

群馬県立産業技術センター 研究報告

令和5年度

Reports of

Gunma Industrial Technology Center

2023

群馬県立産業技術センター

目 次

試験分析高度化研究

キャリアガスにアルゴンを用いた有機元素分析に関する検討	1
綿貫陽介、恩田紘樹、瀬賀悟史	
超ハイテン材用プレス解析パラメータ取得と解析ソフトへの適用	5
荻野直彦、増田直也、新井宏章	
樹脂／ゴム製品の熱劣化解析のための FT-IR スペクトルライブラリの構築	10
渡辺元浩、岩沢知幸、中曽根佑一	
製品加工に対する異常検知システムの実装	13
高橋慶行、青柳大志、小和瀬登、狩野幹大、 新井宏章	
異物分析システムの開発	17
田島 創、町田晃平、永田昌弘	
金属積層造形技術を活用した管巻機の長寿命化にかかる研究	20
小林興尚、齋藤 宏、齋藤裕文、三ツ木寛尚、 狩野幹大、小宅智史	
ノギス、マイクロメータの出張校正手段の確立	24
小宅智史、増田直也、中村哲也	
熱応力解析技術の高度化に関する基礎検討	30
林 和、三ツ木寛尚、青柳大志、岩沢知幸、 狩野幹大	

次世代産業創出研究

ドローンを活用した工場内巡視点検業務の省力化に関する研究	35
町田晃平、三ツ木寛尚、小和瀬登、小林興尚、 荻野直彦、石黒 聡	

その他研究

微生物資源のデータベース化	41
渡部貴志、田島 創、吉野 功	
群馬 KAZE 酵母 3 号の尿素非生産性化と高品質清酒の製造	47
渡部貴志、田島 創、石田一成	

試験分析高度化研究

キャリアガスにアルゴンを用いた有機元素分析に関する検討

綿貫陽介・恩田紘樹・瀬賀悟史

Attempt to organic elemental analysis using argon as carrier gas

WATANUKI Yosuke, ONDA Koki and SEGA Satoshi

本研究では有機元素分析装置に用いるキャリアガスにアルゴンを用いて標準物質としてスルファニルアミドの測定を行い、元素ごとに検量線を作成した。その結果、有機元素分析においてキャリアガスにヘリウムを使用した場合と比較して、検出感度は、窒素、炭素、水素および硫黄でそれぞれ0.15倍、0.17倍、1.1倍および0.35倍に、また、定量下限値はそれぞれ1.6倍、3.1倍、1.2倍および1.2倍となった。これらの結果から微量分析であれば試料量を変えずに分析可能と考えられた。

キーワード：有機元素分析、キャリアガス、ヘリウム、アルゴン、スルファニルアミド

In this study, organic elements of sulfanilamide were analyzed by using argon instead of helium as carrier gas, and the calibration curves of nitrogen, carbon, hydrogen and sulfur were determined. As a result, detection sensitivities for nitrogen, carbon, hydrogen and sulfur were decreased by 0.15, 0.17, 1.1, and 0.35 times, respectively. In addition, the quantification limits of them increased by 1.6, 3.1, 1.2, and 1.2 times, respectively. These results suggested that these elements could be quantified by organic microanalysis which was used argon as carrier gas without changing sample amount.

Keywords : organic elemental analysis, carrier gas, helium, argon, sulfanilamide

1 まえがき

有機元素分析装置は、有機化合物に含まれる炭素、水素、窒素および硫黄の重量%を測定する装置である。投入試料中の炭素、水素、窒素および硫黄は、燃焼管および還元管を通過後にそれぞれ二酸化炭素(CO₂)、水蒸気(H₂O)、窒素(N₂)および二酸化硫黄(SO₂)に変換され、分離カラムにより分離されたのち、熱伝導度検出器(TCD)で検出される。その後検出した各成分のピーク面積値から、投入試料中の各元素の重量%を定量する。有機元素分析装置は、樹脂、医薬品、食品といった幅広い分野で物質の同定や品質管理に活用されている。

群馬産業技術センターではこれまで有機元素分析のキャリアガスに幅広い線速度で高い分離能が得られる²⁾ヘリウムを使用してきたが、昨今のヘリウムガス供給不足により¹⁾、代替キャリアガスを用いた分析手法の確立が急

務となっている。そこで本研究では、有機元素分析のキャリアガスとしてヘリウムおよびアルゴンを使用した際の検出感度変化について検証するとともに、キャリアガス毎にCO₂、H₂O、N₂およびSO₂の検量線を作成し、それを基に検出限界値および定量下限値を比較したので報告する。

2 方法

2.1 標準試薬

標準試料にはスルファニルアミド(elementar製、S15.00-0062)(C₆H₈N₂O₂S)を用いた。なお、スルファニルアミドに含まれる窒素、炭素、水素および硫黄の重量割合はそれぞれ16.26%、41.85%、4.68%および18.62%である。

2.2 有機元素分析

本研究の有機分析には有機元素分析装置(elementar、UNICUBE)を使用した。また、燃

焼管は 1150℃ に設定し、内径 28 mm の石英ガラス管 (elementar 製、S11.00-1150/4) に助燃材として WO₃ (elementar 製、S11.02-0017) を充填したものを用いた。還元管は 850℃ に設定し、焼管と同型の石英ガラス管を用い、還元剤として還元銅 (elementar 製、S05 000 699) を充填したものを用いた。

試料は錫カプセルで包み、有機元素分析装置に供した。キャリアガスはヘリウム使用時、およびアルゴン使用時でどちらも 200 ml/min 供給した。また焼管にて試料を燃焼させる際の O₂ 流量はいずれも 30ml/min とし、90 秒間供給した。

2. 3 検量線の作成

スルファニルアミドを 0.1mg~18mg まで秤量して有機元素分析に供し、x 軸にスルファニルアミド中の窒素、炭素、水素、硫黄の重量、y 軸に CO₂、H₂O、N₂ および SO₂ の TCD ピーク面積値をプロットして検量線を作成した。なお、スルファニルアミド中の窒素、炭素、水素、硫黄の重量 E については、分析に供したスルファニルアミド重量 G とスルファニルアミド中の各元素の重量%を用いて式 1~式 4 より算出した。

$$E_{\text{窒素}} = 0.1626G \quad \text{式 1}$$

$$E_{\text{炭素}} = 0.4185G \quad \text{式 2}$$

$$E_{\text{水素}} = 0.0468G \quad \text{式 3}$$

$$E_{\text{硫黄}} = 0.1862G \quad \text{式 4}$$

2. 4 検出限界値と定量下限値の算出

本研究での有機元素分析における各元素の重量の検出限界値 Xd は、ブランクの応答にもかかわらず成分が検出されたと判断される確率 α と、成分の応答にもかかわらずブランクと判断される確率 β がともに 5% ($\alpha = \beta = 0.05$) と設定し、§ 2.3 で求めた検量線の傾き a とブランクにおけるピーク面積値の標準偏差 σ を用いて、式 5 より算出した³⁾。なお、 $\alpha = \beta = 0.05$ として検出限界値を定義する方法は IUPAC にて推奨されている。⁴⁾

$$Xd = 3.29\sigma/a \quad \text{式 5}$$

なお、定量下限値については検出限界値を 3 倍した値とした。この値は一般的に定量下限値として用いられているブランクの 10 σ 相当の値である³⁾。

3 結果および考察

3. 1 キャリアガス毎の TCD ピーク挙動の把握

スルファニルアミド 2mg に対して、キャリアガスにヘリウムおよびアルゴンを使用した際の TCD ピーク挙動を図 1 に示す。ヘリウム使用時の N₂、CO₂、H₂O および SO₂ のピーク面積値は、それぞれ 1.35×10⁴、2.60×10⁴、9.99×10³ および 4.77×10³ であった。それに対して、アルゴン使用時の N₂、CO₂、H₂O および SO₂ のピーク面積値は、それぞれ 2.05×10³、4.40×10³、1.13×10⁴ および 1.67×10³ であった。

ヘリウム使用時と比較して、アルゴン使用時の N₂、CO₂、H₂O および SO₂ の検出感度はそれぞれ 0.15 倍、0.17 倍、1.1 倍、0.35 倍だった。このようにキャリアガスをアルゴンにした場合、水素の検出感度はあまり変化しなかった一方、窒素、炭素、硫黄のそれは低下したことが示された。これは、N₂、CO₂、SO₂ におけるアルゴンとの熱伝導度の差が、ヘリウムとの熱伝導度の差と比較して小さく、TCD 検出器の感度が低下したためと推察される。

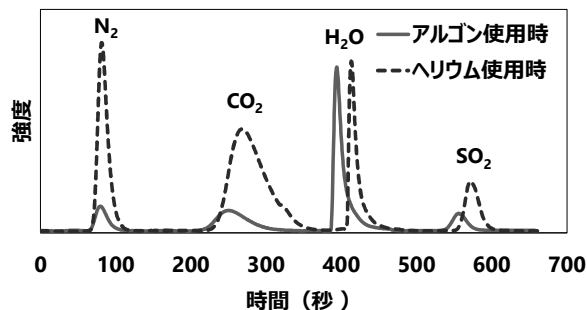


図 1 キャリアガスによる TCD ピークの変化

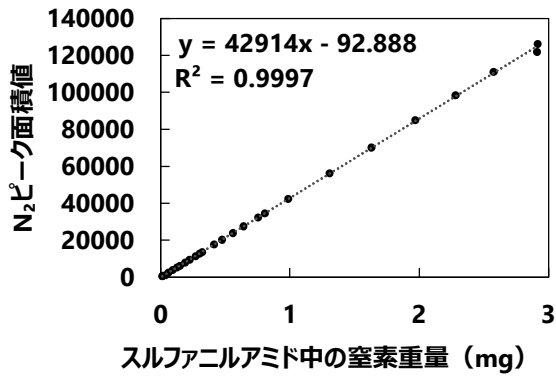


図2 窒素検量線(ヘリウム使用時)

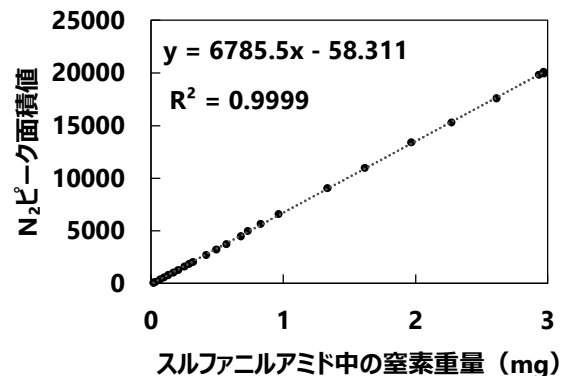


図6 窒素検量線(アルゴン使用時)

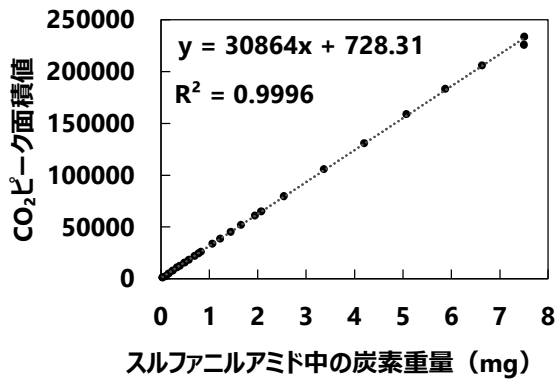


図3 炭素検量線(ヘリウム使用時)

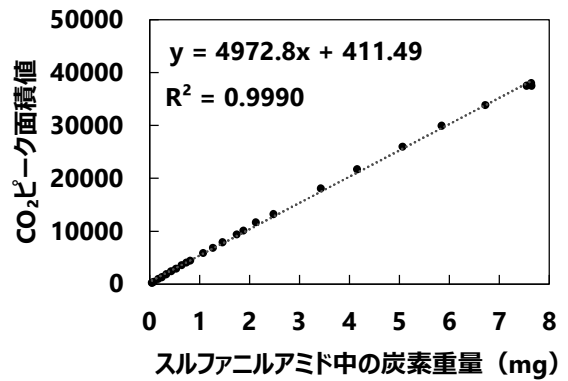


図7 炭素検量線(アルゴン使用時)

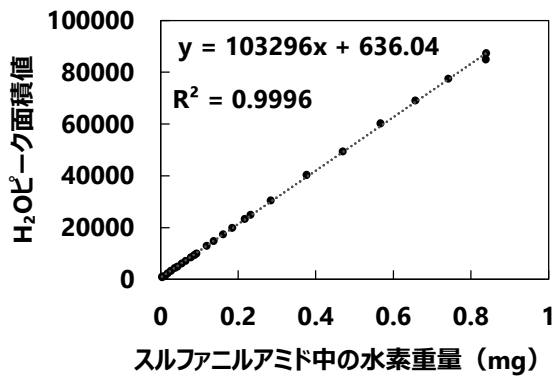


図4 水素検量線(ヘリウム使用時)

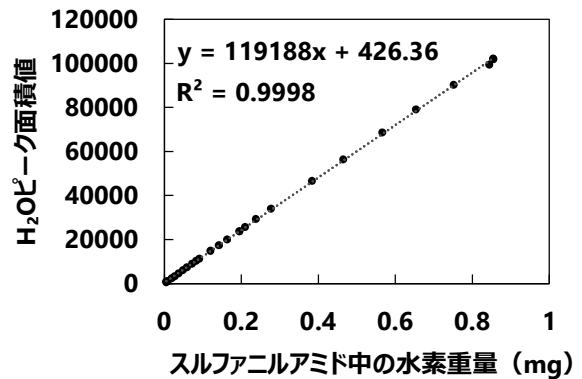


図8 水素検量線(アルゴン使用時)

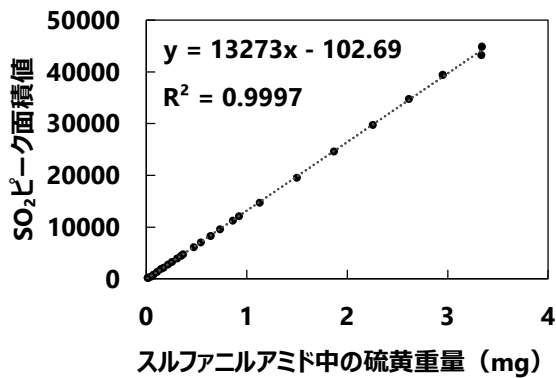


図5 硫黄検量線(ヘリウム使用時)

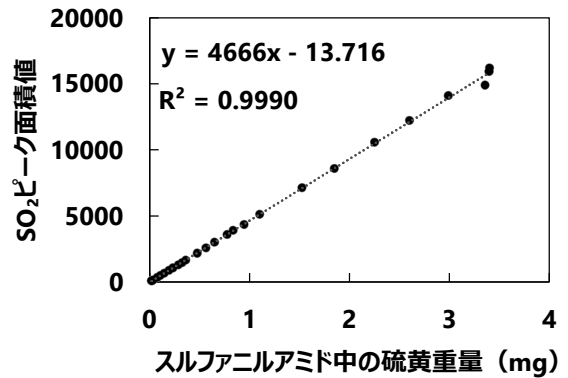


図9 硫黄検量線(アルゴン使用時)

表 1 分析時のキャリアガスと検出限界値および定量下限値

分析時のキャリアガス	検出限界値(μg)				定量下限値(μg)			
	窒素	炭素	水素	硫黄	窒素	炭素	水素	硫黄
ヘリウム	4.5	5.2	4.6	6.0	13.5	15.6	13.9	18.1
アルゴン	7.1	16.1	5.5	7.4	21.2	48.3	16.6	22.1

3.2 キャリアガスにヘリウムおよびアルゴンを使用した時の検量線

キャリアガスにヘリウムを使用して、§2.3に記載の方法で作成したN₂、CO₂、H₂OおよびSO₂の検量線を図2から図5に示す。N₂、CO₂、H₂OおよびSO₂の検量線の傾きはそれぞれ、 4.29×10^4 、 3.09×10^4 、 1.03×10^5 および 1.33×10^4 であり、検量線の相関係数はそれぞれ0.9997、0.9996、0.9996および0.9997だった。

一方キャリアガスにアルゴンを使用した場合のN₂、CO₂、H₂OおよびSO₂の検量線を図6～図9に示す。N₂、CO₂、H₂OおよびSO₂の検量線の傾きはそれぞれ、 6.79×10^3 、 4.97×10^3 、 1.19×10^5 および 4.67×10^3 、検量線の相関係数はそれぞれ0.9999、0.9990、0.9998および0.9990だった。

キャリアガスにヘリウムおよびアルゴンを使用した場合にはいずれも良好な直線性が得られたと考えられた。

3.3 検出限界値と定量下限値

キャリアガスにヘリウムを使用した場合、N₂、CO₂、H₂OおよびSO₂のブランクにおけるピーク面積値の標準偏差はそれぞれ57.5、47.7、142、23.9であった。このことから式1により算出した検出限界値は表1に示すように窒素、炭素、水素および硫黄でそれぞれ4.5μg、5.2μg、4.6μgおよび6.0μgであり、定量下限値は窒素、炭素、水素、硫黄でそれぞれ13.5μg、15.6μg、13.9μgおよび18.1μgだった。各元素の定量下限値と検量線からスルファニルアミド中の窒素、炭素、水素および硫黄を定量するのに必要なスルファニルアミド量はそれぞれ0.08mg、0.04mg、0.30mgおよび0.10mgとなる。一方、キャリアガスにアルゴンを使用した場合、N₂、CO₂、H₂OおよびSO₂のブランクにおけるピーク面積値の標準偏差はそれぞれ14.6、24.4、200および10.5だったことから、検出限界値は窒素、炭素、水素および硫

黄でそれぞれ7.1μg、16μg、5.5μgおよび7.4μg、定量下限値は窒素、炭素、水素および硫黄でそれぞれ21.2μg、48.3μg、16.6μgおよび22.1μgとなる。このため各元素の定量下限値と検量線からスルファニルアミド中の窒素、炭素、水素および硫黄を定量するのに必要なスルファニルアミド量はそれぞれ0.13mg、0.12mg、0.35mgおよび0.12mgとなる。

以上のことから1回の分析試料量が2～3mgの有機微量元素分析であればキャリアガスにヘリウムからアルゴンに変更してもこれまでと同様の試料量で測定可能と考えられた。

4 まとめ

- ・キャリアガスにアルゴンからヘリウムに変更した場合、N₂、CO₂、H₂OおよびSO₂の検出感度はそれぞれ0.15倍、0.17倍、1.1倍および0.35倍だった。
- ・キャリアガスがヘリウムおよびアルゴンの場合いずれもスルファニルアミド0.1～18mgの範囲で検量線は良好な直線性を示した。
- ・キャリアガスにアルゴンからアルゴンに変更してもキャリアガスにアルゴンに変更してもこれまでと同様の試料量で測定可能と考えられた。

文 献

- 1)環境省水・大気環境局総務課及び大気環境課：事務連絡（その2）、令和5年4月21日
- 2)平松良朗：代替ガスを用いた分析技術の紹介、低温工学、56-3（2021）
- 3)上本道久：検出限界と定量下限の考え方、ぶんせき、5、（2010）
- 4)IUPAC Recommendation 1995、L.A. Currie：Pure & Appl. Chem.、67、1699-1723（1995）。

超ハイテン材プレス解析用パラメータ取得と解析ソフトへの適用

荻野直彦・増田直也*・新井宏章**

Acquisition of press analysis parameters for ultra-high-tensile strength materials and their application to analysis software

OGINO Naohiko, MASUDA Naoya, ARAI Hiroaki

自動車構造用部品では、カーボンニュートラルへの対応で軽量化が求められる中で、非常に厳しい燃費改善と衝突安全性の保障が要求されており、構造材の厚さを薄くしても強度を確保できる高張力鋼板（ハイテン材）の使用が主流となる。近年では、引張強さ 1GPa 以上の超ハイテン材の使用も拡大している。超ハイテン材のプレス成形には、複雑な形状プレス成形時に発生するしわや割れ、成形後に発生するスプリングバックなどの寸法誤差などの欠陥が発生しやすく、CAE 解析の必要性がますます高くなる。超ハイテン材の CAE 解析には、材料パラメータの取得が求められるが、特殊な試験方法が必要となるため、高度な材料試験技術が必要となる。本研究では、プレス成形解析用の超ハイテン材の材料パラメータの取得し、プレス成形解析、実機成形を実施したので、その結果について報告する。

キーワード：高張力鋼板、プレス成形解析、材料パラメータ

In the case of automotive structural parts, there is a demand for extremely strict fuel efficiency improvement and collision safety guarantees amid the need for weight reduction in response to carbon neutrality, and high-tensile steel sheets (hereinafter referred to as ultra-high-tensile steel materials) that can ensure strength even if the thickness of structural materials are reduced. The press forming of ultra-high-tensile strength materials is prone to defects such as wrinkles and cracks that occur during complex shape press molding, and dimensional errors such as springback that occurs after molding, and the need for CAE analysis is becoming more and more high. In this study, we obtained the material parameters of ultra-high-tensile strength materials, performed press analysis, and performed actual machine molding, and reported the results.

Keywords : High Tensile Strength Steel, Press Forming Analysis, Material Parameter

1 まえがき

強度試験に関する群馬県産業技術センターの依頼試験業務では、インストロン社製の材料試験機により、高度な試験に対応することが可能となっている。

プレス成形解析用の材料パラメータ取得には、薄い板材に引張と圧縮を加える特殊な試験方法を用いて、引張圧縮の繰り返し応力歪み線図を取得し、材料パラメータ同定ソフトにより、パラメータの取得を行う必要がある。通常、材料試験において、板材に圧縮を加えると座屈が生じるため、特殊な治具が必要不

可欠となる。現状、センターの保有する治具では軟鋼に対する材料パラメータの取得は可能であるが、ニーズの高い超ハイテン材の材料パラメータ取得は困難な状況にある。原因は、現状の治具が座屈強度に耐えられないためと考察される。そこで、本研究では、構造解析などを用いて最適化された試験用治具の開発を行う。評価検証のため、実際に材料試験を行い、パラメータ取得する。パラメータ取得後に、実際にプレス成形解析ソフトにより、取得されたパラメータを用いて解析を行い、適用の可否について判断する。

2 方法

本研究では、群馬産業技術センターの保有する材料試験機（材料試験システム インストロン社）を使用して、プレス成形解析に用いる材料パラメータの取得を行った。

取得した材料パラメータは、YU パラメータを選定した。YU パラメータは、自動車部品の寸法精度変動を低減するために開発された手法である。1) この手法は、超ハイテン材のプレス成形において、湾曲した部品で発生するスプリングバックの変形予測を精度向上するために、バウシinger効果を活用した新しい成形解析手法として開発されて、広く活用されているものである。

YU パラメータ取得後に、取得した材料パラメータを使用して、実際に成形解析ソフトにて成形解析を行った。予測確認のため、実機でのハット曲げの実験を行い、その結果を比較検証したのでその結果を報告する。

2.1 材料物性値の取得

本研究で使用した材料試験システム（100kN）（Instron5982 型）を図.1 に示す。材料の物性値を測定するための引張試験や圧縮試験、曲げ試験、繰り返し試験、剥離試験、引裂き試験、摩擦試験など、広範な機械的試験を実施できる強度試験機器である。



図1 材料試験システム

今回の検証を行う材料は、1.0GPa 級の超ハイテン材を使用した。本試験機を用いて、材料の材料物性値を測定した。

2.2 引張圧縮試験

本研究で用いた引張圧縮試験の方法について述べる。図.2 に治具および試験片形状を示す。平板で試験片を押すことで座屈を防止する治具構造とした。試験片は平行部の長さは28.1 mm、幅は20.0 mmとした。ひずみは試験片中央分に張り付けたゲージ長1mmのひずみゲージにより測定した。

取得した応力-ひずみ曲線の応力 σ_0 、ひずみ ε_0 から真応力 σ 、真ひずみ ε を次式により算出した。

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad (1)$$

$$\sigma = (1 + \varepsilon_0)\sigma_0 \quad (2)$$

真応力と真ひずみを導いた後、データに含まれるノイズ成分を削減するために移動平均処理を行った。その後、MatParaを用いて、Y-Uパラメータを導いた。

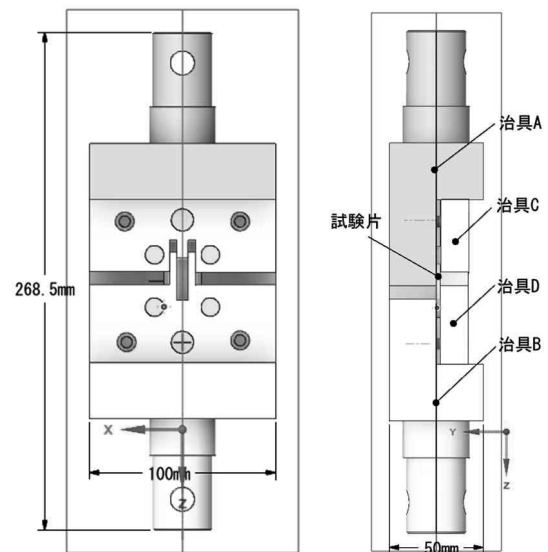


図2 試験治具

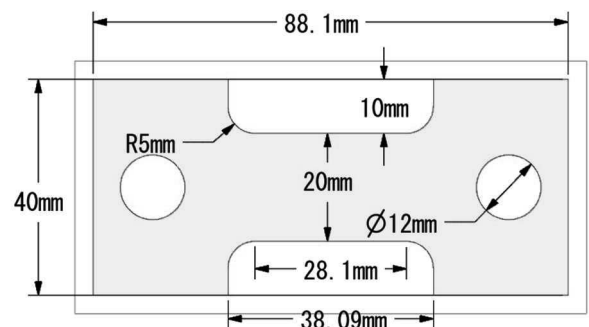


図3 試験片

2.3 プレス成形解析

図.4 にハット曲げ解析の概要を示す. 本解析に用いたソフトウェアは, 協力企業様の所有する(株)J-SOL 製 J-Stamp を使用した.

ブランクの寸法は長さ 100mm 幅 20mm, 板厚 1mm である.

金型は上型と下型で構成され, 板厚のみを考慮した上下面平行の形状としている. パンチとダイはホルダで押さえない構造とした.

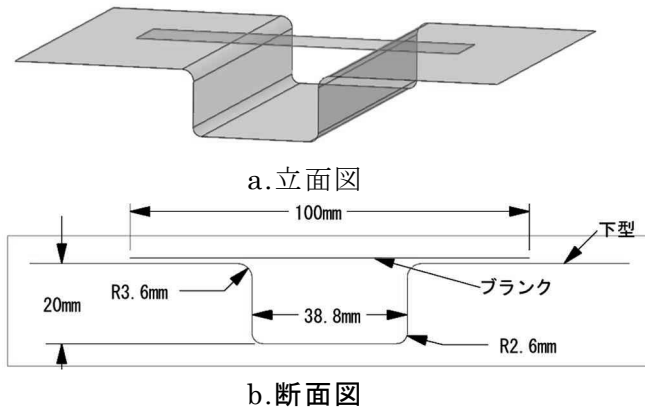


図 4 曲げ形状

2. 4 テストプレス

テストプレスに用いた金型を図.5 に示す. 解析条件と同じ形状の金型にて, テストプレスを行い, 形状を取得した.

実機によるプレスを想定し, プレス速度はテストプレスに用いた材料試験システムの上限度速度である 500mm/min とした.

テストプレスで取得した形状と解析結果を比較して, その妥当性を評価した.

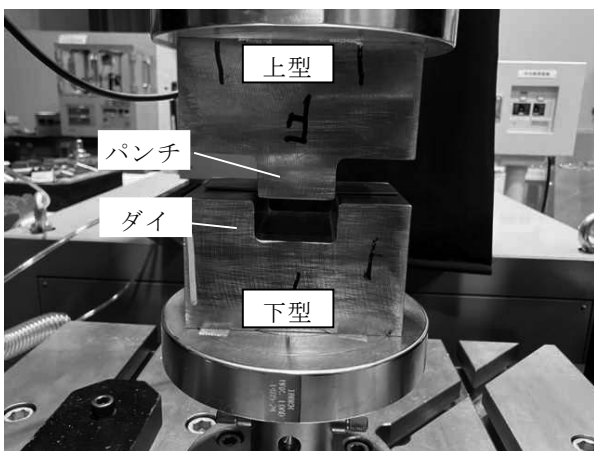


図 5 試験状況

3 結果

3. 1 材料物性値

取得した応力ひずみ線図を図.6 に示す.

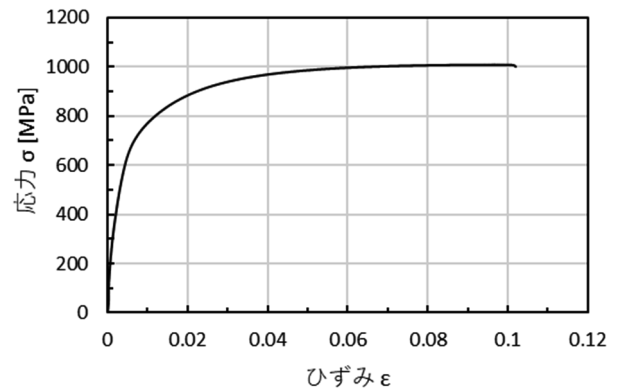


図 6 1.0GPa 級超ハイテン材
応力ひずみ線図

取得した材料物性値を表.1 に示す.

表 1 材料物性値

	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	ヤング率 [GPa]	r 値
0°	1023	202	0.70
45°	1022		0.84
90°	1022		0.71

3. 2 材料パラメータ

材料パラメータの取得にあたり, 考案した治具の構造解析を行っている. 構造解析の結果を図.7 に示す.

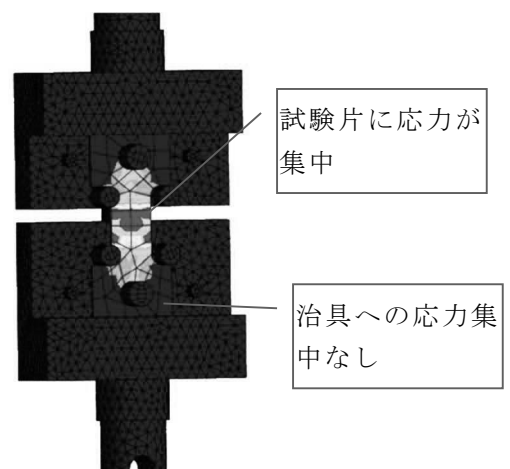


図 7 構造解析の結果

治具の構造解析結果では, 治具への応力

集中している箇所は見られないことから、試験に影響を及ぼす治具の変形はないことが確認された。

考案した治具を用いて、引張圧縮試験を行い、YUパラメータの同定をした。YUパラメータの同定は、自動でパラメータを同定した後、手でパラメータを調整し応力-ひずみ曲線の試験結果とY-Uモデルで算出されたプロファイルが一致するように調整した。調整後の応力-ひずみ曲線を図.8、Y-Uパラメータを表.2に示す。黒の実線が引張試験により得られた応力-ひずみ曲線、赤色がY-Uパラメータの調整後に得られた応力-ひずみ曲線である。

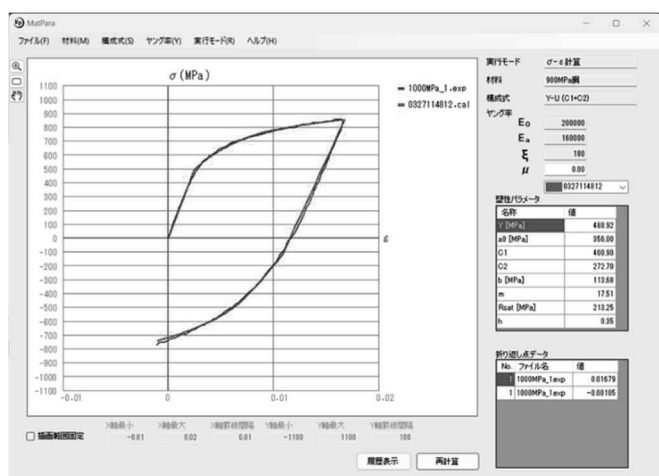


図8 引張試験とY-Uモデルで算出された応力-ひずみ曲線

表2 同定したY-Uパラメータ

Y [MPa]	a0 [MPa]	C1	C2	b [MPa]
488.9	356	408.9	272.7	113.6
m	Rsat [MPa]	h	E0 [GPa]	Ea [GPa]
17.51	213.2	0.35	200	160

3.3 プレス成形解析結果

プレス成形解析結果を図.9に示す。

a.はYUパラメータを使用しない解析結果、
b.はYUパラメータを使用した解析結果である。



a.YUパラメータなし



b.YUパラメータあり

図9 解析結果

3.4 テストプレス結果

テストプレス品を図.10に示す。

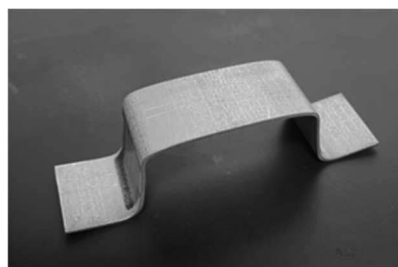


図10 テストプレス品

プレス成形解析結果とテストプレス品の差異を評価するための寸法測定箇所を図.11に示す。

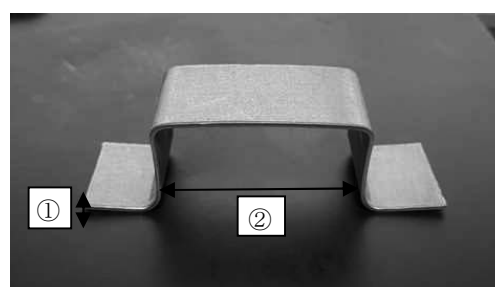


図11 結果比較のための測定箇所

比較結果を表.3に示す。

表3 結果比較

	①[mm]	②[mm]
テストプレス	1.6	39.5
YUパラメータあり	1.4(-0.2)	39.6(+0.1)
YUパラメータなし	0.5(-0.9)	38.3(-1.2)

YUパラメータを使用すると、使用してい

ない場合と比較して 4 倍以上予測精度が向上した。今回開発した治具で取得した YU パラメータがプレス成形解析による形状予測精度に寄与していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、プレス解析用の材料パラメータ取得の可否について評価した。

引張圧縮試験により、圧縮側の応力ひずみ線図の取得した。取得した応力ひずみ線図より材料パラメータを同定した。

取得した材料パラメータをプレス成形解析ソフトへ適用し、解析結果とテストプレス品での評価を行った。

テストプレス品とプレス成形解析結果の比較から、有用な材料パラメータの取得ができていることを確認できた。材料パラメータ取得サービス提供が可能な水準を確保したと考えられる。

謝 辞

本研究の進捗に当たり、鈴木工業株式会社、有限会社永井製作所よりご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 上森 武，藤原賢司，岡田達夫，吉田総仁：塑性と加工，42（2001），64-69.

樹脂/ゴム製品の熱劣化解析のための

FT-IR スペクトルライブラリの構築

渡辺元浩・岩沢知幸・中曽根佑一

Building of FT-IR spectral library for thermal degradation analysis of resin/rubber products

WATANABE Motohiro, IWASAWA Tomoyuki, NAKASONE Yuichi

樹脂/ゴム製品の異物、異常調査に関する依頼分析の高度化、サービスの向上を目的として、複数の加熱した樹脂/ゴムの赤外スペクトルを測定し、ライブラリを作成した。これらの加熱した樹脂/ゴムは加熱前の状態と比較して、赤外スペクトルのピーク変化が確認された。これらのピーク変化は、酸化や主鎖の切断、官能基の構造の変化が発生していることが示唆された。

キーワード：FT-IR、樹脂、ゴム、高分子、熱劣化

For sophistication of requested analysis and improvement of service concerning foreign matter and abnormality investigation of resin/rubber products, infrared spectra of several heated resins/rubbers were measured, and a library was built. Peak changes in the IR spectra of these heated resins/rubbers were observed compared to the state before heating. These peak changes suggested that oxidation, cleavage of the main chain, and changes in the structure of the functional groups had occurred.

Keywords : FT-IR, Resin, Rubber, Polymer, Thermal degradation

1 まえがき

群馬産業技術センターでは、樹脂/ゴム製品中の異物、樹脂製品の変色など、樹脂/ゴム製品の異常について技術相談をうけることがある。これらを依頼分析として赤外分光分析を行った結果、熱、紫外線などを原因とする樹脂/ゴムの劣化が影響している可能性がある事例が散見される。

依頼分析には群馬産業技術センターで保有している市販のライブラリを主に活用している。これらのライブラリのスペクトルは試薬由来のスペクトルが多く、これまで樹脂が劣化したスペクトルデータは体系的に保有していなかった。

そこで、群馬産業技術センターで独自に樹脂/ゴムを劣化させた上で、スペクトルデータを取得し、ライブラリを作成することで、樹脂/ゴムの劣化品に関するデータ、知見を提供

することを目標とした。

2 方法

2.1 試料

試料は添加剤・充填剤などの影響を減らすため、ポリプロピレンなど、試薬があるものはSigma-Aldrich社製の試薬を用いた。ウレタン、ニトリルブタジエンゴムなど試薬が見つからないものについては、市販の製品を用いた。本研究の期間で合計16種類の樹脂/ゴムに対して以下の加熱、測定を実施した。

2.2 加熱・劣化

試料の加熱には、TG-DTA (NETZSCH社製TG-DTA2000S)を用いた。試料をアルミナもしくはアルミニウム製の試料容器に入れ、試料温度が150~400℃の範囲で選択した温度、加熱時間になるようにプログラムを設定して空気雰囲気下で加熱を行った。

2. 3 測定

加熱を行った樹脂は、一部をサンプリング後にダイヤモンドコンプレッションセルにて圧延薄片化して測定サンプルを作成した。その後、Thermo Fisher Scientific 社製フーリエ変換赤外分光分析装置 iS50 及び赤外顕微鏡 Continuum を用い、顕微透過法により測定した。

3 結果

測定の結果、加熱を行った試料は、試料の種類や温度の違いにより、酸化や分子構造の変化を示す赤外スペクトルのピーク増減が確認された。以下に4つの例を示す。なお、測定に用いたポリエチレン、ポリブチレンテレフタレート、エチレン酢酸ビニル、スチレンブタジエンはいずれも Sigma-Aldrich 社製の試薬を用いた。

3. 1 ポリプロピレン、エチレン酢酸ビニル

ポリプロピレン(PP)は、加熱することで、 1715cm^{-1} 前後に新しいピークが出現した。このピークは、カルボニル基の $\text{C}=\text{O}$ 振動であり、樹脂の一部が酸化したことを示している。また、加熱温度を高くして更に酸化を進めると、カルボキシ基を示す 1765cm^{-1} のピークが検出された。

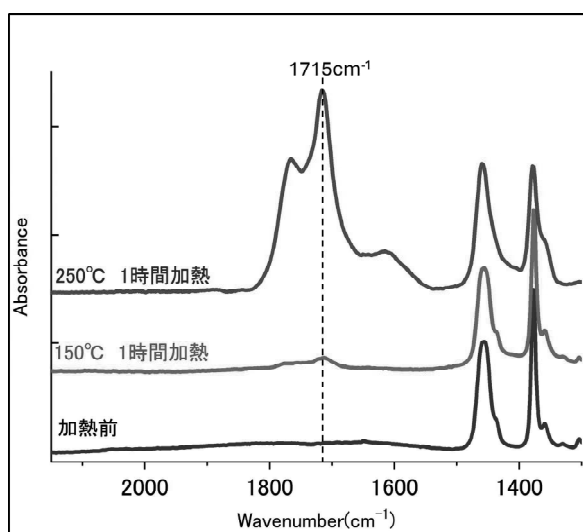


図 1 PP およびその加熱品の赤外スペクトル

エチレン酢酸ビニル(EVA)は側鎖に酸素

を含んでおり、加熱前より 1735cm^{-1} に $\text{C}=\text{O}$ の振動を示すピークが存在する。EVA を加熱すると、 1735cm^{-1} のピークの幅が広がることを確認された。これは、EVA の官能基に $\text{C}=\text{O}$ の結合を有していたことに対し

加熱による酸化は主鎖、側鎖において、不規則な箇所が発生していることが考えられる

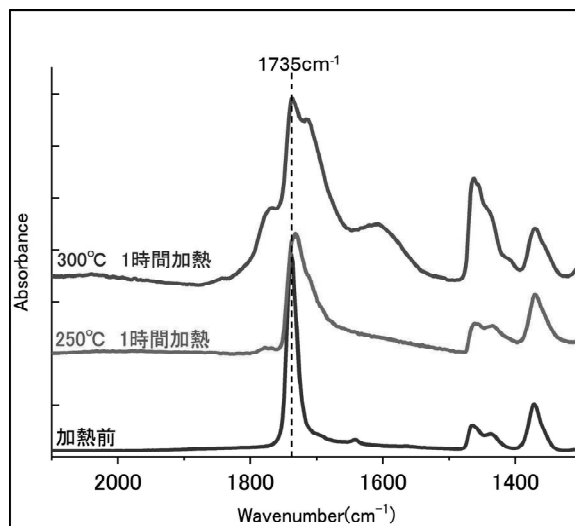


図 2 EVA およびその加熱品の赤外スペクトル

3. 2 ポリブチレンテレフタレート

ポリブチレンテレフタレート(PBT)は、加熱することで 1250cm^{-1} のピークが減少した。このピークは、PBT 中の主鎖に含まれるエステル結合のピークであり、熱によって切断されたことを示唆している。

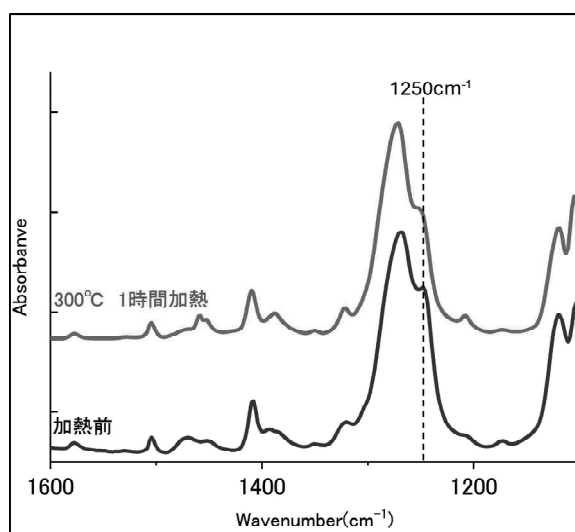


図 3 PBT およびその加熱品の赤外スペクトル

3. 3 スチレンブタジエン

スチレンブタジエン(SBC)は加熱すること

で、3.1 同様、酸化を示す C=O のピークが 1720cm^{-1} に検出された。それに加えて、ブタジエン由来の C=C 結合を示す 965cm^{-1} のピークが減少していることが認められた。ブタジエンのピーク減少は、C=O のピーク検出よりも低い温度で発生したことから、劣化の検出において有効なピークであると考えられる。

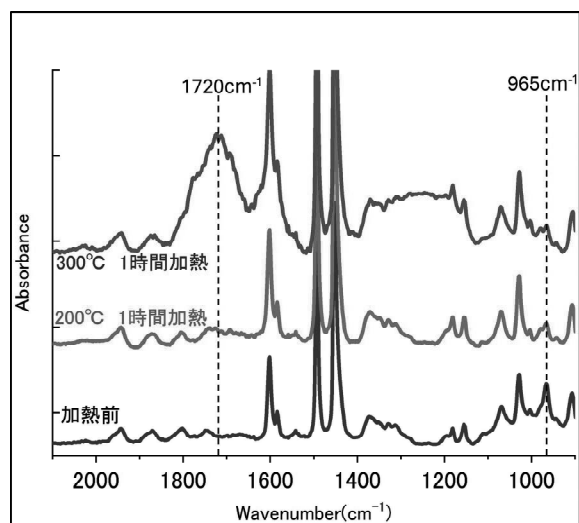


図 4 SBC およびその加熱品の赤外スペクトル

4 まとめ

樹脂/ゴムを加熱することで生じる構造の変化を赤外分光分析で測定した。分析の結果、加熱を行った試料は、(1)酸化(2)主鎖の切断(3)官能基の変性などの状態変化が赤外スペクトルとして検出された。

これらの試験で得られたスペクトルは、製品の劣化調査、異物分析などの依頼分析において、有用なデータとして活用できる。

参考文献

- 1) 赤木剛ほか：宮崎県工技セ、R2 年度研究発表会要旨、6(2021)
- 2) 佐藤亨：新潟工技総研、H30 年度工業技術研究報告書、68(2018)
- 3) 石塚智也ほか：「高分子の劣化・変色メカニズムとその対策および評価方法」株式会社 R&D 支援センター (2014)

製品加工に対する異常検知システムの実装

高橋慶行・青柳大志*・小和瀬登**
狩野幹大*・新井宏章***

Implementation of anomaly detection system for product processing

TAKAHASHI Yoshiyuki, AOYAGI Hiroshi, KOWASE Noboru, KANO Motohiro, ARAI Hiroaki

製品加工における不良率低減および生産性向上を図るため、生産時の加工異常を検知するシステム構築を行った。さまざまな不具合要因を解決するため、プロトタイプデジタル機器を使用したオリジナルの異常検知システムを、企業が保有する量産設備を用いて実装した。

キーワード：異常検知, データ収集, 可視化, 通知, プロトタイプ, IoT

In order to reduce the defective rate and improve productivity in product processing, we built the system to detect processing abnormalities during production. In order to resolve various causes of failures, we implemented an original anomaly detection system using prototype digital equipment using mass production equipment owned by the company.

Keywords: anomaly detection, data collection, visualization, notification, prototype, IoT

1 はじめに

製造業の現場では、さまざまな設備を用いて製品を生産している。これらの設備は、生産性向上や品質向上のために大きな役割を担い、迅速かつ正確な作業を行うことができる。一方で、設備に適した加工状態でなければ、本来の性能は発揮されず、寸法不良などの不具合を導き大きな損失に繋がる。

本研究では、製造現場における不具合の発生を解消するため、デジタル技術を活用して加工状態を可視化し、異常を検知することを目的とする。変動する加工状態に対し、プロトタイプデジタル機器で構成した異常検知システムを、企業が保有する量産設備を用いて実装する。

2 方法

2.1 不具合に対する原因と対策

製造現場では、様々な要因で不具合が生じる。本研究では、歯科用精密医療部品において、最も不良率が高い製品に注目し、デジタル技術を活用して問題解決を行った。ここで、過去に発生した具体的な不具合事象について紹介する。ドリルで加工された2つの異なる円筒穴において、同軸度 $\Phi 0.01$ を外れる加工不良が発生した。この不具合に対する、原因と対策を表1に示す。

表1 不具合要因に対する原因と対策

	不具合要因	原因	対策
1	温度 (設備/材料)	温度高低差による、設備動作と材料膨張ばらつきによる精度不良	設備/材料の温度管理
2	切削油 (透過度/汚れ)	切削粉塵等の混在による切粉の排出不具合による加工不良	切削油の透過度管理
3	ドリル (摩耗/欠損)	ドリル工具の摩耗および欠損による加工不良	ドリル/材料の接触による電流値管理

不具合の発生は、企業にとって大きな損失になる。本研究の目標として、ターゲット部品における不良発生率を、企業目標である3%以下/月に定めた。3%以下にすることで、不良品の材料費、不具合対応に伴う人件費を計上した効果金額を、約70万円/月とした。

2.2 センサ選定とデータ収集

表1で定める3つの不具合要因に対して、センサおよびデジタル機器を選定し、加工状態のデータ収集を行った。選定するセンサは、安価で入手しやすくデジタル機器との親和性を考慮した。

1つ目の温度は、BOSCH社のセンサBME280を用い、生産設備と材料置き場に設置した。測定したデータは、WiFi機能を搭載したESP-WROOM-32によりMathworks社が提供するThingSpeakTM(¹⁾(無料版)IoTプラットフォームにデータを送った。

2 つ目の切削油は、キーエンス社のセンサ FU-80MTZ を使用し、切削油タンク内の不純物や汚れを透過度として測定した。通信モジュールは NQ-MP8L を用いて PC で制御しデータを収集した。

3 つ目のドリルは、切削中の負荷率の変動を測定するため、サラ社のセンサ 3702-150N/191 を選定した。このセンサは、ドリルと材料の接触時に発生する負荷抵抗を測定し、Arduino MEGA により制御され、測定データは PC に収集した。使用した 3 種類のセンサ写真を図 1 に、センサおよびハード/ソフトウェアの仕様を表 2 に示す。



1. 温度用センサ 2. 切削油用センサ 3. 電流用センサ
図 1 各種測定センサ

表 2 センサ/ハード/ソフトウェア

不具合要因	センサ	ハード/ソフトウェア
1 温度 (設備/材料)	温湿度気圧 AE-BME280	・ ESP-WROOM-32搭載マイコンボード ・ Arduino IDE 2.3.2
2 切削油 (透過度/汚れ)	透過型センサ FU-80MTZ	・ 通信モジュールNQ-MP8L + PC ・ NQ Sensor Monitor
3 ドリル (摩耗/欠損)	CTセンサ分割型 3702-150N/191	・ Arduino MEGA 2560 R3 + PC ・ Arduino IDE 2.3.2

2. 3 可視化と異常検知

生産時のデータを収集することで、加工中の詳細情報を蓄積することができる。蓄積されたデータを分析および可視化するため、MATLAB^{®2)} App Designer (R2022a Update2) を用いた。MATLAB は、2021 年度に群馬産業技術センターが導入した開発環境であり、MathWorks 社が開発した数値解析やシミュレーション、可視化のためのソフトウェアである。

この App Designer は、さまざまな表示や配色を容易にレイアウトすることができるため、ユーザの要望を細部まで反映した、オリジナルのダッシュボードを作成することができる。ダッシュボードのデザインは、ノーコードで作成可能なため、プログラム初心者でも着手しやすい。

異常通知に関しては、3 つの開発環境を用いた。1 つ目はデータを収集・蓄積するための IoT プラットフォーム Thingspeak、2 つ目は異常データを解析する MATLAB、3 つ目は異常をタブレットに受信するための SNS アプリ slack³⁾ と、Thingspeak との通信インターフェイスである slack_api を用いた。

また、不具合が発生した際の異常通知は、作業者が所有するタブレットへ通知される。通知が発信される閾値に関しては、製品の良好な加工状態を検証した上で数値化し決定した。発信に関する管理閾値を表 3 に示す。

表 3 不具合要因と管理閾値

	不具合要因	管理閾値
1	温度 (設備/材料)	適正温度：15°C以上および33°C以下
2	切削油 (透過度/汚れ)	適正透過度：56以上
3	ドリル (摩耗/欠損)	適正電流値：異常度14以下

2. 3. 1 温度に対する可視化と異常検知

温度センサで収集したデータは、インターネット経由で Thingspeak へ送られる。今回用いた温度センサ BME280 は、温度に加え湿度、気圧も同時に測定することが可能である。温度を含む 3 つのデータは、MATLAB App Designer を用いて開発した、ダッシュボードで可視化した。

異常検知に必要な温度データは、Thingspeak に蓄積される。通知発信の閾値は、Thingspeak にある Thingspeak_React コマンドで発信の数値を設定し、Thingspeak_HTTP で異常時のコメントを入力し、slack_api を介して slack へ送信される。通知用の設定画面を図 2 に、温度の可視化と異常検知に対するシステムフローを図 3 に示す。

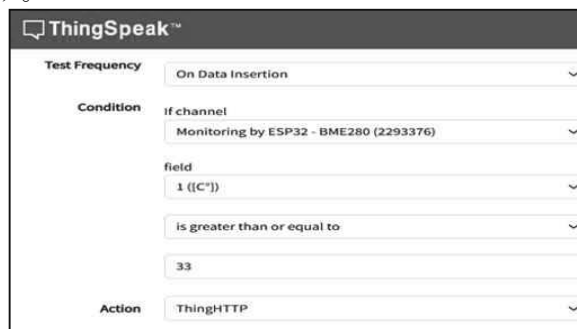


図 2 異常通知用 Thingspeak の設定コマンド

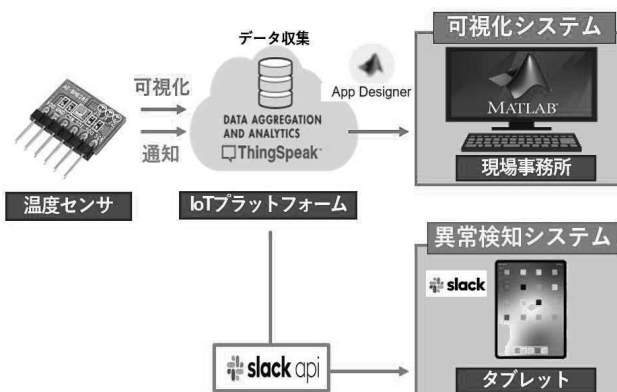


図 3 温度のシステムフロー

2. 3. 2 切削油に対する可視化と異常検知

切削油センサで収集したデータは、PC へ送られる。蓄積データに対しダッシュボードを用いて、切削油の透過度を棒グラフで示した。現場で一括管理できるよう、温度、湿度、気圧に加え切削油の 4 項目を同じモニターで管理するようダッシュボードを作成した。異常検知に関しては、温度同様 Thingspeak の設定を行った。切削油の可視化と異常検知に対するシステムフローを図 4 に示す。

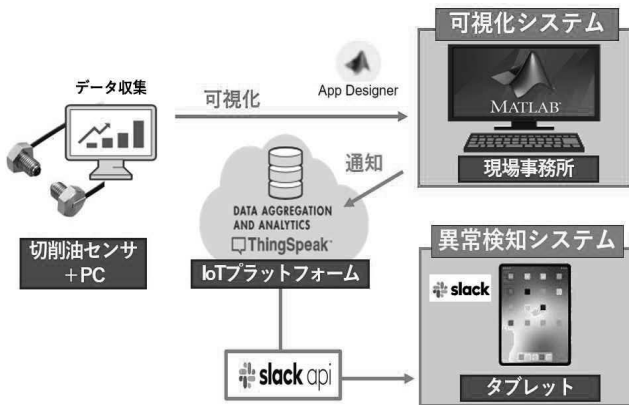


図 4 切削油のシステムフロー

2. 3. 3 電流に対する可視化と異常検知

電流センサで収集したデータは、PC へ送られ蓄積される。データを可視化し加工状態を常時確認するため、正常時は緑色ライト、異常時は赤色ライトをダッシュボードに表示した。

異常検知に関しては、まず過去の生産データを MATLAB で解析し、正常データを抽出した。異常の検出には、加工データと正常データとの差を数値化する。この方法は、K 近傍法 (K-Nearest Neighbors, KNN) に基づく解析手法で、測定対象となるデータとその近傍点との距離 D を計算する。異常度が高い場合、そのデータは周囲のデータから大きく離れていることを示し、異常とみなされる。概略図を図 5 に示す。

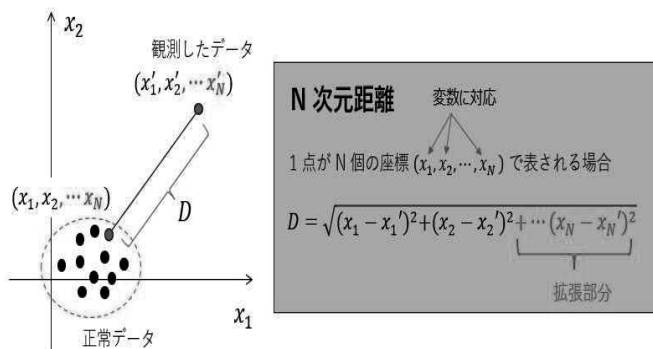


図 5 K 近傍法を用いた異常検知

一方、電流の異常通知に関しては、温度同様 Thingspeak の設定を行った。可視化と異常検知に対するシステムフローに関しては、図 4 の切削油と同様に設定を行った。

3. 実装結果

本研究で構築した異常検知システムは、企業が保有する量産設備を用いて実装した。まず、温度、湿度、気圧、切削油の 4 点に関する可視化については、工場内の現場事務所のモニターに表示し、作業者が常に状態を確認できる環境整備を行った。また、設定した異常閾値を超えると、モニターの表示コメントと数値の色が変化することで、その場で確認することが出来る。図 6 に現場事務所に設置した可視化モニターを示す。



図 6 現場事務所の可視化モニター (温度、湿度、気圧、切削油)

次に、ドリルの摩耗および欠損状態を確認するため、電流値を可視化した。図 7 に現場事務所の可視化モニターを示す。



図 7 現場事務所の可視化モニター (電流)

画面左上には、加工状態の正常/異常が判断できるよう、緑/赤のライトで識別できる。画面上段の波形は、過去 3 か月分の電流データから抽出した正常データである。このデータに対し、生産中に取得された加工データが随時、画面中段で表示される。

画面下段は、正常データと加工データの差を異常度として数値化される。異常度は検証の結果、14を超えた場合のみ、検出されるよう設定した。異常数値が検出されると、システムに回数がカウントされる。一方、異常数値は瞬間的に上昇する可能性があるため、14を超える数値が連続して3回検出された場合のみ、赤色ライトが点灯する。このように、正常/異常をデジタルで管理することで、個人の判断に依存することなく、工場にいる全ての作業者が正しい判断をできるようになった。

一方、異常により発信された通知例を図8に示す。通知は、インターネットを経由してタブレット（slack）に送信されるため、作業者が生産現場から離れても、異常を把握することができる。作業者が不在の夜間においても、slackが確認できる環境であれば工場外でも通知が届くため、24時間確認できるようになった。また、通知には具体的な異常内容が記載されているため、生産ラインで改めて不具合事象を確認する必要がなくなり、円滑な復旧作業が可能となった。



図8 タブレットによる異常通知

4 まとめ

本研究により、製品加工に対する異常検知システムの実装を行った。このシステムは、プロトタイプによる異常検知の事例として、量産設備における実用性を確認できた。一般的に、本研究と同等のシステム構築には、1000万円以上の高額な費用が必要となる。本研究での必要経費は約45万円であり、低コストでオリジナルの可視化および異常検知の実装を行うことができた。

約2か月間実装した結果として、目標としていた不良発生率3%以下に対して、不良発生率0.5%/月となり、得られた効果金額は約78万円となった。

今後の方針としては、デジタル技術の更なる進展のため、ノウハウ構築を行っていく。方法や解決手段、ソフトや使用機器等のデジタル内容を仕様書としてまとめていくことで、情報共有や技術伝承にも繋がる。また、地域SIerとも連携し、中小企業に対してより幅広い範囲で、よりスピーディーに支援を行い、デジタル技術の成果に対して、実証および実感してもらえるよう、継続的に進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究の遂行にあたり、スバル工業㈱の野村社長様はじめ従業員の皆様に、多大なるご協力を頂いた。ここに記して、深く謝意を表する。

参考文献

- 1) <https://thingspeak.com/>
- 2) <https://jp.mathworks.com/>
- 3) <https://slack.com/>

異物分析システムの開発

田島 創・町田晃平*・永田昌弘

Development of contaminant analysis system

TAJIMA So , MACHIDA Kouhei and Masahiro Nagata

本研究では、対象物の画像を入力として、人工知能（AI）で作製した学習モデルによりこの対象物の種類を推定して出力する異物分析システムを開発した。この学習モデルは、機器分析などにより種類を特定した科学的根拠に基づいた対象物のみ利用し、複数の対象物の画像を機械学習して作製した。この異物分析システムは、スマートフォンにダウンロードできるアプリケーションから成るため、産業分野において利用しやすいと考えられた。

キーワード：異物分析、機械学習、人工知能、スマートフォンアプリ

In this study, we have developed a foreign substance analysis system that uses an image of a substance as input and uses learning models created by artificial Intelligence (AI) to estimate and output the type of the substance. This learning model was created by machine learning images of multiple substance, using only scientifically based ones whose types has been identified through instrumental analysis. The analysis system was thought to be easy to use in the industrial field because it consists of an application soft that could be downloaded to a smartphone.

Keywords : foreign substance analysis system、machine learning、artificial intelligence、smart-phone application soft

1 まえがき

製造業において、製品に含まれる異物は、本来製品に含まれるべきではない物質であるため、異物が製品中に認められた場合には問題となる。特に食品工業分野において異物が認められた場合には、消費者がこの異物を口に含むことも容易に想像できるため、早急な対策が求められる。

一方、異物を分析する際、目視又は顕微鏡観察による外観の確認、電子線マイクロアナライザーなどによる成分分析、赤外線吸収スペクトルの測定による有機物の同定などが初期対応として実施されるが、いずれも費用と時間が必要となるため、速やかな対応が求められる場合には課題となっていた。

本研究では、異物が認められた際に行われるこの目視による観察を補助することを目的

とした異物の種類を推定する異物分析システムを開発した。この異物分析システムは、iPhone用アプリケーションソフトであり、対象となる物質の画像を入力とし、この物質の種類を出力する人工知能により作製した解析モデルを搭載した。現在は試作品であるβ版をダウンロードできる状態にあり、20社ほどで利用されている。

2 方法

2.1 異物分析システムの構成

この異物分析システムの構成を示す。分析器本体は、Apple社製iPhoneとし、10、11、12、13、14及び15で動作を確認した。本研究で作製した学習モデルを搭載したアプリケーション（以下、アプリ）は、SwiftUIを用いて作成し、iPhoneにダウンロードできるようにした。β版の公開を行い、ダウンロードしたβ版が適切に

動作することを確認した。

対象物が5 mm未満の大きさとなる場合を想定し、対象物の画像を取得の際に iPhone の画像取得機能の拡大機構と、10 倍から 20 倍の対物レンズとをそれぞれ併用できるようにした。

2. 2 異物分析システムの学習モデル

この異物分析システムの機能は、対象物の画像を入力してこの対象物の種類を出力とする、物質の種類を推測するものである。この推測には、事前に人工知能を用いて作製した学習モデルを用いる。この学習モデルは、機器分析により種類を特定した複数の対象物の画像を教師データとし、これを機械学習することで作製した。学習モデル作成のための教師データは、iPhone の画像取得機能を用いて取得した。対象物の種類は、無機物、岩石、樹脂（プラスチック含む）、骨、歯、爪、タンパク質、植物片、甲殻類、昆虫、植物片及び不明の 12 種類とした。

2. 3 異物分析の方法について

この異物分析システムでの分析の方法は次のとおりである。まず、簡便性を追求し、アプリ選択から解析結果を得るまでのタップ数を 5 未満に設定した。具体的には、①アプリ選択、②「スタート」で画像取得機能の立ち上げ、③「撮影」で対象物を撮影、④「解析する」で、「解析」で結果を出力、の 4 工程を含むアプリを作成した。解析結果は、一致率の高い種類から上位 3 種を表示するようにした。対象物の画像を再度取得したい場合は、「再度撮影」をタップすると新しい画像を取得できるようにした。

2. 4 推定精度について

この異物分析システムの推定精度を検証するため、60 種の鉱物標本（東京サイエンス社製）の種類を推定する実験を行った。この鉱物サンプルごとに、画像数 20 枚（計 1200 枚）と 50 枚（計 3000 枚）を撮影して教師データを得た。この教師データにより学習モデル M20 と M50 とをそれぞれ作成した。これら学習モデルを用いて、この 60 種の鉱物を推定した。学習モデルごとの解析精度は、各鉱物を対象に 5 回ずつ計 300 回の解析を行い、当該鉱物が上位 3 位に選ばれる割合として求めた。

2. 5 アンケート調査

この異物分析システムの使いやすさを評価するため、食品工業に携わる約 30 名の来場者に実際に利用していただき、画面の見やすさ、操作のしやすさ、解析結果の出力に対する意見などについてアンケート調査を行った。この約 30 名の来場者は、群馬産業技術センターの業務に理解と興味を持つ、アーリーアダプターとして設定した。

3 結果

3. 1 アプリについて

このアプリの名称は、「これって何だろう？」から、「Corette（コレット）」と命名し、第 9 類 ダウンロードできるアプリケーションソフト、理化学機器として商標登録¹⁾した。この異物分析システムのアプリ立ち上げ後に表示される iPhone の初期画面、タンパク質及びカニの甲羅の一部を推定した結果を図 1 に示す。

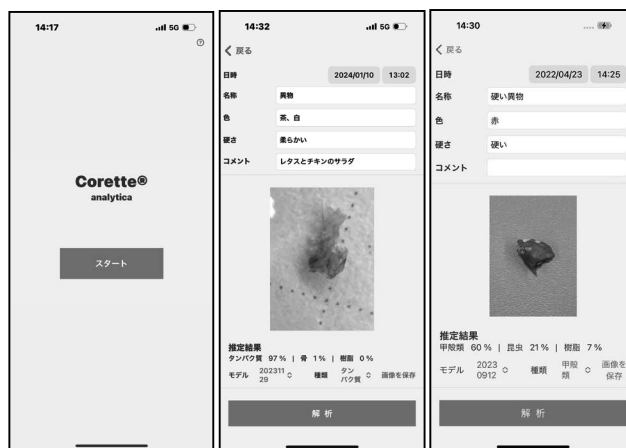


図 1 アプリの初期画面（左）、タンパク質（中央）とカニの殻（右）の解析結果

3. 2 異物分析用学習モデル

教師データとして利用しなかった対象の画像をこのアプリで新たに取得して、異物推定用学習モデルで推定した結果、多くの場合、機器分析によりこの対象を分析した結果と矛盾しない結果が得られた。一方、対象の画像を取得する際、対象表面に反射した光が画像に強く含まれる場合は、この対象を無機物と判定する誤判定が多く認められた。この結果から、対象を撮像する際の仕様として、反射光に対する記述を行

うことが重要と考えられた。

合計 1000 回ほどこの推定を行ったが、このアプリによる分析方法については、違和感なくかつ直感的にできると考えられた。

3. 3 解析精度について

このアプリの解析精度を調べるため、60 種の鉱物サンプルを対象とし、60 種ごとに 20 枚の教師データを取得した学習モデル M20 と、50 枚の教師データを取得した学習モデル M50 とをそれぞれ作成した。それぞれのモデルを用いて、鉱物ごとの判定率を求めた。学習モデル M20 では、当該鉱物の判定結果が 60 種中上位 3 位に入る確率は 88% (264/300) だった。教師データ数を 50 にした M50 では、この確率は 95% (285/300) となり、7%程度改善した。また、M20 では、鉱物サンプルの一つである硫黄を誤判定するケースが多く認められたが、M50 では、このような誤判定の偏りは認められなかった。教師データ数が増えることで、解析精度が向上することが確認できた。

岩石を対象としたモデルや、節足動物を対象としたモデルでは、現時点では教師データが不足しているため、十分な解析結果が得られていない。しかし、今後学習データを蓄積することで、有用な学習モデルを作成できると考えられた。

3. 4 知的財産権取得への取り組み

本研究で開発したアプリでは、対象の推定ができることを確認した。独立行政法人工業所有権情報・研修館の特許情報プラットフォームにおいて先願調査をしたところ、このアプリを含む異物分析システムに新規性があると判断したため、発明の名称を「種類判定システム」として群馬県から特許庁あて特許出願した¹⁻²⁾。

また、このアプリの名称「Corette」について、他の商品やサービスとの差別化を図るべきと判断したため、区分第 9 類の「ダウンロードできるコンピュータプログラム（アプリ含む）及び理化学機械器具」を指定商品として、商標登録願を群馬県より特許庁あて提出し、商標として登録した³⁾。

3. 5 アンケート調査について

アーリーアダプターを対象としたこのアプ

リを用いた異物分析のデモンストレーションに対するアンケート調査の結果、画面の見やすさについては、見やすい 96%、見にくい 4%となった。分析については、直感的にできる 28%、まあまあ直感的にできる 52%、慣れが必要だ 20%となった。画面の見やすさと画面遷移については、良い評価が得られたが、画像取得時のピント合わせや拡大など、スマートフォンの操作を含む画像の取得に慣れが必要との評価だった。

アプリの利用に係る金額についての質問は、「この分析器の月額使用料がいくらなら購入を検討するか」とし、月額使用料として、2,000 円、5,000 円、10,000 円及び購入は検討しないの 4 つの選択肢を設けた。この質問に対し、2,000 円 44%、5,000 円 44%、10,000 円 0%、その他 12% の回答を得た。この結果から、アーリーアダプターを対象とはしたもの、88%の方が月額使用料 2,000 円であれば、このアプリの購入を検討することが確認できた。金額に対するその他の意見は、年間使用での割引や回数ごとの課金、1 ライセンスで複数台の利用など、より低い金額設定の希望であり、課金を否定するものではなかった。一方、使用した感想として、より高い精度を求める意見が多かった。想定する利用者との情報共有を繰り返し行うことで、より精度の高い分析システムを構築することが必要と考えられた。

4 まとめ

産業分野などで認められる異物の種類を、画像により推定する異物分析システムを開発した。この異物分析システムは、iPhone 用アプリケーションとした。この分析システムの名称を「Corette」とし、商標登録した。また、この分析システムについて、特許出願を行った。今後は、より精度の高い分析が行えるよう、教師データの取得とモデル化を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 特願 2022-139978 号
- 2) 特願 2023-156581 号
- 2) 商標出願 2022-145990

金属積層造形技術を活用した管巻機の長寿命化にかかる研究

小林興尚・齋藤宏****・齋藤裕文****

三ツ木寛尚*・狩野幹大**・小宅智史***

Research on prolonging the lifespan of warping machines utilizing
metal additive manufacturing technology

KOBAYASHI Okihisa, SAITO Hiroshi, SAITO Hirohumi,
MITSUGI Hironao, KANOHI Motohiro and OYAKE Satoshi

伝統織物製造に関連する機器の一部では、メーカーの撤退が原因で、消耗品や交換部品の入手、機器修理が困難な現状があり、シャトル織機での織物生産は必須となる管巻機も修理や更新が困難な状況にある。本研究では、管巻機を運用し続けるために部品を再生することを目指し、レーザースキャナを用いて管巻機の周囲環境や外観形状を記録するとともに、産業用 X 線 CT と金属積層造形技術を活用して補修部品の再生に取り組んだ。

キーワード：管巻機、シャトル織機、レーザースキャナ、X 線 CT、金属積層造形技術

In some equipment related to traditional textile manufacturing, the withdrawal of manufacturers has resulted in a challenging situation where obtaining consumables, replacement parts, and equipment repair services is difficult. Additionally, bobbin winders, essential for fabric production on shuttle looms, also face challenges in repair and updating. This study aimed to regenerate parts to continue operating bobbin winders. Using laser scanners, the study recorded the surrounding environment and external appearance of the bobbin winders. Furthermore, the study employed industrial X-ray CT and metal additive manufacturing technology to tackle the regeneration of repair parts.

Keywords : Warping machines、Shuttle loom、X-ray CT、laser scanner、metal additive manufacturing technology

1 まえがき

群馬県立産業技術センターは、令和 3 年 4 月 1 日から群馬県繊維工業試験場を統合し、群馬産業技術センター（前橋）、東毛産業技術センター（太田）および繊維工業試験場（桐生）の 3 拠点新体制としたことで支援範囲の拡大、支援体制の拡充を進め、相互に連携することで多分野の知識、技術が必要となる内容の繊維産業支援にも取り組んでいる。

繊維工業試験場は古くから繊維産業の支援

を行っており、織物を生産するために必要な様々な機器を所有している。そのうちの一つに管巻機があり、昭和 50 年頃から稼働している。管巻機はシャトル織機で織物を生産する際の準備に必要な専用機で、ヨコ糸を管（くだ）と呼ばれる部品に巻き付ける作業を行うために使用される。準備するヨコ糸の長さは生産ごとに異なるが、長いものでは 1000m 程度の糸を一定の張力で一定の太さに巻き上げることが必要であるため、本専用機以外での作業や人力での作業は極めて困難である。しかしながら、管巻機のメーカーは全社が製造から撤退しているため、消耗部品や交換部品

群馬産業技術センタースマートファクトリー推進係、*電子機械係、**生産システム係、***計測係、****繊維工業試験場 生産技術係

の供給は絶たれており、メーカーによる修理もできない状態にある。管巻機の故障は、シャトル織機での織物製造不能につながるため、繊維業界では、管巻機の故障、部品不足が深刻な問題となっている。

繊維工業試験場では管巻機を3台所有しており、このうち2台は稼働が可能な状態であるが、1台は主に装置上半分の糸を繰り出す機構が欠損し稼働できない状態であり、業界と同様の問題に直面している。今後、稼働中の2台も故障等によって稼働できなくなった場合には、連鎖的にシャトル織機の使用ができなくなり、織物製造技術の研究・支援の範囲を狭めることになってしまう。このことから、昨年度は群馬産業技術センターと繊維工業試験場が連携し、各々が保有する機器及び技術を活用しながら管巻機の長寿命化及び再生にかかる検証を行った。検証内容は、図面のない機構部品のソリッドデータ化とコイルを製造する機器を管巻機として流用するものであり、一定の成果を得た。

昨年度に続き、管巻機を今後も運用し続けるための検討として、本研究では高分解能計測用 X 線 CT システム（以下「産業用 X 線 CT」という）を用いて表面形状データを作成し、金属積層造形技術を活用して部品の再生に取り組んだ。部品再生の際には形状の再設計や構造変更は実施せず、可能な限り工数を削減し、現状の形状を再現することに特化させて検証した。部品再生の方法として金属積層造形を採用した理由は、対象とする再生部品が鋳造部品または複数の部品を組み合わせで作られた組立部品であり、切削加工で作製するには効率が悪いと考えたためである。再生部品のもととなる表面形状データには令和4年度の研究にて取得したデータ¹⁾を流用した。また、管巻機の部品再生の準備として、3D 空間モデリングシステム（以下「レーザースキャナ」という）を用いて管巻機の外観形状や周囲環境を記録し、部品再生の補助となるデータを作成したので併せて報告する。

2 方法

2.1 使用機器

管巻機の外観形状や周囲環境の記録は、群馬産業技術センターデジタルソリューションラボ（DSL）に導入したレーザースキャナ（Focus S plus 150、FARO 社）を使用した。部品の表面形状データ取得は産業用 X 線 CT（Phoenix v|tome|x m 240/180、日本ベーカーヒューズ株式会社）を使用した。産業用 X 線 CT で取得した断面画像のボリュームデータ化および STL 形式への変換は VG Studio MAX3.2（ボリュームグラフィックス株式会社）を使用した。STL データの編集は QuicksurfaceFull（KVS 社）を使用した。

2.2 レーザースキャナによる点群データ化

レーザースキャナのパラメータ設定は、プロファイルは屋内 10m 以内、分解能は 1/8、品質は 4、カラーキャンは ON とした。プロファイルは測定対象との距離、分解能は単位面積あたりに取得する点数、品質は定点の繰り返し数（2 の（品質値-1）乗）、カラーキャンは点群データのカラー化の有無を示す。

2.3 金属積層造形による部品の再生

産業用 X 線 CT と VGSTUDIOMAX での STL データ（表面形状のポリゴンデータ）の取得、QuicksurfaceFull による STL データの修正、金属積層造形の流れで、部品を再生した。対象とした部品は、単体の鋳造部品（以下「単体部品」という）および単体部品とは異なる形状の鋳造部品と他の金属部品とが組み合わされて構成された部品（以下「組立部品」という）の2種類とした。群馬産業技術センターでは、金属積層造形を実施する機器を保有していないため、委託にて造形を実施した。積層造形に使用した機種は Coherent CREATOR（現 2 Create）、メーカーは O.R. Lasertechnologies GmbH。（現 2oneLab GmbH.社）であった。材料は SUS316L、積層ピッチは 25 μ m、レーザーパワーは 107W、レーザースピードは 1200 mm/s、ビーム直径は 40 μ m とした。

造形した部品については産業用 X 線 CT にて表面形状データを取得し、偏差解析により元となった部品と形状を比較した。偏差解析の形状合わせはベストフィットで行った。産業用 X 線 CT での X 線照射条件は、管電圧

200 kV、管電流 170 μ A、X線焦点と測定対象物の間に挿入した金属フィルタは厚さ 1.0mm の銀および厚さ 0.5mm の錫、ボクセルサイズは 57 μ m、投影画像取り込み数 1600 枚、FOD (Focus to Object distance) を 229.4mm、FDD (Focus to Detector distance) を 808.674mm とした。画像再構成の際には、ビームハードニング補正等のフィルタ処理は行わず、中心軸補正のみ行った。

3 結果

3.1 レーザースキャナによる点群データ化

レーザースキャンの結果、パソコン画面上でおおよその採寸を行うことができる点群データを取得した。管巻機の形状を採寸し、その数値を表示した結果を図 1 に示す。点群データは、マスターデータとは別に、閲覧データとして出力したもので、あらかじめ採寸する権限を付与している。このため、専用のソフトウェア不要で採寸作業が可能である。このデータにより、現地に赴かなくとも、管巻機、織機、柱等の構造物の位置関係を確認可能となり、管巻機のおおよその形状も任意のタイミングで確認できるようになった。ただし、レーザーの照射されていない部分の形状は点群データ化されないため、詳細な確認は現地で実施する必要がある。

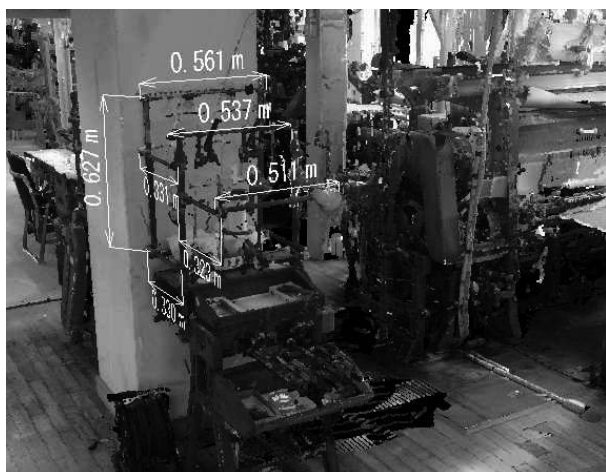


図 1 採寸結果を表示した点群データ

3.2 金属積層造形による部品の再生

単体部品について、金属積層造形の対象とした元部品を図 2、金属積層造形にて作製し

た造形部品を図 3、偏差解析により形状比較した結果を図 4 に示す。元部品と造形部品を比較すると、積層造形の方角に沿って緩やかに全体が湾曲し ± 0.4 mm 程度の差があった。また、造形部品の穴径が 0.2mm 小さく仕上がった。

組立部品について、金属積層造形の対象とした元部品を図 5、金属積層造形にて作製した造形部品を図 6、偏差解析により形状比較した結果を図 7 に示す。元部品と造形部品を比較すると、全体の湾曲の程度は単体部品に比べて小さく、 ± 0.3 mm 程度となった。造形部品の穴径については、単体部品の場合と同様に 0.2mm 小さく仕上がった。

異なる部品形状である鋳造部品および組立部品は、いずれも湾曲した仕上がりとなった。今回の造形では応力を除去するための熱処理は実施していないので、これは残留応力の解放の影響であると考えられる。金属積層造形では、金属粉末をレーザーで溶かして固めることで形状を造形していくが、金属を溶かした後に冷え固まる際には凝固収縮が発生し、さらに周囲の温度に合わせて冷える際には熱収縮が発生する。積層造形では、造形した部分の上にさらに材料を敷いて熱をかけていることになり、これら収縮の影響で残留応力が働き、湾曲の原因となったと考えられる。



図 2 元部品
(単体部品)

図 3 造形部品
(単体部品)

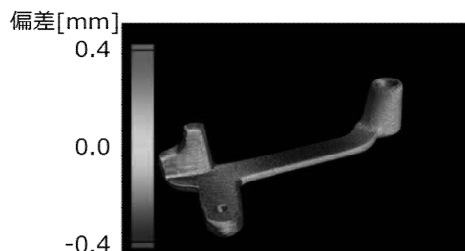


図 4 偏差解析結果
(単体部品)



図5 元部品
(組立部品)



図6 造形部品
(組立部品)

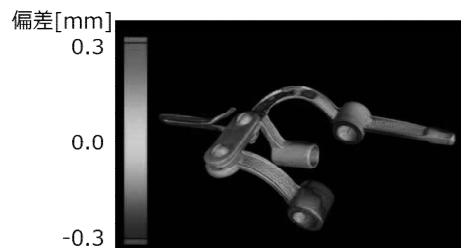


図7 偏差解析結果
(組立部品)

図3に示した造形部品について、穴径を0.2mm 拡張する加工を施し、実機への取り付けを行った。元部品と造形部品をそれぞれ実機に取り付けた際の写真を図8に示す。造形部品について手動による動作の検証を行い、元部品と同様であることを確認した。

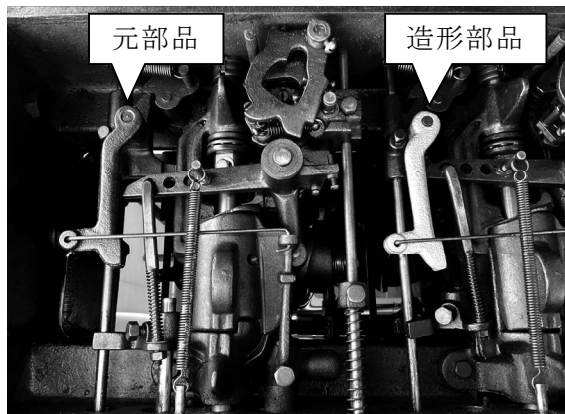


図8 造形部品の実機取り付け

図6に示した組立部品について、穴径を修正すれば取り付けは可能になる見込みであったが、加工を行う際の部品の姿勢保持が困難であったため実施していない。図3の部品のようなシンプルな形状ではなく、組み合わせる部品が多く複雑な形状を有している場合には、機器に取り付けられないことがある。対策としては、造形後に追加で加工を施すことを考慮した形状への変更や、専用の加工用治具を用意することが考えられる。

4 まとめ

レーザースキャナによる管巻機の外觀形状や周囲環境の点群データ化と、金属積層造形によって、管巻機の部品の再生を行った。

比較的小さいサイズの部品であれば、群馬産業技術センターの設備で表面形状の取得・修正を実施することができた。さらに、金属積層造形で得られた造形部品に対して適当な加工を施すことによって実機取り付けが可能となることを確認した。今後は造形部品の強度や耐久性について評価を進める予定である。また、外觀形状や周囲環境をデータ化したことで、現地に行かなくても現場の機器設置状況を把握することができるようになった。カラー化した点群データは、施設管理などに活かすことができる可能性があることから、今後は点群データ利用した施設管理の実施などについての活用を検討していきたい。

参考文献

- 1) 小林ほか：群馬県立産業技術センター研究報告 令和4年度 p36-40
- 2) 戸田裕之：X線CT-産業・理工学でのトモグラフィ実践活用-
- 3) 田中俊敬ほか：産業用X線CTの理解と活用、軽金属学会誌、第71巻、第9号、417 (2021)

ノギス、マイクロメータの出張校正手段の確立

小宅智史・増田直也*・中村哲也

Establishment of on-site calibration ways for calipers and micrometers
OYAKE Satoshi, MASUDA Naoya, NAKAMURA Tetsuya

出張による校正作業は温度変化を伴っており現在、校正作業時の不確かさは明確でない。本研究では、そのような状況下の校正作業の不確かさを明確にすることで、出張校正手段を確立することを目的とする。恒温恒湿器を用いた実験で、校正作業の不確かさの算出に必要な熱的効果の標準不確かさを求めた。その結果、特定の温度条件下では、熱的効果の標準不確かさがノギス校正時には約 $2.6\mu\text{m}$ 、マイクロメータ校正時では約 $0.83\mu\text{m}$ であることが分かった。そして、マイクロメータに関しては校正作業時の不確かさが $3.4\mu\text{m}$ と求まり出張校正手段を確立することができた。

キーワード：出張校正、不確かさ、ノギス、マイクロメータ

Calibration work by business trip is accompanied by temperature changes, and the uncertainty during calibration work is not clear at present. The purpose of this study is to establish a means of on-site calibration by clarifying the uncertainty of calibration work under such circumstances. In an experiment using a constant temperature and humidity device, the uncertainty of the thermal effect, which is necessary for calculating the uncertainty of the calibration work, was determined. As a result, it was found that under certain temperature conditions, the uncertainty of the thermal effect was about $2.60\mu\text{m}$ during caliper calibration and about $0.83\mu\text{m}$ during micrometer calibration. As for the micrometer, the uncertainty at the time of calibration work was determined to be $3.4\mu\text{m}$, and it was possible to establish a means of on-site calibration.

KEY WORD: on-site calibration , uncertainty , calipers , micrometers

1 はじめに

ISO9001への対応やトレーサビリティ確保のために企業では、外部機関での測定機器の校正を行っている。計測係においても様々な測定器の校正依頼を受けているが、最近ではノギス、マイクロメータに関して、出張校正の要望が多い。しかし、現状センターでは出張校正のサービスは行っていない。理由としては、外出先のような校正環境の温度が変化する状況下での校正作業の

不確かさが明確でないためである。校正作業時の不確かさの算出には、①測定器の指示値の標準不確かさ②標準器の標準不確かさ③熱的効果の標準不確かさを求める必要がある。

本研究では、恒温恒湿器を用いた実験により、熱的効果の標準不確かさについて求め、温度変化のある状況下での校正作業時の不確かさを算出し、出張校正が行えるようにすることを目的としている。ここでは、校正作業時の不確かさは①～③の標準不確

かさを合成した合成標準不確かさを2倍した合成拡張不確かさとして定義する。また、①～③を合成した不確かさをここでは校正作業時の合成標準不確かさと定義する。マイクロメータの校正作業時の標準不確かさの算出には、実験から求めた熱的効果の標準不確かさに、センターで既に算出をしている①測定器の指示値の標準不確かさ②標準器の標準不確かさをを用いて算出を行った⁽¹⁾⁽²⁾。

2 実験方法

2.1 校正作業時の不確かさ

マイクロメータの合成標準不確かさは、下記の式で算出できる⁽¹⁾。

$$u^2(E) = u^2(L) + u^2(T) + u^2(L_i) \quad (\text{数式1})$$

ここで、

$u(L)$:マイクロメータ指示値の不確かさ

$u(T)$:ブロックゲージの長さの不確かさ

$u(L_i)$:各種補正項の標準不確かさ

である。以下、これら各成分の標準不確かさの評価を行う。 $u(L_i)$ は、熱的効果と幾何学的効果が考えられる。幾何学的効果については、マイクロメータ指示値の不確かさに含まれると考えられるので、幾何学的効果の不確かさは見積もらない。熱的効果による標準不確かさ $u(L_{\text{thermal}})$ は、下記の式で求められる。

$$u^2(L_{\text{thermal}}) = L_N^2 \cdot \alpha_s^2 \cdot u^2(\delta\theta) + L_N^2 \cdot u^2(\theta) \cdot u^2(\delta\alpha) \quad (\text{数式2})$$

ここで、

L_N :呼び寸法

α_s :標準ブロックゲージの熱膨張係数

$u(\delta\theta)$:マイクロメータとブロックゲージの温度差

$u(\theta)$:マイクロメータ温度の20℃からの偏差値

$u(\delta\alpha)$:マイクロメータとブロックゲージの熱膨張係数の差

なお、合成標準不確かさの計算方法は、ノギスの場合も同様である⁽²⁾。

そのため、本研究では、マイクロメータ（ノギス）とブロックゲージ（キャリパチエッカ）の温度差 $u(\delta\theta)$ 及びマイクロメータ（ノギス）の温度20℃からの偏差値 $u(\theta)$ について実験値から算出を行い熱的効果による標準不確かさを求め、合成標準不確かさ、合成拡張不確かさを算出する。マイクロメータとノギスの各場合について、実験値から求めた $u(\delta\theta)$ 及び $u(\theta)$ は、不確かさが大きくなる場合について考え、実験値の最大値を使用する。

2.2 使用機器

本研究に使用した恒温恒湿器(SSE-74TP-A、株式会社カトー)及びデータロガ(NR-600、株式会社キーエンス)を図1に示す。また、使用した測定器及び標準器を図2に示す。

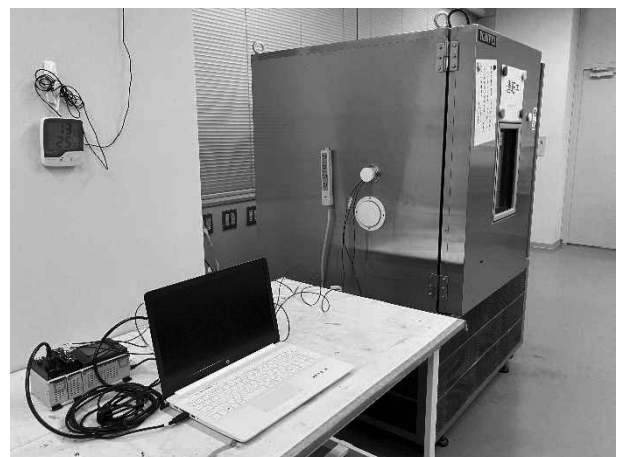


図 1 実験システム(データロガ、温度取得用ノートPC、恒温恒湿器)

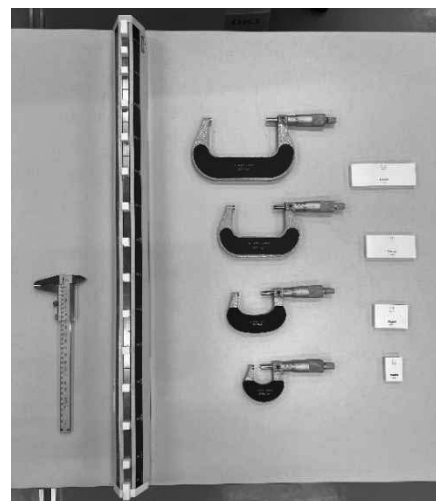


図 2 実験に使用した測定器及び標準器

測定器は、マイクロメータ0mmから100mmまで計4種類とし、ノギスは測定長150mmの1種類とする。

基準器であるブロックゲージは25mm、50mm、75mm、100mmの4種類とし、キャリパチェッカは1種類とした。

2.3 実験条件

実験条件は、年間を通して出張校正を行うことを想定し、夏季(条件1)と冬季(条件2)の温度変化を模擬した条件とした。夏季は高温環境下での測定を、冬季は低温環境下での校正作業環境を想定している。

校正業務を行う時間は最大で9時から16時の間とし、試験時間は7時間とした。恒温恒湿器の設定温度範囲について、条件1の場合は25℃から40℃に設定し、条件2の場合は-5℃から20℃に設定した。

温度条件の決定については、気象庁のHPから今年度の前橋の温度変化を参考にした。また、温度勾配は変化の大きい場合が最も測定器と基準器の温度差が大きくなると考え、1時間当たり3℃の温度変化とした。

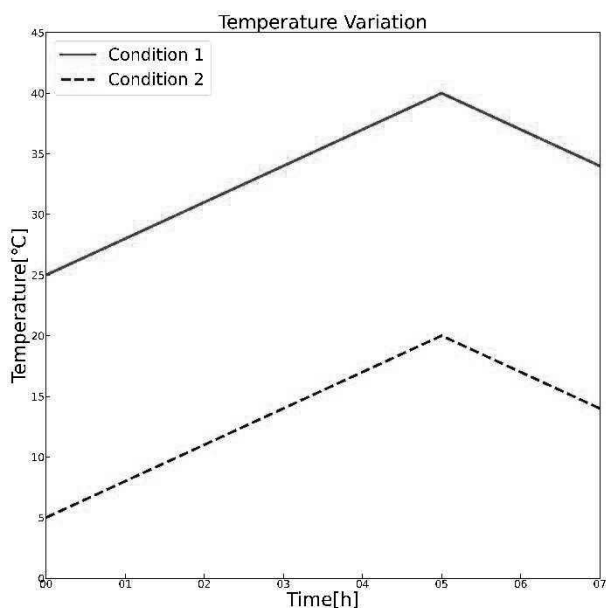


図 3 夏季と冬季を模擬した温度条件

2.4 実験手法

データログに接続した熱電対を恒温恒湿器内、測定器及び基準器に接続し、恒温恒湿器内の温度、測定器の温度及び基準器の温度を取得する。測定器と基準器の組み合わせは下記の表1のとおりである。

表 1 測定器と基準器の組み合わせ

測定器	測定長	標準器	
マイクロメータ	0-25mm	-	25mm
	25-50mm	25mm	50mm
	50-75mm	50mm	75mm
	75-100mm	75mm	100mm
ノギス	0-150mm	キャリパチェッカ	

恒温恒湿器内のブロックゲージ(ノギス)及びマイクロメータ(キャリパチェッカ)に対して熱電対を接続し温度を取得している様子を図4、5に示す。

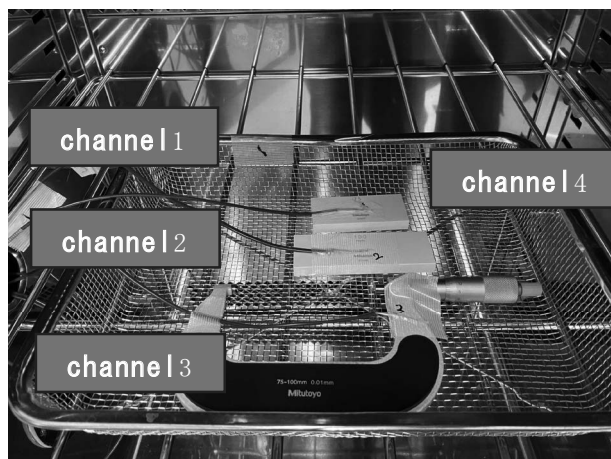


図 4 温度取得の様子(マイクロメータ)

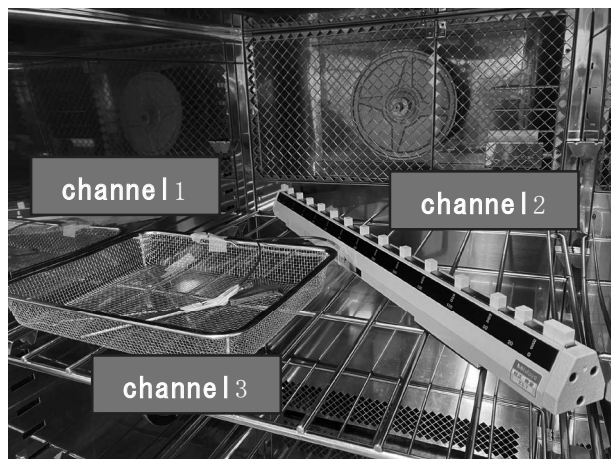


図 5 温度取得の様子(ノギス)

条件1及び条件2において、各チャンネルの熱電対から測定器と基準器及び恒温恒湿器内の温度を1分ごとにデータログで取得を行い、温度取得用ノートPCで記録する。channel1では恒温恒湿器の温度を取得する。

channel3では、測定器(ノギスまたはマイクロメータ)、channel2または4では、標準器の温度の取得を行う。図6に温度取得時の温度取得用ノートPCの画面を示す。

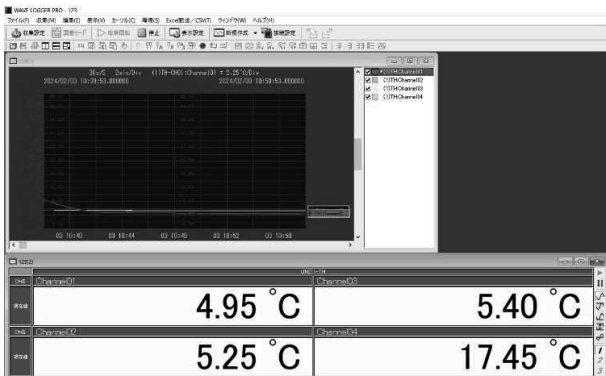


図 6 ノートPCでのデータ取得画面

そして、表1の各測定器及び基準器の組み合わせに対して、温度取得用ノートPCに記録された温度情報から、測定器及び標準器の温度差及び、測定器の20°Cからの偏差値を計算し、熱的効果の標準不確かさを求める。その後、校正作業時の標準不確かさ及び合成拡張不確かさを算出する。

3 結果及び考察

3. 1 夏季(条件1)での測定結果

図7に夏季(条件1)における基準器と測定器の温度差の結果を示す。

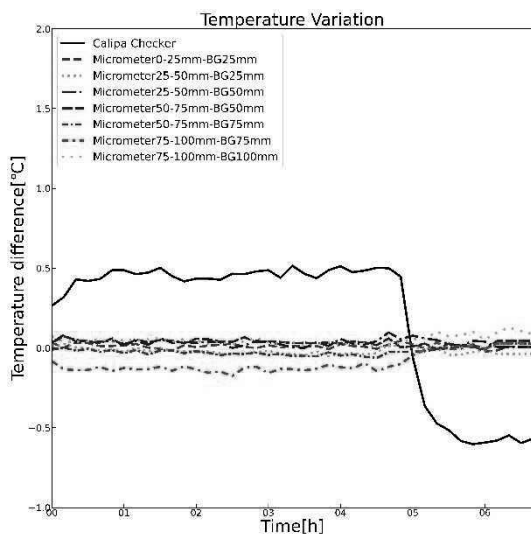


図 7 条件1での測定器と基準器の温度差

結果から、各マイクロメータとブロックゲージの組み合わせに関してどの組み合わせ

でも同様の温度差の傾向であった。そして、温度差の大きい組み合わせで最大0.25°Cの温度差があった。

一方、ノギスに関しては基準器との温度差が大きく、最大0.8°Cという結果となった。また、測定器の20°Cからの偏差を図8に示す。

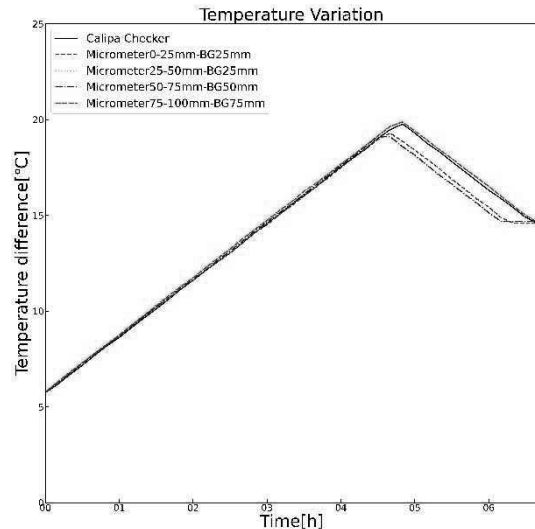


図 8 測定器の温度20°Cからの偏差

図8から測定器の20°Cからの偏差は、最大でノギスは19.5°C、マイクロメータで19.7°Cであった。

3. 2 冬季(条件2)での測定結果

図9に冬季(条件2)における基準器と測定器の温度差の結果を示す。

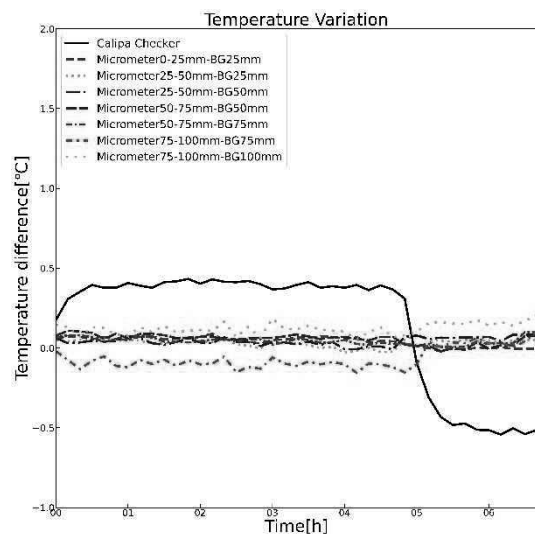


図 9 条件2での測定器と基準器の温度差

冬季(条件2)については、マイクロメータで一番温度差の大きい組み合わせで最大

0.4℃の温度差があった。

一方、ノギスに関しては最大0.7℃の温度差という結果となった。また、測定器の20℃からの偏差を図10に示す。

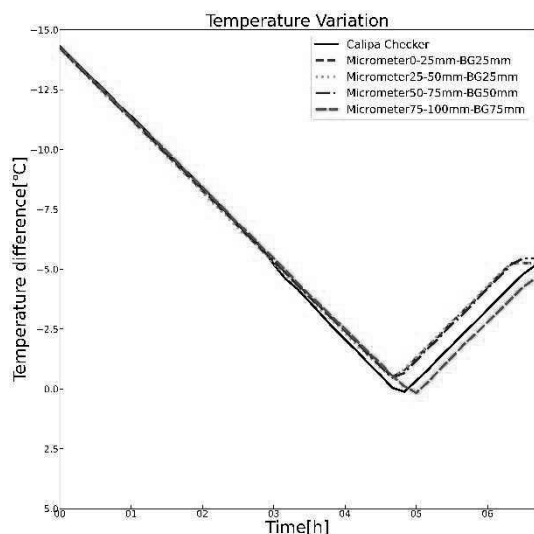


図 10 測定器の温度20℃からの偏差

測定器の20℃からの偏差については、夏季(条件1)の方が大きかったため、不確かさの算出には、夏季(条件1)の実験結果を使用する。

3.3 不確かさの算出

条件1及び条件2での実験結果から求めた測定器及び標準器の温度差及び、測定器の20℃からの偏差をもとに計算した不確かさを、熱的効果による標準不確かさを求める数式2に代入する。その結果、マイクロメータについては下記の通り。

$$\begin{aligned}
 u^2(L_{\text{thermal}}) &= L_N^2 \alpha_s^2 u^2(\delta\theta) + L_N^2 u^2(\theta) u^2(\delta\alpha) \\
 &= (100\text{mm})^2 (9.3 \times 10^{-6}\text{K}^{-1})^2 (0.7 \text{ }^\circ\text{C})^2 + \\
 &\quad (100\text{mm})^2 (11.62^\circ\text{C})^2 (2.54 \times 10^{-6}\text{K}^{-1})^2 \\
 &= 0.83\mu\text{m}
 \end{aligned}$$

また、ノギスについても同様とし、熱的効果による標準不確かさは下記の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 u^2(L_{\text{thermal}}) &= L_N^2 \alpha_s^2 u^2(\delta\theta) + L_N^2 u^2(\theta) u^2(\delta\alpha) \\
 &= (150\text{mm})^2 (10.5 \times 10^{-6}\text{K}^{-1})^2 (1.2 \text{ }^\circ\text{C})^2 + \\
 &\quad (150\text{mm})^2 (11.83^\circ\text{C})^2 (1.3 \times 10^{-6}\text{K}^{-1})^2 \\
 &= 2.6\mu\text{m}
 \end{aligned}$$

マイクロメータについては、本研究で求めた熱的効果の標準不確かさの他に、測定器の指示値の標準不確かさ及び標準器の標

準不確かさを合成して校正作業時の合成標準不確かさを算出すると、1.7μmと求めた。よって校正作業時の合成拡張不確かさは3.4μmと求めた。

マイクロメータ及びブロックゲージの温度差よりもノギス及びキャリパチェッカの温度差が大きい結果となったが、これは、ブロックゲージ及びキャリパチェッカの材質が鋼であり、大きさがブロックゲージと比較しキャリパチェッカが大きいため、熱容量が大きく、測定器との温度差が大きくなったためと考えられる。

また、マイクロメータについて一定温度で校正を行った場合と、温度変化がある状況下での校正作業とで、合成拡張不確かさの差を求めると、0.3μm程であり不確かさの多くは、測定器の指示値及び、標準器の不確かさが影響していることが分かった。

4 まとめ

本研究ではノギス、マイクロメータの出張校正手段を確立するため、熱的効果による標準不確かさの算出を行い、マイクロメータに関しては校正作業時の合成拡張不確かさを算出した。結果は以下のとおりである。

- ・マイクロメータ100mm以下の校正作業時における熱的効果の不確かさは0.83 μm。
- ・ノギス150mm以下における校正作業時の熱的効果の不確かさは2.6 μm。
- ・マイクロメータの100mm以下の校正作業時における拡張不確かさは3.4 μm。

本研究の効果としては、出張校正時のマイクロメータの合成拡張不確かさが分かったことで、出張校正を行った際に不確かさを考慮した校正値を求めることが出来る。

今後は、本研究で算出まで行うことが出来なかったノギスに関して合成拡張不確かさの算出を行い、マイクロメータ同様に出張校正時の合成拡張不確かさの算出を行いたい。また、企業様からの要望がある、ハイトゲージやシリンダゲージに関して出張

校正時の拡張不確かさの算出を行いたい。

参考文献

- 1) 群馬県立群馬産業技術センター. 不確かさ見積もり手順書 (マイクロメータ). 2018
- 2) 群馬県立群馬産業技術センター. 不確かさ見積もり手順書 (ノギス). 2018

熱応力解析技術の高度化に関する基礎検討

林和・三ツ木寛尚*・青柳大志**

岩沢知幸***・狩野幹大**

Basic Study on The Advancement of Thermal Stress Analysis Technology

HAYASHI Yawara, MITSUGI Hironao, AOYAGI Hiroshi,

IWASAWA Tomoyuki, KANO Motohiro

群馬産業技術センターでは熱応力に関する解析と実際の挙動の比較検討を詳細に行った事例が少なく、解析結果の精度の把握が不十分である。そこで熱応力解析において解析精度の定量的な把握を目的とし、熱応力測定とそれに対する熱応力解析を実施した。その結果、熱応力に関する問題において傾向予測ができるようになったことで机上での様々な設計検討を行えるようになった。

キーワード：熱応力、CAE、ひずみゲージ

At Gunma Industrial Technology Center, there are few cases in which detailed comparative studies of thermal stress analysis and actual behavior have been conducted, and the accuracy of the analysis results is not fully understood. Therefore, with the aim of quantitatively understanding the analysis accuracy in thermal stress analysis, we conducted thermal stress measurement and thermal stress analysis. As a result, it has become possible to predict trends in problems related to thermal stress, making it possible to conduct various design studies on a desk.

Keywords : Thermal stress, CAE, Strain gauge

1 まえがき

自動車においてエンジンやバッテリーなどの発熱や外気温の変化により周辺部品には熱サイクルが付加される¹⁾。熱サイクルにより周辺部品には熱応力が付加され、機能や信頼性の低下を招くことが問題となる。また、開発期間の短縮やコストダウンの要求によりシミュレーション(CAE、Computer Aided Engineering)による事前検討のニーズが高まっている²⁾。このような熱問題への対策は自動車部品の開発現場だけでなく、金型の熱変形による加工品質への影響の検討³⁾など製造現場においてもニーズが高くなっている。群馬産業技術センターではこれまでに熱応力

を評価するCAE(以下、解析)の実績はあるものの、解析と実測の比較検討を行った事例は少ない。そのため解析の精度把握が不十分であり、センター利用企業に対して精度を含めた解析活用の提案ができていない。そこで本研究では熱応力解析において解析精度の定量的な把握を目的とする。

2 研究課題

本研究では熱応力解析技術の構築を行った。まず、熱応力について参考文献⁴⁾より説明する。熱応力は式(1)にて表される。 σ は熱応力、 E はヤング率、 ε はひずみである。物体が何も拘束されていないとき、温度が変化すると物体に熱ひずみが生じる。物体に生じるひずみは弾性ひずみと熱ひずみの和となり式(2)で表される。 ε_1

応用機械係

*電子機械係

**生産システム係

***材料解析係

は弾性ひずみ、 ε_2 は熱ひずみである。弾性ひずみと熱応力の間にはフックの法則が成り立つため、式(1)と式(2)より式(3)が導かれる。さらに熱ひずみは式(4)で表される。 α は線膨張係数、 T_1 は初期温度、 T_2 は目標温度である。ここで対象の物体が固定されているとすると、ひずみの和は 0 となることから式(3)に式(4)を代入すると熱応力は式(5)で表すことができる。ここで、ヤング率及び線膨張係数は材質に固有の値である。よって熱応力は温度差に比例する。以上より熱ひずみによる弾性変形を測定するには弾性ひずみを測定する必要がある。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2)$$

$$\sigma = E\varepsilon_1 = E(\varepsilon - \varepsilon_2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \alpha(T_2 - T_1) \quad (4)$$

$$\sigma = -E\alpha(T_2 - T_1) \quad (5)$$

本研究ではひずみゲージを用いて弾性ひずみ測定を行った。ひずみゲージは設置した長手の方向のひずみの大きさを測定する。そのため設置する向きと位置が重要となる。さらにひずみゲージは製品ごとに測定可能な温度範囲及び温度補償範囲が設定されている。ばらつきの少ないデータを取得するためには適切なひずみゲージを選択する必要がある。また、熱応力解析においては物性値、接触やメッシュなどの解析パラメータを検討することによって実測に近い挙動を再現することが求められる。以上の理由から解析精度の定量的把握を行うためには以下の 3 つ課題がある。

- A. ひずみゲージ設置位置および方向の決定
- B. 低温・高温環境下での測定技術
- C. 予測技術の構築

3 熱応力解析技術の確立

3.1 ひずみゲージ設置位置および方向の決定

本研究では産業製品で広く使用され、入手が容易である SS400 と A5052 の線膨張係数の差で生じる熱ひずみ測定を行う。図 1 に本研究で使用した試験片を示す。試験片の温度を変化させると SS400 と A5052 の線膨張係数の差に応じた熱ひずみが生じ、さらに弾性ひずみが生じる。表 1 に各材質の線膨張係数⁵⁾を示す。初めに文献⁶⁻⁷⁾の物性値を用いて事前解析を実施した。解析には ANSYS Mechanical 2022 R2 を使用した。本研究ではボルト締結にて接触面が固着している想定にて解析を実施した。解析の結果から弾性ひずみが生じやすい位置と方向に 10 か所ひずみゲージを設置した。ひずみゲージ設置位置を図 2 に示す。

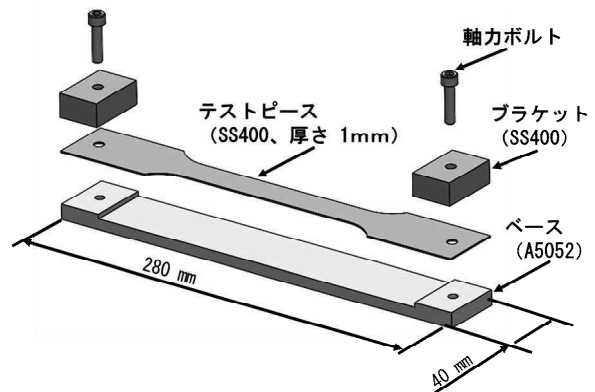


図 1 試験片構成

表 1 各材質の線膨張係数

材質	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)
SS400 (一般構造用圧延鋼材)	11.7
A5052 (アルミ合金)	23.8

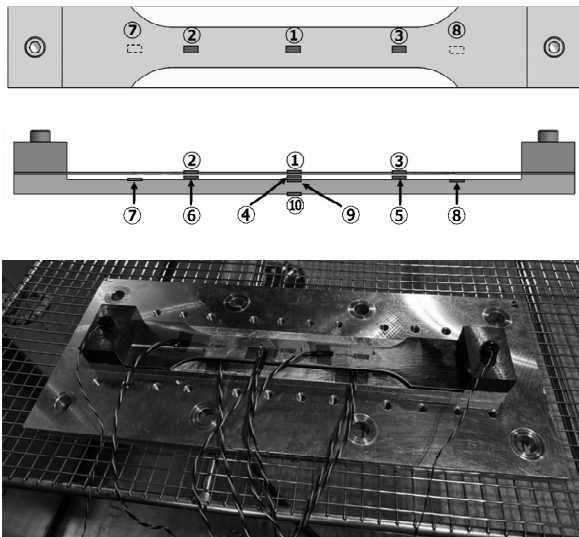


図2 ひずみゲージ設置位置

3. 2 低温・高温環境下での測定技術

3. 2. 1 温度プロファイル

恒温槽 (IMV 製、Syn-4HW-70-VH) にて保持温度 -40°C 、 120°C の2条件にてひずみ測定を行った。なお、降温、昇温はともに4時間とし、 23°C のひずみを0とした。図3に各温度条件における温度プロファイルを示す。試験片の温度測定はテストピースとベースの中央部の計2か所に白金測温抵抗体を設置して行った。

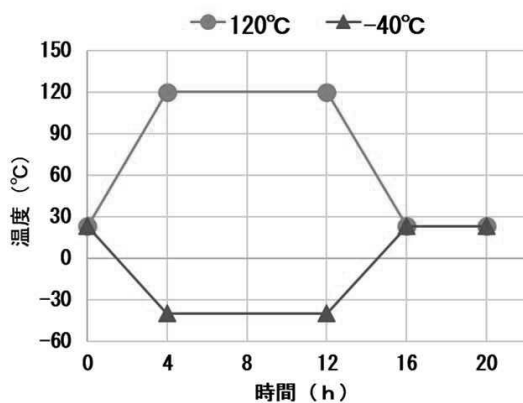


図3 温度プロファイル

3. 2. 2 ひずみ測定結果

図4に -40°C における熱ひずみ測定結果を示す。まず汎用ひずみゲージにて測定を実施した。汎用ひずみゲージは使用可能範囲が $-196^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 、温度補償範囲は 10°C

$\sim 100^{\circ}\text{C}$ である。本研究では測定範囲が温度補償範囲外であったため、各測定点でのばらつきが大きいデータとなった。(エラーバーは標準偏差の範囲を示す。)そこで、使用可能温度が $-269^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 、温度補償範囲が $-196^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ の広温度範囲ひずみゲージを使用して測定した。すると各測定点のばらつきが小さく、安定したデータが測定できた。 120°C においても -40°C と同様の傾向がみられており、広温度範囲ひずみゲージで測定した結果を実験値とした。

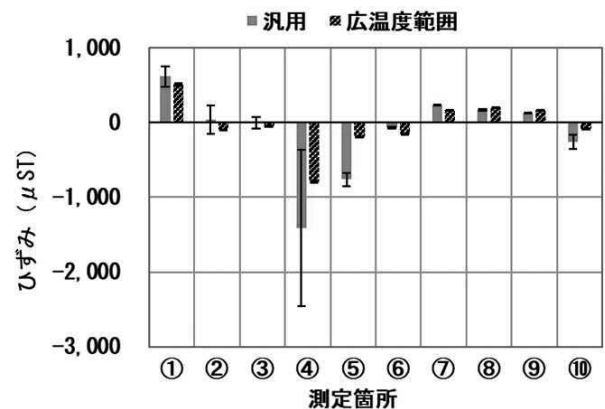


図4 熱ひずみ測定結果 (-40°C)

3. 3 予測技術の構築

3. 3. 1 解析に関わるパラメータ

実験値と事前解析結果の比較について図5に示す。これらの結果を比較すると、最小の解析誤差は測定箇所⑤で22%、最大の解析誤差は測定箇所④で213%となった。そこで、さらなる解析パラメータの検討を行った。解析パラメータの一覧を表2に示す。解析で検討する主なパラメータとしては物性値、接触、メッシュである。このうち、物性値についてはSS400およびA5052の温度依存性弾性率を引張試験にて事前に取得した値を使用した。線膨張係数は表1の値を使用した。ボルト軸力はひずみゲージをボルト内部にした軸力ボルト⁸⁾にて測定した。温度荷重については3.2.1で示したとおり、測温抵抗体で測定した値を用いてモデル全体に一樣温度荷重として負荷した。本研究では残るパラメータである接触条件を中心に解析パラメータを変更し、計23条件を実施した。

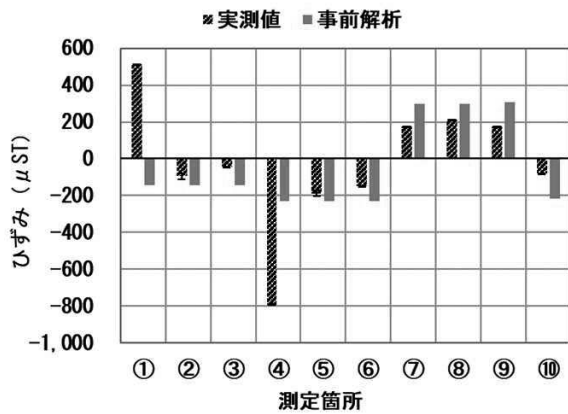


図5 実験値と事前解析比較 (-40°C)

表2 解析パラメータ

大項目	小項目
物性値	弾性率
	線膨張係数
荷重	ボルト軸力
	温度荷重
接触	接触タイプ
	接触面積
メッシュ	要素サイズ

3.3.2 解析結果

前節にて検討した解析パラメータのうち、接触タイプが最も解析結果に影響を及ぼすことが分かった。ここでは最も実験値との一致がみられた条件の結果を示す。図6は-40°Cにおける各測定箇所のひずみの方向を加味した解析結果である。-40°Cでの最小の解析誤差は測定箇所①で3%、最大の解析誤差は測定箇所⑤で49%となった。この解析条件を条件1とする。事前解析と条件1の挙動を図7に示す。また、接触部の拡大図を図8に示す。実測に近づいた要因としては次の点が考えられる。事前解析では接触面は固着した接触面（滑りも分離も許容しない）としたため、ベースとテストピースは互いに拘束されている。一方で条件1では接触面に滑りおよび分離を考慮したことによりテストピースの挙動に自由度が生まれた。また、ベース中央部寄りのベースとテストピースの接触面では微小なクリアランスが発生した。その結果、テストピースはZ方向に大きく凸形状に変形する挙動となった。このことで実験値に近

い値となったと考えられる。120°Cにおいても接触面に滑りおよび分離を考慮した条件が最も実験値に近い結果となり、最小の解析誤差は測定箇所②で0.5%、最大の解析誤差は測定箇所⑦で79%となった。120°Cにおける各測定箇所のひずみ方向を加味した解析結果を図9に示す。このように部分的に誤差は大きいもの、設計検討において傾向予測できる程度の予測技術を構築できたと考える。

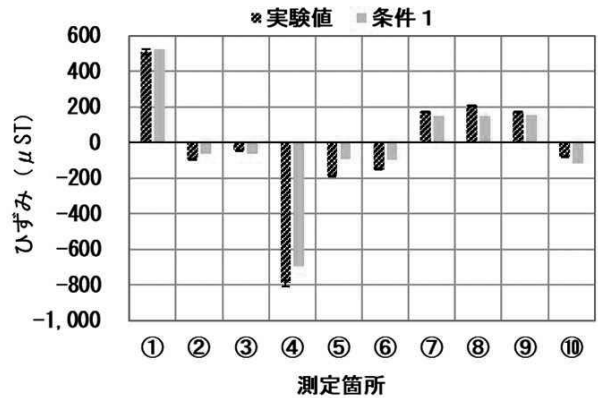


図6 実験値と解析結果の比較 (-40°C)

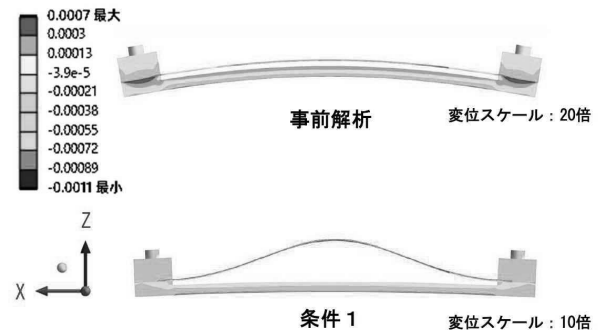


図7 各解析条件における挙動 (X方向垂直弾性ひずみ)

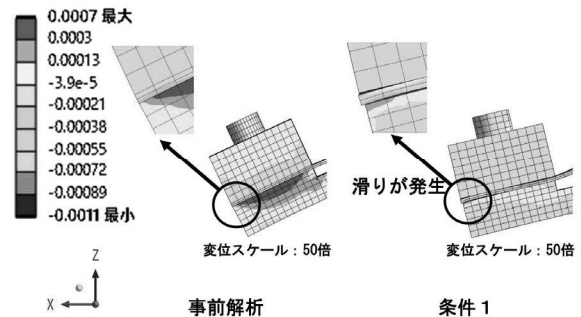


図8 結合部拡大図 (X方向垂直弾性ひずみ)

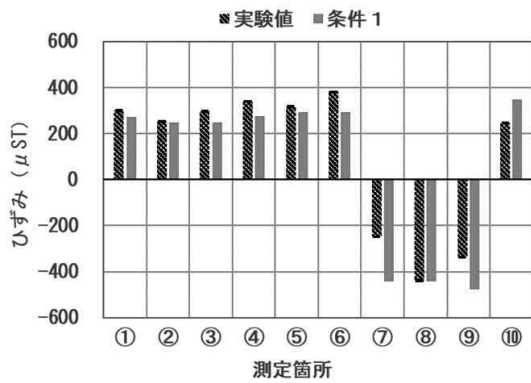


図9 実験値と解析結果の比較 (120°C)

3. 3. 3 解析の誤差要因

条件1の解析結果では実験値と近い値の箇所もあったが、大きく外れている箇所もあった。その要因について検討する。前節にて接触タイプが解析結果に大きな影響を及ぼすことが分かった。本研究において接触面の状態について確認すると、ボルト締結方法、ブラケットの錆の発生や熱変形によって接触状態が変化したと考えられる。また、測温箇所が少ないため、温度分布が不均一であった可能性がある。また、線膨張係数を文献値の値を使用して解析を行っていたことが挙げられる。今後は錆の発生など管理できる条件については可能な限り管理した上で、温度分布の影響を検討することで精度を向上させる可能性がある。

4 まとめ

本研究では熱応力解析において解析精度の定量的な把握を目的として課題A～Cに取り組んだ。その結果、熱応力問題において傾向予測が可能な予測技術を構築した。本研究の成果をもとに熱応力に関する問題において机上で様々な設計検討を行い、試作の手間を少なくできるように企業支援を行いたい。

今後はさらなる解析の高精度化のため、接触状態、摩擦係数の把握を行いたい。さらに温度分布を再現するために伝熱解析や流体解析との連成解析技術の構築を視野に

検討を進める。

参考文献

- 1) 今川ほか：日本製鉄技報、416、89、(2020)
- 2) 于強ほか：日本機械学会論文集(A編)、75、758、(2009)
- 3) 西澤和毅：精密工学会誌、3、67、(2001)
- 4) 日本機械学会誌 第3回 熱応力・熱ひずみ、<https://www.jsme.or.jp/kaisi/1204-36/>
- 5) TDC、線膨張係数とは？、https://mirror-polish.com/material_knowledge/the_rmal-expansion-coefficient/
- 6) 添野ほか：日立評論、15、669、(1964)
- 7) 日本アルミニウム協会標準化委員会：アルミニウムハンドブック、7、43、(2007)
- 8) 東京測器研究所、ボルトゲージ埋込・校正サービス、<https://tml.jp/product/service/bolt-service.html>

次世代産業創出研究

ドローンを活用した工場内巡視点検業務の省力化に関する研究

町田晃平・三ツ木寛尚・小和瀬登
小林興尚*・荻野直彦*・石黒聡*

Research on labor saving for factory patrol inspection work using drone
MACHIDA Kohei, MITSUGI Hironao, KOWASE Noboru,
KOBAYASHI Okihisa, OGINO Naohiko, ISHIGURO Satoshi

工場での巡視点検業務の省力化を目的として、ドローンを活用した巡視点検を提案する。本研究では、ドローンを活用した巡視点検デモの構築と現場での実証実験を行った。巡視点検デモでは、キーフレーム機能を用いた自動巡回のデモを構築するとともに、付加価値として、事前学習不要の AI 画像解析と点検結果確認 Web アプリを構築した。実証実験では、3 か所のフィールドにて実験を行い、非 GPS 環境でも安定飛行が可能なことや、ドローンで撮像したデータから点検を代替できる可能性があることを確認した。

キーワード：ドローン、画像解析、クラウド

We propose patrol inspection using drone to save labor for factory patrol inspection work. In this study, we constructed the patrol inspection demo using drone and conducted on-site demonstration tests. In the patrol inspection demonstration, we built a demonstration of automatic patrols using a keyframe function and, as an added value, an AI image analysis that requires no prior learning and web application for checking inspection result. The demonstration tests were conducted at three field sites, and confirmed that stable flight is possible even in non-GPS environments, and that there is potential to replace inspections based on data captured by the drone.

Keywords : drone, image analysis, cloud

1 まえがき

工場やプラントにおいて、巡視点検業務は施設を安全に稼働させるための重要な保全業務の一つである。しかし、現状では巡視点検のほとんどは人手により行われており、省力化が求められている。

点検の省力化として、ネットワークカメラや IoT センサを用いた遠隔監視が普及しつつあるが、設置箇所に応じてコストが増大するため、主要設備以外には不向きである。

一方、ドローンを活用することで、高所や危険な場所への人の立ち入りを減らし、安全かつ効率的に点検を行うことが可能になる。ドローンはカメラやセンサを搭載し、飛行中に施設の

状態を撮影・測定することができる。これにより、従来の遠隔監視手法では困難だった様々な点検を行うことも可能となる。

そこで、本研究では、ドローンを活用した巡視点検技術を確立し、工場での巡視点検業務を省力化することを目的として研究を行った。

2 方法

本研究では、ドローンとして群馬産業技術センターデジタルソリューションラボ（以下、DSL）に導入した屋内対応自動監視ドローンシステム (Skydio 社製 Skydio 2+) を使用し、巡視点検デモの構築と現場での実証実験を行った。

2.1 屋内対応自動監視ドローンシステム

本研究で使用したドローンシステムの外観を図1に示す。本ドローンは機体上下に搭載された計6個のナビゲーションカメラとAIを用いた映像解析機能により、機体周囲360°の障害物検知・回避が可能である。障害物検知範囲は4段階で任意に設定でき、ドローンを飛行させるエリア状況に合わせて検知範囲を設定することができる。

また本ドローンは、機体のホバリング位置をマーキングするキーフレーム機能を持つ。キーフレーム設定後は、それらの位置を順次辿る飛行パスを設定・記録することが可能なため、例えば屋内の巡視点検ルートを模擬した自律飛行を行うことも可能である。



図1 屋内対応自動監視ドローンシステム

2.2 ドローンを活用した巡視点検デモの構築

DSLにてドローンを活用した巡視点検のデモを構築した。デモは、キーフレーム機能によるドローン自動巡回を中心に構築した(図2)。



図2 キーフレーム機能による自動巡回

付加価値として、事前学習不要のAI画像解

析と点検結果確認 Web アプリを構築した。ドローンで撮像した画像や動画を解析する場合、従来の手法では、画像処理のパラメータ設定やAIの学習が必要となり、点検内容に応じて事前の準備に大きなコストがかかっていた。そこで、本研究では、事前学習を行うことなく解析が可能なAI画像解析技術を構築した。さらに、点検結果のデータをクラウドにアップロードすることで、インターネットから結果を閲覧できる点検結果確認 Web アプリを構築した。

2.3 現場での実証実験

企業等の協力のもと、実際の企業等の現場にて、ドローンを活用した点検の実証実験を行った。本実証実験の目的を以下に示す。

(1) 技術的検証

- ・ 安定飛行の可能性
- ・ 撮像データを用いた点検の実現可能性

(2) 導入時の課題の特定

今回、以下の3か所のフィールドにて実証実験を行った。

- (1) 発電所の点検 (群馬県企業局鬼石発電所)
- (2) タンク内の点検 (正田醤油株式会社)
- (3) 飲料製造ラインの点検 (ハルナプロデュース株式会社)

3 結果

3.1 ドローンを活用した巡視点検デモの構築

3.1.1 事前学習不要のAI画像解析

本研究では、Grounded-Segment-Anything (Grounded-SAM)¹⁾を用いて、事前学習不要のAI画像解析を構築した。Grounded-SAMは、任意のテキスト入力に基づいて、物体検出やセグメンテーションを可能にする技術である。画像とテキストの関係を認識するモデルであるGrounding DINO²⁾と、画像内の物体の領域を分割するSegment Anything³⁾を組み合わせることで実現されている。Grounded-SAMのソースコードは、Apache-2.0ライセンスの下、オープンソースにて公開されている⁴⁾。

Grounded-SAM を用いて、ドローンで撮像した画像からクラックや工具を検出した様子を図3、4に示す。テキストプロンプトとして、クラックには「crack」、工具には「tool」を入力した。図のように、任意のテキスト入力により物体を検出できている様子が分かる。



図3 クラックの検出



図4 工具の検出

Grounded-SAM と画像処理を組み合わせることで、アナログメータの読み取りも可能である(図5)。アナログメータの読み取りでは、まず、Grounded-SAM を用いてメータの針を検出する。図5のメータでは、「red needle of gauge」とテキストプロンプトを指定することで、針の検出が可能である。検出した針の領域は、マスク画像として出力ができる。このマスク画像を画像処理により直線近似することで、針の角度を算出する。そして、針の角度をメータの値に換算することで、アナログメータの読み取りが可能となる。



図5 アナログメータの読み取り

3. 1. 2 点検結果確認 Web アプリ

本研究で構築した当アプリのシステム構成図を図6に、使用したサービス(サーバ、ツール等)の開発環境を表1に示す。当システムはクラウドサービス(Google Cloud Platform)を使用し、インターネットからドローン撮影画像をブラウザで閲覧できるアプリとした。

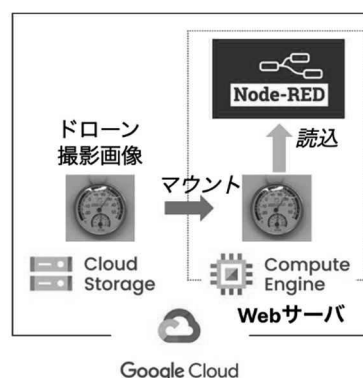


図6 結果確認 Web アプリシステム構成図

表1 開発環境仕様

クラウドサービス	Google Cloud Platform	
使用プロダクト	Cloud Storage	Compute Engine (Linux マシン)
構成内容	クラス: Standard	タイプ: e2-medium Ubuntu 20.04.6 LTS Node.js v16.20.2 Node-Red v3.1.5

当システムフローとしては、ドローン撮影画像をSDカードからPC端末経由でCloud Storageの所定バケットにアップロードするとCompute Engineに構築したWebサーバ

がマウント（自動認識）し、ノーコードの Web 開発ツールである Node-RED⁵⁾ から読込むことで、本ツールで開発した Web サイトにアクセスすると、図 7 で示すように当画像が表示という流れとなる。アプリ操作は、各巡視場所の選択やコメント等の書込みを可能とした。

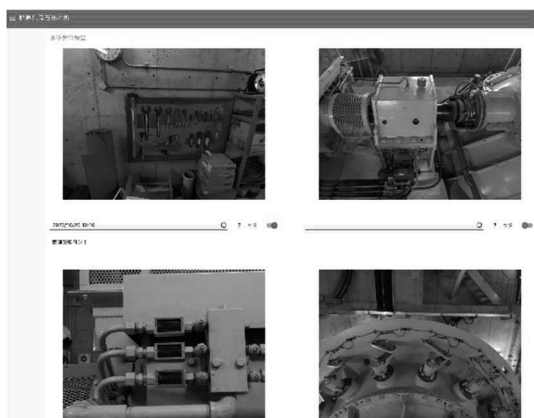


図 7 結果確認 Web アプリ画面例

3. 2 現場での実証実験

3. 2. 1 発電所の点検（群馬県企業局鬼石発電所）

群馬県企業局鬼石発電所では、水車発電機室の目視点検の代替可能性を検証した。鬼石発電所は、藤岡市にある水力発電所である（図 8）。同発電所では、職員が巡視点検表に則った点検を毎月実施している。巡視点検では、主に、温度や圧力、油量などの発電機の動作状態や、室内の漏水などの異常を点検している。点検は職員 2 人 1 組で実施し、1 回あたりおよそ 90 分の点検時間を要している。



図 8 群馬県企業局鬼石発電所

鬼石発電所の発電機室でドローンを飛行さ

せた様子を図 9 に示す。発電機室は地下にあるため、非 GPS 環境であるが、安定して飛行可能なことが確認された。

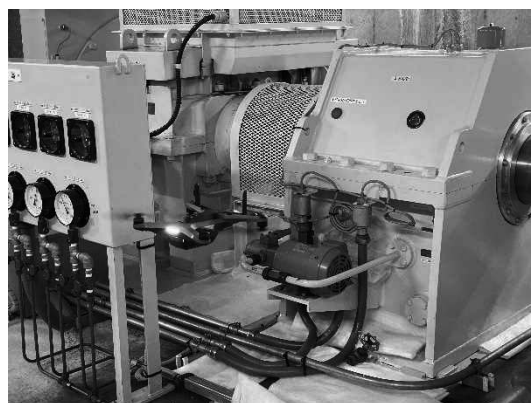


図 9 鬼石発電所でのドローン飛行

鬼石発電所の巡視点検表には 44 項目あり、そのうち 34 項目が目視に関する内容である。そこで、この 34 項目について、ドローンで撮影した画像や動画で点検が可能か、鬼石発電所の職員にアンケート調査を行なった。その結果を表 2 に示す。34 項目のうち 16 項目（47%）が、ドローンで撮影した画像や動画により巡視点検が代替可能であった。14 項目（41%）は、画像や動画の品質が改善すれば代替可能となった。これは、発電機室が少し暗い環境であったため、撮像データにノイズやブレが生じてしまったためである（図 10）。4 項目（12%）は、代替不可能であった。これは排水ピットの点検などで、ドローンで進入することが難しかったためである。

表 2 鬼石発電所でのドローン飛行

回答内容	項目数
代替可能	16
品質が改善すれば代替可能	14
代替できない	4

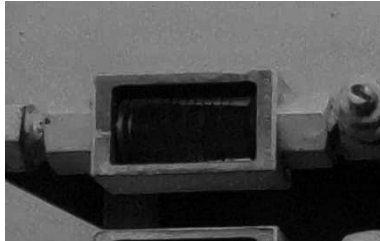
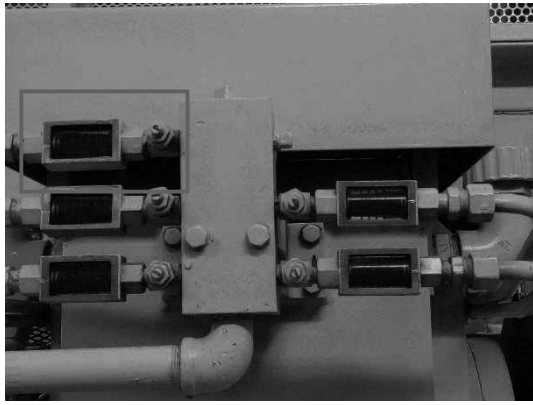


図 1 0 ノイズにより指示値が不鮮明な画像

実証実験により明らかとなった課題としては、まず、前述のように薄暗い環境では撮像データにノイズやブレが生じてしまうことが挙げられる。この点については、後処理による画像の鮮明化や、投光器の設置により環境を明るくすることなどが対策として考えられる。他の課題として、狭所部進入時のデッドロックが発見された。現場は狭い空間が随所にあり、マニュアル運転により入ることができたものの、入った先で障害物検知機能が働いてしまい、身動きが取れなくなる状況が発生した。これについては、現場の状況に応じて障害物検知範囲を切り替えたり、進入するかどうかの判断を行ったりすることが大切である。

実証実験により気づいた点としては、まず、場所によっては動画の方が点検しやすいことが挙げられる。今回の場合、軸の回転の様子や軸受の流水の様子などについては、動画の方が適している。その他に、ドローンを活用することで、現場でかがんだり登ったりする行為が減り、体への負担が少なくなる可能性も示唆された。

3. 2. 2 タンク内の点検（正田醤油株式会社）

正田醤油株式会社の実証実験では、醤油タンク内の目視点検の代替可能性を検証した。正田醤油株式会社は、320kL のタンクを 50 基保有

し、毎年 12 基を点検している（図 1 1）。点検では、タンク内部壁面の損傷や汚れの有無などを確認している。現状の点検方法は、タンク上部から人がロープで吊り下がって確認し、損傷や汚れが疑われる場所については、足場を組んで詳細に確認している。そのため、点検に多くのコストがかかることや、作業の危険性も高いことから、別の点検方法を模索していた。



図 1 1 正田醤油株式会社のタンク

正田醤油株式会社のタンク内でドローンを飛行させた様子を図 1 2 に示す。タンクは鉄製のため、その内部は非 GPS 環境となる。以前に民生用ドローンで試験した際には、非 GPS 環境のため、飛行ができなかったとのことであったが、実験に使用したドローンシステムでは、問題なく飛行することができた。また、ドローンで撮像したデータは、点検のための品質として問題がないことを確認した。



図 1 2 醤油タンク内でのドローン飛行

課題として、今回のタンクは内壁が一様のため、撮像データを使用して後から損傷や汚れを見つけても、それらが実際のタンクのど

こにあるのかが分かりづらいことが挙げられる。対策としては、ドローンの飛行ログなどにより撮像データと実際の場所を紐付ける方法などが考えられる。

3. 2. 3 飲料製造ラインの点検（ハルナプロデュース株式会社）

ハルナプロデュース株式会社の実証実験では、飲料製造ラインの目視点検の代替可能性を検証した。ハルナプロデュース株式会社では、ペットボトル飲料を中心とした飲料の製造を行っている。工場では、点検員による製造ラインの巡視点検を定期的に行っている。点検では、主に設備の動作や制御盤の表示、配管からの漏れがないかといった点を確認している。

ハルナプロデュース株式会社の製造ラインでドローンを飛行させた様子を図1-3に示す。製造ラインにおいても安定して飛行することができた。特に、配管の入り組んだ部分については、以前に民生用ドローンで試験した際には飛行が難しかったとのことであったが、実験に使用したドローンシステムでは、障害物検知範囲を1段階下げることによって、安定的に飛行ができることを確認した。



図1-3 飲料製造ラインでのドローン飛行

実証実験により、目視では難しい上部の配管などの点検に特に有効なことが確認された。また、ドローンによる点検は車椅子に乗った方など、障がいのある人の雇用にも有用であることが示唆された。

4 まとめ

本研究では、ドローンを活用した巡視点検技術を確立し、工場での巡視点検業務を省力化することを目指して、デモ構築と実証実験を行っ

た。実証実験では、企業等の協力のもと、3か所の現場にて飛行の検証を行った。実験の結果、従来のドローンでは飛行が難しかった非GPS環境においても、飛行可能なことが確認された。また、基本的にはドローンで撮像したデータにより点検の代替が可能であるが、現場が薄暗い環境の場合には、ノイズやブレの影響により画像や動画の品質が下がり、改善が必要となることも確認された。本研究での成果を踏まえ、今後は、従来の点検方法との比較による効果検証や、導入・運用面での支援を行っていきたい。

参考文献

- 1) Tianhe Ren ほか : Grounded SAM: Assembling Open-World Models for Diverse Visual Tasks, arXiv preprint arXiv:2401.14159, (2024)
- 2) Shilong Liu ほか : Grounding DINO: Marrying DINO with Grounded Pre-Training for Open-Set Object Detection, arXiv preprint arXiv:2303.05499, (2023)
- 3) Alexander Kirillov ほか : Segment Anything, arXiv preprint arXiv:2304.02643, (2023)
- 4) Grounded-Segment-Anything, <https://github.com/IDEA-Research/Grounded-Segment-Anything>
- 5) 石黒聡ほか : ローコード開発による簡易遠隔監視装置の構築、群馬県立産業技術センター研究報告、(2022)

その他研究

微生物資源のデータベース化

渡部貴志・田島 創*・吉野 功**

Construction of bio-resource database
WATANABE Takashi, TAJIMA So, and YOSHINO Isao

群馬産業技術センターが保有する産業微生物について、微生物情報のデータベース化を行い、保存方法を決定した。約600株の保存株のうち職員間で重複するものなどを整理し、約300株に集約した。また、新たに県内企業からの寄託株や、共同研究等で開発された株などの約400株を保存し、令和5年3月末で合計726株（うち、清酒酵母が623株）を保存した。清酒酵母については、増殖性、醸造特性、高泡形成能、キラー活性なども評価した。
キーワード：微生物資源、データベース化、清酒酵母

We constructed the bio-resource database of industrial microorganisms, stocked in Gunma industrial technology center, and the storage method in the deep-freezer. About 600 strains, duplicate stocked between staff member were reduced to about 300 strains. On the other hand, about 400 strains which were deposited from manufactures in Gunma prefecture and bred in several researches, were newly stocked. Totally 726 strains (623 strains of them were sake yeast) were stocked as of March, 2023. Growth, Jyozo-properties, Foaming abilities, and killer activities of sake yeasts was also evaluated.

Keywords: bio-resource, database, sake yeasts

1 はじめに

群馬県では、昭和9年から商工課醸造試験室（昭和12年から群馬県醸造試験場）を設置し、以後組織改編を経ながら醸造工業および食品工業の支援を行いつづけている。これまでに、清酒酵母や、抗菌試験や食品微生物試験の対照株で用いる大腸菌、黄色ブドウ球菌などの多くの産業微生物を取得・保管している。世界保健機関（WHO）は、実験室バイオセーフティ指針を示しており、各国の生物を扱う機関には、安全性を確保する取り組みが求められている¹⁾。群馬産業技術センター（以下、センター）では、微生物実験安全管理規程を定め、保有微生物の管理を行っている。

光計測係

* 食品化学開発係

** 環境・エネルギー係

また、近年では微生物の性質が保存の過程で変質することが分かってきており、微生物の由来や特性を記録し、微生物が変質しないよう、 -80°C での冷凍保存（グリセロールストック）や凍結乾燥によるアンブル保存が推奨されている。さらに、多くの公設試や大学では、職員の退職や異動により、微生物が後任に引き継がれず、長年の労力と費用をかけた貴重な財産を損失してしまう危険性がある。このような損失を防ぐため、（独）酒類総合研究所（以下、酒総研）では、酒造用微生物の受託保存を長年行っており、文部科学省では2002年からナショナルバイオリソースプロジェクト（NBRP）を立ち上げ、バイオリソースの収集・保存・提供を実施している。

このような外部機関に微生物資源の保存を委託する場合、少なからずの費用が発生するため、全ての微生物を委託することは、

現実的には難しい。一方で、微生物を一度損失してしまうと二度と同じものが手に入らないため、適切な管理を行う必要がある。そこで本研究では、職員毎に委ねられていた微生物の保管方法を統一化し、微生物の由来のデータベース化を行った。また、清酒酵母については、増殖性と醸造特性などのデータベース化を行ったので報告する。

2 実験材料と方法

2.1 供試株およびデータベース化

平成28年度以降令和4年度までに在職していた担当職員が管理していた微生物を中心に、約1200株を供試株とした。グリセロールストックにより、-80℃で冷凍保存されていた株については、酵母はYM寒天培地（酵母エキス3 g/L、麦芽エキス3 g/L、ペプトン5g/L、グルコース10 g/L、寒天20 g/L）、細菌は標準寒天培地（酵母エキス2.5 g/L、カゼイン製ペプトン5.0 g/L）、ブドウ糖1.0 g/L、寒天15.0 g/L）で増殖が確認されたものを対象とした。

複数の職員が保存していた株については、グリセロールストック化されているものに集約した。データベースには、整理番号、株名、属種、取得者名、保存年月日、商標権を有する機関名を記録し、ノートなどで記録が残っている場合に由来、特徴を明記した。また、清酒酵母については、高泡形成能、増殖性、小仕込み試験による醸造特性のデータを取得した。

2.2 グリセロールストックの作成

酵母の前培養は、YM培地（酵母エキス3 g/L、麦芽エキス3 g/L、ペプトン5g/L、グルコース10 g/L）を用いた。細菌の前培養は、普通ブイヨン（NB）培地（肉エキス3.0 g/L、ペプトン10 g/L、塩化ナトリウム5 g/L）を用いた。前培養液5 mLを含む試験管に微生物を一白金耳接種し、酵母は30℃、細菌は37℃で24時間、150 rpmの振盪培養を行った。滅菌済み80%グリセロール溶液200 μLを含む凍結保存用チューブに前培養液を600 μL加え、良く混合した後、菌株名および保存日を明記し、ディープフリーザーにて-80℃で凍結してグリセロールストックを作成した。

表1 総米200 gの仕込み配合

	酒母	一段	一段	追水	計
		目	目		
総米(g)			200		200
麴米(g)		40			40
掛米(g)			160		160
汲水(mL)	12	68	200	30	310

2.3 酵母の増殖性の確認試験

YM 5mLを含む試験管に酵母を一白金耳接種し、30℃で24時間、150 rpmの振盪培養を行った。YD培地（酵母エキス10 g/L、グルコース20 g/L）15 mLを100 mL容三角フラスコに加え、前培養液15 μLを接種し、30℃で150 rpmの振盪培養を行った。培養12、24、32時間後に各酵母の培養液を200 μL採取し、菌体増殖量（OD₆₆₀）を分光光度計UV-1900（（株）島津製作所）を用いて分析した。

2.4 酵母の高泡形成能の評価試験

15 mL容ファルコンチューブに濃縮麴エキスを5 mL加え、酵母を一白金耳接種し、30℃で24時間静置培養を行った。培養液を遠心分離（3000 rpm×1 min）し、得られた菌体ペレットを5 mLの蒸留水で再懸濁した。ネジ付き試験管に懸濁液1 mLとベンゼン1 mLを加え、蓋を閉めた後に試験管ミキサーで10秒間激しく混合した後、水相に菌体が残っているものを高泡形成能無し（泡無し）株として判定した²⁾。

2.5 総米200 gの小仕込み試験

清酒酵母については、表1に示す条件を基準とした総米200 gの小仕込み試験を行った。α化米および乾燥麴は、精米歩合70%一般米の規格で、徳島製麴（株）で調製したものを購入した。また、センターで蒸きょうして用いた原料米は、山田錦または舞風であり、精米歩合は40~60%であるものを購入した。

麴エキス（Brix 5°）2.5 mLに酵母を一白金耳接種し、23℃で4日間静置培養を行った。この培養液1 mLに滅菌酒母用汲水（リン酸二水素カリウム1.0 g/L、硫酸マグネシウム・七水和物0.2 g/L、塩化ナトリウム0.15 g/L、乳酸5 mL）11 mLを加えたものを酒母の代わりとして用いた。麴米は乾燥麴あるいはセンターで製麴したも

のを用いた。掛米は α 化米を用いる場合は、蒸米までの吸水分を考慮し、汲水を52 mL増やした。また、センターで原料米を蒸きょうする場合、洗米後、35%吸水率となるように浸水し、蒸籠で蒸きょうしたものをを用いた。また、汲水は水道水を用い、6、12、15日目に10 mLずつ追水を行った。仕込み温度15℃、18日後に上槽を遠心分離（7000×g, 15 min）で行った。

2. 6 分析方法

酸度、アミノ酸度、日本酒度、エタノールは国税庁所定分析法に従い、分析を行った。グルコース、マルトースは、高速液体クロマトグラフ、示差屈折率検出器を用い、分析を行った。香気成分（酢酸エチル、イソアミルアルコール、酢酸イソアミル、カプロン酸エチル、イソブチルアルコール）は、ヘッドスペースガスクロマトグラフで分析した。

2. 7 キラー活性検定試験

酒総研の意見を参考にし、キラー活性検定培地は、酵母エキス10 g/L、ペプトン20 g/L、グルコース20 g/L、グリセロール100 g/L、クエン酸0.5 g/L、クエン酸三ナトリウム0.2 g/L、寒天20 g/Lを組成とし、各酵母を接種して30℃で24時間静置培養した。続いて、K701をYM培地（酵母エキス3 g/L、麦芽エキス3 g/L、ペプトン5 g/L、グルコース10 g/L）5 mLで30℃、150 rpmで24時間振盪培養した。上記のキラー活性検定用培地を加温加圧滅菌して50℃以下まで冷却した後、清酒酵母きょうかい701号（以下、K701）の培養液を1%加えてよく混合し、被検体が生育している培地上に上層した。20℃で2日間静置培養し、被検体の周りにK701の生育を阻害したハロが形成しているかを目視し、キラー活性を判定した。

3 結果と考察

3. 1 保有株の整理

センターには、平成4年度にディープフリーザーが導入されて、微生物のグリセロールストックが作成されていたが、平成14年度以降は作成されていなかった。これは、当時推奨されたグリセロールストッ

クの作成方法では、グリセロール濃度が50%と高く、氷温下でも復帰作業中に融解してしまうことが要因と考えられた。このため、当時のグリセロールストックからは、微生物が7割程度しか復帰させることができなかった。

また、これまでは、醸造協会の方法を参考に県独自酵母などをスラント（寒天培地を試験管で斜面状に作製したもの）に植え継ぎ、保存していた。スラント保存では、清酒酵母の性質が変わりやすく、一つの県独自酵母でも複数の系統のスラントを作製し、毎年醸造特性を調べて県内酒造会社に提供する清酒酵母を決めていた。このため、複数の職員が保有していた同一名の県独自酵母などを整理し、平成28年度時点で保管されていた微生物約600株を約300株に集約した。

この過程において、県独自酵母は可能な限り元の性質のものを県内酒造会社に提供するように改めることに成功した。特に群馬G2酵母の泡無し株の取り直し³⁾や、平成初期以降頒布されなくなった群馬G1酵母を見出し、泡無し化を行うこと⁴⁾ができた。なお、清酒酵母は、異なる遺伝子型を有する2つの一倍体が接合したヘテロザイガスな二倍体であり、植え継ぎによりヘテロな配列が部分的にホモ化するLoss of Heterozygosity (LOH)により、性質が変わると考えられている⁵⁾。

平成28年度以降には、県内企業からの微生物の寄託保存に加え、県独自酵母の尿素非生産性化研究⁶⁻⁸⁾、清酒酵母の泡無し化研究³⁻⁴⁾、やよいひめ酵母を用いたビール製造研究⁹⁾、蔵付き酵母研究¹⁰⁻¹¹⁾などを令和5年3月現在で約400株を保存し、微生物保管簿に726株（うち、623株が清酒酵母）記載している。

3. 2 酵母の増殖性

酵素タンパク質や抗生物質などの有用物質生産では、増殖速度が速く、一細胞当たりの生産量が高い微生物が、単位体積単位時間当たりの生産効率が高くなる。このため、微生物の基本的な性質評価の項目の一つに、経時的な菌体量の変化（増殖性）がある。そこで、清酒酵母を中心に470株の酵母の増殖性をデータベース化した。

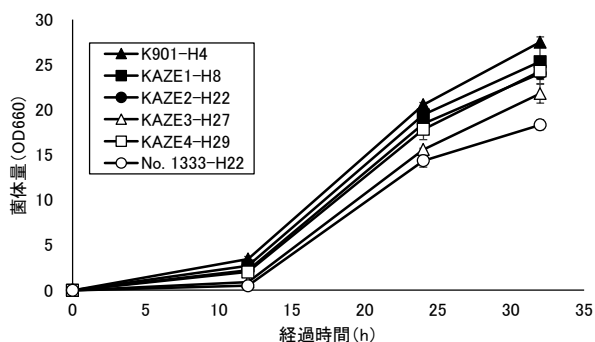


図1 群馬KAZE酵母関連酵母の増殖曲線
独立した3回の試験結果の平均値を示す。

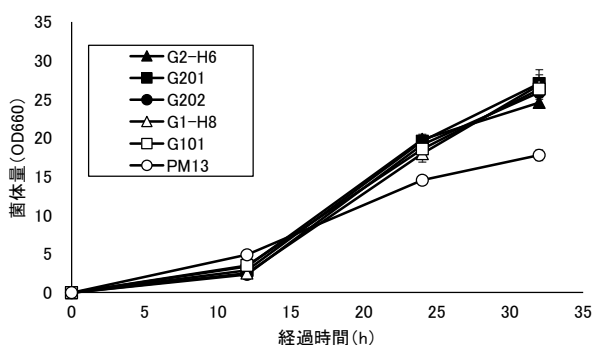


図2 その他の県独自酵母の増殖曲線
独立した3回の試験結果の平均値を示す。

代表的な県独自酵母である群馬KAZE酵母 (KAZE酵母) ¹²⁾に 関する酵母の増殖曲線を一例として示す (図1)。親株である平成4年度頒布の清酒酵母きょうかい901号 (K901) に比べ、KAZE1、KAZE2、KAZE4はやや増殖性が悪くなるだけに留まっていた。一方、KAZE3およびイオンビーム酵母 (No. 1333、親株は平成20年度頒布のK901) ¹³⁾は顕著に増殖性が悪くなっていた。しかしながら、KAZE3はNo. 1333より24時間後の増殖量は多かった。これらは、酒造りのもろみ初期のボエの良し悪し、もろみ後半のキレの良し悪しと傾向が似ており、増殖性を評価する重要性が確認された。

つづいて、その他の県独自酵母の増殖曲線を見てみると、群馬G2酵母および群馬G2酵母の泡あり株、泡無し株ともに差はほとんど認められなかった (図2)。酒造りでは、群馬G1酵母が群馬G2酵母よりも発酵力が高く、もろみ初期でのエタノール生産性が良い。YD培地の増殖曲線では、両者の増殖速度には差がなかったことから、



図3 水-ベンゼン混濁を用いた簡易識別

もろみ初期の高糖ストレス耐性などが、発酵力に影響を与えていることが考えられた。一方で、ビール用のやよいひめ酵母PM13は、群馬G1、G2酵母に比べると培養初期の菌体量は高いが、培養後半で低くなっており、酵母の違いにより増殖性の違いがあることが確認された。

3. 3 酵母の高泡形成能の評価

酵母の高泡形成能とは、もろみ発酵中の炭酸ガスに酵母細胞が吸着して生じる泡が高く形成される性質である。古来より用いられてきた清酒酵母は、高泡形成能を有する「泡あり株」であり、酒造りの際に桶から泡が流出する恐れがあり、衛生上にも問題があった。現代では「泡無し株」が開発され、酒造りの主流になっている。このため、平成28年度以前に保管され高泡形成能が不明であった清酒酵母83株と、その後の研究で取得・開発した酵母155株の計238株について、水-ベンゼンの混濁による簡易的手法²⁾を用いて高泡形成能を評価した (図3)。その結果、平成6年度以前に保存された株の多くが泡あり株であったのに対し、それ以降は泡無し株が主流となっていることなどが確認された (データ略)。

3. 4 酵母の醸造特性の評価

清酒酵母の醸造特性は、造られる酒質に大きな影響を与える重要項目である。また、酒類は嗜好性のものであり、その時代に合わせた酒質となる酵母を選定するためにも、保有する酵母の醸造特性のデータベース化と適切な管理が必要と考えられる。そこで、平成28年度時点で保有されていた清酒酵母161株と、その後の研究で取得・開発した酵母347株を合わせた計508株の醸造特性のデータベース化を行った。

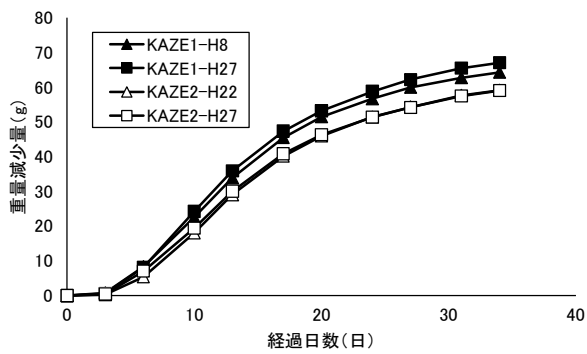


図4 KAZE酵母の重量減少量の経時変化

小仕込み試験では、用いる原料米や精白歩合、収穫年度、種麴などにより原料の状態が大きく異なる。また、仕込時期により水道水や地下水の水質、外気温も異なることや、仕込み条件にも影響を受けることから、醸造特性の比較は同ロットの試験結果でしか行えない。ここでは、KAZE1およびKAZE2のグリセロールストック作成時期の違いを調べた結果について示す。発酵力を示す炭酸ガス発生による重量減少量の経時変化では、平成8年度のKAZE1よりも平成27年度のKAZE1の方が高い発酵力となっていることが確認された(図4)。また、小仕込み試験酒の分析値を見てみると、新しい年のKAZE1、KAZE2の方が古い年のものよりもイソアミルアルコール、酢酸エチル、イソブチルアルコールなどの高いとオフフレーバーとされる香気成分が高くなり、カプロン酸エチルや酢酸イソアミル

などの高いと高評価される香気成分が低くなる傾向が示された(表1)。

スラントでの植え継ぎでは、保存期間中に生き残った細胞が選抜されてしまう。平成27年度までは、半年から一年間というとても長い周期で行っており、酵母の発酵力や醸造特性が変質要因になったと考えられる。これらのことから、平成29年度以降はスラントでの植え継ぎ酵母の提供は中止し、既定のグリセロールストックから毎年起こし直して提供することになった。

ところで近年では、リンゴ様の香気成分カプロン酸エチルを高生産する酵母が開発され、その酵母で造られた清酒が人気となっている。一方で、昔ながらのバナナ様の香気成分酢酸イソアミルを高生産する酵母で造られた清酒が際評価されるようになってきた。平成6年度に群馬G2酵母の、平成8年度に群馬G1酵母のグリセロールストックが作製されていたことにより、酢酸イソアミルを生産する群馬県独自酵母を提供することができていると考えられる。

3. 5 酵母のキラ活性の評価

酵母のキラ活性とは、ある酵母がキラーチン産出し、同じ属の酵母を殺す作用をもつものである¹⁴⁾。キラ酵母で汚染された場合、優良酵母をもろみに添加しても、キラ酵母により駆逐されてしまい、目標とした酒質の酒が得られない要因になってしまう。蔵付き酵母などを酒造り

表2 KAZE酵母の小仕込み試験結果のまとめ

	KAZE1-H8	KAZE1-H27	KAZE2-H22	KAZE2-H27
重量減少量(g)	64.2	67.0	59.1	59.0
日本酒度(-)	-2.7	+2.7	-9.4	-10.7
酸度(mL)	2.0	2.0	1.9	1.9
アミノ酸度(mL)	2.3	1.9	2.2	2.1
Ethanol(%(v/v))	17.2	18.4	15.8	15.7
Glucose(%)	4.0	3.6	5.2	5.2
イソアミルアルコール(ppm)	160.4	165.1	139.4	154.6
酢酸イソアミル(ppm)	6.2	5.8	7.3	5.6
カプロン酸エチル(ppm)	7.6	6.6	10.8	9.3
酢酸エチル(ppm)	76.1	96.3	67.5	68.6
イソブチルアルコール(ppm)	67.0	84.0	57.9	63.9
E/A(-)	3.9	3.5	5.3	3.6

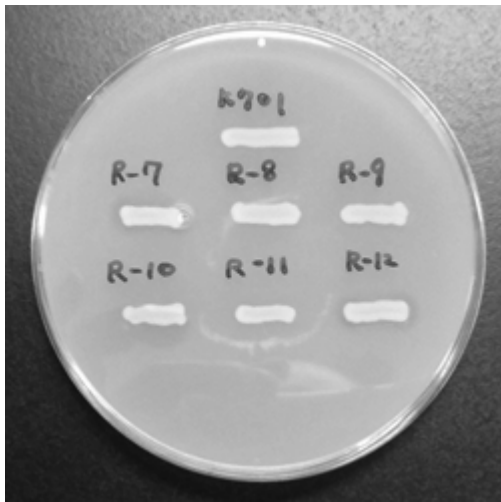


図5 キラー活性検定試験結果の一例

K701をキラー感受性株として用い、酵母の周りにハロ（阻止円）ができたものをキラー活性ありと判定する（R-7、R-12）。

に使うか検討する場合には、キラー活性を調べる必要がある。そこで、群馬県内酒造会社の蔵付き酵母60株について、重層法によるキラー活性検定試験を実施した。

報告例の多いキラー活性判定試験は、画線法と呼ばれ、供試株とキラー感受性株（キラー活性により殺される株）を同時に培地に接種し、交差した部位の酵母の増殖が阻止されているかいないかで判定している。しかしながら、この方法ではキラー活性ありの株が活性無しであると誤判定されることが多い。酒総研の助言により、重層法により調べたところ（図5）、60株中28株にキラー活性が確認された。また、これらの株はTTC染色法ではきょうかい7号（K7）系の優良清酒酵母と判定される赤色にはならず、野生型清酒酵母と判定される桃色になる株であった（データ略）。これらのことから、蔵付き酵母を利用した酵母無添加の酒造りをする酒造会社では、定期的にキラー活性を調べ、キラー酵母の混入を注意する必要があると考えられる。

4 まとめ

本研究では、群馬県が保有する産業微生物の保管方法を定め、また有効活用するため、微生物資源のデータベース化に取り組んだ。その結果、令和4年3月現在で微生物保管簿に726株（うち、623株が清酒酵

母）記載した。清酒酵母については、増殖性、醸造特性、高泡形成能、キラー活性などについても評価を行い、データ化した。今後も県内産業振興に向けて、微生物を適切に管理し、産業利用に貢献したい。

謝 辞

微生物資源の整理では、前群馬産業技術センター職員の上山修氏、高橋仁恵氏、増淵隆氏、関口昭博氏、前橋工科大学の林秀謙准教授に資料の提供をして頂いた。キラー活性検定試験では、（独）酒類総合研究所の赤尾健部門長に助言を頂いた。また、県独自酵母などの開発には、県内酒造会社との共同研究や、科研費基盤C（21K12528）などの研究費を利用した。

文 献

- 1) バイオメディカル研究会：実験室バイオセーフティ指針（WHO 第3版）（2004）
- 2) 布川弥太郎ら：化学と生物 11、216-224（1973）
- 3) 渡部貴志ら：令和2年度群馬産業技術センター研究報告、23-28
- 4) 渡部貴志ら：令和4年度群馬産業技術センター研究報告、56-61
- 5) 赤尾健：日本醸造協会誌、366-380（2012）
- 6) 渡部貴志ら：平成29年度群馬産業技術センター研究報告、11-14
- 7) 渡部貴志ら：平成30年度群馬産業技術センター研究報告、1-4
- 8) 渡部貴志ら：令和4年度群馬産業技術センター研究報告、62-67
- 9) 渡部貴志ら：令和2年度群馬産業技術センター研究報告、29-33
- 10) 渡部貴志ら：令和3年度群馬産業技術センター研究報告、38-50
- 11) 渡部貴志ら：令和3年度群馬産業技術センター研究報告、51-56
- 12) 上山修ら：平成13年度群馬県工業試験場研究報告、39-43
- 13) 増淵隆ら：平成22年度群馬産業技術センター研究報告、25-27
- 14) 原昌道：科学と生物 23、151-161（1985）

群馬KAZE酵母3号の尿素非生産性化と高品質清酒の製造

渡部貴志・佐藤勝也*・今井健夫**
大野 豊*・田島 創***・石田一成****

Breeding of non-urea producing Gunma KAZE3 yeasts to produce high-quality sake
WATANABE Takashi, SATOH Katsuya, IMAI Takeo
Oono Yutaka, TAJIMA So, and ISHIDA Kazushige

群馬KAZE酵母は、吟醸酒用酵母として開発され、群馬県内の多くの酒造会社に利用されている。清酒中の尿素は、カルバミン酸エチルの前駆物質であり、この物質は国際ガン研究機関（IARC）によりおそらく発がん性があるとされるグループ2Aに指定されている。我々は、イオンビーム照射により、群馬KAZE酵母3号（KAZE3）の尿素非生産性化に取り組んだ。選抜方法を修正することにより、17株の尿素非生産性候補株を取得した。本研究では、実用化に向けたKAZE3の尿素非生産性株の選抜を試みた。

キーワード：清酒、尿素非生産性酵母、カルバミン酸エチル、イオンビーム

Gunma KAZE yeasts, bred for ginjyo-sake brewing, are utilized in many sake-manufactures of Gunma prefecture. In Japanese sake, urea is a main precursor of ethyl carbamate which is classified in the group 2A “probably the cause of cancer” by International Agency for Research on Cancer. We attempted to breed a non-urea producing yeast from Gunma KAZE3 yeast by ion-beam irradiation. By modifying the selecting condition, we succeeded to isolate 17 candidates that did not produce urea. In this study, we tried to select non-urea producing KAZE3 for practical use.

Keywords: Japanese sake, non-urea producing yeast, ethyl carbamate, ion-beam

1 はじめに

全国の清酒の生産量は、従来大半を占めていた普通酒の割合が下がり、特定名称酒（本醸造酒、吟醸酒、純米酒等）の割合が増えてきている。これは、旅館や居酒屋向けの大量消費型のものから、清酒専門店や清酒愛好家向けの品質本位の清酒に転換していることを表している。清酒の中でも地域の特徴が出てくる地酒は、国内だけでなく国外でも高く評価されており、海外輸出量は11年間連続で毎年平均10%以上増加を続けている¹⁾。

光計測係

* 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所

** 聖酒造株式会社 *** 食品化学開発係

**** 食品・バイオ係

清酒の個性を出させるものの一つに、清酒酵母がある。（公財）日本醸造協会が全国の酒造会社に頒布している「きょうかい清酒酵母」は、清酒の品質を向上させる上で非常に重要な役割を果たしてきた。一方で、各地の公設試等が開発した独自酵母も、その土地ならではの清酒造りに欠かせない役割を担っている。群馬県では、平成14年に実用化された群馬KAZE酵母²⁾、令和元年、令和2年に泡無し株が実用化された群馬G2酵母³⁾、群馬G1酵母⁴⁾がある。また、（国研）量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所と共同で、世界で初めてイオンビーム育種技術を活用して群馬227酵母を開発している⁵⁾。

群馬県独自酵母の中でも、群馬KAZE酵母を用いて作られる清酒の売り上げは、年

間6億円（小売店ベース価格で換算）を越える。群馬県の地酒の海外輸出量も増加傾向にあり、今後も増えることが期待される。一方で、海外輸出量が増えるにつれて懸念されているのが、清酒中に含まれるカルバミン酸エチルの含有量を規制する国が増えることである。カルバミン酸エチルは、国際がん研究機関（IARC）によって「ヒトに対する発がん性がおそらくある」とされるグループ2Aに属する化合物である。清酒中のカルバミン酸エチルは、清酒の火入れ・貯蔵中に尿素とエタノールが縮合して生成する。このことから、尿素を生産しない尿素非生産性酵母を用いることにより、清酒中のカルバミン酸エチルの含有量を低減させることができる。

尿素非生産性酵母の開発方法は、既に報告されており⁶⁾、各地公設試が独自酵母の尿素非生産性化の取り組みを行っている。群馬県でも2019年に群馬KAZE酵母1号、2号の尿素非生産性株の実用化を行っている⁷⁾。一方、群馬KAZE酵母の中で2号の次に使用量の多い3号（以下、KAZE3）は、既存の報告の手法では尿素非生産性化が行えなかったため、解決方法が模索され、2021年に初めて候補株が17株取得された⁸⁾。群馬KAZE酵母3号の特徴は、リンゴ様の吟醸香を生成するのみならず、有機酸の生産量が少ないため、綺麗でフルーティーな酒質の清酒造りに適している。

そこで本研究では、優れたKAZE3の醸造特性を維持しつつ、尿素非生産性となった候補株を選抜し、実用化に取り組むことにより、群馬県の地酒の海外輸出を促進することを目的とした。また、聖酒造株式会社で実地試験醸造を行い、得られた製成酒について評価を行ったところ、最終的に令和5年度に県内酒造会社の共通財産として実用化されたので報告する。

表1 総米200 gの仕込み配合

	酒母	一段目	一段目	追水	計
総米(g)			200		200
麴米(g)		40			40
掛米(g)			160		160
汲水(mL)	12	68	200	30	310

2 実験材料と方法

2.1 供試酵母

群馬県独自酵母KAZE3は、県内酒蔵に頒布しているスラントのものを使用した。また、2021年度にKAZE3から取得した17株の尿素非生産性候補株を用いた。

2.2 総米200 gの小仕込み試験

尿素非生産性候補株17株と親株KAZE3の合計18株について、令和2年度兵庫県産山田錦40%精米を用いて表1に示す条件で、総米200 gの小仕込み試験を行った。麴エキス（Brix 5°）2.5 mLに酵母を一白金耳接種し、23℃で4日間静置培養を行った。この培養液1 mLに滅菌酒母用汲水（リン酸二水素カリウム1.0 g/L、硫酸マグネシウム・七水和物0.2 g/L、塩化ナトリウム0.15 g/L、乳酸5 mL）11 mLを加えたものを酒母の代わりとして用いた。麴米はハイG（樋口松之助商店）を種麴として製麴したものをを用いた。掛米は洗米後、35%吸水率となるように浸水し、蒸籠で蒸したものをを用いた。また、汲水は水道水を用い、6、12、15日目に10 mLずつ追水を行った。仕込み温度15℃、18日後に上槽を遠心分離（7000×g, 15 min）で行った。

2.3 分析方法

得られた製成酒の尿素は、F-kit 尿素／アンモニア（Roche Diagnostics GmbH, Germany）を用い、アンモニアの値を差し引いて測定した。酸度、アミノ酸度、日本酒度、エタノールは国税庁所定分析法に従い、分析を行った。グルコース、マルトースは、高速液体クロマトグラフ、示差屈折率検出器を用い、分析を行った。香気成分（酢酸エチル、イソアミルアルコール、酢酸イソアミル、カプロン酸エチル、イソブチルアルコール）は、ヘッドスペースガスクロマトグラフで分析した。

2.4 総米1 kgの小仕込み試験

総米200 gの小仕込み試験で選抜した候補株6株と親株KAZE3について、令和2年度兵庫県産山田錦40%精米を用いて表2に示す条件で総米1 kgの小仕込み試験を行った。麴エキス（Brix 5°）2.5 mLに酵母を一白金耳接種し、23℃で4日間静置培養を行った。この培養液1 mLに滅菌酒母用

表2 総米1 kgの仕込み配合

	酒母	一段	二段	三段	追水	計
総米(g)		100	400	500		1000
掛米(g)			400	400		800
麴米(g)		100		100		200
汲水(mL)	61	69	500	770	200	1550
温度(℃)	-	20	15		-	-

汲水60 mLを加えたものを酒母の代わりとして用いた。麴米は、ハイG（樋口松之助商店）を種麴として製麴したものをを用いた。掛米は、洗米後に35%吸水率となるように浸水し、蒸籠で蒸したものをを用いた。汲水は水道水を用い、8、14、17日目に50 mLずつ追い水を行った。仕込み温度は8~20℃で経日的に変化させ、20日後に上槽を遠心分離（7000×g, 15 min）で行った。

2.5 パイロットプラント試験醸造

総米1 kgの小仕込み試験で選抜した2-2株、7-4株および親株KAZE3に対し、令和3年産群馬県産舞風（50%精米）を用い、表3に示す配合で総米72 kgの試験醸造を行った。酵母の拡大培養は、麴エキス（Brix 5°）18 mLで23℃、4日間静置培養により行った。麴米は、吟麗（日本醸造工業株式会社）を種麴として製麴したものをを用いた。掛米の吸水率は酒母が32%、添が33%、仲留が32%になるよう調整した。なお、酒母の汲水は水道水を加工し（リン酸二水素カリウム1.0 g/L、硫酸マグネシウム・七水和物0.2 g/L、塩化ナトリウム1.5 g/L）、乳酸28.8 mL加えて5日間の中温速醸を行った。また、もろみの汲水は水道水を用いた。

2.6 官能検査

試験醸造を行った製成酒について、群馬産業技術センター職員2名で官能検査を行った。品温は20℃に保ち、利き猪口を用

いて5点法の総合評価と短評を評価した。

2.7 実地試験醸造

パイロットプラント試験醸造で最終選抜した候補株（2-2株）と親株KAZE3を用い、令和3年度兵庫県産山田錦50%精米を用いた総米600 kgの実地試験醸造を行った。群馬産業技術センターで酵母の拡大培養を行い、冷蔵の宅配便で聖酒造株式会社へ輸送した。拡大培養は、酒母は速醸もと造り、もろみは三段仕込みの通常の市販酒を造る方法で行った。

3 結果と考察

3.1 総米200 gの小仕込み試験による一次選抜

尿素非生産性候補株は尿素生産性だけでなく醸造特性にも影響を与えている可能性がある。このため、KAZE3および候補株17株を用いて総米200 gの小仕込み試験を実施し、尿素生産性と醸造特性を調べることにした。

まず、酵母の発酵力を示す炭酸ガス発生による重量減少量の経時変化は、親株KAZE3に比べて発酵力が大きく低下している株が6株（2-3株、2-4株、3-2株、9-1株、11-1株、11-2株）あった（図1）。続いて、試験酒を分析したところ、KAZE3の試験酒には尿素が6.1 mg/L含まれていたのに対し、用いた全ての候補株のものは

表3 パイロットプラントでの仕込み配合と試験条件

	酒母	初添	仲添	留添	追水	計
総米 (kg)	3.6	12.0	22.8	33.6		72.0
掛米 (kg)	2.4	8.4	18.0	28.8		57.6
麴米 (kg)	1.2	3.6	4.8	4.8		14.4
汲水 (L)	4.8	13.2	41.0	45.4	10.8	115.2
温度 (℃)	18	12	8	6~12		

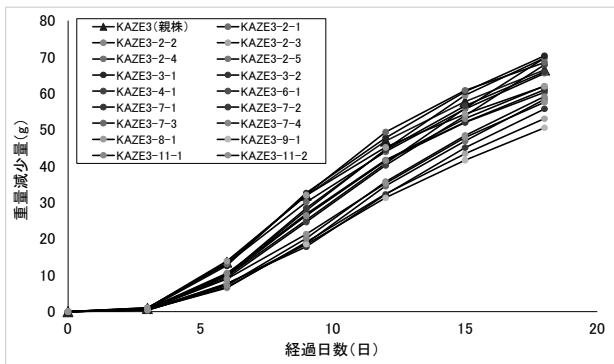


図1 総米200 gの小仕込み試験での重量減少量の経時変化

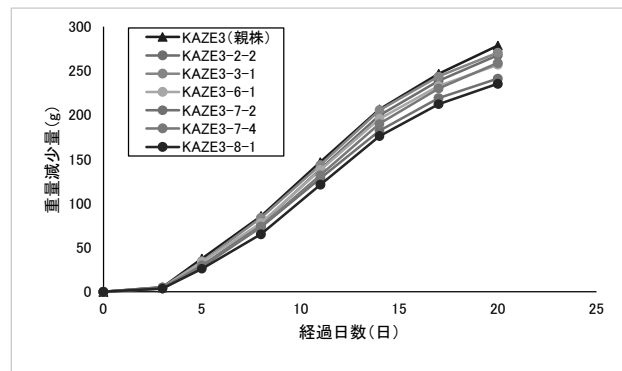


図2 総米1 kgの小仕込み試験での重量減少量の経時変化

尿素が検出限界以下であった（表4）。また、日本酒度は親株KAZE3の試験酒に比べて低いものがほとんどであり、発酵力が全体的に下がっていることが確認された。また、バナナ様の吟醸香を示す香気成分酢酸イソアミル、リンゴ様の吟醸香を示すカプロン酸エチルの値が大きく変化しているものもあった。醸造特性のバランスを踏まえ、2-2株、3-1株、6-1株、7-2株、7-4株、8-1株の6株を一次選抜した。

3. 2 総米1 kgの小仕込み試験による二次選抜

先の総米200 gの小仕込み試験では、一度に多くの本数を仕込めるが、仕込み段数を多く取れないため、細やかな水分調整や温度調整が行い難い。そこで、先に選抜した6株と親株KAZE3を用いて、総米1 kgの小仕込み試験を実施した。

まず、重量減少量の経時変化を見てみると、全ての候補株が親株KAZE3より低くめに推移しており、仕込みの段数を多くすることで発酵力に影響が出ることが分かった（図2）。特に2-2株、3-1株は、総米200 gの小仕込み試験の時に比べて、重量減少量が親株KAZE3と逆転していた。

続いて、試験酒を分析したところ、全ての供試株で日本酒度とアミノ酸度が総米200 gの小仕込み試験酒の値より下がり、より実醸造酒に近い成分値になっていた（表5）。また、総米200 gの小仕込み試験酒の香気成分値と比較すると、3-1株では酢酸イソアミルの生産性が高いことが、6-1株ではカプロン酸エチルの生産性が高いことが顕著になり、バランスが変わっていた。官能検査の結果より、2-2株と7-4株を二次選抜で選ぶことにした。

表4 総米200 gの小仕込み試験の結果のまとめ

	重量減少量 (g)	日本酒度 (-)	酸度 (mL)	アミノ酸度 (mL)	EtOH (%v/v)	Glucose (g/100 mL)	Maltose (g/100 mL)	イソアミルアルコール (ppm)	酢酸イソアミル (ppm)	カプロン酸エチル (ppm)	酢酸エチル (ppm)	イソブチルアルコール (ppm)	E/A (-)	尿素 (mg/L)
KAZE3 (親株)	66.46	-3.8	2.3	1.4	17.5	2.0	1.1	246.3	7.1	7.4	97.1	133.3	2.9	6.1
KAZE3-2-1	65.55	-12.1	2.4	1.5	16.2	2.8	1.5	242.4	6.0	5.7	59.0	114.9	2.5	ND*
KAZE3-2-2	69.79	-5.3	2.4	1.5	17.4	1.9	1.3	279.5	8.9	6.4	82.0	168.4	3.2	ND*
KAZE3-2-3	53.07	-34.0	2.3	1.8	13.3	6.0	1.8	204.2	5.3	5.7	71.3	111.0	2.6	ND*
KAZE3-2-4	58.41	-23.4	2.1	1.6	14.8	4.0	1.7	256.2	5.3	4.7	52.6	136.5	2.1	ND*
KAZE3-2-5	69.74	-16.1	2.1	1.6	15.4	3.2	1.5	223.0	4.6	4.7	39.1	109.0	2.1	ND*
KAZE3-3-1	70.36	-5.0	2.3	1.3	17.2	2.1	1.1	263.7	8.9	5.7	69.7	143.9	3.4	ND*
KAZE3-3-2	55.77	-21.6	2.0	1.4	14.6	4.2	1.4	257.4	8.7	1.4	95.1	160.3	3.4	ND*
KAZE3-4-1	67.91	-16.1	2.4	1.5	15.3	3.1	1.5	246.7	4.6	9.0	39.9	125.9	1.9	ND*
KAZE3-6-1	60.35	-20.0	2.7	1.5	15.5	3.8	1.6	270.3	8.7	8.9	71.0	157.8	3.2	ND*
KAZE3-7-1	61.01	-15.5	2.3	1.6	16.0	3.4	1.5	230.1	7.7	11.7	84.6	121.1	3.3	ND*
KAZE3-7-2	65.97	-9.1	2.4	1.5	17.2	2.5	1.3	254.3	8.2	10.2	79.0	134.9	3.2	ND*
KAZE3-7-3	68.56	-2.1	2.3	1.4	18.1	2.0	0.9	335.5	23.1	2.3	149.8	185.2	6.9	ND*
KAZE3-7-4	62.04	-11.3	2.2	1.4	16.4	3.1	1.2	279.3	10.3	6.6	83.0	143.2	3.7	ND*
KAZE3-8-1	61.96	-11.0	2.2	1.5	16.7	3.0	1.2	268.4	11.1	8.0	98.9	131.9	4.1	ND*
KAZE3-9-1	50.57	-33.0	1.8	1.7	13.4	6.1	1.6	187.6	2.6	9.8	48.3	107.4	1.4	ND*
KAZE3-11-1	59.14	-21.5	2.3	1.6	15.3	4.2	1.6	222.9	6.1	8.4	67.1	113.3	2.7	ND*
KAZE3-11-2	57.58	-21.8	1.9	1.5	14.8	4.1	1.3	245.6	7.2	1.9	104.9	150.0	2.9	ND*

*ND: 検出限界以下

表5 総米1 kgの小仕込み試験の結果のまとめ

	重量減少量 (g)	日本酒度 (-)	酸度 (mL)	アミノ酸度 (mL)	EtOH (%v/v)	Glucose (g/100 mL)	Maltose (g/100 mL)	イソアミルアルコール (ppm)	酢酸イソアミル (ppm)	カブロン酸エチル (ppm)	酢酸エチル (ppm)	イソブチルアルコール (ppm)	E/A (-)
KAZE3(親株)	278.7	-12.7	2.2	1.0	15.8	2.2	1.6	171.2	5.6	3.7	78.2	75.1	3.3
KAZE3-2-2	267.9	-11.4	2.1	1.0	15.8	2.2	1.6	174.1	7.4	5.8	83.3	85.9	4.2
KAZE3-3-1	270.6	-10.3	1.9	0.9	16.2	2.1	1.4	190.3	8.6	3.2	92.0	88.2	4.5
KAZE3-6-1	256.9	-15.4	1.9	1.0	15.3	2.6	1.7	164.1	5.8	12.5	60.4	71.6	3.6
KAZE3-7-2	241.3	-24.3	2.0	1.1	14.0	3.7	2.3	144.9	4.0	9.2	45.6	56.7	2.7
KAZE3-7-4	259.1	-13.1	1.7	1.0	15.8	2.3	1.6	203.4	11.0	4.2	95.2	94.4	5.4
KAZE3-8-1	235.3	-8.0	1.3	0.9	14.7	2.3	1.1	182.0	6.8	7.2	79.0	65.1	3.7

3.3 パイロットスケールでの試験醸造での最終選抜

育種酵母を実用化する場合、小仕込み試験の検討で候補株を選抜した後、パイロットプラントで一連の清酒製造工程を行い、もろみ経過データと試験醸造酒を評価する必要があります。そこで、先の総米1 kgの小仕込み試験で二次選抜した2-2株と7-4株と親

株KAZE3を用いて、群馬産業技術センター内のパイロットプラントを用い、総米72 kgの試験醸造を行った。

試験醸造で用いた原料米は、群馬県で独自に開発された酒造好適米の舞風であり、小仕込み試験で用いていた山田錦と品種が異なる。舞風は、タンパク質を多く含み、米が溶けにくく、グルコースの供給が少な

表6 パイロットプラントでの試験醸造の経過のまとめ

KAZE3(親株)	酵母					もろみ													試験酒
	1d	2d	3d	4d	添加前	踊り	4d	6d	8d	11d	13d	15d	18d	20d	22d	25d	27d	28d	
ボーメ(日本酒度)	13.1	14.1	12.8	9.8	8.9	-	5.0	3.9	2.6	1.0	0.0	-0.6	-1.3	-1.6	-1.8	-2.0	-2.1		-2.1
酸度	3.8	4.8	5.7	6.2	5.9	-	0.8	0.7	1.1	1.2	1.2	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6		1.4
アミノ酸度	1.1	1.4	1.1	1.0	1.3	-	0.6	0.6	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0
エタノール (%)	0.0	0.1	2.1	6.1	6.8	-	2.4	4.1	6.8	10.8	12.4	13.8	15.4	15.9	16.4	16.9	17.2		17.0
グルコース (%)	10.0	13.9	13.4	10.4	9.3	-	6.7	5.3	3.6	1.9	1.1	0.9	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3		0.5
マルトース (%)	6.9	7.1	5.6	5.0	4.7	-	1.4	1.3	1.4	1.2	0.9	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0		0.0
マル+グル (%)	16.9	21.0	18.9	15.4	14.0	-	8.2	6.6	5.0	3.2	2.1	1.5	0.8	0.5	0.4	0.4	0.4	上槽済	0.6
イソアミルアルコール (ppm)	1.7	1.7	58.5	147.7	137.5	-	35.5	54.6	80.8	125.6	148.5	169.2	177.7	192.6	199.2	203.3	205.7		235.9
酢酸イソアミル (ppm)	0.1	0.1	0.1	0.7	0.9	-	0.1	0.1	0.1	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2	2.3	2.2	2.3		1.7
カブロン酸エチル (ppm)	3.0	2.4	1.7	1.7	1.7	-	1.3	1.5	2.9	4.3	4.7	5.7	5.8	6.8	6.9	6.7	6.9		4.5
酢酸エチル (ppm)	0.3	1.8	2.9	10.4	14.9	-	3.9	6.3	9.9	24.9	25.2	31.7	35.1	39.6	40.3	40.3	40.4		35.9
イソブチルアルコール (ppm)	1.5	1.5	36.1	88.9	77.7	-	13.2	19.8	28.5	44.6	51.9	57.2	61.6	64.2	66.3	67.3	68.1		78.5
E/A比	7.0	6.8	0.2	0.5	0.6	-	0.3	0.2	0.2	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1		0.7
KAZE3-2-2	酵母					もろみ													試験酒
	1d	2d	3d	4d	添加前	踊り	4d	6d	8d	11d	13d	15d	18d	20d	22d	25d	27d	28d	
ボーメ(日本酒度)	13.0	14.1	13.1	9.9	8.0	-	5.2	4.2	3.3	1.7	0.7	0.1	-0.7	-1.0	-1.3	-1.5			-1.4
酸度	3.5	4.4	5.6	6.6	6.1	-	0.9	0.9	1.2	1.3	1.6	1.7	1.8	1.8	1.7	1.9			1.7
アミノ酸度	1.2	1.5	1.1	0.8	0.9	-	0.5	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.1	1.3	1.3	1.4			1.2
エタノール (%)	0.0	0.0	1.5	5.5	7.4	-	2.6	4.7	7.3	11.2	13.0	14.4	15.7	16.5	17.0	17.5			16.8
グルコース (%)	9.5	14.2	14.4	10.4	7.7	-	6.6	5.3	4.0	2.2	1.6	1.2	0.8	0.7	0.6	0.6			1.1
マルトース (%)	7.0	7.0	5.8	4.9	4.7	-	1.7	1.7	1.8	1.7	1.4	1.1	0.8	0.6	0.5	0.3			0.2
マル+グル (%)	16.5	21.2	20.2	15.2	12.4	-	8.4	7.0	5.8	4.0	2.9	2.3	1.6	1.3	1.1	0.9			1.3
イソアミルアルコール (ppm)	1.8	1.8	55.9	220.3	219.4	-	42.7	64.3	91.0	124.8	137.0	146.5	153.5	160.0	162.6	165.9			173.4
酢酸イソアミル (ppm)	0.1	0.1	0.1	0.6	1.7	-	0.1	0.1	0.1	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.6	1.7			1.3
カブロン酸エチル (ppm)	1.8	1.6	0.8	0.6	1.7	-	0.1	0.8	2.9	7.8	9.3	10.3	11.2	12.5	12.2	12.5			7.7
酢酸エチル (ppm)	0.3	2.0	1.6	11.8	22.3	-	4.0	7.5	11.1	19.9	19.9	23.9	27.6	30.3	36.1	33.1			29.5
イソブチルアルコール (ppm)	1.6	1.6	33.1	189.7	178.2	-	21.4	30.3	38.6	49.0	51.0	53.5	56.7	58.4	58.4	59.2			60.2
E/A比	6.4	6.5	0.2	0.3	0.8	-	0.3	0.2	0.1	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0			0.7
KAZE3-7-4	酵母					もろみ													試験酒
	1d	2d	3d	4d	添加前	踊り	4d	6d	8d	11d	13d	15d	18d	20d	22d	25d	27d	28d	
ボーメ(日本酒度)	13.2	14.4	14.1	11.4	9.6	-	5.3	4.5	2.6	0.0	-0.8	-1.4	-1.8	-2.0	-2.1	-2.2	-2.3	-2.3	-2.2
酸度	3.8	4.4	5.3	6.4	6.3	-	0.7	0.7	0.7	1.0	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4
アミノ酸度	1.1	1.6	1.5	1.2	1.2	-	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9
エタノール (%)	0.0	0.0	0.6	4.3	5.9	-	1.8	3.3	5.9	10.7	12.4	13.5	14.9	15.4	15.9	16.3	16.4	16.4	16.5
グルコース (%)	9.8	16.7	17.1	13.4	11.8	-	7.1	6.7	4.2	1.0	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
マルトース (%)	6.6	7.1	5.6	4.6	5.1	-	1.3	1.3	1.3	0.7	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
マル+グル (%)	16.4	23.8	22.7	18.0	16.9	-	8.3	8.0	5.5	1.8	1.0	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
イソアミルアルコール (ppm)	1.7	1.7	14.9	135.3	156.9	-	36.4	57.6	85.3	146.5	182.3	207.8	236.3	235.6	247.4	257.2	261.0	261.9	247.1
酢酸イソアミル (ppm)	0.1	0.1	0.1	0.1	1.5	-	0.1	0.1	0.1	2.1	2.9	3.5	4.0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.6	2.4
カブロン酸エチル (ppm)	2.3	2.4	1.8	1.3	1.4	-	0.9	1.0	2.2	4.6	5.5	6.0	6.2	6.0	6.1	6.2	6.4	6.3	4.2
酢酸エチル (ppm)	0.3	1.8	2.5	7.3	14.6	-	2.9	5.2	10.6	22.9	27.9	33.6	37.1	37.3	37.2	43.5	40.5	39.6	31.2
イソブチルアルコール (ppm)	1.5	1.5	10.5	83.7	88.9	-	15.1	23.0	33.6	56.4	67.0	77.5	89.0	88.4	92.6	96.7	98.2	98.5	92.8
E/A比	6.9	6.7	0.8	0.1	0.9	-	0.3	0.2	0.2	1.4	1.6	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.0

表7 実地醸造試験酒の成分分析のまとめ

	KAZE3(親株)	KAZE3-2-2
日本酒度 (-)	0.0	0.0
酸度 (mL)	1.5	1.6
アミノ酸度 (mL)	1.1	1.2
EtOH (%(v/v))	16.4	16.5
Glucose (g/100 mL)	2.5	2.5
Maltose (g/100 mL)	1.0	0.9
イソアミルアルコール (ppm)	168.7	159.2
酢酸イソアミル (ppm)	1.6	1.6
カプロン酸エチル (ppm)	5.2	5.9
酢酸エチル (ppm)	59.2	48.5
イソブチルアルコール (ppm)	41.3	39.4
E/A (-)	1.0	1.0
尿素 (mg/L)	13.8	ND

い性質である。群馬KAZE酵母は、カプロン酸エチルを高生産するために高グルコース条件下が必要であり、舞風で酒造りするのが難しいとされてきた。一方、KAZE3は、群馬KAZE酵母の中でも増殖速度が遅いため、もろみ初期にグルコースを必要以上に消費せず、舞風に適しているのではないかと考えられた。

酒母造りにおいては、親株KAZE3と2-2株がほぼ同等の経過を示していたのに対し、7-4株はやや発酵が遅れる傾向を示した(表6)。一方、もろみ初期の品温を下げすぎたため、最高ポーメが4日目の5.0~5.3と低くなってしまい、米が想定より溶けないもろみ経過となった。この影響が分からないが、小仕込み試験では酢酸イソアミルの生産性が良かった7-4株では、カプロン酸エチルの値の方が高くなっていた。尿素は、KAZE3が10.2 mg/Lであったのに対し、候補株2株とも検出限界以下で、小仕込み試験の結果を再現できた。粕歩合は、KAZE3が60.4%、2-2株が55.4%、7-4株が68.4%となり、品質と経済性から2-2株を最終選抜株にすることになった。

3. 4 実地試験醸造による試作

実用化研究の最終段階として、令和3年度産山田錦を用い、聖酒造株式会社で実地試験醸造を行うことにした。

2-2株の試作酒は、小仕込み試験やパイロットスケールでの試験醸造と同様に、親株KAZE3のものよりカプロン酸エチル

がやや高めだった(表7)。また、2-2株は、群馬KAZE酵母の中で酸度が低いというKAZE3の特徴を維持していた。さらに、実地試験醸造でも2-2株の試作酒は、尿素含有量が検出限界以下であった。

4 まとめ

本研究では、KAZE3の優れた醸造特性を維持した尿素非生産性株の選抜の実用化に取り組んだ。最終選抜株2-2株は、パイロットスケールでの試験醸造で親株KAZE3と同様のもろみ経過を示し、試験醸造酒の各種成分もカプロン酸エチルがわずかに高めで大差がなく、尿素非生産性であることが確認された。さらに聖酒造株式会社での実地醸造試験でも上記と同様の結果に加え、親株KAZE3がもつ酸度が低めとなる特徴を維持していた。本酵母は、群馬県酒造組合との協議により、令和5年度よりKAZE3-Argとして実用化し、県内酒造会社に頒布することになった。

謝 辞

本研究の一部は、令和2年度群馬県地域企業支援課の研究開発推進費、科研費基盤C(21K12528)、及び聖酒造株式会社との令和4年度群馬産業技術センター公募型共同研究により実施した。

文 献

- 1) 国税庁：第67回全国酒造技術指導機関合同会議資料(2022)
- 2) 上山 修ら：平成13年度群馬県工業試験場研究報告、39-43
- 3) 渡部貴志ら：令和2年度群馬産業技術センター研究報告、23-28
- 4) 渡部貴志ら：令和4年度群馬産業技術センター研究報告、56-61
- 5) 増渕 隆ら：平成21年度群馬産業技術センター研究報告、12-14
- 6) 北本勝ひこら：日本醸造協会誌、106-114(1993)
- 7) 渡部貴志ら：平成30年度群馬産業技術センター研究報告、1-4
- 8) 渡部貴志ら：令和4年度群馬産業技術センター研究報告、62-67