

東海大学紀要

工 学 部

Vol. 63, No. 1 2023

目次

論文

アモルファス二硫化ゲルマニウム膜の作製過程が銀のフォトリソに与える影響	能登勇真・村上佳久・渋谷猛久	1
円板を用いた圧電振動発電の特性に及ぼす振動モードの影響	呉 文宝・森山裕幸・土屋寛太郎・内田ヘルムート貴大	7
Profit Sharing 法を用いた追跡問題における視野領域を考慮した学習方法の提案	澤田志門・奥山 淳	15
音波波形の時間微細構造から見たアクリル板設置による聞き分け低下の要因とその簡易改善法	山本亜優・八坂由衣・堀越哲郎	23
アルカリ法によるプラスミド DNA 精製過程における溶液混和が最終精製標品の品質に与える影響の検討	笹川 昇・小林 響・覧村龍之介	31

2023 年度 新任教員研究紹介

工学部	新井啓之	39
-----	------	----

PROCEEDINGS
OF THE
SCHOOL OF ENGINEERING
OF
TOKAI UNIVERSITY
CONTENTS

VOL. 63, No. 1 2023

Technical Papers

Effect of Fabrication Process of Amorphous Germanium Disulfide Films on Silver Photodoping	Yuma NOTO, Yoshihisa MURAKAMI and Takehisa SHIBUYA... 1
Effect of Vibration Mode on the Characteristics of Piezoelectric Power Generation with a Circular Plate	Wenbao WU, Hiroyuki MORIYAMA, Hirotarou TSUCHIYA and Helmut Takahiro UCHIDA... 7
Proposal of a Profit Sharing Method for the Pursuit Problem Considering Field of View	Shimon SAWADA and Atsushi OKUYAMA... 15
Undesirable Effect of Acrylic Partitions on Speech Recognition and a Simple Improvement Method Estimated by the Temporal Fine Structure of Speech Sound Waveforms	Ayu YAMAMOTO, Yui YASAKA and Tetsuro HORIKOSHI... 23
Effect of Solution Mixing Condition on the Quality of Isolated Plasmid DNA by the Alkaline-SDS Method	Noboru SASAGAWA, Hibiki KOBAYASHI and Ryunosuke MIMURA... 31

Introduction of research activities of new faculty members (2023)

School of Engineering	Nobuyuki ARAI... 39
-----------------------	---------------------

アモルファス二硫化ゲルマニウム膜の作製過程が 銀のフォトドーピングに与える影響

能登 勇真^{*1} 村上 佳久^{*2} 渋谷 猛久^{*3}

Effect of Fabrication Process of Amorphous Germanium Disulfide Films on Silver Photodoping

by

Yuma NOTO^{*1}, Yoshihisa MURAKAMI^{*2}, and Takehisa SHIBUYA^{*3}

(Received on Apr. 9, 2023 and accepted on Jul. 6, 2023)

Abstract

Silver photodoping into an amorphous chalcogenide layer is expected to be applied to various optical devices and optical information recording materials. To understand the optical diffusion of silver, amorphous GeS₂ films deposited on Si substrates were fabricated under different conditions. Photodoping processes were investigated by X-ray reflectivity. The results showed that a reaction layer originating from the fabrication conditions is formed at the boundary between Ag and GeS₂, and this layer affects the optical diffusion of Ag.

Keywords: Silver photodoping, Amorphous chalcogenide, Germanium disulfide

1. まえがき

フォトドーピングとは金属とアモルファスカルコゲナイド（以後 a-Ch）の二層膜に a-Ch の吸収端近傍の光を照射することで金属が a-Ch 中へ異常拡散する現象で、Kostyshin らによって発見された^{1,2)}。金属が a-Ch 内にドーピングされた領域は反射率が大きく変化する。この現象を利用することで、パターンが描かれたマスクを通して光照射する、光束を走査する、あるいは光の干渉・回折を利用することで、光学デバイスや情報記録材料としての応用が期待されている。

フォトドーピングのメカニズムについては、最近、Ag/GeS_{100-x} (x=20, 33, 40)の X 線反射率(以後 XRR)、中性子反射率(以後 NR)の測定が行われ、この組み合わせの膜構造で、膜厚方向の銀の拡散プロセスが明らかにされつつある³⁻⁶⁾。XRR および NR 測定から、Ag 膜、a-Ch 膜、反応膜の厚みが 10⁻¹ nm オーダーで推定されるとともに、これらの膜の構造、密度と関係する散乱長密度の導出が可能になる。

a-Ch へのフォトドーピングは金属/a-Ch 界面における光反応が引き金になっていると考えられる。そのため、界面状態の違いがフォトドーピングの進行に大きく関わると予想される。実際、induction period と呼ばれる、光

照射してもフォトドーピングが見かけ上起こらない時間帯が存在する場合があるが、その存在の有無が薄膜作製法に依存し、界面状態の違いによって生じていると考えられている⁷⁾。

真空蒸着法により作製された銀/二硫化ゲルマニウム（以後 Ag/ GeS₂）薄膜については、GeS₂ 蒸着後、Ag 膜をつける前の GeS₂ 膜のアニール処理の有無がフォトドーピングに影響する可能性がある。

本研究では GeS₂ 薄膜の成膜後のプロセスの違いによって Ag 膜との界面状態がどのようになるのか、さらに光照射した際、フォトドーピングにどのような違いが表れるかを解析したので報告する。

2. 実験の概要

2.1 フォトドーピング試料の作製

真空蒸着装置を用いて GeS₂ および Ag の薄膜を作製した。真空度は 6.0×10⁻⁴ Pa 程度である。膜厚は水晶振動子型膜厚モニターを使用した。下地基板には Si ウエハーを用いた。一層目の GeS₂ を膜厚が 200 nm になるように成膜した。GeS₂ 膜は、成膜後大気に戻す場合には、アニール処理を行うものを行わないもの、大気に戻さずアニール処理をしないものの計三種類である。これらの処理を行った試料に対して二層目の Ag を 30 nm 成膜した。いずれの場合でも成膜後は蒸着装置内で 2 時間放置した。成膜後試料を真空容器から取り出す際には大気圧になるまでアルゴンガスを導入した。

*1 電気電子工学専攻修士課程

*2 筑波技術大学

*3 東海大学理系教育センター 教授

(1) アニール処理有

真空容器から取り出した試料は大気にさらされた後、チューブ型電気炉を用いてアニール処理を行った。パイレックス管の中に試料をセットし、アルゴンガスを約 100 sccm 流しながら約 205 °C で 2 時間加熱処理を行った。その後は室温になるまで自然冷却した。その後二層目の Ag を成膜した。

(2) アニール処理無

(1)と同じように大気にさらされるが、アニール処理を行わず再び真空装置の中にセットし、二層目の Ag を成膜した。

(3) 連続成膜

GeS₂ 薄膜を成膜した後真空容器から取り出さない試料は、真空状態のまま 2 時間経過した後 Ag を成膜した。大気にさらされることなく二種類の膜は成膜されているがアニール処理されていない試料となる。

2.2 フォトドーピング過程の X 線反射率測定

X 線反射率法は、X 線を物質表面すれすれに入射させ、その入射角度に対する X 線反射率の依存性を調べることで、膜厚、密度、表面や界面のラフネスといった膜構造パラメータを求める手法である。この手法は非破壊検査であり、それぞれの膜のパラメータをフィッティング解析から求めることで多層膜の解析ができる。

Ag のフォトドーピング過程を XRR 測定する際の装置の配置を Fig. 1 に示す。X 線回折装置 (Philips (PANalytical) 製 X'Pert MRD, Cu ターゲット, K_α) 内にフォトドーピング用の波長 405 nm の半導体レーザーを設置した。X 線回折装置内の様子を Fig. 2 に示す。レーザー光はスペイシャルフィルター (10 倍の対物レンズ, 25 μm のピンホール) によりビームノイズを取り除いた。照射光強度は、約 7 mW/cm² であった。半導体レーザーの照射領域は X 線の測定領域とは重ならないようにした。X 線の入射角度 0.1~1.5 度の範囲で X 線反射率測定を行った。

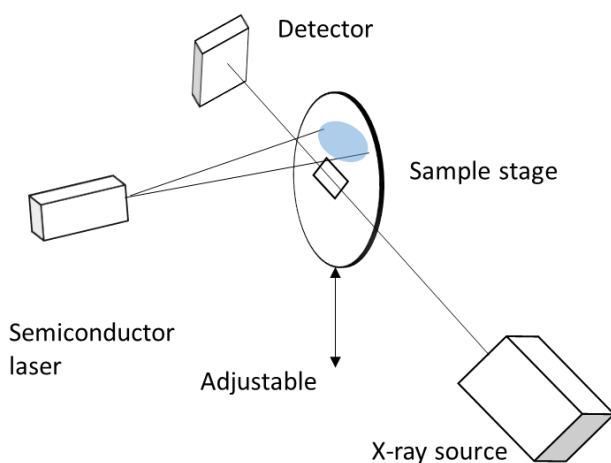


Fig. 1 Schematic diagram of X-ray reflectivity.

光を照射する前に XRR 測定を行い試料の初期状態を計測した (Before)。その後ステージを移動させレーザー光照射領域で所望の時間、光を照射した。その後再び測

定領域へと移動し XRR 測定を行った。これらの過程を繰り返し、照射時間に対する Ag のフォトドーピング過程を観測した。照射時間はステージが光照射領域にいる時間とした。

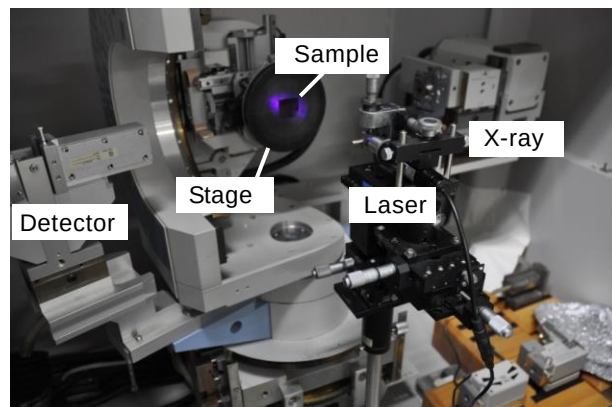


Fig. 2 Experimental setup of XRR for photodoping process.

試料への LD の照射時間は、アニール有の試料、アニール無の試料では 1 ~ 4 回は 15 分間とし、その後は 30 分間とした。連続成膜の試料については 5 分間とした。(1)の試料は全体で 15 時間照射,(2)の試料は全体で 12 時間照射, (3)の試料では全体で 3 時間照射した。

測定された XRR スペクトルの解析ソフトウェアとして Motofit を使用した⁸⁾。モデル薄膜における散乱ベクトル(Q)と X 線反射率(R)と実験で得られたスペクトルの関係から、Ag, GeS₂ 等の膜厚、散乱長密度実部 (以後 SLD) 等を求めることが出来る。SLD は構成元素と密度で決まる値である、膜構造を解析する際、想定している原子を含む膜であるかの指標となる。光照射時間に対する XRR スペクトルから Ag, GeS₂ 等の膜厚、SLD 等を求めることで Ag のフォトドーピング過程を観測した。

3. 結果

3.1 X 線反射率スペクトルとフィッティング

(1) アニール処理有

アニール処理をした試料における XRR スペクトルの光照射時間依存性とそのフィッティング結果を Fig. 3 に示す。フィッティングの精度を示す χ^2 は 0.005~0.0251 であった。15 分間の光照射で光照射前にあったフリンジが無くなっている事がわかる。散乱ベクトル Q の 0.5~0.8 nm⁻¹ の領域について反射率の急激な落ち込みが光照射 15 分から始まり 90 分頃まで続いた。

(2) アニール処理無

アニール処理をしていない試料における XRR スペクトルの光照射時間依存性とそのフィッティング結果を Fig. 4 に示す。フィッティング精度、 χ^2 は 0.005~0.0251 であった。(1)の試料と同様に 15 分の光照射で光照射前にあったフリンジが無くなっている事がわかる。散乱ベクトル Q の 0.5~0.8 nm⁻¹ の領域について反射率の急激な落ち込みが(1)の試料と比較して光照射 15 分から 45 分までと短くなった。

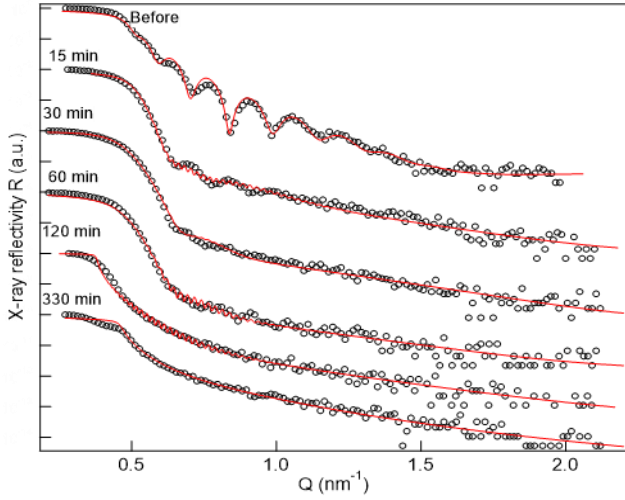


Fig. 3 XRR spectra and model fitting curves (annealed sample).

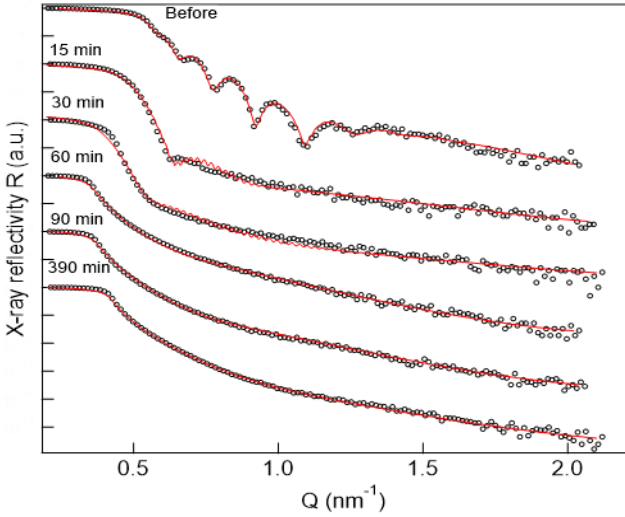


Fig. 4 XRR spectra and model fitting curves (non-annealed sample).

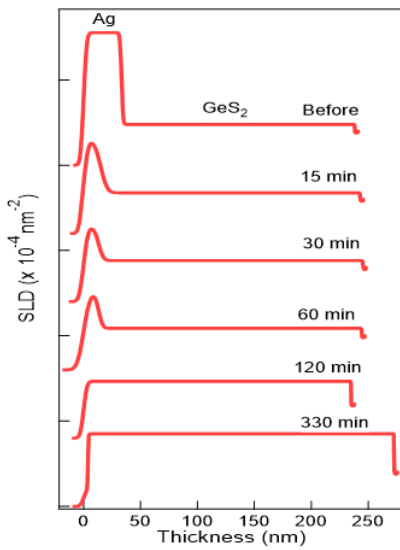


Fig. 6 SLD spatial distribution versus exposure time (annealed sample).

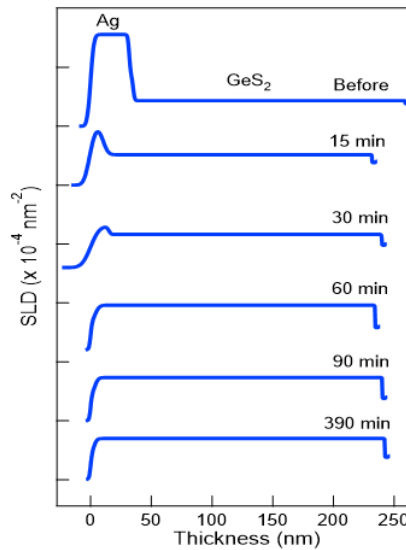


Fig. 7 SLD spatial distribution versus exposure time (non-annealed sample).

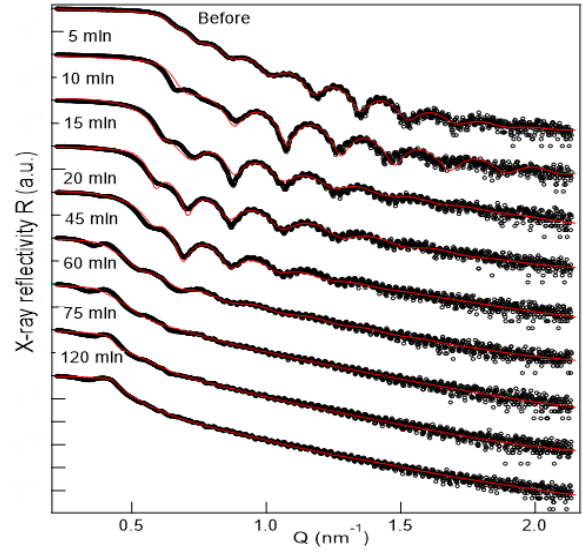


Fig. 5 XRR spectra and model fitting curves (non-annealed sample without atmospheric exposure).

(3) 連続成膜

真空中で2種類の膜を成膜した連続成膜の試料におけるXRRの照射時間依存性とそのフィッティング結果をFig. 5に示す. フィッティング精度 χ^2 は0.008~0.03であった. 照射時間45分で照射前にあったフリンジが無くなっている事が分かる. 照射時間45分からQの0.3~0.5 nm⁻¹の範囲において新しいフリンジが観測された.

3.2 SLDおよび膜厚プロファイル

3種類の試料の厚さ方向のSLDプロファイルをFig. 6~8に示す. AgのSLDは $77 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ 程度でGeS₂は $20 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ 程度である. 照射はAg側(グラフ左側か

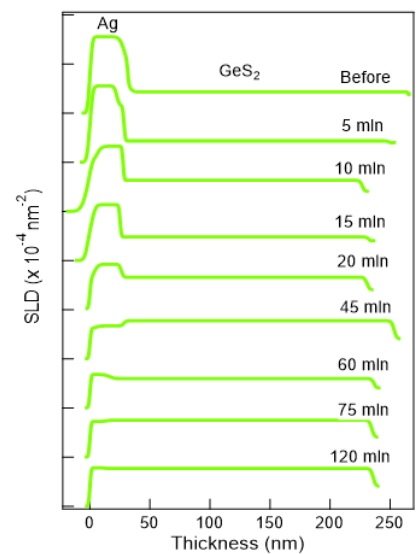


Fig. 8 SLD spatial distribution versus exposure time (non-annealed sample without atmospheric exposure).

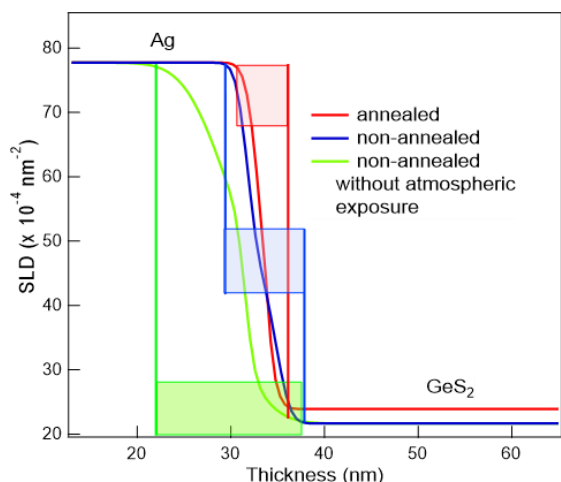


Fig. 9 SLD profiles of sample before the light exposure produced by different fabrication processes.

ら右に向けて) から行った. 光照射を行う前の XRR スペクトルから膜構造を解析する際, Ag と GeS_2 の膜の他に両者の境界面に反応層(Reaction)を仮定した方がフィッティング精度の値が良くなった. 光照射を行う前の反応層付近の SLD の拡大図を Fig. 9 に示す. GeS_2 を成膜した後アニール処理を行った場合, 反応層は 5.5 nm 程度, アニール処理を行わない場合には 8.0 nm の膜厚であると考えられる. 一方で連続成膜の場合には反応層が厚く 15 nm 程度になることが分かった.

(1) アニール処理有

アニール処理を行った試料のそれぞれの膜厚変化を Fig. 10 に示す. SLD の変化と膜厚変化のグラフから, 光照射前には Ag の SLD を持つ膜が試料表面に 30 nm 程度存在していたが, 15 分間の光照射後には Ag 膜は消失した. その代わりに照射前に存在していた反応層の SLD の

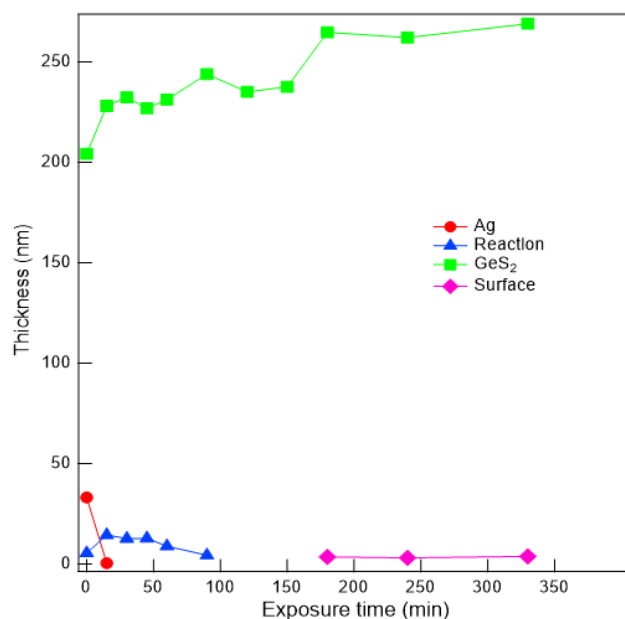


Fig. 10 Film thickness versus exposure time (annealed sample).

値が上昇した. 反応層の SLD の値は光照射時間の経過に伴って減少した. 反応層の膜厚に関しても, 照射時間の SLD は上昇していった. 120 分の段階で両者の値は同じになり, SLD が一致した膜となった. GeS_2 の膜厚は光照射に伴い増加していった. その後も光を照射し続けると試料の表面に SLD が小さい表面層 (Surface layer) が形成された.

(2) アニール処理無

アニール処理をしていない試料についてそれぞれの膜厚変化を Fig. 11 に示す. Ag の SLD を持つ膜は光照射が 15 分で無くなり, その後かなり早い段階で表面層が形成されたと考えられる. 反応層の SLD の減少および GeS_2 の SLD の増加はアニール処理をした試料と比べて早く, 30 分の光照射で SLD の値は近くなった. 60 分後には両者の SLD が一致した膜になった.

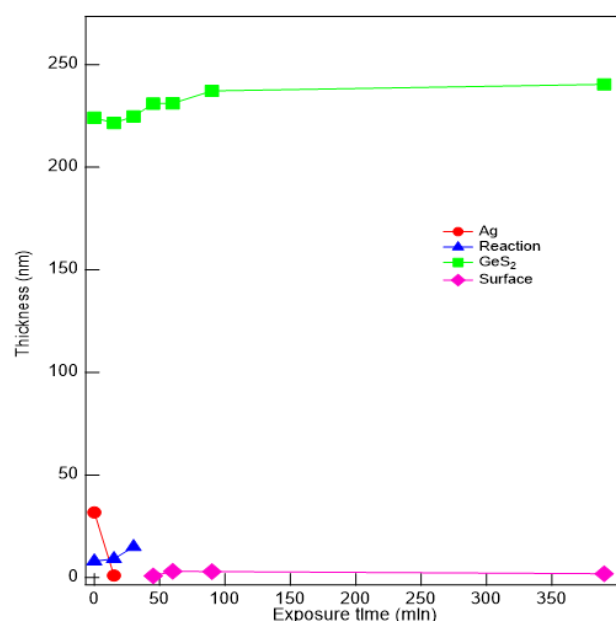


Fig. 11 Film thickness versus exposure time (non-annealed sample).

(3) 連続成膜

GeS_2 成膜後大気にさらされない試料のそれぞれの膜厚変化を Fig. 12 に示す. Fig. 8 の SLD プロファイルから, 光照射と共に Ag は次第に薄くなり. SLD の値も減少した. この試料においても 15 分の光照射で Ag の SLD を持つ膜は消失した. 反応層の SLD は銀の消失とともに上昇するが, その後低下していく. 反応層の SLD の減少に伴い GeS_2 の SLD が上昇してきた. 表面層は 20 分照射後に形成され, 60 分後に消失した. 120 分後には両者の SLD の値は一致した膜となった.

4. 考察

4.1 試料の膜構造

試料としては Ag と GeS_2 の 2 層構造で成膜したが, 光照射する前の試料に対しての XRR スペクトル解析の結果, いずれの試料においても反応層が確認された.

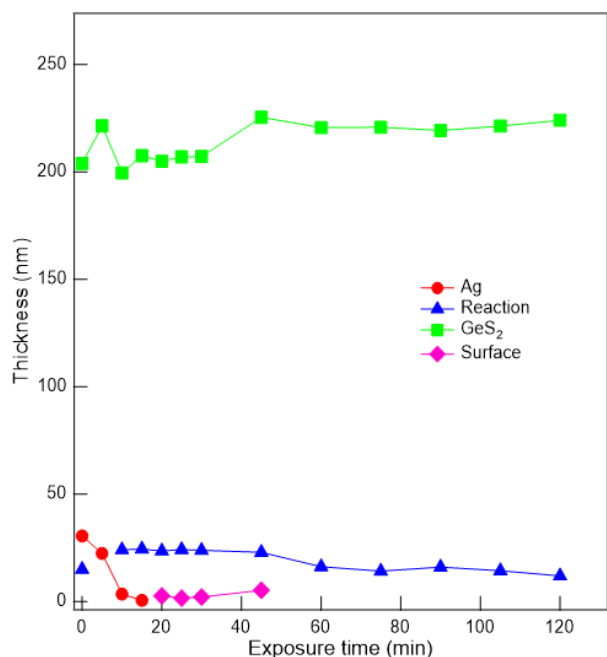


Fig.12 Film thickness versus exposure time (non-annealed sample without atmospheric exposure).

アニール処理を行うことによって GeS_2 は膜全体としてほとんどの Ge と Ch の結合がなされたものと考えられる。アニール処理をした GeS_2 の上に Ag を成膜した場合、表面近傍の部分までしか Ag が侵入できないため、反応層の厚さは薄くなっている。

一方アニール処理を行っていない GeS_2 は Ge—Ch のネットワークの再構築は行われないため Ge—Ch 結合が切断されたものも多い。アニールしていない GeS_2 の場合は比較的深くまで Ag が侵入したため反応層の厚さが厚くなったと考えている。またアニール処理をしていないが一度大気にさらされた試料は、酸素との結合が一部で発生するため銀の侵入が制限され、反応層の膜厚は連続成膜のものよりは薄くなったと考えられる。

4.2 Ag のフォトドーピング

GeS_2 膜内の拡散には Ge と Ch 原子ネットワークが関係している⁹⁾。 GeS_2 中の Ge—Ch 結合が切断され、Ch サイトに Ag を捕獲する空隙が出来ると考えられている。光が照射されると Ag は最初にこの反応層内の Ch の空隙に取り込まれる。Ag を取り込んだ反応層の SLD は上昇するが、光照射が進むにつれて反応層内の Ag は GeS_2 内へと拡散していく。そのため反応層の SLD は減少し、 GeS_2 の SLD は上昇していく。最終的にはこれらは一致した膜となる。

表面に存在していた Ag はいずれの試料作製条件においても光照射を行うと 15 分程度で消失した。しかしながら SLD が高くなった反応層から GeS_2 膜全体に Ag が均質に拡散するには 60 分から最長で 120 分であった。反応層の膜厚が薄かったアニール処理をした試料の場合、反応を起こすためのポテンシャル障壁が高いため、光照射による界面反応が遅かったと考えられる。光照射によっ

てもネットワークの切断が進まず、Ag の拡散に長い時間を必要とした。大気にさらされることなく二層を成膜した試料に関しては、光照射後の反応層の SLD の値は高く、膜が厚くなった。これは GeS_2 が大気中の酸素と反応していない為、Ag を捕獲する原子がより多く存在するためだと考えられる。

いずれの試料も GeS_2 の膜厚はフォトドーピングが進行するにしたがって厚くなっている。 $\text{Ag}/\text{As}_2\text{S}_3$ の場合は非晶質の構造が 2 次元的配置の中に Ag が入り込むことによって 3 次元的に変形するため体積膨張が発生する¹⁰⁾。 GeS_2 の場合は 3 次元的配置であるが、Ch の空隙へ Ag が侵入することによるひずみが生じ、結果的に膜厚が厚くなったと考えられる。

いくつかの XRR スペクトルにおいては最表面に SLD の小さい表面層を導入した方がフィッティングの精度が高くなった。この表面層の SLD は GeS_2 の値よりも小さい。大気にさらされた試料については SLD が同一となった後も光照射を続けた場合発生し、大気にさらされていない試料では Ag が消失してすぐに発生し、しばらくして消失した。表面層については他の測定を行うなどして実在を確かめる必要がある。

5. 結言

真空蒸着法で成膜したアモルファス GeS_2 薄膜への Ag のフォトドーピング過程について XRR スペクトル法を用いて観測した。スペクトル解析から GeS_2 と Ag との界面に反応層が存在する事が明らかになった。この反応層の厚さは GeS_2 の処理方法により異なることが分かった。今回実験した GeS_2 が 200 nm の下地の上に Ag が 30 nm 成膜した試料に、波長 405 nm、照射光強度 7 mW/cm² の LD 光を照射した場合、試料の処理方法にかかわらず Ag は 15 分程度で表面から消失した。Ag のフォトドーピング過程は、反応層への Ag の拡散と、反応膜から GeS_2 への拡散の 2 つの過程が同時進行している。そのため膜の SLD が均質になるまでの時間はフォトドーピングを行う前の反応層の厚さだけでは決まらないことが分かった。

X 線反射率法により埋もれた界面状態を測定することが出来、試料の処理方法の違いによる銀のフォトドーピング過程の違いを明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、薄膜の MRD による XRR 測定、Dektak による膜厚測定など、多くの分析装置を利用させていただきました。東海大学研究推進部技術共同管理室、森川真希氏、小田慶喜氏に御礼申し上げます。

X 線反射率測定のデータ解析に関してご指導いただきました CROSS 坂口佳史主任研究員には心より御礼申し上げます。X 線反射率測定のデータ解析において、ともに研究生として参加した渋谷研究室修士課程 1 年生の加茂直紀氏に協力いただき感謝いたします。X 線反射率のデータ解析は CROSS 研究生制度の支援を受けたもので、関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) M. T. Kostyshin, E. V. Mikhailovskaya and P. F. Romanenko: Photographic sensitivity effect in thin semiconducting films on metal substrates, *Sov. Phys. Solid State*, Vol. 8, pp. 451-452 (1966).
- 2) Y. Murakami and M. Wakaki: Observation of Ag photodoping phenomena in GeS₂ chalcogenide glass films by spectroscopic ellipsometry and atomic force microscopy, *Thin Solid Films* Vol. 542, pp. 246-250 (2013).
- 3) Y. Sakaguchi, Y. Sakaguchi, T. Hanashima, Al-Amin. A. Simon, M. Mitkova: Excitation light energy dependence of Silver photodiffusion into amorphous Germanium Sulfide: Neutron and X-Ray reflectivity and S-ray diffraction, *Phys. Status Solidi B* Vol. 257, p. 2000178 (2020).
- 4) Y. Sakaguchi, T. Hanashima, Al-Amin. A. Simon, M. Mitkova: Silver photodiffusion into amorphous Ge chalcogenides-Excitation photon energy dependence of kinetics probed by neutron reflectivity, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* Vol. 90, p. 30101 (2020).
- 5) Y. Sakaguchi, H. Asaoka, Y. Uozumi, K. Kondo, D. Yamazaki, K. Soyama, M. Ailavajhala, M. Mitkova: Silver photo-diffusion and photo-induced macroscopic surface deformation of Ge₃₃S₆₇/Ag/Si substrate, *J. Appl. Phys.* Vol. 120, p. 055103 (2016).
- 6) Y. Sakaguchi, H. Asaoka, M. Mitkova: Silver photodiffusion into Ge-rich amorphous germanium sulfide – neutron reflectivity study, *J. Appl. Phys.* Vol. 122, p. 235105 (2017).
- 7) A. V. Kolobov, S. R. Elliott: Photodoping of amorphous chalcogenides by metal, *Adv. Phys.* Vol. 40, pp. 625 -684 (1991).
- 8) A. Nelson: Co-refinement of multiple-contrast neutron / X-ray reflectivity data using MOTOFIT, *J. Appl. Crystallogr.* Vol. 39, pp. 273-276 (2006).
- 9) G. Kluge: A new interpretation of the photodoping effect in amorphous As- and Ge-chalcogenides, *Phys. Stat. Soli. (a)* Vol.101, pp. 105-114 (1987).
- 10) 村上佳久, 佐田康幸, 若木守明: 非晶質 GeS₂ 薄膜への Ag のフォトドーピング現象に関する研究, *東海大学紀要工学部* Vol. 48, pp. 33-40 (2008).

円板を用いた圧電振動発電の特性に及ぼす振動モードの影響

呉 文宝^{*1} 森山 裕幸^{*2} 土屋 寛太郎^{*3} 内田 ヘルムート貴大^{*4}

Effect of Vibration Mode on the Characteristics of Piezoelectric Power Generation with a Circular Plate

by

Wenbao WU^{*1}, Hiroyuki MORIYAMA^{*2}, Hirotarou TSUCHIYA^{*3} and Helmut Takahiro UCHIDA^{*4}

(Received on Mar. 31, 2023 and accepted on Jul. 19, 2023)

Abstract

In this study, a circular plate of constant thickness, on which a piezoelectric element was installed, was adopted as the host structure of an energy-harvesting system. The plate was supported at its end having some stiffness, which was intermediate between simple and clamped supports, and was subjected to a harmonic point force. The piezoelectric performance of the system greatly depended on the vibration characteristics of the plate. Regarded as one of the representative vibrational characteristics, the natural frequency of the plate was affected not only by the dimensions, support conditions, and vibration modes of the plate, but also by how the piezoelectric element was installed. Therefore, the location of the piezoelectric element varied the natural frequency, thus affecting the conversion of vibration energy into electrical energy through the piezoelectric effect. The theoretical results confirmed that the natural frequencies of the plate in each vibration mode can be reduced to the respective lowest frequencies by attaching a piezoelectric element at the location where the maximum amplitude occurs. The effect of attachment gradually weakens as the piezoelectric element is moved towards the support. Moreover, when the center of the plate is within the piezoelectric portion, the power generation efficiency is relatively high. But, when the center deviates from this area, the power generation efficiency drops rapidly.

Keywords: Piezoelectric element, Circular plate, Electricity generation, Efficiency, Vibration mode

1. 緒 言

近年エネルギー需要の高まりからソーラーエネルギー、風力発電などの再生可能エネルギーやエナジーハーベストに関する研究が注目され、その中の一つにエネルギーの有効利用の観点から振動発電の研究が活発に進められている。圧電振動発電とは圧電素子を振動体に直接貼付し、物体の振動エネルギーを圧電素子に生じるひずみの変動を通して電気エネルギーに変換する発電方法である¹⁾。

圧電型は振動に伴う圧電材料の変形により誘起された圧電効果に基づく発電方式で、逆磁歪型は振動を受けるコイルに内包した逆磁歪材料の変形で発現した逆磁歪効果により電磁誘導を誘起することで発電する。逆磁歪型は素子を変形させるという点では圧電型と似ているが、疲労強度の高い材料を選択すれば相対的に加工性が優れていることから、圧電型に比べて自由度の高い設計が可能である。一方、圧電型は構造が単純かつ丈夫で小型化

も容易なため、様々な製品に使用されている。しかし発電時の電圧が高い反面、電気抵抗が大きく電流が取り出し難いことから、電力を確保するために圧電素子を積層や、振動を応力として効果的に素子に伝えるための工夫が必要である。特に圧電素子の積層数と加振周波数の増加は発電時の電圧及び電力を増大させるが、それらの増加率は飽和する傾向にある^{2,3)}。

振動を応力として効果的に素子に伝えるためにホスト構造としてははり構造を用いることが多く、一般的に圧電素子の貼付方法にはモノモルフやバイモルフが採用されている。多くの先行研究の中で、圧電素子を片持ちばりの両面に貼付したバイモルフの圧電振動発電装置に関し、強制変位による振動入力パワーと減衰による散逸パワーの差分が電力に変換されると仮定し、振動入力エネルギーから電気系のエネルギーへの変換効率をエネルギーバランス式から導出されている^{4,5)}。上記の通り、ホスト構造に生じる応力に起因したひずみ成分は発電特性と密接な関係があり、はり構造では幅方向のひずみ特性は一樣になるものと想定しているため、長手方向の特性のみ注目することになる。当然ながら幅の拡大は幅方向の

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程

*2 工学部機械システム工学科教授

*3 工学部機械システム工学科助教

*4 工学部機械工学科准教授

ひずみ特性に変化を生じさせ、2次元構造として取り扱わなければならないため解析的な取り扱いはやや複雑になるが、その成果の汎用性は高まることになる。

そのため本研究では円板構造をホスト構造とした圧電振動発電システムを取り上げ、その発電特性に直接関与するひずみ特性は円板寸法、材質、支持条件及び振動モード等に影響される。一方、本システムでは円板表面に生じるひずみ成分から圧電素子を通して電気エネルギーを回収するため、発電特性は圧電素子の貼付位置にも強く影響される。そこで本報告では円板寸法、材質及び支持条件が一定の下、圧電素子の貼付位置を変化させたときの固有周波数、面外変位及び面内変位（ひずみ）を含む振動特性に注目した。これらの振動特性を踏まえ、本システムの発電特性は貼付位置の影響を振動モード間の比較から検討され、特性改善に合理的な設置方法を提示する。

2. 解析方法

本理論解析に用いた基本的な解析モデルを Fig. 1 に示す。円板は周辺に均等に分布したばね定数が T の直線ばねと R の回転ばねにより支持されている。半径 r_c と板厚 h_c の円板中心には、半径と厚みがそれぞれ r_p と h_p の圧電部及び r_b と h_b の電極部で構成された圧電素子が貼付されている。座標は面内方向を r と θ 、面外方向を z で表記し、円板は r_e, θ_e の位置に点加振力 F が付加され、加振周波数は円板の固有周波数としている。

円板の面外変位 w_c は A_{nm}^s 及びモード形を含む式(1)で表現し、以後の解析では基底関数として用いられる⁽²⁾。ただし本解析では、圧電素子は円板に完全密着しているものと仮定している。

$$w_c = \sum_{s=0}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm}^s \sin\left(n\theta + \frac{s\pi}{2}\right) \left(\frac{r}{r_c}\right)^m. \quad (1)$$

n と m は円板の振動モードにおける円周方向 (θ 方向) と半径方向 (r 方向) の節線数を示し、以後振動モードは (n, m) で表記する。加振時の円板に蓄えられる弾性ひずみエネルギーは面外変位（面内ひずみ）が極大化する箇所が大きくなるため、その箇所が最も少ない $(0, 0)$ 次モードでは円板中心付近に集中し易くなる。本研究では $(0, 0)$ 次

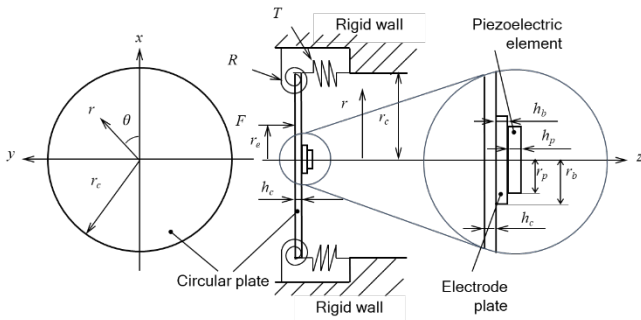


Fig. 1 Analysis model.

モードの発電特性を高次モードにおける特性との対比で検討する際、 $(1, 0)$ 次モードは妥当な振動モードの一つに挙げられるため、 $(0, 0)$ 次と $(1, 0)$ 次モードに注目している。また s は振動モードの対称性を表す指標、 A_{nm}^s は以後面外変位の決定に必要な係数であり、円板振動における振幅に対応する。

円板と圧電素子が有する運動エネルギーとポテンシャルエネルギー等を含むラグランジュ関数に式(1)を適応し、 δw_c から求めたオイラー方程式(2)が機械的な支配方程式に相当する。一方、圧電部に生じる電圧 v_p の第一変分から求めたオイラー方程式(3)が、電気系の支配方程式と見なせる。

$$\sum_{m'=0}^{\infty} [K_{cnmm'}^s (1 + j\eta_c) + K_{pnmm'}^s (1 + j\eta_p) + K_{bnmm'}^s (1 + j\eta_b)] + r_c F_{sn} \left\{ T + \left(\frac{m}{r_c}\right) \left(\frac{m'}{r_c}\right) R \right\} - \omega^2 (M_{cnmm'}^s + M_{pnmm'}^s + M_{bnmm'}^s) \times A_{nm'}^s e^{j\omega t} - \sum_{m'=0}^{\infty} \beta v B_{nm'}^s e^{j\omega t} = \mathbf{F}_{nm}^s e^{j\omega t}, \quad (2)$$

$$\sum_{m'=0}^{\infty} C_p^{-1} \beta A_{nm'}^s = \sum_{m'=0}^{\infty} (j\omega R_{cir} + C_p^{-1}) B_{nm'}^s. \quad (3)$$

上記式(2)における $K_{cnmm'}^s$ 、 $K_{pnmm'}^s$ 、 $K_{bnmm'}^s$ と $M_{cnmm'}^s$ 、 $M_{pnmm'}^s$ 、 $M_{bnmm'}^s$ は、円板、圧電部、電極部の剛性マトリックスと質量マトリックスの要素をそれぞれ示したものである。また η_c 、 η_p 、 η_b は円板、圧電部、電極部の減衰係数を意味し、 F_{sn} は n と s で決定される係数である。さらに $\mathbf{F}_{nm}^s$ は加振力ベクトルであり、 $(0, 0)$ 次及び $(1, 0)$ 次の固有モードに対応した角周波数 ω で円板に付加される。

電気系の支配方程式における C_p は圧電素子の静電容量であり、 β は電気系と機械系間の連成係数である。また R_{cir} は電力消費回路の抵抗であり、 $B_{nm'}^s$ は電荷の振幅をそれぞれ示している。

以上は円板中心に圧電素子を貼付した解析モデルの説明であるが、本研究では圧電素子の設置位置及び設置数を変化させている。Fig. 2 に示す通り、圧電素子を円板中心から距離 e だけ偏心させ、 x 軸から θ_0 だけ回転させた位置に貼付した場合、次式の r 座標を用いて表現したラ

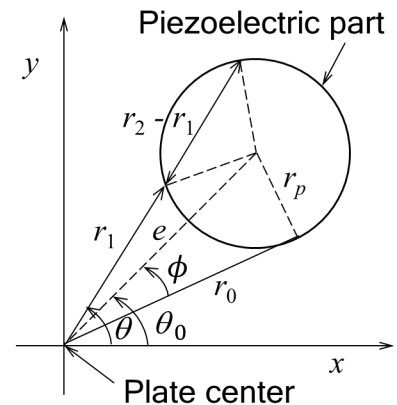


Fig. 2 Eccentricity-attached model of piezoelectric

element.

グランジュ関数に変分原理を適用し、式(2), (3)と同様の手順で機械系と電気系の支配方程式を導出する。

$$\begin{aligned} r_1 &= e \cos \phi - \{r_p^2 - e^2(\sin \phi)^2\}^{1/2} \\ r_2 &= e \cos \phi + \{r_p^2 - e^2(\sin \phi)^2\}^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

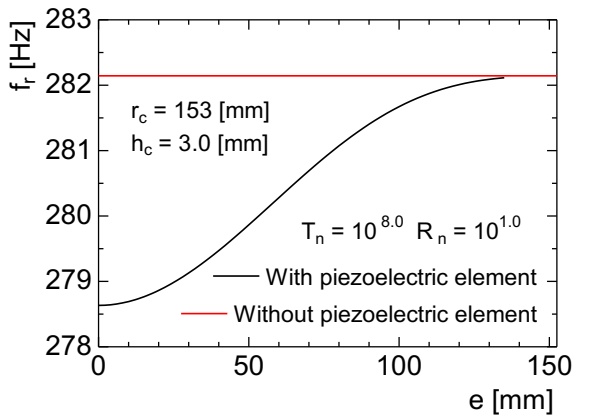
具体的には Matlab による式(2)と(3)の連立計算から A_{nm}^s と B_{nm}^s を決定し、 A_{nm}^s からは振動速度に基づく機械的な供給パワー P_m を、 B_{nm}^s からは発生電圧に基づく電力 P_e をそれぞれ求める。本解析結果における発電性能を評価するため、上記 P_m と P_e より発電効率が以下のように定義されている。

$$P_{em} = \frac{P_e}{P_m} \times 100 [\%]. \quad (5)$$

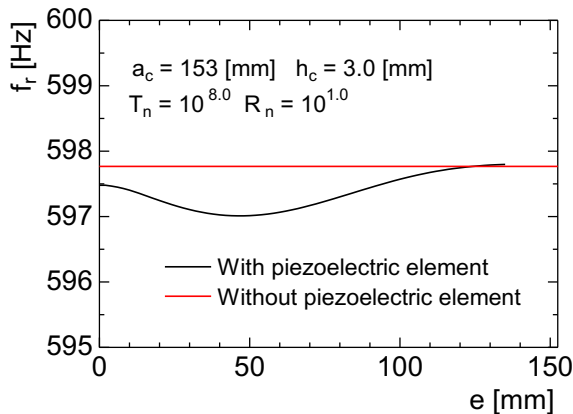
3. 結果及び考察

3.1 円板の振動特性

解析モデルは半径 $r_c = 153$ mm のアルミニウム合金製円板を想定しており、板厚 h_c には 3.0 mm を選択した。円板はばね定数が T と R の直線ばねと回転ばねで周辺が支持されているが、支持条件は曲げ剛性 $D = [Eh_c^3/12(1-\nu^2)]$ を用いた無次元ばね定数 $T_n (=Tr_c^3/D)$ と $R_n (=Rr_c/D)$ で表現される。



(a) (0,0) mode



(b) (1,0) mode

Fig. 3 Changes in natural frequency due to position of

piezoelectric element.

このようなばね支持を採用した解析モデルでは、 $T_n = 10^{8.0}$ と $R_n = 0$ で単純支持、 $T_n = 10^{8.0}$ と $R_n = 10^{8.0}$ で固定支持を表現できる。ただしこれらの支持条件を実験で再現するのは非常に困難であるため、本研究では $T_n = 10^{8.0}$ のままに $R_n = 10^{1.0}$ とした中間的な弾性支持を採用した。

上記円板表面には、圧電部 ($r_p = 12.5$ mm, $h_p = 0.53$ mm) と電極部 ($r_b = 17.5$ mm, $h_b = 0.30$ mm) で構成された圧電素子を貼付した。貼付位置は $r = 0$ mm, $\theta = 0^\circ$ の円板中心 ($x = 0$ mm, $y = 0$ mm) から、 $\theta = 90^\circ$ の r 軸上 (y 軸上) を移動させたが (Fig. 1 を参照)、移動量は圧電素子の偏心距離 e で表現されている (Fig. 2 を参照)。一方、加振位置は圧電素子の移動領域と x 軸に関して対称領域に設定するため、 $r_e = 61$ mm, $\theta_e = 270^\circ$ とした。

円板の振動特性を的確に評価できる指標の一つに、固有周波数が挙げられる。Fig. 3 は円板表面に圧電素子を貼付したときの(0,0)次及び(1,0)次モードにおける固有周波数 f_r について、貼付位置の偏心距離 e による推移を示したものである (黒線)。比較のために、圧電素子を貼付していない円板の f_r も提示している (赤線)。まず Fig. 3(a)における(0,0)次モードにおいては、 f_r は圧電素子の中央貼付 ($e = 0$ mm) から e と共に増加し、最大偏心位置 ($e = 135$ mm) において圧電素子が未貼付の f_r に達している。これは円板の振動特性が圧電素子の貼付によって影響されることを意味し、そ

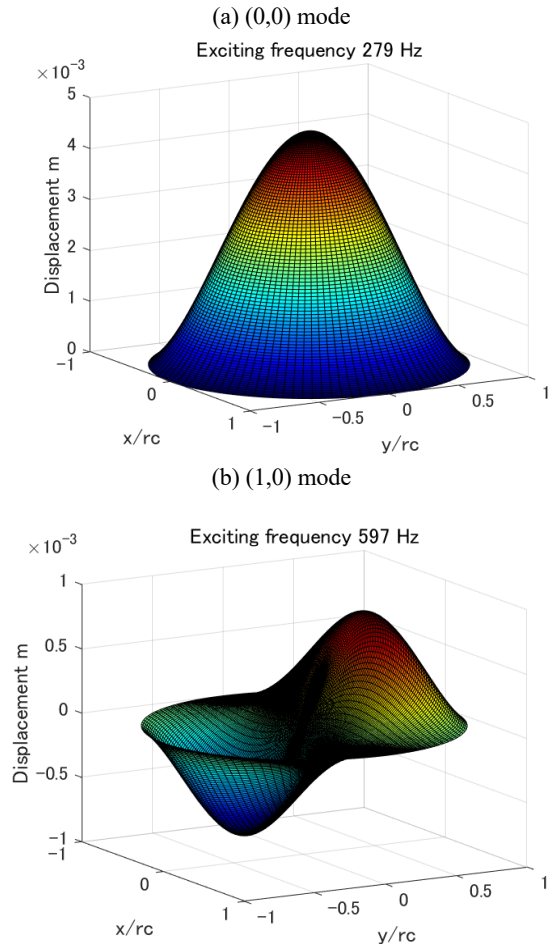


Fig. 4 Out-of-plane displacement distribution.

の影響は偏心量の増大に伴い弱められていることを示唆している．この影響は式(2)に示す通り，圧電素子に関する剛性・質量マトリックスに依存することになる．特に圧電素子の貼付位置が(0,0)次モードでは円板中心 ($e = 0$ mm) 付近，(1,0)次モードでは $e = 50$ mm 付近で， f_r の低減が顕著に現れている．

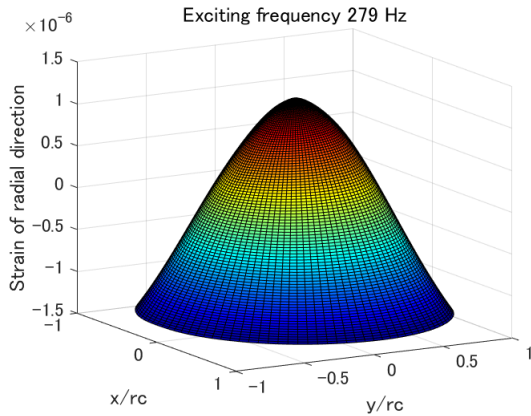
このような f_r の低減を検討するため，圧電素子を中心に貼付した円板について ($e = 0$ mm)，(0,0)次及び(1,0)次モードにおける面外変位分布を Fig. 4(a)と(b)にそれぞれ示している．面外変位 w_c の分布特性は振動モードに合致しており，特に(1,0)次モードでは w_c が y 軸上で極大化する振動姿態を呈するため，本解析で設定した圧電素子の貼付位置は妥当なものと思なせる．そのため f_r の低減が圧電素子の y 軸上での移動に依存することを考慮すれば，この変化には質量マトリックスが強く関わるものと推測される．一方， f_r の変動幅を振動モードで比較すると，(0,0)次モードでは(1,0)次モードを大きく上回り (約 4.6 倍)，面外変位においても(0,0)次モードの最大値は(1,0)次モードの約 5.5 倍に達している．これも f_r の変化には，質量マトリックスが強く寄与していることを裏付けている．

円板の固有周波数や振動モードと共に，円板振動時の面外変位は重要な振動特性の一つに挙げられる．しかし円板表面に貼付した圧電素子による発電特性に注目するのであ

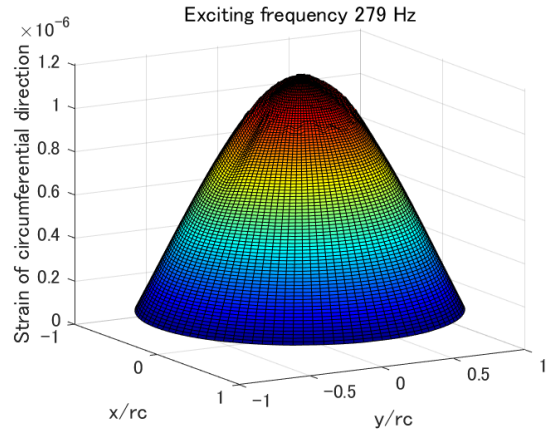
れば，面内変位は圧電効果に直接関わる重要な振動特性と見なせる．Fig. 5(a)と(b)は面内変位から導かれる面内ひずみの半径方向 (r 方向) 成分 ε_r を z 軸にとり，(0,0)次と(1,0)次モードに関する円板全面にわたる ε_r 分布をそれぞれ示したものである．これらの分布特性は ε_r 値の増減と極大・極小値の生成及び振動モード間の大小関係という観点から， w_c 分布と類似点が多く見受けられる．しかし極大値(正数値)からの減少過程を検討すると， ε_r は任意の領域を越えると負数値に至ることになる．ただし(1,0)次モードにおける極小値からの増加過程では，逆過程を経ることは明らかである．

Fig. 6(a)と(b)は面内ひずみの円周方向 (θ 方向) 成分 ε_θ について，(0,0)次と(1,0)次モードに関する分布をそれぞれ示したものである．これらの分布特性は ε_r 分布と同様に，多くの点で w_c 分布と類似性が認められる．特に極大値からの減少過程においては，正数値から負数値への符号変換は認められない．当然，(1,0)次モードにおける極小値からの増加過程でも，符号変換しないことを確認できる．

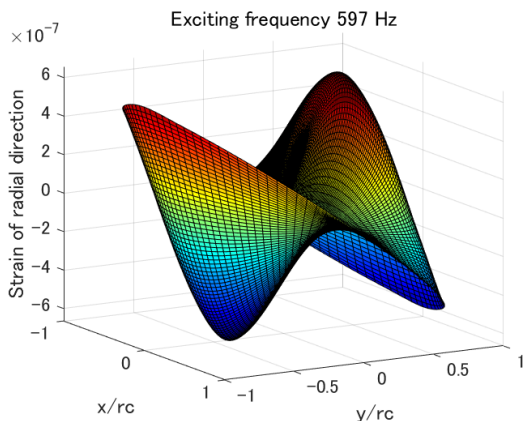
以上のような ε_r と ε_θ の分布特性を詳細に検討するため， $\theta = 90^\circ$ における r 軸 (y 軸の正数値領域) 上のひずみ分布に注目する．Fig. 7 は(0,0)次と(1,0)次モードについて， ε_r と ε_θ の分布を示したものである．これらのデータは Fig. 5, 6 から抜粋したものなので，(0,0)次モードにおける ε_r と ε_θ



(a) (0,0) mode

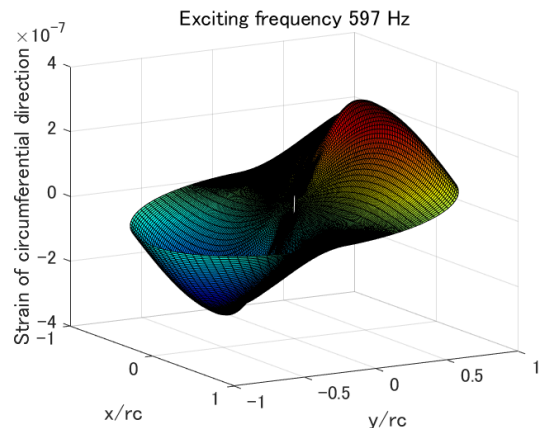


(a) (0,0) mode



(b) (1,0) mode

Fig. 5 Strain of radial direction.



(b) (1,0) mode

Fig. 6 Strain of circumferential direction.

は r の増加に伴い単調減少し, (1,0) 次モードのひずみ成分では中心付近において r と共に増加するが, 各ひずみが最大値に達した後は減少傾向に転じている。

上記のような全体傾向を踏まえた上で各ひずみ成分を検討すると, ε_r は r の増加に伴い各モードの最大値 (正数値) から減少し, (0,0) 次モードで r/r_c が約 0.57 付近, (1,0) 次モードでは約 0.78 付近からそれぞれ符号の変換が生じている。このような符号の逆転には θ 軸周りの曲げモーメント M_r の変化に依存するが, 本解析モデルにおける円板の支持条件は単純支持と固定支持に対して中間的な弾性支持と見なせ, 支持部では固定モーメントに相当する M_r が生じることになる。理論上, 単純支持では境界条件として $r/r_c = 1.0$ のとき $M_r = 0$ を想定するが, 本解析モデルにおける $r/r_c = 1.0$ では支持部に存在する反モーメントに対応する M_r が存在するため, 上記の符号逆転が生じたものと考えられる。一方, ε_θ が (0,0) 次と (1,0) 次モードでそれぞれ最大値を有し, 本図における r/r_c の領域において正数値が維持されることは, Fig. 6 の分布特性を追認する結果である。

これらのようなひずみ特性は発電特性に直接関与するものであるため, ε_r と ε_θ の関係についても言及する。(0,0) 次モードにおける ε_r と ε_θ の全体特性の相違は上述の通りであるが, 両成分はほぼ同値の最大値が円板中心付近に現れている。(1,0) 次モードでも全体特性の相違は同様であるが, 最大値の大きさにも相違が認められる。特に最大値に関しては, (0,0) 次モードのひずみ値が大きく上回っている。

3.2 発電特性と圧電素子の貼付位置との関係

前節で取り上げた円板の振動特性に及ぼす圧電素子の貼付位置による影響は, 固有周波数の変化を示すことによって確認した。またこの変化は振動モードによって大きく異なることも示すことができたが, これらの影響は発電特性にも及ぶことになる。そこで発電特性を評価するため, 発電時の電力を重要な物理量として取り上げる。

Fig. 8(a) と (b) は (0,0) 次と (1,0) 次モードでそれぞれ生じた電力 P_e について, Fig. 3 と同様に圧電素子の貼付位置を円板中心から移行させたときの推移を示している。(0,0) 次モードにおける P_e は $e = 12$ mm 付近まで相対的に高値が維持され, それ以後 e の増加に伴い急激に減少して,

$e = 50$ mm 以降では発電がほとんど認められない。この P_e の高値が維持される e は圧電部半径 r_p にほぼ一致しており, 圧電部が円板中心から逸脱すると P_e は減少することを示すものである。(1,0) 次モードにおける P_e は円板中心から e と共に増加し, $e = 70$ mm で最大値に達するが, 以後減少傾向で推移している。ただし電力は (0,0) 次モードの P_e に比べ, 極めて小さく抑えられている。

このような発電特性を Fig. 7 のひずみ特性との関連で検討すると, (0,0) 次モードにおける P_e が高値に維持される $e = 12$ mm ($e/r_c = 7.8 \times 10^{-2}$) までは, ε_r と ε_θ がほぼ同値の最大値付近を推移している。それ以降 e の増加に伴い両ひずみ値共に減少しているが, ε_r の減少割合は ε_θ に比べて顕

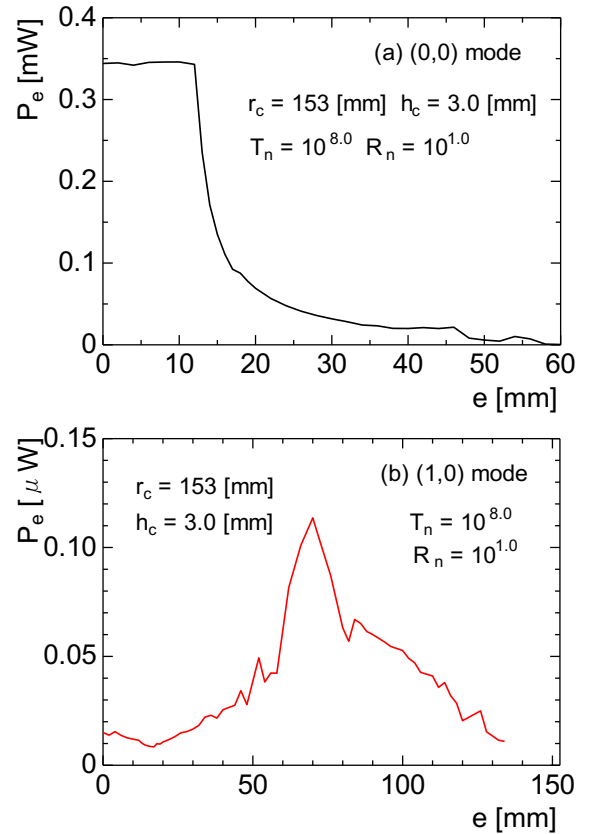


Fig. 8 Electric power as function of eccentric distance.

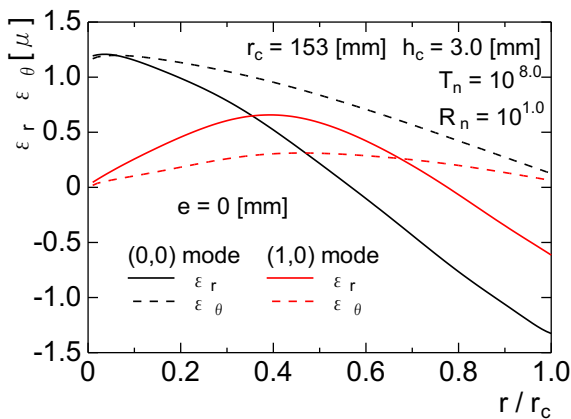


Fig. 7 Strain distributions of radial and circumferential directions.

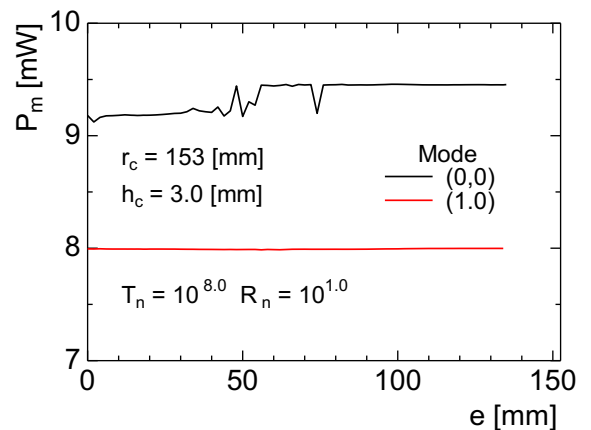


Fig. 9 Mechanical power supplied to the plate as function of eccentric distance.

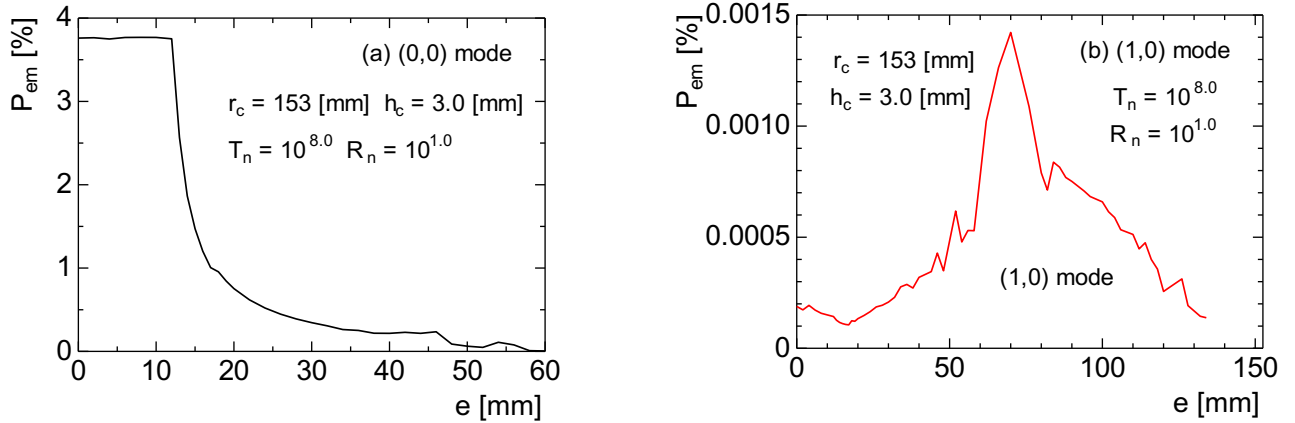


Fig. 10 Power generation efficiency as function of eccentric distance.

著に大きくなっている。発電がほとんど認められない $e = 50 \text{ mm}$ ($e/r_c = 0.33$) では、 ε_r は大きく減少しているのに対して ε_θ は相対的にある程度の大きさが維持されている。このような発電及びひずみ特性間の関係は、二次元面内ひずみに由来する圧電効果において、一方向のひずみ成分の大幅な低減が発電特性を大きく損なうことを示唆している。(1,0)次モードでは、 P_e が最大になる $e = 70 \text{ mm}$ ($e/r_c = 0.46$) において ε_θ も最大値に達しているが、この ε_θ は ε_r に比べて相対的に低値に留まっている。そのため上記の通り P_e の最大値を確認できるもの、その大きさは(0,0)次モードの P_e に比べて極めて小さく抑制されている。

このような発電時の P_e は加振力 F に依存するが、本解析は $F = 1 \text{ N}$ 一定の下で行われてきた。 e の変化に対する発電特性を P_e で評価する場合、円板に供給される機械的なパワーが加振周波数と加振点の面外変位に依存するため、モード間での定量的な比較には問題が残る。そこで円板に供給される機械的パワー P_m に注目し、(0,0)次と(1,0)次モードにおける P_m の e に対する推移を Fig. 9 に示す。(0,0)次の P_m には多少の変動が認められるが、各振動モードでほぼ一定値であることを確認できる。

そこで Fig. 8 における P_e とこの P_m を式(5)に適用して発電効率 P_{em} を取り上げ、(0,0)次と(1,0)次モードにおける e に対する推移をそれぞれ Fig. 10(a)と(b)に示す。(0,0)次モードの P_{em} が $e = 12 \text{ mm}$ 付近まで相対的に高効率が維持され、それ以後 e の増加に伴い急激に減少する傾向は Fig. 8(a)の P_e と同様である。このような P_{em} が P_e と類似な傾向で推移することは(1,0)次モードでも確認でき、その値も(0,0)次モードに比べて極めて小さく抑えられている。この(1,0)次モードにおける P_e と P_{em} の抑制には、Fig. 7 における ε_r と ε_θ の減少及びひずみ値間の差異が関与しているが、それに加えてひずみの発生個所にも依存しているものと考えている。例えばひずみエネルギーに注目した場合、Fig. 7 における ε_r と ε_θ から導かれるひずみエネルギーについて、円板中心から遠ざかるに従いそのエネルギーが反映する領域が拡大することになる。その結果、エネルギー密度(単位面積当たりのエネルギー)は、同じひずみ値であっても中心から遠ざかるに従い減少するものと考えられる。これは逆の視点で検討すれば、(0,0)次モードにおける P_e と P_{em} が相対的に高値になったことを裏付けるものである。

4. 結 言

本研究では円板表面に圧電素子を貼付した振動発電システムを取り上げ、貼付位置を移行させたときの発電特性を軸対称の(0,0)次モードと非軸対称の(1,0)次の振動モードの比較から検討した。その結果、以下のことを明らかにできた。(1) 各振動モードにおける円板の固有周波数は、最大(極大)振幅が生じる箇所に圧電素子を貼付することでそれぞれの最低周波数に至り、圧電素子を支持部方向に移行することによって貼付による影響は徐々に弱められる。この変動幅は、(0,0)次モードが(1,0)次モードを大きく上回る。(2) 半径及び円周方向の面内ひずみ成分は面外変位と類似の分布を呈し、(0,0)次モードの両成分は円板中心付近においてほぼ同値で最大化される。しかし(1,0)次モードにおける円周方向成分の最大値は面外変位と同じ位置で生じるが、その大きさは半径方向成分を下回り、さらに両成分共に(0,0)次モードに比べて抑制されることになる。(3) 発電特性は上記ひずみ特性に依存することから、(0,0)次モードにおける電力と効率は圧電部が円板中心から逸脱するまで高値のまま維持される。一方、(1,0)次モードにおける発電効率は円周方向の最大ひずみが生じる個所付近で増大するが、それらの大きさは(0,0)次モードに比べて極めて小さく抑えられることになる。

参考文献

- 1) H. A. Sodano, G. Park and D. J. Inman : Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting, Strain Journal, Vol.40, No.2, pp.49-58(2004).
- 2) 藤本滋, 今井健嗣, 一木正聡 : 圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究(第2報, 圧電素子の積層化による発電特性の向上), 設計工学, Vol.51, No.7, pp.497-508(2016).
- 3) 藤本滋, 今井健嗣, 一木正聡 : 圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究(第3報, 積層圧電素子の最適積層数の検討), 設計工学, Vol.52, No.9, pp.567-582(2017).

- 4) 安達和彦, 田中亨: 機械共振式の圧電振動発電に関する基礎研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.761, pp.28-35(2010).
- 5) 安達和彦, 坂本達哉: 圧電コンポジットを用いた振動発電装置のエネルギー変換効率に関する研究 (システムのエネルギーバランスと発電効率の評価), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78 No.789, pp.1575-1585(2012).
- 6) H. Moriyama, H. Tsuchiya, H. T. Uchida : E Effect of Acoustic Radiation from Circular Plate Installed with Piezoelectric Element on Electricity Generation Performance, Strain Journal, Applied Acoustics, Vol.186, pp.1-12(2022).

Profit Sharing 法を用いた追跡問題における 視野領域を考慮した学習方法の提案

澤田 志門^{*1} 奥山 淳^{*2}

Proposal of a Profit Sharing Method for the Pursuit Problem Considering Field of View

by

Shimon SAWADA^{*1} and Atsushi OKUYAMA^{*2}

(Received on Mar. 31, 2023 and accepted on May. 25, 2023)

Abstract

Multi-agent reinforcement learning (MARL) has received considerable attention in recent years. MARL has often been applied to the pursuit problem, in which multiple hunters try to catch single or multiple prey. In this problem, hunters are usually considered to have an infinite range of field of view (FoV) to obtain the absolute or relative positions of the prey as the hunters' states. However, this is inappropriate owing to "the curse of dimensions" and the range of FoV should be restricted suitably. On the other hand, strict restrictions on the range of FoV would prevent hunters from observing their states and continuing learning because they cannot obtain the prey's position when it is outside their FoV. Therefore, in this study, numerical simulations were performed to: (1) propose a method to continue to learn when the prey is outside the hunter's FoV, and (2) evaluate the appropriate restriction of the range of FoV for a size of field. The simulation results validated the effectiveness of the proposed method and revealed the relationships between the range of the hunter's FoV and the size of the field.

Keywords: Multi agent system, Reinforcement learning, Profit sharing, Pursuit problem

1. 緒言

近年、マルチエージェントシステム (MAS: Multi Agent System) に関する研究が広く行われている。MAS は複数の自律的に行動する主体 (エージェント) が協調して動作することで目標の達成を試みるもので、作業効率や耐故障性やコストパフォーマンスに優れるとされている¹⁾。

この MAS の中でも特に、MAS へ強化学習を適用してその有効性を検証するマルチエージェント強化学習 (MARL: Multi Agent Reinforcement Learning)^{2,3)}の検討が活発である。例えば荒井らは追跡問題 (Pursuit Problem) に対して Q 学習と Profit Sharing 法 (以下、PS) を適用し、MARL においては PS の方が有効であることを示した⁴⁾。ここで、追跡問題は MAS における典型的な例題の 1 つであり、2 次元のセル空間上を移動する複数のハンターエージェント (以下、ハンター) および複数もしくは単数の獲物エージェント (以下、獲物) を対象とする。また、ハンターが獲物を捕獲することを目的とし、MARL ではその捕獲戦略の学習を試みる。

ただし、従来は学習に用いる状態を明言せず、暗黙の了解として絶対座標系に基づいた獲物やハンターの位置

座標を状態とすることが多い⁴⁻⁸⁾。他方、状態として任意のハンターを基準とした相対座標系における、獲物や他のハンターとの相対位置を採用する検討もいくつか存在する⁹⁻¹⁴⁾が、これらはどれもハンターが無限大の視野領域を持っており、自分からみた他のハンターおよび獲物との相対位置がわかることを条件としている。しかし、このように無限大の広さの視野領域をもつことは実ロボットへの適用を考えると適切ではなく、また RL および MARL の課題の 1 つである次元の呪いを生じうる。このことからハンターの視野領域を適切に制限する必要があるが、過剰に制限すると状態の取得が行えず、学習へ悪影響を及ぼす可能性もある。このため、フィールドの大きさに応じて適切な視野領域を設計する必要があるが、そのような検討は少ない。

また、視野領域を制限した場合には獲物が視野領域外に存在することがあるが、その場合ハンターは自身と獲物との相対座標を取得できず、学習における「状態」を取得することができない。この場合学習を継続することができなくなるため、視野領域外に存在する獲物も「状態」として考慮することが必要になる。しかし、そのような手法についての検討は筆者の知る限り存在しない。

そこで本研究は限られた視野領域を持つハンターによる追跡問題を題材とする。また追跡問題においては、視

^{*1} 総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程

^{*2} 工学部精密工学科教授

視野領域内の獲物の相対座標を状態として用いた PS による捕獲戦略の学習を試みる。加えて、獲物が視野領域外にいても学習を行えるような手法を 2 通り提案し、視野領域の広さを変更したシミュレーション検討を行うことで、フィールドの大きさと視野領域の広さの関係性および視野領域外の獲物の扱い方について考察する。

2. 強化学習

2.1 概要

強化学習は機械学習の 1 つであり、学習主体が試行錯誤的に行動を繰り返すことで適切な行動を学習していく手法である。なお、これ以降「強化学習によって学習を行う、自律的に行動する主体」をエージェントとする。

ここで、本研究ではエージェントが観測できる状態の集合を $\mathcal{S}$ 、実行できる行動の集合を $\mathcal{A}$ とする。ただし、行動の集合 $\mathcal{A}$ は状態の関数であるものとし、ある状態 $s \in \mathcal{S}$ において実行できる行動の集合を $\mathcal{A}(s)$ とする。また離散的な時間ステップを表す変数を t ($t = 1, 2, \dots$) とし、時刻 t における状態と行動をそれぞれ $s(t) \in \mathcal{S}$ 、 $a(t) \in \mathcal{A}(s(t))$ とする。ここで、エージェントは次の 5 つのステップを繰り返すことで学習を行う： (1) エージェントは時刻 t において、自身の状態 $s(t) = s_t$ ($s_t \in \mathcal{S}$) を環境から知覚する。 (2) エージェントは知覚した状態 s_t を元に、自身の方策 $\pi(s_t, a)$ から実行する行動 $a(t) = a_j$ ($a_j \in \mathcal{A}(s_t)$) を決定する。 (3) エージェントが (2) で決定した行動 a_j を行うことで、環境が変化して状態が $s(t+1)$ へ遷移する。 (4) エージェントが環境から報酬 $R(t+1)$ を受け取る。 (5) $t+1 \rightarrow t$ として (1) に戻る。

また、強化学習は Q 学習などの環境同定型 (Exploration-oriented method) と、PS などの経験強化型 (Exploitation-oriented method) に大別され、学習に要する時間や必要な条件などに違いがある¹⁵⁾。ここで、Q 学習は特定の条件下では最終的に最適な政策が得られることが証明されているが、その条件として状態遷移がマルコフ過程 (MDP : Markov Decision Process) であることを仮定している。しかし、MARL では複数のエージェントが同時に行動を行うために状態遷移が MDP にならず、MARL には適さない。

他方、PS は最終的に得られる政策が最適である保証がないものの、状態遷移が MDP でなくても学習を行うことができる。荒井らは追跡問題に Q 学習と PS をそれぞれ適用し、学習結果の比較から MARL に対しては PS の方が有効であることを示している⁴⁾。このことから MARL の検討では PS が多く用いられており、本研究でも PS を適用する。

最後に、強化学習の課題の 1 つに次元の呪いがある。これは状態数の爆発とも呼ばれ、状態数がきわめて多くなってしまうことによって学習が適切にできなくなるという課題である。MARL でも、エージェント数の増加が状態数の指数関数的な増加を引き起こしてしまうため、課題の 1 つとされている^{2,3)}。今、エージェントが自身を中心とした $m \times m$ マス ($m \in \mathbb{N}$) を知覚できる場合、視野領域の総マス数は m^2 となる。また視野領域内にいる他の

エージェントを知覚して状態とする場合、エージェントの総数を n ($n \in \mathbb{N}$) とすれば状態の総数が $(m^2)^n = m^{2n}$ となる。ここで指数の肩に n があるため、状態の総数はエージェント数の増加に伴って指数関数的に増加してしまう。このことから、これを次元の呪いまたは状態数の爆発と呼ぶ。

2.2 Profit Sharing 法 (PS)^{16,17)}

PS は経験強化型の強化学習手法の 1 つであり、状態と行動に対する重みを更新することで行動の学習を行う。ここで、エージェントの状態 s と行動 a の組を併せてルール $r = \overline{sa}$ とし、学習を開始してから報酬を獲得するまでのルール系列をエピソードと呼ぶ。また、あるエピソードにおいて同一の状態に対して異なる行動が選択されているとき、その間のルール系列を迂回系列と呼ぶ。学習を開始してから現在までのエピソードで常に迂回系列上にあるルールを無効ルール、そうでないルールを有効ルールと呼ぶ。このため、PS はルールに対する重みを強化する学習法ともいえる。

時刻 t における状態 $s(t)$ と行動 $a(t)$ によるルール $r(t) = \overline{s(t)a(t)}$ について、その重みを $w_{r(t)}$ とすると更新式は式 (1) で表される。

$$w_{r(t)} = w_{r(t)} + f(t) \quad (1)$$

ここで、 $f(t)$ は時刻 t における強化関数の値である。この強化関数によって重みを更新し、行動の学習を行う。

宮崎らは、無効ルールの学習を抑制するような強化関数の条件として合理性定理を提案している¹⁷⁾。式 (2) に合理性定理を示す。1 エピソードにおけるステップ数の上限を W とし、時刻 $t = W$ で報酬を獲得したとする。無効ルールを抑制して学習を行うには、時刻 $t = 1, 2, \dots, W$ において強化関数 $f(t)$ が式 (2) を満たせばよい。なお、各状態における有効ルールの最大個数を L とした。

$$L \sum_{\tau=t}^W f(\tau) < f(t-1) \quad (2)$$

この合理性定理を満たす強化関数として、式 (3) が提案されている¹⁷⁾。式 (3) において $U \geq L+1$ であり、本研究では行動集合の要素数 $|\mathcal{A}|$ を用いて $U = |\mathcal{A}|$ とした。ここで詳細は 3.1 節で述べるが、本研究ではすべての状態においてエージェントが最大で 5 つの行動を選択可能である。このためある状態 s において選択可能な行動の集合 $\mathcal{A}(s)$ について $|\mathcal{A}(s)| \leq 5$ が成り立つが、式 (3) においてはこの最大値 5 を用いれば強化関数は式 (2) を満たす。よって本研究では $U = 5$ とした。また、 R は報酬値である。

$$f(t) = \begin{cases} R & (t = W) \\ \frac{1}{U} f(t+1) & (t = 1, 2, \dots, W-1) \end{cases} \quad (3)$$

また、本研究ではハンターがルーレット選択を用いて行動を選択するものとする。今、時刻 t における状態 $s(t) = s_c$ において、エージェントが行動 $a(t) = a_k$ ($a_k \in \mathcal{A}(s_c)$)を選択する方策 $\pi(s_c, a_k)$ は、ルール $r_{ck} = \overline{s_c} a_k$ に対する重み w_{ck} を用いて式(4)で表される。なお w_{ch} はルール $r_{ch} = \overline{s_c} a_h$ ($a_h \in \mathcal{A}(s_c)$)に対する重みである。

$$\pi(s_c, a_k) = \frac{w_{ck}}{\sum_{a_h \in \mathcal{A}(s_c)} w_{ch}} \quad (4)$$

3. 追跡問題

3.1 基本的な問題設定

追跡問題は MAS の基本的な例題の 1 つであり、複数のハンターによって単数もしくは複数の獲物を捕獲することを目的とする。本研究では従来研究⁴⁻¹⁴⁾を参考に、以下の設定とする。

まず、フィールドは $p \times p$ マスのセル状であるとし、壁のないトーラス形状であるとする。ここで、 $p \times p$ マスのフィールドの大きさを p で表す。さらに本研究では 2 台のハンターと 1 台の獲物が存在し、どちらも上下左右マスへの移動およびその場での静止という 5 つの行動を行えるものとする。ただしハンターと獲物はそれぞれ固有の視野領域をもつ。すべてのハンターと獲物は各エピソードの開始時に重複しないランダムなセルへ配置され、そこから 1 ステップごとに 1 つの行動を選んで一斉に実行するものとする。

また、本研究では獲物の上下左右マスのうち、いずれか 2 マスに全ハンターが位置すれば捕獲を達成した、として全ハンターへ等しい大きさの報酬を与える。

さらに、本研究ではフィールドがトーラス形状であるため移動や視野領域に回り込みが生じる。Fig. 1 を用いてこれの詳細を述べる。ここで、Fig. 1 はあるタイミングにおけるハンターおよび獲物の位置関係の一例である。Fig. 1 はフィールドの大きさが $p = 5$ であり、獲物を四角形、ハンターを三角形およびひし形で表している。また、Fig. 1 ではハンターの視野領域を 3×3 としており、塗りつぶしたマスがハンター1の視野領域を表している。このとき、フィールド形状からハンター1の視野領域は下方が反対側へ回り込むようになる。また詳細は後述するが、獲物はこのとき上下左マスへの移動または静止の 4 つからランダムに行動を選択する。もし左または下へ移動する場合、獲物はその反対側である黒い星型のあるマスへ回り込むように移動を行う。

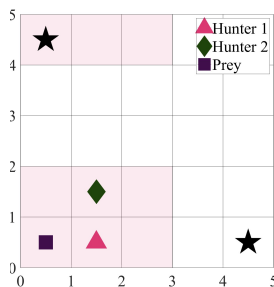


Fig. 1 An example of positions of predators and a prey.

3.2 獲物の詳細な定義

獲物は自分を中心とした 3×3 マスの視野領域をもち、視野領域内のハンターから逃避的な行動を取るものとする。例えば Fig. 1 の場合、獲物はハンター1 と重なることを避けるため、右マスを除いた残りの上・下・左マスへの移動およびその場での静止という 4 つの行動から等確率に行動を選択する。なお、視野領域内にハンターが存在しない場合は移動するマスへの制限がないため、上下左右マスへの移動および静止という 5 つの行動から 1 つを等確率で選択する。

3.3 ハンターの詳細な定義

ハンターは自分を中心とした $q \times q$ マスの視野領域をもち、その中にいる獲物および他のハンターの相対位置を知覚できる。また、自身を基準にした獲物の相対位置を学習における状態として用いる。ここで、 $q \times q$ マスの視野領域の広さを q で表す。Fig. 1 の場合は $q = 3$ であり、ハンター1 は自身の左マスに獲物が、上マスにハンター2 がいることを知覚できる。またハンター2 は自身の左下マスに獲物が、下マスにハンター1 がいることを知覚できる。

ここで、各ハンターは獲物のいるマスへの移動を行わないため、獲物と重複しないマスのみを候補とし、方策に従って行動を選択する。これの詳細を Fig. 1 のハンター1 を例として述べる。今、ハンター1 の上下左右マスへの移動および静止の行動を順に a_U, a_D, a_L, a_R, a_S とし、ハンター1 を基準にした獲物の相対位置を学習における状態とする。このとき獲物がハンター1 の 1 マス左に位置しているため、状態を s_L で表すこととする。また s_L におけるルール $r_h = \overline{s_L} a_h$ ($h = U, D, L, R, S$)に対する重みを w_h とする。このときハンター1 は左マスに移動すると獲物と重なってしまうため、残りの a_U, a_D, a_R, a_S のうちから行動を選択する。つまり、状態 s_L において実行可能な行動の集合は $\mathcal{A}(s_L) = \{a_U, a_D, a_R, a_S\}$ となる。このときハンターは式(4)に示すルーレット選択によって行動を選択するため、例えば上マスへの移動である行動 a_U を選択する確率 $\pi(s_L, a_U)$ は次式で求められる。ここで実行できない行動 a_L は集合 $\mathcal{A}(s_L)$ に含まれておらず、その重み w_L は行動選択に用いないことに注意が必要である。

$$\pi(s_L, a_U) = \frac{w_U}{w_U + w_D + w_R + w_S}$$

ただし、ハンター2 においては獲物が自身の上下左右には存在しないため、上下左右マスへの移動および静止の 5 つから方策ののって行動を選択する。一方、もし獲物が上への移動、ハンター2 が左への移動を選択すると同じマスへ移動することになる。このとき、本研究ではこのような場合の例外処理は行わない。つまり、ハンター2 と獲物は重複するマスへ移動するが、その後獲物は静止以外の 4 つから行動を選択し、ハンター2 は獲物が同じマスにいるという状態を認識するものとする。これは、Fig. 1 においてハンターの視野領域は 3×3 であるため合計 9 マスが認識できる一方、ハンター・獲物の

行動は上下左右および静止の 5 つであり、視野領域のうち斜めの 4 方向はハンター・獲物の行動を制限しないためである。

なお、獲物と重複するマスへの移動については従来研究でも「重複したマスへ移動しようとした場合はその場で静止させる」とするものがある。しかしその場合は本来ハンターが選択した行動を実行させておらず、必要以上に静止行動の重みが強化されてしまい学習に悪影響を与えると考えた。そこで、本研究ではハンターが初めから獲物と重なるマスへは移動せず、獲物と重複しないよう行動する中で学習を行うものと定義した。

3.4 従来研究での追跡問題における課題

本研究では、追跡問題における視野領域の広さに注目する。1 章および 3.1 節でも述べたように、追跡問題は MAS における典型的な問題の 1 つであり、MARL の研究でも広く用いられている。しかし、MARL の従来研究の多くはハンターが無限大の広さの視野領域をもっており、他のハンターや獲物の位置を常に正確に把握することができるとしている。これは、視野領域に制限を設けた場合ハンターが視野領域外にいる獲物を認識できず、学習する際に「状態」が不明になってしまうためである。したがって、従来研究の学習方式では獲物が視野領域外になった瞬間から学習を継続することができなくなる。

この解消を図るため、本研究では獲物が視野領域外に存在する場合にもハンターが学習を継続できる手法を提案する。

4. 提案手法

4.1 概要

本研究では、獲物がハンターの視野領域外にいる場合にも、ハンターが学習を継続できる手法を提案する。獲物がハンターの視野領域外に存在する場合、ハンターの視野領域内には獲物がいなくなるため、ハンターは自身からみた獲物の相対位置を取得することができない。

このため、本研究では視野領域をいくつかに分け、視野領域外の獲物はその分割した領域のいずれかにいるものとして扱う。この視野領域を分割した領域を写像領域と呼び、「視野領域外に存在する獲物がいずれかの写像領域へいるものとして扱う」ことを「獲物の位置を任意の写像領域へ写像する」と表現する。

しかし、視野領域の分割方法には自由度が存在するため、本研究ではこの分割方法を 2 つ提案し、効果的な学習を行うことができる分割方法についてシミュレーション検討の結果から考察する。

4.2 提案手法 1

提案手法 1 は、写像領域として視野領域の外周部のみを分割したものをを用いる手法である。詳細を Fig. 2 に示す。Fig. 2 ではフィールドの大きさを $p = 7$ 、視野領域の広さを $q = 5$ とし、ハンターを三角形で示している。また、写像領域を分割ごとに塗りつぶし、対応する番号を振っている。本手法では視野領域の外周部のみ上下左右と斜

めの 8 領域に分割して写像領域を定義している。このとき、詳細は 4.4 節で述べるが各写像領域を構成する視野領域内のマス全てに対してルール重みの強化が行われる。

本研究では式(3)で定義される強化関数によってルール重みの強化を行うが、その値は学習開始直後のステップが最も小さく、報酬を獲得したステップで最も大きい。このとき視野領域の外周部分はハンターから $(q-1)/2$ マスだけ離れているため、「最後に獲物が外周部分にいたステップ数」は視野領域広さ q が大きくなるほど「報酬獲得ステップ」から遠ざかる。このため視野領域の外周部分のルール重みを強化する強化関数の値は q が大きくなるにつれて小さくなるため、本手法によって視野領域の外周部分を多く強化すれば効果的な学習が実現できると考えた。なお、この分割方法は渡邊ら¹³⁾における視野の制限方法を参考に決定した。

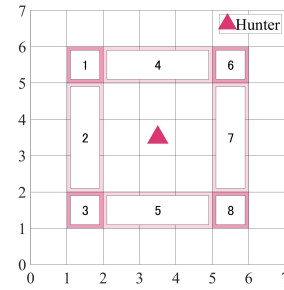


Fig. 2 Correspondence between Mapping area and hunter's FoV in proposal method 1.

4.3 提案手法 2

提案手法 2 は写像領域として視野領域内を十字に分割したものをを用いる手法である。この詳細を Fig. 3 に示す。Fig. 2 と同様に $p = 7$ 、 $q = 5$ とし、ハンターを三角形で示した。また Fig. 2 と同様、写像領域を分割ごとに塗りつぶし、番号を振っている。Fig. 3 のようにハンターの上下左右マスおよびそれ以外の 8 つに視野領域を分割し、写像領域としてこの 8 領域を用いる。このとき、詳細は 4.4 節で述べるが提案手法 1 に比べて視野領域内のより多くのマスを強化できるため、視野領域内に獲物が存在する場合に適切な行動を選択することができ、学習に良い影響を及ぼすと考えた。なお、この分割方法は伊藤ら⁹⁾および片山ら¹²⁾を参考に決定した。

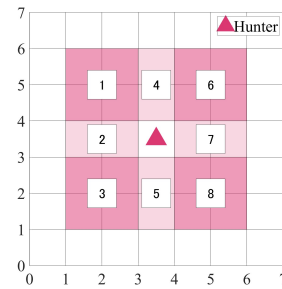


Fig. 3 Correspondence between Mapping area and hunter's FoV in proposal method 2.

4.4 提案手法の適用方法

本研究では 2 つの提案手法で視野領域を分割し、写像

領域のいずれかに視野外の獲物が存在するものとして推定（写像）する．ただし，どの領域へ写像されるかはランダムに決定し，それぞれの領域へ等確率に，12.5%の確率で写像されるものとする．

加えて，各領域を選択した場合に学習をどのように行うか述べる．今，Fig. 4 のようにハンター・獲物が存在し，ハンターは提案手法 2 を用いるとする．また $p = 7$ ， $q = 5$ であり，ハンター・獲物をそれぞれ三角形・四角形で示した．さらに，ハンターは視野領域内にいる獲物の相対的な位置を学習の状態として用いるが，ハンターが認識する相対位置と「状態」の番号を対応付けて Fig. 4 に示した．例えば獲物がハンターの右方 1 マス，上方 2 マスに存在した場合，Fig. 4 よりハンターの状態は状態 15 となる．ハンターと獲物が Fig. 4 の位置関係にあるとき，獲物はハンターの視野領域外に存在するため，状態の番号は取得できない．そこで写像領域を 1 つランダムに選択するが，ここでは赤い線で囲った写像領域 1 が選ばれたものとする．このとき，写像領域 1 は Fig. 3, 4 より状態 1, 2, 6, 7 から構成されているため，式(1)を用いた重みの更新をこの 4 状態に対して行う．ここで，このように視野領域外に獲物がある場合は各領域を構成するすべてのマスに対して重みの更新を行うのに対し，視野領域内に獲物がある場合は獲物が位置するマスが正確に取得できるため，その特定のマスに対して重みの更新を行うことに注意が必要である．

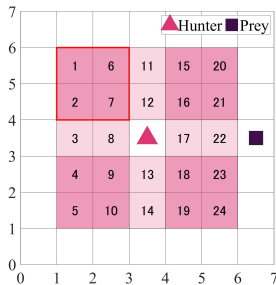


Fig. 4 An example of how to reinforce a Hunter.

続いて，提案手法におけるハンターの行動選択手法について述べる．ハンターは式(4)に示すルーレット選択によって行動を選択するが，獲物が視野領域内にいる場合は獲物の位置するマスが正確にわかる．したがってそのマスにおけるルール重みの値から式(4)を用いて行動を選択する．他方，獲物が視野領域外にいる場合は前述のように写像領域がランダムに選択されるため，「獲物の位置するマスのルール重み」を用いることができない．このとき，ハンターは写像領域を構成するマスのルール重みを平均した値を用いて式(4)からルーレット選択を行い，行動を選択する．例えば Fig. 4 における写像領域 1 が選択された場合，写像領域 1 は状態 1, 2, 6, 7 から構成されるためこれらの状態におけるルール重みの値を平均し，その平均値を用いてルーレット選択から行動を選択する．

最後に，視野領域の大きさの制限について述べる．本研究では Fig. 2, 3 のように視野領域の分割方法を 2 つ提

案するが，視野領域の広さ q は $q \geq 5$ とする．これは Fig. 5 のように， $q = 3$ であるときは視野領域が 2 つの提案手法で同じように分割されてしまうためである．なお，Fig. 5 は $p = 5$ かつ $q = 3$ とし，ハンターを三角形で示した．

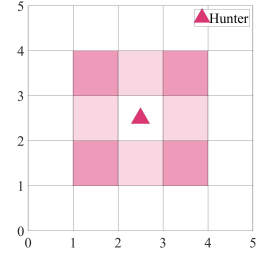


Fig. 5 Divided hunter's FoV area when $q = 3$.

5. シミュレーション条件と結果および考察

5.1 シミュレーションの環境と条件

本研究では数値計算用ソフトウェアである MATLAB 2022a を用い， $p = 11$ のフィールドを対象としてシミュレーション検討を行った．各シミュレーションにおけるパラメータを Table 1 に示す．Table 1 より報酬値は 1000 であり，これは獲物の捕獲達成時に各ハンターへ与えられる値である．またこの値を用いて式(3)から強化関数の値が導出され，式(1)によってルール重みの強化が行われる．

Table 1 Learning conditions.

Field size	11 × 11
Size of hunter's FoV	5, 7, 9, 11
Number of episodes	3.0×10^5
Maximum number of steps in each episode	100
Reward value	1.0×10^3
Initial value of rule weight	200

5.2 学習の継続性からみた提案手法の有効性の検証

本節では獲物がハンターの視野範囲外に出てしまうエピソード数およびステップ数について述べる．3.4 節でも述べたように，従来手法ではハンターが獲物の視野領域外に出てしまうとハンターは状態を取得できず，学習を継続できない．このため，本研究ではそうした状況でも学習を継続できるような手法を提案する．学習の継続性という観点から提案手法の有効性を検証するため，学習の中で獲物がハンターの視野範囲外に出てしまうエピソード数およびステップ数を調べた．

ここで，本研究ではハンター・獲物の初期位置や行動選択などにランダム性が関係するが，このランダム性は乱数の種によって制御される．そこで，本研究ではこの乱数の種を 6 つ設定し，それぞれにおいて視野領域の広さを $q = 5, 7, 9, 11$ と変化させて追跡問題の学習を試みる．

各乱数の種を用いた追跡問題において，視野領域の広さを $q = 5, 7, 9$ としたとき，獲物がいずれかのハンターの視野領域外に出たエピソード数とステップ数を Table 2 に示す．なお，Table 2 では各乱数の種および視野領域の広さ q に対して，視野領域外に出たエピソード数 $n_{Episode}$ ，

ステップ数 n_{Step} を $(n_{Episode}, n_{Step})$ として示した．例として，Table 2 において 1 番目の乱数の種に対して視野領域の広さ q が $q = 9$ であるとき，値が $(2, 1)$ となっている．これは，この条件では 2 エピソード目の 1 ステップ目に獲物がいずれかのハンターの視野領域外に出てしまうことを意味する．なお，1 エピソード目の 1 ステップ目で視野領域外に出ていない表の項目を薄く塗りつぶしてある．また，Table 2 に示した各乱数の種の値は筆者が任意に定めた．

Table 2 Number of episodes and steps when the prey is outside of the field of view of any Hunters.

Number	Value	$q = 5$	$q = 7$	$q = 9$
1	1109	(1,1)	(1,1)	(2,1)
2	31	(1,1)	(1,1)	(1,5)
3	323	(1,1)	(1,1)	(1,1)
4	11	(1,1)	(1,1)	(1,1)
5	9	(1,1)	(1,1)	(1,1)
6	1205	(1,1)	(1,1)	(1,1)

Table 2 より，すべての乱数の種において $q = 5, 7$ の場合は 1 エピソード目の 1 ステップ目に獲物がいずれかのハンターの視野領域外に位置していることがわかる．特に 3・4・5・6 番目の乱数の種では $q = 9$ の場合にも同様であり，1・2 番目の乱数の種もそれぞれ 2 エピソード目の 1 ステップ目，1 エピソード目の 5 ステップ目に獲物が視野領域外に位置している．

つまり，すべての乱数の種において少なくとも 2 エピソード目以降はハンターが学習における状態を取得できないため，従来手法を用いた場合に捕獲戦略の学習ができなくなることがわかる．他方，提案手法を用いればこうして視野領域外に出た獲物についても学習に用いることが可能であるため，Table 1 に示した全 30 万エピソードによる学習が可能である．

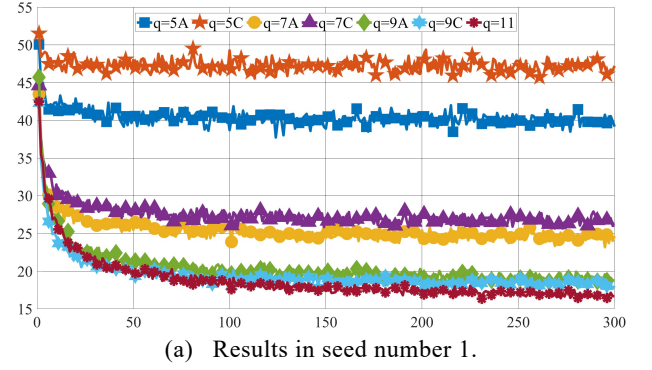
5.3 シミュレーション結果・考察

次に，提案手法による学習性能についての検討を行う．

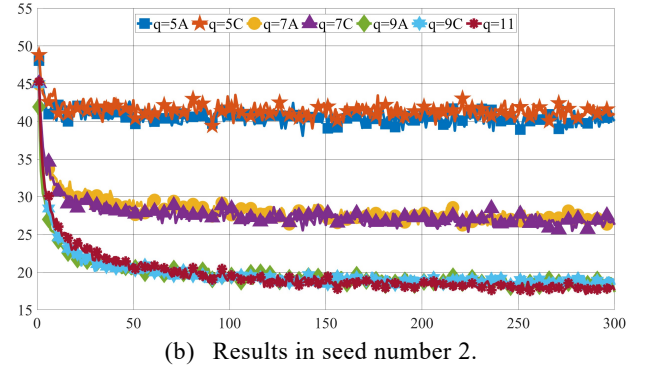
結果を述べる前に，まず本研究では 3.1 節および 5.2 節でも述べたようにエピソードごとに獲物・ハンターの初期位置がランダムに設定される．このため，エピソードによっては初期位置の影響で捕獲が容易または困難になることがある．このような初期位置への依存性をなくすため，全 30 万エピソードを 1000 エピソードごとに分割し，その分割ごとに捕獲までのステップ数の平均を取った．以降，1000 エピソードごとに平均を取った，1 エピソードにおける捕獲までのステップ数を単に「捕獲ステップ数」と呼ぶ．

ここで，Fig. 6 (a)~(f)はそれぞれ 1~6 番目の乱数の種を用いて追跡問題の学習を行った際の，各視野領域の広さ・提案手法における捕獲ステップ数の推移である．それぞれ横軸がエピソード数 ($\times 1000$)，縦軸が捕獲ステップ数を表す．また，各図の凡例として，視野領域の広さ q の値と共に提案手法 1 を用いたものを A，提案手法 2 を

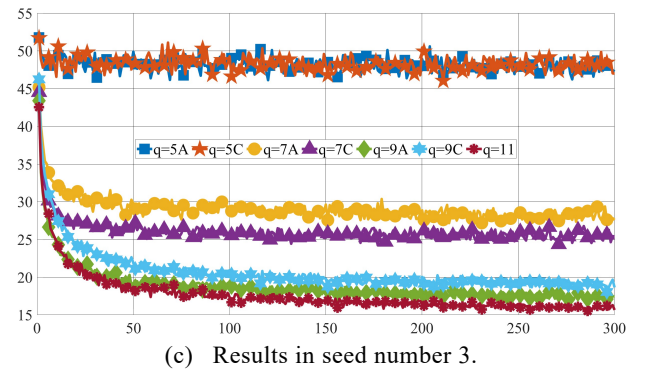
用いたものを C とした．例えば Fig. 6 (a) の中央に存在する紫色で三角形のマーカーを付けたものは凡例が $q = 7C$ となっているが，これは視野領域の広さを $q = 7$ として，提案手法 2 を用いた時の結果であることを意味している．なお， $q = p$ であるときはフィールドを完全に知覚でき，提案手法の影響を受けないため，単に $q = p$ とした．



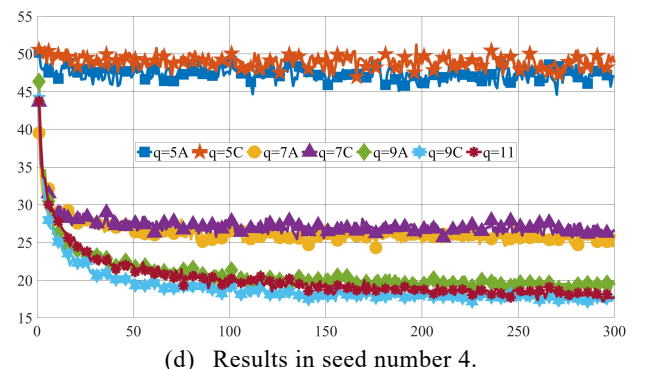
(a) Results in seed number 1.



(b) Results in seed number 2.

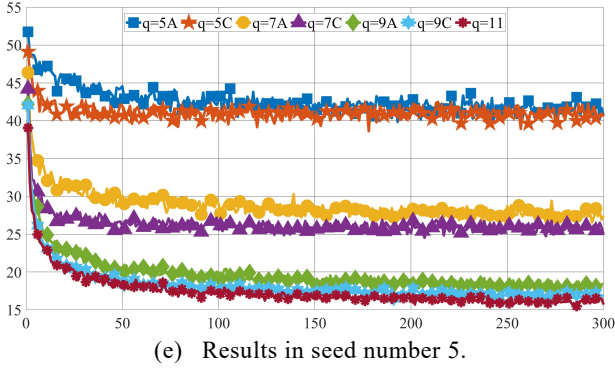


(c) Results in seed number 3.

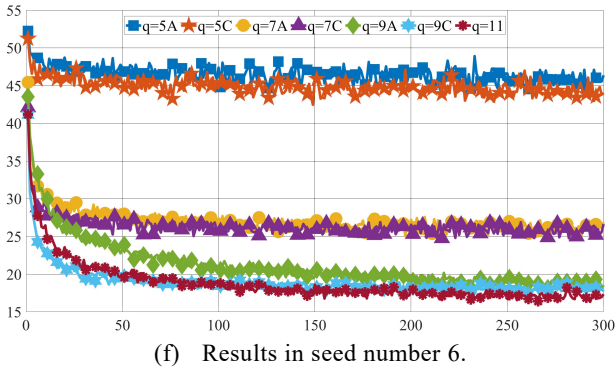


(d) Results in seed number 4.

Fig. 6 Number of averaged captured steps in each FoV.



(e) Results in seed number 5.



(f) Results in seed number 6.

Fig. 6 Number of averaged captured steps in each FoV.

Fig. 6 より、いずれの乱数の種を用いた場合も視野領域の広さ q がフィールドの大きさ p に等しいとき、捕獲ステップ数が小さい値に収束していることが確認できる。また、この収束値は約 17 ステップであり、学習を始めたばかりの約 40~45 ステップよりも少ないステップ数で捕獲が達成できている。ただし Fig. 6 (d)より、乱数の種によっては最小値には収束していない。この原因の 1 つとして、学習エピソードの数が不足していることが考えられる。Fig. 6 (d)において、 $q = 9A$, $q = 9C$ の値はどちらも約 150($\times 1000$)エピソード以降でそれぞれおよそ 19, 17 ステップに収束している。他方、 $q = 11$ の値は 150($\times 1000$)エピソード以降も緩やかな減少を続けており、300($\times 1000$)エピソードにおける値が約 17 ステップになっている。ここで $q = 9$ の場合は視野領域を構成するマス数が $q^2 = 81$ マスである一方、 $q = 11$ の場合は $q^2 = 121$ マスとなる。つまり、 $q = 11$ の場合は視野領域を構成するマス数が $q = 9$ の場合より 40 マスだけ多いため、 $q = 9$ の場合より多くのマスに対してルール重みの学習を行う必要がある。このことから学習にはより多くのエピソード数が必要であり、 $q = 9$ のときは本研究で定めた全 30 万エピソードで学習が収束する一方、 $q = 11$ のときはエピソード数が不足していたと考えられる。

なお、本研究では Table 1 に示したように全 30 万エピソードで学習を行ったが、この 30 万という値は筆者が試行錯誤的に決定したものである。Fig. 6 (b) より、 $q = 11$ の場合の値は 200($\times 1000$)エピソードで値が収束しているものの、 $q = 9A, 9C$ の場合は約 150($\times 1000$)エピソードで値が収束している。また、荒井らの検討では全 10 万エピソードでの学習を行っており⁴⁾。これらの点を考慮

して本研究ではエピソード数を 30 万とした。

続いて、 $q < p$ の場合は $q = 9, 7, 5$ の順に捕獲ステップ数が小さい値へ収束していることがわかる。まず $q = 9$ の場合、いずれの乱数の種を用いた場合も提案手法 1・2 の両方で捕獲ステップ数が $q = p$ の場合の収束値に近い値に収束していることがわかる。また、3・4 番目の乱数の種を用いた場合はそれぞれ提案手法 1・2 を用いた方がより小さい捕獲ステップ数に収束している。ただしその差は約 3 ステップほどであり、またこれ以外の 1・2・5・6 番目の乱数の種を用いた場合はほとんど収束値に差がない。このことから、両提案手法で捕獲ステップ数の収束値に大きな差はないと考えられる。なお、捕獲ステップ数の値の推移に着目すると、2・4・6 番目の乱数の種を用いた場合は提案手法 2 が、1 番目の乱数の種を用いた場合は提案手法 1・2 の両方が $q = p$ の場合より早く値が収束している。このことから、視野領域の広さが $q = 9$ の場合は提案手法 2 を用いることで比較的早く学習が収束するものの、学習性能に大きな差はなく、両手法とも $q = p$ の場合に近い学習性能を持っているといえる。

続いて $q = 7$ の場合、両提案手法とも捕獲ステップ数が約 25~28 ステップ程度に収束しており、2・4・6 番目の乱数の種を用いた場合はほとんど同じ値に収束していることがわかる。また 1・5 番目の乱数の種を用いた場合は提案手法 2 を、3 番目の乱数の種を用いた場合は提案手法 1 を用いた方がより少ないステップ数に収束している。このことから、 $q = 7$ の場合も $q = 9$ の場合と同様に両提案手法で学習性能に大きな差はないと考えられる。

ここで $q = 5$ の場合を考えると、まず $q = p, 9, 7$ の場合は捕獲ステップ数が学習初期は約 40~45 ステップとなっており、学習によってそこから約 20 ステップまたは約 30 ステップに収束している。一方 $q = 5$ の場合、学習初期は捕獲ステップ数が約 50 ステップとなっており、そこから 40~45 ステップの値に収束していることがわかる。特に 3・4 番目の乱数の種を用いた場合は収束値がほとんど変化していないため、 $q = 5$ の場合学習そのものは行えるものの、学習性能は低いと考えられる。

最後に、視野領域の広さについて考察する。今回のシミュレーション検討では対象とするフィールドの大きさを $p = 11$ としたが、この場合フィールドの総マス数は $11^2 = 121$ マスである。他方、視野領域を構成するマス数はその広さ q を用いて q^2 で求めることができる。ここで、フィールドの総マス数に対して視野領域が占めるマス数の割合を、視野領域の広さ q の関数として $H(q)$ で定義する。このとき、フィールドの大きさ p が $p = 11$ であるため $H(q) = q^2/121$ であり、 $q = 5, 7, 9$ とした場合の値を Table 3 にまとめる。このとき、 $q = 5$ の場合は学習の性能が低く、 $q = 7$ 以上であれば性能に差はあれ学習が行えるため、フィールドの大きさに対しておよそ 40%の領域が知覚できるとき、提案手法によって学習が行えると考えられる。また、視野領域の広さが $q = 9$ であるとき、すなわち約 66%が知覚できれば、提案手法によってフィールド全域が知覚できる場合と同等の学習性能を発揮できると考えられる。

Table 3 Ratio of each field of view to the field.

q	5	7	9
q^2	25	49	81
$H(q)$	0.2066	0.4049	0.6694

6. 結言

本研究では、視野領域を制限したハンターによる追跡問題に対して、視野領域外に存在する獲物を学習に用いるための手法について検討を行った。従来手法では獲物が視野領域外に存在することがないように無限大の広さの視野領域を持つことがほとんどであるが、視野領域外の獲物の位置を「写像領域」のいずれかへ写像し、その写像した状態を学習に用いることで視野領域外に獲物が存在するときでも追跡問題の学習が行えることをシミュレーション検討によって示した。

シミュレーション検討においては 11×11 のフィールドを対象とし、複数の乱数の種を用いて追跡問題の学習を行い、その学習性能の評価を行った。まず学習の継続性から考えると、従来手法では少なくとも2エピソード目までにいずれかのハンターの視野領域外に獲物が存在してしまい、学習が継続できなくなるのに対して、提案手法ではその視野領域外の獲物に対しても学習が行えることを示した。次に、フィールド全域が認識できているときに最も捕獲までのステップ数は少ない値に収束するものの、視野領域が 9×9 であれば、提案手法を用いることでフィールド全域が知覚できている場合とほぼ同じ捕獲ステップ数へ収束することが分かった。また、 5×5 の視野領域しか認識できない場合も性能は劣るものの、学習によって捕獲ステップ数が小さい値へ収束することが分かった。加えて、提案手法を用いれば少なくともフィールドの40%程度が知覚できれば学習を行うことができ、また66%程度が知覚できればフィールド全体が知覚できる場合と同等の学習性能を示すことが示された。

今後の展望として、現在は獲物の相対位置のみを状態として用いているが、例えば他のハンターの状態を加味しての学習や、情報通信を考慮した学習などを行い、ハンター間の協調の創発を試みる。また、フィールドをさらに大きくした上でのハンター・獲物の台数の増加、連続時間系への理論の拡張などを行う予定である。

参考文献

- 橘義博, 森翔平 and 滑川徹: 外乱を考慮したマルチエージェントシステムの協調制御, 計測自動制御学会論文誌, Vol.50, No.9, pp. 669-676 (2014).
- L. Canese, G. C. Cardarilli, L. D. Nunzio, R. Fazzolari, D. Giardino, M. Re and S. Spanò: Multi-Agent Reinforcement Learning: A Review of Challenges and Applications, Applied Sciences, Vol.11, No.11, p.4948 (2021).
- 荒井幸代: マルチエージェント強化学習: 実用化に向けての課題・理論・諸技術との融合, 人工知能学会誌, Vol.16, No.4, pp.476-481 (2001).
- 荒井幸代, 宮崎和光 and 小林重信: マルチエージェント強化学習の方法論: Q-Learning と Profit Sharing による接近, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp.609-618 (1998).
- 伊木美太輔, 松本啓之亮 and 森直樹: 追跡問題における状態数とメモリ量の削減に着目した Q 学習, システム情報学会論文誌, Vol.25, No.10, pp.266-271 (2012).
- 安田真, 古橋武, 橋山智訓 and 大熊繁: マルチエージェント系のポテンシャル関数による制御と強化学習の適用に関する検討, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.8, pp.698-706 (2000).
- 保知良暢, 松井藤五郎, 犬塚信博 and 世木博久: マルチエージェント強化学習における報酬発生条件に基づく貢献度判別と報酬分配, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.JSAI02, p.129 (2002).
- 宮崎和光, 荒井幸代 and 小林重信: Profit Sharing を用いたマルチエージェント強化学習における報酬分配についての理論的考察, 人工知能学会誌, Vol.14, No.6, pp.1156-1164 (1999).
- 伊藤僚, 吉川毅 and 野中秀俊: マルチエージェント強化学習における知覚情報の適応的粗視化, 日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集, Vol.26, p.18 (2010).
- 長行康男 and 伊藤実: マルコフゲームにおける環境モデルの推定を利用したマルチエージェント強化学習法, 情報処理学会研究報告知能と複雑系, Vol.2001, No.73(2001-ICS-125), pp.29-36 (2001).
- 長谷川雄吾, 高田沙都子, 中野秀洋, 荒井秀一 and 宮内新: 行動選択確率に基づく動的強化関数を用いた強化学習手法, 信学論, J.89-D-I, No.4, pp.788-796 (2006).
- 片山謙吾, 興石尚宏 and 成久洋久: 強化学習エージェントへの階層化意志決定法の導入--追跡問題を例に--, Vol.19, No.4, pp.279-291 (2003).
- 渡邊俊彦 and 和田竜也: マルチエージェント追跡問題のための相対座標系に基づく階層型モジュラー強化学習, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol.12, No.2, pp.65-74 (2010).
- 玉城斉, 遠藤聡志 and 山田孝治: Q-learning を用いたマルチエージェントにおける協調行動獲得に関する研究, 琉球大学工学部紀要, No.54, pp.101-108 (1997).
- 山村雅幸, 宮崎和光, 小林重信: エージェントの学習, 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, pp.23-29 (1995).
- 玉嶋大輔, 小坪成一, 岡本卓 and 平田廣則: 期待強化値を考慮した動的強化関数を用いる Profit Sharing, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.129, No.7, pp.1339-1347 (2009).
- 宮崎和光, 山村雅幸, 小林重信: 強化学習における報酬割当ての理論的考察, 人工知能学会誌, Vol.9, No.4, pp.580-587 (1994).

音声波形の時間微細構造から見たアクリル板設置による聞き分け 低下の要因とその簡易改善法

山本 亜優^{*1} 八坂 由衣^{*1} 堀越 哲郎^{*2}

Undesirable Effect of Acrylic Partitions on Speech Recognition and a Simple Improvement Method Estimated by the Temporal Fine Structure of Speech Sound Waveforms

by

Ayu YAMAMOTO ^{*1}, Yui YASAKA ^{*1} and Tetsuro HORIKOSHI ^{*2}

(Received on Mar. 29, 2023 and accepted on May 25, 2023)

Abstract

In this study, the phenomenon of acrylic partitions affecting speech waveforms and making them difficult to hear was evaluated by observing speech waveforms from the perspective of the temporal fine structure. The results revealed a strong tendency for the waveform features of voiceless and voiced burst consonants and affricative consonants to be obscured by an acrylic partition. In order to reduce this negative effect on speech recognition, we tested whether the waveforms of these consonants could be restored by forming a small window in the acrylic partition and attaching a splash-proof PVDC film to it. As a result, the waveforms of these consonants were partially but effectively restored. The methods used in this study are simple and inexpensive, yet effective.

Keywords: Speech sound waveform, Consonant recognition, Temporal fine structure, Acrylic partition

1. まえがき

2019 年より世界にパンデミックを引き起こした新型コロナウイルス感染症(COVID-19)は、日本において 2023 年 3 月現在も完全には収束していない。その感染対策のひとつとして、対面での会話の際にアクリル板のパーティションを対話者の間に置き、お互いの飛沫を直接浴びないように努める場面も多い。アクリル板はガラス板と同程度の透明度を持ち視覚情報を遮らないこと、比較して軽いために設置しやすいこと、割れた場合での安全性も比較的高いことなどから対面会話時のパーティションとして多く導入されている。一方、アクリル板があることによって音声聞き取りにくくなることも報告されており¹⁾、それを補うためにマイクとスピーカーをアクリル板両側に設置する装置も市販されている。このような付加装置はアクリル板の設置に加えての費用や電源の確保が必要となり、教育現場のような場で多数導入することは難しい。そこで本研究では、アクリルパーティションを介した音声の聞き取りにくさを音声波形の観察で評価する簡易的な方法を用い、アクリル板に簡単な工作を施すことで聞き取りを改善できるか検討した。

アクリル板が音声伝達を妨げる原因として次の事が考

えられる。(1)空気とアクリル樹脂では音響インピーダンスが大きく異なるため、音エネルギーの多くはアクリル板表面で反射されてしまう。具体的に反射率を推定すると空気の音響インピーダンスはおよそ $4 \times 10^2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ であり、アクリル樹脂の音響インピーダンスが $3.6 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ という報告²⁾を基にすれば反射率 99.98%となる。つまり、話者から直進的に発せられた音声のほとんどはアクリル板で反射されてしまい聴取者にはほぼ直接には届かない。(2)そのため聴取者に届く音声のほとんどはアクリル板の縁を回折して届くものと机の天板や部屋の壁や天井などで反響したものとなり、それらが聴取者の耳元で干渉して合成された音となる。(3)音の回折の点から見るとヒトの可聴域 20 Hz から 20 kHz の音は音速 340 m/s とすれば波長がおよそ 17 m から 17 mm となる。特に音声の聞き分けに重要とされる 300 Hz から 4kHz の周波数帯域³⁾に限っても 1.1 m から 85 mm となり、低音は回折により到達しやすいが高音になるとアクリル板の陰になる場所には到達しにくいことになる。加えてアクリル板や室内での反射により様々な経路長を取った音が合成されるため位相情報が乱されることになる。これらにより音声の聞き取りに重要とされる時間微細構造^{4,7)}の乱れ、つまり本来必要な波形特徴量の減少が予想される。

これらの予想を特別な機材を使わずに実験的に確かめることとアクリル板の飛沫防止効果を保ったまま音声伝

^{*1} 工学部医用生体工学科学部生

^{*2} 工学部医工学科教授

達を改善することを目指して本研究では次の実験を行った．通常の実験室内の実験机の上に設置したアクリル板の有無によって，到達する音声波形の時間微細構造がどの程度変化するかをスピーカーで再生した音声をマイクで記録することにより観察した．次にアクリル板のほぼ中央部に視認性を妨げない程度の開口部(窓)を設け，そこへ空気の流れを遮断しつつ音の透過を妨げにくい薄いフィルムを貼ることで音声の時間微細構造がどの程度保たれるのか検討した．その結果，アクリル板設置により音声波形の高周波成分の振幅と山谷数の減少が見られ，それがアクリル板に開口部を設けることで一定程度減少が抑えられること，そしてその開口部を厚さ 0.011 mm のポリ塩化ビニリデンフィルムで密閉しても音声波形への影響は少ないことが確認された．この方法を用いればコストをほとんどかけずに音声伝達に必要な時間微細構造の状態を簡易評価できる．それに加え，簡単で安価な加工法によりアクリル板のパーティションとしての利点を保ちつつ音声伝達も改善できることが示された．

2. 実験方法

通常の実験室内の実験机上に幅 800 mm 高さ 600 mm 厚さ 5 mm のアクリル板 (Aurako 製) を設置した．アクリルパーティションを介した人の会話を想定し，アクリル板を挟むようにして各々 15 cm 離れた位置に USB スピーカー (サンワサプライ製, MM-SPU9BK) と全指向性バックエレクトレットコンデンサ型モノラルマイクロフォン (オーディオテクニカ製, AT9931PC) を設置した．人の口と耳の位置に近くなるようにスピーカーの中心高さは机上 27 cm, マイクの中心高さは 34 cm とした．アクリル板に窓を設定する場合は，会話者同士の視認性を損なわないことを考慮して眼の高さより下になるようにした．具体的にはアクリル板の左右の中心かつ下端から 22.5 cm を中心とした幅 10 cm 高さ 5 cm の窓とした (Fig. 1)．窓に貼るフィルムとしてはポリ塩化ビニリデン (PVDC: polyvinylidene chloride) フィルム (サランラップ®, 旭化成製, 厚さ 0.011 mm) を使用した．なお，使用した PVDC フィルムは水や多くのガスを通さず自己接着性 (密着性) を持つ⁸⁻¹⁰⁾．アクリル板にも接着剤などを使うことなく密着させることができた．

音声は PC (Dell 社 Dimension E520) に保存した NHK ラジオニュースの音声ファイル (サンプリング周波数 48 kHz 約 2.5 分間の MP3 ファイル) を再生することで行った．音の再生と録音は波形編集ソフト (Audacity® Ver. 2.0.5) を用い，一連の実験中にスピーカーの音量とマイクのゲインは一定とした．実験室の空調は作動しているが，周囲で会話はされていない条件で測定を行った．マイクで録音された音データは波形編集ソフト (Audacity® Ver. 3.2.5) を用いて波形表示し，そのうちの典型的であった部分を Sample Data Export 機能により数値データとして書き出し，それを表計算ソフト (Microsoft 社, Excel)

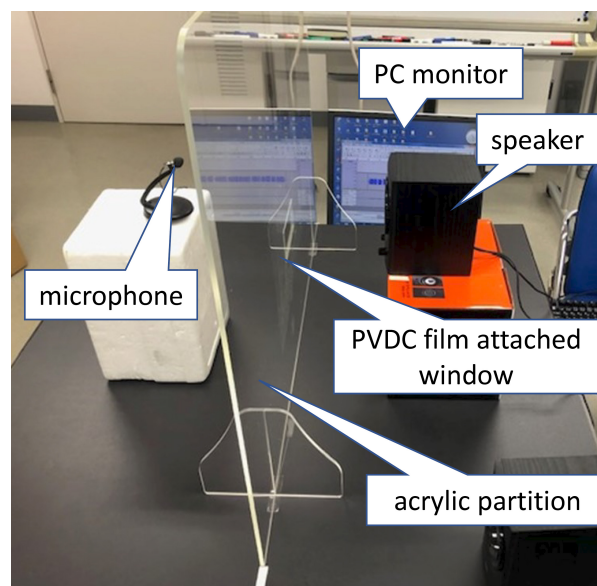


Fig. 1 Photograph of experimental set up.

によりグラフ表示した．なお，録音した音データは一切の加工をせずに波形観察に使用した．

なお，著者らはこの研究に関連したいかなる利益相反も無い．

3. 結果と考察

3.1 アクリル板設置による音声波形の変化

アクリル板無しでの録音を対照としてアクリル板を設置した場合の録音を聴き比べると音声全体がこもって (くぐもって) ぼやけた感じになり，いくつかの単語が聞き取りにくくなったという印象を著者らは受けた．ただし，完全に聞き取れない単語があるということでは無かった．特に母音については聞き取りが難しいとは感じられなかった．一方いくつかの子音，具体的には，無声破裂音 (/t/, /k/, /p/ など) と有声破裂音 (/d/, /g/, /b/ など)，無声摩擦音 (/chi/, /tsu/ など) で聞き取りが難しくなる傾向を感じた．無声破裂音を子音とする /ta/ と有声破裂音を子音とする /ba/, そして無声摩擦音である /chi/ を含む文である「～の立場を～」の部分の音声波形を示したのが Fig. 2 である．Fig. 2A にはこの部分全体の波形，Fig. 2B には注目した子音部分の拡大波形を示している．アクリル板無しの状態と有りの状態を比較するとアクリル板によって波形の高周波成分が減弱していることが波形全体から読み取れる．また，子音部分に注目すると /t/ の特徴である図中 0.15 s 付近の高周波の山谷がアクリル板により振幅が小さくなり数も減ることが見られた．より具体的には，0.14 s から 0.16 s の間に見られる先行する /no/ の母音の反響と考えられる約 5 周期の基本振動に，複合する形で /t/ の成分である高周波の山谷が主なものだけでも 30 以上，しかもそこにはより高周波の成分も伴って見られたのに対し，アクリル板によって /t/ 成分の振幅は大きく減り 20 程度のなめらかな山谷になっていた．/chi/

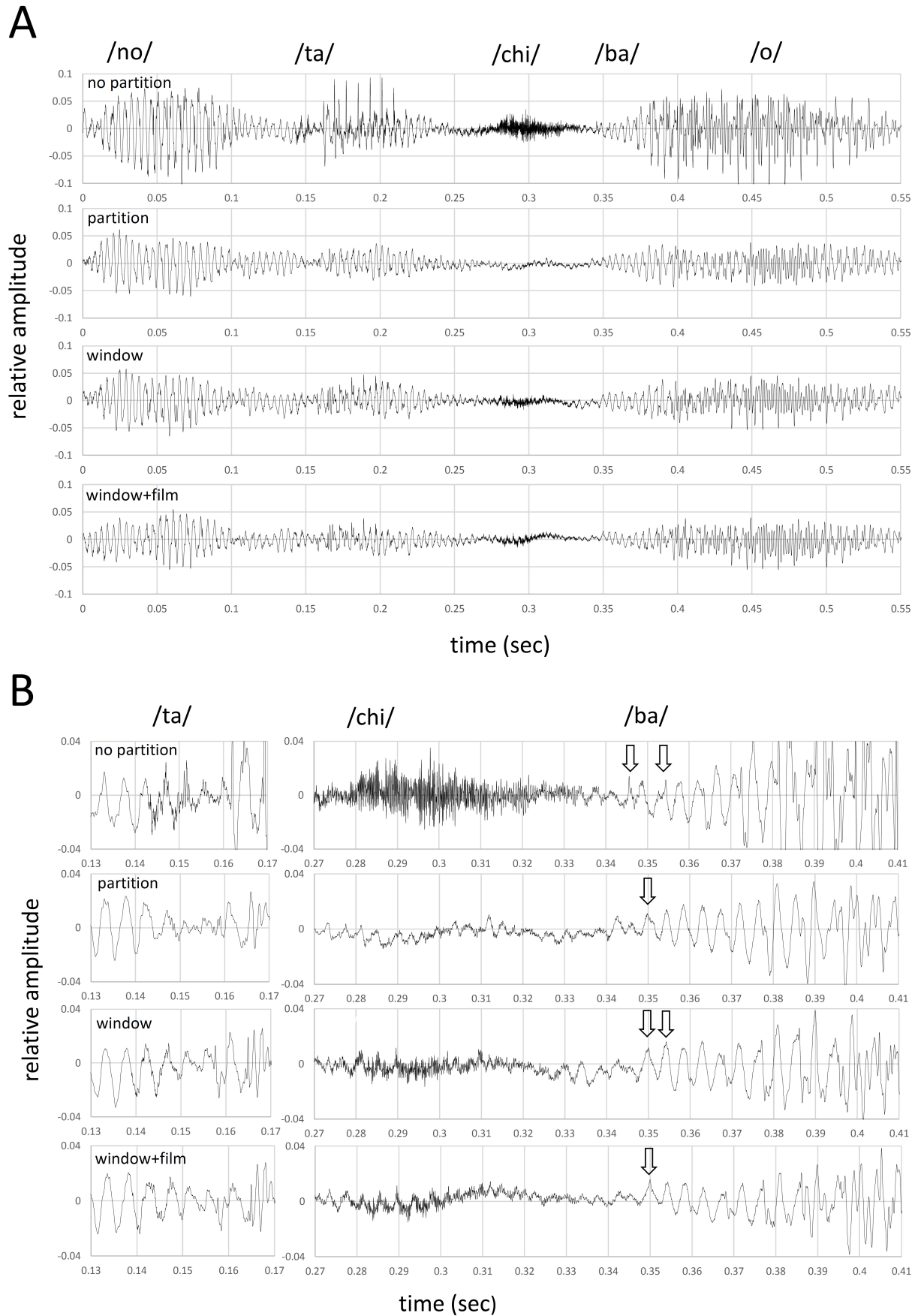


Fig. 2 Waveforms of “no-ta-chi-ba-o”. Comparison of control (no partition), partition, partition with window, and partition with PVDC film attached window. Whole waveforms (A), and enlarged regions of consonants (B).

については高周波の摩擦音に相当する波形がアクリル板によってほぼ見えなくなり、先行する/ta/の母音部分との境界をはっきりと特定するのが難しくなった。また、/ba/については立ち上がりの破裂音部分（Fig. 2B 図中の矢印）がアクリル板無しでははっきり見られるものの、アクリル板有りでははっきりしなくなっていた。なお、これらそれぞれの音の部分だけを取り出して再生してみたところ、アクリル板有りでは/ta/が/pa/に聞こえたり、/chi/の認識が難しかったり、/ba/が/wa/のようにも聞こえたというのが著者らの印象だった。ただし、一連で再生すると「～の立場を～」と聞き取ることは可能だった。これは先行する音によって聴覚の順応状態が変わるために音の周波数帯域が変化することに聴覚が敏感であることと、これまでの言語学習によって不明瞭な部分を文脈で補って認識する³⁾ためと推測される。

母音の波形について見るとこちらも高周波成分の減弱が見られた。しかし、母音それぞれの特徴を大きく決める第1フォルマントと第2フォルマントの成分は日本語では3.5 kHzまでに収まっていると報告されており¹¹⁾、母音の識別に重要なこれらの波形成分はほぼ保たれていることがアクリル板有無での波形の直接観察比較とスペクトル解析の面(data not shown)から確認された。また、母音は継続時間が長い聴覚の神経処理としては一連

の繰返し周期内の時間微細構造を集積して認識につなげることになり、経過時間が短い子音成分より認識が容易であると考えられる。また、再生に使用した元の音声ファイルの波形と比較したところ実験環境下での反響によると思われる母音成分の継続時間の延長が見られ、これも母音の認識に有利にはたらくことが予想される。一方、これによって無声子音の前後に入っている無音部分に母音の反響が重なってしまうことは、子音の認識を低下させる一因になっていることが考えられる。

3.2 音声波形に対する窓とフィルムの効果

アクリル板に窓を設け音声を記録した場合の波形データとその窓にPVDCフィルムを貼って記録した時の波形を Fig. 2A,B の下2段に示した。これらに示されるように、アクリル板で少なくなった先行する母音の基本振動に重複した/h/の高周波成分の山谷の数と振幅が、窓によって部分的に回復されており、PVDCフィルム貼付でもその傾向は保たれていた。/chi/では高周波成分の振幅がアクリル板で1/6程度になっていたものが、窓によって1/3程度にまで回復し、PVDCフィルム貼付によっても1/4程度の振幅が見られた。これによって破擦音としての開始時と摩擦音が認識しやすくなると考えられる。

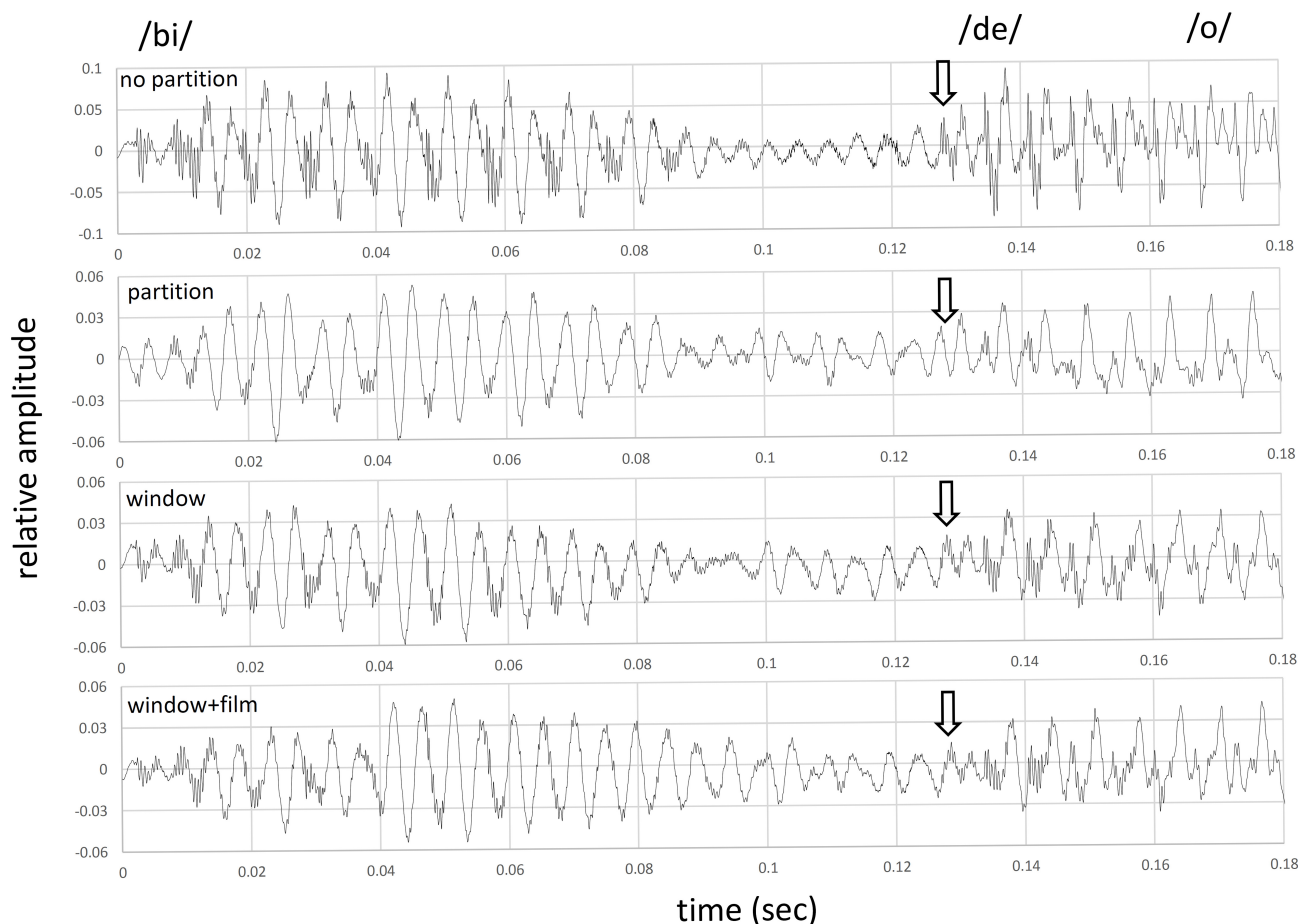


Fig. 3 Waveforms of “bi-de-o”. Comparison of control (no partition), partition, partition with window, and partition with PVDC film attached window.

/ba/については、/chi/の高周波成分が収まってからの/ba/への移り変わりがアクリル板ではっきりしなくなっていたものが、窓によってははっきりするようになり、/ba/の立ち上がり部分（Fig. 2B 図中の矢印）の認識がしやすくなると考えられた。この傾向は PVDC フィルム貼付でも保たれていた。

一方、母音について見ると窓によって高周波成分が回復する傾向は見られるものの、全体的な振幅はアクリル板無しの程度までは回復せず、窓無しのアクリル板有りとほぼ同じレベルであった。このことは音量的にはアクリル板設置による減少を今回の窓によっては回復させられていないことを示している。

Fig. 3 は「ビデオ」という音声の波形を示したものである。アクリル板により有声破裂子音である/b/の立ち上がり部分の高周波成分の振幅が减弱されている。また/de/の立ち上がり開始部（Fig. 3 図中の矢印）が不明確になっている。このためか、アクリル板有りの音声を聴くと「ビオ」または「ビヨ」のようにも聞こえるという印象を著者らは持った。これは、アクリル板の設置により/d/の開始部分が不鮮明になることと母音/e/から/o/に遷移する部分も変化が不鮮明なために起きている可能性が

考えられる。日本語の母音の第 1 フォルマントと第 2 フォルマントは、/e/では概ね 450 Hz と 2000 Hz，/o/では概ね 430 Hz と 650 Hz とされており¹²⁾、/e/の第 2 フォルマントの認識がアクリル板によって難しくなったために第 1 フォルマントの周波数が比較的近い/e/と/o/が区別しにくくなった可能性が考えられる。なお他の母音では、/a/が概ね 790 Hz と 1210 Hz，/i/が概ね 280 Hz と 2210 Hz，/u/が概ね 310 Hz と 1100 Hz とされており¹²⁾、これらは/e/と/o/とは第 1 フォルマントが大きく異なることからこの推測は妥当であると考えられる。アクリル板に窓を設け PVDC フィルム貼付したところ、/b/の立ち上りの高周波波形がはっきりすること、/de/の開始部（Fig. 3 図中の矢印）がはっきりすること、/e/と/o/の波形も高周波成分が多かった状態から少ない状態へと波形が明確に変化するのが見られた。これらが「ビデオ」の聞き取りを明瞭にすることに繋がっているものと思われる。

Fig. 4 は/ka/の波形全体を左の列に、/k/部分の拡大を右の列に示したものである。なお、縦軸も右の列で拡大されている。この図を見ると無声破裂子音である/k/の特徴的な振動は、およそ 10 ms あたり 16 個の山谷つまり約 1.6 kHz であると推定される。この振動が母音/a/に先行し

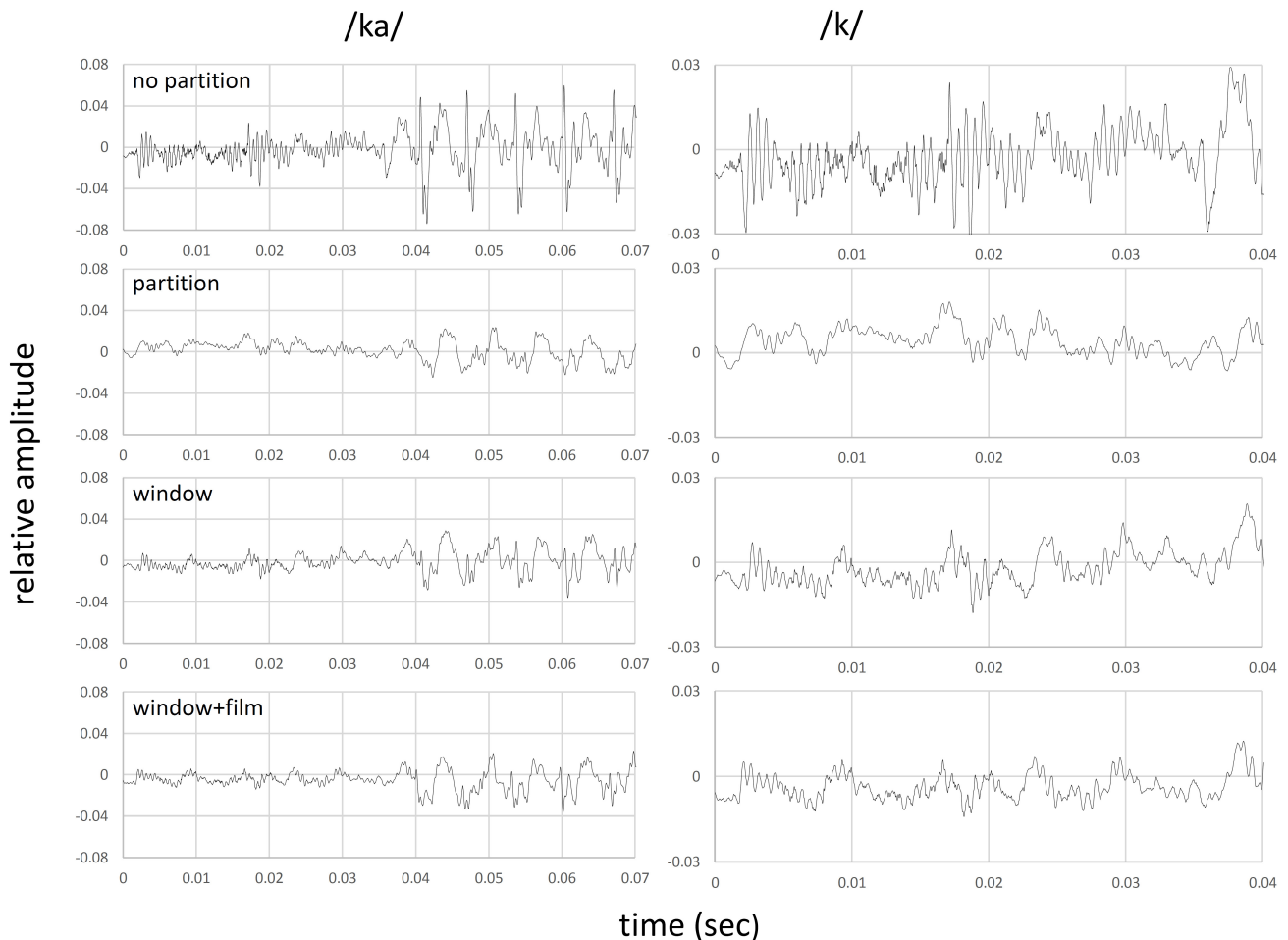


Fig. 4 Waveforms of “ka”. Comparison of control (no partition), partition, partition with window, and partition with PVDC film attached window. Right column indicates enlarged region of consonant /k/.

て入ることが/k/の認識に必要であると思われる。この子音部がアクリル板によって振幅が大きく抑制されており、山谷の数がはっきりしにくい時間領域が増えている。これらが/k/認識が難しくなる要因になると考えられる。一方、窓に PVDC フィルム貼付したものでは/k/部分の振幅に部分的な回復が見られており、認識しやすくなっていると考えられる。なお、実際に著者らが音声を聴いた印象では、/k/の前がほぼ無音の状態であればアクリル板を介した音声でも/k/を認識するのは容易であるが、/k/に先行して母音がありその反響が長引くと/k/の認識が難しくなるというものだった。例えば、単語中の/k/の部分だけを聴くと/dka/のよう感じられたり、/ku/が/kbu/または/fu/のように感じられた例や、/ko/が/ho/や/po/に感じられた例もあった。なお波形データは示さないが、ここまで示した以外の子音でアクリル板により認識が不明瞭になると著者らに感じられた例としては、/gi/が/bi/や/ni/または/i/と区別するのが難しくなった例、/ze/が/de/と区別しにくくなった例、/hi/が/pi/と区別しにくくなった例、/tsu/が/zu/と区別しにくくなった例などが感じられた。これらの子音の認識の明瞭化に対しても、窓に PVDC フィルム貼付した場合に一定の改善効果があると感じられた。

4. おわりに

今回の測定方法は厳密な音響学的な計測ではない。しかし、単に一連の音声データを FFT により全体的なパワースペクトルを見ただけでは音声の認識に関わる要素である波形 1 周期内の山谷の構造、その経時変化、そして特定の波形の継続時間といった分析は十分にはできない。今回目的としたのは一般的に入手可能な機材で再現実験が可能であり、音波形の直接観察といった簡易的な方法であっても音声伝達における聞き分けに重要となる子音成分の修飾や継続時間の変化といった時間微細構造に関わる要素を定性的に評価できることである。そして、その目的は達成されたと考えている。我々の研究室では既にクラリネットの発音や音色の知覚に関わる波形要素の見積もり¹³⁾や、アルトリコーダーで吹鳴された重音の知覚に関わる波形要素の提案¹⁴⁾において、今回同様の波形観察方法の有用性を示している。従って、本研究で行った測定・観察方法は、今後それぞれ具体的に異なるアクリルパーティションの設置環境においても、音声伝達の良否を定性的に評価するための実用的な方法として提案できたと考えている。これに加えて、本研究では次の事も示すことができた。アクリル板は切削といった加工性も高く窓を設けることは難しくない。PVDC フィルムは薄くても強度があり破れにくく音声の透過性が良い一方、飛沫の透過は防ぐ。PVDC フィルムはアクリル板にも密着し、平面的に貼れば窓部分を介しての視認性も妨げにくい。しかも安価で入手しやすく、必要に応じて簡単に張り替えられるので衛生的に使用できる。以上により、

アクリルパーティションに窓を設け PVDC フィルムを貼るという方法は、聞き取りを簡易的に改善する方法として有効かつ実用的であると言えるであろう。

実際の会話の状況では様々な環境雑音や、他者の会話が聞こえていることも多いであろうから、今回の実験条件より更に聞き分けが難しい場面が多くなると考えられる。アクリル板を使用していると聴取者の後ろから届いてくる音がアクリル板の反射により大きく聞こえることも体験される。そういった状況下では人は両耳機能を用いて妨害音の中から聞きたい音声を音源定位によって聴取する事が可能なことが知られている³⁾。しかし、アクリル板によって正面からの音が遮られてしまうと、視覚情報から判断される正面である話者の位置と音源定位能力による音声源の位置が一致なくなってしまう。このような場合でも、PVDC フィルム貼付の窓があれば、そこを通して直接音が聴取者に届くことになり、より話者の音声を選択的に認識することに有利になるものと予想される。そのため今後は、環境雑音や他者の会話が聞こえているような状況下で、被検者による実地試験を行い、アクリル板に PVDC フィルム貼付の窓を設けることの有効性を様々な実環境下で具体的に評価する必要がある。なおそれと並行して、より聞き取りに優れたアクリルパーティションとして実用化するためには、聞き分けに重要な子音成分を効果的に透過させられる窓の大きさや形状そして位置について検討することも必要であろう。高齢者では老化により高周波域の聴力が低下し、同時に音声分析する能力も低下することが知られている³⁾。現在多く使用されているアクリルパーティションでは音声コミュニケーションに難しさを感じている人々がいることを忘れずに改良を進めていく必要があるであろう。

参考文献

- 1) 青木佐奈枝, 小野聡士, 福井晴那, 川嶋真紀子: COVID-19 感染防止対策が心理支援にもたらした問題とその対応, 心理学研究, Vol. 93, No.4, pp.359-365 (2022).
- 2) 久本誠一, 樋口雅俊, 田中均, 藤井尚子, 合田真理子, 上津遊恭平: 水槽を併用した超音波エコー法による体肢断面観察法の検討, パイオメカニズム学会誌, Vol. 34, No.1, pp.68-72 (2010).
- 3) 廣谷定男(編著): 聞くと話すの脳科学 (日本音響学会編, 音響サイエンスシリーズ 17), コロナ社 (2017).
- 4) M.S. Lewicki: Efficient coding of natural sounds, Nature Neurosci., Vol.5, No.4, pp.356-363 (2002).
- 5) E.C. Smith and M.S. Lewicki: Efficient auditory coding, Nature, Vol.439, pp.978-982 (2006)
- 6) B. C. J. Moore: The role of temporal fine structure processing in pitch perception, masking, and speech perception of normal-hearing and hearing-impaired people, J. Assoc. Res. Otolaryngol., Vol.9, pp.399-406

- (2008).
- 7) J.N. Oppenheim and M.O. Magnasco: Human time-frequency acuity beats the fourier uncertainty principle, *Physical Review Letters*, Vol.110, pp. 044301(1-5) (2013).
 - 8) 板谷実: プラスチックフィルムによる食品の包装, *調理科学*, Vol.3, No.2, pp.73-78 (1970).
 - 9) 市川和昭: 食品包装の研究 (第1報) プラスチック包装材料についての一考察, *名古屋文理短期大学紀要*, Vol.18, pp.101-107 (1993).
 - 10) 中尾卓: サランラップ®の製膜とフィルム特性, *化学と教育*, Vol.58, No.12, pp.558-561 (2010).
 - 11) T. Hirahara and R. Akahane-Yamada: Acoustic characteristics of Japanese vowels, *Proc. ICA2004*, pp.3287-3290 (2004).
 - 12) 加藤重弘, 安藤智子: 基礎から学ぶ音声学講義, 研究社, pp.223 (2016).
 - 13) 堀越哲郎, 藤原正明: クラリネットマウスピースのフェイシング部の微小形状変化が吹鳴音波形に与える影響, *東海大学紀要工学部*, Vol.62, No.1, pp.35-42 (2022).
 - 14) 堀越哲郎, 藤原正明: アルトリコーダーで得られた重音波形の時間構造に見られた特徴, *東海大学紀要工学部*, Vol.59, No.2, pp.51-58 (2019).

アルカリ法によるプラスミド DNA 精製過程における溶液混和が 最終精製標品の品質に与える影響の検討

笹川 昇^{*1,3} 小林 響^{*2} 覧村 龍之介^{*2}

Effect of Solution Mixing Condition on the Quality of Isolated Plasmid DNA by the Alkaline-SDS Method

by

Noboru SASAGAWA^{*1,3}, Hibiki KOBAYASHI^{*2} and Ryunosuke MIMURA^{*2}

(Received on Mar. 23, 2023 and accepted on Jul. 6, 2023)

Abstract

The alkaline-SDS method is the most popular and reliable way to isolate plasmid DNA from recombinant *Escherichia coli*. The principle of this method is a sudden and stepwise change of the pH of a solution containing plasmid DNA, bacterial genomic DNA, and proteins. At each step of the experiment, complete mixing of added solutions is required. On the other hand, the mixing condition of adding solution III (which neutralizes the pH of the sample) is ambiguous in the standard protocol and unfamiliar to beginners. Based on this background, we investigated the mixing condition of solution III and chloroform by the alkaline-SDS method. We tested four conditions of mixing solution III and chloroform, either gently or vigorously. Among these four conditions, we found that only gentle mixing resulted in the ideal high quality. Conditions with any vigorous mixing led to contamination of bacterial genomic DNA in the final product. Furthermore, we tested changing the volume of solution II, and also tested a vortex mixer as a mixing tool. The results provide a clear guideline for those who are inexperienced with alkaline-SDS plasmid purification.

Keywords: Plasmid DNA, Alkaline-SDS method, Solution mixing condition, Solution III, Chloroform

1. はじめに

分子生物学において、プラスミド DNA の精製は基礎的かつ重要な実験である。精製度の高いプラスミド DNA を取得することが、その後の実験結果を左右すると言っても過言ではない。

プラスミド DNA の精製手法はいくつか存在するが、その中で主流となっているのはアルカリ法と呼ばれる精製法である。アルカリ法によるプラスミド精製実験は学生実習でも定番の実験であるし、分子生物学系の研究室に配属された学生が一番初めに習得を目指す実験手法のひとつとしても数えられる。

アルカリ法は 1979 年に Birnboim によって報告されて以来¹⁾、いくつかの改変が行われ、現在では実験手順が確立されている。現在はキット化されたプラスミド精製試薬が販売されている場合も多いが、その手法の一番重要な原理はキットであっても変わらない。

既に確立された手法だというもの、アルカリ法による精製の際、加えた溶液の混和方法に迷う場合がある。この実験では様々な試薬組成の溶液を段階的かつ順番に加えていくのだが、その際、加えた溶液をどのように混

和していくのかということが問題となることが生じるのである。Birnboim 原法では『gently mixed by inversion for a few seconds』となっている実験操作に対し、これを直訳したであろう『数秒間ゆっくりと攪拌』としている実験書もあれば²⁾、他にも複数の実験書で『inverting the tube several times』³⁾、『shake 10 times』⁴⁾、『反転させて混合』⁵⁾、『よく混ぜ』⁶⁾、『ボルテックスミキサーで良く混合』⁷⁾、『激しく転倒させて十分に混和』⁸⁾などと様々な表現がされており、溶液をどの程度混和しても良いものなのか、初心者には判断が難しい場合がある。このような事情もあり、アルカリ法によるプラスミド DNA 精製における溶液混和の過程は、研究室ごとに変法（ローカルルール）が生じやすいところである。また学生実習の際にも『混ぜると書かれているが、実際にどの程度の強さで混ぜれば良いのか分からない』と質問を受けやすい手順でもある。

このような状況を踏まえ、本研究では、アルカリ法によるプラスミド精製の際に加える溶液の混和方法が最終精製標品の精製度に与える影響について具体的な検討を行った。今回の検討を行ったきっかけとして、一般的に行われる手順通りに実験を進めたにもかかわらず、得られた精製プラスミド DNA の電気泳動を行うと、その品質が低いことを示すスミアなバンドが泳動像に生じたこ

*1 工学部生物工学科 教授

*2 工学部生命化学科 学部生

*3 責任著者

とが挙げられる。そのスミアの原因として、アルカリ法に使用される試薬の Solution III やクロロホルムの混和方法の違いに関係性があると考え、その条件を検討した。具体的な検討の手順として、アルカリ法を用いたプラスミド精製実験で使用される Solution III とクロロホルムの混和方法を何通りかに変化させ、その後得られた精製標品に対して吸光度測定やアガロース電気泳動を用いることで精製度の評価を行うこととした。

2. 実験の概要

2. 1 大腸菌およびプラスミド DNA

プラスミドは pBAD-GFPuv を用いた (Fig. 1)。宿主となる大腸菌は K12 株由来の XL-1 Blue を用いた。pBAD-GFPuv はアンピシリン耐性遺伝子を保持するため、これを取り込んだ大腸菌 (形質転換体) はアンピシリン耐性を獲得する。この形質転換体をアンピシリン入り LB 培地に画線培養し、シングルコロニーを獲得した。このシングルコロニーを滅菌済み爪楊枝でつつき、200mL 三角フラスコに入った 50mL の滅菌済み 2×YT 培地に植菌し、37℃で一晩の振盪培養を行った。翌日、培養済みの形質転換体を 15mL 遠心チューブに 15mL ずつ分注し、2500rpm、室温で 20 分間遠心して大腸菌を沈殿させた。遠心後の 15mL チューブから上清を完全に取り除き、沈殿をチューブごと -30℃で凍結保存した。このような凍結サンプルを一度に多数作成することにより、形質転換体サンプルごとのばらつきを抑えた。なお、遠心後の上清を含め、遺伝子組換え実験の指針に従い、生じた全ての実験廃棄物に対して次亜塩素酸ナトリウム処理を行った。

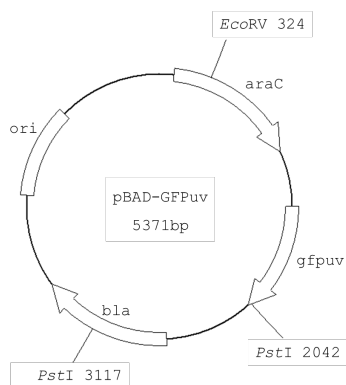


Fig. 1 Map of pBAD-GFPuv, a plasmid used in the experiment.

2. 2 アルカリ法に用いる試薬類

調製に用いた試薬は全て特級を用いた。以下、調製した試薬の組成を以下に示す。

Solution I : 25mM Tris/HCl, 10mM EDTA, pH8.0

Solution II : 0.2N NaOH, 1% SDS

Solution III : 3M CH₃COOK, 15% v/v CH₃COOH

また、制限酵素、RNase および反応バッファーは Takara 社もしくは Nippon Gene 社の製品を用いた。

2. 3 アルカリ法によるプラスミド精製 (1) Solution I, Solution II および Solution III の添加

アルカリ法によるプラスミド精製は、Birnboim の原法⁷⁾、および文献 2, 3, 7 に従って操作した。2.1 の 15mL チューブに入った菌体に対して Solution I を 500μL 加え、菌体を懸濁した。この際、ボルテックスミキサーなどの懸濁装置を用いて激しく完全に懸濁した。次に Solution II を 1000μL 加えて、30 秒間、チューブを横に倒しながら全体を混ぜ合わせ (倒立混和)、溶液に粘性が出たことを確認した後に、更に氷中で 5 分放置した。その後、Solution III を 750μL 加えた。Solution III を加えた後の混和条件については 3.1 および 3.3 で詳述する。なお、本実験では Solution III を加えて混和した後に、Birnboim 原法にないクロロホルム処理を施している⁷⁾。この過程の混和条件に関しても 3.1 および 3.4 に記載する。

2. 4 アルカリ法によるプラスミド精製 (2) Solution III およびクロロホルム添加後の処理 (最終精製標品の作製)

Solution III およびクロロホルムを添加して混和させた後のサンプルを、2,500rpm、室温、20 分間遠心分離させた。遠心分離後、全てのチューブ内で上から水層、中間層、有機層の三層に分離していた。これらのチューブから水層を回収した。回収した水層に対し、その容量に対して 0.6 倍量から 1 倍量の 2-プロパノールを加え、12,000rpm、4℃で 15 分間遠心分離した。遠心分離後、75% エタノールで沈殿を洗浄した。チューブからエタノールなどの液体成分を完全に取り除き、沈殿のみの状態にしたうえで、チューブ内を完全に乾燥させた。乾燥後、チューブに 400μL の T¹⁰E¹ (10mM Tris/HCl, 1mM EDTA, pH8.0) を加えてピペッティングで沈殿物を溶解した (これを粗精製サンプルとする)。この粗精製サンプルに 10mg/ml の RNase を 2μL 加え、ピペッティングの後に 37℃、2 時間の反応を行った。その後、徐タンパク質のためにフェノール・クロロホルム抽出を行ない、次いで酢酸ナトリウム存在下でエタノール沈殿を行った。沈殿物を 75%エタノールで洗浄したのちに完全に乾燥させ、最終的に 100μL の純水に溶解させたものを最終精製標品とした。

2. 5 制限酵素処理およびアガロース電気泳動

プラスミド DNA 最終精製標品の確認のために制限酵素処理とアガロースゲル電気泳動を行った。用いた制限酵素と組合せは以下の 4 通りである。

- uncut (制限酵素切断無し、プラスミド DNA のみ)
- EcoR V (単一酵素切断)
- Pst I (単一酵素切断)
- EcoR V, Pst I (二重切断)

反応時にはプラスミド DNA 最終精製標品を 2μL、制限酵素を各々 0.5μL、10 倍濃縮反応バッファー (10×H Buffer) を 2μL 加え、それぞれのチューブで反応系の全体量が 20μL となるように滅菌水で調整した。これを 37℃で 1 時間保温した後、1%アガロースにおける電気泳動を行った。電気泳動は 80V、40mA の条件で 80~100 分間行った。泳動時にサンプルに添加するローディングバッファーの色素 (ブロモフェノールブルー) がアガロースゲル

ルの 2/3 程度の位置まで進んだところで泳動を止めた。泳動後のアガロースゲルを臭化エチジウムで 40 分染色した後に写真撮影を行った。

3. 結果

3. 1 様々な混和条件下で回収した最終精製標品の濃度と純度

2. 3 までの手順で 750 μ L の Solution III を加えた試料を全く同じ条件で 4 本用意したのち、以下の条件で混和を行った。

①：試料の入った 15mL チューブのキャップ側を親指、下側を中指で持ち、泡が立たない程度にゆっくりと 20 秒間転倒混和(以下、穏やかに混和)

②：①と全く同条件でおだやかに混和

③：試料の入った 15mL チューブを片手で持ち、ふたがしっかりと閉まっていることを確認して泡が大量に立つように 5 秒間激しく混和(以下、激しく混和)

④：③と全く同条件で激しく混和

ここで穏やかに混和させた①②では、白い乳白色の不溶物の出現を確認した。一方で激しく混和させた③④では①②同様の乳白色の不溶物出現を確認したが、①②に比べて混和後の溶液がやや白く濁っていた。

次に、①から④すべての 15mL チューブに対してクロロホルムを 500 μ L 加え、以下の操作を行った。

①：穏やかに混和

②：激しく混和

③：穏やかに混和

④：激しく混和

ここで Solution III を加えて穏やかに混和した①②では不溶物の全体量に変化が見られなかった。一方で、激しく混和した③④では細かいサイズの不溶物が凝集し、混和後の溶液の透明度が上昇することが観察された。

以上の作業により、

①：Solution III，クロロホルムともに穏やかに混和

②：Solution III を穏やかに混和，クロロホルムを激しく混和

③：Solution III を激しく混和，クロロホルムを穏やかに混和

④：Solution III，クロロホルムともに激しく混和という、互いに異なる混和条件の 4 サンプルを作成した。

以降、この 4 サンプルに対して全く同じ操作を行うことで最終精製標品を得た。得られた最終精製標品の濃度と純度の測定には NanoDrop™1000 (Thermo Fisher)を用いた。

Table 1 に、様々な混和条件下での最終精製標品の濃度と純度を示す。一般的に核酸の濃度と純度は波長 260nm の吸光度 (OD260) によって算出され⁹⁾、その値と波長 280nm の吸光度 (OD280) の比 (OD260/280) の値が 1.8 以上であればタンパク質の混入が無く純度の高い DNA だと判断される。実験結果から、溶液混合に関して今回試したいずれの条件によっても、タンパク質の混入が無く高純度の DNA が得られたことを示唆する結果となった。

Table 1 Concentrations and qualities of isolated plasmid DNA with various mixing conditions of solution III and chloroform. (Solution I : II : III=1 : 2 : 1.5, n=3, mean $\pm$ s.d.)

	Solution III	Chloroform	conc. μ g/ μ L	OD260/280
①	gently	gently	4.62 $\pm$ 0.08	1.84 $\pm$ 0.02
②	gently	vigorously	4.36 $\pm$ 0.07	1.89 $\pm$ 0.01
③	vigorously	gently	4.31 $\pm$ 0.09	1.91 $\pm$ 0.02
④	vigorously	vigorously	4.31 $\pm$ 0.04	1.90 $\pm$ 0.01

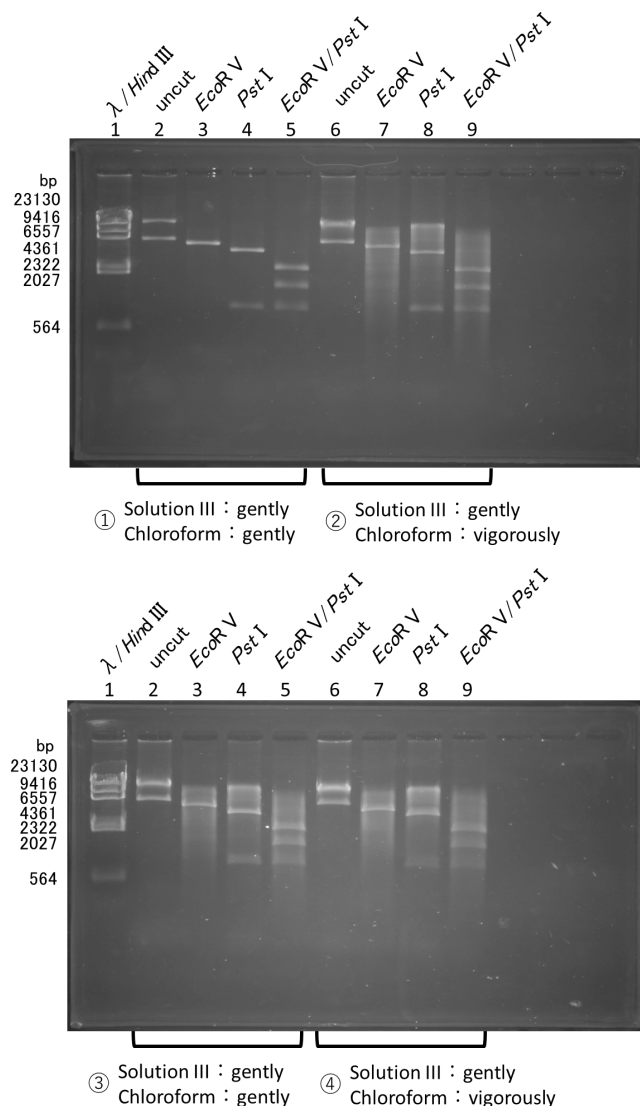


Fig. 2 Quality check of isolated plasmid DNA by restriction enzyme reaction and agarose gel electrophoresis. (Solution I : II : III=1 : 2 : 1.5)

3. 2 様々な混和条件下で回収した最終精製標品の電気泳動結果

Fig. 2 に、最終精製標品の電気泳動結果を示す。この電気泳動像から、Solution III およびクロロホルムの添加の際にいずれも穏やかに混和したサンプル①ではプラスミド DNA 以外の不純物が取り除かれており、高品質のプ

ラスミド DNA が精製できたことを示唆する結果が得られた。一方で、それ以外のサンプル②③④の混和条件では、電気泳動時のバンドにスメアが認識された。つまり、Solution III およびクロロホルム添加後に激しく混和する段階をひとつでも経ると、最終精製標品の品質が低下することが示唆された。

3. 3 加える Solution II の容量が実験結果に与える影響

文献 1, 2, 3, 7 では、加える Solution I, II, III の容量比を 1:2:1.5 としている。一方で、この容量比を 1:1:1 としている手法も知られている⁸⁾。用いる試薬の容量を抑えることで実験の操作性が向上することもあるため、本研究では Solution I, II, III の容量比が 1:1:1.5 の条件でも実験を行うこととした。Solution III の混和条件を含め、Solution II の容量以外の条件は 3.1 と同一とした。なお、以下の①' から④' はそれぞれ 3.1 の①から④の実験条件に対応する。Table 2 が示すように、ここでも Solution III 添加時の混和条件による濃度・純度の差は認められなかった。一方で Fig. 3 で明らかなように、やはりここでも Solution III の添加時に穏やかに混和した条件で精製度が高く、激しく混和するとスメアが生じることが見て取れた。かつ、Solution I, II, III の容量比を 1:2:1.5 で精製を行った時よりもスメアの度合いが濃くなっている結果となった。

Table 2 Concentrations and qualities of isolated plasmid DNA with various mixing conditions of solution III and chloroform. (Solution I : II : III=1 : 1 : 1.5, n=3, mean $\pm$ s.d.)

	Solution III	Chloroform	conc. $\mu\text{g}/\mu\text{L}$	OD260/280
①'	gently	gently	2.30 ± 0.96	1.91 ± 0.06
②'	gently	vigorously	3.88 ± 0.24	1.90 ± 0.02
③'	vigorously	gently	3.78 ± 0.15	1.86 ± 0.02
④'	vigorously	vigorously	3.35 ± 0.91	1.88 ± 0.02

3. 4 ボルテックスミキサーによる溶液混和の検討

溶液混和の条件検討の一環として、ボルテックスミキサーによる溶液の攪拌を試みた。Solution III およびクロロホルムを加えた後の溶液混和時に、Scientific Industries 社の VORTEX-GENIE 2 を用いて作業した。この装置のの強弱つまみを 10 段階中の 10 (最強) とし、以下の条件で攪拌した。

- ⑤ : Solution III 添加後 5 秒, クロロホルム添加後 5 秒
 - ⑥ : Solution III 添加後 10 秒, クロロホルム添加後 10 秒
 - ⑦ : Solution III 添加後 15 秒, クロロホルム添加後 15 秒
- この攪拌条件以外は 3. 1 と完全に同一の作業条件とし、

【2. 実験の概要】で示された手順で作業を行った。なお、⑤⑥⑦の実験は Solution I, II, III の容量比を 1:2:1.5 で行い、容量比を 1:1:1.5 で行ったものを⑤'⑥'⑦'とした。これらの最終精製標品⑤⑥⑦について濃度と純度を計測した結果を Table 3 に、⑤'⑥'⑦' の濃度と純度を Table 4 に示す。NanoDrop™1000 による吸光度測定の結果では、

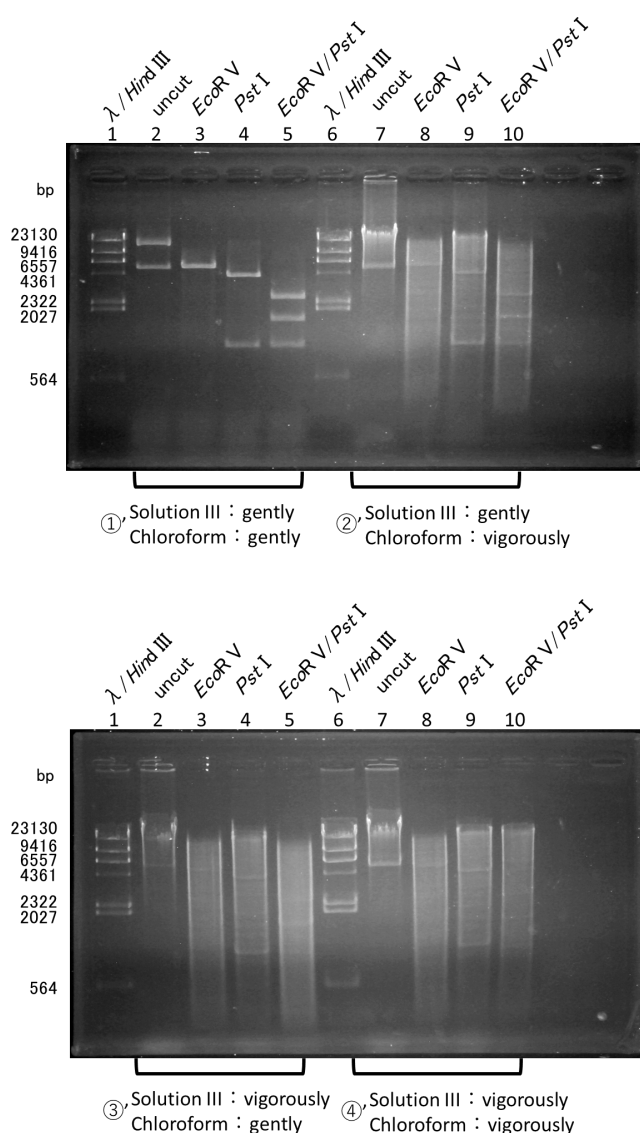


Fig. 3 Quality check of isolated plasmid DNA by restriction enzyme reaction and agarose gel electrophoresis.

(Solution I : II : III=1 : 1 : 1.5)

ボルテックスミキサーに供した時間を変化させても濃度や純度に大きな差は見られなかった。また、⑤⑥⑦を 3. 2 と同様に制限酵素消化およびアガロース電気泳動に供した結果を Fig. 3 に、⑤'⑥'⑦'の電気泳動結果を Fig. 4 に示す。ここから分かるように、Solution I, II, III の容量比を 1:2:1.5 で行った⑤⑥⑦の場合は、ボルテックスミキサーにかけける時間が 5 秒+5 秒 (延べ 10 秒) から 15 秒 +15 秒 (延べ 30 秒) の範囲では結果に大きな差が無く、いずれの条件でも手動でおだやかに混和した①に比べてごくわずかなスメアが認められる結果となった。一方で容量比を 1:1:1.5 で行った⑤'⑥'⑦'の場合では(Fig. 5), ボルテックスミキサーによる攪拌時間の長さに比例する形でスメアが出現していくことが判明した。ただし、スメアの度合いは②'③'④'に比べて軽微であった。

Table 3 Concentrations and qualities of isolated plasmid DNA with various mixing conditions of solution III and chloroform by Vortex mixer.

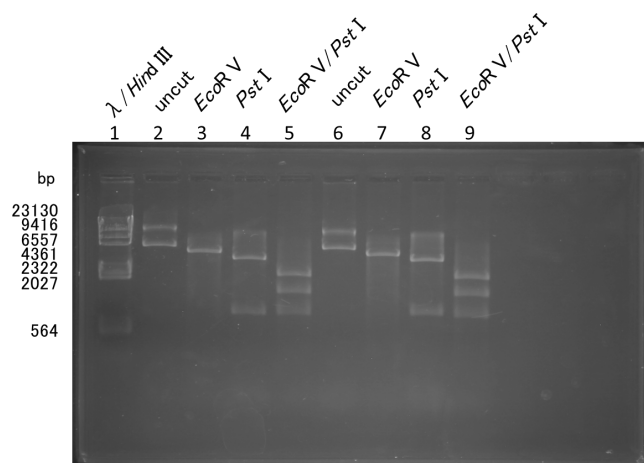
(Solution I : II : III=1 : 2 : 1.5, n=3, mean $\pm$ s.d.)

	Solution III	Chloroform	conc. $\mu\text{g}/\mu\text{L}$	OD260/280
⑤	5sec	5sec	4.13 ± 0.23	1.91 ± 0.03
⑥	10sec	10sec	4.24 ± 0.02	1.89 ± 0.01
⑦	15sec	15sec	4.37 ± 0.14	1.89 ± 0.03

Table 4 Concentrations and qualities of isolated plasmid DNA with various mixing conditions of solution III and chloroform by Vortex mixer.

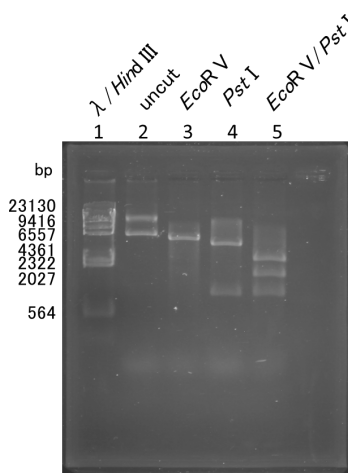
(Solution I : II : III=1 : 1 : 1.5, n=3, mean $\pm$ s.d.)

	Solution III	Chloroform	conc. $\mu\text{g}/\mu\text{L}$	OD260/280
⑤'	5sec	5sec	3.09 ± 0.40	1.96 ± 0.01
⑥'	10sec	10sec	3.57 ± 0.30	1.94 ± 0.03
⑦'	15sec	15sec	3.32 ± 0.29	1.96 ± 0.01



⑤ Solution III : Vortex 5sec
Chloroform : Vortex 5sec

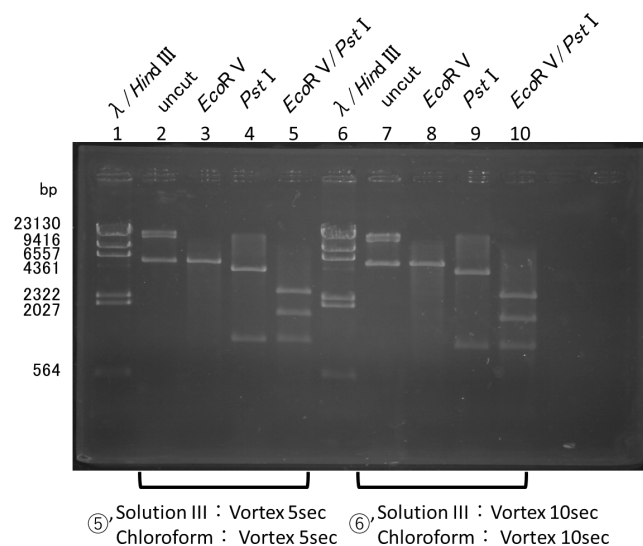
⑥ Solution III : Vortex 10sec
Chloroform : Vortex 10sec



⑦ Solution III : Vortex 15sec
Chloroform : Vortex 15sec

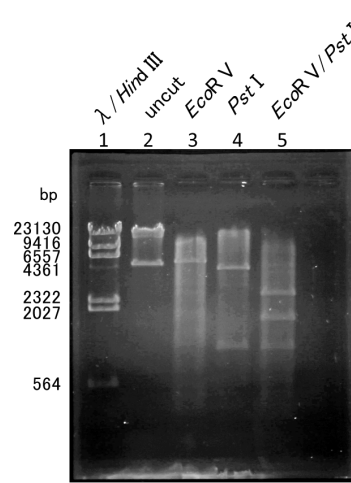
Fig. 4 Quality check of plasmid DNA by restriction enzyme reaction and agarose gel electrophoresis.

(Vortex mixer, Solution I : II : III=1 : 2 : 1.5)



⑤ Solution III : Vortex 5sec
Chloroform : Vortex 5sec

⑥ Solution III : Vortex 10sec
Chloroform : Vortex 10sec



⑦ Solution III : Vortex 15sec
Chloroform : Vortex 15sec

Fig. 5 Quality check of plasmid DNA by restriction enzyme reaction and agarose gel electrophoresis.

(Vortex mixer, Solution I : II : III=1 : 1 : 1.5)

4. 考察

今回のアルカリ法によるプラスミド DNA の精製時において検討した条件の中では、Table 1 の結果では今回の検討条件間で精製純度に差が見られることは無かったものの、Fig. 2 の結果から、最も精製度の高いプラスミド DNA を生成できる組み合わせは Solution III とクロロホルムのどちらも穏やかに混和する方法であることが判明した。なお、Table 1 の結果より、①から④全ての最終精製標品でタンパク質の混入は見られていない。また Fig. 2 のサンプル②③④の泳動像から、制限酵素の有無によってスメアの状態に変化が見られることが分かる。従って、このスメアの要因は大腸菌ゲノム DNA の混入であり、このゲノム DNA が制限酵素消化によって更なる断片化を受けて泳動像上のスメアとなったと考察される。それに加え、①は当然のことながら、②③④でもプラスミド DNA が制限酵素消化を受けており、①から④全てのサン

ブルで制限酵素消化が問題なく進行していることが分かる。このことから、①から④全ての最終精製標品において有機溶媒等の残存混入は無いものと考えられる。

サンプル②③④で生じた大腸菌ゲノム DNA 混入の原因を、アルカリ法によるプラスミド精製における Solution III とクロロホルムの役割という観点から考察する。Solution III は、その溶液に含まれる酢酸カリウムと氷酢酸によって緩衝作用を有している。その作用を通じて Solution III は Solution II によって大きく塩基性に傾いた実験試料の pH を中和する役割を担っている。また Solution III 中の酢酸カリウムは Solution II に含まれている SDS と反応して不溶性のドデシル硫酸カリウム(PDS)を生成せしめる。この急激な中和作用と PDS の生成を通じ、Solution II 中の NaOH の作用で変性した大腸菌のタンパク質やゲノム DNA が Solution III の添加によって不溶性の不溶性画分に移行する。一方でクロロホルムは上述した不溶性画分の中に取り込まれている水分子を水層側に移動させ、プラスミド DNA などを含む水層、タンパク質などの不溶物の層、クロロホルムの有機層の三層に明確に分離する働きを担っている。断片化した DNA の混入を起こす原因は、Solution III で生成された不溶物に対して物理的に強い衝撃を加えることで不溶物の形が崩れてしまい、その際に本来なら不溶性画分に分離されるはずの大腸菌ゲノム DNA が断片化してしまうことだと考えられる。断片化した DNA は、その後の精製作業の過程でも取り除かれることなく、最終精製標品の中に混入してしまう。言いかたをかえれば、クロロホルムの添加自体がスメアの原因と関係しているわけではなく、Solution III を加えた後に生じる不溶性画分に強い衝撃を与える混和方法をしてしまうことが、大腸菌ゲノム DNA 混入の原因になってしまうと考えられる。

今回の実験では、加える Solution II の容量についても検討を加えた。いわゆる常法では Solution I, II, III の容量比を 1:2:1.5 として順次添加していくが、この容量比を 1:1:1.5 としても十分にプラスミド DNA が精製されることが Fig. 3 より示唆される。一方でこの容量比とした場合、Solution III の混和の条件によってゲノム DNA 混入の度合いが大きく変化することが判明した。Solution II は強塩基性の試薬であり、Solution III はそれを中和する作用がある。そのため、Solution II を加える容量が相対的に少なければ、Solution III を加えた際の中和反応がより速やかに進行すると思いきや、今回はその予想を覆す結果となった。この結果について、現時点では様々な要因を想定している。まず、反応系の最終的な液量がゲノム DNA の混入量に影響を及ぼしたことが考えられる。Solution III を加えたときに生じる不溶性画分は、時として反応溶液全体の速やかな混和を妨げる要因となりうる。最終的な液量が十分にあるほうが、液体全体にわたる中和反応を速やかに進行させ、結果としてゲノム DNA の混入を抑制しているという考え方も出来る。次に考えられることとして、加える Solution II の量を変化させたことにより、ゲノム DNA の変性が不十分となっていた可能性がある。ゲノム DNA の変性が不十分であった場合は、Solution III を加えてもゲノム DNA が不溶性画分に移行

せず、プラスミド DNA と共に回収されてしまう。ただし、この場合は穏やかな条件で混和した場合でも一定量のゲノム DNA 混入が起これると予想される。これらの事柄を明らかにするためには、Solution II を加えた時点での pH 変化や Solution III を加えて中和させた際の pH 変化を逐一確認するなどの精査が必要である。また、プラスミド DNA を精製する際の菌体量や用いる容器の形状によっても実験結果が異なってくるかもしれない。これらの要因を総合的に条件検討する必要が生じてくる。

Solution III を加えた後の混合にはボルテックスミキサーを使用せよとする実験書⁷⁾もあるが、Fig. 5 が示すように、時と場合によってはボルテックスミキサーによる過度な攪拌が大腸菌ゲノム DNA の混入の原因となりうることを示唆された。ただし Fig. 5 は Solution I, II, III の容量比を 1:1:1.5 とした場合の結果である。いわゆる常法における Solution I, II, III の容量比 (1:2:1.5) で実験を行った Fig. 4 の場合では、同じようにボルテックスミキサーによる攪拌を行ってもわずかにスメアが確認されるのみであり、ゲノム DNA の顕著な混入は確認されなかった。これも意外なことに、手作業で行う溶液混和よりもボルテックスミキサーによる溶液混和のほうが穏やかな条件であることが今回の実験によって示唆されるのである。ただし、ボルテックスミキサーを用いて精製したサンプルでは、わずかではあるが電気泳動時にスメアが確認され、今回の実験では加える Solution II の容量比に関わらず手作業で穏やかに混和して精製したプラスミドの品質が一番高いという結果となった。アルカリ法によるプラスミド精製時にこの程度のゲノム DNA の混入は無視できるものとして、誰でも確実に同程度の混和が可能な手順としてボルテックスミキサーを用いる手法があるのかもしれない。ただしこの場合も、実験に用いる容器によって条件が左右される可能性は否定できない。誰もが安定的に作業できる実験系の確立を目的とした場合、引き続き今後の検討課題であると考えられる。

謝辞

実験を遂行するにあたり、議論に参加してくださいました高橋凌真さんに感謝申し上げます。また、日々の実験に際して共に励まし合ってくださいました木村優未さんに心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) H.C. Birnboim and J. Doly: A rapid alkaline extraction procedure for screening recombinant plasmid DNA. *Nucleic Acids Res.* 7, pp.1513-1523 (1979).
- 2) 高木 昌宏：いまさら聞けないプラスミド抽出法の原理, *生物工学会誌*, Vol.89, No.9, pp.544-548 (2011).
- 3) J.F. Sambrook et al. *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, ISBN978-0879695774.
- 4) 豊島久真男, 山本雅 監修, 東京大学医科学研究所 制癌研究部編：新細胞工学実験プロトコール, 秀潤

- 社, ISBN4879621250.
- 5) 日本生化学会 編: 基礎生化学実験法 4 核酸・遺伝子実験 2 応用編, 東京科学同人, ISBN9784807911844.
- 6) 村松正実, 岡村博人 編: 遺伝子工学ハンドブック, 羊土社, ISBN494639866X.
- 7) 中山広樹, 西方敬人: バイオ実験イラストレイテッド②遺伝子解析の基礎, 秀潤社, ISBN4879621498.
- 8) QIAGEN® Plasmid Purification Handbook, HB-1193-005
- 9) 柴山 祥枝: 核酸 (DNA・RNA) の定量法 ―吸光度分析法と蛍光法を中心に―, ぶんせき, Vol.523, pp.268-274 (2018).

新任教員紹介

工学部・講師・新井啓之

略歴

1998.3 東海大学工学部航空宇宙学科 卒業
2000.3 東海大学大学院工学研究科航空宇宙学専攻 卒業
2003.3 東海大学大学院工学研究科航空宇宙学専攻 満期退学
2003.4-2004.3 東海大学総合情報センター非常勤助手
2004.4-2022.3 東海大学理系教育センター非常勤講師
2017.4-2019.3 東海大学工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻 臨時職員
2020.4-2022.3 東海大学工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻 臨時職員
2023.4 現職



担当科目

プログラミング, 情報処理実習, 航空宇宙学実験 1・2, ドローン操縦実習

研究活動内容

1. はじめに

航空工学分野を中心に流体力学や飛行力学に関する研究テーマや、近年、高効率な単結晶シリコンセル、ブラシレスモータやリチウムポリマー電池の活用により実現可能となった長時間飛行が可能なソーラー無人飛行機開発に関するテーマを手掛けている。

2. プロペラ表面の流れ測定¹⁾

2.1 概要

プロペラ駆動による推進は、低速での推進機構としては極めて効率がよく、Reynolds 数が 10^4 から 10^6 前半の領域においては、推進機構の主体として活躍している。

ブレードの設計に於いて、ブレード表面での流れ、及びプロペラ後流、すなわち縮流、翼端渦、渦層の移動がその性能を決定する上で極めて重要である。本実験では、低レイノルズ数領域に適した断面翼型を有するプロペラブレードに対して、回転中のブレード周りの流れに関する計測として、ブレード表面の圧力測定、タフトによるブレード表面の流向調査を行った。

低レイノルズ数領域下でのブレード形状は Adkins-Liebeck による最適形状設計法を使用し、Reynolds 数 10^5 の条件でブレード形状を決定し Fig.1 のブレードを製作した。

東海大学工学部航空宇宙学科の低速風洞試験設備を使用

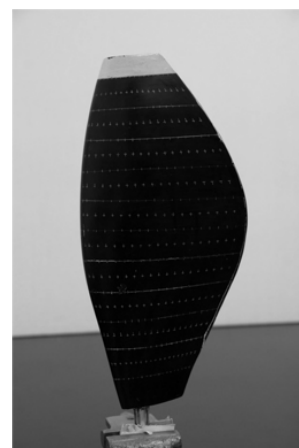


Fig. 1 Propeller blade for low Reynolds flow.

し、6 分力天秤に駆動系一式を取り付け、推力を、プロペラと AC モータの間に設置したトルクメータを用いてトルクを測定した。

また、プロペラ表面に等間隔に空けた圧力測定孔（1 ブレードあたり 319 孔）を通してプロペラ駆動中の表面圧力分布の測定も行った。プロペラ回転下で測定された圧力は遠心力の影響を受けるため、測定後に遠心力による圧力寄与分を差し引いている。

2.2 圧力測定

Fig. 2 より、ブレード端ほど翼弦方向に沿った圧力変化は大きいことが分かる。また、ブレード端の後縁付近では、局所的に等高線の粗密が変化している箇所が見られ、流れの剥離と再付着が小規模で発生するショートバブル²⁾ の

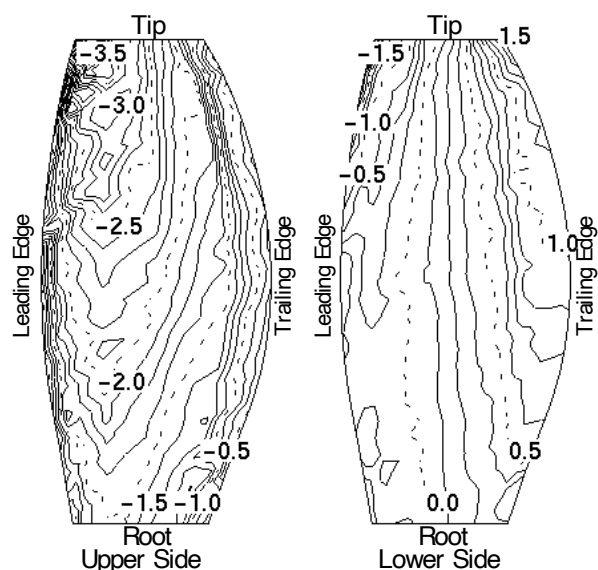


Fig. 2 Pressure distribution by direct measurement.

発生が考えられ、等高線が粗になっている部分では、剥離後に死水領域が存在し、また等高線が密になっている部分の直後では再付着していると考えられる。

2.3 タフトによる流れ

ブレード表面にタフトを取り付け回転中のタフトの様子をストロボ撮影した図 d を元に、遠心力によるタフトの曲げを考慮し、表面での流れの向きを評価した。設計値よりも効率が低下する要因として、ショートバブルなど 3 次元の流体現象の発生が確認できた。

3. ソーラー無人飛行機

3.1 機体開発

東海大学とサウジアラビア・キングアブドゥルアズィーズ大学（以下 KAU）との共同研究プロジェクト d では、ソーラー無人飛行機 SunFalcon1（翼幅 3.7m, 全長 3.2m）及び SunFalcon2（翼幅 7.6m, 全長 3.0m）について、概念設計³⁾や詳細設計等の機体設計を担当し、空力、構造、駆動系および発電系など全般に亘る幅広い知見を得た。



Fig.3 Solar UAV "SunFalcon1".

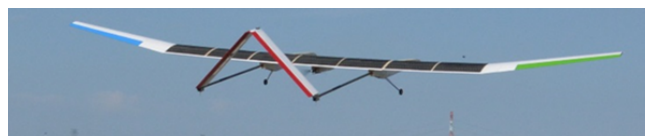


Fig.4 Solar UAV "SunFalcon2".

また、2017 年度～2019 年度の NEDO プロジェクト「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」でのソーラー無人機開発（主体：スカパーJSAT）では再委託先の JAXA, NICT と共に東海大学の一人として、ソーラー無人飛行機の概念設計や基本設計等の機体設計（空力、材料、構造、駆動系および発電系など全般）を担当した。

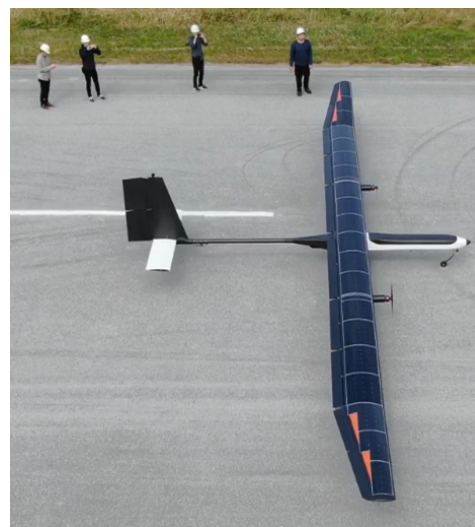


Fig. 5 Solar UAV "SolarPhoenix".

3.2 エネルギーシミュレーション

ソーラー無人飛行機の開発の元となる概念設計では、機体構造や重量の推算と併せて、エネルギー収支の算定が重要である。直射光・散乱光分離型の日射量モデルを用い、セル温度やフィルムによる反射モデルと、機体の姿勢角変化を組み合わせることにより、発電と消費電力に関するエネルギーシミュレーション⁴⁾を構築した。

参考文献

- 1) 新井啓之 and 平岡克己: 低レイノルズ数流れでのプロペラブレード表面の圧力とタフト測定に基づく流体解析, 航空宇宙学会論文集 Vol. 57, No.662, pp.98-109 (2009).
- 2) 李家賢一: 翼型上に生ずる層流剥離泡, ながれ, Vol. 22, pp.15-22(2003).
- 3) Nobuyuki ARAI and Katsumi HIRAOKA: Conceptual Design of Solar UAV for Long Endurance, 29th International Congress of the Aeronautical Sciences(2014).
- 4) 山下善基, 新井啓之, 佐川耕平 and 木村英樹: 太陽電池を搭載した固定翼無人航空機の姿勢を考慮した発電電力シミュレーション, 2021 年電気学会産業応用部門大会前刷り集(2021).

東海大学工学部紀要委員会

委員長	高橋哲夫		
委員	稲田喜信	鈴木昌和	
	奥山淳	成田正敬	
	磯村雅夫	菊川久夫	
	浅香隆		

EDITORIAL COMMITTEE OF PROCEEDINGS OF THE SCHOOL OF ENGINEERING OF TOKAI UNIVERSITY

Chairman	Tetsuo TAKAHASHI	
Members	Yoshinobu INADA	Masakazu SUZUKI
	Atsushi OKUYAMA	Takayoshi NARITA
	Masao ISOMURA	Hisao KIKUGAWA
	Takashi ASAKA	

本紀要は、学術刊行誌である。掲載可と判定された原著論文で工学部紀要委員会で査読・審査を受けている。

東海大学紀要工学部

Vol. 63. No. 1 2023

2023年9月30日

発行者 東海大学工学部

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4丁目1番1号
School of Engineering Tokai University
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa-ken.
Japan
