



独立行政法人 国立高等専門学校機構  
弓削商船高等専門学校紀要  
第 44 号

## 第 44 号 令和 4 年 3 月

### 【学術論文】

No.	頁	表題	著者名
1	1-5	VGP に対応した環境配慮型潤滑油のゲル化	村上 知弘, 佐久間 一行, 池田 真吾, 佐藤 圭司
2	6-9	中和法を用いた石鹼生成抑制に関する研究 I 一石けん析出に与える中和法の影響 一	秋葉 貞洋, 阿部 大二郎, 村上 舜哉
3	10-14	中和法を用いた石鹼生成抑制に関する研究 II	秋葉 貞洋, 宇田 稔啓, 金光 学史
4	15-18	滴下法を用いた BDF の作成に関する研究	秋葉 貞洋, 宇田 稔啓, 金光 学史
5	19-22	可視光カメラを用いた液中プラズマ実験監視システムの開発	佐久間 一行, 高瀬 玄渉
6	23-30	船員のメンタルヘルスアンケートから見た学生の船員イメージとギャップ	森 瑛太郎, 山下 訓史, 村上 知弘
7	31-36	平行平板間内を流れる十分に発達した層流の運動方程式の無次元化解析 (Part 1)	ダワァ ガンバット, ジャンバル オダゲレル, 横山 友花, 長井 弘志
8	37-42	平行平板間内を流れる十分に発達した層流の運動方程式の無次元化解析 (Part 2)	ダワァ ガンバット, 横山 友花, ジャンバル オダゲレル, 長井 弘志
9	43-49	促音の自動挿入アルゴリズムの検証	前田 弘文, 山本 健太
10	50-55	生名フェリー乗車待機レーンのモニタリング システムの構築	田房 友典
11	56-59	KeTSlide のためのシンタックス・カラーリング (MacOS 編)	久保 康幸
12	60-66	中国人日本語教師の来日研修目的 一PAC 分析によるニーズ調査一	要 弥由美
13	67-75	高等専門学校一般科目における数学と物理の双方向性の構築	南郷 毅, 牧山 隆洋

### 【教育・研究報告】

No.	頁	表題	著者名
14	76-83	史料紹介 G.E.ルンフィウス 恐怖の地震の本当の歴史 アンボイナ島およびその周辺の島々で、1674 年 2 月 17 日に発生した大地震と、それに先立ち発生した諸地震について	河野 佳春

# VGP に対応した環境配慮型潤滑油のゲル化

村上 知弘\*, 佐久間 一行\*, 池田 真吾\*, 佐藤 圭司\*\*

## Gelation of environment-friendly lubricating oil for VGP

Tomohiro MURAKAMI\*, Ikko SAKUMA\*, Shingo IKEDA\*  
and Keiji SATO\*\*

### Abstract

In recent years, environmentally friendly lubricating oils have been required from the viewpoint of environmental protection. Especially in the United States, there are Vessel General Permit(VGP), and environmentally friendly lubricants must be used. In this study, we tried to gel this environment-friendly lubricating oil. The gelled lubricating oil was observed by SEM, and the greases were compared. From the SEM results, the lubricating oil gel showed a fractal structure, which is one of the characteristics of the gel. Furthermore, it was analyzed by FTIR to investigate how gelation was performed. From these results, a typical spectrum was obtained and the data represented gelation was obtained.

### 1. はじめに

2020年7月モーリシャス沖にて、日本船社が所有する船が座礁し、大規模な油流出事故が起きた。このような事故は、定期的な起り世界的にも大きく報道され、そのたびに世界的な注目を集めている。海洋環境保全の問題は、SDGs (Sustainable Development Goals (持続可能な開発目標))の14番目の目標である「海の豊かさを守ろう」でも掲げられているように世界が取り組まなくてはならない重要課題の一つである。このような世界的な流れにより海洋環境における規制も年々強化されている。

また、上記のような大事故ばかりでなく、船舶では船尾管や可変ピッチプロペラ、スラスタなど海水と接しているため、潤滑油の微小な流出は日常的に起こっている。これらについても見逃せない状況になってきており、船舶に関して、アメリカの環境庁(US Environmental Protection Agency: EPA)が定める汚濁物質防止削減制度でも船舶の航行におけるオイルに関する偶発的な流失を規制している。特に船舶入港規制(Vessel General Permit: VGP)では「環境に配慮した潤滑油」の使用を義務づけている。2008年から努力目標としていたが、2013年12月より「アメリカに入港するすべての船舶操船社は海水に接するオイル

すべての機器に環境に配慮した潤滑油を使用しなければならない」とされ、さらに2018年に同規制は延長され継続となっている。このように船舶では環境配慮型潤滑油の使用は絶対条件となりつつある。これまでの非環境配慮型の代表である鉱物油ベースの潤滑油からの転換が急務となっている。

一方、潤滑油は機械を安定して運転させるために摩擦・摩擦を低減させるものであり、機械摺動部にしっかりと油膜を形成し続ける必要があり、船舶機器に欠かせないものである。通常、油というと燃料油に注目されるが、海と接するという観点で見ると潤滑油の重要性は高い。潤滑油の性能に関して、上述のように油膜の形成保持が需要である。この点を考慮すると液体よりも流動性の少ないゲル化が有効であると考えられる。流動性が少ないことを考慮するとグリースもがんと得られるが、より液体に近い挙動を示すゲルがり有効であると思われる。

潤滑油のゲル化に関しては、これまでに設楽や大野らを中心に進められてきており、温度による低摩擦性を持ち、液体潤滑油に比べ機械摩擦面との吸着作用が増し、油膜形成状況が向上し、グリースなどと比べても潤滑油として長寿命も確認されている[1-2]。

一方、潤滑油の船舶機関室での使用は陸上で扱う機械と違い、海水との混合という陸上とは異なる環境で

\* 商船学科

\*\* 海技大学校

の使用となっている。このため船用機関において、環境配慮型潤滑油の使用に伴うメンテナンスの向上や油水(海水)処理方法が近年の課題の一つとなっている。

ここで油のゲル化に関して、これまで筆者らはいくつかの油水分離などの観点から吸油性ゲルを作製してきた[3-4]。それらを応用することによって、新しい潤滑油ゲルを作製できると考えた。本研究では海洋環境を守ることに潤滑効果を考えた環境配慮型潤滑油ゲルの作製を試み、これまでの非環境配慮型潤滑油ゲルともにフーリエ変換赤外分光光度計 FTIR を用いて比較検討を行った。

## 2. 実験

### 2. 1 環境配慮型潤滑油と非環境配慮型潤滑油

ここで環境配慮型潤滑油 (Environmentally Acceptable Lubricants: EAL) の定義について述べる。環境配慮型潤滑油として成立するためには大きく 4 つの特色があげられる。「生分解性があること」、「毒性が極めて少ないこと」、「バイオ・アキュムレーション (生物内の化学物質の貯蓄) 性がないこと」、「水面での光沢がないこと」があげられる。海洋環境を守るためには、上記の条件がそろえることが大前提となる。特に工場からの排出規制が厳しくなった現在は、船舶からの排出も注目の一つとなっている。

本研究で使用する潤滑油は、図 1 に示す環境配慮型潤滑油 (600 dijet : MOTUL) (左) と非環境配慮型潤滑油 (右) として本校練習船弓削丸で使用している潤滑油を用いた。図 1 の左側の少し黒い色をした方が環境配慮型潤滑油である。右側は、現在本校練習船弓削丸で使用している通常の潤滑油である。



図 1 環境配慮型潤滑油 (左) と弓削丸潤滑油 (右)

図 2 に一般的なオイルゲルの構造を示す。主鎖としてアクリル酸オクタデシル (ODA) と架橋剤としてジメタクリル酸エチレングレコール (EGDMA) で合成する。

そこに潤滑油 (シェルガデニア 30) を加えて溶解させる。次にイニシエーターとしてアゾビス (イソブチロニトリル) (AIBN) を加え溶解させ、ゲル化させる[4]。ただし、作製後も室温付近では液体のままであり、低温になるとゲル化する。このゲル化が起こる温度に関しては、架橋剤などの量によって制御できる[5]。

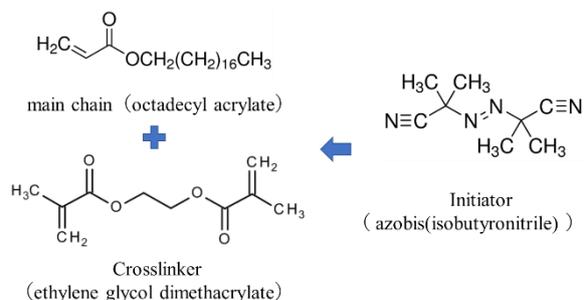


図 2 オイルゲルの構造

図 3 は非環境配慮型潤滑油を前述の方法で配合させた試料を低温状態にしたものである。この資料は写真にはないが、室温状態では液体に近くゾル状であるが、低温時には写真のように固化する。白色となり、粉が吹いているように見えるが固まっている状態である。しかしながら温度によってすぐに液状に戻り、通常の油のようになり、強い熱可逆性が見られた。

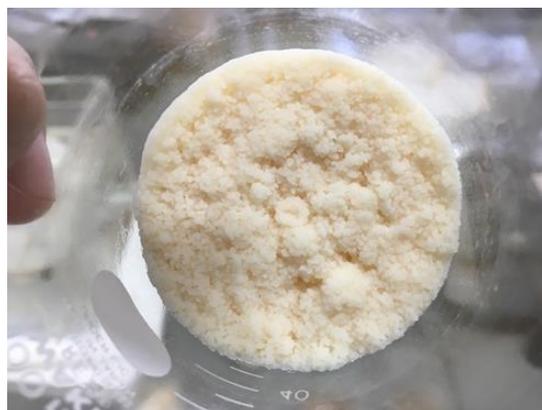


図 3 オイルゲル (固形) 低温(10°C)

### 2. 2 走査型電子顕微鏡(SEM)

図 4 に実験に使用した走査型電子顕微鏡 (SEM) (ERA-8900FE、株式会社エリオニクス) を示す。図 3 に示した試料ゲルを撮影した。試料は、比較のため 1200 倍と 5000 倍で撮影した。

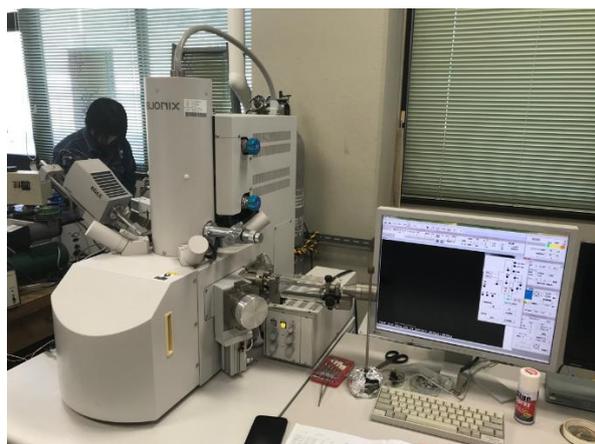


図4 SEM

### 2. 3 フーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)

環境配慮型潤滑油と本校弓削丸の潤滑油及びそれぞれの試料ゲルを図5に示すフーリエ変換赤外分光光度計(FTIR) (JASCO FT-IR4600) で測定を行い、得られたスペクトルデータからその違いの分析を行った。その後、環境配慮型潤滑油と非環境配慮型潤滑油に12-ヒドロキシステアリン酸を添加しゲル化を試みた。そして得られた試料をFTIRで測定し、どのような変化が起きているか分析した。



図5 FTIR

### 3. 実験結果

はじめに図3に示した非環境配慮型潤滑油ゲルをSEMで撮影したものを図6及び図7に示す。図6の写真は約1200倍である。ブロッコリーのような模様を示し、フラクタル形状が見られる。さらに図7に同ゲルの5000倍のSEM画像を示す。倍率を上げてさらにも同様な模様ははっきりと見られ、フラクタル形状が現れていることがわかる。このようなフラクタル構造はゲルの凝集体で見られる独特な構造であり、本試料

である潤滑油がゲル化していることを視覚的に示している。

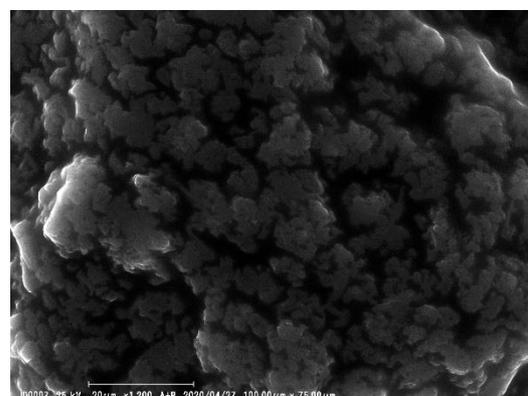


図6 非環境配慮型潤滑油ゲル SEM(1200倍)

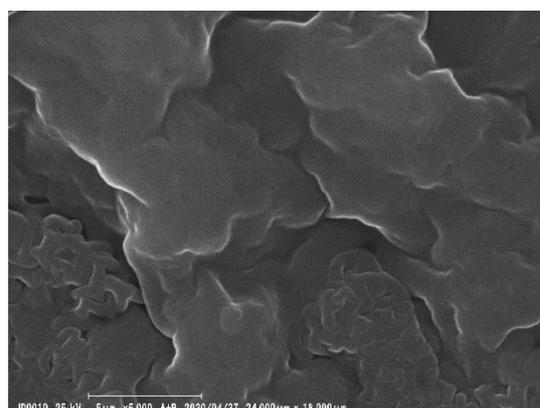


図7 非環境配慮型潤滑油ゲル SEM(5000倍)

また環境配慮型潤滑油と本校弓削丸で使用している非環境配慮型潤滑油をFTIRで測定した結果を図8及び図9にそれぞれ示す。

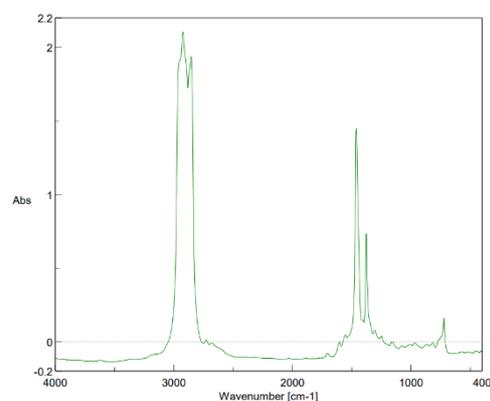


図8 弓削丸使用の通常潤滑油

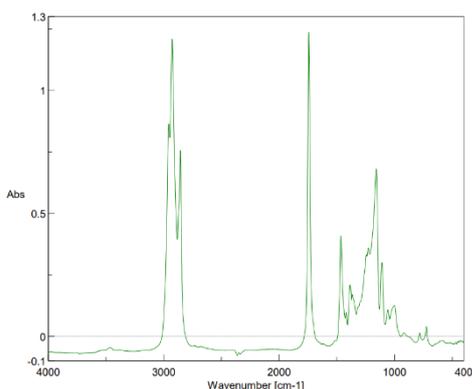


図 9 環境配慮型潤滑油

図 8 は、弓削丸で使用している非環境型潤滑油は鉱油ベースであるためごく普通の油と同様な単純なスペクトルを示している。C-H 伸縮振動 ( $3000\sim 2840\text{ cm}^{-1}$  間のピーク) と C-H 変角振動 ( $1500\sim 600\text{ cm}^{-1}$  間の三つのピーク) が見られることからオクタンが主な構成物質であることが分かる。

一方、図 9 は、環境配慮型潤滑油は複雑な化学合成油であり、スペクトルに多数のピークが表れており特徴的な  $1750\text{ cm}^{-1}$  付近のピークから C=O 伸縮結合が示されていることが分かる。これによりカルボニル化合物の存在を示し、エステルが含まれると分かる。この環境配慮型潤滑油をゲル化させ、再度 FTIR で分析した。その結果を図 10 に示す。

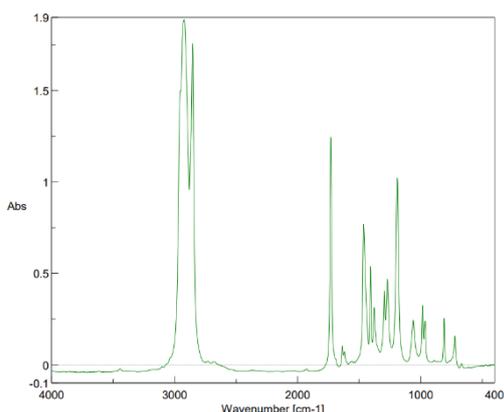


図 10 環境配慮型潤滑油ゲル

図 10 では、様々なピークが乱立し、ゲル化の状況を示すが、特にエステル基 ( $-\text{COO}-$ ) に由来する特徴的なピークが  $1740\text{ cm}^{-1}$  付近に検出された。一方、油の融点は脂肪を構成する脂肪酸によって決まるため、不飽和脂肪酸のように炭素 2 重結合をコントロールすれば、融点がコントロールできることが示唆できた。

#### 4. まとめ

一般的に潤滑油は、機械を安定して運転させるために摩耗・摩擦を低減させるものである。そのために機械修道部間にはしっかりと油膜を形成し続ける必要がある。また潤滑油の漏えいにより、油膜の形成保持に影響を及ぼすことを考慮するとき、流動性の少ないゲル化が有効である。さらに環境によってグリースより、液体に近い挙動を示すことがゲルでは可能である。

これまで潤滑油のゲル化に関しては、設楽らが常温で半固体のグリース状で、加熱すると液状になる熱可逆性のアミド系ゲル状潤滑油を作成し、潤滑性のみならず低摩擦特性を持つことが報告されてきた[1-2]。また潤滑油をゲル状にすることによって、液体潤滑油に比べ油膜形成が向上し、また漏えいも少なく、液状である海水との油水分離処理も容易になると考えられる。

さらに佐賀大の大野らによると潤滑剤をゲル状にすることによって、機械摩擦面との吸着作用が増し、油膜形成状況が向上し、グリースなどと比べても潤滑油として長寿命も確認されている[6]。

本研究では、潤滑油をゲル化することができた。詳細な議論には至っていないが、ゲル化の状態が明らかに吸水ゲルとは異なり、SEM 画像からも吸水ゲルとは全く異なるフラクタル形状のような構造が見られた。一般的なグリースの SEM 画像で見られる増ちよう剤の形状とも大きく異なる。また同ゲル潤滑油は応答速度の速い熱可逆性を有しており、作業環境に適応して働くものと考えられる。環境配慮型潤滑油と本校弓削丸で使用している非環境配慮型潤滑油を FTIR で測定した結果では、弓削丸の潤滑油は鉱油ベースの単純なスペクトルを示し、C-H 伸縮振動 ( $3000\sim 2840\text{ cm}^{-1}$  間のピーク) と C-H 変角振動 ( $1500\sim 600\text{ cm}^{-1}$  間の三つのピーク) が見られることからオクタンが主な構成物質であることが分かる。一方、環境配慮型潤滑油は複雑な化学合成油であり、スペクトルに多数のピークが表れており特徴的な  $1750\text{ cm}^{-1}$  付近のピークから C=O 伸縮結合が示されていることが分かる。これによりカルボニル化合物の存在を示し、エステルが含まれると分かる。この環境配慮型潤滑油をゲル化させ、再度 FTIR で分析した。

本潤滑油をゲル化させると温度依存性が見られ、低温度域ではグリース状に固化される。同ゲルを SEM で観察すると SEM 画像(1200 倍～5000 倍)から倍率を変えてもブロッコリーのような特異なフラクタル形状が見られる。つまり油の融点は、脂肪を構成する脂肪酸によって決まるため、不飽和脂肪酸のように炭素 2 重結合をコントロールすれば、融点がコントロ

ールできることが示唆できた。

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤（C）課題番号 18K04587）の支援を受けた。ここに謝意を表す。

### 参考文献

- [1] 設楽裕治, ENEOS Technical Review, 第 53 巻, 第 3 号, (2011).
- [2] 設楽裕治, トライボロジスト, 58 巻, 10 号, P 722-727, (2013).
- [3] classNK テクニカルインフォメーション, No.TEC-0986, (2014).
- [4] 村上知弘, 馬越翔吾, 池田真吾, マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, P47-48 (2011).
- [5] 村上知弘, 池田真吾, 黒川耀工, 鶴村凜太郎, マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, P139-140, (2018).
- [6] Toshikazu Ono, Takahiro Sugimoto, Seiji Shinkai, Kazuki Sada : Nature Materials, 6, P429-433, (2007).

# 中和法を用いた石鹸生成抑制に関する研究 I

—石けん析出に与える中和法の影響—

秋葉貞洋\*, 阿部大二郎\*\*, 村上舜哉\*\*\*

## Study on Suppression of Saponification Reaction by Acid I

—Effect of Neutralization with Acid on the Precipitation Reaction of  
Soap—

Sadahiro AKIBA \*, Daijiro ABE\*\*, Syunya MURAKAMI\*\*\*

### Abstract

Effect of Neutralization with acid on the precipitation of soap was investigated. Rapeseed oil was mixed NaOH solution in methanol by a magnetic stirrer, transesterification reaction and saponification reaction were started. However, transesterification reaction and saponification reaction were started under alkaline condition, it was supposed that transesterification reaction and saponification reaction would be stopped by neutralization with acid. Therefore, after mixing rapeseed oil and NaOH solution in methanol by a magnetic stirrer for 20minutes, the mixing oil was neutralized with acid which were 2mol/L hydrochloric acid or acetic acid by mixing with a magnetic stirrer for 5 minutes. The neutralizing oil was standing still in 500ml measuring cylinder for 24hours and soap was separated. The results were discussed account for the effect of neutralization by acid on the precipitation reaction of soap.

### 1. はじめに

ディーゼル機関は経済性、汎用性に優れているため、陸上、海上を問わず各種機械の原動機として幅広く用いられている。しかし、ディーゼル機関から排出される窒素酸化物(NOx)や粒子状物質(PM: Particulate Matter)などが原因の環境汚染が大きな社会問題となっており、それら有害燃焼生成物を低減する方法には多段噴射<sup>1)</sup>による燃焼改善やエマルジョン燃料<sup>2)</sup>、BDF (BDF: Bio Diesel Fuel)を含む含酸素燃料<sup>3)</sup>による燃焼性状改善などがある。さらに近年では、地球温暖化が原因とされる異常気象による被害に注目が集まり、化石燃料を起因とする二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)への対策も求められている。そして、CO<sub>2</sub>対策の1つとして注目されているものにBDFがある。

BDFとは油脂をエステル交換<sup>4)</sup>した燃料のことであり、油脂に植物性のものを用い、例えば光合成により大気中のCO<sub>2</sub>を吸収することになる。つまりBDFを使用することは大気中のCO<sub>2</sub>絶対量の増加を抑制することになり、このサイクルをカーボンニュートラル(Carbon Neutral)と言う。

しかし、植物油は高粘度であるため植物油とメタノール(CH<sub>3</sub>OH)でエステル交換を行うことで粘度を低くしている。その際、触媒としてKOH(水酸化カリウム)を使用しているため、エステル交換と同時に塩基(アルカリ)性の高い副産物としてグリセリンや石けんが生成されてしまう。そのため、BDFからこの塩基濃度の高い副産物を取り除くために静置分離を行っているが、微量ながらBDF中に副産物と触媒が残ることになり、BDFを水洗することでそれらを取り除いている。そして、それらの塩基性の高い副産物と洗浄水の処理がBDF利用の促進を妨げる要因となっている。

これまでの研究において判明していることは、水酸化ナトリウム(NaOH)を用いてBDF作成を行うと、Naにより固形の石けんがBDF中に析出する。また、植物油にNaOHを混ぜたメタノール溶液を投入・かく拌すると混合液が茶色く変色し、あたりに甘いにおいが立ち込め、その後、においが薄くなる。そして、反応液をメスシリンダに移して静置すると、まず、容器の下部に茶色いグリセリンが沈降、時間の経過とともに石けんが析出して沈殿することである。ここで、反応開始直後に発する甘

\*商船学科

\*\*商船三井オーシャンエキスパート (株)

\*\*\*ケイラインローローバルクシップマネージメント (株)

いにおいてはエステル交換により生成されたグリセリンによるものだと考えられる。また、石けんの析出までにはある程度の時間がかかることから、エステル交換とけん化反応は、反応が起るまでに時間差があるのではないかと仮定をたてた。そこで、けん化反応もエステル交換反応も塩基(OH)条件下で起こる反応であるから、エステル交換反応後すぐに酸を用いて BDF とグリセリンを中和すれば、石けんの生成を抑え、かつ、廃棄物が中性となるので、BDF の利用促進の可能性が広がるのではないかと考えた。

本研究では、NaOH 触媒を用いた BDF 作成において、エステル反応後に反応液を酸により中和をすることで、BDF 中に析出する固形石けんの析出状態について調査し、中和によるけん化反応抑制または石けんの析出の抑制の可能性について考察した。

## 2. 実験条件および実験方法

### 2. 1. 実験条件

表 1 に実験条件を示す。原材料としてなたね油 300g に CH<sub>3</sub>OH(メタノール)47.6g、触媒として NaOH を 2.9g 用いた。エステル交換反応は室温で行った。

原材料と触媒の混合には回転数と加熱温度を制御できるホットスターラを用い、回転数を 350rpm とした。エステル交換反応液の中和には塩酸(HCl : 2m/L)と酢酸を使用した。原料と触媒の計測には電子天秤を用い、特に計測が下 1 桁まで必要なメタノールと触媒の計測には下 2 桁まで計測可能な電子天秤を用いた。

### 2. 2. 実験方法

#### 2. 2. 1. 時間経過と石けん析出状態の確認実験

コニカルビーカに入れたなたね油 300g に対し、CH<sub>3</sub>OH 47.6g に NaOH を 2.9g 完全溶解させた混合液を投入し、スターラで 30 分間かく拌した。この時、2 分おきにビーカ内の様子を目視で確認し、石けんの析出状態を調べた。

#### 2. 2. 2. 中和による石けん析出状態確認実験

コニカルビーカにいれたなたね油 300g に CH<sub>3</sub>OH 47.6g に対し、NaOH を 2.9g を完全溶解させた混合液を投入し、スターラで 20 分間かく拌した。かく拌後、NaOH 2.9g のモル数に相当する HCl (2mol/L) 38.5g または酢酸 4.4g を投入し、5 分間かく拌することで中和を行った。そして中和液を 500ml メスシリンダに入れて 24 時間静置して、石けんの析出状況を目視で確認した。

表 1 実験条件

なたね油	300 (g)
メタノール	47.6 (g)
NaOH	2.9 (g)
かく拌回転数	350 (rpm)



A. 2分後 B. 30分後

図 1 エステル交換反応の様子

表 2 時間経過と石けんの析出

時間 (min)	石けん (○・×)	時間 (min)	石けん (○・×)	時間 (min)	石けん (○・×)
2	×	12	×	22	×
4	×	14	×	24	○
6	×	16	×	26	○
8	×	18	×	28	○
10	×	20	×	30	○

## 3. 実験結果

### 3. 1. 時間経過と石けん析出状態

図 1 にエステル交換反応における、最初と終了間際の反応液の様子を示す。これまでの研究からエステル交換を行うと、以下に記すような事象が起こることが明らかになっている。まず、なたね油に CH<sub>3</sub>OH に NaOH を完全溶解したものを投入し、かく拌を行うと BDF とグリセリンが生成される。そうすると図のように混合液の色が薄黄色(A)から、茶色(B)に変色し、甘い匂いがたちこめる。しばらくすると甘い匂いは消え、石けんが反応液中に漂い始める。そして、グリセリンを分離するために反応液の静置を行うと、最初はほとんど確認できなかった石けんが、時間経過とともに石けんの析出量が増え、容器の下部に沈殿する。

反応開始直後に立ち込める甘い匂いにおいては、副産物のグリセリンの匂いであると考えられる。また、時間経過とともに石けんの析出量が増大していくことから、けん化とエステル交換にはタイムラグがあり、静置分



図2 反応液中の石けんの様子 (24分後)



A, 未中和の反応液 B, 中和した反応液

図3 反応液を中和した場合としない場合の石けん析出状態の比較

離中にもけん化反応が進行している可能性があるのではないかと推測した。つまり、石けんが析出する前にけん化反応を止めることができれば、石けんの除去の問題が解決することになる。そのため、反応中の時間経過と石けんの析出の関係を目視で調査した。

表2に経過時間と石けん析出の確認結果を、図2に石けん析出の様子を示す。大変見にくいですが図中の赤丸で囲んだ反射のような白い物体が石けんで、大きさは約1cmほどであった。表2と図2より、反応開始後24分が経過した時点で石けんの存在が確認できた。この結果より、中和による石けんの析出防止効果を確認する実験では、反応時間を20分とすることにした。そして、酸で反応液を中和して24時間静置させたのちに石けんの析出状態について調査しすることにした。

### 3.2 中和による石けん析出状態の確認実験

固形のせっけんが生成、析出するにはいくつかの条件がある。まず、石けんを生成する反応であるけん化が起きること、そして、塩基触媒が固形石けんを作る反応が起きるものであることである。けん化も塩基下で起こる反応である。そして、けん化はエステル交換と異なり、エステル交換で触媒として用いているNaOHが油脂と反応することで固形石けんを生成することになる。そのため、反応液中の“OH<sup>-</sup>”を酸で中和すれば、エステル交換とけん化反応を停止すること

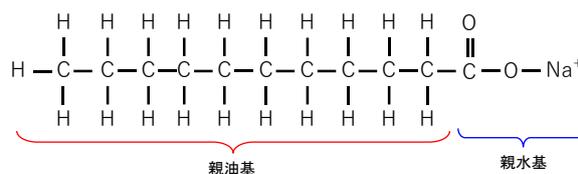
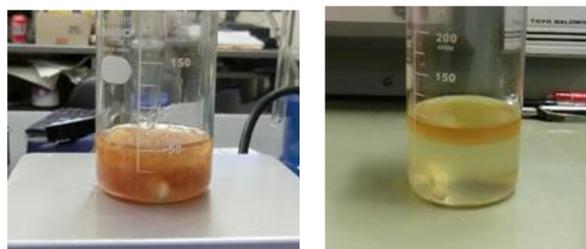


図4 石けんの構造モデル



A,分離した石けんとグリセリン B,石けんとグリセリンと2mol/L HClの混合液

図5 分離したグリセリンと石けんおよび2mol/L HClとの混合した場合の様子

ができるのではないかと考えた。そのため、確実に大量の石けんが析出する触媒量2.9gでエステル交換を行ったのち、反応液を酸で中和した。中和剤として使用した酸は、2mol/L HClである。2mol/L HClを選択した理由は劇物指定(10%超)を受けない濃度(7.0%)であり、比較的入手や保管が容易であるためである。そして、2mol/L HClと反応液の混合時間は5分間とした。

図3に中和した反応液(B)と中和していない反応液(B)を24時間静置した後の写真を示す。図より、中和していない条件では明らかに石けんが析出しているのに対し、中和により石けんの析出がなくなっていることが分かる。さらに、メスシリンダ下部に沈降しているグリセリン部分の色が透明となっている。以上の結果より、2mol/L HClの中和がけん化とエステル交換、石けんの析出になにかしらの影響している可能性があることがわかった。

図4に、石けんの構造モデルを示す。石けんとは長い炭化水素の鎖の先にNaが取り付けられてきている。長鎖の部分は油となじみやすい親油基で、Na<sup>+</sup>が付着している部分は親水基である。そのため、石けんと石けんの分子の間に油を取り込んで膨張するため、実際の体積と見た目の体積とに差が生じることが多い。

今回使用した酸は2mol/Lの塩酸(塩化水素水溶液)であり、“塩酸”とは溶媒である水に塩化水素(HCl)が溶けたものである。つまり、2mol/L HClで中和するという事は、反応液中に大量の水も混合されたことになる。前述したように、石けんは親水基を持つため、油だけでなく水とも相性がよい。つまり、石けんの分子は水によく分散ことになる。また、グリセリン(C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>(OH)<sub>3</sub>)は3価アルコール(OH)の一種で、グリセ

リンも水との相性がよく、かつ、BDF に比べ密度が高いので容器下部ある水の中にグリセリンと石けんが分散して存在している可能性が考えられる。そこで、中和していない BDF から分離した石けんとグリセリンを 2mol/L HCl と混合し、石けんとグリセリンが分散することでグリセリンと石けんが目視できなくなったのかを確認することにした。

図 5 に分離したグリセリンと石けん(A)と分離したグリセリンと石けんに中和に用いたのと同体積の 2mol/L HCl を混合したもの(B)の写真を示す。図 5(B)より、若干の濁りがあるものの石けんとグリセリン(A)が溶けていることが分かる。以上の結果より、2mol/L HCl による中和によって石けんの析出が確認できなかったのは、中和の効果ではなく、石けんおよびグリセリンが 2mol/L HCl の溶媒である水に分散したためだと考えられる。

2mol/L HCl では中和によるけん化反応、または石けん析出の抑制効果が確認できなかった。そこで、入手しやすく、かつ、多量の水を含まない酸である酢酸を用いて反応液を中和することにした。結果を図 6 に示す。図の右側が中和したもの、左が中和していないものであり、酢酸でも HCl と同じように下液は透明になり、石けんの析出はないことが分かった。ここで中和に使用した 2mol/L HCl (1.03g/L @20°C)は 2.9g の NaOH と同じモル数となる 38.5g であり、体積にすると約 38ml、酢酸 (1.05g/l @20°C)も NaOH と同じモル数となる 4.4g、体積にすると約 4ml となる。グリセリンと石けんの混合物の見かけの体積が約 50ml であること、図 5 および図 6 の様子を考慮すれば、体積の約 1/10 の酢酸にすべてのグリセリンと石けんが分散しているとは考えにくい。以上の結果より酸による中和は、けん化反応の抑制または石けん析出を抑える効果を持っている可能性があると考えられる。

以上の結果をまとめると、酸を用いた中和により目に見える石けんの析出を抑えられるが分かった。この結果はあくまで、目視による石けんの析出が見られなかったという状態である。今後、実際に石けんが生成されていないのか、または石けんが分散されているだけなのかを反応液の成分の分析を行い、反応液中の石けんの有無を確認するとともに、石けんが存在するならどのような形で存在しているのか確認する必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

エルテル交換とけん化反応は塩基化で起こる反応であるため、反応液を酸により中和することで石けんの生成が抑えられるのではないかという推測を行った。

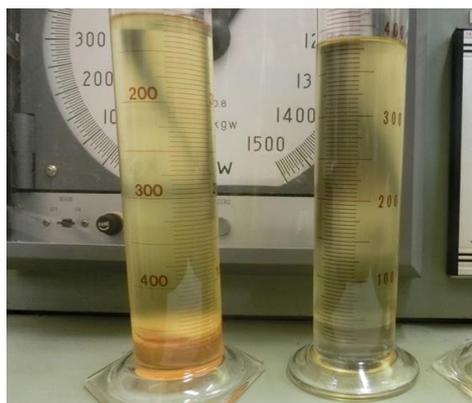


図 6 反応液を中和した場合(右)としない場合(左)の石けん析出状態の比較

その仮定に基づき、エステル交換反応中の時間経過と石けんの析出状態の目視確認と、反応液を中和することで石けんの析出の様子の変化を目視で確認した。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- エルテル交換反応を始めると、24 分経過した時点で反応液中に石けんの析出が確認できた。
- エルテル交換開始後 20 分経過した反応液を 2mol/L HCl で中和し、24 時間静置したところ、石けんの析出は確認できなかった。また、メスシリンダ下部に他沈降したグリセリンの色が中和していない条件とでは明らかに異なり、透明となった。
- 中和していない状態で生成したグリセリンと石けんを中和で用いた同容積の 2mol/L HCl と混合したところ、石けんとグリセリンがほとんど目視できなくなった。この結果は、2mol/L HCl の中和により石けんの析出が確認できなかったのは酸による中和の効果でなく溶媒である水の影響であると考えられる。
- 中和に酢酸を用いた場合も 2mol/L HCl と同様に、石けんの析出は確認できず、かつ、グリセリンも透明となった。投入した酢酸の容積は生成したグリセリンと石けんの 1/10 程度であり、石けんとグリセリンがすべて酢酸中に分散したとは考えづらい。この結果は酸による中和が石けんの生成、もしくは石けんの析出を抑制する可能を示すものだと考えられる。

#### 参考文献

- [1] 秋葉・西田, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 40 (6), p123, (2005)
- [2] 島田, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 46(6), p26, (2011)
- [3] 段・他 3 名, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 41 (3), p117, (2006)
- [4] 原田, 油脂化学の知識, 幸書房, p80, (1980)
- [5] 原田, 油脂化学の知識, 幸書房, p76, (1980)

# 中和法を用いた石鹼生成抑制に関する研究Ⅱ

## —エステル交換およびけん化反応に与える中和法の影響—

秋葉貞洋\*, 宇田稔啓\*\*, 金光学史\*\*

# Study on Suppression of the Saponification Reaction by Acid II

## —Effect of Neutralization with Acid on The transesterification and Saponification Reaction—

Sadahiro AKIBA \*, Toshiaki UDA\*\*, Masashi KANEMITU\*\*

### Abstract

Effect of Neutralization with acid on the transesterification and saponification reaction was investigated. Keeping the quantity of rapeseed oil, NaOH, acetic acid, the mixing period for transesterification and saponification reaction was varied. After mixing rapeseed oil and NaOH solution in methanol by a magnetic stirrer, the mixing oil was neutralized by mixing with acetic acid for 5 min. The neutralizing oil was standing still in a 500ml squib type separatory funnel for 24hr and glycerin was separated from BDF, and quantity of glycerin was measured. To confirm the existence of soap in the neutralizing oil, soap was separated by  $\text{CaCl}_2$  solution in methanol. The results were discussed account for the effect of neutralization by acid on the precipitation reaction of soap.

### 1. はじめに

ディーゼル機関は経済性、汎用性に優れているため、陸上、海上を問わず各種機械の原動機として幅広く用いられている。これまではディーゼル機関の高効率化、小型軽量化が主たる目標とされてきたが、近年これらの目的に加え、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )や粒子状物質(PM: Particulate Matter)などディーゼル機関から排出される有害な燃焼生成物が原因の環境汚染が大きな社会問題となり、それらの有害燃焼生成物を軽減させることが緊急の課題となっている。それら有害燃焼生成物を低減する方法に、触媒やフィルタによる排ガスの後処理<sup>1)</sup>、層状水噴射<sup>2)</sup>多段噴射<sup>3)</sup>による燃焼改善やエマルジョン燃料<sup>4)</sup>、BDF (BDF: Bio Diesel Fuel)を含む含酸素燃料<sup>5)</sup>による燃焼性状改善などがある。

BDFとは油脂とメタノール( $\text{CH}_3\text{OH}$ )をエステル交換<sup>6)</sup>した燃料のことであり、 $\text{CO}_2$ 排出量低減の対策として注目されている。化石燃料である軽油、重油などはその精製過程の途中と燃焼時に排出される二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )が地球温暖化を引き起こすと考えられている。しかし、植物は光合成により大気中の $\text{CO}_2$ を吸収するので、植物油を

原料としたBDFを使用するという事は、大気中の $\text{CO}_2$ 絶対量を増加させないことになる。そして、このサイクルをカーボンニュートラル(Carbon Neutral)と言う。

しかし、植物油は高粘度であるため植物油とメタノール( $\text{CH}_3\text{OH}$ )でエステル交換<sup>7)</sup>を行うことで粘度を低くしている。その際、触媒としてKOH(水酸化カリウム)を使用しているため、エステル交換と同時に塩基(アルカリ)性の高い副産物としてグリセリンや石けんが生成されてしまい、この塩基濃度の高い副産物を取り除くために静置分離を行っている。しかし、静置分離をしても微量ながらBDF中に副産物と触媒が残ることになる。そのため、BDFを水洗することでそれらを除去しているの、それら高塩基性の副産物と水洗水の処理がBDF利用の促進を妨げる要因となっている。

これまでの研究において判明していることは、NaOH(水酸化ナトリウム)を用いてBDF作成を行うと、Naにより固形の石鹼がBDF中に析出する。また、植物油にNaOHを混ぜたメタノール溶液を投入・かく拌すると混合液が茶色く変色し、あたりに甘いにおいが立ち込め、その後、においが薄くなる。そして、反応液をメスシリンダに移し静置すると、茶色いグリセリンが沈降するた

\*商船学科

\*\*商船学科 5年

め、BDF とグリセリンが分離する。さらに時間が経過するとともに石けんが析出して容器下部に沈殿することである。ここで、反応開始直後に発する甘いにおいはエステル交換により生成されたグリセリンによるものだと考えられる。また、石けんの析出までにはある程度の時間がかかることから、エステル交換とけん化<sup>9)</sup>には、反応が起こるまでに時間差があるのではないかと仮定をたてた。そこで、けん化反応もエステル交換反応も塩基(OH)条件下で起こる反応であるから、エステル交換反応後すぐに酸を用いて BDF とグリセリンを中和すれば、石けんの生成を抑え、かつ、廃棄物の処理が容易になるので、BDF の利用促進の可能性が広がるのではないかと考えた。

本研究では、NaOH 触媒を用いた BDF 作成において、反応時間を変化させたエステル反応(以降、反応液と記述)を行い、その反応液を中和(以降、中和液と記述)した。その後、中和液を分液ロートに移し替えて 24 時間の静置を行い、BDF とグリセリンを分離し、グリセリンの生成質量を比較することでエステル交換反応の促進状況の比較を行った。さらに、中和液中に石けんが存在するかどうかを簡易的に調べるため、中和液から石けんを強制的に分離することのできる  $\text{Ca}^{2+}$  を含んだ塩化カルシウム( $\text{CaCl}_2$ )・メタノール溶液を中和液と混ぜ、石けんの析出を目視で調査した。それらの結果を比較することで、酸による反応液の中和がけん化反応または石けん析出を抑制する可能性について考察を行った。

## 2. 実験方法および実験条件

### 2. 1. 実験条件

表 1 に実験条件を示す。使用した原材料はなたね油 (300g)、 $\text{CH}_3\text{OH}$  (47.6g) とした。触媒は NaOH (2.0g) を用い、反応時間を 5 分～30 分の間で変化させ、そして、エステル交換反応は室温で行った。中和液は酢酸を用い、NaOH が 2.0g (KOH が 2.9g) に対し、当量となる酢酸は 3.1g となる。また、比較対象として、触媒として NaOH と KOH を 2.9g 使用した条件のエステル交換実験を行った。

原材料と触媒、中和液の混合には回転数と加熱温度を制御できるホットスターラを用い、回転数を 350rpm とした。原材料と触媒の計測には電子天秤を用い、質量計測に下 2 桁まで必要な  $\text{CH}_3\text{OH}$  と NaOH、酢酸では下 2 桁まで計測可能な電子天秤を用いた。

### 2. 2. 実験方法

#### 2. 2. 1. 反応時間とグリセリン生成量の比較実験

まず、ステンレスカップにいれた  $\text{CH}_3\text{OH}$  47.6g に NaOH を 2.0g を入れ、完全に溶解するまでかく拌(以降、

表 1 実験条件

なたね油 (g)	300		
$\text{CH}_3\text{OH}$ (g)	47.6		
触媒 (g)	KOH	NaOH	
	2.9	2.0, 2.9	2.9
酢酸 (g)	3.1	3.1	4.4
反応時間 (min)	5, 10, 15, 20, 30		
回転数 (rpm)	350		
反応温度	室温		

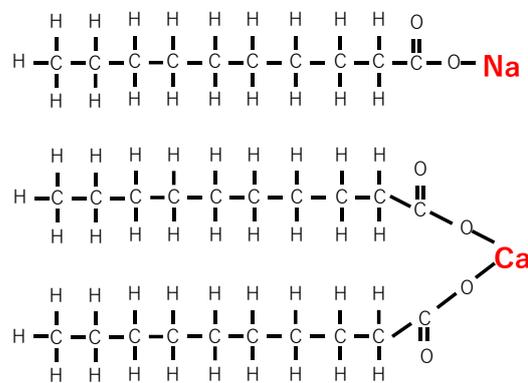


図 1 石けんの構造モデル

混合液と記す)した。この時、 $\text{CH}_3\text{OH}$  の蒸発を抑えるため、カップにはステンレス製のふたをした。完全に溶解した混合液を 500ml ステンレスカップに入れた 300g のなたね油に投入し、エステル交換反応を行わせた。反応時間は 5 分、10 分、15 分、20 分、30 分とした。反応後、酢酸 3.1g を反応液に入れたのち、5 分間かく拌して反応液を中和した。その後、中和液を 500ml スキープ型分液ロートに移して 24 時間静置し、BDF とグリセリンを分離、グリセリン生成質量の計測を行った。グリセリンと BDF の分離にスキープ型分液ロートを使用したのは、反応液は BDF と BDF よりやや色の薄いグリセリンで構成されてため、通常に分液ロートや円筒型分液ロートでは分離時に境界面が判別しにくいためである。

また、触媒の種類や触媒や中和液の量により、グリセリン生成量等に差が出るか比較する為、触媒として KOH を 2.9g 使用した条件で 30 分間反応させ、酢酸 3.1g で 5 分間中和した実験と、触媒として NaOH を 2.9g 使用した条件で 30 分間反応させ、酢酸 3.1g と 4.4g で 5 分間中和した実験を行い、グリセリン生成量の比較を行った。

#### 2. 2. 2. $\text{CaCl}_2$ メタノール溶液を用いた石けん分離実験

2.1 の条件のうち、触媒に NaOH が 2.0g、反応時間が 5 ～20 分の条件で、酢酸 3.1g による中和液を作成した。石

表 2 NaOH と KOH におけるグリセリン生成量

触媒	NaOH	KOH	
触媒量(g)	2.0	2.9	
酢酸量(g)	3.1	3.1	0.0
グリセリン量(g)	36.7	37.4	41.3

表 3 触媒量とグリセリン生成量

触媒	NaOH		
触媒量(g)	2.0	2.9	
酢酸量(g)	3.1	3.1	4.4
グリセリン量(g)	36.7	—	41.6

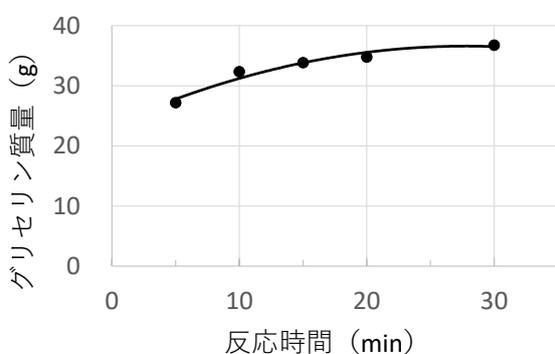


図 2 反応時間とグリセリン生成量

けん検出用試薬として 2mol/L CaCl<sub>2</sub>メタノール溶液(以降 CaCl<sub>2</sub>溶液と記す) 13ml を中和液に入れて 10 分間攪拌した。かく拌後、500ml のメスシリンダに入れて 24 時間静置して、石けんの析出状態の確認を行った。

図 1 に Na 石けんと Ca 石けんの構造式を示す。CaCl<sub>2</sub> 溶液を石けん検出薬に採用したのは、図 1 に示すように、Na 石けんでは Na に長鎖が 1 本であるのに対し、Ca 石けんでは Ca に 2 本の長鎖が取り付くので石けんの分子量が大きくなって、Na よりも石けんが析出しやすくなる。そして、触媒として NaOH が 2.0g (0.05mol) 使用されているので、最大で必要量は NaOH の 1/2 モルとなる。

### 3. 実験結果

#### 3. 1. 反応時間とグリセリン生成量の比較

図 2 に反応時間とグリセリン生成量の関係図を示す。この実験において基本となる NaOH の質量は 2.0g としている。これは一般的に BDF を作成するにあたり使用されている触媒 KOH の触媒量が 2.9g であり、NaOH と KOH のモル数を合わせたためである。また、この実験におけるグリセリンとは、中和液を 24 時間の静置分離により容器の下部に溜まった液体を指すものとする。

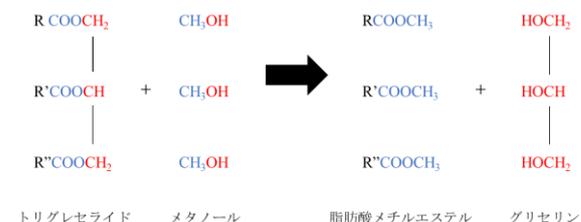
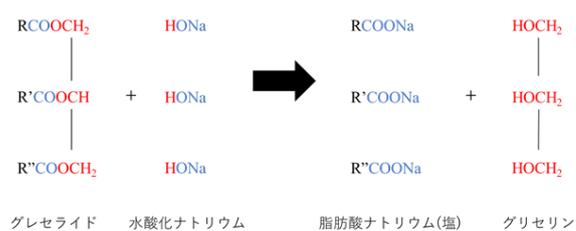


図 3 けん化(上)とエステル交換(下)

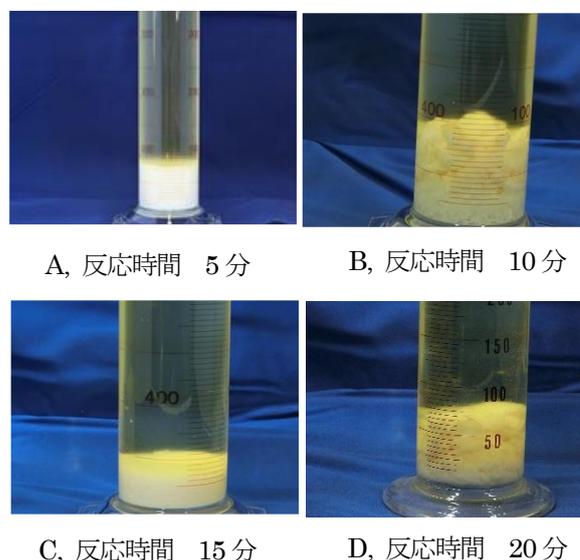


図 4 CaCl<sub>2</sub>メタノール溶液を用いた中和液中の石けん析出の様子

図より、時間経過とともにグリセリン生成量が増加し、反応時間が 15 分を超えるとグリセリン生成量が頭打ちとなっていることがわかる。反応時間の違いでグリセリン生成量に差が生じている結果より、中和にはエステル交換、けん化反応を停止させる効果があることがわかった。また、この結果からエステル交換等の反応はかく拌開始後 15 分ほどで終わることがわかった。

表 2 に反応時間 30 分、NaOH を 2.0g を使用した場合と KOH を 2.9g 使用した場合におけるエステル交換反応で酢酸で中和した条件と中和していない条件でのグリセリン生成量を示す。表より、グリセリンの生成量は触媒が異なっても中和した場合には大きな差はみられないが、触媒は同じでも中和することによりグリセリン量が減少していることがわかる。中和剤の酢酸の密度は 1.05g/L @20℃ と BDF より密度が高いため、静置分離すると下部に沈降するはずである。また、これまでの経験から触媒が

過剰状態で 24 時間静置すると石けんが分離容器の下部に沈降していることも考慮すると、中和によりエステル交換もしくはけん化反応、または石けんの析出(凝集)が抑制されることで、グリセリン生成量が減少している可能性があると考えられる。

表 3 に、触媒量と酢酸量を変化させた場合のグリセリン生成量を示す。反応時間は 30 分とした。表より、NaOH が 2.9g (0.07 mol) でエステル交換した反応液を酢酸量 3.1g (0.05mol) で中和した条件では、分液漏斗内に石けんが生じてしまいグリセリンの分離を行えなかった。この結果より中和が不十分であると石けんが析出することがわかった。そして、NaOH を 2.0 g (0.05 mol) でエステル交換した反応液を酢酸 3.1 g で中和した場合と NaOH 2.9g, 酢酸 4.4 g (0.07mol) で中和した場合のグリセリン生成量を比較すると、NaOH が 2.9 g の条件のほうが 4.9 g グリセリン量が増加している(表 3)。

NaOH が 2.0g の条件に対し 2.9g の条件では、NaOH および酢酸の投入量の差は 2.2g (0.9g+1.3g) 増加している。NaOH と酢酸がすべてグリセリンのほうへ移行したと仮定しても、グリセリン質量の増加分が触媒と中和液の増加質量分より多くなっている。しかし、図 3 に示すように、けん化ではグリセリンと石けんが生成される。言い換えれば、NaOH が過濃な状態でエステル交換よりけん化が優勢になれば、生成されたグリセリンと石けんが容器下部に集まることになり、グリセリンのみための質量は増加することになる。つまり、NaOH が 2.9g の条件でグリセリン質量が触媒量と酢酸の増加量より大きくなったのは、触媒投入量が増えることで塩基濃度が高くなり、エステル交換よりけん化が優勢となったためだと考えられる。そして、この状態で石けんが目視できないのは、酸が分散剤の役目を果たして石けん凝集を防いでいるためだと推測される。また、KOH が 2.9 g の条件でエステル交換した反応液を酢酸 3.1 g で中和すると中和していないときよりもグリセリン量が減少するのは、前述した酸による石けんの分散効果により石けんが BDF の方へ分散されたためだと推測される。

### 3. 2. CaCl<sub>2</sub>メタノール溶液を用いた石けん分離

3. 1 の結果と比較するために、石けん検出試薬として CaCl<sub>2</sub> 溶液を中和液に投入、10 分間かく拌して中和液中の石けんを析出させた。反応時間が 5 分、10 分、15 分、20 分の条件における中和液中の石鹸析出の様子(24 時間静置後)を図 3 に示す。図より、反応時間により石けんの析出状態は違いますが、石けんの析出が確認できた。これまでは実験観察の経験から、反応開始から石けんの析出までに時間がかかるため、けん化反応とけん化反応にはタイムラグがあるのではないかと推測していた。しかし、試薬を投入したすべての条件に

おいて石けんが析出していることから、けん化とメチルエステル交換反応は同時の反応であり、これまでの実験で観察された時間とともに石けんの析出が増えていたのは、反応液中の石けんの分子が凝集して目に見えるまで成長するのに時間がかかっていただけであることがわかった。そして、この結果は酸により石けんの凝集を防ぐ効果を示すものであると考えられる。

## 4. まとめ

エルテル交換とけん化反応は塩基下で起こる反応であるため、反応液を酸により中和することで石けんの生成または析出が抑えられるのではないかという仮定を立てた。その仮定に基づき、反応時間を変化させたエステル交換反応を行い、グリセリン生成量の変化を調べた。さらに、CaCl<sub>2</sub>メタノール溶液を用いて中和した反応液中に石けんが存在するかの簡易的な確認を行い、中和液中の石けんの存在の有無を確認した。得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- 反応時間を変化させたエステル交換反応を行い、反応液を酢酸で中和した。その結果、反応時間が 15 分までは反応時間が長くなるとグリセリン生成量が増大することがわかった。この結果より、エステル交換とけん化反応は中和により停止できることがわかった。
- 反応液中の中和に触媒の当量より少ない酢酸を使用すると石けんが析出する。
- 反応時間 30 分、NaOH が 2.0g と 2.9g の条件でエステル交換を行い、触媒量の当量となる酢酸で中和したもののグリセリン生成量を比較すると、2.9g の条件のほうがグリセリン生成量が増加する。そして、グリセリン増加量は NaOH と酢酸の増加量より多くなる。グリセリン量の増加は NaOH 過濃状態(塩基性が高くなる)ではけん化反応が優勢になり、析出していない状態でグリセリンのほうへ石けんが移動したためだと考えられる。また、この状態で石鹸が目視できないのは酸が分散剤の役目を果たすことで、石けんの凝集を防いでいるためだと推測される。
- 反応時間 30 分、触媒を 0.05 mol の NaOH と KOH でエステル交換反応を行い、反応液を 3.1g の酢酸で中和した場合のグリセリン生成量に変化はほとんどなかった。また、KOH を用いた条件での反応液を中和した条件とそうでない条件を比較した場合には、中和に用いた密度の高い酢酸の分だけグリセリン質量が増えていなければいけないにもかかわらず、中和した条件でのグリセリン生成量が減少した。この結果は、酸による石けんの凝集を防ぐ効果により、石けんが BDF の方へ分散されたためだと推測される。

・中和液に  $\text{CaCl}_2$  溶液を加えるとすべての条件で石けんが析出した。この結果は、エステル交換とけん化が同時に起こっていることを示している。そのため、この結果は、酸による石けんの凝集を防ぐ効果を裏付けるものであると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 長山, 初めて学ぶ基礎エンジン工学, 東京電機大学出版局, p197, (2008).
- [2] 畑村, 自動車エンジン技術がわかる本, ナツメ社, p66, (2009).
- [3] 高崎・他 5 名, 日本機械学会論文集, B63-613, p3165, (1997).
- [4] 秋葉・西田, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 40 (6), p123, (2005)
- [5] 島田, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 46(6), p26, (2011)
- [6] 段・他 3 名, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 41(3), p117, (2006)
- [7] 原田, 油脂化学の知識, 幸書房, p80, (1980)
- [8] 原田, 油脂化学の知識, 幸書房, p76, (1980)

# 滴下法を用いた BDF の作成に関する研究

秋葉貞洋\*, 宇田稔啓\*\*, 金光学史\*\*

## Effect of Potassium Hydroxide Solution Methanol Dropping Method on BDF Reaction

Sadahiro AKIBA \*, Toshiaki UDA\*\*, Masashi KANEMITU\*\*

### Abstract

Effect of KOH solution in methanol dropping method on BDF reaction was investigated. KOH solution in methanol were dropped into rapeseed oil by tubing pump and the Drop and rapeseed oil were mixed by a magnetic stirrer. The dropping period was 30 min, and the total dropping quantity was 50.5g, and the total mixing time was 35 min from the start of dropping, and mixing speed of a magnetic stirrer and temperature of rapeseed oil and inner diameter of tube and number of tubes were varied. The mixing oil was standing still in 500ml separatory funnel for 24hr and glycerin was separated from BDF, and the quantity of glycerin was measured. The results were discussed account for the effect of KOH solution in methanol dropping method on BDF reaction.

### 1. はじめに

ディーゼル機関は経済性、汎用性に優れているため、陸上、海上を問わず各種機械の原動機として幅広く用いられているが、ディーゼル機関から排出される窒素酸化物(NOx)や粒子状物質(PM: Particulate Matter)などの有害な燃焼生成物が原因の環境汚染が大きな社会問題となり、それらの有害燃焼生成物を軽減させることが緊急の課題となっている。それら有害燃焼生成物を低減する方法には、多段階噴射<sup>1)</sup>による燃焼改善やエマルジョン燃料<sup>2)</sup>、BDF (BDF: Bio Diesel Fuel)を含む含酸素燃料<sup>3)</sup>による燃焼性状改善などがある。近年ではそれらに加えて地球温暖化による環境の変化にも注目が集まり、化石燃料である軽油、重油などの燃焼や製造過程の途中と燃焼時に排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の削減も求められている。CO<sub>2</sub>は炭化水素が燃焼すると必ず生成するものであり、どんなに燃焼の高効率化がすすんでも排出が抑制されるだけで、排出をゼロにすることはできない。そして、化石燃料を使用するということは長い年月をかけて地中にためていた炭素を一度に放出することを意味しており、それを再び地中に戻すのには同じだけの年月が必要となる。そこで、現在注目されている対策法にBDFがある。

BDFとは油脂とメタノール(CH<sub>3</sub>OH)をエステル交換<sup>4)</sup>した燃料のことである。そのため、油脂を植物性のものとすることで、燃焼により排出されたCO<sub>2</sub>は短いスパンで植物に吸収されることになる。このサイクルをカーボンニュートラル(Carbon Neutral)と言い、大気中のCO<sub>2</sub>濃度増加の抑制に有効であると考えられる。

しかし、植物油は高粘度であり、ディーゼル機関で良好な燃焼状態を得るためにエステル交換を行うことで粘度を低くしている。その際、触媒としてKOH(水酸化カリウム)を使用しているため、エステル交換と同時に高アルカリ(塩基性)の副産物としてグリセリンや石けんが生成されてしまう。この高塩基性副産物を取り除くために静置分離を行っているが、それだけでは微量ながらBDF中に副産物と塩基触媒が残ることになる。そのため、BDFを水洗することで除去しなければならず、さらに塩基性廃棄物が増えてしまう。つまり、この高塩基性廃棄物の処理をしなければならぬ手間がBDF利用の促進を妨げる要因の一つとなっている。

一般的に、化学反応を行うときには溶液が均質な状態で反応を行わせ、エステル交換は塩基性の反応である。そのため、エステル交換を行うと大量の塩基触媒を使用する。しかし、選択的に触媒濃度を変化させる、言い換え

\*商船学科

\*\*商船学科 5年

れば、未反応のなたね油に未反応の触媒を混ぜた  $\text{CH}_3\text{OH}$  を滴下すれば、触媒総量を低減しても局所的には触媒濃度の濃い領域を確保できることになる。そして、廃棄物の塩基濃度が下がれば廃棄物処理が容易になるので、BDF の利用の促進につながるのではないかと考えた。

本研究ではチューブポンプを用いてなたね油にメタノール KOH 混合液を滴下することにより、OH 濃度の高い混合液の滴になたね油を混合することでエステル交換を行った。そして、BDF 収率に変化が生じるかを調べるために副産物であるグリセリンの生成質量を計測し、混合パラメータが BDF 作成に与える影響を明らかにすることで、塩基性廃棄物を削減した BDF 作成の可能性について考察を行った。

## 2. 実験方法および実験条件

表 1 に実験条件を示す。実験は 500ml ステンレスビーカーに入れたなたね油 300g に対し、 $\text{CH}_3\text{OH}$  と KOH を 47.6 : 2.9 の割合で混合した溶液(以降、混合液と記す)をチューブポンプにより 30 分間で 50.5g 滴下した。そして、実験には内径が 0.8mm と 1.6mm のチューブを使用した。

かく拌には加熱温度と回転数を設定できるホットスターを用いた。かく拌時間は滴下時間+5 分間とし、滴下時間の終了間際に滴下された混合液滴がなたね油と反応する時間を考慮した。そして、かく拌には長さ 50 mm のかく拌子を用い、かく拌子回転数は 350rpm と 500rpm とした。また、反応温度は室温と加熱(設定 50°C)とした。

かく拌終了後、なたね油と混合液を反応させた液(以降、反応液と記す)は 500cc 分液ロートへ移し、24 時間静置した。静置後、分液ロートの下液(グリセリン)を分離して、グリセリンの生成質量を計測した。

図 1 に滴下実験装置の外観を示す。かく拌時間が 35 分と長い場合、混合液中のメタノールの蒸発の影響を抑える必要があった。そのため、混合液を入れる容器は口が絞られている 100ml 三角フラスコを用いた。さらに、チューブを通す穴をあけたステンレス製の蓋を作成し、フラスコにかぶせることで開口部面積をできるだけ小さくした。

また、なたね油に滴下した混合液の質量は滴下前後に計測したフラスコの質量差から求め、さらに、滴下中もフラスコ質量を 5 分おきに計測し、ポンプのコントローラを操作して滴下質量の調整を行った。この時、できるだけフラスコ質量を素早く正確に計測する必要がある。しかし、混合液にチューブを浸したままフラスコの質量を計測すると、浸したチューブの体積分だけチューブの質量も計測してしまうことになる。そして、混合液の減少とともに液にかかっているチューブ質量が変化するので、滴下質量の微調整に支障をきたすことになる。そこで、チューブの質量が混合液にできるだけかからないよう、スタンドに取り付けたス

表 1 実験条件

なたね油 (g)	300
混合液比 (KOH : $\text{CH}_3\text{OH}$ )	2.9 : 47.6
混合液滴下量 (g)	50.5 ± 2wt%
滴下時間 (min)	30
かく拌時間(滴下法) (min)	35
チューブ内径 (mm)	0.8, 1.6
かく拌回転数 (rpm)	350, 500
反応温度	室温, 50°C



図 1 滴下装置外観

表 2 混合法と滴下法のグリセリン生成量

	グリセリン生成量	
	室温	50°C
反応温度	室温	50°C
混合法 (g)	41.3	46.3
滴下法 (g)	44.2	47.9

テンレスパイプでチューブ質量を受ける構造にして、計測時に混合液からチューブを引き上げてフラスコの質量の計測を行った。

滴下によるエステル交換を行った場合(以降、滴下法と記す)の比較対象として、ステンレスカップに入れたなたね油 300g に対し  $\text{CH}_3\text{OH}$  47.6g に KOH を 2.9g を完全溶解させた混合液を一括投入し、30 分間かく拌してエステル交換した(以降、混合法と記す)実験を行った。かく拌子回転数は 350rpm、反応温度は室温と加熱(設定 50°C)とした。

## 3. 実験結果

表 2 に、混合法と滴下法におけるグリセリン生成量を示す。混合法では室温におけるグリセリン生成量が 41.3g に対し、加熱(50°C 設定)では 46.3g となり、室温でのエステ

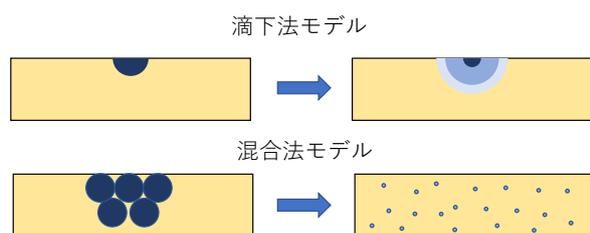


図 2 反応モデルイメージ

ル交換は加熱の 89%の生成率となることがわかった。この生成率の増加は、化学反応は温度が高いほど反応が進むためである。しかし、 $\text{CH}_3\text{OH}$  の沸点は  $64.7^\circ\text{C}$  であり、エステル交換は発熱反応であるため、反応熱により温度上昇を考慮すると、なたね油の加熱温度は余裕を見て  $50^\circ\text{C}$  までとしたほうが良いと考えられる。

表より、滴下法における室温のグリセリン生成量は  $44.2\text{g}$ 、加熱では  $47.9\text{g}$  とった。混合法と同じく滴下法でも加熱することによりグリセリン生成量が増加することがわかった。

また、室温では滴下法は混合法より 7%の改善が見られ、かつ、室温滴下法は加熱混合法の 95%の収率となった。加熱条件で混合法と滴下法を比較すると滴下法は混合法より生成率が 3%改善していることから、滴下法は混合法より効率的にエステル交換が可能であることがわかった。

図 2 に滴下法と混合法の反応モデルのイメージを示す。黄色部分がなたね油、濃紺部分が混合液とする。なたね油  $300\text{g}$  に対して  $\text{KOH}$  が  $2.9\text{g}$  というのは、混合法においてなたね油と  $\text{CH}_3\text{OH}$  が十分にエステル交換を行うのに必要量以上の塩基(OH)濃度を確保できる量である。すなわち、 $\text{CH}_3\text{OH}$  にすべ $\text{KOH}$  をすべて溶かしこむと、混合液での塩基濃度は過剰な状態となる。そして、なたね油(油脂)に  $\text{KOH}$  はほとんど溶けないので、エステル交換を行う場合には  $\text{CH}_3\text{OH}$  を  $\text{KOH}$  の溶媒として利用している。

混合法のように、かく拌しながら混合液を一括投入すると、下図のように投入直後はなたね油中に濃い混合液が存在することになるが、すぐに混合液がなたね油分散して均一な OH 濃度のもとで反応が起こることになる。しかし、滴下法の場合は、ある程度の間隔で連続して滴下される OH 濃度の濃い領域に次々なたね油が送り込まれることでエステル交換が起こることになる。つまり、1 つの滴で考えれば混合液滴中の  $\text{CH}_3\text{OH}$  がなたね油とのエステル交換で消費されるか、もしくは、混合液滴中の OH 濃度がなたね油により希釈されて反応を維持できない濃度となることで反応が停止することになる(上図)。しかし、次々の落下する滴も十分に OH 濃度が高いので、局所的に OH 濃度が高い領域が連続して作られるのでエステル交換反応が促進したのだと考えられる。

表 3 回転数とグリセリン生成量

かく拌子回転数 (rpm)	350	500
グリセリン生成量 (g)	44.2	43.8

表 4 チューブ内径とグリセリン生成量

チューブ内径 $\phi$ (mm)	0.8	1.6
グリセリン生成量 (g)	44.0	44.2

表 5 チューブ本数とグリセリン生成量

チューブ内径 $\times$ 本数	$1.6 \times 1$	$1.6 \times 2$
グリセリン生成量 (g)	44.2	41.2

また、滴下法と混合法を比べると、混合液供給方法以外で設定が異なるのは、滴下法のほうがかく拌した時間が 5 分間だけ長いことである。考え方によれば、かく拌時間が 5 分伸びれば反応が進むと考えることもできるが、滴下法では、滴下時間の後半に滴下された混合液滴ほどかく拌時間が短くなるので、全体的にみれば混合液を最初一括入する混合法のほうが混合液となたね油が会合確率が高くなると考えられる。そのため、表 2 の結果は図 2 の滴下法モデルの効果を裏付けるものであると考えられる。

表 3 に、室温におけるかく拌子回転数  $350\text{rpm}$  と  $500\text{rpm}$  のグリセリン生成量の結果を示す。使用したチューブ内径は  $1.6\text{mm}$  である。表より、かく拌子回転数  $350\text{rpm}$  のとき  $44.2\text{g}$ 、 $500\text{rpm}$  のとき  $43.8\text{g}$  となり、差は  $0.9\%$  である。この結果のみを見るならば、回転数はグリセリン生成量に与える影響はほとんどないといえる。しかし、前述した滴下モデルで考えると、混合液滴内のなたね油の拡散スピード、言い換えれば、なたね油への混合液の拡散スピードがエステル交換反応に強く影響していると考えられる。ここでは結果として示していないが、図 1 の装置図にあるようにステンレスカップに蓋をして実験中に内部が確認できないため、実験中にかく拌子の入れ忘れやスターラのスイッチの入れ忘れのため、なたね油に混合液を滴下しただけの状態になったことがある。この時はほとんどなたね油と混合液が混ざらず、エステル交換反応はおこらなかった。このことを踏まえると、この回転数の差ではエステル交換反応に影響が与えられるほど拡散スピードを増加させることができなかったため、グリセリン生成量に変化が生じなかったのではないかと推測される。

表 4 にチューブ内径を変化させた場合のグリセリン生成量の比較を示す、この時の拌子回転数は  $350\text{rpm}$  である。表より、内径  $0.8\text{mm}$  のグリセリン生成量は  $44.0\text{g}$ 、内径  $1.6\text{mm}$  の生成量は  $44.2\text{g}$  となり、差は  $0.5\%$  であった。この結果からグリセリン生成量に対してチューブ内径(滴径)は影響しないといえる。この場合、滴下時間及び滴下量が決ま

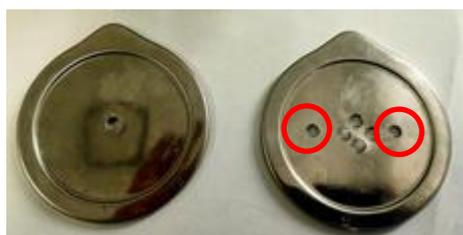


図3 滴下位置設定用蓋

っているため内径0.8mmは内径が小さくなった分、滴下間隔が短くなる。そのため、1回の滴下量が減少しても、すぐに次の滴が落ちてくるため、滴下位置ではOH濃度が下がりにくい状態になったため、生成量に変化が現れなかったのではないかと推測される。

表5にかく拌子回転数350rpmにおけるチューブ内径1.6mmでチューブ本数を1本と2本とした条件でのグリセリン生成量を示す。表より、1本ではグリセリン生成量が44.2gとなるのに対し、2本では生成量は41.2gとなり、明らかに本数がグリセリン生成量に影響していることがわかった。

図3に滴下実験で用いた蓋を示す。滴下実験を行う場合、チューブの位置がずれる影響を防ぐために、ステンレスカップのふたに開けた穴にチューブを挿入することで、位置がずれないようにしている。1本の場合はカップの中央付近にチューブを差し込む穴をあけているのに対し、2本の条件で図の赤丸に示す穴にチューブを指して実験を行った。これは中央付近にある穴を使用すると、かく拌時に液滴が混ざり合可能性が考えられたためである。

単純に滴下モデルを適応すると、2か所同時に反応を行える2本のほうが1本の条件に比べグリセリン生成量が増加するはずである。しかし、2本の条件で生成量が減少する結果となったのは、次に挙げる理由が考えられる。まず、2本の条件は1本の条件に対して1回に倍の量が滴下されるので、滴下の間隔が長くなる。次に、かく拌子回転数(角速度)が同じでも滴下箇所が中央より離れることで滴下位置のなたね油の周速度(流速)が速くなることである。つまり、滴下間隔が長くなることで、混合液となたね油の混合が進みOH濃度を維持しにくくなること、それに加え、滴下位置が中央から離れることで、滴下箇所のなたね油の流速が速くなり、さらにOH濃度を下げたからだと考えられる。そしてグリセリン生成量が混合と同程度となったのは、初期はOH濃度がすぐに低下するので反応が進みにくく、滴下したなたね油中のOH濃度の濃度がエステル交換を行うのに十分な濃度を超えたあたりでエステル交換が進み始めることで、混合と同じようなグリセリン生成量になったのではないかと推測される。

#### 4. まとめ

本研究ではCH<sub>3</sub>OH(メタノール)にKOHを溶かした混合液をなたね油に滴下することで、局所的にOH(塩基)濃度の高い領域を作り、混合パラメータを変化させたエステル交換(BDFの作成)を行った。パラメータがBDF作成に与える影響について得られた結果を以下に示す。

- ・内径φ1.6mmのチューブを用いた場合、室温の混合法に対し滴下法ではグリセリン生成量が7%増加した。また、常温滴下法のグリセリン生成量は加熱(50℃設定)混合法の生成量の95%となった。加熱条件において、滴下法は混合法よりグリセリン生成量が3%改善した。この結果から、滴下法はエステル交換に適していることがわかった。
- ・かく拌子回転数、チューブ内径を変化させた条件ではグリセリンの生成量に大きな変化は見られなかった。滴下法の反応効率の改善効果は局所的なOH濃度の高い領域を作ることができること、つまり、混合液の拡散スピードが重要であると考えられる。かく拌子の回転数を増加させた条件でグリセリン生成量に変化がほとんどなかったのは、回転数が高くなり拡散スピードが増してもエステル交換を維持できるOH濃度が維持できるだけの混合液が滴下されたため、チューブ内径を変化させた場合では、1回の滴下量が減っても滴下間隔が短くなり、エステル交換を維持できるOH濃度が維持できるだけの混合液が滴下されたためだと考えられる。
- ・チューブの本数を2本とした滴下法と1本の滴下法を比較した場合、2本の滴下法のグリセリン生成量は1本の滴下法のものよりも減少した。2本の条件と1本の条件に比べてグリセリン生成量が減少したのは、混合液の滴下場所と滴下間隔が原因だと考えられる。1本の場合、滴下位置はカップのほぼ中央部であるのに対し、2本の場合はカップ中央と外縁の中間点付近の2か所となるので、かく拌子の回転数が同じ(角速度)であってもなたね油の流速が増してOHの拡散スピードが増したこと、それに加え、30分間の滴下量が一定としたため、2本の条件は1本より滴下間隔が長くなることにより、エステル交換反応に必要なOH濃度を維持することが難しくなったためだと考えられる。

#### 参考文献

- [1] 秋葉・西田, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第40(6), p123, (2005)
- [2] 島田, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第46(6), p26, (2011)
- [3] 段・他3名, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第41(3), p117, (2006)
- [4] 原田, 油脂化学の知識, 幸書房, p80, (1980)

# 可視光カメラを用いた液中プラズマ実験監視 システムの開発

佐久間 一行\*・高瀬 玄渉\*\*

## Development of in-liquid plasma experiment monitoring system by using visible light camera

Ikko Sakuma\* , Towa Takase \*\*

### Abstract

In the in-liquid plasma experimental device at the National Institute of Technology, Yuge College, research has been conducted on the application of chemical reactions occurring at the interface between the liquid and gas phases. However, since the reaction field including the plasma produced by the experimental apparatus is very small, the experiments are conducted by repeatedly generating the reactions for a long time to investigate their effects. Therefore, in this study, we developed a system to monitor the experiments using a simple PC-connectable camera device. By using this system, the experimenter is notified when a discharge loss occurs during the experiment. The net plasma discharge time during the experiment can also be measured, which allows for more accurate control of the experiment time. The developed system has an error rate of about 2 [%] between the net discharge time and the set experiment time depending on the frame rate setting.

### 1. 緒言

弓削商船高専にある液中プラズマ実験装置[1]では、水中気泡内で発生させるプラズマを用いて液相と気相およびプラズマ相によって形成される高温の反応場を用いた応用研究として、油水分解実験や水素同位体交換反応実験などを行っている。しかしながら、図1の写真に実験装置で生成されるプラズマを示すが、

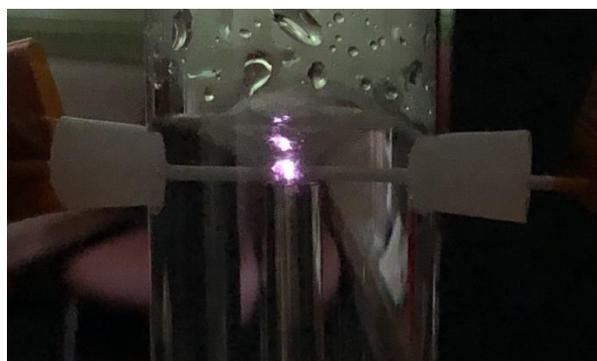


図1 液中プラズマ放電の様子

電極間距離が0.5 [mm]、電極直径が1 [mm]と微小であるため、各実験は反応を長時間繰り返し生じさせ、その効果を調べている。このため、実験は最大で4時間程度有する場合もある。また、プラズマの生成にはアルゴンなどのガスを液中に注入するため、電極の位置や気泡のゆらぎによって放電が消失することがある。したがって、実験中の正味の実験時間を把握するためには、放電を監視する必要がある。一方で、本校の研究室は1名体制が基本であり、長時間実験の実施にはスケジュール調整を工夫して時間を確保する必要がある。このため、実験サンプルを確保するために日を要することが課題としてあった。そこで本研究では、簡易的なPC接続可能なカメラデバイスを用いて実験の監視を行うシステムの開発を行った。監視システムでは、主にプラズマ放電の発光を計測し、設定時間以上放電が消失した際に実験者に通知を送る仕組みとした。これによって、実験時間における正味の放電時間の計測ができ、かつ放電が設定された時間以上途切れた場合に実験の意味が消失するため、そこで実験を打ち切

\* 商船学科

\*\* 専攻科生産システム工学専攻

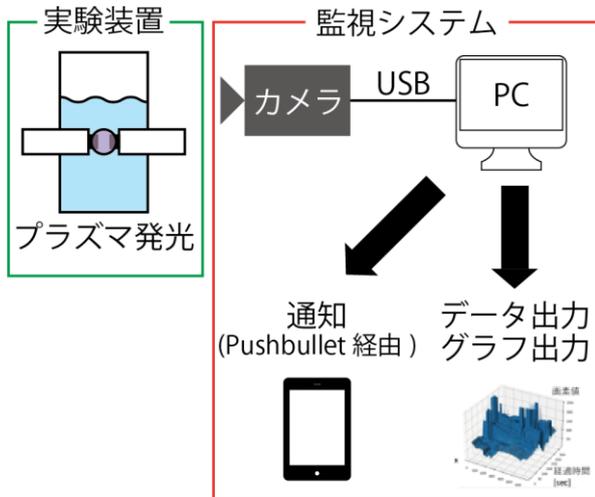


図 2 プラズマ監視システムの概要

る判断が可能となる。

また、漏電などによる過電流等の致命的な異常には電源回路に停止機構が備わっている。

## 2. プラズマ実験監視システム

図 2 に本研究で開発する計測システムの概要を示す。本計測システムは、液中プラズマ実験装置で生成された水中気泡内のプラズマからの可視発光をパソコン接続で使用できるカメラ(Microsoft, LifeCam Studio Q2F-00021)によって画像取得し、その画像に対する数値解析処理を用いてプラズマの発光を判断し、発光時間を計測する。システムは計測中と計測後の動作に分かれており、計測中には、発光時間の積算とプラズマ消失時間の積算を行い、設定された時間以上にプラズマが消失した場合には、実験者に通知を送る仕組みとなっており、実験中止の判断を仰ぐ仕組みとなっている。また、実験後には、プラズマ放電時間を返すだけでなく、グラフとして時間ごとの発光強度を示す。計測プログラムは、プログラミング言語の Python (Ver3.8.6)により記述・実行され、画像処理は OpenCV [2]ライブラリを用いた。図 3 にカメラ計測システムのプログラムのフローチャートを示す。プログラムでは、まずライブラリのインポートおよびカメラ設定が行われる。次に、実際のカメラで撮影された映像に対する繰り返し処理が行われる。カメラは設定された毎秒フレーム数(FPS)に従い、像を取得し、PCへと送信する。本研究で使用した Web カメラは 15 および 30 FPS が設定可能である。PC では、送られてくる 1 フレームごとの画像を処理する。プラズマによる発光の有無を判断するために、まずグレースケール処理し、それを踏まえて設定された閾値による 2 値化処理を行う。これにより、グレースケール画像における閾値以上の明る

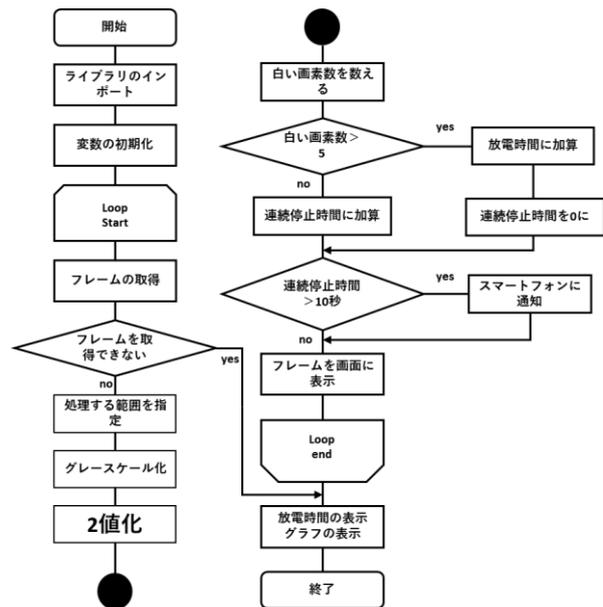


図 3 Web カメラを用いたプラズマ監視プログラムのフローチャート

さを持つ点を発光している画素として数えた。この発光画素数に対しても閾値設定を行い、閾値以上の範囲で発光が確認できたときにその画像はプラズマの発光があるものとし、設定 FPS による 1 フレームあたりの時間を発光時間として積算する。これをカメラから送られる画像ごとに実施し、積算された時間を放電時間として実験終了に伴うプログラムの終了時に表示させることで、放電時間を表示する。なお、使用したカメラ撮影画素数およびレンズ画角から放電実験において不要な背景が大きいいため、予め取得画像のうちの処理範囲を制限して処理を行った。

また、放電が行われないフレームについては、積算されないが、一方で、ある設定時間連続して放電が無いと判断された場合には、プログラムから外部の Pushbullet[3]アプリケーションを通じて実験者に通知を行う。実験終了時には、積算した発光時間、発光強度分布グラフが表示される。

また、可視光像の計測においては、実験実施時の時刻による太陽光の反射光の影響が大きい。可視光カメラはスペクトル分解能が無く、計測可能な波長範囲の光をすべて採光する。しかしながら、太陽光の影響は実験時間内で大きく変化することは無いと考えられるため、プログラムにおいて背景光を実験前に一定時間計測し、その背景光を差し引きした状態でプラズマ発光の計測を行うことで、太陽光などの背景光の影響を最小化するようにした。

### 3. 実証試験

#### 3. 1 放電監視試験

開発した監視システムを用いて、実際の液中プラズマ放電実験の発光を使用した Web カメラ(Microsoft, LifeCam Studio Q2F-00021)で設定可能な 30 FPS および 15 FPS を使用して 1 時間監視した。図 4 に示すようにカメラを設置し、また反射光が減るように後ろに黒い紙によるスクリーンを置き、実験時には電気を消灯して放電し、監視を行った。1 時間実験を行った際の手動計測による正味のプラズマ発光時間と監視システムによるフレーム処理回数を表 1 に示す。

表 1 1 時間放電の監視結果

フレームレート [FPS]	総処理フレーム数 [フレーム]	誤差率 [%]
30	54053	-49.95
15	52852	-2.13

30 FPS で監視する場合、1 時間のフレーム数の理論値は 108000 フレームである。取得できた総フレーム数が 54053 フレームであることから、誤差率  $\varepsilon$  は理論フレーム数を  $f_0$ 、取得フレーム数を  $f$  とすることより

$$\varepsilon = \frac{f - f_0}{f_0} \times 100 [\%]$$

として求められる。同様に、15 FPS での場合は、理論フレーム数が 54000 フレームに対して取得フレームが 52852 フレームであり、誤差率は -2.13 [%] であった。これにより、設定フレームレートによる計測誤差の違いが生じていることが明らかとなった。このため、この原因を 1 フレームあたりの処理時間を調べることで調査したところ、1 フレーム目の処理に設定フレームレートの周期の 10 倍近くの時間がかかっており、処理落ちしていることが明らかとなった。また、1 フレーム

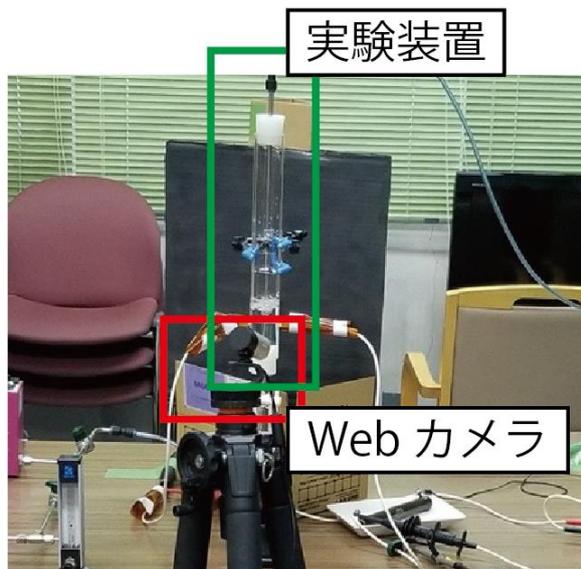


図 4 プラズマ監視試験時の様子

ムの処理は、大別するとカメラからのデータ取得と取得した画像データに対する処理の二つの処理があり、特に画像処理に時間がかかっているため、処理落ちしフレームが抜けるため、誤差が生じたと考えられる。特に 30 [FPS] では、1 フレームの周期は 0.03 [秒] 程度であるため、プログラムの改善が必要となる。なお、本研究に使用した PC のスペックを表 2 に示す。

一方で、Pushbullet による通知機能は問題なく動作した。

表 2 実験に使用した PC スペック一覧

PC メーカー	DELL Vostro 3581
CPU	Core i3-7020U 2.30 GHz
実装 RAM	16.0 GB
システム	64 bit OS

#### 3. 2 監視システムによる液中プラズマ実験装置における放電率の計測

開発した監視システムを使用して、液中プラズマ実験装置の放電実験における放電率の計測を行った。ここで、放電率  $\sigma$  は、下記のように定義する:

$$\sigma = \frac{\text{正味の放電時間}}{\text{設定放電時間}} \times 100 [\%]$$

これまでに監視システムと合わせて行った液中プラズマ放電実験の結果から、放電率をまとめたものを図 5 に示す。特に、水素同位体交換反応実験では、液相に水または重水を用いており、これらは純度が高く導電率が低く、放電が生じにくいことがこれまでの実験でわかっており、これに対して、油水分解実験では界面活性剤等が混入する場合や炭化水素中での実験などでは放電率はほぼ 100% であるため、監視システムを使用していないため、図 5 には含めていない。実験結果より、実験時間の伸長にともない放電率が低下してお

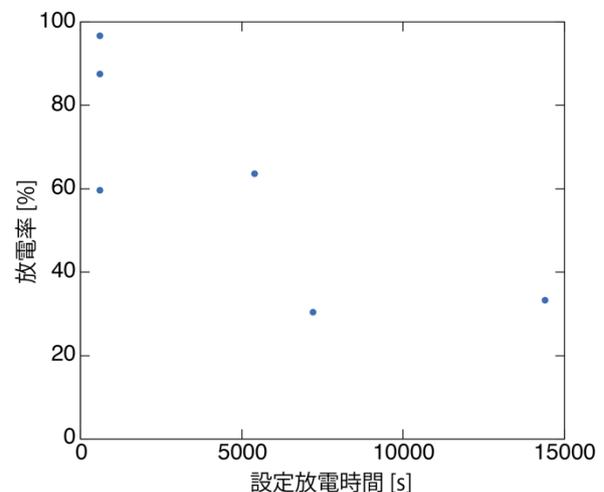


図 5 液中プラズマ実験装置における放電率

り、最も低い点で 30.5 [%]となっており、これは単純に 3 回に 1 回放電が起きておらず、放電時間が 1/3 程度になっていることを示す。一方で、放電率の低下は線形にではなく、5000 秒程度までで急激に落ち込み、そこからほぼ横ばいになるような様子を示している。

これは、放電により短時間で電極形状が変形したことで電界が集中する箇所が変わることが原因として考えられるため、電極を使用する際の前処理過程を検討する必要がある。

#### 4. 結言

弓削商船高等専門学校において液中プラズマ実験装置を用いた研究の効率化およびプラズマ放電の実験時間計測を行うために PC 接続の可視光カメラを使用した実験監視システムの開発を行った。監視システムでは、カメラより取得する放電前の背景画像と放電中の発光がある状態の画像とを比較することで放電中であることを判断し、フレームごとの時間を積算することで放電時間を計測した。また、放電が消失されたフレームが設定時間以上続いた場合には、実験者に異常通知を送るシステムを組み込み、実験者が常に実験に立ち会う必要がないシステムとした。また、実証実験に使用した環境では、15 [FPS]設定で、誤差率-2 [%]で放電時間を計測できることが明らかとなった。

液中プラズマは液相の条件によって放電が途切れることがあるため、この監視システムを用いて液中プラズマの放電率を計測した。これにより、設定時間が伸長することによって放電率が非線形に低下することが明らかとなり、最も低い放電率が 30 [%]程度であることがわかった。

本研究により、液中プラズマ実験装置を用いた実験において、特に導電率の低い液相を使用した状況で放電を行う場合には設定実験時間と実放電時間との乖離が設定実験時間が長いほど生じるため、プラズマ監視システムを用いた実放電時間の計測が実験時間の管理および実験の失敗を防ぐためにも有効である。

#### 参考文献

- [1] 佐久間一行, 船舶ビルジ水処理に向けた液中プラズマ実験装置の開発, 弓削商船高等専門学校紀要, 41 号, pp.7-11, 2018
- [2] OpenCV, <https://opencv.org/>
- [3] Pushbullet, <https://www.pushbullet.com/>

# 船員のメンタルヘルスアンケートから見た 学生の船員イメージとギャップ

森 瑛太郎 \*・山下 訓史 \*・村上 知弘 \*\*

## Seafarers Image and Gap of the Students as seen from the Seafarer's Mental Health Questionnaire

Eitaro Mori \*, Satoshi Yamashita \*, Tomohiro Murakami \*\*

### Abstract

In recent years, youth turnover has become a problem. On the other hands, seafarers' management of mental health has become a major issue in the field of sailor training. Therefore, appropriate measures for their mental health are critical considering their working environment for maritime logistics. To improve the guidance and practical training of students who will work as seafarers in the future, we conducted a questionnaire survey on what causes their mental health problems during the voyage. Considering that many of the factors that cause mental problems are related to human relationships, It is considered that guidance on communication methods aimed at building smooth human relationships on board and a training environment simulating a company ship should be incorporated into the training.

### 1. はじめに

厚生労働省（以後厚労省）が令和2年10月に公表した新規学卒就職者の離職状況（平成29年3月卒業者の状況）<sup>[1]</sup>によれば、平成29年における新規大卒就職者の3年以内の離職率は32.8%、新規高卒就職者の3年以内の離職率は39.5%となっており離職率が高いことがわかる。ただし、これは厚労省が過去20年調べた結果とほとんどかわりはない。つまりバブル期であろうが、就職氷河期であろうが離職率に大きな変化はない。一方、Z世代と呼ばれる近年の学生たちは、生まれた時からスマートフォン（以後スマホ）があり、ものごころつく頃から様々な情報を自由にやり取りしているデジタルネイティブである。このような学生たちと親世代のバブル期・氷河期の世代とは会社を辞める理由が少しながら異なることが考えられる。

また近年、勤労者等のメンタルヘルスが社会的に大きな問題になってきており、船員をはじめとした海上業務を遂行する海技者においても、陸上から離れた閉鎖的で、かつ仕事と生活が一体となった環境下で業務を遂行するという特殊性があることなどにより、メン

タルヘルスの対策等の構築が重要な課題となってきた<sup>[2]</sup>。このため、一般財団法人海技振興センターでは、国土交通省と連携して、海技者のメンタルヘルスに関する調査研究専門委員会を開催し、船員のメンタルヘルスに関するわが国初の大規模アンケート調査を行ったうえ、「船員のメンタルヘルス確保のための手引き」<sup>[3]</sup>及び「船員版職場環境改善チェックシート」<sup>[4]</sup>を作成している。

そこで、一般財団法人海技振興センターが船員に対して行ったアンケートと同様なアンケートを弓削商船高等専門学校（以後本校）商船学科の学生に行い、同アンケート結果から両者を比較することによって、学生の考える船員と現状の船員の状況とのギャップがあるかを調べた。これにより本校学生が想像する未来像が実際の船員の生活にギャップがないかを調査した。多くの場合このギャップが大きいために離職してしまう。本研究では就職後の定着率を上げることを目標に学生が就職後に受けるリアリティショック（理想と実際のギャップ）の明確化及び練習船を使ってできる教育実習を検討した。

\* 練習船弓削丸

\*\* 商船学科

## 2. アンケート調査

### 2. 1 アンケートの概要

本研究で行ったアンケートでは、海技者のメンタルヘルスに関する船員に実施したアンケート調査を基に船員と学生とが比較できるように本校学生用にアンケートを作成した。質問内容は、2020年3月船員版職場環境改善チェックシートプレテスト調査結果報告書<sup>[5]</sup>における職業性ストレス簡易調査(57項目)の内、学生が船員をイメージして回答可能な仕事の内容・状態に関する17項目の質問、2019年7月船員のメンタルヘルスに関するアンケート調査報告書<sup>[6]</sup>における船員の仕事に関する質問(船員の業務性に関するストレス度合いの把握)29項目と乗船中のストレス解消法に関する質問8項目、メンタルの問題に関する質問2項目を実施した。また、独自に職場環境及び人間関係に関する質問4項目を準備し学生にアンケートを実施した。これらのアンケートは、紙ベースのアンケートのようにホームルームなどを活用せずとも各自好きな時間に行うことができるのでMicrosoft Formsを使用して行った。

### 2. 2 アンケート対象者及び比較船員数

アンケート対象者は、令和3年度に弓削商船高等専門学校商船学科に在籍する1年生から5年生とした。回答を行った学生は134名であった。回答率73%であった。

また、比較対象である船員はメンタルヘルス報告書<sup>[6]</sup>より、外航船員566名、内航船員1208名、外航と内航の両方に従事する船員72名、練習船72名の合計2167名であった。また環境改善報告書<sup>[5]</sup>より、外航船員270名、内航船員906名、外航と内航の両方に従事する船員211名、未回答45名の合計1432名である。

### 2. 3 アンケートの内容

本研究のアンケートは前述しているように一般財団法人海技振興センター海技者のメンタルヘルスに関する調査研究委員会が公表している内容と同様なものであるため、実際に就職していない学生には練習船実習などの体験などから船員の仕事をイメージして回答してもらった。

質問内容として、大きく4項目あり、「仕事の内容・状態に関する」質問、船員の業務性に関するストレス度合いの把握として「船員の仕事に関する」質問、「乗船中のストレス解消法に関する」質問、「メンタルの問題に関する」質問、「人間関係に関する」質問について、それぞれ表1-5に記す。

表1 仕事の内容・状態に関する質問

船員の仕事にはどんなイメージをしていますか?
選択式
・非常にそう思う・かなりそう思う
・多少そう思う・そう思わない
1 非常にたくさんの仕事をしなければならない
2 時間内に仕事が処理しきれない
3 一生懸命働かなければならない
4 かなり注意を必要とする
5 高度の知識や技術が必要な難しい仕事だ
6 勤務時間中はいつも仕事のことを考えていなければならない
7 からだを大変よく使う仕事だ
8 自分のペースで仕事ができる
9 自分で仕事の順番・やり方を決めることができる
10 職場の仕事の方針に自分の意見を反映できる
11 自分の技能や知識を仕事で使うことが少ない
12 部署内で意見の食い違いがある
13 他の部署とうまが合わない
14 職場の雰囲気は友好的である
15 職場の作業環境は良くない(音、照明、温度、換気など)
16 仕事の内容は自分にあっている
17 働きがいのある仕事だ

表2 船員の仕事に関する質問

船員のストレスの要因になりそうなものはなんだと思いますか?
選択式
・非常にそう思う・かなりそう思う
・多少そう思う・そう思わない
1 衝突、転覆、座礁等の事故が発生しないよう、気をつけること
2 危険と隣り合わせの仕事であること
3 危険物貨物の管理に気をつけること
4 船舶を直接運航するための業務のほか、書類の作成に時間をつかうこと
5 運航スケジュールがハードであること(用船者の運航計画に余裕がないこと)
6 船内の限られた環境で、数日、数週間、数月を過ごすこと
7 常時動揺し、騒音のある環境下で数日、数週間、数月間を過ごすこと
8 限られた人達と職務や生活を職・住を数日、数週間

間、数月間を過ごすこと
9 船内で他の船員とのコミュニケーションがとれないこと
10 船内ではプライベートな時間がとれないこと
11 陸上の家族や友人、恋人との連絡手段がないこと
12 携帯電話が使えないこと
13 陸上の家族や友人と会う機会がないこと
14 睡眠時間が1日に連続して7時間以上とれないこと
15 自由な時間が1日に8時間以上ないこと
16 外航船員の方にお伺いします。外国人船員との混乗していること
17 外航船員の方にお伺いします。時差の関係で1日の時間が変化すること
18 酷暑や酷暑のスタンバイ時等は、過酷な長時間労働であること
19 入出港時などは時間制限のある労働となること
20 食事は、決められた量以上に食べることができないこと
21 食事はメニューが限られていること
22 飲酒の機会が制限されていること
23 喫煙の場所や時間が制限されていること
24 運動をする機会が充分にないこと
25 趣味に没頭できる機会が充分にないこと
26 アウトドアの趣味ができないこと
27 気の合わない上長と乗船すること
28 気の合わない部下と乗船すること
29 話などをする船員が限られた人になりがちなこと

表3 乗船中のストレス解消法に関する質問

船上でのストレス解消としてどんなことをしたいですか？
以下より選択（複数解答可）
1 携帯電話を使う
2 趣味や運動を楽しむ
3 プライベート時における他の船員とのコミュニケーション
4 友人、相談相手などをつくる
5 一人でお酒などを楽しむ
6 陸上の家族、友人、恋人と連絡をとる
7 睡眠を十分とる
8 仕事上円滑なコミュニケーションをとる

表4 メンタルの問題に関する質問

選択式
1 これまでに練習船（弓削丸や大型練習船）で気分が落ち込んだり、実習を受ける気力が起きない問題が起きたことがありますか？
・あった・それに近いことがあった・なかった
2 乗船中はメンタルの問題が起きやすいと思いますか？
・起きやすい・ある程度起きやすい・思わない
・わからない

表5 人間関係に関する質問

1 船員の上司はどんなイメージをしていますか？
・怖そう・緊張する（話しづらい）・優しく
・かっこいい
2 理想の船員の上司はどんな人ですか？
・仕事面において尊敬できる
・部下の成長を考えてくれる
・コミュニケーションがとりやすい
3 円滑に業務を進めるために重要視することは何ですか？
・コミュニケーション・スケジュール管理
・やる気・操船技術、整備技術
4 船員という職業にハラスメントはあるとおもいますか？
・あると思う・それに近いものがあると思う
・ないと思う

### 3. アンケート結果および考察

#### 3. 1 仕事の内容・状態に関する質問

この質問事項は、上述の報告書より本来船員と陸上の労働者を比較するために実施されたものである。これらの報告では、船員については仕事の量的負担、質的負担ともに過酷な環境下にあることが改めて示されている。一方、ストレス反応としては「気がはりつめている」「よく眠れない」といったところで陸上の労働者に比べて悪化している項目があったが、「概ねやや良好が変わらない様子であった」と報告されている。

それに対し本研究結果では学生が持つ船員に対するイメージが明確に示された。

船員と学生との比較を図1に示す。図1は、質問に対する回答の中で、一番高いストレス度を示す回答をグラフにしたものを示した。

図1④より、学生が「かなり注意を集中する必要が

ある」という項目が最も選択されており、2番目に「一生懸命働かなければならない」、3番目に「高度の知識や技術が必要な難しい仕事だ」、4番目に「自分のペースで仕事ができる」、5番目に「非常にたくさんの仕事をしなければならぬ」の項目に対して半数以上の学生が船員の仕事では高いストレスを受けるであろうとイメージしている。

これは学生が、まだ社船での船の仕事を理解できていないことと学生たち自身が様々な作業を認識していないため、過剰に難しいと感じているあかしであろう。実際の船員の仕事は毎日のルーティーンもあり、常に高等な技術を使っているわけではない。このように船員という仕事を十分にイメージできていないということと練習船で一部知っているという不安から多くの学生にとってストレス度が高いと感じていることがうかがえる。4番目に選ばれた「自分のペースで仕事ができる」という項目は、学生にとってはまだ船員の仕事のサイクルや仕事のペース、仕事の分量などがつかめていないため自分のペースで仕事ができないのではないかと想像する学生が多かったため上位にあがってきたと推測される。

これは、Z世代と呼ばれる学生たちの特徴の一つであり、小学校のころから「自分のペース」を大事にされており、社会が「自分のペース」で動いていないことを理解していない結果が明確に表れている。しかしながらマイペースをみんなのペースに変えることは本校の教育でも十分にできるのではないかと考える。この点を実習の観点から考えていくことは必要である。

また、学生のアンケートの結果より船員の方が数値の高かった項目は、「私の職場の作業環境（騒音、照明、温度、換気など）はよくない」、「私の部署内で意見の食い違いがある」、「働きがいのある仕事だ」であった。作業環境については、練習船では日本近海や気象海象を考慮し危険な海域等での実習は行っていないため、環境に関してそこまで想像できていないことがわかる。言い換えるときれいな練習船しか知らない学生にとって船員の職場環境は少なからずいいイメージで見えている。しかしながら実際の会社ではそのような環境ばかりではない船もあるため、ギャップが生まれ、大きなストレスを感じて離職につながっているのではないかと推測される。

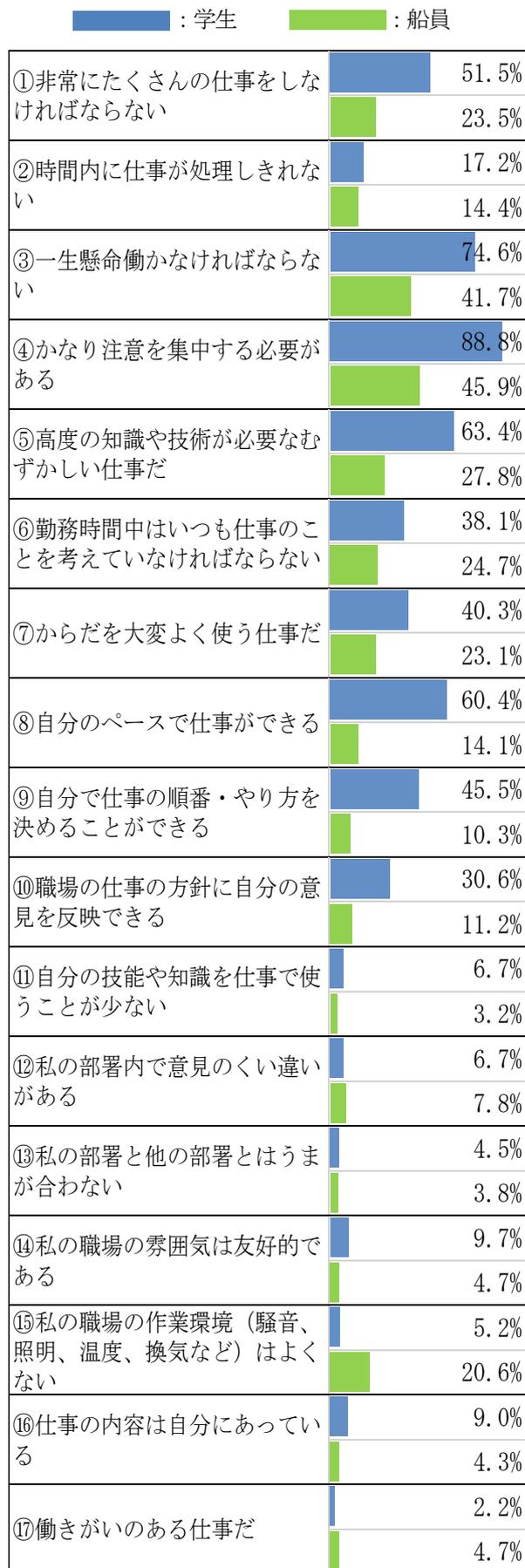


図1 仕事の内容・状態に関する質問

### 3. 2 船員の仕事に関する質問

この質問は、船員業務の特殊性に関するストレス度合いを船員及び学生それぞれ示したものである。上位10項目について図2に船員及び図3に学生の結果を示す。前述の報告書<sup>[6]</sup>の分析では、全体としては、「危険と隣り合わせ」、「事故が発生しないように気を使う」という船員としての業務に起因する要因が高い。

一方で高ストレス者は、「上司との関係」、「運航スケジュールがハード」、「限られた環境」によるストレスが高いと分析されている。学生と比較した結果では「運航スケジュールがハード」については、船員の順位は2位に対して、学生の順位は5位となっており、「上司との関係」については、船員の順位4位に対して、学生の順位は8位となっている。これも前述のように船員の仕事の理解不足から学生との船員の結果に差が出ている。運行スケジュールのストレスなどは実際に経験してみないと分からないためこのような結果になったと思われる。これは前項のマイペースであればあるほどつらく感じてくるかもしれない。高ストレス者ほど上記の項目によるストレスが高くなっているのにもかかわらず、学生は実際の仕事のイメージわかないので、船員との差が生まれたと思われる。

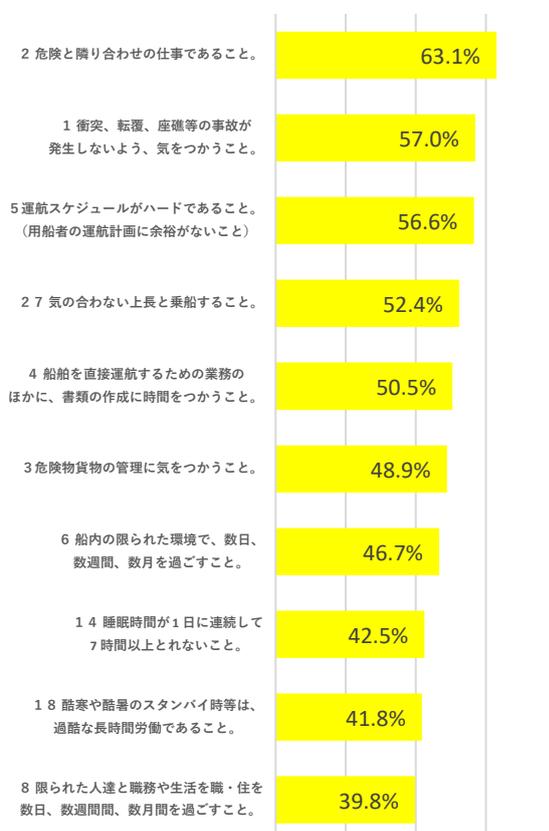


図2 (船員) 船員の仕事に関する質問上位10項目

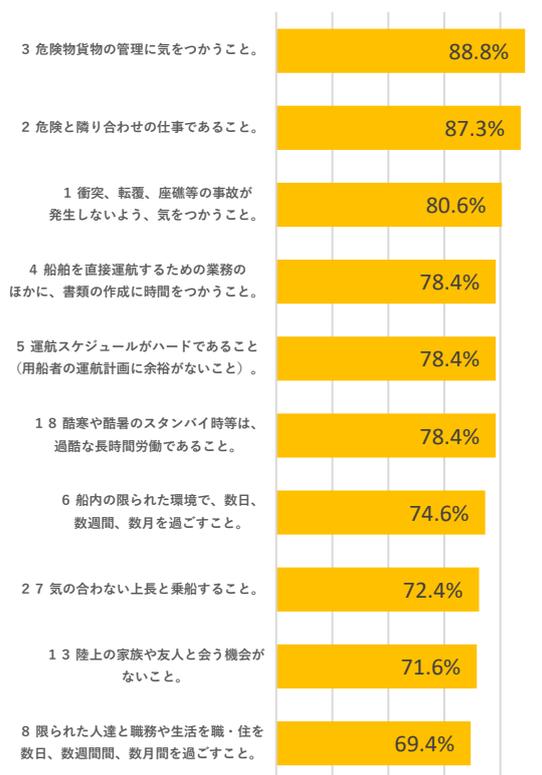


図3 (学生) 船員の仕事に関する質問上位10項目

### 3. 3 乗船中のストレス解消法に関する質問

この質問は、乗船中のストレス解消法に関する質問である。船員に対して実施された調査では、各項目の「非常に」及び「かなり」が選択された回答データが報告されており。学生には同様の8項目の質問事項に対し、複数回答可とした。

表よりストレス解消法として、船員と学生どちらも多く選択された項目は、「睡眠を十分とる」や「趣味や運動をたのしむ」であった。一方、「陸上の家族、友人、恋人との連絡をとる」や「仕事上円滑なコミュニケーションをとる」については、学生に比べ船員の方が選択した割合が多くなっている。

これはまだ学生自身が子供であるため、また思春期でもあり親からの独立心が生まれる頃でもあるため、家族への思いなどは大人と違うと思われる。

どちらも上位の睡眠については疲労の回復やストレスの緩和につながる、趣味や運動もストレス解消法として広く一般的にも知られている。ただし船の労働環境上、陸上での生活のような時間帯で仕事をするわけではないので、十分な睡眠の確保ができない場合もある。さらに船内では陸上のようにWiFi等が整備されているわけでもなく、時間も限られており限られた趣味や運動しかできないといったことでストレスを解消

する方法を制限されることを学生も理解しておくことが必要である。

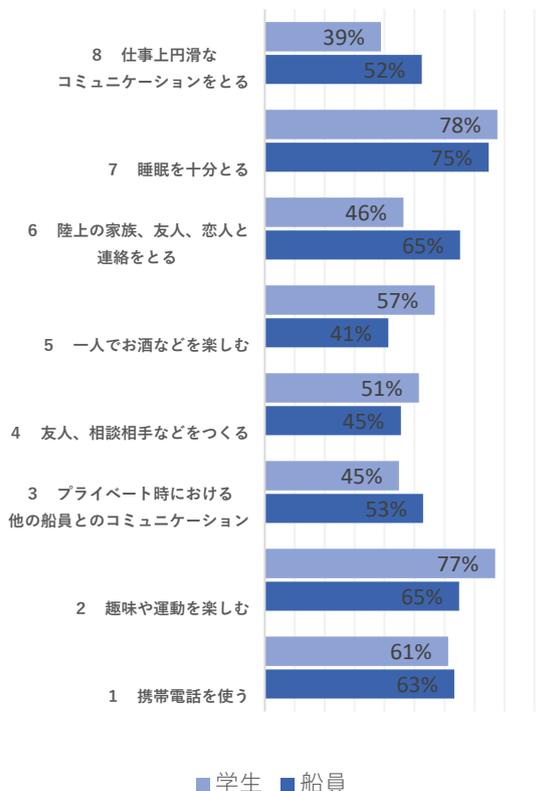


図 4 ストレス解消法に関する質問

### 3. 4 メンタルの問題に関する質問

この質問は、メンタルの問題に関する質問である。項目 1 の質問に関しては、学生は練習船実習の経験をもとに回答してもらった。図 5 より船員の 80.6%が「工作上メンタルの問題が起きたことがある」についてあったもしくはそれに近いことがあったと回答している。学生は 44%が練習船実習においてあったもしくはそれに近いことがあったと回答している。「乗船中はメンタルの問題が起きやすいと思いますか」との質問に対しては、おきやすいもしくはある程度起きやすいと回答した船員は 78%、学生は 72%となっている。船員の 80%の人がメンタルの問題が起きやすいと回答しているという事実は、船員という職業は、メンタルの問題が起きやすい職業であるということを明確に示している。これは練習船しか経験していない学生でも十分に理解している証拠であろう。つまり学生自身が理解しているにもかかわらず、それでもギャップが生まれていることが大きな課題であろう。

これまで自分自身にメンタルの問題（例えば「気分が落ち込む」「仕事をする気にならない」「常にイライラする」、「怒りっぽくなる」）が起きたことがありますか。

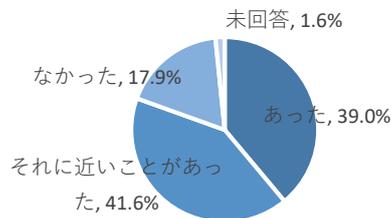


図 5 船員の回答

これまでに練習船（弓削丸や大型練習船）で気分が落ち込んだり、実習を受ける気が起きない問題が起きたことがありますか？

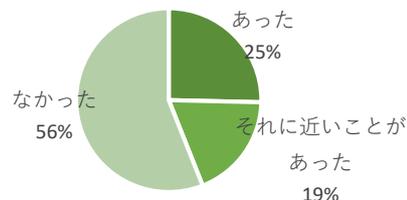


図 6 学生の回答

乗船中はメンタルの問題が起きやすいと思いますか。

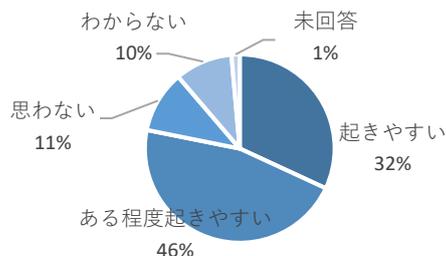


図 7 船員の回答

乗船中はメンタルの問題が起きやすいと思いますか？

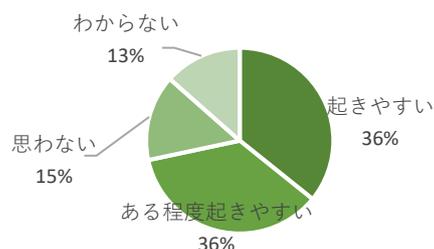


図 8 学生の回答

### 3. 5 人間関係に関する質問

この職場環境及び人間関係に関する質問は、学生のみに行った。図9より上司のイメージとして「怖そう」や「緊張する」といったネガティブな選択を91%の学生がしている。図10より理想の上司はどんな人かの質問には、56%の学生が「コミュニケーションがとりやすい上司」と回答した。図11より円滑に業務を進めるために重要視することは何かの質問には、70%の学生が「コミュニケーション」と回答している。学生たちからみた「コミュニケーションがとりやすい上司」とは、自分たちの意見を聞いてくれる人という意味であり、相互に話し合えるということではないのかとは思える。

また、図12より「船員という職業にハラスメントはあると思いますか」という質問には、図12より92%の学生が、あると思うもしくはそれに近いものがあると思うと回答している。これらの質問は、まさにイメージであり、実際に働いたことはないの、これまでの学校生活の先輩、また家庭の父親であったり、年配の人を恐れている世代のアンケート調査特有であると思われる。近年、どの会社でもハラスメント研修などを行っており、職員は皆ハラスメントについて一定の理解はある。しかしながらまったくないかというところのあたりについては職場によって大きく異なるので一概に会社ではとは指導しづらいところでもある。ただし、どの会社でもひと昔のような状況ではないことは理解させる必要があると思われる。インターンシップなどを経験させ、実際の社船を体験することがいいのではないかとと思われる。

近年の学生たちは耐ストレス性が低いと言われていたが、耐ストレス性がなくとも船員として働ける環境であってほしいという願いも我々にも少なからずある。学生たちの耐ストレス性を身に着けることと同時に会社側にも船員を増やすためにも若者への理解と対策を勧めていく必要があると思われる。

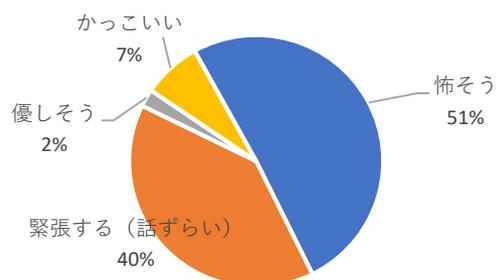


図9 船員の上司はどんなイメージをしていますか？

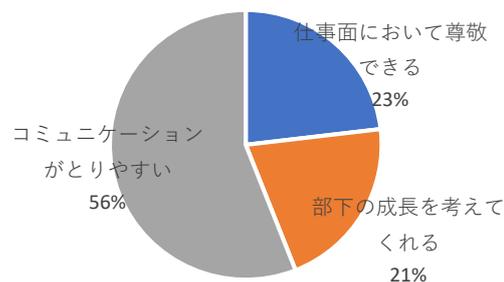


図10 理想の上司はどんな人ですか？

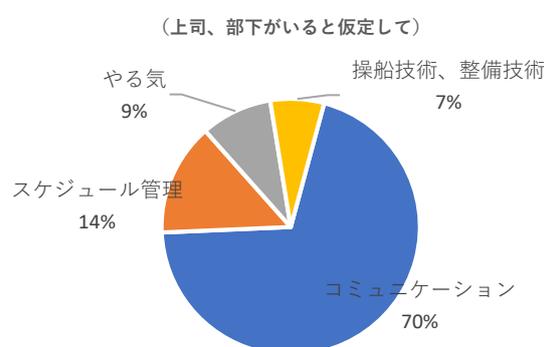


図11 円滑に業務を進めるために重要視することは何ですか？

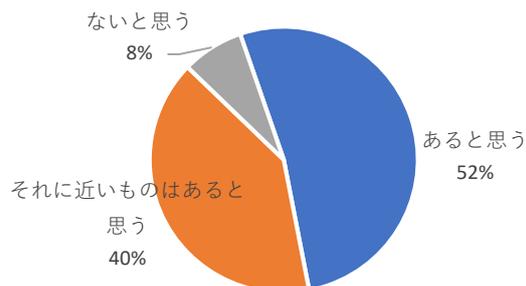


図12 船員という職業にハラスメントはあると思いますか？

## 4. まとめ

本研究では、学生が船員の行ったアンケートと同様の調査を行うことで学生がイメージしている船員の仕事を探ることができた。船員と学生の比較では、船員の仕事について両者ともにアンケート自体に大きな差

が出ているわけではなく、表1の仕事の内容・状態に関する質問の結果から、学生自身が船員という仕事は技術的にも体力的にも大変なこと、一生懸命働かないという事がある程度予測できている事がわかった。ただし、アンケートの結果から分かるように学生が将来の職場のイメージができていても実際にメンタルの問題が起こる可能性が十分にある。つまり船という特殊な環境で働く上で学生自身がメンタルヘルスの問題とどのようにつきあっていくか考えることが重要である。一般財団法人海技振興センターの行った調査<sup>[5]</sup><sup>[6]</sup>では、若年者のストレス要因としては、上長との人間関係が大きい要因であると報告されている。実際にアンケートでもメンタルに関して船ではメンタルの問題が発生しやすいと船員と学生の両者とも多くの方が回答している。学生たちもまた、船員として働くうえで人間関係に少なからず不安を抱えているのも事実である。学生たちが就職後、上司や環境はすべてが自分で選べるわけではないため、いかに働きやすくするために自分たちがどうすればよいかについて、対応策を知る必要がある。特に高ストレス者の要因として多かった「人間関係」に着目した取り組みが必要と考える。

改善策の一つとして次世代海事人材育成プロジェクトのキャリア教育での本校が練習船で実施している上級生と下級生による船員の職場を模擬した実習である。上級生を上司、下級生を部下として、合同で実習を実施することで両者のコミュニケーションや船内での共同生活や当直中など学生と生徒間では経験できない船員の職場を模した環境のストレスをかけることで、将来の職場で必要とされるコミュニケーションの取り方やストレス耐性を身につけることができると考えられる。

また、船員を目指す学生にとってこのメンタルヘルスの問題については、問題を引き起こす可能性のある要因については事前に把握しその対処の仕方を知っておくこともとても重要なことである。一般財団法人海技振興センターでは、船員のメンタルヘルス確保のための手引き<sup>[2]</sup>が公表されており、若手船員向けのガイドダンスも記載されているため船員としての心構えとして学生へ周知させることも必要であり、実施したいと考えている。

### 参考文献

- [1] 厚生労働省 HP, (2021.12.10)  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000177553\\_00003.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000177553_00003.html)
- [2] 一般財団法人海技振興センターHP, (2021.1.28)

<https://mhrij.org/Default.aspx?tabid=276>

- [3] 海技者のメンタルヘルスに関する調査研究専門委員会：船員のメンタルヘルス確保のための手引き, (2020.6)
- [4] 海技者のメンタルヘルスに関する調査研究専門委員会：船員版職業環境チェックシート, (2020.6)
- [5] 海技者のメンタルヘルスに関する調査研究専門委員会：船員版職場環境改善チェックシートプレテスト調査結果報告書, (2020.3)
- [6] 海技者のメンタルヘルスに関する調査研究専門委員会：船員のメンタルヘルスに関するアンケート調査結果報告書, (2019.7)

# 平行平板間内を流れる十分に発達した層流の 運動方程式の無次元化解析 (Part 1)

ジャンバル オダゲレル\*<sup>1</sup>, 横山 友花\*<sup>2</sup>, 長井 弘志\*<sup>1</sup>, ダワァ ガンバット\*<sup>1</sup>

## Non-dimensional analysis of a fully developed laminar flow between parallel plates (Part 1)

Odgerel Jambal\*<sup>1</sup>, Yuka Yokoyama\*<sup>2</sup>, Hiroyuki Nagai\*<sup>1</sup>, Ganbat Davaa\*<sup>1</sup>

### Abstract

We considered three different cases of fully developed laminar flow velocity profile distributions between parallel plates with the axial movement of one of the plates. The fluid is non-Newtonian and the fluid shear stress is described by the power-law model.

In this report we focused on Case 1 and carried out nondimensionalization of the continuity and momentum equations to obtain the exact solutions for the velocity field. The position of the maximum velocity is provided in accordance with the relative velocity of the moving plate and the flow law index of non-Newtonian power-law fluids.

### 1. まえがき

製造過程などの工学的な応用では、多くの重要な流体が非ニュートン流体であり、それらの流動特性は重要である。そのため、非ニュートン流体の流動・伝熱特性に関する知見が必要とされている [1]。

今回は、一方が移動する平行平板間内を流れる非ニュートン流体が十分に発達した層流の運動方程式について調べた。この問題を詳しく調べることで、ガラス製造過程やプラスチックおよびセラミックス製造過程での熱流体問題に応用できる。

非ニュートン流体の構成方程式（つまり、せん断応力とせん断速度の関係）は、非ニュートン流体の流れと熱伝達に最も頻繁に使用されている指数測モデル (power-law model) によって記述される [2]。

本論文では、運動方程式の無次元化、流体の最大速度における位置、およびニュートン法を用いた数値解析について報告する。これらは、移動平板の相対速度、指数測流体での速度分布と摩擦係数の流れ指数の影響を明らかにするために行った。一方が軸方向に運動する平行平板流路内での流体の速度分布について三つの形を想定する。流体の速度分布のイメージを図1に示す。

### 主要記号

$C$	積分定数
$f$	摩擦係数
$F$	無次元パラメータ
$L$	チャンネルの幅
$m$	整合性インデックス
$n$	流れの指数
$p$	圧力
$Re^*$	一般化されたレイノルズ数
$\rho$	密度
$u$	流体の軸方向速度
$u^*$	無次元速度 = $u/u_m$
$u_m$	流体の平均速度
$U$	移動平板の軸方向速度
$U^*$	移動平板の相対速度 = $U/u_m$
$y$	固定平板に垂直な座標
$y^*$	無次元座標 = $y/L$
$z$	軸方向座標

### 添字

0	固定平板
L	移動平板

\*1 電子機械工学科

\*2 専攻科生産システム工学専攻

図 1 の上図から平行平板流路内に最大速度を存在していること、中図と下図から最大速度が運動する平板上に存在している (速度分布の形が異なる) ことが分かる。速度分布のこの三形は、それぞれ式(3)のせん断応力の適用の仕方が異なる。今回は、上図の速度分布の形 (Case 1) に絞って理論する。

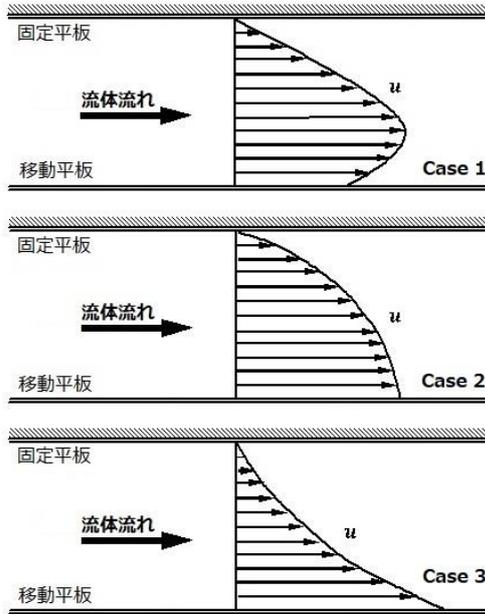


図 1 速度分布のイメージ図

## 2. 解析

図 2 に示す物理モデルを考える。流体解析に際して次の仮定を設定する [3].

- 流れは非圧縮・定常層流で流体力学的に十分発達している。
- 流体は非ニュートン流体で、せん断応力は Ostwald-de Waele の指数法則 (power-law model) で表され、物性値は一定とする。
- 一方の平行平板が軸方向に速度一定で運動している。

### 2. 1 基礎式

流体の運動方程式とその境界条件は上記の仮定により次式ようになる。

運動方程式：

$$\frac{d\tau}{dy} = -\frac{dp}{dz} \quad (1)$$

境界条件：

$$\begin{cases} u = 0 & \text{at } y = 0 \\ u = U & \text{at } y = L \end{cases} \quad (2)$$

ここで、式(1)の左辺のせん断応力  $\tau$  は次式の指数法則 (power-law model) で与えられる。

$$\tau = -m \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (3)$$

$n = 1$  の場合はニュートン流体に相当、 $m$  は流体の粘性係数 (viscosity) と一致する。

摩擦係数  $f$  と一般化されたレイノルズ数  $Re^*$  は、それぞれ次式で計算される。

$$f \equiv \frac{L}{\rho u_m^2} \left( -\frac{dp}{dz} \right) \quad (4)$$

$$Re^* \equiv \frac{\rho u_m^{2-n} (2L)^n}{m} \quad (5)$$

$u_m$  は流体の平均速度であり次式で定義される。

$$u_m \equiv \frac{1}{L} \int_0^L u dy \quad (6)$$

速度場の解析に際して次の無次元数を導入する。

$$y^* \equiv y/L \quad (7)$$

$$u^* \equiv u/u_m \quad (8)$$

$$U^* \equiv U/u_m \quad (9)$$

$$L_{max}^* \equiv L_{max}/L \quad (10)$$

### 2. 2 Case 1 (流体の最大速度が平行平板間に存在する場合)

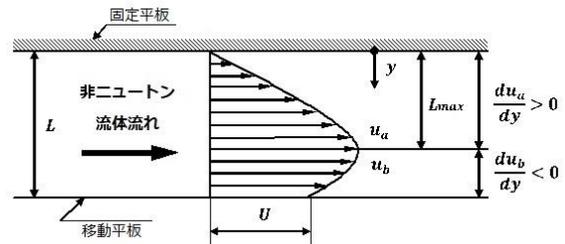


図 2 Case 1

この場合には、せん断応力  $\tau$  は次式で計算される。

$$\tau = -m \left( \frac{du_a}{dy} \right)^n \quad (0 \leq y \leq L_{max}) \quad (11)$$

$$\tau = m \left( -\frac{du_b}{dy} \right)^n \quad (L_{max} \leq y \leq L) \quad (12)$$

$$(a) \quad 0 \leq y \leq L_{max} \quad (0 \leq y^* \leq L_{max}^*)$$

式(11)を適用し、さらに式(7)~式(10)の無次元数を用いると運動方程式と境界条件は次のように変換される。

運動方程式：

$$(2) \quad \frac{d}{dy^*} \left( \frac{du_a^*}{dy^*} \right)^n = -F \quad (13)$$

境界条件：

$$u_a^* = 0 \text{ at } y^* = 0 \quad (14)$$

式(12)を適用し、さらに式(7)～式(10)の無次元数を用いると運動方程式と境界条件は次のように変換される。

ここで、 $F$  は次式で定義される無次元数である。

$$\frac{f \cdot Re^*}{2^n} = \frac{L^{n+1}}{m \cdot u_m^n} \left( -\frac{dp}{dz} \right) \equiv F \quad (15)$$

運動方程式：

$$\frac{d}{dy^*} \left( -\frac{du_b^*}{dy^*} \right)^n = F \quad (19)$$

最大速度の位置 ( $y^* = L_{max}^*$ ) では速度勾配が零であることから次式の条件が課せられる。

$$\frac{du_a^*}{dy^*} = 0 \text{ at } y^* = L_{max}^* \quad (16)$$

境界条件：

$$u_b^* = U \text{ at } y^* = 1 \quad (20)$$

最大速度の位置 ( $y^* = L_{max}^*$ ) では速度勾配が零であることから次式の条件が課せられる。

式(13)を式(16)の条件で1回積分すると次式になる。

$$\frac{du_a^*}{dy^*} = F^{\frac{1}{n}} (L_{max}^* - y^*)^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

$$\frac{du_b^*}{dy^*} = 0 \text{ at } y^* = L_{max}^* \quad (21)$$

さらに、式(17)を式(14)の条件で積分すると次式の解が得られる。

$$u_a^* = \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left[ L_{max}^* \frac{1+n}{n} - (L_{max}^* - y^*)^{\frac{1+n}{n}} \right] \quad (18)$$

式(19)を式(21)の条件で1回積分すると次式になる。

$$\frac{du_b^*}{dy^*} = -F^{\frac{1}{n}} (y^* - L_{max}^*)^{\frac{1}{n}} \quad (22)$$

さらに、式(22)を式(20)の条件で積分すると次式の解が得られる。

(b)  $L_{max} \leq y \leq L$  ( $L_{max}^* \leq y^* \leq 1$ )

$$u_b^* = U^* + \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left[ (1 - L_{max}^*)^{\frac{1+n}{n}} - (y^* - L_{max}^*)^{\frac{1+n}{n}} \right] \quad (23)$$

$F$  と  $L_{max}^*$  の値は不明のままである。それらは以下で決定される。

$$\int_0^1 u^* dy^* = 1 \quad (26)$$

ここで、 $y^* = L_{max}^*$  における速度の適合条件より

$$u_a^* = u_b^* \text{ at } y^* = L_{max}^* \quad (24)$$

式(26)は、さらに  $u_a^*$  と  $u_b^*$  を用いると次式のように書くことができる。

であるから、式(24)に式(18)と式(23)の速度を適用すると  $F$  に関して次の第1番目の関係式が得られる。

$$\int_0^{L_{max}^*} u_a^* dy^* + \int_{L_{max}^*}^1 u_b^* dy^* = 1 \quad (27)$$

$$F = \left[ \frac{U^*}{\frac{n}{1+n} \left\{ L_{max}^* \frac{1+n}{n} - (1 - L_{max}^*)^{\frac{1+n}{n}} \right\}} \right]^n \quad (25)$$

式(18)の  $u_a^*$  と式(23)の  $u_b^*$  を式(27)に代入すると、 $F$  に関して次の第2番目の関係式が得られる。

$$F = \left[ \frac{1 - U^*(1 - L_{max}^*)}{\frac{n}{1+2n} \left\{ L_{max}^* \frac{1+2n}{n} + (1 - L_{max}^*)^{\frac{1+2n}{n}} \right\}} \right]^n \quad (28)$$

なお、いまだ確定していない  $L_{max}^*$  の値を決定するためには、 $F$  に関して式(25)とは別の関係式が必要である。これは平行平板間を流れる流体の流量バランスから以下のように得られる。

式(6)を無次元化すると次式が得られる。

ここで、式(25)と式(28)から  $F$  を消去すると  $n$ 、 $L_{max}^*$  および  $U^*$  に関して次式の関係が得られる。

$$U^* = \frac{L_{max}^* \frac{1+n}{n} - (1 - L_{max}^*) \frac{1+n}{n}}{L_{max}^* \frac{1+n}{n} - \frac{n}{1+2n} \left\{ L_{max}^* \frac{1+2n}{n} + (1 - L_{max}^*) \frac{1+2n}{n} \right\}} \quad (29)$$

### 3. 解析方法

平行平板の一方が軸方向に移動する平行平板間の非ニュートン流体の予測摩擦係数を計算し、非ニュートン流体の速度分布を明らかにするために以下の順番でこの研究を進める予定である。

- 1) ニュートン法 (Newton's method) を用いて式(29)から  $L_{max}^*$  を求める。
- 2) プログラミング言語 “Python” を用いて数値解析用のプログラムを作成し、以下のパラメータや速度を解析する。
  - ・ 式(28)から無次元パラメータ  $F$  を求める。
  - ・ 式(15) を使って (摩擦係数) × (一般化されたレイノルズ数) ( $f \cdot Re^*$ ) を求める。
  - ・ 式(18)と式(23)を使って速度を求める。
- 3) 解析で得たデータを利用して速度分布、流体の予測摩擦係数の影響を示すグラフを作成する。

### 4. ニュートン法

数値解析の分野において、ニュートン法は、方程式系を数値計算によって解くための反復法による求根アルゴリズムの 1 つである。対象とする方程式系に対する条件は、領域における微分可能性と 2 次微分に関する符号だけであり、線型性などは特に要求しない。収束の速さも 2 次収束なので古くから数値計算で使用されていた。

この方法の考え方は以下のようなものである。

初めに、予想される真の解に近いと思われる値を一つとる。次に、そこでグラフの接線を考え、その  $x$  切片を計算する。この  $x$  切片の値は、予想される真の解により近いものとなるのが一般である。以後、この値

に対してそこでグラフの接線を考え、同じ操作を繰り返していく。上の考え方は次のように定式化される。

ここでは、考える問題を  $f : R \rightarrow R, x \in R$  として  $f(x) = 0$  となる  $x$  を求めることに限定する。このとき、 $x$  の付近に適当な値  $x_0$  をとり、次の漸化式によって、 $x$  に収束する数列を得ることができる場合が多い。

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (A)$$

図 3 にニュートン法の一手順の概念を示す。図の青線が関数  $f$  のグラフで、その接線を赤で示している。 $x_n$  よりも  $x_{n+1}$  のほうが  $f(x) = 0$  の解  $x$  についてのより良い近似を与えている [4]。

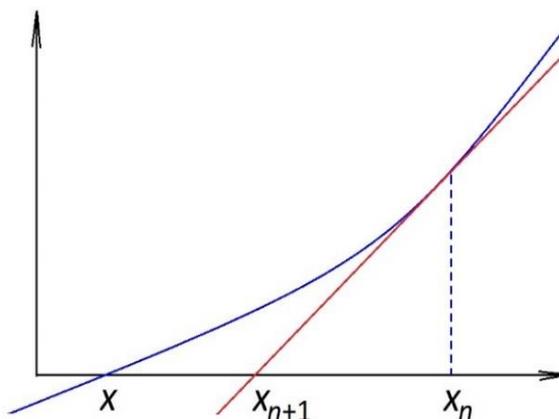


図 3 ニュートン法の一手順

### 5. 結果

ニュートン法の式(A)を使って式(29)の  $L_{max}^*$  を求める。まず、式(29)を以下のように変化する。

$$L_{max}^* \frac{1+n}{n} - (1 - L_{max}^*) \frac{1+n}{n} = U^* \left[ L_{max}^* \frac{1+n}{n} - \frac{n}{1+2n} \left\{ L_{max}^* \frac{1+2n}{n} + (1 - L_{max}^*) \frac{1+2n}{n} \right\} \right] \quad (30)$$

式(30)は  $L_{max}^*$  に関する式なので以下のように書けることができる。

$$f(L_{max}^*) = L_{max}^* \frac{1+n}{n} - (1 - L_{max}^*) \frac{1+n}{n} - U^* \left[ L_{max}^* \frac{1+n}{n} - \frac{n}{1+2n} \left\{ L_{max}^* \frac{1+2n}{n} + (1 - L_{max}^*) \frac{1+2n}{n} \right\} \right] \quad (31)$$

式(31)を  $L_{max}^*$  で積分すると以下の式が得られる。

$$f'(L_{max}^*) = \left(\frac{1+n}{n}\right) \left\{L_{max}^* \frac{1}{n} + (1-L_{max}^*) \frac{1}{n}\right\} - U^* \left[ \left(\frac{1+n}{n}\right) L_{max}^* \frac{1}{n} - L_{max}^* \frac{1+n}{n} + (1-L_{max}^*) \frac{1+n}{n} \right] \quad (32)$$

式(31)と式(32)を式(A)に代入し, Python でニュートン法による数値解析プログラムを作成した後,  $L_{max}^*$  を解析した. その結果を表 1 と表 2 に示す. 表 2 にある  $U_{cr}^*$  は Case1 と Case2 の境界を示す臨界値 (critical value) である. 式(29)に  $L_{max}^* = 1$  と代入すると,  $U_{cr}^*$  を求める式が以下のように得られる.

$$U_{cr}^* = \frac{1+2n}{1+n}$$

### 6. 結言

移動平板の相対速度, 指数測流体での速度分布と摩擦係数の流れ指数の影響を明らかにするための準備として: 「層流・乱流, ニュートン流体, 非ニュートン流体, クウェット流れ, ポアズイユ流れ」, 「指数測流体」, 「平行平板間クウェット・ポアズイユ流れ」, 「数値解析のニュートン法」について学ぶことができた.

今回は「指数測流体の平行平板間クウェット・ポアズイユ流れ」の数学モデルを作成し, 運動方程式を無次元変化することができた.

### 参考文献

[1] R. P. Chhabara and J. F. Richardson, Non-Newtonian Flow in the Process Industries, 1<sup>st</sup> ed., Butterworth Heinemann, Oxford (1999)

[2] T. F. Irvine and J. Karni, Non-Newtonian Fluid Flow and Heat Transfer, in S. Kakac, R. K. Shah and W. Aung (eds.), Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, 20.6-20.9, Chapter 20, John Wiley & Sons, Inc. (1987)

[3] Davaa G., Shigechi T. and Satoru M., Plane Couette-Poiseuille Flow of Power-Law Non-Newtonian Fluids, *Reports of the Faculty of Engineering*, Nagasaki University, pp.29-36, Vol.30, No.54 (1999)

[4] ニュートン法, <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E6%B3%95>

表 1 最大速度での無次元位置,  $L_{max}^*$  ( $U^* = -2.0 \sim -0.2$ )

n	$U^*$									
	-2.0	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2
0.1	0.4776	0.4789	0.4804	0.4820	0.4837	0.4857	0.4878	0.4902	0.4930	0.4962
0.2	0.4621	0.4644	0.4668	0.4694	0.4723	0.4756	0.4792	0.4833	0.4880	0.4935
0.3	0.4509	0.4537	0.4568	0.4602	0.4639	0.4681	0.4728	0.4782	0.4843	0.4915
0.4	0.4424	0.4457	0.4492	0.4532	0.4575	0.4624	0.4679	0.4742	0.4814	0.4899
0.5	0.4358	0.4393	0.4433	0.4476	0.4524	0.4578	0.4640	0.4710	0.4791	0.4886
0.6	0.4305	0.4343	0.4384	0.4431	0.4483	0.4542	0.4608	0.4684	0.4772	0.4876
0.7	0.4261	0.4301	0.4345	0.4394	0.4449	0.4511	0.4581	0.4662	0.4757	0.4867
0.8	0.4224	0.4266	0.4312	0.4363	0.4420	0.4485	0.4559	0.4644	0.4743	0.4860
0.9	0.4193	0.4236	0.4283	0.4336	0.4396	0.4463	0.4540	0.4629	0.4732	0.4854
1.0	0.4167	0.4211	0.4259	0.4314	0.4375	0.4444	0.4524	0.4615	0.4722	0.4848
1.1	0.4144	0.4188	0.4238	0.4294	0.4357	0.4428	0.4509	0.4604	0.4714	0.4844
1.2	0.4123	0.4169	0.4220	0.4277	0.4341	0.4413	0.4497	0.4593	0.4706	0.4840
1.3	0.4106	0.4152	0.4203	0.4261	0.4326	0.4401	0.4486	0.4584	0.4699	0.4836
1.4	0.4090	0.4137	0.4189	0.4248	0.4314	0.4389	0.4476	0.4576	0.4693	0.4833
1.5	0.4076	0.4123	0.4176	0.4235	0.4302	0.4379	0.4467	0.4569	0.4688	0.4830
1.6	0.4063	0.4111	0.4164	0.4224	0.4292	0.4370	0.4459	0.4562	0.4683	0.4827
1.7	0.4051	0.4100	0.4154	0.4214	0.4283	0.4361	0.4451	0.4556	0.4679	0.4824
1.8	0.4041	0.4089	0.4144	0.4205	0.4274	0.4354	0.4445	0.4550	0.4675	0.4822
1.9	0.4031	0.4080	0.4135	0.4197	0.4267	0.4347	0.4438	0.4545	0.4671	0.4820
2.0	0.4022	0.4072	0.4127	0.4189	0.4260	0.4340	0.4433	0.4541	0.4668	0.4818

表 2 最大速度での無次元位置,  $L_{max}^*$  ( $U^* = 0.0 \sim 1.6$ )

$n$	$U^*$									
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	$U_{cr}^*$
0.1	0.5000	0.5046	0.5106	0.5188	0.5321	0.5681				1.0909
0.2	0.5000	0.5080	0.5181	0.5319	0.5532	0.5987				1.1667
0.3	0.5000	0.5104	0.5237	0.5415	0.5681	0.6178	0.8894			1.2308
0.4	0.5000	0.5124	0.5280	0.5489	0.5791	0.6311	0.7867			1.2857
0.5	0.5000	0.5139	0.5315	0.5546	0.5875	0.6409	0.7616			1.3333
0.6	0.5000	0.5152	0.5343	0.5593	0.5942	0.6484	0.7536			1.3750
0.7	0.5000	0.5162	0.5366	0.5631	0.5996	0.6544	0.7507	0.9798		1.4118
0.8	0.5000	0.5171	0.5385	0.5663	0.6041	0.6592	0.7498	0.9343		1.4444
0.9	0.5000	0.5179	0.5402	0.5691	0.6079	0.6633	0.7497	0.9065		1.4737
1.0	0.5000	0.5185	0.5417	0.5714	0.6111	0.6667	0.7500	0.8889		1.5000
1.1	0.5000	0.5191	0.5429	0.5735	0.6139	0.6696	0.7505	0.8771		1.5238
1.2	0.5000	0.5196	0.5440	0.5753	0.6163	0.6721	0.7511	0.8687		1.5455
1.3	0.5000	0.5201	0.5450	0.5769	0.6184	0.6743	0.7517	0.8626		1.5652
1.4	0.5000	0.5205	0.5459	0.5783	0.6203	0.6762	0.7523	0.8579		1.5833
1.5	0.5000	0.5208	0.5467	0.5795	0.6220	0.6780	0.7529	0.8542	1.0000	1.6000
1.6	0.5000	0.5211	0.5474	0.5807	0.6235	0.6795	0.7535	0.8513	0.9860	1.6154
1.7	0.5000	0.5214	0.5481	0.5817	0.6249	0.6809	0.7540	0.8489	0.9752	1.6296
1.8	0.5000	0.5217	0.5487	0.5826	0.6261	0.6822	0.7545	0.8470	0.9666	1.6429
1.9	0.5000	0.5220	0.5492	0.5835	0.6272	0.6833	0.7550	0.8453	0.9596	1.6552
2.0	0.5000	0.5222	0.5497	0.5843	0.6282	0.6843	0.7554	0.8439	0.9537	1.6667

# 平行平板間内を流れる十分に発達した層流の 運動方程式の無次元化解析 (Part 2)

横山 友花\*<sup>1</sup>, ジャンバル オダゲレル\*<sup>2</sup>, 長井 弘志\*<sup>2</sup>, ダワァ ガンバット\*<sup>2</sup>

## Non-dimensional analysis of a fully developed laminar flow between parallel plates (Part 2)

Yuka Yokoyama\*<sup>1</sup>, Odgerel Jambal\*<sup>2</sup>, Hiroyuki Nagai\*<sup>2</sup>, Ganbat Davaa\*<sup>2</sup>

### Abstract

The present paper is an extension of our previous study. In this report we provide the non-dimensional analysis results for Case 2 and Case 3 where the flow maximum velocities overlap with the moving plate velocity. We obtained the exact solutions for the velocity by solving the momentum equation together with the continuity equation. The integral constant for the exact solution is obtained in accordance with the relative velocity of the moving plate and the flow low index of non-Newtonian power-law fluids. These results may be used to clarify the effects of the axial movement on the velocity fields of different non-Newtonian fluid flows and to determine the flow characteristics.

### 1. まえがき

製造過程などの工学的な応用では、多くの重要な流体が非ニュートン流体であり、それらの流動特性は重要である。そのため、非ニュートン流体の流動・伝熱特性に関する知見が必要とされている [1]。

今回は、一方が移動する平行平板間内を流れる非ニュートン流体が十分に発達した層流の運動方程式について調べた。この問題を詳しく調べることによって、ガラス製造過程やプラスチックおよびセラミックス製造過程での熱流体問題に応用できる。

非ニュートン流体の構成方程式（つまり、せん断応力とせん断速度の関係）は、非ニュートン流体の流れと熱伝達に最も頻繁に使用されている指数測モデルによって記述される [2]。

本論文では運動方程式の無次元化、および流体速度分布と摩擦係数の式内の積分定数を求める数値解析結果について報告する。これは、最大速度が運動する平板上に存在しているときの Case 2 と Case 3 についての理論で前論文 (Part1) の続きである。この場合、速度分布の形が異なる。

まず、図 1 に示す物理モデル (Case2) を考える。

### 主要記号

$C$	積分定数
$f$	摩擦係数
$F$	無次元パラメータ
$L$	チャンネルの幅
$m$	整合性インデックス
$n$	流れの指数
$p$	圧力
$Re^*$	一般化されたレイノルズ数
$\rho$	密度
$u$	流体の軸方向速度
$u^*$	無次元速度 = $u/u_m$
$u_m$	流体の平均速度
$U$	移動平板の軸方向速度
$U^*$	移動平板の相対速度 = $U/u_m$
$y$	固定平板に垂直な座標
$y^*$	無次元座標 = $y/L$
$z$	軸方向座標

### 添字

0	固定平板
L	移動平板

\*1 専攻科生産システム工学専攻

\*2 電子機械工学科

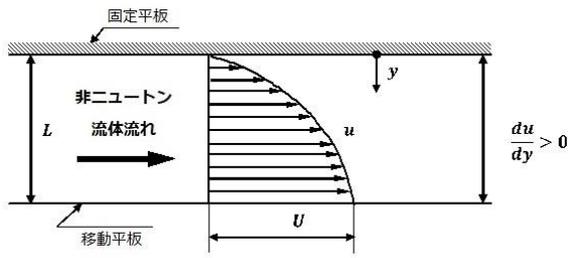


図 1 Case 2

2. 解析

流体解析に際して次の仮定を設定する [3].

- 流れは非圧縮・定常層流で流体力学的に十分発達している.
- 流体は非ニュートン流体で, せん断応力は Ostwald-de Waele の指数法則で表され, 物性値は一定とする.
- 一方の平行平板が軸方向に速度一定で運動している.

2. 1 基礎式

流体の運動方程式とその境界条件は上記の仮定により次式ようになる.

運動方程式:

$$\frac{d\tau}{dy} = -\frac{dp}{dz} \tag{1}$$

境界条件:

$$\begin{cases} u = 0 & \text{at } y = 0 \\ u = U & \text{at } y = L \end{cases} \tag{2}$$

ここで, 式(1)の左辺のせん断応力  $\tau$  は次式の指数法則 (power-law model) で与えられる.

$$\tau = -m \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \left| \frac{du}{dy} \right| \tag{3}$$

$n = 1$  の場合はニュートン流体に相当,  $m$  は流体の粘性係数 (viscosity) と一致する.

摩擦係数  $f$  と一般化されたレイノルズ数  $Re^*$  は, それぞれ次式で計算される.

$$f \equiv \frac{L}{\rho u_m^2} \left( -\frac{dp}{dz} \right) \tag{4}$$

$$Re^* \equiv \frac{\rho u_m^{2-n} (2L)^n}{m} \tag{5}$$

$u_m$  は流体の平均速度であり次式で定義される.

$$u_m \equiv \frac{1}{L} \int_0^L u dy \tag{6}$$

速度場の解析に際して次の無次元数を導入する.

$$y^* \equiv y/L \tag{7}$$

$$u^* \equiv u/u_m \tag{8}$$

$$U^* \equiv U/u_m \tag{9}$$

$$L_{max}^* \equiv L_{max}/L \tag{10}$$

2. 2 Case 2 (流体の最大速度が運動する平板上に存在する)

この場合には, せん断応力  $\tau$  は次式で計算される.

$$\tau = -m \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (0 \leq y \leq L) \tag{11}$$

式(11)を適用し, さらに式(7)~式(10)の無次元数を用いると運動方程式と境界条件は次のように変換される. 運動方程式:

$$\frac{d}{dy^*} \left( \frac{du^*}{dy^*} \right)^n = -F \tag{12}$$

境界条件:

$$\begin{cases} u^* = 0 & \text{at } y^* = 0 \\ u^* = U^* & \text{at } y^* = 1 \end{cases} \tag{13}$$

ここで,  $F$  は次式で定義される無次元数である.

$$\frac{f \cdot Re^*}{2^n} = \frac{L^{n+1}}{m \cdot u_m^n} \left( -\frac{dp}{dz} \right) \equiv F \tag{14}$$

式(12)を1回積分すると次式になる.

$$\frac{du^*}{dy^*} = F^{\frac{1}{n}} (C - y^*)^{\frac{1}{n}} \tag{15}$$

さらに, 式(15)を式(13)の条件で積分すると次式の解が得られる.

$$u^* = \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left[ C^{\frac{1+n}{n}} - (C - y^*)^{\frac{1+n}{n}} \right] \tag{16}$$

ここで,  $C$  は積分定数である.

式(13)の条件  $u^* = U^*$  at  $y^* = 1$  を式(16)に利用すると次式が得られる.

$$U^* = \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left[ C^{\frac{1+n}{n}} - (C - 1)^{\frac{1+n}{n}} \right] \tag{17}$$

平行平板間を流れる流体の流量バランスから以下のように得られる.

$$\int_0^1 \left[ \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left\{ C^{\frac{1+n}{n}} - (C-y^*)^{\frac{1+n}{n}} \right\} \right] dy^* = 1 \quad (18)$$

式(18)を積分すると次式の解が得られる.

$$\frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left[ C^{\frac{1+n}{n}} + \frac{n}{1+2n} \left\{ (C-1)^{\frac{1+2n}{n}} - C^{\frac{1+2n}{n}} \right\} \right] = 1 \quad (19)$$

式(19)から  $F$  を求めると次式の解が得られる.

$$F = \left[ \frac{1}{\frac{n}{1+n} \left[ C^{\frac{1+n}{n}} + \frac{n}{1+2n} \left\{ (C-1)^{\frac{1+2n}{n}} - C^{\frac{1+2n}{n}} \right\} \right]} \right]^n \quad (20)$$

(17)式と(20)式より

$$U^* = \frac{C^{\frac{1+n}{n}} - (C-1)^{\frac{1+n}{n}}}{C^{\frac{1+n}{n}} + \frac{n}{1+2n} \left\{ (C-1)^{\frac{1+2n}{n}} - C^{\frac{1+2n}{n}} \right\}} \quad (21)$$

境界条件:

$$\begin{aligned} u^* &= 0 \quad \text{at} \quad y^* = 0 \\ u^* &= U^* \quad \text{at} \quad y^* = 1 \end{aligned} \quad (24)$$

### 2. 3 Case 3 (流体の最大速度が運動する平板上に存在する場合)

図 2 に示す物理モデルを考える. 流体解析に際して仮定は Case2 と同様に設定する [3].

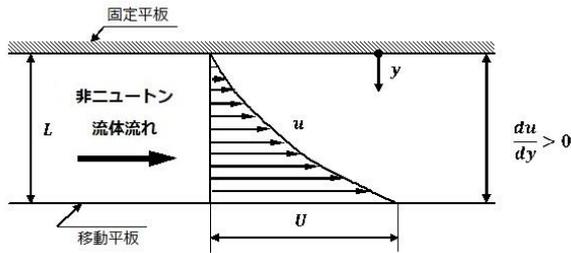


図 2 Case 3

この場合には, せん断応力  $\tau$  は次式で計算される.

$$\tau = m \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (0 \leq y \leq L) \quad (22)$$

式(22)を適用し, さらに式(7)~式(10)の無次元数を用いると運動方程式と境界条件は次のように変換される.

運動方程式:

$$\frac{d}{dy^*} \left( \frac{du^*}{dy^*} \right)^n = F \quad (23)$$

ここで,  $F$  は次式で定義される無次元数である.

$$\frac{f \cdot Re^*}{2^n} = \frac{L^{n+1}}{m \cdot u_m^n} \left( -\frac{dp}{dz} \right) \equiv F \quad (25)$$

式(23)を1回積分すると次式になる.

$$\frac{du^*}{dy^*} = F^{\frac{1}{n}} (C + y^*)^{\frac{1}{n}} \quad (26)$$

さらに, 式(26)を式(24)の条件で積分すると次式の解が得られる.

$$u^* = \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left[ (C + y^*)^{\frac{1+n}{n}} - C^{\frac{1+n}{n}} \right] \quad (27)$$

ここで,  $C$  は積分定数である.

式(24)の条件  $u^* = U^*$  at  $y^* = 1$  を式(27)に利用すると次式が得られる.

$$U^* = \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left[ (C+1)^{\frac{1+n}{n}} - C^{\frac{1+n}{n}} \right] \quad (28)$$

平行平板間を流れる流体の流量バランスから以下のように得られる.

$$\int_0^1 \left[ \frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \left\{ (C+y^*)^{\frac{1+n}{n}} - C^{\frac{1+n}{n}} \right\} \right] dy^* = 1 \quad (29)$$

式(29)を積分すると次式の解が得られる.

$$\frac{n}{1+n} F^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+2n} \left\{ (C+1)^{\frac{1+2n}{n}} - C^{\frac{1+2n}{n}} \right\} - C^{\frac{1+n}{n}} = 1 \quad (30)$$

式(30)から  $F$  を求めると次式の解が得られる.

$$F = \left[ \frac{1}{\frac{n}{1+n} \left[ \frac{n}{1+2n} \left\{ (C+1)^{\frac{1+2n}{n}} - C^{\frac{1+2n}{n}} \right\} - C^{\frac{1+n}{n}} \right]} \right]^n \quad (31)$$

(28)式と(31)式より

$$U^* = \frac{(C+1)^{\frac{1+n}{n}} - C^{\frac{1+n}{n}}}{\frac{n}{1+2n} \left\{ (C+1)^{\frac{1+2n}{n}} - C^{\frac{1+2n}{n}} \right\} - C^{\frac{1+n}{n}}} \quad (32)$$

### 3. 解析方法

平行平板の一方が軸方向に移動する平行平板間の非ニュートン流体の予測摩擦係数を計算し、非ニュートン流体の速度分布を明らかにするために以下の順番でこの研究を進める予定である.

- 1) ニュートン法を用いて Case2 の場合:式(21)から、Case3 の場合:式(32)から  $C$  を求める.
- 2) プログラミング言語 “Python” を用いて数値解析用のプログラムを作成し、以下のパラメータや速度を解析する.
  - ・ Case2 の場合:式(20)から、Case3 の場合:式(31)から無次元パラメータ  $F$  を求める.
  - ・ Case2 の場合:式(14)、Case3 の場合:式(25)を使って(摩擦係数) × (一般化されたレイノルズ数) ( $f \cdot Re^*$ ) を求める.
  - ・ Case2 の場合:式(16)、Case3 の場合:式(27)を使って速度を求める.
- 3) 解析で得たデータの速度分布、流体の予測摩擦係数の影響を示すグラフを作成する.

### 4. 結果

Python でニュートン法による数値解析プログラムを作成し、Case2 と Case3 の積分定数  $C$  を解析した. その結果をそれぞれ表 1 と表 2 に示す.

Case1 と Case2 の境界を示す臨界値  $U_{cr}^*$  を求める

式は、式(21)に  $C = 1$  と代入すると以下のように得られる.

$$U_{cr}^* = \frac{1+2n}{1+n}$$

詳しい数値は、前論文の表 2 を参照されたい. ニュートン流体の場合、流れの指数は  $n = 1$  であるため、 $U_{cr}^* = 1.5$  となる.

### 5. 結言

移動平板の相対速度、指数測流体での速度分布と摩擦係数の流れ指数の影響を明らかにするための準備として:「層流・乱流、ニュートン流体、非ニュートン流体、クウェット流れ、ポアズイユ流れ」、「指数測流体」、「平行平板間クウェット・ポアズイユ流れ」、「数値解析のニュートン法」について学ぶことができた.

今回は「指数測流体の平行平板間クウェット・ポアズイユ流れ」の数学モデルを作成し、運動方程式を無次元変化することができた. また、Python でニュートン法による数値解析プログラムを作成し、Case2 と Case3 の速度分布の最大速度の位置  $C$  の値を解析することができた.

参考文献

- [1] R. P. Chhabara and J. F. Richardson, Non-Newtonian Flow in the Process Industries, 1<sup>st</sup> ed., Butterworth Heinemann, Oxford (1999)
- [2] T. F. Irvine and J. Karni, Non-Newtonian Fluid Flow and Heat Transfer, in S. Kakac, R. K. Shah and W. Aung (eds.), Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, 20.6-20.9, Chapter 20, John Wiley & Sons, Inc. (1987)
- [3] Davaa G., Shigechi T. and Satoru M., Plane Couette-Poiseuille Flow of Power-Law Non-Newtonian Fluids, *Reports of the Faculty of Engineering*, Nagasaki University, pp.29-36, Vol.30, No.54 (1999)

表1 積分定数,  $C$  (Case 2)

$n$	$U^*$									
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.99
0.1	1.0909	2.0055	2.8687	3.8433	5.0905	6.8662	9.7352	15.3693	32.1050	332.1608
0.2		1.1667	1.6362	2.1405	2.7738	3.6681	5.1075	7.9285	16.2996	166.3301
0.3			1.2340	1.5812	2.0082	2.6071	3.5685	5.4504	11.0322	111.0533
0.4			1.0385	1.3080	1.6306	2.0805	2.8016	4.2130	8.3993	83.4150
0.5				1.1495	1.4082	1.7676	2.3437	3.4720	6.8201	66.8321
0.6				1.0483	1.2637	1.5617	2.0402	2.9790	5.7679	55.7768
0.7					1.1638	1.4169	1.8250	2.6279	5.0168	47.8803
0.8					1.0920	1.3104	1.6650	2.3654	4.4538	41.9579
0.9					1.0391	1.2295	1.5418	2.1620	4.0163	37.3516
1.0						1.1667	1.4444	2.0000	3.6667	33.6667
1.1						1.1170	1.3658	1.8681	3.3809	30.6517
1.2						1.0772	1.3013	1.7587	3.1429	28.1393
1.3						1.0454	1.2477	1.6667	2.9419	26.0134
1.4						1.0199	1.2026	1.5883	2.7698	24.1912
1.5							1.1644	1.5209	2.6208	22.6120
1.6							1.1318	1.4623	2.4907	21.2303
1.7							1.1038	1.4111	2.3760	20.0111
1.8							1.0798	1.3660	2.2743	18.9274
1.9							1.0591	1.3260	2.1835	17.9577
2.0							1.0414	1.2904	2.1019	17.0851

表 2 積分定数,  $C$  (Case 3)

$n$	$U^*$									
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
0.1	34.4442	17.7266	12.1241	9.3027	7.5953	6.4460	5.6164	4.9870	4.4917	4.0905
0.2	16.9695	8.6082	5.8047	4.3918	3.5361	2.9594	2.5425	2.2259	1.9763	1.7738
0.3	11.1455	5.5706	3.7009	2.7582	2.1870	1.8018	1.5232	1.3113	1.1441	1.0082
0.4	8.2343	4.0532	2.6509	1.9440	1.5155	1.2265	1.0174	0.8584	0.7327	0.6306
0.5	6.4881	3.1438	2.0225	1.4574	1.1151	0.8842	0.7173	0.5902	0.4899	0.4082
0.6	5.3244	2.5385	1.6049	1.1348	0.8502	0.6585	0.5199	0.4146	0.3314	0.2637
0.7	4.4937	2.1069	1.3078	0.9058	0.6628	0.4993	0.3814	0.2918	0.2212	0.1638
0.8	3.8709	1.7839	1.0859	0.7354	0.5239	0.3819	0.2797	0.2022	0.1413	0.0920
0.9	3.3869	1.5333	0.9143	0.6040	0.4173	0.2923	0.2026	0.1349	0.0819	0.0391
1.0	3.0000	1.3333	0.7778	0.5000	0.3333	0.2222	0.1429	0.0833	0.0370	0.0000
1.1	2.6837	1.1703	0.6668	0.4159	0.2659	0.1664	0.0958	0.0434	0.0032	
1.2	2.4203	1.0348	0.5751	0.3467	0.2109	0.1214	0.0585	0.0125		
1.3	2.1977	0.9207	0.4981	0.2891	0.1655	0.0848	0.0288			
1.4	2.0071	0.8232	0.4327	0.2405	0.1277	0.0548	0.0055			
1.5	1.8421	0.7392	0.3766	0.1992	0.0959	0.0303				
1.6	1.6979	0.6660	0.3281	0.1638	0.0692	0.0106				
1.7	1.5708	0.6017	0.2858	0.1333	0.0468					
1.8	1.4581	0.5449	0.2487	0.1070	0.0280					
1.9	1.3573	0.4944	0.2160	0.0841	0.0124					
2.0	1.2668	0.4493	0.1870	0.0643	0.0000					

# 促音の自動挿入アルゴリズムの検証

前田 弘文\*, 山本 健太\*\*

## Examination of automatic geminate insertion algorithm

Hirofumi Maeda\* and Kenta Yamamoto\*\*

### Abstract

In this study, we propose an algorithm that automatically inserts geminate into the audio data used in Japanese speech acquisition research. This algorithm automates the insertion of geminate by performing three processes in order: mora extraction by noise removal, matching of original audio data and extracted mora, and insertion of soundless duration and geminate. As a result of the experiment, it was shown that there is a strong negative correlation between the soundless duration inserted with the algorithm and the amplitude of the audio data.

### 1. 緒 言

一般的に、日本語学習者が日本語音声習得する際、自立拍と比較して、特殊拍と呼ばれる促音、撥音、長音の方が難しいとされている<sup>[1]~[16]</sup>。その中でも促音は、その知覚と生成が非常に難しいことから習得に時間を有する。特に中国語を母語とする日本語学習者の音声知覚および生成は、中国語の声調と日本語のアクセントの関係、促音が母語に存在しないという特徴から困難を極める<sup>[17]~[19]</sup>。

そこで、日本語の音声習得研究の分野では、この問題点に着目し、研究が進められてきた。栗原は、日本語の長音と短音を材料として、知覚と生成の関係性を探ることを目的に、中国語北方方言母語話者30名に対し、知覚および生成の実験を行った。実験には、「かと（過渡）」と「かとう（加藤）」、「とこ（床）」と「とこう（渡航）」の語末の母音の長短のみによって分けられた2組のミニマルペアが用いられ、それぞれ「これを〜と読みます。」というキャリア文に挿入される形で、音声として学習者に提示された。長音については、音響操作によって14段階の長さの音声を用意された。学習者は、長音14段階と短音の計15段階の音声を長音から短音に、短音から長音に順に聴覚提示され、その知覚境界線のタイミングを測定された。その測定結果から、語末母音の長短の知覚境界は、学習者の日本語能力にかかわらず、違いは見られないと報告された<sup>[20]</sup>。一方、英語母語話者を対象に同様の実験を行った戸田の報告では、日本語の習熟度が上がるにつれて、知覚範疇が定まり、

安定していくと示された<sup>[21]</sup>。また、この2つの報告の対象となった刺激語は3拍であるが、音節数の増加や特殊拍の位置変化が知覚に影響を及ぼす可能性があるにもかかわらず、その検証はなされていない。さらに、音節数が増えるとアクセント型も増える。また、中国語を母語とする日本語学習者を対象とした知覚範疇の検討は長音に関するものが多く、促音を対象としたものが見当たらない。

このような背景の下、山本はアクセント型の違いと促音位置の違いが知覚範疇化にどのような影響を与えるかを実験的、探索的に調査した。その結果、アクセント型も促音位置の違いも知覚範疇化に影響を与えることがわかった<sup>[22]</sup>。それと同時に、これらの音声習得研究が日本語学習者の日本語習得の効率化を図る上で、大きな意味と影響を及ぼすにもかかわらず、あまりに進んでいない背景には、研究で提示される音声データを研究者自らがマニュアル操作で作成している点にあることもわかった。これらの研究には多くの検証や実験が必要となるが、1つの検証用の音声データを作るだけで莫大な作業時間を要する。さらに、提示する文の数だけでなく、アクセントの位置、イントネーションの変化などの組み合わせを加えると準備すべき音声データの数が爆発的に増加することから、マニュアル操作による音声データの作成時間が、そのまま研究の停滞に直結することが容易に想像できる。

そこで、この問題を解決する方法として、音声習得研究に使用する音声データの自動作成を行った<sup>[23]</sup>。その過程のノイズ除去判断において、-50 dBFSとい

\*情報工学科

\*\*総合教育科

う判断基準を設けたが、本研究ではこの判断基準である-50 dBFS と音声データの振幅との関係性を検証する。

## 2. 促音の自動挿入アルゴリズム

ここでは、マニュアル音響操作による音声データの作成に対する自動化の方法について述べる。自動化処理では、大きく分けて「ノイズ除去によるモーラの抽出」、「元音声データと抽出モーラのマッチング」、「無音と促音の挿入」の3つの処理を順次行っていく必要がある。以下にそれぞれの処理について詳細に述べる。

### 2.1 ノイズ除去によるモーラの抽出

日本語は、母音 (V : vowel) と子音 (C : consonant) の組み合わせによって定義されたモーラと呼ばれる単位で音声を発音するという特徴がある。モーラは、V や CV の構造をとるものが基本であるが、中には CCV という構造をとるものもある。これに対し、特殊拍にあたる促音、撥音、長音は、それぞれ /Q/、/N/、/R/ で表記される。今回対象となる子音は、/p/、/t/、/k/ の3つの清音の破裂音である。破裂音とは、調音点で声道を閉鎖し、続いて瞬間的に呼気を開放することで生成される音のことである。図1に破裂音の概略図を示す。清音の破裂音は、後続の母音が始まるまで声帯が振動しないために無声音になるのに対し、濁音の破裂音は、破裂に先立ち母音より前に声帯が振動を始める有声音になる。

ここで促音の説明のための補足として、摩擦音と破裂音についても述べる。図2に摩擦音の概略図、図3に破擦音の概略図を示す。

摩擦音とは、調音点で声道をせばめ、その隙間に呼気を通過させることで生成される音のことである。図2のように清音の摩擦音は、後続の母音が始まるまで声帯が振動しないために無声音になるのに対し、濁音の摩擦音は、摩擦とともに声帯が振動を始める有声音になる。

破擦音については、破裂音と摩擦音が連続する音であり、2つを組み合わせた性質を持っている。そのため、図3に示すように清音の破擦音は、後続の母音が始まるまで声帯が振動しない無声音になるのに対し、濁音の破擦音は、破裂に先立ち声帯が振動を始める有声音になる。

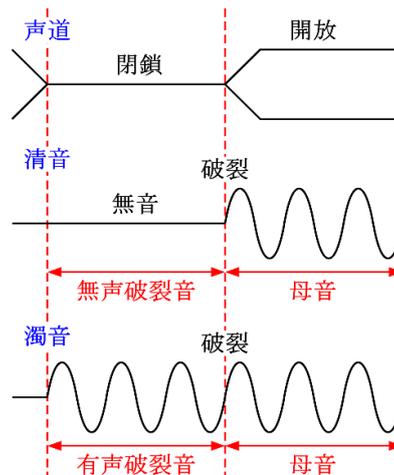


図1 破裂音の概略図

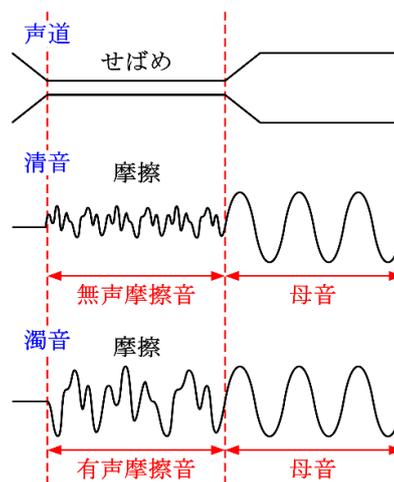


図2 摩擦音の概略図

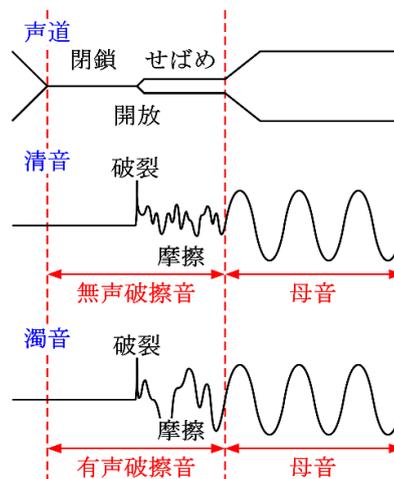


図3 破擦音の概略図

次に、促音の概略図を図4に示す。促音は、後続の音によって発音が左右される特徴を有している。破裂音や破擦音が促音に後続する場合は、閉鎖が続くため促音は1拍分の無音となる。これに対し、摩擦音が促音に後続する場合は、せばめが続くため1拍分の摩擦音になる。

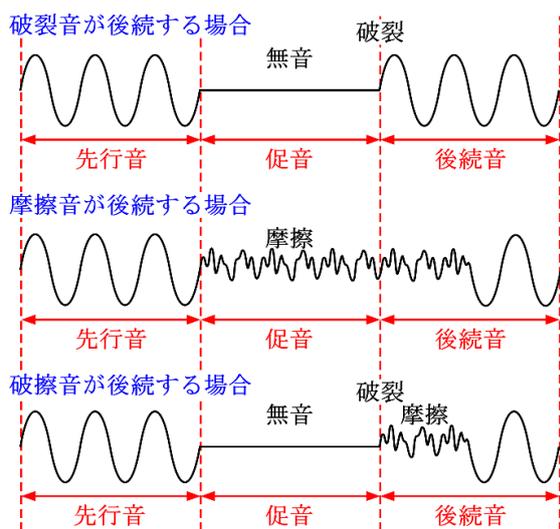


図4 促音の概略図

このことから理論上は、図5に示すように元の音声データである促音を含まない3音節3拍の第1音節または第2音節に無音を挿入することで、促音を含む3音節4拍の音声データを作成することができる。

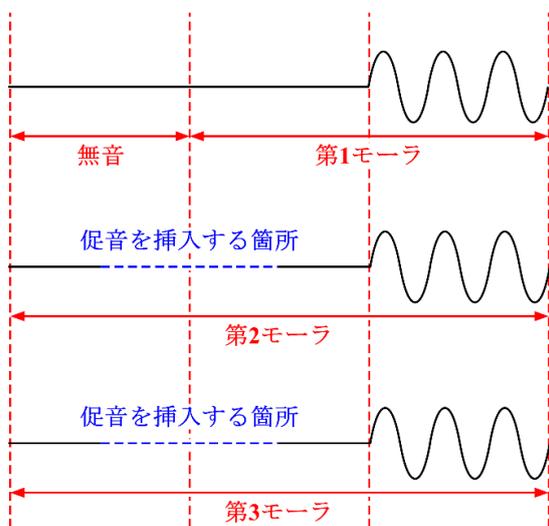


図5 3音節4拍の音声データの作成方法

しかし、実際には図6に示すように、音声データには生活音や服の擦れる音、録音機材が発する音など、人間には聞こえないさまざまなノイズと一緒に録音される。

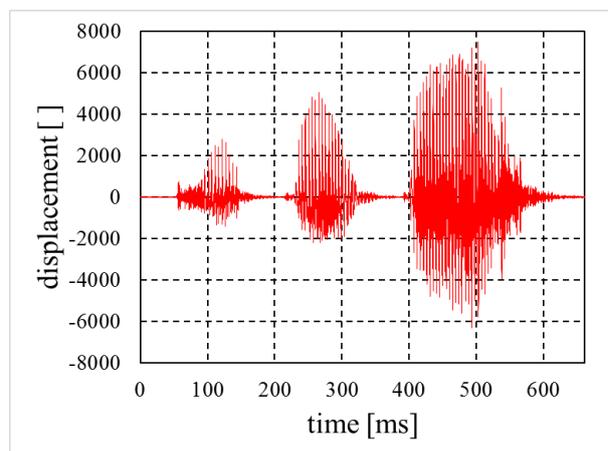


図6 音声データに生じたノイズの例

そこで、これらの人間には聞こえないノイズを除去することで、モーラ部分 (CV) のみの抽出を行う。図7~図9は、-50 dBFS以下の音声が続く場合をノイズと判断した場合の図6からの抽出結果である。

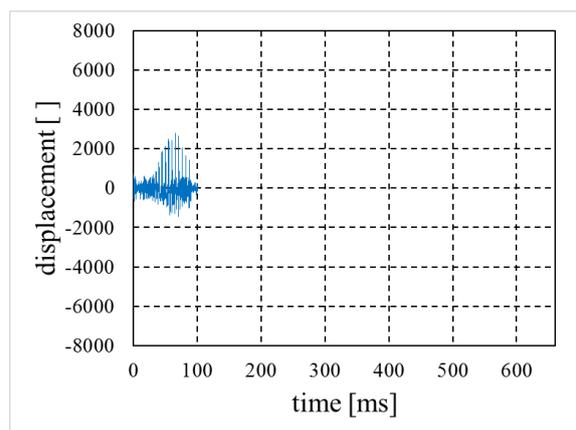


図7 図6におけるノイズ除去による/ta/の抽出

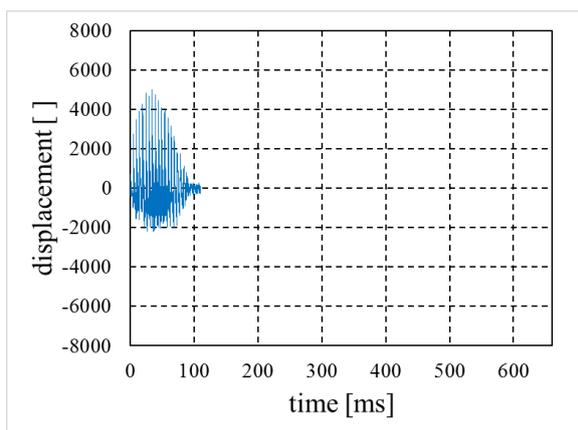


図8 図6におけるノイズ除去による/ka/の抽出

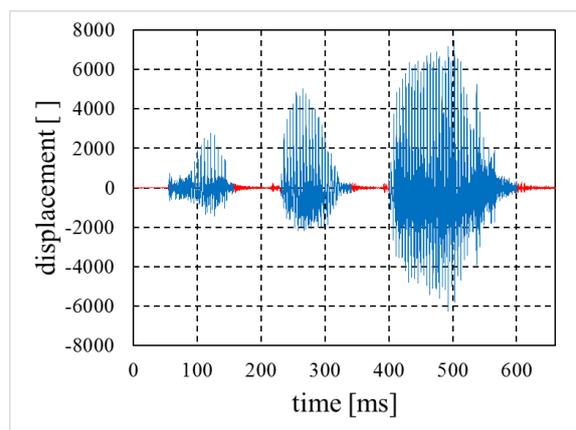


図10 元音声データと抽出モーラのマッチング例

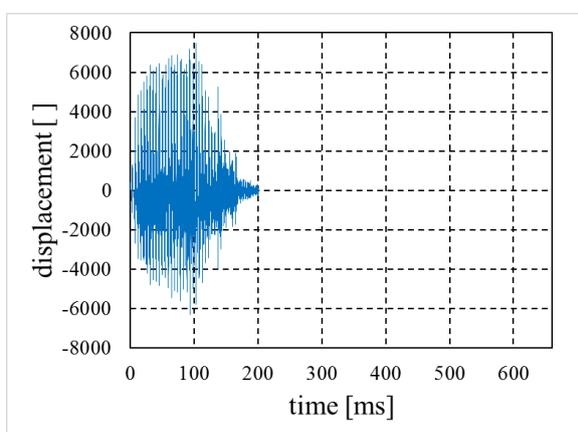


図9 図6におけるノイズ除去による/pa/の抽出

## 2.2 元音声データと抽出モーラのマッチング

2.1のノイズ除去によって各モーラの抽出を行ったが、その抽出箇所を特定しなければ、再度1つの音声データに復元することができない。そこで、元の音声データと抽出した各モーラの音声データとがマッチングする場所を特定する。元の音声データと各モーラの音声データはデジタル値であり、各モーラは元の音声データより抽出したものであるため、これらのデータが完全にマッチングする場所は必ず存在する。図10に2.1の図6と図7~図9とをマッチングさせたものを示す。

## 2.3 無音と促音の挿入

2.2のマッチングにより、モーラの抽出箇所の特定がなされたため、この隙間を無音(0)で埋め尽くすことで、元音声データへの復元が可能となる。これは、ノイズ部分がもともと人間の耳では認識できない音であることから、無音に置き換えても問題が発生しないためである。また、無音に置き換える際に、第1音節または第2音節に1拍分の無音を付与することで、促音を表現することができる。無音によって促音が表現できる理由は、すでに2.1で述べたように、モーラが/p/, /t/, /k/の3つの清音の破裂音で構成され、破裂音が促音に後続する場合に促音が1拍分の無音になるためである。2.2の図10の音声データの復元を図11に、促音の挿入例として1.5msの促音を第1音節に入れた場合を図12に、第2音節に入れた場合を図13に示す。

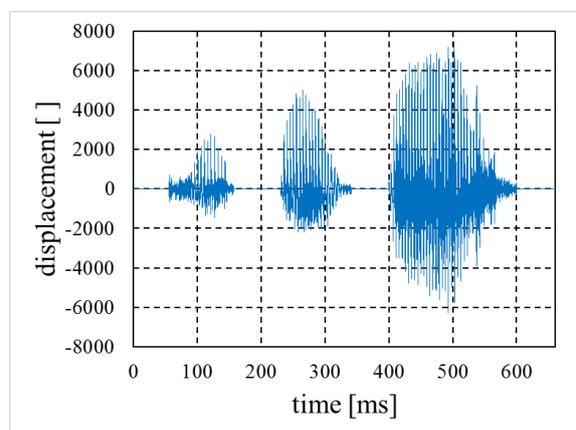


図11 音声データの復元例

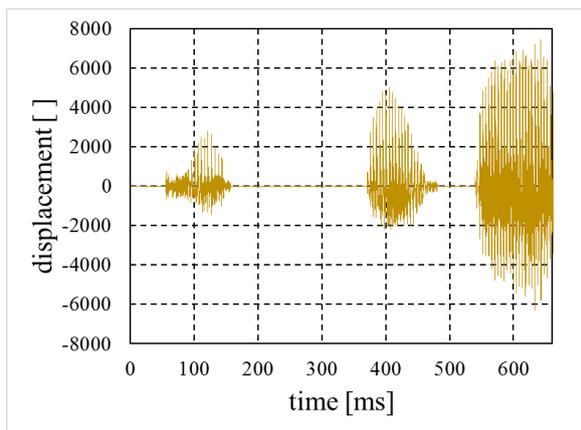


図 12 音声データの第 1 音節への促音の挿入例

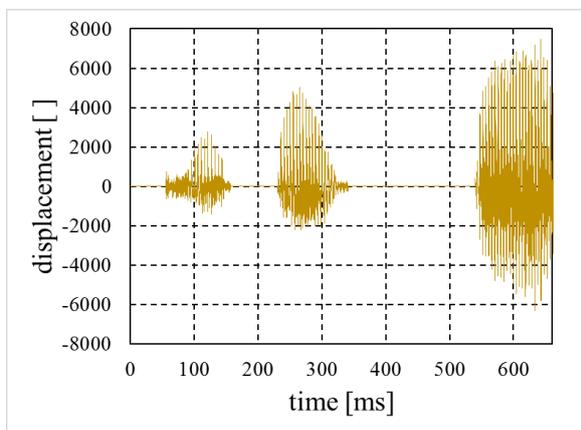


図 13 音声データの第 2 音節への促音の挿入例

### 3. 実験による検証

第 2 章の促音の自動挿入アルゴリズムを用いて、過去の知覚範疇化実験で使用した「たかば」の音声データ（音声操作前）への促音挿入を行った。第 1 音節に促音を挿入した場合の結果と第 2 音節に促音を挿入した場合の結果を表 1 に示す。この表 1 のデータを元に、自動挿入アルゴリズムによって挿入された無音時間と音声データの振幅の関係を表したものを図 14 に示す。また、この無音時間と振幅の相関係数は $-0.746$  となり、強い負の相関があることが分かった。

表 1 促音の挿入に関する無音時間と振幅の比較

話者	アクセント	第1音節		第2音節	
		無音時間 [ms]	最大振幅 [ ]	無音時間 [ms]	最大振幅 [ ]
A	平板	96.98	4247	127.98	4247
	中高	107.96	3969	124.99	3969
	頭高	89.98	5698	135.96	5698
B	平板	115.99	3311	128.98	3311
	中高	111.97	2707	140.98	2707
	頭高	83.97	2912	115.99	2912
C	平板	73.99	13767	58.98	13767
	中高	75.99	13011	92.00	13011
	頭高	83.97	8678	89.98	8678

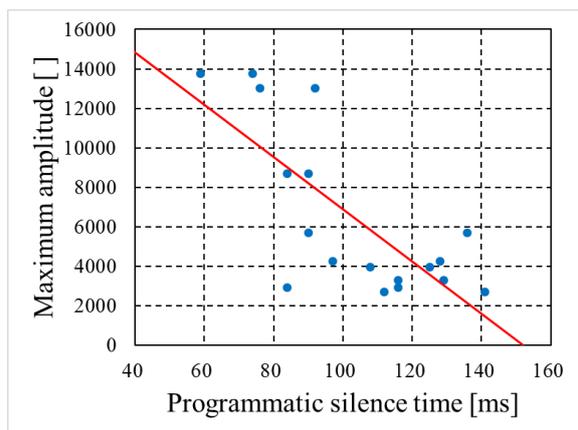


図 14 無音時間と振幅の相関

## 4. 結 言

本研究では、日本語の音声習得研究に使用する音声データに対して、自動で促音を挿入するアルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは、「ノイズ除去によるモーラの抽出」、「元音声データと抽出モーラのマッチング」、「無音と促音の挿入」の 3 つの処理を順に行うことで、促音の挿入を自動化した。また実験において、自動挿入アルゴリズムによって挿入された無音時間と音声データの振幅の間に強い負の相関があることが分かった。

### 謝辞

本研究は、「英語能力及び英語教材の評価に関する研究（合同会社 PISC）」の助成を受けて実施しており、謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 石澤 徹, "英語を母語とする日本語学習者における日本語促音の誤聴", 広島大学大学院教育学研究科紀要. 第二部, 第60号, 2011, pp. 173-181.
- [2] 石澤 徹, "英語母語話者による日本語特殊拍の知覚", 中国四国教育学会 教育学研究ジャーナル, 第8号, 2011, pp. 21-30.
- [3] 内田 照久, "中国人日本語学習者における長音と促音の聴覚的認知の特徴", 教育心理学研究, 41巻, 第4号, 1993, pp. 414-423.
- [4] 内田 照久, "外国人のための日本語音声教育における特殊拍の問題をめぐる基礎的研究の課題 -音声科学に視座をおいた教育心理学からのアプローチ-", 名古屋大学教育学部紀要, 41巻, 1994, pp. 87-102.
- [5] 内田 照久, "日本語特殊拍の心的な認知過程からとらえた音節と拍 -定常的音声区間の持続時間に対するカテゴリー的知覚-", 音声研究, 第2巻, 第3号, 1998, pp. 76-86.
- [6] 小熊 利江, "学習者の自然発話に見られる日本語リズムの特徴", お茶の水女子大学 紀要論文 言語文化と日本語教育, 24巻, 2011, pp. 1-12.
- [7] 窪菌 晴夫, "日本語の促音とアクセント", 国語研プロジェクトレビュー, No. 6, 2011, pp. 3-15.
- [8] 戸田 貴子, "日本語学習者による促音・長音・撥音の知覚範疇化", 文藝言語研究. 言語篇, 33巻, 1998, pp. 65-82.
- [9] 戸田 貴子, "日本語教育通信 日本語・日本語教育を研究する 第31回 日本語特殊拍の習得に関する研究", 国際交流基金 日本語教育通信, <https://www.jpf.go.jp/j/project/japanese/teach/tsushin/research/031.html>, 2007, (2021年8月5日アクセス) .
- [10] 松崎 千香子, "中国語母語話者の促音の発音に与えるリズム指導の効果", 甲南国文, 5号, 2006, pp. 120-105.
- [11] 松崎 寛, "リズム教育における特殊拍の扱いに関する基礎的研究", 広島大学日本語教育研究, 14号, 2004, pp. 25-32.
- [12] 松崎 寛, "日本人の「音節」と「拍」の知覚 -外来語聴取実験を通して-", 東北大学文学部日本語学科論集, 6巻, 1996, pp. 81-92.
- [13] 本橋 美樹, "促音聞き取りにおける視覚情報の効果", 関西外国語大学留学生別科 日本語教育論集, 20号, 2010, pp. 43-52.
- [14] 本橋 美樹, "日本語学習者による文字表記の誤用と音声知覚の関連性", 関西外国語大学留学生別科 日本語教育論集, 22号, 2012, pp. 53-62.
- [15] 山崎 真弓, "中級日本語学習者の拍の誤りについて: ストーリーナレーション中の拍の増減と誤りの位置 (水谷信子先生退官記念号)", お茶の水女子大学 紀要論文 言語文化と日本語教育, 9巻, 1995, pp. 189-200.
- [16] 山田 恒夫, "アメリカ英語話者による日本語短母音・長母音・促音の学習: 第2言語音声学習の基礎研究と教材開発に関わる諸問題 (メディア教材の構造と利用に関する基礎的研究)", 放送大学研究報告, 第99号, 1997, pp. 63-71.
- [17] 彰 飛, "外国人を悩ませる日本語からみた日本語の特徴 -漢字と外来語編-", 凡人社, 2003.
- [18] 福岡 昌子, "中国人日本語学習者の日本語音声の習得及びその指導に関する研究 -破裂音とイントネーションを中心として-", 博士論文 お茶の水女子大学, 1999.
- [19] 蒔安 誠, 太田栄次, スティーブン・スナイダー, "日本語と英語・中国語との音声学的特徴と相違点 -第二言語学習の壁を理解するために-", 九州健康福祉大学紀要, 8巻, 2007, pp. 133-138.

- [20] 栗原 通世, "中国語北方方言を母語とする日本語学習者による母音長の制御と長短の知覚", 音声研究, 第 10 巻, 第 2 号, 2006, pp. 77-85.
- [21] 戸田 貴子, "日本語教育における促音の諸問題", 音声研究, 第 11 巻, 第 1 号, 2007, pp. 35-46.
- [22] 山本 健太, "アクセント型及び促音位置の違いが促音の知覚範疇化に与える影響 -中国語母語話者を対象として-", 修士論文 広島大学, 2017.
- [23] Hirofumi M. Kenta Y., "Automatic Geminate Insertion Algorithm for Japanese Audio Data", International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol. 10, Issue 2, 2021.

# 生名フェリー乗車待機レーンのモニタリングシステムの構築

田房 友典\*

## Development of Camera Monitoring System in Ikina Car Ferry Terminal

Tomonori Tabusa \*

**Abstract:** In Kamijima Town, there is the Ikina Ferry route that connects Kamijima Town Tateishi Port and Onomichi City Nagasaki Port. The distance of this route is about 300m, the required time is about 5 minutes, and 54 round trips a day. With the opening of the Iwaki Bridge in 2022, it is predicted that the number of cars on board the ferry will increase. Therefore, it is necessary to get on the ferry smoothly. If the status of both ferry terminal can be monitored, the ferry berthing direction can be changed, and guides can be assigned.

In this research, we will build a Wi-Fi network on the Ikina ferry route and build a system that can monitor the status of both ferry terminal from the ferry bridge. In this paper, we show the specifications of the system such as the Wi-Fi network and the camera that were actually constructed.

Camera Monitoring System, Wi-Fi network, Ferry terminal, Ikina Ferry

### 1. はじめに

上島町は、2004年10月に弓削町、生名村、岩城村、魚島村の4町村が合併し誕生した。愛媛県の再北東に位置し、広島県尾道市因島に近く、因島からはしまなみ海道を経由して尾道、福山市内へ短時間で移動できる。

2011年までは、各町村を結ぶ経路は船のみであったが、同年7月に生名橋が開通された。これによって、弓削島と佐島から因島へ渡る一つの航路が廃止され、町民の多くは因島への移動に生名フェリーを利用しはじめた。2022年3月には岩城橋が開通され、岩城地区から広島方面への移動に、生名フェリーが利用され、利用者がさらに増加することが予測される。

上島町は、岩城橋の開通に伴う生名フェリー利用者の増加を見込み、2021年9月、従来のフェリーよりも一回り大きな生名フェリー「ゆめしま」を建造した。また、同時に生名側の車両の待機レーンの増設、因島長崎側の待機レーンの用地拡大を進めている。

生名フェリー航路は、距離約300mを約5分で航海するが、通勤通学時間帯には、1時間に5往復しており、円滑な車両の乗下船と乗船車両が公道へ並ばないよう待機レーン車両の管理が必要である。

利用者増加に伴う生名フェリーの運航を実現するために、生名側と因島長崎側を無線ネットワークで接続し、生名側にある事務所や対向側にフェリーが位置するときにも、車両待機レーンの状態を確認することができれば、より円滑なフェリーへの乗船とその対応を行うことができる。

船舶と陸上をネットワークで接続する研究として、海洋ブロードバンドの研究が進められ、2010年頃から実用化に関する報告<sup>[1]</sup>がなされているが、本研究の対象船舶は瀬戸内海の定期航路のみの運行のため、国際的規模のネットワークは必要ない。沿岸水域を対象とした船舶には、携帯電話網を用いたLTE/3G/4G回線を用いた研究<sup>[2]</sup>も報告されているが、主な通信対象がテキストデータであり、本研究の目的のように常時ビデオ映像を転送することは、帯域制限があるため不可能

である。また、月々のランニングコストも必要である。限定された領域において、ビデオ映像を使ったモニタリングを実現するためには、省電力無線 LAN が伝送帯域とコスト面で優位と考えられ、船舶内だけ<sup>4)</sup>、港湾施設内だけでの利用では実用化されている。しかし、本研究のような狭水道を挟んだ対岸の港と、その水道を往来する船舶とを結ぶ報告はなされていない。

本研究では、対岸の港（乗車待機レーン）とその水道を往来する船舶とを省電力無線 LAN でネットワーク接続し、乗車待機レーンの状態をモニタリングすることで、次のような対応を行う。

①待機レーンが混雑してきたときには、公道へ乗船車両がはみ出ないように、待機車両の誘導を行う。

②因島長崎側の待機レーンが混雑した場合は、誘導員を立石側事務所から配置する。

③大型車両が乗船する場合は、車両の下部が栈橋に接地しないよう栈橋に対して、フェリーの着岸方向を変更する。

本研究では、生名と因島長崎栈橋を結ぶ無線ネットワークを構築し、待機レーンを監視できるシステムを導入した。本稿では、構築した監視システムの構成および仕様、設置状況等について述べる。

## 2. システムの構築環境

### 2.1 生名フェリー航路

生名フェリー航路は、図1に示す愛媛県越智郡生名島立石港と広島県尾道市長崎栈橋間の約300mを結ぶ航路である。1日（平日）に54往復しており、上島町民にとって、欠かすことのできない航路である。



図1 生名フェリー航路

### 2.2 生名フェリー「いきな」と「ゆめしま」

2021年9月26日、生名フェリー「いきな」に代わって新造船「ゆめしま」が就航した。「ゆめしま」のドック入り時には、「いきな」も代船として利用されるため、構築システムは2隻で利用できるように移設可能

でなければならない。「いきな」と「ゆめしま」主要諸元を表1に示す。

表1 「いきな」と「ゆめしま」主要諸元

船名	ゆめしま	いきな
進水日	令和2年7月	平成14年3月
総トン数	194トン	146トン
全長	48m	41m
ランプ長	7m	6m
幅	12.5m	12.1m
深さ	2.95m	3.09m
旅客定員	150名	120名
航海速度(最大)	8.9KNOT	8.7KNOT

## 3. システムの構築

### 3.1 無線ネットワークの比較

上島町公営事業課公共交通係において、コンサルティング会社から提案を受けた3つの生名フェリー航路間を無線通信する環境を表2に示す。

表2Aは、鉄道車両等の移動体での実績が多く、信頼性が高い。表2Bは同表Aと無線方式は同じであるが対象が固定局となっている。これらの2方式は実績のある製品であるが、管理に無線登録や免許が必要かつ高価な商品である。表2Cは無線免許が不要な方式であるかであるが、指向性アンテナしか販売されていないため、潮流によって船の航路を変更する生名フェリーには適さない。

本研究は、民生用に販売している無線アクセスポイントとビル間通信用アンテナを用いて、生名フェリー航路を接続することを提案する。立石港側と長崎栈橋側には指向性のアンテナと無指向性のアンテナの双方を付け、航路の変化にも対応できる点と、安価であることが特徴である。

立石港側では、無線ネットワークに待機レーンをモニタリングするカメラを接続し、港務事務所と公共交通係の2拠点からモニタリングを行うことできる。また、モニタリング映像をレコーダに2か月間保存している。

表2 生名フェリー航路の無線通信方法

製品	A <sup>6)</sup>	B <sup>6)</sup>	C <sup>7)</sup>
周波数	4.9GHz	4.9GHz	5.18-5.7GHz
伝送速度 (理論値)	350Mbps	250Mbps	867Mbps
伝送距離	5km程度	5km程度	1km程度
無線免許	要	要	不要
価格	約320万	約210万	約90万

長崎棧橋側も同様に待機レーンをモニタリングするカメラ（パン・チルト機能搭載）を接続し、立石港側からモニタリングすることが可能である。

生名フェリーの船橋には、Wi-Fi 受信モジュールを搭載したノートパソコンを設置し、立石港側と長崎棧橋側の待機レーンが同時にモニタリングできるようにソフトウェア設定を行っている。ノートパソコンであるため、「いきな」での代船時にも同様に活用することができる。

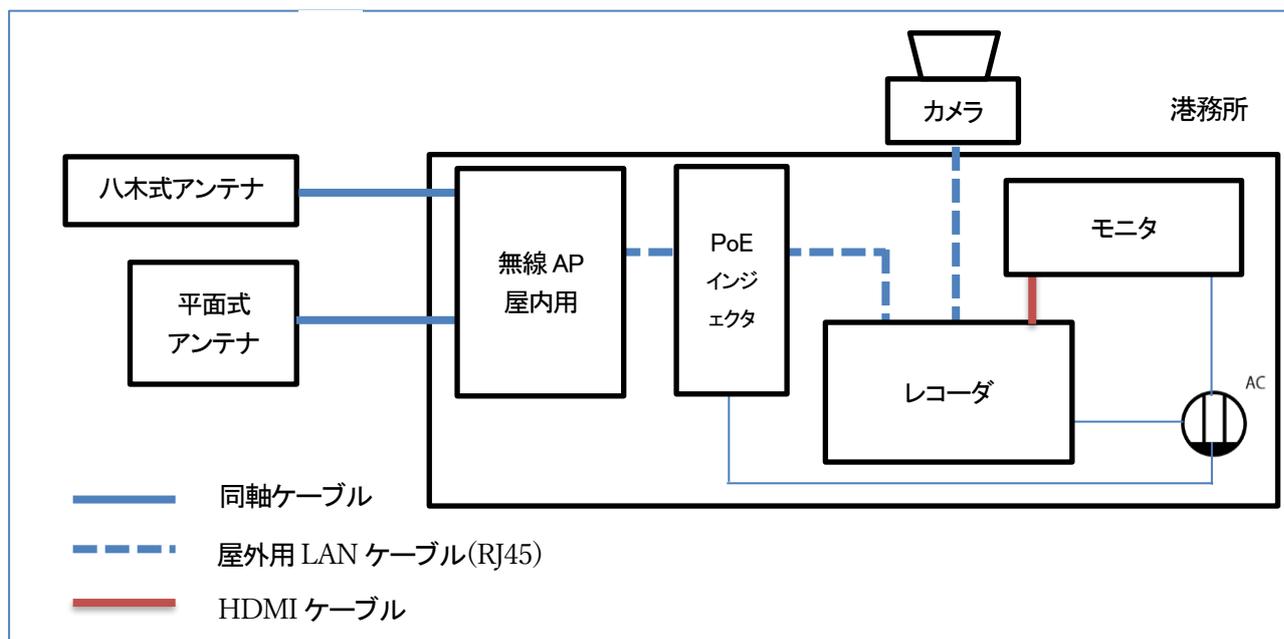
表3に提案するするシステムの構成を示す。

表3 提案システムの無線通信方法

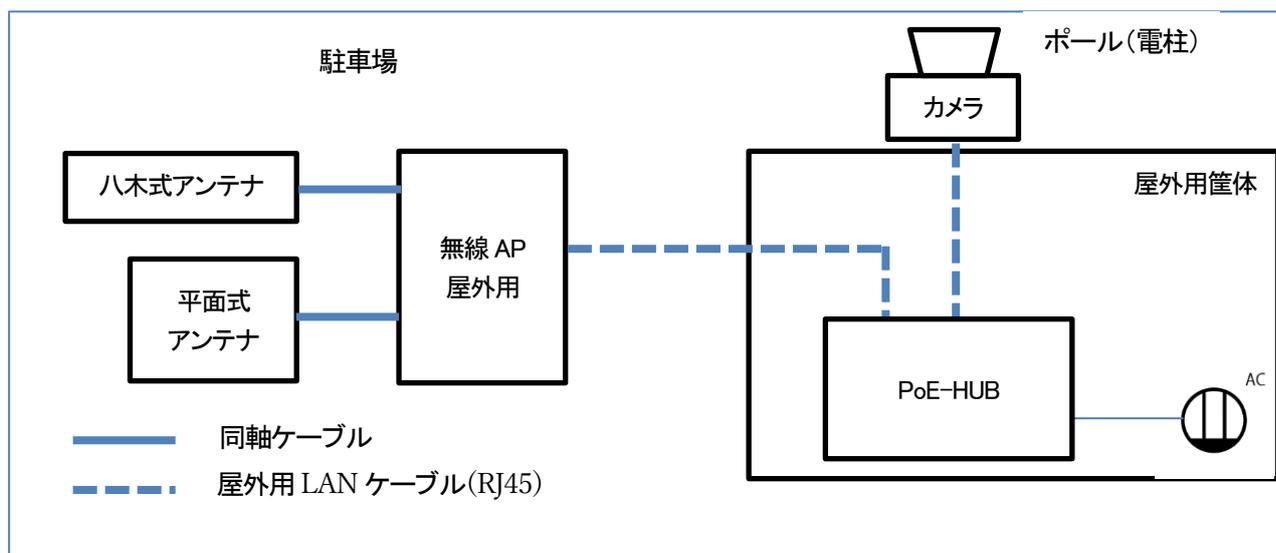
周波数	2.4GHz
伝送速度	300Mbps
伝送距離	2km 程度
無線免許	不要
価格	約 40 万

3. 2 システム構成図

生名フェリー航路の立石港と長崎棧橋を結ぶ無線ネットワークを図2に示す。



(a)立石港側のシステム構成図



(b)長崎棧橋側のシステム構成図

図2 提案システムの構成図

## 4. 検証実験とシステムの設置

### 4. 1 検証実験

2021年6月23日、図3に示すように立石港2階にビル間通信アンテナ、無線アクセスポイントとネットワークカメラを簡易的に設置した。長崎栈橋側には、ビル間通信アンテナと無線アクセスポイントだけを設置し、航路間のネットワークを構築した。アンテナの向きや生名フェリーの位置によって立石港に設置したカメラ映像の品質と接続状態をモニタリングした。

実証実験の結果、公共交通系の仕様を満たすレベルであることを確認した。

### 4. 2 システムの設置

2021年9月25日、提案システムの機器の設置確認および無線アクセスポイントやネットワークカメラとレコーダ等のネットワーク設定を行い、システムの運用を開始した。

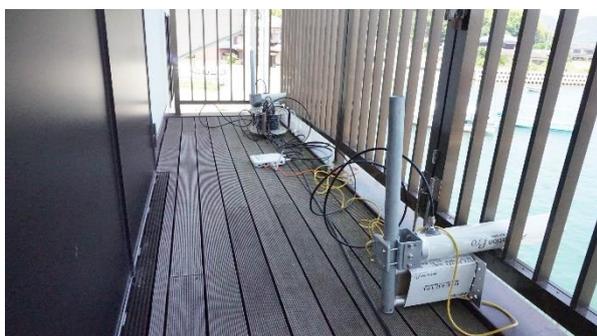
立石港側に設置した各種機器を図4、長崎栈橋側の機器を図5、モニタリング用として設置したタブレットとパソコンを図6に示す。



(a)ビル間通信アンテナ



(b)無線アクセスポイント



(a)ビル間通信アンテナ



(c)レコーダとモニタ

図4 立石港側のシステム設置

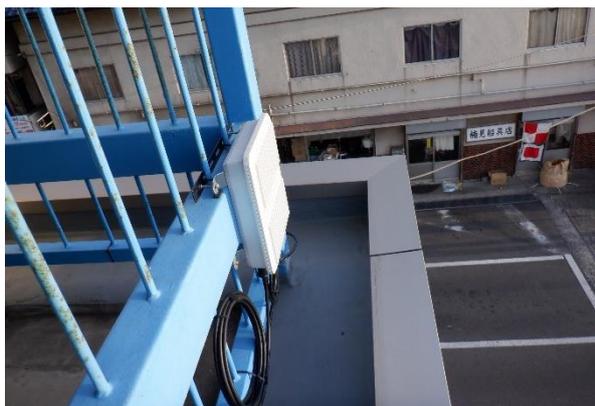


(b)無線アクセスポイントとネットワークカメラ

図3 検証実験の様子



(a)ビル間通信アンテナ



(b)無線アクセスポイント



(c)ネットワークカメラ

図 5 長崎棧橋側のシステム設置



(a)港湾事務所でモニタリングするタブレット



(b)生名フェリー船橋でモニタリングする PC

図 6 モニタリング機器

#### 4. 3 生名フェリー乗船案内動画

初めて生名フェリーを乗船する利用者は、乗船券の購入方法がわからない。また、生名フェリー「ゆめしま」の就航に伴い、フェリーに乗船可能であることを示すパトランプの設置を待機レーンの先頭から見える位置に行った。パトランプの設置によって音声と視覚の双方で利用者に乗船可能状態を伝えることができ、明瞭かつ冗長性のあるシステムとなった。

生名フェリー利用者に事前に視聴してもらうために、乗船券の購入や待機レーンからの乗船方法などをまとめた動画を作成した。

作成した動画の URL を次に示す。

[https://youtu.be/LAMo\\_vW4y4c](https://youtu.be/LAMo_vW4y4c)

#### 5. おわりに

2022 年に開通される岩城橋の開通に伴う車両台数の増加に対応するため、生名フェリー運航に必要なシステムとして構築することができ、より安全・安心な運航に貢献することができた。

本研究は上島町と官学連携し、最も安価なシステム構成で求めるニーズに答えることができ、上島町の予算（税金）を有効利用する取組みとしても貢献することができた。本校には、様々な技術や知識を持つ教員（研究者）がおり、今後も地域における問題解決に本校が貢献できることに期待する。

#### 謝辞

本研究は、独立行政法人国立高等専門学校機構（弓削商船高等専門学校）と愛媛県越智郡上島町の受託研究契約によって実施しており、研究の遂行にあたり上島町公営事業課公共交通係へ謝意を表す。

**参考文献**

- [1] 海洋ブロードバンドシンポジウム, 日本航海学会誌 NAVIGATION 174(0), pp.44-76, 2010
- [2] 大島浩太,古谷雅理,北川直哉,庄司るり:スマートフォンと生体情報センサを用いた小型船舶向け海難通報システム,日本航海学会論文集 136(0), pp.72-79, 2017
- [3] 長尾和彦,瀬尾敦生,肥田琢弥,宇崎裕太:スマートフォンで動作する AIS と連携した小型船舶向け事故防止システムの開発,日本航海学会論文集 135(0), pp.11-18, 2016
- [4] 浦上美佐子,松野浩嗣,岩崎寛希: 船間無線 LAN を用いた小型船舶対象の安心ネットワーク構築,日本航海学会論文集 119(0), pp.67-74, 2008
- [5] エイチ・シー・ネットワークス株式会社 RADWIN FiberinMotion®  
<https://www.hcnet.co.jp/products/wireless/move/radwinfiberinmotion.html> (参照 2021.11.30)
- [6] エイチ・シー・ネットワークス株式会社 4.9GHz帯 長距離無線LAN RADWIN 5000  
<https://www.hcnet.co.jp/products/wireless/fwa/radwin5000.html> (参照 2021.11.30)
- [7] コムスコープ Ruckus P300  
<https://webresources.ruckuswireless.com/data-sheets/p300/ds-ruckus-p300-jp.html> (参照 2021.11.30)

# KeTSlideのためのシンタックス・カラーリング (MacOS 編)

久保 康幸 \*

## Editor syntax coloring for KeTSlide (MacOS Edition)

Yasuyuki Kubo \*

### Abstract

Three years ago I suggested a syntax coloring idea to make it easier to edit the text file used when creating slides using  $\text{K}_{\text{E}}\text{T}$ Cindy. At that time, it was an editor for Windows (Sakura Editor). This time, I set the syntax coloring in CotEditor to do the same thing on MacOS.

### 1. はじめに

私は、過去の紀要(久保 [1])において、 $\text{K}_{\text{E}}\text{T}$ Cindyを使用してスライドを作成するとき使用するテキストファイルを編集しやすくするために、構文の色付けのアイデアを提案した。その当時は、Windows 対応のエディタ(さくらエディタ)を使っていた。

今回、Mac の PC で同様のことをするにあたり、サクラエディタが MacOS に対応してないため、代わりに CotEditor を選んだ。

#### 1.1 前回との差

前回も今回も、構文色付けの基本は正規表現であるが、エディタの違いから、正規表現の変更が必要となった。また、多くのエディタと同様に、CotEditorにも、 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  ソースを編集するための構文色付けが用意されていたが、修正が必要であることが分かったので、KeTSlide のコマンドの構文色付けと同時に  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  ソースの構文色付けの修正も示す。

#### 1.2 CotEditor による設定の特徴

サクラエディタのときは、入力した正規表現をどの色指定のグループに反映させるか選ぶようになっていた。CotEditor では、優先順位のついたグループ別に正規表現を入力する。また、CotEditor で正規表現を入力するときは、開始文字列と終了文字列を入力することができる。開始文字列の正規表現だけでも、肯定先読みの正規表現を使えば良さそうだが、正規表現を簡略にするため、場合によって利用した。

### 2. 設定の紹介

ここから、設定の流れと、正規表現を  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  のコマンド、KeTSlide 用のコマンドに分けて紹介する。

CotEditor の環境設定をみると、表示タグ(図1)にテーマがある。テーマに応じて、分類ごとの色が設定されている。"KeTSlide"という名称のテーマを追加することにした。

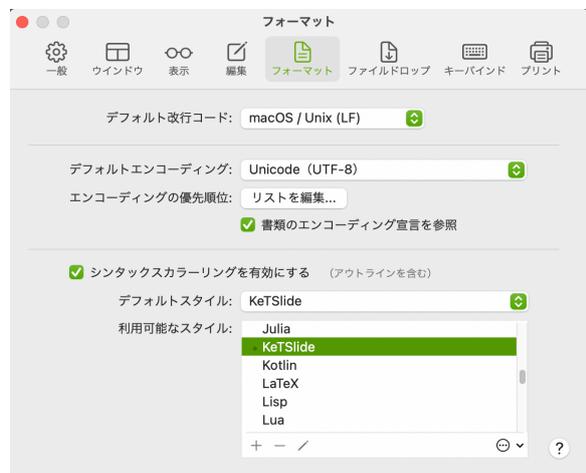


(図1 表示タグ)

ここで、シンタックスごとの色を変える。並んでいる順の後の方が優先されるようなので、それを意識して、正規表現を入力する。

正規表現は、フォーマットタグ(図2)の「シンタックスカラーリングを有効にする」にチェックが

入っていることを確認し、その下のスタイルを選択する。"LaTeX"というスタイルがあるので、それを複製し、ここでも"KeTSlide"という名称でスタイルを追加することにした。



(図2 フォーマットタグ)

スタイル名"KeTSlide"の編集(図3)に入ると、キーワード、コマンド、タイプといったグループに分かれて、正規表現の入力文字列があり、"RE"にチェックを入れることで、正規表現が有効になる。



(図3 スタイル編集)

## 2.1 TeXのコマンド

TeXのコマンドは、バックスラッシュ"\で始まる英字または記号(数字を含めない)の文字列であり、大文字と小文字を区別する。MacOSでは、バックスラッシュ"\(U+005C)と半角の円記号"¥"(U+00A5)と区別し、TeXコンパイル時に"¥"で始まるものはコマンドとして認識しないから注意する。

サクラエディタのときのように、TeXの通常のコマンドは青、"\begin", "\end"は緑色とした。

"LaTeX"というスタイルを複製すると、LaTeXコマンドの色付けのため、キーワード、コマンド、タイプのグループに正規表現が入力されていた。その正規表

現が"[\¥]"で始まっていて、TeXソース入力時の入力ミスを見落とす原因となるので、"[\]"に修正しておいた。

なお、正規表現の先頭に"[\¥]"があれば、バックスラッシュ"\, または, "¥"で始まる文字列が対象となる。

(1) TeXの通常のコマンドを青くするため、次の式をグループ「タイプ」に追加した。

式:`\\{1,1}([a-zA-Z])\*(?=[\s\^\_\\ () , , " ' " \{\}\[\]\%|=. \b])`

"\\{1,1}([a-zA-Z])"により、先頭に"\\"がちょうど1個あり、アルファベットの文字列が続く文字列が対象となる。

TeXのコマンドには、"\*"を最後につけるものがあり、それに対応するため、"\\*"を続けた。

コマンドの後ろに空白や別のコマンド、変数のための"\{"などが続く場合のため、想定される文字を羅列して、`(?=[\s\^\_\\ () , , " ' " \{\}\[\]\%|=. \b])`を続けた。

"?=["と"]"に挟まれたもののいずれかが後ろにある文字列が対象となる。

この正規表現により、コマンドのリストを列挙するのと違って、新たに定義したコマンドも色付けの対象とできる。

(2) "\begin"と"\end"は、環境のコマンドとして、通常のコマンドと異なる緑色にしたいので、次の式をグループ「文字」に追加した。

式(開始文字列):`\\(begin\end)\{`

式(終了文字列):`\}`

正規表現に、終了文字列を利用することにより、"\begin"と"\end"につづく変数となる文字列の条件を正規表現で指定せずに済ませた。

(3) "{"と"}"を緑にするため、次の式をグループ「文字」に追加した。

式:`\\{\}`

(4) "\$"と"&"を茶色にするため、次の式をグループ「値」に追加した。

式:`\\$|\&`

(5) ここまでの正規表現で、どのような色付けがされるかを例示する。

```
\abc\def{, \begin{ }\end{ }, \fboxsep = 2pt,
\makebox [20mm]{\small abc} $ &
```

## 2.2 KeTCindyでのスライド作成時

KeTCindyでスライドを作成するとき、内容を入力するテキストファイル(拡張子txt)を別に用意する。スライド作成時のtxtファイルには、texコマンドの

ほかに  $\text{KeT}Cindy$  独自の命令も入力する。

この節では,  $\text{KeT}Slide$  用のコマンドと書式のために設定した正規表現を紹介する。

その特徴は, まず, "%" で始まるコマンド名があり, 通常の  $\text{T}E\text{X}$  ソース編集用のエディタのように "%" でコメントアウトする色付けでは, コマンドが分かりにくくなることである。 $\text{KeT}Slide$  の作業時は, コメントアウトには, 2つ以上の "%" を使用する。

次に, "\" で始まらず, ":" が続く文字列, あるいは, 行頭に文字列があり "/" で終わる行をコマンドとしているものがある。

そのため, 行頭に制限する "^" や 単語の境界を示す "\b" を使う正規表現が多い。

### 2.3 コメントアウトについて

上のような事情から, コメントアウトに使う "%%" への対応を考える。

スタイルの編集に入り, 「コメント」グループを見ると, 他のグループと異なり, インラインコメントのための文字を入力する枠が用意されている。(図4)



(図4 コメント設定)

そこを "%" の代わりに "%%" とすればよい。しかし, 他で作成した " $\text{T}E\text{X}$ " ソースなどを  $\text{CotEditor}$  で開いたとき, コメントアウトのつもりで "%" を見落とさないようにするため, 次の正規表現を追加することにした。

式:  $\%(?:repeat|para|thin)$

すべての "%" が色付けされるのは, 後で設定する "%" で始まるコマンドにとって都合が悪いから, それらのコマンドが後ろに続かない (否定先読み) ときに, 色付けすることにした。

コメントアウトは目立つように, 明るいピンク色にした。

"%" による効果を例示すると, 次のようになる。

"%" が二つのコメントアウト

"%" が一つのみコメントアウト

### 2.4 スライド作成のためのリスト

サクラエディタと異なり,  $\text{CotEditor}$  は, キーワードのリストを保存する方式はないようで, スライド作成のコマンドの色付けは, すべて, 正規表現のリストで対応する。

これらは, スタイルのグループ「文字列」に入れ, オレンジ色で表示する。(スタイルのグループ「キーワード」は, 既に  $\text{L}A\text{T}E\text{X}$  のために青色が指定されている。)

以下に, 正規表現と対応するコマンドを列挙し, その後に, サンプルを表示する。

式:  $\%(repeat|para)$

"%" に "repeat", または, "para" が続くときに色付けする。

式:  $\backslash b(para)(?==)$

単語 "para" に "=" が続くときに色付けする。

$parallel=$ ,  $unpara=$ ,  $para=$

なお, このコマンドは,  $\text{KeT}Cindy$  で作ったパラパラ動画をスライドに利用するとき使う。

式 1:  $\backslash b(mf(?:\(\)))$

式 2:  $\backslash b(?:<=mf(\(\))(\d+)?(?:\(\)))$

パラパラ動画のパラメータ値  $s$  のときの図を記述 ( $s$  は数字) するコマンド " $mf(s)$ " を色付けする。

式 1 により単語 " $mf$ " に "(" が続く場合の色付けができるが, ( ) 内に正の整数値があれば数字も色付けするように, 式 2 を付加した。

$mf()$ ,  $mf(値)$ ,  $mf(23)$

式:  $(\\slidepage|thin)(\[\d+\])?$

" $\slidepage$ " (スライドにページ番号を表示) と, " $thin$ " (指定ページ以外で薄文字にする) が "[" と "]" に入れた数値で指定するときは, それも色付けする。

$\slidepage \slidepage[2]$

$thin thin[2] thin[]$

式:  $(\\setthin\{.*\})$

" $\setthin{濃さ}$ " (文字の濃さ) を色付けする。

$\setthin{濃さ}$

式:  $\sim(enumerate|itemize|end)$

$(?=(\\\/\|))$

" $enumerate$ ", " $itemize$ ", " $layer$ " のいずれかの環境の始まりと環境の終わりのため, これらの単語が行頭にあり, "/" で終わるか, この単語だけの行となると色付けする。

式:  $\\.\\.\\.(\\/\|)?$

空白行を挿入するときには, 行末で "...", または,

"...//" とする。

式：`^(item|new|main|layer|title)::`  
 行頭に限定して使い、"`::`"で終わるコマンド "`item::`  
 文"(item を追加), "`new::`文字列"(節タイトルの指  
 定), "`main::`"(章タイトルの指定), "`layer::`{数値  
 }{数値}"(layer 環境の始まり), "`title::`ファイル  
 名"(K<sub>E</sub>T<sub>C</sub>indy で作成したスライドのタイトルページ  
 の読み込み)などを色付けする。

式1：`\b(putnote::)`

式2：`\b(include\[.*\])`

layer 環境に、図などを入れるコマンド "`putnote::`  
 方向と位置など", "`include[option]::`ファイル名  
 (pdf)" を色付けする。

なお、2021年10月22日現在の K<sub>E</sub>T<sub>C</sub>indy には、  
 2020年5月31日版の "`houtouseslidej.txt`" が含ま  
 れており、それを参考に必要なコマンドと使用法を確  
 認した。

K<sub>E</sub>T<sub>C</sub>indy は、CTAN ([2]) で配布されていて、最  
 新版は、そのリンクからダウンロードできる。

## 2.5 他の PC との共有

ここで紹介した CotEditor の構文色付け (シンタッ  
 クス・カラーリング) は、テーマは "`cottheme`" という  
 拡張子、スタイルは "`yaml`" という拡張子のファイル  
 として、書き出し・読み込みにより、他の Mac PC に  
 インストールした CotEditor に反映できる。

### 参考文献および参考 URL

[1] 久保康幸：T<sub>E</sub>X と K<sub>E</sub>T<sub>C</sub>indy2 つの工夫, 弓削商  
 船高等専門学校紀要, 第 41 号, pp.12–15, (2019).

[2] 「CTAN」(<https://ctan.org>)

(サイト確認 2021/11/27) :

# 中国人日本語教師の来日研修目的

## —PAC 分析によるニーズ調査—

要 弥由美\*

## Why Does the Chinese Teacher of Japanese Comes to Japan? :

—The Needs Analysis by PAC Analysis—

KANAME, Yayumi \*

### Abstract

This study investigates the needs of a Chinese teacher of Japanese who stayed for a short time at a Japanese university which is a partner institution for international educational cooperation. The participant was a Chinese teacher of Japanese. He visited Japan to receive teacher training in Japanese as a second language. However, the university that accepted this teacher does not have Japanese language department. Therefore, what could he learn at this university where there was no appropriate Japanese language program? The purpose of this study is to understand this teachers' needs, and suggest a training program based on this analysis.

Personal Attitude Construct (PAC) analysis was used for this analysis. The result showed that the Chinese teacher wanted to gain general knowledge and information about Japan, Japanese people, or in other words, "experience Japan." Moreover, according to the literature review, the Chinese teachers generally need to be involved in active learning to accommodate their students' requests. This paper is suggesting that the university has to arrange specific and diverse activities and to encourage the Chinese teacher to participate in active learning.

### 1. はじめに

大学間協定締結が盛んになり、学生の交換留学のみならず教員が提携校へ研修来日を希望するケースが出てきている。そのようなケースの中に、海外の協定校のノンネイティブ日本語教師が、日本の日本語学や日本語教育学部・学科を持たない大学に日本語教育研修にやってくるというケースも生じている。一般にノンネイティブ日本語教師の来日研修といえ、日本語力または、教授能力向上のために、日本語学や日本語教育関係の学部や教育センターのプログラムに参加するものと考えられがちだが、そうではないケースもある。それでは、これらのノンネイティブ教師は、日本語教育関係の学部・学科を持たない大学での日本語教育研修に何を求めているのだろうか。本稿では、ある日本語教育関係の学部・学科を持たない大学に、日本語教育研修のために来

日した中国人日本語教師の来日研修目的調査を通して、中国人教師が日本での研修に求めているものは何かを探り、研修プログラム立案への提言を行う。

### 2. 先行研究

#### 2. 1 日本におけるノンネイティブ教師の日本語研修

国際交流基金日本語国際センターには、ノンネイティブ教師研修として、日本語運用能力の向上、教授法、日本文化の3つの授業部門が設けられており、日本語運用能力の向上のための授業には、4技能を統合した授業と文法の授業が行われている(木谷・木山・八田・向井・築島(2003)、木田(2004)参照)。また、国際交流基金関西国際センターでは、研究者・大学院生に対して、研究活動に必要な日本語能力の養成と研究活動の支援を目的とした研修が行

われている(今井・羽太・金・西野(2007)参照)。その他、筑波大学留学生センターでは、韓国人日本語教師に対して、日本語の4技能の向上と今後の授業改善を目的とした研修プログラムが実施されている(許(2007)参照)。

これらの研修はプログラムが先行し、参加者がそれに応募するといった形であるため、研修実施者・参加者ともに研修内容が理解されている。それに対して、今回対象とする研修希望者はプログラムがないところに研修を希望し、また受け入れ側も日本語教師に対する研修プログラムがないにもかかわらずこれを受け入れている点で、上記の研修希望者と研修受け入れ側との関係とは異なっているといえる。

## 2. 2 中国で日本語教師に求められている事柄あるいは、教師が求めている事柄

根津・高(2003)は、中国人日本語教師の研修希望の中で、「聞く・話す」力の伸ばし方および、コミュニケーション重視の教え方の教授法についての受講ニーズが高まっていることを報告している。その原因には、学生の質や教師の役割変化など社会的な要因と、コミュニケーション重視の語学教育や英語教育の影響による教育観の変化があると考えられている。

譚(2006)は、中国の20大学の20名の日本事情担当教師と3大学97名の学生を対象としてアンケートを行い、次のような教師と学生の意識を明らかにしている。教師側は、日本人とのコミュニケーションや現代日本人理解に役立つかどうかを教授内容の重要度の判断基準としている。しかし、中国国家教育部の「教学大綱」に書かれている「日本文化、日本の歴史的発展過程、政治経済の基本事項」を中心とする現在の教授内容を改善したいという意識を明確に持っている教師は少ない。また、半数以上の教師は学生参加型の活動を大事だと考えているにもかかわらず、参加度の低い教え方をしている。他方、学生側は、教授内容の重要性を、日本人とのコミュニケーション、現代日本人の理解、将来の仕事と関連付けながら判断しており、現代事情に詳しく、様々な補助教材を使うことが教師の重要条件だととらえている。そこから、教師は「教える」だけでなく「導く」という姿勢で、学生が活用できるリソースを紹介すべきだとの提案がなされている。

## 3. 調査

### 3. 1 受け入れの背景

大学間の交流協定締結により、学生間及び教員間の交流が行われることになった今回の受け入れ校で

は、学生に関しては既に数年来の交換留学や訪問などの実績があったが、教員についてはそのようなことは行われていなかった。そこへ、協定校から協定に基づき教員の交流のための教師研修受け入れの要望があり、教員が来日した。教員が来日する以前に、文書のやり取りで研修内容の希望を問い合わせたが、中国人教師側からは特に研修計画や活動予定は知らされず、希望する研修内容も「教授法」といった漠然とした回答であったため、受け入れ側は、来日後、話を聞いてから研修計画を立てざるを得ないと判断した。その際、中国人教師側も受け入れ校には日本語関係の専攻がないことは承知していた。

### 3. 2 調査概要

調査対象となる協力者は、中国語を母語とする中国人で、本稿では、Aと記述する。ここでの協力者の情報には、協定校からの情報と後の調査で明らかになったものも含める。

Aは37歳の男性で、高校および4年制大学の日本学科で日本語を学び、1996年に大学を卒業。2001年に中国史関係の大学院を修了している。現在は4年制大学の日本学科の教員である。今回は初めての来日で、6カ月の滞在ビザが発行されている。Aは5月中旬に来日し、10月初めまでの滞在を予定していた。

調査は、研修担当教員から依頼を受け、筆者が行った。ただし、筆者は中国語に精通していないため、Aが日本語・中国語の両言語を使用できるように、インタビュー時には中国語に堪能な日本人教員が通訳として同席した。しかし、調査中、Aは一貫して日本語のみを使用したため、通訳を必要としなかった。調査の申し入れはAが来学した日に行い、その週のうちにPAC分析を実施した。調査は連続した2日に分けて行われた。これは、1日にまとめて行うと拘束時間が長くなるため、来日後後に心理的緊張を強いることになり好ましくないと考えられたからである。

### 3. 3 方法

調査は内藤哲雄によって開発された Personal Attitude Construct (PAC: 個人別態度構造) 分析を用いて行った。PAC分析は、実験社会心理学的アプローチと臨床心理学的アプローチが融合されており、「個」を研究することで普遍的研究へとつながる視点を導くことができるとされている(内藤(2002)参照)。また、PAC分析は、通常のインタビューとは異なり、調査者側が想定できない協力者側のスキーマ構成要素とその構造を導き出すことができる。今回の協力者には事前に再三研修希望内容を問い合わせたが、具体的な回答はなかった。そのため、PAC

分析を用いることで、協力者自身の自由連想から研修希望内容の認知的枠組みを知ることができる可能性があると考えられた。また、協定校からの教師研修の受け入れ要請は今後も続くことが予想されるため、次年度以降の研修プログラム作成のために中国人教員のニーズの共通性を導き出す必要もあり、結果を一般化できる PAC 分析は今回の調査方法に適していると考えられた。

調査に先立って、文書および口頭で調査協力の依頼を行い、文書により同意を得た。調査では、まず、1日目に調査者が示す質問（刺激文）に対して、協力者に自由に単語や文を連想し、記録用紙に記入してもらい、その後、類似度評定のためにその単語や文の重要度や単語や文同士の関係の強さを7段階で報告してもらった。次に、2日目に類似度距離行列によるクラスター分析結果を提示し、協力者によるクラスター構造のイメージや解釈の報告を、各クラスター別とクラスター間関係、および補足質問と各項目別の「+・-・0」のイメージの順に行った。調査には1日目は90分、2日目は1時間を費やした。なお、報告時には、調査者によるメモと、テープによる録音を行った。クラスター分析には HALBAU7 を用い、ウォード法で行った。

### 3.4 刺激文

受け入れ校では、日本語学や日本語教育学の研修が不可能であるため、日本語以外のニーズが導き出せるように、当初、「あなたにとって、日本語を教えるためにしなければならないと思う勉強や知識はどんなことですか。思いついたことをカードに書いてください。」という刺激文を用意し、中国語訳とそのバックトランスレーションを行った。しかし、「しなければならない」の中国語訳が、「必須」となり、バックトランスレーションでは、「不可欠な」といったニュアンスにしかならず、在日年数の長い中国人教員から、中国人的発想からすれば語学の勉強に限定されたことしか出ない可能性があるという指摘を受け、意識に近い刺激文を提示することにした。

その結果、「あなたが日本語を教えるために日頃からしていることは何ですか。また、今、していないけれども必要だと思うことは何ですか。頭に浮かんできたイメージや言葉を、思い浮かんだ順に番号のついているカードに記入してください。記入は日本語でも中国語でもどちらでも構いません。」という刺激文、および、その中国語訳「为了教好日语您平时都做哪些努力？另外，现在还没有着手，但是您认为很有必要的有哪些？请您把您想到的按照想起来的顺序写在标有顺序号码的卡片上。用中文或日文写都可以。」を併記して提示した。

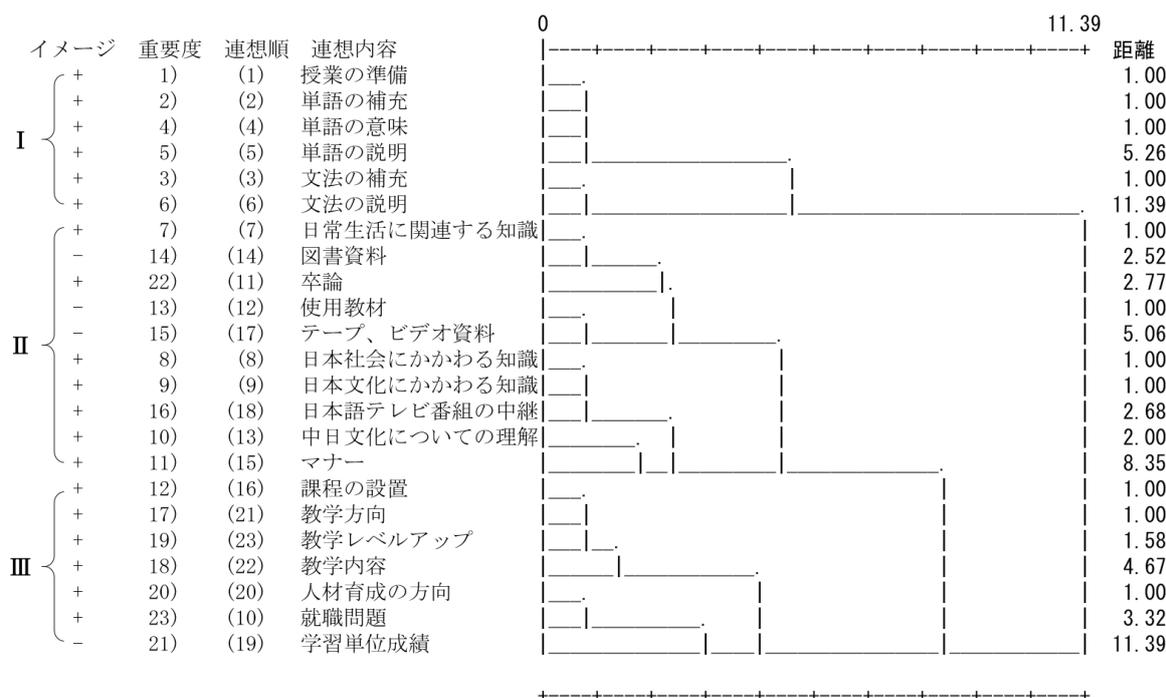


図1 Aの連想項目とデンドログラムおよび分析者によるクラスター分割案

## 4. 結果と考察

### 4. 1 AのPAC分析結果

Aによる自由連想では、23の項目があがった。これらの項目を連想順位、重要度順位、+・-・0のイメージ、クラスター分析結果に基づく分割案とともに前ページの図1に示す。以下、本稿で項目を扱う際は、重要度順位で示す。項目は3つのクラスターに分割され、第Iクラスターには項目1・2・4・5・3・6が、第IIクラスターには項目7・14・22・13・15・8・9・16・10・11が、第IIIクラスターには項目12・17・19・18・20・23・21が布置された。以下にAのクラスターのイメージと解釈を記す。発話中の「グループ」はクラスターをさす。後の解釈で言及する部分を中心に、第Iクラスターについては実線で、第IIクラスターについては点線で、第IIIクラスターについては波線で下線を付す。[ ]内は、調査者による発話である。発話内の誤りはそのままと記す。

#### 4. 1. 1 第Iクラスターについて

先生として授業の前の時間の準備を十分にしなければなりません。自分にもわからない問題が出て、前もって準備して無難と思う。もちろん私の担当している授業は総合日本語ですから、今の学校の学生は全部初心者ですから、単語の補足が必要だと思います。単語のいろいろな意味を説明する必要があります。[単語の補足とは?] 関連のある単語の補足。文法は言うまでもなく、文法は日本語の基礎だと思います。教師として、まじめで一生懸命、前もって授業の準備をする必要があると思います。そうですね、積極的に。

#### 4. 1. 2 第IIクラスターについて

いうまでもなく、日本語の学習者として日本語を勉強して、たぶん日本社会の知識を身につける必要があります。日本語を勉強して、日本人、日常生活や社会、日本文化の知識を身につける必要があると思います。教師として、こういうような知識をしっかりと身につけて、学生に教える必要があると思います。ビデオ・図書資料を利用して、日本に関連する知識を学生に教えます。もっと、中日文化の比較を理解できると思います。中日文化、風俗、習慣の異同、同じなところや違うところをもっと理解できると思います。マナーは日本人は礼儀正しい民族だといわれています。日本語の勉強を通して中国の学生にも礼儀の必要性を教えます。今は、学校の日本語教育についての資料が少なく、特に新しい資料が貧乏です。一昨年から申請して日本テレビ番組を中継できるように努力しましたが、中継できれば学生た

ちはテレビを見ることを通して、もっと日本社会・文化などを理解できると思います。知識を把握することは非常に意味深い。今は中国では学校によって使用テキストは違います。統一的なテキストがありません。良い教材を選んで教える必要があると思います。

#### 4. 1. 3 第IIIクラスターについて

これらの内容は関係、深い関係を持っていると思います。教学方向と教学内容は、課程の設置と関連深いと思います。課程の設置は、教学方向や教学内容を定めるだと思います。例えば、経済についての方面の授業が多くて、たぶん、学生は卒業してから、貿易会社に関連する会社に就職すると思います。もし、日本社会や文化についての授業をたくさん設けたら、研究型人才を育成すると思います。だから、課程の設置は教学の方向と内容と深い関係があつて、人材育成の方向を決めると思います。いったい、どのような人材育成をするか、これも就職と深い関係を持っていると思います。すぐれた人材を育成するために教育方向と課程の設置はとても大事だと思います。重要だと思います。優秀な人材を育成して、社会にいろいろな人材を育成して、就職もやさしくなると思います。

#### 4. 1. 4 第Iクラスターと第IIクラスターとの関係

1グループは教師としてしなければならないことだと思います。自分の把握した知識をよりよく学生に伝授するために、教師自身はたくさんの準備をする必要があると思います。2グループはたぶん、学部や学院と関係がある、教師自分で資料を集める必要がある。中国では普通、国家から費用をもらって資料を買う。その資金を使って資料を買う必要がある。教学のために、資料が十分あつたら、授業するとき関連な知識を教えることができます。[同じところは?] 全部授業のため。2グループはこういう資料、もしあつたら教師は自分自身の知識を広めることができると思います。資料を利用して授業するとき、単語や文法を説明する、説明して、こういうような、2グループのような知識を説明します。違うところは、1グループは教師としての責任だと思います。仕事だと思います。2グループは、教師も勉強必要があつて学生自身でも利用できると思います。図書資料は誰でも利用できると思います。

#### 4. 1. 5 第Iクラスターと第IIIクラスターとの関係

1グループは3グループの中の教育内容に含めています。つまり、教育内容は、1グループの内容を含めています。1グループは全部教育内容ですね。

これは同じところですが、違うところは、先ほどもう説明しました。3グループは学院・学部で行われています。1グループは教師自身でやります。教師によって教え方が違いますから。

#### 4. 1. 6 第Ⅱクラスターと第Ⅲクラスターとの関係

似ているところは、2グループは3グループの中の教学内容と関連、深い関係があると思います。且日本語教育の中で、内容はたぶん日本の社会や文化、中日文化の比較などの知識を教えます。教学内容は日本社会・日本文化・中日比較などの内容があります。日本語学習者としてそういう内容を勉強する必要があります。だから、どんな大学でも日本社会と文化関連知識を教える必要があります。教学方向を決めたら、あるいは、課程の設置を決めたら、2グループの関連資料を集める必要があります。課程の設置と関連する資料を。3グループは、学院、あるいは、学部の仕事ですから、人材育成の方向と関連があります。2グループは主に学院あるいは学部によっていろいろな資料を集めます。違うところは、…どんな違いがあるか…ほとんどありませんね。ふつう、中国では学院で実施します、課程の設置や資料を集めること。

#### 4. 2 調査者による総合的解釈

第Ⅰクラスターは、「教師としてしなければならない」、「授業の準備」、「責任」、「仕事」、「教師自身でやります」といった言葉から、「教師としての個人業務」と命名できよう。それに対して、第Ⅲクラスターは、「学院あるいは学部の仕事」と説明されているので、これは「組織の一員としての教師の業務」といえよう。そして、第Ⅱクラスターは、「日本社会の知識を身につける必要があります」、「テレビを見ることを通して、もっと日本社会・文化などを理解できると思います」、「知識を把握することは非常に意味深い」、「教師自分で資料を集める必要がある」、「資料が十分あったら、授業するとき関連な知識を教えることができます」といった言葉から「日本知識情報収集欲求」を表していると考えられる。

第Ⅰクラスターの6項目はすべてプラスの評価がなされているのに対し、第Ⅱクラスターでは、14の「図書資料」、13の「使用教材」、15の「テープ、ビデオ資料」がマイナスとなっている。また、第Ⅲクラスターの21の「学習単位成績」もマイナス評価である。これらの事項はAにとって心理的に負担を感じ、個人では解決困難な事柄であると推察される。特に第Ⅱクラスターについては、「今は、学校の日本語教育についての資料が少なく、特に新しい資料が貧乏です」、「良い教材を選んで教える必要がある

と思います。」と述べているように、現状の資料・教材がAの考えるよい授業の妨げになっていると思われる。

例えば、14の「図書資料」は22の「卒論」に結節していることから、学生に卒業論文を書かせるための資料が不足していることが考えられる。また、13の「使用教材」が15の「テープ、ビデオ資料」に結節していることから、授業で使用するためのテープ・ビデオ教材について不満があると推測できる。これらは、Aが述べているように、新しい資料が学校に不足していることを意味しているのであろう。さらに、15の「テープ、ビデオ資料」は11の「マナー」に結節していることから、日本人がいない中国の大学でも、テープやビデオで日本人の姿を見せることによって、日本のマナーを教えようとしていると考えられる。「マナー」はプラスであるが、そのマナーを教えるための資料が不足しているのであろう。そして、その「マナー」は、21の「学習単位成績」に結節している。21の「学習単位成績」は、6の「文法の説明」とも結節している。Aが「文法は言うまでもなく、文法は日本語の基礎だと思います」と述べていることから、6の「文法の説明」が「学習単位成績」に結節することは当然と考えられるが、「マナー」に関しては、「マナーは日本人は礼儀正しい民族だといわれています。日本語の勉強を通して中国の学生にも礼儀の必要性を教えます。」と異文化間比較・異文化間理解の視点に触れている。ここから、文法でつけられる成績と異文化間理解的な視点からつけられる成績との間に葛藤があるのではないかと推察される。

#### 5. まとめと提言

本研究の目的は、日本語教育関係の学部・学科を持たない大学へ日本語教育研修のために来日した日本語教師の来日研修目的を調査することであった。Aの分析では、「教師としての個人業務」、「日本知識情報収集欲求」、「組織の一員としての教師の業務」の3つのクラスターができた。その中で、Aは「こういう資料、もしあったら教師は自分自身の知識を広めることができますと思います」、「資料が十分あったら、授業するとき関連な知識を教えることができます」、「どんな大学でも日本社会と文化関連知識を教える必要があります」と言いつつ、「今は、学校の日本語教育についての資料が少なく、特に新しい資料が貧乏です」と資料不足が授業の障壁となっていることを示唆している。また、これら資料不足は4. 2でも見たように、Aにとってマイナスイメージである。ここから、Aが日本で得たいと考えてい

るのは第Ⅱクラスターに表れた日本に関する知識と資料ではないかと考えられる。A 自身、「日本語を勉強して、日本人、日常生活や社会、日本文化の知識を身につける必要があると思います。教師として、このような知識をしっかりと身につけて、学生に教える必要があると思います。」「2グループは、教師も勉強必要があつて」と述べている上、A 自身が今回、初来日であることを考えると、A には日本社会・文化関連知識材料が不足していることが推測できる。

以上から、A が必要としているのは、教師として教室に持ち込むことができる教材としての資料及び、自分自身の「日本体験」という生の資料であるといえよう。先行研究で述べられていたように、中国の学生は現代日本事情に詳しく、様々な補助教材を使う教師をよい教師だと考えている。このような学生の要求に応えるためにも、A は新しい教材と多面的な日本知識を必要としているのではないかと。また、近年では、中国で日本語を学んでから来日する中国人留学生も多い。それら渡日するであろう学生を前にして、日本を知らず、乏しい資料で日本語を教えている教員が、新しい物理的資料のみならず、自身も日本を体験しておきたいと思うのは必定であろう。

しかし、教材と知識を収集して帰ることが、教室で必要とされている事柄への対処法なのかについては疑問がある。確かに、教師自身が経験した異文化を学習者に伝えることは学習者の動機づけにはなるだろう。だが、知識だけでは現在の中国でのニーズに対応できないのではないかと。社会の変化をともなつた、道具的な動機で日本語を学習したいと考えている学習者に対応するには、知識重視の授業ではなく、コミュニケーション重視の授業への思考の転換と、そのための実際の教授法を学習して帰る方がよいのではないだろうか。なぜなら、日本に関する知識が増えたからといって、教授法が改善されたり、教授能力が向上したりするわけではないからである。また、3. 1にも述べたように、今回の研修希望内容が「教授法」であったことを考え合わせると、教授法を研修プログラムに入れることはAの希望に沿うことにもなる。

譚(2006)の報告では、中国の教師が学生参加型の活動を大事だと考えていながら、参加度の低い教え方をしている理由に、日本人がいない、物理的に和服などの日本のものがないといったことが挙げられている。しかし、参加型の活動とは、日本人を授業に招いたり、日本のものを手にしたりすることだけではないであろう。このようなことを考え合わせると、中国人教師には、これまでの学習観・教育観・

指導法を変えることが必要なのではないだろうか。

実際、Aの発言内容をみると、第Ⅰクラスターについての発話では、「単語のいろいろな意味を説明する」、「自分の把握した知識をよりよく学生に伝授する」、第Ⅱクラスターでは、「ビデオ・図書資料を利用して、日本に関連する知識を学生に教えます」、「資料を利用して授業するとき、単語や文法を説明する、説明して、このような、2グループのような知識を説明します」、「日本語教育の中で、内容はたぶん日本の社会や文化、中日文化の比較などの知識を教えます」、「日本社会と文化関連知識を教える必要があります」、第Ⅲクラスターでも、「もし、日本社会や文化についての授業をたくさん設けたら、研究型人才を育成すると思います」とあり、一方的に知識を説明するような知識の伝達、講義、教え込み型の授業展開が想像される。加えて、日本についての知識や資料を欲しているAが、社会や文化の授業を多く設置すれば研究型人才育成となると述べていることは、先行研究に述べられていたコミュニケーションや現代日本人理解、将来の仕事日本語学習と関連付けている中国の学習者ニーズに対応できていないことの表れではないだろうか。このように、Aには学習者中心の授業や能動的参画学習などの授業形態が念頭にないと考えられる。そのため、コミュニケーション重視の授業や、そのための教授法を研修に加えるべきだと思われる。

以上から、日本語教育関係の学部・学科を持たない大学での日本語教育研修に、以下の2点を提案したい。一つは、研究者の受け入れとは異なつた、留学生が経験するのと同様の日常の日本生活や日本人との交流・葛藤が体験できるような受け入れ態勢を用意することである。それによって中国人日本語教師は、日本人と実際にコミュニケーションのできる、現代事情に詳しい知日派の理想的な教師として中国の学生に迎えられるであろうし、また、留学してゆく学習者にとってのよきアドバイザーたり得るであろう。もう一つは、これまでの教師中心から学習者中心のコミュニケーション重視の教授法へと理解の転換をもたらすことである。これは、日本語教育関係の学部・学科を持たない大学でも可能であろう。例えば、Aの研修先の大学でも、各科目で学習者中心のアクティブ・ラーニングや参画・能動的学習としてのポスターセッションを行ったり、地域貢献と地域からの学びを取り入れたサービス・ラーニングなどが取り入れられたりしている。このような教師中心ではない、異なる視点からの学習方法の存在に気づくことも、中国人教師にとって意味のあることではないだろうか。

以上、本研究では、PAC 分析によって、日本語教育関係の学部・学科を持たない大学に、日本語教育研修のために来日した中国人日本語教師の来日研修目的を調査した。その結果から、教師研修には、教師自身が教室に持ち込むことのできる物理的な資料及び日本での実体験と、学習者中心の能動的学習の視点が与えられるようなプログラムを用意する必要性を提言した。今後はこれに基づくプログラムの立案と実行、その検証を課題としたい。

### 参考文献

- [1] 木谷直之・木山登茂子・八田直美・向井園子・築島史恵「海外日本語教師短期研修―「総合日本語シラバス」の開発について―」『日本語国際センター紀要』第 13 号 国際交流基金 29-45 (2003)
- [2] 木田真理「外国人日本語教師研修における文法授業のあり方―文法シラバス整備に向けて―」『日本語国際センター紀要』第 14 号 国際交流基金 51-68 (2004)
- [3] 今井寿枝・羽太園・金秀芝・西野藍「研究者・大学院生日本語研修における「自己評価支援システム」の検証―学習者と教師の認識のズレをめぐって―」『国際交流基金日本語教育紀要』第 3 号 国際交流基金 135-151 (2007)
- [4] 許明子 (HEO Maeongja)「現職日本語教師を対象とした日本語研修プログラムの実践報告―2005 年度筑波大学留学生センターにおける京畿道外国語教育研修院日本研修の実施について―」『筑波大学留学生センター日本語教育論集』第 22 号 81-90 (2007)
- [5] 根津誠・高偉建「中国大学日本語教師訪日研修から見て」第 8 回海外日本語教育研究会「中国における日本語教育」(2003)  
[http://www.jpf.go.jp/j/urawa/world/chek/wld\\_03\\_12.html](http://www.jpf.go.jp/j/urawa/world/chek/wld_03_12.html) (2008.5.25.参照)
- [6] 譚建川「中国における「日本事情」教育の現状」『日本語言語文化研究会論集』2 号 日本語文化研究会 59-81 (2006)
- [7] 内藤哲雄『PAC 分析入門 [改訂版]: 「個」を科学する新技法への招待』ナカニシヤ出版 (2002)

# 高等専門学校一般科目における数学と物理の 双方向性の構築

南郷 毅\*, 牧山 隆洋\*\*

## Constructing an Interactive Approach to Mathematics and Physics in KOSEN Education

Tsuyoshi Nango\* and Takahiro Makiyama\*\*

### Abstract

This paper discusses the relationship between learning content of mathematics and physics in National Institute of Technology (KOSEN) education. Recently, the importance of studying mathematics and physics in relation to each other has been pointed out. It is clear that there is a relationship between mathematics and physics. However, there are few studies that mention learning content of them. The authors surveyed learning content on the basis of textbooks and create tables of relationship between the learning content of mathematics and physics. Moreover, the authors constructed example of teaching material that allow for an understanding of mathematical and physical perspectives.

### 1. はじめに

近年、これからの社会を見据えた教育として、学習事項を他分野と関連づけて理解する力や、学習事項を現実世界の問題の発見や解決に活用する力の育成が、学校種別を問わず強く求められている。

高等専門学校では、従来から教育の改善の文脈の中で述べられていた一般科目と専門科目の関連を図る教育が、モデルコアカリキュラム[1]における到達目標の中で明確化されている。数学科では、本科の到達目標として「専門分野の基本的問題の解決に数学の知識や計算技術を用いることができる」とともに、数学の知識等を専門分野での現象に関連づけて活用できる。」が示され、専門分野での数学の活用が明示されている。また、学習内容の取り扱いとして「中学校の学習成果を活用するとともに、専攻科数学および物理・専門科目との連携を密にし、スムーズにカリキュラムが展開するように指導計画を作成する。」と示され、物理や専門科目と連携した教育が明確に求められている。物理の内容の取り扱いにおいても、数学と連携した教育を求める趣旨の記述がある。このように、高等専門学校では、数学と物理や

専門科目との関連を図る教育が強く求められている。本稿では、高等専門学校における数学と物理の関連を図る教育を検討する。

「数学と物理の学習事項間には関連がある」という主張には、誰も異論がないであろう。微分積分やベクトルが物理と関連があることはすぐに頭に浮かぶ。しかし、数学と物理を両方担当しているような場合は別として、数学の教員が、数学のある単元が物理のどの単元に関連があるか、学習時期はいつなのか等を具体的に述べることは難しい。また、数学の教員が、物理の教員が重視する物理的な見方や考え方について述べることは難しい。これは物理の教員にも言える。私たちは、数学と物理の学習事項間に関連があることは理解しているが、その理解は、関連を図る教育を実践するといった教育的な観点からは不十分である。特に、関連を図ることを意識した特別な教材や指導法を準備していない日常の授業において、数学と物理の関連を図ることは困難な状況にある。

そこで、本研究では、高等専門学校の一般科目で取り扱う数学と物理の学習事項間の関連の整理や、数学の見方や考え方や物理の見方や考え方の例示を

\*非常勤講師  
\*\*総合教育科

通じて、日常の授業で活用できる数学と物理の双方向性を構築することを目的とする。

高等専門学校の学生は、専門科目の学習の中で数学を活用する。しかし、学生から「専門科目で唐突に数学を使った説明が始まり、よくわからなかった。」、「式と手順を覚えて終わった。」といった声を少なからず聞いた。このような状態を解消するには、低学年時から、学生に数学と他分野の関連を意識させるような教育が必要である。物理は数学と同様に1学年から履修が始まるため、その対象として適切な科目である。

## 2. 先行研究の検討と本研究の位置付け

高等専門学校における数学と物理の関連についての先行研究を検討する。

佐伯ら[2]は、物理現象に関する実験・観察を題材とした一連の授業群からなるカリキュラムを開発し、実践結果を報告している。各授業では、学生が物理現象についての実験を行い、各種センサーを用いてデータを取得、そのデータをもとに数学モデルを作成、モデルの物理的意味の解釈を行なっている。学生が数学と物理を関連づけて学ぶことを通じて、数学が物理の中で活用される場面を実感できることが明らかにされている。馬淵[3]は、高専教育において、数学が数学以外の場所で活用されていることを知る有用性を指摘し、線形代数の応用例として微小振動の解析を取り上げた教材を開発している。

これらは、特別な教材を用いた授業の実践や教材の開発研究である。これらの成果の活用には、カリキュラムの改定や特別な教材が必要である。また、取り扱う内容がやや高度であることから、低学年の学生に対して用いることは難しい。日常的に数学と物理の関連を図る観点からは、これらの研究の活用は難しい。

高等学校における数学と物理の関連についての先行研究を検討する。

金児[4]は、物理基礎の力のつりあい単元の授業において、数学Ⅰの三角比の学習内容を限定的に指導した実践について述べ、生徒が教科間の関連の認識を深めている様子や、生徒の学習意欲の向上について報告している。金児[5]では、物理と数学Ⅱで扱う弧度法を、物理と数学Ⅱの双方の授業で互いに関連づけた指導を行うことにより、生徒が関連を意識できるようになり、学習内容の理解が深まったことを報告している。一方で、この授業を参観した教員から「1回だけでは効果が薄いだろう。」という指摘があったことも報告し、継続的な指導の必要性を示唆

している。

これらは、特別な教材を用いない日常の授業における関連を図る実践であり、その有効性を示している。日常的にこのような教育を実践するには、学習事項間の関連の把握が必要である。

そこで、数学と物理の学習事項間の関連を調査した研究を検討する。今村[6]や飛田ら[7]は、高等学校の教科書に現れる数式を軸に、数学と物理の関連を調べている。これらは学習内容の調査ではあるが、分類が、熱、波動、電気などの非常に大きな括りであることや、登場する数式の個数を示しているため、日常的に関連を図る教育には活用できない。

本研究で作成する数学と物理の学習事項を確認できる対応表は、日常の授業で活用可能な学習事項間の関連を、双方向から明らかにしている。また、本研究では、先行研究で取り上げられていなかった数学的な見方や物理的な見方についても例示しており、これまでの数学と物理の関連を図る教育に関する研究を補完する位置付けにある。

## 3. 高等専門学校一般科目における数学と物理の関連

本章では、高等専門学校一般科目の数学と物理の学習事項間の関連を明らかにする。また、それぞれの見方や考え方を例示する。数学の学習の前提として物理の学習事項が必要になることは、基本的にはない。そこで、モデルコアカリキュラム[1]の数学科の目標を踏まえ、本研究では、一般科目における数学における学習事項が一般科目における物理の学習に用いられている場合に、数学と物理の学習事項間の関連があると捉えることにする。

### 3. 1 高等専門学校における数学と物理の学習事項間の関連

高等専門学校の数学と物理の学習の基本となる教材は教科書である。そこで、教科書をもとに学習事項間の関連を調査する。各高等専門学校の一般科目のシラバスを参照すると、物理では、高等専門学校向けの教科書だけでなく、高等学校向けの教科書も広く用いられている。そこで、数学は高等専門学校向けの教科書、物理は高等学校向けの教科書と高等専門学校向けの教科書を調査する。

調査結果を表1から表5に示す。表1は基礎数学、表2は線形代数、表3は微分積分から見た物理との学習事項間の関連である。なお、微分積分は、一般科目で扱う物理の範囲を考慮し、1変数の微分積分までとしている。表4は力学、表5は熱、波動、電気と磁気、原子から見た数学との学習事項間の関連で

ある。単元名は筆者らの勤務校で用いている教科書から選定した。

表には現れていないが、中学校数学で物理と関連している学習事項として、連立方程式、三平方の定理、相似、角度（対頂角、錯角、同位角）の関係、絶

対値記号の取り扱い、比、三角形の合同、円の性質がある。また、物理の学習事項についての問題演習では、文字式の計算、指数法則、1次不等式、因数分解、2次方程式、2次不等式が用いられる。

表1 基礎数学分野と物理の関連

分野名	単元名	学習事項	関連する物理の学習事項	関連する物理の単元名	関連する物理の分野名	
基礎数学	2次関数とグラフ、方程式・不等式	2次関数	水平投射	物体の運動	力学	
			斜方投射	円運動と単振動		
		2次関数のグラフ	単振動の力学的エネルギー	物体の運動		
			水平投射	円運動と単振動		
	指数関数・対数関数	指数関数	原子核の変化と放射線	原子と原子核	原子	
		指数関数のグラフ	原子核の変化と放射線			
	三角比	三角比	速度の合成と分解 相対速度 水平投射 斜方投射 剛体に働く力のモーメント 剛体のつりあい 運動量と力積 運動量の保存 物体の衝突 慣性力 単振り子 惑星の運動 重力 クーロンの法則 電流が作る磁界 電流が磁界から受ける力	速度の合成と分解	物体の運動	力学
				相対速度		
				水平投射	剛体のつりあい	
				斜方投射		
				剛体に働く力のモーメント	運動量	
				剛体のつりあい		
				運動量と力積	円運動と単振動	
				運動量の保存		
				物体の衝突	万有引力	
				慣性力		
				単振り子	電氣と電流	
				惑星の運動		
	重力	電氣と磁界				
	クーロンの法則					
	電流が作る磁界					
	電流が磁界から受ける力					
	弧度法	弧度法	等速円運動 等速円運動の速度と加速度 等速円運動をする物体に働く力 単振動の変位、速度、加速度 磁界中の荷電粒子の運動	等速円運動	円運動と単振動	力学
				等速円運動の速度と加速度		
				等速円運動をする物体に働く力		
				単振動の変位、速度、加速度	電氣と磁界	
	三角関数	三角関数	等速円運動 等速円運動の速度と加速度 等速円運動をする物体に働く力 単振動の変位、速度、加速度 単振動の力学的エネルギー 正弦波を表す式 音波 うなり 光の反射と屈折 光の回折 光の干渉 磁界中の荷電粒子の運動 交流の発生 コイルを流れる交流 コイルとコンデンサーの消費電力 交流回路 電氣振動 X線の波動性 X線の粒子性	等速円運動	円運動と単振動	力学
				等速円運動の速度と加速度		
				等速円運動をする物体に働く力		
				単振動の変位、速度、加速度	波の伝わり方	波動
単振動の力学的エネルギー				音		
正弦波を表す式				光		
音波						
うなり				電氣と磁界		
光の反射と屈折						
光の回折				電子と光		
光の干渉						
磁界中の荷電粒子の運動				原子		
交流の発生						
コイルを流れる交流	電氣と磁界					
コイルとコンデンサーの消費電力						
交流回路						
電氣振動						
X線の波動性	電子と光					
X線の粒子性						
三角関数のグラフ	三角関数のグラフ	単振動の変位、速度、加速度 正弦波を表す式 波の独立性と重ね合わせの原理 音波 うなり 交流の発生 コイルを流れる交流 コイルとコンデンサーの消費電力 交流回路 電氣振動 X線の波動性 X線の粒子性	単振動の変位、速度、加速度	円運動と単振動	力学	
			正弦波を表す式	波の伝わり方	波動	
			波の独立性と重ね合わせの原理	音		
			音波	電氣と磁界		
			うなり			
			交流の発生	電子と光		
			コイルを流れる交流			
			コイルとコンデンサーの消費電力	原子		
			交流回路			
			電氣振動	電氣と磁界		
			X線の波動性			
			X線の粒子性			
三角関数の性質	三角関数の性質	正弦波を表す式 コイルを流れる交流 コイルとコンデンサーの消費電力 交流回路	正弦波を表す式	波の伝わり方	波動	
			コイルを流れる交流	電氣と磁界		
			コイルとコンデンサーの消費電力			
			交流回路			
三角関数の相互関係	三角関数の相互関係	単振動の力学的エネルギー X線の粒子性	単振動の力学的エネルギー	円運動と単振動	力学	
			X線の粒子性	電子と光	原子	
三角関数の和と積	三角関数の和と積	波の独立性と重ね合わせの原理 うなり コイルとコンデンサーの消費電力 交流回路	波の独立性と重ね合わせの原理	波の伝わり方	波動	
			うなり	音		
			コイルとコンデンサーの消費電力	電氣と磁界		
			交流回路			
三角関数の合成	三角関数の合成	交流回路	交流回路	電氣と磁界	電氣と磁界	
関数とグラフ	関数とグラフ	分関数のグラフ	万有引力による位置エネルギー	万有引力	力学	
			電位	電氣と電流	電氣と磁界	
図形と方程式	図形と方程式	図形の性質 直線のグラフ 楕円の方程式 双曲線の方程式 双曲線のグラフ	ボイルの法則	気体分子の運動	熱	
			重心	剛体のつりあい	力学	
			シャルルの法則	気体分子の運動	熱	
			惑星の運動	万有引力	力学	
			干渉波	波の伝わり方		
			干渉波			

表 2 線形代数分野と物理の関連

分野名	単元名	学習事項	関連する物理の学習事項	関連する物理の単元名	関連する物理の分野名					
線形代数	ベクトル	ベクトルの意味とその演算	変位と速度	物体の運動	力学					
			速度の合成と分解							
			相対速度							
			加速度							
			水平投射							
			斜方投射							
			剛体に働く力のモーメント	剛体のつりあい						
			剛体のつり合い							
			剛体に働く力の合成							
			重心	運動量						
			運動量と力積							
			運動量の保存							
			物体の衝突	円運動と単振動						
			等速円運動の速度と加速度							
			等速円運動をする物体に働く力							
			慣性力							
			遠心力							
			単振動の変位、速度、加速度	万有引力						
			単振り子							
			惑星の運動							
			万有引力	気体分子の運動						
			重力							
			万有引力による位置エネルギー	電気と電流						
			気体の圧力と気体分子の熱運動							
			クーロンの法則	電流と磁界						
			点電荷の周りの電界							
			電流が作る磁界							
			電流が磁界から受ける力							
			磁界中の荷電粒子の運動							
			交流回路							
			ベクトル	ベクトルの成分		ベクトルの成分	変位と速度	物体の運動	力学	
							速度の合成と分解			
							相対速度			
							水平投射			
							斜方投射			
							重心	剛体のつりあい		
							運動量と力積			
							運動量の保存			
							物体の衝突	円運動と単振動		
	等速円運動をする物体に働く力									
	慣性力									
	単振動の変位、速度、加速度									
	単振り子									
	惑星の運動	万有引力								
	重力									
	気体の圧力と気体分子の熱運動									
	クーロンの法則	電気と電流								
	点電荷の周りの電界									
	電流が作る磁界	電流と磁界								
	電流が磁界から受ける力									
	磁界中の荷電粒子の運動									
	交流回路									
	ベクトル				ベクトルの大きさ		ベクトルの大きさ	速度の合成と分解		物体の運動
		相対速度								
		水平投射								
		斜方投射								
		重心						剛体のつりあい		
		運動量と力積								
		運動量								
		慣性力						円運動と単振動		
		単振り子								
		気体の圧力と気体分子の熱運動						気体分子の運動		
		クーロンの法則								
		点電荷の周りの電界						電気と電流		
		電流が作る磁界								
		電流が磁界から受ける力						電流と磁界		
	磁界中の荷電粒子の運動									
	交流回路									
	ベクトル	ベクトルの分解			ベクトルの分解		速度の合成と分解	物体の運動		力学
			相対速度							
			水平投射							
			斜方投射							
			剛体に働く力のモーメント	剛体のつりあい						
			剛体のつり合い							
			剛体に働く力の合成							
			運動量の保存	運動量						
			物体の衝突							
			等速円運動をする物体に働く力	円運動と単振動						
			慣性力							
			単振動の変位、速度、加速度							
			単振り子							
			惑星の運動			万有引力				
			重力							
			気体の圧力と気体分子の熱運動							
			クーロンの法則	電気と電流						
			点電荷の周りの電界							
			電流が作る磁界	電流と磁界						
			電流が磁界から受ける力							
			磁界中の荷電粒子の運動							
			交流回路							
			内分・外分			内分・外分	内分・外分	剛体に働く力の合成	剛体のつりあい	
				重心						

表3 微分積分分野と物理の関連

分野名	単元名	学習事項	関連する物理の学習事項	関連する物理の単元名	関連する物理の分野名
微分積分	微分法	平均変化率	変位と速度	物体の運動	力学
			加速度		
			運動量と力積		
			等速円運動の速度と加速度		
		瞬間の速さ	電磁誘導	電流と磁界	電気と磁気
			変位と速度	物体の運動	
			運動量と力積	運動量	
			等速円運動の速度と加速度	円運動と単振動	
	接線の傾き	変位と速度	物体の運動	力学	
		加速度			
	関数の近似式	光の反射と屈折	光	波動	
		光の回折			
	積分法	区分求積法	コンデンサーに蓄えられるエネルギー	電気と電流	電気と磁気
			コイルに蓄えられるエネルギー	電流と磁界	
			電位	電気と電流	
			気体の体積変化と気体のなす仕事	気体分子の運動	
面積		万有引力による位置エネルギー	万有引力	力学	
		電位	電気と電流	電気と磁気	
		コンデンサーに蓄えられるエネルギー			
		コイルに蓄えられるエネルギー			
気体の体積変化と気体のなす仕事	気体分子の運動				
熱					

表4 力学分野と数学の関連

分野名	単元名	学習事項	関連する数学の学習事項	関連する数学の単元名	関連する数学の分野		
力学	物体の運動	変位と速度	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数		
			ベクトルの成分				
			平均変化率			微分法	微分積分
			瞬間の速さ				
		接線の傾き					
		ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数			
		ベクトルの成分					
		ベクトルの大きさ					
		ベクトルの分解					
		速度の合成と分解	三角比	三角関数	基礎数学		
			ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数		
			ベクトルの成分				
			ベクトルの大きさ				
		ベクトルの分解					
		相対速度	三角比	三角関数	基礎数学		
			ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数		
	ベクトルの成分						
	ベクトルの大きさ						
	ベクトルの分解						
	加速度	三角比	三角関数	基礎数学			
		ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数			
		平均変化率			微分法	微分積分	
		接線の傾き					
	2次関数	2次関数とグラフ、方程式・不等式					基礎数学
	2次関数のグラフ						
	ベクトルの意味とその演算		ベクトル	線形代数			
	ベクトルの成分						
	ベクトルの大きさ						
ベクトルの分解							
水平投射	三角比	三角関数	基礎数学				
	2次関数	2次関数とグラフ、方程式・不等式	基礎数学				
	2次関数のグラフ						
	ベクトルの意味とその演算			ベクトル	線形代数		
ベクトルの成分							
ベクトルの大きさ							
ベクトルの分解							
斜方投射	三角比	三角関数	基礎数学				
	2次関数	2次関数とグラフ、方程式・不等式	基礎数学				
	2次関数のグラフ						
	ベクトルの意味とその演算			ベクトル	線形代数		
ベクトルの成分							
ベクトルの大きさ							
ベクトルの分解							
剛体のつりあい	剛体に働く力のモーメント	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数			
		ベクトルの分解					
		三角比			三角関数	基礎数学	
		ベクトルの意味とその演算			ベクトル	線形代数	
	ベクトルの分解						
	三角比	三角関数	基礎数学				
	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数				
	ベクトルの分解						
	内分・外分						
	ベクトルの意味とその演算			ベクトル	線形代数		
	ベクトルの成分						
	ベクトルの大きさ						
内分・外分							
重心	図形の性質	図形と方程式	基礎数学				

力学	運動量	運動量と力積	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数
			平均変化率	微分法	微分積分
			瞬間の速さ		
			ベクトルの成分	ベクトル	線形代数
			ベクトルの大きさ		
		三角比	三角関数	基礎数学	
		運動量の保存	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数
			ベクトルの成分		
			ベクトルの分解		
	三角比		三角関数	基礎数学	
	物体の衝突	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数	
		ベクトルの成分			
		ベクトルの分解			
		三角比			
	円運動と単振動	等速円運動	弧度法	三角関数	基礎数学
			三角関数		
		等速円運動の速度と加速度	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数
			平均変化率	微分法	微分積分
			瞬間の速さ		
			弧度法	三角関数	基礎数学
		等速円運動をする物体に働く力	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数
			ベクトルの成分		
			ベクトルの分解		
			弧度法	三角関数	基礎数学
		慣性力	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数
			ベクトルの成分		
			ベクトルの分解		
			ベクトルの大きさ		
		三角比	三角関数	基礎数学	
		遠心力	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数
		単振動の変位、速度、加速度	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数
			ベクトルの成分		
ベクトルの分解					
弧度法			三角関数	基礎数学	
三角関数のグラフ					
単振り子	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数		
	ベクトルの成分				
	ベクトルの分解				
	ベクトルの大きさ				
三角比	三角関数				
単振動の力学的エネルギー	2次関数	2次関数とグラフ、方程式・不等式	基礎数学		
	2次関数のグラフ				
	三角関数	三角関数			
	三角関数の相互関係				
万有引力	惑星の運動	楕円の方程式	図形と方程式		
		ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数	
		ベクトルの成分			
		ベクトルの分解			
	三角比	三角関数	基礎数学		
	万有引力	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数	
		ベクトルの成分			
		ベクトルの分解			
	三角比	三角関数	基礎数学		
	万有引力による位置エネルギー	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数	
		分数関数のグラフ	関数とグラフ	基礎数学	
面積		積分法	微分積分		

表5 熱、波動、電気と磁気、原子分野と数学の関連

分野名	単元名	学習事項	関連する数学の学習事項	関連する数学の単元名	関連する数学の分野	
熱	気体分子の運動	ボイルの法則	分数関数のグラフ	関数とグラフ	基礎数学	
		シャルルの法則	直線のグラフ	図形と方程式		
		気体の圧力と気体分子の熱運動	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数	
			ベクトルの成分			
ベクトルの分解						
ベクトルの大きさ	積分法	微分積分				
気体の体積変化と気体のなす仕事			区分求積法			
波動	波の伝わり方	正弦波を表す式	三角関数	三角関数	基礎数学	
			三角関数のグラフ			
			三角関数の性質			
		波の独立性と重ね合わせの原理	三角関数のグラフ	図形と方程式		
	三角関数の和と積					
	干渉波	双曲線の方程式	三角関数			
	音波	双曲線のグラフ				
	音	うなり	三角関数	三角関数		
			三角関数のグラフ			
	光	光の反射と屈折	三角関数	微分法		微分積分
			関数の近似式			
			三角関数			
関数の近似式						
電気と磁気	電気と電流	クーロンの法則	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数	
			ベクトルの成分			
			ベクトルの分解			
			ベクトルの大きさ	三角関数	基礎数学	
	三角比					
	点電荷の周りの電界	ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数		
		ベクトルの成分				
	電位	ベクトルの成分	関数とグラフ	基礎数学		
		ベクトルの分解				
	コンデンサーに蓄えられるエネルギー	ベクトルの大きさ	積分法	微分積分		
		分数関数のグラフ				
	電流と磁界	電流が作る磁界	区分求積法	ベクトル	線形代数	
面積						
面積						
面積						
電流が磁界から受ける力		ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数		
		ベクトルの成分				
		ベクトルの分解				
		三角比	三角関数	基礎数学		
三角関数						
磁界中の荷電粒子の運動		ベクトルの意味とその演算	ベクトル	線形代数		
		ベクトルの成分				
電磁誘導		ベクトルの分解	三角関数	基礎数学		
	弧度法					
コイルに蓄えられるエネルギー	三角関数	微分法	微分積分			
	平均変化率					
電流と磁界	交流の発生	区分求積法	積分法	基礎数学		
		面積				
	コイルを流れる交流	三角関数	三角関数			
		三角関数のグラフ				
	コイルとコンデンサーの消費電力	三角関数			三角関数の性質	
		三角関数のグラフ				
	交流回路	三角関数の性質			ベクトル	線形代数
		三角関数の和と積				
三角関数の合成						
ベクトルの意味とその演算						
電気振動	ベクトルの成分	三角関数	基礎数学			
	ベクトルの分解					
原子	電子と光	三角関数	三角関数	基礎数学		
		三角関数のグラフ				
	原子と原子核	三角関数			指数関数・対数関数	
		三角関数の相互関係				
原子と原子核	原子核の変化と放射線	指数関数	指数関数・対数関数			
		指数関数のグラフ				

### 3. 2 数学の見方や考え方と物理の見方や考え方

数学と物理の学習事項間の関連を表 1 から表 5 に示した. 表に示した関連がある学習事項であっても, 数学と物理において同じように取り扱うわけではない. 数学には数学的な見方や考え方があり, 物理には物理的な見方や考え方がある. 数学と物理の関連を図る教育を実践する際には, このような見方や考え方の違いも指摘したい. このことは, 学生が同じ対象を複数の視点で考察する経験につながる.

ボイルの法則 (温度が一定のとき, 一定質量の気体の体積  $V$  は, 気体の圧力  $p$  に反比例する. 式で表すと  $pV = \text{一定}$  となる.) を例に示す. 学習事項として「気体が入った容器があり, 温度が一定の時に体積を減らしていく. この時, ボイルの法則に従うと圧力はどうなるか.」を考える.

数学的な見方や考え方から捉えると, 次のようになる.

- ・温度が一定のとき, ボイルの法則から, 等式  $pV = \text{一定}$  は常に成立する.
- ・つまり,  $V$  は  $p$  に反比例するので,  $V$  が減少すると  $p$  が上昇する.

このときには, 図 1 に示すような反比例のグラフのイメージがある.

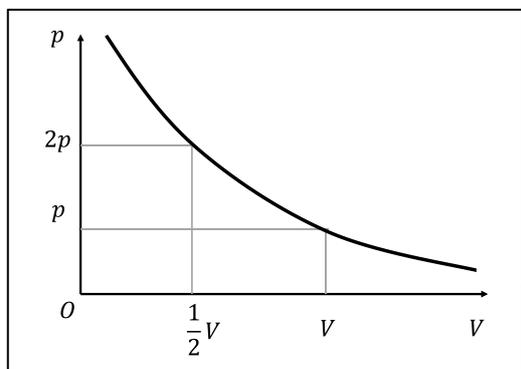


図 1 ボイルの法則 (数学的なイメージ)

物理的な見方や考え方から捉えると, 次のようになる.

- ・ピストンが押されて体積が減ることで, 分子が動く範囲が狭まる.
- ・分子が狭い範囲を動き回り容器の壁にぶつかることで, 圧力  $p$  が上昇する. この状況は, ボイルの法則  $pV = \text{一定}$  と合致する.

このときには, 図 2 に示すような, 現実的な事象のイメージがある.

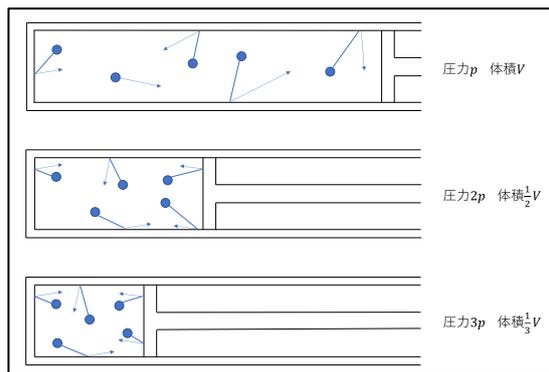


図 2 ボイルの法則 (物理的なイメージ)

### 4. 授業での活用方法の検討

各高等専門学校のシラバスを参照すると, 数学は 1, 2 学年で基礎数学を学習し, 2, 3 学年で線形代数と微分積分を並行して学習する傾向が見られる. 物理は, 取り扱う分野にも差があるが, 概ね 1, 2 学年で力学, 熱, 波動, 電気と磁気, 原子の順番で学習する傾向が見られる. 従って, 数学でベクトルを学んでいない状態で, 物理で力学を学びベクトルを活用するといった状況が見られる. このような現状を踏まえ, 授業での活用方法を検討する.

作成した表とシラバスを参照することで, 学生が物理の学習で利用した数学の学習事項がわかる. 数学においては, 表 6 に示すような活用方法が考えられる.

表 6 数学の授業での活用方法

場面	活用方法
授業の構想時	表とシラバスで把握した事項を題材に物理の教員と議論する.
教材の作成時	数学の学習事項の活用として, 物理の学習事項を含む教材や演習問題を作成する.
授業時	(物理で活用した学習事項) 物理では事象の表現のために使った事項を, 数学として体系的に学習することについて, 見方や考え方の違いも含めて言及する. 学生に数学での取り扱い方と物理での取り扱い方を比較させ, それぞれの見方や考え方を考えさせる. (物理で活用していない学習事項) 学習事項が物理のどの単元の学習事項で活用されるか言及する.

筆者らの事例として次のようなものがある.

- ・三角比の教材の作成の際に, 斜面上の物体

に働く力の分解を追加する.

- ・2次不等式の練習問題で、物体の投げ上げ運動を題材にする.
- ・ベクトル分野の導入において物理で活用していたベクトルを、数学として抽象化、体系化することに言及する. その際に、物理におけるベクトルとは異なる観点で扱うことに言及する.

物理においては、表7に示すような活用方法が考えられる.

表7 物理の授業での活用方法

場面	活用方法
授業の構想時	表とシラバスで把握した事項を題材に数学の教員と議論する.
教材の作成時	数学の学習状況を踏まえ、教材や練習問題を作成する.
授業時	(数学で学習している事項の場合) 数学で学んだことを活用していることについて、見方や考え方の違いも含めて言及する. 学生に物理での取り扱い方と数学での取り扱い方を比較させ、それぞれの見方や考え方を考えさせる. (数学で学習していない事項) 学習事項が数学のどの単元で学習するか言及する. 今後、数学の授業で数学として体系的に学ぶことに言及する.

筆者らの事例として次のようなものがある.

- ・等速円運動の単元で数学の弧度法と度数法の関係を指導する.
- ・度数法の成り立ちと天体の運動の話の関係を説明し、円運動が数学の話を経由して天体の話につながっていることに言及する. その際に、学習事項を関連づけて捉えることの重要性に言及する.

### 5. まとめ

本研究では、数学と物理の学習事項を双方向に確認できる対応表を作成し、日常の授業で活用可能な学習事項間の関連を明らかにした. 本研究は、高等専門学校一般科目における数学と物理の学習事項間の双方向性を構築するものである. 日常の授業で数学と物理の関連の意識を醸成しておき、実験や特殊な教材を準備した授業を行うことで、学生が数学と物理の関連をより深く理解することができる. また、

学生が、低学年時から関連や科目特有の見方や考え方についての観点を持つことができれば、数学を活用した専門科目の学習に円滑に取り組むことができる.

今後の課題は、本研究で構築した対応表等を実際の授業で繰り返し活用し、より詳細化すること、数学と物理の見方や考え方についての具体例を作成することである.

数学と物理の教員が互いの研究だけでなく教育実践についても議論することで、多くの気づきを得ることができる. 今後も、互いの専門分野を尊重しつつも議論を重ねていく.

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K03185, JP19K03158 の助成を受けたものである.

### 引用・参考文献

- [1] 独立行政法人高等専門学校機構, モデルコアカリキュラム  
<https://www.kosen-k.go.jp/Portals/0/MCC/mcc2017a11.pdf>  
2020年11月6日確認
- [2] 佐伯昭彦ほか, 数学と物理とを統合したクロスカリキュラム型授業の教育効果, 工学教育第51巻, 第1号, 99.109-114, 2003年
- [3] 馬淵雅生, 古典力学で使われる線形代数の例 日本数学教育学会高専・大学部会論文誌, 第25巻, 第1号, pp.111-122, 2019年
- [4] 金児正史, 数学の学習内容を意識して指導する物理基礎の事例研究—三角比やベクトルの指導を組み込んだ物体にはたらく力のつりあいの学習—, 日本科学教育学会年会論文集, 40巻, pp.135-138, 2016年
- [5] 金児正史, 数学の学習内容を加味する物理と物理の学習内容を加味する数学の授業—三角関数の指導と等速円運動の学習を意識した数学IIと物理の指導実践—, 日本科学教育学会年会論文集, 41巻, pp.135-138, 2017年
- [6] 今村吉孝, 高校物理の教科書にて用いられる数式と高校数学のカリキュラムの関連について, 日本科学教育学会年会論文集, 42巻, pp.581-582, 2018年
- [7] 飛田光徳ほか, 物理教科書に現われる数式と高校数学との関連, 物理教育, 第37巻, 第1号, pp.35-38, 1989年

## 史料紹介

G. E. ルンフィウス

### 恐怖の地震の本当の歴史

アンボイナ島およびその周辺の島々で、1674年  
2月17日に発生した大地震と、それに先立ち発生  
した諸地震について

河野 佳春\*

**Japanese translation of Georg Everhard Rumphius`  
historical document about the earthquake at 1674 Ambon.**

Yoshiharu Kawano\*

This document is a translation into Japanese of the Dutch document : Rumphius, G. E., *Waerachtigh Verhael, van de Schrickelijke Aerdbevinge / Nu onlanghs eenigen tyd herwaerts, ende voornaementlijck op den 17. February des Jaers 1674. Voorgevallen, In / en ontrent de Eylanden van Amboina, Mitsgaders ongehoorde watervloeden, droevige ongelucken, en wonderlijkcke by-sonderheden, &c. dear op gevolght, gelijk sulcx in het Gagh-Register van dien, neerstigh en omstanstigh aengeteyckent state, en uytgetrocken is, Als mede Autentyque Extracten van Brieven over het selve. Alles met het latest Schip de Vrije-zee bericht / en bekent gemaect* Gedruckt near de Cope van BATAVIA In't Jaer Onses Heeren, 1675.

#### 断り書き

本稿は“Rumphius, G. E., *Waerachtigh Verhael, van de Schrickelijke Aerdbevinge / Nu onlanghs eenigen tyd herwaerts, ende voornaementlijck op den 17. February des Jaers 1674. Voorgevallen, In / en ontrent de Eylanden van Amboina, Mitsgaders ongehoorde watervloeden, droevige ongelucken, en wonderlijkcke by-sonderheden, &c. dear op gevolght, gelijk sulcx in het Gagh-Register van dien, neerstigh en omstanstigh aengeteyckent state, en uytgetrocken is, Als mede Autentyque Extracten van Brieven over het selve. Alles met het latest Schip de Vrije-zee bericht / en bekent gemaect* Gedruckt near de Cope van BATAVIA In' t

Jaer Onses Heeren, 1675.”の紹介かつ試訳である。

この史料は、オランダ東インド会社職員としてアンボンで活動した、著名な博物学者G. E. ルンフィウス、Georg Eberhard Rumphius (1627年? - 1702年6月15日)による、1671年10月から1674年5月にかけてアンボンを襲った地震と津波に関する報告書に、同様の内容に関する別の不明の人物による書簡を加えたものである。

テキストは、Buijze, W. による再活字化原文と英訳を伴う1997年の復刻版“Rumphius, G. E., *Waerachtigh Verhael, van de Schrickelijke Aerdbevinge / Nu onlanghs eenigen tyd herwaerts, ende voornaementlijck op den 17. February des Jaers 1674. Voorgevallen, In / en ontrent de*

アンボイナ島およびその周辺の島々で、1674年2月17日に発生した大地震と、それに先立ち発生した諸地震について

*Eylanden van Amboina, Mitsgaders ongehoorde watervloeden, droevige ongelucken, en wonderlijkcke by-sonderheden, &c. dear op gevolght, gelijk sulcx in het Gagh-Register van dien, neerstigh en omstanstigh aengeteyckent state, en uytgetrocken is, Als mede Autentyque Extracten van Brieven over het selve. Alles met het latest Schip de Vrije-zee bericht / en bekent gemaect* Gedruckt near de Cotype van BATAVIA In' t Jaer Onses Heeren, 1675. Facsimile, Dutch transcription and Edition W. Buijze 1997.”を用いた。

日本語訳は、英訳を参考にしつつ、原文から行った。したがって英訳とは内容の異なる部分がある。文中の地名は、確認できる限り現代の現地での呼称に即してカタカナ表記に直した。また、必要に応じて( )内に説明を記した。紙幅の関係で、本稿は本文の日本語訳のみとし、注釈等は別稿に譲る。

なお、本稿執筆にあたっては、2020年度科学研究費補助金(基盤研究B 研究課題番号20H04429 研究代表者長津一史「津波常襲地における海辺居住のレジリエンス:東インドネシアと南タイの地域間比較」)の助成を受けた。

## 報告書

アンボイナ

1671年10月17日と18日にかけて、コラコラ艦隊がセラム周辺に遠征している間に、突然の強くて激しい地震がホニモア(サパルア)とルアシ諸島を襲いました。それはハトゥアネ(サパルア北岸)のヴェルゼン砦を(破壊して)平らにただけでなく、シリ・ソリのホランディア砦を破壊し、田園地帯を破壊した。山々は巨大な岩塊が崩れ落ちて、大きな被害を受けた。地面はいくつかの場所でココナツの木の高さほど深く裂けていて、(もしココナツの木が)裂け目に落ちたならば、先端が突き出ているだけだったろう。ハトゥアネの海岸全体が1フィート以上沈下し、パペルー村(サパルア南岸)の前のリーフはさらに沈み、原住民が釣りをするにはもう適さないほどにバラバラになった。この地震で亡くなったのはわずか数人で、その数は今でも不明だが、それが怠慢によるのか、それとも無知によるのかは不明である。

その日以来、大地はホニモアで1ヶ月以上揺れ続け、その年の残りの期間中、しばしば揺れた。その日の同

時刻に、オマ(ハルク)と呼ばれる島やバグアラ岬(アンボン島東部)、(アンボン市の)ヴィクトリア城でも強い揺れを感じたが、それほど大きな揺れではなかった。城で最初に起きた地震は、1673年7月12日の夜6時頃で、その時に、城内やその他の石造建築にいた人々は、強い衝撃を何度も感じた。同じ日の朝、人々は、つきさざりとびはねる稲妻をともなった奇妙な激しい雷鳴を経験した。屋根から稲妻が走ったように思われ、何人かの人々はそれを感覚的に思い知らされた。

他にも、城の東側の木に雷が落ちたことや、ヨットのダマック号で、船員がビルジを排水している時に、ビルジ管に落雷するなど、驚くべき出来事があった。雷はダマック号と同じように停泊していたフルート船ウィムメヌム号の甲板にも、火のような形をして投げつけられた。他にも30マイル以上離れた場所で見られた稲妻はもちろんのこと、空には時折様々な兆候が見られた。また、現在の西モンスーンの間、風がめまぐるしく変化したため、通常の貿易風に頼ることができなくなり、多くの船乗りが不利益を被った。

しかし、これがどんなにひどいものであったとしても、次に起こったこととは、比較にならない。その時から揺れと地鳴りが止まることはなかったが、1674年2月17日の土曜日の夜、7時半頃、美しい月と穏やかな天候の下で、私たちの州全体、レイティモール、ヒトゥ、ヌサテロ、セラム、ブル、マニパ、アンブラウ、ケラン、ブアノ、ホニモア、ヌサラウト、オマとそれらに隣接する場所、特に最初に述べた2つの場所で、ほとんどの人々が審判の日が来たと確信するような恐ろしい衝撃を受けた。

レイティモールのヴィクトリア城の鐘が一斉に勝手に鳴り響き、立ち話をしていた人々は、大地が海のように上下に揺れて、互いにぶつかったり、倒れたりした。75の中国風のペダックや、小さな石造りの建物と一つの大きな石造建物が、崩れ落ちて瓦礫になり、79人が死亡したが、その中には、商人G.E.ルンピウスの妻、その末娘、秘書ヨハネス・バスティンクの未亡人、そして4人のヨーロッパ人が含まれていた。

他にも35人が腕、足、頭、股関節に重傷を負った。

群衆が、中国人がいつものように新年を祝う様子を見物に集まっていた。

水は4から5フィートの高さまで上がり、いくつか

の深い井戸は人が素手で水をすくい上げることができるほどに水位が上がり、次の瞬間には再び空になった。ワイトム川の東岸が裂け、水が18~20フィートの高さまで噴き出し、ほとんどの人が2~3尋の深さでしか発見できないと信じていた青く濁った砂を吹き上げた。群衆は、自分たちの身を守るために高台に逃げたが、そこで総督と大部隊に遭遇した。澄み切った空の下で、彼は集会を祈りに導いた。ほとんどが北と北西からだったが、山々が爆発しているのか、少なくともぼろぼろに崩れているような、遠く大砲の発砲のような音が聞こえ続けた。(その音の正体は)夜が明けてから、ヒトウ特にワワニ山地とセイで明らかになった。激しい揺れは一晚中続き、誰も30分ほどの安らぎも与えられなかった。揺れのほとんどは、巨大な梁が足の裏に当たっているかのように地中から湧き上がってきた。そして耳を澄ますと、地面の下で水がざぶざぶと音を立っているのがわかった。

驚くべき救助と神の救いのしるしがあった。地震から3日後、瓦礫の中から生後1ヶ月くらいの中国人の子供が見つかり、死んだ母親の胸の上にいるのを、救出された。

地震の夜、瓦礫の下に生き埋めになった様々な人々が、生きたまま掘り出されたが、中には無傷で、何か悪いことをしたので罰せられるかもしれないと恐れているかのように、逃げ出したパプア人の少年がいた。残された石造りの建物は、所有者が住むことを躊躇するほど大きな被害を受け、人々は家から逃げ出し、暗く澄んだ空の下か、小さな小屋で夜を過ごした。

ひどく損傷したマレー教会は、完全に滅茶苦茶になった。その最も南側の柱は、外に向かって曲がり、説教壇の後ろの仕切りが引きちぎられ、頭上の梁が大きく外れ、屋根がつぶれた。さらに、いくつかの墓石が倒壊し、教会の門が崩れて中に入れなくなった。

説教壇はまた、最も不安定で、螺旋階段から引きちぎられて、砂時計があった肘掛けが椅子から引きちぎられて、今では説教壇の正面を向いていた。ある牧師が、以前にその肘掛けを動かそうとして動かすことができなかった。教会はもはや礼拝に使うことができず、城の大ホールも同様だったため、地震の翌日、私たちは通常の礼拝の場を奪われた。

しかし、この日は、地震の影響が衰えずに続いていたため、あらゆる不快感にもかかわらず、疑いもなく他の日よりも熱狂的に礼拝をした人が多かった。アン

ボンの人々が、大勢、バイレオ、先祖代々の木でできた共同体議場に集まり、詩篇を一晚中歌って祈っているのが聴こえた。

波止場の鍛冶場や設備や雑貨の木造倉庫や、対岸のワイ・トモ川の木造倉庫がすべて壊れて、驚くべきことに土台からほとんど引き剥がされていました。

これは、タウンホールと病院(両方とも石造りの建物)についても同様で、それぞれ中央の壁が崩壊し、特に病院は、川の側がひどく損傷していた。洗濯場として使われていたエレファント川、アンボンタウンの南東にあるオリファント川(現在のワイ・バトゥ・ガジャ)の石造りの家も、完全に瓦礫になった。にもかかわらず、姦淫の罪で刑務所に収監されていた女性一人以外に死者はなく、額に骨まで届く穴の開いた、知事の小さな娘を除いて、誰も重傷を負わなかったことを主に感謝します。

その川の河口に係留されていた数隻の帆走スループと原住民市民所有のオレンベイ(地元のタイプのプラウ)は、1つの小さなオレンベイがより大きなものの中に放り込まれた状態で、上流の橋に激突して橋は、ぐらぐらになった。多くの人々が、自分たちのキャビネット、本棚、食器棚などの家具が前方に倒れ、磁器の入った皿入れが壁から外れて、バラバラになったと言った。奇妙なことに、ある家の縁側にあった酒の甕が、壊れたり、倒れたりせずに、3~4フィート移動した。

後で分かったように、この地震はレイティモールの山でも強く感じられた。ナクでは7軒の家が倒壊し、山の高いところから大きな岩が数個落ち、何人かの人をかすめたが、何の被害もなかった。あるココナツの木は、男性とその妻と2人の子供たちが食事をしている中間に倒れたが、食べ物だけをつぶし、妻が腰に軽傷を負った以外に被害はなかった。

オマでは、2つの岩が海に落ち、地面は斧で平らにされたかのように滑らかになった。一つの岩は、7人の男たちが抱きかかえることができないほどの大きさで、井戸のような穴を残して移動していた。エマとソヤの間の道は、少なくとも23か所に地割れができ、幅が2~3フィートあるものもあれば、ギザギザになっているものもあった。海岸からそう遠くないフトゥムリ村では、掘ったばかりの穴から海水の噴水が空中に高く飛び出した。

ここに停泊していた船の艀装が、互いにぶつかって

アンボイナ島およびその周辺の島々で、1674年2月17日に発生した大地震と、それに先立ち発生した諸地震について

ガタガタと音を立てた。操舵手は、大砲とその架台が甲板から持ち上げられ、転覆することなく降ろされたと証言した。レイティモールの南、ヌサニウエ岬の近くを航行していたスループ船フリッシンヘン号に乗っていた人たちは、高波がスループにぶつかって、船がまるで座礁したかのように揺れていることに気づいた。

シモン・オスコ・ファン・ゴアと呼ばれるあるキリスト教徒の奴隷は、高貴な会社に属し、教会管理者の部下だった。彼は、来るべき宗教的な礼拝のために、城の大ホールでロウソクに火を灯しに行くように命じられていたが、地震の約1時間前に同じホールで、白い顔と手を持つ人が説教壇に立って、左手に四分冊のフォリオのような本を持って南東の方を向いていて、読書をしているかのように本の近くに右手で燃える白いうそくを持っているのを見たという、驚くべき証言をした。その人は長い黒い服を着ていて、それは椅子の端に掛かっていた。その人はいばらの冠をかぶっており、その茨のとげは指の半分ほどの長さで、暗いラピスラズリの色であった。

真実が何であれ、我々は読者の判断に任せるが、彼はこの話を何度も、時には重要な人々に話し、彼は話の内容を変えることはなかった。

地震直前にヒトウの海岸で、人々は空に2つの縞を見た、それぞれ楕円の半分で、家の骨組みのように互いに上昇して、ルフからセイに、またはセイでは南北に伸びていた。

地震は、ここの城と同じように、そこにも強く襲ったが、間もなく巨大な轟音とともに発生した恐ろしい海水の山が来た。私達は信頼できる情報源から、この巨大な波がレベレフの近くで発生したと聞いた。それは急に盛り上がり海面に崩れ落ち、3つの部分に分かれ、そのうちの2つは田園地帯を浸水させ、3つ目は海に向かって進み、その通り道にあったすべての木、家々と人々を奪った。

この海岸の被害のなかでも、最も重要なのは、ヨーロッパ人31人を含む2243人以上の人々の死亡、合計2322人の犠牲者だ。我々は、ヒトウの最も西から、各場所について詳述する。

ラリケ

地震の後、水は要塞（ロツテルダム）の周りで2フ

ートの高さになりました。それは3回上昇し、会社のオレンバイとプラウを粉砕する以外に害はなかった。

ヌサテル諸島

水は、突然ウレンの方向に遠く引き、海岸では露出した海底が見えて、ほとんど海水が無くなった。その後、水は島の最下部に沿って2方向から3回戻ってきて、2つの水の壁が激しく衝突した。

ウレン

ヒトウの他の場所と同じように、馬車どうしが衝突したような恐ろしい轟音が聞こえた。上昇した後、水はヌサテルの方向に海底を見るほど引き、海が消えたようだった。海水は砦を取り囲んだが、中には入らなかった。注目すべきことに、マイナ・ファン・フーアモヘルと呼ばれる女性が、カイからヒラに向かって旅をしていた兵士に助けられた。彼女と4ヶ月の子供は洪水で海に流された。彼女は丸太につかまっていたが、真夜中に蛇が彼女と子供に巻きついた。彼女は蛇をなだめようとしたが、蛇は丸太の周りに巻きついて、女性と子供が助けられた時もそこに居た。

リマ

レベレフの方角から水が来て、沸騰したように、ホールレム砦の近くまで上昇した。水に押し上げられた石、泥、砂が、すべてを覆った。その中には、男が2-3人でも動かさないような岩も含まれていた。これらは砦の1階に雪崩込み、見張り台がそこで任務に就いていた歩哨もろともに倒され、その下の住居と石造りのキッチンも壊され、その扉は後に村の中で発見された。軍曹の妻は海水に流され、砦から20尋離れたレモンの木に引っかかり命拾いした。営倉の中にいた兵士を除いて、兵士たちは皆、砦の下の階に逃げたが、一人は木の上に、もう一人は家の屋根に、もう一人は乾いた土地の上に投げ出され、そこから高台に逃げた。軍曹は第一波で流されたが、漂流中に幸運にも頑丈なものを見つけてしがみついた。流された兵士が軍曹の足を掴み、軍曹が自分の体を自由にしようともがいている時に、彼の幼い娘が海に流されて父に助けを求めている。しかし、彼が身動きできるようになる前に、彼女は流されて溺れてしまった。生後6ヶ月奴隷の子供も流されたが、洪水後の海岸で泣いているのを無傷で救助された。砦の屋上が崩壊した。ビナウ村の一部も流されて、ヒトウのインチェタイ (inche tay、慣習法首長、

Hitu の PAEP の最高位者) のために新しいパイロウの建設を助けるためにヒラに向かっていた 39 人を含む 86 人が亡くなった。

#### セイ

ここでは海水が砦の窓まで上がった。その軍曹と会社のために働いている他の人々は、多くの家族を喪った。しかし、アンボン人が最も苦しんだのは、セイ、レベレフとワッセラの村が完全に流され、ラムでは6軒の家が破壊されたためである。そのため 619 人が亡くなった。また、重傷者も多く、その中には前述の村に遊びに行く途中だったハウトゥナ村の数人の長や長老をふくむ 29 人も含まれた。なお、ハウトゥナ村は他の村よりも高い位置にあったため、被害はなかった。亡くなった人たちの多くは、最初の揺れを感じたときに、それが最後の審判だと思ってモスクに逃げ込んで祈りを捧げていたところ、モスクと一緒に海に流されたと言われている。

その4日後、夜の11時頃にまた激しい揺れがあり、耐え難いほどの高い口笛のような音が歩哨所を貫き、耳に突き刺さるような音に、悪魔が笛を吹いているのだと思われた。恐怖を感じた歩哨たちの誰の仕業でもなかったため、他の人たちは、地中で発生した蒸気が十分に開放されていなかったために、この騒音が発生したのではないかと考えている。ワセラ村の生後7日目の赤ん坊は、地震の3日後にサグ椰子の枝の間で生きているのが発見されたが、母親は溺死していた。

#### ヒラ

ここが最も(被害が)ひどかったと言われているのだが、地震が起こるとすぐに、上の階で足止めされた数人を除いて兵士全員が、砦から下の広場に撤退した。そこは安全と思われたが、残念なことにそうではなかった。誰も水がアムステルダム砦の見張り台まで上昇すると推測できなかった。水は屋根に押し寄せ、砦の周りの村々を押し流したが、その中で柱の上に2軒の家が残っていた。ファン・ゼイルの副官の妻と子供2人、外科医エファライン・グラマンスキの妻と子供4人、そしてインチェタイアブドゥル・ラグマンと彼の家族の21人のメンバーと一緒にヒラのラティン集落の首長ら1461人が死亡した。同様の運命は、ちょうどインチェタイに呼ばれた前述のラティン集落を支配したブランという若い慣習法首長(Orangkay)に、さらにカイトゥの首席慣習法首長だけでなく、他の村々のレヘントたちにも降りかかった。

多くの兵士は、彼らの体の上を水流が2回超える間、彼らの腕と足で大砲につかまって、助かった。砦の後ろにあった石の礮臼が元の場所から26ヤードのところで見つかった。インチェタイの家にあった金属製のモスクドラムも60ヤード以上離れたところに放り出されていた。3.5フィート四方で厚さ8インチのサンゴ石は、それが置かれていた場所から41ヤード離れた、砦後ろの墓石に引っかかっていた。半径200m内には、波に流されたり、瓦礫に巻き込まれたりした大量の死体が散乱し、埋葬される前に害虫のような悪臭を放っていた。

#### ヒトゥ・ラマ

ここでは水位が通常より10フィートほど高くなり、砦の下にあった軍曹の家や他の会社の建物が破壊された。軍曹は流されたが、木に引っ掛かった。ここで兵士1名とアンボン人35名が命を落とした。

#### ママラ

この村では約40軒の家が流されたが、死者は一人も出なかった。リアン、トゥレフ、ワイでは、地震が感知され、水位も通常より高くなったが、家は流されず、人的被害もなかった。

#### ティアル

この地はヒトゥの東の岬にあって前述の村より少し低い場所であった。故にモスクとイスラム教の司祭のバイレオが、普通の家と一緒に流された。

(区切り目だが表題なし)

北西ヒトゥは、かなりの水害を被り、特にリマ村とヒラの間で、すべての木が流された。水は、それらの村とセイの間で、標高50または60尋と推定される複数の丘の上まで上昇した。また、セイとリマの間で、砦の場所以外、すべて岬と海岸を一掃した。岩がなくなったので、いくつかの場所では、上陸や陸路移動が容易になった。ヒラとリマ村の間のすべての木が流されたが、中にはこの2、3年で生産を始めたばかりの若いクローヴの木の高貴な農園もあった。ママラ、エリ、セナル、カイトゥ、セイ、レベレフ、リマの石灰窯も破壊され、流された。これらの石灰窯はわずか1年半前に、コラ艦隊の年間労働の代償として設置されていた。フシホル、ヒトゥ・ラマ、ワカルは3カ所だけは、少し高台にあったために助かった。市場ゆえに、そして最も重要なイスラム教徒の集まる場所として、有名だっ

アンボイナ島およびその周辺の島々で、1674年2月17日に発生した大地震と、それに先立ち発生した諸地震について

たレバレフは、200m幅で破壊された。もはやそこには海岸はなく、非常に険しい断崖絶壁があるだけだ。ちょうど同じことがセイとヒラの間でも、後者の場所の海岸と同じくらい、アムステルダム砦の西側、インチェタイ支配下の地域ヌクナリ、タエラ、ワワニもすべて船が停泊していた泊地（係留杭に用いた岩？）とともに消えてしまった。どうやら前述した水流は、レバレフのすぐそばから直接起こったようである。あるいはヒトウから来たのかもしれない。というのも、遠くない沖合にいた船に乗っていた人々が、さざ波しか感じなかった。波は3つに分かれた。1つは東のセイとヒラに行き、もう1つは西のリマとウレンの村に行き、3つ目はまっすぐにシアル岬（セラム島）に向い、岬を越えて（反対側の海に）達した。沿岸の船に乗っていた人が気持ち悪くなるほど、水はひどく臭く、引き揚げられた人は泥水に浸かったようだった。水の塊は、上部が炎のように輝き、下部は石炭のように黒くて、轟音を立てていた。屈強な男たちが、膝位の水嵩で足をすくわれ流されたので、それはただの水とは信じがたかった。何人かは海に流されたが、幸運にも足や頭から押し戻されて、陸地に投げ出されたと話した。アムステルダム砦周辺の家屋、特に少し離れて立っていた一軒を流す様子は驚くべきだった。水は腕を伸ばすように、（その家を）土台から引き剥がしたが、少しも濡らさず、まるでそれだけでいいと言わんばかりに引いた。

波はアムステルダム砦の西と南のすべての村民の家を流し、バラバラに破壊した（or 砦も部分的に破壊した）。東のセナロは、多くの木と多くの低木が生えているところで、水は2回か3回、時にはそれ以上に押し寄せたが、あまりにも流れが速く、把握できなかった。第1波は穏やかに来て、第2波はすべてを破壊し、第3波は、村があったところを空っぽにした。まるで箒がそれらを一掃したようだった。

ほとんどすべてのボート、スループ、サンパンそしてプラウが粉碎され、一掃された。魚たちがまるで人間のように泣いたのは、クロコダイルがたくさん住んでいたからかもしれない。

海岸には大量の魚が打ち上げられ、中にはヒラの倉庫まで届いたものもあったが、木のように味がなく、捨てるしかなかった。牛や多くの野豚が海に流されたのは、主なる神が強弱に関係なく、誰を助け、誰を滅ぼすかを決めておられることを証明していた。強くて丈夫な者が最も痛めつけられ、足の不自由な者たちが最も痛めつけられなかったことを、もう一度述べておく。

地元の住民は、ほとんどがヒトウの海岸から来ていたので、怖くなって山に逃げ込んだのは当然である。アムステルダム砦周辺に住んでいた人々の多くは、貧しさのあまり海水によってダメになった会社の米を回収しようとした。これを知ったアントニオ・ハルト総督は、貧しい人々に良い米を配るように命じたが、それを受け取る者もいれば、そうでない者もいた。多くの金持ちが貧乏になり、多くの貧乏人が様々なものを引き揚げて金持ちになった。

ここでも上流のセイでも、川の水は濃く濁り味も悪いので、もう使えない。人々はただ惨めな顔で座り込み、仲間を喪ったこと、自分たちの悲惨な状況を嘆いていた。セイの上流のワワニとマヌスの2つの高い山から、巨大な地滑りが谷間に大量の土砂を流し込み、それが川を塞いで、塞き止め湖ができてしまい、いつそれが決壊するかという、危険な状態になった。

セラム・クチルまたはホアモアル

シアル岬では、海からも陸からも高波が押し寄せ、被害が及んだ。西側の海岸は、岩場が砂浜に変わり、ワイプティ近くの岬の東側の大部分は消滅した。ルフのオフエルブルフ砦近くのムスリム村落は、すべてのプラウ船とともに流されたが、人的被害はなかった。この水は通常より3尋高かった。カフラ（Cahula）の平地には木が生えておらず、会社のサゴ園の監督者の住居が流された。洪水が引いた後で、同じ監督たちが荷物や武器を取り戻した。

タヌノ湾では、キリスト教会と家の半分が飲み込まれたが、死者は一人も出なかった。ここでは海水が一度だけ陸に上がったようだが、ホアモアルとヒトウの海岸の間の海は多少のさざ波を除いて穏やかだった。このことは、約200mしか離れていない海上にいて、陸地の轟音を聞いた何人かの人が証言した。

ブル、アンブラウ、マニパ、ケランとブアノ

これらの場所でも、地震を感じた。また、マニパ砦の周りの堀に、突然、水が上がってきた。いくつかの村で40軒ほどの家が流されたが、そこでも地震がかなり激しかったにもかかわらず、人的被害はなかった。ケラン島のサラティにある会社の警備所では、水が6フィートまで上昇したが、それ以上の被害はなかった。

オマ（ハルク）ホニモア（サパルア）とヌサラウト

地震は、ここでも非常に激しく、一晩中続いた。オマでは、最初の揺れの後、地震は24時間続き、水は通常より6フィート上昇した。

パソ・バグアーラ

ミッドルブルフ砦の乾燥した地下室に保管されていた大量の火薬は、深刻な危機にさらされたが、結局は救出された。ヴィクトリア砦から流れてきた水は、幸いにもパソの地峡を越えることなく、片側一帯を覆っただけだった。城から流れてきた水は、内湾に近い最初の家々にまで達した。これが幸いで、これ以上流れていたら、砦も含めすべて流されただろう。バグアラとフトゥムリ周辺の地域では、地割れが発生した。

バンダネイラからは、同日の同時刻に中程度の地震があったというニュースが届いたが、晴天の月夜で穏やかな天候だった。水位は多少上昇したが、被害はなかった。

このように、州全体で悲惨な状況だった。揺れや地鳴りが収まらず、ある人には大砲のような、ある人には馬や馬車が走っているような音が聞こえた。天の炎も消えなかった。5月6日(日)状況が少し落ち着き14日ほどたった頃、夜の7時頃、激しい雨の中で2回ほど激しい揺れがあった。人々は東方に、その根元は狭く上の方は広い火を見た。雨が降ったり止んだりしていた。その後の木曜日、つまり5月10日の夜9時頃、アンボンの町にあるヴィクトリア砦の外壁近くに座って話をしていた5、6人の兵士が、東の空に棒のような形をした淡い火が最初は小さく、次に大きく広がるのを見た。これが見られた場所は完全に晴れていたが、他の場所では薄い雨雲に覆われていた。

主がさらなる災害のために私たちを守ってくださいますように。

#### (以下は末尾に書簡)

親愛なる皆様へ、N.N.より

この島では3年前から地震が頻発しており、起こったことをすべて説明するには膨大な紙面が必要となるが、それでも起こったことの恐ろしさは人智を超えていると思う。そして、もし誰かが見た奇妙な出来事を

すべて記述したとしても、その理解力と記憶力は不十分であることがわかる。さらに、その人の健康が保たれていなければならないが、これは非常に稀なことである。ここでは、1671年の10月13日、14日、15日、16日、17日にホニモア島(サパルア島)で地球の猛威が始まったことを紹介したい。コップス総督は、コラコラ船団と共にホンギ遠征に出かけていた。艦隊は56隻のコラコラと2隻の船と2隻のスループで構成されており、ヨーロッパ人とモルッカ人を合わせた総勢3000人から4685人であった。午後、我々はセラム海岸のラーハキット村の近くにいたが、突然、恐ろしい稲妻と激しい雷を伴う猛烈な嵐に見舞われた。その日の夕方、ホニモアでは大地が揺れ始め、ヴェルゼン砦が倒れ、山が割れ、岩礁が飲み込まれ、多くの人、家畜、木が失われた。正確な数字はわからないが、200人が死んだと言われている。この時、私たちは海上にいて、セラムの海岸に沿ってケフィン村あたりまで旅を続けていたが、船団の被害はわずかで、水面の奇妙な波紋が気になった程度だった。コップ総督が提督として乗船していた大型コラコラ船ティティワイ号は、メインヤードが破断し、少なからず座礁の危険があった。私たちは地元の酋長らの対立を解決し、反乱軍の一部を連行した。

この苦行の1ヶ月後、我々はこのアンボン島に来て、すでに述べた事実を確認した。私たちは夜空からいくつもの燃える何かが落ちてくるのを見た。それは人間の頭を持ったドラゴンのようにも見え、その後は松明のようにも見えた。私はこれを城の中から見た。これが第一の出来事であったが、第二の出来事はさらに恐ろしく危険なものであった。その直後、ヨーロッパでの戦争、フランス、イギリス、ミュンスター、ケルンとの戦争、1672年から1678年のニュースを聞いたのである。1674年の初めには、神の怒りがテマテで始まり、震えを伴う揺れと土地の隆起があり、一方で、大きな山ガムゴノラ(実際にはハルマヘラ島にある)が爆発し、周囲のすべてのものが崩壊し、人も含めて消えてしまいました。大量の灰と軽石がアンボンまで流れてきた。

底知れぬ深海から、大量の魚が森の中に投げ込まれた。この悲惨な光景がアンボンを襲ったのは、1674年2月17日、土曜日の夕方、ヨーロッパでの戦争のために行われた祈祷会の最中だった。天気は良く、月は明るかった。その日の夜、異教徒である中国の人々は、自分たちの新年を祝うことに興じていた。人々が新年のお祝いをして楽しんでいたその最中に、大地が急に上下に揺れ動き、石造りの家が崩れて瓦礫に埋もれ、ほ

アンボイナ島およびその周辺の島々で、1674年2月17日に発生した大地震と、  
それに先立ち発生した諸地震について

とんどの人が亡くなった。ヒトウではさらに恐ろしいことに、大地が崩れたところに水が押し寄せ、それが丘の上に上り、まさに山に挑んでいるようだった。すべてが押し流されて、2000 人もの人々が溺れ、木々もろとも深みに吸い込まれた。レベレフ、セナルの丘陵地帯は、15分足らずで一掃され、深さ60~70尋の底なしの穴が空いた。2465人が死亡したと推定されている。

しかし、私は本当に神の慈悲によって奇跡的に救われた。私はワヤンの公演を見に行くつもりだったが、

その通りに来たときに、ふと悪魔にそそのかされているのではないかと思い、別の道を通ったのだ。その結果、右膝を負傷しただけで済んだ。続いて、アンボンで猛威を振るったひどい熱病が、私にも降りかかってきた。それは日曜日の朝に突然やってきて、私の中に恐怖と大きな圧迫感を与えました。

しかし、全能の主は私をすべてから救ってくださり、10月17日にここバタビアに到着した。

以上。

地図 アンボン島、ルアシ諸島およびセラム島

