

エ 学 部 Vol.62, No.1 2022

目次

## 論文

研磨加工に用いる砥石の微細構造と和鋼の	友研磨特性
3YSZ/8YSZ 複合体のビッカース硬さおよび	電気伝導率
Ni/YSZ 複合体のマイクロ波合成および電気	云導率
	吉永昌史・宮澤理玖1:
学生フォーミュラ用モノコック構造の FEM	解析による剛性評価
野球の実投球における球速や回転数,回転	曲を用いた飛翔軌道シミュレーション
	森山幸平・藤田颯雲・大久保雅俊・岡永博夫2
クラリネットマウスピースのフェイシング	『の微小形状変化が吹鳴音波形に与える影響
·····	
正規圧密粘土の塑性ポテンシャルとひずみ	
一次 圧 変 に 上 ろ 粘 十 の 強 度 増 加 と 圧 変 度	

## 2022 年度 新任教員研究紹介

航空宇宙学科·航空宇宙学専攻	真53
医工学科	賢史55
生物工学科	真57
工学部	-ク59
工学部	惠61
工学部橋本作	言一63

# PROCEEDINGS OF THE SCHOOL OF ENGINEERING OF TOKAI UNIVERSITY

#### CONTENTS

## VOL.62, No.1 2022

## **Technical Papers**

Microstructure of Whetstones Used for Polishing Japanese Steel and Surface Morphology by Stock Removal
Kouki YAOITA, Hendrik Hubert Maria Goncalo LINDELAUF and Masafumi CHIBA 1
Vickers Hardness and Electrical Conductivity of 3YSZ/8YSZ Composite
Masashi YOSHINAGA, Hiroshi KATOH and Yuji FUJIMOTO 9
Synthesis of NiO/YSZ Composites by Microwave Heating and Their Electrical Conductivity
Masashi YOSHINAGA and Riku MIYAZAWA15
Estimation of Rigidity of Monocoque Structure of Racing Cars for SAE Competition Based on FEM Analysis
Flight Trajectory Simulations Using Ball Speed, Rotation Speed and Rotation Axis on Actual Pitching of a Baseball
Influence of Small Alterations in the Shape of Clarinet Mouthpiece Facing on the Blown Sound Waveform
Tetsuro HORIKOSHI and Masaaki FUJIWARA35
Plastic Potential and the Ration of Strain Components of Normally Consolidated Clays
Increase of Strength of Clays due to Secondary Compression and the Degree of Consolidation
YOSHIHITO IMAI, Masaru AKAISHI and Motohiro SUGIYAMA47

Introduction of research activities of new faculty members (2022)

Dept. of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Course	Makoto TANAKA 53
Dept. of Medical Engineering	Kenji MIZUTANI 55
Dept. of Bioengineering	······ Makoto OBA 57
School of Engineering	Mark SHROSBREE 59
School of Engineering	Megumi NISHIKAWA 61
School of Engineering	Shinichi HASHIMOTO 63

# 研磨加工に用いる砥石の微細構造と和鋼の被研磨特性 <sub>矢尾板 航己<sup>\*1</sup> ヘンドリッキ リンデラウフ<sup>\*2</sup> 千葉 雅史<sup>\*3</sup></sub>

# Microstructure of Whetstones Used for Polishing Japanese Steel and Surface Morphology by Stock Removal

by

Kouki YAOITA<sup>\*1</sup>, Hendrik Hubert Maria Goncalo LINDELAUF<sup>\*2</sup>, and Masafumi CHIBA<sup>\*3</sup> (Received on Mar. 25, 2022 and accepted on Jun. 4, 2022)

#### Abstract

Japanese swords were valuable not only as weapons, but also as traditional works of fine art. Forging technology and the polishing process are important elements of sword manufacturing. However, there has been little quantitative discussion of the process. In this paper, the microstructure and the composition of various whetstones used for polishing are quantitatively evaluated to clarify their characteristics. The effects of differences in the properties of the whetstones, which are a specific polishing material, on the surface of Japanese steel were examined. The crystal structure of natural whetstones is hexagonal, and the main component is quartz in the form of SiO<sub>2</sub>. Other impurities such as C, Al, K, and Mg ions were also detected. In particular, the concentration of C contained in quartz is of great significance. It was found that increasing the concentration to 13 at% as a threshold gave a hard touch feel, whereas decreasing it gave a soft touch feel during the polishing. On the other hand, artificial whetstones use SiC or Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as the abrasive, and have a more porous structure than natural whetstones. The parameters of the surface morphologies such as the root mean square and the arithmetic mean roughness were obtained by conducting experiments of polishing nails made of Japanese steel. The effects of the properties of the whetstone on the surface roughness were investigated. In the case of an industrial artificial whetstone, a positive correlation was found in which the surface roughness of the steel surface increased as the roughness of the grindstone increased. Furthermore, a slight negative correlation was found in the case of the whetstone used for sword polishing.

Keywords: Surface morphology, Polishing process, Whetstone, Japanese steel, Microscopic structure

## 1. 緒言

日本刀は伝統的な武器としての機能性だけでなく、美 術工芸品として現在では日本の文化財を象徴する重要な 位置付けにある.刀身の素材である玉鋼(たまはがね)は, 砂鉄を直接精錬して作ることから、資源に乏しい日本独 自の製鉄技術として古くより伝承されている 1~3). さら に、玉鋼の折り返し鍛錬によって形成される層状の刀身 組織と、焼入れ工程で付与される刃部の刃文や光沢から 生まれる造形からも,日本刀が武具としての特徴と価値 だけでなく、美術工芸品としての魅力も持ち合わせてい ることは明白である 4~7). そして刀剣製作過程において 必要な様々な技術の中でも、日本刀に美術品としての付 加価値を与える要素のひとつが表面の研磨作業である. 単に切れ味を高めて武器としての性能向上を目指すので はなく、刀身を磨く過程で、沸(にえ)、匂(におい)、砂流 (すながし)などの多数種類の表情を刀身から引き出す狙 いで施される 8,9). 日本刀研磨では一般的な刃物と同様 に砥石が用いられるが、天然砥石のみならず人造砥石も 併用される.実際の工程では、下地砥では研磨力の強い 人造砥石を用いる場合があるが、仕上砥の段階では全て 天然砥石が用いられる.日本では天然砥石の産出が豊富 で、砥石は荒砥、中砥、仕上砥などに分類されて目的別 に使い分けられている.一方で、工業製品における研磨 と研削加工に関しては、粒状の研磨材を結合剤で固めた 人造砥石を使って行われることがほとんどであり、砥石 の特性評価項目についても、研磨能率、研削比、仕上面 粗さなど極めて多岐にわたって実験を伴った科学的な検 証が多数見受けられる<sup>10,11)</sup>.しかし刀剣研磨ではその重 要性が求められるものの、技術が流派内の伝承で異なっ ていることや、研ぎ師の感覚に頼るところが大きく、研

そこで本研究では、日本刀の文化的価値を付与する工 程である研磨技術に着目し、刀剣製作技術の一翼を担う 研磨工程の理解に意義を求めるものであり、まず最初に 研磨に用いられる各種砥石の構造と組成などを定量的に 評価して特性を明らかにし、次に砥石の性状の差異が被 研磨材料である和鋼の表面に与える影響について考察す ることを目的とする.

<sup>\*1</sup> 工学部精密工学科学部生

<sup>\*2</sup> 生方刀剣研磨工房,日本刀研師

<sup>\*3</sup> 工学部精密工学科教授

## 2. 刀剣研磨工程

刀剣研磨の目的は2つに大別することができる.1つ は刃物としての切断力を向上させるためであり、日本刀 を実用品として利用していた時代に主に行われていた. それとは別に、鍛造後の日本刀に対して姿形を整えて各 部位の特徴を明確に表現し、美術鑑賞的価値を付与する ことを目指して研がれることがあり、現在では後者の方 が主流となっている.行き届いた環境の下で保管されて いない刀身は状態が健康的とは言えず、表面に錆が発生 したものや、欠損あるいは著しい腐食の進行が認められ るものが多数存在する.そこで、下地研ぎと仕上研ぎの 2つの工程を経て、作製された当時の姿形をより美しく 再現するための作業が刀剣研磨加工である.

Table1は研磨の作業工程順にその工程名称と、そこで 用いられる砥石あるいは研磨剤や道具の特徴を取りまと めたものである.なお、作業は本阿弥流や藤代流などの 流派や研ぎ師、あるいは刀身の状態によって適用される 工程や資材は異なるが、標準的な手法によると前半の下 地研ぎは「1-1 金剛砥」から「1-6 内曇砥」までの6段階 あり,後半の仕上研ぎは「2-1 刃艶」から「2-7 流し」ま での7段階で構成される.表に示したように、「1-1金剛 砥」から「1-5 細名倉砥」までの下地研ぎの段階では人 造砥石が用いられる場合もあり、目安値として工業用研 磨微粉の粒子サイズで規定される番手#180~3000 を併 記した. 下地研ぎでは粗目の砥石から徐々に細目の砥石 へと番手を上げながら表面を研ぎ、地金を均して刀身を 整える作業を行う.ここで,研磨力が強力な「1-1 金剛 砥」は、刀身に欠損や極度に錆が進行した場合にのみ適 用される工程であり、薄い錆身程度であれば「1-2 備水 砥」工程から開始することが多く, 順次, 前工程の研ぎ 跡を消しつつ次工程へと作業を進める.

次に仕上研ぎは,地金の色調を整えたり刃文のコント ラストを創出して,波形状をより鮮明に可視化できるよ

Table 1 Example of polishing process for Japanese swords.

Proces	SS	Grit size	Polishing material
1. Shi	tajitogi		
1-1	Kongoudo	#180~#200	Artificial or Natural stone
1-2	Binsuido	#400	Artificial or Natural stone
1-3	kaiseido	#800	Artificial or Natural stone
1-4	Chuunagurado	#2000~#3000	Artificial or Natural stone
1-5	Komanagurado	—	Artificial or Natural stone
1-6	Uchigumorido	—	Natural stone
2. Shi	agetogi		
2-1	Hazuya	—	Natural stone
2-2	Jizuya	—	Natural stone
2-3	Nugui	—	Paste with iron oxide
2-4	Keshoutogi	—	Natural stone
2-5	Migaki	—	Tungsten alloy
2-6	Narume	—	Natural stone
2-7	Nagashi	—	Tungsten alloy

う表現するために行われる. 下地研ぎとは異なり, 各工 程で使用する砥石や治具が工程ごとに変化する. 例えば, 「2-1 刃艶」は内曇砥をベースに層状劈開面を利用して ペレット状に薄く分割して漆で和紙を裏打ちしたものを 用い,「2-3 拭い」は丁子油に火造(ひづくり)の際に生 成された酸化鉄や Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HgS 等の粉末を混合したペー ストを使う. さらに「2-5 磨き」と「2-7 流し」の工程で は, W を母材とする円柱状の超合金を使い, 鎬地と棟を 完全な光沢鏡面にする研磨を施したり, はばき元に研ぎ 師の銘となる印影を刻印する作業を行う.

## 3. 実験方法

#### 3.1 試料の選択と準備

本研究が対象とする砥石は2タイプである.1つは工 業用途であり精密研磨用微粉を研磨剤に含む人造砥石で, その番手は,#240,400,800,1500,3000,6000,8000, 10000の8種類である.もう1タイプは刀剣研磨に用い る砥石であり、「1-2備水砥」、「1-5細名倉砥」、「1-6内 曇砥」、「2-2地艶」の4種で、本実験では10試料入手し た.Table 2に本実験で用いた刀剣研磨用砥石の種類と、 試料 ID,人造あるいは天然の種別などをまとめた.なお、 表中の Touchの欄にある Hard と Soft の表記は、砥石そ のものの硬度を示したものではなく、研磨作業中に研ぎ 師が感覚的に受ける手応えを意味し、砥石と刀身との接 触状態を作業者の掌を介して伝わる情報から、硬軟の程 度に見立ててそれぞれ"Hard"および"Soft"の2値で表現 したものである.

次に,日本刀の製作許可ならびに登録対象となるには, 「伝統的な製作方法によって鍛錬し,焼き入れを施した もの」とされており<sup>12)</sup>,このことを解釈すると,鉄鉱石 由来の鋼の使用は認められず,現代においても砂鉄を出 発材料として,たたら製鉄法により精錬して生成した玉 鋼を素材として製作することを意味する.このことは各 都道府県の教育委員会が定める規定にも明記されている <sup>13)</sup>.しかし,玉鋼の入手は刀匠資格者にのみに限定的で

Table 2 Whetstone for Japanese sword.

Proc	ess	Sample ID	Stone type	Touch
1-2	Binsui	bs-01	Artificial	Hard
		bs-02	Artificial	Hard
		bs-03	Natural	Soft
1-5	Komanagura	kn	Artificial	—
		bn	Natural	—
1-6	Uchigumori	ug-01	Natural	—
		ug-02	Natural	Soft
		ug-03	Natural	Hard
2-2	Jizuya	jz-01	Natural	Soft
		jz-02	Natural	Hard

あることから,玉鋼と同一出自で入手容易な和鋼に着目 して試料選択した.つまり,本実験での被研磨材である 和釘は,有限会社嘉孝製作所(新潟県三条市)製で,階 折頭頂形状の長さ36mmのもので,日本刀の原材料と同 様の砂鉄を母材とする和鋼と同等とみなし,それに対す る各種評価実験を行った.なお,試料の和釘には折返し 鍛錬を施していない.

各種砥石による研磨が和釘の表面性状に与える影響を 検討するため、以下に述べる研磨加工を施したものを評 価対象試料とした.最初に,入手直後の和釘は目視的に も表面状態が一様ではなく, FeO や α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> など の酸化皮膜で覆われていることが一般的に知られている 14). そこで,全ての研磨実験の前段階として,#600のサ ンドペーパーで 500 回の表面研磨を行って酸化皮膜を除 去し、これを前処理とした.次に、精密研磨用微粉から なる人造砥石を用いた研磨実験では、先の前処理に続い て各種砥石で 500 回研磨したものを評価対象試料とした. さらに,刀剣研磨用砥石については,同一工程の砥石の 中から, bs-03, bn, ug-01, jz-01の4種の天然砥石を選 択し,砥石そのものを#1000 のダイヤモンド砥石で 500 回研磨して表面を平坦化し、それを用いて前処理済みの 和釘に対して各 500 回ずつの研磨を工程順に行ったもの を評価対象試料とした.

#### 3.2 評価方法および測定条件

各種砥石の物性評価と和釘に対する研磨実験後の表面 性状の測定を行った.まず,表面状態については,白色 干渉顕微鏡を用いて測定倍率×20倍で観察した.なお, 観察前には表面付着物を除去する目的でエタノールによ る超音波洗浄を行った.次に刀剣研磨用砥石の組成なら びに結晶構造を検討するため,セラミクス製乳鉢を用い て砥石を微粉化し,X線回折法による結晶構造解析を行 った.また,砥石の任意の場所を約5×5mm<sup>2</sup>角のペレッ ト状に砕き,エネルギー分散型X線分析装置を用いて含 有元素の検出と定量分析を行った.さらに,砥石の断面 形態と空隙率の差異を検討するため,走査型電子顕微鏡 を用いて断面観察を行った.ここで,空隙率の評価方法 には OpenCV を用いて先に観察した断面 SEM 像を二値 化し,黒で表現されたピクセルを空隙と見なして全ピク セルに対する割合を導出して空隙率とした.なお,詳細 な評価項目と測定条件を Table 3 にまとめて示す.

### 結果および考察

#### 4.1 刀剣研磨用砥石

#### 4.1.1 外観と特徴

先に述べたように、刀剣研磨では人造砥石を用いるこ ともあるが、多くは鉱山より採掘される天然砥石が用い られる.天然砥石は自然界において長期間かけて結晶化 した鉱物であり、含有イオン種や元素の濃度と分布、不 純物の分散などは人工物と比較して一般的にばらつきが 大きいと考えられる.かつては京都府をはじめ国内各地 で産出された天然砥石ではあるが、近年は安価で大量生 産が可能で、かつ均質な人造砥石が普及したことで、鉱 山は閉山が相次いで安定的に天然砥石を得ることが難し い状況にある.

Fig.1 は本実験で用いる4種類10 試料の刀剣研磨用砥石の外観写真を一覧にしたものであり、各試料の特徴である組成物由来の色調や紋様について比較すべく撮影したものであり、拡大倍率は資料毎に異なる. 試料のうち bs-01とbs-02 は平滑な表面で、組成物由来の着色コントラストが揃っており、岩石中の紋様も認められず、人造物ならではの均質な外観を呈していることがわかる.一



Fig. 1 Appearance images of the whetstone for Japanese sword.

Evaluation	Apparatus, Model	Measurement conditions
Surface morphology	White light interferometry	Magnification; ×20
	Nikon; BW-S507	Scan area X×Y; 561.530×561.518 [μm]
		Z range; ±20 [μm]
		Scann step; 20 [nm]
Crystal structure	X-ray diffraction	X-ray; Cu-Kα
	Bruker; D8-DISCOVER	Voltage-Current; 40 [kV]- 40 [mA]
		Scan step; 0.02 [deg]
		Scan speed; 0.03 [deg/s]
Composition	Energy dispersive X-ray analysis	Accelaration voltage; 15 [kV]
	JEOL; NeoScope JCM-6000PLUS	Magnification; $\times 100$ ~600
Cross section	Scanning erectro microscope	Accelaration voltage; 10~15 [kV]
	JEOL; NeoScope JCM-6000PLUS	Magnification; $\times 100 \sim 600$

Table 3 Analysis apparatus and measurement conditions.

方,備水のbs-03と黒名倉のbn,および内曇のug-01から地艶のjz-02までの7つが天然砥石である.外観に関する特徴を列挙すると,ug-01には赤色の斑点,ug-02には茶色が混ざった模様があり,ug-03はわずかに白い粒子が見られ,さらにjz-01は全体的に灰色の模様に薄茶色の斑点,jz-02は薄オレンジ色の母相に茶色の模様が確認できる.このように目視的にも均質ではなく,随所に色調の異なる粒子や模様が観察でき,これらは天然産出物がゆえの構造的特徴が顕著に表れていることが確認できた.

#### 4.1.2 X 線回折プロファイル

準備した 10 試料に対して組成および結晶構造の検討 を行った. Fig. 2 は線源に Cu-Ka線を用いて X線回折測 定を行なった結果を示したものであり,縦軸は相対強度 *III*0を使用して全ての回折線を規格化してある. 図中の回 折線は下段より bs-01 から jz-02 まで Table 2 の記載に準 じて整理した. なお,ピーク位置の同定とフィッティン グには Materials Data の JADE を使用し,化合物の定性は ICDD の PDF データベースと照合して行なった.ここで, 類似のプロファイルを示した測定結果を分別して着色し たところ,赤,緑,そして水色の3つに区分できること がわかった.水色で示した7種の試料は,先の外観観察 で述べた天然鉱物による砥石試料と符合しており,同一 の組成構成であると伺える.その他の3種の人造砥石は, 赤と緑で示した2種類に分別できた.そこで,3色にグ ループ分けした回折線について順次簡単に考察を行なう.



Fig. 2 X-ray diffraction profiles from the various whetstone for Japanese sword.

まず赤で示した試料 bs-01 からの回折線については, 強度最大の 1st peak から強度順に 35.64°, 60.00°, 38.12° の強い回折線が観測され、これをもとに PDF#29-1127 と 照合した結果,化合物は SiC で結晶構造は六方晶であり, それぞれ (004), (110)ならびに(102)面とよい一致を示し た. また, その他の回折線についても面間隔に大きなず れはない.ただし,最大強度を示す回折線に着目すると, 既知データでは 34.76°の(101) 面であるのに対し,実験 では35.64°の(004)面からの回折線が優勢であることか ら,配向性に変化が認められた. さらに,低角度側に見 られる 21.8°と 26.6°の比較的強度の強い回折線は六方晶 SiC のデータとはマッチングできず、今後詳細な検討を 必要とするが、SiC に加えて他の化合物と混合物を形成 している可能性があると考えられる.いずれにしても、 試料 bs-01 の人造砥石は、研磨剤の母材が六方晶 SiC で 構成されていると推定できる.

次に,緑で示した試料 bs-02 と kn からの回折線も同様 に 1st peak から強度順に 3 本の回折線を選んでフィッテ ィングしたところ, PDF#10-0173 と非常に良い一致が見 られた. ピーク位置 43.3°は (113) 面, 35.5°は (104) 面 そして 25.5°は (012) 面からの回折線であり,その他の ピークと強度に対しても既知データと合致しており,配 向性の変化も認められず,この2つの試料は主たる研磨 剤が Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> から構成されている人造砥石であることが明 らかとなった.

さらに、水色で示した天然砥石に対する測定結果と既 知データ(PDF#46-1045)とを照合したところ、面間隔な らびに強度ともにほぼ完全一致しており、六方晶構造を した化合物 SiO2の石英であることがわかった.ここで同 じ石英でありながらも、先の外観観察の結果では色調に それぞれ変化が見られるが、これは母相である石英に含 まれる不純物イオン種とその濃度に起因するものである と推察できる.

#### 4.1.3 組成構成

先に述べた X 線回折の結果より,7種類の天然砥石の 母相は全て石英であることが明らかとなった.そこで, 同じ石英でも研磨時の感触が異なる内曇砥石の ug-01, ug-02 および ug-03 の3種類に着目し,母相以外の含有 元素を検出するため,EPMAを用いて元素分析を行なっ た.Fig.3 は3種の内曇砥石から検出された主な元素と その含有量を図に表したものである.母相を構成する O と Si 以外に,含有量が多いものから順に C,Al,Kそし て Mg が検出された.ここで,約21 at%の Si と結合して いる O<sub>2</sub> 以外は,Al と結合した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>や,Mg と結合して Mg(OH)<sub>2</sub>を形成していると考えられ,残りの約5 at%は O<sub>2</sub> の状態で母岩中に存在していると思われる.

ここで、C 量に有意な差異が認められたことが特徴的 であり、それ以外の K や Mg などの微量元素には大きな 違いはない. すなわち、ug-03 は ug-02 の約 2.6 倍の C 量 であり、ug-01 は両者の中間程度であるとの定量結果を 得た. このことと、Table 2 に示した研磨時の研ぎ師の手



Fig. 3 Compositions and concentrations of whetstone used in Uchigumori process.

の感触とを総合的に検討すると、母岩中の C 含有量が 13 at%を境に増加すると硬い感触となり、逆に C 量が減少 すると柔らかく感じることと対応させることができる. ここで、研磨時の感触を決定する要因にはこの他にも粒 子の形態、砥石の表面粗さや含水量など、複数の原因が 複雑に関係していると考えられるが、本実験の範囲にお いて天然内曇砥石中に含まれる C 量が寄与しているもの と考えられる.

#### 4.1.4 断面形態ならびに空隙率

下地研ぎの初期段階で使用される,比較的目の粗い備 水砥石を用いてその断面形態を観察し,そこから砥粒の 充填状態を検討した.観察対象として選択したのは人造 砥石の bs-01 と天然砥石の bs-03 で,先の分析結果から 双方ともに構造は六方晶で,組成はそれぞれ bs-01 は SiC で bs-03 は SiO<sub>2</sub>(石英)である.また,精密研磨用微粉 を研磨剤に用いた#240の人造砥石も,比較対象として評 価に加えた.Fig.4 は各試料の破断面を SEM を用いて観



Fig. 4 Cross-sectional SEM images and binarized images of the whetstone sample of bs-01, bs-03, and #240.

察したものであり、それぞれ観察時の1視野を左右に2 分割し、左部分は SEM 像を、右側半分を OpenCV を用 いて二値化処理した画像にして示した.なお、二値化に 必要な閾値を 40 に設定し、二値化処理後の黒ピクセル を空隙と見なして全画素数に対する割合を算出したもの を空隙率とした.

まず,人造試料の bs-01 と天然試料の bs-03 を倍率×500 で観察した結果からは,bs-01 の破断面は不揃いな形状の 粒子がランダムに凝集して凹凸が激しい形態となってお り,他方 bs-03 の破断面は緻密で細かく揃った微粒子で 形成され,劈開時に発生したと思われる流れの筋模様が 観察できる.また,それぞれの空隙率は,bs-01 は 3.53 % で,bs-03 にはほとんど空隙はなく 1.20×10<sup>-3</sup> %であり, 約 3000 倍の高充填率を示すことがわかった.これは,天 然砥石は堆積物からなる岩石を採掘し,鑿や鏨を用いて 適切な大きさに切り出すのに対し,人造砥石は人工の研 磨剤砥粒と結合材を固化する製造法の違いに起因するも のと考えられる.

次に,工業用途の#240の精密研磨用砥石を比較対象と して同手法で観察したが,先の試料にも増して凹凸が顕 著で,倍率を×100 に設定して観察せざるを得なかった. これに対しても二値化処理をしたところ,黒ピクセルの 分散が bs-01 よりもさらに面内全体に点在していること がわかった.なお,空隙率は約7.21%と算出でき,刀剣 研磨用の bs-01 よりもさらに疎な構造となっていること が確認できた.

#### 4.2 和釘に対する研磨加工と表面性状

ここまでの実験で明らかになった特徴を有する砥石を 用いて,具体的に和釘に対して研磨加工を施し,白色顕 微鏡にて表面性状パラメータを求め,研磨特性に与える



Fig. 5 Relations of the arithmetic mean roughness between Wakugi and whetstone as a function of various kinds of stone type.



Fig. 6 Relations of the root mean square roughness between Wakugi and whetstone as a function of various kinds of stone type.

砥石の表面粗さの影響について検討する. Fig. 5 および Fig. 6 は, いずれも横軸に砥石の表面粗さをとり, 縦軸に は研磨加工後の和釘の表面粗さをとってプロットしたも のであり, 図中の記号oは精密研磨用微粉砥石での値を,  $\bullet$ は刀剣研磨用砥石(試料 bs-03, bn, ug-01 および jz-01) を使用した実験の結果を示す. なお, Fig. 5 は算術平均粗 さ Sa で, Fig. 6 は二乗平均平方根粗さ Sq で評価したも のであり, 双方ともに類似の結果である.

精密研磨用微粉からなる人造砥石そのものの表面粗さ Sa および Sq は, #240 では 16.3 ならびに 19.9μm であり, そこから番手数の上昇に伴ってそれぞれの値は小さくな る. すなわち平坦化の傾向がある.図から, οで示した精 密研磨用微粉砥石の場合には砥石の表面粗さが増すとと もに和釘表面の表面粗さも増加していく正の相関が見ら れる.砥石は表面を被研磨材に擦りつけることで加工を 行うため,砥石と和釘の表面性状に正の相関が見られる ことは比較的容易に納得できる.

一方,刀剣研磨用砥石での場合には,砥石の表面粗さ とは逆にわずかな負の相関性が見られ,SaやSqの指標 のみでは説明が難しい.天然砥石での研磨時には研汁の 発生が多く,これが砥石と和釘の間に混入することで研 磨に影響を及ぼしていることと,研磨中に砥石が削れて 微粉化し,砥石の表面状態が常に変化していることが予 想される.以上の結果から,特に天然砥石については表 面性状のみで研磨特性を評価することは困難であり,砥 粒の粒径や硬度とともに剥離状態なども検討しなければ ならないと考えられる.

#### 5. 結言

鍛刀と研磨は共に日本刀製作過程において最も重要な 技術である.中でも,刃部の刃文や地鉄の構造表現など, 美術工芸品としての魅力を最大限に引き出したり,保存 状態の思わしくない刀剣を蘇らせたりする研磨加工は, 刀剣本来の文化的価値を付与する工程である.そこで本 研究では研磨に用いられる各種砥石の構造と組成などを 定量的に評価して特性を明らかにし,さらに砥石の性状 の差異が被研磨材料である和鋼の表面に与える影響につ いて考察することを目的として,形態観察,表面性状測 定,微細構造評価および断面観察など各種の実験を通し て以下の知見を得た.

刀剣研磨用砥石の中でも天然砥石は,目視的にも均質 ではなく,随所に色調の異なる粒子や模様が分散分布し ており,天然産出物ゆえの構造的特徴が顕著であった. またその結晶構造は六方晶で,組成はSiO<sub>2</sub>を母相とする 石英で構成されており,わずかにCや,Al,K,Mgなど の不純物イオンが含まれていた.またそれらの不純物は 母岩中にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やMg(OH)<sub>2</sub>などの化合物を形成して安定 的に存在していると考えられる.研磨作業中において砥 石と金属表面との間で生じる相互作用に起因する手応え は,石英中に含まれるCの濃度が13 at%を閾値として増 加すると硬い感触となり,減少すると柔らかく感じるこ とがわかった.一方,人造砥石は研磨剤にSiCやAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が用いられ,比較的空隙率の高い構造をしており,堆積 物からなる天然砥石とは明らかに異なる特徴を有するこ とがわかった.

このような特徴を有する刀剣研磨用砥石や工業用途で ある精密研磨用微粉砥石を用いて、和釘に研磨加工を施 して表面性状パラメータを求め、表面粗さに与える砥石 の性状の影響について検討した.その結果、算術平均粗 さと二乗平均平方根粗さによる指標を使って評価したと ころ、精密研磨用微粉砥石の場合には砥石の表面粗さの 増加と共に和釘表面の表面粗さも増加していく正の相関 が見られ、一方、刀剣研磨用砥石での場合にはわずかな 負の相関性が見られた.今後は、砥粒の粒径や硬度とと もに加工中の剥離状態などを計測し、相関性に与える影 響を明らかにしたい.

#### 謝辞

本研究を推進するにあたり, 微細構造評価を本学キャ ンパスサポートオフィス(技術共同管理室)の高度物性評 価施設および本学イメージング研究センターにて行った. 各種測定において熱心にご指導いただいた森川真紀技師 補をはじめ関係各位に御礼申し上げます.また,工学部 精密工学科の内田ヘルムート貴大准教授からは有益なご 助言をいただき,心から感謝致します.

#### 参考文献

- 清永欣吾: たたら製鉄とその金属学, まてりあ, Vol. 33, No.12, pp.1453-1458 (1994).
- 井上達雄:日本刀-その材料,鍛錬および焼入れのシ ミュレーション,まてりあ、Vol.35, No.2, pp.174-178 (1996).
- 3) 臺丸谷政志:日本刀の科学,SB クリエイティブ

(2016).

- 佐々木直彦,桃野正:伝統的鍛錬工程における日本 刀材料の炭素量変化,鉄と鋼, Vol.93, No.12, pp.792-798 (2007).
- 5) 井上達雄:日本刀-その美,外国刀との比較と焼入れ の変態・熱・力学シミュレーション,まてりあ, Vol.47, No.7, pp.359-363 (2008).
- 6) 井上達夫:日本刀に息づく科学と技術,材料, Vol.66, No.11, pp.804-810 (2017).
- 7) 公益財団法人日本美術刀剣保存協会: "刀剣博物館, 日本刀を知る".
   https://www.touken.or.jp/museum/sword/attraction.html, (参照 2021-07-13).
- 8) 俵國一:刀の研き面の模様と鍜錬組織,鐵と鋼, Vol.7, No.3, pp.201-204 (1921).

- 9) 俵國一:日本刀の研磨法に就き,鐵と鋼, Vol.6, No.2, pp.171-189 (1920).
- 10) 岡田昭次郎: 研削砥石, 精密機械, Vol.49, No.7, pp. 938-940 (1983).
- 11) 岩崎重義: 刃物, まてりあ, Vol.34, No.8, pp.995-1001 (1995).
- 12) 銃砲刀剣類登録規則(昭和三十三年文化財保護委員 会規則第一号).
- 13) 神奈川県. "銃砲刀剣類登録審査会・各種手続のお知らせ".

https://www.pref.kanagawa.jp/docs/ar3/cnt/f6660/index. html, (参照 2022-03-17).

 14) 古主泰子:備中国分寺和釘の酸化皮膜の調査,鉄と 鋼, Vol.91, No.1, pp.91-96 (2005).

# 3YSZ/8YSZ 複合体のビッカース硬さおよび電気伝導率 <sub>吉永</sub>昌史<sup>\*1</sup>加藤 寛<sup>\*2</sup>藤本 優志<sup>\*2</sup> Vickers Hardness and Electrical Conductivity of 3YSZ/8YSZ Composite

by

Masashi YOSHINAGA<sup>\*1</sup>, Hiroshi KATOH<sup>\*2</sup> and Yuji FUJIMOTO<sup>\*2</sup> (Received on Sep. 30, 2021 and accepted on Jul. 7, 2022)

#### Abstract

The Vickers hardness and electrical conductivity of the 3YSZ/8YSZ composite system prepared by the conventional solid-state reaction were evaluated. Relative densities of more than 88% were obtained. The crystal structures of the composites were indexed as cubic and tetragonal phases investigated by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. Scanning electron microscopy revealed particle sizes, which increased with the increase of 3YSZ content. Vickers hardness of 75 mass% 3YSZ - 25 mass% 8YSZ was high in comparison with those of other specimens, which were approximately correlated with relative density. The 50 mass% 3YSZ - 50 mass% 8YSZ specimen showed high electrical conductivity and low activation energy at 600 and 700°C.

Keywords: Yttria-stabilized-zirconia, 3YSZ/8YSZ, Composite, Vickers hardness, Electrical conductivity

### 1. 緒論

#### 1.1 YSZ の電解質, アノード材料としての可能性

イットリア安定化ジルコニア (YSZ) は,800~1000°C で高い酸化物イオン導電性を示すため,固体酸化物形燃料電池 (SOFC) やジルコニア酸素センサーのアノード材料や電解質として有望である.空気中 900°C での YSZ の電気伝導率σは logσでおよそ-1 であり,ドープされた CeO<sub>2</sub> (セリア)系および LaGaO<sub>3</sub> (ガレートランタン-ガ レート)系酸化物の電気伝導率よりも約一桁低い値を示 す<sup>1-3)</sup>.電気伝導率が低いにもかかわらず,YSZ が電解 質やアノード材料として使用される理由は,その化学的 安定性と高温での高い機械的強度が要因である.YSZの 室温での硬度はガレートランタンの約 1.5 倍である<sup>4.5)</sup>. YSZ を電解質支持 SOFC や薄膜電解質 SOFC に使用する 場合,機械的強度と導電性の両立性が重要である.

#### 1.2 YSZの機械強度と電気伝導率

電解質の機械的強度を向上させることができれば、電 解質を薄くすることができる.薄膜化できれば、電解質 の電気抵抗が低下するため、発電時電解質でのエネルギ ー損失を低減できる. YSZ は、約 0mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-100mol% ZrO<sub>2</sub> ~ 6mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-94mol% ZrO<sub>2</sub> の Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (イットリア) 濃度範囲で高い機械的強度を示す.しかしながら、本範 囲の YSZ の電気伝導率は高濃度範囲の YSZ のそれより も低い事が判明している. 高濃度範囲の 8mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-100mol% ZrO<sub>2</sub> ~ 10mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-94mol% ZrO<sub>2</sub> の YSZ は低濃度と比較して、低い機械的強度と高い電気伝 導率を有する. YSZ の単一組成物を電解質材料として使 用する場合,機械的強度と電気伝導率はトレードオフの 関係にあるため,両方の値が高い材料を選択することは できない.

#### 1.3 複合化による機械強度と電気伝導率の両立性

本研究では、機械的強度と導電性の両方を実現するために、機械的強度の高い 3YSZ と導電性の高い 8YSZ を 複合体化した.  $Y_2O_3$ の 35mass%の下での 3YSZ / 8YSZ 複合材料の電気的および機械的特性は、Ghatee らによっ て報告された<sup>5)</sup>. 彼らは、35mass%の 3YSZ の複合材料 が高い導電性と高い機械的強度を示したことを報告した. YSZ 電解質ディスクを焼成する場合 1400℃で焼成する 事が一般的である<sup>6-8)</sup>. これは 1350℃ではイオンの拡散 速度が遅く、粒成長も十分でないためである. 3YSZ 濃 度の高い比率での特性も研究されていない. 複合化によ る特性向上の機構の詳細も不明である.

#### 1.4 研究の目的

この研究では、3YSZ / 8YSZ 複合材料の結晶構造と微 細構造を、X 線回折 (XRD)、ラマン分光法、および二 次走査型電子顕微鏡 (SEM) によって調査しました. *x* = 0 ~ 100mass%までの*x* mass% 3YSZ / (1-*x*) mass% 8YSZ 複合材料を準備して、ビッカース硬さと空気中の電気伝 導率の相関関係を明らかにした.

### 2. 実験方法

### 2.1 実験手順

複合試験片は、3YSZ(東ソー社製 TZ-3YE)と 8YSZ (東ソー社製 TZ-8YS)の2種類の粉末で製作した.Table 1に示すように、複合試験片の重量混合比率は次の;

<sup>\*1</sup> 工学部機械システム工学科講師

<sup>\*2</sup> 工学部動力機械工学科学部生

Table 1 Sample name, composition, density, and relative density.

Name	Composition	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Relative density (%)
Z0100	100% 8YSZ	5.341	91
Z1090	10wt% 3YSZ-90wt% 8YSZ	5.176	97
Z2575	25wt% 3YSZ-75wt% 8YSZ	5.239	88
Z3565	35wt% 3YSZ-65wt% 8YSZ	5.747	95
Z5050	50wt% 3YSZ-50wt% 8YSZ	5.811	97
Z6535	65wt% 3YSZ-35wt% 8YSZ	5.807	96
Z7525	75wt% 3YSZ-25wt% 8YSZ	5.449	90
Z9010	90wt% 3YSZ-10wt% 8YSZ	5.735	94
Z1000	100% 3YSZ	5.829	96



Fig. 1 XRD patterns of 3YSZ/8YSZ composites after sintering at 1400 °C for 5 h.

3YSZ: 8YSZ = 0:100, 10:90, 25:75, 35:65, 50: 50, 65:35, 75:25, 90:10, 100:0 の比率について試 料を準備した. 例えば 75 mass% 3YSZ - 25 mass% 8YSZ の呼び名は "Z7525" と表現する. 所定比で秤量された 粉黛を瑪瑙乳鉢で1時間混合および粉砕され, 40MPa の 圧力下で一軸プレスによってペレット形状にプレスされ た. ペレットを 1400°C, 5 時間空気中で焼結した. 得 られたディスクは,エメリ研磨紙およびバフと懸濁液(ア ルミナ 0.03  $\mu$ m) による研磨により, 鏡面に仕上げた. ディスクの相対密度は 88%以上であり, これは 6.10 g / cm<sup>3</sup> の 3YSZ と 5.90 g / cm<sup>3</sup> の 8YSZ の理論密度から計算 された.

### 2.2 キャラクタリゼーション

複合ディスクの結晶構造を調査するために、CuKa 放 射線を使用してMac ScienceMXP3回折計によりX線回折 パターンを測定した. X-Ray Differection (XRD)測定は、 40 kV~40 mA で、10~90°の20範囲で、0.05°のステッ プ幅で2秒間の露光時間で実行した.

焼結後の複合ディスク表面の原子の結合状態を調査す るため、ラマン分光分析(Raman spectroscopy; HORIBA, XploRa)を、励起波長 532 nm、スペクトル範囲 100~ 1700cm<sup>-1</sup>の大気圧、空気中、室温で実行しました.分析 は、30 秒の各曝露時間に対して同じ場所で 10 回実行さ れた.

研磨前に焼結されたディスクの表面を走査型電子顕微 鏡(SEM; HITACHI, S-4800)によって観察した. 複合試 験片のビッカース硬さは、明石製作所製 AKASHIAVK-A ビッカース硬さ試験機によって、15 秒間、負荷 9.8N で 評価した. 得られたくぼみの対角線の長さからビッカー ス硬度を算出した.

電気伝導率は、大気圧、空気中で従来の直流四端子法に よって測定した.4本のプラチナワイヤーをプラチナペ ーストで研磨したディスクに固定し、1200℃で2時間, 空気中で焼成した.測定は100℃ごとに600~900℃で行 った.

## 3. 実験結果

#### 3.1 複合体の結晶構造

空気中 1400°C で 5 時間焼結した未研磨の複合試験片 表面の XRD パターンを Fig. 1 に示した. 横軸に 20, 縦 軸に X 線強度(任意)を示す. 正方晶相(JCPDF カード #00-078-1808)が Z1000 から観察された. 8YSZ の量が 増えると, Z7525 から Z0100 まで立方晶相(JCPDF カ



Fig. 2 XRD patterns of 3YSZ/8YSZ composites after sintering at 1400 °C for 5 h at 20 of around 74°.

ード#00-082-1246)が観察され,正方晶相が消失した. Fig. 2 に,Fig. 1 の 20 = 74°付近の XRD パターンを拡 大表示する. Z1000 の XRD パターンでは,正方晶相と して指数付けされた 2 つのピークが 73.2°と 74.6°付近に 観察された (JCPDF カード#00-078-1808). 3YSZ が 35mass%以下の試験片 (Z7525 ~ Z0100)では XRD パ ターンは,立方晶相 (JCPDF カード#00-082-1246)で指 数付け可能であった. Z7525 ~ Z5050では,立方晶と 正方晶の両方の相が観察された.

#### 3.2 複合体の格子の変化

Fig. 3 は,約 74°の X 線のピークによって計算された 3YSZ / 8YSZ 複合材料の立方 8YSZ の格子定数 a を示し ている.純粋な 8YSZ,つまり 100 mass% 8YSZ の場合, 格子 a は 0.51262 nm と計算された.これは JCPDF カー ド#00-082-1246 と良く一致した. a の長さは,8YSZ の 量を 25 から 75mass%に増加させるに伴って増加した. 75~100 mass%の 8YSZ 量では,a は変化なく一定の値を 示した.4 価の 8 配位 Zr のイオン半径は 3 価の 8 配位 Y のイオン半径の約 80%である.格子の伸びは 8YSZ の 置換量が増大したためである.1400 °C 焼成時に熱拡散 により,イットリウム濃度の高い 8YSZ から濃度の低い 3YSZ ヘイットリウムが拡散した可能性が考えられる. 例えば Z7525, Z6535, Z5050 中の 8YSZ からイットリウム が抜けて,3YSZ へ拡散しているのではないかと考えた.

Fig. 4 は, 74°付近の XRD ピークによって計算された 複合材料の正方晶 3YSZ の格子定数 *a* および*c* を示した. 純粋な 3YSZ の場合, *a* および*c* は 0.35939 および 0.51634 nm と計算され, JCPDF カード#00-078-1808 と良く一致 した. 8YSZ の添加により, Z9010 では *a* と*c* が約 0.0005 nm 増加した. 複合材料の場合, 8YSZ の含有量が増える につれて, *a* と*c* は減少した. 立方晶の格子の挙動と合 わせて考えると, イットリウムが 8YSZ から 3YSZ に拡 散していることが示唆された.

#### 3.3 複合試験片のラマンスペクトル

焼結後の複合試験片のラマンスペクトルを Fig. 5 に示 す. Z0100 の 618 cm<sup>-1</sup>に現れるピークは,立方晶 YSZ 相





composites calculated by the XRD peak at around 74°.



Fig. 4 Lattice constant *a* and *c* of tetragonal 3YSZ in the 3YSZ/8YSZ composites calculated by the XRD peak at around 74°.



Fig. 5 Raman Spectra for 3YSZ/8YSZ composites after sintering.

における Zr-O の結合状態のピークに対応します<sup>9</sup>.

Z5050 のスペクトルは,立方晶および正方晶のピーク が観測された<sup>9)</sup>. 純粋な 3YSZ, Z1000 の場合,正方晶の ピークのみが観察さた. ラマン分析は XRD 測定の結果 と概ね一致した. ラマン分光法により, Z9010 から Z1090 までの 2 つの相がはっきりと観察された.

Fig. 6 に示すように、ラマンスペクトルの主なピーク 位置を各 8YSZ 含有量についてプロットした. ピーク位 置の波数は、8YSZ 含有量の増加とともに減少した. こ れはカチオンと酸化物イオンの結合状態が強化されてい る事を示唆している. イットリウムと酸素の電気陰性度 の差は、ジルコニウムの差よりも大きい. 複合試験片中 のイットリウムの量が増えると、陽イオンと酸素の間の 平均結合状態が強くなる. 8YSZ の添加により、カチオ ンと酸化物イオンの結合状態が強化されていると考えら



Fig. 6 SEM images of composite electrolytes after sintering on (a) Z1090 and (b) Z5050 surfaces.



Fig. 7 Vickers hardnesses and relative density of 3YSZ/8YSZ composites.

れる. Z1000 ~ Z5050 の場合,メインピークは正方晶由 来で,Z3565~Z0100 の場合,メインピークは立方晶由来 であると考えられる. Z3565 前後で勾配に変化がある. これは複合体のドメイン結晶構造の変化を示している.

### 3.4 複合試験片表面の SEM 観察

Fig. 6 に未研磨の 3YSZ / 8YSZ 複合体の表面の SEM 画 像を示す. Fig. 6(a)に示すように, Z1090 の一次粒子サイ ズの平均は約 0.30 µm であった. 粒子サイズの均一性が 観察された. Fig. 6(b)から, Z5050 の一次粒子サイズの平 均は約 0.75 µm であり, Z1090 よりも大きく, 粒子サイ ズのばらつきが大きかった. 3YSZ と 8YSZ は互いに焼結



Fig. 8 Electrical conductivity of the composite electrolytes.

助剤として作用している事が示唆された.

### 3.5 複合試験片のビッカース硬さ

Fig. 7 に 3YSZ / 8YSZ 複合材料のビッカース硬さと相 対密度を示す. Z5050, Z6535, および Z7525 は,他の 試験片よりも高いビッカース硬さを示した. Z7525 は最 高のビッカース硬さ 1429 を示した.複合化により,母材 である 3YSZ および 8YSZ を超える硬さが得られた.こ れは複合化による微細構造と結晶構造の変化によるもの と考えられる.

#### 3.6 複合試験片の電気伝導率

Fig. 8 に複合電解質の電気伝導率を示す. 900 および 800°C で, Z0100 は高い電気伝導率を示した. 対照的に, 600°C では低い電気伝導率を示した. これは報告値と一致した <sup>5)</sup>. 3YSZ を 0mass%から 50mass%へ増やすと (Z0100 ~ Z5050), 電気伝導率は増加した. 3YSZ 量が 50mass%より多い領域(Z5050 ~ Z1000)では, 電気伝導率 が低下した. Fig. 9 に Fig. 8 の傾きから活性化エネルギー を示す.



Fig. 9 Activation energy for the composite electrolytes estimated by the slope of the line of the electrical conductivity.



Fig. 10 Relationship of the electrical conductivity and Vickers hardness.

Z5050の電気伝導率は700および600℃で最高であり, 活性化エネルギーは0.84 eV であった. Z5050は,600お よび700℃で最低の活性化エネルギーと最高の電気伝導 率を示したが,800および900℃での電気伝導率は純粋 な8YSZよりも低かった.Fig.10に電気伝導率とビッカ ース硬さの関係を示した.電気伝導率と硬さは8YSZ量 でプロットすると,概ね似た形状であった.両者には相 関関係があると考えられる.Z7525は焼結密度が低く, 電気伝導率も低かったが,硬さは低下しなかった。これ は,微細構造の影響と思われる.詳細を知るには更なる 実験が必要である.3YSZと8YSZは相互に焼結剤として 作用し,Fig.6に示すように粒子サイズが大きくなった と考えられる.これにより,Z5050の粒界抵抗が減少し た.抵抗率の低下により,良好な導電性と低い活性化エ ネルギーがもたらされると考えた.

#### 4. 結論

3YSZ / 8YSZ 複合体のビッカース硬度と電気伝導率を 明らかにした. Z5050, Z6535, および Z7525 は, 1400 を超える高いビッカース硬度を示した. これは, 複合材 料中の 3YSZ および 8YSZ の結晶構造およびその良好な 焼結性によるものと考えられる. 600 および 700°C で, Z5050 の高い電気伝導率が示された. これは焼結性の向 上によってもたらされる小さな界面抵抗と 8YSZ の 3 次 元ネットワークによってもたらされたと考えられる.

## 参考文献

- V. V. Kharton, F. M. B. Marques and A. Atokinson: Transport properties of solid oxide electrolyte ceramics: a brief review, *Solid State Ionics*, Vol.174, pp.135-149 (2004).
- T. Ishihara, H. Matsuda and Y. Takita: Doped LaGaO<sub>3</sub> Perovskite Type Oxide as a New Oxide Ionic Conductor, J. Am. Chem. Soc., Vol.116, pp.3801-3803 (1994).
- K. Huang, M. Feng and J. B. Goodenough: Sol-Gel Synthesis of a New Oxide-Ion Conductor Sr- and Mg-Doped LaGaO<sub>3</sub> Perovskite, J. Am. Chem. Soc., Vol.195, pp.6367-6372 (2010).
- M. Morales, J. J. Rao, J. Tartaj and M. Segarra: A review of doped lanthanum gallates as electrolytes for intermediate temperature solid oxides fuel cells: From materials processing to electrical and thermo-mechanical properties, *Int. J. European Ceram. Soc.*, Vol.36, pp.1-16 (2016).
- M. Ghatee, M. H. Shariat and J. T. S. Irvine: Investigation of electrical and mechanical properties of 3YSZ/8YSZ composite electrolytes, *Solid State Ionics*, Vol.180, pp.57-62 (2009).
- 6) D. Lee, J. -H. Han, Y. Chun, R. -H. Song and D. R. Shin: Preparation and characterization of strontium and magnesium doped lanthanum gallates as the electrolyte for IT-SOFC, J. Power Sources, Vol.166, pp.35–40 (2007).
- S. -G. Kim, S. P. Yoon, S. W. Nam, S. -H. Hyun and S. -A. Hong: Fabrication and characterization of a YSZ/YDC composite electrolyte by a sol-gel coating method, *J. Power Sources*, Vol.110, pp.222–228 (2002).
- S. Park, R. J. Gorte and J. M. Vohs: Applications of heterogeneous catalysis in the direct oxidation of hydrocarbons in a solid-oxide fuel cell, *Appl. Catal. A*, Vol.200, pp.55–61 (2000).
- T. Hirata, E. Asari and M. Kitajima: Infrared and Raman Spectroscopic Studies of ZrO<sub>2</sub> Polymorphs Doped with Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or CeO<sub>2</sub>, *J. Solid State Chem.*, Vol.110, pp.201-207 (1994).

# Ni/YSZ 複合体のマイクロ波合成および電気伝導率 <sub>吉永</sub> 昌史<sup>\*1</sup> 宮澤 理玖<sup>\*2</sup>

# Synthesis of NiO/YSZ Composites by Microwave Heating and Their Electrical Conductivity

by

Masashi YOSHINAGA<sup>\*1</sup> and Riku MIYAZAWA<sup>\*2</sup>

(Received on Sep. 30, 2021 and accepted on Jul. 7, 2022)

#### Abstract

NiO/YSZ composites were synthesized by the microwave assisted urea homogeneous precipitation method utilizing microwave absorption of core oxide materials of NiO and/or YSZ. The deposition behavior of YSZ on NiO particles was evaluated by SEM-EDX. A roughly homogeneous distribution of YSZ on NiO was observed. Crystal structures of the deposited YSZ and NiO core were evaluated by XRD measurement. The results of SEM-EDX and XRD clarified that the composites were successfully synthesized. The common logarithm of electrical conductivity for NiO core composite at 900°C was –0.60 Scm<sup>-1</sup>, which was higher than that of YSZ core composite (YCC).

Keywords: NiO/YSZ, Composite, Microwave heating, Urea homogenous precipitation

## 1. まえがき

#### 1.1 長期運転によるアノードの劣化

固体酸化物形燃料電池(SOFC)は、高効率で排気ガス がクリーンな発電システムである. [1] SOFC のアノード は、ガス、金属、酸化物の3つの相で構成されている. 主要な電気化学反応場として三相境界(TPB)は重要で ある. ゆえに TPB の長さが長いほど, アノードの性能 が向上する.アノードの性能は、その形態と化学組成に よって向上させることができる. Ni-YSZ は SOFC のア ノード材料として広く研究されてきた. 800°C を超える 高温で動作するアノードは, 化学的安定性のみならず, 低コストで優れた電極触媒特性が要求される. さらに, 長期間の使用には高い耐久性と信頼性が求められる. 800°C 以上の高温長期運転で、ニッケルはシンタリング により粗大化する、粗大化はアノード性能を低下させる 問題である.長期間のアノードの動作に対する安定性の ために、初期の微細構造が重要である. [2]アノードの構 成材料の複合化は、シンタリングによる粗大化を防ぐ事 が報告されている. [3-9]

#### 1.2 YSZ の機械強度と電気伝導率

均一沈殿法では,沈殿剤で水素イオン濃度を制御する ことで,沈殿を得ることができる.水酸化物や酸化物の 沈殿を獲得するために,尿素の加水分解による沈殿プロ セスが使用される. [10]尿素加水分解の化学反応は次の 通りである.

\*1 工学部動力機械工学科講師

 $(NH_2)_2CO + 3H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + HCO_3^- + OH^-$ 

この反応は水溶液温度が 80°C を超えると急速に進行 する.したがって、均一な加熱ができれば、温度を調整 しながら沈殿物の量を制御することが出来る.

#### 1.3 液相マイクロ波加熱法

近年,マイクロ波化学が大きな注目を集めている.[11] マイクロ波照射の大きな利点は、均一な加熱であり、従 来の加熱と比較して、より均一な核形成と短い結晶化時 間をもたらす.

Fig. 1 は, 0.2 gの NiO 或いは, YSZ 粉末を 200 mlの 蒸留水へ撹拌して 0 - 100 秒間のマイクロ波加熱曲線を 示している.マイクロ波の周波数は,水を加熱するため, 吸収率の高い 2. 45 GHz を採用した. K型熱電対で丸底 フラスコ内の温度を測定した.



Fig. 1 Microwave heating curve of distilled water with NiO and YSZ particles.

<sup>\*2</sup> 工学部動力機械工学科学部生

マイクロ波リアクターは Shikoku Instrumentation CO. LTD., SMW-060 を用いた. NiO 或いは YSZ のマイクロ波 吸収能力によって,粉末を撹拌した蒸留水は,蒸留水の みの場合よりも高い温度上昇曲線が観察された. このマ イクロ波吸収能力により,マイクロ波照射中,粉末周り の水の温度は,粉末から遠方の水より高くなるはずであ る. このような特徴を利用して,尿素均一沈殿法を実施 し,粒子の周囲に陽イオンを選択的に沈殿させることに より,NiO / YSZ 複合材料を合成することとした.

#### 1.4 研究の目的

本研究ではNiO/YSZ 複合材料は,尿素均一沈殿法の加熱プロセスで液相マイクロ波加熱によって合成された. NiOとYSZのマイクロ波吸収能力を利用して,NiOコアとYSZコアの複合材料を調製した.調整された複合体の結晶構造,および電気伝導率を明らかにした.

## 2. 実験方法

#### 2.1 複合体の合成方法

NiOを核とする複合材料の合成プロセスを Fig. 2 に示 す.最初に、NiO 粉末を尿素均一沈殿法で調製した.



Fig. 2 Synthesis process of the NiO powder and the composite of NiO core (NCC).



Fig. 3 Synthesis process of the YSZ powder and the composite of YSZ core (YCC).

溶液中のカチオン濃度は、蒸留水によって 0.2 mol/1に 制御された.尿素濃度は陽イオン濃度の 20 倍に調整した. 調製した NiO 粉末を硝酸ジルコニウム二水和物、硝酸イ ットリウム、尿素を溶解させた液体に加え、数分で攪拌 した. NiO と YSZ の比率は、動作雰囲気を想定して、 ニッケルと YSZ の体積比が 1:1になるように製作した. 2.45 GHz で 7 分間照射されたマイクロ波により、YSZ 前 駆体が NiO 粉末の表面に沈殿した.得られた複合体の前 駆体を蒸留水で洗浄し、空気中 100°C で 12 時間乾燥さ せた. NiO を核とする複合材料(以下 NCC)は、空気 中 1200°C, 2 時間で焼結することによって得られた. YSZ を核とする複合材料(以下 YCC)は、同じ方法で得 られた. NiO および YSZ 粉末の市販製品を混合および 焼結して、比較用の複合材料(以下, CPC)を準備した.

#### 2.2 キャラクタリゼーション

X線粉末回折パターン (XRD) は、複合体の結晶構造 を調査するために CuKa線を使用して Mac ScienceMXP3 回折計で取得された. XRD は、静的空気中で  $10~90^{\circ}$ の $2\theta$ 範囲にわたって 40 kV~40 mA で測定された.

複合材料の形態と元素分布は, HITACHI 製 S-4800, 走 査型電子顕微鏡 (SEM) によって観察された.

電気伝導率は、大気圧、空気中で従来の直流四端子法 によって測定した. ↓ 5 mm の丸棒状試験片を一軸金型成 形して 1400°C, 5 時間空気中で焼結した. 4 本の白金線 を白金ペーストで試験片に固定し、1200°C, 2 時間空気 中で焼成して固定した. 電気伝導率は、大気圧、空気中 で測定した.

#### 3. 実験結果

## 3.1 複合体の結晶構造

合成した NiOの XRD パターンを Fig. 4a に示した. NiO 粉末の XRD パターンは立方晶相 (JCPDF カード #00-078-0643) である事が判った.不明なピークは確認 されなかった. Fig. 4b に焼結後の NCC 試験片の XRD パ ターンを示す. 白丸で示す YSZ の立方晶相 (JCPDF カー ド#00-082-1243) ピークのみが観測された.



Fig. 4 XRD patterns of (a) NiO as prepared after sintering at  $800^{\circ}$ C for 5 h and (b) NiO core composite, NCC, after sintering at  $1200^{\circ}$ C for 2 h.



Fig. 5 XRD patterns of (a) YSZ as prepared after sintering at 1000 °C for 5 h and (b) YSZ core composite, YCC, after sintering at 1200 °C for 2 h.

合成した YSZ の XRD パターンを Fig. 5a に示す. 蛍石型 構造の立方晶相 (JCPDF カード#00-082-1243) 由来のピ ークのみが観察された. Fig. 5b に YCC の XRD パターン を示す. YSZ の立方晶相 (JCPDF カード#00-082-1243) で指数付けされた黒い菱形でインデックスされたピーク が観察された.

#### 3.2 複合体の格子の変化

典型的な NCC 粒子の SEM 画像を Fig. 6a に示す. NCC 粒子のサイズは数ミクロンから 10 μm の分布を持ってい る. Fig. 6b に典型的な YCC 粒子の SEM 画像を示す. YCC の粒子サイズは数ミクロンから 10 μm の分布を持っ ていた. NCC と YCC の両方の粒子サイズの分布は概ね 一致した.



Fig. 6 SEM images of (a) NiO core composite, NCC, and (b) YSZ core composite, YCC.

典型的な NCC 粒子の SEM 画像と Zr および Ni の元素分 布画像,およびその EDX ラインスキャン分析の結果を Fig. 7 に示す. NCC 粒子サイズは約 4  $\mu$ m であった. Zr は NiO 表面にほぼ均一に分布していたが,NCC は Ni が 部分的に検出された. EDX ラインスキャン分析により, NCC の表面に Zr と Y が観察された.得られた NCC は SEM および EDX 分析により NiO を核とし周りを YSZ で 構成されている事が判明した.NCC と YCC 複合粒子は 核を酸化物が包み込む構造である事が判った.

#### 3.3 複合体の電気伝導率

Fig.9にNCC,YCC,およびCPC(市販製品の複合材料) 複合材料の電気伝導率を示す.複合材料は,CPCと比較して高い導電率を示した.複合材料は NiOを含んでいるにもかかわらず,報告にあるYSZ電気伝導率とよく一致していた.[12] NCCの導電率はYCCの導電率よりも高い.これはNiOとYSZの配置に起因していると考えられる.本電気伝導率測定の場合,キャリアは酸化物イオンである.NiOは絶縁体セラミックであり,YSZは電気伝導率の複合材料でのみ機能した.YCCのYSZは,NCCのYSZと比較して,酸化物イオンの導電パスが細いと考えられる.



Fig. 7 SEM image of NCC and elemental distribution images for Zr and Ni, and its EDX line-scan analysis.



Fig. 8 SEM image of YCC and elemental distribution images for Zr and Ni, and its EDX line-scan analysis.

Table 1 Elemental molar ratios of Y, Zr, and Ni in the particles and bulks of the NCC and YCC by EDX analyses.

	Y (mol%)	Zr (mol%)	Ni (mol%)
NCC particle	3.1	27.5	69.4
YCC particle	1.0	9.4	89.6
NCC bulk	3.7	34.4	61.8
YCC bulk	1.7	15.4	82.9
As calculated	3.6	21.0	75.4



Fig. 9 (a) SEM image of cross-section of NCC bulk and (b) mapping of the positional distribution of element for Zr, (c) that for Ni, and (d) for O.



Fig. 10 (a) SEM image of cross-section of YCC bulk and (b) mapping of the positional distribution of element for Zr, (c) that for Ni, and (d) for O.

一方, CPC は絶縁体 NiO を含んでいるため導電率が低か った.これは他の報告と傾向が一致している.[9]良好な 導電性は, NiO と YSZ の複合化合物によってもたらされ る良好な形態によって引き起こされると考えられる.

### 3.4 複合試験片表面の SEM 観察

Fig. 9 に空気中, 1400°C, 5 時間焼結した NCC バル ク断面の SEM 画像と, Zr, Ni, および O の元素分布画 像を示す. Ni と Zr は異なる場所で検出された. Ni と Zr は概ね同じ面積で観測された. Zr および O の元素分布よ り,酸化物イオンの拡散経路は十分に維持されていると 推定される. 一方,YCC バルク断面の場合, Fig. 10 に示 すように, Zr 分布は偏りがあり,酸化物イオンの拡散経 路は十分に維持されていない様に推定された.

Table 1 は, EDX 分析による NCC および YCC 断面の Y, Zr, および Ni の元素モル比, Ni および, 仕込値である YSZ の体積比 1:1 からの計算値を示す. NCC では, Y と Zr のモル比が計算値よりも大きかったのに対し, Ni の比は計算値よりも小さかった. YCC では, NCC とは 異なり, Y と Zr の比率が小さく, Ni の比率が大きかっ た. これは, 複合材料のコアシェル構造が原因と考えら れる. NCC 断面 SEM 観察とは対照的に, YCC 断面は多 孔性であった. 酸化物イオンの拡散経路と多孔性は, 導 電率と関連していた. YSZ の良好なネットワークと高密 度を備えた NCC は, 高い導電性性能に到達する可能性 がある.

## 4. 結論

NiO コア複合材料 (NCC) と YSZ コア複合材料 (YCC) は、マイクロ波加熱を伴う尿素均一沈殿法によって首尾 よく合成された. NCC および YCC 複合材料の導電率が 明らかとなった. 複合材料の電気伝導率は CPC のそれよ りも優れていた. これは複合化による恩恵であると考え られる.NCCの導電率は YCC よりも優れた値であった. この高い導電率は, YSZ の良好な 3 次元ネットワークと その緻密性によって引き起こされたと考えられる.

### 参考文献

- N. Q. Minh: J. Am. Ceram. Soc., Vol.76, pp.563-588 (1993).
- A. Faes, A. Hessler-Wyser, D. Presvytes, C.G. Vayenas and J. Van herle: *Fuel Cells 09*, Vol.6, pp.841-851 (2009).
- K. Sato, G. Okamoto, M. Naito and H. Abe: J. Power Sources, Vol.193, pp.185-188 (2009).
- T. Fukui, S. Ohara, M. Naito and K. Nogi: *Power Technol.*, Vol.132, pp.52-56 (2003).
- R. Nishida, P. Puengjinda, H. Nishino, K. Kakinuma, M.E. Brito, M. Watanabe and H. Uchida: *RSC Adv.*, Vol.4, pp.16260-16266 (2014).
- T. Talebi, M. H. Sarrafi, M. Haji, B. Raissi and A. Maghsoudipur: *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.35, pp.9440-9447 (2010).
- H. S. Hong, U. S. Chae, S. T. Choo and K. S. Lee: J. Power Sources, Vol.149, pp.84-89 (2005).
- T. Hosomi, M. Matsuda and M. Miyake: J. Eur. Ceram. Soc., Vol.27, pp.173-178 (2007).
- S. D. Kim, H. Moon, S. H. Hyun, J. Moon, J. Kim and H. W. Lee: *Solid State Ionics*, Vol.177, pp.931-938 (2006).

-18 -

- T. Mitsumori, K. Yano, R. Fujihara, K. Sasaki and M. Yoshinaga: J. Ceram. Soc. Jpn., Vol.123, No.5, pp.359-362 (2015).
- 11) K.J. Rao, B. Vaidhyanathan, M. Ganguli and P. A.

Ramakrishnan: Chem. Mater., Vol.11, No.4, pp.882-895 (1999).

12) V. V. Kharton, F. M. B. Marques and A. Atokinson: *Solid State Ionics*, Vol.174, pp.135-149 (2004).

# 学生フォーミュラ用モノコック構造の FEM 解析による剛性評価 山本 哲也\*1 森山 裕幸\*2 加藤 英晃\*3 成田 正敬\*3

# Estimation of Rigidity of Monocoque Structure of Racing Cars for SAE Competition Based on FEM Analysis

by

Tetsuya YAMAMOTO<sup>\*1</sup>, Hiroyuki MORIYAMA<sup>\*2</sup>, Hideaki KATO<sup>\*3</sup> and Takayoshi NARITA<sup>\*3</sup> (Received on Mar. 31, 2022 and accepted on Jul. 7, 2022)

#### Abstract

This paper describes estimation of the rigidity of a monocoque structure, which forms the main body of the racing cars used for the Student Formula SAE Competition of Japan. The monocoque structure is constructed of sandwich panels in which a honeycomb core made of aluminum alloy is sandwiched between two CFRP panels. The rigidity of the body is considered numerically by analyzing the monocoque structure by FEM, whereas a micro model, which consists of the actual honeycomb core and the CFRP panels, cannot be used for the entire model due to the limited number of elements and nodes. Therefore, a macro model is assumed by applying the homogenization method to the micro model. Being greatly affected by the dimensions of the honeycomb cores. In this case, the honeycomb cores and CFRP panels have specific dimensions and materials, respectively. Then, by determining reasonable mechanical properties from the homogenization method, structural analysis by FEM is performed on the entire monocoque structure by applying those mechanical properties to the analysis. The results show that the maximum deformation is greatly affected by how the honeycomb cores are placed between the sandwich panels.

Keywords: SAE formula, Monocoque structure, Torsional rigidity, Honeycomb core, CFRP panel

## 1. 緒言

レーシングカーや高性能車,航空機,宇宙機ではハニ カム構造材を板材で挟んだ,通称ハニカムサンドイッチ 構造が多く用いられている.ハニカムサンドイッチ構造 は一般的な構造材と比較して高い比強度・比剛性を持つ. 学生フォーミュラ車両用モノコックでは,一般にアルミ ニウム合金製のハニカム構造材を CFRP 製パネルで挟ん だ構造を採用している.ここで用いられるハニカム構造 材は正六角形の構造を並べた構造体で,軽量かつ強度を 保つ構造材として様々な分野で注目されている<sup>1,2)</sup>.

現在の自動車業界では内燃機関車両や電気自動車等の 動力源を問わず,エネルギーの効率的な利用が追求され ている.この問題を解決するために車体重量の削減は共 通の課題であり,高い比強度・比剛性を持つ材料の導入 は今後の自動車業界で更に推進されていくものである. 本研究で扱う CFRP とアルミハニカムを用いたハニカム サンドイッチ構造はエネルギーの効率的な利用を実現し うる材料であり,レーシングカーに限らず市販車にも採 用が進むことが期待される<sup>3)</sup>.

本研究では東海大学の学生フォーミュラプロジェクト である Tokai Formula Club の学生フォーミュラ車両用フ

- \*1 工学部動力機械工学科学部生
- \*2 工学部動力機械工学科教授

ルカーボンモノコックの3次元モデルを用いた数値解析 を行っている<sup>4)</sup>. 解析にはANSYS workbench を使用して いる. このソフトは多くの企業で導入されている解析ツ ールであり,自動車業界でも広く用いられている.本研 究でもANSYS workbench を用いて学生フォーミュラ用 モノコックの静的構造解析を行い,剛性の観点から構造 特性についての評価・検討を行う.特に,本年度の研究 では複合材料であるサンドイッチパネルの持つ異方性に 着目し,これまで用いてきたモノコック全体に全く同一 方向の材料データを適用し,実際のモノコックが持つ材 料方向を無視した研究手法の妥当性を検討することに主 眼を置いた.

## 2. 解析方法

#### 2.1 解析全般

本研究では実物をモデル化したミクロモデルを用い, 複雑な対象物の材料データを抽出するための均質化解析 法を採用した<sup>5)</sup>.この解析よりハニカム・サンドイッチ パネルの3軸方向の材料データを求め,機械的性質が各 軸方向において均質なパネルデータをモノコック全体の 構造解析に適用した.

具体的には構造解析には ANSYS workbench 19.0, モデ ル作成は ANSYS workbench 19.0 内のモデル作成機能で

<sup>\*3</sup> 工学部動力機械工学科講師

ある Design Modeler を用いた.また,均質化解析では ANSYS へのアドオン製品である Multiscale.Sim を用いて, Design Modeler にて作成したモデルを対象に解析を行っ た.均質化解析によって得られる材料データは,縦弾性 係数 E [MPa], せん断弾数係数 G [MPa],ポアソン比  $P_r$ , 線膨張係数  $C_{te}$  [ $\mathbb{C}^{-1}$ ] である.これらの値は X軸, Y軸, Z軸の各軸方向の値を算出することが可能である.なお 本論文で全ての材料データを取り上げことできないため, 代表的な物性値である縦弾性係数に着眼して報告を行う.

### 2.2 ハニカムコアの均質化解析

ハニカムミクロモデルは、東海大学の学生フォーミュ ラプロジェクトで使用されたものと同寸法で作成した. 材質はアルミニウム合金(A5086)であり、ミクロモデルの 初期状態では Fig. 1 のような単一のセルのみで構成され ている.そこで、Design Modeler の編集機能を用いて単 ーセルのモデルを複製し、Fig. 2 のように複数セルを有 するアルミハニカムのミクロモデルを用い、セル数を増 加させた際の材料データの変化を検証した.複製はX軸 方向のみ複製、Y軸方向のみ複製、X軸方向を 2~5 セル に固定し Y軸方向のみ複製した、計6種類のパターンで 行った.本来であれば更に多くのパターンでの均質化解 析を行う計画であったが、モデルサイズや形状の複雑さ による計算量の増大がソフトウェアの処理可能な計算量 の上限に達したため、ここに提示した解析パターンに留



Fig. 1 Analytical model of single Honeycomb core.



Fig. 2 Analytical model of multi-honeycomb core.

の上限に達したため、ここに提示した解析パターンに留 まった. Fig. 3 には本解析で用いたアルミハニカムのミ クロモデルの寸法を示す. このミクロモデルは、Tokai Formula Club の 2020 年度車両で使用されたハニカムを 再現したものである.

#### 2.3 サンドイッチパネルの均質化解析

Tokai Formula Club のフルカーボンモノコックで用い られているサンドイッチパネルのミクロモデルも、アル ミハニカム同様 Design Modeler を用いて作成した.実車 のモノコックで用いられている、厚さ10mmのアルミハ ニカムを1.15mmと0.50mmのUDプリプレグ材料で挟 んだ構造を再現した.そのサンドイッチパネルのミクロ モデルのグラフィックをFig.4に示す.実車のサンドイ ッチパネルのコア材にはハニカム構造を使用するため、 直方体ボディのみで構成されたミクロモデルはアルミハ ニカム部分の形状が大きく異なる.しかしこのコア部に ハニカム構造を再現した場合と、直方体ボディで代用し た場合の解析結果の差異が非常に小さいことを先行研究 で明らかにしている.よって、本研究でもFig.4のよう なミクロモデルを用いて解析を行い、解析時間及び計算 量の軽減を図った.

この解析では,算出される材料データがメッシュサイズやモデルサイズによって変化する可能性を考慮した.



Fig. 3 Dimensions of honeycomb core in micro-model.



Fig. 4 Micro-model of sandwich panel.

メッシュサイズの変化による影響は、モデルサイズを固定した条件でメッシュサイズを1.0mmから0.30mmの範囲で0.10mmずつ減少させて均質化解析を行い、その結果を比較することで検証した.メッシュサイズが0.30mm以下の範囲では、解析ソフトウェアにおける節点数の上限から解析を行わなかった.同様にモデルサイズの変化による影響は、メッシュサイズを1.0mmに固定した条件でモデルの厚み(Z軸方向)以外の寸法を10mm×10mmから50mm×50mmの範囲で10mmずつ増加させて均質化解析を行い、その結果を比較することで検証した.モデルサイズが50mm×50mmよりも大きい範囲では、解析ソフトウェアの計算量の制約から解析を行わなかった.

#### 2.4 モノコックの静的構造解析

CFRP やハニカムサンドイッチ構造は、繊維やハニカム の方向によって材料特性が大きく異なる異方性と呼ばれ る性質を有している.そのため部材の方向によって全く 異なる物性値を示す.Tokai Formula Club のモノコックを 例に取り上げると、Fig.5(a)のようにフロア面と側面のパ ネルはX軸を中心に角度が90[°]国転することになる. しかしこれまでの研究では Fig.5(b)のように、均質化解 析で算出した材料データをモノコックのモデル全体に適 用し静的構造解析を実施していた.これは使用するソフ トウェアにおいて、1つのモデルに対して適用可能な材 料データの数が1つであることが原因である.本来であ れば Fig.5(a)のようにモノコックの面ごとに適切な方向 の材料データを適用すべきであるが、ソフトウェア上の



(a) Actual vehicle



(b) Vehicle for analysis Fig. 5 Panel direction of actual and analytical vehicles.

制約からやむを得ず Fig. 5(b)に示した設定で解析を実施 してきた.この方法ではモノコック全体に同一方向の材 料データを適用しており,実際のモノコックの持つ材料 方向の特性を一切無視したモデルを用いていた.そこで 本年度のモノコック静的構造解析では,実車との強い相



(a) Analysis 1



(b) Analysis 2





(d) Analysis 4 Fig. 6 Direction of each panel in analysis.

関を持つ解析結果を得ることは重視せず,これまで用い てきた実車の材料方向を無視した解析手法の妥当性を検 証した.モノコック全体に同一方向の材料データを適用 する手法は継続しつつ,材料データの方向を様々な方向 に変更して解析及び解析結果の比較を行った.異なる材 料データを適用したモデルを比較した際,その違いに関 わらず解析結果が同等のものとなれば,解析上での材料 データ方向の影響は無視できるものと考えられる.その 一方で,材料データの方向によって解析結果に大きな差 異が生じる場合は解析上での材料データ方向の影響は無 視できず,これまでの解析手法・結果は実車の特性から 大きく外れる可能性があるもの推定される.

使用する材料データは均質化解析によって算出した 材料データをベースに,適用方向を変更した材料データ を計4種類作成した.ここで作成した4種類の材料デー タをモノコックにそれぞれ適用することで,材料の方向 を変更した際の解析結果の変化を検証した.材料データ の適用方向は,Fig.6(a)~(d)に示す通りである.

静的構造解析を行う際の拘束箇所は、リアサスペンションアームを取り付けるポイントとし、片側4箇所、左 右合計で計8箇所とした.荷重負荷箇所はフロントサス ペンションアームを取り付ける位置とし、拘束箇所同様 に片側4箇所、左右合計で計8箇所とした.負荷荷重に よってモノコックにねじり変形を発生させるため、進行 方向に対する右フロントのサスペンションにはZ軸方向 に+1000 [N]、左フロントサスペンションにはZ軸方向 に-1000 [N]を負荷し、ねじりモーメントが発生するよ うに設定した.拘束を適用した箇所をFig.7(a)、荷重を 負荷した箇所をFig.7(b)にそれぞれ示している.メッシ ュサイズ等,材料データの適用方向以外の設定は全て統 ーした状態で解析を実施した.



Fig. 7 Constraining and Loading points for the monocoque.

## 3. 解析結果

#### 3.1 ハニカム均質化解析結果

アルミハニカムの均質化解析で得られた*X*, *Y*, *Z*軸における縦弾性係数に注目し, それぞれ *Ex*, *Ey*, *Ez* で表記している.ここでは縦弾性係数とハニカムのセル数の関係を検討するため, セル数に対する *Ex*, *Ey*, *Ez* での推移をそれぞれ Fig. 8, 9, 10 に示している.

Fig. 8 と Fig. 9 から, アルミハニカムの縦弾性係数で ある Ex, Ey 共に, セル数が少ない段階では 1.66 MPa 程 度に留まり, セル数の増加に伴い 1.81 MPa 程度まで増大 することが分かる. Ez は Fig. 10 から読み取れる通り, セル数が少ない段階では 1674 MPa 程度を示しているが,



Fig. 8 Modulus of Longitudinal Elasticity along X-axis.



Fig. 9 Modulus of Longitudinal Elasticity along Y-axis.





計算量に起因するエラーが発生する直前で 1700 MPa 程 度まで値が上昇する傾向を示している.

以上の内容から、本研究で取り扱ったアルミハニカム のミクロモデルによる均質化解析では、セル数が増加す ると共に縦弾性係数が特定のセル数を境に値が急激に増 大し、その後はほぼ一定の値に収束すると予想される結 果を確認できた.縦弾性係数の変化量を比較してみると、 *Ex と Ey* では約 0.15 MPa の差が生じていたが、*Ez* では 最大で約 28MPa もの差が現れていた.ただし *Ez* の縦弾 性係数は、*Ex と Ey* と比較すると値そのものが大きく異 るため、*Ex、Ey、Ez* それぞれの最大値と最小値の相対誤 差を Table 1 に示している.

Table 1 から、軸方向ごとの縦弾性係数の相対誤差は、 Ez が Ex と Ey に比べて小さいく抑えられている.相対誤 差は最大で 9.72%であることから、アルミハニカムモデ ルの複製パターンによって生じる縦弾性係数の差異は、 この後のサンドイッチパネルの均質化解析とモノコック の静的構造解析に影響を与える可能性がある.本年度の 研究の目的は、高精度なモノコック静的構造解析を実施 するのではなく、サンドイッチパネルの持つ異方性によ る解析結果への影響を検証することであるため、アルミ ハニカムの縦弾性係数の相対誤差の影響については検証 を行なっていない.しかし、今後更に高精度な結果を期 待する場面においては、アルミハニカムのミクロモデル の複製パターンによる材料データの違いに対しても、十 分な検証が要求されると考えられる.



Fig. 11 Young's modulus of each axis of sandwich panel with changing mesh size.



Fig. 12 Young's modulus of each axis of sandwich panel with changing model size.

#### 3.2 サンドイッチパネルの均質化解析結果

アルミハニカムの均質化解析で得られた材料データを, Fig. 4 に示したサンドイッチパネルのミクロモデルに反 映させた均質化解析を実施した.この解析で得られた縦 弾性係数のうち、メッシュサイズを変更したときの解析 結果を Fig. 11,モデルサイズを変更した解析結果を Fig. 12 にそれぞれ示している.横軸には Fig. 11 でメッシュ サイズ, Fig. 12 でハニカム横断面における辺長さをとり, 縦軸は共に各軸方向の縦弾性係数 *Ex*, *Ey*, *Ez* としている.

Fig. 11 と Fig. 12 から,縦弾性係数はメッシュサイズ やモデルサイズによらず一定であることが分かる.実際 の数値ではメッシュサイズによって Z 軸方向の縦弾性係 数に僅かな差異が生じているが,その相対誤差は 10<sup>-4</sup>オ ーダーのごく微小なものであることから,解析結果に大 きな影響を及ぼすことは無いと判断した.

#### 3.3 モノコックの静的構造解析結果

初めにモノコック静的構造解析から得られた全変形量 について述べる.まず, Analysis 1~Analysis 4 で算出さ れた全変形量の最小値,最大値,平均値を Table 2 に, Analysis 1 を基準とした全変形量の最大値を比較したも のを Table 3 に示す.また各解析で得られた構造全体の 変形状況を視覚的に確認するため,Fig.13(a)~Fig.13(d) において 3 次元表示の変形図が示されている.なお変形 量は構造寸法に比べて極めて小さいため,全変形量の変 形表示スケールは全て 40 倍に設定している.

Table 3 から全変形量の最大値は, Analysis 2 が Analysis 1 に対して+2.5 %の値になっている. Analysis 3 は +105.8 %, Analysis 4 は+75 %の値となり, これらの最大 値は Analysis 2 と比較して著しく差が大きくなることを

$\smallsetminus$	minimum values	maximum values	Relative errors
Ex	1.659 MPa	1.820 MPa	9.7 %
Ey	1.659 MPa	1.820 MPa	9.7 %
Ez	1674 MPa	1702 MPa	1.7%

 
 Table 1 Relative errors of Young's modulus between three axes of honeycomb micro-model.

Table 2 Minimum, maximum and average values of the overall deformation calculated for each analysis.

		Analysis 1	Analysis 2	Analysis 3	Analysis 4
	Minimum Values	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Deformations	Maximum Values	1.917 mm	1.964 mm	3.945 mm	3.355 mm
	Average Values	0.6715 mm	0.6803 mm	1.620 mm	1.460 mm

Table 3 Comparison of deformations calculated in each analysis.

Analysis Number	Maximum Value of Deformation	Difference Based on Analysis 1	Percentage Based on Analysis 1
Analysis 1	1.917 mm	0 mm	100 %
Analysis 2	1.964 mm	0.04701 mm	103 %
Analysis 3	3.945 mm	2.028 mm	206 %
Analysis 4	3.355 mm	1.438 mm	175 %

確認できる.変形図に着目すると, Analysis 1 と Analysis 2 ではフロアの一部に最大変形が集中し、そこから離れ るに従い変形量が減少していることを確認できる.また, 前方からの可視化した変形図ではコックピット側面がほ とんどねじれ変形しておらず、上下に移動するように変 形していることを確認できる. つまり, Analysis 1 と Analysis 2 ではねじれ変形が主にフロアや上面等で発生 したことから、相対的にコックピット側面の方が高いね じれ剛性を有しているものと判断した. Analysis 3 と Analysis 4 では大きな変形がコクピット開口部の前半分 に集中しており、コックピット側面は Analysis 1 や Analysis 2 と比較すると傾きが大きいことが前方からの 変形図で確認できる. つまり, ねじれ変形は主にコック ピット側面で発生しており, Analysis 1 と Analysis 2 とは 変形分布やねじれ変形が生じる面が全く異なっているこ とを確認できる.

続いて、Analysis 1 ~ Analysis 4 で算出された主応力の 最小値,最大値,平均値を Table 4 に、Analysis 1 を基準 とした最大主応力を比較したものを Table 5 に示してい る.また各解析における主応力の分布特性は Fig. 14(a)~ Fig. 14(d)に示す通り、Fig. 13 で提示した変形図のモノコ ック表面にコンタ図で表現されている.



Fig. 13 Overall deformation distribution in each analysis.

Table 5 から, 主応力の最大値は Analysis 2 が Analysis 1 に対して+3.7 %の値であるのに対して, Analysis 3 は-29.5 %, Analysis 4 は-44.1 %である. よって, Analysis 1 を基準とした主応力の最大値の比較では, 全変形量の最大値と同様に, Analysis 2 よりも Analysis 3 と Analysis 4 の方が Analysis 1 との差が大きくなることを確認できた. 応力分布に着目すると,全ての解析で右フロント上部からコクピット開口部付近,左フロント下部, コクピット開口部付近左後方,フロア右後方等に主応力が増大する傾向にある. 以上のことから,最大主応力の値には大きな差異が生じたが,その分布特性は全ての解析で共通の

Table 4 Minimum, maximum and average values of principal stress calculated for each analysis.

		Analysis 1	Analysis 2	Analysis 3	Analysis 4
Maximum	Minimum Values	-0.2333 MPa	-0.2291 MPa	-0.6731 MPa	-0.5249 MPa
Principal Stress	Maximum Values	6.326 MPa	6.561 MPa	4.460 MPa	3.539 MPa
	Average Values	0.2213 MPa	0.2229 MPa	0.2098 MPa	0.2068 MPa

 
 Table 5 Comparison of maximum principal stress calculated in each analysis.

Analysis Number	Maximum Value of Maximum Principal Stress	Difference Based on Analysis 1	Percentage Based on Analysis 1
Analysis 1	6.326 MPa	0 MPa	100 %
Analysis 2	6.5601 MPa	0.2341 MPa	104 %
Analysis 3	4.460 MPa	-1.866 MPa	70.5 %
Analysis 4	3.539 MPa	-2.788 MPa	55.9 %



(b) Analysis 2



(c) Analysis 3



(d) Analysis 4 Fig. 14 Principal stress distribution in each analysis.

傾向を有していることが分かる.

本研究の本題からは逸れるが、主応力が集中している 開口部付近や面と面の境界付近では、実車においても走 行によるダメージ(積層の剥離)が発生しやすい箇所で あることが経験的に知られている.そのため、この静的 構造解析から、モノコックの形状特有の応力集中が発生 する箇所を予測できる可能性があると推察される.

以上,4 種類の材料データを用いた静的構造解析から 算出された構造全体の変形及び主応力特性より,実施し た4 つの解析から得られた全変形量は Analysis 1 と Analysis 2 及び Analysis 3 と Analysis 4 で,傾向が 2 パタ ーンに分類することができる.

続いて,解析結果のパターンについて考察する.一般 に、ハニカム構造材は Fig. 15 の黄色点線部に示すような 平行部 (Parallel edges) の方向に最も高い強度・剛性を発 揮することが知られている. Tokai Formula Club のフルカ ーボンモノコックをはじめとして, ハニカム構造材を用 いた製品の設計においても、このことを考慮した設計が 行われることが多い. Fig. 6 から各解析のアルミハニカ ムの平行部 (Parallel edges) の方向は, Analysis 1 と Analysis 2 が X 軸方向(モノコックの前後方向), Analysis 3 と Analysis 4 が Y 軸方向(モノコックの左右方向) であ ることが分かる. 第2章4節で述べた通り, 本研究のモ ノコック静的構造解析においては、サンドイッチパネル の適用方向以外の条件は統一して解析を実施した. その ため解析結果の傾向が2分される要因としては、サンド イッチパネル内のアルミハニカムの方向が強く影響して いると考えられる.

この節の最後に、本研究の目的である、これまで用い てきたモノコック全体に全く同一方向の材料データを適 用し、実際のモノコックが持つ材料方向を無視した研究 手法の妥当性について検討する.前述した通り、同一の サンドイッチパネルを使用していても、その適用方向に よって解析結果の傾向は2分された.それはつまり、モ ノコック全体に同一方向のサンドイッチパネルの材料デ



Fig. 15 Parallel edges of honeycomb core.

ータを適用する手法で静的構造解析を実施することは、 モノコックが本来持つサンドイッチパネルの異方性に応 じた特性を再現できていないことを意味する.例年の研 究ではモノコックの変形量を用いてねじり剛性を算出し ているため、変形量の差異は算出されるねじり剛性の差 に直結する.よって、材料データの適用方向によって変 形量やその分布に大きな違いを生じるこれまでの手法で は、ねじり剛性を算出するためのモデルとしては不十分 なモデルであると結論付けられる.

## 4. 結言

本研究では複合材料であるサンドイッチパネルの持つ 異方性に着目し、これまで用いてきた、実際のモノコッ クが持つ材料方向を無視した研究手法の妥当性を検討す ることに主眼を置いた. アルミハニカムの均質化解析で は同一サイズのハニカムについて, そのセル数を変化さ せた解析を行いその影響を検証した. CFRP パネルとア ルミハニカムで構成されるサンドイッチパネルの均質化 解析では、メッシュサイズとモデルサイズをそれぞれ変 化させた解析を行った.モノコックの静的構造解析では, それまでに得られたサンドイッチパネルの材料データの 適用方向を変更して構造全体の変形量と主応力について の解析を実施し、材料方向の違いによる解析結果への影 響を検証した.また、その検証によってこれまで考慮さ れていなかったサンドイッチパネルの異方性による解析 結果への影響を再検討した.以上の研究から以下のこと 明らかにした.

- (1) アルミハニカムモデルの均質化解析で得られる縦弾 性係数は、セル数が増加すると特定のセル数から値が 急増する.ただしその値は2領域に分布し、将来的に 高精度な解析が要求される場合、その差がサンドイッ チパネルやモノコックの解析に与える影響を検討す る必要がある.
- (2) サンドイッチパネルの均質化解析では、メッシュサイズやモデルサイズに関わらずほぼ一定の縦弾性係数を得られ、モノコック静的構造解析に与える影響は無視できるものと考えられる.
- (3) モノコックの静的構造解析において、サンドイッチパネルにおける材料データの適用方向を変更した場合、 全変形量と最大主応力及び変形分布は2つのパターン に分類されることが分かった.これらの傾向はアルミ ハニカムの平行部 (Parallel edges) によって生じたものであり、これまでの解析方法の不備な点を指摘すると共に、解析精度を向上させる改善点を指摘することができた.

#### 参考文献

- 菅原憲明: ハニカム構造材料,日本ロボット学会誌, Vol.3, No.2, pp.180-184 (1995).
- 瀬藤和芳,佐藤千明,須藤洋,宮崎隼人,原賀康介:ハ ニカム構造板の曲げ変形と接着剤の弾性率との関係,

日本機械学会第 21 回機械材料・材料加工技術講演会 論文集, CD-ROM, pp.1-4 (2013).

- 3) 山田泰宏: F1 モノコックサイドパネルの軽量化研究, Honda R&D, Technical Review 2009, pp.273-276 (2009).
- 4) N. Yamanouchi, K. Ishii, H. Moriyama and H. Kato:

Structural Characteristics of the Racing Car in the Student Formula SAE Competition, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E, Vol.44, pp.7-13 (2019).

5) 高野直樹: 均質化法による新しい数値シミュレーション, 日本複合材料学会誌, Vol.27, No.1, pp.4-11 (2001).

# 野球の実投球における球速や回転数、回転軸を用いた

# 飛翔軌道シミュレーション

森山 幸平\*1 藤田 颯雲\*2 大久保 雅俊\*2 岡永 博夫\*3

# Flight Trajectory Simulations Using Ball Speed, Rotation Speed and Rotation Axis on Actual Pitching of Baseball

by

Kohei MORIYAMA<sup>\*1</sup>, Soun FUJITA<sup>\*2</sup>, Masatoshi Okubo<sup>\*2</sup> and Hiroo OKANAGA<sup>\*3</sup> (Received on Mar. 18, 2022 and accepted on Jul. 7, 2022)

#### Abstract

In baseball, the pitching trajectory is rarely exactly the same due to factors such as the axis of rotation, number of revolutions, ball speed, and release point. Since the reduction rate of the actual pitching speed and ball speed due to such factors has not been clarified, the accuracy of pitching trajectory simulation remains questionable. Therefore, in this study, the orbit and rotation speed were measured by conducting experiments involving actual pitching of a ball. In addition, using the drag coefficient and lift coefficient obtained by wind tunnel experiments, we simulated four-seams and sliders with different ball speeds and rotation speeds. From the results, the reduction rate of the ball speed and number of revolutions, as well as their influence on the pitching trajectory, were clarified. It was found that the difference in the reduction rate of the number of revolutions is small between four-seams and curves, but that the deceleration rate of the ball speed is higher in the four-seams. In addition, the change in the horizontal direction of sliders increases with larger number of revolutions, and decreases with lower ball speed. In other words, if the ball speed approaches four-seam, it is difficult for the batter to determine.

Keywords: Baseball, Aerodynamics, IoT-ball, Serial photographs, Flight trajectory simulation

## 1. 緒言

野球というスポーツは,世界的に人気のあるスポーツ であり.広く親しまれているスポーツの1つである. ピ ッチャーが投げるボールはその試合の勝敗を分ける大き な要因となる.投球軌道は回転軸,回転数,球速,リリ ースポイントといろいろな要素が複雑に絡み合うため, まったく同じ投球軌道を描くボールはほとんどない. ボ ールの空力特性や飛翔軌道の研究は数多く行われている が、その一例を参考文献の(1)と(2)に示す<sup>1)2)</sup>. 村田らの研究<sup>3,4)</sup>では IoT ボールという球速と回転数,回 転軸などが測れるボールを用いて実投球を評価した. そ の結果、回転軸の傾きが小さいほど上下の変化量が大き くなり、傾きが大きいほど左右の変化量が大きくなると の報告がされている.また,鈴木らの研究 5ではプロ野 球選手のデータと風洞実験の結果をもとにしたストレー トの投球軌道シミュレーションが行われている.球速が 速いほど落ちない軌道を描き、球速が同じでも回転数が 多いほど落ちない軌道を描くことが報告されている.し かし、鈴木氏らの研究ではストレートの投球軌道シミュ

```
*2 工学部機械工学科
```

```
*3 工学部機械工学科教授
```

レーションは行われているが、変化球の投球軌道シミュ レーションは行われていない.また実投球の回転数や球 速の減少率が解明されていないため投球軌道シミュレー ションの精度に疑問が残る.

そこで本研究では,実投球による飛翔軌道実験及び風 洞実験で得られた抗力係数,揚力係数を用いて,ストレ ートとスライダーを球速と回転数を変化させたシミュレ ーションを行い,それらが投球軌道に与える影響を明ら かにすることを目的とする.

## 2. 実験装置および方法

#### 2.1 実験球

本実験で使用する実験球を Fig. 1 に示す.回転数およ び球速測定の飛翔軌道実験での実験球を(a)に示す.投球 の回転数を判別しやすくするためにボールの半面を黒塗 りにして実験を行った.風洞実験での実験球を(b)に示す. 風洞実験では(b)の縫い目の位置を風洞吹き出し口に向 けて固定する.風洞実験ではミズノ製の社会人試合球 JABA を使用する.日本国内での公式使用されているボ ールの直径約74 mm,重量は約145gの硬式野球ボール である.

<sup>\*1</sup> 工学研究科機械工学専攻修士課程





(a)Flight orbit experiment Fig. 1 Experimental balls.

(b)Aerodynamic experiment

## 2.2 ボールの球速及び回転数の測定

Fig.2に実投球測定の投手, 捕手, カメラ保護用のアク リル板とネット, 高速度カメラの配置図を示す. 球種は ストレートとカーブで, カメラに収まった 10 球を画像 解析した.本研究のストレートは4seamとする. 投手は 本研究室内の野球経験者3名を採用し, 撮影した動画か ら連続写真を作製する.写真から得られたボールの球速 と回転数の減速率と減少率を算出した.最初の回転数は 投手の手からボールが離れた瞬間から約300フレーム以 内で1回転しているコマを算出する.最後の回転数はボ ールがカメラからフレームアウトした瞬間から直前の約 300フレーム以内から1回転しているコマを算出する. 作製した画像から初速と終速を算出した.高速度カメラ はカトウ光研株式会社製の MEMRECAM GX-1F を使用 した.高速度カメラの設定はフレームレート2000 fps で 撮影を行った.



Fig. 2 Image of field experiment.

### 2.3 空気力測定

本実験で使用した風洞装置およびボールの支持装置を Fig.3に示す.Fig.3はピアノ線支持装置の概略図である. 風洞装置の吹き出し口の大きさは400×400 mm である. フレームは風洞の吹き出し口から 90 mm 離して設置した.実験球は Fig.1(b)を使用した.回転時ボールの空気 力測定ではピアノ線支持装置を用い,ピアノ線で 500× 500 mm のフレームの中心に固定して実験を行った.ピ アノ線支持装置のピアノ線の直径に,A.J.Smith氏らの研 究<sup>6)</sup>よりボール直径をd,ピアノ線の直径をdpとした場 合,d/D が 0.037 より小さければピアノ線の影響を無視 することができる.硬式野球ボールの直径は 74 mm であ るため、測定の影響が出ない直径 2 mm のピアノ線を使 用した.ボールは可変直流安定化電源とフレーム下部に 設置したモーターを用いて、Fig. 3 のように時計回りに 回転させる.測定時のサンプリング周波数は 1000 Hz, 測定秒数は 2 秒、収録データ数は 2000 である.これを 5 回行い、平均値と誤差を求めた.得られたデータを用 いて式(1)式(2)より抗力係数C<sub>D</sub>,揚力係数C<sub>L</sub>を算出する. 無次元量のS<sub>P</sub>:スピンパラメータを式(3)に示す.ここで、 D:抗力,L:揚力,A:投影断面積、p:空気密度、U:流速、d: ボール直径、N:ボールの回転数である.なお、本実験の 流速は 40 m/s とし、ボールの回転数は、スピンパラメー タを実際の競技領域に合わせるために、1500~3000 rpm で 100 rpm ごとに回転数を増加させた.

$$C_D = \frac{2D}{\rho U^2 A} \tag{!}$$

$$C_L = \frac{2L}{\rho U^2 A} \tag{2}$$

$$S_P = \frac{\pi dN}{U} \tag{3}$$



Fig. 3 Schematic diagram of wind tunnel and piano support.

#### 2.4 投球軌道シミュレーション

風洞実験で得られた抗力係数および揚力係数の値を基 に4次のルンゲ・クッタ法を用いて Table 1の条件で投 球軌道シミュレーションを行う.また,以下の支配方程 式を用いた<sup>3)</sup>.

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -k \cdot V \cdot u + \frac{l}{H} \cdot V^2 \cdot \left(vA_z - wA_y\right) + \frac{s}{F} \cdot V^2 \{(A_z u - A_x w)w - (A_x v - A_y u)v\}$$
(4)

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = -k \cdot V \cdot v + \frac{l}{H} \cdot V^2 \cdot (wA_x - uA_z)$$
  
+  $\frac{s}{F} \cdot V^2 \{ (A_xv - A_yu)u - (A_yw - A_zv)w \}$  (5)

$$m\frac{d^{2}z}{dt^{2}} = -k \cdot V \cdot w + \frac{l}{H} \cdot V^{2} \cdot \left(uA_{y} - vA_{x}\right)$$
$$+ \frac{s}{F} \cdot V^{2}\left\{\left(A_{y}w - A_{z}v\right)v - \left(A_{z}u - A_{x}w\right)u\right\} - mg \qquad (6)$$

$$F = \begin{bmatrix} \left\{ (A_{z}u - A_{x}w)w \\ -(A_{x}v - A_{y}u)v \right\}^{2} + \left\{ (A_{x}v - A_{y}u)u \\ -(A_{y}w - A_{z}v)w \right\}^{2} \\ + \left\{ (A_{y}w - A_{z}v)v \\ -(A_{z}u - A_{x}w)u \right\}^{2} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}}$$
(7)

$$H = \begin{cases} \left(A_{z}v - A_{y}w\right)^{2} + \left(A_{x}w - A_{z}u\right)^{2} \\ + \left(A_{y}u - A_{x}v\right)^{2} \end{cases}^{\frac{1}{2}}$$
(8)

$$V = (u^2 + v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}$$
(9)

$$k = \frac{1}{2}\rho \frac{\pi}{4} d^2 C_D \tag{10}$$

$$l = \frac{1}{2}\rho \frac{\pi}{4} d^2 C_L$$
 (11)

$$s = \frac{1}{2}\rho \frac{\pi}{4} d^2 C_s$$
 (12)

$$u = V\cos\theta\cos\gamma \tag{13}$$

 $v = V \cos \theta \sin \gamma \tag{14}$ 

$$w = V \sin \theta \tag{15}$$

ここで, m:ボールの質量[kg] d:ボール直径[m] V:ボール速度の大きさ[m/s] u,v,w:それぞれx,y,z軸方向の速度[m/s] A<sub>x</sub>.A<sub>y</sub>,A<sub>z</sub>:回転軸ベクトルのx,y,z軸方向成分 θ:鉛直方向角度[°] γ:水平方向角度[°] Cs:横力係数

である. 球種はストレートとスライダーとし, 村田氏らの研究 <sup>3,4)</sup>データの IoT ボールで測定した球速と回転数 を使用した.計算条件を Table 1 に示す.

Table1 Condition for simulation.

	Type of pitch	Slider	Straight
	Initial velocity[km/h]	95,114,145	114,148
	Number of rotations[rpm]	1712,2085,2406	2085,2478
	Azimuth[°]	140	90
Depression angle[°]		15	0

## 3. 実験結果

#### 3.1 ボール回転数と球速の測定

Table 2 にストレートの球速減速率, Table 3 にカーブ の球速減速率の結果を示す.ストレートの減速率は 14.2%減少しており,カーブは 10.3%減少していること が確認できた.このことからストレートはカーブより減 速していることが確認された.

Table 2 Velocity of ball (pitcher2 straight).

Straight	Initial velocity	Final velocity	Deceleration
Pitcher2	102.6 km/h	88.02 km/h	14.2 %

Table 3 Velocity of ball (pitcher2 curve).

Curve	Initial velocity	Final velocity	Deceleration
Pitcher2	90.72 km/h	81.36 km/h	10.3 %

Table 4 にストレートの回転数減少率, Table 5 にカー ブの回転数減少率の結果を示す.回転数は,高速度カメ ラの映像を著者らのうち2名が目視で観測して回転数を 測っている.個人差による測定誤差は1%以内であり、 ピッチャーごとの回転数の変動は最大で6%であった. ストレートの減少率は1.42~2.09%の範囲で減少してお り,カーブの減少率は1.17~2.06%の範囲で減少してい ることが確認できた.また,ストレートとカーブの減少 率の差は変わらないことが確認された.

Table 4 Rotation number of ball (pitcher2.3 straight).

	Initial rotation	Final rotation	Deceleration
Pitcher2	1127 rpm	1111 rpm	1.42 %
Pitcher3	1481 rpm	1450 rpm	2.09 %

Table 5 Rotation number of ball (pitcher1.2.3 curve).

	Initial rotation	Final rotation	Deceleration
Pitcher1	1747 rpm	1711 rpm	2.06 %
Pitcher2	1191 rpm	1172 rpm	1.60 %
Pitcher3	1283 rpm	1268 rpm	1.17 %

#### 3.2 風洞実験結果

Fig. 4, Fig. 5 に抗力・揚力係数測定の結果を示す. Fig. 4 より抗力係数は 0.34~0.36 で,スピンパラメータが増加 しても抗力係数の値は変化しなかった. Fig. 5 より揚力 係数は 0.18~0.22 の範囲で,スピンパラメータが増加す るにつれ,揚力係数は増加した.これらは坂本氏らの 4 シームの研究結果<sup>1)</sup>と同様な結果が得られている.



Fig. 4 Drag coefficient of rotating of ball.



Fig. 5 Lift coefficient of rotating of ball.



Fig. 6 Trajectory of experiment and simulation (viewed from the side).

#### 3.3 実投球の飛翔軌道及びシミュレーション比較

実際に IoT ボールでストレートを投げ、それと同時に 投げたボールを高速カメラで撮影した. IoT ボールのデ ータより、球速 112 km/h,回転数 1467 rpm,回転軸 9°で あった.このデータと,風洞実験で得られた抗力係数, 揚力係数のデータを用いてシミュレーションを行った軌 道と動画から抽出した連続写真から得られた軌道を Fig.6 に示す.実際に投じられた投球の連続写真とシミュ レーションを比較すると軌道はおおよそ一致しており, 実際の投球軌道を再現できていることが確認できた.

#### 3.4 飛翔軌道シミュレーション比較

Fig. 7 はストレートのシミュレーションとスライダー の球速 114 km/h で固定し,回転数を変えたシミュレーシ ョンの結果を示したものである.図中の(a)はストレート の軌道を横から見た図,図中の(b)はスライダーの軌道を 上から見た図である.回転数がバックスピンであるスト レートにおいては Fig. 7(a)より 2406 rpm は 2085 rpm と 比較すると 0.01m 高く,1712 rpm と比較すると 0.06 m 高 い軌道になった.スライダーにおいては Fig. 7(b)より 2406 rpm は 2085 rpm と比較すると 0.02 m 横方向に大き く変化し,1712 rpm と比較すると 0.05 m 横方向に大きく 変化した.以上の結果から,スライダーは回転数が多い ほど落ちない軌道であり,横方向に変化が大きくなるこ とが明らかになった.

Fig. 8 はストレートのシミュレーションとスライダー の回転数 2085 rpm で固定し, 球速を変えたシミュレーシ ョンの結果を示す.ストレートの場合, Fig. 8(a)より 145 km/h は 114 km/h と比較すると 0.41 m 高く, 95 km/h と 比較すると 0.7 m 高い軌道になった.スライダーの場合, Fig. 8(b)より 145 km/h は 114 km/h と比較すると 0.02 m 横方向に曲がらなく, 95 km/h と比較すると 0.05 m 横方 向に曲がらなかった.以上の結果から,スライダーは球 速が速いほど落ちない軌道であり,横方向の変化が小さ くなることが明らかになった.

Fig. 7(a), Fig. 8(a)よりストレートとスライダーの到達 点において大きな差があり,回転数よりも球速の方が軌 道に大きな影響を及ぼしており,球速を上げた方が打者 はストレートとの見極めが難しくなる. MLB のすべての ピッチングデータを取得できるサイト<sup>っ</sup>を見ると、クレ イトン・カーショウはスライダーの球速は速く 143 km/h で被打率は 0.192 を記録しており,ストレートとの球速 の差は約7 km/h である. それに対し,田中将大のスライダー の球速は約 135 km/h で被打率は 0.260 を記録しており, ストレートとの球速の差は約 13 km/h である. 球速差が 少ないほど被打率が低くなっているため見極めが難しい と考えられる.



Fig. 7 Trajectory simulation (fixed speed ball).





## 4. 結言

球速において、ストレートとカーブでは、ストレート の方が減速率は高く、回転数ではストレートとカーブと もに減少率の差はなかった.つまり、回転数は空力特性 に影響はほぼないことが確認できた.また、高速度カメ ラによる連続写真と IoT ボールのデータと、風洞実験デ ータの軌道シミュレーションはおおよそ一致したため、 実際の投球軌道を再現できていることが確認できた.そ して、飛翔軌道シミュレーションにより、スライダーは 回転数が多いほど落ちない軌道で横方向に大きく変化し、 球速が多いほど落ちない軌道だが、横方向への変化は小 さいことが確認できた.ここで、回転数を上げるよりも、 球速をストレートの球速に近づけた方が、より打者が見 極めづらいボールになることも明らかになった.

## 参考文献

 坂本誠馬,長谷川淳哉,溝田武人,統一球と日米硬 式野球ボールの特性,日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンドヒューマン・ダイナミクス 2011 講 演論文集 [2011.10-11.31-2,京都].

- 溝田武人:スポーツボールの飛翔軌道の不思議と流体力学(生物流体力学における計測問題),数理解析研究所講究録, pp.40-58 (2015).
- 3) 村田遼平,伊藤慎一郎,平塚将起,岡永博夫: IoT ボ ールを用いた変化球の実投球データの測定と軌道シ ミュレーション,日本機械学会シンポジウム:スポ ーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2020 講演論文集 [2020.11.13-11.15, オンライン].
- 4) 村田遼平,伊藤慎一郎,岡永博夫: IoT ボールを用いた硬式野球ボールの実投球データの測定と軌道シミュレーション,日本機械学会2020年度年次大会講演論文集 [2020.9.13-16,名古屋].
- 5) 鈴木悠太, 坪井一洋, 野球ボールの投球軌道シミュ レーション, 茨城大学卒業論文 (2010).
- A. J. Smits and D. R. Smith: A new aerodynamic model of a golf ball in flight, Science and Golf II, E.&F.N. Spon, London, pp.340-347 (1994).
- 7) https://www.brooksbaseball.net/ [2021.9.28 閲覧].

# クラリネットマウスピースのフェイシング部の微小形状変化が

# 吹鳴音波形に与える影響

## 堀越 哲郎\*1 藤原 正明\*2

# Influence of Small Alterations in the Shape of Clarinet Mouthpiece Facing on the Blown Sound Waveform

by

## Tetsuro HORIKOSHI<sup>\*1</sup> and Masaaki FUJIWARA<sup>\*2</sup> (Received on March 17, 2022 and accepted on May 27, 2022)

#### Abstract

Clarinet players and teachers can feel differences in mouthpieces not only among different models but also among individual pieces of the same model. One of the likely causes is the tiny left-right asymmetry in the shape of the mouthpiece facing. To test this hypothesis experimentally, a 0.03 mm-thick film was fixed to one side of the side rail of the mouthpiece facing, and changes in the blown sounds were observed from the viewpoint of the temporal fine structure of the sound waveform. As a result, the following features were observed. Without the film, (1) in the clarinet's base (chalumeau) register A note, the waveforms differed greatly between piano and forte; for example, the number of peaks and troughs (which correspond to overtones) in one cycle increased with louder sound, and (2) in the mid-high (clarion-altissimo) register, there was almost no change in the number of peaks in one cycle between piano and forte, but the relative amplitude of each peak-trough difference was increased in forte. With the film, (3) the rise of the sound was slowed especially in the low-mid range forte, and (4) the extent of the waveform variation between piano and forte was reduced by the film. Based on the physiological knowledges of hearing, these observed waveform changes may be key points for discriminating the character of sound.

Keywords: Clarinet mouthpiece, Facing, Sound waveform, Temporal fine structure

## 1. まえがき

クラリネットやサクソフォンといったシングルリード 楽器はマウスピース部に付けられたリードが息の吹込み によって振動し,それが発音源となって吹鳴されている. マウスピースは様々なメーカーから複数のモデルが作製 提供されており,奏者はそれらを実際に吹奏して試す中 で自らの目的である音色感や音のコントロールのしやす さなどに応じて選択している.加えて,同じモデルであ っても個体差による吹奏感の違いは無視できず,複数の 同一モデル個体を試奏して選定することも頻繁に行われ る. この個体差とは主に製作過程で生じる誤差による形 の僅かな違いによっており,欧米ではリフェイサーと呼 ばれる職人がその誤差を見つけ修正すること(リフェイ シング)が行われている<sup>1)</sup>.その修正の際にまず第1に 対象にするのは,フェイシングと呼ばれるリードの振動 運動を規定する領域であろう(Fig. 1B).リード前方部は 振動時にサイドレールとティップレールと名付けられて いる部分に振動周期毎に接触し、リードの振動領域や振 幅が制限されている.リードは左右対称に振動するもの が理想的と奏者が感じることが既に報告されている<sup>2)</sup>. そのため奏者はバランスをとるためにリードの表面を僅 かに削るなどしてリードを調整することも多い.一方、 マウスピースのサイドレールのカーブが左右で僅かにず れているといくらリードを調整しても左右対称に振動す ることは難しくなってしまい、そのカーブを揃えること が必要になる.一般にリフェイシングにより鳴りの悪い 音が無くなることや、息が吹き込みやすくなること、高 音のコントロールが安定することが知られている<sup>1)</sup>. こ の状態が奏者にとって吹きやすい状態に該当するのであ ろう.

本研究では、吹きやすさといった奏者の感覚によって 規定されるような情報の要素が、発せられた音波形の特 徴から捉えられないかという視点で実験を計画した.感 覚は奏者個々の主観によるものであるが、一方、外部で 聴取している音楽指導者等からは、発せられた音からそ

<sup>\*1</sup> 工学部医用生体工学科教授

<sup>\*2</sup> MASA Music 音楽事務所主催



Fig. 1 Photographs of clarinet mouthpiece attached with 0.03 mm-thick film on side rail. Nomenclature of clarinet mouthpiece of reed setting side (A). Side view of mouthpiece with reed (B). Facing indicates the region of reed to be oscillating. Film (4 mm length, 003 mm thick) is attached at about center of facing of left side rail (A-C).

の奏者が意図した通りに演奏できているのか、もしくは 何らかの困難を感じているのかを判断できるというのも 事実であろう.従って、客観的に捉えられる要素が音波 形自体の中に存在していると予想できる. 聴覚の特徴を 生理学的にみると次の点が知られている. 音の開始時に 聴神経の発火頻度が高く 10 ms 以内で大きく順応するこ と<sup>3)</sup>, 音のピッチ感覚が temporal coding と呼ばれる時間 微細構造(temporal fine structure)に大きく依存しているこ と4,5),音の情報を聴神経がコード化する場合に哺乳動物 では4kHzぐらいまでの振動には位相同期的に発火する こと 67)などである.これらをふまえると特に聴覚感度が 高い発音時の音波形の時間微細構造を観察することで, 感覚に関係の深い波形の特徴を見出せる可能性が予想で きる. そこで本研究では次の実験を行った. フェイシン グの左右のずれがほぼ無いことを確認したマウスピース を使用し、そのサイドレールの片側の一部に厚さ 0.03 mm のフィルムを貼ることによってフェイシングが僅か に左右アンバランスになる状態を作る. そして, このフ ィルムの有無によって発音される音の立上り時にどの様 な違いが見られるのか、音波形の時間微細構造の面から 観察するというものである.なお,我々は既に音波形の 観察からマウスピースのモデルや個体差による違いを捉 えた例を示している<sup>8)</sup>. また, リコーダーで得られる単 音と重音の特徴的な違いが,時間微細構造の波形の山谷 の特徴付けから説明できる可能性を示している<sup>9)</sup>.

## 2. 実験方法

この実験全般を行うにあたっては,一般演奏家が再現 実験や計測を行いその結果を利用できることを考慮し, 特別な測定機器や解析ソフトウエアは使用せずに行った. 音波形の記録は,環境音や反射音の影響を抑えるため簡



Fig. 2 Schematic drawing of experimental setup (A) and tested notes (in Bb for clarinet) in the present study (B).

易防音室(ヤマハ社,アビテックスミニ AMAC12H)内 で行った.床面にハンディレコーダー(Zoom社,H2n) を置き、椅子に座った状態でクラリネット(Bb管ソプ ラノクラリネット, Orsi 社, O21-S) を吹奏した(Fig. 2A). 使用したマウスピース(Vandoren 社, モデル 11.1) はシ クネスゲージ(新潟精機(株),品番 65M)を用いてフェ イシングのカーブの左右差を確認し、ずれが無い状態に 修正したものを使用した.リードは樹脂製のもの(Légère Reeds Ltd.社, Signature 3・1/4), リガチャーは合成皮革製 のもの (Rovner 社, Dark (1R)) を使用した. 樹脂製のリ ードを使用したのは, 天然素材のリードでは吹鳴中に水 分含量の変化が起こり、それによって音色や吹奏感が微 妙に変化するので、その影響を避けるためである. レコ ーダーはクラリネットの管体の直線状の位置でベル先端 との距離約40 cmの床面に置いた.録音にはレコーダー 内蔵の MS マイクを使用し、サイドマイクのゲインを 0 とし、ミッドマイクの出力だけを記録するモノラル録音 とした. 録音データの記録フォーマットは 96 kHz, 24-bit の WAV とした. 録音中はレコーダーのマイクのゲイン は一定に保ち、同時に、 クラリネットとマイクの位置関 係もできるだけ変化させないように注意した. サイドレ ールに貼り付けるフィルムはリバテープ製薬(株)製のケ アピタフィルム (ポリウレタン製, アクリル系接着剤を 使用した厚さ 0.03 mm のフィルム)を使用した. 4 mm 四方に切ったフィルムを片側のフェイシングの中央部の サイドレールに貼り付け(Fig. 1), リードをセットした後 に吹奏した.波形観察に使用した音は B b 管クラリネッ トの記譜上のシャルモー域(低音域)のA音(実音G3) とその倍音系列のクラリオン域(中音域)のE音(実音 D5), そしてアルティシモ域(高音域)のC#音(実音 B5), G音 (実音 F6), H音 (実音 A6) とした(Fig. 2B). それぞれ強弱記号 mf, p, f を意識してこの順にそれぞれ 3,4回ずつ発音し、続けてフィルムを剥がして同様の発 音を行い、これを一連の録音データとした.音データは 波形編集ソフトウエア(Audacity®, ver. 3.1.2)を用いて波 形表示し、そのうち典型的であった部分を Sample Data

Export 機能により数値データとして書き出し,それを表 計算ソフト(Microsoft 社, Excel)によりグラフ表示し た.なお,録音した WAV データは,例えばゲインの変 更等も含めて,一切の加工をせずに波形観察に用い,グ ラフ表示した.

なお,著者らはこの研究に関連したいかなる利益相反 も無い.

## 3. 結果と考察

#### 3.1 強弱の変化による波形の変化

フィルムを付けない通常のフェイシングの状態で低音 域A音を発音した時の波形の典型例がFig.3である.ほ ぼ無音の状態から波形の振幅が最大となるまでにかかる 時間はpからmfそしてfへと音量が上がるほど短くなる 傾向が見られた.また音の立上りの振幅が一定の状態に なるまでの経過を見るとpでは三角波に近い波形から矩 形波的な傾向になり,そこへ更に基本周期内にごく小さ い山谷が入っているというものであった.mfでは三角波 状から基本周期内に大きな山谷がおよそ8個含まれる波 形に推移した.更に音量を上げたfになると音の立上り 初期から基本周期内の山谷が現れ,振幅の増大に伴って

その数と個々の山谷の振幅が大きくなっていき、振幅が 最大になると山谷がおよそ 11 個まで増加した波形が見 られた. この様にクラリネットの低音域 A 音では, p か らfへと音量の変化に連れて音色を構成する倍音を示す 山谷がはっきりと表れるようになり、その数も増えると いう特徴が見られた. クラリネットの低音域(シャルモ 一域)の音色は音量によって変化することが言われるが 10)、その特徴が強弱表現に伴う波形の変化と対応してい ると考えられる. p と f の聴き分けにあたっては、単に 音量だけでなく音色の違いも重要な要素になっているこ とが報告されている<sup>11)</sup>. 今回の結果でも, p と f では定 常に至った時点での1周期内の山谷の数や個々の山谷の 振幅の違いに加えて, 音の立上り時の山谷の増加過程に も違いが見られており、これらが p と f の聴き分けの要 素となる音色の違いの波形的な実態であることが考えら れる. なお一方で, Fig. 3 の結果から, 演奏者としての 訓練を積む上では、pとfでは立上り時間が変わること を考慮した練習が必要なことが示唆される. 適切なタイ ミングで発音したリズム感良い演奏のためには、音量を 変えての発音練習が必要であろう.



Fig. 3 Sound waveform of low A. Low A was sounded at piano (upper row), mezzo forte (middle row) or forte (lower row) on clarinet. Sound waveforms are expanded (left to right) for observation of temporal fine structure (see text). Vertical axes indicate relative amplitude.



Fig. 4 Temporal fine structures of low A and its overtones. Red box indicates 1 cycle of low A waveform at forte. Blue box above waveform of each overtone indicates each 1 cycle at forte. Blue vertical line indicates each period of overtone (A). Red vertical lines indicate the timing of peaks and shoulders observed in waveform of low A (B).

## 3.2 音域による波形の違い

フェイシングにフィルムを貼ったことによる影響を見 るにあたって、今回テストした低音域 A 音の倍音系列の 各音(Fig. 2B) をfで吹鳴した最大振幅時での波形を比較 したのが Fig. 4 である. ここでは低音域 A 音の 1 周期(最 も高い山からの1周期)を赤枠で示し、その同じ時間内 に倍音系列の各音が何周期入るのか,そして各1周期内 (青四角)に山谷が何個見られるのか示したものである (Fig. 4A). ここに見られるように中音域 E 音では 3 周期 で周期内の山谷はおよそ5個,高音域C#音では5周期で 山谷は2個,高音域G音では7周期で山谷は3個,高音 域H音では9周期で山谷は2個が見られている.なお, 高音域 C#と H では 1 周期内の山谷が 2 個に収束してい るが,高音域 C#では中音域 E 音までで見られる山谷を 複雑な形にする明らかな肩(図中の矢印)が見られてい る. また, 各倍音の2周期目始めの山の位置を比較する と(青直線),比較した各音に見られる山の位置とすべて ではないが多くで一致が見られている.また,低音域 A 音に見られた山と肩と判断したタイミングを示したのが Fig. 4B の赤直線である. これらは倍音系列の各音の山や 肩のタイミングで多くが一致することが見られた. クラ

リネットは閉管楽器としての特徴を持っており、その倍 音系列は奇数倍音が強く表れるとされている<sup>12)</sup>.その特 徴がこれらの波形の比較によって、視覚的に確認できる 形で表れていると言えるであろう.

#### 3.3 フィルム貼付の有無による発音波形の違い

片側のサイドレールのフェイシング中央部に 0.03 mm 厚のフィルムを貼り付けたことで,発音することが不可 能になることは無かった.ただし,吹込む息の量や圧力 がより必要と感じられることや,発音のタイミングが遅 れないように注意が必要だと感じること,音量の変化を コントロールするのが難しくなる傾向があることが吹奏 時に感じられた.フィルム貼付有無による波形の違いを 検討するにあたっては,mfでは音量の僅かな加減で p 的 な要素と f 的な要素が任意の割合で混合される傾向が見 られたので,今回は p と f でそれぞれフィルムの有無に よる音波形の比較を行った.

低音域A音をpとfで発音した時に得られた波形がFig. 5である.pでの波形を見ると発音開始時のほぼ無音の時 期にフィルム有(w/film)でノイズが大きい傾向が見られ ている.これは,発音のためにより息吹込みの圧力を上



Fig. 5 Influence of attached film on low A sound waveform. Upper two traces indicate low A sound waveform at piano without (w/o) or with (w/) attached film on the one side of side rail of mouthpiece. Each temporal fine structure of waveform is shown in right. Lower two traces and their enlarged view indicate low A sound waveform at forte without or with attached film. See text for details. Vertical axes indicate relative amplitude.



Fig. 6 Influence of attached film on mid E sound waveform (See text for details).

— 39 —



Fig. 7 Influence of attached film on high C# sound waveform. Each red arrow indicates shoulder.



Fig. 8 Influence of attached film on high G sound waveform. Red arrow indicates shoulder.



Fig. 9 Influence of attached film on high H sound waveform. Red arrow indicates shoulder.

げる必要があり、それによってマウスピースとリードの 隙間を通る気流がより多くなり、その際に発生する乱流 により摩擦音的雑音がより大きくなったものと考えられ

る. また,より柔らかい音色の p を表現するには構成倍 音の認識に関わる1周期内の山谷の数を少なくかつ個々 の振幅を小さくするのが望ましいことが Fig. 3 から考え られるのであるが、フィルムの貼付によって発音のため の息圧がより上がったために,摩擦音的雑音から構成倍 音の山谷が誘導されやすくなったと思われる波形になっ ている.また、細かく観察するとその山谷の振幅が周期 ごとに変動するのも見られている.これら2つに要素が, フィルム貼付によるフェイシングカーブの左右不均等に よって,柔らかい音色の p 表現が難しくなったと感じさ せる要因になっていることが予想できる.一方,fの波 形では息圧がかかって僅かに振動が見られ始める時間を 0として比較したところ,フィルム有でおよそ5ms遅れ て1周期内に出現する山谷が見られた. また, 最大振幅 時で見るとフィルム無では約 11 個見られた山谷がフィ ルム有によって約9個に減少するのが見られた.これは、 短時間内に見られた2つの山谷の2ヶ所(Fig.5右の波 形の拡大表示内の赤丸部)において、2 つの山谷が 1 つ の山谷に収束したのが主な特徴であった. Fig. 3 に見ら れた p から f に向かって音の立上りが早くなる傾向と最 大振幅時に山谷の数が増えるという傾向をふまえると, フィルム貼付により立上りが少し遅れる傾向になり (Fig. 5のfでフィルム貼付でおよそ5msの遅れ),振幅が大 きくなっても山谷が比較的少ない状態しか作ることがで きず(Fig. 5のfで約11個の山谷がフィルム貼付で約9 個に減少),これらが奏者の感じる発音の鈍さや倍音の不 足に繋がり,楽器が鳴りきらないという感覚に繋がって いる可能性が考えられる.一方,周りで聴いている音楽 指導者等にとっては、この山谷の数の少なさや音の立上 りの遅さを音色の違いなどとして感じ取ることは可能で あると予想される.なぜならば、ヒトの聴覚での時間分 解能は 10~20 μsとされており 6,13), しかも位相同期的に 神経系で符号化されていることを前提とすれば次のよう に概算することができるからである. 低音域 A 音(197.2 Hz)の1周期が5.07msであり,その1/9周期がおよそ0.56 ms. 1/11 周期がおよそ 0.46 ms と計算され, その違い約 100 µsは聴覚での時間分解能で十分見分けることが可能 な範囲となる.また、フィルム有により収束を見せた2 つの山(Fig. 5 右の赤丸部)の時間間隔は、波形データ からの計測で 0.17 ms から 0.20 ms の範囲であり、これも 聴覚の時間分解能で分離可能な範囲に入っている.従っ て,音の違いとして感じ取ることは十分に可能であろう. なお, 今回の計測では音波形を 96 kHz, 24-bit の WAV フ オーマットで記録しており、その時間分解能は約0.0104 ms (約 10.4 μs) となる. 従って, ここの結果に示され た数値は計測時間分解能より十分大きく意味のあるもの である.

中音域 E 音での波形を比較したのが Fig. 6 である.上 段の p では、フィルム無では緩やかに振幅が大きくなる のに対し、フィルム有では音の立上りが遅れがちである が、いったん振幅が大きくなりだすと構成倍音を示す山 谷が急速に大きくなる傾向が見られている.ここでもフ ィルム貼付により柔らかい p 表現に該当する状態を保つ のが難しいと考えられる波形が見られている.一方,f ではフィルム有によって息によってリードがわずかに振 動した状態からはっきりした音になるまでの時間が長い 傾向が見られている.また,ほぼ最大振幅で見られた波 形は小さい山や肩を示す位置が違うが,両者で1周期内 に3個の山と1個の肩が見られ,この点で違いは無かっ た.ただし,フィルム有ではより丸みを帯びた波形にな っており,山谷の主要因となっている周波数帯域より更 に高周波領域のパワーがフィルム有では小さくなってい ることを示している.

高音域の C#音(Fig. 7), G 音(Fig. 8)の波形を比較したと ころ,fでは音の立上りや1周期内の山谷の数はフィル ムの有無で違いがほぼ見られなかった.ただし、山谷の 間に見られる肩の部分(図中の赤矢印で示したところ) はフィルム無ではっきりしていたものが、フィルム有で ははっきりしなくなる傾向が見られた. 一方, p での波 形は,高音域 C#音と G 音ではフィルム有で構成倍音の 山谷が大きく深くなる傾向がありfの波形パターンに近 くなることが見られた.特にG音のpの波形を詳しく見 ると、フィルム無においては、音の立上り中期(0.06 s 付近)では1周期内に山谷が大小合わせて4個であった のが後期(0.08 s付近)では3個となり、加えて各山谷 の振幅比が変わるという波形パターンの変化が観察され た (Fig. 8 上段右の 2 つの拡大図の比較). これに対し, フィルム有のpでは山谷は基本的に3個で,音立上りに 伴って波形パターンが変化するというよりは、構成倍音 を含めて単調に山谷の振幅が増大する傾向が強かった. これらの特徴は、フィルム貼付によってpとfの間で取 り得る音色としての変化幅が狭くなることを示している と考えられる.

高音域 H 音の f の波形を比較したのが Fig. 9 である. フィルムの有無で音の立上りに大きな差は見られず,1 周期内の山谷が2 つであることも共通していた.しかし, 波形を詳細に見るとフィルム無では大きい山の後部に僅 かに肩(図中の赤矢印)が確認できるのに対し,フィル ム有ではそれがほぼ見えなくなっている.また,小さい 山の位置を比較すると(Fig. 9 右下の重ね合わせ図)フ ィルム有によって約0.055 ms 早いタイミングにシフトし ているのが確認された.この値はこの音高の1 周期0.561 msの約10%に相当する.なお,高音域 H 音での p での 比較も試みたが,フィルム有無にかかわらず音量を落と して安定して発音することが難しかったため,波形の比 較は行わなかった.高音域 H 音は通常の演奏ではクラリ ネットの最高音域にあたり,表現の幅が広く取れないこ とは一般に指摘されている<sup>10</sup>.

フェイシングカーブに左右のアンバランスがあると高 音を安定して吹鳴することが難しくなるという一般的な 指摘<sup>1)</sup>があるが、今回の結果ではフィルム有で p と f の 音色の幅、つまり波形の時間微細構造の変化の幅が狭め られることが特徴と思われた.なおデータには示さない が、フィルムを貼る位置をティップレールのすぐ近くの サイドレール上部にした場合は、高音域での発音が難し くなる傾向が強くなると感じられ、波形でも音の立上り 時期の波形が乱れる例が多く観察された.フェイシング のどの領域がどの音域に大きな影響を与えるのかという 点に注目して、今後更なる実験を計画する必要があるで あろう.

## 4. おわりに

今回の結果からフィルムを貼ることにより次のような 変化が波形に見られたと言えるであろう.1 つ目はフィ ルム有によって特に中低音域で音の立上りが遅くなる傾 向があることである.この音域は、通常のクラリネット 演奏で中心になる音域である.2つ目は,pとfでの波形 の変化の幅、つまり山谷の数の増減や山谷の高さ深さの 差の変化をコントロールできる幅が小さくなる傾向が出 ることである. 特に柔らかい音色の p (pp)を表現するに は構成倍音の山谷を小さくすることが必要だと Fig. 3 か ら考えられるのだが、フィルム有によってそれが難しく なる傾向になる. これらのことがフェイシングカーブに 左右の僅かな不揃いによって表現の幅の狭さや吹きにく さを感じさせる要素になっているものと考えられる. な お,低音域のfでは構成倍音の山谷の数がフィルム貼付 によって減ることが見られており、低音域での構成倍音 を聴き取ることができる訓練を積んでいれば違いを感じ 取れるが、そうでないとフィルム有無の違いを音色から 感じ取るのは難しいことも考えられる. 言語や楽音の聴 き分けの研究から、音楽の訓練を積んでいる者とそうで ない者では違いを感じ取る閾値が違い、音楽の訓練を積 んでいる者では音の時間情報を神経活動に符号化する精 度が学習によって向上していることが明らかになってい る<sup>14,15)</sup>.従って音楽指導者などでは、今回示した音波形 の時間微細構造としての違いを感じ取っている可能性は 十分にあると考えられる.具体的にどの程度の差を感じ 取れるのかについては, 今後心理学的実験や, 脳波の計 測を併用した聴き分けの実験などを組合せて明らかにす る必要があるであろう.

中音域以上のfではフィルム有無によって山谷の数で はっきりした差は見られなかった.しかし,波形の肩が 見られなくなることや,波形全体が丸みを帯びるといっ た変化が見られた.今回パワースペクトル解析について は触れないが,こういった波形の変化は高周波域成分の パワーが減少することに対応する.ヒトでの位相同期可 能な最高周波数については 1.5 kHz から 8 kHz までのい くつかの見解が出されており,まだ統一的なものになっ ていない<sup>5)</sup>.しかし,一般にヒトの可聴域が 20 kHz まで あること,そして高周波域に応じる聴神経も音エネルギ ーに依存して発火頻度が変化すること<sup>16)</sup>を考えると聴 取者が中高音域で見られたフィルム有無による違いを音 色の違いとして感じ取ることは可能だと考えられる.

今回行った音波形を直接観察する方法ではFFT 分析の

ような多数の構成倍音の周波数とパワーを表示すること はできないが、音楽表現に重要な音の立上りや音色の違 いの認識に関わる時間微細構造の要素の特徴づけについ て、一定の示唆は与えられたものと考えている.加えて、 音を聴き分析する訓練がまだ十分でない演奏者にとって は、録音して時間軸を任意に拡大して視覚的に波形の時 間微細構造を確認することが、自分の発音や音色の状態 を知るための客観的な手掛かりとなり得るので、吹奏練 習の際に活用されることが期待される.

### 参考文献

- R. ウドコフスキ: クラリネットマウスピースのリフェイシングと修復(前編,後編), パイパーズ, Vol. 36 No.6, pp.30-33, Vol.36, No.7, pp78-81 (2017).
- F. Pinard, B. Laine and H. Vach: Musical quality assessment of clarinet reeds using optical holography, J. Acoust. Soc. Am, Vol. 113, No.3, pp.1736-1742 (2003).
- L. A. Westerman and R. L. Smith: Rapid and short-term adaptation in auditory nerve response, Hearing Res., Vol.15, pp.249-260 (1984).
- 大串健吾,音のピッチ知覚 (日本音響学会編,音響 サイエンスシリーズ 15),コロナ社 (2016).
- 5) E. Verschooten, S. Shamma, A. J. Oxenham, B. C. J. Moore, P. X. Joris, M. G. Heinz, C. J. Plack: The upper frequency limit for the use of phase locking to code temporal fine structure in humans: A compilation of viewpoints, Hearing Res., Vol.377, pp.109-121 (2019).
- M. F. ベアー, B. W. コノーズ, M. A. パラディーソ (加藤宏司,後藤薫,藤井聡,山崎良彦監訳): 神経 科学-脳の探求-,西村書店, pp.283-288 (2007).
- J. O. Pickles: An Introduction to the Physiology of Hearing (3<sup>rd</sup> ed.), Emerald Group Publishing Limited,

pp.82-84 (2008).

- 堀越哲郎,藤原正明: スマートフォンを用いたクラ リネットマウスピース比較のための音波形観察の 有用性,東海大学紀要工学部, Vol.57, No.2, pp.41-47 (2017).
- 9) 堀越哲郎,藤原正明:アルトリコーダーで得られた 重音波形の時間構造に見られた特徴,東海大学紀要 工学部, Vol.59, No.2, pp.51-58 (2019).
- 竹内彬:ドビュッシーのクラリネット用法の独自性 と《第一狂詩曲》——従来の管弦楽法との比較を通 して ——,東京音楽大学大学院論文集, Vol.4, pp.19-37 (2018).
- M. Fabiani and A. Friberg: Influence of pitch, loudness, and timbre on the perception of instrument dynamics, J. Acoust. Soc. Am., Vol.130, No.4, pp.EL193-EL199 (2011).
- (12) 安田由典:新版 楽器の音響学,音楽之友社, pp.49-50 (1996).
- B. Grothe, M. Pecka and D. McAlpine: Mechanisms of sound localization in mammals, Physiol. Rev., Vol.90, pp 983-1012 (2010).
- 14) J. N. Oppenheim and M. O. Magnasco: Human time-frequency acuity beats the fourier uncertainty principle, Physical Review Letters, Vol.110, pp. 044301(1-5) (2013).
- 15) D. L. Strait and N. Kraus: Biological impact of auditory expertise across the life span: Musicians as a model of auditory learning, Hearing Res., Vol.308, pp.109-121 (2014).
- M. F. ベアー, B. W. コノーズ, M. A. パラディーソ (加藤宏司,後藤薫,藤井聡,山崎良彦監訳): 神経科 学-脳の探求-,西村書店, pp.265-282 (2007).

# 正規圧密粘土の塑性ポテンシャルとひずみの比 今井 誉人\*1 飯沼 孝一\*2 赤石 勝\*3 杉山 太宏\*4

## Plastic Potential and the Ratio of Strain Components of Normally Consolidated Clays

by

Yoshihito IMAI<sup>\*1</sup>, Koichi IINUMA<sup>\*2</sup>, Masaru AKAISHI<sup>\*3</sup> and Motohiro SUGIYAMA<sup>\*4</sup> (Received on May 27, 2022 and accepted on July 7, 2022 )

#### Abstract

The relationship between the ratio of strain components and the plastic potential Q of the elasto-plastic constitutive model used for finite element analysis is investigated. The following results were obtained. 1) Reproduction of the  $K_0$  stress deformation state depends on the assumed plastic potential. 2) The adoption of the associated flow rule is a constraint on the rational elasto-plastic deformation analysis for soft grounds; it is necessary to adopt the non-associated flow rule. 3) If a plastic potential that can reproduce the  $K_0$  value is adopted, the stress-strain relationship at the stress ratio near the  $K_0$  value is more useful for practical prediction.

Keywords: Clay, Strain, Flow rule, Plastic potential

## 1. 緒言

地盤の弾塑性有限要素解析では、載荷前の地盤内の応 力状態変化が予測精度に影響する.載荷前の平坦地盤内 の応力状態、すなわち、静止土圧状態からの地盤内応力 変化に対応したひずみが計算される場合、初期応力を決 める静止土圧係数は、計算上必要不可欠な定数の一つで ある.代表的な弾塑性構成式の一つカムクレイモデルの 塑性ポテンシャルでは、実際の測定値よりかなり大きな 静止土圧係数Ko値を与えることが知られている<sup>1),2)</sup>.載 荷前の地盤内初期応力を再現できない弾塑性構成式では、 盛土や構造物載荷後の地盤変形や地盤内応力計算値の信 頼度は低いものとなる.また、実務では塑性指数やせん 断抵抗角から推定したKo値を用いることがあるが、その Ko値の信頼性も高くない.

粘土を対象とした弾塑性モデルのK<sub>0</sub>値には,弾性ひず み成分はポアソン比,塑性ひずみ成分は塑性ポテンシャ ルが関係する<sup>3)</sup>.両ひずみ成分によってK<sub>0</sub>値を再現でき れば,静止土圧状態に近い異方応力状態で発生するひず み成分をより正確に予測できる可能性があると考えられ る.この論文では,応力比一定の三軸異方圧密試験で発 生する軸ひずみと体積ひずみの関係を検討した.具体的 には,K<sub>0</sub>条件の応力増分を加えた三軸圧密試験で軸ひず みと体積ひずみの大きさが等しく,側方ひずみゼロが計 算される塑性ポテンシャルを提案した.これを用いた弾 塑性応力ひずみ関係の計算結果と実験結果を比較するこ

\*4 工学部土木工学科教授

とで,提案する塑性ポテンシャルがK<sub>0</sub>値付近の応力比で 圧縮された粘土の軸ひずみと体積ひずみ関係の予測に適 用可能なことを示す.

## 2. ひずみ関係と塑性ポテンシャルQ

粘土要素に生じる全ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  は, 弾性ひずみ速 度成分  $\dot{\epsilon}_e$  と塑性ひずみ速度成分  $\dot{\epsilon}_p$  の和として式(1)で 表し, 弾性ひずみ速度成分はフックの法則, 塑性ひずみ 速度成分は粘塑性流動則の式(2)を用いて計算する.粘塑 性流動則を用いても, 定常状態であれば弾塑性解析とな る<sup>4</sup>.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_p$$
 (1),  $\dot{\varepsilon}_p = \langle F \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma}$  (2)

20

ここに、F は降伏関数、Q は塑性ポテンシャル、 $\sigma$ は応 力成分である。 $F \leq 0$  ならば〈〉内の値はゼロとし、F > 0 ならば通常の括弧として扱う。また、"・" は時間につい ての微分を示し、この論文では時間増分で発生するひず み増分の計算には前進差分法を用いる。

式(2)から明らかなように、Fはゼロか正かが塑性ひず み増分の計算に影響する.また、塑性ひずみ成分は塑性 ポテンシャルQの応力勾配に比例するので、一次元圧縮 において計算される水平有効応力、すなわち静止土圧係 数は塑性ポテンシャルQに影響される.その塑性ひずみ 成分に対するQの影響を比較検討するため、代表的弾塑 性構成式として知られている式(3)のオリジナルカムク レイ、式(4)の修正カムクレイモデルと、提案する式(5)の 塑性ポテンシャルを用いる<sup>5,6</sup>.

<sup>\*1</sup> 小野田ケミコ株式会社 技術設計部

<sup>\*2</sup> 株式会社 オオバ

<sup>\*3</sup> 東海大学名誉教授

$$Q_0(=F_0) = q - Mp \ln(p_0/p)$$
 (3)

$$Q_M(=F_M) = q^2 + M^2(p^2 - pp_0)$$
(4)

$$Q_P(=F_P) = q^2 - 2\gamma_p pq + \gamma_p^2 pp_0 + M^2(p^2 - pp_0)$$
(5)

ここに、qは偏差応力、pは平均有効応力、 $p_0$ はそれぞれ 塑性ポテンシャルのサイズパラメーター、Mは限界状態 線 CSL の勾配、 $\gamma_p$  (=  $\eta_0^2 + 3\eta_0 - M^2$ )/3、 $\eta_0 = q_0/p_0$ )は $K_0$ 圧密時の応力比 $\eta_0 \ge M$ から決定する定数である<sup>2)</sup>. 式(5) において $\gamma_p = 0$ とした $Q_p$ は、修正カムクレイモデルのそ れと一致する.なお、式(3)~(5)のカッコ内 $F_0$ 、 $F_M$ 、 $F_p$ は降 伏関数で、いずれの式も関連流動則を意味する.

Fig.1は、式(3)~(5)の各降伏関数(F=0)を p-q 空間に 示したもので、 ©印の応力でK<sub>0</sub>圧密されたカムクレイモ デルの降伏面は破線がオリジナル、一点鎖線が修正カム クレイモデルである.カムクレイモデルは周知のとおり 関連流動則(F=Q)であり、Fig.1の降伏関数から塑性ポ テンシャルQによる塑性ひずみ増分ベクトルの方向が推 測できる.これらの F や Q を用いることで、三軸供試 体の弾塑性応力ひずみ関係が式(6)で求められる<sup>7)</sup>.

$$\begin{bmatrix} d\upsilon \\ d\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\upsilon_e + d\upsilon_p \\ d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix}$$
(6)  
$$C_{11} = \frac{1}{H} \frac{\partial F}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial p} + \frac{1}{K} \qquad C_{12} = \frac{1}{H} \frac{\partial F}{\partial q} \frac{\partial Q}{\partial p}$$

$$C_{21} = \frac{1}{H} \frac{\partial F}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial q} \qquad \qquad C_{22} = \frac{1}{H} \frac{\partial F}{\partial q} \frac{\partial Q}{\partial q} + \frac{1}{3G}$$
$$H = -\frac{\partial F}{\partial v_p} \frac{\partial Q}{\partial p}$$

ここに、体積ひずみ $\upsilon$  (=  $\varepsilon_a + 2\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_a$ ; 軸方向ひずみ,  $\varepsilon_r$ ; 軸方向ひずみ), 偏差ひずみ $\varepsilon$  (= 2( $\varepsilon_a - 2\varepsilon_r$ )/3), 平均有 効応力 p (= ( $\sigma_a + 2\sigma_r$ )/3), q (=  $\sigma_a - \sigma_r$ ) は偏差応力, 下付き添え字の  $a \ge r$  は軸方向と半径方向を,  $e \ge p$  は 弾性ならびに塑性ひずみ成分をそれぞれ表す. K は体積 弾性係数, G はせん断弾性係数である.

応力比一定三軸圧密試験における偏差ひずみのせん断 弾性係数 G の影響を無視して式(3),式(5)をそれぞれ式 (6)に代入すれば,偏差塑性ひずみ増分dɛpが式(7),式(8) として求められる.両式の体積ひずみ増分は共通で式(9) である.

$$d\varepsilon_p = -\frac{(\lambda - \kappa)}{f_0} \frac{1}{(M - \eta)} \frac{dp}{p}$$
(7)

$$d\varepsilon_p = \frac{(\lambda - \kappa)}{f_0} \frac{2(\eta - \gamma_p)}{(M^2 - \eta^2)} \frac{dp}{p}$$
(8)

$$d\upsilon = \frac{\lambda}{f_0} \frac{dp}{p} \tag{9}$$

ここに、 $f_0$ は体積比、 $\lambda$ は圧縮指数、 $\kappa$ は膨張指数、 $\eta$ (=q/p) は応力比である.式(8)では、 $\gamma_p = 0$ とすれば修正カムク レイの偏差ひずみ増分となる.

これらの関係式を用いた式(6)の数値積分で三軸圧密



Fig. 1 Yield surface F=0.

試験の軸ひずみと体積ひずみの関係が計算可能である. 弾性せん断ひずみ増分d $\epsilon_e = 0$ , すなわちd $\epsilon = d\epsilon_p$ と仮定 すれば, 応力比一定三軸圧密試験の体積ひずみ増分と軸 ひずみの比がオリジナルカムクレイは式(10), 提案式は 式(11)となって, 応力比 $\eta$ に依存する値となる.

$$d\upsilon/d\varepsilon_p = \frac{3(M-\eta)}{3\Lambda + M - \eta}$$
(10)

$$d\upsilon/d\varepsilon_p = \frac{3(M^2 - \eta^2)}{3\Lambda(\eta - \gamma_p) + M^2 - \eta^2}$$
(11)

ここに,  $\Lambda = 1 - \kappa / \lambda$  である.

Table 1 Physical properties of soils.

Sample	Gs	$\omega_{\rm L}$	Ip	Grading (%)		
		(%)	(%)	Clay	Silt	Sand
Н	2.660	121	69	18	72	10
K	2.642	112	51	47	38	15
М	2.648	67	31	34	55	11
Y	2.652	73	41	30	38	32
Ι	2.183	172	84			

#### 3. 試料および実験方法

Table 1 に示した物性を示す5種類の粘性土試料を液性 限界以上の含水比で練り返した後,一次元圧密容器に投 入して所定の圧密圧力で予圧密を行い,三軸圧密試験用 粘土塊を作成した.直径5 cm,高さ12 cmの供試体を成 形し,圧密を促進するため円柱供試体の上下周囲に濾紙 を巻き三軸室にセットした.予圧密圧力に等しい圧密圧 力で1日間K<sub>0</sub>圧密後,次の試験を実施した.

<u>K<sub>0</sub>圧密ならびに非排水せん断試験</u>:非排水状態で等方応 力増分を載荷,B値(≒1)を確認後K<sub>0</sub>圧密試験を実施し た.圧密開始後,軸ひずみと体積ひずみの大きさが等し いK<sub>0</sub>条件となるよう水平応力増分を制御した.



Fig. 3 K<sub>0</sub> consolidation test ; Sample H.

 $K_0$ 圧密後ひずみ制御の非排水せん断試験を行い,応力 ひずみ関係の計算に必要なせん断抵抗角を求めた. <u>応力比一定三軸異方圧密試験</u>:鉛直応力 $\sigma_{a0}$ =98 kPa で $K_0$ 圧密後,鉛直応力増分 $d\sigma_a$ =98 kPa を4等分し,1日間隔 で載荷・圧密した.所定の応力比で応力比増分がゼロと なるよう水平応力増分 $d\sigma_r$ を設定したので,応力比一定試 験と言っても最初の載荷段階の応力比は一定ではない. 2 から4段階の載荷が所定の応力比となる試験の体積ひ ずみvと軸ひずみ $\varepsilon_a$ の経時変化を測定した.圧密せん断過 程中は,98 kPa のバックプレシャーを載荷した.

## 4. 実験ならびに計算結果と考察

試料 Y と H の $K_0$  圧密試験における体積ひずみvと軸ひ ずみ $\varepsilon_a$ の経時変化が,それぞれ Fig. 2 と Fig. 3 である. Fig. 2 は試料 Y に対して鉛直応力 $\sigma_a$ を4 段階(49,98, 147,196 kPa) で載荷した時の各両ひずみ,Fig.3 は瞬間 載荷(黒印)と段階載荷(赤印)で得られた両ひずみに 加え $K_0$ 条件のために制御した水平応力 $\sigma_r$ の経時変化も青 印の記号で併せて示している.試料や荷重載荷方法によ らず $v \coloneqq \varepsilon_a$ となり,水平方向ひずみゼロの $K_0$ 状態が確認で きる.また,両粘土とも顕著な二次圧密挙動が観察され るが,二次圧密の継続中,水平有効応力は一定値に収束 し両試料の $K_0$ 値は同じ 0.44(応力比 $\eta$ =0.894)となった.

Fig. 4 は,応力比ηを変えた等方圧密(η=0)を含む異 方圧密試験(試料 K)の軸ひずみε<sub>a</sub>と体積ひずみυの経時



Fig. 4 Anisotropic Consolidation test ; Sample Y.



Fig. 5 Relation of axial and volumetric strain ; Sample Y.

変化である.1日間隔の段階載荷ではあるが載荷増分が 大きいため、載荷直後に軸ひずみ $\epsilon_a$ は急増し、応力比 $\eta$ の 増加に伴い軸ひずみ量は増加する.3段階の載荷により 生じた各試験の両ひずみの関係を示したのが Fig.5であ る.各載荷段階の応力比 $\eta$ が変わらなければ、 $\epsilon_a$ とvの比 は破線で示すようにほぼ一定となることがわかる.Fig.5 と同様に試料 Hの $\epsilon_a \sim v$ 関係を示したのが Fig.6で、両 者には赤破線のとおり直線関係が認められる.

試験を行った 4 試料の応力比ηと軸ひずみと体積ひず みの比 $\varepsilon_a/v$ の関係を調べた Fig.7 によれば、ηと $\varepsilon_a/v$ には 比例関係が認められる.この関係を利用すれば、η一定で 行う異方圧密試験の結果から $K_0$ 値を推測できる可能性 がある.

Fig.8は、試料 Hの $\eta \ge \varepsilon_a / \upsilon$ 関係の実測値と弾性せん断 ひずみをゼロと仮定した近似式(10)、(11)による計算結果 の比較である.式(10)のオリジナルカムクレイモデルで は軸ひずみを2倍以上過大に評価するのに対し、提案式 (11)では非関連流動則を採用し、式(5)の $Q_p$ 決定に必要な 定数 $\gamma_p$ 値を実験の $K_0$ 値と限界状態線の勾配Mから求める ことで、 $K_0$ 状態が計算できている.しかし、 $\eta$ が $K_0$ 状態か ら遠ざかるほど実測値との差が広がる.これは、弾性せ ん断ひずみの影響を無視したことと、仮定する塑性ポテ ンシャルの不適合のためと考えられる.

Fig.9は、 $\eta$ =0.75 ( $K = d\sigma_r/d\sigma_a$ =0.5)、試料 I で実施した 異方圧密試験の $\varepsilon_a/v$ 関係の実測値で、正規圧密領域の  $\varepsilon_a/v$ =1.15 である.式(5)と(6)による数値積分で $\varepsilon_a/v$ =1.15 となる計算結果は、 $K_0$ 値の再現に必要な塑性ポテンシャ



Fig. 6 Relation of v,  $\varepsilon_a$  and  $\eta$ ; Sample H.



Fig. 7 Relation of v,  $\varepsilon_a$  and  $\eta$ ; Samples H,M,Y&K.

ルの $\gamma_p$ 値(=-0.26)を設定することで得られる. 弾塑性構 成式による排水条件下の軟弱地盤のせん断変形予測には, 仮定する塑性ポテンシャルの適用性が重要である.式(5) のQの適用性は、今後より大きな $\eta$ ( $\eta > \eta_0$ )の異方圧密 試験により、更に検討する必要がある.

#### 5. 結言

地盤の有限要素解析に用いる弾塑性構成式の塑性ポテ ンシャルとKo値の関係について検討した.周知のように, Cam clayモデルの流動則で採用する塑性ポテンシャルで は、Ko変形応力状態を再現できず、Ko圧密地盤に載荷す る多次元圧密変形の合理的な予測はできない.提案した Ko値を再現できる塑性ポテンシャルを利用すれば、応力 比を一定とした三軸異方圧密試験で得られる軸ひずみと 体積ひずみ関係の予測が可能であることを示した.

この論文の検討は、弾塑性構成式で仮定する塑性ポテ ンシャルを利用して計算される塑性ひずみ成分とK<sub>0</sub>値 の関係に限られている、弾性ひずみに関係するポアソン 比はK<sub>0</sub>値から計算しているが、異方応力条件下の圧縮に おけるその前提の検討は今後の課題である.



Fig. 8 Observed and Calculated relations of  $\varepsilon_a / \upsilon$  and  $\eta$ .



Fig. 9 Ratio of  $\varepsilon_a / \upsilon$  of  $\eta$  constant test ; Sample I.

## 参考文献

- 1) J. H. Atkinson: *Foundations and slopes*, McGRAW-Hill, (1981).
- 飯沼孝一,今井誉人,赤石勝,杉山太宏:一次元圧密 における有効応力経路と塑性ポテンシャル,土木学 会論文集 C(地圏工学), Vol.71, No.2, pp.119-124 (2015).
- 3) D. J. Naylor and G. N. Pande: *Finite element in geo*mechanical engineering, Pineridge Press Ltd. (1981).
- 4) D. R. J. Owen and E. Hinton: *FINITE ELEMENTS IN PLASTICITY*, Pineridge Press Ltd. (1980).
- 5) K. H. Roscoe and J. B. Burland: On the generalized stress strain behavior of saturated clay, Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press (1968).
- Y. F. Dafalias and M. Akaishi: A simple anisotropic clay plasticity model, Mechanics Research Communications, Vol.29, pp.241-245 (2002).
- 7) I. M. Smith: *Programing the Finite Element Method with Application to Geomechanics*, John Wiley & Sons, Inc. (1982).

# 二次圧密による粘土の強度増加と圧密度 今井誉人\*1・赤石勝\*2・杉山太宏\*3

# Increase of the Strength of Clays due to Secondary Compression and the Degree of Consolidation

by

Yoshihito IMAI<sup>\*1</sup>, Masaru AKAISHI<sup>\*2</sup> and Motohiro SUGIYAMA<sup>\*3</sup> (Received on May 27, 2022 and accepted on June 7, 2022)

#### Abstract

Secondary compression is unrelated to the increase of effective stress associated with consolidation, but it affects the increase in strength. When secondary compression occurs during primary consolidation, the effect of the consolidation time on the undrained shear strength cannot be ignored. A method of evaluating the strength based on the ratio of primary compression is proposed and the results are as follows.

1) In one-dimensional consolidation analysis considering secondary compression, the generation of excess pore water pressure due to secondary compression is equivalent to the virtual external force. The increase in strength due to secondary compression can be explained by relating the equivalent stress to the amount of secondary compression to the increase in strength due to primary consolidation. 2) The increase of the strength due to secondary compression during primary consolidation can be evaluated by the proposed definition for the degree of consolidation. 3) As the primary compression cannot be measured separately from the total observed compression, the need to assume the ratio of primary compression is an unsolvable problem.

Keywords: Primary consolidation, Secondary compression, Shear strength

## 1. 緒 言

全応力法による安定計算では、圧密による地盤の強度 増加を予測する必要がある.地盤の圧密度に対応する土 の強度増加率の把握には、室内圧密非排水せん断試験結 果を利用するが、せん断前の圧密時間の設定が難しい. 粘土では二次圧密が発生し、圧密時間の増加とともにせ ん断強度も増加する<sup>1)-3)</sup>.土質試験法では3t<sub>T</sub>法により圧 密打ち切り時間を決定するが、逆S字状とならない圧密 量時間曲線では、3t<sub>T</sub>法を適用しにくい<sup>4)</sup>.また、圧密打 ち切り時間までに発生する二次圧密による強度増加も評 価されていない.

一次元圧密中の偏差応力の増加が二次圧密発生の主要 因であり、二次圧密は静止土圧係数の増加によるものと 指摘されているが、圧密リングを用いた標準圧密試験で は、一次元圧密中の水平方向応力変化を測定することは できない<sup>5)-7)</sup>.二次圧密は、一次圧密中にも発生している と考えられるが、これも直接測定することが不可能であ る<sup>8).9)</sup>.一次圧密量は一般に圧密に伴う有効応力増分と関 係づけられるが、二次圧密も同じく有効応力増加に伴う

\*2 東海大学名誉教授

\*3 工学部土木工学科教授

強度増加と関連付ける必要がある.

この論文では粘土要素に発生する圧密量を有効応力変 化による一次圧密量と二次圧密量の和と考え、二次圧密 の発生に寄与した等価有効応力増分も強度増加に影響す ると仮定した.全圧密量と一次圧密量の比で定義する圧 密度を利用し、一次・二次圧密過程に拘らない強度増加 評価法を提案する.

## 2. 二次圧密と圧密方程式

### 2.1 二次圧密モデルの仮定

二次圧密に関する既往の研究では,式(1)あるいは(2)で 表す二次圧密ひずみ速度*ɛ*sが採用されている<sup>10,11)</sup>.

$$\dot{\varepsilon}_S = \alpha/t \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \dot{\varepsilon}_i * exp(-\Delta \varepsilon_s / \alpha) \tag{2}$$

ここに、 $\alpha$ は二次圧密係数,tは圧密経過時間、 $\epsilon_i$ は二次圧 密の初期ひずみ速度、 $\epsilon_s$ は二次圧密のひずみ量である. 式(1)を積分して二次圧密量を求める問題点は、二次圧密 の発生開始時間を決定できないことである. 圧密層内の 位置によって圧密開始時間が異なるように、二次圧密の 発生も異なると考えられる. 対数目盛の時間に対してプ ロットした圧密量時間曲線から二次圧密係数 $\alpha$ を求め、 $\alpha$ 

<sup>\*1</sup> 小野田ケミコ株式会社 技術設計部

を求めた直線部分を図上で左上(時間が短い)方向に延 長し,仮定する一次圧密量(水平線)との交点として式 (3)から求められる時間t<sub>i</sub>は,二次圧密の開始時間に関す る圧密層全体の平均値と考えられる.

$$t_i = t_f * \exp(-\Delta \varepsilon_{sf} / \alpha) \tag{3}$$

ここに、 $t_f \iota m_v i d \varepsilon$ 決定した圧密時間(標準圧密試験では1日)、 $\Delta \epsilon_{sf} \iota t_f \iota s$ ける二次圧密量であり、時間 $t_f o$ 全圧密量 $\Delta \epsilon_f \geq$ 仮定した一次圧密量 $\Delta \epsilon_p$ から $\Delta \epsilon_{sf}$ (= $\Delta \epsilon_f - \Delta \epsilon_p$ )が得られる.

仮定した一次圧密量 $\Delta \varepsilon_p$ から、平均圧密量時間曲線の  $\alpha$ を利用することで、式(2)の二次圧密の初期速度 $\dot{\varepsilon}_i$ は式 (4)で計算できる.

$$\dot{\varepsilon}_i = \dot{\varepsilon}_{sf} * \exp\left(\bigtriangleup \varepsilon_{sf} / \alpha\right) \tag{4}$$

ここに,  $\dot{\epsilon}_{sf} = \alpha/t_f$  である.

ー次元圧密量は一次圧密量と二次圧密量の和とし,式 (3)あるいは式(4)で二次圧密の初期条件を考えると,二次 圧密は一次圧密中から発生することになる.

#### 2.2 圧密方程式と圧密度

ー次元圧密における圧密速度(=体積ひずみ速度)を 一次,二次圧密成分の和とし,連続条件式に代入すれば, 二次圧密を考慮した間隙水圧の圧密方程式(5)が得られる<sup>8)</sup>。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v^* \frac{\partial^2 u}{\partial v^2} + \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} + \dot{\varepsilon}_s / m_p \tag{5}$$

ここに、u は間隙水圧、y は圧密層内の位置座標、 $c_v^*$ (= $k/\gamma_w/m_v$ , k は透水係数、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量、 $m_p$ は一次圧密量で定義する体積圧縮係数)は圧密係数、 $\sigma_v$ は鉛直荷重である.

式(5)右辺第2項は載荷速度,第3項は単位時間に二次 圧密によって発生する過剰間隙水圧である.この過剰間 隙水圧成分で二次圧密による強度増加を考慮することが できる.

式(6)は Biot の圧密理論に基づく有限要素連成圧密マトリックス方程式である<sup>12)</sup>.

$$\begin{bmatrix} \underline{K} & \underline{C} \\ \underline{C^T} & \Delta & t \underline{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{d_{t+\Delta t}} \\ \underline{u_{t+\Delta t}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{F_t} + \underline{F_s} \\ \underline{C^T} * \underline{d_t} \end{bmatrix}$$
(6)

ここに,<u>K</u>は剛性マトリックス,<u>P</u>は透水マトリックス, <u>C</u>は連成マトリックス,  $d_t$ は節点変位, $u_t$ は節点間隙圧 である.添え字は時間を意味する.<u>F</u>は節点外力,そし て<u>F</u>,は二次圧密量(あるいは初期ひずみ量)から計算さ れる節点力であり式(7)で計算される。

$$\underline{F}_{S} = \int \underline{B}^{T} \underline{D} \varepsilon_{S} \, dv \tag{7}$$

ここに、<u>D</u>は応力ひずみマトリックス、<u>B</u>はひずみ変位 マトリックス、<u>c</u>は二次圧密に基づくひずみ成分である.

有限要素圧密解析における式(7)の節点荷重<u>F</u>は,式 (5)の右辺第三項の二次圧密によって発生する過剰間隙 水圧に対応する.式(5)と(6)から明らかなように,数値解 析で用いる圧密荷重は,実際の荷重と二次圧密による体 積変化に寄与した式(7)のような等価節点力の和と考え られる.二次圧密量が粘土の強度増加に影響するならば, 外力として実際の荷重のみの考慮では強度を適切に評価 できない.

そこでこの論文では, 圧密に伴う強度増加評価のため 圧密度を式(8)のように定義する<sup>13)</sup>。

$$U = v_f / v_p \tag{8}$$

ここに、 $v_f$ はある時間における圧密量、 $v_p$ は一次圧密量 である.式(8)の分母を $v_p$ とすることでU>1を定義でき、 二次圧密成分を考慮した圧密度Uで室内圧密試験の二次 圧密による強度増加の評価が可能となる.

#### 3. 試料および実験方法

3.1 試料

日立市内でシンウオールサンプリングした不攪乱試料 H,宮崎市,草加市ならびに伊勢原市で採取したそれぞれ シルト(試料 M と S;練り返し再構成)と高有機質土(試 料 I;ブロックサンプリング)を実験に用いた.

Table 1 Physical properties of soils

Sample	Gs	$\omega_{\rm L}$	ω <sub>p</sub>	G	rading (%	6)
		(%)	(%)	Clay	Silt	Sand
Н	2.660	121	52	18	72	10
М	2.648	67	36	34	55	11
S	2.672	82	21	54	41	5
Ι	$\omega_n=400$ %, $L_i=40$ %					

## 3.2 実験方法

圧密時間の長短による圧密量時間曲線,強度増加への 影響ならびに式(8)で定義する圧密度の有用性を調べる ために,圧密時間の異なる一次元圧密,三軸圧縮および 定体積一面せん断試験を行った.

1) 標準圧密試験機による一次元圧密試験

載荷前の圧密時間の違いが,測定される圧密量時間関係に及ぼす影響を調べた.式(6)による圧密 FE 計算によって,得られた結果の再現計算を行った.

2) 三軸K0 圧密非排水せん断試験

赤井らは<sup>6)</sup>長期K<sub>0</sub>圧密試験の二次圧密領域において, K<sub>0</sub>値が次第に増加する,すなわち側圧が増加することを 報告している.そこで,K<sub>0</sub>圧密中の所定の圧密時間で側 圧を増加させ,その後の二次圧密挙動を調べた.側圧増 加後は異方圧密状態となり,側圧の変化(増加)が二次 圧密とせん断強度に及ぼす影響を調べた.



3) 等方圧密非排水せん断試験

K<sub>0</sub>圧密試料に 98 kPa の等方圧密圧力増分を加え,所 定の圧密時間で圧密を打ち切り後,非排水せん断試験を 実施した.圧密時間が短く未だ一次圧密中の場合には, 圧密を打ち切った 2 時間後,過剰間隙水圧が一定値に収 束後に非排水でせん断した.この場合の供試体内の圧密 度は一定でない.供試体内に正規圧密領域と過圧密領域 の存在する供試体の非排水せん断試験で,圧密度による 強度増加を調べた<sup>の</sup>。

4) 定体積一面せん断試験

改良型一面せん断試験機でせん断前の一次元圧密を行い、所定の圧密時間で圧密を停止させるべく約2時間定 体積を保った後、定体積一面せん断試験を実施した. せん断前の供試体に正規圧密と過圧密領域が残るが、圧密 停止時間の平均圧密度でせん断強度を調べた. せん断前 の二次圧密期間を長くした供試体では標準圧密試験機で 所定期間圧密後、一面せん断試験機内で1日間再圧密し てからせん断した.

## 4. 実験ならびに計算結果と考察

4.1 載荷前圧密時間の違いによる圧密挙動と数値計算 Fig.1は,試料Hの一次元圧密試験結果である.Fig.1(a) の●印, 圧密時間t<sub>c</sub>=1440 min の試験結果から計算に必要 な土質定数として,体積圧縮係数m<sub>v</sub>=2.54\*10<sup>4</sup>(1/kPa),圧 密係数c<sub>v</sub>=0.06 cm<sup>2</sup>/min, 二次圧密係数α=0.004 を求め, 一 次圧密比r<sub>p</sub>(=m<sub>p</sub>/m<sub>v</sub>; m<sub>p</sub>=一次圧密量で定義する体積圧 縮係数) は仮定した.二次圧密を無視し $r_p=1$ とした圧密 量時間曲線の計算結果が Fig.1(a)の赤破線で,試験結果と は大きく異なる.そこで, $r_p=0.7$ とすると赤実線となっ て実測値に近い結果が得られる.

図中矢印で示す圧密時間 $t_c$ で次の荷重を載荷した後の 圧密量時間曲線が Fig.1(b)である. 圧密曲線の形状と圧 密量には前の載荷段階の圧密時間 (Fig.1(a))の長短が影 響し, $t_c$ の長い供試体の全圧密量は少なくなってそれぞ れの $m_v$ 値は異なるが,二次圧密係数aへの影響はほとん ど無く,前の載荷段階のそれとほぼ同じ (a=0.004)であ る. Fig.1(b)の実測値に近い計算結果を得るため, $r_p$ を変 化させて計算した結果が実線と破線で, $\alpha$ , $c_v$ 値は Fig. 1(a)の載荷段階と同じ値を使用した.前の載荷段階の圧 密時間 $t_c$ が一次圧密量に影響を及ぼし,それが圧密量時 間曲線と $m_v$ 値に反映されたと考えられる. この実験と計 算から, $t_c$ によって一次圧密比 $r_p$ は変化するが, $\alpha$ 値への 影響は少ないことを確認した.

## 4.2 K<sub>0</sub>ならびに異方圧密粘土の二次圧密と非排水強度

Fig. 2 は再構成した試料 H の $K_0$ 圧密試験結果で,鉛直 方向載荷増分 $d\sigma_v$  =98 kPa (載荷前 $\sigma_{v0}$ =98 kPa) による体 積ひずみ (〇印) と軸ひずみ (●印) である.二次圧密 係数 $\alpha$  (=0.003) は, Fig. 1 の乱れの少ない粘土試料の値 とほぼ同じである.粘土によっては二次圧密領域で $K_0$ 値 が増加することが知られているが<sup>6)</sup>,  $K_0$ 値はほぼ一定値 ( $K_0$ =0.44) に収束した.水平方向応力 $\sigma_H$ が一定値となっ た時を一次圧密終了時間 $t_{EOP}$  (=60 min) と仮定して一次



圧密量を推測すると、全圧密量の約6割となる.

K<sub>0</sub>圧密粘土に対して側圧の増加が非排水せん断強度 に影響するかを検討するため,所定の圧密時間 90,120, 1440 min で側圧のみを増加させた場合の体積ひずみと軸 ひずみの経時変化が Fig. 3(a)~(c)である.側圧の増加に よって軸ひずみ(●印)の顕著な増加が測定されたが, 側圧の増加によりK<sub>0</sub>圧密から異方圧密状態となること で,両ひずみの圧密速度は減少する(二次圧密係数 α=0.0011~0.0016).K<sub>0</sub>圧密試験のように側圧の増加速度 が極めて小さければ,やがて二次圧密は一定値に収束す る可能性は考えられる.側圧増加,偏差応力の減少によ る二次圧密の減少,すなわち二次圧密の進行で偏差応力 が減少しゼロになれば,二次圧密量が一定値に収束する のかどうかは今後確認すべき残された課題である<sup>3)</sup>.

異方圧密試験終了後の非排水せん断試験の非排水有効 応力経路が Fig. 4 である. 側圧がより大きく増加した供 試体ほど破壊時の最大偏差応力は大きくなり強度増加し ている. 鉛直応力一定条件下で異方圧密された粘土の非 排水強度には側圧の大きさも関係することを示すもので, 強度増加率は異方圧密時の応力状態にも依存することが 明らかである<sup>14)</sup>. この結果は,二次圧密によってK<sub>0</sub>値が 増加する, すなわち二次圧密による強度増加を示唆する ものである.

#### 4.3 圧密度と強度増加

等方圧密非排水せん断試験の圧密課程において,所定 の時間で圧密排水を停止し,供試体内の圧密挙動が終了 したと考えられる約2時間後に非排水せん断した. Fig.5 (a)に試料 M, (b)に試料 Iの圧密量時間曲線を示した.最 短10 min から最長 10080 min までの各沈下曲線は、当然 ながら各試料においてほぼ同じ形状である.提案した圧 密度式(8)の一次圧密量 $v_p$ を推定するため,載荷時間 1440 min による圧密量時間曲線(黒●印)に適合するよう圧 密係数 $c_v^*$ や一次圧密比 $r_p$ を仮定して再現計算した結果が Fig.6 である.一次圧密比を仮定し二次圧密を考慮する 圧密解析が、実測圧密量時間曲線によく適合することを Fig.6 でも確認できるため、一次圧密比 $r_p$ =0.8 と仮定した 一次圧密量 $v_p$ を圧密度Uの評価に利用する.

Fig. 7(a),(b)は,所定の圧密時間で圧密排水を停止した 非排水せん断試験の非排水経路である.圧密打ち切り時 間の増加,二次圧密量の増加とともに非排水せん断強度 の増加が明らかである.せん断試験前圧密時間の増加に よる二次圧密量の増加は,非排水せん断時に発揮される ダイレイタンシー,非排水経路や強度増加に影響したと 考えられる.

Fig. 8 は、図中に示した所定の圧密時間で圧密排水を 停止した等体積せん断試験のベクトルカーブである. 圧 密時間の増加とともにせん断強度は増加し、一次圧密が 終了した 100 min 以降も二次圧密によるせん断強度の増 加が明らかである.

これらの実験結果を用いて一次圧密量で定義する提案 式(8)の圧密度とせん断強度の関係をまとめたのが Fig. 9 である.一次圧密中の圧密度に対応するせん断強度を実 験で特定することは困難なためバラツキは大きいが,非



Fig. 8 Vector curves ; Sample I.

排水せん断強度は圧密度 Uにほぼ比例している.中には 線形関係が得られた試料もあり、これについては式(8)の 圧密度によって、一次、二次圧密過程のせん断強度の評 価が可能である.

5. 結 言

二次圧密が一次圧密中から発生すると仮定し,二次圧 密の圧密時間が非排水せん断強度に及ぼす影響を,一次 圧密量を用いた圧密度で評価する方法を提案した.提案 法の適用性を確かめるために圧密・せん断試験を実施し て得られた結果は次のように要約される.

- 一次元圧密試験とその数値解析から、載荷前の圧密時間t<sub>c</sub>の長短は次の載荷段階の圧密量に影響を及ぼし、t<sub>c</sub>が長いほど体積圧縮係数m<sub>v</sub>は減少、一次圧密比r<sub>p</sub>は増加すること、二次圧密係数αへの影響は少ないことを確認した。
- 2) K<sub>0</sub>圧密中の一次圧密終了後の圧密時間で側圧を増加 させると、軸ひずみは瞬間的に増加するがその後の 圧密速度は減少する.非排水せん断強度は増加させ た側圧に連動して変化し、二次圧密による強度増加 が示唆された.
- 3) 圧密時間を1 min から 40000 min の範囲で実施した 等方圧密非排水せん断試験と定体積せん断試験から, 一次圧密期間はもとより二次圧密期間の長短によっ ても非排水せん断強度は変化した. 圧密中のある圧 密時間 t の一次圧密量vp, 圧密非排水強度の測定時 の全圧密量vfとし, 圧密度 U=vf/vpと定義すること で,一次圧密終了後,二次圧密の進行による強度増 加をも評価できることを確認した.

全圧密量は測定できるが一次圧密量は全圧密量から分 離測定できない.この論文の二次圧密を考慮した一次元 圧密解析では、一次圧密比を仮定している.実測値に近 い計算結果が得られても幾つかの仮定に基づく計算結果 の信頼性については、今後更に検討すべき課題である.

### 参考文献

1) 三笠正人,木下哲生:粘性土の圧密時間とせん断強



Fig. 9 Degree of consolidation and the strength of soils.

さについて,第25回土木学会年次学術講演会概要集, pp.150-162 (1970).

- 赤井浩一:基礎地盤の圧密度と強度増加の関係,土 木学会論文集, No.60, pp.46-53 (1959).
- 3) 外崎明, 似内政康, 赤石勝, 稲田倍穂: 一次元圧密に おける圧密度と強度増加, 土と基礎, Vol.34, No.12, pp.5-9 (1986).
- 4) 土質工学会編:土質試験法,第6編第4章三軸試験, p.516 (1979).
- 赤井浩一,足立紀尚:有効応力よりみた飽和粘土の一次元圧密と強度特性に関する研究,土木学会論文集, No.113, pp.11-27 (1965).
- 赤井浩一, 佐野郁夫:二次圧密における粘性土の状態 変化,土木学会論文集, No.364, pp.123~131 (1985).
- 7) 稲田倍穂,赤石勝:ダイレイタンシーを考慮した一次元圧密解析,土質工学会論文報告集,Vol.20, No.2, pp.119-127 (1980).
- G. Mesri and A. Rokhsar: Theory of consolidation for clays, Proc. of ASCE, Vol.100, No.GT8, pp.889-904 (1974).
- 白子博明, 杉山太宏, 外崎明, 赤石勝: 一次圧密中に 発生する二次圧密の推定, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.565-570 (2008).
- H. Sekiguchi and M. Torihara: Theory of one dimensional consolidation of clays with consideration of their rheological properties, Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp.27-44 (1976).
- 11) 飯沼孝一, 今井誉人, 赤石勝, 杉山太宏: 一次元圧密 における有効応力経路と塑性ポテンシャル, 土木学 会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.2, pp.119-124 (2015).
- I. M. Smith: Programming the finite element method, John Wiley & Sons Ltd. (1982).
- 13) 稲田倍穂,赤石勝,寒河江健也:強度増加率に関する一考察,土質工学会論文報告集,Vol.21,No.2, pp.132-136 (1980).
- H. Sekiguchi and H. Ohta: Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. 9<sup>th</sup> ICSMFE, Specialty Session 9, Tokyo, p.229 (1987).

## 新任教員紹介

# 航空宇宙学科・航空宇宙学専攻・教授・田中 真

### 略歴

1990.03 東海大学 工学部 航空宇宙学科 卒業 東海大学 大学院 1992.03 工学研究科 航空宇宙学専攻博士課程前期 修了 東海大学 大学院 工学研究科 航空宇宙学専攻博士課程後期 単位取得後退学 1995.03 1997.10 九州工業大学 工学部 SVBL 中核的研究機関研究員 2000.04 東海大学 電子計算センター 情報処理研究教育施設 講師 ドイツ・Ernst-Mach-Institute 訪問研究員 2004.04-2005.03 2006.04 東海大学 総合情報センター 情報処理研究教育施設 助教授 2021.04 東海大学 理系教育センター (情報教育センター) 教授 2022.04 現職



## 担当科目

物理学,基礎情報処理,プログラミング,宇宙航行力学,宇宙計測学特論,宇宙探査工学特論など

#### 研究活動内容

## 1. 研究背景

宇宙のゴミ、スペースデブリ(Space Debris, Orbital Debris, 以後デブリ)は 2022 年 6 月現在, Fig. 1 に示すように地球の 周回軌道上に約 25620 個(直径 10 cm 以上)存在し,超高速 度で地球近傍を飛翔している<sup>1)</sup>.太陽活動に同期して地球 の大気が膨張するので,高度 1000 km 以下のデブリは大気 抵抗の影響を受けて徐々に軌道が低下し,最終的には大気 圏に再突入する.しかし,大気が存在しない高度 1000 km 以上のデブリは半永久的に地球を周回するため,デブリ回 収という能動的な措置を取らない限り,宇宙開発の発展と 共にデブリの数は増加し,宇宙空間を汚染し続けることに なる.

世界のデブリ問題に関連して,現在最も懸念される事柄 は,アメリカの民間企業 SpaceX 社が運用している衛星コ ンステレーションシステムである. SpaceX 社は 2018 年か ら Starlink衛星群の打ち上げを開始し,2022年6月現在2405 機が打ち上げられている. 今後も Starlink 衛星群の打ち上 げは続き 12000 機の目標衛星数まで継続される予定である. 宇宙空間は過密状態になりつつあり,宇宙物体同士の衝突 確率は急激に高まりつつある.

宇宙開発国が有する宇宙物体の総数を比較したグラフ が Fig.2 となる.日本は、アメリカ(US)、ロシア(CIS)、中 国(PRC)、フランス(FR)、イギリス(UK)に次ぐ、世界第6 位の宇宙物体保有大国であり、軌道上に総計 329 個の宇宙 物体を有している. Starlink 衛星はアメリカに含まれ、その 数はフランスなどをはるかに超えていることが分かる.





Fig. 2 Major countries with space objects.

— 53 —

## 2. 研究活動

Fig. 3 は,陸・海・空・宇宙における輸送手段の全体像 を表現している. 2022 年の現在は,新型コロナ感染症の影 響により世界の空を飛び交う航空機の数は低下しているが, 少しずつ航空交通量は増加すると考えられている.また新 しい産業の1つとして,宇宙観光旅行(Space Tourism)の発 展と需要が世界中で見込まれている.日本においても内閣 府の中で「サブオービタル飛行に関する官民協議会」<sup>2)</sup>が 開かれ,宇宙観光旅行を宇宙政策の1つとして検討がすで に始まっている.

現在行っている研究活動は, Fig. 3 の様相から Fig. 4 に示 すような危機的な状況に変化した時の,工学的考察,及び 基礎技術の研究開発である.確率的には滅多に発生しない 事象ではあるが,宇宙航空産業に関連する重大事故に備え た基礎研究を継続している.



Fig. 3 Overall picture of transportation on land, sea, air and space.



Fig. 4 Collision events related to spacecraft, aircraft and space debris.

現在力を入れている研究活動は3つあり,1)宇宙航空物 体の監視システムの確立,2)信号解析技術・画像解析技術 の向上,3)宇宙航空管制の最適化,である.以下にその概 要を解説する.

## 2.1 宇宙航空物体の監視システムの確立

宇宙物体の監視システムは、アメリカ軍のレーダ網シス テムに、全世界が頼っていると言っても過言ではない. 宇 宙物体を計測する手段は大きく2つあり、1つは地上の電 波レーダであり、もう1つは光学レーダ(天体望遠鏡)であ る.現在、ソフトウェア無線(Software Defined Radio: SDR) の技術を取り入れ、安価、シンプルなシステム、持ち運び 可能な電波レーダの開発を目指している. この簡易レーダ を用いてFig.4に示すような重大事故につながる可能性の ある飛翔物体を監視したいと考えている.

### 2.2 信号解析技術・画像解析技術の向上

電波レーダや光学レーダが完成したとしても,次は解析 技術が大きな課題となる.デブリや航空機,飛翔する物体 から計測された電波信号や光信号は,ノイズの中に埋もれ てしまい,識別することが困難となる.現在取り組む研究 では,天体望遠鏡でデブリを撮影し,特殊なアルゴリズム を使って,不明瞭なモザイク模様の画像を自動で識別・認 識する技術開発を行っている.

## 2.3 宇宙航空管制の最適化

Fig.4 に示すような重大事故を未然に防ぐことを目指し て、レーダで計測された飛翔物体の軌道データを用い、正 確な軌道予測、衝突確率の算出、衝突回避のプロトコル(手 順)の研究も行っている.現在取り組む研究では、宇宙観光 旅行船(宇宙船)が地上の宇宙港から出発し、無事に宇宙港 に帰還するまでのパス(軌道)を最適化する研究を研究室の 学生と共に行っている.宇宙船の行き帰りにおいて、デブ リや人工衛星との衝突確率を算出し、さらに航空機の航空 交通運行を妨げることなく、安全に宇宙船を宇宙港に帰還 させることは可能か、という研究を進めている.

## 3. まとめ

宇宙と空の安全につながる研究開発に取り組んでいる. 学生と共に1歩ずつ研究を前進させ、継続させたい所存で ある.詳細情報は researchmap<sup>3)</sup>をご参照頂きたい.

## 参考文献

- 1) CELESTRAK, https://celestrak.org/, (参照 2022-06-30).
- サブオービタル飛行に関する官民協議会,内閣府, https://www8.cao.go.jp/space/policy/suborbi/kaisai.html, (参照 2022-06-30).
- 田中真, researchmap, https://researchmap.jp/makoto\_tanaka\_mt, (参照 2022-06-30).

## 新任教員紹介

# 医工学科・准教授・水谷賢史

## 略歴

- 2003.03 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了, PhD, 博士(理学)取得
- 2003.09 スゥエーデン国カロリンスカ研究所客員研究員
- 2005.04 東海大学理工学部情報科学科専任講師准教授
- 2022.04 東海大学工学部医工学科准教授

### 担当科目

ヒューマンコンピュータインタラクション, 工科の線形代数, 物理学Aなど

## 研究活動内容

## 1. はじめに

ヘッドマウント型のディスプレイが安価に市販され,ゲ ーム利用での仮想現実(VR)は身近な物となってきている. 主に視覚や聴覚への働きかけにより構築された環境は,利 用者を仮想現実の世界へと誘導し,没入させる.平面ディ スプレイでのゲームと同様に第3者視点での行動も可能で あるが,特に1人称視点での世界投影に優れた方法である.

しかしながら、仮想現実の中にある物体は当然実在しな いため、存在感を与える工夫が必要となる.例えば、接触 感覚を付与するためには、特殊な外部装置を追加するか、 他の感覚により補わなければならない.五感の1つ1つへ の刺激や感覚フィードバックを与える/感じるモジュール を、モーダルというが、古くよりモーダルは互いに干渉(ク ロスモーダル)することが知られている.例えば、黒い箱 は白い箱よりも重く感じられることは古くから知られてい るが、これは視覚(色)が力覚へ干渉したクロスモーダルの 事例である.近年で有名なのはメタクッキーであろう.ク ッキーに仮想的に色を重複させ、匂いを与えることで、味 覚を誘導する事例である.

私達の研究室では、人の触力覚をその他の感覚からのク ロスモダリティで補強する研究をしている.先行研究では、 疑似触力覚提示<sup>(1)</sup>が課題として扱われてきた.一方、聴覚 刺激により疑似触力覚提示された報告<sup>(2)</sup>は少なく、どのよ うな聴覚刺激が有効かを解明することが求められている. クロスモーダル現象は複数の感覚刺激を提示することで、 より高い効果が現れることが知られている.有用な聴覚刺 激を発見することは、視覚と聴覚による強力な複合刺激提 示手法の開発につながる.本稿では、聴覚が重量力覚にク ロスモダリティを誘導した事例として、2022 年3月に本学 大学院工学研究科電気電子工学専攻を修了した武田昌樹氏 と伴に行った研究<sup>(3,4)</sup>を中心に,複数音色で音階を変えた場合と,音量を変えた場合に,重力感覚への作用が得られた 旨を紹介する.

## 実験の概要

#### 2.1 アプリケーション

重力感覚への作用は、仮想ダンベルを掴み、持ちあげ、 落とすことで確認した.そのためのアプリケーションをゲ ームエンジン Unity(ユニティ・テクノロジーズ)で作成した (Fig. 1). 被験者は Oculus Rift S(Oculus 社)を装着し、前述 のアプリケーションのシーンを再生する.動作は椅子に座 って行い、コントローラ(Oculus 社)のグリップボタンを握 ることでダンベルを持ち上げ、離すことで落とす仕様とし た.ダンベルの色は重力感覚への影響を除くために、灰色 とした.ダンベルが落下し床に接触した際に生じる音とし て、金属音と木材音を用意した.音はピッチを2倍、1.5 倍、0.5倍にしたものと音量を2倍、1.5倍、0.75 倍、0.5倍にしたもの(ただし、1倍の際に HMD のスピー カーから得られた音量が約 60 dB)を音声編集ソフト Audacity(The Audacity Team)で作成した.



Fig.1 ダンベル持ち上げアプリケーション



#### 2.2 実験方法と結果

シーン再生時に、ダンベルは中空に浮いており、再生と ともに落下する.床に衝突すると,任意の音が再生される. 被験者は音階/音量が基準のシーンと任意倍のシーンを交 互に再生体験する.いずれのシーンも再生時間は1分間と した.その間、被験者は自由にダンベルを持ち上げたり、 落としたりできた.その後、基準のシーンで感じた重さを 100とした場合に、任意倍のシーンで感じたダンベルの重 さがいくらだったかの回答を得た(ME法).ランダムな順 番で、全種類の音階/音量を衝突音にもつシーンの実施を求 め、ME 法の回答も求めた.

全ての実験を終えた後に、感性評価(SD法)の項目への回答も求めた. アプリケーションに対し、評価性(良い⇔ 悪い、親しみやすい⇔親しみにくい、うるさい⇔静かな)、 力量性(強い⇔弱い、硬い⇔柔らかい、動的な⇔静的な)、 活動性(はっきりした⇔ぼんやりした、安定した⇔不安定な、 鋭い⇔鈍い)の3要素9項目へ5件法で評価を受けた.

ME 法の結果より,落下音の有無で重さ感覚が大きく変わることがわかった.そしてピッチを上げると軽く,ピッチを下げると重く感じる傾向があることがわかった.さらに音量を上げると重く,音量を下げると軽く感じる傾向があることがわかった.

次に,ME法の結果とSD法の結果の間の相関を求めた. 音のピッチに対し、「強い⇔弱い」「鈍い⇔鋭い」の感性評価と重力感覚評価の間に非常に強い相関があることがわかった.「良い⇔悪い」「親しみやすい⇔親しみにくい」「安定した⇔不安定な」にも強い相関があった.一方、「うるさい⇔静かな」「硬い⇔柔らかい」「動的な⇔静的な」「はっきりした⇔ぼんやりした」との相関は弱かった.

本実験を経て、聴覚が重量感覚にクロスモダリティを誘 導することがわかった.金属音による音刺激でピッチの低 さや音量の大きさが重さ感覚を増す要素である事がわかっ た.

## 3. 今後の予定

VR 環境下における物体の着地衝撃音の変更を用いた重 量感覚提示の研究を経て,聴覚が重力感覚にクロスモダリ ティを誘導することはわかった.しかし,この方法では VR 空間での重力感覚を補完する状況は限定される.2022 年度 の卒業研究では的当てアプリケーションを用いて,投げる ボールの重さ感覚へのクロスモダリティの誘導に関して研 究を行っている.

また、私達の研究室では、このほかにも、複数のプロジ ェクトを推進している.その中から、まず、プロテウス効 果についての検証事例を紹介する.プロテウス効果とは、 仮想空間で利用者の身体を形成するアバターの容姿に利用 者の行動や思考が誘導される現象をさす.仮想空間上の物 体にアバターの腕を伸ばし掴む動作に対し、アバターの腕 の長さと現実の身体の腕の長さの違いが及ぼす影響を調査 している(Fig. 2).



Fig.2 運動予測とプロテウス効果

次に,視線追従機能を利用した,自動運転車に対する歩 行者の行動を解析する研究を紹介する(Fig. 3). 仮想現実で は昼夜などの環境を容易に変更できるため,現実では難し い検証も可能である.



Fig.3 自動運転車と歩行者とのチキンレース

### 参考文献

- 平尾 悠太朗, 三家 礼子, 河合 隆史: VR 空間におけ るクロスモーダルを用いた重さ感覚提示手法の提案と 評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.23, No.4, pp.263-270 (2018).
- 2) 臼井亮人、中島武三志、菅野由弘:視覚及び聴覚刺激によるクロスモーダル現象を利用した力覚の錯覚、エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2017 論文集, pp.184-187 (2017).
- M. Takeda, K. Mizutani : Landing impact sound changed the sense of weight of objects in virtual reality, IEVC2021 Proceedings, Session 5A: Computer Vision & 3D Image Processing (2021).
- 4) 武田昌樹: VR 環境下における物体の着地衝撃音の変 更を用いた重量感覚提示手法の提案-音の三要素を変 更した場合の総括-,令和3年度東海大学大学院修士論 文(2022).

## 新任教員紹介

# 生物工学科・教授・大場 真

## 略歴

1985.03	東京都立大学理学部化学科卒業
1987.03	東京都立大学大学院理学研究科化学専攻修士課程修了
1995.07	博士(理学,東京都立大学)
1987.04-1992.03	日本曹達株式会社小田原研究所勤務
1992.04-2014.03	東海大学開発工学部物質化学科 助手,講師,准教授を経て 2008.04 より教授
2014.04-2022.03	東海大学理学部基礎教育研究室(清水教養教育センター)教授
2022.04-	現職



## 担当科目

応用生化学実験,有機化学実験,生物学実験,生命化学発展研究,卒業研究

#### 研究活動内容

## 1. はじめに

これまで筆者は(1)各種アミノ酸の合成研究,(2)キラ ルプール法による光学活性化合物の合成研究,(3)新規有 機ケイ素試薬の開発,(4)有機テルル化合物の合成・構造・ 反応性に関する研究などに携わってきた.本稿では紙面の 都合上,近年精力的に取り組んできた有機テルル化合物に 関する研究について紹介したい.

## 2. 有機テルル化合物の化学

#### 2.1 背景

テルルは、16族に属する原子番号52の半金属元素であ り、硫黄やセレンと共にカルコゲンと呼ばれている. 天然 には火山周辺の鉱脈に極僅か存在しレアメタルに分類され ているが、火山国である日本はテルルの主要な生産国の一 つである. 無機化学工業においてテルルは, 鉄鋼やガラス の添加剤,感光ドラム,太陽電池セル,熱電変換素子,赤 外線検出材料、光ディスクなど様々な材料に用いられてお り,我々の生活に不可欠な元素となっている. 一方,有機 化学の分野においては、周期表上で周辺に位置する硫黄, セレン、臭素、ヨウ素、スズなどの元素が広く研究されて いるのに対し、有機テルル化合物についての研究は非常に 限られている. その原因として, 多くの有機テルル化合物 が、明確なスペクトルデータを与えない不規則なオリゴマ ーとして存在し、非常に取り扱いが困難であることが挙げ られる.本研究は、その取り扱いにくさのためにあまり注 目されてこなかった有機テルル化学にスポットライトを当 てたものであり, 有機テルル化合物の合成, 構造, 反応性

に関する基礎的な知見を得るとともに、テルルの特徴を生かした新しい反応系の構築を目的としている.

## 2.2 ジアリールテルリドの一重項酸素酸化

2004年、ジアリールテルリドを光増感条件下で空気酸化 するとジアリールテルロキシドが効率よく生成することを 見出し本研究をスタートした<sup>1)</sup>. その後、テルル上の置換 基や反応条件を工夫することによって、これまで不規則な オリゴマーしか得ることのできなかったテルロンをモノマ ーとして単離することに初めて成功し、テルリドの一重項 酸素酸化によるテルロキシドやテルロンの生成機構を明ら かにした(Scheme 1)<sup>1)</sup>.



Scheme 1 Reaction pathway for the formation of telluroxide **2** and tellurone **3** by photosensitized oxygenation of telluride **1**.

この様な一重項酸素に対する高い反応性は、同族体であるスルフィドやセレニドには全く見られないテルリド特有の性質であり、半金属元素と高周期元素の特徴を併せ持つ テルルの性質が大きく影響していると考えられる.事実、 テルリドの HOMO は、スルフィドやセレニドと比較する と明らかにテルル原子上に局在化しており、一重項酸素に



Fig. 1 HOMO diagrams for diaryl chalcogenides bearing 2,4,6-triisoproylphenyl (Tip) groups calculated by DFT method.

### 2.3 テルリド触媒を用いる空気酸化システムの構築

空気中の酸素はクリーンで安価な酸化剤として注目され ているが、その安定性の高さゆえ有機合成に利用するのは 容易ではない.そこで、一重項酸素に対して高い反応性を 持つテルリドを酸化触媒として利用することができれば、 新しい空気酸化システムを構築できるのではないかと考え た.実際、一重項酸素に対して不活性な亜リン酸エステル、 シラン、チオールに触媒量のジアリールテルリドを共存さ せ、光増感条件下で空気酸化を行ったところ、相当する酸 化生成物が高収率で得られた(Scheme 2)<sup>1)</sup>.



Scheme 2 Photosensitized air-oxidation of phosphites, silanes and thiols catalyzed by diaryl telluride.

一方,希少元素の一種であるテルルを有機合成に用いる 場合,テルル試薬のリサイクルは必須の課題である.そこ で,イオン液体(IL)にジアリールテルリドを担持した触 媒4を合成し,亜リン酸エステルやチオールの酸化に応用 したところ,触媒活性を低下させることなく再利用が可能 であることが明らかとなった(Fig.2)<sup>2,3)</sup>.なお,イオン液 体担持有機テルル触媒に関する研究は理学部化学科小口真 一准教授との共同研究である.



Fig. 2 Recycling experiment of IL-supported diaryl telluride catalyst 4.

現在,より有機合成上有用な炭素原子上の酸化,例えば アルコールの酸化やオレフィンのエポキシ化などを実現す るべく新たな有機テルル触媒を探索中である.

#### 2.4 有機テルル酸化物のX線結晶構造解析

多くの有機テルル酸化物は大きく分極した Te-O 結合の 分子間相互作用によって不規則なオリゴマーとして存在す るため、その構造解析は困難を極める。例えば、スルホン (R<sub>2</sub>SO<sub>2</sub>)やセレノン(R<sub>2</sub>SeO<sub>2</sub>)はよく知られた化合物であ るが、相当するテルロン(R<sub>2</sub>TeO<sub>2</sub>)に関する研究は非常に 限られており、その分子構造でさえ未解明であった。2008 年、筆者らはテルル原子上に嵩高い芳香族置換基を導入す ることによって速度論的に安定化されたテルロンを初めて 単離することに成功した<sup>4)</sup>.また最近、結晶溶媒や分子内 配位結合を含まないテルロン単体のX線結晶構造を初めて 報告した(Fig.3)<sup>5)</sup>.



Fig. 3 ORTEP drawing of bis(2,6-diisopropylphenyl) tellurone showing thermal ellipsoids at the 50% probability level.

以上,有機テルル化合物の化学はいまだ発展途上にあり, 同族の硫黄やセレン化合物にはない新たな性質が明らかにな りつつある. 今後,テルルの性質を生かした新しい物性や反 応性が見出されることを期待したい.

## 参考文献

- A. Ouchi, W. Ando and M. Oba, Advances in the Photochemistry of Organoselenium and Organotellurium Compounds, in The Chemistry of Organic Selenium and Tellurium Compounds, Volume 4, edited by Z. Rappoport, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp.447–541 (2013).
- A. Mihoya, S. Koguchi, Y. Shibuya, M. Mimura and M. Oba, Oxidation of thiol using ionic liquid-supported organotelluride as a recyclable catalyst, Catalysts, Vol.10, p.398 (2020).
- A. Mihoya, Y. Shibuya, A. Ito, A. Toyoda, M. Oba and S. Koguchi, Aerobic oxidation of phosphite esters to phosphate esters by using an ionic-liquid-supported organotelluride reusable catalyst, Synlett, Vol.31, pp.2043-2045 (2020).
- M. Oba, Y. Okada, K. Nishiyama, S. Shimada and W. Ando, Synthesis, Characterization and oxidizing properties of a diorgano tellurone carrying bulky aromatic substituents, Chem. Commun., pp.5378-5380 (2008).
- Y. Shibuya, S. Koguchi and M. Oba, Bis(2,6diisopropylphenyl) tellurone: a well-defined monomeric diorganotellurone without cocrystallized solvents and without stabilizing intramolecular contacts, Acta Cryst., Vol. C78, pp.88-93 (2022).

## 新任教員紹介

# 工学部・教授・Mark Shrosbree (シュロズブリー・マーク)

## 略歴

1997.10-2000.06 MA in Linguistics (TESOL), University of Surrey, UK
1993.01-1993.02 RSA/University of Cambridge TEFLA Certificate
1978.10-1981.07 BSc in Land Management, Reading University, UK



## 担当科目

Basic English for Engineers 1 & 2 (エンジニアのための基礎英語 1 & 2), English for Science and Technology (イングリッシュ・ フォー・サイエンス・アンド・テクノロジー1 & 2) など

## 研究活動内容

## 1. Background

I was born in Epsom, 25 kilometres south of London, UK. Epsom is famous for Epsom salts (MgSO<sub>4</sub>) which was first produced in the hot springs of Epsom. It is also the home of the Epsom Derby, one of the most famous horse races in the world. I was educated at Glyn Grammar School in Epsom, and then did my undergraduate degree in Land Management at Reading University.

#### 2. Work

#### 2.1 Work in UK

After university, I worked in various jobs, including tree felling (forestry) and antique furniture restoration. I then returned to college to study for a City & Guilds qualification in carpentry, and I went on to do an apprenticeship in carpentry working for the City of Sheffield. I worked as a carpenter for 7 years and then returned to college once more to study for a CTEFLA English teaching qualification.

#### 2.2 Work in Japan (pre-Tokai University)

I worked as an English teacher in various language schools, including the International Master's Academy run by Encyclopaedia Britannica. I also taught at Fuji High School in Tokyo, and business classes at Japan Highways. From 1994 to 1999, I taught academic writing to graduate students at Noko University in Fuchu in the Department of Forestry, and in 2000, I worked part-time at Koka University, Hachioji.

### 2.3 Tokai University

I started work at Tokai University in 2000. From 2004 to 2008, I held the position of Vice-Chair of the Foreign Language Center (now the Language Education Center). In 2012, I received the Tokai Teaching Award, in part for my teaching of a course in global issues (one of my great passions). Over this period, I have been involved in all aspects of English education at Tokai, including curriculum coordination, faculty design, and the English Speech Contest. In recent years, there have been two main focuses to my work at Tokai. Firstly, I have been heavily involved in the creation of materials for the required English Listening & Speaking and Global Skills courses. I was part of a team of teachers which developed English study projects for all first- and second-year students. Together we created all the worksheets, audio recordings, videos, and tests. Secondly, I have been the creator and administrator of two websites for the LEC. The first is the LS/GS/RW/AE website which accompanies the four required English courses provided by the LEC. This website is built with the Google Sites software and hosts all study materials, including worksheets, audio, video, and PowerPoint files, as well as links to reference materials. The second website is called T-Web and is an important portal for English language teachers at Tokai. This website was built using the Moodle open-source software and required the extensive use of HTML which I had to learn from scratch.

As well as general English courses, I have created all the materials for the following courses: English Presentation for Engineers (2007 – present), Technical English for Engineers (2010 – present), Science Presentation 1 & 2 (2014 – 2018).

— 59 —

#### **3. Research Interests**

My main research interests concern teaching methodology, materials design, and curriculum development. This has led me into the field of professional development (faculty development). I have also worked together with a colleague at McGill University, Canada on an international email exchange project. There follows a summary of my interests.

#### 3.1 Content and Language Integrated Learning (CLIL)

I have published and presented extensively on CLIL themes, particularly related to my experience of teaching global issues content and creating a wide range of study materials. I have also presented on the work of creating the content-based "Global Skills" required curriculum.

#### 3.2 Materials & Methods

I am enthusiastic about developing teaching methodologies and materials for use by English teachers at Tokai. I have chaired the Lunchtime Workshop FD sessions in the LEC up to 12 times a year since 2014. This experience has allowed me to publish and present on material design and teaching methodology.

#### 3.3 Email Exchange Project

In 2013, I started an email exchange project with Ms. Tomoko Ikeda (a former teacher of Japanese at Tokai University Shonan Campus) at McGill University, Canada. We published both together and individually on this "tandem learning" project in which students exchanged bilingual (English and Japanese) emails.

#### 3.4 Education Technology

I have published and presented extensively on the use of technology, such as digital video, the Internet, smartphones, etc., for language learning. From 2007 - 2020, I organised the Japan Association of Language Teaching (JALT) Technology in Teaching Workshops at their annual international conference.

### **3.5 Professional Development**

My experience in materials writing and methodology, as well as my work in FD at Tokai University, has led me to co-author two papers with colleague Catherine Cheetham on the subject of professional development.

#### References

- M. Shrosbree: Essential Considerations for Content-based Instruction, Tokai University FLC Monograph, 2007 (2007).
- M. Shrosbree: Enhancing Communicative Teaching with Simple Technology, TESOL Greece Newsletter, Issue 123 (2014).
- M. Shrosbree: English-Japanese Email Exchange Project. In P. Clements, A. Krause, & H. Brown (Eds.), Focus on the Learner. Tokyo: JALT (2016).
- M. Shrosbree and C. Cheetham: Teachers Learning from Teachers. In P. Clements, A. Krause, & H. Brown (Eds.), Transformation in Language Education. Tokyo: JALT (2017).

## 新任教員紹介

# 工学部・准教授・西川惠

## 略歴

2004.	05		Department of Human Development at Teachers College, Columbia University
			(M.A. in Cognitive Science in Education)
2003.	10-2005.	03	東京外国語大学リサーチアシスタント
2005.	04-2007.	03	国立音楽大学・東京工科大学非常勤講師
2007.	04-2010.	03	東海大学外国語教育センター専任講師
2010.	04-2021.	03	東海大学国際教育センター准教授
2021.	04-2022.	03	東海大学語学教育センター准教授
2022.	04-		東海大学語学教育センター准教授(兼務)
			(現在に至る)



#### 担当科目

TOEFL 演習 2 (操縦学専攻), TOEFL 演習 3 (操縦学専攻), 科学英語(機械工学科), 英語リスニング&スピーキング

#### 研究活動内容

## 1. はじめに

応用言語学は、理論言語学を他領域との関連へ応用し、 心理学、教育学、社会学、人類学等の様々な研究手法によ り言語と社会に関わる問題の解明を試みる分野である.社 会言語学をはじめ、第二言語習得研究(SLA)、外国語とし ての英語教授法(TESOL)や高等学校までの学校英語教育、 大学学部・大学院、及び職業目的別に必要な ESP(English for Specific Purposes)、世界諸英語(World Englishes)研究 まで幅広く含まれる.本稿では、大学レベルでこれから必 要となる ESP とそのカリキュラム開発の一例として航空機 操縦士訓練生のための ESP 調査研究を紹介したい.

## 2. ESP カリキュラム開発

## 2.1 ESPとは

一般日常生活や学校教育での英語は EGP (English for General Purposes) とされるのに対し,目的が学術的専門分 野や職業に限定的である場合は ESP とされる. ESP は EAP (English for Academic Purposes), EPP (English for Professional Purposes), EOP (English for Occupational Purposes) に分かれ,さらに EGAP (English for General Academic Purposes), ESAP (English for Specific Academic Purposes), EGPP (English for General Professional Purposes) ESPP (English for Specific Professional Purposes), EGOP

(English for General Occupational Purposes), ESOP (English for Specific Occupational Purposes) と下位分類される

Table 1 ESP の分類と状況や学術・職業分野の例

	wone i _	
ESP 5	分類	状況や学術・職業分野の例
EAP	EGAP	レポートを書く, 講義内容を理解する, 専
		門研究プレゼンテーションを行う,講義の
		メモを取る,電子メールを書く
	ESAP	医学,工学,経営学,生物学,法学,看護
		学等の学術分野の論文や専門書を読む
EPP	EGPP	問診(医師·看護師)
	ESPP	法廷(弁護士)、救急救命室(医療チーム
		スタッフ),空港や航空機内(航空機操縦
		士・整備士・管制官)
EOP	EGOP	観光,電話オペレータ
	ESOP	ホテル受付,客室係

(Table 1) .

ESPでは語彙や文構造,談話構造,会話ややり取りの順 序は EGP のそれとは大きく異なることも多いため EGP 的 側面は当然必要ではあるものの十分であるとは言い難い. 例えば,TOEIC®や TOEFL®といった EGP (一部 EOP や EGAP)テストでのスコアが高くても,専門分野の英語論 文を読む・執筆する際や,医療従事者,航空従事者,法律 家,エンジニアが必要とする総合的英語力が習得できてい るわけではない.EGP を土台に英語使用の目的や状況に照 準を合わせた ESP 学習法やカリキュラムが必要となるが, ESP の場合は教材用資料収集にも法的縛りがある点や専門 家との協力体制が欠かせない点等の理由から十分な量の収 集に労力と時間がかかり,EGP に比べて容易ではなく,需 要は高いにもかかわらず十分に対応できているとはいえない.

#### 2. 2 ESP カリキュラム開発のステップ

ESP カリキュラムは、専門や職業分野の内容と英語を統合して学習する点が大きな特徴である.よって、その開発には教材開発前段階の資料として、学習者のニーズ分析及び専門・職業分野の discourse community における個別状況での談話 (specialist discourse)分析が欠かせない<sup>1)</sup>.

ニーズ分析は、学習者が英語を必要とする場面や困難を 感じる状況を調査し、結果から必要とする英語力を特定す ることを目的とする.主にアンケート及びインタビュー調 査法で実施される.

ニーズ分析により場面や状況と必要な英語力を特定後, 教材作成のための資料を収集する.例えば,専門書や雑誌, インターネット上のサイト等からのものは入手が簡単であ るが,救急医療現場でのスタッフ同士の会話や操縦席での やり取りといったものは入手が難しく,実際に現場で録 画・録音するといった ethnographic 手法が必要となり,実 施だけでなく結果の解釈にも専門家の協力が不可欠である. 音声資料は文字に起こし,文字資料は電子化し,収集され たテキストはジャンル分析 (Genre analysis) やコーパス分 析 (Corpus analysis) により各テキストタイプ (genre) に 潜む英語使用のパターンを特定する.

#### 2.3 ジャンル分析事例

ここで,北米にある訓練所で訓練をうける航空機操縦士 訓練生を対象とした資料収集事例を紹介する.アンケート とインタビューによるニーズ分析では管制官とのやり取り, 教官とのコミュニケーション,座学での専門用語等様々な 状況が挙げられた.その中でアメリカ人飛行教官と日本人 訓練生の飛行訓練中のやり取りを文字起こししたものの一 部を取り上げる(Table 2)<sup>2)</sup>.

Table 2	教官による物	勿標・	操縦動作等の説明

発話

OK? Not too fast because we need practice OK? <u>Nice and slow</u>. We just make moving on OK? All right, take one\*\*\* Look at windsock, so we have <u>little bit crosswind from right</u>, not very much because it is variable. Now we wanna\*\*\* <u>hold it hold it</u> <u>back hold it back</u> Ok? Now we wanna going to do, we were still do moving, we wanna go<u>t nice and slowly increase the throttle</u> to all way in the full OK? <u>Nose coming up from the ground</u>, <u>let's the gentle down pressure when you got pressure OK</u>? (中 略) <u>Watch now airspeed</u>. OK? What's the airspeed?

 注.
 →度合・タイミング, \_\_\_\_→物標, \_\_\_→操

 縦動作(機体の位置・向き・状態), \_\_\_\_→操縦装置・

 機体部位, \_\_\_\_\_→速さ, 高さ, 方向(左右、上下、前後), \_\_\_\_→計器確認

Table 2 から英語使用の特徴として, ①操縦動作(強さ・ 速さ・度合・タイミング等)を説明する特定の品詞(形容 詞や副詞)の使用, ②物標の見え方や位置の描写, ③気象 条件や機体位置、高度や速度の描写, が挙げられる. これ 以外で全体では④高度やスピードを表す数字が頻出する点 も特徴的である. また, 日本語での教官と訓練生のやり取 りの分析結果と比較すると, 操縦動作の説明の際, 日本語 では, 操作が<u>ぎゅっぎゅっ</u>じゃなくて<u>じわーっ</u>とした rudder control といったようなオノマトペの使用がみられた が, 英語では bump up the power really quick や don't use too much rudder といった形容詞や副詞で表現される<sup>3</sup>.

## 3. 今後の展望

このようなニーズ分析と ethnographic 手法によるジャン ル分析事例はほかにも警察署<sup>1)</sup>,企業でのビジネスミーテ ィング,医療現場,外注コールセンターといった状況での ものも報告されており,その状況の多様さから国境を越え て物や人が行き来するグローバル化が進む現代において discourse community 構成員の母語も多様化していることが 分かる<sup>4)</sup>. ビジネスモデルの変化やインターネット環境の 整備が進む中,社会の構造変化に応じて英語の役割もマク ロには国際語として,ミクロには discourse community 内で の ESP としてより実用的な側面が求められる.このような 時代に備え,大学レベルでの工学分野においては例えばエ ンジニアに必要な ESP 研究と ESP カリキュラムの充実が大 きなカギとなると思われる.

## 参考文献

- H. Basturkmen: Developing courses in English for specific purposes, Palgrave Macmillan, pp. 36-51 (2010).
- 西川惠・縄田義直: 航空機操縦士訓練生に必要な英語 力調査と没入型 VR 教材の検証, The JACET International Convention Proceedings: The JACET 60th Commemorative International Convention, pp. 258-259 (2021).
- 西川惠・縄田義直: 航空機操縦士訓練生は英語で何が できることが望まれるのか一日英 PFB 比較からみ る必要な英語力一, Japan Association of Applied Linguistics in JACET Proceedings Vol. 2, pp. 95-102 (2020).
- 4) C. Nickerson: English for specific purposes and English as a lingua franca, In B. Paltridge and S. Starfield (ed.), The handbook of English for specific purposes, Wiley-Blackwell, pp. 445-460 (2013).

## 新任教員紹介

# 工学部・准教授・橋本信一

## 略歴

1990.05 オレンジバーグ・ウィルキンソン公立高校(米・サウスカロライナ州)卒業
1996.05 クレムソン大学(米)経営学部経済学科 卒業
1997.12 アメリカ創価大学大学院(米)外国語教授法修士課程(TESOL)修了<del>卒業</del>
1998.04-2002.03 創価大学 教務部 嘱託職員
2002.04-2013.05 創価大学 ワールドランゲージセンター 講師(特任)
2013.10-2014.03 電気通信大学 情報理工学部 非常勤講師
2014.04-2019.03 電気通信大学 情報理工学域 特任准教授
2019.04-2022.03 東海大学 語学教育センター 特任准教授
2022.04- 東海大学 工学部 准教授(専任)



#### 担当科目

英語リスニング&スピーキング,英語リーディング&ライティング,グローバルスキル,アカデミック英語,基礎英文法, 基礎英語,科学技術英語(EU学科),英語アカデミック・プレゼンテーション(EI・ER学科),国際理解

### 研究活動内容

## 教育と就職の背景

英語教員として少し変わった経歴を持つので,自己紹介 を兼ねて自身の教育と就職の背景を紹介する.

筆者は香川県高松市生まれだが、4歳の時にアメリカの サウスカロライナ州に移住した.平日は地元で小、中、高 の学校に通いながら、土曜日には一時間離れた町で日本語 の補習校に通った.19歳の時、日本語があまり喋れないこ とから創価大学の日本語別科に留学生として入学し、日本 語を一年間学んだ.大学は若い時からロボット技術に憧れ と興味がありクレムソン大学の工学部・電気工学科に入学 したが上級生になるにつれ勉強についていけず、最後の2 年間は経済学に専攻を変更し Bachelor of Science in Economics を取得し卒業した.大学院を選ぶ際、マルティ カルチャーのバックグラウンドをいかせて社会に貢献出来 る仕事は何かと考え抜いた末、英語を第二言語として教え る教授法を学ぶと決めた.

修士課程を修了し日本での初めての職は、大学の教務部 の嘱託職員だった.創価大学で数年前から新設されたワー ルドランゲージセンターのセルフ・アクセス・センターの マネージャーとして勤務.東海大学のアゴーラとイメージ が似ているが、留学生スタッフと日本人学生が、英語オン リーで話したり仲良くなったりするスペースだった.多く の日本人学生が英語オンリーのポリシーに高いハードルを 感じ施設利用に躊躇し、利用者数が伸び悩んでいた.その 解決策として、必修英語科目の宿題として一学期に何回か 訪れることを提案し、その予約システムなどを確立した. 最初のハードルを下げ何回か利用するようになったら、英 語を喋る楽しさが徐々に浸透し、課題では無い時でも利用 する学生が増えた.

2002年に職員から教員のポストに移転し,授業を持つようになった.最初は一般的な一年生の英語科目を担当したが,2003年に工学部からの依頼があり環境共生学科の一年生に技術英語の授業を学科の先生と共に開発した.コースの目的は様々な環境問題を英語でディスカッションし,発表することだった.ここで大学時代の前半に学んだ化学,物理,数学などの知識が思わぬ形で役立った.2009年に工学部の3つの学科全てに一年生の工学英語科目が実施されるようになり,そのカリキュラム開発の先頭に立った.また二年生のライティング授業のコース作成を依頼され,工学部の学生に英語のライティングの基本を教えていく科目を開発.2006年からは工学部の大学院生が国際学会で研究発表できるようにプレゼンテーションスキルを強化する授業を担当した.

2014年,電気通信大学に学部技術英語のコーディネータ として赴任.3年生の必修,「学部技術英語」科目を担当し, プログラムの創始者の史先生のもとで5名のTAと10名の 非常勤の先生を束ねる立場でプログラムを運営した.技術 的な英単語を促進するアクティビティやライティングの流 暢さを強化するアクティビティ等を導入し、プログラムに 幾つかの新しい提案をした.毎年学生の TOEIC-IP のスコ アも少しずつ伸び、我々運営者の努力が実り学内の評価が あがり、技術英語は学内組織として「委員会」から「部会」 に発展した.

2019年から東海大学に特任准教授として赴任し,今年専 任教員として工学部の一員になった.今までの経験をいか し,工学部の学部生や院生に特化した英語の授業を発展さ せ,全員のスキルアップを目指していく所存である.

## 2. 研究活動の概要

#### 2.1 ジャーナル掲載

ジャーナルで掲載された研究は様々な技術を使用しての 英語教育のアプローチを探っているものが多い.また,科 研の分担者としてコラボレーションを通して多岐に渡る研 究を行っている.主な研究分野は English for Specific Purposes (ESP), Computer-Assisted Language Learning (CALL), Collaborative Learning と Vocabulary Acquisition である.手短に論文の内容を幾つか紹介する.

Short-term Chaotic Time-Series Prediction of Language Test Scores Adopting the Backpropagation Algorithm (2016) では 英語のテストの点数をカオス時系列として捉え,ニューラ ルネットワークを使い,短期予測をすることが可能だとい う研究. Reading and Summarizing in L1 and L2 Using a Social Networking Website (2015) では SNS を介してリーディン グや要約のスキルを強化できるかの検証を行った.

Development of Web-based e-Learning Programs for Extensive Reading (2013) ではブラウザーベースで多読を促進するプログラムの開発をした.

#### 2.2 特許

科研グループで長年研究をした成果として、二つの特許 を取得した.今年の3月に取得したのが第7039015号「教 材学習スケジュール決定装置」.学習者がどの英語のスキル が脆弱でそれを補うための一番効果的な学習手順を示すソ フトウェアの発明に貢献した.2013年には第5369463「多 読・速読学習システム、多読・速読学習装置、多読・速読 学習プログラム」学習者が英語のテキストをウェブ・ブラ ウザーに載せると、そのテキストの多読・速読をサポート する装置の発明に貢献した.

#### 2.3 著書

国際語学社より幾つかの出版物が(単著や監修として) あるが,研究関連のものでは無く,一般の方向けの英語の 本である.「私のアメリカ英語手帳」(2010),「英語手紙の 書き方」(2009).また,共著で英単語の勉強をサポートす る「頻出準英単語 2000+」(2014)や「パーフェクトフレー ズ英語日常英会話」(2009)もある.

## 2.4 学会参加

研究分野の ESP と関連して,大学英語教育学会(JACET) の ESP SIG 関東支部に所属.副支部長として6年間運営に 携わり,去年から支部の学術誌の編集長である.その他, 全国語学教育学会(JALT),映像メディア英語教育学会 (ATEM),外国語教育メディア学会(LET)にも所属をし ており,今年初めて全国数学教育学会の大会で口頭発表を 行った.2016年 Joint International Conference on ESP in Asia の国際大会では事務局長として大会の運営をした.

#### 2.5 口頭発表

研究で一番件数が多いのは口頭発表で,主なテーマは授業の工夫や取り組みである.常日頃より効果的な教え方や 学生の学びが進む方法を探っている.

## 3. まとめ

これまで主に ESP 授業を担当し、学生のニーズに合うカ リキュラム開発,教材作成,評価システムの確立など,様々 な角度から授業を運営してきた.そして,沢山の教員や職 員とのコミュニケーションを大切にする.授業の担当以外 にも大学をサポートする業務にも携わった一学生の海外研 修の引率,大学の発行物の編集,FD 研修の発表や運営等. これからも、「即戦力」として東海大学に全力で貢献したい.

#### 参考文献

- K. Kido, E. Fukuda, S. Hashimoto and H. Okazaki, Short-term Chaotic Time-Series Prediction of Language Test Scores Adopting the Backpropagation Algorithm, J. for Japan e-Learning Assoc. Vol. 16, pp. 65-72 (2016).
- E. Fukuda, S. Hashimoto and H. Okazaki, Reading and Summarizing in L1 and L2 Using a Social Networking Website, OnCUE J. Vol.8, No.2, pp.83-105 (2015).
- H. Okazaki, H. Nitta, S. Hashimoto, E. Fukuda and K. Kido, Development of Web-based e-Learning Programs for Extensive Reading, J. for Japan e-Learning Assoc. Vol.13, pp.40-48 (2013).

	東海	大学	工学部紀望	要委員	会		
委員長 委 員	高 橋 那賀川 槌 谷 磯 村 香	哲一和雅	夫 郎 義 夫 隆	鈴 森 菊	木山川	昌裕久	和幸夫
EDITOR T	IAL COM HE SCH TO	ÍMITT OOL ( KAI (	TEE OF PROC DF ENGINEER JNIVERSITY	EEDINGS SING OF	S OF		
Chairman Members	Ta Ic K M Ta	Tetsuo TAKAHASHI Ichiro NAKAGAWA Kazuyoshi TSUCHIYA Masao ISOMURA Takashi ASAKA			Masakazu SUZUKI Hiroyuki MORIYAM Hisao KIKUGAWA		

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. 62. No. 1 2	022			
2022年9月30日				
発行者 東海大学工	学部			
〒259-1292 神	奈川県平均	で市北金目	4丁目1番	1号
School of Engine	ering Tokai	i Universi	ty	
4-1-1 Kitakanam	e, Hiratsuka	a-shi, Kan	agawa-ken.	
Japan				