

# 工業技術研究報告書

Report of the Industrial Research Institute of Niigata Prefecture No.38 2009

No.38 2009



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 Ward, Niigata City, Niigata 950-0915, Japan

# 目 次

## I 研究論文

1. 省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼のプレス成形性・・・・・・・・・・ 3  
(誘導加熱用鍋釜の軽量化に関する要素技術開発研究)
2. マグネシウム合金パイプ材の曲げ加工技術の開発・・・・・・・・・・ 10
3. 高断熱・均熱金型の開発・・・・・・・・・・ 18
4. cBN エンドミル工具による鉄系材料の鏡面加工・・・・・・・・・・ 26
5. Mg 合金の実用的な表面処理技術の開発および評価（第 2 報）・・・・・・・・ 32
6. 窒素吸収処理ステンレス鋼の開発・・・・・・・・・・ 39
7. 電子線リソグラフィーを用いた三次元微細形状創成技術の研究・・・・・・・・ 45
8. ウェットブラストを利用したリフトオフプロセスの開発・・・・・・・・・・ 51
9. 画像処理を利用した鋳鉄品の外観検査の自動化についての研究・・・・・・・・ 56
10. 匠の技を継承し発展させる技能伝承支援システムの開発・・・・・・・・・・ 62
11. 食品産業支援の化学チップ開発・・・・・・・・・・ 67
12. 高齢化社会に適した再生医療普及のための安価な培養システムの開発・・・・・・・・ 73

## II ノート

1. マグネシウム合金板の精密打ち抜き加工技術・・・81
2. 温間再絞り成形シミュレーションに関する研究・・・84
3. プレスシミュレーションにおける材料特性の逆解法に関する研究・・・87
4. 難削材の加工技術研究・・・90
5. レーザ測長器を用いた三次元座標測定システムの開発・・・96
6. 石油系溶剤回収静止乾燥機における安全性の調査研究・・・99
7. 布の繋ぎ目検出および測長に関する研究・・・102
8. たて糸インクジェット捺染織物の開発支援・・・105
9. ユニフォームの防汚性試験方法に関する研究・・・108
10. 靴下のあたたかさの測定に関する研究・・・111

## III 調査・報告

1. 航空機産業参入に係る可能性調査報告・・・117
2. 炭素繊維複合材料の製造と用途開発に関する調査研究・・・120
3. 鋳物廃砂ダストをシリカ原料とする有用物質製造の研究・・・123
4. 熱処理技術に関する調査・・・126
5. 溶接技術の高度化に関する調査研究・・・129
6. ナノテク機器利用技術講習会・・・133

# I 研究論文





# 省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼のプレス成形性 (誘導加熱用鍋釜の軽量化に関する要素技術開発研究)

山崎 栄一\* 杉井 伸吾\* 白川 正登\* 田村 信\*

Press Forming of Cr-Mn-Ni Austenitic Stainless Steels

YAMAZAKI Eiichi\*, SUGII Shingo\*, SHIRAKAWA Masato\* and TAMURA Makoto\*

## 抄 録

オーステナイト系ステンレス鋼の代表鋼種である SUS304 と同等の加工性と耐食性を旨とした材料として注目されている省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼 (Cr-Mn-Ni オーステナイト系ステンレス鋼) の機械的性質の温度依存性および、常温と温間におけるプレス成形性を調べ、SUS304 とほぼ同等の絞り成形性であり、温間加工によってさらに成形性が向上することを示した。また、温間での再絞り加工を行い、再絞り率 55% の成形が可能であること、また、成形品のパンチ肩部で板厚が最も薄くなるものの、加工誘起マルテンサイト変態の発現はわずかであることを示した。

## 1. 緒 言

近年のニッケル価格変動を受け、SUS304 と同等の加工性と耐食性を有し、Ni 含有量が少ないことから価格変動リスクが少ない鋼種として注目を集めている省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼について、機械的性質の温度依存性を調べるとともに常温および温間での絞り成形性と張り出し性の評価を行った。また、絞り加工 1 工程では成形が困難な、アスペクト比の高い製品を得る場合に、絞り加工を繰り返して行う再絞り加工を温間で行い、第 1 絞り成形後と再絞り成形後の品質について、板厚、硬さ、加工誘起マルテンサイト変態量の分布を調べたので報告する。

## 2. 供試材

供試材は省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼 3 種 (公称板厚 0.8mm) を用い、加工性については SUS304 と比較を行った。供試材の呼びをその代表成分から定め、それぞれの化学成分とともに

に表 1 に示す。また、組織観察写真を図 1 に示す。

## 3. 試験方法

### 3.1 機械的性質

供試材の機械的性質を調べるため、圧延方向に対して 0°, 90° の方向に JIS Z 2201 による 13B 号試験片を採取し、精密万能試験機 (株) 島津製作所製 AG-250KNI) により引張り試験を実施した。試験条件は初期クロスヘッド速度を 5mm/min とし、ひずみ 5% 以降は 10mm/min とした。また、試験温度は常温、100°C および 150°C とした。

### 3.2 絞り成形性

絞り成形性は、円筒絞り成形により評価を行った。試験装置は (株) アミノ製塑性加工万能試験機 (インナー 1274kN, アウター 686kN) を使用し、絞り比 (DR : Drawing Ratio) を 0.1 刻みに変えて限界絞り比 (LDR : Limiting Drawing Ratio) を求めた。また、試験は常温 ~ 150°C の間でダイス温度を変えて温間加工の効果を確認した。

\* 研究開発センター

表 1 供試材の化学成分 (wt%)

| 呼 び       | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr    | Mo | Cu   | Ti | Nb | N |
|-----------|------|------|------|-------|-------|------|-------|----|------|----|----|---|
| 2.5Ni-6Mn | 0.10 | 0.60 | 6.48 | 0.042 | 0.006 | 2.44 | 17.18 | -  | 2.48 | -  | -  | - |
| 4.5Ni-4Mn | 0.06 | 0.60 | 3.78 | 0.028 | 0.004 | 4.58 | 17.01 | -  | 2.64 | -  | -  | - |
| 3.5Ni-6Mn | 0.06 | 0.60 | 5.73 | 0.029 | 0.003 | 3.60 | 17.49 | -  | 2.17 | -  | -  | - |
| SUS304    | 0.06 | 0.41 | 0.98 | 0.030 | 0.006 | 8.02 | 18.23 | -  | -    | -  | -  | - |

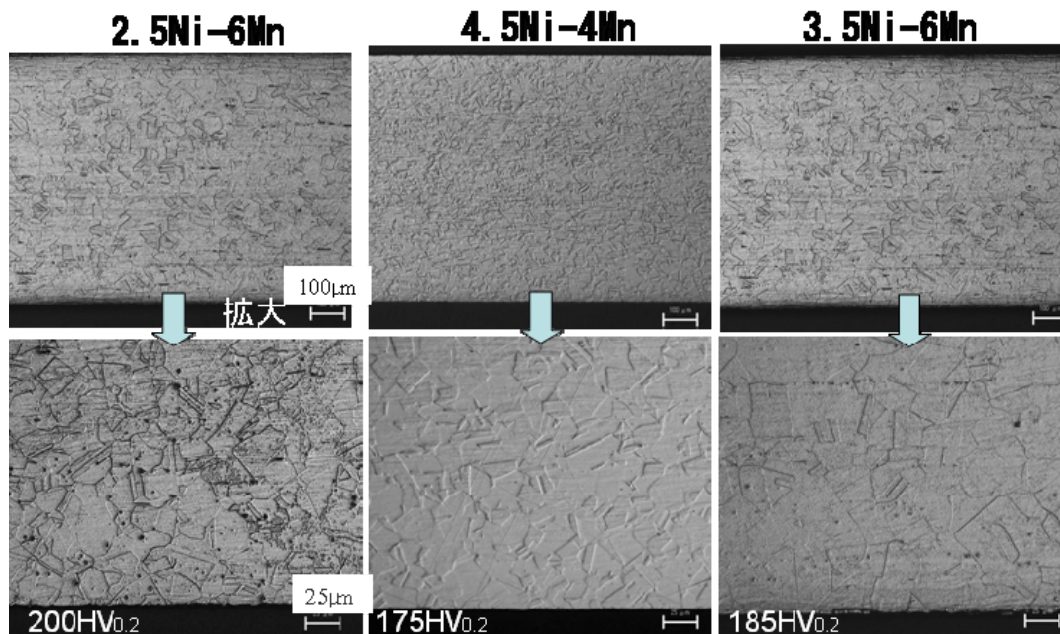


図 1 供試材の組織写真

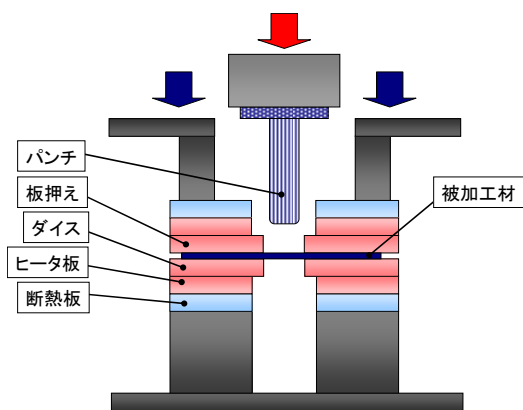


図 2 温間絞り金型の概要

表 2 円筒絞り試験条件

|             |                      |
|-------------|----------------------|
| ダイス材質       | SKD11硬質Crめっき         |
| パンチ径        | 40mm                 |
| パンチ肩半径      | 3.8mm                |
| ダイス径        | 42.1mm               |
| ダイス肩半径      | 3mm                  |
| ダイス温度/パンチ温度 | 27/27, 100/5, 150/5℃ |
| しわ抑え力       | 50kN                 |
| パンチスピード     | 3mm/sec              |
| 潤滑剤         | PTFEシート 0.05mm       |

図 2 に金型概要を、表 2 に試験条件を示す。

### 3.3 再絞り試験

再絞り加工には、前工程の絞り加工におけるパンチよりも小径のパンチを、前工程の挿入方向と同一方向に挿入する直接再絞りと、前工程の絞り

加工におけるパンチの挿入方向と逆方向に挿入する逆再絞りがある。<sup>1)</sup> 本試験では、直接再絞りにおける、再絞り率 (= 再絞りパンチ径 / 第 1 絞りパンチ径 × 100%) 55% の試験を行った。なお、第 1 絞りの成形にはサーボプレス装置 (アイダエンジニアリング (株) 製 NS1-2000 (D)、加圧能

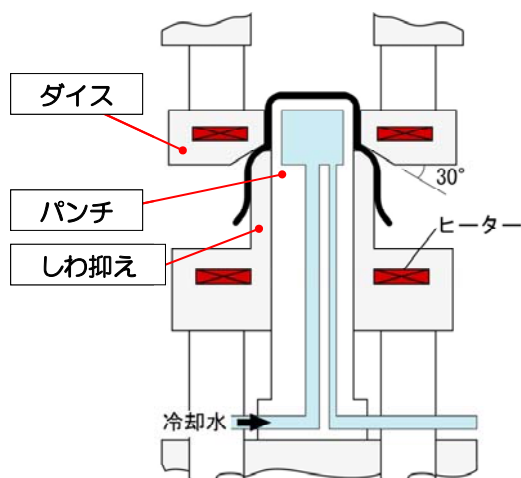


図3 再絞り金型構造

表3 再絞り試験条件

|      |             |               |
|------|-------------|---------------|
| 第1絞り | 絞り比         | 2.6           |
|      | 金型材質        | SKD11 硬質Crめっき |
|      | パンチ径        | 60mm          |
|      | パンチ肩半径      | 6mm           |
|      | ダイス径        | 61.8mm        |
|      | ダイス肩半径      | 5mm           |
|      | ダイス温度/パンチ温度 | 120/0 °C      |
|      | しわ抑え力       | 110kN         |
|      | パンチスピード     | 3.5mm/sec     |
|      | 潤滑剤         | PTFEシート0.05mm |
| 再絞り  | 再絞り率        | 55%           |
|      | パンチ肩半径      | 3mm           |
|      | ダイス肩半径      | 4mm           |
|      | ダイス温度/パンチ温度 | 150/5 °C      |
|      | しわ抑え力       | 10kN          |
|      | パンチスピード     | 3.5mm/sec     |
|      | 潤滑剤         | 乾燥皮膜型         |

力 2000kN) を、再絞りには複動油圧プレス装置 ((株) 不二越製, 加圧能力 294kN, ダイクッション能力 245kN) を使用した。

再絞り金型の構造を図3に、試験条件を表3に示す。

### 3.4 張り出し成形性

張り出し成形性の評価は JIS Z 2247 エリクセン試験方法に準じて行い、パンチ側のみ潤滑剤として PTFE シート (厚さ 0.05mm) を用い、試験温度を常温、100℃、150℃にして試験を行った。試験装置は絞り成形性の試験で用いた (株) アミノ製塑性加工万能試験機である。

## 4. 試験結果

### 4.1 機械的性質

試験した各供試材の圧延方向 (0° 方向) の機械的性質の測定結果を図4(a)~(c)に示す。

常温において 4.5Ni-4Mn, 3.5Ni-6Mn の2鋼種は引張強さで 720MPa, 0.2%耐力は 350MPa 程度でほぼ同等の値を示し、2.5Ni-6Mn はそれらに比べ 50MPa 程度高い値を示した。また、試験温度上昇に伴い、いずれも値が低くなり各鋼種とも 150℃においては引張強さで2割程度、0.2%耐力で3割

程度低下する。

破断伸びは、各鋼種ともに常温で 55%以上示すものが温度上昇に伴って低下し、150℃では 40~45%となった。

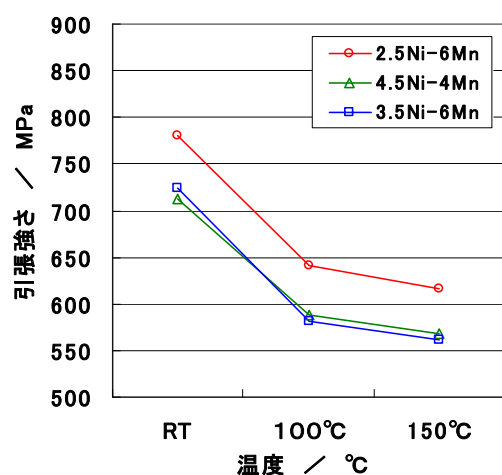
板材の圧延方向に関する異方性について 4.5Ni-4Mn の圧延方向とその 90° 方向の測定結果を図4(d)に示すが、0.2%耐力では圧延方向の影響がほとんど見られないのに対し、引張強さでは圧延方向が強く、破断伸びでは圧延方向に対し 90° 方向が大きな値となる傾向が各試験温度において見られた。また、同様の傾向を他の2鋼種も示した。

### 4.2 絞り成形性

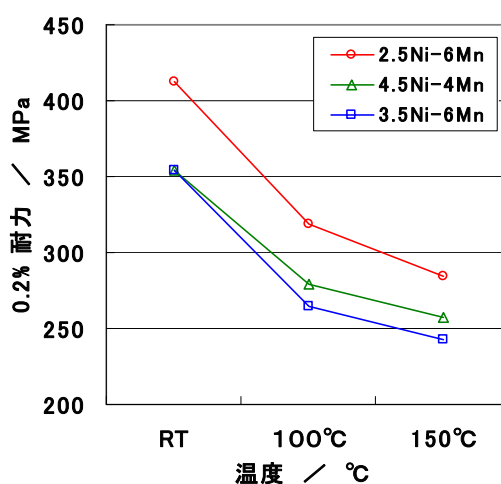
円筒絞りにおける限界絞り比の試験結果を図5に示す。

常温における省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼の LDR は 2.1 を示し、SUS304 のそれを若干上回った。また、各鋼種ともに温度上昇に伴い LDR が向上することから、温間加工により成形限界向上の効果があることがわかる。

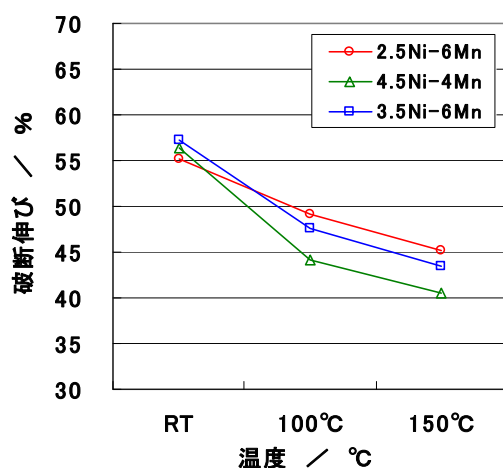
各温度において省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼は SUS304 とほぼ同等の絞り成形性を持つ。



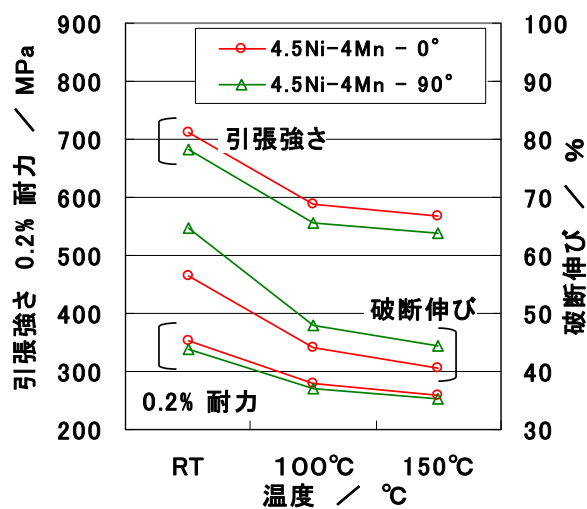
(a) 引張強さ



(b) 0.2% 耐力



(c) 破断伸び



(d) 異方性

図4 機械的性質の温度依存性

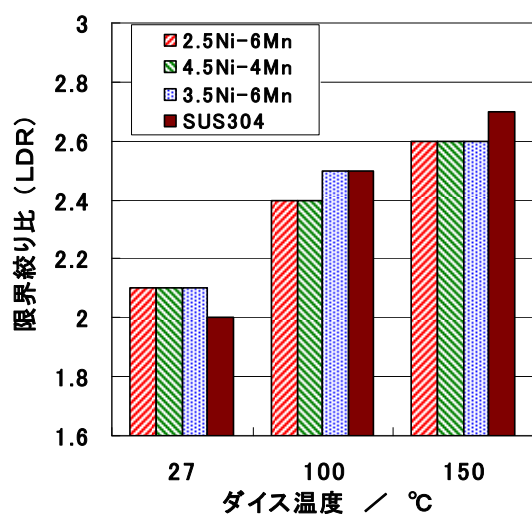


図5 限界絞り比



左：第1絞り 右：再絞り

図6 再絞り成形品

### 4.3 再絞り試験

第1絞りおよび再絞り成形品の写真を図6に示す。第1絞り後の軸方向板厚分布を図7に、再絞り後の軸方向板厚分布を図8に示す。第1絞り後の板厚は、素材板厚 800 $\mu\text{m}$  に対して底部は 650～700 $\mu\text{m}$ 。パンチ肩部が最も薄く 600～650 $\mu\text{m}$ 。側壁部はその値から徐々に厚さが増し、ダイス肩部近傍では 800 $\mu\text{m}$  を超える値となっている。鋼種別に見ると、全域で 2.5Ni-6Mn が他の鋼種に比べ 50 $\mu\text{m}$

前後厚くなっている。再絞り後には、底部の板厚は第1絞り後と変わらず、パンチ肩部は第1絞りよりも 50 $\mu\text{m}$  前後薄くなっている。側壁部はパンチ肩部からフランジ方向に向かっておよそ 30mm の領域で 100 $\mu\text{m}$  程度厚さが増し、その後ダイス肩部近傍まで厚さ変化がほとんど見られない。鋼種別では 2.5Ni-6Mn が他の鋼種に比べて厚い傾向は第1絞り後と同様である。

第1絞り後および再絞り後の軸方向硬さ分布お

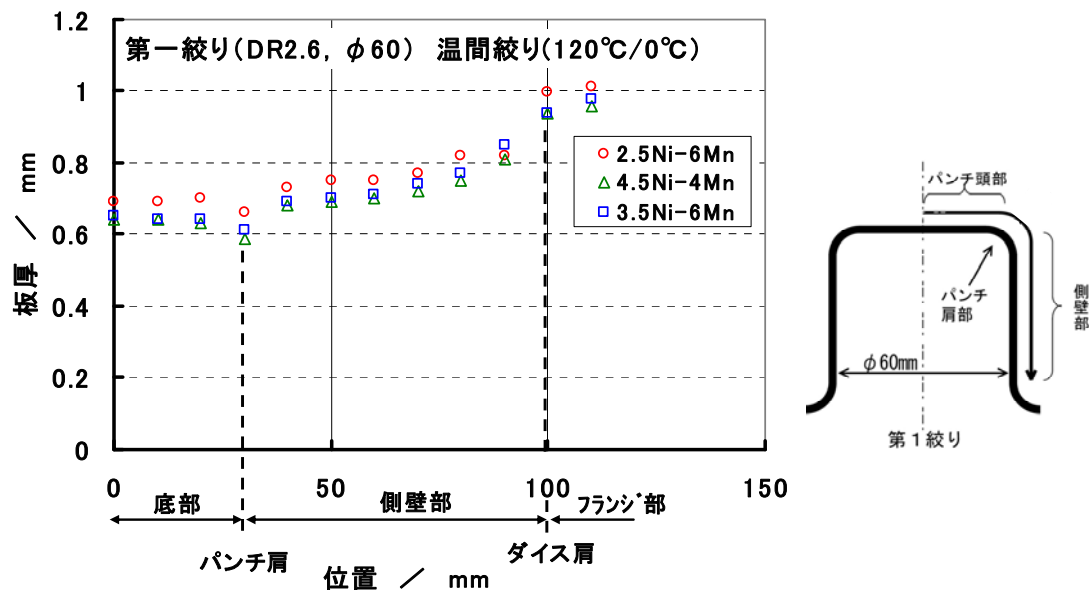


図7 第1絞り後の板厚分布

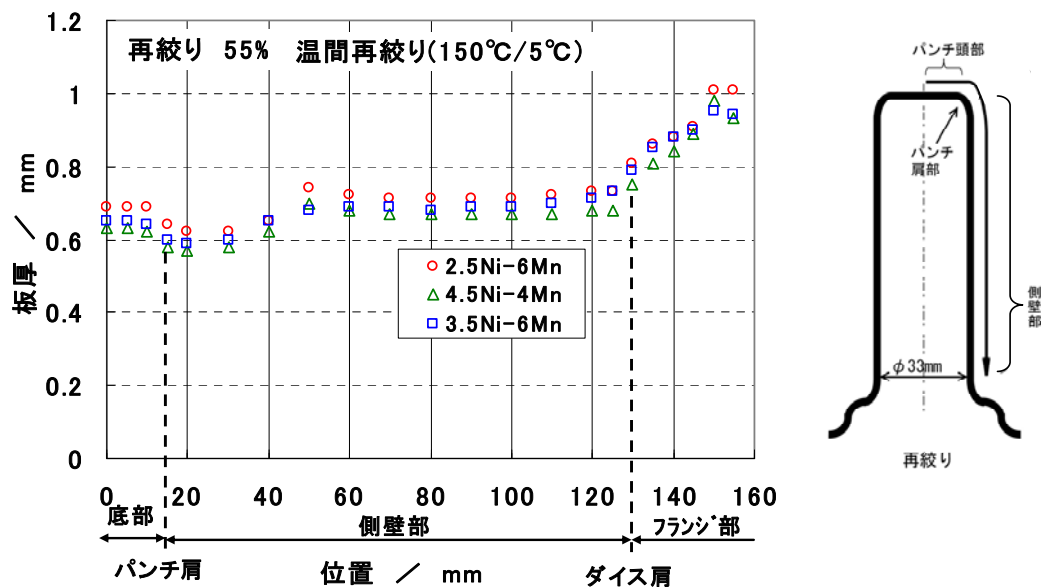


図8 再絞り後の板厚分布

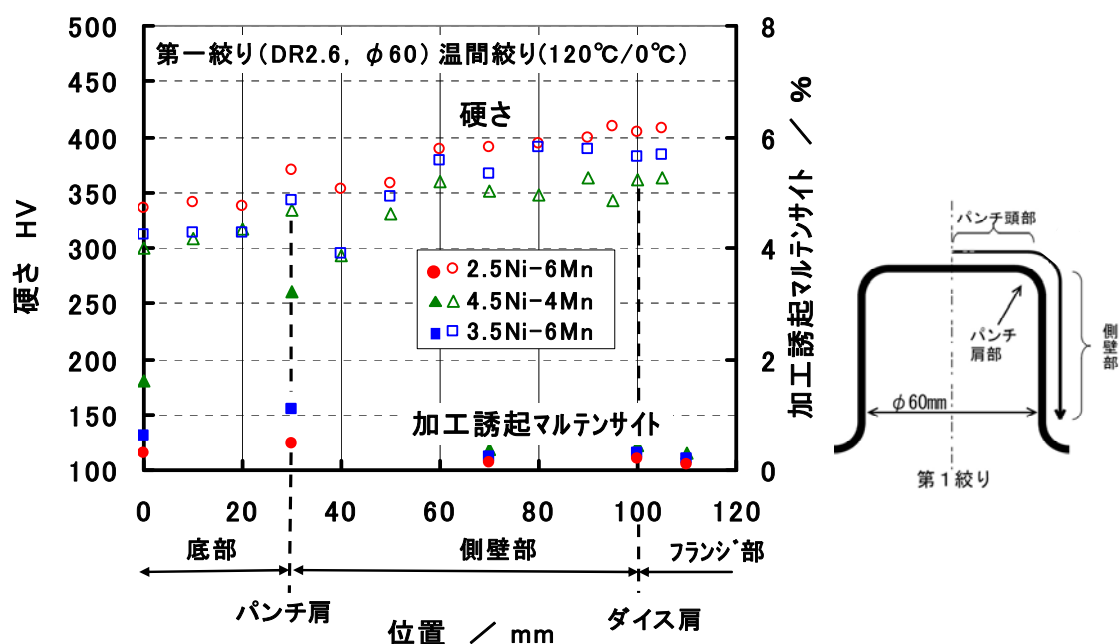


図9 第1絞り後の硬さとマルテンサイト変態量

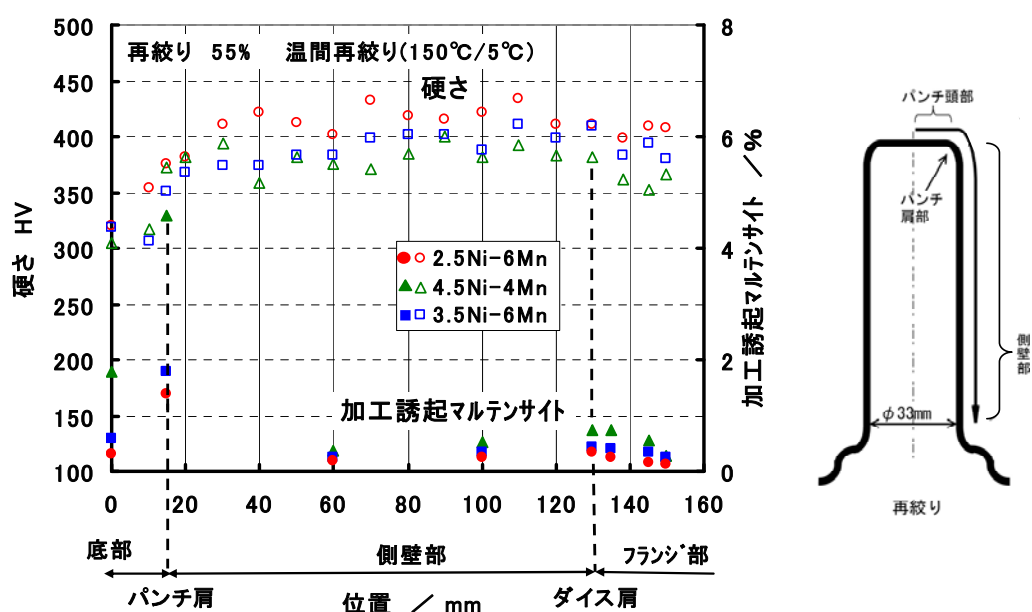


図10 再絞り後の硬さとマルテンサイト変態量

よび加工誘起マルテンサイト変態量をそれぞれ図9, 10に示す。第1絞り加工後における硬さを見ると、底部はHV300～350、側壁部はフランジ部に向かって徐々に上昇し、2.5Ni-6Mnでは最大でHV410超、4.5Ni-4MnではHV360程度となり、3.5Ni-6Mnはその中間的な値を示した。加工誘起マルテンサイト変態量を見ると、最も大きな変態

量となるのがパンチ肩部であり、鋼種別では4.5Ni-4Mnが最大約3%である。温間で変形が進んだ側壁部、フランジ部は全ての鋼種で0.5%以下であった。

再絞り後では、側壁部のほぼ全域で硬さの値が大きく、2.5Ni-6MnではHV400～430に達し、4.5Ni-4Mnでは360～400程度、3.5Ni-6Mnはその



中間的な値を示し、再絞りによって第1絞りよりも硬さの値は大きくなっている。

加工誘起マルテンサイト変態量は、再絞りのパンチ肩部が最も値が大きくなり、4.5Ni-4Mn が最大 5%弱である。鋼種別では硬さの値が低かった 4.5Ni-4Mn の変態量が多くなったことから、加工による硬さ値の上昇と変態量を直接関連づけることはできない。

マルテンサイト変態量 10%以上が SUS304 の置き割れ危険領域と言われている<sup>2)</sup> ことから本試験の値で置き割れへの進展の可能性は低いと考えられるが、省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼については今後検証が必要である。

その他の鋼種はパンチ肩部でも 2%以下で、側壁部は第1絞りに比べ大きな増加は見られず 0.5% 以下となった。

#### 4.4 張り出し成形性

張り出し成形性の指標となるエリクセン試験の結果を図 11 に示す。常温における省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼のエリクセン値は SUS304 に比べ若干低く、張り出し成形性は劣ると言える。しかし、100℃以上の試験結果ではその差が縮まる傾向を示した。

試験温度の上昇に伴うエリクセン値の推移は低下傾向を示すことから、いずれの鋼種も温間加工による張り出し性の向上は期待できない。

#### 5. 結 言

SUS304 と同等の加工性、耐食性を有し、Ni 価格変動の影響を受けにくい鋼種として注目を集めている省 Ni 型オーステナイト系ステンレス鋼のプレス成形性について調べ、つぎの結果を得た。

- (1) 絞り成形性は SUS304 とほぼ同等の成形性を持ち、温間加工により成形限界が向上する。

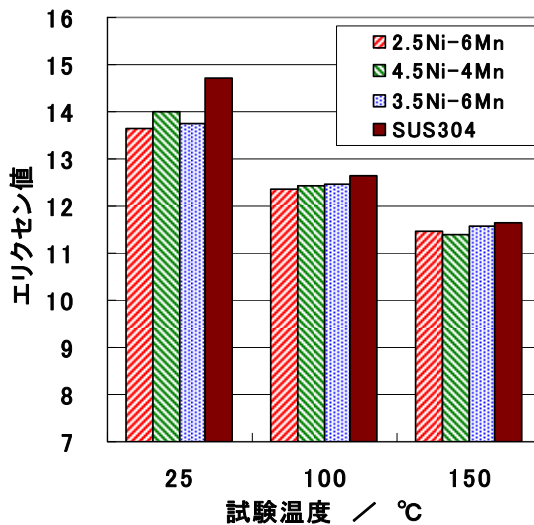


図 11 エリクセン試験結果

- (2) 温間の再絞り加工後の硬さは側壁部が大きくなり、各鋼種ともに HV400 を超える点が見られた。また、鋼種別では 2.5Ni-6Mn が最も値が大きく、次いで 3.5Ni-6Mn、4.5Ni-4Mn の順となった。
- (3) 加工誘起マルテンサイト変態量は再絞りのパンチ肩部で多くなり、本試験では 4.5Ni-4Mn の再絞りで最大 5%弱であった。また、マルテンサイト変態量と硬さの値には相関がない。
- (4) 張り出し成形性は常温において SUS304 よりも若干劣るものの温間加工ではその差が縮まる。また、温間加工による張り出し性向上は期待できない。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本塑性加工学会編、塑性加工便覧、2006, p479.
- 2) 鋸屋正喜、塑性加工学会ステンレス鋼板のプレス成形分科会資料、28, 1983.



# マグネシウム合金パイプ材の曲げ加工技術の開発

相田 収平\* 白川 正登\*\* 山崎 栄一\*\*

Development of High-performance Bending Technology of Magnesium Alloy Pipes

AIDA Shuhei\*, SHIRAKAWA Masato\*\* and YAMAZAKI Eiichi\*\*

## 抄 録

マグネシウム合金パイプは、実用金属中では最軽量かつ重量に対して高剛性の中空型材といった両特長を有していることから、構造部材に適用した場合のメリットが大きく、今後の適用拡大が期待されている。本研究では、異形断面を有するパイプの曲げ加工技術として、パイプの軸方向に引張り力を付加する引張り曲げ加工、および素管径に対して拡張しながら曲げ加工を行う浮動拡張プラグ曲げ加工技術についてマグネシウム合金パイプへの適用を試みた。その結果、引張り曲げ加工では、軸方向の引張り力と曲げ部の断面形状との関係を明らかにした。また、浮動拡張プラグ曲げ加工では、円形断面の素管に対して、楕円および四角形状の断面に変形させながら曲げ加工を可能とする技術を開発した。

## 1. 緒 言

マグネシウム合金は、実用金属としては最も軽い材料であるとともに、同一重量において比較した場合の比強度では、鋼やアルミニウムより優れている。また、パイプ材は中空構造であることから重量に対して高剛性であり、軽量化やコストダウンに適している。これら両方の特長により、例えば車両用のシートフレーム部品などの構造部材に適用した場合には、強度と軽量を両立することが可能となり、大きなメリットが得られることから、今後の用途の拡大が期待できる<sup>1)</sup>。

ところで、これらの製品の多くはパイプ材を曲げ加工した部品と板材をプレス成形した部品を組み合わせた形態となっている。しかしながら板材の成形技術に比べて、パイプの加工技術についての報告は少ない<sup>2) 3)</sup>。

本研究では、マグネシウム合金パイプの曲げ加工技術を開発することによって、構造用部品等へ

の適用拡大を図ることを目的とした。それを実現するための加工技術として、引張り曲げ加工、および浮動拡張プラグ曲げ加工技術を取り上げ、マグネシウム合金パイプへの適用を検討した。

## 2. マグネシウム合金パイプの引張り曲げ加工

### 2.1 供試材およびプレス曲げ特性

供試材である AZ31 マグネシウム合金製、長円形断面を持つパイプの断面形状を図 1 に示す。このような異形断面形状のパイプは、長軸方向断面において断面係数が大きくなり、この方向での曲げ強度が向上するため、部材の軽量化を図る上では有効な手段である。そこで、当該パイプの長軸方向のプレス曲げ試験を行った。

図 2 に示すパンチとダイスより構成される金型を用いて、長さ 300mm のパイプの 90°曲げを行った。曲げ加工性は、加工温度を室温から 230℃まで変化させ、パンチ半径  $R_p$  によって評価した。なお曲げ加工には、加工能力 1100kN、加工速度 50SPM のクランクプレス機械を用い、パイプの

\* 下越技術支援センター

\*\* 研究開発センター

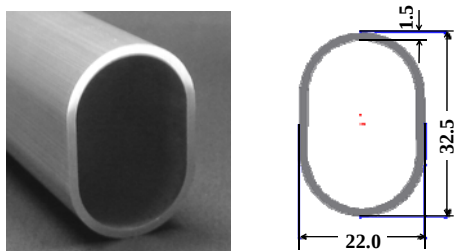


図1 長円形断面パイプ (単位:mm)

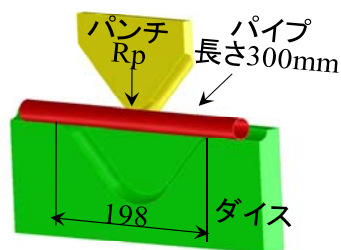


図2 パイププレス曲げ試験金型概略

表1 パイププレス曲げ試験結果

|                | 曲げ試験温度 T (°C) |     |     |     |     |
|----------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
|                | R.T.          | 100 | 150 | 200 | 230 |
| 内側曲げ半径 Rp (mm) | 27.5          |     |     |     | ◎、○ |
|                | 33            |     | ◎   | ○   |     |
|                | 38.5          |     | ◎   |     |     |
|                | 44            |     |     |     |     |
|                | 49.5          | ◎   | ○   | ○   |     |
|                | 55            |     |     |     |     |
|                | 60.5          | ○   |     |     |     |
|                | 66            |     |     |     |     |
|                | 71.5          |     |     |     |     |
|                | 77            |     |     |     |     |

長円形断面パイプの  
曲げ可能領域

偏平化を抑制するために、パイプ内に平均粒径 0.5mm の鉄製ビーズを充填している。

表1にプレス曲げ試験結果を示す。縦項目はパンチ半径  $R_p$ 、横項目は加工温度  $T$  をパラメータとして、曲げ加工が可能な加工条件の領域を表す。比較対象として、外径  $D_0=22\text{mm}$ 、肉厚  $t_0=1.8\text{mm}$  の円管パイプの限界曲げ半径を◎で、同外径、肉厚  $t_0=1.0\text{mm}$  の円管パイプの限界曲げ半径を○でそれぞれ表中に示す<sup>4)</sup>。表から明らかのように、いずれのパイプについても加工温度の上昇に伴って曲げ加工性が向上するが、長円形断面パイプは、円管に比べて曲げ加工性が悪い。

図3は、長円形断面パイプの  $R_p=44\text{mm}$  と  $55\text{mm}$  での曲げ加工後の曲げ部の断面形状について

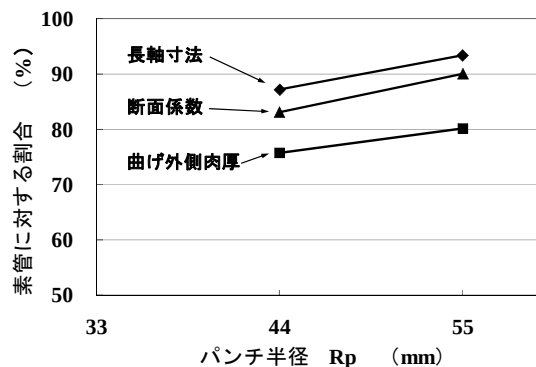


図3 パイプ曲げ部断面形状

て示しており、それぞれ加工温度  $230^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\text{C}$  での限界曲げ半径の曲げ加工結果である。 $R_p=44\text{mm}$  では曲げ部外側の肉厚および断面係数は加工前のそれぞれ 76%、83%に低下している。

## 2.2 引張り曲げ試験

長円形断面パイプの曲げ加工性を向上させる手段として、図4に示す引張り曲げ試験機により、引張り曲げ加工<sup>4)</sup>を試みた。付加引張り力は  $1.47\sim 2.45\text{kN}$ 、加工温度は  $200^\circ\text{C}$ 、パンチ半径は  $R_p=22\text{mm}$  にて行った。

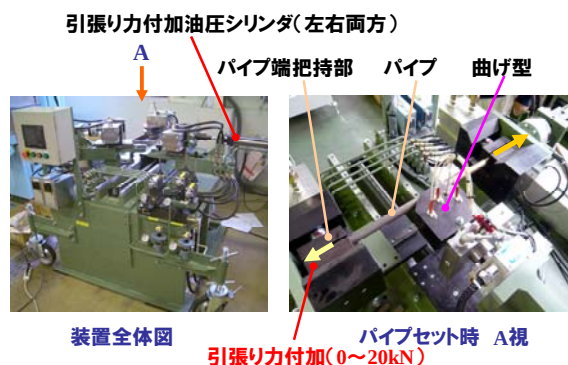


図4 パイプ引張り曲げ試験機



図5 パイプ引張り曲げ外観

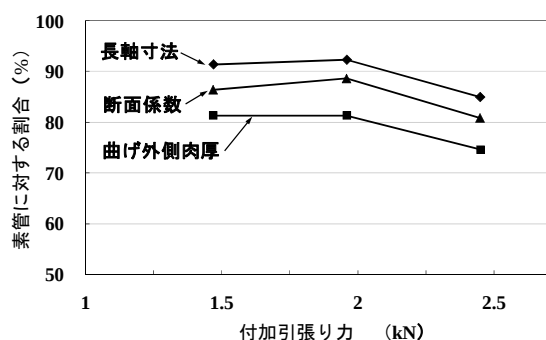


図6 パイプ曲げ部断面形状

図5にはパイプ曲げ部の外観を示す。また、図6には付加した軸方向の引張り力と曲げ部の断面形状について示している。引張り力の増加とともに曲げ部偏平化が進んでいることが外観図から明らかである。断面係数の変化については、付加引張り力が1.96kN程度までは偏平化による低下は緩やかであるが、2.45kNでは偏平化が大きく進行し、断面係数は曲げ加工前の約80%程度に低下している。

### 3. 浮動拡管プラグ曲げ加工

#### 3.1 浮動拡管プラグ曲げ加工装置

浮動拡管プラグ曲げ加工法とは、自由に移動できるように細い鋼線で支持された拡管プラグにパイプを通し、拡管しながら押し出すとともに、拡管されたパイプに曲げロールによって曲げモーメントを付加して所定の曲率に曲げる加工法である。その際、プラグは曲げロールの押し込み力によってその方向に移動しようとし、逆にパイプからはプラグを中心に戻そうとする力が作用する。これらがバランスした位置にプラグが移動することを

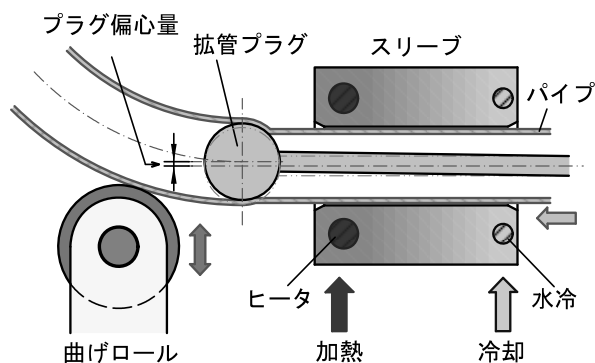
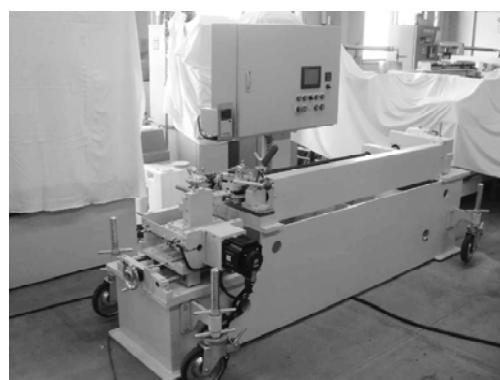


図7 浮動拡管プラグ曲げ概要

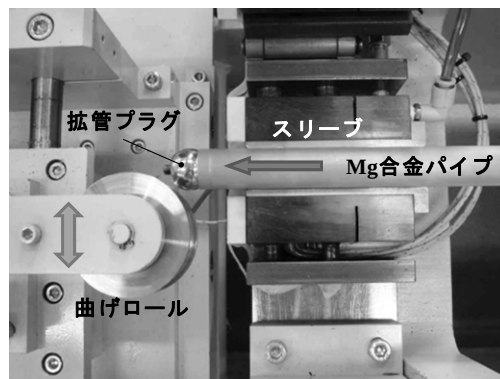
特徴とする加工法であり、偏平、偏肉等が小さく断面形状が良好で、曲げ半径が小さい加工が可能なパイプの曲げ加工法として報告されている<sup>5)</sup><sup>6)</sup>。さらに、この加工法による楕円等異形断面形状のパイプの加工も報告されている<sup>6)</sup><sup>7)</sup>。しかし、銅合金やアルミニウム合金への適用がほとんどであり、マグネシウム合金パイプへの適用例は報告されていない。

マグネシウム合金パイプの塑性加工は、一般的に常温では困難であり、温間域での加工が必要となる。そこで、温間加工が可能な浮動拡管プラグ曲げ加工装置の開発を行った。

装置の開発にあたって、既存装置の加工部近傍に簡易的な加熱構造を設けて、マグネシウム合金パイプの成形を試みた。その結果、加工するパイプが長尺の場合や曲率や拡管率が厳しい曲げ条件では、スリーブ内やスリーブ入口よりも手前で素材のパイプが座屈してしまう現象が確認された。これは、マグネシウム合金は圧縮強度が弱いうえ、伝熱によりパイプ全体が加熱され、座屈強度が低



(a) 装置外観



(b) 加工部拡大写真

図8 浮動拡管プラグ曲げ加工装置

下したためであると考えられる。したがって、拡張荷重および曲げモーメントが大きくかかるプラグ近傍では高温に加熱することで成形荷重を低下させ、それ以外の位置では、強度を保持できる温度にパイプが冷却される構造が望まれる。そこで、パイプのガイドとなるスリーブをヒータにより加熱できる構造とし、加工部に近いスリーブ出口側で高温に、スリーブの入り口側は、水道水により冷却できる構造とした。図7に開発した浮動拡張プラグ曲げ加工装置の概要を示す。開発した装置の外観写真を図8(a)に、加工部（分割スリーブを開放した状態）の拡大写真を図8(b)に示す。

## 3.2 潤滑剤の拡張性能評価試験

### 3.2.1 供試材および潤滑剤

供試材には、外径  $D_0=15\text{mm}$ 、肉厚  $t_0=1.0\text{mm}$  の AZ31 マグネシウム合金パイプを用いた。試験片の長さは  $60\text{mm}$  とした。

潤滑剤は、水溶性乾燥皮膜潤滑剤、溶剤希釈型乾燥皮膜潤滑剤、油系潤滑剤の3種類について評価を行った。

### 3.2.2 試験方法

拡張の潤滑性能は、内面に潤滑剤を塗布した供試材に拡張プラグ（鋼球）を押込み、押込み荷重の最大値で評価した。主な試験条件を表2に、試験の様子を図9に示す。試験機には、自動万能試験機（インストロンジャパン製 5582）を用い、試験温度の恒温槽内にて試験を行った。押込み長さは、荷重のかかり始めた位置から  $40\text{mm}$  とした。拡張率は  $E=10, 15.4, 22.1\%$  とし、試験温度は  $150, 175, 200^\circ\text{C}$  とした。拡張率  $E$  の定義を以下

表2 潤滑剤の拡張性能評価試験条件

| 潤滑剤種類                     |                 | 水溶性乾燥皮膜潤滑剤<br>溶剤希釈型乾燥皮膜潤滑剤<br>油系潤滑剤                               |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|
| 拡張プラグ<br>(鋼球)             | 材質(硬さ)          | SUJ2 (60~67HRC)                                                   |
|                           | 寸法(mm)<br>(拡張率) | $\phi 14.3$ (10%)<br>$\phi 15.0$ (15.4%)<br>$\phi 15.875$ (22.1%) |
| 試験温度 ( $^\circ\text{C}$ ) |                 | 150, 175, 200                                                     |
| 試験速度 (mm/sec)             |                 | 1                                                                 |
| 押込み長さ (mm)                |                 | 40                                                                |

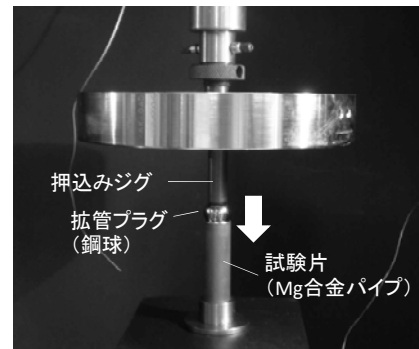


図9 試験状況

に示す。

$$E = (d/d_i - 1) \times 100 \%$$

ここで  $d$  は拡張プラグ外径、 $d_i$  は素管内径である。

### 3.2.3 実験結果

各拡張率における試験温度と押込み荷重の関係を図10に示す。すべての試験条件において、水溶性乾燥皮膜潤滑剤の最大押込み荷重が最も小さな値となり、試験温度の上昇にともなって押込み荷重は減少する傾向が確認された。この結果と比較すると他の潤滑剤は、押込み荷重が大きいのみではなく、試験温度上昇にともなう押込み荷重の低下傾向が明確には確認されなかった。特に、試験温度  $175^\circ\text{C}$  における最大押込み荷重が高い値を示す傾向が見られた。

試験中のプラグ押込み量と押込み荷重の関係について、拡張率  $15\%$ 、試験温度  $175^\circ\text{C}$  における試験結果を図11に示す。同一潤滑剤の結果をそれぞれ2例ずつ示した。試験中の現象として乾燥皮膜型の潤滑剤では、びびり音等の異音が発生する場合があります。このような試料では細かな荷重の変動が確認された。特に拡張率が高い場合、試験温度が高い場合、潤滑剤皮膜の乾燥が不十分な場合に発生頻度が高かった。また、予備実験において潤滑剤皮膜の乾燥が不十分な場合には、顕著な荷重の上昇も確認されている。油系潤滑剤では、異音の発生はないものの油煙や異臭が激しく、作業環境が悪い状況であった。また、高温による粘度低下によりパイプ下端側に潤滑剤の流出が認められ、潤滑切れが懸念される。この油系潤滑剤で

は、最大押込み荷重のばらつきが大きく、図 11 においても、20～25%の押込み荷重の差が認められる。

以上の結果から、びびりの発生等の課題はあるものの、拡管時のプラグの押込み荷重が比較的安定して小さな値を示した水溶性乾燥皮膜潤滑剤を用いて次節の試験を行うこととした。また、実際のプラグ曲げ加工においては、パイプには拡管のための押出し荷重に加えて曲げモーメントが付加されるため、パイプ周方向の各位置で塑性ひずみの形態が異なることとなり、潤滑の状態も変わるものと考えられるが、実加工における潤滑性能の評価は今後の課題としたい。

### 3.3 浮動拡管プラグ曲げ加工試験

#### 3.3.1 供試材

異形断面パイプの加工実験には、外径  $D_0=22\text{mm}$ 、肉厚  $t_0=1.0\text{mm}$  の AZ31 マグネシウム合金パイプを用いた。潤滑には、水溶性乾燥皮膜潤滑剤を用いた。

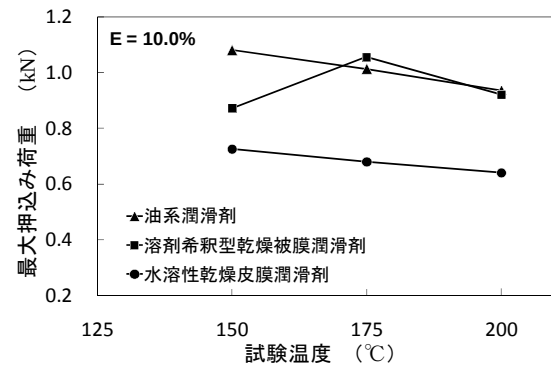
#### 3.3.2 試験方法

開発した浮動拡管プラグ曲げ加工装置を用いて、曲げ加工試験を行った。供試材である円形断面パイプから、拡管率  $E=10\%$  の円形断面および楕円断面、また、拡管率  $E=16.4\%$  の正方形断面（プラグコーナ半径  $4\text{mm}$ ）の曲げパイプの加工を試みた。試作したプラグ形状の概要を図 12 に、断面形状の設計値を図 13 に示す。楕円パイプの曲げ方向は、楕円の長径方向とした。異形断面パイプの拡管率は次式により定義する。

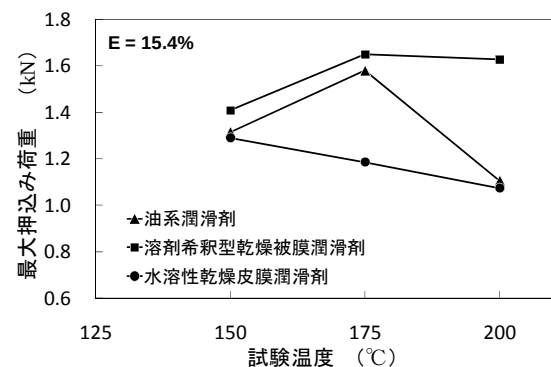
$$E = (L / \pi d_i - 1) \times 100 \%$$

ここで  $L$  は拡管プラグの設計断面形状周長、 $d_i$  は素管内径である。

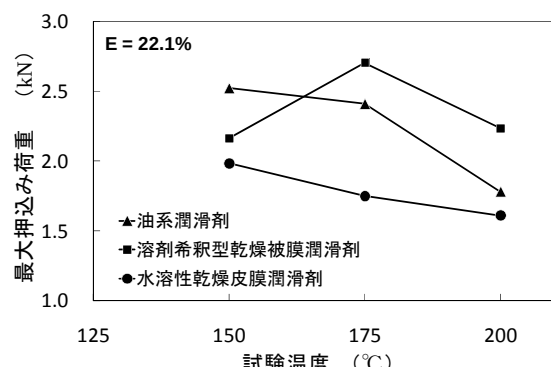
曲げ加工における主な試験条件を表 3 に、各パラメータの説明図を図 14 に示す。曲げ加工の後、万能投影機（ニコン製 V-16E）を用いて曲げ半径の測定を行った。曲げ内側および外側の曲げ半径を測定し、その平均値を中心線曲げ半径  $R$  とした。また、曲げ部および拡管のみの押出し部につ



(a) E=10.0%



(b) E=15.4%



(c) E=22.1%

図 10 拡管試験温度と最大押込み荷重

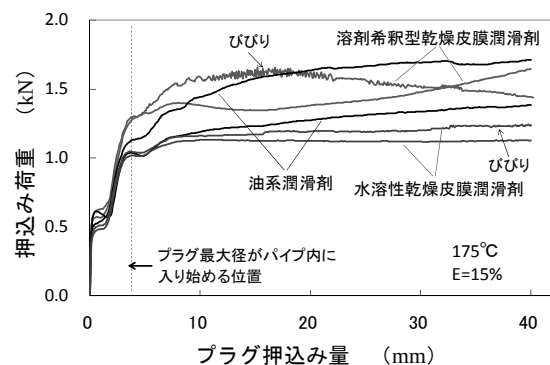
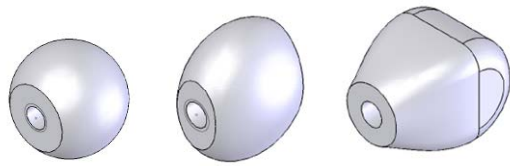


図 11 プラグ押込み量と押込み荷重の関係



円形断面プラグ 楕円断面プラグ 正方形断面プラグ

図 12 試作プラグの形状

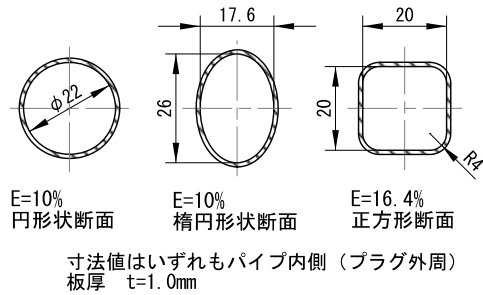


図 13 曲げパイプ断面形状（設計値）

いて、マイクロメータを用いて肉厚および外形寸法の測定を行い、偏肉率  $e$ 、および偏平率  $f$  を求めて評価を行った。偏肉率  $e$ 、偏平率  $f$  の定義を以下に示す。

円形および正方形断面パイプの場合

$$e = (t_i - t_o) / t \times 100 \%$$

ここで、平均肉厚  $t = (t_i + t_o) / 2$

$$f = (D_1 - D_2) / D \times 100 \%$$

ここで、平均外形寸法  $D = (D_1 + D_2) / 2$

楕円断面パイプの場合

$$e = (t_{\max} - t_{\min}) / t \times 100 \%$$

ここで平均肉厚  $t = (t_i + t_o + t_u + t_d) / 4$

$$f_1 = D_1 / D_{S1} \times 100 \%$$

$$f_2 = D_2 / D_{S2} \times 100 \%$$

$t_i$ 、 $t_o$ は、曲げ方向内側と外側の肉厚、 $t_u$ 、 $t_d$ は曲げと直角方向の肉厚で、 $t_u$ が加工時の上側、 $t_d$ が加工時の下側である。また、 $t_{\max}$ および $t_{\min}$ は、前記4方向の肉厚のうちの最大値および最小値とする。 $D_1$ および $D_2$ は、曲げ方向および曲げと直角方向の外形寸法で、円形断面では外径、正方形断面では外側2面幅、楕円断面では長径が $D_1$ 、短径が $D_2$ である。また、楕円断面パイプにおいては基準外径を $D_{S1}$ 、 $D_{S2}$ とし、それぞれ設計形状の長径と短径の寸法とする。

表 3 浮動拡管プラグ曲げ試験条件

| プラグ種類 | E    | v      | L1 | L2 | Y  | u      | T1  | T2  |
|-------|------|--------|----|----|----|--------|-----|-----|
|       | %    | mm/sec | mm | mm | mm | mm/sec | °C  | °C  |
| 円     | 10   | 1.5    | 30 | 30 | 20 | 0.5    | 250 | 140 |
| 楕円    | 10   | 2.0    | 30 | 30 | 20 | 0.5    | 250 | 140 |
| 正方形   | 16.4 | 1.0    | 30 | 30 | 15 | 0.5    | 275 | 160 |

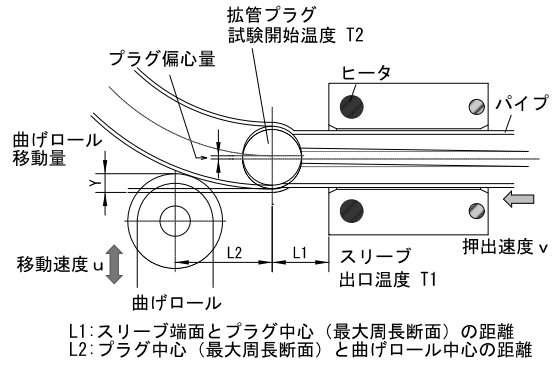


図 14 曲げ試験説明図

### 3.3.3 試験結果

曲げ加工試験中の写真を図 15 に、得られた曲げパイプの外観を図 16 に示す。図 15 に一例を示すように、円形パイプ素材から正方形断面等の異形断面への形状変更を伴う浮動拡管プラグ曲げ加工が可能なことを確認した。

図 17(a)～(c)に各断面形状の曲げパイプの曲げ部における断面の写真と各部の肉厚の測定結果を



図 15 異形パイプ曲げ加工試験



図 16 拡管曲げパイプ外観

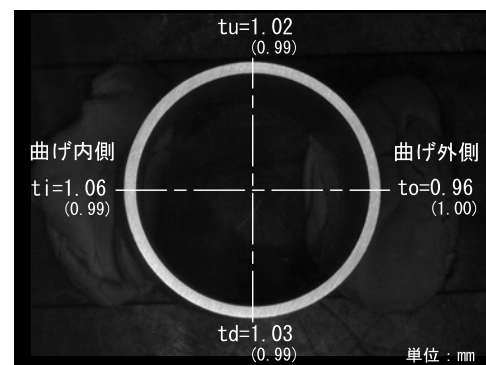


示す。また、表 4 に曲げ半径、偏平率、偏肉率の評価結果を示す。

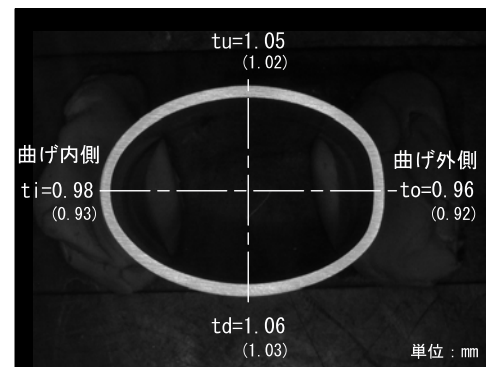
円形断面の拡張曲げパイプにおいては、曲げ部においても、偏平率が 1%以下という非常に良好な形状であった。また、偏肉率は約 10%であり、内径側が厚い傾向であった。拡張のみで曲げを伴わない断面では、偏平率、偏肉率とも 1%以下であった。

楕円断面の拡張曲げパイプでは、偏平率は、曲げ方向で 4.1%、曲げと直角方向で-2.4%であり、図 17(b)に示すように曲げ外側に顕著なつぶれが見られる。これは、曲げロールにより押しつぶされたものと考えられる。本試験では、前記の円形断面用の半径 12mm の R 溝付き曲げロールを用いたため、曲げ外側の頂部のみがロールにあたり、曲げ力が集中的に付加されて変形したものと考えられる。ロール形状を設計形状と同一にすることで改善すると考える。拡張のみで曲げを伴わない断面では、長径 27.9mm 短径 19.67mm といった設計寸法±0.1mm 以内の寸法で拡張成形されていた。偏肉率は、曲げ部で約 10%であったが、円形断面の場合と異なり曲げ方向の内側、外側ともに、肉厚が素材パイプより減少する傾向が確認された。これは、プラグの断面形状が拡張開始位置から楕円であるため長径方向に引張り力が働きながら拡張され、ひずみが集中しやすくなっているものと考えられる。特に曲げ外側が薄く、素材パイプと比べ 4%の肉厚減少があった。それに対し、曲げと直角方向に 5~6%の肉厚増加が生じたため約 10%の偏肉率となった。また、拡張のみで曲げを伴わない場合における偏肉率は約 11%であった。長径方向の肉厚が薄くなる傾向は曲げ部と同様の結果であったが、全体的に曲げ部の方が 0.03~0.05mm 程度肉厚が厚くなる傾向にあり、曲げにより偏肉率が若干改善する結果となった。

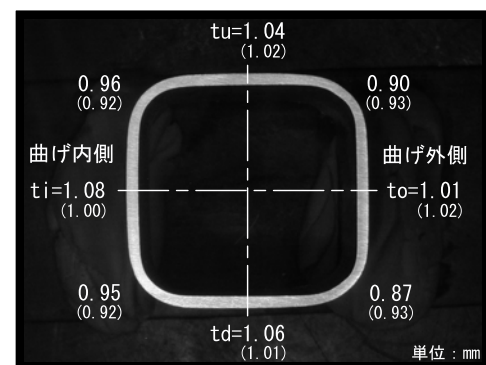
正方形断面の拡張曲げパイプでは、偏平率は、-2.9%であった。これは、曲げ方向の 2 面幅寸法が曲げ直角方向のそれより大きい形状であり、曲げ力により押しつぶされる偏平とは逆の関係になる。原因としては、プラグの設計形状断面と加工



(a) 円形断面



(b) 楕円断面



(c) 正方形断面

図中の括弧付の値は曲げを伴わない場合の肉厚

図 17 パイプの曲げ部断面

表 4 パイプの曲げ半径、偏肉率、偏平率

| 断面形状 | 拡張率<br>E<br>% | 評価位置 | 曲げ半径<br>R<br>mm | 偏肉率<br>e<br>% | 偏平率    |         |         |
|------|---------------|------|-----------------|---------------|--------|---------|---------|
|      |               |      |                 |               | f<br>% | f1<br>% | f2<br>% |
| 円    | 10            | 曲げ部  | 113.4           | 9.9           | 0.7    | —       | —       |
|      |               | 拡張のみ | —               | -1.0          | 0.7    | —       | —       |
| 楕円   | 10            | 曲げ部  | 143.5           | 9.9           | —      | 4.1     | -2.4    |
|      |               | 拡張のみ | —               | 10.9          | —      | 0.4     | -0.4    |
| 正方形  | 16.4          | 曲げ部  | 164.7           | 6.7           | -2.9   | —       | —       |
|      |               | 拡張のみ | —               | -2.0          | 0.0    | —       | —       |

中にパイプがプラグから離れる位置の断面が異なっているためと思われる。また、曲げロールには、他の曲げ加工試験と同様に R 溝のロールを用いているため、曲げ外側のコーナ部に曲げ力が集中して付加され、コーナ部に形状のゆがみが見られる。これも偏平率の悪化の原因になっている可能性がある。拡張のみで曲げを伴わない場合においては、ほぼ偏平率 0%の均一な形状で拡張成形されていた。曲げ部の偏肉は、円形断面と同様曲げの内側が厚く、外側が薄くなり、偏肉率 6.7%であった。ただし、この偏肉率には、コーナ部の肉厚が考慮されておらず、図 17(c)に示すようにコーナ部において 0.1mm 以上の減肉が見られる。拡張の過程においてコーナ部にひずみが集中することによるものと考えられる。

本試験結果は、パイプ外形 D に対する曲げ比 R/D で 4.7~7.4 といった値であり、それほど厳しい曲げ加工ではない。より厳しい曲げ加工への適用について今後の課題である。

#### 4. 結 言

- (1) 長円形断面パイプのプレス曲げ性は、内側曲げ半径で円管の 27.5mm に対して 44mm が限界であり、円管に比べて大きく低下する。
- (2) 長円形断面パイプの軸方向に引張り力を付加しながら曲げることにより、曲げ性が向上する。また、付加する引張り力によって曲げ部の断面形状も大きく変化するため、適当な引張り力の付加が重要である。
- (3) スリーブの温度を制御し、成形するパイプの温度を加工部では高温にすることで加工性を向上させ、加工部以外の位置では座屈を防止するために温度上昇を抑えることが可能な浮動拡張プラグ曲げ加工装置を開発した。
- (4) 拡張荷重により潤滑剤の潤滑性能を評価し、浮動拡張曲げ加工に適した潤滑剤として、水溶性乾燥皮膜潤滑剤を選定した。
- (5) マグネシウム合金の浮動拡張プラグ曲げ加

工試験を行い、円形断面パイプを形状精度良く曲げ加工できることを確認した。また、円形パイプから楕円断面、正方形断面等異形断面への形状変更を伴う浮動拡張曲げ加工が可能なことを確認した。

なお、本研究は、平成 20 年度都市エリア産学官連携促進事業（発展型）長岡エリア「マグネシウム合金の次世代製品開発」の中で実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 相田収平, “車両用軽量シートフレームの開発”, 軽金属, 57, 7, 2007, p341-343.
- 2) 長谷川収, 真鍋健一, 西村尚, “AZ31 マグネシウム合金押出円管の室温におけるプレス曲げによる変形挙動”, 軽金属, 52, 7, 2002, p298-302.
- 3) 須貝純一, 岩井匡之, 本保元次郎, 清水亨, 早田博, アレキサンダーマクリン, “AZ31 マグネシウム合金押出パイプの曲げ加工性に及ぼす Mn 量の影響”, 軽金属, 56, 12, 2006, p705-710.
- 4) 相田収平, 須藤貴裕, 山崎栄一, “マグネシウム合金パイプ材の曲げ加工技術の開発”, 工業技術研究報告書, No.37, 2008, p63-67.
- 5) 中村雅勇, 牧清二郎, 原田泰典, 林清隆, 中島正憲, “浮動拡張プラグを用いた円管の曲げ加工”, 塑性と加工, 37, 424, 1996, p540-545.
- 6) 中村雅勇, 牧清二郎, 小山秀夫, “浮動拡張プラグにより付加価値をつける円管の加工”, 塑性と加工, 46, 538, 2005, p1044-1049.
- 7) 中村雅勇, 浅井雅弘, 牧清二郎, 原田泰典, 竹内聖, “浮動拡張プラグ曲げ法による曲がり楕円管の製造”, 平成 7 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 1995, p269-270.



## 高断熱・均熱金型の開発

本田 崇\* 田村 信\* 杉井 伸吾\*

Development of Well Insulated and Thermal Uniformity Technology for Forming Die

HONDA Takashi\*, TAMURA Makoto\* and SUGII Shingo\*

## 抄 録

温間絞り加工用などの熱源を有する金型に対して、断熱性能の向上と温度分布の均熱化を目的に、シミュレーションを用いた数値解析手法による高断熱・均熱設計手法の確立に取り組んだ。その結果、適切な断熱対策を採ることで、加熱に必要なエネルギーを従来比 1/2 以下に削減できることを示した。また、熱源の配置を適切に行うことにより、加工領域の温度分布を均一にできることも併せて示した。実際に、250×500mm マグネシウム合金板用ブロー成形金型（以下ブロー成形金型）を 450℃の使用条件にて設計・試作を行い、本設計手法の有効性を示した。

## 1. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼の深絞り成形やマグネシウム合金など常温での絞り加工が困難な材料に対して、金型を加熱し成形を行う温間成形加工が有効である。これは、材料強度の温度依存性を利用し加工性を向上させるもので、金型の断熱設計・温度制御が非常に重要となる。断熱対策では、プレス機への熱の逃げを防ぐため、プレス機との間に断熱板が使用されているが、その効果について十分に把握されていない。また、加工領域の均一な加熱のためには、熱源の適切な配置を行う必要があるが、金型の構造・材質、断熱方法により温度分布が大きく変わるため、適切な熱源配置は容易ではない。

このような背景から、当研究所ではこれまでに熱伝達係数・放射率を測定し、熱収支の評価と面状ヒータを熱源とした均熱金型の試作を行い、その効果を確認した<sup>1)</sup>。本研究ではその成果を応用し、低コストな汎用の棒状ヒータを用いた均熱化に加え、新たに断熱効果向上の検討を行い、高断熱・均熱設計の手法確立に取り

組んだ。実際にこの手法を用いてブロー成形金型の設計・試作を行い、評価を行った。

## 2. 断熱効果の検討

金型からの熱損失は、①プレス機への熱伝導、②空気への対流伝熱、③周囲環境への輻射（放射）伝熱の3形態である<sup>2)</sup>。これらの対策をシミュレーションにより検討し、断熱設計手法の確立に取り組んだ。解析には ANSYS, Inc 社製汎用有限要素解析コード ANSYS Workbench ver.11.0 を用いた。前報<sup>1)</sup>にて熱流挙動を把握済みである図1に示す角筒絞り用金型にて検討した。②③の損失については、小型サンプルで

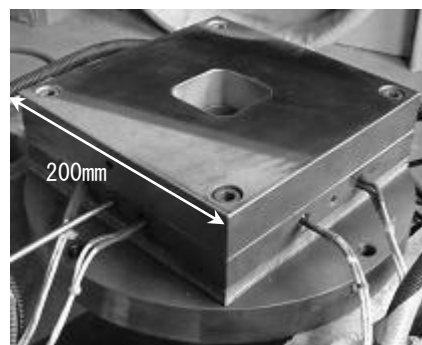


図1 角筒絞り用金型

\* 研究開発センター

の熱伝達係数の実測値に、それぞれの表面の放射率から求めた等価熱伝達を併せて冷却条件とした。

## 2.1 プレス機への熱損失低減

### 2.1.1 熱損失の割合

プレス機への熱伝導を減らすには、プレス機と金型との間に、断熱板を入れる対策が一般的である。金型構造のイメージを図2に示す。断熱板として用いられる材料に求められる性能として、加工時の負荷に耐える強度を持つこと、耐熱温度が使用条件以上であること、熱損失を減らせるよう熱伝導率が小さいことが挙げられる。しかし、熱伝導率と熱損失量については強度、耐熱温度ほど検討されていない。市販されている断熱材の成分および熱的性質を表1に示す。金属材料としてS45C、SUS316および参考

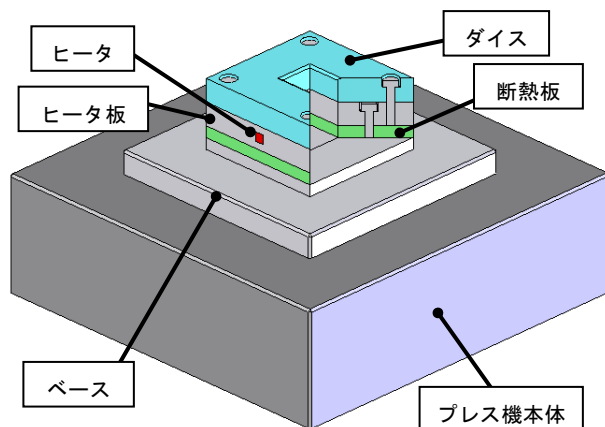


図2 金型構造イメージ

表1 熱的性質

| 種類     | 成分                  | 耐熱温度 (°C) | 熱伝導率 (W/(m・K)) |
|--------|---------------------|-----------|----------------|
| 高断熱    | ガラス繊維<br>ケイ酸系バインダ*  | 400       | 0.08           |
| 標準     | ガラス繊維<br>ケイ酸塩系バインダ* | 220       | 0.71           |
| 耐熱仕様   | ガラス繊維<br>ケイ酸塩系バインダ* | 500       | 1.21           |
| S45C   | -                   | -         | 50             |
| SUS316 | -                   | -         | 16             |
| 静止空気   | -                   | -         | 0.025~         |

として空気について併せて示した。表1から断熱材の性能には差があるものの、金属材料にくらべ熱伝導率はかなり小さいことがわかる。熱伝導率の大小だけでは熱損失量の違いを把握しにくいので、比較対象の金型を150°Cに加熱したときのS45C製ボルトと断熱材を通りプレス機へ逃げる熱損失量を求めた。熱損失量は、シミュレーション結果の温度分布を基に、断熱材上面・下面位置でのそれぞれの温度差から求めた。解析モデル、温度分布を図3、4にそれぞれに示す。解析モデルは対称性より1/8とした。熱損失量の計算結果を表2に示す。この条件では、ボルトが全断面積に占める割合は少ないが、

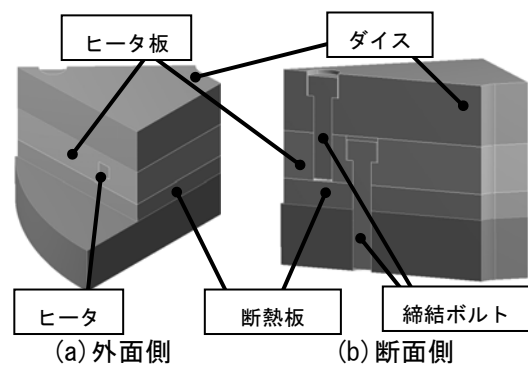


図3 解析モデル

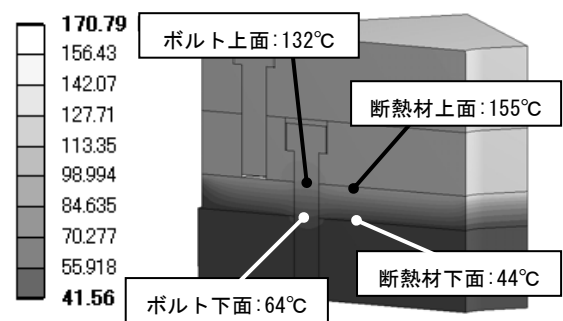


図4 解析結果の温度分布

表2 熱損失の割合

|                        | ボルト  | 断熱材  |
|------------------------|------|------|
| 熱伝導率 (W/(m・K))         | 50   | 0.1  |
| 断面積 (mm <sup>2</sup> ) | 79   | 4560 |
| 断面積比 (%)               | 1.7  | 98.3 |
| 熱流出量 (W)               | 17.9 | 3.4  |
| 損失割合 (%)               | 84   | 16   |

熱損失の80%以上はボルトを通してであることがわかる。以上の検討から、プレス機への熱損失は、ボルトからの熱の逃げの影響が大きいことが確認できた。

### 2.1.2 締結部の検討

シミュレーションにより締結部の断熱対策を検討した。検討は断熱ワッシャの有無、ボルトの材質およびボルト首下部とヒータ板・断熱材との隙間の有無について行った。検討した対策を表3に示す。断熱ワッシャについては、熱伝導率の低いアルミナ製（熱伝導率:0.24W/(m・K)）とし、厚さは5mmとした。隙間については、ボルトと金型の隙間の有無による熱流の違いを確認するために設けた。解析結果を図5に示す。断熱性能の評価については、金型の温度が高いほど熱損失も大きくなるので、プレス機への熱損失量の比較だけで断熱性能の評価はできない。そこで、入力エネルギーに対する金型の表面温度を求め、対策ごとの温度の違いから熱損失低減効果を検討した。

表3 検証した締結部構造

|   | ボルト材質  | 隙間 | ワッシャ |
|---|--------|----|------|
| ① | S45C   | なし | S45C |
| ② | S45C   | なし | 断熱   |
| ③ | SUS316 | なし | S45C |
| ④ | SUS316 | あり | S45C |
| ⑤ | SUS316 | あり | 断熱   |

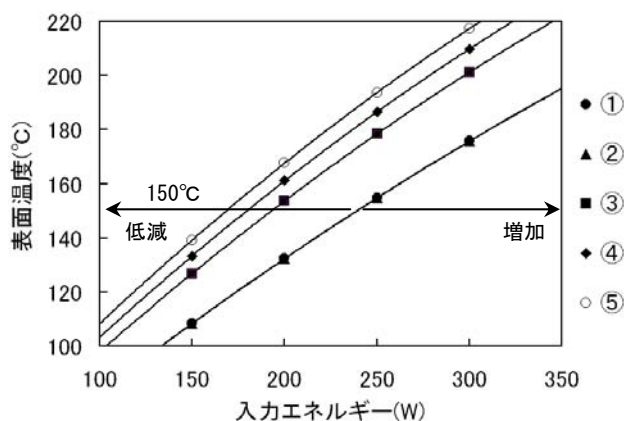


図5 締結部の断熱効果

表4 締結部断熱の比較

|         | ①   | ②   | ③   | ④   | ⑤   |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 入力 (W)  | 242 | 240 | 194 | 180 | 169 |
| 削減 (W)  | -   | -2  | -48 | -62 | -73 |
| 削減率 (%) | -   | -1  | -20 | -26 | -30 |

比較条件：表面温度 150℃

まず、従来構造に断熱ワッシャを追加したが、効果はほとんど見られない(①→②)。これは、断熱ワッシャによりヒータ板とボルトフランジ間の熱流を防いでも、他の箇所でも接触してしまうことで、断熱ワッシャの効果はほとんどなくなることを示している。次にボルトの材質による違いであるが、金型表面を 150℃に設定時の入力エネルギーで約 48W の低減効果が見られる(①→③)。したがって、ボルト材質の変更は断熱性能の向上に非常に有効な対策であるといえる。

次にボルトと金型の接触について検討した(③→④)。適切な隙間を設けることにより、ヒータ板からの熱流を減らせたことでさらに約 14W の低減効果が見られる。このような隙間を設けた場合には断熱ワッシャの使用は有効で、さらに約 11W の低減効果が見られた(④→⑤)。検討結果を整理すると表4のようになる。削減率は①の入力エネルギーに対し、対策により削減できるエネルギーの割合である。最も有効な①→⑤の対策により約 30%の入力エネルギー削減効果を得られることが予測される。

### 2.2 対流損失の低減

周囲空気への断熱は、金型を断熱材により覆うことが有効である。周囲の断熱板は、金型とプレス機の間を使用する断熱板と同じものを用いる場合が多い。しかし、金型 - プレス機間の断熱板には加工時の面圧に耐える強度が必要であるのに対し、金型の周囲には負荷はないため、周囲の断熱板は断熱性能を重視した選定が有効と考えられる。そこでシミュレーションを用いて、金型周囲に配置した断熱材の効果を確認するとともに、断熱性能による効果の違いを比較

した。表 5 に比較した断熱材を示す。ここで、①、②、④、⑤の断熱材は表 1 に示した成分のものである。③、⑥のシリカ断熱材は、ヒュームドシリカを圧縮成形したもので、静止空気を内部に閉じ込めていることから断熱性能が高く、耐熱温度が 950℃と高温での使用が可能である。一方、やわらかく強度は小さい。

また、断熱材の材質と併せて、断熱材の表面状態の違いによる輻射効果も検討した。放射率の実測結果より、断熱材のままを 0.87、アルミで被覆したものを 0.08 とした。評価方法は 2.1.2 節と同様に入力エネルギーに対する金型の

温度で比較した。

解析結果を図 6 に示す。周囲に断熱材を用いない構造の結果を比較のため示した。まず、耐熱仕様の断熱材(①)であるが、周囲に断熱材を用いない金型に比べ、加熱に多くのエネルギーを必要とする。これは、断熱材の断熱効果より断熱材設置に伴う表面積増加による熱損失が大きくなったことに起因しており、断熱材の使用が必ずしも熱損失を低減しないことを示している。高断熱仕様(②)、シリカ断熱材(③)については熱損失低減の効果はあり、金型表面温度 150℃時の入力エネルギーでそれぞれ約 19W、42W の低減効果が見られる。以上の検討から、金型の周囲に使用する断熱材にとって、熱伝導率は重要であることがわかった。

次に表面状態の比較についてであるが、断熱性能が低い場合(①→④)では、放射率を小さくすることによる熱損失低減の効果が見られる。輻射による熱損失は熱流出面の表面温度と周囲環境温度の 4 乗の差に比例し、断熱性能の低い断熱材ほど表面温度が高くなるため、輻射による熱損失は大きい。そのため、同様の表面状態であっても、断熱性能が低い仕様の方が、放射率を下げた効果が現れている。高断熱仕様(②→⑤)では、若干放射低減の効果は見られるものの、耐熱仕様ほどの効果はなく、シリカ断熱材(③→⑥)の場合は、ほとんど効果がない。150℃加熱時における比較結果を表 6 にまとめた。なお、⑥の結果については③とほぼ同じであるため省略する。最も有効な③の対策により約 17%の入力エネルギー削減が予測される。

表 5 金型周囲の断熱材比較

| 種 類   | 圧縮強さ<br>MPa | 熱伝導率<br>W/(m・K) | 表面<br>放射率 |
|-------|-------------|-----------------|-----------|
| ①耐熱仕様 | 45～55       | 1.21            | 0.87      |
| ②高断熱  | 94          | 0.08            | 0.87      |
| ③シリカ  | —           | 0.02～0.03       | 0.87      |
| ④耐熱仕様 | 45～55       | 1.21            | 0.08      |
| ⑤高断熱  | 94          | 0.08            | 0.08      |
| ⑥シリカ  | —           | 0.02～0.03       | 0.08      |

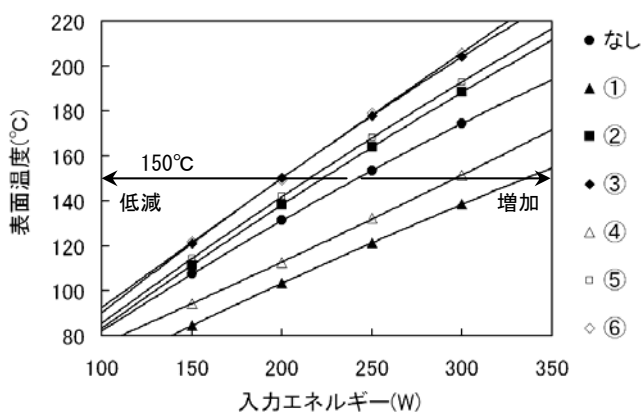


図 6 金型周囲の断熱効果

表 6 金型周囲の断熱効果の比較

|        | なし  | ①   | ②   | ③   | ④   | ⑤   |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 入力(W)  | 242 | 335 | 223 | 200 | 296 | 216 |
| 削減(W)  | —   | +93 | -19 | -42 | +54 | -26 |
| 削減率(%) | —   | +38 | -8  | -17 | +22 | -11 |

比較条件：表面温度 150℃

断熱材の厚さ：10mm

### 3. ブロー成形金型の設計

ブロー成形金型を図 7 に示す。まず、これまでの経験により設計した金型（以下従来設計）について、シミュレーション上で性能を確認した。それを基に、2 章の断熱技術と前報<sup>1)</sup>の均熱技術を応用した高断熱・均熱金型を設計し、性能比較を行った。断熱方式によって最適な熱源配置は変わるため、最初に断熱設計を行った

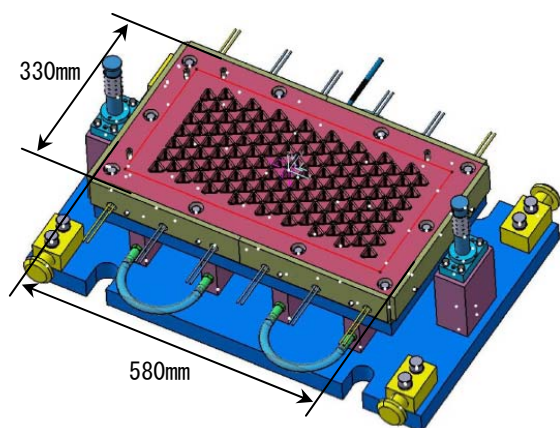


図 7 ブロー成形金型

後、均熱化の検討を行った。

### 3.1 従来仕様金型の性能評価

ブロー成形金型の使用温度は 450℃である。よって、表面平均温度が 450℃の状態、必要な入力エネルギーと表面の温度分布を調べた。

表 7 従来設計の金型の仕様

| 熱 源  | 500W×12 本 |
|------|-----------|
| 部 品  | 材 質       |
| ダイス  | NAC55     |
| ボルト  | S45C      |
| ワッシャ | S45C      |

| 断熱材     | 耐熱温度<br>(℃) | 熱伝導率<br>(W/m・K) | 厚さ<br>(mm) |
|---------|-------------|-----------------|------------|
| プレス機断熱材 | 700         | 0.3             | 15         |
| 周囲断熱材   | 700         | 0.3             | 10         |

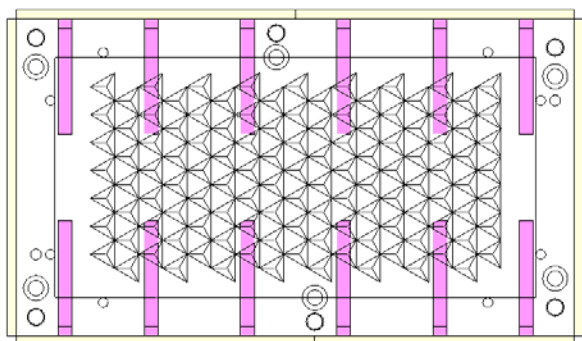


図 8 従来設計によるヒータ位置

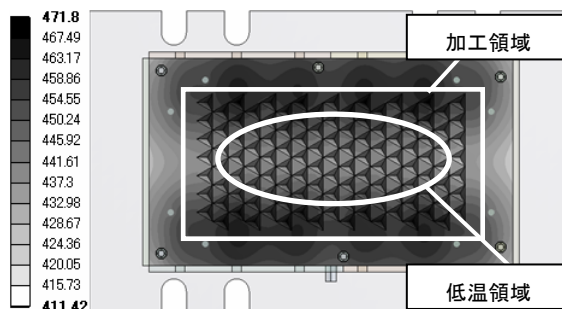


図 9 従来設計金型解析結果

従来設計金型の仕様を表 7 に、ヒータ配置を図 8 に示す。450℃の加熱を想定し、2 章で検討した断熱板以上の耐熱性能をもつ断熱板を選定してある。ヒータ配置は加工領域で均等な間隔で配置してある。また、放射率については加熱時の金型表面の酸化を考慮し 0.95 とした。

この仕様におけるシミュレーション結果を図 9 に示す。金型表面の温度差は大きく、加工部中央に温度が低い領域ができると予測される。加工領域内の温度差は約 28℃、加熱に必要なエネルギーは 8.19kW である。

### 3.2 高断熱・均熱金型の設計

#### 3.2.1 高断熱設計

2 章で検討した各対策を用いて高断熱仕様の金型を設計した。併せて、断熱性能は高いが耐熱温度が低いために 450℃の条件では使用できない断熱材について活用を検討した。具体的には、2 枚の断熱板を重ねて複層での使用を検討した。それぞれの断熱板について耐熱温度を超えていないかシミュレーションで確認し、最適な断熱材の組み合わせを採用した。

表 8 変更した金型の仕様

| 部 品              | 材 質    |
|------------------|--------|
| ボルト（ヒータ板 - ベース）  | SUS316 |
| ワッシャ（ヒータ板 - ベース） | SUS316 |

| プレス機断熱材 | 耐熱温度<br>(℃) | 熱伝導率<br>(W/m・K) | 厚さ<br>(mm) |
|---------|-------------|-----------------|------------|
| ヒータ板側   | 700         | 0.3             | 5          |
| ベース側    | 400         | 0.08            | 10         |



表 8 に従来設計から高断熱設計へ変更した仕様を示す。また、従来設計では NAC55 材の酸化による金型表面の放射率が大きく、金型の温度が高温であることから輻射による熱損失が大きくなることが懸念される。この対策として、酸化しにくく放射率が小さい硬質 Cr を表面にメッキすることにし、放射率を 0.13 と設定した。この仕様にて金型表面を 450℃ に加熱したときの入力エネルギーは 3.50kW であり、従来設計に比べ約 57% の削減が予測される。

### 3.2.2 均熱金型の設計

3.2.1 節で設計した断熱仕様にて、汎用の棒状ヒータを用いた均熱設計を試みた。ヒータの移動は従来位置での加熱温度分布を基に①各ヒータ単独での加熱効果により、配置した真上の位置がそれぞれ温度分布のピークとなる②ヒータとヒータの間は温度勾配が 0 となり、熱流の移動はないという 2 点を方針とし、ヒータ位置を調整した。均熱配置されたヒータ位置を図 10 に、加熱したときの表面温度分布を図 11 に示す。比較のため従来配置の温度分布を併せて示した。従来設計に比べ、均熱設計した金型の温度は均一になっており、加工領域の温度差は 28℃ から 14℃ に減っている。このように、形状の自由度が少ない棒状ヒータでも、適切な配置とすることで均熱設計が可能であると予測される。また、ヒータの配置については、従来設計からの変更はわずかであるにもかかわらず温度分布には大きな違いがあることから、熱源配置の検討は必要であることがわかった。

### 3.3 ブロー成形金型の試作

シミュレーションによる結果を検証するため、従来設計と高断熱・均熱設計の金型を試作し、温度分布および入力エネルギーの測定を行った。試作した金型を図 12 に示す。

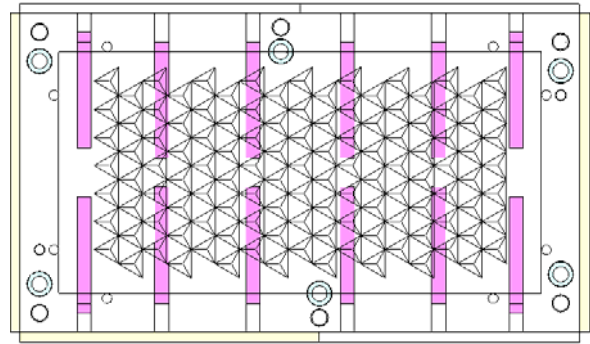
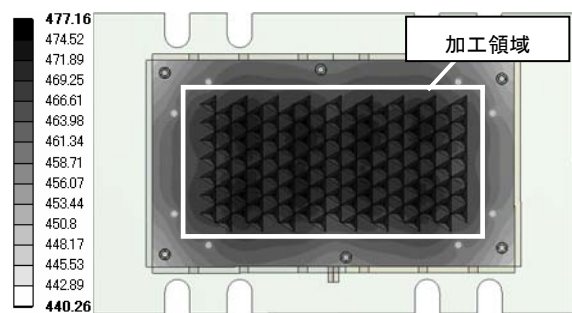
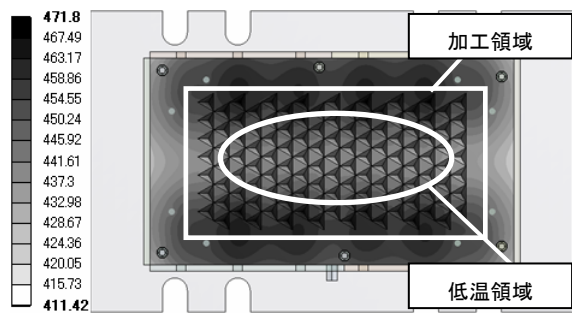


図 10 均熱設計によるヒータ配置



(a) 均熱設計金型



(b) 従来設計金型

図 11 シミュレーションによる温度予測結果

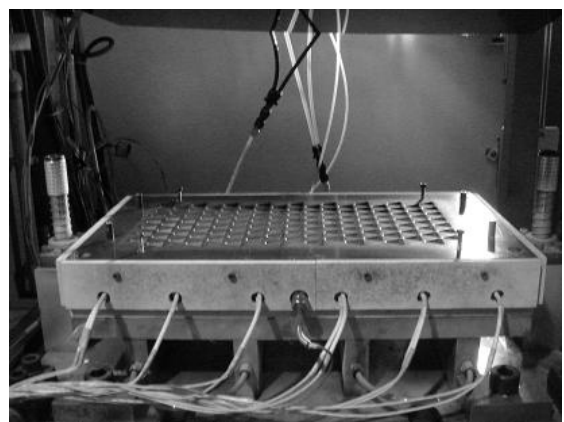


図 12 試作したブロー成形金型

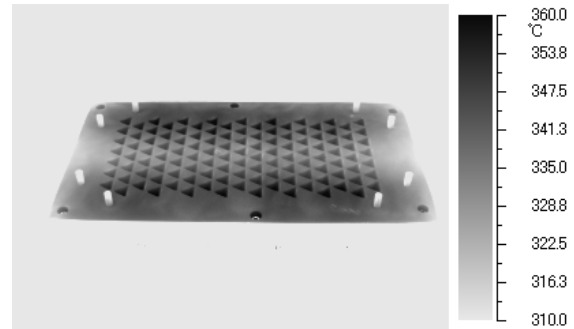
表 9 温度分布測定条件

| 設 計       | 金型表面 | 放射率  | 350℃ | 450℃ |
|-----------|------|------|------|------|
| 従来        | 黒体   | 0.95 | ①    | -    |
| 高断熱<br>均熱 | 黒体   | 0.95 | ②    | ③    |

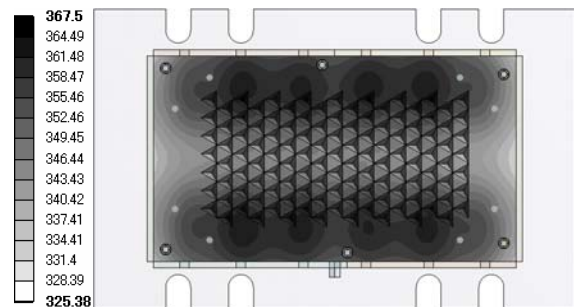
### 3.3.1 温度分布の測定

金型表面全体の温度分布を把握するには、赤外線計測による熱画像測定が有効である。ただし、赤外線を温度に変換する場合、温度測定値は変換に使用する放射率の設定値に依存する。精度よく温度測定を行うには、測定面の放射率が一定であること、放射率が十分に大きいことが必要である。NAC55 材の酸化表面は、放射率の大きさは測定に十分であるが場所によるムラが大きく、測定に与える影響が大きい。また、Cr メッキ面は放射率が小さく、表面の反射等で測定誤差が発生してしまう。そこで、金型表面を黒体スプレーで放射率を 0.95 に固定して、各設計の表面温度の違いを熱画像により測定した。熱画像測定にはアビオニクス社製 TVS-500EX を用いた。温度分布測定条件を表 9 に示す。従来設計の金型ではヒータ出力を最大にしても 350℃までしか昇温できなかったため、350℃と加工温度である 450℃の 2 条件で測定した。

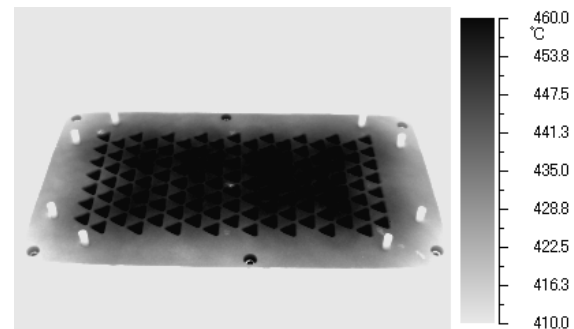
熱画像測定の結果を図 13 に示す。シミュレーションにより予測したとおり、従来設計では加工領域の温度に差が大きいことが確認できる。従来設計と同様、均熱設計による金型においても、シミュレーションにより予測したとおり熱源配置による均熱化が確認できた。350℃での温度差は、従来設計金型で 28℃、均熱設計金型で 11℃であった。また、設計温度である 450℃加熱時の温度差は、シミュレーションで 14℃、実測値で 18℃とほぼ予測したとおりであった。以上から、本手法による均熱手法が有効であることを示した。



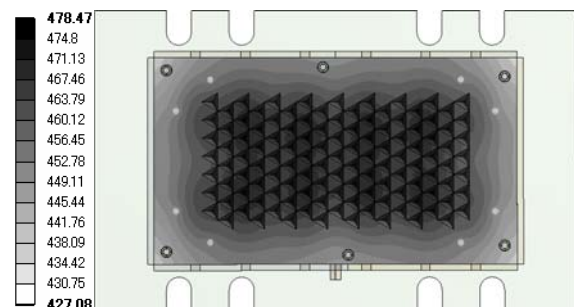
(a) 測定条件① 実測結果  
(従来設計 金型表面黒体 350℃)



(b) 測定条件① シミュレーション予測  
(従来設計 金型表面黒体 350℃)



(c) 測定条件③ 実測結果  
(高断熱・均熱設計 金型表面黒体 450℃)



(d) 測定条件③ シミュレーション予測  
(高断熱・均熱設計 金型表面黒体 450℃)

図 13 温度分布測定

表 10 入力エネルギー測定条件

| 設 計       | 金型表面   | 放射率  | 350℃ | 450℃ |
|-----------|--------|------|------|------|
| 従来        | NAC55  | 0.95 | ①    | ③    |
| 高断熱<br>均熱 | Cr メッキ | 0.13 | ②    | ④    |

表 11 入力エネルギー測定結果まとめ

| 条<br>件 | 実測値        |            | シミュレーション   |            |
|--------|------------|------------|------------|------------|
|        | 入力<br>(kW) | 削減率<br>(%) | 入力<br>(kW) | 削減率<br>(%) |
| ①      | 5.68       | 0          | 5.50       | 0          |
| ②      | 2.62       | -54        | 2.31       | -58        |
| ③      | —          | —          | 8.19       | 0          |
| ④      | 4.01       | —          | 3.50       | -57        |

### 3.3.2 断熱性能比較

次に各条件における入力エネルギーの比較を行った。表 10 に入力エネルギーの測定条件を表 11 に測定結果のまとめを示す。削減率は、従来設計から高断熱・均熱設計への変更において、同じ温度条件での比較とした。実測した 350℃加熱時の結果から、54%のエネルギーを削減できたことがわかる。また、シミュレーションの結果から、450℃加熱時でも 50%以上のエネルギー削減が期待できる。これより、本研究で行った断熱設計の有効性を示した。実験とシミュレーションの入力エネルギーを比較すると、高断熱・均熱仕様における実測値が若干大きい。これは、表面形状の凹部 Cr メッキの均一性および加熱中の表面の酸化等の影響で、シミュレーションで設定した条件に比べ放射率が

大きくなったことによると考えられる。こうした点を考慮すれば十分な解析精度である。

## 4. 結 言

- (1) プレス機への熱損失はボルトを含めた締結部からの割合が大きい。熱伝導率の小さい材料への置換が有効な断熱対策となる。
- (2) 周囲雰囲気への断熱は、断熱材設置に伴い面積が増加するため、断熱特性の検討が重要となる。断熱性能の低い断熱材を使用することにより、表面積が大きく増加する場合には、断熱材未使用時より熱損失が大きくなる可能性がある。
- (3) シミュレーションを活用し、汎用の棒状ヒータによる均熱手法を確立した。実証試験により、350℃加熱時に従来設計で約 28℃あった温度差を約 11℃に抑えることができた。また、金型設計温度である 450℃においても、温度差を 18℃に抑えることができた。
- (4) シミュレーションによる断熱手法を確立した。同じ温度に加熱する際のエネルギーを従来設計に比べ 1/2 以下に抑えることができた。

## 参考文献

- 1) 本田崇，田村信，須藤貴裕，“金型均熱化技術の開発”，工業技術研究報告書，37，2008，p68-75.
- 2) J. R. ホールマン，“伝熱工学”，丸善，1982.



## cBN エンドミル工具による鉄系材料の鏡面加工

平石 誠\* 宮口 孝司\* 斎藤 博\* 石川 淳\*\* 馬場 大輔\*\*\*

Mirror Surface Milling of Ferrous Metals with cBN Endmill

HIRAISHI Makoto\*, MIYAGUCHI Takashi\*, SAITO Hiroshi\*,  
ISHIKAWA Atsushi\*\* and BABA Daisuke\*\*\*

## 抄 録

cBN ボールエンドミルによる鉄系材料の三次元曲面の鏡面加工を実現することを目的に工具の開発を行い、工具の表面粗さや切れ刃稜線の位置が加工面の表面粗さにおよぼす影響について調べた。スカイフ盤研磨を施した cBN 工具を用いることにより焼入鋼の切削面粗さが改善された。主軸を加工面に対し直角にしたときの切削面粗さを改善する回転中心刃形状を検討したが、効果はわずかであった。

## 1. 緒 言

鏡面加工を目的とした超精密切削加工には切れ刃稜線の鋭利さゆえに単結晶ダイヤモンド工具がしばしば用いられるが、鉄系材料の加工においては工具と被削材との間で起こる反応により工具に著しい磨耗が生ずることが知られている。

一方、cBN はダイヤモンドに次ぐ硬さを有しており鉄系材料を高効率に切削することが可能である。しかし、通常の工具研削盤による切れ刃形成では切れ刃が粗くなり精密な切削加工が困難である。

cBN 工具による鉄系材料の精密切削については、旋盤加工に関するいくつかの報告があり<sup>1)2)</sup>、切削面粗さには工具逃げ面の面粗さが強く影響すること、逃げ面が高精度に研磨された工具を用いることにより最大高さが数十 nm の切削面

粗さが得られることが知られている。

本研究では、鉄系材料の三次元曲面の鏡面加工に cBN ボールエンドミルによる超精密加工を適用することを目的とし、工具の表面粗さや切れ刃稜線の位置が加工面の表面粗さにおよぼす影響について調べた。

## 2. 実験方法

鉄系材料の切削実験に使用した工具は、半径 0.5mm の cBN 製一枚刃ボールエンドミルである。工具の表面粗さの効果を検討するため

に、逃げ面およびすくい面をスカイフ盤により研磨したもの、およびスカイフ盤研磨を施していないものの二種類を作製した。

工具形状は図 1 に示したようであり、回転中心では切削速度が 0 になることから、これを避けるために 1~20 $\mu$ m の間で三種類の逃がしを設けた。

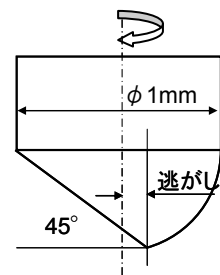


図 1 工具形状

\* 研究開発センター

\*\* 下越技術支援センター

\*\*\* 上越技術支援センター

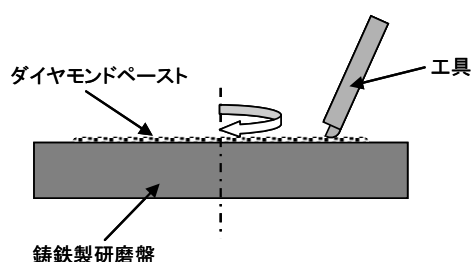


図2 スカイフ研磨盤の模式図

なお、スカイフ盤は、図2にその模式図を示すように、精密に研磨された鋳鉄製円盤にダイヤモンドペーストをすり込み、回転させた円盤に工具を接触させて刃先を鋭利に仕上げる研磨定盤であり、ダイヤモンド工具の研磨にしばしば使用される。

鉄系材料の被削材には Rz1.0 $\mu$ m に研削加工された焼入鋼（日立金属製 HPM38, 硬さ：HRC52）を用いた。

加工機にはエアスピンドルを搭載した超精密ナノ加工機（ファナック製 ROBONANO  $\alpha$ -0iA）を使用した。

切削条件を表1に示す。主軸回転数と送り速度から一刀当たりの送り量は3 $\mu$ mとなる。ピックフィード(Pf)は加工面法線方向から見てダウンカットとなる方向に送った。主軸角度については、加工面に対して垂直に立てた場合と曲面加工を想定して傾けた場合について検討した。後者の場合、図3の模式図に示すように主軸角度はX方向に傾け、送りをこれと平行および直交させた条件について検討した。また、切削領域は送り方向3mm×ピックフィード方向1mmとした。

切削面の表面粗さは非接触三次元測定機（三鷹光機(株)NH-3SP, 高さ方向分解能：0.001 $\mu$ m）を用いて Rz(カットオフ:80 $\mu$ m, 測定長:480 $\mu$ m)を測定した。測定方向は Pf 方向とした。また、工具逃げ面の粗さについても同じ測定器を用い、Rz(カットオフ:10 $\mu$ m, 測定長:60 $\mu$ m)を測定した。

表1 切削条件

|                  |                                |
|------------------|--------------------------------|
| 主軸回転数            | 50,000 min <sup>-1</sup>       |
| 送り速度             | 150 mm/min                     |
| 軸方向切込み           | 3 $\mu$ m                      |
| ピックフィード (Pf)     | 3~15 $\mu$ m<br>(ダウンカット)       |
| 主軸角度( $\theta$ ) | 加工面法線方向に対し<br>0°, 10° および -10° |
| 送り方向             | X, Y 方向                        |
| 切削油              | スプレー供給                         |

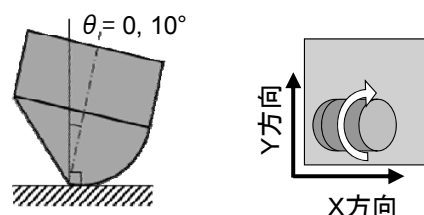


図3 工具の傾斜方向と移動方向

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 工具表面の観察

スカイフ盤研磨を施した工具と研磨無しの工具の切れ刃部のSEM観察結果および逃げ面の粗さ曲線を図4に示す。

スカイフ盤研磨により逃げ面、すくい面ともに平滑になり、切れ刃稜線が鋭利に仕上げられていることがわかる。図中の粗さ曲線は、逃げ面の切れ刃稜線近傍を稜線と平行な方向に測定

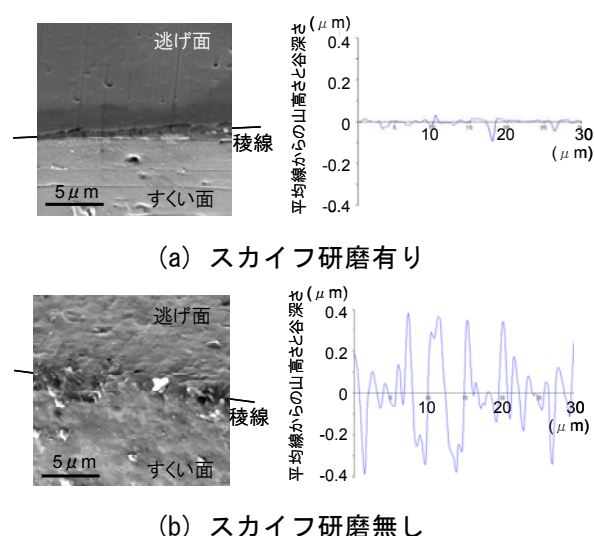


図4 工具切れ刃と逃げ面の断面曲線

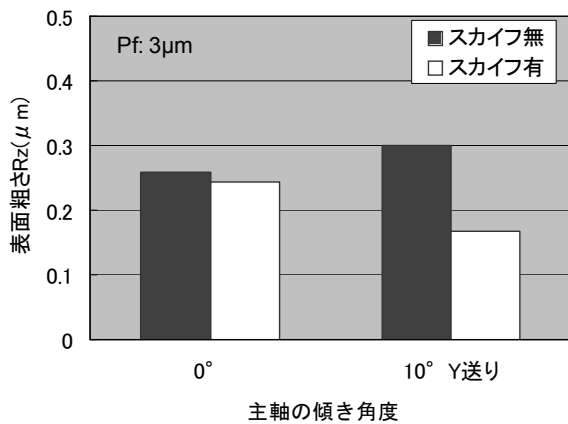


図 5 切削面粗さへのスカイフ研磨の効果

したものである。粗さ曲線の比較からもスカイフ盤研磨の効果は明かである。表面粗さは、研磨無しの場合  $Rz0.70\mu m$  であるのに対し、研磨有りでは  $Rz0.08\mu m$  となった。

### 3.2 工具による切削面粗さへの影響

図 1 における切れ刃先端の逃がし量を  $5\mu m$  とした工具を作製し、切削実験に供した。工具姿勢を変えて焼入鋼を切削した時の切削面の粗さ測定結果を図 5 に示す。いずれの工具姿勢においてもスカイフ盤研磨工具を用いることにより表面粗さは低減された。特に主軸を傾斜させた場合に顕著な効果があり、このとき、目視では回折による発色が若干あるものの鏡面に近い状態が得られた。

### 3.3 主軸を傾斜させた場合の切削面

主軸角度  $10^\circ$  のときの表面粗さに及ぼす Pf の影響を調べた結果を図 6 に示す。スカイフ盤研磨工具の効果は  $Pf=9\mu m$  において最も顕著になり、表面粗さは  $Rz0.16\mu m$  が得られ、研磨無しの場合の  $1/3$  程度となった。また、いずれの工具に

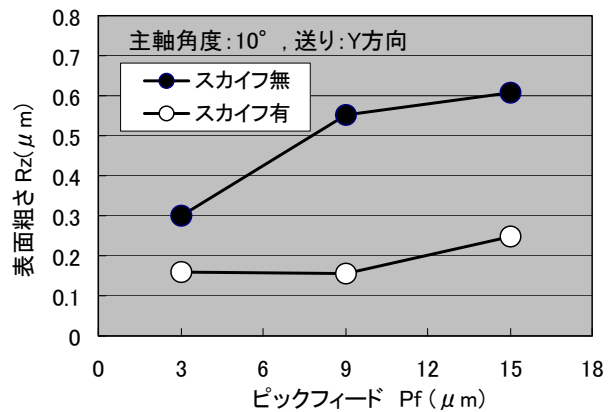
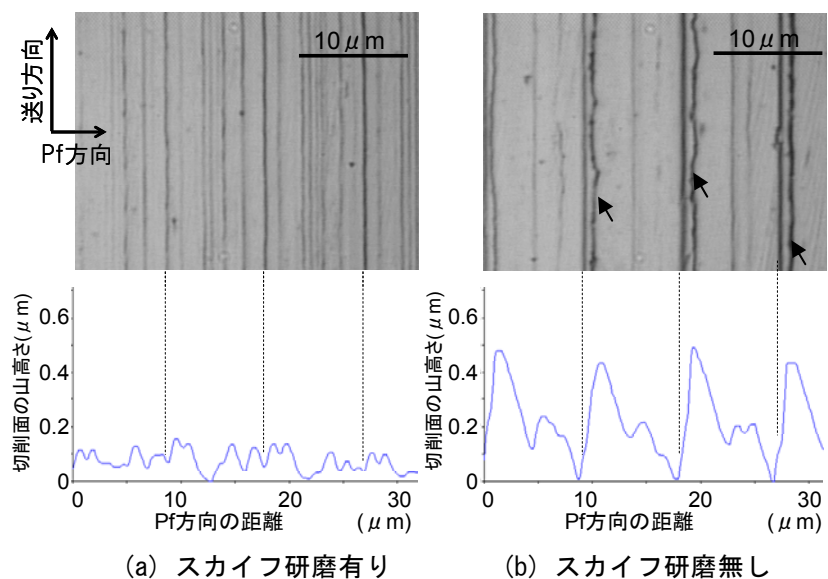


図 6 切削面粗さにおよぼす Pf 量の影響

も Pf 量の増加とともに表面粗さが増加する傾向がある。これは、Pf 量を大きくすると切削面の形成に関与する切れ刃稜線上の凹凸の数が増え、各々の高さにばらつきがあるためであると考えられる。表面粗さの増加率がスカイフ研磨を施した場合の方が小さくなったのは、研磨により切れ刃稜線上の凹凸のばらつきが抑えられた結果、Pf 量の影響が小さくなったものと考えられる。

$Pf=9\mu m$  で加工したときの切削面の写真と Pf 方向の断面曲線を図 7 に示す。断面曲線は写真の下辺に沿って測定したもので、横軸の寸法は写真と一致している。



(a) スカイフ研磨有り (b) スカイフ研磨無し

図 7 主軸角度  $10^\circ$  における切削面と断面曲線

切削面には送り方向に平行な筋状の模様が認められ、 $9\mu\text{m}$  ピッチでほぼ同じ断面形状を繰り返すことがわかる。研磨無しの場合には、切れ刃の輪郭が転写されたと考えられる大きな凹凸が形成されている。また、バリと思われる直線性を欠いた模様（矢印で示す）が断面曲線の頂点付近に観察される。スカイフ盤研磨工具の場合も同様の模様は認められるが、ごくわずかである。

スカイフ盤研磨工具を用いることによる切削面粗さの低下は、工具逃げ面の平滑化とともに切れ刃が鋭利になったことでバリなどの塑性流動の発生が抑えられたものと考えられる。

スカイフ研磨工具を用いて各種工具姿勢で切削を行った際の表面粗さを図 8 に示す。Pf= $3\mu\text{m}$  と  $9\mu\text{m}$  では工具姿勢の影響はほぼ同様であり、主軸角度  $0^\circ$  に比べ主軸角度を  $10^\circ$  傾けたときの方が粗さは小さくなった。ただし、 $-10^\circ$  X 送りの条件では粗さは大きくなった。

図 9 は Pf= $9\mu\text{m}$  のときの主軸の傾斜方向の影響を比較したものである。主軸を送り方向に傾けた場合 ( $10^\circ$ )、加工面には工具の痕跡はほとんど認められないが、送りと反対方向に傾けた場合 ( $-10^\circ$ ) にはカッターマークが観察される。これは、同図に示したように、 $-10^\circ$  では加工面にバリが発生すると考えられ、この場合は Pf 方向を反対向き、すなわちアップカットにすることにより粗さを低減できるものと予想される。

### 3.4 主軸を垂直にした場合の切削面

図 5 に示したように、主軸角度  $0^\circ$  の場合にはスカイフ盤研磨工具による切削面粗さの低減効果はわずかであった。図 10 は主軸角度  $0^\circ$  における切削面の写真と、その一部を非接触三次元測定機により測定した凹凸像である。

スカイフ研磨工具の場合、工具 1 回転毎に形成されたカッターマークの部分にピークが存在している。ここでは切れ刃先端の逃がし量が  $5\mu\text{m}$  の工具を使用しているため、半径が  $5\mu\text{m}$ 、一刃当たり送り量が  $3\mu\text{m}$  のトロコイド曲線を切

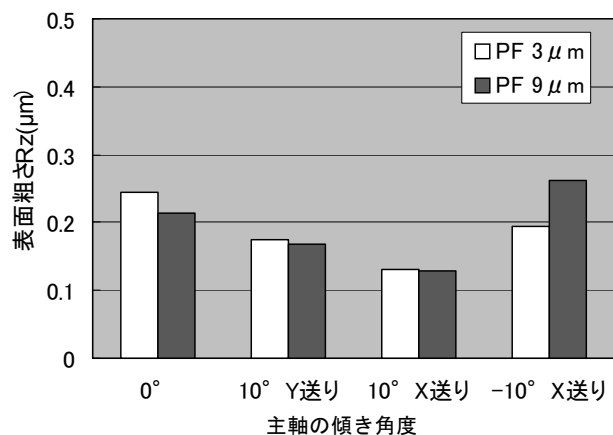


図 8 スカイフ研磨工具による各種工具姿勢での切削面粗さ

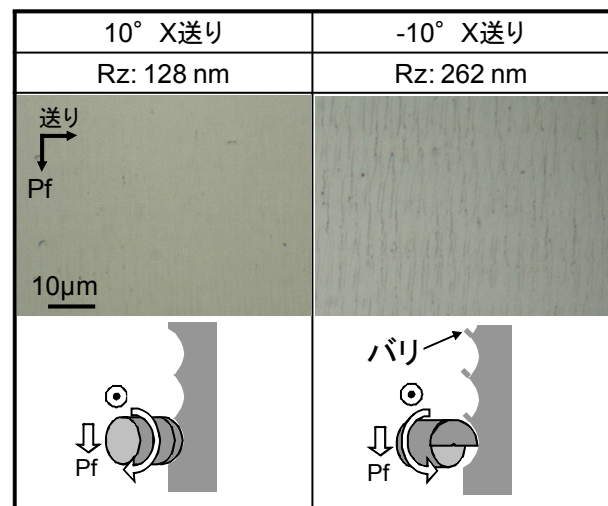


図 9 切削面への主軸傾斜方向の影響

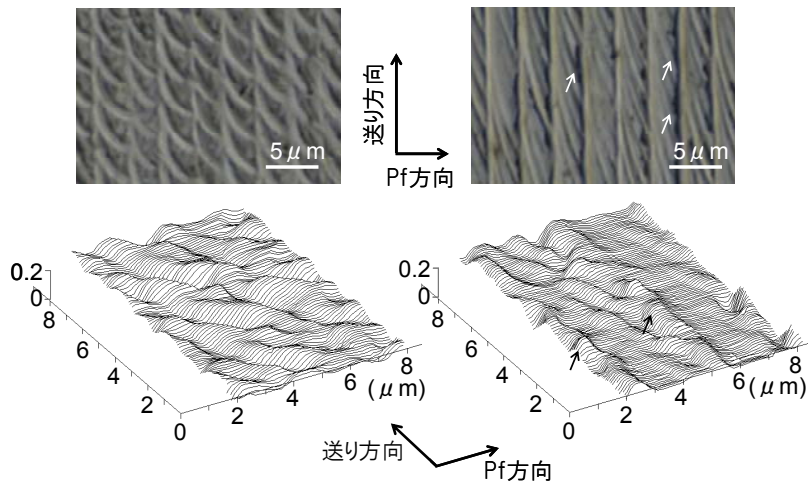
削面に重ね合わせた (図 11)。トロコイド曲線がカッターマークのパターンと一致することから、カッターマークは切れ刃先端によって形成されたバリもしくは切り残しであることがわかる。

一方、研磨無しの場合は矢印で示したバリが発生し、これが凹凸の原因になっている。

主軸角度  $0^\circ$  の場合、スカイフ研磨の有無が表面粗さにおよぼす影響は少ないが、表面の形態は大きく異なっている。

### 3.5 回転中心刃の検討

スカイフ盤研磨工具を用いた場合の主軸角度が  $0^\circ$  のときの切削面粗さを改善するために、回



(a) スカ이프研磨有り

(b) スカ이프研磨無し

図 10 主軸角度 0° における切削面の様子

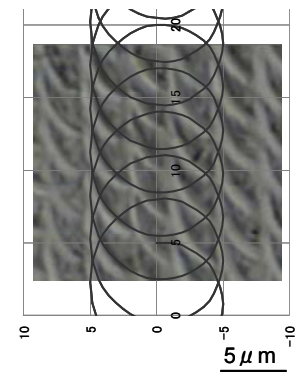


図 11 切れ刃先端軌跡の重ね合わせ

転中心刃の形状について切削面の凹凸を潰す工具を検討することとし、次のような設計指針を基に作製した。

- ・ 切れ刃先端の逃がし量を小さくし、切れ刃を回転中心付近まで形成することにより上記のカッターマークを発生させないようにする。
- ・ バニッシング効果を期待して切れ刃を回転方向前方に出す。

作製した工具の設計形状、SEM 観察像および回転中心の測定結果を図 12(a)~(c)に示す。スカ이프研磨により仕上げられた逃げ面粗さは  $Rz0.09\mu\text{m}$  であった。また、切れ刃先端は半径方向に  $1\mu\text{m}$ 、回転方向前方に  $5\mu\text{m}$  の位置であった。

以下、スカ이프研磨工具は逃がし量に対応した枝番をつけて記すこととし、この工具を MD01、前節まで使用した工具を MD05 とする。

上記の工具を用いて主軸角度 0° で切削を行った際の加工面の粗さを図 13 に示す。Pf=9μm 以上の加工条件では工具 MD01 の方が表面粗さがわずかながら小さくなる傾向が認められた。

MD01 と MD05 を用いて Pf=9μm の条件で加工した時の切削面を図 14(a), (b)に示す。いずれの工具を用いた場合も一刀当たりの送り量は  $3\mu\text{m}$  であるが、MD05 を用いたときの方がパターンが細かく、詳細に観察すると一刀当たり送りの

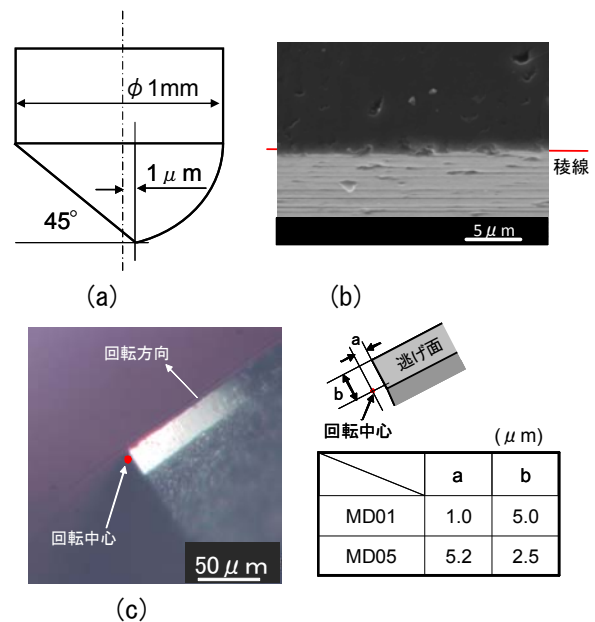


図 12 バリをつぶす工具 (MD01) の形状

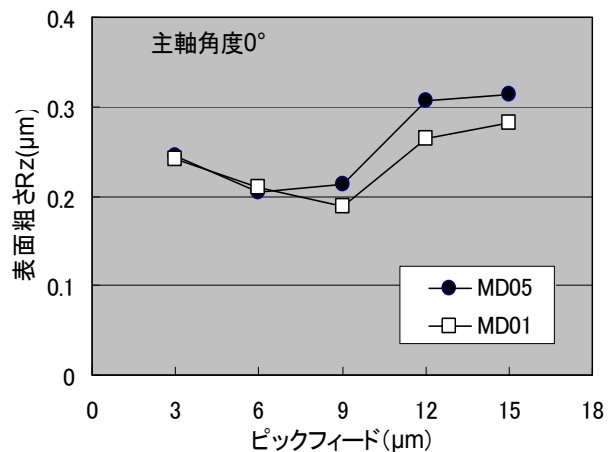


図 13 MD01 による切削面粗さ



間に 2 つのピークが存在していた。これは、上述のように、切れ刃先端によってバリが排出されたためと考えられる。

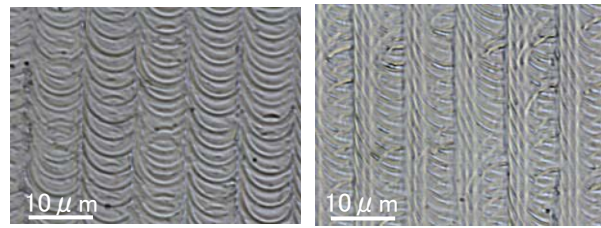
一方、MD01 の場合にはカッターマークは  $3\mu\text{m}$  ピッチで形成されており、凹凸のピークはカッターマークの円周上に存在していた。MD05 の場合に見られた二重のピークがないことから、狙いとしたバニッシングの効果はあったものとする。しかし、バリを完全に潰すにはならず、結局、 $5\mu\text{m}$  突き出した切れ刃終端によって形成されたバリがカッターマークの円周上に発生し、このために表面粗さの改善効果もわずかな量にとどまったものと考えられる。

#### 4. 今後の課題

主軸角度が  $0^\circ$  のときの切削面粗さを改善する方法として切れ味を重視した工具を作製し、効果を検証する。設計指針としては、切削速度の増加、すくい角の設定などを考えている。

#### 5. 結 言

- (1) cBN 工具のすくい面および逃げ面にスカイフ盤研磨を施した結果、表面が平滑で切れ刃稜線が明瞭な工具を作製できた。
- (2) 焼入鋼の切削においてはスカイフ盤研磨 cBN 工具を用いることにより表面粗さが改善され、主軸を傾けた場合に効果が顕著であった。ただし、主軸を加工面に対し直角にした場合の効果はわずかであった。



(a) MD01

(b) MD05

図 14 回転中心刃形状の切削面への影響

- (3) 主軸を加工面に対し直角にした際に発生するバリをバニッシング効果により潰すことを目的として工具を作製したが、別の個所に凹凸が形成され、表面粗さはわずかな改善にとどまった。

本研究は平成 20 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「複数工程で製作される情報家電向け多機能光学シート成形金型の革新的工程集約を実現させる超精密微細切削加工システムの構築」において実施されたものである。

#### 参考文献

- 1) 梶田正美，西口隆，“CBN 工具による鋼の精密切削”，精密工学会誌，52，12，1986，p2024-2029.
- 2) 西口隆，梶田正美，“単結晶 CBN 工具による鉄系材料の精密切削”，精密工学会誌，54，2，1988，p384-389.

## Mg 合金の実用的な表面処理技術の開発および評価（第 2 報）

小林 泰則\* 内藤 隆之\*\* 林 成実\* 五十嵐 晃\* 三浦 一真\* 磯部 錦平\*

Development on the Techniques for Surface Treatment of Magnesium Alloys II

KOBAYASHI Yasunori\*, NAITO Takayuki\*\*, HAYASHI Narumi\*, IKARASHI Akira\*,  
MIURA Kazuma\* and ISOBE Kohei\*

### 抄 録

前報にて報告した手法を AM50 材に対して適用するとともに、アルカリ浸漬処理法の開発、ゾル-ゲル法によるシリカコーティング法の適用、カップ状の成形物への開発法の適用、開発法に塗装を施した試験品の 1000 時間塩水噴霧試験および表面処理・腐食の有無による材料強度の変化に関する検討を行った。その結果、塗装品について塩水噴霧試験 1000 時間を達成するとともに、開発した表面処理法の有効性を確認することができた。

### 1. 緒 言

マグネシウム合金（以下、Mg 合金という）は実用金属中最も軽量であり、比強度、電磁波シールド性などの長所を利用した機能性材料として有望視されている。しかし、実用金属中では活性が高く、最も腐食しやすい材料である。そのため耐食性を付与する表面処理方法は JIS H8651 をはじめ、最近の特許出願動向においても環境負荷低減を目的とした有害物フリーの処理方法が種々提案されている<sup>1)</sup>が、未だ開発途上にある。

大気中における Mg 合金の腐食形態は、粒界や介在物などを起点とする局部腐食<sup>2) 3)</sup>と考えられる。そのため現状では外装品などへの表面処理方法として塗装が不可避と考えられ、外装用表面処理法として非塗装で実用化されている例はないものと思われる。

一方、強度部品への応用に際しても Mg 合金の腐食性の高さが問題として取り上げられる機

会は多いが、Mg 合金における腐食の発生が材料強度に与える影響について検討を行った研究はほとんどないのが実情である。

前報<sup>4)</sup>において、我々は AZ31 マグネシウム合金の表面処理に関してフッ酸/アルカリ処理およびアルカリ+有機酸処理が介在物を除去する前処理方法として有効であり、さらに前処理後に水熱処理を行うことで耐食性の向上に有効であることを報告した。本報では前報にて報告した手法を AM50 材に対して適用した結果について報告するとともに、アルカリ浸漬処理、ゾル-ゲル法によるシリカコーティング法の開発、カップ状の成形物への開発法の適用、開発法に塗装を施した試験品の 1000 時間塩水噴霧試験結果および表面処理・腐食の有無による材料強度の変化に関する研究結果について報告する。

なお本研究は文部科学省の委託研究「都市エリア産官学連携促進事業（発展型）【長岡エリア】マグネシウム合金の次世代型製品開発」（管理人：(財)にいがた産業創造機構）のサブテーマ「高耐食性を有する表面処理技術の開

\* 研究開発センター

\*\* 下越技術支援センター



発」(千葉工業大学：高谷松文教授，長岡技術科学大学：松原浩准教授，新潟県工業技術総合研究所)内で行われたものの一部である。

## 2. 実験・評価方法

### 2.1 使用した板材

実験には AZ31B および AM50A (相当) の圧延板材を用いた。AZ31B 材は通常の市販品 (日本金属(株)製) であるが，AM50 の圧延材は都市エリア事業での開発材である。以降特に断りがない場合，各種実験および試験は大きさ 25 mm×60mm，厚さ 0.8mm の試験片を用いて行った。すべての条件において，試験前にアセトン中で超音波洗浄を行った。

### 2.2 前処理による介在物の除去

前報にて報告したフッ酸/アルカリ処理，グルコン酸ナトリウム+アルカリ処理に加えて，クエン酸ナトリウム+アルカリ処理を実施した。処理条件は前報と同様の条件で行った。

### 2.3 改質層の生成

水熱処理は前報と同様の方法<sup>4)</sup>で実施した。アルカリ浸漬処理は水熱処理と同じ設備を用いてアルカリ水溶液内に試験片を浸漬させた状態で加圧・加熱処理を行った。

### 2.4 ゴル - ギル法によるシリカコーティング

ゴル - ギル法は溶液から出発して主に金属酸化物の多孔質ゲルやガラスなどを作る材料合成法であり，バルク体からコーティング膜まで幅広い形態のものが作成可能である。出発原料としては金属アルコキシドが使われる例が最も多く，これに加水分解用の水，溶媒としてアルコール，触媒として酸または塩基が加えられる。これらの原料を混合後，加水分解と重合反応によって溶液がゾル化し，さらに反応が進むとゲル化する<sup>5) ~8)</sup>。

本研究では出発原料をテトラエトシキシルン ( $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ) とし，溶媒としてエタノール，

触媒として塩酸を使用し，ディップコーティング法によるシリカ薄膜の製膜を試みた。

### 2.5 カップ状成形品への開発法の適用

成形温度 225℃，絞り比 3，内径 40mm の条件にて成形された深絞り成形品に対して前処理および改質処理を実施，塩水噴霧試験 100 時間を実施し，耐食性を評価した。

### 2.6 塗装方法

下塗り塗装としてエポキシ樹脂系プライマーを約 18μm，上塗りとして耐候性ウレタン塗装を約 13μm を実施した。

### 2.7 表面処理・腐食の有無による材料強度の変化

AZ31 材を用いて本研究にて開発した表面処理を実施したものと実施していない JIS13B 号引張試験片を作製し，(株)島津製作所製精密万能試験機 AG-250KNI にて引張試験を実施し，それらの試験結果の比較を行った。

また同様の試験片について塩水噴霧試験を 24 時間実施して表面を腐食させた前後での材料強度の変化を解析した。

### 2.8 塩水噴霧試験

本研究における耐食性の評価は全て塩水噴霧試験にて行った。試験はスガ試験機(株)製 ST-ISO-3 型試験機を用いて行った。

### 2.9 その他の分析および解析

素材成分の分析にはサーモフィッシャーサイエンティフィック(株)製プラズマ発光分光分析装置 iCUP 6300DUO を用いた。X 線マイクロアナライザーによる試験片表面の定性分析には日本電子(株)製 JXA-8100 を用いた。グロー放電発光分光法(GD-OES)による皮膜の深さ方向の元素分析は HORIBA Jobin Yvon 製 GD-Profilier2 にて行った。

表 1 使用材の成分分析結果

|                                      | Al      | Zn       | Mn       | Fe     | Si    | Cu     | Ni     | Ca     |
|--------------------------------------|---------|----------|----------|--------|-------|--------|--------|--------|
| AZ31B 規格値 (wt%)<br>(MP1B: JIS-H4201) | 2.4-3.6 | 0.50-1.5 | 0.15-1.0 | ≤0.005 | ≤0.10 | ≤0.05  | ≤0.005 | ≤0.04  |
| AZ31 測定値(wt%)                        | 2.87    | 0.95     | 0.38     | 0.003  | 0.014 | 0.001  | <0.001 | <0.001 |
| AM50A 規格値 (wt%)<br>(MDC4: JIS-H5303) | 4.4-5.4 | ≤0.22    | 0.26-0.6 | ≤0.004 | ≤0.10 | ≤0.010 | ≤0.002 |        |
| AM50 測定値(wt%)                        | 4.95    | -        | 0.23     | 0.006  | -     | 0.002  | 0.002  |        |

### 3. 結果と考察

#### 3.1 使用材の成分分析結果

実験に用いた素材の成分分析結果を表 1 に示す。表中の規格値はそれぞれ相当する JIS 規格によるものである。

なお、AM50 材の分析結果は長岡技術科学大学の松原浩准教授らによるものである。

#### 3.2 前処理による介在物の除去および改質層の生成

図 1 に各種の前処理および改質処理を行った

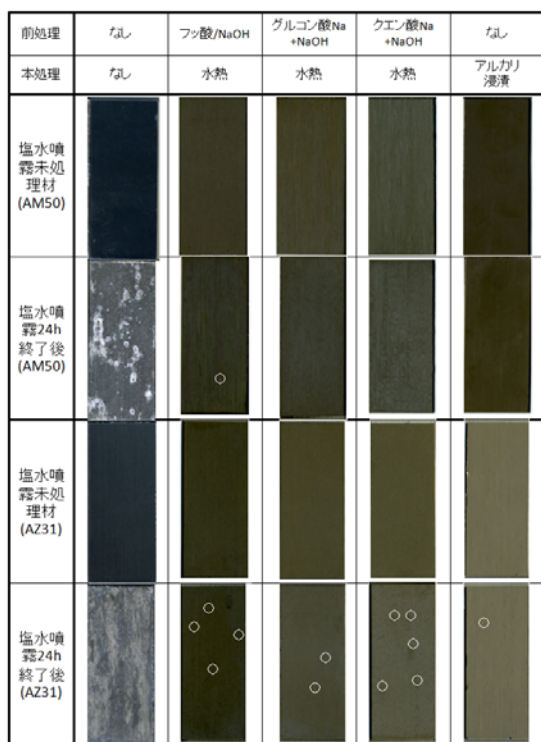


図 1 各種表面処理後の外観と塩水噴霧試験結果

試験片および塩水噴霧試験（連続 24 時間）を行った後の外観を示す。図中の白丸は目視にて確認できた孔食点を示している。素材のままの状態では AZ31 材、AM50 材ともに全面腐食的な挙動を示しているが、水熱処理およびアルカリ浸漬処理を行った試験片については全面腐食的な挙動は示さずに孔食が発生するという局部腐食的な挙動を示している。これは表面処理によって耐食性のある皮膜が生成したため全面腐食せず、生成した皮膜の欠陥部などの局部的に耐食性の劣る部分から腐食が進行したためであると考えられる。

なお、一部の条件においては全面的に変色している様子が見られたが、明らかな腐食生成物の生成は確認できなかった。AZ31 材については、発生した孔食の数に前処理法によって差が現れ、アルカリ浸漬処理において発生した孔食点の数が最も少なかった。

ここで図 2 に AZ31 材について、素材のまま、水熱処理およびアルカリ浸漬処理を行った場合の試験片表面の Al, Mn, Zn の EPMA 定性分析結果を示す。図 2 から、水熱処理およびアルカリ処理を行った試験片では Al, Mn, Zn の分析値が素材のままのものに比べて大きく低下していることがわかる。これは表面処理によって、表面近傍にあるそれらの成分が溶出・除去されていることを示している。この結果から、これらの処理によって、素材表面にある介在物が除去されている可能性が考えられる。

また、図 3 に水熱処理を行った試験片(a)とアルカリ浸漬処理を行った試験片(b)の表面からの

深さ方向の元素分布解析結果を示す。

なお、成分によって含有量に大きな差があるため、表示の都合上適当な係数を乗じてある。図3において示されている含有量および表面からの深さの数値はおおよそその値である。図3から、どちらの結果においても15～25μmの深さ

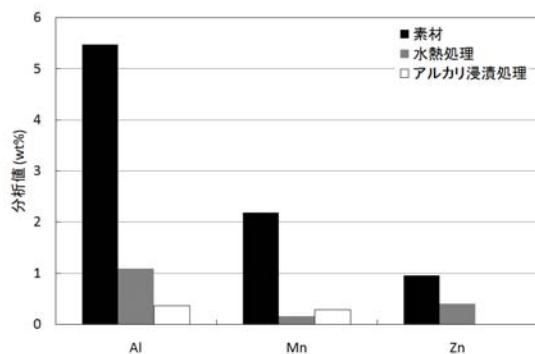
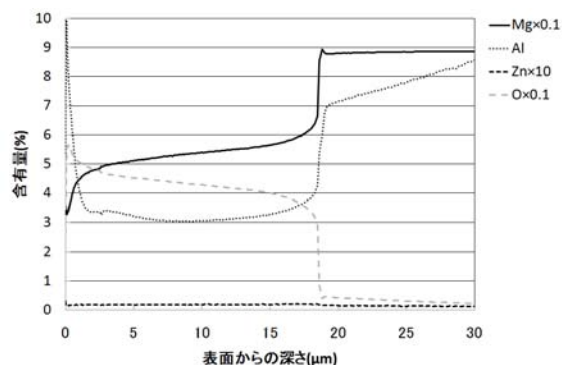
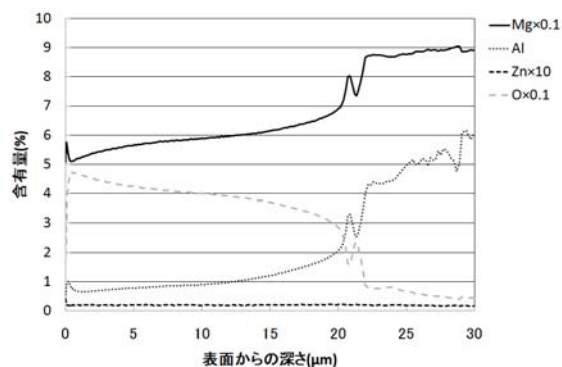


図2 試験片表面のEPMA定性分析結果



(a) 水熱処理



(b) アルカリ浸漬処理

図3 GD-OESによる深さ方向分析結果

で組成が大きく変化しているのが確認できるが、その地点が表面処理によって生成した改質層と素材との境界点である。これらの結果を比較すると、生成皮膜中のアルミ濃度が水熱処理品に比べてアルカリ浸漬処理では低くなっていることが分かる。

AM50材の表面処理品について連続100時間の塩水噴霧試験を行った試験片を図4に示す。図中の白丸は孔食の発生部位を示しており、周辺部はマスキングテープにてマスキングを行っている。図4からわかるように、100時間噴霧後にはすべての条件において孔食が発生し、その数が少ない順にアルカリ浸漬処理、グルコン酸+水熱処理、フッ酸+水熱処理、水熱処理のみ、クエン酸+水熱処理の順となった。

### 3.3 ゾル-ゲルコーティングによる耐食性の向上

図5にアルカリ浸漬処理後にゾル-ゲル法によってシリカコーティングした試験品に対し、100時間の塩水噴霧試験を実施した結果を示す。なお、本節にて実施したアルカリ浸漬処理の

| 前処理                | なし | フッ酸/NaOH | グルコン酸Na + NaOH | クエン酸Na + NaOH | なし     |
|--------------------|----|----------|----------------|---------------|--------|
| 本処理                | 水熱 | 水熱       | 水熱             | 水熱            | アルカリ浸漬 |
| 塩水噴霧100h終了後 (AM50) |    |          |                |               |        |

図4 連続100時間塩水噴霧結果 (AM50)

| 素材          | AM50   |        | AZ31   |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 前処理         | なし     | なし     | なし     | なし     |
| 本処理         | アルカリ浸漬 | アルカリ浸漬 | アルカリ浸漬 | アルカリ浸漬 |
| 後処理         | なし     | ゾルゲル   | なし     | ゾルゲル   |
| 塩水噴霧100h終了後 |        |        |        |        |

図5 ゾル-ゲルコーティングした試験品の連続100時間塩水噴霧試験結果

処理時間は図 1、4 に示したものの半分とした。図 5 において、ゾル - ゲルコーティングをしたものとしてないものを比較すると、AZ31 材については明確な違いがないが、AM50 材については孔食の発生の有無という形で差が現れた。図からわかるように、AM50 材については、アルカリ浸漬処理にゾル - ゲルコーティングした場合、変色は見られるものの目視での孔食は確認されなかった。図 4 の結果と比較すると、AM50 材についてはゾル - ゲルコーティングとアルカリ浸漬処理を組み合わせることで、2 倍の処理時間をかけた水熱処理と同等以上の耐食性を実現することができることがわかった。

### 3.4 カップ状成形品への適用

AZ31 材および AM50 材について、カップ状の成形品に対して表面処理を行い、塩水噴霧試験（100 時間）を行った結果について図 6 に示す。写真からわかるように、凹凸部にも一様に

改質層が生成していることがわかる。

また、塩水噴霧試験結果から、上部の平坦部と垂直に立ちあがった側面部で腐食の進み方に差があるものの、大まかに見て平板の試験片を用いた結果とほぼ同等の耐食性が得られていることがわかった。

### 3.5 塗装品への塩水噴霧試験

塩水噴霧試験結果の一覧を図 7 に示す。1 条

| 前処理                |    | フッ酸/NaOH | グルコン酸Na +NaOH | クエン酸Na +NaOH |        |
|--------------------|----|----------|---------------|--------------|--------|
| 本処理                | 水熱 | 水熱       | 水熱            | 水熱           | アルカリ浸漬 |
| AZ31<br>(100h 終了後) |    |          |               |              |        |
| AM50<br>(100h 終了後) |    |          |               |              |        |

図 6 成形品の塩水噴霧試験結果

| 前処理  |           | なし | フッ酸/NaOH | グルコン酸Na +NaOH | クエン酸Na +NaOH | 水熱 | アルカリ浸漬 |
|------|-----------|----|----------|---------------|--------------|----|--------|
| AZ31 | 塩水噴霧前     |    |          |               |              |    |        |
|      | 500h 経過後  |    |          |               |              |    |        |
|      | 1000h 経過後 |    |          |               |              |    |        |
|      | 乾燥後       |    |          |               |              |    |        |
| AM50 | 塩水噴霧前     |    |          |               |              |    |        |
|      | 500h 経過後  |    |          |               |              |    |        |
|      | 1000h 経過後 |    |          |               |              |    |        |
|      | 乾燥後       |    |          |               |              |    |        |

図 7 表面処理 + 塗装品の連続 1000 時間塩水噴霧試験結果



件に対するサンプル数は3枚とし、そのうち2枚に対してクロスカットを実施した。試験片の周辺部はメッキ用マスキングテープにてマスキングした。AZ31材、AM50材ともにクロスカットを実施しなかったサンプルについては1000時間塩水噴霧後も腐食は発生しなかった。クロスカットを施したサンプルについては、AZ31材については大きな膨れは発生せず、比較的良好な結果を示した。一方、AM50材のクロスカット品については、前処理の有無や前処理法によって腐食や塗膜剥離の程度に有意の差が現れた。図からわかるように下地処理をしていないものが最も腐食が激しく、続いて腐食の程度が激しい順にクエン酸処理、グルコン酸処理、フッ酸処理、水熱処理、アルカリ浸漬処理となった。このように本研究にて開発した前処理法および改質法は塗装の下地処理としても有効な手法であることが示された。

### 3.6 表面処理の有無および腐食の有無による材料強度の変化に関する研究

表面処理の有無による引張試験結果の違いを図8に、塩水噴霧試験前後での引張試験結果の違いを図9(a)~(c)に示す。(a)は素材、(b)は水熱処理したもの、(c)はアルカリ浸漬処理したものの結果である。これらの結果は弾性変形域においてはほぼ同様の結果であったので、塑性変形域の部分のみを示してある。

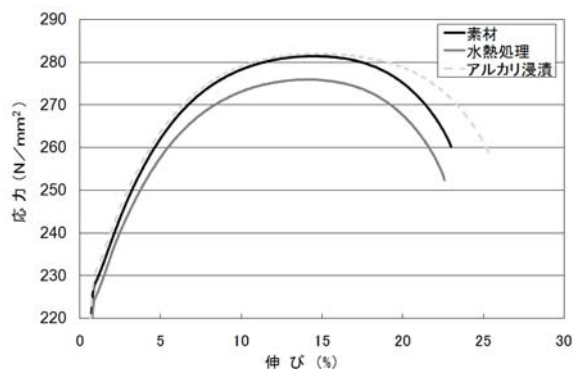
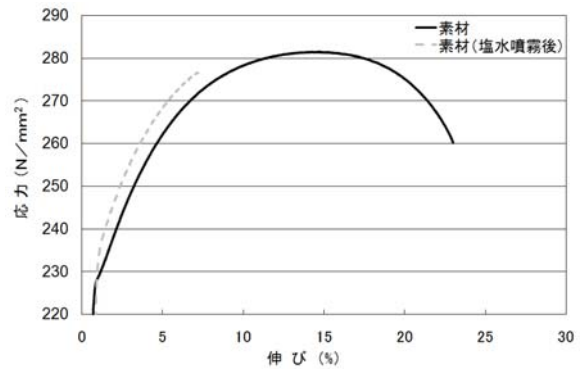
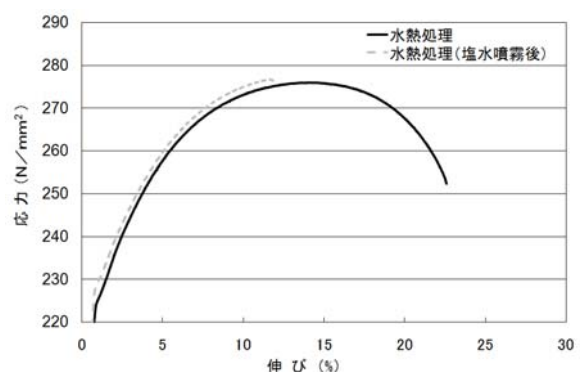


図8 表面処理の有無による引張試験結果の違い

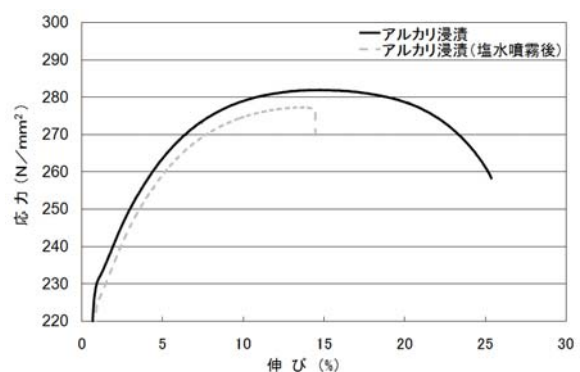
また、得られた強度および伸びの一覧を表2に示す。図8からわかるように、表面処理の前後では伸びおよび強度に大きな違いは見られなかった。一方、図9に示されるように、塩水噴



(a) 素材



(b) 水熱処理



(c) アルカリ浸漬処理

図9 塩水噴霧の前後による引張試験結果の違い

表 2 引張試験結果一覧

| 前処理条件等<br>結果              | 塩水噴霧前 |      |        | 塩水噴霧後 |      |        |
|---------------------------|-------|------|--------|-------|------|--------|
|                           | 素材    | 水熱処理 | アルカリ浸漬 | 素材    | 水熱処理 | アルカリ浸漬 |
| 最大強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 281   | 276  | 282    | 277   | 277  | 277    |
| 最大伸び (%)                  | 23    | 23   | 25     | 7     | 12   | 14     |

霧試験を実施したものは表面処理の有無や種類にかかわらず、その前後で強度に大きな差が見られなかったが、塩水噴霧後は塩水噴霧前に比べてすべての場合において伸びが低下した。塩水噴霧後の試験片表面を観察すると、素材のものについては全面腐食的に腐食していたが、表面処理をしたものは目視にて何点かの孔食点が観察されている。塩水噴霧試験後ではすべての場合において伸びが低下していたことから、塩水噴霧試験によって表面が腐食して何らかの形で表面に形状的な不均一が生じ、それが破壊の起点となったため伸びが低下した可能性が考えられる。

#### 4. 結 言

- (1) 前報にて報告した前処理法および改質法を AM50 に適用し、その有効性を確認した。
- (2) 従来法と比較して処理工程・時間を短縮させた新規の前処理法および改質法を開発した。
- (3) アルカリ浸漬処理とゾル-ゲルコーティングを組み合わせることで、AM50 材において塩水噴霧試験 100 時間で無孔食を達成し、水熱処理と同等以上の耐食性を達成することができた。
- (4) 開発した前処理法および改質法を下地処理として塗装を施した試験品に対する塩水噴霧試験の結果、1000 時間を達成するとともに、本研究にて開発した手法が塗装の下地処理として耐食性の向上に有

効な手法であることが示された。

- (5) 本研究において開発した表面処理による材料強度、伸びの変化はともに確認できなかった。塩水噴霧試験実施の前後では強度の変化はほとんどなかったものの、伸びは低下した。

#### 参考文献

- 1) “マグネシウム合金構造用材料の製造技術”，特許庁平成 17 年度特許出願技術動向調査報告書，（2009 年 3 月 31 日閲覧）  
[http://www.jpo.go.jp/shiryoku/pdf/gidou-houkoku/17mani\\_magnesium\\_gokin.pdf](http://www.jpo.go.jp/shiryoku/pdf/gidou-houkoku/17mani_magnesium_gokin.pdf).
- 2) 寺脇翼，山本厚之，椿野晴繁，軽金属，57，2007，p269.
- 3) O. Lunder, J. E. Lein, T. Kr. Aune and K. Nisancioglu, *Corrosion*, 45, 1989, p741.
- 4) 内藤隆之，磯部錦平，三浦一真，山田昭博，小林泰則，“Mg 合金の実用的な表面処理技術の開発および評価（第 1 報）”，工業技術研究報告書，No.37，2008，p76.
- 5) 土岐元幸，“ゾル-ゲル法のやさしい概要とその用途”，表面技術，Vol.50，No.2，1999，p35.
- 6) 作花済夫，“ゾル-ゲル法のあらまし：ゾル-ゲル技術とその応用”，表面技術，Vol.57，No.6，2006，p2.
- 7) 作花済夫，“ゾル-ゲル法の科学”，アグネ承風社，1988.
- 8) 作花済夫，“ゾル-ゲル法の応用”，アグネ承風社，1997.

## 窒素吸収処理ステンレス鋼の開発

三浦 一真\* 小林 泰則\* 内藤 隆之\*\*

Development of Nitrogen Absorption Processing Stainless Steel

MIURA Kazuma\*, KOBAYASHI Yasunori\* and NAITO Takayuki\*\*

## 抄 録

SUS445J2 相当の Fe-22mass%Cr-1mass%Mo を用い、窒素吸収処理プロセスを開発した。素材を窒素雰囲気・高温で処理すると、表面部から窒素が固溶してオーステナイト相を形成することがわかった。短時間処理では中心部にフェライト相が残るが、処理時間を長くするとフェライト相は薄くなり、4h の処理でオーステナイト単相となった。窒素吸収処理材について耐孔食性を評価する孔食電位の測定や塩化第二鉄腐食試験を行ったところ、既存のステンレス鋼を大きく上回る耐食性を示した。

## 1. 緒 言

SUS304に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼（クロム（Cr）－ニッケル（Ni）系）は延性、強度、耐食性、耐熱性、低温靱性、などに優れ、溶接性も良好であることから家庭用品、建材、一般機械、産業機械、電気機器、医療用途、などに幅広く使用されている<sup>1)</sup>。

Ni を含まないフェライト系ステンレス鋼の中で 18mass%Cr（以後 mass%を省略）以上の高 Cr 系と呼ばれる鋼種については、SUS304 や 316 などの代替材料になり得る素材と考えられている<sup>1)</sup>。しかし、塩水噴霧試験で評価した耐食性については SUS304 や 316 と同等レベルにあるといわれるものの、強度などの機械的特性はやや劣り、磁性を有するため、同じ特性を有する材料とは言い難い。

このような状況のもと、我々は Fe-24Cr-2Mo（研究開発材、以後、Fe を省略）の素材に窒素を 1%強添加させることでオーステナイト系ステンレス鋼と同等以上の特性を有する Ni を含まない Ni フリーステンレス鋼の研究開発を行ってきた<sup>2) 3)</sup>。

本研究では、市場に流通している素材を用いた処理技術の開発を目的に 24Cr-2Mo 類似組成である SUS445J2 相当鋼を選定して窒素吸収処理を行い、金属組織解析や各種の分析を行って、オーステナイト相への変態挙動について調査した。さらに処理材の耐食性試験を行い、得られた結果について既存のステンレス鋼と比較した。

## 2. 実験方法

## 2.1 窒素吸収処理

窒素吸収処理に用いた素材は 22Cr-1Mo で厚さ 0.8mm の板材である。この素材には耐食性を改善するためにチタン（Ti）やニオブ（Nb）が微量添加されている。

窒素吸収処理は誘導加熱方式の真空加熱装置（SK メディカル電子(株)製、MD-1700D）で行った。装置外観を図 1 に示す。処理可能なサンプルの大きさは 50×50mm である。処理手順は、脱脂・洗浄した板材サンプルを炉内に設置後、真空排気によるガス置換を行い、窒素ガス充填後、加熱を開始した。加熱温度は 1200℃とし、大気圧窒素雰囲気にて行った。保持時間は 4h までとし、加熱終了後は窒素ガスで冷却した。処理したサンプルは簡易的に磁性を評価

\* 研究開発センター

\*\* 下越技術支援センター



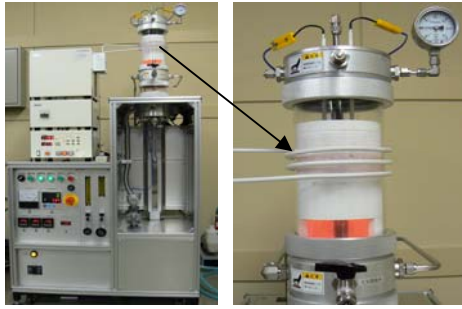


図 1 真空加熱装置外観

するため、フェライトスコープ（(株)フィッシャー・インストルメンツ製，MP30）を用いてフェライト量を測定するとともに金属組織観察やビッカース硬度測定を行った。また，X 線マイクロアナライザー（日本電子(株)製 JXA-8100，以下 EPMA と略）や ONH 分析装置（(株)堀場製作所製，EMGA-1300）を用い，素材に含まれる窒素の定性・定量分析を行った。さらに，X 線回折装置（(株)リガク製，RINT-UltimaIII）を用いて物質の同定を試みた。これらの測定・分析結果から，オーステナイト相への変態の有無を判断した。

## 2.2 耐食性評価方法

ステンレス鋼で発生する局部腐食は応力腐食割れ，孔食，粒界腐食割れ，すき間腐食などがある<sup>4)</sup>。本研究では耐食性に優れているといわれているオーステナイト系においても問題となる腐食形態で応力腐食割れと並んで発生頻度の高い孔食に着目し，耐孔食性について評価した。

耐孔食性の評価には外部から電位をかけたときに食孔発生時の孔食電位を求める方法と塩化第二鉄腐食試験の 2 通りの試験を行った。

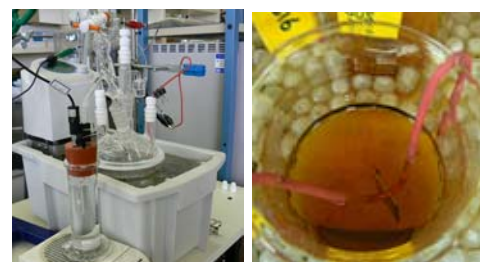
孔食電位の測定は JIS G 0577『ステンレス鋼の孔食電位測定方法』に準拠した。耐食性試験用サンプルは試験前に耐水研磨紙#600 で研磨を行った後，アセトン洗浄，硝酸による不動態化処理を行った。試験前に  $1\text{cm}^2$  の電極面を確保し，それ以外を特殊材にてコートし，乾燥後試験面を再度#600 の耐水研磨紙で研磨し，サン

プルを電解槽内にセットした。

試験溶液は 4%NaCl 水溶液を使用し，脱気は高純度窒素ガスを用いて行った。設定液温は  $30^\circ\text{C}$  である。また，電位掃引速度は  $20\text{mV}/\text{min}$  に設定した。試験は電流値の変化を見るものである。典型的な変化は，電位を上げると途中電位の変化にかかわらず電流値が一定になる不働態域に入り，さらに電位をあげたときにある電位で急激に電流値が高くなる。この電流値が立ち上がる際の電位が孔食電位であり，このとき素材が激しく溶け出して食孔が形成される。試験後の表面についてはデジタルマイクロスコープを用いて観察した。図 2(a)に測定装置の外観を示す。

塩化第二鉄腐食試験は素材を幅 20mm，長さ 30mm，厚さ 0.8~1.0mm の板状試験片に加工し，JIS G 0578 に準拠した方法により行った。試験片は樹脂被覆ワイヤーに通してつり下げるため， $\phi 2\text{mm}$  の穴を開けている。なお，窒素吸収処理材については前記の要領にて試験片を加工したものを所望の条件で処理したものを用いた。試験は，表面積・質量とも測定した試験片を塩化第二鉄水溶液に 24h 浸漬し，試験前後の質量変化を測定する方法で行った。

塩化第二鉄腐食試験水溶液は， $0.05\text{ mol/l}$  の HCl 水溶液に  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  を溶解することにより調製した 6% $\text{FeCl}_3$ -HCl 水溶液を用い，試験温度は  $35^\circ\text{C}$  とした。試験片は図 2(b)に示すように樹脂性の被覆ワイヤーにつり下げた状態でサンプル全体をビーカー内に浸漬し保持した。



(a) 孔食電位測定 (b) 塩化第二鉄腐食試験

図 2 腐食測定装置外観

### 3. 結果と考察

#### 3.1 窒素吸収処理

図 3 は 22Cr-1Mo 板材を 1200℃で窒素処理したサンプルの板厚方向断面の金属組織写真を示す。図 3(a)は 1h 処理、図 3(b)は 2h 処理、図 3(c)は 4h 処理を行った場合の組織を示す。組織は白色の組織（以後、白色相と呼ぶ）とエッチングにより黒色を呈している組織（以後、黒色相という）からなっている。白色相は(a)の場合は表面から約 50～100μm 付近にのみ分布しているが、時間とともに内部に広がっていき、2h では表面から約 200μm まで、4h 処理の(c)では白色相のみが観察された。一方、黒色相は 1h では表層を除いた部分で見られるが、処理時間が長くなると小さくなり、4h 処理では見られなかった。フェライト量は(a)は約 25%，(b)は 15% で、(c)では 0%であった。ONH 測定装置より測定した窒素濃度は(a)は 0.35%，(b)は 0.80%，(c)では 1.1%であった。ビッカース硬度は黒色相は 180～220HV で既存のステンレス鋼板材の硬度に近かった。一方、白色相は 300～320HV であり黒色相に比べ硬くなっている。

図 4 は図 3(b)と同じ 2h 処理した板材の電子顕微鏡写真と窒素の EPMA 線分析結果を示す。線分析より窒素のピーク強度は両側の白色相で高く、中心付近の黒色相では弱くなっている。したがって、白色相で窒素濃度が高く、黒色相

は窒素濃度が低いといえる。

図 5 は窒素吸収処理材の X 線回折結果であり、処理時間が 1h, 2h, 4h の結果を示した。処理時間が短いとオーステナイトの他にフェライトや窒化物のピークが散見される。処理時間が長くなるとオーステナイト以外のピークは弱くなり、4h 処理になると、オーステナイトピークのみとなった。

以上の解析結果より、表層より形成されている白色相は窒素が吸収されているところでオーステナイト相である。内部に認められる黒色相はフェライト相であると判断できる。

短時間の窒素吸収処理ではフェライト相とオーステナイト相の 2 相に分かれることがわかった。一般の 2 相ステンレス鋼はフェライト相とオーステナイト相が無秩序に存在しているのに対し、本研究の窒素吸収処理プロセスでは完全に分離はしていないものの、表層側のオーステナイト相と内側のフェライト相とに分かれていることが特徴である。非磁性が要求される場合は、4h まで処理を行う必要があるが、表層の耐食性の確保のみでよければ、意図的に表層のみオーステナイト化することもできる。耐食試験結果については次節以降で述べる。

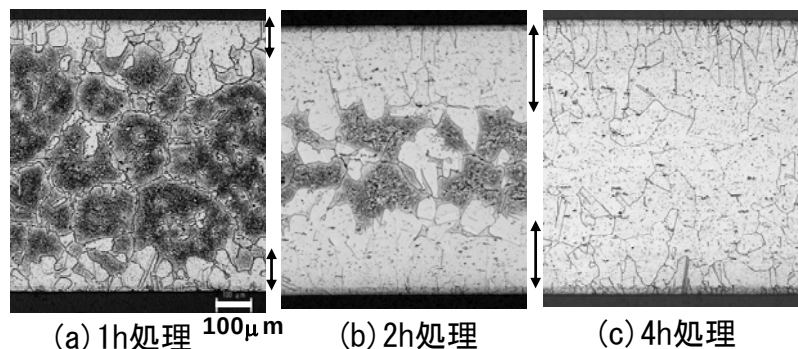


図 3 窒素吸収後の金属組織

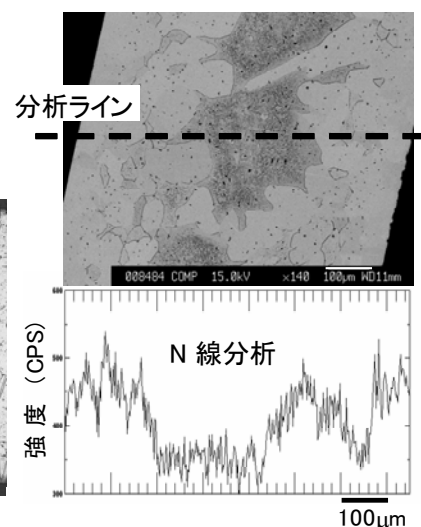


図 4 窒素吸収材（2h 処理）の電子顕微鏡像と EPMA 線分析結果

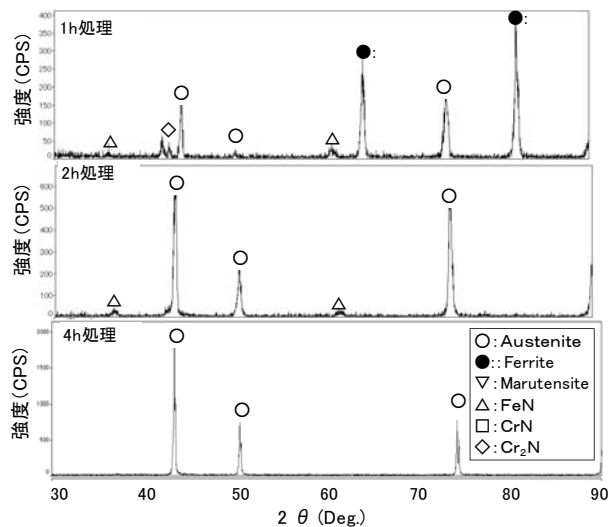


図5 窒素吸収処理材のX線回折結果

窒素吸収処理を行った際に表面極近傍で起こる現象の把握を目的に窒素吸収済み板材の表面分析を行った。図6は高周波グロー放電発光表面分析装置（株）堀場製作所製，GD-Profiler2，

以下GD-OESと略）による22Cr-1Mo窒素吸収材（2h処理）の極表面の深さ方向分析結果を表す。なお、横軸はスパッタリングの深さ方向を示す。縦軸は組成割合（%）であり、図6(A)，(B)，(E)については得られた分析値をCr(図6(C))については実際組成の1/2の値，N(図6(D))については実際組成の1/5の値で表示した。

表面付近にはO，22Cr-1Mo材の添加元素であるNbやTiのピークが確認された。特に添加

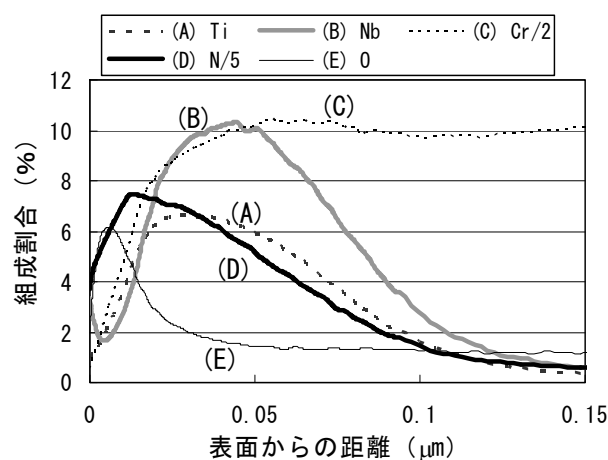


図6 GD-OESによる窒素吸収処理材の表面からの深さ方向分析結果

元素のNb，Tiは表面から0.1μm以内で高い濃度を示し、両者の深さ方向のプロファイルは似ている。表面近傍でNのピークはOの外側に存在し、その組成は約40%と高く表面から0.1μmにおいても10%弱の組成であり、広範囲に分布していることから、窒素吸収時において、表面では酸化物がその内側には窒素が固溶し、さらにその一部はTiやNbと反応して窒化物を形成している可能性があると考えられる。

市場に流通するフェライト系ステンレス鋼を用いた場合、素材や溶接部耐食性改善のために添加される微量元素の種類と添加量が窒素吸収に影響することを示した。これらの元素は表面に濃化している場合もあり、窒素吸収の表面反応メカニズムについては窒素拡散挙動と合わせ、今後、実験・分析で解明する必要がある。

### 3.2 孔食電位測定

窒素吸収処理材について孔食電位測定を行った。既存ステンレス鋼の代表値（平均値）と比較しながら窒素吸収処理材の耐食性試験結果について説明していく。

図7は孔食電位測定結果（アノード分極曲線）で22Cr-1Mo窒素吸収材（図7(E)：1h処理，図7(F)：4h処理）とSUS430（図7(A)），SUS304（図7(B)），SUS316（図7(C)），および22Cr-1Mo（図7(D)）のプロファイルを示す。

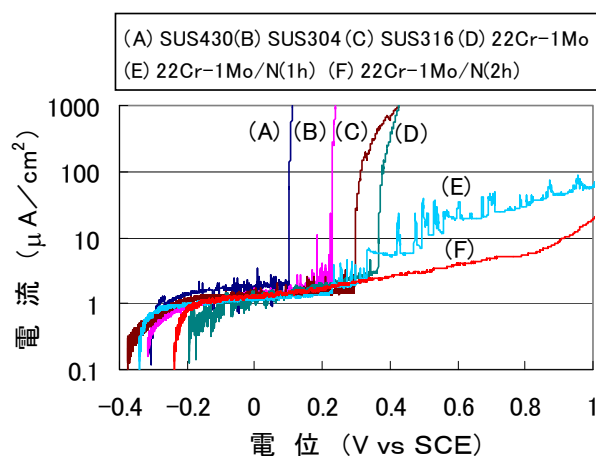


図7 各種ステンレス鋼の孔食電位測定結果（アノード分極曲線）

なお、孔食電位はアノード分極曲線の電流密度  $100\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  に対応する電位で、孔食の有無はその電位における電流値変化（曲線の立ち上がり度合い）で判定した。

分極曲線を見ると、既存のステンレス鋼はすべて、ある電位にて急激な電流の立ち上がりが見られ、明確な孔食を示した。それらの孔食電位は  $\text{SUS430} < \text{SUS304} < \text{SUS316} < 22\text{Cr-1Mo}$  の順で高くなった。

それに対して、窒素吸収処理材は電位とともに電流値は若干高くなる傾向にはあるものの印加電位 1V までの範囲では急激な電流値の立ち上がりは見られなかった。

窒素吸収処理材の電流値変化を比較すると、未処理の 22Cr-1Mo の孔食電位である 0.4V 付近までは電流値の変化は小さくほぼ同じプロファイルを示したが、これより電位が高くなると、1h では電流値は増加に転じ、数カ所で小規模な電流値の立ち上がりが観察された。

一方、2h で処理した曲線は 1h の場合に比べ、電流値の上昇度合いは低く、1h 処理で見られた小規模な電流値の立ち上がりも認められず、安定したプロファイルが得られた。試験終了後のサンプル表面写真を図 8 に示す。図 8(a) の SUS316 では明瞭な食孔が観察されている（図中の矢印）。一方、22Cr-1Mo で 2h で処理した図 8(c) では食孔は認められなかった。図 8(b) は、食孔は観察されなかったが微細孔が認められた。この微細孔は分極曲線において見られた小規模な電流値の立ち上がり時に形成されたと思われるが、即座に不動態皮膜が形成されて修復され、食孔形成には至らなかったものと考えられる。電流値が図 8(E) に比べて高いのは、微細孔形

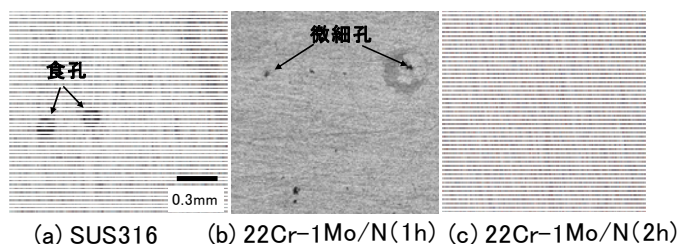


図 8 試験後のサンプル表面写真

成と皮膜修復が繰り返されたためと考えている。これは表層のオーステナイト相が薄いことが影響していると思われる。

### 3.3 塩化第二鉄腐食試験

図 9 に塩化第二鉄腐食試験結果一覧を示す。試験に用いた鋼種は孔食電位測定と同じである。縦軸は単位面積・時間あたりの腐食減量で測定を 3 回行い、平均をとった値である。

なお、窒素吸収処理材については 2h 処理したものをを用いた。既存ステンレス鋼の結果を見ると、SUS304 の腐食減量値は 430 の約半分であり、SUS316、22Cr-1Mo（未処理）の腐食減量は 304 の 6 割である。窒素吸収処理を行うことで腐食減量は SUS316、22Cr-1Mo の 1/3 以下にまで減少することがわかった。

塩化第二鉄腐食試験後のサンプル表面写真の例を図 10 に示す。図 10(a) の SUS304 や (b) の SUS316 では食孔が観察され、SUS304 では比較的大きな貫通孔が認めれる。一方、図 8(c) の 22Cr-1Mo/N(2h) ではわずかに微細孔は観察されるものの、食孔は認められなかった。

### 3.4 腐食メカニズムについて

2 つの耐孔食試験結果より、窒素吸収処理を施したステンレス鋼は既存のステンレス鋼に比べ、高い耐食性を示すことが確認できた。

孔食は水溶液中の塩素イオンが、不動態皮膜の不安定な部分に酸素、水酸基塩に置き換わり金属塩化物の錯塩を形成し、加水分解を経て

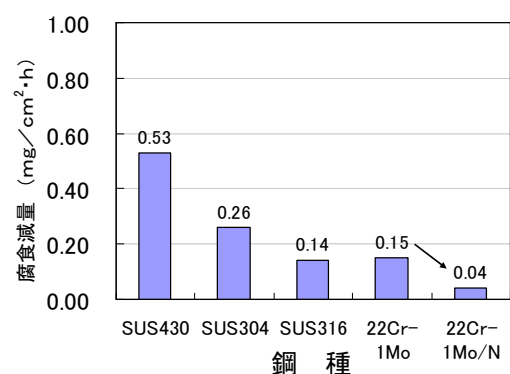


図 9 塩化第二鉄腐食試験結果



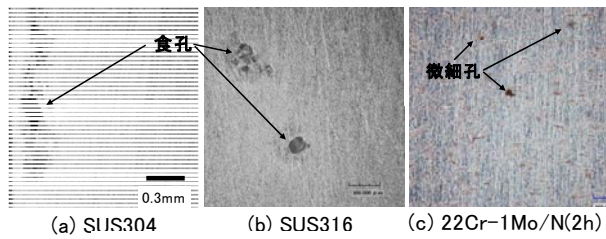


図 10 試験後のサンプル表面写真

最終的に生成した塩酸が局部的に皮膜を溶解し、その部分を起点に発生する<sup>4)</sup>。

ステンレス鋼への窒素吸収により耐食性が向上するメカニズムについては、例えば、アンモニアや硝酸塩生成によるインヒビター効果、不動態皮膜と金属との界面付近への窒素富化による不動態皮膜強固機構説がある<sup>5)</sup>。インヒビター効果は、孔食の初期段階で加水分解により生成した水素イオンと皮膜中の窒素とが反応してアンモニウム塩が形成され、孔食を抑制するというメカニズムや窒素の働きで液中に硝酸塩が形成されて孔食発生を抑えるというメカニズムで説明されている<sup>5)</sup>。

窒素吸収は耐すきま腐食性にも有効であり、腐食試験と X 線光電子分光法 (XPS) を用い、溶液中に溶け出した硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) が不動態皮膜の表面に吸着して母材溶解を抑制するとのメカニズムが報告されている<sup>6)</sup>。

本開発の窒素吸収処理ステンレス鋼の腐食メカニズムについては今後詳細に検討する必要があるが、分極曲線プロファイルと試験後のサンプル表面観察結果から判断すると、1h 処理ではインヒビター効果説、2h 処理は窒素富化による不動態膜強固機構説によるメカニズムが考えられる。また、図 6 の 2h 処理材の GD-OES による表面分析結果では表面に窒素の濃縮が見られたが、これが不動態皮膜を強固にし、耐食性の向上に寄与しているものと推察される。

今後はメカニズムの解明とともに温度や水溶液組成など試験条件を変えたり、実用化に即した試験法を考案し評価を行っていく。

#### 4. 結 言

- (1) 高 Cr 組成の SUS445J2 相当組成材 (22Cr-1Mo) について、真空加熱装置を用い、 $1200^\circ\text{C}$ ・大気圧窒素雰囲気下で窒素吸収処理を行った結果、周辺部からオーステナイト化され、4h で完全オーステナイト化することに成功した。
- (2) 窒素吸収処理ステンレス鋼の表面について GD-OES を用いて深さ分析を行ったところ、表面極近傍の Ti, Nb, 窒素濃度はそれぞれのバルクの濃度より高く、表面に薄い窒化物層が形成されている可能性がある。
- (3) 孔食電位測定、塩化第二鉄腐食試験の結果、窒素吸収処理ステンレス鋼は既存のステンレス鋼を大きく上回る耐食性を示した。

#### 参考文献

- 1) 三浦一真, “ニッケルフリーステンレス鋼の特性と開発動向”, プレス技術, Vol.45, No.15, 2007, p37-41.
- 2) 三浦一真, 丸山英樹, 天城裕子, 田村信, “高窒素 Ni フリーステンレス鋼の加工性向上及び製品実用化に関する研究”, 工業技術研究報告書, No.34, 2005, p63-67.
- 3) 三浦一真, 岡田英樹, 田辺寛, 大澤康暁, 安藤俊幸, 渡辺光雄 “ニッケルフリーステンレス鋼の実用化研究”, 工業技術研究報告書, No.36, 2007, p18-22.
- 4) 根本力夫, “ステンレス鋼の選び方・使い方とトラブル対策”, (株)情報技術センター主催講演資料, 2007, p8-21.
- 5) 遅沢浩一郎, 小林裕, “窒素鋼の耐食特性—特にステンレス鋼に関して—”, 窒素が拓く鋼の新しい展開とその利用 (190 回西山記念講座), 2006, p73-91.
- 6) 馬場晴雄, 片田康行, 木村秀夫, “オーステナイト系ステンレス鋼のすきま腐食と再不動態化に及ぼす窒素の影響”, 日本金属学会誌, Vol.71, No.7, 2007, p570-577.

# 電子線リソグラフィーを用いた 三次元微細形状創成技術の研究

宮口 孝司\* 佐藤 健\*\* 平石 誠\* 丸山 英樹\*\*\* 樋口 智\* 斎藤 博\* 坂井 朋之\*\*\*\*

Development of Creation Process for Three Dimensional Micro Structure Using EB Lithography

MIYAGUCHI Takashi\*, SATO Takeshi\*\*, HIRAISHI Makoto\*, MARUYAMA Hideki\*\*\*,  
HIGUCHI Satoru\*, SAITO Hiroshi\* and SAKAI Tomoyuki\*\*\*\*

## 抄 録

表面性状の評価を標準化するため、標準面実量器が必要とされている。本研究では、標準面実量器を実現するために、電子線描画装置を用いた三次元微細形状作製技術を開発した。具体的には、電子線の多重露光手法を適用し、フォトレジストに等高線加工による擬似三次元形状を形成し、ニッケル電鍍およびナノインプリントを行うことで、標準面実量器の作製プロセスを確立した。

## 1. 緒 言

経済のグローバル化、製品の高機能化に伴い、製品や機能部品表面性状の定量化の重要性はますます高まっている。今日、表面性状は主に、表面の代表的な直線上で測定した凹凸形状から算出した表面粗さで規定されているが、異方性や、機能性を十分に評価することができない。評価の際、最も問題とされている要因は、測定方式や演算法の違いによる機種間でのばらつきである。そこで標準となる三次元ランダム表面形状を定義する試みが行われている。

本研究では、粗さパラメータから算出された、ランダム性を有する標準面の形状データを現実の実量器に変換する手法の一つとして、電子線描画装置による擬似三次元形状作製法の開発、電鍍によるニッケル型の作製方法、およびナノインプリントによる複製方法を検討した。

## 2. 電子線描画装置による三次元形状形成技術

電子線描画装置による標準面実量器の製作では、電子線描画装置による三次元形状作製手法の確立のために、三角波形状およびランダム形状の2種類について検討を行った。三角波形状に関しては、三次元形状の基本的な形成方法の検討を行うための基礎的実験である。

標準面実量器を電子線描画装置によって製作する手段として、以下の方法が考えられる。

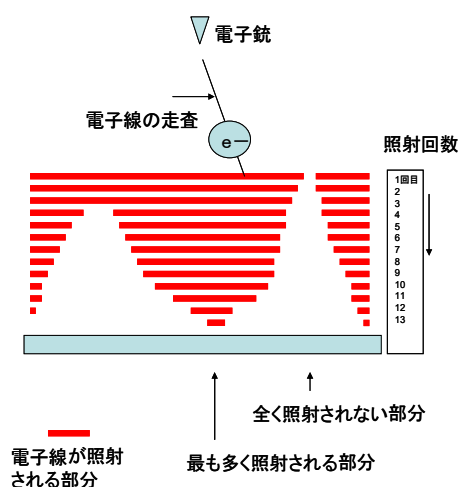


図1 電子線の多重露光法

\* 研究開発センター  
\*\* 中越技術支援センター  
\*\*\* 下越技術支援センター  
\*\*\*\* 企画管理室

- i. ポジ型 EB レジストの遷移領域を用いた多重露光法
- ii. 上記レジストにエッチングを組み合わせ、シリコンに形状を転写する方法
- iii. 成膜、パターンニングとエッチングを繰り返す積層法

i は図 1 のように電子線を三次元形状に対応させて EB レジストに逐次照射し、現像を行うことによって、EB レジストに三次元形状を形成することができる。

ii に関しては、レジストに転写した形状をリアクティブイオンエッチングによって異方性エッチングを行うが、シリコンに転写する際に、選択比に相当する倍率で高さ方向が拡大される。また、リアクティブイオンエッチングではガスの回り込みにより、形状が鈍る恐れがある。

iii に関しては、厚み方向の精度を高めることが可能だが、電子線描画装置のチャンバからの基板搬出・搬入の必要があり、既加工部分と追加加工部分のつなぎ精度を保つのが困難である。

上記理由から、本研究では i の方法を採用することとした。三次元形状を製作するために必要な電子線レジストの特性は、以下のとおりである。

- i. ポジ型であること
- ii. 膜厚 1 $\mu\text{m}$  以上
- iii. アナログ的な感度曲線
- iv. 高解像度

これらの特性を満足するレジストとして、東京応化の OEBR1000 を選択した。スピニングコートした膜厚は 1472nm であった。

レジスト除去率とドーズ量の関係を図 2 に示す。レジスト除去率の自然対数とドーズ量は比例することがわかる。この感度曲線をもちいて図 3 に示すような三角波を製作した。レジストパターン中心線付近を非接触三次元測定器（三鷹光機製 NH3SP）によって、

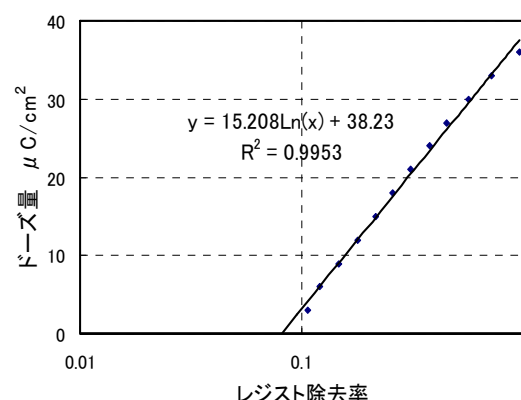


図 2 レジスト除去率とドーズ量の関係

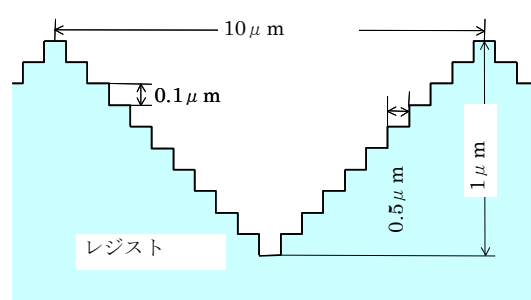


図 3 レジストパターンデータ

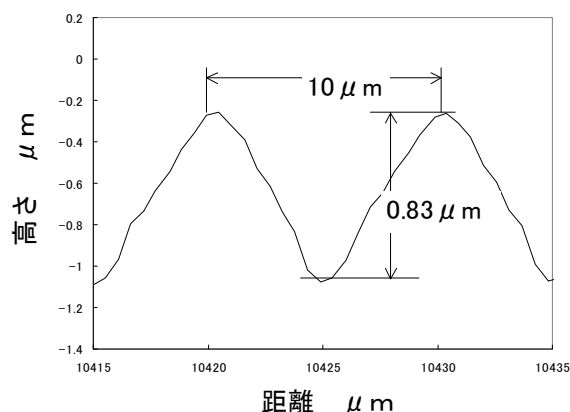
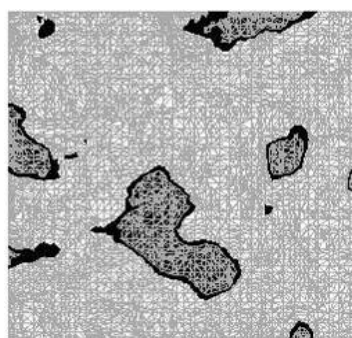
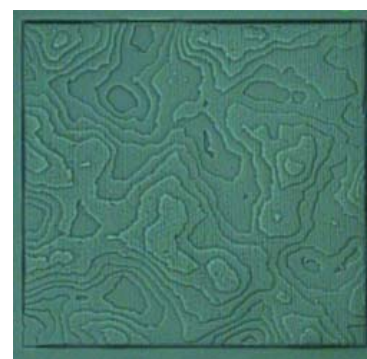


図 4 加工したレジスト断面形状の測定結果



(a) 等高線データの一部



(b) 加工面の光学顕微鏡写真

図 5 加工データと電子描画装置によって作成したランダム面



計測した結果を図 4 に示す。三角波のピッチは、ほぼ設計値どおりであったが、高さが 17%ほど小さい。この原因はレジスト感度曲線を求めるときの形状と三角波形状作成時の形状が異なることが原因である。補正式を用いることで補正可能である。

三次元ランダム形状を EB レジストに転写する方法について検討した。三次元ランダム形状は、CAD 間でデータを交換するための中間ファイルフォーマットである IGES に変換される。IGES は一般に面データであり、加工を行う部分を確定するためには、ソリッドモデル化する必要がある。IGES データを等高線データに変換したものを図 5(a) に示す。

このデータから、ランダム表面を電子線描画装置で製作したレジストパターンを図 5(b) に示す。ソリッドデータから抽出した等高線データと電子描画装置で作製したレジストパターンは良く一致している。

### 3. 電鍍作製条件の検討

#### 3.1 試料の固定法

電子描画装置を用いて作製した形状を電鍍によって転写する方法について検討した。ニッケル電鍍によって、電子線レジストで形成したパターンにニッケルを堆積し、剥離することによって、ニッケルに三次元パターンを転写させ、十分な強度を付与させる。

図 6 にニッケル電鍍によるレジストパターンの転写法を示す。方法は 3 つのプロセスからなる。①シリコン上に形成した、レジストにニッケル電気めっき用のシード層になる金属を薄くスパッタする。②スルファミン酸ニッケル溶液中で電気めっきを行う。③シリコンとレジストを剥離する。

上記方法にて、レジストパターンをニッケルに転写させるとともに、十分な強度と耐久性を付与させることができる。

電鍍を行う際問題になるのは、応力によるそり・剥がれおよび気泡の付着である。応力は、スルファミン酸の pH 管理および濃度管理を適切に行うことで安定する。

気泡に関しては、水溶液に投入時に持ち込むものと、水素の発生によって発生するものがある。気泡の持込は、基板をプラズマ等で処理し親水化させ、水溶液には界面活性剤を添加して泡の脱離を促すことによって防止することができる。また、基板を水溶液に浸漬する際、溶液を噴射し、付着した泡を除去することが持ち込み防止に効果的である。水素発生は、通常の電流使用域で加工を行う際にはほとんど問題にならない。

スルファミン酸水溶液は 75℃以上で加水分解し、アンモニアを発生する。また、水溶液の pH を 4 以下にすると、スルファミン酸が加水分解されやすくなる。アンモニアは、電鍍の性状を悪化させる要因であるので、加熱および pH 管理は慎重に行う必要がある。

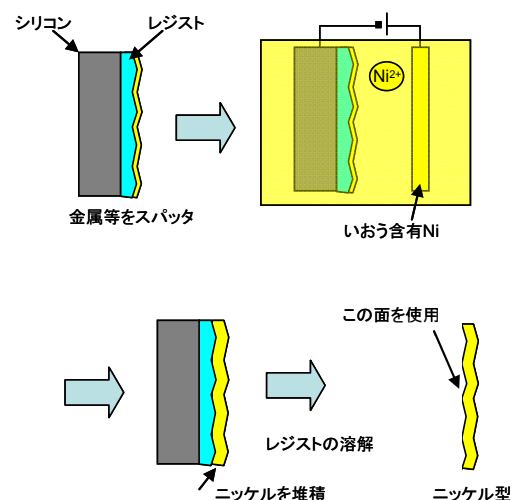


図 6 電鍍を用いたレジストパターンの転写

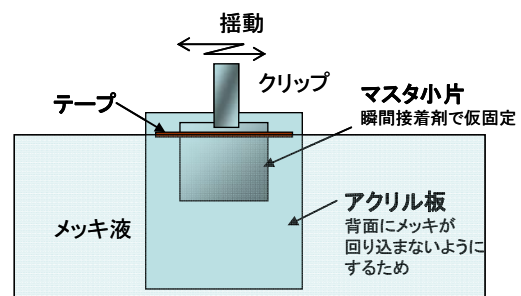


図 7 EB 露光行ったマスター小片の固定方法

図 7 に EB 露光を行ったマスタ小片の固定方法を示す。アクリル板にマスタ小片を貼り付けることによって、メッキが背面に回りこむのを防ぐ。メッキが回り込むと電鍍の剥離が困難になるためである。また、アクリルに直接金属膜を形成すると、小片表面とアクリル板間で不連続面が生じ、電気伝導がうまく行われない。電気伝導率が低いと金属膜がアクリル表面を移動し、断線することがあったため、試料に直接電極が接するようにした。

### 3.2 シード層作製条件

電鍍を行う際、レジスト面にスパッタによってシード層を形成する必要がある。シード層は、電鍍の下地になるだけではなくそれ自体で表面の形状を保つ役割を担っているため、均一に厚くつけることが重要である。シード層として、Cr と Ni に関して、亀裂等が生じないスパッタ条件を検討した。

使用した EB レジストは、OEBR1000LB である。塗布条件は 300rpm×3sec, 1000rpm×3min, ベークはホットプレートにて 90℃×1.5min である。同条件で 2 度塗布を行い膜厚 1479nm とした。

図 8 に Cr のスパッタ条件と亀裂の有無の関係を示す。20nm 程度の膜厚が限度で、それ以上の膜厚では亀裂が生じる。電力を 100W に下げても厚さを 85nm 以上に厚くすることができない。一方、表 1 に示す Ni は 565nm の膜厚 (Ar 25sccm, RF250W, 30min) でも亀裂が生じないことが分かった。Ni の引張り残留応力が低いためと考えられる。

上記結果から EB レジストのシード層には Ni のほうが適していることが分かった。上記構成で EB レジスト上に作成した三角波形状を電鍍によって転写した。電鍍条件を表 2 に示す<sup>1)</sup>。電流密度の後に記した括弧内の数字は通電時間である。攪拌は試料を揺動装置によって試料面に並行に水平揺動させることで行った。

作製した EB レジストパターンに Cr を約 10nm スパッタしたものとそれを基に電鍍に転写したものを非接触三次元測定器にて測定した。それぞれの形状を比較したのが図 9 である。スパッタによる金属膜の厚みを考慮すると、両者

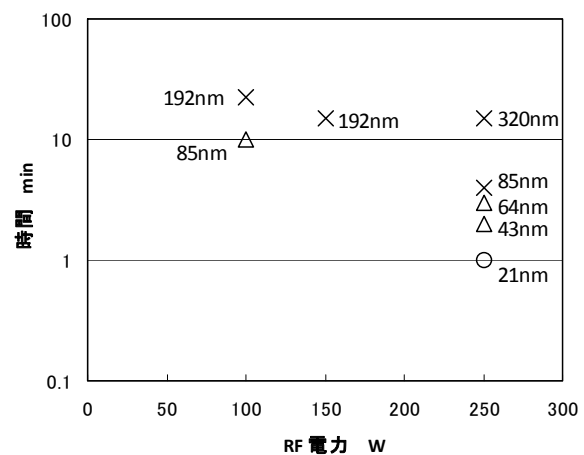


図 8 Cr スパッタ条件と亀裂の有無  
(○亀裂なし, △一部亀裂, ×全面亀裂)

表 1 Ni スパッタ条件と亀裂の有無  
(○亀裂なし, △一部亀裂, ×全面亀裂)

| 250W          |   |
|---------------|---|
| 3min (72nm)   | ○ |
| 10min (200nm) | ○ |
| 20min (383nm) | ○ |
| 30min (565nm) | ○ |

表 2 電鍍条件

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| スルファミン酸<br>ニッケル濃度      | 450g/l        |
| ホウ酸濃度                  | 30g/l         |
| 界面活性剤濃度                | 5ml/l         |
| 温度                     | 40℃           |
| 電流密度 A/dm <sup>2</sup> | 2 (1000 sec)  |
|                        | 4 (1000 sec)  |
|                        | 8 (12000 sec) |

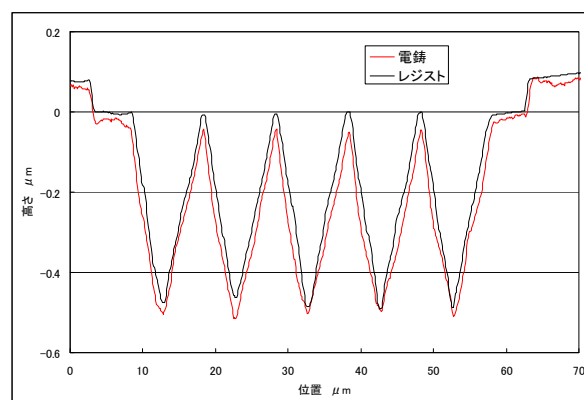


図 9 EB レジストパターンと転写形状の比較

はほぼ一致しており、電鍍による転写精度は非常に高いことが分かる。

#### 4. ナノインプリントによる三次元形状の複製

ニッケル電鍍では、電子線レジストの形状を1対1にしか転写することができない。実量器を量産するには、ほかの方法を併用する必要がある。本研究では、ナノインプリントによる転写技術を導入することとした。ナノインプリントは、UV硬化式と熱転写式があるが、UV硬化式では、材料の種類が限られるうえ、型に紫外線透過性が求められるため、ニッケル電鍍で作成した型を用いられない。一方熱転写式は、形状保持に不可欠な厚い材料に転写可能であり、転写可能な形状も数十 nm と十分な転写能力を有することから、熱転写式について検討することとした。使用したナノインプリント装置はSCIVAX 製 X200 であり、加圧はメカニカルプレス方式である。

ナノインプリント時の部材配置を図 10 に示す。型には前述の電鍍型およびシリコンウエハを用いた。転写を行う樹脂材料はCOC(Cyclic Olefin Copolymer)である。COC の下に敷いたシリコンウエハは、COC が装置に付着するのを防止するとともに、平坦性を維持するためのものである。グラファイトシートには型の歪みを吸収する役目がある。

この装置を用いて 60nm の L/S を COC に転写した。型は、シリコン上に形成した EB レジストをマスクとして RIE (リアクティブイオンエッチング) によってシリコンをドライエッチングすることによって作製した。形成したシリコン型を図 11 に示す。レジストの側壁に生じた粗さが転写されているが、おおむね 60nm の L/S が形成されている。型表面には単分子相当の厚さで離型処理を行った。

成形条件を表 3 に示す。一般に成形温度は樹脂のガラス転移温度より 20～30℃高温で行われるが、今回の実験では 150℃が最適であった。また、COC 全体が熔融することを防止するため、基板側の温度をガラス転移点以下に保った。インプリントが終了した後、冷却時にも圧力を一定に保ち、熔融された材料の表面張力によって形状が消失するのを防いだ。ガラス転移点より

30℃ほど下がった時点で離型を行い、取り出し温度まで冷却後、取り出した。

図 12 に転写物の SEM 写真を示す。全体的に欠陥はなく、ピッチは約 110nm となり、ほぼ型のピッチに等しい。

次に、擬似三次元形状である 3 角波のナノインプリントを行った。型は前述の EB 多重露光によって作製したものを基に電鍍によって作製した。離型処理を次の手順で行った。①クリーンエース S (洗浄剤) の 10 倍希釈水溶液に 2 時間浸漬したのち、超純水の流水でリンスを行う

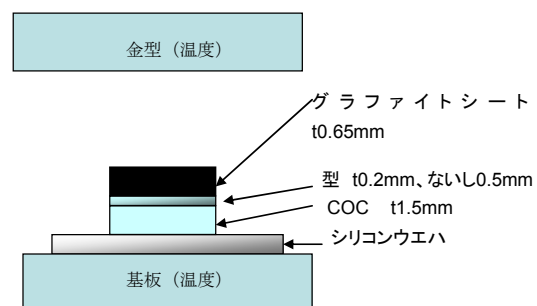


図 10 ナノインプリント時の部材配置

表 3 COC の成形条件

|          |       |                 |  |
|----------|-------|-----------------|--|
| 成形雰囲気 大気 |       |                 |  |
| 成形       | 温度    | 金型150℃, 基板 120℃ |  |
|          | 圧力    | 1.5MPa          |  |
|          | 時間    | 180sec          |  |
|          | 速度    | 10μm/sec        |  |
| 離型       | 冷却時圧力 | 成形時と同じ          |  |
|          | 温度    | 金型および基板 100℃    |  |
| 取出し      | 温度    | 金型および基板 70℃     |  |

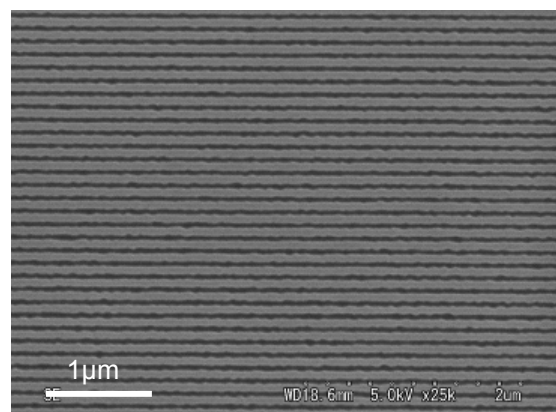


図 11 60nmL/S のシリコン型

ことで洗浄を行った。②単分子層離型剤 DURASURF HD-2101TH にディッピング後、エアブローを行い、1日放置した。

上記離型処理後、表 3 の成形条件にて実験を行った。図 13 にニッケル型の断面形状を示す。計測には非接触三次元測定器を用いた。

図 14 に転写 12 回めの転写物の断面形状を測定した結果を示す。図中に記入した数字は、各頂点と谷の高さである。頂点の平均値から谷の平均値を引くと、ニッケル型は  $0.4997\mu\text{m}$ 、転写物は  $0.4814\mu\text{m}$  であり、高精度に転写が行われた。

## 5. 結 言

- (1) 電子線描画装置による多重露光法によって任意の三次元微細形状を作製するプロセスを開発した。
- (2) ニッケル電鍍によるレジストパターンの転写技術を確認し、ピッチ  $10\mu\text{m}$  深さ  $0.47\mu\text{m}$  の三角波を転写することが可能になった。
- (3) メカニカルプレス方式によるナノインプリント技術を確認し、サブマイクロ形状の量産技術が可能であることを示した。

本研究は、(独)科学技術振興機構 JST イノベーションサテライト新潟の実用化のための育成研究課題「ナノメートル領域までの表面粗さ測定を向上させる標準面実量器の製作」において実施されたものである。

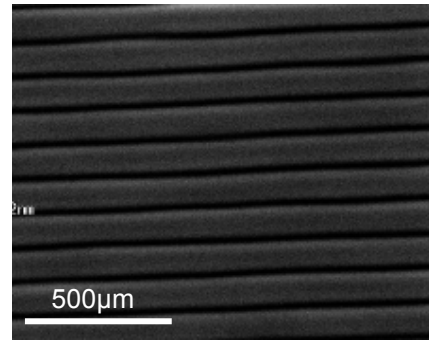


図 12 シリコン型から転写した COC 表面

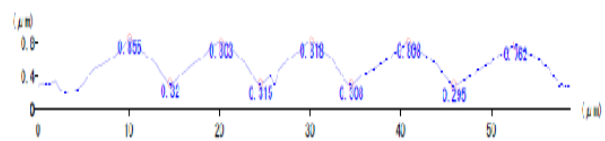


図 13 ニッケル型の断面形状

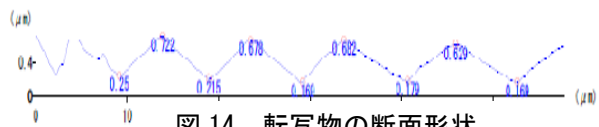


図 14 転写物の断面形状

## 参考文献

- 1) 早乙女康典, “金属材料のマイクロ・ナノ成形法”, 平成 18 年 1 月 20 日にいがたナノテク研究会 第 5 回 MEMS 技術分科会資料

# ウェットブラストを利用したリフトオフプロセスの開発

佐藤 健\* 丸山 英樹\*\* 平石 誠\*\*\* 斎藤 博\*\*\* 坂井 朋之\*\*\*\*

Development of Lift-off Process using Wet-brust Technology

SATO Takeshi\*, MARUYAMA Hideki\*\*, HIRAISHI Makoto\*\*\*,  
SAITO Hiroshi\*\*\*\* and SAKAI Tomoyuki\*\*\*\*

## 抄 録

パルス細線放電法により試作したアルミナのナノ粒子でスラリーを作製した。このスラリーを使用したウェットブラストをリフトオフプロセスに適用して、金属配線のパターンニングを試みた。従来のリフトオフプロセスと比較して、パターン形成が容易になるとともに、サブミクロンオーダーの微細パターンの形成も可能となった。さらに基板表面を保護する工程を付与することにより、ブラストにより生じるパターン表面の損傷を防止することができた。

## 1. 緒 言

ナノ粒子の作製方法の一つにパルス細線放電法<sup>1)</sup>がある。この方法では、金属細線にパルス電流を通電して蒸発させ、これが冷却する過程でナノ粒子を作製する。蒸発雰囲気制御することで、粒子に有機物を被覆したり、金属だけでなく酸化物などの化合物も可能で、さらにエネルギー変換効率が高いため、低コストでナノ粒子を作製できる。

本研究では、この方法で作製したアルミナ粒子を微細加工に応用することを検討した。アルミナ粒子を水に分散させたスラリーをウェットブラスト<sup>2)</sup>の媒体として使用し、リフトオフへの適用を試みた。

リフトオフとは、薄膜のパターンニング方法の一つである。図1に示すようにシリコンなどの基板にフォトリソでパターンニングしておき、その上からスパッタリングなどで金属などを成

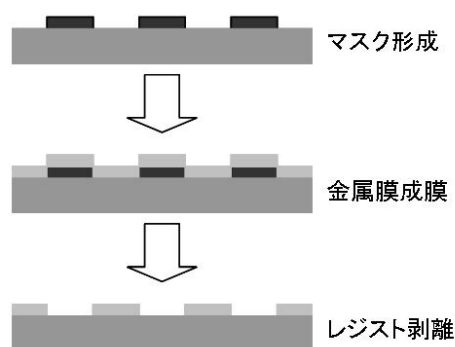


図1 リフトオフプロセス

膜した後、レジストを溶解することで所望のパターンを形成する方法である。

エッチングでは、被エッチング材に合わせてエッチング試薬やガスを選択する必要があるが、リフトオフは、材質を問わないので簡便であり、ガスや試薬の使用量も削減できる利点がある。ただし、レジストの溶解を容易にするために、レジスト厚を成膜材よりも極端に厚くする必要があり、数  $\mu\text{m}$  以下の微細なパターン形成は困難ことが多い。

このプロセスにウェットブラストを適用することでレジストの溶解を容易にし、サブミクロン以下の微細パターン形成を試みた。

\* 中越技術支援センター

\*\* 下越技術支援センター

\*\*\* 研究開発センター

\*\*\*\* 企画管理室

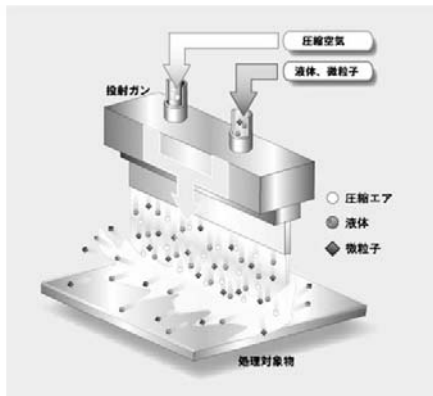


図2 ウェットブラストの概要<sup>2)</sup>

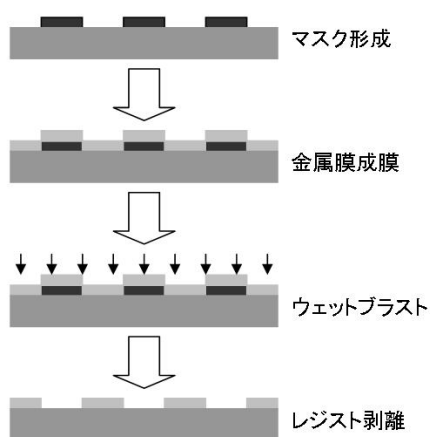


図3 ウェットブラスト適用プロセス

## 2. ウェットブラストの適用効果と粒径の影響

### 2.1 実験

リフトオフプロセスに対して、ウェットブラストを適用した場合の効果の有無、ウェットブラスト用スラリーに使用するアルミナ粒子の粒径の影響について評価した。

ウェットブラストの概要を図2に、これを適用した場合のリフトオフプロセスを図3に示す。

シリコン基板上にフォトリソグ（東京応化工業製 OFPR800-50cP）をスピン塗布し、ホットプレートで乾燥させた。露光・現像して、ラ

インアンドスペース（以下、L&Sと記す）5 $\mu$ mのレジストマスクを厚さ2 $\mu$ mで形成した。

その上からCr、Auの順でそれぞれ0.02 $\mu$ m、0.1 $\mu$ mの厚さでスパッタリングして、Au/Cr薄膜を成膜した。

試料の成膜面にウェットブラスト処理を行った。この処理は、固定したノズルからスラリーを噴射させ、その下を試料基板を一定速度で通過させる方法で行い、その通過回数で処理量を調整した。条件の詳細を表1に示す。

スラリーは、市販のアルミナ粒子（フジミインコーポレーテッド製 WA#10000、メディアン径0.5～0.7 $\mu$ m）を水に濃度6wt%で分散させたものと、パルス細線放電法で作製したアルミナ粒子（メディアン径40nm）を高圧湿式ジェットミル（スギノマシン製スターバーストシステム）で水に分散させた2種類を使用した。以下、便宜上それぞれをミクロンスラリー、ナノスラリーと呼ぶ。

ブラスト処理の後、アセトン中で2分間の超音波洗浄を行い、マスクを溶解させ、さらにイソプロピルアルコールで洗浄した。

ウェットブラスト処理をしない試料も同様に作製し、上の試料とパターンの形成状態を比較した。

### 2.2 結果と考察

図4(a)～(c)は、通常のリフトオフプロセスとウェットブラスト処理をしたプロセスで作製した試料を光学顕微鏡で観察したものである。

図4(a)に示すように、通常のリフトオフプロセスでは、マスク上のAu/Cr薄膜の大部分が剥離できず、L&Sパターンは形成できなかった。

図4(b), (c)は、それぞれミクロンスラリー、ナノスラリーを使用したウェットブラスト処理をしたプロセスで作製した試料である。

ブラスト処理回数をパラメータとして評価した結果、ミクロンスラリーでは2回、ナノスラリーでは8回の処理を行うことで、溶剤中での超音波洗浄でレジストマスクは溶解し、マスク上のAu/Cr薄膜は容易に剥離した。

図5は、レジストマスクを電子顕微鏡で観察した写真であるが、段差部分が順テーパ形状になっていることから、Au/Cr薄膜のステップカ

表1 ウェットブラスト条件

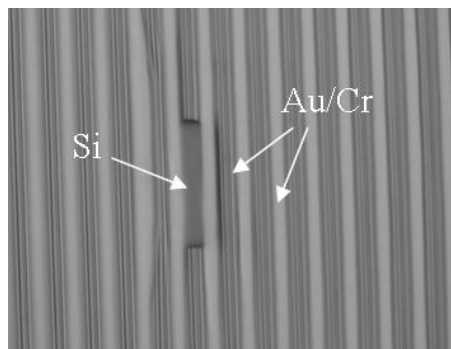
|               |      |
|---------------|------|
| エアー圧 (MPa)    | 0.2  |
| スラリー圧 (MPa)   | 0.18 |
| 処理速度 (mm/sec) | 10   |
| ノズル～試料距離 (mm) | 15   |



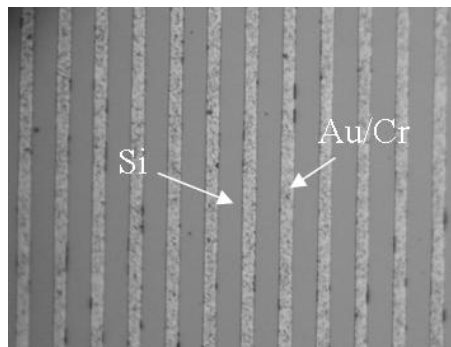
バレッジが良好と推測される。このような状態は、溶剤のレジストへの浸透や、金属膜の不要部分の剥離を阻害すると考えられる。

このため、通常のリフトオフではパターンが形成されなかったと考えられる。

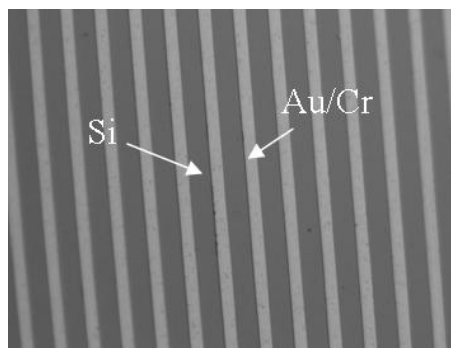
ブラスト処理をした試料は、このような順テーパ形状のマスクであっても、ミクロンスラリー、ナノスラリーともにパターン形成が良好に



(a) 通常のリフトオフ



(b) ミクロンスラリー



(c) ナノスラリー

図4 ウェットブラスト適用プロセス

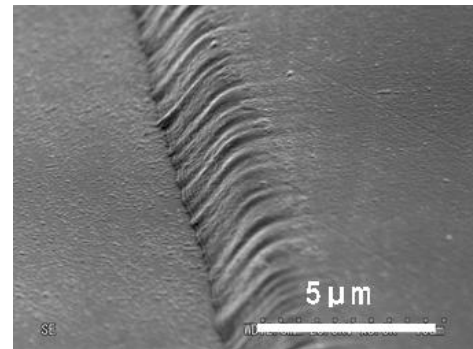


図5 レジストマスクの段差形状

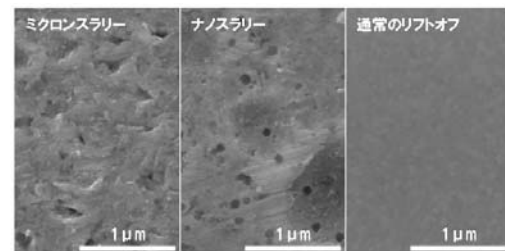


図6 Au/Cr 薄膜の表面状態

表2 表面粗さ

| 条件       | Ra (μm) | Rz (μm) |
|----------|---------|---------|
| ミクロンスラリー | 0.027   | 0.178   |
| ナノスラリー   | 0.009   | 0.096   |
| 通常のリフトオフ | 0.003   | 0.025   |

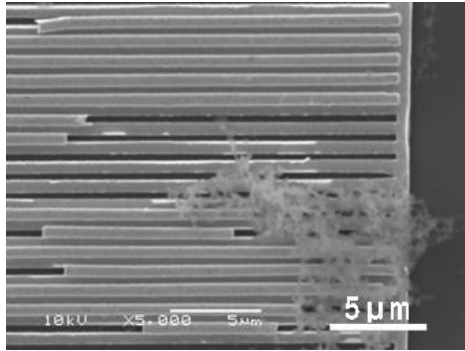
できていたことから、ウェットブラストをリフトオフに適用する効果は大きいと考えられる。

図6にそれぞれの試料の Au/Cr 薄膜の表面状態を SEM で観察した結果を、表2に表面粗さを非接触三次元測定機（三鷹光器製 NH-3SP）を用いて、レーザースポット径 1μm で測定した結果を示す。

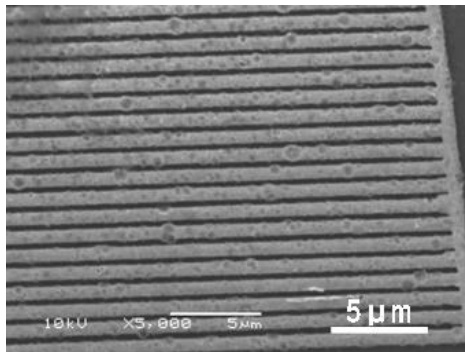
ブラスト処理をしたものは、スラリーに含まれるアルミナ粒子が試料表面全体に衝突するため、処理しないものに比べ表面が粗くなる。

ミクロンスラリーによるブラスト処理は、損傷の程度が大きく、観察される欠陥サイズからサブミクロンオーダーの微細なパターン形成には適さないと考えられる。

ナノスラリーによるブラスト処理は、パターン形成に要する処理回数が多くなるため、効率の面でミクロンスラリーには劣るが、表面の損



(a) 通常のリフトオフ



(b) ウェットブラスト適用

図7 L&S0.5μmパターンの形成状態

傷は大きく軽減されるため、微細なパターン形成には適すると考えられる。

### 3. サブミクロンパターンの形成

#### 3.1 実験

ナノスラリーを用いたウェットブラストをリフトオフに適用し、サブミクロンオーダーのパターン形成を試みた。

シリコン基板上に電子線描画レジスト（日本ゼオン製 ZEP7000-22）をスピンドットし、ホットプレートで乾燥させた。電子線による描画と現像を行い、L&Sで0.5μmのレジストマスクを厚さ0.46μmで形成した。その上からCr, Auの順でそれぞれ0.02μm, 0.1μmの厚さでスパッタリングして、Au/Cr薄膜を成膜した。

この試料に処理回数をパラメータとしてウェットブラストを実施した。

次に、ZEP7000-22の専用溶剤（日本ゼオン製 ZD-MAC）中で2分間の超音波洗浄を行った後、イソプロピルアルコールで洗浄した。

また、ブラスト処理をしない試料も同様に作製し、上と比較した。

### 3.2 結果と考察

パターン形成に要したブラスト処理回数は、16回となり、前項のL&S5μmのパターンに比べ増加した。

図7(a), (b)にブラスト処理の有無による試料の状態を示したが、前項と同様に処理の有無でパターンニング性に差が生じており、ここでもブラスト処理が有効であることが確認された。

処理回数については、L&S5μmのパターンに比べ倍増したが、微細なパターンを形成するためにレジストマスクを薄くしたため、Au/Cr薄膜のカバレッジが向上したことが原因と考えられる。

また、ナノスラリーを用いたウェットブラストでは、試料表面の損傷は比較的少なかったが、パターンサイズが微細になったことで、相対的に目立つようになり、対策が必要である。

## 4. 表面損傷改善のための新規プロセス

### 4.1 実験

前項のサブミクロンパターンを形成する際に

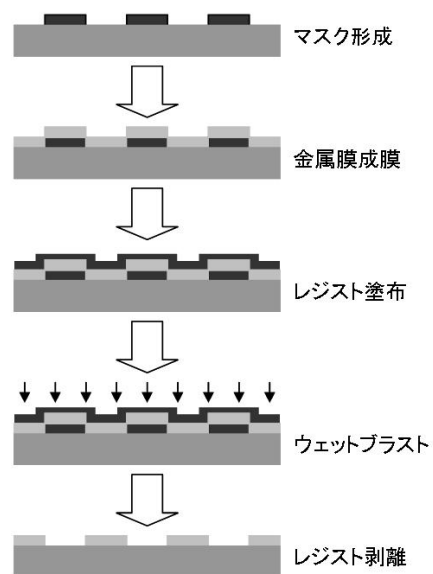
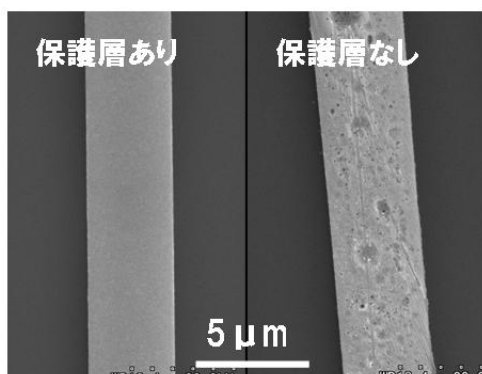
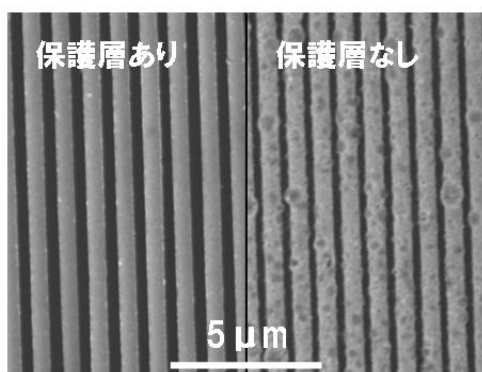


図8 新規のリフトオフプロセス



(a) 5  $\mu$ m L&S パターン



(b) 0.5  $\mu$ m L&S パターン

図9 保護層の有無による表面状態

発生した表面損傷を改善するため、新規のプロセスを試みた。

図8に示すように、ウェットブラストを適用するリフトオフプロセスにおいて、金属薄膜を成膜した後、さらにレジストを塗布・乾燥して表面保護層を形成しブラスト処理を行う。

2, 3項と同様にシリコン基板にL&S 5 $\mu$ mと0.5 $\mu$ mのレジストマスクを作製し、その上からCr, Auの順でそれぞれ0.02 $\mu$ m, 0.1 $\mu$ mの厚さでスパッタリングして、Au/Cr 薄膜を成膜した。

その上にマスク形成と同じレジストを同条件でスピン塗布した後、ホットプレート上で乾燥させ、保護層を形成し、ブラスト処理をした。

ブラスト処理回数は、2, 3項と同じく、L&S 5 $\mu$ mの試料には8回、L&S 0.5 $\mu$ mの試料には16回とした。

処理後、溶剤中で2分間の超音波洗浄をし、さらにイソプロピルアルコールで洗浄した。

## 4.2 結果と考察

図9(a), (b)は、それぞれL&S 5 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ mの試料について、SEMにより表面状態を観察したものである。

保護層を形成した試料は、5 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ mのL&Sパターンともに表面損傷が全くない状態で形成できた。

また、パターン形成に必要なブラスト処理の回数は、保護層の有無で差がなかったことから、このプロセスでは、ブラスト処理の効果を減じることなく、表面損傷を防止できることがわかった。

本実験では、剥離時に一括に除去できることから、保護層をレジストマスクと同じ材料で形成したが、溶剤で除去できるものであれば、他の安価な材料も選択できる。

## 5. 結 言

- (1) アルミナスラリーを使用したウェットブラストをリフトオフプロセスに適用することで、パターン形成が容易になった。
- (2) ナノスラリーを使用したウェットブラストにより、サブミクロンオーダーの微細なパターン形成が可能になった。
- (3) ブラスト処理に先立ち、基板表面に保護層を形成することで、パターン表面の損傷を防止できることがわかった。

なお、本研究は、(独)科学技術振興機構の平成17～20年度育成研究課題「有機物被覆複合ナノ粒子量産用パルス細線放電装置開発」の一環で実施したものである。

## 参考文献

- 1) 長岡技術科学大学極限エネルギー密度工学研究センターホームページ, パルス細線放電法, (2009年3月23日閲覧)  
<http://etigo.nagaokaut.ac.jp/reacearch/PWD.htm>
- 2) マコー株式会社ホームページ, 技術情報, (2009年3月31日閲覧)  
[http://www.macoho.co.jp/r\\_technology/](http://www.macoho.co.jp/r_technology/)

# 画像処理を利用した鋳鉄品の外観検査の自動化についての研究

大野 宏\* 木嶋 祐太\*\* 白川 正登\* 本田 崇\* 伊関 陽一郎\*\*\*  
内山 照嘉\*\*\*\* 中澤 義人\*\*\*\* 山森 正人\*\*\*\* 田口 圭一\*\*\*\*

Study on Automatic Surface Inspection of Cast Metals Using Image Processing

OHNO Hiroshi\*, KIJIMA Yuuta\*\*, SHIRAKAWA Masato\*, HONDA Takashi\*, ISEKI Youichirou\*\*\*,  
UCHIYAMA Teruyoshi\*\*\*\*, NAKAZAWA Yoshito\*\*\*\*, YAMAMORI Masato\*\*\*\* and TAGUCHI Keiichi\*\*\*\*

## 抄 録

鋳鉄品の外観検査を自動化するために、照明方法、画像処理方法、ロボットのハンドリングおよび鋳鉄品の供給装置について研究を行った。その結果、鋳鉄品の外観検査に適した照明方法と画像処理方法を開発した。また、供給装置と反転機構を開発し、外観に欠陥があるか判別する検査装置を試作した。

## 1. 緒 言

鋳鉄品は複雑な形状部品を大量に製造できるため、安価な量産部品として製造されている。しかし、鋳型に不具合が生じたり、鋳造条件が不適当だったりすると鋳鉄品に欠陥が発生する。そのため、目視による外観検査が行われているが、検査員による個人差や疲れによるばらつきが生じるため自動化が望まれている。

このような背景から、画像処理を利用した鋳鉄品の外観検査に自動化について研究し、検査装置を試作したので報告する。

②複雑形状であり、曲面、垂直面および溝などがある。

③製品番号として凹状または凸状の刻印を付けるが、欠陥との区別が難しい。



(a) 検査対象 (b) 欠陥例

図1 検査対象と欠陥例

## 2. 検査対象

検査対象は、砂型鋳造による鋳鉄品とし、生産量が多く 1kg 以下と比較的小型の物とする。鋳鉄品には、画像処理による自動検査を難しくする次の特徴がある。

①鋳肌表面はざらざらしていて、欠陥部と正常部の区別が難しい。

- \* 研究開発センター
- \*\* 下越技術支援センター
- \*\*\* 県央技術支援センター
- \*\*\*\* (株)三条特殊鋳工所

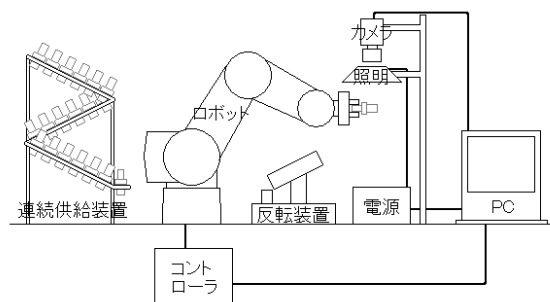


図2 システム構成

上記鋳鉄品の特徴の影響を受けにくい検出方法を検討した。

今回は、産業用機械の部品であるピンクランクを対象とし、外観と欠陥例を図1に示す。このような表面上の凹状と凸状の欠陥を画像処理で検出する。

### 3. 外観検査装置

試作した外観検査装置のシステム構成を図2に示す。カメラで対象となる鋳鉄品を撮像し、画像処理用パーソナルコンピュータで画像を解析し欠陥の有無を判別する。照明にはLED照明を利用し、画像を撮像する時のみ点灯するようパーソナルコンピュータで制御する。検査対象となる鋳鉄品を連続供給装置にセットし、多関節型ロボットが1個ずつ保持し、カメラの下に移動させ向きを変えて全面を検査する。解析する画像サイズは640×480画素である。また、本研究で検出する欠陥の大きさは縦横とも1mm以上、凹状の欠陥の深さと凸状の欠陥の高さは1mm以上とする。



図3 連続供給機構

### 4. 鋳鉄品の連続供給機構と反転機構

鋳鉄品の外観検査を自動化するためには、これらを連続的に供給する仕組みが必要となる。小型で軽量な対象であれば、モータの振動を利用して整列するパーツフィーダを使えるが、鋳鉄品のような中型・大型のパーツは振動で整列させることが困難である。そのため、鋳鉄品を連続的に検査装置に供給する機構を製作した。

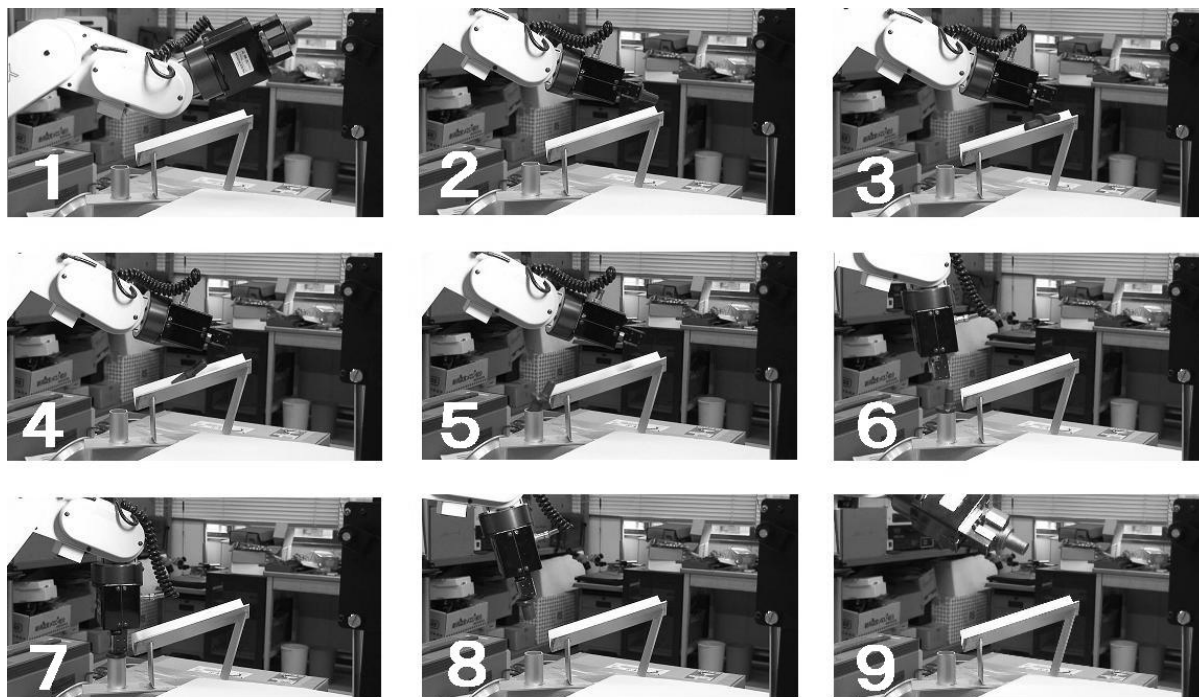


図4 反転機構

また、全面を検査するため、途中で鋳鉄品を反転させロボットで持ち替える機構を製作した。

#### 4.1 連続供給機構

連続供給機構の外観を図3に示す。螺旋状の滑り台のような構造をし、1番下の鋳鉄品をロボットが掴むと、他の鋳鉄品の自重で全体が1個ずつ下に滑り降りる。検査の前に、この連続供給機構に鋳鉄品を多数セットしておけば、供給を含めて検査を自動的に行うことができる。

#### 4.2 反転機構

全面を検査するために、鋳鉄品の片側をロボットハンドで保持するが、この保持した側に欠陥がある可能性もあるため、こちら側も検査する必要がある。そのため、滑り台のような構造の反転機構を製作した。図4に示すとおり、ロボットは最初にクランクの太い方を保持して細い方を検査し、その後、鋳鉄品を反転機構の右上で離すと鋳鉄品は左下に滑って円柱に細い方を上にして収まる。ロボットは、この細い方を保持して反対側の太い方を検査する。

### 5. 前処理

鋳肌の表面はざらざらしており、欠陥部と正常部の区別が難しいため、これらを区別しやすくする前処理方法を検討した。

#### 5.1 評価方法

最初に前処理の評価方法について述べる。カメラのある走査線の明るさの変動を図5に示す。欠陥部分の波形を検出すべき信号  $S$  とし、ノイズ  $N$  は正常部分の信号の標準偏差の3倍 ( $3\sigma$ ) とし、 $S/N$  を評価値とした<sup>1)</sup>。この値が大きいほど、鋳肌表面のざらざらの影響が小さく欠陥部分を検出しやすくなる。

#### 5.2 前処理フィルタ

先の図5に示すとおり、鋳肌の正常部分の信号は周期が細かく高周波の成分であることが

わかる。そのため、この高周波成分を除去するため平滑系のフィルタ（平均値フィルタと中間値フィルタ）の窓の大きさを変化させた時の  $S/N$  を計算した。平均値フィルタはある画素とその周辺の画素の平均値に、中間値フィルタはある画素とその周辺の画素の中間値に変換する。計算結果を図6に示す。窓サイズが  $4 \times 4$  画素の中間値フィルタで  $S/N$  が最大となった。

中間値フィルタは、中間値の計算に並べ替えを行うた処理時間がかかるが、SIMD (Single Instruction Stream Multiple Data Stream) を効果的に利用すれば、計算時間を約  $1/10$  に短縮できる。

### 6. 欠陥検出

LED 照明を鋳鉄品の表面に照射してカメラに取り込むと、欠陥部分には光が当たらず黒くな

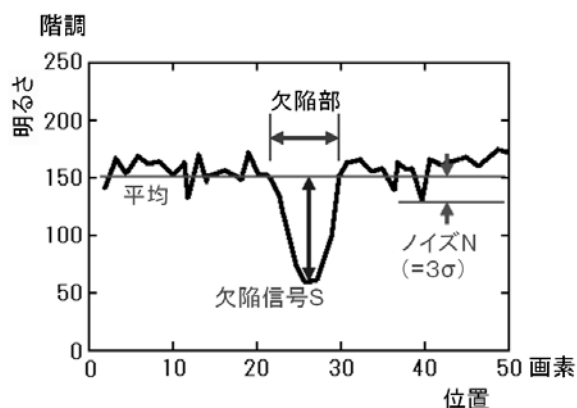


図5 システム構成

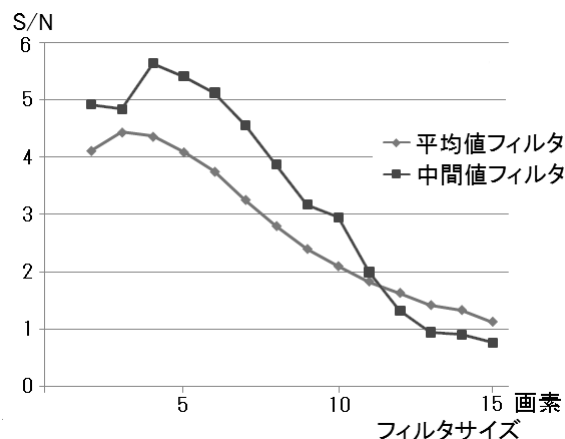


図6 前処理フィルタの効果



る。これを画像処理で検出する。LED 照明の取り付け角度を約 60 度とし、撮像した原画像に 4×4 画素の中間値フィルタ処理を加え、2 値化して欠陥を検出した。2 値化には、照明の明るさの変動を考慮した動的 2 値化を適用した<sup>2)</sup>。また、欠陥を検出するためには十分強い光を照射する必要があるが、その領域が限られるため、画像処理の領域を設定した。

### 6.1 動的 2 値化

照明の明るさは時間とともに変動するため、2 値化のしきい値を決まった値にする固定 2 値化では、図 7 に示すとおり誤った欠陥検出をする可能性がある。そのため、平滑画像を生成し、原画像と平滑画像の差分を 2 値化した。その様子を図 8 に示す。この方法は、照明の明るさ変動の影響を除去でき、安定した欠陥検出が可能となる。平滑化は原画像に 15×15 画素の平均化処理を行った。動的 2 値化は、場所によって明るさが異なる画像でも、平滑画像を利用することで傷や欠陥のみを検出することができる。

### 6.2 領域設定

検査対象となる鋳鉄品は曲面のため、側面を検査する場合は明るさが場所によって極端に異なる。そのため、検査領域を設定する必要がある。また、上面を検査する場合は、突起により

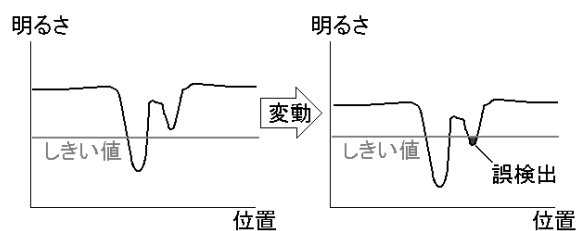


図 7 固定 2 値化

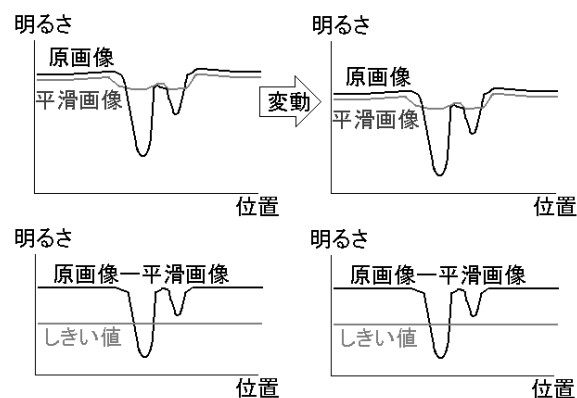


図 8 動的 2 値化

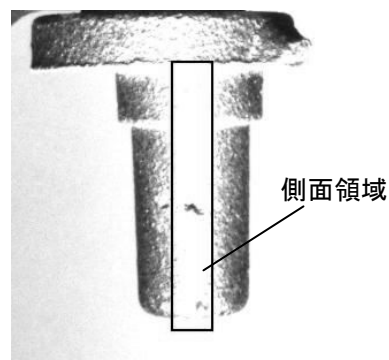
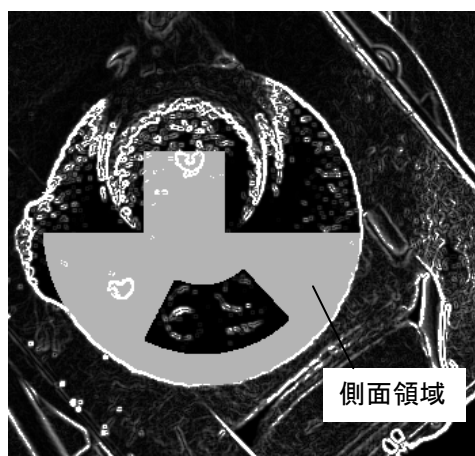
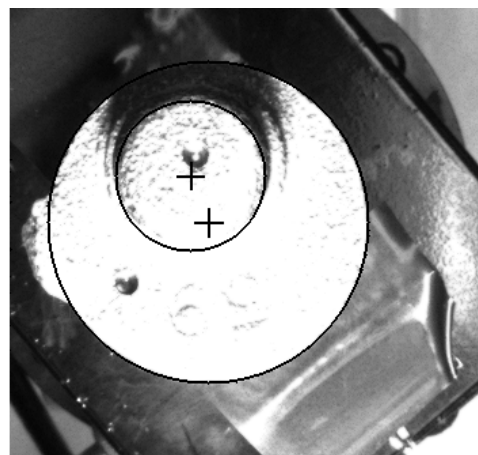


図 9 側面検査



(a) 検査領域



(b) 2つの円の検出

図 10 上面検査

陰が生じるため、検査ができない領域が発生する。同様に上面検査でも領域を設定した。側面と上面どちらも検査領域が限られるため、検査対象をロボットで回転させて画像を取り込み、これを繰り返すことで全面を検査した。

側面を検査する場合の検査領域を図 9 に示す。また、上面を検査する場合は図 10 に示すとおり、陰の部分や照明の弱い部分を検査領域からはずし、図 9 (a) の灰色で示す部分を検査領域とした。さらに、凹状の文字は欠陥との区別が難しいため、検査領域からはずした。検査領域の設定は、画像のエッジを検出し、図 9 (b) に示すとおり、ハフ変換で検査対象の外側の円と突起部分の内側の円を検出し、2つの円の位置関係から文字の位置を算出した。ハフ変換では円の直径を指定して、計算時間を短縮した。

## 7. 実験と結果

欠陥のある鋳鉄品を画像処理し、図 11 に側面検査の結果を、図 12 に上面検査の結果を示す。どちらも、左側は原画像、右側は検出結果である。側面と上面で凹状と凸状の欠陥を検出できることを確認した。ロボットハンドが鋳鉄品を傾いた状態で保持すると、設定した検査領域から鋳鉄品がはずれてしまうため、鋳鉄品の曲面に合わせたアタッチメントを製作し、ロボットハンドに取り付けて傾かないようにした。

現在手元にある不良品のサンプル数は 10 個と少ないため、次年度、本試作機を工場に持ち込み多くの鋳鉄品を検査し評価を行う予定である。



図 11 側面検査



図 12 上面検査

## 8. 結 言

- (1) 平面型の LED 照明を使い強い光を照射することで、凹状と凸状の欠陥がはっきりと表れた。
- (2) 平滑化フィルタを用いて鋳鉄品の欠陥画像の SN 比を向上させることができた。
- (3) 動的 2 値化処理による欠陥検出で、鋳鉄品の良否の判別を行うことができた。

## 参考文献

- 1) 染次孝博ほか, “鋳鉄部品表面の凹状欠陥自動検出システムの開発”, 精密工学会誌, Vol.63, No.10, 1997, p1412-1416.
- 2) 石井明ほか, “画像処理応用システム”, 東京電機大学出版局, 2000, p156-160.

# 匠の技を継承し発展させる技能伝承支援システムの開発

五十嵐 晃\* 大野 宏\* 中部 昇\*\* 今泉 祥子\*\*\*

Development of Technical Skill Succession Support System

IKARASHI Akira\*, OHNO Hiroshi\*, NAKABE Noboru\*\* and IMAIZUMI Shoko\*\*\*

## 抄 録

新潟県の中でも、とくに県央地区の金属製造業では、研磨や鍛造、溶接等、自動化や機械化が難しく、熟練技能者の技に大きく依存した製造工程であり、それらの技の伝承が大きな課題となっている。そこで、当所において平成 19 年度に、IT、センサ、計測技術を利用することにより、金属製品製造工程の中でも研磨工程における熟練技能者の技を初心者へ円滑に継承するための、技能伝承支援システムを考案し、その試作を行った。そこで得られた技術をもとに、本研究では、研磨工程の現場において、その場で作業状況が確認可能な技能伝承支援システムを考案し、その基礎技術を確立したので報告する。また、加工と同様に匠の技と言われる検査工程への本開発システムの適用可能性についても述べる。

## 1. 結 言

様々な製造工程で重要な位置を占めている熟練作業者に蓄積されていたノウハウの継承が企業の大きな課題となっている。そこで、平成 19 年度の研究<sup>1)</sup>では、初期段階として、熟練技能者と初心者の作業についての計測可能性を確認する目的で、両者の作業の計測および、作業を経た製品の評価を行い、両者の結果に明確な差異のあることを確認した。しかし、それらは計測後、オフラインでデータを解析を行った後によりよくわかったものであったため、作業現場でリアルタイムに評価結果がわかるシステムが求められていた。

そこで本研究では、作業現場において、技能を短期間かつ高度に継承可能とすることを目的とした、新しい技能伝承支援システムの開発を行った。当該支援システムは、(1)作業計測システムと、(2)画像評価システムの 2 つから構

成されている。本研究では、それらのシステムを作業現場において製造作業中に使用することを想定し、(1)作業計測システムでは、リアルタイムに計測結果を表示できる仕様とした。一方、(2)画像評価システムでは、熟練技能者の加工物（以下、ワークと表記）と初心者のワークの光沢のわずかな違いを強調する仕様とした。これらの 2 つのシステムをまとめて、研磨作業の技能伝承支援システムとし、その基礎技術を確立した。

さらに、上述の成果を踏まえ、製造工程のみならず、検査工程における熟練技能者の技能継承の、県内企業における現状とニーズに関して調査を行った。そしてその調査結果をもとに、本研究成果である研磨作業の技能伝承支援システムの基礎技術を検査工程に適用することの有効性について検討を行った。

## 2. 作業計測システムの開発

従来、技能の伝承は熟練技能者がその作業、すなわち工具や工作物の動かし方を手本として

---

\* 研究開発センター  
\*\* 県央技術支援センター  
\*\*\* 下越技術支援センター

見せる、あるいはそのノウハウを口頭で伝えるといった方法が主に行われてきた。例えば、図1に示すバフ研磨においては、工作物全体を均一に研磨するためにワークの動かし方やバフに押し付ける際の力加減を微妙に調整して作業を行っているが、一般にこれらの情報を作業の初心者に伝えることは難しく、特にバフへ押し付ける力加減については、見た目ではわからないため、口頭での伝承に限定される。

ワークの動かし方や力加減は、先の報告<sup>1)</sup>において熟練技能者と初心者間で差があることが示されており、作業中においてこれらの情報をモニター、提示することは、熟練技能者の技能の教示、さらには初心者が作業する際のフィードバックのためのデータとして利用するのに有効であると考えられる。そこで、ワークの動かし方や力加減をリアルタイムに計測し、PCの画面上に表示するシステムを開発した。

作業計測システムの概要を図2に示す。システムはワークの動きを計測する装置とワークに作用する荷重の計測装置、およびこれらのデータを入力、表示するPCから構成される。ワークの動き・姿勢計測にはモーションキャプチャー（NaturalPoint社製 OptiTrackFLEX:V100）を用いた。自作のワーク台にビデオマーカーを取り付け、作業時におけるマーカーの三次元座標の変化を計測した。あらかじめマーカーとワークの位置関係を求めておくことによって、作業中におけるワークの位置、姿勢をリアルタイム

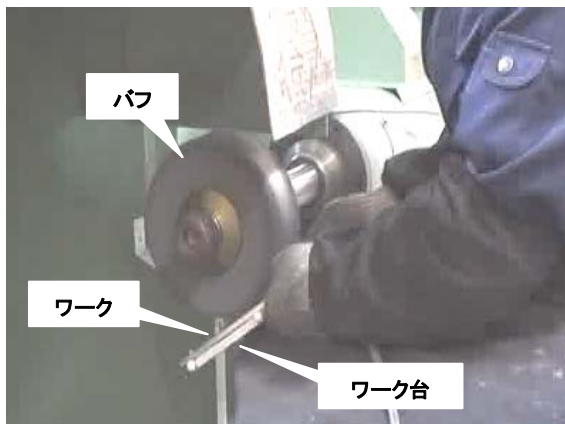


図1 バフ研磨の様子

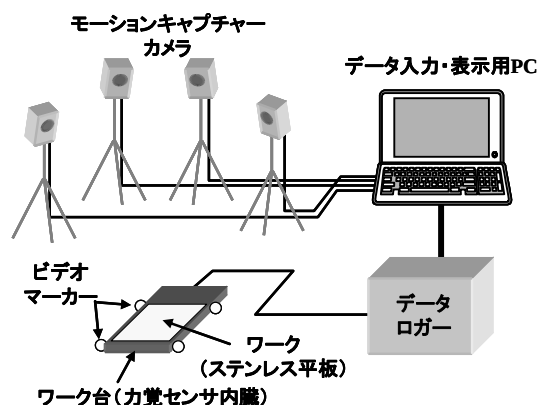


図2 作業計測システムの概要

に算出し、PC画面上にグラフィック表示できるようにした。

ワークに作用する荷重は、図3に示すようにワーク台中に配置した3個の3軸小型力覚センサ（テック技販製 USL06-5H-100N）によって計測した。センサの出力値はデータロガー（横河電機製 WE-7000）を介してリアルタイムにPCに入力し、ワークへの3軸方向の作用荷重、およびその荷重中心を算出した。これらのデー

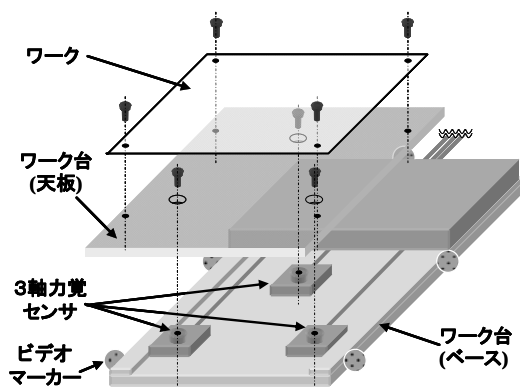


図3 3軸小型力学センサと設置状況

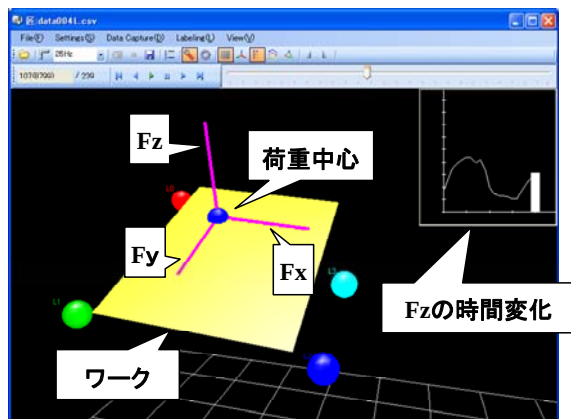


図4 作業計測中の画面の様子

タは前述の PC 画面上に示したワークのグラフィックに重ねて表示できるようにした。

作業計測中における PC 画面の一例を図 4 に示す。本計測システムにより、研磨作業におけるワークの動かし方や力加減をリアルタイムに表示できるようになった。

### 3. 画像評価システム

研磨されたワークについて、表面の輝度とそのばらつきを画像評価システムで計測し、熟練技能者と初心者の違いについて調べた。

#### 3.1 画像評価システムの概要

試作した画像評価システムの概要を図 5 に示す。基本的には、研磨されたワークの表面の輝度を CCD カメラで測定する装置である。ワークの表面は鏡のように反射するため、本装置では、ハーフミラーを利用し、周囲の状況の映り込みを防いで、横側に設置してある LED 照明の光をカメラの同軸方向から照射することが可能である。また、XY テーブルによりワークを移動させながら複数回に分けて画像を取り込むことにより、面積の大きなワークに対応することが可能である。ここで、照明の強さやカメラのゲイン等により、カメラで得られる輝度は変化してしまうため、本装置は、複数のワークの表面の比較を行う場合は、それらを相対的に比較できるシステムとなっている。

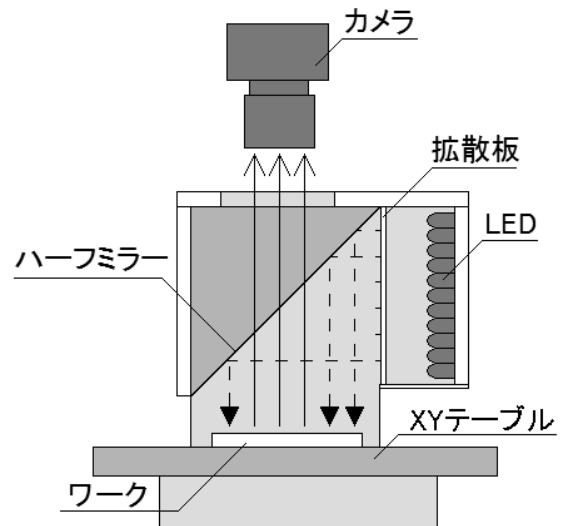
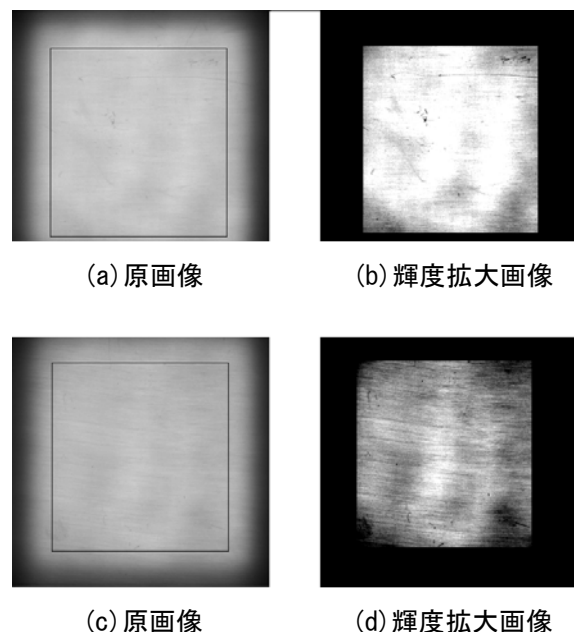


図5 画像評価システム

#### 3.2 測定結果

熟練技能者と初心者が研磨したステンレス製平板（100×200mm、厚さ 2mm）の輝度を、画像評価システムで測定した。その結果を図 6 に示す。原画像とわかりやすくするために輝度を 6 倍に拡大したものを並べた。また、表 1 は熟練技能者と初心者の明るさの平均値とその分散を示す。これより、熟練技能者と初心者を比較すると、熟練技能者の方が輝度が大きく、かつ、ばらつきが小さいことがわかった。



(a) 原画像

(b) 輝度拡大画像

(c) 原画像

(d) 輝度拡大画像

図6 測定結果 ((a) (b) : 熟練技能者, (c) (d) : 初心者)



表 1 測定結果

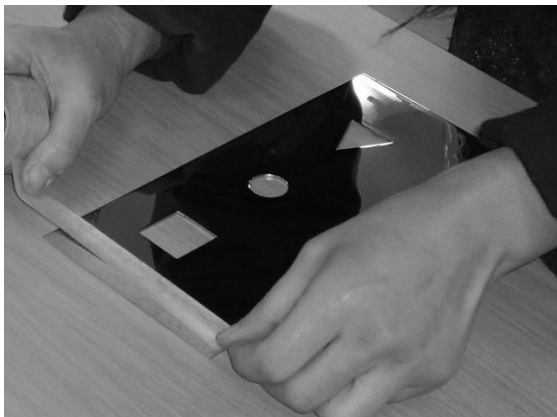
|            | 熟練技能者  | 初心者    |
|------------|--------|--------|
| 輝度の<br>平均値 | 195.64 | 181.04 |
| 分 散        | 6.92   | 8.14   |

### 3.3 競技会での評価

金属研磨仕上げ競技会で研磨された 3 枚のサンプルを本システムで測定した。この競技会は、平成 20 年 11 月 8 日に燕市の「磨き屋一番館」で開催されたもので、一番館の研修生と外部から合計 19 名の参加があった。競技会の様子を図 7 に示す。課題は四角形、円および正三角形の穴の開いた SUS304 の平板（120×240mm）を制限時間 60 分以内に鏡面仕上げし、一部につや消しを施すものである。ワークが大きいため XY テーブル上にサンプルを



(a) 研磨工程



(b) 仕上げ工程

図 7 競技会の様子

表 2 測定結果

|            | サンプル A | サンプル B | サンプル C |
|------------|--------|--------|--------|
| 輝度の<br>平均値 | 227.75 | 231.14 | 214.44 |
| 分散         | 8.91   | 8.22   | 4.09   |

のせ、18 回に分けて測定を行い、平均と分散を計算した。その結果を表 2 に示す。サンプル B, A, C の順に輝度が大きくなり、また C は輝度は大きくないものの、ばらつきが小さくなった。なおこの結果は、実際の審判員の目視による評価と同様の結果となった。

### 4. 技能伝承支援システムの検査工程への適用

これまで述べてきた研磨作業の製造工程にかかる技能伝承支援システムの基礎技術を、検査工程に適用させることの有用性について、県内企業を調査した。調査対象企業は、多岐に渡った。具体的には、表面処理、電機、スポーツ用品、米菓の各メーカーのほか、人工歯や歯茎、矯正装置といった歯科業界、および、大学である。

調査の結果、業種を問わず、検査工程の数値化への要求が大きいことがわかった。例えば、現在熟練技能者が行っている目視検査の結果、言い換えれば、OK 品か NG 品かの判断基準が、初心者にはわかりづらいため、その基準の伝承が課題となっている企業が多かった。そのため、検査工程において、熟練技能者の目視検査を機器測定による数値結果と比較し、OK 品と NG 品の境界が初心者にも理解できるようなシステムを希望する意見が多数あった。初心者には OK 品と NG 品を目視で比較しても、その違いがわからないということが現状である。装置測定により OK 品と NG 品の数値結果に明瞭な相違があれば、初心者にも容易に判断することが可能となる。

以上より、今回の調査から、検査工程に技能伝承支援システムを適用することの有用性が明らかになった。

## 5. 結 言

- (1) 研磨作業における，ワークへの力加減等の作業の計測結果をリアルタイムに PC 上に表示するシステムを開発した。
- (2) 研磨作業を経たワークの表面の様子を画像で取り込み，輝度を拡大することで，熟練技能者と初心者のワークの光沢の違いを強調させることができた。
- (3) 技能伝承支援システムを検査工程へ適用することに対して，県内企業のニーズは多業種に渡って非常に多いことがわかった。

- (4) 従来の目視検査工程を数値化し，技能伝承支援システムとして適用することの有用性が明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 五十嵐 晃，大野 宏ほか“新潟の匠の技を継承し発展させるための計測と制御に関する研究調査”，工業技術研究報告書，37，2008，p24-26.

## 食品産業支援の化学チップ開発

永井 直人\* 笠原 勝次\* 平石 誠\*\*

On-plate chromatographic spectroscopy using Marangoni and/or Poiseuille flow

NAGAI Naoto\*, KASAHARA Katsuji\* and HIRAISHI Makoto\*\*

## 抄 録

プレート上にカバーガラスをかけその中に試料溶液を導入することでマランゴニ流, ポワズイユ流, 乱流を発生させ試料成分の自己組織化を誘導して, プレート上に散逸構造のトレースを形成させる手法を開発した。このトレースに各種分析プローブを投入することで, 混合物の組成を簡便に低コストで分析できるようになった。赤外, ラマン, TOF-SIMS, MALDI-TOF/MS などによる検出を試みた結果を紹介する。

## 1. 緒 言

近年, 食品異物や表示偽装などの「食の安全・安心」が注目されている。また, 機能性食品といった食の高付加価値も注目されるようになっている。新潟県は高い食品ブランドを有しているが, 今後, 以上のような点に留意しつつ県内企業を科学的にサポートしていく必要があると考えられる。しかし, 一昨年度発生した ギョーザ事件に見られるように加工食品は一般に多くの成分の混合物であり, その中から注目成分を取出して分析するのは非常に困難な問題である。さらに化学構造変化まで解析しようと思うと格段に難しくなる。

これらの問題は分析装置にかける際の前処理で困難さの度合いが大きく変化する。そこで, 我々は上記の問題に対応するために, 主成分から微量成分まで分析可能で化学構造変化まで解析するための新しい前処理法の開発を行ってきた。さらに, 食品産業ではこのような問題に時間とコストをかけることはできないので, 迅速かつ低コストで実行できるシステムを構築することを考慮した。

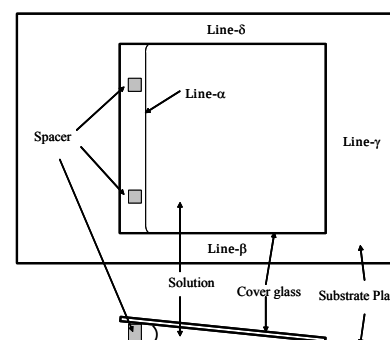


図1 化学チップシステムの構成概略図

昨年度はカバープレートに斜めに配置しその中にサンプルと溶媒を挿入することで, マランゴニ流を発生させ表面張力の違いによってプレート上での吸着位置を変化させて分離する新しいシステムを提案し実証してきた<sup>1)</sup>。今年度は分離効率を上げるためにさらにメカニズムの考察を行い, 本手法を適用して実施した例を紹介する。なお, 本法は食品分野のみならず, 工業, 農業, 医療・バイオなどの多くの分野に適用できることを目指した。

## 2. 原理

## 2.1 送液

図1には配置の概念図を示した。シリコン

\* 下越技術支援センター

\*\* 研究開発センター

ウェハーなどのプレートの上にカバーガラスを傾斜をつけて配置し、そのすき間に試料を溶かした溶液（必ずしも完全に溶けている必要はない）を導入して放置する。液の導入は、昨年度、接触角測定装置を改造した装置においてシリンジ先端をカバーガラスのすき間付近に溶液を滴下することで行った。毛細管現象によって自動的にカバーガラス下に液が導入され、カバーガラス外にはみ出すことはない。

## 2.2 分離

図2は昨年度使用したブルーベリーエキスのエタノール溶液をカバーガラス下に導入してカバーガラスの一端（図1のline-βに相当）をプレートの真上から時間変化を追ったものである。時間の経過とともに(a)→(h)となっている。今年度は可視化を目的に比較的高濃度の試料を選んだ。

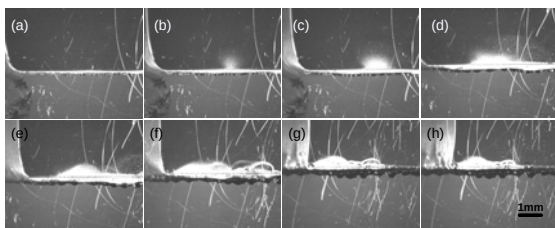


図2 ブルーベリーエキス成分の乱流

最初、均一な溶液は次第に不均一になり「プロミネンス」領域が現れてくる(b)。このプロミネンスは渦を形成し、その渦は次第に形を変えながら”下流”に流れていくのが観察される。そして大きな渦から小さい渦へエネルギーを交換しながら次第に散逸していく様子が見える。しかし、ある領域から先へはその渦は進行しない。図3には「プロミネンス」が始まる直前のカバーガラスエッジ部を拡大した画像を示した。周辺を走るパーティクル（図中矢印）に注目し約0.3秒後のスナップショットを図3(b)に示した。粒子は周辺の気液界面をかなりのスピードで移動し分裂しているのが観察される。液内部の流動は非常にゆっくりであるが、気液界面は

高速に動いておりせん断応力が発生していることが分かる。

以上の現象から気液界面をせん断力を伴って流れる流体であることからマランゴニ流が発生していることが分かる。この流れは、気液界面において表面張力の大きい領域に向かって流れが発生する現象であり、カバーガラスの基板との隙間が小さい領域(line-γ 方向)で温度が低くなっているか、もしくは表面張力が大きい物質の濃度が高くなっているかのどちらか、あるいは両方が起こっていると考えられる。Khrustalev と Faghri の分離圧を考慮した計算では隙間のメニスカス領域の直径が小さい場合のその領域からの気化による熱伝導効率が低いことが示された<sup>2) 3)</sup>。すなわち、隙間の狭い領域周辺(line-γ および line-γ に近い line-β 領域)で温度が低くなっていると考えられる。実際、放射温度計で計測すると1℃程度低いこと

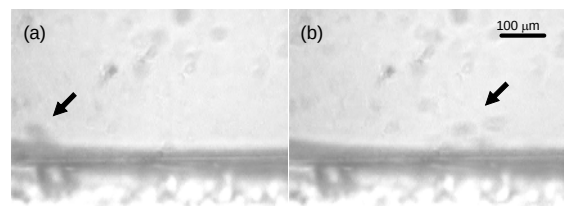


図3 カバーガラス周辺のマランゴニ流

が確認される。

この状態で溶液がカバーガラス下で周辺に沿ってマランゴニ流によって物質移動が起これば、ル・シャトリエの原理によってマランゴニ流を阻害するために高表面エネルギー物質の物理吸着が隙間の小さい領域ではじまる。一方、上流側では低表面エネルギー物質を物理吸着させることでマランゴニ流を阻害する傾向が発生する。それでもマランゴニ流は発生し続けるが、表面エネルギー物質が吸着しさらに隙間が狭くなっているため、ある場所から流れ込んできた物質が散乱され流動が乱される領域が突如現れる。それが先に述べた「プロミネンス」であると考えられる。すなわち、ここで流動が散乱されて乱流が発生する。乱流の特徴としては最初は大

きな渦が発生し、エネルギーを小さい渦に渡していくが、そのプロセスではエネルギー散逸はない。しかし、渦がどんどん小さくなって最終的にはエネルギーを散逸してしまう<sup>4)</sup>。図2は

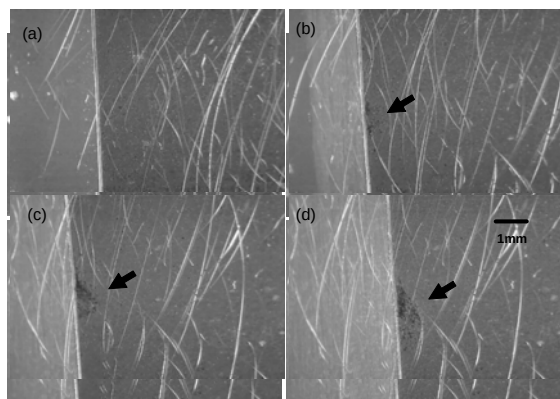


図4 溶液導入部付近に現れる渦構造

その間に現れる「コヒーレント構造」を示していると考えられる。このコヒーレント構造が形成される間に物質の混合と再配列が起こる。

図4には隙間の最も大きい領域 (line- $\alpha$ ) で溶液が導入された後の気液界面の時間変化を示した。時間とともに(a)→(d)となっている。最初、均一に分散されていた溶液中の成分は次第に渦を形成しながら集まっていく。最終的には集まって、マランゴニ流によってカバーガラス周辺領域 (line- $\beta$  や line- $\delta$ ) に流れ込んでいく。このような現象は表面張力の不均一性のゆらぎによって形成されるベナード・マランゴニセルと考えられ、それを溶液の断面で観察していることになる<sup>5) 6)</sup>。

一方、溶液に非常に良く溶け込んでいる物質は、最後まで吸着せず、最もカバーガラスの隙間が狭いライン上に相対的に表面エネルギーの大きい物質から析出・吸着していくことになる。なお、この過程における流体の駆動は毛管現象の不均一性に基づくポワズイユ流である<sup>7)</sup>。

以上をまとめると、カバーガラス周辺の気液界面のプレート上にはマランゴニ流によって駆動された溶液成分が表面エネルギーの違いによって異なる場所に物理吸着され、さらに流動してきた物質は高表面エネルギー物質による散乱

で乱流を発生させその中で混合と再配列を起こす。一方、ベナール・マランゴニセルによって集まってきた溶解されにくい成分はゆっくりとマランゴニ流によって駆動されて、line- $\beta$  あるいは line- $\delta$  上で吸着する。逆に、溶解度の高い成分は最後までポワズイユ流によって駆動されて最後に表面エネルギーの大きい物質から析出・吸着される。以上の一連のプロセスによって溶液の中に一様に溶解、分散していた成分はプレート上に分離されていくと考えられる。

カバーガラス下に一樣溶液を導入して放置しておくだけで、分離が起こっていくことは一見するとエントロピーが減少していくように見えるが、この過程の中で、溶媒の蒸発という非常に大きなエントロピー増加が起こっていることから、系全体としてはエントロピーが増加しているが、カバーガラス下の溶液で見ると非平衡開放系となっており、部分的にエントロピーが減少して不均一組織構造が現れたものと考えられる。プリゴジンはこのような構造を「散逸構造」もしくは「自己組織化」と呼んだが<sup>8)</sup>、本系では「散逸構造」のトレースが現れたものであり、この「散逸構造のトレース」を分析に利用し、低コストの分離分析を達成しようという点で革新的と考える。

## 2.3 ブルーベリー分離分析結果

流動が終了した後にカバーガラスを剥がし、現れたシミを分析した結果を図5に示した。本実験では可視化が目的ではないので、低濃度試料にて赤外およびラマン分光分析を行った結果

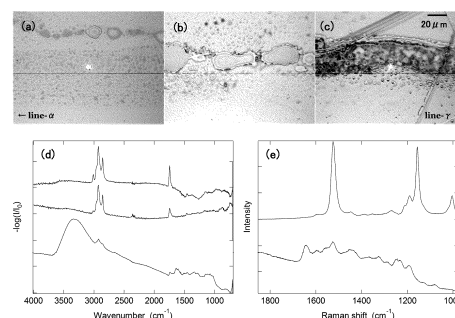


図5 ブルーベリーエキスの分離結果

である。上図左から右へは吸着した成分の写真であるが、明らかに吸着物質の形態的な違いが観察される。下図にはスポットで分析した赤外およびラマンスペクトルを示した。昨年度の試料をプレート上に置いた場合と同様に、飽和脂肪酸油脂、不飽和脂肪酸油脂、アントシアニン、カロテノイドが分離して検出されていることを確認することができた。

### 3. 応用

以下では、上記の原理に基づいて分析応用を行った例をいくつか紹介する。

#### 3.1 米

図6には県内の加茂産の米(a)と黒崎産の米(b)を時間飛行型2次イオン質量分析装置(ToF-SIMS)で測定したマッピング分析の結果を示した。この手法は高い感度で表面nm深さのフラグメント(正および負)イオンを検出することができる手法で、なおかつマッピング分析も可能である。図には油脂由来の成分のフラグメント(上段)とアミンのフラグメント(右下)およびリン酸(左下)とカリウムおよびカルシウムイオン(中段)のフラグメント分布を示した。明るいところは濃度が高い領域を示している。油脂のフラグメントが現れる位置とアミンの現れる位置は明らかに異なっており分離が達成されていることが分かる。これは赤外分光やラマン分光で分析されるトリグリセリド(油

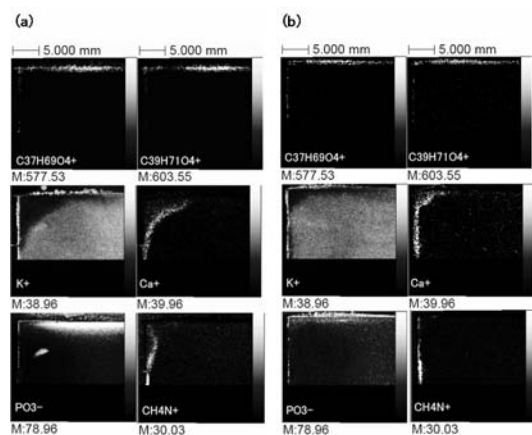


図6 加茂産(a)と黒崎産(b)の米の  
ToF-SIMS 分析結果

脂)やアミド(タンパク)の位置とも一致している。また、加茂産と黒崎産という米ではほぼ同様な分布になっており、手法としての再現性も確認される。加茂産と黒崎産ではリン酸の強度分布に大きな違いが認められる点が特徴である。筆者の食べた感じでは加茂産の方がおいしく感じられたが、リン酸濃度が影響している可能性が考えられる。あるいは産地の違いによる米の代謝成分の違いを反映したものとも考えられる。タイ米を同様に分析すると油脂成分の中でもパルミチン酸やステアリン酸由来の脂肪酸成分が多く検出される。これは文献で報告されている結果とも一致しており<sup>9)</sup>、また、タイ米ではケイ素濃度が高い傾向も見られるなど地域間の違いを解析するのに利用できる可能性が高い。

本法では、油脂はいつもほぼ同様な位置に液滴として吸着して残ることが確認できる。そこで、それらの液滴に注目して新米、古米、古古米の油脂の化学構造変化を調べることができるかどうか確認した。図7には赤外分光分析とラマン分光分析の比較結果を示した。赤外分析から油脂は古古米になると加水分解してエステル( $1740\text{cm}^{-1}$ )がカルボン酸( $1710\text{cm}^{-1}$ )となるが古米では新米との中間状態となっていることが分かる。一方、ラマン分光分析ではC=C結合が強

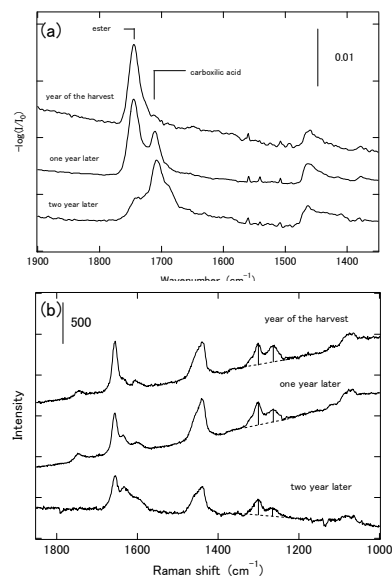


図7 新米、古米、古古米の構造変化  
(a) 赤外, (b) ラマンスペクトル



く現れるが( $1640\text{cm}^{-1}$ 付近), C-H 変角振動の相対強度を不飽和結合のそれと比較すると( $1350\text{cm}^{-1}$ と $1260\text{cm}^{-1}$ バンドの比), 不飽和度が減少していくことが分かった。

### 3.2 メタミドホス／ギョーザ

最近「食の安全・安心」が大きく注目されるようになった理由として冷凍ギョーザに農薬のメタミドホスが混入されていたことがあげられる。それも、予想を超える濃度であった。さらに牛乳にメラミンが混入されているなど、通常の製造工程の混入では想像できないような物質や濃度の場合があることが大きな問題となっている。このようなケースでは分析する側も単に食品に関する知識だけではなく、工業製品や毒物に関する知識も要求され、主要成分から微量成分まで分析可能な技術が要求されるようになっている。

図8は市販の冷凍ギョーザにモデル的にメタミドホスを種々の重量比で混ぜてそのギョーザを試験管に取ってエタノール：水=1：1の溶媒で激しく振とうさせた後にその液を本法にて流したのちの分析の結果である。写真で特徴的なシミはカバーガラスと基板との間の隙間が最も狭い最後のライン (line-γ) に現れる。メタミドホスは水に良く解けるため最終的にはポワズイユ流で駆動されて、その領域に現れるものと考えられる。特徴的なシミ領域でラマンスペクトルはメタミドホスを検出できることが分かる。図

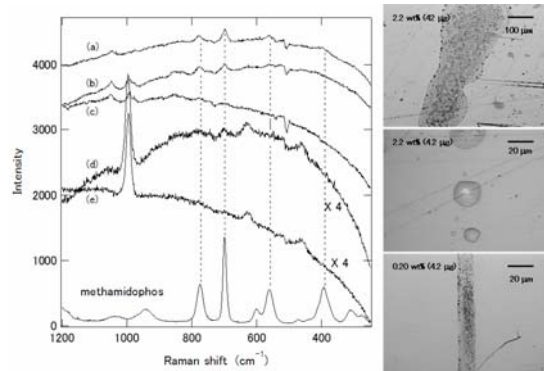


図8 ギョーザにメタミドホスを混入させた試料のシミとラマン分析結果

では、ギョーザに対する重量比で示した場合と採取した溶液の体積から計算された絶対量とを示した。濃度ではラマン分光分析で200ppmまで検出可能で絶対量でもマイクログラムオーダーは十分検出可能であった。TOF-SIMSなどの質量分析を使えばさらに高感度に検出できると考えられる。

### 3.3 タンパク

タンパクは食品のみならず医療やバイオ分野でもその分離と構造解析が注目されている。そこで、まずモデル系として水にアルブミンとリゾチムを溶かした溶液を本法にて流動させ、水がなくなったあとラマン分光にて分析した。赤外分光では両者ともポリアミドとしての吸収しか現れず、判定するのに2次構造までの解析が必要になるため、ラマンにて判定を行った。ラマン分光ではリゾチムで $1560\text{cm}^{-1}$ にピークが現れるため両者の区別が可能である。このピークはトリプトファンのインドール環の伸縮振動のピークである。図ではシミの模式図とその位置およびそれぞれの位置でのラマンスペクトルを示した。カバーガラスで傾斜のついている

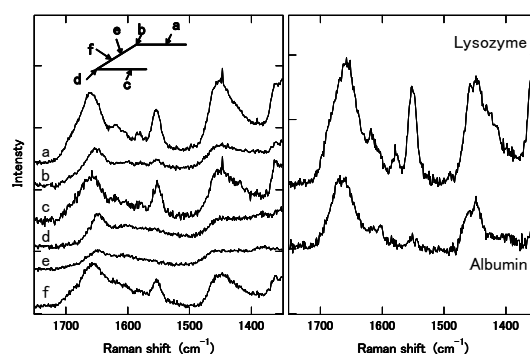


図9 リゾチムとアルブミン混合試料の分離分析結果

ところでは主にリゾチムが認められ隙間の最も狭くなっている端部付近でアルブミンが認められる。一方、隙間が最も狭いラインでは主にアルブミンが認められるもののところどころリゾチムも認められるという結果になった。アルブミンの水への溶解度が大きいことが主に効いているように思われるが、この分離はかなり

明瞭に現れる。しかし、他の複数のタンパクが混入している場合の分離と検出ができるかということを検討するために、さらにラクトフェリンとカゼインを混ぜた試料を用意し実験を行った。分離効率を上げるためにカバーガラス形状を工夫し加工を施した石英板を用意した。また、分析もマトリックス支援レーザー脱離時間飛行型質量分析装置 (MALDI-TOF/MS) を行った。この分析はタンパクなどの非常に大きな質量を持つ物質を分解せずイオン化して分析できる画期的手法であり、島津製作所の田中耕一氏がノーベル賞を受賞したことで著名である。結果の

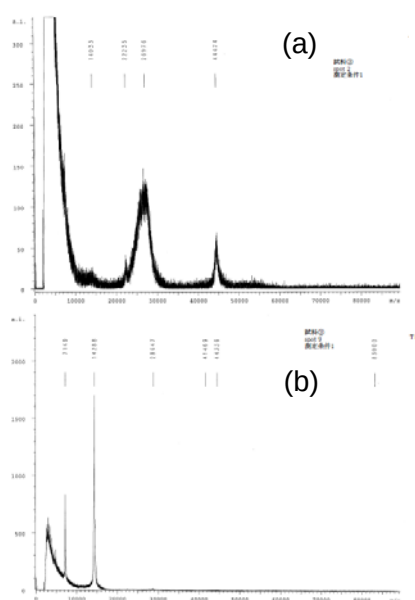


図 10 分離タンパクの MALDI-TOF/MS 分析結果

(a) line- $\gamma$  付近 (b) line- $\beta$  付近

一部を図に示した。やはり、リゾチームが傾斜のついているカバーガラス周辺に検出され、アルブミンおよびカゼインは最も隙間の小さいラインで検出された。リゾチームは質量数 14000 付近に、アルブミンは 44000 付近にピークが認められている。また、カゼインは 27000 付近に認められている。比較的溶解度の高いラクトフェリンが隙間の大きい領域 (line- $\alpha$  と line- $\beta$  の交差領域) で観察されている。

今回は構成物が分かっている試料でモデル的

に分析したが、プレート上で分離してそれぞれの成分を検出できたことから、多くのバイオ分野の試料に関しても比較的簡便に分離分析が可能になるのではないかとと思われる。

#### 4. 結 言

- (1) カバーガラスをプレート上に傾斜をつけてその隙間に溶液を導入して溶媒を気化させることで、溶質を自己組織化させて分離分析する技術を開発した。
- (2) 分離した成分を赤外、ラマン、TOF-SIMS, MALDI-TOF/MS などの主要成分から微量成分、高質量成分の分析が可能であることを確認した。
- (3) 食品はじめ、工業製品、農業、医療・バイオなど多くの分野に利用可能である。

#### 参考文献

- 1) 永井直人, 笠原勝次, 佐藤健, “食品産業支援の化学チップ開発”, 新潟県工業技術総合研究所工業技術研究報告書, 37 号, 2009, p3.
- 2) D. Khrustalev, A. Faghri, Int. J. Heat Mass Transfer, 38, 1995, p3091.
- 3) D. Khrustalev, A. Faghri, J. Heat Transfer, 118, p725.
- 4) テネケス, ラムレイ, “乱流入門”, 東海大学出版会, 1998.
- 5) E. L. Koschmieder, J. Fluid Mech, 30, 1967, p9.
- 6) E. L. Koschmieder, M. I. Biggerstaff, J. Fluid Mech, 167, 1986, p49.
- 7) ドウジェンヌ, ブロシヤール・ヴィアール, ケレ, “表面張力の物理学”, 吉岡書店, 2003.
- 8) グレアゴール・ニコリス, イリア・プリゴジン, “散逸構造”, 岩波書店, 1992.
- 9) 石谷孝佑, 大坪研一, “米の科学”, 朝倉書店, 1995.

# 高齢化社会に適した再生医療普及のための安価な培養システムの開発

明歩谷 英樹\*

Development of Low Priced Culture System for Regenerative Medicine Spread that is Appropriate for Aging Society

MYOUBUDANI Hideki\*

## 抄 録

再生医療に使用するための細胞培養用の柔らかい足場の開発を行った。ニット産地の持つ編み技術を用いて、編み組織を変化させた足場やエレクトロスピニング法を用いた複合足場など複数の足場を試作することができた。また、培養細胞との親和性をあげるため、ぬれ性を付与する加工方法を検討した。

## 1. 緒 言

高齢化社会に向けて疾病や事故などで失われた身体の一部の機能を回復するための再生医療をより容易に普及させるため、細胞培養、足場、増殖因子のそれぞれに新たな工夫を凝らし、低コストの培養システムの開発を行う。当センターでは、ポリ乳酸やポリグリコール酸などの生体内分解吸収性繊維を用いた柔らかい足場を開発することを分担目標とする。

本研究は新潟大学、HOYA(株)、(株)ジュース、(株)佐文工業所、(株)ジャパン・ティッシュ・エンジニアリング、新潟県工業技術総合研究所がそれぞれテーマを分担し進めている JST 育成研究による。

## 2. 軟素材用足場について

ポリ乳酸やポリグリコール酸などの生体内分解吸収性として知られている繊維を用いて、細胞を培養する足場の開発を行っている。図1は培養足場の概略図を示す。これまでに商品化されている足場にはコラーゲンなどを用いたゲル状のものやポリ乳酸やキトサンなどを用いたスポンジ状のものなど、様々なタイプのものが登場してきている。しかし、それぞれに一長一短

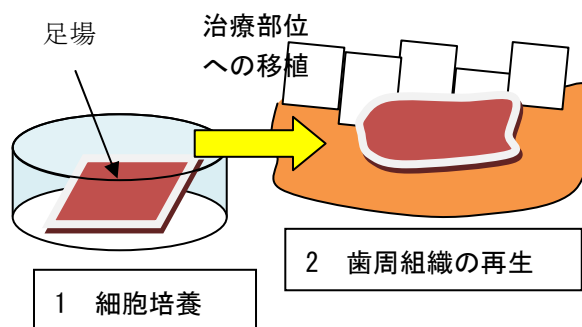


図1 細胞培養足場

があるといわれ、より使い勝手のよいものへの要求が強まってきている。我々は生体内分解吸収性繊維を新潟県のニット産地が持つ技術を用い編み立てることで、編み地状の足場を開発することとした。足場開発においてはこれまでに多くの論文などで紹介されている必要条件として、以下の3つがあげられている。①生体内にアレルギー反応などの害を及ぼさない生体適合性があること。②培養後の移植の際に破断することがなく手術後体内に埋入し、ある一定期間後には体内で分解吸収されること。③細胞自体が足場から滑り落ちていかない細胞との親和性を持つこと。

\* 素材応用技術支援センター

表 1 生体内分解吸収性合成素材

| 高分子        | 構 造                                                                                                         |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ポリ(グリコール酸) | $\begin{array}{c} \text{—(O—CH}_2\text{—C)—} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$                          |
| ポリ乳酸       | $\begin{array}{c} \text{—(O—CH—C)—} \\   \quad \parallel \\ \text{CH}_3 \text{ O} \end{array}$              |
| ポリグラクテン    | ポリ(グリコール酸)/ポリ乳酸<br>= 9 / 1                                                                                  |
| ポリジオキサノン   | $\begin{array}{c} \text{—[O—(CH}_2\text{)}_2\text{—O—CH}_2\text{—C)—} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$ |
| ポリカプロラクトン  | $\begin{array}{c} \text{—[O—(CH}_2\text{)}_5\text{—C)—} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$               |

## 2.1 生体内分解吸収性素材<sup>1) 2) 3)</sup>

この項では、一般的に使用されている、生体内で分解し最終的に吸収されてしまう素材について紹介する。表1はその分子構造と特徴を示す。これら高分子材料は触媒や酵素により分解され、最終的には二酸化炭素や水に分解される。

## 2.2 試料

生体内での安全性が確認されている点から縫合糸として上市されている素材を入手し、これを編み立てることで足場を作成することとした。表2は、入手した縫合糸の商品名および物性値を示した。比較試料として、工業用に使用されているポリ乳酸についても試験用試料とした。

試料を検討していく中で、組紐タイプの縫合糸材料にはウイルスなどの異物の侵入を避けるため、糸表面にステアリン酸カルシウムなどをコーティング処理している。図2はコーティ

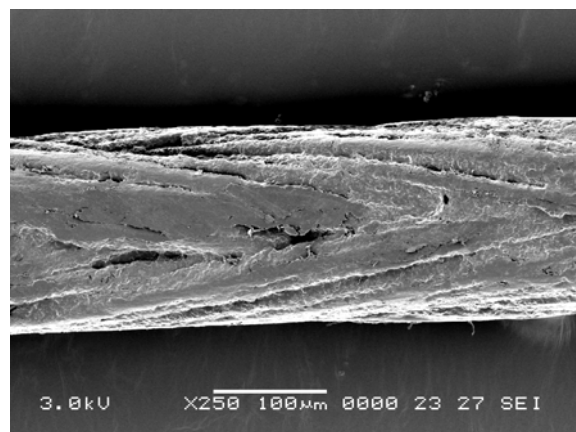


図2 組紐のコーティング状況

ング処理を施した組紐の拡大写真を示す。この処理を施した試料を培養皿へ提供したところ、培養中に細胞が死滅してしまう結果となった。よって、細胞培養にはコーティング処理は適さないことがわかり、足場用素材としては未コーティング素材を使用することとした。

## 3. 細胞培養用軟足場開発

先の項で紹介した試料を用いて、編み立てによる足場開発を行った。

### 3.1 編み組織による開発

編み立て技術では「ループを作る/ニット」と「ループを作らない/ミス」の繰り返しや、それぞれを組み合わせることによって立体的な構造を作成することができる。この編み立て技術を使って、天竺編み地、ゴム編み地、2/2切り替え編み地、ニット・デニット編み地などを試作した。図3は天竺編み地、図4はニット・デニット編み地を示す。



図3 天竺編み地 (PGA)

|                                      | 商品名                        | 太さ        | 構造        | 熱収縮温度 |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------|-----------|-------|
| ポリグリコール酸繊維<br>(PGA)                  | ケイセイ医科工業(株)製<br>「クレイヨン」    | 2.30 dTex | 組紐        | 122℃  |
| ポリグリコール酸/<br>ポリ乳酸共重合体繊維<br>(PGA/PLA) | ジ'エソワ&ジ'エソワ(株)製<br>「バイクリル」 | 2.80 dTex | 組紐        | 93℃   |
| ポリジオキサノン繊維<br>(PDO)                  | ケイセイ医科工業(株)製<br>「PDO 5-0」  | 1.06 dTex | モノフィラメント  | 83℃   |
| ポリ乳酸繊維<br>(PLA)                      | ユニチカファイバー製<br>「テラマック」      | 8.4 dTex  | マルチフィラメント | 84℃   |

表2 試料一覧



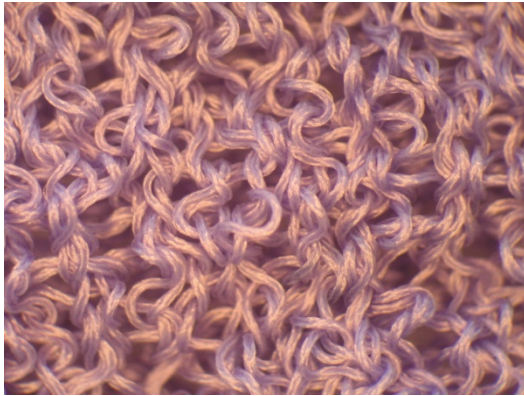


図4 ニットデニット編み地 (PGA)

糸素材：PGA（ポリグリコール酸繊維 以降 PGA と示す）

天竺編み地は編み目がはっきりわかり、比較的隙間が多いのに対し、ニット・デニット編み地は、不規則な糸の転びによって隙間が少ない構造となった。このような立体的効果の異なる編み地足場を作成することができた。この足場によって、細胞の付き易さや栄養や酸素、排出物の行き来など細胞培養時に及ぼす影響については今後培養班と連携し調査を進めていく。

### 3.2 エレクトロスピンニング法による複合化

細胞培養用足場において、エレクトロスピンニング法と呼ばれる数 $\mu\text{m}$ ～数 $\text{nm}$ の直径を持つ糸または不織布を作成する技術が近年注目されている<sup>4) 5)</sup>。この項ではこのエレクトロスピンニング法を用いた複合化技術による足場の開発について示す。図5は複合足場のモデルを示す。

皮膚組織自体も厚さ方向によって表皮細胞、真皮細胞などのように特徴が変化することが知られている。このような厚さ方向への構造変化を足場の段階で加えることで、細胞培養への良い影響が出ることを期待し、編み立てによって作成した母材の上にエレクトロスピンニング法による不織布を積層させた複合足場を開発した。

母材：PLA（ポリ乳酸繊維 以降 PLA と示す）  
天竺編み地  
エレクトロスピンニング層：PLA

試作したエレクトロスピンニング足場の拡大写真を図6に示す。今回は工業用のPLAを使用し

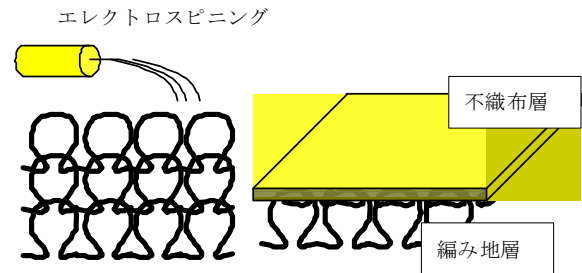


図5 エレクトロスピンニング足場

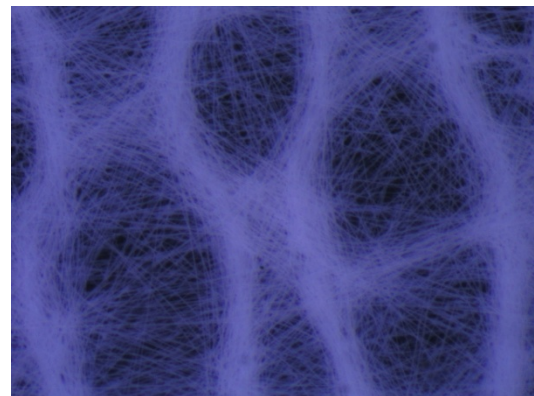


図6 エレクトロスピンニング複合足場

ため、培養実験までには至っていないが、このような複合足場の効果についても、今後素材を変えて試験を実施していく。

### 3.3 めれ性向上

細胞培養用足場で必要とされている事項の一つとして、2.の項で示した③細胞との親和性があげられる。しかし、栄養素や老廃物の堆積などを考えると、一概にめれ性がよいだけでは細胞培養に適した足場とはいえないとの議論もあり、未だ適正な数値（接触角など）がわかっていない。そこで、電子線照射などの処理によってめれ性を变化させた試料を試作し、足場のめれ性と細胞培養への影響を調べる試料を試作した。

足場：・PDO（ポリジオキサノン繊維 以降 PDO と示す） 天竺編み地  
・PLA 天竺編み地

電子線照射装置：岩崎電気（株）製

LIGHTBEAM-L EC110/15/70L

熱水処理：80℃温水中で30秒間浸漬

熱プレス処理：100℃ 30kgf/cm<sup>2</sup>加重で5分間保持

図7は編み地足場へ電子線を照射した試料、熱水処理した試料、熱プレスした試料を作成し、各試料の接触角を測定した結果を示す。PDO、PLAともに電子線照射で接触角が微増する傾向（ぬれ性が悪くなる）にある。PDOについては、熱水処理やプレス処理によって接触角が低下した。

また、図8は各素材の電子線照射量と引張り強度の試験結果を示す。電子線量増加とともに破断強度（最大点荷重）は低下し、PLAについては、270kGyではさわるだけで破断するほど強度低下してしまった。過度な電子線照射は取り扱いを悪くするため、適度な照射が必要であることがわかった。以上のように、ぬれ性の異なる試料を多数試作することができた。

### 3.4 編み目空隙率について

細胞培養用足場へのもう一つの要望として、栄養分や排泄物の出入りが可能である空隙が存在することもあげられる。この項では足場の空隙を制御する方法について示す。今回は、天竺編み地、およびその編み地を熱水収縮させることで目を詰める方法、その後熱プレスをする方

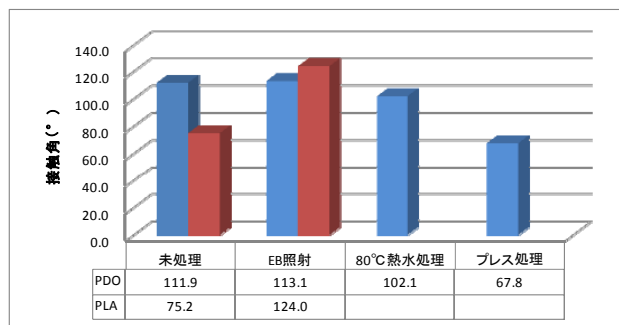


図7 各種処理とぬれ性の関係

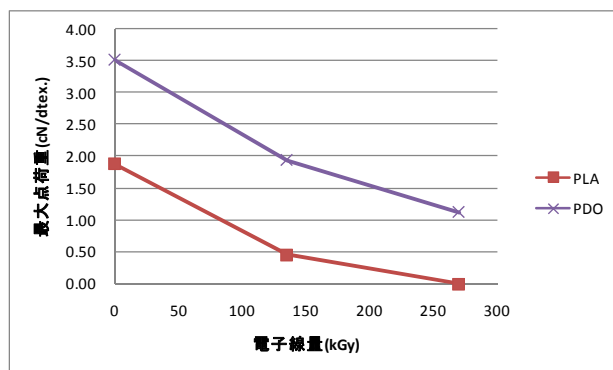


図8 電子線量と強度の関係

法の3種類の処理を行った。

素材：PDO 天竺編み地

熱水処理：80℃温水中で30秒間浸漬

熱プレス処理：100℃ 30kgf/cm<sup>2</sup>加重で5分間保持

図9は未処理の編み地を、図10は熱水収縮後の編み地を、図11は熱プレス後の編み地の拡大写真を示す。また、図12には各処理後の糸の直径を示し、さらには表面から見たときの穴の割合（空隙率）を示した。今回試験を行った各処理によって、条件を適宜選択することで希望する編み目の大きさに調整できることが確

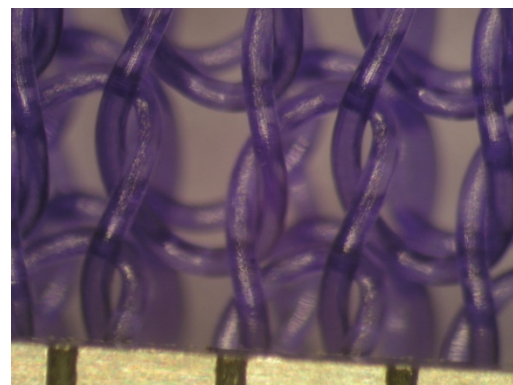


図9 PDO 編み地

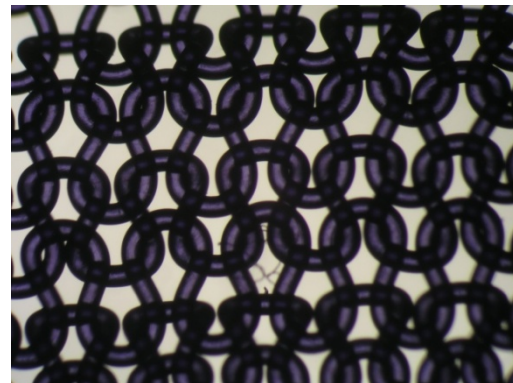


図10 PDO 編み地を熱水処理後

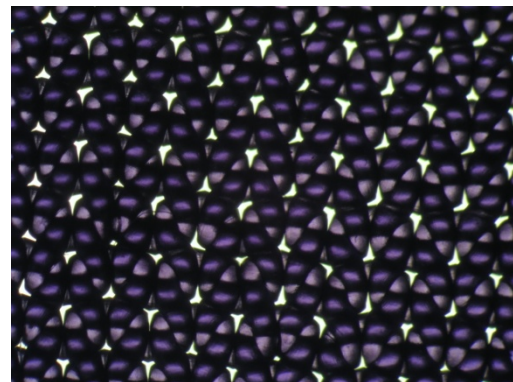


図11 PDO 編み地を熱プレス



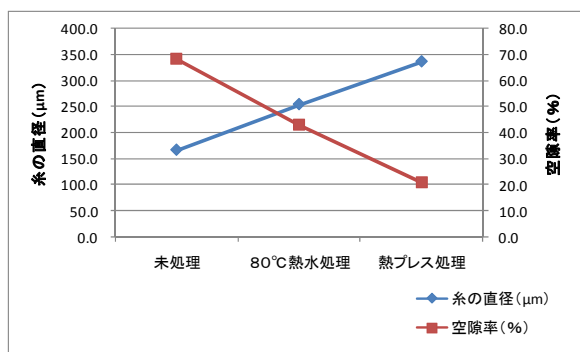


図 12 各処理による編み目の大きさ

認できた。

#### 4. 結 言

- (1) 各種縫合糸を入手し、これを用いた編み地足場を試作した。その中で、コーティング処理を施した縫合糸については細胞培養用足場に適さないことがわかった。
- (2) 編み組織を変えた足場、エレクトロスピニング法を用いて複合化した足場、ぬれ性を変化させた足場などを試作した。
- (3) 編み地足場による栄養や排出物の行き来を可能にする、空隙の大きさを制御するための方法を示した。

#### 参考文献

- 1) 玄丞然, “バイオプラスチックの利用事例 医療用としての応用事例”, バイオプラスチックの高機能化・再資源化, 2008, p290-298.
- 2) 澤田和也, “再生医療用バイオスキャフォールド作成のための生体繊維処理技術の開発”, 繊維と工業, Vol.62, No.5, 2006, p155-156.
- 3) 陳国平, “生体組織工学のための新しい基盤材料”, AIST Today, 2, 2002, p8.
- 4) 谷岡明彦, “進展するナノファイバー技術”, 工業材料, Vol.56, No.8, 2008, p29-33.
- 5) Zheng-Ming Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, “A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites”, Composites Science and Technology, 63, 2003, p2223-2253.



## Ⅱ ノート



# マグネシウム合金板の精密打ち抜き加工技術

白川 正登\* 本田 崇\* 山崎 栄一\*

Fine Branking Technology of Magnesium Alloy Sheet

SHIRAKAWA Masato\*, HONDA Takashi\* and YAMAZAKI Eiichi\*

## 1. 緒 言

軽量化，リサイクル性の観点から注目されているマグネシウム合金のプレス加工に関する研究が数多く報告されている。実際のプレス加工では，ブランク作製や穴加工のための打ち抜き加工等のせん断加工に伴う場合が少なくない。マグネシウム合金は，常温におけるせん断加工時には針状または粉状のせん断くずが発生し，安全上の観点から対策が必要であるとともに，切り口面の品質が劣悪なため，後工程において切り口の仕上げ処理が必要である<sup>1)</sup>。また，マグネシウム合金の精密せん断加工に関する報告は極めて少なく<sup>2)</sup>，非常に情報が少ないのが現状である。

本研究では，AZ31 マグネシウム合金の打ち抜き加工において，素材加熱を行うとともに，打ち抜き形状輪郭に沿って V 字型突起を設けた板押さえを用いることにより，材料の拘束力を高め，切れ刃部の圧縮力を高めることで切り口面の品質の向上を試みたので紹介する。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材および抜き形状

実験には，板厚  $t=4\text{mm}$  の AZ31 マグネシウム合金板を用いた。

### 2.2 金型および実験条件

図 1 に試験用金型による打ち抜き加工のイメージ図を，図 2 に実験に用いた金型の板押さえ側外観写真を示す。板押さえには，打ち抜き

形状輪郭に沿って V 字型突起を設け，ばね力によりブランクを押さえる構造となっている。ばねは強弱 2 種類を用意し，板押さえ力を変えて比較実験を行った。弱いばねを用いた場合の

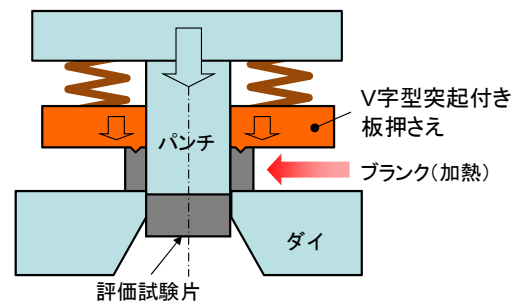


図 1 打ち抜き加工イメージ

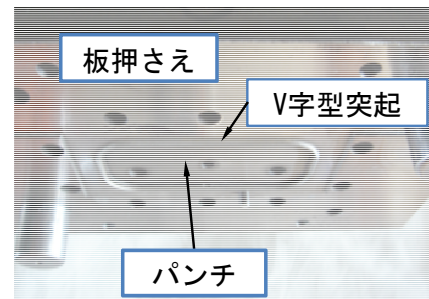


図 2 板押さえ部外観

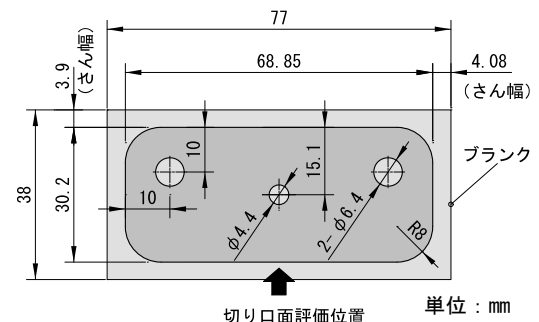
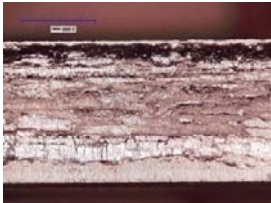
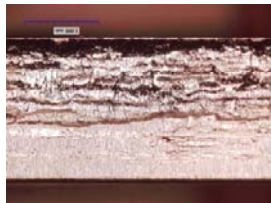
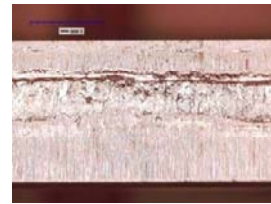
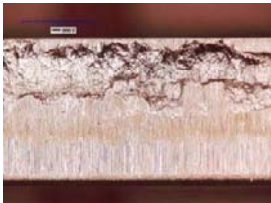
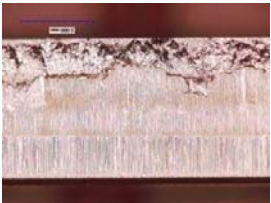
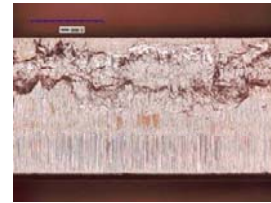


図 3 打ち抜き形状およびブランク寸法

\* 研究開発センター

| 加工<br>温度<br>(°C) | 板押さえ                                                                                |                                                                                      |                                                                                       |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | V字型突起 なし                                                                            | V字型突起 有り                                                                             |                                                                                       |
|                  | 板押さえ力 弱                                                                             | 板押さえ力 弱                                                                              | 板押さえ力 強                                                                               |
| 25               |    |    |    |
| 200              |    | —                                                                                    |    |
| 250              |   |   |   |
| 300              |  |  |  |
| 350              | —                                                                                   |  | —                                                                                     |

2mm  
└───┘

図4 切り口面の拡大写真

抜き始めから抜き終了にかけての板押さえ力は9kN～24kN，強いばねを用いた場合が15kN～33kNである。また，V字型突起を設けない板押さえによる打ち抜き実験を行い，切り口面の比較を行った。図3に打ち抜き形状およびブランクの寸法を示す。実生産における材料歩留まりの向上を考慮し，さん幅（打ち抜き後残材の

縁幅）は板厚同等の約4mmとした。金型のパンチとダイのクリアランスは，ほぼ零クリアランスとした。加工温度は，室温および200～350℃とし，加熱炉で加熱したブランクをダイス上に位置決めし，設定温度にて打ち抜き加工を行った。加工には，サーボプレス（アイダ製NS1-2000D）を用い，加工速度40spmのクラン



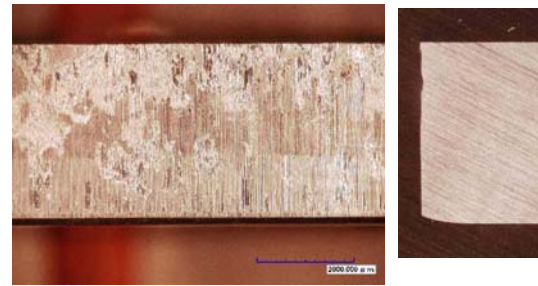
クモーションとした。評価には、デジタルマイクロスコープ（ハイロックス製 KH-7700）を用い、切り口面の写真撮影を行った。

### 3. 結果と考察

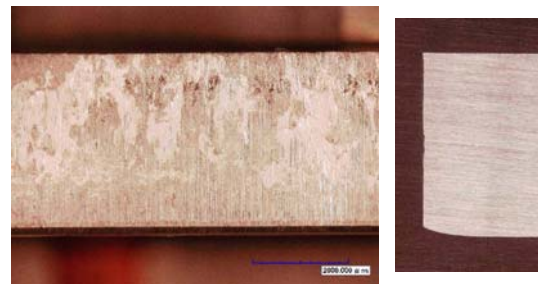
図4に、各条件で打ち抜き加工を行った試験片の切り口面の拡大写真を示す。室温ではいずれの条件でも切り口面に大きな割れが見られる。加工温度の上昇に伴って、せん断面が認められるようになるものの250℃までの温度域では、板押さえのV字型突起の有無および板押さえ力の強弱にかかわらず顕著な割れが残っている。また、250℃以上の温度域では、切り口の板厚中央部付近に、平滑ではあるが、せん断面とは異なり破面を押しつぶしたような面が見られる。温度上昇による素材の延性増大、強度低下に伴いせん断時の亀裂発生の仕方に変化があるものと推測される。加工温度が300℃になると、切り口面の割れによる凹みが浅くなる。板押さえにV字型突起を設けた場合の方が、より割れの深さが浅くなる結果が得られた。本実験の範囲では、板押さえ力の強弱で切り口面の性状に明瞭な差は確認されなかった。350℃まで加工温度を上げ、V字型突起有りの条件では、割れはほとんど確認できない。図5(a), (b)に、それぞれ300℃および350℃におけるV字型突起有りの条件で打ち抜き加工したサンプルの切り口面およびその断面の拡大写真を示す。断面写真でも、材料内部に割れは確認されない。特に、350℃の条件では、表面に微かな凹みが見られるものの、かなり平らな切り口面が得られていることが分かる。このような平らな切り口面であれば、打ち抜き加工後の仕上げ工程が不要あるいはバレル加工等簡易な後処理で製品品質を満たす場合も多数あると考えられる。

### 4. 結 言

- (1) 加工温度300℃以上の加工条件では、切り口面の割れによる凹みは浅くなる。特に、板押さえにV字型突起を設けること



(a) 300℃ V字突起 有り 板押さえ力 弱



(b) 350℃ V字突起 有り 板押さえ力 弱

図5 切り口面および断面の拡大写真

で、割れを抑えることができる。

- (2) V字型突起付きの板押さえを用い、350℃以上の温度で打ち抜き加工をすることで、割れのない切り口面を得ることができる。

### 謝 辞

本研究を実施するにあたり田辺プレス株式会社様には、加工法および金型製作に関するご助言ご協力をいただき、深く感謝いたします。

なお、本研究は、平成20年度都市エリア産学官連携促進事業（発展型）長岡エリア「マグネシウム合金の次世代製品開発」の中で実施したものである。

### 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会，“マグネシウム加工技術”，コロナ社，2004，p91-101.
- 2) 古閑伸裕，羽斗一成，Ratchanee PAISARN，“AZ31 マグネシウム合金のせん断・シェービング加工”，軽金属，51，9，2001，p452-456.

# 温間再絞り成形シミュレーションに関する研究

片山 聡\* 相田 収平\*\* 杉井 伸吾\*\*\* 田村 信\*\*\*

A Study on Warm Redrawing Simulation

KATAYAMA Satoshi\*, AIDA Shuhei\*\*, SUGII Shingo\*\*\* and TAMURA Makoto\*\*\*

## 1. 緒 言

角筒絞りの工程設計については、すべり線場理論の有効性が報告されている<sup>1)</sup>。しかし、すべり線場理論では成形の可否や板厚変化、加工硬化などが考慮されず、温間絞り成形のように成形条件が多岐にわたる場合、最終的な工程設計には幾度かの試作、実験が必要となる。

一方、温間絞り成形については、シミュレーション技術の有効性が報告されているが<sup>2)~4)</sup>、これらは実験的研究としての意味合いが強く、再絞りなどの多段成形については言及されていない。また初期工程設計は作業者の経験によるところが大きく、自動化・迅速化への障壁となっている。

本研究では両者の利点（すべり線場理論の持つ迅速な初期工程設計、シミュレーション技術の持つ成形予測）を融合させた工程設計手法の有効性を検討するため、角筒温間再絞り成形実験および有限要素法による同解析を実施した。

## 2. 角筒温間再絞り成形解析

### 2.1 使用ソフトウェア

角筒温間再絞り成形解析には、伝熱－構造連成解析機能（Hot Stamp 機能）を有す ESI 社製 PAM-STAMP 2G 2007 を用いた。ただし、本ソフトウェアの Hot Stamp 機能には表 1 に示すような制限事項が存在する。

表 1 Hot Stamp 機能の主な制限事項

|      |                                                        |
|------|--------------------------------------------------------|
| 材料特性 | ヤング率の温度依存性なし<br>熱ひずみの考慮なし<br>降伏関数は Hill'48, Hill'90 のみ |
| 伝熱解析 | 大気中への熱伝達なし<br>板厚方向への温度分布は一定                            |

### 2.2 有限要素モデル

金型およびブランクの有限要素モデルは、すべり線場理論を用いて設計された 3 次元 CAD モデルより、PAM-STAMP のオートメッシング機能を用いて作成した。分割密度は平面部が 2mm 間隔、曲面部が 15°間隔である。図 1 に金型の有限要素モデルを示す。なお、工程間の金型再配置を容易にするため、ダイスは側壁を有す第 1 および第 2 工程共通の一体構造とした。また、金型については変形および温度変化のない剛体として定義し、ダイスは全自由度を拘束、パンチおよびしわ抑えは絞り方向並進自由度以外を拘束した。

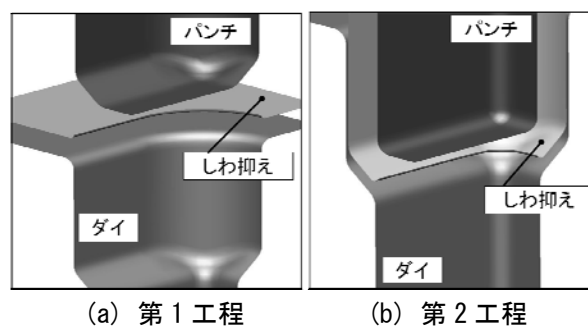


図 1 金型の有限要素モデル

\* 中越技術支援センター

\*\* 下越技術支援センター

\*\*\* 研究開発センター

## 2.3 材料モデル

ブランクに適用した SUS304 の主な機械特性および熱特性を表 2 に示す。降伏関数は Hill'48 型を使用した。降伏後の塑性挙動は、万能材料試験機による引張試験にて得られた各温度の応力-ひずみ曲線（図 2）より、プロット点を直接入力した。

表 2 SUS304 の特性値

|                           |      |
|---------------------------|------|
| ヤング率 (GPa)                | 190  |
| ポアソン比                     | 0.3  |
| 質量密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 7850 |
| 熱伝導率 (W/m・K)              | 16.7 |
| 比熱 (J/kg・K)               | 590  |

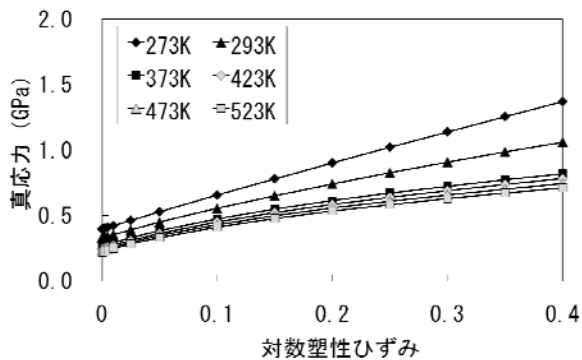


図 2 SUS304 の応力-ひずみ曲線

## 2.4 計算条件

金型に付与した主な境界条件を表 3 に示す。PAM-STAMP では、剛体（金型）のエンタルピーは計算されず、常に初期温度を保つよう設定される。接触熱伝達係数は非接触状態では距離関数による熱伝達として、接触状態では圧力関数による熱伝達として取り扱われるが、本計算では距離関数のみに依存するよう設定した。

また、工程間におけるブランクの応力解放および冷却については考慮せず、第 1 工程終了時の接触および温度状態を保ったまま、第 2 工程へと移行するよう設定した。

## 3. 角筒温間再絞り成形実験

成形実験条件を表 4 に示す。計算結果との比

表 3 金型に付与した主な境界条件

|          |     |                          |
|----------|-----|--------------------------|
| 摩擦係数     |     | 0.1                      |
| しわ抑え制御   |     | 定隙間                      |
| 絞り速度     |     | 10 mm/sec                |
| 金型温度     | 加熱側 | 373 K                    |
|          | 冷却側 | 275 K                    |
| ブランク初期温度 |     | 293 K                    |
| 接触熱伝達係数  |     | 1500 W/m <sup>2</sup> ・K |

表 4 成形実験条件

|        |     |             |
|--------|-----|-------------|
| 潤滑     |     | 油性潤滑材 G755B |
| しわ抑え制御 |     | 定隙間         |
| 絞り速度   |     | 10 mm/sec   |
| 金型温度   | 加熱側 | 373 ± 4K    |
|        | 冷却側 | 276 ± 1K    |

較のため、成形品の板厚をボールジョイントマイクロメータおよびダイヤルキャリパーを用いて測定した。

## 4. 計算および実験結果

### 4.1 板厚分布比較

第 1 工程終了後の成形形状を図 3 に、第 2 工程終了後の成形形状を図 4 に示す。外観的な特徴は両工程とも実験、計算とも一致していることが分かる。

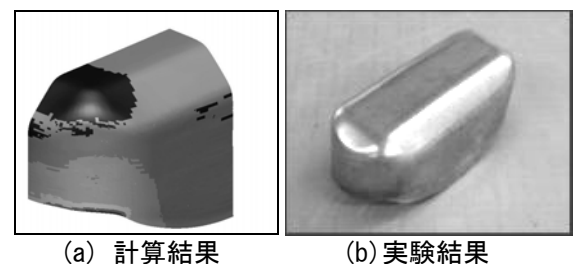


図 3 第 1 工程終了後の成形形状

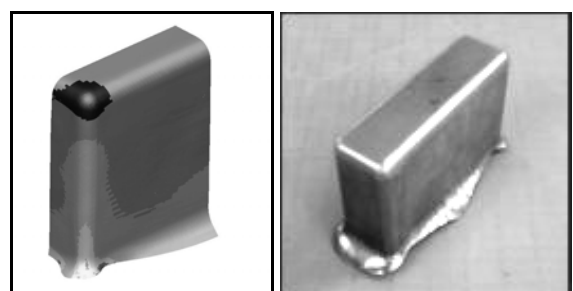


図 4 第 2 工程終了後の成形形状

第2工程終了後の板厚分布比較を図5に示す。短辺フランジ近傍にて値が離れるが、全体的な傾向としては一致しているといえる。特に長辺側では傾向、値ともよく一致している。

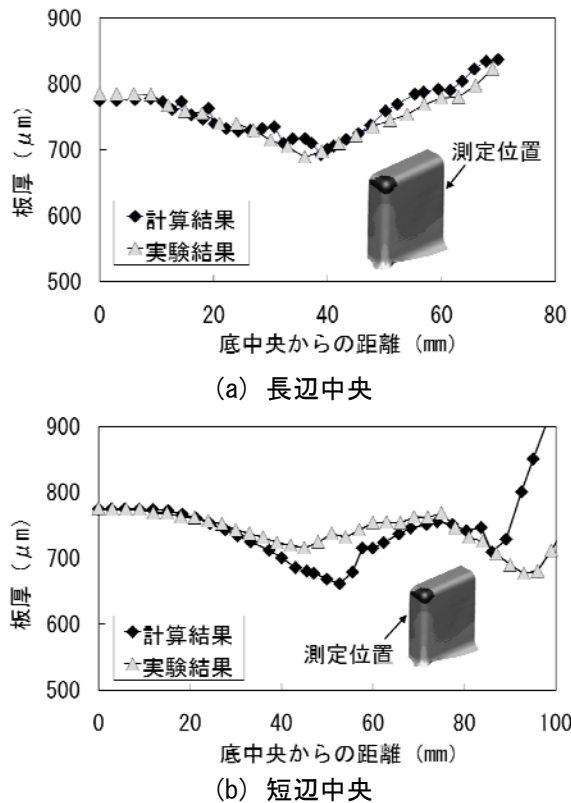


図5 第2工程終了後の板厚分布

## 4.2 成形可否判断

4.1 のとおり，すべり線場理論を初期工程設計に用いた温間絞り成形解析は，実験結果とよく一致した。ただし，成形条件によっては図6に示すような成形不良が発生することが，実験，解析とも確認された。破断個所については実験と解析にてよく一致しており，成形可否判断および成形条件の最適化にシミュレーション技術が有効であるといえる。

## 5. 結 言

- (1) すべり線場理論が温間絞り成形においても有効であり，初期工程設計の迅速化に大きく寄与することを示した。

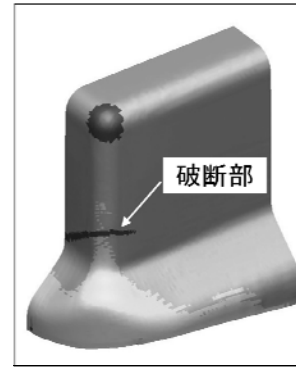


図6 第2工程における破断形態

- (2) すべり線場理論にシミュレーション技術による成形可否検証を加えることで，より迅速かつ実用的な工程設計手法となり得ることを示した。

なお，本研究は平成20年度戦略的基盤技術高度化事業の成果の一部であり，経済産業省の委託を受けて実施したものであることを付記する。

## 参考文献

- 1) 桑原利彦ほか，“四角筒容器多段絞り金型の自動設計”，塑性と加工，30，337，1989，p227-233.
- 2) 下村修ほか，“有限要素法を用いたマグネシウム合金板の温間深絞りにおける温度条件の検討”，第55回塑性加工連合講演会資料，121，2004，p121-122.
- 3) 宅田裕彦ほか，“AZ31 マグネシウム合金板の温間深絞り加工の有限要素解析”，塑性と加工，47，541，2006，p41-45.
- 4) 永倉寛巳，“プレス成形シミュレーション技術を駆使した高効率プレス成形技術の開発”，佐賀県工業技術センター研究報告書，2008，p17-21.

# プレスシミュレーションにおける材料特性の逆解法に関する研究

須貝 裕之\*

Reverse Analysis of Material Property for Stamping Simulation

SUGAI Hiroyuki\*

## 1. 緒 言

有限要素法によるプレスシミュレーションはプレス成形の試作コストと時間を低減する技術として、中小企業においても普及が進みつつある。シミュレーションを行う際に必要なデータにプレス材料の加工硬化特性がある。この特性は主要材料の一般的な値であれば解析ソフトウェアにあらかじめ登録されているが、実際には同じ規格の材料でも組成や加工履歴等によって特性が異なる。したがって個々に特性を調べる方が解析精度も向上するが、材料試験機を持たない企業では容易でない。そこで既存のプレス成形の結果から加工硬化特性を逆算できれば、企業でもプレスシミュレーションの精度を向上させることができ、シミュレーションを導入しやすくなる。

本研究ではプレス成形結果とプレスシミュレーションより材料の加工硬化特性を推定する手法について基礎的検討を行った。ここでは成形時に得られるパンチ荷重やフランジ直径などの成形結果のうち加工硬化特性の変化に対して大きな影響をうける、すなわち加工硬化特性を逆算しやすい成形結果について調べた。

## 2. 加工硬化特性を得るための引張試験

実際の材料の加工硬化特性を調べるため、アルミニウム圧延材の引張試験を行った。材料は純アルミニウムA1052-Oで板厚は0.8mm。試験片の形状はJIS Z2201の13B号とした。試験片を

圧延方向に対して平行と直角の2方向からそれぞれ切り出し、材料特性の異方性についても調べた。試験速度は5 mm/minとした。試験結果を図1に示す。

圧延方向の違いにより加工硬化特性に違いは見られるが、その差は2.5~5%程度とわずかであった。そこで今後行うシミュレーションでは、これらの試験結果の中間的な特性となるよう加工硬化特性近似式の各係数を決めた(表1)。

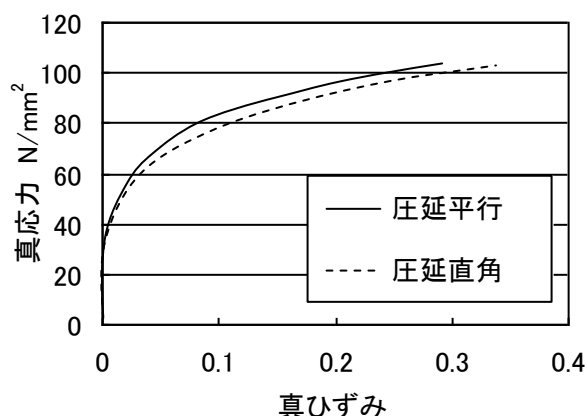


図1 材料試験結果

## 3. シミュレーションの解析設定が計算時間と精度に結果に与える影響

今回の解析には動的陽解法有限要素法ソフトウェア LS-DYNA ver.970 を使用した。このソフトウェアでは動的陽解法に特有の解析設定項目があり、その設定が解析時間や解析精度に大きな影響を及ぼすことが経験的にわかっている。最初にこの影響について確認するため前項で行った引張試験を再現した解析モデルを作成し、各種設定と計算精度・解析時間の関係を調べた。

\* 中越技術支援センター

図2に解析モデル，表2に今回調べた解析パラメータの種類とそれによる解析時間・解析精度の結果をしめす。ここでは特に設定を行わない場合の解析結果（標準解析モデル）を計算誤差と計算時間の基準とした。この解析モデルでは最大ひずみ量が0.23を越えると図3のような解析精度を悪化させるアワーグラスモードが発生することが確認されている。そこで「アワーグラス制御」\*1，「マススケーリング」\*2，「完全積分」\*3の3条件で解析を行った。計算の結果「完全積分」の条件が，アワーグラスの発生を抑制し，かつ最も計算誤差が小さい結果となった。その反面，計算時間は3倍以上に増加してしまう。これに対して「マススケーリング」の場合，解析上の材料の質量密度を実際の100倍にする

- \*1 アワーグラスの発生を押さえる解析パラメータ  
 \*2 材料の質量密度を大きくすることにより1ステップあたりの解析時間を大きくしトータルでの解析時間を短縮させる解析パラメータ  
 \*3 要素内の積分点を増加させた解析パラメータ

表1 加工硬化特性

| 近似式      | $\sigma = F\varepsilon^n$ |
|----------|---------------------------|
| 強化係数 F   | 145                       |
| 加工硬化指数 n | 0.27                      |

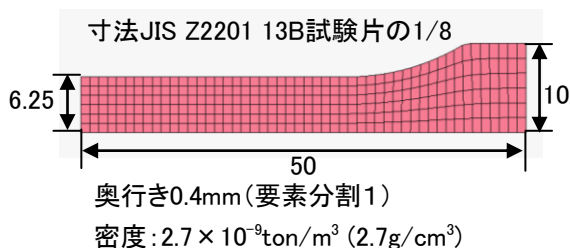


図2 材料試験解析モデル

と，計算時間は1/10に短縮される。また計算誤差も-5%と完全積分には及ばないものの大きな差ではない。以上の結果より，本研究では解析の迅速性を優先するため，マススケーリングを適用して円筒深絞りシミュレーションを行うこととした。

#### 4. 加工硬化特性近似式の係数が深絞り加工結果に与える影響

実際の深絞り試験から得ることが容易なデータには，加工中のパンチ荷重，加工前にblank表面に描いたスクライブドサークル<sup>1)</sup>を測定することにより得られる成型品のひずみ量，そして加工終了後の成型品フランジ部の直径が考えられる。ここではどの結果が加工硬化特性の逆算に有効かを検討するため，円筒深絞りシミュレーションにおいて表1にしめす2つの係数Fとnをそれぞれ±10%変化させ，この変化が上記3つの結果に及ぼす影響について調べた。

表2 解析パラメータの種類

|          | 標準解析モデル | アワーグラス制御 | マススケーリング | 完全積分  |
|----------|---------|----------|----------|-------|
| アワーグラス制御 | ×       | ○        | ×        | ×     |
| マススケーリング | ×       | ×        | ○        | ×     |
| 完全積分     | ×       | ×        | ×        | ○     |
| 計算誤差     | 0%      | -8%      | -5%      | -2%   |
| アワーグラス発生 | △*4     | なし       | なし       | なし    |
| 計算時間     | 20min   | 16min    | 2min     | 71min |

\*4 ひずみ量0.23付近からアワーグラス発生

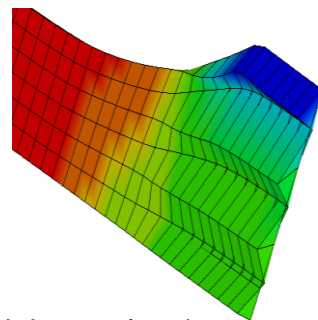


図3 試験片つかみ部に生じたアワーグラスモード

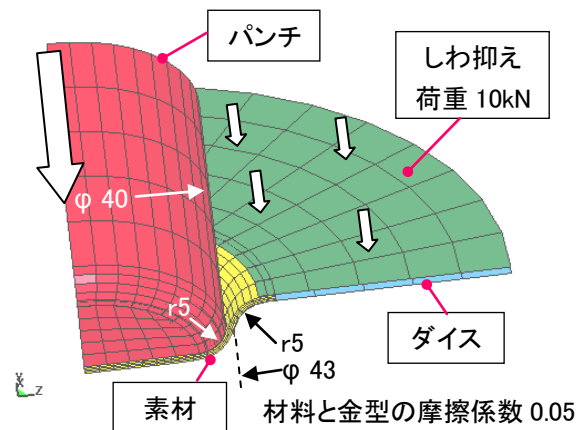


図4 円筒深絞り解析モデル



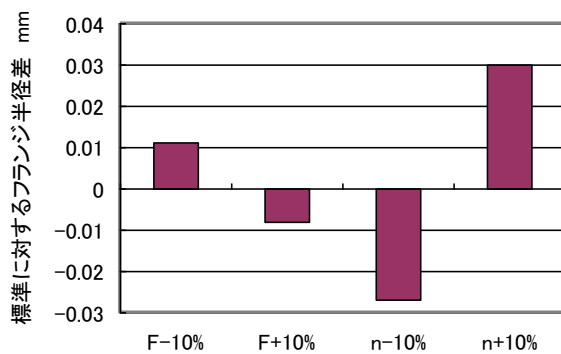


図5 標準条件に対するフランジ半径差  
(パンチストローク 10mm)

図4に解析モデルをしめす。実在する円筒深絞り金型と同じ寸法とし、金型はシェル要素、材料はソリッド要素とした。今回の解析では材料の異方性は考慮しないので、形状の対称性より4分の1の部分のみをモデル化した。要素数は944、節点数は1385である。最初に表1の加工硬化特性の係数F, nを変化させない条件（標準条件）で計算を行い、次に係数F, nを変化させて計算を行って標準条件との差を調べた。図5～7に成形終了後のフランジ半径、成型品表面のひずみ量、パンチ荷重それぞれの標準条件に対する差をしめす。係数F, nが±10%変化するのに対して、フランジ直径と成型品表面のひずみ量の変化はそれぞれ±30μm, -0.6～+1.4%とわずかで実際に測定するのは困難である。一方パンチ荷重は±9%,

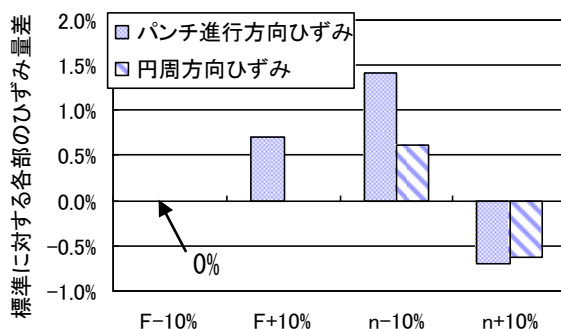


図6 標準条件に対するひずみ量の差

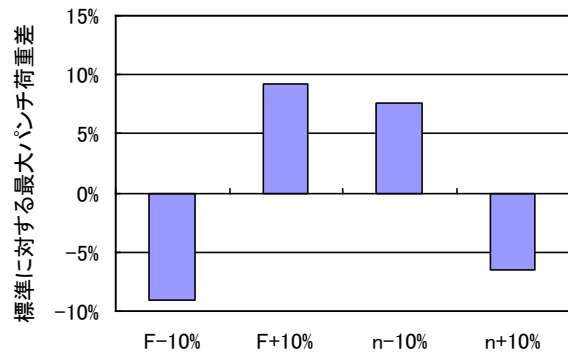


図7 標準条件に対する最大パンチ荷重の差

荷重にして±420Nとなり、ロードセル等を用いれば実用的に検出可能であるという計算結果が得られた。今回の結果を実際に適用する場合以下の手順となる。

まず既存の金型でプレス成形を行いパンチ荷重をロードセルで測定する。次にプレスシミュレーションにて実測したパンチ荷重と同じパンチ荷重が得られるまで係数Fとnの値を変化させる。これにより材料試験を行うことなく、材料の加工硬化特性を得ることができる。得られた値を使って異なる金型形状での高精度なプレスシミュレーションが可能となる。

## 5. 結 言

加工硬化特性近似式の係数の変化がプレス成形結果に与える影響をシミュレーションにより調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 実際のプレス成形のデータをもとに材料の加工硬化特性を推定する場合、成形中のパンチ荷重を利用するのが有効である。
- (2) 動的陽解法有限要素法の解析設定項目を変化させる場合、マスキングを適用することにより計算精度の低下を-5%程度に留め、かつ計算時間を1/10に短縮することができる。

## 参考文献

- 1) 中村和彦他, "プレス絞り加工", 日刊工業新聞社, p5.

# 難削材の加工技術研究

須藤 貴裕\* 相田 収平\*\* 石川 淳\*\* 中川 昌幸\* 樋口 智\*  
白木 和範\*\*\* 久保 知巳\*\*\* 深堀 英明\*\*\*

## A Research of High Speed Milling of Titanium Alloy

SUTOH Takahiro\*, AIDA Shuhei\*\*, ISHIKAWA Atsushi\*\*, NAKAGAWA Masayuki\*, HIGUCHI Satoru\*,  
SHIRAKI Kazunori\*\*\*, KUBO Tomomi\*\*\* and FUKABORI Hideaki\*\*\*

### 1. 緒 言

近年、医療産業や航空機産業およびエネルギー産業などで多く使用されているチタン合金の切削加工技術が注目されている。チタン合金は難削材であり、切削加工においては、高トルクタイプの主軸を搭載した高剛性の工作機械を用い、大量の冷却液を用いた加工が常識となっている。こうした加工では、荒加工から仕上加工に至るまでに何十種もの工具を使用することも少なくなく、また高トルクタイプの主軸により強引に切削するため、工具寿命も短く、同じ工具を何本も用意し、次々と工具を交換することもしばしばである。これは、工具費の増加はもちろん、多種類の工具を使用するために多くの時間を CAM 操作に費やすことになり、低コスト化を進めるうえで重大な課題となっている。

本研究では、これまで蓄積した小径ボールエンドミルによる金型の高速ミーリング加工技術の知見をもとに、荒加工から仕上加工まで必要最小限の工具種類で加工する同技術をチタン合金に適用し、実加工時間や工具費の低減はもとより、CAM 操作に費やす時間の大幅な低減に取り組んだ結果を報告する。

### 2. チタン合金の切削性

表 1 に代表的なチタン合金である  $\alpha-\beta$  型の

|     |            |
|-----|------------|
| *   | 研究開発センター   |
| **  | 下越技術支援センター |
| *** | 株式会社山之内製作所 |

チタン合金 (Ti-6Al-4V) と鉄の物理的性質を示す。チタン合金は鋼などの鉄系材料に比較して耐食性、耐熱性、引張強さなどで優れた性質を持っている反面、切削加工する場合はこれらの特性が工具寿命を短くする原因となる。具体的な特徴を以下に示す。

- 1) 高温強度が高いことから切削抵抗・切削温度が高く、また切削応力が切れ刃近傍に集中する
- 2) 熱伝導率が低いために刃先に熱が蓄積し、さらに化学的に活性であるため凝着摩耗が進行しやすい
- 3) ヤング率が鋼の約 1/2 と低い上に、鋸状切り屑の発生に伴ってびびり振動が生じやすい

チタン合金の切削で特に問題となるのは切削に伴う熱である。図 1 に切削により発生する熱とその流れを模式的に示す。チタン合金を切削したときの切削温度は、同一切削条件で S45C を切削した場合に比較すると約 200℃ も高い<sup>1)</sup>。また、チタン合金は熱伝導率が小さいために切削熱が工具に蓄積しやすい。超硬工具による切削の場合、S45C では発生した熱が工具側と切り屑側に伝わる比率は 1:1 であるのに対して、チタン合金の場合は 4:1 と工具側に伝わる比率が非常に高いことが知られている<sup>2)</sup>。以上の点から、チタン合金の切削では切削速度を低くして切削温度を下げる、また大量の冷却液を用いて工具の温度上昇を防ぐことなどが重要とされてきた。

表 1 チタン合金と鉄の物理的性質

|                                                | チタン合金<br>(Ti-6Al-4V) | 鉄     |
|------------------------------------------------|----------------------|-------|
| 比重                                             | 4.42                 | 7.9   |
| 溶融点 (°C)                                       | 1,540 - 1,650        | 1,530 |
| ヤング率(Gpa)                                      | 113                  | 192   |
| 熱伝導度 (W/m°C)                                   | 7.5                  | 62    |
| 熱膨張係数<br>( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | 8.8                  | 12    |



図 2 ボールエンドミルによる切り屑形状

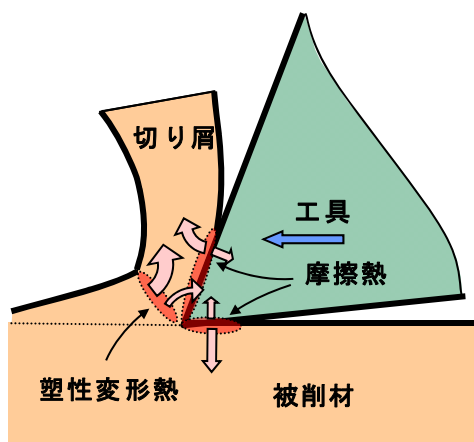


図 1 切削により発生する熱とその流れ

### 3. 小径ボールエンドミルの適用

金型など高硬度材の加工においては、小径ボールエンドミルによる高速ミーリングが大きな効果を持つことが明らかにされているが<sup>3)</sup>、チタン合金の切削においてはボールエンドミルが使用されることは少ない。これは自由曲面の創生が求められる場合以外はそれを積極的に活用する必然性がないこと、また中心に切れ刃を持つボールエンドミルの切削機構が複雑であり、加工精度や加工品質の点で問題視されやすいことなどによる。しかし、その複雑な切削機構を逆手にとれば、問題解決の有効な手立てになる。図 2 にボールエンドミルによる切り屑形状を示す。ボールエンドミルでは切れ刃の幾何学的な形状から切削速度と切り屑厚さが連続的に変化するため、切込み深さや 1 刃当たりの送りを変

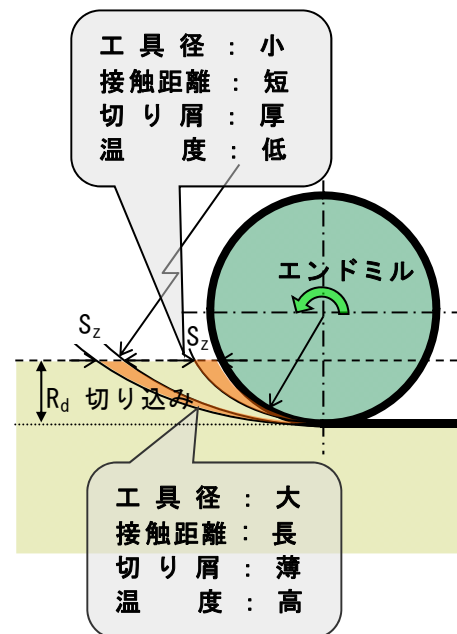


図 3 工具径の違いによる切り屑の模式図

えることで、切削による熱の発生量とその流れを細かくコントロールすることが可能である。

つづいて、図 3 に使用する工具径の違いによる切り屑の模式図を示す。切れ刃 1 枚あたりの送り量を一定としたとき、比較的大径のエンドミルを用いた場合には、切れ刃と被削材の接触距離が長くなり、生成される切り屑厚さが薄くなる。一方、小径エンドミルを用いた場合には、接触距離が短くなるとともに、切り屑厚さが厚くなることから、小径エンドミルを適用することにより、切削による熱の

発生量を少なくすることができるほか、切り屑厚さを厚くすることで切り屑の熱容量が大きくなり、より多くの熱を切り屑へ伝導させることができる。

こうした点からチタン合金に小径ボールエンドミルを適用した場合、従来の加工法のように大量の冷却液を必要とせず、ドライまたはセミドライによる加工が可能であるほか、工具や被削材に切削による熱が蓄積しないことから、切削速度を高めた高速ミーリングが可能と考えられる。

## 4. 研究内容

### 4.1 切削加工条件の検討

チタン合金の高速ミーリングに適した切削加工条件を検討するため、切削速度の違いによる工具寿命を比較した。一辺が 43mm、深さ 15mm のポケット形状を加工することで行った。なお、工具の突き出し長さは 20mm とした。加工には主軸に空気静圧スピンドルを搭載した NC フライス盤を用いた。NC フライス盤の主な仕様を表 2 に示す。工具は TiAlN 系コーティングを施した市販の直径 6mm のボールエンドミルを使用した。切削速度は基準となる条件 1 の切削速度を 1.0 とした場合、条件 2 は 1.4、条件 3 では 1.8 とした。送り速度は 1 刃あたりの送り量が一定となるように設定し、オイルミストを使用したセミドライ加工とした。なお、ここで設定した切削速度と送り速度はエンドミルの一般的な推奨加工条件と比較すると数倍以上の値である。工具寿命の判断には切削に用いたフライス盤の主軸動力値と工具の逃げ面摩耗幅の両方を用いた。主軸動力値は、各条件において最初の切削

距離 50m における主軸動力の最大値を 100 とする値で表し、120 を超えた時点で寿命と判断した。

各加工条件における切削距離と主軸動力値および逃げ面摩耗幅の関係を図 4 に示す。切削速度が最も遅い条件 1 では切削距離 1,000m において、主軸動力値および逃げ面摩耗幅ともほとんど増加せず、相当な長寿命が期待できる。条件 1 と比較して 1.4 倍の切削速度とした条件 2 では、切削距離の増加に伴い緩やかに主軸動力値、逃げ面摩耗幅とも増加しているが、切削距離が 2,900m におよぶまでの主軸動力値は 120 に到達していない。条件 1 と比較して 1.8 倍と最も高速な切削速度である条件 3 では、切削距離の増加に伴い、急激に主軸動力値と逃げ面摩耗幅が増加していることがわかる。切削距離 450m において主軸動力値が 120 を超えたため寿命と判断した。前述のとおり、条件 1 では条件 2 を超える相当な長寿命が期待できるが、実際の加工において工具費と単位時間当たりの機械費を考慮すると、トータルでの加工費低減にはつながらないと判断し、実験を中断した。図 5 に実験を終了した時点での工具切れ刃部分の写真を示す。条件 1 では切れ刃部分は初期摩耗程度である。条件 2 では、境界部での摩耗が進行しており、条件 3 の工具では、先端部、境界部ともに摩耗が進んでいる。

ここで、図 6 に各加工条件において、部品加工にかかる加工費を試算した結果を示す。部品の加工に要する切削距離を 9,000m とし、工具費は 5,000 円/本、機械費は 3,000 円/hr とそれぞれ仮定した。なお、条件 1 では、相当な工具寿命が期待できるため、工具寿命を 9,000m とし、工具は 1 本のみですべて加工できるものと仮定した。図に示したとおり、条件 3 では加工時間は短く機械費は最も安くなるが、工具寿命が短いために工具費が著しく増大し、トータルでは最も高価になった。一方、条件 1 では工具費は最も少なくなるものの、加工時間が増大するために機械費が増大する。条件 2 においては、工

表 2 NC フライス盤の主な仕様

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| 主軸形式              | 空気静圧スピンドル    |
| 主軸回転数 (min-1)     | 5,000~50,000 |
| 最大切削送り速度 (mm/min) | 20,000       |
| 制御装置              | TOSNUC-888.2 |
| 移動指令最小値(mm)       | 0.001        |

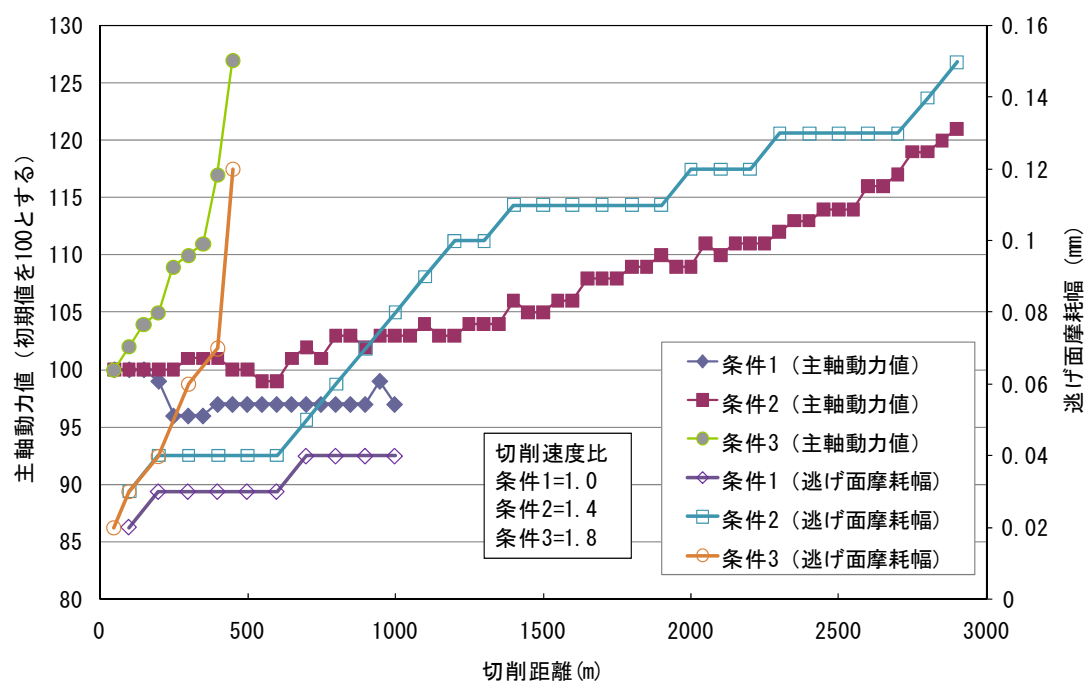


図 4 各加工条件における切削距離と主軸動力値および逃げ面摩耗幅の関係

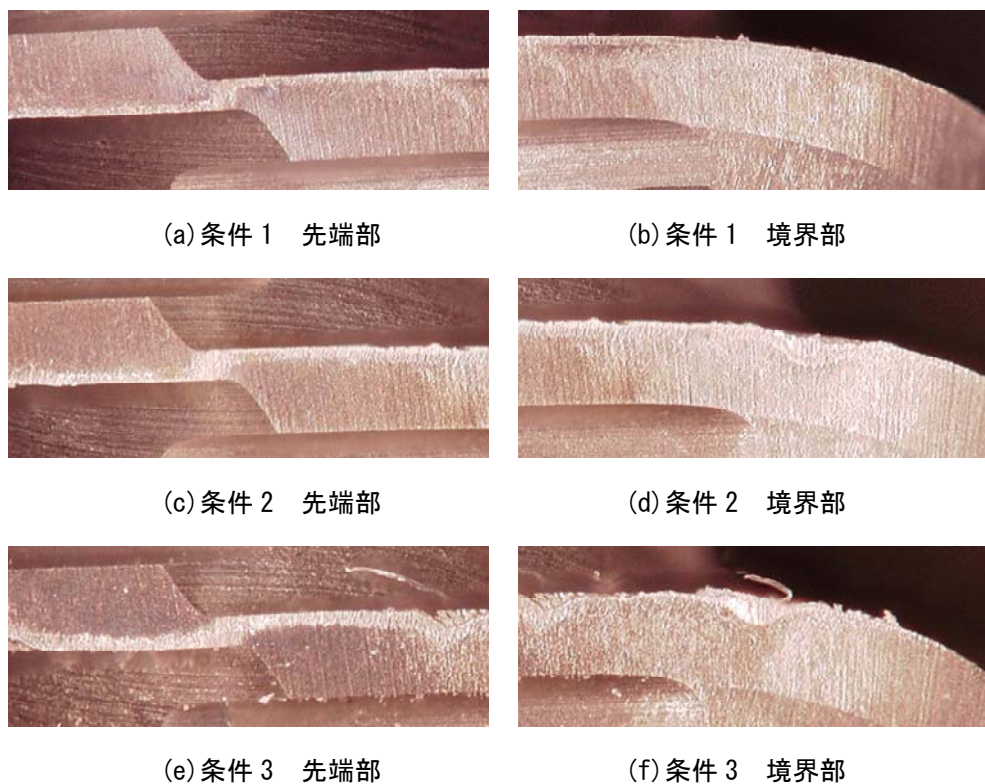


図 5 試験終了時の工具

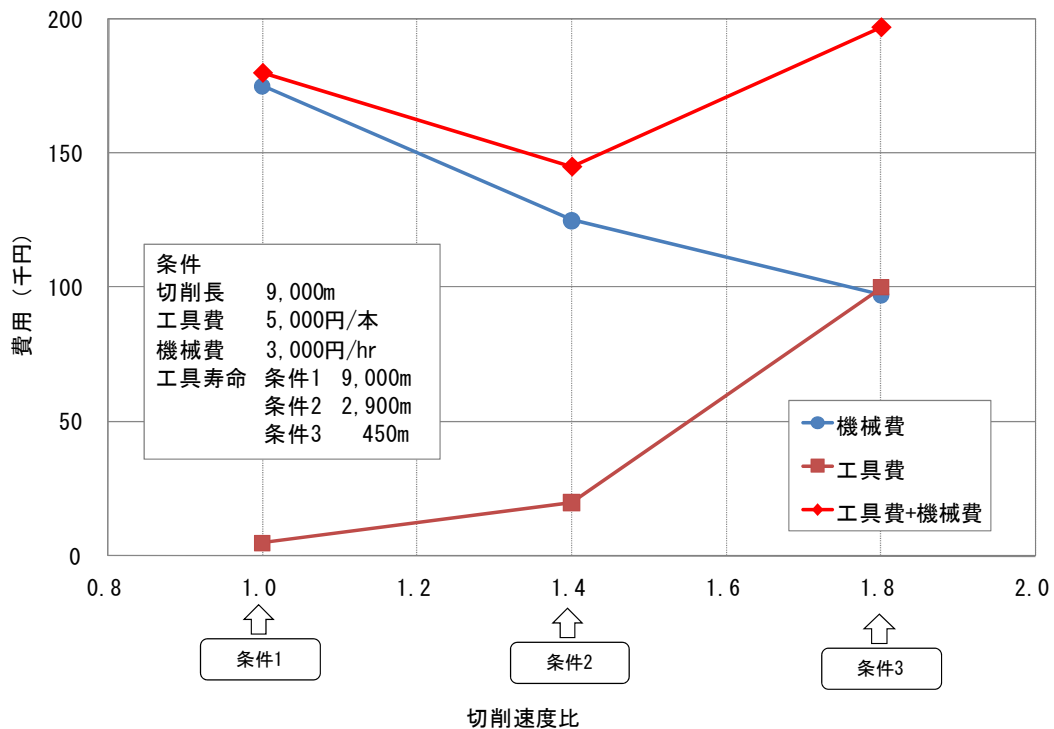


図 6 各加工条件における加工費の試算

具費および機械費とも中間的な値であるが、トータルでは最も安価となった。よって条件2が最適な条件であると判断した。なお、CAM 操作にかかる費用はどの条件においても1種類の工具による加工であるため、同一であると仮定し除外した。

## 4.2 部品加工による検証

### 4.2.1 ツールパス作成

最適化した加工条件をもとに、チタン合金製部品を想定した形状をモデリングし、それを加工するツールパスを作成した。図7に加工する部品の形状を示す。外形寸法は200mm×200mm×38mmである。使用する工具の種類を1種類とし、加工条件は前述の条件2を選択した。加工に用いるNCプログラムは使用する工具の種類の数が必要であり、従来の加工法では相当数のNCプログラムを作成する必要があった。しかし、本加工法では工具を1種類とすることで、作成するNCプログラムは荒加

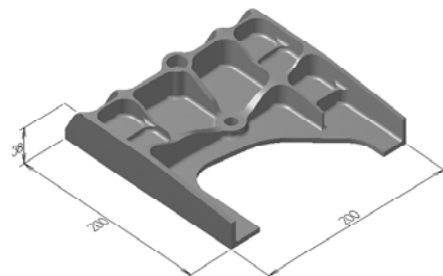


図 7 加工する部品の CAD モデル

工用1、仕上加工用1の合計2つを必要とするのみであり、従来法と比較して、CAM 操作に費やす時間を大幅に短縮することができた。

### 4.2.2 部品加工

先にモデリングした形状を加工し、従来の加工法に対する優位性を検証した。総切削距離は約1,500m、除去体積は約700mlである。図8に加工した部品の写真を示す。使用した工具は1種類で、荒加工を1本のみで終了することがで





図 8 加工した部品

きた。仕上加工では新品の工具を使用した  
が、合計で 2 本の工具を使用したのみで加工を完了  
することができた。従来の加工法では、同程度  
のサイズの部品を加工するために 10 数時間を  
要しているが、本加工法での加工時間は 8 時間  
であり、加工時間についても短縮することがで  
きた。

## 5. 結 言

チタン合金加工に対して、小径のボールエン  
ドミルを用いた高速ミーリングの適用を試みた  
結果、CAM 操作の負担軽減、切削時間の短縮、  
使用工具種類の削減などによる工数の大幅な削  
減が可能であることを明らかにした。

## 参考文献

- 1) N.Narutaki, A.Murakoshi, S.Motonishi, “Study  
on Machining of Titanium Alloys”, *Annals of  
the CIRP*, Vol.32, No.1, 1983, p65-69.
- 2) Mustafizur RAHMAN, Yoke San WONG,  
A.Rahmath ZAREENA, “Machinability of  
Titanium Alloys”, *JSME International Journal,  
Series C*, Vol.46, No.1, 2003, p107-115.
- 3) 嶽岡悦雄, 宮口孝司, “新潟における高速ミ  
ーリング研究の動向”, *機械と工具*, Vol42,  
No.4, 1998, p24-29.

# レーザ測長器を用いた三次元座標測定システムの開発

菅野 明宏\*

Development of Three-dimensional Coordinate Measuring System Using a Laser Distance Meter

KANNO Akihiro\*

## 1. 緒 言

県内の製造業では、産業機械や鉄道車両そして造船の分野などにおいて数メートルから数十メートルといった大きな構造体の加工が行われている。その製造現場では、それら大型構造体の機械加工や溶接後の寸法を高精度に管理することで、後工程の組立時に生じる不具合や修正工数を低減させたいという要望がある。そしてそれを実現するためには、被測定物上の三次元座標を離れた位置から簡便かつ高精度に測定する技術が必要である。

ここで既存の三次元測定器について考えると、一般的には測定テーブル上に載せることができる比較的小さな物体を対象としているものが多い。数メートル以上の広空間に対して三次元座標を測定できる装置では、アーム式のタッチプローブ型座標測定器や、レーザ測距機能を応用した三次元レーザスキャナなどがある。しかし前者は、測定範囲に限界があることに加えて測定者の手の届かないような離れた場所の座標測定は困難である。一方で後者は、非接触で広空間の三次元形状が測定できるが数千万円といった価格であり、コスト面から前述のような製造現場における加工精度確認への応用は難しい。

そこで本研究では、製造現場で利用できる簡便かつ低コストな寸法測定技術の確立を目的として、レーザ測長器を利用した簡易的な三次元座標測定システムを試作した。本システムは数メートルから数十メートル程度離れた位置にある物体上の三次元座標をミリメートルの精度で

表 1 システム構成要素の仕様

|         |              |                               |
|---------|--------------|-------------------------------|
| レーザ測長器  | 測定精度         | 平均±1.5mm/最大 2mm               |
|         | 測定範囲         | 0.3～100m                      |
|         | 測定時間         | 0.5～4 秒/点                     |
|         | レーザ<br>スポット径 | 6/30/60mm<br>(10/50/100m 測定時) |
| ガルバノミラー | 走査範囲         | ±30 度 (光学角)                   |
|         | 分解能          | $1.17 \times 10^{-4}$ 度/パルス   |

測定することを目的として開発を進めている。本稿では、そのシステムの概要と測定実験の一例を紹介する。

## 2. システムの概要

### 2.1 構成と仕様

本研究で作製したシステムの外観を図 1 に示す。本体部はレーザ測長器 (Disto pro 4a : Leica Geosystems 製) と 2 つのデジタルガルバノミラー (FS-1AG15 : キヤノン (株) 製) で構成される。表 1 にそれら構成要素の仕様を示す。レーザ測長器による距離計測とガルバノミラーの駆動は

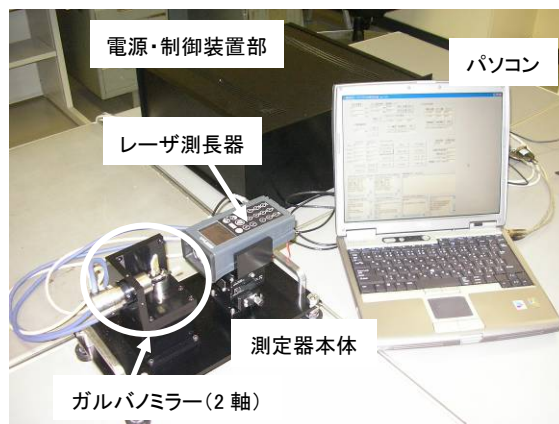


図 1 システムの外観

\* 下越技術支援センター

本研究で開発したソフトウェアを用いてパソコンにより制御される。

## 2.2 三次元座標系と測定範囲

図 2 にレーザ走査部の詳細と測定座標系を示す。測定ではレーザ測長器から射出されたレーザが、2つのミラー(XおよびYミラーとする)によって偏向され、被測定物上へ照射される。その際にレーザ測長器によって計測される距離データと2つのガルバノミラーの回転角度データより、レーザが照射されている点の三次元座標を演算する<sup>1) 2)</sup>。ここで測定座標系の原点は、2つのミラーの回転角度が0度の際のYミラー上のレーザ反射点としている。そして測定できるのはZ軸上からX軸およびY軸周りに $\pm 30$ 度の範囲である。また図2では鉛直上向をZ軸としているが、ガルバノミラーを固定しているホルダーを90度回転させることで水平方向をZ軸にすることができる。さらに本システムでは2点間の距離測定、および任意の断面プロファイルや領域に対する点群座標の自動測定が可能である。

## 3. 測定実験

### 3.1 実験内容

離れた場所にある構造物の測定を模して、工場などの天井にある角ダクトの寸法測定を行った(図3)。ここで角ダクトは床から約3mの高さにある。実験では図3に示したラインAお

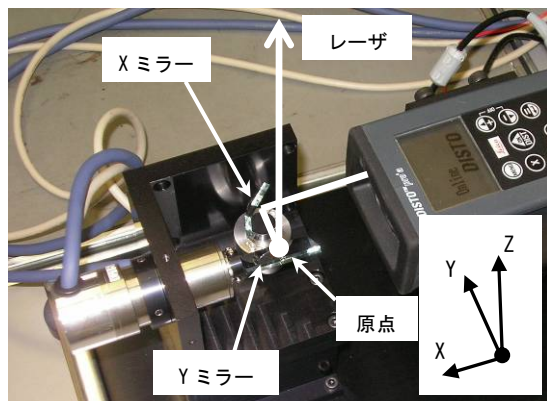


図2 レーザ走査部の詳細と測定座標系

よびラインB上の座標を測定して断面プロファイルを求めた。測定ではガルバノミラーのステップ角度を $2.93 \times 10^{-3}$ 度とした。このとき3m離れた位置では測定間隔が約0.3mmとなる。ラインAは2,001点の座標を、ラインBは2,241点の座標を測定した。そして、あらかじめ計測部の角ダクトの幅を直尺により測定しておき、本システムにより測定した座標から求めた値との比較を行った。加えてラインA部については、天井を基準とした角ダクトの高さの寸法も求めて同様に比較を行った。

### 3.2 実験結果

図4に本システムでの測定結果を示す。それぞれのラインの座標測定では、Yミラーを固定していたので、結果はX-Z平面内の断面プロファイルとなる。ここでダクトの幅はエッジ部の2点の座標間距離から求めた。また、高さの演算では、はじめにダクト部と天井部の測定座標について最小二乗法により直線近似を行った。次に、エッジ部を基点としてダクト部の近似直線に対して垂直な線と天井部の近似直線との交点を求めて、先のエッジ部の基点座標との距離から高さを算出した。このとき、エッジ部の基点座標は後述する測定誤差の要因を考慮して、ダクト中心方向に10点の測定座標の平均値と

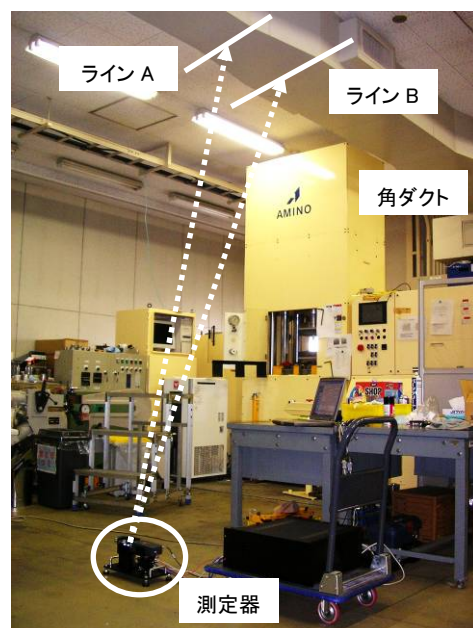


図3 角ダクトの寸法測定風景

した。表 2 に本システムの測定座標から求めた値と直尺での測定値を示す。これより本実験では直尺での測定に対する本システムの測定誤差は-1.9mm から+2.6mm であった。すなわち、約 3m 離れた場所で数ミリメートル程度の精度で寸法測定が可能であると言える。

#### 4. 考 察

ここでは本システムにおける測定誤差の主な要因について考える。実験では、微小なステップでレーザ光を移動させて座標測定を行うことによりエッジ部分の座標を求めている。しかしながら、表 1 のとおりレーザのスポット径は測定距離が長くなるほど大きくなる。例えば 3m 離れた対象物上でのスポット径は約 5mm の大きさになる。従って、本実験のような測定では、エッジ部近傍でレーザ光がダクト突出部と天井部の両方に照射される場合がある。そのときの測距値はそのレーザ照射範囲の中央部分の平均値として現れるため、誤差が生じるものと考えられる。これは図 4 の測定断面プロファイルで、エッジ付近に明らかに大きな誤差を含んでいる座標値があることから推察できる。紙面の都合上で詳細は割愛するが、今回はエッジ近傍において最大 4 ステップ分の測定座標値にそれらの誤差が含まれていた。なお本実験では、寸法測定の際にそれらの誤差を含む座標値は除外している。今後は、それらの座標値に対する補間アルゴリズムを検討することで、測定精度を向

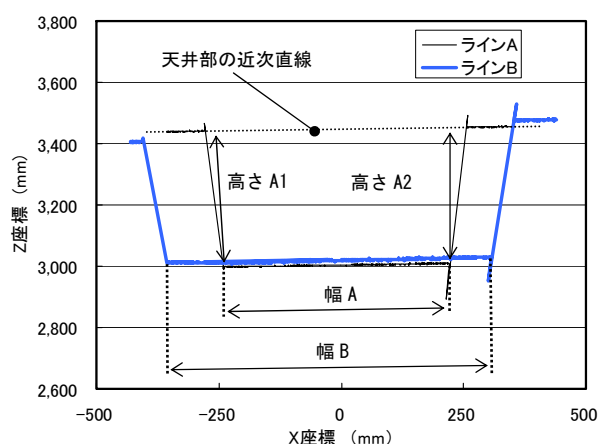


図 4 測定結果(X-Z 断面プロファイル)

表 2 測定結果(寸法測定)

| 測定箇所  |       | 測定結果(mm) |       | 誤差<br>(mm) |
|-------|-------|----------|-------|------------|
|       |       | 本システム    | 直尺    |            |
| ライン A | 幅 A   | 461.6    | 463.5 | -1.9       |
|       | 高さ A1 | 443.3    | 442.0 | +1.3       |
|       | 高さ A2 | 444.6    | 442.0 | +2.6       |
| ライン B | 幅 B   | 662.7    | 664.0 | -1.3       |

上できると考えている。

#### 5. 結 言

- (1) 大型構造体の寸法を簡易的に測定することを目的としたレーザ三次元座標測定システムを試作した。本システムにより約 3m 離れた位置にある凸形状の寸法測定を行い、数ミリメートルの精度で測定できることを示した。
- (2) エッジなどレーザスポット径の範囲内で Z 座標が大きく変化する形状部の測定で誤差が大きくなる。測定精度をさらに向上させるためには、それらの測定座標値の補間アルゴリズムを検討する必要がある。

#### 謝 辞

新潟大学工学部機械システム工学科の新田 勇教授には、レーザによる座標測定技術に関してご指導いただくと共に実験機材の貸与で多大なるご協力をいただきました。ここで深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 新田 勇, 小森克也, 飯村良雄, 西村孝司, “レーザ測長器を用いた 2 点間測定に関する基礎研究”, 日本機械学会 北陸信越支部第 43 期総会・講演会論文集, 2006, p139-140.
- 2) 新田 勇, 小森克也, “レーザ測長器を用いた 3 次元測定器の基礎研究”, 日本機械学会第 6 回機素潤滑設計部門講演会論文集, 2006, p153-154.

# 石油系溶剤回収静止乾燥機における安全性の調査研究

内藤 隆之\* 笠原 勝次\* 木嶋 祐太\* 馬場 大輔\*\*  
桂澤 豊\* 吉田 正樹\* 阿部 淑人\* 佐藤 清治\*

A safety analysis report of a wear drying machine equipped with a petroleum solvent recovery unit

NAITO Takayuki\*, KASAHARA Katsuji\*, KIJIMA Yuuta\*, BABA Daisuke\*\*,  
KATSURAZAWA Yutaka\*, YOSHIDA Masaki\*, ABE Yoshito and SATO Seiji\*

## 1. 緒 言

対象装置は業務用のドライクリーニング乾燥機である。従来の乾燥機は回転ドラム方式であり乾燥工程で発生する溶剤ガスを大気へ排出してきた。この排出される溶剤ガスは大気汚染防止法では「揮発性有機化合物(VOC)」に該当し、ドライクリーニング乾燥機は法規制の対象施設（施行令第2条の2）には該当しないもののVOC削減のため事業者の自主的な取り組み（法第2条の6）が求められている施設のひとつである。昨今の国内におけるVOC規制に関しては東京都、埼玉県および大阪府でドライクリーニング施設を規制対象の施設としており、今後他の県でも規制されてくるものと考えられる。

対象装置はVOC対策および溶剤のリサイクルを目的に新規開発されたものである。具体的には石油系溶剤で洗浄した衣類を脱液後、本装置で乾燥と同時に揮発させた溶剤ガスを回収している。ただし、蒸発させる際に揮発する石油系溶剤のガス濃度と乾燥熱風温度の値により引火、爆発、火災の危険性がある。そこで、安全かつ迅速に衣類乾燥をするための安全運転領域等の確認を行った。

また、対象装置は静止方式であり回転ドラム方式と比べて乾燥中に受ける衣類のダメージ（揉み、叩き、擦れ等）が少ないことを特徴としている。

## 2. 実施方法

### 2.1 乾燥機内温度分布の測定

乾燥機内の5箇所に温度センサーを取り付け、乾燥機運転中の温度変化を測定し、温度分布の経時変化を調べた。運転条件を表1に示す。

図1に乾燥機の概略および計測場所を示す。乾燥

表1 乾燥機の運転条件

| 設定温度(℃) | 保持時間(分) |
|---------|---------|
| 55      | 5       |
| 60      | 5       |
| 65      | 12.5    |
| OFF(冷風) | 2.5     |

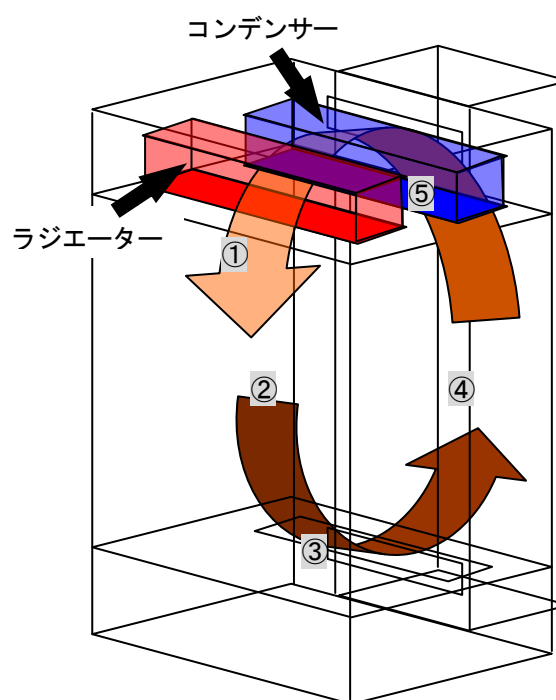


図1 乾燥機概略

\* 下越技術支援センター

\*\* 上越技術支援センター



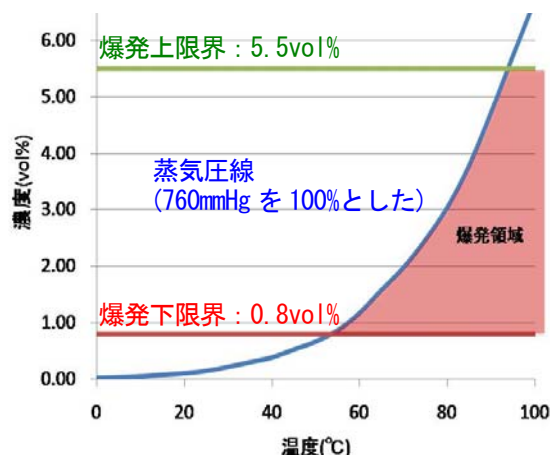


図2 試験用溶剤の爆発領域

機の運転方法は背面のシロッコファンにより内部の空気を循環させ、同時に乾燥機上部に設置したラジエーターとコンデンサーにより空気の加熱と冷却を行った。ワークはラジエーターを通過した温風で乾燥させ、同時に蒸発した溶剤ガスはコンデンサーで回収した。試験に用いたワークは紳士冬物ジャケットとし、一度に10着を乾燥した。

## 2.2 乾燥機内溶剤蒸気濃度分布の測定

乾燥機内に設けた測定ポイントへ検知管を挿入して、表1に示す運転条件における溶剤蒸気の濃度変化を測定し、溶剤蒸気濃度の経時変化を調べた。試験に用いた溶剤の爆発領域を図2に示す。

ガス濃度測定は試験開始直後、3, 6, 9, 12, 15, 18, 21分経過後に行った。検知器の吸引量は100ml (1回)、吸引時間は1分30秒とし、測定回数は各測定場所でそれぞれ3回行った。溶剤ガス濃度は図2に示す①および④の場所付近の側壁に設けた開口部に検知管を挿入して測定した。同時にワークの脱液率および溶剤の回収率も計測した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 乾燥機内温度分布の測定

乾燥機内の温度計測結果を図3に示す。計測場所①では運転開始から1分で温度が100℃まで急上昇し、その後22.5分まで90±10℃であった。計測場所②では運転開始から1分で温度が70℃まで急上昇し、1分から8分まで65±5℃、8分から22.5分まで70±5

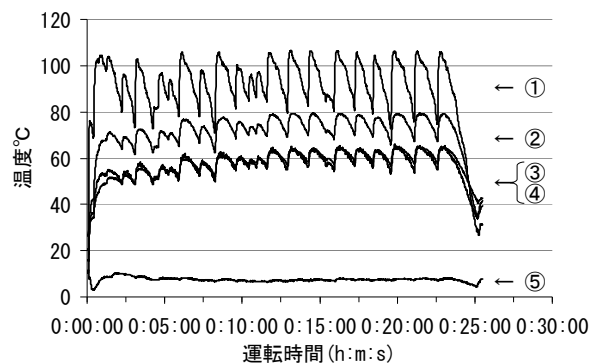


図3 乾燥機内の温度計測結果

℃であった。計測場所③と④では運転開始から1分で温度が50℃まで急上昇し、1分から6分まで55±3℃、6分から10分まで57±3℃、10分から22.5分まで60±5℃であった。計測場所⑤では運転開始から1分で温度が3℃まで急降下し、その後22.5分まで9±1℃であった。

以上のことから、55℃と60℃の設定変更により温度変化が追従できておらず、60℃以下の温度制御について課題のあることがわかった。また、計測場所①の測定値は計測場所④と比べて約40℃高く、変動も±10℃と大きく、計測場所②の測定値も計測場所④と比べて約20℃高く、変動は同じだった。図2より爆発下限界温度が57℃付近であり、爆発領域内で作業することを十分に考慮する必要がある。乾燥機内の溶剤ガス濃度が爆発下限界濃度(0.8vol%)を十分に下回るように、コンデンサーの溶剤回収について注力することが重要である。

### 3.2 乾燥機内溶剤蒸気濃度分布の測定

乾燥機の運転時間とガス濃度の関係を図4に示す。また、ガス濃度および溶剤の脱液率、残液量、回収率の結果を表2に示す。計測場所①では運転開始直後で約1400ppm、3分後にピークを迎え約2400ppm、その後漸減した。計測場所④のシロッコファン直上でも同様な結果となったが、理由は不明なもの全般に①より測定値は高くなり、3分後では約4000ppm(0.4%)であった。しかし爆発下限界である0.8%の半分であり、この運転条件において危険性は極めて低いと考えられる。ただし測定値(読み値)は吸引量100mlおよび吸引時間



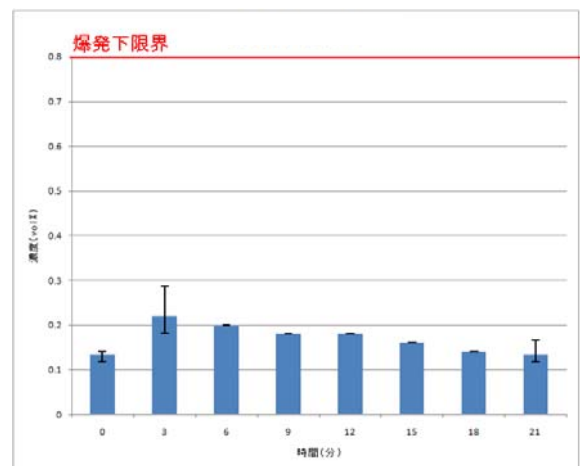
1 分 30 秒での積算値である。つまり乾燥機を 25 分間運転させたときの途中経過として任意の 1 分 30 秒間における平均値とみることができる。瞬間で 0.8%を超えていた場合は確認できていないことになる。ガス濃度は運転開始からおよそ 5 分間で急激に高くなることがわかったので注意したい。

また、今回の実験はワーク 10 着分の脱液率が約 90%(残液率で約 10%:残液量として約 0.74kg = 約 1000ml) で、乾燥中のガス濃度は最高 0.4%程度であったが、仮に脱液率 80%(ワーク 10 着分で残液量が約 2000ml) となった場合においてガス濃度は最高 0.8%近くになることが予想でき、爆発下限界に達してしまう危険性がある。

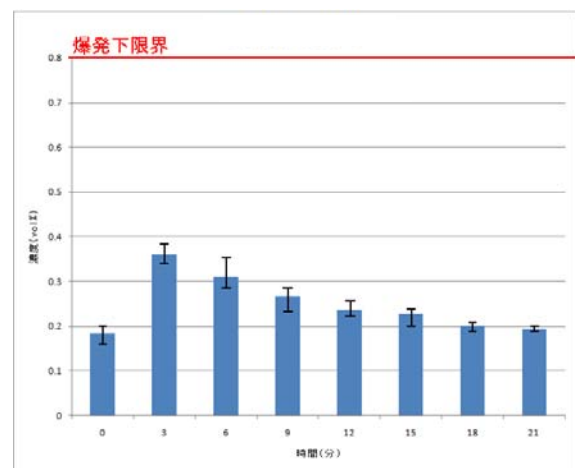
#### 4. 結 言

脱液率 90%のとき測定値が最大で約 0.4%となり、爆発下限界 0.8%の半分であった。しかし今回の測定結果に安堵することなく、乾燥機の操作中における危険性を強く認識したい。

クリーニング業界では従来機種（大気放出タイプ）の使用にあたり乾燥前の脱液率として 80%以上を目安にしているとのこと。本機（密閉循環タイプ）の使用者に対しては脱液率を含めた注意喚起が重要である。



(a) 測定場所①



(b) 測定場所④

図 4 乾燥機の運転時間とガス濃度の関係

表 2 ガス濃度および溶剤の脱液率, 残液量, 回収率

| 場所<br>時間 | 1 回目 (ppm)  |             | 2 回目 (ppm)  |             | 3 回目 (ppm)  |             |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|          | ①           | ④           | ①           | ④           | ①           | ④           |
| スタート     | 1400 ( 700) | 2000 (1000) | 1400 ( 700) | 1900 ( 950) | 1200 ( 600) | 1600 ( 800) |
| 3 分経過    | 2800 (1400) | 3600 (1800) | 1800 ( 900) | 3400 (1700) | 2000 (1000) | 3800 (1900) |
| 6 分経過    | 2000 (1000) | 2800 (1400) | 2000 (1000) | 3000 (1500) | 2000 (1000) | 3500 (1750) |
| 9 分経過    | 1800 ( 900) | 2400 (1200) | 1800 ( 900) | 2800 (1400) | 1800 ( 900) | 2800 (1400) |
| 12 分経過   | 1800 ( 900) | 2200 (1100) | 1800 ( 900) | 2400 (1200) | 1800 ( 900) | 2400 (1200) |
| 15 分経過   | 1600 ( 800) | 2000 (1000) | 1600 ( 800) | 2400 (1200) | 1600 ( 800) | 2400 (1200) |
| 18 分経過   | 1400 ( 700) | 1900 ( 950) | 1400 ( 700) | 2100 (1050) | 1400 ( 700) | 2000 (1000) |
| 21 分経過   | 1200 ( 600) | 1900 ( 950) | 1200 ( 600) | 2000 (1000) | 1600 ( 800) | 1900 ( 950) |
| 脱 液 率    | 90.1 %      |             | 90.6 %      |             | 90.1 %      |             |
| 残 液 量    | 0.74 kg     |             | 0.70 kg     |             | 0.74 kg     |             |
| 回 収 率    | 86.5 %      |             | 82.9 %      |             | 86.5 %      |             |

カッコ内の数値は検知管の読み値

# 布の繋ぎ目検出および測長に関する研究

松本 好勝\*

A Study about Detection of the Joint and Measurement of the Length about Jointed Cloths

MATSUMOTO Yoshikatsu\*

## 1. 緒 言

近年染色整理業の生産現場において、品質管理面およびコスト面から一反ごとの長さを工程中でリアルタイムに測長・管理することへの要求が強まってきている。

測長・管理の対象となる工程の代表的なものとして図1のような染色仕上げ加工の工程がある。矢印のついた線は布（ワーク）とその流れる方向を示している。途中についでいる×印が検出対象となる繋ぎ目を表している。これは実際には図2の白い糸部分のような形で布の端と端を繋いでいる。

現在は図1のドラム（反送りローラー）部分のような生産設備の一部分に手動測長カウンタを設け、繋ぎ目を目視で確認しながら、測長を行っている例が多く見られる。しかしながらこの方法は、作業者にとって手間であり、限られたデータしか取れないことと、さらに目視手動操作による測長誤差の影響も懸念される。

また、設備によってはそのような測長動作を

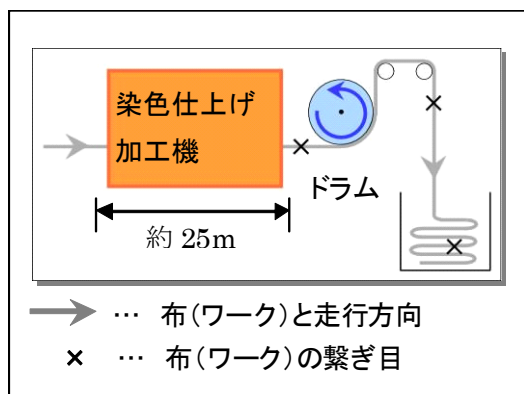


図1 測長・管理対象工程



図2 繋ぎ目（検出対象）

自動的に行う自動測長システムが取り付けられている場合もあるが、大型で設置箇所を選ぶといったことから、現在設置されている手動測長カウンタと同じ位置に取り付けて使うといったことができなかった。

これらのことから、反送りローラー部分のような生産設備の一部分に直接取り付けることによって設置を容易なものにしながらも、繋ぎ目を自動で高精度に検知し、その繋ぎ目間の長さをリアルタイムで自動計測表示するためのシステムの開発を行ったので報告する。

## 2. 測長機の構成

測長機は、①繋ぎ目検出部、②測長部、③表示部の大きく分けて3つの部分で構成されている。

### 2.1 繋ぎ目検出部

繋ぎ目検出部は、図2のような繋ぎ目の部分をその他の部分と区別して電気信号に変換して出力する部分である。この繋ぎ目検出がうまく

\* 素材応用技術支援センター

いかないと、測った長さが不正確となってしまうため、システムの中で最重要となる部分である。

検出をより確実なものとするためには、例えば意図的に結び目部分に他の布部分と全く異質なものを持ってくるのが考えられる。このようにすれば、S/N比がより向上するため、検出はより容易である。一例として、蛍光糸を結び糸に用いて紫外光源下での蛍光発光量を調べる方法があり、実際にそのようなシステムを採用しているところもある。

しかし一方で、今までの工程が変更されることや原材料や製品とは全く異質なものを導入することによるトラブル発生の可能性に対する懸念もある。

そこで本研究においては、通常の結び糸を用い、反送りローラー部分のような生産設備の一部分に直接取り付けることによって設置を容易なものとしながらも、高精度な自動測長を行うことを可能とする技術を開発・採用した。

この成果については特許出願済である。

## 2.2 測長部

反物の測長については多くの生産現場で図3のような市販の接触式長さ計測用発信器を用いた測長が行われている。

布の表面に発信器の車輪が当たるようにセットしておき、布を走らせると、発信器の車輪も回転し、その回転数を長さに応じたパルス信号に変換して出力する。図3の発信器の場合、



図3 測長部

0.1m 間隔でパルスを出力するので、そのパルス数をカウンタ（計数器）で計数することによって、0.1m 単位で長さを測ることができる。

## 2.3 表示部

表示部は測長結果を表示する部分である。通常単体のカウンタには設けられている部分である。また、BCD（Binary Coded Decimal：2進化10進数）のような数値データを表示するだけの表示器やPT（プログラマブルターミナル）もこの一種である。

## 3. 測長動作

図4に測長回路の一例を示す。上記の結び目検出部、測長部、表示部を協調動作させて実際の自動測長動作を行う。

図5は動作の一例をタイムチャートで表したものである。右に向かって時間が進んでいき、図の長方形で示されている部分は信号 ON の状態、それ以外は OFF の状態を表している。

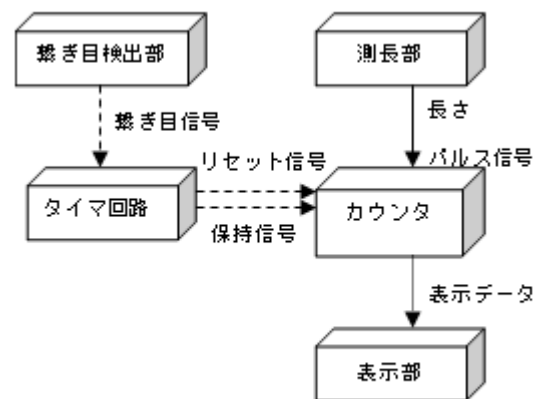


図4 測長回路

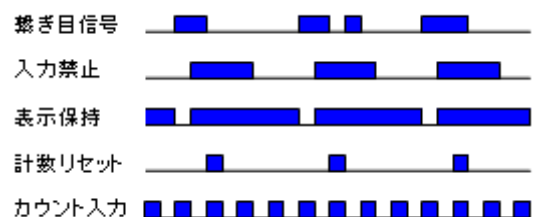


図5 測長タイムチャート

図5のように結び目が検出された直後にことごとく計数リセット信号をカウンタに入力して計数をゼロリセットすれば、結び目間の長さを自動的に測るシステムとして動作することになる。

さらにリセット信号入力の前から表示保持動作を行うことによって、常に直前の結び目からその一つ前の結び目までの長さを表示させることができる。

#### 4. 試作測長装置

今回はPLC（プログラマブル・ロジック・コントローラ）とPTの組み合わせで測長動作を行うシステムを構築した。

図6は計測中のPT画面である。この画面では一反ごとの長さの履歴を表示させている。他に現在測定中の長さの値（カウントアップ値）と直前の長さの値、検出ランプを組み合わせた計測画面、流れた反物の全長を表示する全長画面、結び目信号のレベルとしきい値をチャートおよび数値で確認しながら検出レベルを調整可能なモニタ画面、検出および表示のためのパラメータを設定する設定画面等があり、これらをメニュー画面で切り替えて使用することが可能である。このように操作部と表示部を一体化して、本体とは別に作業者の近くに設置することが可能である。このことによって、例えば計測



図6 PT画面

部および表示部は反物の排出側に設置し、操作表示部は作業者のいる投入側に設置するといった使い方が可能である。

#### 5. 測長試験

測長システムを実際の生産設備に取り付け、測長テストを行った。

生産設備に取り付けてある手動の測長カウンタで測った長さの測定値と今回の自動測長システムで測定した測定値の差は大きくても0.4mであり、人間が測長動作を行うことによるばらつきの程度であり、十分に既設の手動カウンタと相関が取れているデータとなった。また、結び目の検出率も高いことが作業担当者から報告されている。

#### 6. 結 言

- (1) 布の結び目検出および測長の研究を行い、自動測長動作を行う装置を試作した。
- (2) 通常の結び糸を用い、反送りローラー部分のような生産設備の一部分に直接取り付けることによって設置を容易なものとしながらも、高精度な自動測長を行うことを可能とする技術を開発・採用した。この成果については特許出願済である。
- (3) 実際に工場内の生産設備で動作試験を行った結果、十分な測長精度であることと、結び目の検出率も高いことが確認された、また、さまざまな種類の反物に対応し、自動測長機として実用的であることが確認できた。
- (4) 小型で1台あたりの設置コストも抑えることができるため、手軽に複数箇所に増設して使用することが可能になった。
- (5) 今回の結果を受け、現在テスト機を設置している企業では本システムの本格導入を検討している。また機械装置メーカーと特許の実施権契約を締結する予定である。



# たて糸インクジェット捺染織物の開発支援

渋谷 恵太\*

Development of Warp Dyeing by Inkjet Printer

SHIBUYA Keita\*

## 1. 緒 言

たて糸捺染は捺染（プリント染め）の一形態であり、製織用のたて糸に対して捺染を行う方法である。布帛に対して捺染を行う一般的な方法と異なり、たて糸捺染は糸の密度が疎な状態で捺染を行うため捺染面の裏側まで染料が行き渡り、製織後の織物は表裏が同じ色柄に仕上がる。これは一般的の捺染品にはない特長である。

たて糸捺染織物の一例としてほぐし織がある。これはごく粗く緯入れして仮織りした織物に捺染を施し、よこ糸をほぐしながら本製織を行う工程を経る。ほぐし織はわが国では大正昭和期に着物柄として隆盛を極めたが現在は工業的な規模ではほとんど行われていない。

織物整理業の有限会社金丸整理工業（見附市）は「経糸巻き取り装置とインクジェットプリントによる新規たて糸捺染織物の開発」を計画し平成19年度財団法人にいがた産業創造機構(NICO)のわがづくり支援事業に採択された。その概要は、製織用ビームに巻いたたて糸をインクジェットプリンタの動作に合わせて巻き取る装置を開発し、この装置でたて糸にインクジェットプリンタで捺染した後、製織、熱処理を行うことでたて糸捺染織物を得るものである。

この装置およびこれを用いて得られる生産品には様々なメリットが期待される。

まず、従来からのほぐし織との比較ではインクジェットプリンタによるため捺染の型が不要であること、仮織りとほぐしの工程がないことによりコストが低減できる。またほぐし織は着尺幅であるが当装置は広幅であるのでその点で

も効率が高い。更に、たて糸捺染による表裏同柄の広幅織物自体が市場にないものであり、この特長からロールブラインドをはじめとしたインテリア資材等、産地として新たな商品展開が期待できる。

本研究は当装置における染色についての適切な染色条件の検討と性能評価について開発を支援する目的で行ったものである。

## 2. 試験と結果

### 2.1 染色試験

金丸整理工業がわがづくり支援事業にて開発したたて糸捺染装置を図1に示す。糸に染色性向上の為の前処理を施した後に整経し、この装置により染色を行い、これを製織し織物を得た。織物の規格、工程の流れ、糸の前処理条件、染色方法や加熱条件等の概要を表1に示す。また、この試験条件によって試作したたて糸織物のうち柄6点について写真を図2に示す。

糸の前処理は整経前の総の状態で行うため、前処理剤の配合および処理条件を細かく振った試験を行うことができなかった。今回試験した結果については、柄際のにじみについては全く問題がなかった。糸を前処理した後の乾燥上が



図1 たて糸捺染装置

\* 素材応用技術支援センター

表 1 織物規格，工程の概要

|         |                                                                             |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 素材      | 綿100%                                                                       |
| 織度      | 60/2s                                                                       |
| 密度      | たて糸：81本/inch よこ糸：76本/inch                                                   |
| 工程      | 糸の前処理<br>↓<br>整経<br>↓<br>インクジェット捺染<br>↓<br>製織<br>↓<br>熱処理，ソーピング<br>↓<br>仕上げ |
| 前処理剤    | 糊剤，アルカリ                                                                     |
| 前処理条件   | 総糸の状態で付着，脱水，乾燥                                                              |
| 染色方法    | インクジェットプリンタ捺染（反応染料）                                                         |
| 加熱方法    | 蒸熱                                                                          |
| ソーピング剤  | センカノール C-80（センカ（株）製） 1g/l                                                   |
| ソーピング条件 | 85℃,10min.後，水洗2回，脱水，乾燥                                                      |

りではやや黄変が認められたが，織物の最終ソーピング上がりでは問題ないレベルにおさまった。染色濃度についてはたて糸捺染後製織で白いよこ糸を打ち込むために淡色化する傾向があることを考慮しても，商品価値の点から，より強く鮮やかな発色となるよう改善することが望ましいと思われる。



(a) 織物 A



(b) 織物 B



(c) 織物 C



(d) 織物 D



(e) 織物 E



(f) 織物 F

図 2 試作織物群

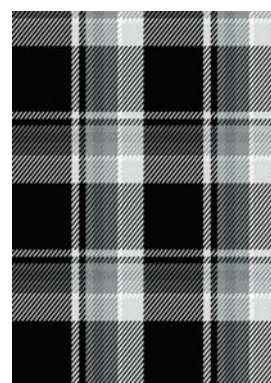


図 3 柄画像データ作成支援事例

加熱とソーピングについても加工機の性能上の制約から条件を振った試験はできなかったが，次項で述べる染色堅ろう度の結果も踏まえたうえで今回の条件で概ね良いものと考えられる。

なお，当装置のインクジェットプリンタによる捺染柄はパソコンに画像データを読み込むことで同一の整経ビーム中でもいつでも変更することができる。柄の画像データについて当センターが作成支援した一例を図 3 に示す。

## 2.2 性能評価

得られた織物について，各種の染色堅ろう度試験を実施し，評価を行った。実施した試験項目とその試験方法を表 2 に示す。試験試料は図 2 に示す A から F の 6 点とした。結果を表 3 に示す。

耐光試験で 4 級未満のものが 6 点中 4 点あった。これについては染料自体の耐光性能の他に現状では染色濃度がまだ低いことも原因の 1 つであると考えられ，これは今後染色濃度の向上を図って行くことでそれに伴い改善されることが期待できる。なお，今回の試験では予備的に

表 2 染色試験方法

| 試験項目 | 試験方法                                                     |
|------|----------------------------------------------------------|
| 耐光試験 | JIS L0842:2004 紫外線カーボンアーク灯光に対する染色堅ろう度試験方法（第3露光法，4級判定）に従う |
| 洗濯試験 | JIS L0844:2005 洗濯に対する染色堅ろう度試験方法 A-2号 に従う                 |
| 摩擦試験 | JIS L0849:2004 摩擦に対する染色堅ろう度試験方法に従う（摩擦試験機 II 形による）        |



表 3 試験結果

| 試験項目 |     | 織物  |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|      |     | A   | B   | C   | D   | E   | F   |
| 耐光試験 |     | 4未満 | 4以上 | 4未満 | 4未満 | 4未満 | 4以上 |
| 洗濯試験 | 変退色 | 4-5 | 4-5 | 4   | 4-5 | 5   | 4-5 |
|      | 汚染  | 綿   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   |
|      |     | 絹   | 4   | 4-5 | 4-5 | 4-5 | 4   |
| 摩擦試験 | 乾燥  | たて  | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   |
|      |     | よこ  | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   |
|      | 湿潤  | たて  | 4   | 4   | 4-5 | 3-4 | 4-5 |
|      |     | よこ  | 3-4 | 3-4 | 2-3 | 2-3 | 4   |

(級)

3級のブルースケールも同時に露光したが、その退色傾向との比較からはいずれの試料とも現状で3級以上の耐光堅ろう度は有していると推察された。

洗濯堅ろう度と乾燥摩擦堅ろう度については良好な結果であった。湿潤摩擦堅ろう度は2-3級とやや低いものが3点あるが、今回の試験試料は最終的な仕上げ加工がなされていない生機

の状態であるので、商品化された際の仕上げ加工が実生産品においては問題ない範囲に収まる場合が多いと考える。なお、いずれの柄についてもよこ方向の試験結果がたて方向より悪かった。これはよこ方向の試験の方が摩擦布と接触するたて糸の本数が多く、また摩擦もたて糸の直角方向からで強い力がかかるためと考えられる。

### 3. 結 言

- (1) たて糸捺染装置の染色および染色堅ろう度に関する評価を行った。染色は発色がより鮮明であることが望ましく、染色堅ろう度と柄のにじみ、捺染面裏側への色透りに関しては概ね良好であった。
- (2) 当装置によるたて糸捺染織物については業界新聞でも開発状況が紹介されている<sup>1)</sup>。引き続き市販化に向けた支援を行いたい。

### 参考文献

- 1) 日本繊維新聞社，“銘仙，亀田縞を再現”，日本繊維新聞，2009年4月3日付け，1面．

# ユニフォームの防汚性試験方法に関する研究

明歩谷 英樹\*

Research of Dirt Adhesion Examination Method on Uniform

MYOUBUDANI Hideki\*

## 1. 緒 言

昨年度実施した野球用ユニフォームの汚れの調査研究「ユニフォームの汚れ発生メカニズムに関する研究」の結果、汚れ成分として、炭素、アルミニウム、鉄、ケイ素などの元素が含まれることがわかった<sup>1)</sup>。また、糸の表面観察の結果、糸自身が溶融していることから耐熱性の向上も汚れ防止の要因であることがわかった。さらに、汚れ付着および落ちやすさの評価に関する JIS 規格の試験方法 JIS L 1919:2006 繊維製品の防汚性試験方法ではユニフォームの汚れの付着が再現しきれなかったことを示した。図 1 は、本研究の典型的な着用後のユニフォームを示す。

本研究では、より使用時の汚れを再現できる試験方法を開発することを目的とし、その防汚対策についても検討した<sup>2)</sup>。

## 2. ユニフォーム用防汚性試験方法の確立

### 2.1 試験試料

(株) ハニーインターナショナルワープ事業部製 ポリエステルたて編み地

### 2.2 試験方法

JIS L 1919:2006 繊維製品の防汚性試験方法  
A 法 (ICI 形ピリング試験機を用いる方法)  
A-2 法 (密閉形樹脂製袋を用いる方法) に準拠して行った。

### 2.3 汚染物質の選定

昨年度実施した試験では、つけた汚れが洗濯によってきれいに落ちてしまい、野球用ユニ



図 1 汚れたユニフォーム

フォームの事例のような洗濯で落ちない頑固な汚れは再現できなかった。そこで、以下に示す通常の汚染物質①の他、粒径の異なるカーボン 2 種を汚染物質に用いた。

粉体汚染物質：

汚染物質① 高松油脂(株)製泥汚れ試験用人工土

汚染物質② 旭カーボン(株)製ナノカーボン「粒径 250nm」

汚染物質③ 旭カーボン(株)製ナノカーボン「粒径 15nm」

汚れにくさ試験：粉体汚染物質を袋に入れた後、試験片を 1 枚入れ、エアポンプで袋いっぱい空気を入封入する。これをピリング試験機に入れ、毎分 60 回転±2 回転で 60 分間操作する。操作後、試験片の四隅を持ちかえて、試験片の中央部を 5 回指で弾き、余分な汚れを取った後、汚染用グレースケールを用いて判定する。

付いた汚れの落ちやすさ試験：上記汚れにくさ試験で汚れを付着させた試験片を JIS L 0217 の付表 1 の番号 103 に規定の方法にて洗濯を行

\* 素材応用技術支援センター

い、乾燥させた後、汚染用グレースケールを用いて判定する。

洗濯機：全自動洗濯機

洗剤：花王(株)製「アタック」

## 2.4 試験結果

各汚染物質に対する汚れにくさおよび付いた汚れの落ちやすさの試験結果を表1に示す。各等級は数字が小さい方が悪く、5級が最も良い評価となる。汚染物質①については汚れは付着するが、一般的な家庭洗濯できれいに落ちた。これに対し、汚染物質②、③のように粒径の小さなナノカーボンにした場合、家庭用洗濯では汚れが落ちづらくなり、より実際のユニフォームの汚れに近づいた。

以上の結果から、通常の汚染物質では評価できなかったスライディングの汚れを再現するためには、粒径が小さな汚染物質を使用することが有効であることがわかった。

## 3. フッ素系材料による防汚効果

汚れにくくする加工としてはっ水はっ油加工が知られており、多くの加工剤メーカーから加工剤が発売されている。この項では、はっ水効果のあるフッ素系材料による防汚効果を検証した。

### 3.1 試料

フッ素系はっ水加工などを施した加工布とフッ素系糸素材を用いた編み地を作成し、試料とした。

フッ素系はっ水加工布：

表1 防汚性試験結果

|             | 汚染物質<br>① | 汚染物質<br>② | 汚染物質<br>③ |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 汚れにくさ       | 2級        | 2級        | 1級        |
| 付いた汚れの落ちやすさ | 4級        | 2-3級      | 1-2級      |

地部／ストライプ部（ポリエステル／ナイロン）のたて編み地

・処理1：フッ素系はっ水加工

・処理2：下地加工

・処理3：下地加工後フッ素系はっ水加工

フッ素系糸編み地：

・FEP：東洋ポリマー(株)製「ハステックス 144D/24f」を天竺編み

・PTFE：東レ・ファインケミカル(株)製「ユミフロン 120D/1f」を天竺編み

### 3.2 防汚性比較

試験は2.2の試験方法によって行い、汚染物質①：人工汚染土と、汚染物質③：ナノカーボン「粒径15nm」について実施した。表2はフッ素系はっ水加工布の汚れにくさ試験の結果を、表3はフッ素系はっ水加工布の付いた汚れの落ちやすさ試験の結果を示した。また、表4はフッ素系糸編み地の汚れにくさ試験の結果を、表5は同じく付いた汚れの落ちやすさ試験の結果を示す。

また、図2はフッ素系はっ水加工布に対して汚染物質①を用いた汚れにくさ試験後の試料の外観を示し、図3は汚染物質③を用いた場合の試験後の試料の外観を示す。図4は汚染物質①

表2 フッ素系はっ水加工布試験結果  
(汚れにくさ)

|       | 未処理  | 処理1 | 処理2  | 処理3 |
|-------|------|-----|------|-----|
| 汚染物質① | 2-3級 | 2級  | 2-3級 | 2級  |
| 汚染物質③ | 1級   | 1級  | 1級   | 1級  |

表3 フッ素系はっ水加工布試験結果  
(付いた汚れの落ちやすさ)

|       | 未処理  | 処理1 | 処理2  | 処理3 |
|-------|------|-----|------|-----|
| 汚染物質① | 3-4級 | 3級  | 3-4級 | 3級  |
| 汚染物質③ | 1-2級 | 1級  | 1-2級 | 1級  |

表 4 フッ素系糸編み地試験結果  
(汚れにくさ)

|       | FEP | PTFE |
|-------|-----|------|
| 汚染物質① | 1 級 | 1 級  |
| 汚染物質③ | 1 級 | 1 級  |

表 5 フッ素系糸編み地試験結果  
(付いた汚れの落ちやすさ)

|       | FEP   | PTFE  |
|-------|-------|-------|
| 汚染物質① | 2-3 級 | 未実施   |
| 汚染物質③ | 1 級   | 2-3 級 |

を用いた汚れの落ちやすさ試験後の試料の外観を示し、図 5 は汚染物質③を用いた場合の試験後の試料の外観を示す。各図とも左から、未処理、処理 1、処理 2、処理 3 の編み地である。

汚れにくさ試験において、今回試験を行ったフッ素系はっ水加工布およびフッ素系糸編み地については、完全に汚れてしまっており、未処理布と比較しても防汚効果が見られなかった。

付いた汚れの落ちやすさに関しては、未処理布よりフッ素系はっ水加工布の方が汚れが残り、はっ水加工による防汚効果は見られなかった。

またフッ素系糸編み地の結果を見ると、汚染物質③の場合は PTFE が 2-3 級と最も良い評価となった。この評価に関しては、糸の構造に起



図 2 汚れにくさ試験後 (汚染物質①)



図 3 汚れにくさ試験後 (汚染物質③)

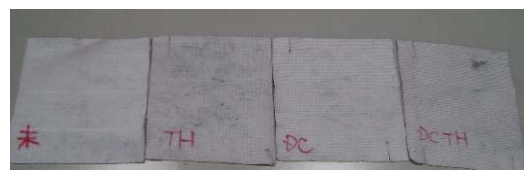


図 4 汚れの落ちやすさ試験 (汚染物質①)



図 5 汚れの落ちやすさ試験 (汚染物質③)

因するの素材自身に起因するかを検証する必要があるが、ナノカーボンの汚れで唯一良い結果が出ており、防汚素材開発のヒントになると考える。

以上、各種試料について複数の汚染物質を用いて試験を行った結果、ナノカーボンによる試験を併用することは有効な手段であることがわかった。すなわち、ナノカーボンの汚れが付にくい、もしくは付いた汚れが落ちやすい素材の開発が防汚ユニフォーム開発の指標になると考える。

#### 4. 結 言

- (1) 汚れ物質の粒径をナノサイズにすることで、ユニフォームの使用時に付着する汚れをよく再現することを示した。また、試験を実施する場合、2 種類以上の汚れ物質を使用した方が性能評価をする上で有効な情報が得られることが確認できた。
- (2) 今回比較した素材のうちで、PTFE の糸素材を使った編み地の防汚効果がよいことがわかった。

#### 参考文献

- 1) 明歩谷英樹, “ユニフォーム上の汚れ発生メカニズムに関する研究”, 工業技術研究報告書, No.38, 2008, p117-119.
- 2) 改森道信, “防汚加工の基礎と商品並びに技術開発”, 繊維機械学会誌, Vol.59, No.5, 2006, p 271-275.

# 靴下のあたたかさの測定に関する研究

橋詰 史則\* 古畑 雅弘\*

A Study about Measurement of Warmth of Socks

HASHIZUME Fuminori\* and FURUHATA Masahiro\*

## 1. 緒 言

編み地が直接肌に触れる下着や靴下は、同じ素材の糸でも編み方や使用する糸番手によってあたたかさの感じ方が異なる。この現象は一部体験的に把握されているが、着用に関する具体的データはあまり見られない。製造するメーカーとしてはより良い商品を開発するため、このような着用に関するデータ蓄積が必要である。またそれらのデータは販促資料として活用することも期待できる。

本研究は課題解決型受託研究（ミニ共同研究）として上記のようなニーズに対応するため、新しく開発した靴下と従来商品、他社商品を比較し、どの試料が保温力があり、着用時あたたかいと感じるのか多角的な点から試験評価を行った。

## 2. 試験

### 2.1 試験試料

本研究では申請企業から提出された、今までよりも更にあたたかさを追求した開発中の新商品（以下新商品）、その新商品の裏地を取り除いたもの（裏地無し）、従来品のあったか靴下（従来品）、他社製の通常の靴下（通常靴下）の計4点を試料とした。図1に各試料を示す。

### 2.2 接触冷温感（q-max）測定

保温性試験機（カトーテック株式会社製 THERMO LABO II）を使用して、熱を蓄えた純銅板が試料表面に接触した直後に、蓄えられた熱量が低温側の試料物体に移動する熱量のピーク値（q-max）を測定した。一般に、q-max は人の皮膚

\* 素材応用技術支援センター



図1 左から新商品、裏地無し、従来品、通常靴下

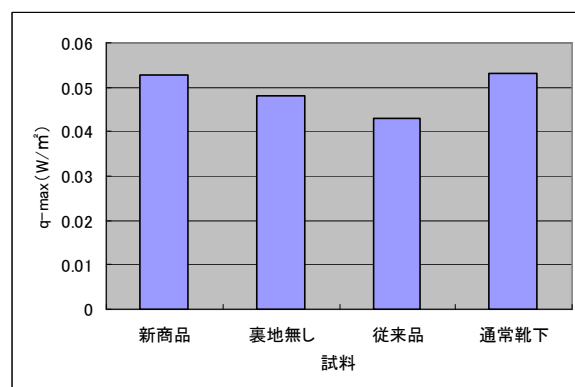


図2 接触冷温感(q-max)

が物体に触れたときに感じる冷温感に対応した値で、この値が大きいほど冷たく、小さいほどあたたかく感じる度合いが強いと言える<sup>1)</sup>。

試料は足に巻き付けたときの状態を再現するため、張った状態で保持できる治具に取り付けて測定した。結果を図2に示した。

従来品の値が最も小さく、4種類中最も触れたときにあたたかく感じるという結果になった。新

商品の値は従来品より大きく、触れたときに従来品より冷たく感じるという結果になった。これらの結果は足に着けた直後の感触に関連するものと言える。従来品は編み目が大きいことと起毛処理により銅板との接触面積が小さく、移動熱量も小さかったと考えられる。新商品は裏地の細かい編み目により接触面積が大きく、移動熱量が大きくなったと考えられる。

## 2.3 熱伝導率測定

保温性試験機（カトーテック株式会社製 THERMO LABO II）を使用して、熱を蓄えた純銅板から、接触している試料に奪われる熱量の値である定常熱流損失値を測定し、以下の式によって熱伝導率  $K$  を求めた。試料の厚さは厚さ測定器を用い、張った状態での厚さを測定した。

$$K=(W \cdot D)/(A \cdot \Delta T) \quad (W/m \cdot ^\circ C)$$

$W$ ：純銅板の定常熱流損失(W)

$D$ ：試料の厚さ(m)

$A$ ：純銅板面積(m<sup>2</sup>)

$\Delta T$ ：試料の温度差(°C)

結果を図3に示す。各試料の厚さが同一であると仮定すると、熱伝導率が大きければ試料内の温度（体温）を外部に伝えやすいと言えるので、保温性の面では不利であると考えられるが、実際は試料ごとに厚さが異なるので、熱が奪われやすいかどうかは測定した定常熱流損失の値が実態に即

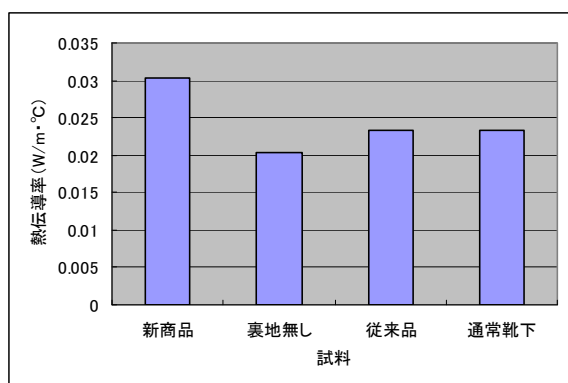


図3 熱伝導率

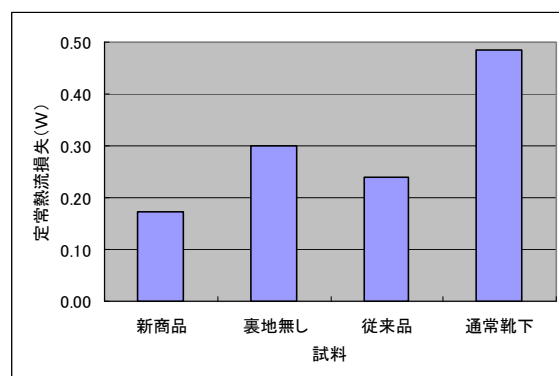


図4 定常熱流損失

表1 厚さと定常になるまでの時間

|          | 新商品 | 裏地無し | 従来品 | 通常靴下 |
|----------|-----|------|-----|------|
| 平均厚さ(mm) | 4.4 | 1.7  | 2.4 | 1.2  |
| 定常までの時間  | 約8分 | 約6分  | 約5分 | 約2分  |

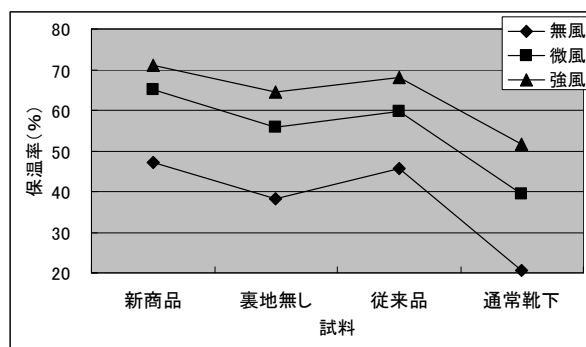
している。定常熱流損失値を図4に、測定時の試料の厚さと熱流損失が定常になるまでの時間を表1に示す。これらを合わせ、新商品について考えると、厚さ（4.4mm）があるので試料自体があたたまるまで時間がかかるが（約8分）、あたたまつた後は厚さがあることにより外部に奪われていく熱量は少ない（4試料中最小の熱流損失）ので、履いてからしばらく経った後はあたたかい状態を保つことができるということになる。新商品は従来品より熱流損失が小さく、裏地無しは従来品より熱流損失が大きいので、従来品と比べてあたたかいかどうかは裏地の有無が影響している。

## 2.4 保温性試験

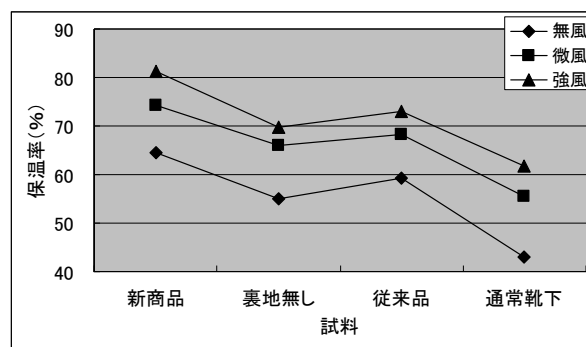
保温性試験機（カトーテック株式会社製 THERMO LABO II）を使用して、ドライコンタクト法とウェットコンタクト法の2方法で保温性を測定する試験を行なった。

保温性の測定方法は、円筒風洞内の熱を蓄えた純銅板上に、試料を取り付けた枠を保持する。銅板温度を30°Cに設定し、無風時と微風時（0.3m/s）および強風時（1m/s）の3条件で、銅板温度を保つための消費電力を測定する。試料を付けた時と付けない時の消費電力の差を保温率とし、数値が大きいほど保温性が高いことを示している。ドライコンタクト法は、人が衣服を着用したときの保





(a) ドライコンタクト法



(b) ウェットコンタクト法

図5 保温性

温性を想定した測定法であり、ウェットコンタクト法は、人が衣服を着用し、汗をかいたときの保温性を想定した測定法である。ウェットコンタクト法の場合は、銅板と試料を取り付けた枠の間に濡らした濾紙を設置する。結果を図5(a)、(b)に示す。

ドライコンタクト法、ウェットコンタクト法とも、新商品が最も高い保温率となった。従来品の数値と比較すると、裏地無しは従来品より保温率が低い、新商品は、細かい編み目で厚みもある裏地が付いたぶん外気を遮断し、従来品よりもあたたかさを保つことができるようになったと言える。

## 2.5 恒温恒湿槽を使用した保温特性試験

恒温恒湿槽の温度変化に伴って、試料を取り付けたペットボトル内の水温がどのように変化するかを測定することにより、試料ごとの保温持続性を把握する試験を行った。



図6 試料設置状態

恒温恒湿槽内中心に発泡スチロール製ブロックを置き、その上に試料を取り付けたペットボトルを設置した。試料に直接槽内の強い風が当たらないよう、ブロックとの間に20mmの隙間を空けてアクリル製囲いを被せた。ボトル内には500mlの純水を入れ、底面から約90mmの位置に測定部が来るよう熱電対を設置した。ブランクとして試料を被せないペットボトルと、槽内温度を測定する熱電対も設置した。図6に設置状態を示す。

設定は36℃・50%RHから0℃へ1時間かけて下げるプログラムを2サイクル行った。また各設定を17時間保持した。

1サイクル目の測定結果を示したものが図7である。恒温恒湿槽内の温度の低下に伴って、各試料内の水温も低下している。その過程で、新商品が最も緩やかに低下してきていることが分かる。測定開始から4時間後では新商品の水温は従来品よりも約2.5℃温度が高く、それだけ新商品の保温性が高いという結果になった。

2サイクル目の測定結果においても同様の傾向であった。また、1サイクル目終了時から2サイクル目に移る際の、槽内温度を再び36℃に上げる時間帯では、新商品の水温が最も低く推移していた。このことから、新商品が他と比べて保温性が高いと言える。

定常熱流損失値や保温性の測定においては、新商品は従来品より良い結果であるが、裏地無しについては従来品より悪い結果であった。裏地の有無が結果に影響していることが伺えたが、本試験については裏地無しでも従来品より保温性が高い

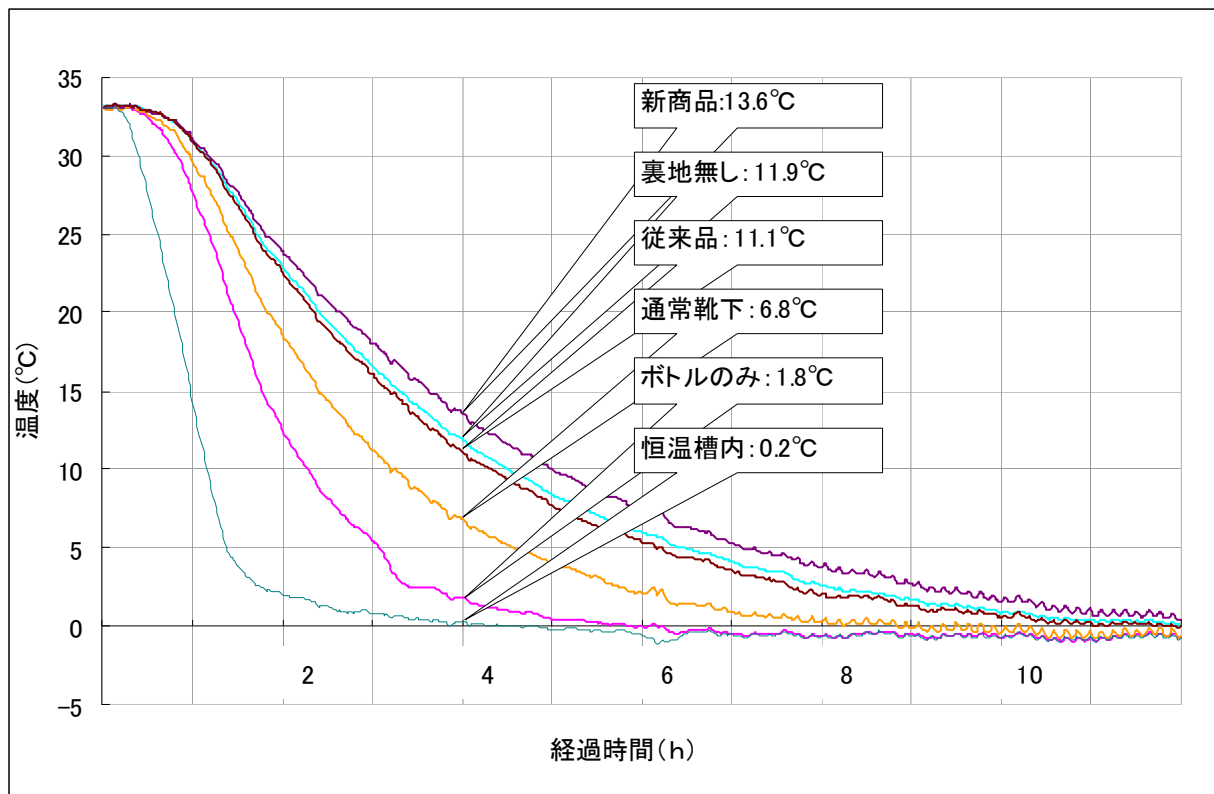


図7 保温特性試験

結果となった。

### 3. 結 言

- (1) 各試験を行い総合的に評価すると、新商品が最も良い結果となった。また裏地の効果が大きいことなど、開発の方向性を明確にすることができた。
- (2) 独自に設定し実施した、恒温恒湿槽を使用した保温特性試験において、保温性の差が明確に分かる結果を得ることができ、製品性能の評価方法として有効であることが分かった。
- (3) 実際の着用時の評価に近い試験結果を得ら

れるよう、今後も同様の試験を行い、データを蓄積していくことが必要である。

- (4) 本研究終了後、今回の研究結果を踏まえ、申請企業から秋冬向けの靴下新商品として発売された。試験結果は実際に製品カタログに掲載された。研究成果が商品開発の支援となるとともに、販促資料としても活用された事例となった。

### 参考文献

- 1) カトーテック(株), 保温性試験機 KES-F7 THERMO LABO II TYPE カタログ

# Ⅲ 調査・報告



# 航空機産業参入に係る可能性調査報告

野中 敏\* 相田 収平\* 吉田 正樹\* 石川 淳\* 須藤 貴裕\*\*  
古畑 雅弘\*\*\* 橋詰 史則\*\*\* 目黒 正義\*\*\*\* 見波 寿樹\*\*\*\*\*

## A Feasibility Study of Entry Into Aerospace Industry

NONAKA Satoshi\*, AIDA Syuhei\*, YOSHIDA Masaki\*, ISHIKAWA Atsushi\*, SUTOU Takahiro\*\*  
FURUHATA Masahiro\*\*\*, HASHIZUME Fuminori\*\*\*, MEGURO Masayoshi\*\*\*\* and MINAMI Toshiki\*\*\*\*\*

### 1. 緒 言

2008 年 3 月に発生した米国のサブプライムローン問題から米国経済は失速を始め、秋のリーマンブラザーズの破綻をきっかけに、米国のみならず日本も含めた世界大不況へと突入した。このため、自動車産業をはじめとした製造業は軒並み事業の縮小を余儀なくされ、新たな活路を模索する必要に迫られた。

こうした中で、短期的には急成長は望めないものの、長期的な有望産業として航空機産業が 2008 年初頭から急速に注目され始めていた。全国的にも航空機産業参入に向けた協議会、研究会など多くの取り組みが地方でも始まっており、活発な活動を行っている地域もある。

当県においても、日本海側有数の集積を誇る機械産業、金属製品など工業分野において新たな活路を見いだそうと、航空機産業への参入の可能性を検討することを目的に「新分野チャレンジ研究会」を開催することとした。この研究会では、講演を主体とする勉強会のほか、各種セミナー・展示会等への参加や国内重工メーカーおよび航空機運航会社などへのヒアリング調査を実施することにより参入における課題を調査し、会員への情報提供を行った。さらに県内企業の参入実態、参入意欲、品質管理体制など

を調査し、新潟県企業の航空機産業に関する実態把握と参入の可能性を検討した。

当報告書ではこれら研究会開催と調査事業で得られた航空機産業の実態と将来性、さらに参入のための課題についてまとめ、県内企業が参入するに必要な支援策について提案している。

### 2. 航空機産業の実態と参入への課題

航空機産業に詳しい外部講師を招いた勉強会や航空機産業関連セミナー、展示会等への参加により、以下のとおり航空機産業の実態と将来性などが把握できた。また、県内企業へのアンケートと聞き取り調査により、航空機産業参入への課題が明らかとなった。

#### 2.1 航空機産業の現状と将来

2007 年時点での全世界のジェット機の運航機数は約 15,000 機程度で、今後の需要予測として 20 年後には約 2.3 倍の 36,000 機程度になると考えられている<sup>1)</sup>。その伸びを支えるものとして 100 席から 169 席までの小型機や 100 席以下のリージョナルジェットが新規需要の 3 分の 2 以上を占めると考えられており、その予想を反映するように、約半世紀ぶりとなる国産の小型旅客機の MRJ（三菱重工）やビジネスジェット機であるホンダジェット（本田技研）などの開発が進んでいる。

一方、大型機メーカー分野でも、ボーイング社の B787 やエアバス社の A380 など新型旅客機において、日本の企業は多くの製造分担をし

\* 下越技術センター  
\*\* 研究開発センター  
\*\*\* 素材応用技術支援センター  
\*\*\*\* (財)にいがた産業創造機構  
\*\*\*\*\* 新潟市経済・国際部

表 1 全国の航空関係協議会・研究会

| 名 称                  | 地 域 | 形 態   |
|----------------------|-----|-------|
| 東北航空宇宙産業研究会          | 東北  | 任／官   |
| 秋田輸送機コンソーシアム         | 秋田  | 任／官   |
| 栃木航空産業懇話会            | 栃木  | 任／民   |
| とちぎ航空宇宙産業振興協議会       | 栃木  | 任／官   |
| まんてんプロジェクト           | 神奈川 | 任＋共／官 |
| すわ航空・宇宙ネット（通称スワン）    | 諏訪  | 任／官   |
| 次世代型航空機部品ネットワーク（OWO） | 大阪  | 任＋共／官 |
| ウィングウィン岡山            | 岡山  | 任／官   |
| 九州航空宇宙開発推進協議会        | 九州  | 任／民   |

注： 任：任意団体 共：共同受注団体 民：民主導 官：官主導

ており、B787の機体製造では日本企業の分担比率は35%と大きなウエイトを占めている<sup>2)</sup>。

しかし、金額ベースでは日本国内での製造金額は約1兆2千億円程度<sup>2)</sup>の規模であり、自動車産業のそれに比べ40分の1程度の大きさの市場でしかないことも認識すべきである。

日本国内では各地で今後の有望産業として航空宇宙産業を掲げ、表1のとおり協議会や研究会などが多数立ち上がっている。これら各地の製造業がすべて参入できるほど大きな市場とは考えられず、新潟県企業の参入においては、他地域の企業との差別化が重要な課題となる。

## 2.2 参入における課題

勉強会やセミナー等に参加して得られた航空機産業参入の課題として、日本の航空機業界における独自の習慣や閉鎖性などが挙げられる。

純国産の旅客機が存在しない現在の日本での航空機メーカーとなると、大・中型機であればボーイング社（米国）やエアバス社（EU）、小型機であればエンブラヤル社（カナダ）やボンバルディア社（ブラジル）等と共同開発などを行う三菱重工、川崎重工、富士重工などの重工メーカーが挙げられる。その下にいくつかの下請け企業とさらにその下を二次・三次下請け企業が連なるピラミッド型をなした産業構造となっており、新規参入の難しい旧態依然とした業界であると言われている。

また、航空機部品の製造、納入には認証規格であるJISQ9100取得などによる高度な品質管理と、将来にわたり長期間部品供給を保証する経営の安定性が要求される場合が多く、そうしたことから、中小企業が大手重工メーカーから直接受注できることは非常に難しく、参入障壁が高いといわれる一因となっている。

また、JAL、ANAなど航空機運航会社への修理部品の供給についても、ボーイング社製航空機ではFAA（連邦航空局）の認可が必要であり、事実上、米国内に事業所をもつ企業しかFAAに申請することはできない。

また、エンジン部品などの安全に関わる重要部品では「工程凍結」という考え方があり、より優れた技術があっても現行の製品には決して採用されることはなく、独自技術や新技術を持っていたとしてもそれらの技術は次のエンジン開発時まで採用されず、長期的な取り組みとなってしまうことを覚悟しなくてはならない。

このように、航空機産業参入には、他の産業ではあまり見られない数々の課題が存在する。

## 2.3 新潟県企業の現状

平成20年7月に開催した新分野チャレンジセミナー（航空機産業）では、県内各地から125名の参加があり、その後開催した新分野チャレンジ研究会には37名の参加があった。このように県内企業の航空機産業への関心は非常



に高いものがある。このたびの調査事業で行ったアンケート（従業員 30 人以上の中小企業 400 社へ配布，187 社回答）によれば，回答した約半分の企業が航空機産業に関心があり，それらの企業は高い品質管理が必要（約 30%）あるいは高い技術力を必要（約 30%）と認識している。しかし，実際に参入を検討している企業は 3 割程度であり，あこがれてはいるが，具体的にはまだ考えてはいない企業も多いという結果となった。その原因としては，参入ルートが分からない（40%）や業界の動向が分からないなど，航空機産業に関する知識，情報の少なさが理由として挙げられている。

なお，すでに航空機産業へ参入している企業は回答数の 13%程度であるが，その部品としては，内装品を除くと「その他」や「分からない」と答えた企業が多く，その金額も売上げの 1～20%と大きなウエイトではなく，県内ではまだ主要な産業分野となっていないことが分かった。

航空機関連の認証規格である JISQ9100 についての質問でも，一般の品質管理規格である ISO9001 と混同していると思われる回答も多く，正しい情報が不足している状況も見受けられた。

また，航空機産業に関心を持つ企業のなかの金型関連企業では，自動車用金型の加工で導入した 5 軸加工機の航空機産業への展開を考えており，5 軸加工技術分野で他県と比べて優位性を持てるような独自技術の開発が必要である。

## 2.4 新潟県企業の参入への課題

航空機産業参入は前述のように，加工技術の高度化や独自技術の確立はもちろんのこと，社内の品質管理体制を整え，信頼できる部品，製品を納められる企業と判断されることが必須である。そのためには，ISO9001 の取得はもとより，JISQ9100 の取得が必須と思われる。また，エンジン部品など重要保安部品の加工受注を狙うのであれば，Nadcap 取得も必須であり，それは ISO9001 の取得が前提となっている。このため，品質管理体制が比較的弱い中小企業の多い

新潟県企業が参入する場合，ISO9001 を含めた品質管理体制の整備が急務である。

また，技術，品質管理が整った企業であっても，航空機産業から受注できる保証はなく，長期的な展望で参入のチャンスを狙う取り組みも必要である。特に，経営者が航空機産業に参入することの目的（利益追求，業務拡大，波及効果，企業イメージの向上など）を明確にする必要があり，経営者自らが航空機産業の特殊性，現状，将来性をきちんと把握し，戦略的にとりくむ決意を示すことが重要である。

航空機産業は，今後発展する産業分野の一つであることは間違いないが，それ自体はそれほど大きなマーケットではないことを認識し，航空機産業からの利益だけではなく，参入への取り組みによって得られる社内の品質管理体制の整備や，それによってもたらされる自社製品の品質向上や，さらには，航空機産業参入がもたらす企業評価の向上による受注増などが利益につながると捉え，航空機産業への参入を図る必要があると思われる。

## 3. 結 言

以上の課題から，航空機産業参入を図りたいとする県内企業への支援機関の支援策として以下の提案を行う。

- (1) 航空機産業参入に向けた品質管理体制の整備を支援するため，「JISQ9100 認証取得研究会」等の開催。
- (2) 県内企業が多く保有する 5 軸加工機を活用した航空機部品の独自加工技術の開発。
- (3) 参入ルートの開拓としての商談会，見学会，航空機メーカーへのプレゼンの実施。および展示会等出店への支援。

## 参考文献

- 1) 出井 裕，“航空機関連産業の現状・将来展望”，新分野チャレンジ研究会講演資料，2008 年 9 月 19 日講演
- 2) 片瀬裕文，“世界の航空機産業の動向と我が国の航空機産業の将来”，飛翔・航空機産業公式ガイドブック，(財)経済産業調査会，2008，p11-27.

# 炭素繊維複合材料の製造と用途開発に関する調査研究

古畑 雅弘\* 橋詰 史則\* 矢内 悦郎\* 小海 茂美\* 明歩谷 英樹\*  
松本 好勝\* 渋谷 恵太\* 佐藤 清治\*\* 吉田 正樹\*\*

A Survey Report of Manufacturing Process and Industrial Application of CFRP

FURUHATA Masahiro\*, HASHIZUME Fuminori\*, YANAI Etsuro\*, KOKAI Shigemi\*, MYOUBUDANI Hideki\*,  
MATSUMOTO Yoshikatsu\*, SHIBUYA Keita\*, SATO Seiji\*\* and YOSHIDA Masaki\*\*

## 1. 緒 言

炭素繊維（以下 CF）は金属よりも軽く強度や弾性率に優れていることから、航空機や橋梁等の土木建築補強資材、テニスラケットやゴルフクラブ、釣り竿といったスポーツ・レジャー用品などに幅広く利用されている。さらに今後は環境規制への対応や省エネルギーへの期待から、自動車分野や市場規模の大きい一般産業分野への取り組みも始まっている。

一方、炭素繊維は単独では利用されることは少なく、一般には樹脂や金属等と組み合わせた複合材料として利用されているが、製品化には、コスト、加工技術、生産性、リサイクル技術等多くの課題を抱えている。

そこで本調査研究では、炭素繊維複合材料（以下 CFRP）の研究開発や事業化の推進を目的として、県内企業における CFRP の取り組みについて現状調査したほか、CFRP の特徴や性質、要素技術、課題等について調査を行い、事業化の可能性を検討した。

## 2. 調査研究の内容

### 2.1 概要

中間基材の製造、成形等の加工技術の最新動向や適性用途について、展示会やセミナーへの参加、県外先進企業を調査した。また県内の繊維、プラスチック製品製造業、機械金属関連企業を訪問し

て、現状調査やアンケートを行い今後の意向等を調査した。さらに講演会を3回開催した。

### 2.2 CFRP 関連の技術動向

CFRP の製品化には、成形技術によるところが大きい。成形メーカーが少ないのが現状である。成形技術には種々あり<sup>1) 2)</sup>、現在主流となっているオートクレーブ法は、仕上がりがきれいで性能も高いが、高コストで生産性が低いことから、航空宇宙部品や一部産業部品などの用途に限定されている。今後、市場を拡大させていくためには、低コスト、生産性の高い成形技術の開発が求められており、例として VaRTM 法やテキスタイルプリフォームによる RTM 法が挙げられている。テキスタイルプリフォームを図1に、VaRTM 法の概略を図2に示す。これらに使用する中間基材も3Dやノンクリンプファブリック（N.C.F）など多種多様になってきている。



図1 テキスタイルプリフォーム<sup>3)</sup>

\* 素材応用技術支援センター

\*\* 下越技術支援センター

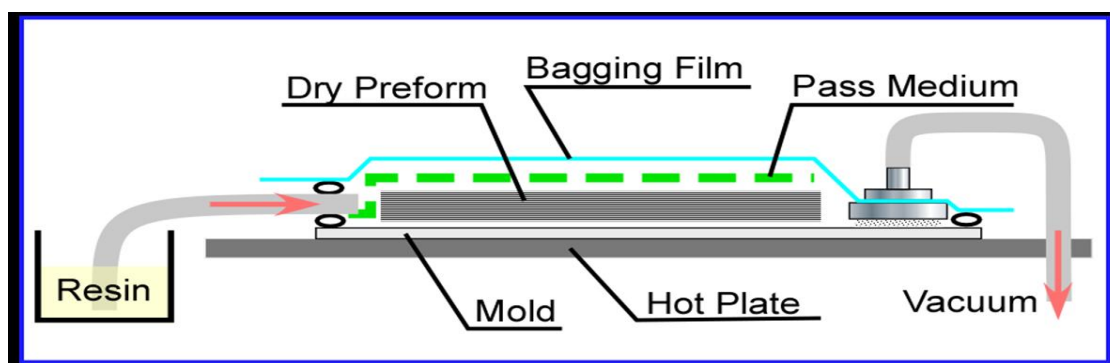


図2 VaRTM法の概略<sup>4)</sup>

また複合材料として考えた場合、CFのみではアルミ等の金属に比べて耐衝撃性等に劣ることから、今後は単一素材の欠点を補う形として複合素材の開発が求められている。

### 2.3 県内企業の調査内容

現在何らかの形でCFに関わっている県内企業は少ないが、関心を持っている企業は数十社に上った。しかしいずれの業種においても、適性用途が明確にならず、具体的な事業化に向けて取り組む状況には至っていない。

業種別に見ると、繊維業ではCFの製織、シート化に関心を持つ企業が多く、既にセミナーの開催等を通じて取り組みを始めた企業も出てきている。燃糸やニット、整理加工業も関心を寄せている。プラスチック製品製造業では、OEM生産により製造に取り組んだ企業もあるが、CFとマトリックス樹脂との相性や成形条件等について試行錯誤しながら技術を蓄積しており、貴重なノウハウとなっている。今後はOEMではなく、自社製品の開発を目指している企業もある。機械金属業では、工具の耐摩耗性や寿命、加工面の仕上がり具合や切削端面のCFの解れ等の課題が浮かび上がった。樹脂による加工特性の把握も重要である。

## 2.4 予備試験研究の内容と結果

### 2.4.1 概要

VaRTM法について、成形工程の手順と素材の特性について知見を得るため、簡易的にVaRTM法による平板の成形試験を行った。使用した機器、

材料を以下に示す。

- ・基材：CF3Kの平織り
- ・樹脂：市販FRP用2液性ポリエステル樹脂
- ・上下面密封用テドラフィルム
- ・側面密封用シーラントテープ
- ・吸気・樹脂注入用シリコンチューブ
- ・樹脂流路確保用網戸ネット
- ・真空ポンプ

### 2.4.2 結果

成形試験の様子を図3に、完成した試料を図4に示す。使用する樹脂の粘度によっては、真空中に引いても試料内に注入されていないため、基材の上面とチューブの先端部周辺に樹脂流路確保のための部材が必要であることが分かった。ポリエステル製網戸用ネットをその部材として使用した後は、良好に樹脂が注入されていくことが確認できた。しかしこの方法では、ネットも一緒に成形硬化されて基材と一体になってしまうことから、ネットを剥がすために離型材を塗布したり離型フィルムを挿入する必要がある。また硬化後のCFRPの成形肌はネットの凹凸がそのまま残るため、成形肌に影響せずなおかつ流路を十分確保できる部材を選定する必要がある。基材の下面は良好な平滑面を得ることができた。

また、側面密封用シーラントテープとシリコンチューブの間に隙間が残り、気密性が保てない場合が多いので、設置時にその周辺を手指で押し、良くなじませておく必要があった。上下面密封用テドラフィルムはほとんど伸びが発生しない。

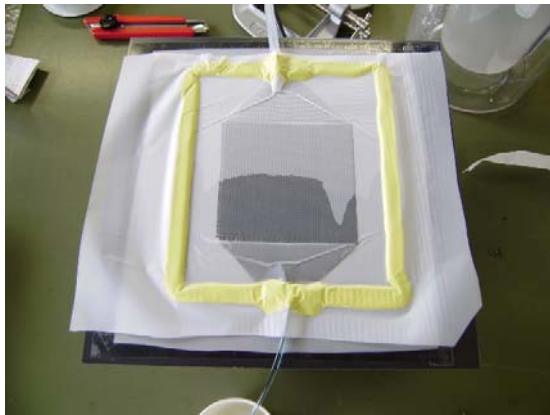


図3 成形中の様子



図4 完成した試料

シリコンチューブ周辺はチューブの太さの分だけ周囲より高さが変わるので、上面からテドラフィルムを被せる際に、その差をうまく吸収できるようにフィルムにたるみを持たせて被せることで、真空引きの際にフィルムの突っ張りや余計なシワが入るのを防ぐことができた。

今後完成試料の断面を観察し、実際に樹脂が繊維間に浸透しているか確認する必要がある。また、成形物が立体的になるほど樹脂が注入されていかないことも予想されるので、樹脂注入口を増やすなどの対策をとる必要がある。

### 3. 新事業創出可能性

県内には業種を問わず、CFRP の研究開発や事業化に関心を持っている企業も多く、事業化にあたっては、生産性や加工技術等の確立とともに適性用途の開発が急務となっている。

こうした中で、今回の調査研究をとおり、医療分野において具体的な製品化の提案もされており、異業種による連携体を構築して研究開発を進めていく。

また低コストで生産性の高い成形法としてのテキスタイルプリフォームの活用や、CF と他素材の複合化による中間基材の開発が求められている。県内には繊維業や機械金属業等多くの産業が集積しており、事業化につなげていくためには、これらの業種と連携して開発を行う必要がある。

### 4. 結 言

- (1) 県内企業では、現時点では CFRP に取り組む企業は少ないが、非常に関心が高いことがわかった。
- (2) CFRP の技術動向を調査した結果、製品化には成形技術によるところが大きく、低コストで生産性の高い成形方法として、VaRTM 法やテキスタイルプリフォームを使用した RTM 法が注目されている。また CF 単一素材の欠点を補う形として複合素材の開発も重要である。
- (3) 県内企業が新規参入していくためには、低コスト成形法を確立するとともに、素材の複合化による適性用途の開発が急務である。また事業化には連携体の構築が重要である。

### 参考文献

- 1) 前田 豊，“炭素繊維の最先端技術”，シーエムシー出版，2007，p32-42.
- 2) (財)科学技術交流財団分野別研究会炭素繊維応用技術研究会資料，2008.
- 3) 第1回国際自動車素材・加工展
- 4) 九州大学軽構造システム工学研究室，“複合材料の低コスト成型技術 VaRTM の開発”，九州大学ホームページ，(平成 21 年 3 月 17 日閲覧)  
<http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/assl/research/VaRTM/VaRTM.html>

# 鋳物廃砂ダストをシリカ原料とする有用物質製造の研究

毛利 敦雄\* 佐藤 健\* 田中 亙\* 久保田 順一\*

Study on Synthesis of Useful Substance using Casting Sand Dust as Silica Source

MOURI Atsuo\*, SATO Takeshi\*, TANAKA Tohru\* and KUBOTA Junichi\*

## 1. 緒 言

中越鋳物工業協同組合企業からは、廃砂ダスト、ノロ、スラグなどの様々な廃棄物が発生する。これらは管理型産業廃棄物として、埋め立て処理を行っている。しかし、埋め立て処分場の処分容量の枯渇や処理費用の高騰に伴い、廃棄物処理量の削減が要請されている。

中越技術支援センターでは、リサイクルが難しいとされているフラン樹脂廃砂ダスト（年間4,000t 発生）をモデルとして取り上げ、これを原料として有用物質に転換する調査研究を行った。

本研究では、市場性を踏まえた有用物質の選定、基礎実験の実施、実用化炉の調査、法律面の検討など、多方面からの調査、実験を行った。

## 2. 調査研究の内容

### 2.1 有用物質の選定

有用物質は、廃砂ダストのけい素分をシリカ原料とするもの、流通量が多く市場が形成されているものとの観点から、選定のための調査を行った。

白土製造メーカー、肥料メーカーなどの調査を通じて、次のことが明らかになった。

廃砂ダストをリサイクルして、けい酸質肥料に変換することが可能と考えられる。

けい酸質肥料は、主として水稻のけい酸補給、および水田の土壌改良のために施用される。

また、けい酸質肥料の生産量は、年 259,000t あり、普通肥料全体（年 9,834,000t）の中で見ても、

ある程度の割合を占める<sup>1)</sup>。

けい酸質肥料では、けい素は可溶性であることが求められる。鋳物砂では、一般的にけい砂（不溶性）を使用する。このため、けい酸質肥料として使用するには、廃砂ダストを消石灰（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）などのアルカリと混合、焼成して反応させ、けい素を可溶性化する必要がある。鉍さいけい酸質肥料の規格は、可溶性けい酸 10%、アルカリ分 35% 以上となっている<sup>2)</sup>。

以上より、廃砂ダストを転換する有用物質としては、鉍さいけい酸質肥料を選択した。

### 2.2 基礎実験

実験に使用したフラン樹脂廃砂ダストの分析値を表 1 に示す。 $\text{SiO}_2$  は約 39%、樹脂分は、Ig.loss（1000℃焼成による重量減）に等しいとすると約 26%である。

廃砂ダストと市販の消石灰をスパチュラで混合し、磁器製箱に収めた磁製角皿に入れて、電気マッフル炉で焼成を行った。

試料は、廃砂ダスト中の Si と、消石灰中の Ca のモル比をパラメータとして作製した。配合組成を表 2 に示す。

焼成物中の可溶性けい酸の含有量を分析した結果を表 3 に示す。

1250℃2h では 12~14%、1300℃2h では 18~23% の可溶性けい酸を含む焼成物が得られた。

また、1250℃以上では焼成物の融着が見られるようになり、反応率が高くなると、焼成物の融着が発生しやすくなることがわかった。

\* 中越技術支援センター

表 1 廃砂ダストの成分 (%)

| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO  | MnO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MgO  | ZrO <sub>2</sub> | S    | lg. loss |
|--------------------------------|------------------|------|------|--------------------------------|-------------------|------------------|------|------------------|------|----------|
| 9.79                           | 39.03            | 1.50 | 0.49 | 3.81                           | 0.85              | 2.10             | 8.24 | 6.19             | 0.96 | 26.20    |

表 2 配合組成

|     | 廃砂ダスト | Ca(OH) <sub>2</sub> | Si:Ca |
|-----|-------|---------------------|-------|
| 組成1 | 30g   | 14.7g               | 1:1   |
| 組成2 | 30g   | 22.2g               | 2:3   |
| 組成3 | 30g   | 24.9g               | 1:2   |
| 組成4 | 30g   | 9.8g                | 3:2   |

表 3 焼成物中の可溶性けい酸 (%)

| 試料<br>条件 | 未粉砕  |      |      |      | 粉砕    |
|----------|------|------|------|------|-------|
|          | 組成1  | 組成2  | 組成3  | 組成4  | 組成1   |
| 1100℃・2h | 1.90 | 2.20 | 2.05 | 1.97 | 6.93  |
| 1150℃・2h | 3.29 | 3.23 |      |      | 9.24  |
| 1200℃・2h | 3.19 | 3.79 | 3.08 | 2.97 | 15.64 |
| 1250℃・2h | 13.7 | 14.1 | 12.9 | 12.2 | 18.22 |
| 1300℃・2h | 融着   | 23.1 | 17.6 | 融着   |       |

このため、実用化に際しては造粒などの融着防止対策が必要であると考えられる。

焼成温度を低下させるため、組成1の試料を使用して粉砕の効果を評価した。

ボールミルを使用して、粉砕前の中心粒径 60μm が 10μm になるまで処理を行ったところ、焼成温度は約 50℃低下した。ただし、原料中の樹脂がバインダーとなり、粉砕中に原料が粉砕容器の壁に付着するため、実用化の上では難しいものと考えられる。

このほか、アルカリ分を消石灰に比べ反応性の高い炭酸カリウム (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) に置き換える実験を行い、粉砕と同様に焼成温度が約 50℃低下することも確認した。

以上の基礎実験により、廃砂ダストと消石灰を混合し、高温で焼成することにより、鉍さいけい酸質肥料に相当する焼成物が得られることがわかった。

## 2.3 実用化炉の調査

基礎実験から得られた焼成条件 (1300℃2h) をもとに、実用炉の調査を行った。

廃棄物処理炉メーカーに、年間処理量が 3,000t と 300t の2つのケースについて、ロータリーキルンの仕様、ランニングコストなどの試算を依頼した。

表 4 実用化炉の概要

| 処理量            | 年3000t処理 | 年300t処理   |
|----------------|----------|-----------|
| 処理方式           | 連続処理     | バッチ処理     |
| キルンの大きさ        | φ2m×L16m | φ2m×L2.7m |
| 処理物1tあたりの重油必要量 | 1.5t     | 5.8t      |

ちなみに、前者は複数社の廃砂ダストを一括処理する場合、後者は1社内で処理する場合を想定したものである。

結果を表4に示す。年間処理量 3,000t のケースでは連続処理、300t のケースでは、1日1回のバッチ処理方式となる。

キルン内で 1300℃の熔融状態を維持するためには、多量の重油が必要である。さらに、通常の焼却炉などで使用されるバーナーでは、昇温が困難であるため、酸素富化による助燃が必要となる。このような高温処理では、燃焼空気中の窒素から環境基準を超える濃度で窒素酸化物が生成するため、これへの対策が必要である。

また、コストに関しては、年 3,000t 処理の場合で、設備費 12 億円、償却年数 10 年とした設備償却を含めたランニングコストが、トンあたり 19 万円と試算された。



## 2.4 法律上の検討

廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下廃棄物処理法）では、廃砂ダストは産業廃棄物の鉱さいに分類され、事業者の責任において処理することとなっている。

次の事例について、弁護士より法律的な見地から指導を受けた。

A 社が鋳物廃砂ダストを社内で処理して、処理物を B 社に有償譲渡する。B 社は処理物から有用物を製造して市場で販売する。

これについての弁護士の見解は、

- ① A 社では処理物の製品管理がなされる。
  - ② 処理物は、書面契約により合理的価格で、継続的かつ計画的に B 社に譲渡される。
  - ③ B 社で製造する有用物は市場を持ち、有用物の販売は、継続的かつ計画的になされる。
- という条件を満たせば、廃棄物処理法の規制には該当しないが、複数社の鋳物廃砂ダストを集めて処理を行う場合は、形態を問わず産業廃棄物中間処理業の許可が必要となるとのことであった。

## 3. 成果発表会の実施

本調査研究で明らかにした内容は、成果発表会を開催して、県内鋳造企業に提示した。

廃砂ダストの処理については、調査したけい酸質肥料のほか、セメント原料やコンクリート二次製品の骨材なども考えられる。廃砂中のフラン樹脂等を焼却し、無機質材料に加工する程度であれば 2.3 で述べた、キルン設備に係る経費は 1/10 程度になるとされている。どの方向に進むかは、本研究を基に中越鋳物工業協同組合など鋳物業界で判断して頂くこととする。

## 4. 結 言

- (1) フラン樹脂廃砂ダストの有用物質への転換について検討した。けい酸質肥料への転換を目標として、焼成条件などの処理方法、事業化に際しての設備や法律上の問題点などを明らかにした。
- (2) 成果発表会において、調査結果を県内鋳造業界に提示し、廃砂ダストのリサイクル化への判断材料として提供した。

## 参考文献

- 1) 農林水産省消費・安全局農産安全管理課監修，“ポケット肥料要覧 2004”，2004，p7-8.
- 2) “肥料取締法に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件”（昭和 61 年 2 月 22 日 農林水産省告示第 284 号）

## 熱処理技術に関する調査

浦井 和彦\* 伊関 陽一郎\* 皆川 要\* 高橋 靖\* 佐藤 亨\* 中部 昇\*  
岡田 英樹\* 三浦 一真\*\* 桂澤 豊\*\*\* 山田 敏浩\*\*\*\* 堀 祐爾\*

### Survey of Heat treatment Technology

URAI Kazuhiko\*, ISEKI Yoichiro\*, MINAGAWA Kaname\*, TAKAHASHI Yasushi\*, SATO Toru\*,  
NAKABE Noboru\*, OKADA Hideki\*, MIURA Kazuma\*\*, KATSURAZAWA Yutaka\*\*\*,  
YAMADA Toshihiro\*\*\*\* and HORI Yuuji\*

### 1. 緒 言

自動車や工作機械、家電から身の回りにある刃物まで多くの工業製品が熱処理工程を経て最終製品化されており、熱処理技術はものづくりにおける重要な基盤技術の一つとなっている。

最近の各種機械の高性能化及び自動化などから、部品の軽量・高強度・高精度化や、金型の高寿命・低歪化、処理コスト低減等が求められ、さらなる技術の高度化が必要とされている。

また、産業のグローバル化に伴い、海外進出に関わる問題や海外企業との価格競争にさらされている。

本事業では、これからの熱処理に関する技術的課題を検討し、県内企業の技術力向上・製品開発につながるような研究テーマの探索を目的として各種調査を行った。あわせて地元企業への情報提供と、熱処理をキーワードとした事業に対する機運醸成のために講習会などを行った。

### 2. 活動概要

#### 2.1 熱処理技術セミナー

対象者を限定せず、広く熱処理に関する知識を習得してもらうことを目的に、以下のとおりセミナーを開催した。

- 
- \* 県央技術支援センター
  - \*\* 研究開発センター
  - \*\*\* 下越技術支援センター
  - \*\*\*\* 中越技術支援センター



図1 セミナー風景

いずれも県央地域はもとより県内各地から定員を超える参加があり、会場に収容しきれず出席者の調整を依頼した回もあった。また、講演終了後も個別に講師との質疑が続き、各社の関心の高さが伺えた。

#### 第1回 10月3日(金)

「モノづくりにおける熱処理の機能と役割」

講師：鈴木健司 氏

(東部金属熱処理工業組合 技術委員長)

- ・適切な設計、材料選択の考え方
- ・熱処理トラブル回避のための留意点 など

#### 第2回 1月23日(金)

「熱処理品の損傷とその原因調査法」

講師：仁平宣弘 氏

(仁平技術士事務所)

- ・様々な破損事例を示しその原因として考えられることを解説、大半が材料選択を含めた設計上の問題と指摘。

### 第3回 3月18日(水)

「機械部品の破断面の見方と損傷事例」

講師：藤木 榮 氏

((独)産業技術総合研究所 客員研究員)

- ・破壊についての基本的な事柄と破断面を観察する上で留意すべき点、解釈の仕方等を説明。

## 2.2 県内企業の情報収集

複数企業が共同で研究に取り組める可能性を探るため、県内の熱処理業および熱処理利用企業10社ほどを訪問し、現状や課題、これからの方向等意見を伺った。

それらをまとめると、以下のようになる。

### (1) 人材育成

技能検定を受けさせているところも多く、そのための勉強の場、基礎的なことを若手に学ばせる場が欲しいとの意見が多く寄せられた。

また、評価手法など実際に自分の手を動かしてやる実技を交えたものが必要との意見も多かった。

### (2) 各社個別の課題

寸法変化や割れの発生はどこからも同様に聞かれた課題ではあるが、各社扱う製品の形状・材質や求める精度などが異なるため、具体的な課題解決は個々での対応とならざるを得ない。

例えば、次に述べる蓄積した一般的形状での系統的データを、個々の課題解決に結びつけられるような個別の取り組みが必要になると考えられる。

### (3) 共同のテーマ

企業が共同で取り組もうとすると、現実的な課題は取り上げにくく、基礎的か最先端のものどちらかになるとの声が聞かれた。

そのようなものでは例えば歪みの問題では、一般的形状物について材質や処理条件と歪みの関係を系統的に実験・調査しデータを蓄積するといったことや、歪みのシミュレーション技術の開発・高精度化を図るといったテーマが考えられる。

また、硬さや耐摩耗性を得る通常の熱処理に加え、摩擦を低減させるなど複数の機能を持たせる複合処理なども複数社から聞かれた。

## 2.3 県外企業の情報収集

関東圏、中京圏など製造業の中心となる地域の熱処理関連企業、試験研究機関を訪問し、現状や動向について情報収集を行った。

どこも景気落ち込みの影響は大きく、現在は社員教育に注力したり、工程改善などを図って景気回復時には即応できる体制を整えておくといった意見が聞かれた。

また、自動車のように量産型の仕事は今後減少し、少量でもより付加価値の高い特徴ある処理を手がけていく必要があるとの意見が大半であった。特に表面改質の高度化に対する意向が高いように思われた。

他県で言われている問題点は

- ①技術開発・ノウハウの蓄積不足
- ②対等な取引関係
- ③企業間連携の希薄
- ④生産のグローバル化への対応
- ⑤川上・川下産業との水平展開の不足
- ⑥新分野への開発力不足
- ⑦人材不足
- ⑧PR不足
- ⑨エネルギーの効率化

などであり、これらは本県にも共通する問題点と思われる。

これらの問題解決には技術的課題の他、企業連携に関わる課題、情報やPRに関わる課題が存在する。今後、新潟県として何ができるかということを産業振興課、(財)にいがた産業創造機構、工業技術総合研究所、それぞれの立場から検討する必要があると考える。

## 2.4 研究開発事業の検討

これら調査結果等各種情報をもとに、今後の工業技術総合研究所での研究テーマを検討した。

熱処理技術は装置産業的な部分があり、そのための実験設備も高価なものになる。第1段階として現有試験機器を活用して次のテーマが考えられる。

(1) 品質予測のためのシミュレーション技術

歪みや硬化層の状態を実用的に予測する技術の開発を行い、高精度金型の製作や後加工を少なくすることで加工時間、加工費を抑え、競争力の向上を図る。

また、実験設備等が当研究所か県内企業に備えることが可能であれば次のようなテーマが考えられる。

(2) これからの成長産業のための熱処理技術

アルミニウムの表面硬化技術やステンレスの耐食性向上等を行い、機器の軽量化による省エネルギー化や、ステンレス材のロングライフ化を図ることで省資源化に寄与する。

(3) 複合熱処理技術

既存技術の効果的組み合わせや複数の効果を期待できる処理技術の開発を行い、機能性薄膜の密着性向上や、多機能膜の生成を可能にする。

特に機器の耐摩耗性に関する問題やすべり潤滑に関する問題は旧来からの問題であり、今後とも研究開発の行われる分野である。

### 3. 結 言

熱処理技術に関し、県内外の企業等を訪問し、現状や課題、技術動向などの調査を行うとともに

に、セミナーの開催等をとおして関連する知識の啓蒙普及を図った。

- (1) 県内外を問わず、企業内での人材育成は大きな課題となっている。東京での講習会等はあるものの、地方の中小企業からでは参加しづらいのが現状で、地元での同様な機会の提供が望まれている。
- (2) 表面の高度化に関する技術分野が今後重要性を増すと考えられ、複合処理やシミュレーションなども含め注目が必要。
- (3) 研究テーマに関しては、熱処理業界全体に関わる問題とそれぞれの企業単独の問題とがあり、分けて考えていく必要がある。

また、その実施と成果の普及には熱処理と評価のための各種設備の確保並びに開発した技術をPRする努力が必要となるが、これらの解決には産学と当所の連携が欠かせないものと考え

### 参考文献

- 1) 金属熱処理業ビジョン ―10年後のあるべき姿―、日本金属熱処理工業会、平成18年11月
- 2) 素形材技術戦略 ―ものづくり基盤を支える素形材技術の羅針盤― 速報版、経済産業省・(財)素形材センター、平成20年11月

## 溶接技術の高度化に関する調査研究

長谷川 雅人\* 五十嵐 宏\* 大野 宏\*\* 平石 誠\*\* 馬場 大輔\* 田村 信\*\* 菅野 明宏\*\*\*

### Study on Improvement of Welding

HASEGAWA Masato\*, IKARASHI Hiroshi\*, OHNO Hiroshi\*\*, HIRAISHI Makoto\*\*, BABA Daisuke\*,  
TAMURA Makoto\*\* and KANNO Akihiro\*\*\*

#### 1. 緒 言

アーク溶接、ガス溶接やレーザ溶接は、県内でも多くの企業に普及している工業生産活動には欠くことのできない技術である。これらの溶接技術自体は歴史もあり、比較的成熟した技術である。しかし、近年ロボットを使った溶接が普及してきており、この分野に関してはまだまだ課題が多い。つまり、自動化、省力化を狙って溶接ロボットを導入しても、ティーチングに時間がかかる、溶接によるワークの熱変形で狙いが溶接線から外れるなどの問題が発生し、結局期待したほどの効果があがらずに悩んでいる企業が多い。

そこで、溶接ロボットの導入においてティーチングや溶接線狙いのズレなどが、県内企業でどの程度問題となっているのかを調査するとともに、それらの問題を解決するための研究を行った。また、レーザとアークの二つの熱源を組み合わせて互いの欠点を補完し、従来にない高品位で高能率な溶接ができると言われているハイブリッド溶接についても調査した。

#### 2. 県内企業の現状と研究テーマ意向調査

県内溶接関連企業 18 社を訪問し、どのよう

な溶接を使いどんな製品を製造しているか、工業技術総合研究所に対し何を研究対象として望むのかを、ハイブリッド溶接、自動追尾溶接、簡易ティーチング技術についての研究を候補として提示し調査した。

さらに、訪問した企業の中から、工業技術総合研究所の研究に関心があり、研究テーマについて検討していただける方々に集まっていただき、検討委員会を 2 回開催した。

訪問調査、検討委員会での討議は以下のよう  
に集約される。

- (1) ハイブリッド溶接については、用途やメリット・デメリットが明確でなく、導入には前向きになれないとの意見が多かった。
- (2) 多くの企業でロボットのティーチングに課題を持っており、簡易ティーチングには関心が高かった。
- (3) 自動追尾溶接については、簡易ティーチングと組み合わせて大幅な省力化ができる理想的なシステムにできないかとの意見に集約された。

#### 3. 先端溶接技術セミナーの開催

県内企業に最新溶接技術の紹介・普及を図るため下記の 2 テーマについてセミナーを開催した。

##### 3.1 「レーザ・アークハイブリッド溶接の特徴と応用」

講師：三菱重工業(株) 神戸造船所

---

\* 上越技術支援センター

\*\* 研究開発センター

\*\*\* 下越技術支援センター

先端製品・機械システム部

メカトロシステム設計課

主席技師 渡辺 眞生 氏

開催日：平成 20 年 11 月 11 日 (火)

参加人数：31 人

### 3.2 「溶接ロボットにおける倣い(アークセンサ)精度及びティーチング技術」

講師：コマツエンジニアリング(株)

産業システム事業部システム営業部

横山 祥二 氏

開催日：平成 20 年 12 月 18 日 (木)

参加人数：46 人

## 4. 調査研究

### 4.1 レーザ・アークハイブリッド溶接

レーザ・アークハイブリッド溶接（以下「ハイブリッド溶接」）は、レーザ溶接とアーク溶接を組み合わせたもので、両者の短所を補完した溶接方法である。その効果としては「要求ギャップ精度の緩和」、「高速度化」、「低歪」、「深溶け込み」、そして「溶接欠陥の抑制」などがあげられる<sup>1) 2)</sup>。そこで、ハイブリッド溶接について技術調査を行うとともに本県における適用可能性について検討した。

#### 4.1.1 現状技術の調査

表 1 に市販のハイブリッド溶接機の主要メー

カと、その装置の特徴を示す。ここでは三菱重工製のレーザとアークが同軸上に配置されている方式<sup>3)</sup>と、それ以外に大別できる。これらの適用先で最も多いのは自動車用鋼板類であり、Frounius 社の装置は VolksWagen や Audi のドア部溶接ラインにも導入されている<sup>4)</sup>。

また、欧州の Meyer 造船所ではハイブリッド溶接を用いた低歪溶接により、歪修正作業の簡略化を実現している<sup>5) 6)</sup>。

その他は重工業向けや、手持ち溶接による薄物製品向けであるが、現時点での実用事例は少ないようである。

#### 4.1.2 方向性

ハイブリッド溶接法の導入が進められているのは主に自動車と造船の分野である。これらの分野ではハイブリッド溶接に有効なロボットやガントリーシステムを用いた自動溶接ラインが多く、また設計製造から検査までの全工程を通したコスト検討が比較的容易である。

すなわちハイブリッド溶接は、そのシステムに対する大きな投資を、一貫した工程管理と自動化によって回収できる分野でのみ積極的に実用化が進められていくと考えられる。

#### 4.1.3 まとめ

県内の溶接産業を俯瞰すると、大型構造物や産業機器、精密板金など対象は多岐にわたるが、

表 1 レーザ・アークハイブリッド溶接機の主要メーカーと特徴

| メーカー                 | レーザ光源                      | アーク源        | 特徴                                        |
|----------------------|----------------------------|-------------|-------------------------------------------|
| 三菱重工業(株)             | YAG,<br>Fiber              | TIG,<br>MIG | レーザ・アーク同軸方式<br>(3 次元溶接に適している)             |
| Precitec<br>(ドイツ)    | YAG,<br>Fiber,<br>Disc, LD | 種々          | ワイヤ横入れ方式<br>溶接部モニタリングカメラ<br>シームトラッキング機構有り |
| Frounius<br>(オーストリア) | YAG                        | MIG         | ワイヤ横入れ方式<br>タンデムタイプ有り                     |
| (株)WEL-KEN           | YAG                        | プラズマ        | レーザ・アーク近軸方式<br>ハンディヘッド (手持ち可)             |



多品種少量生産が多く、自動化が進んでいる分野は少ない。したがって、県内でハイブリッド溶接を有効に利用できる企業は一部に限定されると思われる。

#### 4.2 自動追尾（倣い）溶接

溶接ロボットなどの自動機によって溶接を行う場合、部品寸法誤差、位置決め誤差、溶接時の熱変形などにより、溶接トーチの狙いと溶接すべきライン（溶接線）にズレが生ずる場合がある。こうした事故を防ぐために、溶接ラインを自動的に検出し、トーチのズレを自動的に修正する自動追尾（倣い）溶接の実現が求められている。

##### 4.2.1 現状技術の調査

溶接線の倣い制御には、現状ではアークセンサが広く用いられている。これは、例えばV字型の形状を持つ溶接継手部に対して、溶接トーチを左右に揺動（ウィービング）させ、そのときの電流変化をモニタリングしながら、溶接トーチが常に開先の中央に来るように制御する方式である。この方式は、アーク自身をセンサとするためトーチ回りがシンプルで低コストであるが、用途が隅肉溶接などに限定され、薄板の突き合わせ溶接などでは溶接線の検出が不可能である。また、ラインレーザセンサを用いた開先検出システムも実用化されているが、開先が大きくかつ溶接方向に急激な変化のない溶接事例に限定される。

##### 4.2.2 方向性

ロボット溶接では、三次元的で溶接線が複雑な溶接物にも対応することが必要である。そこで、複雑な溶接物にも対応するため画像処理による溶接線検出方法を検討した。また同時に、高さ方向を検出するために光切断法を検討した。

##### 4.2.3 実験

画像処理による溶接線検出方法は、カメラか

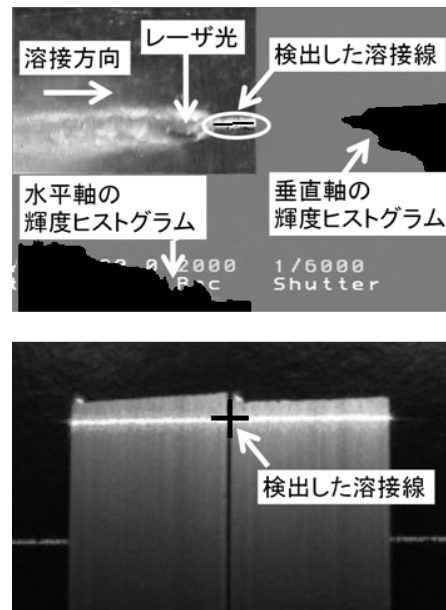


図1 上 画像処理による溶接線検出  
下 光切断法による検出

ら得られた映像を直接画像処理して輝度などの特徴量を抽出し溶接線を検出するものである。また、光切断法は、ライン状レーザ光を対象物に照射し、それを斜め前方からカメラで撮像し、形状計測を行って溶接線を検出するものである。

画像処理による検出方法においては、図1上に示すように、溶接中の動画像<sup>7)</sup>から垂直軸、水平軸それぞれについて輝度ヒストグラムを作成し、垂直軸についてはピーク値から、水平軸については設定した閾値以下の部分を抽出し、視覚的に溶接線位置を検出することができた。また、光切断法においては、図1下のようなラインレーザ光より形状情報を得て溶接線の高さを検出することができた。

##### 4.2.4 まとめ

本研究では、画像処理と光切断法から溶接線を検出する手法について検討し、実験的には溶接線を検出することがわかった。これらの手法が実用化されるためには、機器のコンパクト化・耐熱性向上、可視化手法、画像処理手法などについてさらに検討が必要である。

### 4.3 三次元簡易ティーチングシステム

ロボットを用いた溶接において、動作に必要な情報（位置情報、溶接情報）をロボットに与え、ロボットの動作プログラムを作成する、という一連の作業がティーチングである。一般的にはリモートペンダントを用いたりリモートティーチングが行われているが、複雑部品ではティーチング作業が膨大となり、問題視されている。

#### 4.3.1 現状技術の調査

三次元 CAD モデルからティーチング情報を作成するオフラインティーチングが実用化されている。これは、現場でのティーチング作業を削減できる利点があるが、実ワークと三次元 CAD モデルにはワーク精度などに違いがあるため、動作プログラムの修正が必要な場合が多い。また、三次元 CAD と高価な CAM ソフトが必要なため、県内企業には普及していない。

#### 4.3.2 方向性

そこで、ティーチング作業の軽減を図るため、簡易ティーチングシステムの可能性を検討した。これは、溶接箇所手持ち可能なティーチペンを合わせ、ティーチペンに取り付けたマーカーの位置情報を計測装置により測定し、その結果からロボットの姿勢を決定し、動作プログラムを生成させるものである。

#### 4.3.3 実験

計測装置としてモーションキャプチャを用い、簡易ティーチングシステムの一連の流れを構築する実験を行った。測定点が 34 点の場合、ティーチング作業時間は約 10 分程度（計測 5 分、データ処理 5 分）であった。ティーチペン位置情報の誤差は、直線距離 100mm で位置 0.3mm、角度 0.05°、400mm で位置 10.1mm、角度 2.3°であった。実験の結果、三次元簡易ティーチングシステムにより作業時間を大幅に短縮できる可能性を見いだしたが、実用化にはティーチペンの三次元位置測定の精度向上が必須である。

そのためには、レンズの歪みなどにより生ずる誤差の補正技術の開発が必要である。

#### 4.3.4 まとめ

本研究では、考案した簡易ティーチングの実現可能性と優位性を示すとともに、その技術的課題を明らかにした。県内企業では、ティーチング作業の作業者への負担、時間的なロスの問題視している企業が多く、早期実現が望まれる。

## 5. 結 言

- (1) 企業訪問調査、溶接研究会検討委員会などを通じて技術要望調査を行い、ハイブリッド溶接、簡易ティーチング、自動追尾溶接について技術調査および可能性実験を行った。
- (2) 簡易ティーチングシステムについては実現の可能性を示すことができた。
- (3) 理想的な省力化自動溶接を目指すためには自動追尾技術などの開発が必要である。

## 参考文献

- 1) 阿部，林，”レーザ・アーク複合溶接法とその将来”，溶接技術，51，7，2003，p62-67
- 2) Ed.Hansen，”Ready for hybrid welding?”，ILSJ，October 2008，p22-24.
- 3) 坪田，石出，渡辺，赤羽，”複雑三次元形状対応レーザ加工システム-同軸レーザ加工ヘッドの開発-”，三菱重工技報，42，2，2005，p86-89.
- 4) ”平成 17 年度 IMS 動向調査報告書”，(財)製造科学技術センター，2006，p32-36.
- 5) 石出，”重工業におけるレーザ加工技術の動向”，平成 20 年度(財)溶接接合工学振興会第 19 回セミナー，2008，p73-76.
- 6) C.Yhomy.Wagner,F.Vollersten,B.Metshkow，”Laser in the Shipyard”，ILSJ，January 2008，p11-14.
- 7) 信越スーパーテクノゾーン推進研究の一環として，旧(株)レーザー応用工学研究所 技術課 平賀仁氏が撮影した映像

# ナノテク機器利用技術講習会

樋口 智\* 平石 誠\* 宮口 孝司\* 斉藤 博\*

Practice on Device Production with Nanotechnology Equipments

HIGUCHI Satoru\*, HIRAISHI Makoto\*, MIYAGUCHI Takashi\* and SAITO Hiroshi\*

## 1. 緒 言

電子機器、光通信、医療機器の小型化に伴い、微細形状を付与した高機能部品や超精密加工部品の利用拡大が進んでいる。これらに対応する技術に、ナノテクノロジー（物質をナノメートル[1nm=10<sup>-9</sup>m]領域で自在に制御する技術）があり、国の重点支援技術領域に指定されるなど製品の高付加価値化を実現する技術として期待されている。しかしながら、本県の主要な製造業である一般機械、精密機械等既存企業の取組みは、先端産業であるが故の技術習得や導入の難しさ（機器が高額）のため、進んでいないのが現状である。そこで、既存産業へのナノテクノロジー技術の導入、普及を図るため、NICOナノテク研究センター機器を利用した技術講習会を実施した。

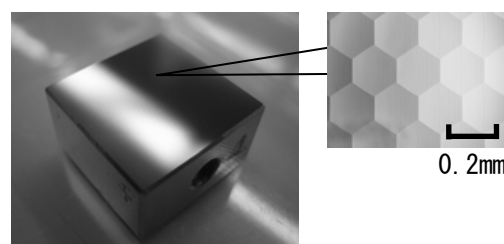


図1 マイクロレンズアレイ金型

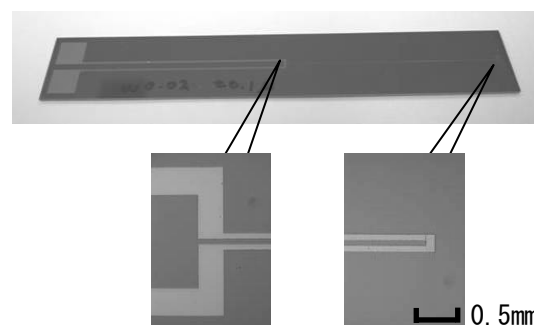


図2 薄膜熱電対

## 2. 講習会の概要

MEMS製品の加工技術および超精密加工・評価技術を対象として技術講習会を実施した。実習テーマとして次の2つを設けた。

- a) 超精密ナノ加工機を使用したマイクロレンズアレイ金型（図1）の試作・評価（以下、超精密研修と記す）
- b) MEMS装置を使用した薄膜熱電対（図2）の試作・評価（以下、MEMS研修と記す）

### 2.1 超精密研修

超精密加工は、デジタルカメラや光学メモリのレンズ、液晶導光板などの光学部品やバイオチップの加工等で不可欠というべき技術となっている。本講習会では、作成したテキストおよび副読本<sup>1)</sup>に基づき超精密加工に関する講義を行い、その後、超精密ナノ加工機を使用しマイクロレンズアレイ金型の試作および加工品の非接触三次元測定機による評価技術について実習した。図3に超精密ナノ加工機、図4に非接触三次元測定機の外観を示す。

超精密ナノ加工機はファナック製のROBONANO α-0iAを使用した。静圧空気軸受

---

\* 研究開発センター

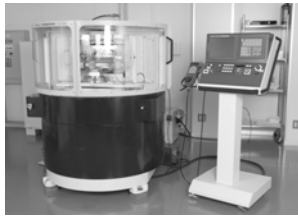


図3 超精密ナノ加工機



図4 非接触  
三次元測定機

けを搭載する5軸加工機で、直線軸（XYZ）の分解能は1nm、回転軸（BC）の分解能は1/100,000度である。

非接触三次元測定機は三鷹光器製のNH-3SPを使用した。レーザースポット径が約1 $\mu$ mでオートフォーカス機構（分解能1nm）を搭載したものである。

## 2.2 MEMS研修

MEMS 加工技術は、紫外線や電子線を用いて数十nm～数 $\mu$ m サイズのパターンを樹脂膜（レジスト）に描画・現像し、エッチング、成膜、レジスト除去を繰り返し、シリコンなどの表面に極微細な形状を形成する技術である。本技術講習会では、作成したテキストおよび副読本<sup>2)</sup>を使用してMEMS加工に関する講義を行った後、薄膜熱電対を題材としてマスクアライナーやスパッター成膜装置を使用して試作・評価技術について実習した。

マスクアライナー（ユニオン光学製：PEM-800、図5）は、パターンが描かれた遮光板（マスク）を通して紫外線をレジストに照射し、パターンをレジストに転写する装置である。通常、一種類のデバイスを作製するために複数枚のマスクが使用されるため、その位置合わせ機能も持っている。マスクやレジストの種類によるが、数 $\mu$ mの線幅の解像が可能である。

また、スパッター成膜装置（芝浦メカトロニクス製：CFS-4EP-LL（i-Miller）, 図6）は、デバイスに電気的あるいは機械的機能を付与するために基板表面に所望の金属や無機物を数十nm～数 $\mu$ mの厚さで堆積（成膜）させる装置である。使用した装置は高周波・マグネトロン方式のも

のであり、高融点金属や絶縁物などの成膜も可能である。



図5 マスク  
アライナー



図6 スパッター  
成膜装置

## 3. 講習会の実施方法

### 3.1 実施概要

講習会の概要を以下に示す。

実施日時：

《超精密研修》平成20年11月13日、14日

《MEMS研修》平成20年11月26日、27日

実施会場：NICO ナノテク研究センター

参加者数：4名（募集定員）

### 3.2 タイムテーブル

各研修のタイムテーブルを図7、図8に示す。

#### <1日目>

|       |               |
|-------|---------------|
| 10:00 | ～講義～          |
|       | 超精密加工の基礎      |
| 12:00 |               |
| 13:00 | ～実習～          |
|       | ・平面加工用工具の取り付け |
|       | ・平面加工         |
| 17:00 |               |

#### <2日目>

|       |                            |
|-------|----------------------------|
| 13:00 | ～実習～                       |
|       | ・レンズ加工用工具の取り付け             |
|       | ・マイクロレンズアレイ加工              |
| 17:00 | （・形状測定および評価） <sup>*1</sup> |

図7 超精密研修

#### <1日目>

|       |                           |
|-------|---------------------------|
| 10:00 | ～講義～<br>MEMSの基礎・実技        |
| 12:00 |                           |
| 13:00 | ～実習～<br>・レジスト塗布<br>・露光、現像 |
| 17:00 |                           |

#### <2日目>

|       |                                        |
|-------|----------------------------------------|
| 13:00 | ～実習～<br>・SiO <sub>2</sub> 成膜<br>・ダイシング |
| 17:00 | ・測定                                    |

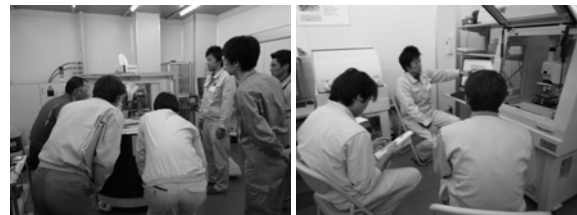
図8 MEMS研修

本技術講習会は（財）にいがた産業創造機構（NICO）の平成20年度産業基盤形成支援事業で実施したものである。



【座学】

【動バランス修正】



【平面加工】

【測定・評価】

図9 研修の様子（超精密研修）

#### 4. 研修風景

研修風景を図9、10に示す。

#### 5. 結 言

- (1) 講習会終了後、受講者を対象にアンケート調査を行った。概略としては、流れや工程が分かりやすく楽しく勉強できた、少人数での受講であったので機器に触れることができ質問もしやすかった等、講習の進め方について肯定的な意見があった一方で、もう少し時間をかけ加工後の評価や応用例などについても言及してほしいとする指摘も寄せられた。
- (2) 超精密加工やMEMS加工という比較的新しい技術分野について受講者の知識や認識に差異があるため対応が難しい面もあるが、今回参加していただいた企業のフォローアップや、今後同様の講習会を開催していく中で県内企業のニーズを把握し、講習内容の改善を進めていきたい。



【座学】

【スパッター成膜】



【ダイシング】

【評価】

図10 研修の様子（MEMS研修）

#### 参考文献

- 1) 竹内芳美，“超精密マイクロ切削加工”，日刊工業新聞社，2008.
- 2) 麻蒔立男，“トコトンやさしい薄膜の本”，日刊工業新聞社，2002.