

群馬県立産業技術センター 研究報告

平成30年度

Reports of

Gunma Industrial Technology Center

2018

群馬県立産業技術センター

目 次

次世代産業創出研究

輸出用に適した群馬清酒酵母の育種に関する研究（第3報）	1
渡部貴志、佐藤勝也、林 秀謙、増渕 隆	

試験分析高度化研究

深層強化学習によるロボットのバラ積みピッキング習得（第1報）	5
町田晃平、石黒 聡、細谷 肇	

実稼動振動可視化技術の構築	9
青柳大志、狩野幹大、新井宏章	

ヒト爪郭部の毛細血管内における血流の画像解析	14
川原潤也、橋本茂樹、横山 靖	

シャルピー衝撃試験評価による焼結材の品質判定ソフトウェアの開発	18
鎌腰雄一郎、石黒 聡	

プラスチック混合物の静電分離に関する検討	23
熊澤直人、恩田紘樹	

鉛フリーはんだ接合部の合金層解析	27
中澤優人、矢澤 歩	

ガスー斉分析技術の確立	31
牛木龍二、恩田紘樹	

味覚センサーを用いた分析における前処理方法の検討	35
石田一成、櫛田麻希、木村紀久	

真菌混在下での細菌数測定系の確立	38
柳澤昌臣、渡部貴志、増渕 隆	

ものづくりにおける生産性向上に関する研究

一切削加工プロセスの生産性向上ー	42
鏑木哲志、新井宏章、黒岩広樹、小宅 勝	

ものづくりにおける生産性向上に関する研究

ーCMMによる検査プロセスの自動化ー	46
鏑木哲志、中村哲也、狩野幹大、小谷雄二	

次世代産業創出研究

輸出用に適した群馬清酒酵母の育種に関する研究 (第3報)

渡部貴志・佐藤勝也*・林 秀謙**・増淵 隆***

Breeding of non-urea producing Gunma sake yeasts which are suitable for export
Takashi WATANABE, Katsuya SATOH,
Hidenori HAYASHI and Takashi MASUBUCHI

発がん性が疑われているカルバミン酸エチルは、清酒酵母が生産する尿素とエタノールの化学反応により生成する。また、清酒中のカルバミン酸エチル含有量に規制値を設ける国が将来的に増えてくることが懸念されている。そこで本研究では、清酒中のカルバミン酸エチル含有量を減らす目的で、群馬県独自酵母の尿素非生産化に取り組んでいる。本年度では、試作株を用いた実地醸造試験を実施し、得られた製成酒のカルバミン酸エチル生成能が低減されたことを確認したので報告する。

キーワード：清酒、群馬清酒酵母、尿素、カルバミン酸エチル、イオンビーム

Ethyl carbamate (EC), considered as probably the cause of cancer, is produced on the chemical reaction of urea and ethanol. These materials are produced by sake yeasts. It is considered that the countries, regulating volume of EC in Japanese sake, would be also increased. Therefore, the purpose of this study was to reduce the volume of EC in Japanese sake, we attempted to breed Gunma sake yeasts which do not produce urea as a precursor of EC. In this year, we demonstrated the real scale brewing test with non-urea producing candidate and confirmed that few EC was formed in the brewed sake.

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

1 はじめに

清酒は、我が国の主食である米を醸して造る伝統的な酒類であり、國酒として親しまれてきた¹⁾。また、清酒の風味は地域性に富み、国内各地の郷土料理とともに独自の飲食文化を形成してきた。一方、欧米諸国からは吟醸酒がライスワインとして認知され、親しまれてきており、近年の日本食ブームで海外輸出量は年々増えている。特に地元産の米や水、酵母で造られる地酒は、ワインでいうテロワールという観点から、欧米諸国から好まれている。

当センターでは、群馬県酒造組合と共同で県独自の吟醸用酵母の開発に取り組んできており、群馬KAZE酵母として県内酒蔵に広く普及している²⁾。さらに、県農業技術センターと共同で県独自の酒造好適米「舞風」も開発している³⁾。これらの成果

は、群馬県の清酒輸出量の増大に少なからず貢献していると言える。

しかしながら、清酒中に含まれるカルバミン酸エチルに規制値を設ける国が増えてくることが懸念されている。カルバミン酸エチルは、国際がん研究機関 (IARC) によって「ヒトに対する発ガン性がおそらくある」とされるグループ2A に属する化合物である。カルバミン酸エチルは、清酒中の尿素とエタノールが火入れ・貯蔵中に縮合して生成する。したがって、清酒酵母が尿素を生産しなくなれば、清酒のカルバミン酸エチルの生成量は低減できると考えられ、既に実用例が報告されている⁴⁾。

そこで本研究では、群馬県独自酵母の優れた醸造特性を維持しつつ、尿素非生産性となった酵母を取得・実用化することを目的に検討している。昨年度までに群馬KAZE酵母1号 (KAZE1)、群馬KAZE酵

母2号（KAZE2）、泡なし群馬G2酵母の尿素非生産候補株を取得した。また、KAZE2の試作株については、当センターのパイロットプラント試験醸造でも良好な結果を確認した^{5,6)}。今年度は、KAZE1の試作株を用いたパイロットプラント試験醸造を行い、KAZE2の試作株については実地醸造試験を行ったので報告する。

2 実験材料と方法

2.1 供試酵母と使用培地

群馬県独自酵母KAZE1、KAZE2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、昨年度取得したKAZE1およびKAZE2の尿素非生産性試作株は、グリセロールストックにしたものを用いた。

菌株のリフレッシュのための前培養は、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5 g/L、グルコース10 g/L、寒天 20 g/L）を用いた。

2.2 パイロットプラント醸造試験

平成29年度兵庫県産山田錦（40%精米）を用い、表1に示す配合で総米75 kgの試験醸造を行った。酵母の拡大培養は、麴エキス（Brix 5°）18.75 mLで23℃、4日間静置培養により行った。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用いた。掛米の吸水率は、酒母32%、初添28%、仲添27%、留添27%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0.8 g/L、硫酸マグネシウム・七水和物0.2 g/L）、乳酸30 mL加えて中温速醸にて5日間の酒母造りを行った。また、もろみの汲水は水道水を用いた。

2.3 製成酒の評価

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、日本酒度は国税庁所定分析法に準拠して分析した。グルコース、マルトース、およびエタノールは、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。香氣成分（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）は、ヘッドスペースガスクロマトグラフを用いて分析した。製成酒の官能検査は、5点法で行った。

2.4 実地醸造試験

実地醸造試験を実施して頂ける県内酒造会社を広く募集したところ、4社に委託することになった。酵母の拡大培養用培地は、食品添加物用の酵母エキス、ミーストP1G（アサヒフードヘルスケア）3 g/L、グルコース50 g/Lを用いた。群馬県独自酵母と同様の手順で拡大培養を行い、酒造会社が指定した期日に酵母をお渡しした。用いる原料米の種類と精米歩合の指定はせず、本醸造酒、純米酒、純米大吟醸酒の試作を委託した。また得られた製成酒について、尿素有量の分析と酒造技術者の利き酒のために提出して頂き、もろみ経過データは発酵状態が健全であることを確認するために集めた。

2.5 カルバミン酸エチル生成試験

実地醸造試験を実施して頂いたA社から、対照となるKAZE2号を用いて同じ条件で醸造を行った製成酒を提供して頂き、それぞれの試料を50℃で24時間加温してカルバミン酸エチル生成試験を行った。なお、カルバミン酸エチルの含有量は、橋口らの方法⁷⁾にしたがってエキストルレートNT3カラム（メルク社）を用いて固相抽出し、GC/MS（アジレント・テクノロジー社）を用いて分析した。

表1 パイロットプラントでの仕込み試験条件

	酒母	初添	仲添	留添	追水	計
総米 (kg)	3.75	12.50	22.50	36.25		75.00
掛米 (kg)	2.50	8.75	17.00	31.25		60.00
麴米 (kg)	1.25	3.75	5.00	5.0		15.00
汲水 (L)	5.00	13.75	30.00	52.50	15.00	131.25
温度 (℃)	22	12	8	6~12		

3 結果と考察

3.1 KAZE1の試作株の醸造特性

育種酵母を実用化する場合、小仕込み試験の検討で多くの候補株の中から試作株を選抜し、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醸成酒を検証する必要がある。その結果を踏まえ、酒造会社にどのような性質を持った株で、どのような造り方をしたら良いかを提案できるようになる。昨年度検討したKAZE2からの尿素非生産性酵母試作株に引き続き、今年度はKAZE1号およびその試作株について、当センター内のパイロットプラントを用い、総米75 kgの試験醸造を行った。

今年度の試験醸造では、甑による蒸米吸水率を調べるために、吸水率を低めに設定したところ、麴米の糖化力価が低くなってしまった。その影響からかポーメがもろみ後半で切れすぎてしまい、KAZE1（表2）、試作株（表3）ともに辛口となってしまった。一方で、試作株の各成分の経時変化は、KAZE1のものとはほぼ同じ傾向を示していた。また、酒造技術者約40名の利き酒により回答を頂いた感想は、両者で

ほぼ同じであったことから、醸造特性を維持できていることを確認した（データ略）。さらにKAZE1の醸成酒の尿素的含有量は15.3 mg/Lであったのに対し、試作株の値は0.8 mg/Lであり、尿素が生産されていないことが確認できた。

3.2 KAZE2の試作株の実地醸造試験

当センターのパイロットプラントでは、同じ原料米を用いて同時進行で試験が行える反面、年に一回しか実施できないので得られるデータが限られてしまう。一方、酒造会社では、様々な種類の原料米を用い、酒造会社毎に異なった水や酒造環境となるため、開発した酵母を実用化するためには、実地醸造試験での評価が必須となる。昨年度はKAZE2の試作株について、当センターのパイロットプラントで有用性を確認したことから、実地醸造試験を行った。

A~D社では、それぞれ原料米が異なっていたが、20~30日のもろみ日数で上槽されており、試作株の発酵力には実用的に問題無いことが確認された。また、醸成酒の分析値をみると、B社ではカプロン酸エチルが低いものの、その他の試料では5.0 mg/L以上あり、KAZE2の高カプロン酸エチル生成能が維持されていた（表4）。さ

表2 KAZE1のパイロットプラント醸造試験のもろみ経過のまとめ

1号機 KAZE1	酵母					もろみ													
	2d	3d	4d	5d	添加前	踊り	4d	6d	8d	11d	13d	15d	18d	20d	22d	25d	27d	28d	
ポーメ (日本酒度)	13.4	13.7	11.9	8.7	7.1	10.2	7.2	7.1	6	4.1	2.84	1.97	1.13	0.74	0.43	0.01	-0.15	-0.31	
酸度	3.55	4.5	5.63	5.84	5.95	1.7	0.7	0.95	1.4	1.5	1.5	1.45	1.45	1.9	1.7	1.72	1.75	1.75	
アミノ酸度	0.85	0.55	0.65	0.56	0.82	0.64	0.2	0.35	0.65	0.65	0.7	0.8	0.85	1	1.17	1.1	1.1	1.1	
エタノール (%)	-	-	-	6.1	-	-	4.4	4.6	6.4	9.4	11.1	12.2	13.8	14.9	15.1	16	16.4	16.9	
グルコース (%)	-	-	-	-	-	-	11.4	10.9	9.2	6.5	5.0	4.1	3.2	2.9	2.6	2.3	2.1	2.1	
マルトース (%)	-	-	-	-	-	-	2.5	2.8	2.9	2.5	2.2	1.7	1.2	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6	
酵母数 (10e8個/ml)	-	-	-	2.2	-	-	1.2	1.5	1.3	2.0	1.9	2.1	2.1	1.6	1.8	1.6	1.8	2.0	
生菌率 (%)	-	-	-	100.0	-	-	100.0	100.0	100.0	100.0	94.9	100.0	100.0	100.0	100.0	94.4	100.0	95.3	
イソアミルアルコール (ppm)	-	-	-	-	-	-	40.7	55.2	64.5	103.2	101.8	115.6	126.3	136.3	138.8	144.4	145.6	145.3	
酢酸イソアミル (ppm)	-	-	-	-	-	-	0.0	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.9	1.8	1.9	2.1	2.2	2.1	
カプロン酸エチル (ppm)	-	-	-	-	-	-	0.2	0.7	1.2	2.1	1.6	2.2	3.5	3.7	4.7	5.1	5.6	5.4	
酢酸エチル (ppm)	-	-	-	-	-	-	5.8	12.1	19.2	17.9	26.8	33.6	42.4	52.2	49.6	50.8	57.1	56.5	
イソブチルアルコール (ppm)	-	-	-	-	-	-	17.9	22.6	27.3	37.1	41.0	45.6	49.2	52.2	52.4	54.1	54.4	54.0	
E/A比	-	-	-	-	-	-	0.0	0.7	0.9	0.8	1.0	1.2	1.5	1.3	1.4	1.4	1.5	1.4	

表3 試作株 (KAZE1) のパイロットプラント醸造試験のもろみ経過のまとめ

2号機 試作株 (KAZE1)	酵母					もろみ													
	2d	3d	4d	5d	添加前	踊り	4d	6d	8d	11d	13d	15d	18d	20d	22d	25d	27d	28d	
ポーメ (日本酒度)	13.5	13.8	11.5	8.3	6.6	9	6.6	6.8	5.9	4	2.76	1.69	0.91	0.47	0.07	-0.23	-0.41	-	
酸度	3.6	4.59	5.31	5.66	6.11	1.22	0.75	1.08	1.45	1.5	1.6	1.5	1.5	1.8	1.6	1.64	1.7	-	
アミノ酸度	0.97	0.8	0.6	0.49	0.55	0.51	0.35	0.35	0.6	0.6	0.7	0.75	0.9	0.85	0.9	1.2	1.09	-	
エタノール (%)	-	-	-	6.7	-	-	2.6	4.0	5.9	9.0	11.0	12.5	13.8	15.1	15.2	16.1	16.7	-	
グルコース (%)	-	-	-	-	-	-	10.6	10.6	9.4	6.7	5.1	4.1	3.2	2.7	2.4	2.1	2.0	-	
マルトース (%)	-	-	-	-	-	-	1.9	2.3	2.5	2.2	1.8	1.6	1.1	0.9	0.7	0.6	0.6	-	
酵母数 (10e8個/ml)	-	-	-	2.9	-	-	1.0	1.6	1.7	1.9	2.2	2.1	2.1	1.5	1.6	1.5	1.8	-	
生菌率 (%)	-	-	-	100.0	-	-	100.0	96.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	94.9	100.0	-	
イソアミルアルコール (ppm)	-	-	-	-	-	-	39.5	53.7	68.4	96.0	108.9	122.1	136.5	144.3	146.6	152.3	153.0	-	
酢酸イソアミル (ppm)	-	-	-	-	-	-	0.0	0.4	0.6	1.2	1.4	1.6	2.1	2.3	2.5	2.6	2.7	-	
カプロン酸エチル (ppm)	-	-	-	-	-	-	0.3	0.5	1.1	2.1	1.7	2.1	3.4	3.9	4.9	5.0	5.5	-	
酢酸エチル (ppm)	-	-	-	-	-	-	5.1	7.7	9.8	20.8	28.7	34.3	47.1	54.6	55.4	57.5	60.2	-	
イソブチルアルコール (ppm)	-	-	-	-	-	-	16.6	21.6	26.9	36.4	41.9	45.6	49.5	51.9	52.2	53.6	53.7	-	
E/A比	-	-	-	-	-	-	0.0	0.7	0.9	1.2	1.3	1.3	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	-	

表4 KAZE2および試作株の実地醸造試験製成酒の各種成分のまとめ

	尿素 (mg/L)	日本酒度	エタノール (度)	酸度 (mL)	アミノ酸度 (mL)	グルコース (g/100mL)	マルトース (g/100mL)	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 (%)
A社KAZE2	23.9	3.1	16.7	1.6	0.9	1.5	0.5	172.9	1.9	5.7	45.7	53.7	1.1
A社試作株	3.1	0.9	16.5	1.8	1.0	1.1	0.4	202.0	1.9	6.4	42.9	60.9	0.9
B社試作株	3.9	-6.0	16.2	1.8	0.8	3.1	0.3	167.1	2.2	2.6	71.2	50.9	1.3
C社試作株	3.3	3.0	16.6	1.7	-	2.9	0.4	190.4	3.2	5.5	54.4	61.7	1.7
D社試作株	0.9	-2.8	17.9	1.9	-	2.5	0.6	180.9	3.8	5.4	58.8	124.7	2.1

らに、試作株の製成酒の尿素含有量が4.0 mg/L以下であり、A社のKAZE2のものの値（23.9 mg/L）より明らかに低くなっていた。さらに、酒造技術者約40名による製成酒の官能評価により回答を頂いた総合評価は、基準値の3.0より良い値であり、KAZE2の良質な酒質を維持していた。

3. 3 カルバミン酸エチル生成能

本研究の最終目標は、清酒中の尿素を低減させることにより、カルバミン酸エチルの生成量を減らすことである。一方、カルバミン酸エチルは、火入れと長期保存によって生成する。そこで、先の検討により作成した、A社の試作株とKAZE2を用いた製成酒を用い、50℃で24時間加温処理することにより、カルバミン酸エチルの生成能について評価することにした。

KAZE2の製成酒の加温前のカルバミン酸エチルの量は、33 ppbであったのに対し、加温後には115 ppbまで増加し、カルバミン酸エチル生成能があることが確認された（図1）。一方、試作株のものでは加温前が2 ppbであり、KAZE2のものより大幅に低くなっており、加温後でも3 ppbとほとんど増加しなかった。これらのことにより、試作株によるカルバミン酸エチルの低減効果が認められた。

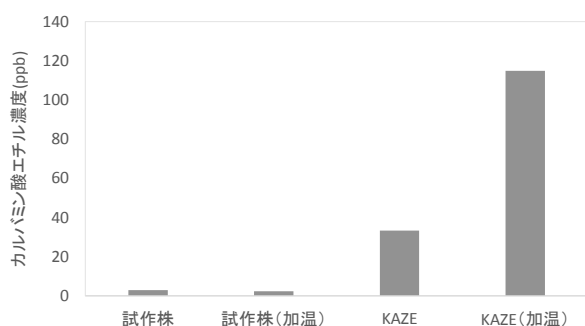


図1 加熱前後のカルバミン酸エチル濃度

4 まとめ

本研究では、清酒中のカルバミン酸エチル含有量を減らす目的で、群馬県独自酵母KAZE1、KAZE2の尿素非生産性試作株の実用性を試験醸造により評価した。また、KAZE2の試作株については、実地醸造試験で得られた製成酒でも尿素が低減されており、カルバミン酸エチルの低減効果も確認することができた。

謝 辞

群馬県内外の酒造技術者の皆様には、試験醸造製成酒の官能評価を行って頂いた。

文 献

- 1) 和田美代子：日本酒の科学（2015）
- 2) 増淵 隆ら：平成17年度群馬産業技術センター研究報告、35-38
- 3) 増淵 隆ら：平成18年度群馬産業技術センター研究報告、40-43
- 4) 北本勝ひこら：日本醸造協会誌、106-114（1993）
- 5) 渡部貴志ら：平成28年度群馬産業技術センター研究報告、11-14
- 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、10-14
- 7) 橋口知一ら：日本醸造協会誌、519-525（2006）

試験分析高度化研究

深層強化学習によるロボットのバラ積みピッキング習得 (第1報)

町田晃平・石黒 聡・細谷 肇*

Learning of Robot Bin Picking by Deep Reinforcement Learning
(1st Report)

Kohei MACHIDA, Satoshi ISHIGURO, Hajime HOSOYA

深層強化学習 Deep Q-Learning によるロボットのバラ積みピッキングを提案する。人間の教示を組み合わせたことにより、約 10 時間の深層強化学習でピッキングに成功した。今後は、本バラ積みピッキング技術や深層強化学習技術を展開し、企業の生産性向上を支援する。

キーワード：AI、深層強化学習、ロボット

We propose robot bin picking using deep reinforcement learning called as Deep Q-Learning. We report the successes of bin picking using deep reinforcement learning in about 10 hours because of human teaching. In the future, we expand this bin picking technology and deep reinforcement learning technology to support the improvement of productivity for enterprises.

Keywords : Artificial Intelligence, Deep Reinforcement Learning, Robot

1 はじめに

工場の生産性を高めるには、ロボットの活用が必要不可欠である。しかし、現状は多くの作業を人手に頼っている。そのような作業の一つとして、バラ積みされたワークの取り出し（バラ積みピッキング）がある。

バラ積みピッキングをロボットとマシンビジョンで実現しようとした場合、バラ積みワークが複雑に重なり合っているため、従来の画像処理手法ではピッキング箇所の取得が難しいという問題があった。

一方、近年の AI（人工知能）技術の発達により、特に画像認識分野において、様々な成果が報告されている。中でも、深層強化学習は、AI が目的を達成するために自ら試行錯誤を繰り返して学習し、最適な行動方法を獲得していく手法である。深層強化学習は、事前に学習データを用意する必要がなく、AI が自動で高いスキルを獲得することができるため、産業分野への応用が期

待されている。

そこで、本研究では、この深層強化学習によるロボットのバラ積みピッキング習得を目指す。昨年度の研究では、深層強化学習による平面に置かれたワークのピッキングを実現した。本研究では、バラ積みされたワークのピッキングに取り組む。

2 研究方法

2.1 強化学習

強化学習は、エージェント（AI）が環境との相互作用により学習を行う。強化学習の枠組みを図 1 に示す。エージェントは、タイムステップ t において、観測した状態 $s_t \in S$ から行動 $a_t \in A$ を選択する。それにより、エージェントは環境から報酬 $r_{t+1} \in R$ と次の状態 s_{t+1} を受け取る。

エージェントの目標は、受け取る報酬の累積（収益）を最大化することである。収益は以下のように定義される。

ここで、 $\gamma(0 \leq \gamma \leq 1)$ は割引率と呼ばれ、

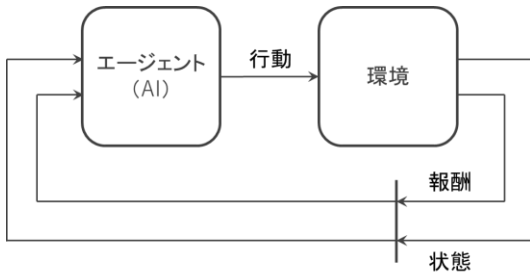


図1 強化学習の枠組み

$$R_t = \sum_{k=0}^T \gamma^k r_{t+k+1} \quad (1)$$

将来の報酬への割引を決定するパラメータである。また、 T はタイムステップの終端を表す。

方策 π のもと、状態 s において行動 a を取ることの価値を行動価値関数 $Q^\pi(s, a)$ として表す。行動価値関数は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} Q^\pi(s, a) &= E_\pi\{R_t | s_t = s, a_t = a\} \\ &= E_\pi\left\{\sum_{k=0}^T \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a\right\} \quad (2) \end{aligned}$$

E_π は方策 π における期待値である。上式のように、行動価値関数は期待報酬として表される。エージェントに行動価値関数を学習させるアルゴリズムをQ学習と呼ぶ。Q学習では、以下のように行動価値関数を更新する。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a) \right] \quad (3)$$

学習で獲得される行動価値関数は、使われている方策とは独立に、最適行動価値関数 Q^* を近似する。これにより、エージェントは現在の状態 s_t から行動価値関数を用いて最適な行動 $\max_a Q^*(s_t, a)$ を取ることができるようになる。

2.2 深層強化学習

本研究では、深層強化学習のアルゴリズムとして、Mnihらによって提案されたDeep Q-Learning¹⁾を用いた。Deep Q-Learningは、Q学習における行動価値関数をニューラルネットワークによって近似する手法である。Deep Q-LearningにおけるニューラルネットワークをDeep Q-



図2 実験環境

Network(DQN)と呼ぶ。DQNに状態を入力することで、各行動を行った場合の価値が出力される。

近似された行動価値関数を $Q(s, a; \theta)$ と表す。ここで、 θ はニューラルネットワークのパラメータである。Deep Q-Learningでは、このパラメータ θ を学習により更新する。

Deep Q-Learningのアルゴリズムをアルゴリズム1に示す。アルゴリズム1において、リプレイメモリ D は、遷移情報 $(\phi_t, a_t, r_t, \phi_{t+1})$ を格納しておくためのメモリである。学習の際には、このリプレイメモリ D から遷移情報のミニバッチ $(\phi_j, a_j, r_j, \phi_{j+1})$ を取り出して学習を行う。これは、Experience Replay(経験再生)と呼ばれる手法である。時系列として相関のない状態・行動・報酬の組を用いて学習した方が、学習の効率が上がるため、Deep Q-LearningではこのExperience Replayが用いられている。また、学習時は試行錯誤による探索を促すため、 ϵ -greedy方策に従って確率 ϵ でランダムな行動を選択する。それ以外の場合には、最適な行動 $\max_a Q^*(s_t, a; \theta)$ を選択する。

2.3 実験条件

実験の環境を図2に示す。ロボットは、小型のロボットアーム uArm Swift Pro (UFACTORY社)を用いた。uArm Swift Proは、pyufと呼ばれるPythonライブラリを用いて、Pythonにより制御した。カメラは、RealSense Depth Camera D435 (Intel社)を用いた。RealSense Depth Camera D435は、ステレオビジョンの深度

アルゴリズム 1 Deep Q-learning

リプレイメモリ D をキャパシティ N に初期化する

行動価値関数 $Q(s, a; \theta)$ をランダムな重み θ で初期化する

各エピソード (1~ M) に対して繰り返し:

初期画像 x_1 を初期状態 $s_1 = \{x_1\}$ として初期化し前処理 $\phi_1 = \phi(s_1)$ を行う

各タイムステップ (1~ T) に対して繰り返し:

行動 $a_t = \begin{cases} \text{random} & (\text{確率 } \varepsilon) \\ \max_a Q^*(s_t, a; \theta) & (\text{確率 } \varepsilon - 1) \end{cases}$ を選択する

行動 a_t を実行し報酬 r_t と次の画像 x_{t+1} を受け取る

次の状態 $s_{t+1} = s_t, a_t, x_{t+1}$ をセットし前処理 $\phi_{t+1} = \phi(s_{t+1})$ を行う

遷移情報 $(\phi_t, a_t, r_t, \phi_{t+1})$ をリプレイメモリ D に格納する

リプレイメモリ D から遷移情報 $(\phi_j, a_j, r_j, \phi_{j+1})$ のミニバッチを取り出す

教師データ $y_j = \begin{cases} r_j & (\phi_{t+1} \text{ が終端の場合}) \\ r_j + \gamma \max_{a'} Q(\phi_j, a'; \theta) & (\phi_{t+1} \text{ が終端でない場合}) \end{cases}$ をセットする

教師データと行動価値関数の誤差 $(y_j - Q(\phi_j, a_j; \theta))^2$ を求め誤差逆伝搬を実行する



図 3 RGB 画像

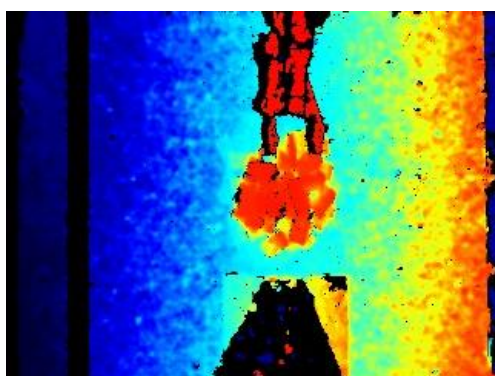


図 4 深度画像

カメラである。2つの深度センサ、RGBセンサ、IR 投射器を搭載する。本実験では、RealSense Depth Camera D435 より取得した RGB 画像 (図 3) と深度画像 (図 4) を DQN へ入力した。画像のサイズは、どちらも 320×240 の 3 チャンネルである。バラ積み部品を想定したワークは、ドミノ 60 個を使用した。ドミノは平面の上にラン

ダムに山積みした。

Deep Q-Learning のプログラムは、深層強化学習ライブラリ ChainerRL を用いて Python で実装した。

エージェントは各タイムステップにおいて、アーム水平方向の上・下・左・右移動と垂直方向の上・下移動およびピッキングの 7 つの行動から選択を行う。ピッキングを選択するとその場でアームを閉じ、uArm Swift Pro のピッキング判定によりピッキングの成功が確認されれば、エージェントに報酬+1 が与えられる。ピッキングに失敗した場合やアームを移動した場合の報酬は-1 である。タイムステップの終端 T は 100 とした。タイムステップの終端 T が終わると、アームは初期位置に戻り、次のエピソードが開始される。

実験に使用した DQN の構造を図 5 に示す。3 層の畳み込み・プーリング層と 2 層の全結合層からなるニューラルネットワークである。最初の畳み込み層へは、3 チャンネルの RGB 画像と深度画像を結合した 6 チャンネルの画像を入力した。畳み込み層と全結合層の活性化関数は、Leaky ReLU を用いた。

学習の最適化手法は、SGD (確率的勾配降下法) を用いた。SGD の学習率は 0.01 とした。学習時の GPU は、NVIDIA GeForce 1080 Ti を用いた。

報酬の割引率 γ は 0.99 とした。 ε -greedy

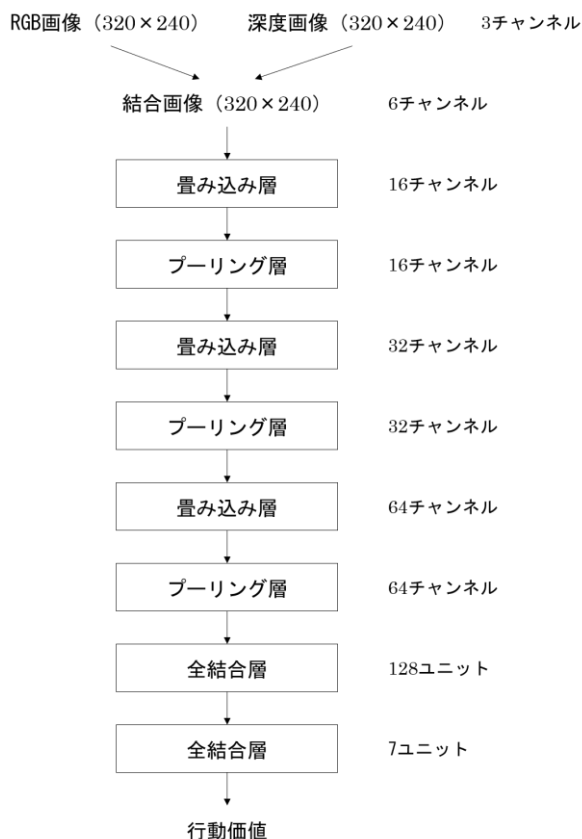


図5 Deep Q-Network の構造

方策の確率 ϵ は、初期タイムステップで0.5、その後各タイムステップで線形に減少させ、3000タイムステップ(30エピソード)で0.3となるようにした。リプレイメモリ D のキャパシティ N は1,000,000とした。Experience Replayには、教師データと行動価値関数の誤差が大きい遷移情報を優先的に取り出して学習を行うPrioritized Experience Replay(優先順位付き経験再生)を用いた。

昨年度の研究より、事前に人間の教示を行うことで、深層強化学習の学習時間を短縮できることが確認された。そのため、本研究では、事前に約30分(500タイムステップ分)の教示を行った後に、深層強化学習を行った。教示は、各タイムステップにおいて、オペレータがロボットの取るべき行動を選択した。

3 研究結果

約30分の人間の教示後、約10時間の深層強化学習により、バラ積みされたワーク

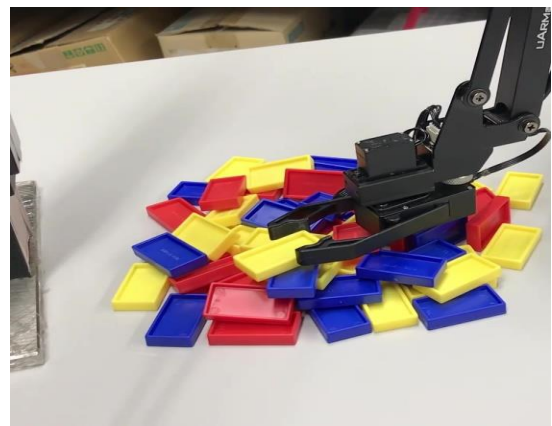


図6 ピッキング成功時(教示30分、深層強化学習10時間後)

のピッキングに成功した(図6)。

一方、人間の教示を行わなかった場合には、1日以上、深層強化学習を行ってもピッキングに成功しなかった。このことから、実用的な時間内で学習を完了するには、人間の教示が重要であることが確認された。また、本バラ積みピッキングを従来の画像処理手法等で実現しようとした場合、数日以上ソフト開発工数がかかることが想定される。このことから、従来手法と比較して、深層強化学習を用いることで開発工数の削減が期待できる。

4 まとめ

深層強化学習 Deep Q-Learning によるロボットのバラ積みピッキングを実現した。本研究の成果により、人間の教示を組み合わせることで実用的な時間内に深層強化学習を完了できることや、従来手法と比較して深層強化学習がソフトの開発工数削減につながる可能性があることが確認された。

今後は、本バラ積みピッキング技術や深層強化学習技術を県内企業に展開し、企業の生産性向上を支援する。

文献

- 1) Volodymyr Mnih, *et al.*: Human-lev elcontrol through deep reinforcement- learning, *Nature*, 518(7540):529, 02(2015)

実稼動振動可視化技術の構築

青柳大志・狩野幹大*・新井宏章**

Development of operational deflection shape visualization method.

Hiroshi AOYAGI, Motohiro KANO, Hiroaki ARAI

内部に加振源をもつ機械や構造物の振動状態は、動特性だけでなく運転中の加振特性にも依存する。振動や騒音、さらには破損に至ったとき、どのような振動状態で運転していたのかを把握することによって問題点を特定し、改善につなげることが期待できることから実稼動振動技術の構築を行った。

キーワード：実稼動モード解析

Vibration state of industrial machines such as prime movers depends on not only dynamic characteristics but also exciting properties. We developed operational deflection shape (ODS) visualization method to identify causes of vibration, noise and failure.

Keywords : operational deflection shape, operational mode analysis(OMA), vibration

1 はじめに

群馬産業技術センターでは従来から機械や構造物の振動試験を行っている。振動台に対象物を設置し、規格等に応じて実使用環境での振動状態をシミュレートすることで耐久性を評価することができる。振動試験の対象はこのように、外部からの加振によって評価することが妥当なものが前提である。

一方、エンジンやモータなどの原動機、タービンなどの回転部をもつ機械のように、外部から加振されるのではなく内部に加振源をもつ製品もある。運転状態において自身の加振力による振動や騒音の発生だけでなく、繰り返し荷重による破損が生じる場合もある。基本的な振動特性は対象物の動特性に依存する。動特性とは固有振動数、固有モード（モード：振動形状）、モード減衰比の3つである。特に加振振動数が固有振動数に一致し、振動が増幅される状態を共振と呼び、平成29年度の試験分析高度化研究で予測技術構築を行った¹⁾。外部/内部から加振される場合ともに、事前に固有振

動数や固有モードを把握し対策を打つことで諸々の問題を未然に防止することができる。ただし、動特性はあくまで対象物が持つ固有の性質であり、加振特性は考慮していない。実際の運転状態で生じる振動は加振力の周波数特性にも依存する。そこで本テーマでは、運転状態でどのような振動をしているのかを可視化する（実稼動振動可視化）手法の構築を行った。可視化によって振動問題がどのように生じているか理解が容易になるだけでなく、改善案の導出が期待できる。

2 手法

実稼動振動を分析する手法を一般に実稼動モード解析と呼ぶ。これはいわゆる打撃試験により行う実験モード解析に対する対比としての呼称と思われる。両者の違いは、実験モード解析がインパルスハンマで励起する加振力と、加振に対する加速度応答を加速度ピックアップで測定するのに対し、実稼動モード解析ではすべて加速度ピックアップによる加速度応答のみで行う点であ

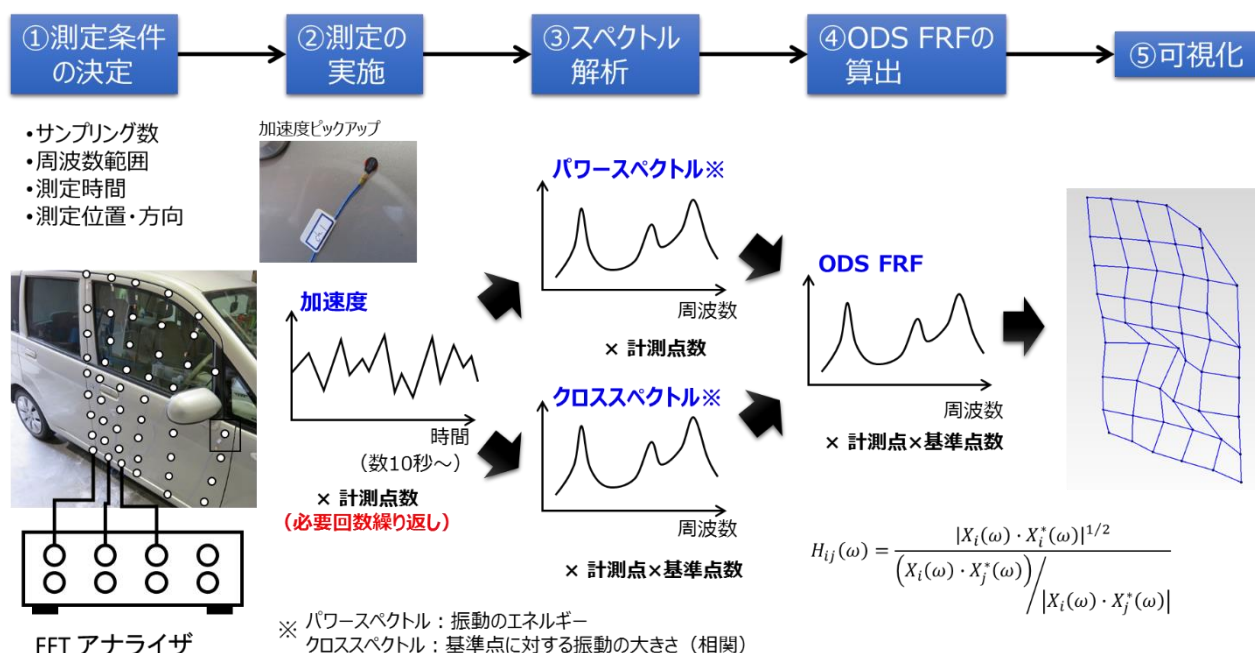


図1 実稼動モード解析の流れ

る。前者は加振力 (F) と加速度応答 (A) から周波数応答関数 (A/F) を求め、固有振動数を同定することができるが、実稼動モード解析では加速度のみ測定するため周波数応答関数を求めることができない。そこで、加振力に代わるものとして基準点の加速度応答を使用する。そのため、基準点の加速度を加振力に相当するものと見なせるよう機械の加振源に近い箇所に設置することが多い。例えば扇風機であればモータが加振源であるので、モータの表面や近くに基準点を設けることが好ましい。応答点については対象物に万遍なく分布させることで実稼動モードの可視化分解能を確保することができる。基準点と応答点の比を取ることによって擬似的な周波数応答関数（一般に伝達率と呼ばれる）を計算することができるが、加振力が大きければ応答点の応答も大きいことが多いため、共振点でフラットな特性になってしまう。そこで次式で定義される実稼動周波数応答関数 (ODS FRF) を用いて評価することとした²⁾。

$$H_{ij}(\omega) = \frac{|X_i(\omega) \cdot X_i^*(\omega)|^{1/2}}{(X_i(\omega) \cdot X_j^*(\omega)) / |X_i(\omega) \cdot X_j^*(\omega)|}$$

ここで X_i は応答点、 X_j は基準点のフーリエスペクトル、 ω は角周波数を表す。すな

わち ODS FRF は振幅を各点のパワースペクトル (分子の 2 乗)、位相を基準点と応答点のクロススペクトルとする関数である (分母はクロススペクトルの大きさを 1 に正規化している)。基準点との比を取らないため、伝達率とは異なり共振点の把握に適している。

3 実稼動モードの可視化

実稼動モードの可視化手順を図1に示し、以下にそれぞれの詳細を述べる。

- ①測定条件の決定

主な項目はサンプリング数、周波数範囲、測定時間、基準点及び応答点の配置、測定方向である。解析の目的に応じてそれぞれ設定するが、事前に実験モード解析やモーダル解析 (CAE) を行うことでより適切に設定することができる。測定時間については③スペクトル解析で詳細を述べるが、ノイズ低減のため数十秒以上とすることが望ましい。
- ②測定の実施

対象物に加速度ピックアップを取り付けた後、対象の機械を定常運転させた状態で加速度の時間データを取得する。応答点の数は数十点以上となることが多い一方で、計測器 (FFT アナライザ等) のチャンネル数

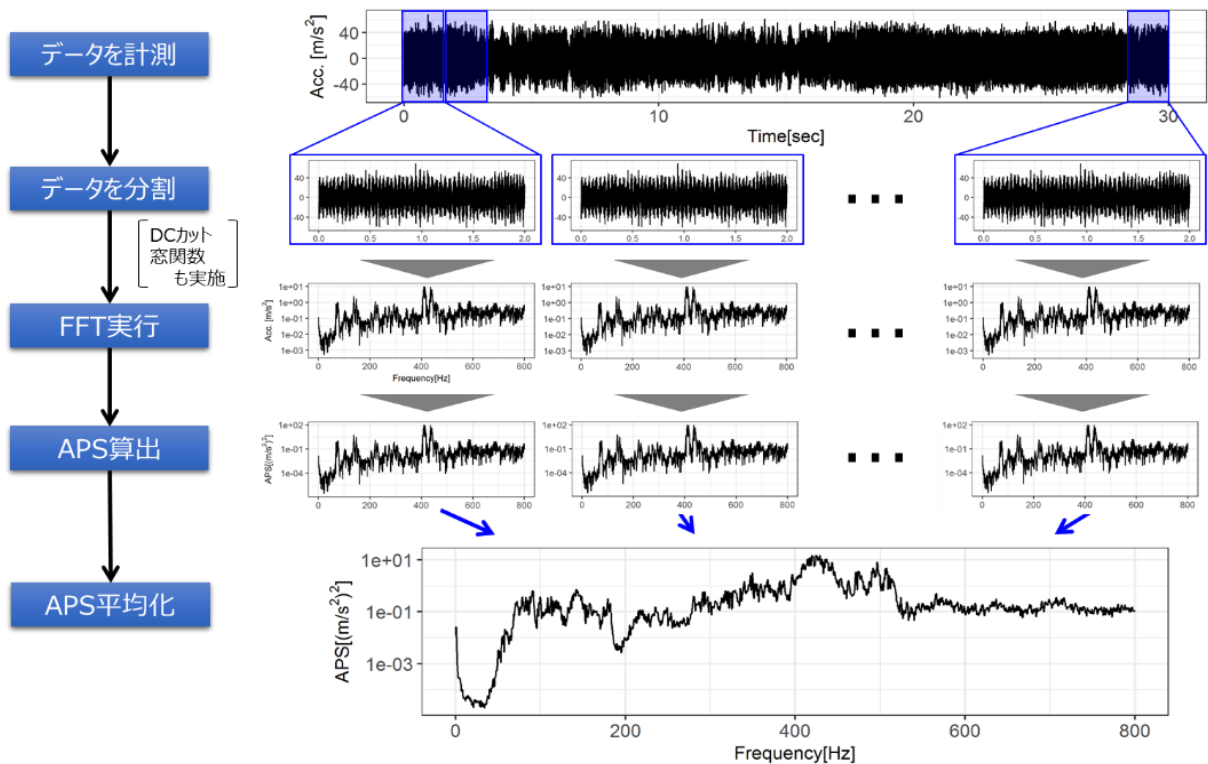


図2 スペクトル解析の流れ (APS : パワースペクトルの例)

は限られているため、回数を分けて測定することが多い。各回の測定結果は本来独立なものであるが、基準点の応答を毎回測定し、④の ODS FRF 算出で測定回ごとの差をスケールリングすることにより同等のデータとして扱うことができる。

③ スペクトル解析

ODS FRF を算出するためには全応答点のパワースペクトルと基準点に対するクロススペクトルが必要である。スペクトル解析の流れを図2に示す。ノイズを極力低減して信号成分を際立たせるため、計測時間を長めに設定して測定した後（例えば30秒とする）、分析周波数とサンプリング数で決まる分析時間ごとに分割する。例えば周波数領域を0~2000Hz、サンプリング数を2048点とすれば、計測時間は0.4秒となる。30秒を0.4秒ごとに分割すると $30 / 0.4 = 75$ 個のデータセットが得られる（ここでは詳細を省くが、オーバーラップすることでさらにデータセット数を増やせる）。各データセットに対してFFTをかけた後、パワースペクトル、クロススペクトルを算出すると、それぞれ75セットのスペクトルデータが得られ

る。これらを平均化することによりノイズ成分を低減したスペクトルが得られる。

④ ODS FRF の算出

③で求めたパワースペクトル、クロススペクトルから ODS FRF を求めることができるが、測定回ごとの加振力の差が生じるため、スケールリングを行う（振幅を基準点応答の平均値で正規化する）。

⑤ 可視化

ODS FRF を各応答点で求めた後、ワイヤフレームモデルに振幅と位相をマッピングすることにより、各点の振動を3次的に可視化する。

本テーマでは小野測器製 FFT アナライザ (DS-3000) 及び加速度ピックアップ (NP シリーズ) を用いて測定②を行った。③~⑤については当初 ME' ScopeVES³⁾で行うことを検討した。しかしデータ点数の増加とともに③のスペクトル解析の手順が煩雑となり、時間を要するだけでなく手順を間違えやすいため、プログラミング言語 R⁴⁾を使用して作業を効率化した。その結果、正確にスペクトル解析を行えるだけでなく工数を 1/30~に減らすことができた。また窓関数等の信

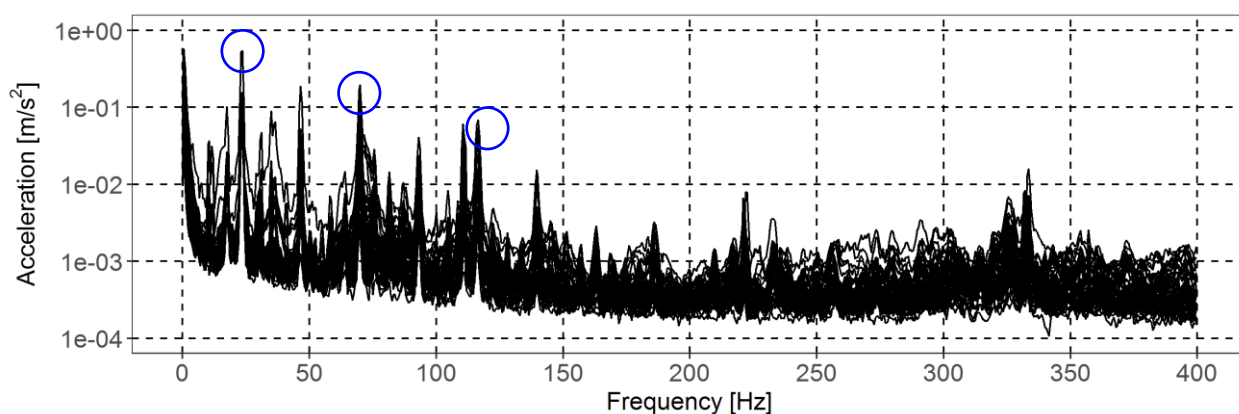


図3 軽自動車ドアの ODS FRF 測定結果（全点の結果を重ね合わせ。○は図6に対応）

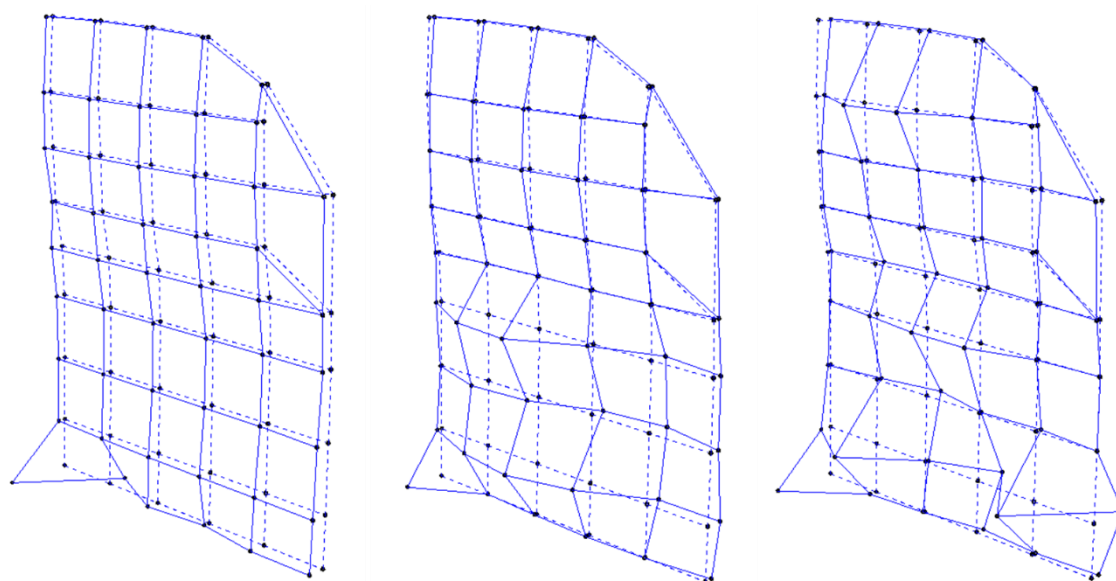


図4 軽自動車ドアの可視化結果（左から 23, 70, 116.5 Hz）

号処理を自由の実装できる点もプログラミングの利点である。このような工夫により、「その場、そのときに可視化したい」という企業ニーズに対応でき、効率良く実稼動解析を行うことができる。

4 事例

まず手法の検証のため振動試験機に設置した梁の振動の可視化を行った後、さまざまな対象を想定してサーキュレータ、ドローン、軽自動車のドアの可視化を行った。ここでは紙面の都合上、自動車の事例について取り上げる。図1に示す全51点について、1回当たり6点の加速度を測定し、10回に分けて各回30秒間測定した。サンプリング数は2048点、オーバーラップ率を50%

とすると、平均回数は29回となる。ドアの振動は面外方向が支配的と考えられることから単軸ピックアップにて測定した。十分に暖機後のアイドリング状態を定常運転と見なした。ドアの振動はエンジン振動によると考えられることから、最もエンジンに近いドアミラー下部を基準点とした。ODS FRFを図3に示す。150Hz以下で約24Hz間隔のピークが見とめられ、アイドリング回転数とその整数倍のピークと思われる。図4はODS FRFをワイヤフレームにマッピングし可視化した結果の例である。23Hzではドア左下の1点のみ振幅が目立つが、ドア裏側に支持部が無く剛性が相対的に低い箇所に対応している。周波数が高くなるとドア鋼板(70Hz)、さらにガラス窓(116.5Hz)の振動モードが目立つようになることが分

かる。このように、各周波数で振動の腹と節を確認することにより、機械の問題箇所
の特定や、改善案を考えるヒントを得ることが
できる。このほかにも県内企業の課題
にも適用を開始しており、振動問題の技術
支援に積極的に活用していく予定である。

参考文献

- 1) 青柳，群馬県立産業技術センター研究報告 平成 29 年度，「共振点予測技術の構築」
(2017)。
- 2) ME' scope VES チュートリアル編(2017)。
- 3) <https://www.vibetech.com/mescope/>
- 4) <https://www.r-project.org/>

ヒト爪郭部の毛細血管内における血流の画像解析

川原潤也・橋本茂樹・横山 靖

Analysis on video of blood flow in human nailfold capillary
Junya KAWAHARA, Shigeki HASHIMOTO, Yasushi YOKOYAMA

毛細血管顕微鏡の実験機を構築し、実験機で撮影された毛細血管の動画を解析するプログラムを作成した。作成したプログラムを用いて画像解析を行った結果、毛細血管の外径を数値的に評価することができた。

キーワード：毛細血管顕微鏡、画像解析

We constructed a capillaroscopy and wrote an image analysis program to analyze video filmed by the capillaroscopy. The result shows that we can quantitatively evaluate the outer diameter of a capillary by using our image analysis program.

Keywords: Capillaroscopy, Image Analysis

1 はじめに

近年、病気を未然に防ぐ予防医療に注目が集まっており、身体の様々な状態の観察結果から疾患を早期診断する技術の研究開発が盛んに行われている。その中でも、血管の状態と疾患の関係性に関する研究は、数多く実施されている¹⁻³⁾。最近では、「血管の健康状態を、非侵襲的に可視化することで、疾患の早期診断を実現」⁴⁾するというバスキュラ・ヘルスサイエンスの構想が提唱され、国内の有力研究機関主導の下に研究開発が進められている^{4,5)}。これらのことから、今後、血管の状態を非侵襲的に可視化する技術の需要は高まっていくものと考えられる。

非侵襲的に血管を可視化する技術は、多くの研究者によって研究されている。それらの技術の中で、最もよく知られている技術は、毛細血管顕微鏡を用いた可視化である⁶⁻⁹⁾。毛細血管顕微鏡では、「爪のつけ根（爪郭部）における皮膚表面近くの微小循環」⁸⁾を主な観察対象とする。毛細血管顕微鏡による可視化は容易であるため、メディアでも度々取り上げられており、毛細血管顕微鏡の開発・販売を行っている企業

も存在する。しかし、現在一般に販売されている毛細血管顕微鏡において、可視化された血管の外観と健康状態を結び付ける機能を有する機器は、著者らの知る限り存在しない。このため、多くの市販機は、「血管の外観を見る」こと以外の機能がなく、医療系の専門知識がない人が所有しても健康管理に役立つ装置になっていないのが現状である。

これに対して、大学等の研究機関では、毛細血管顕微鏡で取得した血管画像を解析することで、血管の外観を定量評価し、その評価結果に基づいて血管の状態と健康状態を結び付けるための研究が進められている⁶⁻¹²⁾。しかし、これらの研究成果の産業界への移転は十分に進んでいない。そこで、本研究では、北海道大学の渡部正夫教授を中心とした研究グループが取り組んできた毛細血管の定量評価に関する研究成果⁶⁻⁸⁾を産業界に技術移転させることを目的として、以下の3点に取り組んだ：

- ① 毛細血管顕微鏡の実験機の構築
- ② 実験機を用いた毛細血管の動画撮影
- ③ 血管動画を簡易的に解析するための画像解析プログラムの作成

本報では、本年度の研究成果について報告

する。

2 研究方法

本年度の研究では、毛細血管の輪郭形状を簡易的に定量評価できる画像解析プログラムの作成を目的として、毛細血管顕微鏡で撮影した画像から血管の外径の値を算出するための解析を行った。毛細血管の撮影には、図1に示す毛細血管顕微鏡（実験機）を用いた。この実験機は、レイマー社製のモニター付き顕微鏡用デジタルカメラ（FLOYD）、HIROX社製の10倍ズームレンズ及び140倍対物レンズ（CX-10C及びOL-140）によって構成されている。光源には、松電舎社製のLED照明（LED-80T）を使用している。実験では、撮影速度30 fpsで爪郭部の毛細血管を動画撮影した。実験機によって撮影された毛細血管の画像の一例を図2に示す。本年度の研究では、毛細血管の動画から、血管の外径の値を算出するための画像解析プログラムを作成した（図3）。

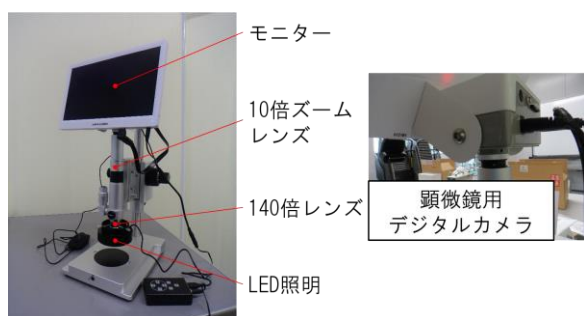


図1 毛細血管顕微鏡の実験機の構成

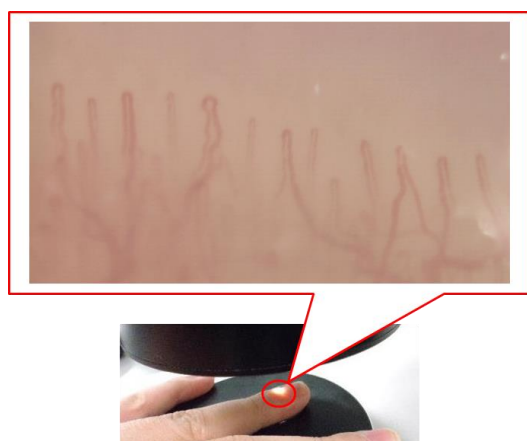


図2 実験機で撮影した毛細血管(140倍)

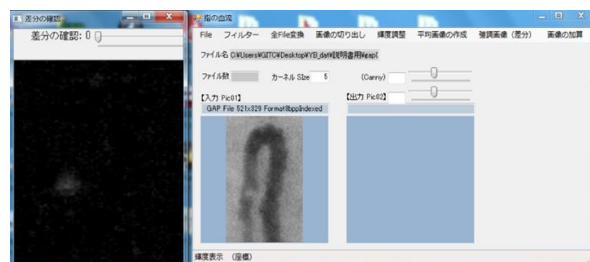


図3 プログラム実行例 (GUI)

3 画像解析結果

図3で示した画像解析プログラムの処理内容と解析結果について報告する。本報で示す解析手法は、佐野の研究成果⁸⁾を参考にしたものであることを強調する。

3.1 二値化による血管壁の抽出

撮影された毛細血管の画像から血管壁を抽出する解析を行った。まず、毛細血管のループ部のみが写っている撮影動画から、1フレーム毎の画像を切り出し、その内の38枚の画像を使用して平均画像を作成する（図4①）。作成した平均画像に対して、二値化処理を行う（図4②）。二値化された画像において、白黒の境界のピクセルを血管壁ピクセルとして抽出する（図4③）。

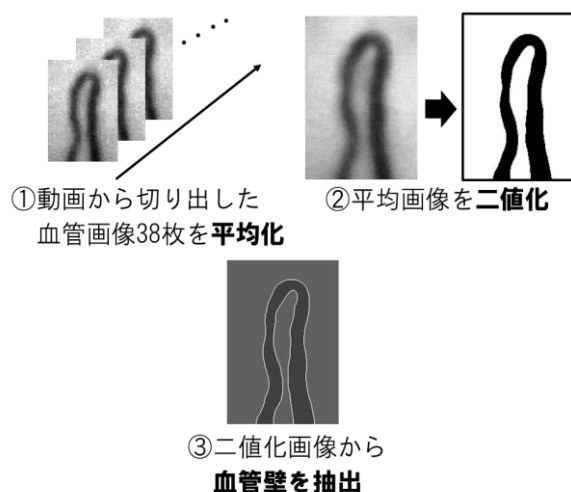


図4 血管画像から血管壁を抽出する手順

3. 2 レベルセット法による血管の中心軸の算出

図4③で作成した画像を構成する各ピクセルにおいて、以下に示す符号付きの距離関数 φ を定義する：

$$\begin{cases} \varphi > 0 & \dots \text{血管外部} \\ \varphi = 0 & \dots \text{血管壁} \\ \varphi < 0 & \dots \text{血管内部} \end{cases}$$

画像中のあるピクセルと全血管壁ピクセル ($\varphi = 0$ の全ピクセル) の間の距離をそれぞれ計算し、最小値をそのピクセルの φ の値とする。このように各ピクセルの φ の値を計算すると、血管の中心軸上のピクセルの φ の値は、周囲に比べて小さい値となる。この φ の値が小さいピクセルを追跡することで、血管の中心軸を抽出する (図5)。

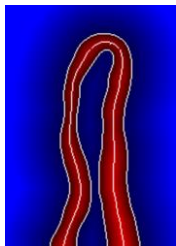


図5 距離関数 φ の値毎に色分けを行った血管画像。(血管の内部を赤、外部を青、血管壁及び中心軸上のピクセルは白色とし、血管壁に近いピクセルほど暗色としている。)

3. 3 血管の外径の算出

前節で説明したように、あるピクセルにおける距離関数 φ の値は、そのピクセルと血管壁間の距離を表す。したがって、中心軸上のピクセルの φ の値は、ピクセル単位での血管の半径の値となる。ここでは、中心軸上のピクセルの φ の値を用いて、毛細血管の入口から出口までの血管の外径の値の変化をプロットした (図6)。爪郭部の毛細血管 (ループ部) 径は10-20 μm 程度と報告されており¹³⁾、図6によって血管の外径を数値的に評価できたといえる。

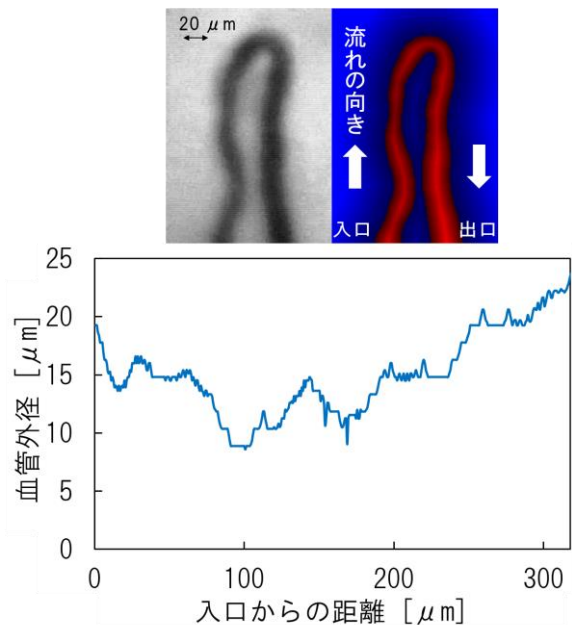


図6 血管の外径 (1 pixel = 0.74 μm)

4 まとめ

本年度の研究では、毛細血管顕微鏡で撮影した画像から血管の外径の値を算出する画像解析プログラムを作成するため、以下の3点に取り組んだ：

- ① 毛細血管顕微鏡の実験機の構築
- ② 実験機を用いた毛細血管の動画撮影
- ③ 血管動画を簡易的に解析するための画像解析プログラムの作成

作成したプログラムを用いて画像解析を行った結果、毛細血管顕微鏡で撮影された血管画像から、毛細血管の外径を数値的に評価できた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、北海道大学の渡部正夫教授に、顕微鏡レンズの貸出・実験データの提供・ご助言等の多大なるご支援をいただいた。また、株式会社エルスの立藏祐樹氏に、レベルセット法による血管の中心軸の算出のアルゴリズムに関する有益なご助言をいただいた。ここに記して、深く謝意を表す。

参考文献

- 1) Cutolo *et al.*, *Best Pract. Res. Clin. Rheumatol.*, **22**, 6, 1093-1108 (2008)
- 2) Angelis *et al.*, *Arthritis. Rheum.*, **61**, 3, 405-410 (2009)
- 3) Guidelli *et al.*, *Eur. J. Rheumatol.*, **1**, 81-83 (2014)
- 4) 椎名, 戸井, *OPTRONICS*, **36**, 429, 87-91 (2017)
- 5) 内閣府, 革新的研究開発推進プログラムImPACT <<http://www.jst.go.jp/impact/program/10.html>>
- 6) Watanabe *et al.*, *J. Biomech. Sci. Eng.*, **2**, 2, 81-92 (2007)
- 7) 田村ら, 日本機械学会北海道学生会第40回学生員卒業研究発表講演会 講演論文集, 129-130 (2011)
- 8) 佐野, 北海道大学大学院工学院機械宇宙工学専攻 平成22年度修士論文 (2011)
- 9) Gurov *et al.*, *Opt. Las. Eng.*, **104**, 244-251 (2018)
- 10) 鳥居, 柴田, 情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービス (1996-GN-021), 157-162 (1997)
- 11) 鳥居ら, 情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理 (1997-DPS-086), 219-224 (1998)
- 12) 永山ら, *J. Int. Soc. Life Infor. Sci.*, **32**, 2, 199-204 (2014)
- 13) 古江ら, *福岡醫學雑誌*, **96**, 6, 277 (2005)

シャルピー衝撃試験評価による焼結材の品質判定 ソフトウェアの開発

鎌腰雄一郎・石黒 聡*

The development of a quality assesment software of sintered steels by the evaluation with the instrumented Charpy impact bend tester.

Yuichiro KAMAKOSHI, Satoshi ISHIGURO

粉末冶金製品の製造現場では、時折焼結不足による品質トラブルが起きている。焼結材の機械的特性を決定するのは、密度・焼成温度・焼成時間の組合せである。鉄系焼結材において、これら要素による品質への影響を機械強度や金属組織観察から判断するのは比較的難しいが、靱性評価で焼結材の品質を判定することが有効であると考えられる。

本研究では、計装化シャルピー衝撃試験機を用いて、衝撃波形を解析することで靱性の評価判定パラメータを見だし、それらを用いて Windows 対応品質判定ソフトウェアを開発した。

キーワード：計装化シャルピー衝撃試験、靱性、焼結、鉄鋼

Troubles by the shortage of sintering have been occurred at manufacturing scenes of powder metallurgy items at times. Determining factors of mechanical properties of the sintered steels were combinations of a density, a temperature and a time. It is difficult to confirm effects of the three factors by the mechanical strength and the microstructure observation. However, it can be considered that the assessment of toughness was very valid for the evaluation of the superior quality of sintered steels.

In this study, the assessment parameters were revealed by the analysis of the impact waveform with instrumented Charpy impact bend tester, and the quality assesment software for Microsoft Windows series was finally developed by use of the parameters.

Key words : instrumented Charpy impact bend tester, toughness, sinter, steel

1 はじめに

焼結機械部品の品質管理基準の現状として、製造現場では重量管理又は高さ管理となっていることや、製品の高さから素材密度は自然と決まるという見方で密度が管理対象外となっていることが多い。また、完成品検査は表面硬さや寸法精度の確認であることが多く、破壊検査や気孔形状、気孔分布、金属組織等の調査は、現場では非現実的である。すなわち、品質管理上の問題点はその管理基準が適正か論じられることがなかったことである。先に述べたような

表面硬さと寸法の管理では、内部の焼結状態の評価ができていない。そのため、焼結不足による品質トラブル（輸送や組付け時の欠損、製品の強度ばらつき）が起きていると考えられる。よって具体的問題点は、①製造コストを抑えつつ、寸法精度確保を容易に実現するため、最低限の条件（低温・短時間焼結）としている、②効率優先で、技能承継や人材育成問題等から伝統的な条件の継続利用に留まる場合もあり、最適焼結条件については曖昧となってきていることである。しかし中小企業では、柔軟な最適焼結条件を提案することも難しく、品質

トラブルへの対応による費用、時間及び労力などの浪費が発生しているとみられる。焼結材の機械的特性を決定するのは、主に密度、焼成温度、焼成時間の組合せと考えられる。従来のシャルピー衝撃試験からわかるのは、全吸収エネルギーのみのため、素材の表面性状、密度及び金属組織等による靱性への影響を詳細に確認することが困難であった。

計装化シャルピー衝撃試験は、一般焼結材でも高密度焼結鍛造材でも、密度、金属組織、気孔形状などの影響による素材の靱性の変化を詳細かつ明確に捉えることが可能であることが、これまでの研究^{1)・3)}でわかっている。よって本研究では、密度、焼成温度、焼成時間の影響を容易にシャルピー衝撃試験で判断できる基礎データの整備及び解析から得られた判断手法を用いた品質判定プログラムを作成した。

2 実験方法

2.1 原料粉及び試験片作製

Moによる焼結促進効果⁴⁾が期待される焼結鉄粉として、Mo系部分拡散合金粉を用いた。粒径分布として主に45 μm以下と75~150 μmの範囲に粒子が多く存在する粉である。その組成を表1に示し、原料粉の電子顕微鏡像を図1に示す。ここでGrは添加黒鉛(Graphite)を意味する。

表1 原料粉の組成

C	Si	Mn	P	S	Mo	O	Gr
0.02	0.01	0.15	0.09	0.006	0.99	0.115	0.35

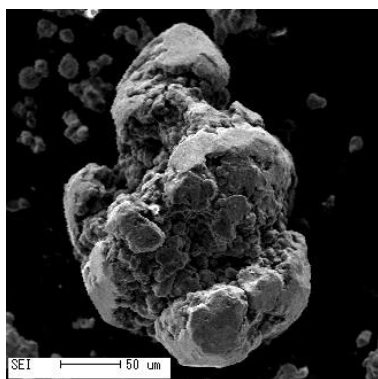
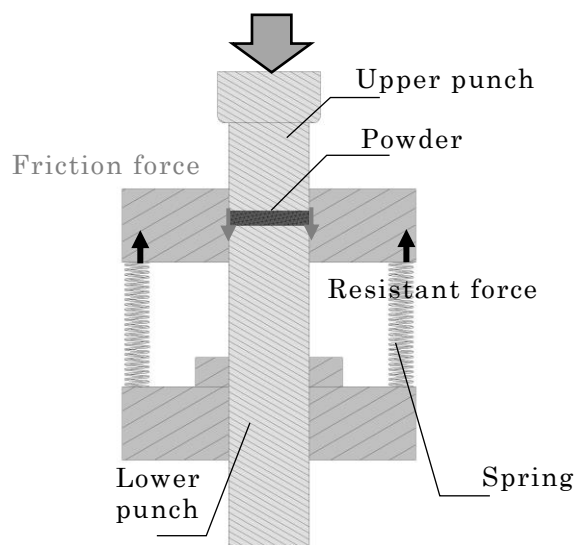


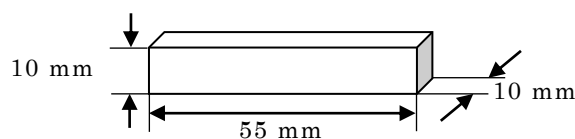
図1 原料粉の電子顕微鏡像

図2にフローティングダイ法による圧粉体成形の概要を示す。図より、上パンチ圧下時に潰れる圧粉体はダイ側面に押しつけられ、その摩擦力により共に下降するが、定数設定したバネの反力を受けて下降量の調節がなされ、意図した両押し状態になる。

よって、上下面が密で中央に粗の部分すなわちニュートラルゾーンがつかれ、密度バランスの良い圧粉体となる。本研究では、最終形状をノッチなしシャルピー衝撃試験片となるよう、鉄粉重量を47.1±0.2 gとし、寸法が幅10 mm×長さ55 mmで、高さを10 mm前後とした。成形圧を370~980 MPaとすることで、圧粉体密度(ρ_c)を6.8~7.4 Mg/m³とした。焼結は、真空度30 Pa以下の真空炉を用い、焼結温度800~1120℃、保持時間20~180minで焼結を行い、炉内で冷却速度約1℃/minにて自然冷却した。これら焼結条件で、圧粉体密度(ρ_c)と焼結体密度に差異がないことを確認し、焼結体密度(ρ_{PS})が6.8~7.4 Mg/m³の衝撃試験片とした。



(a) フローティングダイ法



(b) 衝撃試験片(ノッチなし)

図2 フローティングダイ法による圧粉体成形及び衝撃試験片の外観

2. 2 使用機器及び実験方法

本研究では、図3に示す東京衝機試験機製 300J 型計装化シャルピー衝撃試験機 CIEM-300D を用いた。これにより、密度及び焼結条件の異なる焼結試験片の衝撃波形を取得し、その特性を把握した。靱性に優れた焼結材の判断指標として、①衝撃ピーク荷重、②衝撃作用時間、③破壊段階ごと衝撃吸収エネルギー、について有効な密度及び焼結条件を特定した。なお密度は水浸法(アルキメデス法)で測定した平均密度とした。最後に測定データから適正焼結条件の判断基準を採用した Windows10 対応品質判定ソフトウェアを作成し、動作検証した。



図3 計装化シャルピー衝撃試験機
(井上熱処理工業(株) 提供)

3 実験結果及び考察

3. 1 衝撃波形の解釈

図4に本研究で用いた Mo 系部分拡散合金粉の焼結材の衝撃波形として、典型的な形状を示す。一般的な衝撃値($E_1+E_2+E_3$)は、x 軸の変位と y 軸の衝撃荷重の全積分値として計測される。波形の特徴をみると、まず衝撃荷重には初期の立ち上がりで2つのピークが存在することがわかる。本研究では、 E_1 及び E_2 は焼結条件によって有意に変動するため、JIS⁵⁾に示されているような平滑化してよいデータと考えず、坂の上らの解釈⁶⁾を参考に衝撃荷重曲線を三分割し考察した。

衝撃波形における各過程①～⑥についての解釈を述べる。第一ピーク(1st peak)に至る前半の領域①を表層域多孔質体の弾性変形域での吸収エネルギー、1st peak か

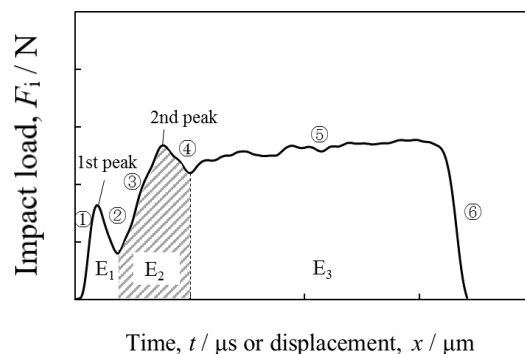


図4 シャルピー衝撃波形例

ら後半の領域②の衝撃荷重下降現象は表層域の気孔潰れ、すなわち塑性変形による衝撃荷重の緩和を意味すると考え、この表層域の吸収エネルギーを E_1 (Elastic-plastic deformation area of the surface layer) と考えた。その後、塑性変形による表層域の高密度化が進みながら、領域③の素材全体として弾性変形状態となることで衝撃荷重が上昇する。そして、第二ピーク(2nd peak)である素材全体としての弾性限界から、領域④の擬似降伏域に入り、不連続的な塑性変形を生じ荷重が低下する範囲の吸収エネルギーを E_2 (Elastic and yield deformation area of the whole material) と考えた。以降の残部として、領域⑤における素材全体の連続的な塑性変形から、領域⑥までのき裂発生及び成長過程の吸収エネルギー E_3 (Plastic deformation and cracking area of the whole material) とした。

3. 2 衝撃試験結果

(1) 密度 6.8 ~ 7.4 Mg/m³ 試験片

図5～図8に焼結時間を 60 min に固定し、焼結温度を変えた場合のシャルピー衝撃波形を示す。ここで各波形に対応する衝撃値も追記した。図から、殆どが衝撃荷重の第一ピーク及び第二ピークが上方向に成長し、およそ 1000℃で両ピークが飽和した後、衝撃作用時間の方向に成長していることがわかる。よって、焼結材として十分な靱性を得るには、まず第一ピーク(E_1 域)及び第二ピーク(E_2 域)が飽和することが第一条件で、その後、裾野(E_3 域)を時間方向にどれだけ成長さ

せるかコントロールすることによって、
 所望の靱性を適切に確保できる。

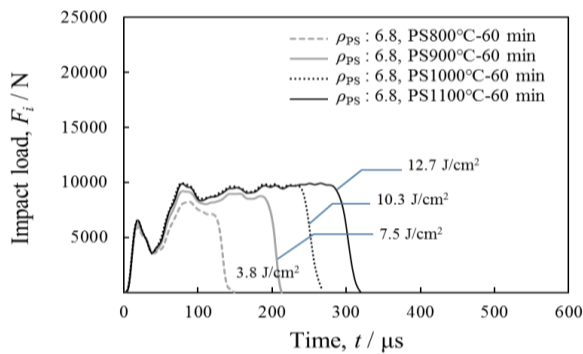


図 5 密度 6.8 Mg/m³ 焼結材の波形

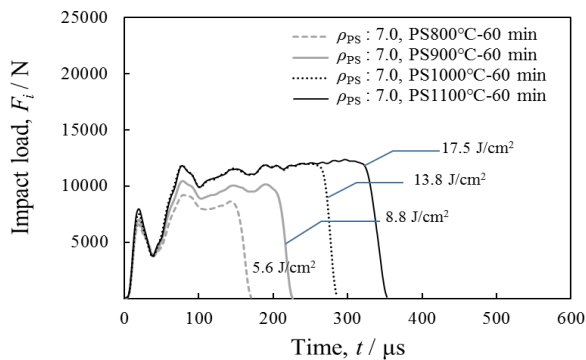


図 6 密度 7.0 Mg/m³ 焼結材の波形

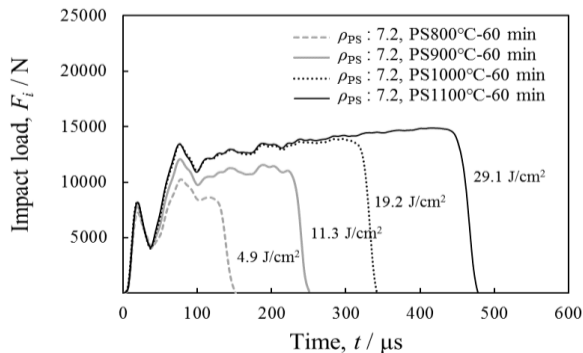


図 7 密度 7.2 Mg/m³ 焼結材の波形

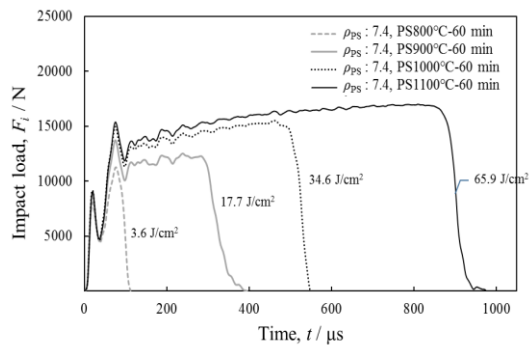


図 8 密度 7.4 Mg/m³ 焼結材の波形

(2) 密度及び温度固定試験片

図 9 に、密度(ρ_{PS})7.4 Mg/m³、焼結温度を 1100°C に固定し、焼結時間を 20～180 min まで変えた場合のシャルピー衝撃波形を示す。図から、焼結時間を増加させても衝撃値(面積)があまり増加しなくなるのがわかる。よって、本研究で用いた素材の場合、製造上実用的な焼結時間は 90 min 程度とみられる。

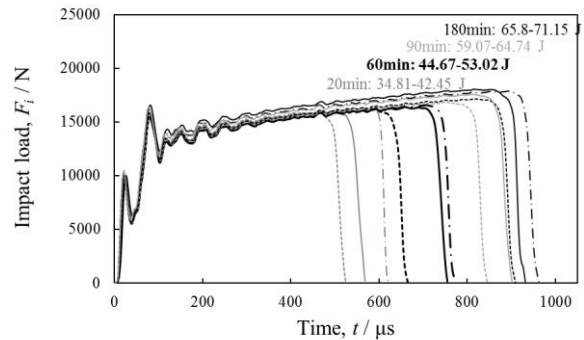


図 9 密度 7.4 Mg/m³、1100°C 材の波形

3. 3 品質判定プログラム

量産製品の高い品質を保つため、量産ラインの最も焼結の遅い部位に試験片を設置し抜き取り試験を行い、衝撃波形及び衝撃値で品質管理することを想定した。

前節の基礎データ等を解析した結果、品質判定における優れた衝撃波形とは、
 ① 吸収エネルギー E_1 , E_2 が限界値に到達
 ② 吸収エネルギー E_3 が大きい
 ③ 衝撃荷重 $F_X < F_Y$ となっている
 であることがわかった。各記号は図 10 に示すとおりである。

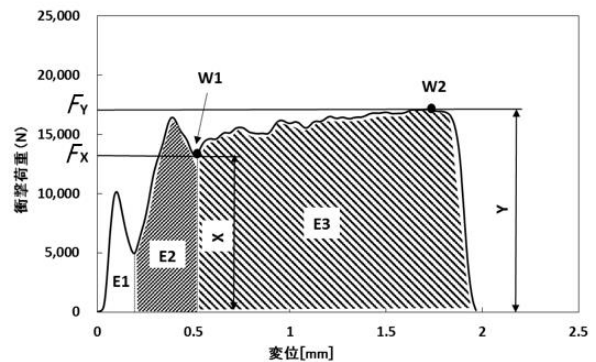


図 10 判定プログラム用波形パラメータ

上述の条件①～③を満たす、波形の合否判定ソフトウェアの構成を表2に示し、実行画面を図11に示す。試験機から試験ごとに生成されるCSVファイルのデータを管理し、高速にデータの抽出、演算ができるようにオープンソースのデータベース「SQLite」を組み込んでいる。図のように、試験機から生成された複数のCSVファイルを予めデータベースに保存しておき、選択した良品の衝撃波形と評価対象の衝撃波形とのずれを判定してOK又はNGを表示するソフトウェアになっている。本ソフトウェアは将来生産ラインにおけるリアルタイム管理による不良品ロットの再焼結の自動化につなげることで、品質トラブルや製品ロスをなくしていくことが可能と考える。また、本プログラムに含まれる判定基準及び品質管理手法は、金属粉末冶金製品の製造方法（特願2018-215407）として特許出願済みである。

表2 ソフトウェアの構成

開発言語	Visual C#
データベース	SQLite
ライブラリ	LINQtoCSV WindowsAPICodePack



図11 焼結材品質判定ソフトウェア

4 まとめ

Fe-Mo系部分拡散合金粉を用い、焼結材の衝撃波形データを収集し、素材に合った判定基準に基づく品質判定ソフトウェアを開発した。今後はインターフェースの改

良、メーカー及びユーザーの意見収集により、本プログラムの完成度を上げていきたい。さらに他の焼結材の衝撃波形データベースの充実及び企業での動作検証実験等を通じて、粉末冶金業界の品質管理手法標準化、製品の品質向上及び廃棄製品減少による省資源化などに貢献したい。

文献

- 1) Y. Kamakoshi, I. Shohji, Y. Inoue, S. Fukuda: Improvement of mechanical strength of sintered Mo alloyed steel by optimization of sintering and cold forging processes with densification, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 257 (2017) 012011.
- 2) 鎌腰雄一郎, 荘司郁夫, 井上紀子, 福田俊二: Mo系低合金焼結鋼の靱性及び疲労強度向上のための焼結冷間鍛造工法と浸炭熱処理条件の最適化, スマートプロセス学会誌, Vol. 7 (2018) pp. 251-259.
- 3) 鎌腰雄一郎: Mo系焼結鋼の冷間鍛造及び熱処理による機械的特性向上に関する研究, 群馬大学博士学位論文, (2019)
- 4) 黒木 英憲, 徳永 洋一: 焼結鉄の靱性に及ぼす Mo と Ni の影響, 粉体及び粉末冶金, Vol. 20 (1973) pp. 43-48.
- 5) 日本工業規格: 金属用シャルピー振り子式衝撃試験—計装化装置, JIS B 775 5, (2011).
- 6) 坂之上悦典, 服部悟, 三田好明: Management & Technology for Creative Kyoto 2012 研究報告, 京都府中小企業技術センター, (2012) p. 17.

プラスチック混合物の静電分離に関する検討

熊澤直人・恩田紘樹*

Attempt to electrostatic separation of plastic mixture.

Naoto KUMAZAWA, Koki ONDA

プラスチック混合物を静電分離により分離するための装置を設計、試作した。さらにポリプロピレンとポリアミドより成るプラスチック混合物を静電分離に供したところ、正極側においてPPを81%、負極側においてPAを80%で分離できた。このように静電分離法により、比重分離では分離が困難なプラスチック混合物から各プラスチック材料を分離できることが示唆された。

キーワード：プラスチック混合物、ポリプロピレン、ポリアミド、静電分離

In this study, in order to separate plastic mixture, electrostatic separator was designed and constructed. When a mixture of polypropylene(PP) and polyamide(PA) were electrostatic separated, the separation precision of PP on positive electrode side and PA on negative electrode side were 81% and 80%, respectively. It was inferred from the results that the plastic mixture which were difficult to separate by gravity separation could be separated by electrostatic separation with high separation precision.

Key words : a mixture of plastics, polypropylene, polyamide, electrostatic separation

1 はじめに

成形性及び耐久性に優れるプラスチックは様々な分野で使われる一方、国内では年間900万tのプラスチックが廃棄されている¹⁾。しかし、多くのプラスチックは自然分解性に乏しいこと、プラスチック種によっては焼却時に有害物質が発生する可能性があることなどから廃棄に関する規制が厳しくなっており、マテリアルリサイクルの需要が年々高まっている。しかし、プラスチックは廃棄の際に材質にかかわらず一括回収されるため、マテリアルリサイクルするためには一定以上の純度で分別することが求められる²⁾。

プラスチックの分別技術の一つである比重分離法は、プラスチック混合物を水などの溶媒に浸漬し、溶媒の比重よりも大きいプラスチックは沈殿する一方、比重の小さいプラスチックが浮遊することにより分離する。しかし、この方法は溶媒に沈殿あるいは浮遊したプラスチック種の分離は困難であり、また分離

後の乾燥処理が必要となるといった課題がある。

一方、図1に示すようにプラスチックは種類ごとに固有の帯電特性を有している。静電分離法はこの帯電特性の違いを利用し、予め帯電したプラスチック混合物を電圧の印加された平行平板電極間に落下することで分離する方法で、比重分離では分離困難な比重差の小さいプラスチックの組合せも分別できる可能性があり、また分離後の乾燥処理が不要であることから近年普及してきている。そこで本報では、静電分離装置を設計、作製した。さらに汎用的に用いられるプラスチックだが、比重分離では分離が困

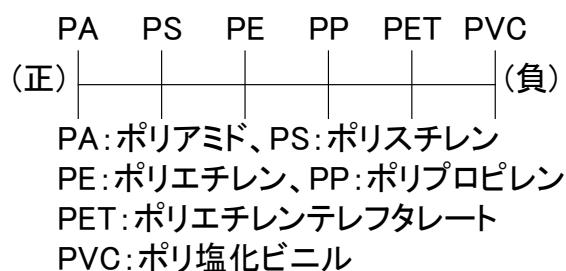


図1 プラスチックの摩擦帯電序列

難なポリプロピレンとポリアミドの分離を試みた。

2 静電分離装置の作製

本研究で作製した静電分離装置の模式図を図2に示す。電源には、小型高電圧電源（GT80N、(株)グリーンテクノ）を用いた。電源と接続した帯電バー（B-140、(株)グリーンテクノ）に任意の大きさのアルミ板を設置し、これを負極とした。一方、負極と同サイズのアルミ板を樹脂製のスタンドに固定し、これを正極とした。電極間距離は任意に調整することが可能である。さらに、各電極下にはプラスチック製の箱（374mm×273mm×64mm）を設置し、電極を通過した試料を回収した。また安全のために両極ともに接地した。

3 操作方法

3.1 分離試料の調製

ポリプロピレン（PP）（ノバテック BC06C、日本ポリプロ（株））及びナイロン 66（PA）（アミラン CM3004-V0、東レ（株））をそれぞれ凍結粉碎機（JFC-300、日本分析工業（株））により平均粒径 1mm 程度に粉碎した。乾熱滅菌器（MOV-212S、PHC ホールディングス（株））を用いて PP を 120℃ で 5 時間、PA を 80℃ で 12 時間乾燥したものを 0.1g ずつ混合し、これをプラスチック混合物とした。

3.2 静電分離実験

プラスチック混合物をミキサーにより 25,000rpm で所定の時間攪拌して帯電し、静電分離装置の上部から自然落下させた。各電極に付着したプラスチック及び電極下に設置された回収箱に回収されたプラスチックを合わせたものを回収物とした。

3.3 分離精度

PP 及び PA の混合物を分離した際、各回収物をギ酸（試薬特級、富士フィルム和光純薬（株））に浸漬し、超音波洗浄機（LEO-80、東京硝子器械（株））に 30 分静置した。静置後、大気圧下でろ過して得た残渣の重量を PP 回収量とした。

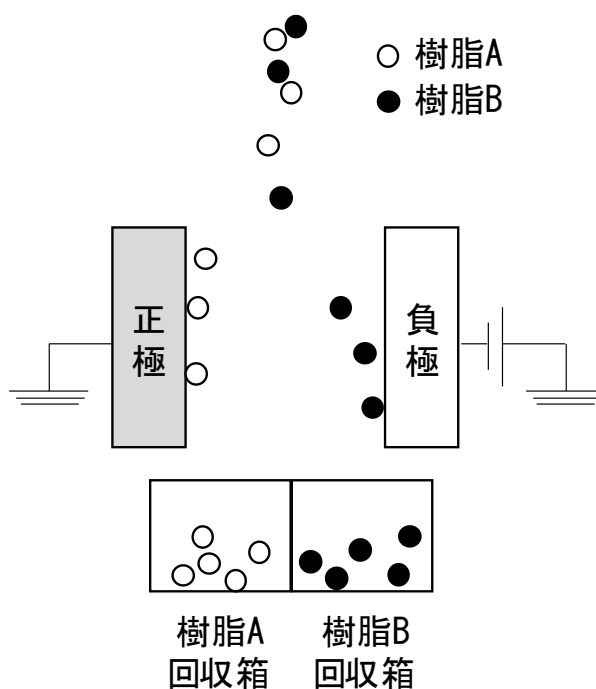


図2 静電分離装置の模式図

また、回収物の総量と PP 回収量の差を PA 回収量とした。また、各 PP 及び PA の分離精度は次の式により算出した。

PP の分離精度 (%) =

$$\frac{\text{PP 回収箱中の PP の総量(g)}}{\text{PP 回収箱中の回収物の総量(g)}} \quad (\text{式 1})$$

PA の分離精度 (%) =

$$\frac{\text{PA 回収箱中の PA の総量(g)}}{\text{PA 回収箱中の回収物の総量(g)}} \quad (\text{式 2})$$

4 結果及び考察

4.1 印加電圧が分離能に及ぼす効果

電極に用いたアルミ板の大きさを 150mm(長さ方向)×150mm(幅方向)、帯電時間を 30s とし、種々の印加電圧でプラスチック混合物の静電分離を行ったところ、正極において PP が、負極において PA が多く回収された。また図3に示すように、印加電圧が 0kV、20kV、30kV、40kV、50kV の時、PP の分離精度は 52%、65%、66%、64%、66% だった。一方、PA の分離精度は 51%、67%、67%、69%、71% だった。

印加電圧を高めることで分離精度が向上した。これは、印加電圧を上げることでプラスチック混合物が電極に引き寄せられる力が大きくなったためと考えられた。

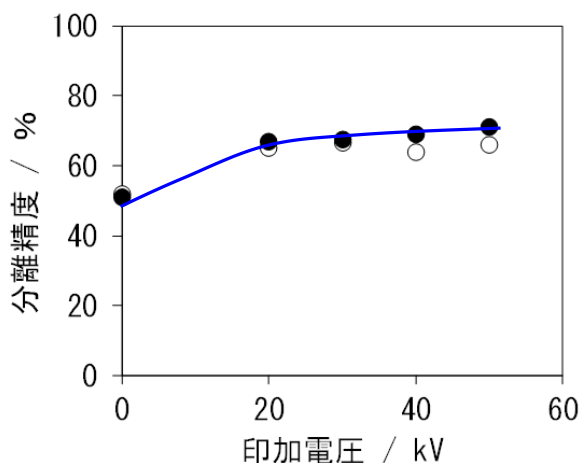


図3 分離精度における印加電圧の影響

- : 正極における PP の分離精度
- : 負極における PA の分離精度

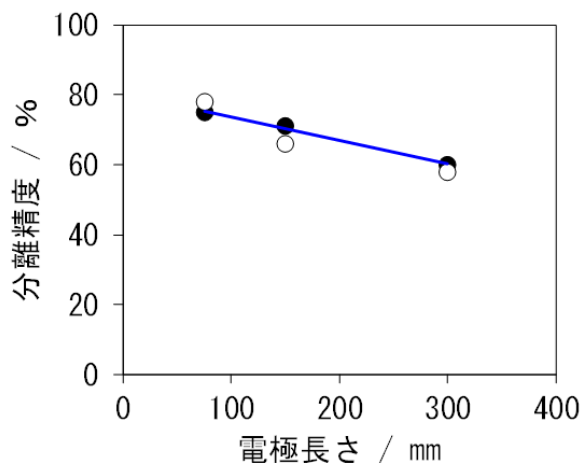


図4 分離精度における電極長さの影響

- : 正極における PP の分離精度
- : 負極における PA の分離精度

4.2 電極長さが分離能に及ぼす効果

印加電圧を 50kV、帯電時間を 30s とし、電極に用いたアルミ板の大きさについては幅方向を 150mm とし、長さ方向を種々の長さに変えてプラスチック混合物の静電分離を行った。その結果、図 4 に示すように電極の長さ方向が 75mm、150mm、300mm とした時の PP の分離精度は 78%、65%、58% であり、PA の分離精度は 75%、71%、60% だった。

電極の長さ方向が短い程、分離精度が向上した。これは、電極の面積が小さいほど電気力線の密度が高まり、電場が強くなったためと考えられた。

4.3 帯電時間が分離能に及ぼす効果

印加電圧を 50kV、電極に用いたアルミ板の大きさを 150mm(長さ方向)×150mm(幅方向)とし、帯電時間を変えてプラスチック混合物の静電分離を行った。その結果、図 5 に示すように帯電時間を 0 秒、30 秒、60 秒、90 秒、120 秒および 150 秒とした時の PP の分離精度は 51%、78%、72%、81%、79%、80% であり、PA の分離精度は 53%、75%、78%、80%、78%、79% だった。

帯電時間が 90 秒までは帯電時間を長くすることで分離精度が向上したが、90 秒以降は分離精度に変化が見られなかった。これは、90 秒までは帯電処理によりプラスチックの帯電量が増加したが、90 秒以上の帯電操作ではプラスチックの帯電と放電により平衡状態

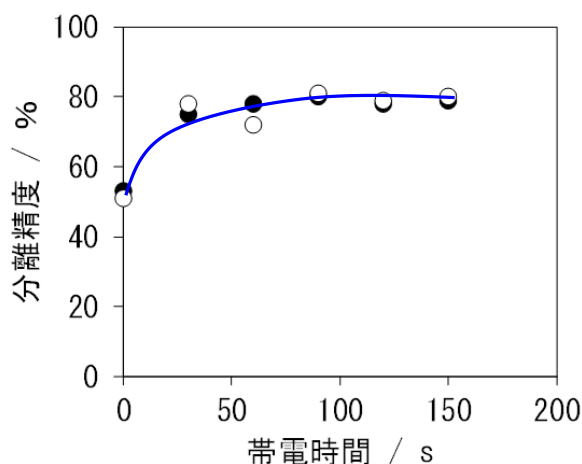


図5 分離精度における帯電時間の影響

- : 正極における PP の分離精度
- : 負極における PA の分離精度

に達したためと考えられた²⁾。

4.4 最適条件での PP と PA の静電分離

§ 4.1 から § 4.3 までの検討より、印加電圧 50kV、電極長さ 75mm、帯電時間 90s という条件下で、プラスチック混合物の静電分離を行った。その結果、図 6 に示すように正極における PP の分離精度は 81%、負極における PA の分離精度は 80% だった。

容器包装プラスチック類から製造した再生材料はその純度により 60%以上 85%未満のものが準リッチ品、85%以上のものがリッチ品に分類される³⁾。今回の静電分離条件では PP と PA を準リッチ品相当の純度で分離できた。

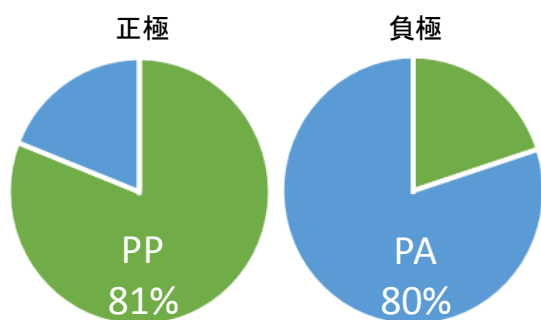


図6 分離精度における帯電時間の影響

○：正極におけるPPの分離精度

●：負極におけるPAの分離精度

5 結論

静電分離装置を作製し、印加電圧 50kV、電極長さ 75mm、帯電時間 90s の条件で、PP と PA の分離を行ったところ、分離精度はそれぞれ 81%および 80%だった。この分離精度は準リッチ品に相当することから、従来比重分離が困難なために廃棄されてきたプラスチック混合物も静電分離により有価物としての再利用が期待できる。

参考文献

- 1)プラスチックリサイクルの基礎知識，一般社団法人 プラスチック循環利用協会
- 2)松下康志，森範宏ら，電学論 D, 117 卷 12 号 (1998).
- 3) ISO 18263-1

鉛フリーはんだ接合部の合金層解析

中澤優人・矢澤 歩

Analysis of alloy layer in lead-free solder joints

Yuto NAKAZAWA and Ayumu YAZAWA

本研究では、はんだ接合の界面組織を簡便且つ正確に解析できる方法を探るため、銅板と Sn-Ag-Cu 系鉛フリーはんだの接合によって形成される合金層について、走査型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分析 (SEM-EDS) による解析を行った。その結果、1) 反射電子組成像 (BED-C) を利用した EDS 点分析、2) フェーズ分析のマニュアル分離、3) 観察視野の工夫による 3 つの方法により、鉛フリーはんだ接合部の合金層を解析する方法を確立した。

キーワード：多変量解析、鉛フリーはんだ、合金層

In this research, we analyzed the alloy layer formed by joining a Sn-Ag-Cu-based lead-free solder and a copper plate in order to explore methods that can analyze the interface structure of the joint simply and accurately by scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometry (SEM-EDS). As a result, we established a method of analyzing the alloy layer by the three approaches, 1) EDS point analysis using backscattered electron composition imaging (BED-C), 2) manual separation of phase analysis, and 3) devising observation field setup.

Keywords: multivariate analysis, lead-free solder, alloy layer

1 緒言

電子・電気機器を対象とする有害化学物質使用規制 WEEE/RoHS の施行に伴い、はんだの鉛フリー化が推進された。しかし、現在主流の Sn-Ag-Cu 系鉛フリーはんだは、従来の Sn-Pb 系共晶はんだに比べて融点が高く、取り扱いが難しい^{1)・4)}。そのため、規制施行から 10 年以上経った今でも、はんだ接合の不具合に関する相談は定期的に寄せられている。はんだ接合の不具合には、ボイドや引巣、界面組織など様々な要因が挙げられるが、ボイドや引巣の有無調査については、X 線 CT や金属顕微鏡などで解決が図られてきた。

一方、はんだ接合の界面組織は数十 nm～数 μm と微小であるため、既存の X 線マイクロアナライザー分析装置 (EPMA-1600) では、観察・分析に限界がある。基板パッド(Cu)と鉛フリーはんだ(Sn-3.0Ag-0.5Cu)の接合に

よって形成される合金層は、 η 層 (Cu_6Sn_5) と ε 層 (Cu_3Sn) が知られているが、合金層は固くて脆い性質があるため、合金層が成長して厚くなると、わずかな振動や衝撃でクラックが発生しやすくなり、はんだ接合の割れを引き起こす原因となる⁵⁾。そのため、はんだ接合の界面組織を分析し、合金層の種類や状態を解析することは、はんだ接合の不具合を解明する上で重要となる。

そこで我々は、昨年度に導入された走査型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分析装置 (SEM-EDS) を用いることにより、はんだ接合によって形成される合金層を簡便且つ正確に解析できる条件・方法を確立することを目的として研究を行った。

2 実験

2.1 銅板 - 鉛フリーはんだ接合試料の作製

銅板 (10×10×0.5mm) と鉛フリーはんだ (Sn-3.0Ag-0.5Cu、太洋電機産業(株)製) を、ミニテストプレス (MP-WCL、東洋精機(株)製) にて 1.0MPa、230℃ で 10 分間接触させた。次に、電気炉 (FO810、ヤマト科学(株)製) にて、160℃ で 30 時間保持した後、空冷させることで銅板と鉛フリーはんだの接合試料 (以下、接合試料と表記) を作製した⁶⁾。

2.2 SEM-EDS 観察及び分析の前処理

2.1 で作製した接合試料を SEM-EDS (SEM : JSM-IT500H、日本電子(株)製 EDS : NORAN System 7、サーモフィッシャー・サイエンティフィック(株)製) で観察・分析できるようにするため、観察面に対してクロスセクションポリリッシャ (SM-09020CP、日本電子(株)製) によるアルゴンイオン研磨 (以下、イオン研磨と表記) を行った。その後、接合試料をアルミニウム製試料台にカーボンテープで貼り付けて固定した。最後に、オートファイナー (JEC-3000FC、日本電子(株)製) にて、試料台を回転させながら、40mA で 90 秒間白金蒸着を行った。

2.1 及び 2.2 の流れを図 1 に示す。

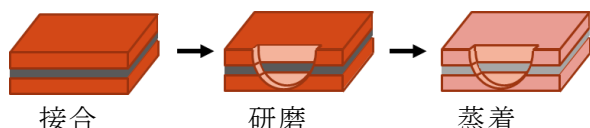


図 1 2.1 及び 2.2 の流れ

3 結果及び考察

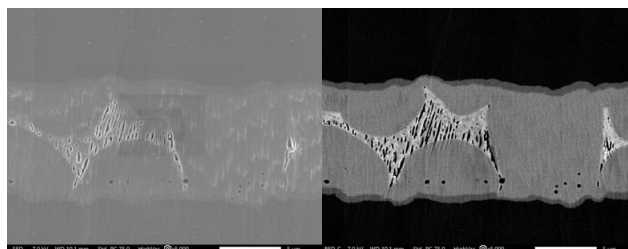
3.1 SEM-EDS による観察

接合試料の観察面に対し、同一視野で二次電子像 (SED) と反射電子組成像 (BED-C) を撮影した結果を図 2 に示す。

図 2 (a) の SED は、試料表面の凹凸を表す電子像であるため、観察面に生じたボイドやクラックの有無を確認するために撮影した。

図 2 (b) の BED-C は、組成変化 (比重の違い) を色の明暗で表示する電子像である。観察視野内において、比重が小さい (構成元素

が軽い) 箇所は暗い色、比重が大きい (構成元素が重い) 箇所は明るい色で表示される。図 2 (b) で接合部が 4 色に分かれているのが確認できることから、接合部には銅板・鉛フリーはんだ・合金層 2 種類の計 4 成分が存在していると判断できる。



(a) SED

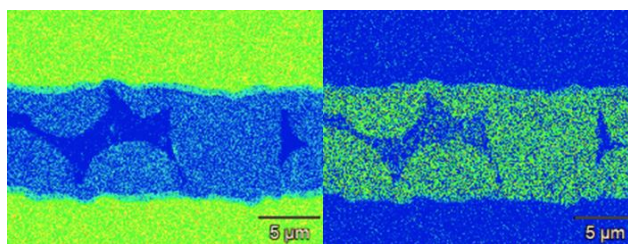
(b) BED-C

図 2 接合部の撮影結果 (観察倍率 5000 倍)

3.2 SEM-EDS による多変量解析

接合部に形成されている合金層を調査するため、EDS 面分析をして、得られた結果に対する多変量解析をした。多変量解析には、サーモフィッシャー・サイエンティフィック(株)が提供する EDS 装置 NORAN System7 のソフトウェア Path Finder を用いた。この多変量解析は、EDS 面分析で得られる情報を解析することで、観察視野内に存在する異なる成分同士を自動で分離することができる。

しかし、図 3 の接合部に対して多変量解析をしても、2 種類の合金層は自動で分離されなかった。



相 1

相 2

図 3 多変量解析による自動分離

接合試料には、構成元素の同じ合金層 (η 層 : Cu_6Sn_5 、 ε 層 : Cu_3Sn) が 2 種類存在しているが、多変量解析のシステムが η 層と ε 層を 1 成分と判定したため、両者を自動で分離できない結果となった。そこで我々は、次の 3 つの方法で合金層を解析した。

3. 3 合金層の解析方法

3. 3. 1 BED-C を利用した EDS 点分析

1つ目の方法は、BED-C を用いて比重の違いごとに EDS 点分析する方法である。BED-C は、組成変化（比重の違い）を色の明暗で表示する特徴があるので、組成の違いを視覚的に判断できる強みがある。

ここで、接合部を BED-C で撮影した画像を図 4 に示す。

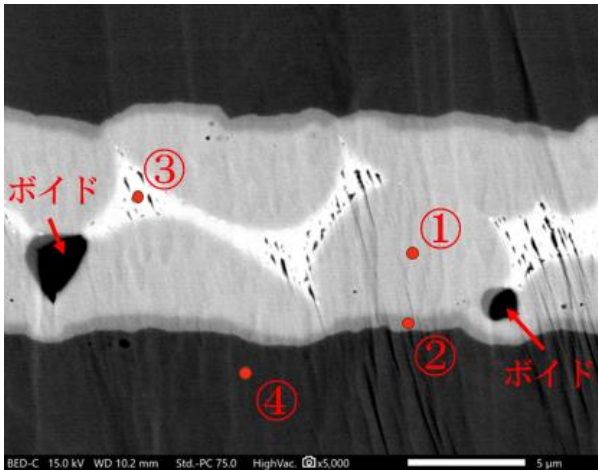


図 4 接合部の BED-C 像

図 4 の接合部が 4 段階で白黒表示されていることから、接合部は 4 成分で構成されると判断できる。なお、接合部内の黒色部 2箇所は、SED によりポイドが存在することを確認した。次に、①～④について EDS 点分析した結果を表 1 に示す。

表 1 EDS 点分析結果

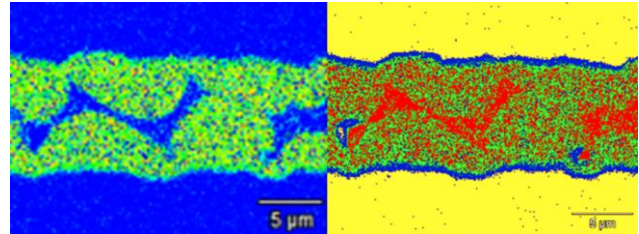
	Cu (at.%)	Sn (at.%)	Ag (at.%)
①	55.28	44.72	0.00
②	72.80	27.20	0.00
③	10.66	85.29	4.05
④	100.00	0.00	0.00

表 1 から、①は η 層 (Cu_6Sn_5)、②は ϵ 層 (Cu_3Sn)、③は鉛フリーはんだ、④は銅板だと判明した。

このように、BED-C で分析対象物の組成変化を確認することができれば、色の明暗箇所を点分析することで、比重の違いによる成分を把握できるようになる。

3. 3. 2 フェーズ分析のマニュアル分離

2つ目の方法は、フェーズ分析の機能を用いて、各相に対するマニュアル操作を行い、成分を分離して表示する方法である。分離された成分は、色画像として出力される。例えば、多変量解析で分離できなかった相を選択し、フェーズ分析でマニュアル分離を行うと、図 5 のように表される。



マニュアル分離前 マニュアル分離後

図 5 フェーズ解析による色画像出力

以上から、マニュアル分離で成分を色分けすることで、銅板・鉛フリーはんだ・ η 層・ ϵ 層の状態（形状や厚み）を視覚的に確認できるようになる。

3. 3. 3 観察視野の工夫

3つ目の方法は、観察視野を絞り込むことで多変量解析に使用される情報を限定させる方法である。

多変量解析の原理は、元素の区別で表示される線分析や面分析とは異なり、波形スペクトルの違いに基づいて成分同士が分離される。ここで、成分分布図と波形スペクトルを図 6 に示す。

図 6 の成分分布図から、 ϵ 層 (Cu_3Sn) は C1・C2 のどちらにも分布することが確認できる。

これは、 ϵ 層 (Cu_3Sn) の波形スペクトルが C1・C2 に近い波形スペクトルとして認識されたため、 ϵ 層 (Cu_3Sn) が 1 成分として区別されなかったことになる。

多変量解析は、前述したとおり、EDS 面分析で得られる情報を基にして、観察視野内にある異なる成分同士を分離する。つまり、これは観察視野内の分析データを唯一の情報源として解析することを意味する。そこで、2 種類の合金層のみが写るように観察視野を絞込み、EDS 面分析をして多変量解析することにした。観察視野絞込み前の SED を図 7 (a)、観察視野絞込み後の SED を図 7 (b)、図 7 (b) に対する多変量解析結果を図 7 (c) に示す。

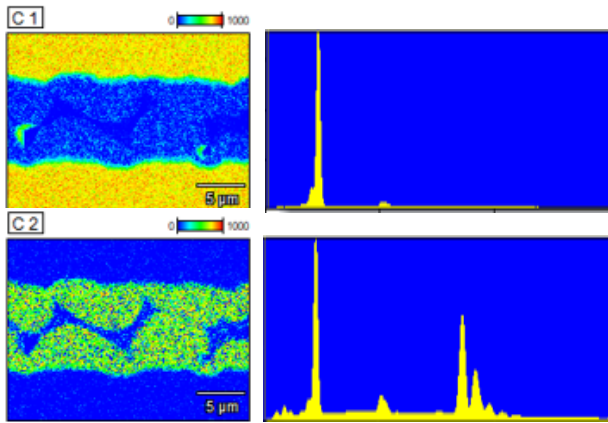
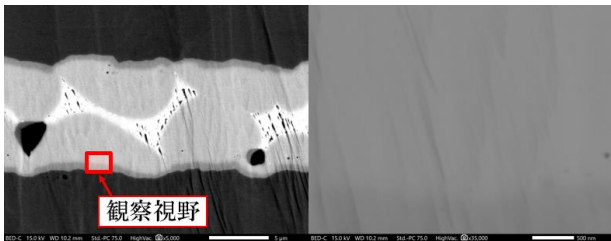
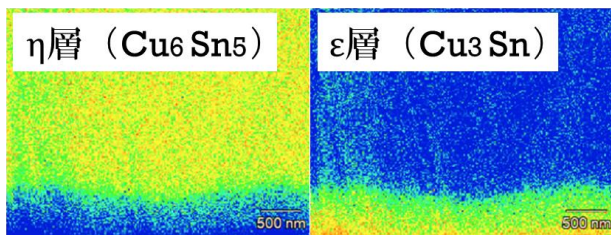


図6 成分分布図と波形スペクトル



(a) 絞込み前 (b) 絞込み後



(c) (b) に対する多変量解析結果

図7 観察視野設定と多変量解析結果

図7(c)から、 η 層 (Cu_6Sn_5) と ε 層 (Cu_3Sn) は、自動で両成分が分離されるようになった。以上から、観察視野を絞り込むことで、限られたデータを情報源として多変量解析をするようになる。その結果、波形スペクトルのわずかな差違を捉えて、 η 層と ε 層を別々の成分として分離できることが明らかとなった。

4 結 論

本研究では、銅板と鉛フリーはんだの接合によって形成される合金層を簡便且つ正確に分析する方法を探るため、以下の3つの方法を行った。

1. BED-C を利用した EDS 点分析
2. フェーズ分析のマニュアル分離

3. 観察視野の工夫

今回の接合試料は、銅板 (Cu)、鉛フリーはんだ (Sn-Ag-Cu 系) のほか、反応層 (Cu-Sn 系) が存在することが予想できたので、条件が整った既知試料の分析となった。未知試料を分析する場合は、3つの方法を組み合わせるのが適当だと考える。

以上の分析方法を駆使することで、はんだ接合の界面組織のみならず、既存の EPMA で分析が困難な薄膜や微小粒子の解析にも応用していきたい。

参 考 文 献

- 1) 竹本正: 鉛フリーはんだの現状, 溶接学会誌, **75**, 583-588 (2006)
- 2) 菅沼克明: 低温鉛フリーはんだの位置づけと市場意識, エレクトロニクス実装学会誌, **6**, 369-374 (2003)
- 3) 北嶋雅之, 庄野忠明: Sn-Zn 系はんだの実用化状況と今後の課題, エレクトロニクス実装学会誌, **6**, 380-385 (2003)
- 4) 平森智幸, 伊藤元剛, 吉川正雄, 廣瀬明夫, 小林紘次郎: 無電解 Ni-P/Au めっきと Sn-Ag 系鉛フリーはんだの界面反応と接合部強度, エレクトロニクス実装学会誌, **6**, 503-508 (2003)
- 5) 菅沼克明, 中村義一: Sn-Ag 共晶はんだと Cu の接合界面の微細組織と強度, 日本金属学会誌, **59**, 1299-1305 (1995)
- 6) 北嶋雅之, 庄野忠明, 野口道子: 錫-銀-銅はんだによる鉛フリー化技術, FUJITSU, **51**, 341-344 (1995)

ガス一斉分析技術の確立

牛木龍二・恩田紘樹

Establishment of simultaneous analysis technology of gases

Ryuji USHIKI, Koki ONDA

水素 (H₂)、二酸化炭素 (CO₂) および微量の一酸化炭素 (CO) 混合ガスの一斉分析を目的として、熱伝導度検出器型ガスクロマトグラフ (TCD-GC)、メタナイザーおよび水素炎イオン化検出器型ガスクロマトグラフ (FID-GC) を組み合わせた分析装置を設計、試作した。また試作した装置の性能を評価するために、改質ガスを模擬したガス (H₂: 69.8%、CO₂: 20.2%、CO: 10.0ppm、CH₄: 10.2ppm) を分析したところ、定量性良く分析できた。このことから微量の CO を含むガスを一斉分析できることが示唆された。

キーワード：一斉分析、改質ガス、一酸化炭素、メタナイザー

In this study, the integrated apparatus composed of TCD-GC and FID-GC with methanizer was designed and constructed to simultaneous analyze of hydrogen, carbon dioxide and trace level carbon monoxide mixed gas. And then, simulated reformed gas containing 70% of H₂, 2% of CO₂ and 10ppm of CO could be measured quantitatively by this apparatus. This result suggested that gas mixture containing CO at ppm level could be simultaneous analyzed by using the designed apparatus in this study.

Keywords : simultaneous analyze, reformed gas, carbon monoxide, methanizer

1 はじめに

家庭用燃料電池システムの改質器(FPS)では、まず都市ガスやLPGの水蒸気改質により水素(H₂)を生成する。このとき副生する一酸化炭素(CO)は燃料電池の白金電極を被毒するため、水蒸気改質の後段でCO変成(CO+H₂O→CO₂+H₂)および選択酸化(2CO+O₂→2CO₂)により10ppm以下にまで低減する。このため、FPSの性能評価にはppmオーダーのCOを含む水素リッチガス組成の定量分析が不可欠である。

一般的にH₂、CO、CO₂などの無機ガス分析には熱伝導度検出器型ガスクロマトグラフ(TCD-GC)が用いられるが、TCD-GCではppmオーダーのCOを定量分析することは困難である。一方、微量COを定量分析する場合、COをメタネーション反応(CO+3H₂→CH₄+H₂O)によりメタン(CH₄)に変換した後、水素炎イオン化検出器型ガスクロマトグラフ(FID-GC)により分析

する方法が知られている¹⁾。これらのことから水素リッチガス中のH₂およびCO₂はTCD-GCで定量分析し、ppmオーダーのCOはメタナイザーでCH₄に変換し、FID-GCで定量分析できると考えられる。さらにTCD-GC、メタナイザーおよびFID-GCを組み合わせ一斉分析できれば、水素リッチガス組成を正確に定量分析ができるものと考えられるが、その実施例は無かった。そこで本研究では、TCD-GC、メタナイザーおよびFID-GCを組み合わせたガス一斉分析装置を設計・試作し、その性能を評価したので報告する。

2 実験

2.1 ガス一斉分析装置

本研究で作製したガス一斉分析装置は、図1のように試験ガスをまずTCD-GCに導入し、H₂やCO₂を定量分析する。その後TCD-GCからの出口ガスをメタナイザーに

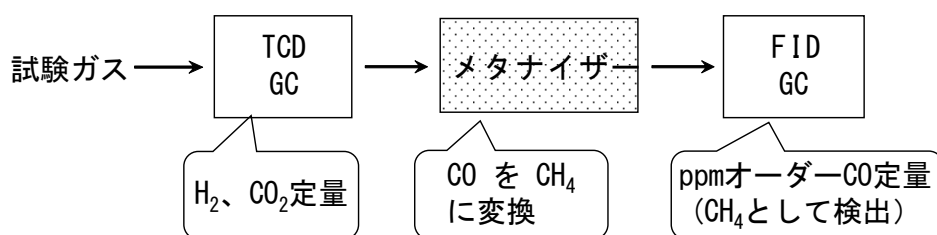


図1 本研究のガスー斉分析のフロー

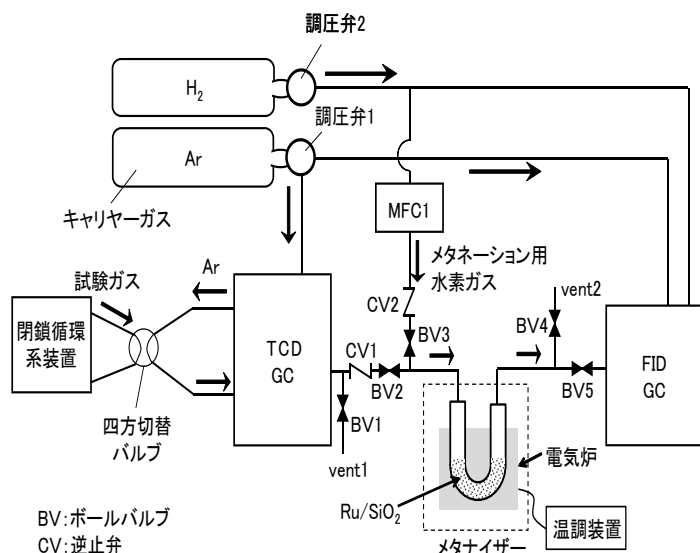


図2 ガスー斉分析装置の設計模式図

導入し、ppm オーダーの CO を CH₄ に変換後、FID-GC により CO を定量分析する。

ガスー斉分析装置の設計模式図を図2に示す。配管には外径 3.17mm(内径 2.17mm)のジーエルサイエンス製 SUS316 配管を用い、調圧弁1 および 2 にはユタカ製 GF1-2516-RS1-V および GF2-2506-LN-V、ボールバルブ(BV)には swagelok 製 SS-41GS2、逆止弁(CV)には swagelok 製 SS-2C-10、マスフローコントローラー1 (MFC1)にはコフロック製 MODEL8500 を用いた。メタナイザー部には外径 6.35mm(肉厚 1mm)のジーエルサイエンス製 SUS316 配管を用い、後述の Ru/SiO₂ 前駆体 0.5g を充填した。またメタナイザー部の加熱には 0.6kW の電気炉を用い、温調装置 (FP93-8P-90-0600、シマデン製) を用いて温度制御した。H₂ および CO₂ の検出は Unibeads C(60~80mesh)を充填した 3mmφ×2m のカラムを取付けた熱伝導度検出器型ガスクロマトグラフ(TCD-GC)(GC-8A、島津製作所製)により行い、また CH₄ の分析には水素炎イオン化検出器型ガスクロマトグラフ (FID-GC)(GC-14B、島津製作所製)を用いた。

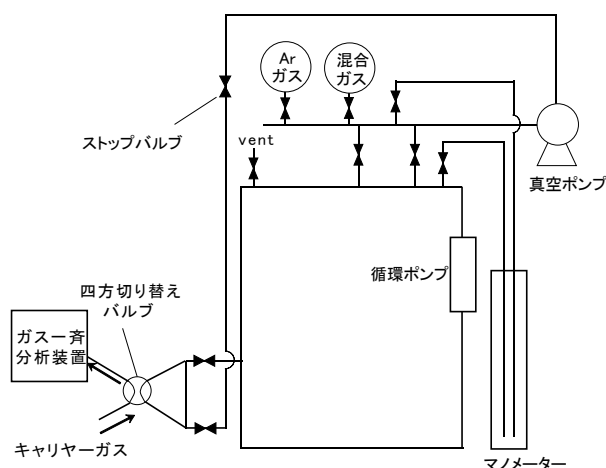


図3 閉鎖循環系装置

2.2 Ru/SiO₂ 触媒の調製

本研究ではメタネーション反応に高い活性を示し、かつ炭素析出が起こりにくい Ru を SiO₂(Silica Gel60、比表面積 410m²/g、Merck 製)に担持した触媒 (Ru/SiO₂) を使用した。Ru/SiO₂ の詳細な調製方法を以下に示す。SiO₂ を電気炉(FO-300、ヤマト科学製)で 500 °C で 2 時間焼成した。仕上がり試料重量基準で Ru が 2wt.% 含有されるよう、塩化ルテニウム(III)・n 水和物 (RuCl₃・nH₂O、和光純薬製)をイオン交換水に溶解させ、塩化ルテニウム水溶液を調製した。この水溶液を予め焼成した所定量の SiO₂ に含浸させ、1 時間静置した。得られたスラリーをロータリーエバポレーターに移し、80°C に加温しながらアスピレーターで減圧乾燥して、200ml の 7%アンモニア水に室温で 1 時間浸漬した。その後、200ml のイオン交換水で 5 回洗浄し 80°C で乾燥して SiO₂ 担持 Ru 触媒(Ru/SiO₂)の前駆体を得た。Ru/SiO₂ 触媒 0.5g をガスー斉分析装置のメタナイザー部の触媒床に設置後、調圧弁1 を開けてアルゴン (Ar) を TCD-GC に導入し、TCD-GC の MFC で流量を

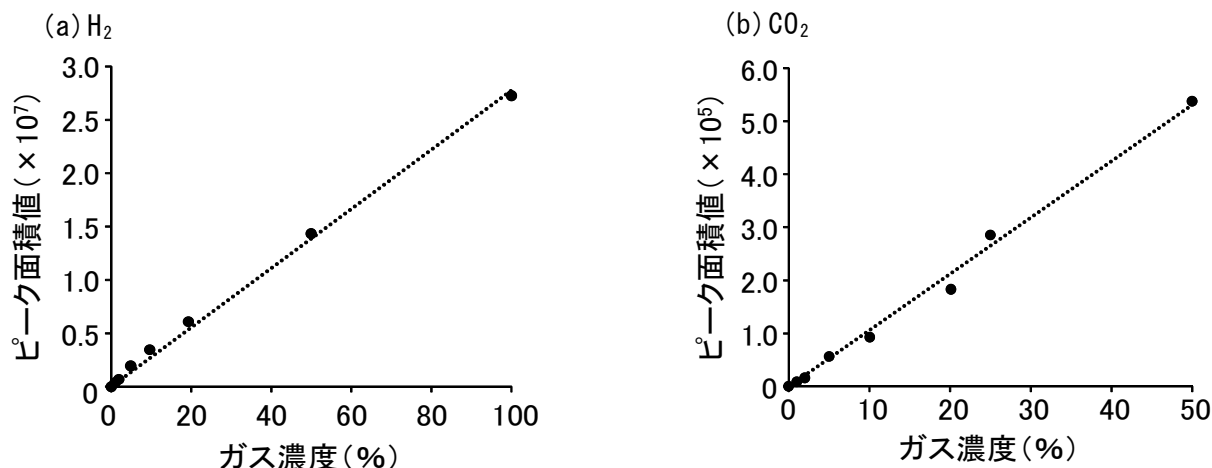


図4 TCD-GCにおけるH₂(a)およびCO₂(b)の検量線

30ml/minに制御しながらBV1、BV3およびBV5は閉じ、BV2およびBV4を開け、メタナイザー部にArを導入し、vent2よりガスを排気させながら、触媒床を電気炉を用いて室温から500°Cに昇温し、1時間保持し、Ru/SiO₂触媒を活性化した。

2.3 模擬ガスの調製

燃料電池へ導入する水素リッチガスの組成を模擬したガスを調製するため、図3に示すような閉鎖循環系装置（系内容積154ml）を用いて調製した。まずCOおよび内部標準としてCH₄を所定量導入した後、COおよびCH₄濃度が共に100ppmとなるようにArを導入して、系内圧力を50Torrとした。その後、H₂を350Torr、CO₂を100Torrそれぞれ導入して、H₂リッチガス（以下模擬ガス、H₂: 69.8%、CO₂: 20.2%、CO: 10.0ppm、CH₄: 10.2ppm）を調製した。

2.4 分析

閉鎖循環系装置に測定ガスを所定量導入し、必要に応じてArで希釈した後、四方切替バルブによりガス一斉分析装置へ導入した。この時、ガス導入時間は1分とした。測定ガスはTCD-GCを通過した後、メタナイザーにおいてCOやCO₂はCH₄に変換され、FID-GCに入る。TCD-GCおよびFID-GCのカラムオープン温度は80°C、キャリアガスにはArを用いた。メタナイザー部の触媒床は350°Cとし、メタネーション用酸素はMFC1で5ml/minで制御し導入した。なお、試験ガスの導入量は水銀柱マンメーターによる系内圧力値から算出した。

3 結果および考察

3.1 ガス一斉分析装置を用いたH₂、CO₂の定量分析

都市ガスを水素源とした家庭用燃料電池システムにおける改質ガスには主にH₂およびCO₂がそれぞれ概ね75%および10%程度含有される²⁾。このような%オーダーのH₂およびCO₂の検量線を作成するため、閉鎖循環系内のH₂濃度が100、50、20、10、5、2および1%となるようにH₂およびArを導入し、系内圧力を500Torrとした後、ガス一斉分析装置に供した。その結果、図4(a)に示すようにH₂濃度とTCD-GCによるピーク面積との間には良好な直線性が得られ、その相関係数は0.997だった。同様にCO₂濃度がそれぞれ50、25、20、10および5%となるように、CO₂およびArを導入し、ガス一斉分析装置に供した場合も図4(b)に示すようにCO₂濃度とTCD-GCによるピーク面積との間には良好な直線性が得られ、その相関係数は0.990だった。このように、FPSから出てくる%オーダーのH₂およびCO₂は、ガス一斉分析装置で定量分析できることが示唆された。

3.2 微量CO分析

ガス一斉分析装置におけるppmオーダーのCO分析の可否について検討するため、まず閉鎖循環系内にてCH₄濃度が50、10、5および3ppm(2.1×10⁻¹、4.2×10⁻²、2.1×10⁻²および1.2×10⁻²μmol相当)となるようにCH₄およびArを導入し、系内圧力を500Torrとした後、ガス一斉分析装置に供

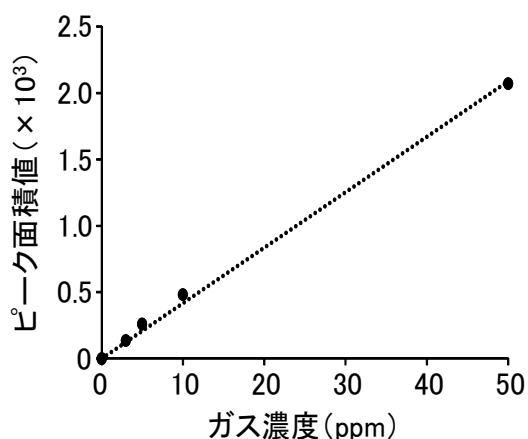


図5 FID-GCにおけるCH₄の検量線

したところ、図5に示すように系内CH₄濃度とFID-GCにより得られたピーク面積との相関係数は0.998を示し、高い相関性が見られた。このようにFID-GC分析ではppmオーダーのCH₄の定量分析が可能なのが示された。

次に、CO濃度が50、10、5および3ppmとなるように閉鎖循環系内にCOおよびArを導入し、系内圧力を500Torrとした後、ガス一斉分析装置に供したところ、TCD-GCではCOは検出限界以下だったのに対し、FID-GCではCOのメタネーションによって変換されたと思われるCH₄のピークが検出された。またFID-GCにおけるCH₄の検量線から、CO由来のCH₄量を算出したところ、それぞれ 2.0×10^{-1} 、 4.6×10^{-2} 、 2.3×10^{-2} および $1.4 \times 10^{-2} \mu\text{mol}$ であり、閉鎖循環系に導入したCO量とほぼ一致した。このことから、ppmオーダーのCOもメタナイザーによりCH₄に変換することでFID-GCにより定量分析できることが示唆された。

3.3 模擬ガスの一斉分析

本研究のガス一斉分析装置を用いることで%オーダーのH₂、CO₂、ppmオーダーのCOを一斉分析できることが示唆されたため、§2.3記載の方法により調製した模擬ガスをガス一斉分析装置で分析した。その結果、TCD-GCではH₂およびCO₂のピークが見られ、図4(a)および(b)に示した検量線よりH₂およびCO₂濃度はそれぞれ70.7および20.4%だった。一方、FID-GCでは図6に示すようにCOのメタネーションによって生成したCH₄のピークが見られ、そ

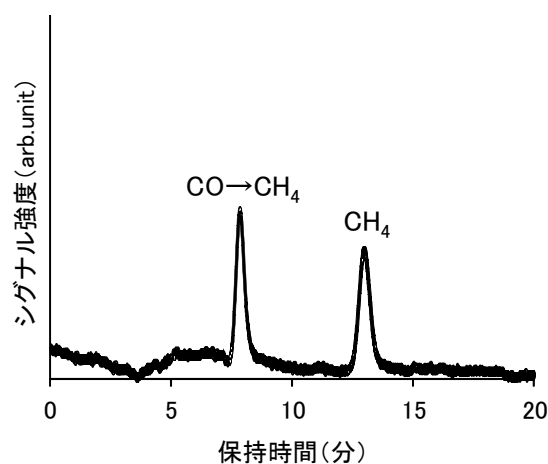


図6 模擬ガスのFID-GC分析で得られたクロマトグラム

の面積値は模擬ガス中に内部標準として10.2ppm添加したCH₄のピーク面積値と概ね一致し、さらに図5の検量線よりCO濃度は10.3ppmだった。このように、本研究で作製したガス一斉分析装置により分析したガス濃度と模擬ガスの組成は良く一致した。以上のことから、ppmオーダーのCOを含有する模擬ガスを定量性良く一斉分析できたことが示唆された。

4 まとめ

- (1) ガス一斉分析装置を設計、作製した。
- (2) 本研究で設計、作製したガス一斉分析装置を用いることで、%オーダーのH₂、CO₂およびppmオーダーのCOを定量分析できた。
- (3) 模擬ガス (H₂: 69.8%、CO₂: 20.2%、CO: 10.0ppm、CH₄: 10.2ppm) はガス一斉分析装置を用いて一斉分析できた。

以上のことから、FPSから出てくる%オーダーのH₂、CO₂およびppmオーダーのCOは、本研究により作製したガス一斉分析装置を用いることで一斉分析できることが示唆された。

文献

- 1) 渡邊卓朗, 加藤健次, 前田恒昭, 分析化学, Vol.62, No.3, (2013)
- 2) 藤木広志, 水素エネルギーシステム, Vol.37, No.1(2012)

味覚センサーを用いた分析における前処理方法の検討

石田一成・櫛田麻希*・木村紀久**

Examination of the influence of the sample extraction methods
on the results of analysis by taste sensing system
Kazushige ISHIDA, Maki KUSHIDA and Norihisa KIMURA

抽出前処理方法が味覚センサー分析の結果に及ぼす影響について検討を行った。豆腐及びポテトチップスを用いた検討で、抽出前処理の方法により試料の呈味の評価に差が生じることが明らかとなった。

キーワード：味覚センサー、抽出、前処理

We examined the influence of the sample extraction methods on the results of analysis by taste sensing system. The examination using tofu and potato chips showed that the results of analysis is dependent on the sample extraction methods.

Keywords : taste sensing system, extraction, pretreatment

1 まえがき

味覚センサーは、測定試料のうち1点を基準として、他の試料の呈味強度を数値化する装置である。この装置は、味覚という個人的な感覚に頼っていたものを数値で客観的に表すことが出来る。この特徴を活かし、目標とする味の再現や、呈味による市場商品のマッピング、自社製品の位置付けなどに用いられている。

この装置の分析対象は水溶液に限られる。固形の食品の場合は、試料を数倍量の水と共にミキサーなどで攪拌することで呈味成分を水に抽出して、その抽出液を測定試料とする。

しかし、食材をミキサー等で処理するだけで味に変化が生じることが一部の食品で報告されている。その一例が豆腐である¹⁾。これは、味覚センサーで通常行う機械的な前処理だけで味に変化することを示唆する。

また、ポテトチップスのように表面がシーズニングで覆われているような食品では、表面のシーズニングのみを抽出する前処理の場合と、イモを含む全体から呈味成分を抽出する前処理の場合とでは、イモの呈味の分だけ違いが生じると予想される。

そこで本調査研究では、実際に前処理方法によって呈味評価に違いが出るか、違いが出る場合には結果をどのように判断するのがよいかについて検討した。その結果を報告する。

2 研究方法

2.1 試料

試料には、市販の豆腐(木綿豆腐)とポテトチップス(コンソメ味)を用いた。

2.2 使用機器

味覚センサーは、(株)インテリジェントセンサーテクノロジー製 味認識装置TS-5000Zを用いた。センサーは、酸味・塩味・苦味・渋味・旨味・甘味の6種を用いた。遠心分離には、いずれも(株)久保田製作所製 テーブルトップ4000、スイングロータST-722M及びチューブラック250 mL(CODE No. 055-4850)を用いた。

攪拌には以下の機器を用いた。

- ・ミキサー：パナソニック(株)製 ファイバーミキサーMX-X300
- ・フードプロセッサー：パナソニック(株)製フードプロセッサーMK-K61
- ・ストマッカー：(株)エルメックス製 ホ

モジナイザーPro・media SH-IIM

- ・ハンドミキサー：ユアサプライムス(株)製 ハンドミキサーLHM-120E
- ・スターラー：東京硝子器械(株)製 Fine多連式スターラーF-606N

2. 3 前処理方法

豆腐の前処理では、ミキサー、フードプロセッサー、スタマッカー及びハンドミキサーを用いた。豆腐に4倍量の水を加え、60秒間処理して呈味成分を抽出した。この抽出液から、遠心分離(ミキサー及びフードプロセッサーの場合のみ実施。3500 rpm、10分間)及びろ過により固形分を除去し、得られた上澄みを味覚センサーで分析した。

ポテトチップスの前処理では、ミキサー、フードプロセッサー、スタマッカー及びスターラーを用いた。前処理条件を表1に示す。最終的な分析試料は、全試料について希釈倍率を50倍に揃えた。

表1 ポテトチップスの前処理条件

器具	抽出時		抽出液の希釈倍率	最終的な希釈倍率
	希釈倍率	処理時間		
ミキサー	50倍	60秒	—	50倍
フードプロセッサー	50倍	60秒	—	50倍
スタマッカー	10倍	30秒を2回	5倍	50倍
スターラー	5倍	300秒	10倍	50倍

3 結果と考察

3. 1 豆腐

異なる前処理方法で調製した豆腐試料の呈味分析の結果を図1に示した。「ミキサー、フードプロセッサー及びスタマッカー」と「ハンドミキサー」とで呈味評価に異なる傾向が見られた。

豆腐は、蛋白質の網目構造に油分が保持されるような微細構造よりなることが報告されている²⁾。前者のような激しい攪拌により呈味成分を抽出した場合、豆腐の微細構造が破壊されて呈味が変化した可能性が示唆された。そのため、豆腐本来の呈味を評価するには、豆腐の微細構造を破壊しないハンドミキサーのような穏やかな攪拌に

よる呈味成分の抽出が好ましい、と考えられた。

また、ミキサー、フードプロセッサー及びスタマッカーの間でも攪拌強度に差があると考えられるが、呈味には大きな差が認められなかった。このことから、呈味の変化は微細構造の破壊により生じ、破壊後更に攪拌しても呈味には影響しない、と推定された。

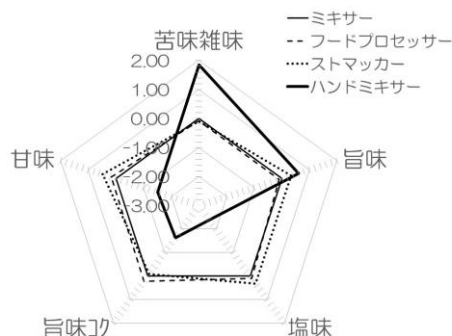


図1 豆腐の呈味分析の結果

3. 2 ポテトチップス

異なる前処理方法で調製したポテトチップス試料の呈味分析の結果を図2に示した。「ミキサー及びフードプロセッサー」と「スタマッカー及びスターラー」とで呈味評価に異なる傾向が見られた。前者のような比較的強い攪拌による呈味成分の抽出では全般的に呈味が強く、特に塩味で顕著であった。

味覚センサーを用いた分析において、塩味は、塩化ナトリウムの呈味の他に、塩分の少ない食品における「濃厚感」とも密接な関係を有するとの報告がある((株)インテリジェントセンサーテクノロジー 第12回味覚センサー活用セミナー展示パネル配付資料)。このことを踏まえると、本測定における塩味の強度の違いは、シーズニングの塩分その他、ポテトチップス本体のイモの濃厚感も評価しているものと考えられた。

以上より、ポテトチップス全体の評価をする場合には、ミキサーやフードプロセッサーなど比較的強い力で本体のイモごと攪拌して呈味成分を抽出する前処理方法が適しており、ポテトチップスのシーズニングのみの評価を行う場合には、スタマッカー

やスターラーなど比較的穏やかな力で攪拌して呈味成分を抽出する前処理方法が適している、と考えられた。

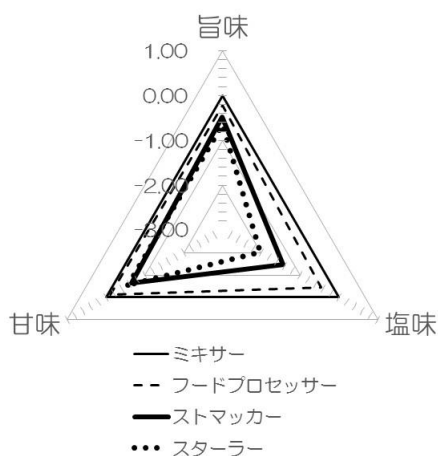


図2 ポテトチップスの呈味分析の結果

4 まとめ

味覚センサーによる分析において、食品の前処理が呈味評価に与える影響について検証を行った。

豆腐の分析では、攪拌による呈味成分の抽出の強度により呈味のバランスに変化が生じることを確認した。また、豆腐の呈味評価を行う際には、ハンドミキサーを用いるなど穏やかな攪拌による呈味成分の抽出が好ましいことを見出した。

ポテトチップスの分析では、攪拌による呈味成分の抽出の強度により呈味強度に違いが生じることを確認した。また、ポテトチップスの呈味評価では、評価の目的に応じて抽出前処理方法を選択するのが好ましいことを見出した。

文献

- 1) ガッテン「超濃厚!豆腐ニューワールド」2016. 11.9放送(NHK)、<<http://www9.nhk.or.jp/gatten/articles/20161109/index.html>>(2019年3月18日アクセス)
- 2) 斎尾恭子ほか：日本食品工業学会誌、15(7)、290(1968)

真菌混在下での細菌数測定系の確立

柳澤昌臣・渡部貴志・増淵 隆*

Construction of bacteria-counting media for fungal intermingled samples
Masaomi YANAGISAWA, Takashi WATANABE and Takashi MASUBUCHI

清酒造りにおいて、麴米の雑菌汚染はオフフレーバー物質である4-ビニルグアイアコール(4-VG)の生成の要因となっている。また、生酏系酒母造りにおいては、乳酸菌が醪中に残存すると多酸の要因になってしまう。これらのことから、酒造業界から酵母や麴菌などの真菌が混在する条件下で、安価に細菌数を測定する方法の確立が求められている。そこで本研究では、抗真菌性の抗生物質カビサイジンを用い、細菌の生育は阻害せずに真菌の生育だけを抑制する培地条件を検討したので報告する。

キーワード：清酒、麴米、4-ビニルグアイアコール、抗真菌性の抗生物質、培地

In the Japanese sake brewing, microbial contamination of *koji*-rice causes the generation of 4-vinyl guaiacol as an off-flavor. On the other hand, survival lactic acid bacteria in *kimoto* yeast mash causes lots of organic acids *moromi*. Thus, it is needed to construct a low cost bacteria-counting media for fungal intermingled samples. In the present study, we selected Kabicidine, as an antibiotic for fungi, and constructed media condition which did not repress bacterial growth but did fungal growth.

Keywords : Japanese sake, koji-rice, 4-vinyl guaiacol, antibiotic for fungi, media

1 はじめに

清酒や味噌、醤油、納豆、ヨーグルトなどの発酵食品は、様々な微生物の働きにより造られている。したがって、各発酵段階での微生物叢の管理が非常に重要であるが、これまでは職人の長年の経験と勘に依存することが多かった。近年、バイオテクノロジーの発展に伴い、発酵途中の微生物叢は遺伝子レベルで解析され、微生物が造り出す酵素や代謝産物の生産動態なども少しずつ解明されてきた。

例えば、清酒の煙臭、薬品臭、香辛料臭の原因物質の4-ビニルグアイアコール(4VG)は、原料米由来のフェルラ酸を微生物が出すフェルラ酸脱炭酸酵素により、生成することが知られている¹⁾。また、清酒酵母にはフェルラ酸脱炭酸酵素生産能が無く、麴米の雑菌汚染が4-VG生成の要因になっていることが分かってきた²⁾。また、酒造環境下の乳酸菌を利用する生酏系酒母

造りでは、清酒酵母を添加する前までは乳酸菌を増殖させる必要がある。しかしながら、醪中に乳酸菌が存在していると、多酸性醪になってしまうため、乳酸菌が造り出す乳酸や、清酒酵母が造り出すエタノールにより、醪添加時に乳酸菌を死滅させておく必要がある。

これらのことから、麴米中の細菌数や生酏系酒母の乳酸菌数を計測し、現状を把握することが、各酒造会社の酒質向上に重要な指標となる。一方で、麴米や酒母の中には、細菌だけでなく、酵母や麴菌などの真菌も存在するため、通常的一般生菌数を計測する標準寒天培地などで生育してくる微生物コロニーは、細菌か真菌かを区別することができない。そこで、従来真菌用の抗生物質と言われていたシクロヘキシミドを用い、麴米中の麴菌の増殖を抑制できるか予備試験的に調べてみた。しかしながら、毒物であるアジ化ナトリウムを添加しないものでは全く効果が無く、むしろシクロヘ

キシミドの添加量を増やすと細菌の生育を抑制してしまうことが分かった。

そこで本研究では、近年単離・同定・市販化された抗生物質のカビサイジンに着目し、麴米中の麴菌や生醗系酒母中の酵母の生育を抑制できるか確認し、依頼試験等の技術支援でも扱えるようにコストダウンする手法を検討したので報告する。

2 実験材料と方法

2.1 供試試料

カビサイジンの濃度検討には、平成27年度兵庫県産山田錦40%精米の原料米に、種麴ハイG（樋口松之助商店）を用い、当センターで製麴した麴米を用いた。麴米の細菌数と酵素活性値の関係性の評価には、群馬県内酒造会社に所属する技術者の団体である群馬県醸衆会から集めた麴米24点を用いた。生醗系酒母中の乳酸菌数の測定方法の検討には、群馬県内のA社から山麩醗を採取して用いた。

2.2 使用培地

カビサイジン配合の抗黴培地「ダイゴ」（富士フィルム和光純薬）（50 g/L）をカビサイジンの麴菌抑制効果確認試験に用いた。カビサイジン添加量の検討には、標準寒天培地（栄研化学）（23.5 g/L）を用いた。生醗系酒母の乳酸菌の測定には、BCP加プレートカウント培地（栄研化学）（24.6 g/L）を加温加圧滅菌後、カビサイジンを20 mg力価/1L添加したものをを用いた。

2.3 微生物試験

麴米約10 gに対し、0.9%滅菌生理食塩水90 mLを加え、ストマッカー（エルメックス社）で1分間混合した。得られた混合液をストマッカー袋の不織布を通して濾液を回収し、0.9%滅菌生理食塩水で適宜希釈した後、培地に混釈あるいは塗布した。37℃で24時間培養後に生育してきた細菌のコロニーを計測した。生醗系酒母については、0.9%滅菌生理食塩水で適宜希釈した後、培地に混釈した。37℃で24時間培養後に生育してきた細菌のコロニーの中で、培地が紫色から黄色に変化したハコを形成するものを生酸菌として計測した。

2.4 酵素活性測定

麴米からの粗酵素液抽出は、キッコーマンの酵素力価分析キットに準拠して以下のように行った。麴米5 gを50 mL容ディスポチューブに量り取り、酵素抽出用酢酸buffer 25 mLを加え、20℃、75 rpmで3時間振盪処理を行った。処理液を8000 rpm×5 min遠心分離を行い、0.45 μmのセルロースメンブレンでシリンジ濾過したものを粗酵素液とした。α-アミラーゼ、糖化力（グルコアミラーゼとα-グルコシダーゼの合計値）、および酸性カルボキシペプチダーゼは、キッコーマンの酵素力価分析キットを用いて分析を行った。酸性ホスファターゼは、*p*-ニトロフェニルリン酸を基質とした方法³⁾で分析を行った。

3 結果と考察

3.1 抗真菌の抗生物質の選定

従来の抗真菌の抗生物質としては、シクロヘキシミドとアジ化ナトリウムの併用であるとされてきた。しかしながら、アジ化ナトリウムは毒物であり、廃棄方法が厳格に規制されているが、微生物試験では膨大な量の培地を使用する。このため、まず予備試験として当センターのパイロットスケール試験醸造で作成した麴米を用い、シクロヘキシミドのみを標準寒天培地に加えて、麴菌生育抑制効果確認試験を行った。その結果、従来のシクロヘキシミド添加量である10 μg/Lの三倍量を加えても、麴菌生育抑制は認められず、むしろ添加量を増やすことによって細菌の生育抑制が引き起こされることが分かった（データ省略）。この結果より、シクロヘキシミドとは別の抗生物質を探索することにした。

金桶は²⁾、麴米の雑菌汚染が清酒の4-VG生成の要因であること明らかにしているが、その際に抗黴培地「ダイゴ」を用いて麴米の細菌数を計測している。そこで、抗黴培地「ダイゴ」の麴菌生育抑制効果確認試験を行ったところ、混釈培養でも麴菌のコロニーは検出されず、抗生物質のカビサイジンの抗真菌効果があり、細菌数を計測することができた（データ省略）。しかしながら、抗黴培地「ダイゴ」を用いた1

つの麴米の分析では、約2,000円もかかるため酒造支援の依頼試験に用いるのが難しいことも明らかとなった。

続いて、一般生菌数の分析に用いられる標準寒天培地にカビサイジンを追加することにより、分析にかかる費用を低減できないか検討することにした。まず、説明書に準拠してカビサイジンにエタノールを加えたものを、加温加圧滅菌後の標準寒天培地に100 mg力価/Lで添加してみたところ、抗黴培地「ダイゴ」と同様の麴菌生育抑制効果と細菌数の生育を抑制しないことを確認した（データ省略）。

しかしながら、エタノールではカビサイジンの不溶性成分が残存し、少量の培地作成には向かないことが分かった。そこで、

溶媒の検討をしたところ、10 mLのジメチルスルホキシド（DMSO）に100 mg力価のカビサイジンが溶解することを確認した。このことより、培地中へのカビサイジンの添加量を検討することが容易となり、従来の5分の1量の20 mg力価/mLまで減らしても、麴菌の生育抑制が可能であることを確認した（図1）。これらの検討結果により、1つの麴米の分析にかかる培地の費用は約300円まで低減できた。

さらに、生酸菌数計測用のBCP加プレート寒天培地にカビサイジンを追加することにより、山麴配中に存在する酵母の生育を抑制し、乳酸菌等の生酸細菌を計測できることが確認できた（図1）。

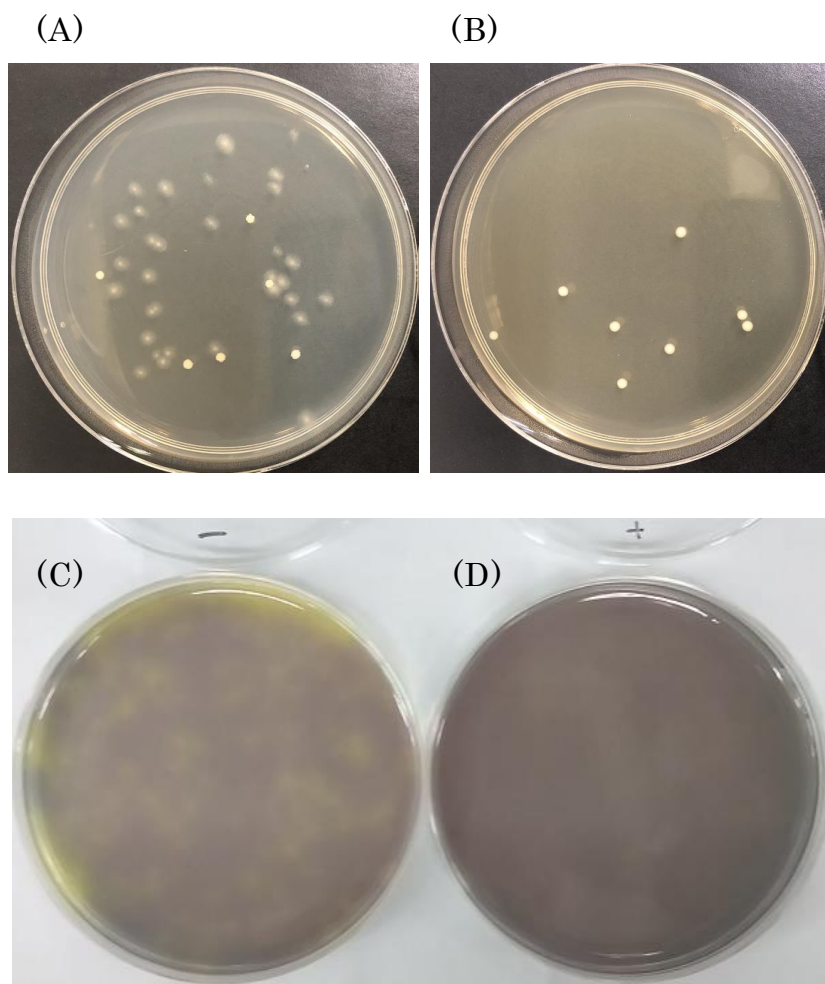


図1 カビサイジン添加の有無による真菌の抑制効果

(A) カビサイジン無添加での麴米の分析、(B) カビサイジン添加での麴米の分析、(C) カビサイジン無添加での山麴配の分析（黄色のハロが酵母）、(D) カビサイジン添加での山麴配の分析

3. 2 麴米の雑菌汚染と酵素力価

麴菌が生産する各種酵素は、掛米を溶解させて清酒酵母にグルコース、窒素源、ビタミン、微量金属等を供給する重要な役割がある。従って、品質の良い麴米を造ることは、清酒造りに重要な技術であり、酵素力価が評価基準の1つである。つまり、各種審査会の出品酒対策としても、麴米の酵素力価を把握し、目標の酒質になるように醗経過を管理することが重要となっている。

一方、麴米の雑菌汚染と4-VG生成の関連性は報告されているが²⁾、雑菌汚染と酵素力価との関連性を評価した報告例はない。そこで、群馬県醸衆会から出品酒用の麴米を集め、細菌数と各種酵素の分析を行なうことにした。

α -アミラーゼは、原料米のデンプンの α -グルコシド結合をランダムに加水分解し、マルトースを切り出してくるエンド型酵素で、液化酵素ともいわれている。また、糖化力はデンプンの α -グルコシド結合を端から加水分解し、グルコースを切り出してくるエキソ型酵素のグルコアミラーゼと、マルトースの α -グルコシド結合を加水分解し、グルコースを切り出す α -グルコシダーゼからなるものである。これらのアミラーゼ系酵素は、清酒酵母にグルコースを供給する働きがあるが、今回用いた麴米の分析では、細菌数との関連は認められなかった（データ省略）。

一方、酸性カルボキシペプチダーゼは、ペプチド鎖のカルボキシル末端からアミノ酸を切り出してくる酵素であり、酸性プロテアーゼとともに掛米から酵母に窒素源を供給する働きがある。今回用いた24点の麴米分析では、信頼性が低いが、酸性カルボキシペプチダーゼ活性と細菌数と弱い正の相関があった（図2）。なお、プロテアーゼ系の酵素は、細菌の至適増殖温度の35℃付近で生産されると言われており、何らかの影響があるのかも知れない。

また、酸性ホスファターゼは、原料米のリン化合物から無機リン酸を加水分解し、清酒酵母にリンを供給する働きがあるが、麴米分析で調べられることはほとんど無い。今回の分析でも、酸性ホスファターゼ活性と細菌数の関連性は認められなかったが、

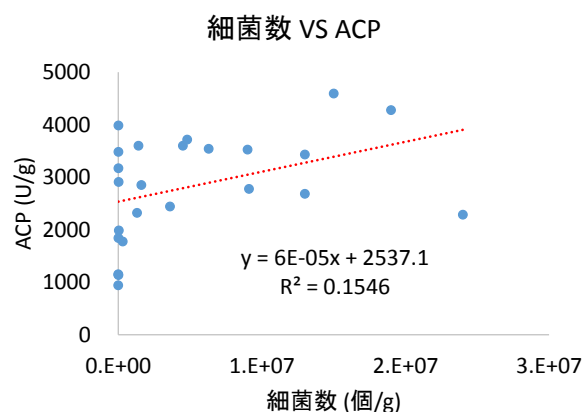


図2 細菌数と酸性カルボキシペプチダーゼ（ACP）の関係性

他の酵素活性とは正の相関性があったため（データ省略）、麴菌の増殖の目安になると考えられた。

4 まとめ

本研究では、清酒造りに重要な麴米の雑菌汚染と生醗系酒母の乳酸菌の消息を把握するため、抗真菌性の抗生物質を用いた細菌数の測定系を確立した。カビサイジンがDMSOに溶解することを見出し、1つの麴米の分析にかかる費用を、抗黴培地「ダイゴ」の約7分の1まで低減でき、依頼試験等の技術支援でも扱えるようになった。

謝 辞

群馬県醸衆会会員の皆様には、出品用の麴米を提供して頂いた。

文 献

- 1) 向井伸彦ら：日本醸造協会誌、967-975（1998）
- 2) 金桶光起：日本醸造協会誌、320-326（2014）
- 3) Takashi Watanabe et al.,: Journal of Bioscience and Biotechnology. 225-230（2009）

ものづくりにおける生産性向上に関する研究

— 切削加工プロセスの生産性向上 —

鏑木哲志・新井宏章*・黒岩広樹*・小宅 勝**

Study on productivity improvement in manufacturing

— Productivity improvement in cutting work —

Tetsushi KABURAGI, Hiroaki ARAI, Hiroki KUROIWA, Masaru OYAKE

ものづくりにおける生産性向上を図るため、切削加工において熟練作業者と同等に加工状態を評価する手法の開発を試みた。生産性の低い低剛性工具による加工を対象として、切削抵抗の時刻歴波形から加工状態を特徴化し、熟練作業者の評価と比較した。熟練作業者が良いと評価する状態は、時刻歴波形の平均値および積分値による特徴化が相当した。本評価手法により切削加工の最適化が可能となる。

キーワード：切削加工、生産性向上、状態評価、最適化

To improve productivity in manufacturing, we developed a method comparable to evaluation of cutting condition conducted by skilled workers. The indicators characterized from cutting resistance waveform in low rigidity tool were compared with the results evaluated by skilled workers. Indicators of average and integral showed a good correlation with evaluation by skilled workers. This evaluation method can be effective for optimization of cutting process.

Keywords : cutting work, productivity improvement, condition evaluation, optimization

1 まえがき

我が国では、少子高齢化に伴う労働人口減少が深刻な問題であり、労働生産性の向上が重要な社会的課題である。ものづくりの分野では、これまで我が国の高い技術力を支えた熟練技能者の高齢化が進み、その優れた技能の後世への伝承が十分に行われておらず、我が国の優位性が失われつつある中、その対策が急務となっている。

我が国が目指す社会のあり方である Society 5.0 では、人口知能、ロボット及び IoT など、生産性を劇的に向上させるイノベーションの実現が必要とされる¹⁾。この実現には IT 化が必要不可欠であるが、中小製造業における多くの生産現場では、直接業務以前に間接業務においても IT 化が進んでいないのが現状である。

このような背景の中、我々は生産プロセスへの IT 活用に向けた取組に注力している。

具体的には、手作業を主体とする作業の機械化や熟練作業者の勘と経験のセンサによる数値化等の IT 手法を実際の生産プロセスに適用し、改善を図る取組である。この取組から、実際の現場での IT 化への動機付けには、身近な具体的事例での成功体験が最も有効である。

本研究では、身近な加工方法である切削の生産性向上に資する手法の開発を行った。熟練作業者の評価と同等に加工状態を評価することを目的として、切削抵抗の時刻歴波形からの状態の特徴化について検討した結果について報告する。

2 加工状態評価の基本的な考え方

一般的な加工条件の決定方法は、工具メーカー等が推奨する条件を参考に実際に加工を行い、その結果から回転速度、切込み量及び送り速度等を調整する。この方法では加工の結果として確認できる振動や音、表面品質、寸法精度ある

いは工具摩耗等の結果系が参考指標となることから、作業者の勘と経験による主観評価となるため、加工能率を単調に下げていく対策となる。

そこで、我々が提案する加工の最適化のあるべき姿を図1に示す。加工の最適化を図るためには、加工の因果関係を解明することが重要となる。従来の対策ではなかった原因系の評価に切削抵抗測定を用いることで、工学的手法に基づく加工の分析が可能となる。これにより、従来困難であった加工能率を上げる対策も合理的に検討することができ、生産性向上の実現が期待できる。

この際、参照となるのは熟練作業者の評価基準である。熟練作業者は経験的に加工状態の良否を五感で捉えており、加工の最適化に反映している。この貴重な技能を原因系の測定で定量化することが課題となる。

本研究では、従来の対策では生産性向上が極めて困難であった細くて長い低剛性工具での加工を対象として、切削抵抗から得られる情報から加工の最適化を検討する。

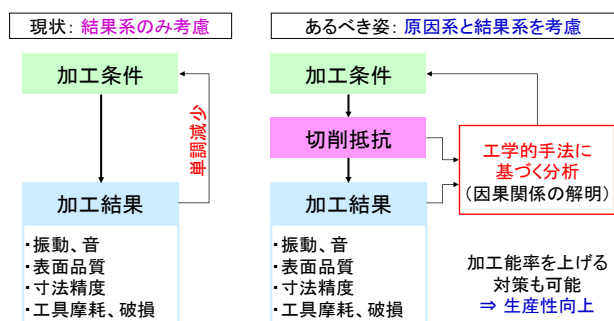


図1 加工の最適化のあるべき姿

3 実験方法

3.1 実験装置

切削加工には汎用のマシニングセンタを用いる。切削抵抗測定にはキスラー製切削動力計 9257B を用いる。工具には、超硬合金製直径 2mm、突き出し長さ 40 mm、3 枚刃を用いる。

3.2 被削材

被削材には合金工具鋼鋼材 SKD61 相当品を用いる。試験片形状は、縦横それぞれ 100 mm、高さ 50 mm の直方体である。切削動力

計のねじを用いて試験片を固定する。図2に加工実験の様子を示す。

3.3 実験条件

加工方法は溝加工とする。実験条件を表1に示す。切込み量が 0.5 mm に到達するまで切込みピッチにて加工を繰り返す。熟練作業者がこれまでの経験により適正と判断する従来条件を No. 1 として、送りおよび切込みピッチを変化させ加工能率が従来条件の 1.3 倍及び 1.5 倍となる条件を設定する。切削動力計のデータ取得間隔は 1 ms とする。

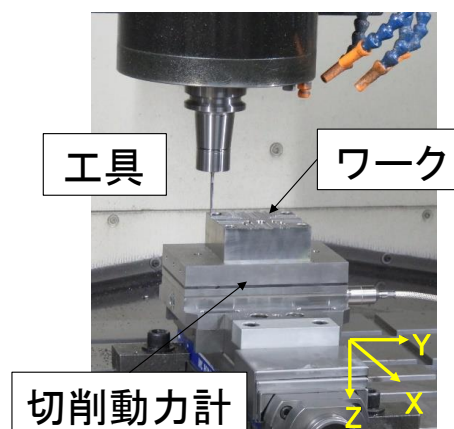


図2 切削加工実験

表1 実験条件

実験No.	回転数 [rpm]	送り [mm/min]	切込みピッチ [mm]	No.1に対する能率
1	2200	300	0.02	1
2		345	0.023	1.3
3		390	0.02	
4		300	0.026	
5		375	0.025	1.5
6		450	0.02	
7		300	0.03	

3.4 波形解析

特徴化のための波形解析には、平均、変動（標準偏差）及び積分とする。平均は、切込み量が 0.5 mm に到達するまでのそれぞれの加工について求め、その平均と標準偏差及び最大最小を求める。標準偏差はそれぞれの加工について求める。積分は切込み量が 0.5 mm に到達するまでの総和を求める。

4 実験結果及び考察

4.1 波形解析による特徴化

切削抵抗の時刻歴波形の例として表 1 に示す実験 No. 1 の加工条件のものを図 3 に示す。この時刻歴波形に対して平均、変動および積分処理したものをそれぞれ図 4 から図 6 に示す。

切削抵抗の時刻歴波形である図 3 から、各軸方向の切削抵抗の変動や振幅の大きさが可視化される。切削動力計では図 2 に示した座標系に従い、直交する 3 方向の力が測定される。図 3 ではこの 3 方向の力を合成力 F も併せて表示する。各軸方向でそれぞれ切削抵抗の大きさと変動度合いが異なる。工具の進行方向が+Y、鉛直下向きが+Z である。エンドミルによる切削加工では複数の切れ刃が回転しながらワークを切断して除去するため断続加工となる。この状態が切削抵抗の変動に表現される。

平均の特徴化である図 4 から、各加工条件の平均的な切削抵抗の大きさが可視化される。誤差範囲により、切削抵抗の最大値がわかることから、工具破損の可能性についての検討が可能となる。ここで、No. 2 から No. 4 は従来条件に対して加工能率が 1.3 倍、No. 5 から No. 7 は同様に 1.5 倍であるが、同じ加工能率でも特徴化された指標に差が生じる。

変動の特徴化である図 5 から、各加工条件での加工回数と変動の関係が可視化される。全ての加工条件において、加工回数が増加すると変動も増加する。従来条件である No. 1 が最も小さく、加工能率ごとにほぼ同様な増加の傾向を示す。全体的な傾向として、変動の増加の傾きが加工前半に比べ後半が小さくなる。この理由として、工具の角 R による影響が挙げられる。使用した工具の角 R は 0.5 mm である。加工回数が増加し加工溝深さが深くなると工具とワークの接触面積が徐々に増加し、理論的に 0.25 mm の切込み深さで角 R 部が全てワークに接触する。その後は、加工深さが増加すると、工具の直線的な円柱部が接触し始める。工具の円柱部が接触すると工具の進行方向に対して直角方向が拘束される状態となり、変動に影響する工具の

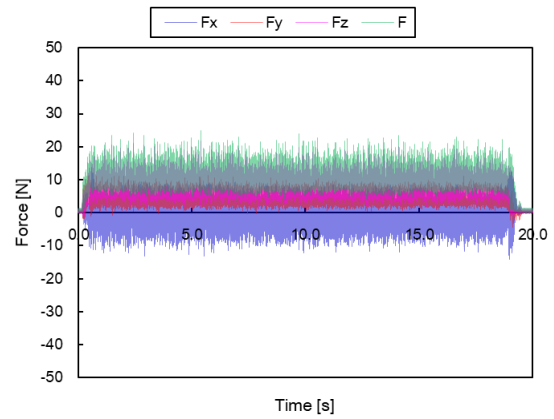


図 3 切削抵抗の時刻歴波形 (No. 1)

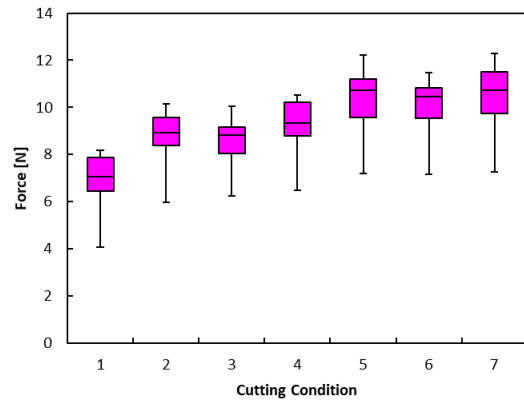


図 4 平均

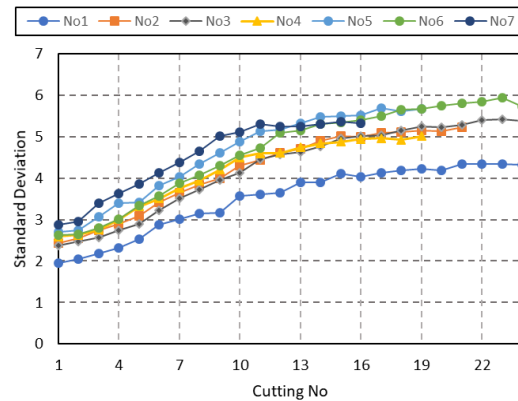


図 5 変動 (標準偏差)

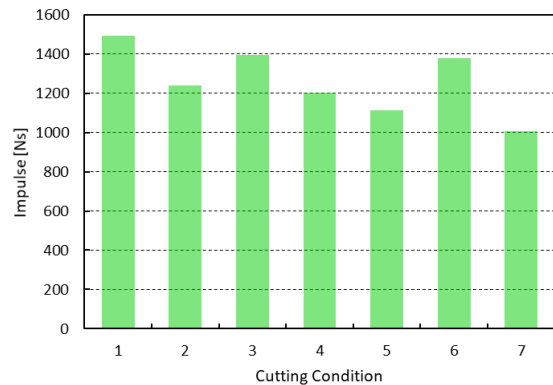


図 6 積分

変形による振動成分が抑制されると考えられる。

積分の特徴化である図 6 から、各加工条件の加工仕事の大きさが可視化される。ワークが工具から受ける力の総和である。積分値は切削抵抗である力と時間の積であり、力積の次元となるが、ワークに作用した力であることから除去加工に要した等価仕事として考えることができる。平均と同様に同じ加工能率であっても条件の違いにより特徴化された指標に差が生じる。それぞれの加工能率において特に No. 3 及び No. 6 が高い値を示す。いずれの条件も切込み量が小さく送り速度が速いものである。積分値の高さは力の転写性の高さである。本実験では全ての加工条件で除去量が同じため、積分値が高いほど効率が高い。そのため、除去加工以外に要した無駄仕事が少ないと考えられる。また、最近の工具開発は切込み量を小さくして送り速度を速くするいわゆる高送りに適した開発が進められており、その特徴が良く活かされた結果が表現されていると考えられる。

4. 2 熟練作業者の評価との比較

熟練作業者が良い状態と判断した条件は No. 3 と No. 6 である。この条件は、能率 1.3 倍及び 1.5 倍の中で切込み量が小さく送り速度が速いものである。この条件での特徴は、図 4 より平均値が低く工具負荷が小さいこと、図 6 より積分値が高く力の転写性が高いことである。前節の考察のとおり高送りの条件である。加工機構に着目すれば、工具負荷が小さいことから工具の変形の抑制や損傷の防止に有効となる。力の転写性が高いことから加工での無駄仕事が抑制され振動や発熱等の防止に有効となる。そのため、加工に有効に作用すると考えられる。熟練作業者の主観的な評価について、切削抵抗の時刻歴波形から特徴化された指標によって加工機構を考察することにより、同様の評価が行える可能性を示した。

この加工条件を実際の金型加工に適用したところ、複雑な部品加工において約 30% の時間短縮と 5% のコスト削減に貢献した。加えて、工具摩耗が抑制されたことにより、加工面品質及び寸法精度が向上した。このように

生産プロセスに IT を活用し熟練作業者の技能を定量化することは、これまでにない加工プロセスの改善への効果が期待され、今後のものづくりにおいて必要不可欠になると考える。

5 まとめ

ものづくりにおける生産性向上を図るため、切削加工における熟練作業者と同等の評価を切削抵抗の時刻歴波形から行う手法を開発した。

本手法により加工の特徴が可視化され、加工機構の考察が可能となり、加工プロセスの生産性向上が可能となる。また、職人の技能の定量化はそれを技術として後世に伝承することも可能となり、ものづくり全体の生産性向上が期待できる。

文 献

- 1) 第 5 期科学技術基本計画、内閣府(2019)
- 2) 中小企業・小規模事業者の IT 利用の状況及び課題について (平成 29 年 3 月)、中小企業庁(2018)

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な御助言を賜りました群馬工業高等専門学校黒瀬雅詞教授、埼玉工業大学河田直樹准教授及び群馬大学名誉教授久米原宏之様に感謝申し上げます。本研究での実験等に御協力いただきました有限会社山口精工様、有限会社石川鉄工所様、鈴木工業株式会社様及びスバル工業株式会社様に感謝申し上げます。

ものづくりにおける生産性向上に関する研究

— CMMによる検査プロセスの自動化 —

鏑木哲志・中村哲也・狩野幹大・小谷雄二*

Study on productivity improvement in manufacturing

— Automation of inspection process by CMM —

Tetsushi KABURAGI, Tetsuya NAKAMURA, Motohiro KANO, Yuji KOTANI

ものづくりにおける生産性向上を図るため、三次元測定機(CMM)による検査プロセスの自動化を試みた。CMMの測定プログラム作成に必要な座標情報を製品の2次元CADデータから抽出する手法を開発した。実際の検査に適用したところ、測定プログラム作成時間を大幅に短縮する効果を確認した。

キーワード：三次元測定機、生産性向上、自動化、CAD

To improve productivity in manufacturing, an automation of the inspection process with a coordinate measuring machine (CMM) was investigated. We developed a method to get the coordinate information necessary for CMM measurement program from 2-D CAD data. It was found that this method significantly reduces the time required to create the measurement program

Keywords : CMM, productivity improvement, Automation, CAD

1 まえがき

我が国では、少子高齢化に伴う労働人口減少が深刻な問題であり、労働生産性の向上が重要な社会的課題である。ものづくりの分野では、これまで我が国の高い技術力を支えた熟練技能者の高齢化が進み、その優れた技能の後世への伝承が十分に行われておらず、我が国の優位性が失われつつある中、その対策が急務となっている。

我が国が目指す社会のあり方である Society 5.0 では、人口知能、ロボット及びIoTなど、生産性を劇的に向上させるイノベーションの実現が必要とされる¹⁾。この実現にはIT化が必要不可欠であるが、中小製造業における多くの生産現場では、直接業務以前に間接業務においてもIT化が進んでいないのが現状である。

このような背景の中、我々は生産プロセスへのIT活用に向けた取組に注力している。具体的には、手作業を主体とする作業の機械化や熟練作業者の勘と経験のセンサによる数値化等のIT手法を実際の生産プロセスに適用し、改

善を図る取組である。この取組から、実際の現場でのIT化への動機付けには、身近な具体的事例での成功体験が最も有効である。

本研究では、身近な検査装置であるCMMの自動化に向けた手法の開発を行った。これまでのCMMでの検査プロセスでは、手作業によるティーチングが主体であり、作業の属人性による生産性低下が問題である。本開発手法では、検査対象製品の2-D CADデータからCMMの測定プログラム作成に必要な座標情報を抽出させ、その情報に従いCMMを動作させる。これにより、検査作業の大幅な生産性向上を可能とし得る結果について報告する。

2 測定プログラム作成の自動化

2.1 自動化の基本構想

検査に使用するCMMはミットヨ製 Crysta Apex C121910 である。制御ソフトウェアはMCOSMOS Ver. 3.2 である。CMMはワークに接触子を接触(プロービング)させた際の座標を読み取り、寸法や形状等の評価を行う。このプロ

ーピングの制御には、図1に示すとおり測定開始となる開始点と接触点となる終了点の座標値が必要となる。従来のプログラム作業では、作業者が図面から座標値を読み取り、1点ずつ手作業で入力する。本作業の自動化の基本構想を図2に示す。図は製品2次元CADの平面図であり、左側面の2点E1及びE2をそれぞれのアプローチ点S1及びS2から測定を想定する。開始点Si及び終了点Eiとして、それぞれの座標値をCADにより抽出し、CMMで変数として扱える形式にテキストデータ化する。CMMではこのテキストデータを読み込み、開始点及び終了点が認識される。この一連の作業をCADにて行う。

2.2 CADソフトウェア

2次元CADデータからの座標抽出に用いるCADソフトウェアはアプリクラフト製Rhinoceors5である。本ソフトウェアを使用する理由は、点の抽出等の機能(コマンド)をユーザで独自に開発できるためである。本ソフトウェアには開発ツールが提供されておりC++やPYTHON等のプログラム言語でコマンドを作成できることが特徴である。

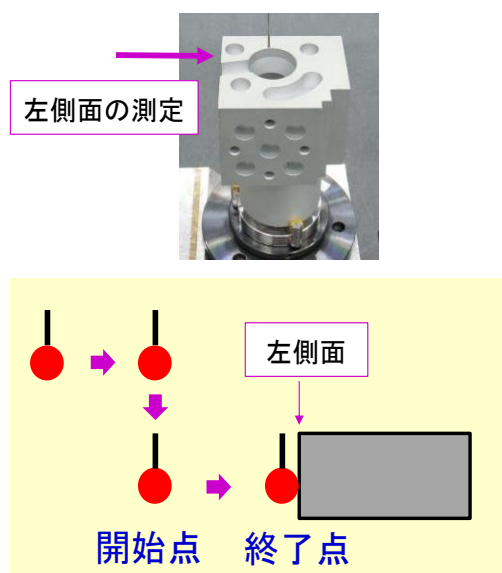


図1 測定の開始点と終了点

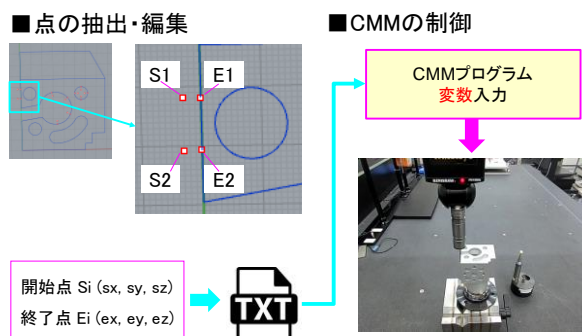


図2 CMMの自動化の基本構想

2.3 座標値抽出手順

図3に示す曲線(カーブ)に測定に必要な開始点及び終了点を発生させる手順を以下に示す。

(1)コマンドの選択

カーブの種類によりコマンドを3種より選択する。3種は、①両端には点を発生させない、②片側の端のみに点を発生させる、③両端に点を発生させるにより選択する。①は通常の辺、②は円など閉じた(クローズしている)辺、③は別の辺と連続的につながる辺を想定する。

(2)カーブの選択

点を発生させるカーブをクリックにて選択する。

(3)アプローチ方向の定義

選択したカーブに対してアプローチする方向をクリックして設定する。

(4)オフセットカーブの作成(自動)

選択したカーブをアプローチの方向にオフセットしたカーブを作成する。図3(b)では赤色のカーブである。オフセット距離は測定のアプローチ距離となりコマンド内で任意に設定可能である。

(5)点の発生

測定に必要な点数を入力し、オリジナル及びオフセットカーブそれぞれに点を発生させる。図3(c)では5点の例である。

(6)座標値のテキスト出力(自動)

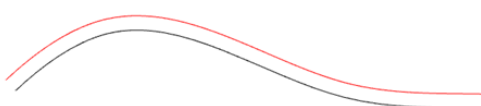
発生させたそれぞれの点のオフセットカーブ上の点を開始点、オリジナルカーブ上の点を終了点として座標値をファイル出力する。Z座標値については一定とする。

本手順のコマンド作成にはPYTHONを用いた。その理由は、機能のライブラリが豊富に準備されていること、構文がわかりやすいこと及び

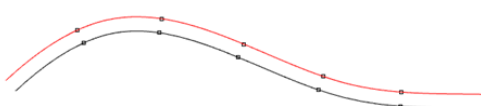
言語としての信頼性が高いことである³⁾。本報告では具体的プログラムの提示は行わないが、いわゆるプログラム作業に知見があれば、コマンドの作成は比較的容易である。



(a) オリジナルカーブ



(b) アプローチ側のオフセットカーブ (赤)



(c) 開始点及び終了点の発生

図3 カーブから開始点及び終了点の作成

3 開発手法の有効性

3.1 実験方法

図1に示した直方体形状に穴が施されたワークを対象に開発手法による測定を実施した。図4にワークの平面図の2次元CADデータを示す。

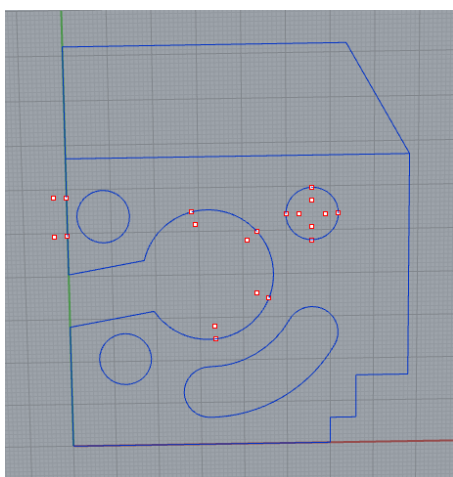


図4 ワーク平面図2次元CAD

本ワークに対して開始点及び終了点を発生させて実際に測定を行う。測定者は開発手法の有効性を評価するため、測定機及びCADに経験を有さない者とした。測定点は任意の端面や穴等の100点とした。従来手法である手作業によるティーチング作業も同様に行い、作業時間及び測定の不確かさについて比較を行った。

3.2 実験結果及び考察

開発した手法による測定の作業時間及び不確かさの改善効果をそれぞれ図5及び図6に示す。

従来手法を Hand working、開発手法を CAD とし、それぞれの手法での手作業 (Manual) と自動作業 (Auto) を示す。従来手法では全て手作業である。開発手法における手作業は CAD による開始点および終了点の抽出作業であり、

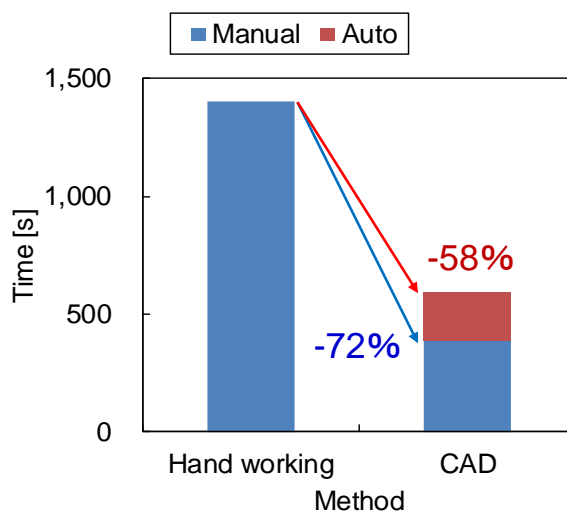


図5 作業時間の改善効果

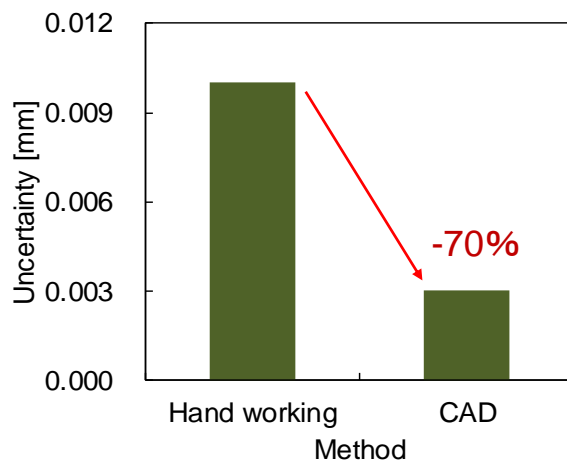


図6 測定の不確かさの改善効果

自動作業は CMM での自動測定である。図 5 に示すとおり開発手法では全体の作業時間を 58%短縮し、さらに手作業時間を 72%短縮する効果を得た。従来手法での手作業では、ジョイスティック動作でワークをプロービングすることから、操作の誤りによる接触子やワークの損傷を避けるための作業性の低下や、作業員から見えづらい位置の安全性の確認作業の増加等が要因となり、作業に多大な時間を要する。開発手法では、CAD 画面上で開始点及び終了点をクリック動作で作成でき、その動作は CAD に基づくことから安全に動作することが保証されるため、作業効率が大幅に向上する。

測定の不確かさは図 6 に示すとおり 70%改善する効果を得た。従来手法の手作業でのジョイスティック動作によるプロービングでは、ワーク法線方向からのプロービング方向の逸脱や測定速度のばらつき等から不確かさは CMM の性能以上に過大となる。開発手法では、測定方向は CAD からワークの法線方向に設定され、CMM の CNC 自動作業により測定速度が一定に制御される。これにより、CMM の性能どおりの精度が実現され、不確かさが改善される。

開発手法は、属人的な作業を CAD (IT) で置換する。その結果、本検討では人生産性を 3.6 倍、測定生産性を 2.3 倍へと向上させ、測定不確かさを 70%改善した。加えて、これを達成したのが CMM 及び CAD の未経験者である。このように生産プロセスに IT を活用することは、これまでになく人の活躍の場の拡大が期待され、今後のものづくりに必要不可欠となると考える。

4 まとめ

ものづくりにおける生産性向上を図るため、CMM による検査プロセスの属人的作業を CAD により置換する手法を開発した。本開発手法は CMM 及び CAD の未経験者でも検査にて生産性向上を図ることを可能とした。

本手法はプログラムの知見があれば開発可能なものであり、広く普及することでものづくり全体の生産性向上が期待できる。

- 1) 第 5 期科学技術基本計画、内閣府(2019)
- 2) 中小企業・小規模事業者の IT 利用の状況及び課題について (平成 29 年 3 月), 中小企業庁(2018)
- 3) 三井和男, Rhinoceros×Python コンピューショナル・デザイン入門, 彰国社(2016)