

東海大学紀要

工 学 部

Vol. 65, No. 1 2025

目次

論文

X線反射率法によるアモルファス GeS ₂ への銀のフォトリソグラフィの解析と拡散モデルの検討	原 竜弥・村上 佳久・坂口 佳史・渋谷 猛久	1
酸化タングステンを光触媒とした人工光合成システムの作製	宮本 承海・渋谷 猛久	9
慣性静電閉じ込めにおける電子ビームおよびイオンビーム生成	内海 倫明・羅 氷決・進藤 春雄	15
沿岸地域を対象とした地層処分の地下水環境特性の影響評価	高橋 正太朗・若杉 圭一郎	21
地層処分の断層シナリオを対象としたニューラルネットワークによる核種移行解析手法の構築	木賊 尋也・若杉 圭一郎	29
制御用音源を境界壁に設置した開放窓通過騒音の能動制御システム	江尻 直樹・森下 達哉	37
一方連続繊維プリプレグを用いた薄肉円筒殻 CFRP 部材のアンギュラプライによる衝撃吸収性能への影響	大竹 聖・松本 尚也・笠松 忍・呉 文宝・小林 一景・黒田 純平・加藤 英晃・成田 正敬	43
ディファレンシャルギヤを用いたハイブリッド車両用動力分配システムに関する基礎研究	劉 峰・加藤 英晃・成田 正敬	49
アクティブシートサスペンションによる超小型モビリティの乗り心地改善（マスキングの位相の影響に関する検討）	落合 真輝・勝間田 龍翔・王 鼎・笠松 忍・呉 文宝・小林 一景・黒田 純平・池田 圭吾・遠藤 文人・加藤 英晃・成田 正敬	55
羽田空港における着陸順序と滑走路選択の最適化による滑走路処理容量の拡大	齋藤 和哉・鈴木 昌和	61

2025 年度 新任教員研究紹介

生物工学科	川上 隆史	71
生物工学科	川本 諭一郎	73
生物工学科	島 亜衣	75
医工学科	小島 萌	77
電気電子工学科	モハメッド シュルズ ミヤ	79
機械システム工学科	劉 曉俊	81
機械工学科	関本 諭志	83

PROCEEDINGS
OF THE
SCHOOL OF ENGINEERING
OF
TOKAI UNIVERSITY
CONTENTS

VOL. 65, No. 1 2025

Technical Papers

Analysis and Diffusion Model of Silver Photodoping into Amorphous Germanium Sulfide Film by X-ray Reflectometry	
..... Tatsuya HARA, Yoshihisa MURAKAMI, Yoshifumi SAKAGUCHI and Takehisa SHIBUYA	1
Artificial Photosynthesis System Using Tungsten Oxide as a Photocatalyst	
..... Tsugumi MIYAMOTO and Takehisa SHIBUYA	7
Electron-Beam and Ion-Beam Generation on Inertial Electrostatic Confinement	
..... Michiaki UTSUMI Luo BINGYANG and Haruo SHINDO	15
Impact Assessment of Groundwater Environmental Characteristics of Geological Disposal for Coastal Areas	
..... Shotaro TAKAHASHI and Keiichiro WAKASUGI	21
Development of Radionuclide Migration Analysis in Fault Scenarios for Geological Disposal by Neural Network Approach	
..... Hiroya TOKUSA and Keiichiro WAKASUGI	29
Active Noise Control System for Noise Passing through Open Windows with Secondary Sound Sources Installed in the Boundary Walls	
..... Naoki EJIRI and Tatsuya MORISHITA	37
A Study on the Effect of Angle Plies on the Impact Absorption Performance of Thin-Walled Cylindrical-Shell CFRP Members Using Unidirectional Continuous Fiber Prepregs	
..... Hijiri OTAKE, Naoya MATSUMOTO, Shinobu KASAMATU, Wenbao WU, Ikkei KOBAYASHI, Junpei KURODA, Hideaki KATO and Takayoshi NARITA	43
A Basic Study on a Power Distribution System Using Differential Gears for Hybrid Vehicles	
..... Feng LIU, Hideaki KATO and Takayoshi NARITA	49
Improvement of Ride Comfort of Ultra-Compact Mobility Vehicles by Active Seat Suspension (Consideration of the Effect of Masker Phase)	
..... Masaki OCHIAI, Ryoga KATSUMATA, Ding WANG, Shinobu KASAMATSU, Wu WENBAO, Ikkei KOBAYASHI, Junpei KURODA, Keigo IKEDA, Endo AYATO Hideaki KATO and Takayoshi NARITA	55
Expanding Runway Capacity at Haneda Airport by Optimizing Landing Order and Runway Selection	
..... Kazuya SAITO and Masakazu SUZUKI	61

Introduction of research activities of new faculty members (2025)

Department of Bioengineering	 Takashi KAWAKAMI	71
Department of Bioengineering	 Yuichiro KAWAMOTO	73
Department of Bioengineering	 Ai SHIMA	75
Department of Medical Engineering	 Moe Kojima	77
Department of Electrical and Electronic Engineering	 Md. Suruz MIAN	79
Department of Mechanical Systems Engineering	 Xiaojun LIU	81
Department of Mechanical Engineering	 Satoshi SEKIMOTO	83

X線反射率法によるアモルファス GeS₂ への 銀のフォトドーピングの解析と拡散モデルの検討

原 竜弥^{*1} 村上 佳久^{*2}, 坂口 佳史^{*3}, 渋谷 猛久^{*4}

Analysis and Diffusion Model of Silver Photodoping into Amorphous Germanium Sulfide Film by X-ray Reflectometry

by

Tatsuya HARA^{*1}, Yoshihisa MURAKAMI^{*2}, Yoshifumi SAKAGUCHI^{*3} and Takehisa SHIBUYA^{*4}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jun. 20, 2025)

Abstract

The phenomenon in which metal undergoes anomalous diffusion into an amorphous material upon irradiation with light near the absorption edge of a chalcogenide in a bilayer film consisting of an amorphous chalcogenide and a metal is known as the photodoping effect. The layer in which the metal has diffused shows changes in optical reflectance. In this study, to investigate the influence of the film interface, we fabricated samples using three different deposition methods. Photodoping processes were investigated by X-ray reflectivity. As a result, layers that promote X-ray scattering and the formation of surface oxide layers were confirmed, and the diffusion process of silver at the buried interface was elucidated.

Keywords: Silver photodoping, Amorphous chalcogenide, Germanium disulfide, X-ray reflectivity

1. まえがき

GeS₂ 非晶質カルコゲナイド(以後 a-Ch)薄膜と金属との二層膜にカルコゲナイドの吸収端近傍の光を照射することで金属が非晶質中へ異常拡散する現象のことをフォトドーピング現象という¹⁾。光を照射することによって金属がドーブされた部分は光反射率が変化する。これを応用して、光学素子や光学的情報記録への応用が期待されている。これまでに、この現象を利用し、レーザーを用いた2光束干渉による回折格子や、レーザー再生ホログラムを製作してきた^{2,3)}。光照射により金属が拡散したドーブ層では光学的、電気的物性の変化が著しく、これらの性質を利用するには再現性、安定性といった多くの問題を抱えている。そのため、フォトドーピングプロセスを解明する必要がある。

現在、フォトドーピングメカニズムの解明にあたって、銀/硫化ゲルマニウムのX線反射率(以後XRR)測定や、中性子反射率(以後NR)のその場測定が行われており、少しずつ解明が進んできている⁴⁻⁸⁾。これらの測定からAg膜、GeS₂膜、反応(reaction)膜、表面層などの、厚みはÅオーダーで、また膜面のラフネス、膜の散乱長密度等の

パラメータの導出が可能になる。これらを利用することにより、Ag、反応膜の膜厚方向の分布や、光照射時間に対する変化を明らかにすることができる。

フォトドーピングは、銀/二硫化ゲルマニウム(以後Ag/GeS₂)界面における光反応が引き金となっていると考えられている⁹⁾。そのため、界面の状態を観察することが重要である。

本研究では2つの膜の界面の状態の違いによる銀の拡散の影響を調べるために3種類の方法で成膜を行った。GeS₂と銀を用いた二層膜試料を作製し、X線反射率スペクトルを測定し、解析ソフトを用いて銀の拡散過程の解明を試みたので報告する。

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(SGC-10M, 昭和真空(株))を用いて、GeS₂およびAgの薄膜を作製した。蒸着材料としては、GeS₂の純度99.99%の粉末(高純度化学研究所(株))、Agは純度99.99%の固体物質(フルウチ化学(株))を使用した。真空度は 8.0×10^{-4} Pa程度である。膜厚、成膜速度は水晶振動子型膜厚モニター(Sycon Instruments)を使用した。下地基板にはSiウエハを用いた。成膜速度が0.10 n/sとなるように調整した。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、

*1 工学研究科電気電子工学専攻 修士課程

*2 筑波技術大学

*3 総合科学研究機構(CROSS)中性子科学センター
主任研究員

*4 理系教育センター 教授

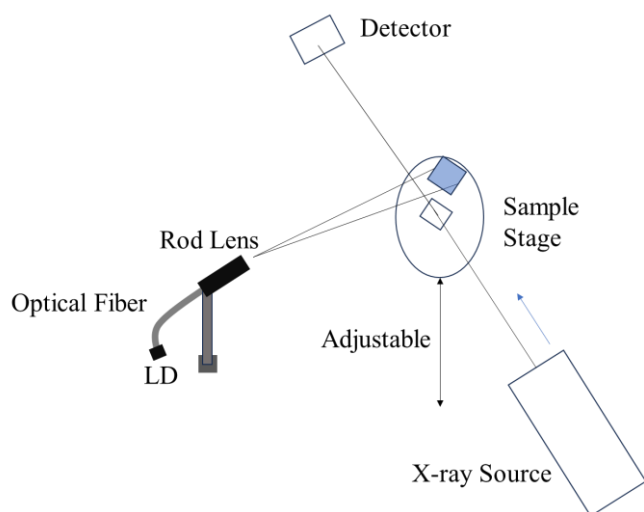


Fig. 1 Schematic diagram of X-ray reflectivity.

大気に戻さずアニール処理をしないものの計 3 種類である。これらの処理を行った GeS_2 膜に対して二層目の 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 時間静置した。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) アニール処理有りの試料

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 流しながら加熱処理を行った。室温からおおよそ 1 時間 30 分程度で 205°C に到達した。アニールの温度は GeS_2 のガラス転移温度以下であること、不純物が含まれるとガラス転移温度が下がることがあり、下がることも考慮してなおかつ可能な限り高い温度として 205°C に設定した。2 時間のアニールの後、室温になるまで自然冷却した。その後真空装置の中にセットし、二層目の Ag を成膜した。

(2) アニール処理無しの試料

(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) 連続成膜の試料

GeS_2 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 時間静置した後 Ag を成膜した。大気にさらされることなく 2 種類の膜を連続して成膜しているが、 GeS_2 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 線を物質表面に微小角度で入射させ、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、散乱長密度、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, $\text{K}\alpha$) 内にフォトドーピング用の波長 405 nm の半導体レーザー (VLM20-405D-80, アクティブレイ・サイエンティフィック (株)) (以後 LD)、光ファイバー、ロッドレンズ (RLQL80-1, 朝日分光 (株)) を設置した。X 線回折装置内の様子を Fig. 2, Fig. 3 に示す。レーザー光は周辺光量に差が出ないようにロッドレンズを用いて四角形に加工した。照射光強度は、約 $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$ であった。LD の照射領域は X 線の測定領域と重ならないように調整し、X 線の入射角度 $0.1\sim 1.5$ 度の範囲で X 線反射率測定を行った。

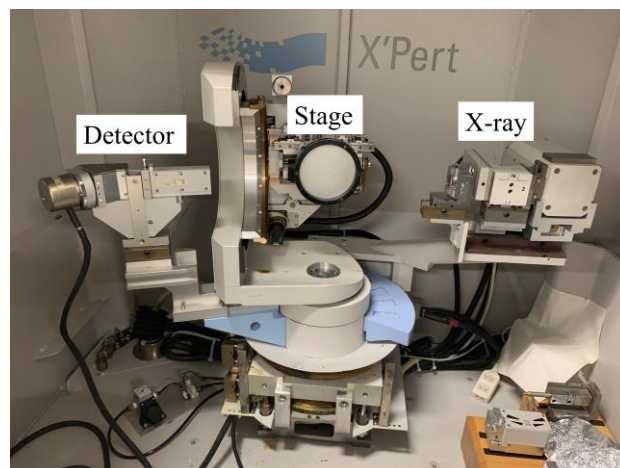


Fig. 2 Experimental setup of XRR for photodoping process.

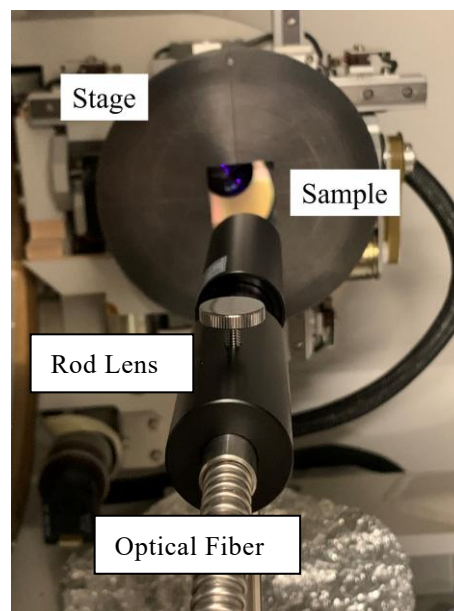


Fig. 3 Experimental setup of light irradiation system.

暗室下で試料と X 線源と X 線検出器の位置を調整し、光照射前の試料の XRR 測定を行った。試料をレーザー光照射領域に移動させ、フォトドーピングを進行させた。ここで設定した時間、光を照射しフォトドーピングを行った後、試料を測定領域に移動させ XRR 測定を行った。

この操作を繰り返し行うことで照射時間ごとの Ag のフォトドーピング過程を観測した。得られた XRR スペクトルと、1 回前に測定したスペクトルの間に大きな差が見られなくなるまで繰り返した。これまでの計測は反応初期においては 15 分間隔で XRR 計測を行ってきたが⁴⁾、SLD の変化が大きく、初期過程を観測できていなかったと考えられる。そのため本研究では、より短い時間間隔（照射時間 5 分毎）での測定を行い、フォトドーピングにおける Ag の拡散初期過程の観測を行った。照射時間の合計は最長で 120 分である。

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¹⁰⁾。モデル薄膜における散乱ベクトル(Q)と X 線反射率(R)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)等を求めることができる。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) アニール処理有りの試料

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. 4 に示す。フィッティングの精度を示す χ^2 は 0.020~0.044 程度であった。光照射 30 分程度までは大きなフリンジがあり、40 分以降は小さなフリンジのみとなったことがわかる。

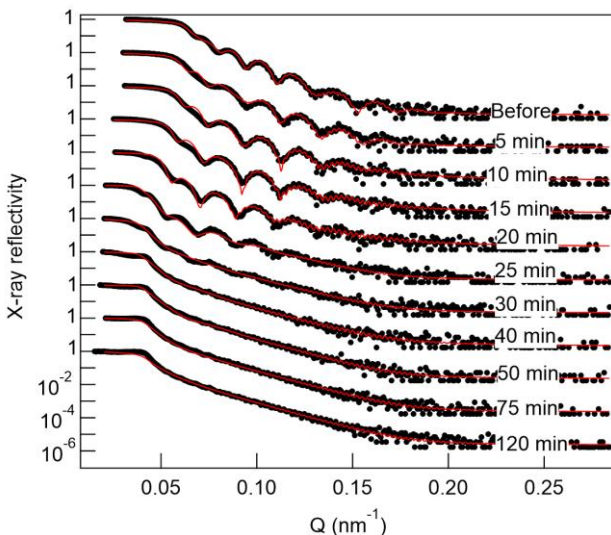


Fig. 4 XRR spectra and model fitting curves (annealed sample).

(2) アニール処理無しの試料

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. 5 に示す。フィッティングの精度を示す χ^2 は

0.021~0.028 程度であった。光照射 15 分程度までは大きなフリンジがあり、20 分以降は小さなフリンジのみとなったことがわかる。(2)の試料と比較すると、大きなフリンジがなくなるまでの時間が短くなったことがわかる。

(3) 連続成膜の試料

連続成膜の試料における 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. 6 に示す。フィッティングの精度を示す χ^2 は 0.025~0.038 程度であった。光照射 10 分程度までは大きなフリンジがあり、15 分以降は小さなフリンジのみとなったことがわかる。(2), (3)の試料と比較すると、大きなフリンジがなくなるまでの時間が短くなったことが明らかである。

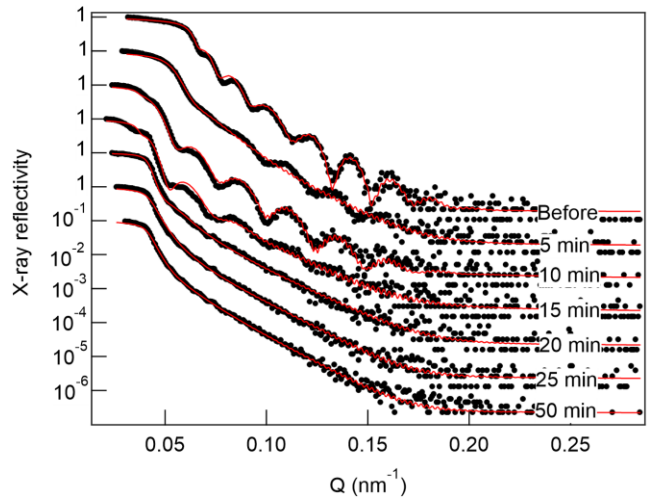


Fig. 5 XRR spectra and model fitting curves (non-annealed sample).

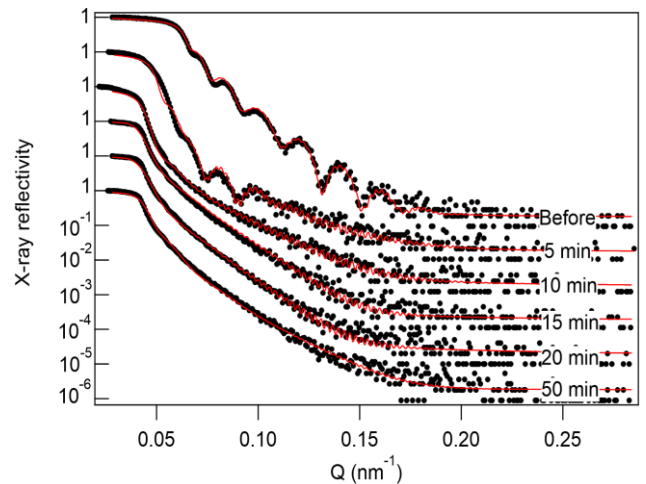


Fig. 6 XRR spectra and model fitting curves (non-annealed sample without atmospheric exposure).

3.2 光照射前試料の SLD プロファイル

光照射前のそれぞれの試料における SLD プロファイルを Fig. 7 に示す。Ag の SLD は $77 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ 程度で GeS₂ は $23 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ 程度、Si ウエハー上の SiO₂, Si はそれぞれ $19 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$, $20 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ 程度である。全ての試料に

において、光照射を行う前から Ag と GeS₂ の間に反応 (Reaction) 層が確認できた。アニール処理無しの試料と連続成膜の試料では、反応層がなだらかに形成されており、アニール処理有の試料では他 2 つの試料よりも反応層の膜厚が 3 nm 程度厚く、階段状(step-like)に反応層が形成されていることがわかった。反応層の厚さはアニール処理無しの試料と連続成膜の試料では 3.6 nm 程度、アニール処理有りの試料では 7.4 nm 程度であった。

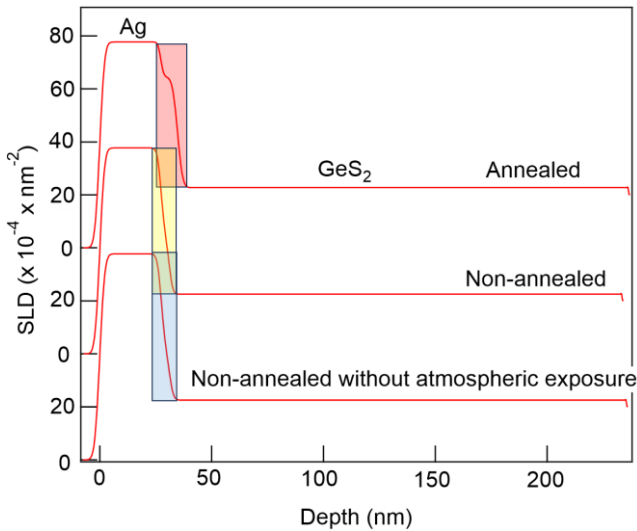


Fig. 7 SLD profiles of samples before the light exposure produced by different fabrication processes.

3.3 光照射時における 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. 8~10 に示す。光照射は Ag 側 (グラフ左側) から GeS₂ 側 (グラフ右側) に向けて行った。また、アニール処理無しの試料と連続成膜の試料の SLD はそれぞれ $44 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$, $42 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ であった。アニール処理有りの試料は $65 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ と非常に高く、銀濃度の高い反応層であることがわかった。また、全てのサンプルにおいて、X 線の散乱を助長する Mid 層が確認され、十分に光を照射すると表面酸化層が形成されたことが確認された。

(1) アニール処理有りの試料

アニール処理有りの試料のそれぞれの膜厚の変化を Fig. 11 に示す。Fig. 8 の SLD プロファイルから光照射を続けていくと step-like を保ちながら銀の膜厚が消失していくことがわかる。光照射前は Reaction 層の SLD は非常に高かったが、光照射時間の経過に伴って減少した。GeS₂ の膜厚と SLD は増加していった。光照射前は Ag の膜厚は 27 nm 程度存在していたが、光照射 5 分後には純粋な Ag 膜は消失した。光照射を行うと純粋な Ag 膜は SLD の値が比較的高い銀濃度の高い反応層 (Reaction2) と、それよりも少し SLD の値が低く銀濃度の低い反応層 (Reaction) に別れたが、光照射 25 分後には Reaction 層と Reaction2 層の SLD がほぼ一致したため、Reaction 層にまとめた。光照射 20~75 分の間、Mid 層が形成されたことがわかった。また、光を過剰に照射すると、表面酸化

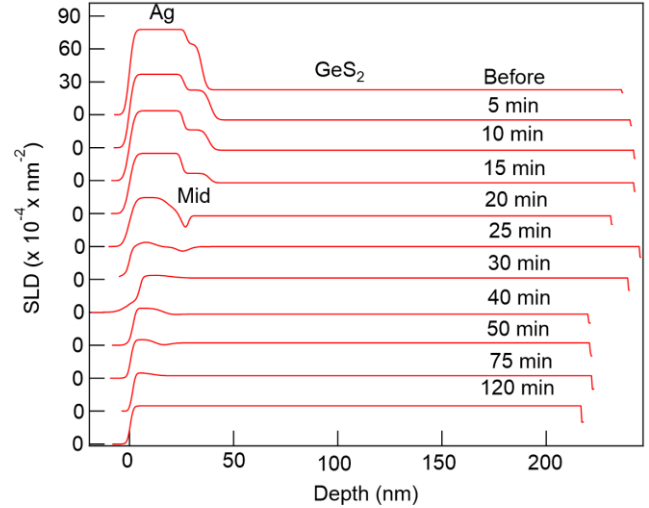


Fig. 8 SLD spatial distribution versus exposure time (annealed sample).

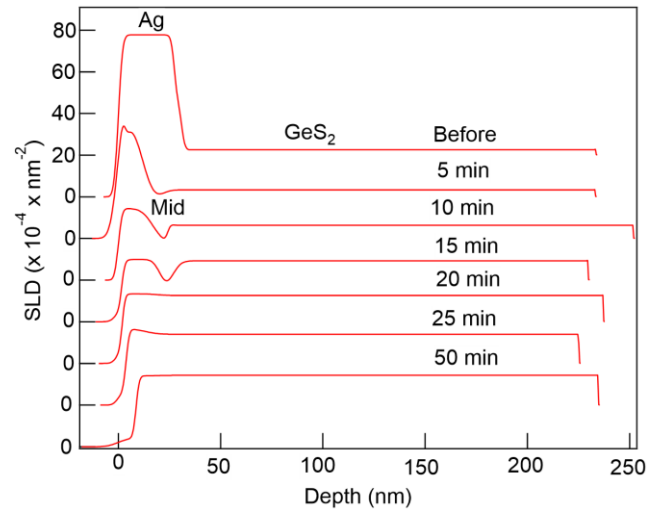


Fig. 9 SLD spatial distribution versus exposure time (non-annealed sample).

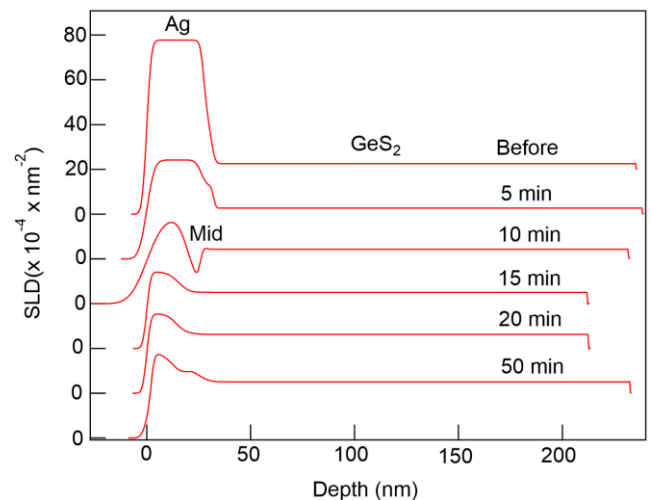


Fig. 10 SLD spatial distribution versus exposure time (non-annealed sample without atmospheric exposure)

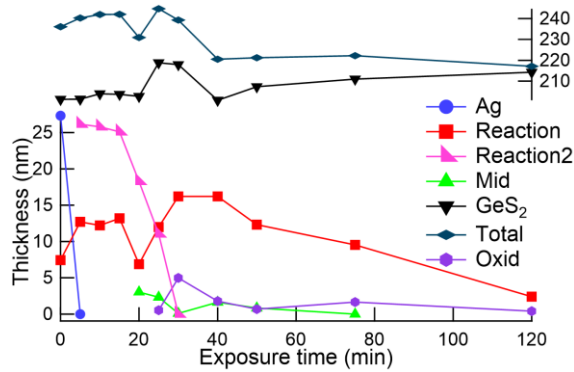


Fig. 11 Film thickness versus exposure time (annealed sample).

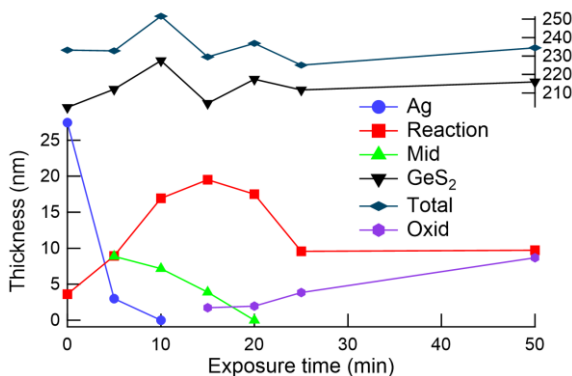


Fig. 12 Film thickness versus exposure time (non-annealed sample).

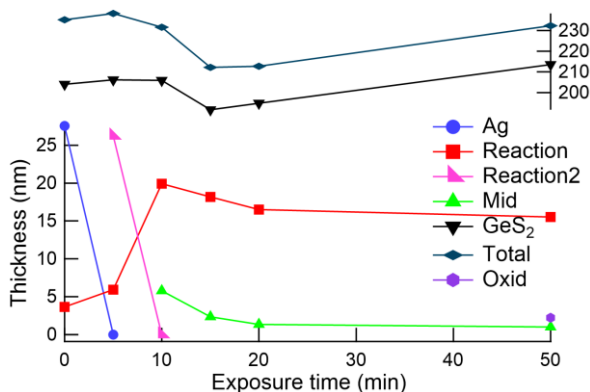


Fig. 13 Film thickness versus exposure time (non-annealed sample without atmospheric exposure).

層が形成され、Reaction層とGeS₂層のSLDがほぼ一致した。

(2) アニール処理無しの試料

アニール処理無しの試料についてそれぞれの膜厚の変化をFig. 12に示す。光照射前の銀の膜厚は27 nm程度存在したが、光照射5分後には3 nm程度、光照射10分後には完全に消失した。Reaction層の膜厚はAgの消失に伴い、増加した。また、Fig. 12の光照射5~15分中はSLDの値が低いMid層が形成された。光照射を進めると、GeS₂のSLDは増加する一方、反応層のSLDは減少していき、最終的にはほぼ一致し、一層となった。また、光照射15

分後には表面酸化層が形成されたことがわかった。

(3) 連続成膜の試料

GeS₂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. 13に示す。アニール処理無しの試料同様、光照射と共に、Agの膜厚が減少していき、光照射5分後には純粋な表面のAg膜は消失し、Reaction2層とReaction層に分裂した。Ag膜が消失する一方、Reaction層とGeS₂の膜厚、SLDは増加し、その後、Reaction層のSLDは低下した。SLDプロファイルから、光照射と共にReaction層のSLDが減少し、光照射10~50分の間Mid層が形成されたことが確認できた。十分に光を照射すると表面酸化層が形成され、Reaction層とGeS₂層のSLDが一致すると思われたが、最終的には一致しなかった。

4. 考察

4.1 試料の膜構造

試料はAgとGeS₂のみで成膜を行ったが、光照射を行う前から反応層の形成が確認された。これは銀を成膜する過程において、GeS₂に付着する際の銀粒子の持っているエネルギーにより、GeS₂表面近傍に拡散し、Reaction層を形成したと考えられる。また、アニール処理有りの試料のみ光照射前のReaction層のSLDが $65 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ と非常に高く、銀濃度の高い反応層だった。これは、熱処理を行ったことによってGeとSの再結合が行われたために、GeS₂の中に上手く銀が入りこまないためだと考えている。

一方で、アニール処理無しの試料では、GeS₂のGe-Sのネットワークの再構築が行われていないため、未結合手が多く存在し、アニール処理有りの試料よりもAgの拡散反応がよいために光照射前のReaction層のSLDが $44 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ 、 $42 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$ と比較的低い値になったと考えている。

アニール処理有りの試料と連続成膜の試料では、Reaction2層の形成が確認された。アニール無しのサンプルにおいては、AgはReaction層からGeS₂層へと移動していくが、アニール処理有りの試料と連続成膜においては、反応の進みが遅いために、Reaction層へと移動せず、より銀濃度の高いReaction2層が形成され、そこからReaction層、GeS₂層へと移動すると考えている。

光照射を行うとAg/GeS₂の界面にSLDの値が低いMid層が形成されたと仮定した。以前の報告⁴⁾では、時間軸が長いこともあり、フォトドーピングの反応過程を十分に追うことができていなかった。そのため、Mid層の存在に至らず、本実験において初めてその存在を明らかにすることができた。このMid領域では、Agが反応によって拡散している途上にあり、界面内にSLDの不均質な構造が生成され、非鏡面反射を起こすことによって見かけ上、鏡面反射で観測されるSLDが減少していると考えている。

3種類の試料間においてMid層の形成される時間に差があった。これはAgが反応によって拡散している途上にあり、界面内にSLDの不均質な構造が生成されるため、反応度合いによって変化すると考えている。アニールし

たサンプルと連続成膜のサンプルにおいては、銀が入り込むのが遅いため、Mid 層の形成も遅くなったと考えている。一方で、アニール無しのサンプルにおいては、反応が進むのが早いために、Mid 層の形成も早くなったと考えている。

4.2 Ag のフォトドーピング

アモルファス GeS₂ の場合、三次元構造かつ正四面体型の構造を取り、Ge-S 結合と S-S 結合の 2 種類が存在する²⁾。光照射に伴い結合が切断され、S と Ag が結合すると考えられている。実際に、アニール処理有以外の試料において、銀の膜厚が減少するにつれて Reaction 層の膜厚と SLD は増加した。その後も光照射を続けると、Reaction 層の SLD は減少し、GeS₂ の SLD は増加した。アニール処理有の試料では、20 min の時に一度減少してしまっているが、Ag 層が消失した後や、Reaction2 層が減少するにつれて Reaction 層の膜厚と SLD が増加しているように見える。アニール処理有りの試料と無しの試料では、最終的に Reaction 層と GeS₂ 層の SLD がほぼ一致した層となったが、連続成膜の試料では光照射 50 分後の段階では一致しなかった。試料内の Ag を捕獲する空隙が飽和するとそれ以上銀の拡散が起きない可能性があるが、3 種類の試料において成膜時の GeS₂ と Ag の膜厚はほぼ等しく、銀が反応するための S の量が足りず、飽和してしまったとは考えにくい。現段階では光照射時間が 50 分では Ag が GeS₂ 膜全体に拡散するのには十分ではなかったと考えている。

光照射を行うと Mid 層が形成されたが、連続成膜の試料以外は途中で消失した。これは連続成膜の試料が未だに均一な層となっておらず、反応が途中段階にあると考ええると、Mid 層の仮定と矛盾しない。また、以前の報告同様に光照射に伴い、表面層が形成された⁴⁾。これは試料表面の Ag が GeS₂ 層に拡散していき、反応が進むと試料表面に GeS₂ が露出されてくるためだと考えている。GeS₂ が試料表面に現れるとバンドギャップに近い光を照射されることによって Ge-S 結合が切断され、空気中の酸素と結合した GeO₂ 層と考えている。実際に GeO₂ の SLD を計算から算出してみると、酸素が含まれると非常に低い値を取ることがわかり、解析結果と矛盾しなかった。

Reaction 層と GeS₂ 層の SLD がほぼ一致するまでの時間に差が見られた。Fig. 8 と Fig. 9 から、アニール処理有りの試料では 30 分程度、アニール処理無しの試料では 15 分程度、また、銀や銀濃度の高い膜厚の変化の様子にも差が生じている。これは熱処理を行ったことによる未結合手の数の差によるものだと考えている。アニール処理によって再結合が促されているために、未結合手が少なく、Ge-S、S-S の結合を切るために、より長い時間光照射を行う必要がある。未結合手の量の推定には ESR 測定を行い、実際に確認する必要があると考えている。

4.3 フォトドーピングの拡散モデル

Ag のフォトドーピングの拡散モデルについて Fig. 14 に示す。横軸は表面からの深さ、縦軸は銀濃度を示している。光照射前から Ag 蒸着の際に熱拡散の影響で

Reaction 層が形成される。光照射を行うと Ag 粒子が Reaction 層へと移動し、その後表面に存在していた純粋な Ag は消失する(First Process)。光照射をさらに続けると、Reaction 層内に取り込まれた Ag は GeS₂ 層に移動し、最終的には Ag 粒子が GeS₂ 膜内に均一に拡散する(Second Process)。このように Ag は二段階のプロセスでフォトドーピング反応が進行していると考えられる。

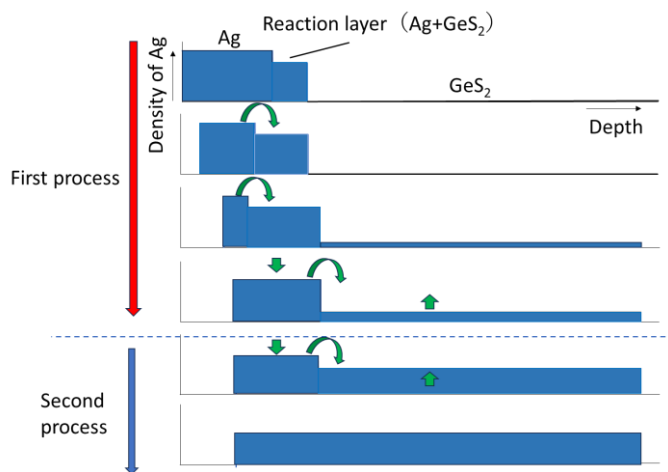


Fig. 14 Time evolution of the Ag concentration profile in the depth direction.

5. 結言

本研究では、真空蒸着装置を用いて成膜した 3 種類の試料に対し、アモルファス GeS₂ 膜への Ag のフォトドーピング過程を XRR スペクトル法により観測した。解析の時間軸を短く設定することで、従来⁴⁾よりも詳細に膜構造の時間変化を追うことが可能となり、Ag の拡散に伴う層構造の変化をより明瞭に捉えることができた。

解析結果からは、光照射前の段階においても Reaction 層の形成が確認され、この Reaction 層の SLD が処理条件に依存して変化することが明らかとなった。さらに、従来の解析では困難であったフィッティングに対して、新たに Mid 層を仮定することで精度が向上した。この Mid 層の存在は、Ag が反応途中で形成する一時的な構造と解釈でき、界面における SLD の不均質性と整合することから、物理的にも意味を持つ構造として妥当であると考えられる。

また、Ag の拡散が進行し、試料表面に GeS₂ 層が現れることで Ge と空気中の O₂ が反応し、GeO₂ の表面層が形成される可能性が示唆された。この表面酸化に関する考察を従来よりも踏み込んで行い、反応過程との関連性について新たな知見を得た。

以上より、本研究は Ag のフォトドーピングの初期過程の詳細な解析がなされ、Mid 層などの導入によってドーピング途中の膜の解析精度も向上した。さらに過剰な光照射により生成された表面層の推定を行うなど、Ag のフォトドーピングにおける様々な過程を明らかにすることが出来た。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり，薄膜の物性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線反射率測定データのデータ解析は2023年度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) 村上佳久，佐田康幸，若木守明：非晶質 GeS_2 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).
- 3) 渋谷猛久，村上佳久，近藤一則，若木守明：Ag フォトドーピングによるアモルファス GeS_2 膜へのホログラム画像記録，第 80 回応用物理学会秋季学術講演会，18a-E205-1, 2019.
- 4) 能登勇真，村上佳久，渋谷猛久：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，東海大学紀要工学部，Vol. 63, pp. 1-6 (2023).
- 5) 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 X-ray diffraction, *Phys. Status Solidi B* vol. 257, p. 2000178(2020).
- 6) 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).
- 7) Y. Sakaguchi, H. Asaoka, Y. Uozumi, K. Kondo, D. Yamazaki, K. Soyama, M. Ailavajhala, M. Mtkova: Silver photo-diffusion and photo-induced macroscopic surface deformation of $\text{Ge}_{33}\text{S}_{67}/\text{Ag}/\text{Si}$ substrate, *J. Appl. Phys.* Vol. 120, p. 055103 (2016).
- 8) 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).
- 9) A. V. Kolobov, S. R Elliott: Photodoping of amorphous chalcogenides by metal, *Adv. Phys.* Vol. 40, pp. 625 – 684 (1991).
- 10) A. Nelson: Co-refinement of multiple-contrast neutron / X-ray reflectivity data using MOTOFIT, *J. Appl. Crystallogr.* Vol. 39, pp. 273-276 (2006).

酸化タングステンを光触媒とした人工光合成システムの作製

宮本 承海^{*1} 渋谷 猛久^{*2}

Artificial Photosynthesis System Using Tungsten Oxide as a Photocatalyst

by

Tsugumi MIYAMOTO^{*1} and Takehisa SHIBUYA^{*2}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jul. 26, 2025)

Abstract

An artificial photosynthesis system was fabricated using a tungsten oxide photosynthesis electrode deposited by the paste method, with tungsten oxide powder as the starting material. Formic acid was detected using NMR from concentrated solution produced by carbon dioxide, water, and UV irradiation. The amount of formic acid produced was estimated to be 257 μmol after approximately 72 hours of UV irradiation at 6.25 mW/cm^2 , and the energy conversion efficiency from carbon dioxide to formic acid was 0.11%.

Keywords: WO_3 , GaN, Pt, Photocatalyst, Artificial photosynthesis system

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量の増加による地球温暖化問題が深刻化しており、これを解決できる技術の開発が早急に求められている。光触媒反応^{1,2)}をベースとした人工光合成技術は、太陽光を利用して二酸化炭素を有用な化学物質に変換する技術として注目されている。我々は窒化ガリウム(GaN)などの光触媒材料を用いて紫外光領域での活性を示してきたが³⁾、紫外光は太陽光全体のわずか数%しか占めておらず、実用化に向けては可視光領域での反応が求められる。本研究では酸化タングステン(WO_3)粉末から作製した光触媒電極の特性、ならびにこの電極を用いた人工光合成システムを評価することを目的とした。

2. 人工光合成の原理と光触媒材料のバンドギャップ

人工光合成は光触媒電極に光が当たると、光励起により電子と正孔が生じ、光触媒電極の表面では正孔によって水を酸素に変換する酸化反応が行われる。この時に生成した水素イオンと正孔の対である電子が暗反応側の金属触媒電極に移動し、ここで二酸化炭素(CO_2)と反応し有機物に変換される。

特に WO_3 の可視光応答性に着目し、 CO_2 還元反応への応用可能性を検討する。光触媒材料が応答できる光源の波長は、その材料のバンドギャップの値で決まるため、例えば 2.6 eV の WO_3 であると 517 nm 以下の光が有効である⁴⁾。一方、二酸化チタン(TiO_2)や GaN のバンドギャ

ップは広いため、可視域の光ではその効果が表れない。従来から光触媒の分野で活用されている TiO_2 はバンドギャップが 3.2 eV であり、387 nm より短い紫外領域の光で光触媒反応が誘起されることになる。しかしながらバンドギャップの上端が CO_2 還元電位に届いていない。また、GaN のバンドギャップは 3.4 eV で TiO_2 と近くにあるが、バンドギャップの上端は CO_2 の還元電位より高く、バンドギャップの下端は水の酸化電位よりも低いため、酸化・還元の両条件を満たす材料である。太陽光のスペクトルにおいて最も強い波長は約 500 nm であることから、可視光領域の 517 nm より短い領域の光に誘起され水の酸化電位に達している WO_3 と、酸化・還元電位の両方に達している GaN の特性を融合することで、より高効率な光触媒電極の作製が可能になると考えた。そこで本研究では、 WO_3 と GaN を混合し、可視光応答性と CO_2 還元性能の両立を図る光触媒の作製を試みた。

それとは別に、 WO_3 にプラチナ(Pt)を添加した試料も作製した。光触媒反応における電子の移動を促進し、二酸化炭素の還元反応を効率化するためである。 TiO_2 に Pt を添加することで CO_2 の還元反応が促進されることが報告されており⁵⁾、本研究では同様の効果を WO_3 系でも期待し、Pt を添加した。

3. 実験

3.1 光触媒電極の作製

光触媒電極を作製する方法として WO_3 ペーストをスクリーン法で金属電極に塗布した。乳鉢に酸化タングステン粉末(東京化成工業(株))0.73 g と分散媒として硝酸(富士フィルム和光製薬(株))を 0.27 ml、蒸留水を 0.6 ml 入れ、乳棒で 15 分間、細かく粉碎し、分散媒と混合させ酸化タ

^{*1} 工学研究科電気電子工学専攻 修士課程

^{*2} 理系教育センター 教授

ングステンペーストを作製した。基板となる電極材料は腐食耐性を考慮してニッケル(Ni)を使用した。Ni 基板上に 50 mm×50 mm の範囲に型枠を設置し、スクリーン印刷法にて塗布した。ペースト塗布後、100℃で 15 分の仮焼成の後 600℃で 30 分間の本焼成を行った。これをベースに GaN 粉末(高純度化学研究所(株))混合試料を GaN:WO₃=1:1, 1:3, 3:1 の比率で、Pt 添加試料を 1%と 5%でそれぞれ作製した。

3.2 紫外線光源の発光特性と光触媒効果

光照射には水銀ランプを光源とする紫外線照射装置(EXCECURE 3000, HOYA)を使用した。この紫外線照射装置の発光スペクトルを、小型分光器(CCS200, ThorLabs)を用いて測定した。測定結果を Fig. 1 に示す。作製した WO₃ 電極の光触媒としての効果をメチレンブルー水溶液中の退色性能から評価した。メチレンブルー溶液中にある光触媒に紫外光が照射されることによって酸化力が発生する。これによりメチレンブルーが分解され、照射時間の経過とともにメチレンブルー水溶液の吸光度が減少する。メチレンブルーの透過率は分光光度計(V-670, JASCO(株))で計測した。メチレンブルー水溶液の吸収波長である 664 nm の透過率から吸光度を算出した。

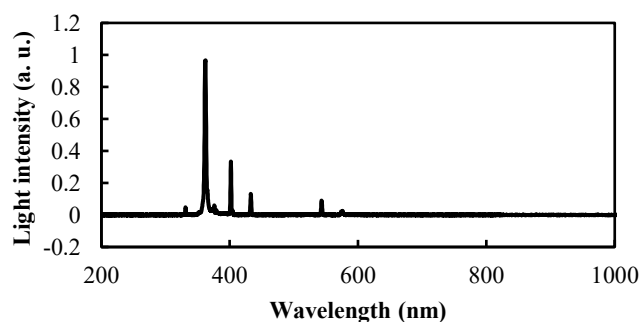


Fig. 1 Spectrum of hydrogen UV light source.

作製した光触媒電極を直径 50 mm のシャーレ底面に設置し、 3.0×10^{-4} mol/L の濃度のメチレンブルー水溶液を 20 ml 入れた。照射前、照射 1 時間、2 時間、3 時間経過した溶液の吸光度を測定した。測定結果を Fig. 2 に示す。照射時間の経過とともにメチレンブルーの吸光度の比率が減少していくことが確認された。一方、光触媒を添加しない系では吸光度の上昇が確認され、これは溶媒の蒸発による濃縮が要因と考えられる。しかし、光触媒を添加した系では蒸発による影響を上回る吸光度の低下が観測されたことから、光触媒によるメチレンブルーの分解が進行していると考えられる。WO₃ 試料の方が GaN 試料より吸光度が低くなったため、GaN よりも高い光触媒活性を示したと考えられる。このことから GaN, WO₃ 粉末, Pt 添加から作製した光電極の光触媒作用が明らかになった。特に、Pt(5wt%)添加試料と GaN:WO₃=1:1 試料は光触媒性能が向上しており、効率的に酸化力が発生することがわかった。WO₃ は可視光領域でもある程度活性

を示すことが報告されており、本実験でもその傾向が確認された。

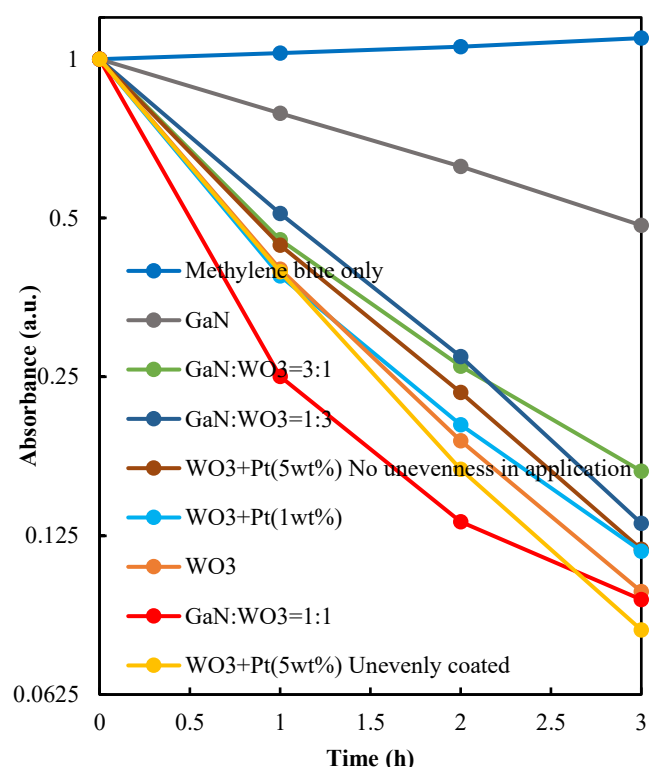


Fig. 2 Time variation of absorbance ratio. The absorbance of the sample without UV irradiation was normalized to 1.

3.3 人工光合成システム

人工光合成システムの概要を Fig. 3 に示す。人工光合成装置は、厚さ 5 mm のアクリル製で、光触媒側と金属触媒側の容器の間には陽イオン交換膜(Na イオン型, ASTOM(株))で仕切られた直径 20 mm の管で接続されている。光触媒側、金属触媒側の容器には 0.5 mol/L の炭酸水素カリウム水溶液(富士フィルム和光純薬(株))をそれぞれ 250 ml 入れた。光触媒電極としてニッケル基板上に酸化タングステン粉末(東京化成工業(株))、窒化ガリウム粉末(高純度化学研究所(株))を 1:1 でペースト法で作製した 50 mm×50 mm 試料を 1 枚、金属触媒側は 50 mm×50 mm、厚さ 1.0 mm のインジウム板(株ニラコ)を使用した。Pt 添加試料は 72 時間照射後に膜剥がれが発生したため、今回の作製条件では運用に向かないと判断した。

光触媒電極側では紫外線照射によって水素イオンが生成される。生成された水素イオンは陽イオン交換膜を通り隣の金属触媒側に移動する。金属触媒上で電子、水素イオン、そして炭酸水素カリウムが反応してギ酸が生成される。WO₃ 試料はバンドギャップが 2.6 eV と比較的小さく、可視光領域(約 400 nm 以上)でも光吸収が可能である。そのため、光照射により WO₃ 表面で電子と正孔が生成され、光触媒反応を引き起こし、ギ酸を生成することが期待できる。さらに、GaN では電子の移動による金属

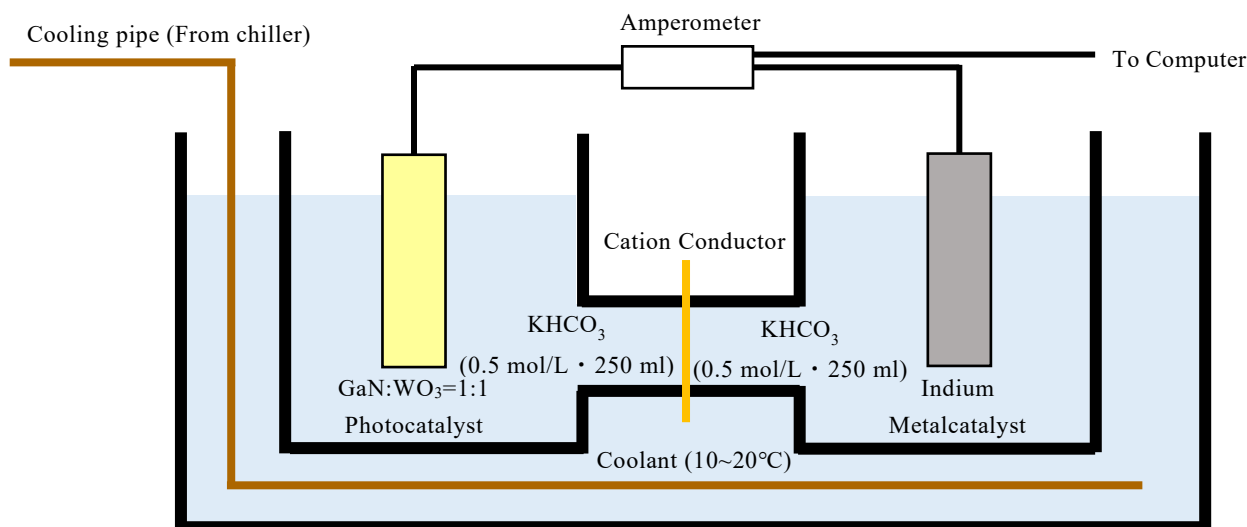
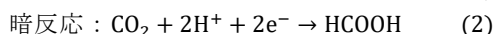
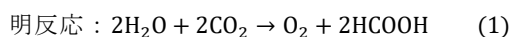


Fig. 3 Schematic diagram of artificial photosynthesis system.

触媒側での反応が期待できるので、電解槽両側でのギ酸の生成を期待した。この明反応と暗反応の過程をそれぞれ式(1), (2)に示す。



溶液中にある光触媒電極およびインジウム板との電気的接続には金線を用いた。光電流はデジタルマルチメータ(DT4253, 日置電機㈱)を用いて計測した。人工光合成システムは外気温の変化の影響を受けるため、人工光合成容器を水浴容器内に入れた。水浴容器内の水は15℃に設定したチラーで冷却された水を冷却用銅パイプ内に循環させることで極端な温度上昇を防いでいる。水浴容器内の温度、それぞれの水溶液の温度は18℃前後であった。

ランプ照射実験の際には光源の強度安定化のため、光源の点灯後2時間経過した後シャッターを開けた。光電極への紫外線光源の照射時間は約72時間である。光電流は光照射の前後の時間も測定した。

3.4 NMRによるギ酸検出

人工光合成の反応によって生成されたギ酸の生成量の測定にはガスクロマトグラフィー、イオンクロマトグラフィーなどが用いられている。本研究においては核磁気共鳴(以下 NMR)法を用いた。NMRでは対象の原子核を高磁場環境に置き、電磁波を照射することで原子核がその時の化学的環境に応じて電磁波を吸収する共鳴現象が発生する。この共鳴を観測することで物質の同定・定量を行う分析法である。本研究で対象としたギ酸(HCOOH)に含まれる水素原子の状態を¹H-NMRにより測定することで8.4 ppm付近にケミカルシフトが観測されるためギ酸の推定が可能である⁹⁾。

ギ酸濃度と8.4 ppm付近のケミカルシフトのスペクト

ル強度の関係から検量線を求めた。人工光合成実験で使用する0.5 mol/Lの炭酸水素カリウム水溶液を溶媒としてギ酸(富士フィルム和光製薬㈱)のモル濃度を200 mmol/Lから1 mmol/Lまでの範囲で濃度既知のサンプルとして調合した。これらをNMR(NMR500, BRUKER)で計測し、8.4 ppm付近のスペクトル強度の最大値を求めた。作成した検量線をFig. 4に示す。

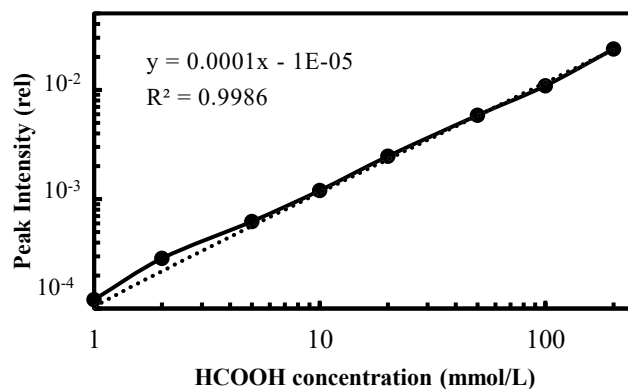


Fig. 4 Calibration curve of formic acid concentration.

ギ酸の濃度とケミカルシフト8.4 ppmでのNMRスペクトルのピーク強度はほぼ比例していることがわかる。

3.5 ギ酸濃縮システム

本システムにおいては、電極のサイズ、変換効率、照射光のエネルギー等を考慮すると、光照射によって生成されるギ酸の濃度はかなり薄いと予想される。NMRでの検出限界よりも薄いギ酸を検出する方法として、溶媒に対してのギ酸の濃度を高くする方法を用いた³⁾。恒温容器内に電子天秤を設置した。恒温容器に2つあるダクトの片方に排気用電動ファンを取り付けた。光照射した溶液をビーカーに入れ、電子天秤で計量する。恒温槽内に

置かれたビーカー内の水分は排気用ファンの動作によって蒸発は促進され、自然蒸発した場合と比較してより短期間で濃縮が進行する。恒温容器内の温度はギ酸の蒸発を避けるため 35℃とした。

濃縮倍率は既知濃度 2.0 mmol/L を濃縮して得られたピーク強度から算出した濃縮係数を液体重量にかけることで算出した。

$$S = (794.93 \times x^{-1.249}) \times \left(\frac{a}{b}\right) \quad (3)$$

ここで S は濃縮倍率, x は採取前の液体重量, a は採取後の液体重量, b は蒸発後の液体重量である。

4. 結果および考察

人工光合成システムを用いてギ酸生成を行った。外光を遮光した環境下にこのシステムを設置した。光触媒電極側に光強度 6.25 mW/cm² の紫外線を照射した。光電流はシャッターを開けた照射開始後約 72 時間後にシャッターを閉じた。

紫外線照射を行う前の試料および照射後に濃縮した試料の NMR の測定結果を Fig. 5 に示す。

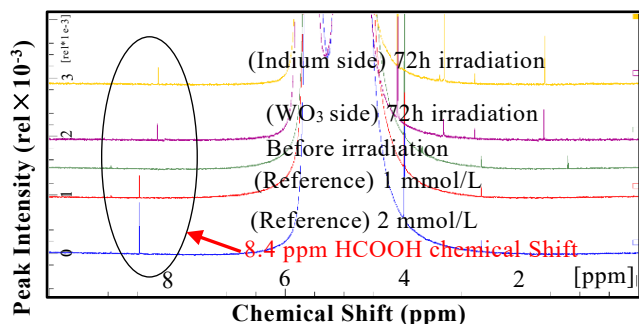


Fig. 5 Chemical shift spectra by NMR method. Samples before and after Irradiation. Reference sample of 1 and 2 mmol/L.

光触媒側溶液の濃縮後の質量が 17.3 g であったことから濃縮倍率は 17 倍である。金属触媒側溶液の濃縮後の質量が 13.7 g であったことから濃縮倍率は 16 倍である。参考としてギ酸のモル濃度 1 mmol/L, 2 mmol/L の NMR スペクトルも示している。重溶媒はメタノールを用いて校正を行った。

紫外線照射前の溶液を濃縮した場合の NMR スペクトルにはギ酸のケミカルシフトは観測されなかったが、紫外線照射後に濃縮処理を行った試料には 8.4 ppm 付近にピークが確認され、ギ酸の生成が確認できた。NMR スペクトル強度は光触媒側では 0.80×10^{-3} rel, 金属触媒側では 0.88×10^{-3} rel と計測され、検量線から濃縮されたギ酸の濃度は光触媒側が 8.13 mmol/L, インジウム側が 8.92 mmol/L と推測された。濃縮倍率を考慮すると光触媒側のギ酸の濃度は 478 μ mol/L, 生成量は 118 μ mol. イン

ジウム側のギ酸の濃度は 558 μ mol/L, 生成量は 139 μ mol, 合計 257 μ mol と求められた。

本システムにおけるエネルギー変換効率(η)を式(4)で定義した。

$$\eta = \frac{E_F}{E_L} \times 100(\%) \quad (4)$$

ここで E_F :ギ酸の生成エネルギー, E_L :紫外線の照射エネルギーである。紫外線の照射エネルギーは 6.25 mW/cm², 照射時間は約 72 時間, ギ酸の生成エネルギーを 1 mol あたり 170.1 kJ とすると, 式(4)を用いて二酸化炭素からギ酸へのエネルギー変換効率は光触媒側で 0.049%, インジウム側で 0.059%と算出された。両側の生成量を足した時のエネルギー変換効率は 0.11%となった。植物の光合成のエネルギー変換効率は 0.2%と言われている。GaN 単結晶膜を用いた場合のエネルギー変換効率は 0.15%と報告されている。単結晶膜のシステムと本システムでのエネルギー変換効率を比較すると光触媒側で 0.33 倍, インジウム側で 0.39 倍, 両側だと 0.73 倍となった。

一方, 光触媒電極の面積化という点では, 単結晶膜基板の価格が問題となる。直径 2 インチの GaN 単結晶膜の基板の場合と本システムで使用した 50 mm×50 mm の光触媒電極の場合で比較すると, 単結晶膜の場合は約 15 万円/枚, 本システムの場合は 1205 円/枚程度である。単位面積当たりで原材料費を比較すると本システムの場合は単結晶膜の約 154 分の 1 と見積もられる。面積化を視野に入れた場合, 本方式の光触媒電極の方が単結晶膜基板を用いるよりも, 単位面積当たりの価格に対するエネルギー変換効率において, 113.6 倍有利であると考えられる。また, 我々の先行研究³⁾である GaN 粉末試料と比べてエネルギー変換効率が 0.0062%から 0.1038%向上し, 約 17 倍となった。植物光合成の 0.2%の半分の効率を実現した。

現在のエネルギー変換効率は 0.11%であり, 植物光合成の 0.2%に近づけるためには, 光触媒電極およびシステム全体の改良が不可欠である。特に, スクリーン印刷法においては, 実験者による操作が膜面に影響を与え, それが膜品質のばらつきとして現れる。このばらつきを減少させるためには, スピンコート法やディップコート法など, より精密な装置を用いて再現性を向上させる必要がある。また, Pt の添加については最適な条件が見つからず, 耐久性の問題が生じ, 運用段階にまで至らなかったため, WO₃, GaN, Pt の組み合わせによるさらなる検討と試行を行い, 改良を加えていく予定である。加えて, コストが低いため, 面積化も視野に入れ, より効率的で経済的なシステムの実現を目指す。

5. 結論

酸化タングステン粉末, 窒化ガリウム粉末, プラチナを出発原料としてメチレンブルーの退色実験でのトップデータである Pt(5wt%)添加試料と GaN:WO₃=1:1 試料か

ら GaN 混合光触媒電極とインジウム金属触媒電極を用いた人工光合成システムを作製した。WO₃ は可視光領域でもある程度活性を示すことが報告されており、その傾向が確認された。二酸化炭素、水と紫外線照射によりギ酸の合成を試みた。生成された溶液を濃縮し、核磁気共鳴法で分析した結果、ギ酸の存在を確認した。GaN 混合試料は、メチレンブルー分解性能、ギ酸の生成、膜の耐久性といった観点で優れた特性を示した。ギ酸の生成量は照射強度 6.25 mW/cm²、照射時間約 72 時間で 257 μmol と推定され、二酸化炭素からギ酸へのエネルギー変換効率は 0.11% であった。

謝辞

本研究を行うにあたり紫外線照射装置を使用させていただきました、藤川知栄美教授に感謝いたします。また、NMR を用いたギ酸の測定に多大にご協力頂きました東海大学技術共同管理室、小田慶喜氏に深く感謝いたします。

参考文献

1) 藤嶋昭, 本多健一, 菊池真一, TiO₂ 半導体電極における光増感電解酸化, 工業化学雑誌, Vol. 72, No. 1, pp. 108-113 (1969).

- 2) A. Fujishima and K. Honda, Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature*, Vol. 238, pp. 37-38 (1972).
- 3) 加茂直記, 渋谷猛久, 窒化ガリウム光触媒を用いた人工光合成システムの試作, 東海大学紀要工学部, Vol. 64, No. 1, pp.1-6 (2024).
- 4) C. Ke, C. Tian, Y. Gan, Tailoring the band gap in codoped GaN nanosheet from first principle calculations, *Frontiers in Materials*, Vol. 7, pp. 124-1–124-7 (2020).
- 5) M. Tasbihi, M. Schwarze, M. Edelmannová, C. Spör, P. Strasser, and R. Schomäcker, Photocatalytic reduction of CO₂ to hydrocarbons by using photodeposited Pt nanoparticles on carbon-doped titania, *Catalysis Today*, Vol. 328, pp. 8-14 (2019).
- 6) N. R. Babji, E. O. McCusker, G. T. Whiteker, B. Canturk, N. Choy, L. C. Creemer, C. V. De Amicis, N. M. Hewlett, P. L. Johnson, J. A. Knobelsdorf, F. Li, B. A. Lorschach, B. M. Nugent, S. J. Ryan, M. R. Smith, and Q. Yang, NMR Chemical shifts of trace impurities: Industrially preferred solvents used in process and green chemistry, *Organic Process Research & Development*, Vol. 20, pp. 661-667 (2016).

慣性静電閉じ込めにおける電子ビームおよびイオンビーム生成

内海 倫明^{*1} 羅 氷洸^{*2} 進藤 春雄^{*3}

Electron-Beam and Ion-Beam Generation on Inertial Electrostatic Confinement

by

Michiaki UTSUMI^{*1}, Luo BINGYANG^{*2} and Haruo SHINDO^{*3}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jun. 20, 2025)

Abstract

A fundamental study on using a two-ring cathode in inertial electrostatic confinement (IEC) discharge was performed. Two different sizes of one-ring and two-ring cathodes were prepared for measuring plasma floating potential and current-voltage characteristics using a cylindrical shaped single probe. The peak of floating potential of two-ring cathodes was about three times larger than that of one-ring cathodes. An ion beam incident on a Langmuir probe in a plasma gives rise to an extra knee in the electron saturation part of the current-voltage characteristics of the probe. At the center of the smaller one of the two-ring cathodes, the extra knee was observed systematically, revealing that ion beams exist.

Keywords: Inertial electrostatic confinement, Neutron source, Glow discharge

1. はじめに

球状または円筒状の対称な静電ポテンシャルの井戸を形成し、そこにイオンを放射状に注入すると核融合反応を起こすことができる。イオンを中心に収束させると、電子はイオンの作る電場により中心に引き寄せられ、イオンの空間電荷を中和し、その結果イオンの密度を上昇させる。ポテンシャルの井戸が十分に深い場合、イオンは核融合反応を起こすのに十分なエネルギーを獲得する。慣性閉じ込め核融合でも磁気閉じ込め核融合でもなく、慣性静電閉じ込め核融合(Inertial Electrostatic Confinement Fusion)¹⁾と呼ばれる。

慣性静電閉じ込め核融合 (IEC 核融合) は 1950 年代に旧ソ連の Lavrent'ev²⁾とアメリカの P.T.Francisworth³⁾ による独立な考案から始まる。その後、1967 年に R.L.Hirsh^{4),5)} の中性子発生が報告され、以降 G.H.Miley⁶⁾ らにより比較的簡単な装置で実験が行われるようになった。

Fig. 1 は IECF 装置の概念図を示している。直径数 10cm 程の球形の接地陽極に対して、直径数 cm のグリッド陰極を陽極と同心に配置し、負の高電圧 (数-10kV) を印加してグロー放電させる。放電により作られた正イオンは、電場により陰極方向に加速されるが、その多くは陰極と衝突せずに、電極間の静電ポテンシャルの谷間に閉じ込められ往復運動を繰り返す。動作ガスとして重水素ガスを用いると、重水素イオンは往復運動の過程で、核融合反応により中性子を生成する。

IEC において、放電を開始すると陰極の中心から陽極方向へ、グリッドの開孔部分を通り抜ける光の筋が形成される。これはマイクロチャンネルと言われ、電子とイ

オンの通る領域と考えられている。電子はマイクロチャンネルを通り陽極へ向かい、その途中で雰囲気ガスを励起またはイオン化する。電子によって作られたイオンは静電場により、陰極中心に収束するが、このイオンの作る空間電荷に電子が集まり、さらにイオンの密度を上昇させる。

2024 年の報告⁷⁾では 1ring 陰極によるマイクロチャンネルの形成およびその内部の電子ビームを確認した。マイクロチャンネルは陰極の周りに作られるシースの重なりにより形成され、マイクロチャンネル内の電子ビームを Langmuir Probe の電流-電圧($I-V$)特性のイオン飽

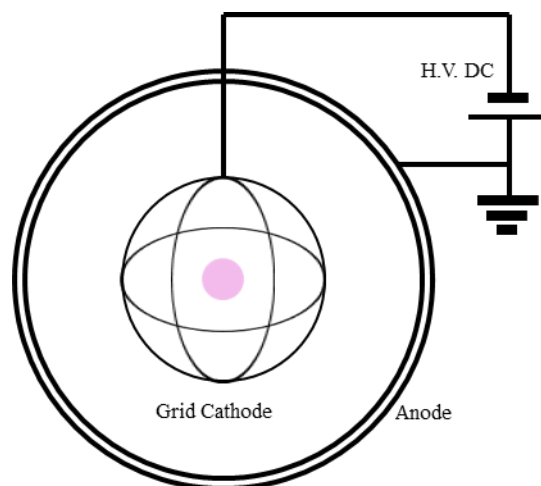


Fig.1 Concept of the Inertial Electro-static confinement apparatus

和領域の段差によって確認した。本論文では 2ring 陰極を用いてシングルプローブ法による陰極中心と陰極の外

^{*1} 理系教育センター教授

^{*2} 東海大学工学研究科応用理化学専攻修士課程

^{*3} (株)プラズマ理工学研究所

側の浮遊電位と $I-V$ 特性の測定を行い、マイクロチャンネルを通るイオンビームを検出することを目的とした。

2. 実験の概要

円筒型の真空容器に水素ガス (H_2) を充填し、容器の中心に陰極を設置した。通常 IECF 装置では、動作ガスとして重水素ガス (D_2) を使用するが、本実験では中性子発生数 (NPR) を測定することを目的としないので、 D_2 ガスとほぼ同じ特性を持ち、核融合反応を起こさない H_2 ガスを使用した。円筒 (内径 50 cm, 長さ 60 cm) 横置き型の真空容器 (陽極を兼ねる) の中心にフィードスルーを介して陰極を設置した。プラズマの電位測定にはタングステンの円筒型シングルプローブ (3mm, 0.8mm ϕ) を使用した。プローブにより円形および円筒形陰極の円平面に対して垂直方向の中心線上にプローブを設置し、プラズマの浮遊電位と $I-V$ 特性のガス圧力依存性を測定した。浮遊電位測定には、Tektronix 製の P6015A 1000X High Voltage Probe を使用した。 $I-V$ 特性は、プローブに直流安定化電源と約 20 オームの抵抗を直列に接続し、基準電極(陽極) に対するプローブ電圧 V_p と抵抗の電位差により得られたプローブ電流 I_p を測定した。 I_p はプローブに流入する電子の方向を正に取っている。陰極の印加電圧は全て-1.3kV である。陰極は1つの円環の 1ring と2つの円環を一本のワイヤーでつなげた円形状の 2ring を用いた。Table. 1 に使用した陰極の形状とサイズをまとめた。陰極円の直径のサイズにより No.1 と No.2 を 5cm タイプ, No.3 と No.4 を 2cm タイプとする。2ring 陰極では、円筒形状の陰極の中心(center)と外側(outer)にプローブを挿入して測定した。Fig. 2 は 2ring 2cm (No.4) 陰極の2か所のプローブの測定位置を示している。

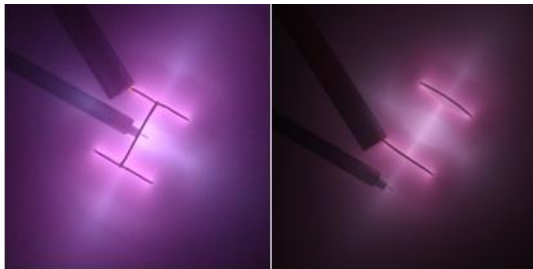


Fig.2 Pictures of the probe inserted into center and outer of the 2ring cathode. (3.8Pa)

Table 1 Types of cathodes used in this study.

No.	Number of Rings	Ring diameter /mm	Ring distance /mm
1	1	55.6	-
2	2	55.7	55.0
3	1	22.3	-
4	2	22.0	25.6

3. 実験結果

3.1 浮遊電位の圧力依存性

Fig.3 は 1ring および 2ring 陰極中心(center)と周辺(outer)の浮遊電位の水素ガス圧依存性を示している。Fig. 3(a)は 5cm を Fig. 3(b)は 2cm 陰極の測定結果であることを示している。Fig. 3 の(a)と(b)では軸のスケールが異なっているので注意してほしい。縦軸は浮遊電位[V], 横軸は水素ガス圧力[Pa]である。1ring, 2ring とともに、5cm 陰極は 1.24Pa 以下で、2cm 陰極は 4.16Pa 以下で浮遊電位が変化する。浮遊電位の絶対値が最大となるのは、陰極 No.1 では 0.43Pa, -96V, 陰極 No.2 の中心(center)では 0.29Pa, -327V, 周辺(outer)では、0.39Pa, -105V であった。陰極 No.3 では、1.46Pa, -193V, 陰極 4 の中心(center)では 1.15Pa, -576V, 外側(outer)では、1.06Pa, -174V であった。2ring 陰極の浮遊電位のピークの比は 2cm, 5cm とともに outer に対して center は約 2.3 倍であった。

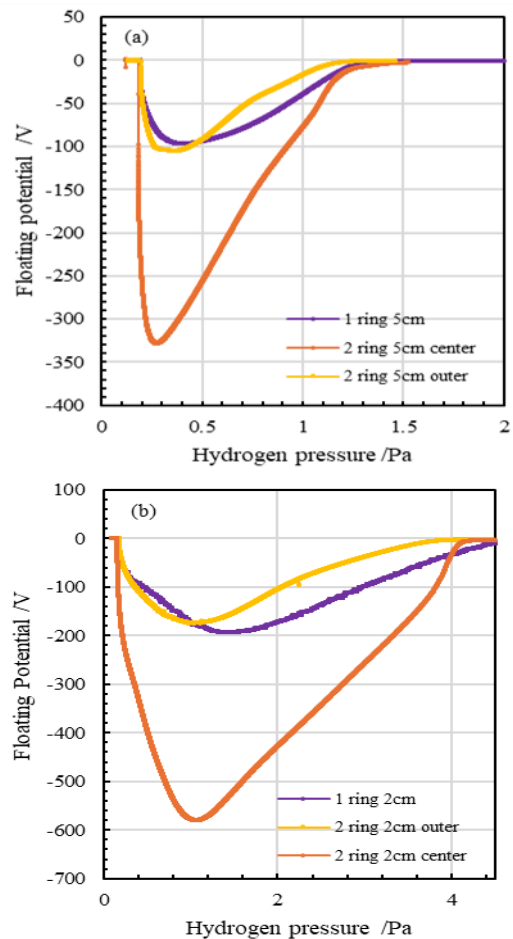


Fig.3 Dependence of floating potential distributions on hydrogen pressure: (a) 5cm diameter cathodes, (b) 2cm diameter cathodes.

3.2 プローブの $I-V$ 特性

プローブの $I-V$ 特性の測定結果を Fig. 4 に示している。Fig. 4(a),(b),(c)はそれぞれ 5cm 陰極の 1ring, 2ring outer, 2ring center を示しており, Fig. 4(d),(e),(f)は 2cm 陰極を示している。2cm 陰極では Probe Potential の負の領域($V_p < 0$)で, Probe Current が正の領域($I_p > 0$)に分布

し, 5cm 陰極ではそれが見られない. これは特に 2ring 2cm center において顕著である. また, 1ring 2cm 陰極では 3.0Pa から 4.0Pa において, 2ring 2cm outer では 1.8Pa から 3.0Pa において Probe Potential の負の領域に以前の論文⁷でも示している通り, 分布に段差が見られた. Fig. 4(g),(h)にこの部分の拡大図を示した. 2cm 陰極ではエネルギーの高い電子電流が流れ, 電子ビームがプローブに到達していることを示し, マイクロチャンネルが形成さ

れている証拠となる.

Probe Potential の正の領域($V_p > 0$)において, 5cm 陰極では+100V になる前に Probe Current I_p が急激に上昇し放電してしまった. 2cm 陰極では Probe Potential が ($V_p \sim 200V$)でも放電せず, 電流が制御されている. 2cm 陰極では, 電子飽和領域において, イオン電流が流れ放電を妨げる役割をしていると考えられる.

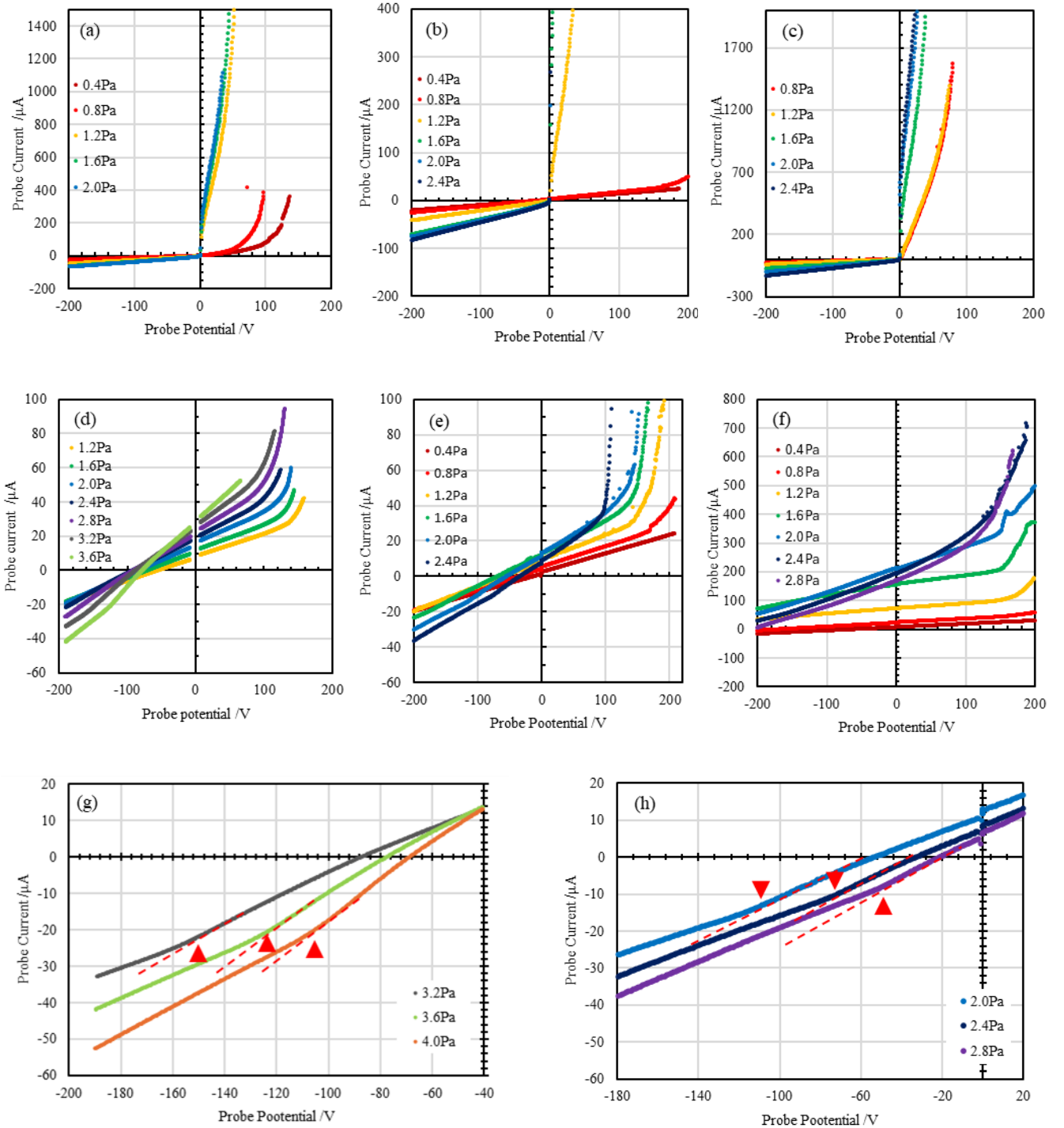


Fig.4 Current-Voltage Characteristics of various cathodes (a) 1ring 5cm, (b) 2ring 5cm outer, (c) 2ring 5cm center, (d) 1ring 2cm, (e) 2ring 2cm outer, (f) 2ring 2cm center, (g) Enlarged view of (d), (h) Enlarged view of (e).

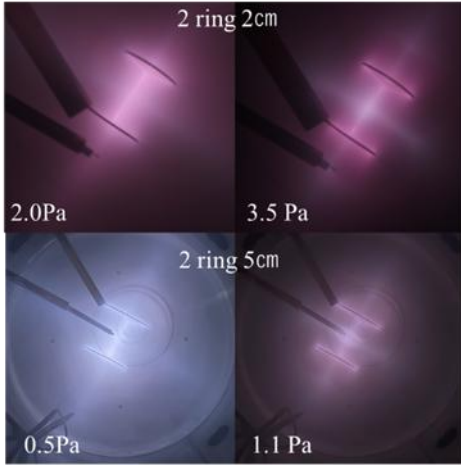


Fig. 5 Photographs of the sheath formed around the 2ring cathodes

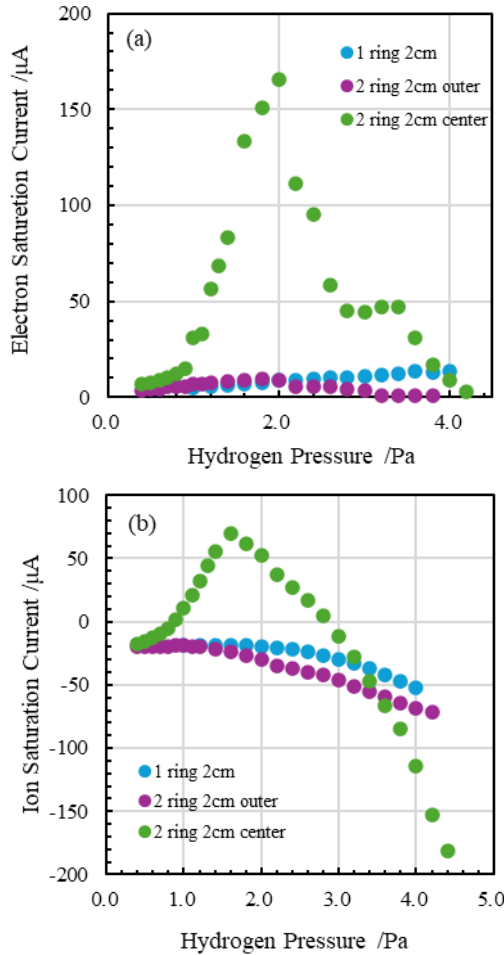


Fig. 6 Dependence saturation current on Hydrogen pressure: (a) Electron Saturation Current, (b) Ion saturation current

4. 考察

4.1 浮遊電位と陰極シースの厚さ

Fig. 3 に示す通り、浮遊電位は 2cm と 5cm の両方において 1ring と 2ring outer 陰極のプロファイルが似ている。

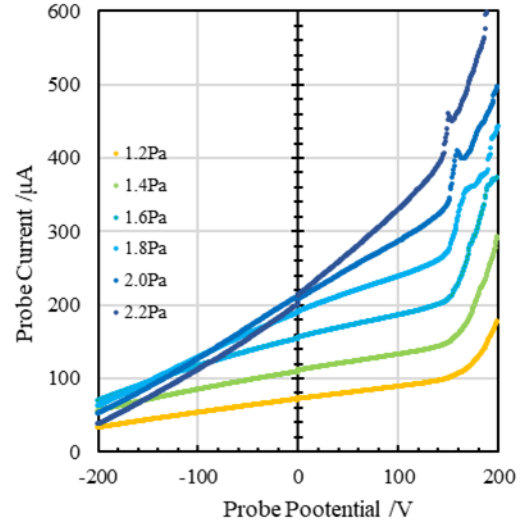
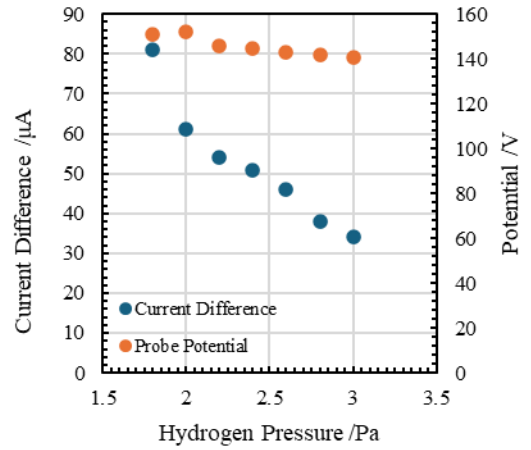

 Fig. 7 Enlarged view of Current-Voltage Characteristics
Fig. 4(f) 2ring 2cm center.


Fig. 8 Current Difference and Probe Potential at the step

これは両者のシースの厚さの気圧依存性がほぼ同じで、5cm 陰極では 1.24Pa 以下、2cm 陰極では 4.16Pa 以下で、マイクロチャンネルが形成されている為である。マイクロチャンネルが形成されると、電子密度が増加し浮遊電位が大きく変化すると考える。しかし、5cm 陰極では浮遊電位のピークとなる気圧が低いので、電子密度が低く、電流を検出できなかったと思われる。Fig. 5 は 2ring 陰極のシースとマイクロチャンネルの写真である。2cm と 5cm のシースの重なりを比べるために、陰極の大きさが等しく見えるようにして並べた。

4.2 電子飽和電流とイオン飽和電流

Fig. 6 は、No.3 と No.4 陰極のイオン飽和電流値と電子飽和電流値の水素気圧依存性を示している。イオン飽和電流はイオンの飽和電流値がグラフから読み取れないので、プローブの印加負電圧-200V の電子電流値とした。電子飽和電流はプローブ法⁸⁾により電子反発領域、電子飽和領域における 2 接線の交点の電流値として求めた。イオン飽和電流は No.4 陰極 center が大きくプラスに分布し、また、電子飽和電流値も同様に No.4 陰極 center が outer に比べて最大で約 18 倍多く流れた。No.4 陰極 center

のイオン飽和電流の最大値は 1.6Pa で 69.3 μ A, 電子飽和電流の最大値は 2.0Pa で 165.5 μ A となった. 2ring 陰極 center はちょうど陰極の 2 つのリングのシースの隙間に位置しており, ここに陰極から出たエネルギーの高い電子が集ったと考えることができる. 集まった電子はマイクロチャンネルを通り陽極へと向かう.

4.3 イオンビーム

No.4 陰極 center の $I-V$ 特性は電子飽和領域の Probe Potential $V_p \sim 150V$ において段差が確認できる(Fig. 8 参照). Fig. 8 は, 段差が見られる 1.2Pa から 2.2Pa までの $I-V$ 特性を示している. Probe Potential の150V付近において段差 (beam edge) が系統的に作られている. これらの段差はイオンビームによるものであると過去の論文^{9),10),11),12)}では結論されている. Probe Potential がイオンビームのエネルギーとほぼ等しくなった時, イオンはプローブの直前に留まり, プローブの周りの電場を歪める. プローブに入射する電子の軌道はこの電場の歪みに影響され, イオンビームが停止することによって電場が作られた瞬間, 電子電流が増加し $I-V$ 特性に段差が生じたものである. 水素気圧に対する, この電流値の差と Probe Potential の関係を Fig. 8 にまとめた. 2ring 陰極の中心付近では, イオンビームはマイクロチャンネルを通り, 陰極中心に向うと考えられる.

5. まとめ

IEC 放電において直径の異なる 1ring, 2ring 陰極を用いてシングルプローブによる浮遊電位と $I-V$ 特性の水素ガス圧力依存性を調べ, 電子ビームとイオンビームの生成を実験的に明らかにすることができた.

浮遊電位測定において 5cm 陰極では陰極シースの重なりが 1.0Pa 以下で起こるが, 浮遊電位のピークとなる気圧は No.2 陰極 center では 0.29Pa と低く, ガスの密度が小さく, 測定限界付近であったと思われる. 本実験の印加電圧 (-1.3kV)では, マイクロチャンネルが形成する条件には適さなかったと考える. 一方, 2cm 陰極では, 浮遊電位の 1.0 ~ 1.5Pa にピークがあり, マイクロチャンネルの形成に必要な粒子密度が確保できたと考えられる.

ラングミュアプローブの $I-V$ 特性は, 2cm 陰極の 1ring と 2ring outer のイオン飽和領域に段差が確認された. 5cm 陰極に段差が見られないのは上記と同様にシースの

重なりが不十分であったためと考えられる. マイクロチャンネルが形成され, 電子ビームおよびイオンビームが生成されるためには, シースの重なりが重要であることがわかった. IEC 核融合では-50kV 以上の印加電圧を想定しているが, シースの厚さと十分な電子密度が必要となる.

最後に, 2ring 2cm center の Probe Potential $V_p = 140 \sim 150V$ において系統的な段差が観測された. これは Weber¹⁰⁾ らの報告による, プローブ近くに静止したイオンの作る電場の歪みが電子を増大させることによる電子電流の増加 (beam edge) であり, イオンビームの生成を実験的に明らかにした.

参考文献

- 1) M. Ohnishi, J. Plasma Fusion Res. Vol.73, No. 10, p.1080(1997).
- 2) O. A. Lavrent'ev et al. Ukrainskii Fizicheskii Zhurnal, Vol. 8, p.440(1962).
- 3) P. T. Fransworth, Space Charge Device for producing Nuclear Reactions, Patent. CA654306, US3258402 (1962).
- 4) R. L. Hirsch, J. Applied Physics, Vol.38, p.4522 (1967).
- 5) R. L. Hirsch, Physics of fluids Vol.11, p.2486 (1968).
- 6) G. H. Miley, J. Nadler, T. Hochberg, Y. Gu, O. Barnouin and J. Lovberg: "Inertial-Electrostatic Confinement: An approach to Burning Advanced Fuels", Fusion Technol., Vol.19, pp.840-845 (1991).
- 7) M. Utsumi et al. Proc. of School of Eng. Tokai Univ., Vol. 64, No 1., p.12(2024).
- 8) H. Amemiya et al. J. Plasma Fusion Res. Vol.81, No.7, pp.482-492 (2005).
- 9) PLASMA DIAGNOSTICS, Vol. I, Discharge Parameters and Chemistry, Edited by Orlando Auciello and Daniel Flamm, Academic Press Inc. New York, Chapter 3. How Langmuir Probe Works by Noah Hershkowitz, P130(1989).
- 10) Wim. J. Weber, W. J. Armstrong, R. J. and Trulsen, J. Journal of Applied Physics, Vol.50, P4545(1979).
- 11) Nakamura, Y., Nomura, Y. and Stenzel, R. L. Journal of Applied Physics, Vol.52, P1197(1981).
- 12) Å. Sköelv et al. Phys. Fluids Vol. 27, P2744(1984).

沿岸地域を対象とした地層処分の地下水環境特性の影響評価

高橋正太郎^{*1} 若杉圭一郎^{*2}

Impact Assessment of Groundwater Environmental Characteristics of Geological Disposal for Coastal Areas

by

Shotaro TAKAHASHI^{*1} and Keiichiro WAKASUGI^{*2}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jun. 4, 2025)

Abstract

Coastal areas are considered suitable for geological disposal due to their relatively stable and slow groundwater flow. However, the groundwater environment in coastal areas exhibits complex characteristics that can significantly influence the nuclides migrating from a disposal site. One key characteristic is the saltwater-freshwater boundary formed by the density difference between saltwater and freshwater, across which groundwater flows behave differently. Moreover, this boundary shifts over time as a result of sea-level changes. In this study, the groundwater environment in coastal areas was characterized through density-dependent groundwater flow analysis, which is considered the influence of salinity-induced density differences. Based on the obtained flow field, nuclide migration analyses were conducted, assuming that nuclides are released from two disposal sites, one located inland and the other offshore, and migrate through groundwater to the biosphere at the ground surface. The results show that, particularly at the offshore site, the migration pathways of nuclides are significantly affected by the temporal movement of the saltwater-freshwater boundary. This shift leads to notable variations in the resulting dose to the biosphere, indicating the importance of accounting for dynamic coastal groundwater conditions in safety assessments of geological disposal in coastal areas.

Keywords: Geological disposal, Coastal area, Groundwater, Density flow analysis, Nuclide migration analysis

1. 緒言

我が国では、原子力発電の運転に伴い発生する高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の処分方法として、地下 300 m 以深に処分施設を建設した上でガラス固化体を埋設する「地層処分」が計画されている¹⁾。地層処分に適した地域の一つとして、沿岸地域が挙げられる。これは、内陸部と比較して動水勾配が小さく地下水流れが緩慢であることから、高レベル放射性廃棄物に含まれる核種が生活圏へ移行しにくいという特性を持っているためである。また、地層処分の候補地選定にあたり考慮すべき科学的特性を整理した経済産業省が公表した科学特性マップ²⁾においても、沿岸地域は高レベル放射性廃棄物の輸送面で好ましい地域であることが示されている。

一方、地下水環境特性は、処分施設から漏えいした核種が生物圏に移行することで生じる公衆被ばくを評価する核種移行解析において、重要な検討事項の一つである。特に沿岸地域の場合、Fig.1 に示すように、地下には、陸側から浸透した淡水系地下水と、海側から海底を通じて浸透した塩水系地下水との密度差によって塩淡水境界が形成される。そして、塩淡水境界を境に、淡水域では陸側の動水勾配に従った流

れ方をするのに対し、塩水域では淡水系の地下水との密度差によって塩水系の地下水が淡水域の下を潜るように流れる（これを密度流と呼ぶ）という異なる地下水流動が見られる³⁾。さらに、長期間の周期で海面水位が上昇あるいは低下を繰り返す海水準変動の影響によって塩淡水境界の位置が変動し、沿岸域の地下水環境は時間的にも複雑に変化する特性を持つ⁴⁾。

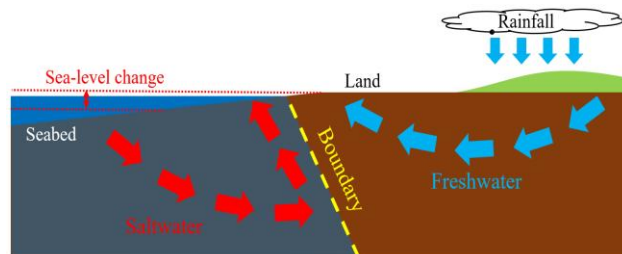


Fig. 1 Groundwater environment in coastal areas

このような沿岸地域特有の水理プロセスに着目した解析はこれまでに数多く存在し、沿岸地域における地下水環境やその状態変遷について一定の知見が蓄積されてきた。しかしながら、これらの沿岸地域の地下水環境特性が漏えいした核種の移行に及ぼす影響を評価した事例はほとんど存在しない。したがって、本研究では沿岸地域の地下水環境を水理解析によって明らかにするとともに、その結果を用い

^{*1} 工学研究科応用理化学専攻修士課程

^{*2} 工学部応用化学科教授

た核種移行解析を行うことにより、沿岸地域の地下水環境が核種移行に及ぼす影響について検討することを目的とした。

2. 解析方法

Fig.2 に本研究の手順を示す。本研究では、始めに沿岸地域特有の地下水環境とその環境下での核種移行経路を把握するために水理解析を実施した。具体的には、沿岸地域の2次元鉛直モデル（以降、沿岸部モデルと記述する）を構築し(Step1)、海水準変動による塩淡水境界および密度流の移動によって複雑化する地下水環境を再現するため、二次元飽和不飽和移流分散解析プログラム Dtransu-2D・EL⁵⁾を用いて、海水中の塩分濃度による密度差を考慮した地下水流動解析である密度流解析(Step2)を実施した。次に、上記の解析によって得られる地下水環境下での核種の移行経路を把握するため、Dtransu-2D・ELの解析結果を視覚情報として出力することが出来るオープンソースの可視化プログラムである ParaView の粒子追跡機能(Particle Tracer)を利用して、深度1000 m の処分場を発生源として移行させた粒子が描く流跡線から移行経路を抽出した(Step3)。また、粒子追跡の結果から、塩淡水境界の移動によって変化する処分場から流出点までの移行距離に加え、移行経路上の流速等の変化についても評価した。

続いて、水理解析で得られた移行経路および海水準変動による塩淡水境界の時間変化の情報を基に、核種移行解析(Step4)を行った。この解析では、汎用的なシミュレーションソフトである GoldSim⁶⁾を利用し、処分場から生物圏まで移行する核種の移行率や線量の変化を評価することによって、沿岸部の複雑な地下水環境が核種移行挙動に及ぼす影響を考察した。

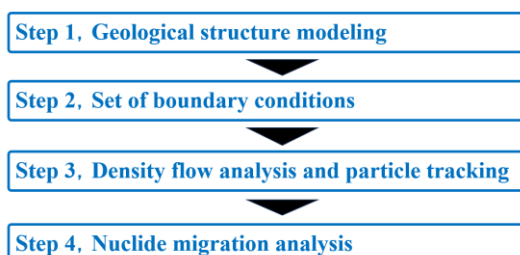


Fig. 2 Overall workflow of the analysis procedure

2.1 地質構造の設定 (Step1)

沿岸部モデルの地形を作成する上で、地下水流動に係る地形勾配に設定する必要があるが、勾配の大きさは地域によって様々である。このため本研究では、「日本の地形・地盤デジタルマップ（若松ほか、2005）」の地形勾配の統計データの中央値を用いて作成した先行研究（産総研ほか、2017）⁷⁾を参考に地形勾配を設定し、これを用いて水理地質構造モデルを作成した。実際に見られる沿岸地域の地形では、陸域から海岸線まで緩やかに傾斜している遠浅の地形の他に、海成段丘のように海底が隆起した地形も見られるが、本研究では Fig.3 のような陸域、大陸棚、大陸傾斜の三つの地形区分で構成される遠浅地形を想定し、鉛直二次元 (Y-Z 軸)

の沿岸部モデルを作成した。また、沿岸地域での地層処分を検討する際には、処分場の位置を陸側では輸送の観点から海岸線から 20 km 程度以内を、海側では建設時の工学的な対応の観点から海岸線より 15 km を目安としている²⁾。これに基づき、各地形区分の水平距離については、陸域を 10 km、海域を 20 km（大陸棚および大陸傾斜をそれぞれ 10 km）とし、全体で 30 km となるような設定を行った。また、地質構造は、巨視的な地下水流動の水理解析による評価で多く採用されている多孔質媒体モデルを採用した。

Table1 に沿岸部モデルでの水理解析に係るパラメータとその設定値を示す。本研究では、1 種類の岩種で構成された単層構造のモデルを仮定し、そのパラメータ値は、核燃料サイクル機構（現、日本原子力研究開発機構）が「第2次取りまとめ 分冊 3」⁸⁾で地下水を介しての核種移行を評価した解析ケース（以降、レファレンスケースと記述する）における岩盤の設定に準拠した。また、上記の参考文献で明示されていないパラメータ（横分散長等）については、同一岩種を用いた他の水理地質モデル評価事例⁹⁾から引用して補完した。

さらに、本研究で考慮する海水準変動は、35 万年前から周期的に急激な海面上昇と段階的かつ緩やかな海面低下を繰り返してきたとされている¹⁰⁾。したがって、本研究では、海退（海面低下）を 7 万年、海進（海面上昇）を 2 万年とし、海水位の変化が ± 140 m になるような 9 万年周期の海水準変動を考慮した。なお、隆起・侵食による地形の変化は考慮しないものとした。

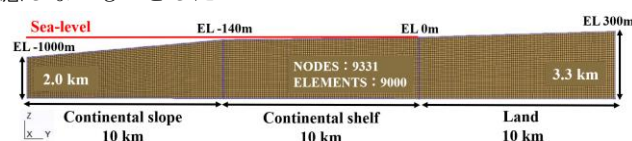


Fig. 3 Coastal Model Structure (EL: Elevation)

Table1 Parameter & Value (Density flow analysis)

Parameter & Value	
Rock	Granite
Coefficient of permeability (m/sec)	1.0×10^{-7}
Porosity (%)	2.0
Specific storage (m^{-1})	1.0×10^{-7}
Anisotropy ($^{\circ}$)	0.0
Dispersion length (m)	Longitudinal : 100
	Horizontal : 10
Diffusion Coefficient (m^2/sec)	3.0×10^{-12}

2.2 境界条件の設定 (Step2)

本研究では、海水準変動を考慮した解析手法として、2通りの方法で密度流解析を実施した。Fig.4 に2つの手法において沿岸部モデルに与えた境界条件を示す。一般的に、地下水環境の時間変化を考慮した水理解析においては、境界条件として水頭値等を一定値とする固定境界条件を設定し、時間断面ごとに地下水環境を静的に表現して移行経路を評価する手法が報告されている。そこで、本研究でも上記の手法を参考に、時間断面ごとに地下水環境を固定して海水準変動による時間変化の影響を考慮した解析を実施した（以

降, この手法を固定境界モデルと記述する). 固定境界モデルでは, モデルの地表面を透水境界とし, 標高が海水位より上の陸側の地表面には, 一定降雨境界を設定した. また, 海水位よりも下の海底となる地表面には, 塩分密度を考慮した圧力水頭固定境界を設定した. さらに, 後述する粒子追跡線解析では, 処分場の発生点から 1.4 万年間隔で粒子が断続的に発生することを想定したため, 粒子が発生する時間間隔での海水位の変化に応じて, 降雨境界および圧力水頭固定境界の設定範囲を変更しながら解析を実施することで, 海水準変動の時間変化を考慮した. これによって, 固定境界モデルでは, 塩淡境界の移動を断続的な変化として確認することが出来る.

しかしながら, 実際の海水準変動は連続的に生じる現象であり, 塩淡境界の移動も連続的なものである. そこで本研究では, 地表面において海水準変動による連続的な海水位の変化に対応し, 海底に設定された圧力水頭値が時間とともに変化する変動境界条件を導入し, 連続的な塩淡境界の移動を考慮した解析も実施した. (以降, 変動境界モデルと記述する.) このモデルにおいては, 海水位の時間変化に応じて降雨境界の設定範囲も変化する. しかし, この手法では計算負荷が大きく, 地下水流動の時間変化を後述する核種移行解析に反映させる際, 解析が複雑になるという課題が存在する. よって, 連続的に変化する地下水環境下の移行経路の把握に加え, 核種移行解析まで行った事例はほとんど無い. そこで, 双方の境界モデルの粒子追跡線解析の結果を比較することにより, 事例の多い固定境界モデルの評価の保守性^{*1}の観点での妥当性, あるいは実際の地下水環境をより忠実に反映していると考えられる変動境界モデルの導入の必要性について考察する.

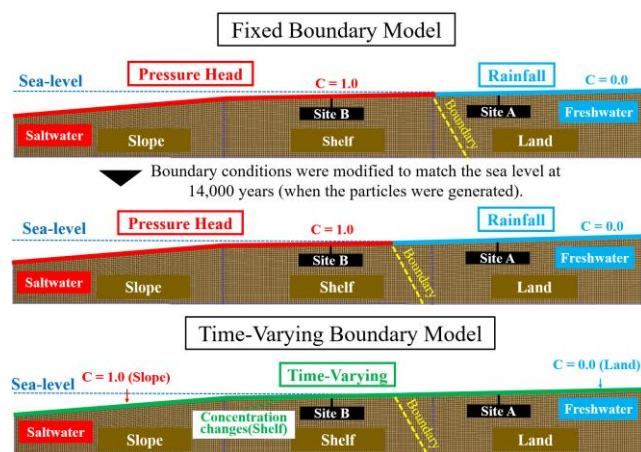


Fig.4 Set of boundary conditions on the ground surface

2.3 密度流解析と粒子追跡線解析(Step3)

[1]密度流解析

密度流解析では, 塩分密度の差による地下水流動への影響と地下水流動に伴う塩分の移流分散を同時に考慮することで, 淡水系地下水と塩水系地下水の密度差によって生じる塩淡境界や密度流を解析する. ここで, この解析に利用す

る Dtransu-2D・EL では, 地下水流動に関する方程式として浸透の基礎方程式, 塩分の移動に関する方程式として移流分散方程式の二つの方程式を連成することで解析を行う.

浸透の基礎方程式は(西垣ほか, 1995)より, 式(1)の通りである^{5),11)}.

$$\rho_f \theta_f \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta S s + C s(\theta) \} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho K_{ij}^s K_r(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \rho K_{iz}^s K_r(\theta) \rho_f \gamma \right\} \quad (i, j = y, z) \quad (1)$$

φ : 圧力水頭 θ : 体積含水率 Ss : 比貯留係数 $Cs(\theta)$: 比水分容量 K_{ij}^s : 飽和透水テンソル $K_r(\theta)$: 比透水係数

K_{iz}^s : 鉛直成分 (Z 軸方向) の飽和透水係数

c : 塩分濃度 ($0 \leq c \leq 1$ 飽和濃度を 1 として正規化)

t : 時間 ρ_f : 溶媒 (淡水) の密度 ρ : 流体の密度

$\rho_f (\rho/\rho_f)$: 溶媒の密度に対する流体の密度比

γ : 溶質 (塩分) の密度比 (一般に海水は $\gamma = 0.025$)

$\beta = 1$: 飽和領域 $\beta = 0$: 不飽和領域

i, j : 水平, 鉛直成分の座標 (y, z 座標) を示す

ここで, 流体の密度 ρ は式(2)のように塩分濃度 c で関連付けられる⁵⁾.

$$\rho = \rho_f (1 + \gamma c) \quad (2)$$

式(2)から, 濃度変化によって流体の密度が変化する. したがって, 式(1)の左辺第 1 項の塩分濃度 c , 左辺第 2 項の流体の密度の値 ρ が変化することで密度流が生じる. そのため, 後述の塩分濃度 c を導出する移流分散方程式と連成して解析を行う必要がある.

続いて, 式(3)に移流分散方程式を示す⁵⁾.

$$R \theta \rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta \rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta \rho V_i c) - \theta \rho \lambda R c - Q_c \quad (3)$$

R : 遅延係数

(土中での吸着による塩分の移行の遅れを示すが, 本解析では考慮しないため「 $R = 1.0$ 」となる.)

D_{ij} : 分散テンソル V_i : 実流速 Q_c : 源泉項 λ : 減衰定数

ここで, 式(3)について, 右辺第 1 項には 2 階微分項の分散項, 右辺第 2 項には 1 階微分項の移流項と性質の異なる項が混在した式となっている. よって, 分散に卓越した固定座標系 (有限要素法) のみで解こうとすると数値分散や解の振動といった数値誤差が顕著になる. 一方で, 移流に卓越した移動座標系 (特性曲線法) のみで解こうとしても分散項に対する数値誤差が顕著となる. そこで, Dtransu-2D・EL は移流分散方程式の変数である塩分濃度 c を, 分散項および移流項に分けて計算する EL 法を適用する. これにより, 境界条件, 初期条件も移流項と分散項を区別し, それぞれの卓越した座標系で計算することにより安定に解を得る¹¹⁾.

[2]粒子追跡線解析

粒子追跡線解析では, 密度流解析結果によって得られたタイムステップ毎, 地質モデルのメッシュ毎に時間変化する水頭の値から, 各節点における動水勾配を求め, これを基

*1 時間スケールが数万年以上に及ぶ地層処分安全評価では, シナリオ, モデル, パラメータに不確実性が伴うため, あえて危険側となる設定で解析を実施することによって評価のロバスト性を確保する評価がなされている. (これを保守的な評価と言う.)

に粒子発生点から流出する粒子を移行させることによって、その粒子の移行挙動を流跡線（移行経路）として評価する。そこで、処分場の位置による粒子の移行経路の違いを把握するため、Fig.5 に示すように粒子追跡線解析の粒子の発生点として、「陸域の処分場(Site A)」と「大陸棚の処分場(Site

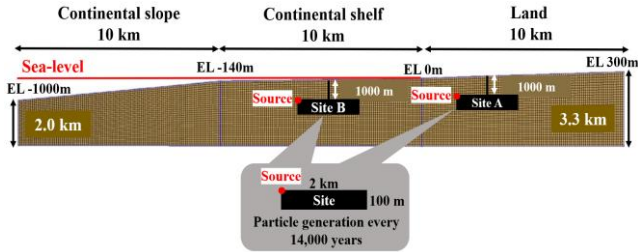


Fig.5 Locations of repository and particle release points

B)」の2つの処分場を想定した。いずれの処分場も建設深度は1000 mとし、スケールは2 km 四方とした。

2.4 核種移行解析 (Step4)

[1]人工バリア中の核種移行

Fig.6 に沿岸地域を対象とした場合の核種移行解析の移行プロセスを示す。地層処分では、処分場に埋設した高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）への地下水の接触を抑制するために、ガラス固化体を金属製容器（オーバーパック）に封入し、その周りを低透水性の緩衝材（ベントナイト）で覆う設計が採用されている。これら複数のバリアは人工バリア (EBS)と呼ばれている。本研究では、ガラス固化体を封入している金属製容器が破損したことによってガラス固化体が接触した地下水により溶解し、地下水に溶け込んだ核種が人工バリアの領域を通過した後、沿岸部地下の岩盤 (Host rock)を通して地表の流出点に流出することによって河川水あるいは沿岸海域水を介して公衆が被ばくするというシナリオを想定し、GoldSim を利用した核種移行解析を実施した。また、本研究では Table2 に示す核種を取り扱った。

モデルの構築にあたっては、レファレンスケースの概念モデルに基づいた核種移行解析を GoldSim で再現した既往研究(仲島ほか,2009)¹²⁾を参考にした。ここで、移行プロセスの内の人工バリアを通過する領域においては、(仲島ほか,2009)で記述されている概念モデル、数学モデルと同様のものをういたため本稿では省略する。しかし、塩淡水境界の移動によって周辺の地下水が塩水あるいは淡水に著しく切り替

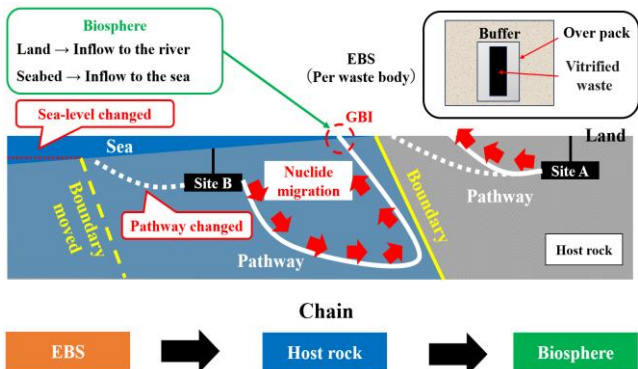


Fig. 6 Nuclide migration pathway

わる大陸棚の処分場内の人工バリアの領域では、地下水に核種が溶け出す溶解度や緩衝材移行中の拡散係数、分配係数が地下水の種類によって変化する核種が存在するため、その核種のパラメータが処分場周辺の地下水環境の切り替わりに応じて変化するという点のみにおいては上記の文献とは異なる設定を行っている。

Table2 Nuclides considered in nuclide migration analysis

4n*	Pu-240→U-236→Th-232
4n+1	Cm-245→Pu-241→Am-241→Np-237→U-233→Th-229
4n+2	Cm-246→Pu-242→U-238→U-234→Th-230→Ra-226→Pb-210
4n+3	Am-243→Pu-239→U-235→Pa-231→Ac-227
FP	Sm-151, Zr-93→Nb-93m, Se-79, Tc-99, Pb-107, Sn-126 Cs-135, Nb-94

* n: Integer

[2]岩盤中の核種移行

水理解析では、沿岸部モデルの岩盤を多孔質媒体であるとして評価を行った。したがって、核種移行解析でも核種は多孔質媒体の岩盤を通過する想定とした。そこで、本研究では、上記の岩盤を対象とした際の数学モデルとして、岩盤中の核種移行に対して多孔質と亀裂性の2種類の媒体を考慮して GoldSim での核種移行解析をおこなった研究例(小尾ほか,2010)¹³⁾を参考にした。ここで、多孔質媒体を想定した場合の核種移行に係る移流分散方程式を式(4)に示す¹³⁾。

$$R_{ij} \frac{\partial C_{ij}}{\partial t} = - \left[\left(\frac{Q}{A} \right) \frac{\partial C_{ij}}{\partial x} - D_L \frac{\partial^2 C_{ij}}{\partial x^2} \right] - C_{ij} \lambda_{ij} R_{ij} + C_{IJ} \lambda_{IJ} R_{IJ} \quad (4)$$

R_{ij} :遅延係数 [-]

C_{ij} :多孔質媒体中の核種濃度 [g/m³]

Q :多孔質媒体間隙水の流量 [m³/y]

A :多孔質媒体の断面積 [m²]

λ_{ij} :元素 i の同位体 j の崩壊定数 [1/y]

D_L :分散係数 [m²/s]

t :時間 [y]

i, j :当該核種を表すインデックス (元素 i の同位体 j)

I, J :親核種を表すインデックス (元素 I の同位体 J)

ここで、分散係数 D_L は式(5)のように示される¹³⁾。

$$D_L = \frac{\alpha Q}{A \theta} + D_p \quad (5)$$

α :縦方向分散長 [m]

θ :多孔質媒体の有効間隙率 [-]

D_p :多孔質媒体の間隙水中の実効拡散係数 [m²/s]

(有効間隙率と実効拡散係数の設定値は Table1 に記載)

また、核種の岩盤中の鉱物表面への吸着による遅延係数 R_{ij} は式(6)のように示される¹³⁾。

$$R_{ij} = 1 + \frac{\rho \cdot K_{dij}}{\theta} \quad (6)$$

ρ :多孔質媒体の乾燥密度 [kg/m³]

K_{dij} :多孔質媒体への元素 i の同位体 j の分配係数 [m³/kg]

[3]海水準変動の時間変化を考慮した移行経路の設定

3 章に後述する固定境界モデルと変動境界モデルの水理解析の結果に基づき海水準変動の時間変化の影響を考慮するにあたって、核種移行解析で反映するべき移行経路の情

報を以下の3点にまとめた。

- 移行経路の変化
- 移行経路の地下水環境の変化（塩水化あるいは淡水化）
- GBI（地表の流出点）の環境変化による生物圏評価モデルの変更

水理解析での粒子追跡による移行経路の把握では、変動境界モデルと固定境界モデルの双方において、海水準変動が1巡する過程での1.4万年間隔で発生した7つの粒子の流跡線の情報を整理した。そこでGoldSimでは、掘削影響領域(EDZ)*2通過後の岩盤(Host rock)の領域に移行距離と経路上の流速が異なる7本の移行経路を設定し、双方のモデル共に海水準変動が1巡する過程で1.4万年が経過するごとに経路が切り替わるような時間変化の設定を行った。また、海水準変動は周期的な現象であることから、2巡目以降についても同様に、9万年ごとに同じ経路が繰り返されるように設定した。

続いて、移行経路の地下水環境の変化とGBIの環境変化の反映方法について記述する。ここで、特に大陸棚に設置された処分場では、海水準変動によって塩淡水境界が処分場を通過するため、地下水が塩水から淡水、あるいはその逆に切り替わり移行核種に対する化学特性が変化する。このような現象にともない岩盤移行中の分配係数が変化する核種が存在し、これを核種移行解析において考慮する必要がある。また、移行経路の流出点(GBI)の環境も、海底あるいは陸上によって公衆への被ばくのプロセスが異なる。具体的には、海底がGBIの場合には、沿岸海域水を介して被ばくする「沿岸海域水モデル」⁸⁾となり、陸上の場合には河川水を介する「河川水モデル」⁸⁾として被ばく線量が評価され、核種の移行率[Bq/y]に乗じる線量換算係数[mSv/Bq]が異なる。したがって、特に移行経路の変化に伴って流出点の環境も変化する大陸棚の処分場では、この現象を考慮する必要がある。以上を踏まえ、以下に固定境界モデルと変動境界モデルのそれぞれの設定内容について述べる。

① 固定境界モデルの設定内容

固定境界モデルでは、1.4万年の間隔において海水準変動による塩淡水境界の移動は考慮されておらず、核種が人工バリアから岩盤に流出した時の塩淡水境界の位置がそのまま保存される。したがって、水理解析で得られた7本の経路の移行経路の地下水環境と流出点(GBI)の環境は変化しない設定となっている。例えば、処分場周辺が塩水域でGBIが海底である時の経路は、核種の生物圏到達までその状態は変わらない。

② 変動境界モデルの設定内容

変動境界モデルでは、海水準の時間変化を連続的に反映し、圧力水頭や塩淡水境界の変動を逐次更新する解析を行った。水理解析では、地下水流速の速度で移行する粒子によって移行経路を把握したが、核種移行解析で取り扱う核種は、

*2 掘削影響領域:処分坑道の周囲に存在する、岩盤の掘削時に新たに生じた割れ目によって地下水の透水性等に影響が生じる領域。

式(6)の遅延係数によって上記の粒子よりも遅く移行する。したがって、核種が岩盤中を移行している間にも塩淡水境界の位置やGBIが時間とともに変化することが予想される。このため本モデルでは、粒子追跡により得られた移行距離や地下水流速は固定しつつも、移行中の地下水環境やGBIの環境が、塩淡水境界の変化に応じて時間経過で切り替わる設定を行った。

[4]核種の移行パラメータ及び線量換算係数の設定

核種移行解析で利用した核種の溶解度、拡散係数、分配係数の移行パラメータと線量換算係数は、「第2次取りまとめ 分冊3」のレファレンスケースの値を引用した。ここで、取り扱う核種の種類は多数に及ぶが、レファレンスケースの解析結果において最大総線量の支配核種となっている¹³⁵Csを例に挙げ、その移行パラメータと線量換算係数の値をTable3に示す。

Table3 Parameter used for nuclide migration analysis(¹³⁵Cs)

Cs-135's Parameter & Value			
	Solubility(mol/l)	Fresh*	Soluble
		Salt*	
EBS	Distribution coefficient(m ³ /kg)	Fresh	0.01
		Salt	0.001
	Diffusion coefficient(m ² /s)	Fresh	5.0 × 10 ⁻¹⁰
		Salt	3.0 × 10 ⁻¹⁰
Host rock	Distribution coefficient(m ³ /kg)	Fresh	0.05
		Salt	0.005
Biosphere	Dose conversion factor(mSv/Bq)	River	1.1 × 10 ⁻¹³
		Sea	3.0 × 10 ⁻¹⁶

*“Fresh” and “Salt” indicate the type of groundwater.

3. 解析結果

3.1 密度流解析、粒子追跡線解析の結果

固定境界モデル及び変動境界モデルの結果について、粒子追跡の発生点として想定した陸域の処分場(Site A)、大陸棚の処分場(Site B)に分けて記述する。

[1] 陸域の処分場(Site A)を対象とした場合の結果

Fig.7のSite Aに、陸域の処分場を対象とした場合の粒子追跡の流跡線の変化の一部を示す。ここで、Fig.7に示す濃度分布および塩淡水境界の位置は、粒子が地表に到達した時間(図中のPA timeで表示)における状態を表している。また、Fig.8には海水準変動の1巡分で発生した全ての粒子の移行距離を算出した結果を示す。さらに、同図には、双方の境界モデルの結果の比較として、粒子の各発生時間における粒子の移行距離の双方の境界モデルの相対比も併せて示しており、この相対比は「境界変動モデルの結果/固定境界モデルの結果」により算出した。以上を踏まえた結果は以下の通りである。

① 移行経路の変化の特徴について

陸域での処分場から移行する粒子の移行経路の形状は、処分場の発生点から地表へ斜め向きに粒子が流れる経路が

確認された。この結果については、先行研究¹⁴⁾における均質な地質を想定した条件下での粒子追跡線解析においても、同様の結果が得られている。また、粒子の発生時間による移行距離の違いについては、Fig.8に示す移行距離の結果から、処分場から塩淡水境界が遠ざかる海退時には塩淡水境界が処分場から遠ざかるため移行距離が延長する傾向が見られた。しかし、0[y]（初期）に発生した粒子と70000[y]（最大海退時）に発生した粒子の移行距離を比較すると、固定境界モデル・変動境界モデルのいずれにおいても、約2倍程度の差にとどまり顕著な変化ではないと考えられる。

② 双方の境界モデルの比較について

陸域の処分場では、地下水の実流速に基づく粒子追跡の結果、陸域では流速が速いため、変動境界モデルにおいても塩淡水境界が移動するよりも早く粒子が地表に到達した。これにより、Fig.8に示すように、移行距離の結果では全ての粒子発生時間において固定境界モデルとの間で差異がない結果となった。また、これによってFig.8に示す移行距離の相対比はほぼ1.0となり、両モデル間の違いが移行距離に影響を与えていないことが確認出来た。

[2] 大陸棚の処分場(Site B)を対象とした場合の結果

Fig.7のSite Bに、大陸棚の処分場を対象とした場合の粒子追跡の流跡線の変化の一部を示す。ここで、Fig.7で示される濃度分布および塩淡水境界の位置は、粒子が地表に到達した時点での状態を示している。そして、Fig.9には海水準変動の1巡分で発生した全ての粒子の移行距離を算出して比較した結果を示す。また、Fig.9には、双方の境界モデルの結果の比較として、[1]と同様の方法で比較した相対比を示している。ここで、粒子の移行距離が短い方が保守的な設定とみなせるため、相対比が1.0を上回る場合は固定境界モデルが、1.0を下回ると境界変動モデルが保守的となる。以上を踏まえた結果は以下の通りである。

① 移行経路の変化の特徴について

大陸棚の処分場から移行する粒子の移行経路の形状は、周辺が塩水域である場合、発生点から塩淡水境界に向かって地下深部へ移行し、その後塩淡水境界に到達すると、そこから地表へ上昇するといった楔型の外周を描くような経路を示した。このような流動パターンは、先行研究¹⁴⁾においても報告されている。さらに、海退に伴い塩淡水境界が処分場を通過して周辺が淡水化すると、移行経路は陸域の処分場と類似した経路に変化し、移行距離が急激に短縮される傾向が確認された。Fig.9に示す粒子の移行距離の結果からは、処分場に塩淡水境界が通過した時点(42000[y])で最短の移行距離となり、最大距離となった0[y]（初期）との比較により、固定境界モデルでは10倍程度、変動境界モデルでは6倍程度の差が生じていた。

② 双方の境界モデルの比較について

大陸棚の処分場では、固定境界モデルと変動境界モデルの境界条件の違いによって粒子の移行距離に明確な差が見られた。特に海退時(0~28000[y]時)の塩水域(海底下時)においては、Fig.9に示す移行距離の相対比が1.0を下回る

ことによって、境界変動モデルが保守的となるような結果となった。この時の相対比は最も差が大きい時でも約0.6倍

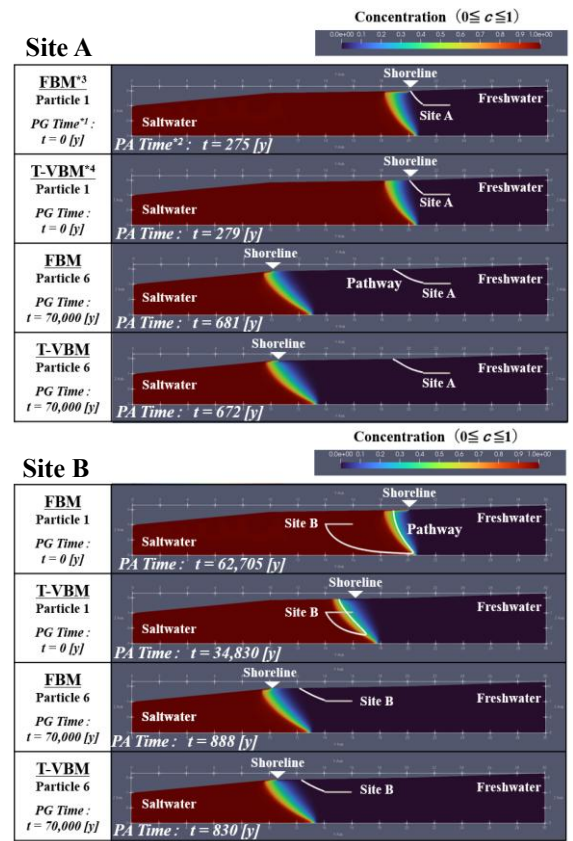


Fig. 7 Change in migration pathway over time at Site A & B

*1 PG Time: Particle Generation Time

*2 PA Time: Particle Arrival Time at the ground surface

*3 FBM: Fixed Boundary Model

*4 T-VBM: Time-Varying Boundary Model

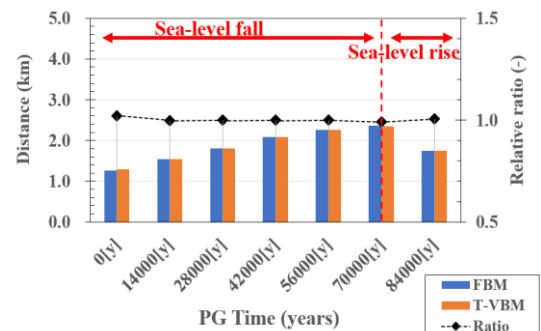


Fig. 8 Change in travel distance over time at Site A

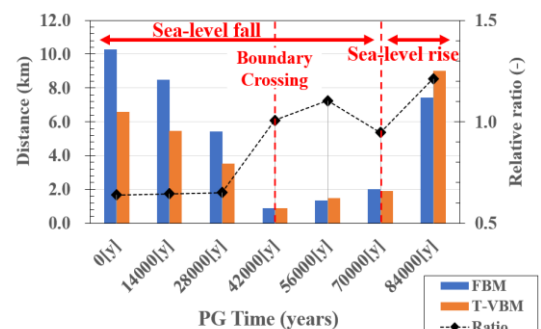


Fig. 9 Change in travel distance over time at Site B

であることが確認された。その後は、海退が進んで淡水化した場合（42000～70000[y]時）において移行距離の相対比が1.0を上回ることにより固定境界モデルが保守的となるような切り替わりが見られ、海進時（84000[y]時）においても相対比は1.0を上回って固定境界モデルが保守的となる結果が得られた。このように大陸棚の処分場では、海水準変動に伴って塩淡水境界が処分場を繰り返し通過することにより、双方の境界モデルの保守性が時間とともに交互に切り替わるような変化が見られた。

3.2 核種移行解析の結果

3.1 で記述した移行経路情報を用いて、固定境界モデル及び変動境界モデルのそれぞれについて核種移行解析を行った。解析では、粒子追跡の発生点として陸域の処分場(Site A)、大陸棚の処分場(Site B)を想定して実施した。得られた線量の結果を以下に記す。

[1] 陸域の処分場(Site A)を対象とした場合の結果

Fig.10 に、陸域の処分場を対象とした場合の生物圏での双方の境界モデルの総線量の変化を示す。2.2 節の[3]で述べたように、固定境界モデルは核種移行中に塩淡水境界が変化しないため、GBI（流出点）の環境も変化しない。一方、変動境界モデルでは塩淡水境界が核種移行中に変化するため、GBI の環境が海水準変動に応じて時間変化する。ここで、総線量のピークの支配核種である ^{135}Cs において、線量換算係数は、Table3 に示すように GBI が海底（沿岸海域水モデル）あるいは陸上（河川水モデル）で3 オーダー程度の差があり、河川水モデルになる陸上の線量換算係数が大きく、それに伴い線量も高くなる。このため、変動境界モデルでは、GBI が海底から陸上へ、陸上から海底へと切り替わる移行経路において線量が周期的に変動する傾向が見られ、これが固定境界モデルの総線量の違いとして Fig.10 に現れている。しかしながら、変動境界モデルの総線量のピーク値は、GBI が陸上にある時であり、固定境界モデルの線量の変化とほぼ一致する挙動を示すことから、評価の保守性の観点では、双方モデルの違いによる影響は小さいと考えられる。

[2] 大陸棚の処分場(Site B)を対象とした場合の結果

Fig.11 に、大陸棚の処分場を対象とした場合の固定境界モデルおよび変動境界モデルによる総線量の時間変化を示す。また、比較のために、固定境界モデルでは処分場周辺の地下水環境が淡水域に変化した時の線量を青字の○(FBM(Fresh))で、変動境界モデルでは処分場周辺の地下水環境が塩水域のときに処分場から放出された核種による線量を黄色の実線(T-VBM (Salt→Fresh))で、それぞれ重ねて表示している。変動境界モデルの総線量において、陸域の処分場と同様に核種移行中に GBI の環境が陸上あるいは海底に繰り返し切り替わる経路によって線量の値が振動しているような変化が確認されたことにより、 $1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6$ [y]において双方のモデルの差異が顕著となった。また、双方の最大線量は、変動境界モデルよりも固定境界モデルが1 オーダー程度高くなるような線量の変化が見られ、固定境界モデルが保守的となるような変化が見られた。

ここで、高線量が発生する要因が双方の境界モデルで異なっていることに注意が必要である。すなわち、固定境界モデルでは、処分場周辺が淡水化した時の移行経路の距離が急激に短縮するとともに、線量換算係数の大きい陸上 GBI になるタイミングで高線量が生じたと推察される。これは Fig.11 において、全経路の総線量が高い時間での変化と淡水域の経路の線量の変化が一致していることから確認することが出来る（イメージ図を Fig.12 に示す）。一方、Fig.11 から変動境界モデルでは約 $1.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ [y]で生じる全経路の線量が高い時間は、移行距離の長い塩水域の経路の線

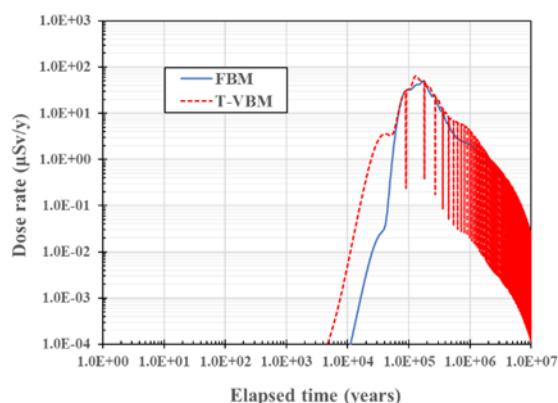


Fig. 10 Change in dose rate over time (Site A)

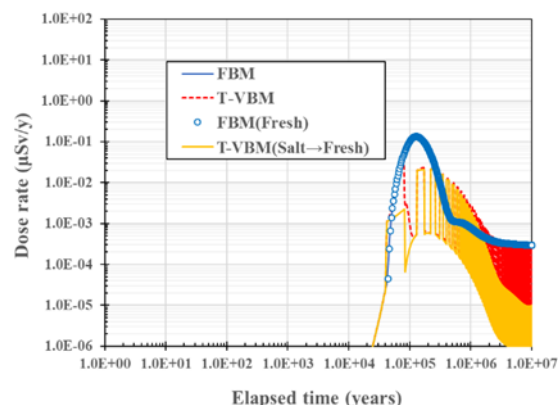


Fig. 11 Change in dose rate over time (Site B)

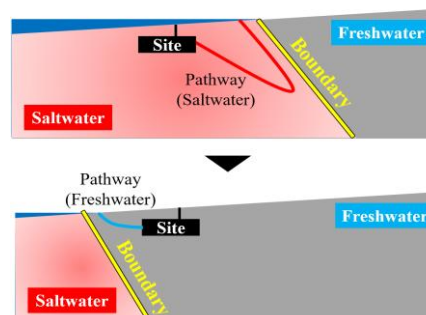


Fig. 12 Image of reaching maximum dose rate (Fixed Boundary Model)

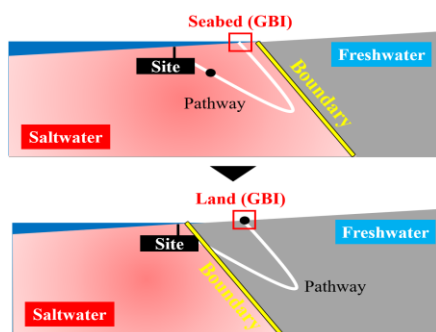


Fig. 13 Image of reaching maximum dose rate
(Time-Varying Boundary Model)

量の変化と一致する。さらに、この時間では GBI の環境変化による総線量の変化も確認された。このことから、処分場から母岩へ核種が移行し始める時点では、処分場周辺の地下水環境は塩水域で GBI は海底になる経路であったが、岩盤中を長い時間をかけて移行する過程で塩淡水境界が移動し、核種 (^{135}Cs) が流出点に到達する頃には、GBI は高線量になる陸上に変化していた。この結果、より大きな線量換算係数が適用され、最終的に線量が高くなると考えられる (イメージ図を Fig.13 に示す)。したがって、処分場周辺が塩水域の時にある時点で核種の移行が開始された場合でも、移行中の塩淡水境界の移動により GBI が陸上に切り替わり、最終的な線量が増加する可能性があることが、変動境界モデルの結果から示唆された。

4. 結言

本研究では、始めに水理解析を実施し、海水準変動による塩淡水境界の変化により複雑化する沿岸部の地下水環境とその環境中における核種の移行経路の把握を試みた。この結果、処分場の位置が陸域か大陸棚かによって、海水準変動が核種の移行経路に及ぼす影響が大きく異なることが明らかとなり、この知見を核種移行解析への入力情報として整理した。次に、地下水環境の時間変化を考慮した解析において、実例が多く比較的簡便である固定境界モデルと、連続的な環境変化を連続的に表現可能であるものの適用事例の少ない変動境界モデルの双方について解析を行い、それぞれのモデルにおける移行経路の差異を明らかにした。

続いて、上記の解析から得られた情報を基に沿岸部特有の地下水環境を考慮した核種移行解析を行い、陸域および大陸棚に設置した処分場を対象に、核種移行率や生物圏での線量を評価した。この結果、陸域の処分場を対象とした場合では双方の境界モデルの違いによる影響は小さく、実例の多い固定境界モデルも保守的な評価が可能であることが示された。一方、大陸棚の処分場を対象とした場合には、変動境界モデルを用いることにより、総線量が増加するような核種移行のシナリオが示されたことから、変動境界モデルによる評価の重要性が示唆された。以上のことから、本研究では沿岸部の地下水環境が核種移行経路に与える影響を、

処分場の位置との関係に着目して明らかにするとともに、沿岸部を対象とした地層処分の核種移行解析において考慮すべき点を整理することができた。

参考文献

- 1) 経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律、第1章 第2条の2(2000)。
- 2) 経済産業省：地層処分に係る地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果（地層処分技術 WG とりまとめ）、p59-62(2017)。
- 3) 日本応用地質学会：応用地質 Q&A 中国四国版、環境地質 環-6 地下水の塩水化、p3-19~3-22(2023)。
- 4) 谷口真人：グローバルな観点からの地下水研究の現状と課題 -地下水研究の時空間方向へのスケールアップ- 総説、水文・水資源学会誌、Vol.13, No.6, p476-485(2000)。
- 5) 西垣誠、菱谷智幸、橋本学、河野伊一郎：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析の手法に関する研究、土木学会論文集、No.511, III -30, p135-144(1995)。
- 6) GoldSim Technology Group : User's Guide GoldSim Contaminant Transport Module, p1~p38(2025)。
- 7) 産総研, JAEA, 原環センター, 電中研:平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, p303-306(2017)。
- 8) 核燃料サイクル開発機構：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊3 地層処分システムにおける安全評価, JNC TN1400 99-023, V-1~V-17, V-24, V-29~V-71, V-104~V-118, VI-1~VI-18, VI-66~VI-86(1999)。
- 9) 日本原子力研究開発機構：平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 直接処分等代替処分技術開発 報告書, p2-175~2-176(2016)。
- 10) 核燃料サイクル開発機構：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021, II -168(1999)。
- 11) 原子力発電環境整備機構：地層処分事業のための安全評価技術の開発(Ⅱ) -核種移行解析モデルの高度化-, NUMO-TU-10-10, 付 4-1~4-2。
- 12) 仲島邦彦, 小尾繁, 蛭名貴憲, 江橋健, 稲垣学: GoldSim による第二次取りまとめレファレンスケースの安全評価モデルの構築, JAEA-Data/Code 2009-009, p2-14(2009)。
- 13) 小尾繁, 稲垣学: GoldSim による核種移行パラメータの時間的変化を考慮した地層処分核種移行解析モデルの構築, JAEA-Data/Code 2010-006, p15(2010)。
- 14) 原子力環境整備促進・資金管理センター：海水準変動を考慮した沿岸地域の地下水流動に及ぼす地層構造の影響について, 土木学会第 60 回年次学術講演会, p613-614(2005)。

地層処分の断層シナリオを対象とした ニューラルネットワークによる核種移行解析手法の構築

木賊 尋也^{*1} 若杉圭一郎^{*2}

Development of Radionuclide Migration Analysis in Fault Scenarios for Geological Disposal by Neural Network Approach

Hiroya TOKUSA^{*1} and Keiichiro WAKASUGI^{*2}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Sep. 16, 2025)

Abstract

In this study, a novel evaluation approach utilizing a neural network was developed to assess the impact of major uncertainty factors in fault scenarios on the maximum annual total dose in geological disposal. The study clarified how variations in fault magnitude, occurrence timing, and fault location affect the results of safety assessment. A more realistic radionuclide transport model was constructed by considering the distinct characteristics of multiple sub-regions within a fault zone, namely the gouge zone, damage zone, and fracture zone. Based on training data obtained from numerical simulations using this model, a machine learning was conducted to obtain prediction models to efficiently estimate the maximum annual total dose. Using this predictive model, an uncertainty analysis was conducted for 1,000 cases involving various combinations of uncertainty factors such as fault magnitude, occurrence timing, and fault location. The results demonstrated that, in all cases, the predicted maximum annual total dose was no more than 12.5 $\mu\text{Sv/yr}$ and remained below the reference levels for unlikely events recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Furthermore, an analysis of the contributions from each fault zone region to the maximum annual total dose revealed that the degree of influence varies depending on the fault's scale and location. These findings indicate that accounting for the number of waste packages located in each fault zone region is essential for an appropriate evaluation of the maximum annual total dose.

Keywords: Geological disposal, Neural networks, Machine learning, Fault scenario, Nuclide migration analysis

1. 緒言

地層処分の実施においては、文献調査、概要調査、精密調査による段階的な地下環境の調査を通じて、長期的に安定な地層が存在するサイトが選定される。これら一連の調査によって断層運動が観測された地域は、地層処分システムに重大な影響を及ぼす可能性があるため、候補地から除外される。このような選定プロセスにより、断層運動が地層処分システムに影響を及ぼす可能性は低いと考えられている。

しかしながら、地層処分は数十年以上の超長期の時間スケールを対象とするため、不可避な不確実性を伴う。大坪ら¹⁾は、このような長期的評価においては、地質そのものが本質的に不確実性を有するため、とりわけ数千年から数百万年という時間スケールにおいては、現在確認されていない断層の形成や既存断層の再活動が生じる可能性を完全に排除することは困難であるとしている。このような断層活動に関する不確実性を踏まえると、地層処分の安全評価においては、調査段階における断層の回避措置に加え、地質の本質的な不確実性に基づき、将来新たに発生しうる断層

活動の影響をあらかじめ評価し、その影響が処分場の安全機能や閉じ込め性能に与える影響を適切に評価（以下、断層影響評価）しておくことが不可欠である。また、国際的にも、発生の可能性が極めて小さい天然現象に起因した稀頻度シナリオについてのめやす線量が設けられており²⁾、新断層発生の不確実性を考慮してもこれらのめやす線量を満たすことを確認することも必要である。このため、これまでに断層影響評価に関する複数の研究が行われており、その例として、第2次取りまとめ（以下、H12）³⁾およびNUMO包括的技術報告書（以下、NUMO 報告書）⁴⁾における評価が挙げられる。

H12の評価では、2,000 m×2,000 mの処分場に断層が対角線上に直撃するシナリオを想定し、これにより断層運動が処分場に与える影響を概略的に評価している。

一方、近年の断層の内部構造に関する研究から、断層帯は破碎の度合いに応じて異なる物理・水理特性を有する複数の領域から構成されることが明らかとなっている⁵⁾。そのため断層内に位置する廃棄体は、その位置する領域の特性によって異なる影響を受ける可能性がある。しかしながら、H12では断層運動により岩盤がずれた境界面（以下、断層面）に位置する廃棄体のみを評価対象としており、断層帯の他

*1 工学研究科応用理化学専攻修士課程

*2 工学研究科応用理化学専攻教授

領域に位置する廃棄体の影響は考慮されていない。さらに、断層の規模（本研究では地震の規模を示すマグニチュードに基づき評価）、断層発生時刻および発生位置といった断層発生に伴う不確実性（以下、これらの因子を「不確実性因子」と呼ぶ）が結果に与える影響を包括的に把握するためには、各不確実性因子の組み合わせを考慮した解析が必要となる。しかし、これらの因子の組み合わせは膨大であり、個別に数値解析を行うには大きな計算負荷を伴う。このような背景から H12 の評価では、断層発生時刻については 1,000 年、1 万年、10 万年の 3 パターンが想定されているものの、断層の発生位置は対角線上の 1 パターンに限定され、断層の規模については考慮されていない。このため、不確実性に関する評価は限定的なものにとどまっている。

一方 NUMO 報告書では、断層帯を構成する複数の領域（破碎の度合いに基づく区分）が考慮されている点で H12 よりも進展が見られるが、不確実性因子に関する体系的かつ定量的な検討は依然として限定的である。

以上のことから、本研究では、断層帯を構成する各領域の特性を反映した核種移行モデルを構築するとともに、各領域に位置する廃棄体の本数を考慮することで、断層帯内の位置に応じた廃棄体の年間あたりの線量率（以下、年間線量という）への寄与を詳細に評価する。また、断層の規模、発生時刻、発生位置といった不確実性因子が最大線量に与える影響を分析することを目的とする。なお、これらの不確実性因子に応じて、断層内に存在する廃棄体本数や発生した断層の位置に応じて断層までの核種の移行距離が変化するため、既往の評価のように廃棄体 1 体あたりの評価結果に影響を受ける廃棄体数を乗じるというアプローチでは正確な評価ができない。すなわち、処分場に定置される 4 万本の廃棄体それぞれについて個別に評価を行うことが必要となる。このような大規模かつ多様なシナリオに基づく評価を人力で実施することは、膨大な作業時間や労力を要する。そこで、本研究ではニューラルネットワークを用いた機械学習を導入することで計算コストの効率化を図り、多種多様な断層の影響を考慮した評価を可能とするための手法についても検討する。

2. 断層帯の特徴および廃棄体への影響

既往の評価事例⁴⁾を参考に設定した本研究における断層帯の概念図を Fig.1 に、各領域に位置する廃棄体を受けるバリア機能への影響をまとめたものを Table 1 に示す。

断層面の直近には断層ガウジ帯（以下、ガウジ帯）が形成される。ガウジ帯は断層面に隣接する領域であり、特に強い破碎および粉碎を受けている。また、断層運動に伴う摩擦熱や深部流体の影響による熱水変質により、粘土状の物質に変化した粘土鉱物で構成されるとされている⁹⁾。この領域に位置する廃棄体への影響としては、強い断層運動の影響を保守的に見積もり、ガラス固化体が瞬時溶解することを仮定する。また、断層運動によって緩衝材が破壊されることで、緩衝材中の収着・拡散機能が喪失することを想定する。

ガウジ帯の外側には断層破碎帯（以下、破碎帯）が広がる。破碎帯も岩石が破碎された領域であるが、構成される岩石片はガウジ帯に比べて大きく、比較的粗い破碎物から

構成される⁹⁾。この領域については、断層による緩衝材の安全機能の喪失に加え、地下水の増加に伴う影響を考慮し、ガラス固化体の溶解速度が増加すると仮定する。これは、地下水の流れが速い環境では、溶解したガラス成分や核種が速やかに移行し、溶解面が常に新しい地下水と接触することで、溶解が促進されるためである。なお、溶解速度の具体的な値は NUMO 報告書を参考に設定している。さらに破碎帯の外側には、プロセスゾーン（以下、割れ目帯）が存在する。割れ目帯は、固結性を保ちながらも割れ目の密度が高く断層活動の影響を受ける領域であるが、人工バリアには直接的な影響を及ぼさないと考えられる。したがってこの領域では、天然バリアの変化、すなわち割れ目の密度の増加による地下水流動の促進を考慮し、透水係数の増加を仮定する。なお、NUMO 報告書においても割れ目帯は考慮されているが、割れ目帯に位置する廃棄体から放出された核種は瞬時に断層面まで流入することが仮定されており、母岩中の移行は保守的に無視されている。一方、本研究では割れ目帯に位置する廃棄体から破碎帯までの母岩中の移行を考慮した。この際、割れ目帯内に存在する廃棄体の位置によって破碎帯までの距離が異なる点に着目し、これら移行距離の違いを考慮した現実的な設定を行った。

NUMO 報告書には、断層帯の各領域における透水係数について、日本全国の地質データに基づく平均値が示されている。これによると、粘土質のガウジ帯は最も透水係数が小さく、最も透水係数が大きいのは破碎帯であることが示されている。このため本研究では、ガウジ帯、破碎帯および割れ目帯に位置する廃棄体からの核種は破碎帯を通り帯水層まで移行すると仮定した。このため、ガウジ帯および破碎帯に位置する廃棄体については、人工バリアを移行した核種が、直接断層（破碎帯）を通して地表へ移行すると仮定している。なお、断層運動の影響を受けない領域として健全な母岩を設定し、この領域に位置する廃棄体については、断層の影響を受けないものとした。

なお、その他の数値設定に関しては H12 を参考に設定した。

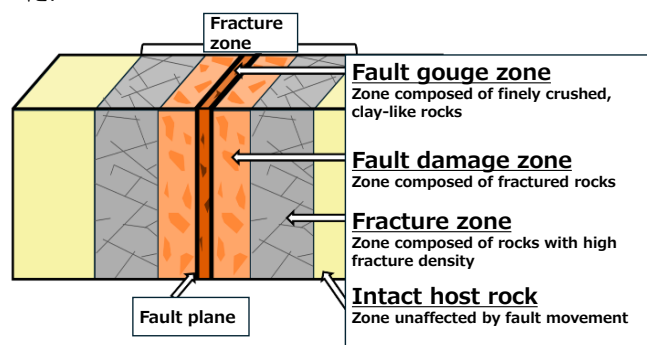


Fig.1 Conceptual model of fault zones.

Table 1 Impact of fault activity on the safety functions in each barrier.

	Fault gouge zone	Fault damage zone	Fracture zone	Impact host rock
Vitrified waste	Instant dissolution	Decrease of dissolution rate(lifetime: 360 years, dissolution rate: 67.2 g/m ² /y)	No effect (dissolution rate: 0.365 g/m ² /y)	No effect (dissolution rate: 0.365 g/m ² /y)
Buffer material	Lost of safety functions (sorption and diffusion)	Lost of safety functions (sorption and diffusion)	No effect (Same value as in the H12)	No effect (Same value as in the H12)
Natural barrier	No natural barrier effect	No natural barrier effect	Permeability increases by two orders of magnitude (Logarithmic mean of the transmissivity: -7.99)	No effect (Logarithmic mean of the transmissivity: -9.99)

3. 断層影響評価モデルの設定

本研究では、断層影響評価モデルの設定において、H12 のレファレンスケースで採用されている評価体系や各種設定を適用した。具体的には、断層発生前の評価体系については、モデル・データともに H12 の設定を採用し、断層発生後については、各領域で想定される安全機能の喪失および劣化に応じて、H12 のモデルのパラメータを適宜変更して評価を行った (Table1)。

また、処分場に関しては以下のような設定を行った。

- H12 と同様に 2,000 m×2,000 m の面積の処分場に 4 万体の廃棄体が処分される。
- 断層帯は必ず処分場を直撃し、処分場を貫通すると仮定する。
- 廃棄体は前章で定義した 4 つの領域 (ガウジ帯、破碎帯、割れ目帯、健全な母岩) のいずれかに位置する。

さらに廃棄体から生活圏までの核種移行経路に関して、本研究では、処分前から既に存在していた断層を「既存断層」、処分後新たに発生した断層を「新生断層」と定義した上で、以下を仮定した。

- 処分後 1000 年が経過するとオーバーパック (以下、OP) が寿命により損傷し、核種の溶出が始まる。
- 新生断層発生前にガラス固化体から溶出し、人工バリア外側まで達した核種は、既存断層を通過して帯水層まで移行し、そこから生活圏へと移行する。
- 新生断層発生後は、ガラス固化体から溶出した核種および緩衝材に存在していた核種は、新生断層を通過して生活圏へ移行する。
- 新生断層中の核種移行モデルは、断層破碎帯の地質学的特徴、すなわち破碎物の隙間を通じた地下水や物質の移行を考慮し、破碎帯を多孔質媒体としてモデル化する。

4. ニューラルネットワークを用いた評価手法

ニューラルネットワーク (以下、NN) とは人間の脳の神経回路を模倣して設計された機械学習モデルである。NN は、与えられたデータからパターンを学習し、未知の値を予測することが可能であり、現在では画像認識や音声認識、自然言語処理などさまざまな分野で広く活用されている。

本研究では、結果に影響を与える説明変数と、それによって得られる目的変数のペア (これを教師データと呼ぶ) を用いて予測モデルを構築する「教師あり学習」を採用した。このとき、具体的には中間層 (学習を行う層) とそのニューロン (演算単位) の数を設定し、教師データの結果とサンプリングによって得られたモデルの予測値を比較する。この誤差が最小となるように中間層やニューロン数を調整しながら学習を繰り返すことで、精度の高い予測が可能となる。この後、構築された予測モデルに対して、説明変数をサンプリングにより設定し、未知の目的変数の予測を行う。ここでは、最終的に断層帯の各領域での年間線量を合計して算出した総線量の最大値 (以下、最大総線量) を目的変数として予測する。本研究の解析手順を Fig.2 に示す。

当初は、Fig.2 に示す解析手順を構築するにあたり、各領域の年間線量を個別に予測し、それらを合計することで最大総線量を算出するというシンプルなアプローチを試行した。しかし、どのような説明変数を用いても、精度の良い予測結果を得ることができなかった。これは、目的変数 (最大総線量) を今回対象とした説明変数 (不確実性因子) のみから直接予測することに限界があったためと考えられる。そこで、Fig.2 に示すように、最大総線量を構成する要因を「各領域に位置する廃棄体数」と「最大総線量時刻における各領域の廃棄体 1 体あたりの年間線量」に分け、それぞれ個別に NN を適用した後、得られた結果から最大総線量を算出する

アプローチを採用した。具体的には、まず説明変数から総線量が最大となる時刻を NN で予測し、その結果を説明変数として用いることでガウジ帯、破砕帯、割れ目帯、健全な母岩のそれぞれの領域における廃棄体 1 体あたりの年間線量を求め、この和と各領域に位置する廃棄体数から最大総線量を推定するという階層的アプローチを導入した。このため、NN による推定では、各核種についての年間線量を評価することはせず、領域ごとに最大線量を生じるときの全核種の合計値としての年間線量のみを評価している。

マグニチュードの設定にあたっては、実際の断層活動の調査に基づいて示された経験式である松田式⁷⁾を参考にした。この式は、日本で発生した内陸型地震のデータをもとに、断層全体の長さ（以下、断層長さ） L km とマグニチュード M の関係を表す経験式である（式 (1)）。松田式ではマグニチュードの範囲は $M6.2 \sim M8.0$ とされているが、本研究ではより広範囲な影響評価を目的として、この経験式が $M6.0 \sim M9.0$ においても成立するものと仮定し、当該範囲を解析対象とした。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (1)$$

L : 断層長さ km

M : マグニチュード

本研究では、断層発生位置を数値化するために、 $2,000\text{m} \times 2,000\text{m}$ の処分場を座標上に設定した。次に、断層を処分場に対してランダムに直撃させ、断層と処分場の境界との交点の座標を算出し、この座標を説明変数における断層発生位置の値として用いた。なお、前章で述べた通り、必ず処分場を貫通するという条件のもと、説明変数として用いている。

断層発生時刻に関しては、適切なサイト選定が行われた場合、少なくとも処分後 1000 年以内に断層が処分場を直撃する可能性は低いと考えられる。さらに、既往の報告書⁸⁾では、断層運動に伴うせん断力が OP に与える影響を評価する試験が実施されており、その結果、OP がせん断力に対して十分な耐性を有することが確認されている。したがって、仮に OP が機能する処分後 1000 年以内に断層運動が生じたとしても、核種の溶出が始まる可能性は低いと予測される。また、既往の研究では、断層発生時刻の上限として 10 万年を設定しているが、本研究ではより広範囲な時間スケールの影響を評価するため、評価対象期間を処分後 1,000 年から 100 万年までに拡張した。

破砕帯および割れ目帯の面積に関しては、まずマグニチュードに基づいて松田式より断層長さを算出し、次に金折の論文⁹⁾にて示された経験式（式(2)および式(3)）を用いてそれぞれの幅を計算した。その後、断層発生位置に基づき処分場内における断層帯の位置を決定し、最終的に各領域の面積を求めた。

$$T = 0.83 \times 10^{-3} L^{1.15} \quad (2)$$

$$P = 1.6 \times 10^{-2} L \quad (3)$$

T : 破砕帯片幅 m

P : 割れ目帯片幅 m

また、「各領域に位置する廃棄体数」における教師データに関しては、Fig.3 に示すように処分場を 25×25 の計 625 ブロックに分割し、ブロック単位で各領域に位置する廃棄体数を計数した値を使用した。なお、ガウジ帯は他の領域と比較して幅が非常に狭いため、一本の直線（断層面）として再現し、この直線に接する人工バリアの数をガウジ帯に位置する廃棄体数として、廃棄体単位で正確に計数した。

「最大総線量に達する時刻」および「最大総線量時刻における廃棄体 1 体あたりの年間線量」における教師データの目的変数に関しては、2, 3 章で定義した条件に基づき、核種移行解析ソフトにて解析モデルを構築し、これを利用して得られた結果を用いた。なお、ここで解析ソフトは、工学・環境・ビジネスなど様々なシステムに加え、核種移行解析も可能な汎用シミュレーションソフトである GoldSim¹⁰⁾を用いた。また、割れ目帯および健全な母岩に位置する廃棄体に関しては、各ブロックの位置に応じて破砕帯までの移行距離が異なる。このため、これら移行距離の違いに起因する移行遅延効果の影響を適切に考慮するために、ブロックごとに移行距離を算出し、それぞれに対応した解析を実施した。

また、これらの解析結果に基づき得られた健全な母岩に位置する廃棄体からの最大総線量は、ほかの領域に比べて 2～3 オーダー程度低く、その影響は非常に小さいと判断された。したがって、健全な母岩に位置する廃棄体からの年間線量は最大総線量の計算から除外した。なお、健全な母岩に位置する廃棄体からの年間線量が相対的に高くなるケース（マグニチュードが低く、断層が処分場の端部を直撃するケース）においても、他の領域に比べて依然として十分に低い値であることが確認されている。

本研究では、上記の設定条件に基づき、教師データとして 100 ケースを収集した。一般的に、NN を用いた予測においては、教師データの数が多ほど予測精度の向上が期待される。しかし今回、教師データの数を 50 ケースから 100 ケースに増やした場合でも最大総線量の予測誤差の改善はほとんどみられなかった。このため、本研究では教師データは 100 ケースで妥当であると判断した。

また、誤差の算出方法に関しては、収集した 100 ケースの教師データのうち無作為に抽出した 10 ケースをテストデータとして使用し、数値解析による解析値と予測結果を比較することで評価を行った。比較結果を Fig.4 に示す。比較の結果、テストデータにおける誤差は、最大で 15.1 % で、平均で 5.4 % であった。NN を用いた予測では、入力空間の局所的な情報不足などのさまざまな要因により精度の低い予測結果（外れ値）が生じる可能性があることから、平均誤差が約 5 % 程度に収まっていることは、構築した NN モデルが最大総線量の予測に対して十分な精度を有していると判断できる。なお、従来の数値解析手法では、教師データ 1 ケースの作成に約 5 時間を要するのに対し、NN を用いた予測では、約 1 時間で 1,000 ケースの解析が可能となった。以上の

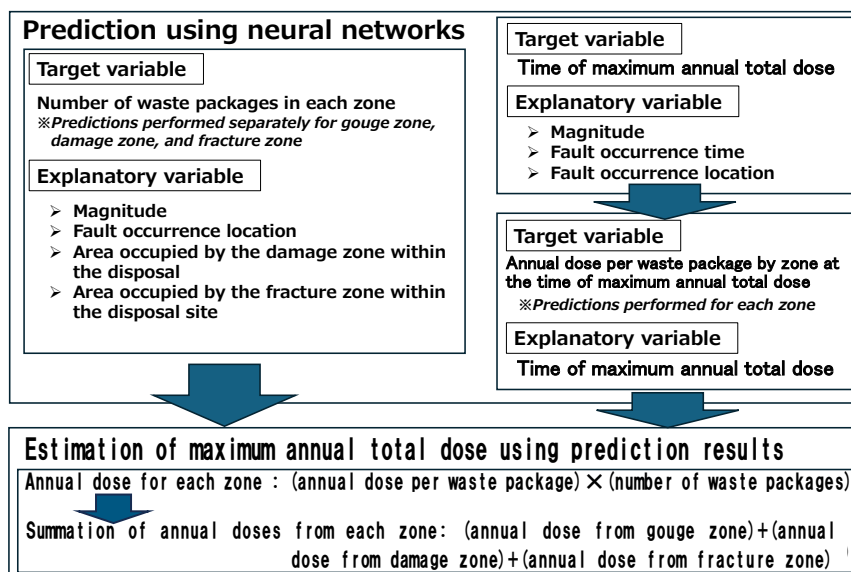


Fig.2 Overall workflow for deriving predictive equation.

ことから、NN の活用により、計算負荷を抑えながら従来手法と同等の解析精度を確保できることを確認した。

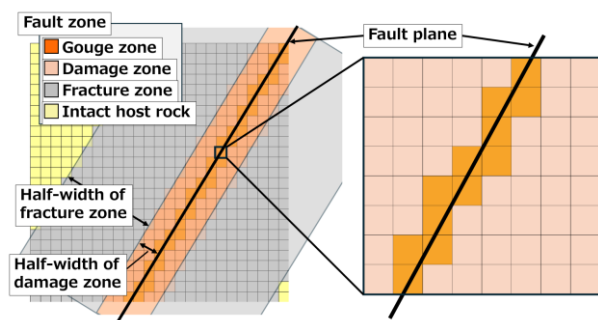


Fig.3 Conceptual diagram of a fault zone occurring in the disposal site.

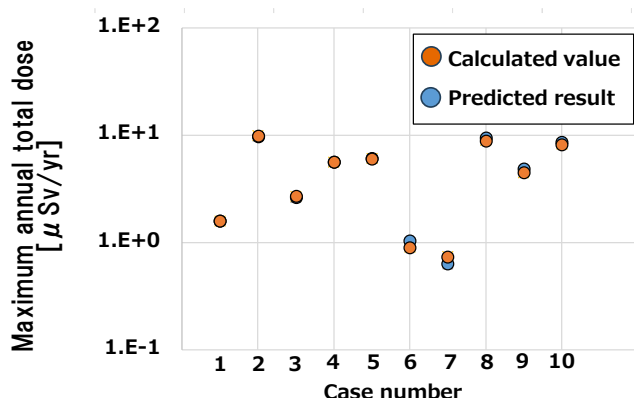


Fig.4 Predicted result of the maximum annual total dose.

5. 断層影響に関する不確実性解析

本研究では、1,000 ケースのサンプリングデータに対して最大総線量の予測を実施した。サンプリング数の設定に関しては、500 ケースおよび1,000 ケースの場合で最大総線量

の標準偏差を比較した結果、両者に大きな差は見られなかった。したがって、サンプリング数として1,000 ケースを採用することが妥当であると判断した。本章では、得られた予測結果をもとに、不確実性因子が最大総線量に与える影響、ならびに断層帯の各領域が最大総線量にどのように寄与しているのかについて考察する。

5.1 最大総線量の上限值に関する考察

ICPR 勧告では、天然現象の影響によるシナリオ（稀頻度シナリオ）において参考とすべき長期間の被ばくの年間線量のめやす値として1~20 mSv/yr の範囲が示されている。本研究における予測結果に基づく最大総線量の上限値は12.5 μSv/yr であり、このめやす値を超えるケースは存在しなかった。

また、この値は既往の断層影響評価における年間線量の最大値、すなわち H12 における1,600 μSv/yr や、NUMO 報告書における100 μSv/yr（深成岩類）と比較しても低い結果となっている。これは、H12 では断層中の移行遅延効果が考慮されておらず、核種が瞬時に生活圏へ移行するという保守的な設定が採用されているのに対し、本研究では、断層を多孔質媒体としてモデル化し、移行過程における核種の収着や拡散等の移行遅延効果を考慮したため年間線量が低くなったと考えられる。また NUMO 報告書では、本研究と同様に断層を多孔質媒体としたモデルが採用されているが、パラメータの設定が本研究と比較して保守的であること（例えば、本研究では動水勾配が0.01 であるのに対し、NUMO 報告書では0.05 など）が影響していると考えられる。なお、NN では核種ごとの年間線量の予測はできないが、各不確実性因子の幅からまんべんなくランダムにサンプリングした教師データの結果では、最大総線量に最も寄与する核種（以下、支配核種）はすべて²²⁹Thであった。このため、NN で評価したケースにおいても支配核種は²²⁹Th であると考えられる。

5.2 重回帰分析

各不確実性因子に対して重回帰分析を行い、最大総線量との相関を評価した。なお、重回帰分析を行うにあたり、データの標準化を行った。また、断層発生位置に関しては、断層の全長のうち処分場を直撃する部分の長さ（以下、「処分場に直撃した断層長さ」）を算出し、このパラメータを説明変数として重回帰分析を行った。各不確実性因子に対する最大総線量の予測結果について、最大総線量に最も影響を与えた領域（以下、支配領域）とともにプロットした結果を Fig.5, 6, 7 に、各パラメータに対する偏回帰係数を Table 2 に示す。Table 2 より、断層発生時刻は最大総線量との相関は極めて小さいことがわかる。一方、マグニチュードや処分場に直撃した断層長さといった、廃棄体数に影響を与えるパラメータは最大総線量に対して正の相関を示すことが明らかとなった。

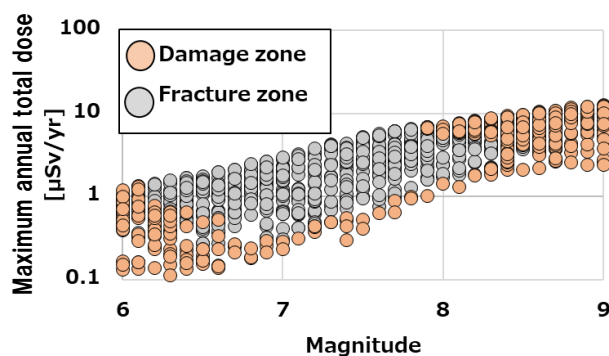


Fig.5 Maximum annual total dose for magnitude.

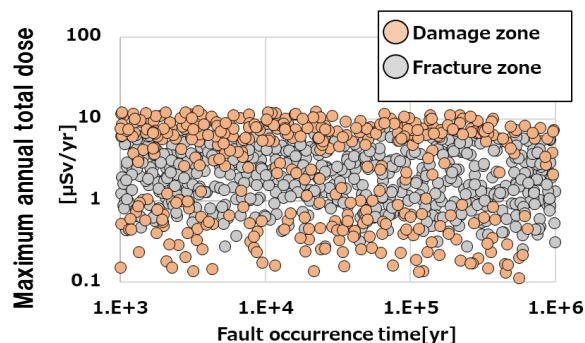


Fig.6 Maximum annual total dose for fault occurrence time.

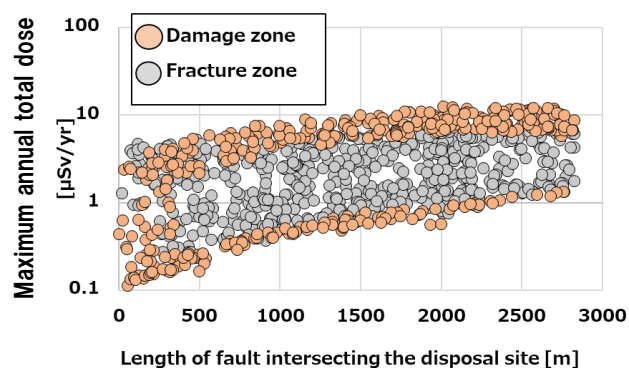


Fig.7 Maximum annual total dose for length of fault intersecting the disposal site.

Table 2 Partial regression coefficients of uncertainty factors for the maximum annual total dose.

	Magnitude	Fault occurrence time	Length of fault intersecting the disposal site
Partial regression coefficient	0.81	-0.057	0.46

5.3 マグニチュードと支配領域の関係

断層が処分場の対角線上に直撃したケースを想定し、代表的なマグニチュードごとの断層帯各領域の面積を例示した図を Fig.8 に示す。

Fig.5 よりマグニチュードの増加に伴い支配領域が破砕帯から割れ目帯、そして再び破砕帯へと変化していることがわかる。M6 付近では断層の規模が小さいため、断層帯が処分場を占める割合が小さい (Fig.8 左図)。この場合、廃棄体への影響が大きく、かつガウジ帯よりも廃棄体数の多い破砕帯が支配領域となるケースが多い。さらにマグニチュードが大きくなるにつれ断層帯が処分場を占める割合が徐々に大きくなり、その結果割れ目帯に位置する廃棄体数が増加することに起因して、割れ目帯が支配領域となる (Fig.8 中央図)。一方、M8 以降では断層帯の規模が処分場と同等あるいは処分場以上のスケールとなり、破砕帯に位置する廃棄体数が増加する (Fig.8 右図)。これにより、割れ目帯が処分場外縁付近に位置するため、この領域内の廃棄体数が減少し、結果として再び支配領域が破砕帯となるケースが増加する。

また、約 M6.7~8.3 の範囲では、最大総線量の変動幅のうち低い側のケースで破砕帯が支配領域となるケースが見られた。これらのケースはいずれも、処分場に直撃した断層長さが 500 m 以下であった。断層が処分場の端部を直撃するような短い長さでは、割れ目帯に位置する廃棄体数の増加が顕著ではなく、このため、M6.7~7.8 の範囲においても一部で支配領域が破砕帯となる傾向が確認された。

一方、Fig.7 から断層長さが 500 m 以下の場合、破碎帯が支配領域になる傾向が確認できるが、これは上述の Fig.5 の結果と整合している。また、同一の断層長さにおける最大総線量の幅は、破碎帯が支配領域となるケースが上限を形成している。これは Fig.5 で示されているように、マグニチュードが 8 以上のケースの多くで破碎帯が支配領域になっているためであり、したがって各断層長さにおける最大総線量の上限はマグニチュードの大きいケース、すなわち破碎帯が支配領域となるケースによって規定されていると考えられる。

以上の結果から、断層の廃棄体への影響は、割れ目帯、破碎帯、ガウジ帯の順で大きくなると仮定したが、最大総線量への影響は必ずしもこの順番で寄与が大きくなるとは限らず、断層の規模や位置に応じて各領域に存在する廃棄体数にも大きく左右されることが示された。

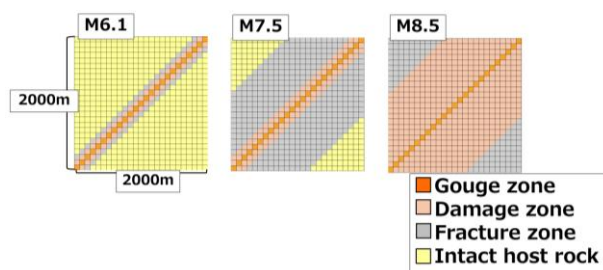


Fig.8 The extent of the fault zone for each magnitude.

6. 結言

本研究では断層帯の各領域の特徴を考慮した核種移行モデルを構築するとともに、NNを用いることにより断層の設定に関する不確実性が最大総線量に与える影響を評価した。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- 従来の断層影響評価では、1本の廃棄体に対する解析結果に断層の影響を受ける廃棄体本数を乗じて総線量を算出していた。本研究ではこれを見直し、断層の影響度に応じて廃棄体を類型化し、実スケール（4万本）を対象とした精緻化した評価モデルを構築した。さらに、断層構造についても、破碎帯・割れ目帯・ガウジ帯といった断層の構造的特徴を反映させたモデルを構築し、より現実的な評価を可能とした。
- このような大規模かつ高解像度なモデルに対して、従来の数値解析手法はモデル構築やパラメータ設定が煩雑であり、さらにこれを用いて不確実性を考慮した多数のケースを解析することは現実的ではない。このため、本研究では、計算負荷を抑えながら高精度な解析を実現できる NN を用いた推定手法の有効性を示し、従来の数値解析手法と同等の結果を得ることが可能であることを確認した。
- NNを用いて 1000 ケースのサンプリングデータに対する最大総線量の予測を行った。その結果、ICRP 勧告における稀頻度シナリオの線量基準値（1 mSv/yr）を超えるケースはなく、最大でも 12.5 μ Sv/yr であった。このような低い値となった要因は、既往の評価で保守的に無視されていた

断層中の移行遅延や断層までの移行距離を適切に考慮したことにある。これにより、既往の評価が過度に保守的であった可能性が示唆された。

- 感度解析・重回帰分析の結果、最大総線量はマグニチュードおよび処分場に直撃した断層長さとの正の相関を示すことが確認された。これは、これらのパラメータの増加が断層帯全体に位置する廃棄体数の増加につながるためである。
- 最大総線量への寄与に関しては、廃棄体への影響が最も高いとされるガウジ帯よりも、破碎帯や割れ目帯に存在する廃棄体の方が大きな影響を示すケースが多かった。これは、ガウジ帯の領域の大きさはマグニチュードによらず一定である一方、破碎帯や割れ目帯の領域はマグニチュードの増加とともに大きくなり、それに伴い廃棄体数が増加することに起因する。このことから、最大総線量に対しては廃棄体への影響度に加えて断層の規模や位置に応じて各領域に存在する廃棄体数を考慮することが必要であることが示された。

今後は、本研究で構築した解析手法および得られた知見を、安全評価における他の不確実性要因にも適用し、核種移行に関わるプロセスを簡略化せずに現実的にモデル化することで、広範な不確実性を考慮した安全評価を実施する予定である。これにより、今後の包括的な安全評価に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 大坪誠 他:地層処分の長期安全を評価する際の断層活動における不確実性, 地質学雑誌 第 120 巻 第 12 号, pp.423-433 (2014).
- 2) ICRP:長寿命放射性固体廃棄物の地層処分における放射線防護, ICRP Publication 122 (2013).
- 3) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊3, JNC TN1400 99-023(1999).
- 4) 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- 5) Aiming Lin 他: Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan. Journal of structural Geology, volume57, pages1-15, (2013).
- 6) 大鹿村中央構造線博物館:断層岩の分類, <https://mtl-muse.com/study/faultrocks/classification/>.
- 7) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震 2, 第 28 巻, pp.269-283(1975).
- 8) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: 平成 25 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発報告書 (2014).

9) 金折裕司:「断層の影響はどこまで及んでいるか」, 応用地質, 第 41 巻, 第 6 号, pp.323-332(2001).

10) GoldSim Technology Group LLC: GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide, GoldSim Technology Group LLC(2009).

制御用音源を境界壁に設置した開放窓通過騒音の能動制御システム

江尻 直樹^{*1} 森下 達哉^{*2}

Active Noise Control System for Noise Passing through Open Windows with Secondary Sound Sources Installed in the Boundary Walls

by

Naoki EJIRI^{*1} and Tatsuya MORISHITA^{*2}

(Received on Apr. 7, 2025 and accepted on Jul. 20, 2025)

Abstract

An active noise control (ANC) system targeting noise passing through windows is being considered to prevent a decrease in sound insulation when ventilating by opening the windows. In the case of windows in residences, etc., it is desirable to install control sound sources around the window opening to ensure lighting, ventilation, and a view. Furthermore, an ANC system with little change in performance even when the window opening area is changed is required. We propose a method for arranging and driving the control sound sources of an ANC system, and propose an ANC system with sufficient noise reduction performance regardless of the window opening area. In the system, in order to control plane wave noise that has propagated from a sufficient distance, the control sound sources installed around the window section generate only the plane wave component. In addition, by adjusting the gain for driving the control sound sources, it is possible to generate only the plane wave component within the window section even if the window opening area changes. Numerical simulation results show that the noise reduction characteristics can be improved by using the proposed ANC system. When the system is tested using a scaled-down window device, the noise reduction characteristics are the same as those of the numerical simulation results.

Keywords: Active control of noise, Open window, Plane wave, Noise reduction

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症の広がりに伴って、住居に加えてオフィスや教室のような空間での換気の重要性が高まっている。換気を行う際に窓を開放することによって、密閉窓で確保されていた遮音性が低下することが問題となる⁽¹⁾。開放した窓部の遮音性を受動的対策で向上させることは困難であり、能動的対策の検討がこれまでも行われている⁽²⁾。

窓部を通過する騒音のアクティブコントロール (Active Noise Control, 以下 ANC) については、窓部開放空間内に制御用音源を配置する構成によって優れた騒音抑制効果が得られることが明らかにされている^(3,4)。住居等の窓部における ANC では、採光、通風、眺望の観点から窓部開放部の周囲に置いた制御用音源を用いることが望ましい。しかし、窓部周囲に制御用音源を配置する構成は窓部開放空間内に制御用音源を配置する構成と比較したとき、騒音抑制効果の低下が指摘されている⁽⁵⁾。また、窓部を開放して換気する際には、開口部面積を変化

させる使用方法が想定される。これまでの窓部周囲に制御用音源を配置する ANC の構成では、窓開口部面積が変化すると有効に動作しないもしくは不要になる制御用音源が出てくるのが懸念される。こうした問題に対応できる ANC システムの構築が必要である。

そこで本研究では、窓部周囲に設置した制御用音源を用いた ANC システムで窓部を通過する騒音を抑制する方法を検討し、窓開放部面積の変化に対応が容易となる ANC システムの構成を提案する。さらに、数値シミュレーション及び実機動作実験を通じて提案 ANC システムの騒音抑制効果について検討する。

2. 窓部周囲に設置した制御用音源によるアクティブコントロール

2.1 制御用音源の配置

本論文では、Fig. 1 に示すような窓部周囲の境界壁面上に制御用音源を 5 つ配置する ANC システムを例に挙げて検討する。騒音源が十分に遠方にあるとすることによって、窓部の音場には平面波成分のみが存在することとする⁽⁶⁾。

一方、制御用音源からは、平面波成分に加えて高次モー

^{*1} 工学研究科機械工学専攻修士課程

^{*2} 工学部機械工学科教授

ド成分も励振される．平面波音場を制御する際に，高次モード成分が騒音抑制効果を損なうことが考えられるため，本研究では，平面波成分のみを生成するように複数の制御用音源を駆動する．次節以降で平面波成分のみの生成方法を述べる．

2.2 窓部断面内の音場

長方形断面のダクト状空間において，位置 $x_0 = (x_0, y_0, z_0)$ におかれた点音源が周波数 ω の音波を励振するものとする．その時位置 $x_1 = (x_1, y_1, z_1)$ において観測される音圧 $p(x_0, x_1; \omega)$ は，

$$p(x_0, x_1; \omega) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m(x_0; \omega) \psi_m(x_1, y_1) \quad (1)$$

のようにモード成分(モードインデックス $m = (m_x, m_y)$)の重ね合わせで表される⁽⁷⁾． a_m は (m_x, m_y) モードのモード振幅であり次式で与えられる．

$$a_m(x_0; \omega) = \frac{\omega \rho_0 c_0}{j(\omega^2 - \omega_m^2)} q(\omega) \psi_m(x_0, y_0) \quad (2)$$

ここで， ρ_0 は空気の密度， c_0 は音速を表す． $q(\omega)$ は音源の粒子速度振幅である．また， $\psi_m(x_i, y_i)$ は空間の境界が剛体である音場の固有関数の座標 (x_i, y_i) における値であり，

$$\psi_m(x_i, y_i) = \sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y} \cos \frac{m_x \pi x_i}{L_x} \cos \frac{m_y \pi y_i}{L_y} \quad (3)$$

で与えられる．なお， $m_{\text{axis}} = 0$ のとき $\varepsilon_{\text{axis}} = 1$ ， $m_{\text{axis}} \neq 0$ のとき $\varepsilon_{\text{axis}} = 2$ である ($\text{axis} = x, y$)． ω_m は長方形断面におけるモード m の固有周波数である．

2.3 制御用音源における音場の生成

制御対象モード成分数と同数の制御用音源を用いることとすると，生成されるモード m のモード振幅 a_m と n 番目の制御用音源の粒子速度振幅 q_n との関係は以下のように表される．

$$\mathbf{a} = \boldsymbol{\psi} \mathbf{q}$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_{00} & \psi_{01} & \cdots & \psi_{0n} \\ \psi_{10} & \psi_{11} & \cdots & \psi_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{m0} & \psi_{m1} & \cdots & \psi_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで， ψ_{mn} は制御用音源 n で生成されるモード m

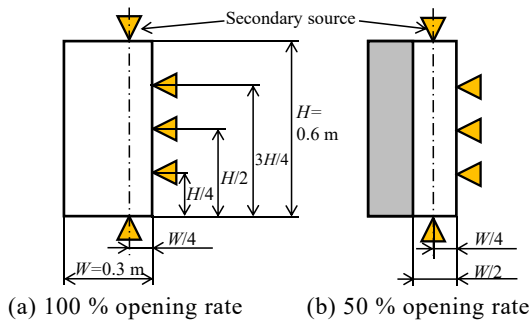


Fig. 1 Configuration of secondary sources

の固有関数の値である．式 (4) が正則行列となるように制御用音源を適切に配置することによって，制御対象モード成分数と同数の制御用音源で，各モード成分を独立に生成できる．

$$\mathbf{q} = \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{a} \quad (5)$$

制御用音源の位置と窓開放面積によって $\boldsymbol{\psi}^{-1}$ が定まるため，式 (5) は所望のモード振幅に定数係数をかけ合わせて制御用音源の粒子速度振幅を決定できることを表している．

3. 数値シミュレーション

3.1 計算モデル

提案 ANC システムの騒音抑制効果を確認するため時間領域差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD 法)⁽⁸⁾を用いて数値シミュレーションを行う．Fig. 2 に数値シミュレーションモデルを示す．空間の大きさを，高さ 1.2 m，幅 0.96 m，奥行 1.76 m とする．騒音が十分遠方で発生するものとし，ガウシアンパルスを駆動信号とした平面波状の音波が窓部に入射するようにする．本研究では居住用窓において ANC システムの運用を想定しているため，実寸大の窓枠の開口部寸法を横 0.9 m，縦 1.8 m とし，数値シミュレーションでは面積比 1/9 として窓開口部寸法を高さ 0.6 m，幅 0.3 m (水色表示部分) とする．なお，解析空間周囲には，吸収境界を設け，解析領域端での数値的な反射波発生を抑制する．

3.2 提案 ANC システムの制御用音源

提案 ANC システムの制御用音源の駆動について Case 1, 2 の 2 つの条件を用いることにする．Case 1 では，平面波成分のみを制御し，他のモード成分を生成しないように，各制御用音源の粒子速度振幅を式 (5) から求め，その値に基づくゲイン G1～G5 を Fig. 3 に示すように各制御用音源に与えて駆動する．窓開口率 100 % と 50 % それぞれのゲインの値を Table 1 に示す．

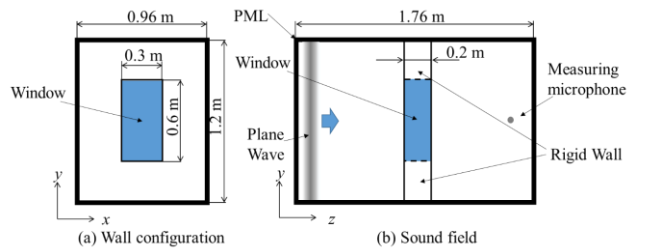


Fig. 2 Numerical model of wall-mounted window system

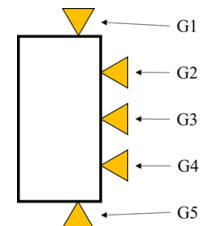


Fig. 3 Allocations from G1 to G5 for control sound sources

Table 1 Gain values for control sound sources

Gain	Case 1		Case 2	
	100%	50%	100%	50%
G1	1.7	0.5	1.0	1.0
G2	-2.9	-0.5	1.0	1.0
G3	3.4	1.0	1.0	1.0
G4	-2.9	-0.5	1.0	1.0
G5	1.7	0.5	1.0	1.0

一方, Case 2 では, 各制御用音源近傍において同振幅, 同位相の音圧が生成されるようにゲイン G1~G5 を等しくして全ての制御用音源を駆動する.

3.3 窓部における音場

まず, 制御用音源近傍の音場の状況の確認を行うため, 窓部断面での音圧レベル分布を確認する. Fig. 4 に, 窓開口率 100 % の場合の窓部断面での 287 Hz における音圧レベル分布を示す. なお, この周波数は (0, 1) モードの固有周波数に相当する. Fig. 4(c)では, ANC OFF とし, 遠方から伝搬する騒音が窓部断面に到達する場合の音圧レベル分布を表している. 平面波状騒音が窓部に到達する場合には, 窓部断面全体で音圧レベル分布は平坦となった. Fig. 4(a), (b) では, 制御用音源を駆動する場合でも, この周波数では, 窓部断面における音圧レベル分布は平坦であった.

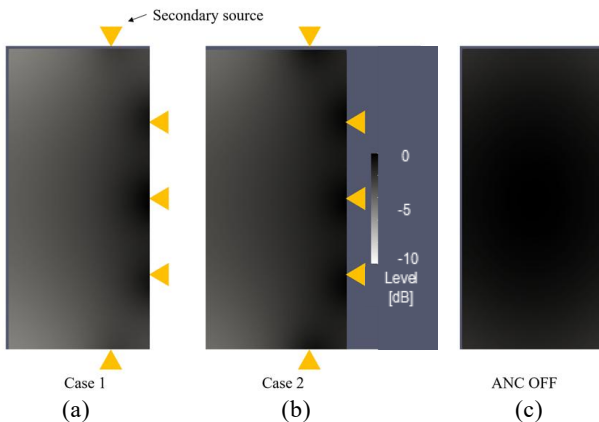


Fig. 4 Distributions of sound pressure levels at 287 Hz within window cross section with 100 % window opening rate.

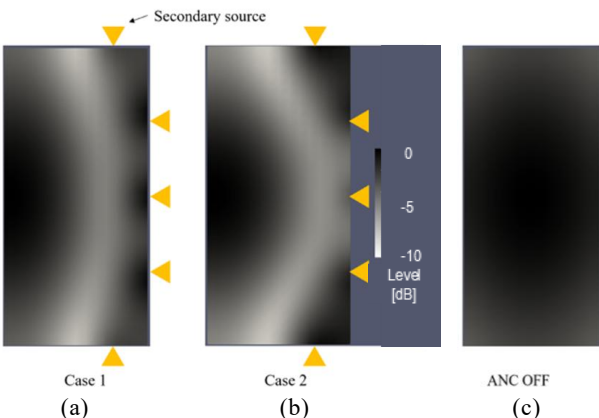


Fig. 5 Distributions of sound pressure levels at 573 Hz within window cross section with 100 % window opening rate.

Fig. 5 に, 窓開口率 100 % の場合の窓部断面での 573 Hz における音圧レベル分布を示す. なお, この周波数は (1, 0) 及び (0, 2) モードの固有周波数に相当する. Fig. 5(c) では, ANC OFF とし, 遠方から伝搬する騒音が窓部断面に到達する場合の音圧レベル分布を表している.

Fig. 5(c) に示すように, 平面波状騒音が窓部に到達する場合には, 573 Hz においても窓部断面全体で音圧レベル分布は平坦であった. Fig. 5(a), (b) では, いずれの場合にも制御用音源から発生する平面波成分以外の高次モード成分の影響と考えられる音圧レベル分布が認められた. ただし, Fig. 5(a) に示す Case 1 として制御用音源を駆動する場合が, Fig. 5(b) に示す Case 2 の場合より音圧レベル差が小さくなった. このことから, Case 1 で制御用音源を駆動することによって窓部断面内の音場が平面波音場に近づくことがわかった.

次に, Fig. 6 に, 窓開口率 50%の場合の窓部断面での 287 Hz における音圧レベル分布を示す. Fig. 6(a), (b) とともに窓開口率 100 % の場合と同様に音圧レベル分布は平坦であった.

Fig. 7 に, 窓開口率 50%の場合の窓部断面での 573 Hz における音圧レベル分布を示す. Fig. 7(a), (b)どちらも窓開口率 50%では音圧レベル分布は平坦であった. これは, 窓の横幅が半分にになり, 窓の横方向の中央に制御用音源を設置することによる音場の対称性から奇数次モードが励振されないため, 音圧レベル差が生じにくくなった.

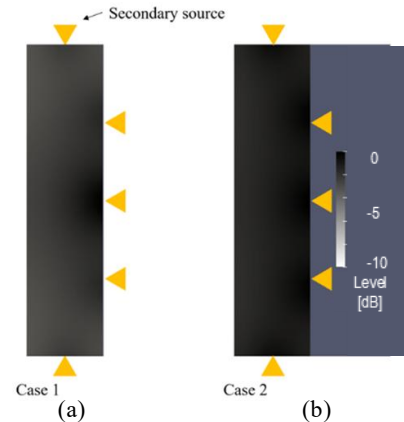


Fig. 6 Distributions of sound pressure levels at 287 Hz within window cross section with 50 % window opening rate.

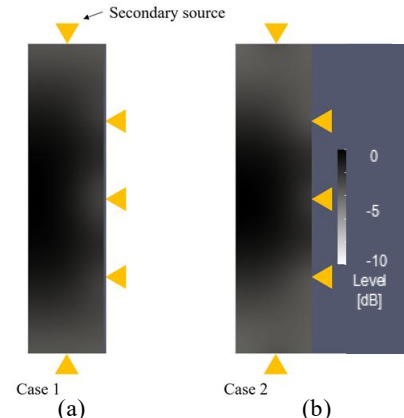


Fig. 7 Distributions of sound pressure levels at 573 Hz within window cross section with 50 % window opening rate.

めと考えられる。

以上より、騒音源が十分遠方にあり、窓部に平面波が入射する場合には、窓部境界内において平面波音場となることを確認した。また、制御用音源を適切に駆動することによって、窓部空間での音圧レベル分布の平坦化が可能であることを確認した。

3.4 提案 ANC システムによる騒音抑制効果

提案 ANC システムによる遠方での騒音抑制効果を確認するため、観測点として設定した窓部正面距離 0.5 m の位置における音圧レベル周波数特性を計算する。Fig. 8(a) に、窓開口率 100 % とした場合の ANC OFF/ON 時の音圧レベルの計算結果を示す。また、Fig. 8(b) に 20 ~ 600 Hz の周波数における音圧振幅 2 乗値の総和である Partial Overall (POA) レベルの計算結果を示す。なおグラフでは、ANC OFF 時の POA レベルを基準 (0 dB) として数値を表示している。すべての制御用音源を等しいゲインで駆動した場合 (Case 2) では、ANC OFF 時と比べて POA レベルが 17.2 dB 減少した。一方、平面波成分以外のモード振幅を 0 として求めたゲインで制御用音源を駆動した場合 (Case 1) では、ANC OFF 時に比べて POA レベルが 25.4 dB 減少した。Case 1 では Case 2 より、POA レベルにして騒音抑制効果が 8.2 dB 改善された。

窓開口率 100 % において、Case 1 の方が Case 2 より騒音抑制効果が改善されたのは、窓枠断面内で平面波成分以外のモード振幅を 0 として求めたゲインで制御用音源を駆動する (Case 1) ことにより高次モード成分の生成が抑制され、遠方の観測点においても音圧レベルの減

少として観測されたためと考えられる。

次に窓開口率 50 % での窓部正面距離 0.5 m の位置における音圧レベルの計算結果を Fig. 9(a) に示す。また、Fig. 9(b) に 20~600 Hz における POA レベルの計算結果を示す。Case 2 では、ANC OFF 時と比べて POA レベルが 21.4 dB 減少した。Case 1 においても、ANC OFF 時に比べて POA レベルが 21.7 dB 減少した。窓開口率 50 % においては、Case 1, Case 2 で同様の騒音抑制効果が得られておりその差は 0.3 dB となった。

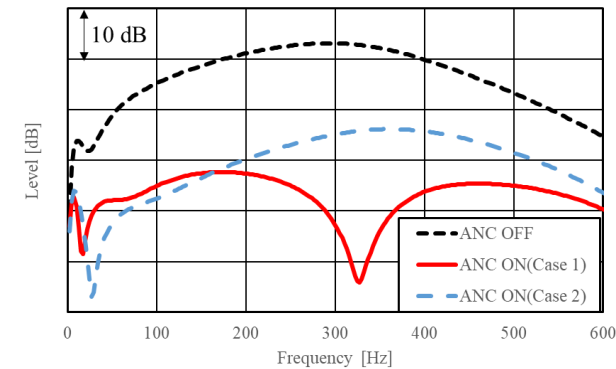
Fig. 6, Fig. 7 に示した窓開口率 50 % における窓部断面内での音圧レベル分布はどちらも平坦であった。これは制御用音源駆動方法によらず、騒音抑制に必要な平面波音場を生成可能なことを示している。窓開口率 50 % において Case1 と Case2 とで改善効果に変化がみられなかったのはこのためであると考えられる。

4. 提案 ANC システムの動作実験

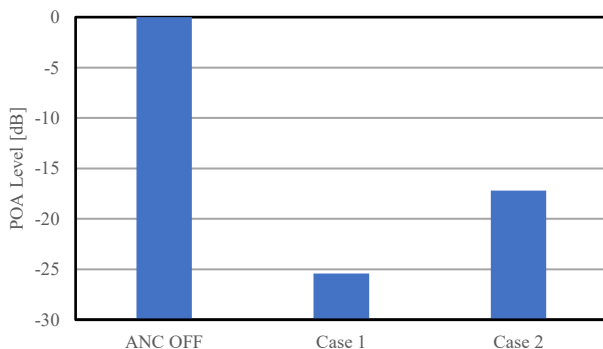
4.1 実験装置

Fig. 2 で示した計算モデルの寸法を基に、横 0.3 m、縦 0.6 m、奥行 0.2 m の窓部周囲の境界壁面上に制御用音源を 5 つ配置した。騒音源用スピーカーを ANC システムから 1 m 離れた場所に設置し、帯域制限したランダムノイズを騒音源から発生させた。この騒音源の周波数特性は比較的平坦であり、数値シミュレーションで用いたガウシアンパルスと同様な周波数特性が得られる。

また、騒音源がある空間とは反対側の空間に装置から 0.5 m 離れた位置に観測点を設けた。騒音の情報は既知

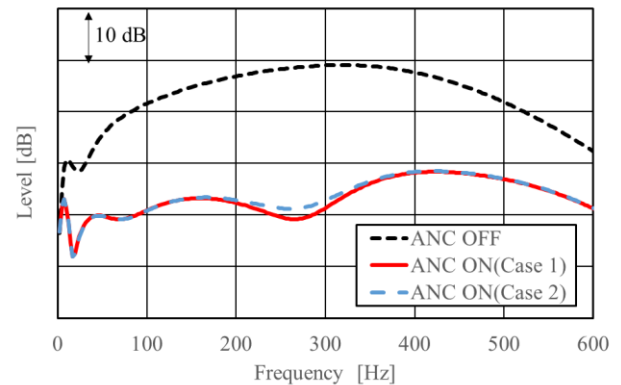


(a) Sound pressure levels

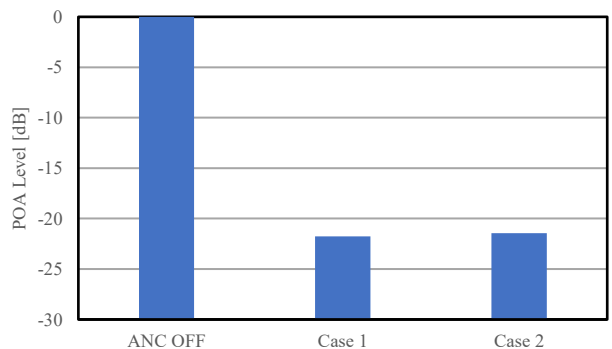


(b) Partial overall levels

Fig. 8 Calculation results at 100 % window opening rate



(a) Sound pressure levels



(b) Partial overall levels

Fig. 9 Calculation results at 50 % window opening rate

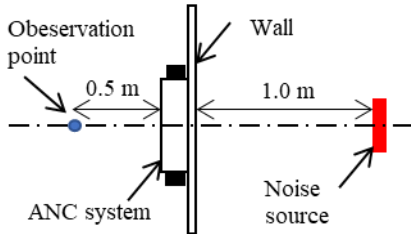
としてリファレンスマイクロホンは配置していない. Fig. 10 に実験装置図及び写真, Fig. 11 に提案 ANC システムのブロック図を示す.

4.2 窓開口部面積の変化させる場合の騒音抑制効果の検討

提案 ANC システムの窓開口部面積の違いによる騒音抑制効果の変化を調べるため窓開口率 100 %, 窓開口率 50 % について実験を行った. 本研究では, 誤差経路 C の特性を事前同定した後に ANC システムを動作させる. 本 ANC システムにおけるサンプリング周波数は 5000 Hz である. ANC システムのコントローラは, 誤差マイクロホン出力が最小になるように Filtered-X LMS 適応アルゴリズムを用いて決定される.

Fig. 12(a) に開口率 100 % の窓から 0.5 m 離れた観測点での音圧レベル周波数特性を, Fig. 12(b) に窓開口率 100 % の場合における観測点での Partial Overall (POA) レベルを, それぞれ示す. 平面波成分以外のモード振幅を 0 として求めたゲインで制御用音源を駆動した場合 (Case 1) と, すべての制御用音源を等しいゲインで駆動した場合 (Case 2) を比較すると, POA レベルの減少量は Case 1 で 7.0 dB, Case 2 で 4.5 dB であり, Case 1 において Case 2 より騒音抑制効果が 2.5 dB 改善された.

Fig. 13(a) に開口率 50 % の窓から 0.5 m 離れた観測点での音圧レベル周波数特性を, Fig. 13(b) に窓開口率 50 % における観測点での POA レベルを示す. POA レベ



(a) Schematic diagram of experimental apparatus



(b) Photo of the experimental device



(c) Photo of the wall-mounted control sources

Fig. 10 Experimental apparatus of open window ANC system

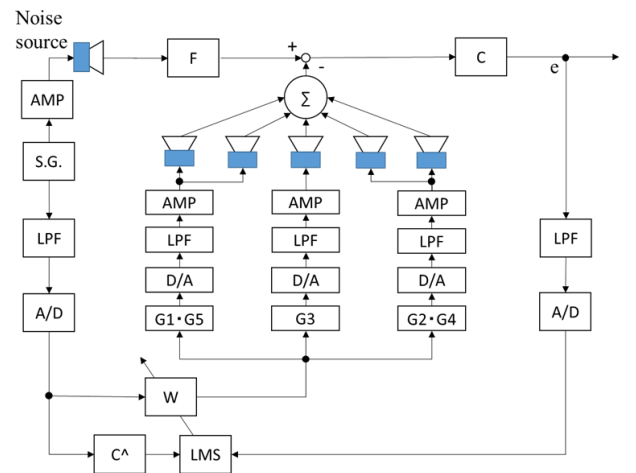
ルの減少量は Case 1 で 14.3 dB, Case 2 で 12.8 dB であり, Case 1 において Case 2 よりも騒音抑制効果が 1.5 dB 改善された.

提案 ANC システムを動作させた場合, 観測点において Case 1, Case 2 を比較すると, Case 1 の方が窓開口率 100 % の場合, 窓開口率 50 % の場合それぞれで騒音抑制効果が改善された. この結果は, 3. 数値シミュレーションで述べた改善効果と定量的には一致しないものの, 同様の傾向を示している. 現実のシステムにおいても, 窓枠断面内で平面波成分以外のモード振幅を 0 として求めたゲインで制御用音源を駆動することによって, 騒音抑制効果を改善できることが確認された.

5. まとめ

本研究では, 窓部周囲に設置した制御用音源を用いた ANC システムで窓部を通過する騒音を抑制する方法及び窓開放部面積の変化に対応が容易となる ANC システムの構成を提案することを目的とした. 提案 ANC システムの数値シミュレーション及び実機動作実験を通じて提案システムの騒音抑制効果について検討を行った.

まず, 数値シミュレーションの結果, 十分遠方の騒音源から平面波が入射する場合には, 窓部境界内において平面波音場となること, 制御用音源を適切に駆動することによって, 窓部空間での音圧レベル分布を平坦化することが可能になることを確認した. また, ANC システムの制御用音源を平面波成分以外のモード振幅を 0 として求めたゲインで駆動することによって, 良好な騒音抑制



AMP: amplifier, S.G.: signal generator, LPF: low-pass filter, F: transfer function between primary loudspeaker (noise source) and secondary loudspeakers installed in window, C: transfer function between secondary loudspeakers installed in window and error microphone, e: output signal of error microphone, LMS (Least Mean Square): adaptive algorithm, W: transfer function of ANC controller determined by LMS, C^A: secondary path filter analogous to C, A/D: analog-to-digital converter, D/A: digital-to-analog converter,

Fig. 11 Block diagram of proposed ANC system

効果が得られることを明らかにした。

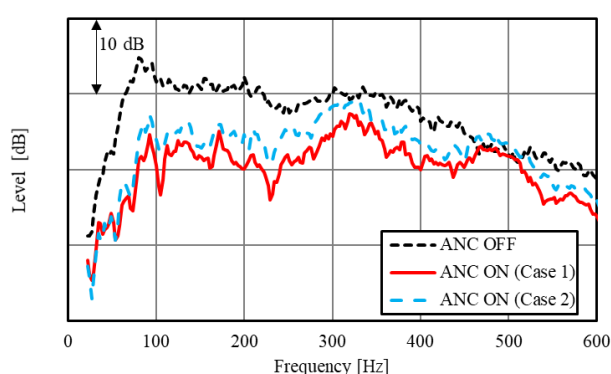
次に、実機動作実験の結果、騒音源がある空間とは反対側の空間に設けた観測点において、ANCシステムの制御用音源を平面波成分以外のモード振幅を0として求めたゲインで駆動した場合に騒音抑制効果が改善された。これらより、窓部周囲に設置した制御用音源を用いて平面波成分以外を励振しないようにしたANCシステムによって、窓開口率の変化によらず良好な騒音抑制効果が得られることを示した。

参考文献

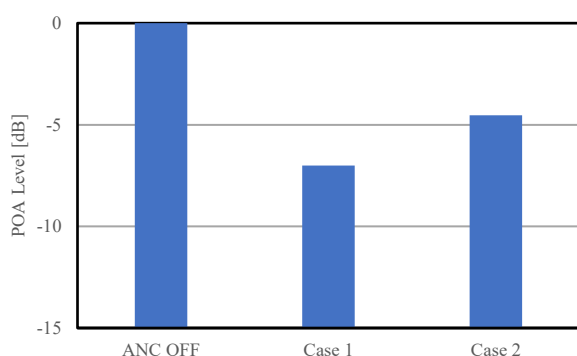
- 1) 前川純一, 森本政之, 阪上公博, 建築・環境音響学第3版, 共立出版 (2011), 第6章.
- 2) Hsiao Mun Lee, Yuting Hua, Zhaomeng Wang, Kian Meng Lim and Heow Pueh Lee, A review of the application of active noise control technologies on windows: Challenges and limitations,, Applied Acoustics Vol. 174, 107753 (2021).
- 3) Tatsuya Murao, Chuang Shi, Woon-Seng Gan and Masaharu Nishimura, Mixed-error approach for multi-channel active noise control of open windows, Applied

Acoustics Vol. 127, pp. 305-315 (2017).

- 4) Shahin Sohrabi, U. Peter Svensson, Teresa Pàmies Gómez, Jordi Romeu Garbí, Active noise control for open windows, Proc. Inter-Noise 2021, No. 3, pp. 3097-3107 (2021).
- 5) Shuping Wang, Jingxia Yu, Xiaojun Qiu, Marek Pawelczyk, Abu Shaid and Lijing Wang, Active sound radiation control with secondary sources at the edge of the opening, Applied Acoustics Vol. 117, pp. 173-179 (2017).
- 6) Bhan Lam, Stephen Elliott, Jordan Cheer and Woon-Seng Gan, Physical limits on the performance of active noise control through open windows, Applied Acoustics, Vol. 137, pp. 9-17 (2018).
- 7) P. E. Doak, Excitation, transmission and radiation of sound from source distributions in hard-walled ducts of finite length (I): The effects of duct cross-section geometry and source distribution space-time pattern, Journal of Sound and Vibration, Vol. 31, No. 1, pp.1-72 (1973).
- 8) 森下達哉, 青木琢哉, 多氣昌生: 時間領域差分法を用いた多孔質材料の音響特性解析. 日本音響学会誌, Vol.59, No.2, pp.63-69 (2003)

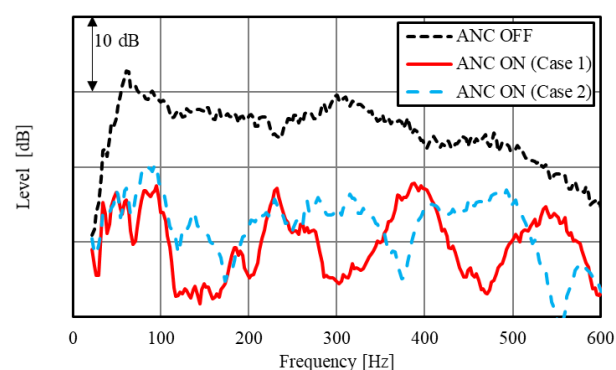


(a) Sound pressure levels at distance of 0.5 m from the window

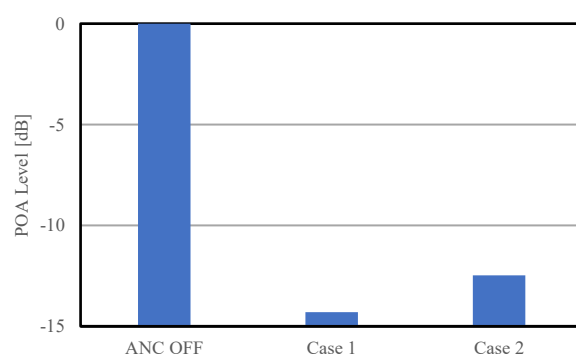


(b) Partial overall levels at distance of 0.5 m from the window

Fig. 12 Experimental results at 100 % window opening rate.



(a) Sound pressure levels at distance of 0.5 m from the window



(b) Partial overall levels at distance of 0.5 m from the window

Fig. 13 Experimental results at 50 % window opening rate.

一方向連続繊維プリプレグを用いた薄肉円筒殻 CFRP 部材の アングルプライによる衝撃吸収性能への影響

大竹 聖^{*1} 松本 尚也^{*1} 笠松 忍^{*2} 呉 文宝^{*2}
小林 一景^{*2,3} 黒田 純平^{*2,3} 加藤 英晃^{*4} 成田 正敬^{*4}

A Study on the Effect of Angle Plies on the Impact Absorption Performance of Thin-Walled Cylindrical-Shell CFRP Members Using Unidirectional Continuous Fiber Prepregs

by

Hijiri OTAKE^{*1}, Naoya MATSUMOTO^{*1}, Shinobu KASAMATU^{*2}, Wenbao WU^{*2},
Ikkei KOBAYASHI^{*2,3}, Junpei KURODA^{*2,3}, Hideaki KATO^{*4} and Takayoshi NARITA^{*4}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jul. 2, 2025)

Abstract

Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are known to be lightweight and strong. Previous research has shown that CFRP exhibits complex strength characteristics depending on the conditions at the time of lamination, which change depending on the orientation of the laminated fibers and the order in which they are laminated. The authors have been studying the application of CFRP to the crush zone at the front of an automobile. In this study, we focused on CFRP with carbon fibers laminated at a 45° angle, and produced test specimens with different numbers of angle plies. We measured the crushing behavior of these test specimens using a drop weight test and examined the effect of the number of layers of angle plies on the impact absorption performance of the component. As a result, within the scope of this study, it was thought that not only the fiber direction close to the direction of the impact by the drop weight, but also other fiber directions, including the fiber direction at 0°, would be supported, making the material more resistant to impact. It was also found that the crushing process was different even when the amount of energy absorbed relative to the amount of crushing was the same.

Keywords: Material, Carbon fiber reinforced plastic, Impact absorption, Uni direction, Drop-weight test

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とは、母材となる樹脂が強化材である炭素繊維で強化されている複合材料の一種である。炭素繊維の特徴として、ガラス繊維強化プラスチックに用いられるガラス繊維に比べて軽量で弾性率も 5 倍程度のもので製造可能である。また CFRP はフィラメント数や単繊維径、積層方向、織り方などによって強度特性が変化するため設計自由度が高い材料である¹⁾。CFRP の特徴として、軽量かつ高強度であることが挙げられる。UD(Uni Direction)プリプレグ(以下、UD プリプレグ)において、比重は鉄の約 1/5、アルミ合金の約 1/2、比強度は鉄の約 20 倍、アルミ合金の約 8 倍ある²⁾。しかし、これらの物性値は製造原料や製造方法によって異なる。

加えて CFRP は部材内の繊維方向に応じて異方性を持つことが知られている¹⁾。一般的な CFRP 部材はこの異方性を持つプリプレグを複数枚積層して製作される。CFRP の衝撃吸収に関する諸研究では積層層間の剥離によって衝撃エネルギーの吸収がなされているという報告がある³⁾。このように積層された繊維の配向とその積層された順番に応じてポアソン比が 1 以上となる場合や、単純な引張荷重に対してねじれを発生させる場合も報告されており、積層時の条件によって複雑な強度特性を示すことが報告されている⁴⁻⁶⁾。

一方、CFRP の応用例として、自動車の衝撃吸収部材として用いる検討が行われている。自動車前面部には衝撃を効率よく吸収し、乗員を保護するクラッシュブルゾーンが設けられている⁷⁾。クラッシュブルゾーンには主要骨格であるフロントサイドドメンバ(以下 FSM)と、その先端に交通事故時の衝撃エネルギーを吸収するクラッシュボックス(以下 CB)が設けられている。ベルト着用重傷者の損傷主部位は 2 番目に脚部が多く、ベルト非着用時は

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程

*2 総合理工学研究科

*3 総合科学技術研究所

*4 工学部機械システム工学科准教授

脚部が最も多くなっている⁸⁾。このことは、FSM は車室足元部付近からフロア下に潜り込むように屈曲して配されるため、FSM が変形すると乗員の下肢部へ傷害を引き起こすためと考えられる⁹⁾。また、フロント部にエンジンを搭載している自動車の場合、エンジンを損傷し車両火災など二次被害を生む可能性も考えられる¹⁰⁾。よって、CB が効率よく衝撃エネルギーを吸収し FSM より先行して圧潰する必要がある。超小型車（1～2 人乗り用のコンパクトな EV）の活用が近年推進されているが、際立った需要拡大には至っていない。超小型車は重量と空間確保の面で、従来存在する FSM や CB を備えていない。超小型車は衝突安全性能の低さが普及の勢いが鈍い一因であるが¹¹⁾、少ない圧潰量で多くのエネルギー吸収が要求されるため対策は困難を極める。そこで従来の自動車では、エネルギー吸収部材として、スチールやアルミなどの金属が多く用いられており検討も多くみられるが¹²⁾、車体の軽量化や衝撃吸収性能向上を目的として、CFRP が注目され、国内外問わず研究が盛んに行われている^{13,14)}。粉碎された破片や層間の剥離などをすべて含めた破壊機構とエネルギー吸収性能の定量的な関係は未解明であり、解析においても課題が残されている段階である^{15,16)}。

これまで CB や FSM 屈曲部単体にてシミュレーション¹⁷⁾や材料¹⁸⁾、形状¹⁹⁾などの多方面から様々な検討が行われてきた²⁰⁻²²⁾。屈曲部を有する FSM に対するエネルギー吸収部材として有効的な CB に用いる材料として、CFRP の使用の検討も行われている。しかしながら、CFRP を用いた積層構成や各層の配向により、設計者が意図した強度・剛性を具現化するための設計指針について言及しているものはみられない。

これまでに、著者らは配向の異なる薄肉円筒殻の CFRP 試験片を製作し、落錘試験により衝撃吸収性能を評価した。それぞれ $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ と $[90^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]$ の順で、軸方向と周方向に繊維を積層した場合、軸方向が多い試験片で衝撃吸収に効果があることが確認されている²³⁾。また、軸方向から繊維方向を 45° 傾けたプリプレグを一部積層した試験片を製作し、 $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ と $[45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ]$ の 2 種類の試験片の衝撃吸収性能を比較したところ、 45° 傾けたプリプレグも衝撃吸収性能を持つことがわかった²³⁾。しかしながら上記試験片のようなアングルプライの CFRP 試験片の衝撃吸収性能について、詳細な検討は行われていない。

そこで本研究は、炭素繊維を軸方向に対して 45° 度方向に積層した CFRP に着目し、アングルプライの積層数を変化させた試験片を製作した。落錘試験によりこれらの試験片の圧潰挙動を衝撃荷重と軸方向変位の推移等から評価し、アングルプライの積層数が部材の衝撃吸収性能に与える影響について検討を行った。

2. UD プリプレグを用いたアングルプライ試験片の作製

試験片は、Fig. 1 のように繊維が一方方向のみに存在する UD プリプレグを使用して製作した。本研究で使用した UD プリプレグは三菱ケミカル製 TR350G125S で、炭素繊維



(a) Overall view



(b) Unidirectional carbon fiber in UD prepreg

Fig. 1 Photograph of UD prepreg.

繊維タイプは PAN24t、樹脂タイプは高靱性エポキシ、炭素繊維質量は 125 g/m^2 、厚みは 0.120 mm である。

プリプレグを用いて RFI (Resin film infusion) で試験片を成型した。RFI 法とは、型に積層したプリプレグを専用のフィルムでパッキングした後、パック内を減圧し加熱を行う成形方法である。試験片を作製するにあたって、UD プリプレグと、治具にはステンレス製の長さ 100 mm 、外径 50.8 mm の円筒を使用した。試験片のサイズは、内径を 50.8 mm 、長さを 100 mm とし、外径は試験片の厚みに個体差が存在するため、積層数のみを揃え 5 層とした。試験片の形成には、Fig. 1(a) のように切り出したプリプレグを積層する面に対して離形処理を行った治具に巻き付けて積層を行った。実際にプリプレグを巻き付ける際の様子は、Fig. 2 に示す通りである。

Fig. 3(a) に試験片の寸法と配向を示した通り、UD プリプレグの繊維方向が試験片の周方向になるものを 0° 、軸方向になるものを 90° とした。そこに Fig. 3(b) に示したように、これまでの角度に対して -45° と 45° 方向になる繊維方向を設定した。これらを 5 層積層して試験片の作製を行い、以下のような配向で積層し、5 種類の試験片を作製した。各試験片の配向はカッコ内に示した。左側が試験片内側の 1 層目であり、スラッシュで区切られた数値が各層の炭素繊維の方向を示している。

試験片 A $[0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ]$

試験片 B $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]$

試験片 C $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$

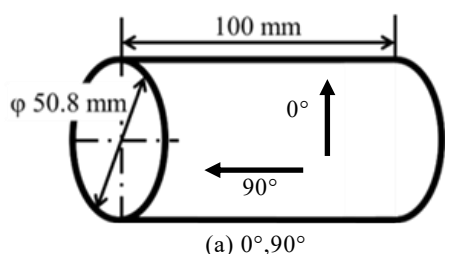
試験片 D $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

試験片 E $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

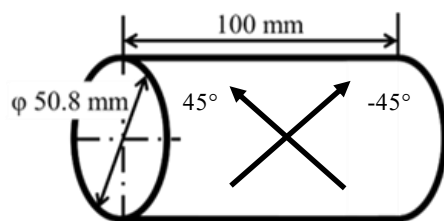
本論文では、 $\pm 45^\circ$ の積層数を 1 層から 5 層へと増加させたことによる比較と、 0° と $\pm 45^\circ$ の比較を行う。加熱後に繊維の歪みが出るために 45° と -45° の枚数なるべく揃



Fig. 2 Manufacturing test specimens.



(a) 0°, 90°



(b) -45°, 45°

Fig. 3 Schematic diagram of specimen made by UD.



Fig. 4 Before calcination process.

える必要がある。そのため、試験片 A～E は、試験片 A の 45° が 1 層含まれる試験片を基準に、45° と -45° を交互に 0° と置き換えた。

積層した試験片をプリプレグからの樹脂漏れを防ぐた



Fig. 5 Photographs of manufactured test specimen.

めにブリーザークロスで包む。ブリーザークロスとプリプレグの間には、ブリーザークロスが熱によって付着しないようにするためにリリースフィルムで包む必要がある。そして真空引きするためにバックフィルムという耐熱性と耐強度のあるフィルムで袋状にする。ここまでの作業が完了し、真空ポンプのホースとバックフィルムに取り付けたバルブを連結させた状態を Fig. 4 に示す。試験片は各 5 個ずつ作製し、5 回ずつ実験を行った。実際に製作した試験片を Fig. 5 に示す。

3. 製作した CFRP 試験片に対する落錘試験

3.1 落錘試験装置

試験片を落錘衝撃試験装置の下部に設置し、ロードセル（共和電業製 LC-20TV）にて荷重を、レーザ変位センサ（KEYENCE 製 LK-G500）にて圧潰量を測定した。レーザ変位センサの設定等を行うため、分離型コントローラ（KEYENCE 製 LK-G3000）を用い、電源ユニット（KEYENCE 製 KZ-U3）を電源に用いる。また、データロガー（KEYENCE 製 NR-500）を用いてデータを出力する。Fig. 6 に落錘体、ロードセル、レーザ変位センサを含む、落錘式試験装置の写真及び概要を示す。

3.2 実験条件と方法

CB の圧潰は静的試験でも確認することができるが、本研究では実際の自動車の衝突事故等を再現するため、動的試験の一種である落錘試験を行った。落錘衝撃試験を行うことで、試験片に対して軸方向からの荷重を加えることができ、試験片の圧潰を確認することができる。本研究では、落錘体に初速度を与えない自由落下式である。自由落下させる落錘体の高さを h [m]、重力加速度を g [m/s²] とすると、試験片に衝突する時点の落錘体の速度 v [m/s] は次式で表される。

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

日本国内で発生している車両事故の過半数が 30 km/h 以下の低速域で発生している²⁴⁾。また、今後は先進安全自動車 (ASV) の発展が進み、衝突被害軽減ブレーキによる、更なる低速域での衝突事故の割合増加が見込まれる²⁵⁾。

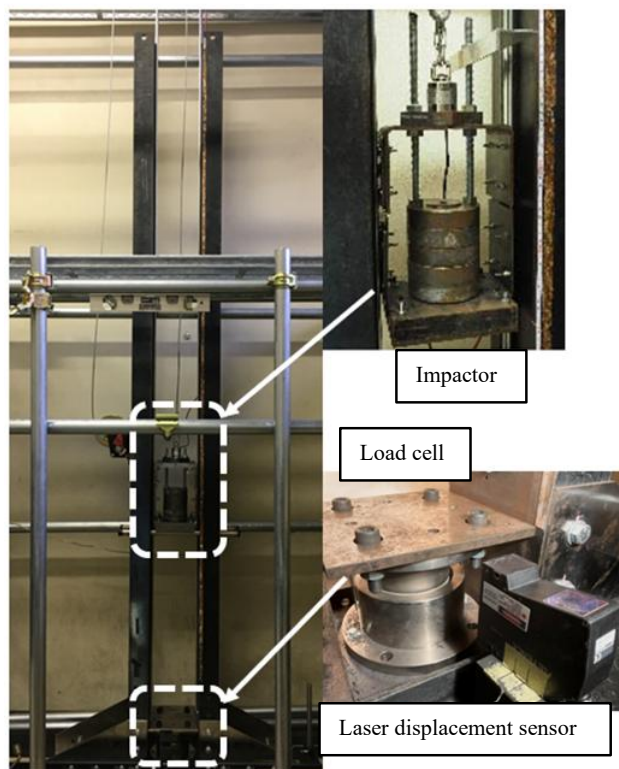


Fig. 6 Photograph of drop weight test device.



Fig. 7 Photograph of specimen fixation method.

以上より、低速域での衝突事故を想定し、落錘体の衝突速度をおよそ 25 km/h に設定するため、式(1)より落錘高さは 2.5 m とした。また、予備実験より、試験片に十分な衝撃を与えることができ、かつ完全に破壊されずに繊維の圧潰のプロセスを確認できる落錘体の質量を確認したところ、17.9 kg であることがわかった。そのため、本実験で使用する落錘体の質量は 17.9 kg とする。試験片の固定は Fig. 7 のように、固定板に低融点金属 U アロイを用いて行った。

3.3 評価方法

実験によって得られたデータをもとに、荷重を縦軸、変位を横軸に配置した荷重－変位線図の作成を行う。ここで用いる荷重とは、落錘体が試験片に与えている荷重を計測するのではなく、試験片が落錘体からの衝撃に耐える反力を計測している。また、荷重－変位線図の面積は、

試験片のエネルギー吸収量であり、エネルギー吸収量－変位線図を作成することができる。本論文では、これら 2 つの線図によって評価を行う。

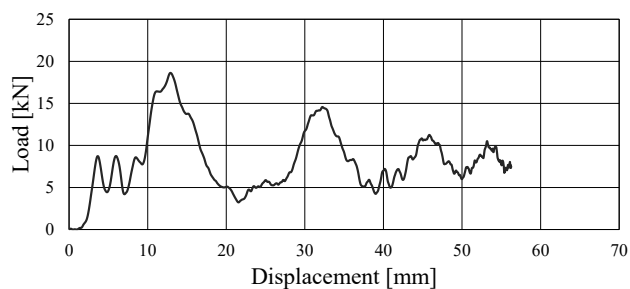
4. 実験結果と考察

先行研究から、荷重が加わる方向に近い繊維方向が多く含まれる試験片で高い衝撃吸収性能が得られることを確認している。周方向である 0° よりも $\pm 45^\circ$ のほうが落錘体による衝撃の方向と角度が近いので、5 層のうち $\pm 45^\circ$ の積層数が多いほど荷重ピークは大きく、圧潰量は少なくなると考えられたが結果は異なった。Fig. 8 に 5 種類の試験片の荷重－変位線図を示した。同図(a)は試験片 A[$0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ$]、(b)は試験片 B[$0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ$]、(c)は試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]、(d)は試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]、(e)は試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]のそれぞれの荷重－変位線図である。 $\pm 45^\circ$ の積層が 4 層含まれる試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]の荷重ピークが最も大きくなり、その他の試験片はほぼ同じ大きさとなった。圧潰量に関しては $\pm 45^\circ$ の積層が 4 層含まれる試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]が最も少なく、 $\pm 45^\circ$ の積層が 2 層含まれる試験片 B[$0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ$]が最も大きくなり、その他の試験片はほぼ同量となった。 $\pm 45^\circ$ の積層が 5 層の試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]は $\pm 45^\circ$ の積層が 4 層の試験片よりも荷重ピークと圧潰量共に小さくなり、 $\pm 45^\circ$ の積層が 3 層の試験片とほぼ同じとなった。これらのことより、落錘体による衝撃の方向と角度が近い繊維方向だけではなく、 0° の繊維方向を含むことにより他の繊維方向を支持し、衝撃に強くなるのではないかと考えられる。

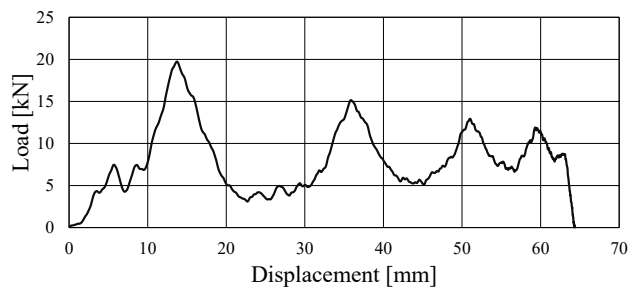
ここで、 $\pm 45^\circ$ の積層数が 3～5 層の試験片 3 種類、試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]、試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]、試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]を Fig. 9 のエネルギー吸収量－変位線図に示した。試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]のみ、圧潰量が 15 mm の辺りから他の試験片 2 種類と比較してエネルギー吸収量が多くなった。このことより、これらの試験片 3 種類から、圧潰量が一定以下である場合にはどの配向を CB に選択しても十分な機能を果たすと考えられる。また、試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]と試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]は、圧潰量に対するエネルギー吸収量もほぼ等しい結果となった。Fig. 10(a)に試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]、(b)に試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]の落錘試験終了後の写真を示す。この 2 つの試験片は試験結果の数値はほぼ等しくなるにも拘わらず、圧潰の様子が異なることがわかる。試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]は繊維が裂け開放するように圧潰していたのに対し、試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]は繊維が細かく破壊されていたことがわかる。この差は、試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]が直交する繊維方向が交互に積層されているためではないかと考えられる。

5. 結言

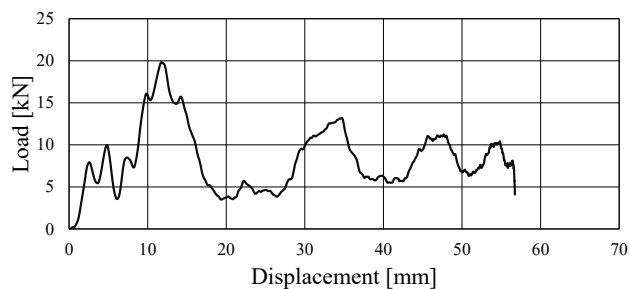
本論文では、低速域での衝突事故に対する CFRP 製 CB



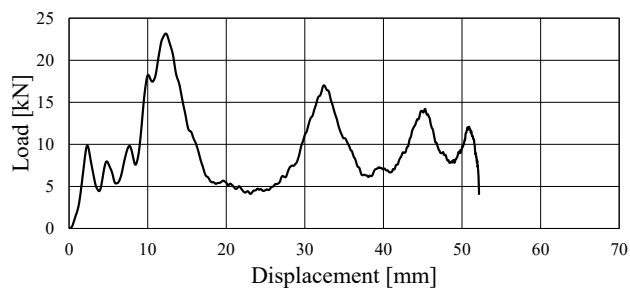
(a) Specimen A $[0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ]$



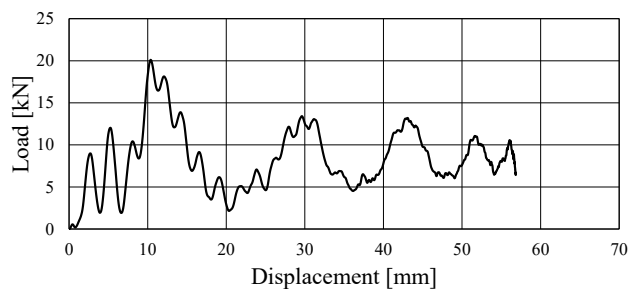
(b) Specimen B $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]$



(c) Specimen C $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$



(d) Specimen D $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ]$



(e) Specimen E $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

Fig. 8 Load displacement diagram of test piece.

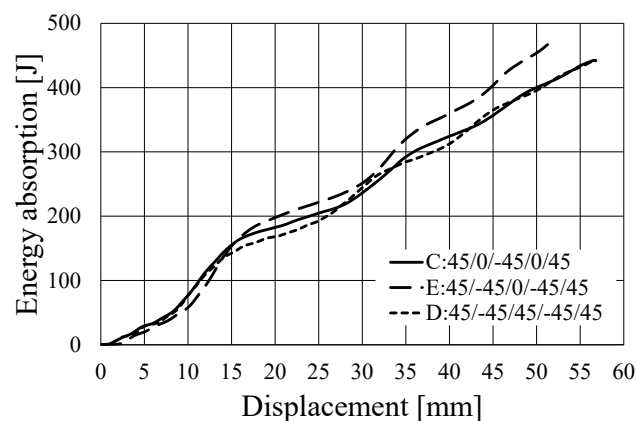


Fig. 9 Relationship between energy absorption and displacement



(a) Specimen C $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$



(b) Specimen E $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

Fig. 10 Photographs of test specimen after testing.

を、設計者が意図した強度・剛性を具現化するために実験を行った。UD ブリプレグを用いた円筒型 CFRP 試験片を 5 種類作製し、これらに対して低速域の衝突を再現した落錘試験を行い、試験片の配向の違いによる衝撃吸収性能の変化に関する検討を行った。その結果、本論文の範囲においては落錘体による衝撃の方向と角度に近い繊維方向だけではなく、周方向の繊維により他の繊維方向を支持し、衝撃に強くなるのではないかと考えられる。また、圧潰量に対するエネルギー吸収量が等しい場合であっても、圧潰過程が異なることが確認された。

今回はシミュレーションや計算方法が確立されていない為、動的試験により各配向の比較を行った。しかしながら、実験結果とシミュレーションや計算の妥当性を、同時に検討し確認を行う必要があると考えており、これが今後の課題になる。加えて、CB として実用化する際に適切な圧潰過程や破片の形状を、人体や事故発生後の二次被害への影響を検討していきたい。

参考文献

- 1) 島村 昭治, 宮入 裕夫, 複合材料-複合化技術と材料の多機能化, 実教出版株式会社, pp.73-76(1986).
- 2) スーパーレジン工業株式会社, CFRP の物性と特徴 <https://www.super-resin.co.jp/cfrp/properties/>
- 3) 濱田 泰以, 中谷 有, FRP 円筒の非軸方向におけるエネルギー吸収特性, 日本機械学会論文集 A 編 64 巻 619 号, 819-824(1998).
- 4) 粕谷 平和, 根本 圭一, 衝撃軸圧縮荷重を受ける複合材料積層円筒殻の動的応答, 日本機械学会論文集 A 編 59 (558), 454-460(1993).
- 5) 粕谷 平和, 根本 圭一, 衝撃負荷を受けるアングルプライ積層円筒殻の動的応答, 東海大学紀要 工学部 32 (1), 191-200(1992/10/30).
- 6) 足立 廣正, 長谷川 照夫, 平織強化 CFRP 材における繊維方向のヤング率の評価, 日本複合材料学会誌 30 (3), 120-125(2004).
- 7) 国土交通省, 独立行政法人自動車事故対策機構, 自動車アセスメント衝突安全性能評価事故時に人を守る技術(2020).
- 8) 国土交通省, 事故の全体俯瞰のグラフ等(平成 16 年), 俯-48(2005).
- 9) 国土交通省, 令和 6 年事故・火災情報の集計結果について, (2025).
- 10) 桜井実, オフセット前面衝突時の下肢障害の発生状況に関する実験的検討, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.4, p.117-122(1997).
- 11) 鬼本大輝, 大賀涼, 杉町敏之, 櫻井俊彰, 槇徹雄, ミニカーのフルラップ前面衝突時における乗員傷害に関する研究, 日本交通科学学会誌 第 19 巻 第 2 号 42-52, 令和元年.
- 12) Ahmad Baroutaji, Mustafa Sajjia, Abdul-Ghani Olabi, On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, Thin-Walled Structures, 118(2017).
- 13) 金 炯秀, 邊 吾一, 青木 義男, 自動車のフロントサイドメンバ用 CFRP 角柱の衝撃実験と解析, 日本複合材料学会誌 34 (2), 51-59(2008).
- 14) Hongyong Jiang, Yiru Ren, Xiaochuan Liu, Qiduo Jin, Enhancing residual energy-absorption of perforated CFRP tube by a critical transition of failure mechanism, Composite structures, 253(2020).
- 15) 松永尚徳, 末村紘志, 3 CFRP 衝撃解析精度の向上, CFRTP の低コスト成形加工技術の開発(第 7 報)
- 16) 高橋 清久, 木村 昌樹, 原川 和久, 伴 菊夫, 酒井 哲也, FRP 積層板の弾性率と強度の解析, 繊維学会誌 40 (1), T7-T12(1984).
- 17) 公益社団法人 自動車技術会, Reduced Model による前面衝突時の車体変形予測技術の開発, 自動車技術会論文集 50 (4), 1102-1107(2019).
- 18) 公益社団法人 自動車技術会, 1180MPa 級超高張力鋼板を適用したエネルギー吸収部材の衝突性能評価, 自動車技術会論文集, 54 (6), 1133-1138(2023).
- 19) 康井 義明, 細見 光史, 鬼武 章, 衝撃軸圧縮荷重を受ける各種多角形薄肉断面構造部材の動的エネルギー吸収特性, 軽金属 55 (6), 252-258(2005).
- 20) 古越 新, 康井 義明, 衝撃軸圧縮荷重を受ける自動車用フロントサイドメンバ屈曲部の強度特性, 東海大学紀要工学部, Vol.49, No.2, pp.73-80(2009).
- 21) 陳 玳珩, 他 2 名, 軸方向に周期的波を有する薄肉円錐型吸収部材の軸圧潰特性, 日本機械学会論文集, 第 77 巻, 第 774 号, pp. 261-270(2011-2).
- 22) 石神 征春, 康井 義明, PS26 各種断面形状を持つ車両用フロントサイドメンバのエネルギー吸収特性(ポスターセッション), M&M 材料力学カンファレンス 2008 (0), PS26-1-PS26-2(2008).
- 23) 大竹 聖, 高 耀東, 松本 尚也, 小林 一景, 黒田 純平, 加藤 英晃, 成田 正敬, 一方連続繊維ブリプレグを用いた薄肉円筒殻 CFRP 部材の配向が衝撃吸収性能に与える影響に関する研究, 東海大学紀要工学部, Vol. 64, No.1, 35-40(2024).
- 24) 国土交通省, 事故の全体俯瞰のグラフ等(平成 16 年), 俯-93(2005).
- 25) 国土交通省, 自動車総合安全情報, <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/#plan>

ディファレンシャルギアを用いたハイブリッド車両用 動力分配システムに関する基礎研究

劉 峰^{*1} 加藤 英晃^{*2} 成田 正敬^{*2}

A Basic Study on a Power Distribution System Using Differential Gears for Hybrid Vehicles

by

Feng LIU^{*1}, Hideaki KATO^{*1}, and Takayoshi NARITA^{*1}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on May. 29, 2025)

Abstract

Hybrid systems, which use multiple power sources including an internal combustion engine (ICE) and electric motors, are installed in many vehicles due to their high efficiency and practicality. Series-parallel hybrids currently on the market have a structure that combines an ICE, a drive motor, and a generator motor. However, due to the mechanism, it is sometimes not possible to convert all of the power generated into driving power, which poses issues in terms of output characteristics. Therefore, this study propose a hybrid system that uses a differential gear mechanism. This system can use all of the power generated by the three installed prime movers as driving force, which is expected to improve the dynamic characteristics of the vehicle. We developed hybrid system configuration that uses differential gears and investigated the output characteristics through simulations in three driving modes corresponding to driving conditions. As a result, it was confirmed that the proposed system can achieve higher output characteristics than conventional systems by integrating power sources.

Keywords: Power transmission system, Power distribution system, Hybrid system, Efficiency improvement, Output control

1. 緒言

近年、環境保護に関する規制が世界的にますます厳格化される、自動車業界では、環境性能の向上や省エネルギー性がこれまで以上に重要視されている。特に、二酸化炭素排出削減や化石燃料依存の低減が求められる状況下で、従来の内燃機関(ICE)と電気モータが発生する複数の動力を用いるハイブリッド車両は、その高い効率性と実用性により多くの車両に搭載されている。

ハイブリッド車両の開発において、車両システム全体のエネルギー利用効率の向上は重要な課題となっている。特に異なるドライブトレインを持つ動力伝達特性の差異がシステム全体の効率に顕著な影響を及ぼすことから、これらの特性を定量的に評価・比較することは、パワートレインの最適化設計を実現する上で理論的価値と工学的意義を有する。

現在、市販されている多くのハイブリッド車は、原動機として複数のモータと1基のICEを搭載している。通常、これらのモータのうち1基は発電専用として設計されており、車両の駆動力には直接使用されない。

現在販売されているハイブリッド車両のシステムは、Fig. 1 に示すように、大きく分けてシリーズハイブリッド、パラレルハイブリッド、シリーズ・パラレルハイブ

リッドの3種類に大別される。シリーズハイブリッドは同図(a)のように、ICE が直接車輪を動かすのではなくICE で発電した電力をバッテリーに充電し、その電力でモータを駆動して車を走行される、このシステムは EV のような静粛性を実現する利点を持つが、ICE の動力を駆動力に利用することができない点に課題がある¹⁾。一方パラレルハイブリッドは同図(b)のようにモータとICE が並列して配置される構造で、低回転域でトルクが小さいICE の欠点を補う利点がある²⁾。ただし、モータの出力が小さい場合やモータとICE を切り離す機構がない場合にはモータ単独での走行が困難となることがある。そこで、同図(c)のようにICE と駆動用モータ、発電用モータを組み合わせる構造を持つ、シリーズ・パラレルハイブリッドが広く採用されている³⁾。しかしながらシリーズ・パラレルハイブリッドは、構造上ICE の出力の一部を電力に変換して再度駆動に利用するため、エネルギー変換に起因損失が避けられない。また、EV モードからHEV モードに切り替わる際、ICE が始動してからクラッチを介して駆動系と接続されるまでの間、出力が駆動輪に伝わらない場合があり、出力の損失の点で課題がある。

そこで本研究はICE と2基のモータの出力を合成して出力できるような、差動歯車機構を用いたハイブリッドシステムを提案した。このシステムは搭載した3基の原動機で発生する出力を全て駆動力に利用することができ

*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准教授

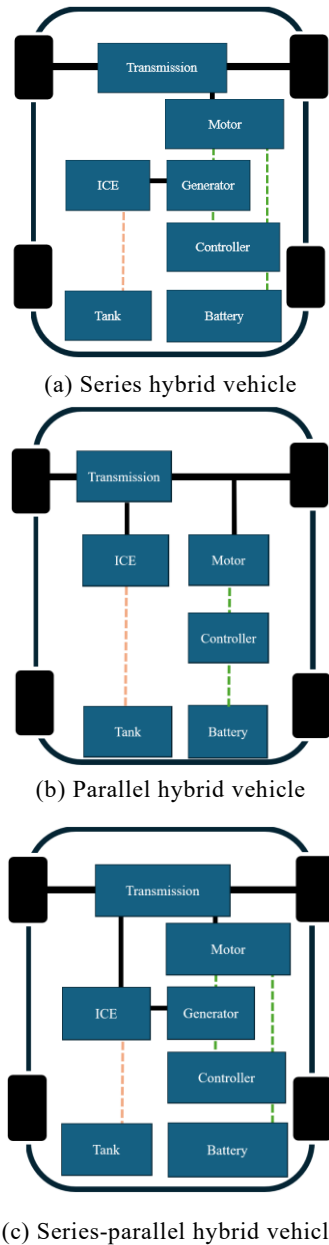


Fig. 1 Schematic of conventional hybrid system

るため、車両の動的特性の向上が期待できる。本論文は差動歯車を用いたハイブリッドシステムの構成を提案し、走行状況に対応する各走行モードにおける、出力特性についてシミュレーションにより検討した。

2. 従来のシリーズ・パラレルハイブリッドシステム

現在販売されているシリーズ・パラレルハイブリッドには、BYD 社製の DualMode-intelligent(DM-i)やトヨタ自動車株式会社製の Toyota Hybrid System(THS)など複数の方式が提案されている。DM-i は、Fig. 2(a)に示すように ICE、発電機、駆動用モータをクラッチで連結する構造を持ち、長距離 EV 走行が実現する利点があるが、バッテリー残量が少ないときに時高負荷出力を維持できない点に課題がある⁴⁾。

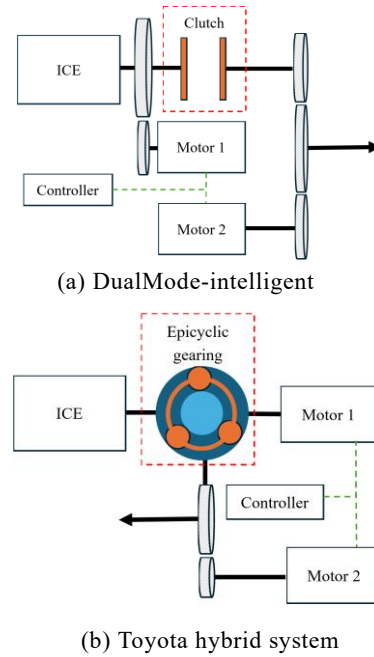


Fig. 2 Schematic of conventional series-parallel hybrid system



Fig. 3 Photograph of differential gear unit

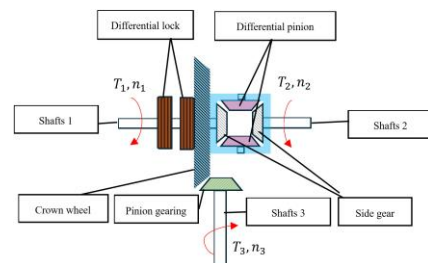


Fig. 4 Schematic of differential gear unit

また THS は、Fig. 2(b)に示すように ICE、発電機、駆動用モータを遊星歯車で連結し、動力を分配する構造を持ち、遊星歯車による動力分配で変速ショックがない利点があるが、ICE 出力の一部が発電機で利用され、駆動用モータで再び機械エネルギーに変換されるため ICE 負荷が増加する欠点に課題がある⁵⁾。

3. 提案するディファレンシャルギアを用いたシリーズ・パラレルハイブリッドシステム

3.1 使用するディファレンシャルギアの特性

提案するハイブリッドシステムに用いるディファレンシャルギアの写真を Fig. 3 に、概略図を Fig. 4 に示す。図中の Shaft 1 と 2 はそれぞれ Side gear と連結されてい

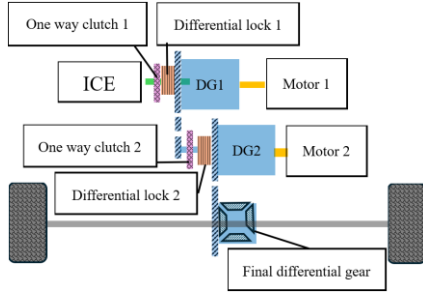


Fig. 5 Proposed System Configuration

る．Side gear に伝わるトルクは Differential Pinion を駆動し,Ring gear を介して, Pinion gear に伝わり, Shaft 3 から出力される． Shaft 1, 2, 3 それぞれのトルクを T_1 , T_2 , T_3 [N・m], 回転数を n_1 , n_2 , n_3 [rpm] とする．

ワンウェイクラッチより, Shaft 1 の回転が制限されている場合は, 図中左側の Side gear は固定されていると見なされる．この状態で出力軸が回転するとき, 出力トルクと回転速度は次式より求めた．

$$T_3 = 2 \cdot T_2 \quad (1)$$

$$n_3 = \frac{1}{2} \cdot n_2 \quad (2)$$

次に Shaft 1 と 2 の回転方向が一致している場合でも, 回転速度およびトルクには差が生じる．これらのトルクは Differential Pinion において合成され, 合成した力が Shaft 3 から出力される．このときの出力トルクと回転速度は次式より求めた．

$$T_3 = \frac{(T_1 \cdot n_1 + T_2 \cdot n_2)}{n_3} \quad (3)$$

$$n_3 = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad (4)$$

3.2 ディファレンシャルギアを用いたハイブリッドシステム

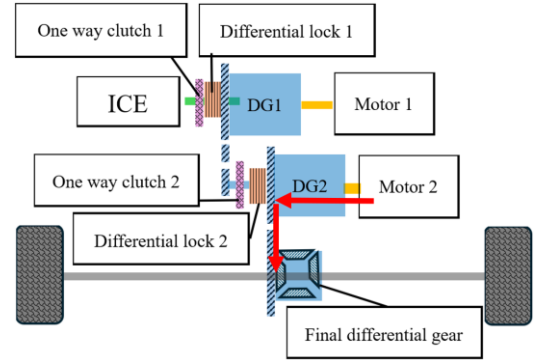
本研究で提案するシステムは Fig. 5 に示すように, ディファレンシャルギア機構を 2 基用いて動力分配を行う．ディファレンシャルギア (DG1) において, ICE と Motor 1 は連結され, 合成された動力はワンウェイクラッチを介して DG2 に入力される． DG2 は, 右側出力軸において Motor 2 に連結される．どちらのディファレンシャルギアにワンウェイクラッチ機構を配置した．これらの機構要素により, エンジンの逆回転防止や, 回転数の同期制御, エンジンの動力のみで走行するモード, スタートモータ機能を多重に実現する．

ハイブリッドシステムにおいては, 車両の構造や走行状況に応じて原動機を最適に制御する複数のモードが存在する．

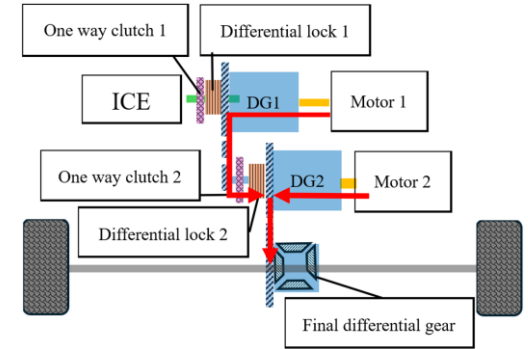
3.3 システムの駆動モード

3.3.1 EV モード

提案するシステムにおいて, モータのみで走行する, EV モードは 2 種類のモードが存在する．1 つ目 Fig. 6(a)



(a) Only motor 2 drives (EV1 mode)



(b) Motor 1 and 2 drives (EV2 mode)

Fig. 6 Schematic diagram of proposed system in EV mode

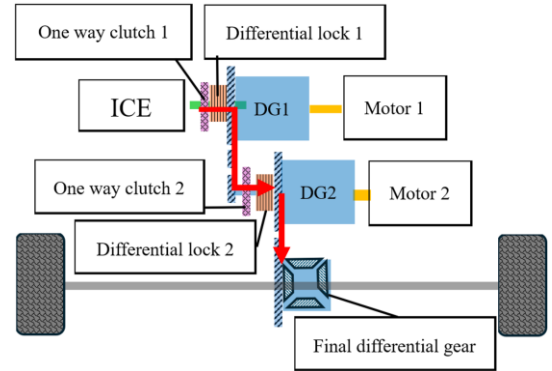


Fig. 7 Schematic diagram of proposed system in ICE Mode

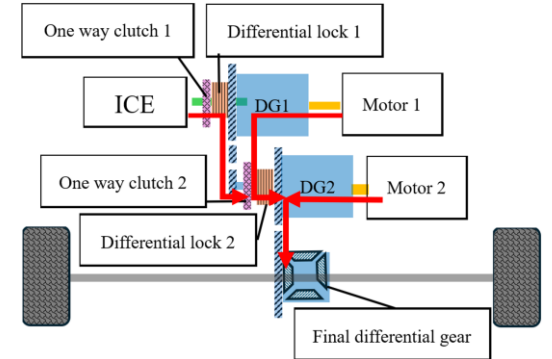


Fig. 8 Schematic diagram of proposed system in HEV Mode

に示すように, Motor 2 のみで車両を駆動する EV1 モードである．より大きな動力が必要な場合には Fig. 6(b)に示すように Motor 1 と Motor 2 を併用して駆動する．これにより, 高いトルクと回転数を得ることが可能である

Table 1 Hybrid System Operating Modes and Utilization

		ICE	Motor 1	Motor 2
Proposed System	EV	×	△	○
	HEV	○	○	○
	ICE	○	×	×
BYD DM-i	EV	×	×	○
	HEV	○	×	○
	ICE	○	×	×
TOYOTA THS II	EV	×	△	○
	HEV	○	×	○
	ICE			

Table 2 Specifications of Motors, and ICE

	Torque T	Power P	Rotational speed n
Motor 1	70 Nm	40 kW	18000 rpm
Motor 2	210 Nm	120 kW	18000 rpm
ICE	146 Nm	82 kW	6000 rpm

3.2.2 ICE モード

ICE モード時は Fig. 7 に示す. ように ICE が接続されている DG1 の Differential lock 1 を接続させ, DG1 の左右車軸回転数を同調させる. 2 つのモータの電気回路を切断することで, ICE の出力を車両駆動に利用する.

3.2.3 HEV モード

HEV モード時は Fig. 8 に示すように, ICE と Motor 1, 2 が同時に出力し, DG 1, 2 を介して動力が統合され, 車両を駆動する. これにより, 高いトルクと回転数を達成することが可能となる.

3.4 他のハイブリッドシステムとの比較

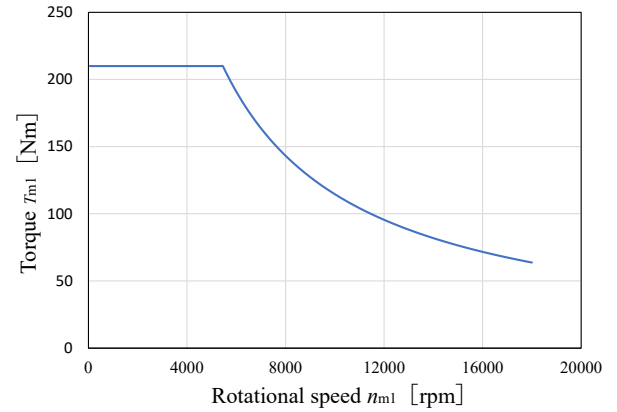
提案するシステムと従来のシステムの各モードに分ける各原動機の駆動力への寄与を Table 1 に示す. 表中の ○ は各原動機の動力を全て駆動力に利用でき, △ は一部が利用でき, × は利用できないことを示す.

トヨタの THS システムはスプリット方式を主としており, EV モードと HEV モードを実現可能であるが, エンジン作動時には 1 つのモータが変速機として回転数とトルクを調整する必要があるため, ICE モード (エンジン直接駆動) を実現できない. BYD DM-i とホンダの i-MMD などのパラレル方式を採用しており, EV, HEV, ICE モードで作動可能で, 1 つのモータは発電専用として機能する. 提案するシステムは, EV, HEV, ICE モードで作動可能であり, HEV モードでは全ての原動機の動力を車両の駆動力に利用できる.

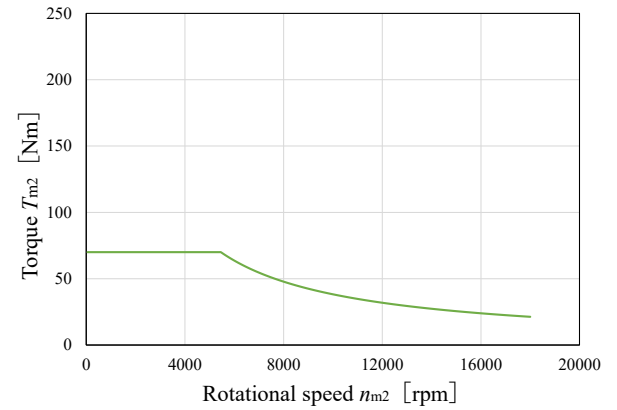
4. シミュレーションによる提案したシステムのトルク特性に関する検討

4.1 シミュレーション条件

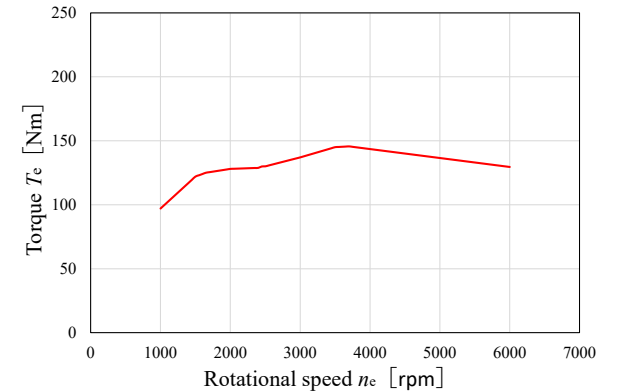
提案したシステムの動力特性についてシミュレーションにより検討を行った. 提案するシステムに ICE 1 基,



(a) Motor 1



(b) Motor 2



(c) ICE

Fig. 9 Relationship between torque and rotational speed in each power unit for proposed hybrid system

モータ 2 基を搭載し, ディファレンシャルギア 2 基で動力の統合を行う. 使用した Motor 1, Motor 2 及び ICE の最大トルク, 定格回転数, 出力を Table 2 に, 各原動機の回転数とトルクの関係を示す. 同図(a)は Motor1 におけるトルク T_{m1} [N・m] と回転数 n_{m1} [rpm], 同図(b)は Motor2 におけるトルク T_{m2} [N・m] と回転数 n_{m2} [rpm], 同図(c)は ICE におけるトルク T_e [N・m] と回転数 n_e [rpm] の関係を示す. これらの原動機の特性は BYD QIN L DM-i の駆動モータと発電機, ICE はマツダの Skyactiv 1.5G エンジン を参考に決定した. ICE と DG1 の減速比 i_1 を 2:1, Motor 1 と DG 1 の減速比 i_2 を 6:1, Motor 2 と DG2 の減速比 i_3 を 3:1, Final differential gear の減速比 i_4 は 2:1 とした

4.2 各システムの出力特性の算出

提案されたシステムと既存の BYD DM-i, THS において EV モード, HEV モードにおいてシステムの出力トルク $T_{sys,mode}$ [N・m] および回転数 $n_{sys,mode}$ [rpm] を計算した。なお, $T_{sys,mode}$, $n_{sys,mode}$ の sys は搭載したハイブリッドシステムの方式 (d :DM-i, t :THS, p :提案したシステム) を示し, $mode$ は走行モード (EV, HEV) を示す。

4.2.1 EV モード

BYD DM-i の EV モードにおける減速比 i_d は 12:1 であり, 次式のように算出した。

$$T_{d,EV} = \frac{T_{m2} * n_{m2}}{n_{d,EV}} \quad (9)$$

$$n_{d,EV} = \frac{n_{m2}}{i_{d,EV}} \quad (10)$$

TOYOTA THS では, システムの減速比 $i_{t,EV}$ は 12 : 1 とし, 各モードの出力軸におけるトルクと回転数は次式で表される。

$$T_{t,EV1} = \frac{T_{m2} * n_{m2}}{n_{t,EV1}} \quad (11)$$

$$n_{t,EV1} = \frac{n_{m2}}{i_{t,EV1}} \quad (12)$$

$$T_{t,EV2} = \frac{T_{m1} * n_{m1} + T_{m2} * n_{m2}}{n_{t,EV2}} \quad (13)$$

$$n_{t,EV2} = \frac{n_{m1}}{i_{t,EV2}} \quad (14)$$

提案システムの, EV1,2 モードのトルク及び回転速度を次式に示す。

$$T_{p,EV1} = \frac{T_{m2} * n_{m2}}{n_{p,EV1}} \quad (15)$$

$$n_{p,EV1} = \frac{n_{m2}}{i_3 * i_4} \quad (16)$$

$$T_{p,EV1} = \frac{T_{m1} * n_{m1} + T_{m2} * n_{m2}}{n_{p,EV1}} \quad (17)$$

$$n_{p,EV1} = \frac{\left(\frac{n_{m1}}{2 * i_2} + \frac{n_{m2}}{i_3}\right)}{2 * i_4} \quad (18)$$

4.2.2 HEV モード

BYD DM-i では, HEV モードにおける, 減速比 $i_{d,HEV1}$ は 4:1 であり, エンジンとモータ間の減速比 $i_{d,HEV2}$ は 3 : 1 であり, 次式のように算出される。

$$T_{d,HEV} = \frac{P_{ICE} + P_{m2}}{n_{d,HEV}} \quad (19)$$

$$n_{d,HEV} = \frac{n_{ICE}}{i_{d,HEV1} * i_{d,HEV2}} \quad (20)$$

TOYOTA THS では, HEV モード時におけるエンジンと Motor2 が同時に出力を発生させる。この際, エンジンの出力の一部が Motor1 による発電に用いられるとともに, エンジン出力トルクの制御が行われる。駆動系の減速比 $i_{t,HEV}$ は 4:1 であり, Motor2 と出力軸のトルク及び回転速度を次式で表される。

$$T_{t,HEV} = \frac{T_{m2} * n_{m2} + T_{ICE} * n_{ICE} - T_{m1} * n_{m1}}{n_{t,HEV}} \quad (21)$$

$$n_{t,HEV} = \frac{n_{m2}}{i_{t,HEV}} \quad (22)$$

提案するシステムでは, HEV モード時における ICE, Motor 1, Motor 2 と共に車両を駆動する場合の出力軸におけるトルク及び回転速度を次式に示す。

$$T_{p,HEV} = \frac{T_{ICE} * n_{ICE} + T_{m1} * n_{m1} + T_{m2} * n_{m2}}{n_{p,HEV}} \quad (23)$$

$$n_{p,HEV} = \frac{\left(\frac{n_{ICE}}{i_1} + \frac{n_{m1}}{i_2} + \frac{n_{m2}}{i_3}\right)}{2 * i_4} \quad (24)$$

4.3 シミュレーション結果

従来のシリーズ・パラレルハイブリッド車両では, ICE とモータをクラッチによって接続する方式が一般的である。この構成では, EV モードから HEV モードへの切り替え時に, ICE はまず始動し, 回転数がモータ側と一致した後にクラッチが接続される。したがって, エンジン始動からクラッチ接続までの間, ICE のトルクは駆動輪に伝達されず, その間に出力の損失が発生する可能性がある。本研究で提案するシステムは, ディファレンシャルギアを介して ICE とモータが常時接続されており, ICE 始動直後から両者の出力を合成して車両を駆動可能である。この構成により, 起動時のエネルギーロスを抑制できる。本稿ではこの利点を明確にするため, Fig. 10 にクラッチ方式との出力比較を示し, 時間軸に対する出力変化を定量的に評価した。▲は ICE 始動 (回転開始), ■は ICE の始動完了, ●はクラッチ接続を示す。この解析では基礎的な検討と仮定して ICE の角加速度を一定とし, 一般的な ICE の相場値の最高値に近い 0.01 秒間で 50rpm の増加率で一定に加速したのとして計算を行った。

EV モード解析において, BYD DM-i システムの EV モード, TOYOTA THS システムの EV モードと提案システムの出力特性をそれぞれ算出し, 出力軸の回転数とトルクの関係を図 11 に示す。EV モードにおける低速度域では, 提案システムは BYD DM-i と比較して高いトルクを用いて, TOYOTA THS と同等のトルク特性を示す。高速度域には, 提案システムが BYD DM-i および TOYOTA THS を上回るトルクを達成し, さらに広い回転数域を実現している。

HEV モード解析において, BYD DM-i システムの HEV モード, TOYOTA THS システムの HEV モードと提案システムの出力特性をそれぞれ算出し, 出力軸の回転数とトルクを図 12 に示す。HEV モードにおいて, 提案システムの総出力を BYD DM-i, TOYOTA THS と比較すると, すべての原動機が駆動力を提供できるため, 中高速度域でより高い最大トルクと最大回転速度を実現できる。

次に提案したシステムの EV1, EV2, HEV モードにおける出力軸のトルクと回転数の関係を図 13 に示す。提案システムの各モードにおける出力特性を算出した結果, EV モードでは Motor1 と Motor 2 が同時に駆動する際は Motor 2 のみで駆動することより高いトルクが出力でき, より大きな回転数の領域で運転することができると得

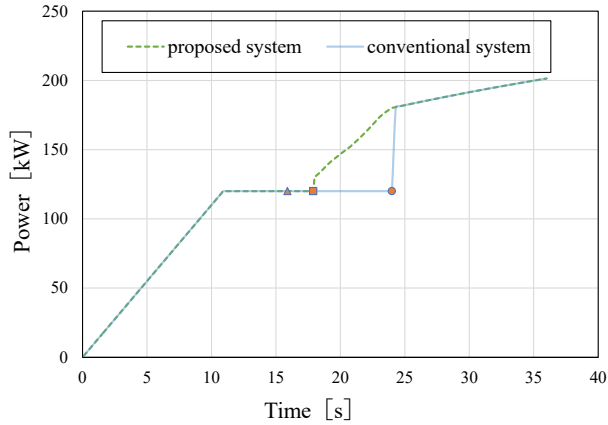


Fig. 10 Power Output and Event Timeline in Engine Start-up Process

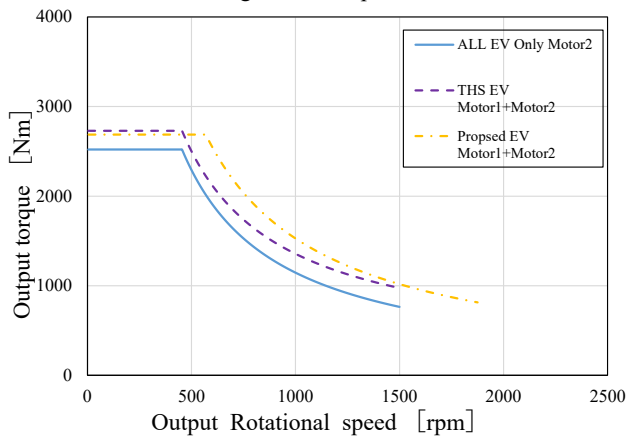


Fig. 11 Relationship between output torque and rotational speed in each system (EV mode)

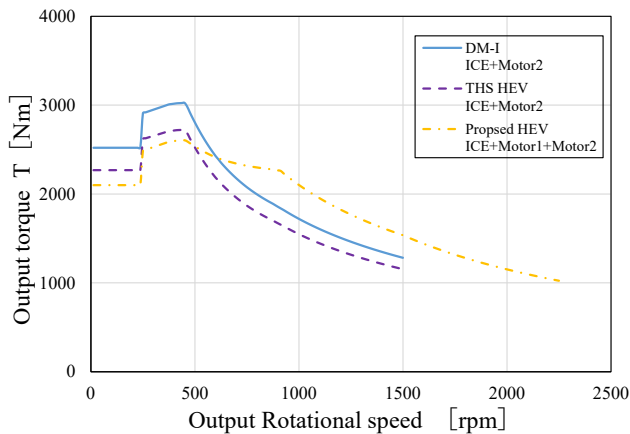


Fig. 12 Relationship between output torque and rotational speed in each system (HEV mode)

られた。HEV モードと EV モードを比較すると、HEV モードは低速域で、EV モードよりトルクが低い特性得られた。したがって、提案システムが低速度域で走行する際には EV モードを採用することで効率よく運転できると考えられる。中高速度域で走行する際には ICE を始動させることで、より大きなトルクと広い速度域を用いることができる。この特徴から、市街地走行などの低速度域が主体となる走行環境では EV モードを積極的に活用

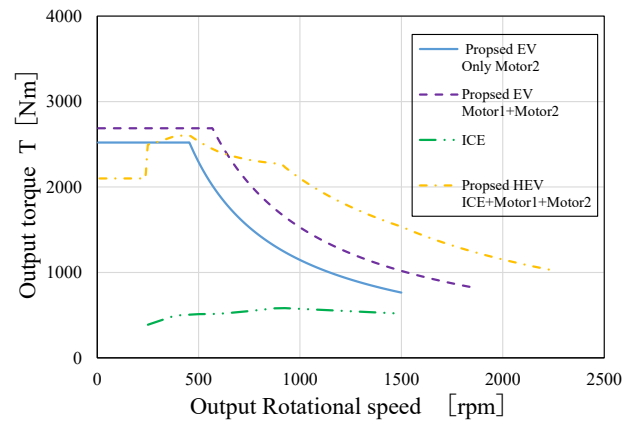


Fig. 13 Relationship between output torque and rotational speed in each system in each mode

し、高速域への移行に伴う動力要求の増大に応じて HEV モードで走行することが有利であると考えられる。

5. 結言

本論文では、ディファレンシャルギアを使用した動力分配機構を提案した。シミュレーションにより既存のシリーズ・パラレルハイブリッドシステムと出力特性について比較検討した結果、2 基のモータと ICE を同時に使用する状況下で高い出力特性が得られることを示した。特に、高回転数域での出力特性が優れていることが確認できた。今後は各モードをどの条件で切り換えた際に効率良く走行できるのかについて検討を行っていく。

参考文献

- 1) C. Nayanatara, P. Shanmugapriya, G. Gurusivakumar and B. Thiruvankadam, Design & development of series Hybrid Electric Vehicle, Energy, 2014 International Conference on Computation of Power, CD-ROM, pp. 114-117(2014). Chennai, India
- 2) Y. Zhang, H. Liu and Q. Guo: Varying-Domain Optimal Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 2, pp. 603-616(2014).
- 3) L. Chen, F. Zhu, M. Zhang, Y. Huo, C. Yin and H. Peng: Design and Analysis of an Electrical Variable Transmission for a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 5, pp. 2354-2363(2011).
- 4) Munehiro Kamiya: Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 126, no. 4, pp. 473-479(2006).
- 5) G. Lu, D. Yang, Y. Rong, Z. Gong, Development of an Intelligent Thermal Management System for BYD DM-i Hybrid Engine, SAE Technical Paper, CD-ROM, pp.10(2021) Live Online Pennsylvania, United States

アクティブシートサスペンションによる 超小型モビリティの乗り心地改善 (マスキングの位相の影響に関する検討)

落合 真輝^{*1} 勝間田 龍翔^{*1} 王 鼎^{*1} 笠松 忍^{*2} 呉 文宝^{*2} 小林 一景^{*2}
黒田 純平^{*2} 池田 圭吾^{*3} 遠藤 文人^{*4} 加藤 英晃^{*5} 成田 正敬^{*5}

Improvement of Ride Comfort of Ultra-compact Mobility Vehicles by Active Seat Suspension (Consideration of the Effect of Masker Phase) by

Masaki OCHIAI^{**1}, Ryoga KATSUMATA^{**1}, Ding WANG^{**1}, Shinobu KASAMATSU^{**2}, Wu WENBAO^{**2}, Ikkei KOBAYASHI^{**2}, Jumpei KURODA^{**2}, Keigo IKEDA^{**3}, Endo AYATO^{**4}
Hideaki KATO^{**5}, and Takayoshi NARITA^{**5}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jul.28, 2025)

Abstract

Improvement of ride comfort for ultra-compact mobility vehicles is required because such vehicles can easily enter narrow and unpaved roads, reducing the driver's ride comfort. Furthermore, vibration control does not always guarantee a comfortable ride for all individuals. As a solution, this study proposes an active seat suspension. To date, our study group has conducted investigations focusing on frequency, jerk, and acceleration amplitude. However, achieving more accurate control will require additional areas of investigation. In this study, LIR, a stress index obtained from differences in cerebral blood flow, and LF/HF, a stress index obtained from ECG heart rate variability, were used for the evaluation. Specifically, an experiment was conducted on nine participants in which the phase of 2 Hz and 8 Hz maskers was varied while they were exposed to unpleasant 4 Hz vibrations. The influence of masker phase on driver ride comfort was examined using biometric information. From the results, an improvement trend was observed in both 2 Hz and 8 Hz masking, but there were differences in the effect depending on the phase, and a phase with a large improvement trend was confirmed.

Keywords: Ride comfort, Active seat suspension, Electrocardiogram, Voice coil motor

1. 緒言

近年、地球温暖化や高齢化社会の観点から、超小型モビリティへの需要が高まっている。これに伴い、国土交通省は令和2年の保安基準改正において超小型モビリティに関する衝突安全基準の緩和を行ったことで、超小型モビリティの需要がより増してくると予想される^{1,2)}。超小型モビリティは型式指定車の場合、長さ2.5 m以下、横幅1.3 m以下、高さ2.0 m以下と小型であるため、幅の狭い道路への通行が容易である。このような狭い道路は未舗装である場合もあるため、一般の乗用車よりも路面の凹凸による振動の入力が大きくなる可能性がある。

路面から振動による乗員の乗り心地低下を防ぐためには、十分なストローク量や減衰性能を持つサスペンションが必要だが、その軽量な車体であるが故に十分な制振性

能を有するサスペンションを車両の4輪のサスペンション全てに設置することは車両の構造上難しい。

そこで当研究グループはこの課題を解決するため、1人乗りの超小型モビリティの座席下部にリニアモータを設置して、座面の加速度を測定して振動を制御する超小型車両にアクティブシートサスペンションを搭載し、乗員の快適性を向上する手法を提案している³⁾。これまでに外乱振動に対しての応答性が高い特徴を持つスライディングモード制御⁴⁾や、予想が困難な振動を安定して制御出来る特徴を持つ μ シンセンス制御の適用⁵⁾により、同期的な路面からの振動を座面で低減できたことを確認している。

一方で、路面からの振動を全て制振する制御が全ての人にとって必ずしも最良な乗り心地をとらないことも確認されている。従って、乗員の体調や心理状態、走行環境によって振動の感じ方が変化すると考えられ、その状況に応じた適切な振動を加えることで、より高度な乗り心地の向上が期待できる。

^{*1} 東海大学大学院工学研究科機械工学専攻
^{*2} 東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻
^{*3} 北海道科学大学工学部機械工学科
^{*4} 福岡工業大学工学部電気工学科
^{*5} 東海大学工学部機械システム工学科



Fig. 1 Photograph of experiment vehicle



Fig. 2 Photograph of active seat suspension

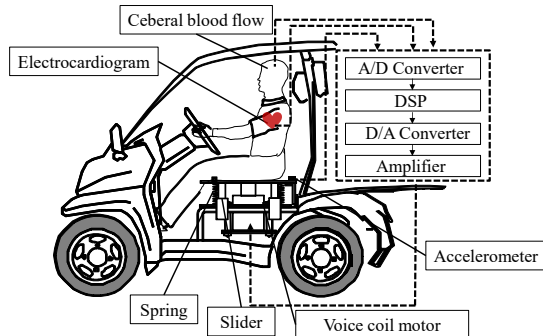


Fig. 3 Schematic diagram of active seat suspension system

そこで著者らは、音響分野において、騒音と異なる音声を重畳することで、人の騒音に対する感度を相対的に低下させ、快適性の向上を図るマスキング^{6,7)}に着目した。このマスキングを車両の振動に応用して、路面から伝わる振動に対して異なる周波数成分の振動を意図的に加える手法を提案した。この手法は単純な振動入力を行う簡易的な手法であり、高度な制御システムを必要としない点から、早期的な実現性の高い制御手法であるが、車体に入力された振動に対するマスキングの研究事例は極めて少ない。当研究グループでは、路面の振動を想定した 5 Hz の振動（マスキー）に対して、異なる周波数の正弦波状の振動（マスカー）を重畳し、不快な振動の感覚を相対的に低減させることで、乗り心地の改善が可能であることを明らかにしている⁸⁾。これまでにマスカーの周波数⁹⁾や加速度振幅¹⁰⁾、躍度¹¹⁾に着目して検討を行い、乗り心地がどのように変化するか検討を行ってきた。

しかしながら、このシステムを実際に利用する状況を想定すると、アクティブシートサスペンションは走行中、常にマスカーの振動を発生させるのではなく、乗り心地を特に悪化させる 4~8 Hz の振動が検出されてからマスカーの振動を発生することになる。このときマスキング

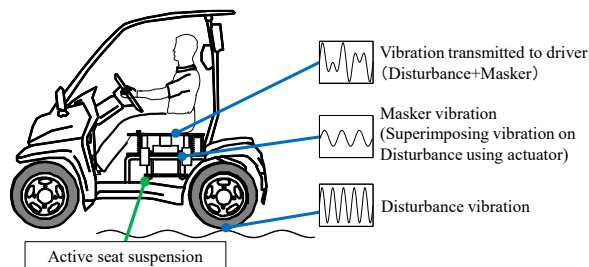


Fig. 4 Masking method

を開始するタイミングによって外乱となるマスキーとマスカーの位相差によって乗員の乗り心地が変化すると考えられる。そこで本研究は、4 Hz のマスキーに対して 2 Hz, 8 Hz のマスカーを重畳し、その位相差を変化させた。このとき乗員の乗り心地を定量的に評価するため、加振された実験協力者の心電図と脳血流を計測し、乗員の乗り心地評価を行った。

2. アクティブシートサスペンションを搭載した超小型モビリティ

2.1 実験車両

本研究で使用した超小型電気自動車の写真を Fig. 1 に、シート下に搭載するアクティブシートサスペンションの写真を Fig. 2 に示す。加えて、制御系を含めた概略図を Fig. 3 に示す。Fig. 2 のとおり、アクティブシートサスペンションは座面となるシート板を支えるようにコイルスプリングを 4 本配置し、シート板の変位を上下方向のみとするため、4 本のリニアスライダが設置されている。これらのコイルスプリングとスライダと並列に制御用アクチュエータとしてリニアモータの一種であるボイスコイルモータを座面中央に設置した。

シート座面には加速度ピックアップが設置され、座面の加速度を測定する。得られた加速度ピックアップの信号は、A/D 変換器を介して Digital Signal Processor(DSP) に入力される。入力された加速度を元に DSP 内で制御信号を計算し、D/A 変換器を介して出力する。この信号は増幅器を介してアクチュエータであるボイスコイルモータに入力され、座面を動作する。

アクティブシートサスペンションは乗員や運転者の座席の下に搭載することを想定しているため、従来のシャシーサスペンションと比べて乗り心地と運動性能を分けた設計が可能となる。そのため、4 輪それぞれに対するアクティブサスペンションよりも低コストかつ小型で装着も可能であると期待され、汎用性が高いと考えられる。また、座席部分にシステムを搭載し座席ごとに制御が可能になるため、シートに座る乗員それぞれに最適な制御が可能になり、より高度な乗り心地制御の実現が期待出来る。

また将来的には、心電図や脳血流といった乗員の生体情報を取得し、リアルタイムに乗り心地を評価し制御を反映させることも可能になる。

2.2 路面からの振動に対するマスキング

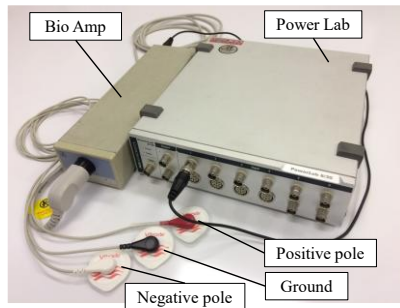


Fig. 5 Electrocardiogram-based measurement

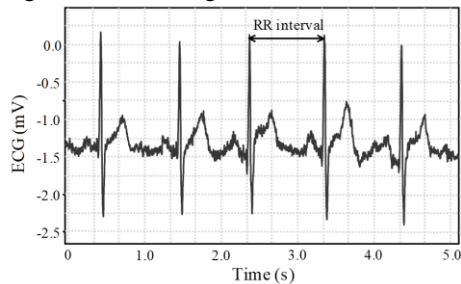


Fig. 6 RR Interval

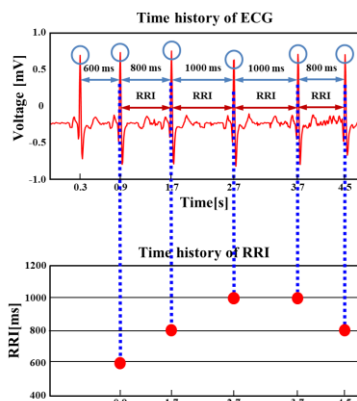


Fig. 7 How to draw the time history of RRI

マスキングとは地面から伝わる不快な振動に対して、アクティブシートサスペンションを通して異なる周波数振動を積極的に入力することで、乗員にとって不快な振動を相対的に低減させる手法である。Fig. 4は実験車両にて対して行ったマスキングの概略図である。同図のように路面の凹凸により、Fig. 4 下部に示すような振動が車体に入力される。この振動をシステムが検知し、Fig. 4 中部に示すようなマスキャーを VCM で発生させる。乗員には、乗り心地を悪化させる路面からのマスキャーに VCM により発生したマスキャーを重畳した、Fig. 4 上部に示すような振動が入力される。

3. 生体情報を用いた乗員の乗り心地評価

3.1 心拍変動の取得方法と評価方法

乗員の乗り心地を評価する際には乗車後にご感じたかを主観的に回答するような、アンケートを記入させる質問紙法が多く用いられる。しかしながら、評価基準が実験協力者によって異なることから、実験協力者間の評価が難しい。加えてリアルタイムに結果を収集することが困難なため、乗り心地に影響を与えたイベントがいつ

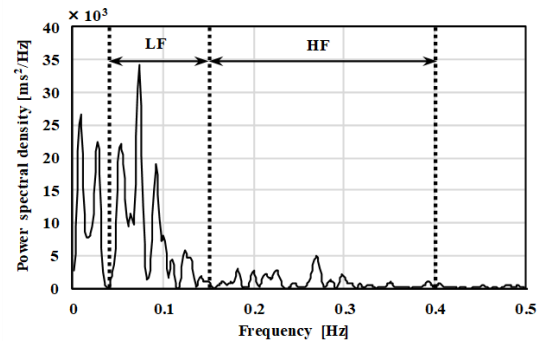


Fig. 8 HRV spectrum

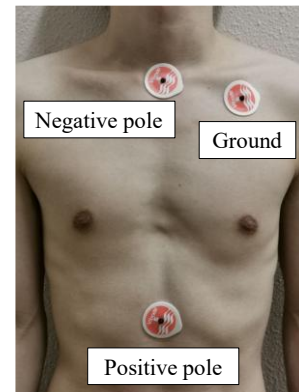


Fig. 9 Installation position of electrode

発生したのか検出することは不可能である。

そこで心理状態を評価方法として心電図と脳血流データを取得した。Fig. 5 に心電図計測器、Fig. 6 に測定中に取得した心電図波形の一例を示す。Fig. 6 において、周期的に現れるプラス方向のピークは R 波と呼ばれる。R 波は心拍ごとに発生し、左心室の収縮を反映している。R 波から次の R 波までの時間を R-R 間隔 (RRI) という。RRI は心拍の変動を示す重要な指標であり、これを時系列データとして整理すると、Fig. 7 のような RRI の変動パターンが得られる。さらに、RRI の時系列データに高速フーリエ変換 (FFT) を適用することで、Fig. 8 に示すようなパワースペクトル密度 (PSD) を算出する。このパワースペクトルにおいて、0.04~0.15 Hz の周波数成分を低周波 (LF)、0.15~0.4 Hz の周波数成分を高周波 (HF) と定義する。LF と HF は自律神経系、交感神経系、副交感神経系の活動の指標として広く用いられており、特に LF は交感神経の活動、HF は副交感神経の活動に関連する。交感神経系は闘争、防御、逃避などの行動を開始する前に緊張状態になる。これは様々な行動を円滑に行えるよう覚醒状態を作り出し、それに伴い血圧の上昇、活動器官への血液量増加による心拍数の上昇など、身体の活動レベル・運動能力を高めるように働く。他にも現代社会での人間関係などによっても精神的ストレスが要因にもなり、身体的活動に対する緊張が必要ない状態にも関わらず、同様の反応が起こる¹²⁾。本研究では実験協力者の自律神経系のバランスを示す指標として LF/HF を用いた。この LF/HF は、交感神経と副交感神経の相対的な活動状態を示し、その変動を解析することで心理的ストレスやリラックス状態の評価が可能となる。LF/HF が高い場合は交感神経の活動が優位であり、ストレ状態を示

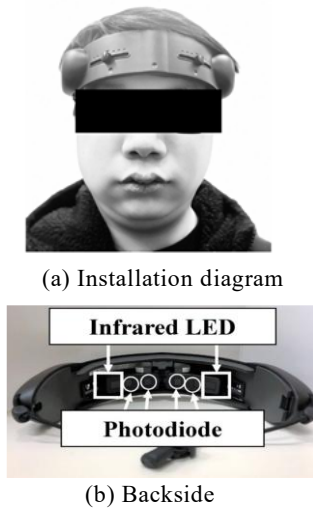


Fig. 10 Cerebral blood flow measuring device

す。一方、LF/HF が低い場合は副交感神経の活動が優位であり、リラックス状態であると判断できる。心電図測定には、日本光電株式会社の Power Lab ML825 2/25 を用い、解析システムは同社の Heart Rate Variability を用いた。心電図は心臓の電気活動を表し、Fig. 9 のように胸部に直接取り付けられた電極を介して心拍数の電位差を測定し、心筋活動を評価する。心筋活動以外の活動電位の影響を受けにくく、R 波を安定して測定できる NASA 誘導法を採用した。

3.2 脳血流の測定方法と評価方法

脳血流測定には携帯型脳活動測定装置 HOT-1000（株式会社 NeU）を使用した。Fig. 10 に示すように、本装置は額部に装着する形状をしており、リアルタイムでの測定が可能である。HOT-1000 は波長 810 nm の近赤外光（NIR: Near Infrared Radiation）を照射する LED と、それを受光する 2 つのフォトダイオード（PD）で構成されている。この装置は近赤外分光法（NIRS）の原理を用いており、LED から発せられた近赤外光が頭皮・頭蓋骨を透過し、大脳皮質の前頭前野に到達する。その後、脳組織内で散乱・吸収された光の一部が再び頭皮表面へ戻り、フォトダイオードで検出される。脳の活動が活発になると局所的な酸素消費量が増加し、それに伴い血液供給が増える。この結果、酸素化ヘモグロビン（Oxy-Hb）や脱酸素化ヘモグロビン（Deoxy-Hb）の濃度が変化する。ヘモグロビンは特定の波長の光を吸収する性質があり、血流量が増加するとフォトダイオードで検出される光量は減少する。したがって、受光強度の変化を解析することで、脳の血流量を推定することが可能である。¹³⁾ 本研究では、測定された脳血流データをもとに左右の脳血流量比（LIR）を算出した¹⁴⁾。LIR の計算には、右側の脳血流量を R_t 、左側の脳血流量を L_t 、測定区間における右脳活動の最小値を R_{min} 、左脳活動の最小値を L_{min} とし、式(1)を用いて算出した。

$$LIR = \frac{\Sigma[(R_t - R_{min}) - (L_t - L_{min})]}{\Sigma[(R_t - R_{min}) + (L_t - L_{min})]} \quad (1)$$

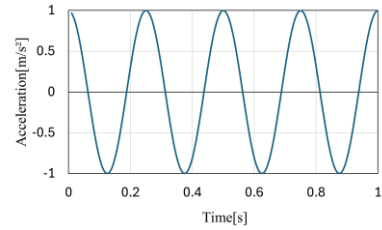


Fig. 11 Time histories of operated acceleration as maskee

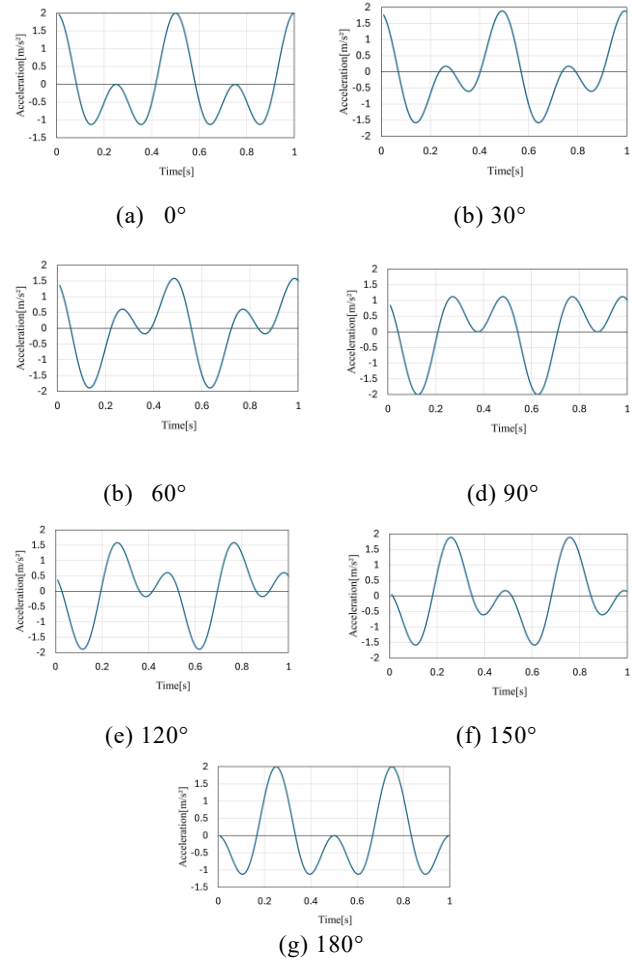


Fig. 12 Time histories of operated vibration under masking (Maskee : 4 Hz, Masker : 2 Hz)

LIR の数値が増加した場合、右脳の血流量が増加しストレス状態と判断し、減少した場合は左脳の血流量が増加しリラックス状態であると判断する。

4. アクティブシートサスペンションを用いたマスキングによる乗員の加振実験

4.1 実験条件

実験は車両を屋内にて走行させない状態で実験を行った。実験協力者は健康な大学生 9 名とした。また、生体情報は加振時間の 3 分間取得し、外乱振動とマスキング振動のストレス値を比べることで評価する。実験協力者に対して Fig. 14 のような実際に車両を運転している際と同様な運転姿勢を取るよう指示した。

加振実験を開始する前に実験協力者の心理状態を

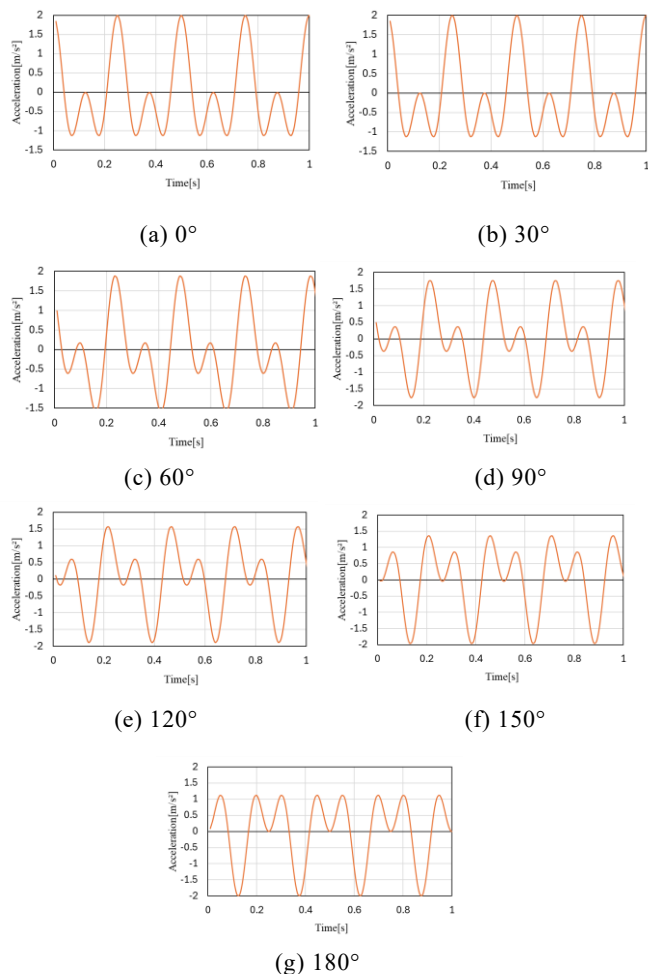


Fig. 13 Time histories of operated vibration under masking (Maskee : 4 Hz, Masker : 8 Hz)

一定に保つため、実験協力者に1分間目を閉じた状態で安静にするよう教示した。次に路面からの振動を想定した Fig. 11 に示すような4Hzの正弦波で加振した。そして4Hzの振動にマスカーとなる振動を重畳した振動で1分間加振した。マスカーの周波数は、ISO2631¹⁵⁾やJaneway¹⁶⁾等によって人が不快に感じる周波数帯域は4~8 Hzと報告されており、そこから4 Hzとした。周波数の感覚は武井ら¹⁷⁾によって0.2~3 Hzはふわふわ感、8~20 Hzはばたつき感と報告されている。中でも整数比である2Hzと8Hzは周期的な位相の干渉が規則的に生じることから、位相差による乗り心地の影響が大きくなると考えられる。また、それぞれ主観的な振動感覚がフワフワ感、バタバタ感と異なることから、マスカーの周波数は2 Hz, 8 Hzとした。また、Fig. 12, Fig. 13 に示すような加振波形の最大値や最小値を取る時点が変化が確認出来る位相差0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°の7種類とした。マスカーとマスカーの加速度振幅(RMS)は1.0m/s²とした。なお、アクティブシートサスペンションの加振によって乗員に伝わる振動が減衰せず直接伝わるようにするため、シート素材にはアクリル板を設置し、ボイスコイルモータの出力が直接伝わるようにした。また、車体の固有振動数による共振を防ぐため、車体はジャッキアップさせた状態で実験を行った。

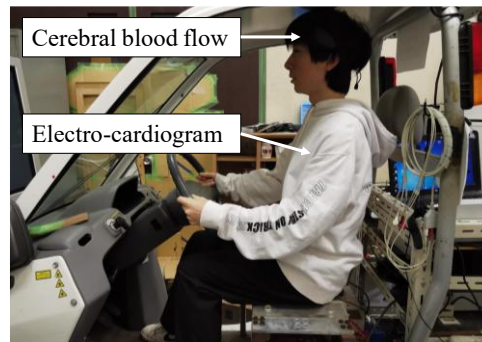


Fig. 14 Cerebral blood flow measuring device

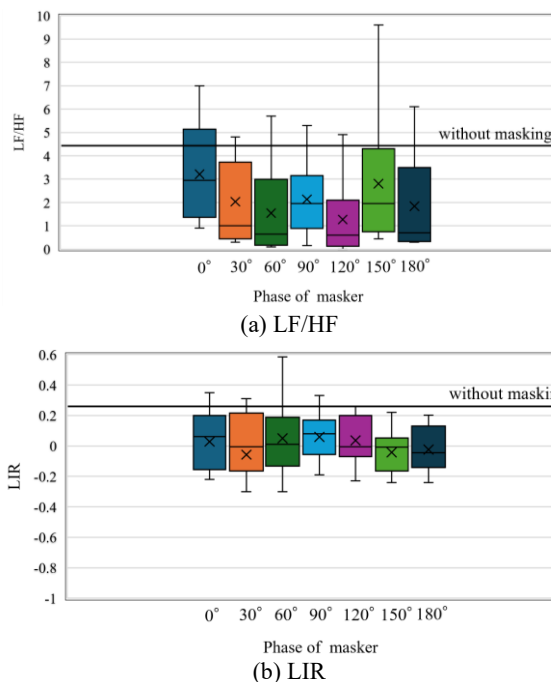


Fig. 15 Experimental results in masker with 2 Hz

4.2 実験結果

4 Hz のマスカーに対して重畳するマスカーの位相を変化させた加振実験を行った。9 人の実験協力者に対して行った2 Hzのマスカーを使用した際の結果を Fig. 15 に、8 Hzの結果を Fig. 16 に示す。Fig. 15, Fig. 16 の (a) は心電図の計測データから算出した LF/HF, Fig. 15, Fig. 16 の (b) は脳血流量から算出された LIR と位相の関係を示している。LF/HF と LIR はどちらも低下すると実験協力者のストレスが低下していると判断できる。図中の×のプロットは実験協力者全員の平均値を示している。なお、図中の実線はマスカーを重畳しない状態、つまり4 Hzのみ含まれる加速度の振動波形で実験協力者を加振した際の結果であり、この線より下の領域の結果が得られたとき、マスキングにより乗り心地が改善すると評価することができる。今回の結果では、すべての条件に置いて生体情報の数値の平均を示す×のプロットは、実線を下回っておりマスキングによる乗り心地改善が得られた。

次に Fig. 15 の2 Hzの結果に着目すると、Fig. 15(a)の LF/HF の結果からは、120°の条件で LF/HF の平均値が最も低い結果が得られた。また Fig. 15 (b) の LIR から30°

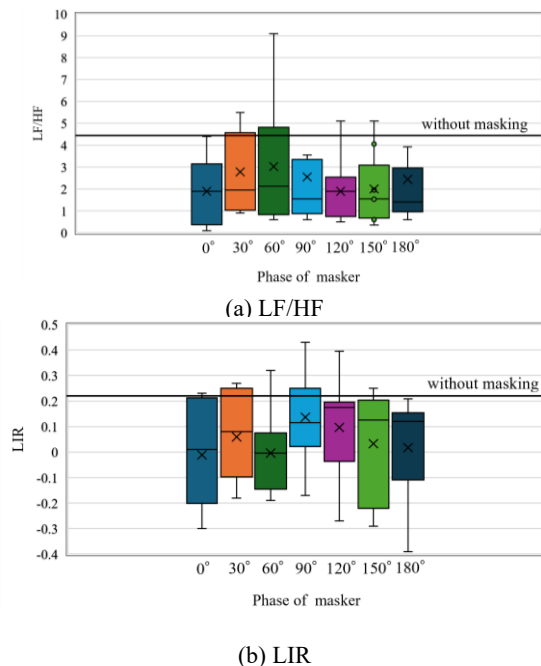


Fig. 16 Experimental results in masker with 8 Hz

の条件で LIR の平均値が他の位相と比べて最も低い結果が得られ、乗り心地の改善が確認できた。

最後に Fig. 16 の 8 Hz の結果に着目すると、Fig. 16(a) の結果からは、120°の条件で LF/HF の平均値が他の位相と比べて最も低い結果が得られた。また Fig. 16(b) の LIR からは 60°の条件で LIR の平均値が他の位相と比べて最も低い結果が得られ、乗り心地の改善が確認できた。

5. まとめ

本論文は、マスキング手法による振動制御システムの構築を目的とし、生体情報を用いた位相差によるマスキング手法による乗り心地改善の有効性の検討を行った。実験結果より、4 Hz が含まれる振動をストレスと感じる実験協力者において、2 Hz、8 Hz のマスキングを重量することで乗り心地が改善できたことを確認した。さらに、特に乗り心地が改善する位相条件を得ることができた。

参考文献

- 1) Urban Affairs Bureau and Automobile Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Guidelines for the Introduction of Ultra-compact Mobility: Toward the Realization of New Social Lifestyles through the Development and Use of New Mobility (2012).
- 2) 国土交通省: 国土交通省における超小型モビリティの取組について, pp. 10 (2020).
- 3) 押野谷康雄, 石橋 一久, 新井創: 能動型シートサスペンションによる小型電気自動車の乗り心地改善に関する基礎的検討, 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 4 pp. 209-205 (2003).
- 4) 押野谷康雄, 新井創, 石橋一久: ボイスコイルモータを用いた小型車両用シート制御（一自由度モデルに対するスライディングモード制御を用いた実験的検討）日本応用磁気学会誌, Vol. 28, pp. 140-144 (2011).
- 5) 荒川敬, 椎野弦士, 長谷川真也, 押野谷康雄, 石橋一久: 小型車両用アクティブシートサスペンション(μ-新センサを用いた実験的検討)日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, No. 08-1 (2008).
- 6) 生藤大典, 辻川美沙貴, 中山雅人, 西浦敬信: 聴覚マスキングに基づく室内騒音の不快感低減手法, 電子情報通信学会論文 A, 基礎・境界 Vol. J96-A, No. 8, pp. 551-519 (2013).
- 7) 内田和宏, 西野隆典, 伊藤克亘, 武田一哉, 板倉文忠: 聴覚マスキングを用いた頭外音像定位の評価法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 103, No. 501, pp. 15-20. (2003).
- 8) Keigo Ikeda, Ayato Endo, Ryosuke Minowa, Takayoshi Narita and Hideaki Kato: Ride Comfort Control System Considering Physiological and Psychological Characteristics: Effect of Masking on Vertical Vibration on Passengers, MDPI Actuators Vol.7, No.42, (2018).
- 9) Ayato Endo, Keigo Ikeda, Ryosuke Minowa, Hideaki Kato and Takayoshi Narita: Evaluation of Ride Comfort and Vertical Vibration of Ultra-Compact Mobility Vehicles Using Brain Blood Flow, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol. 43 pp. 17-23 (2018).
- 10) 加藤英晃, 長谷川 真也, 押野谷 康雄: 超小型車両用アクティブシートサスペンションの乗り心地評価（振動加速度が心拍変動に与える影響）, 東海大学紀要工学部, Vol. 52, No. 2, pp. 263-270(2012).
- 11) Takahiro Ohta, Keigo Ikeda, Ayato Endo, Hideaki Kato, and Takayoshi Narita: Ride Comfort Estimation Method Using Biological Information and Subjective Evaluation: A Fundamental Consideration Focusing in Jerk of Vertical Vibration, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol. 45. pp. 51-57(2020).
- 12) 後藤幸生「心身自律神経バランス学」真興交易(株)医学出版部 pp10-17.
- 13) 坂谷薫「NIRS-基礎と臨床-」新興医学出版 pp3.
- 14) W. Ishikawa, M. Sato, Y. Fukuda, T. Matsumoto, N. Takemura and K. Sakatani, Correlation between asymmetry of spontaneous oscillations of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: A near-infrared spectroscopy study, J. Biomed. Opt., 19 No. 2 027005 (2014).
- 15) I.S.O.: Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, No. ISO-2631 (1978).
- 16) Janeway, R.N.: Human Vibration Tolerance Criteria and Application to Ride Evaluation : SAE Tech. Pap. Ser. No. 750166, pp. 24. (1975).
- 17) 武井一剛, 石黒陸雄, 乗員の官能評価にもとづく乗り心地評価, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 30, No. 3, pp. 47-56. (1995).

羽田空港における着陸順序と滑走路選択の最適化による 滑走路処理容量の拡大

齋藤 和哉^{*1} 鈴木 昌和^{*2}

Expanding Runway Capacity at Haneda Airport by Optimizing Landing Order and Runway Selection

by

Kazuya SAITO^{*1} and Masakazu SUZUKI^{*2}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jun. 17, 2025)

Abstract : In this research, we propose a new operational method to alleviate the problem of runway capacity pressures at Haneda Airport caused by congested air traffic. We aim to improve runway capacity by optimizing the sequence of landing aircraft and runway selection while taking into account wake turbulence control separation, and by minimizing landing intervals. Tabu search was used as the optimization method. Simulation results showed that the optimization increased the landing runway capacity by approximately 19% to 37 aircraft per hour, and the maximum number of takeoffs increased by up to 22%. This showed that the number of takeoffs and landings per hour could be expanded from the current maximum of 90 to a minimum of 95 and a maximum of 99. As secondary effects, a reduction in fuel consumption due to shorter flight times and a reduction in delays due to airborne waiting are also expected.

Keywords : Air Traffic Management, Tokyo International Airport, Runway Capacity, Landing Order and Runway Selection Optimization

1. 緒論

1.1 背景

航空需要は年々増加が見込まれ、すでに現在ではコロナ禍前の2019年を上回る利用者数となり、日本のグローバル化に伴って今後さらに利用が増加することが予想される。そのためアジア地域の東端に位置する日本で、都心からほど近い羽田空港では、24時間運用可能な空港として世界各国から日本へのインバウンド需要、または北米とアジア各国への乗り継ぎ需要に対応し、国内線の要としても羽田空港の機能増強が必要である。

羽田空港では2026年度に第1ターミナルのサテライト新設が予定されており²⁾、駐機スポットの増設計画はあるものの、滑走路増設の議論は活発ではなく、このままでは離発着を増やすことはできず、発着枠の拡大は見込めない。発着枠を左右する要素の一つに滑走路処理容量があり、これは1時間あたりに1つの滑走路が処理可能な発着機数を指す。羽田空港においてこの滑走路処理容量は羽田容量算出方式と呼ばれる方法に基づき、航空機の滑走路占有時間（以下 ROT : Runway Occupancy Time）を基準として算出される。着陸機の ROT は、着陸機が滑走路端の1NM手前に到達してから滑走路を完全に離脱するまでの時間を指し、羽田空港では現在115秒と設定されている。この基準に基づき、着陸専用滑走路の滑走路処理容量は1時間あたり31機と算出される。滑走路処理

容量をさらに増加させるためには、ROTの短縮が有効である。しかし、ROTを短縮すると、後続機は先行機の発生させる後方乱気流の影響を受ける危険性が生じる。後方乱気流は大型航空機が発生させる渦状の空気の流れであり、後続機の操縦性に大きな影響を及ぼすため、航空機同士の安全な間隔を確保する必要がある。これを後方乱気流管制間隔と呼び、Table 1の航空機の重量や翼幅で定まる後方乱気流区分（ICAO (International Civil Aviation Organization, 国際民間航空機関) 航空機7区分）の、先行機と後続機の組み合わせによって決定される（Table 2）。羽田空港において滑走路処理容量の増加を実現するためには、後方乱気流の影響を考慮しつつ、ROTを短縮することが有効である。

羽田空港の滑走路運用は、風向きに応じた方面別滑走路運用が採用されている。航空機の離着陸は向かい風になるように滑走路を使用するのが基本である。風向きに応じた運用形態として、本研究では15:00から19:00のうち3時間に使用される北風新経路と南風新経路での滑走路運用（以下、北風/南風運用）を対象とし、簡単のため北風・南風に限らず15:00から18:00をピーク時間帯と仮定する。Fig.1, Fig.2に北風運用、南風運用の場合の滑走路運用の模式図を示す。北風運用では、着陸機は滑走路34L（以下 RWY34L）と滑走路34R（以下 RWY34R）を使用し、離陸機は滑走路05（以下 RWY05）と RWY34Rを使用する。北海道や東北、北米などの北方面からの着陸機は RWY34R を、東南アジアや西日本などの南西方面からの着陸機は RWY34L を使用する。一方、南風運用で

*1 工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻学士課程

*2 工学部航空宇宙学科航空操縦学専攻教授

は、北方面からの着陸機は滑走路 16R（以下 RWY16R）を、南西方面からの着陸機は滑走路 16L（以下 RWY16L）を使用し、離陸機は滑走路 22（以下 RWY22）と RWY16R を使用する。

このような羽田空港特有の事情を考慮しながら、制限のある滑走路運用においても滑走路を最大限に活用し、発着枠を拡大可能な方法を検討することが求められる。

Table 1 Wake turbulence category
(ICAO aircraft 7 categories)³⁾

Category	Maximum takeoff weight M [kg]	Wingspan s [m]
A	$136,000 \leq M$	$74.68 < s \leq 80$
B		$53.34 < s \leq 74.68$
C		$38.1 < s \leq 53.34$
D	$18,600 < M < 136,000$	$32 < s$
E		$27.43 < s \leq 32$
F		$s \leq 27.43$
G	$M \leq 18,600$	—

Table 2 Wake turbulence control separation [NM]³⁾

		Wake turbulence category for following aircraft						
		A	B	C	D	E	F	G
Wake turbulence category for leading aircraft	A	3	4	5	5	6	6	8
	B	3	3	4	4	5	5	7
	C	3	3	3	3	3.5	3.5	6
	D	3	3	3	3	3	3	4
	E	3	3	3	3	3	3	4
	F	3	3	3	3	3	3	3
	G	3	3	3	3	3	3	3

1.2 研究目的

本研究では羽田空港における発着枠の拡大方法を検討し、増加する航空需要に対応することを目的とする。そのために、現在羽田容量算出方式で定められている着陸機の最低間隔に着目し、間隔を短縮した場合の後方乱気流による影響を考慮した上で着陸順序と滑走路選択を最適化し、滑走路処理容量の増加を実現可能な運用方法を提案する。これにより、羽田空港の発着枠の拡大を図る。

具体的には、羽田空港での北風新経路および南風新経路での運用において、15:00 から 18:00 の 3 時間に着陸する航空機について、後方乱気流管制間隔を考慮して着陸順序と使用滑走路を最適化することによって、着陸専用滑走路（北風運用での RWY34L と南風運用での RWY16L）の滑走路処理容量を増加させ、次節で詳述する相互従属運用で干渉し合う航空機を減らすことにより、羽田空港の発着枠を拡大する運用方法を提案する。その際、滑走路処理容量の増加のみを追及することにより特定機の遅延が拡大しないよう、東京進入管制区入域（Fig.3 の青枠）から滑走路端到達までの飛行時間の全機合計の短縮と上空待機等による遅延の抑制も考慮した最適化を行う。

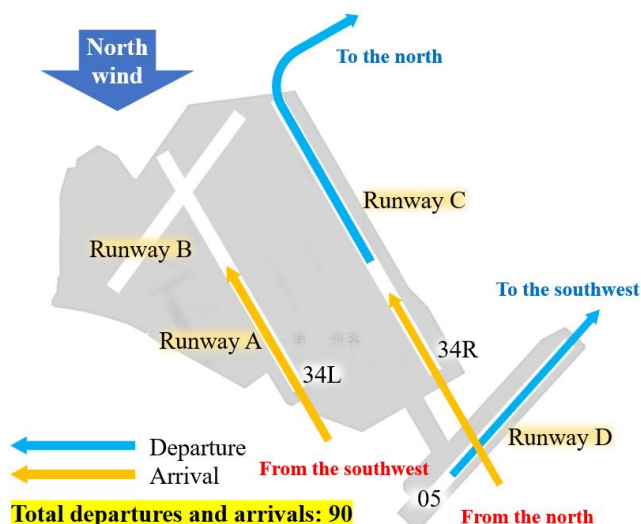


Fig.1 Runway operation for the new north wind route

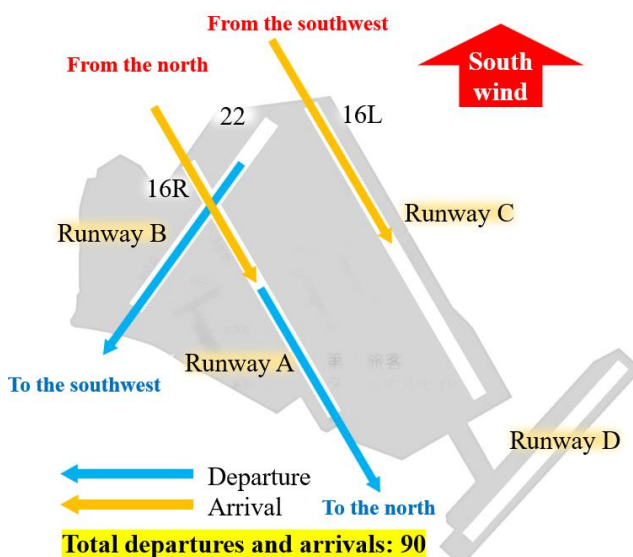


Fig.2 Runway operation for the new south wind route

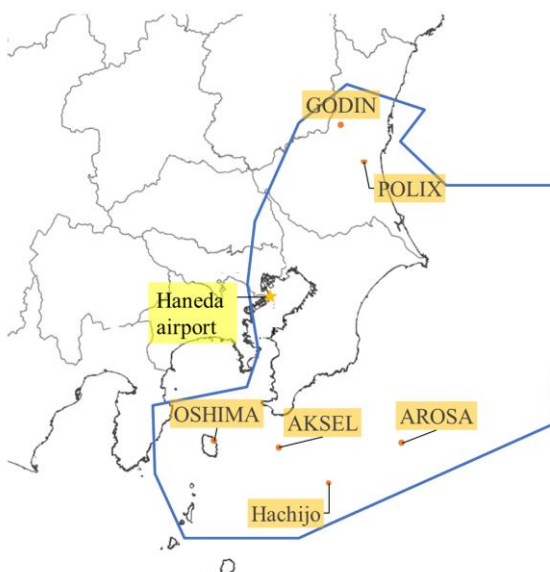


Fig.3 Tokyo approach control area⁴⁾ and entry points

1.3 論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。第2節では羽田空港の滑走路運用の現状と課題を説明する。第3節では本研究で提案する施策とそれにより目標とする増便数を明らかにする。第4節では問題設定と研究方法について述べる。第5節では離陸機の増便を目標とした滑走路の効率的な運用方法を提案し、増便可能な離陸機数を算出する。第6節では着陸機の増便を目標とした滑走路の効率的な運用方法を提案し、増便可能な着陸機数を算出する。これら増便可能な離着陸機数を明らかにすることにより、発着枠を拡大する運用方法を示す。

2. 羽田空港の滑走路運用と課題

2.1 方面別滑走路運用

羽田空港では、風向きや目的/出発地の方面、時間帯に応じて滑走路を使い分ける運用が行われている⁵⁾。2020年3月29日からは混雑時間帯における滑走路処理容量の向上を目的として、都心上空を通過する新経路が運用開始された。

北風運用ではRWY34Lは着陸専用、RWY34Rは離着陸共用、RWY05は離陸専用であるが、RWY05離陸機はRWY34R着陸機がRWY05上空を通過するまで離陸できず、RWY34R着陸機はRWY05に離陸機がいる場合は着陸できない相互従属運用となっている。相互従属運用では離陸と着陸の処理可能機数がトレードオフの関係となるため、羽田空港ではRWY34Rの着陸機数によってRWY34RとRWY05の離陸機数が変化する。最も効率の良い運用をした場合では発着枠は90回となる⁵⁾。

南風運用では一部の欧米方面への離陸機を除きRWY16Lは着陸専用、RWY16Rは離着陸共用、RWY22は離陸専用であり、RWY16RとRWY22は相互従属運用となっている。最も効率の良い運用をした場合、発着枠は90回となり、北風時と同数の発着枠を確保している⁵⁾。

2.2 管制間隔⁶⁾

管制官が航空機同士の安全な間隔を確保するために設定する最小間隔を管制間隔と呼ぶ。管制間隔はFig.4に示すように、航空機の飛行経路に対して前後（縦）方向、左右（横）方向、上下（垂直）方向の3次元で定義される。この間隔の基準は、ICAOが示す指針に基づき決定される。国内では、レーダーで監視可能な空域において、航空路管制では5NM以上、空港周辺のターミナル管制では3NM以上の縦横間隔を確保するというレーダー間隔が適用されている。

2.3 後方乱気流管制間隔⁶⁾

後方乱気流の影響を考慮し、航空機ごとの安全な間隔を確保するために、従来航空機をその最大離陸重量に合わせて4つの区分に分類し、飛行の順序によって後方乱気流管制間隔を規定していたが、近年ではこれまでの後

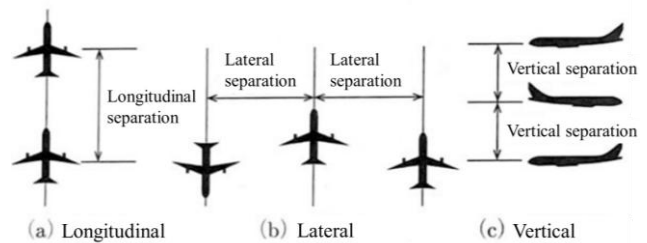


Fig.4 Types of separation⁶⁾

方乱気流管制間隔を短縮する新しい基準が適用されつつある。日本でもICAOが新しく定めるRECAT (wake turbulence re-categorization)の適用を進めている。Table 1に示すように、ICAOの新基準では、航空機の最大離陸重量と翼幅によって7つの区分に細分化し、例えばA区分の航空機の後にB区分の航空機が飛行する場合は4NM、C区分の航空機が飛行する場合は5NMというように管制間隔を定めている。数値の規定がない場合には、ターミナル管制におけるレーダー間隔である3NMが適用される。

また実際の運用では、安全性を確保するために、定められた管制間隔に加えて一定のマージンを考慮する必要がある。日本のように管制支援システムが導入されていない場合は18.0秒のマージンを必要とする。

2.4 羽田容量算出方式⁷⁾

羽田空港における滑走路処理容量は、羽田容量算出方式に基づいて決定され、特に着陸専用滑走路の処理容量は着陸機のROTを基に算出される。2007年まではFig.5に示すように、ROTは滑走路を3つの区間に分割して定義され、以下の各区間の時間要素で構成されていた。

[1] t1: 滑走路進入端手前1NM地点の通過から滑走路進入端までの飛行時間。この区間では着陸復行の指示とその対応に要する時間が含まれ、実測値に安全率を加味して27秒と設定。

[2] t2: 滑走路進入端から滑走路縁を通過するまでの時間。実測値の平均は57秒であるが、着陸機の99.5%が安全に着陸できるようバッファ値を加え、76秒と設定。

[3] t3: 滑走路縁から停止線を超えるまでの時間。これは実測時間に安全率を考慮し、15秒と設定。

これらの時間を合計すると、ROTは118秒となる。これを基に着陸専用滑走路の処理容量を算出すると、毎時30機となる。2007年9月以降、t2とt3の合計を1つの確率変数として扱う新たな考え方が導入され、着陸機1機あたりのROTが115秒に短縮されたことで、着陸専用滑走路の処理容量は毎時31機に増加している。

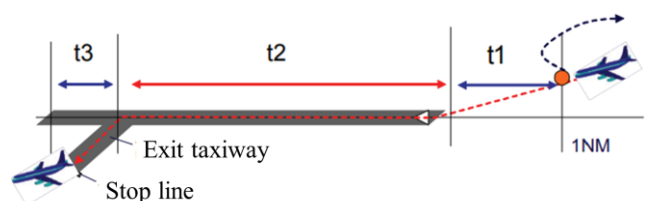


Fig.5 Landing aircraft handling time division⁷⁾

欧米の主要空港と比べて羽田空港の ROT は長く、ROT が飛行中の管制間隔よりも滑走路処理容量に大きな影響を及ぼしている。これは羽田空港において大型機の割合が高いことや、誘導路のレイアウトなどが要因とされる。

2003 年時点では ROT が 124.5 秒であり、後方乱気流管制間隔（最大 120 秒）を上回っていたため、ROT がボトルネックとなっていた。しかし 2007 年 9 月以降は ROT が 115 秒まで短縮され、120 秒を下回ったことで、今後の着陸機数の増加においては、ROT と後方乱気流管制間隔の両方の観点から滑走路処理容量を検討する必要があるとされている。

3. 効率的な滑走路運用を目指した施策

本研究では、羽田空港における着陸専用滑走路の着陸間隔に重点を置き、本節で示す施策により、着陸専用滑走路の滑走路処理容量を増加させることで羽田空港の発着枠を拡大することを目指している。着陸専用滑走路の滑走路処理容量を増加させることは、単に着陸機数を増加させるだけでなく、離陸機に干渉する離着陸共用滑走路への着陸機を減らすことで離陸機の増便も可能とし、結果として羽田空港の発着枠を拡大させる可能性がある。よって以下では、着陸専用滑走路の滑走路処理容量を増加することにより羽田空港発着枠の拡大を図る。

3.1 滑走路占有時間（ROT）の短縮

羽田容量算出方式では、着陸機の最小間隔が 115 秒で設定されているが、実際には間隔が 60 秒程度であった例や、着陸専用滑走路の着陸機数の実績値が毎時 34 機となった例もあるなど、間隔短縮に余地があることが議論されてきた⁸⁾。そこで本研究では、Fig.5 における t_1 、 t_2 および t_3 に関して、CARATS Open Data⁹⁾の空港面データで ROT の見直しをし、航空保安業務処理規程第 5 管制業務処理規程¹⁰⁾に従い、最小着陸間隔の緩和を検討した。短縮の考え方は以下のとおりである。

[1] t_1 の短縮：近年では航空機の性能向上に伴い、一定の着陸速度での進入が可能となっていることから、本研究では航空機の着陸速度(V_L)を航空機のサイズごとに設定し、後方乱気流区分が B の機体では 270km/h、D の機体では 260km/h、E の機体では 250km/h とする。 t_1 にあたる滑走路進入端 1NM 地点から滑走路進入端までの飛行時間は、対象機の 99%が時間内にこの区間を通過可能となるようカテゴリーD の機体の着陸速度を用いて 26 秒と設定し、従来よりも 1 秒の短縮を行う。

[2] t_2 の短縮：CARATS Open Data の空港面データから、2019 年 11 月 15 日の航空機の滑走路進入端から滑走路縁離脱までの平均時間を計算したところ、51 秒であった。この平均時間を 1.33 倍し、本研究では t_2 を 68 秒とする。従来よりも 8 秒の短縮となる。

[3] t_3 の削除：航空保安業務処理規程第 5 管制業務処理規程において、連続着陸の場合の後続到着機が滑走路に進

入できるのは「先行到着機が滑走路縁を離脱して停止位置標識から離れたことを目視又は当該機からの通報により確認したとき。ただし、当該機が滑走路縁を離脱後、停止位置標識を遅滞なく通過できると判断した場合は、当該機が滑走路縁を離脱したことを目視により確認したとき。」と定められている。よって後続機の着陸許可は、先行機が滑走路縁を離脱することで発出することができる。実際にはこの時点では後続機は最小間隔の場合においても滑走路端 1NM 手前に存在することになるため、本研究では t_3 を削除する。

以上より本研究では羽田容量算出方式を見直し、ROT を t_1 と t_2 のみで計算する。よって着陸機 1 機あたりの ROT は $26+68=94$ 秒となる。

3.2 着陸順序と使用滑走路の最適化

ROT を短縮すると、最終進入飛行中の安全間隔がボトルネックとなる。ICAO の基準では後方乱気流管制間隔は Table 2 のようになり、先行機と後続機の後方乱気流区分が同じである場合や、後続機の機体サイズが大きい場合の最低間隔は 3NM である。一方、先行機の後方乱気流区分が B で、後続機が D の場合は 4NM の間隔が必要となる。後続機が D の場合、着陸間隔は 3NM または 4NM が必要となり、D の着陸速度 260km/h を用いると 3NM は 77 秒、4NM は 103 秒となる。着陸間隔はこれに先述のマージン 18 秒を加えた 95 秒および 121 秒となる。後続機が E の場合、その着陸速度 250km/h を用いて 3.5NM は 112 秒、5NM は 152 秒の着陸間隔となる。これは、先行機と後続機の組み合わせによって、航空機同士の間隔に差があることを示し、この組み合わせを最適化し最小の間隔を維持することによって時間あたりの着陸機数が増え、滑走路処理容量の拡大につながる。

本研究では前項の ROT の短縮と着陸機の着陸順序と使用滑走路の最適化によって着陸間隔を 95 秒に維持することで、着陸専用滑走路の処理容量は毎時 $3600/95=37.89$ 機と計算できるので、現状の毎時 31 機から最大で毎時 37 機まで増加させることを目標とする。

4. 最適化問題の設定と最適化手法

4.1 着陸順序と滑走路選択最適化の対象

本研究では 15:00 から 18:00 の 3 時間において、着陸専用滑走路の処理容量向上の可能性を評価する。最適化の対象は 14:40 から 18:00 に東京進入管制区に入域する航空機であり、入域時刻で 20 分ごとに区切って 10 のグループに分け、各グループに対して最適化を行う。東京進入管制区は Fig.3 の青枠で定義され、青枠内に航空機が進入することを入域とする。最適化を行う時刻は、各グループの先頭機の入域時刻直前とし、シームレスな最適化が行えるよう、入域済の直前グループから着陸時刻が遅い 5 機も最適化対象として再最適化を行うものとする。各 20 分間の最適化対象機数を n と表す。

4.2 決定変数の定義と飛行時間の算出法

最適化における決定変数は、 n 機の着陸順序を示す順列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ とそれぞれに対する使用滑走路 (0 または 1) の選択 $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ である。ここで、 $y_i = 0$ では航空機 i は着陸専用滑走路（北風時 RWY34L, 南風時 RWY16L）を使用することとし、 $y_i = 1$ では離着陸共用滑走路（北風時 RWY34R, 南風時 RWY16R）を使用することとする。すなわち決定変数とその選択肢は

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad x_i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \mathbf{y} &= (y_1, y_2, \dots, y_n), \quad y_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

本研究では、入域ポイント通過直後より初速度から等減速度で着陸速度まで減速して着陸する方式を線形減速アプローチと呼ぶ。ただし、入域直後からの減速で実運用時のアプローチ飛行時間より長くなる場合（北風運用時の GODIN, POLIX, 南風運用時の OSHIMA, AKSEL, POLIX, AROSA）は、入域後一定時間は初速度を継続する。以下では、最短経路長 $L_{P_i, y_i}^{\min}$ を線形減速アプローチにより着陸した場合の着陸時刻を最短着陸時刻 $T_{S,i}$ とする。 $T_{S,i}$ は各入域ポイント P_i から滑走路までの最短経路長 $L_{P_i, y_i}^{\min}$ (Table 3) を用いて式(1)で求める。

$$T_{S,i} = \frac{L_{P_i, y_i}^{\min}}{\frac{1}{2}(V_{0,i} + V_L)} + T_{E,i} \quad \dots (1)$$

$L_{P_i, y_i}^{\min}$ は必ず通過されるとされるウェイポイントを用いて算出した。 $V_{0,i}$ は航空機 i の入域速度、 V_L は航空機 i の着陸速度、 $T_{E,i}$ は航空機 i の東京進入管制区入域時刻である。

Table 3 The shortest route length $L_{P_i, y_i}^{\min}$ [km]

		Runway in use y_i			
		34L	34R	16L	16R
Entry point P_i	OSHIMA	141.2	154.1	295.9	318.1
	AKSEL	178.3	180.5	341.2	363.3
	GODIN	226.8	208.4	211.2	197.8
	POLIX	317.8	299.4	328.1	314.7
	AROSA	231.6	221.5	385.2	407.3
	Hachijo	154.3	165.1	317.2	347.9

4.3 決定変数と着陸時刻の関係

各航空機の着陸時刻は、直前に同じ滑走路を使用する航空機の着陸時刻に必要な時間間隔を加えた時刻である。決定変数 $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ と航空機 i の着陸時刻 $T_i(x_i, y_i)$ との関係は式(2)で表される。

$$T_i(x_i, y_i) = T_{x_i-k}(x_i - k, y_{x_i-k}) + I_i \quad \dots (2)$$

ここで I_i は着陸間隔を表し、先行機 $(x_i - 1)$ の後方乱気流区分が自機 (i) よりも大きい場合、Table 2 に示す着陸間隔を適用する。具体的には 3.2 項で算出した、3.5NM では 112 秒、4NM では 121 秒、4.5NM では 152 秒の着陸間隔を空けるものとする。一方、先行機の後方乱気流区分が自機と同じか小さい場合は、レーダー管制間隔である 3NM の 95 秒の着陸間隔を適用する。ただし、式(2)の計

算によって得られる時刻よりも最短着陸時刻 $T_{S,i}$ の方が遅い場合は、 $T_{S,i}$ を着陸時刻とする。また、各滑走路に最初に着陸する航空機の着陸時刻は、最短着陸時刻 $T_{S,i}$ とする。すなわち $y_i = y_{x_i-k}$, $T_{S,i} < T_{x_i-k}(x_i - k, y_{x_i-k}) + I_i$, $x_i \geq 2$ を同時に満たす最も小さな k を用いて $T_i(x_i, y_i)$ を算出する。

4.4 評価関数の定義

本研究では、(1) 着陸専用滑走路のすべての着陸機が 95 秒間隔で着陸して着陸機数が最大となる毎時 37 機となり、(2) 各機の入域後平均飛行時間が 18 分 40 秒となり、(3) 各機の平均遅延時間が 2 分となるという 3 条件を同時に実現する状態を理想状態とする。この理想状態にどれだけ近いかを評価するための各グループに対する最適化問題における最小化すべき評価関数を式(3)で定義する。

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= 50 \left\{ \frac{T_{L1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - T_{L2}}{C_1(n - n_1 - 1)} - 1 \right\} \\ &+ 10 \left[\frac{1}{C_2 n} \sum_{i=1}^n \{T_i(x_i, y_i) - T_{E,i}\} - 1 \right] \\ &+ \left[\frac{1}{C_3 n} \sum_{i=1}^n \{T_i(x_i, y_i) - T_{S,i}(y_i)\} - 1 \right] \quad \dots (3) \end{aligned}$$

式(3)右辺の第 1 項は評価関数の主要項となる着陸専用滑走路を使用する着陸機 1 機あたりの使用時間であり、これを最小にすることで滑走路処理容量を拡大させる。理想状態の条件(1)が満たされるとき、第 1 項は 0 の値となる。第 2 項では航空機の入域後の飛行時間が過度に長くないように調整している。航空機 i の入域後の飛行時間は、算出された着陸時刻 T_i から設定値として与えた入域時刻 $T_{E,i}$ を差し引いて求める。理想状態の条件(2)が満たされるとき、第 2 項の値は 0 となる。第 3 項では航空機の遅延時間が過度に大きくならないように調整している。航空機 i の遅延時間は、算出された着陸時刻 T_i から、最短着陸時刻 $T_{S,i}$ を差し引いて求める。理想状態の条件(3)が満たされるとき、第 3 項の値は 0 となる。

各項の重み係数は、評価関数各項のスケールが同等となるように調整し、 $\{50, 10, 1\}$ とした。 $C_1 = 1.273 \times 10^{-3}$, $C_2 = 1.296 \times 10^{-2}$, $C_3 = 1.389 \times 10^{-3}$ は、各項が理想状態で 1 となるように値を定め、更に理想状態で各項が 0 になるように 1 を引いている。

T_{L1} は着陸専用滑走路に最後に着陸する航空機の着陸時刻で、 T_{L2} は着陸専用滑走路が使用可能となる時刻とする。 T_{L2} は第 1 グループの最適化では 15:00 と設定し、第 2 グループ以降では前グループの最適化で着陸順序が決定した最後の航空機の着陸時刻の 95 秒後とする。 n_1 は 20 分間の対象機数 n のうち離着陸共用滑走路を使用する機体数であり、残りの $n - n_1$ 機が着陸専用滑走路を使用する。これを制約条件として課して着陸滑走路選択の最適化を行う。 n , n_1 , $T_{E,i}$ は設定値として与えるものとする。

4.5 タブーサーチ

本研究ではメタヒューリスティクスの一つであるタブ

一サーチを最適化手法として用い¹¹⁾、決定変数 (x, y) の最適化を行う。タブーサーチは近傍解の探索を繰り返し、探索履歴をタブーリストに一定期間記憶する。このタブーリストに含まれる解は選択しないことで局所最適解に陥ることを避け、探索の停滞を防ぎながら広範囲の探索を実現する。本研究では終了判定条件として最大反復回数を 100 回とし、タブーリストのサイズを 100 とする。

タブーサーチの近傍解は、決定変数 x または y のいずれか一方の要素を入れ替えることによって生成する。着陸順序 x については、異なる 2 便を選択しその順序を入れ替える。 n 機に対して着陸順序に関する nC_2 個の近傍解が生成される。使用滑走路 y については、着陸専用滑走路と離着陸共用滑走路に振り分けられた航空機の中から 1 機ずつ選び、その要素を入れ替える。離着陸共用滑走路に着陸する n_1 機に対して使用滑走路に関する $n_1(n-n_1)$ 個の近傍解が生成される。したがって近傍解の個数は合わせて $nC_2 + n_1(n-n_1)$ 個である。具体的な n_1 の値は、5 節および 6 節で詳述するように目的に応じて設定される。

5. 実データに基づく最大離陸機数

本節では 2019 年および 2022 年に実際に羽田空港に着陸した航空機のデータを用いて、着陸専用滑走路を最大限に活用した際の離陸機の増便可能性を検討する。ここでは離陸機と従属関係のある着陸機数 n_1 を 1 時間あたり 6 機に制限し、最適化によって着陸専用滑走路を効率的に運用する。この結果、着陸機数を維持しつつ離陸機と干渉する着陸機数を削減できるため、その際の増便可能な離陸機数を明らかにする。

5.1 評価対象とする着陸機の設定値

対象とする着陸機の設定値（便名、後方乱気流区分、 P_i, T_{Ei}, V_{Qi} ）は CARATS Open Data から取得し、コロナ禍前に発着枠が最大限に活用されていた時期（2019 年）とコロナ禍後に需要が回復した時期（2022 年）の設定値を選定した。また実際の運用（北風・南風）、および天候等を考慮し、8 日分の設定値を対象とした。対象とした日付と条件を Table 4 に示す。本研究では特定の日付と運用条件（北風・南風）を考慮し、与えられた設定値（便名、後方乱気流区分、 P_i, T_{Ei}, V_{Qi} ）に基づいて評価をおこなう単位をシナリオと表現する。各シナリオ (No.1 から No.8) について設定値を取得し、それぞれ 3 時間の着陸機数を算出した。設定値と解 (x, y) を式(2)に代入することで各航空機 i の着陸時刻が順に決定され、各時間帯に着陸する航空機をカウントして着陸機数を算出する。

5.2 着陸機数の算出結果

Table 4 に、対象とする各シナリオにおける実運航時の着陸機数(A)、羽田容量算出方式に基づく着陸機数(B)、ROT 短縮による着陸機数(C)、および ROT 短縮と最適化

を組み合わせた着陸機数(D)を示す。

Table 4 Comparison of the data and the calculated number of landing aircraft for each scenario

No.	Date	WD	(A)	(B)	(C)	(D)
			L_O/L_S	L_O/L_S	L_O/L_S	L_O/L_S
1	2019/8/17	S	87/34	87/36	102/18	106/19
2	2019/8/13	S	79/33	74/33	86/18	93/13
3	2019/12/12	N	84/37	85/37	100/18	105/19
4	2019/12/9	N	88/32	87/32	100/18	106/16
5	2022/8/19	S	87/34	85/35	99/18	106/20
6	2022/8/20	S	79/35	79/36	95/18	102/13
7	2022/12/7	N	87/29	86/29	96/18	102/15
8	2022/12/11	N	83/38	82/38	96/18	103/18
Average			84/34	83/35	97/18	103/17

WD(Wind Direction)は風向きによる滑走路の運用状況 (N: 北風運用, S: 南風運用) を表す。 L_O は着陸専用滑走路の着陸機数を、 L_S は離着陸共用滑走路の着陸機数を示す。(A)は実運航時の着陸機数、(B)は羽田容量算出方式に基づいて算出した着陸機数、(C)は ROT を短縮した時の着陸機数、(D)は ROT 短縮と着陸順序と滑走路選択を最適化した時の着陸機数である。

5.2.1 実運航時および羽田容量算出方式の場合

3 時間に着陸した航空機数を実運航時の着陸時刻から算出し (Table 4 (A))、その場合と同じ設定値を用いて、着陸間隔を 115 秒以上とする羽田容量算出方式に基づき着陸機数を算出した (Table 4 (B))。両者の間に大きな差異はないことが確認された。

5.2.2 滑走路占有時間 (ROT) を短縮した場合

$n_1 = 6$ と制限し、ROT を 94 秒に短縮したことによって得られた結果を Table 4 の(C)で示す。具体的には、着陸順序 x は入域時刻順とし、遅延の大きい順に毎時 6 機の着陸機を選択して離着陸共用滑走路に着陸させ、それ以外の着陸機を着陸専用滑走路に着陸させるものとした。着陸間隔は 4.3 項に示した通りである。

従来の羽田容量算出方式と比較すると、最大で管制間隔が 20 秒短縮されるため、着陸専用滑走路の処理機数は増加した。しかし、この制限下では ROT を短縮しても、実運航時の着陸機数(A)および羽田容量算出方式(B)における合計着陸機数には達せず、着陸に使用する 2 本の滑走路の合計処理容量は減少することが分かった。

5.2.3 着陸順序と使用滑走路を最適化した場合

ROT 短縮に加え、着陸機の順序と使用滑走路の最適化を行い、5.2.2 と同様の制限下で離着陸共用滑走路の着陸機数を抑えたときの着陸専用滑走路の着陸機数を算出した。その結果を Table 4 の(D)に示す。 $n_1 = 6$ の場合でも、ROT 短縮と着陸順序と使用滑走路の最適化を組み合わせることで、実運航時や羽田容量算出方式と同程度、また

はそれ以上の着陸機数を確保できることが分かった。

また、羽田容量算出方式に基づいて決定した着陸時刻における着陸機の平均飛行時間は 28 分 08 秒であり、ROT 短縮と着陸順序と使用滑走路の最適化により決定した着陸時刻での着陸機の平均飛行時間は 27 分 00 秒であった。したがって、飛行時間は約 4.3%短縮した。

Table 4(D)の離着陸共用滑走路着陸機数において、18 時以降に着陸した航空機は着陸機数としてカウントしていない。 $n_1 = 6$ としたので 1 回の最適化対象 20 分間では 2 機であり、よって本来 10 回の最適化で離着陸共用滑走路の着陸機数は 20 機となるが、離着陸共用滑走路の着陸機が最大 5 機、再最適化の対象となるため、離着陸共用滑走路着陸機数の 3 時間の合計は 20 機以下となり、最小で 13 機の場合もある。

5.3 ROT 短縮と最適化による離陸機数の評価

本節では離陸機に干渉する着陸機数を減らすことで離陸機の増便数を検討することを目的としたので、5.2.3 で示した最適化結果を基に各シナリオにおける離陸枠の変化を評価した。まず、羽田容量算出方式に従い、離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻から、2 本の離陸滑走路での最大離陸可能機数を算出した。最大離陸可能機数は、離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻 $t_{L,i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n_1$) を基に、1 機の離陸時間（離陸許可から離陸地点まで）を 62 秒、連続離陸の間隔を 95 秒とする羽田容量算出方式に従って求めた。最大離陸可能機数は、2 機の着陸時刻の間隔 $t_{L,i+1} - t_{L,i}$ を 95 秒で割った商、すなわち何機分の ROT を確保できるかをカウントして算出する。ただし、最後の時間枠が 62 秒以上の場合、次の着陸機が接近する前に離陸が完了するため、その時間枠は最大離陸可能機数としてカウントする。

Table5 の(A)には、各シナリオの実運航時の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数を示している。また、ROT 短縮と最適化により着陸専用滑走路に着陸する航空機を増加させた場合の最大離陸可能機数を(B)に示している。最も効率の良い滑走路運用を行った場合、羽田容量算出方式によると離着陸共用滑走路に着陸する航空機は毎時 13 回、離陸枠は 46 回であった⁵⁾。実運航時の離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数 (Table 5 の(A)に示した 3 時間あたり 164 機から 178 機) と、実際の離陸機数の毎時 46 回を比べると、最大離陸可能機数の約 8 割が離陸枠として使用されていることが分かる。さらに、ROT 短縮と最適化により算出された離着陸共用滑走路着陸機の着陸時刻を基に最大離陸可能機数を算出したところ、最も増加数の少ない No.5 のシナリオでは 3 時間の最大離陸可能機数が従来の 172 機から最適化後には 194 機へと増加し、3 時間で 22 機 (1 時間あたり 7.3 機) の増加となった (13%増加)。また、最も増加数の多い No.8 のシナリオでは、従来の 164 機から最適化後には 200 機へと増加し、3 時間で 36 機 (1 時間で 12 機) の増機となった (22%増加) (Table 5 の No.5 および No.8

の(D))。

増加が最小で毎時 7.3 機、最大で 12 機であることから、最大離陸可能機数の約 8 割が実際に使用されると仮定すると、毎時 6 回から 10 回の離陸枠の増加が可能である (Table 5 の(E))。したがって、現状の離陸枠 46 回にこれを加えることで、離陸枠は最小 52 回、最大 56 回まで増加可能であることが分かった。また ROT の短縮により、理論上の着陸専用滑走路の着陸機数は 37 機となり、 $n_1=6$ としたため、着陸機数の合計は 43 機となる。これにより、発着枠は現状の 90 回から少なくとも 95 回、最大 99 回まで増加可能であることが示された。以上より、離陸機のピーク時間帯において、ROT 短縮と着陸順序および使用滑走路の最適化が発着枠を増加させることが明らかとなった。

Table 5 Changes in number of takeoff slots

No.	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
1	171	207	36	12	9.6
2	170	201	31	10.3	8.24
3	175	202	27	9.0	7.2
4	166	195	29	9.7	7.76
5	172	194	22	7.3	5.84
6	173	208	35	11.7	9.36
7	178	207	29	9.7	7.76
8	164	200	36	12	9.6
Average	171	202	31	10.2	8.2

(A)は実運航時の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数、(B)は最適化後の着陸時刻から算出した最大離陸可能機数、(C)は(A)と(B)の差によって得られる 3 時間の増加機数、(D)は(C)を 3 で割った 1 時間あたりの増加機数、(E)は(D)に 0.8 を乗じた増便可能な離陸機数を示している。

6. 増便時の最大着陸機数

本節では従来 1 時間あたり 35 便程度であった到着機数を 1 時間あたり 50 便に増便した仮想の時刻表に対応した設定値リストを作成し、この時刻表を用いて、離陸機に影響を与えない着陸専用滑走路を最大限に活用した場合の着陸機の増便可能性について検討する。ここでは ROT を 94 秒に設定し、離陸機と従属関係のある着陸機数 n_1 を、1 時間あたり 12 機に設定する。

6.1 作成した設定値

増便に伴う設定値（便名、後方乱気流区分、 P_i 、 $T_{E,i}$ 、 $V_{0,i}$ ）のリストを、2 つのパターンで作成した。パターン 1 では、後方乱気流区分“B”の機体数を全体の 40%，“D”の機体数を 60%と設定した。この比率は、第 5 節で取得した 2022 年のデータに基づく機体サイズ構成比率をほぼ維持しつつ、1 時間あたり 50 便に増便した場合を模擬するものである。一方、パターン 2 では後方乱気流区分“B”の機体数を 40%，“D”の機体数を 40%，“E”の機体数を 20%

と設定した。この比率は、人口減少や国内のビジネス需要の縮小に伴い航空機の小型化が進んだ 2040 年代を想定し¹²⁾、1 時間あたり 50 便に増便した場合を模擬するものである。

6.2 着陸順序と使用滑走路を最適化した時の

着陸機数

増便パターン 1 のシナリオにおける最適化結果を Table 6 に示す。最適化の結果、RWY34L での着陸機数は理論上の最大値である毎時 37 機となった。 $n_1=12$ と設定したので、2 本の着陸滑走路の合計着陸機数は 1 時間あたり 49 機となった。これは、羽田容量算出方式と比較して、最大着陸機数が 5 機増加可能であることを示しており、着陸順序と滑走路選択の最適化によって着陸機数を増便可能なことが確認できた。

Table 6 Number of landing aircraft
in Increased Flight Pattern 1

	34L	34R	Total
Number of landings in 3 hours	111	36	147
In the 15:00 hour	37	11	48
In the 16:00 hour	37	14	51
In the 17:00 hour	37	11	48

増便パターン 2 のシナリオにおける最適化結果を Table 7 に示す。さまざまな機体サイズの航空機が着陸する場合、組み合わせによっては最大 152 秒の間隔を必要とする (3.2 項)。しかし、このような場合でも、RWY34L での着陸機数は理論上の最大値である毎時 37 機となり、今後航空機の小型化が進んだ場合でも、1 時間あたりの最大着陸機数が羽田容量算出方式に比べて 5 機増加可能なことが確認できた。

Table 7 Number of landing aircraft
in Increased Flight Pattern 2

	34L	34R	Total
Number of landings in 3 hours	111	36	147
In the 15:00 hour	37	14	51
In the 16:00 hour	37	14	51
In the 17:00 hour	37	8	45

6.3 ROT 短縮と最適化による着陸機数の評価

本節では ROT の短縮と着陸順序と滑走路選択の最適化によって、着陸専用滑走路の 1 時間あたりの着陸機数が 37 機に増加可能であることを確認した。 $n_1=12$ としたため、着陸機数の合計は 49 機に増加可能である。離陸機数の 46 機に変化はないので、発着枠は 95 回に増加可能であることが示された。また、パターン 1 およびパターン 2 の両方で、着陸機の機体サイズ構成比率に関わらず、着陸専用滑走路では最大の滑走路処理容量を達成した。これにより、ROT 短縮と着陸順序と滑走路選択の最適化が、着陸機数を増加させることが明らかとなった。

7. 結言

7.1 まとめ

本研究では羽田空港における航空機需要の増加に対応するため、可能な滑走路占有時間の短縮を想定した上で着陸機の順序と使用滑走路を最適化することで、滑走路処理容量の向上を図った。その結果、5 節、6 節に示したように、発着枠は現状の 90 回から 95 回、ないし 99 回に増加可能なことが示された。また、到着機の進入管制区入域後の飛行時間は約 4.3% 短縮された。これにより消費燃料の削減や遅延低減といった効果も期待できる。

7.2 今後の展望

本研究では離陸機のピーク時間帯と着陸機のピーク時間帯を想定し、5 節では離着陸共用滑走路の着陸機数を従来の約半数に制限した場合の離陸機の増便可能性を、6 節では離陸機数に影響を与えずに着陸機の増便可能性を検討した。ただし、5 節で示した離陸機の最大機数や 6 節で示した着陸機の最大機数は、着陸機のための最適化結果に過ぎず、離陸機と着陸機のバランスを考慮した最も効率的な滑走路運用を実現するには、さらに複雑な計算と膨大なデータ解析が必要となる。また、東京進入管制区入域後の限られた空域で着陸順序と使用滑走路を入れ替えることを想定しているため、実運用では管制業務がさらに煩雑化する可能性や飛行ルート設計に課題が生じることが懸念される。さらに、着陸間隔を現行よりも短縮する提案を含むことから、実機を用いた安全性の検証が最優先課題となる。

今後は、提案手法の安全性や運用上の実現可能性を詳細に検証し、管制官の負担軽減を図るとともに、柔軟かつ効率的な運用を実現するための仕組みの構築が求められる。本研究の知見が羽田空港における運用改善や発着枠の拡大に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 日本空港ビルディング：旅客ターミナル利用実績 <http://www.tokyo-airport-bldg.co.jp/result/index.html> (2024 年 9 月 19 日閲覧)
- 2) Aviation Wire：第 1 ターミナル北側サテライトが 26 年夏開業 <https://www.aviationwire.jp/archives/300162> (2024 年 9 月 19 日閲覧)
- 3) ICAO, Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management, Doc 4444, 16th Edition, November 2020. https://www.enri.go.jp/jp/event/enri_seminar/doc/2023/g9.pdf (2025 年 3 月 30 日閲覧)
- 4) 国土交通省航空局：AIS JAPAN (Japan Aeronautical Information ServiceCenter), 東京進入管制区 <https://ais.japan.mlit.go.jp/Login.do> (2024 年 10 月 3 日閲覧)
- 5) 国土交通省航空局：羽田空港のこれから <https://www.>

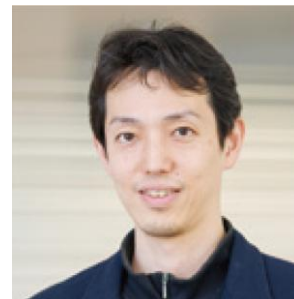
- mlit.go.jp/common/001088928.pdf (2025 年 3 月 14 日
閲覧)
- 6) 伊藤恵理：航空交通管理システム概論，コロナ社（2023）
- 7) 平田輝満ほか：羽田空港再拡張後を対象とした滑走路容量算定方法と容量拡大方策に関する研究 https://trans.civil.ibaraki.ac.jp/hirata/ip2009aki_haneda.pdf (2025 年 3 月 14 日閲覧)
- 8) 国土交通省航空局：羽田空港発着容量の考え方について，<https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/12/120613/10.pdf> (2025 年 3 月 14 日閲覧)
- 9) 電子航法研究所：CARATS Open Data 関連情報 https://www.enri.go.jp/jp/research/organization/atm/carats_open_data.html (2025 年 3 月 10 日閲覧)
- 10) 航空保安業務処理規程第 5 管制業務処理規程 https://www.japa.or.jp/wp-content/uploads/2022/02/japa_cab20220203_3.pdf (2025 年 3 月 14 日閲覧)
- 11) 最適化アルゴリズムを実装していくぞ(タブーサーチ) <https://qiita.com/pocokhc/items/7f2fb4ee8d83e08e842b> (2024 年 6 月 23 日閲覧)
- 12) JAL, A321neo 初導入 赤坂社長「人口減少は止めようがない」特集・767 国内線後継をなぜ小型化するのか <https://www.aviationwire.jp/archives/296971> (2025 年 1 月 3 日閲覧)

新任教員紹介

生物工学科・准教授・川上 隆史

略歴

2003.3 東京大学工学部 化学生命工学科卒業
2005.5 東京大学大学院 工学系研究科 化学生命工学専攻 修士課程修了
2008.4-2009.9 JSPS 特別研究員 DC2
2009.9 東京大学大学院 工学系研究科 化学生命工学専攻 博士課程修了
2009.9-2011.11 Massachusetts Institute of Technology, Department of Chemistry 博士研究員
2009.4-2010.3 JSPS 特別研究員 PD
2010.5-2013.4 HFSP Long-term fellowship Fellow
2011.12-2014.3 東京大学大学院 総合文化研究科 研究員
2014.4-2016.10 産業技術総合研究所 創薬分子プロファイリング研究センター 研究員
2016.11-2024.10 山梨大学 大学院総合研究部 助教 (PI)
2016.11-2020.3 JST さきがけ 研究員 (兼任)
2016.11-2021.3 MEXT 卓越研究員 (兼任)
2025.4 現職



担当科目

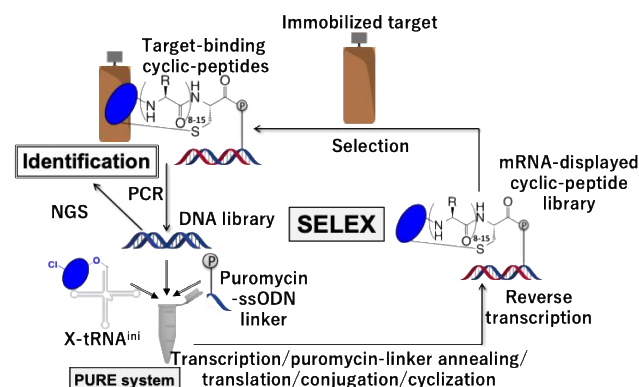
バイオテクノロジー, 生物工学概論, 生体分子実験, 微生物学, 入門ゼミナール A

研究活動内容

1. はじめに

2018 年ノーベル化学賞の対象となった directed evolution (指向性進化法) は, 人工生体分子を遺伝子工学的にスクリーニングするバイオテクノロジーである. その代表例である Systematic evolution of ligands by exponential enrichment (SELEX) 法は RNA の超ハイスループットスクリーニングに利用され, 脂質異常症に関わる PCSK9, 悪性新生物 (がん) に関わる HER3, 自己免疫疾患に関わる IL-6R, IL-17RA, IL-23 などの創薬標的タンパク質・タンパク質間相互作用を阻害する新規 RNA アプタマーが創製され¹⁾⁻⁵⁾, 基質を拡張することで非天然塩基核酸アプタマーの創製も報告されている. また, 同じく 2018 年ノーベル化学賞の対象となったファージディスプレイ法を高度化させた in vitro virus (mRNA display) 法や cDNA display 法は, ペプチドの遺伝子工学的スクリーニングに利用されているバイオテクノロジーである. 別のバイオテクノロジーである, 個別精製した組換え (recombinant) タンパク質を構成要素 (element) とする再構成型無細胞転写・翻訳系である PURE system (Polypeptide synthesis Using Recombinant Elements system) と組み合わせることで, 例えば, 人工小分子に bioorthogonal に結合する人工ペプチドタグが創製され, 生細胞内タンパク質の蛍光イメージング等へ応用されている^{6),7)}. また,

更に別のバイオテクノロジーである遺伝暗号拡張技術による非天然基質翻訳⁸⁾⁻¹²⁾と組み合わせることで, アレルギー性疾患に関わる IL-5, 自己免疫疾患に関わる TNF α , 加齢黄斑変性に関わる VEGFR2, 悪性新生物 (がん) に関わる β -catenin 等の創薬標的タンパク質に作用する新規環状 (N アルキル) ペプチド化合物の創製も報告されている¹³⁾⁻²⁰⁾.



2. 展望

mRNA display 法や cDNA display 法, PURE system, 遺伝暗号拡張技術を組み合わせた指向性進化法による新規人工生体分子創製で利用されているバイオテクノロジーは, 創薬やバイオイメージングに限らず, 今後は, 光応答性分子を

利用したオプトジェネティクスや光免疫療法などの光制御技術や iPS 細胞を利用した再生医療、ノックダウンによるタンパク質機能制御、プロテオミクスによる疾患原因遺伝子の同定など様々な他のバイオテクノロジー関連分野への応用も期待される²³⁾。

参考文献

- 1) T. Ando, M. Yamamoto, T. Yokoyama, D. Horiuchi, T. Kawakami, *In vitro* selection generates RNA aptamer that antagonizes PCSK9-LDLR interaction and recovers cellular LDL uptake, *J. Biosci. Bioeng.* Vol. 131, pp.326-332 (2021).
- 2) T. Yokoyama, T. Ando, R. Iwamoto, D. Fuji, M. Yamamoto, T. Kawakami, A human epidermal growth factor receptor 3/herectin interaction inhibitor aptamer discovered using SELEX, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* Vol. 553, pp.148-153 (2021).
- 3) T. Ando, M. Yamamoto, Y. Takamori, K. Tsukamoto, D. Fuji, T. Kawakami, *In vitro* selection of an RNA aptamer yields an interleukin-6/interleukin-6 receptor interaction inhibitor, *Biosci. Biotechnol. Biochem.* Vol. 85, pp.1170-1174 (2021).
- 4) Y. Takamori, T. Ando, M. Sato, S. Vedi, D. Fuji, T. Yokoyama, K. Tsukamoto, M. Yamamoto, T. Kawakami, Artificial aptamer that inhibits interleukin-23/interleukin-23 receptor interaction discovered via SELEX, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* Vol. 614, pp.17-21 (2022).
- 5) A. Munshi, T. Wang, Y. Takamori, T. Ando, T. Yokoyama, D. Fuji, Z. Xu, S. Vedi, M. Yamamoto, K. Tsukamoto, T. Kawakami, SELEX-discovered aptamer that inhibits cellular interleukin-17/interleukin-17 receptor interaction and antagonizes interleukin-17 signaling, *Biosci. Biotechnol. Biochem.* Vol. 88, pp.147-153 (2024).
- 6) T. Ando, Y. Takamori, T. Yokoyama, M. Yamamoto, T. Kawakami, Directed evolution of dibenzocyclooctyne-reactive peptide tags for protein labeling, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* Vol. 534, pp.27-33 (2021).
- 7) T. Kawakami, K. Ogawa, N. Goshima, T. Natsume, DIVERSE System: De Novo Creation of Peptide Tags for Non-enzymatic Covalent Labeling by In Vitro Evolution for Protein Imaging Inside Living Cells, *Chem. Biol.* Vol. 22, pp.1671-1679 (2015).
- 8) T. Kawakami, T. Sasaki, R. C. Patrick, H. Murakami, Incorporation of electrically charged N-alkyl amino acids into ribosomally synthesized peptides via post-translational conversion, *Chem. Sci.* Vol. 5, pp.887-893 (2014).
- 9) T. Kawakami, T. Ishizawa, H. Murakami, Extensive reprogramming of the genetic code for genetically encoded synthesis of highly N-alkylated polycyclic peptidomimetics, *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 135, pp.12297-12304 (2013).
- 10) T. Kawakami, A. Ohta, M. Ohuchi, H. Ashigai, H. Murakami, H. Suga, Diverse backbone-cyclized peptides via codon reprogramming, *Nat. Chem. Biol.* Vol. 5, pp.888-890 (2009).
- 11) T. Kawakami, H. Murakami, H. Suga, Ribosomal synthesis of polypeptoids and peptoid-peptide hybrids, *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 130, pp.16861-16863 (2008).
- 12) T. Kawakami, H. Murakami, H. Suga, Messenger RNA-Programmed Incorporation of Multiple N-Methyl-Amino Acids into Linear and Cyclic Peptides, *Chem. Biol.* Vol. 15, pp.32-42 (2008).
- 13) T. Yokoyama, T. Ando, Y. Takamori, D. Fuji, M. Sato, S. Vedi, M. Yamamoto, T. Kawakami, *In vitro* display evolution of unnatural peptides spontaneously cyclized via intramolecular nucleophilic aromatic substitutions, *Chem. Commun.* Vol. 58, pp.5237-5240 (2022).
- 14) D. Fuji, T. Ando, M. Sato, S. Vedi, Y. Takamori, T. Yokoyama, M. Yamamoto, T. Kawakami, Discovery of IL-5-binding unnatural cyclic peptides from multiple libraries by directed evolution, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* Vol. 610, pp.188-195 (2022).
- 15) Y. Takamori, T. Ando, D. Fuji, T. Yokoyama, M. Yamamoto, T. Kawakami, *In vitro* display evolution of IL-6R-binding unnatural peptides ribosomally initiated and cyclized with m-(chloromethyl)benzoic acid, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* Vol. 535, pp.47-53 (2021).
- 16) K. Tsukamoto, T. Ando, D. Fuji, T. Yokoyama, Y. Takamori, D. Horiuchi, R. Iwamoto, M. Yamamoto, T. Kawakami, *In vitro* display evolution of the PURE system-expressed TNF α -binding unnatural cyclic peptide containing an N-methyl-D-amino acid, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* Vol. 534, pp.519-525 (2021).
- 17) T. Kawakami, K. Ogawa, T. Hatta, N. Goshima, T. Natsume, Directed Evolution of a Cyclized Peptoid-Peptide Chimera against a Cell-Free Expressed Protein and Proteomic Profiling of the Interacting Proteins to Create a Protein-Protein Interaction Inhibitor, *ACS Chem. Biol.* Vol. 11, pp.1569-1577 (2016).
- 18) T. Kawakami, T. Ishizawa, T. Fujino, P. C. Reid, H. Suga, H. Murakami, *In vitro* selection of multiple libraries created by genetic code reprogramming to discover macrocyclic peptides that antagonize VEGFR2 activity in living cells, *ACS. Chem. Biol.* Vol. 8, pp.1205-1214 (2013).
- 19) 高守幸男, 富士大輔, 安東丈洋, 横山匠, 佐藤将, ベディサンタナ, 山本美月, 川上隆史: ペプチド医薬品開発のための新規ペプチド環状化法の開発と非天然型環状ペプチド SELEX への応用, *BIO INDUSTRY* Vol. 7, pp.9-17 (2022).
- 20) T. Kawakami, H. Cheng, S. Hashiro, Y. Nomura, S. Tsukiji, T. Furuta, T. Nagamune, A Caged Phosphopeptide-Based Approach for Photochemical Activation of Kinases in Living Cells, *ChemBioChem* Vol. 9, pp.1583-1586 (2008).

新任教員紹介

生物工学科・准教授・川本諭一郎

略歴

1978.6	熊本県生まれ
1997.3	熊本県立熊本高等学校 卒業
2001.3	東京大学薬学部 卒業
2006.3	東京大学大学院薬学系研究科 博士課程卒業
2006.4-2017.6	アステラス製薬株式会社 創薬化学研究所 主任研究員
2017.7-2025.3	東京薬科大学生命科学部 助教
2025.4-	現職



担当科目

入門ゼミナール A、基礎化学、基礎有機化学 2

研究活動内容

1. はじめに

マンネンタケ科菌類由来天然物は、古くから民間薬や健康食品として様々な目的に用いられてきた。Fig. 1 に示す lucidumone (**1**) はマンネンタケ科の霊芝から単離され、ジヒドロキノン構造とテルペノイドが縮環した特徴的な炭素骨格を有している (Fig. 1)¹⁾。複雑な 6/5/6/6/5 五環性骨格を持つ前例のない籠状メロテルペノイドで、ビシクロ[2.2.2]オクタン骨格がインダノン構造に縮環し、さらにエーテル架橋された構造を特徴とする。

Lucidumone (**1**) は 2:3 のエナンチオマー混合物として単離され、炎症反応の誘導において重要な役割を担う COX-1/2 に対する阻害活性作用を示す。単離論文では、キラル HPLC により (+)-lucidumone と (-)-lucidumone を分離して活性評価しており、(+)-lucidumone は COX-1/2 に対し同程度の阻害活性を示す一方、(-)-lucidumone は COX-1 が $IC_{50} = 45.2 \mu M$ 、COX-2 が $IC_{50} = 5.62 \mu M$ と、COX-2 を選択的に阻害するユニークな生物活性を有する。著者は、このように魅力的な構造及び生物活性を示す lucidumone の不斉合成に成功したので、その詳細について紹介する。

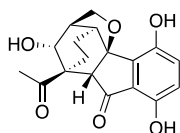


Fig. 1 Chemical structure of lucidumone (**1**).

2. 研究概要

2.1 Lucidumone のラセミ合成

最初に、プロモインデノン **2** 及びアリルアルコール **3** を

*t*BuOK 存在下加熱したところ、付加脱離で生成するアリルビニルエーテル **4** の Claisen 転位が進行し、化合物 **5** が得られた (Fig. 2)。室温まで冷却後、さらに塩酸で処理することにより脱ケタール化と分子内アルドール反応が進行し、四環性化合物 **6** を合成することに成功した。本連続反応では、Claisen 転位と分子内アルドール反応をワンポットで行うことで、複雑な四環性骨格を簡便な操作で一挙に構築することが可能となった。また、アルドール反応による環化では二種類のジアステレオマー **6** 及び **6'** が生成し

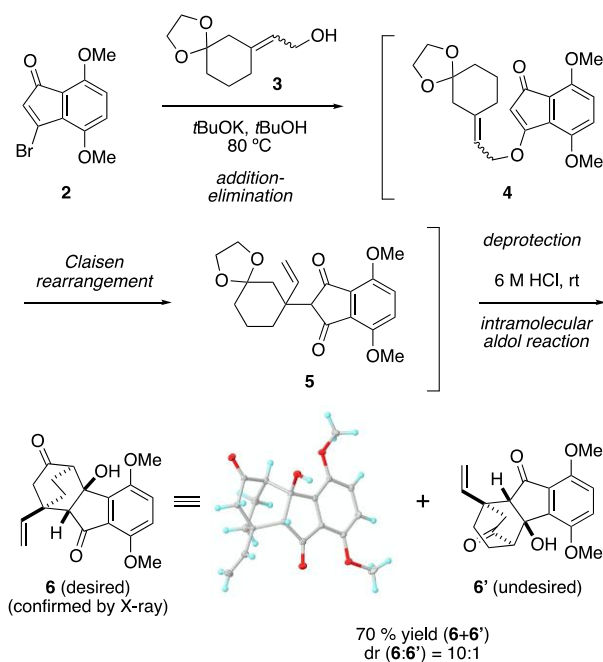


Fig. 2 One-pot construction of tetracyclic skeleton.

得るが、ジアステレオ選択的に環化が進行し、望みの化合物 **6** を優先的に得ることができた。なお、化合物 **6** の構造及び立体化学は X 線結晶構造解析により確認している。

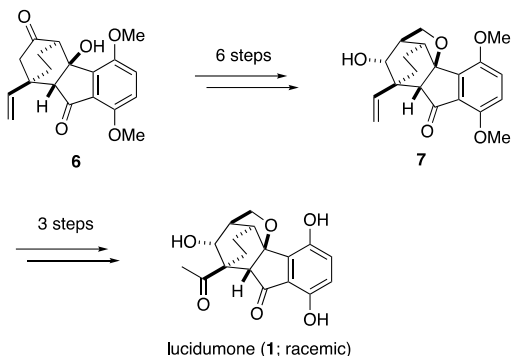


Fig. 3 Racemic total synthesis of **1**

得られた化合物 **6** は、6 工程の変換によりエーテル環が構築された五環性化合物 **7** へと導いた (Fig. 3)。さらに、ビニル基のメチルケトンへの変換及び脱メチル化により lucidumone (**1**) のラセミ合成を達成した。

2.2 Lucidumone の不斉合成

ラセミ体での合成ルート確立に成功したため、続いて不斉合成への応用を検討した (Fig. 4)。すなわち、アリルアルコール **3** にキラル中心を導入した第二級アルコール **10** を光学活性体として合成できれば、不斉転写型クライゼン転位により、分子内アルドール反応前駆体である化合物 **12** を光学活性体として構築可能と考えた。まず、市販のケトン **8** を Horner-Wadsworth-Emmons 反応と続く MeLi 添加によりメチルケトン **9** へと誘導し、*E/Z* 混合物として得た。メチルケトン含有ホスホネートを用いた場合、望みの化合物 **9** は得られるものの低収率であったため、Weinreb アミドを経由したワンポット操作による変換を行った。カラム精製による分離後、*E* 体のみを (*R*)-2-methyl-CBS-oxazaborolidine を用いた不斉還元により第二級アルコール **10** へと変換し、光学純度 96% ee にて合成した。次に、ラセミ体合成と同様に塩基存在下プロモインデノン **2** と反応させたところ、付加脱離に続いてクライゼン転位が進行し、望みの化合物 **12** が得られた。キラル HPLC を用いて化合物 **12** の光学純度を確認することにより、第二級ヒドロキシ基のキラル中心が第四級炭素の立体中心へ不斉転写されていることを確認した。続いて、酸性条件下脱ケタール化と分子内アルドール反応を行い化合物 **13** へと変換した後、ラセミ体合成と同様のルートにて lucidumone の不斉全合成を達成した²⁾。

マクロライド系天然物や鎖状型天然物と異なり、テルペノイドやポリケチドなど複数の環構造を有する複雑天然物は、統一的合成方法論に乏しく構築法が確立されていない。化合物ごとに特徴を見極め、立体化学を高度に制御しつつ無駄を省いた緻密な合成戦略に基づいて、新たな構築法を開拓する必要がある。また天然物創薬への応用を見据え、低

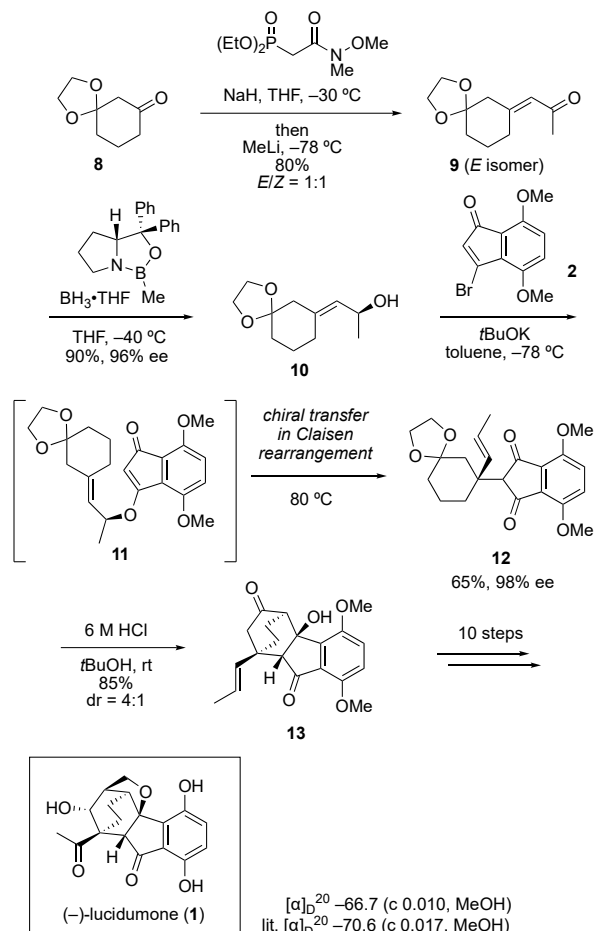


Fig. 4 Enantioselective total synthesis of **1**

コストかつ簡便な反応を用い、保護基を極力使用しない短工程合成法を確立しなければならない。本稿で紹介した lucidumone の合成では、四つの異なる変換を組み合わせた骨格構築を、ワンポットかつ極めてオーソドックスな反応条件を用いて行っており、使用した保護基もケタールのみで、既知化合物から 10 工程にて全合成を達成している。このように、複雑な構造を有するメロテルペノイドを、短工程かつ簡便に合成する新たな方法論を確立することに成功したと考えている³⁾。

参考文献

- 1) Y.-M. Yan, H.-X. Zhang, H. Liu, Y. Wang, J.-B. Wu, Y.-P. Li, Y.-X. Cheng, (+/-)-Lucidumone, a COX-2 Inhibitory Caged Fungal Meroterpenoid from *Ganoderma lucidum*, *Org. Lett.*, Vol.21, 8523-8527 (2019).
- 2) Y. Kawamoto, N. Noguchi, T. Kobayashi, H. Ito, Total Synthesis of Lucidumone through Convenient One-pot Preparation of the Tetracyclic Skeleton by Claisen Rearrangement and Subsequent Intramolecular Aldol Reaction, *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol.62, e202304132 (2023).
- 3) 川本諭一郎, 内田恭平, 小林豊晴, 伊藤久央, マンネンタケ科植物由来メロテルペノイド類の網羅的全合成, 有機合成化学協会誌, Vol. 82, 348-356 (2024).

新任教員紹介

生物工学科・講師 島 亜衣

略歴

2011.03 東京大学 大学院総合文化研究科修了、博士（学術）
2011.06-2015.03 ペンシルバニア大学医学部 ポスドク
2015.04-2016.09 神戸大学 大学院医学研究科 助教
2016.10-2019.03 東京大学 生産技術研究所 特任研究員/特任助教
2019.04-2025.03 東京大学 大学院情報理工学系研究科 特任助教
2025.04- 現職



担当科目

現代生命科学/生物学概論 2, 脳神経科学, 生化学実験

研究活動内容

1. はじめに

私は、大学院在籍時より一貫して骨格筋に関する研究に取り組んできた。骨格筋研究の大きな目的のひとつは、筋ジストロフィーなどの遺伝性筋疾患の治療に貢献する知見を得ることである。私自身は基礎生物学を学んでいたため、直接的な症例研究や治療法探索に従事したわけではないが、骨格筋の分化制御機構に関する基礎的研究を行うなかで、どんな小さな発見でも、いつか患者さんの役に立つかもしれないという気持ちがあったように思う。2020年に、デュシェンヌ型筋ジストロフィーを対象としたエキソンスキッピング治療薬（特定のエキソンを読み飛ばすことで原因タンパク質ジストロフィンの発現を促し、症状の改善を図る薬剤）が、この疾患に対する初めての新規治療薬として保険承認されたというニュースは、尽力した先生方の顔が浮かび、骨格筋研究の端の端にいた私にとっても感慨深いものであった。その後、超高齢化社会を迎える日本において、骨格筋の萎縮や運動機能の低下は誰もが直面する問題であるという意識が強くなってきたように思う。学術集会においても「フレイル」や「ロコモティブシンドローム」などの言葉が良く聞かれるようになった。そして、ここ10年ほどの間に、急激に骨格筋研究のホットトピックとして現れたのが「培養肉」である。つまり、筋肉を「知る」「治す」に加えて「作って食べる」という発想が生まれたのである。もちろん、畜産における肉質の改良は骨格筋研究の主要な分野のひとつではあった。ただ、個人的には培養肉という発想は農学よりも組織工学分野から派生してきたように思う。近年、再生医療が現実化し、さまざまな臓器や組織を再現する技術が成熟してきたなかで、当然、多くの研究者が骨格筋の構築にも取り組んだ。ところが、遺伝性筋疾患

にしる、廃用性萎縮にしる、筋肉というのは全身で問題が起こる。外科手術後に一部の筋肉を移植して補うことや、指先や目の筋肉の機能を維持することで意思疎通が可能となり、寝たきりの患者さんのQOLが向上するというケースもあるだろうが、やはり筋疾患治療は全身投与可能な方法が中心になるのではないか。そのような状況において、発展した技術のひとつの出口が、「お肉を作って食べればいいじゃない？」ということではなかったかと私自身は感じている（個人的な意見であり、まったく見当違いの可能性もある）。同時に、現行の大規模畜産は持続可能な食肉生産方法ではない、近い将来にお肉が食べられなくなるかもしれない、タンパク質クライシスの到来だ、といった社会問題が顕在化して、一気に培養肉研究が盛り上がったのではないか。実は、アイデア自体は、ウィンストン・チャーチルが1931年に発表したエッセイに「チキンは食べる部位だけを栄養液のなかで育てればよい」とすでに書いているのだ。必要性和技術の成熟が合わさり、培養肉が実現したのが今ということなのだろう。

培養肉を世界で初めて作製したのは、オランダのマーク・ポストらのグループであり、2013年のことである [1]。彼らはウシの組織から筋細胞を単離して8週間培養し、増やした細胞をハンバーガーパテにして実食するというデモンストレーションを行った。この実験を端緒に、培養肉研究は、世界中の大学やスタートアップ企業において盛んにおこなわれるようになった。シンガポール（2020年～）、アメリカ（2023年～）、イスラエル（2024年～）ではすでに培養肉の生産・販売が承認されている。日本ではまだ販売の見通しはたっていないが、JSTの競争的資金が投入されるなど、その研究開発は積極的に進められている。本稿では私がここ数年携わった培養肉研究について紹介したい。

2. 培養肉開発の課題

2.1 大きな塊肉を作る技術

マーク・ポストが最初に作った培養肉は未熟な筋細胞を集めたミンチ肉状であった。目下、世界中で開発が進められているのは塊肉の作製であり、これはすなわち生体骨格筋の再現である。課題としては、中心部まで壊死の起こらない分厚い組織を作ること、筋線維の配向と肥大を実現すること、脂肪や血管などの組織を導入することが挙げられる。壊死を避けるためには二つの方法が考えられる。ひとつは、酸素が十分に拡散するくらいの薄い組織を作製し、これを組み合わせて大型組織を作る方法であり、もうひとつは組織内部に血管様構造を作って灌流培養をする方法である。前者は、微小组織をビルディングブロックとしたボトムアップ的アプローチであり、後者は最初から大きな組織を作製するトップダウン的アプローチといえる。前者の方法で、ウシ初代培養筋細胞をコラーゲンゲルに懸濁後、シリコンゴム製の型で薄いシート状に成型し、これを40枚積層することで約1 cm 角の組織を作製することに成功した。積層後に培養することで、シート同士が接着して組織は一塊となった。このとき、各シートにスリットを設ける事で、さらに培養液が組織内部へ到達できるように工夫をした。また、積層後の組織の両端を固定して培養することで、細胞の牽引力によって縮もうとする組織に対抗する張力を与え、筋管細胞（生体筋線維ほど成熟してはいないが、多核のひも状となった筋細胞）の配向を実現した [2]。

後者の方法では、例えば1 cm×2 cm×0.5 cm の組織形成用の型にあらかじめ中空糸ファイバ（半透性の膜を有し、培養液を流すと酸素と栄養素が外側の組織へ供給される）を配置し、中空糸ファイバを内部に有する組織を作製した。中空糸ファイバの一端はシリコンチューブを介してシリンジポンプに接続し、シリンジを押し引きすることで組織内を常に培養液が流れるようにした。組織断面を観察すると、中空糸周囲に細胞数や分化した筋管細胞数が多いことが示され、灌流培養の効果は明らかであった。なお、この組織の両端にも組織固定用アンカを配置して、筋管細胞の配向を促した。この方法で作ったニワトリ胚由来筋細胞組織（Fig. 1）では、灌流を行わなかった組織と比較して、味の指標である遊離アミノ酸の含有量が高かった [3]。



Fig. 1 灌流培養装置で作製したニワトリ筋組織
（詳細は参考文献3 参照）

2.2 食べられる肉を作る技術

培養肉開発においては、食べられるお肉を作ることも重要である。当たり前のことを言っていると思われるかもしれないが、従来の細胞培養技術は動物の血清や抗生物質の使用を前提としており、これを法律で認められる可食素材（食品と食品添加物）だけで代替するのは至難の技である。特に、細胞の増殖に必須である胎児ウシ血清（FBS）の代替品の探索は急務である。成長因子や植物由来成分を用いた無血清培養が報告されているが、FBS ほどの細胞増殖効果を示す成分は未だ見つかっていない。

私は、牛乳を使って筋細胞が培養できないかと考えた。乳は血液から作られるうえ、牛乳ならばすでに食品として安全性と生産体制が確立されている。近年は消費量減少による余剰も問題となっており、培養肉生産に活用できれば有意義ではないだろうか。熱処理されていない無殺菌生乳を牧場から購入し、フィルタ滅菌を行うために限外ろ過でカゼインを除去した。いわゆる乳清の状態に基礎培地に懸濁し、骨格筋モデル細胞マウス C2C12 を培養したところ、細胞の増殖速度は FBS と比べて顕著に遅いが、乳清は細胞の生存を維持し、ゆっくりとではあるが増殖させ、筋管細胞へと分化させることが示された [4]。すなわち、牛乳成分を用いた細胞培養は可能といえる。ただし、FBS と比べて培養効率が低い点、増殖と分化誘導を明確に区別できない点、初代細胞への効果が低い点が問題となっている。

3. まとめ

骨格筋研究はその対象や目的が時代の影響を受けて変化を続けるが、私自身は培養皿のなかで増え、形を変えて、運動する筋細胞をいつも魅力的に感じてきた。培養肉研究はコストや安全性、消費者イメージなど一般的な科学研究とは異なる視点が求められる場面があり苦勞もするが、挑戦的課題として、引き続き楽しみながら取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) M. J. Post: Cultured beef: medical technology to produce food, J. Sci. Food Agric., Vol.94, pp. 1039–1041 (2014)
- 2) M. Furuhashi, Y. Morimoto, A. Shima, F. Nakamura, H. Ishikawa and S. Takeuchi: Formation of contractile 3D bovine muscle tissue for construction of millimetre-thick cultured steak, NPJ Sci. food, Vol.5, No.1, 6 (2021)
- 3) M. Nie, A. Shima, M. Yamamoto and S. Takeuchi: Large-scale tissue biofabrication via perfusable hollow fiber arrays for cultured meat applications, Trends Biotechnol., DOI: 10.1016/j.tibtech.2025.02.022 (2025)
- 4) A. Shima, H. Oda and S. Takeuchi: Milk-derived extract for skeletal muscle cell cultivation, Food Biosci., Vol.66, 106218 (2025)

新任教員紹介

医工学科・講師・小島 萌

略歴

2006.03 静岡医療科学専門学校 卒業
2006.03 放送大学 卒業
2006.04 東海大学医学部附属病院群 入職
2015.04 公益社団法人 日本臨床工学技士会 国際交流委員会部会委員
2024.04 一般社団法人 臨床工学国際推進財団 評議員
2024.04 公益社団法人 神奈川県臨床工学技士会 代議員
2025.03 吉備国際大学大学院 連合国際協力研究科 国際協力専攻 修了
2025.04 現職



担当科目

代謝機能代行装置学、医用機器安全管理学、生体機能代行装置学、呼吸機能代行装置学、人の構造及び機能、生体機能代行装置学実習、医用治療機器学実習、医用機器安全管理学実習、基礎医学実習、生体計測装置学実習、臨床実習、卒業研究

研究活動内容

1. はじめに

臨床工学技士は、医師の指示の下生命維持管理装置を操作、点検する医療従事者である。臨床工学技士が活躍している分野は多岐に渡るが、血液浄化領域は臨床工学技士が専門性を発揮する重要な分野の一つである。筆者も血液浄化領域に携わり多く臨床研究を行ってきた。本稿では筆者の最新の研究の一部を簡単に紹介させていただく。

2. 実験の概要

2.1 実験要因と割付け

Vascular access (va)とは、血液透析を行うための血管アクセスであり、透析患者にとっては生命を維持するために必要不可欠なものである。そのためva管理法は様々な方法が研究されている。日本の透析患者の9割以上がvaとしてシャントを使用しているため、va=シャントと捉えて問題は無い¹⁾。一方で透析患者の高齢化や糖尿病性腎症の増加に伴い、透析中の患者のモニタリングの重要性が高まり、様々なモニタリング機器が開発されている²⁾。その一つとして、非侵襲的かつリアルタイムに微小血管の血流量をモニタリングすることができるポケットLDFレーザー血流計(JMS, 日本)が発売され、臨床に応用されている。

vaは構造的に末梢への動脈血流を減少させることから、

シャント肢の末梢循環血流量は減少すると考えられる。つまり、理論的にシャント肢/非シャント肢の末梢循環血流量の比(shunt symmetry index : SSI)は1以下になると推測できる。一方でシャント静脈に狭窄がある場合はシャント肢の血流はうっ滞し、末梢循環血流量が増加すると考えられる。その結果、SSIは1を超えると推測できる。これらを踏まえ、本研究ではLDFを用いたva管理を検討した。

2.2 対象と方法

対象はシャントを有する維持透析患者82名(男性43名、平均年齢70.4±9.2歳)。方法は安静に仰臥位になり、両手第3指にLDFを装着し末梢循環血流量を5分間測定し、それぞれの平均血流量からSSIを算出した。またシャント血管の狭窄時の治療であるvascular access interventional therapy : VAIVTの適応となる患者のSSIとの関連性を調べるため、ROC曲線分析を実施した。

2.3 結果

対象の85.4%(70人)はシャント肢の血流が非シャント肢よりも低かった。またシャント吻合部の部位によるSSIの有意差は認められなかった($p=0.96$:Fig1)。

VAIVT適応と非適応の患者のSSIはそれぞれ 1.20 ± 0.49 と 0.65 ± 0.33 であり、2群間に有意差が認められた($p<0.001$:Fig2)。ROC解析によって決定されたSSIのカットオフ値は1.06(感度:0.69, 特異度:0.93, 曲線化面積:0.81:Fig3)

であった。

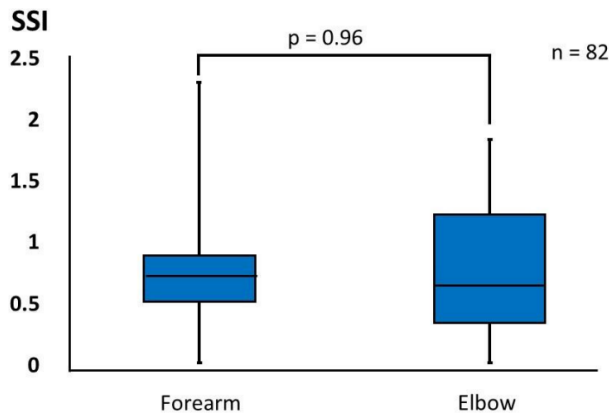


Fig. 1 シャント吻合部による血流比の比較

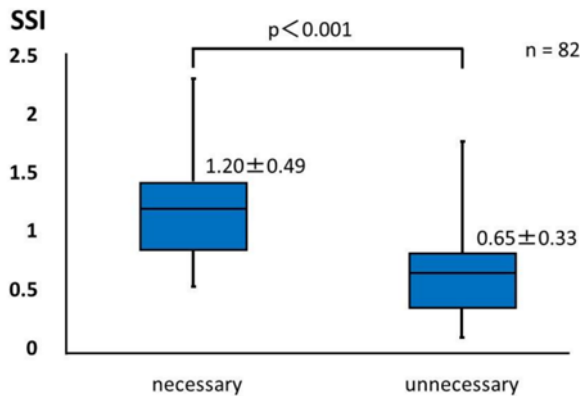


Fig. 2 VAIVT 要、不要患者の血流比の比較

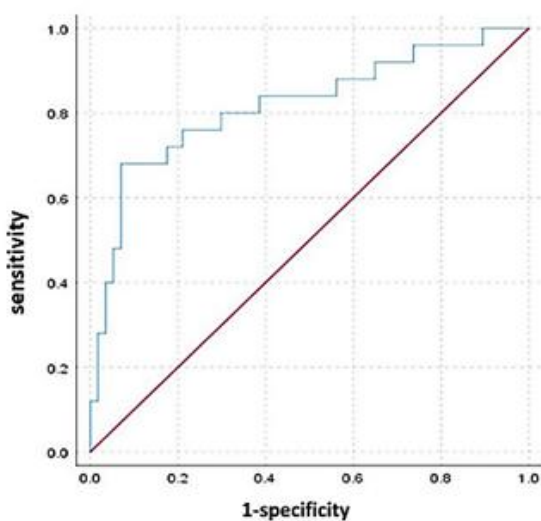


Fig3 末梢循環血流比の ROC 曲線

2.4 考察

結果より、シャントが末梢循環血流を減少させていることが示唆された。一方でシャント肢の方が末梢循環血流が多い場合は、シャントの静脈血管の狭窄が疑われ、適切な対処が必要であると考えられる。またシャント吻合部の場所の違いに関しても SSI に影響は無いことが分かった。

VAIVT の有無に関しては、VAIVT によりシャント狭窄が改善し、シャント肢の SSI が減少したと推察できる。本研究では、シャント血管の狭窄の有無のカットオフ値を 1.06 と特定した。我々は理論的なカットオフ値は 1.0 と想定したが、SSI が 1 以上の患者の中には VAIVT を必要としない患者も存在していた。その患者のシャント血流は深部静脈へ流れており、その血流が SSI 値に影響しているのではないかと考えられる。また測定誤差などの影響も否定はできないと考えられる。

2.5 結語

ベッドサイドにて LDF を両手指に装着するだけの簡便な操作で、客観的な数値を用いた va 管理が実施できることを示唆している。

3. おわりに

臨床工学技士の世間一般的なイメージは、医療機器の保守管理を行う職種であると推察できる。しかし実際は血液浄化領域や循環器領域、手術室や集中治療室など多くの臨床現場で医師や看護師をはじめとするチーム医療の一員として活躍している。我々は医療現場で唯一のエンジニアであるため、その知識を患者へ還元できるように日々研鑽している。

臨床工学技士は政府による医師の働き方改革により、タスクシフトがなされ、業務範囲が増加しており、今後も活躍の場所が広がっていくことが予想される。そのような中で、患者に寄り添った豊かな臨床工学技士を排出することができるよう、尽力していきたい所存である。

参考文献

- 1) Nakai S, Suzuki K, Masakane I, Wada A, Itami N, Ogata S, et al. Overview of regular dialysis treatment in Japan (as of 31 December 2008). Ther Apher Dial. 2010 Dec;14(6):505–40.
- 2) Masakane I, Taniguchi M, Nakai S, Tsuchida K, Wada A, Ogata S, et al. Annual Dialysis Data Report 2016, JSDT Renal Data Registry. Renal Replace Ther. 2018;4:45

新任教員紹介

電気電子工学科・特任講師・モハメッド シュルズ ミヤ

略歴

1984.1 バングラデシュ・フェニ地区生まれ
2003.9 Iqbal Memorial College, バングラデシュ・フェニ 卒業
2007.9 東海大学 別科日本語研修課程 修了
2011.9 東海大学 情報理工学部 情報通信電子工学科 卒業
2013.9 東海大学 工学研究科 電気電子システム工学専攻 修士課程 修了
2016.9 東海大学 総合理工学研究科 総合理工学専攻 博士課程 修了
2016.11-2019.9 東海大学 工学部 動力機械工学科 特定研究員
2017.4-2023.3 東海大学 国際教育センター 非常勤講師
2019.9-2024.9 成蹊大学 理工学部 理工学科 助教
2024.9-2025.3 成蹊大学 理工学部 理工学科 非常勤講師
2025.4 現職



担当科目

電気電子材料, 電気・電子情報工学実験 A, 入門ゼミナール, 次世代電気電子システム, 卒業研究 I

研究活動内容

1. はじめに

学部4年次に機能性酸化物薄膜の研究を主に行う研究室に配属になった後, 修士課程, 博士課程では, 機能性酸化物薄膜の研究に従事した。博士課程修了後, 2年半特定研究員として, 廃熱を回収し, エネルギーに変換するものとして最近注目を浴びている熱音響機関に関する研究に従事した。その後, 再び機能性酸化物薄膜の研究に戻り, 数年間様々な機能性酸化物薄膜の研究に従事し, 現在に至る。

本稿では, これまでの研究内容を紹介するとともに, 今後の大学における研究内容について述べる。

2. これまでの研究内容

(A) 二酸化バナジウムの低電圧スイッチングと自励発振現象に関する研究

機能性酸化物薄膜は半導体や光学材料として幅広く利用されている。酸化物材料の中で, 温度上昇時に可逆的に急峻な抵抗値変化, 即ち絶縁体-金属転移(Insulator-Metal Transition: IMT)を示す材料が様々な分野で応用が期待されている。私は修士・博士課程において導電層上への二酸化バナジウム(VO_2)薄膜の低温成長とその応用に関する研究に取り組んで来た。 VO_2 は比較的低温の $\sim 68^\circ\text{C}$ (341K)付近で低温相単斜晶系から高温相正方晶系に構造相転移を示す物質である。これに伴い抵抗率が4~5桁に亘って急激に変

化する, 絶縁体-金属相転移(Insulator-metal transition: IMT)を示す。特に電圧印加時にあるしきい値を越えると急激に電流ジャンプが生じ, 高抵抗状態から低抵抗状態への抵抗スイッチングを示し, 高速且つ制御性に優れる特徴を有する。私は VO_2 を動作層とする積層型構造に注目し, Si上に堆積したチタン(Ti)膜上に誘導結合型プラズマ支援スパッタ法(ICP支援スパッタ法)を用いて VO_2 薄膜の堆積を行い, これまで報告例がない 250°C という低温での結晶成長に成功した。そして, 本デバイスでは, 従来の平面型デバイスのスイッチング電圧($\sim 6\text{V}$)を 0.55V まで下げることに成功し, VO_2 を実用的なスイッチング素子として使用できることを示した。しかし, VO_2 薄膜が良好な結晶成長を示す高温の 400°C 成膜においては導電層上では下部電極であるTiの拡散および酸化が生じ, 面直方向へのIMTの実現ができなかった。この課題を解決するため, 拡散バリアとして窒化チタン(TiN)を導入した。これによって, 低温に加えて高温でも VO_2 薄膜の成長に成功し, 導電層上へ幅広い温度領域において VO_2 薄膜の成長を可能にした¹⁾。

VO_2 薄膜に電圧を印加するとあるしきい値電圧において抵抗値が急減して電流ジャンプが生じる。このとき, スwitchング後は VO_2 薄膜に流れる電流が増加する一方で電圧は低下する負性抵抗域を示す。一般に負性抵抗を有するしきい値スイッチングを示す素子に直流電圧を印加すると素子の端子電圧が増加と減少を自発的に繰り返す自励発振現象が発現することが知られている。 VO_2 においても, VO_2

薄膜を直列抵抗とソース電源からなる回路に組み込み、電源電圧を上昇させると自励発振が起きる。この自励発振現象はニューロコンピューティング、グラフの彩色問題等の様々な分野への応用が期待されている。私は、開発した積層型構造にいて、本材料で世界初となる MHz (9.0 MHz) オーダーの高周波自励発振実現に成功した²⁾。

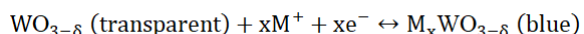
(B) 二酸化バナジウムの自動調光窓ガラスに関する研究

近年、日本において住宅・非住宅ではエネルギー消費量が増加し続けている。それは、建物において熱損失の大半(冬:約5割,夏:約7割)を占めている窓ガラスが原因である。そこで、近年、VO₂を動作層とする自動調光熱遮蔽窓ガラスが注目されている。VO₂を動作層とする自動調光熱遮蔽窓ガラスでは夏場において温度が高くなるとVO₂が転移して赤外光を反射し、室内温度の上昇を抑制する。また、冬には赤外光を透過し、室内の温度降下を抑制する。しかし、VO₂薄膜の室温における透過率が低い光学的な応用への大きな課題となっている。そこで、本酸化物の光学的な応用には透過率の向上が欠かせない。透過率の向上には膜厚の減少が有効。我々は、基板バイアス印加法を用いて低温でVO₂薄膜を体積させた。VO₂薄膜の膜厚を60~120 nmに変化させ、さらに反射防止膜としてSiO₂膜を導入し、光透過率(T_{lum})と太陽光変調能率(ΔT_{sol})の改善を図った。SiO₂ (174 nm)/VO₂ (120 nm)/ZnO (250 nm)/ガラス構造において、 ΔT_{sol} は最大17.7%、 T_{lum} は27.8%の値が得られた。また、SiO₂ (85 nm)/VO₂ (90 nm)/ZnO (250 nm)/ガラス構造において、 T_{lum} と ΔT_{sol} のバランス値として44.2%と11.6%が実現された³⁾。この結果は、SiO₂が優れた反射防止層として機能し、VO₂ベースの構造の性能を向上させることを示した。得られた T_{lum} と ΔT_{sol} は、VO₂薄膜においてこれまで報告された中で最高値であり、これらの成果はVO₂の自動調光窓ガラスへの実用化に大きく貢献することが期待できる。

(C) エレクトロミック酸化タングステンに関する研究

酸化物の中で、タングステン酸化物(WO₃)、モリブデン三酸化物(MoO₃)、ニッケル酸化物(NiOx)は、よく知られているエレクトロクロミック(EC)材料である。中でも、WO₃は無色から濃い青色に変化する特性から特に注目されている。この現象は可逆的で、低電圧で発生する。さらに、デバイスを回路から外しても色は維持されるため、消費電力は非常に低い。これにより、建物や車両のスマートウィンドウへの応用に適している。

WO₃の電気化学的特性は、Wの価数の変化と関連しており、化学反応式は次のように表される。



ここで、MはH⁺, Li⁺, Na⁺, またはK⁺などの陽イオンを表す。

私は、高遮光窓ガラス実現に向けて、導電性ITO/ガラス

基板上に反応性直流マグネトロンスパッタ法を用いて、厚さ500 nmと1000 nmの2種類の非晶質WO₃薄膜を成膜した。異なる薄膜厚さの影響に加え、排気速度やスパッタリングモード(酸素流量)などの成膜条件がWO₃の着色と消色特性に与える影響を調査した。成膜直後の試料は、すべての堆積条件および膜厚において透過率が80%を超える値を示した。着色状態では、1000 nmの試料は500 nmの試料よりも透過率が低く、実用的な応用において有利であることを示した⁴⁾。

2. 今後の大学における研究

本学では、引き続きVO₂とWO₃の研究を継続するとともに新たな半導体材料に関する研究を行う予定である。VO₂について、VO₂の発振現象のメカニズムの解明とニューロコンピューティング、グラフの彩色問題等への応用を目指す。さらに、VO₂を動作層とする自動調光窓ガラスに関しては、SiO₂に加えて別の反射防止膜を導入し、室温における透過率の改善と太陽光変調能率を向上させることに挑戦する。また、VO₂の堆積法には工業的に有利とされている大電力パルススパッタ法などの導入も行う。WO₃に関しては、着色時に実現できた低透過率サンプルの消色過程の透過率が戻らない原因の解明を行うとともに実用化に向けた研究を行う。更に、新たな半導体材料に関する研究を行う予定である。

参考文献

- 1) Md. Suruz Mian and Kunio Okimura, Effect of conductive TiN buffer layer on the growth of stoichiometric VO₂ films and the out-of-plane insulator-metal transition properties, Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol. **32**, pp. 041502-1 - 041502-6 (2014).
- 2) Md. Suruz Mian, Kunio Okimura, and Joe Sakai, Self-oscillation up to 9 MHz Based on Voltage Triggered Switching in VO₂/TiN Point Contact Junctions, Journal of Applied Physics, Vol. **117**, pp. 215305-1 -215305-5 (2015).
- 3) Kunio Okimura, Md. Suruz Mian, Iwao Yamaguchi, Tetsuo Tsuchiya, High luminous transmittance and solar modulation of VO₂-based smart windows with SiO₂ anti-reflection coatings, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. **251**, Page 112162 (2023).
- 4) Md. Suruz Mian, Riko Yagi, Kei Oya, and Takeo Nakano, Coloring and Bleaching Properties of 500–1000-nm-Thick Electrochromic Tungsten Oxide Films Deposited by Reactive Direct Current Magnetron Sputtering, Physica Status Solidi A, Vol. **219**, Issue 5, Page 2100646 (2021).

新任教員紹介

機械システム工学科・特任講師・劉 暁俊

略歴

2016.03 東海大学工学部動力機械工学科 卒業
2018.03 東海大学大学院工学研究科機械工学専攻 修了
2021.03 東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻 修了 博士(工学)
2018.04-2025.03 オムロン株式会社 技術・知財本部 ロボティクス R&D センタ 主査
2025.04- 現職

担当科目

情報処理, ロボットデザイン, ロボット動力学, プロジェクト製作, 機械システムゼミナール1, プログラミング, ロボットの設計と創造, ロボット工学の基礎, ロボット運動学, ロボット制御, 問題発見ゼミナールなど

研究活動内容

1. はじめに

近年, ロボティクス技術の進化に伴い, 製造業や医療, 福祉などのさまざまな産業分野において, ロボットが果たす役割は飛躍的に拡大している. 特に製造業界では, 少子高齢化による深刻な労働力不足や, 多品種少量生産への対応という課題を背景に, 単純な作業の自動化だけでなく, 人間と協働できる「協働ロボット」のニーズが急速に高まっている. こうしたロボットには従来以上に高度な知能性や柔軟性が求められることから, ロボティクス分野は新たな発展段階を迎えている¹⁾.

従来, 産業用ロボットはティーチング&プレイバック方式を中心に活用されてきた. これはあらかじめ人間が指示した動作を忠実に再現するものであるが, 作業環境や対象物の変動が激しい現場, あるいは人間との密接な協調作業を必要とする現場においては, その柔軟性や適応性に限界があった. また, 人とロボットが物理的に近接する環境下では, 安全性への配慮や人間の動作・意図への理解が不十分であるという課題も指摘されてきた²⁾. こうした課題に対して, 近年のセンシング技術や AI 技術の著しい進展は, ロボット技術に新たな可能性をもたらしている. 特に深層学習や強化学習, 模倣学習などの機械学習技術を利用することで, ロボットが環境から自律的に学習し, 自ら状況に応じた判断や動作を創出することが可能となった. また, 視覚センサや触覚センサ, IoT 技術の普及により, ロボットがより精密に環境や人間の状態を把握し, 柔軟に動作を調整する能力も飛躍的に向上した³⁾.

筆者は, こうしたロボティクス技術の進化を背景として, 人間に寄り添い, 安全で円滑な協調動作を実現するロボッ

トシステムの開発を進めている. 特に卓球ロボット「FORPHEUS (フォルフェウス)」の開発では, 人間の動作やボール軌跡をリアルタイムでセンシングし, それに基づいて精密に動作を制御する技術を培ってきた. また, 創薬分野向けラボラトリーオートメーションシステムでは, マニピュレーションの精度向上や動作の自律化を目指したシステム構築を進め, 実用化に向けた技術的課題の解決に取り組んでいる. これらの経験を通じて, 「Sensing (感知)」、「Control (制御)」、「Think (思考)」という3つの要素技術を体系的に統合し, 自律性と柔軟性を兼ね備えたロボットの研究基盤を構築している.

2. 研究の概要

2.1 卓球ロボットにおける Sensing・Control・Think の統合と知能化

図1に示す卓球ロボット「FORPHEUS」は, 人とロボットが卓球を通じて互いに学び合い, 成長することを目指し



Fig. 1 “FORPHEUS” play table tennis with human player

て開発された協調型ロボットである。筆者はオムロン株式会社が在籍時に、本ロボットの開発を深く関与し、Sensing (感知), Control (制御), Think (思考) の三要素を高度に統合することで、人との自然なラリーや状況適応を実現した。本ロボットでは、ボールの軌跡や相手プレイヤーの動作をリアルタイムに観測・解析するビジョンセンシング、高速・高精度の軌道生成と動作制御、そして機械学習を用いた返球戦略の自己学習機能を組み込んでいる。この自己学習機能は、相手プレイヤーの特徴や打球傾向に応じた返球戦略の最適化に加え、空気抵抗や温度、湿度の変化といった物理パラメータの影響による返球誤差を学習的に吸収する役割も担っている。その結果、返球精度が大きく向上し、状況に応じた多様な戦術の実行が可能となっている。

図2に、FORPHEUSにおける返球精度向上のための自己学習プロセスのフローチャートを示す。観測された環境状態をもとに相手の動作やボールの着弾位置を推定し、強化学習によって返球戦略を継続的に更新、その結果を動作計画と制御に反映する一連の流れを表している。

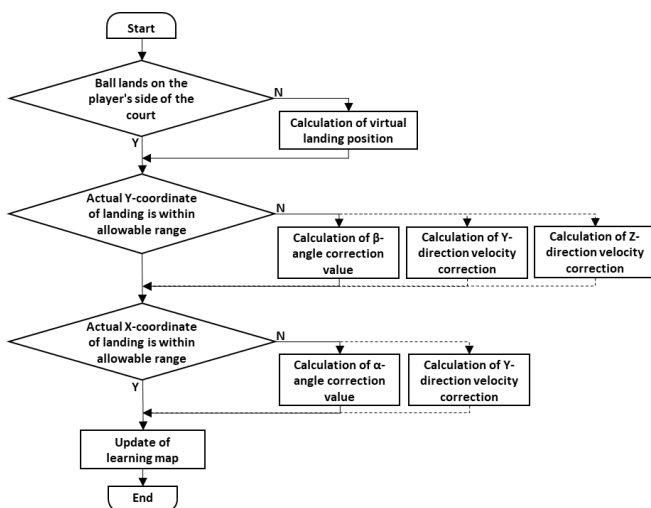


Fig.2 Flowchart of self-learning process for improving robot return accuracy

2.2 ラボラトリーオートメーションにおける自律マニピュレータの設計とシステム構築

ラボラトリーオートメーション (LA) は、創薬や分析化学などの研究現場において、実験作業の効率化、人的ミスの削減、再現性の向上を目的として急速に普及が進んでいる。筆者は、オムロン株式会社において、製薬企業との共同研究を通じて、複雑なサンプルハンドリングや液体操作を高精度に行うロボットマニピュレータの設計と、システム全体のアーキテクチャ構築に取り組んできた。LA システムでは、従来の産業用ロボットのような定型作業ではなく、試薬の性質や容器の多様性、測定機器とのインターフェースなどに応じた柔軟な動作と、高い信頼性が要求される。そのため、マニピュレータのメカニカルデザインに加えて、センサを用いた状態推定やエラー検出、動作調整の

ためのインピーダンス制御を導入し、複雑環境下での動作安定化を図っている。

現在は、長時間連続稼働や人手を介さない完全自律化に向けて、運用信頼性の向上、タスクの汎用性確保、遠隔監視・制御技術の実装などに段階的に取り組んでいる。将来的には、人の作業知と機械知能を融合させた「ハイブリッド自動化」の実現を目指し、医療・ライフサイエンス分野に貢献するロボットシステムの展開を構想している。

3. 今後の展望

今後の研究では、「人に寄り添い、安全に協働するロボット」の実現を目指し、ロボットが人間の視線・表情・骨格・生体情報などをもとに内面状態を推定し、その結果に応じて自然な協調動作を生成できる制御技術の確立を目指している。具体的には、センシングデータを多角的に統合することで、人間の注意・集中・緊張・疲労といった状態をリアルタイムに推定し、その情報に基づいてロボットが適切な距離感・速度・動作パターンを調整するような“人にやさしい協働行動”の設計に取り組む。このような制御を実現するには、単純なルールベースの制御を超えて、環境や人間の状態を理解し、文脈に応じた柔軟な判断・動作選択が可能な「Think (思考)」の仕組みが必要である。従来のティーチングやプログラミングによる手法では限界があるため、深層学習・強化学習・模倣学習などの機械学習技術を用いて、ロボットが自律的に学習・適応しながら高度な行動を獲得できるアプローチを探索する。

さらに、こうした技術を単なる実験室内のロボット制御にとどめず、教育・福祉・医療・研究支援など、実社会におけるロボット活用の現場へと展開することも視野に入れている。これまで FORPHEUS や LA のプロジェクトを通じて蓄積してきた技術や知見を活かしつつ、ロボットが「人を理解し、人と共に進化する存在」となるための基盤技術の構築を進める。

参考文献

- 1) 日本ロボット工業会：ロボット産業ビジョン 2050, https://www.jara.jp/publications/img/vision/visionver0_booklet.pdf, (参照 2025-07-18).
- 2) 経済産業省：ロボットを取り巻く環境変化と今後の施策の方向性 ～ロボットによる社会変革推進計画～, https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/robot_shakaihenkaku/pdf/20190724_report_01.pdf, (参照 2025-07-18).
- 3) D. Han, B. Mulyana, V. Stankovic and S. Cheng, A survey on deep reinforcement learning algorithms for robotic manipulation, *Sensors*, Vol.23, No.7, 3762 (2023).

新任教員紹介

機械工学科・特任講師・関本 諭志

略歴

2010.03 東京大学工学部航空宇宙工学科 卒業
2012.03 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 博士前期課程 修了
2015.03 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 博士後期課程 修了（博士（工学））
2015.04-2016.03 ㈱東芝電力システム社京浜事業所 タービン基本設計担当
2016.04-2020.10 東京理科大学工学部情報工学科 ポストドクトラル研究員
2020.11-2024.09 東京農工大学工学部機械システム工学科 助教
2024.09-2025.03 産業技術総合研究所省エネルギー研究部門流体制御グループ 招聘研究員
2025.04- 現職



担当科目

流れ学基礎, プログラミング, 機構学, 入門ゼミナール A など

研究活動内容

1. はじめに

流体分野においては, 多様な条件下での流体制御が求められる. 従来の流体制御手法としては, 表面への突起設置 (ボルテックスジェネレータ), 舵面の利用, 吹き出しジェットなどが挙げられる. しかし, これらの方法には, 1) 応答性が低い, 2) 強い制御入力が必要とする, 3) 機器設計の大幅な変更を伴う, などの欠点がある.

これに対し, 近年注目を集めているのがプラズマアクチュエータ (以下, PA¹⁾) である. PA は図 1 に示すように, 誘電体とそれを挟む二つの電極で構成され, 電極間に交流高電圧を印加することで上部電極端からプラズマが発生し, それに伴って数 m/s 程度の流れが誘起される. この流れを利用することで流体制御を実現できる. 電氣的現象を利用するため応答性に優れ, また, 電極と誘電体を貼り付けるだけで構成できる簡単な構造であり, 可動部を持たず, 薄型かつ柔軟に設置できる点が大きな特徴である.

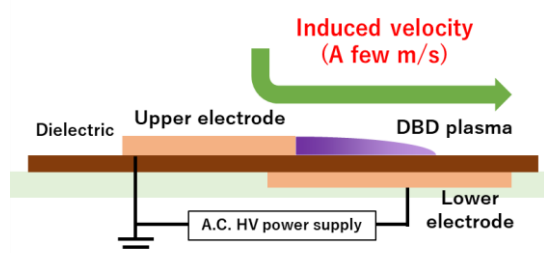


Fig. 1 Schematic of a DBD plasma actuator.

PA による流体制御の歴史は比較的短く, 1998 年に Roth らが境界層制御に利用したこと²⁾に端を発する. 2000 年代は PA の誘起流れに関する基礎研究が主体であったが, 2010 年代以降は PA を用いた流体制御の研究が世界的に拡大し, 国内でも機械工学・航空工学分野を中心に研究が進められている.

私は 2010 年, 大学院在学中にこの PA と出会い, 以来継続的に PA による流体制御研究に携わってきた. 本稿では, その取り組みの一部を紹介させていただく.

2. PA を用いた流体制御

これまで筆者が携わってきた PA による流体制御研究は, 主に以下の 3 つに分類できる: 1) PA による剥離流れ制御の基礎研究 2) PA の実機実装に向けた応用研究 3) PA 適用領域の拡大. 本稿では紙面の都合上, 1) については代表的な論文を示す³⁾に留め, 2) および 3) の内容について紹介する.

2.1 PA 実機実装に向けた応用研究: 小型飛行体高性能化に向けた実証研究

PA は航空宇宙分野において長らく発展してきており, その適用先として航空機が期待されてきた. しかし PA は単体での制御能力が高くないため, 適用は低レイノルズ数域に限られ, 翼幅約 2 m 程度の小型飛翔体 (図 2 上) が対象となる.

一方で, PA の駆動には高電圧が必要であり, 従来の高電圧電源は大型であったため, 小型飛翔体への搭載は困難で

あった。本研究では、大気圧プラズマを扱う企業と共同で、小型飛翔体に搭載可能かつ十分な PA 駆動性能を持つ小型高電圧電源（図 2 左下）を開発した⁴⁾。市販の小型飛翔体に本電源と自律飛行モジュールを搭載してフライト試験を実施し、PA による失速遅延効果を実証した（図 2 右下）⁵⁾。

現在はプレディターミンド制御のみであるが、今後はフィードバック制御など高度な制御手法による性能向上を目指している。今後は学科を横断して、航空宇宙工学科の先生方とも連携しながら発展させていきたい。

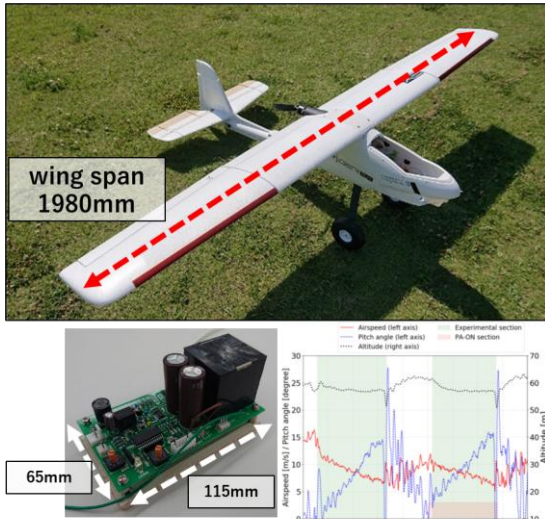


Fig. 2 2m-span UAV with PA (top), small HV power supply (left bottom) and example of time-series of flight data (right bottom).

2.2 PA 適用領域の拡大：熱音響機器マイナーロス低減

近年、工場などの排熱利用が注目されている。その実現方法の一つとして、熱と音波を相互にエネルギー変換・輸送する熱音響現象⁶⁾がある。この現象を利用するデバイスを熱音響デバイスと呼び、可動部を持たない単純な構造で耐久性・メンテナンス性に優れるという利点を持つ。しかし、設計上避けられない曲げ・分岐・断面積変化などの局所形状に起因するエネルギーロス（マイナーロス）が無視できないほど大きいという課題がある。

熱音響デバイスの管路径は直径数十～数百 mm 程度と設置空間に制約があり、また数十～数百 Hz の音波に追従できる高い応答性が必要となる。このような条件下では、筆者の知る限りこれまで積極的な能動制御の試みはほとんどなかった。

筆者は、PA の応答性と設置の柔軟性がこの課題に適していると考え、数年前から研究を開始した。現段階では、テーパ形状の断面積変化部を持つ装置（図 3 左）を用いた事前実験を行っている。このようなテーパ部では局所的な流れの剥離が発生し、エネルギーロスの要因となる。そこで、PA 駆動周波数を音波周波数に合わせ、音波に対する位相を変化させながら駆動したところ、特定の位相ではマイナーロスが低減し、逆位相では増加することが確認され

た（図 3 右）。この結果は、PA による熱音響デバイス内部の流れ制御の可能性を示すものである。

筆者が着任した機械工学科には、日本における熱音響研究の第一人者である長谷川教授が機械工学科に着任されており、今後は連携を通じて双方の研究の発展させていきたい。

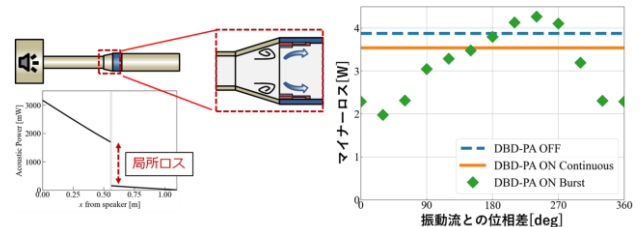


Fig. 3 Schematic of minor-loss reduction using PA (left) and comparison of experimental result (right).

3. おわりに

寄稿の機会をいただき、本稿では PA を用いた流体制御研究の一部を紹介した。これまでの研究を深化させることは重要であるが、新たな環境においては、学内の多様な研究者との連携を通じ、この東海大学だからこそ実現できる研究課題を見出し、取り組んでいきたいと考える。

参考文献

- 1) Corke, T. C., Enloe, C. L., and Wilkinson, S. P., Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 42, No. 1, pp. 505–529 (2012).
- 2) J. Roth, D. Sherman and S. Wilkinson, Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma, *AIAA 98-0328* (1998).
- 3) S. Sekimoto, T. Nonomura and K. Fujii, Burst-Mode Frequency Effects of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Separation Control, *AIAA J.*, Vol. 55, No. 4, pp. 1385-1392 (2017).
- 4) S. Sekimoto, K. Fujii, S. Hosokawa, H. Akamatsu, Flow-control capability of electronic-substrate-sized power supply for a plasma actuator, *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 306 (2020).
- 5) S. Sekimoto, H. Kato, K. Fujii, K. and H. Yoneda, In-flight demonstration of stall improvement using a plasma actuator for a small unmanned aerial vehicle. *Aerospace*, Vol. 9 (2022).
- 6) G. W. Swift, Thermoacoustic engines, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 84, No. 4, pp. 1145–1180. (1988).

東海大学工学部紀要委員会

委員長	落 合 成 行	
委 員	池 田 知 行	鈴 木 昌 和
	槌 谷 和 義	沖 村 邦 雄
	菊 川 久 夫	高 橋 哲 夫
	吉 田 茂 生	

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

Chairman	Masayuki OCHIAI	
Members	Tomoyuki IKEDA	Masakazu SUZUKI
	Kazuyoshi TSUCHIYA	Kunio OKIMURA
	Hisao KIKUGAWA	Tetsuo TAKAHASHI
	Shigeo YOSHIDA	

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. 65. No. 1 2025

2025 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
