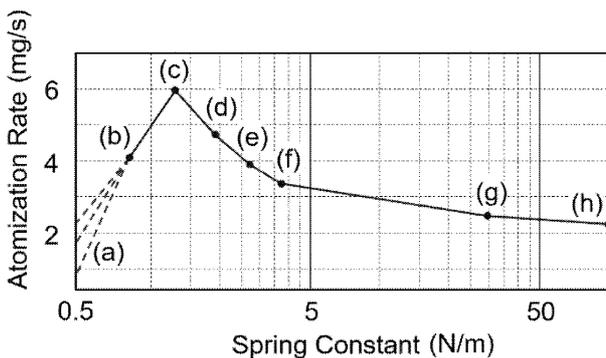


Fig. 5 Relationship between the rate of jet atomization and the spring constant of the hydrophilized diaphragm. (a) Spring constant: 0.46 N/m, thickness: 0.05 mm, (b) Spring constant: 0.80 N/m, thickness: 0.06 mm, (c) Spring constant: 1.27 N/m, thickness: 0.07 mm, (d) Spring constant: 1.90 N/m, thickness: 0.08 mm, (e) Spring constant: 2.71 N/m, Thickness: 0.09 mm, (f) Spring constant: 3.71 N/m, thickness: 0.1 mm, (g) Spring constant: 29.72 N/m, thickness: 0.2 mm, (h) Spring constant: 100.29 N/m, thickness: 0.3 mm.

一方、振動板の厚み 0.05mm (バネ定数: 0.46N/m) で発生した霧化は、通常の霧化とは大きく異なり、不安定で不連続な霧化となった。振動板は振動子上の水によって不均一に振動し (Fig. 4e, 4f, 白矢印)、不連続な不安定振動状態となった (Fig. 4e: 左揺動, 黒矢印, Fig. 4f: 右揺動, 黒矢印)。

Fig. 4 に示した、バネ定数の異なる親水化振動板により発生する霧化の速度 (効率) を計測した。Fig. 5 は、霧化速度とバネ定数の関係を示したものである。縦軸は霧化速度 (mg/s)、横軸はバネ定数 (N/m) を対数で表したものである。バネ定数が 100.29N/m から小さくなるにつれて霧化速度は増加し (Fig. 5h, 厚さ 0.3mm)、バネ定数が 1.27N/m のときに霧化速度は最大 5.96mg/s となった (Fig. 5c, 厚さ 0.07mm)。しかし、バネ定数が 0.8N/m になると霧化速度が低下し始め (Fig. 5b, 厚み 0.06mm)、バネ定数が 0.46N/m になると振動板の揺動より霧化が不安定になり (Fig. 5a 赤線, 厚み 0.05mm)、霧化速度が極端に低下することが判明した。

(3) 霧化発生温度の直接計測

ジェット霧化の特性は、霧化の発生領域の温度とも密接な関係があるはずである。歴史的に霧化は室温で起こると考えられており、この低温霧化が超音波霧化の利点の一つとされてきた [11-14]。しかし、振動板を用いない従来の霧化 (Fig. 6) では、霧化水柱 (Fig. 6a, 矢印 a1) が激しく揺動し、霧化液滴は境界が不鮮明な3次元の拡がり (Fig. 6b, 矢印) をもつ。このため、霧化領域の温度をその場測定で、再現性よく正確に測定することは、これまで非常に困難であった。

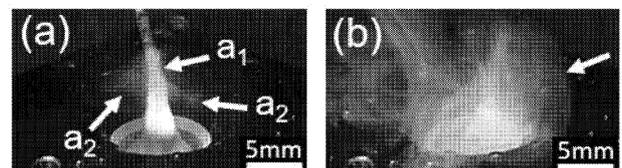


Fig. 6 Conventional atomization without a diaphragm. (a) The very moment when atomization occurs (arrows a₂) from a liquid column (arrow a₁). (b) Conventional atomization spreading in three dimensions (white arrow).

一方、振動板を用いたジェット霧化 (Fig. 7a) の場合、振動板とジェットの境界から選択的に霧化が発生する。このため、微小熱電対を用いて霧化領域の

温度をその場で、再現性よく、正確に測定することが可能になった。ここで、温度とは、分子プローブを用いた瞬間的なソノルミネッセンスにより分光学的に測定される分子スケールの温度ではなく、マイクロスケールの熱電対で測定できるマクロ的な意味での平均温度のことを指す[15-17]。

本研究では、直径 $50\ \mu\text{m}$ の微小熱電対を用いて霧化領域の温度を測定した。厚さ $0.07\ \text{mm}$ の親水性振動板を使用した。室温と同じ 24°C の蒸留水を補充する事により、振動子上の水量を 500mg に維持した。温度測定は、実験環境の温度を安定させるために、ジェット霧化を 2 時間継続させた後に行った。

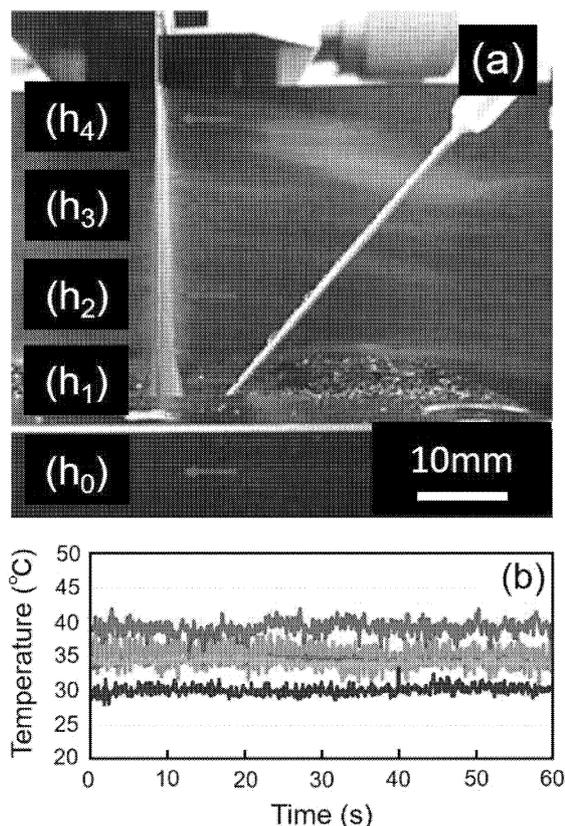


Fig. 7 Temperature measurement at the generating areas of jet atomization. (a) Five measurement positions ($h_0\sim h_4$) along the centerline of the diaphragm (red arrows). (b) Temperature data measured at the above five positions for 60 seconds. (h_0 : purple, h_1 : orange, h_2 : red, h_3 : green, h_4 : blue). Details of this graph are shown in Supplementary S4.

Fig. 7 は、ジェット霧化時の振動板に沿った 5 箇所温度測定位置 (Fig. 7a, 赤矢印) と測定結果 (Fig. 7b) である。温度は振動板の中心線に沿った霧化領域で測定した。測定は、振動板の先端 (0mm , 矢印 h_0)

から 10mm (矢印 h_1), 20mm (矢印 h_2), 30mm (矢印 h_3), 40mm (矢印 h_4) の高さの位置で行った。各位置での温度はそれぞれ 34.3°C (矢印 h_0), 34.1°C (矢印 h_1), 39.2°C (矢印 h_2), 35.1°C (矢印 h_3), 30.1°C (矢印 h_4) であった。これらは、Fig. 7b で得られた 1 分間の測定値の平均値である。

以上の測定結果をまとめると、霧化部の平均温度は 34.6°C であり、振動板の高さ方向に $30.1\sim 39.2^\circ\text{C}$ の温度分布をもつことがわかった。この結果から、霧化部の温度は 100°C よりはるかに低く、マクロ的に見て沸騰していないことが明らかとなった。

3. 解析

以上の実験結果と霧化メカニズムの 3 つの仮説である表面波説[1-4], キャビテーション説[5-7], 沸騰説[8-10]に基づき、振動板を用いたジェット霧化の発生メカニズムを解析した。

Fig. 8 は、振動板上に形成された水膜から発生するジェット霧化の様子を上から見たものである。ここで、もし振動板上の水膜の沸騰やキャビテーションによる気泡の崩壊に伴い、ジェット霧化が生じるのであれば、霧化は振動板上の水膜の全域にわたり、ランダムなタイミングで発生するはずである。したがって、ジェット霧化の上面図は Fig. 8a のようになるはずである (黒矢印)。

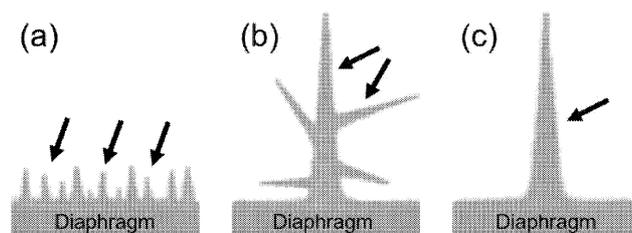


Fig. 8 Top view of jet atomization from the water film on the diaphragm. (a) Image of multi-jet atomization from the entire water film on the diaphragm. (b) Image of branched jet atomization from the main jet. (c) Image of actual jet atomization observed by experiments.

同様に、もし沸騰やキャビテーション気泡の崩壊によりジェットから霧化が起こった場合には、霧化したジェットは Fig. 8b (黒矢印) のように直線状ではなく、分岐があるはずである。しかし、実際のジェット霧化は、Fig. 8c の黒矢印に描かれているように、振動板の中

心から振動板に垂直な方向に分岐することなくまっすぐに発生していた。

したがって、Fig. 8c のような実際のジェット霧化の形状を沸騰説やキャビテーション説で説明するためには、水膜の沸騰やキャビテーションによる気泡崩壊が、振動板中央の水膜だけで発生するという、不自然なメカニズムが必要になる。

このジェットの形状に基づく解析は、霧化が振動板上の水膜の沸騰[8-10]やキャビテーション[5-7]によるものではなく、水膜上に形成される表面波[1-4]によるものであるという考えを支持している[18-20]。

また、Fig. 7 で示した霧化の温度測定も、上記の解析を支持している。ジェット霧化発生部の温度は沸点(100℃)よりはるかに低く、霧化の発生に沸騰は必要条件ではないことは明らかである。

さらに、振動板上の高さ方向に沿って 10℃程度の温度分布が観察された(Fig. 7)。この結果は、表面波の粘性による発熱[21]とキャビテーション気泡の崩壊による発熱[15-17]が振動板に沿って分布している可能性を示唆している。

実際に、超音波振動に伴うキャビテーションの発生/崩壊の際、分光学的な温度計測により、直径数 μm の領域が数百度から数千度に上昇したとする結果も存在する。このため、キャビテーションの崩壊に伴う、局所的かつ瞬間的な温度上昇の可能性は存在する。問題は、このキャビテーションの崩壊による温度上昇が霧化を発生させる主要因になり得るかどうかである。以下にこの点についての考察を記載する。

ここで、もしジェット霧化発生の主要因がキャビテーションであり、上記の温度分布がキャビテーション気泡の崩壊によるものであると仮定すれば、キャビテーション気泡の崩壊が活発な温度の高い領域でより活発なジェット霧化が起こるはずである。しかし、実際には、振動板上の温度の低い領域(振動板上の高い位置)で、より活発なジェット霧化が起こっていた(Fig. 4, Fig. 7)。例えば、最も活発に霧化が起こっている矢印 h_4 の部分(Fig. 7)は、最も激しいキャビテーションが起こり、その結果、最も高い温度になっているはずである。しかし、 h_4 の部分の霧化温度は最も低く(平均で 30.1℃)になっている。また、霧化温度が最も高い(平均 39.2℃) Fig. 7 の領域 h_2 は、最も激しいキャビテーションが発生し、その結果、最も活発なジェット霧化が起こるはずであった。しかし、実際には、 h_2 領域での霧化の活性は高くなく、むしろ低かった。

これらの矛盾は、キャビテーション(あるいはキャビテーション気泡の崩壊)が霧化生成の主要因ではないことを支持するものである。

逆に、表面波がジェット霧化発生の主要因であり、上記の温度分布が表面波の粘性によるものと仮定すれば、粘性による熱損失の小さい領域、すなわち低温領域から、より活発なジェット霧化が発生するはずである。実際、最も活発なジェット霧化は、Fig. 7 の矢印 h_4 で示す最も低温の領域(平均 30.1℃)で発生した。逆に、粘性による熱損失が大きい領域、すなわち高温の領域からは、活発な霧化は起こらないはずである。実際、Fig. 7 の矢印 h_2 で示す最高温度領域(平均 39.2℃)では、ジェット霧化があまり活発ではなかった。これらの一致は、表面波がジェット霧化発生の主要因であるという考えを支持するものである[11-13]。

一方、Fig. 3 と Fig. 5 に示す実験結果から、以下に示すジェット霧化の基本特性が明らかになった。

- ① 霧化は親水性振動板の中心部から発生する(Fig. 3, 接触角: 9.8° , 濡れ面積: 50.24mm^2)。
- ② 霧化速度(効率)は振動板の濡れ性に依存し、親水性振動板(3.37mg/s)は疎水性振動板($\sim 0.33\text{mg/s}$)に比べ、約 10 倍の効率を示した(Fig. 3)。
- ③ ジェット霧化速度(効率)は振動板のバネ定数に依存し、バネ定数が 1.27N/m のとき、最大霧化速度(5.96mg/s)を達成した(Fig. 5)。

上記特性①の理由は、以下のように考えることができる。振動板の親水化により、超音波振動子から上方への水流が発生し、振動板の全幅に振動水膜が形成される。この振動水膜が振動板の左右両端部で進行波と反射波を誘起し、表面波を発生させる。この表面波は互いに相互作用し、振動板の中央部において対称性により増幅され、表面波振幅が増大する事により霧化されるはずである(Fig. 8c, 黒矢印)。したがって、ジェット霧化は親水性振動板の中心部から効率よく発生したと考えられる。

上記②と③の性質を Fig. 3 と Fig. 5 の実験から考察すると、Fig. 3 は振動板の濡れ性によって振動板と水膜の相互作用が異なることを明確に示しており、親水性振動板がより強く水膜と相互作用していることを示唆している。

Fig. 5 の実験では、振動板のバネ定数だけが異なり、振動子の電力、振動板上の水量、各振動板の表面処理は同一であった。したがって、Fig. 5 で各振動板と水膜が等しく相互作用していれば、各振動板でのジェット霧化の効率はすべて同じになるはずである。しかし、Fig. 5 に示すように、振動板のバネ定数によって霧化効率が変化していることが明らかになった。この結果は、振動板のバネ定数の違いにより、霧化発生

時において振動板と水膜の相互作用が異なることを示している。

以上をまとめると、Fig. 3, Fig. 5 の実験から、各振動板と水膜の相互作用は、振動板の濡れ性とバネ定数に依存し変化していることがわかった。この結果は、上記①で支持した表面波説と合わせて、以下のように考えられる。振動板と水膜の相互作用の違いにより、異なる表面波が発生し、霧化の性質が異なり、結果として霧化効率も変化する。すなわち、振動板と表面波の相互作用は霧化の発生と密接に関係しており、その相互作用の違いにより、上記②や③のように霧化効率が変化していると考えられる。

振動板と表面波の相互作用を考える場合、以下の2つの可能性を考慮する必要がある。

- (A) 共振状態：振動板の固有周波数と表面波の周波数が一致する場合
- (B) 非共振状態：振動板の固有周波数が表面波の周波数と異なる場合

従来の霧化に関する先行研究では[2, 22-23]、水面上の定在波の周波数が超音波振動子の周波数と一致することが仮定されてきた。この仮定は、霧化液滴の直径と表面波の周波数の関係を示す以下の式(1)を導き出す際、Lang[2]によって提案され、多くの実験によって支持されてきた[22, 23]。

$$d = 0.34 \left(\frac{8 \pi \sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 d は霧化液滴の直径(m)、 σ は液体の表面張力(N/m)、 ρ は液体の密度(kg/m^3)、 f は表面波または振動子の周波数(Hz)である。

実際、Fig. 9 に示す、我々の実験では、ジェット霧化で発生した霧化液滴の直径は平均 $3.1 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $1.7 \mu\text{m}$ であり、上記式(1)の正当性を裏付けている。そこで、本研究では、ジェット霧化における表面波の周波数は、超音波振動子の周波数(2.4MHz)と同じであると仮定する。

一方、振動板の固有振動数は、片持ち梁の固有振動数を記述する以下の式(2)に基づいて検討し[24-27]。この式は、片持ち梁の固有振動数 f とばね定数 k の関係を表している。この式によれば、振動板の固有振動数 f は励起振動モード λ に応じて無限に存在することになる[24-27]。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{3\rho AL}} \lambda^2 \quad (2)$$

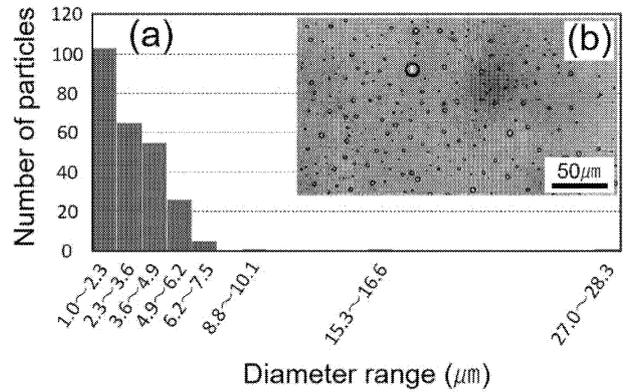


Fig. 9 Distribution of water droplets generated by jet atomization. (a) Histogram of number and diameter of atomized droplets. (b) Optical image of atomized water droplets. These droplets were collected by the immersion method using silicone oil.

ここで、 f は片持ち梁の固有振動数(Hz)、 k は片持ち梁のバネ定数(N/m)である。また、 ρ 、 A 、 L 、 λ はそれぞれ片持ち梁の密度(kg/m^3)、断面積(m^2)、長さ(m)、共振モード(-)である。

振動板の固有振動数 f と共振モード λ の関係は、振動板の材料特性を上記(2)式に代入することにより定量化した。この実験に用いた振動板の材料特性は、バネ定数： $k \sim 1.27$ (N/m)、密度： $\rho \sim 7930$ (kg/mm^3)、断面積： $A \sim 1.25 \times 10^{-6}$ (mm^2)、長さ： $L \sim 55 \times 10^{-3}$ (m)である。

この推察に基づく、振動板の固有周波数は、共振モード λ が 664 のとき約 2.4MHz となり、本研究で想定した表面波の周波数と同じになる。したがって、振動板が表面波と共振することは理論的には可能である[28-30]。

ただし、共振モード 664 が実際に励起されるかどうかは議論の余地がある。つまり、振動学的には共振モード 1 の基本モードが最も励起されやすいと考えられる。このため、664 という高次の励起モードへエネルギーが分配される確率が問題になる。例えば、現在の実験系に対し、外部からホワイトノイズ的な振動を与えた場合には、664 などの高次モードの励起確率は低いと考えられる。しかし、本実験の様に、超音波振動子から 2.4MHz の単一縦振動(共振モード 664 に相当)を印可した場合には、少なくとも共振モード 664 が励起される確率は、ホワイトノイズ振動を印可した場合より高いと考えられる。逆に、共振周波数(2.4MHz)を印可した場合に、対応する共振モード(664 の振動モード)が励起されないと考えることは不自然である。

この点に関し、理論的に解決する事は簡単ではない。つまり、上記式(2)で示される片持ち梁の理論では、外部から印加するエネルギーに対し、各共振モードへのエネルギーの分配確率を決定する事はできない。特に、本実験の様には、振動板だけでなく、液体の振動も複合的に作用する実験系の場合、理論解析は非常に困難である。

上記の理由により、2.4MHz で振動する超音波振動子が、振動板の振動モード 664 を励起し、振動板が 2.4MHz で振動しているかどうかは、実験的に確認する必要がある(本紀要では非公開)。現時点では、次の2つの可能性を検討するに留める。

上記(A)の共振状態が実現された場合、ジェット霧化の生成過程は以下のように考えることができる。振動板の固有周波数が表面波の周波数(2.4MHz)と一致すると、振動板は表面波と共振し、その振動振幅が最大となる[30-33] ことにより、ジェット霧化の効率が最大となる。

一方、上記(B)の非共振状態が実現された場合、ジェット霧化の生成過程は以下のように考えることができる。振動板の固有周波数が表面波の周波数(2.4MHz)と異なる場合、振動板は表面波と共振できず、両者の振動振幅が減少する[30-33]、ことにより、振動数の差に応じて霧化効率が低下する。

現時点では、振動板と表面波の共振状態で霧化が行われるかどうかは実験的に確認できていない。しかし、運動学的観点から、物体間のエネルギーの伝播効率は共振状態で最大となることが知られているため[30, 31]、振動板と表面波の共振状態が実現できれば、ジェット霧化の効率は最大になるはずである。

振動板と表面波の共振状態が達成された場合、ジェット霧化のメカニズムと効率は以下のようにまとめられる。超音波振動による形成された、振動板上方への上昇水流は、親水性の振動板と強く相互作用し、振動板の全幅にわたり均一な振動水膜を形成し表面波を発生させる。この表面波は、水膜の強い表面張力により、振動板の左右両端部で進行波と反射波の双方を誘起する。この表面波は互いに相互作用し増幅され、対称性により振動板の中央で最大振幅の表面波となる。この表面波の周波数が振動板の固有周波数の一つである 2.4MHz に近づくと、表面波と振動板は共振状態を達成する[30-33]。共振状態では、表面波の振動エネルギーが最大効率で振動板の振動エネルギーに伝達される。このため、振動板の振幅は最大となる[30-33]。最大振幅になった振動板は、表面波を振動板から垂直方向に伸長させ、表面波の振動振幅は最大になる。この最大に伸長した表面波は

不安定になり[34-36]、表面張力により水滴を形成し、振動板と垂直方向に 2 次元方向にジェット霧化が発生する(Fig. 8c)。

現時点では、上記のジェット霧化の発生と効率に関する解析は仮説である。今後の研究において、振動板および表面波の振動数を測定することにより、この仮説を確立する予定である。

4. 総括および結論

本研究では、60 年以上未解明である超音波霧化の発生メカニズムの解明を目指した。研究のアプローチとして、振動板を利用した、ジェット霧化という新しい霧化方式を開発し、以下の3項目にフォーカスを当て実験的検証を行った。

1. 振動板の親水性および撥水性と霧化効率の関係
2. 振動板のばね定数と霧化効率の関係
3. ジェット霧化の発生メカニズムの解明(表面波説・キャビテーション説・沸騰説の検証)

上記1および2に対し、理想的なジェット霧化を実現するためには、振動板は高い親水性(接触角 9.8° 、濡れ面積 50.24mm^2)を持ち、バネ定数は約 1.27N/m であることが望ましい事が分かった。

上記3 に対しては、ジェット霧化の形状から、ジェット霧化は水の沸騰やキャビテーションではなく、水膜上に形成される表面波により引き起こされるという考えが支持された。

また、霧化領域の平均温度は 34.6°C であり、振動板に沿って 30.1°C から 39.2°C の間で分布しており、 100°C の水の沸騰はジェット霧化発生の要因ではないことが明らかになった。

さらに、振動板の温度分布から、温度の低いところでは霧化が活発であり、温度の高いところでは不活発であることが判明した。この実験結果は、キャビテーションが霧化の主要因ではないことを示している。逆に、この結果は、超音波霧化は、沸騰やキャビテーションに起因するのではなく、表面波が霧化発生の主要因であるという考えを支持している。

一方、単純な片持ち梁モデルを用いて、振動板と表面波の間に共振モードが存在することを理論的に確認したが、これらの共振状態はまだ実験的に検証できていない。

今後は、振動板および水膜表面波の振動数を検出する事により、霧化メカニズムの詳細を解明する予定である。また、物質表面には数 MHz ~ 数 GHz の弾性表面波が励起されることが知られている[37-39]。このため、振動板の弾性表面波と水膜の表面波の相互作用についても検討する予定である。

本研究の成果は、薬物や DNA、そしてマイクロプラスチックなどの微粒子を均一に分布させ、その性質を解析することが求められる薬学、医学、環境科学への基礎的貢献が期待できる。次の研究では、ジェット霧化を用いてマイクロプラスチックを基板上に均一分散させた結果を報告する。

謝辞

本研究は、AUT グループ研究費および文科省科研費（課題番号 JP21K04856）の支援を受けて実施しました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] T. B. Benjamin, F. Ursell, Proc. R. Soc. Lond. A, **225**, 505-515 (1954).
- [2] R. J. Lang, J. Acoust. Soc. Am. **34**, 6-8 (1962).
- [3] A. J. Yule, Y. Al-Suleimani, Proc. R. Soc. A, **456**, 1069-1085 (2000).
- [4] J. Blamey, L. L. Yeo, J. R. Friend, Langmuir, **29**, 3835-3845 (2013).
- [5] O. K. Eknadiosyants, Sov. Phys. Acoust., **14**, 80-84 (1968).
- [6] J. Frohly, S. Labouret, C. Bruneel, I. L. Baquet, R. Torguet, J. Acoust. Soc. Am., **108**, 2012 (2000).
- [7] O. A. Sapozhnikov, V. A. Khokhlova, M. R. Bailey, J. C. Williams, J. A. Mcateer, R. O. Cleveland, L. A. Crum, J. Acoust. Soc. Am., **112**, 1183-1195 (2002).
- [8] R. Pillai, M. K. Borg, J. M. Reese, Phys. Rev. Lett., **121**, 104502 (2018).
- [9] J. C. Simon, O. A. Sapozhnikov, V. A. Khokhlova, L. A. Crum, M. R. Bailey, J. Fluid Mech., **766**, 129-146 (2015).
- [10] V. A. Khokhlova, M. R. Bailey, J. A. Reed, B. W. Cunitz, P. J. Kaczkowski, L. A. Crum, J. Acoust. Soc. Am., **119**, 1834-1848 (2006).
- [11] M. Sato, K. Matsuura, T. Fujii, J. Chem. Phys., **114**, 2382 (2001).
- [12] S. Nii, K. Matsuura, T. Fukazu, M. Toki, F. Kawaizumi, Chem. Eng. Res. Des., **84**, 412 (2006).
- [13] Y. Tanaka, Y. Mori, K. Matsuura, K. Tsuchiya, J. Chem. Eng. Jpn., 10.1252/jcej.11we214 (2011).
- [14] H. Naidu, O. Kahraman, H. Feng, Ultrason. Sonochem., **86**, 105984 (2022).
- [15] E. B. Flint, K. S. Suslick, Science, **253**, 1397 (1991).
- [16] J. Rae, M. Ashokkumar, O. Eulaerts, C. von Sonntag, J. Reisse, F. Grieser, Ultrason. Sonochem., **12**, 325 (2005).
- [17] C. Gong, D. P. Hart, J. Acoust. Soc. Am., **104**, 2675 (1998).
- [18] W. Eisenmenger, Acoustica, **9**, 327 (1959).
- [19] A. Qui, L. Y. Yeo, J. R. Friend, Phys. Fluids, **20**, 074103 (2008).
- [20] D. J. Collins, O. Manor, A. Winkler, H. Schmidt, J. R. Friend, L. L. Yeo, Phys. Rev. E, **86**, 056312 (2012).
- [21] I. Imai, A New Approach to Electromagnetic Theory (Saiensu-sya, Tokyo, 1990) [in Japanese]. "English translation are published in Bull," Soc. Franco-Japon. Des Sci. Pur. Appl., Num. Spec., **4**, 353 (1990).
- [22] R. L. Peskin, R. J. Raco, J. Acoust. Soc. Am., **35**, 1378 (1963).
- [23] L. Rayleigh, Lond. Edinb. Phil. Mag., **34**, 94 (1917).
- [24] R. D. Blevins, R. Plunkett, J. Appl. Mech., **47**, 461 (1980).
- [25] R. D. Blevins, *Formulas for natural frequencies and mode shape*, (Krieger, Florida, 1984).
- [26] D. J. Gorman, *Free vibration analysis of beams and shafts*, Wiley, New York, 1975).
- [27] R. C. Hibbeler, *Engineering Mechanics Dynamics*, (Prentice Hall, New Jersey, 2010).
- [28] M. C. Ece, M. Aydogdu, V. Taskin, Mech. Res. Commun., **34**, 78 (2007).
- [29] R. Jategaonkar, D. S. Chehil, J. Sound Vib., **133**, 303 (1989).
- [30] I. Bloch, *The Physics of Oscillations and Waves: With Applications in Mechanics and Electricity* (Springer, Berlin Heidelberg, 1997).
- [31] R. E. D. Bishop, D. C. Johnson, *The mechanics of vibration*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2011).
- [32] H. Matsuura, H. Furukawa, T. Uda, Phys. Rev. E, **73**, 066306 (2006).
- [33] H. Matsuura, T. Tanikawa, S. Kokaji, Jpn. J. Appl. Phys., **43**, L894 (2004).

- [34] S. Tomotika, Proc. R. Soc. Lond. A, **150**, 322 (1935).
- [35] S. Tomotika, Proc. R. Soc. Lond. A, **153**, 302 (1936).
- [36] J. C. Simon, O. A. Sapozhnikov, V. A. Khokhlova, Y. N. Wang, L. A. Crum, M. R. Bailey, Phys. Med. Biol., **57**, 8061 (2012).
- [37] M. Kurosawa, T. Watanabe, A. Futami, T. Higuchi, Sens. Actuator A Phys., **50**, 69 (1995).
- [38] Q. Aisha, L. Y. Yeo, J. R. Friend, Phys. Fluids., **20**, 074103 (2008).
- [39] J. Ju, Y. Yamagata, H. Ohmori, T. Higuchi, Sens. Actuator A Phys., **145**, 437 (2008).

研究論文

自己組織化プロセスにもとづいた金属ナノピラーアレイの形成

近藤 敏彰*, 原田 柊真

(2022年9月30日受理)

Formation of Metal Nanopillar Array by Self-ordering Process

Toshiaki KONDO*, Touma HARADA

(Received September 30, 2022)

Abstract

Formation of a highly ordered gold nanopillar array using an anodic porous alumina as an electrodeposition template was demonstrated. The present process is simpler than the electrodeposition process using an anodic porous alumina template. Geometrically controlled gold nanopillar arrays were obtained by the present process. The gold nanopillar array was thought to effectively absorb visible light due to LSPR effect and multiple scattering of light. The present fabrication process is thought to be applied to fabricate sensing devices and energy conversion devices.

キーワード: 自己組織化プロセス, 金属ナノピラーアレイ, アノード酸化, ポーラスアルミナ, プラズモン

Keywords : Self-ordering process, Metal nanopillar array, Anodization, Porous alumina, Plasmon

1. はじめに

ナノメートルスケールまで微細化した貴金属(金, 銀, 銅など)に光を照射すると, 金属表面には自由電子の集団振動が励起され(局在表面プラズモン共鳴/Localized Surface Plasmon Resonance: LSPR), 自由電子密度の粗密な空間分布が形成される[1]. 高密度の部分では光電場の強度が増強されており, 近年, この増強光電場にもとづいたセンシングデバイスや太陽電池など様々な光機能デバイスが提案されている.

デバイスの性能はLSPR特性に依存しており, LSPR特性は金属ナノ構造体の幾何学形状に大きく依存しており, デバイス性能の向上には金属ナノ構造体の幾何学形状制御が本質的である. 幾何学形状が制御された金属ナノ構造の形成には, 一般的には半導体微細加工技術が用いられるが, この手法はプロセスが煩雑であり, 装置が高額であるといった問題がある.

当研究室ではこれまでに, 自己組織化プロセスにもとづいた金属ナノ構造配列の形成手法について検討を行ってきた. 自己組織化材料の一つであるアノード酸化ポーラスアルミナにもとづく手法によれば, 典型的な微細加工技術と比べて簡便かつ安価に幾何学形状が制御された金属ナノ構造体を形成することができる[2,3]. アノード酸化ポーラスアルミナにもとづく作製

手法の一つに, ポーラスアルミナをテンプレート材とした電解析出法による金属ナノピラーアレイの形成手法

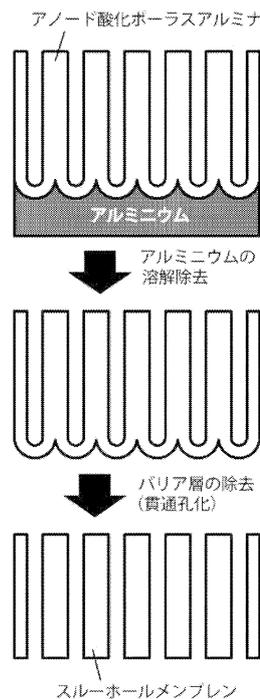


Figure 1 Fabrication process of through-hole membrane of anodic porous alumina

* 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

が挙げられる[4]。この手法によれば、幾何学形状が精密制御された金属ナノピラーアレイが形成可能となる。しかしこの手法は、図1に示すように、ポーラスアルミナの貫通孔化処理が必要であり、作製プロセスのさらなる簡略化が望まれていた。本報では、幾何学形状制御された金属ナノピラーアレイ形成のさらなる効率的な形成手法に関する近年の検討結果について報告する。

2. 実験プロセス

金ナノピラーアレイ形成のためのテンプレート材であるポーラスアルミナを、二段階アノード酸化プロセスにより形成した。二段階アノード酸化プロセスは、既報にて詳細に報告しており[2,3]、ここでは簡単に説明する。図2には、二段階アノード酸化プロセスに関する模式図を示す。アノード酸化初期、ナノ細孔の配列はランダムであるが、適切な条件にてアノード酸化を行うと、アノード酸化にともなってナノ細孔配列は自己組織的に規則化する。細孔底部はドーム形状しており、バリア層と呼ばれている。その後、形成されたポーラスアルミナ層を選択的に溶解除去すると、アルミニウムの表面にはバリア層の規則配列に対応したくぼみの規則配列が形成される。このサンプルをアノード酸化すると、それぞれのくぼみが細孔発生の開始点として働くため、ナノ細孔の規則配列構造が得られる。

図3には金ナノピラーアレイの作製プロセスを示す。

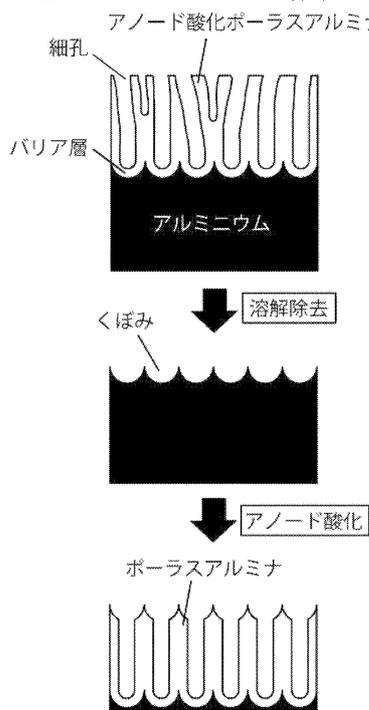


Figure 2 Two-step anodization process

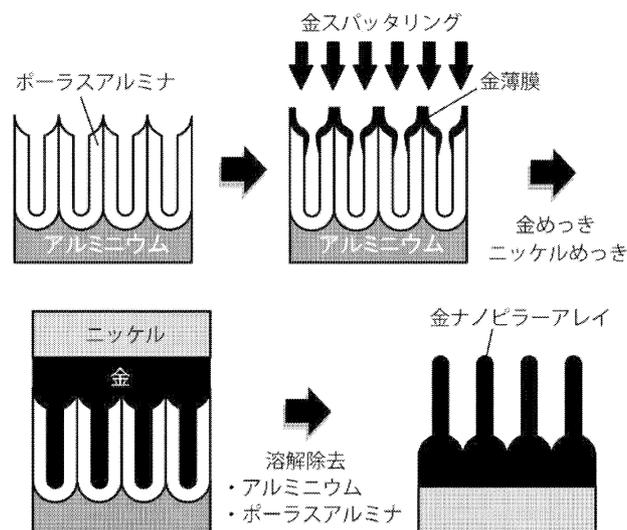


Figure 3 Formation scheme of highly ordered gold nanopillar array

本手法は、従来手法のような細孔の貫通孔化を必要としない。二段階アノード酸化プロセスにより形成したポーラスアルミナの表面に、スパッタリング装置を用いて金薄膜層を形成した。サンプルを金めっき液に浸漬し、金薄膜層を導通層として金めっきを施すことで、ポーラスアルミナのナノ細孔中に金を充填した。さらに、機械的強度の向上を目的にニッケルめっきを施した。従来手法では、ナノ細孔中に金を充填するために細孔の貫通孔化を必要としていたが、この手法によれば貫通孔化のプロセスは不要となる。貫通孔化処理は、実験者の手先の器用さに依存するテクニカルな要素を含むため、貫通孔化を不要とする本プロセスによれば、金ナノピラーアレイを簡便に形成可能になる。最後にサンプルを水酸化ナトリウム水溶液に浸漬し、ポーラスアルミナをよびアルミニウムを選択的に溶解除去することで、金ナノピラーアレイを得た。得られたサンプルの幾何学形状は走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察し、光学特性はサンプルの反射スペクトルを分光光度計により測定することで評価した。

3. 結果と考察

図4には、本手法により形成されたポーラスアルミナの SEM 観察像を示す。ナノメートルスケール直径のナノ細孔が自己組織的に規則配列している様子が観察された。細孔直径と配列間隔は、それぞれ、150nm と 500nm であった。ここには示していないが、細孔深さは 900nm であった。

図5には、本手法により形成された金ナノピラーアレイの典型的な SEM 観察像を示す。SEM 像より、金ナノピラーが規則配列している様子が観察された。ナノ

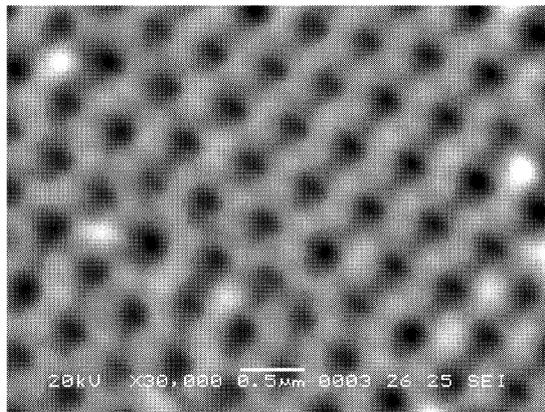


Figure 4 Typical SEM image of highly ordered anodic porous alumina

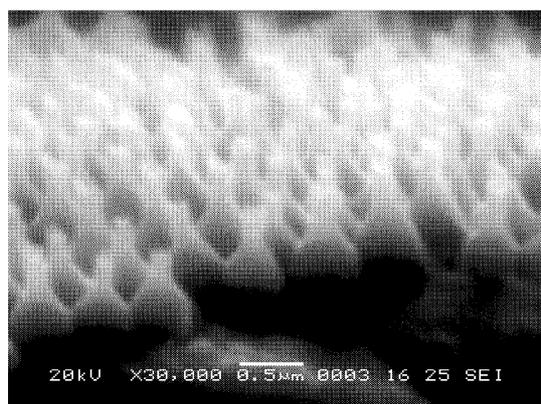


Figure 5 Typical SEM image of highly ordered gold nanopillar array

ピラーの直径および配列間隔は、テンプレート材としたポーラスアルミナの幾何学形状を一致していた。また、ナノピラーの高さは、450nmであった。

図6には、金ナノピラーアレイの反射スペクトル測定結果を示す。比較として、平滑な金表面の場合も示している。いずれの場合においても波長 500nm より短波長の波長帯域において反射率が低い様子が観察された。また、金ナノピラーアレイの場合、平滑な場合と比較して、反射率が低い様子が観察された。これは、LSPR効果に加えて、金ナノピラーアレイでの光の多重散乱による光吸収の効率化によるものと考えられる。

4. おわりに

本手法によれば、従来の手法において必要とされていたナノ細孔の貫通孔化処理を必要とせず、簡便に、幾何学形状が精密制御された金ナノピラーアレイの形成が可能であった。得られた金ナノピラーアレイはLSPRなどの効果にもとづき、可視光の波長帯域において、高い光捕集効果を示すことが示唆された。本手法は、高感度センシングデバイス、水素生成デバイス作製への適用が期待される。

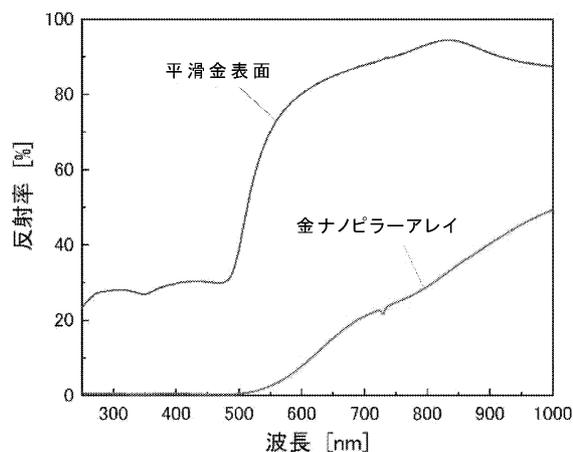


Figure 6 Reflection spectra of gold nanopillar array and smooth gold surface

参考文献

- [1] 近藤敏彰, 柳下崇, 益田秀樹: “大面積規則ナノ構造体の形成とプラズモニクスデバイスへの応用,” CSJ カントレビュー プラズモンと光圧が導くナノ物質, 日本化学会編, pp.127-133, 化学同人, 2019.
- [2] H. Masuda, T. Yanagishita, K. Toshiaki: “Fabrication of anodic porous alumina,” Encyclopedia of Interfacial Chemistry 1st Edition, Elsevier, 2018.
- [3] H. Masuda, K. Fukuda, “Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina”, Science, vol.268, pp.1466-1468, 1995.
- [4] T. Nishikawa, H. Nakano, K. Oguri, N. Uesugi, M. Nakao, K. Nishio, H. Masuda, “Nanocylinder-array structure greatly increases the soft X-ray intensity generated from femtosecond-laser-produced plasma,” Applied Physics B, vol.73, pp.185-188, 2001.

音声対話システム周辺での環境音に対する データ拡張による識別精度の向上

神谷 俊樹*, 實廣 貴敏*

(2022年9月30日受理)

Improvement of discriminative performance by data augmentation for ambient sounds in the vicinity of a spoken dialog system

Toshiki KAMIYA*, Takatoshi JITSUHIRO*

(Received September 30, 2022)

Abstract

This paper describes how to improve the discriminative performance for ambient sounds in the vicinity of a spoken dialog system even if the size of training data is small. At first, using the Convolutional Neural Network (CNN) trained by using a huge size of database, we investigated two training methods, i.e., transfer learning and fine-tuning. Second, we introduced data augmentation, specifically Gaussian noise addition, time shift, mixup, and BC Learning. Experimental results show that the best performance obtained by the combination of fine-tuning, Gaussian noise addition, time shift, and BC Learning.

キーワード: 環境音, 深層学習, CNN, 転移学習, ファインチューニング, データ拡張

Keywords : Ambient sound, Deep learning, CNN, Transfer learning, Fine tuning, Data augmentation

1. はじめに

通信技術の急速な成長を遂げている現代, IoT という「モノ」をインターネットに接続する技術が注目を集めている. IoT システムは, 離れた場所の観測や見守りに役立つことができる. インターネット経由で環境音を認識することで, 遠隔地の状況を把握でき, セキュリティ対策や見守りシステムといった技術に活用することができる. 環境音だけで認識する利点として, カメラなどで撮影した動画よりもプライバシーを守ることができる. また, マイクなどでデータを収集できるため, デバイスを小型にしたシステムを考えることができる. 本研究では, そのようなシステムのフロントエンドが必要とする機能として環境音識別について検討する.

著者らの研究室では, 環境音の認識に関する研究として, 発話者の距離と人数に着目した環境音の認識[1]や音声対話システムと会話した時の周囲の状況や人間の反応に着目した認識[2]について検討を行ってきた. しかし, そのどちらも学習データ量を増やすことが残された課題となっている. これは, 環境音を学習するためのラベル付きデータを人手で集めるには時間

がかかってしまうからである. 例えば, 長時間収録しても特定の環境音が観測される頻度が少ないことや, ラベルを人手で付与するには大きな労力が必要である.

このような, データ量が少ない問題を解決するための方法として, 主に画像認識の分野で提案されている, すでに学習済みのモデルで再学習する転移学習[3], ファインチューニング[4], また, データ量の水増しをするデータ拡張[5]などがある.

本研究では, 音声対話システム周辺での環境音認識精度向上のため, 少量データでの学習でも正確に対応できる手法を目的とする. 検討手順としては, まず初めにパターン認識でよく利用される Convolutional Neural Network (CNN)を用い, 現在収録されている環境音を識別するとどのような問題が存在するか明らかにする. 次に, その問題を解決するために, 少量データで高い精度を得るための手法として転移学習やファインチューニング, データ拡張といった手法を用いて識別実験を行う.

2節では, 本研究で識別対象とする, 音声対話システム周辺の環境音の収録条件と観測された環境音に

* 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 Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, Gamagori, Aichi, 443-0047, Japan

ついて述べる。3 節では、環境音識別モデルとして CNN について述べる。4 節では、CNN での識別実験とその結果について述べる。5 節では、転移学習およびファインチューニングについて解説する。また、環境音に対して転移学習させた実験と結果について述べる。6 節では、データ拡張の手法について解説する。そして、環境音に対してデータ拡張した実験と結果について述べる。7 節にて、本論文をまとめる。

2. 音声対話システム周辺の環境音

本節では、本実験で識別対象とする環境音データの収録状況やサンプルデータについて述べる。

2.1. 環境音の収録条件

Table 1 は 2020 年度の収録実験に使用された機材と環境についてまとめたものである。収録場所は、本学 AUT ホール棟一階にあるロビーの中央付近にある階段の横で行われた。およそ 9 m×18 m の広さがあり、周囲に机や椅子が並べられており、休憩時間などに多くの学生が利用している場所である。また、オープンキャンパスや大学祭などでは、多くの学生や地域の方々などが待機したり、行き来したりする場所である。

Table 1 The conditions for recording ambient sounds, and the number of the obtained sound files.

収録場所	愛知工科大学 AUT ホール 1 階ロビー
サンプリング周波数	96 kHz
量子化ビット数	16 bit
収録機材	ビデオカメラ SONY HDR-CX170
	録音装置 EDIROL by Roland 4-CHANNEL PORTABLE RECORDER R-44
収録時間	環境音収録 平日授業日 12 時 30 分～13 時 30 分 対話システムとの対話収録 平日授業日 14 時～15 時
ラベル付けされた環境音データ	総時間数 1580 秒 ファイル数 316 個
従来研究でよく利用されるデータベース ESC-50[6]	総時間数 10000 秒 ファイル数 2000 個

収録は二つのパターンで行われた。一つ目は、音声対話システム周辺での環境音の収録である。このパターンでは、最も学生が行き来する休憩時間に環境音の収録が行われた。二つ目は、音声対話システムとの対話収録である。音声対話システムと質問者が 1 対 1 で対話を行い、後ろで他の人がリアクションを取る。例えば、音声対話システムが質問者の意図している回答ではなかった場合、後ろで話したり、笑ったりしてもらう。従来研究でよく用いられる ESC-50 の総時間数やファイル数と比較して、大変少量データであることがわかる。

2.2. 観測された環境音

Table 2 は音声対話システム周辺で観測された環境音とラベルについてまとめたものである。環境音としてはラベル毎にその音が継続しているだけ切り出す。学習・識別実験を行うときは長さを 5 秒に合わせている。5 秒より短いデータに関しては、0 詰めをして時間を合わせている。

Table 2 The kinds of labels for the observed ambient sounds.

ラベル名	詳細	ファイル数
bloom	掃除する音	20
footstep	足音	15
vm	自動販売機の音	17
chair	椅子を引きずる音	30
ms	金属音	11
door	自動ドアが開く音	20
conversation_far	遠くで会話している声	23
conversation_near	対話システムに向けての声	60
laugh	笑い声	17
trash	ごみ捨てる音	11
voice	音声対話システムの声	92

Fig. 1 は bloom (掃除する音), Fig. 2 は voice (音声対話システムの声)のラベルを割り当てた環境音である。図中の上側は対象の音声波形になっており、下側はそのサウンドスペクトログラムを表している。

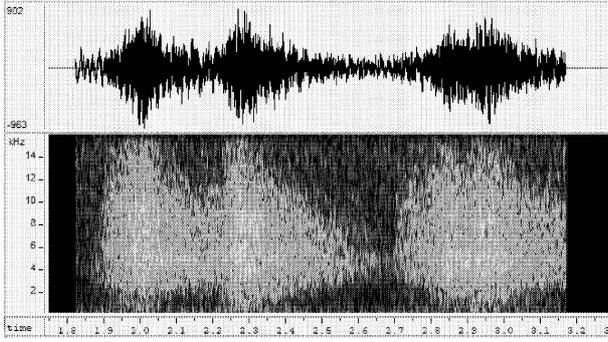


Fig. 1 The example of the ambient sound, “bloom”.

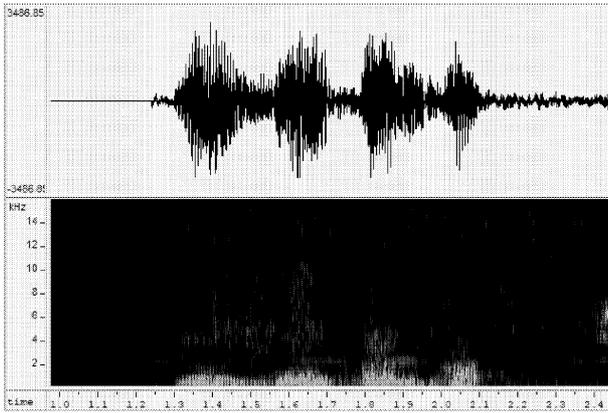


Fig. 2 The example of the ambient sound, “voice”.

3. Convolutional Neural Network (CNN)

畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) [7]は、画像認識や音声認識の分野で広く使われている。Fig. 3 に、CNN の構造を示す。CNN は、畳み込み層とプーリング層、全結合層の三つの層で構成される。

畳み込み層では、畳み込み演算を行い局所的な特徴を抽出する。Fig. 4 に畳み込み演算の処理を示す。畳み込み演算とは、入力データに対してカーネルと呼ばれるフィルターのウィンドウを一定の間隔でスライドさせながら適用させていく演算である。それぞれの場所でカーネルと入力の対応する要素を乗算し、その和を求める。この計算をすべての入力に対して行うことで、入力データの局所的な特徴量として出力することができる。

プーリング層では、縦・横方向の空間を小さくする演算を行い、入力データをより扱いやすい形に変形する。プーリングには、Max プーリングと Avg プーリングの2種類がある。Max プーリングは、単純にデータの最大値を特徴として抽出する。Avg プーリングは、データ内の平均を取ったものを抽出する。Fig. 5 に Avg プーリングの処理を示す。この処理を行うことで、入力データに小さなズレがあった場合でも同じような結果を得るこ

とができる。その為、入力データの微小なズレに対して堅牢性 (ロバスト) を保つことが出来る。畳み込み層とプーリング層は何度か繰り返す行い、最後に全結合層で結果を結合し出力する。本論文では、Avg を使用して実験を行う。

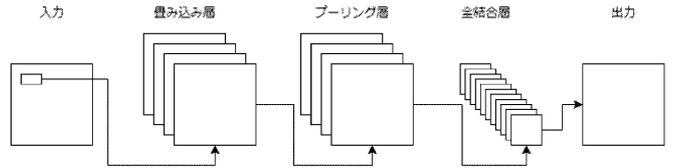


Fig. 3 CNN.

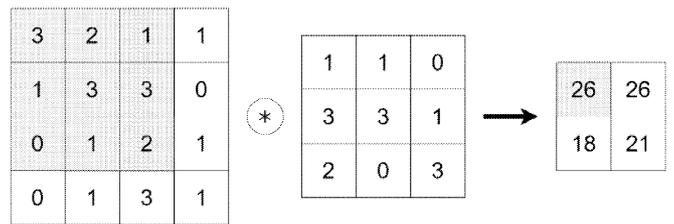


Fig. 4 The convolution operation.

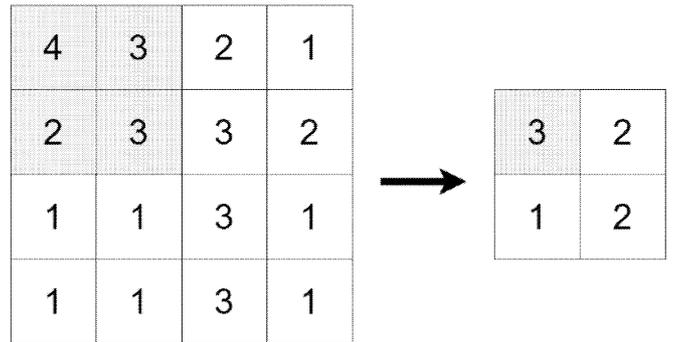


Fig. 5 The average pooling.

4. CNN を用いた識別実験

4.1. 実験内容

収録された環境音から、ラベル付けされた 11 種類の環境音で識別実験を行う。これらの環境音を識別することで、音声対話システム周辺の空間の状況把握や音声対話システムに対しての呼びかけについて認識することが可能になる。本来であれば、複数の環境音が含まれている状況でそれぞれの環境音について識別する技術も必要だが、本研究では、単一の環境音を抽出して分類するという検討のみ行う。

まず、録音データを分析し、手動でラベル付けされたデータを元に環境音を抽出する。そして、環境音の時間を一定に調整する。本研究で識別する環境音の最長時間は、5 秒弱であったため、各環境音データを 5 秒に調整して実験を行う。

調整する方法として、2通りの実験を行い、結果を比較する。1つ目は、環境音の前後を切り出して、5秒に調整する方法である。2つ目は、対象の環境音のみを抽出し、その前後に無音区間(0で埋める)を付与することで5秒に調整する方法である。

4.2. 共通の実験条件

Table 3は、実験条件の共通項目についてまとめたものである。収録時に96kHzだったサンプリング周波数を32kHzにダウンサンプリングして用いた。量子化ビット数は16bitであった。音声特徴量は、メルスペクトログラムを用いた。音声データに短時間フーリエ変換を施し、メルフィルタバンクを適用した特徴量であり、人間の聴覚特性に合うように変換したものである。検証方法にはK分割交差検証を用いた。収録されたデータをK個に分割して、そのうちの一つをテストデータとして使い、残りのK-1個を訓練データとしてモデルの学習を行う。今回の実験では、K=5とした。まず、4個の訓練データで学習をしたモデルを作る。次に、作成したモデルでテストデータに対して精度を出す。これを、5回繰り返し精度の平均値を正解率とする。

Table 3 The common items of experimental conditions for all experiments in this paper.

環境音データ	収録時： 96 kHz サンプリング周波数 実装時： 32 kHz サンプリング周波数 量子化ビット数：16 ビット 時間：5 秒
ソフトウェア	Python ver.3.6.5 PyTorch ver.1.10
音声特徴量	メルスペクトログラム
検証方法	K-分割交差検証(K-Fold Cross Validation)
活性化関数	ReLU 関数

Fig. 6は、今回の実験で使う共通のCNNの構造を示したものである。今回、実験で使用するCNNのモデルは6層の畳み込み層で構成されている。各畳み込み層は、3×3のカーネルサイズを持った2個の畳み込みブロックで構成されており、各畳み込みブロックの間にはバッチ正規化を適用し、ReLU関数を使用している。また、各畳み込み層の間に2×2のサイズの平均プーリングを適用している。今回このモデルを使用した理由は、5節で行う実験において、公開されている学習済みのモデルを利用する為である。

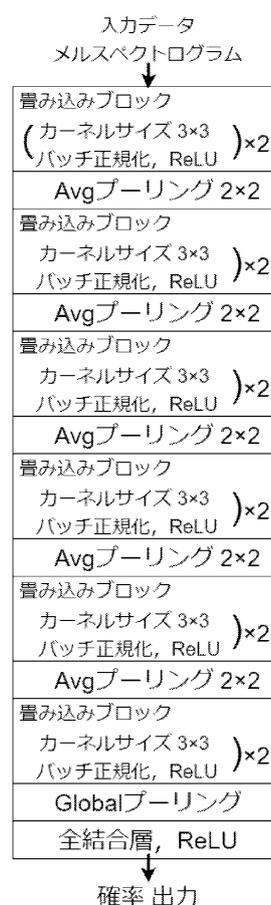


Fig. 6 The structure of CNN.

4.3. 実験結果

Fig. 7は、環境音の前後5秒をそのまま切り出した場合と対象の環境音を無音で5秒に調整した場合の正解率をまとめたグラフである。2つを比較すると環境音の前後5秒をそのまま切り出した場合よりも無音で5秒に調整したほうが13.06%高いということが分かる。恐らく、対象の環境音の前後に他のラベル付けされているデータが含まれていたため正解率が高くならなかったのではないかと考えられる。

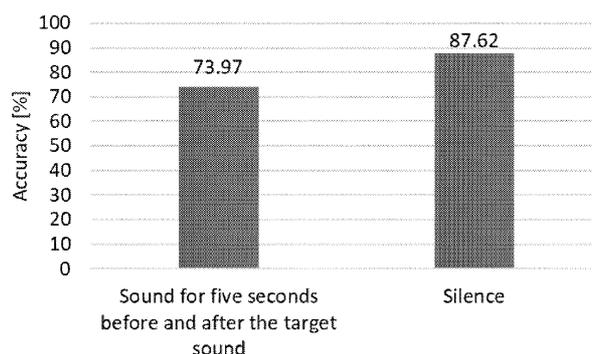


Fig. 7 Accuracy rates for the two types of added sounds.

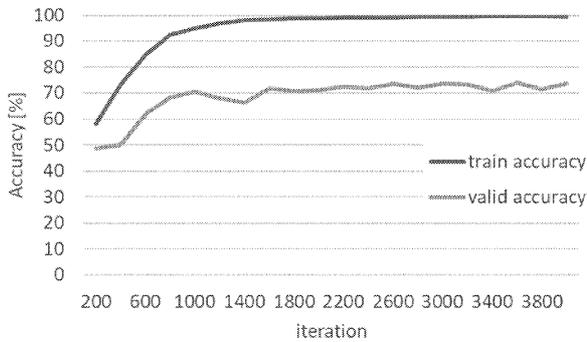


Fig. 8 Learning curves for adding 5-second sounds.

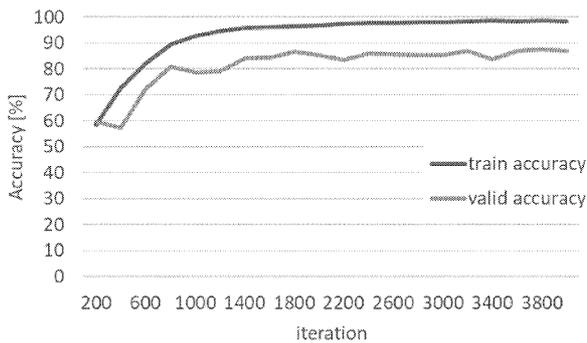


Fig. 9 Learning curves for adding silence.

Fig. 8, 9 は、学習データと検証データそれぞれに対しての学習回数に対する正解率の変化を表したグラフである。どちらの結果も学習データの正解率は高くなっているが検証データに対しての正解率はそれほど高くなっていない。このことから、データ数が少ないために学習不足を起こしていると言える。このことから、単純に利用できる学習データを用いて CNN を学習させるだけでは、データ量によっては精度向上が困難な場合があることがわかる。少量データでも、精度の高いモデルを得る方法を検討する必要がある。

5. 転移学習とファインチューニングによる検討

5.1. 少量データで高い精度を得るための手法

少量データで CNN の学習を行う場合、統計的には出現頻度の少ない学習データに引っ張られ、偏ったデータを信頼してしまう可能性がある。そのため、未知のデータに対する精度が低下する。そこで、少量データで高い精度を得るために、既存の学習済みのモデルを再学習させる転移学習や、擬似的なデータを人工的に作成してデータを増やすデータ拡張という手法がある。

5.2. 転移学習

Fig. 10 は、転移学習(transfer learning)の概念図である。転移学習とは、「ある領域で学習済みのモデルを別の領域に役立たせる学習手法」である[3]。最終出力層に近い部分だけを学習し直し、入力層に近い部分の重みは固定する。これにより、既に別の領域で学習済みのため、新しいデータに対して殆ど学習せずとも最適な値を得ることができる。また、学習済みのモデルを転用することで、大量のデータと学習にかかる時間を削減することができる。ただし、学習済みのデータと似通ったデータであることが必要である。入力層やそれに近い層では、特徴量抽出に重きを置かれていると考えられるため、似通ったデータであれば、同様な処理が利用できる。

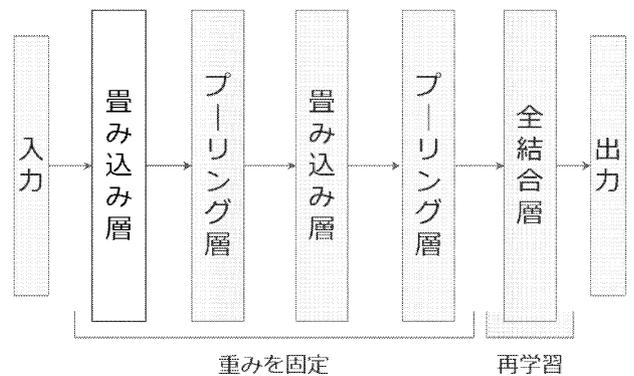


Fig. 10 The concept of transfer learning

5.3. ファインチューニング

ファインチューニング(fine-tuning)とは、「学習済みのモデルをベースに重みの微調整を行う学習手法」である[4]。転移学習では、最終出力層に近い部分だけを学習し直していたが、ファインチューニングでは全ての層を再学習する。ファインチューニングは、元々は多層化されたニューラルネットワーク(Deep Neural Network, DNN)の学習を実現化するため、まず、プレトレーニングと呼ばれる、一層ごとに学習を行い、その後、学習済みの層をまとめた後に DNN 全体を再学習させることを示していた。通常の学習では、重みの初期値を乱数で決める。しかし、ファインチューニングでは、重みの初期値が最適な値に近い状態から学習を始めるので、新しいデータに対しても最適な値を推定しやすいと言える。ただし、全ての層を再学習するため転移学習よりも学習時間が長くなるというデメリットがある。

5.4. 実験に使用する学習済みデータ

今回の実験では、大規模なデータセットである AudioSet[8]で学習済みである PANNs (Pretrained Audio Neural Networks) [9]というモデルを使用して行う。PANNs で学習に使用された AudioSet の構成についてまとめたのが Table 4 である。

Table 4 AudioSet.

環境音データ	1,934,187 個
クラス数(環境音種類数)	527
1 ファイルあたりの再生時間	10 秒
サンプリング周波数	32kHz

AudioSet に含まれる環境音データは、YouTube の動画から抽出されている。YouTube にアップロードされている環境音データのほとんどがモノラルでサンプリング周波数が低いため、全ての環境音データをモノラルに変換し、サンプリング周波数を 32kHz にリサンプリングされている。

5.5. 転移学習とファインチューニングの比較実験

収録された環境音から、ラベル付けされた 11 種類の環境音(2.2 節)に対して転移学習とファインチューニングを行い識別実験する。実験条件は 4.2 節で Table 3 と同じである。使用する実験データに関しては、4.3 節の結果より、無音で 5 秒間に調整する方の精度が良いと分かったのでそのデータを用いて学習させた。

Fig. 11 は、CNN のモデルをはじめから学習させた場合と転移学習させた場合とファインチューニングを行った場合の正解率をまとめたグラフである。転移学習が最も精度が低く 36.78%、精度が高いのは、ファインチューニングで 91.42%であった。転移学習が最も低かった理由として、AudioSet に含まれていたデータと本学で取れた環境音との差が大きかったのではないかと考えられる。ファインチューニングでは、初期値を乱数で学習させた場合よりも 2.22%精度が高くなるということが分かった。恐らく、最終層だけでは、うまく特徴を学習することができなかったが、再度すべての層を学習することでうまく特徴を学習できたのではないかと考えられる。

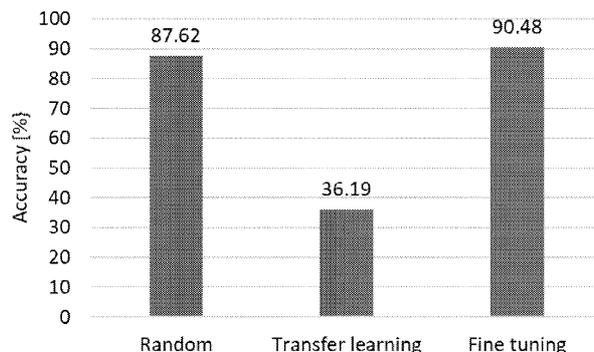


Fig. 11 The results for transfer learning and fine tuning.

6. データの拡張による実験

6.1. 音に対してのデータ拡張

本節では、学習データ増加だけではなく、様々な状況でも正確に識別できるように過学習の抑制とロバスト性を高めるためのデータ拡張について検討する。データ拡張とは、既存のデータに対して様々な変換を施したデータを使うことでデータ数を水増しするという手法である。元々は画像認識の研究で提案された考え方であり、画像を回転させる、拡大縮小する、左右に平行移動するといった様々な手法が検討されている。

音に対してのデータ拡張にも様々な手法が存在する。本研究では、ガウスノイズ付加、タイムシフト、Mixup[10]、Between-class Learning[11]を検討する。

- (1) ガウスノイズは信号のデータ点が正規分布(ガウス分布)を持つノイズのことである。環境音に予期せぬノイズが入った時を想定して CNN により重要な特徴量を抽出させるよう学習させられる。
- (2) タイムシフトは環境音の始まりを前後に動かす処理である。学習データに存在しない開始時刻での環境音を模擬できる。
- (3) Mixup は 2 つの学習データを混ぜ合わせた新たな学習データを生成する方法である。2 つのランダムで選ばれたデータとラベルである (x_i, y_i) および (x_j, y_j) から新たな学習データ (\hat{x}, \hat{y}) を作成する。この時、 (\hat{x}, \hat{y}) は下記式で表される。ラベル y_i, y_j は one-hot ベクトルで表現される。データを混ぜ合わせる比率として、ベータ分布 $Beta(a, b)$ から $\lambda \in [0, 1]$ を取得して用いる。

$$\hat{x} = \lambda x_i + (1 - \lambda) x_j$$

$$\hat{y} = \lambda y_i + (1 - \lambda) y_j$$

- (4) Between-class (BC) Learning も Mixup 同様、2 つの学習データを混ぜ合わせる手法。異なるクラスの異なる 2 つのデータを混ぜ合わせる。異なるクラスのデータを混ぜることにより、中間クラスがで

きて過学習が起こりにくくなる. 新たに作成される (\hat{x}, \hat{y}) は次式で表される.

$$\hat{x} = \frac{px_i + (1-p)x_j}{\sqrt{p^2 + (1-p)^2}}$$

$$p = \frac{1}{1 + 10^{\frac{G_i - G_j}{20}} \cdot \frac{1-r}{r}}$$

$$\hat{y} = ry_i + (1-r)y_j$$

ここで, G_i, G_j は音圧レベル[dBA]を表し, 合成比率 r は一様分布 $U(0,1) = \text{Beta}(1,1)$ で表される.

6.2. データ拡張したときの比較実験

収録された環境音から, ラベル付けされた 11 種類の環境音に対してデータ拡張を行い, 識別実験する. データ拡張を行ったデータで識別を行うことで, 少量のデータでの精度向上と過学習の防止をする. ただデータ拡張をしたデータで学習させるだけではなく, 転移学習させた場合とファインチューニングをした場合でも実験を行い, 比較を行った.

BC Learning において, ラベル「conversation_far」と「conversation_near」は話し声という点で似ているため, 合成されないように調整を行った. また, BC Learning での学習を行う際には損失関数に Kullback-Leibler Divergence (KL-divergence) を用いた.

Table 5 は実験条件とそれぞれの実験で使ったファイル数をまとめたものである. 実験では, 初期値乱数で学習させた場合, 転移学習させた場合, ファインチューニングを行った場合の 3×12 通りの 36 通りの実験を行い, 結果を比較した. また, それぞれの実験は 5 回ずつ行いその平均を取った. Mixup と BC Learning に関しては学習データにのみ拡張を行い, ガウスノイズとタイムシフトに関しては, 学習データと評価データ両方に拡張を行った.

6.3. 実験結果

すべての結果を掲載することは困難であるので, 5 節までの結果も合わせ, 学習方法とデータ拡張で最も結果の良い組み合わせを取り出し, Fig. 12 に示す. 最も精度が高かったのは, ガウスノイズ+タイムシフト+BC Learning でデータ拡張し, ファインチューニングを実施した場合で, 正解率は 97.46% を得た. 初期値乱数での 87.62% と比較すると, 約 10 ポイントの大きな精度向上を実現することが出来た.

Table 5 Experimental conditions and the number of files.

実験条件	ファイル数
データ拡張なし	316
ガウスノイズ	632
タイムシフト	632
ガウスノイズ+タイムシフト	948
Mixup	316
BC Learning	316
ガウスノイズ+Mixup	632
ガウスノイズ+BC Learning	632
タイムシフト+Mixup	632
タイムシフト+BC Learning	632
ガウスノイズ+タイムシフト+Mixup	948
ガウスノイズ+タイムシフト+BC Learning	948

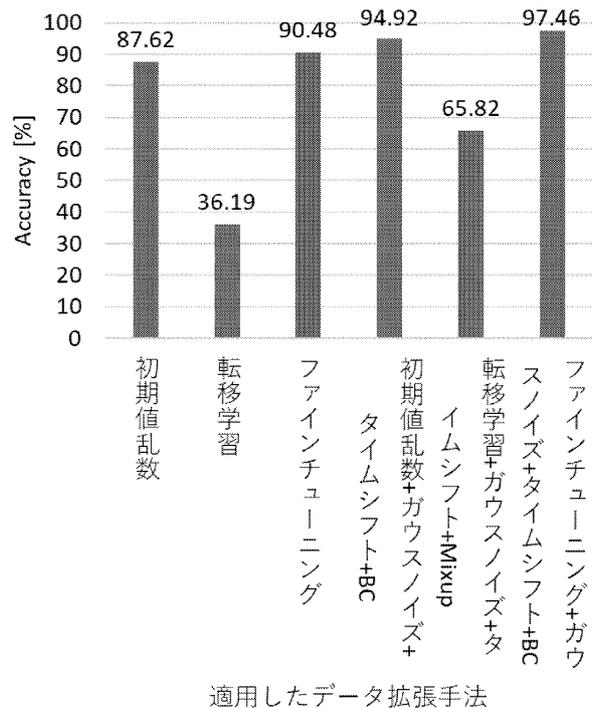


Fig. 12 The accuracy rates of several methods.

7. おわりに

本研究では, 少量のデータであっても学習のさせ方を工夫し, 環境音の認識精度をできるだけ高くする手法を検討した.

対象とする環境音は, 本学ホール棟で昨年度収録

されたもので、収録された時間は 6 時間と少量であった。その環境音にラベリングを行った結果、11 種類の環境音、316 個のファイルを集めることができた。

識別モデルには、Convolutional Neural Network (CNN)を用いた。識別対象の音の長さは 5 秒に固定したが、収録された環境音の最長が 5 秒弱だったため、5 秒に調整して行った。この時、データを 5 秒に調整する方法として、5 秒をそのまま切り出す方法と対象の音だけを切り出し、0 詰めで 5 秒に調整する方法の 2 パターンの実験を行った。結果としては、環境音の前後 5 秒を切り出した場合は正解率 73.97%と低く、0 詰めで調整した方が正解率は 87.62%と精度が高くなるということが分かった。しかし、データ数が少ないためか、学習データに対しての正解率は高く、評価データに対しての正解率は低いという過学習を起こしていることが分かった。

過学習を抑えるために、まず、少量データの学習に適していると言われる転移学習およびファインチューニングをそれぞれ行ったモデルで識別する実験を行った。学習済みのモデルとして PANNs というモデルを使用した。これは、AudioSet という 1,934,187 個の環境音で学習済みのものである。結果として、転移学習では正解率が 36.78%と最も低く、最も正解率が高かったのはファインチューニングで正解率は 90.48%だった。これにより、学習済みのモデルで再学習させることはある程度の精度向上の効果があることが分かった。しかし、転移学習では当初の問題であった過学習を抑えることはできなかった。

次に、データを人工的に増やすデータ拡張を検討した。音を変形することでデータを拡張するガウスノイズ付加とタイムシフト、音を合成することでデータを拡張する Mixup、Between-class Learning を検討した。また、それぞれのデータ拡張技術にどれほどの効果があるのか確かめるために、36 通りの組み合わせで実験を行った。この中で、最も正解率が高かったのはガウスノイズ付加、タイムシフト、Between-class Learning を施した状態でファインチューニングを行うことで正解率は 97.46%であった。音を変形するデータ拡張はそれ単体で精度の向上に寄与していた。音を合成するデータ拡張は単体では精度はそれほど上がらなかったが、音を変形するデータ拡張と組み合わせることのできる効果が出た。これは、音を合成するためデータ数が少ないと合成する組み合わせも少なくなってしまうためあまり効果が出なかったのだと考える。データ拡張を施すことで、過学習を抑えながら精度の向上をすることができた。

今後の課題としては、実際に音声対話システムで動かした場合の評価があげられる。今回の実験では、認識対象には、単一の環境音のみが含まれるとしたデータを用いた。ただ、実際の環境では、複数の音が同時に becoming することが十分にあり得る。その為、今回作成したモデルを実際の環境で動かし、どのような精度が得られるか評価する必要がある。

参考文献

- [1] 丸山巧, “音声対話システム周辺の環境音の認識とシーン推定に関する研究”, 愛知工科大学 2019 年度卒業論文, 2020 年
- [2] 都築亮登, “Deep Neural Network を用いた音声対話システム周辺の環境音識別”, 愛知工科大学 2020 年度卒業論文, 2021 年
- [3] Sinno Jialin Pan and Qiang Yang, “A survey on transfer learning,” *IEEE Transactions on, Knowledge and Data Engineering*, 22(10):1345-1359, 2010.
- [4] G. E. Hinton and R. Salakhutdinov, “A better way to pretrain deep Boltzmann machines,” *Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems 25*, pp. 2447-2455, 2012.
- [5] 矢野正基, 大賀隆裕, 大西正輝, “深層学習を用いた画像識別タスクの精度向上テクニック”, *電子情報通信学会論文誌 D*, vol. J102-D, no.2, pp. 34-52, 2019 年
- [6] K. J. Piczak, “ESC: Dataset for Environmental Sound Classification,” in *Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia*, pp. 1015-1018, ACM, 2015.
- [7] 斎藤康毅, “ゼロから作る Deep Learning”, pp.205-221, (株)オライリー・ジャパン, 2016 年
- [8] J. F. Gemmeke, D. P. Ellis, D. Freedman, A. Jansen, W. Lawrence, R. C. Moore, M. Plakal and M. Ritter, “Audio Set: An ontology and human labeled dataset for audio events,” in *IEEE ICASSP*, 2017.
- [9] Qiuqiang Kong, Yin Cao, Turab Iqbal, Yuxuan Wang, Wenwu Wang and Mark D. Plumbley, “PANNs: Large-Scale Pretrained Audio Neural Networks for Audio Pattern Recognition”, in *IEEE*, 2019.
- [10] H Zhang, M Cisse, YN Dauphin and D Lopez-Paz, “Mixup: Beyond Empirical Risk Minimization”, in *ICLR*, 2017.
- [11] Y. Tokozume, Y. Ushiku and T. Harada, “Between-class Learning for Image Classification,” in *CVPR*, 2018.

研究論文

ノッチフィルタの中心周波数が広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響

山高 正烈*, 坂本 修一**, 鈴木 陽一***

(2022年9月30日受理)

Effects of center frequency of notch filters on sound localization of broadband noise

Zhenglie CUI*, Shuichi SAKAMOTO**, Yôiti SUZUKI**

(Received September 30, 2022)

Abstract

The perception of the position of sound sources is called sound localization. The spectral shape of the head-related transfer function plays an important role in sound localization, particularly in the median plane. On the other hand, the timbre of sound is also closely related to their frequency spectrum. Interestingly, humans can separately perceive both the timbre and position of sound sources even though the frequency spectrum of a sound reaching the listener's each ear is a mixture of both frequency spectra. Our previous studies reported that listeners can detect one of the spectral notches in the HRTF, known as N1 and commonly centered around 7 kHz, by the changes it causes on the perceived timbre. In this study, we investigated the influence of the N1 on sound localization when the center frequency changed. Results shows that the influence of the center frequency deviation of N1 on the sound localization is small.

キーワード: 音空間知覚, 頭部伝達関数, 音像定位, 知覚手がかり

Keywords : Spatial hearing, HRTF (head-related transfer function), Sound localization, Perceptual cue

1. はじめに

人間の両耳に到達する音信号には、音源からの直接音だけでなく反射音や回折音等が含まれており、耳介周りの外耳道や耳甲介腔による共振も生じる[1]. このため、両耳で観測される音の周波数スペクトルは音源の相対方向に応じて変化する. この周波数スペクトルの変化を伝達関数として表現したものを頭部伝達関数(HRTF: head-related transfer function[2])と呼ぶが、頭部伝達関数は音像定位[3]の重要な手がかりとなっている. 特に、両耳に入力される音の時間差や強度差がほとんどない正中面や、その変化があまりない矢状面上 (cone of confusion [4]) に位置する音源の音像定位については、頭部伝達関数のスペクトル形状が非常に重要な知覚手がかりとされている (以降、スペクトラルキュー呼ぶ).

一方、人間は音を聞く際に、音の方向のみならず音色も同時に知覚できる. 音色とは、音源が何であるかを認知するための手がかりとなる特性であり、音を聞いた主体が音から受ける印象の諸側面の総称と定義される[5]. 音色の知覚は、主に音の周波数特性が影響しており、音源の周波数スペクトルによって変化する[6][7]. このように、人間の耳に入力される音信号は、音色の手がかりと音像定位の手がかりが混在した状態であり、両方とも耳入力信号の周波数特性が手がかりであると考えられている.

ところで、耳入力信号の周波数特性が音色の知覚と音像定位両方の手がかりとなっている中で、例えば、ある人の声の方向によって音色が変わって聞こえたり、若しくは、聞き慣れない音の到来方向が分かり難くなったりする等の現象が起こってもおかしくない. しかし、人間は音色と音像の双方を明確に知覚することが

* 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 Information, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

** 東北大学電気通信研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

*** 東北文化学園大学, 〒981-8551 仙台市青葉区国見 6-45-1

可能であり、音の方向が変わっただけで別の音色に聞こえることを日常生活で経験することはないであろう。即ち、人間は日常的に耳入力信号から音色の情報と音像位置の情報を何らかの仕組みで切り分けて知覚し、それぞれの情報を別々に利用していると考えられる。この機序を解明することは、頭部伝達関数に含まれる音像定位の手がかり、スペクトラルキューを調べる上で有用な知見になると言える。

先行研究を俯瞰すると、音色弁別のスペクトラルキューについては従来から研究が行われ、いくつかの知見が示唆されている。例えばMooreら[8]は、仰角によって系統的に変化する頭部伝達関数の 7 kHz付近に現れるノッチ(N1)や、ピーク(P1)に着目し、広帯域雑音に長方形のスペクトルノッチN1 またはピークP1 を課し、N1 やP1 の中心周波数の変化を識別するための閾値を測定した。その結果、中心周波数の帯域幅が増加するにつれ、N1 の検出率が改善し得ることが示唆された。我々の先行研究[9-11]では、広帯域雑音中に付加したN1 ノッチフィルタの帯域幅や中心周波数を系統的に変化させ、それに対応する音色変化の検知限と聴取者自身の頭部伝達関数を比較することで、音色と音像定位のスペクトラルキューについて検討した。その結果、N1 の中心周波数の変化は音色の変化としては知覚され得るが、仰角方向の音像定位に充分寄与するとは言えないことが示された。また、これらの先行研究[9-11]において、音色の弁別が充分可能なノッチ幅を実験条件として設けた問題点を踏まえ、新たに狭いノッチ幅を実験条件として設定し、N1 中心周波数の偏移が音色の弁別にどのような影響を及ぼすかを調べた[12]。その結果、中心周波数の偏移よりも、N1 の帯域幅自体が音色弁別のスペクトラルキューとなり得る可能性が示唆された。

このように、音色のスペクトラルキューについてはいくつかの知見が示されつつあるが、正中面音像定位のスペクトラルキューについては未だに明らかにされていない。過去の研究では、2 kHz以上の周波数帯域における頭部伝達関数の概形を再現すれば高精度の音像定位が可能であり、そのスペクトラルキューとして仰角によって系統的に変化する複数帯域のレベル差が示唆されている[13]。また、仰角によって系統的に変化する 7 kHz付近に現れるノッチがスペクトラルキューであるという報告もなされている[4]。しかし、聴覚系における周波数分析機構を司る聴覚フィルタの特性を考慮すると、N1 のように鋭いスペクトル上のノッチは、元の形状よりもはるかに緩やかで浅い興奮パターンを示すと考えられる[14]。したがって、音像定位の手がかりはN1 そのものの形状やその変化ではなく、聴覚興

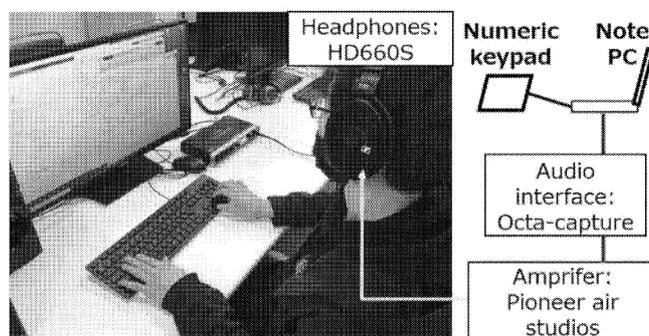


Fig.1 Experimental setup

奮パターンの形状にあるとも考えられる。実際、頭部伝達関数の 2 kHz以上の帯域を平滑化しても音像定位が可能であるという報告や[13]、8 kHzを中心とする 3/4 オクターブ中心周波数帯域において、それ以外の帯域とは仰角の変化に伴う帯域のレベルの変化が異なる様相を呈することを示した報告もなされている[15]。

以上のように、正中面音像定位の工学的制御にノッチN1 が重要であることは明らかであるが、それに起因する聴覚興奮パターン上のスペクトラルキューが何なのかについては統一的な理解が得られていない。そこで本研究では、これら先行研究の知見を踏まえ、頭部伝達関数の周波数スペクトル上に顕著に表れるN1 を模擬したノッチをピンクノイズに付加し、ノッチの中心周波数N1 を広範囲にわたり変化させた場合、N1 の中心周波数の変化が仰角方向の音像定位知覚にどのような影響を及ぼすかを検討した。具体的に、実験 1 では高域ノッチN1 中心周波数について、実験 2 では低域ノッチN1 中心周波数について調べ、両者を比較・検討した。

2. 実験1(高域ノッチ中心周波数条件)

2.1 目的

実験 1 では、ピンクノイズにN1 を模擬した反共振形ノッチを付加し、その中心周波数を 7 kHzから大きく増加させた場合、N1 の中心周波数が音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。

2.2 聴取者と実験環境

正常な聴力を有する、20 代の成人男性 8 名が聴取実験に参加した。実験環境の概略をFig.1 に示す。実験は愛知工科大学の実験室で行った。音の提示には、オーディオインターフェース(Roland, Octa-capture)と耳介開放型ヘッドフォン(SENNHEISER,

HD660S)を用いた。

2.3 実験刺激

実験は、2つの音を連続して提示し比較する方法で実施した。以降、2つの音について、先に提示する音を参照音、後に提示する音を比較音と呼ぶ。音刺激は、参照音と比較音ともに、周波数が1オクターブ増加するごとにパワーが半減する特徴を持つピンクノイズにノッチを加えて生成した。ノッチフィルタ[16]の帯域幅と深さは参照音と比較音で共通しており、帯域幅は0.5 ERBと3.0 ERBのいずれかで、深さは20 dBの値を用いた。

中心周波数(f_0)については、参照音と比較音で異なる値を用いており、参照音では実験を通じて $f_0 = 7$ kHzで固定した。比較音には5種類の値を用いた。1つは参照音と同一の中心周波数 f_0 で、 f_0 から2 ERBずつずらし、それぞれ($f_0 + 2$) ERB, ($f_0 + 4$) ERB, ($f_0 + 6$) ERB, ($f_0 + 8$) ERBの値を用いた。以下、N1ノッチフィルタを例に、フィルタの設計について説明する。設計に当たっては、 g , r , ω_0 をパラメータとした式(1)で表される2次のIIRフィルタを用いて反共振ノッチフィルタを作成した。ここで f_n , G_c , G_n , B は、それぞれ中心周波数[Hz], 帯域幅を定めるカットオフのレベル[dB], ノッチの深さ[dB], G_c における帯域幅[Hz]を表す。なお、 f_s はサンプリング周波数である。深さ G_n は-20 dB, 帯域幅はノッチ両側の平坦な帯域のレベルから-3 dB低下する周波数間の値であり、+1.5 ERBに固定した。作成した刺激の形状をFig.2に示す。

$$H(z) = \frac{1-2rcos\omega_0z^{-1}+r^2z^{-2}}{1-2\frac{g}{r}cos\omega_0z^{-1}+\frac{2g-1}{r^2}z^{-2}} \quad (1)$$

$$g = \frac{1}{1+tan\left(\frac{B_0}{2}\right)\frac{\sqrt{1-A_c^2}}{A_c}}$$

$$r = 1 - A_n \frac{B_0}{\pi}, \quad \omega_0 = 2\pi \frac{f_n}{f_s}$$

$$A_c = 10^{\frac{-G_c}{20}}, \quad A_n = \frac{1}{A_c} 10^{\frac{-G_n}{20}}, \quad B_0 = 2\pi \frac{B}{f_s}$$

2.4 実験手続き

実験では、参照音と比較音をランダムな順に0.5秒間隔で連続して提示した。これを1試行とし、1セッションに40回行い、計4セッション(40×4=160試行)実施した。4セッション中に、参照音と異なる4種類の比較音を各20試行ずつ提示し、残りの80試行は各セッションで20試行ずつ、参照音と同一の比較音を用いた。これは、実験を通していつも異なる刺激が提

示されるとの知覚バイアスをなくすためであった。被験

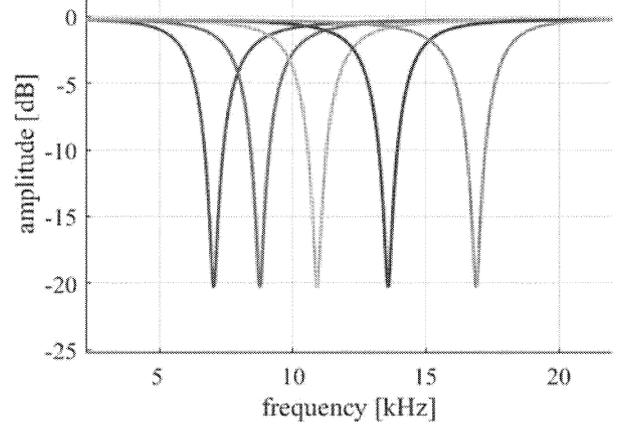


Fig.2 N1 notch filter for high frequency

者には、最後に提示した音が前の音と比べて仰角方向の音像定位の偏移が上下どちらに変化したかを、マウスの上下ボタンを押して判断させた。

2.5 実験結果

各被験者ごとに、参照音に対し比較音が上方に偏移したと判断した割合を算出し、Fig.3に示す。図から、N1の帯域幅を3 ERBで固定した条件のもと、中心周波数を先行研究[12]よりも偏移量の大きい2~8 ERB偏移させた場合においても、被験者全員の弁別閾が50~60%水準で推移していることが見て取れる。即ち、すべての被験者が仰角方向の音像定位ができていなかったと考えられる。このことから、先行研究[12]で示された帯域幅3 ERB条件下において、中心周波数が7 kHzから約6 ERB以上偏移しても、正中面音像定位に影響を及ぼさないことが示唆される。

3. 実験2(低域ノッチ中心周波数条件)

3.1 実験目的

実験1の結果から、ノッチN1の中心周波数の偏移量を、7 kHzを基準に大きく変移させても仰角方向の音像定位に影響を及ぼさないことが分かった。即ち、高域ノッチ中心周波数の偏移は音像定位に影響を及ぼさないことが示された。そこで実験2では、人間の肩から反射して両耳に入る音信号が概ね1~2 kHz付近であることを考慮し、ノッチN1の中心周波数を1 kHz付近に設定し、低域ノッチ中心周波数が音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。

3.2 実験内容

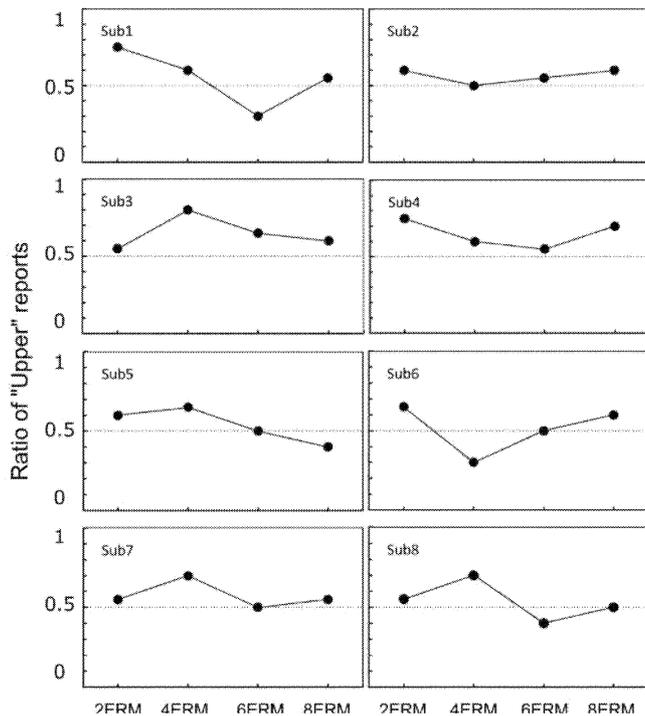


Fig. 3 Sound localization discrimination for high frequency band

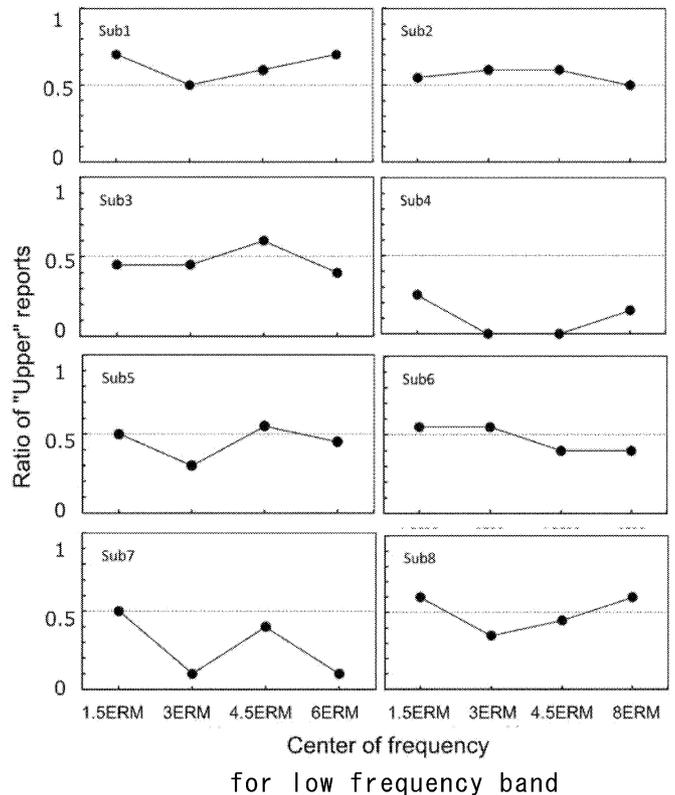
被験者と実験環境は実験1と同様であった。ただし、ノッチの中心周波数を、1 kHzを基準に1.5 ERBずつ6 ERBまで偏移させた。即ち、比較音は参照音と同一の中心周波数 $f_0=1$ kHzから、右方向に1.5 ERBずつずらし、それぞれ $(f_0 + 1.5)$ ERB, $(f_0 + 3)$ ERB, $(f_0 + 4.5)$ ERB, $(f_0 + 6)$ ERBと、計5条件を用いた。実験1と同様に、被験者には最後に提示した音が前の音と比べて音像定位の仰角方向の偏移が上下どちらに変化したかを判断させた。

3.3 実験結果

実験1と同様に、被験者ごとに、参照音に対し比較音が上方に偏移したと判断した割合を算出し、Fig.4に示す。図から、弁別閾が50~60%水準で推移している被験者群いる一方、実験1と異なり、被験者4や被験者7のように弁別閾が50%より大幅に低く、負の方向にシフトする被験者群もいることが見て取れる。

弁別閾が50~60%水準で推移している被験者群は、実験1と同様に仰角方向の音像定位ができていなかったと考えられる。即ち、音色弁別が充分可能なN1の帯域幅3 ERB条件下において、中心周波数が1 kHzから約6.00 ERB以上偏移しても、正中面の音像定位に影響を及ぼさないと考えられる。一方、弁別

閾が50%より大幅に低く、負の方向にシフトした被験



者群は、仰角方向の音像定位を「上」ではなく、「下」方向にシフトして定位していた可能性が考えられる。

4. 総合考察

実験1では、ピンクノイズにN1を模擬した反共振形ノッチを付加し、その中心周波数を7 kHzから大きく増加させた場合、N1の中心周波数が音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。実験結果、ノッチN1の中心周波数の偏移量を7 kHzを基準に大きく増加させても、仰角方向の音像定位に影響を及ぼさないことが分かった。この結果から、高域ノッチ中心周波数の偏移は、音像定位に影響を及ぼさない可能性が考えられる。

一方、実験2では、人間の肩から反射して両耳に入る音信号が概ね1~2 kHz付近であることを考慮し、ノッチN1の中心周波数を7 kHzから更に低い1 kHz付近に設定し、低域ノッチ中心周波数の偏移が仰角方向の音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。実験結果、実験1とは異なり、仰角方向の音像を「下」方向へと定位する被験者群と、仰角方向の音像定位自体が全くできていない2グループの被験者群が現れた。そのため、両者を2グループに分けて比較・検討した。

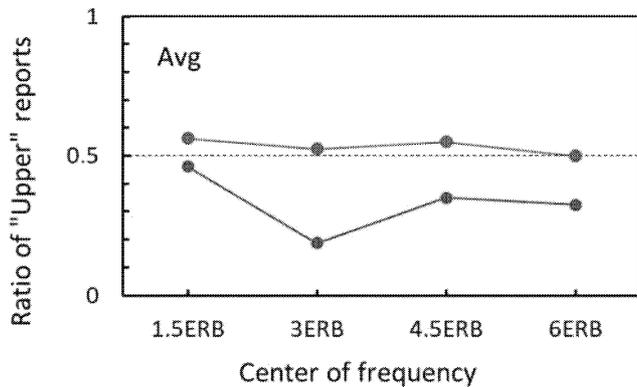


Fig. 5 Comparison for sound localization discrimination between two listeners group

音像を「下」方向に定位した被験者群と、音像定位が全くできていない被験者群に分けてその平均割合を算出し、各実験条件ごとにFig.5 に示す。図の下線は音像を「下」方向に定位した被験者群の平均値であり、上線は回答率が 50～60%と音像定位が全くできていないと思われる被験者群の平均値である。

下線に着目すると、音像を「下」方向に定位した被験者群の場合、中心周波数の偏移幅が 3 ERBの時に「下」方向への判断率が 80%以上であり、中心周波数の偏移幅が 4.5 ERBと 6 ERBの場合においても 70%程度と常に高い値となっている。このことから、これらの被験者群においては、低い中心周波数帯域の偏移が、正中面音像定位のスペクトラルキューになり得る可能性が考えられる。

5. まとめ

本研究では、正中面音像定位のスペクトラルキューの解明を目指して、頭部伝達関数の周波数スペクトル上に顕著に表れるN1を模擬した反共振ノッチをピンクノイズに付加し、中心周波数を広範囲にわたり移動させながら、N1の中心周波数の偏移が仰角方向の音像定位にどのような影響を及ぼすかを検討した。具体的には、実験1では高域N1ノッチ中心周波数について、実験2では低域N1ノッチ中心周波数の影響について調べ、両者を比較・検討した。

実験1の結果、中心周波数が7 kHzから約6 ERB以上偏移しても、正中面音像定位に影響を及ぼさないことが分かった。実験2では、人間の肩から耳に入る音信号が1～2 kHz付近であることを考慮し、N1の中心周波数を1 kHzから1.5 ERBずつ偏移させた。実験結果、仰角方向の音像を「下」方向へと定位する被験

者群と、仰角方向の音像定位自体が全くできていない被験者群に分けられることが分かった。

両者を2グループに分けて比較・検討した結果、音像を「下」方向に定位した被験者群の場合、中心周波数を3 ERB以上偏移させた時に「下」方向の判断率 70%以上と高い値となった。このことから、これらの被験者群においては、低い中心周波数帯域の偏移が、正中面音像定位のスペクトラルキューになり得る可能性が考えられる。N1の中心周波数が1～2 kHz付近で見られるこれらの特徴から、低中心周波数帯域の偏移が、正中面音像定位に何らかの影響を及ぼしている可能性が示唆された。ただし、被験者群間に見られる、これら音像定位の様相の差異が何に起因するかは不明なままであり、今後被験者を増やして更に検討する必要がある。

また、低周波数帯域を含め、N1中心周波数の偏移が音像定位に及ぼす影響は限定的であった。今後は、N1の操作のみではなく、頭部伝達関数に広く現れるP1やN2を含めた幅広い特徴量を模擬して同様に検討を行い、正中面音像定位のスペクトラルキューの解明を目指したいと考えている。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費19H02396の助成を受けた。本研究の聴取実験にご協力いただいた愛知工科大学の橋本祐輝君に感謝する。

参考文献

- [1] E. A. G. Shaw, "Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane," J. Acoust. Soc. Am, vol.56, no.6, pp.1848-1861, 1974.
- [2] M. Morimoto and Y. Ando, "On the simulation of sound localization," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), vol.1, pp.167-174, 1980.
- [3] J. Blauert, "Spatial Hearing- The Psychophysics of Human Sound Localization," Revised edition (MIT Press, Cambridge, Mass.), 1996.
- [4] K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki and M. Morimoto, "Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues," Applied Acoustics, no.68, pp.835-850, 2007.
- [5] 日本音響学会, "音響用語辞典," コロナ社, 2003.

- [6] H. L. F. Helmholtz, "On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music," Translated by A. J. Ellis, 1954.
- [7] S. Namba, "Dimensions of timbre, in Diversity in harmony, insights from psychology," Proc. 31st Intl. Cong. Psychology, John Wiley & Sons, 2018, Part I, p. 145-163.
- [8] B. C. J. Moore, S. R. Oldfield and G. J. Dooley, "Detection and discrimination of spectral peaks and notches at 1 and 8 kHz," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 85, No. 2, 1989, p. 820-836.
- [9] 齋藤優一, 鈴木陽一, 坂本修一, "ノッチフィルタが広帯域雑音の音色弁別に及ぼす影響," 日本音響学会聴覚研究会資料, pp.77-82, 2016.
- [10] 日吉啓, 鈴木陽一, 坂本修一, "広帯域ノイズ中のノッチ中心周波数の偏位が音色と音像定位に与える影響," 電子情報通信学会技術研究報告, EA2018-44, pp.103-108, 2018.
- [11] 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, "ノッチフィルタが広帯域雑音の音像定位に及ぼす影響," 愛知工科大学紀要第18巻, pp.21-26, 2021.
- [12] 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, "頭部伝達関数におけるノッチ幅と中心周波数の偏移が音色知覚と音像定位に及ぼす影響," 愛知工科大学紀要第19巻, pp.19-24, 2022.
- [13] F. Asano, Y. Suzuki and T. Sone, "Role of spectral cues in median plane localization," J. Acoust. Soc. Am., no.88, pp.159-168, 1990.
- [14] 北島周, 鈴木陽一, 坂本修一, "周波数振幅スペクトル上のノッチによる音色変化の検出限と弁別限," 日本音響学会講演論文集, 2-P-9, pp.819-820, 2015.
- [15] 曲谷地哲, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, "仰角依存性の強い帯域のレベルを模擬した頭部伝達関数による正中面定位," 聴覚研究会資料, vol.42, no.1, pp.47-52, 2012.
- [16] 川浦純一, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 相馬次郎, "悪条件の伝達関数の逆特性推定のための新しい方法," 電子通信学会論文誌, J69-A, pp.914-917, 1986.

リハビリのための両側性転移に関する研究

～両側性転移における視覚情報の効果を評価するロボットシステム～

裴 艶玲*, 大日方 五郎**

(2022年9月30日受理)

The Study on Bilateral Transfer for Rehabilitation - A Robotic System to Evaluate the Effect of Visual Information in Bilateral Transfer-

Yanling Pei*, Goro Obinata**

(Received September 30, 2022)

Abstract

Robot-assisted bilateral movement training rehabilitation system is effective for post-stroke rehabilitation. In addition, rehabilitation with proprioceptive and rehabilitation with movement intention are also considered as increasing the rehabilitation effect. In this study, we investigated the effects of proprioception on subjects' active movement through a series of experiments under different conditions, such as simultaneous movement of both hands, while watching the movement of the presentation side or not, or non-simultaneous movements. The results show that better reproducing performance was obtained when the reproduction side moves after the movement of the presentation side.

キーワード: 固有受容性感覚, 能動的な運動, イメージトレーニング, リハビリ

Keywords: Proprioception, active movement, image training, rehabilitation

1. はじめに

脳卒中後の上肢運動麻痺の改善のため、麻痺腕を他動的に動かすことや筋肉に電気刺激を与えて動かすなどリハビリを受けている。Kidgellらは安静にしているとき、と意識的に軽く筋肉を収縮させた状態で同じ強度の磁気刺激を行い、安静のときと比べて筋電図の波形が大きくなることを示した。これは、事前に運動野から筋肉を軽く収縮させる電気信号が流れていたため、運動野や脊髄の感度が高くなっていたことを示している^[1]。そのため、脳卒中のリハビリにおいて、患者が運動意思を持ち、リハビリを行った場合、運動野や筋の受容器の感度が高くなって、リハビリの効果が高まると

考えられるため、本研究では患者のアクティブリハビリ運動に注目する。

Brian C. Clarkらは「長期間の筋使用抑制による筋力低下を、イメージトレーニングだけである程度予防できる」という研究結果を報告している^[2]。鏡像原理を利用し片麻痺患者の患肢をロボットアームにより健肢と対称な軌道をリアルタイムで他動的に動かすことで、左右脳の交差を通じて患肢の機能を回復させる^{[3][4]}。また、固有受容リハビリは、固有受容感覚信号とそれらの中枢統合を改善または強化することを目的としており、大脳基底核のゲーティング機能の障害を補う可能性がある。末廣らは「感覚入力・感覚受容とそれに伴う運動の変化について調べた^[5]。これらの事柄がどうリハビリに影響したかという研究は、Parkらは利き

* 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

** 名古屋産業科学研究所, 〒463-0003 名古屋市守山区大字下志段味字穴ヶ洞 2271-130

Nagoya Industrial Science Research Institute, 2271-130 Oaza-Shimosidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-003, Japan

手と非利き手のそれぞれに、運動の提示と運動の再現を行っていった^[6].

本研究は「両側性転移」と「固有感覚」の上、患者の運動意思を加え、脳卒中後のリハビリシステムを構築する。実験によって、被験者の意思に従って、両側性転移の効果を評価する。

2. 実験

2.1 被験者

被験者は、上肢に障害がない健康な右利きの 20 代男性 12 名、実験目的や研究内容は被験者が先入観や偏見を持たないようにするため一切知らせずに実験を行う。また本実験は被験者に対する実験手順の教示をあらかじめ作成し、それに沿って進めていくこととする。

2.2 実験環境

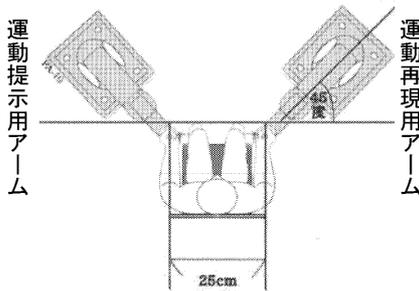


Fig.1 Configuration of the manipulator

本実験では、2 台のマニピュレータ(PA-10,三菱重工)を用い、二つ持ち手の距離は 25 cm であり、図 1 のように配置されている。被験者の左側が運動提示用アーム、右側が運動再現用アームとする。運動再現用アームには 6 軸力覚センサ、運動提示用アームには 3 軸力覚センサを取り付ける。2 種類の力覚センサはいずれのマニピュレータの場合も持ち手とエンドエフェクタの間に位置する。

2.2 座標系の定義

本実験では、手先座標を人間から見た座標系ではなく、運動再現用アームの初期姿勢の手先位置を中心とした座標系で示す。図 2 において、 Σ_h は被験者から見た座標系で、 Σ_t は運動再現用アームの初期姿勢の手先位置を中心とした座標系である。 Σ_t は Σ_h を 225 度回転させ、 X_h 方向に 12.5 cm、 Y_h 方向に 15 cm 平行移動させた座標系である。 Σ_h 、 Σ_t ともに右手系座標系である。S は実験の開始点、T は実験の目標

点で、S と T を結ぶ直線が目標軌道とする。開始点から目標点の適切な距離は PARK らが行った研究を参考にして 20 cm に決定した^[6]。20 cm は上肢が最大に伸びた長さではない。最大に伸ばした状態では肘・肩関節が極端な角度になるので、それを防がなければならない。また、Mark らによると、被験者が自分の上肢の長さの 90%以上のところに彼らの上肢が伸びた時に胴体が動き始めることを報告している^[7]。これを防ぐため、目標軌道の長さを 20 cm に設定した。

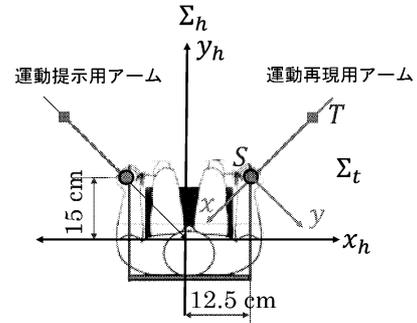
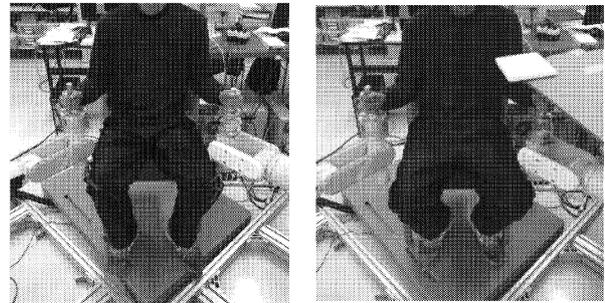


Fig.2 Coordinate system definition

2.3 実験内容



(a) 視覚情報ある (b) 視覚情報なし

Fig.3 State of the experiment

本研究では、「左側の運動提示用アームから提示させた運動を左手で感じて、その対称な運動を右手が能動的に運動を行い、できるだけ正確に再現する」実験を 3 種類行う。実験の様子を図 3 に示す。(a) は視覚情報あり、(b) は視覚情報を遮断した場合の様子である。本研究では、以下の 3 種類の実験を行う。

1. 「同時①」: 左側の運動提示用アームが見える場合の実験
2. 「同時②」: 左側の運動提示用アームを隠して見えない場合の実験
3. 「非同時」: 左側の運動提示用アームが目標点に到達した後に、右手でその動作を再現する実験

同時①、同時②の実験を行うことで、視覚情報の有

無が結果にどのような影響を与えるのかを実験的に調べる事ができる。また、両側性転移、固有受容の効果も調べる。なお、腕に残る感覚を減らすため、同時①と同時②は日にちを変えて実験を行う。非同時実験を行うことで、両側性転移の効果を実験的に調べる事ができる。被験者 12 名を 4 グループに分けて実験を行い、表 1 に各グループの試行順序を表す。

Table.1 Sequence of trial

グループ	試行順序	
	一日目	二日目
A1 (3 名)	同時①	同時②→非同時
A2 (3 名)	非同時→同時①	同時②
B1 (3 名)	同時②	同時①→非同時
B2 (3 名)	非同時→同時②	同時①

3. 実験結果

3.1 同時①と同時②

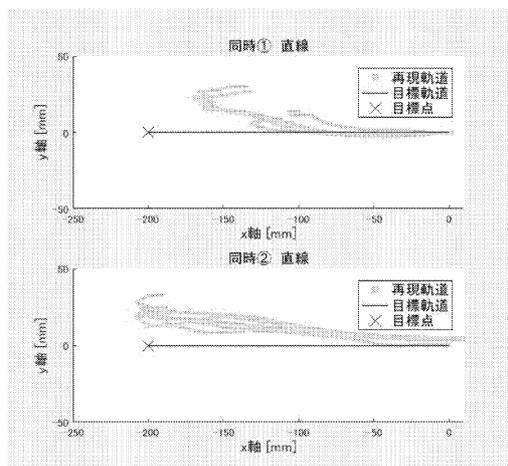


Fig.4 Simultaneous①, Simultaneous②reproduction trajectories

図 4 に同時①と同時②の条件で A1 グループの一人の被験者が 5 回試行した再現軌道を示す。横軸を手先座標の X 軸とし、縦軸を手先座標の Y 軸とする。同時①の実験を先に行い、同時②の実験を次の日に行った。

3.2 同時①と非同時

図 5 に同時①と非同時の目標軌道が直線の場合に A2 グループの一人の被験者が 5 回試行した再現

軌道を示す。

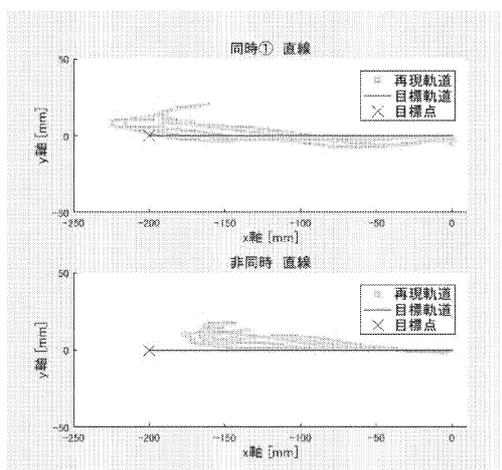


Fig.5 Simultaneous① and non-simultaneous reproduction trajectories

4. 実験結果の解析

4.1 解析方法

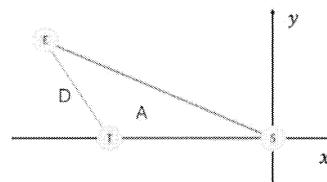


Fig.6 Variables for the motion reproduction

図 6 に手先座標を解析するのに使用する変数を示す。S を開始点、T を目標点、E を終端位置とする。ST を目標軌道、SE を再現軌道とする。ET は目標点と終端位置を結んだ距離 D は終端位置誤差、A は S、T、E の 3 点を結んだ場合の面積を面積誤差とする。この全部のパラメータを表 2 に纏めて表示する。本論文では、終端位置誤差と面積誤差を評価に用いる。

Table.2 Variables for the motion reproduction

A	面積誤差
D(TE)	終端位置誤差
S	開始点
E	終端位置
T	目標終端位置
ST	目標軌道
E	再現軌道

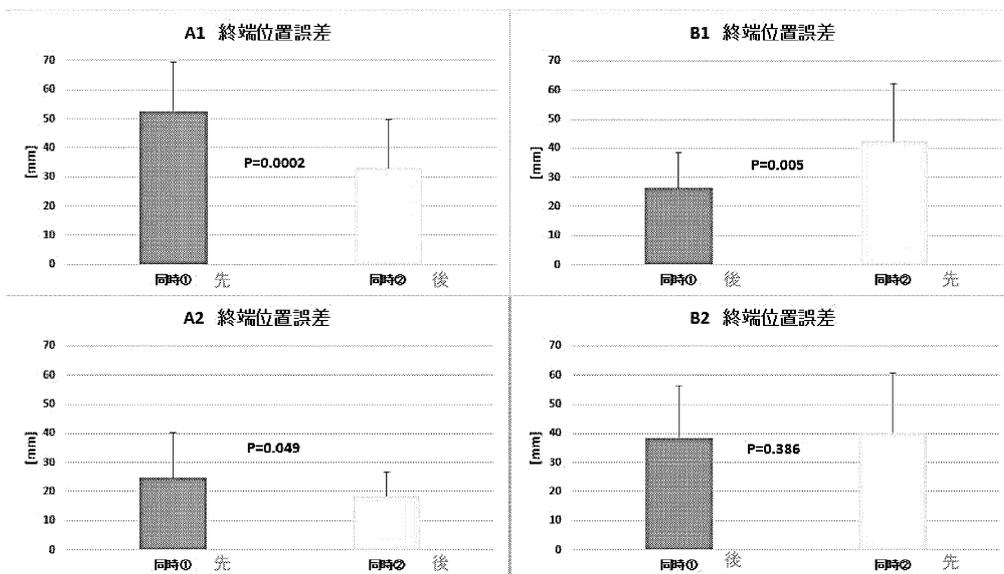


Fig.7 End position error of simultaneous ①, ②

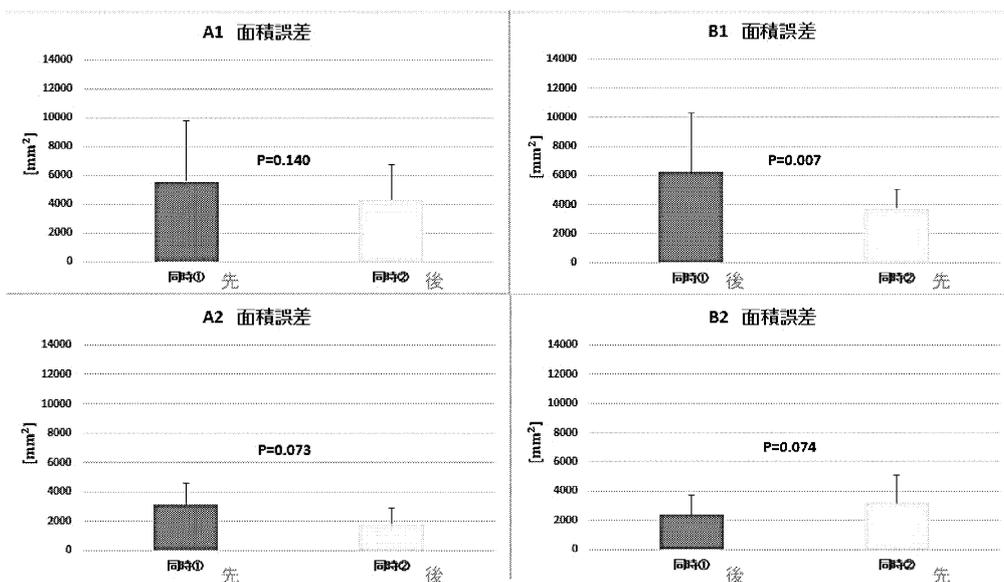


Fig.8 Area error of simultaneous ①, ②

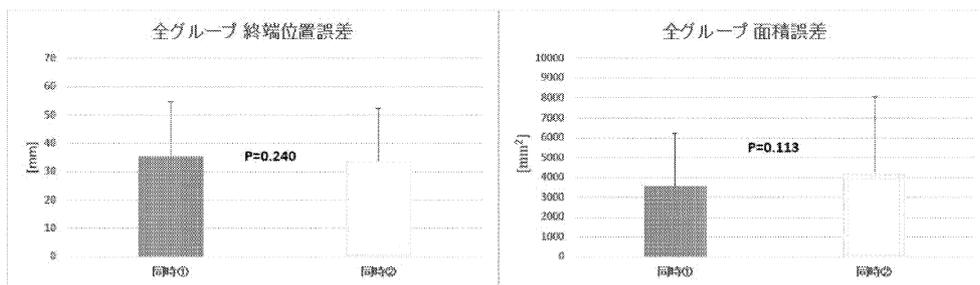


Fig.9 End position error and area error of simultaneous ①, ②

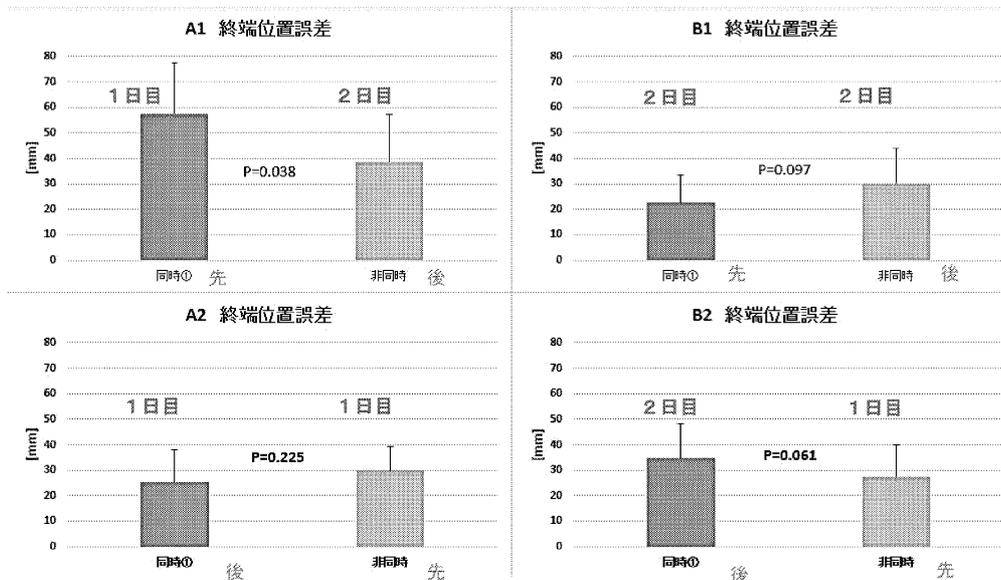


Fig.10 End position error of simultaneous① and non-simultaneous

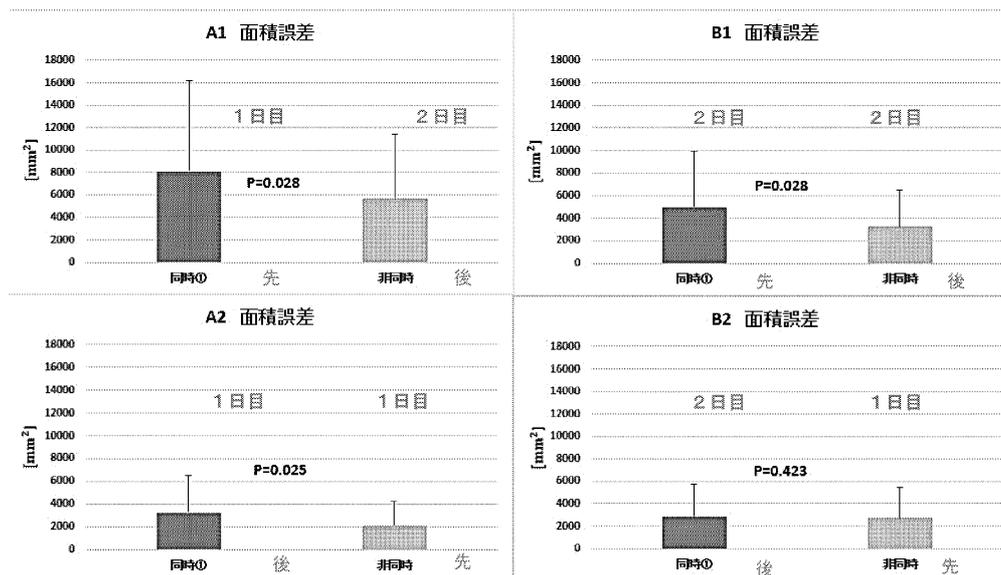


Fig.11 Area error of simultaneous① and non-simultaneous

さらに、t 検定の手法を用いて、視覚情報の有無、運動再現の同時・非同時それぞれの面積誤差、終端位置誤差について有意差の検定を行う。

4.2 同時①と同時②の比較

視覚情報有無の面積誤差、終端位置誤差を図 7、図 8 に示す。全部のグループにおいて、二日目に実験を行った場合に終端位置誤差が小さくなっているこ

とが分かる。次に面積誤差に注目する。B1 を除いたほかのグループは終端位置誤差と同様に、二日目に実験を行った場合に面積誤差が小さくなっていることが分かる。

同時①、同時②を比較した場合に実験条件での決定的な違いは見られなかったが、学習効果があるということが分かった。したがって、同時①、同時②の実験条件での差よりも、学習効果の方が実験結果に影響することが言える。

図 7 において、グループごとに同時①と同時②の場合の終端位置誤差の有意差 P を示す。A1, A2, B1 の P の値は 0.0002, 0.049, 0.005 となり、有意差があることを示し、決定的な違いが明らかになった。B2 グループの P の値は $P > 0.10$ となり有意差を確認することができなかった。3 つのグループで有意差があることが t-検定より明らかになった。しかし、ここで注目すべき点は、3 つのグループで確認できた有意差が同時①、同時②の実験条件の差ではなく、学習効果による有意差ということである。

図 8 において、B1 の P の値は 0.007 となり、有意差が $P < 0.05$ を満たしており、決定的な違いが明らかになった。A2, B2 の P の値は 0.073, 0.074 となり、有意傾向であることを示す $0.05 < P < 0.10$ を満たしており、違いが明らかになった。A1 グループの P の値は $P > 0.10$ となり有意差を確認することができなかった。1 つのグループで有意差があることが t-検定より明らかになった。

図 9 に全グループをまとめた終端位置誤差と面積誤差の平均と標準偏差を表す。終端位置誤差、面積誤差ともに実験条件による差は分らなかった。

4.3 同時①と非同時の比較

図 10, 11 に各グループで同時①と非同時の比較を終端位置誤差と面積誤差で行った場合の平均、標準偏差と有意差を表す。終端位置誤差においては、学習効果や実験条件での決定的な違いは見られなかった。全グループが非同時の方が同時①より面積誤差が小さいことを示している。

A1 グループの P の値は 0.038 となり、決定的な違いが明らかになった。B1, B2 グループの P の値は 0.097 と 0.061 となり、有意傾向であることを示し、違いが明らかになった。A2 グループの P の値は $P > 0.10$ となり有意差を確認することができなかった。3 つのグループで有意傾向以上の結果が t-検定より明らかになった。次に、面積誤差の有意差について、A1, A2, B1 グループの P の値は 0.028, 0.025, 0.028 となり、 $P < 0.05$ を満たしており、決定的な違いが明らかになった。B2 グループの P の値は $P > 0.10$ となり有意差を確認することができなかった。原因は、B2 グループにおかしな値を出した被験者がいる。この被験者を除き、t-検定を行うと、データ数は 5 となり少ないが、P の値は 0.065 となり、有意傾向であることが明らかになる。3 つのグループで有意差があることが t-検定より明らかになった。

5. おわりに

本研究より、提示された運動を正確に再現するためには、再現を同時に行うのではなく、提示後に行うほうが正確に再現できることが確認された。

リハビリに本研究結果を適用するとロボットにより提示された運動を健常な部位で感知し、その後に患者が再現運動を行うようなリハビリが、運動軌道の正確な制御のためには効果があることを示唆している。また、ロボットを用いて行うので、麻痺の度合いが軽い人の方がこのリハビリ方法が適している。

参考文献

- [1] Kidgell DJ, et al., “Corticospinal responses following strength training: a systematic review and meta-analysis”. *Eur J Neurosci*, Sep 2017.
- [2] Brain C Clark et al., “The power of the mind : the cortex as a critical determinant of muscle strength/weakness”, *Journal of Neurophysiology*, Vol.112, pp3219-3222, 2014.
- [3] Sathian K. Greenspan AL. et al, “Doing it with mirrors, A case study of a novel approach to neuro rehabilitation”, *Neurorehabilitation neural repair*, Vol.14, pp.73-76, 2000.
- [4] Hesse S, Schulte-Tigges G, Konrad M, Bardeleben A, Werner C, “Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects”. *Arch Phys Med Rehabil*, Vol.84, no.6, pp.915-920, 2003.
- [5] 末廣 健児, 後藤 淳, “感覚入力・感覚受容とそれに伴う運動の変化について”, *関西理学*, Vol.11, pp21-24, 2011.
- [6] Keunyoung Park, Youngwoo Kim, Chikara Nagai, Goro Obinata, “Bilateral Transfer in Active and Passive Guidance-Reproduction of Upper Limbs motion: Effect of Proprioception and Handedness”, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.7, No2 pp143-150, 2012.
- [7] Mark, L. S., Nemeth, K., Gardner, D., “Postural dynamics and the preferred critical boundary for visually guided reaching”, *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, Vol.23, pp1365-1379, 1997.

蛍光磁性ナノ粒子を用いた迅速同時多項目免疫測定法の開発

田中 俊行*

(2022年9月30日受理)

Development of Rapid Multiplex Immunoassay Utilizing Fluorescent Magnetic Nanoparticles

Toshiyuki TANAKA*

(Received September 30, 2022)

Abstract

To improve the accuracy of disease diagnosis, we developed a rapid multiplex immunoassay that utilizes fluorescent magnetic nanoparticles. Alpha-fetoprotein (AFP) and prostate-specific antigen (PSA) were measured by europium complex-colored nanoparticles and samarium complex-colored nanoparticles, respectively. The magnetophoresis of the nanoparticles toward the microplate surface accelerated the antigen-antibody reaction and thereby the total assay time was within 10 min. Although the fluorescence intensity fluctuated depending on the other antigen, the limit of quantitation of AFP was estimated at 4.2 ng/mL and PSA at 0.26 ng/mL, which is able to measure the upper limit of the reference interval of each antigen.

キーワード: 蛍光磁性ナノ粒子, 同時免疫測定, 磁気泳動

Keywords : Fluorescent Magnetic Nanoparticles, Simultaneous Immunoassay, Magnetophoresis

1. はじめに

生体内に存在するさまざまな蛋白質や化合物のなかで、生体の状態や変化と明確な因果関係がある物質をバイオマーカーと呼んでいる。特に疾患に関連するバイオマーカーは疾患の有無や病状の変化、治療の効果などの指標となる。そのため、疾患の確定診断には生体試料中のバイオマーカーの分析が必須となっている。バイオマーカーの分析に用いられる方法に免疫化学的測定法(免疫測定法)と呼ばれる方法がある[1]。これは測定対象であるバイオマーカーを抗原として、これに特異的に結合する抗体を用いてバイオマーカーを検出・定量する方法である。中でも ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) は高感度な定量法として広く活用されている。ELISA には 2 種類の抗体を用いるサンドイッチ法と 1 種類の抗体で測定する競合法がある。サンドイッチ法はマイクロプレートなどの固相に結合した抗体(固相化抗体)と酵素で標識した抗体(標識抗体)により抗原を検出する。蛋白質などの大きなサイズの抗原の測定は主にサンドイッチ法が用いられる。一方で、競合法は固相化抗体に対して試料中の抗原と標識抗原とを競合的に反応さ

せることで抗原を定量する。一般的に分子量 1,000 以下の低分子抗原は 2 種類の抗体でサンドイッチすることが難しいため競合法が用いられる。

ところで、疾患診断の精度や特異度の向上のために、複数のバイオマーカーの測定が行われている。例えば、甲状腺疾患では甲状腺刺激ホルモン(TSH)やサイロキシンなどの複数の項目が測定されている[2]。甲状腺の機能は下垂体から分泌される TSH により調節される一方で、TSH の分泌はサイロキシンなどの甲状腺ホルモンによるネガティブフィードバックにより調節されている。よって、TSH とサイロキシンの両方を測定することにより、甲状腺疾患がどの器官の異常によるものかなどの判断が可能となる。また、心筋梗塞では心筋トロポニン T と心筋型脂肪酸結合蛋白(H-FABP)の両方の測定が行われる場合がある。これは、H-FABP は発症 1~2 時間後に上昇するのに対して、心筋トロポニン T は発症 3~4 時間後に上昇するためであり、来院時のような発症からの経過時間が不明な場合の早期診断には同時測定が必要である[3]。しかし、一般的な免疫測定法では項目毎に数十から数百 μL の試料を必要とすることから、複数のバイオマーカーを

* 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, Nishisama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

測定する場合に多くの試料が必要となり、患者の負担が大きくなるという問題がある。そこで、単一の試料から複数のバイオマーカーを同時に測定する様々な技術が開発されている。例えば、オリゴ DNA[4,5]、量子ドット[6,7]、蛍光色素[8,9]を標識に用いた免疫測定法などでは、項目毎に異なる標識を用いることで同時測定を可能にしている。

また一方で、感染症や心疾患、甲状腺疾患などは放置すると生命に関わる場合があることから、適切な治療を早急に開始するための迅速診断が必要となる。そのため、これらの疾患に関連するバイオマーカーを迅速かつ高感度に測定するシステムが求められている。この要求に答えるため、蛍光磁性ナノ粒子を利用した免疫測定法が開発されている[10,11]。この方法は、試料と抗体結合蛍光磁性ナノ粒子を混合して粒子表面の抗体に抗原を結合させた後に、磁石により粒子をマイクロプレートの底面に泳動して固相化抗体と抗原との反応を促進することにより、測定の迅速化を実現している。また、粒子から強い蛍光を発するため高感度な測定をも可能としている。しかし、先行研究では単一抗原の測定に留まっていた。

そこで、本研究では疾患診断の精度や特異度の向上と迅速化の両方を実現すべく、項目毎に異なる蛍光色素で着色した蛍光磁性ナノ粒子を用いて、複数のバイオマーカーを単一の試料から迅速かつ同時に免疫測定する方法を開発した。評価に用いるバイオマーカーとして、先行研究[10,11]にて評価実績がある肝細胞癌マーカーの α -フェトプロテイン(AFP, 分子量約 70,000)と前立腺癌マーカーの前立腺特異抗原(PSA, 分子量約 34,000)を選定し、これらの組み合わせで本測定法の構築を行った。

2. 迅速同時多項目免疫測定法の概要

迅速免疫測定法による AFP と PSA の同時測定の流れを Fig.1 に示した。AFP の測定には蛍光色素としてユウロピウム(Eu)錯体で着色した磁性ナノ粒子を、PSA の測定には蛍光色素としてサマリウム(Sm)錯体で着色した磁性ナノ粒子を用いた。AFP と PSA の測定は共にサンドイッチ法とし、抗 AFP 抗体結合 Eu 錯体磁性ナノ粒子、抗 PSA 抗体結合 Sm 錯体磁性ナノ粒子および抗 AFP 抗体・抗 PSA 抗体結合マイクロプレートを用意した。測定手順は次の流れで行った。まず、2 種類の粒子と抗原をマイクロプレートウェルに添加して混合し、抗原を粒子表面の抗体に結合させる。続いて、磁石をマイクロプレートウェルの下から当てて粒子をウェル底面に泳動し、粒子表面に結合した抗原とウェル表面の固相化抗体との反応を促進させる。なお

磁気泳動の時間は1分間であり、短時間ながら十分なシグナルが得られることは先行研究[10]にて確認されている。最後に、マイクロプレートウェルを洗浄して未反応の粒子や抗原を除去した後に蛍光測定を行う。以上の操作により測定は 10 分以内に完了することができる。また、Eu 錯体と Sm 錯体の蛍光強度は時間分解蛍光測定を行うことにより高感度検出が可能となる。Eu 錯体は励起波長 340 nm、蛍光波長 615 nm、Sm 錯体は励起波長 340 nm、蛍光波長 650 nm であり、共に蛍光スペクトルの幅が狭い[12,13]ことから、測定時の蛍光クロストークが小さい。また、Eu 錯体は蛍光寿命の時定数が約 1 ms、Sm 錯体は蛍光寿命の時定数が 100~200 μ s と長い[13]ことから時間分解蛍光測定が可能である。時間分解蛍光測定では、Eu 錯体に対しては励起光照射後 400~800 μ s の蛍光強度を測定し、Sm 錯体に対しては励起光照射後 50~100 μ s の蛍光強度を測定する。これにより、蛍光寿命が数 ns である自家蛍光の影響を抑えることができ、高感度測定を可能にする。

3. 実験方法

3.1 抗体結合蛍光磁性ナノ粒子の作製

まず、表面にカルボキシ基を有した磁性ナノ粒子を既報[14,15]に従って作製した。また、Eu 錯体と Sm 錯体を既報[12,13]に従って合成し、それぞれを磁性ナノ粒子に着色して 2 種類の蛍光磁性ナノ粒子を作製した。続いて、25 mM 2-モルホリノエタンスルホン酸水溶液(pH 6.0) 200 μ L 中で蛍光磁性ナノ粒子 1 mg、1-エチル-3-(3-ジメチルアミノプロピル)カルボジイミド塩酸塩 10 mg および *N*-ヒドロキシこはく酸イミド 10 mg を室温で 30 分間混合し、粒子表面のカルボキシ基を活性化させた。その後、25 mM 酢酸水溶液(pH 5.0) 200 μ L 中で活性化させた粒子 1 mg と抗体 100 μ g を 4°C で 2 時間混合し、粒子に抗体を結合させた。ここで、Eu 錯体蛍光磁性ナノ粒子に抗 AFP モノクローナル抗体(4A3)を、Sm 錯体蛍光磁性ナノ粒子に抗 PSA モノクローナル抗体(1H12)をそれぞれ結合させた。最後に、0.1 M エタノールアミン水溶液(pH 8.0) 500 μ L と抗体結合粒子を 4°C で一晩混合し、粒子表面に残った活性化カルボキシ基をブロッキングした。

3.2 抗体結合マイクロプレートの作製

まず、抗 AFP モノクローナル抗体(5H7)と抗 PSA モノクローナル抗体(5A6)をそれぞれ 5 μ g/mL となるようにリン酸緩衝生理食塩水(PBS)に混合した。続いて、コーニング社の 96 ウェル黒色高結合マイクロプレートのウェルに混合液 100 μ L を入れて 4°C で一晩静置し、

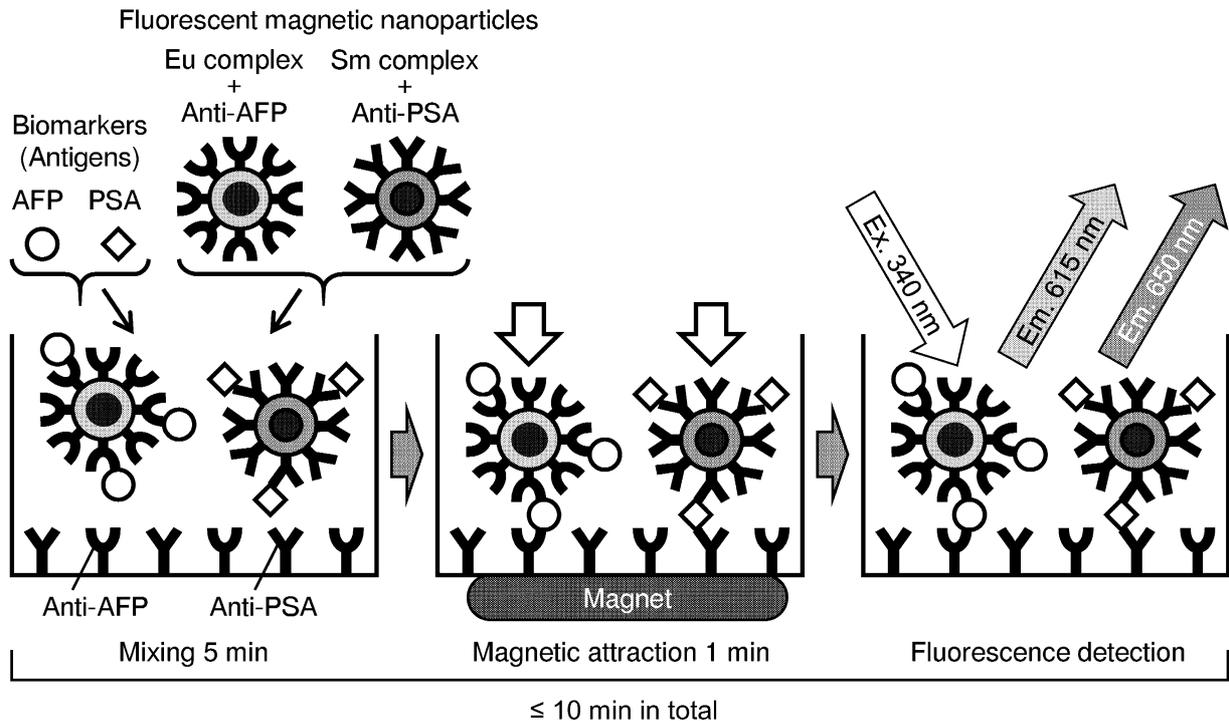


Fig.1 Scheme of rapid multiplex immunoassay of AFP and PSA utilizing fluorescent magnetic nanoparticles.

ウェル表面に抗体を結合させた。その後、混合液を除去した後に 4% ブロックエースと 0.05% Tween 20 を混合した溶液 200 μL をウェルに入れて 4°C で一晩静置し、ウェル表面の抗体が結合していない箇所をブロッキングした。

3.3 迅速多項目免疫測定

まず、測定用溶液 (50 mM トリスヒドロキシメチルアミノメタン (pH 8.0), 150 mM NaCl, 0.5% ウシ血清アルブミン, 0.4% ブロックエース, 0.05% Tween 20) に AFP と PSA を種々の濃度で混合して抗原溶液を作製した。また、作製した 2 種類の抗体結合蛍光磁性ナノ粒子をそれぞれ 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ となるように測定用溶液に混合して粒子混合液を作製した。続いて、抗体結合マイクロプレートのウェルに粒子混合液 50 μL と抗原溶液 50 μL を添加し、数秒間攪拌した後に室温で 5 分間静置した。その後、ウェルに合わせて配置した 96 個のネオジム磁石 (直径 6 mm, 長さ 10 mm) をマイクロプレートの下から 1 分間当て、粒子をウェル底面に泳動した。最後に PBS と 0.05% Tween 20 を混合した溶液でウェルを洗浄した後、プレートリーダによって Eu 錯体と Sm 錯体の時間分解蛍光測定を行った。なお、蛍光強度の測定値はプレートリーダのソフトウェアにより蛍光クロストークの影響が除去された補正值として得られた。

3.4 分析能の評価

迅速多項目免疫測定の分析能は文献 [16, 17, 18]

に基いて次のように評価した。まず、抗原濃度 x と蛍光強度 y の関係を示す標準曲線を求めるため、測定値の不偏分散を重みとした重み付き最小二乗法により式 (1) の 4 変数ロジスティック関数を当てはめた。

$$y = \frac{a - d}{\left(1 + \frac{x}{c}\right)^b} + d \quad (1)$$

ここで、 a, b, c, d は係数である。続いて、蛍光強度 y の標準偏差 σ_y を推定するため、各抗原濃度における蛍光強度の平均値と不偏分散の関係をプロットし、これらの点に対して式 (2) の関数を最小二乗法により当てはめた。

$$\sigma_y^2 = ey^g \quad (2)$$

ここで、 e, g は係数である。さらに、逆推定における抗原濃度 x の精度プロファイルを得るため、抗原濃度 x の変動係数 ρ_x を次の式 (3) により求めた。

$$\rho_x = \frac{\sigma_y}{x} \left| \frac{dy}{dx} \right| \quad (3)$$

ここで、 dy/dx は標準曲線の傾きである。最後に、 ρ_x が

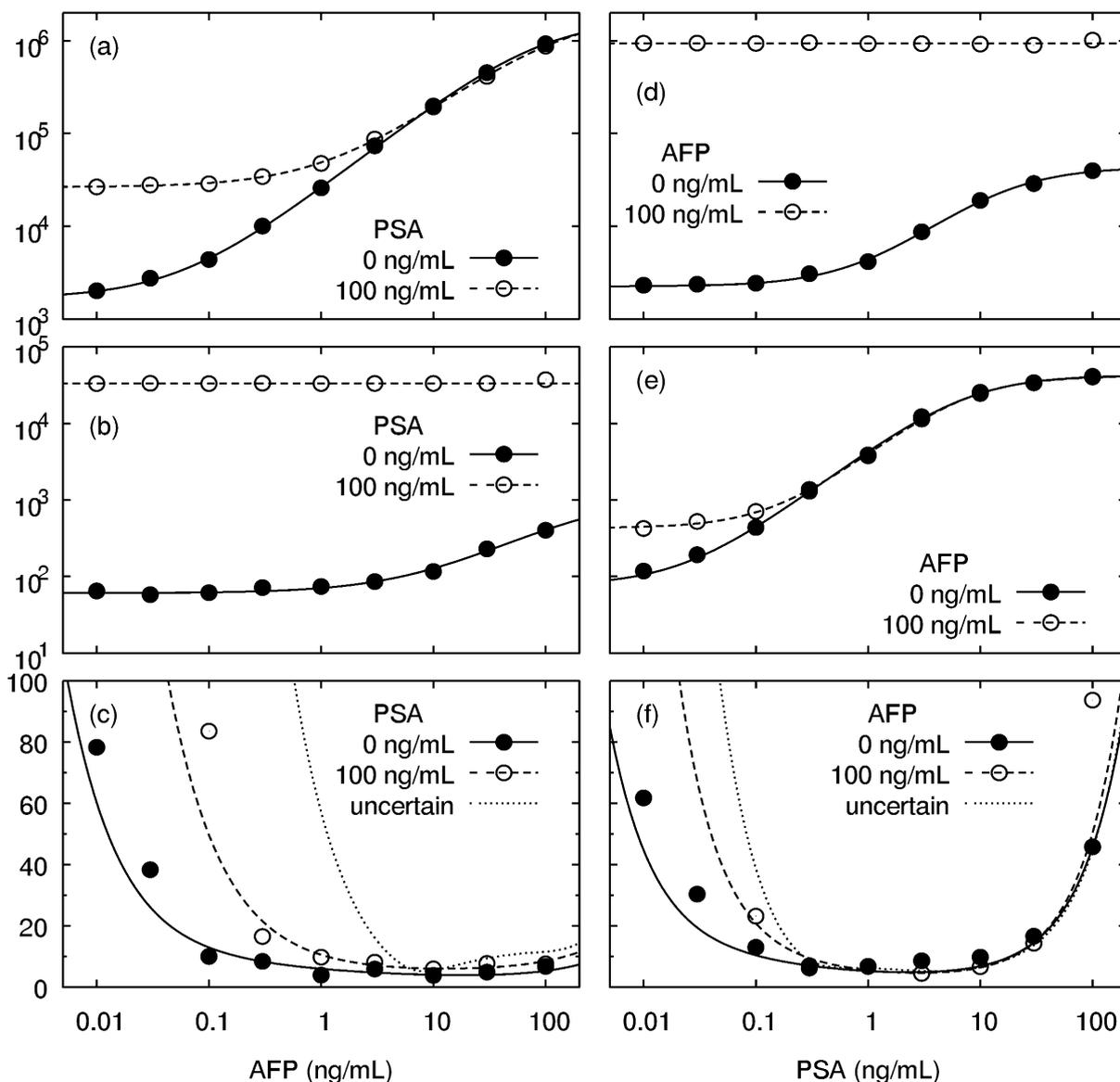


Fig.2 Results of rapid multiplex immunoassay of AFP and PSA. (a) Standard curves of AFP assay. (b) The effect of AFP concentration on PSA assay. (c) Precision profiles of AFP assay. (d) The effect of PSA concentration on AFP assay. (e) Standard curves of PSA assay. (f) Precision profiles of PSA assay. All data computed over 3 experiment replicates.

30%を示す抗原濃度 x を検出限界 (limit of detection, LOD), ρ_x が 10%を示す抗原濃度 x を定量限界 (limit of quantitation, LOQ) として求めた.

4. 実験結果および考察

AFP と PSA の迅速同時測定の結果を Fig.2 に示した. Fig.2(a)-(c) は PSA 濃度を 0 ng/mL または 100 ng/mL で一定にして AFP 濃度を変化させた場合の結果である. Fig.2(a) は Eu 錯体の蛍光強度を測定した結果であり, AFP 測定の標準曲線を表している.

Fig.2(b) は Sm 錯体の蛍光強度を測定した結果であり, AFP 濃度が PSA 測定へ及ぼす影響を表している. Fig.2(c) は Fig.2(a) の標準曲線により AFP 濃度を逆推定した際の変動係数であり, AFP 測定の精度プロファイルを表している. 一方, Fig.2(d)-(f) は AFP 濃度を 0 ng/mL または 100 ng/mL で一定にして PSA 濃度を変化させた場合の結果である. Fig.2(d) は Eu 錯体の蛍光強度を測定した結果であり, PSA 濃度が AFP 測定へ及ぼす影響を表している. Fig.2(e) は Sm 錯体の蛍光強度を測定した結果であり, PSA 測定の標準曲線

を表している。Fig.2(f)は Fig.2(e)の標準曲線により PSA 濃度を逆推定した際の変動係数であり、PSA 測定の精度プロファイルを表している。

AFP 測定の標準曲線(Fig.2(a))を見ると、Eu 錯体の蛍光強度は AFP 濃度の増加に従って上昇する結果が得られた。これはサンドイッチ法による AFP 測定が正しく機能していることを示している。しかし、PSA 存在下(100 ng/mL)では PSA 非存在下(0 ng/mL)と比較して AFP の低濃度側であるバックグラウンドの蛍光強度が上昇した。また、AFP 測定の精度プロファイル(Fig.2(c))を見ると、PSA 非存在下では LOD は 0.025 ng/mL、LOQ は 0.18 ng/mL だったのに対して、PSA 存在下では LOD は 0.19 ng/mL、LOQ は 1.1 ng/mL と悪化した。これは、PSA 存在下でバックグラウンドの蛍光強度が上昇したことと関連している。また、AFP 測定における PSA 濃度の影響を調べたところ、AFP が高濃度の場合には PSA の影響はほぼ無かったのに対して、AFP が 0 ng/mL の場合には PSA 濃度が増加するに従って Eu 錯体の蛍光強度も増加した(Fig.2(d))。この Eu 錯体の蛍光強度の増加傾向は、PSA 測定の標準曲線の傾向にほぼ従っていた(Fig.2(e))。

同様に、PSA 測定の標準曲線(Fig.2(e))を見ると、Sm 錯体の蛍光強度は PSA 濃度の増加に従って上昇する結果が得られた。これはサンドイッチ法による PSA 測定が正しく機能していることを示している。しかし、AFP 存在下(100 ng/mL)では AFP 非存在下(0 ng/mL)と比較してバックグラウンドの蛍光強度が上昇した。また、PSA 測定の精度プロファイル(Fig.2(f))を見ると、AFP 非存在下では LOD は 0.016 ng/mL、LOQ は 0.11 ng/mL だったのに対して、AFP 存在下では LOD は 0.067 ng/mL、LOQ は 0.27 ng/mL と悪化した。これは、AFP 存在下でバックグラウンドの蛍光強度が上昇したことと関連している。また、PSA 測定における AFP 濃度の影響を調べたところ、PSA が高濃度の場合には AFP の影響はほぼ無かったのに対して、PSA が 0 ng/mL の場合には AFP 濃度が増加するに従って Sm 錯体の蛍光強度も増加した(Fig.2(b))。この Sm 錯体の蛍光強度の増加傾向は、AFP 測定の標準曲線の傾向にほぼ従っていた(Fig.2(a))。

バックグラウンドの蛍光強度が片方の抗原濃度に依存して高くなる傾向は、AFP と PSA のいずれの場合でも同様に生じた。この理由は次のように考えられる。磁石の磁場により粒子が磁化されると、磁場によって粒子が泳動するだけでなく、粒子同士が数珠状に凝集する[19,20]。ウェル底面に結合した粒子上にも数珠状の凝集が形成され、洗浄操作ではこれらが除去されずに残ったことで、バックグラウンドの蛍光として検

出されたと考えられる。

他方の抗原濃度が未知の場合における分析能を考える。他方の抗原濃度が 0 ng/mL の場合の標準曲線を用いて抗原濃度を逆推定することとして、LOD および LOQ を次のように推定した。すなわち、他方の抗原の影響による蛍光強度の変動を不確かさとみなし、一様分布を仮定して式(4)によって変動係数 ρ_x を算出し、LOD および LOQ を求めた。

$$\rho_x = \frac{\sqrt{\sigma_{y_{100}}^2 + \frac{(y_{100} - y_0)^2}{3}}}{x \left| \frac{dy_0}{dx} \right|} \quad (4)$$

ここで、 y_0 は他方の抗原濃度が 0 ng/mL の場合の標準曲線、 y_{100} は他方の抗原濃度が 100 ng/mL の場合の標準曲線、 $\sigma_{y_{100}}$ は他方の抗原濃度が 100 ng/mL の場合の蛍光強度の標準偏差である。これにより得られた精度プロファイルを Fig.2(c)および Fig.2(f)の点線として示した。AFP の LOD は 1.8 ng/mL、LOQ は 4.2 ng/mL、PSA の LOD は 0.12 ng/mL、LOQ は 0.26 ng/mL となった。LOD よりも低い濃度域では他方の抗原の影響が大きいと定量性が悪く、LOD よりも高い濃度域では他方の抗原の影響が小さいと定量性が良いことを示している。また、臨床検査における AFP の基準値上限は 10 ng/mL、PSA の基準値上限は 4 ng/mL であり[21]、これらは LOQ よりも高いと本技術で定量可能である。よって、他方の抗原濃度が未知の場合でも迅速同時測定による定量が可能であることが示された。

5. まとめ

本研究では疾患診断の精度や特異度の向上と迅速化の両方を実現すべく、蛍光磁性ナノ粒子の磁気泳動による抗原抗体反応の促進を利用した迅速免疫測定法を用いた同時多項目測定法を開発した。AFP と PSA をモデル抗原として、Eu 錯体と Sm 錯体のそれぞれで着色した蛍光磁性ナノ粒子を用いて、単一の試料からの同時測定を試みた。その結果、10 分以内に AFP と PSA のそれぞれに対応する蛍光強度が測定できた。ただし、他方の抗原によって蛍光強度が変動することが確認できた。他方の抗原濃度が未知の場合の分析能を推定したところ、AFP と PSA 共に臨床検査の基準値上限が定量可能であることが明らかとなった。よって、本技術によって複数項目のバイオマーカーを同時にかつ迅速に測定できることが示された。なお、今後の検討事項としては、粒子同士の凝集の

低減, 低分子バイオマーカーを含む迅速同時測定, 3項目以上のバイオマーカーの迅速同時測定などが挙げられる。

謝辞

本研究は文部科学省平成 23~27 年度地域イノベーション戦略支援プログラム, 公益財団法人信州医学振興会平成 24 年度研究費助成, 公益財団法人中谷医工計測技術振興財団平成 24 年度開発研究助成および日本学術振興会科学研究費(若手研究(B)26860364)の助成を受けて実施した。また東京医科大学半田宏特任教授, 信州大学本田孝行教授および東京工業大学坂本聡助教より助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

[1] 免疫測定法 基礎から先端まで, 生物化学的測定研究会(編), 講談社, 東京, 2014.

[2] 西川光重, “甲状腺機能検査法とその読み方”, 関西医科大学雑誌, vol.43, pp.1-13, 1991.

[3] 石井潤一, “急性冠症候群の診断とリスク層別化”, 心臓, vol.38, pp.666-671, 2006.

[4] 芝崎太, 森實芳仁, 槇坂典子, “MUSTag 法による蛋白バイオマーカーの超高感度多項目測定と簡易・迅速診断への応用”, 臨床病理, vol.57, pp.1104-1112, 2009.

[5] 芝崎太, 森實芳仁, 槇坂典子, “MUSTag 法による超高感度同時多項目測定”, 基礎老化研究, vol.33, pp.17-21, 2009.

[6] E.R. Goldman, A.R. Clapp, G.P. Anderson, H.T. Uyeda, J.M. Mauro, I.L. Medintz, and H. Mattoussi, “Multiplexed toxin analysis using four colors of quantum dot fluororeagents,” *Anal. Chem.*, vol.76, pp.684-688, 2004.

[7] K.E. Sapsford, S. Spindel, T. Jennings, G. Tao, R.C. Triulzi, W.R. Algar, and I.L. Medintz, “Optimizing two-color semiconductor nanocrystal immunoassays in single well microtiter plate formats,” *Sensors*, vol.11, pp.7879-7891, 2011.

[8] M. Nichkova, D. Dosev, S.J. Gee, B.D. Hammock, and I.M. Kennedy, “Multiplexed immunoassays for proteins using magnetic luminescent nanoparticles for internal calibration,” *Anal. Biochem.*, vol.369, pp.34-40, 2007.

[9] D. Geißler, S. Stuffer, H.-G. Löhmansröben, and N. Hildebrandt, “Six-color time-resolved Förster resonance energy transfer for ultrasensitive multiplexed biosensing,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol.135, pp.1102-1109, 2013.

[10] S. Sakamoto, K. Omagari, Y. Kita, Y. Mochizuki, Y. Naito, S. Kawata, S. Matsuda, O. Itano, H. Jinno, H. Takeuchi, Y. Yamaguchi, Y. Kitagawa, and H. Handa, “Magnetically promoted rapid immunoreactions using functionalized fluorescent magnetic beads: a proof of principle,” *Clin. Chem.*, vol.60, pp.610-620, 2014.

[11] K. Terada, T. Tanaka, N. Hanyu, T. Honda, H. Handa, “Rapid and sensitive detection of alpha-fetoprotein by a magnetically promoted shake-free immunoassay employing fluorescent magnetic nanobeads,” *Int. J. Anal. Bio-Sci.*, vol.2, pp.101-107, 2014.

[12] T. Taketatsu, A. Sato, “Spectrofluorimetric determination of europium and samarium with mixtures of 2-thenyltrifluoroacetone and tri-*n*-octylphosphine oxide in aqueous solutions containing Triton X-100,” *Anal. Chim. Acta*, vol.108, pp.429-432, 1979.

[13] 黄漢国, 平木敬三, 西川泰治, “ユウロピウム, サマリウム-β-ジケトン錯体の蛍光特性とその蛍光分析への応用”, 日本化学会誌, vol.1981, pp.66-73, 1981.

[14] K. Nishio, Y. Masaike, M. Ikeda, H. Narimatsu, N. Gokon, S. Tsubouchi, M. Hatakeyama, S. Sakamoto, N. Hanyu, A. Sandhu, H. Kawaguchi, M. Abe, and H. Handa, “Development of novel magnetic nano-carriers for high-performance affinity purification,” *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, vol.64, pp.162-169, 2008.

[15] M. Hatakeyama, Y. Mochizuki, Y. Kita, H. Kishi, K. Nishio, S. Sakamoto, M. Abe, and H. Handa, “Characterization of a magnetic carrier encapsulating europium and ferrite nanoparticles for biomolecular recognition and imaging,” *J. Magn. Mater.*, vol.321, pp.1364-1367, 2009.

[16] R.A. Dudley, P. Edwards, R.P. Ekins, D.J. Finney, I.G.M. McKenzie, G.M. Raab, D. Rodbard, and R.P.C. Rodgers, “Guidelines for immunoassay data processing,” *Clin. Chem.*, vol.31, pp.1264-1271, 1985.

[17] JIS K 0461:2006, 競合免疫測定方法通則.

[18] JIS K 0462:2006, 非競合免疫測定方法(サンドイッチ法)通則.

[19] M. Fermigier and A.P. Gast, “Structure evolution in a paramagnetic latex suspension,” *J. Magn. Mater.*, vol.122, pp.46-50, 1993.

[20] J.H.E. Promislow, A.P. Gast, and M. Fermigier, “Aggregation kinetics of paramagnetic colloidal particles,” *J. Chem. Phys.*, vol.102, pp.5492-5498, 1995.

[21] 臨床検査データブック 2021-2022, 高久史磨

(監修), 医学書院, 東京, 2021.

研究ノート

廃棄ミカンの堆肥化温度に及ぼす供給空気量および処理量の影響

渡部 吉規*

(2022年9月30日受理)

Effect of Supplied Air Flow Rate and Amount of Raw Material Usage on Composting Temperature of Waste Mandarin Oranges

Yoshinori WATANABE*

(Received September 30, 2022)

Abstract

Mandarin orange farms generate waste mandarin oranges, and the disposal cost is making serious their management. Disposing of mandarin oranges not only puts pressure on management, but also wastes agricultural resources and the energy required for cultivation. As a countermeasure, we attempted to compost waste mandarin oranges. Since there are few examples of fruit composting, we obtained basic knowledge about the quantity of air supply and the amount of fruit processing required for composting. In composting mandarin oranges, the composting temperature varied with changes in the quantity of air supplied and the amount of mandarin oranges processed, but the maximum temperature was about 50 °C. It was also found that by increasing the airflow and the amount of mandarin oranges processed, the temperature near the maximum temperature could be maintained for a long time.

キーワード: 廃棄ミカン, バイオマス, 堆肥化発酵熱, 熱回収

Keywords : Waste mandarin orange, Biomass, Composting fermentation heat, Heat recovery

1. 緒言

本学が所在する蒲郡市は全国有数のミカン産地であり、「蒲郡温室みかん」は蒲郡の中心ブランドとして全国に販売^[1-3]されている。その一方で、年間約 400 t 以上の規格外ミカンが発生しており、栽培農家では廃棄処分に多額の費用を投じ経営が圧迫されている。可食果物の廃棄は経済的な問題だけでなく、食品ロス、栽培に要したエネルギーの浪費でもあり対策が求められる。

そこで、著者研究室では廃棄ミカンをバイオマス資源とし、その成分ごとに様々な方法で利用する試みを行っている。その一環として廃棄ミカンを堆肥化し、その際に発生する堆肥化発酵熱を回収する検討を行っている。廃棄ミカンの堆肥化により農家の処分費用が軽減されるだけでなく、肥料の購入費用も抑制できると思われる。また、一般的な堆肥化^[4]では 70~80 °C の発酵熱が発生することが知られていることから、発酵熱を効率よく回収することで温室栽培への活用が可能になり暖房用エネルギーの抑制が期待される。

しかしながら、産業的な堆肥化では畜産農家から発生する家畜排せつ物が対象であり、水分および植物繊維の多い果実については発酵温度の上昇が見込めず殆ど行われていない。そこで本研究では蒲郡ミカンに含まれる糖質成分が他の果実とは異なりそのほとんどが、グルコース、フラクトース、シュクロースであることに着目した。これらの低分子糖質はデンプンやセルロースに比べ発酵速度が速く、比較高い発酵温度の発生が予想される。

本研究ノートでは、堆肥原料としてミカン果実を用い微生物の生育に必要なの空気の供給量および処理する果実量を様々に変えた場合の堆肥化発酵温度の挙動を測定し、堆肥化の実用性について検討した結果を報告する。

2. 堆肥化について

2.1 堆肥化の定義^[5]

堆肥化とは好気性または嫌気性条件下で食品廃棄

* 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

物、植物の枝葉や家畜糞尿などの有機性廃棄物を微生物の発酵により酸化分解処理するプロセスである。この反応では有機物及び水が適切に混合され十分な空気が供給された状態で、数か月間熟成されることで堆肥と呼ばれる良質な有機肥料が生産される。

2.2 堆肥化の条件

堆肥化では有機廃棄物を微生物が処理する際微生物の働きを最大限に引き出すため、堆肥化装置内の温度制御が求められる。装置内の温度が上昇すると堆肥内に含まれる微生物が活性化し、また、病原菌などの悪影響を防ぐことができ、質の高い堆肥を生産することが出来る。堆肥化の過程で堆肥の温度を高く保つには、外部から加温する方法も考えられるが、微生物の活動に必要な酸素を十分に供給することで有機物の分解速度が大きくなり、分解熱の増加で堆肥の温度が上昇させることができる。また、堆肥の含水率^[7]は 60～70 % が適している。

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

堆肥化実験では実験室レベルの小型堆肥化装置を作成し堆肥化発酵熱を測定した。Figure 1 に実験装置の概略を示す。

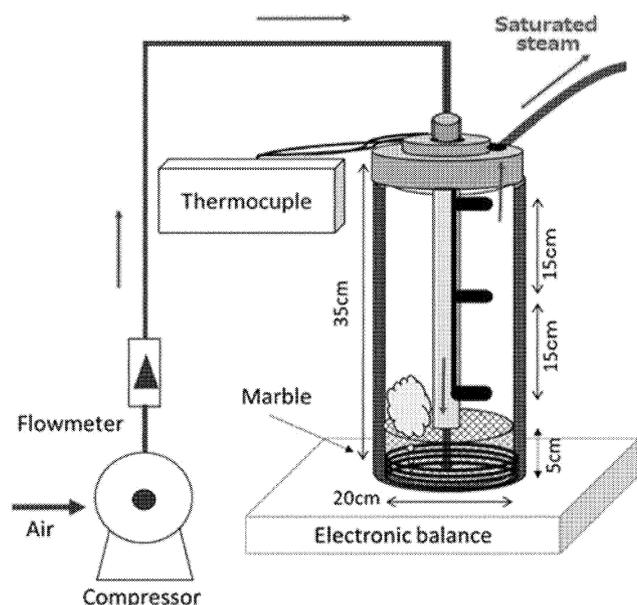


Fig.1 Schematic diagram of composting unit

堆肥の発酵槽として容積 10 L の断熱性の円筒型容器(31C-AL:アズワン社)を使用した。発酵槽の底は半球状のため、堆肥の底面が水平になるよう底から

5 cm まで径約 2 cm のガラス球を敷き詰め、その上に堆肥原料を入れて高さ 30 cm の堆肥層を形成した。発酵槽の中心軸には堆肥層の上部、中央部および下部の 3 か所の温度を測定するための熱電対が設置されており、発酵槽の上は断熱性の蓋で閉じてある。発酵槽は質量を測定できるように、電子天秤の上に設置した。堆肥に供給する空気はコンプレッサーから送気され、発酵槽の中心軸に設置した配管中を通り発酵槽の最下部から上方に放出される。堆肥層中を上昇した空気および堆肥から発生したガスや水蒸気は発酵槽上部の配管から大気へ排出される。

3.2 堆肥化実験試料

堆肥試料(以下試料という)の発酵原料には、露地栽培された市販の蒲郡ミカンを用いた。ミカンの成分組成^[6]を Table1 に示す。ただし、時期によって成分比率が変化するため、代表的な代用的値を記載した。水分調整および発酵用微生物の供給を兼ねた副材として、チップ材(エコパワーチップ:エコ・クリーン社)を使用した。原料の調製ではまず、ミカンをも 1/4 程度にカットし皮ごとミキサーにて粉碎した。完全に液状にした後、チップ材 0.80 kg に対しミカン重量を 0.60, 0.80, 1.6, 2.4, 3.0 kg と比率を変えながら混合することで含水率が 30～80 % 程度になるよう調整した。なお、正味の含水率は乾燥法にて測定した。ただし、含水率の変化とともに含有成分比率も変化するため、注意が必要である。

Table 1 Ingredient of mandarin orange

Component	Composition [%]
Water	87
Glucose	1.6
Fructose	2.0
Sucrose	5.2
Citric acid	1.0
Ascorbic acid	0.005

3.3 実験方法

実験装置を室温 25 °C、湿度 30 % で一定の室内に設置した。層高さが 30 cm となるように試料を発酵槽に充填し、上部の蓋を閉め、配管以外から空気や発生ガスが漏れないようにシールした。コンプレッサーから流量 0.5～3.0 L/min の空気を供給し、試料の温度および質量を 1 h 毎に自動計測測定した。実験は発酵により温度が上昇した後、概ね 30 °C 以下に低下するまでの 7 日間まで継続して行った。

4. 結果および考察

4.1 供給空気量の影響

堆肥の試料原料として、ミカン 2.4 kg および副資材(チップ材) 0.80 kg を混合し、有機物含有率 18%, 含水率 66% で一定とした場合の供給空気量が試料の温度および質量変化に及ぼす影響を検討した。

Figure 1 に堆肥の最高温度と空気流量の関係を示す。縦軸は実験期間中に示した堆肥の最高温度 [°C] を横軸は空気流量 [L/min] を表す。空気流量が 0.5~2.0 L/min までは流量の増加に伴い試料の最高温度は上昇したが、それ以上ではほぼ一定であった。供給空気量が少ない場合には、空気量の増加に伴って微生物が生存または増殖するのに必要な酸素の量が増加したことで微生物が活性化し、有機物の分解が促進されて温度が上昇したと考えられる。一方、2.0 L/min 以上で温度があまり変わらない理由は、微生物に必要な酸素量が飽和に達していることが考えられる。ただし、多量の空気の流通により堆肥が冷却された可能性もあるため、さらに詳しい検討が必要である。

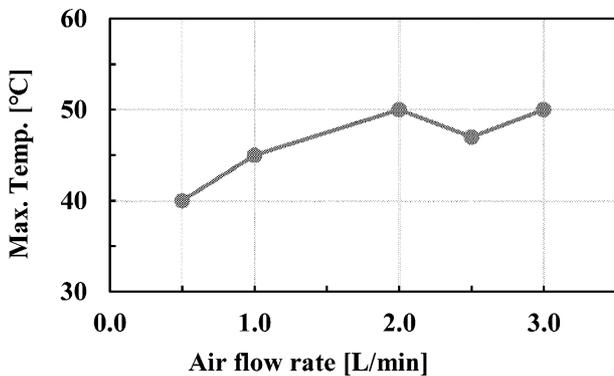


Fig.1 Effect of air flow rate on maximum temperature in composting

次に、堆肥温度が 45 °C 以上を維持する時間を高温保持時間とし、供給空気量が高温保持時間に及ぼす影響を検討した。Figure 2 に堆肥の高温保持時間と空気流量の関係を示す。縦軸は高温保持時間 [h] である。空気流量が 0.5~1.0 L/min では発酵の最高温度が 45 °C 未満であったため高温保持時間は存在しなかったが、それ以上の空気流量では流量が多いほど高温保持時間が長くなった。ただし 2.5 L/min 以上では温度上昇は小さくなった。この理

由として 0.5~2.0 L/min の条件では、酸素供給量の増加に伴い微生物の生育環境がより適した状態になるが、2.5 L/min 以上ではあまり変化がないためと推測される。なお、空気流量 2.0~2.5 L/min ではカビの発生が認められた。適度な空気量ではカビの増殖しやすい環境にもなるため、この結果からカビの発生が認められなかった 3.0 L/min 以上の空気流量で堆肥化を行うことが好ましいと考えられる。

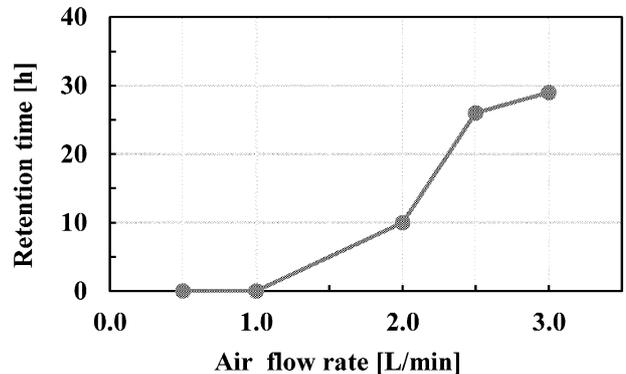


Fig.2 Effect of air flow rate on retention time above 45 °C

堆肥の質量変化に及ぼす空気流量の影響について検討した。実験開始 7 日後の堆肥試 1 kg 当たりの質量減少率 [%] を Figure 3 に示す。

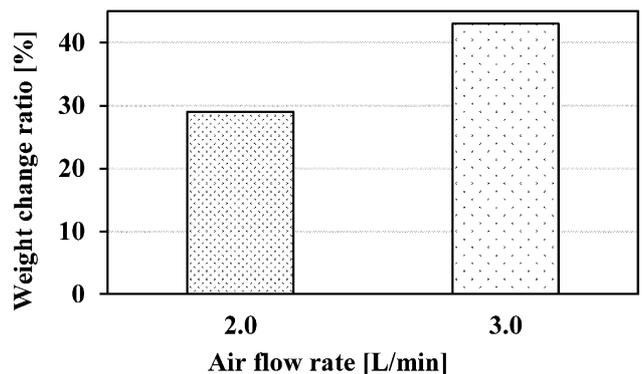


Fig.3 Effect of air flow rate on weight reduction ratio after 7 days composted

空気流量が 2.0 L/min よりも 3.0 の方がミカン 1 kg 当たりの堆肥の質量減少率が 1.5 倍大きくなった。これは、空気流量が 2.0 と 3.0 とで試料の最高温度は同じだが、3.0 の場合には高温保持時間が長くなることで微生物の高活性が継続する時間が長くなり有機物の分解が進んで堆肥質量の減少率が大き

くなったと考えられる。ただし、空気の流通量が多いほど試料の乾燥が進むため、堆肥の質量がより多く減少した可能性もある。

4.2 処理量の影響

供給空気量を一定とし、一定質量の副資材(チップ材) 0.80 kg に対して混合するミカンの質量を変えることで有機物含有量を変化させた試料原料を作成した場合の試料温度を測定し、処理量の影響を検討した。ただし、副資材に対するミカンの混合割合を大きくすると試料に含まれる有機物の含有率は大きくなるが、同時に Figure 4 に示すように試料の含水率も大きくなる。高含水率では空気の供給量が少ないと腐敗が生じるため供給する空気量を多くして実験した。有機物含有率が 5.0~13 % では空気流量を 0.5 L/min, 18~22 % では 2.5 L/min とした。

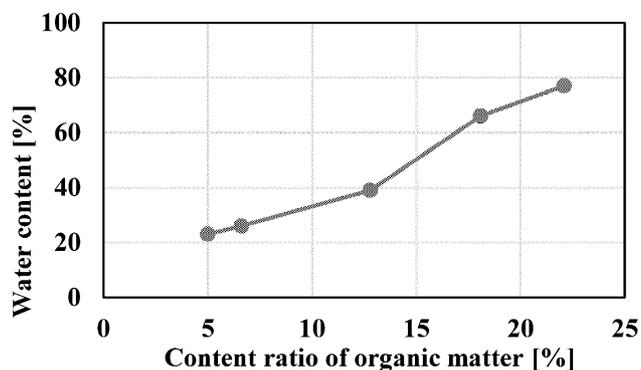


Fig.4 Relation between organic matter content and water content in samples

Figure 5 に堆肥試料中の有機物含有率を変えたとき実験期間中に示した試料の最高温度を示す。

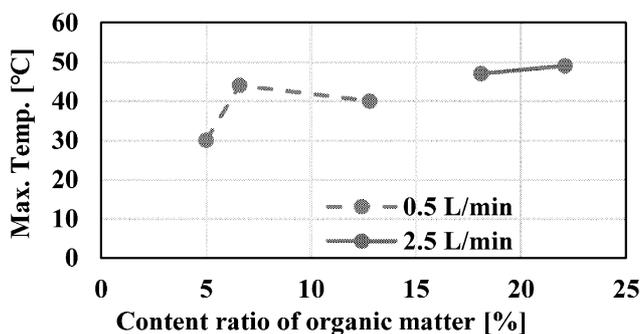


Fig. 5 Effect of organic matter content on maximum temperature in composting

空気流量が 0.5 L/min の場合、有機物含有率が 5.0~6.6 % までは最高温度は上昇し、6.6 % 以上

では一定であった。一方、2.5 L/min の場合は有機物含有率の影響は認められなかった。つまり、有機物含有率の増大による最高温度の上昇には限界があることが分かった。なお、有機物含有率が 18 % 以上では試料内に青かびが発生した。これは試料の有機物含有率の増大に伴って含水率が高くなり、かつ 45 °C 前後という、カビが発生しやすい環境^[8]が整ったことが原因と考えられる。試料の有機物含有率 18 % のときの含水率は 66 % であり、これは堆肥化微生物にとっても適した環境である。両微生物の微妙な最適環境を見極める必要がある。

Figure 6 に堆肥化試料の有機物含有率を変えた場合に試料が 40 °C 以上に維持された時間を示す。有機物含有率が 13 % 以下で試料温度が 40 °C を越えることはほとんどないが、18 % 以上では維持時間が顕著に長くなった。空気流量が異なるため一律に比較はできないが、試料の有機物含有率が 13 % 以下では最高温度が 40 °C になったとしても、温度を維持することが困難である。一方、18 % 以上では微生物の餌となる有機物量が多いため、40 °C 以上を維持する時間が長くなった。

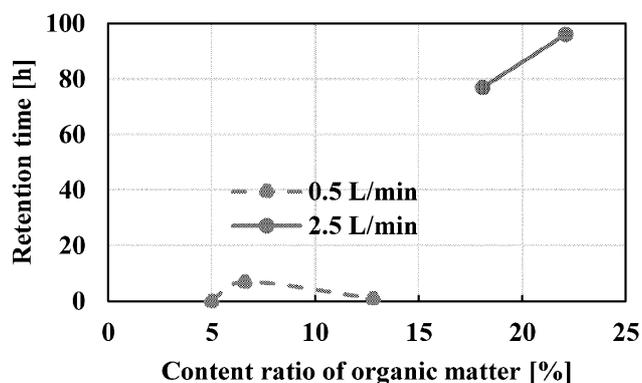


Fig. 6 Effect of organic matter content on retention time above 40 °C in composting

5. 結論

含水率の高い果実であるミカン为原料として堆肥化を行うにあたり以下の知見を得た。

- ・堆肥化試料に供給する空気量が堆肥化温度に及ぼす影響について、供給空気量が少ない場合には空気量の増加とともに最高温度は上昇するが、空気量を一定以上増やしても最高温度は 50 °C でほぼ一定となった。
- ・今回の実験範囲内では、供給空気量が多いほど試料温度が 45 °C を越える時間は長くなった。また、45 °C 以上の継続時間が長いほど有機物

の活性化し、有機物の分解が促進される傾向が伺われた。

- ・堆肥化用の副資材に対して、混合するミカンの割合を多くしても堆肥化の最高温度は 50 °C を越えることはなかったが、40 °C 以上を継続する時間は長くなった。

参考文献

- [1] 「蒲郡みかん」愛知県ホームページ,
<https://www.pref.aichi.jp/nogyo-keiei/nogyo-aichi/tokusanhin/gamagori-mikan/index.html>
- [2] 「みかん」蒲郡市ホームページ,
<https://www.city.gamagori.lg.jp/site/nougyou/index-nogyo.html>
- [3] 「蒲郡みかん」JA 蒲郡市ホームページ,
<https://ja-gamagori.or.jp/farms/orange/>
- [4] 「そもそも堆肥とは何か？」共和化工株式会社,
<https://kyowa-kako.co.jp/press/772/>
- [5] 「堆肥の定義とは」Reclaim the Earth!,
<https://leaps.jp/?p=3909>
- [6] 「日本食品標準成分表 2020 年版(八訂)」文部科学省ホームページ,
https://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/mext_01110.html
- [7] Fumihito MIYATAKE, Kazunori IWABUCHI, Yoshiyuki ABE and Yoshifumi HONDA, “Effect of High Moisture Content on Temperature and Microbial Activity of Composting Dairy Cattle Manure,” *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* **69**, 48-54 (2007)
- [8] 「食品のカビについて」株式会社東邦微生物病研究所ホームページ
<https://www.toholab.co.jp/info/archive/1550/>

研究ノート

授業中の自発的発言を促すスタンプカードシステムの試作

加藤 高明*, 板橋 知生**

(2022年9月30日受理)

Prototype of “Stamp Card System” to Urge Students to Speak Up in Class

Komei KATO*, Kazuki ITABASHI**

(Received September 30, 2022)

Abstract

In this paper, we give an outline of digitalization of “Stamp Card”. We have been taking “Stamp Card” to urge students to speak up in class with active responses to questions, even in lecture class. When a student makes a spontaneous answer during class, a stamp is given on “stamp card”, add points to the grade. Digitization in education is accelerating, we developed a prototype of “Stamp Card System” that students can check the current number of stamps using their smartphones.

キーワード:スタンプカード, 能動的, 自主性, スタンプカードシステム, デジタル化

Keywords : Stamp Card, Active, Independence, Stamp Card System, Digitize

1. はじめに

本学における学生の「自立と夢の実現」を目指す独自の教育方法である「AUT教育」は、その根幹は学生一人ひとりの学びの主体性にある。学生同士が互いに教え合うことで学習意欲を高める協同学習(アクティブラーニング)や、雁という鳥がV字型の編隊を組んで飛行するように、同じ目標と連帯意識で結ばれた学生たちが互いの推進力を利用して学力向上をめざす雁行型教育など、学生が能動的に学習に取り組めるような試みを積極的に展開中である。科目担当者ごとも、授業科目の性質に合ったさまざまな工夫が取り入れられているが、筆者はこれまで一方向的になりがちな座学科目であっても学生が自主性をもって授業へ参加し、積極的な発言や発問に対する応答を促すため、「スタンプカード」を取り入れてきた。授業中に自発的な発言や解答があった場合に、「スタンプカード」にスタンプを押し、その獲得数に応じて平常点に加点するというものであるが、毎年学生からの評価は良好である。コロナ感染防止対策推進もあり、教育におけるデジタル化は加速している。紙ベースであるスタンプカードをデジタル化し、学生はスマートフォンから現在の獲得スタンプ数を確認できるようなシステムの試作開発を行った。本稿では、その内容を紹介する。

2. 紙ベーススタンプカードの概要

現在導入している紙ベースのスタンプカードは、科目を履修している各学生に対して、初回の授業時にFig. 1に示すような「スタンプカード」を配布して、学生は毎授業に持参し、自発的な発言者や解答者に対してその場でスタンプを押すことで、平常点に加点するものである。具体的な手順は次のとおりである。

- ①初回の授業で、スタンプカードを学生に配布する。
- ②授業中の自発的発言に対し、その場でスタンプを押す。
- ③スタンプカードは最終回の授業で回収し、成績評価の平常点に反映する。

スタンプが集められなくても減点するのではなく、獲得した分だけ加点される方式であることを強調する。

また「感想・意見等」の自由記述欄を設け、授業最終回の回収時に記入を指示する。その際記入がないと平常点に交換できないこと、また記入があればスタンプが1つ追加で押されることを周知して、「感想・意見等」への記入徹底を図っている。

参考文献[1]で示されたように、「感想・意見等」には否定的な意見はほとんどなく、「やる気が向上する」、「発言が活発化され、より理解が深まるので良い」、

* 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

** 愛知工科大学大学院工学研究科 博士前期課程, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Graduate School of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Gamagori 443-0047, Japan

「眠気がでなくなった」など、肯定的で良好な意見が大半を占めている。

授業に積極的に参加して、発言・発表点をゲット！

基礎コンピュータ概論1 スタンプカード

- 授業中の発言や解答等に対して、適宜スタンプを押します。スタンプの数は、成績評価意欲の発言・発表点に反映させます。
- 基礎コンピュータ概論1の時間には、忘れず持参してください。その時間中のみスタンプを押します。
- スタンプカードを紛失した場合は再発行しますが、それまでに押されたスタンプはすべて無効となります。
- スタンプカードの利用は、本人に限定します。
- スタンプカードは、第15回目（最終回）の授業で回収します。

1 さあー、 ほりきっていいこう	2	3 どんどん いけー	4	5 5スタンプゲット！ だぜい
6	7 ラッキー セブンです	8	9	10 よっしゅ！ 紙の返しだ
11 後半に 突入ッ	12	13 いやー がんばってるわ	14	15 15スタンプ獲得！ この場で
16	17	18	19 あー！つ！ いけるぜー	20 やっだね！ 『勝』も夢ではない

密着・意見等（記入の間違い場合、スタンプは無効となります。最終回の回収時に記入のこと。）

クラス _____ 番号 _____ 氏名 _____

Fig. 1 スタンプカード

3. スタンプカードシステムの試作

3.1 紙ベーススタンプカードの不都合点

紙ベースのスタンプカードは、以下の不都合点がある。

- ①スタンプカードは、A4サイズのカラーのコピー用紙に印刷したもので、学生は授業時に持参するが、持参忘れや紛失が発生する。
- ②最終回の授業で回収して成績評価に反映させるが、持参忘れで回収が遅れると成績処理の遅延が懸念される。

スタンプカードをデジタル化し、獲得個数をサーバで一括管理できれば不都合点は解消され、学生の利便性向上も期待できる。

3.2 スタンプカードシステムの概要

デジタル化するスタンプカードシステムの概要をFig.2 に示す。発言のあった学生に対するスタンプ付

与は、学生の席で学生の保有する学籍番号のバーコードをワイヤレススキャナで読み取ることで行う。学生は各自のスマートフォンでサイトにアクセスすることで現在の獲得スタンプ数を確認できる。

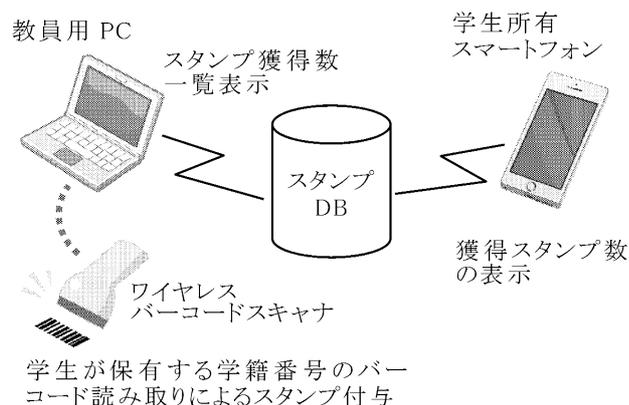


Fig. 2 スタンプカードシステムの概要

3.3 スタンプカードシステムの構成

スタンプカードシステムの構成はFig.3の通りである。

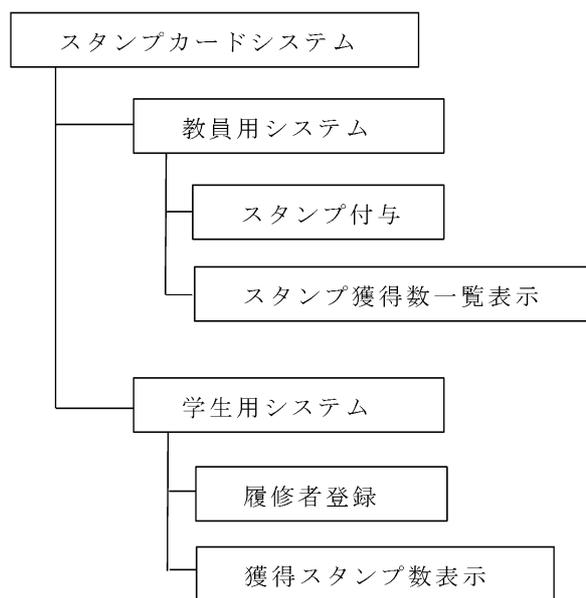


Fig. 3 スタンプカードシステムの構成

教員用システムは、授業中に学生にスタンプを付与する機能と、各学生が現在どれだけのスタンプを獲得しているかを一覧表示させる機能から構成される。

学生用システムでは、その科目のスタンプカードシステムのデータベースに各自の学籍番号、クラス、氏名などを登録する履修者登録機能と、現在の自分の獲得スタンプ数を確認できる機能からなる。

両システムはいずれもアプリをインストールする必要

はなく、すべてサイトにアクセスすることで機能する。

3.4 使用したソフトウェア

開発にあたりWebアプリケーションの開発環境がパッケージ化された Windows 向けXAMPP (8.1.6)を使用した。XAMPPのパッケージ内容を、Table1 に示す。

Table1 XAMPP のパッケージ内容

ソフトウェアの種類	ソフトウェア名	今回の使用状況
Web サーバ	Apache	使用
データベースシステム	MariaDB	使用
プログラミング言語	PHP	使用
プログラミング言語	Perl	未使用

4. スタンプカードシステムの操作手順

ここでは、初回の授業での操作方法から順に、画面を示しながら説明する。

①初回の授業における履修者登録

学生は指定のサイトにアクセスして Fig.4 のトップ画面から「学生用」-「履修者登録」を選択して、Fig.5 の履修者登録画面からスタンプデータベースに各自の学籍番号、パスワード、クラス、名前などを登録する。

②各授業におけるスタンプの付与

教員は授業中は、Fig.4 トップ画面から「教員用」-「スタンプの追加」を選択し、Fig.6 の画面で管理者パスワードを入力して、送信する。

Fig.7 スタンプの加算画面の表示中は、ワイヤレスバーコードで学籍番号のバーコードを読み取ることで、該当学生に加算スタンプ数が付与される。

なお学籍番号のバーコードは、あらかじめ作成方法を指示して、スマートフォンなどに保存しておく。

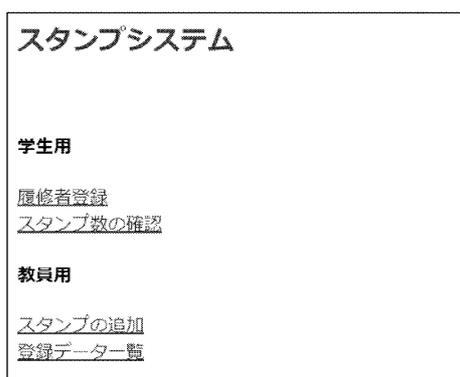


Fig.4 トップ画面

Fig.5 履修者登録画面

Fig.6 管理者パスワードの入力画面

Fig.7 スタンプの加算画面

③学生による獲得スタンプ数の確認

学生が自分の獲得スタンプ数を確認するには、Fig.4のトップ画面から「学生用」-「スタンプ数の確認」を選択して、Fig.8 の画面から学籍番号とパスワードを入力することで、Fig.9 に示す画面で獲得スタンプ数を確認することができる。

④教員による学生の獲得スタンプ数の一覧表示

教員が現在の各学生の獲得スタンプ数を確認するには、Fig.4のトップ画面から「教員用」-「登録データ一覧」を選択して、管理者パスワードを入力することで、Fig.10 に示すように獲得スタンプ数を一覧で表示することができる。学籍番号順、クラス順、スタンプ数順などでソートが可能で、プリントアウト用のレイアウト表示

も備えている。

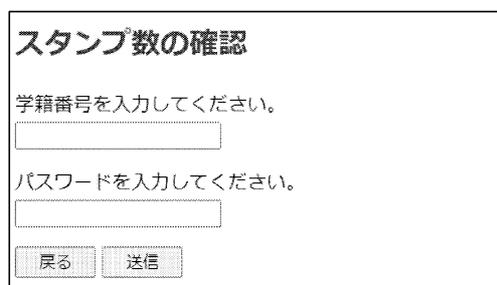


Fig.8 スタンプ数の確認画面



Fig.9 スタンプ数の確認画面

履修者データの一覧

学籍番号	クラス	番号	名前	スタンプ数	バーコード	処理
77777777	J1A	7	竜崎太郎	2	77777777	Delete
22223333	J3A	19	テスト四郎	0	22223333	Delete
44444444	J3B	40	テスト次郎	7	44444444	Delete
55555555	J4A	15	テスト太郎	11	55555555	Delete
88888888	J4B	1	愛知工太郎	1	88888888	Delete

ソート無効化 (プリントアウト用)

Fig.10 スタンプ数の確認画面

5. 導入にあたっての検討事項

試作としての動作確認は終了しているが、授業への導入にあたっては、以下の点を検討する必要がある。

- ①ワイヤレススキャナとノートPCとの接続距離の確認
150名程度収容の中規模講義室では、教卓上のノートPCとワイヤレススキャナの無線接続に問題はないが、実際はどの程度の規模の講義室まで無線接続が可能かを確認する必要がある。

②デザイン性の向上

今回画面のデザイン性は特に意識せず、機能と動作を優先している。ゲームのメカニズムを応用して、ゲーム以外の分野での利用者の行動を促すゲーミフィケーションの要素も取り入れたデザイン性向上を検討

する。

③複数科目への対応

担当する科目が複数あり、それぞれにスタンプシステムを導入したい場合は、科目毎の管理が必要となる。ユーザインタフェースも含めて、実装方法を検討する。

スタンプカードのデジタル化は、学生や教員の利便性を向上させ、機能拡張も期待できる。検討事項に積極的に取り組み、早期導入を目指したい。

参考文献

[1] 加藤高明, “授業中の発言を促すスタンプカードの試行導入,” 愛知工科大学紀要, 第11巻, pp.81-85, 2014年3月。

研究ノート

回転するダブル・ホイール外周部に軸方向荷重を付与したときの ホイール・ボルト軸力の経時変化(実験装置の設計製作)

服部 幸廣*, 甲村 一貴*, 巨藤 誠*, 深谷兼光*

(2022年9月30日受理)

Change with time of Axial Force of Wheel Bolts under Axial Load is Applied to the Periphery of Rotating Double Wheels (Design and Manufacture of Experimental Device)

Yukihiro HATTORI*, Kazuki KOUMURA*, Makoto KOTO*, and Kanemitsu FUKAYA

(Received September 30, 2022)

Abstract

When heavy vehicles turn left, strong twisting force around vertical axis is applied to rear-left double wheels due to turning radius is very small. Therefore, the axial force of wheel bolts that connect rear-left double wheels will change with time. We have designed and manufactured the experimental device to verify this hypothesis. The experimental device can investigate the change with time of axial force of wheel bolts under axial load is applied to the periphery of rotating double wheels. The feature and performance of this device are reported in this research note.

キーワード: 事故, 整備, 大型車, ホイール脱落

Keywords : Accident, Maintenance, Heavy Vehicles, Wheel Separation

1. はじめに

図1に車輪を取り付けるホイール・ボルトの折損またはホイール・ナットの脱落により車輪が脱落した事故件数の推移を示す[1]. 2020年度(令和2年度)は131件であり過去最多である. また, 2013年以降のホイール規格(JIS, ISO)別事故件数は, 研究代表者が国土交通省に行政文書の開示請求を行って得た資料を用いて分類したものである. ISO規格のホイールが普及し始めた2010年度以降, 同規格のホイールの割合が近年急増している. また, 2020年度は約95%で左側後軸のダブル・ホイールが脱落している[1].

JIS規格の脱落事故が多発した2004年度に「大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査検討会」が旧独立行政法人交通安全環境研究所(平成28年から独立行政法人自動車技術総合機構交通安全

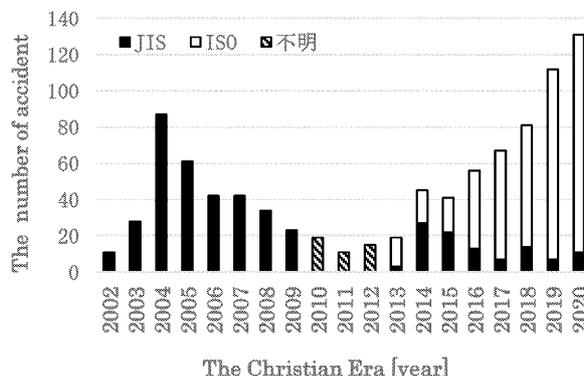


Fig.1 The number of tire separation accidents of heavy vehicles

環境研究所)内に設立され, 同年12月に検討結果をとりまとめ, 国土交通省に報告している. ま

* 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

た、ISO 規格の脱落事故が増大した 2019 年度の 11 月には、「大型車の車輪脱落事故防止対策に係る連絡会」の傘下に「大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査検討 WG」を立ち上げ、2014 年度から 2018 年度に発生した脱落事故の分析結果を、2004 年度の調査検討会での分析結果（1994 年度から 2004 年度）と比較した報告書「大型車の車輪脱落事故防止対策に係る調査検討 WG の中間とりまとめ」を 2020 年 10 月に国土交通省が公表しており、これらの報告書[2,3]の中で、脱落事故の推定原因がいくつか挙げられている。そのひとつに、左旋回時の旋回半径は右旋回時より小さいため、後軸のダブル・ホイールには、鉛直軸まわりに大きな曲げモーメントが生じるため、ホイールやホイール・ボルトに大きな負荷がかかることが挙げられているが検証がされていない。

著者らはこれまでに、規格（JIS, ISO）や材質（スチール、アルミニウム合金）の異なる大型車後軸のダブル・ホイール取り付け時の締め付けトルクと軸力の静的関係（締結後にホイールは回転させない場合の関係）に及ぼす潤滑状態の影響や、JIS 規格のアルミホイール用ホイール・ボルトとホイール・ナットを用いて、スチール・ホイールを組み付けてしまう場合（誤組）による軸力低下などを公表してきた[4~9]が、本報では、大型車で実際に使用されているホーシング、ベアリング、アクスルシャフト、ハブホイール（リヤ）、ドラム、ダブル・ホイール（ISO 規格のアルミニウム合金

製）などを、ホイール・ボルトおよび座金付きのホイール・ナットで締結した構造体（以降、ボルト締結体と呼ぶ）を作製し、左折時に後軸左側のダブル・ホイールをねじる力を再現するため、ダブル・ホイール外周部に軸方向荷重を付与しながら、ボルト締結体を回転させたときのホイール・ボルトに生じる軸力の経時変化を明らかにする。

2. 実験装置

2.1 ホイール・ボルト締結体

図 2 に作製したボルト締結体の両端を旋盤で支持した外観を示す。ホーシング、ドラムおよびアルミホイール（2 本）は軽量化および小型化するため、実験に不要な部分を溶断や切削により除去した。

2.2 荷重付与機構

回転するホイールの外周部に軸方向の荷重が付与できる装置を作製して旋盤の軸方向の送り機構に取り付けた外観を図 3(a)(b)に示す。内部にはシャフト、複数個の皿ばね、ロードセルが内蔵されている。旋盤の軸方向の送り機構により荷重付与機構を軸方向に動かし、先端のローラーをホイール外周部に接触させる。この位置から付与機構を更に軸方向に動かすことで皿ばねが圧縮されてばね力が生じたため、移動距離に比例した軸方向の荷重が付与できる。また、内蔵しているロードセルで付与荷重の大きさを確認・監視できる。

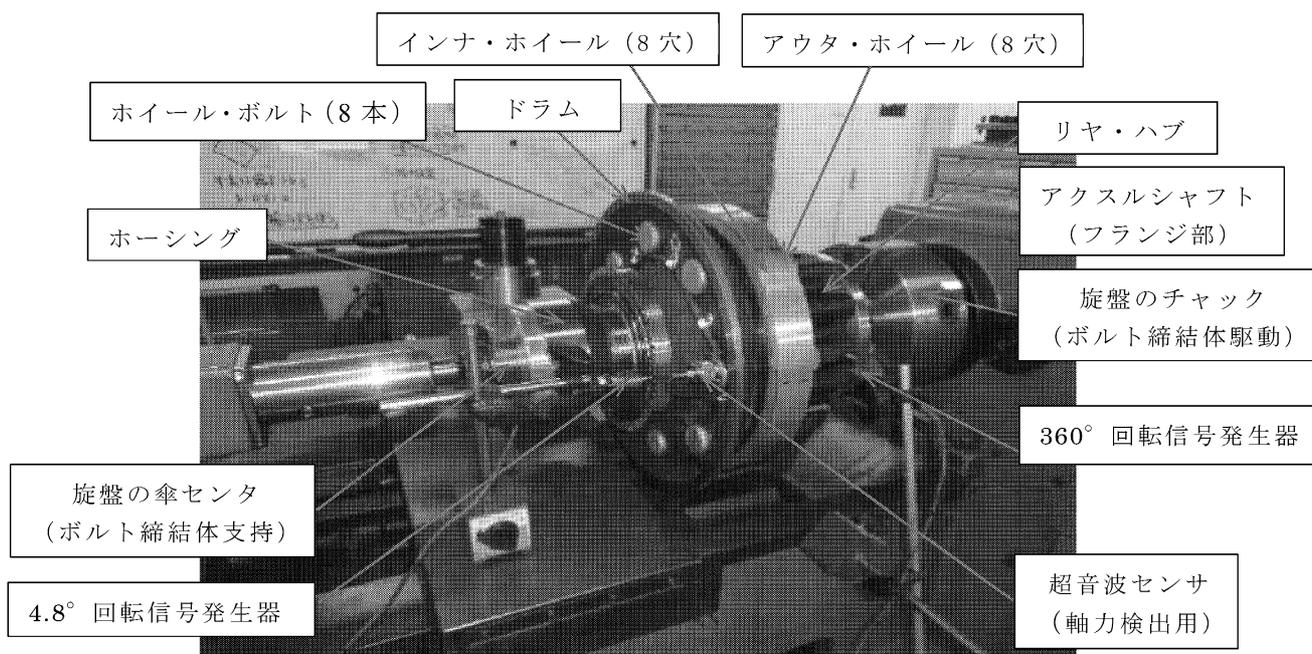


Fig.2 Experimental device

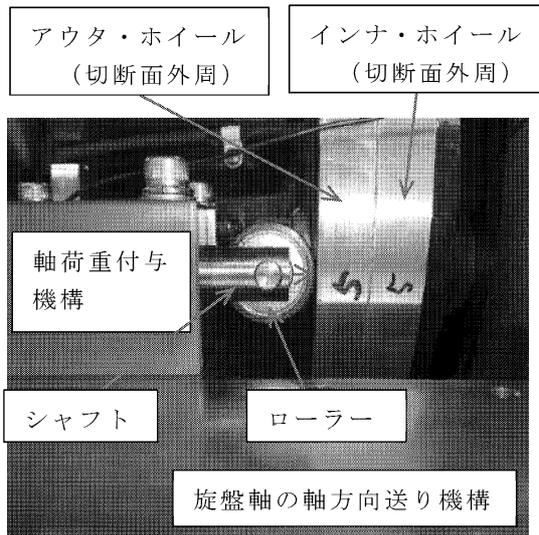


Fig.3(a) Axial load applying unit (side view)

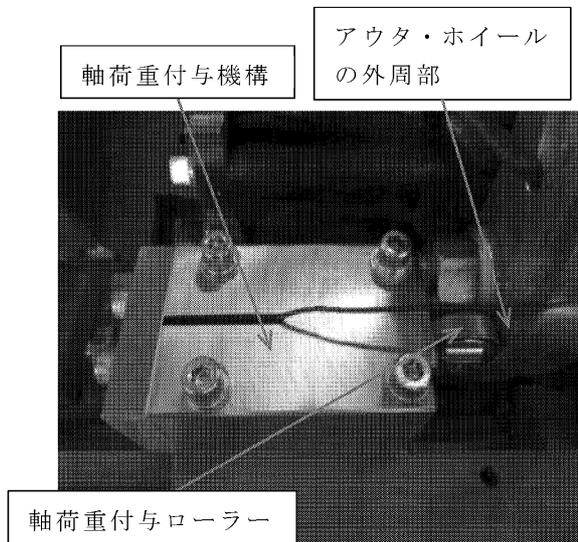


Fig.3(b) Axial load applying unit (top view)

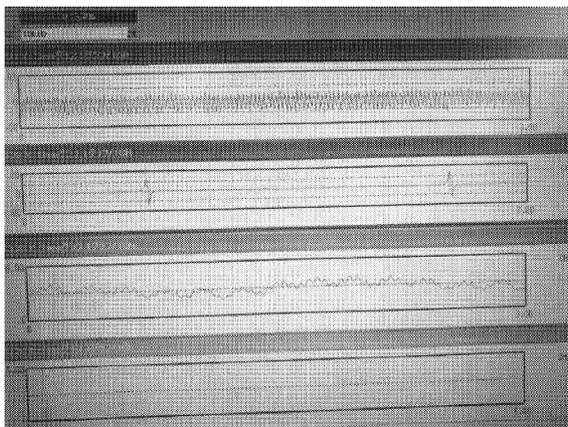


Fig.4 観測信号 (上から 4.8° 回転信号, 360° 回転信号, 付与荷重, 未使用)

2.3 ボルト締結体の支持とホイールの駆動

ボルト締結体両端の片側（ホーシング端面）を旋盤の傘センタで固定し、もう片側（アクスルシャフト）を旋盤のチャックで挟んで駆動する。構造上、アクスルシャフト、リヤ・ハブとダブル・ホイールは一体であるため、大型車の走行状態が再現できる。これまでに、軸方向の荷重 2500N を付与しながら回転速度 200min^{-1} で 5 時間の連続回転を複数回行い、ボルト締結体の安全性や耐久性を確認している。

2.4 計測システム

回転するホイール外周部に付与する軸方向の荷重を検出するロードセルからの信号、ボルト締結体の回転速度や回転位置を検出する 360° 信号およびホイールの回転位置を詳細に検出する 4.8° 信号がアンプを内蔵したインターフェースを経由してノートパソコンに取り込まれる。これらの信号は適切なサンプリング周期下でリアルタイムに時系列データの表示およびストレージが可能である。観測中の時系列信号を図 4 に示す。しかし、超音波センサを用いた軸力計には測定信号の外部出力端子がないため、軸力計の表示部で測定時の値を目視確認した後、手動の入力キーで軸力データをストレージする。

ホイール回転中の軸力を測定するため、ホイール・ボルトの頭部に取り付けた超音波センサがボルト締結体とともに回転して、センサから軸力計本体までの信号線がねじられることを防ぐため、センサからの信号線と軸力計本体の間にブラシ（制御信号転送用）を配置した。超音波センサからの信号線はドラム、リヤ・ハブ、ダブル・ホイールに設けた貫通孔を通し、さらに、ドライブシャフトの中心に設けた貫通孔を通してブラシに接続した。図 5 に超音波センサからブラシまでの信号線の外観を示す。

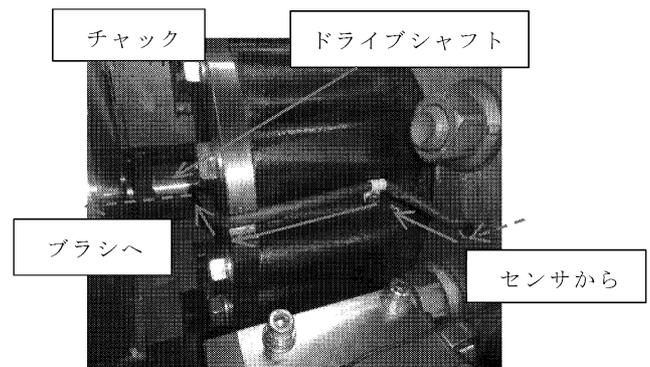


Fig.5 Signal line of supersonic sensor

3. 実験結果

3.1 ボルト軸力(ボルトの伸び)の経時変化

ホイール外周部に軸方向の荷重(約 2500N)を付与しながら回転速度 200min⁻¹で 5 時間連続回転させ、ホイール・ナットを規定トルク(550N・m)で締め付けたときのホイール・ボルトの自然長からの伸びと回転時間の関係を 2 回調査した。その結果を図 6 中に□、■で示す。なお、回転中にホイール・ボルトの温度は変化しないと考えていたため、超音波伝播速度の温度依存性は考慮していない(温度補償なし)。この時点では、伸びは時間とともに大きくなっていくと解釈したが、その後、ホイール・ボルトの温度はベアリングなどの摺動による発熱で経時的に上昇することが分かったため、温度センサでホイール・ボルト頭部の温度を測定して、温度補償しながらボルトの伸びを 2 回計測した。軸力およびホイール・ボルト頭部の温度の経時変化を、それぞれ図 6 および図 7 中に▲、●で示す。

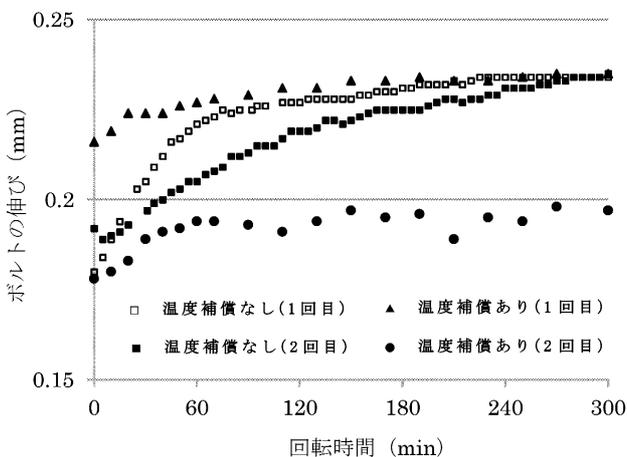


Fig.6 Change with time of elongation of a wheel bolt

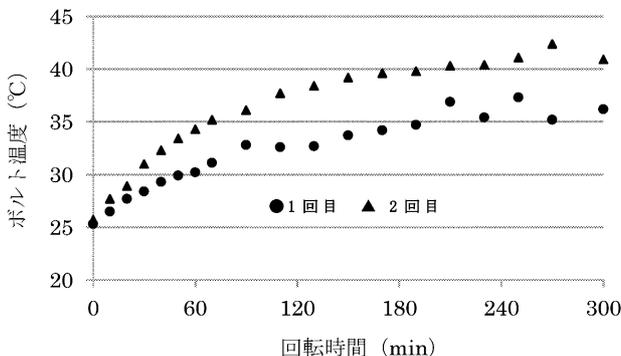


Fig.7 Change with time of temperature of a wheel bolt

現在は温度センサをボルト頭部に固定したまま回転させることができないため、一旦回転を止めて直ちに温度センサをボルト頭部に取り付けて測定した。センサの熱容量が大きいので値がばらついてはいるが、ホイール・ボルトの温度上昇に伴う超音波の伝播速度の低下を計測器が補償しており、実際にはボルトの伸びは少ないことが確認された。現在、温度センサをボルトに常時固定できるように改良している。

ール・ボルトの温度上昇に伴う超音波の伝播速度の低下を計測器が補償しており、実際にはボルトの伸びは少ないことが確認された。現在、温度センサをボルトに常時固定できるように改良している。

4. おわりに

今後は締め付けトルク、潤滑条件、使用するホイール・ボルトとホイール・ナットの性状、ボルト締結体外周部に付与する軸方向荷重、締結体の回転速度を変えた実験を本格的に実施する計画である。

参考文献

- [1] <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001426197.pdf> (2022年10月8日参照)
- [2] (独法)交通安全環境研究所, “大型車のホイール・ボルト折損による車輪脱落事故に係る調査検討会報告書,” Dec. 2004.
- [3] 国土交通省, “大型車の車輪脱落事故防止に係る調査検討WG - 車輪脱落事故防止対策の方向性 - 中間とりまとめ,” Oct. 2020.
- [4] 服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠, “大型車用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響(二硫化モリブデン入り潤滑油を用いた場合の特性),” 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第48号, p.42-46 (2019)
- [5] 甲村一貴, 巨藤誠, 服部幸廣, “大型車ホイール誤組時の締め付けトルクとボルト軸力の関係(スチール・ホイールをアルミホイール用のホイール・ボルトで締め付けた場合の特性),” 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第49号, p.23-28(2020)
- [6] 服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠, “ISO スチール・ホイール用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響,” 愛知工科大学紀要, 第18巻, p.27-33(2021)
- [7] 巨藤誠, 甲村一貴, 服部幸廣, “大型車用ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係に及ぼす潤滑状態の影響 (ISO規格の特性とJIS規格との比較),” 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第50号, p.25-30(2021)
- [8] 服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠, “大型車の車輪脱落事故,” 愛知工科大学紀要, 第19巻, p.49-52(2022)
- [9] 服部幸廣, 甲村一貴, 巨藤誠, “大型車用中古ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係,” 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第51号, p.17-20 (2022)

Maxwell 方程式の系譜

石川雄二郎¹, 石川雄俊²

(2022年 9月 30日受理)

Genealogy of Maxwell Equations

Yujiro Ishikawa¹, Taketoshi Ishikawa²

(Received September 30, 2022)

Abstract

We first show Maxwell equations based on vector analysis and then we add three other representations of Maxwell equations. These three representations are based on tensor analysis, differential forms, and Lagrangian and variational methods. Next, we introduce the Minkowski space and the fundamentals of field strength tensors to apply them later. Finally, we prove that each of three representations is equal to Maxwell equations by deriving Maxwell equations based on vector analysis from each of three representations, respectively.

キーワード : Maxwell 方程式, ベクトル解析, テンソル解析, 微分形式, ラグランジアン

Keywords : Maxwell Equations, Vector Analysis, Tensor Analysis, Differential Forms, Lagrangian

1. まえがき

ベクトル解析による Maxwell 方程式は, 電場, 磁場, 電荷密度, 電流密度に関する 4 式から構成されている. Maxwell 方程式は, 電磁と磁場の代わりに電磁ポテンシャルを基本量として書き換えることができる. 本文で扱う, 場の強さを表すテンソル, 微分形式, 変分原理に基づく Maxwell 方程式の定式化においては電磁ポテンシャルの導入が不可欠である. また Aharonov-Bohm 効果等により電場と磁場よりも電磁ポテンシャルを場の基本量と考えることもできる. 本文ではベクトル解析による Maxwell 方程式に加えて, 場の強さを表すテンソル, 微分形式, 変分原理に基づいた Maxwell 方程式を考察する. これらに基づいた Maxwell 方程式の表式はベクトル解析による Maxwell 方程式と等価であることを, 各表式からベクトル解析の Maxwell 方程式をすべて導き出すことによって示す.

なお, ベクトル解析による Maxwell 方程式は 4 式構成であり, 場の強さを表すテンソルと微分形式による Maxwell 方程式は 2 式構成である. 後者が 2 式構成であるのは, 4 次元時空での定式化であることによる.

2. ベクトル解析による Maxwell 方程式

本文では, 特殊相対論との整合性を重視して, 電磁場の基本量として, 電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B} をとり, 磁界の強さ \mathbf{H} と電束密度 \mathbf{D} は用いない^[1]. ベクトル解析による Maxwell 方程式は次式で表される.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

¹ 愛知工科大学情報メディア学科 定年退職

² 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

である。ここで、 $\mathbf{J} = (J_x, J_y, J_z)$ は電流密度、 ρ は電荷密度、 ϵ_0 は真空の誘電率、 μ_0 は真空の透磁率、 c は光速である。このように Maxwell 方程式は、Gauss の法則 (1)、Ampère-Maxwell の法則 (2)、磁気モノポールが存在しないことを表す法則 (3)、Faraday の法則 (4) と呼ばれる 4 式から構成される。ベクトル解析による Maxwell 方程式は、スカラーポテンシャル ϕ とベクトルポテンシャル $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)$ を用いると

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\nabla\phi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}, & \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \square^2\phi + \frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial\phi}{\partial t} \right) &= -\frac{1}{\epsilon_0} \rho \\ \square^2\mathbf{A} - \nabla \left(\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial\phi}{\partial t} \right) &= -\mu_0 \mathbf{J} \end{aligned} \quad (5)$$

と書き直すことができる [2]。 \square^2 は d'Alembert (波動) 演算子であり

$$\square^2 = \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

で表される。

3. 場の強さテンソル $F_{\mu\nu}$ と電磁場

4次元時空の計量テンソル $\eta_{\mu\nu} (= \eta^{\mu\nu})$ を $(-1, 1, 1, 1)$ を対角要素に持つ行列に取り、時空の座標を、反変と共変を区別して

$$x^0 = -x_0 = ct, \quad x^1 = x_1 = x, \quad x^2 = x_2 = y, \quad x^3 = x_3 = z \quad (6)$$

とする。4次元電磁ポテンシャルは

$$A^0 = -A_0 = \frac{\phi}{c}, \quad A^1 = A_1 = A_x, \quad A^2 = A_2 = A_y, \quad A^3 = A_3 = A_z \quad (7)$$

と取る。以下、巡回的表現を用いて簡潔に表現するため添字 x, y, z の代わりに $1, 2, 3$ を使う。式 (5) の電磁場は、 $1, 2, 3$ を巡回的に変えた i, j, k によって

$$E_i = -c \left(\frac{\partial A^0}{\partial x^i} + \frac{\partial A^i}{\partial x^0} \right), \quad B_i = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial A^k}{\partial x^j} \quad (8)$$

になる。ここで ϵ_{ijk} は、3階完全反対称テンソルであり

$$\epsilon^{ijk} = -\epsilon_{ijk} = \begin{cases} +1 & (ijk) \text{ が } 1, 2, 3 \text{ の偶置換の場合} \\ -1 & (ijk) \text{ が } 1, 2, 3 \text{ の奇置換の場合} \\ 0 & (ijk) \text{ に同じものがある場合} \end{cases}$$

によって定義される。

場の強さとよばれる共変テンソルを $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ として

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \quad \left(\partial_\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x^\mu} \right) \quad (9)$$

で定義すると、式 (9), (7), (8) より

$$\begin{aligned} F_{0i} &= \frac{\partial A_i}{\partial x^0} - \frac{\partial A_0}{\partial x^i} = \frac{\partial A^0}{\partial x^i} + \frac{\partial A^i}{\partial x^0} = -\frac{1}{c} E_i \\ F_{jk} &= \frac{\partial A_k}{\partial x^j} - \frac{\partial A_j}{\partial x^k} = \frac{\partial A^k}{\partial x^j} - \frac{\partial A^j}{\partial x^k} = B_i \end{aligned}$$

すなわち、電磁場の成分は共変テンソルにより

$$F_{0i} = -\frac{1}{c} E_i, \quad F_{jk} = B_i \quad (10)$$

になる。以下ではテンソルの総和に対して Einstein の既約を適用し \sum は省力する。反変テンソルは

$$F^{\mu\nu} = \eta^{\mu\kappa}\eta^{\nu\lambda}F_{\kappa\lambda} = \frac{\partial A^\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial A^\mu}{\partial x_\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu \quad \left(\partial^\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x_\mu} \right)$$

だから、成分を

$$F^{0i} = \frac{1}{c}E^i, \quad F^{jk} = B^i \quad (11)$$

とすると、慣性系では

$$E_i = -cF_{0i} = cF^{0i} = E^i, \quad B_i = F_{jk} = F^{jk} = B^i$$

が得られ

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= (E_1, E_2, E_3) = (E^1, E^2, E^3) \\ \mathbf{B} &= (B_1, B_2, B_3) = (B^1, B^2, B^3) \end{aligned}$$

と書ける。以上のように Minkowski 空間では共変テンソル、反変テンソルのいずれからでも式 (10), (11) によって電磁場を与えることができる。

また、電荷密度を ρ 、電流密度を \mathbf{J} として

$$J^\nu = (c\rho, \mathbf{J}) = (c\rho, J^1, J^2, J^3) \quad (12)$$

は 4 次元電流密度である。

$F_{\mu\nu}$ の双対テンソルは

$${}^*F_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\epsilon_{\kappa\lambda\mu\nu}F^{\kappa\lambda} \quad (13)$$

により定義され、双対テンソルの各成分は関係式

$${}^*F_{0i} = -F^{jk} = -B^i, \quad {}^*F_{ij} = -F^{0k} = -\frac{1}{c}E^k \quad (14)$$

を満たす。ここで、 $*$ は Hodge スター演算子である。また $\epsilon_{\kappa\lambda\mu\nu}$ は、4 階完全反対称テンソルであり

$$\epsilon^{\kappa\lambda\mu\nu} = -\epsilon_{\kappa\lambda\mu\nu} = \begin{cases} +1 & (\kappa\lambda\mu\nu) \text{ が } 0, 1, 2, 3 \text{ の偶置換の場合} \\ -1 & (\kappa\lambda\mu\nu) \text{ が } 0, 1, 2, 3 \text{ の奇置換の場合} \\ 0 & (\kappa\lambda\mu\nu) \text{ に同じものがある場合} \end{cases}$$

により定義される。

4 次元微分形式の基底 dx^λ の双対基底 ${}^*(dx^\lambda)$ は

$${}^*(dx^\alpha) = \frac{1}{6}\epsilon_{\lambda\mu\nu\kappa}\eta^{\alpha\lambda}dx^\mu \wedge dx^\nu \wedge dx^\kappa \quad (15)$$

により定義され^[3]

$$\begin{aligned} {}^*(dx^0) &= dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3, & {}^*(dx^1) &= dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ {}^*(dx^2) &= -dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3, & {}^*(dx^3) &= dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \end{aligned} \quad (16)$$

になる。

4. Maxwell 方程式の各種表式

4.1 場の強さのテンソルによる表式

モノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) は Bianchi 恒等式

$$\partial_\mu F_{\nu\kappa} + \partial_\kappa F_{\mu\nu} + \partial_\nu F_{\kappa\mu} = 0 \quad (17)$$

と等価であり, Gauss の法則 (1) と Ampère-Maxwell の法則 (2) は

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = -\mu_0 J^\nu \quad (18)$$

と等価である. ここで, J^ν は 4 次元電流密度 (12) である. 場の強さのテンソルを使うと, Maxwell 方程式は極めて簡潔な 2 式 (17), (18) で表すことができる.

4.2 微分形式による表式

4 次元微分形式の基底を dx^μ ($\mu = 0, 1, 2, 3$) に選び, ベクトルポテンシャルと電流密度を 4 次元に拡張し

$$A = A_0 dx^0 + A_1 dx^1 + A_2 dx^2 + A_3 dx^3, \quad J = -c\rho dx^0 + J^1 dx^1 + J^2 dx^2 + J^3 dx^3 \quad (19)$$

とし, 場の強さ F を

$$F = dA = \frac{1}{2} F_{\mu\nu} dx^\mu \wedge dx^\nu \quad (20)$$

と定義する. このとき, モノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) は

$$dF = 0 \quad (21)$$

と等価であり, Gauss の法則 (1) と Ampère-Maxwell の法則 (2) は

$$d^*F = \mu_0^* J \quad (22)$$

と等価である. 微分形式を使うと, Maxwell 方程式は極めて簡潔な 2 式 (21), (22) で表すことができる.

4.3 電磁場の変分原理による表式

電磁場を記述する Lagrangian 密度 $\mathcal{L}(\phi, A_1, A_2, A_3)$ は

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4\mu_0} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - J^\nu A_\nu \quad (23)$$

である [4]. このとき ϕ に関する Euler-Lagrange 方程式は Gauss の法則 (1), A_1, A_2, A_3 に関する Euler-Lagrange 方程式は Ampère-Maxwell の法則 (2) と等価である. モノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) は自動的に成り立つ.

5. 各表式からの Maxwell 方程式の導出

5.1 場の強さのテンソルによる表式からの導出

最初に, 式 (17) はモノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) と等価であることを示す. 式 (10) を使うと

(a) $(\mu, \nu, \kappa) = (0, 1, 2)$ のとき

$$\partial_0 F_{12} + \partial_2 F_{01} + \partial_1 F_{20} = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial B_3}{\partial t} + \frac{\partial E_2}{\partial x^1} - \frac{\partial E_1}{\partial x^2} \right) = \frac{1}{c} \left\{ (\nabla \times \mathbf{E})_3 + \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_3 \right\} = 0. \quad (24)$$

(b) $(\mu, \nu, \kappa) = (0, 1, 3)$ のとき

$$\partial_0 F_{13} + \partial_3 F_{01} + \partial_1 F_{30} = -\frac{1}{c} \left\{ (\nabla \times \mathbf{E})_2 + \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_2 \right\} = 0. \quad (25)$$

(c) $(\mu, \nu, \kappa) = (0, 2, 3)$ のとき

$$\partial_0 F_{23} + \partial_3 F_{02} + \partial_2 F_{30} = \frac{1}{c} \left\{ (\nabla \times \mathbf{E})_1 + \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_1 \right\} = 0. \quad (26)$$

(d) $(\mu, \nu, \kappa) = (1, 2, 3)$ のとき

$$\partial_1 F_{23} + \partial_3 F_{12} + \partial_2 F_{31} = \frac{\partial B_1}{\partial x^1} + \frac{\partial B_2}{\partial x^2} + \frac{\partial B_3}{\partial x^3} = \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (27)$$

以上より式 (17) はモノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) と等価であることが示された。

次に、式 (18) は Gauss の法則 (1) と Ampère-Maxwell の法則 (2) と等価であることを示す。式 (10), (12) を使うと

(a) $\nu = 0$ のとき

$$\begin{aligned} \text{左辺} = \partial_\mu F^{\mu 0} &= \left(\frac{\partial F^{10}}{\partial x^1} + \frac{\partial F^{20}}{\partial x^2} + \frac{\partial F^{30}}{\partial x^3} \right) = -\frac{1}{c} \left(\frac{\partial E^1}{\partial x^1} + \frac{\partial E^2}{\partial x^2} + \frac{\partial E^3}{\partial x^3} \right) = -\frac{1}{c} (\nabla \cdot \mathbf{E}) \\ \text{右辺} &= -\mu_0 J^0 = -\mu_0 (c\rho) = -\frac{1}{c} \left(\frac{\rho}{\epsilon_0} \right). \end{aligned}$$

ただし、最後の等式で $c^2 = 1/(\epsilon_0\mu_0)$ を用いた。以上より

$$(\nabla \cdot \mathbf{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}.$$

(b) $\nu = 1$ のとき

$$\begin{aligned} \partial_\mu F^{\mu 1} &= \frac{1}{c} \frac{\partial F^{01}}{\partial t} + \frac{\partial F^{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial F^{31}}{\partial x^3} \\ &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial E^1}{\partial t} - \left(\frac{\partial B^3}{\partial x^2} - \frac{\partial B^2}{\partial x^3} \right) \\ &= \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)_1 - (\nabla \times \mathbf{B})_1 = -\mu_0 J^1. \end{aligned}$$

(c) $\nu = 2$ のとき

$$\partial_\mu F^{\mu 2} = \frac{1}{c} \frac{\partial F^{02}}{\partial t} + \frac{\partial F^{12}}{\partial x^1} + \frac{\partial F^{32}}{\partial x^3} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)_2 - (\nabla \times \mathbf{B})_2 = -\mu_0 J^2.$$

(d) $\nu = 3$ のとき

$$\partial_\mu F^{\mu 3} = \frac{1}{c} \frac{\partial F^{03}}{\partial t} + \frac{\partial F^{13}}{\partial x^1} + \frac{\partial F^{23}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)_3 - (\nabla \times \mathbf{B})_3 = -\mu_0 J^3.$$

以上より式 (18) は Gauss の法則 (1) と Ampère-Maxwell の法則 (2) と等価であることが示された。

5.2 微分形式による表式からの導出

最初に、式 (21) はモノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) と等価であることを示す。F の外微分は式 (20) より

$$\begin{aligned} dF &= \frac{1}{2} \partial_k F_{\mu\nu} dx^\kappa \wedge dx^\mu \wedge dx^\nu \\ &= \frac{1}{6} (\partial_\mu F_{\nu\kappa} + \partial_\kappa F_{\mu\nu} + \partial_\nu F_{\kappa\mu}) dx^\mu \wedge dx^\nu \wedge dx^\kappa \\ &= (\partial_0 F_{12} + \partial_2 F_{01} + \partial_1 F_{20}) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \end{aligned} \tag{28}$$

$$+ (\partial_0 F_{13} + \partial_3 F_{01} + \partial_1 F_{30}) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \tag{29}$$

$$+ (\partial_0 F_{23} + \partial_3 F_{02} + \partial_2 F_{30}) dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \tag{30}$$

$$+ (\partial_1 F_{23} + \partial_3 F_{12} + \partial_2 F_{31}) dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \tag{31}$$

$$= 0$$

である。式 (24)~(27) を式 (28)~(31) にそれぞれ代入すると

$$\begin{aligned} dF &= \frac{1}{c} \left(\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_3 dt \wedge dx^1 \wedge dx^2 - \frac{1}{c} \left(\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_2 dt \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad + \frac{1}{c} \left(\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_1 dt \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \nabla \cdot \mathbf{B} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 = 0 \end{aligned}$$

になる。基底の独立性より式 (21) はモノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) と等価であることが示された。

次に、式 (22) は Gauss の法則 (1) と Ampère-Maxwell の法則 (2) と等価であることを示す。*F は式 (14) を使うと

$$\begin{aligned}
d^*F &= \frac{1}{6} (\partial_\mu^* F_{\nu\kappa} + \partial_\kappa^* F_{\mu\nu} + \partial_\nu^* F_{\lambda\mu}) dx^\mu \wedge dx^\nu \wedge dx^\kappa \\
&= (\partial_0^* F_{12} + \partial_2^* F_{01} + \partial_1^* F_{20}) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \\
&\quad + (\partial_0^* F_{13} + \partial_3^* F_{01} + \partial_1^* F_{30}) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\
&\quad + (\partial_0^* F_{23} + \partial_3^* F_{02} + \partial_2^* F_{30}) dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\
&\quad + (\partial_1^* F_{23} + \partial_3^* F_{12} + \partial_2^* F_{31}) dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\
&= \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial E^3}{\partial t} - \frac{\partial B^1}{\partial x^2} + \frac{\partial B^2}{\partial x^1} \right) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 - \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial E^2}{\partial t} + \frac{\partial B^1}{\partial x^3} - \frac{\partial B^3}{\partial x^1} \right) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\
&\quad + \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial E^1}{\partial t} - \frac{\partial B^2}{\partial x^3} + \frac{\partial B^3}{\partial x^2} \right) dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{1}{c} \left(-\frac{\partial E^1}{\partial x^1} - \frac{\partial E^3}{\partial x^3} - \frac{\partial E^2}{\partial x^2} \right) dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\
&= \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{B} \right)_3 dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 - \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{B} \right)_2 dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\
&\quad + \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{B} \right)_1 dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 - \frac{1}{c} \nabla \cdot \mathbf{E} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3
\end{aligned}$$

になる。そして、 $\mu_0 J$ の双対微分形式は式 (19) より式 (16) を使うと

$$\begin{aligned}
\mu_0^* J &= -\frac{1}{c} \frac{\rho}{\epsilon_0} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \mu_0 J_x dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\
&\quad - \mu_0 J_y dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 + \mu_0 J_z dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2
\end{aligned}$$

になる。基底の独立性より式 (22) は Gauss の法則 (1) と Ampère-Maxwell の法則 (2) と等価であることが示された。

5.3 電磁場の変分原理からの導出

計算のため、テンソル和 $-F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} / (4\mu_0)$ を F_0, F_1 の 2 つの和に分ける。添字 $\mu\nu$ に 0 が含まれる項の和 F_0 は式 (9) より

$$\begin{aligned}
-\frac{1}{4\mu_0} (F^{01} F_{01} + F^{10} F_{10}) &= \frac{1}{2\mu_0} F_{01}^2 \\
&= \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{\partial A_1}{\partial x^0} - \frac{\partial A_0}{\partial x^1} \right)^2 \\
&= \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{1}{c} \frac{\partial \phi}{\partial x^1} \right)^2 \\
&= \frac{1}{2} \epsilon_0 \left\{ \dot{A}_1^2 + 2\dot{A}_1 \frac{\partial \phi}{\partial x^1} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^1} \right)^2 \right\} \\
-\frac{1}{4\mu_0} (F^{02} F_{02} + F^{20} F_{20}) &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \left\{ \dot{A}_2^2 + 2\dot{A}_2 \frac{\partial \phi}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^2} \right)^2 \right\} \\
-\frac{1}{4\mu_0} (F^{03} F_{03} + F^{30} F_{30}) &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \left\{ \dot{A}_3^2 + 2\dot{A}_3 \frac{\partial \phi}{\partial x^3} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^3} \right)^2 \right\}
\end{aligned}$$

より

$$\begin{aligned}
F_0 &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \left\{ \dot{A}_1^2 + \dot{A}_2^2 + \dot{A}_3^2 + \right. \\
&\quad \left. + 2\dot{A}_1 \frac{\partial \phi}{\partial x^1} + 2\dot{A}_2 \frac{\partial \phi}{\partial x^2} + 2\dot{A}_3 \frac{\partial \phi}{\partial x^3} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^3} \right)^2 \right\}
\end{aligned}$$

になる。ここで \cdot は t に関する微分を表す。

$-\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ の添字に 0 を含まない項の和 \mathcal{F}_1 は

$$\begin{aligned} -\frac{1}{4\mu_0} (F^{12}F_{12} + F^{21}F_{21}) &= -\frac{1}{2\mu_0} F_{12}^2 = -\frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{\partial A_2}{\partial x^1} - \frac{\partial A_1}{\partial x^2} \right)^2 \\ -\frac{1}{4\mu_0} (F^{23}F_{23} + F^{32}F_{32}) &= -\frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{\partial A_3}{\partial x^2} - \frac{\partial A_2}{\partial x^3} \right)^2 \\ -\frac{1}{4\mu_0} (F^{31}F_{31} + F^{13}F_{13}) &= -\frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{\partial A_1}{\partial x^3} - \frac{\partial A_3}{\partial x^1} \right)^2 \end{aligned}$$

より

$$\mathcal{F}_1 = -\frac{1}{2\mu_0} \left\{ \left(\frac{\partial A_2}{\partial x^1} - \frac{\partial A_1}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_3}{\partial x^2} - \frac{\partial A_2}{\partial x^3} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_1}{\partial x^3} - \frac{\partial A_3}{\partial x^1} \right)^2 \right\}$$

になる。

また、式 (23) の右辺第 2 項は式 (12), (7) より

$$\mathcal{F}_2 = J^\nu A_\nu = c\rho A_0 + J^1 A_1 + J^2 A_2 + J^3 A_3 = -\rho\phi + J^1 A_1 + J^2 A_2 + J^3 A_3$$

になる。このとき電磁場の Lagrangian 密度は

$$\mathcal{L} = \mathcal{F}_0 + \mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2$$

となる。

最初に式 (23) の ϕ に関する Euler-Lagrange 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\phi}} + \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_i \phi)} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial \mathcal{F}_0}{\partial (\partial_i \phi)} - \frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial \phi} = 0$$

は Gauss の法則と等価であることを示す。ここで最右式左辺第 1 項は

$$\begin{aligned} &\left\{ \frac{\partial}{\partial x^1} \frac{\partial}{\partial (\partial_1 \phi)} + \frac{\partial}{\partial x^2} \frac{\partial}{\partial (\partial_2 \phi)} + \frac{\partial}{\partial x^3} \frac{\partial}{\partial (\partial_3 \phi)} \right\} \mathcal{F}_0 \\ &= \epsilon_0 \left\{ \frac{\partial}{\partial x^1} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^1} + \dot{A}^1 \right) + \frac{\partial}{\partial x^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^2} + \dot{A}^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x^3} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x^3} + \dot{A}^3 \right) \right\} \\ &= -\epsilon_0 \left(\frac{\partial E_1}{\partial x^1} + \frac{\partial E_2}{\partial x^2} + \frac{\partial E_3}{\partial x^3} \right) \\ &= -\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E}. \end{aligned}$$

最右式左辺第 2 項は

$$-\frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial \phi} = -\frac{\partial}{\partial \phi} (-\rho\phi + j^1 A_1 + j^2 A_2 + j^3 A_3) = \rho$$

になるので、最右式は

$$-\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} + \rho = 0$$

になる。以上より式 (23) は Gauss の法則 (1) と等価であることが示された。

次に式 (23) の A_j ($j = 1, 2, 3$) に関する Euler-Lagrange 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{A}_j} + \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_i A_j)} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_j} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathcal{F}_0}{\partial \dot{A}_j} + \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial (\partial_i A_j)} - \frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial A_j} = 0$$

より Ampère-Maxwell の法則 (2) が得られることを示す。 $j = 1$ のとき、最右式左辺第 1 項は

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathcal{F}_0}{\partial \dot{A}_j} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(2\dot{A}_1 + 2 \frac{\partial \phi}{\partial x^1} \right) = -\epsilon_0 \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)_1.$$

最右式左辺第 2 項は

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial (\partial_i A_1)} &= \frac{\partial}{\partial x^1} \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial (\partial_1 A_1)} + \frac{\partial}{\partial x^2} \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial (\partial_2 A_1)} + \frac{\partial}{\partial x^3} \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial (\partial_3 A_1)} \\
&= -\frac{1}{\mu_0} \left\{ -\frac{\partial}{\partial x^2} \left(\frac{\partial A_2}{\partial x^1} - \frac{\partial A_1}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x^3} \left(\frac{\partial A_1}{\partial x^3} - \frac{\partial A_3}{\partial x^1} \right) \right\} \\
&= -\frac{1}{\mu_0} \left\{ -\frac{\partial}{\partial x^2} (\nabla \times \mathbf{A})_3 + \frac{\partial}{\partial x^3} (\nabla \times \mathbf{A})_2 \right\} \\
&= \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B})_1.
\end{aligned}$$

最右式左辺第 3 項は

$$-\frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial A_1} = -J^1.$$

以上より

$$(\nabla \times \mathbf{B})_1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)_1 = \mu_0 J^1$$

が得られる。\$A_2, A_3\$ に関する Euler-Lagrange 方程式についても同様に

$$\begin{aligned}
(\nabla \times \mathbf{B})_2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)_2 &= \mu_0 J^2 \\
(\nabla \times \mathbf{B})_3 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)_3 &= \mu_0 J^3
\end{aligned}$$

になる。以上より式 (23) の \$A_1, A_2, A_3\$ に関する Euler-Lagrange 方程式は Ampère-Maxwell の法則 (2) と等価であることが示された。

最後に磁気モノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) について考察する。式 (9) にて定義される場の強さの共変テンソル \$F_{\mu\nu}\$ は式 (17) を恒等的に満たす。実際、式 (9) より

$$\begin{aligned}
\partial_\mu F_{\nu\kappa} &= \partial_\mu (\partial_\nu A_\kappa - \partial_\kappa A_\nu) = \partial_\mu \partial_\nu A_\kappa - \partial_\mu \partial_\kappa A_\nu \\
\partial_\kappa F_{\mu\nu} &= \partial_\kappa (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) = \partial_\kappa \partial_\mu A_\nu - \partial_\kappa \partial_\nu A_\mu \\
\partial_\nu F_{\kappa\mu} &= \partial_\nu (\partial_\kappa A_\mu - \partial_\mu A_\kappa) = \partial_\nu \partial_\kappa A_\mu - \partial_\nu \partial_\mu A_\kappa
\end{aligned}$$

になり、辺々加えると式 (17) が得られる。したがって、5.1 小節で示したように、磁気モノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) は、実は、\$F_{\mu\nu}\$ を式 (9) で定義する限り、自動的に成立している。

6. むすび

5.1 小節で示したように Bianchi 恒等式は、磁気モノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) であり、5.3 小節の後半で示したように、Bianchi 恒等式は \$F_{\mu\nu}\$ を式 (9) で定義する限り成り立つ恒等式である。したがって、\$F_{\mu\nu}\$ を用いた Maxwell 方程式の表式では、導き出す必要のある方程式は Gauss の法則 (1) と Ampère-Maxwell の法則 (2) の 2 式のみで十分である。しかし、本文ではベクトル解析による Maxwell 方程式の 4 式がそれぞれの表式においてどのように対応するかを重視して、敢えて磁気モノポールが存在しない法則 (3) と Faraday の法則 (4) も導き出した。

ベクトル解析による Maxwell 方程式は、場の強さのテンソル、微分形式によって極めて簡潔に表現できる。それは Minkowski 空間で共変形式の Maxwell 方程式を考察することに基づいている。また、電磁場の変分原理からも、その Euler-Lagrange 方程式として Maxwell 方程式を導きだすことができる。変分原理による電磁場の解析力学的な理論はゲージ理論へと続いているので、量子論的な電磁場の基礎として重要である。

本文のどの Maxwell 方程式の表式を採用しても、その表す内容はもちろん等価である。しかし、数値解析的にはそれぞれの表式によるコンピュータ数値計算の優位性は異なることが予想され、この観点から新しい数値計算法の研究が期待される。

参考文献

- [1] 太田浩一, “電磁気学の基礎 2”, 東京大学出版会, 東京都, 2012.
- [2] 中野董夫, “物理入門コース 相対性理論”, 岩波書店, 東京都, 2006.
- [3] 菅野禮司, “微分形式による特殊相対論”, 丸善株式会社, 東京都, 1996.
- [4] 牟田泰三, “現代の物理学 電磁力学”, 岩波書店, 東京都, 1992.

報告

ブレンディッド型教育推進のための初学者向け講義デザインの検討

尾関 智恵*, 小林 直美*, 近藤 敏彰*, 西口 直浩*, 加藤 央昌*

(2022年9月30日受理)

Design and Practice of Lectures for Beginning Students to Promote Blending-type Education

Tomoe OZEKI*, Naomi KOBAYASHI*, Toshiaki KONDO*, Tadahiro NISHIGUCHI*, Hiroaki KATO*

(Received September 30, 2022)

Abstract

This paper describes how to develop the lecture blended traditional and online lecture for beginning students of Aichi University of Technology. The lecture is developed carefully to take into beginning students who are unfamiliar with PC and smartphones. The lecture design started in 2020, when the covid-19 pandemic began, and the concept of its construction and the status of lectures conducted until 2022 is reported.

キーワード: ブレンディッド教育, 対面講義, オンライン講義, 初学者向け教育

Keywords: Blending education, Traditional lectures, Online lectures, Education for beginners

1. はじめに

2020年より新型コロナウイルスによるパンデミックが発生し、今日もなおイベントの中止・実施のあり方や生活様式の変更を迫られている。全世界的に社会的やりとりに ICT 技術を活用したコミュニケーション環境が採用され、官・民・学すべてのフィールドで迅速な情報化が実施された[1]。

1.1 教育現場におけるオンライン化の状況

教育現場ではギガスクール構想が前倒しとなり、タブレット端末を用いた学習支援システムやオンライン会議ツールの活用が広がった。小中高の学校教育現場では、対面重視および生活指導も含む教育に重点があるため、現在も試行錯誤が繰り返されている[2]。

一方、高等教育機関である大学ではコロナ前よりこれらのシステムを活用している場合はさらなる充実が図られたが[3]、今回の状況で自学習環境の移行を迫られた場合は、学習支援システムの立ち上げだけではなくインフラ整備など、ICT 活用がそもそも不能だったケースも浮き彫りとなった。この問題は大学・教員側の問題が注目を受けやすいが、同時に受講する学生側の情報リテラシー能力の格差が対応度合いに強く影響を与えていることも重大な課題と考える。

1.2 本学におけるオンライン化の状況

本学においては、2020年4月～5月までの2ヶ月間全学休講となった。その際、コロナ以前より Web ポータルによる情報周知・履修管理や、一部で利用されていた Google クラウドルーム等のオンライン学習支援システムによって、在学中の学生については最低限の情報リテラシーを持っていた状態でパンデミックによる全学休講期間を迎えることができた。そのため、教職員・在学生共に戸惑いや不安、導入のしやすさの度合いがあったものの、比較的スムーズにオンライン講義への転換ができたといえる。

しかし、新入生においてはこれらの情報システムに関するガイダンスも満足にできない状態であった。ひとまず入学式の際に一旦集合したものの、次の日からは自宅学習に突入せざるを得ない状況を迎えた。これに加え世界的な半導体不足[4]の影響で1年生向けの PC が届かずオンライン化に移れない問題や、短期間で調査した範囲でもインターネット利用が困難な学生がいることが判明したため、オンラインを介した公平な情報提供やサポートが不可能であった。そのため、2020年4月20日に郵送による3ヶ月分紙資料の配布を迅速に実施した[5]。あわせて Google クラウドルー

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

ムの利用方法についても紙資料を同封し、オンライン参画できる学生の母数を増やす試みもおこなった。しかし、紙による取り組み度合いでも個人差が生まれ、学生によっては課題遂行どころかメンタルヘルスの面で負担が大きくなり、期待に胸を高めて大学生活をスタートさせるはずだった学生の中には体調不良や休学に至る者もでる事態となった。

このような中、本学の特徴であるコンパクトで面倒見の良さを最大限に活かすため、2020年5月末より臨時登校日を実施し、1年生だけでなく2年生以上の在校生についても対面で学生の状況観察を行った。そして、6月より他学に先駆けて対面講義の再開に踏み切った[6]。しかし、夏休み直前の8月4～8日には再度全学休講となった[7]。その後も目まぐるしく変化する状況の中、対面と遠隔を繰り返しながら2020年度は1年生も含めどちらの状況でも学びを止めない姿勢と努力で学習スケジュールを全学的に実施できた。

2. AUT 教育入門前半での取り組み

2020年度の経験を活かし、依然終わりの見えないコロナ禍の状況を見据えて、2021年度新入生に向けた初年度時教育のあり方と導入の仕方について各所で検討とブラッシュアップが行われた。その1つある「AUT 教育入門」について2021年度に行われた検討と2022年度までに行われた実施状況を報告する。

「AUT 教育入門」は本学に入学した全学科を横断する初年次教育の一つである。本学での大学生活を円滑に開始できるようカリキュラムデザインされていることが特徴である。この授業について、2020年12月中旬に初年次教育部門センター長の命を受け、各学科より若手を中心に本講義を調整するコアメンバーとして招集された。表1のように打ち合わせを重ね、本講義に必要とされる要件の整理を行い、カリキュラムに組み込んでいった。

表1 コアメンバーによる検討実績とその内容

日程	参加者	内容
2020/12 中旬	関係者	メール等で事前情報共有
2021/1/19 13:30-15:00	コアメンバー	シラバス、運営方法、評価方法
2021/1/27 15:00-16:30	センター長、 部門長	シラバス、評価、 その他(PC関係)
2021/3/17 13:00-17:10	コアメンバー	スケジュール、連携、 講義内容
2021/3/24 15:00-16:30	コアメンバー	講義内容、教員 説明会準備、SA
2021/4/6 16:30-17:30	アドバイザー	教員説明会

2.1 入学生に必要なスキルの整理

次年度の2020年度の経験から、パンデミックに限らず在宅待機が必要な状況において、本学の入学者の学びを止めないためには何が必要かを検討した。その際、以下に示す内容を対面実施からオンライン実施に置き換えることがセンター長からの要件として示されていた。

- ・工場見学が中止の場合の対応
- ・テキストの印刷の有無
- ・学長講話の実施方法
- ・Google クラウドでの実施

これを受け、教育効果を考慮しながら授業目標とねらいを以下のように設定した。講義内容にはWebポータル及びGoogle クラウドそしてGmailによるオンラインコミュニケーション方法の習得についても明記している。

大学での学びと生活をスムーズに始められ、大学生活の過ごし方を自分で考えられる。課題を通じ大学生としての基礎学力を身につける。グループ活動、ディスカッションやプレゼンテーションを通してコミュニケーション能力を身につける。自己理解を深め自分の活かし方を考え、気づくことができる。他人と協同して問題解決ができる。自主、自立、自治の精神を高め、夢の実現に向けた力があることを実感できる。

2.2 ブレンディッド教育

コロナ禍以前より、対面とオンライン学習を併用し、教育効果を高める手法としてブレンド型教育は存在していた。こういった教育手法はアクティブラーニングの効果を高める反転学習[8]やすべての講義をオンラインで実施しながら高度な人材を輩出し続けているミネルバ大学での教育実践[9]などから報告され続けている。このような教育手法は、知識を試験やその場限り覚えていればよいといった学習にならないよう、学習者が生きていくために必要なものとして身につけることを目的としている。知識を生活や仕事で使うためには、主体性をもってその知識を身につけるだけでなく、自ら問題定義してうまく使えるようになることを促進してはならない[10]。つまり学び方の多様性を保証するのである。反転学習研究やミネルバ大学の実践では、学生の多様性を重んじて学習デザインを丁寧に行い、計画と実施そして評価を切り離すことなく毎回検討しながら改善することで実現可能であると報告している。

本学においては、ブレンド型教育を、ICTを活用し、時間や場所を有効に活用できる教育・学習環境を実現するような授業方法であるとし、本学の特徴に

沿うように解釈と定義を行っている[11]. そこでAUT 教育入門前半では、これらのエッセンスを盛り込んだ講義計画を立案した. 本講義の要件として Google クラスルームでの実施が求められていた. これは、本学の他の講義でもオンライン学習環境として活用していこうという流れを受けてのことである. これまでは初学者向けに PC の利用の仕方やおフィソフト各種およびインターネット利用の基本知識を身に付けさせることが目的の「情報リテラシー」で導入を図っていた. しかし、2020 年度の状況より、複数科目で連携しながらオンライン環境を活用し、できるだけ早い時期に入学者に本学のオンラインツールである Web ポータルと Google クラスルーム (Gmail を含む) に慣れる必要があった.

そこで 2021 年度は、各講義での Google クラスルーム導入のタイミングを確認しながら、Web ポータルや Google クラスルームを操作する活動を組み込んだ講義内容を構築した (表 2). 工場見学は 2020 年度に引き続き中止となったことから、これを補填する講義及び学習活動は予定されなかった.

これに対し、2022 年度は前年度の実施状況を踏まえ、更に前年度は中止で完全に実施を見送りにした工場見学に代わる講義を組み込み込んだ. その実施時間については、後半の 1 コマを減少させ、前半に確保できるよう調整した. 工場見学に相当する内容は、コロナ禍において企業の採用活動などで事例が増え始めたバーチャル工場見学を採用し、地域企業の協力のもと 5 回目に組み込んだ (表 3).

表 2 2021 年度講義内容と利用したオンラインツール

回	内容	オンラインツール
1	グループメンバーを知り、情報共有しよう	Web ポータル, Gmail Google フォーム
2	オンライン・対面講義受講のコツをつかもう	Google フォーム Google クラスルーム
3	大学の施設・設備を知ろう	Google フォーム Google クラスルーム
4	学長講話「自立と夢の実現に向けて」	Google フォーム Google クラスルーム
5	図書館の利用方法を学ぼう	Google フォーム Google クラスルーム
6	レポートって何？	Google フォーム Google クラスルーム Youtube
7	レポートを書いてみよう！	Google フォーム Google クラスルーム Youtube
8	三河中央に所在する企業を知ろう	Google フォーム Google クラスルーム Youtube

表 3 2022 年度講義内容と利用したオンラインツール

回	内容	オンラインツール
1	グループメンバーを知り、情報共有しよう	Web ポータル, Gmail Google フォーム
2	オンライン・対面講義受講のコツをつかもう	Google フォーム Google クラスルーム
3	チームの力を高めよう	Google フォーム Google クラスルーム
4	大学の施設・設備を知ろう	Google フォーム Google クラスルーム
5	バーチャル工場見学	Google フォーム Google クラスルーム
6	レポートって何？	Google フォーム Google クラスルーム Youtube
7	レポートを書いてみよう！	Google フォーム Google クラスルーム Youtube
8	図書館の利用方法を学ぼう	Google フォーム Google クラスルーム
9	学長講話「自立と夢の実現に向けて」	Google フォーム Google クラスルーム

2.3 学習デザイン

AUT 教育入門は大学生活を円滑に開始できるようにすることが目的であるため、そのような学生の多様な学び方や主体性を育むよう、ブレンディッド教育やアクティブラーニングで成果が得られている学習活動をもとにデザインした. その際、アドバイザーの教員や SA が必要であると考える支援や対応を必要に応じて実施できるよう、柔軟で調整可能な学習活動になるよう配慮した.

本学の特色を盛り込んだ具体例としては、従来の「AUT 教育入門」では、SA は工場見学のみだったが、ブレンディッド教育推進に欠かせないスマホや PC を活用した講義のサポートのために、SA を各学科から 3～4 名雇用し、各会場に配置した. また、留学生支援に特化した国際交流センター職員を TA として配置した.

3. 実施状況

2021 年度は受講生 218 名に対しコアメンバー 5 名・アドバイザー 18 名・SA/TA 12 名、会場は 4 会場 (図書閲覧室, 4301/7303/6804 教室) で行った. 2022 年度は受講生 155 名に対しコアメンバー 4 名・アドバイザー 9 名・SA/TA 14 名で会場は 2 会場 (4301/6804 教室) で行った. このような体制によりアドバイザーの教員及び SA や TA がサポートを積極的に行うことで、新入生の不安やつまづきの解消に努めた (図 1).

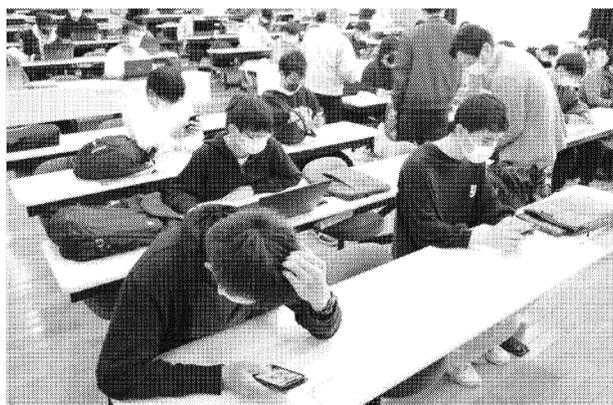
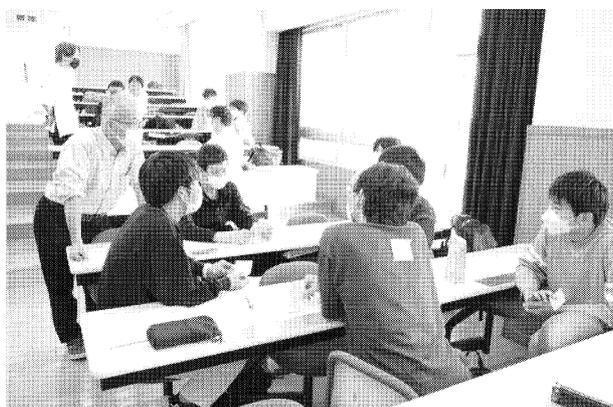


図 1 AUT 教育入門でのグループワークの様子

本講義では、毎時間学んだことを内省し、自らの知識として定着させるよう振り返り活動をフォームに回答させることで支援を行った。各年度の学生の入力した振り返りフォームの初回と最終回の内容を分析した結果を示す(図 2, 3, 4, 5)。質問「今日の講義で理解・解釈したことを(自分の言葉で)書き出してください」で使われた言葉や文章を元に、共起ネットワークグラフ[12]を作成した。これは、講義後に学生それぞれがどのような理解をしようとしているのかを、総合的に解釈するために作成した。共起ネットワークグラフは言葉の共起関係を表すもので、円が大きいほど頻出している言葉で、線の太さでその関係性の強さを表している。

まず、2021 年度 1 回目(図 2)と 2022 年度 1 回目(図 3)については、その時の講義「グループメンバーを知り、情報共有しよう」に対する理解を表している。これを見ると 2021 年度(図 2)では、「グループ」や「コミュニケーション」と「大切」がつながって大きく描画されていることから、講義内容の重要性が学生に伝わっている様子が解釈できる。これに対し 2022 年度(図 3)では「グループ」「コミュニケーション」「大切」が独立せず、つながって大きく描画されていることから、昨年度同様に講義内容が理解されようとしていることが伺える。しかし、線で繋がったグループを形成する概念の数が 2021 年度(図 2)は 10 グループ、2022 年度(図 3)は 7 グループと減っており、講義内容で強調した「Web ポータルを毎日見る」に関しては 2021 年度(図 2)はやや大きく描画されているのに対し、2022 年度(図 3)では円も小さく「毎日」が出現していないことから、同様の内容の講義を実施しても理解の度合いに差が生じた可能性が考えられる。

次に、2021 年度第 8 回「三河中央に所在する企業を知ろう」に関する回答(図 4)と 2022 年度第 9 回「学長講話「自立と夢の実現に向けて」」に関する回答(図 5)では、それぞれの異なる講義内容を反映する結果が描写された。内容が異なるので言葉それぞれを比較することは難しいが、講義内で伝えられた内容に対する理解への態度や重要性を感じている様子は両年度で生じていると考えられる。ただし、最終回においても、線で繋がったグループを形成する概念は、2021 年度(図 2)は 8 グループ、2022 年度(図 3)は 5 グループであった。この回の自由記述でも 2022 年度は概念数が少なかったことから、講義内容理解に何らか異なる状況もしくは要因があった可能性がある。

それぞれに出現している言葉も 2021 年度(図 2, 4)の方が具体的な行動を想起させる共起関係が見られるが、2022 年度は漠然とした講義中の言葉をなぞっている解釈もできる(図 3, 5)。両年度アドバイザー

として参加した教員から上がった所見では、2021年度より2022年度の方が課題の提出率が悪く、何度声がけても提出に結びつかない学生もいたとの報告を受けている。このことから、主体的な学びができるように注意して学習活動や講義デザインをしても、受講する学生の状態によって具体性を持った理解(学校生活でどのように振る舞うか理解し実践できる状態)を促す方略が異なる可能性がある。

以上のことから、本講義は本学での大学生活を円滑に開始できるような具体性を持った理解と行動を定着させることにある程度貢献できたと考える。しかし、2021年度と2022年度に出現している概念数の差が見られることから、学生の状態によってその効果が影響を受けることが考えられる。AUT教育入門は一番最初に知っておいてほしい内容を盛り込んだ講義として位置付けられているが、主体性を育むためには多様な学び方を許容して調整する必要がある。そのためには、成績の差を縮めることを目標とするより、入学後の早い段階で学生の学びの傾向を捉え、今後の対応を創造的に試行錯誤する学習プログラムとして運用する方が適切であると考えられる。

4. 今後の課題

2021～2022年度でコロナ禍を見据えた改訂をおこなったAUT教育入門前半のようなブレンディッド教育を改善していくためには、計画と実施そして評価を切り離すことなく毎回検討しながらブラッシュアップしていくことが必要となる。教材の配布・提出、動画による授業など効果的な部分の見極めは、全学科で協力して負担を分散させるなどの効率化は教育効果の向上や質の保証に必須となる工程である。

また、陳腐化を防ぐため一定期間後は内容の根本的な見直し、新しい教育視点からの評価をもとにした改善・修正が必要である。このような挑戦的な改革を行えるのも、AUT教育のような本学が目指すべき教育目的や理念が確固たるものとして設定できていたことに起因する。そのため、先人の残した資料や教育に対する姿勢も定期的に探訪することも重要である。新しい風を入れるだけでなく、引き継がれてきた思想のバランスに配慮することも忘れてはならない。

謝辞

2021～2022年度AUT教育入門前半の実施にあたり、関係者・アドバイザーの先生方には大変なご理解とご協力を賜りました。実施できたのも皆様のご助力のおかげです、心より感謝申し上げます。また、授業運

営の支援をしてくれたSA/TAにも感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 内閣府，“新型コロナウイルス完成対策”，内閣府特設ホームページ，(参照日:2022年9月30日，<https://corona.go.jp>)。
- [2] 文部科学省，“GIGAスクール構想について”，文部科学省ホームページ，(参照日:2022年9月30日，https://www.mext.go.jp/a_menu/other/index_000111.htm)。
- [3] 文部科学省，“令和4年度前期の大学等における授業の実施方針等に関する調査の結果について(令和4年6月3日)”，文部科学省ホームページ，(参照日:2022年9月30日，https://www.mext.go.jp/content/20220603-mxt_kouhou01-000004520_02.pdf)。
- [4] 日本経済新聞，“半導体不足、断たれた供給網〈混迷2021〉(2021年12月28日2:00)”，日本経済新聞ホームページ，(参照日:2022年9月30日，<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC222970S1A121C2000000/f>)。
- [5] 愛知工科大学，“【工学部】自宅学習期間中の課題学習について(2020年4月16日)”，愛知工科大学ホームページ，(参照日:2022年9月30日，<https://www.aut.ac.jp/news/4337/>)。
- [6] 愛知工科大学，“「緊急事態宣言」解除に伴う本学の対応について(2020年5月20日)”，愛知工科大学ホームページ，(参照日:2022年9月30日，<https://www.aut.ac.jp/news/4378/>)。
- [7] 愛知工科大学，“新型コロナウイルス感染者の発生に伴う対応について(2020年8月8日)”，愛知工科大学ホームページ，(参照日:2022年9月30日，<https://www.aut.ac.jp/news/3878/>)。
- [8] Lage, Maureen; Glenn Platt, Michael Treglia, “Inverting the Classroom: A gateway to Creating an Inclusive Learning Environment” (PDF). *Journal of Economic Education*, 2000.
- [9] Craik, Fergus I. M., “Levels of processing: A framework for memory research”, *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 11 (6): 671-684, 1972-12-01.
- [10] 白水始, 三宅なほみ, & 益川弘如, 学習科学の新展開 学びの科学を実践学へ. *認知科学*, 21(2), 254-267, 2014.
- [11] 愛知工科大学，“学長プレゼンテーション”，愛知工科大学2021年度第10回教職員連絡会(2021年12月23日)，(参照日:2022年9月30日)。
- [12] Koichi Higuchi, “A Two-Step Approach to Quantitative Content Analysis: KH Coder Tutorial Using Anne of Green Gables (Part II)”, 2017, *Ritsumeikan Social Science Review*, 53(1): 137-147, 2017.

LEDで光る極超小型人工衛星 AUTcube2 の開発

西尾正則, 大西正敏, 名和靖彦, 花井雅昭

(2022 年 9 月30日受理)

Development of the LED-lit Ultra-nano-satellite - AUTcube2 -

Masanori Nishio, Masatoshi Onishi, Yasuhiko Nawa, Masaaki Hanai

(Received September 30 , 2022)

Abstract

We report results of development and in-orbit operations of the pico-satellite AUTcube2, launched in October 2018 as a piggyback payload of H-IIA rocket. The satellite is a 1U CubeSat with a cube shape of 10 cm per side, and has four missions including the main mission, a visible light communication (VLC) experiment. The VLC mission is an experiment to transmit digital data in visible light from the satellite to the ground using high-brightness LEDs. Based on indoor experiments, the apparent brightness on the ground was estimated to be 3.0 magnitude at maximum for the high-gain LED unit, and it was found that the light could be seen by the naked eye from the ground.

キーワード： キューブサット, 可視光通信, LED, 相乗り衛星

Keywords : Cubesat, Visible Light Communication, LED, Piggyback payload

1 はじめに

ロケット打ち上げ能力の余剰リソースを利用して小型衛星を搭載する試みのひとつとして、1999年に衛星の大きさを一辺10 cmのサイコロ型、重量1 kg以下というように標準化した衛星CubeSat(キューブサット)の規格が提唱され、2003年には東京大学のXI-IV(サイ・フォー)と東京工業大学のCUTE-1が世界初のCubeSatとして打ち上げられ、運用に成功した[1][2]。それ以降、大学や企業により、CubeSatを含む様々な超小型人工衛星の開発と宇宙での実証運用が活発に行われている。

愛知工科大学では、金属加工を得意とする蒲郡市内の7社、県内外の教育研究機関および企業・団体と協力し、2015年よりLEDによる可視光通信(VLC)実験を主ミッションとした1UキューブサットAUTcube2(愛称”がまキューブ”)を開発してきた。この衛星は、2018年10月29日にH-IIAロケットの超小型副衛星として打ち上げられた[3]。VLC装置を搭載した小型衛星としては、これまで福岡工業大学のFITSAT[4]および信州大学のSindaisat[5]の2機

が打ち上げられてる。FITSATは、2012年10月5日に国際宇宙ステーション(ISS)から放出された1Uキューブサットである。VLC装置からの光の見かけの光度は6等級よりも暗く、衛星からの光は光学望遠鏡と高感度カメラによって観測された。Sindaisatは、50cm級のナノ衛星であり、2014年2月28日に相乗り超小型副衛星としてH-IIAにより打ち上げられた。VLC装置の光の見かけの光度は最大で-2等級であり、目視で見ることができる明るさであった。AUTcube2では、1U CubeSatで初めて、望遠鏡などを使わずLEDの点滅を直接目で見るができることを目標とした[6]。このため、民生品として市販されている製品としては最も光束の大きいLEDを選択し、照度を上げるためにLEDに合わせた小型の反射鏡を設計・製作した。また、LEDを駆動するための電源装置も新たに開発した。

本論文では、AUTcube2のミッションおよび衛星システム、主ミッションであるVLC装置とその装置の性能評価の結果を示す。また、打ち上げ後の状況について述べる。

Table 1 Success Levels

	ミッション	判断基準 (Criteria)	確認方法
ミニマム	可視光通信実験	LED の点滅を確認	光学望遠鏡に搭載したビデオカメラで点滅を確認
	全方位地球・宇宙観測	カメラで撮影できる	一方のカメラ画像を地上に送り、画像を目視確認
	超低電力 RF 通信	4-FSK 信号の受信	4-FSK 信号を受信し、スペクトルアナライザで確認
	宇宙 EMI 観測	受信信号の時間変化	信号強度の時間変化を 10 分間分取得
フル	可視光通信実験	LED 点滅が目視可能	点滅をカメラで撮影した画像で 6 等級以上を確認
	全方位地球・宇宙観測	全周画像の安定取得	2 台のカメラで撮影した画像から全周画像を合成
	超低電力 RF 通信	JT65 (0.25 cps) 通信	1 mW 送信データを標準 JT65 復調ソフトで復調
	宇宙 EMI 観測	スペクトルの受信	受信信号を周波数スペクトル情報として取得
アドバンスド	可視光通信実験	イベントへの利用	点滅によるメッセージ送信を目視で確認
	全方位地球・宇宙観測	VR 画像としての利用	受信した画像を VR コンテンツとして公開する
	超低電力 RF 通信	FSK441 (147 cps) 通信	送信データを標準 FSK441 復調ソフトで復調
	宇宙 EMI 観測	スペクトル時間変化	周波数スペクトルの時間変化を 1 周回分取得

2 衛星のミッション

AUTcube2 では、主ミッションである VLC 実験の他に、全方位地球・宇宙観測、超低電力 RF 通信、および宇宙 EMI 観測の 4 つのミッションを設定した。各ミッションの概要は以下のとおりである。

(1) 可視光通信 (VLC) 実験

衛星に搭載した高光度 LED の点滅を直接目でとらえ、その点滅のしかたによりメッセージを伝える実験である。望遠鏡などを使わず LED の点滅を直接目で見るができるようにすることで、衛星からのメッセージをより広く伝えることが可能となり、将来、「人に伝えたいメッセージを宇宙から光で送る」、「花火大会などの夜のイベントで開会の合図を宇宙から送る」などのエンターテイメントへ幅広く応用することを目指している。

(2) 全方位地球・宇宙観測

衛星の対向する二面に取り付けた魚眼レンズを使い、衛星の全方位を撮影して地上に送る実験を行う。取得された画像をヘッドマウントディスプレイに投影することで、CubeSat に乗って宇宙を飛行しているような体験を行うことを目指している。

(3) 超低電力 RF 通信

送信電力 1 mW の送信機で、地上へのデータ伝送を行う。通信方式には、月反射通信や流星散乱通信など、アマチュア無線家間の弱信号無線通信に使用さ

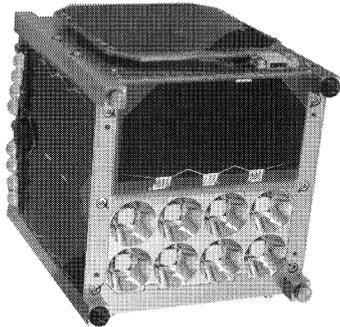
れている WSJT を用いる。本実験は、将来の月周回あるいは深宇宙へ向かう超小型宇宙機に搭載することを目標とするものである。また、今後、増加が予想される超小型衛星の打ち上げにおいて問題になる電波干渉を低減することも目指したものである。

(4) 宇宙 EMI 観測

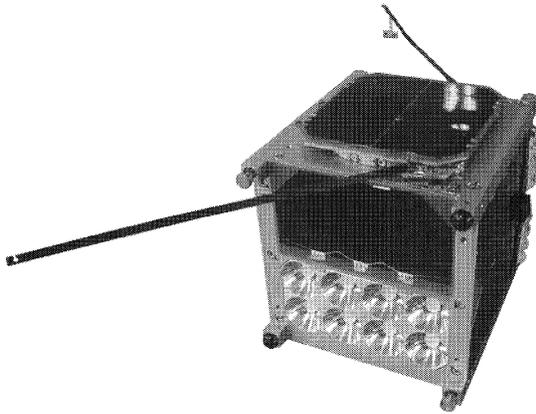
地上と衛星間および衛星と衛星間での通信を行う周波数について、背景電波のレベルを測定する。今後、増加が予想される超小型衛星の打ち上げにおいて問題になる電波干渉を低減することを目指したものである。

各ミッションのサクセスレベルを Table 1 に示す。可視光通信実験については、ミニマムサクセスを天体望遠鏡などに搭載したカメラで LED の点滅を確認できること、フルサクセスを LED が 6 等級以上の明るさを持つこと、アドバンスドサクセスレベルをメッセージ送信を目視で確認できることとした。全方位地球・宇宙観測については、ミニマムサクセスを 2 台のカメラのうちの 1 台で撮影した画像を地上に送り確認できること、フルサクセスを 2 台のカメラで撮影した画像から全周画像を合成できること、アドバンスドサクセスレベルを受信した画像を VR コンテンツとして公開することとした。超低電力 RF 通信については、ミニマムサクセスを 4-FSK で変調された電波を地上で受信できること、フルサクセスを地上で受信した信号を復調できること、アドバンスドサクセスをより高速な変調方式で送られた信号を地上で受信・復調できることとした。宇宙 EMI 観測については、ミニマムサクセスを観測用受信機で

10 分間の信号強度の観測データを取得できること、フルサクセスを受信した時系列信号から周波数スペクトルを取得できること、アドバンスドサクセスを周波数スペクトルの時間変化を1周回分取得できることとした。



(a) Shape during launch



(b) Shape on orbit

Fig.1 Appearance of AUTcube2

3 衛星システム

AUTcube2の外観を Fig. 1 に示す。衛星は、1 U Cube-Sat と呼ばれる1辺が10 cmの立方体形状である。図1(a)は打ち上げ時、図1(b)は軌道上での外観である。衛星の座標は、衛星放出方向を+Z方向、サービスコネクタやフライトピンを取り付けた面を+X方向としている。本衛星の主ミッションである可視光を使ったVLC実験用のLEDユニットを衛星の+Z面および±Y面に搭載している。+Z面は反射鏡付きの高利得型、±Y面は広放射角の低利得型である。地上管制局との通信用アンテナは、半波長モノポール型であり、-X面に取り付けられている。アンテナは導電性のあるバネ材であり、打上げ時は太陽電池パネルの下に丸めて収納し、先端をテグスで固定している。衛星放出後、テグスをヒーターで焼断し、アンテナを展開する。

図1(b)では2本のアンテナが見えるが、このうちの1本が、地上管制局との通信用であり、もう1本は宇宙におけるEMI観測ミッション用である。+Z側外面パネルに、超低電力RF通信ミッション用のUHF帯パッチアンテナを取り付けている。

衛星の諸元を Table 2 に示す。質量は1.37 kgであり、機体の主要構造には超々ジュラルミン A7075-T73 を使用した。衛星の初期軌道は高度613 km、軌道傾斜角98度の円軌道である。コマンドアップリンクおよびテレメトリデータダウンリンクには、437 MHzのUHF帯アマチュア無線の電波を用いた。太陽電池セルには、GaAs三接合型(変換効率29%)を用いた。太陽電池の寸法は80 mm × 40 mmであり、このセルを±X面、±Y面、および+Z面に各2枚、-Z面に1枚を取り付けた。バスシステム用二次電池には、容量3.4 Ahのリチウムイオン二次電池1セルを用いた。姿勢制御用に3軸磁気トルカーを搭載し、+Y面パネルおよび-Y面パネルに全方位撮影用の魚眼レンズカメラを1台ずつ搭載した。

Table 2 Major specifications of AUTcube2

Items	Values
Dimension	111 × 110 × 122 mm (without UHF antennas)
Mass	1.37 kg
Material	A7075-T73
Orbit	Attitude 613 km Inclination 98 deg.
Power	
Solar Cells	GaAS Triple Junction 80 × 40 mm × 11 cells $\eta = 29\%$
Battery	Li-Ion 3.4 Ah × 1 for bus Li-Ion 3.4 Ah × 8 for LED
RF Comm.	
Uplink	437 MHz, 1200 bps
Downlink	437 MHz, 1200/9600 bps, 0,8 W
Beacon	437 MHz, 0.1 W
Attitude Cont.	Magnetic Torquer × 3 axis

搭載サブシステムのブロック構成図を Fig. 2 に示す。C&DH系はPICマイコンPIC16F877Aで構成されており、地上管制局から送られてきたコマンドにより搭載機器の電源のON/OFF、ビーコン電波(モールス信号)の生

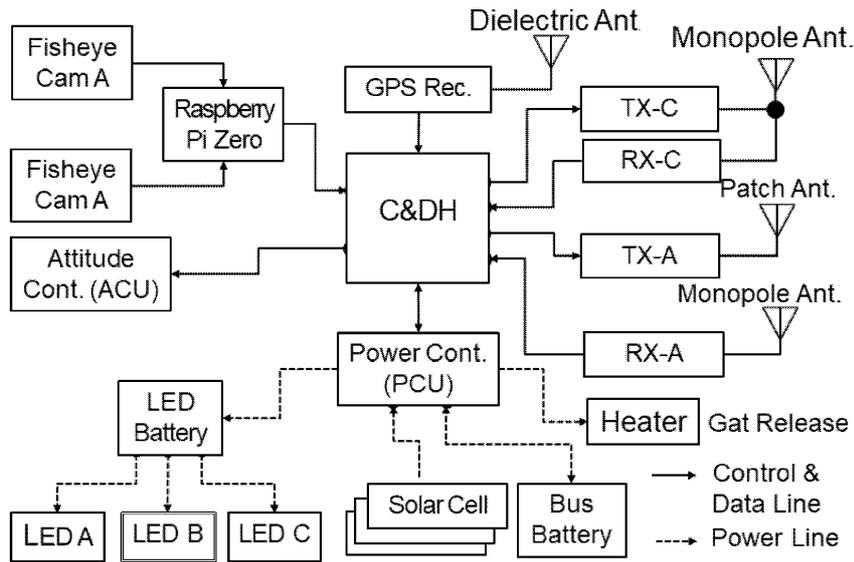


Fig.2 Block diagram of on-board subsystems

成、送信器のテレメトリパケットの生成、姿勢制御系への制御情報の設定、カメラ制御装置 (Raspberry Pi Zero) への撮影の起動/停止、GPS 受信機からの位置データ取得、宇宙 EMI 観測用受信機からのデータ取得などを行う。電源系は、太陽電池セル、太陽電池基板、二次電池、電源制御基板で構成されており、各系に必要な電力の供給を行う。太陽電池基板は太陽電池に対して最大電力点制御を行う機能および太陽電池セルを機体に固定する機能を持つ。二次電池は、太陽電池が動作していない日陰時において電力を供給するとともに、各系に必要な電力の変動を補填する働きをする。電源制御基板は太陽電池基板および二次電池から供給される 1 次バス電圧から各系に必要な電圧を生成するとともに C&DH 系からの指令に従って電力の供給/停止の制御を行う。また、衛星の軌道投入時にアンテナの展開やビーコン電波の送出などを C&DH 系の指令なしに自律的に行う。これらの機能を行うため、電源制御基板には C&DH 系とは別に PIC マイコン PIC16F877A を搭載している。通信系は、西無線研究所の超小型人工衛星用 FMCW 送受信器 TEX430MFMCW-302A-RU および通信制御基板、逆 L 型 1/4 波長アンテナで構成されており、地上からのコマンドの受信および地上へのテレメトリデータおよびビーコン信号の送信を行う。姿勢系は 3 軸姿勢トルカと 3 軸磁気センサおよび GPS 受信機で構成されており、衛星の軌道投入時の自転の停止および LED 搭載面の地球方向への指向制御を行う。なお、磁気センサのみでは姿勢決定ができないので、ミッション系として搭載した広視野カメラを用いて太陽および地球の縁を観測し、姿勢決定に利用

する。

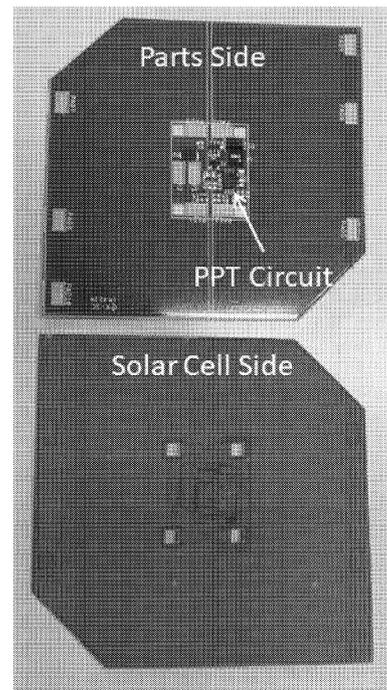


Fig.3 Board Appearance of solar cell board

Fig. 3 に、太陽電池基板の外観を示す。基板の大きさは 82 mm × 80 mm で、基板の一面に最大電力制御回路を搭載している。太陽電池セルを、基板の部品の搭載されていない面側に張り付け、セルの電極を部品面の配線パターンとはんだ付けしたのち、この基板の部品面側を衛星外面に張り付けている。貼り付けは、接着剤ではなくアウトガスの少ない素材で構成された両面テープを使用した。

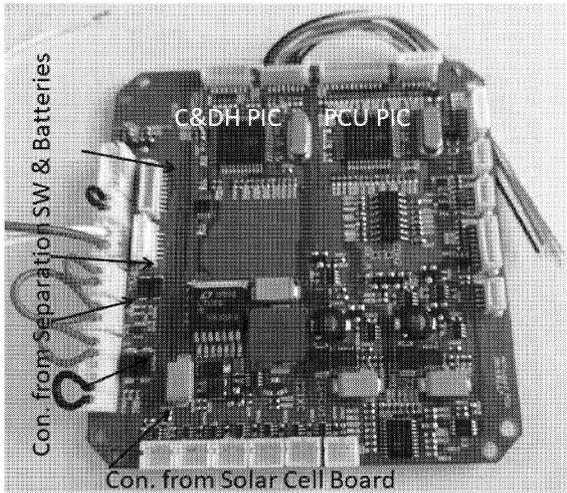


Fig.4 Appearance of power control unit board

Fig. 4 に、電源制御基板の外観を示す。基板の大きさは 80 mm × 80 mm であり、この基板上に C&DH 系のマイコンも搭載されている。図 4 の左上の IC が C&DH 系のマイコン、右上の IC が電源制御用のマイコンである。

主ミッションである可視光光通信 (VLC) 実験のための装置は、LED ユニット、LED 制御基板、LED 駆動用二次電池で構成されている。全方位カメラによる地球と宇宙の観測ミッションのための広視野カメラは Raspberry Pi Zero を介して C&DH 系に接続されている。

衛星の内部機器配置を Fig. 5 に示す。衛星のほぼ 3 分の 1 を LED 駆動用二次電池を内蔵した電池ボックスが占めている。この電池ボックスの 1 面に C&DH 系と電源制御装置の基板が取り付けられている。コマンド用受信機 (RX-C) およびミッション用の送受信機 (TX-C&RX-A) が -X 面パネルの内面側に取り付けられ、さらにその上にテレメトリデータ用送信機 (TX-C) とバス系二次電池を内蔵した電池ボックスが取り付けられている。LED 制御基板は、-Z 面パネルの内面側に取り付けられている。

4 VLC 装置

4.1 装置の構成

AUTcube2 における VLC 実験は、地上から肉眼で見えることを優先し、光を毎秒数回程度点滅させることにより簡単なメッセージを観察者に伝えることとした。恒星に比べて天空を移動する速度が速いことから、見かけの光度が 4.0 等級以上となるように光学系を設計した。

VLC 装置は、狭放射角の高利得 LED ユニットと広放射角の低利得 LED ユニットの 2 種類で構成されている。高

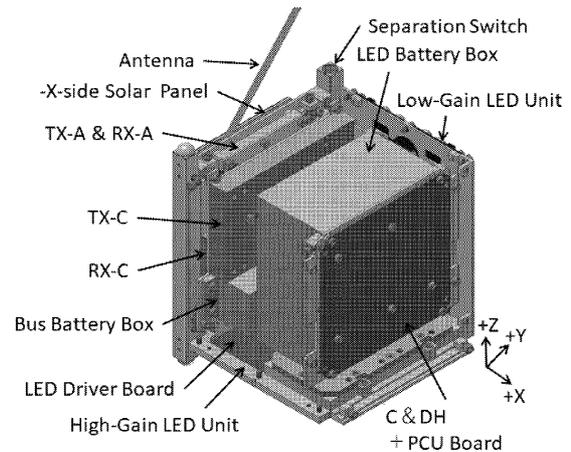


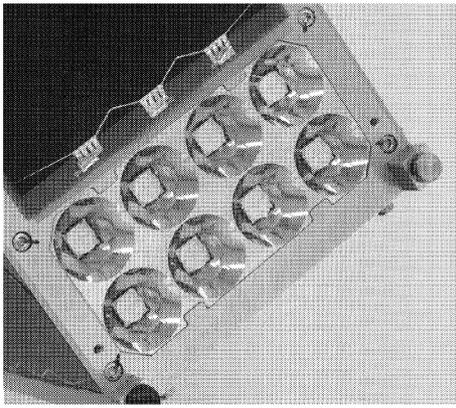
Fig.5 Layout of satellite internal units

Table 3 Specifications of LED Units

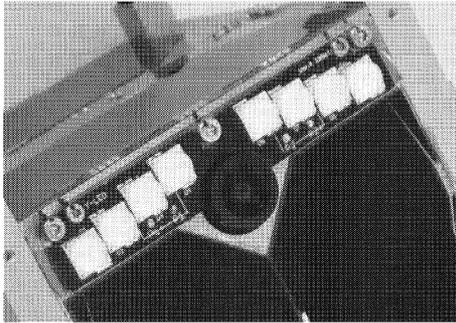
Items	Values	
Number of LEDs	8 for each unit	
LED	Dimension	7 mm × 7 mm
	Color Temperature	6500 K
	Flux minimum	1710 lm @ 85°C @ 1.05 A
	maximum	4022 lm @ 32 W
Forward Voltage V_f	12 V	
Forward Current I_f	1.05 A nominal (2.4 A max.)	
Luminous efficiency	150 lm/W max.	
View Angle	120 deg.	
Mirror	Diameter	20 mm
	Focal Length	2.5 mm
	Material	Ultra duralumin A7375

利得 LED ユニットは -Z 面に取り付け、低利得 LED ユニットは ±Y 面に取り付けた。高利得 LED ユニットの外観を Fig. 6(a) に、低利得 LED ユニットの外観を Fig. 6(b) に示す。また、LED ユニットの仕様を Table 3 に示す。使用した LED は、CREE 社の HXP70A である。この LED は、順方向電流 1.05 A、85°C の温度において、1710 lm 以上の光束を得ることができる。LED の放射角は 120 度である。各ユニットには 8 個の LED を取り付け、高利得ユニットにはパラボラ鏡を装着した。

LED ユニットの駆動は、2 並列電池を 4 組直列に接続することによって駆動する。Fig. 7 に LED 制御基板のブロック構成、Fig. 8 に基板外観を示す。LED 制御基板は、



(a) High-gain type



(b) Low-gain type

Fig.6 Appearances of LED units

LED 用二次電池の充電回路と LED の点灯/消灯を制御するための駆動回路で構成される。充電は、FET スイッチマトリクスにより 2 並列電池 4 組を時分割で順次一次バス電源に接続して行く。LED の駆動は、同じく FET スイッチマトリクスにより 2 並列電池 4 組を直列接続して行く。本方式により充電を行うことで、一次バス電圧を昇圧して 4 直列の電池を直接充電する方法に比べて充電効率を上げることができる。FET スイッチマトリクスの制御は、専用の PIC マイコンにより行っている。

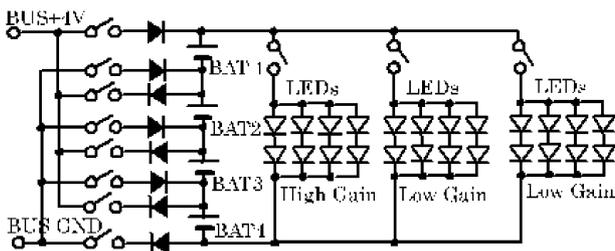


Fig.7 Block configuration of LED control board

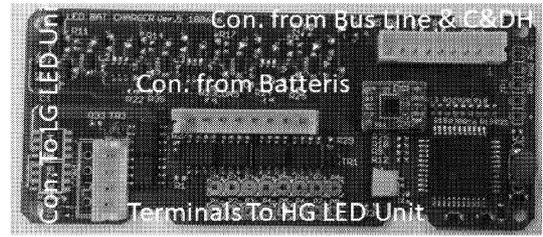


Fig.8 Appearance of LED control board

4.2 性能評価：ビーム幅の測定

ビームパターンの測定は LED ユニットの回転台の上に置き、照度計に対して回転させながら行った。高利得 LED ユニット内の単一 LED セルの測定結果を Fig. 9(a) に全 LED を点灯したときの測定結果を Fig. 9(b) に示す。ここで、LED ユニットと照度計間の距離は、単一 LED セル測定時が 2 m、全 LED を点灯したときが 1 m である。単一 LED セルでの放射ビームパターンは、ビーム中心で照度約 2400 lx、そこから $\pm 25^\circ$ で照度 500 lx になるまで急速に下がり、それ以後で平坦部を有する形をしている。全 LED セル点灯時の放射ビームパターンも、ほぼ同様の形をしている。図 9(b) から、高利得 LED ユニットの HPBW は約 30° であることがわかる。

4.3 性能評価：見かけの等級の計算

光源からの光束 Φ [lm] が面積 A [m²] に入射するとき、照度 E [lx] は

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (1)$$

で与えられ、光束 Φ は光度 I [cd] と放射立体角 ω [sr] により

$$\Phi = \omega I \quad (2)$$

で与えられるので、照度 E と光度の関係は

$$E = \frac{\omega I}{A} \quad (3)$$

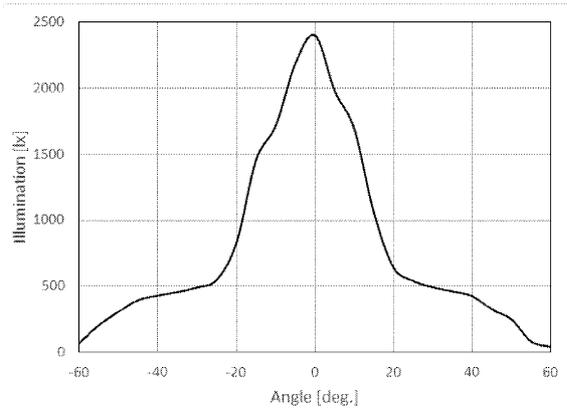
であり、光源から光が等方に放射されているとき、光源から距離 R [m] における照度は

$$E = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2} \quad (4)$$

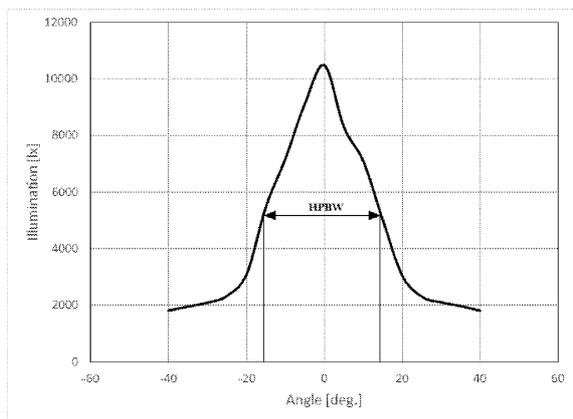
で与えられる。

照度 E の光源の見かけの等級 M は、参照光源の見かけの等級を M_{ref} および照度 E_{ref} として

$$M = M_{\text{ref}} - \frac{5}{2} \times \left\{ \log \left(\frac{E}{E_{\text{ref}}} \right) \right\} \quad (5)$$



(a) Single LED on state



(b) All lights on state

Fig.9 Radiation pattern of high-gain LED unit

である。

光源からの放射が等方的場合、式 (5) に式 (4) を代入し、光度と見かけの等級の関係として

$$M = M_{\text{ref}} - \frac{5}{2} \times \left[\log \left\{ \left(\frac{I}{I_{\text{ref}}} \right) \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R} \right)^2 \right\} \right] \quad (6)$$

を得る。ここで、 R_{ref} は参照光源から観察者までの距離である。

光源からの照射が非等方的場合、対象となる光源の光度と参照光源の光度の比は

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_{\text{ref}}} &= \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{ref}}} \right) \left(\frac{\omega_{\text{ref}}}{\omega} \right) \\ &= \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{ref}}} \right) \left\{ \frac{\omega_{\text{ref}}}{2\pi(1 - \cos \theta/2)} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 Φ_{ref} は参照光源の光束、 ω_{ref} は参照光源の放射立体角、 ω は対象とする光源の放射立体角、 θ は対象とする光源からの放射角である。

LED ユニットの見かけの等級を計算するためのパラメータを表 4 に示す。ここで、太陽を参照光源とした。パラ

Table 4 LED ユニットおよび参照光源のパラメータ

Items	Symbol	Values
luminous flux of the sun	Φ_{sun}	4.3×10^{28} lm
Radiation solid angle of the sun	ω_{sun}	4π sr
Distance of the sun from observer	R_{sun}	1.5×10^{11} m
Visual magnitude of the sun	M_{sun}	-26.7
Luminous flux of the LED unit	Φ	1965 lm @25°C
HPBW of LED cell	θ	120 deg.
Distance of LED from observer	R	6.13×10^5 m

Table 5 LED ユニットの見かけの等級

Device	Number of LEDs	HPBW [deg.]	Visual Mag.
LED cell	1	120	8.2
Low gain LED unit	8	120	5.9
High gain LED unit	8	30	3.0

メータを式 (6) と (7) に代入し、LED 1 個に対する見かけの等級として 8.2 を得る。

n 個の LED を並列にした場合、光度比 I/I_{ref} は

$$\frac{I}{I_{\text{ref}}} = n \times \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{ref}}} \right) \left(\frac{\omega_{\text{ref}}}{\omega} \right) \quad (8)$$

となる。低利得 LED ユニットと高利得 LED ユニットの見かけの等級を、表 5 にまとめる。低利得 LED ユニットの等級は 5.9 である。AUTcube2 は星よりも比較的速く空を移動するので、低利得 LED ユニットからの光は肉眼では検出できないと考えられる。一方、高利得 LED ユニットの見かけの等級は 3.0 であり、肉眼で光を検知することが可能である。

5 打ち上げ後の状況

AUTcube2 は、H-IIA ロケット 40 号機により 2018 年 10 月 29 日 13 時 08 分 00 秒 (日本時間) に鹿児島県の種子島宇宙センターより打ち上げられた。主衛星は「いぶき 2 号 (GOSAT-2)」及び観測衛星 KhalifaSat であり、小型副衛星として東北大学の DIWATA-2、九州工業大学の「てん

こう」、静岡大学の Stars-AO および本学の AUTcube2 の 4 機が相乗り衛星として搭載された。DIWATA-2 と「てんこう」は 30 センチ級衛星であり、Stars-AO と AUTcube2 は 1 U Cubesat である。H-IIA ロケット 2 段目から主衛星 2 基が分離された後、小型副衛星が DIWATA-2、てんこう、Stars-AO、AUTcube2 の順に分離され、AUTcube2 は、高度 613 km、軌道傾斜角 98 度の円軌道に投入された。

ロケットから分離された後の AUTcube2 の予定動作シーケンスは

- ロケットから分離 + 0 秒
 - 分離スイッチ 3 個が通電状態となる
- ロケットから分離 + 230 秒
 - アンテナ展開用テグスヒータ ON
 - アンテナ展開
- ロケットから分離 + 270 秒
 - 送信機 TX-C 起動：モールス形式の電波送信開始
 - 送信機 TX-A 起動：WSJT 形式の電波送信開始

であり、分離後に愛知工科大学内に設置した地上管制局の上空をはじめて通過する時間に合わせて、当日 14 時 44 分（日本時間）より衛星の追跡を行った。Fig. 10 に地上管制局のブロック構成図、Fig. 11 に衛星追跡中の地上管制局の様子を示す。

衛星追跡の結果、衛星からの電波を受信することはできなかった。その後、約 3 か月間継続して衛星を追跡し、その後も適時受信を試みているが、衛星からの電波を受信できていない。電波が受信できない原因としては、(1) 機体がロケットから放出されていない (2) 分離スイッチが動作していない (3) 電源制御回路が動作していない (4) 衛星搭載プログラムが停止した (5) アンテナ展開機構（テグスを溶断する機構）が動作しなかったが考えられる。衛星の耐久性試験の結果、および NORAD による衛星のレーダー観測からは原因 (1) の可能性は低いと推定される。衛星のバスシステムは、電源が入り、電源制御回路が動き始めると 2 台の送信機（TX-C および TX-A）が起動する。送信機の 1 台（TX-A）はプログラムが動作せず、アンテナが展開してなくても電波を正常に送信する仕組みを有している。原因 (4) および (5) の場合には少なくとも 2 台のうち的一方（TX-A）からの電波は受信できると考えられる。これらの結果より、衛星からの電波が受信できない原因としては (2) または (3) の可能性が高い。

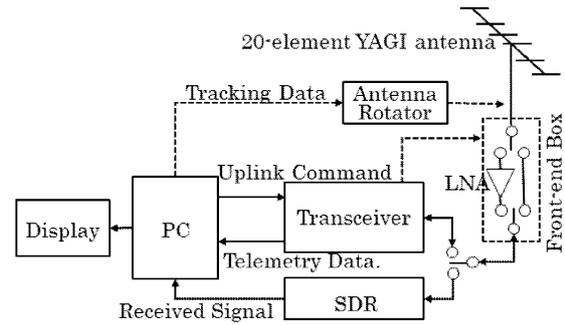


Fig.10 Block diagram of ground control station



(a) View of the control console



(b) Radio signal monitor screen

Fig.11 Satellite tracking at ground control stations

6 結言

AUTcube2 は、肉眼で検知可能な LED 可視光通信装置を備えた最初のキューブサットである。衛星には、高利得 LED ユニットと低利得 LED ユニットの 2 種類の LED ユニットの搭載した。高利得 LED ユニットは、光束 1965 lm の LED に口径 20mm の反射鏡を取り付けたものを 8 個組み合わせ構成した。高利得 LED ユニットのビーム放射角は 30 度（HPBW）であり、初期軌道において見かけの光度は最大で 3.0 等級と推定される。低利得 LED ユニットは、衛星表面に光束 1965 lm の LED を 8 個取り付けた構成である。低利得 LED ユニットのビーム放射角は 120 度

であり、初期軌道において見かけの光度は最大で 5.9 等級と推定される。

AUTcube2 は、2018 年 10 月に H-IIA 相乗り小型副衛星として打ち上げられた。AUTcube2 は軌道投入後、地上との通信ができていない。故障原因の解析を進め、次期衛星において AUTcube2 に比べてより高速の衛星-地上間 LED 光通信に挑戦する予定である。

謝辞

AUTcube2 の構造製作を担当していただいた蒲郡市の企業 7 社（株式会社蒲郡製作所，飯島精密工業株式会社，飯島産業株式会社，加藤カム技研株式会社，株式会社三協，株式会社中川製作所，有限会社細井鉄工所，AUTcube2 に搭載した LED ユニットの製作と評価を担当していただいた中島厚元信州大学特任教授，有限会社信陽精機製作所ほか Sindatsat 開発メンバー，超低電力通信機を提供していただいた深井貫氏，搭載基板に関する助言をいただいたツール工房有限会社，AUTcube2 の構造解析を担当していただいた株式会社エイ・エス・アイ総研，AUTcube2 の開発と評価試験を担当していただいた愛知工科大学の学生諸氏に感謝します。また，AUTcube2 の開発は，一般財団法人東海産業技術振興財団，文部科学省平成 27 年度宇宙航空科学技術推進委託費（委託先：特定非営利活動法人大学宇宙工学コンソーシアム），愛知工科大学特別研究推進プロジェクトによって資金援助を，がまごおり産学官連携ネットワークにより活動支援を受けました。ここに感謝します。

参考文献

- [1] 中須賀真一，酒匂信匡，津田雄一，永島隆，船瀬龍，中村友哉，永井将貴，”CubeSat-XI の軌道上実証成果と超小型衛星による低コスト化・短期開発化の試み，”信学論 (B)，Vol. J88-B, No.1, pp. 41-48, Jan. 2005.
- [2] 此上一也，澤田弘崇，中谷幸司，宇井恭一，宮下直己，居相政史，岡田英人，占部智之，柏宗孝，山口信齊，尾曲邦之，松永三郎，”超小型衛星 CUTE-I の開発と軌道上運用評価，”信学論 (B)，Vol. J88-B, No.1, pp. 49-57, Jan. 2005.
- [3] M. Nishio, M. Onishi and Y. Nawa, ”ShindaiSat: Development of Cubesat for LED Light Communication”, Proc. of 32nd ISTS & 7th NSAT, 2019-f-17, Fukui, June 2019.
- [4] T. Tanaka, Y. Kawamura and T. Tanaka: ”Development and operations of nano-satellite FITSAT-1 (NIWAKA)”, Acta Astronautica, Vol. 107, pp. 112-129, 2015.
- [5] A. Nakajima, N. Sako, et al.: ”A Visible Light Communication Experimental Micro-Satellite”, Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2012, 2017-12-1, Ajaccio, Oct. 2012.
- [6] 西尾正則，大西正敏，名和靖彦: ”LED で光る超小型衛星，”信学技報，Vol. 119, No. 175, pp. 73-77, Aug. 2019.

報告

姉妹校連携事業における講師派遣の状況報告

(2022年9月30日受理)

Report of dispatch of lecturer to Tokai Polytechnic College

Tatsuya Ukai*

(Received September 30, 2022)

Abstract

Due to the effects of the declining birthrate that has become more serious in recent years, the number of students enrolled at our university has been decreasing year by year. One of the causes is a significant decrease in the number of students who go on to higher education from sister schools. It was from the school headquarters in the sense of strengthening cooperation between sister schools and strengthening ties with each other. Since we did not keep a record of the efforts in the previous dispatch, we decided to record it as a "report" this time.

キーワード: 講師派遣, 授業再構築, 原動機, 実習授業

Keywords: Lecturer dispatch, Class restructuring, Motives, Practical lessons

1. はじめに

近年深刻化しつつある少子化等の影響により, 本学も年々入学者数が減少傾向にある. その原因の一つに姉妹校からの進学者数の減少がある. 次年度に向けての姉妹校進学者数減少対策として, 機械系の姉妹校である東海工業専門学校熱田校と学校間の連携強化を図り, お互いの結び付きを強くするという意味で講師派遣の要請が学園本部からあったと聞いている. また, 筆者は7年前にも同様な理由で同校に派遣された経験があり, このような姉妹校からの進学者数の増加のための取り組みは, 学園組織の強化にも繋がることであり重要な役割である.

当初は7年前の実習を再現することで対応できると安易に考えていたが, 環境は色々と変化しており, 授業内容を再構築しながら取り組む必要が出て来た. 前回の派遣では, その記録を残さなかったが, 今回改めて派遣でどのような実習準備を行ったのか, 派遣されての実習授業を行うということは教科書のみで授業が出来る学科科目とは大きく異なるため, 事前準備をどのように行ったかを報告する.

2. 担当実習の概要

2022年2月3日, 東海工業専門学校熱田校にて派遣内容について打ち合わせを行った結果, 2022年度は課題研究の原動機実習を担当することになった.

具体的には, 機械科計4クラスを8分割し, 1年間掛けて入れ替えながら進めて行く. 1グループを15名前後とし, 1時限(50分)を3時限連続して行う実習形態を1回と数え, 5回で完結する. 従って, 4クラス行うには合計8回の入れ替えが必要である. Table 1に入れ替えのローテーション表を示す.

Table 1 Rotation table

火曜日				水曜日			
E組	前半	1~5回 シーケンス	6~10回 原動機	C組	前半	1~5回 シーケンス	6~10回 原動機
	後半	1~5回 原動機	6~10回 シーケンス		後半	1~5回 原動機	6~10回 シーケンス
F組	前半	1~5回 シーケンス	6~10回 原動機	D組	前半	1~5回 シーケンス	6~10回 原動機
	後半	1~5回 原動機	6~10回 シーケンス		後半	1~5回 原動機	6~10回 シーケンス



Fig. 1 Teaching engine

* 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

また、教材には三菱重工業(株)製の単気筒エンジン(排気量 123cm³)を使用し、分解・測定・組立を行う。使用する教材エンジンを Fig. 1 に示す。

前回派遣された平成 27 年度は、今回と同様の時間割りで 7 回で完結する授業を行った。当初、今回も同じ形態で実習が行えるものと安易に考えていた。その当時の進度表を Table 2 に示す。

Table 2 2015 training progress table

	1限目	2限目	3限目
1回目	原動機実習の導入 4サイクル・2サイクル	ボルト・ナットの種類 工具の名称と用途	エンジン補器類の脱着
2回目	エンジン外装品取り外し	氧化器の原理説明 エンジン外装品取り付け	エンジン外装品取り付け
3回目	エンジン分解 シリンダ・ヘッド取り外し	締め付けトルク 面圧均等・対角均等	シリンダ・ヘッド取り付け エンジン組み立て
4回目	エンジン分解	エンジン組立	エンジン組立
5回目	計測と測定 部品の良否判定	マイクロメータとノギス	シリンダ内径・行程計測 燃焼室容積の測定
6回目	圧縮比と排気量の計算	4サイクル・エンジン 構造作動の研究	4サイクル・エンジン 構造作動の研究
7回目	計測機器の取り扱い 試験(1人ずつ確認)	計測機器の取り扱い 試験(1人ずつ確認)	自動車の歴史・分類 レポートのまとめ

実習で使用する教材エンジンは、平成 27 年に派遣された時に使用していたものである。この実習で使用する教材は、翌日には他のクラスが実習で使用するため分解した状態での保存が出来ない。そのため毎回実習終了時には完全に組み立てが終わっている状態にする必要がある。前回は 7 回で実施していたため、少しずつ数回に分けて分解・組立を行うことで作業要領を生徒に覚え込ませ、最終的には分解・組立の説明が無くとも比較的スムーズに実習作業が行えるような工夫がなされたので問題なかったが、今回は内容を極力削ることなく 2 回分の実習時間を減らす必要があるため実習内容を再構築する必要が出て来た。

3. 昨年度までの状況調査

実習内容を再構築するにあたり、昨年までどのような実習が行われていたかを、2021 年度 2 月時点で本学に在学していた東海工業専門学校熱田校の卒業生数名から聞き取り調査を行った。残念ながらこの時点では報告として纏める予定ではなかったためアンケート形式ではなく単純に直接聞き取りで済ませており、当時の資料が残っていない。聞き取りを行った学生の話から、教材のエンジンはかなり使い込まれており、ねじ山も相当傷んでいるためボルトを完全に締めることが出来ない、又はボルトが欠品しており部品を固定することができない等の不具合があることが分かった。また、班ごとの作業進度の差が大きく時間的にばらつく問題や、担当の先生方の生徒指導に費やす時間も多ク、

修理も大変な状況であったことが分かってきた。課題研究の担当者間での打ち合わせに於いて、生徒たちに 4 サイクル・ガソリン・エンジンの最大の特徴であるピストンとクランクの動きを見せたいという思いから、クランク・ケースまで分解してピストンとクランクシャフトの作動を直接見ることを実習作業の到達目標とした。この作業を行いつつ、分解した実物を見ながら 4 サイクルを理解させる計画を立てた。教材に関しては、筆者らが平成 27 年度に実習を担当した時点でも傷みが酷く、当時一緒に派遣された加藤寛助教と共に修理・修正を行いながら実習授業を行い、派遣終了時には充分実習に耐えられる状況に整備したが、7 年が過ぎて繰り返し使用されて来た教材であるために傷みが進んでいることは仕方が無いことである。実習で幾度となく繰り返し使用されて来たにも関わらず随時メンテナンスがなされ、現在でも教材として現役で使用可能な状態に保たれている状況は大変驚きであり、この実習を引き継いで担当された先生方の努力とご苦勞は相当なものであったものと思われる。

4. 実習の再構築

与えられた時間内で分解・組立ができる範囲での実習作業を行うだけであれば、その時々作業進度で区切って出来る範囲の作業をすれば良い。しかし、この実習の目的は原動機の分解・組立作業を通して基本構造や作動を見せることで原動機に興味を持たせ、自動車と自動車整備に目を向けて貰うことにある。更にこの実習を通して姉妹校である本学への興味を持って貰いたいという思いがあるため、十分に検討された授業内容の構築を心掛けなければならないと考えた。そのためには教材のメンテナンスも重要で、本学での仕事の合間を縫って 2 月 22 日に現地に出向き使用予定の教材エンジンのメンテナンスを行った。しかし、全ての教材を修理することが出来ず、4 月以降の授業が予定されている火曜日、水曜日の午前中を教材修理の時間に充てて対応することにした。修理に必要な工具・機材は全て東海工業専門学校熱田校で揃えて頂いた。これと並行して実習内容の再構築を行った。前回は 3 人の担当者で実習を担当したため協力して準備や修理が行えたが、今回は筆者が 1 人で実習内容の構築をしなければならなかった。しかし、全てを任せて頂いたため先方へ出向いて打ち合わせをする必要がなく、筆者の考えた内容で構築できた。

4.1 実習時間の再構築

再構築にあたり 2 回 6 時間分の内容をどのように削

るかを検討した。まずは 5 回という実施回数が決めているため、その中で何をすべきか進度表を作成した。計測機器の取り扱いには「読み取り」の試験も含めて 2 回は確保する必要がある。したがって、原動機の分解・組立は 3 回しか行えず、この減らした 2 回分をどのようにするのか考える必要があった。計画した 5 回の実習進度表を Table 3 に示す。

Table 3 Reiwa 4th year training progress table

	1限目	2限目	3限目
1回目	原動機実習の導入 4サイクル・2サイクル	ボルト・ナットの種類 工具の名称と用途	エンジン補器類の脱着
2回目	エンジンの分解 ピストンの抜き取りまで	エンジン組み立て	エンジン組み立て
3回目	エンジンの分解 クランク取り外しまで	エンジン組み立て	エンジン組み立て
4回目	計測と測定 部品の良否判定	マイクロメータとノギス	計測作業
5回目	計測機器の取り扱い 試験(1人ずつ確認)	シリンダ内径と行程計算 (燃焼室容積の測定)	圧縮比と廃棄量の計算

4.2 実習資料の再構築

決められた回数で目標を達成するため全ての回ごとに分解・組立作業の要領、エンジンの構造・作動を説明するための静止画面のみの Power Point を作成した。筆者が残しておいた 7 年前の資料を基に作成を行ったが、4 月に授業が始まった 1 回目に教材を改修した部分が生徒にとって分かり辛かったため、授業を担当する火曜日、水曜日の午前中に Power Point や教材の修正を加えることにした。その結果、このエンジンの修理書[1]の手順や作業要領とは異なり『整備して動かすこと』を目的とした作業要領ではなく『構造・作動を知ること』を目的とした資料が出来た。作成した Power Point の一部を Fig. 2 に示す。

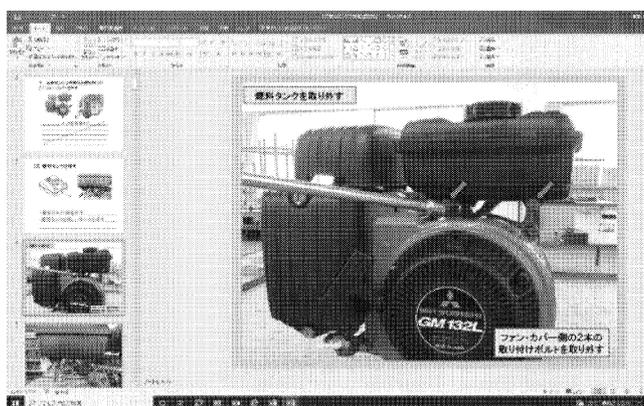


Fig. 2 Part of Power Point explaining the work procedure

作成した Power Point に対応したプリントも同時に作成し、授業で説明した作業内容を書き込むことで作業要領書が出来上がる仕組みを考えた。生徒達は実習作業中にこの資料を見ながら作業を行うことが出来るため、実習作業時間の短縮にも繋がることを期待した。作成したプリントの一部を Fig. 3 に示す。

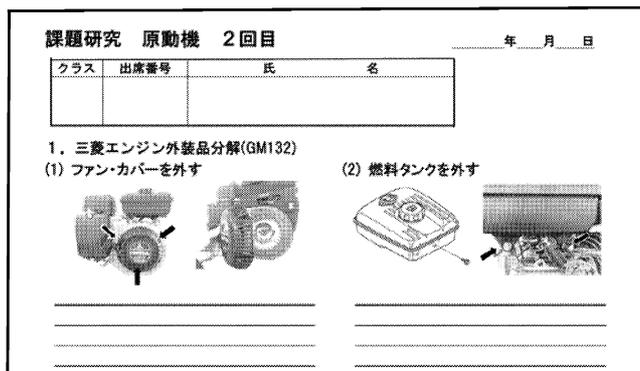


Fig. 3 Part of the print for the lecture

4.3 教材エンジンの再構築

資料作成は重要であるが Power Point やプリントのみで実習時間を短縮することは容易ではない。『構造・作動を知ること』を目標にしての実習作業になるため、実習教材の提供の仕方にも種々の工夫が必要になった。原動機メーカーが提供している作業要領書[1]通りの作業では細かな作業が多過ぎて実習授業で生徒たちに見せたい部分まで辿り着けない。目標に辿り着くために障害となり得る作業は、部品点数の多さや専用工具を使う必要性があることから、キャブレータのガバナ機構関係の分解・組立、シリンダ・ヘッドの動弁機構の分解・組立、フライホイールの脱着、ピストンの挿入の作業等が予想される。

そこで、1 回目の授業での作業が困難になると予想されるガバナ機構をエンジンから取り払うことにした。ガバナ機構が取り付けられていた元の状態を Fig. 4 に示す(図中で破線で囲まれた部分がガバナ機構)。

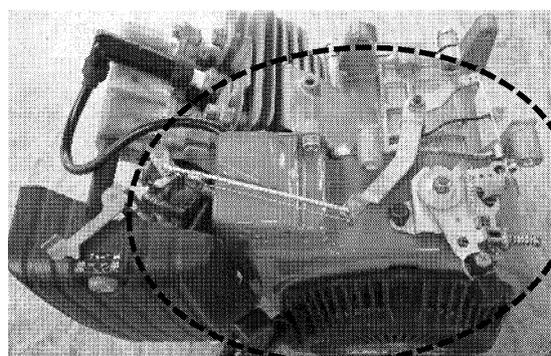


Fig. 4 The state where the governor mechanism was attached



Fig. 5 With the governor mechanism removed

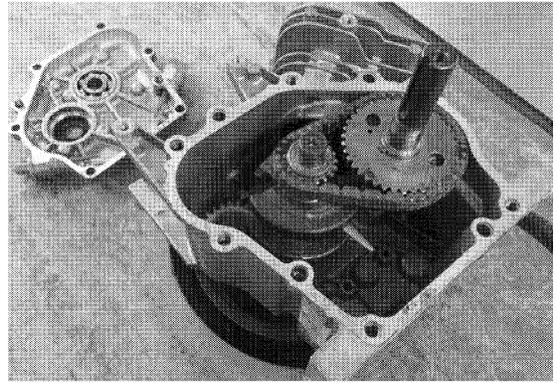


Fig. 7 With the crankcase cover removed

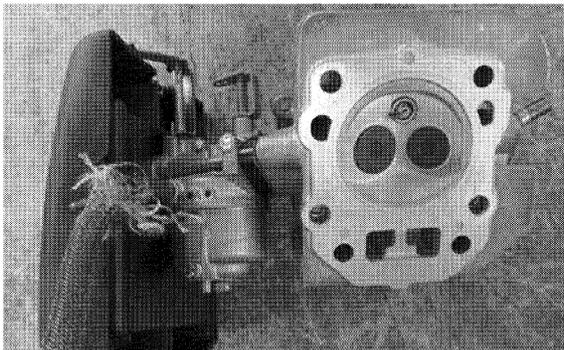


Fig. 6 Cylinder head removed with integrated carburetor



Fig. 8 Piston with ring (left), without ring (right)

この状態からクランク・ケース内のガバナ・レバーを取り外し、スロットル・レバー及びリンク関係、スプリングに至るまで全て取り外した。取り外した状態を Fig. 5 に示す。これによって実習作業でキャブレターを取り外し、構造研究を行う時間を確保しつつ、1回目の授業時間内で目的の進度内に納めることが可能になった。

次に 2 回目の実習作業でピストンの取り外し、取り付けを予定しており、効率の良い作業をする必要がある。この回ではキャブレター等の補器類の取り付け、取り外しは行わずエンジン本体を分解することにした。動弁機構を取り外した後、シリンダ・ヘッドはキャブレター及びエア・クリーナ・ケースごと取り外すことで実習作業時間の短縮が可能になった。取り外したシリンダ・ヘッドを Fig. 6 に示す。本来の作業手順であればこの後にファン・カバー側を分解しフライホイールの取り外しを行うが、この分解は行わずクランク・ケース・カバーを取り外しピストンとクランクの動きを確認することにした。予定した時間内にクランクシャフトとカムシャフトの関係も確認できる。クランク・ケース・カバーを取り外した状態を Fig. 7 に示す。ピストンの取り外し作業では、クランクシャフトとピストン、カムシャフトがチェーンによって駆動されていることなどの構造と作動を確認する。その後

のピストンの組み付け作業では、ピストン・リングの拡張力が作業を困難にするため、あらかじめ教材エンジンからピストン・リングを取り外しておいた。作業要領を説明する場面で、予め用意したピストン・リングが装着されている状態のピストンを見せて本来の状態と取り付け要領について説明することにした。Fig. 8 にリング付き(左)、リング無し(右)のピストンを示す。これらの工夫により2回目の実習作業でクランク機構や動弁機構の作動確認を行うところまで作業を進めることが可能になった。

3 回目の実習作業では生徒たちは既に分解・組立作業を一通り経験しており、各々が作成した資料も手元にあるため簡単な指示で作業が可能である。この時点でクーリング・ファン、フライホイールの脱着作業を追加した。更に自動車工学 I の教科書[2]を持参させ、主要構成部品の役割を生徒達が調べて記入出来るプリントを用意した。プリントの一部を Fig. 9 に示す。

今回はフライホイール側も分解しクランクシャフトの取り外しまで行うため、締め付けトルクの説明とトルク・レンチの使用方法を追加した。フライホイールの取り付けにトルク・レンチを使用している様子を Fig. 10 に示す。

課題研究 原動機 3回目 _____年 月 日

クラス	出席番号	氏名

原動機3回目は、各班毎で班員と協力してエンジンの分解・組立を行う。
 並行して、エンジンの構造・作動についての与えられた課題について「自動車工学Ⅰ」の教科書を活用して調べて完成させ、3時間終了時に提出する。

1. エンジンの働き (P83→)

(1) 4サイクル・エンジン

_____が2往復(4行程)を行う間にクランク軸(クランクシャフト)が_____回転して、1つのサイクルを完了するエンジンを_____・エンジンという。

① ピストンがクランク軸から最も離れた位置にあるとき、その位置を_____死点といい、また、クランク軸に最も近い位置にあるとき、その位置を_____死点という。

Fig. 9 Part of the print for the third lecture

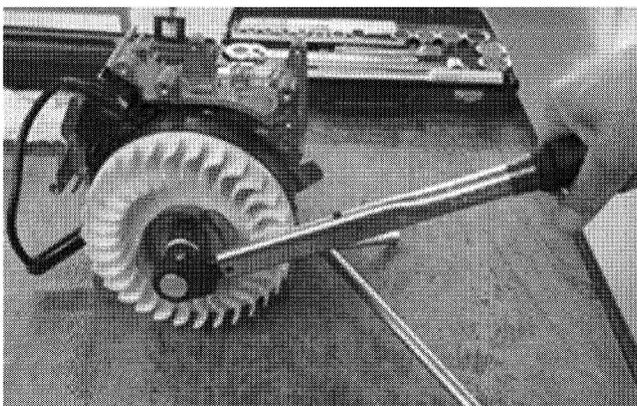


Fig. 10 Use of torque wrench

4.4 計測実習の再構築

4回目以降は既に生徒たちが学んでいるマイクロメータとノギスを使用して、ピストン及びカムシャフトの計測を行うことを目標にした。生徒達は実際の測定物での計測作業は不十分な状況と伺っていたので、実機での計測の前にボルトとナットを用いて各部寸法を計測することで取り扱いの練習を行い、ボルト・ナットの呼び名と工具のサイズとは異なることも併せて理解させることにした。同じ測定物を計測しても精度の違う計測器で計測を行うとわずかではあるが計測結果に違いが出るため、求められる精度の計測機器を使用する必要があることも併せて理解させたい部分である。今回は複数回計って平均を求めることで確からしい値を求める作業を行うことにした。用意した教材のボルトとナットを Fig. 11 に示す。各自で複数回測定して平均値を求めた値を最後に各班でまとめさせることにした。確からしい値を求めることで取り扱いの反復練習とし、複数回測定することの重要性に気付いて貰うことを目標とした。作成した測定結果記入用プリントの一部を Fig. 12 に示す。

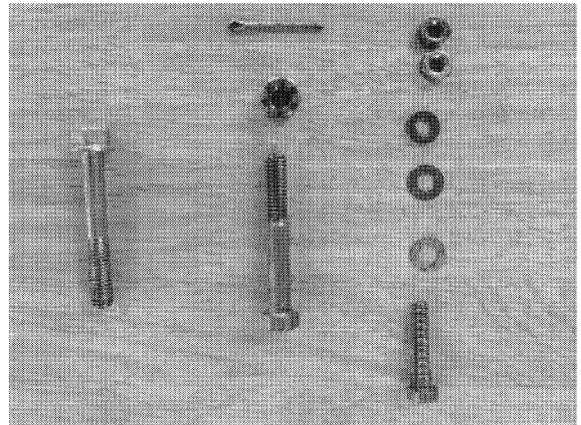


Fig. 11 Bolts and nuts for teaching materials

1. 測定作業

- (1) ノギスとマイクロメータを使用して、用意されている3セット分のボルトとナットの各部計測を行う。
- (2) それぞれ3回測定して平均値を求めて確からしい値とする。
- (3) 班員全員の測定結果全ての平均値を求めて、真値とする。

	教材番号	測定回数	二面幅	呼び径	首下長さ	全長
ノギス	1.	1				
		2				
		3				
		平均値				
	2.	1				
		2				
		3				
		平均値				
	3.	1				
		2				
		3				
		平均値				

Fig. 12 Print for entering measurement results

5回目の実習で、ノギスとマイクロメータの読みの試験を計画した。1グループ15人前後のため、1人当たり3分程度の時間であれば45分で完了する。準備と片付けを含めても時間的に余裕があることから実習場に保管されていた廃品を集めて、外装品とシリンダ・ヘッドを取り外した状態の教材エンジン6台を組み立てた。この教材を使ってクランク・ケース・カバーを取り外してピストンを抜き取り、クランクシャフトを取り外してそれぞれの計測作業を行うことが可能になった。組み立て後ピストン・ストロークの測定を行い、計測結果から排気量の計算とカタログ・データ上の圧縮比を与えて燃焼室容積を計算で求め5回目の実習を終了させ、原動機実習を完了することにした。用意した計測用教材エンジンを Fig. 13 に示す。

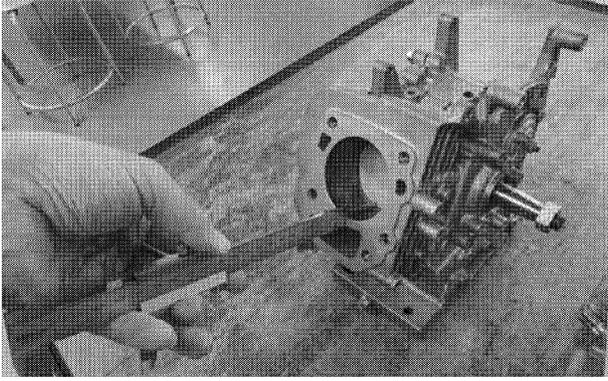


Fig. 13 Prepared teaching material engine

5. まとめ

実習授業の再構築に関しては、この報告の内容が全てではなく、分解した部品の保管方法や取り外したボルトやナットの保管方法まで見直すことで生徒たちに「効率良く作業する」考え方も提示したが、紙面の関係で今回は割愛している。また、この報告を執筆している時点では、1学期が終わったばかりであるため、この実習の効果や次年度の進学者数の動向などの結果を検証できる状況ではない。毎回提出させているプリントに記述された生徒たちの所感によれば「初めて原動機に触れ、その構造を知ること興味湧いてきた。」という内容のものから、機械科の生徒であるにも関わらず「原動機の実習は手が油で汚れて嫌だった。」と否定的な感想を述べている生徒もいた。これは全体から見ればほんの一部の感想に過ぎず、全ての生徒がこの実習授業を受けたことで自動車や原動機に興

味を持つことが出来たか、又は本学への進学意欲が湧いたかは不明である。そこを調べるにはアンケートを実施し、次年度の本学への進学にどのような影響が出るのか調査をする必要がある。今回の報告では、あくまでも筆者が再度講師として派遣された経緯と実習授業を行うにあたり実習内容を再構築したことについての記録を残すことを目的としている。これを意味のあるものにするには、この取り組みを次年度につなげて連携事業を更に継続して行くことが重要と考えている。その先に東海工業専門学校熱田校と本学との結び付がより強固なものとなり、両校の入学者数が共に上がって行くことを願っている。その結果として少子化時代における子供たちの工業科離れや自動車離れに歯止めを掛けることに少しでも役立つことが出来れば幸いである。

謝辞

このような重要な使命を持って臨む実習授業を行う機会を与えて下さった中島守副学長をはじめ、東海工業専門学校の原和正校長、夏目秀一教頭、授業構築にご指導頂いた杉本康善教務課長、高須泰彰先生及び学園関係者の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] 三菱重工業株式会社，“整備解説書 三菱メキエンジン GM シリーズ， 2007.
- [2] 全国自動車研究会，“自動車工学 I，”実教育出版株式会社，2021.

●業績リスト(2022.1～2022.12)

[著書]

加野 章子: 全国学生相談研究会議編 (編集代表 杉原保史) 学生相談カウンセラーと考えるキャンパスの危機管理, 遠見書房 (2022.5.15).

中島 守, 吉田 昌央, 小野 秀文, 高田 富男, 平野博敏, 川村 貴裕: 安全のころえ (2022 年度版), 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学(2022.3.).

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 4 年度版), 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学(2022.3.).

中島 守, 掛布 知仁, 高田 浩充, 森 勝行, 吉田 昌央: 基礎数学 (令和 4 年度版), 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学(2022.3.).

[論文/国際会議]

阿部 己和, 梶谷 満信: 電動車いすの理論に基づく SIMULINK モデル, 産業応用工学会論文誌, vol.10, no.1, pp.22-27 (2022).

Toshiaki Kondo, Yusuke Kuroda, Tomoki Shichijo, Takashi Yanagishita, Hideki Masuda: Formation of ideally ordered porous Ga oxide by anodization of pretextured Ga, Journal of Vacuum Science & Technology B, vol.40, 010603 (2022.1.12).

Toshiaki Kondo, Masahiro Yoshida, Takashi Yanagishita, Hideki Masuda: Electrodeposition and electrodisolution of Li metal in nanohole arrays of anodic porous alumina, Journal of the Electrochemical Society, vol.169, 092507 (2022.9.7).

Toshiaki Kondo, Atsushi Ono: Formation of Li Nanorod Array Using Anodic Porous Alumina, The 7th International Symposium on Biomedical Engineering (ISBE2022), online (2022.11.25).

Hiroki Kurita, Masaki Oku, Takeshi Nakamura, Takeshi Yoshida, and Takanori Fukao: Localization Method using Camera and LiDAR and Its Application to Autonomous Mowing in Orchard, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.34, no.4, pp.877-886 (2022.8.20).

豊吉 巧也, 小澤 暦世, 泰地 隆平, 和田 義孝: 畳み込みニューラルネットワークを用いた疲労き裂進展の予測(第 1 報 単一のななめき裂に対する予測), 日本機械学会論文集, vol.88, no.915 (2022.11.25).

Hiroshi Matsuura, Hiromitsu Furukawa, Yoshinori Watanabe, Shin Murakami, Yuji Ishihara, Tamio Tanikawa and

Hideki Hashimoto: Optimal conditions and generation mechanism of jet atomization for uniform distribution of nano- and micro-droplets, Japanese Journal of Applied Physics, vol.61, no.8, 085501 (2022.7.15).

Hiroshi Matsuura, Hiromitsu Furukawa, Atsushi Kondo, Tamio Tanikawa, and Hideki Hashimoto: Acoustic Analysis of Jet Atomization for Uniform Dispersion of Nano- and Micro-Droplets, Journal of Applied Physics, vol.132, no.22, 224502 (2022.12.8).

渡部 吉規, FAUZI ZULIAN DAHNU: 堆肥化排ガスが堆肥化時の質量変化および温度変化に及ぼす影響, 化学工学論文集, 48 巻, 5 号, pp.190-198 (2022.9.20).

湊 史仁, 阿多 萌, 鈴木 拓也, 平野 博敏: 自動運行装置・運行補助装置の校正作業に関する調査, 全国自動車短期大学協会 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第 51 号, pp.5-8 (2022.10).

荒川 俊也, 尾林 史章, 板宮 朋基, 小林 一信, 山邊 茂之, 宇野 新太郎, 鈴木 高宏: 津波避難訓練用シミュレータシステムの地域防災への試用と評価-「西尾市防災カレッジ」の体験を例として, 地域安全学会論文集(電子ジャーナル論文), no.40-2 (2022.3).

荒川 俊也, 山邊 茂之, 尾林 史章, 鈴木 高宏, 小林 一信, 板宮 朋基, 宇野 新太郎, 田島 淳: シミュレータを活用した津波避難訓練手法の提案-津波避難訓練用シミュレータシステムの妥当性検証-, no.20-2 (2022.7).

山中 裕介, 實廣貴敏: 感情音声合成を用いた高齢者向けコミュニケーションツール, 愛知工科大学紀要, 第 19 巻, pp.9-18 (2022.3.25).

Shota ABE, Shuichi SAKAMOTO, Zhengile CUI, Yôiti SUZUKI: Determination of optimal levels of whole-body vibration using audio-visual information of multimodal content, Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, in press.

Masahiro YAMATAKA, Yôiti SUZUKI, Shuichi SAKAMOTO, Brian C. J. MOORE: Discrimination of changes in the bandwidth of a notch simulating N1 in the human HRTF, Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics ICA2022, ABS-0226 (2022.10.24).

山高 正烈, 荒川 俊也, 早見 武人: 運転経験の違いが後続車によるあおり運転発生時の後方車間距離知覚に及ぼす影響, 自動車技術会論文誌, vol.53, no.3, pp.549-553 (2022).

山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一: 頭部伝達関数におけるノッチ幅と中心周波数の偏移が音色知覚と音像定位に及ぼす影響, 愛知工科大学紀要, 第 19 巻, pp.19- 24 (2022.3).

S. Akagi, K. Tagawa: Development of wearable lump display using a sheet and air jet, Proc. of AsiaHaptics 2022 (2022.11).

Y. Ishikawa, K. Tagawa, H. Touyama: Alternative methods of translational gains by manipulating viewpoint in the pitch direction, Proc. of Machine Learning and Cybernetics 2022 (2022.9).

K. Tagawa, C. Kuyama, M. Yamamoto, H. T. Tanaka: A visual attention guidance approach for minimally invasive VR surgery training, Proc. of Innovation in Medicine and Healthcare 2022 (Springer; Smart Innovation, Systems and Technologies) pp.221–225 (2022.6).

矢野 優, 杉浦 浩子, 三代澤 邦恵, 尾関 智恵, 毛利 哲也: 精神障がい者におけるコミュニケーションロボットの印象評価, 健康レクリエーション研究, vol.17, pp.77–84 (2022.3).

尾関 智恵: SDGs に対応したエンジニアリング・デザイン教育の動向, 愛知工科大学紀要, 第 19 巻, pp.47–48 (2022.3).

三宅 正樹, 西尾 誠人, 神邊 篤史, 鈴木 桂輔: 生理特性を用いたオフセンタ領域における操舵感の評価, 自動車技術会論文集, vol.53, no.2, pp.430–436 (2022.3.4).

Tokihiko Akita, Haruya Kyutoku and Yusuke Akamine: Error Correction Method for Untrained Data to Estimate Accurate Parking Vehicle Shape by Millimeter-Wave Radar with Deep Learning, International Journal of Automotive Engineering, vol.13, no.2, pp.97–102 (2022.4.1).

磯貝 正弘, 楊 哲: BMI に関する基礎的研究(簡易脳波計を用いた被験者と健常者との意思伝達の基礎実験), 愛知工科大学紀要, 第 19 巻, pp.25–31 (2022.3.25).

佐々木 大輔, 今富 大介, 加藤 亨: 軟鋼-アルミニウム合金メカニカルクリンチ接合体の引張せん断試験における水素誘起縦割れを伴うマイクロ損傷発達, 鉄と鋼, vol.108, no.11, pp.835–845 (2022.11.3).

田中 俊行, 田川 和義, 長谷川 進, 加藤 修司: IoT を活用した製造現場改善を習得するための実習用教材の開発, 工学教育, vol.70, no.5, pp.30–35 (2022.9.20).

Hiroki Tadauchi, Yoshitaka Nagano, Shigeru Miyachi, Reo Kawaguchi, Tomotaka Ohshima, and Naoki Matsuo: Development of a Force Sensor for a Neuroendovascular Intervention Support Robot, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.34, no.6 (2022.12)

Yashiyuki Kishimoto, Atsushi Hashizume, Yuta Imai, Masahiro Nakatochi, Shinichiro Yamada, Daisuke Ito, Ryota Torii, Yoshitaka Nagano, Hideo Fujimoto, and Masahisa Katsuno: Quantitative evaluation of upper limb ataxia in

spinocerebellar ataxias, *Annals of Clinical and Translational Neurology*, vol.9, no.4, pp. 529–539 (2022.4)

Keizo Tominaga, Yanling Pei, Yuji Nishizawa and Goro Obinata: Model-based Analysis of Knee Joint Spasticity Based on Pendulum Testing of the Lower Extremities and Independent Component Analysis, *Advanced Biomedical Engineering*, vol.11 (2022) in press.

Akitomo Mori: The Analysis of Effectiveness for the Instruction of Reading Strategy (in EFL) based on Problem Solving by Collaborative Discussion, *The JACET Chubu Journal*, vol.20, in press.

Tatekawa Takayuki and Tohru Tashiro: High-Precision Simulations for Collisional Self-Gravitating Systems Incorporating Relativistic Effects, *JGRG31*, online (2022.10.26).

[特許]

永野 佳孝, 小野 浩司, 杉森 順子, 佐藤 仁, 眞鍋 吉仁: 中空立体映像表示装置, 中空立体映像表示システム, 中空立体映像の歪補正方法, および歪補正データ作成プログラム, 特開 2022-161368 (2022.10).

[解説・総説]

Masahiro YAMATAKA, Shota ABE, Shuichi SAKAMOTO, Yōiti SUZUKI: Effects of body vibration generated by audio-visual signal on perceived reality in multimodal content: Center for Nation-Wide Cooperative Research on ICT FY 2021 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects (2022.2.17).

小林 直美: ジェンダー平等なスポーツ報道を共に創る, *女子体育*, 第 64 巻, 第 10 号, pp.48–51 (2022.10.8).

服部 幸廣, 甲村 一貴, 巨藤 誠: 大型車の車輪脱落事故, *愛知工科大学紀要*, 第 19 巻, pp.49–52 (2022.3.25).

鵜飼 達也: コロナ禍における音楽系課外活動「電音部」の活動継続に向けて, *愛知工科大学紀要*, 第 19 巻, pp.53–58 (2022.3.25).

[口頭発表]

田中啓心, 石原裕二: 簡易車両モデルの空気抵抗低減に及ぼすプラズマアクチュエータの効果 (On/Off 制御による効果), *日本機械学会東海支部 第 53 回学生会卒業研究発表講演会*(2022.3).

苅谷 溪太, 石原裕二: プラズマアクチュエータを用いた円柱振動の流体制御, *日本機械学会東海支部 第 53 回学生会卒業研究発表講演会* (2022.3).

近藤敏彰: アノード酸化による半導体ナノホールアレイの形成と機能化, アノード酸化皮膜の機能化部会 第 37 回三河コンファレンス, 依頼講演 (2022.9.9).

豊吉 巧也, 浦田 勝: 深層学習技術を用いた変位場予測手法の開発に関する検討, 日本機械学会 第 35 回計算力学講演会(CMD2022), no.22-30 (2022.11.16).

二村拓人, 村上新: 半球殻案内面をもつ転がり球体ダイナミックダンパの研究, 日本機械学会東海学生会 第 53 回学生会卒業研究発表講演会, 講演前刷集, pp.63-64 (2022.3.4).

渡部吉規: 堆肥化排ガスが堆肥化に及ぼす影響, 化学工学会第 87 年会 (2020.3.16).

渡部吉規: 堆肥化熱の有効利用, 第 59 回 日本伝熱シンポジウム (2020.5.20).

渡部吉規: 堆肥化装置への堆肥化排ガス導入による堆肥化促進の可能性, 第 33 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2020.9.21).

Zhou Qihang, 實廣 貴敏: 異常検知技術を用いた非母語話者の日本語発音誤り検出, 令和 4 年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, H5-7 (2022.8.30).

岡田 拓真, 山高 正烈: Ambisonics 録音方式を用いた単一音源の再生方法についての一検討, 日本音響学会 2022 年秋季研究発表会講演論文集, pp.389-390 (2022.9.14).

白井 将太, 神邊 篤史, 山高 正烈: VR 野球スイング時の接触時間幅が高次感性に及ぼす影響, 日本バーチャルリアリティ学会第 27 回全国大会論文集, 3E1-1 (2022.9.14).

春日井 陵午, 倉田 優斗, 山高 正烈, 荒川 俊也, 早見 武人: 後続車の加速度があおり運転知覚時の車間距離および危険度に及ぼす影響, ヒューマンインタフェース学会 2022 全国大会, (2022.9.1).

阿部 翔太, 坂本 修一, 山高 正烈, 鈴木 陽一, 行場次朗: 多感覚コンテンツにおける音響特徴量を用いた全身振動最適レベル決定法の検討, 日本音響学会 2022 年春季研究発表会講演論文集, 2-4P-2 (2022.3).

阿部 翔太, 山高 正烈, 坂本 修一, 鈴木 陽一, 行場 次朗: 多感覚コンテンツにおける最適振動レベルに影響を及ぼす映像および音響特徴量の検討, 信学技報, 121(362), EMM2021-89, pp.31-36 (2022.1.27).

佐々昌 稔, 山高 正烈: 後続車の加速追従があおり運転知覚に及ぼす影響, 電子情報通信学会東海支部 令和 3 年度卒業研究発表会, 1-14 (2022.3.4).

堂前 優太, 白井 将太, 神邊 篤史, 山高 正烈: VR バッティングの時間操作が高次感性に及ぼす影響, 電子

情報通信学会東海支部 令和 3 年度卒業研究発表会, 1-13 (2022.3.4).

岡田 拓真, 山高 正烈: 音源の種類と再生方法が高次感性に及ぼす影響, 電子情報通信学会東海支部 令和 3 年度卒業研究発表会, 1-12 (2022.3.4).

山高 正烈: 災害時における「正常性バイアス」を打破する緊急避難アナウンスの開発, 東三河地域防災協議会 研究成果発表会 (2022.7.25).

小辻 祐一, 加藤 央昌, 田川 和義: ドローンを用いた省人力的な屋外の 3D モデル作成手法の模索, バーチャル学会 2022 (2022.12).

松井 佐耶香, 加藤 央昌, 田川 和義: VR リハビリ開発に向けた遠隔協働環境の開発, バーチャル学会 2022 (2022.12).

大石 萌佳, 加藤 央昌, 田川 和義: アバタの腕の関節角増幅が操作者の腕の身体所有感に与える影響, 電気学会電子・情報・システム部門知覚情報研究会「複合現実型実応用および一般」(2022.12).

板橋 知生, 森澤 知也, 加藤 央昌, 田川 和義: 顧客の見え情報に基づくアパレル店舗推薦システムの構築, 2022 年電気学会電子・情報・システム部門大会 (2022.9).

板橋 知生, 森澤 知也, 加藤 央昌, 田川 和義: 一般投稿からのファッションスタイル抽出手法の検討と着用衣料のスタイル情報による店舗推薦システムの構築, 第 28 回画像センシングシンポジウム(SSII2022) (2022.6).

伊東 賢人, 田川 和義, 加藤 央昌: 着用画像およびタグ情報からのファッションスタイル情報の抽出手法の検討, 令和 3 年度 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会 (2022.3).

木村 怜, 田川 和義: 摩擦を有する粒子群による仮想レオロジー物体の変形・切断表現, 令和 3 年度 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会 (2022.3).

板橋 知生, 田川 和義, 加藤 央昌: 着用衣料のスタイル情報による店舗推薦システムの構築, 令和 3 年度 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会 (2022.3).

棚瀬 隆也, 荒谷 隼基, 田川 和義, 加藤 央昌: 二軸回転機構を用いた簡易設置が可能な没入型仮想環境の構築, 令和 3 年度 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会 (優秀卒業研究発表賞を受賞) (2022.3).

森下 雄介, 田川 和義: 腹腔鏡下胆嚢摘出術における熟練者の視線傾向分析, 令和 3 年度 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会 (2022.3).

赤木 惣一, 田川 和義: しこりを有する柔軟物のなぞり感覚提示を可能とする小型触覚デバイスの提案, 令和 3 年度 電子情報通信学会東海支部 卒業研究発表会 (2022.3).

田川 和義: 手術手技の能動的な視力覚教示手法の開発と低侵襲 VR 手術訓練への応用, 公益財団法人大川情報通信基金「2021 年度研究助成オンラインフォーラム」(2022.1).

尾関 智恵, 鶴田 慎弥, 小林 直美, 寺田 和憲, 高木 寿, 上野 将敬: 理想体型アバターが VR 空間内における力試し方略に与える影響, HAI シンポジウム 2022, p.29 (2022.3).

尾関 智恵, 清水 楓: 認証方法の違いが作業態度に与える影響の検討, 日本教育工学会 2022 年春季全国大会, 5-S144-3, pp.317-318 (2022.3).

尾関 智恵, 毛利 哲也: 指先に提示される剛性の違いが知覚価値へ与える影響, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 in Sapporo, 2A1-H01 (2022.6).

尾関 智恵, 小林直美, 毛利 哲也: ロボット技術に関する文理融合型教育プログラムの開発, 第 40 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 4G2-06 (2022.9).

尾関 智恵, 寺田 和憲, 高木 寿, 上野 将敬: インタラクティブエージェントによる人の牛乳・乳製品に対する価値観の推定, 日本認知科学会第 39 回全国大会大会予稿集, P2-037, pp.722-723 (2022.9).

Tomoe OZEKI, Syo-ma KAIHATSU, Hiroaki KATO, Akitomo MORI, Takehiro SATO: Comparison Between Novice and Intermediate Students in Asynchronous Presentations Using a Virtual Classroom, Program of the JSET Spring Conference 2022 (40th), OD-137, pp.567-568 (2022.9).

尾関 智恵, 毛利 哲也, 馬場 遼太郎: 対話を活性化させる体を使ったオンラインコミュニケーションツール開発—ノンバーバルなやりとりの支援方法を探る—, 第 18 回日本子ども学会学術集会論文集 (2022.10).

尾関 智恵, 福井 颯, 毛利 哲也: コミュニケーションロボットが方言で行う観光紹介プロセスにおける関係構築と印象評価, 第 23 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(SI2022) 3A2-B10 (2022.12).

尾関 智恵, 寺田 和憲, 高木 寿, 上野 将敬: 牛乳・乳製品に対する価値観を引き出すインタラクティブエージェントの具象化の検討, HCG シンポジウム 2022 A-4-3 (2022.12).

尾関 智恵, 寺田 和憲, 高木 寿, 上野 将敬: 牛乳・乳製品に対する価値観を引き出すカウンセリングワールド構築の試み, バーチャル学会 2022 B3-2 (2022.12).

判家 宏彰, 加藤 央昌, 田川 和義: 科に着目した類似骨格動物における共有可能な骨格データの検証, 2022

年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 講演論文集, pp. 408-411 (2022).

坂梨 瑠音, 荒谷 隼基, 加藤 央昌, 田川 和義: 没入型仮想環境を想定した投影光学補正手法の検討, 令和 3 年度 電子情報通信学会 東海支部卒業研究発表会, 予稿集, p.27, (2022). (優秀発表賞)

開発 祥真, 加藤 央昌, 尾関 智恵: 人の存在を視認できるオンライン学習環境の機能抽出と検討, 令和 3 年度 電子情報通信学会 東海支部卒業研究発表会, 予稿集, pp. 25-26 (2022).

二橋 輝斗, 加藤央昌: 室内の CO₂ の流れを想定した簡易型シミュレータの検討, 令和 3 年度 電子情報通信学会 東海支部卒業研究発表会, 予稿集, p.24 (2022).

下村 優斗, 入砂 勇太, 神邊 篤史, 鈴木 桂輔: 自動車用周辺視認デバイスを用いた場合の注意資源と運転行動の関係, 自動車技術会 2022 春季大会 (2022.5.25).

秋田 時彦, 久徳 遙矢, 赤峰 悠介: ミリ波レーダを用いた駐車車両形状推定における深層学習の確率的信頼度推定, 自動車技術会 2022 年春季大会学術講演会予稿集, 242 (2022.5.27).

谷本 樹希, 久徳 遙矢, 道満 恵介, 目加田 慶人: マルチモーダルカメラを用いた自己教師あり学習に基づく物体検出手法の検討, 第 25 回画像の認識・理解シンポジウム論文集, IS2-64 (2022.7.27).

久徳 遙矢: 歩行者検出タスクにおける外界環境に応じた自動カメラ選択に関する基礎検討, 第 25 回画像の認識・理解シンポジウム論文集, IS2-87 (2022.7.27).

Jiahang Lu, Haruya Kyutoku, Keisuke Doman, Takahiro Komamizu, Yasutomo Kawanishi, Takatsugu Hirayama and Ichiro Ide: A study on intra-modal constraint loss toward cross-modal recipe retrieval, HCG シンポジウム 2022, A-3-1 (2022.12.15).

K. Imai, N. Hirakoso, M. Nishio, T. Takada, K. Kitamura, J. Nakaya, Y. Murakami, M. Tokumitsu, M. Imai, K. Fukai: Technology Demonstration CubeSat KOSEN-1 for Jupiter Radio Observations, Proc. of 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 2022-f-23 (2022.3.2).

M. Imai, K. Imai, N. Hirakoso, Y. Ito, T. Sugawara, S. Suzuki, M. Nishio, T. Takada, K. Kitamura, J. Nakaya, Y. Murakami, M. Tokumitsu, M. Wakabayashi, KOSEN-1 Team: Jupiter's decametric radio common observation campaign from KOSEN-1 and ground-based radio telescopes Japan Geoscience Union Meeting 2022 (2022.5.26).

M. Imai, M. Wakabayashi, K. Imai, M. Tokumitsu, J. Nakaya, Y. Murakami, N. Hirakoso, T. Takada, K. Shimada: Enhancing KOSEN Education in Space Engineering through the Development of KOSEN-1 and KOSEN-2 CubeSats, The 15th International Symposium on Advances in Technology Education 2022 (2022.9.20).

若林 誠, 今井 雅文, 徳光 政弘, 中谷 淳, 今井 一雅, 平社 信人, 池田 光優, 高田 拓, 北村 健太郎, 村上 幸一, 梶村 好宏, 高専スペース連携: 実践的宇宙人材育成を目指した高専スペースアカデミア 2021 及び全国高専宇宙コンテストの実施報告, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 3C08 (2022.11.3).

中谷 淳, 土屋 華奈, 高田 拓, 若林 誠, 徳光 政弘, 今井 雅文, 梶村 好宏, 今井 一雅, 北村 健太郎, 村上 幸一: ブレッドボードモデルへ発展可能なキューブサット学習モデルの開発と高専衛星開発における教育活用事例, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 3C11 (2022.11.3).

今井 一雅, 平社 信人, 西尾 正則, 村上 幸一, 中谷 淳, 徳光 政弘, 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(4), 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 3E14 (2022.11.3).

徳光 政弘, 平社 信人, 今井 一雅, 中谷 淳, 今井 雅文, 村上 幸一, 辻 正敏, 高田 拓, 北村 健太郎, KOSEN-2 チーム: 高専連携技術実証衛星 2 号機「KOSEN-2」の軌道上実証と宇宙工学技術者育成(2), 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 4E12 (2022.11.4).

永野 佳孝, 小野 浩司, 杉森 順子, 佐藤 仁, 眞鍋 吉仁: 8K プロジェクションマッピングのための FPGA 設計, 2022 年映像情報メディア学会年次大会 (2022.8).

西山 泰登, 中島 厚, 西尾 正則, 牛越 弘彰, 難波 江舜: CrestP-Sat 1 - 可視光通信によるデジタルで伝える AI (愛), 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 2C13 (2022.11.2).

廣野 敦士, 西尾 正則, 田中 俊行, 山下 達也, 林衆 治: LED と動画カメラによる衛星間光通信の検討, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, P045 (2022.11.2).

北村 健太郎, 梶村 好宏, 池田 光優, 高田 拓, 村上 幸一, 今井 一雅, 平社 信人, 西尾正則, 若林 誠: 人工衛星開発教育プログラムにおける参加者の態度・能力測定に関する試行結果報告, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 3C07 (2022.11.3).

清水 新悟, 木戸 勝己, 小橋 健司, 宮内 博之, 佐々木 和憲, 裴 艶玲: カーボン足底挿板の開発についての検討, 第 28 回日本義肢装具士協会学術大会, 2022 (2022.7.9).

Akitomo Mori: Instruction of Language Learning Strategy for Learners of English Based on Bottom Up Model, The 61st JACET International Convention, online (2022. 8. 5).

小林 直美: ニュースのジェンダー・バイアス: 東京オリンピック 2020 から考える, 外国語教育メディア学会中部支部第 98 大会 (基調講演) (2022.5.28).

小林 直美: メディア・教育・ジェンダー, 外国語教育メディア学会中部支部第 98 大会シンポジウム「メディアとジェンダーから考える」(2022.5.28).

小林 直美: 東京 2020 メディアが覆い隠したもの, 第 21 回日本スポーツとジェンダー学会 2022 シンポジウム「東京 2020 が覆い隠したもの」(2022.7.2).

三須 亜希子, 川野 佐江子, 小林 直美, 須藤 典子, 高峰 修, 橋本 和美, 前田 博子, 山村 弘一, 來田 享子: 東京 2020 大会テレビ報道のジェンダー表象分析, 第 21 回日本スポーツとジェンダー学会 2022 (2022.7.2).

服部 幸廣, 甲村 一貴, 巨藤 誠: 大型車用中古ホイール・ボルトの締め付けトルクと軸力の関係, 全国自動車短期大学協会 自動車整備技術に関する研究報告誌, vol.51, pp.17-20 (2022.10.31).

尾崎 慎弥, 中島 公平, 吉田 昌央, 大藏 信之: 強制対流下での切欠きフィン付き空冷シリンダの冷却特性(前方切欠きフィンの冷却効果), 日本設計工学会東海支部令和 3 年度研究発表講演会講演論文集, pp.25-27 (2022.3).

尾崎 慎弥, 中島 公平, 吉田 昌央, 大藏 信之: 強制対流下での切欠きフィン付き空冷シリンダの冷却特性(前方切欠きフィンの熱流体解析), 日本設計工学会 2022 年度秋季研究発表講演会, pp.145-148 (2022.10).

[その他(受賞・セミナー講師・作品出展など)]

宇野 新太郎: ネットワークの基礎知識1~6, Tech Note, 株式会社イプロス(2022.1.8).

加藤 高明: 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(2022.10.28).

田川 和義: 高大連携授業 触覚のバーチャルリアリティとは (触覚のバーチャルリアリティの概要と医療応用について体験授業), 一色高等学校 (2022.11).

田川 和義: 地元展示会への出展 遠隔協働型 VR 手術シミュレータの研究開発, ものづくり博 2022 in 東三河 (2022.6).

神邊 篤史: 東三河懇話会主催第 457 回東三河産学官交流サロン, 「感性データ分析に基づく新製品開発」(2022.11.15).

中谷 淳: 高専スペースキャンプ 2022「KOSEN-2 衛星構体関係 CAD のチュートリアル」(2022.9.2).

西尾 正則: 帝京大学宇宙機研究開発センター主催・第1回セミナー「キューブサット作りましょう！—やれたこと、やれなかったこと、やりたいこと—」(2022.3.25).

西尾 正則: JAXA 監修・鹿児島県立楠隼中学校・高等学校「宇宙学」・中学2年「人工衛星と私たちの生活」(2022.9.14).

西尾 正則: 一般社団法人中部圏イノベーション推進機構主催・第24回アカデミックナイト「極超小型衛星キューブサットをビジネスに利用するための試み」(2022.11.17).

小林 直美: 名古屋市千種生涯学習センター〈女性セミナー〉「CM に描かれる『女性』について考えましょう」(2022.1.27).

小林 直美: 名古屋市名東生涯学習センター〈女性セミナー〉「CM やアニメにおけるジェンダー」(2022.6.2).

小林 直美: 春日部市男女共同参画推進センター「オリンピック報道とジェンダーの多様性」(2022.6.26).

小林 直美: 蒲郡市スキルアップ講座「メディアリテラシーを知ろう！」(2022.11.26).

加野 章子: 蒲郡ロータリークラブ講話会「アディクション」(2022.12.16).

橋本 孝明, 長谷川 康和: 幸田町理科教室(日時計を作って天文学入門), 幸田町立図書館 (2022.8.21).

愛知工科大学紀要 第20巻 令和5年3月25日

紀要編集委員会

委員長 近藤敏彰
委員 磯貝正弘 尾関智恵
田代 徹 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/>