

令和6年度

研究報告

第27号

Bulletin of Okinawa Industrial Technology Center
No.27, November 2025



2025年11月

研究報告

枯濁する工芸品原材料（壺屋焼化粧土）に関する調査研究
沖縄産コーヒーの物理、化学、官能特性について
泡盛のカメ香形成について -官能評価と香気成分分析-
乾燥工程の効率化に関する研究

研究ノート

バイブレーションルアーに関する流体構造連成解析

Okinawa Industrial Technology Center
沖縄県工業技術センター
(<https://www.pref.okinawa.jp/shigoto/kenkyu/1011573/>)

令和6年度 沖縄県工業技術センター研究報告 第27号 (2025)

目次

研究報告

枯濁する工芸品原材料（壺屋焼化粧土）に関する調査研究	花城可英、赤嶺欣哉..... 1
沖縄産コーヒーの物理、化学、官能特性について	豊川哲也、望月智代、玉村隆子、東 啓子..... 6
泡盛のカメ香形成について ―官能評価と香气成分分析―	玉村隆子、紀元智恵、豊川哲也、比嘉 剛..... 15
乾燥工程の効率化に関する研究	金城 洋、泉川達哉..... 19

研究ノート

バイブレーションルアーに関する流体構造連成解析	泉川達哉、與那覇 歩..... 27
----------------------------------	--------------------

※ 研究報告内に記載されている数字記号（2020 技 099 など）は、沖縄県研究評価システムにおける各研究課題の課題 ID です。

No.27 (2025)

CONTENTS

Report

An Investigative Study on the Depleting Craft Raw Material (Tsuboya Ware Engobe)	Kaei HANASHIRO, Kinya AKAMINE.....1
On Physical, Chemical, and Sensory Properties of Okinawa-Produced Coffee	Tetsuya TOYOKAWA, Tomoyo MOCHIZUKI, Takako TAMAMURA, Keiko AZUMA.....6
On Awamori's Kame Aroma Formation —Sensory Evaluation and Aroma Component Analysis—	Takako TAMAMURA, Chie NORIMOTO, Tetsuya TOYOKAWA, Tsuyoshi HIGA..... 15
A Study on Drying Process Efficiency Enhancement	Hiroshi KINJO, Tatsuya IZUMIKAWA..... 19

Notes

Fluid-Structure Interaction Analysis of Vibration Lures	Tatsuya IZUMIKAWA, Ayumu YONAHARA..... 27
---	---

研究報告

枯渇する工芸品原材料（壺屋焼化粧土）に関する調査研究

花城可英、赤嶺欣哉

沖縄県は、伝統的工芸品である壺屋焼の原材料の確保を目的として、恩納村安富祖地区で原材料の賦存調査を実施した。この調査で得られたボーリングコア中の砂質シルト層部にある白色の安富祖粘土について、その鉱物組成等の性状を分析した。その結果、安富祖地区観葉植物団地内で採取されたボーリングコアは、安富祖粘土とされる白色部の層厚が比較的厚く、粗粒部が少なかった。また鉄分が1%前後と少なく、焼成試験体は白色を呈し、壺屋焼化粧土として利用可能であることがわかった。

1 はじめに

壺屋焼は沖縄県を代表する陶器であり、伝統的工芸品に指定されている。壺屋焼は、無釉の「荒焼」と赤土に白化粧を施し釉掛けした「上焼」に大別される。この上焼に用いられる化粧土は、沖縄県内において新たに確保することが困難であり、将来的に伝統的工芸品の供給に懸念がある。

壺屋焼に使用される化粧土として、これまで、沖縄本島北部で採掘されていた喜瀬粘土及び安富祖粘土が伝統的工芸品の原料として指定されている。喜瀬粘土はホテル建設により採掘困難（1995年）となり、安富祖粘土は不法採掘による土砂流出が問題となり、地権者等から採掘の許可が得られず採掘禁止となった（2001年）。そのような状況の中、壺屋陶器事業協同組合は採掘禁止となっている崖から離れた安富祖地区観葉植物団地内の農地付近から安富祖原土を60 t確保した（2013年）。しかし、組合外の需要にも応えて販売したため、その在庫は逼迫している。

今回、沖縄県は壺屋焼原材料確保を目的として、恩納村安富祖地区でボーリング調査を実施した。その調査業務報告書（以下、報告書）において「安富祖粘土」としての試料について化学組成などの分析を行い、化粧土としての利用の可能性について明らかにしたので報告する。

2 実験方法

2-1 試料

安富祖地区のボーリング調査地点を図1に示す。以前B-5及びB-6間付近の安富祖地区観葉植物団地で安富祖粘土が確認され、採取が行われていた。またB-1、B-2、B-3及びB-9付近の北側崖部分では、露頭が確認されている。

報告書では、採取されたボーリングコアのうち砂質シルトで白色部を安富祖粘土としている。前回採取地に近く、白色部の層厚が比較的厚いB-5及びB-8では複数試料

を採取した。B-8は安富祖粘土とされる層より下部に白色部が認められたので、試料を追加した。B-4及びB-6については、白色の砂質シルトが確認できなかった。

ボーリングコアと試料採取箇所を図2に示す。なお、コアの試料採取位置は赤丸で示す。

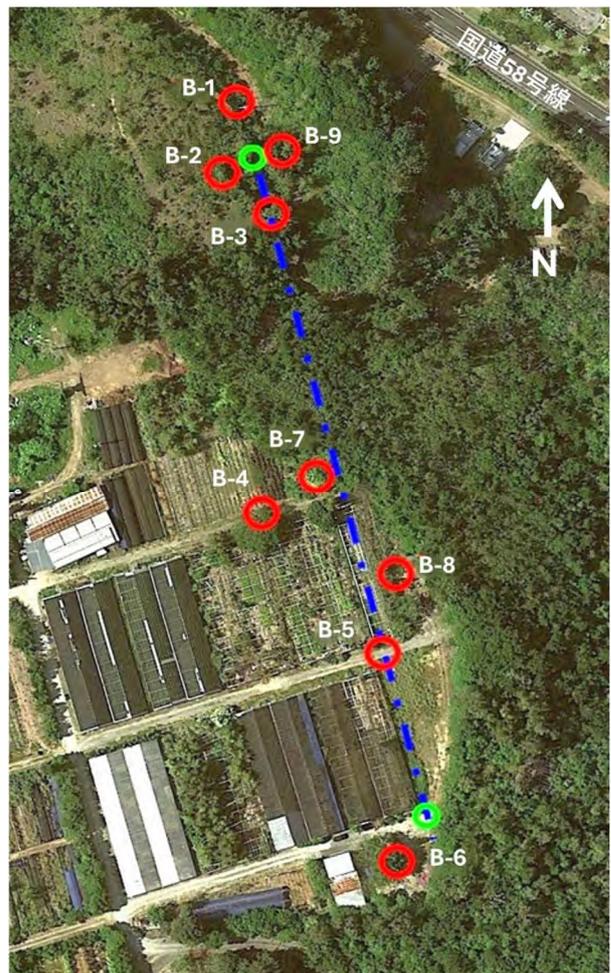


図1 安富祖地区ボーリング調査地点

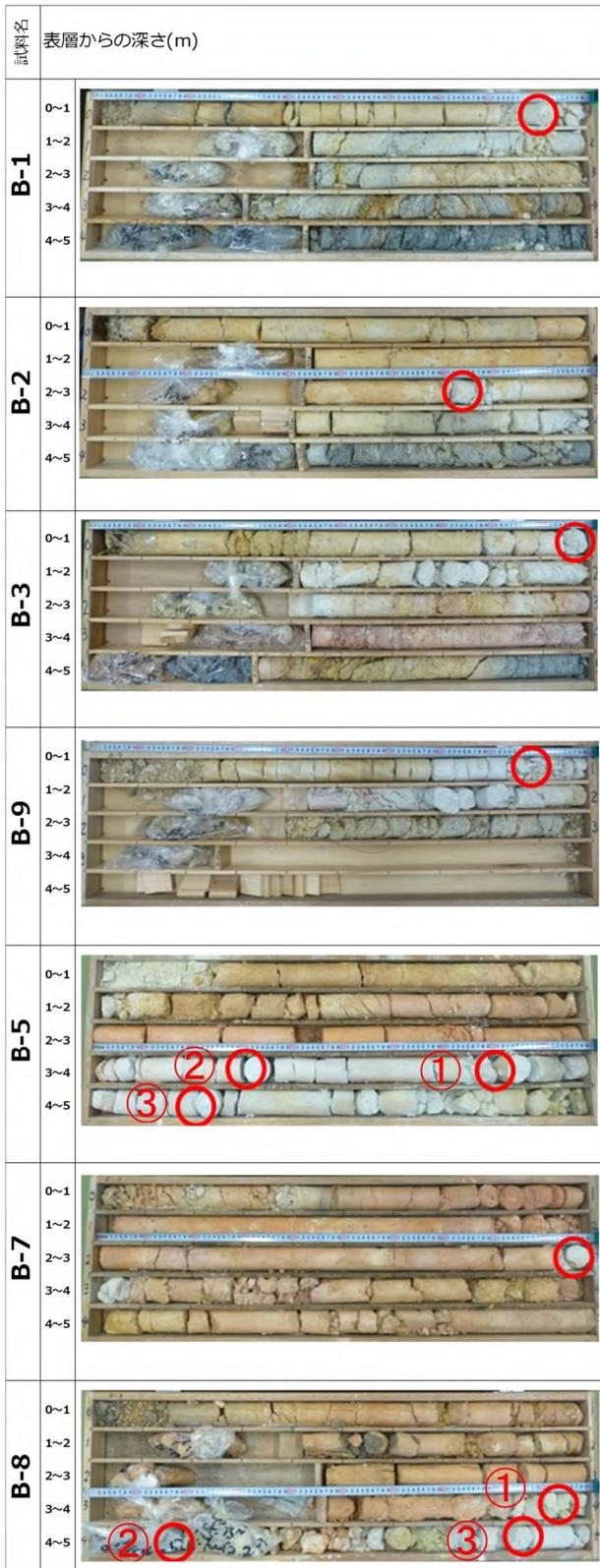


図2 各ボーリングコアと試料採取位置

各ボーリングコアから塊状の白色試料を採取し、風乾後、乳棒で軽くほぐす程度に粗砕し、100 g量り取った。粗粉碎した試料を目開き2 mmのフルイ（以下、2 mmフルイ）により分級しフルイ上に残った残渣を粗粒部とした。

2-2 化学組成及び強熱減量

化学組成は、エネルギー分散型蛍光X線分析装置（PANalytical社製、Epsilon 3 XL）を用いて測定した。試料はルーズパウダー試料容器によるFP法により求めた。強熱減量はJIS M 8853 セラミックス用アルミノけい酸塩質原料の化学分析方法を参考に、磁器るつぼを使用し、1,025℃で1時間強熱することにより求めた。

2-3 鉱物組成

X線回折装置（RIGAKU社製、UltimaIV）を用いて測定した。

2-4 粒度分布

2 mmフルイ下試料を用い、レーザ回折散乱式粒度分布装置（マイクロトラック・ベル社製、MT3300EX II）を用いて、水を溶媒として湿式で測定した。

2-5 焼成試験

試料に水を加え、混練してテストピースを作成し、小型電気炉を用い、1,250℃で焼成した。焼成試験体は目視により呈色を確認した。

3 実験結果及び考察

3-1 2 mmフルイ試験結果

安富祖粘土の層厚と試料採取位置、2 mmフルイ試験結果を表1に示す。

B-5及びB-8のコアから複数の試料を採取し、試料名をB-5①、B-5②、B-5③、B-8①、B-8②及びB-8③とした。

表1 安富祖粘土の層厚と試料、フルイ試験結果

調査地点	深度GL-(m)		層厚(m)	試料名	採取位置(m)	2mm< (%)
	上端	下端				
B-1	0.8	1	0.2	B-1	0.9	30.5
B-2	2.7	2.8	0.1	B-2	2.7	47.3
B-3	0.8	1.5	0.7	B-3	0.9	27.8
B-9	0.7	1	0.3	B-9	0.8	23.8
B-5	3	4.7	1.7	B-5①	3.3	1.8
				B-5②	3.8	1.8
				B-5③	4.2	29.5
B-7	2.95	3.05	0.1	B-7	2.9	3.7
B-8	3.85	4.6	0.75	B-8①	3.9	0.2
				B-8②	4.1	0.5
				B-8③	4.8	23.3

図1において安富祖粘土の露頭が確認できる崖付近のB-1、B-2、B-3及びB-9は、安富祖粘土の層厚が0.1 m～

0.7 mと比較的薄く、また2 mm以上の粗粒部が23.8%～47.3%と高くなっている。このことから、化粧土として利用できる可能性は低いと考えられる。

これに対し、B-5は安富祖粘土の層厚が1.7 mと比較的厚く、B-8は安富祖粘土の層厚が0.75 mであるが、さらに下層に白色部が確認できる。これら試料の安富祖粘土上層は2 mm以上の粗粒分が少ない。しかしながら、B-5及びB-8とも深度が深い試料ほど、粗粒粒分が20%を越えて多い。

3-2 化学組成及び強熱減量

試料の化学組成と強熱減量を表2に示す。

表2 試料の化学組成と強熱減量

試料名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	強熱減量 (%)
B-1	64.0	21.2	3.01	1.06	1.25	4.41	0.11	4.9
B-2	62.4	24.3	1.08	1.20	0.81	4.49	0.19	5.4
B-3	59.5	26.3	1.14	1.23	0.87	5.01	0.12	5.7
B-9	61.9	24.8	0.87	1.32	0.84	5.58	0.13	4.3
B-5①	73.4	17.0	0.76	0.64	0.91	2.44	-	4.8
B-5②	77.7	13.6	0.64	0.51	0.65	1.72	-	5.1
B-5③	78.8	12.2	0.83	0.35	0.31	1.14	-	5.2
B-7	72.1	20.0	2.16	0.28	0.90	1.85	-	2.6
B-8①	74.8	17.6	1.22	0.65	0.92	2.61	-	2.1
B-8②	73.6	18.4	1.30	0.64	0.97	2.60	-	2.3
B-8③	77.8	15.4	0.75	0.38	0.41	1.23	-	3.7

試料のうち、安富祖粘土の露頭が確認できる崖付近のB-1、B-2、B-3及びB-9は2 mm以上の粗粒部分が多く、化学組成はSiO₂が60%前後、Al₂O₃が20%台であった。これに対し、安富祖地区観葉植物団地のB-5及びB-8はSiO₂が70%を越えて多く、Al₂O₃が10%台と少ない。

B-1、B-7以外の試料は、Fe₂O₃が1%前後と比較的少なく、TiO₂が1%前後であるため、TiO₂の影響により若干着色する可能性もあるが、白化粧土として使用できると考えられる。

また、今回採取した試料はNa₂Oが少なく、相対的にK₂Oが多い。

3-3 鉱物組成

安富祖粘土試料B-3のX線回折結果を図3に示す。

各試料ともピーク高さに差はあるが、粘土鉱物の一種であるセリサイトと石英のピークが確認できる。

セリサイトの理想化学組成はKAl₂AlSi₃O₁₀(OH)₂であり、カリウムを含む粘土鉱物である。X線回折結果は、

ナトリウムが少なく、カリウムが多いという化学分析結果を裏付けている。

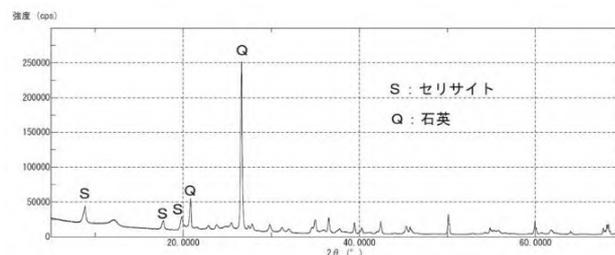


図3 X線回折結果 (B-3)

3-4 粒度分布

試料B-5①、②、③の粒度分布測定結果を図4に示す。

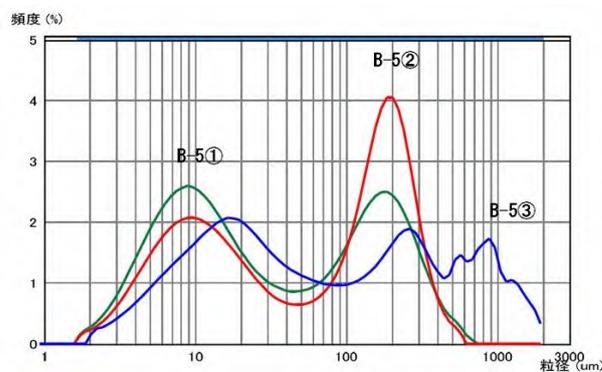


図4 粒度分布測定結果 (B-5)

各試料とも10 μm及び200 μm付近に粒度分布のピークを示している。また、2 mm以上の粗粒部が多いB-5③の試料は1,000 μm付近にも複数のピークが見られる。

安富祖粘土は、風化残留性粘土であるため粘土分が少なく、母岩に由来する珪石粒と珪砂を多く含む²⁾ため、このような粒度分布を示していると考えられる。

今回得られた安富祖粘土を化粧土として利用する場合、すい簸、あるいは粉碎処理し、木節粘土などを配合する必要があると考えられる。

3-5 焼成試験

1,250℃で焼成した試験体を図5に示す。

焼成した試験体はFe₂O₃の量により、呈色に違いが見られる。Fe₂O₃を3%含むB-1は黄土色を呈しており、化粧土として利用は難しいと考えられる。Fe₂O₃が1%前後のB-2、B-3、B-9、B-5及びB-8は白色を呈しており、化粧土として利用可能と考えられる。



図5 焼成試験体 (1, 250°C)

4 まとめ

安富祖粘土の露頭が確認できる崖付近のボーリング地点B-2、B-3及びB-9は安富祖粘土とした白色の砂質シルト層が0.1 m～0.7 mと薄い上に、2 mm以上の粗粒部が23.8%～47.3%と多い。 Fe_2O_3 は1%以下で、焼成体は白色を呈しているが、大量に確保する化粧土としての利用は難しいと考えられる。

安富祖地区観葉植物団地のボーリング地点B-5及びB-8は安富祖粘土層が比較的厚く、その上層は2 mm以上の粗粒部が少ない。 Fe_2O_3 は1%以下となり、焼成体は白色を呈している。粒度分布は10 μm 及び200 μm 付近にピークを示しており、粉碎後に粘土を配合することにより、化粧土として利用可能であると考えられる。

本研究は、令和6年度実施の工芸産業育成対策費「工芸原材料供給強化・支援事業」のうち、「枯渇する工芸品原材料（壺屋焼化粧土）に関する調査研究（2022技003）」として実施した。

参考文献

- 1) 沖縄県商工労働部ものづくり振興課：壺屋焼原材料土質調査報告書，28 (2024)
- 2) 照屋善義，沖縄の陶器技術と科学，39 (2000)

An Investigative Study on the Depleting Craft Raw Material (Tsuboya Ware Engobe)

Kaei HANASHIRO, Kinya AKAMINE

Okinawa Industrial Technology Center

A geological survey was conducted in the Afuso District of Onna Village to estimate the amount of available raw materials for Tsuboya ware, a traditional craft product of Okinawa Prefecture, with the aim of ensuring the stability of their supply. We studied the mineralogical composition and other properties of the white Afuso clay in the sandy silt layers of the boring cores obtained from this survey. The results revealed that the drilling core sample from the ornamental foliage plant park in the Afuso District contained a relatively thick white layer, identified as Afuso clay, and had a low proportion of coarse particles. With a low iron content of around 1 percent, calcined specimens exhibited a white color, indicating that the sampled clay can be used as Tsuboya ware engobe.

沖縄産コーヒーの物理、化学、官能特性について

豊川哲也、望月智代、玉村隆子、東 啓子

沖縄産コーヒーの特性を主要産出国で生産されたコーヒーと比較することで評価した。沖縄産生豆の物理的特徴は小粒で丸みを帯びており肉薄でかさ密度が低く、焙煎による膨化が小さいことである。化学的には、他産地のコーヒーと比較して糖分やポリフェノール量が少なく滴定酸度および粗脂肪含有量が同程度であった。官能特性として香りが穏やかであり、甘み・苦味が少なく適度な酸味が感じられるすっきりした風味であった。

1 はじめに

コーヒーは、北緯25度から南緯25度に広がる「コーヒーベルト」と呼ばれる赤道付近の地域で栽培されている。北緯24～28度に位置する沖縄県は、やや高緯度であるが海洋性気候の影響もあり、コーヒー栽培の北限地となっており、将来的には沖縄の特産品となることが期待されている。現在のところ沖縄産コーヒーの年間取引量は約5トンと少なくその希少性から生豆が1 kgあたり5～6万円という高値で取引されている。一方で、品質にはばらつきがあり品質に関する評価は定まっていない。ブランドとして認知されるためには、品質特性の明確化と、それを活かす生産・精製・焙煎方法の確立が不可欠である。高品質なアラビカ種コーヒーは、熱帯の標高1,000～2,000 mの乾燥した高地で栽培され、気温は15～25℃、昼夜の寒暖差が小さいことが望ましいとされている²⁾。気温の影響は大きく、30℃を超えると成育に支障が始め、35℃を超えると落花や落果が発生する。また、10℃以下では低温障害によって落葉が見られる。沖縄はコーヒー栽培が可能な地域ではあるが、那覇の夏季の最高気温は概ね31℃前後であり、近年の地球温暖化の影響により、2024年の那覇における日中の平均最高気温は、7月に33.9℃に達し、10月までの4か月間は30℃を上回っている³⁾。さらに、台風による風害や塩害、強烈な日差し、多湿な気候もコーヒー栽培には不向きである。とはいえ、このような過酷な環境こそが沖縄産コーヒーの風味に独特の個性を与えているとも言える。沖縄産コーヒーが世界の中で品質面でも存在感を示すためには、その特徴を明確化し、特性を最大限に引き出す精製・焙煎・抽出方法の開発が求められる。本稿では、主要産出国で生産されたコーヒーと沖縄産コーヒーを比較することで、沖縄産コーヒーの特性を明らかにすることを目的とする。

2 実験方法

2-1 原料

コーヒー生豆は、那覇市のコーヒー店より購入した。

2-2 粒径、水分、一定容積当たりの重量および粒数

粒径はノギスにより長径、短径、厚さを測定した。水分はコーヒー豆水分計（株式会社ケット科学研究所社製、PM-450）にて測定した。かさ密度である一定容積当たりの重量および粒数は水分計に付属のカップ（240 cm³）にコーヒー豆を充填し重量と粒数を計測した。

2-3 コーヒー生豆の粉砕

コーヒー生豆は超遠心粉砕機（Retche社、MZ200）で1.0 mmのスクリーンで粉砕し、粉砕生豆を調製した。

2-4 焙煎および焙煎豆の粉砕

コーヒー豆の焙煎は焙煎機（Ikawa社製、PRO50）を用いて行った。40 gの生豆を用いて排気温度110℃で焙煎を開始し、20秒後80℃、89秒後に150℃、199秒後に180℃、330秒後に192℃、660秒後に205℃、205℃達温後に1分間の冷却とする排気プロファイルで焙煎を行った。このプロファイルで最高品温は約240℃程度となった。粉砕は、電動式グラインダー（デロンギ社製、KG521J-M）を用いて目盛り9で中挽きし焙煎粉砕豆を調製した。

2-5 糖類および酸度の測定

粉砕生豆1 gに20 mLのイオン交換水を添加し沸騰水浴中で20分間保持した。遠心分離機（1,000 rpm、15 min）で固液分離し上清を回収した。沈殿物にイオン交換水10 mLを添加し再度沸騰水浴中で10分加熱抽出した。加熱抽出と固液分離を4回繰り返し、回収上清を合わせて100 mLにイオン交換水で定容した。ショ糖、ブドウ糖、果糖の測定はE-kit（r-biopharm社）を用い同社の提供するプロトコル⁴⁾に従って測定した。酸度は熱水抽出液に0.01 Mの水酸化ナトリウム溶液を用いてpH 8.3を終点として滴定した。

2-6 ポリフェノール量および粗脂肪の測定

ポリフェノール量および粗脂肪は粉碎生豆を試料として、日本食品標準成分表2015年版（七訂）分析マニュアル⁵⁾に則りフォーリン・チオカルト法およびクロロホルム-メタノール混液抽出法にて測定した。なお、ポリフェノール量はクロロゲン酸量に換算した。

2-7 香気成分の分析

焙煎粉碎豆4 gに対し80~90℃の水75 mLを加え2分間静置し、上清を20 mL容バイアルに5 mL密封し、80℃で10分間保温したのちヘッドスペースガスを分析装置（Alpha MOS製、フラッシュ GC ノーズ HERACLES II）に導入した。分析条件を表1に示す。分析で得られた各ピークについては、保持指標&においライブラソフト ArochemBaseを用いて成分を推定した。

表1 フラッシュGCノーズ Heracles II 分析条件

注入量	5000 μl
注入速度	250 μl/s
インキュベーション温度	80℃
インキュベーション時間	10min
シリンジ温度	90℃
トラップ温度	70℃
トラップ時間	30s
インジェクタ温度	220℃
バルブ温度	250℃
注入時間	25s
初期圧	80kPa
最終圧	180kPa
昇圧速度	1.67kPa/s
昇温条件	40℃ (10s) → 1℃/s → 150℃ → 1.5℃/s → 250℃ (53s)
検出器	FID
検出器温度	260℃

表2 低産地・高産地のコーヒーの特徴

	色	豆質	香り	酸味	渋み	コク	エイジング	焙煎	価格
低産地	薄緑色	柔らかい	弱い	弱い	弱い	少ない	不適	容易	安価
高産地	深緑色	堅い	強い	強い	強い	多い	適	難しい	高価

『田口護のコーヒー大全』より引用

2-8 官能試験

官能検査はSociety Coffee AssociationsのProtocols and Best Practices⁶⁾に則ってカップテストを実施した。また、ドリップコーヒーでの評価は10 gの粉碎豆を88℃の水道水150 mLで抽出し、コーヒー抽出液を吐き出さずに飲み込み評価した。

2-9 抽出効率の測定

ドリップコーヒーに関し、可溶性固形分TDS (Total dissolved Solid) を測定し、抽出量PE (Percent extraction) を求めた⁷⁾。TDSは、ブリックス値に0.75を乗じて求め、PEは下記の式より算出した¹²⁾。

$$PE(\%) = TDS \times \text{コーヒー抽出液量} / \text{粉碎コーヒー量} (g)$$

2-10 統計解析

統計解析はExcel (マイクロソフト社)、エクセル統計、エクセル多変量解析、エクセル数量化理論 (いずれもエスミ社) およびAlfaSoft (アルファモス社) にてt-検定、ボンフェローニの多重比較検定および主成分分析を行った。

3 実験結果および考察

3-1 沖縄産コーヒーの物理的特性

表2に成書²⁾より引用した低産地、高産地コーヒーの特徴を示す。コーヒー生豆の形状や密度およびその均質性は焙煎・抽出をするうえで重要な特性であり、ひいてはコーヒーの風味を決定づける要因のひとつである。輸入されたコーヒー豆には、極端に大きさの違う豆や、虫食い、異物、未成熟豆、カビ豆などが混在する。こうした不良豆は焙煎時に焙煎ムラや風味不良の原因となるため焙煎前に取り除かれる。また、グレードの低い豆ほど不良豆の混入率が高い。そこでArabica coffee defect hand book⁷⁾に従い不良豆を選別除去した。表3に試験に供したコーヒーの産地、精製法、乾燥法などの諸データを示す。

沖縄産コーヒーの物理特性に関し長径、短径、厚さおよびかさ密度を測定した。不良豆選別除去前の物理特性

表3 コーヒー生産諸元

サンプル名	産出国	生産地域	生産者	品種	標高(m)	精製方法	乾燥方法	Flavor*	グレード
ブラジル	ブラジル	São Sebastião da Gramma	RECREIO農園	Yellow bourbon	1200 - 1400	Natural	パティオ	Chocolate, Cacao, Roasted nuts, Caramal	Specialty
エチオピアB	エチオピア	Banko Gotiti, Gargari Kebele, Yirgacheffe	多くの小農園	kurume	1900	Natural	アフリカンベッド	Blueberry, Floral, Muscat, Syrupy, Tea	Top Specialty
エチオピアK	エチオピア	Shakiso, Oramia, Guji	Kayon Mountain 農場	74110, 74112	1900 - 2200	Washed	アフリカンベッド	Milk chocolate, White peach, Grape, Floral	Top Specialty
ケニア	ケニア	Mugaga, Nyeri	Mugaga Farmers協同組合	SL28, SL34, Batian, Ruiru11	1684	Full-Washed	アフリカンベッド	Earl Grey, Caramel, Roasted almond	Top Specialty
インドネシア	インドネシア	Gayo, Ache, Sumatra	Ribang Gayo Musara協同組合	Abyssinia, Ateng, Caturra, Gayo, Timtim, Typica	1400 - 1500	Natural	アフリカンベッド/ パティオ	Red wine, Caramel, Herbal, Black cherry	Top Specialty
ペルー	ペルー	Ortiz Arrieta, Lonya Grande, Utcubamb	Miraflores農場	Typica	1720 - 1914	Washed	アフリカンベッド	Cinnamon, Brown sugar, Floral, Citrus, Tea	Top Specialty
沖縄	日本	沖縄県	2農園の混合	未確定	200	Honey	アフリカンベッド		

*) 購入したコーヒー店の評価

表4 不良豆選別除去前の粒径、水分、かさ密度、粒数

	長径(mm)	短径(mm)	厚さ(mm)	水分(%)	240cm ³ あたりの重量(g)	240cm ³ あたりの粒数
ブラジル	8.60 ^b ± 0.94	6.58 ^c ± 0.49	3.86 ^{bc} ± 0.32	9.3	168.1	1178
エチオピアB	7.04 ^b ± 0.87	5.40 ^a ± 0.26	3.64 ^{ab} ± 0.68	10.1	178.6	1875
エチオピアK	8.26 ^b ± 1.18	6.06 ^b ± 0.50	3.86 ^{bc} ± 0.31	9.3	181.7	1499
インドネシア	9.64 ^c ± 1.28	7.33 ^d ± 0.56	4.43 ^d ± 0.40	10.0	173.4	840
ケニア	9.40 ^c ± 0.94	7.52 ^d ± 0.29	4.38 ^d ± 0.32	9.8	177.5	1251
ペルー	9.49 ^c ± 1.23	6.81 ^c ± 0.54	4.07 ^c ± 0.38	9.9	176.0	1024
沖縄	7.55 ^a ± 0.92	6.04 ^b ± 0.64	3.40 ^a ± 0.37	9.6	129.6	1687
各産地平均	8.57	6.53	3.95	9.7	169.3	1336

数値は平均値 ± 標準偏差で示す。

n=50, 平均値の上付き文字は、同じ文字(アルファベット)に有意差を認めないことを示す。

表5 不良豆選別除去後の粒径、水分、かさ密度、粒数

	長径(mm)	短径(mm)	厚さ(mm)	水分(%)	240cm ³ あたりの重量(g)	240cm ³ あたりの粒数
ブラジル	9.06 ^c ± 0.61	6.55 ^c ± 0.61	3.53 ^b ± 0.33	9.2	169.8	1178
エチオピアB	7.37 ^a ± 0.74	5.41 ^a ± 0.21	3.46 ^b ± 0.19	10.3	190.8	1927
エチオピアK	8.21 ^b ± 0.73	5.89 ^b ± 0.42	3.62 ^b ± 0.30	9.4	183.0	1412
インドネシア	9.89 ^{de} ± 1.06	7.08 ^{de} ± 0.55	4.02 ^{cd} ± 0.36	9.7	176.6	957
ケニア	9.52 ^{cd} ± 0.74	7.33 ^e ± 0.20	4.14 ^d ± 0.58	9.5	180.5	963
ペルー	10.13 ^e ± 0.68	7.04 ^d ± 0.29	3.90 ^c ± 0.16	9.3	177.0	972
沖縄	7.96 ^b ± 0.38	6.09 ^b ± 0.40	3.20 ^a ± 0.27	9.8	150.0	1472
各産地の平均	8.88	6.48	3.70	9.6	175.4	1299

数値は平均値 ± 標準偏差で示す。

n=50, 平均値の上付き文字は、同じ文字(アルファベット)に有意差を認めないことを示す

表6 焙煎後の粒径、水分、かさ密度、粒数

	長径(mm)	短径(mm)	厚さ(mm)	水分(%)	240cm ³ あたりの重量(g)	240cm ³ あたりの粒数
ブラジル	9.74 ^{bc} ± 1.35	8.10 ^c ± 0.58	4.77 ^b ± 0.37	1.5	95.8	790
エチオピアB	8.12 ^a ± 1.05	6.57 ^a ± 0.48	4.26 ^a ± 0.35	2.2	96.7	1202
エチオピアK	9.22 ^b ± 1.15	7.15 ^b ± 0.64	4.70 ^b ± 0.43	1.5	89.7	833
インドネシア	11.58 ^e ± 1.09	8.68 ^d ± 0.70	5.25 ^c ± 0.41	1.9	83.2	511
ケニア	10.38 ^{cd} ± 1.01	8.56 ^d ± 0.43	5.11 ^c ± 0.35	1.5	94.2	606
ペルー	10.65 ^d ± 1.16	8.08 ^c ± 0.63	5.08 ^c ± 0.49	1.8	98.3	644
沖縄	7.87 ^e ± 0.86	6.61 ^a ± 0.68	4.04 ^a ± 0.54	1.5	83.1	1072
各産地の平均	9.65	7.68	4.74	1.7	91.6	809

数値は平均値 ± 標準偏差で示す。

n=50, 平均値の上付き文字は、同じ文字(アルファベット)に有意差を認めないことを示す

を表4に、除去後の特性を表5に示す。沖縄産コーヒーは、主要産出国のコーヒーと比較して長径が顕著に短く、短径は中程度であり、厚さは顕著に小さいことが認められた。水分に顕著な違いは認められない。一方、かさ密度である240 cm³あたりの重量は最も小さく、粒数は2番目に多かった。これは、沖縄産コーヒー豆が小粒で丸みを帯びており肉薄で密度が低いコーヒー豆であると言い換えることができる。不良豆選別除去により長径はやや大きくなり、短径はほとんど変化せず、厚さは小さくなった。当然のことながら、ばらつきは小さくなった。不良豆選別除去により、産地間の相対的な物理特性に大きな違いは認められなかった。焙煎によりコーヒー豆の物理特性は大きく変化する⁸⁾。焙煎の進行によりコーヒー豆内部の水分が気化するとともに、熱分解などによるガスが発生し、コーヒー豆が膨張し表面や内部にひび割れが生じる。また、メイラード反応などにより色調が茶色から黒色へと変化するとともに、細胞壁の破壊などが生じコーヒー豆は硬くもろくなる。焙煎前後のコーヒー豆の外観を図1に、焙煎後の物理的特性を表6に示す。焙煎により沖縄を除く各産地のコーヒー豆は長径、短径、厚さとも増大した。一方、沖縄産コーヒーの長径、短径は焙煎の前後でほとんど変化せず、厚さの変化も小さく、膨化の程度は低かった。沖縄産焙煎コーヒー豆の水分は低く、そのため一定容積当たりの重量は最も小さく、粒数は2番目に多かった。以上の結果から、沖縄産コーヒーは焙煎で膨らみにくく、かさ密度が低い豆であるといえる。

3-2 沖縄産コーヒー生豆の化学的特性

各産地のコーヒー生豆の糖分（ショ糖、ブドウ糖、果糖）、ポリフェノール量および滴定酸度および粗脂肪量を表7に示す。糖類はコーヒーの甘みの主成分であり、

生豆ではショ糖5-9%、ブドウ糖0.1-0.3%、果糖0.1-0.3%で構成⁹⁾されている。コーヒーに含まれるポリフェノールで重要な成分はクロロゲン酸であり、クロロゲン酸はコーヒーの苦味に大きく関与している。生豆を焙煎すると、クロロゲン酸の脱水反応が進行しクロロゲンラクトン類が生じる。これがコーヒーの独特な苦味の呈味成分である⁸⁾と考えられている。酸度は、酸味の指標でありコーヒー生豆ではクロロゲン酸、クエン酸、リンゴ酸、乳酸などが主要な酸類¹⁰⁾である。沖縄産コーヒーは糖類およびポリフェノール量が各産地のコーヒー豆と比較して少なく、酸度は高いことが認められた。コーヒー豆には約7-17%の脂質が含まれ、その約75%がトリアシルグリセロールで、この他、コーヒーに特有の脂質としてカフェストールなどのジテルペン化合物なども含まれる¹¹⁾。しかしながら、脂質含量が風味に与える影響への明確な報告はない。脂質は焙煎時に様々な化合物を溶かし込む溶媒として反応の場を担っていると考えられている⁸⁾。沖縄産コーヒーの粗脂肪含有量は、14.5 g/100 gでほぼ各国の平均値に近い値であった。

3-3 コーヒー抽出液の特性

カップテストによる官能評価を行い、各産地のコーヒーの相対的位置をイメージスケール上にマッピングした（図2）。スケールは、横軸に「複雑」と「単純」を、縦軸に「軽い」と「重い」を配置した。沖縄産コーヒー抽出液は、相対的に軽くて単純な風味であると特徴づけられた。ただし、あくまで相対的な特徴であり、実際には風味が薄いかか乏しいといった印象はなく、フルーツ感もありバランスの取れた風味であった。ドリップコーヒーを調製し、コーヒーの濃さの目安¹²⁾であるTDS（Total dissolved Solid）と、抽出効率の目安であるPE（Percent extraction）を算出した（表8）。抽出液の

表7 糖分、ポリフェノール濃度、滴定酸度、粗脂肪

	ショ糖 (mg/100g)	ブドウ糖 (mg/100g)	果糖 (mg/100g)	総糖量 (mg/100g)	ポリフェノール* (mg/100g)	滴定酸度 (0.10N ml)	粗脂肪 (g/100g)
ブラジル	8.4	0.15	0.46	8.98	6.4	0.139	14.8
エチオピア B	7.3	0.26	0.35	7.89	7.8	0.154	15.9
エチオピア K	7.3	0.17	0.20	7.63	7.6	0.148	14.7
ケニア	8.9	0.24	0.03	9.17	7.6	0.129	15.0
インドネシア	8.2	0.14	0.49	8.80	8.0	0.115	13.6
ペルー	7.0	0.07	0.22	7.29	7.0	0.145	14.8
沖縄	6.0	0.25	0.47	6.75	6.0	0.166	14.5
サンプル平均	7.6	0.2	0.3	8.1	7.2	0.142	14.8



図1 生豆および焙煎豆の外観。図中のバーは1cmを示す。

TDSおよびPEともに沖縄産コーヒー抽出液が最低値を示した。TDSが低値であることは、官能検査で沖縄産コーヒーが軽くて単純な風味であったことと符合する。TDSは1.15～1.35、PEは18～22が適正の目安とされている。沖縄産コーヒーは、適用した抽出条件で濃さは適正であるが抽出効率が若干弱いことが示された。

3-4 ガスクロマトグラフ分析

コーヒー抽出液を試料としてガスクロマトグラフ分析を行った。検出ピークから識別指数が0.5以上を選択し主成分分析を行った。図3に各サンプルの主成分得点を散布図で示す。抽出液の香りに関する官能検査を実施し第1主成分は香りの軽重を表していると解釈した。負符号側のブラジル産生豆から抽出したコーヒーがコゲやローストの重い香りを主体としているのに対し、正符号側の沖縄産豆やエチオピアBから抽出したコーヒーは果実や花を特徴とする軽い香りであった。主成分1に関する

ピークの主成分得点をみると、負符号側に沸点の高い重い香り成分の主成分得点が多くみられ、正符号側に沸点の低い軽い香り成分の主成分得点が高いことが認められた（データは示さない）。これは、官能検査の結果と符合する。主成分2の特徴として正符号側にブラジル、インドネシア、エチオピアBのナチュラル精製（果肉をつけたまま乾燥を行う方法）および沖縄のハニー精製（ミッシュレージを付けたまま乾燥を行う）のグループが配位しており、負符号側にケニア、エチオピアKおよびペルーのワッシュド精製（多量の水でミッシュレージを取り除く）グループが配位している。一般的に、ナチュラル精製およびハニー精製したコーヒーの香りの特徴は、ベリーやトロピカルフルーツが強く複雑で奥深い香りであり、ワッシュド精製は、フローラルノートや柑橘類のような爽やかな香りで雑香が少なくすっきりしているといわれている。このことから、第2主成分は香りの質であると解釈した。

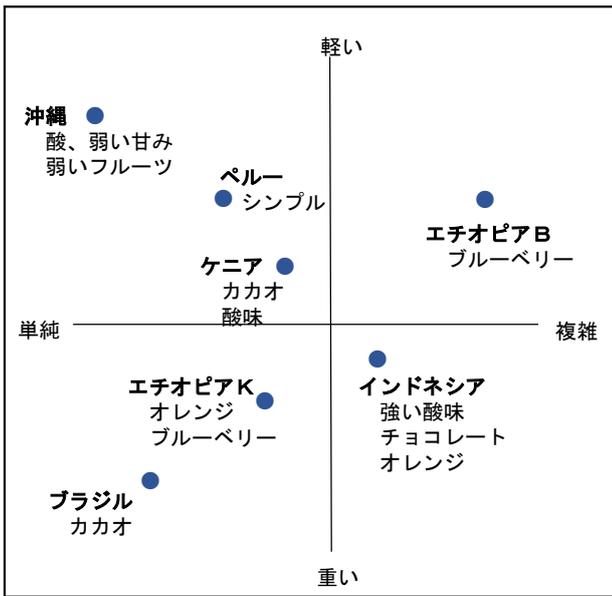


図2 各国産コーヒーの官能マップ

表8 TDSとPE

	TDS	PE
ブラジル	1.3	17.1
エチオピアB	1.3	16.6
エチオピアK	1.5	19.3
インドネシア	1.5	19.0
ケニア	1.5	19.1
ペルー	1.5	17.6
沖縄	1.2	14.7

4 まとめ

沖縄産生豆の物理的特徴は、小粒で丸みを帯びており肉薄でかさ密度が低いことである。化学的には、他産地のコーヒーと比較して糖分やポリフェノールが少なく滴定酸度が同程度であることが認められた。また、実際にコーヒーを抽出して評価した沖縄産コーヒーの特徴は、他産地と比べ香りが穏やかであり、甘み・苦味が少なく、適度な酸味が感じられるすっきりした風味であった。コーヒーの風味は、焙煎や抽出によりある程度矯正可能である。一般的に、焙煎度合いが深くなればなるほど、苦味が強くなり、焙煎度合いが浅いほど、酸味の強

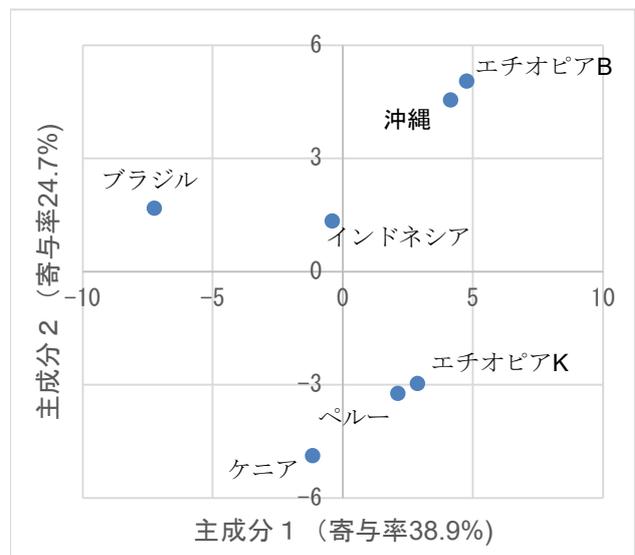


図3 ガスクロマトグラフより作成した主成分得点の散布図

い傾向になる。沖縄産豆は小粒で扁平であるが、膨化の程度は低い。これは、焙煎中のコーヒー豆の膨張に伴って豆の構造が壊れるときに聞こえるハゼ音が沖縄産豆ではほとんど聞こえないことからもうかがえる。こうした特徴は、浅煎りから中煎りに向いた特性だと考えられる。

参考文献

- 1) 一般社団法人沖縄コーヒー協会ホームページ、
<http://okinawacoffee.jp/producer/> (参照日 2025年6月19日)
- 2) 田口護著、田口護のコーヒー大全、pp 10-11、NHK出版、東京都 (2023)
- 3) 気象庁 HP、
https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/monthly_s3.php?prec_no=91&block_no=47936&year=&month=&day=&view=a2 (2025) (参照日 2025年6月19日)
- 4) Enzytec™ Lequid Sample preparation guide、r-biopharm
- 5) 日本食品標準成分表2015年版(七訂)分析マニュアル、
https://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365297.htm (参照日 2025年6月19日)
- 6) Protocols and Best Practices、Society Coffee Associations、
<https://www.scith.coffee/wp-content/uploads/2021/03/SCA-Protocols--Best-Practices.pdf> (参照日 2025年6月19日)
- 7) Specialty coffee Association of America、
<https://cdn.coffeestrategies.com/wp-content/uploads/2020/08/Green-Coffee-Defect-Handbook.pdf> (参照日 2025年6月19日)
- 8) 旦部幸博、コーヒーの科学、pp181-194、株式会社講談社、東京都 (2023)
- 9) Hosam E. et al, Microbiological and Chemical Characteristics of Wet Coffee Fermentation Inoculated With *Hansinaspota uvarum* and *Pichia kudriavzevii* and Their Impact on Coffee Sensory Quality, Sec. Food Microbiology, 12 (2021)
- 10) Anna P. et al, Organic acids produced during fermentation and sensory perception in specialty coffee using yeast starter culture, Food Research International 128 (2020)
- 11) Karl Speer and Isabelle Kolling-Speer, The lipid fraction of the coffee bean, Braz. J. Plant Physiolm 18(1):201-216(2006)
- 12) Huimin Liu et al, Dual-frequency countercurrent

ultrasonic-assisted extraction of the cold brew coffee and in situ real-time monitoring of extraction process, Ultrasonics Sonochemistry 111 (2024)

- 13) Protocols and Best Practices, Specialty coffee association
- 14) Towards a New Brewing Chart 25, Issue 13,
<https://sca.coffee/sca-news/25/issue-13/towards-a-new-brewing-chart>

On Physical, Chemical, and Sensory Properties of Okinawa-Produced Coffee

Tetsuya TOYOKAWA, Tomoyo MOCHIZUKI, Takako TAMAMURA, Keiko AZUMA

Okinawa Industrial Technology Center

We comparatively assessed the characteristics of coffee produced in Okinawa and those of coffee from major producing countries. The green coffee beans from Okinawa are physically characterized as being small in size, round in shape, thin in thickness, and with low bulk density and low expansion during roasting. Chemically, these beans have lower sugar and polyphenol content than their counterparts from other producer regions, while similar to the latter in titratable acidity and crude fat content. Regarding sensory properties, the Okinawan coffee was noted for its mild aroma along with a refreshing, moderately sour flavor, accompanied by low sweetness and bitterness.

泡盛のカメ香形成について

—官能評価と香気成分分析—

玉村隆子、紀元智恵、豊川哲也、比嘉 剛*

泡盛は沖縄を代表する蒸留酒であり、特に古酒（クース）と呼ばれる長期熟成された泡盛は、その香味特性から高い評価を受けている。中でも、甕（カメ）による貯蔵は古くから行われており、「カメ香」と称される独特の香りが、泡盛古酒の品質を特徴づける要素のひとつとして知られている。しかしながら、このカメ香が発現するメカニズムおよび成分については、未だ特定されていない。そこで本研究では、カメ香に関与する成分を明らかにするため、カメ香の官能評価と香気成分分析を行った。

1 はじめに

泡盛の香味表現と成分については、泡盛フレーバーホイールにまとめられており、「バニラ」の香りを呈するバニリン、「カラメル様」の香りを呈するソトロンなど、それぞれの香りについて起因する成分が特定されているものがある一方、「トーフナビーかざ」や「ウーヒージャーかざ」、「白梅香かざ」²⁾など、成分が不明なものもある。中でも、泡盛の「カメ香」はカメ貯蔵泡盛の特徴であるにも関わらず成分は不明であり、カメからの溶出成分によるのか、カメにより香りが異なるかなどの発現メカニズムについて具体的な知見がほとんどない。カメに関する研究としては、新酒とカメ貯蔵古酒の一般成分の差異³⁾やミネラル分に着目した報告⁴⁾、成分特性と熟成度合いの関係⁵⁾についての報告などがあるが、カメ香を呈する成分は不明である。伝統的に行われているカメ貯蔵古酒の価値を明確化するためには、カメ香の成分と生成メカニズムを明らかにすることが必要である。そこで本研究では、カメ香に関与する香気成分の解明を目的として、官能評価と機器分析を組み合わせた検討を行った。

2 実験方法

2-1 試料

カメ香確認のためのモデル試料として、泡盛またはエタノールに、工業技術センターで保管されていた泡盛貯蔵用カメをハンマーで粉碎後、ポットミルで摩砕して得られた微粉碎粉を浸漬したものをを用いた。すなわちステンレス瓶にカメの微粉碎粉500 gを入れ、希釈アルコール（アルコール度数60%）または、新酒（アルコール度数44度）を1 L注ぎ、それぞれモデル試料（エタノール）およびモデル溶液（泡盛）として調整し、40℃で約1年間保管したものをを用いた。対照として、微粉碎粉を入れ

ない希釈アルコールと、新酒を同様に保管した。カメ貯蔵泡盛として、株式会社石川酒造場より提供いただいた85点を用いた。

2-2 官能評価

モデル試料については、工業技術センター職員3名によりカメ香の有無を確認した。

カメ貯蔵泡盛については、泡盛の香味特性把握のための官能評価を、石川酒造場社員、沖縄国税事務所鑑定官および工業技術センター職員など、計25名で行った。官能評価の語句として「カメ香」の他、「バニラ」「ドライフルーツ」「カラメル様」「甘い風味」「オイリー」「スパイシー」「酸味」および「刺激感」を用い、それらの香りが感じられる場合に加点する方法で行った。得られた結果はコレスポンデンス分析により解析した。また、カメ香の強度測定を、カメ貯蔵泡盛を用い工業技術センター職員3名で行った。強度は「カメ香をほとんど感じない」「カメ香を感じる」「カメ香を強く感じる」の3段階とした。

2-3 ガスクロマトグラフ分析

ガスクロマトグラフ装置にアルファモス社製フラッシュGCノーズ Heracles IIを用い、カメ貯蔵泡盛のヘッドスペースガス分析を行った。具体的には、20 mL容ガラスバイアルに、蒸留水でアルコール度数15%に調整したカメ貯蔵泡盛10mLを封入したものをGC分析用サンプルとした。測定前に60℃で10分間保温後、ヘッドスペースガス5,000 μLを分析に供した。成分の分離は、カラムに微極性のMXT-5（長さ10 m × 内径0.18 mm、膜厚0.4 μm）と、極性のMXT-WAX（長さ10 m × 内径0.18 mm、膜厚0.4 μm）の2本のメタルキャピラリーカラムによる同時測定を行った。注入口温度は260℃、カラム温度は

*現商工労働部ものづくり振興課

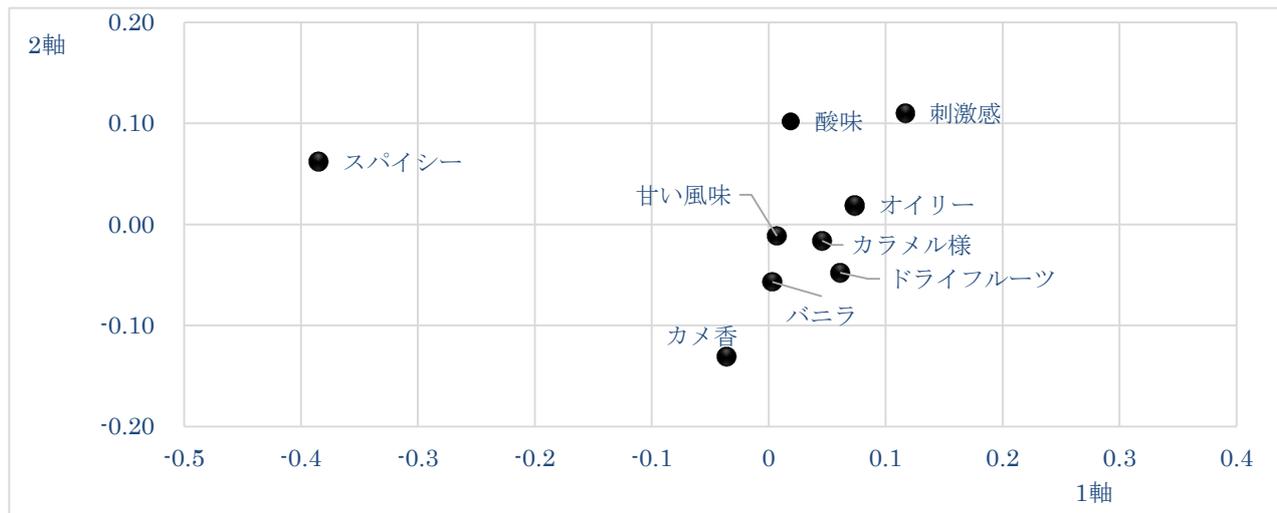


図1 カメ貯蔵泡盛の官能評価コレスポンデンス分析結果

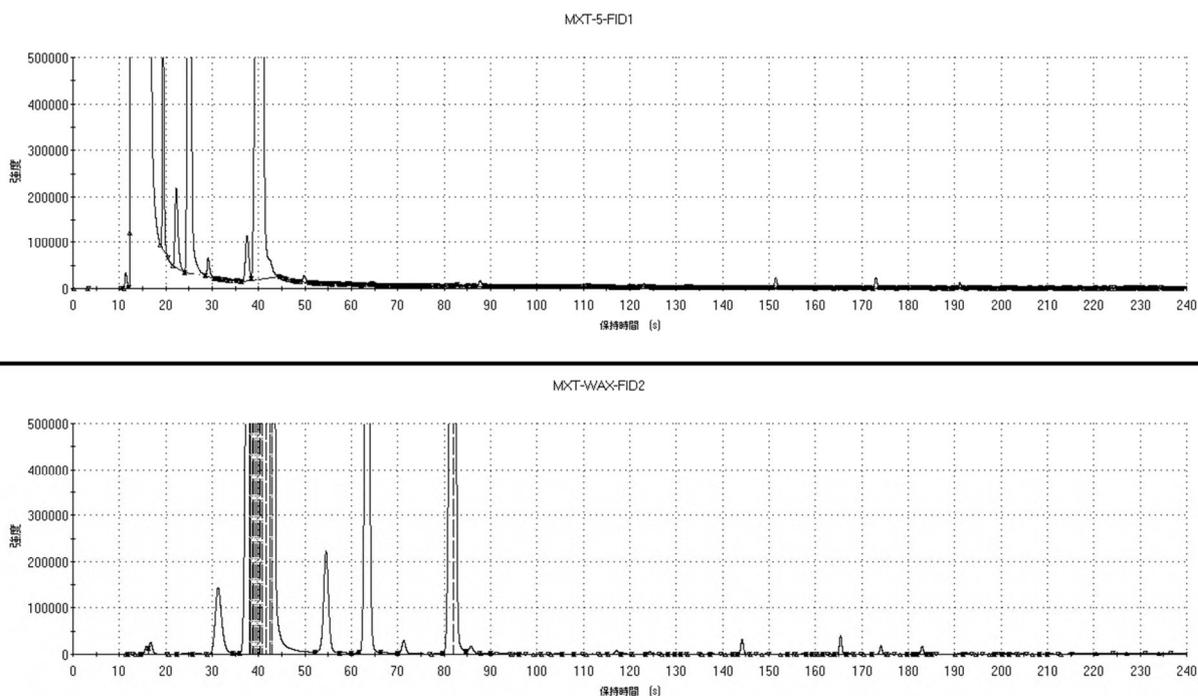


図2 カメ貯蔵泡盛のガスクロマトグラム例

40℃で10s保持後、150℃まで1.0℃/sで昇温したのち250℃まで1.5℃/sで昇温し53s保持した。キャリアーガスは水素を用い、FIDにより検出した。

2-4 統計解析

ガスクロマトグラフ装置による測定はn=3で行い、得られたピーク面積を基にAlphaSoft (AlphaM.O.S社製)により主成分分析を行った。主成分分析に用いたピークは識別指数0.5以上の成分を選択した。

3 実験結果および考察

3-1 官能評価

モデル試料を用いてカメ香の有無を確認した結果、モデル試料 (エタノール)、微粉碎粉を入れていない試料ではカメ香は確認されず、モデル試料 (泡盛) では、カメ香が明確に感じられた。このことから、カメ香は単なるカメ微粉末からの溶出物ではなく、泡盛中の成分がカメ成分と相互作用することによって生成または顕在化する香りである可能性が示唆された。

カメ貯蔵泡盛の香り特性について官能評価結果をコレスポンデンス分析で解析したところ、「カメ香」は、泡盛古酒香の一つである「バニラ」⁶⁾、カメ貯蔵古酒の特徴である「カラメル様」⁷⁾、貯蔵年数と相関するとされる「ドライフルーツ」⁸⁾とは異なるポジションに配置され、他の香りとは独立した香りであることを確認した(図1)。

また、カメ貯蔵泡盛のカメ香の強度について官能評価を行った結果、カメ容器の個体差によりカメ香の強度に違いがあることが確認された。個体差については、カメの原料である土やカメの形状、焼成条件などが考えられる。

3-2 主成分分析

カメ貯蔵泡盛をガスクロマトグラフ分析にかけた代表的なガスクロマトグラムを図2に示す。2つのカラムから得られたピークのうち識別指数0.5以上を示す任意のピークを用いて、主成分分析を行った。その結果、第1主成分で2グループに大別された(図3)。カメ香を感じない試料のほとんどがグループ1に、カメ香を感じる、カメ香を強く感じる試料がグループ2に多く含まれていた。このことから、今回分析に用いたピークにカメ香に関与する成分が含まれていることが示唆されたが、成分の同定には至らなかった。

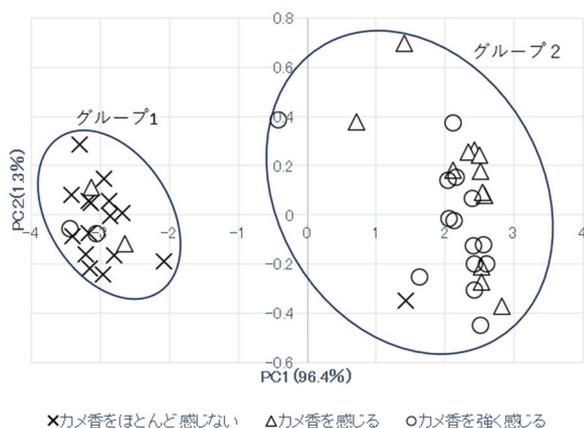


図3 カメ貯蔵泡盛香り成分の主成分分析結果

4 まとめ

本研究では、泡盛古酒における「カメ香」関与成分の特定を目的に、官能評価と機器分析を行った。その結果、カメ香はその他の古酒香と異なる香りとして認識されること、新酒でも発現し、泡盛とカメ成分の相互作用によって発現することが示唆された。また、カメ香の強度に関する官能評価結果と機器分析による結果との間に相関が認められ、カメ香に関与する香り成分の存在が示された。今後は、カメ香を呈する香り成分の特定を目指す。

謝辞

本研究の実施にあたり、貴重な試料を提供いただいた株式会社石川酒造場の皆様、官能評価にご協力いただいた皆様にお礼申し上げます。

本研究は、令和4～6年度実施の工業振興対策費「琉球泡盛新発展戦略事業」のうち、「様々なカメ香による官能評価マッピングの作成及び試醸酒ライブラリの活用による製品開発支援(2022技008)」として実施した。

参考文献

- 1) 宮本宗周：泡盛フレーバーホイールの作成について、日本醸造協会誌，113巻，536-543（2018）
- 2) 金子豊編：「松山王子尚順全文集」（和書），榕樹書林
- 3) 玉城武，桑原健治，長嶺順子，高江洲朝清：泡盛新酒と古酒の一般成分含量の差異，日本醸造協会誌，78巻，970-972（1983）
- 4) 玉城武，桑原健治，長嶺順子，高江洲朝清：泡盛新酒とカメ熟成古酒の金属成分含量の差異，日本醸造協会誌，78巻，973-976（1983）
- 5) 玉城武，高宮義治，下地睦子：泡盛の成分特性と熟成度合いとの関係，醱酵工学，64巻，9-15（1986）
- 6) 小関卓也，伊藤康朗，伊藤清，岩野君男，蓼沼誠：泡盛中に見いだされたフェノール化合物，日本醸造協会誌，89巻，408-411（1994）
- 7) 玉村隆子，望月智代，仲本健吾，比嘉賢一：貯蔵泡盛の酒質に関する研究（第2報），沖縄県工業技術センター研究報告，16号，7-10（2014）
- 8) 相澤常滋，宮本宗周：定量的記述分析法（QDA法）を用いた泡盛古酒及び新酒の香味特性の評価，日本醸造協会誌，116巻，535-541（2021）

On Awamori's Kame Aroma Formation **—Sensory Evaluation and Aroma Component Analysis—**

Takako TAMAMURA, Chie NORIMOTO, Tetsuya TOYOKAWA, Tsuyoshi HIGA*

Okinawa Industrial Technology Center

*Okinawa Industrial Technology Center (currently Manufacturing Promotion Division, Okinawa Prefectural Government)

Awamori is a distilled liquor synonymous with Okinawa. Long-term aged varieties, known as Kusu, are particularly highly valued for their characteristic flavor. These liquors have traditionally been aged during storage in Kame (clay vessels). Their distinctive aroma, particularly known as the "Kame aroma" is recognized as one of the hallmarks of high-quality aged Awamori. However, the mechanism and components responsible for the manifestation of this Kame aroma remain unidentified. Hence, this study aims to identify the components contributing to the Kame aroma through sensory evaluation and aroma component analysis.

乾燥工程の効率化に関する研究

金城 洋、泉川達哉

乾燥機を用いた乾燥工程は、県内企業でも多く見ることができるが、その運用は経験的に行われていることがほとんどであり、乾燥ムラなどの課題も多い。乾燥物の表面温度を熱電対により直接測定し、乾燥状態をリアルタイムに把握することができれば、乾燥工程を効率化することが可能となる。そこで、乾燥実験により定率乾燥速度などのパラメータの算出を行い、熱流体シミュレーションによる予測とマイコンを用いた簡易測定システムの構築を行った。これにより、乾燥中の含水率をリアルタイムで推測することができ、乾燥物の状態把握が可能となった。

1 はじめに

乾燥作業は、食品や陶磁器、廃棄物など、県内企業の様々な製造工程で広く行われている。乾燥は一般によく知られた加工方法の一つであるが、その背後にある物理現象は非常に複雑である。そのため、実際の乾燥工程における条件設定や操作は、多くの場合、経験則に基づいて行われているのが実状である。一方で、水の蒸発に伴う潜熱は非常に大きく、乾燥工程には膨大なエネルギーが必要となる。そのため、乾燥の効率化は重要な課題である。さらに、乾燥は気温や湿度といった外部環境の影響を受けやすく、乾燥装置を用いても乾燥ムラが発生しやすいといった課題も抱えている。

本研究では、こうした課題の解決に向けて乾燥に関する知見を集約し、乾燥工程の効率化を通じて県内企業の生産性向上に寄与することを目的として、情報収集、乾燥実験、シミュレーションなどの取り組みを行った。

まず、恒温恒湿器を用いて乾燥実験を実施し、乾燥理論および測定手法の確認を行った。あわせて、シミュレーションに必要な各種パラメータを算出した。次に、当センターが所有する汎用シミュレーションソフトを活用し、乾燥現象がどの程度再現可能であるかを検証した。

これらの乾燥実験およびシミュレーションで得られた知見を基に、近年著しく進歩し扱いやすくなったマイコンを活用し、リアルタイムに乾燥状態を把握できる簡易測定システムの構築を目指した。

2 実験方法

2-1 乾燥試料

乾燥試料は、繰り返し実験することを考慮して、市販のセラミック製コースター（100 mm x 100 mm x 6 mm）

（以下、乾燥試料）を選定し、図1に示すように最も乾燥が遅いと予測される後流側にK熱電対を接着剤にて取り付け付けた。熱電対を取り付けた乾燥試料を30分程度浸水

したのち、表面に付着している水分を紙ウェスにて拭き取ってから、重量測定を行い、予め実験温度まで昇温させた恒温恒湿器内にセットした。

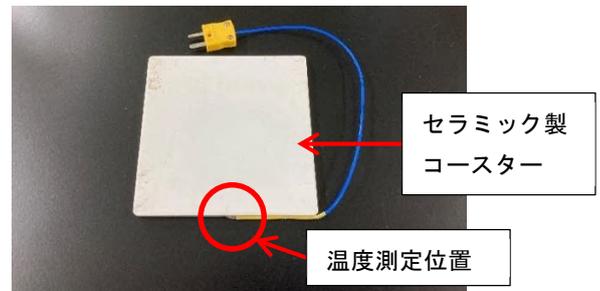


図1 熱電対を取り付けた乾燥試料

2-2 恒温恒湿器

乾燥実験には、エスペック（株）製恒温恒湿器「LHU-114」を用いた。恒温恒湿器内はファンにより攪拌されている。株式会社テスト社製の環境測定器「testo440dp」のベーン式流速計にて内部の流速を測定し、流速が比較的安定している図2の位置に乾燥試料を吊り下げた。乾燥試料を設置した位置での流速は約1.2 m/sであった。



図2 恒温恒湿器内部

2-3 温度測定センサー

熱風と乾燥試料に取り付けた熱電対の温度測定には、既出の環境測定器を使用した。同器は熱電対による温度測定と、プローブによる温風の温度、湿度測定を同時に行うことができ、測定器内部にデータの保存ができる。

2-4 乾燥条件

恒温恒湿器を用いた乾燥実験は、恒温恒湿器の設定範囲および環境測定器の測定範囲を考慮して、表1の4つの条件で実施した。材料温度が熱風温度と同程度かつ安定するまで、試料の材料温度と熱風温度および熱風湿度を測定した。

表1 乾燥条件

	熱風温度 (°C)	相対湿度 (%)
条件①	70	50
条件②	70	70
条件③	50	50
条件④	50	70

2-5 含水率

乾燥試料の乾き基準含水率は下記に示す式(1)を用いて算出した。

$$w = m_w / m_s \quad \dots (1)$$

ただし、 w : 乾き基準含水率 (kg/kg-乾き材料)
 m_w : 含水量 (kg)
 m_s : 乾き材料の重さ (kg)

乾き材料の重さ m_s は、熱電対の固定に用いた接着材の耐熱温度が82°Cであったため、80°Cで6時間程度乾燥させた際の試料の重量とした。なお、業界によって湿り基準含水率が常用されることもあるが、湿り基準含水率は含水量と比例せず乾燥の状況が理解しにくいいため、本報告内では乾き基準含水率を用いている。

2-6 乾燥速度¹⁾

通常乾燥中の材料温度と含水率は図3のように進行することが知られている。ここで期間IIは、含水率が高く一定温度で乾燥が進み、含水率も直線的に減少し、乾燥速度が一定となる期間で定率乾燥期間と呼ばれている。また期間IIIは、乾燥が進み時間の経過とともに乾燥速度がしだいに減少してくる期間で減率乾燥期間と呼ばれている。

単位時間当たりの乾燥速度 j は、下記の式(2)で表すことができる。

$$j = \frac{1}{A} \left(- \frac{dm_w}{dt} \right) \quad \dots (2)$$

ただし、 j : 乾燥速度 (kg/(m²・s))
 A : 乾燥物の面積 (m²)
 m_w : 含水量 (g)
 t : 時間 (s)

そこで、定率乾燥期間の乾燥速度(定率乾燥速度)を求めるには式(3)のように、定率乾燥期間中の2点以上で重量測定を行う必要があるが、一旦恒温恒湿器から取り出して重量測定を行うと、恒温恒湿器内部と乾燥物の温度が下がりその後の実験が継続できないため、再現性を確認したうえで、複数回乾燥時間の異なる実験を行い、算出している。

$$J_c = \frac{m_{w1} - m_{w2}}{t_2 - t_1} \quad \dots (3)$$

ただし、 J_c : 定率乾燥速度 (g/(min))
 $t_{1,2}$: 定率乾燥期間中の点1, 2

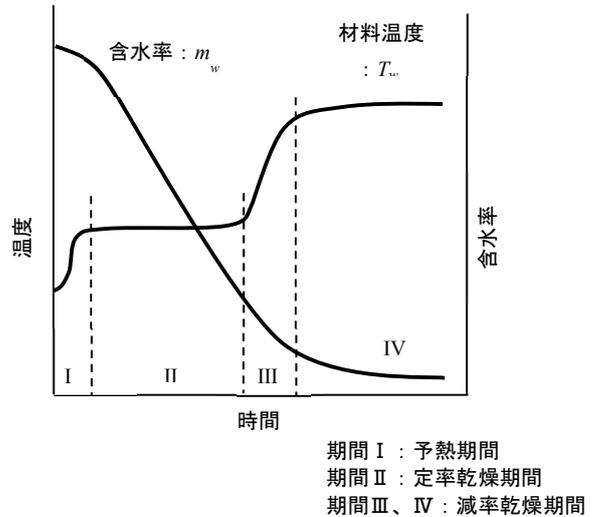


図3 乾燥中の含水率と温度の変化

3 実験結果および考察

3-1 乾燥実験

乾燥実験の結果、乾燥試料の温度を図4に示す。2-6で先述したように温度が一定となる期間(定率乾燥期間)が現れていることが分かる。それぞれの温度、湿度条件において、複数回の実験を行ったが、ほぼ重なるデータとなっており、再現性が確認できた。そこで、定率乾燥期間の途中で取り出して重量を測定後、条件を初期化し、再度定率乾燥期間の途中で取り出して重量を測定することを複数回繰り返して、定率乾燥速度を算出した(表2)。

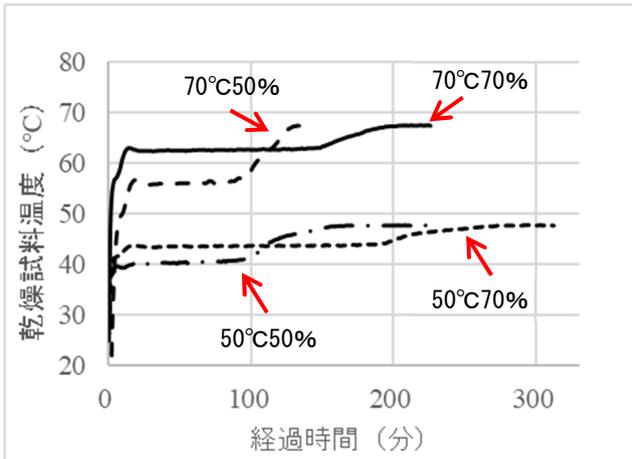


図4 乾燥中の物体温度

表2 定率乾燥速度の比較

実験条件 (温度、相対湿度)	70°C 50%	70°C 70%	50°C 50%	50°C 70%
定率乾燥速度 (g/min)	0.226	0.113	0.166	0.088
実験からの熱伝達係 数 (W/m ² /K)	28.2	25.9	26.3	25.3
関係式による熱伝達 係数 (W/m ² /K)	12.0	11.7	12.9	12.8
湿球温度との差 (°C)	14.1	7.6	11.3	6.2

平板の熱伝達係数 h_c と熱風の質量速度 G の間には式(4)の関係があることが知られている¹⁾。

$$h_c = 10.6G^{0.8} = 10.6(\rho u)^{0.8} \dots (4)$$

ただし、 h_c : 熱伝達係数 (W/(m²・K))

G : 質量速度 (kg/(m²・s))

ρ : 密度 (kg/m³)

u : 風速 (m/s)

これを基に、今回の場合の熱伝達係数を算出し、実験値と比較したところ、実験値の方が2倍程度大きな値となった。原因としては、実際の風速が測定値よりだいぶ大きいと考えられる。

定率乾燥速度は原理的に、熱伝達係数と温度差(熱風と乾燥物の表面温度の差)の積になる。今回のように風速が一定の場合、熱伝達係数はそれほど大きく変わらないため、定率乾燥速度は温度差に依存することになる。そのため現場で簡易的に乾燥時間を予想する手法として、

湿球温度と乾燥温度との差を指標として算出することが可能である。

3-2 シミュレーション

流体シミュレーションには、ANSYS社製熱流体解析ソフト「ANSYS FLUENT17.2」(以下ANSYS)を用いた。図5のように恒温恒湿器内に吊り下げられた乾燥試料を参考にモデリング(以下、プレート)している。

入口流速1.2 m/s、温度70°C、相対湿度50%、プレートの温度は湿球温度である55.9°Cで設定した。

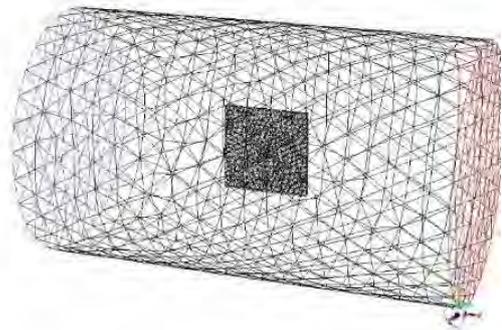


図5 解析メッシュ

ANSYSでは様々な解析モデルを準備しているが、乾燥現象を厳密に扱うには、空気と水蒸気の混合気体と水から水蒸気への相変化を扱う必要があり、複雑な解析となる。そこで、今回は下記の3つのモデル

- a. 簡易モデル
- b. 化学種輸送モデル
- c. 化学種輸送+eulerモデル

を検討し、各モデルの解析の難易度と精度について検証した。

a. 簡易モデル

流体は空気のみを扱い、蒸発現象はモデル化せず、プレートの温度を湿球温度(55.9°C)に固定した。定率乾燥期間中は空気からプレートに伝達する交換熱量と蒸発に必要なエネルギーが釣り合っているため、解析から出口での流体の増加したエネルギーを求め、それを潜熱と表面積で除することで、蒸発速度を算出した。図6に解析結果の温度分布を、図7に速度ベクトルを示す。

b. 化学種輸送モデル

化学種輸送モデルでは、様々な種類の流体を混ぜ合わせた混合流体を使用できる。そこで、流入流体に空気と水蒸気の混合流体を用いた。ただし、蒸発現象はモデル

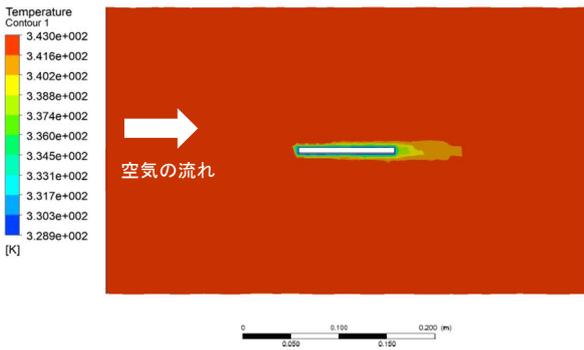


図6 温度分布 (簡易モデル)

モデル上面から見た分布 (以下の図も同様)

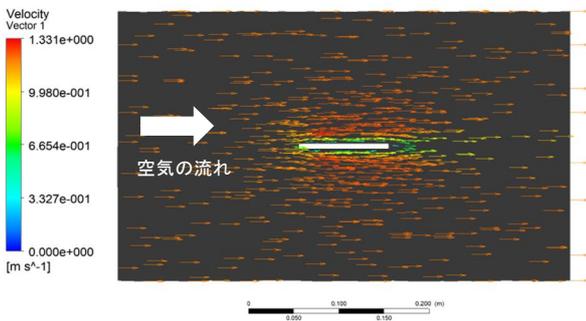


図7 速度ベクトル (簡易モデル)

化せず、プレートの温度を湿球温度に固定して、プレート表面の湿度を飽和湿度に固定した。解析の結果、水蒸気の質量分布は図8のようになり、熱風中への水蒸気の拡散が見えている。この時の出口境界での水分増加量は、 $3.923 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ 、乾燥物表面での熱交換量は、 6.311 W となっている。水分増加量から交換熱量を参照すると、 $3.923 \times 10^{-5} \text{ kg/s} \times \text{潜熱}2365096 \text{ J/kg} = 93 \text{ W}$ となっており、水分増加量と熱交換量が見合っていない結果となった。また水蒸気が増加した分、空気が減少しており、実際の現象と異なっている。

c. 化学種輸送+eulerモデル

eulerモデルは、複数の相のモデルをそれぞれオイラー法で計算することで、複雑な問題を扱うことが可能なモデルである。ただし、複雑な問題の場合は、計算負荷が高く、計算の安定性も悪くなる。

今回の解析ではプレート部分を初期条件で湿球温度の水とし、動かないようにセルのパラメータで固定した。水から水蒸気への相変化を扱うため、質量変換の相互作用で蒸発・凝集の変換式の設定を行った。なお、本モデルは非定常の計算となり、計算負荷が高いことから2次元での解析を行った。

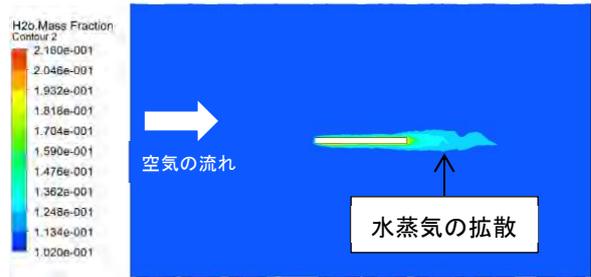


図8 水蒸気質量分率 (化学種輸送モデル)

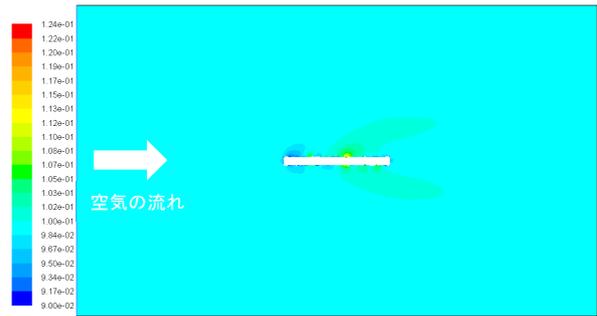


図9 水蒸気質量分率 (オイラーモデル)



図10 蒸発量割合 (オイラーモデル)

図9に水蒸気の質量分率、図10に質量変換した蒸発量割合の分布を示す。蒸発速度に関しては、非定常の解析になってしまっているので、時間ごとの変化が大きく、一定の値を求めることができなかった。

各モデルを用いた場合のシミュレーション結果を表3に示す。複雑なモデルを用いると蒸気の拡散の状況などを視覚的に見ることができ、計算の難易度と計算負荷が高く、定量的な値を求めることが困難であった。蒸発速度の実測値は、 70°C 、 50% の乾燥実験で求めた 0.226 g/min (表2)を表面積で除した 0.168 g/m^2 だが、今回簡易モデルを用いても、 0.991 g/m^2 であり、大きくはかけ離れてはいないことから、場合によっては十分利用することが可能と思われる。

表3 解析モデル比較

モデル	a. 簡易モデル	b. 化学種輸送モデル	c. 化学種輸送+eulerモデル
流体	空気のみ	空気、水蒸気	空気、水、水蒸気
時間	定常	定常	非定常
モデル	3D	3D	2D
蒸発速度 (実測値0.168 g/m ² s)	0.0911	1.75	算出 不可



図11 M5Stackとセンサー

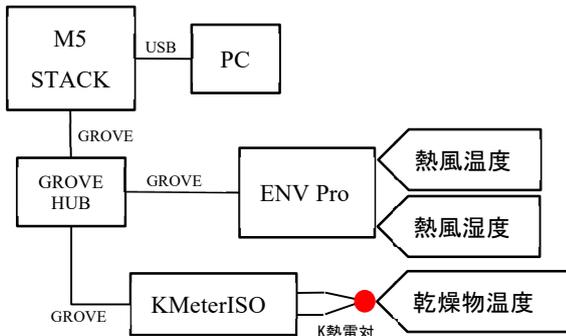


図12 配線図

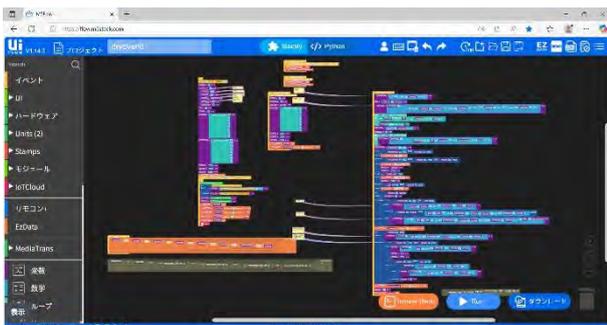


図13 UIFlowによるプログラム

3-3 簡易測定システム

簡易測定システムのメインのマイコンには、M5Stack社が開発している「M5Stack Basic」を用いた。本ユニットは、専用ケースに収められているためハードウェアの設計が不要で、対応するセンサー類が充実しており、ケーブルを接続するだけで容易に様々な測定が可能である。

今回は、熱電対温度測定ユニット「KMeterISO」と環境測定ユニット「ENV Pro SENSOR」を接続し（図11）、乾燥試料の熱電対による温度と熱風温度、熱風湿度を計測した。配線図を図12に示す。測定したデータは、USBで接続したパソコンにシリアル出力し、Microsoft Excelの「Data Streamer」アドインによりリアルタイムで取り込んでいる。

M5Stackのプログラムは、ブロックを組み合わせるようにプログラムを作成できる「UIFlow」を用いた（図13）。

プログラミングの概要を以下に示す。

1. 乾燥速度の入力
2. 熱電対からの物体温度、環境測定ユニットからの熱風温度、湿度の取り込み
3. 潜熱の算出、乾燥速度の熱風密度による補正
4. 物体温度と熱風温度の差の傾きを算出し、現在の乾燥期間を場合分けして表示
5. 予測時間の算出、表示
6. 現在の含水率の算出、表示

プログラミングを作成後、実際に乾燥実験を行い、動作を確認した。

3-3-1 含水率の予測

定率乾燥期間であれば、乾燥は直線的に進むため、含水率の予測は可能である。その際の含水率は式（5）で表される。

$$\omega_2 = \omega_1 - j_c \frac{A}{m_s} \Delta t \dots (5)$$

ただし、 ω : 含水率 (kg/kg)

j_c : 定率乾燥速度 (kg/s)

A : 材料の表面積 (m²)

m_s : 乾き材料の質量 (kg)

Δt : 点1, 2間の経過時間 (s)

$t_{1,2}$: 定率乾燥期間中の点1, 2

また、この時の定率乾燥速度 j_c は、

$$j_c = h_c(T - T_w) / (\Delta h_v)_w \dots (6)$$

ただし、 h_c : 熱伝達係数 (W/(m²K))

T : 熱風温度 (°C)
 T_w : 湿球温度 (°C)
 $(\Delta h_v)_w$: 湿球温度 T_w における蒸発熱 (J/kg)

これを上記の式 (5) に代入して

$$\omega_2 = \omega_1 - h_c \frac{A(T - T_w)}{m_s(\Delta h_v)_w} \Delta t \dots (7)$$

ここで、材料の表面積 A および乾き材料の質量 m_s は毎回の乾燥の度に変わるが多く、求めることが困難である。そこで材料の表面積 A は乾き材料の質量 m_s に比例すると仮定する。すなわち、乾燥時は薄く均一の厚みで材料を配置すると、 A/m_s はほぼ一定の値とみなせる。そこで、 $h_c \frac{A}{m_s}$ も一定の値とし、これを h_c' とすると、式 (7) は式 (8) のように表せる。

$$h_c' = h_c \frac{A}{m_s} = \text{一定}$$

$$\omega_2 = \omega_1 - h_c' \frac{(T - T_w)}{(\Delta h_v)_w} \Delta t \dots (8)$$

この仮定により、材料の表面積や質量を気にすることなく予測が可能となる。また、定率乾燥速度は材料に依存しないことから、風速が変わらなければ、同じ設定で予測することができる。実際の測定プログラムにおいては上記の計算を1分毎に実行した。

減率乾燥期間中も同様の式で算出すると、実際の含水率より早く減少することから、 h_c' が乾燥に従い小さくなると予想される。そこで、簡易的に下記の式 (9) を用い減率乾燥期間中の含水率を算出した。

$$\omega_2 = \omega_1 - h_c' \frac{(T - T_w)}{(\Delta h_v)_w} \Delta t \times \frac{\omega_1}{\omega_c} \dots (9)$$

ただし、 ω_c : 減率乾燥期間移行時の含水率 (kg/kg)

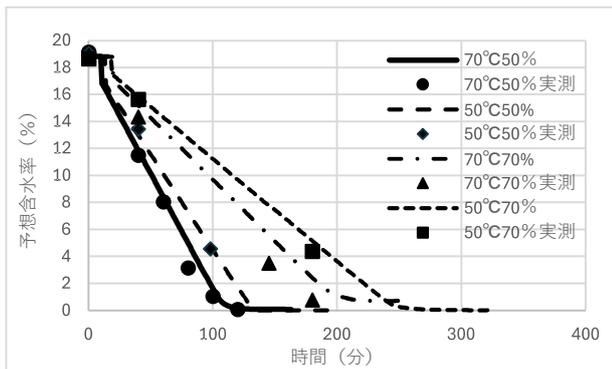


図14 予想含水率

これらの計算を用いて予想した含水率を図14に示す。実測値と比較すると、乾燥速度の遅い条件で多少のずれはあるものの、おおむね予測できていることが分かる。本プログラムで実際に入力するのは修正した熱伝達係数 h_c' のみであり、風速が変化しなければ、温度や湿度の条件を変更しても同一のプログラムを用いることができることから、現場においても利用しやすいと考えられる。

3-3-2 乾燥期間の表示

前述で示した図3の通り、乾燥工程は4つの期間に分かれるが、これを判断し、表示することにより、現在の状況を把握できる。そこで、熱風温度と材料温度の差 ΔT の傾きを算出すると、定率乾燥期間であれば温度差は一定の値に落ち着くので、傾きはほぼ0となる。また、減率乾燥期間に入ると、だんだんと温度差が小さくなっていくので、傾きがマイナスになる。そこで、傾きの値に応じて期間が表示されるようにした。

傾きの算出は、1分おきにサンプリングされる温度差の直近の10点の値を用いて、回帰係数を求め算出した。図15に温度差の傾きをグラフにしたが、減率乾燥期間に入るタイミングで傾きがマイナスになっていることが分かる。ただ乾燥条件が悪くなると、もともとの温度差も小さくなることから傾きの絶対値が小さくなっていることが分かる。今回は、傾きが $-0.1^\circ\text{C}/\text{分}$ になった時点で減率乾燥期間に入るものとした。図16に乾燥期間を表示した簡易測定システムの画面を示す。

今回用いた熱電対測定ユニット (KMeterISO) は、誤差と揺らぎが環境測定器より大きく、傾きの算出や含水率の予想にかなり影響しており、温度の補正が必要であった。

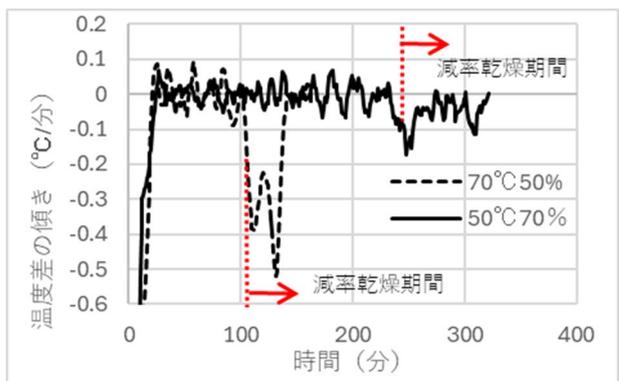


図15 温度差の傾き



図16 M5STACKの画面表示

4 まとめ

乾燥工程の効率化を目指して、乾燥実験、シミュレーション、簡易測定システムの構築を行い、下記の結果が得られた。

- ・乾燥実験により、定率乾燥速度や熱伝達係数を算出した。
- ・修正した熱伝達係数を採用することで、乾燥物の重量、表面積を入力することなく、含水率の予測が可能となった。
- ・マイコンを用いた簡易測定システムを構築し、含水率のリアルタイム表示や乾燥期間の表示が可能となった。
- ・気液混合や相変化を伴う流体シミュレーションに関する知見を得た。

今回の研究では、セラミック製のコースター以外の乾燥試料で実験を行うことができなかつたため、今後は実際の現場にて本測定システムを活用し、他の乾燥物に対しても予測が可能か検証を行いたい。

本研究は、経常研究課題「乾燥工程の効率化に関する研究(2023技007)」により実施した。

参考文献

- 1) 立元雄治, 中村正秋: 乾燥速度, pp.66-71, 「分かる!使える!乾燥入門」, 日刊工業新聞社, 東京(2019)

A Study on Drying Process Efficiency Enhancement

Hiroshi KINJO, Tatsuya IZUMIKAWA

Okinawa Industrial Technology Center

Drying processes using dryers are often seen in enterprises throughout Okinawa Prefecture. In most cases, their operation relies on empirical rules of thumb, often resulting in such issues as uneven drying. Drying efficiency would be improved if the surface temperature of each drying item could be directly measured using a thermocouple to monitor the drying process progress in real time. Hence, we conducted a drying experiment to calculate the constant drying rate and other parameters based on which we ran a thermal fluid simulation to make a prediction and built a simple measurement system using microcontrollers. This system can estimate in real time the moisture content during drying, which enabled the monitoring of the drying process progress.

研究ノート

バイブレーションルアーに関する流体構造連成解析

泉川達哉、與那覇 歩*1

高度化する技術ニーズに対応するため流体構造連成解析技術の習得を目指し、釣り用バイブレーションルアーの挙動解析および実験を行った。ルアー本体だけでなく釣り糸や竿のしなりをモデル化することで、実際のルアーの水中における挙動に近い解析結果を得ることができた。

1 はじめに

コンピュータを使ったシミュレーション技術は、部品単体の応力や変形などのように比較的単純な現象を対象としたものから、風を受けて変形する物体の応力などのように、複数の物理現象が互いに影響し合う複雑なものを扱うように進展している。

沖縄県内においても釣り具であるルアーや水車の開発など、従来の単純なシミュレーション技術では対応できない技術相談が増えてきた。

本研究では、高度化する技術ニーズに対応するため、水や空気などの流体と構造体が互いに影響し合う現象を扱う流体構造連成解析技術（FSI）の習得を目的とした取組みを行った。

2 解析

2-1 解析方法

解析の対象は図1に示すバイブレーションルアーである。ルアーの全長は約73 mm、重量は21.5 g、UV硬化レジンを使った光造形で製作している。水中での姿勢を安定させるため、ルアーの内部には鉄製の球が4個埋め込んである。上部にあるアイ（金具）に釣り糸を連結し、下部および後部のアイには釣針を取り付けて使用する。このルアーは、経験的に水中において激しく左右に振動することが知られている。

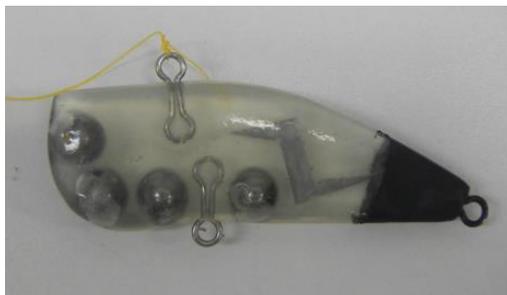


図1 バイブレーションルアー

解析で使用したシミュレーションソフトはANSYS 2023R1、使用したパソコンのCPUはintel Xeon w-2235（3.8 GHz）、メモリ64 GB、解析時は4つのコアを用いた並列計算を行った。

ANSYSを用いたルアーのシミュレーション方法としては、システムカップリングによる手法と6DOFソルバーによる手法が考えられた。

システムカップリング手法では、図2のように流体解析と構造解析のモデルをそれぞれ作成し、それら2つのモデルを連成させるモジュールを別途作成し用いる。モデルの構成が分かりやすい反面、流体と構造のモデルをそれぞれ作成する必要があるため作業量が多いという難点もある。



図2 システムカップリング手法のモデル構成

6DOF手法は、流体モデルのみを作成し、ルアーの形状は流体内の単なる空間としてモデリングすることができるため、モデル作成が容易であるが、ルアーに設定する拘束条件が課題となった。拘束条件は、ルアーの任意の箇所に対してXYZ方向の並進と回転の組み合わせを与えるのだが、ルアーのアイの位置（糸を結ぶ箇所）や重心の位置に対して様々な組み合わせの拘束条件を与えてみたものの、実際のルアーの挙動とは異なる結果しか得られなかった。そのため、ここでは6DOFではなく、システムカップリングによる手法を用いることにした。

※1 元沖縄県工業技術センター

図3に流体解析のモデルを示す。流体解析の設定はANSYSの流体解析用コンポーネントFLUENTで行った。領域の大きさはX195×Y120×Z115 mm、ルアーの前面を入口境界、後面を出口境界、その他の面は対称境界としている。ルアーの近傍はメッシュの設定を別途細かく設定するためのBOI (Body of Influence) 領域としている。流体解析モデルでは水の流れる領域をソリッドでモデリングしており、ルアーの位置する部分は空間となっている。

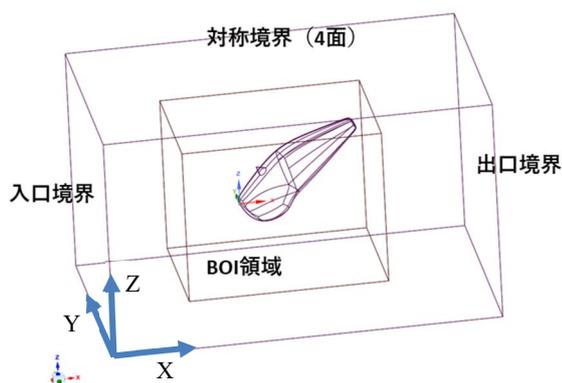


図3 流体解析モデル

図4に構造解析のモデルを示す。構造解析の設定はANSYSの構造解析用コンポーネントMechanicalで行った。ルアー本体と釣り糸をモデリングし、ルアーには実際と同じように球形のおもりが4つある構造とした。ここでルアー本体の形状は、流体解析モデルの空間に一致するように作成する必要がある。また、ルアーはピッチング (Y軸回転) 25 deg、ヨーイング (Z軸回転) 15 degを初期姿勢とした。

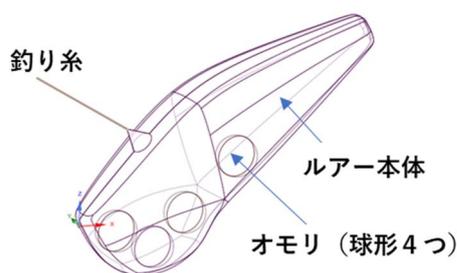


図4 構造解析モデル

図5に流体解析のメッシュを示す。メッシュ形状はダイナミックメッシュに対応した四面体、ボリュームメッシュの最大値は20 mm、BOI領域のメッシュは最大15 mm、ルアー表面のメッシュは1mm~10 mm、境界層メッシュは5層である。解析領域全体でのメッシュ数は122,978となった。

流体メッシュを作成した後、ルアーの挙動に対応してメッシュを動かすためダイナミックメッシュの設定を行った。ここでは、FLUENTに予め用意されているスージングとリメッシングの機能を用いた。また非定常解析における時間ステップ内で安定してメッシュを更新するのに有効な陰的更新の設定も行っている。

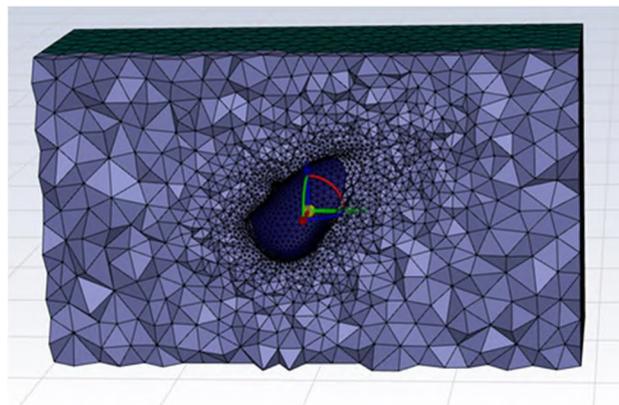


図5 流体解析のメッシュ

流体解析に関するその他の設定としては、入口境界に流速1.75 m/s、出口境界は大気圧、乱流モデルには標準のk-εモデル、壁近傍には標準の壁関数を用いている。

図6に構造解析のメッシュを示す。今回の解析ではルアーの変形は殆ど考えられないことから、メッシュをあまり細かくする必要はなく、三角形状で要素数3,706、節点数6,193のメッシュを作成した。また、釣り糸はビーム要素でモデリングし分割数を20とした。更に従来の研究²⁾を参考に釣り糸の端部は、竿のしなりを表現するため2つのバネ要素でモデリングし、その剛性は左右で異なる値 (100 N/m、75 N/m) とした。

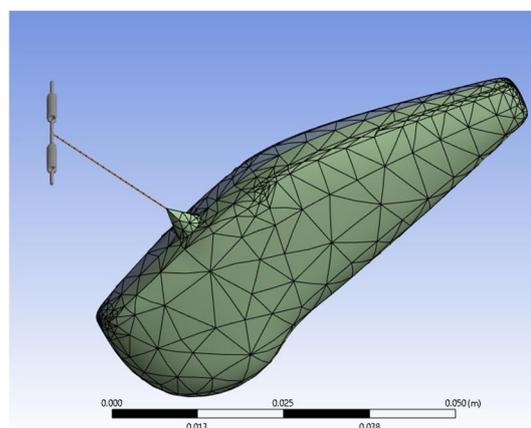


図6 構造解析のメッシュ

構造解析に関するその他の設定としては、ルアーの重心位置に重力加速度を与え、釣り糸とルアーの連結は、釣り糸の端点とルアーの上面について接触条件 (ボンド)

を与えモデリングしている。拘束条件は竿を表現したバネ要素の2つの端点を完全拘束している。

非定常解析における時間ステップは0.0002 秒としている。これより大きな時間ステップでは上手く計算することができなかった。

2-2 解析結果

解析で得られたルアーの動きを図7に示す。これはルアーを斜め上から見た図を時間経過毎に示したものである。解析スタート後、ルアーは流れに乗って図の右下方へ移動するが、竿のしなりをモデリングしたバネが十分に伸び切った後は、逆にバネに引き戻されるように移動し、その後、再び流れに乗って移動する。以降の動作はこれらの繰り返しとなる。一連の動作の間、ルアーは小刻みに左右にローリング (X軸回転) している。

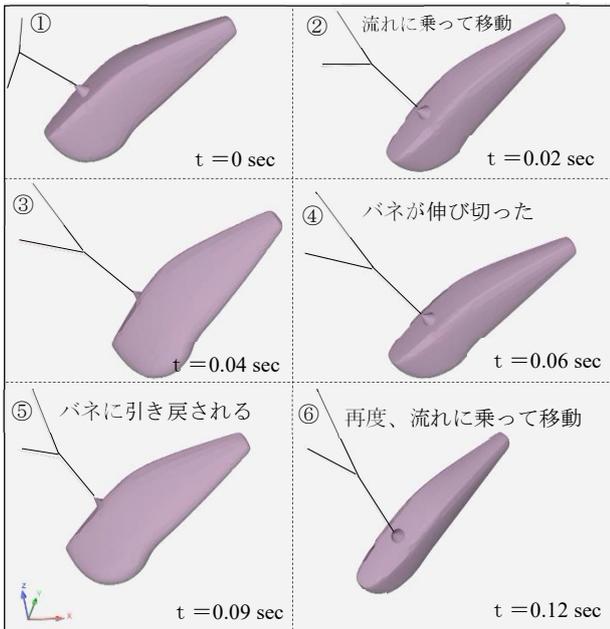


図7 ルアーの動き

ルアーと釣り糸の連結部におけるY方向の変位は、図8のようになる。ローリング時の振幅は8 mm~12 mm、振動数は約17 Hzである。これは流速が1.75 m/sの場合であるが、流速が若干遅い1.1 m/sでは、図9のようにローリングが続かず、逆に流速が3.0 m/sと速い場合は、図10のように振幅の大きなローリングが続くことが確認された。

ルアーの周りの流速ベクトルの一例を図11に示す。ルアーの外形に沿うような滑らかな流れが確認できる。流速の分布は約1.5m/s~3.0 m/sである。

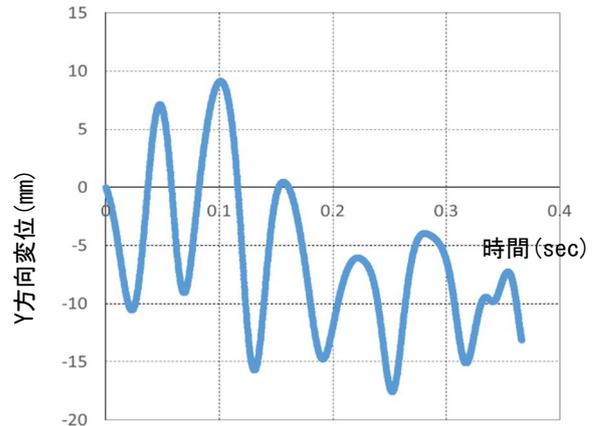


図8 ルアーのY方向変位 (流速1.75 m/s)

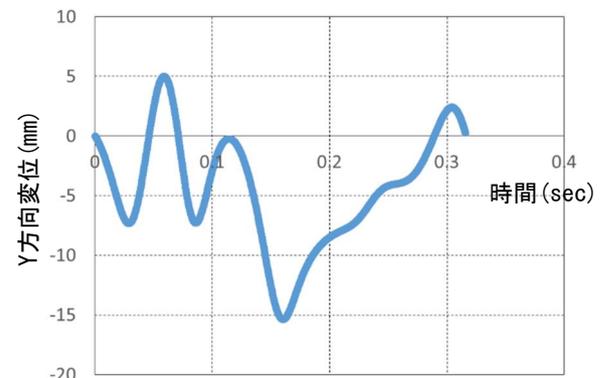


図9 ルアーのY方向変位 (流速1.1 m/s)

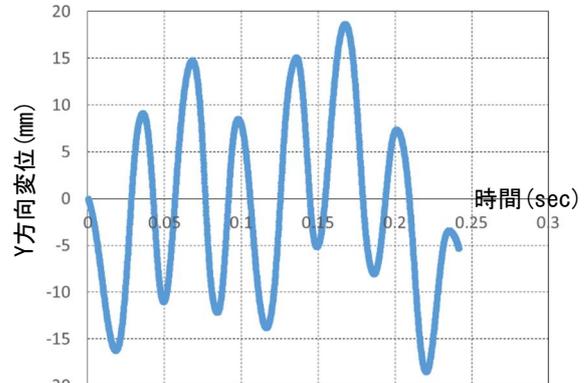


図10 ルアーのY方向変位 (流速3.0 m/s)

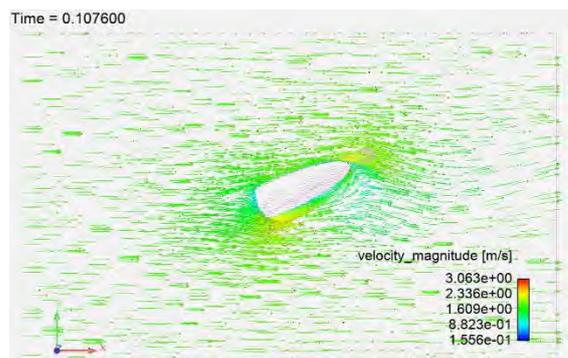


図11 ルアー周りの流速ベクトルの例

3 実験

3-1 実験方法

図12に示す室内プール（L2200×W1360×H500 mm）に水深115 mmまで水を貯め、ルアーを釣り糸で引いた様子をデジタルカメラのハイスピードモード（240 FPS）で撮影し流速と振動数を算出した。またProAnalystを用いたトラッキング解析を行い振動の振幅を計測した。



図12 実験で用いた室内プール

3-2 実験結果

撮影した動画から、実験時の流速（ルアーの移動速度）は約1.7 m/s、振動数は17.2 Hz～19.0 Hzであると推定した。図13はトラッキング解析の様子である。釣り糸の連結部である上部のアイは、画像が不鮮明で追跡することが難しかったため、ルアーの後端部を黒く塗装しトラッキングしている。図14はトラッキングの軌跡を2次元座標にプロットしたものであり、軌跡の前半部分にはかなり明瞭なローリングの様子が確認され、この結果から振幅は約10.25 mmであると推定した。

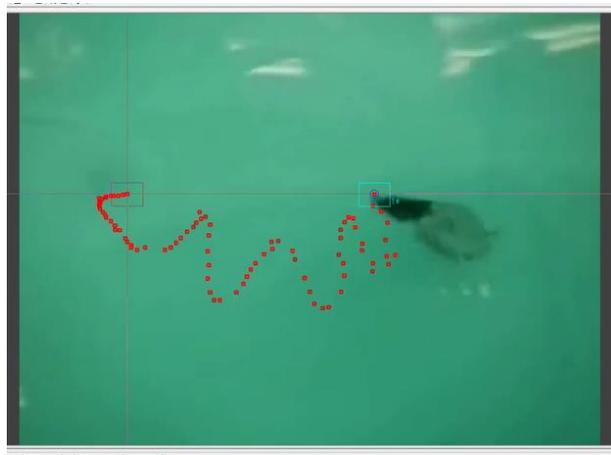


図13 トラッキング解析

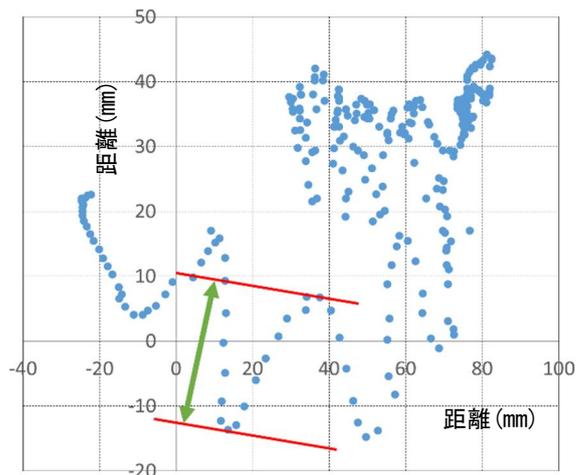


図14 トラッキング解析の結果

4 おわりに

流体構造連成解析技術の習得を目的として、ルアーの挙動解析および実験による解析結果の検証を行った。解析と実験の両方で、水中でルアーが小刻みに左右にローリングの様子を確認することができた。またローリング時の振動数については、解析によって予測できる可能性のあることが示された。今回対象としたバイブレーションルアーと形状が異なる場合は、メッシュの設定や解析条件などを再度調整し直す必要があると考え、ルアー本体だけでなく、釣り糸や竿のしなりをモデリングすることで現実に近いルアーの挙動を再現できたのは大きな収穫であった。

本研究は、経常研究課題「流体構造連成解析を用いた製品開発（2022技005）」により実施した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ルアーに関する情報を提供頂いた株式会社シマウマの山科和史氏、ルアーに関する解析手法について情報交換させて頂いた東京都立産業技術研究センターの大久保智氏、小見山慎氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) ANSYS, Inc: Ansys Fluent User's Guide Release 2023 R2: p1842
- 2) 史 金星, 山田 陸人: 流体-構造連成解析によるバイブレーションルアーの水中運動再現および構造最適設計, 日本機械学会論文集, vol. 89, No. 922 2023

Fluid-Structure Interaction Analysis of Vibration Lures

Tatsuya IZUMIKAWA, Ayumu YONAHA*¹

Okinawa Industrial Technology Center

*¹Former affiliation : Okinawa Industrial Technology Center

We conducted behavioral analyses and experiments on vibration fishing lures with the aim of acquiring fluid-structure interaction analysis techniques to meet increasingly sophisticated technical needs. We modeled the flexibility of not only the lure itself but also that of the fishing line and rod, thereby successfully obtaining analysis results that closely approximated the underwater behavior of actual lures.

令和6年度 研究報告 第27号
2025年11月発行

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎12番2

TEL (098)929-0111

FAX (098)929-0115

URL : <https://www.pref.okinawa.jp/shigoto/kenkyu/1011573/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。