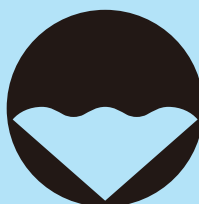


工業技術研究報告書

Report of the Industrial Research Institute of NIIGATA Prefecture No.55 2025

No. 55 令和7年度



新潟県

新潟県工業技術総合研究所

Industrial Research Institute of NIIGATA Prefecture

〒950-0915 新潟県新潟市中央区鋳西 1-11-1

1-11-1 Abumi-nishi, Chuo-ku, Niigata City, Niigata 950-0915, Japan

令和8年6月

目 次

I コア技術高度化事業

1. 金属堆積造形による銅合金マルチマテリアル造形技術の開発とプレス金型への適用… 3
2. AI を活用した生産性向上の研究 …………… 11
3. ロボットの高度制御技術の開発 …………… 15
4. MA-SPS による機能性硬質材料に関する研究 …………… 18

II 共同研究

1. 鍛造加工における CAE・AI を使った技能継承に向けた DX の取組 …………… 25
2. DX 推進に向けたプレス金型設計のデジタル化および大型電池ケースの開発 …………… 31
3. 生成 AI を活用した充填包装機のユーザー支援システムの開発（第 1 報） …………… 34

III 受託研究

1. 装置のアライメント精度を上回るマスクアライメント手法の研究 …………… 43

IV 創造的研究推進費

1. 環境負荷低減に向けたナノ複合化による高機能プラスチック材料の開発 …………… 49

V 技術課題探索

1. 地域企業に貢献する次世代デジタルエンジニアリングの調査研究 …………… 55
2. 環境負荷低減に向けた洗浄技術に関する研究 …………… 59
3. 鋳造シミュレーションの精度検証 …………… 64
4. フッ素化成品代替撥水剤・コーティング剤に関する技術課題探索 …………… 67
5. PFAS フリー撥水加工に関する技術課題探索 …………… 69
6. 電解処理における電流分布、電解電圧計算プログラムの開発 …………… 72
7. 積層材料の加工シミュレーション手法に関する研究（第 1 報） …………… 76
8. 積層材料の加工シミュレーション手法に関する研究（第 2 報） …………… 82
9. 供試装置の電源ケーブル終端条件が放射ノイズ測定に与える影響の検証 …………… 87

VI 簡易受託研究

1. 過去のデータを学習したレリーフ製作用 AI の開発 …………… 93
2. DED 方式堆積造形による金属製ワインボトルの試作 …………… 96

I コア技術高度化事業

金属堆積造形による銅合金マルチマテリアル 造形技術の開発とプレス金型への適用

田村 信* 須藤 貴裕* 中村 一夫* 斎藤 雄治*

Development of Multi-material Copper Alloy Deposition Technology
by Directed Energy Deposition and Its Application to Press Dies

TAMURA Makoto*, SUTOH Takahiro*, NAKAMURA Kazuo* and SAITO Yuji*

抄 録

本研究では、パウダ DED 方式を用いて SS400 基材上へ銅合金を造形したマルチマテリアル構造を対象に、硬さ、化学成分および金属組織を評価するとともに、プレス金型への適用可能性を検討した。高力黄銅系は、硬さに寄与する亜鉛含有量が造形に伴い大きく低下したが、凝固組織の微細化および第二相の分散強化により、鑄造材と同程度の硬さを維持した。一方、アルミニウム青銅系は造形に伴う成分変化がわずかで、凝固組織の微細化および第二相の分散強化により、鑄造材よりも高い硬さを示した。さらに、表面にアルミニウム青銅系を造形した金型による SUS304 の円筒絞り加工試験では、100 ショットの連続成形において金型の割れおよび焼付きは認められなかった。これらの検討結果から、アルミニウム青銅系はプレス金型への適用可能性が示された。

1. 緒 言

金属 AM(Additive Manufacturing) は、従来の切削加工や塑性加工に次ぐ新たな加工技術として注目されており、近年は試作用途や補修分野にとどまらず、実部品への適用が進む¹⁾など、産業への応用段階へ移行しつつある。中でもパウダ DED(Directed Energy Deposition) 方式堆積造形は、既存部材へ異種材料を局所的に付加できる特徴を有する。この特徴により、金型や構造部品に対する部分補強や傾斜機能構造の形成が可能であり、機能性を必要部位にのみ付与するマルチマテリアル化技術として期待されている。

銅合金は、優れた摺動特性（摩擦特性、耐焼付き性）および熱伝導性を有し、金型や摺動部材、放熱部品などに用いられている。一方で、鉄系材料に比べ高価であり、近年の価格高騰も相まって部材全体への適用は経済性の観点から課題がある。そのため、DED 方式によって必要

部位のみに銅合金を付加するマルチマテリアル構造が有効と考えられる。

本研究では、銅合金の高機能性と経済性の両立を目的として、DED 方式により SS400 基材上へ銅合金を造形し、必要部位のみに機能を付与するマルチマテリアル化を検討した。具体的には、造形に伴う成分変化、硬さおよび金属組織を評価し、硬さに影響する要因を考察した。さらに、得られた知見に基づきアルミニウム青銅系造形材を円筒絞り加工ダイへ適用し、プレス金型への適用可能性を検討した。

2. 造形装置および評価に用いた機器

造形には、パウダ DED 方式堆積造形装置 LAMDA200（ニデックマシンツール(株)製）を使用した。造形ヘッドの模式図を図 1 に示す。造形ヘッド先端中央から照射されるレーザ（波長 1.07 μm 、最大出力 2kW）により基材表面に熔融池を形成し、レーザ光軸周りに配置されたノズルから吐出された粉末を当該熔融池へ供給す

* 技術統括センター

ることで造形する。本装置は、インナーシールドおよびアウターシールドの 2 系統からなるシールドガスにより高いシールド性を確保できる点が特徴である。

なお、評価には表 1 に示す機器を用いた。

3. 銅合金粉末

造形には、高力黄銅系およびアルミニウム青銅系の粉末を用いた。各粉末は、JIS H 5120²⁾に規定される「高力黄銅铸件」および「アルミニウム青銅铸件」の化学成分を参考として開発されたものである。耐久性が要求される部品や金型への適用を想定し、硬さおよび耐摩耗性の向上を目的として、化合物析出による強化を狙った化学成分を添加している（以下、それぞれ高力黄銅系、アルミニウム青銅系と呼称する）。粉末原料には化学成分を調整した铸造材を用い、ガスアトマイズ法により粉末化した。造形には粒径を 45～150 μm に分級した粉末を用いた。

粉末の粒子形状および化学成分の偏析を確認するため、電子顕微鏡を用いて反射電子像観察を行った。図 2 に観察結果を示す。高力黄銅系粉末は、粒径のばらつきが比較的大きく、微粉の付着（サテライト）が認められた。一方、アルミニウム青銅系粉末は、前者と比べ粒径分布が揃っていた。いずれの粉末も、本観察条件では顕著なコントラストは認められず、化学成分の偏析を示す明確な所見は得られなかった。

4. 評価試験片

評価試験片の基材には SS400 を用いた。図 3 に示す評価試験片の造形条件を表 2 に示す。造形条件は、シングルビード造形による基礎検討の結果に基づいて選定した。具体的には、レーザー出力、送り速度などの主要因子を変化させ、欠陥（割れ、気孔など）の有無を指標として、健全なビードが安定して得られる条件を選定した。造形部の寸法は長さ 90mm、幅 20mm として、厚さが 4mm 以上となるよう造形高さを設定した。なお、造形パスは走査方向を長手方向と

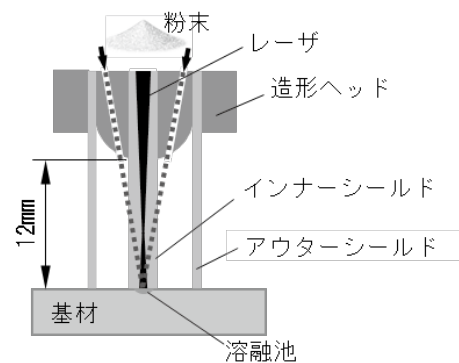
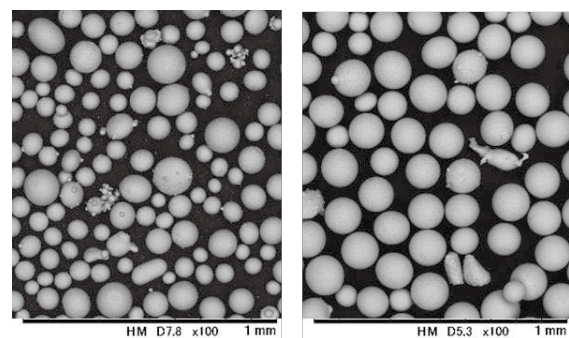


図 1 造形ヘッド模式図

表 1 評価に用いた機器

電子顕微鏡	走査型電子顕微鏡 TM3030Plus (株)日立ハイテクノロジー製
金属顕微鏡	デジタルマイクロスコープ DSX500 オリンパス(株)製
硬さ試験機 (マクロ硬さ)	ロックウェル硬さ試験機 ATK-F3000 (株)明石製作所製
硬さ試験機 (微小硬さ)	マイクロビッカース硬さ試験機 VH1102 BUEHLER製
蛍光X線 分析装置	波長分散型蛍光X線分析装置 ZSX Primus II 理学電機工業(株)製



(a) 高力黄銅系 (b) アルミニウム青銅系

図 2 粉末の反射電子像

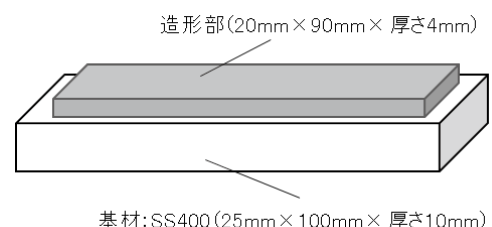


図 3 評価試験片の模式図

表 2 評価試験片の造形条件

	高力黄銅系		アルミニウム 青銅系
	上層	中間層 (アルミ銅)	
レーザ スポット径 (mm)	1.8	1.8	1.8
レーザ出力 (W)	1200	1200	1200
送り速度 (mm/min)	1000	1000	300
粉末供給量 (g/min)	12	9	3.6
水平方向ピッチ (mm) 括弧内は走査数	0.9 (24本)	0.9 (24本)	1.6 (13本)
垂直方向ピッチ (mm) 括弧内は層数	0.55 (6層)	0.65 (3層)	0.80 (5層)

し、評価試験片は造形後、上面を切削加工した。

高力黄銅系については、SS400 基材と造形部の界面近傍において割れが確認された。そのため、界面の割れ抑制を目的に、アルミ銅 (Cu-8wt%Al) を中間層として先行造形し、その上層に高力黄銅系を造形する手順を採用した。

なお、比較材として、粉末原料に用いた鑄造材と同等の化学成分を有する鑄造材を用いた。

5. 試験結果

5.1 高力黄銅系

5.1.1 硬さおよび化学成分の比較

高力黄銅系の鑄造材、粉末ならびに造形材の硬さの平均値および Zn 含有量を表 3 に示す。マクロ硬さ（ロックウェル硬さ）は評価試験片上面の切削面で、微小硬さ（ビッカース硬さ）は試験片長手方向中央の断面にて試験した。化学成分は蛍光 X 線分析により簡易定量した。

マクロ硬さは鑄造材が 87.0HRB、造形材が 86.0HRB であり、両者の差は極めて小さかった。微小硬さについても、鑄造材 180HV0.5、造形材 169HV0.5 と顕著な差は認められず、造形による硬さへの影響は限定的であった。

一方、低沸点元素である Zn 含有量については、鑄造材の 34.8wt% に対し、造形材は 18.0wt% で

表 3 高力黄銅系鑄造材、粉末および造形材の硬さの平均値および亜鉛含有量

供試材		硬さ		成分 分析 結果
		ロックウェル	ビッカース	
		HRB	HV0.5	Zn (wt%)
高力 黄銅系	鑄造材	87.0	180	34.8
	粉末	---	---	32.6
	造形材	86.0	169	18.0

※ 試験点数:ロックウェル3点, ビッカース7点

あり、造形材において Zn 含有量の著しい低下が認められた。Zn 含有量は粉末段階でも鑄造材に比べて低下していたが、造形材における低下の程度が大きいことから、Zn 含有量の低下は造形に起因する影響が大きいと考えられる。なお、化合物析出を狙った添加化学成分については、Zn 含有量の低下に伴う相対的な変化が認められる程度であった。

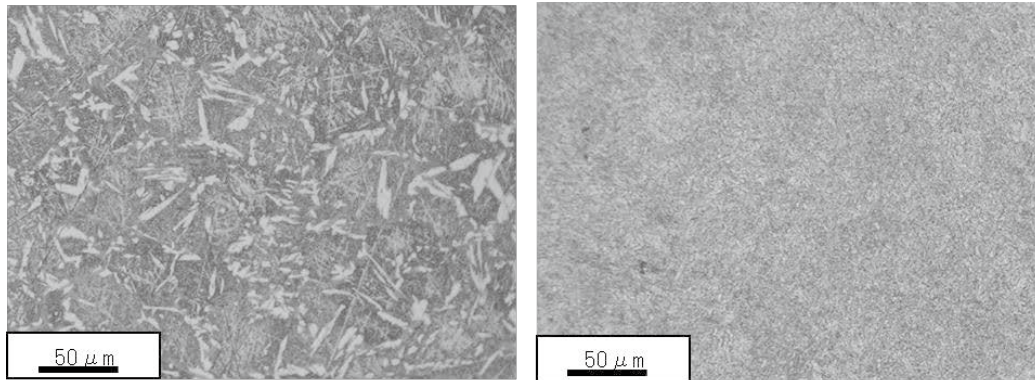
一般に Zn 含有量の低下は、硬さ低下側に作用する³⁾が、本結果では硬さが概ね維持された。この要因を明らかにするため、金属組織観察に基づいて考察を行った。

5.1.2 硬さに影響する要因の考察

各試験片のエッチング後の金属組織を図 4 に、未エッチングの金属組織を図 5 に示す。鑄造材と造形材は同程度の硬さを示したが、組織形態には明確な差異が認められた。

鑄造材のエッチング後の組織では粗大で片状の凝固組織が観察されたのに対し、造形材では全体として均一かつ微細な凝固組織を呈している。これは、凝固過程における冷却速度が、鑄造材に対して造形材の方が速かったことに起因すると考えられる。

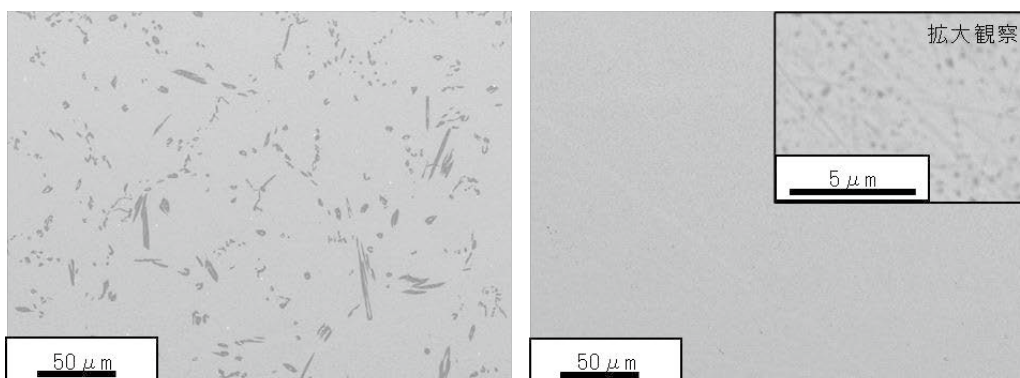
未エッチングの組織では、鑄造材において粗大な片状の第二相 (EDS 分析により添加元素の濃化を確認しており、化合物相、または添加元素の濃化領域と推定される) が点在していた。



(a) 鋳造材

(b) 造形材

図4 高力黄銅系のエッチング後の金属組織(金属顕微鏡, 長手中央断面)



(a) 鋳造材

(b) 造形材

図5 高力黄銅系の未エッチングの金属組織(電子顕微鏡反射電子像, 長手中央断面)

このように粗大かつ片状に分布する場合, 分散強化としての寄与は限定的となる可能性がある。一方, 造形材ではサブミクロンオーダーの第二相がマトリックス中に分散していた。これは急冷凝固により, 第二相の粗大化が抑制されたためと考えられる。

以上より, 両者の硬さが同程度となった要因は次のように推察される。鋳造材は相対的に高いZn含有量に起因するマトリックスの固溶強化により比較的高い硬さを示したと考えられる。一方, 造形材はZn含有量の低下によりマトリックスは軟化傾向にあるものの, 凝固組織の微細化および第二相の分散強化が寄与し, Zn低下の影響を相殺したと考えられる。

なお, 低沸点元素であるZnは, 粉末製造段階および造形段階の双方で低下しやすく, 所望の特性を得るためには, Znの低下をあらかじめ考

慮した合金組成の設計, あるいは造形条件による入熱制御が極めて重要であることを確認した。

5.2 アルミニウム青銅系

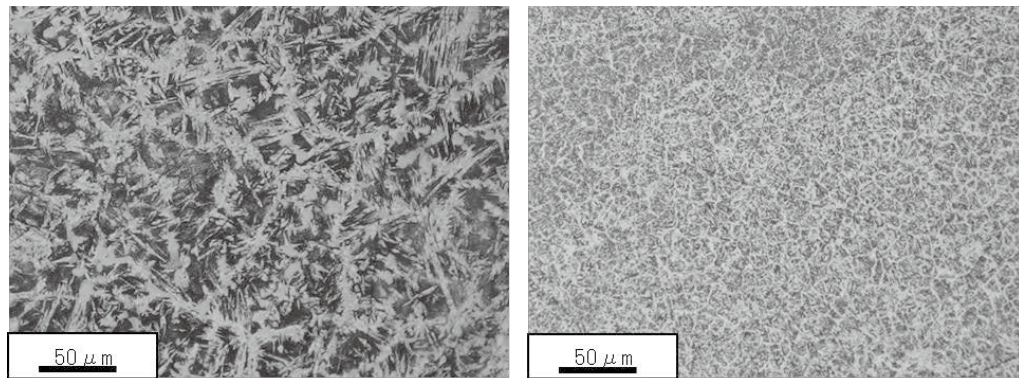
5.2.1 硬さの比較

アルミニウム青銅系の鋳造材および造形材の硬さの平均値を表4に示す。マクロ硬さは鋳造

表4 アルミニウム青銅系鋳造材および造形材の硬さの平均値

供試材		硬さ	
		ロックウェル	ビッカース
		HRC	HV0.5
アルミニウム 青銅系	鋳造材	29.5	282
	造形材	35.9	333

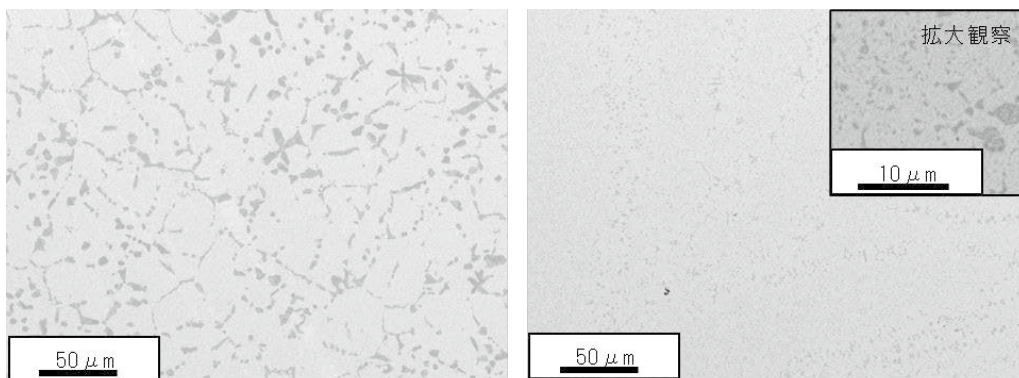
※ 試験点数:ロックウェル3点, ビッカース7点



(a) 鋳造材

(b) 造形材

図 6 アルミニウム青銅系のエッチング後の金属組織(金属顕微鏡, 長手中央断面)



(a) 鋳造材

(b) 造形材

図 7 アルミニウム青銅系の未エッチングの金属組織(電子顕微鏡反射電子像, 長手中央断面)

材が 29.5HRC, 造形材が 35.9HRC であり, 造形材の方が高い値を示した。微小硬さにおいても, 鋳造材 282HV0.5 に対し造形材は 333HV0.5 に向上しており, 高力黄銅系とは異なり, 造形により硬さが向上する傾向が認められた。

また, 化学成分の分析結果では, 造形後に顕著な成分変化は認められず, 粉末設計時に意図した化学成分が概ね維持されていた。

5.2.2 硬さに影響する要因の考察

アルミニウム青銅系において, 造形材が鋳造材を上回る硬さを示した要因について, 金属組織の観点から考察した。各試験片のエッチング後の金属組織を図 6 に, 未エッチングの金属組織を図 7 に示す。

鋳造材のエッチング後の組織では粗大な凝固組織が観察されたのに対し, 造形材では全体と

して均一かつ微細な凝固組織が観察された。これは, 前述の高力黄銅系と同様に凝固過程における冷却速度の違いに起因すると考えられる。

鋳造材の未エッチングの組織では, 数 μm へ十数 μm 程度の第二相が点在し, 網の目状に分布していた。このように第二相が連続的に偏在する場合, 分散強化への寄与は限定的となる可能性がある。さらに, 応力集中やき裂進展経路となりやすく, 機械的性質の低下につながる懸念もある。一方, 造形材ではサブミクロンオーダーの第二相がマトリックス中に分散している様子が観察された。

以上より, アルミニウム青銅系における硬さ向上の主因は, 造形時の急冷凝固に伴う凝固組織の微細化および第二相の分散強化であると考えられる。

5.3 高力黄銅系とアルミニウム青銅系の比較

高力黄銅系およびアルミニウム青銅系のいずれにおいても、造形により凝固組織の微細化と第二相の分散状態の変化が認められたが、硬さへの影響には明確な差があった。

高力黄銅系では造形に伴う Zn 含有量の著しい低下がマトリックスの軟化側に作用し、組織微細化および第二相の分散による強化効果と相殺された結果、硬さは鑄造材と同等水準にとどまった。一方、アルミニウム青銅系では造形後も顕著な成分変化は認められず、急冷凝固に伴う組織微細化に加え、添加元素に起因する第二相の分散による強化が硬さの向上として明瞭に現れた。

以上より、低沸点元素を含む高力黄銅系では、成分変化を考慮した合金設計および入熱制御が重要であるのに対し、アルミニウム青銅系では成分変化が小さく、添加元素由来の第二相による強化を安定して得やすい。したがって、アルミニウム青銅系のほうが造形に適した材料であり、鉄系材料と組み合わせたマルチマテリアル金型の構成材料として適用しやすいと考えられる。

6. プレス金型への適用

6.1 市販プレス金型用銅合金との比較

一般に、オーステナイト系ステンレス鋼板

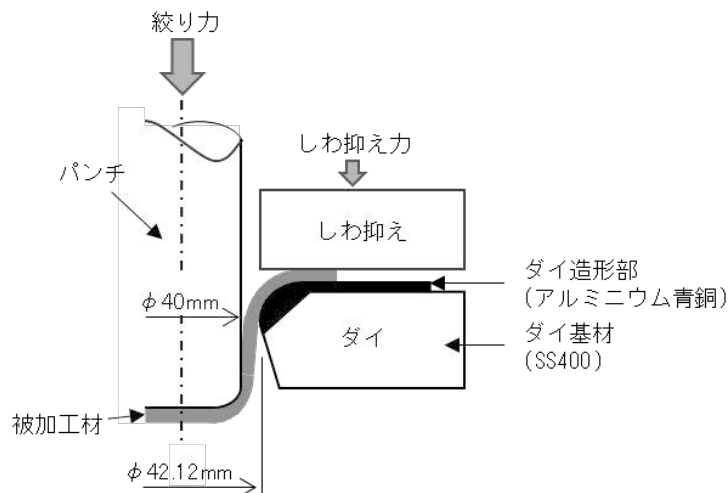
（例：SUS304）は加工硬化が大きく成形時に高い成形荷重を要するため、条件によっては型かじり・焼付きが発生しやすい⁴⁾。そのため、金型には耐焼付き性に優れるプレス金型用銅合金が適用される場合がある。そこで、アルミニウム青銅系造形材のプレス金型への適用性を検討するため、まず金型としての基礎指標である硬さの観点から汎用的なプレス金型用銅合金 A および B と比較した。

造形材、金型用銅合金、ならびに SUS304 展伸材の硬さの平均値および円筒絞り成形品の硬さを比較した結果を表 5 に示す。円筒絞り成形品については、各部で加工硬化の程度が異なるため、成形品断面各部における硬さの範囲を示した。

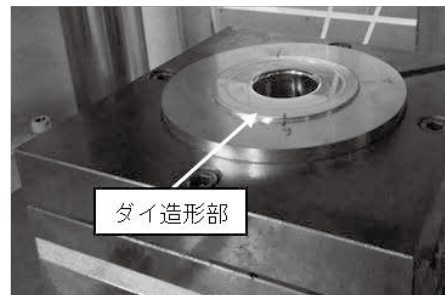
造形材は 35.9HRC(333HV0.5)の硬さを有しており、比較に用いた金型材と同等の水準であった。一方、SUS304 は、展伸材の硬さは 170 HV0.5 であるものの、円筒絞り成形品は加工硬化により最大で 380HV0.5 に達した。造形材と成形品の硬さを比較すると、成形品（最大 380HV0.5）に対して造形材(333HV0.5)は、数値上では下回る。しかし、金型の耐久性は硬さの絶対値だけで決まるものではなく、相手材との摺動特性や焼付きの起こりやすさに加え、表面性状および潤滑条件にも依存する。造形材は成形品より硬さが低いものの、市販のプレス金型

表 5 プレス金型用銅合金、造形材および SUS304 (成形品を含む)の硬さ

供試材			硬さ		備考
			ロックウェル	ビッカース	
			HRC	HV0.5	
アルミニウム青銅系		造形材	35.9	333	試験点数:ロックウェル3点, ビッカース7点
プレス金型用銅合金	A	鑄造材	37.3	378	
	B	鑄造材	37.6	324	
SUS304		展伸材	---	170	試験点数:7点 板厚:0.8mm
		円筒絞り成形品	---	264~380 (成形品各部の硬さ)	被成形材板厚:0.8mm 金型温度:常温 絞り比:2.0 潤滑:油性潤滑剤



(a) 金型の断面模式図



(b) ダイの外観

図 8 円筒絞り加工金型の断面模式図および製作したマルチマテリアル構造のダイの外観

用銅合金と同等の硬さを有することから、円筒絞り加工金型などのプレス金型への適用可能性があると考えられる。

一方で、技術的課題として、造形時の熱履歴に起因して造形部表面に引張残留応力が残存することが懸念される⁵⁾。例えば、円筒絞り加工金型のダイに適用した場合、成形時にダイ表面には被成形材の流動方向に引張応力が作用するため、残留応力と加算されて割れを生じるおそれがある。

以上を踏まえ、円筒絞り加工ダイを製作して円筒絞り加工試験を行い、適用可能性を検証した。

6.2 金型の造形および円筒絞り加工試験

図 8 に円筒絞り加工金型の断面模式図と製作したダイの外観を示す。ダイの基材には廉価な SS400 を用い、被成形材に接触するダイ表面に限定してアルミニウム青銅系を所定厚さで造形し、SS400／銅合金のマルチマテリアル構造とした。

被成形材を SUS304（板厚 0.8mm）として円筒絞り加工試験（金型温度：常温，絞り比：2.0，潤滑：油性潤滑剤）を行った。その結果、100 ショットの連続成形においても懸念された割れ

および焼付きは認められず、表面欠陥のない良好な成形品が得られた。

なお、本結果は 100 ショットの範囲での評価であり、より多くのショット数による耐久性評価は今後の課題である。以上より、少なくとも本条件において、アルミニウム青銅系造形材は円筒絞り加工金型への適用可能性を有することが示された。

7. 結 言

- (1) 高力黄銅系の造形材は、造形時の入熱により低沸点元素である Zn の著しい低下を確認した。成分変化を考慮した合金設計および入熱制御が重要である。
- (2) アルミニウム青銅系の造形材は、成分変化が小さく、添加元素由来の第二相による強化を安定して得やすい。アルミニウム青銅系は造形に適した材料である。
- (3) SS400／アルミニウム青銅系のマルチマテリアル構造のダイを用いた SUS304 の円筒絞り加工試験において 100 ショットの連続成形の範囲では、割れや焼付きを生じることはなかった。このことからプレス金型への適用可能性が示された。

参考文献

- 1) 森雅彦ほか, “AM 技術を通じた製造業の展望と取り組み”, AM フューチャー, vol.1, no.2 (2025), pp.243-246.
- 2) “JIS H 5120:2016 銅及び銅合金鋳物”, 一般財団法人日本規格協会
- 3) 本間梅夫ほか, “黄銅鋳物の標準性質および実体強さ”, 鋳物, 第 32 巻, 第 12 号(1960), pp.908-915.
- 4) 中村尚文ほか, “アルカリ可溶潤滑処理ステンレス鋼板のプレス成形性”, 日新製鋼技報, No.83 別冊(2002), pp.20-29.
- 5) 渡邊健太郎ほか, “Ti-6Al-4V 製レーザ肉盛部の X 線回折による残留応力評価”, SPring-8/SACLA 利用研究成果集, pp.246-252.

本報告は, 令和 7 年度コア技術高度化事業「金属 3D 堆積造形による高機能化技術の開発」における研究の一部をまとめたものである。

AI を活用した生産性向上の研究

長谷川 直樹* 大野 宏* 石澤 賢太*

Research on Productivity Improvement Using AI

HASEGAWA Naoki*, OHNO Hiroshi* and ISHIZAWA Kenta*

抄 録

コア技術高度化事業として、AI（人工知能）を活用した製造業の生産性向上に関する調査・研究に取り組んだ。外観検査自動化のための画像解析技術として、AI による不良品画像自動生成、視覚言語モデルの追加学習による不良判別の研究を行った。また、生成 AI の製造現場活用として、生産スケジュールの最適化、ノーコードツール活用手法について研究を行った結果を報告する。

1. 緒 言

AI（人工知能）の製造現場への活用は、人手不足対策、技能伝承、属人化解消に有効であり、企業の関心も高いが、技術習得が難しく、活用手法が確立されていない。近年、生成 AI の急速な発展により、様々なソリューションが提案されているが、製造現場への適用に際しては、現場特有の制約や要求条件などにより、解決すべき課題が多い。一方、当所はこれまで共同研究や技術支援を通じ、多くのテーマで AI の活用に取り組んでおり、さらに関連技術の調査・研究を進め、AI を活用した製造現場の生産性向上に関する技術シーズを確立することが本研究の目的である。

本稿では、画像解析技術として、AI の学習に使用する不良品画像の自動生成と視覚言語モデルのファインチューニングによる不良判別について、また、生成 AI の製造現場活用として、生産スケジュールの最適化とノーコードツールの活用について取り組んだ結果を報告する。

2. 外観検査自動化のための画像解析技術

2.1 不良品画像の自動生成

外観検査は品質保証に不可欠であり、当所では検査対象に応じて画像処理プログラムを作成

し、自動で外観検査を行うシステムの研究開発を行ってきた。10 年ほど前からは AI の発展によりディープラーニングを使い、良品・不良品の判別を行う方法に取り組んできたが、新潟県内で盛んな金属製品の検査では、不良品データの収集が難しいため、分類学習が困難な場合が多い。その解決策として、少量の欠陥データを基に画像生成 AI によって疑似的に不良データを大量に生成し、検査モデルの学習データに用いる方法がある。

本研究では、Stable Diffusion¹⁾を用いて疑似不良品画像を生成した。Stable Diffusion で使われている拡散モデルは、まず「きれいな画像」に少しずつノイズを加えて、最後はほぼ砂嵐の状態にしてから、その逆向きに「ノイズから元画像を復元する方法」を学習する。画像生成するときは、最初にランダムなノイズ画像を用意し、AI がノイズを少しずつ取り除きながら形や色を整えていき、途中で文章の指示を手がかりにして、望む内容の画像へ誘導し生成する。今回の検証では、少量のデータを用いてファインチューニングを行う LoRA²⁾ (Low-Rank Adaptation) を用いた。この手法は、大きなサイズのモデルにアダプタと呼ばれるネットワーク層を追加し、もとのパラメータは凍結し、追加したアダプタ部分だけを学習する。そのため、学習すべきパ

* 技術統括センター

ラメータ数が大幅に削減され、大容量の GPU がなくてもファインチューニングが可能になる。

2.2 視覚言語モデルの活用

視覚言語モデル (VLM : Vision Language Model) は、画像・動画等の視覚情報とテキスト等の言語を関連付け、両者を理解・生成する AI モデルである。ここでは、VLM として、画像とテキストを組み合わせた高度な対話や分析が可能なマルチモーダル AI モデルで幅広い機能と応用性を備えている LLaVA³⁾(Large Language and Vision Assistant) に着目した。LLaVA は、製品の外観検査や不良品の検出において、人間の目では見落としがちな微細な欠陥も正確に検出することができる⁴⁾とされている。

画像と質問文を VLM に渡すと回答文が出力される。この方法を活用し、外観検査の自動化のための良品・不良品判定及び不良種類の判別に取り組んだ。

2.3 ファインチューニングによる不良判定

LLaVA のモデルをファインチューニングし、チューニングガム画像の不良判別を行った。対象データセットは、VisA⁵⁾(Visual Anomaly dataset) の Chewinggum を使用した。良品画像 503 枚、不良画像 100 枚からなり、不良画像は、図 1 のようにシミ、欠け、穴、キズの 4 種類の不良が予めラベル付けされている。データセットの前処理は、文献⁶⁾を参考にし、学習用、評価用のデータセットを作成した。

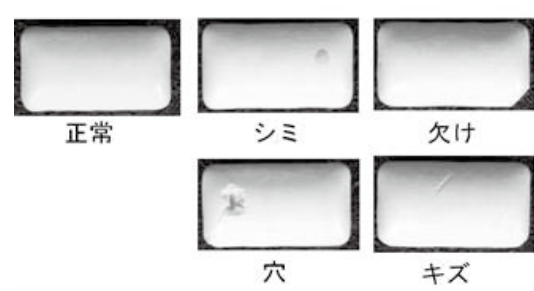


図 1 Chewinggum の不良画像

表1 ファインチューニングの設定

モデル	Pre-Trained Weights: llava-v1.5-7b
学習データ	良品493枚, 不良各10枚程度を計328枚に拡張
評価データ	良品10枚, 不良各2~4枚, 合計22枚
プロンプト	<image>\n You are a classifier. Output only one token: normal, similar colour spot, ..., scratches.

ファインチューニングの諸条件を表 1 に示す。学習に利用できる不良画像が少ないため、不良画像を複数回使用し、不良が全学習データの 4 割になるように拡張した。前記 LoRA と、学習を高速化し効率的に処理するための DeepSpeed を使用した⁷⁾。ここでのポイントは学習時に設定するプロンプトであった。自然言語を回答する VLM にクラス判定を行わせるため、classifier であること、一単語だけ回答させることを明示する必要があった。また、ソースコードを修正し、学習中に途中の評価結果を計算する機能を追加した。学習過程の予測誤差、予測精度の推

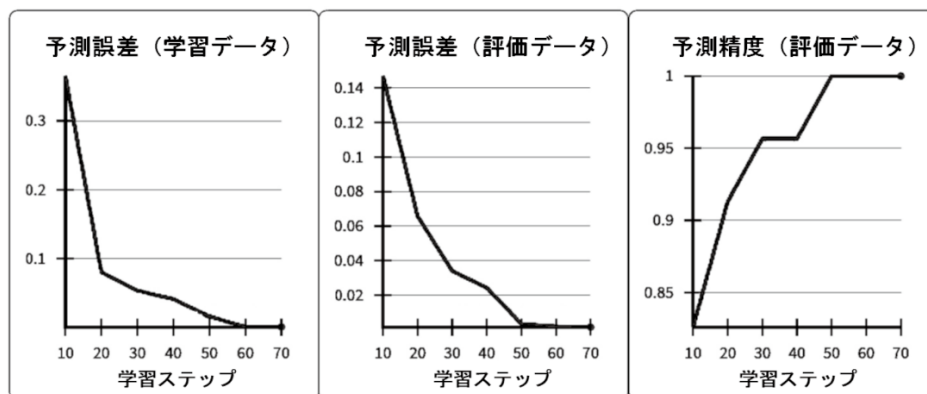


図 2 学習過程

移を図2に示す。評価データによる予測精度は100%であった。また、2.1 節と同様に自動生成した不良品画像を用いてデータ拡張し、ファインチューニングを行う方法についても有効性を確認した。

3. 生成 AI の製造現場への適用
3.1 生産スケジュールの最適化

生成 AI の性能向上に伴い、DX 推進に取り組んでいる企業から生産スケジュール最適化に関する相談が増えている。生産スケジュールの作成は依然として属人化が残り、市販ソフトがあるものの導入障壁が高い。

生産計画の中核は、一般的にデータ整備と数理最適化で実現する。生成 AI・AI エージェントは、マスタ整備支援、欠損・矛盾データの検出、入力作業の半自動化といった前工程の効率化で効果が出やすく、最適化のコア部分は数理最適化が使われている。市販ソフトの導入は高機能なために使いこなしが難しいだけでなく、使える人が限られるため、属人化する傾向にあり、コストも高い。そこで、Python を使った自社業務適合型の段階導入が推奨されている。多品種・現場制約など固有条件への適合性が高い、不要機能を排し、投資対効果を明確化できる、利用者を限定しない運用設計（現場定着）にしやすいなどの特徴がある。

Google が提供している最適化ツールである「OR-tools」を使い、簡単な条件で最適な生産スケジュールを作成できるか試みた。図 3 に示す条件で、早く生産が完了し、工程の変更回数をできるだけ少なくするよう生産スケジ

- ①製品 P1 を 10 個、P2 を 15 個作る。
②製品 P1 の工程は A（所要時間 20 分）、次が B（20 分）、最後が C（20 分）で、製品 P2 の工程は A（20 分）、次が B（20 分）で、順番を厳守して加工する。
③作業者は 3 人で、W1 は工程 A が、W2 は工程 A と B が、W3 は工程 A と B と C が可能である。
④装置は 3 台で、M1 は工程 A を、M2 は工程 A と B を、M3 は工程 A と B と C を加工できる。
⑤段取り替えと加工品の移動時間はゼロで計算する。

図 3 生産スケジュール作成の条件

ュールを作る Python プログラムを作成した。結果を図 4 に示す。この図の縦軸は作業者 W1～W3 を、横軸は時間を示し、1 コマ 20 分で生産時間は 420 分と最適な結果が得られた。また、P1-1-A は、製品 P1 の 1 個目の A 工程を意味する。一方、段取り替えの回数は 3 回と最適な値ではなかったため、手作業により 2 回に減らした。

3.2 ノーコードツールの活用

当所のこれまでの生成 AI 活用の研究では、Python でプログラミングしていたが、言語習得の壁が高いことが課題であった。一方、最近は無コードで生成 AI アプリを開発するツールが普及している。

Dify[®]（ディファイ）は、生成 AI アプリを容易に作成して運用できるプラットフォームである。公式ドキュメントでは、Dify を「オープンソースの Agentic Workflow 構築基盤」と位置づけ、視覚的なフロー設計、既存ツール、データ接続、デプロイまでを統合している点

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
W1	P1-1-A	P1-2-A	P1-3-A	P1-4-A	P1-5-A	P1-6-A	P1-7-A	P1-8-A	P1-9-A	P1-10-A	P2-3-A	P2-4-A	P2-5-A	P2-7-A	P2-9-A	P2-11-A	P2-12-A	P2-13-A	P2-14-A	P2-15-A	
W2		P1-1-B	P1-2-B	P1-3-B	P1-4-B	P1-5-B	P1-6-B	P1-7-B	P1-8-B	P1-9-B	P1-10-B	P2-1-B	P2-2-B	P2-3-B	P2-4-B	P2-5-B	P2-7-B	P2-9-B	P2-11-B	P2-13-B	P2-15-B
W3	P2-1-A	P2-2-A	P2-6-A	P2-8-A	P2-10-A	P1-1-C	P1-2-C	P1-3-C	P1-4-C	P1-5-C	P1-6-C	P1-7-C	P1-8-C	P1-9-C	P1-10-C	P2-6-B	P2-8-B	P2-10-B	P2-12-B	P2-14-B	

図 4 最適化された生産スケジュール（段取り替え：黒地に白抜き）

が特徴である。チャットボット，エージェント，ワークフロー，チャットフローなどを視覚的に容易に構築できる。また，言語モデルも選択でき，情報漏洩の心配のないローカル環境に構築することも可能である。しかし，Python でシステムを作る場合に比べて，細かいカスタマイズに限界がある，非常に大きいデータを扱う場合は不向きである，完全ノーコードとはいえない（時々Python の知識が必要）等の課題もある。

4. 県内企業の状況

新潟県は経済産業省が実施している DX 認定制度への申請支援事業に取り組んでおり，DX 推進に取り組む県内企業も増えている。

生成 AI の活用では，プログラミング，調査，技術的な相談（壁打ち）などに利用する企業は増えているが，AI エージェントの活用による業務の自動化・省力化に取り組む企業は少ない。その要因として，IT 関連以外の企業ではこれらで何ができるのかよく分からないこと，システムを自社で開発するには Python を習得する必要があることが壁になっている。

当所では，ノーコードツールの普及が鍵になると考え，Dify の講習会や生成 AI 活用の講演会を開催した。その中で，業務の自動化・省力化に生成 AI を活用したいとの相談があり，今後，共同研究事業等で支援していく予定である。

5. 結 言

(1) AI による不良品画像自動生成，視覚言語モ

デルの追加学習による不良判別の研究を行い，有効性を確認した。

(2) 生産スケジュールの最適化，ノーコードツール活用について調査・研究を行い，生成 AI の活用手法を検討した。

(3) 県内企業のニーズを調査し，今後の支援の方向性を確認した。

参考文献

- 1) Robin Rombach, et al, “High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models”, arXiv pre-print arXiv:2112.10752, 2022.
- 2) Edward J.Hu, et al, “Lora:Low-rank adaptation of large language models”, arXiv preprint arXiv:2106.09685, 2021.
- 3) LLaVA: Large Language and Vision Assistant, <https://github.com/haotian-liu/LLaVA>, (閲覧 2026-2-10).
- 4) LLaVA とは？アーキテクチャ・特徴・マルチモーダル競合との比較を徹底解説！, <https://ai-market.jp/services/llava/>, (閲覧 2026-2-10).
- 5) Visual Anomaly (VisA): <https://registry.opendata.aws/visa/>, (閲覧 2025-10-10).
- 6) 進藤佑樹, “第 4 部 生成 AI を活用したデータ拡張による異常分類モデルの精度検証”, インターフェース, 2025 年 3 月号 (2025), pp.79-93.
- 7) How to Fine-Tune LLaVA on a Custom Dataset, <https://wandb.ai/byyoung3/ml-news/reports/How-to-Fine-Tune-LLava-on-a-Custom-Dataset--Vmlldzo2NjUwNTc1>, (閲覧 2026-2-10).
- 8) Dify, <https://dify.ai/jp>, (閲覧 2026-2-26).

ロボットの高度制御技術の開発

木嶋 祐太* 高橋 靖* 長谷川 直樹*

Development of AI-Enabled Autonomous Robot Control Technologies

KIJIMA Yuta*, TAKAHASHI Yasushi* and HASEGAWA Naoki*

抄 録

本研究は専門的なプログラム無しで自律的に動作し、製造工程の自動化を実現するロボットの開発を目的としている。本研究では、ロボットに求められる AI 技術の調査および AI エージェントによるロボットの制御、模倣学習によるロボット行動生成モデルの学習について実施した内容を紹介する。

1. 緒 言

国内製造業は就労人口の減少や高齢化へ対応しながら生産性を向上することが求められている。解決の手段として、画像処理や AI と連携した高度なロボットの制御技術が注目されている。

ロボットを制御するためにはプログラムを作成する必要があるが、現在、ノーコードツールなどによりそのハードルは下がっているが、最新の AI 技術を用いることで、さらに運用が容易になり、導入障壁を低くすることが期待できる。本研究は専門的なプログラム無しで自律的に動作し、製造工程の自動化を実現するロボットの高度制御技術について検討した。

通信手段を持たないロボット同士の連携への音声の活用、といった事例が報告されている。

2.2 基盤モデル、物理 AI

基盤モデルは大量の画像・言語・行動データから汎用的な知識や判断能力を学習し、環境変化への柔軟な対応を可能にしたモデルであり、物理 AI は、センサで観測された実世界の状態を入力とし、物理法則・機構制約・時間連続性を前提に、行動や制御量を生成するモデルである。これらを組み合わせることで、教示や再設計の負担を減らした高度なロボットの実現が期待されている。

2. AI 技術の調査

2.1 生成 AI, AI エージェント

近年急速に普及している生成 AI や AI エージェントは、ロボット制御において、環境理解、作業手順の自動生成、状況に応じた行動選択を担う知能層として機能することで、従来の制御則やルールベースを補完し、人の意図を柔軟に反映した自律的なロボット動作の実現につながることが期待されている。VLM (Vision Language Model) と呼ばれる画像と言語に対応したモデルによるロボットの周辺環境認識、複数のロボット群の統括への AI エージェントの応用、

3. ロボットの高度制御技術の開発

3.1 AI エージェントによるロボットの制御

AI エージェントは、目標を与えると、状況を観測・判断し、必要な行動を自律的に選択・実行する AI のことである。対話、計画、ツール操作、他システムとの連携を通じて、単なる回答に留まらず、タスクを継続的に遂行する点が特徴である。本研究では AI エージェントがロボットを制御するシステムを試作した。

ロボットを動作させるツール、画像を取得するツール、画像と物体の名前から物体の位置を取得するツールの 3 つを定義した。AI エージェントはこれらのツールを使用してタスクを実行

* 技術統括センター

する。例えば「キューブを持ち上げる」というタスクが与えられたら、AI エージェントは、各ツールを使用し表 1 の順番で実行する。対話によりタスクを遂行することもあり、複数の物体が見つかった場合にはどの物体を持ち上げるかを指示者に聞く。

図 1 に示す RGB-D カメラとロボットからなるデモ装置を作成した。RGB-D カメラは Intel 社製 RealSense D405i を、ロボットは RT Corporation 製 CRANE+V2 を使用した。デモ装置では RGB-D カメラとロボットの座標系を合わせるため AR マーカーを使用した。図 1 に示すキューブ、テープ、消しゴムを検出する物体とした。物体をランダムに配置して、表 2 に示すタスクをそれぞれ 12 回ずつ実施した。X のみのタスクは 3 種類の物体を 4 回ずつ、X と Y があるタスクは 6 通りの組み合わせを 2 回ずつである。表 2 に結果を示すが、失敗はすべて物体の位置を取得するツールのミスが原因であった。

重さを測るタスクではデジタルのキッチンばかりを用いた。システムは画像を取得できるため、物体を乗せた後に撮影した画像を AI エージェントが解析し数値を読み取ることができる。ネットワークに接続できる機器でなくても結果を画像で読める機器はシステムに活用できることがわかった。

3.2 模倣学習によるロボット行動生成モデルの学習

物理 AI に活用されることが想定されるロボッ

表 1 「キューブを持ち上げる」の実行手順

1	ロボットを動作させるツールで、ロボットを撮影の邪魔にならない姿勢に移動。
2	画像を取得するツールで、環境を撮影。
3	物体の位置を取得するツールで、画像からキューブの位置を取得。
4	ロボットを動作させるツールで、ロボットにキューブを把持。
5	ロボットを動作させるツールで、キューブを持ち上げ。
6	「キューブを持ち上げました」と回答。

ト行動生成モデルである ACT(Action Chunking Transformer)¹⁾および GR00T²⁾を模倣学習により学習し、動作実験を実施した。模倣学習とは、人の操作データをもとにロボットの制御を学習する手法である。

ACT および GR00T は、画像、関節角、言語プロンプト（言語プロンプトは GR00T のみ）を入力とし、複数ステップ分の関節指令列を出力するロボット行動生成モデルである。ACT は、行動を一定区間ごとにまとめて生成するチャンク構造を採用し、過去の流れを考慮しながら行動を生成する。さらに潜在変数により行動のばらつきも表現できるため、予測で生じる誤差の累積を抑え、複雑で揺らぎのある操作タスクに適しているという特徴を持つ。GR00T は、大規模な視覚と言語データを事前学習した基盤モデルを基に、ロボットの観測情報から直接行動を生成するモデルである。多様な環境やタスクに対して汎用的に適応するために、少量の追加データによる微調整が想定されている。

図 2 に示すデモ装置を作成し、ロボットがキューブを収納場所に運ぶタスクを実験した。画像を撮影するためのカメラはカメラ 1 とカメラ



図 1 AI エージェントデモ装置

表 2 AI エージェントでの実施タスクと結果

タスク	結果 (成功率)
Xを持ち上げる	11/12回成功 (92%)
XをYの上に乗せる	9/12回成功 (75%)
Xの重さを測る	8/12回成功 (67%)

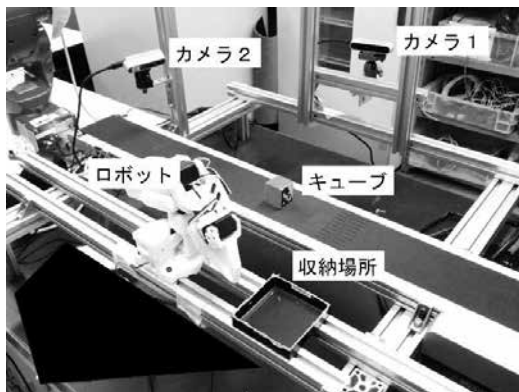


図2 ロボット行動生成モデルのデモ装置

2 の位置に配置した。カメラ 1 は Intel 社製 RealSense D415i を、カメラ 2 は Intel 社製 RealSense D435i を使用した。ロボットは LeRobot³⁾プロジェクトが公開しているオープンソースロボット SO-101 を使用した。人間がロボットを操作して、キューブを収納場所に運ぶ動作を 250 回行い学習データを作成した。学習データの作成条件を表 3 に示す。

図 3 に示す●位置の 9 か所にキューブを配置して、カメラ 1 に対して正対および斜めの 2 条件でキューブを収納場所に運ぶテストを実施した。テストの結果を表 4 に示す。タスクは極めて単純であるが、どちらのモデルも成功率が高いとは言えなかった。

4. 結 言

- (1) AI 技術を調査し、AI エージェント、物理 AI といった技術のロボット制御への応用が期待されていることがわかった。
- (2) AI エージェントにより、ツールを定義することで、人が与えたタスクを解釈し、自律的にロボットが動作するシステムが開発できることを確認した。
- (3) プログラミングをせずに、ロボット行動生成モデルを模倣学習し、ロボットを自律的

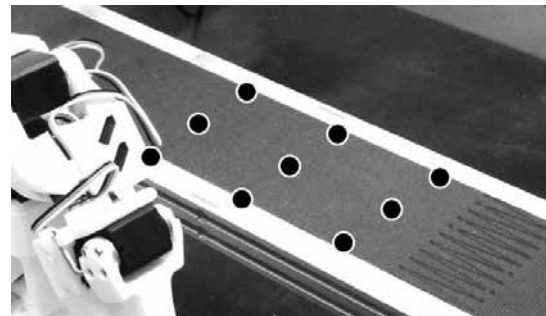


図3 テストのキューブの配置位置

表 3 学習データの作成条件

データ数	250
画像サイズ	320×240
サンプリングレート	10 Hz
ロボットの関節角数 (グリップも含む)	6
GR00T の学習に用いたテキスト指示	Pick up the yellow cube and move it to the specified fixed location on the workspace.

表 4 ロボット行動生成モデルのテスト結果

ロボット行動生成モデル	結果 (成功率)
ACT	11/18回成功 (61%)
GR00T	9/18回成功 (50%)

に動作させた。多くの学習データが必要な割に、タスクの成功率は高くなかった。

- (4) 物理 AI の活用を見据えて、シミュレーターによるデータ生成などの手段でロボット行動生成モデルのタスク成功率を向上する研究を今後実施する。

参考文献

- 1) tonyzhaozh act, <https://github.com/tonyzhaozh/act>, (閲覧 2026-2-13)。
- 2) NVIDIA Isaac-GR00T, <https://github.com/NVIDIA/Isaac-GR00T>, (閲覧 2026-2-13)。
- 3) LeRobot, <https://github.com/huggingface/lerobot>, (閲覧 2026-2-13)。

MA-SPS による機能性硬質材料に関する研究

中川 昌幸* 永井 智裕* 遠藤 桂一郎*
林 成実* 近 正道** 森田 渉***

Study on Functionally Enhanced High-Hardness Composite.

NAKAGAWA Masayuki*, NAGAI Tomohiro*, ENDO Keiichiro*,
HAYASHI Narumi*, CHIKA Masamichi** and MORITA Wataru***

抄 録

本研究では、メカニカルアロイングー通電加圧焼結（以下 MA-SPS）法を用いて、TiB₂ と Ni の複合化を検討し、2200HV の緻密な焼結体が得られた。また、青銅系銅合金の切削屑をポットミルで予備粉砕した後 TiB₂ と混合して MA-SPS 法により複合化した結果、断面硬さが 530HV の緻密な焼結体が得られた。

1. 緒 言

本研究は、工業技術総合研究所におけるコア技術研究として、「材料・サステナビリティ技術」分野に該当するテーマに位置付けられている¹⁾。

研究対象として、産業の基盤技術である切削や塑性加工に用いられる工具や金型の耐久性向上を目指した硬質材料の開発を検討した。金型、工具の耐久性向上は高付加価値化につながるだけでなく、段取り替えにかかる人件費削減など低コスト化にも直結するため、企業における競争力向上につながるものである。

我々は、硬質材料として TiB₂ を用いた焼結複合材を検討してきた²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。TiB₂ はホウ化物セラミックスであり、モース硬度がタングステンカーバイド（以下 WC）と同等以上と非常に硬く、熱伝導性、電気伝導性が金属とセラミックスとの中間程度という特徴的な物性を持っている。また、比重は 4.4g/cm³ で WC の 15.63g/cm³ と比べると非常に小さく、これらの性質から超硬合金における WC の置き換えや軽量の硬質・耐摩耗材料としての活用が期待され

ている。本研究では、この TiB₂ と Ni を用いた MA-SPS 焼結による複合化を検討した。

もう一つの研究対象として、「サステナブル」な材料開発として、Cu 合金切削屑のリサイクル技術を検討した。Cu 合金は鋳造品を切削し、水道配管や継ぎ手などに多く用いられる。このような部品の製造時に切削屑が生成されるが、廃材は溶解・精錬・成分調整により再生材として利用される。本研究では通常用いられるプロセスである溶解・精錬を介さず、脱炭素に資するアップサイクル法として青銅系鋳物材料の切削屑をポットミルで予備粉砕して、MA により TiB₂ 粉末と混合、混錬した後、SPS 焼結を試みた。

本報では、MA-SPS プロセスを用い、TiB₂-Ni 硬質材料および、青銅系銅合金切削屑と TiB₂ の複合化について検討した結果を報告する。

2. MA-SPS による TiB₂-Ni 複合材の検討

2.1 供試材および実験方法

供試材には(株)高純度化学研究所製の TiB₂、Ni 粉末を使用した。それぞれ粒径は 2~3μm である。TiB₂ と Ni の配合比は重量比で 3:1 とし、総量 6g の粉末を用意した。MA は(株)フリッチュジャパン製遊星型ボールミル PL-7を使用した。

* 技術統括センター

** 上越技術支援センター

*** 素材応用技術支援センター

表 1 供試材

サンプル	供試材		
	粉末配合比		
	TiB ₂	Ni	計
A	0.75	0.25	1.00
B			
C			

表 2 MA 条件

MA条件				
サンプル	回転速度 [rpm]	加工時間[min]		サンプル： ボール比
		TiB2のみ	TiB2 + Ni	
A	720	0	1方向15min	1:46
B		0	リバース5min x 3	
C		リバース5min x 2	リバース5min x 3	

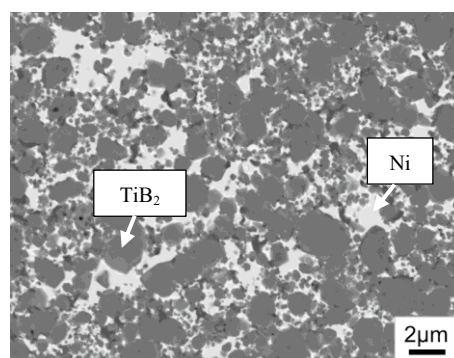
供試材粉末の配合比を表 1 に、MA 条件を表 2 にそれぞれ示す。MA の効果を比較するため、条件の異なる 3 つの MA 粉末を作製した。TiB₂ と Ni の混合粉末の MA 時間は 15min とし、条件 A は回転方向を一定、条件 B は 5min ごとに回転方向を 2 回反転させた。また、条件 C は B と同様に 5min ごとに 2 回反転させたが、その前処理として TiB₂ のみ 5min で 1 回反転させ、計 10min の MA を行った。

使用した SPS 焼結機は(株)シンターランド製 LaBOX-110 である。焼結条件は焼結温度 1080℃、保持時間 5min、加圧は 30MPa とした。

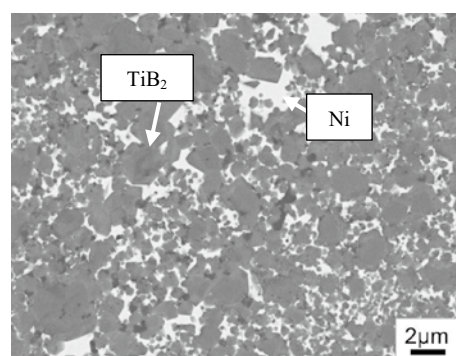
焼結体の硬さは、(株)ビューラー製マイクロビッカース硬度計 VH1102 を用いて測定した。また、断面組織観察には、JEOL 製電界放出形走査電子顕微鏡 JSM-7800FP を用いた。

2.2 結果と考察

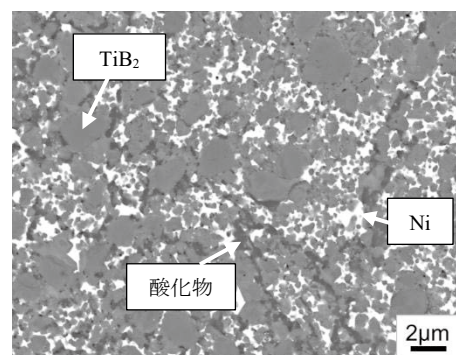
各サンプル断面の反射電子像を図 1 の(a)～(c)に示す。濃いグレーの粒子は TiB₂ で、その周辺の明るいコントラストが Ni である。また、1μm 程度以下の微細な黒い粒子が見られる。より暗いコントラストのため、生成した酸化物と考えられる。いずれのサンプルも TiB₂ の粒径は



(a) A



(b) B



(c) C

図 1 焼結体断面の反射電子像

ほぼ原料粉末と同等の 2～3μm のものと、それらの粒子間にさらに細かい 1μm 以下の粒子が分散している。分散状態を比較すると C がより一様な分散となっており、A は TiB₂ および Ni の集中がみられ最も不均一な分散状態と考えられる。MA 条件において A、B は処理時間が同一だが、A では 1 方向に 15min 処理するのに対し、B では 5min ごとに反転し、計 15min の処理となる。MA 処理において回転方向の反転は、材料の混錬をより効率的にする効果があると考えられる。

焼結体断面の硬さ試験の結果を図 2 に示す。

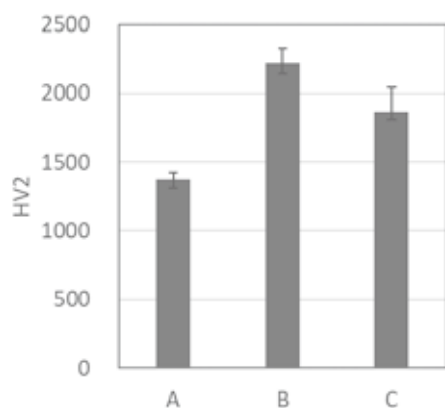


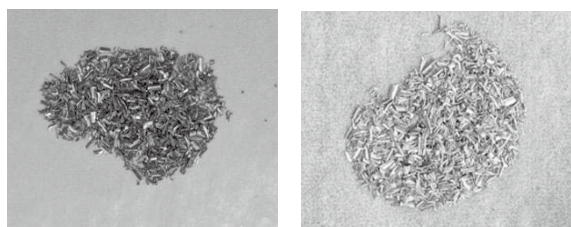
図2 焼結体断面の硬さ (HV2)

MAによる微視組織の均一性はA, B, Cの順に良好となったが、硬さはBが最も硬く2200HV2と非常に硬い焼結体が得られた。Cの微視組織は最も均一な分散状態と思われるが、硬さがBよりも低い理由として生成した酸化物の影響が考えられる。図1より微細な黒い粒子状のコントラストはCにおいて最も多く、 TiB_2 粒子の界面に分布する傾向が見られる。この微細な酸化物が TiB_2 の界面強度を低下させ、結果として硬さが低下したと推測される。

3. 青銅系銅合金切削屑と TiB_2 の複合化の検討

3.1 供試材および実験方法

使用した青銅鋳物の切削屑の外観を図3(a)に、これをエタノール洗浄した外観を図3(b)に示す。切削屑表面には使用したクーラントの残留や加工熱による酸化物などの付着により茶黒色だが、



(a) 入手状態 (b) エタノール洗浄後

図3 切削屑の外観

表3 ポットミル予備粉碎条件

ポットミル予備粉碎条件		
回転速度 [rpm]	加工時間 [Hr]	サンプル： ボール比
150	6	1:54

表4 MA条件

MA条件		
回転速度 [rpm]	加工時間 [min]	サンプル： ボール比
720	リバース3min x 5	1:17

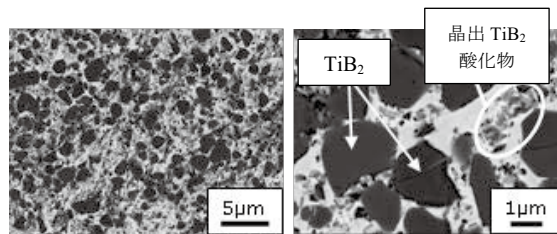
エタノール洗浄により金属光沢を呈しており、付着物はある程度除去されたと考えられる。

エタノール洗浄後の切削屑を予備粉碎としてボールミルで加工後、 TiB_2 粉末を加え、遊星回転ボールミルにより複合化粉末を作製した。粉碎媒体として、ポットミルでは $\phi 20\text{mm}$ のジルコニアボールを20個/容器、遊星回転ボールミルでは、 $\phi 6\text{mm}$ のジルコニアボールを40個/容器使用した。Cuと TiB_2 は重量比で55:45の割合とした。各工程の処理条件を表3, 4に示す。

使用した機器、評価は前述の2.1節と同様である。焼結条件は焼結温度 980°C 、保持時間5min、加圧は30MPaとした。

3.2 結果と考察

焼結体断面の反射電子像を図4に示す。黒い粒子状に見えるのが TiB_2 でその周辺の明るいコントラストは青銅(Cu-Sn系)の成分である。 TiB_2 の1次粒子(2~3 μm)の周辺に液相に溶解



(a) x3000 (b) x12000

図4 焼結体断面の反射電子像

し、晶出した $1\mu\text{m}$ 以下の超微細な TiB_2 粒子の分散と同様なサイズの介在物が見られる。介在物はポットミル、MA の際に残留した酸化物やその他コンタミと考えられる。

この焼結体の断面硬さは 530HV 程度であり、素材硬さ 100HV 以下程度と比較すると 5 倍以上の硬さとなった。これは TiB_2 の分散強化によるものであると考えられる。すなわち、MA-SPS 法を用いて TiB_2 を複合化させることにより、銅合金切削屑の機械的性質を向上させた再生材の可能性が確認された。

4. 結 言

工業技術総合研究所における「材料・サステナビリティ技術」分野におけるコア技術研究として、 TiB_2 を複合化した機能性硬質材料について検討してきた。本報では、 TiB_2 -Ni 複合材および銅合金切削屑と TiB_2 の複合化について紹介した。以下に結果をまとめる。

- (1) MA-SPS による TiB_2 と Ni を検討し、1 方向の回転で MA を 15min 行うよりも 5min ごとに反転させて 15min 実施した方が焼結体における分散状態がより一様となり、断面硬さが 1400HV から 2200HV に向上した。
- (2) TiB_2 と Ni を混合して MA を行う前に TiB_2 のみを MA した場合、焼結体断面の硬さは低下し 1800HV 程度となった。断面微視組織観察から、生成した微細な酸化物の影響と推測される。

- (3) 青銅系銅合金の切削屑をポットミルで予備破碎した後、 TiB_2 と混合して、MA-SPS 法を行ったところ、断面硬さが素材に対し 5 倍以上となる 530HV の焼結体が得られた。銅合金切削屑の TiB_2 との複合化によるアップサイクル材料の可能性が示された。

参考文献

- 1) 新潟県工業技術総合研究所 コア技術高度化事業, <https://www.pref.niigata.lg.jp/site/iri/core-technology.html>, (閲覧 2026 -3-18).
- 2) 中川他, MA-SPS による TiB_2 系硬質材料の開発, 金属, Vol.95, No.7 (2025), pp.18-23.
- 3) 中川, MA-SPS による Ni, W と TiB_2 の複合化による 高硬度高靱性材料の開発, 公益財団法人天田財団 助成研究成果報告書, Vol.38 (2025), pp.216-219.
- 4) 遠藤他, MA-SPS による TiB_2 系硬質焼結体の検討, JSPM 粉体粉末冶金協会 2024 年度秋季大会 (第 134 回講演大会) 概要集 (2024), p.175.
- 5) 永井他, MA-SPS プロセスを適用した TiB_2 -Ni 系硬質材料の機械的性質向上に関する検討, JSPM 粉体粉末冶金協会 2025 年度秋季大会 (第 135 回講演大会) 概要集 (2025), p.95.
- 6) 近他, MA-SPS による TiB_2 -Ni-W 系複合材料の結晶相と機械的性質の関連性, 令和 7 年度日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部 連合講演会概要集 (2025), p.70.

Ⅱ 共同研究

鍛造加工における CAE・AI を使った 技能継承に向けた DX の取組

片山 聡* 大川原 真** 木嶋 祐太* 櫻井 貴文* 須貝 裕之* 田辺 寛*
兼古 敦史*** 星野 勝亮*** 小林 龍雄*** 岸本 成人*** 原 知弘***

A Study on Digital Transformation for Skill Inheritance in Forging Process using CAE and AI

KATAYAMA Satoshi*, OKAWARA Makoto**, KIJIMA Yuuta*, SAKURAI Takafumi*,
SUGAI Hiroyuki*, TANABE Hiroshi*, KANEKO Atsushi***, HOSHINO Katsuaki***,
KOBAYASHI Tatsuo***, KISHIMOTO Shigeto*** and HARA Tomohiro***

抄 録

鍛造加工分野における技能継承を推進するため、CAE 技術による加工プロセスのデジタル化と機械学習を用いたデータ分析による暗黙知の形式知化に取り組んだ。本報告書では研究成果の一例として、(1)加工素材の材料パラメーター同定におけるデータ分析事例と、(2)AI 技術を用いたシミュレーション結果の予測事例について報告する。(1)では材料パラメーターと摩擦係数を同時に同定可能なサロゲートモデルを作成し、同定結果を用いたシミュレーションが実際の挙動とよく一致することを確認した。(2)ではシミュレーション結果を教師データとすることで、変形後の塑性ひずみ分布図を予測（出力）可能な機械学習モデルを作成することができた。

1. 緒 言

製造業においては、熟練技能者の経験に基づく勘やコツ（暗黙知）の継承が喫緊の課題となっている。鍛造加工をはじめとする塑性加工分野では、加工中に発生する音や振動をもとに加工条件の調整や予知保全が行われることが多く、その形式知化のため、近年では IoT（Internet of Things：モノのインターネット）技術を用いた加工情報の収集や、AI（Artificial Intelligence：人工知能）技術を用いた加工機の自律制御化に関する研究が行われている¹⁾²⁾。また、どの手順で加工するのが最適であるかといった工程設計技術についても自動化が進められている³⁾。

本研究では県内企業の技能伝承を推進することを目的に、作業工具の鍛造加工における暗黙知の形式知化（可視化）に取り組んだ。具体的

には、CAE (Computer Aided Engineering) 技術による加工情報のデジタル化と機械学習を用いたデータ分析により、鍛造加工結果に影響を及ぼす材料パラメーターや加工条件因子を特定した。また、AI 技術による最適加工条件の自動探索手法について調査・検証した。

本報告書では研究成果のうち、加工素材の材料パラメーター同定におけるデータ分析事例と、AI 技術を用いたシミュレーション結果の予測事例について報告する。

2. 材料パラメーター同定におけるデータ分析

2.1 概要

CAE 技術において、使用する材料モデルの正確さはシミュレーション精度に大きな影響を及ぼす要因のひとつとなっている。材料モデルの塑性挙動は、強度試験によって取得された応力-ひずみ曲線や、それを近似した関数によって定義される。強度試験には単軸引張試験や圧縮試験が用いられることが多いが、単軸引張試験

* 技術統括センター

** 県央技術支援センター

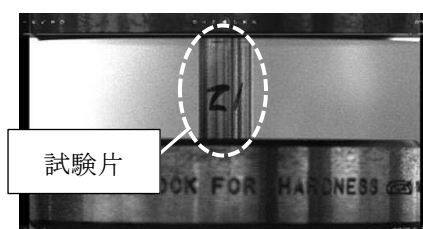
*** アネックスツール(株)

の適用範囲は一樣伸び限界（最大公称応力が生じる伸び）までであり⁴⁾、100%を超えるような大ひずみが生じる鍛造加工へ試験結果を適用するのは適切ではないと考えられる。一方、圧縮試験は実際の鍛造加工に近いひずみ域での試験が可能であるが、摩擦係数が大きい場合には高さ方向に樽型変形が生じ、単軸応力状態ではなくなくなるという問題がある⁵⁾。そのため、圧縮試験から応力-ひずみ曲線を得る場合には、摩擦係数の影響を考慮する必要がある。

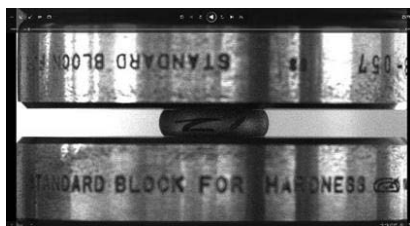
そこで本研究では圧縮試験を対象に、逆解析による材料パラメーターと摩擦係数の同時同定を試みた。併せて、それぞれの値が圧縮試験結果に及ぼす影響について分析した。

2.2 圧縮試験

圧縮試験の様子を図 1 に示す。試験機には(株)島津製作所製万能材料試験機 UH-F500kNC を用いた。試験片は素材形状（丸棒）のまま使用し、端面は円筒面と同等の表面状態に仕上げた。試験片直径に対する高さの比は約 1.7、圧縮率（試験ストローク÷初期高さ）は 80%とした。また、試験片の端面は拘束せず、脱脂後、無潤滑で試験を実施した。試験環境は室温とした。圧縮試験結果の一例を図 2 に示す。



(1) 試験前



(2) 試験後

図 1 圧縮試験の様子

参考データとして、加工素材の引張試験結果を図 3 に示す。試験機には(株)島津製作所製万能材料試験機 AGX-300kNV を使用し、試験片は丸棒のまま（JIS Z 2241 14A 号試験片）とした。一樣伸び限界は 4%程度であり、引張試験を用いて大ひずみ域の材料データを取得することが困難であることがわかる。

2.3 サロゲートモデル

本研究における逆解析手法は、サロゲートモデルを用いた誤差最小化問題（最適化）とした。サロゲートモデルとは、シミュレーション条件とシミュレーション結果の関係性を学習し、それをもとに未知の条件に対する結果を「シミュレーションを実施せずに予測する」機械学習モデルである。シミュレーションを実施するよりも素早く結果が得られることから、多数の候補点が必要とする最適化との連携に適している。

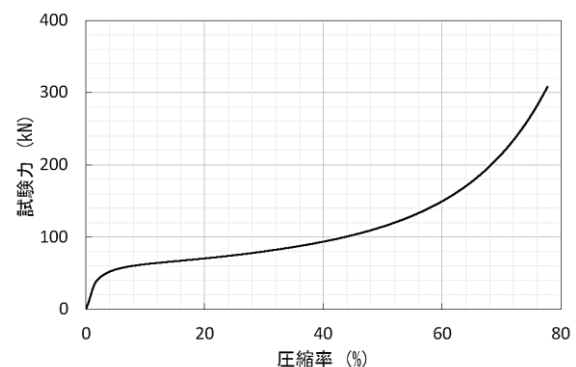


図 2 圧縮試験結果

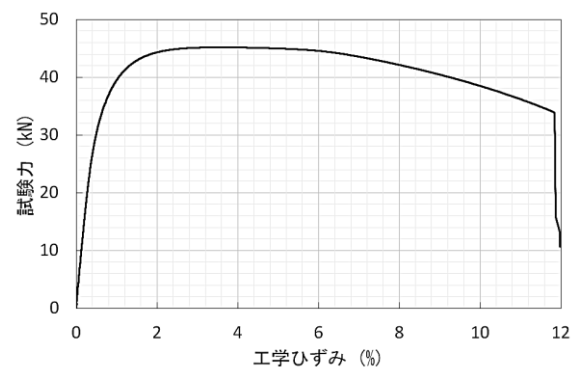


図 3 引張試験結果

サロゲートモデルの学習データ（シミュレーション結果）は SFTC 社製鍛造シミュレーションソフトウェア DEFORM-2D V13.1 (SP1) を用いて作成した。シミュレーションは 2 次元軸対称モデルで実施し、ソルバーパラメーターは弾塑性材料モデルに対するデフォルト値を用いた。材料モデルの塑性挙動は等方性硬化とし、変形抵抗は式(1)に示す Voce 則⁶⁾をもとに、多直線近似型で定義した。サロゲートモデルにおける入力変数は摩擦係数のほか、Voce 則パラメーター（降伏応力 Y 、飽和応力 S_∞ 、無次元定数 c ）とした。ただし、降伏応力が飽和応力を上回らないよう、降伏応力は降伏比（降伏応力÷飽和応力）により決定した。目的変数は、圧縮率－試験力曲線（勾配で重み付けして 16 点取得）および圧縮率後の端点移動量（図 4）とした。

$$\sigma = S_\infty - (S_\infty - Y) \exp(-c\varepsilon^p) \quad \cdots (1)$$

ここで、 σ ：真応力、 ε^p ：対数塑性ひずみ

学習データのサンプリング（実験計画法に基づく入力変数の組み合わせ）には Ansys 社製構造解析ソフトウェア Ansys Mechanical の応答曲面最適化機能 (Ansys DesignXplorer) を用いた。サンプリングアルゴリズムは最適充填設計（中心 L2）とし、学習データ数は 125 点とした。テ

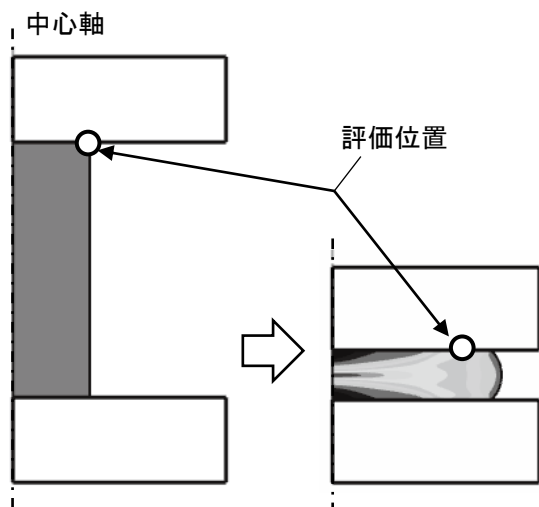


図 4 端点移動量の評価位置

ストデータは学習データとは異なるランダムシードを用いて 25 点作成した。また、サロゲートモデルの作成アルゴリズムには遺伝的集合、最適化には多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。なお、Ansys DesignXplorer の最適化では非劣解集合をもとに推奨される候補点を複数示すが、本研究においては最上位の候補点を同定値として採用した。

2.4 同定結果

作成したサロゲートモデルにおいて、各目的変数に対する平均絶対パーセント誤差は約 3% となった。同定値を用いて実施した圧縮試験シミュレーション結果を図 5 に示す。併せて、同定値から摩擦係数のみを大きくしてシミュレーションした結果と、引張試験結果から同定した材料特性値を用いてシミュレーションした結果（摩擦係数は同定値を使用）についても示す。図より、同定値を用いたシミュレーション結果は圧縮試験結果をよく再現していることがわかる。一方、摩擦係数を同定値よりも大きくした場合には、圧縮率が大きくなるにつれて誤差が増大しており、同定された摩擦係数の妥当性が確認できる。また、引張試験結果から同定された材料特性値を用いた場合には、試験力が実際の値よりも全体的に 20~30% 程度大きくなっており、低ひずみ域の応力－ひずみ曲線を鍛造加工シミュレーションへ適用することが困難であることを確認できる。

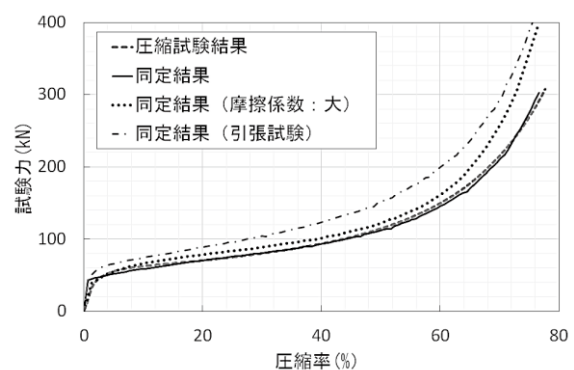
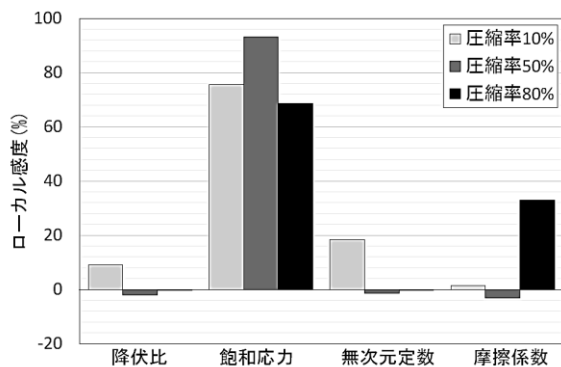


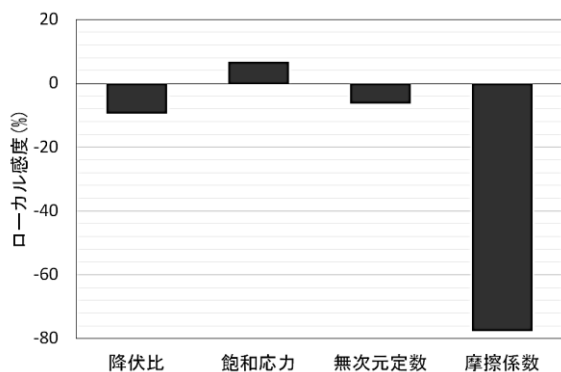
図 5 同定値によるシミュレーション結果

2.5 データ分析（寄与度分析）結果

通常、機械学習手法を用いて作成されたサロゲートモデルはブラックボックス化されているが、XAI（Explainable AI：説明可能な AI）技術を適用することで、モデル精度に影響を及ぼす入力変数や、入力変数値に対する目的変数の変動傾向を分析することが可能となる。本研究では Ansys DesignXplorer の寄与度分析機能を用いて、材料パラメーターや摩擦係数がサロゲートモデル（圧縮試験の予測結果）に対してどのような影響を及ぼしているか確認した。



(1) 試験力



(2) 端点移動量

図6 寄与度分析結果

表1 候補点の変動係数(単位:%)

圧縮率の最大値(%)	50	80
降伏比	4.33	4.40
飽和応力	0.57	0.75
無次元定数	3.95	6.79
摩擦係数	26.97	6.54

目的変数に対する入力変数の寄与度分析結果を図6に示す。試験力は飽和応力の影響が最も大きいが、圧縮率10%では降伏比や無次元定数の影響が、圧縮率80%では摩擦係数の影響が現れていることがわかる。また、端点移動量は摩擦係数に大きく依存していることがわかる。

加工力に対する摩擦係数の寄与度が圧縮率によって異なっていることから、同定に用いるデータ範囲の影響について確認した。同定に用いる圧縮率の最大値を50%および80%とした場合の同定結果（候補点上位20点の変動係数：標準偏差÷平均値）を表1に示す。データ範囲を50%までを対象とした同定結果は80%までを対象とした場合に比べ、特に摩擦係数の変動係数が大きくなっていることがわかる。これは、圧縮率50%では摩擦係数の影響が小さく、同定値が一意に定まらなかったためと考えられる。

以上のように、サロゲートモデルに対するデータ分析により、同定作業におけるデータ範囲設定の重要性を確認することができた。

3. AI技術を用いた画像予測モデルの作成

3.1 概要

上述のサロゲートモデル（以下、材料同定モデル）では、圧縮試験における加工力や端点移動量といった「数値」を予測したが、CAE技術は現象の可視化もその利点であることから、予測結果として応力分布図などの「シミュレーション画像」を出力（生成）するサロゲートモデル（以下、画像予測モデル）を作成可能であるか検証した。データセットは材料同定モデル作成時のものを用いた。

3.2 学習データ

画像予測モデルにおける予測対象は、圧縮率80%時の相当塑性ひずみ分布図とした。その一例を図7に示す。色階調は各シミュレーション結果の最小値～最大値に対して8階調とした。そのため、画像間で相当塑性ひずみの絶対値は統一されていない。学習では全条件の結果画像

150 枚を、学習データ 100 枚、検証データ 25 枚、テストデータ 25 枚に分割して使用した。

3.3 画像の生成方法

画像予測モデルの概念図を図 8 に示す。処理の流れは以下のとおりである。

【画像予測モデルにおける処理の流れ】

- ①4 次元の入力データを 2 層の多層パーセプトロンにより 128 次元の特徴量に変換する。
- ②128 次元の特徴量を各画素にコピーし、それに x 座標と y 座標の座標位置を加える。
- ③各画素に 130 次元の情報を持つデータを、4 層の畳み込みニューラルネットワークを用いて分布画像（各画素にひとつの値を持つデータ）に変換する。

学習条件を表 2 に示す。学習における損失関数には MSE（Mean Squared Error：平均二乗誤差）を用いた。また、ひずみ分布の色階調が少ないことによる境界部の大きな変化を避けるため、

TV（Total Variation：隣合う画素の差の総量）に重み比率 0.2 をかけて損失に加えた。画像予測モデルの構築には、オープンソースライブラリ PyTorch を利用した。画像の読込・保存、データ処理、ライブラリの組込みおよび評価結果出力プログラム作成には Python を用いた。

3.4 予測結果

作成された画像予測モデルにおいて、テストデータに対する MSE の平均値は 0.19、正解率（各画素の色階調一致率）の平均値は 82.1%となった。画像予測モデルによって作成された相当塑性ひずみ分布図を図 9 に示す。画像予測モデルはシミュレーション結果の特徴を概ね再現できているといえる。

今回の画像予測モデルでは比較的少ない学習データでシミュレーション結果を再現することができたが、これは図 6(2)にも示すように、端点移動量が摩擦係数に大きく依存していることが影響したものと推察される。このことを確認するため、摩擦係数のみを入力変数として画像



図 7 相当塑性ひずみ分布の例

表 2 学習条件

項目	値
エポック数	300
バッチサイズ	8
学習率	0.001
損失関数	MSE+0.2・TV

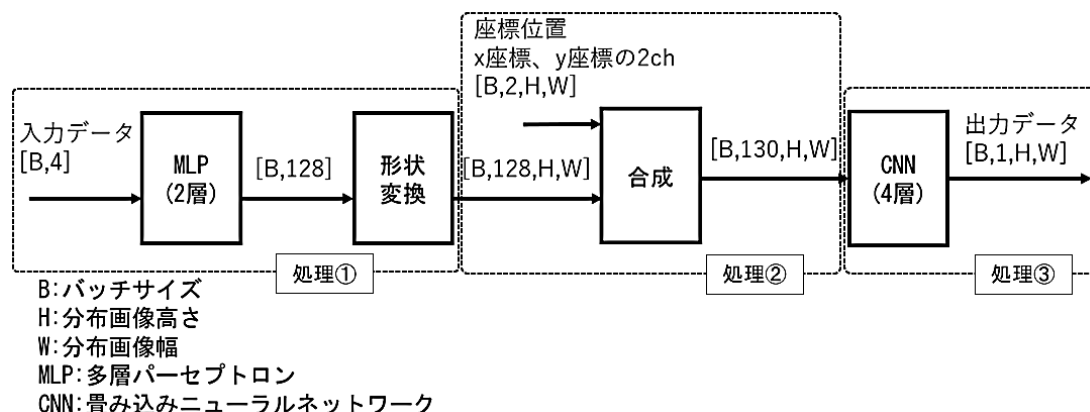


図 8 画像予測モデルの概念図



(1) 摩擦係数：小



(2) 摩擦係数：中



(3) 摩擦係数：大

図9 相当塑性ひずみ分布

(上：シミュレーション結果，下：予測結果)

表3 入力変数による予測精度の違い

入力変数	MSE	正解率
4変数	0.19	82.1 %
摩擦係数のみ	0.19	81.8 %

予測モデルを再作成し，予測精度を確認した。結果を表3に示す。入力変数を摩擦係数のみとした場合においても予測精度が低下していないことから，上記の推察のように，ほぼ1変数に対する予測となっていたことがわかる。

4. 結 言

- (1) 圧縮試験結果より材料パラメーターと摩擦係数を同時に同定可能なサロゲートモデルを作成し，同定結果が実際の現象とよく一致することを確認した。
- (2) サロゲートモデルにおける入力変数の寄与度分析を実施し，摩擦係数の同定においては，高圧縮率時の試験結果を含める必要があることがわかった。
- (3) 圧縮試験における相当塑性ひずみ分布を予測するサロゲートモデルを作成し，予測結果がシミュレーション結果とよく一致することを確認した。

参考文献

- 1) 長洲慶典ほか，“加工センシングによるプレス金型異常検知に関する研究”，長野県工業技術総合センター研究報告，no.15 (2020)，pp.7-12.
- 2) 四宮徳章ほか，“強化学習を用いたスライドモーション制御による熱間鍛造の最適化”，塑性と加工，vol.65，no.762 (2024)，pp.100-107.
- 3) 小林康彦ほか，“ディスク部品を対象にした型打ち鍛造工程設計の自動化手法”，ぷらすとす，vol.7，no.77 (2024)，pp.272-276.
- 4) 片山聡ほか，“プレス成形シミュレーションの高精度化に向けた引張試験方法に関する研究”，工業技術研究報告書，no.54 (2024)，pp.55-62.
- 5) 吉田佳典，“シミュレーションのための材料試験-流動応力同定-”，軽金属，vol.68，no.5 (2018)，pp.266-273.
- 6) 桑原利彦，“初等塑性力学(その1)”，軽金属，vol.57，no.4 (2007)，pp.171-181.

DX 推進に向けたプレス金型設計のデジタル化 および大型電池ケースの開発

山田 佳奈* 村木 智彦* 本田 崇**
小野田 徹*** 木下 昌亮*** 高野 明*** 山田 翔太***

Digital Transformation in Press Die Design and Development of Drawing Technology for Large Battery Cases

YAMADA Kana*, MURAKI Tomohiko*, HONDA Takashi**
ONODA Toru***, KINOSHITA Masaaki***, TAKANO Akira*** and YAMADA Shota***

抄 録

絞り成形による大型電池ケースの実現を目的に、CAE を中心としたデジタルツールを活用したデジタルトランスフォーメーション(DX)により、工程案の検討、各工程の金型設計および成形品の評価を行った。設計した工程案の評価を CAE で行い、最終工程まで割れの発生なく成形可能であることを確認した後、成形試験による検証を行った。併せて、実成形品の評価をデジタルツールで行い、解析精度の検証を行った。

1. 緒 言

近年、世界的な脱炭素化の推進を背景に、電動車両の市場が拡大している¹⁾。航続距離の延伸の需要に応じて電池の大容量化が進んでおり、大型電池ケースの実現が求められている。

電池ケースの代表的な製造方法の一つに絞り成形があるが、車載用途で求められる軽量化と大容量化を両立するためには、①角型、②大型、③アルミニウム合金製といった仕様を満たす必要がある。ただし、これらすべての仕様を満たす成形は難しく、現状国内外のメーカーで量産化を確認できていない。

このような成形に対して、コンピューター上に仮想的な実験環境を構築し、様々な条件下での挙動を検討できる技術(CAE)の活用が進められている。そこで本研究では、大型電池ケースの実現に向け、CAE を中心としたデジタルツールを活用した DX により、工程案の検討、各工程の金型設計および成形品の評価を行った。

* 技術統括センター

** 中越技術支援センター

*** 東芝プレシジョン(株) 新潟事業所

2. 工程設計

単一工程での絞り成形では成形可能な形状に限界があり、大型電池ケースのような深い角筒形状を得るには多工程による段階的な加工が必要となる²⁾。一般的に、多工程の絞り成形では各工程間のワークの周長比および板厚の減肉率の2点を主な指標として設計する。以下に、本研究における設計方針を示す。

(1) 周長比

円筒形状を対象とした絞り成形では、実験結果から、材料ごとに成形可能な全周の周長比として、絞り比・絞り率が把握されている。本研究対象は角筒形状のため、円筒形状と違って場所ごとの変形が大きく異なっている。そこで、短辺・コーナー部・長辺の3か所で周長比を算出し、最も条件が厳しい箇所を基準として設計を行った。成形に余裕がある初期工程では周長比を50%以内、成形が厳しくなる後半の工程では90%以内に抑える方針とした。

(2) 板厚の減肉率

周長比と同様に、短辺・コーナー部・長辺の

3 か所で板厚の減肉率を算出した。本研究では工程間の減肉率を 12%以内に抑える方針とした。

以上の方針に基づき、CAE を用いて工程設計を行った。

3. 材料の評価

本研究の供試材である A3003-H12 の機械的特性を把握するため、引張試験を行った。試験片は JIS Z2241 に規定の 13B 号とした。(株)島津製作所製の AGX-300KNV を用いて、クロスヘッド変位速度 5mm/min にて引張試験を実施した。

引張試験より得られた応力-ひずみ曲線を図 1 に、rankford 値および 0.2%耐力比を表 1 に示す。表 1 において、0°方向は圧延方向とした。また、0.2%耐力比は 0°方向の耐力を 1 とした基準で算出した。

引張試験の結果、0°方向の変形抵抗は他の方向と比べて高く、試験方向に対して rankford 値は大きく異なっている。

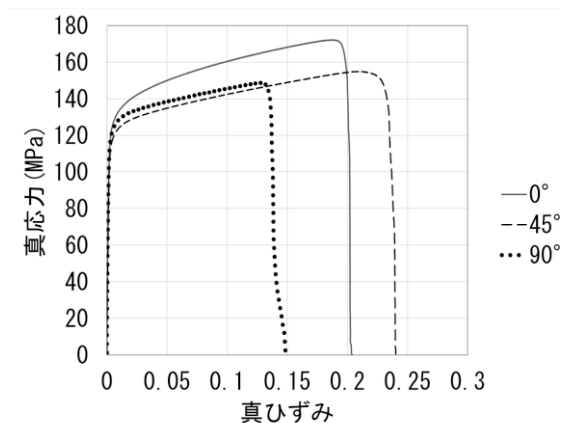


図 1 応力-ひずみ曲線

表 1 rankford 値と 0.2%耐力比

方向	rankford 値	0.2%耐力比
0°	0.44	1.00
45°	0.90	0.94
90°	0.29	0.98

そこで本研究では、供試材の面内異方性の大きさを考慮するため、CAE には、YU モデルと吉田 6 次降伏関数を組み合わせた材料モデルを採用した³⁾。各パラメータについては引張試験の結果をもとに ESI 製ソフトウェア MAT-WIZARD を用いて決定した。

4. 成形解析

4.1 使用ソフトウェア

3 次元 CAD には、Dassault Systemes 製ソフトウェア SOLIDWORKS2010 を使用した。成形解析には ANSYS.Inc 製ソフトウェア ANSYS-dyna の動的陽解法を用いた。

4.2 解析モデル

本研究で対象とした電池ケースおよび金型形状は、容器開口部より見て、長手、短手方向ともに対称である。このため、解析時間の短縮を目的として、解析モデルは全体形状の 1/4 とした。

一般的な成形解析の要素タイプは、ワーク、金型ともにシェルが用いられ、特に金型は剛体とすることが多い。ただし、本研究では板厚を管理するため、強いしごきを行う工程があり、しごきによるワークの板厚方向応力による板厚変化およびダイのたわみの考慮が必要である。

そこで、ワークおよびダイにはソリッド要素を採用するとともに、ダイは変形体とした。要素サイズについては、金型を最大 2mm、ワークを最大 1.6mm とした。

摩擦係数については、金型とワークの接触面の面圧の影響を考慮して、面圧に応じて摩擦係数を設定した。

4.3 解析結果

前節の条件で解析を実施し、工程案の検討および各工程における金型の設計を行った。検討案における最終工程の解析結果を図 2 に示す。

解析の結果、検討案で割れの発生なく成形可能であることを確認した。

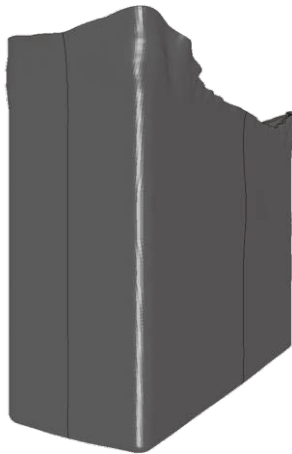


図2 最終工程の解析結果(斜視)

5. 成形試験

検討案の妥当性を確認するため、金型を作製して成形試験を実施した。成形試験はアイダエンジニアリング(株)製の NC2-160 により実施した。最終工程における成形品の形状を図3に示す。割れの発生なく成形できており、検討した工程設計案の妥当性が確認できた。

次に NIKON METROLOGY, LLC 製の MCT225 による成形品の CT 解析を行い、得られた形状と成形解析の結果の比較を行った(図4)。

成形品と解析結果の形状はよく一致しており、解析結果は実成形品を良好に再現できていることがわかる。

以上の検討により、CAE を中心にデジタルツールを活用することで大型電池ケースの成形を実現できた。

6. 結 言

- (1) 要素タイプやメッシュサイズ等の各解析条件を適切に設定し、工程案の検討および金型設計に適用可能な高精度の解析モデルを構築した。
- (2) 設計した工程案に対し、CAE を活用して成形性の確認を行った。また、成形試験を実施し、大型電池ケースの成形を実現した。



図3 最終工程の成形品(斜視)

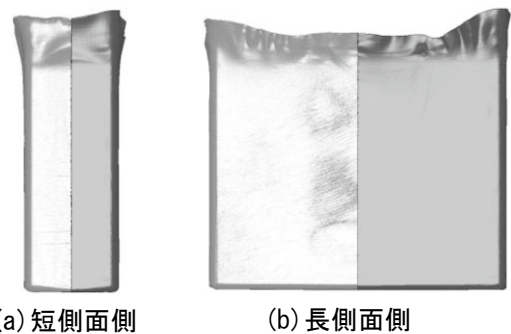


図4 CT 解析結果(左)と
CAE による成形解析結果(右)の比較

参考文献

- 1) 蓄電池産業の現状と今後の方向性, <https://www.aist.go.jp/Portals/0/kansai/images/event/2023/231218lect1r.pdf>, (閲覧 2026-3-31).
- 2) EV バッテリー市場 現状と予測 市場分析, <https://www.fortunebusinessinsights.com/jp/%E6%A5%AD%E7%95%8C-%E3%83%AC%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%88/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E8%87%AA%E5%8B%95%E8%B8%A%E7%94%A8%E3%83%90%E3%83%83%E3%83%86%E3%83%AA%E3%83%BC%E5%B8%82%E5%A0%B4-101700>, (閲覧 2026-3-31).
- 3) 濱崎洋, “アルミニウム合金板の塑性異方性のモデル化と高精度プレス成形 CAE の開発”, 軽金属, vol.65, no.11, 2015, pp.536-541.

生成 AI を活用した充填包装機ของผู้ใช้支援 システムの開発（第 1 報）

大野 宏* 石澤 賢太* 長谷川 直樹* 丸山 隆成** 本間 克美** 滝原 正貴** 澤田 恒輝**

Development of a User Support System for Filling and Packaging Machines Using Generative AI (Part 1)

OHNO Hiroshi*, ISHIZAWA Kenta*, HASEGAWA Naoki*, MARUYAMA Takashige**, HONMA Katsumi**
TAKIHARA Masaki** and SAWADA Kouki*

抄 録

株式会社悠心が販売している製造装置に関するカスタマーサポートでは、客先トラブルの電話対応に長時間を要し、担当者も長時間拘束される。この課題を解決するため、生成 AI を活用し操作マニュアルやトラブル対応マニュアルを参照し、ユーザーの質問に回答し支援するシステムの開発に取り組んだ。まずは、入社間もない社員が支援システムを使うことで、トラブル対応をベテラン社員並みにできるシステムを開発した。さらに、回答精度の向上と想定外の質問への対応を進め、最終的には顧客が直接使用できるシステムへの発展を目指す。

1. 緒 言

株式会社悠心の主力製品である液体充填包装機は、連続するフィルムを袋状に加工するとともに、一定量の液体を充填し、温度と圧力を一定時間かけて溶着・切断する。充填する液体の種類・状態により袋の温度が変わり、またロットの品質のばらつきにより、溶着の最適条件が変わることもあり、液漏れがまれに発生する。トラブルが発生すると、顧客からの電話に対して、装置に詳しいサポート担当者が状態を聞き対策を伝える。この際、顧客の説明が不十分で状況が正確にサポート担当者に伝わらないことがあり、復旧までに時間がかかり、担当者も対応で拘束される。また、担当者により助言内容が若干変わることもある。

そこで、日々性能が向上している生成 AI を活用し、カスタマーサポートの課題を解決するため、客先の現場作業員に対し、装置の操作方法とトラブル対応方法を提示する支援システムを開発した。顧客が装置の操作やトラブル対応を

円滑に行える環境を構築し、対応の迅速化による高付加価値化とサポート業務の効率化を目指す。まずは、入社間もない社員でも本システムを利用することで、顧客からの質問にベテラン社員並みの回答ができるようにする。これにより、多くの社員が効率よく顧客対応が可能になり、ベテラン社員は開発等にかかる時間を確保できる。次年度は、想定外の質問や外国語にも対応できるように改良し、顧客が直接質問し、回答を得てトラブルに対応できるシステムを開発する予定である。将来的には、顧客はトラブルが発生しても 24 時間・祝休日も利用できることを目指す。

2. システムの概要

開発するシステムの概要を図 1 に示す。液体充填包装機の現場における操作支援およびトラブル対応の迅速化を目的として、生成 AI を用いた質問回答機能を構成の中心とした。システムは、操作方法マニュアルやトラブル対応マニュアルを参照して質問に回答し、音声でも入出力できるようにした。

* 技術統括センター

** 株式会社悠心

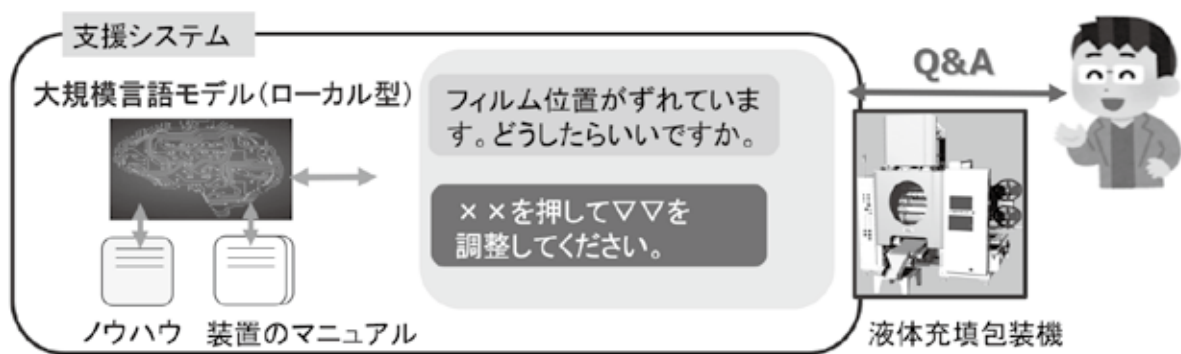


図1 システムの概要

回答を生成する大規模言語モデル (Large Language Model : LLM) は、社内のパソコンにダウンロードして使うローカル型の大規模言語モデル Llama-3-ELYZA-JP-8B¹⁾を利用した。このモデルは若干古いものの日本語に強く回答速度が速いことが特徴である。ローカルモデルを使う場合は、社内情報をクラウドに上げる必要がないために情報漏洩の心配がなく、本システムをインターネットに接続できない工場でも使うことができる。

3. マニュアルの整備

既存の操作マニュアルには、装置の操作方法、設定方法、取り扱いの注意点などが記載されているが、顧客は不明な点があると、マニュアルを読まずに電話で問い合わせることが多い。そのため初版から改訂があまりなされておらず、生成 AI が誤解してしまう表現や情報不足が確認された。そこで、曖昧表現の排除や文言の統一など、生成 AI の知識基盤として再整理した。

具体的には、各部の名称と働きにおいて、機能の詳細説明があるものの、基本的な役目の説明が不十分な場合は、これを追記した。また、同じ機能について、違う単語が使われていることがあり、適切な文章が検索されやすいよう、これらを統一した。

トラブル対応では、症状→原因候補→確認→対処の流れが重要であるため、液漏れを含む代表的トラブルを対象に、現場で実施できる確認

方法と対処手順を記したマニュアルを作成した。また、症状別にマニュアルを作成し、1 個ずつ確認を行い、該当する場合は対処し、症状が解消されたか確認するようにした。例として「横シールが溶着しない」、というトラブルについて、図 2 に対応フローチャートを、図 3 に対応マニュアルを示す。トラブル対応マニュアルを読んで 1 つずつ原因候補を確認するよう LLM に指示すると、フローチャートのよう 1 項目ずつ確認しトラブルを解決することができる。

4. 質問から回答を生成するシステムの開発

4.1 概要

本章では、生成 AI を用いてユーザーからの質問に回答する仕組みを設計・実装した内容を述べる。回答の一貫性と現場で実行可能な具体性を満たすことを目標とした。システムは、まず質問から操作に関する内容か、トラブルに関する内容かを判定する。質問が操作に関する内容の場合は操作マニュアルを参照し、トラブル対応に関する内容の場合は、対象のトラブル対応マニュアルを参照して回答する。

4.2 質問分類機能

質問から、装置の操作方法や設定方法に関する内容か、トラブル対応に関する内容かを正確に分類できれば、参照する文章が限定されるので、回答精度が向上する。そのため、質問を分類するプログラムを開発した。当初は、LLM に

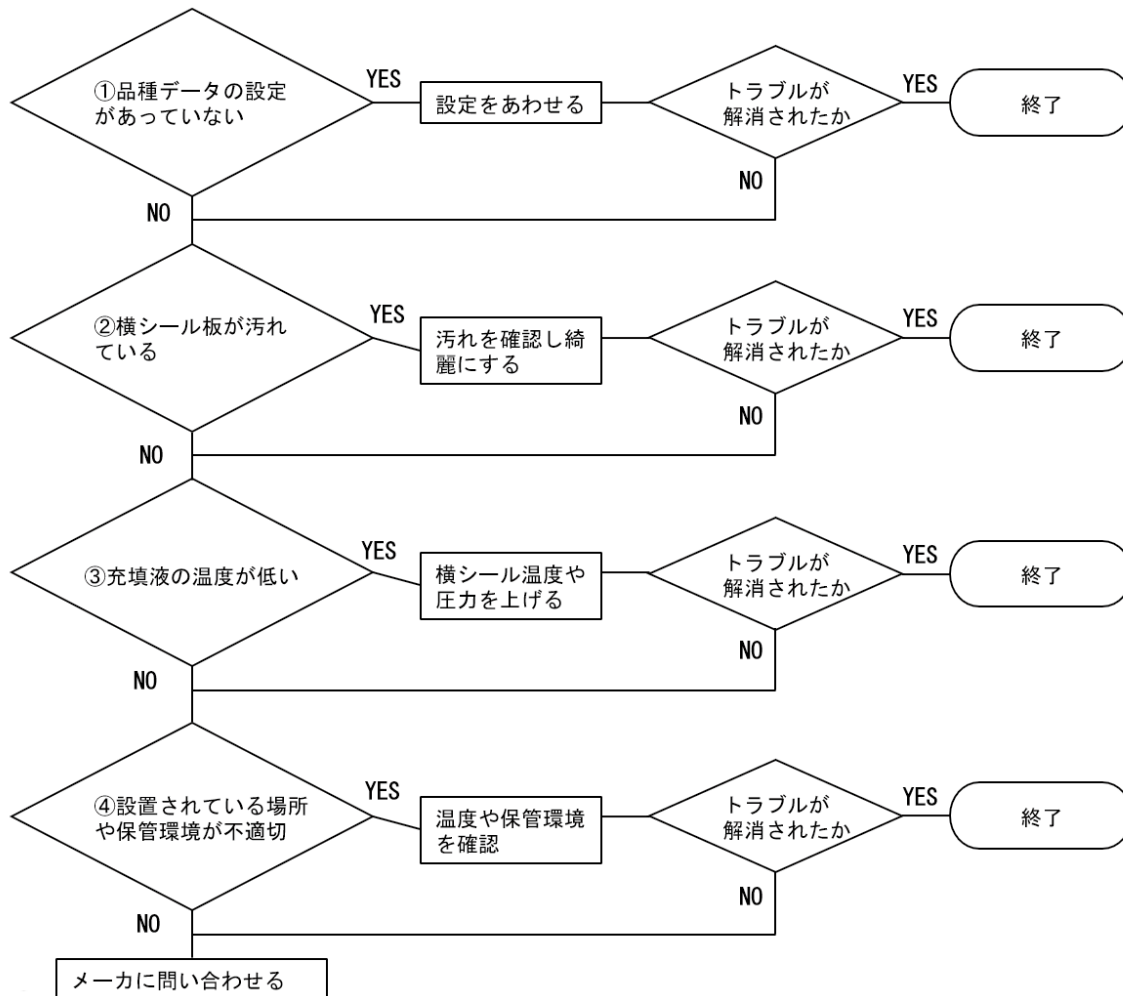


図2 トラブル対応フローチャート(横シールが溶着しない)

現象：横シールが正しく溶着しない。そのため液漏れが発生する可能性がある。その原因として、次の4個が考えられる。

原因候補1：フィルムと品種データの番号があていない。

確認方法：フィルムと品種データの番号はあっているか確認する。データ番号や生産条件の確認は自動運転モニタの画面で行う。

対処手順：フィルムと品種データの番号があっているか照合し、解決できるか確認する。

原因候補2：横シール板にフィルムや液が付着して汚れている。

確認方法：横シール板にフィルムや液が付着して汚れていないか確認する。横シール板の汚れは次の画面を参考に確認する。

対処手順：横シール板にフィルムや液が付着して汚れている場合は、板表面の汚れを除去し、解決できるか確認する。汚れは濡らしたメラミンスポンジで清掃する。

原因候補3：充填液の温度が通常より低くなっている。

確認方法：機械左側の液温度パネルを見て液温が基準より低下していないか確認する。

対処手順：液温を直接上げることは難しいので、横シール温度を上げるか、横シール周速を伸ばし、解決できるか確認する。横シール温度の設定は自動運転モニタの画面で行う。横シール周速の設定は生産条件1設定で行う。

原因候補4：装置が設置されている場所やフィルム保管環境が寒冷な状況である。

確認方法：装置が設置されている場所やフィルム保管環境が寒冷な状況でないか確認する。理想の温度は20℃～25℃である。

対処手順：縦シール温度やプリヒート温度の設定を高くし、解決できるか確認する。縦シール温度の確認と設定は生産条件1設定の画面で行う。

* 4つの原因全てを確認して解決されない場合は、メーカーに問い合わせる。

図3 トラブル対応マニュアル(横シールが溶着しない)

質問を分類させようとしたが、「横シール温度の設定方法を教えてください。」という設定方法の質問をすると、横シールという単語に引きずられて「横シールが溶着しない」というトラブルと分類されてしまう。そこで、トラブル対応に関する質問には、「どうしたらいいですか。」という定型表現を含める運用とし、当該表現が含まれる場合のみ類似度計算によって、どのトラブルに相当するか判断する方式に改めた。

4.3 RAG の利用

生成 AI は汎用知識を持つ一方、装置固有の仕組み、操作方法や設定方法など、LLM が学習していない事には、正確に答えられない。そのため、操作マニュアルの質問回答では RAG (Retrieval-Augmented Generation : 検索拡張生成) を用い、ユーザーの質問に関連する箇所をマニュアルから 10 件検索し、これを基に回答を生成する。具体的にはマニュアルを 50~100 字程度に分割し、エンベディング関数でベクトル化し、質問文との類似度を計算し、その値が高いものを参照した。また、回答時に根拠箇所を提示可能とすることで、利用者が参考にしながら作業できるようした。なお、操作マニュアルはワードで作成され PDF に変換しているが、補足情報としてページ数から PDF の該当ページを表示させるため、ページ情報を持つ PDF からテキストを抽出した。

4.4 ICL の利用

本システムの LLM である Llama-3-ELYZA-JP-8B は LLM の中では比較的小さなモデルであり、液体充填包装機自体の知識が不足しているせいか、当初は回答精度が低かった。そのため、図 4 に示す装置の概要を毎回読ませるようにした。すると、装置の概要を踏まえて回答を生成するため、回答精度が大幅に向上した。これは、ICL²⁾(In-Context Learning) とよばれる方法である。LLM には、入力できる文字数に制限がある

概要：本装置は、タレを充填した小袋を製造する装置である。ロール状のフィルムを供給し、折り曲げて端部を重ね合わせ、熱と圧力で溶着して袋状に成形する。次に液体を充填し、上部を溶着した後、切断して製品を完成させる。

図 4 装置の概要

ので、装置の概要を 100 字程度に簡潔にまとめた。

4.5 会話履歴の参照

人間同士の会話では、「さきほど質問した件について」や「この回答をもう一度分かりやすく説明して」など、過去のやり取りを踏まえて話を進めるのが一般的である。生成 AI との対話でも、過去の経緯や前提が引き継がれない場合、背景説明の繰り返しや認識違いが起こりやすい。特にトラブル対応では、確認すべきチェック項目が複数あるため、「項目1と項目2を確認済みであること」を踏まえ、次に「項目3の確認」を促すといった手順に沿った応答が求められる。

本システムでは、トラブル対応の場合、会話履歴の参照範囲を直近10往復分（ユーザーの質問とシステムの回答を1往復として数える）とする設定にした。これにより、直近の流れを維持しつつ、LLM への入力文字数の上限を超えにくい形で運用できる。一方、操作マニュアルに関する質問回答では、ほぼ一問一答で終わることが多いので、少なめの3往復分にした。

4.6 音声入力と音声出力

本システムに質問を音声で入力する機能と、回答を音声で出力する機能を追加した。音声入力では、マイクで音声を録音し、音声認識モデル faster-whisper³⁾で日本語テキストに変換する。これは OpenAI が開発したモデルで、高速かつ省メモリで動作する。モデルのサイズは 5 種類あり、大きいサイズのモデルは認

❖ 質問を入力してください。

🔊 音声入力

「充填液量の調整方法を教えてください。」

❖ 充填液量の調整方法は、7-2-2-7 生産条件3の「液絞り設定」で行うことができます。具体的には、液絞り回転速度、液絞り隙間(充填時)、液絞り隙間(停止時)を設定することで、充填液量を調整することができます。

🔊 音声出力

図5 支援システムの画面の例(操作方法に関する質問)

識精度は高くなるが動作に時間がかかるため、GPUがあると快適に動作する。音声出力は、テキストを読み上げるアプリ VOICEVOX⁴⁾を利用した。これを起動した状態で、Python プログラムからテキストファイルを渡すと音声ファイルに変換し、音声として出力される。設定番号を変えると、様々なキャラクターの音声を使うことができる。

4.7 支援システムのプログラム

システムは Python で開発し、ChatGPT のような GUI(Graphical User Interface)を簡単に構築できる Chainlit⁵⁾を利用した。実際の画面の例を図5に示す。プログラムを起動すると、各種モデルなどの読み込みを行い、準備が整うと「質問を入力してください。」と表示される。「充填液量の調整方法を教えてください。」と質問すると、操作方法に関する質問なので操作マニュアルを検索し質問と関連の高い部分を参照し、LLM が出力した回答を表示する。この時、検索された参照部分も表示することができ、この調整方法が記載されている操作マニュアルの 7-2-2-7 を表示する。また、質問を音声で入力する時に使用する「音声入力」ボタンと、回答を音声で出力する時に使用する「音声出力」ボタンが表示される。これを押すと音声で質問を入力し、音声で回答を出力する。

5. 精度検証と改良

実際の運用を想定し、システムの精度検証と改良を行った。100個の質問と理想の回答を考え、実際の回答と比較したところ、10問で満足する回答が得られなかった。これらが不正解となった原因を分析し、回答精度向上に向けた改良を実施した。

操作マニュアルに関する質問では、RAGを用い、ユーザーの質問に関連する箇所をマニュアルから10件検索し、これを基に回答を生成している。質問に対応する箇所が正しく検索されれば、正しい回答が生成されるので、この検索が鍵になる。RAGの対象となる文章は4.3節に述べたように、文字を定数ごとに区切り、前後をオーバーラップさせる方法が一般的であるが、文章が途中で途切れてしまう。そこで、文章を句読点や改行で文章の切りの良いところで区切り、文頭にマニュアルの章と節をつけて、その文章が何に関するものかより明確にすることで、不正解を減らすことができた。

トラブル対応に関する質問では、4.4節で述べたICLの利用により回答精度が上がった。また、参照ファイルの文字数が多くなると、指示文の指示を守らずに、すでに確認した項目を再度確認するよう回答する。そのため、再度、明確に指示をした。最初の指示文は、「参考情報と過去の会話履歴を踏まえて、で

きるだけ正確に回答してください。」と「原因候補を1つずつ確認するよう回答してください。」であったが、これに「すでに確認したことを再び確認しないようにしてください。」を加えたところ、正しく回答するようになった。

誤回答する質問については、マニュアルに記載がなかったり、表現が分かりにくかったりするものがあり、その都度加筆修正した。

6. GENIAC-PRIZEへの申請

経済産業省とNEDOは「国内の生成AI開発力を底上げして、社会実装まで加速させる」ために、プロジェクト生成AIアクセラレータ・チャレンジ⁶⁾(Generative AI Accelerator Challenge : GENIAC)を令和4年度から実施し、国内企業の言語モデルや視覚言語モデルの開発を支援している。また、令和7年度にGENIAC-PRIZEという、実証・コンテスト型プログラムが実施された。生成AIの利用を活発にするためには、現場のニーズに基づき活用されるシステムの開発が必要であり、生成AIアプリやサービスを開発し実証したものが応募対象となる。募集対象は4分野で、領域1「国産基盤モデル等を活用した社会課題解決AIエージェント開発」の「カスタマーサポート生産性向上」に本システムの研究開発を申請し、特別賞（地域賞）を受賞した。

7. 結 言

- (1) 生成 AI を活用し、マニュアルを参照して質問に回答する支援システムを開発した。本システムにより、入社間もない社員でも高い水準のカスタマーサポートが可能となった。
- (2) 回答精度が上がるようにマニュアルの加筆修正を行った。
- (3) 直接ユーザーが本システムを活用してトラブル対応ができるよう、回答精度の向上、予期せぬ質問へ対応など、今後も改良に取り組む。

参考文献

- 1) ELYZA, <https://huggingface.co/elyza/Llama-3-ELYZA-JP-8B>, (閲覧 2026-2-11)。
- 2) Adrian de Wynter, “Is In-Context Learning?”, arXiv:2509.10414, 2025.
- 3) faster-shisper, <https://github.com/SYSTRAN/faster-whisper>, (閲覧 2026-2-11)。
- 4) VOICEVOX, <https://github.com/VOICEVOX>, (閲覧 2026-2-11)。
- 5) Chainlit, <https://github.com/Chainlit/chainlit>, (閲覧 2026-2-11)。
- 6) GENIAC, https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/geniac/index.html, (閲覧 2026-2-11)。

Ⅲ 受託研究

装置のアライメント精度を上回る マスクアライメント手法の研究

宮口 孝司* 佐藤 健* 山田 敏浩*

A Study on Alignment Method Beyond Machine Alignment Accuracy

MIYAGUCHI Takashi*, SATO Takeshi* and YAMADA Toshihiro*

抄 録

回折光学素子(DOE: Diffractive Optical Element)など多レベル深さの素子を作製する際には、複数の露光・エッチングを繰り返す必要があり、なおかつサブ μm オーダーのマスクアライメント精度が要求される。一部の露光装置にはサブ μm オーダーのアライメント機構を持つものがあるが、汎用的な装置では $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度のアライメント精度のものも多い。本研究では、バーニアの原理を用いることによって、 $2\mu\text{m}$ のアライメント精度を持つマスクアライナで、サブ μm オーダーのアライメントを実現する手法を開発した。

1. 緒 言

3Dセンシングや顔認証などに使用される回折光学素子は、シンプルな光学系で任意の投射パターンを生成できるため、今後さらなる用途拡大が期待されている¹⁾。

DOE は大きく位相型と振幅型の 2 種類に分類され、位相型は振幅型に比べて高い回折効率を有する。また、多値化により回折効率を向上できることが知られている。理論上の回折効率は、2, 4, 8 レベルのとき、それぞれ 0.41, 0.81, 0.95 である²⁾。

しかし、フォトリソグラフィーにより多レベル構造を形成する場合、複数のフォトマスクを用いた露光およびエッチング工程を繰り返す必要があり、この際のマスク重ね合わせ精度が回折効率や形状精度に大きく影響する。

本研究では、4 レベルの DOE モデルを対象とし、装置のアライメント精度を超える重ね合わせ精度を実現する手法について検討した。

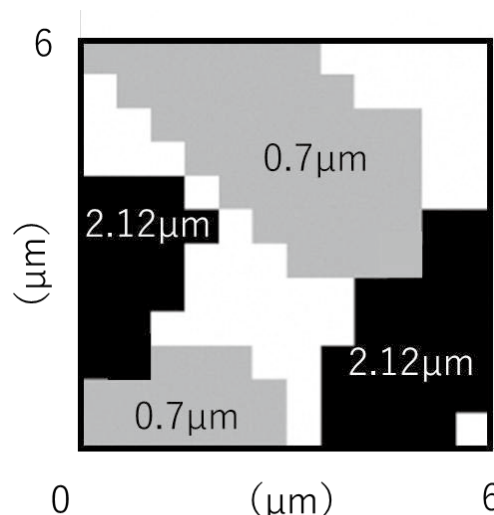


図1 4レベルのDOEモデル形状

2. マスク重ね合わせ

2.1 原理及び実験方法

図1に4レベルのDOEモデル形状を示す。想定する波長は $1.55\mu\text{m}$ とし、DOE 材料の屈折率は 1.54 と仮定した。本モデルは x および y 方向に周期 $6\mu\text{m}$ で配置されている。灰色部分は深さ $0.7\mu\text{m}$ 、黒色部分は $2.12\mu\text{m}$ の深さにエッチングされる構造である。2つの要素は完全に分離しており、実質的には3レベル構造となっている。

図2に周期的に配置したDOEモデル形状を示す。深さ $0.7\mu\text{m}$ の要素1と深さ $2.12\mu\text{m}$ の要素2

* 技術統括センター

レーザー・ナノテク研究室

は隣接して配置されており，フォトマスクの重ね合わせ誤差は形状の劣化を招くため，サブ μm オーダーの位置合わせが要求される。

表 1 に DOE モデルの作製条件を示す。使用したマスクアライナの仕様上の重ね合わせ精度は $\pm 5\mu\text{m}$ であるが，撮像系の改良および微動機構の改善により，実効的には $\pm 2\mu\text{m}$ まで向上させている。本研究ではこの装置を用い，サブ μm 精度のアライメントを実現する方法を検討した。

図 3 に 2 種類のマスク形状を示す。これらを周期的に配置したフォトマスクを用い，両者を適切に重ね合わせることで図 2 の構造を形成する。

図 4 にフォトマスクのパターン配置を示す。フォトマスク 1 は 10mm 間隔でパターン領域を配置しているのに対し，フォトマスク 2 では 9.9994mm 間隔で配置している。この微小なピ

ッチ差 ($0.6\mu\text{m}$) により，バーニア効果を利用した高精度な位置合わせが可能となる。

両マスクを完全に重ね合わせた場合，中央領域ではずれが $0\mu\text{m}$ となり，隣接領域では相対的に $0.6\mu\text{m}$ のずれが生じる。したがって，中央部

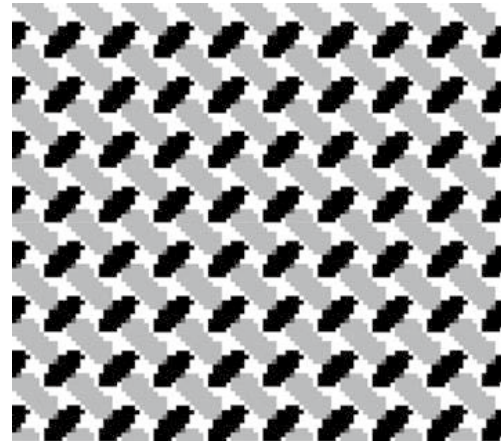


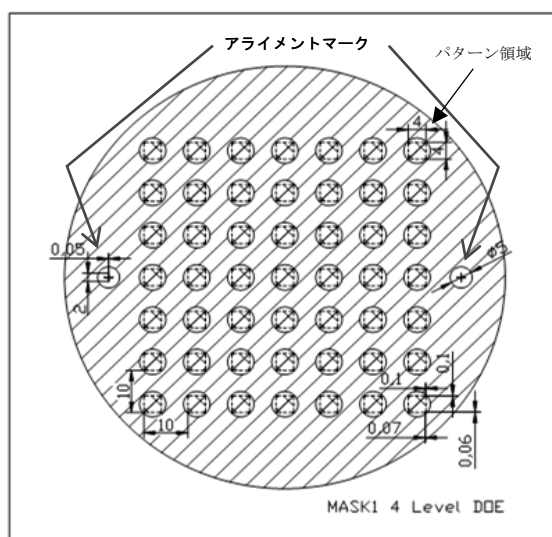
図 2 周期的に配置した DOE モデル形状

表 1 DOE モデル作製条件	
マスクアライナ	ユニオン光学 PEM-800 マスク合わせ精度 $\pm 2\mu\text{m}$
基板	$\phi 100\text{mm}$, $t=0.525\text{mm}$ Si ウェハ
フォトレジスト	OFPR-8600 (23cP)
ドライエッチング	住友精密工業 ASE-HRME (ボッシュプロセス)

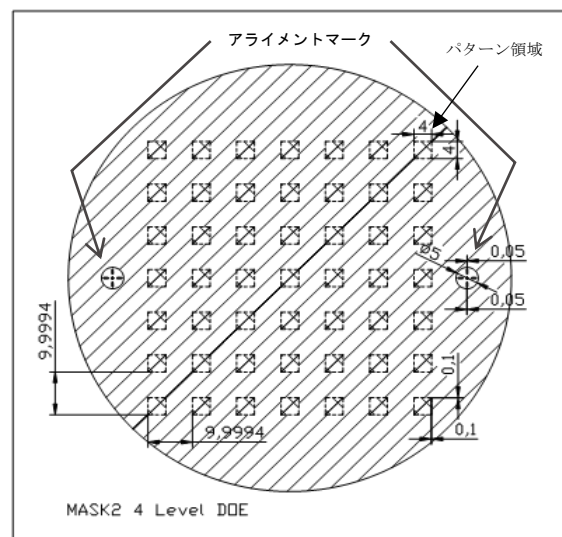


マスク 1 (要素 1) マスク 2 (要素 2)

図 3 2 種類のマスク形状



フォトマスク 1



フォトマスク 2

図 4 フォトマスクのパターン配置

において、最大で約 $1.8\mu\text{m}$ の位置ずれが存在しても、いずれかの領域において $0.6\mu\text{m}$ 以下のずれに抑えることができる。

図5に露光およびエッチングの工程を示す。1回目は浅い構造を形成するマスク1を用い、2回目にマスク2を用いた。これは、2回目のフォトリソト塗布により表面の平坦性を確保するためである。最終的に電鍍工程により転写面型を作製する。

2.2 実験結果

図6に重ね合わせ露光およびエッチング後の形状を示す。マスクのずれが最小となる領域（中央写真）で、2つの要素のずれを見積ると、図示部分の隙間は $0.8\mu\text{m}$ であり、他方の隙間が $0\mu\text{m}$ なので、実際のずれ量としては $0.4\mu\text{m}$ である。ずれの方向が 45° 傾いていることを考慮して x および y 方向に分解すると、それぞれ $0.28\mu\text{m}$ になり、 x および y 方向のずれ量は $0.6\mu\text{m}$ 以下に収まっている。上下左右の写真はそれぞれの方向に隣接するパターン領域であり、それぞれ異なる方向にずれが生じている。

当該領域は設計した DOE 構造に近い形状を示しており、本手法により高精度な重ね合わせが実現できていることが確認された。

また、パターン領域数を増やし、ピッチ差をより細かく設定することで、さらに高精度な位置合わせが可能であると考えられる。

ただし、本手法は2枚のマスクを前提としており、3枚以上のマスクを用いるマルチレベル構造への適用には異なる手法の検討が必要である。

3. 結 言

- (1) バーニアの原理を用いたフォトマスク設計により、装置精度を超える重ね合わせ手法を提案した。
- (2) 本手法により、重ね合わせずれ量を $0.6\mu\text{m}$ 以下に抑制できることを確認した。

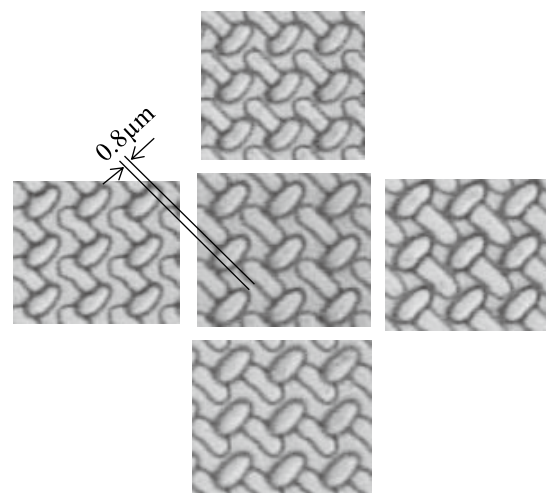
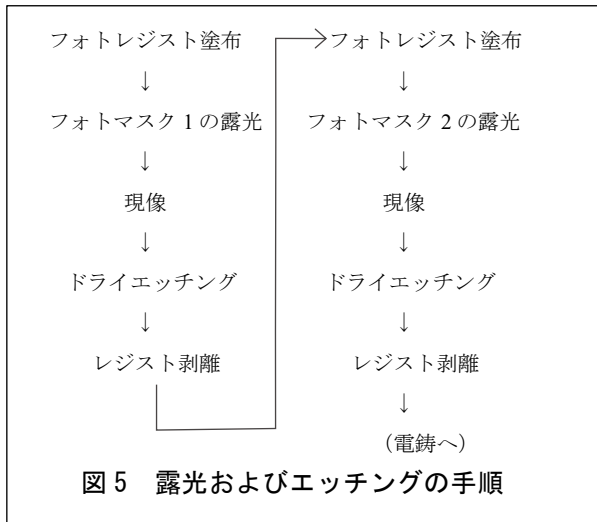


図6 重ね合わせ露光およびエッチング後の形状

本報告は、三共化成(株)及び長岡工業高等専門学校の永井睦准教授との共同で実施した、令和5年度中小企業政策推進事業費補助金（成長型中小企業等研究開発支援事業）「3Dセンシング普及促進の一翼を担うマイクロ部品を実現する革新的転写技術の開発」の一部を抜粋したものである。

参考文献

- 1) 例えば AGC DOE・ガラス拡散板,
https://www.agc.com/products/electronic/detail/doe_and_diffuser.html, (閲覧 2026-3-19).
- 2) 例えば(社)応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ監修, 回折光学素子入門, (平成11年), p.15.

IV 創造的研究推進費

環境負荷低減に向けた ナノ複合化による高機能プラスチック材料の開発

岡田 英樹* 中川 昌幸* 林 成実* 永井 智裕* 河原 崇史* 遠藤 桂一郎*

Development of High-Performance Plastic Materials via Nanocompositing
for Environmental Load Reduction

OKADA Hideki*, NAKAGAWA Masayuki*, HAYASHI Narumi*, NAGAI Tomohiro*,
KAWAHARA Takashi* and ENDO Keiichiro*

抄 録

プラスチックはその優れた利便性により、我々の生活には欠かせないものとなっているが、カーボンニュートラル社会実現に向けて使用量削減につながる取組は重要な技術開発課題となっている。そこで、カーボンニュートラル性の高いバイオプラスチックの利用を促進するため、新潟県工業技術総合研究所の有するポリマーブレンド技術によって PLA の耐衝撃性や耐熱性を改善するためにブレンドする材料を選定し、加工条件の最適化を行った。その結果、耐衝撃性は PLA 単体に対して 2.8 倍となり、大幅に改善することができたが、耐熱性には変化が見られなかった。

1. 緒 言

プラスチック材料は幅広い物性や高い成形性により日用品から自動車、医療と幅広い分野で使用されており、我々の生活には欠かせないものとなっている。一方で、プラスチック材料はそのライフサイクルにおいて、化石資源由来であること、製造過程や廃棄過程でも CO₂ を排出することから、国が宣言している「2050 年カーボンニュートラル」の実現のためにプラスチック材料の使用量削減やリサイクルに関する様々な取組が進められている。しかしながら、プラスチック材料を全く使用しないといった社会の実現は難しく、使用量削減やリサイクルにつながる技術開発が重要となっている。プラスチック材料の使用量削減においてバイオプラスチックの採用が推進されているが、化石資源由来のプラスチック材料と比べると、物性・機能性が劣ることに加えてコストアップにつながることから、バイオプラスチックの普及は遅れている¹⁾。

バイオプラスチックの中でバイオマス由来の生分解性プラスチックであるポリ乳酸（以下 PLA）は優れたカーボンニュートラル性を有する材料である。しかし、耐衝撃性や柔軟性がないこと、耐熱性が低いことなどが障壁となり、国内で使用されているバイオプラスチック中の PLA の占める割合はおよそ 10%とあまり高くない²⁾。

そこで、本研究では、PLA と他のプラスチック材料のポリマーブレンドによって耐衝撃性や耐熱性の改善を目指した。ポリマーブレンドは、個々のプラスチック材料では実現できない物性の材料開発で用いられる一般的な手法であるが、混ざり合わない、もしくは混ざりにくい組合せが多く、相溶化剤を使用したり、化学的な結合を用いたりするケースがほとんどであった。一方、高せん断成形加工技術は、相溶化剤を使わずに相溶化しないプラスチック材料をブレンドする技術²⁾であり、複合化する材料はプラスチック材料以外の材料も強いせん断作用によって

* 技術統括センター

ブレンドすることが可能で、用途に合わせて特性を調整できる。

2. 実験方法

PLA はユニチカ (株) 製テラマック TE-2000 を用いた。ブレンドする材料には上野製薬 (株) 製液晶ポリマー (以下 LCP) UENO LCP AL-7000 を使用した。PLA に LCP を重量比で 1%, 2%, 5%, 10%ブレンドした後に真空乾燥機で 40℃, 4 h 以上乾燥させた。

高せん断加工は、高せん断成形加工装置 NHSS8-28 ((株)ニイガタマシンテクノ製) を使用した。加工条件として、高せん断スクリュの回転数を 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm, 高せん断を付与する時間を 10 s とした。LCP 濃度 1%の 2000 rpm の実験中に装置のモータ負荷が過大となり、途中で加工ができなくなったため、データが欠損している。

加工した材料について、シャルピー衝撃強さと動的粘弾性測定による貯蔵弾性率ならびにガラス転移点の測定を行った。PLA の耐熱性が低いとされる要因は、60℃と低いガラス転移点に由来することが多いため、耐熱性評価の指標としてガラス転移点を用いることとした。試験片として幅 10 mm, 厚み 3 mm, 長さ 80 mm の形状に射出成形し、標準雰囲気 (室温 23℃, 相対湿度 50%) 下に 48 時間以上静置したものを供試した。

シャルピー衝撃強さの測定はユニバーサルインパクトテスター ((株)東洋精機製作所製) を用い、ハンマーひょう量 7.5J, ノッチ加工はなしとした。試験を 5 回行い、その平均値をシャルピー衝撃強さとした。

動的粘弾性の測定は、動的粘弾性測定装置 DMA Q800 (ティ・エイ・インスツルメント・ジャパン (株) 製) を用い、室温から 170℃まで 3℃/min で昇温し、ひずみ 0.05%を周波数 1 Hz で付与して行った。貯蔵弾性率は 35℃の時の値を代表値とし、ガラス転移点は $\tan \delta$ のピークから算出した。

3. 実験結果

図 1 に各条件のシャルピー衝撃強さの測定結果を示す。PLA に LCP を添加することによってシャルピー衝撃強さは向上したが、LCP 濃度が 2%を最大として LCP 濃度の増加とともに低下した。高せん断加工の回転数の影響は、PLA 単体ではその影響はみられなかったが、LCP 濃度が 1%, 5%, 10%では 1500 rpm, LCP 濃度 2%では 2000 rpm で最大となった。高回転側のシャルピー衝撃強さが大きくなる傾向がみられることから、強いせん断作用によって LCP が微分散して、衝撃強さが大きくなったと推察されるため、シャルピー衝撃試験後の破断面の電子顕微鏡観察を行った。その結果を図 2 に示す。LCP 濃度が 10%, 回転数が (a) 1000 rpm, (b) 1500 rpm である。粒状に見えるものが添加した LCP であると考えられるが、電子顕微鏡観察ではそのサイズに大きな差は確認できなかった。

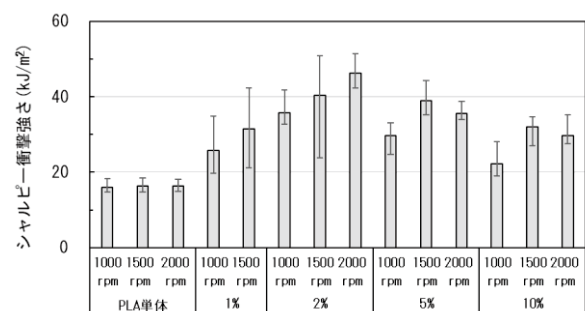


図 1 各条件のシャルピー衝撃強さ

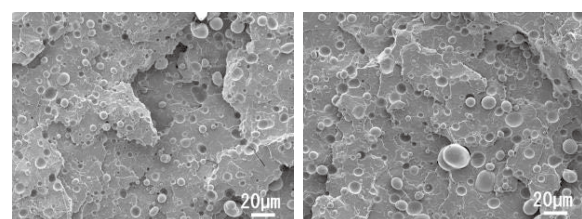


図 2 シャルピー衝撃試験後の破断面観察

図 3 に各条件の貯蔵弾性率の測定結果を示す。PLA 単体についてはシャルピー衝撃強さに差が見られなかったことから、1500 rpm のみ動的粘弾性の測定を行った。LCP 濃度が高くなると貯蔵弾性率が大きくなり、実験範囲では 10%が最大となった。高せん断加工の回転数の影響は LCP 濃度が 1%, 2%, 10%では 1500 rpm, 5%では 2000 rpm で最も大きくなった。

図 4 に各条件のガラス転移点の測定結果を示す。ガラス転移点は LCP 濃度や回転数の影響に傾向はみられず、変化の範囲が数℃と小さいため、LCP 添加による耐熱性改善の効果は実験範囲内では確認することができなかった。

以上、PLA の耐熱性や耐衝撃性を改善するため、高せん断成形加工技術による PLA/LCP 材の開発を行った。その結果、シャルピー衝撃強さは PLA 単体に対して最大で 2.8 倍、貯蔵弾性率は 1.1 倍となり、ガラス転移点はほとんど変化しなかった。

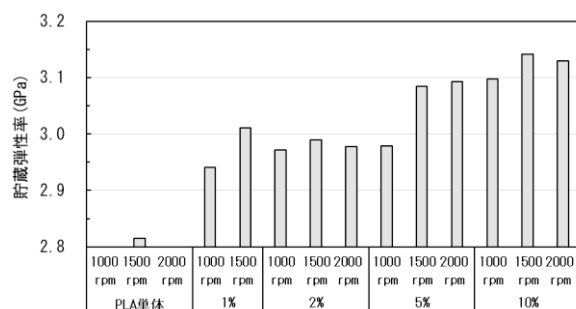


図 3 各条件の貯蔵弾性率

4. 結 言

- (1) バイオプラスチックの利用拡大のため、高せん断加工によるポリマーブレンドによって PLA の物性改善に取り組んだ。
- (2) PLA に LCP を添加した結果、シャルピー衝撃強さや貯蔵弾性率は大きくなり、ガラス転移点はほとんど変化しなかった。特にシャルピー衝撃強さは LCP 濃度が 2%で最大となり、PLA 単体に対しておよそ 3 倍の結果となった。

参考文献

- 1) 環境省他, “バイオプラスチック導入ロードマップ”, <https://www.env.go.jp/content/900534511.pdf>, (閲覧 2025-5-8).
- 2) 清水博, Yongjin LI, “高せん断成形加工技術により創製した新規ナノコンポジットの構造と物性”, 高分子論文集, Vol.71, No. 3, (2013), pp.69-88.

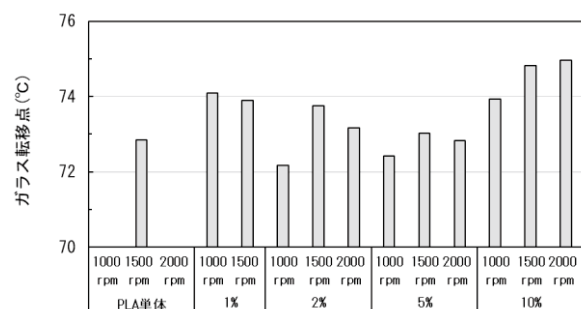


図 4 各条件のガラス転移点

V 技術課題探索

地域企業に貢献する次世代デジタル エンジニアリングの調査研究

斎藤 雄治* 小林 豊* 山田 昭博*

A Survey Study on Next-Generation Digital Engineering for Supporting Local Companies

SAITO Yuji*, KOBAYASHI Yutaka* and YAMADA Akihiro*

抄 録

県内製造業における DX（デジタルトランスフォーメーション）の取組状況、課題および工業技術総合研究所（工技総研）に対する支援ニーズの把握を目的として、県内製造業企業 133 社を対象にヒアリング調査を実施した。ヒアリングの結果を分析し、企業における DX 推進上の課題から、求められる支援内容を検討するとともに、課題解決に資するデジタル技術のシーズを抽出し、その中から工技総研で実施可能な FS 研究テーマの方向性について整理・検討した。

1. 結 言

近年、製造業においては、DX（デジタルトランスフォーメーション）の重要性が広く認識されている。背景には、少子高齢化による人材不足、熟練技能者の減少、製品の高付加価値化や品質要求の高度化など、製造現場を取り巻く環境の大きな変化がある。これらの課題に対応するため、デジタル技術を活用した業務効率化や品質安定化への期待が高まっている¹⁾。

一方で、中小製造業においては、人材、資金、時間といった制約から、DX への対応が十分に進んでいない現状が指摘されている。特に、デジタル技術の導入自体が目的化し、現場の課題解決につながらない事例や、導入後の運用が定着せず、十分な効果が得られない事例も少なくない²⁾。このような状況は、DX に対する具体的な進め方や適用方法が整理されていないことに起因していると考えられる。

こうした課題を踏まえると、DX 推進においては、単に新たなデジタル技術を導入するのではなく、製造現場が抱える課題を的確に把握し、ビジネスモデルの変革につながるように、それ

に適した技術を段階的に適用していくことが重要である。そのためには、企業自身が課題を整理し、技術選定や活用の方角性を検討できるための支援が求められる。

本調査では、県内企業が実際に直面している製造現場の課題や DX に対する認識、工技総研に期待する役割についてヒアリングを行った。さらに、その結果に基づき DX に関する課題を整理して、課題解決に資するデジタル技術のシーズを抽出し、工技総研が担うべき FS 研究テーマの方角性を明らかにすることを目的とする。

2. 調査結果

調査期間は令和 7 年 4 月から令和 8 年 2 月までとし、県内の製造業企業 133 社を対象にヒアリング調査を実施した。本調査では、DX の取組状況や課題、工技総研に対する要望等について情報収集を行い、その内容を整理・分析した。

ここで、ヒアリング調査企業の産業分類別内訳を表 1 に示す。表より、機械・金属関連分野が全体の中で大きな割合を占めている。

* 技術統括センター

表1 ヒアリング調査企業の産業分類別内訳

産業分類	企業件数
金属製品製造業	35
生産用機械器具製造業	19
はん用機械器具製造業	11
電気機械器具製造業	8
食料品製造業	8
プラスチック製品製造業	8
輸送用機械器具製造業	7
化学工業	5
飲料・たばこ・飼料製造業	3
その他	29

2.1 企業における DX 推進上の課題

ヒアリング結果の分析から、多くの企業が DX の必要性そのものは認識している一方で、具体的な取組方針や進め方が定まっていない状況が確認された。本節では、ヒアリング結果から見られる DX 推進上の共通の課題を「目的の設定に関する課題」と「適用方法に関する課題」に分けて整理する。

(1) 目的の設定に関する課題

まず、DX の取組目的に関する共通の課題として、「DX を何のために実施するのが明確でない」という点が挙げられる。

多くの企業において DX の必要性は認識されている。しかし、自社の製造現場における具体的な課題（品質ばらつき、作業効率低下、技能伝承など）との対応関係が整理されておらず、DX が単なる IT 導入やデータ取得にとどまり、現場の改善や経営課題の解決に結び付いていない事例も見受けられた。

すなわち、「何を改善したいのか」という目的の設定が不明確であることが、DX 推進の初期段階における課題となっている。

(2) 適用方法に関する課題

次に、適用方法に関する共通の課題として、「どの工程で、どのようなデータを取得し、ど

のように活用すべきかが分からない」という点が挙げられる。

ヒアリングでは、「どの工程で、どのようなデータを取得すべきか分からない」「データを取得しても、どのように活用すればよいか判断できない」といった意見が確認された。

また、既存の業務記録や生産データについては、紙や Excel 等で蓄積されているものの、分析や改善活動に十分活用されていないケースが見られた。これは、データの整理方法や評価指標が明確でないことに起因すると考えられる。

さらに、DX 推進を担う人材の不足により、技術導入後の運用や改善活動が継続できないという課題も確認された。

(3) 求められる支援内容

以上の課題から、企業ニーズとしては高度なデジタル技術の導入そのものよりも、自社の製造現場の課題を起点として DX を段階的に進めるために、次のような支援が求められると考える。

- ・製造工程を整理し、各工程における品質ばらつき、不良発生、作業効率の低下といった課題を可視化する支援
- ・課題に対応して、どの工程でどのようなデータ（寸法、温度、時間、稼働状況等）を取得すべきかを整理する支援
- ・取得したデータと品質や生産性との関係を把握するための分析手法（統計的工程管理（SPC）や実験計画法（DOE）等）の適用支援
- ・分析結果を基に、加工条件の見直しや作業手順の改善につなげるための評価指標および活用手順の提示

すなわち、企業が自律的に DX を推進するために、課題整理からデータ活用までの一連のプロセスを支援する枠組みが求められる。また、これらの支援を実施するには、職員においてもデジタル技術およびデータ活用に関する知識の向上が求められる。

2.2 デジタル技術のシーズ

前節で整理した企業ニーズに対応するデジタル技術シーズとしては、すでに多様な技術が実用段階にある。具体的には、後付け可能な IoT センサを用いた工程データの取得、SPC や DOE による品質ばらつき等の要因分析、既存ソフトウェアを活用したデータ整理・可視化手法などが挙げられる。

これらの技術は、必ずしも大規模な設備投資や高度なシステム構築を必要とせず、小規模・段階的に導入可能である点に特徴がある。

しかしながら、中小製造業においては、「何を目的として DX に取り組むのか」、「どの工程に対してどの技術を適用するのか」という対応関係が整理されておらず、技術の選定や導入判断が難しい場合がある。

また、技術導入後の運用段階においても、取得したデータを、どのような指標で評価するか、どのように品質改善や工程改善に結び付けるか、といった一連の活用プロセスが明確でなく、十分な効果が得られない事例が見受けられた。

このことから、単に技術を紹介するだけでなく、「課題設定 → データ取得 → 分析 → 改善」までの一連の適用プロセスを含めて、現場課題と技術シーズを結び付ける具体的な適用モデルの提示が重要と考えられる。

2.3 FS 研究のテーマの方向性

本調査結果を踏まえ、工技総研で実施可能と考えられる FS 研究テーマの方向性を検討した。その結果、デジタル技術のシーズを活用して企業の DX 推進上の課題を解決するテーマとして、次の FS 研究が有効と考えられた。

第一に、後付け IoT を活用した製造工程の可視化に関する研究である。本テーマでは、市販の簡易センサ等を用いて加工・製造工程における状態データを取得し、品質や作業条件との関係を整理することを目的とする。これにより、「どの工程で、どのようなデータを取得することが有効か」を例示し、中小企業でも導入可能

な可視化モデルの構築を目指す。

第二に、技能や経験に依存した工程判断の数値化・ルール化に関する研究である。企業によっては、作業の進め方や条件設定などが熟練者の経験に依存している。本テーマでは、作業時の条件設定と製品の仕上がり（寸法のばらつき、不良の発生状況、外観品質等）の関係を整理し、判断基準を数値やルールとして表現する手法を検討する。これにより、技能の見える化や標準化をはかり、技能継承や品質安定化等の課題への対応が期待される。

第三に、小規模データを前提とした品質ばらつきの要因解析に関する研究である。中小製造業では、大量のデータを前提とした解析手法の適用が困難な場合が多い。本テーマでは、限られたデータ量でも適用可能な SPC や DOE の現場での適用方法を整理し、品質のばらつき低減に資する実践的な解析手法の構築を目指す。

これらの FS 研究テーマは、特定分野に限定されるものではなく、分野横断的に適用可能である点に特徴があり、工技総研が主体となって取り組む意義は大きいと考えられる。

3. 結 言

- (1) 本調査により、地域製造業における DX 推進上の共通の課題として、DX の目的が自社の製造工程における具体的課題と十分に結び付いていないことや、どの工程に対してどのようなデータを取得し、どのように活用するかという適用方法が整理されていないこと等が明らかとなった。
- (2) これらの課題に対応するためには、製造工程の整理、工程データの取得項目の整理、分析手法の適用など、課題整理からデータ活用までの一連のプロセスの支援が必要と考えられる。
- (3) デジタル技術のシーズとしては、後付け IoT による工程データ取得、SPC や DOE による要因解析、既存ツールを活用したデータ可視化などが挙げられるが、これらを企業の

課題と結び付けて適用するための具体的な活用モデルの提示も重要と考えられる。

- (4) 本調査で得られた知見は、今後の FS 研究テーマの具体化および技術支援の高度化に活用するとともに、県内企業への展開を通じて、地域製造業における DX 推進の実効性向上に寄与することが期待される。
- (5) これらの支援を効果的に実施するためには、

職員におけるデータ活用技術や課題に対する整理能力等の向上が重要であり、今後の人材育成の取組が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 経済産業省・厚生労働省・文部科学省編, 2025 年版 ものづくり白書, (2025).
- 2) 中小企業庁編, 中小企業白書 2025 年版, (2025).

環境負荷低減に向けた洗浄技術に関する研究

内藤 隆之* 大川原 真* 皆川 森夫* 橋詰 史則*
林 成実** 天城 裕子** 渡邊 亮**

Cleaning Technique for Environmental Load Reduction

NAITO Takayuki*, OKAWARA Makoto*, MINAGAWA Morio*, HASHIZUME Fuminori*
HAYASHI Narumi**, AMAKI Yuuko** and WATANABE Ryo**

抄 録

SUS304, SUS430, SUS420J2の各ステンレス鋼について、環境負荷低減を目的にトリクロロエチレン洗浄の代替方法を検討して、硫酸と硝酸の混酸液への浸漬と超音波照射併用による洗浄を検討した。この結果、切削油等の汚れに対しては液温が室温の状態で60秒以内に、絞り加工やバフ研磨による油等の汚れの場合は80℃以下の加温で60秒以内に、ステンレス鋼を肌荒れせずに洗浄できることを確認した。今後、溶剤洗浄の代替方法となり得る可能性を示した。

1. 緒 言

塩素系洗浄剤であるトリクロロエチレンは金属製品製造工程の脱脂洗浄で多用されてきたものの発癌性物質との指摘を受け、人・環境への影響を考慮して、新潟県では「トリクロロエチレンの排出抑制に向けた自主的取組ガイドライン」¹⁾を策定するなど²⁾、その使用に当たり大気への放出を抑制する対策に取り組んでいる。

一方、トリクロロエチレンに代わる洗浄剤としてアルカリ洗浄剤や炭化水素系洗浄剤等が検討されているものの、現状では生産性や安全性（難燃性であること）を考慮すると、特に研磨剤除去の目的としてはトリクロロエチレン以上に有用な洗浄剤が見つからない状況にある。

また、トリクロロエチレン同様に多用されてきたフッ素系洗浄剤は第一世代が1995年末に生産全廃、第二世代と第三世代は規制され、第四世代が上市されている状況であるが、いずれ規制対象となる可能性が高い。

本研究ではトリクロロエチレンの代替方法として、これまでに SUS304 の酸洗浄方法を検討

した結果、硫酸と硝酸の混酸による浸漬洗浄に超音波照射を併用することで洗浄効果の著しい向上を確認した³⁾。今年度は鋼種を増やすと共に実際の工程で付着する汚れを想定して、機械加工油とバフ研磨品を対象とした洗浄方法について、その効果を検証した。

2. 実 験

2.1 金属表面の洗浄力評価

被洗浄材は測定面が鏡面研磨された SUS304 と SUS430 (50x50x1mm) 及び三徳包丁（刃渡り

(加熱処理前)



(加熱処理後)

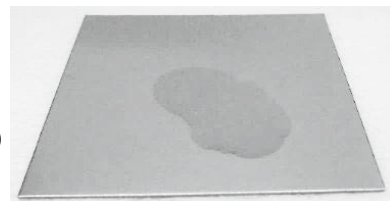


図1 加熱処理前後の SUS304 試験片の蒸留水に対する濡れの様子

* 県央技術支援センター

** 技術統括センター



中和 ← 水洗 ← 混合酸洗浄
(アルカリ電解水) (水道水) (超音波照射)

図2 混酸による洗浄実験の様子

17cm：SUS420J2 製）を用いた。三徳包丁は予め刃先を丸めてから 17cm の刀身を幅 4cm 程度に分割して被洗浄材とした。なお，表面は鏡面研磨せずに使用した。本実験では初めに被洗浄材の除染目的で 350℃の加熱処理をした（図1）。その測定面に模擬汚染物として市販の切削油（ホーザン(株)製 Z-217）と極圧潤滑剤（化研産業(株)製 NASKALUB）を個別に塗布し，ウェスで余分な油や潤滑剤を拭き取り，温風乾燥後，試験片（以下，試験片）とした。この 2 種類の模擬汚染物への洗浄方法は，硫酸と硝酸の混酸（以下，混酸）を室温にてガラス容器中で調製後，試験片をこの混酸に浸漬直後に容器ごと超音波洗浄器へ移し入れ，超音波を 30 秒間照射した後，試験片を取り出して水洗とアルカリ電解水での中和処理をし（図 2），最後に蒸留水で濯ぎ温風乾燥した。超音波洗浄器は，（株）エスエヌディ製 US-01 を使用した。蒸留水は，ヤマト科学(株)製純水製造装置オートスチル WG250 より採取した。

2.2 混酸に対する試験片表面の耐食性評価

混酸に対する各試験片の耐食性試験を表 1 の条件で行った。試験前後における試験片表面の評価方法は，オリンパス(株)製 3D 測定レーザー顕微鏡 OLS4100-SAT を使用して，表面観察と表面粗さ（Ra と Rz）の計測を行った。

表 1 各試験片の耐食性試験条件

試験条件	1	2
超音波	あり	なし
浸漬時間	3 分間	96 時間

2.3 実験結果

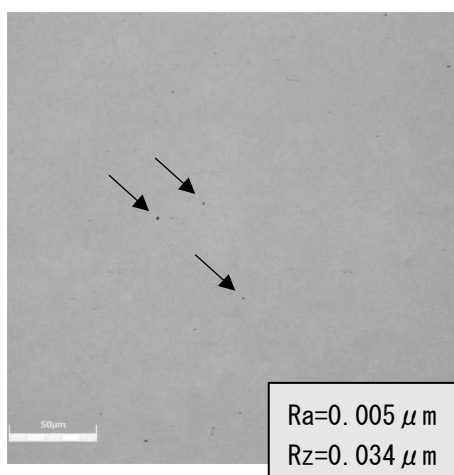
2 種類の模擬汚染物（切削油と極圧潤滑剤）に対する各試験片での混酸洗浄結果は良好であり，模擬汚染物を塗布する前の状態（図 1 の加熱処理後）と同様な濡れの様子を示した。

次に，混酸に対する各試験片の耐食試験結果を図 3 から図 5 に示す。

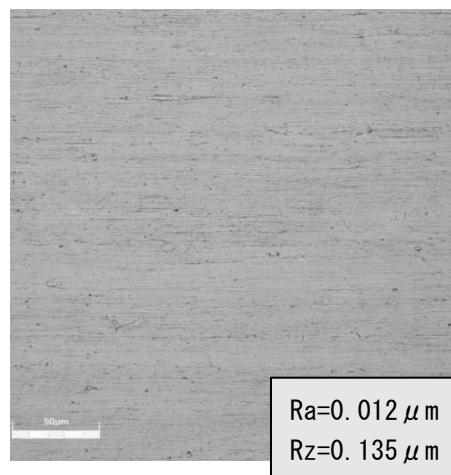
SUS304 について，超音波あり 3 分間浸漬の試験では試験前後の表面の様子と表面粗さは同程度であった。一方，超音波なし 96 時間浸漬の試験では，試験前の表面観察で確認できた凹み（矢印）の数が試験後の表面では増えており，若干 Rz の値が大きくなった（ $0.034\mu\text{m} \rightarrow 0.050\mu\text{m}$ ）ものの，目視では肌荒れは確認できなかった（図 3）。

SUS430 については，SUS304 と異なり，試験前の時点で研磨痕による横縞模様が見られた。超音波あり 3 分間浸漬の試験では試験後の表面粗さ（Ra, Rz）の値が大きくなった（Ra： $0.012\mu\text{m} \rightarrow 0.026\mu\text{m}$ ，Rz： $0.135\mu\text{m} \rightarrow 0.167\mu\text{m}$ ）ものの，表面の横縞模様の濃淡は同程度のように見えており，目視では肌荒れは確認できなかった。一方，超音波なし 96 時間浸漬の試験では，表面の横縞模様の濃淡が試験後に濃く見えたものの，目視では肌荒れは確認できなかった。この横縞模様の濃淡の変化は Rz の値が大きくなったこと（ $0.135\mu\text{m} \rightarrow 0.205\mu\text{m}$ ）から，試験前の研磨痕（横縞模様）による凹み部分が深く成長したものと考えられる（図 4）。

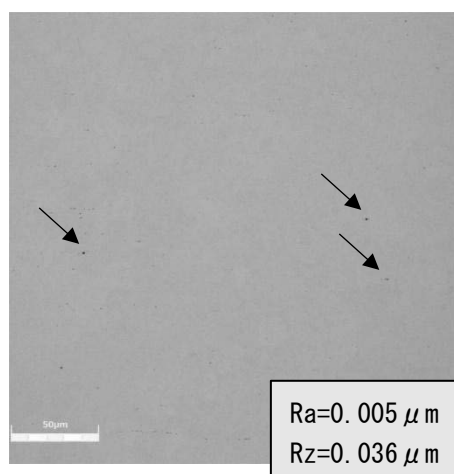
SUS420J2 については，試験前の時点でヘアライン仕上げされた表面であり，研磨痕の凹凸による表面粗さ（Ra, Rz）の値が SUS304 と SUS430 と比較して一桁大きい。超音波あり 3 分間浸漬の試験では試験後の Rz の値が大きくなっ



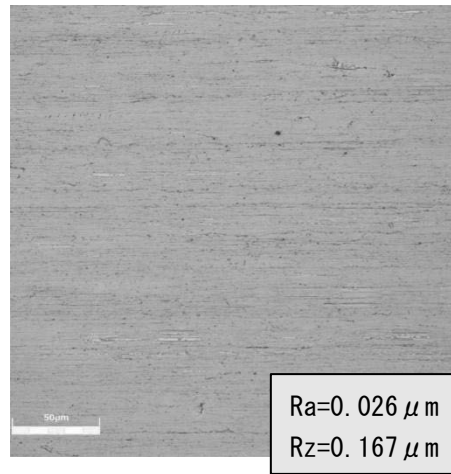
(a) 試験前



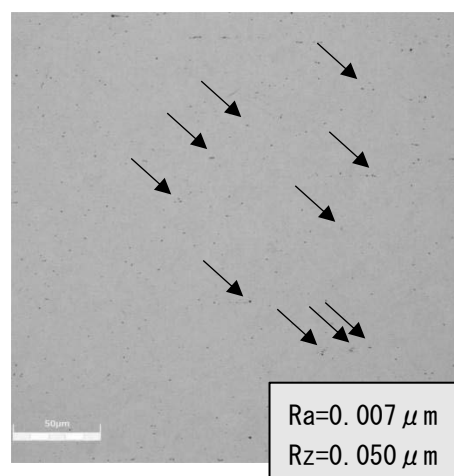
(a) 試験前



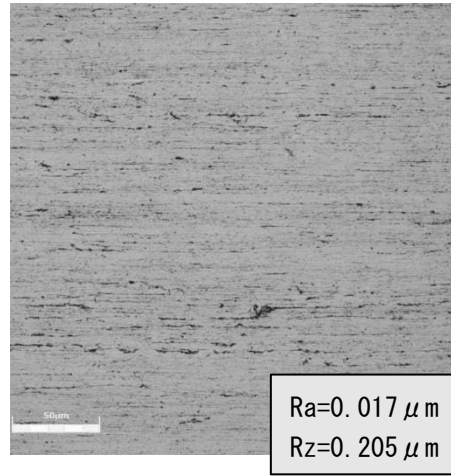
(b) 超音波あり 3 分間浸漬



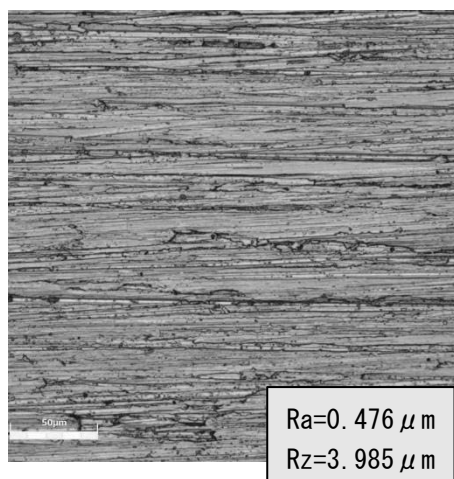
(b) 超音波あり 3 分間浸漬



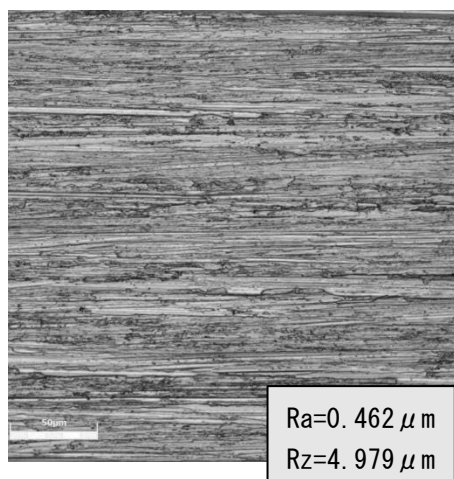
(c) 超音波なし 96 時間浸漬
図 3 SUS304 の耐食試験結果



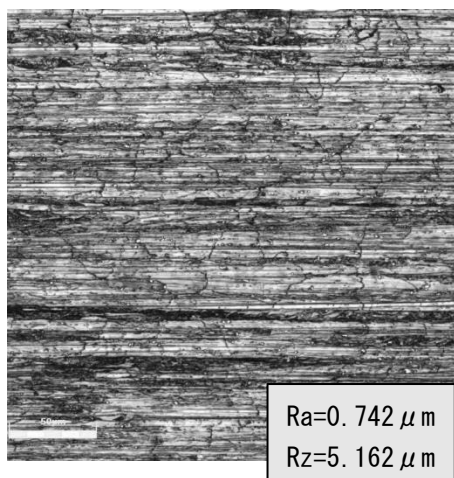
(c) 超音波なし 96 時間浸漬
図 4 SUS430 の耐食試験結果



(a) 試験前



(b) 超音波あり 3 分間浸漬



(c) 超音波なし 96 時間浸漬

図 5 SUS420J2 の耐食試験結果

た ($3.985\mu\text{m} \rightarrow 4.979\mu\text{m}$) もの、表面の研磨痕による凹凸は同程度のように見えており、目視では肌荒れは確認できなかった。一方、超音波なし 96 時間浸漬の試験では、混酸が青緑色に着色しており、試験片表面が溶解していることがわかった。表面の様子はヘアラインの研磨痕が残るものの、結晶粒界が表出する程度に表面が浸食されており、試験後の表面粗さ (R_a , R_z) の値が大きくなったこと ($R_a : 0.476\mu\text{m} \rightarrow 0.742\mu\text{m}$, $R_z : 3.985\mu\text{m} \rightarrow 5.162\mu\text{m}$) も併せて確認した。また、目視では試験前後で光沢面が少し曇る程度の肌荒れが確認された。

以上のことから、超音波あり 3 分間の室温混酸浸漬による洗浄方法では SUS304, SUS430 および SUS420J2 に対し、目視で肌を荒らすことなく洗浄できることを示せた。また、長時間の浸漬という厳しい条件下であっても、SUS304 および SUS430 については目視で肌荒れは無いことを確認できた。

2.4 実製品の洗浄実験

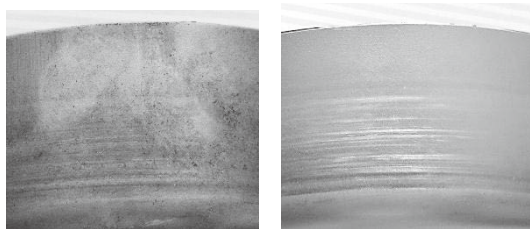
(株)セキヤ (新潟県燕市) より SUS304 製の絞り加工品及び同加工品にバフ研磨 (研磨剤 : 白棒) した洗浄実験試料 (以下、被洗浄品) を提供していただいた。洗浄実験の一例を図 6 と図 7 に示す。結果は被洗浄品の表面に固着した加工油や研磨粉 (矢印) が綺麗に除去でき、また目視でも肌荒れ無く良好な結果が得られた。

2.5 研究結果の特許出願

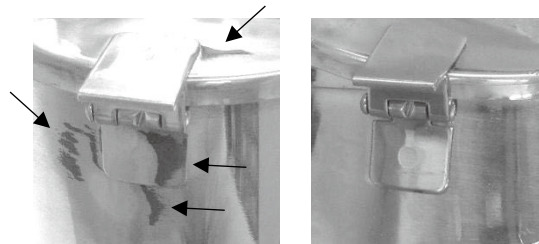
本研究結果を踏まえ、「ステンレス鋼の酸洗浄方法」として特許出願 (特願 2026-43120) を行った。

3. 結 言

(1) 本研究で用いた混酸による洗浄方法では、切削油と極圧潤滑剤に対して、洗浄液が室温でも十分な洗浄効果を得ることができた。また、洗浄液を昇温することで、絞り加工品やバフ研磨品等の実製品の洗浄にも有効



(洗浄前) (洗浄後)
図6 洗浄前後の絞り加工品
(80℃浸漬・超音波 60 秒)



(洗浄前) (洗浄後)
図7 洗浄前後の白棒研磨品
(60℃浸漬・超音波 60 秒)

であった。

- (2) 超音波を併用した室温での3分間の浸漬試験により，本研究で用いた混酸による各種ステンレス鋼の耐食性を評価した結果，目視で試験片表面に肌荒れは確認できなかった。
- (3) 当該混酸洗浄方法は，ステンレス鋼の洗浄方法として溶剤洗浄の代替方法となり得る可能性を示した。
- (4) 「ステンレス鋼の酸洗浄方法」として特許出願を行った。

謝 辞

本研究にあたり，絞り加工やバフ研磨した洗

浄実験試料を提供いただいた(株)セキヤ，特許出願を支援いただいた弁理士法人牛木国際特許事務所に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) トリクロロエチレンの排出抑制に向けた自主的取組ガイドライン, <https://www.pref.niigata.lg.jp/site/kankyo/200410torikurogaidorain.html>, (閲覧 2024-5-7).
- 2) トリクロロエチレン取扱セミナー, (2025-12-11 燕市主催).
- 3) 内藤隆之, 大川原真, 皆川森夫, “新潟県工業技術研究報告書”, No.54, 令和6年度, pp.47-50.

鑄造シミュレーションの精度検証

福田 拓哉* 本田 崇*

Validation of Casting Simulation Accuracy

FUKUDA Takuya* and HONDA Takashi*

抄 録

砂型アルミ鋳物を対象として引け巣予測解析を実施し、実際に発生した鋳造欠陥の再現をとおして、適切な解析設定の検証を行った。適切な要素サイズを設定することで、現品で発生する引け巣を再現できることがわかった。また、熱物性値の温度依存性を考慮することで予測精度は向上するが、対象とした薄物のドーム形状の場合、一定値でも引け巣の有無は予測できることがわかった。

1. 緒 言

中越地域には石油採掘や工作機械産業の隆盛を背景に、多くの機械鋳物の製造企業が存在する。それらの企業においては、技術者の経験と感覚に基づく設計と製造が主流である。しかし、鋳造における溶湯の流れや凝固の様子を直接観察することは困難であり、それらをイメージしながら試行錯誤する現状の手法は多くの時間や費用を要する。そのため、品質・納期・価格に対する要求が一段と厳しくなる中で、従来の手法による設計、製造では対応が困難となりうる。

近年、コンピュータで様々な物理現象を可視化できる技術として、CAE の活用が進んでいる。当所でも、**铸造シミュレーションソフトウェア（株）日立産業制御ソリューションズ ADSTEFAN**）を所有している。運用において様々な解析設定を適切に行うためには、実際の**铸件（以下、現品）**と**計算結果の比較による検証**を行う必要がある。

そこで本研究では、今後の支援力強化のため、砂型アルミ鋳物を対象に、上記ソフトウェアによる引け巣予測解析を実施し、実際に発生した鋳造欠陥（引け巣）を再現することで、適切な解析設定を検証した。

2. 計算モデル

計算モデルを図 1 に示す。計算時間短縮のため、計算モデルは溶湯経路を含めて全体の 1/4 とした。製品部はドーム形状で表面に同心円状に押湯が配置される。鋳型上には断熱材のスリーブが設置され、内部で押湯上端が成型される。

3. 適切な要素サイズの検証

3.1 計算条件

使用したソフトウェアでは均等直交メッシュを採用しており、全解析領域を同サイズの立方体で要素化する。要素サイズは計算精度と計算時間に影響する。そのため、これらを両立可能な要素サイズの設定が求められる。そこで、主要形状の層数を変化させた計算モデルを用いて、比較・検証を行った。本研究では、ドーム形状

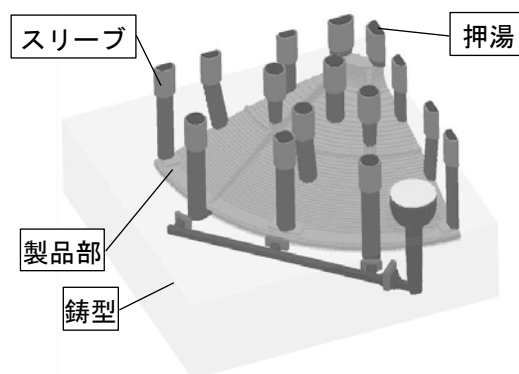


図1 計算モデル

* 中越技術支援センター

の曲面部の厚さ方向に対して、最少で2層、3層、4層となる要素サイズとした。

計算条件を表1に示す。材質はソフトウェアの材料データベースから適用し、溶湯・雰囲気温度及び注湯時間は実工程を踏まえて設定した。

溶湯-鋳型間の熱伝達係数については、ソフトウェアベンダーより示されている範囲（以下、ベンダー設定例）から、 $1700\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ とした。

3.2 引け巣解析結果

凝固完了時の製品部及び押湯の健全度並びに計算時間を図2に示す。凝固収縮による空隙が生じると健全度が低下し、引け巣発生リスクが高い箇所（以下、不健全部）となる。押湯の下部に発生した現品の鋳造欠陥に対して、2層では不健全部が生じず、3層及び4層では実際と近い位置に発生した。本研究対象のような形状で引け巣の予測を行う場合、計算時間を考慮すると3層の分割が適切なサイズと考えられる。

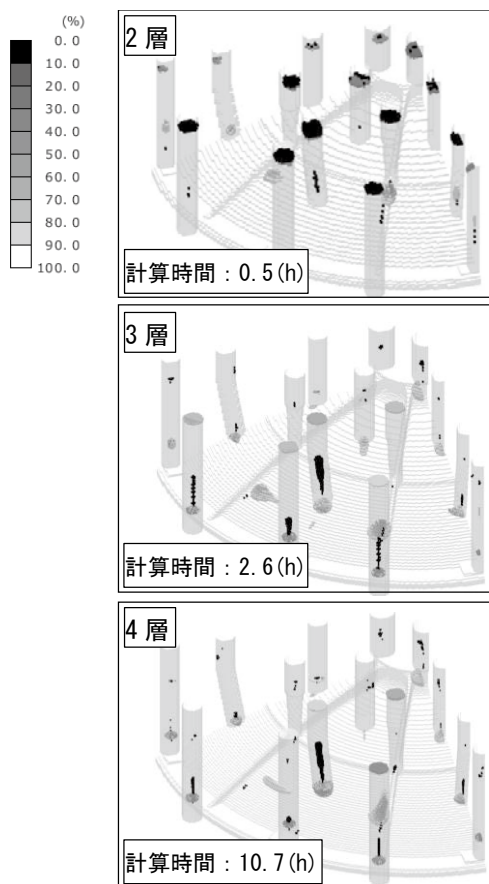


図2 健全度(凝固率 100%)と計算時間

表1 計算条件

材質	温度(℃)		注湯時間(sec)
	溶湯	雰囲気	
AC2A	760	5	120

4. 熱特性の調整

鋳造解析の精度向上を図るには、さまざまな熱特性を実測し、解析パラメータとして設定する必要がある。一方で、多岐に渡る形状や材質を取り扱う場合、その都度測定を行うことは容易ではない。本研究では、熱特性値を極端に変更することで、引け巣解析結果に与える影響を基に、厳密な設定が必要であるか確認した。なお、要素分割は前章の結果より3層とした。

4.1 溶湯-鋳型間の熱伝達

溶湯と鋳型間の熱伝達は溶湯の温度変化に大きな影響を与える重要なパラメータであるが、鋳物・鋳型の材料や形状、充填条件などで変化するため、値を定めることが困難である。一方測定例として、中村ら¹⁾は実験からアルミ合金と砂型の熱伝達係数を $200\sim 1150\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ と算出している。前章の熱伝達係数は $1700\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ であり、上記の算出値に比べて溶湯の熱がより奪われやすい設定である。そこで、熱伝達係数の影響を確認するため、ベンダー設定例上、最も熱が奪われない $837\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ で計算を行った。

図3に凝固完了時の健全度を示す。不健全部が発生する範囲は若干異なるが、前章の結果と同様の傾向を示している。熱伝達係数の変更により、溶湯の温度は奪われにくくなったものの、溶湯温度の分布や凝固過程の変化への影響は少なく、引け巣発生への影響も少なかったためと考えられる。

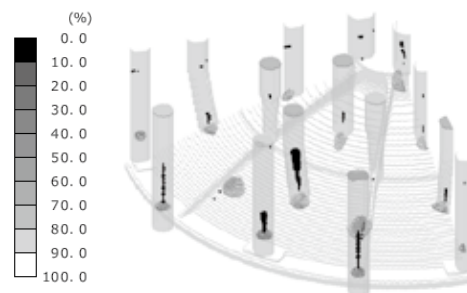


図3 健全度(凝固率 100%)

4.2 鋳物材料の熱物性値

鋳物材料の相変態時の挙動を精度よく再現するにあたって、比熱や熱伝導率などの熱物性値は重要なパラメータである。山口²⁾は測定した温度依存性を持つ熱物性値を解析に用いることで、引け巣予測精度を向上させた。

多くの熱物性値は温度依存性を持つが、使用したソフトウェアを含め、データベースの登録上、全温度域で一定値の場合がある。そこで上記の文献値を参考に、比熱・熱伝導率の温度依存性を考慮して計算し、引け巣発生への影響を確認した。設定した熱物性値を表2に示す。熱物性値以外は3.2節の3層の条件である。

凝固完了時の健全度を図4に示す。3.2節の結果に比べて、押湯直下に引け巣が生じる傾向があり、より現品に近い結果が確認された。

5. 鋳造欠陥対策案の再現

現品では、一部の押湯・スリーブ形状及び材料をAC4Cへ変更して鋳造欠陥を改善した。これまでの検討結果から、3.2節の3層の条件で、現品の引け巣を再現できている。そこで、実施した対策案にこの設定を適用して計算を行い、改善の効果を再現できるか確認を行った。

表2 熱物性値

	温度 (°C)	熱伝導率 (W/m・K)	比熱 (J/kg・K)
初期	全温度域	141.991	962.79
変更後	0	140	800
	500	140	1200
	600	70	1100
	800	70	1100

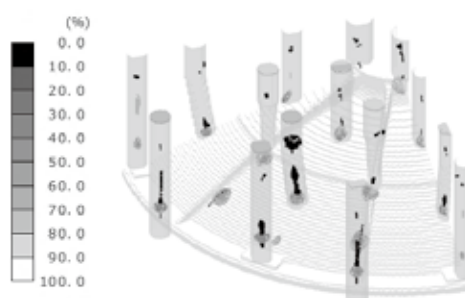


図4 健全度(凝固率 100%)

対策前後の凝固完了時の健全度を図5に示す。押湯下部に発生していた不健全部の大半は押湯内に収まり、現品同様の対策効果が見られた。

6. 結 言

- (1) 適切な要素サイズの設定により、現品での引け巣の発生及び対策効果を確認できた。
- (2) 熱伝達の設定は引け巣の発生予測への影響は少ない。
- (3) 熱物性値の温度依存性を考慮することで、引け巣の予測精度は向上する。ただし、本モデルのような薄物形状の場合、データベースの値でも引け巣の有無は予測できる。

参考文献

- 1) 中村侑未ほか, “積層鋳型とアルミニウム合金溶湯の間の熱伝達係数算出方法とその課題”, 日本鋳造工学会 第180回全国講演大会講演概要集(2022), p.110
- 2) 山口真弘, “アルミ鋳造品の鋳巣予測精度向上のための物性測定技術および湯流れ・凝固解析による鋳巣予測結果の紹介”, 神戸製鋼技報, Vol.73, No. 2(2024), pp.129-134.

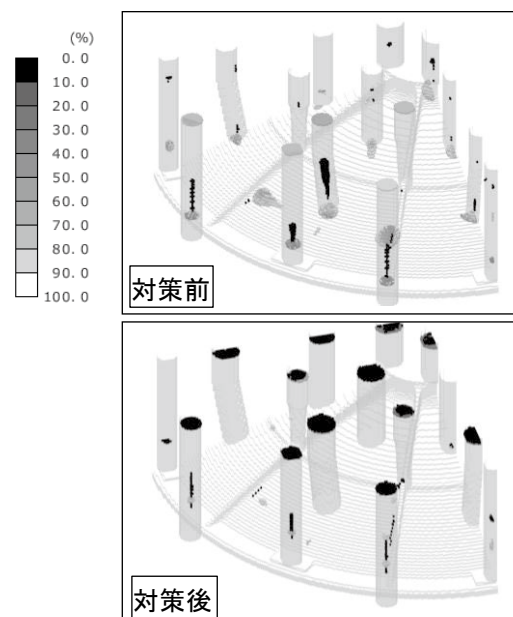


図5 健全度(凝固率 100%)

フッ素化成品代替撥水剤・コーティング剤に関する 技術課題探索

土田 知宏* 菅家 章* 近 正道*

Research Report on Alternative Water Repellent and Coating Agent to Fluorochemicals

TSUCHIDA Tomohiro*, KANKE Akira* and CHIKA Masamichi*

抄 録

PFAS 規制強化による撥水・撥油加工分野への影響を調査し、代替技術の可能性と課題を明確化する目的で技術課題を探索した。従来の PFAS 含有撥水剤は高い撥水・撥油性および耐久性を有していたが、規制による使用継続の困難が予想される。そのため、代替化成品の技術動向把握と性能評価が必要である。PFAS 代替技術は開発中であるが、性能および作業性の両面で改良が必要だと分かった。

1. 緒 言

PFAS (Per and Polyfluoroalkyl Substances : 有機フッ素化合物) の使用に関する規制により、従来の PFAS 含有の撥水剤やコーティング剤の使用ができなくなる。フッ素に代わる化成品は多くの原材料メーカーから提案されているが、従来品の高い撥水・撥油性と耐久性に見合う性能は実現できておらず、良い化成品の開発が求められており、素材応用技術支援センターと連携して技術課題を探索した。

2. 実施内容

2.1 企業ニーズ調査

県内外の PFAS 規制の影響や課題を調査した。調査結果の一部を表 1 で紹介する。

EU では REACH で包括規制案を策定し、2030 年以降の段階的禁止を目指している。日本国内でも規制が厳しくなり、現在影響のない企業においても、将来について不安を感じている企業が確認できた。

表 1 PFAS 規制の影響や課題

業種	所在地	PFAS規制の影響や課題
輸送用機械器具製造業	柏崎市	先日、欧州化学物質庁（ECHA）からパブリックコメントを求められ、報告済み。
ゴム製品製造業	糸魚川市	扱っている製品にフッ素は含有していないので影響はない。
外衣・シャツ製造業	長岡市	欧州向けは100%シリコン系の撥水剤に変わっている。国内は06。シリコン系は初期撥水は4級だが10回洗濯で2級に落ちる。
染色整理業	五泉市	イタリアでPFAS訴訟で有罪になったとの情報あり。
食料品製造業	新潟市	PTFEなどは社内で使用しているため、今後の動向は気になる。基本的には食品衛生法に則っているため、PFASが対象となれば情報をもらえると嬉しい。
パルプ・紙・紙加工品製造業	長岡市	自社製品の改質による撥水性付与は可能かもしれない。イオン性液体で溶かす加工で業界では動きがある。環境省などの規制に関する情報のセミナーを開催してほしい。
金属製品製造業	三条市	食品衛生法の改正により、テフロン製のパッキンが規制対象になった。
情報通信機器・同附属装置製造業	上越市	菌検査でPFASの案件あり。シリコン系を検討したがフッ素含有で材料選択の幅が狭まっている。
一般産業用機械・装置製造業	糸魚川市	今のところ影響はない。
非鉄金属素材材製造業	上越市	パルプにテフロン、Oリングにフッ素ゴムとフッ素系コーティング剤を使用しており、書面でいずれもPFAS類が含有していない事を確認した。PFAS規制が年々きびしくなると聞いているので、情報収集している。
電気機械器具製造業	大阪府	PFAS汚染で地元住民800人が大阪府に公害調停を申請。
染色整理業	十日町市	絹のガード加工を行っており、現在薬品メーカーと共同でフッ素フリー加工を新規開発中。後日、性能評価の依頼も。
プラスチック製品製造業	長岡市	飲料水用容器についてもPFAS規制が制定され、当社食品容器事業部においても注目ワードになっている。全国飲料工業会が主催の研究会も盛り上がっている。取扱製品においてもAmara's Law（ミネソタ州法 Minn. Stta. *116. 943）を背景とした問い合わせもある状況。

* 上越技術支援センター

2.2 技術シーズ調査

PFAS 代替の各種加工剤について調査した。調査結果の一部を表 2 で紹介する。

炭化水素系やシリコン系の加工剤や分析支援、フッ素非含有の素材を使用した取り組みなどの動向が分かった。

2.3 セミナー

令和 8 年 2 月 6 日（金）に PFAS フリーの撥水加工技術開発の紹介と経済産業省より化学物質管理法令に関する最新動向についての「PFAS フリー セミナー」を素材応用技術支援センターと共同で開催した。

2.4 FS 研究

フッ素化成品代替品について、素材応用技術支援センターと連携して繊維に対する性能評価を実施したところ、分散剤の課題（臭いがきつい、扱いにくい）が分かった。

3. 結 言

- (1) PFAS 規制動向を調査した結果、EU では 2030 年以降の段階的禁止が検討されており、国内企業においても将来的な規制強化を見据えた対応が必要であることを確認できた。
- (2) PFAS 代替技術の技術シーズ調査により、炭化水素系、シリコン系加工剤およびフッ素非含有素材の活用などの動向を把握したが、従来品と同等の撥水・撥油性および耐久性を満たす技術は限定的であり、性能向上が課題である。
- (3) FS 研究で繊維への適用評価を実施した結果、基本的な撥水性能は確認できたが、分散剤に強い臭気や作業性の課題が認められ、実用化に向けた改良および工程最適化が必要である。

参考文献

- 1) 環境省ホームページ, <https://www.env.go.jp/water/pfas.html>, (閲覧 2025-5-8)。

表 2 PFAS 代替の各種加工剤や各メーカーの取り組み

	メーカー	商品名	技術要素	用途等
1	日油(株)		長鎖アルキルユニット	繊維、紙への加工剤
2	住友ベークライト(株)	COPLUS	環状オレフィン樹脂、非極性タイプ 接触角106°	
3	東レ(株)	DEWEIGHT™ (デューエイト)	2種類のスパイラル構造を有する原系からなるマルチラフネス構造（特殊な凹凸構造）	アウター、ボトムス用途
4	関西ポリマー(株)		各種PFASフリー塗料など	
5	ダイキン工業(株)	UNIDYNE XFシリーズ	炭化水素系	テキスタイル
6	ダイキン工業(株)	UNIDYNE XPシリーズ	炭化水素系	紙
7	日華化学(株)	ネオシード シリーズ	PFASフリー、架橋剤	
8	日華化学(株)	ドライボン	シリコン系撥水剤	
9	JFEテクノリサーチ(株)	PFAS分析		素材、製品、水、排水中のPFAS含有量分析
10	日本ゴア(同)	GORE-TEX	従来のフッ素ポリマーを加工した「ePTFE」(延伸ポリテトラフルオロエチレン)から、「ePE」(延伸ポリエチレン)に変更する取り組みが進められてきた。	次世代ゴアテックス耐久性を追求

PFAS フリー撥水加工に関する技術課題探索

渋谷 恵太* 諸橋 春夫* 森田 渉* 皆川 要*

Exploring Technical Challenges Related to PFAS-Free Water-Repellent Coatings

SHIBUYA Keita*, MOROHASHI Haruo*, MORITA Wataru* and MINAGAWA Kaname*

抄 録

PFAS に対する規制強化を背景に、繊維製品の撥水加工では PFAS フリー化が急速に求められている。本研究では、県内企業から提供を受けた複数の PFAS フリー撥水加工剤を用いて布帛への試加工を行い、それらの撥水性についての性能評価試験を実施した。その結果、特に非水系加工剤で加工初期の状態では比較的良好な性能を示すことが確認できた一方で、実生産への導入に際しては課題があることが示唆された。

1. 緒 言

PFAS（有機フッ素化合物）は炭素とフッ素の非常に強固な結合を特徴とする人工化学物質であり、自然界には存在しない。数千種類に及ぶ PFAS は、撥水・撥油性や耐熱性などの特性から、繊維製品の撥水加工、食品包装材、消火剤、半導体製造など多様な分野で利用されてきた。その有用性は、C-F 結合の強さにより分子が分解されにくく、表面に薄い膜を形成して水や油を長期間はじく点にあり、産業用途で極めて重宝されてきた。こうした特性は長年にわたり製品開発を支えてきた一方で、環境負荷に関する議論を呼び起こす要因にもなっており、近年は規制動向を含め社会全体で注視すべき化学物質として位置づけられている。

この物質の特性である難分解性は環境中での残留性や生体内蓄積を招くものとして健康影響が懸念されるようになっており、特に PFOA（ペルフルオロオクタン酸）や PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）は発がん性や免疫機能低下の点から国際的に問題視されている。また、地下水や河川を通じ広範に拡散することによる環境汚染が深刻化しており、対策の必要性がより強く認識されている。

こうした背景から欧米では規制が急速に進展している。EU では PFOS・PFOA の禁止に加え包括規制案が示され、米国でも飲料水基準が厳格化されるなど、規制は今後さらに強化される見通しである。

当然これらの動きは国内にも波及しており、代替技術の確立が急務となっている。以上の状況を踏まえ、県内企業の課題整理と対応支援を目的として、上越技術支援センターと共同で PFAS 問題に関する課題探索に取り組んだ。

2. 試験と結果

2.1 概要

PFAS 規制強化への対応として繊維製品の撥水加工の PFAS フリー化に取り組んでいる県内企業複数社から PFAS フリー撥水加工剤サンプルの提供を受けた。提供製品を用いて布帛への試加工を行い、加工布について性能評価の試験を実施した。

2.2 試加工

試加工の概要を表 1 に示す。加工用の試験布には JIS L 0803 染色堅ろう度試験用添付白布に規定のポリエステル布を用いた。加工は提供企業の示すレシピ（非公開）に従って行った。

* 素材応用技術支援センター

表 1 試加工の概要

加工	未処理	水系1	水系2	水系3	非水系1	非水系2
加工剤	—	シリコン系	炭化水素系	炭化水素系	シリコン系	シリコン系
分散媒	—	水	水	水	有機溶剤	有機溶剤

表 2 スプレーテスト結果

加工	未処理	水系1	水系2	水系3	非水系1	非水系2
判定(級)	1/1/1	4/3/3	3/4/3	3/4/4	5/4/5	5/5/5

加工自体は、今回の実験室レベルの小規模な条件では問題なく行うことができた。しかし、有機溶剤を加工剤の分散媒として使用する非水系の加工方法については、現在水系での加工を行っている事業場においては、有機溶剤の臭気に対応した作業環境の確保や適切な廃液処理等の点から、既存設備のままでは導入が難しいことが推察された。

2.3 性能評価（スプレーテスト）

スプレーテストは繊維製品の撥水性評価において最も広く用いられている試験方法である。今回の評価では、JIS L 1092 繊維製品の防水性試験方法 7.2 はっ水度試験（スプレー試験）に準拠して行った。スプレーテストの実施例を図 1 に、試験結果を表 2 に示す。

試験の評価は 1 級から 5 級までの 5 段階で行われ、1 級が最も低く、5 級が最も高い性能を示すが、非水系の加工を行った試験布は良好な性能を示した。なお、この試験は加工直後の試験布に対して行ったものであり、洗濯等の劣化操作を行った後の性能変化の有無、程度については今後検証を進める必要がある。

2.4 性能評価（接触角測定）

接触角測定による加工布の撥水性評価についても実施した。測定条件を以下に示す。

試験環境：20℃、53%RH

測定方法：水の滴下 60 秒後に計測

試験結果を図 2 に示す。撥水性が高いほど接触角は大きくなるが、加工布は未処理に比較し



図 1 スプレーテストの実施例

て大きな接触角を示した。水系と非水系の加工の比較では非水系の方がより優れた値を示した。この性能評価についても、洗濯等による性能変化への影響について検証が必要である。

3. セミナー

PFAS フリー撥水加工技術及び化学物質管理法令の規制動向に関するセミナー「PFAS フリーセミナー」を開催した。

【日時】令和 8 年 2 月 6 日(金)

【会場】素材応用技術支援センター及びオンライン

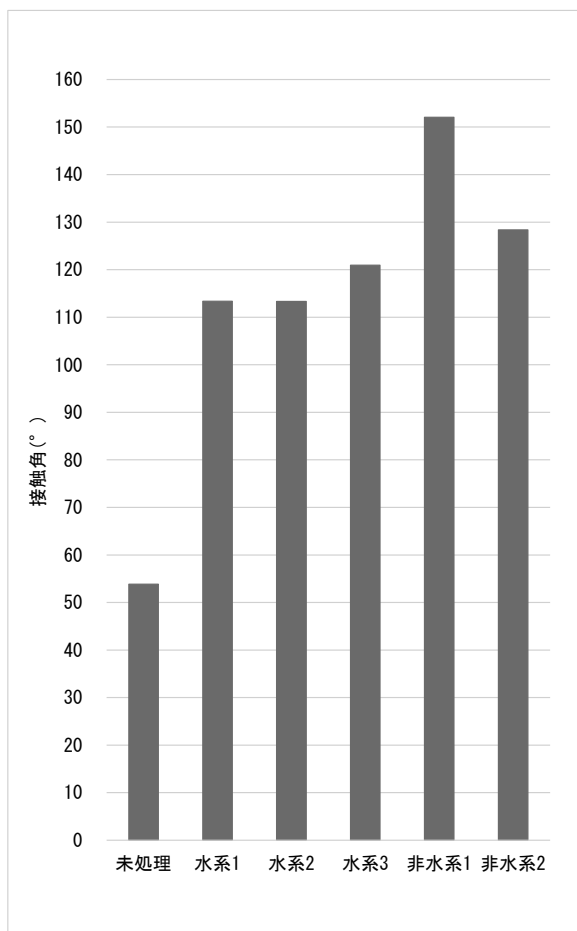


図2 接触角測定結果

【講演】

「PFAS フリー撥水加工の開発」

新潟県工業技術総合研究所 渋谷 恵太

「経済産業省の化学物質管理政策について」

経済産業省 産業保安・安全グループ

化学物質管理課 係長 田中 博之 氏

セミナー会場の様子を図3に示す。当日は会場21名、オンライン20名、合計41名もの多く



図3 セミナー会場の様子

の参加をいただき、PFAS フリーに関する技術面の課題や今後の規制動向について情報共有と活発な意見交換がなされるとともに、製品開発に対しての素材応用技術支援センターの支援体制について周知することができた。参加者へのアンケートでは、「PFAS フリー加工の種類や性能評価の方法及び現状における性能面の課題について理解が深められた」、「PFAS をはじめとする各種の化学物質の管理について多くの情報が得られた」等の意見が寄せられた。

4. 結 言

- (1) PFAS フリー加工剤による繊維製品の撥水加工及びその性能評価を実施し、加工実施における課題と現状の撥水性能について把握した。
- (2) セミナーを開催し、PFAS 規制の動向、性能評価事例及び製品開発支援体制について周知、情報共有した。

電解処理における電流分布, 電解電圧計算プログラムの開発

小林 泰則*

Development of a Program for Calculating Current Distribution
and Electrolysis Voltage in Electrolytic Process

KOBAYASHI Yasunori*

抄 録

電気めっきや電解採取などの電解処理における電流密度分布や極板間電位差が計算できるプログラムの開発を行った。開発したプログラムの妥当性を既往文献の結果と比較することで検証し、Zn 電解採取実験に対するパラメータフィッティングおよび実験結果の再現性の確認を行った。

1. 緒 言

電気メッキや電解採取などの電解処理プロセスにおいては、製品の品質や省電力性を確保するために、各電極上の電流密度分布や極板間電位差が重要な役割を果たしている。例えば金属の電解採取プロセスを想定した場合、槽の大きさや形状、電極の形状、面積、配置状態、電源の電圧もしくは電流の設定値などの条件によって単位時間あたりに採取できる金属の量や採取に必要な電力量などの生産能力や必要なコストが変わってくる。これらの条件は通常、実験や試作を行うことによって明らかになるものであるが、新たなプロセスの立ち上げ時にはそのリスクが高く無視できない。そこでシミュレーション技術を活用することによりプロセス設計時のリスクやコストを低減できると期待できる。

これらの問題に対応可能と思われるシミュレーションソフトはいくつか市販されており、それらを用いた研究も盛んに行われている¹⁾²⁾。しかしながらそれらの研究の多くは電解プロセスの理論的な側面の理解や、電気めっきの際に重要な電流密度分布の均一化にターゲットを絞ったものがほとんどである。本研究では、電解採

取の低コスト化に重要な役割を果たす端子間電圧の低減をターゲットとした検討を行うことを目標とし、それらの問題に適応可能なシミュレーションソフトウェアを自作して検討を行った。

2. 研究結果

2.1 開発したプログラムの詳細

開発したプログラムが基にしている基礎理論や計算方法は既往のシミュレーションプログラムや研究報告¹⁾で用いられているものと同様であるので細かい説明は省略し、簡単に述べる。なお、本研究においては電解液の電気伝導率は時間や場所によって変わらないとして計算している。

計算手順としては電解液中の電位分布をラプラス方程式を解いて求め、その後オームの法則を適用して電解液中の電流密度分布を求めるという流れになる。電位に関するラプラス方程式を計算する際の境界条件としては、浴槽内壁面などの絶縁境界面には、境界面の法線方向の電位勾配がゼロとなるというノイマン型の境界条件を適用する。電極表面と接する電解液境界の境界条件についてはディリクレ型の境界条件が適用される。プログラムは有限体積法に基づく

* 技術統括センター

計算プログラム作成用ツールボックスである OpenFOAM を利用して作成した。

シミュレーションの計算の目的としては、極板間電位差を指定して電解電流や電流密度分布を求める場合と電解電流を指定して極板間電位差や電流密度分布を求めるという 2 つのパターンがある。現段階では開発したプログラムは前者のパターンのみに対応しており、後者のパターンは前者の条件で計算された電解電流値が指定の値になるように手動で極板間電位差を変えた計算を繰り返して行うことで実質的に実現している。

2.2 1 次電流密度計算結果の検証

作成したプログラムの妥当性を検証するために、既往の計算結果との比較を行った。

まず 1 次電流密度計算結果の検証として、ハルセル電解槽カソード上の 1 次電流密度分布の計算結果を寺門ら³⁾による理論計算結果と比較した。試験槽の構造および電解液の電気伝導率は寺門ら³⁾による値を用いた。また、境界条件として電極表面と接する境界の電位の値は電極の電位と等しくした。比較結果を図 1 に示す。図 1 から分かるように、開発プログラムから得られた結果は寺門ら³⁾による理論計算結果に近い結果となっており、開発プログラムによる 1 次電流密度計算の妥当性が示されたと考える。

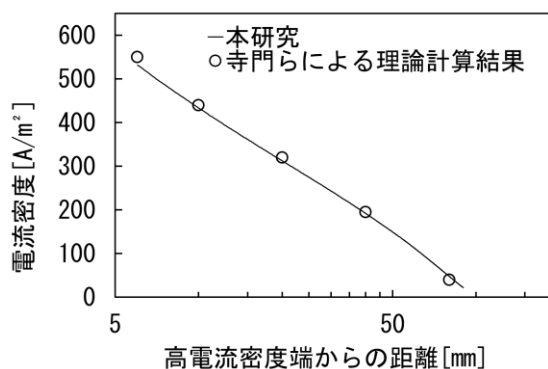


図 1 1 次電流密度計算結果の比較

2.3 2 次電流密度計算結果の検証

引き続き 2 次電流分布の計算結果の検証として、ハルセル電解槽カソード上の 2 次電流密度分布の計算結果を小原ら²⁾による計算結果と比較した。計算に必要なパラメータは全て小原らによる報告²⁾に記載の値を用いた。電解槽モデルは一般的なハルセル電解槽形状とした。2 次電流密度を計算する場合は、電極表面と接する境界の電位は電極表面の電位から一定値ずれていると考える。そのずれの大きさを $\Delta\Phi$ と表すとする。本検証では $\Delta\Phi$ は小原ら²⁾による式およびパラメータを用いて計算した。カソード上の平均電流密度を 50, 300 A/m² としたときの計算結果を小原ら²⁾の結果と比較したものを図 2 に示す。図 2 から計算結果は小原ら²⁾の結果とよく一致しており、開発プログラムの 2 次電流密度計算結果の妥当性が示されたと考える。

2.4 Zn 電解採取への応用

Zn 電解採取における電解槽のスケールアップ時の電解電圧予測への適用を目指し、100mL 規模の電解実験に対するパラメータフィッティングおよび実験結果の再現の確認を行った。

まず、シミュレーションから求められた極板間電位差が実験結果と一致するように、Zhang ら¹⁾によるパラメータを元に $\Delta\Phi$ の計算パラメータを修正する検討を行った。なお、本検討では

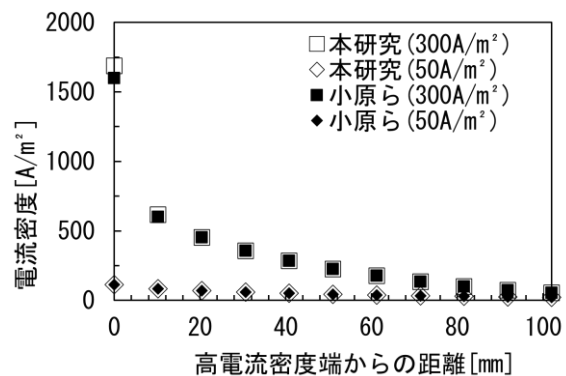


図 2 2 次電流密度計算結果の比較

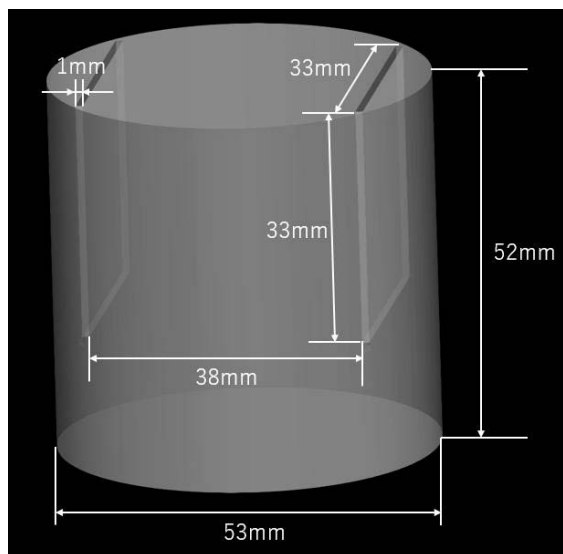


図3 シミュレーションに用いた
電解槽モデル

$\Delta\Phi$ はアノード側は O_2 の発生反応，カソード側は Zn の還元反応を対象として $\Delta\Phi=a+b\log|i|$ (a , b は定数, i は電流密度) で表されるものとして計算した。

実験に用いた電解液は ZnO および H_2SO_4 をそれぞれ Zn が 60g/L, H_2SO_4 が 200g/L の濃度になるように水に溶解させたものである。アノード材質は Pt, カソード材質は A5052 アルミ合金である。なお，各電極の相対する面の反対側の面はテープにてマスキングした。

計算に用いた電解槽形状を図 3 に示す。電解槽の形状は円筒形状であり，各電極は電解槽形状に対して対称的になるように配置した。実験槽の構造は図 3 の構造とほぼ同じであるので提示は省略する。セル分割は基本セルサイズを 0.5mm として snappyHexMesh を用いて境界面形状へのフィッティングを行った。

Zhang ら¹⁾によるパラメータから換算した $\Delta\Phi$ 式の a , b パラメータおよびその修正後の値の一覧を表 1 に示す。表 1 に示すように， b パラメータの修正は行っておらず， a パラメータのみ修正を行った。

実験結果から得られた平均電流密度－極板間電位差曲線と，表 1 の修正後のパラメータ値を用いたシミュレーション結果との比較を図 4 に

表 1 文献値から換算したパラメータ値および修正後の値

	アノード		カソード	
	文献値	修正後	文献値	修正後
a (V)	1.422	1.747	0.694	1.019
b (V)	0.030	0.030	0.063	0.063

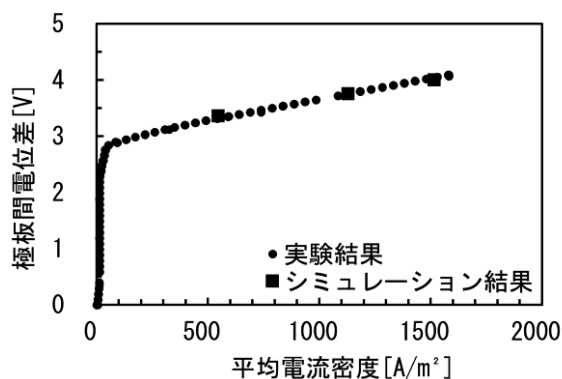


図4 実験結果とシミュレーション結果
の比較

示す。図 4 に示す結果から，平均電流密度 550～1500A/m² の範囲では，フィッティングしたパラメータにより実験で得られた平均電流密度－極板間電位差特性を十分な精度で再現できるものと判断した。

3. 結 言

- (1) 電解処理における電流密度分布，極板間電位差を計算可能なシミュレーションソフトウェアを作成し，ハルセル試験槽の 1 次電流密度および 2 次電流密度の計算結果を文献値と比較することによりその妥当性を確認した。
- (2) Zn 電解採取への適用を目指し実験結果を再現するための境界条件パラメータのフィッティングを行った結果，平均電流密度 550～1500A/m² の範囲で極板間電位差を十分な精度で再現することができた。

参考文献

- 1) Z. Zhang, J. M. Werner and M. L. Free, “Modeling Zinc Electrowinning for Current Efficiency Prediction Based on Nernst-Plank Equation and

- Electrode Gas Evolution Reaction Kinetics”, *Journal of The Electrochemical Society*, vol.165, no.15 (2018), pp.J3246-J3252.
- 2) 小原勝彦, 畑瀬博, 櫻井達美, “表面処理における電流分布解析の応用”, 表面技術, vol.47, no.9 (1996), pp.751-756.
- 3) 寺門龍一, 長坂秀雄, “ハルセル(Hull Cell)の電流分布に対する一考察”, 金属表面技術, vol.27, no.12 (1976), pp.676-679.

積層材料の加工シミュレーション手法に関する研究（第1報）

片山 聡*

A Study on Simulation Methods for Plastic Forming of Laminated Sheets (Part1)

KATAYAMA Satoshi*

抄 録

積層材料の塑性加工シミュレーション手法を確立するため、Ansys LS-DYNA における積層材料モデルの構築手法および必要とされるシミュレーション設定について調査した。その結果、板厚方向のせん断ひずみ分布に対する補正処理がシミュレーション結果に大きな影響を及ぼすことがわかった。また、その影響度は構成材料の剛性に差があるほど大きくなることを確認した。

1. 緒 言

CAE (Computer Aided Engineering) はコンピューター上で仮想実験を行い、製品性能や加工方法の妥当性を検証する設計支援ツールである。当所ではこれまでに金属材料のプレス加工を中心に CAE を用いた研究や技術支援を行ってきたが、近年ではクラッド鋼板や CFRP (炭素繊維強化プラスチック) など、積層材料の塑性加工に関する相談が増加している。そこで本研究では、これらの技術相談への対応力強化と当所における新たな技術シーズの確立を目的に、積層材料の塑性加工シミュレーション手法に関する調査を実施した。本報告書では調査結果のうち、ANSYS, Inc. 製構造解析ソフトウェア Ansys LS-DYNA (以下、LS-DYNA) における積層材料モデルの構築方法とシミュレーション設定値が結果に及ぼす影響について報告する。

2. 積層材料モデルの構築方法

2.1 モデル化手法の種類

積層材料のモデル化は、シェル要素やソリッド要素を用いて各層を個別にモデル化して結合する方法と積層シェル要素を用いて板厚方向の積分点に層特性を定義する方法に大別される。各層を個別にモデル化する方法では、接着層の

挙動を考慮した層間剥離も再現可能であり、高精度なシミュレーションが期待できるが²⁾、その一方で結合処理の安定性のほか、要素数の増大やクーラン条件の低下に伴うシミュレーション効率の悪化が懸念事項となる³⁾。積層シェル要素によるモデル化は、数値入力だけで積層状態を定義・編集できるため利便性に優れるが、層間のずれが大きい場合にはシミュレーション精度が低下する恐れがある⁴⁾。LS-DYNA ではどちらの方法にも対応しているが、他の CAE ソフトウェア、例えば ESI 社製プレス成形シミュレーションソフトウェア PAM-STAMP においても積層シェル要素 (Blank Material Type: Multiplies) が適用可能となっていることから、本研究では積層シェル要素を用いたモデル化を対象に調査を進めた。

2.2 積層情報の定義方法

LS-DYNA で積層シェル要素を作成するには、*INTEGRATION_SHELL, *PART_COMPOSITE, *ELEMENT_SHELL_COMPOSITE のいずれかを用いて、薄肉シェル要素もしくは厚肉シェル要素に積層情報を追加する必要がある。必要とされる情報は、各層の厚さ、材料特性およびシェル要素主軸方向に対する層主軸の方向 (角度) である。なお、積層方向はシェル要素の法線方

* 技術統括センター

向によって決定されるため、部品内で法線方向を一致させておくことが推奨される。

*INTEGRATION_SHELL はシェル要素の任意断面に積分点情報を追加するキーワード (LS-DYNA の設定入力コマンド) である。積分則は *SECTION_SHELL に準拠しており、その汎用性は高いものの、キーワード内に積分点以外の情報を持っておらず、板厚や材料特性は他のキーワードを用いて定義する必要がある。そのため、モデル構築作業は他のキーワードよりも煩雑となる⁵⁾。*PART_COMPOSITE は、部品単位で積層情報を定義するキーワードである。キーワード内で厚さや材料特性が定義可能であり、積層板など、積層構成が一般的な材料を一括でモデル化するのに適している。そのため、塑性加工シミュレーションに向けた積層材料のモデル化には最も適していると考えられる。一方、デフォルトの積分則は台形則であり、特に積層数 (積分点数) が少ない場合にはシミュレーション精度が低下する可能性がある⁶⁾。その対策としては、オプション設定の IRPL を有効にし、シンプソン則を適用するといった方法が考えられる⁷⁾。*ELEMENT_SHELL_COMPOSITE は、要素単位で積層情報を定義するキーワードである。積層構成が異なる要素であっても同一部品として扱えるため、接合部のみに補強層が追加された製品など、実製品の強度シミュレーションに適している。厚さや材料特性の定義方法は *PART_COMPOSITE と同様である。各要素に対する定義は、LS-DYNA 専用プリポスト処理ソフトウェア LS-PrePost や複合材料プリポスト処理ソフトウェア Ansys Composite PrepPost を使用することで比較的容易に行うことができる⁵⁾。

2.3 シミュレーション設定

LS-DYNA で積層シェル要素を使用する場合、定義するキーワードは通常のシェル要素と同じであるが、一部の設定値は変更する必要がある。*CONTROL_SHELL では、積層シェル理論を適用するため、LAMSH 有効にしなければならない。

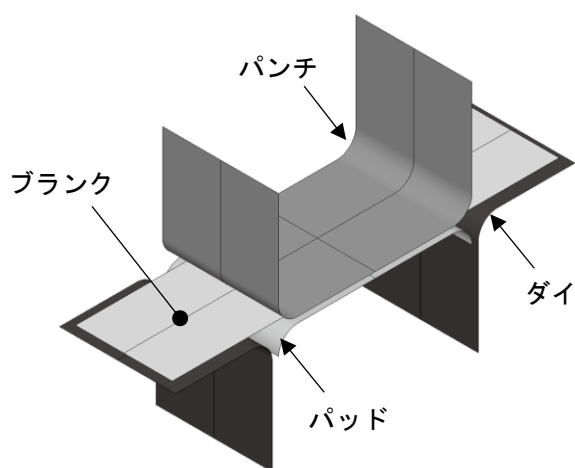
それに併せて、*PART_COMPOSITE もしくは *SECTION_SHELL のせん断補正係数 SHRF は 1 (通常は 5/6) へ変更する必要がある。これらは板厚方向のせん断ひずみの非一様性に対する補正処理となる⁸⁾。また、積層厚肉シェル要素では、板厚方向のせん断ひずみ分布 (を模擬するため、*PART_COMPOSITE_TSHELL および *SECTION_SHELL やに TSHEAR が設けられており、要素定式や積層数に応じて切り替えることが推奨されている。これは本来ソリッド要素定式に向けた機能であるが、LAMSH と組み合わせることで、シェル要素定式にも適用することが可能となる。

3. 曲げ加工シミュレーション

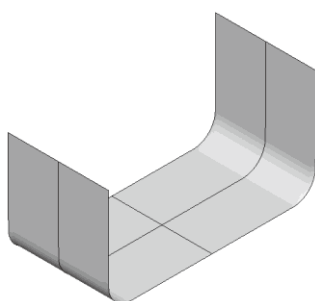
3.1 概要

前節で述べたシミュレーション設定の違いがシミュレーション結果にどのような影響を及ぼすか、クラッド鋼板を対象とした曲げ加工シミュレーションにより検証した。

曲げ加工シミュレーションのジグ構成と加工形状を図 1 に、ジグ寸法を図 2 に示す。ブランク (クラッド鋼板) は長さ 100mm、幅 25mm、板厚 1.5mm とした。積層数は全 3 層とし、上下層を鋼 (層厚さ: 0.3mm)、中間層をアルミニウム合金 (層厚さ: 0.9mm) に設定し、積層薄肉シェル要素は *PART_COMPOSITE を、積層厚肉シェル要素は *PART_COMPOSITE_TSHELL を用いてモデル化した。鋼およびアルミニウム合金の材料モデルは 2 直線近似等方弾塑性体 (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) とした。使用した材料特性値を表 1 に示す。要素形状は低次四辺形 (薄肉)、低次六面体 (厚肉) とし、要素代表寸法は 1mm とした。積層薄肉シェル要素の定式には Belytschko-Tsay (ELFORM=2) および完全積分 (ELFORM=16) を用いた。積層厚肉シェル要素の定式には薄肉シェル要素の代替となる面内 1 点積分 (ELFORM=1) および次数低減面内 2×2 点積分 (ELFORM=2)、ソリッド材料の仮想ひずみの低減積分 (ELFORM=5)、シェル材料の



(a) ブランクおよびジグ構成



(b) 加工形状 (薄肉シェル要素)

図 1 曲げ加工シミュレーションの概要

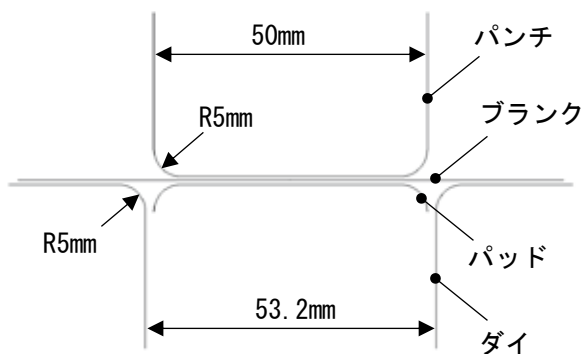


図 2 ジグ寸法

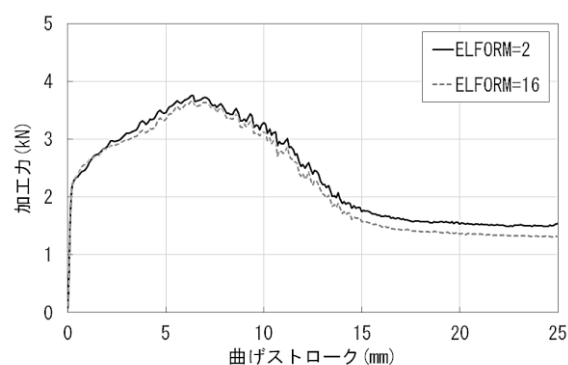
表 1 材料特性値

	鋼	アルミニウム 合金
密度 (kg/m ³)	7850	2770
縦弾性係数 (GPa)	200	71
ポアソン比	0.30	0.33
降伏応力 (MPa)	250	50
接線係数 (MPa)	1000	500

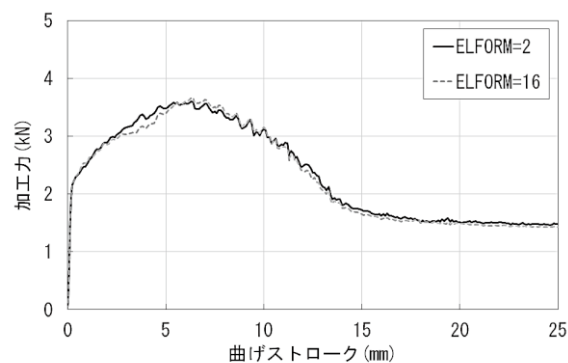
仮想ひずみの低減積分 (ELFORM=6) を用いた。ジグは剛体として、代表寸法 1mm の低次四面体でモデル化した。また、ジグとblankの摩擦係数は 0.2、最大曲げストロークは 25mm とした。シミュレーションでは LAMSHT, IRPL および TSHEAR の設定値を切り替えたが、SHRF は LAMSHT と連動する設定であるため、LAMSHT を有効とした条件では 1 に、無効とした条件では 5/6 に設定した。

3.2 積層薄肉シェル要素による検証結果

積層薄肉シェル要素を用いたクラッド鋼板の曲げ加工シミュレーション結果 (曲げストローク加工力曲線) を図 3 に示す。ELFORM=2 のほうがblankの剛性を高く見積もっており、その傾向は IRPL を有効にした場合に強くなる



(a) IRPL 有効



(b) IRPL 無効

図 3 積層薄肉シェル要素に対する ELFORM の影響 (LAMSHT 有効)

ことがわかる。図 4 に ELFORM=16 における IRPL の影響を示す。ELFORM=16 では加工後半に IRPL 設定の影響が現れているが、これは積分則の違いによるスプリングバック挙動（ダイ

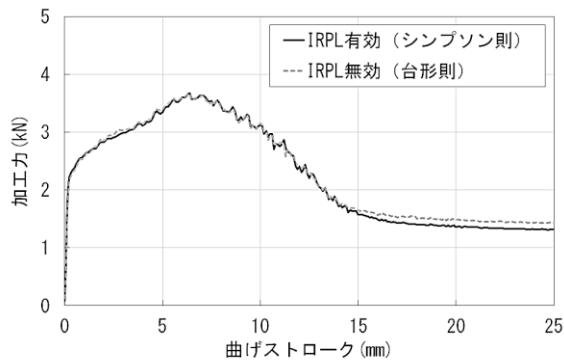
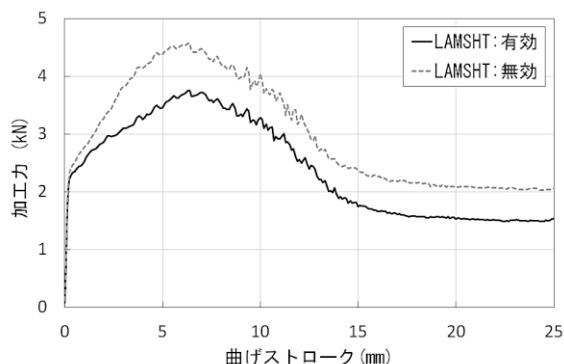
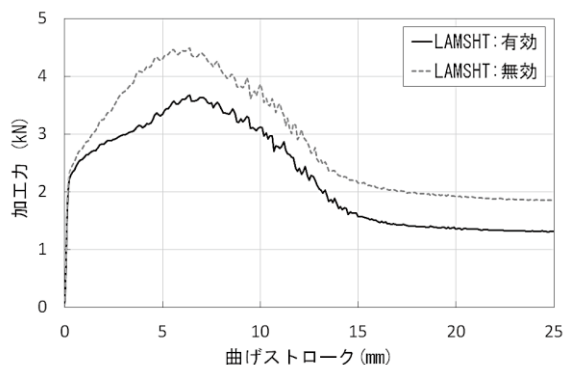


図 4 積層薄肉シェル要素に対する IRPL の影響 (ELFORM=16, LAMSHT 有効)



(a) ELFORM=2



(b) ELFORM=16

図 5 積層薄肉シェル要素に対する LAMSHT の影響 (IRPL 有効)

との接触力) の差によって生じたものと考えられる。図 5 に LAMSHT の影響を示す。要素定式によらず、LAMSHT を無効とした場合にはブランクの剛性を大きく見積もっていることがわかる。LAMSHT の影響は他のシミュレーション設定よりも大きく、積層材料のシミュレーションにおいては、板厚方向のせん断ひずみの再現が重要になると考えられる。

LAMSHT の影響の大きさを確認するため、中間層の材料をゴムを模した等方性弾性材料（縦弾性係数 0.1GPa, ポアソン比 0.46）に変更し、シミュレーションを実施した。結果を図 6 に示す。LAMSHT による加工力の変化はアルミニウム合金の場合よりも大きく、初期の傾きやピーク位置も変化していることがわかる。このことから、LAMSHT の影響は積層材料を構成する素材の剛性差が大きいほど、強く現れるものと考えられる。

3.3 積層薄肉シェル要素による検証結果

積層厚肉シェル要素を用いたシミュレーション結果を図 7 に示す。なお、シミュレーションにおける標準条件は、LAMSHT 有効, IPRL 無効, TSHEAR 一定型とした。図より、積層薄肉シェル要素とは異なり、要素定式によって結果が大きく異なっていることがわかる。これには平面応力仮定の適用有無のほか⁹⁾、積層数や要素アスペクト比、接触処理なども関係している

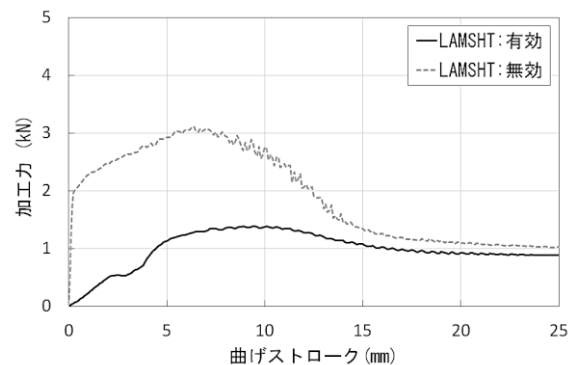


図 6 中間層をゴムとした場合のシミュレーション結果 (ELFORM=16, IRPL 有効)

と考えられ、その検証は今後の課題となる。本研究では、積層薄肉シェル要素と比較的近い結果を得られたELFORM=2について、各種シミュレーション設定の影響を確認した。

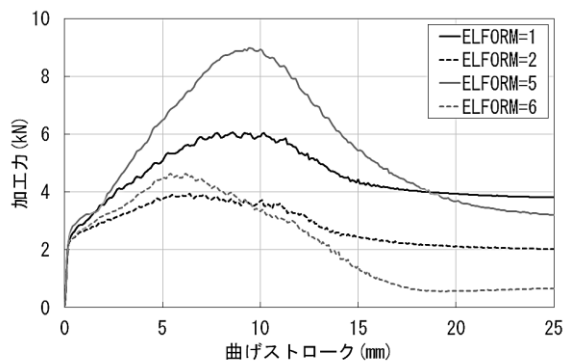


図7 積層薄肉シェル要素に対するELFORMの影響

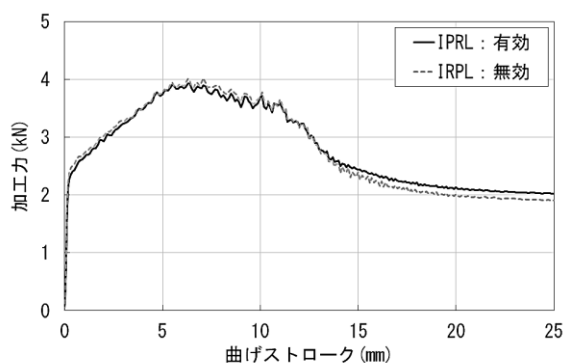


図8 積層薄肉シェル要素に対するIRPLの影響(ELFORM=2)

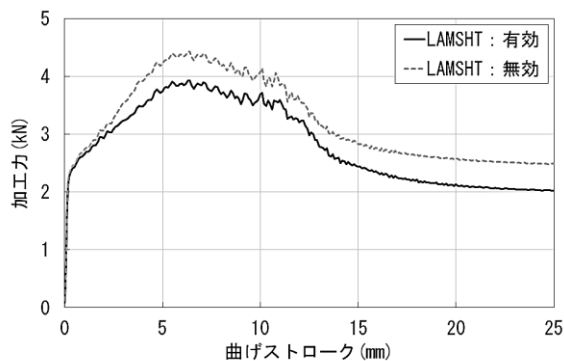


図9 積層薄肉シェル要素に対するLAMSHTの影響(ELFORM=2)

ELFORM=2におけるIRPLおよびLAMSHTの影響を図8, 9に示す。併せて、中間層をゴムに変更した場合のシミュレーション結果を図10に示す。これらの影響は積層薄肉シェル要素の場合と同様であり、LAMSHTの影響が最も強く現れた。TSHEARの影響を図11に示す。TSHEARの影響は大きく、せん断ひずみの分布状態によってLAMSHTと同等の差が生じていることがわかる。

以上のことから、積層厚肉シェル要素においては、積層シェル理論の適用有無のほか、板厚方向のせん断ひずみ分布のモデル化が重要であることがわかる。その影響度は要素定式のほか、積層数でも変化することが予想されることから、シミュレーション手法の確立に向け、今後これらの検証を進める必要があるといえる。

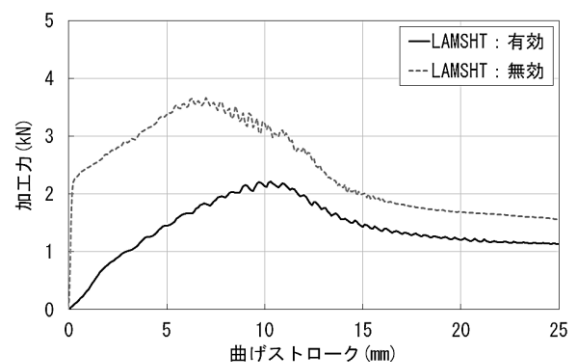


図10 中間層をゴムとした場合のシミュレーション結果(ELFORM=2)

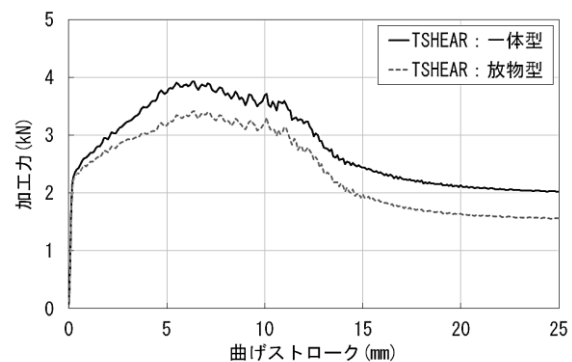


図11 積層薄肉シェル要素に対するTSHEARの影響(ELFORM=2)

4. 結 言

- (1) 積層シェル要素（薄肉，厚肉）においては，積層シェル理論(LAMSHT)の適用有無がシミュレーション結果に大きな影響を与える。また，その影響は積層材料を構成する材料の剛性差が大きいほど強く現れる。
- (2) 積層厚肉シェル要素においては，板厚方向のせん断ひずみの分布様式(TSHEAR)もシミュレーション結果に影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 例えば，須貝裕之ほか，“テラードブランクの対向液圧によるプレス深絞り成形法の開発”，工業技術研究報告書，no.47(2017)，pp.53-54.
- 2) 西正人ほか，“自動車衝突解析のための CFRP 積層部材の有限要素モデリングと損傷破壊解析”，日本複合材料学会誌，vol.46，no.6(2020)，pp.256-264.
- 3) 青村茂ほか，“LS-DYNA の事例紹介 ～頭部有限要素モデルの衝撃解析～”，バイオメカニズム学会誌，vol.34，no.1(2010)，pp.79-82.
- 4) 米大海ほか，“多層シェル連成問題のシミュレーション”，第 32 回計算力学講演会講演論文集，(2019).
- 5) Ulrich Stelzmann et al., “Ply-based composite modeling with the new *ELEMENT_SHELL_COMPOSITE keyword”, *8th European LS-DYNA Users Conference*, (2011).
- 6) 中嶋徳正ほか，“積分方程式解法における高速・高精度な係数行列構築法の提案”，日本シミュレーション学会論文誌，vol.8，no.4(2016)，pp.129-137.
- 7) 成澤哲也，“異方性平板・シェルの振動と制御”，釧路工業高等専門学校紀要，no.38(2004)，pp.7-13.
- 8) 殿塚勲，“複素関数の積分に対する数値積分の試み”，広島工業大学紀要研究編，no.44(2010)，pp.269-275.
- 9) 山本剛大，“板厚変化を考慮したシェル要素の弾塑性問題に対する性能評価”，日本機械学会第 29 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集，(2016).

積層材料の加工シミュレーション手法に関する研究（第2報）

片山 聡*

A Study on Simulation Methods for Plastic Forming of Laminated Sheets (Part2)

KATAYAMA Satoshi*

抄 録

積層材料に対するシミュレーション精度の向上を目的に、異方性材料の材料特性値を同定する方法について検証した。その結果、ねじり試験において軸方向の移動量を拘束すると、試験トルクに横弾性係数だけでなく、縦弾性係数の影響も現れることを確認した。また、このような多軸応力状態の試験結果から材料特性値を同定する場合、機械学習によるアプローチが有効であることを確認した。

1. 緒 言

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）や紙などの積層材料は、方向によって異なる強度特性を有する異方性材料である。そのため、これらの材料を用いた強度・塑性加工シミュレーションにおいては、異方性材料に適した材料モデルを使用するほか、方向ごとに材料特性値を正しく定義する必要がある。

そこで本研究では、ANSYS, Inc. 製構造解析ソフトウェア Ansys Mechanical（以下、Ansys）および Ansys LS-DYNA（以下、LS-DYNA）に搭載される異方性材料モデルの種類や材料特性値の定義方法について調査した。併せて、強度試験による材料特性値の取得方法についても調査した。なお、本報告書においては積層材料の主軸方向を X 軸、主軸直交方向を Y 軸、板厚方向を Z 軸、XY 平面を面内方向とする。

2. 異方性材料モデルの種類

2.1 Ansys に搭載される異方性材料モデル

Ansys（Workbench 環境）では、弾性および塑性の特性値を個々に定義して、異方性材料モデルを構築する。弾性においては直交異方性弾性と異方性弾性が選択可能であり、前者では X、Y、Z 方向の縦弾性係数 (E_x , E_y , E_z)、ポアソン

比 (ν_{xy} , ν_{yx} , ν_{xz}) および横弾性係数 (G_{xy} , G_{yz} , G_{xz}) を、後者は剛性マトリクスの係数 ($c_{11} \sim c_{66}$) を定義する仕様となっている。塑性は多直線近似のほか、n 乗硬化則や Voce 則が定義可能であるが、Hill の異方性降伏基準（方向ごとの降伏応力比）を用いることで、直交 3 方向およびせん断 3 方向で異なる挙動を模擬することが可能となっている。減衰については Rayleigh 減衰が、粘弾性については Prony 級数を用いたせん断緩和および体積緩和が設定可能となっている。

2.2 LS-DYNA に搭載される異方性材料モデル

LS-DYNA では Ansys と異なり、CFRP や紙など、各素材に特化した異方性材料モデルが用意されている。LS-DYNA に搭載されている主な異方性材料モデルを表 1 に示す。基本モデルは

表 1 主な異方性材料モデル (LS-DYNA)

MAT 番号	詳細
002	異方性弾性モデル
022	複合材料モデル
058	積層複合繊維材モデル
108	汎用異方弾塑性モデル
157	金属向け異方弾塑性モデル
213	複合材料弾塑性モデル
249	UD 材向け弾塑性モデル
274	紙専用弾塑性モデル

* 技術統括センター

MAT_002 であり、これに塑性や破壊基準を追加したものが MAT 番号の大きな材料モデルとなる。

弾性の定義方法は Ansys の直交異方性弾性と同様であるが、ポアソン比についてはマイナーポアソン比（面内方向においては ν_{yx} ）を入力する仕様となっている。塑性を定義可能な材料モデルは限定されるが、MAT_108 や MAT_157 では、Hill の異方性降伏基準を定義することが可能となっている。また、MAT_213 や MAT_274 では方向だけでなく、荷重極性（引張、圧縮）に対して異なる塑性を定義可能となっている。なお、塑性の設定項目がない材料モデルにおいても、MAT_ADD_INELASTICITY を用いることで、多直線近似型の等方硬化特性を付加可能となっている。減衰については Rayleigh 減衰を設定可能であるが、これは部品単位での適用となるため、積層材料においては層ごとに別部品としてモデル化する必要がある。粘弾性は MAT_ADD_INELASTICITY により、Prony 級数によるせん断緩和を材料モデルに付加可能となっている。

以上のように、ソフトウェアに搭載される異方性材料の種類や形式は Ansys と LS-DYNA で異なっているものの、その定義方法は共通する部分が多いことがわかった。

3. 材料特性値の同定方法

3.1 概要

異方性材料モデルの材料特性のうち、面内方向の縦弾性係数 E_x および E_y 、ポアソン比 ν_{xy} は、ビデオ伸び幅計や DIC（デジタル画像相関法）装置を用いた引張試験により取得することが可能である¹⁾。面外方向の材料特性値（ E_z 、 ν_{yz} 、 ν_{xz} ）についても原理的には圧縮試験から取得可能であるが²⁾、実際には試験機のたわみやひずみ計測分解能の問題で、材料が薄くなるほど取得するのが困難となる。代替試験として、超微小硬さ試験機による測定が考えられるが³⁾、試験力の大きさや結果の評価方法については、その妥当性を事前に検証する必要があるといえる。

等方性材料モデルにおける横弾性係数 G は縦弾性係数 E とポアソン比 ν を用いて式(1)で決定される。しかし、異方性材料モデルにおける横弾性係数は縦弾性係数から独立した値となるため、式(1)を適用することはできない⁴⁾。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \dots (1)$$

異方性材料における横弾性係数は、CFRP のように構成部材（繊維、樹脂）の材料特性値や構成比率が既知の場合には、理論式や均質化法によって算出することが可能であるが⁵⁾、これらが不明な場合には材料試験より取得する必要がある。等方性材料、異方性材料によらず、横弾性係数を得る試験方法としてはせん断試験があるが²⁾、試験の容易さからねじり試験も多く用いられている⁶⁾。板材のねじり試験における回転角度 θ と試験トルク T の関係は、板材の把持間隔を L 、断面形状によって決まるねじり定数を J （幅 b 、厚さ t が $b \gg t$ の場合、 $J \approx bt^3/3$ ）とすると式(2)で表されるが⁷⁾、式中の横弾性係数 G は等方性が前提であるため、これを異方性材料および積層材料へ適用するのは困難と考えられる。そこで本研究では、シミュレーションと機械学習を用いてねじり試験結果から横弾性係数を同定する方法について検証した。

$$\theta = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \quad \dots (2)$$

3.2 シミュレーションモデルの妥当性検証

Ansys で作成したねじり試験シミュレーションモデルを図 1 に示す。試験片は幅 20mm、厚さ 1mm、把持間隔 100mm とし、高次四辺形シェル要素でモデル化した。要素寸法は 1.0mm とした。境界条件は両端の把持面に与え、一方を完全固定面、もう一方をリモート回転面（強制回転：8°）とした。また、リモート回転面におけるねじり方向以外の並進・回転自由度はすべて拘束した。この境界条件はねじり試験に使用した INSTRON 社製疲労試験機 ElectroPuls

E10000 の把持状態を模擬したものである。シミュレーションでは完全固定面に生じるモーメント反力と軸方向反力を取得した。これは試験機のロードセルに生じる試験トルクと軸力に相当する結果となる。

シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、試験結果とシミュレーション結果を比較した。本研究の対象材料は異方性材料であるが、モデル検証においては現象を単純化するため、試験、シミュレーションとも試験片には材料特性値が既知の等方性材料(SUS304 材)を用いた。使用した材料特性値を表 2 に示す。

ねじり試験結果およびシミュレーション結果を図 2 に示す。ロードセル容量に対する試験値が小さく、試験結果にはノイズが加わっているが、ねじれ角に対するモーメント反力の線形性や、ねじれ角が増すにつれ軸方向反力の変化量が大きくなる傾向は、試験結果とシミュレーション結果で概ね一致しており、現実を模した妥当なモデルであると考えられる。なお、軸方向反力は軸方向変位を拘束した場合に発生するものであるが⁸⁾、本シミュレーションモデルでは大変形解析機能を有効にすることで、これを再現している。

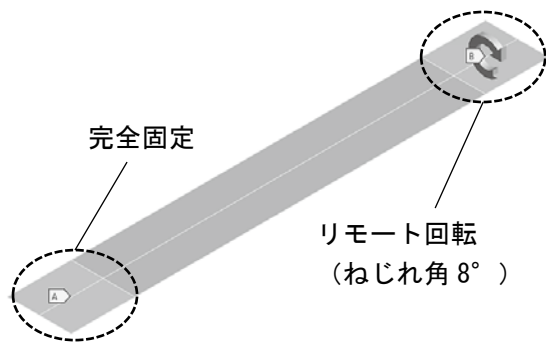


図 1 ねじり試験シミュレーションモデル

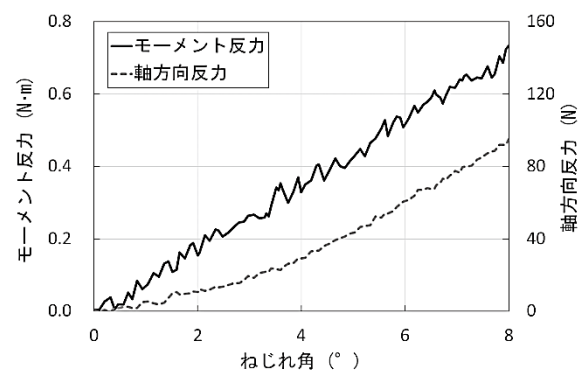
表 2 材料特性値(SUS304 材)

特性名	値
縦弾性係数 (GPa)	180
ポアソン比	0.28
横弾性係数 (GPa)	70.3

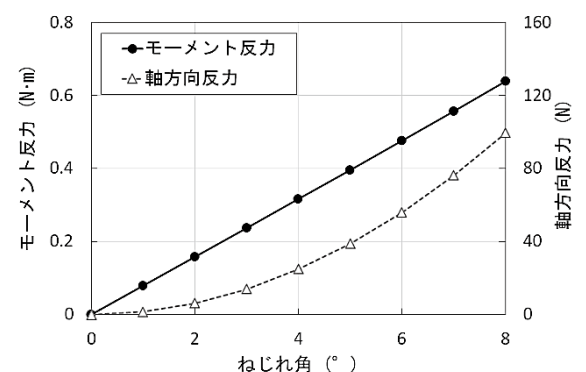
3.3 機械学習を用いた横弾性係数の同定

前節のシミュレーションモデルに対し、表 3 に示す材料特性値を適用してねじり試験シミュレーションを実施し、表 4 に示す結果から材料特性値を同定できるか試みた。同定作業には Ansys DesignXplorer の応答曲面最適化機能を使用し、(1)シミュレーションによる学習点の作成、(2)応答曲面の作成、(3)ねじり試験シミュレーション結果に対する逆解析（最適化）の順に作業を進めた。

応答曲面最適化において、入力変数は材料特性値 (9 変数) とした。入力変数の変動範囲を表 5 に示す。目的変数はモーメント反力および軸方向反力とした。学習点は 1000 点とし、最適空間充填設計（中心 L2）でサンプリングした。応答曲面作成には遺伝的集合アルゴリズムを、最適化には多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。



(a) 試験結果



(b) シミュレーション結果

図 2 ねじり試験, 同シミュレーション結果

表 3 同定対象の材料特性値

縦弾性係数 (GPa)	E_x	280
	E_y	110
	E_z	110
ポアソン比	ν_{xy}	0.18
	ν_{yz}	0.40
	ν_{xz}	0.18
横弾性係数 (GPa)	G_{xy}	40
	G_{yz}	90
	G_{xz}	40

表 4 ねじり試験シミュレーション結果

モーメント反力(N・m)	503
軸方向反力(N)	249

表 5 入力変数の範囲

縦弾性係数 (GPa)	E_x	100~300
	E_y	100~300
	E_z	100~300
ポアソン比	ν_{xy}	0.15~0.45
	ν_{yz}	0.15~0.45
	ν_{xz}	0.15~0.45
横弾性係数 (GPa)	G_{xy}	35~100
	G_{yz}	35~100
	G_{xz}	35~100

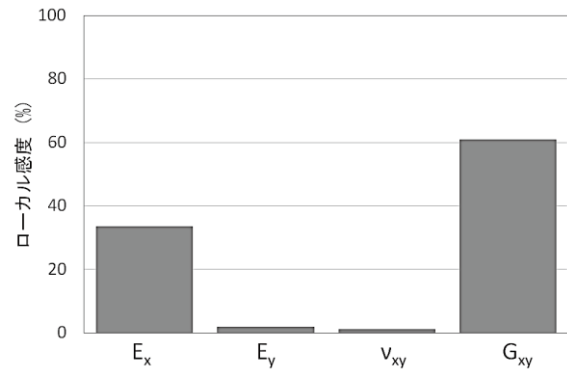
表 6 同定結果

縦弾性係数 (GPa)	E_x	280
	E_y	118
	E_z	118
ポアソン比	ν_{xy}	0.17
	ν_{yz}	0.37
	ν_{xz}	0.17
横弾性係数 (GPa)	G_{xy}	40
	G_{yz}	96
	G_{xz}	40

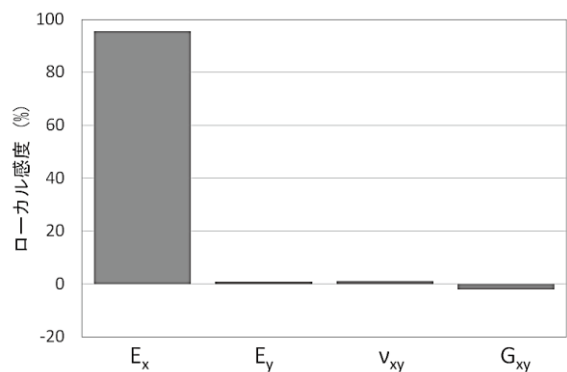
Ansys DesignXplorer によって示された非劣解の最上位候補値（同定値）を表 6 に示す。同定結果は横弾性係数 G_{xy} だけでなく、他の材料特性値も表 3 に近いものとなっており、機械学習を用いた材料特性値の同定手法の有効性を確認することができた。

3.4 応答曲面に対する寄与度分析結果

同定作業において作成した応答曲面に対する入力変数の寄与度分析結果を図 3 に示す。なお、



(a) モーメント反力



(b) 軸方向反力

図 3 材料特性値の寄与度分析結果

シェル要素（薄板）の場合、面外方向の特性値は意味を持たないため⁹⁾、寄与度分析は面内方向の材料特性値だけを対象とした。図より、モーメント反力は横弾性係数 G_{xy} だけでなく、縦弾性係数 E_x の影響も受けていることがわかる。その影響度は比較的大きく、横弾性係数 G だけで構成されている式 (2) に対しては、本シミュレーション結果を適用できないことがわかる。

4. 結 言

- (1) ねじり試験において軸方向の変形を抑制した場合、結果として得られるモーメント反力に縦弾性係数の影響が現れ、理論式を用いた横弾性係数の同定が困難となる。
- (2) 上記の試験結果を用いた材料特性値の同定には、機械学習による逆解析（最適化）が効果的な方法のひとつとなる。

参考文献

- 1) 片山聡ほか, “プレス成形シミュレーションの高精度化に向けた引張試験方法に関する研究”, 工業技術研究報告書, no.54 (2024), pp.55-62.
- 2) Weerayut JINA et al., “Finite element analysis of the folding process of creased white-coated paper-board using a combined fluffing resistance and shear yield glue model”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, vol.12, no.2 (2018).
- 3) 翁拓也ほか, “ナノインデンテーション法によるヤング率測定の精度検証”, 長野県工業技術センター研究報告書, no.15 (2020), pp.30-33.
- 4) 杉本直ほか, “FRTP と FRP の動的破壊特性を考慮した FEM シミュレーションモデルの構築”, 日本大学生産工学部第 49 回学術講演会講演概要, (2016), pp.89-92.
- 5) 片山聡ほか, “マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械特性評価に関する研究”, 工業技術研究報告書, no.45 (2015), pp.17-24.
- 6) 吉田勉ほか, “異方性材料のねじり試験による横弾性係数値の測定”, 日本機械学会材料力学部門後援会講演論文集, (2003), pp.885-886.
- 7) ねじり剛性を理解する: 工学における原理, 計算, 応用, <https://firstmold.com/ja/tips/torsional-rigidity/>, (閲覧 2026-03-26).
- 8) JFE テクノリサーチ(株) ねじり(回転)付与時の軸方向荷重計測試験, <https://www.jfe-tec.co.jp/download/pdf/3E3J-172-00.pdf>, (閲覧 2026-03-26).
- 9) 山本剛大ほか, “板厚方向の変形を考慮したシェル要素の開発”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, (2013).

供試装置の電源ケーブル終端条件が放射ノイズ測定に与える影響の検証

牧野 斉* 須田 孝義** 石井 啓貴* 本多 章作**

Validation of the Influence of Mains Cable Termination Conditions of
the EUT on Radiated Emission Measurements

MAKINO Hitoshi*, SUDA Takayoshi**, ISHII Hirotaka* and HONDA Shosaku**

抄 録

供試装置の放射ノイズ測定にはテストサイト間でばらつきが生じ、その一因として電源ケーブル終端条件の不明確さが指摘されている。本検証では、VHF-LISNの適用が測定再現性に与える影響を評価するため、当所の3mおよび10m電波暗室で同一ノイズ源を用いた比較測定を実施した。VHF-LISNの使用により相関係数と標準偏差が改善し、最大差分も低減した。測定結果はCISPR 16-1-4が規定するテストサイト間偏差 ± 4 dB以内に収まり、VHF-LISNの有効性が確認された。得られた知見は、企業への測定指導に活用できるとともに、将来的な規格化への対応にも有用である。

1. 緒 言

供試装置(EUT: Equipment under Test)から放射されるノイズの測定結果は、テストサイトごとにはばらつきが生じることが知られている¹⁾。主な原因の一つとして、EUTの電源ケーブルの終端条件が測定規格などで明確に定義されていない点が挙げられる。電源ケーブルはアンテナのように振る舞うことがあり、そこから放射されるノイズの強度は、EUTから見た電源ラインのインピーダンス等の終端条件に大きく左右される。

一般財団法人VCCI等の標準化機関では、放射ノイズ測定の再現性向上を目的として、VHF-LISN(Very High Frequency Line Impedance Stabilization Network、電源インピーダンスを安定化させる装置)使用の国際規格化を推進している²⁾。将来的に、CISPR 16-2-3³⁾(放射ノイズの測定法の国際規格)等において、電源ケーブル終端条件としてVHF-LISNの使用が規格化される可能性を踏まえ、本検証では、当所におけるその適用の妥当性を検証する。

* 技術統括センター

** 中越技術支援センター

本検証では、同一のノイズ源を用いて、3mおよび10m電波暗室における放射ノイズの測定結果を比較する。また、電源ラインにVHF-LISN⁴⁾を挿入した場合の影響を定量的に評価することを目的とする。

2. 検証方法

2.1 ノイズ源と電源ケーブルの接続

本検証では、ノイズ源の周波数およびノイズレベルの安定性が重要となることから、次のようにノイズ源を構成する。図1に示すように、コムジェネレータ(Schaffner(TESEQ)製 Reference Spectrum Generator RSG1000)⁵⁾をCDN(TESEQ製 Coupling Decoupling Network M016(M3))⁶⁾のRF portに接続し、コムジェネレータからの信号がCDNを介してEUT portに接続された電源ケーブルへ注入されるように構成⁷⁾する。電源ケーブルのL線とN線はCDNのEUT port出力端子の外側直近位置で短絡し、注入された信号がL線とN線を同相で伝搬するようにする。CDNのAE portは開放状態とする。このようにコムジェネレータをノイズ源とすること

で安定性が確保される。また、実際の EUT の放射ノイズ測定と同様な状態で電源ラインにノイズ源を接続することができ、VHF-LISN の影響を評価することが可能となる。

2.2 測定配置および測定手順

2.1 で構成したノイズ源を高さ 0.8m の EUT 支持台（ポリスチレン製、H 0.8 × W 0.3 × D 0.3 m）に設置する。電源ケーブルは EUT 支持台の後端からまっすぐ下に垂らし、床面（基準金属面）上を直線状に水平に這わせて電源接続ボックスに接続し、変動しないように固定した。

この際、CDN から基準金属面へ至る電源ケーブルの垂直部分がターンテーブルの回転軸と一致するように配置する。測定距離（測定アンテナから電源線の垂直部分までの水平距離）は 3m とする。測定アンテナの高さは 1m、2m および 3m とし、ターンテーブルを 360 度回転させ、周波数 30MHz から 300MHz において 10MHz 間隔で放射ノイズの最大レベル（ピーク検波）を水平偏波および垂直偏波について記録する。測定時の配置を図 1 に、測定の様子を図 2 に示す。

3. 測定結果

VHF-LISN の有無でそれぞれ放射ノイズの測定を行い、測定結果を比較した。

図 3 の (a) から (d) に放射ノイズレベルの測

定結果を、図 4 に 3m 電波暗室と 10m 電波暗室間の放射ノイズレベルの差分を VHF-LISN の有無ごとに示す。また、表 1 にサイト間の相関係数および標準偏差並びに最大差分を、VHF-LISN の有無で比較評価した。

表 1 に示す相関係数は、3m および 10m 電波暗室における放射ノイズレベルの測定結果の一致度を示す統計指標であり、1 に近いほど両者のスペクトラム形状がよく一致していることを意味する。表 1 に示すように、VHF-LISN を使用することで相関係数および標準偏差の双方に改善が見られる。また、VHF-LISN 無しの場合には垂直偏波で 6.9 dB、水平偏波で 7.9 dB の最大差分が確認されたが、VHF-LISN を使用することで最大差分は垂直偏波で 3.4 dB、水平偏波で 6.2 dB へと低減した。

一方で、VHF-LISN 有りでも 100 MHz 以下では水平偏波において 6 dB 程度の差分が残っている。これは、使用しているアンテナの SWR (Standing Wave Ratio) が 3 以上と高く、アンテナ特性が測定値に影響しているためと考えられる。

アンテナ特性の影響を除けば、テストサイトの特性である NSA (Normalized Site Attenuation) を規定する国際規格 CISPR 16-1-4⁸⁾ において、許容されるテストサイト間偏差 ±4 dB 以内に収まっており、VHF-LISN の有効性が確認された。

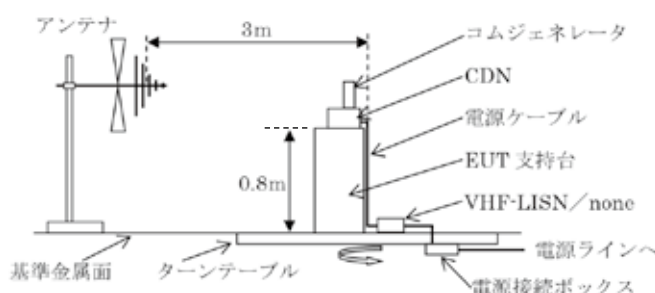


図1 測定時の配置

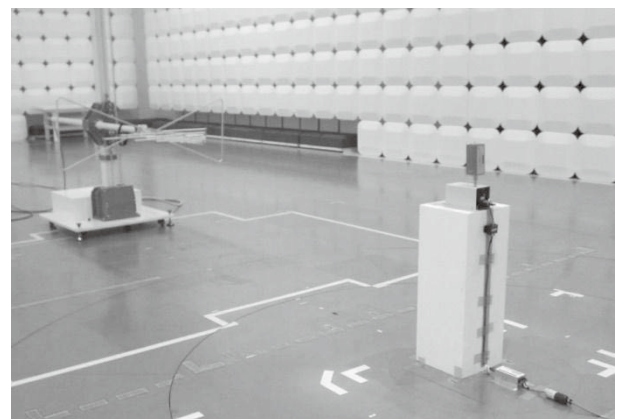
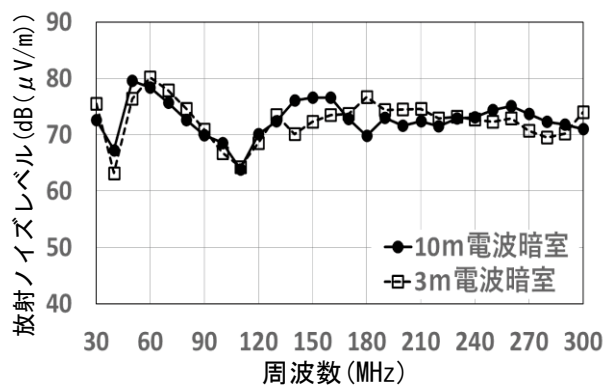
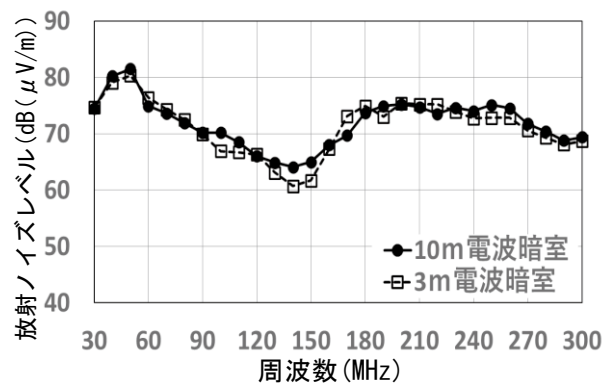


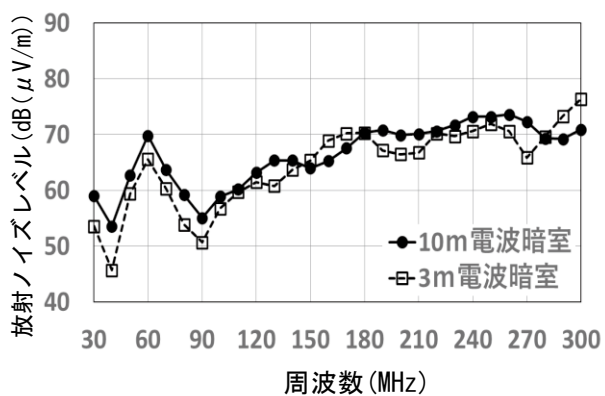
図2 測定の様子



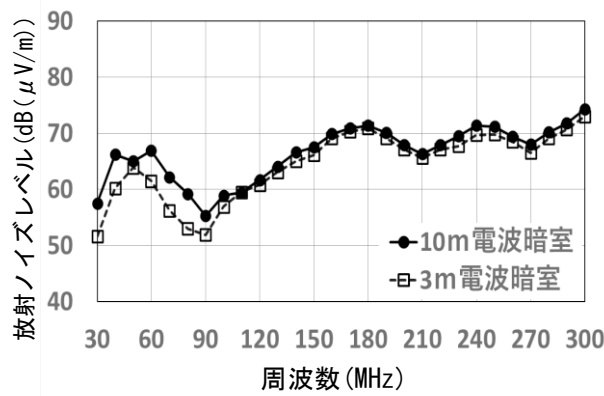
(a) 垂直偏波 VHF-LISN 無



(b) 垂直偏波 VHF-LISN 有

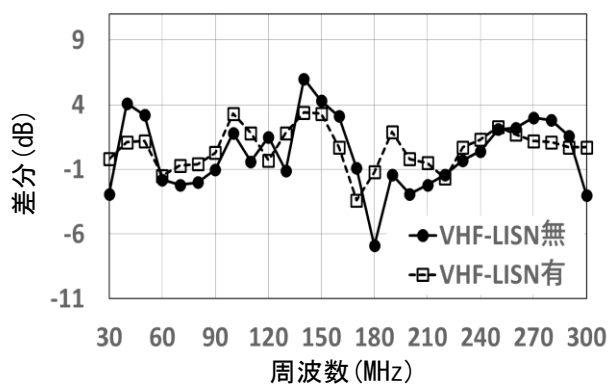


(c) 水平偏波 VHF-LISN 無

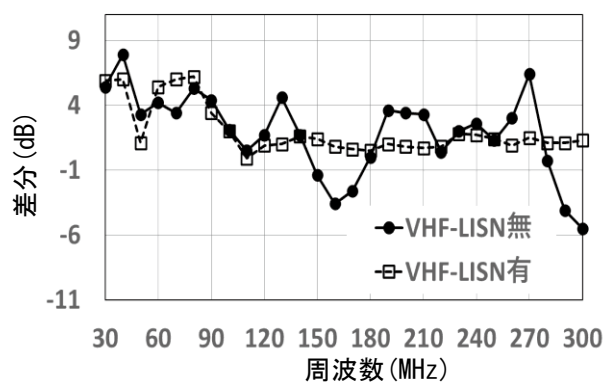


(d) 水平偏波 VHF-LISN 有

図3 放射ノイズレベル



(a) 垂直偏波 差分



(b) 水平偏波 差分

図4 電波暗室間の放射ノイズレベルの差分

表 1 評価結果

電源ケーブル の終端条件		VHF-LISN	
		無	有
相関係数	垂直	0.68	0.95
	水平	0.91	0.96
標準偏差 (dB)	垂直	2.81	1.56
	水平	3.17	1.90
最大差分 (dB)	垂直	6.9	3.4
	水平	7.9	6.2

4. 結 言

- (1) 本検証で得られた結果は、放射ノイズ測定
の再現性向上に寄与するものであり、当所
の電波暗室を利用する企業に対し、具体的
な留意点を示す技術的根拠として活用でき
る。
- (2) 将来的に VHF-LISN の使用が測定規格に採用
された場合^{9) 10)}には、本検証で蓄積した知見
を基盤として、迅速かつ的確に技術支援体
制を整えることが可能となった。

参考文献

- 1) 田中嶋克行, “エミッション測定用擬似電源回
路網を用いた放射妨害測定の有効性に関する
調査(VHF-LISN を使用したラウンドロビンテ
スト)”, 電波環境協議会 EMCC レポート, 第 26
号(2010), pp.12-17.
- 2) 一般財団法人 VCCI 協会, 供試装置(EUT)の電
源ケーブルを平衡型 VHF-LISN により終端し
た条件で実施する放射エミッション測定に関
するガイダンス, VCCI 32-1-L(2024).

- 3) International Special Committee on Radio Inter-
ference, “CISPR 16-2-3 Ed.4.2 : Specification for r
adio disturbance and immunity measuring apparat
us and methods - Part 2-3 : Methods of measurem
ent of disturbances and immunity - Radiated distu
rbance measurements”, 2023.
- 4) 協立電機(株), 電源ライン・インピーダンス
整合回路網, 製品カタログ VHF-LISN Model:K
DEMC-1015L.
- 5) TESEQ, Reference Spectrum Generator RSG 100
0, Data sheet 82-234361 E01 Dec. 2011.
- 6) TESEQ, Coupling / Decoupling Network, Data sh
eet 82-239965 E10 December 2021.
- 7) 放射妨害波測定における電源インピーダンス
の影響, [https://www.gitec.rd.pref.gifu.lg.jp/files/r
eports/2021/gitec_2021_35.pdf](https://www.gitec.rd.pref.gifu.lg.jp/files/reports/2021/gitec_2021_35.pdf), (閲覧 2025-10-1
6).
- 8) International Special Committee on Radio Inter-
ference, “CISPR 16-1-4 Ed.5.0 : Specification for ra
dio disturbance and immunity measuring apparatu
s and methods - Part 1-4: Radio disturbance and i
mmunity measuring apparatus - Antennas and test
sites for radiated disturbance measurements”, 202
5.
- 9) 長部邦廣, “VHF-LISNのCISPR規格化動向と関
連課題への取り組み”, 一般財団法人 VCCI協
会, 2026年 規定説明会・技術シンポジウム,
技術シンポジウム発表資料, 東京, 2026年.
- 10) 長部邦廣, “平衡型VHF-LISN適用の妥当性と
ガイダンス(VCCI 32-1-L:2024)に基づく測定”,
一般財団法人 VCCI協会, 2026年 規定説明
会・技術シンポジウム, 特別講演発表資料,
東京, 2026年.

VI 簡易受託研究

過去のデータを学習したレリーフ製作用 AI の開発

木嶋 祐太* 石澤 賢太*

Development of an AI-Based Relief Generation System Trained on Existing Data

KIJIMA Yuta* and ISHIZAWA Kenta*

抄 録

県内製造業が行っているレリーフ製作の業務改善のため、製作したい題材画像を入力するとその画像用のレリーフ形状情報（デプス画像）を出力する AI を開発した。AI モデルとして MiDaS (Mixed Datasets for Monocular Depth Estimation)¹⁾と条件付き拡散モデル²⁾を採用し、勾配損失を加えた損失関数や3次元での回転によるデータ拡張の効果を確認した。

1. 緒 言

レリーフは記念品などに用いられる金属板の造形物で、デザインテーマとなる画像をもとに製作される。画像は色の情報しか持たないため、そのままでは製作に使用することはできない。そのため図1(a)に示す画像を図1(b)に示すデプス画像へ変換する必要がある。現状、画像からデプス画像への変換は画像編集ソフトウェアを用いてデザイナーがデータを加工しているが、非常に手間がかかる。フィギュア製作などの用途で画像から形状データが作成できるシステムの利用も考えられるが、造形表現がデザイナーの意図と違う問題がある。そこで、本研究では過去に作成した12セットの画像とデプス画像を学習することで造形表現を保ったまま、新しい画像に対しデプス画像を出力する AI を開発した。

深度・合成データなど複数の異種深度データセットを統合して学習することで、スケールに依存しない汎化性の高い深度表現を獲得する。本研究ではバックボーンとして DPT (Dense Prediction Transformer)³⁾を使用した MiDaS を用いた。DPT を用いることで局所的ではなく大域的な幾何構造を正しく捉えることができる。

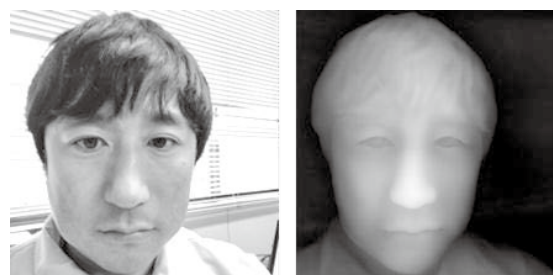
DPT を採用した MiDaS は物体境界や段差部における局所的な深度変化が過度に平滑化される傾向がある。特に、画素単位の回帰損失のみを用いた学習では、深度エッジが曖昧になり、幾何学的な不連続性が十分に再現されない場合がある。そこで推定深度と正解深度の空間勾配に基づく勾配損失を導入した。具体的には、水平方向および垂直方向の有限差分により算出した深度勾配の差を損失として加えた。図2にこの

2. AI モデルの検討

画像を入力するとデプス画像を出力する AI モデルとして MiDaS と条件付き拡散モデルを検討した。

2.1 MiDaS

MiDaS は単眼画像から相対的な深度構造を推定する AI モデル群であり、実測深度・ステレオ



(a) 画像 (b) デプス画像

図1 レリーフ製作用データ

* 技術統括センター

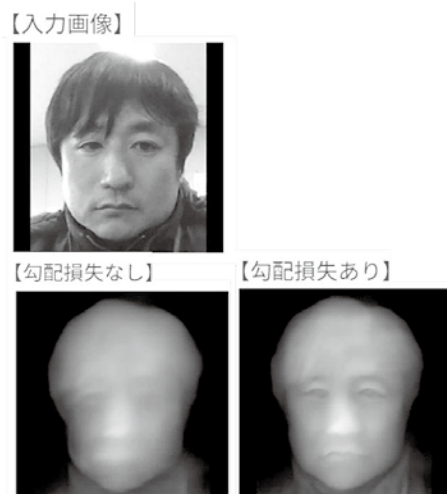


図2 勾配損失の導入結果



図4 ノイズ推定とデプス画像推定

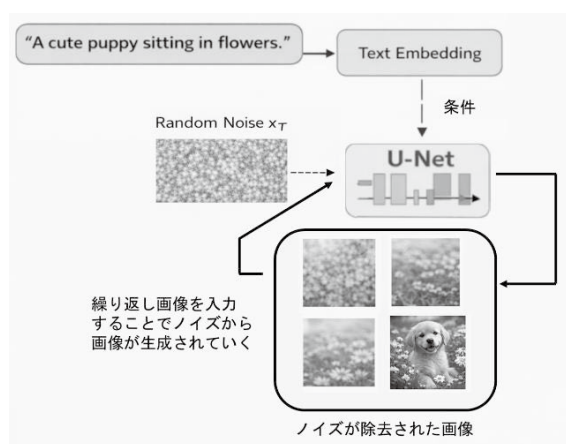


図3 条件付き拡散モデルによる推論

モデル学習時の勾配損失の有無で推定されるデプス画像の違いを示す。

2.2 条件付き拡散モデル

近年、写実的でリアルな画像を生成できる Stable Diffusion に代表される拡散モデルの普及が進んでいる。条件付き拡散モデルは、データに段階的にノイズを付与する前向き過程と、そのノイズを除去してデータを復元する逆過程から構成される。これを学習すると条件に応じてノイズを除去する AI が構築される。推論時は図 3 に示すようにノイズを除去する AI（図 3 では U-Net）にランダムノイズと条件（図 3 では A cute puppy sitting in flowers）を入力すると、ノイズが除去された画像が出力される。それを繰り返

返し AI に入力することで徐々にノイズが除去され所望の画像が生成される。

本研究では、条件付き拡散モデルを適用するために条件として画像を用いる。ビッグデータを学習した AI による特徴抽出を活用したいため、画像を直接入れる代わりに学習済みの ResNet18 に画像を入力して抽出される特徴マップを条件として AI に入力した。

条件付き拡散モデルは、一般的にはノイズを推定する。今回は学習データが少なく、図 2 の勾配損失も導入したいため、ノイズではなくデプス画像を推定する方法をとった。図 4 にその比較を示すが、ノイズを推定するよりデプス画像を推定する方法が良い結果となった。

3. データ拡張

今回のデータはデプス画像であるため 3 次元の位置情報を持ち、3 次元的な回転をすることができる。そこで、画像とデプス画像を表 1 の手順でランダム回転させることでデータ拡張を実施した。図 1 のデータをデータ拡張した画像を図 5 に示す。

4. レリーフ製作用 AI の作成と評価

レリーフ製作用 AI として MiDaS と条件付き拡散モデルのそれぞれを学習し、データ拡張した場合としない場合を比べた。図 4 の入力画像



図5 データ拡張した画像

表1 データ拡張の手順

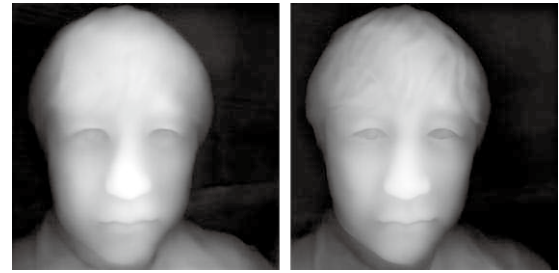
1	カメラ内部パラメータを仮定して、画素位置を距離に変更する。
2	画像とデプス画像を点群に変換する。
3	点群の重心を求める。
4	重心を中心に点群をランダム回転させる。
5	回転後の点群を仮定したカメラパラメータを用いて画像、デプス画像に再投影する。該当画素に複数ある場合は上下で上となる点を優先とする。
6	小さな穴は TELEA 法 ⁴⁾ を用いて埋める。

を入力しデプス画像を推定した結果を図6と図7に示す。データ拡張の効果があり、MiDaSのほうが安定した結果が出ることが確認できた。

このAIをデザイナーに評価してもらった結果、「現状では実務ですぐに使えるデプス画像は出力されていない。しかし想定よりは良い品質であるため、今後の研究開発次第では実用化の可能性はある。」との見解を得た。

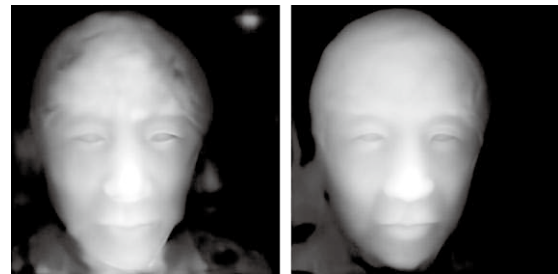
5. 結 言

- (1) MiDaS や条件付き拡散モデルを用いた画像からデプス画像を出力するレリーフ製作用AIを開発した。
- (2) 勾配損失を加えた損失関数や3次元での回転によるデータ拡張の効果を確認した。
- (3) デザイナーから、現状では実務で使えないが、実用化の可能性があると評価された。



(a) データ拡張なし (b) データ拡張あり

図6 MiDaSでの推測結果



(a) データ拡張なし (b) データ拡張あり

図7 条件付き拡散モデルでの推測結果

参考文献

- 1) René Ranftl, Katrin Lasinger, David Hafner, Konrad Schindler, Vladlen Koltun, “Towards Robust Monocular Depth Estimation: Mixing Datasets for Zero-shot Cross-dataset Transfer”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.44, (2022), pp.1623-1637.
- 2) Jonathan Ho, Tim Salimans, “Classifier-Free Diffusion Guidance”, <https://arxiv.org/abs/2207.12598>, (閲覧 2026-2-4).
- 3) René Ranftl, Alexey Bochkovskiy, Vladlen Koltun, “Vision Transformers for Dense Prediction”, *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (2021), pp.12179-12188.
- 4) Telea, Alexandru, “An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method”, *Journal of Graphics Tools*, Vol.9 (2004), pp.25-36.

DED 方式堆積造形による金属製ワインボトルの試作

須藤 貴裕* 田村 信* 中村 一夫*

Prototyping of a Metal Wine Bottle by Directed Energy Deposition

SUTOH Takahiro*, TAMURA Makoto* and NAKAMURA Kazuo*

抄 録

DED 方式堆積造形を用いた SUS316L 製ワインボトル形状の造形を試み、レーザ出力や積層ピッチなどの最適造形条件を検討した。その結果、高さ 270mm、最大直径 103mm、厚さ 1.5mm（設計寸法）のボトル形状を、所要時間 200 分で再現性良く造形できることを確認した。コストやリードタイムなどの詳細な評価は今後の課題であるものの、DED 方式は従来の切削加工や塑性加工の代替として、あるいはこれらとのハイブリッドによる製品試作工法としての活用が期待される。

1. 緒 言

金属 3D 積層造形技術は、様々な方式の研究開発が国内外で活発に進められ、社会実装も進展しつつある技術である。従来の切削加工や塑性加工の代替として、同技術を活用した製品試作などへの期待が高まる一方で、装置や材料粉末が高価であること、ならびに造形条件の最適化が難しいことから、中小企業が単独で新規導入するにはハードルが高い技術でもある。

こうした背景を踏まえ、公益財団法人にいがた産業創造機構が主催する次世代デジタルものづくり研究会・金属 3D 積層造形分科会では、会員企業からテーマを募集し、設計から後加工・評価までの一連の工程に取り組む「造形トライアル」事業を実施している。

本報告では、DED(Directed Energy Deposition)方式堆積造形を用いて、同事業に応募された金属製ワインボトル（図 1）を試作造形した際の造形条件および造形に要した時間などの基礎データを報告する。

2. 造形装置

造形にはパウダ DED 方式堆積造形装置 LAMDA200（ニデックマシンツール(株)製）を

使用した。最大造形サイズは 200mm×200mm×200mm である。図 2 に造形部の模式図を示す。造形ヘッドの先端中央から照射されるレーザ光

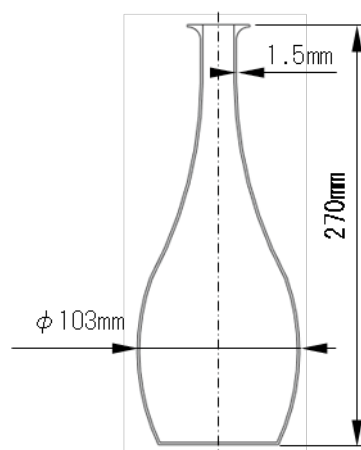


図 1 金属製ワインボトルの設計寸法

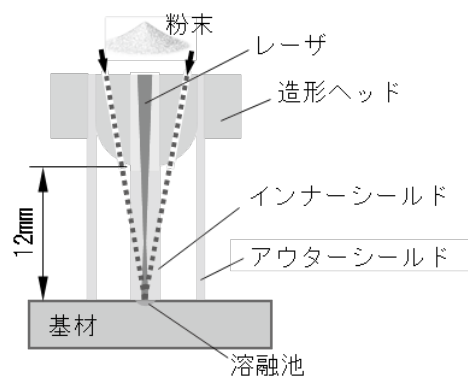


図 2 装置造形部の模式図

* 技術統括センター

(波長 1.07 μ m, 最大出力 2kW) により, 基材表面に熔融池を形成する。レーザ光の光軸周りに配置されたノズルから吐出された粉末が, 熔融池に投入されることで堆積層を形成する原理である。本装置の特徴として, インナーシールドおよびアウターシールドの 2 系統からなるシールドガスにより高いシールド性を確保できる点と, 造形中の熔融池の状態を監視し, 造形が安定するように, レーザ出力と送り速度をフィードバック制御するモニタリングシステムを搭載している点が挙げられる。

3. 研究内容

3.1 造形方針の検討

造形対象物の高さは 270mm であり, 前述の造形装置では軸ストロークの制約から一体造形できない。そこで, 図 3 に示すように対象物を上下に分割して造形し, その後, 「造形トライアル」事業に応募した企業(以下, 応募企業という)にて基材切除, 溶接, 造形表面の仕上げを行う方針とした。また, 対象物は高さがあるうえ, 大部分が板厚 1.5mm の薄肉形状であるため, 造形時に入熱量が過大となると形状が崩れる恐れがある。そこで, レーザスポット径を小さくしてパワー密度を高め, 十分な熔融池を確保しつつ高速走査すること, さらに薄肉部を 1 周のヘリカル動作で造形することにより, 総入熱量を抑える方針とした。

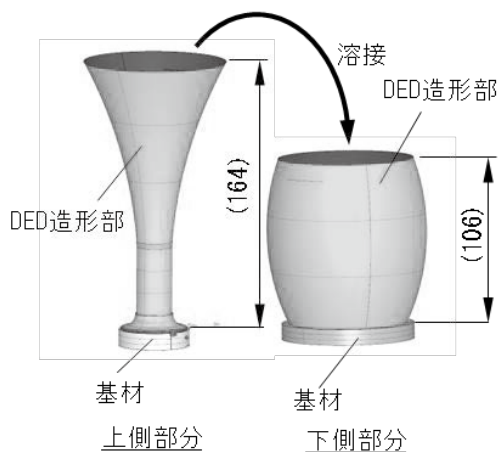


図 3 造形方針の概略

3.2 造形条件の検討

3.2.1 レーザ出力の検討

前述の造形方針に基づき, レーザ出力を検討した。なお, 造形材種は, これまでの実績から SUS316L を選定した。

レーザ出力の検討では, SUS316L 製平板基材(幅 20mm×長さ 100mm×厚さ 10mm)上に, 造形条件のうち, レーザスポット径 0.96mm, 送り速度 1000mm/min, 粉末供給量 10g/min を固定して, レーザ出力のみを変化させてシングルビードを造形し, その幅を測定した。結果を表 1 に示す。ビード幅はレーザ出力の増加に伴い広がり, 700W では 1.25mm となった。造形対象の板厚 1.5mm よりも小さいが, ビードを重ねて壁状に造形すると, 壁厚さはシングルビードの幅よりも増加する傾向がある。このことから, レーザ出力は 700W を採用した。

3.2.2 積層ピッチの検討

シングルビードを 30 層積層して壁状に造形して積層ピッチを検討した。

多層造形では造形後半に蓄熱が進み, 熔融池の温度が上昇する傾向がある。そこで以降の試験では, 前述のモニタリングシステムを用い, 2 層目造形時の熔融池の温度状態と同等になるようにレーザ出力をフィードバック制御し, 熔融池温度の安定化を図った。なお, 本試験の目的は積層ピッチの適正化であるため, 積層高さに直結する送り速度は制御せず, 1000mm/min に固定した。

積層ピッチと壁高さの結果を表 2 に示す。表中の設計壁高さは積層ピッチ×積層数を表す。積層ピッチ 0.33mm および 0.30mm では設計壁高さを大きく下回り, 0.28mm および 0.26mm では設計高さに近い結果となった。

表 1 レーザ出力とビード幅

No.	レーザ出力(W)	ビード幅(mm)
1	500	0.99
2	600	1.11
3	700	1.25

表 2 積層ピッチと壁高さ (30 層)

No.	積層ピッチ (mm)	壁高さ (mm)	
		設計	造形
1	0.33	9.9	6.3
2	0.30	9.0	7.2
3	0.28	8.4	7.8
4	0.26	7.8	8.0

表 3 積層ピッチと壁高さ (60 層)

No.	積層ピッチ (mm)	壁高さ (mm)	
		設計	造形
1	0.26	15.6	16.8
2	0.27	16.2	16.5

使用した装置は、ノズル下端から 12mm の位置で材料粉末が集束するよう設計されている。造形物高さがこの位置に一致すると、熔融池へ適切な粉末量が投入され、良好な造形が実現する。しかし、造形物高さが集束位置から外れると、熔融池への粉末投入量が減少し、1 層あたりの積層高さが低下する。積層ピッチ 0.33mm および 0.30mm では、実際の積層高さより設定ピッチが大きかったため誤差が累積し、粉末集束位置と熔融池位置がずれて設計壁高さに到達できなかったと考えられる。一方、積層ピッチ 0.28 mm および 0.26mm では、実際の積層高さと設定ピッチが概ね一致し、設計壁高さに近い造形をすることができた。なお、いずれの条件でも壁厚さは 1.6~1.7mm で、造形対象の設計板厚に近い値が得られたことから、レーザ出力は 700W が妥当であると判断した。

積層ピッチのさらなる最適化を目的として、0.26mm および 0.27mm の条件で 60 層の壁状造形を実施した。表 3 に示す結果のとおり、積層ピッチ 0.27mm のときに設計壁高さと造形壁高さが概ね一致したことから、本条件を採用することとした。

3.3 製品形状造形

造形条件を最適化できたことから、図 3 の上側部分、下側部分をそれぞれ造形した。造形時

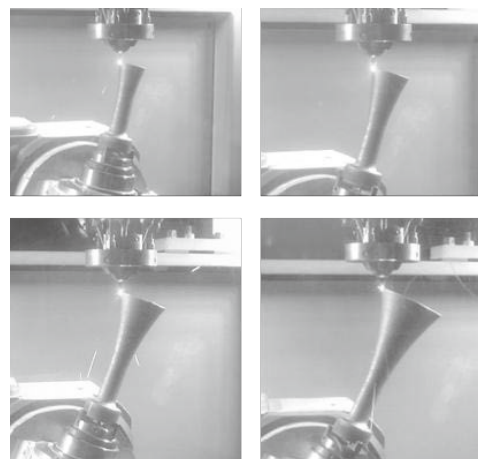


図 4 造形姿勢

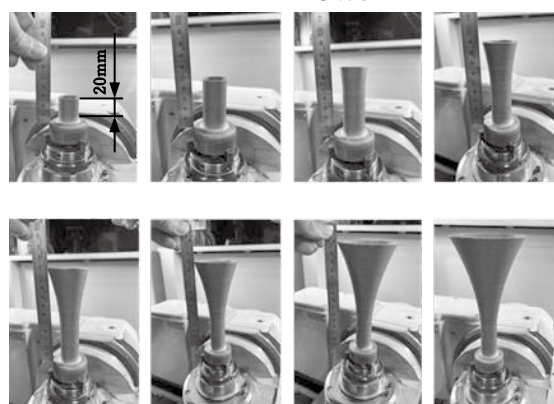


図 5 造形時の工程分割

には、前述のモニタリングシステムによってレーザ出力と送り速度をフィードバック制御し、造形の安定化を図った。造形姿勢は、図 4 に示すとおり、積層方向が壁面に沿うように同時 5 軸制御で造形した。このような造形姿勢とすることで、溶け落ちによる形状崩れを抑制できる。また、図 5 に示すとおり、概ね高さ 20mm ごとに工程分割して造形した。工程分割した理由は、①造形物と造形ノズルなど機械側の冷却と②造形高さの確認と補正のためである。本造形では、適切な造形条件を設定できたため、いずれの工程でも概ね設計どおりの高さに造形でき、高さを補正することなく造形を完了した。

造形完了後の上側部分、下側部分の写真を図 6 に示す。それぞれの造形表面に若干の違いは認められるが、上下の合わせ部の寸法も一致しており、概ね設計形状どおりに再現性良く造形できている。

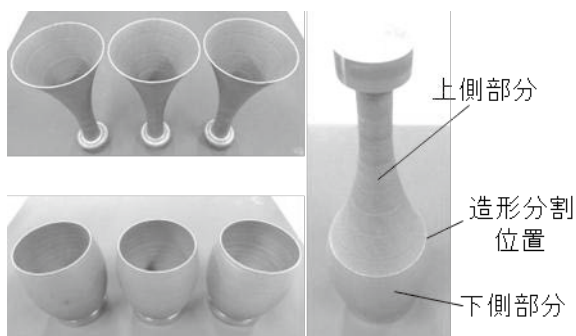


図6 造形完了後の写真

上側・下側それぞれの造形時間（工程間の冷却時間を除く）を表4に示す。上下を分割して造形したため、溶接などの後工程に要する時間は別途必要となるものの、造形自体は上下合わせて200分で完了した。

基材を切除して溶接した写真を図7、その後ボトルの外側全面を研磨した写真を図8にそれぞれ示す。いずれも応募企業で実施したものである。研磨後の表面を観察した範囲では、造形による空孔欠陥は認められず、良好な造形が実現できている。

表4 造形時間

造形部位	造形時間(min)
上側	85
下側	115
合計	200



図7 溶接後の写真



図8 外側全面を研磨した写真

以上の結果から、コストやリードタイムなどの詳細な評価は今後の課題であるものの、DED方式は従来の切削加工や塑性加工の代替として、あるいはこれらとのハイブリッドによる製品試作工法としての活用が期待される。

4. 結 言

- (1)DED(Directed Energy Deposition)方式堆積造形を用いて、SUS316L製のワインボトル形状を3個試作造形した。造形条件を最適化することによって、概ね設計形状どおりに再現性良く造形可能であった。
- (2)高さ270mm、最大直径103mm、厚さ1.5mmのボトル形状の造形に要した時間は200分であった。
- (3)コストやリードタイムなどの詳細な評価は今後の課題であるものの、DED方式は従来の切削加工や塑性加工の代替として、あるいはこれらとのハイブリッドによる製品試作工法としての活用が期待される。

なお、本報告は、公益財団法人にいがた産業創造機構が主催する次世代デジタルものづくり研究会・金属3D積層造形分科会で実施した「造形トライアル」事業において、当該財団から受託した研究内容をまとめたものである。

参考文献

- 1)令和7年度：金属3D積層造形トライアルのテーマ募集について、<https://www.nico.or.jp/sien/seminar/73193/>, (閲覧 2026-3-13).