

ISSN 0919-6676  
CODEN: SFHPFE

# 試験研究報告

令和元年度

# 令和元年度 福島県ハイテクプラザ 試験研究報告

## 目 次

### ◆再生可能エネルギー分野

水素社会実現のためのプラント運転管理・点検技術の開発	1
バイパスダイオード内蔵太陽電池パネルの開発	9

### ◆ロボット・AI・IoT 分野

AI を用いた物体の位置と状態を特定する手法の検討	16
深層学習を用いた気象状況判断プログラムの試作	20
安価な測距センサを用いた「移乗です」の自動停止機能の開発	23
GPS とセンサの組み合わせによる自己位置推定システムの開発（第2報）	27
狭隘内部空間の三次元構造復元に関する研究開発	34

### ◆製造プロセス分野

#### ・材料開発

セルロースナノファイバー（CNF）複合材料の開発	40
天然藍を原料とした染料の製造方法	45

#### ・デジタル応用技術（CAD・CAM・CAE）

CAE を用いたプリント基板上のはんだクラックの解析	49
整形外科手術用器具の強度評価	52
半凝固鋳鍛成型の工程設計のための CAE 活用法	61
工具経路生成時間短縮のためのポリゴンメッシュの簡略化	67

#### ・工程改善

異なる手法で洗浄された真空用部品からの放出ガスの比較	73
ドライフラワー製品の残留塩素の低減処理	76
カラスステンレスの液相着色法における新構造電極の開発	79

#### ・検査技術

三次元デジタイザによる寸法測定条件の最適化（第2報）	83
溶接における研磨仕上げ部の自動欠陥検出技術の開発（第2報）	87

### ◆繊維分野

オールシーズン対応可能な改質リネン編地の開発	91
コーティング繊維織物を活用した空調（柁目）織物の開発	95
縫製企業の接着工程における最適条件の検討と工程改良の提案	100

### ◆醸造・食品分野

カプロン酸エチル高生成焼酎酵母の育種及び実用化に関する研究	104
マロラクティック発酵用乳酸菌からの新規山廃酒母乳酸菌の選抜	106
福島県オリジナル清酒製造技術の開発（第5報）	111
県産味噌の品質向上に向けた微生物の評価	117
福島県産果実の品質・加工適性評価	121

### ◆工芸分野

木製履物の設計のための FEM 解析の評価	126
デジタルファブリケーションによる伝統工芸品の製造手法の提案（第2報）	131

## 事業区分説明

---

(1) 新製品・新技術開発促進事業

企業が直面している技術的課題をハイテクプラザが代わりに解決し、その成果を技術移転することで企業の製品開発を支援します。(ハイテクプラザが独自に取り組んだ内容であり、応募企業と共同で取り組んだ内容ではありません。)

(2) チャレンジふくしま「ロボット産業革命の地」創出事業

震災からの産業復興のため、次世代の新たな産業分野であるロボット産業の集積を目指し、ハイテクプラザにおいてフィールドロボットと自律走行用自己位置推定システムの要素技術開発を実施します。

(3) 福島新エネ社会構想等推進技術開発事業 産総研連携強化型技術開発事業

福島新エネ社会構想等推進技術開発事業の一環として、産総研と連携しながら水素関連分野及び再生可能エネルギー分野に携わる技術開発を行います。

(4) 福島県オリジナル清酒製造技術の開発

県オリジナル酵母「うつくしま夢酵母」「うつくしま煌酵母」と県産酒造好適米を用いたオリジナル清酒の製造方法とその特徴についての検証を行います。

(5) 基盤技術開発支援事業

震災からの復興やグローバル化などの課題に直面している地域産業の復興のため、先導的技術や独自技術の開発等に取り組み、その研究成果を技術移転します。

(6) 産業廃棄物減量化・再資源化技術支援事業

産業廃棄物対策をはじめとした循環型社会の構築のため、産業廃棄物排出業者へ技術面からの支援を行うことにより、産業廃棄物減量化・再資源化を図ります。

(7) 科学技術調整会議共同研究事業

県内の8公設試験研究機関等で構成される科学技術調整会議の共同研究分科会において、各機関単独では解決困難な課題について共同で研究を実施します。

(8) 外部資金等活用研究事業

他機関や企業からの研究委託や競争的資金制度等の外部資金等を活用しながら、ハイテクプラザが各種研究を実施することにより、本県の産業振興に寄与する新技術の開発や技術的課題の解決に繋がります。これにより蓄積された研究成果を県内企業に技術移転することで、本県ものづくり基盤の強化を図ります。

# 水素社会実現のためのプラント運転管理・点検技術の開発

Development of plant operation & maintenance technology for realizing "hydrogen society"

技術開発部 工業材料科 工藤弘行 穴澤大樹 鈴木雅千  
技術開発部 生産・加工科 柿崎正貴 尾形直秀

水素プラント設備に適したプラント運転管理・点検技術を開発するため、水素ステーションで使用されるバルブ、蓄圧器、配管継手の実験モデルを作製し、各種試験、CAE解析を実施し、早期に故障を検知できる点検技術を提案した。また、点検技術を広く普及する観点から、CAEをカスタマイズした「点検アプリ」をベースにする点検システムを考案し、これを配信するプラットフォームを構築した。

Key words: IoT、予知保全、デジタルツイン、CAE

## 1. 緒言

福島県では、福島新エネ社会構想の一環として、水素エネルギー活用に関する様々な取組みが行われている。令和2年3月には、浪江町に福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R)が開所し、水素製造を開始するなど、水素活用の機運が一段と高まっている。

水素の利用に当たっては、ガス漏洩などに対する懸念があり高い安全性や長期信頼性の確保が急務となっている。また、水素関連施設の普及のためには、建設費のみならず、管理保守費の低減も必要であり、安全性と経済性を両立する技術が望まれる。

ここで期待されるのが、IoT、AI、ビッグデータ解析などを活用した新しいプラント運転管理・メンテナンス(O&M)技術である。経済産業省では、近い将来、これらの技術を活用した新しいタイプのO&M産業が生まれると予見し、産業育成を強化している。

以上より、本事業では福島県が水素社会の実証拠点化することを活かし、いち早く水素プラント設備に適用できる運転管理・点検手法の技術や仕組みを県内企業や各機関と連携して構築することを目指し、研究開発を進めている。最終年度となる本年度は、バルブ、蓄圧器の点検技術を実証段階に向けて最適化するとともに、点検システムの構築に取り組んだ。

## 2. 実験及びCAE解析

### 2. 1. 点検技術の概要

表1に本研究が点検対象とする部品を示し、各部品に対する点検技術の概要を下記に記す。

(i) 配管継手・・・機械式継手では締結力低下に起因する漏洩の危険性がある。本研究では、移動式水素ステーションの配管継手に着目し、移動時の振動による締結力低下を点検対象とする。漏洩のメカニズムとして、図1に示す「接触面漏洩」の考え方を用いる。

(ii) 圧力容器(蓄圧器)・・・水素充填に伴う繰り返し荷重により、容器内面に生じた初期き裂が進展し、表面に達することで漏洩が生じる。本研究では独自技術としてDIC画像処理による変位・ひずみ測定で、き裂の影響を捉える手法を適用する。

(iii) バルブ・・・液体水素の沸点は $-253[^\circ\text{C}]$ であり、異常低温による動作不良が考えられる。本研究ではCAE解析を併用することで、センサやカメラでは測定できない製品内部の温度を推定する技術の活用を行う。

表1 点検対象部品と故障モードの絞り込み

水素運搬形態	部品	故障モード	頻度	危険度
高圧ガス	配管継手	シール面からの漏洩	大	大
高圧ガス	圧力容器(蓄圧器)	容器からの漏洩(疲労、水素脆化)	中	大
液体水素(極低温)	バルブ	異常冷却による動作不良	小	大

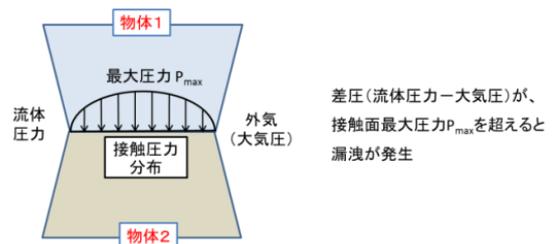


図1 接触面漏洩の概念図

### 2. 2. バルブ冷却試験

本研究では、IoTセンシングやサーモカメラ撮影とCAE解析を連携する点検技術を用いる。CAE連携の実用性を検討するため、バルブ冷却試験を行った。

図2に本事業で使用したバルブ実験モデルを示す。実験モデルは液体水素貯槽の払い出し部を模している。実験モデルは大野ペロー工業(株)が製作したもので、バルブを構成する部材や寸法は、実際の水素ステーション

ョンで使用されているものと同一である。通称、「首下」と呼ばれる細長い部品が特徴である。

これまでの研究により、フランジ部の温度がバルブ全体の温度分布を代表するとの知見が得られている。本年度は、より実用化に適した測定点として、図3に示すようにボルト頭部に熱電対を埋め込み、IoT センサ測定点とする検討を行った。温度測定はナショナルインストルメンツ社製 CompactDAQ システムを使用し、サンプリング速度 1 サンプル/秒とした。

図4は、組込み用途向け小型サーモカメラである。据置型の装置に比べて、測定可能な温度範囲が狭いことが課題であるが、CAE との連携が可能か検討した。



図2 バルブ実験モデル



図3 ボルトへの熱電対の取付状況



図4 組込み用途向け小型サーモカメラ

### 2. 3. バルブ実験モデルのCAE伝熱解析

IoT と CAE と連携した点検技術の検討のため、バルブ実験モデルの CAE 伝熱解析を実施した。図5に CAE 解析モデルを示す。解析ソフトウェアとして COMSOL Multiphysics を使用し、伝熱解析において課題となる熱伝達係数の逆同定を効率よく行うため、指定したパラメータの組合せを一括して計算する「パラメトリックスイープ機能」を用いた。

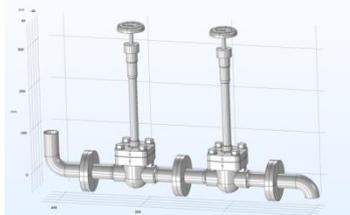


図5 バルブ実験モデルのCAE解析モデル

### 2. 4. 蓄圧器実験モデルによるDIC測定試験

図6に、本研究で使用した蓄圧器実験モデルを示す。このモデルは移動式水素ステーションの製造実績が豊富な大陽日酸エンジニアリング(株)会津若松事業所が製作したもので、部材や寸法は実際の移動式水素ステーションと同一である。蓄圧器の代替として直径約400[mm]、板厚5[mm]の模擬容器が取り付けられている。

本研究で使用する画像処理ソフトウェア VIC-3D は、照明やピントなどの撮影条件などから、期待精度を mm 単位で算出できる。そこで、図7に示すように模擬容器を対象に期待精度を調べる DIC 視野確認試験を行った。測定距離は 0.5[m]、1[m]、3[m]、8[m]の4条件、レンズは焦点距離 17[mm]、35[mm]の2条件とした。

また、DIC 測定精度検証のため、図8に示すように円弧試験片を用いた試験を行った。円弧試験片は、模擬容器と同一の曲率を持ち、幅 100[mm]、板厚 5[mm]である。試験片の一端を支持固定し、他端を DIC 測定面とした。DIC 測定面の内径側にひずみ変換式変位計を取り付け、測定面内径部を指で押した時の変形を測定した。測定距離は 1 [m]、レンズは焦点距離 17[mm]とした。変位は約 0.02[mm]～約 2[mm]の 5 条件とした。



図6 蓄圧器実験モデル



図7 蓄圧器模擬モデルのDIC測定試験状況



図8 DIC測定精度試験状況

### 2. 5. 蓄圧器のCAE破壊力学解析

蓄圧器にき裂が生じた場合の影響を調べ、点検技術の参考とするため、CAE 破壊力学解析を実施した。図9に、蓄圧器の CAE 解析モデルを示す。解析ソフトウェアは、破壊力学解析機能を持つ ANSYS Mechanical を

用いた。直径 400[mm]、全長 2500[mm]、板厚 30[mm]、ステンレス鋼製とした。図中に拡大して示したように、内径部に板厚の3分の1の長さを持つ半楕円き裂を作成した。内圧条件を 70[MPa]として、破壊力学パラメータである応力拡大係数を算出した。

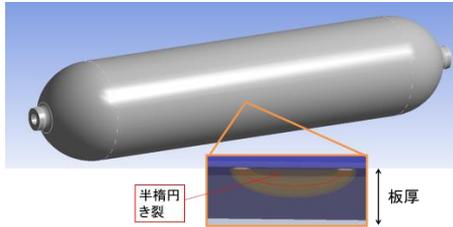


図9 蓄圧器CAEモデル

## 2. 6. 配管継手モデルの荷重試験、振動試験

図10に、本研究で使用した配管継手実験モデルを示す。この実験モデルは大陽日酸エンジニアリング(株)会津若松事業所が製作したもので、部材や寸法は、実際の移動式水素ステーションと同一としている。

荷重試験は図11に示すように鉛直下向きに200[N]の荷重を付与した。図12に示すように、継手根元にひずみゲージを貼付し、ひずみ測定を行った。

振動試験は、実製品が移動時に受ける振動の方向を踏まえ、図13に示す加振方向とした。製品の特徴点に加速度センサを取り付け、共振点探索試験を実施した。共振点探索試験は、周波数範囲 50~1000[Hz]、入力加速度 1[m/s<sup>2</sup>]とした。

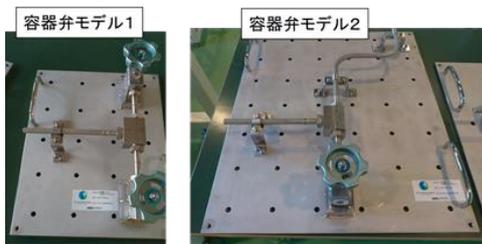


図10 配管継手実験モデル

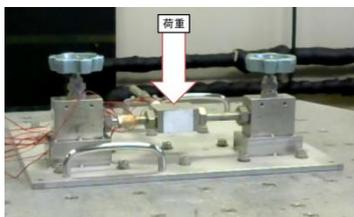


図11 荷重試験時の荷重方向



図12 荷重試験時のひずみ測定状況

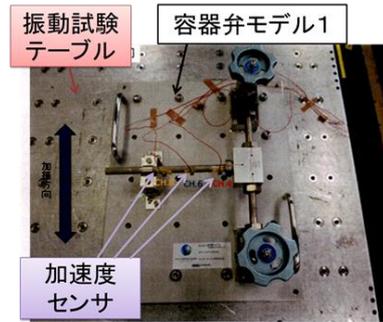


図13 振動試験取付状況

## 2. 7. 配管継手モデルのCAE解析

点検技術の検討のため、配管継手実験モデルの荷重試験と振動試験に関するCAE解析を実施した。解析ソフトはCOMSOL Multiphysicsを用いた。図14に配管継手のCAE解析モデルを示す。荷重試験、振動試験に関する静解析と固有値解析を実施した。

接触面漏洩に関する詳細な検討のため、接触面のCAE解析を行った。解析ソフトウェアはANSYS Mechanicalを用いた。図15は解析モデルを示したもので、対称性を考慮し2分の1モデルとした。継手はカラー、ナット、パイプの3部品からなるが、簡略化のため、カラーはナットと一体化し、ねじ山形状を省略した。実験モデルに使用したフジキン(株)製の継手は円錐面の接触部において、ボディ受け側の開口角度60度に対し、パイプ側先端の開口角度59度とわずかに角度を変化させているため、モデルに反映させた。

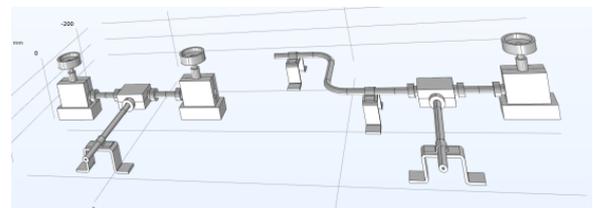


図14 配管継手実験モデルのCAEモデル

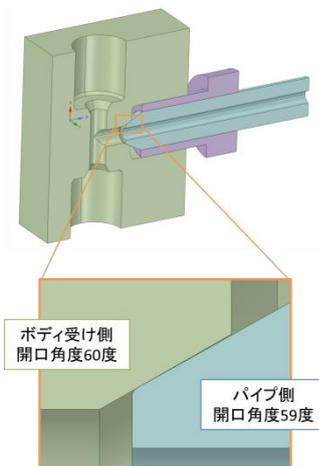


図15 CAE解析モデル  
(上:全体図、下:接触部拡大図)

## 2. 8. 点検システムの構築

3年間計画の最終年度となる本年度は、実プラントや実設備での実証段階に向けた点検システムの構築を行った。

また、本事業が提案する技術は、5～10年後に一般化する点検技術の先取りを目指したものであり、新しい点検技術の方向性を多くの関連企業に周知し、体験してもらうことも重要である。よって、点検技術を普及するための仕組みづくりについても併せて検討した。

## 3. 結果

### 3. 1. バルブ試験モデル冷却試験結果

図16に冷却試験時の温度-時間グラフを示す。この測定例では、図中、矢印で示すように約25分間の冷却を2回に分けて行い、下フランジは最低-145[°C]に達しており、定常状態に近い。ボルト部は上下フランジの中間的な温度で、他の測定点との運動性が高く、測定点として優れていることが確認できた。

組込み向けサーモカメラの測定結果として、図17に33分後と74分後の熱画像を示す。いずれも流路に近い部分は測定下限以下となるが、首下部の温度分布を測定することは可能である。カメラ付属のソフトウェアでは、熱画像中のラインカーソル上の温度プロファイルを実タイム表示することが可能である。バルブの温度分布は単調なので、熱画像自体を記録するより、温度プロファイルを連続的に記録する方法がデータ量削減という意味から望ましいと考える。

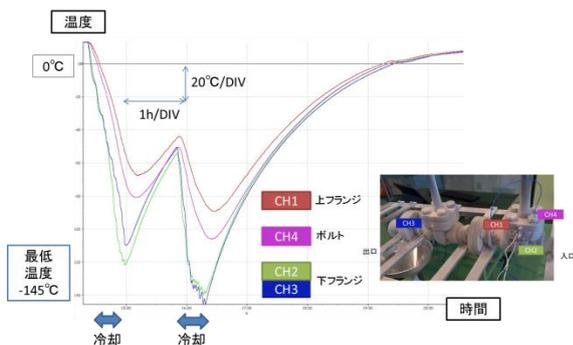


図16 冷却試験時の温度-時間グラフ

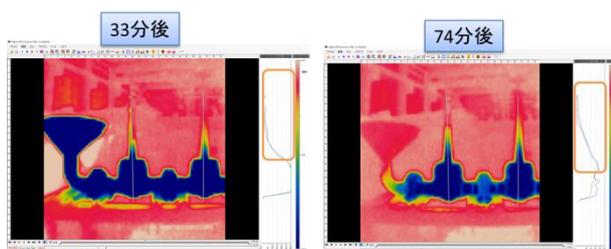


図17 冷却試験時のサーモカメラ画像

### 3. 2. バルブ試験モデルのCAE解析結果

バルブ試験モデルのCAE解析結果の例として、図18に液体水素で冷却した場合の温度分布を示す。温度分布は、冷却試験時のサーモカメラ結果と酷似しており、冷却現象をよく再現できていると考える。

次に、「パラメトリックスイープ機能」の例として、図19に、バルブ下フランジの温度-時間グラフを示す。この例では、冷却流体の熱伝達率3条件と周囲大気熱伝達率3条件の組合せによる9条件の計算を一括で実施している。このグラフから、冷却過程の初期においては冷却流体の熱伝達率が、終期においては周囲大気熱伝達率が支配的であるとの知見を得ることができた。

フランジ間のシール部やボルト部の伝熱パラメータについても同様に複数条件の計算を行い、冷却実験結果に合致するように各パラメータを逆同定した。得られたパラメータを用いて再現した冷却試験の温度-時間グラフを図20に示す。実験結果である図16とほぼ同等のカーブを示しており、実際の冷却現象を再現できている。CAE解析においても、ボルト温度は他の測定点との運動性が高いことが確認できた。

次に、サーモカメラの温度プロファイルと比較のため、CAE解析中のバルブ中心線上の結果を取得し、図21に座標-温度のグラフとして示した。温度プロファイルは、サーモカメラの結果と類似の形状を維持したまま、冷却に応じて移動する挙動となった。バルブでは、形状が比較的単純で、熱伝達条件も確定的であるため、伝熱の法則に基づいた単調な温度分布しか取り得ないことを意味している。点検技術としては、サーモカメラとCAE解析の温度プロファイルを照合することで、バルブ全体の温度を推定する手法が有望である。



図18 温度分布（液体水素冷却の場合）

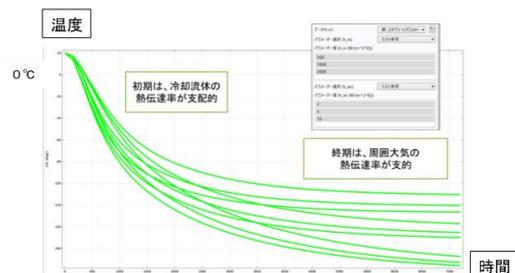


図19 冷却試験時の温度-時間グラフ

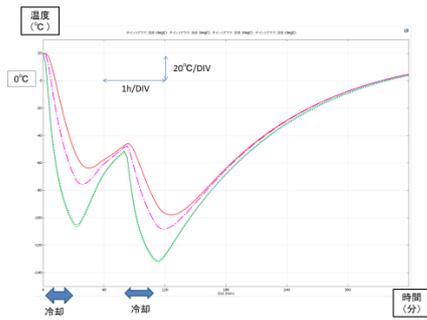


図 20 冷却試験時の温度-時間グラフ

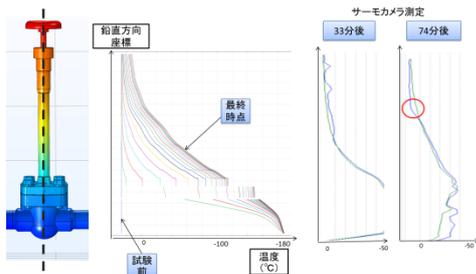


図 21 冷却試験時の温度-時間グラフ

### 3. 3. 蓄圧器モデルの D I C 試験結果

図 2 2 は撮影距離 0.5[m]、レンズの焦点距離 17[mm] の場合の DIC 視野確認試験結果である。図中、紫色の部分には精度が良好な範囲である。点検への応用を踏まえ、紫色領域の横幅、縦幅を X 視野、Y 視野、コンター図区分の上限値を期待精度として、表 2 にまとめた。表中には実画像も併せて記載した。

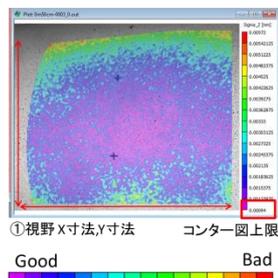


図 2 2 冷却試験時の温度-時間グラフ

表 2 D I C 視野確認試験結果

	撮影距離							
	0.5m		1m		3m		8m	
レンズ	X視野 (mm)	Y視野 (mm)						
17mm	190	170	500	400	1400	400	-	-
	期待精度 0.001mm		期待精度 0.003mm		期待精度 0.057mm		-	
35mm	-	-	220	200	630	400	1800	400
	-		期待精度 0.001mm		期待精度 0.023mm		期待精度 0.204mm	

次に、DIC 精度確認試験の例として、約 0.1[mm] の変位を与えた場合の変位-時間グラフを図 2 3 に示す。DIC 測定と変位計測定はほぼ同等の結果が得られた。微小変位では、試験テーブルや治具の変位も障壁となるため、テーブル上に基準ブロックを設置して差分を求める補正を行った。5 条件の変位-時間グラフのピーク値を読み取り、表 3 に結果をまとめた。

また、図 2 4 に DIC 補正値と変位計測定値の相関性を示した。測定点数が少ないものの、プラント点検分野で想定される程度の変位について、DIC 測定が実用上十分な精度を持っていることを確認した。

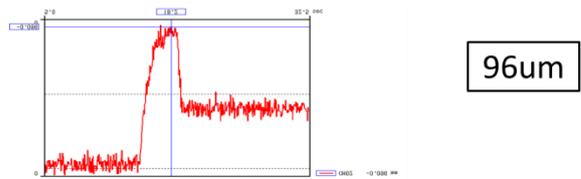
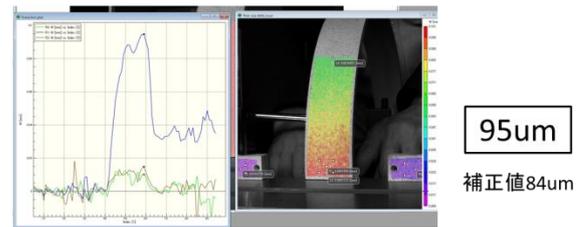


図 2 3 DIC 精度検証試験結果  
(上) DIC 測定 (下) 変位計測定

表 3 D I C 精度確認試験の結果

サンプル名	DIC 測定点 (mm)	DIC 基準点 (mm)	DIC 補正値 (mm)	変位計 (mm)	誤差 (mm)
N12	1.947	0.411	1.536	1.580	-0.044
N5	0.372	0.036	0.336	0.354	-0.018
N9	0.126	0.014	0.112	0.119	-0.007
N4	0.094	0.01	0.084	0.096	-0.012
N10	0.029	0.015	0.014	0.016	-0.002

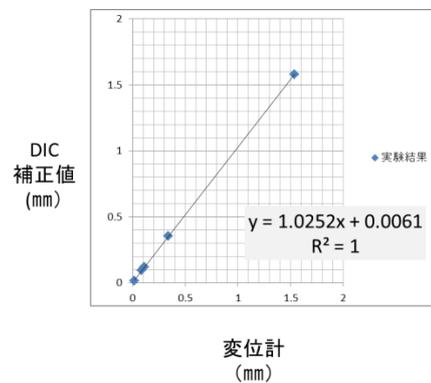


図 2 4 DIC 補正値と変位計測定値の比較

### 3. 4. 蓄圧器モデルの C A E 解析結果

図 2 5 に、き裂長さ 10[mm] の場合の変位分布図を示

す。図25右は視点と欠陥の位置関係を示したもので、赤い三角形が欠陥を丸数字が視点を示す。き裂の影響は広範囲に及ぶため、図中橙色の四角枠の測定範囲が適切と考える。表2と照合すると、レンズ17[mm]、撮影距離1[m]のDIC測定が適切である。

この時の応力拡大係数の最大値は約  $55[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$  であり、既知のき裂進展特性データ<sup>1)</sup>に基づく、き裂進展速度は  $1 \times 10^{-6}[\text{m}/\text{cycle}]$  前後である。これは、1000回のFCV充填により、き裂が1[mm]進展することを意味しており、このレベルのき裂の影響を捉えることができれば、漏洩事故を未然に防げると考える。

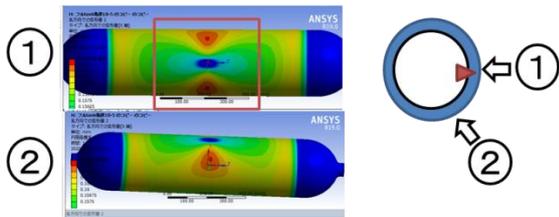


図25 蓄圧器モデルの変位分布図

### 3. 5. 配管継手モデルの荷重・振動試験結果

容器弁モデル1の荷重試験の結果を、図26に示す。この図は荷重試験中の4点のひずみ測定結果を、縦軸に荷重、横軸にひずみのグラフとして示したものである。試験中、200[N]の荷重を負荷・除荷するサイクルを3回繰り返したが、いずれの測定点も線形関係を示し、同じ経路を往復する挙動であった。荷重が付与された鉛直方向であるCH13とCH15で最大  $40[\mu\epsilon]$  程度、水平方向のCH14とCH16は最大  $10[\mu\epsilon]$  程度であった。荷重負荷方向と合致した位置にひずみを貼付すれば、継手に掛かる荷重を測定できると考えられる。

振動試験例として、図27に100~1000[Hz]までのサイン掃引試験結果を示す。403[Hz]、530[Hz]、671[Hz]、751[Hz]に共振点があることが分かった。輸送時の振動負荷を再現するランダム振動条件には200[Hz]までの周波数成分しか存在しないため、T字継手など基本構造が、輸送振動に対して十分な耐振動性を持っていることと考えられる。今後の着眼点としては、基本構造以外の配管支持部に着目すべきである。

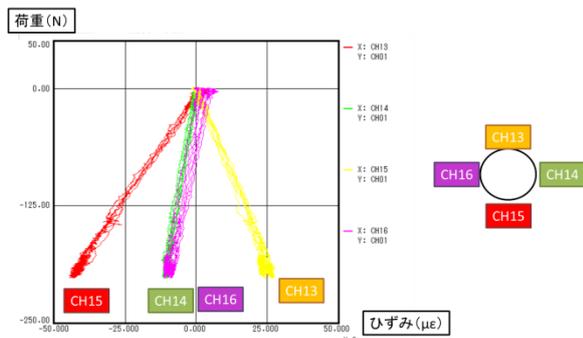


図26 荷重試験時の荷重-ひずみグラフ

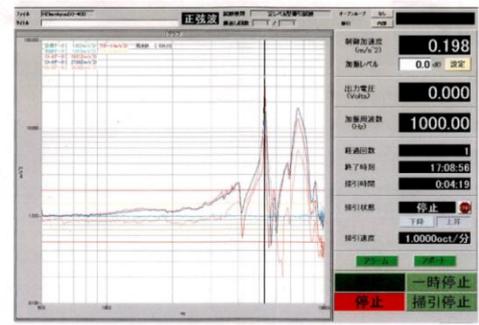


図27 サイン掃引試験結果（加速度一周波数グラフ）

### 3. 6. 配管継手モデルのCAE解析

荷重試験を再現したCAE解析結果例として、図28にひずみ分布図を示す。ひずみがピークとなるのは、T字継手に接続された配管の根元で、左右方向の配管で最大約  $40[\mu\epsilon]$ 、中央方向の配管で約  $15[\mu\epsilon]$  である。これは図26に示したひずみ測定値とほぼ同等である。配管継手の構造は比較的シンプルなので、試験結果とCAE解析が一致しやすいと考えられる。

図29に水平方向に1G加速度負荷した場合の変位分布図を示す。いずれのモデルも配管支持部での変位が大きい。これは高圧水素ガス用の配管肉厚が大きく、配管の剛性が高いことが理由と考えられる。

図30に容器弁モデル2の固有値解析結果を示す。図示したのは1次モードの結果で、共振周波数は442[Hz]である。この結果から明らかなように、長い配管を持つ製品の共振は配管支持部を節とする変形モードとなる。従って、実プラントの点検技術としては、配管支持部も含めたCAE固有値解析を予め実施しておき、危険な変形モードと危険位置を絞り込むことが有効だと考えられる。

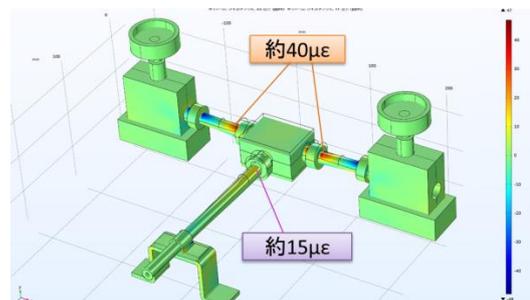


図28 荷重試験時のひずみ分布図

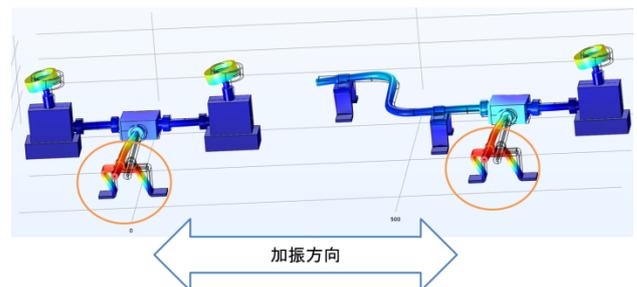


図29 1G負荷時の変位分布図

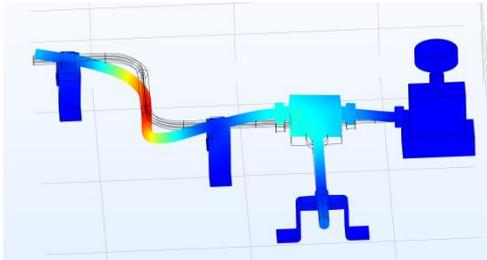


図30 蓄圧器モデル2の固有値解析結果  
(1次モードの変位図)

次に、接触面漏洩に関する CAE 解析結果を示す。  
ねじ締結を再現するため、軸方向に強制変位を与えた場合の応力分布図を図31に示す。円錐面では、非常に狭い範囲で接触が生じ、材料力学分野で良く知られる典型的な接触応力分布が生じている。

ねじ締結に加え、曲げモーメントを与えた場合の応力分布を図32に示す。円錐接触面だけでなく、ナットとボディとの接触部などで変形が生じている。また、接触面の上下で応力分布の違いが生じている。

接触面漏洩への影響を調べるため、接触面圧に着目し、図33に接触面圧図を示した。図33(a)ねじ締結では均等な面圧が生じているのに対して、図33(b)曲げモーメント負荷では、下部の接触部面圧が低下し、接触幅も狭くなっている。このような部位では、水素ガス漏洩の危険性が高まると考えられる。

図34は、曲げモーメント負荷時のひずみ分布を示している。図中、矢印で示したのは、図12の荷重試験時のひずみゲージ測定点である。この分布から分かる通り、測定点のひずみと円錐面のひずみ分布は相関性がある。従って、荷重試験など測定していたひずみゲージ測定値を基に CAE 解析と連携することで、バルブ点検技術と同様に、直接測定することはできない接触部の状況を予測することが実現可能であり、今後、追加の検証試験が必要と考える。

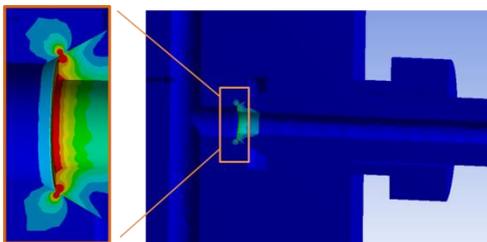


図31 締結時の相当応力分布図

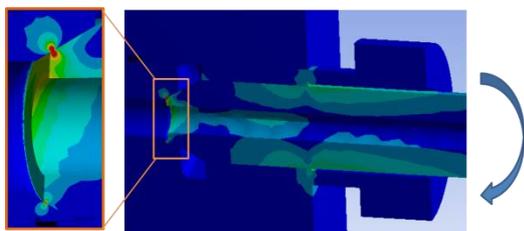
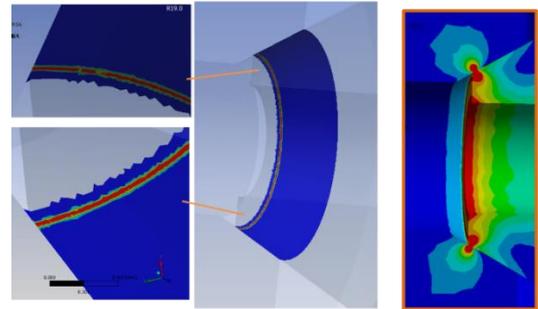
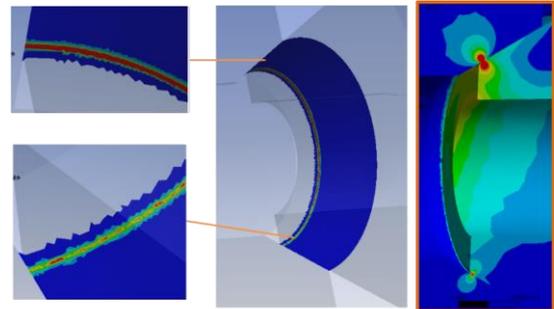


図32 曲げモーメント負荷時の相当応力分布図



(a) 締結時の場合



(b) 曲げモーメント負荷した場合

図33 円錐接触部の面圧分布と応力分布  
(左) 面圧拡大図 (中央) 面圧全体図 (右) 応力分布図

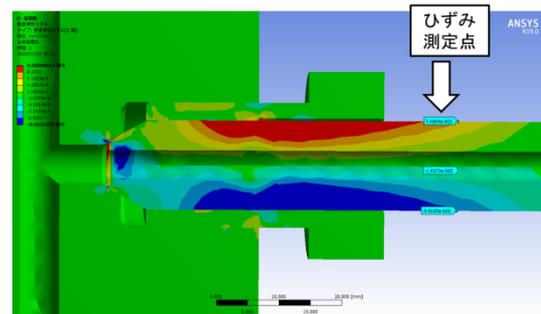


図34 曲げモーメント負荷時のひずみ分布

### 3. 7. 点検システムの構築

本研究で提案した点検技術は、CAE 解析を活用する点が特徴である。この特徴を活かすため、CAE 解析ソフト COMSOL Multiphysics が持つ「CAE アプリケーション (CAE アプリ)」機能を全面的に採用した点検システムを考案した。この機能は、解析済みの CAE を再利用し、GUI 画面を作成するもので、数値入力やボタン操作だけで容易に CAE 計算を行うことが可能である。我々は、これを「点検アプリケーション (点検アプリ)」として活用することとした。図35は、バルブに関する点検アプリケーション例であり、伝熱条件を入力することで、霜層の発生状況を予測するものである。

さらに、オプション製品である COMSOL Server を用いることで、遠隔地からインターネット通信を介して「CAE アプリ」が保存されたサーバへアクセスし、Web

ブラウザ上で「CAE アプリ」を実行することが可能である。この時、CAE 計算はサーバのコンピュータが行うため、遠隔地で使用するデバイスはスマートフォンなど計算能力に劣るもので十分である。

我々は、この仕組みをプラント点検に応用し、図36に示すような点検プラットフォームとして共同利用することを提案する。この画面上の一つ一つの画像が、本研究の成果の一部を点検アプリケーションに作り替えて表現したものである。

図37に著者らが考える点検システムの全体概要図を示す。IoT や AI 関連技術は、様々な要素技術の集合体であるため、全体像を把握することや、他者と技術的なアイデアを共有することが困難であるが、この図をベースにすれば、共有の助けになると考える。この図はセンサ、データ、解析の3つの主要な技術要素を、プラント点検現場、解析拠点、サーバ拠点の3拠点に割り振った基本形と言える。インターネット通信を前提とすれば、3拠点の空間的な制限はなく、様々な組合せが想定される。この図をベースすれば、どんな組合せも基本形のバリエーションと捉えることができる。例えば、現場作業員が表示デバイスを使用する場合は、点検現場と解析拠点が同じ場合であり、エッジコンピューティングとはサーバ拠点と解析拠点が現場近くに存在する場合である。

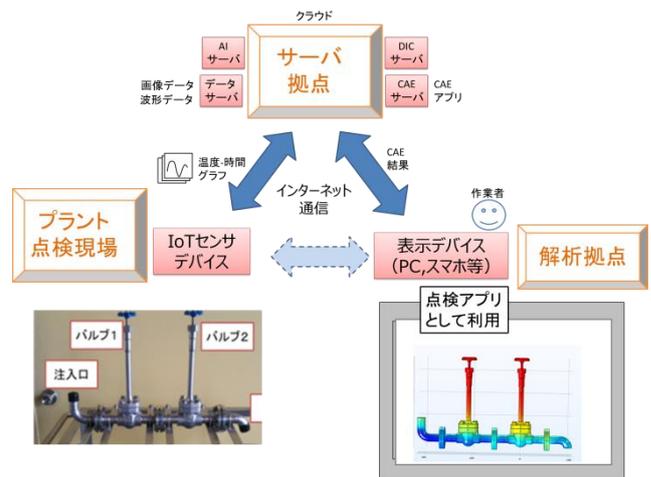


図37 点検システムの概要図

#### 4. 結言

水素プラント点検技術開発のため、水素ステーションで使用されるバルブ、蓄圧器、配管継手に関する各種試験やCAE解析を実施するとともに、新しい点検技術を普及するための点検システムや仕組みについて検討を行い、以下の成果を得た。

- ① バルブ実験モデルの冷却伝熱実験を実施し、ボルト部に熱電対を埋め込み温度測定をする方法、サーモカメラで首下部分の温度分布を測定する方法が有効であることを確認した。
- ② バルブ実験モデルのCAE解析を実施し、冷却実験時の温度分布や温度変化を再現することを確認した。
- ③ 蓄圧器のDIC測定試験、CAE解析を行い、撮影距離1[m]で直径全体を測定視野とする手法が、点検技術として有望であることを確認した。
- ④ 配管継手に関する荷重試験やCAE解析を行い、配管根元のひずみ測定値を基にCAE解析を行うことで、継手接触部の力学的な状況を推定できる可能性を示した。
- ⑤ CAE解析をカスタマイズした点検アプリケーションをベースとする点検システムを考案した。
- ⑥ 研究成果の一部を点検アプリケーションとして共有できるプラットフォームを構築した。

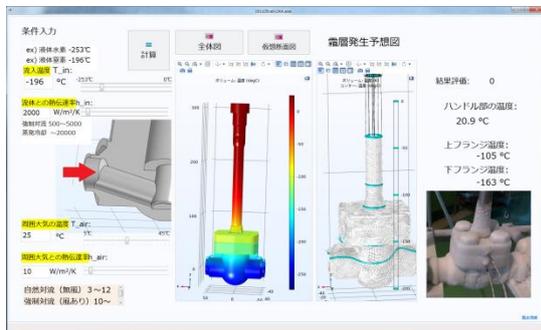


図35 点検アプリケーション画面例

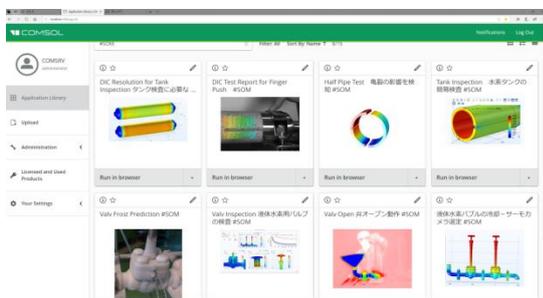


図36 点検プラットフォームのトップ画面例

#### 参考文献

1) 日鉄テクノロジー(株): 高圧水素環境下の疲労試験, <https://www.nstec.nipponsteel.com/technology/mechanical/fatigue/fatigue09/> (参照 2020-3-24)

# バイパスダイオード内蔵太陽電池パネルの開発

## Development of solar panels with built-in bypass diode

技術開発部 プロジェクト研究科 小野裕道 三瓶義之 小林翼 本田和夫  
 国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所  
 高遠秀尚 白澤勝彦 水野英範 望月敏光  
 福島双羽電機株式会社 本田剛  
 アンフィニ株式会社 川崎俊弘 根本克広 木村太亮

太陽電池パネルの設置場所の拡大のため、バイパスダイオードをパネルに内蔵し裏面のジャンクションボックスを無くした太陽電池パネルを開発する。厚さ 0.7[mm]の薄型バイパスダイオードを開発し、これを内蔵した太陽電池パネルを試作した。電流バイパス時のバイパスダイオードの熱を効率的に放熱する設計を行い、定格電流 12[A]を流してもバイパスダイオードの温度上昇を 55[°C]以下に抑えることができた。

**Key words:** 太陽電池パネル、バイパスダイオード、内蔵

## 1. 緒言

再生可能エネルギーにより発電した電力の固定価格買い取り制度により、再生可能エネルギー発電設備が大量に導入された。特に太陽光発電の導入量の増加は大きく、さらなる拡大をめざし自動車車載用や建材一体型など設置箇所も多様化している。

現在の太陽電池パネル（以下：モジュール）は裏面に突起となるジャンクションボックスがある。これが、車両や建材に張り付ける際に障害となるため、ジャンクションボックスを省くことが求められている。しかし、ジャンクションボックス内には、太陽電池モジュールに影がかかるなどの不具合が発生した際に、電流をバイパスさせて太陽電池セルを保護する役割のバイパスダイオードが設置されている。このため、ジャンクションボックスを単純に取り除くあるいは移動させることはできず、裏面の突起を無くし、意匠性に優れた薄型太陽電池モジュールを生産することは難しい。

そこで、ハイテクプラザは福島県内の企業2社と産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所（FREA）と共同で、バイパスダイオードを内蔵した太陽電池モジュール及び実装技術の研究開発を行った。本報告では、薄型バイパスダイオードを開発し、これを内蔵した太陽電池モジュールを製作した結果を報告する。

## 2. 実験及び結果

### 2. 1. 薄型バイパスダイオードの開発

#### 2. 1. 1. 熱膨張の応力緩和と構造の開発

バイパスダイオードは屋外直射日光による加熱に加えて、バイパス動作時にはダイオードを流れる電流の抵抗加熱によりダイオードチップ自体が発熱する。日中-夜間の温度変化に加え、バイパス動作の ON/OFF に



図1 バイパスダイオードの外観

表1 構造シミュレーション条件

解析ソフトウェア	Solid Works Professional
端子形状	・ M008-H2-01
解析条件	・ 静変形解析 ・ 表裏面の変形拘束 ・ 端子間に強制変位 0.2[mm]
表示	・ 相当応力 ・ 変位量

よる熱膨張-収縮は、ダイオードに引張・圧縮応力を加え破損させる恐れがある。

そこで、図1のようにばね性により応力の集中を緩和するための曲げを入れたダイオードの端子の形状について検討した。3次元CAD SolidWorks を用いて接続されたタブ線の熱収縮に相当する強制変位 0.2[mm]を与えた端子の応力分布をシミュレーションし、その有効性を評価した。解析条件を表1に示す。

シミュレーションにより得られた薄型バイパスダイオードの相当応力とその集中部位を図2に示す。この結果、単純な平板からなる端子では破損する条件であっても、曲げにより応力を分散することで、破損を避けることができることが確認できた。

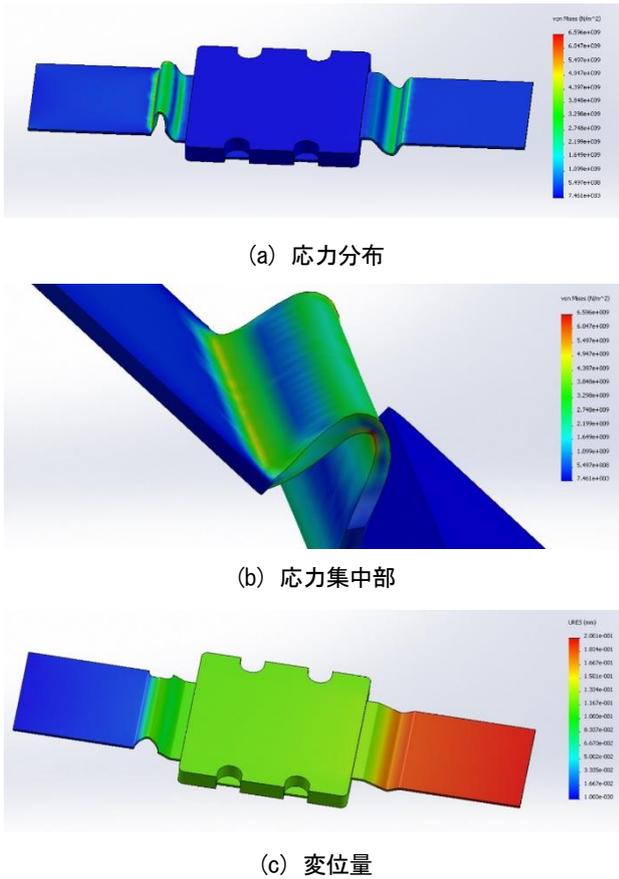


図2 シミュレーション結果

### 2. 1. 2. 薄型バイパスダイオードの試作

太陽光発電モジュールは、太陽電池セル(厚さ $300[\mu\text{m}]$ 以下)とインターコネクタ(厚さ $0.3[\text{mm}]$ )、タブ線(厚さ $0.3[\text{mm}]$ )がラミネートされている。バイパスダイオードを太陽光発電モジュールに内蔵させるためには、これらを重ねた最大の厚さ、 $0.9[\text{mm}]$ 以下の厚さであることが求められる。

また、屋外の直射日光下に長時間、設置されることが前提であるため、ダイオードチップは内部保護のため樹脂モールドで封止されていることが望ましい。

これらの条件を満たす薄型バイパスダイオードの試作は、福島双羽電機株式会社が取り組んだ。

## 2. 2. 太陽光発電モジュールの放熱設計

### 2. 2. 1. 薄型バイパスダイオードのラミネート試験

試作した薄型バイパスダイオードを太陽光発電セルと共にラミネートすることを試みた。薄型バイパスダイオードをタブ線にはんだ付けし、太陽光発電モジュールと同様にエチレン・酢酸ビニル共重合体(Ethylene-vinyl acetate copolymer 以下 EVA)フィルムではさみ真空加熱ラミネーターでガラス板にラミネート加工した。ダイオードの温度測定のため、ダ

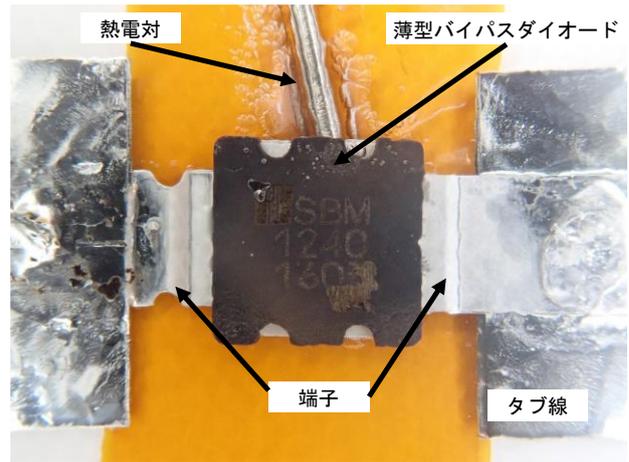


図3 ラミネート試験

イオードの裏面にシース熱電対を同時にラミネートした。図3に示すように、熱電対の周辺にEVAの剥離があるものの、薄型バイパスダイオード周辺には気泡もなくラミネートできることを確認した。

### 2. 2. 2. 薄型バイパスダイオードの熱抵抗の測定

薄型バイパスダイオードを太陽電池モジュールに使用するには、太陽電池モジュールが太陽光により昇温し、さらにラミネートされた薄型バイパスダイオードから発熱があったとしても、ダイオードの動作温度範囲である $150[^\circ\text{C}]$ 以下に保つことが求められる。

一般に、電子回路の熱設計では、素子の消費電力ごとの上昇した温度を測定し、消費電力と温度の傾きである熱抵抗 $R_{\text{th}}[\text{K/W}]$ を算出して評価する。これと同様に薄型型バイパスダイオードについても、熱抵抗を求め、周辺への放熱の状況の評価した。

内蔵された薄型バイパスダイオードの発生した熱の大部分はタブ線によりモジュール内を伝導すると考えられる。そこで、タブ線の幅を変えてダイオードを接続し、通電した際のダイオードの温度上昇を測定することで、タブ線の幅の違いによる熱抵抗の違いを測定した。タブ線の幅を $1.5[\text{mm}]$ と $6[\text{mm}]$ 、 $12[\text{mm}]$ の3種類とし、これと比較のため市販の外付けのジャンクションボックスに内蔵されたダイオードも測定した。

作製した試料に太陽電池モジュールの定格電流を想定して定電流電源より表2に示す条件で通電し、熱電対でダイオードのカソード端子側の温度上昇を測定した。消費電力と薄型バイパスダイオードの温度上昇を図4に示す。タブ線の幅が広くなると放熱量が大きくなり、温度上昇は抑制された。最もタブ線幅が広い幅 $12[\text{mm}]$ の熱抵抗は $24.2[\text{K/W}]$ で、 $12[\text{A}]$ を通電した際 $120[^\circ\text{C}]$ の温度上昇があった。これは日中の日向設置でパネル温度が $30[^\circ\text{C}]$ 以上であれば、 $150[^\circ\text{C}]$ を超えてしまい不具合の原因となる。そこで温度上昇を抑制する配置方法の開発に取り組んだ。

表2 通電実験の実験条件

電源	定電流電源
電流値 [A]	3, 5, 7, 10, 12.5
温度測定	ダイオードの温度 ラミネート熱電対 ガラス板の表面温度 サーモカメラ

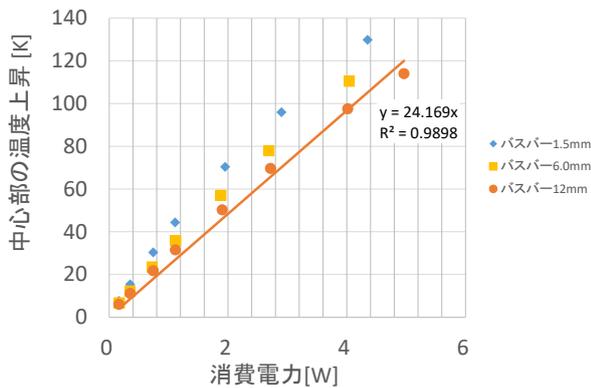


図4 消費電力と薄型バイパスダイオードの温度上昇

比較対象である従来の外付けのジャンクションボックスに内蔵されたバイパスダイオードの熱抵抗は14[K/W]であり、これと同程度を、太陽光モジュールにラミネートした薄型バイパスダイオードの熱抵抗の目標とした。

### 2. 2. 3. 薄型バイパスダイオードの並列配置

通電している薄型バイパスダイオードの発熱を抑制するには、電流を減らすことが有効である。このダイオードに使用したショットキーバリアダイオードの電流-電圧特性は比例関係になく、電流値を1/2にすれば電圧降下は1/2以下となる。そのためダイオードを2個並列に配置すれば、1個あたりの消費電力は1/2以下になり、発熱の総量は減少する。

そこで図5に示すように薄型バイパスダイオードを並列配置し、通電した際の温度上昇を測定した。ラミネートしたダイオードを表2の条件で通電し、その温度上昇を測定した結果を図6に示す。並列に2個配置したことで温度上昇は抑制され、熱抵抗は16.9[K/W]まで減少した。

### 2. 2. 4. 放熱経路の設計

バイパスダイオードの温度上昇を抑えるためには、タブ線への放熱量を増やすことが効果的である。しかし、ガラス板の表面の温度分布をサーモカメラにより観察すると、図7のとおりダイオード周辺部に急な温度勾配が観察される。これはダイオード周辺で放熱が

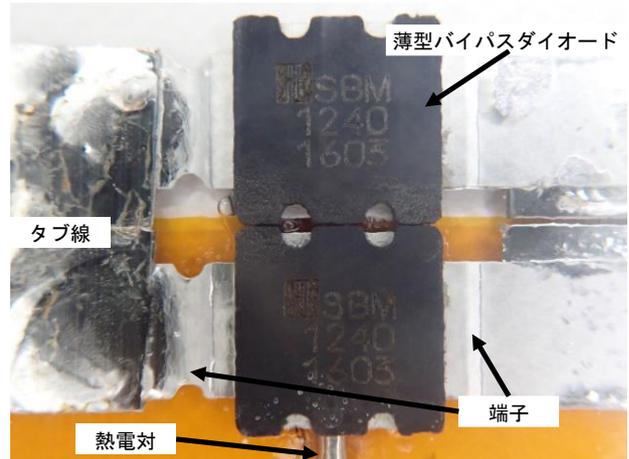


図5 薄型バイパスダイオードの並列配置

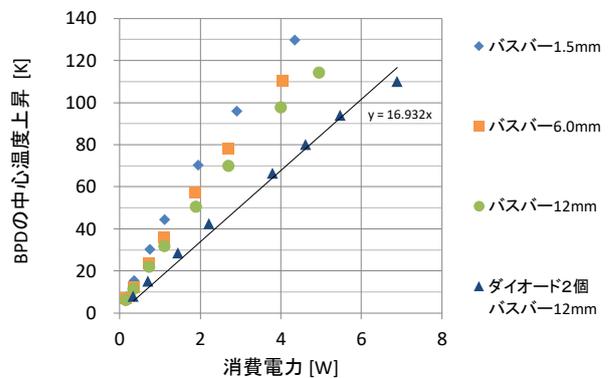


図6 並列配置した薄型バイパスダイオードの温度上昇

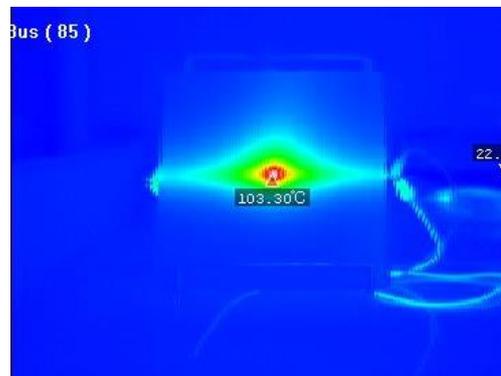


図7 ガラス表面の温度分布

妨げられていることを示している。そこで、この原因についてシミュレーションにより探索した。ダイオードからタブ線までを図8のとおりモデル化し、CAEにより温度分布を求めた。バイパスダイオードの熱は、厚さ0.1[mm]の端子を介してタブ線-EVA-ガラス板あるいはバックシートへ伝導し、ガラス板とバックシートから空気へ伝達する。解析したところ、図9に示す大きな勾配の温度分布が算出された。これは発熱体であるダイオードとタブ線を熱接続する端子が薄いため、

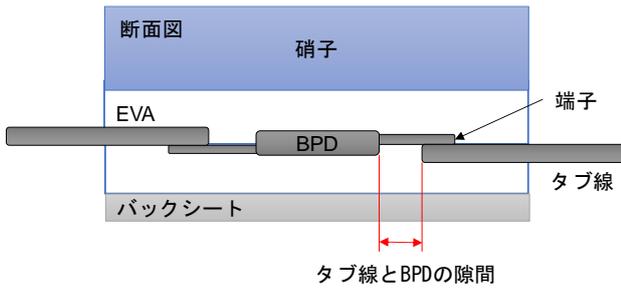


図8 バイパスダイオードの熱解析モデル

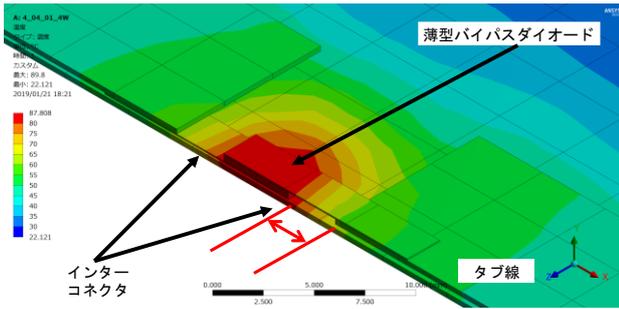


図9 ダイオード周辺の温度分布

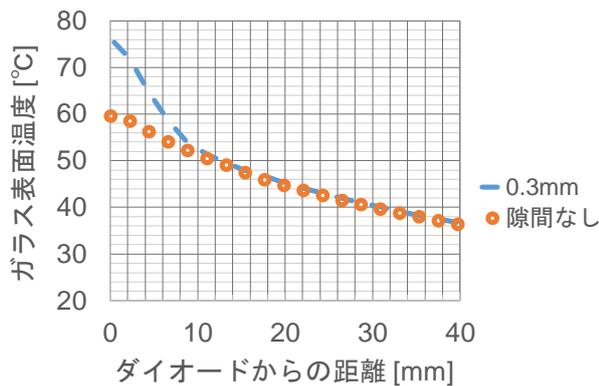


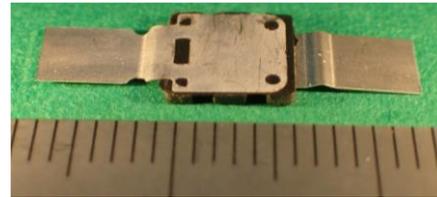
図10 薄型バイパスダイオードとタブ線の温度勾配

この部分で伝熱量が制限されたと考えられる。端子の薄い部分を少なくするため、ダイオードとタブ線の距離を縮めて解析すると、伝熱量は増加しガラス表面の温度分布は図10のとおりとなり、急な温度勾配は解消した。

このように、薄型バイパスダイオードの端子が熱伝導の律速である可能性があることから、それを解消するため薄型バイパスダイオードとタブ線を熱的に接続することを試みた。薄型バイパスダイオードは図11に示すとおり、中央部は樹脂封止されているものの、カソード側の電極は露出している。図12に示すようにカソード電極とタブ線を熱的に接続できれば伝熱量の増加が期待できる。はんだ付けあるいはろう付けは熱伝導性に優れているが、接合時の加熱により薄型バイパスダイオード内のダイオードチップと端子のはんだが再熔融することが懸念される。そこで、薄型バイ



(a) モールド側



(b) カソード端子側

図11 薄型バイパスダイオードの外観

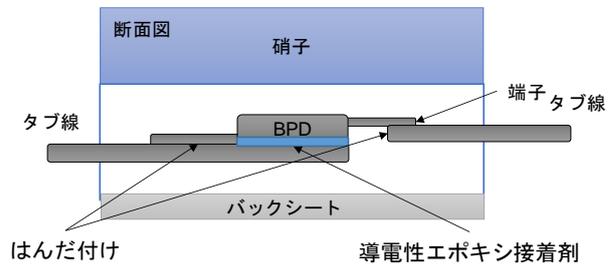


図12 カソード側電極熱接続の模式図

パスダイオードのカソード電極とタブ線の熱接続は、固化する際にはんだ熔融温度まで加熱されない導電性エポキシ接着剤で行い、端子とタブ線の電気接続は、端子先端部のはんだ付けとした。

### 2. 3. 発熱量を抑制したバイパスダイオードの開発

薄型バイパスダイオードの通電による発熱量を低減させるためには、内蔵されるダイオードチップの電気抵抗を小さくすることが有効と考えられる。

そこで、1つのパッケージにダイオードチップを2個並列に内蔵したダイオード及び、より電流容量の大きいダイオードチップを内蔵したダイオードを試作し、電気特性と発熱特性を評価した。

使用したダイオードチップの特性を表3に、試作した薄型バイパスダイオードの外観を図13及び図14に示す。

発熱特性を評価した結果、ダイオードチップを2個入れたものは、温度上昇が抑えられていることが確認された。これは、ダイオードチップを並列に入れたことによりも電気抵抗が低下したことと発熱源が分散されるために熱抵抗の面で有利に働いたことが原因と考えられる。

一方、より電流容量の大きいダイオードチップを内蔵したダイオードでは、むしろ発熱量が上昇する傾向が見られた。これは、電流容量を大きくしたことで順

表3 使用ダイオードチップ特性

薄型バイパス ダイオード型式 (モールドタイプ)	ダイオードチップ仕様
SBM2440	平均整流電流：12[A] 繰り返しピーク逆電圧：40[V] の ダイオードチップ 2 個使用
SBM1545	平均整流電流：15[A] 繰り返しピーク逆電圧：45[V] の ダイオードチップ 1 個使用



図13 SBM2440の外観

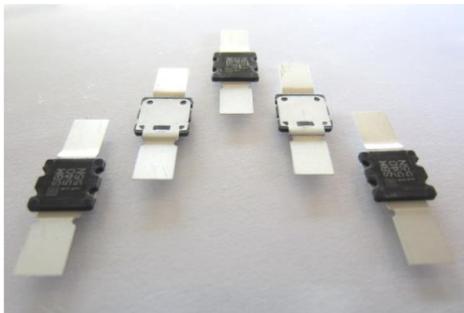


図14 SBM1545の外観

方向の電気抵抗自体が上昇したためと考えられる。

#### 2. 4. ミニモジュールの製作

太陽光発電セルと共にラミネートした状態で温度上昇を評価するため、太陽光発電セルを4枚使ったミニモジュールを作製した。一般的なモジュールは太陽光発電セルが60枚程度直列に配置されるが、薄型バイパスダイオード周辺の配置を模擬して、温度分布を評価した。作製したミニモジュールを図15に示す。

#### 2. 5. 温度上昇の測定

発熱素子は発熱量と放熱量が同量となれば、温度は一定になる。ダイオードの発熱量は電流値で決まり、放熱量は温度勾配と熱伝導路の材種と断面積で決まる。ダイオードの温度だけで放熱経路を評価することはで



図15 温度測定用のミニモジュール

表4 実験条件

印加方向	順方向
印加電流	6A, 12A, 12.5A
装置	直流電源 PAD55-20L (菊水電子工業(株)) デジタルマルチメータ PC500 (三和電気計器(株)) K熱電対
静定時間	6分
セル設置	80°に傾け

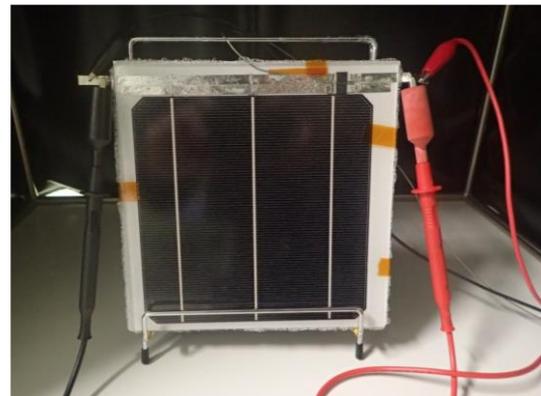


図16 実験中の太陽光発電モジュール

きないため、電子機器の放熱設計の指標となる熱抵抗を算出した。これは、ダイオードの消費電力当たりの温度上昇から算出される。

バイパスダイオードに電流が通過することを想定し、バイパスダイオードに順方向電流を通電し、消費電力当たりの温度上昇を測定した。市販品として多く使われている156[mm]×156[mm]の単結晶シリコン太陽光発電セルは、定格出力電流は10[A]程度が得られる。バイパスダイオードにも最大で同量の電流が通過することから、12.5[A]の直流電流を負荷し試験した。実験条件を表4に、実験の外観を図16に示す。評価したミニモジュールの諸元と熱抵抗を表5に示す。

表5 ミニモジュールの諸元と熱抵抗

型式	個数	配線幅	硝子サイズ	BPD配置	熱抵抗	順方向印加電流		
						6A	12A	12.5A
SMB1240	2個並列	12mm	180mm×180mm	アノード-ガラス	14.8 K/W		67.6K	73.4K
	1個並列	6mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	21.6 K/W	53.2K	85.9K	-
	2個並列	12mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	14.1 K/W	30.7K	61.7K	65.1K

表6 裏面に屋根材を張り付けたミニモジュールの熱抵抗

型式	個数	配線幅	硝子サイズ	BPD配置	裏面の鋼板	熱抵抗	順方向印加電流		
							6A	12A	12.5A
SMB1240	2個並列	12mm	180mm×180mm	アノード-ガラス	-	14.8 K/W		67.6K	73.4K
	1個並列	6mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	-	21.6 K/W	53.2K	85.9K	-
					鋼板	16.8 K/W	42.4K	70.7K	-
	2個並列	12mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	-	14.1 K/W	30.7K	61.7K	65.1K
鋼板					11.5 K/W	26.0K	51.8K	54.8K	

この熱抵抗から算出される電流通過時の温度上昇は65[°C]程度となり定格温度とほぼ同じになる。夏の日向に設置されモジュール温度が上昇した場合に安全性を確保するには、より温度上昇を抑制する必要がある。

そこで屋根材と一体に施工することを想定し、厚さ0.5mmの鋼板製の屋根板に接着した。バイパスダイオードに近いバックシート部分に接着剤を塗布し、屋根材と接着して温度上昇を測定した。同様に表4の実験条件で熱抵抗を測定すると表6のとおり、温度上昇を55[°C]以内に抑制することができた。これはジャンクションボックス内に設置される従来のバイパスダイオードの温度上昇と同程度であった。



図17 ミニモジュールの外観

2. 6. 難燃性ラミネート材による太陽電池の試作

2. 6. 1. ラミネート材の選定

太陽光発電セルに影がかかるなどして発電量が下がると、セルが発熱しホットスポットになる。バイパスダイオードはセルに流れていた電流を迂回させ、セルの発熱は減らすが、バイパスダイオード自体が発熱する。ダイオードの温度上昇によりモジュールのラミネート材が変性しないよう材種を選定する必要がある。そこでEVAフィルムより高温に耐えられる難燃性ラミネート材を選定した。

2. 6. 2. ラミネート試験

薄型バイパスダイオードは太陽光発電セルよりも厚く、ラミネート工程で気泡残りやラミネート材との剥離が発生する懸念がある。そこで従来のEVAと難燃性ラミネート材でラミネート試験を実施した。

太陽電池セル4枚を直列配置し、セルとタブ線をはんだ付けしたストリングを作製した。これをEVAフィルムと難燃性ラミネート材のそれぞれで挟み、真空加熱ラミネーターでガラス板にラミネート加工した。

2. 6. 3. 外観検査

難燃性ラミネート材によるミニモジュールのラミネート後の外観を図17に示す。薄型バイパスダイオードを内蔵した太陽光発電セルよりも厚い部分に気泡が残った。これは難燃性ラミネート材に対応したバックシートの柔軟性が低かったためと考えられた。太陽光発電セル部分に気泡残りはなく、良好であった。薄型バイパスダイオード内蔵太陽光発電モジュールを難燃性ラミネート材で製作できると考えられる。

2. 7. 量産機によるミニモジュールの試作

2. 7. 1. レイアップ加工

開発した製造工程が量産工程として耐えられるか確認するため、量産機を用いてミニモジュールの試作を行った。太陽光発電セル4枚を直列に配置し、セルとタブ線をはんだ付けしたストリングを製作した。これを図18の順でレイアップさせた。

4. 2. 2. ラミネート加工

レイアップしたミニモジュールをアンフィニ株式会社の量産機でラミネートした。表7に示す条件でラミネートした試料を図19に示す。ラミネート後のバイ

パスダイオード内蔵ミニモジュールの外観を図20に示す。薄型バイパスダイオードの内蔵部分にシート破損や発泡、断線は見られず、良好にラミネートできた。開発した製造工程が量産機に適していることを確認した。

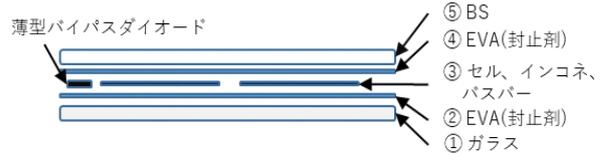


図18 ミニモジュールの断面図

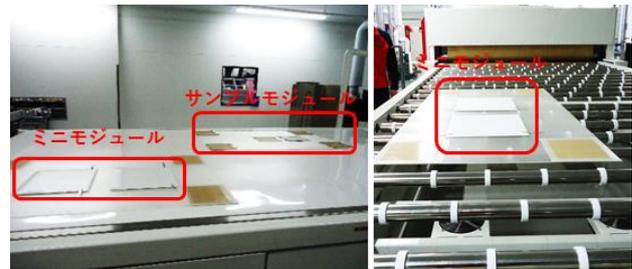
### 3. 結言

薄型バイパスダイオードを開発し、これを内蔵した太陽光発電モジュールを開発し、次の結果を得た。

- ・ダイオードチップが樹脂モールドで封止された、厚さ0.7mmの薄型バイパスダイオードを開発した。
- ・タブ線の温度変化による伸縮を吸収するため薄型バイパスダイオードの端子部にばね性を持たせた。
- ・ダイオードチップを2個使用し、電流通過時の発熱を抑制した。
- ・薄型バイパスダイオードに順方向電流 12.5[A]を流しても、温度上昇 55[°C]以下に抑えることができた。
- ・高温で変性しない難燃性ラミネート材により太陽光モジュールを試作した。バックシートの柔軟性が低かったため、薄型バイパスダイオード周囲に気泡残りがあったが、良好にラミネートできた。
- ・量産機により薄型バイパスダイオードを内蔵したミニモジュールを良好に製造でき、製造工程が量産工程に適することを確認した。

表7 ラミネーターの条件

封止材	EVA (中国製) バックシート (中国製)		
処理条件		1層目	2層目
	温度 [°C]	142	151
	保持時間 [s]	150	450
	到達 ゲージ圧力 [kPa(G)]	1段階	-20
	2段階	-15	-10
	3段階	-10	-5



(a) 投入前

(b) 投入後

図19 ラミネーター投入前後のモジュール

### 参考文献

- 1) 小野裕道, 他. 福島県ハイテクプラザ研究報告書 バイパス回路内蔵太陽電池パネルの実装技術の開発. 福島県ハイテクプラザ, 2020



図20 バイパスダイオード内蔵ミニモジュール

# AI を用いた物体の位置と状態を特定する手法の検討

Investigation of method for specifying position and state of objects using AI technology

技術開発部 生産・加工科 鈴木健司 近野裕太 柿崎正貴 清野若菜 山田昌幸

応募企業 株式会社ランプハウス

製品検査等に応用するため、ライン上を移動する物体を想定し、物体認識と位置特定を行うための手法を検討した。AI 技術のひとつである YOLO を用いて物体認識と状態識別を行うことができた。

Key words: AI、ディープラーニング、YOLO、物体検出

## 1. 緒言

応募企業の株式会社ランプハウスは、生産設備における自動化・省力化機器や各種検査機器の設計・製作を行っている。生産工程において、ある作業の自動化や検査を行うためには、製品の識別と状態を把握する必要がある。これまでは、画像処理やパターン認識など一定のアルゴリズムにしたがって物体の認識や状態の把握を行うことが多かった。しかし、近年では多品種少量生産の生産工程が増えてきており、品種によってアルゴリズムのパラメータを変えて対応することは、検証などにも時間がかかり困難である。

そこで、本研究では、リアルタイム物体検出システムである YOLO<sup>1-2)</sup>を用いて物体認識と状態識別を行う手法を検討した。さらに、認識した物体の位置を特定するためのプログラムを作成した。これにより、学習データを集めるだけで、プログラムを変更せずに多品種に対応できる可能性を示すことができた。

## 2. 実験と結果

手法の検討を行うため、図1に示す人形を使って学習及び学習結果の評価を行った。人形は座った状態 (sitdown) と立った状態 (standup) の2つの状態とした。これにより、2つの状態を別物として学習させることで、物体の認識と状態の識別が同時に可能となる。学習には表1に示す計算機を用いた。

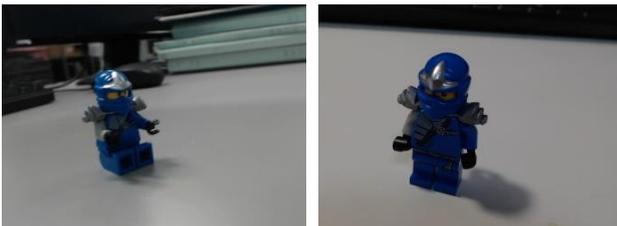


図1 学習対象の人形の sitdown 状態 (左図) と standup 状態 (右図)

表1 学習に用いた計算機

OS	Ubuntu16.04LTS
メモリ	768 [GB]
CPU	Intel Xeon E5-2699 v4 x2
GPU	NVIDIA Tesla V100 x8
GPGPU プラットフォーム	CUDA V9.0
学習モデル	YOLO-v3
実装	Darknet

### 2. 1. YOLO を用いた学習

YOLO は、リアルタイム物体検出システムであり、Darknet<sup>3)</sup>や Keras/TensorFlow、PyTorch など様々なディープラーニングフレームワーク上で実装されたものが提供されている。

本研究では、Darknet を github サイト<sup>4)</sup>からダウンロードして学習に利用した。Darknet を用いて学習を行うため、以下のコマンドによりソースをダウンロードし、コンパイルした。

```
$ git clone https://github.com/pjreddie/darknet.git
$ cd darknet
$ make
```

GPU や cuDNN を利用して学習を高速化するため、また様々な画像を処理できるようにするため、Makefile 中のパラメータは GPU = 1、CUDNN = 1、OPENCV = 1 に設定した。この後に、最後の make コマンドを実行すると実行ファイルが作成される。また、学習の実行には以下のファイルを設定する必要がある。

```
datasets.data
train.txt
test.txt
```

class.txt

yolov3-voc.cfg

train.txt と test.txt にはそれぞれ、学習用データとテスト用データのファイルパスが記述されている。datasets.data では、分類するカテゴリ数、train.txt と test.txt、class.txt のファイルパス、学習済みモデルの保存場所などを指定する。yolov3-voc.cfg には、ニューラルネットワークの構造や各種パラメータが定義されており、入力データのサイズに応じて width と height の値を、式 (1) に従い filters の値をそれぞれ変更させる必要がある。

$$\text{filters} = \text{mask\_num} * (\text{classes} + 5) \quad (1)$$

mask\_num は標準のものから変更しないので 3 を、classes は分類するカテゴリ数なので、今回は sitdown と standup の 2 つの状態であるので 2 を入力する。したがって、filters = 21 となる。また、学習データのサイズは今回、幅 640、高さ 480 ピクセルとなるので、width = 640、height = 480 とした。学習は以下のコマンドで実行した。

```
$ ./darknet detector train datasets.data ¥
yolov3-voc.cfg
```

## 2. 2. 学習データの準備

学習データは、Web カメラに写っている映像を一定時間ごとに画像に保存する Python プログラムにより収集した。画像は JPEG 形式で、画像サイズは幅 640、高さ 480 ピクセルに設定した。画像枚数は、sitdown と standup のそれぞれについて約 100 枚ずつ準備した。

次に、得られた画像中でどの領域が認識すべき物体であるかを矩形の領域 (Bounding Box) で学習モデルに示す作業 (Annotation) が必要になる。Annotation には、BBox-Label-Tool<sup>5)</sup>を使用した。BBox-Label-Tool は Annotation を GUI 操作によって実施できる補助ツールであり、その作業は図 2 に示すように、画像中の対象物を矩形で囲う作業になる。これにより、画像と同じファイル名で、Bounding Box の座標値を示すテキストファイルが保存され、学習する対象が画像中のどこにあるかを示すことができる。しかし、この座標値は、Bounding Box の左上と右下の座標値の組になっているが、YOLO で扱う形式は、Bounding Box の中心座標と幅、高さになるので、変換が必要である。変換は、Python によるプログラムで行った。

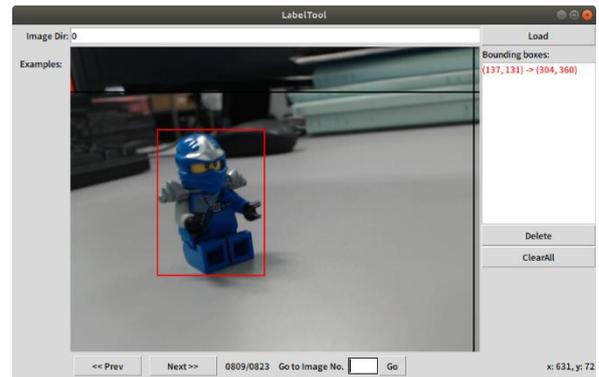


図 2 Annotation 作業の様子

## 2. 3. YOLO による物体認識と状態識別の結果

学習が終了すると yolov3-voc\_40000.weights のファイルが作成される。これは、学習済みのモデルで以下のコマンドにより、img.jpg の画像に対して、物体認識を実行することができる。

```
$ ./darknet detector test datasets.data ¥
yolov3-voc.cfg yolov3-voc_40000.weights ¥
img.jpg
```

図 3 は、学習に使用していない画像による識別結果である。sitdown と standup の 2 つの状態について正しく識別されていることが確認できた。さらに、未学習の画像 20 枚を識別したところ、すべての状態を正しく識別できた。

また、学習済みモデルを用いて、Web カメラの映像をリアルタイムで物体認識することも可能である。実行コマンドは以下のとおりである。

```
$ ./darknet detector demo datasets.data ¥
yolov3-voc.cfg yolov3-voc_40000.weights
```

上記コマンドで、Web カメラの映像をリアルタイムで物体認識した様子を図 4 に示す。角度によっては正しく認識しないこともあるが、おおよそ正しく判断することができた。しかし、背景が変わったり、ある光の当たり方になったりすると全く正しく識別しなくなることがあった。そのため、実際に利用する際は、使用場所や明るさの環境に応じた学習をする必要があると考えられる。

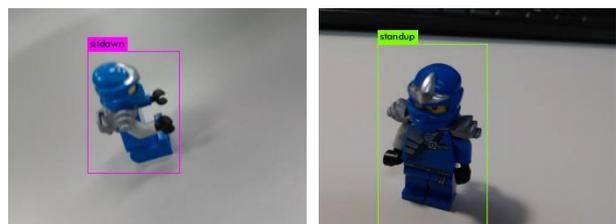


図 3 未学習データによる識別結果

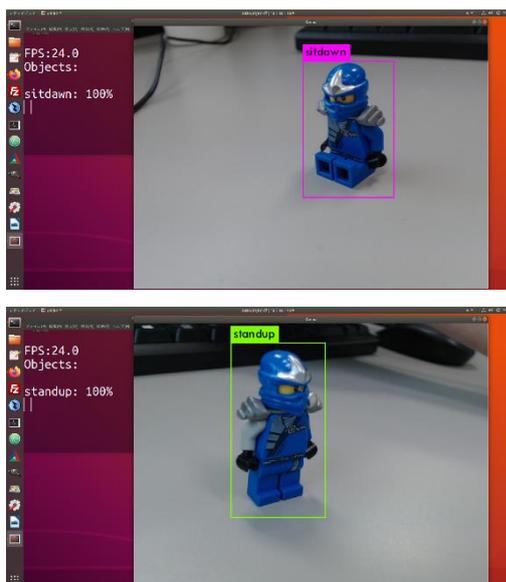


図4 Webカメラによるリアルタイム物体認識

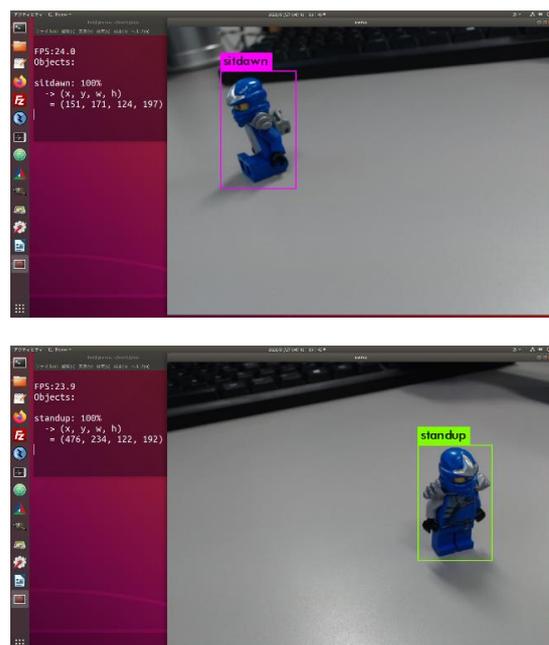


図5 Bounding Boxの座標値出力の結果

## 2. 4. 位置特定のためのプログラム

リアルタイムの物体認識の結果を使って、認識対象に何かしらの動作をする場合には、その位置を特定しなければならない。darknet の実行ファイルの現状では、Bounding Box の座標値は表示されないのので、ソースコードの修正が必要になる。darknet の実行ファイルがある場所の src ディレクトリの中に、image.c のファイル名でソースコードがある。その中に draw\_detections 関数が記述されているので、その中の print 文の下に以下のコードを挿入する。

```
printf(" -> (x, y, w, h)%n");
printf(" = (%d, %d, %d, %d)%n",
      (int)(dets[i].bbox.x*im.w),
      (int)(dets[i].bbox.y*im.h),
      (int)(dets[i].bbox.w*im.w),
      (int)(dets[i].bbox.h*im.h));
```

座標値は Bounding Box の中心の座標値 (x, y)、幅 w、高さ h で示される。修正後、darknet の実行ファイルがあるディレクトリで make コマンドを実行し、リビルドを行うと Bounding Box の座標値を得る実行ファイルが作成される。図 5 に Web カメラのリアルタイム物体認識の結果を示す。ターミナル画面に、Bounding Box の座標値が表示されていることがわかる。

## 3. 結言

本研究では、可動式の人形を使って、2つの異なる状態を作り、それらを学習対象とし、YOLO による物体認識を行った。これにより、同一の物体であっても別のものとして認識することで、異なる状態を識別する

ことができることを確認できた。

また、学習済みモデルを用いて、認識した物体の座標値を出力するプログラムを用いることで、物体の画面上での位置を特定することができた。

これらの結果より、状態の異なる物体を識別し、さらには、画面上での識別対象の位置を特定することで、生産工程における自動化への応用の可能性を示すことができた。

一方、背景や明るさの違いなどで全く識別できなかったこともあったので、使用環境に合わせて学習を調整することが今後の課題である。また、識別対象の画像上の座標値と実座標値をどのように対応させるかも検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) Joseph Redmon. "YOLO: Real-Time Object Detection". <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>. (参照 2020-01-31).
- 2) J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi. "You only look once: Unified, real-time object detection." arXiv preprint arXiv:1506.02640,2015.
- 3) Joseph Redmon. "Darknet: Open Source Neural Networks in C". <https://pjreddie.com/darknet/>. (参照 2020-01-31).
- 4) GitHub. "pjreddie/darknet". Convolutional Neural Networks. <https://github.com/pjreddie/darknet>. (参照 2020-01-31).

- 5) GitHub.“puzzledqs/BBox-Label-Tool”.  
<https://github.com/puzzledqs/BBox-Label-Tool>.  
(参照 2020-01-31).

# 深層学習を用いた気象状況判断プログラムの試作

## Prototyping of weather condition judgment program using deep learning

技術開発部 生産・加工科 鈴木健司 近野裕太 柿崎正貴 清野若菜 山田昌幸 尾形直秀

応募企業 旭日産業株式会社

降雪・積雪状況に応じて融雪装置の発停を制御するため、カメラ画像から降雪・積雪の有無を判断するための手法について検討した。ディープラーニングを用いて、降雪時や積雪時の画像を学習し、適切に判断できるかを評価した。

Key words: AI、ディープラーニング、NVIDIA DIGITS

## 1. 緒言

応募企業の旭日産業株式会社は、降雪時や積雪時にカメラ画像から融雪装置の発停を制御するシステムを検討している。現在は、赤外線画像を用いて昼夜を問わず状況を判断させているが、雨や水たまりなどを雪として誤認識してしまうことがある。しかし、安全のため閾値を下げ、誤認識している可能性が高くても雪があるものと判断している。そのため、雪がない状況でも運転をしていることがあり、無駄となっている。

そこで、本研究では、ディープラーニングを用いて降雪時、積雪時、降雪・積雪がない時の3パターンの画像を用いて学習を行い、カメラ画像の気象状況を判断するための手法について検討し、カメラ映像からリアルタイムに気象状況を判断するサンプルプログラムを作成した。

## 2. 実験と結果

本研究では、分類する気象状況を、降雪あり・積雪あり、降雪なし・積雪あり、降雪なし・積雪なしに設定することとした。画像の取得には表1に示すIPカメラを用い、学習には表2に示す計算機を用いた。IPカメラは2箇所を設置し、定期的に映像を保存するプログラムを実行し、データを収集した。IPカメラには、光度センサーがついており、昼間はカラー映像に、夜間は赤外線によるモノクロ映像に自動的に切り替えて撮影を行った。

表1 データ収集に用いたIPカメラ

メーカー/型番	H. View / HV-400E1
画素数	400万画素
フレームレート	20[fps]
視野確度	100[°]
その他	PoE 給電、赤外線、防水 IP66

表2 学習に用いた計算機

OS	Ubuntu18.04LTS
メモリ	16[GB]
CPU	Intel Core i7 7700K
GPU	NVIDIA GeForce 1080
GPGPUプラットフォーム	CUDA V10.0
学習モデル	AlexNet
実装	NVIDIA DIGITS

### 2. 1. NVIDIA DIGITSについて

ディープラーニングの学習には、GPUなどを製造している半導体メーカーのNVIDIA社が開発したDIGITS<sup>1)</sup>を用いた。DIGITSは、対話型のディープラーニングを学習するためのWebアプリケーションである。図1に示すように、データの预处理やニューラルネットワークの設定、学習の推移、結果の可視化などをGUI操作で行うことができる。また、学習済みのモデルを使って、推論を行うことも可能であるほか、複数の画像を一度に推論させることもできるため、学習の結果を効率的に評価できる。

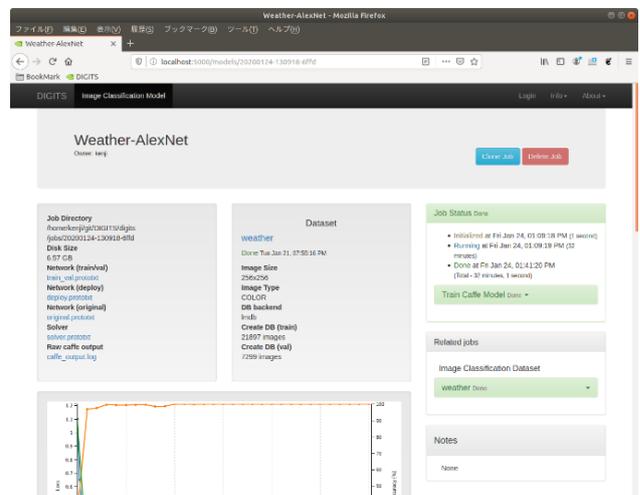


図1 DIGITSの操作画面

## 2. 2. 学習データの準備

学習データは、屋外2箇所を設置したIPカメラの映像を定期的に動画ファイルに保存するPythonプログラムを用いて収集した。学習に用いるデータは画像データであるので、以下のffmpeg<sup>2)</sup>コマンドにより動画ファイルを画像ファイルへ変換した。

```
$ ffmpeg -i input.mp4 -r 20 img%04d.png
```

このコマンドにより、input.mp4の動画ファイルをimg(通し番号).pngの画像に変換することができる。rオプションは、動画1秒あたり何枚の画像に変換するか値であり、上記の場合は、1秒あたり20枚の画像を出力する。

このようにして画像を収集し、気象状態に合わせて、降雪あり・積雪あり、降雪なし・積雪あり、降雪なし・積雪なしの3つの状況に分類した。DIGITSでは、ディレクトリ名が分類する正解ラベルに対応しており、画像データは気象状況に応じて、それぞれの名前のディレクトリへ保存する。画像枚数は、それぞれの状態につき約1万枚準備した。図2に3つの気象状況の画像データ例を示す。



図2 気象状況の例 (降雪あり・積雪あり(上)、降雪なし・積雪あり(中)、降雪なし・積雪なし(下))

## 2. 3. AlexNetによる学習と判定結果

DIGITSを用いて学習を行い、学習モデルにはAlexNet<sup>3)</sup>を用いた。AlexNetは現在飛躍的に精度を高めている様々なニューラルネットワークの基礎的なモデルである。今回の分類数は3つと少数となっており、基礎的なモデルでも十分対応可能であると考え、採用した。

図3に学習結果のグラフを示す。epochは学習の進捗、lossは損失関数の値となっており、epochが進むにつれlossの数値が小さくなっていき、学習がうまく進んでいることを示している。また、正答率accuracyは学習が進むにつれ、数値が大きくなっており、正しく気象状況を判定できていることを示している。

trainは学習データ、valは学習に用いていない検証用のデータで数値を算出したことを示している。したがって、学習済みのモデルが正しく判定できるかを判断するためには、valの数値が重要となってくる。例えば、loss(train)が小さくなっているのに対し、loss(val)が大きくなるような場合は、学習データでは正しく判定できるが、それ以外の未学習データは正しく判定できない過学習が起きていると考えられる。今回の学習結果のグラフは、loss(train)、loss(val)ともに値が小さくなっていることから、過学習は起こっておらず、正しく学習できていると考えられる。

図4は未学習のデータを学習済みモデルで判定させたときの結果である。画像の解像度は1920x1080であるが、学習モデルの入力サイズは256x256であるため、画像を縮小して入力する。気象状況は降雪あり・積雪ありであるが、正しく判定されていることが確認できた。

この他、DIGITSでは、一括で画像判定をすることもできる。それぞれの気象状況について、10枚ずつの未学習画像データ、合計30枚を判定させた。結果は、30枚中29枚が正しく気象状況を判断していることが確認できた。

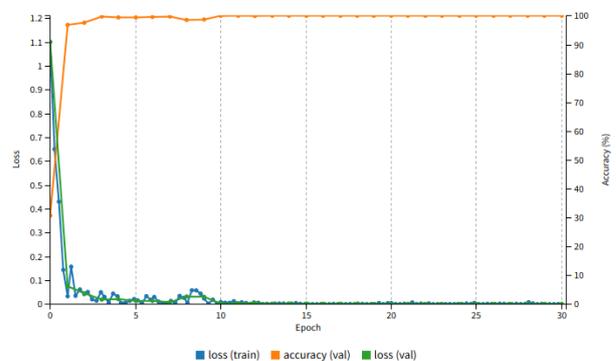


図3 正答率 accuracy と損失関数の値 loss の結果

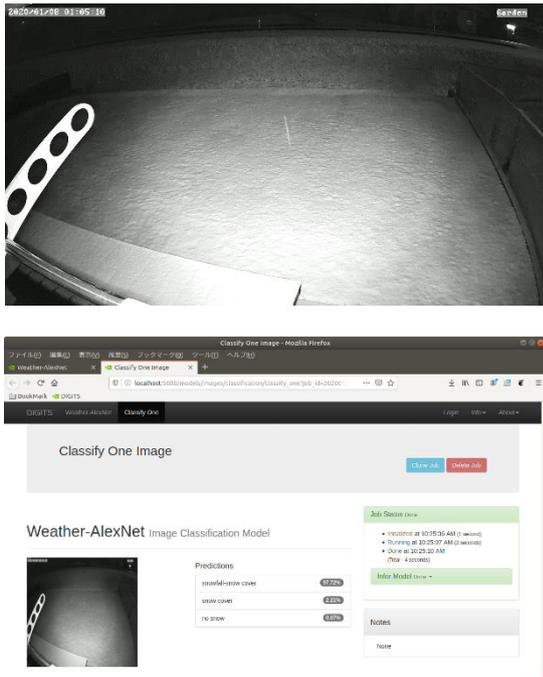


図4 降雪あり・積雪ありの未学習データ（上）とその認識結果（下）

## 2. 4. リアルタイム気象判定のサンプルプログラム

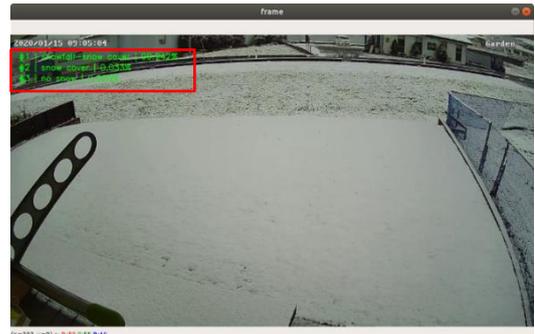
学習済みモデルを使ったアプリケーションの例として、IPカメラに映っている気象状況をリアルタイムに判定させるサンプルプログラムを作成した。

DIGITS で学習を行うと caffemodel ファイルが作成されるが、これが学習済みモデルになる。caffemodel ファイルは、python などの言語で、AI 技術を取り入れたプログラムにポーティングして使用できる。

caffemodel を用いて正しく判定させるためには、他にモデル構造を定義した deploy.prototxt ファイルと学習データの平均値である mean.binaryproto が必要になる。このため、mean.binaryproto はプログラム中で使用できるように npy 形式に変換して mean.npy としておく。

判定の流れは、まず deploy.prototxt を読み込んでネットワークモデルを構築し、caffemodel により重み付けをする。次に入力データから mean.npy の値を引き、そのデータを学習済みの重み付けをされたネットワークに入力すれば結果が出力される。

図5に作成した気象状況判定プログラムの実行画面を示す。IPカメラにアクセスし、左上に学習済みモデルで判定した気象状況を赤枠内に表示している。図5の画像は降雪あり・積雪ありのものであるが、約99[%]の確率で正しく判断していることが確認できた。



- #1 | snowfall-snow cover | 99.942% (降雪あり・積雪あり)
- #2 | snow cover | 0.033% (降雪なし・積雪あり)
- #3 | no snow | 0.025% (降雪なし・積雪なし)

図5 学習済みの caffemodel を用いたリアルタイム気象状況判定のサンプルプログラム

## 3. 結言

本研究では、IPカメラの画像を使って、学習データセットを作成し、降雪あり・積雪あり、降雪なし・積雪あり、降雪なし・積雪なしの3つの状況に分類するディープラーニングの学習を行った。その結果、過学習になることなく、気象状況を正しく判断するモデルを作成することができた。

また、学習済みモデルを用いて IPカメラの映像からリアルタイムに気象状況を判定するサンプルプログラムを作成した。これにより、DIGITS による学習結果を用いて独自にアプリケーションを作成する手法を示すことができた。

これらの結果より、降雪などの気象状況に応じて機器を制御するような状況に対して、解決するための手法を示すことができた。

今後の課題は、今回学習したモデルが、他の場所に設置したカメラの映像でも正しく判定できるか検証を行い、必要があれば各場所に応じた学習の調整方法を検討することである。また、朝方や夕方時間帯、晴天や雨天時の様々な状況に対応できるかも考えなければならない。

## 参考文献

- 1) nVIDIA. "CUDA-X AI". NVIDIA DIGITS | NVIDIA Developer.  
<https://developer.nvidia.com/digits>.  
(参照 2020-01-31).
- 2) FFmpeg. "FFmpeg". <http://www.ffmpeg.org/>.  
(参照 2020-01-31).
- 3) A Krizhevsky, I Sutskever, GE Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks." Advances in neural information processing systems. 2012. p. 1097-1105.

# 安価な測距センサを用いた「移乗です」の自動停止機能の開発

Development of automatic stop function of “IJODESU” using inexpensive ranging sensor

技術開発部 生産・加工科 菅野雄大 柿崎正貴 尾形直秀

応募企業 株式会社あかね福祉

応募企業の製品である移乗用機械「移乗です」は、被介護者を脱衣ベッド等から抱え上げ移乗するためにモータ駆動により上下に移動する昇降部が備えられており、これにより介護者や被介護者の負担を軽減し移乗が可能である。しかし、装置の座面の停止位置は、予め設定された高さで停止する仕様となっており、ベッド等の座面高さが変わると、その都度、予め設定し直さなければならない。本事業では、「移乗です」に測距センサを用いることで、ベッドや椅子の高さに合わせ、自動で停止する機能を付加することを目的とし、車椅子座面の高さ検出が可能であるか検証した。

Key words: 移乗、測距、低コスト、LiDAR、超音波センサ

## 1. 緒言

応募企業の株式会社あかね福祉は、図1に示す、抱え上げ移乗による腰痛防止対策機械「移乗です」を開発・商品化している。この装置は、被介護者を脱衣ベッド等から抱え上げ移乗するためにモータ駆動により上下に移動する昇降部が備えられており、これにより介護者が被介護者を持ち上げる負担が軽減され、介護者の腰痛予防や被介護者に負担を与えることなく移乗が可能である。

しかし、装置の座面の停止位置は、予め設定された高さで停止する仕様となっており、ベッドや車椅子等の座面高さが変わってしまうと、その都度、設定し直さなければならない。

本事業では、「移乗です」の座面が、ベッドや椅子の高さに合わせ、自動で停止する機能を付加することを目的に、座面を測距センサにより検出可能であるか検証した。また、安全機能として、万が一、装置の座面が人と接触した際、それを知らせる機能を開発した。

本事業の目標として、「移乗です」(以下、装置)に、低コストで座面高さ検出機能と安全機能を付与し、目標とする座面の高さ検出の精度は、座面から2 [cm]以内とした。これ以上離れると装置の座面を非介護者の太もも裏にスライドさせる際、太ももを高く持ち上げる必要があり、介護者、非介護者ともに負担がかかると考えられる。また、今回対象とする座面は、実際の利用シーンを考慮し、車椅子、ベッドの座面を想定した。

## 2. 実験と結果

### 2. 1. システム構成

使用したセンサを表1に示す。椅子の座面検出は、検出可能な座面箇所や「移乗です」にセンサを取り付けられる箇所が限られており、接触式のセンサでは困難であるため、非接触式の安価で小型な測距センサを



図1 「移乗です」の外観(左)と利用シーン(右)

表1 使用センサとシステム搭載時の機能

センサ	LiDAR	超音波センサ	感圧センサ
型番	Tiny LiDAR	HC-SR04	MF02-N-221-A01
外観			
サイズ	2.1×2.5 [cm]	4.5×2.0×1.5 [cm]	4.0×4.0 [cm]
仕様	測距範囲： ~200 [cm] 精度：3 [%] サンプルレート： 最大 60 [Hz] 通信方式：I <sup>2</sup> C	測距範囲： 2~400 [cm]、 正面 15 [°] 分解能：0.3 [cm] 動作周波数： 40k [Hz]	感圧レンジ： 約 30~1000 [g] 感圧エリア： 3.96×3.96 [cm] 測定誤差：±5 [%] 反応速度：~1 [ms]
価格(円)	約 3,000	200~500	約 1,500
機能	・椅子の座面検出	・椅子の座面や人体の検出(緊急停止用)	・ベッドの座面検出 ・人体検出(緊急停止用) ・下乗時の座面検出

選定した。なお、センサデータの送受信等の制御には、容易にプログラム開発が可能な Arduino UNO R3 互換ボード ELEGOO UNO R3 を使用した。

試作したセンサシステムの構成を図2に示す。各種

センサの取り付けは、3Dプリンタで製作した治具により装置に固定した。

超音波センサは、対象物に超音波を発信し、その反射波を受信するまでの時間と音速との積から、対象物までの距離を計算する。空気中の音速  $V$  は、周囲の温度の影響を受けるため、Texas Instruments 社のアナログ温度センサ LM35DZ を使用し、以下の式(1)より補正した<sup>1)</sup>。

$$V = 331.5 + 0.6 t \quad [\text{m/s}] \quad t : \text{温度} [\text{°C}] \quad (1)$$

また、超音波センサには、図2①のように3Dプリンタで製作したエクスポネンシャル（指数関数）形状のホーンを取り付けることで指向性を高めた。

### 2. 1. 1. 座面高さ検出機能

椅子の座面の高さ検出は、図2①のように、レーザレンジファインダ（以下、LRF）を座面の前面を測距することで検出する。装置の昇降部を下方に移動させた際、図3のように、測距対象が人体から座面が変わるところで急激に距離が短くなる。図4は、LRF の測距データ  $d$ 、測距データを10回移動平均した  $d_{ave}$ 、 $d_{ave}$  の過去50個分のデータの最大値  $d_{max}$ 、最大値と平均値の差  $\Delta d$  のグラフである。図4のように、座面にセンサのレーザが当たると  $\Delta d$  の値が大きくなる。

そのため、 $\Delta d$  がある閾値を超えた時に、座面を検出する手法をとった。閾値は、服のふくらみ等の別要因による誤検出を考慮しつつ最小となるように4 [cm] に設定した。LRF の取り付け位置は、一人の被験者が実際に車椅子に座り、座面検出時に装置座面が車椅子座面高さになるよう調整して取り付けた。また、図2②のように、上方からLRFにより座面を検出する手法も取り入れた。こちらは、距離データ  $d_{ave}$  が21 [cm] 以下になった時に座面を検出するようにした。

なお、図2③のように、椅子座面のLRFのレーザ光が当たる箇所にQuarton社製レーザモジュールVLM-650-29 LPT（赤色）で十字印をつけ、その目印が隠れないように装置の向きや人の足の配置を調整することで、測距センサが座面以外の対象物を測距してしまうことを防ぐ。

ベッドの座面の検出は、図2④のように装置の座面裏に感圧センサを取り付けてベッドと接触した時の圧力を検出する手法とした。また、感圧センサを取り付けることで、装置から降りる際は装置の座面が閉じた状態であるため、ベッド以外に椅子に降りる際も椅子の座面を検出することが可能である。

### 2. 1. 2. 安全機能

図2①のようにLRFで検出できなかった場合の緊急停止用として、LRFの上に超音波センサを取り付けた。また、万が一、測距センサで座面を検出できず人の大

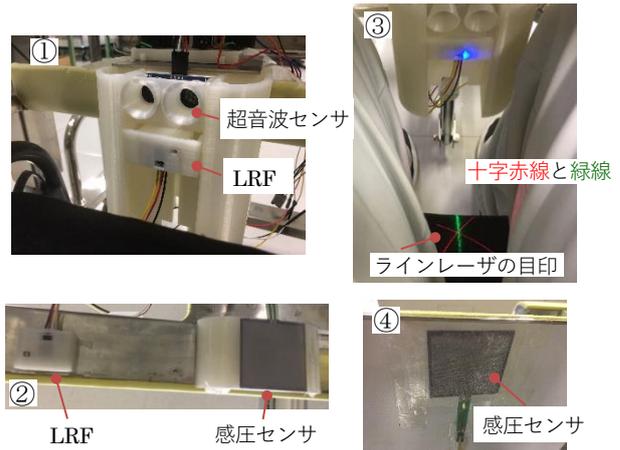
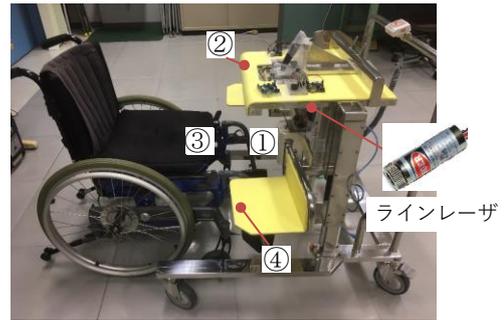


図2 センサシステムの構成

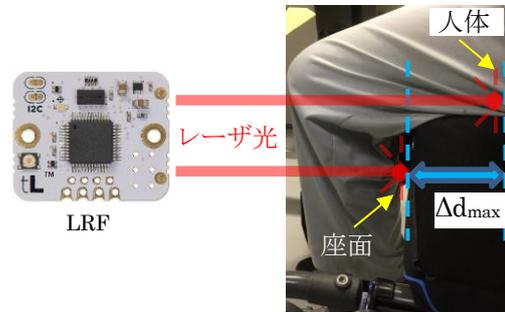


図3 座面高さ検出手法

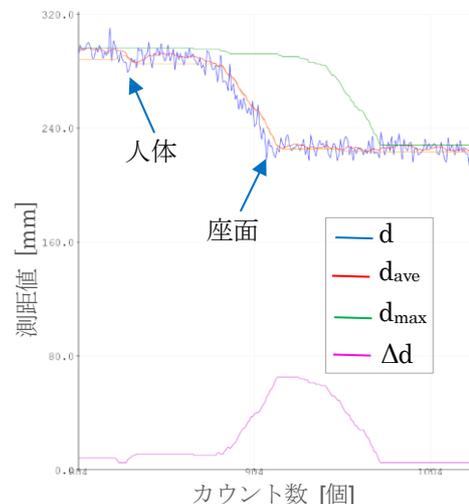


図4 LRFによる測距データ

腿部等に装置が接触した際、それを検出できるように図2②のように感圧センサを取り付けた。

## 2. 2. 測距センサの精度検証実験

今回選定した超音波センサ及びLRFの測距精度を検証した。対象の座面は、実際に介護用車椅子等で使用されている黒色のクッションとした。

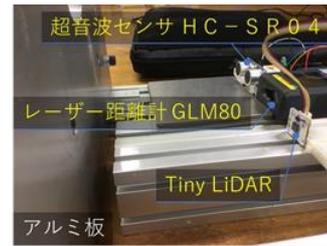


図5 センサの配置

### 2. 2. 1. 実験方法

図5、図6のように、超音波センサとLRF及びリファレンス用のBOSCH社製レーザ距離計GLM80を測定対象物のクッションに対し平行に設置し、GLM80の距離データを基準に15 [cm]から30 [cm]まで1 [cm]刻みで距離を測定した。実験は、クッションの前面と上面を測距した場合の2通り実施した。

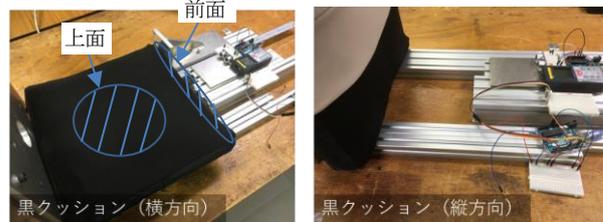


図6 クッションの前面(左)と上面(右)の測定時の様子

### 2. 2. 2. 実験結果

図7に超音波センサ、図8にLRFの測距結果を示す。測定データは100個の測定値を平均している。

グラフより、超音波センサでは、ばらつきが少なく、リニアリティがあることがわかる。しかし、超音波センサは指向性が低いため、クッションの中身が不均一の場合や、近くに人の足など別の物体がある場合は、複数の距離データを返す場合がある。

LRFでは、距離が離れるほど、ばらつきが大きくなり、クッションの前面から当たった場合は、22 [cm]以上距離が離れるとリニアではなくなった。これは、対象物が黒色であったためLRFからのレーザ光が対象物表面で吸収され、実際より大きな値になったと考えられる。この結果から、対象物までの距離が22 [cm]以上にならないよう、図2③のレーザの目印が座面に当たる距離を22 [cm]以内とし、目印が当たる位置に装置を移動させるようにした。

以上より、椅子座面の検出には、人の足など異なる対象物を誤検出しないように指向性の高いLRFを使用する。超音波センサは指向性が低く、異なる対象物を誤検出する可能性はあるが、測距精度は良く人や座面を検出しない可能性は低いことから、LRFの上部に取り付け、LRFで対象を検出できなかった際の緊急停止用として使用することにした。

## 2. 3. 座面検出の精度検証実験

図2のセンサシステムを使用し、実際に人が車椅子に乗った状態で、車椅子の座面の検出精度を検証した。

### 2. 3. 1. 実験方法

被験者は、平均年齢 39±12 歳の健常成人男性 1 2 名(身長 172.6±6.1 [cm]、体重 71.2±12.3 [kg])である。被験者には、車椅子にレーザの目印が隠れないように少し足を開いた状態で座るように説明した。な

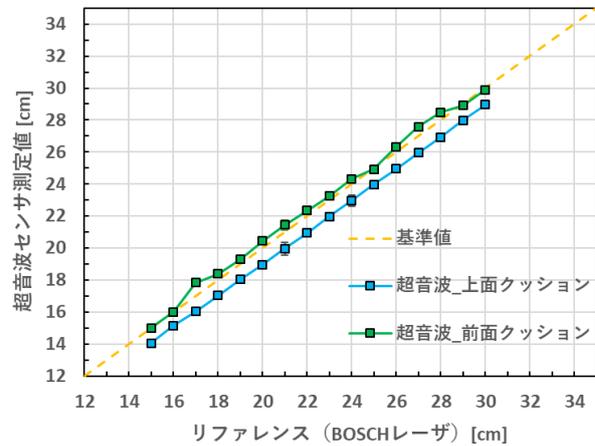


図7 超音波センサの測距実験結果

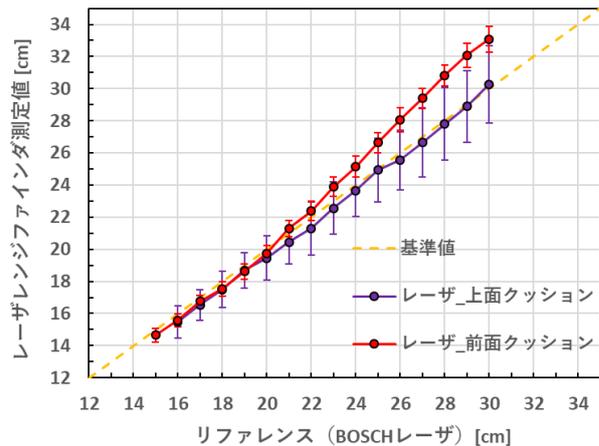


図8 LRFの測距実験結果

お、レーザによる目印には、赤色レーザ以外に、より視認性の良いCanon社製緑色レーザポインタPR11-GCを使用した。LRFで座面を検出した場合は、LEDの点灯及び圧電ブザーの音で知らせるようにした。装置の操作者は一人に限定し、既存の「移乗です」操作用レバ



図9 地面までの距離測定（左）とリファレンス値の確認時の様子（右）

一により昇降部の上下移動を操作する。一定の高さから昇降部を降下し、座面検出時のブザー音が鳴った際に昇降部の移動を操作レバーにより手で停止する。その後、図9（左）のように、装置座面に固定したGLM80を使用し、地面までの距離を測定値とし、これを10回繰り返した。また、リファレンス値は、図9（右）のように、被験者の足を上げた状態で、車椅子の座面に、装置の座面がスライド可能で、座面間の距離が最も短くなる値とし、測定値と比較した。

### 2. 3. 2. 実験結果

今回、全ての実験においてLRFにより車椅子の座面を検出することができた。

図10に、被験者12人の測定10回分の平均測定値を示す。各被験者間の平均値の差異は、体格の個人差やクッションが柔らかいため、座る場所により車椅子座面の沈みがあったと考えられる。ばらつきの差異は、服が黒色であることや体格差により、車椅子の位置が装置より遠く離れた場合に、2.2章の測距センサの精度検証実験の結果のとおり、センサの測定値にばらつきが生じたためと考えられる。

図11に平均値とリファレンス値との差を示す。平均値がリファレンス値よりも大きい時の最大差は+1.0 [cm]であった。差が+になる原因としてはクッションの沈み込みの影響と考えられ、比較的后方に座り、両足をより広げた状態で座った場合に、車いすの座面両端が測距レーザの当たる座面中央よりも低くなるのが原因として考えられる。平均値がリファレンス値よりも小さい場合は、最大差が-2.0 [cm]であった。これもクッションの沈み込みの影響と考えられる。リファレンス測定時に装置の座面を車椅子座面上にスライドさせる際、被験者の足を上げて行うため、沈み込んだクッションが元の形状に戻るように、位置が高くなるのが原因として考えられ、比較的前方に座った場合に、このようになると考えられる。

この対策として、2 [cm]以上、センサの取り付け位置を低くする方法や、制御に組み込む際に装置座面高さをオフセットする方法が考えられる。しかし、その場合、今回の実験結果では最大差が $1+2=3$  [cm] 以上となり、目標の2 [cm]を超えることになる。

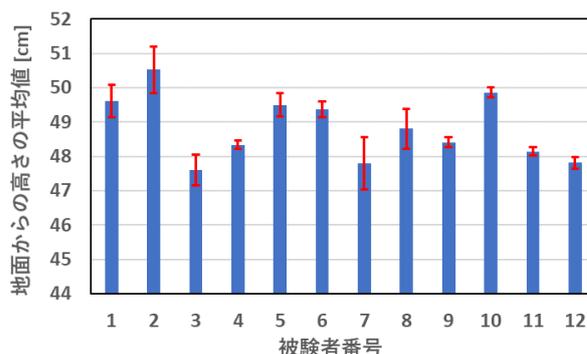


図10 地面から装置座面までの距離の平均値

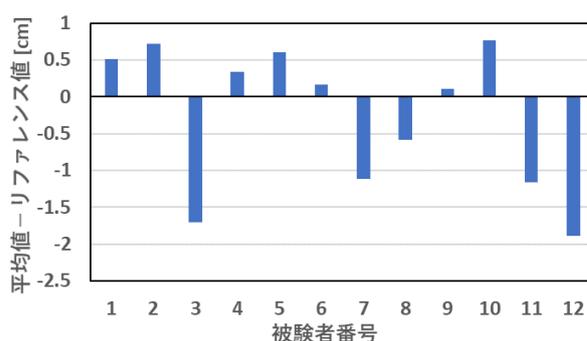


図11 リファレンス値と平均値との差

## 3. 結言

本事業では、「移乗です」に自動停止機能を付加するために測距センサを使用し、座面を検出する手法を開発した。

その結果、LRFを使用して距離の変化をみることで、車椅子の座面を検出することができた。また、安全機能を付加するために感圧センサ及び超音波センサを選定し、センサの精度検証実験の結果より、緊急停止用として装置に設置した。更に、LRFの測距箇所を目印としてレーザポインタを使用することで、容易に対象の座面にLRFの測距位置を合わせることが可能となった。

しかし、座面検出の精度検証実験では、実際の座面の位置から-2.0～+1.0 [cm]の誤差があった。今後は、この誤差が許容範囲であるか官能試験等による検証が必要である。また、今回の実験結果からLRFを2 [cm]低い位置に設置した状態での実験や、被験者を更に増やして服装など実際の利用環境に近い条件で実験を実施し、座面検出の精度を検証する必要がある。また、座面の検出結果から「移乗です」が自動停止する制御プログラムを作成していく予定である。

### 参考文献

- 1) 本多電子株式会社. “距離計測”. [https://www.honda-el.co.jp/hb/3\\_17.html](https://www.honda-el.co.jp/hb/3_17.html) (参照 2020-02-13).

## GPS とセンサの組み合わせによる自己位置推定システムの開発（第2報）

## Development of localization system by GPS and other sensors (2nd report)

技術開発部 生産・加工科 吉田英一 菅野雄大 稲葉勉 近野裕太 清野若菜

GPS等の測位衛星からの信号が受信できない環境下でも利用可能な、安価なセンサの組み合わせによる自己位置推定システムを開発する。今年度は北陽電機製のレーザレンジファインダ UTM-30LX（以後、「LRF」と呼ぶ）による自己位置推定システムを構築し、センサ評価ロボットに搭載して屋内外で環境地図の作成や自律走行実験を行った。また、障害物を回避するため、YOLOによる障害物の認識実験を行った。その結果、屋内においてLRFによる自律走行ができることや、ロボットに搭載したカメラで障害物を認識できることが確認できた。

Key words: GPS、自己位置推定、障害物検出、YOLO

## 1. 緒言

近年、自律走行ロボットの研究開発が盛んに行われており、GPSトラクターや農作物の無人運搬ロボットなど屋外の様々な環境を走行可能なロボットの実用化が期待されている。

しかし、屋外で自律走行するロボットの多くは位置情報を取得するためにGPSを利用するが、GPSアンテナ周辺に壁等の障害物がある環境では位置情報の誤差が大きくなる課題がある。また、自律走行を実現するためには多くの要素技術を開発する必要があり、開発コストや技術者不足の面から中小企業だけですべて開発することは難しく、ロボット関連産業の参入障壁の一つとなっている。

そこで本研究では、自律走行を実現するために必要な自己位置推定技術において、GPSからの位置情報による位置推定のほか、位置情報が正確に取得できない環境でも、各種センサを組み合わせることでロボットの位置を推定するシステムを開発する。

また、深層学習による画像認識技術を活用して障害物の認識と回避を行うシステムも併せて開発する。

本研究の概要を図1に示す。

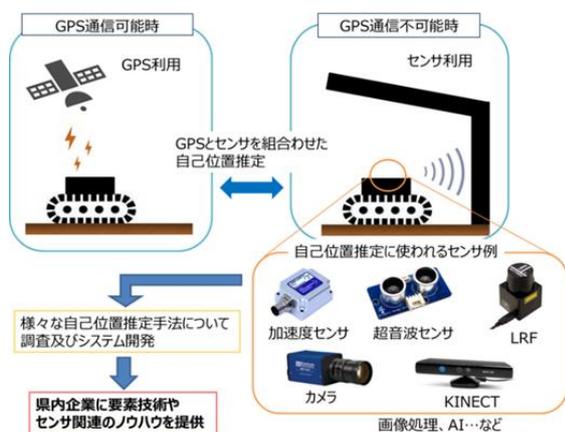


図1 研究概要

昨年度は、自己位置推定に利用するGNSS受信機を使い、単独測位やRTK測位などの測位方式の違いによる測位実験を行い、測位精度を比較した。また、センサ評価基板及びロボットを製作し、ロボットに搭載した状態でのセンサ評価、自己位置推定システムの評価を行う開発環境を構築した。さらに、自律走行ロボットに物体検出機能を付加する目的で、深層学習による物体検出システムYOLOを用いて屋外における物体の学習モデルの作成と評価を行った。

今年度はLRFによる自己位置推定システムを構築し、昨年度製作したセンサ評価ロボットに搭載して、屋内外で環境地図の作成や自律走行実験を行った。

本稿では、LRFによる自己位置推定システムの開発と、動作を検証するために行った環境地図作成や自律走行実験について述べる。また、AIを活用した障害物の認識実験について述べる。

## 2. 実験と結果

## 2.1. 自己位置推定システムの概要

本研究ではGNSS、ベイズフィルタ、自律航法による位置推定手法を組み合わせた自己位置推定システムの開発を行う。自己位置推定とは既存の地図やセンサデータから走行中のロボットの位置や向きを推定する技術のことで、自律走行に必須の技術となっている。

ロボットの自律走行の実現には自己位置推定のほかに、地図作成、障害物検出と回避、経路・動作計画などの機能を実装する必要があり、膨大なソフトウェアすべてを自前で実装することは現実的ではない。

そこで本研究ではROS<sup>1) 2)</sup> (Robot Operating System)を使用し、自律走行機能を持つROSパッケージ(任意の機能を含むソフトウェアの集合)とGNSSや自律航法の位置推定手法を組み合わせることで自己位置推定システムを構築する。

また、利用するセンサは、位置推定や障害物検出に

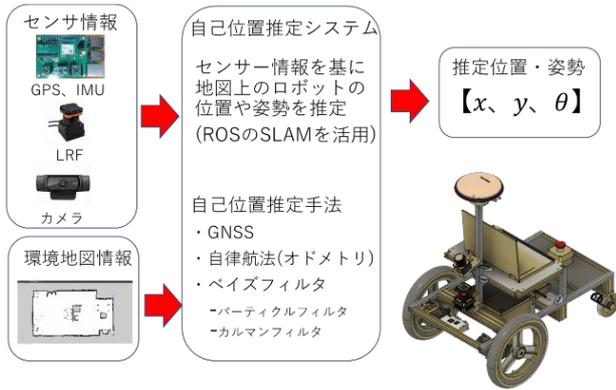


図2 自己位置推定システムの概要

使用する GPS、LRF、慣性センサ、カメラ、超音波センサとし、ROS のセンサドライバやデータ送受信機能を利用して、センサデータの取得や送信を行うこととする。自己位置推定システムの概要を図2に示す。

センサ情報と環境地図情報から自己位置推定手法によりロボットの推定位置座標 $(x, y)$ とロボットの向き $\theta$ を推定し、目標地点までの経路を計画して自律走行する。また障害物を AI により画像認識し、ロボットは停止や回避行動を行う。

## 2. 2. 自律走行実験

### 2. 2. 1. センサ評価用ロボットの概要

ROS を用いた自己位置推定システムの動作検証をするため、LRF を搭載したセンサ評価用ロボットでの環境地図の作成や、環境地図を利用したロボットの位置推定と自律走行実験を行った。

センサ評価用ロボットは i-Cart middle<sup>3)</sup> をプラットフォームとしたロボットで、ツジ電子社製の T-frog 二軸ブラシレスモータドライバ「TF-2MD3-R6」を搭載している。センサ評価用ロボットの外観を図3に示す。

TF-2MD3-R6 は、オープンソースの移動ロボット走行制御プラットフォーム「YP-Spur」と組み合わせることで、2 台のブラシレスモータを制御して二輪差動駆動の移動ロボットを容易に構築できる<sup>3)</sup>。ロボットの仕様を表1に示す。

自己位置推定のためのセンサとして、ロボット前方上段に GNSS アンテナ、下段に 2 次元 LRF を搭載した。



図3 センサ評価ロボットの外観

表1 センサ評価用ロボットの仕様

最大外形	L700×W490×H730[mm]
重量	21[kg]
使用センサ	GNSS 受信機、LRF、カメラ
車輪	4 輪（前方 2 輪が駆動輪、 後方 2 輪が従動輪） 前輪直径：300[mm]
ロボット主電源用バッテリー	廣隆光電社製密閉式鉛蓄電池 WP12-12（電圧 12[V]、容量 12[Ah]）を 2 個直列
ブラシレスモータ（2 個）	ツジ電子社製 TF-M30-24-3500-G200L、TF-M30-24-3500-G200R ギヤ比 200：1
モータドライバ基板	ツジ電子社製 TF-2MD3-R6

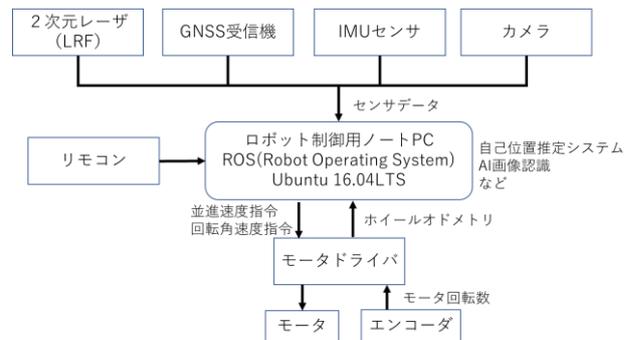


図4 システム構成図

ロボット前方中段にはカメラを搭載した。下段の LRF で周囲の建造物などの形状データを取得し、ロボットのホイールオドメトリと併せて自己位置推定を行う。ロボット走行中の前方画像を中段のカメラで取得し、AI により障害物を認識し、ロボットの停止や回避動作に利用する。システム構成図を図4に示す。

センサデータやリモコンからの信号は Ubuntu16.04 LTS と ROS を搭載したロボット制御用ノート PC で処理し、ROS ノード（ROS パッケージ内の複数の独立したプログラム）を介してロボットの速度指令をモータドライバに送信して制御を行う。

### 2. 2. 2. LRF による自己位置推定システムの構築

ROS を利用して北陽電機製 LRF「UTM-30LX」による自己位置推定システムを構築した。ロボットの自律走行は、2 次元の占有格子地図と呼ばれる環境地図を使用することが基本となっている。2 次元占有格子地図の作成には gmapping を使用した。2 次元占有格子地図を用いたロボットの自己位置推定には amcl を使用した。amcl はパーティクルフィルタを利用した自己位置推

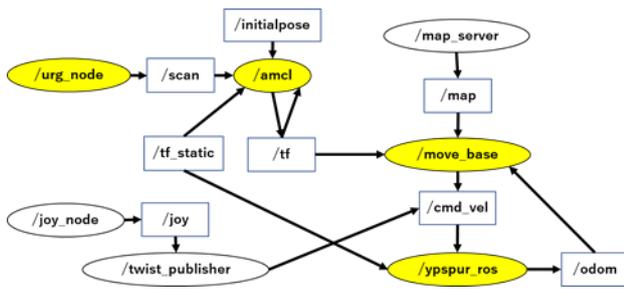


図5 自律走行時のデータ入出力

定手法である Monte Carlo Localization (MCL) に Kullback-Leibler Divergence (KLD) サンプリング等のテクニックを加えたものである<sup>2)</sup>。ロボットが走行する経路計画には ROS パッケージの move\_base を使用した。

ROS を利用してロボットが自律走行する時のノードとトピック（ノード間の一方方向のデータ送受信経路）の関連図を図5に示す。図ではノードを丸囲み、トピックを四角囲みで表している。

ypspur\_ros ノードはモータドライバからロボットのオドメトリ情報を取得し、odom トピックを出力する。amcl ノードは LRF からのスキャン情報 scan トピックを入力し、オドメトリから計算される座標系情報 tf トピックを出力する。move\_base ノードはロボットへの速度指令 cmd\_vel トピックを ypspur\_ros ノードに送信し、ロボットのモータ制御を行っている。

### 2. 2. 3. 環境地図の作成

ロボットの自律走行に利用する環境地図を事前に作成するため、LRF を搭載したロボットをリモコンで操作し、研究室の2次元占有格子地図を作成した。作成した環境地図を図6に示す。約7[m]四方の研究室の環境地図を作成したところ、歪みのない環境地図が作成できた。

ハイテクプラザ敷地内の中庭において屋外での環境地図の作成実験も行った。作成した環境地図を図7に示す。約58[m] × 約22[m]の中庭の環境地図を作成したところ、地図に歪みが生じた。屋内に比べ屋外では路面が滑りやすく、広範囲の地図作成のため走行距離が長くなり、車輪の回転数から求めるオドメトリの誤差が蓄積したことが原因と考えられる。また、今回の実験では初期パラメータの gmapping で地図を作成したことも原因と考えられる。

今後、GPS や IMU センサによる補正やシミュレーションを利用した最適な gmapping のパラメータの調整により、歪みの少ない環境地図の作成を目指す。

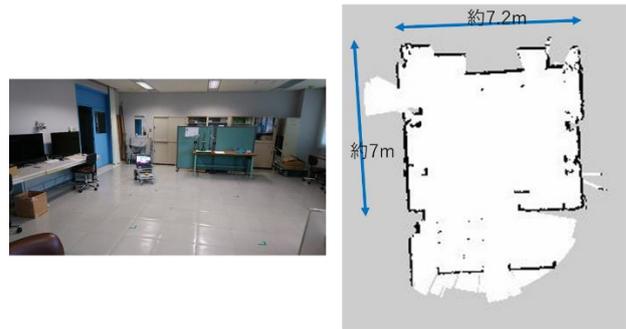


図6 研究室の環境地図

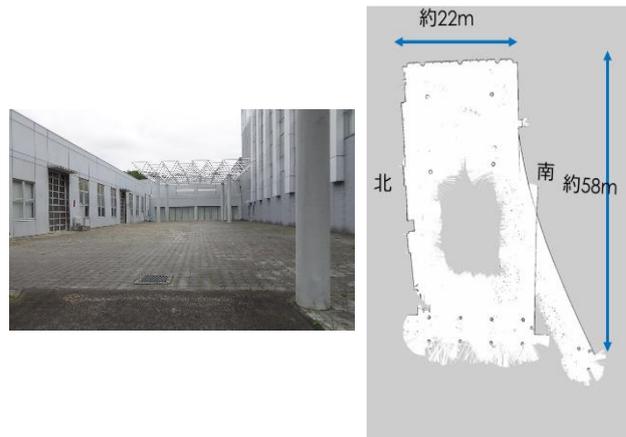


図7 中庭の環境地図

### 2. 2. 4. 自律走行実験

位置推定の実験では、LRF により検出した研究室内の形状と環境地図の壁やロッカーのなどの特徴的な形状をマッチングして、ロボットの位置推定ができることが確認できた。また、目標地点を設定することで現在位置から目標地点までの経路を計画して自律走行できることや、通過地点であるウェイポイントを4点設定し、4点間を自律走行することも確認した。

位置推定と自律走行実験の様子を図8に示す。

### 2. 3. GNSS 受信機による測位実験

#### 2. 3. 1. GNSS 測位の課題

昨年度は GNSS を利用した自己位置推定の際に、衛星の遮蔽やマルチパスの影響を受けやすい建物の壁際や木の付近で、どの程度測位精度が劣化するかを検証するため、u-blox 社製1周波 RTK-GNSS 受信機「C94-M8P」を使用して単独測位方式と RTK (Real Time Kinematic) 測位方式の測位精度を比較した。GNSS 受信機1台で測位する単独測位に対し、RTK 測位は、基準局と移動局の2つの GNSS 受信機を使用し、リアルタイムに2点間で情報をやり取りすることで測位精度を高める測位方式である。

その結果、衛星の遮蔽やマルチパスの影響を受けやすい建物や木の付近では、単独測位方式に比べて RTK 測位方式のほうが高精度で測位できることが分かった。

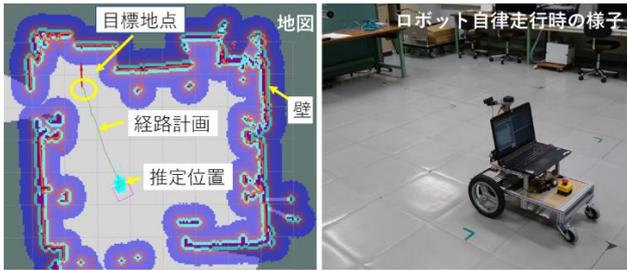


図8 位置推定と自律走行実験

しかし、RTK 測位方式は精度数 cm の Fix 解が得られるまでの初期化時間が長いことや、静止した状態では Fix 解が得られるものの移動しながらの測位では精度が数 m の Float 解に落ちてしまうという課題があることが分かった。

今年度は1周波受信機と同様に数万円で入手可能な u-blox 社の低価格2周波対応 RTK-GNSS 受信機「C099-F9P」を使用してC94-M8P との比較を行った。C099-F9P は測位衛星から発信される2つの周波数帯の電波を受信して測位する。1周波対応 C94-M8P に比べ、Fix 解を求めるまでの初期化時間が数秒と短いことや Fix 持続性が向上することが特長である。

### 2. 3. 2. GNSS 測位実験方法と結果

ハイテクプラザ敷地内テニスコートのオープンスカイ環境で、u-blox 社製1周波 RTK-GNSS 受信機 C94-M8P と2周波 RTK-GNSS 受信機 C099-F9P を使用してテニスコートの白線に沿って歩いた軌跡を取得し、初期化時間と Fix 持続性の比較を行った。

以下に実験条件を示す。

#### <実験条件>

日時：令和元年7月16日（火）15:33 - 15:52

場所：ハイテクプラザ敷地内のテニスコート（図9）

使用 GNSS 受信機：u-blox 社製 C94-M8P

u-blox 社製 C099-F9P

（RTK 測位時は2台使用）

衛星：GPS、BeiDou、QZSS

測位方式：RTK 測位

オープンスカイ環境で測位実験を行った時の受信衛星数は18、PDOPは1.39だった。位置精度低下率PDOP（Position Dilution Of Precision）は衛星数の減少や衛星配置による精度低下率の指標を表す数値である。

測位結果の解析にはu-blox社が無償提供しているGNSS 評価ソフトウェア「u-center」を使用した。測位結果を図9に示す。グーグルアース上に緑と赤の実線で示す歩行軌跡の測位結果を張り付け、2受信機の測位結果を比較した。基準局は三脚にアンテナを取り付け、テニスコートの中央（図9の×印）に設置した。

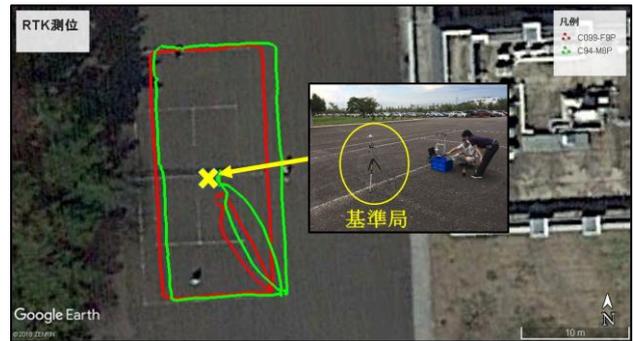


図9 RTK 測位結果（緑線：C94-M8P 赤線：C099-F9P）

実験より、測位精度の大きな違いは見られなかったが、初期化時間やFix 持続性に大きな違いがみられた。1周波 RTK-GNSS 受信機 C94-M8P は静止状態では Fix 解が得られて高精度測位できたが、移動しながらの測位では複数回 Float 解になり、静止しないと Fix 解に戻らなかった。一方、2周波 RTK-GNSS 受信機 C099-F9P では Float 解から Fix 解になるまでの初期化時間が M8P に比べて短く、移動中でも Fix 解を維持して高精度測位することが確認できた。

この実験結果より、ロボットには2周波 RTK-GNSS 受信機を搭載するほうが高精度の測位データを安定して取得できることが分かった。今後は、LRF と組み合わせた自己位置推定システムを開発する予定である。

### 2. 4. YOLO を用いた物体検出システムの開発

自己位置推定システムを搭載した自律走行ロボットは、搭載された LRF 等を用いて周囲に存在する物体を高精度で検出することができる。この検出物が何であるかを理解することは、ロボットの走行上において、回避や停止の動作を判断するために重要である。

本研究では、自律走行ロボットに物体検出機能を付加する目的で、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）による動画の物体検出システム YOLO を用いて、屋外における物体検出の学習モデルを作成しその物体検出度を評価する。

YOLO<sup>4) 5)</sup> は、リアルタイム物体検出アルゴリズムで、Darknet<sup>6)</sup> や Keras/TensorFlow、PyTorch など様々なディープラーニングフレームワーク上で実装されたものが提供されており、検出精度も非常に高い。YOLO の大きな特徴は、候補領域（Bounding Boxes）の切り出しとその候補領域のクラス確率（Class Probability）の算出を一回の推測で同時に行う点にある<sup>7)</sup>。このため、YOLO は非常に高速に物体検出を行うことができる。

本研究では、Darknet で実装された YOLO-v2<sup>8)</sup> を github のサイト<sup>9)</sup> からダウンロードして利用した。

YOLO による画像認識実験の様子を図10に示す。実験によりロボットに搭載したカメラでリアルタイムに人や物体の認識ができることを確認できた。

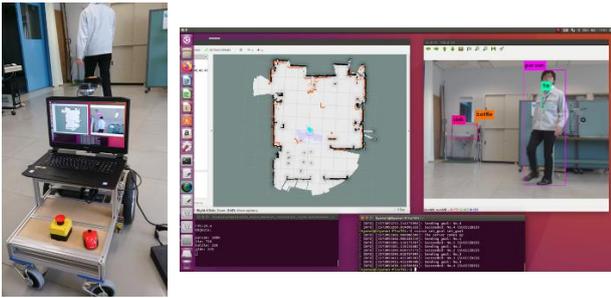


図10 YOLOによる画像認識実験

## 2. 5. 開発環境の構築

### 2. 5. 1. 自律走行評価用ロボットの製作

屋内外環境においてGNSS受信機やLRFなどの各種センサを利用した自律走行を評価するため、自律走行評価用ロボットを製作した。自律走行評価用ロボットの外観を図11に示す。

このロボットは平成30年度に製作したセンサ評価用ロボットの小型軽量化と、比較的平坦な屋内外環境でのモータ駆動走行を目指して、車輪径を300[mm]から150[mm]、ロボットの幅(トレッド長)を490[mm]から365[mm]に小型化し、ロボット重量を21[kg]から11[kg]に小型軽量化を図った設計とした。ロボットの仕様を表2に示す。

### 2. 5. 2. AI 認識評価システムの製作

ロボットに搭載したカメラの画像からYOLOにより物体を認識できるか評価するため、GPU搭載組み込み装置 NVIDIA Jetson AGX Xavier 開発者キット(以後、「エグゼビア」と呼ぶ)と深度カメラ Intel Realsense D435i(以後、「深度カメラ」と呼ぶ)で構成されるAI認識評価システムを製作した。

エグゼビアには NVIDIA 社から提供される JetPack をインストールして Ubuntu 18.04 ベースの OS を動作させ、CUDA、cuDNN、TensorRT、OpenCV など AI 関連のソフトウェアやドライバをインストールした。また、USB 接続した深度カメラや WEB カメラからの画像を AI 認識評価できる仕様とした。



図11 自律走行評価用ロボットの外観

表2 自律走行評価用ロボットの仕様

最大外形	L423×W365×H480[mm]
重量	11[kg]
使用センサ	GNSS 受信機、LRF、カメラ
車輪	3 輪 (前方 2 輪が駆動輪、 後方 1 輪が従動輪) 前輪直径: 150[mm]
ロボット主電源 用バッテリー	GS ユアサ製鉛蓄電池 NPH5-12 (電 圧 12[V]、容量 5[Ah]) を 2 個直列
ブラシレス モータ (2 個)	ツジ電子社製 TF-M30-24-3500-G15L、 TF-M30-24-3500-G15R ギヤ比 15 : 1
モータドライバ 基板	ツジ電子社製 TF-2MD3-R6

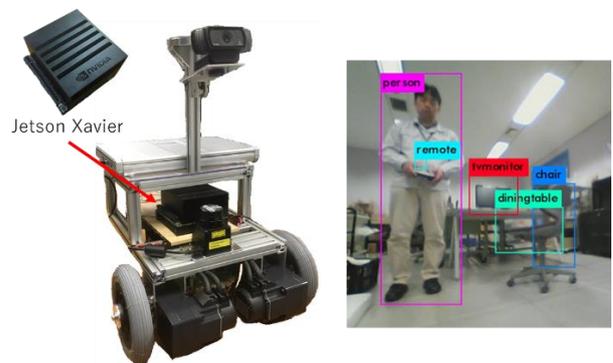


図12 YOLOでの画像認識実験

ロボットにエグゼビアを搭載して認識実験を行った様子を図12に示す。ロボットを走行させながらカメラで撮影した画像をYOLO-v2 tiny モデルで認識させたところ、約50フレーム/秒の処理スピードでリアルタイムに画像内の人や複数の物体を認識できた。今後、エグゼビアを使い、YOLO-v3 での認識実験や屋外障害物の学習データを使った認識実験を行う予定である。

### 2. 5. 3. シミュレーション環境の構築

2. 2. 3. 章で述べたように、歪みの少ない地図作成には gmapping の最適なパラメータ設定が必須であるが、屋外ではロボット車体の振動など不特定のノイズが多く困難である。そこで、シミュレーションを活用し、最適なパラメータ値を求める。本章では、ロボットのモデル作成と自律走行シミュレーション環境の構築について述べる。

シミュレータには Gazebo を使用した。Gazebo は、ロボットの実機がなくてもバーチャルな三次元空間で姿勢や動作などを確認できるオープンソースの三次元シミュレータである。また、ROS のデータ可視化ツールである RViz を使用し、LRF のデータなど ROS 上の

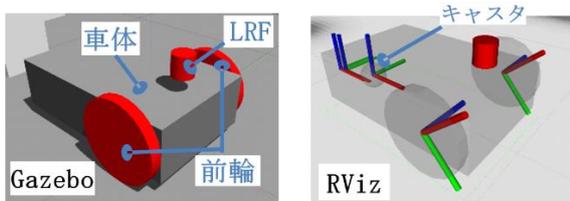


図13 シミュレーション用ロボットモデル

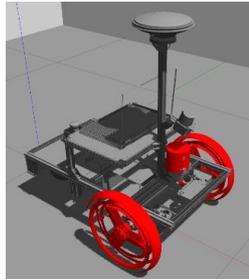
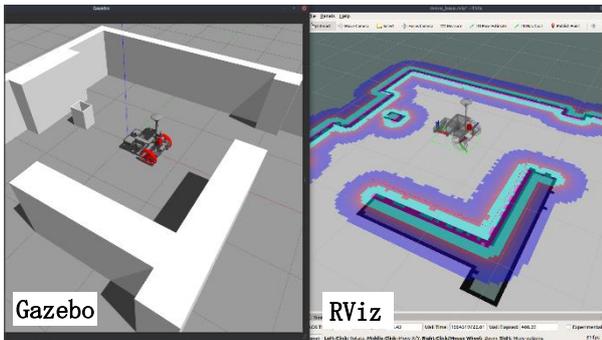


図14 ロボットモデルの外観

図15 左：構築したシミュレーション環境  
右：作成した地図の表示

データを三次元空間上に可視化した。

図13に自律走行シミュレーション用に作成したロボットのモデルを示す。ロボットのモデルは、図3のロボットと同様に、車体とモータのついた前輪2輪、車体を支えるキャスト、LRF からなる二輪差動駆動型とした。ロボットの構造は、ロボットの記述ファイルである URDF (Unified Robot Description Format) と呼ばれる XML フォーマットにより記述した。URDF には車輪半径や車輪間距離等の車体パラメータや、慣性モーメント等の動力学パラメータを設定することで、シミュレーション環境上で実際のロボットの自律走行に近い動作を模擬できる<sup>10) 11)</sup>。

また、図14、図15のようにロボットの外観や部屋の壁といった周囲の障害物は、各々の三次元 CAD のメッシュデータ (STL) から RViz や Gazebo の画面に表示させた。図15のように、ロボットによる地図作成や事前に作成した地図を使用したロボットの自律走行をシミュレーション可能な環境を作成した。今後は2.2.3.章で述べた図7のような地図の歪みを改善す

るため、作成したシミュレーション環境上で gmapping のパラメータの調整を行っていく予定である。

### 3. 結言

今年度は LRF による自己位置推定システムを構築し、このシステムを搭載したセンサ評価用ロボットで屋内の環境地図作成と走行実験を行った。その結果、屋内の壁や机などの障害物を LRF でスキャンした環境地図を作成し、LRF で環境地図とスキャンデータをマッチングしながらセンサ評価用ロボットが自律走行できることを確認した。また、屋外で LRF とホイールオドメトリのみで環境地図を作成した結果、環境地図に歪みが生じることが分かった。これは屋内に比べ屋外では車輪の滑りや LRF のノイズの影響が大きく、歪みが生じたためと考えられる。今後は、シミュレーション上での gmapping のパラメータの調整や、GPS、IMU センサによる補正を行い、歪みの少ない環境地図の作成を目指す。

自己位置推定に利用する GNSS 受信機の実験では、1周波と2周波対応 GNSS 受信機を使ってオープンスカイ環境で RTK 測位実験を行い、測位精度、初期化時間や Fix 持続性について比較した。その結果、2周波対応 GNSS 受信機では初期化時間及び Fix 持続性が改善されることが分かった。

さらに、自律走行ロボットに物体検出機能を付加する目的で、深層学習による物体検出システム YOLO を用いて人や物体をリアルタイムで認識することができた。

今年度得た知見を利用して、今後は GNSS と LRF を組み合わせた ROS による自己位置推定システム及び AI による物体認識の開発を行い、屋内外で自律走行の実験を行っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 原 祥堯, “ROS を用いた自律走行”, 日本ロボット学会誌, Vol.35 No.4, p.286~290, 2017.
- 2) 上田隆一, “移動ロボットのための ROS パッケージの紹介と実機への導入方法”, 計測と制御, 第57巻 第10号 2018年10月号, p.715~720.
- 3) 渡辺敦志, “移動ロボット用二軸ブラシレスモータドライバの開発とオープンソースプラットフォームを用いた走行制御”, <http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/~ohya/pdf/RSJ2013-AWD.pdf>.
- 4) Joseph Redmon. “YOLO”. YOLO:Real-Time Object Detection. <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>. (参照 2019-04-03).
- 5) Redmon, Joseph, et al. “You only look once: Unified, real-time object detection.”. arXiv

- preprint arXiv:1506.02640,2015.
- 6) Joseph Redmon. “Darknet” .Darknet: Open Source Neural Networks in C. <https://pjreddie.com/darknet/>. (参照 2019-04-05).
  - 7) 藤田一弥, 高原歩:実装ディープラーニング, オーム社, (2016).
  - 8) Joseph Redmon and Ali Farhadi. “Yolo9000: Better, faster, stronger”.arXiv preprint arXiv:1612.08242, 2016.
  - 9) GitHub. “pjreddie” . pjreddie (Joseph Redmon). <https://github.com/pjreddie>. (参照 2019-04-03).
  - 10) srs. “ROS講座33 車輪ロボットを作る1(rvizで表示)” . Qiita. <https://qiita.com/srs/items/c1065543228e95be1a0f>.
  - 11) 西田健, “実用ロボット開発のための ROS プログラミング”, 森北出版株式会社 p.75～88, 2018.

# 狭隘内部空間の三次元構造復元に関する研究開発

## Research and development on 3-D structure restoration of interior narrow spaces

技術開発部生産・加工科 鈴木健司 山田昌幸 浜尾和秀

南相馬技術支援センター機械加工ロボット科 三浦勝吏 太田悟

本研究では、単眼光学カメラ、ミリ波レーダを利用し、狭隘空間内構造物の三次元復元に  
向けた点群データ取得法を開発する。本報では、単眼光学カメラ画像を用い、先行研究の  
Visual-SLAM による深度推定、AI 人工知能による深度推定を試み、得られる点群データ及  
び深度画像から深度精度を比較評価した。また、レーダ評価基板を用い、ミリ波レーダにお  
ける二つの物体の距離方向分離、及び方位方向分離を評価した。

**Key words:** 狭隘、単眼、カメラ、ミリ波、レーダ、三次元、構造、復元

## 1. 緒言

高度経済成長期に整備された橋梁やトンネル等の社会インフラの老朽化が進み、社会インフラ更新時期の本格的到来に備えた対応が、全国的な課題となっている。現在 340 万人の技能労働者のうち今後 10 年間に 110 万人の離職予測<sup>1)</sup> から、インフラ点検の効率化が喫緊の課題となっている。また、修繕・更新工事費用の急激な増加 (7.6 兆円：2015 年度)<sup>2)</sup> に伴い、予防保全さらには予知保全に向け、維持管理の重要性が増している。この問題は、県内のインフラ点検業者 (建設業者等) においても同じく課題となりつつある。

本研究開発では、従来、目視点検だけに頼っていた点検をロボットビジョンと組合せ、小型のセンサが必要な、狭隘部分の検査メンテナンスを対象とし、狭隘部内部空間の点検の定量化を図ることで点検業務の効率化に寄与することを目的とする。

ここで構築するデータは、3D 図面との突合、あるいは、図面が無い場合にこの計測を元に内部点検・モニタリングに供することができ、従来の外観検査の範囲を向上させることができる。

本研究開発は、単眼光学カメラによる構造物の深度推定及びミリ波レーダによる深度計測を行う。

## 2. 実験

### 2. 1. 光学単眼カメラ

#### 2. 1. 1. 畳み込みニューラルネットワークによる深度推定

##### 2. 1. 1. 1. 環境構築及び実験準備

カメラを用いて三次元構造を復元する場合、画像から距離を計測する深度計測が必要となる。深度を計測する際、ステレオカメラや LiDAR が使用されることが多いが、今回の研究では狭隘部を想定しているため、小型化可能な単眼カメラを用いて深度を計測する必要がある。そのため、畳み込みニューラルネットワーク (以下、CNN という) を用いて単眼カメラによる画

像から深度を推定する手法である Deeper Depth Prediction with Fully Convolutional Residual Networks<sup>3)</sup> (以下 FCRN) 及び Monodepth2<sup>4)</sup> を実装し、性能について評価した。開発環境は表 1 の通り。

光学単眼カメラの評価については、長さ 3[cm] の立方体木製ブロックを複数個組み合わせたものを対象物 (以下、物標と言う) として用いた。また、赤外線ステレオカメラ (インテル社製 Real Sense D435) を真値として評価実験を行った。実験の様子を図 1 に示す。

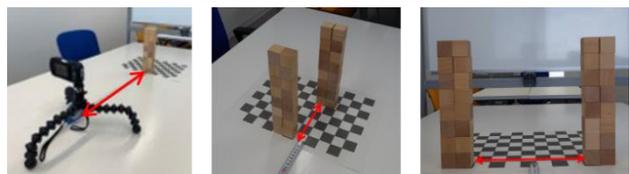
### 2. 1. 1. 2. 深度推定の評価

W6×D3×H24[cm] の物標を 50[cm] 及び 75[cm]、100[cm] の 3 か所において深度推定を行い、距離を計測した。深度推定の結果を表 2 に示す。なお、Monodepth2 については得られた深度値の単位が定められていなかったため、50[cm] 及び 150[cm] の深度推定を行い、得られた深度値を基準として距離 75[cm] 及び 100[cm] の時の深度値をセンチメートルに換算している。ステレオカメラと比較した結果、FCRN、Monodepth2 いずれにおいても深度推定値が大きく外れる結果となった。

また、表 3 の条件で物標が奥行き方向に分離して計測できるか確認した。オフセット 15[cm] の場合と 3[cm] の場合の結果を図 2 及び図 3 に示す。また、横軸

表 1 開発環境

	FCRN	Monodepth2
フレームワーク	Tensoflow1.15	Pytorch0.4.1
言語	Python3.5	Python3.6
OS	Ubuntu18.04	Ubuntu18.04
GPU	GeForce GTX 1650	GeForce GTX 1650



深度推定

オフセット距離

物標間距離

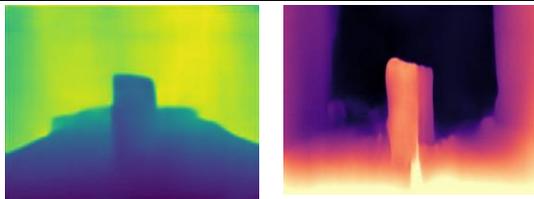
図 1 実験環境

表2 深度推定結果 [cm]

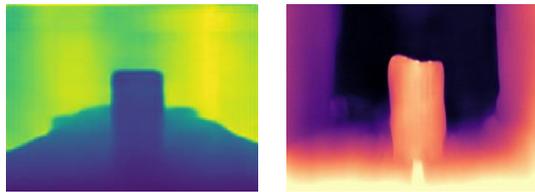
	ステレオカメラ	FCRN	Monodepth2
50 [cm]	51	114	-
75 [cm]	77	131	100
100 [cm]	99	142	131
RMSE	1.4	50.0	45.1

表3 深度推定実験条件

測定手法		ステレオカメラ、FCRN、Monodepth2
物標の大きさ	左	W6×D3×H24 [cm]
	右	W6×D3×H24 [cm]
カメラからの距離 ( )はオフセット値	左	50 [cm]
	右	65 (15), 59 (9), 53 (3) [cm]
画像サイズ		160×128 [pixel]



FCRN Monodepth2  
図2 物標間オフセット (15[cm])



FCRN Monodepth2  
図3 物標間オフセット (3[cm])

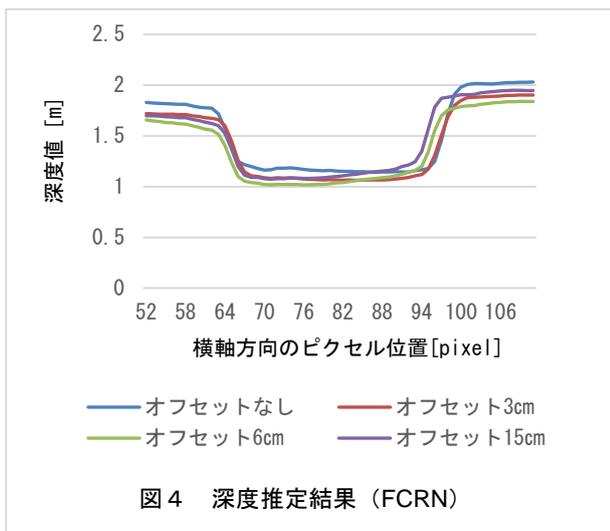


図4 深度推定結果 (FCRN)

にピクセル位置、縦軸に深度値をとったグラフを図4、図5に示す。なお、深度値は、画像中で物標が存在する位置の縦方向のピクセル位置50から90までの平均

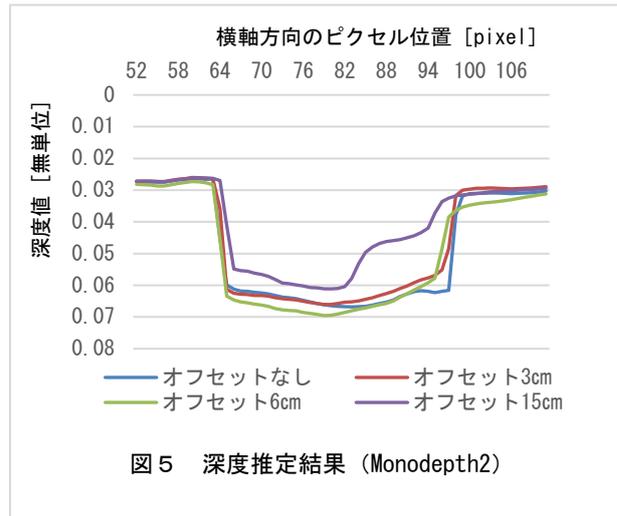


図5 深度推定結果 (Monodepth2)

をとっている。

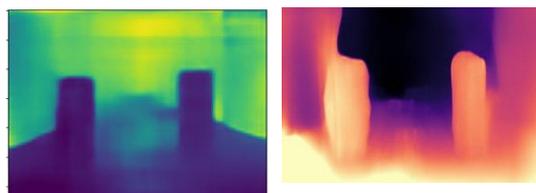
ステレオカメラは3[cm]のオフセットでも2組の物標の深度の違いを認識できたが、FCRNについては15[cm]オフセットさせた場合でも2組の物標が1つの物体として表示される結果となった。また、Monodepth2については、オフセット15[cm]までは物標を別と認識できていたが、オフセット3[cm]及び9[cm]の場合は1つの物標として認識される結果となった。

### 2. 1. 1. 3. 方位方向の評価

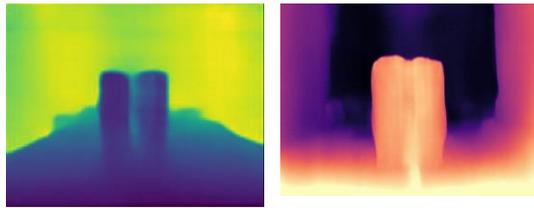
方位分解能について評価実験を行った。表4の条件で方位方向に物標が分離できるか確認した。物標間が21[cm]の場合と3[cm]の場合の結果を図6及び図7に示す。深度画像を分析したところ、FCRNについては、物標間の距離が3[cm]の場合でも、深度推定画像から物標が2つあることが確認できた。Monodepth2については物標間の距離が9[cm]までは物標が2つあることが確認できたが、3[cm]の場合は物標が1つの物体として表示されることを確認した。

表4 方位方向の実験条件

測定手法		ステレオカメラ、FCRN、Monodepth2
物標の大きさ	左	W6×D3×H24 [cm]
	右	W6×D3×H24 [cm]
カメラからの距離		50 [cm]
物標間の距離		21, 15, 9, 3 [cm]
画像サイズ		160×128 [pixel]



FCRN Monodepth2  
図6 物標間間隔 (21[cm])



FCRN Monodepth2  
図7 物標間隔 (3[cm])

2. 1. 1. 4. 物体認識の評価

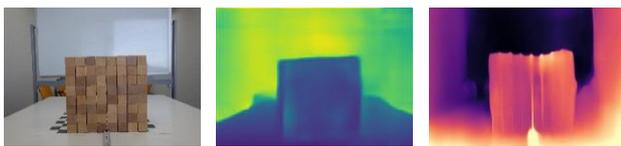
物体認識について評価実験を行った。表5の条件で物体が認識できるか確認した。物標がない場合の深度値を基準として、それぞれの物標の場合の二乗平均平方根 (RMS) を算出した。結果を表6に示す。また、W24×H24 [cm] 及び W3×H3 [cm] の深度推定結果をそれぞれ図8、図9に示す。FCRN については W3×H3 [cm] には深度値のばらつきに埋もれてしまい、物標を検出できないことが分かった。Monodepth2 については、RMS を比較したところ物標がない場合と差は出ていることから、何か物体があると認識していることが確認できた。

表5 物体認識の実験条件

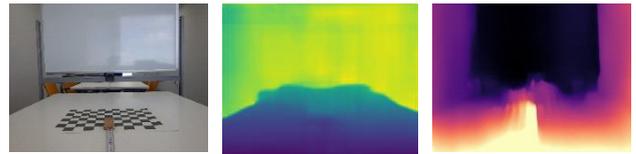
測定手法	ステレオカメラ、FCRN、Monodepth2
物標の大きさ	W24×D3×H24 [cm]
	W18×D3×H18 [cm]
	W12×D3×H12 [cm]
	W6×D3×H6 [cm]
	W3×D3×H3 [cm]
カメラからの距離	50 [cm]
画像サイズ	160×128 [pixel]

表6 物標がない場合の深度値を基準とした RMS と標準偏差 [cm]

(W×H [cm])	RMS					標準偏差 物体なし
	24×24	18×18	12×12	6×6	3×3	
FCRN	134.14	87.29	50.29	14.76	2.87	6.35
Monodepth2	82.63	125.59	84.29	78.27	67.56	25.75



元画像 FCRN Monodepth2  
図8 物標サイズ W24×D3×H24 [cm]



元画像 FCRN Monodepth2  
図9 物標サイズ W3×D3×H3 [cm]

2. 1. 2 Visual-SLAM の実装

Visual-SLAM とは画像を解析することでカメラの位置と姿勢を推定し、同時に三次元情報を取得する技術である。CNN を用いた深度推定と同様に単眼カメラから三次元情報を取得できるため、狭隘部の三次元構造を復元する手段としても期待できる。そこで、Visual-SLAM の代表的な手法である ORB-SLAM2<sup>5)</sup>、LSD-SLAM<sup>6)</sup>、及び REMODE<sup>7)</sup> を実装した。開発環境は表7のとおり。

ORB-SLAM2 は画像から特徴点を抽出し特徴点の三次元情報を取得するため、疎な点群が得られ、LSD-SLAM 及び REMODE は画像の輝度を利用して密な点群が得られるといった特徴がある。それぞれの手法を用いて、研究室の一部を三次元化した様子を図10に示す。三次元復元を行うにはより密な点群が得られる REMODE が有用であることが確認できた。

2. 2. ミリ波レーダ

2. 2. 1. レーダの特性

レーダは光学カメラに比べ、雨・霧・雪・濃煙・粉塵環境下でも測距が可能であり、昼夜に依存しないこと、太陽光の直射による影響がなく、気象や外部環境による影響をほとんど受けない測定手段としての利用

表7 Visual-SLAM 開発環境

	ORB-SLAM2	LSD-SLAM	REMODE
フレームワーク	ROS-melodic	ROS-indigo	ROS-indigo
OS	Ubuntu18.04	Ubuntu14.04	Ubuntu14.04
GPU	GeForce GTX 1650		
使用カメラ	ロジクール社製 C615		



研究室風景 (左上) ORB-SLAM2 (右上)  
LSD-SLAM (左下) REMODE (右下)

図10 Visual-SLAM による三次元像

が期待できる。本報では、送信アンテナ2素子、受信アンテナ4素子からなるMIMOレーダ機能を持つ79[GHz]レーダ評価基板を用い、物標の深度計測に利用することにした。レーダ評価基板の主要諸元を表8に示す。

用いるレーダ評価基板は筆者らの事前調査から、高い方位角分解能が得にくく、近接した複数物標の分離や形状認識が苦手であるため、本報では、距離方向(以下、レンジ方向と言う)及び方位角方向(以下、アジマス方向と言う)で、2つの物標が分離できる距離を確認する。

なお、利用したレーダ評価基板は、非技術基準適合品であるため、全ての実験は、電波暗室及びシールドブース内で実施した。

2.2.2. 送信波の確認

福島ロボットテストフィールドに設備するレーダ評価装置を用い、表9のレーダ送信波形を空間伝播のOTA(Over The Air)で計測した。計測画面を図11に、解析結果を表10に示す。設定どおりのFastChirp変調信号が輻射できていることを確認できた。なお、解析結果のTime Lengthが、輻射するChirp Cycle Timeより短い理由は、解析時に波形の立ち上がり後と、立

表8 レーダ評価基板の主要諸元

型名	IWR1642Boost ※非技術基準適合品
送信アンテナ[ch]	2
受信アンテナ[ch]	4
周波数[GHz]	77-81
変調方式	FCM (Fast Chirp Modulation)
距離分解能[cm]	4.3
方位分解能[deg]	15
最大視野角[deg]	±60
最大仰俯角[deg]	±20

表9 Fast Chirp 変調信号諸元

Idle Time[μs]	Ramp End Time[μs]	Chirp Cycle Time[μs]	Frequency Slope[MHz/μs]
429	57.14	486.19	70

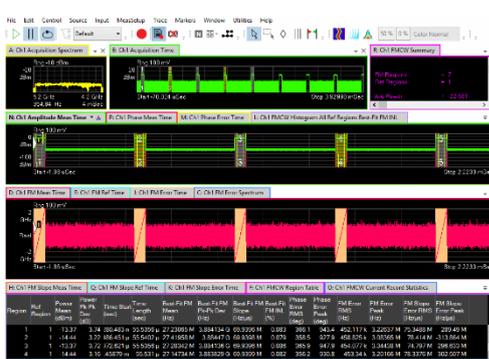


図11 チャープ波形4波の取得

表10 計測波形の解析結果

Region	Time Start [sec]	Chirp Cycle Time [sec]	Time Length [sec]	Best-Fit FM Slope [Hz/μs]
1	2.80E-07		5.55E-05	6.99E+07
2	0.00048645	4.86E-04	5.55E-05	6.99E+07
3	0.00097262	4.86E-04	5.55E-05	6.99E+07
4	0.00145879	4.86E-04	5.55E-05	6.99E+07
5	0.00194496	4.86E-04	5.55E-05	6.99E+07

下り前を波形トリガのため決めた事に起因する。

2.2.3. アジマス方向

狭隘空間内の同一距離の複数物標を別々に計測するためには、アジマス方向の分解能を把握することが必要である。レーダ評価基板を基準に、コーナリフレクタとの距離を図12(左)のように取り実験を行った。なお、コーナリフレクタ2個間の距離は図12(右)に示す間の距離とした。用いたコーナリフレクタは三角錐型で、レーダ断面積は79[GHz]で0.117[m<sup>2</sup>](−9.33[dBsm])である。

レーダとの距離を50[cm]、60[cm]、70[cm]、80[cm]と変え、コーナリフレクタが分離して計測できるコーナリフレクタ間距離を求めた。その結果を図13に示す。

図13の方位分解能から、レンジが長くなる程、コーナリフレクタ間距離を離さないで分離できない事を確認できた。

2.2.4. レンジ方向

狭隘空間内の距離が異なる物標を別々に計測するためには、レンジ方向の分解能を把握することが必要である。表8の距離分解能4.3[cm]に基づき、表11の条件でコーナリフレクタが分離して計測できるかを確認した。その結果を図14に示す。



レーダとの距離      リフレクタ間距離

図12 実験環境

レンジとリフレクタ間距離

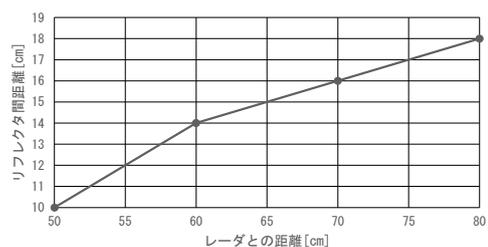


図13 レンジとリフレクタ間距離

表 1 1 コーナリフレクタオフセット位置

コーナリフレクタ	レーダ評価基板からの距離 [cm]			
左	50	55	60	65
右	50	50	50	50

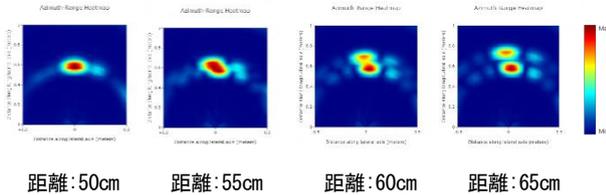


図 1 4 レーダとリフレクタ間の距離

図 1 4 は、アジマス(横軸±0.5[m])とレンジ(縦軸 1[m])の Heatmap で、赤いスポットはコーナリフレクタの位置を示し、レーダの強い反射を示す。図 1 4 から、隣接したコーナリフレクタは 5[cm]の距離差で分離できることを確認できた。

### 2. 2. 5. 不要反射

物標以外からの意図しないレーダの不要反射を抑圧する技術に CFAR (一定誤警報率)<sup>8)</sup>がある。CFAR-CA、CFAR-GO、CFAR-SO それぞれについて、閾値を変動させその効果を確認した。

測定範囲がレンジ方向 1[m]、アジマス方向±0.5[m]としているため、本報の実験環境では不要反射が存在せず、CFAR の効果はなかった。

## 3. 考察

### 3. 1. 光学単眼カメラ

深度についてステレオカメラと比較し、実験を行ったが精度よく深度を推定することができなかった。これは、深度推定を行った学習モデルが狭隘部などの狭い空間を想定していないためだと考えられる。今後、狭隘部の画像データを学習させ、再度評価を行うこととしたい。

### 3. 2. ミリ波レーダ

レーダ評価基板の方位分解能 15[deg]から、レンジが長い程アジマス方向に物標を分離できない事が確認できた。該当レンジの物標測定時は、レーダ評価基板を左右に動かすことで、アンテナの方位分解能を超えて物標を捉える必要がある。レンジ方向では、5[cm]の距離差で物標を分離できることが確認できた。

同一レンジの物標では、先のアジマス方向で述べたとおり物標を分離できないが、レンジ方向に 5[cm]の距離差が生じれば分離できるため、計測時はアジマス方向の分解能に留意が必要である。

計測環境中の不要反射は、対象としている領域が狭いこと、本計測ではコーナリフレクタだけを用いた理想環境であることから、CFAR の効果は認められなかった。

## 4. 結言

本報告では、光学単眼カメラ、ミリ波レーダを用いた狭隘内部空間の構造を三次元復元するための基礎実験を報告した。

光学単眼カメラでは、CNN を用いた深度推定手法である FCRN 及び Monodepth2 を実装し、深度及び方位分解能、奥行き分解能、物体認識について評価を行った。FCRN と Monodepth2 を比較した場合、深度値の誤差は Monodepth2 の方が小さい結果となった。今後の学習モデルの結果次第ではあるが、現時点では Monodepth2 が有用であることが確認できた。

また、Visual-SLAM の手法である ORB-SLAM2 及び LSD-SLAM、REMODE を実装し動作確認を行った。三次元復元を行うには密な点群が得られる REMODE が有用であることが確認できた。

ミリ波レーダでは、物標としてコーナリフレクタ 2 個を用い、アジマス方向、レンジ方向で物標を分離できるレンジ方向の距離及び同一レンジでのコーナリフレクタ間分離距離を確認した。また、計測環境中の不要反射は無かった。

次年度は、具体的な対象物による深度計測を光学単眼カメラ及びミリ波レーダを用い進める予定である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省. “参考資料 建設産業の現状と課題”. 第 6 回建設産業政策会議資料”. 2017.6. p.8.
- 2) 公益財団法人日本プラントメンテナンス協会. “2016 年度メンテナンス実態調査報告書概要”. 2017.4. p.31.
- 3) Iro Laina, Christian Rupprecht, Vasileios Belagiannis, Federico Tombari, Nassir Navab. “Deeper Depth Prediction with Fully Convolutional Residual Networks.” International Conference on 3D Vision. IEEE,2016,p.239-248.
- 4) Clement Godard, Oisín Mac Aodha, Michael Firman, Gabriel J. Brostow “Digging Into Self-Supervised Monocular Depth Estimation”.ICCV2019,2019
- 5) Raul Mur-Artal, J. M. M. Montiel, Juan D. Tardos. “ORB-SLAM2: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System”. IEEE Transactions on Robotics,2015
- 6) Jakob Engel, Thomas Schöps, Daniel Cremers

“LSD-SLAM:Large-Scale Direct Monocular SLAM”.ComputerVisionECCV2014, 2014,p.834-849.

- 7) Matia Pizzoli, Christian Forster, Davide Scaramuzza“REMODE: Probabilistic, Monocular Dense Reconstruction in Real Time”. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA),2014
- 8) 電子情報通信学会.“5 章基礎・共通技術 5-2 レーダの原理”. 電子情報通信学会「知識ベース」. 2011. p.10.

# セルロースナノファイバー複合材料の開発

## ーバクテリアセルロースを用いた摺動材料の開発ー

### Development of cellulose nanofiber reinforced composite materials

#### - Development of bacterial cellulose reinforced sliding material -

技術開発部 工業材料科 菊地時雄 高木智博 長谷川隆

セルロースナノファイバー (CNF) の1種であるバクテリアセルロース (BC) を、従来の化学処理や特殊微粉砕機を用いずに、解繊・微粉化するプロセスを開発した。また、この微粉砕 BC とポリスチレン (PS) を混練し分散性と耐熱性を確認した。このことにより、低コストで熱可塑性樹脂と混練可能な BC 微細フィラーを製造することが可能となり、摺動部材の開発が大きく前進した。

Key words: freeze-dry, bacterial cellulose(BC), corn starch, CNF

## 1. 緒言

セルロースナノファイバー (CNF) は、紙やパルプにはない特異的な性質を活かして、多種多様な用途への展開が期待されている。また、植物バイオマスから取り出した天然由来の繊維であり、低炭素社会の実現にも貢献できる素材である。この CNF の一種に、グルコースなどを原料に酢酸菌によって造られるバクテリアセルロース (BC) があり、一部食用 (ナタデココ) となっている。これは、ヘミセルロースやリグニンなどをほとんど含まない、純度の高い生分解性にすぐれたセルロースである。BC はマイクロフィブリルの微細な網目構造をとることを特徴とし、力学的特性にすぐれている<sup>1)</sup> ことから、生分解性を有する機能性素材として注目され、その効率のよい培養技術の開発<sup>2)</sup> 及び用途開発<sup>3)</sup> が進められている。

CNF は、直径が数 nm~数百 nm の繊維で、水分が 80~95wt% のゲル状物質である。これをゴムや熱可塑性樹脂に混練りすることはできないので、乾燥させて、混練り可能な粉体にする必要がある。しかし、これを直接乾燥させると強固な水素結合と3次元網目構造により、強固なシートとなり、微粉砕には特殊な粉砕機が必要となる。また、水素結合を弱めるために化学修飾をし、乾燥粉砕を行う方法もあるが、これらの方法はいずれもコストアップにつながり、県内中小企業に技術移転できるものではない。

そこで、本稿では、繊維の3次元の絡み合いを弱める粉末の分散材<sup>4), 5), 6)</sup> と水素結合の結合間距離を長くする凍結乾燥法<sup>7)</sup> を組み合わせ、BC ゲルを簡単に解繊粉砕する方法を開発したので報告する。

## 2. 実験

### 2. 1. BC ゲルの調製

市販の業務用ナタデココ (フジッコ (株)) を家庭用

ミキサーで粉砕し、水中に分散させた。ここにコーンスターチを加え攪拌混合した BC ゲルを2種類調製した。調整した BC ゲルは、ナタデココの乾燥重量に対して、コーンスターチを表1のとおり添加した。また、比較のため粉砕古紙とコーンスターチを混合したものも作製した。

表1 試料調整

試料名	セルロースの種類	セルロース1に対するコーンスターチの添加量
比較	粉砕古紙	1.5
A	BC(ナタデココ)	1
B	BC(ナタデココ)	0.5

### 2. 2. BC ゲルの凍結乾燥・解繊・微粉末化

調製した BC ゲルを、均一な多孔質体にするため、攪拌しながら冷凍庫で凍結させた<sup>7)</sup>。これを真空乾燥して、BC/コーンスターチの3D多孔質体を得た。これを家庭用フードプロセッサーで粉砕し、解繊・微細化 BC (以下、微粉末 BC と略す) を得た。

### 2. 3. 微粉末 BC と樹脂の混練

射出成形用汎用ポリスチレン (以下、GPPS と略す) (東洋スチレン (株)) に、フィラーをそれぞれ 5、10、15[wt%]混練し、コンパウンドを得た。

樹脂との混練は、レオ・ラボ (株) で行った。Xplore 社製の卓上型混練 MC15HT (図1) を使い、バレル温度 220[°C]、スクリュ回転数 50[rpm] で5分間混練した。この装置の特徴は、同方向2軸コニカルスクリュで混練中の樹脂がバレル中を循環し、フィラーのナノレベルの分散が可能なことである。

### 2. 4. 特性評価

フィラーによる機械的特性を確認するため、混練機から押し出したストランドで3点曲げ試験 (支持スパ

ン 32[mm]、試験速度 5.0[mm/min]) を行い比較した。  
 また、微粉末 BC の分散程度を確認するため、破断面の SEM 観察と偏光顕微鏡観察を行った。



図 1 使用した卓上混練機 (カタログより抜粋)

### 3. 結果及び考察

#### 3. 1. 混練結果



図 2 フレーク状微細 BC

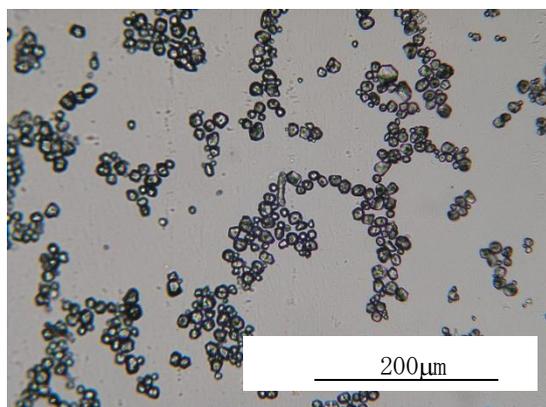


図 3 光学顕微鏡観察結果

図 2 は、調整して得られたフレーク状の微粉碎試料 B である。図 3 はそれを拡大した顕微鏡観察結果で、微細な BC フィブリルに澱粉粒がまとわりついて、クラスターを形成しているのがわかる。

調整したフィラー 3 種類 (表 1) について添加量を変えたときの混練時のトルクを表 2 に示した。添加量に対してトルクの大きな変化はなく、混練に十分耐えられることがわかった

表 2 混練時のトルク

試料名	フィラー [wt%]	トルク [N-m]
比較-1	5	8.3~9.5
比較-2	10	7.9~9.8
比較-3	15	8.3~9.7
A-1	5	7.5~8.5
A-2	10	7.7~8.9
A-3	15	7.9~9.2
B-1	5	7.7~8.7
B-2	10	8.3~9.4
B-3	15	7.8~9.1

次に、コーンスターチの少ない試料 B タイプの観察例を示した。理由は、コーンスターチが多すぎて、BC の分散がよく判別できなかったためである。

図 4 は、得られた試料 B-1、B-3 の破断面の SEM 観察結果である。角張った球状に見えるのがコーンスターチで、周囲には図 3 で観察された繊維形状は観察できなかった。破断面は GPPS のそれとは異なり、フレーク状になっている。これは、柔軟で微細なフィラーを強化材として用いた場合に特有の破断面<sup>7)、8)</sup>であり、樹脂中に微細分散しているものと思われる。偏光顕微鏡観察ではそれを裏付ける繊維状の物質が観察された (図 5)。

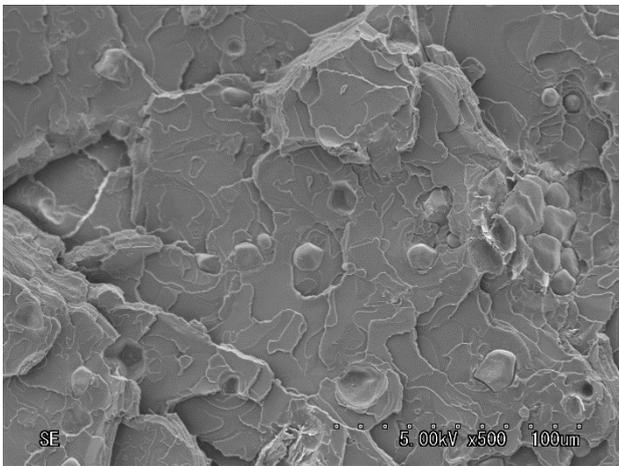
図 5 は、試料 B-1、B-3 の偏光顕微鏡 (暗視野) 観察結果である。この観察方法では、マトリックスの GPPS は非結晶性樹脂で等方性材料であるため、黒く観察されるが、BC やコーンスターチは白く光って観察される。粒子状に観察されるのがコーンスターチで、白雲の様な箇所が BC である。B-1、B-3 のどちらにも酸化による変色は見られず、フィラーはほぼ均一に分散しているのがわかる。

市販の CNF は直径が 3~100[nm]程度であり、特に 50[nm]以下をナノクリスタルと呼び区別している。セルロースの融点は 260~270[°C]であるが、CNF は比表面積が大きいので、酸化しやすく耐熱温度は低い。樹

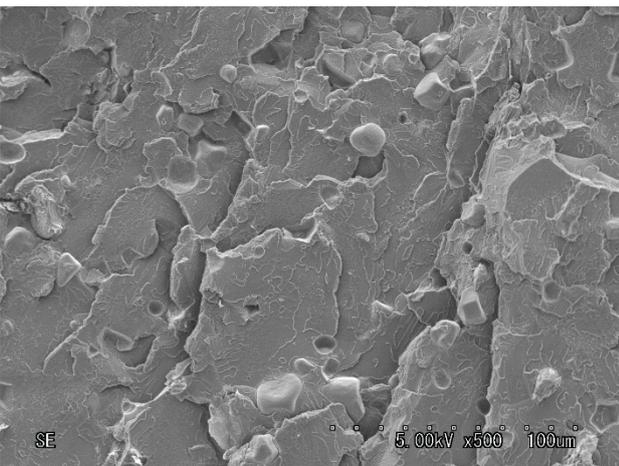
脂との混練り温度は 200[°C]以下に限られており、化学修飾が必要<sup>9)</sup>である。

BC の直径は 20~50[nm]であるが、実験ではナタデココを、家庭用ミキサーで粉砕しているため、その直径は数ミクロンと大きく、そのため比表面積が市販品 CNF より小さいため、化学修飾をせずに 220[°C]の混練り温度にも耐えうることができたものと考えられる。

繊維の 3次元の絡み合いを弱める粉末の分散材として、澱粉を使用した。理由は、入手しやすいことと低価格であること、また、生分解性であることの 3点である。これまでの研究<sup>4)、5) 6)</sup>から分散材の形状、添加量などにより絡み合いを弱める程度が異なることがわかっている。数多くある澱粉の中で、コーンスターチは平均粒径 15[μm]程度と小さく、表面性状は非常に細かく角張っているため、BC のマイクロフィブリルと絡みやすいものと考えた。また、吸湿性も小さいため、樹脂と複合させた際の形状安定性をも考慮した。



(a) 試料 B-1



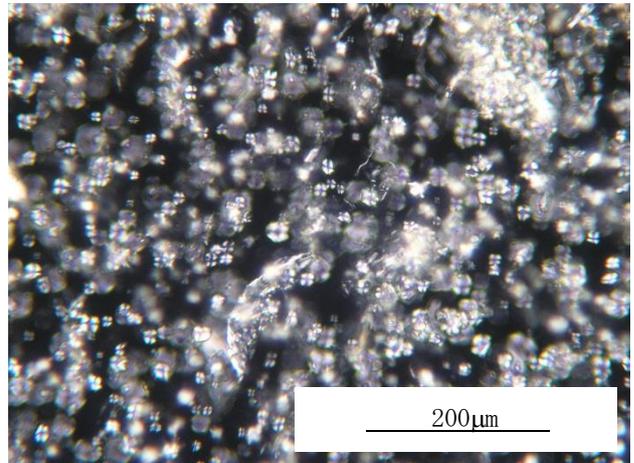
(b) 試料 B-3

図 4 GPPS に混練りした試料の SEM 観察結果

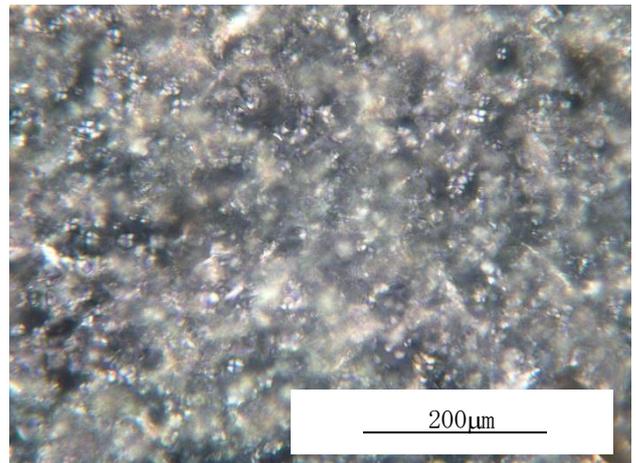
### 3. 2. 3点曲げ試験結果

3点曲げ試験結果を図 6, 図 7 に示した。「●」はカタ

ログ値である。これと比較して添加量の増加に従い、強度(図 6)、弾性率(図 7)はともに低下傾向にあった。今回の強度試験片は押し出し機から吐出したまま



(a) 試料 B-1



(b) 試料 B-3

図 5 GPPS に混練りした試料の偏向顕微鏡観察結果

のストランドをそのまま用いているためボイドが多く、これが強度低下の一因であると考えられる。粉砕古紙を用いた比較試料の強度、弾性率の低下が大きいのは、BC に比べて直径約 10~30[nm]、長さ 200[μm]と大きいため、異物と認識されたためと考えられる。試料 A と B の違いはコーンスターチを含んだ微粉砕 BC 中の BC の量である。この場合も毛玉のような BC が異物として認識されたためと考えられる。

CNF の特徴<sup>10)</sup>の 1 つに、引っ張り強度 3[GPa]、引っ張り弾性率 140[GPa]という優れた機械的特性があげられる。しかしこれは、直径 5~6[nm]の CNF の測定値であり、理想的な状態の場合である。また、強化繊維のパフォーマンスを十分に発揮するためには、その充填材の長さとの比 L/D は大きい方が有利であ

り、また、ランダム分散系よりは一方向強化の方が補強繊維の性能を十分に発揮する。しかしBCの場合、図8に示したように3次元に複雑に絡んだ高次構造をしているために、強度や弾性率の向上には寄与しにくいものと考えられる。

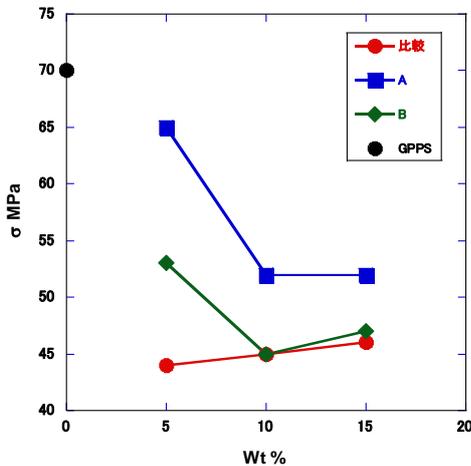


図6 曲げ破断応力と添加量

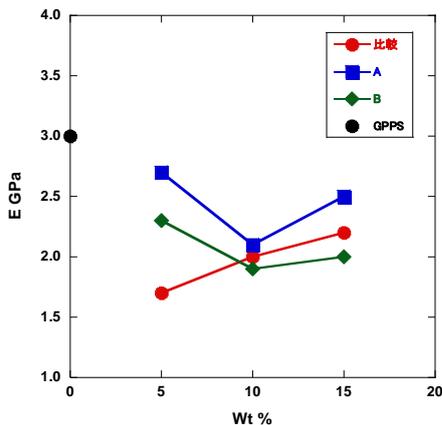


図7 曲げ弾性率と添加量

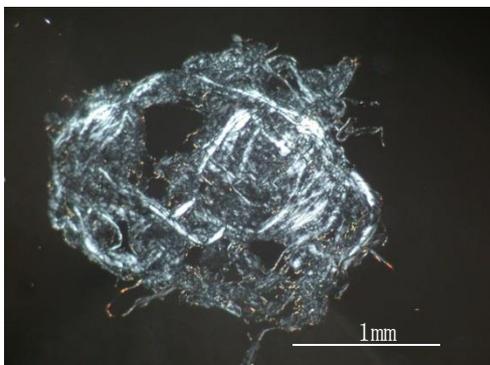


図8 BCの高次構造（偏光顕微鏡観察 暗視野）

しかしこの高次構造のために、摺動時のせん断応力による発生クラックのパスが複雑になるため、磨耗量の低下が考えられ<sup>11)</sup>、低磨耗量の摺動材開発には欠くことのできない材料と考えられる。

市販の微粉砕 CNF の中には、ボールミルで微粉砕する際に、数ミクロンの炭酸カルシウムやカオリン、タルクといったミネラルを重量比で 50~80[%]混合させたミネラル混合品があり、紙などの改質材として使用実績がある。今回開発したプロセスでは、粉体が 30、50[wt%]の BC/澱粉混合物である。BC にくらべ澱粉粒は大きいので、強度や磨耗特性などに悪影響を及ぼすことが考えられるため、今後は分散材の添加量を少なく抑える方法を検討する。

#### 4. 結言

開発した分散材と凍結乾燥法の組み合わせによる、BCの解繊・微粉砕プロセスにおいて、以下の結論を得た。

- ・樹脂の改質材として CNF の 1 種類の BC を、特殊な化学処理や粉砕機を用いずに微粉砕を得るプロセスを確立した。

- ・得られた微粉砕 BC は、GPPS との混練温度 220[°C]に耐え、樹脂の改質フィラーとして用いることができた。

BC は、醸造酢の製造工程で水分約 90[wt%]の含水ゲルとして排出されている。県内数社ある醸造所でも各社年間数百 kg のゲルを産業廃棄物として処理されている。また、県内で廃棄されている果実や加工残さを用いて BC を製造することも可能<sup>12)</sup>である。このような廃棄物から樹脂の改質材としての CNF を安価に製造できれば、産業廃棄物の減少、新たな雇用の創出および 6 次化産業に分野にも貢献できるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 生分解性プラスチック研究会編 生分解性プラスチックハンドブック、213 (1995)
- 2) 特開 2000-31702
- 3) 特許第 2617431
- 4) 菊地時雄、他、成形加工、P. 657, vol. 18, No. 9 (2006)
- 5) 菊地時雄、他、IWGC-4 予稿集、P. 116 (2006)
- 6) 菊地時雄、他、M&M2006 予稿集、P. 53 (2006)
- 7) 菊地時雄、他、JCOM-36 予稿集、P. 9 (2007)
- 8) 関口尊文、他、成形加工シンポジア' 18, P. 323 (2018)
- 9) 仙波健、他 成形加工シンポジア' 18, P. 319, (2018)
- 10) 矢野浩之、高分子、P. 525, 60 (2011)
- 11) 菊地時雄、他、P.55-58, 19ME-S4 (2008)

1 2) 草野作工株式会社ホームページ  
<http://www.kusanosk.co.jp/>、参照日：2020/2/20

# 天然藍を原料とした染料の製造方法

## Method for producing dye from natural indigo

福島技術支援センター 繊維・材料科 中島孝明 伊藤哲司

季節に依存せず入手可能な乾燥藍葉から色素を抽出する方法として、酵素分解及び塩基処理を試し、乾燥藍葉中の不純物の減量率と染料中のインジゴ濃度の測定を行った。セルラーゼ等の酵素処理では 30[%]以上の減量率を、水酸化ナトリウム水溶液による処理では 40[%]以上の減量率を達成することができた。ジメチルスルホキシドにインジゴを溶解させて分光光度計で測定したところ、インジゴ濃度は塩基処理をすることでスクモ以上になることが分かった。今後は、スクモと併用した使い方について藍建てを行い検証していく。

**Key words:** タデ藍、セルラーゼ、インジゴ、ジメチルスルホキシド、分光光度計

## 1. 緒言

近年、合成染料に比べて人体や環境への負荷が低いといった利点から、天然物由来の染色材から抽出した染料や染色された製品が注目されている。当所では、本藍染め製品の量産化に向けた課題解決に取り組んでおり、藍染めにおける微生物発酵条件の確立や染色工程の管理を行ってきた。

安定して藍染め製品を生産するためには、染料を十分に確保する必要がある。伝統的な藍染めに使用される染料は、刈り取り直後の生葉を原料とするため限られた時期にしか製造できず、100日以上発酵させて作られ、手間がかかるため高価であり、量産化の課題になっている。

藍の葉は乾燥して保存でき、乾燥葉を染料として使うこともできる。しかし、葉の収穫時期や染色量毎に染色性が異なり、茎や葉脈などの不純物が多く出て染色物が汚染されるため、そのまま染料として利用するには不向きである。そこで、通年入手が可能な藍の乾燥葉を原料とし、短時間で染料化するための技術開発に取り組んだ。

今年度は、乾燥葉中の不純物を減量する方法として、葉のセルロースを分解酵素によって除去する方法と、葉を塩基で煮沸し不純物を溶解する方法を検証した。

## 2. 実験

### 2. 1. 乾燥葉の減量法

#### 2. 1. 1. タデ藍の水分率

実験で使用した藍は、露地で栽培したタデ藍（福島県伊達郡産）を用いた。刈り取り直後の質量と乾燥後の質量を測定し、水分量を算出した。タデ藍は頂芽から 50[cm]程のところを刈り取り、室温（30[°C]程）で 3日間乾燥を行った。

#### 2. 1. 2. 酵素による減量処理

セルラーゼ分解酵素による減量処理は、洛東化工工

業株式会社製のエンチロンの中から表 1 の 3 種の酵素を使用した。

試料の作製方法を以下に示す。①乾燥葉 1.0[g]と蒸留水 50[mL]を 100mL 三角フラスコに加え、アルミ箔で蓋をして 250[°C]に設定したホットプレート上で加熱した。②沸騰後 5 分間煮沸したのち、机上で室温になるまで放冷した。③pH 緩衝剤（洛東化成工業株式会社 ブライト BAF CONC）で pH4 程度に調整後、各酵素を 1.0[g]添加した。④三角フラスコを恒温水槽振とう器に取り付け、水温 55[°C]、振動数 160[rpm]に設定し 6 時間酵素反応させた。⑤反応後は、ホットプレート上で 1 分間煮沸し、酵素の失活を行った。⑥三角フラスコ内からガラス棒で葉のみを取り出し、残渣物を含む水溶液を No. 5C のろ紙でろ過した。⑦ろ紙と、葉はそれぞれ秤量したシャーレに移し、105[°C]に設定した乾燥機で乾燥後、秤量した。

表 1 使用した酵素の概要

商品名	至適 pH	至適温度[°C]	摘要
CM40L	4.0~5.0	50~60	セルロース繊維用原料加工（改質）酵素
HPY	3.3~5.5	25~55	複合酵素剤
MIT	4.0~5.0	55~65	毛羽除去酵素

### 2. 1. 3. 塩基による減量処理

試料の作製方法を以下に示す。①乾燥葉 2.0[g]と表 2 の塩基水溶液を 300[mL]三角フラスコに加え、アルミ箔で蓋をして 250[°C]に設定したホットプレート上で加熱した。②沸騰開始後 5 分間煮沸した後、机上で室温になるまで放冷した。③塩酸 0.25[%]水溶液を加え、pH 試験紙で中和を確認した。④ろ紙 No. 5C でろ過を行い、残渣を 105[°C]の乾燥機で乾燥後、秤量した。

表2 塩基水溶液の概要

使用試薬	等級	濃度[%]	添加量[mL]
NaOH	富士フィルム和	2.5	50
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	光純薬(株)特級	5.0	100

### 2. 2. インジゴ濃度の測定

試料中のインジゴ濃度は、インジゴの溶媒であるジメチルスルホキシド（以下 DMSO）に試料を浸漬・攪拌させてインジゴの抽出を行い、得られた抽出液の吸光度から求めた。

はじめに、既知濃度のインジゴ溶液から検量線を以下の手順で作成した。インジゴ（富士フィルム和光純薬(株)特級）を 5.0[mg] 量り取り、DMSO（富士フィルム和光純薬(株)特級）100[mL] に溶解させた。調製したインジゴ溶液を 20mL メスフラスコに 2, 4, 6, 8[mL] 量り取ったのち DMSO を標線まで加え、標準溶液を作製した。調整した 5 つの濃度の溶液を 10mm 石英セルに入れ、分光光度計（島津製作所製 UV-2500CP）で吸光度を測定し、インジゴ濃度を算出する検量線を作成した。

次に、2. 1. 2. と 2. 1. 3. で作製した試料からインジゴ抽出液を作製し、インジゴ濃度の定量を行った。試料を乳鉢で 30 分以上粉砕し、粉体にした。試験管に粉体試料を量り取り、DMSO を 10[mL] 程加えよく攪拌した。3 分ほど静置し上澄みをビーカー等に移した。再び、DMSO を 10[mL] 程加えよく攪拌し静置、上澄みをビーカーに移す作業を複数回繰り返し、残渣から色素が滲出しにくくなるまで繰り返した。抽出後はビーカーの質量から溶媒の質量を算出した。抽出液は No. 5C のろ紙でろ過し、ろ液を分光光度計で測定を行った。

## 3. 結果

### 3. 1. 乾燥葉の減量法

#### 3. 1. 1. タデ藍の水分率

刈り取ったタデ藍の水分率を表 3 に示す。

表3 タデ藍の水分率

サンプル名	刈り取り後のタデ藍質量[g]	乾燥後の質量[g]	水分率[%]
A	48.3	9.70	79.9
B	15.3	2.24	85.4
C	22.2	5.10	77.0
D	23.5	5.97	74.6
E	29.1	4.73	83.7
F	7.60	1.64	78.4
G	6.71	1.36	79.7
平均			79.8

### 3. 1. 2. 酵素による減量処理

乾燥葉を酵素で減量処理をした結果を表 4 に示す。使用した酵素では、CM40L が最も減量率が高くなった。

表4 酵素処理による減量率

酵素名	pH 緩衝剤 [g]	残留葉量 [g]	微粉を含む総量 [g]	減量率 [%]
HPY	0.10	0.50	0.70	30.0
MIT	0.10	0.59	0.75	25.0
CM40L	0.10	0.45	0.68	32.0
なし	0.10	0.74	0.77	23.0

### 3. 1. 3. 塩基による減量率の測定

乾燥葉を塩基水溶液で減量処理した結果を表 5 に示す。また、図 1 に各減量率を示す。

表5 塩基処理による減量率

使用塩基	乾燥葉 [g]	濃度 [%]	塩基量 [mL]	残留葉量 [g]	減量率 [%]
NaOH	2.05	2.5	50	1.21	41.0
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2.00	5.0	100	1.31	34.5

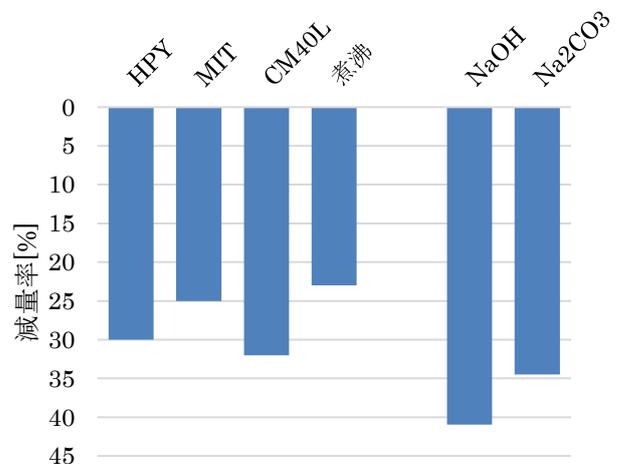


図1 減量率の一覧

### 3. 2. インジゴ濃度の測定

#### 3. 2. 1. 測定法

図 2 に 2. 2. の方法で作成した検量線を示す。相関係数の二乗値が限りなく 1 に近い値となり、相関性の高い検量線を得ることができた。

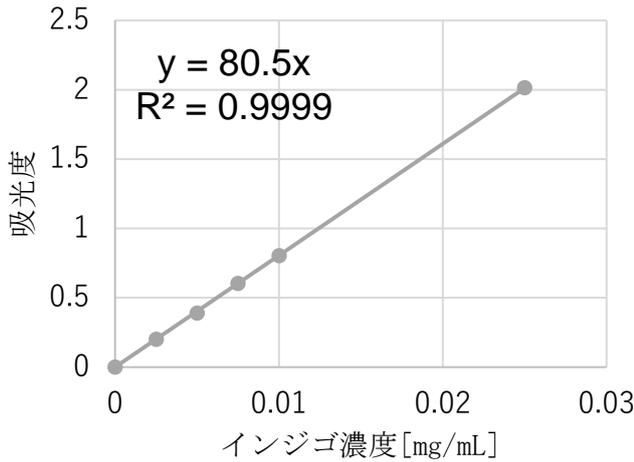


図2 DMSO中のインジゴの検量線(波長618[nm])

### 3. 2. 2. 酵素処理によるインジゴ濃度の変化

酵素による減量方法において、最も減量率が高いCM40Lで処理をした葉と、同処理により生じた残渣のインジゴ濃度を、図2の検量線を用いて求めた。結果を表6に示す。

表6 酵素処理後のインジゴ濃度

サンプル名	サンプル量 [mg]	DMSO量 [mL]	DMSO中のインジゴ濃度 [mg/mL]	インジゴ/乾燥葉 [%]
酵素葉	10.4	10.8	0.0158	1.64
酵素葉残渣	10.2	14.3	0.0062	0.86

### 3. 2. 3. 塩基処理によるインジゴ濃度の変化

塩基性水溶液による減量方法において、水酸化ナトリウム水溶液、炭酸ナトリウム水溶液で5分間煮沸した試料のインジゴ濃度を表7に示す。

対照試料として、乾燥葉、蒸留水で5分間煮沸した試料、乾燥葉を水で洗浄した試料、粉碎粒度の異なるスクモのインジゴ濃度を表8に示す。図3は表6と表7、表8のインジゴ濃度を示す。

表7 塩基処理後のインジゴ濃度

サンプル名	サンプル量 [mg]	DMSO量 [mL]	DMSO中のインジゴ濃度 [mg/mL]	インジゴ/乾燥葉 [%]
NaOH	13.2	20.2	0.0128	1.96
Na2CO3	15.5	17.1	0.0110	1.21

表8 対照試料のインジゴ濃度

サンプル名	サンプル量 [mg]	DMSO量 [mL]	DMSO中のインジゴ濃度 [mg/mL]	インジゴ/乾燥葉 [%]
乾燥葉	177.5	44.5	0.0289	0.72
水洗い	9.3	14.1	0.0062	0.93
煮沸	9.6	11.2	0.0096	1.12
スクモ	19.3	22.5	0.0130	1.16
スクモ微粉	10.3	14.4	0.0082	1.52

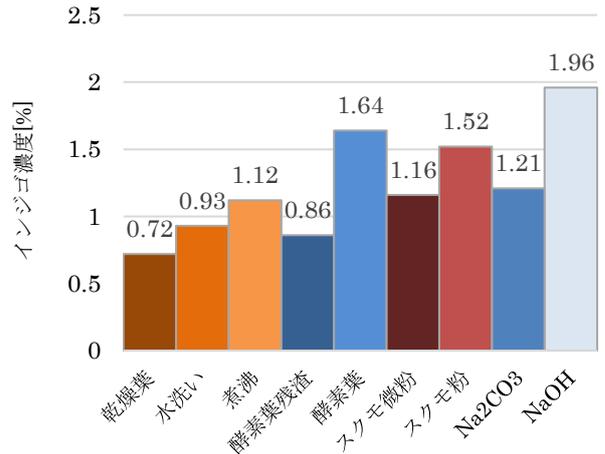


図3 各粉試料のインジゴ濃度

## 4. 考察

### 4. 1. 乾燥葉からの染料抽出法

実験に用いたタデ藍の水分量は、刈り取り直後に80[%]程あることが分かった。また、乾燥葉を蒸留水で煮沸するだけでも20[%]程の減量効果があることが確認できた。これは、乾燥葉に含まれるペクチンやヘミセルロースの一部が、煮沸により溶解したためと考えられる。CM40Lは、セルラーゼのほかにペクチナーゼ、ヘミセルラーゼ活性を持つ酵素剤であることから、セルロース、ペクチン、ヘミセルロースと幅広い成分を分解でき、煮沸のみや他の酵素より減量率が高くなったと考えられる。

塩基処理では、共に30[%]以上の減量率となり、水酸化ナトリウムを使用した場合は、減量率が4割を超えた。また、処理後の塩基水溶液は濃い緑色であり、底部には青い粉体が見られた。水酸化ナトリウムは、炭酸ナトリウムに比べ強い塩基であることから、塩基溶液に溶解しやすいペクチンやヘミセルロースをより溶解したと考えられる。したがって、処理した葉は形が残っているものの、指でほぐれるほどに軟化し、一部のインジゴは溶液中に沈殿したと考えられる。

#### 4. 2. インジゴ濃度の測定

乾燥葉中のインジゴ濃度が 0.72[%]であったのに対し、酵素処理をすることで 1.64[%]、水酸化ナトリウムによる処理では 1.96[%]と濃度を高めることができた。また、スクモのインジゴ濃度 1.52[%]と比較しても、同等以上の濃度であることが分かった。酵素処理及び塩基処理は、セルロースやヘミセルロースの分解作用によりインジゴ以外の成分を溶解または微細化し、インジゴ濃度の上昇に起因したと考えられる。また、細胞壁といった組織の破壊により、潜在化していたインジゴが溶媒に接しやすくなり抽出しやすくなったことも考えられる。

乾燥葉を酵素処理すると、大部分の葉は形が残ったが、一部は微粉化し残渣として沈殿した。沈殿した残渣のインジゴ濃度は、表 6 から低いことが分かる。CM40L には、セルロース繊維の非還元末端からセルビオース単位に加水分解するセルラーゼが含まれているため、インジゴを含まない葉の最表面などの末端部分から分解され、残渣として沈殿したと考えられる。

タデ藍を 100[kg]収穫すると、乾燥後は 20[kg]になり、乾燥葉のインジゴ含有量を 0.7[%]とすると、正味インジゴは 140[g]含まれていることになる。現在は 4 割程度の減量率が最も高い値となっているが、さらに不純物を溶解し、インジゴ濃度を上げていきたい。

### 5. 結言

#### 5. 1. 乾燥葉からの染料製造方法

- ・繊維加工用の酵素を用いて乾燥葉を減量すると、乾燥葉を煮沸する場合と比較し、1 割程減量率を上げることができた。
- ・乾燥葉を水酸化ナトリウム水溶液で処理することで、4 割程減量でき、処理前と比較してインジゴ濃度を 2 倍程にすることができた。
- ・塩基処理や酵素処理によりリグニン、ヘミセルロース、セルロースを総合的に分解、除去することで減量率を高めることができた。

#### 5. 2. 今後の展開

- ・微細化した染料を液中からどのように回収するかが収量向上に不可欠な課題であるため、セルロースナノファイバーの製造技術を取り入れるなどを行い、染料の簡易な回収、濃縮方法を試験する。
- ・乾燥葉から製造した染料の特性について、藍建てを行い染色性や堅牢度を試験する。

#### 謝辞

実験に用いたタデ藍を提供してくださったアイ・ネット福島の石塚代表様、福島県織物同業会の藤原事務局長様に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 谷田治. 酵素によるセルロース繊維の改質. 繊維と工業. 1994, Vol.50, No.2, p.75-79.
- 2) 川人美洋子, 安川涼子. 天然藍で染めた色と合成藍で染めた色の比較. 繊維と工業. 2007, Vol.63, No.2, p.48-53.

# CAEを用いたプリント基板上的のはんだクラックの解析

## Analysis of solder crack on printed circuit board using CAE

技術開発部 工業材料科 工藤弘行 矢内誠人  
 応募企業 日本ケミコン (株)

CAEを用いることで実験に比べて短時間で効率的に、はんだ接合部の耐久性評価や基板設計上の指針を得る手法を検討した。実製品のはんだ接合部の断面写真の代表寸法を測定した上で統計的な整理を行い、設計パラメータの水準を決定することで、整合性のあるCAEモデルを作成し、各種要因の影響を評価する手法を見出すことができた

**Key words:** はんだ接合部、耐久性評価、CAE、Coffin-Manson 則

### 1. 緒言

温度サイクルに晒される電子基板で最も典型的な不良現象は、熱膨張・熱収縮によって生じる熱応力をきっかけとした、はんだ接合部の熱疲労破壊である。はんだ形状は個体差が大きく、形状が寿命に与える影響も大きいため、はんだ形状の影響も含めて電子基板の耐久性を実験的に評価するには、多くのサンプルと長い時間を要し、非効率である。

そこで、本研究では、CAEを活用して、はんだクラックの発生に関する解析を行い、実験に比べ短時間で効率的に設計変更の指針を得ることを目的とした。具体的には、はんだ部のCAE解析で課題となるCADモデリング、要素分割、解析条件設定、結果評価手法について検討した。また、当所が過去に実施した電子デバイスの信頼性評価の研究<sup>1)</sup>の成果を活用し、Coffin-Manson 則による寿命予測を試みた。

### 2. 実験

#### 2. 1. はんだ部の断面写真計測

はんだ形状の影響を調べるための基本情報として、画像処理ソフト WinR00F2015 を使用して、提案企業が撮影した16サンプルのはんだ断面写真から、はんだ形状や配置に関する代表寸法を計測した。図1に測定した代表寸法の模式図を示す。

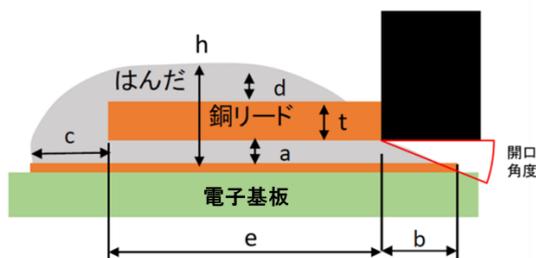


図1 はんだ形状の代表寸法模式図

#### 2. 2. CAE解析モデル作成

有限要素解析で高精度の計算を行うためには十分細かい要素分割をするのが理想であるが、計算時間が長くなる。そこで、本研究では破断に関わる部分の要素のみ統一的な条件で細かく分割し、それ以外は粗く分割する方針とした。この前提として、はんだ形状を単純形状でモデリングすることとした。

図2に標準形状モデルを示す。図中、橙色の部分が、はんだである。このモデルでは、円柱形状を基本に、端部にフィレット形成した後に、基板や銅板などと重複する部分を削除し、残った部分をはんだとした。

図3に疑似断面モデルを示す。このモデルは断面観察で得られた寸法により忠実にモデル作成することを意図したもので、観察面を奥行き方向に押出した構造とした。

図4に標準形状モデルの要素分割図を、図5に疑似断面モデルの要素分割拡大図を示す。今回ののはんだ部では、銅リードの下で破断することが分かっており、この部分を最低でも2分割するため、要素サイズを20[ $\mu\text{m}$ ]に設定した。

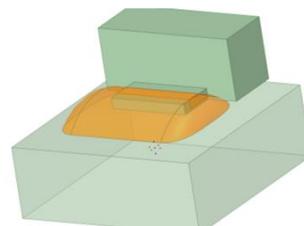


図2 標準形状モデル

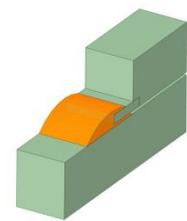


図3 疑似断面モデル

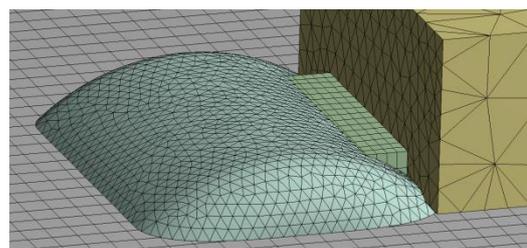


図4 標準形状モデルの要素分割図

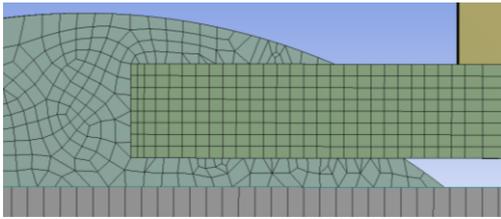


図5 疑似断面モデルの要素分割拡大図

### 2. 3. CAE解析条件設定

はんだ部に生じる熱応力は、その周辺の実装部品や電子基板の熱膨張をきっかけとするため、精度の高い計算を行うには周辺の構造も含めた計算が必要であるが、計算コストが高い。

そこで、本研究ではマルチスケールCAE手法を用いた。この手法は、はじめにマクロスケールCAEで大まかな計算を行い、その結果を詳細なモデリングを行ったミクロスケールCAEに受け渡して計算するものである。図6はその概念図を示したものであるが、本研究で使用するCAEソフトANSYS Mechanicalでは、図示するように、2つの解析を2つの表として表現し、各行を線でつなぐだけで容易にデータの共有や結果の転送が可能である。

本研究では、マクロスケール解析で低温側 30[°C]、高温側 130[°C]の温度サイクルの計算を行い、ミクロスケール解析は 30[°C]から 130[°C]への昇温過程の計算を行った。本報告ではミクロスケール解析の単一はんだモデルの結果のみ記載する。

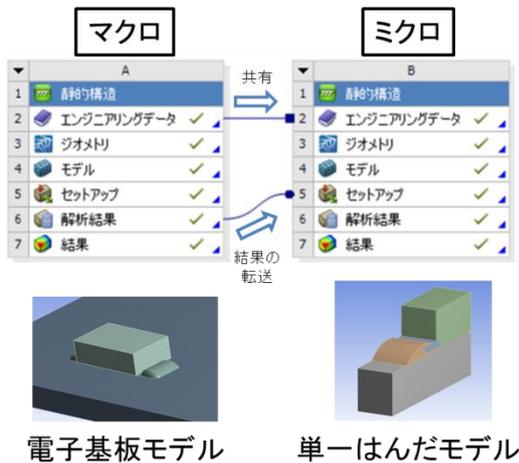


図6 マルチスケール解析の概念図

## 3. 結果及び考察

### 3. 1. 断面写真測定結果

断面写真測定の代表的な結果として、図7、図8にサンプル番号「No. 10」、「No. 12」の測定結果画面を示す。このうち、「No. 12」は、ポイドが存在する上、研磨による影響か、はんだ形状が大きく乱れており、異

常値として除外すべきと思われる。

異常値の判断の参考とするため、計測した16サンプルの代表寸法の測定値の平均値、標準偏差 $\sigma$ 、変動率(標準偏差/平均値)を求めた。平均値 $\pm 2\sigma$ の範囲外にあるデータを異常値として除外した後に平均値、標準偏差を再計算した。計測結果を表1に示す。

CAEでは要因の影響を検証する場合に、ある程度、変化幅が大きいほど明確な差が得られやすい。一方、実形状のばらつき具合を反映した現実的な評価という観点も重要である。本研究では、両者のバランスをとり、変化幅を $2\sigma$ とし、平均値 $-2\sigma$ 、平均値、平均値 $+2\sigma$ を3水準として、要因の影響度を調査する際の基準として選定した。

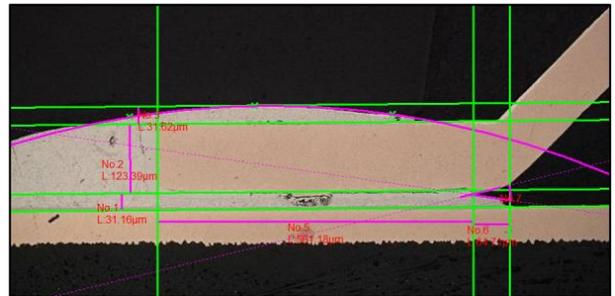


図7 サンプル「No. 10」の測定結果

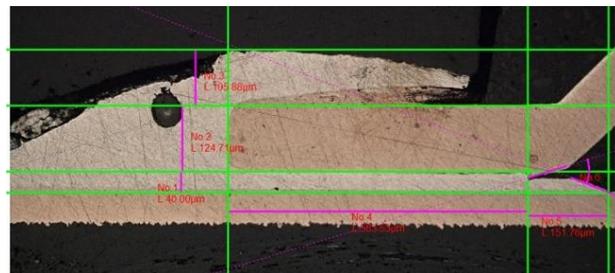


図8 サンプル「No. 12」の測定結果

表1 はんだ代表寸法測定結果

長さ測定箇所	水準2	標準偏差 $\sigma$	変動率	水準1	水準3
	平均値			平均 $-2\sigma$	平均 $+2\sigma$
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
n)全高さ	184.4	18.6	10.1%	147.3	221.5
a)リード下	32.7	4.0	12.3%	24.7	40.8
b)リード板厚	121.6	2.6	2.2%	116.4	126.8
d)リード上部	38.4	5.1	13.4%	28.2	48.7
e)リード長さ	567.0	8.1	1.4%	550.7	583.2
b)切欠き部長さ	105.2	24.1	22.9%	57.0	153.4
c)リード左側長(予測値)	521.0	18.7	3.6%	483.6	558.3
R1)曲率1	1.101	117	10.6%	867	1336
角度測定箇所	平均値	標準偏差 $\sigma$	変動率	平均 $-2\sigma$	平均 $+2\sigma$
	度	度		度	度
開口部	29.9	3.9	13.2%	22.0	37.7

### 3. 2. CAE解析結果

図9に標準形状モデルの塑性ひずみ分布結果を示す。外周部角でひずみ最大となったが、本製品については、すでに破断位置が明確であることを踏まえ、実破断部を評価対象とした。3次元CAE解析では特定の断面を規定し2次元分布とした方が比較評価しやすいため、断面観察との照合のしやすさを考え、図10に示すよ

うにリードの側面近傍を仮想的に切断し、評価断面とした。この図から、ひずみ最大値は約 5200[ $\mu \epsilon$ ] (0.0052) と読み取ることができる。

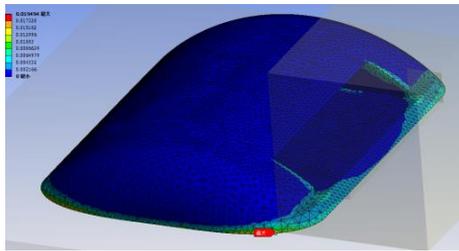


図9 塑性ひずみ分布図

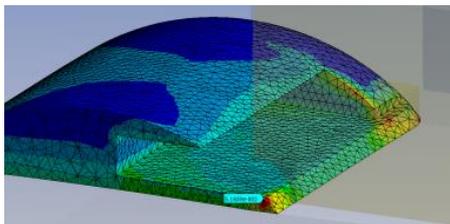


図10 評価断面の仮想切断図

次に、代表寸法の影響の調査例として、疑似断面モデルを用いて、図1中のa寸法（リード下のはんだ厚み）を、選定した3水準である 24.7[ $\mu \text{m}$ ]、32.7[ $\mu \text{m}$ ]、40.8[ $\mu \text{m}$ ]と変化させた場合の解析例を示す。図11は、水準2にあたるa寸法32.7[ $\mu \text{m}$ ]の場合の塑性ひずみ分布である。開口部や角部など複数の部位で高いひずみが発生した。

本研究では、寿命則として Coffin-Manson 則を用いるが、有限要素解析に応用する場合は、要素単位で評価するのが適切である。そこで、要素単位で最大となる部位を探索した。

図12はひずみ最大となった開口部の拡大図であるが、要素の4点の平均値でひずみを評価した。他の2水準でも同様に同じ位置が最大であった。

3水準のCAE結果から、最大点のひずみを算出し、Coffin-Manson 則により寿命予測を行った結果を表2に示した。本研究では、2 $\sigma$ 区間を基準とした水準を定めたことから、約95%のはんだ部の寿命は予想された寿命の範囲に存在すると判断できる。

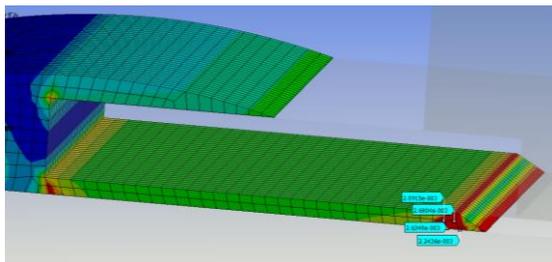


図11 水準2の場合の塑性ひずみ分布図

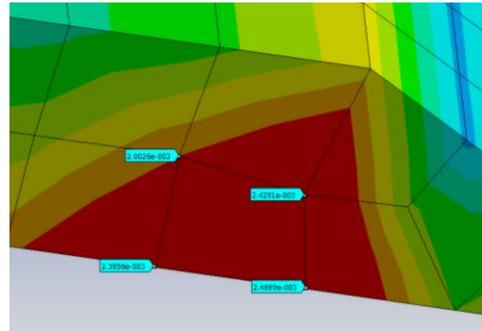


図12 開口部のひずみ分布拡大図

表2 a寸法の影響度の検証

	a寸法 ( $\mu \text{m}$ )	最大ひずみ	寿命予測 サイクル数
水準1	24.7	0.00241	5831
水準2	32.7	0.00233	6099
水準3	40.8	0.00212	6841

#### 4. 結言

本研究では、CAE を用いることで実験に比べて短時間ではんだ接合部の耐久性評価や基板設計上の指針を得ることを目的に、断面観察、CAE 解析を行い、以下の結果が得られた。

- ① 多数のはんだ部断面写真から、はんだ寸法及び位置などの特徴寸法を測定し、統計的な扱いをすることで特徴寸法に関して、3水準の設計値を求めた。
- ② ミクロスケールモデルとして、単一はんだモデルのCAE解析を行い、断面観察と同一視野の評価断面を用いることにより、実際の破断状況と同一ポイントのひずみで負荷レベルを定量評価することが可能となった。
- ③ 3水準の設計値を用いた解析から、Coffin-Manson 則による寿命予測を行い、特徴寸法が寿命に及ぼす影響を定量的に評価できることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 矢内誠人, 鈴木雅千, 工藤弘行. CAE による電子デバイスの信頼性評価手法の確立. 平成27年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, (2016), p. 55-58.

# 整形外科手術用器具の強度評価

## Evaluation of strength of orthopedic surgery instruments

技術開発部 工業材料科 西村将志 工藤弘行 鈴木雅千  
 応募企業 株式会社マイステック

応募企業が開発した整形外科で使用する医療用器具（脊椎手術用）は、従来製品から大きく構造を変更したため、強度設計に関する情報が不足しているのが課題である。そこで、本事業では応募企業が開発した製品の挙動評価試験及び強度評価を行った。その結果、圧縮、曲げ、ねじりの各変形様式に対する製品の挙動及び溶接部での破断リスクを評価することができた。

## 1. 緒言

応募企業が開発した製品は、外閉鎖筋腱を停止部の骨を付着させたまま大転子より切断する器械である。図1のとおり製品は人骨に押し込み外閉鎖筋腱の採取を行う先端部（SUS31）と、配管部（SUS316）、把持部の部材で構成されており、配管部の端部と先端部が溶接により一体化されている。なお、先端部は骨切りを行うためにギザギザに加工されている。

同製品は従来製品から大きく構造を変更したため、強度設計に関する情報が不足しており、溶接部が破断するトラブルが顕在化している。設計改善の必要性も出ているが、破断の原因が使用者の使い方に問題があるのか、それとも製品の不良なのか明確に判断できないことが課題となっている。

そこで、本事業では基本形状（パイプ形状、U字穴形状）と製品形状についてそれぞれ解析した。

基本形状の解析では、CAE解析及び荷重試験により器具全体がどのように変形するかを捉える評価手法を検討した。

製品形状の解析では、溶接部に着目し、溶接部の断面マクロ観察を行い、溶接部モデルを作成することにより溶接部への負荷や破断のリスクを定量的に評価する手法を検討した。



図1 製品形状

## 2. 実験・CAE解析

### 2.1. CAE解析手法（基本形状解析）

基本形状解析では、ひずみゲージを貼付する位置や方向を事前検討することを目的とした。軸や板などの単純形状については、特定の変形様式に対するひずみゲージの貼付手法が知られているが、本製品の実使用時には複数の変形様式が重なった複雑な変形が生じると見込まれる。そのため、過去の知見を参考にしつつ、複数の変形様式を区別して測定できることを目指した。

図2に基本形状である「U字穴形状」と「パイプ形状」の代表寸法を、図3に解析モデルを示す。パイプ形状は製品の基本断面と同様に外径18[mm]、内径15[mm]、長さ200[mm]とした。U字穴形状は製品の溶接部を一体化したとみなした形状であり、パイプ形状モデルから全長30[mm]、平行部26[mm]のU字穴部を除去して作成した。荷重条件は、実使用で想定される「圧縮」、「曲げ」、「ねじり」の3条件とした。荷重試験との整合性を取るため、荷重50[N]に統一した。ねじり、曲げについてはそれぞれアーム長60、160[mm]を想定し、3,000、8,000[N・mm]のモーメントを与えた。

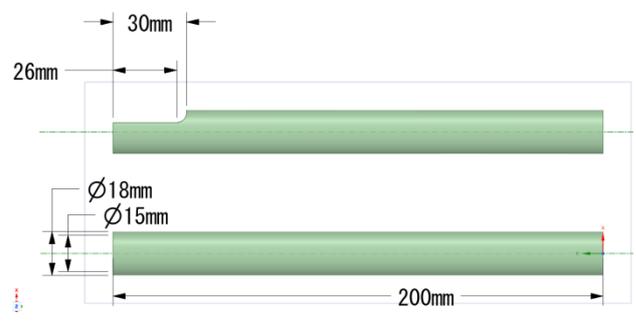


図2 CAE解析モデル寸法図  
 (上) U字穴形状 (下) パイプ形状

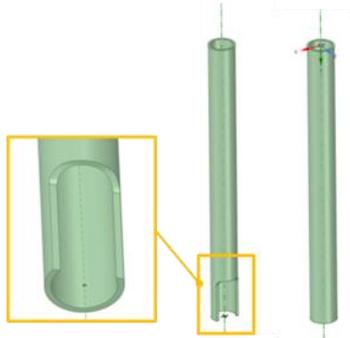


図3 基本形状解析モデル  
(左) U字穴形状 (右) パイプ形状

## 2. 2. 荷重試験 (パイプ形状)

パイプ形状の試験は、器具全体の变形様式及びCAE解析結果と比較する目的で行った。

荷重試験では、先端部を人骨に押し込み使用することを想定し、先端部を樹脂製治具で固定し把持部に荷重を加えることとした。荷重条件は、CAE解析との整合性を取るため、「圧縮」、「曲げ」、「ねじり」の3条件とし、図4のとおりロードセルで50[N]になるよう約10秒間荷重を加え、除荷した。試験のばらつきも考慮し、荷重の負荷・除荷は3回繰り返した。

各荷重条件における荷重値と変位量の関係を求めるため、図5に示すようにパイプの表裏に2個ずつ計4個のひずみゲージを貼り付けることとした。なお、ひずみゲージ貼付位置及び方向については後述の3.1.CAE解析結果(基本形状解析)により得られた結果を参考に決定した。なお、ひずみゲージの貼付方向が軸に対して45°傾いているため、圧縮及び曲げ試験の結果について、軸方向の値を求めるために三平方の定理を用いて計算すべきであるが、変形挙動の評価が主目的であるため簡略化のために実測値のままとした。

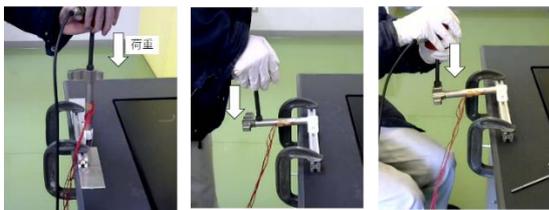


図4 試験方法  
(左) 圧縮 (中) 曲げ (右) ねじり

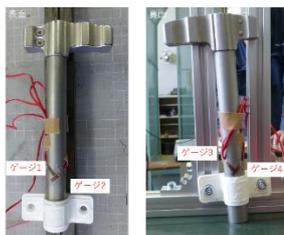


図5 ひずみゲージ貼付位置 (パイプ形状)

## 2. 3. 溶接部の断面マクロ観察

製品は、配管部の端部に先端部が覆いかぶさるように溶接される構造を持つ。溶接部の状態を確認し、CAE解析のためのモデル作成に反映する目的で溶接部の断面マクロ観察を行った。

マクロ観察用試験片の採取位置を図6に示す。溶接部①を中心に幅20[mm]程度に切断を行い、樹脂包埋、研磨を行った。腐食液には10%シュウ酸水溶液を用い、3[V]、30秒の条件で電解エッチングを行った。観察は、オリンパス株式会社製倒立型金属顕微鏡(GX-71)で25倍、明視野で実施した。



図6 マクロ観察試験片採取位置

## 2. 4. CAE解析手法 (製品形状解析)

製品形状解析は溶接部での破断のリスクを定量的に評価する目的で行った。図7に製品形状解析モデルを示す。図8に先端構造の拡大図を示す。後述の3.3.溶接部の断面マクロ観察結果から配管部と先端部の間に中空部分があることを確認したため、中空部分の代表寸法を読み取り、高さ500[μm]、幅5[mm]として中空部をモデリングした。図9に中空部斜視図、図10に中空部断面図を示す。図中、先端部品を透明表示としており、内部に存在する橙色の部分が中空部である。破断に与える中空部分寸法の影響を調べるため、中空部端部と製品表面の残厚に着目した。図11に示すように、残厚0.3[mm]、残厚0.8[mm]の他、中空部なしの3種類のモデルを作成した。先端側内径部の隅肉溶接部は図12に示すように、断面を一辺0.3[mm]の直角二等辺三角形と仮定しモデル作成した。荷重条件は、最も代表的な「ねじり」変形を想定し、3,000[N・mm]のモーメントを与えた。



図7 製品形状解析モデル

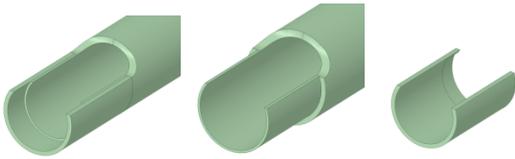


図8 先端構造拡大図  
(左) 組立図 (中) 配管形状部 (右) 先端部品

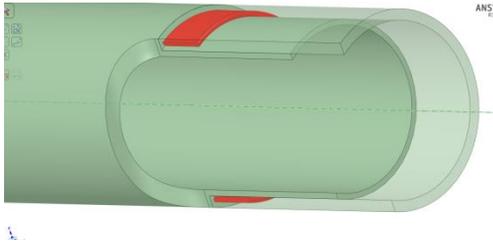


図9 中空部斜視図

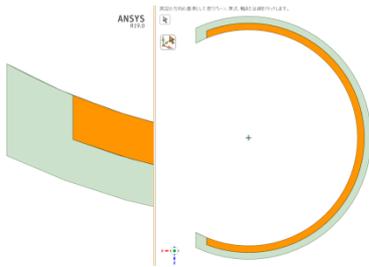


図10 中空部断面図

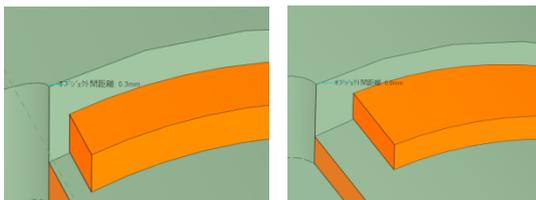


図11 残厚部拡大図  
(左: 残厚0.3mm、右: 残厚0.8mm)

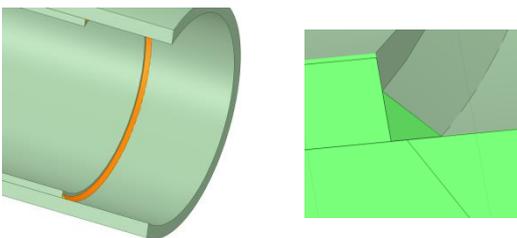


図12 先端側溶接部  
(左) モデル図 (右) 断面図

## 2. 5. 荷重試験 (製品形状)

製品形状での荷重試験は、変形様式の特定に加えて溶接部での破断のリスクを定量的に知る目的で実施した。荷重条件は「圧縮」、「曲げ」、「ねじり」の3条件とし、図13のとおりひずみゲージ貼付位置は後述の3.1. CAE解析結果 (基本形状解析) により得られた結果を参考にゲージ1からゲージ4についてはR部より十分離れた位置とした。また、R部にゲージ5、ゲージ6を追加した。

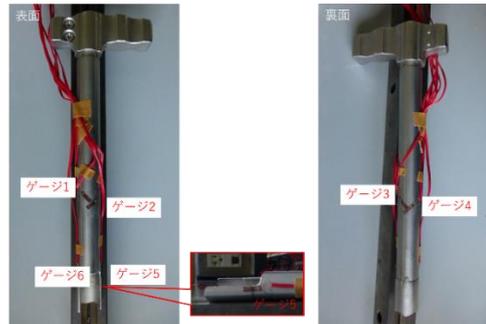


図13 ひずみゲージ貼付位置 (製品形状)

## 3. 結果及び考察

### 3. 1. CAE解析結果 (基本形状解析)

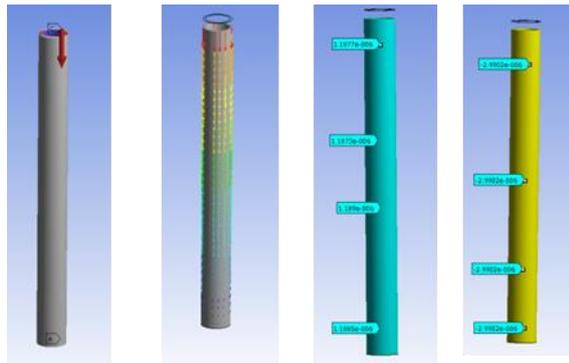
#### 3. 1. 1. パイプ形状

図14は、圧縮、曲げ、ねじりの3種類の変形様式に対して、境界条件図、変位ベクトル図、最大 (引張) 主ひずみ分布図、最小 (圧縮) 主ひずみ分布図を左から順番に、一覧できるように並べたものである。また、変位最大値と主ひずみピーク値、ピーク位置を表1にまとめた。

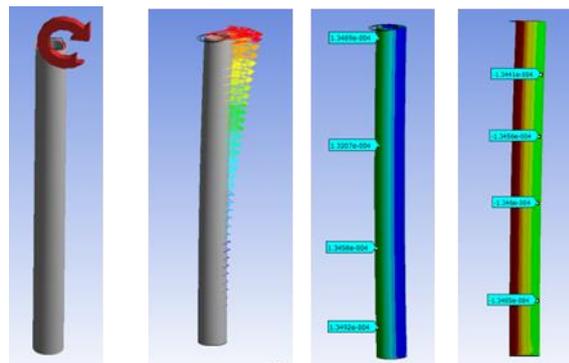
図14の主ひずみ分布図から、圧縮、ねじりによる変形ではパイプの全外径面で同一のひずみが生じるのに対し、曲げ変形では曲げ荷重を受ける表面と裏面で主ひずみの絶対値が最大となり、側面ではひずみがゼロに近いことが確認できる。

また、表1のピーク値とピーク位置から、ねじりは最大・最小主ひずみのピーク値が逆符号で絶対値が同じこと、曲げは表面と裏面のピーク値が逆符号で絶対値が同じことが確認できる。

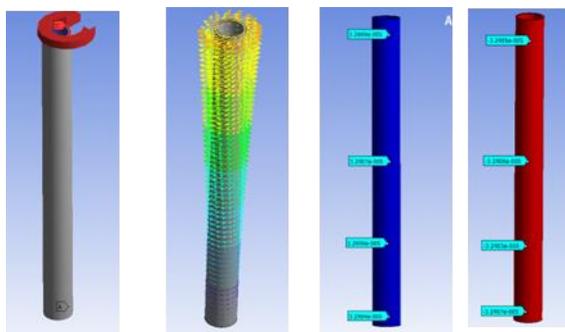
以上より、曲げ荷重の表面と裏面の対になる位置にひずみゲージを貼付すべきである。これを踏まえ、図15に主ひずみベクトル図をパイプの表面と裏面を対にして図示した。複数の変形様式を区別して測定するために、ひずみゲージの貼付位置を図16のように提案した。表2に提案手法で測定されるひずみを符号で示した。表中には絶対値が等しくなる関係を持つ項に矢印を記した。この手法であれば、4ゲージ測定値の符号の組み合わせから圧縮、曲げ、ねじりの特定や、4ゲージ測定値同士の演算により特定の変形様式の変形を抽出することが可能と考えられる。



(a) 圧縮



(b) 曲げ



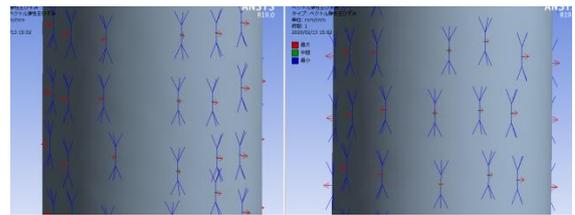
(c) ねじり

図14 パイプ形状 CAE 解析結果  
(左から順に、境界条件図、変位ベクトル図、最大主ひずみ分布図、最小主ひずみ分布図)

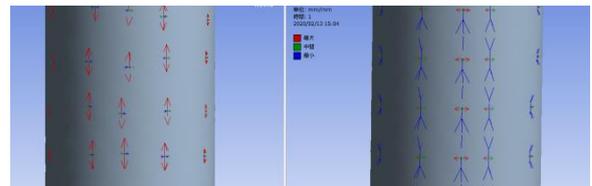
表1 配管形状 CAE 解析のまとめ

解析モデル	変位 最大値 mm	最大(引張)主ひずみ		最小(圧縮)主ひずみ	
		ピーク値 με	ピーク位置	ピーク値 με	ピーク位置
圧縮	0.00066	1.2	全外径面	-3.0	全外径面
曲げ	0.325	135	表面	-135	裏面
ねじり	0.016	33	全外径面	-33	全外径面

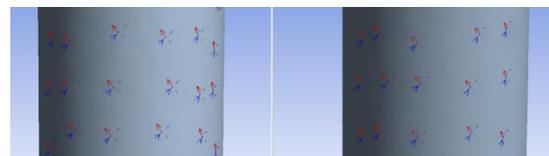
表面側 裏面側



(a) 圧縮



(b) 曲げ



(c) ねじり

図15 主ひずみベクトル図

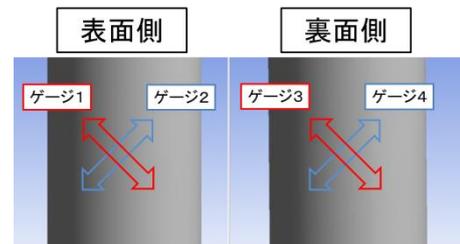


図16 提案するひずみゲージ貼付手法

表2 提案手法で測定されるひずみ一覧表

変形様式	表面		裏面	
	ゲージ1	ゲージ2	ゲージ3	ゲージ4
圧縮	-	↔	-	↔
曲げ	+	↔	+	↔
ねじり	+	↔	-	↔

### 3. 1. 2. U字穴形状

圧縮、曲げ、ねじりの3種類の変形様式に対する最大(引張)主ひずみ分布図、最小(圧縮)主ひずみ分布図を図17に示す。また、主ひずみのピーク値、ピーク位置を表3にまとめた。圧縮、曲げ、ねじり、いずれの変形様式においても主ひずみはR部でピーク値となることが確認できた。また、曲げ、ねじりについては、ピーク値が逆符号となることが分かった。以上から、U字穴形状を持つ実製品に対するひずみゲージ測定は、R部近傍に左右に対になる位置

にすべきと判断した。

次に、ゲージ貼付方向を検討するため、ねじりの場合の主ひずみベクトル図を図18に示す。これによると主ひずみピーク値を示すR部では、軸方向とほぼ合致する方向が主体的であり、一方向のみの測定が妥当である。

図19にU字穴形状とパイプ形状の最大主ひずみ分布図を示す。U字穴部から十分離れた位置では、両者のひずみ値はほぼ等しく、図18の主ひずみベクトル図も合わせて考えるとほぼ純粋なねじり変形が生じていると考えられる。従って、R部の測定と同時に十分離れた位置で、パイプ形状と同等のひずみ測定を行えば、変形様式の特定と破断リスクを両立した評価ができると見込まれる。ここで、R部と十分離れた配管面のひずみの倍率は、図19の場合、 $231[\mu\epsilon]/33[\mu\epsilon]=7$ 倍となるが、この倍率は、U字形状と変形様式の組み合わせによる変形のしやすさを表す指標とみなせるため、強度評価をする上で重要な指標となる。

表3 U字穴形状のまとめ

解析モデル	最大(引張)主ひずみ		最小(圧縮)主ひずみ	
	ピーク値	ピーク位置	ピーク値	ピーク位置
	$\mu\epsilon$		$\mu\epsilon$	
圧縮	3.8	R部	-12	R部
曲げ	214	R部	-214	R部
ねじり	231	R部	-231	R部

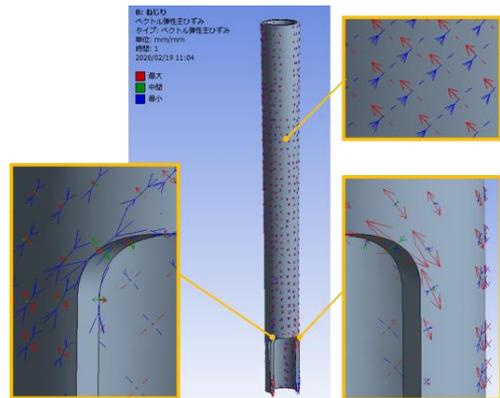
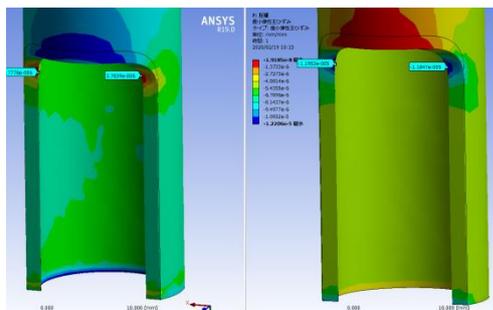
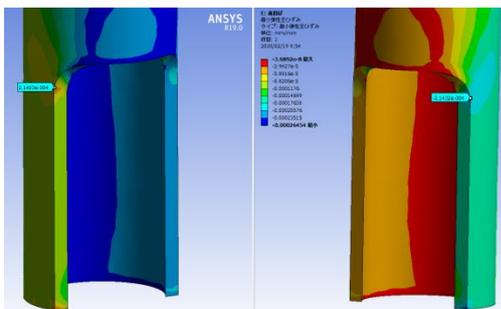


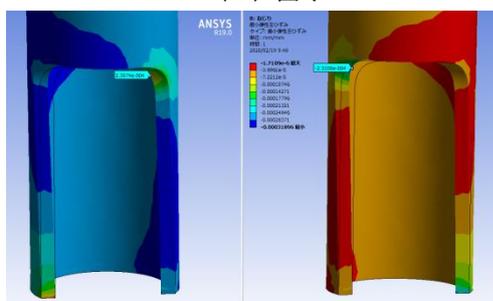
図18 主ひずみベクトル図  
(左) 全体図 (右) 拡大図



(a) 圧縮



(b) 曲げ



(c) ねじり

図17 U字穴形状 CAE 解析結果  
(左) 最大主ひずみ分布 (右) 最小主ひずみ分布

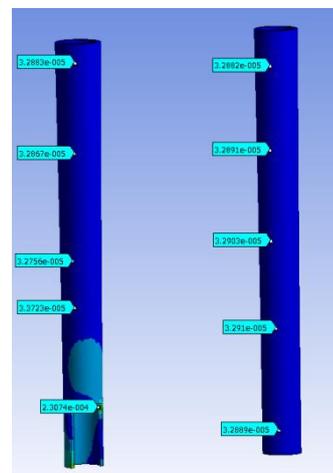


図19 最大主ひずみ分布図  
(左) U字穴形状 (右) パイプ形状

### 3. 2. 荷重試験結果 (パイプ形状)

圧縮、曲げ、ねじりの3種類の変形様式に対して得られた結果を図20に、荷重ピーク値と各ゲージ位置におけるひずみピーク値を表4にまとめた。また、荷重とひずみに比例関係が成り立つと試験が安定して行えたと判断できるため、試験結果の妥当性の確認として荷重-ひずみ線図を図21に示す。

圧縮試験では、各ゲージにおけるひずみ量の絶対値は等しくなったが、変形の方法がCAE解析(表2)で得られた結果と一部異なった。荷重-ひずみ線図も

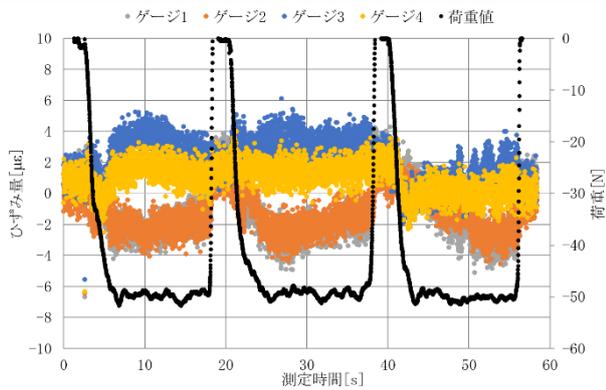
比例関係は成り立っておらず、安定した試験とはならなかった。

曲げ試験では図 2 1 (b) に示す通り荷重とひずみの比例関係が確認され、変形の方法も CAE 解析(表 2) で得られた結果と一致したが、ゲージ 2 の絶対値のみ他よりも値が小さかった。

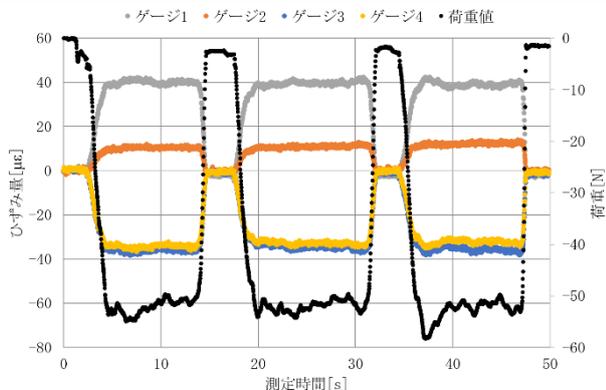
ねじり試験においても図 2 1 (c) に示すとおり荷重とひずみの比例関係が確認されたが、ゲージ 2 およびゲージ 3 で変形の方法が CAE 解析(表 2) で得られた結果とは一致しなかった。変形の方法が曲げ試験の結果と一致していることから、純粋なねじり変形とはならず、曲げの要素も加わった複合的な

変形になっているものと考えられる。

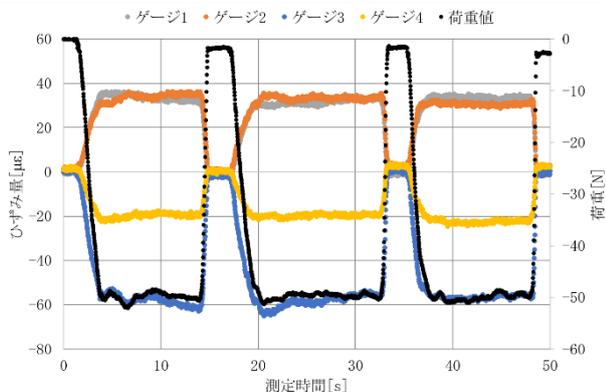
3 種類の変形様式において、CAE 解析結果とは一部異なる結果となった原因は固定及び負荷方法と考えられる。圧縮においては、圧縮方向にのみ荷重を加えることが非常に困難であり、曲げの要素も加わり純粋な圧縮変形とはならなかった。固定も荷重試験においては樹脂製治具を用いているため、負荷の際に樹脂製治具も若干の変形をしており、完全固定として計算されている CAE 解析と異なる結果になったものと考えられる。各変形様式での荷重とひずみの関係性をより正確に求めるためには、固定治具及び負荷方式の再検討が必要である。



(a) 圧縮

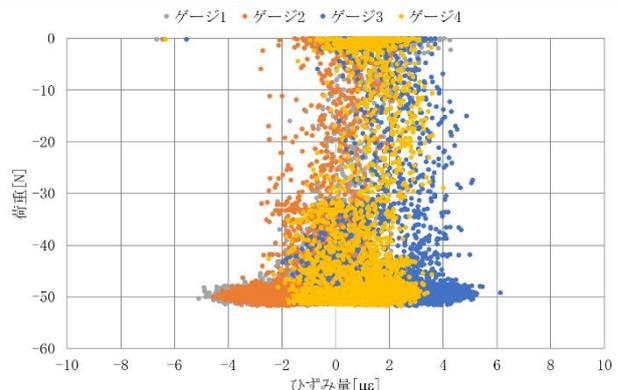


(b) 曲げ

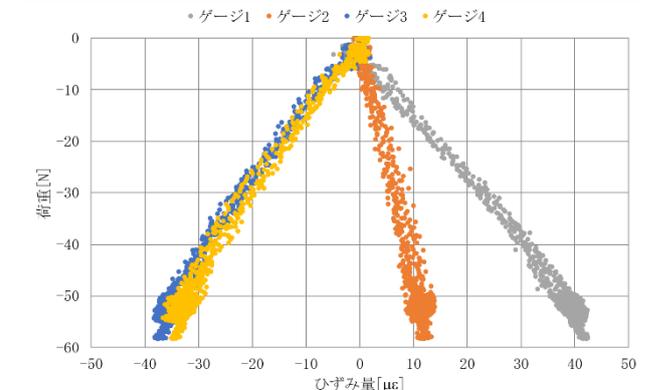


(c) ねじり

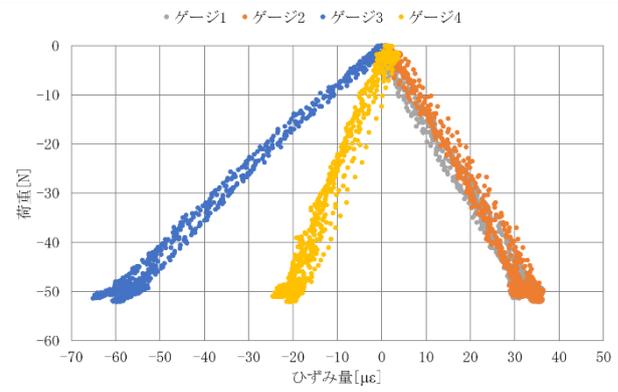
図 20 荷重試験結果 (パイプ形状)



(a) 圧縮



(b) 曲げ



(c) ねじり

図 21 荷重-ひずみ線図

表4 荷重試験結果（パイプ形状）のまとめ

変形様式	荷重[N] (ピーク値)	ひずみ量[με](ピーク値)			
		ゲージ1	ゲージ2	ゲージ3	ゲージ4
圧縮	-51.7	-6.7	-6.4	6.1	-6.3
曲げ	-58.3	42	14	-38	-37
ねじり	-52.1	36	36	-65	-25

3. 3. 溶接部の断面マクロ観察結果

図22に断面マクロ観察結果を示す。配管部の端部と先端部の間に高さ458[μm]、幅5.3[mm]の中空部分があることがわかった。設計図面に加えて、この結果をCAE解析におけるモデル作成に反映させることにより実製品に近い結果を得ることが期待される。また、溶接線から溶接を複数回繰り返していることも確認された。



図22 マクロ観察結果

3. 4. CAE解析結果（製品形状解析）

はじめに、中空部なしの応力分布を図23に示す。ここでは最大主応力（引張）分布図を示した。R部と先端に大きな応力が生じているが、これは基本形状解析と同様の傾向である。先端部の応力が高いのはCAE解析における拘束条件の影響であり、実製品では骨を削る部分にあたるので、破断リスク評価の対象外とする。

図24に先端側すみ肉溶接部の応力分布図を示す。先端側すみ肉溶接部の応力は十分小さく破断のリスクは低い。

以降は最も破断リスクが大きいと見られるR部に着目する。

図25は、R部とそれに隣接する先端部品の溶接部の2か所に着目した最大主応力分布図を示したもので、残厚0.3[mm]、残厚0.8[mm]、中空部なしの3種類の場合を示した。それぞれの最大値を、表5に示した。いずれの場合でもR部は同様の分布を示し、最大値はほぼ同じであった。一方、溶接部は中空部がある場合は、中空部なしの場合に比べて高く、残厚が小さい方が高い傾向が見られた。

残厚0.3[mm]の場合の溶接部最大値35.5[MPa]は、

R部の最大値47.8[MPa]より小さいが、溶接部は強度が低いため、R部と同等の破断リスクがあると考えられる。これら2か所に着目したCAE解析を踏まえた設計検討が望まれる。

本事業では、R部や中空部の形状寸法について、設計図面や一部の断面写真を参考にしたが、今後は、より詳細な観察や測定が必要である。

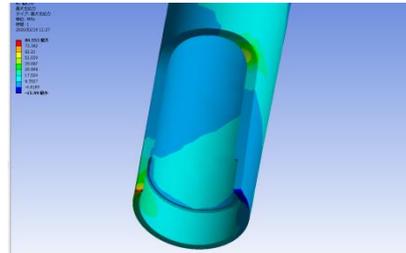


図23 最大主応力分布図（中空部なし）

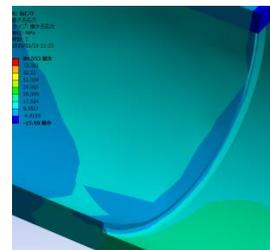
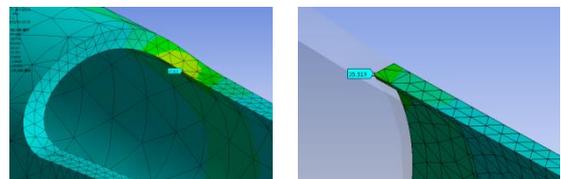
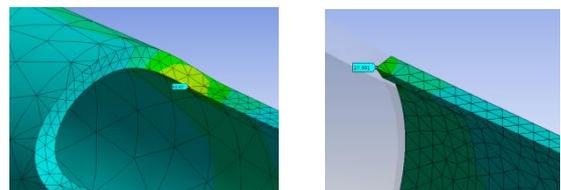


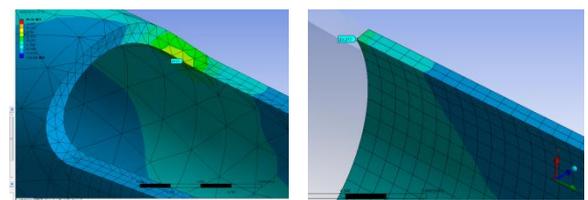
図24 最大主応力分布図  
(中空部なし、先端溶接部拡大図)



(A) 残厚0.3mm



(B) 残厚0.8mm



(C) 中空部なし

図25 最大主応力の比較  
(左) R部 (右) 先端部品側溶接部

表 5 製品形状モデル最大応力の比較

モデル	応力(MPa)	
	R部 最大値	溶接部 最大値
残厚0.3mm	47.8	35.5
残厚0.8mm	48.4	28.0
中空部なし	48.2	23.3

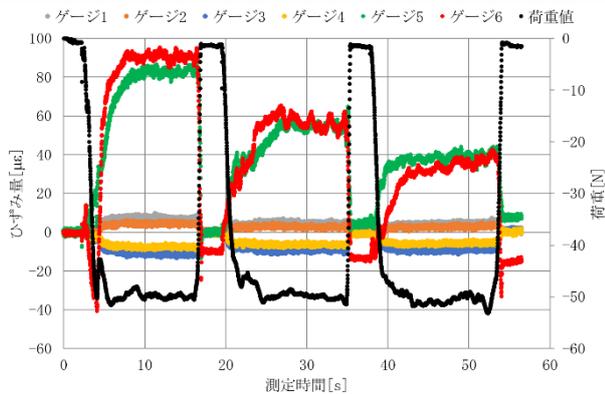
### 3. 5. 荷重試験結果 (製品形状)

圧縮、曲げ、ねじりの3種類の変形様式に対して得られた結果を図26、荷重ピーク値と各ゲージ位置におけるひずみピーク値を表6に、R部と配管面のひずみの倍率を表7にまとめた。また、試験結果

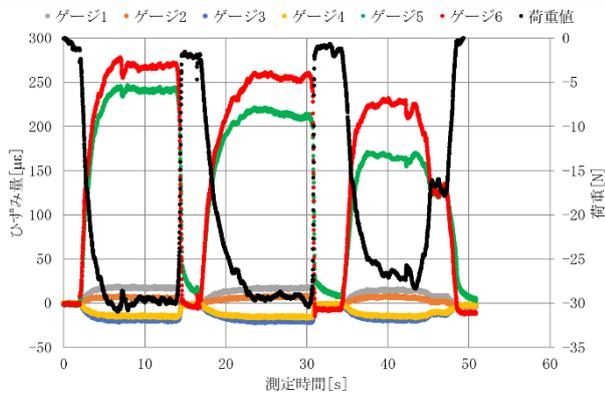
の妥当性の確認として図27に荷重-ひずみ線図を示す。なお、先端形状がU字穴形状となったことで固定が不安定になり、曲げ試験、ねじり試験において負荷した際に製品が外れてしまう事例が発生したことから、曲げ試験、ねじり試験の荷重値は30[N]狙いとした。

図27から各試験において荷重とひずみの関係はおおむね比例関係にあり、試験の妥当性が確認できた。先端部がギザギザ形状に加工されていることで負荷の際に安定しないことがあり、ゲージ5、ゲージ6について一部比例関係が成り立たなかった。

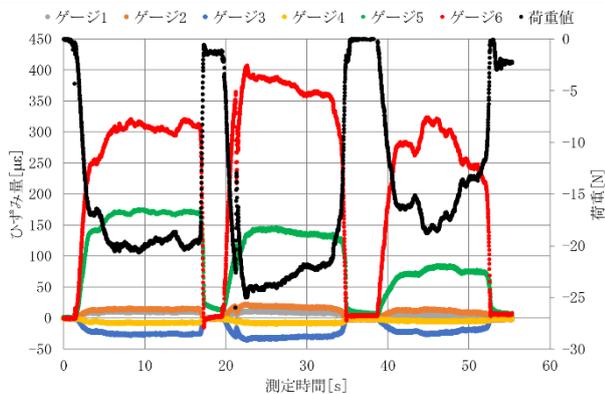
圧縮、曲げ、ねじりの各試験において、いずれも



(a) 圧縮

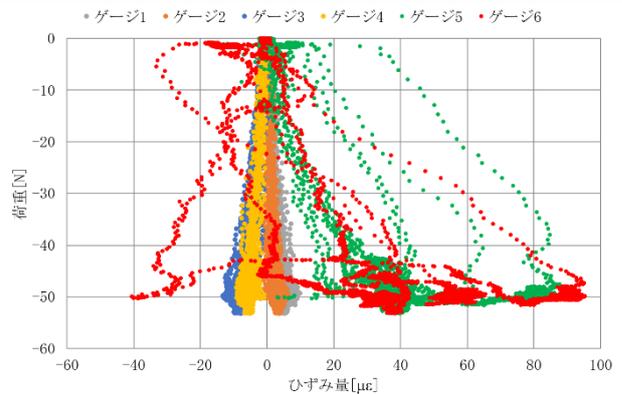


(b) 曲げ

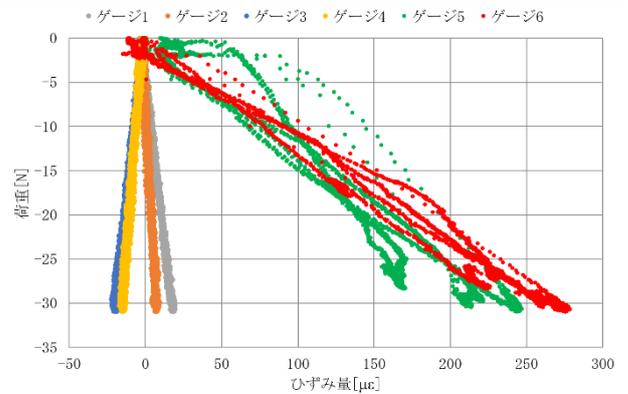


(c) ねじり

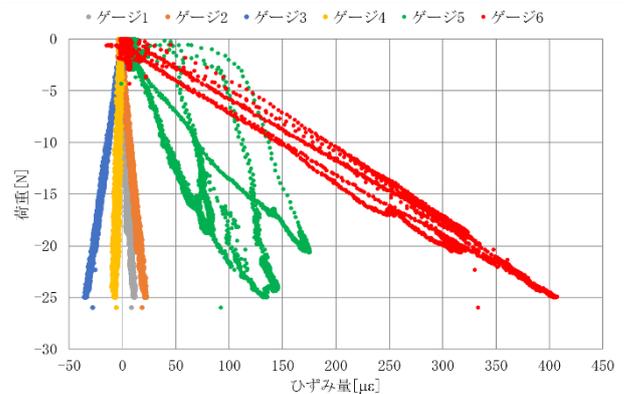
図 26 荷重試験結果 (製品形状)



(a) 圧縮



(b) 曲げ



(c) ねじり

図 27 荷重-ひずみ線図

ひずみ量はR部で最大となり、配管面との倍率は10倍以上となった。この倍率は、U字形状と変形様式の組み合わせによる変形のしやすさを表す指標とみなせるため、ねじり、曲げ、圧縮の順にR部での破断リスクが高いことが分かった。また、表6の結果は、CAE解析結果で得られた倍率7倍(図19)よりも大きな結果となった。この原因はCAE解析における拘束条件の設定の際にR部の内側が面拘束となっているためと考えられる。実製品においてはR部の内側も自由に変形するため、荷重試験の方がより確からしい結果が得られたものとする。本実験により得られた結果を今後CAE解析の拘束条件に反映させることで、より実製品に近い結果となることが期待される。

待される。CAE解析においては拘束条件やモデル作成に必要なデータを実験データや詳細な観察結果から反映させることでより実製品に近い結果を得ることが期待される。

表6 荷重試験結果(製品形状)のまとめ

変形様式	荷重[N] (ピーク値)	ひずみ量[ $\mu\text{e}$ ](ピーク値)					
		ゲージ1	ゲージ2	ゲージ3	ゲージ4	ゲージ5	ゲージ6
圧縮	-53.2	9.8	6.3	-13	-9.3	88	95
曲げ	-30.9	19	9.3	-22	-17	247	279
ねじり	-26.0	12	23	-36	-10	176	407

表7 R部と配管面のひずみの倍率

変形様式	ひずみ量[ $\mu\text{e}$ ]		ひずみの倍率 R部/配管面
	配管面(表)	R部	
圧縮	9.8	95	9.7
曲げ	19	279	14.3
ねじり	23	407	17.9

#### 4. 結言

本事業では応募企業が開発した製品の挙動及び強度を評価するため、基本形状についてCAE解析及び荷重試験を行った。また、製品形状については溶接部に着目し、溶接部のマクロ観察、CAE解析及び荷重試験により破断リスクの評価を行った。これらの結果から以下の知見が得られた。

- ① CAE解析及びひずみゲージを用いた荷重試験結果から、圧縮、曲げ、ねじりの各変形様式に対して製品がどのような変形挙動を示すかが分かった。また、荷重とひずみ量の関係が分かった。
- ② 溶接部の断面観察結果から、中空部分があることが分かった。また、CAE解析結果から中空部分がない場合よりも中空部分がある場合の方が破断リスクが高く、残厚が小さい方が破断リスクが高いことが分かった。
- ③ CAE解析及び荷重試験結果を比較することで、各試験方法の課題が分かった。荷重試験においては、固定治具及び負荷方法の再検討によりさらに正確な荷重とひずみの関係を求めることが期

# 半凝固鑄鍛成型の工程設計のための CAE 活用法

## Application of CAE for process design of semi-solid casting and forging

技術開発部 工業材料科 穴澤大樹 工藤弘行 矢内誠人  
応募企業 日本オートマチックマシン株式会社

応募企業は半凝固鑄鍛成型技術の開発を行っているが、参考にできる情報が少なく、工程設計が困難であるという課題がある。そこで今回、CAE 解析による工程設計の効率化を目指して、材料試験と CAE 解析結果を照合し、半凝固鑄鍛成型の CAE 解析を行った。その結果、鍛造 CAE 解析により組織や欠陥の予測が可能であることが分かった。

### 1. 緒言

金属加工一般に、温度や金型や加工条件の工程パラメータについて様々な組み合わせを試し、最適な組み合わせを見つける作業を工程設計と呼ぶ。提案企業が取り組む半凝固鑄鍛成型は、半熔融・半凝固加工の一種で、(1)金型に及ぼす熱影響が小さい、(2)熱間割れが発生しにくい、(3)加工に要するエネルギーが少ない等の利点<sup>1)</sup>を有している。しかし、実用段階にあるものは稀で、参考にできる情報が少なく、工程設計が困難である。そのため、工程設計には CAE の有効活用が求められるが、鑄造 CAE と鍛造 CAE のどちらを使用すべきなのか、どこまで適用できるのか見がなく、検証を行う必要がある。

そこで本研究では、材料試験を行い半凝固鑄鍛成型の特徴を調べるとともに、その結果を CAE 解析にフィードバックすることで、半凝固鑄鍛成型の CAE 解析の活用法を検討する。また、CAE 解析により得られた情報から試験・観察位置を決めるという CAE 解析から実験へのフィードバックも行い、CAE 解析と実験を統合的に行うこととする。

### 2. 実験

#### 2. 1. 実験概要

半凝固鑄鍛成型の工程設計が難しいのは、凝固や熱間の塑性変形など、複雑な変化を生じるためである。図 1 に本研究で対象とする A6061 合金 (Al-Mg-Si) の Al-Mg<sub>2</sub>Si 擬 2 元系状態図を示す<sup>2)</sup>。A6061 合金の一般的な組成は、Al-Mg<sub>2</sub>Si の擬 2 元系状態図上に存在するため、2 元系合金として取り扱うことができる。このとき、図 1 中の液相線より上 (A) で成型する工程が鑄造、液相線と固相線の間 (B) で加工する工程が半凝固鑄鍛成型、固相線より下 (C) で加工する工程が熱間鍛造となる。半凝固加工は、固液共存状態から固相へと移り変わる途中で加工を行うため、加工を行わない鑄造や固相域での加工となる鍛造に比べ、複雑に変化することは状態図からも明らかである。

この複雑な変化を調べるにあたり、本研究では、X線CT観察、金属組織観察、硬さ試験を行う。

X線CT観察では、ボイド等の内部欠陥の確認と欠肉等の成型不良の確認を行う。この試験は非破壊で三次元的に観察できるため、他の試験を行う際の参考情報にもなる。例えば、内部欠陥を発見した際には、組織観察で、その断面を選択的に観察することができる。

金属組織観察は結晶粒径や介在物の有無、微小なボイドを観察する目的で行う。上述の通り、半凝固鑄鍛成型では金属組織がダイナミックに変化するため、組織観察を行いその特徴を確認する。

硬さ試験はサンプル各部位の機械的特性を調べるために行う。一般に温度履歴や加工度が違う場所は機械的特性にも差が生じる。半凝固加工では、表面と内部の温度勾配が大きく、一つのサンプル中でも場所によって温度履歴や加工度が異なっている。各部位の硬さを調べることで温度と加工条件に関する情報が得られると期待できる。

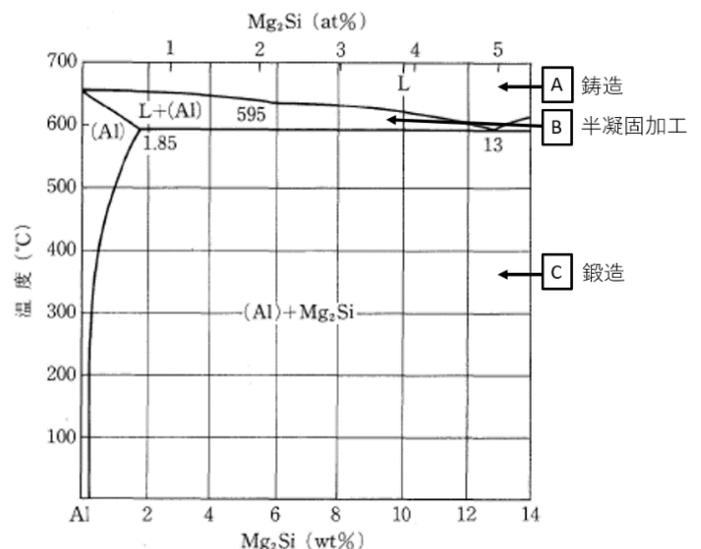


図 1 Al-Mg<sub>2</sub>Si の擬 2 元系状態図<sup>2)</sup>

CAE 解析では鍛造解析用のソフトを用いて、製品形状、フローライン、加工履歴、温度履歴など基本

情報を算出する他、想定される加工欠陥である「ボイド」「欠肉」「自己接触」等の評価手法を検討した。

さらに、半凝固鑄鍛成型後の組織・硬さと、その後の熱処理後の組織・硬さを比較し、半凝固鑄鍛成型の熱処理に与える影響についても確認を行う。

## 2. 2. 試験項目

本研究では、素材を半凝固鑄鍛成型し、熱処理をするという一連の流れの各工程において、図2に示す試験を行う。素材と半凝固鑄鍛成型後のサンプルではCT観察、硬さ試験、組織観察を行い、熱処理後のサンプルには硬さ試験と組織観察を行った。

また、加工速度や加工温度の異なる2種類のサンプル(10-4, 11-4)を作製する(サンプル番号は提案企業指定)。サンプル名は表1に示したようにサンプル番号+工程とした。

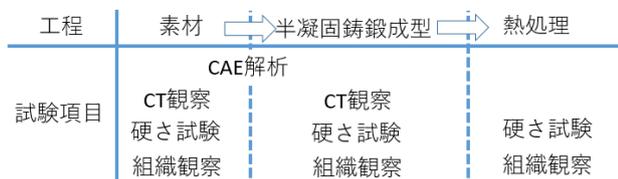


図2 各工程における試験内容

表1 サンプル名

工程 サンプル番号	素材	半凝固鑄鍛成型	熱処理
10-4	素材	10-4鑄鍛後	10-4熱処理後
11-4		11-4鑄鍛後	11-4熱処理後

## 2. 3. サンプル作製

### 2. 3. 1. 半凝固鑄鍛成型

素材として A6061 材を使用。切削加工によりある程度、最終形状に近づけた状態で半凝固鑄鍛成型を行った。

### 2. 3. 2. 熱処理

熱処理は T6 処理とした。T6 処理は溶体化処理により合金元素を母材中に固溶させた後、時効処理によって微細析出させ、機械的特性を向上させる熱処理である。条件は、一般的な T6 処理の条件<sup>3)</sup>として、溶体化処理を 530[°C]で 2 時間加熱後急冷(衝風冷却)、時効処理を 160[°C]で 18 時間行った(図3参照)。

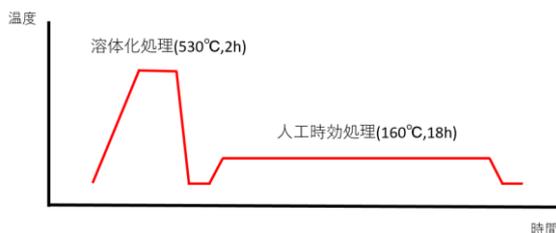


図3 T6 処理概要

## 2. 4. 試験

### 2. 4. 1. CAE 解析

本研究では、鍛造・熱処理解析が可能な simufact.forming を用いて解析を行った。このソフトは、有限要素解析と有限体積解析という2つの解析手法を併せ持つことや、解析上の専門用語ではなく加工現場の言葉を用いて解析の設定や評価ができることが特徴である。

図4はその基本画面である。基本画面は、ツリーウインド、部品庫ウインド、結果選択ウインド、メインウインド、グラフウインド等からなる。部品庫ウインドは工程設計の候補条件を一時的に保管する場所であり、条件をツリーウインドにドラッグ&ドロップするだけで容易に条件を変更できるなど、CAEソフトに不慣れな操作者でも、扱いやすい仕様となっている。

モデルは素材、ストリッパ、パンチ、ダイの4部品で構成される。ダイを固定し、ストリッパとパンチにそれぞれ異なるプレスモーションを与えた。プレスモーションは、時間とストロークを表形式で設定する「テーブルプレス」を用いた。これは、提案企業が使用するプレス機が出力する時間-ストロークグラフのデータをそのまま利用し、解析のリアリティを高めるためである。図5に「テーブルプレス」設定画面を示す。

本研究では、実験データとの連携のため、フローライン機能、ポストパーティクル機能を活用した。これらは、鍛造・熱処理解析に特化した Simufact.forming ならではの機能である。

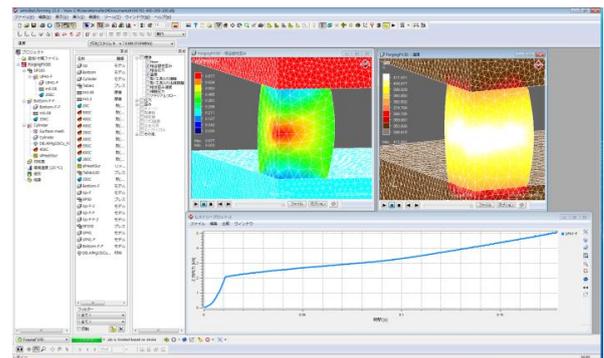


図4 基本画面

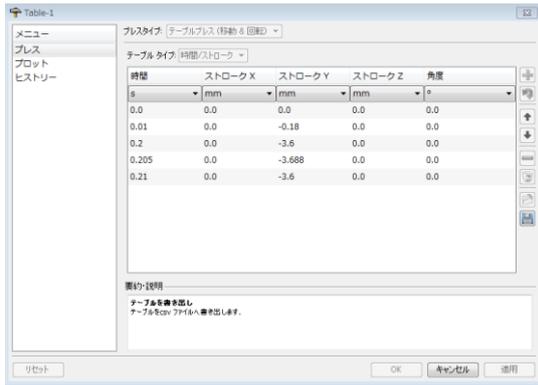


図5 プレスモーション設定画面

### 2. 4. 2. X線CTによる観察

非破壊構造解析装置 (TOSCANER-FTC32251phd) にて観察を行った。観察時の条件は管電圧 200[kV]、管電流 60[μA]、画素ピッチ約 70[μm]であり、今回の観察ではおおよそ 200[μm]以上の欠陥が観察対象となる。

### 2. 4. 3. 組織観察

各サンプルを樹脂包埋、研磨後エッチングを行った。エッチング液は 0.5[%]ふっ酸水溶液を用い 450 秒間液中に浸漬した。通常より長時間浸漬した理由は、半凝固プレス加工後のサンプルの粒界が現出しなかったため、結晶方位の違いによるコントラストを際立たせて結晶粒の観察を行うためである。その後、高倍率金属顕微鏡 (GX-71) にて観察を行った。観察はすべて明視野で行った。

### 2. 4. 4. 硬さ試験

マイクロビッカース硬度計 (HMV-2ADW) にて硬度測定を行った。荷重は 100[gf]で測定を行った。マイクロビッカース硬さ試験は微小な領域の硬さを測定することが可能であり、製品中の加工度や温度履歴の異なる様々な場所の測定ができる。

## 3. 結果及び考察

### 3. 1. CAE 解析結果

図6にフローライン解析の例を示す。図6左は塑性歪みのカラーマップ、図6右は温度のカラーマップとなっており、図中の黄色い線がフローラインである。フローライン解析は加工前の形状を基準に製品中の縦方向、横方向に等間隔の升目を配置し、加工後、加工中に、升目がどのように移動、変形するかを頼りに、加工の特徴を分かりやすく表示するものである。この方法は、鍛造加工におけるモデル材料 (例えば粘土が用いられる) を使った模擬試験や、板成型加工におけるスクライブドサークル試験と類似性のある評価といえる。なお、フローライン解析

という名称は、組織観察において素材自体が持つ方向性のある線状の模様を活用した観察に由来する。

図7にポストパーティクル解析の例を示す。この機能は、加工後の素材の形状を基準に任意の点や、升目で設定した点の加工履歴データを算出するものである。仕組みとしては、過去の計算結果を徐々にさかのぼりながら、その点がどこに居たかを、時間を遡るように追跡し (パーティクルトラッキングと呼ぶ)、その点の計算結果を収録する仕組みである。なお、この計算結果は積分点結果からの補間推定値である。

図7左は算出点の候補を設定する画面であり、データ算出後、表示する点を選び、グラフを生成する仕組みである。図7右は横軸を時間、縦軸を温度として、数点の温度履歴をプロットしたものであるが、全体としてどのような履歴を取り得るのか、例外的な履歴を持つ点はないかを調べる応用が考えられる。その他、加工後の位置を基準とする特徴から、組織観察や硬さ測定と紐づけた評価に有効と思われる。

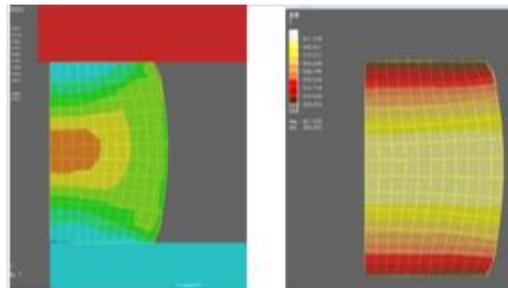


図6 フローライン解析例  
(左: 塑性歪み 右: 温度)

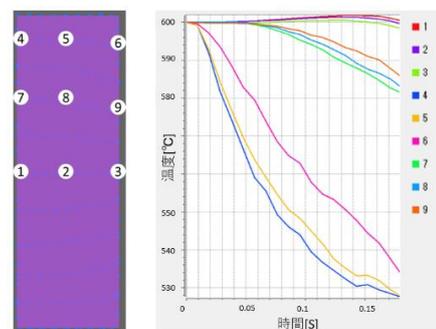


図7 ポストパーティクル解析例

### 3. 2. X線CTによる観察結果

いずれのサンプルにおいても欠陥は見当たらず、良好な結果であった。また、CT 観察結果から作成した STL データをシミュレーション結果と重ねることで欠肉部の評価ができると期待できる。

### 3. 3. 組織観察および CAE との照合結果

#### 3. 3. 1. 組織観察結果

図8～11に組織観察の一部の結果を示す。基本的には鍛造組織と類似した組織となっている。鍛造後のサンプルでは結晶粒界がほとんど現出されなかったが、熱処理を行うことで、結晶粒界が確認できるようになった。これは、素材時点で結晶粒界に集まっていた合金元素が、半凝固鍛造成型によって全体に拡散し、その後の熱処理によって再度、結晶粒界に合金元素が集まったためだと考えられる。結晶粒は、結晶粒径 100～200[ $\mu\text{m}$ ]程度の結晶粒が引き延ばされている。Si や Mg-Si 化合物が万遍なく分布していたが、その他問題となる介在物や欠陥は見当たらなかった。



図8 10-4 鍛造後組織観察結果



図9 10-4 熱処理後組織観察結果



図10 11-4 鍛造後組織観察結果



図11 11-4 熱処理後組織観察結果

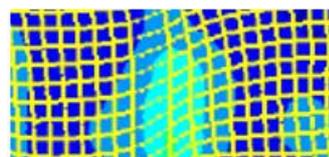
#### 3. 3. 2. 鍛流線

鍛流線はファイバーフローとも呼ばれ、金属材料の鍛造時に見られる繊維状の組織の流れである。製品の機械的特性に影響を与える要素の一つであり、主に靱性に関与する。流れに沿った力に対して強い組織となるため、鍛流線の向きを制御することは製品開発において重要なポイントとなる。

図8、図10のような半凝固鍛造成型後サンプルでは、鍛流線がはっきりと見える結果となった。図12に示したように CAE 解析結果と比較すると高い精度で合致している。この時、CAE 解析では、フローライン解析を用いた。フローライン解析を用いることで高い精度での鍛流線予測が可能であることが分かった。



組織観察結果



CAE解析結果

図12 鍛流線とフローライン解析結果の比較

### 3. 3. 3. 欠肉部

図13に示す通り、CAEで予測されていた欠肉は組織観察でも観察でき、発生箇所もほぼ一致していた。今回の半凝固鑄鍛成型の条件であれば、液相の噴出、漏れ等は起こらず、CAEで予測された欠肉は実際の試験においても発生可能性が高いとみられる。

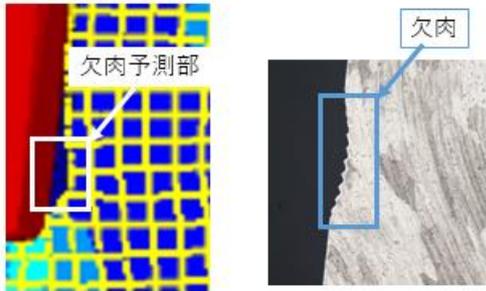


図13 CAEによる欠肉予測と組織観察結果

### 3. 3. 4. 自己接触部

図14に示すように、CAEで予測されていた自己接触は組織観察では見られなかった。CAE解析結果によると、自己接触時の温度は550~600[°C]とみられ、A6061の固相線温度が595[°C]であることを考えると接触後、溶け込む温度帯であった可能性がある。これは半凝固鑄鍛成型の大きなメリットである。この結果から、鍛造シミュレーションで自己接触が予測される場所において、同時に温度分布シミュレーションを行うことで不良発生の判断が可能になると期待できる。

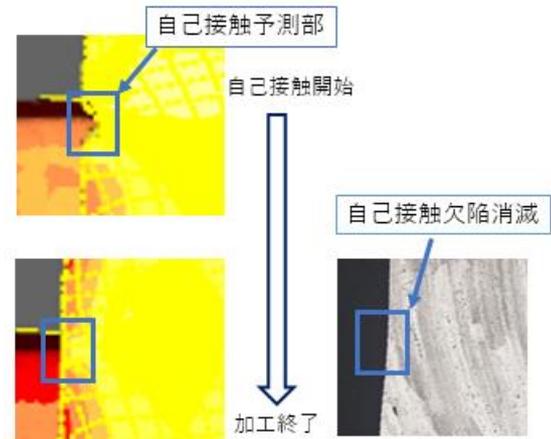


図14 CAEによる自己接触予測と組織観察結果

### 3. 4. 硬さ試験結果

10-4 鑄鍛後サンプルに対して等間隔で74点の測定を行ったところ、全体的に55HV0.1程度と、ほぼすべての測定箇所において誤差の範囲内となった。これは今回の加工温度域では加工硬化が起こらないことが原因だと考えられる。図15にA6061合金のフローカーブを示した。縦軸が流動応力(Pa)、横軸

が塑性ひずみであり、いわゆる応力-ひずみ曲線に相当する。図15には複数の温度条件(350~600[°C])、ひずみ速度条件(0.001~100[/sec])のフローカーブが描かれている。グラフの形を見ると350[°C]の場合と400[°C]の歪み速度が大きい場合を除きほとんどが平坦もしくは右肩下がりとなっており、加工硬化しないことを表している。したがって、半凝固鑄鍛成型では硬さがほぼ均一になると思われる。

この結果を受けて、10-4 熱処理後、11-4 鑄鍛後、11-4 熱処理後については、特徴点となる場所のみ測定することとした。測定位置はCAE結果から、①塑性歪みの大きい部分と小さい部分の境となる箇所、②塑性歪みが小さい箇所、③塑性歪み大きく特徴的な箇所、④塑性歪みの大きい箇所、⑤冷却速度が速い箇所を選んだ。結果を表2に示す。硬さの差は鑄鍛後サンプルの結晶粒の大きさや加工度の違いによる差と考えられる。通常、硬さ試験だけではここまで調べることはできないが、CAEを活用することで、加工温度やひずみ量を考慮した試験位置決定、検討を行うことが可能となる。

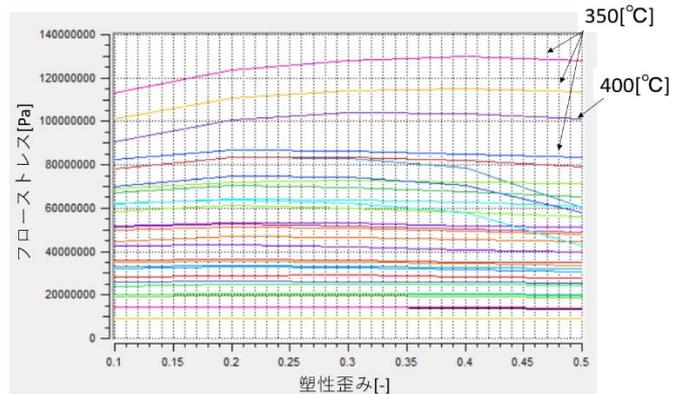


図15 A6061合金フローカーブ

表2 硬さ試験結果

	①	②	③	④	⑤
素材	121.6	123.9	120.7	122.9	122.0
10-4鑄鍛後	56.2	56.6	54.2	53.6	54.8
10-4熱処理後	126.3	125.6	128.4	131.2	119.7
11-4鑄鍛後	57.4	56.8	53.6	52.8	52.6
11-4熱処理後	121.6	119.8	132.3	121.1	124.4

(HV0.1)

## 4. 結言

本研究では、半凝固鑄鍛成型に対して CAE 解析や CT 観察、組織観察、硬さ試験等を行い、下記の知見を得ることができた。

- ① 鍛造 CAE でポイントトラッキングやフローカーブ機能、温度分布シミュレーションを活用することで組織予測・不良予測が高い精度で可能である。これらは工程設計において有用な情報であり、今回使用した CAE ソフトが工程設計に活用できる。
- ② 半凝固鑄鍛成型は加工の影響が硬さにあまり影響せず、全体的に均一な硬さになると考えられる。
- ③ 半凝固鑄鍛成型後は強度が A6061-O 材程度となるが、熱処理によって通常の A6061-T6 材とほぼ同等の機械的特性になると見込まれる。
- ④ 半凝固鑄鍛成型は接合性に優れ、自己接触による欠陥を抑制することができる。

### 参考文献

- 1) 杉山澄雄. 半溶融・半凝固加工研究の流れ. 生産研究. 2013, 65 巻 6 号, P. 803-809
- 2) 大堀紘一. Al-Mg-Si 系合金. 軽金属. 1988, Vol. 38, No. 11, P. 748-763
- 3) 軽金属学会. アルミニウムの組織と性質. 1991, 572p.

# 工具経路生成時間短縮のためのポリゴンメッシュの簡略化

## Simplification of polygon mesh to shorten tool path generation time

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 夏井憲司  
 応募企業名 有限会社トライ金型

CAMにおいてポリゴンメッシュから工具経路を生成する場合、計算時間が長時間になるという問題が発生する。その対策として、ポリゴンの間引きを行ってから工具経路の計算をするという方法が知られているが、間引きを行うと元々の形状から偏差が発生してしまう。そこで、今回ポリゴンメッシュの間引き条件が工具経路の計算時間や機械加工後の形状に与える影響を調べた。その結果、工具経路の計算時間は切削モデルの総ポリゴン数に依存することやエッジ部が間引きの影響を受けやすいことなどのいくつかの知見が得られた。

**Key words:** ポリゴンメッシュ、CAM、工具経路、リバースエンジニアリング

## 1. 緒言

図面やCADデータのない古い金型を複製したいというニーズが高まっている。現在は、非接触三次元測定機で測定したスキャンデータからリバースエンジニアリングでCADデータを作成し、それをを用いて機械加工するという方法で金型の複製が行われている。しかし、リバースエンジニアリングは高価な専用ソフトが必要になることに加え、形状が複雑な場合は作業が長時間に及ぶという問題がある。

そこで、応募企業では、測定されたスキャンデータをそのまま工具経路生成のための切削モデルに使用し、リバースエンジニアリングなしに金型を複製するという取り組みを行っている。しかし、CAMでの工具経路生成にポリゴンメッシュを使用する場合、CADデータを使用した場合に比べて計算時間が長時間に及ぶという問題が発生する。その解決法として、ポリゴンメッシュの間引きを行う方法があるが、間引きを行うとスキャンデータの形状から偏差が発生する。間引き後のポリゴンメッシュを基に工具経路を計算すると、間引きによる偏差が加工後の製品形状にも影響してしまうため、適切な間引き条件を見定めることが重要となる。

そのため、今回ポリゴンメッシュの間引き条件が工具経路の計算時間や機械加工後の形状に与える影響を下記の手順で調べた。

- ① 実験用CADモデルの作成
- ② CADモデルを使用した工具経路生成、加工品の削り出し
- ③ 非接触三次元測定機を使用した加工品の形状測定（スキャンデータの取得）
- ④ スキャンデータに間引きを施した切削モデルの作成
- ⑤ 切削モデルを使用した工具経路生成、加工品の削り出し
- ⑥ 自由曲面形状の評価
- ⑦ エッジ部の形状評価

## 2. 実験

### 2. 1. 実験モデル

今回の実験のために作成したCADモデルを図1に示す。提案企業の取り扱う金型には自由曲面を含んだものが多いため、CADモデルの上面には位相をずらした正弦波形状の断面をロフトでつないだ自由曲面と長穴形状の突起をモデリングした。また、ポリゴンの間引きによる影響はエッジ部が一番大きいと考えられるため、突起の外周にはシャープエッジやR面取り、C面取りなど様々なエッジ形状を持たせた。



図1 実験用CADモデル

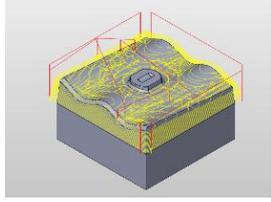
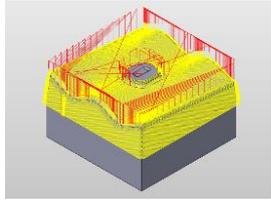
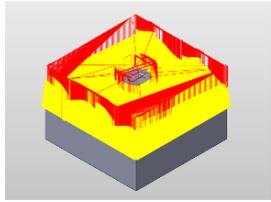
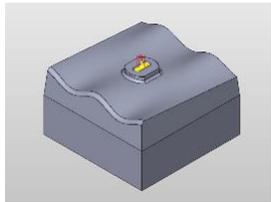
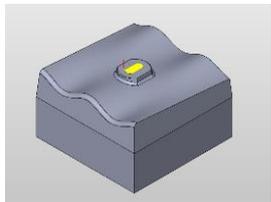
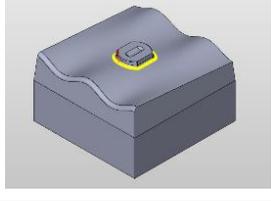
### 2. 2. 実験モデルの削り出し

作成したCADモデルを基に、マシニングセンタ（VARIAXIS j-600/5X AM（ヤマザキマザック製））を用いて機械加工を行い加工品を削り出した。工具経路の作成には、hyperMillバージョン19.2を使用した。使用した工具を表1に、工程及び加工条件を表2に示す。被削材にはアルミニウム合金（A5052）を使用した。なお、CADモデルを使用した工具経路の計算時間は、合計60[秒]であった。

表1 使用した工具

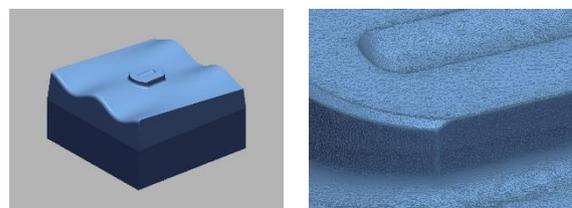
	名称	詳細
T1	スクエアエンドミル	超硬 外径10mm
T2	ボールエンドミル	超硬 外径6mm
T3	ボールエンドミル	超硬 外径3mm

表2 工程及び加工条件

工程	加工条件
1 自由曲面部粗加工 等高線粗加工 (T1) 	S(主軸回転数) :10,000[rpm] f(送り速度): 1,000[mm/min] a <sub>p</sub> (軸方向切込み) :0.5[mm] a <sub>e</sub> (半径方向切込み) :8[mm]
2 自由曲面部中仕上げ加工 等高線最適化加工 (T2) 	S:10,000[rpm] f:1,000[mm/min] a <sub>p</sub> :0.5[mm] a <sub>e</sub> :0.5[mm]
3 自由曲面部仕上げ加工 等高線最適化加工 (T2) 	S:10,000[rpm] f:1,000[mm/min] a <sub>p</sub> :0.1[mm] a <sub>e</sub> :0.1[mm]
4 上面溝部粗加工 等高線粗加工 (T3) 	S:10,000[rpm] f:800[mm/min] a <sub>p</sub> :0.3[mm] a <sub>e</sub> :0.3[mm]
5 上面溝部仕上げ加工 走査線仕上げ加工 (T3) 	S:10,000[rpm] f:800[mm/min] a <sub>e</sub> :0.05[mm]
6 削り残り部加工 (T3) 	S:10,000[rpm] f:800[mm/min] a <sub>p</sub> :0.05[mm] a <sub>e</sub> :0.05[mm]

### 2. 3. スキャンデータの取得

非接触三次元測定機 (ATOS Compact Scan 12M (GOM社製)) を使用して、CAD 加工品の形状測定を行った。切削加工面は金属光沢を有するため、浸透探傷試験の現像液を表面に塗布してから測定を行った。取得したスキャンデータを図2に示す。



(a) 全体 (b) 中央突起部

図2 スキャンデータ

### 2. 4. 間引き条件

取得したスキャンデータに複数の条件で間引きを行い、切削モデル (以下、スキャンデータに間引きを施した後のポリゴンメッシュを切削モデルとする。) を作成した。各切削モデルの間引き条件と処理後のポリゴン数、処理時間を表3に示す。ポリゴンの間引きには、Geomagic DesignX (3D Systems 社製) の間引きとメッシュの最適化のコマンドを使用した。

間引きは、ポリゴンメッシュの幾何特徴形状を維持しながら、ポリゴンの頂点を合成することによりポリゴン数を削減するコマンドである。条件設定には、目安となるポリゴンの削減率と曲率の高い領域の解像度をスライドバーで設定することができる。今回の実験では、削減率 50、75、90 [%] の3条件と解像度を最高と最低にした2条件を掛け合わせた6つの切削モデルを作成した。

図3に No. 3 と No. 6 の切削モデルを示す。曲率の高い領域の解像度を最高にした No. 3 では、主に曲率の低い緩斜面や平面で間引きが行われておりエッジ形状は保たれていたが、解像度を最低にした No. 6 では、曲率に関係なく間引きが行われたためエッジが崩れた形状をしていた。

メッシュの最適化は、スキャンデータを有限要素解析やリバーエンジニアリングに適したメッシュに変換するコマンドである。オプションとして、変換後のポリゴンエッジの最小・最大長さ (図4) の制限やスムージング効果を調整する機能もあり、前者を活用することによりポリゴンの間引きを行うこともできる。また、メッシュの最適化は、すべてのポリゴンに正三角形に近い形状に変換するため、間引きのコマンドに比べて処理時間が長くなるという特徴がある。

今回の実験では、ポリゴンエッジの最小長さを 0.15[mm] と 0.3[mm] とした2条件と最大長さを 0.6[mm] と 1.5[mm] にした2条件を掛け合わせた4つ

の切削モデルを作成した。

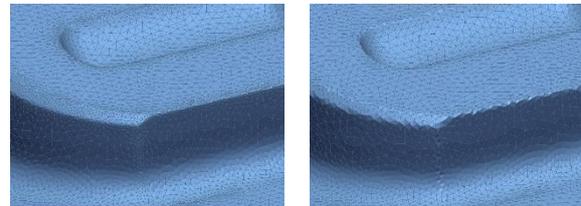
図5にNo.7とNo.9の切削モデルを示す。ポリゴンエッジの最小長さを0.15[mm]としたNo.7ではエッジ部が小さなポリゴンで形成されるため、比較的均一な形状になっていたが、最小長さを0.3[mm]としたNo.9ではエッジ部を形成するポリゴンが大きくなったため、不均一な粗いエッジ形状となった。



図4 ポリゴンエッジの長さ

表3 間引き条件

No.	間引き条件	ポリゴン数 (削減率)	処理 時間
ref	スキャンデータ (間引きなし)	894, 878	-
1	間引き (削減率 50%、 解像度 高)	441, 316 (50.7[%])	7[秒]
2	間引き (削減率 75%、 解像度 高)	217, 722 (75.7[%])	7[秒]
3	間引き (削減率 90%、 解像度 高)	84, 701 (90.5[%])	7[秒]
4	間引き (削減率 50%、 解像度 低)	441, 068 (50.7[%])	7[秒]
5	間引き (削減率 75%、 解像度 低)	222, 437 (75.1[%])	7[秒]
6	間引き (削減率 90%、 解像度 低)	89, 303 (90.0[%])	7[秒]
7	メッシュの最適化 (最小長さ 0.15mm、 最大長さ 0.6mm)	258, 782 (71.1[%])	98[秒]
8	メッシュの最適化 (最小長さ 0.15mm、 最大長さ 1.5mm)	112, 820 (87.4[%])	77[秒]
9	メッシュの最適化 (最小長さ 0.3mm、 最大長さ 0.6mm)	226, 232 (74.7[%])	91[秒]
10	メッシュの最適化 (最小長さ 0.3mm、 最大長さ 1.5mm)	76, 239 (91.5[%])	72[秒]



(a) No. 7 (b) No. 9

図5 メッシュの最適化を行った切削モデル

## 2. 5. 工具経路の計算および加工品の削り出し

作成した切削モデルを基に、工具経路の計算を行った。工程および加工条件は、2. 2節と同じものを使用した。その後、作成した工具経路を使用して、加工品の削り出しを行った。

## 3. 結果及び考察

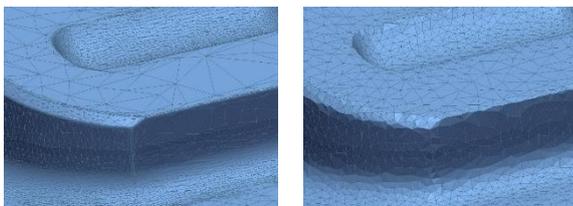
### 3. 1. 工具経路の計算時間

工具経路の計算時間と切削モデルの総ポリゴン数の関係を図6に示す。すべての間引き条件で工具経路の計算時間は、CADモデルでの計算時間60[秒]を超える結果となった。特にスキャンデータを使用した場合は、342[秒]とCADモデルの6倍近い計算時間が必要となり、ポリゴンメッシュを工具経路生成に使用すると計算時間が長時間になることが確認された。また、ポリゴン数を90[%]削減した条件3では計算時間が90[秒]まで減少しており、間引きによりポリゴン数を削減するほど、計算時間も減少することも確認された。

今回、曲率の高い領域の解像度を変更してエッジ部のポリゴンの大きさの変更や、メッシュの最適化を用いてポリゴン形状の正三角形に近い形への変更などいろいろな条件を試したが、それらに関係なく、計算時間と総ポリゴン数の相関係数は0.98となり強い正の相関がみられた。このことから、工具経路の計算時間はポリゴンの大きさや形状にはほとんど影響を受けず、総ポリゴン数のみに依存することが確認された。

### 3. 2. 自由曲面形状の評価

削りだした加工品を非接触三次元測定機で測定し、自由曲面の形状評価を行った。図7にスキャンデータ及びポリゴン数の削減率の大きい間引き条件No.3、No.6、No.10の加工品の測定データとCADモデルとの



(a) No. 3 (b) No. 6

図3 間引きを行った切削モデル

形状偏差を示す。削減率の大きい切削モデルでも、スキャンデータと同様に自由曲面部では大きな形状偏差は見られなかった。曲率の低い自由曲面においては、大幅な間引きを行っても形状の崩れは小さいことがわかった。

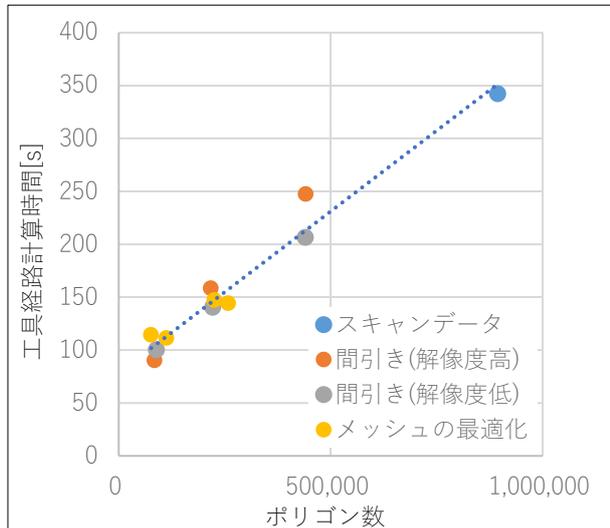


図6 工具経路の計算時間とポリゴン数の関係

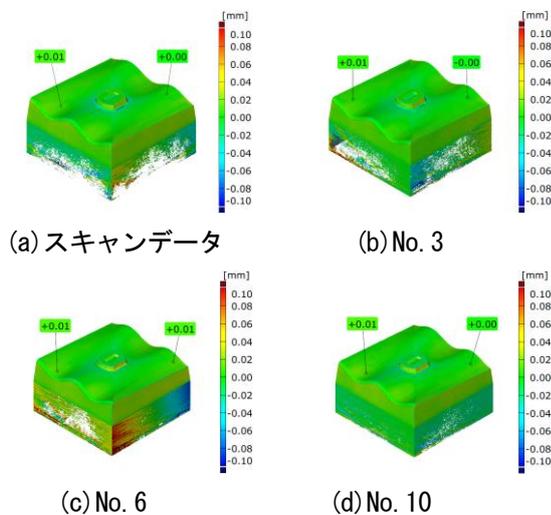


図7 CADモデルとの形状比較

図8にNo. 6とNo. 8の加工品の自由曲面の観察画像を示す。観察には実体顕微鏡(S9i(ライカ社製))を使用した。No. 6の自由曲面は滑らかな表面をしているのに対し、No. 8の自由曲面は表面がうろこ状になっていた。これはメッシュの最適化を行った際の設定でエッジの最大長さを1.5[mm]と大きくしたことで、1つのポリゴンが定義する平面の面積が大きくなりすぎたためだと考えられる。



(a) No. 6 (b) No. 8  
図8 自由曲面の観察画像

### 3. 3. エッジ形状の評価

表面粗さ・輪郭形状測定機(SV-C4500L8(株)ミットヨ製)を使用して、各加工品の図9に示すシャープエッジ部の輪郭形状測定を行った。CADとスキャンデータの加工品の輪郭曲線を図10に示す。CAD加工品のエッジは、シャープエッジが形成されていたのに対し、スキャンデータ加工品は鋭利なエッジにはならず、わずかにR面取りしたような形状になっていた。

今回使用した非接触三次元測定機は、測定原理の関係でシャープエッジを測定したとしても、スキャンデータのエッジ部には0.1[mm]程度の小さなコーナーR(図11)が発生する。スキャンデータ加工品のエッジが、シャープエッジにならなかったのは、形状を削り出す基となるスキャンデータ自体のエッジ形状がシャープエッジではなかったためである。

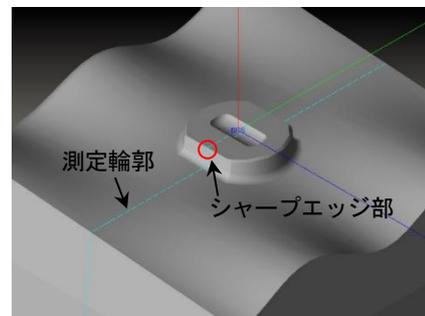


図9 輪郭形状測定箇所

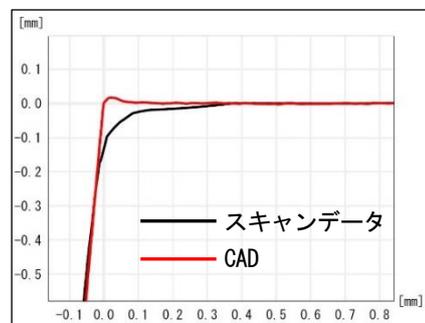


図10 シャープエッジ部の輪郭曲線

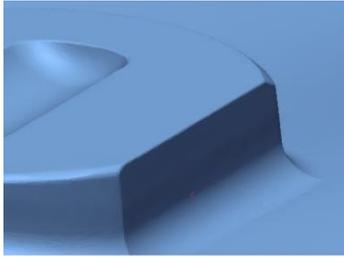


図 1.1 スキャンデータのシャープエッジ部

その他の加工品の測定結果を図 1.2 に示す。曲率の高い領域の解像度を最高にし、90[%]の間引きを行った No. 3 加工品は、スキャンデータの輪郭曲線と一致していたが、解像度を最低にした No. 6 加工品では、スキャンデータの輪郭曲線とずれが発生していた。

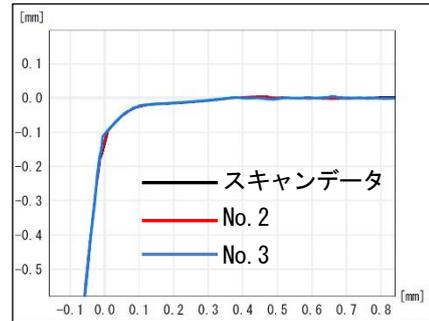
メッシュの最適化のコマンドでエッジの最小長さを 0.15[mm]とした No. 7、No. 8 加工品は、スキャンデータの輪郭曲線と一致していたのに対し、エッジの最小長さを 0.3[mm]とした No. 9、No. 10 加工品は一部にずれが発生していた。これは、2.4 節の No. 9 切削モデルで見られた粗いエッジ形状の影響だと考えられる。

### 3. 4. リバースエンジニアリングの試み

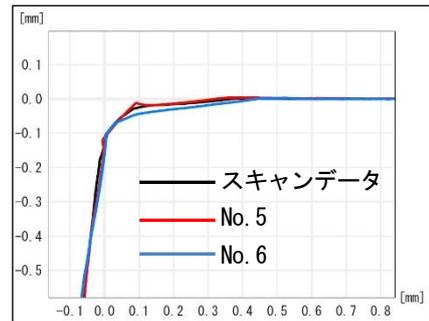
Geomagic DesignX を使用してリバースエンジニアリングを行い、スキャンデータから CAD データ（以下、リバース CAD とする。）を作成した。リバース CAD 加工品を削り出して、自由曲面とエッジ形状の評価を行った。

リバース CAD 加工品と CAD モデルとの形状偏差を図 1.3 に示す。No. 1~No. 10 の加工品では、自由曲面での形状偏差がほぼなかったのに対し、リバース CAD から切削したモデルでは R3[mm] のフィレット部に 0.08[mm]程度の偏差が発生した。これはモデリングの手法の違いが原因だと考えられる。

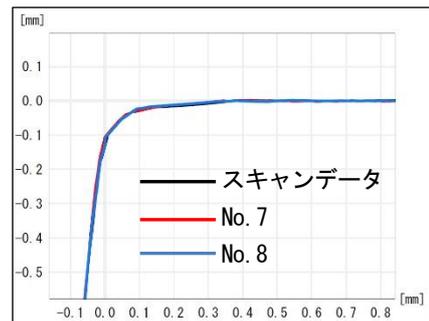
CAD モデルを作成した際は、位相をずらした正弦波形状の断面をロフトでつなぐことにより自由曲面を作成したが、リバースエンジニアリングではスキャンデータの自由曲面部を一枚の NURBS 曲面で近似することによりモデリングを行った。自由曲面自体に偏差は発生しなかったが、フィレット形状を付与したエッジは近似した NURBS 曲面を曲率が変わらないという仮定のもと延長させたサーフェスと平面との交線として作成した。曲率が変わらないという仮定の下、サーフェスの延長を行ったため、フィレット部で偏差が発生したと考えられる。



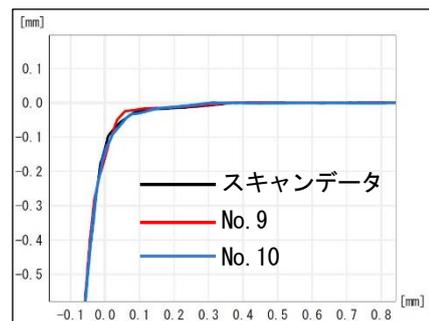
(a) No. 2、No. 3



(b) No. 5、No. 6



(c) No. 7、No. 8



(d) No. 9、No. 10

図 1.2 シャープエッジ部の輪郭曲線

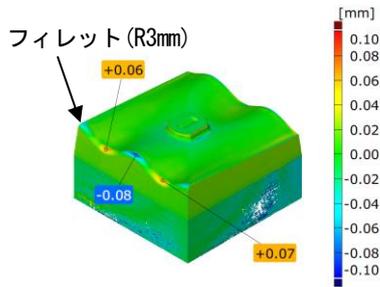


図 1.3 CAD モデルとの形状偏差 (リバース CAD)

図 1.4 に、リバース CAD 加工品のシャープエッジ部の輪郭形状の測定結果を示す。リバース CAD 加工品のエッジは、CAD 加工品と同様にシャープエッジとなっていた。

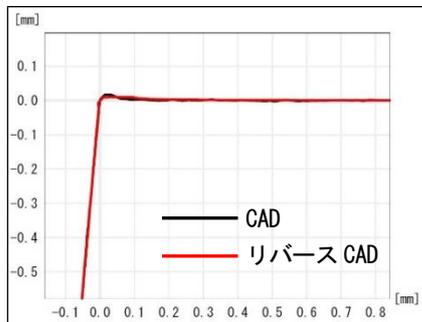


図 1.4 シャープエッジ部の輪郭曲線

## 4. 結言

ポリゴンメッシュデータを使用した工具経路生成において、ポリゴンメッシュの間引き条件が工具経路の計算時間や機械加工後の形状に与える影響の調査を行った。その結果、本実験の範囲内で以下の知見を得た。

- 1) 工具経路の計算時間は、ポリゴンの大きさや形状にはほぼ影響を受けず、切削モデルの総ポリゴン数だけに依存する。そのため、工具経路の計算時間を短縮するためには、切削モデルの総ポリゴンを減少させることが重要である。
- 2) 曲率の低い自由曲面などは、間引きの影響を受けにくいですが、ポリゴンエッジの長さを大きくすると、表面がうろこ状になることがある。
- 3) 曲率の高いエッジ部などは間引きによる影響を受けやすいため、形状偏差を小さくするには曲率の高い領域の解像度を高めるなど適切な間引き条件の設定が必要となる。
- 4) シャープエッジを非接触三次元測定機で測定すると、小さなコーナーRが発生する。このコーナーRをシャープエッジにするには、リバースエンジニアリングが有効である。

## 異なる手法で洗浄された真空用部品からの放出ガスの比較

Comparison of outgassing from vacuum components cleaned by different methods

技術開発部 プロジェクト研究科 三瓶義之

応募企業 ニッコーシ株式会社

洗浄による真空用部品の表面の汚染物質の除去及び洗浄に起因する新たな残渣の発生がないことを確認するため、真空用部品から放出されるガスの量及び成分の比較を行った。異なる方法で洗浄した真空用部品を真空チャンバー内に入れ、一定時間排気した後の圧力の測定及びその時にチャンバー内部に残留している放出ガスの質量分析を行った。その結果、異なる洗浄手法の間で到達圧力に有意な差は見られず、質量分析のピークにも差は見られなかった。

Key words: 真空、放出ガス、質量分析

## 1. 緒言

真空成膜装置や半導体製造装置などの高真空装置の内部で用いられる部品には、部品からの放出ガスによって装置内の圧力上昇や汚染を起こさないことが求められる。

この放出ガスを低減するためには、放出ガスの少ない部材の素材選定と適切な表面処理に加え、部品表面に付着している汚染物質を洗浄除去することが必要となる。

そのため、不適切な洗浄手法では汚染物質の除去が不十分であったり、逆に新たなガス放出の原因となったりすることも考えられ、ガスの種類によっては、装置の行うプロセスの障害になることが考えられる。

そこで、手法を変えて洗浄した試料を真空チャンバーに入れて真空排気を行い、一定時間経過後にその到達圧力を測定することで、放出ガス量の比較を行った。

また、チャンバー内に残留しているガス成分について質量分析を行い、検出されるピークの差を観察することで試料から放出されるガス種の分析を行った。

## 2. 実験

## 2. 1. 排気系の到達圧力測定と残留ガスの質量分析

真空チャンバー中に試料を入れて排気し、その到達圧力から試料の放出ガス量を評価する場合、排気系の到達圧力が十分低いことが必要である。

そこで、試料をチャンバー内に設置せず、到達圧力の測定を行った。また、バックグラウンドとなる真空チャンバー及び排気ポンプなどの排気系からの放出ガスについて汚染物質からの放出ガスが含まれていないことを確認するため、到達圧力に達したチャンバー内の残留ガス成分の質量分析を行った。

実験装置には、内径 300 [mm] 高さ 260 [mm] のチャンバーに ULVAC 製マスフィルター型質量分析計 MASSMATE-

100 を接続したものをを用いた。主排気ポンプには最大排気 400 [l/sec.] のターボ分子ポンプ、補助ポンプに Ti ゲッタポンプを用い、チャンバー及び質量分析計を接続するパイプのベーキング用に、IN HEATER と MS HEATER を設置した。実験装置の概略図を図 1 に示す。

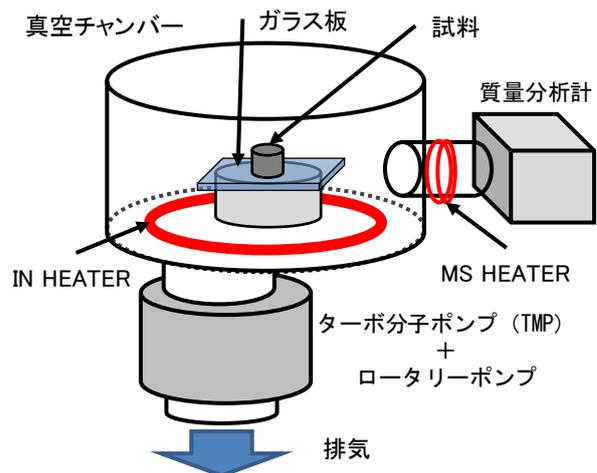


図 1 実験装置概略図

この実験装置を用いて 120 [時間] 排気を行った結果、到達圧力は  $3.4 \times 10^{-6}$  [Pa] であり、目標の  $10^{-5}$  [Pa] 以下に到達していることが確認できた。その際の残留ガスの質量分析結果を図 2 に示す。

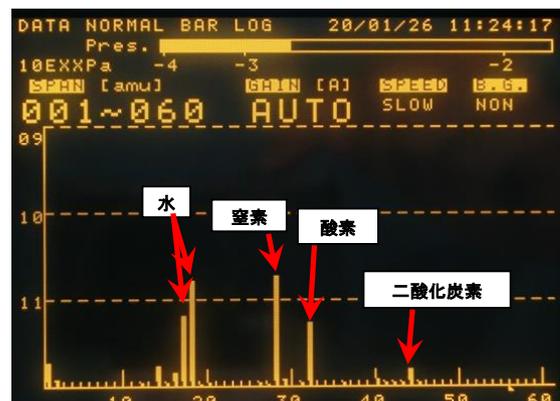


図2 チャンバー単体での残留ガスの質量分析結果

図2より、マススペクトルは信号の大きい順に窒素、水、酸素、二酸化炭素といったピークが観察され、それ以外の信号は非常に小さいことがわかる。

これらのことから、この実験装置は試料からの放出ガス量及び質量分析に使用できることが確認できた。

2. 2. 洗浄した試料の放出ガス量評価

ニッコーシ株式会社において異なった手法で洗浄した試料1及び2の放出ガス量を評価するため、実験装置に設置して排気を行い、到達圧力の測定を行った。

試料はチャンバーのベーキング時の熱を遮断するためにガラス板を介して設置した。試料設置の状況を図3に示す。

排気の際の条件をそろえるため、Ti ゲッタポンプ、及びIN Heater、MS Heater の操作タイミングをそろえて排気を行い、20[時間]排気後の到達圧力を測定した。排気時の操作タイミングを表1に、測定された到達圧力を表2に示す。

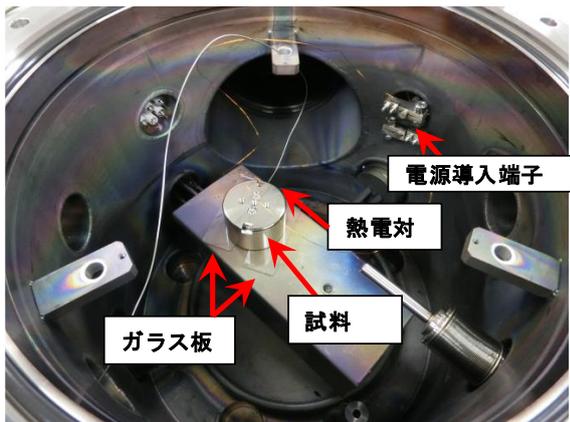


図3 チャンバー内への試料設置の状況

表1 排気時の操作タイミング

排気時間	Tiゲッタポンプ	IN HEATER	MS HEATER
00:10	連続加熱	ON	ON
00:20	連続加熱	OFF	ON
00:40	連続加熱		OFF
01:45	加熱5分/余熱5分		
03:00	OFF		
20:00	到達圧力測定		

表2より、試料1、2ともに到達圧力は $1 \times 10^{-5}$ [Pa]台の低い圧力を示していることがわかる。

この結果より、試料1及び2ともに試料表面の汚染

物質は除去されており、放出ガス量が低く抑えられていることが確認できた。

表2 20時間排気後の到達圧力

試料	到達圧力 [10 <sup>-5</sup> Pa]
試料1+ガラス	1.6
試料2+ガラス	1.3
試料なし	0.34
ガラスのみ	0.53

2. 3. 洗浄した試料の放出ガスの成分分析

試料の放出ガス成分を分析するため、試料1、2、ガラスのみ及び試料なしの状態に到達圧力に達した際のチャンバー内の残留ガスの質量分析を行った。その結果を図4に示す。

図4の試料1、2及びガラスのみの質量分析結果からは、試料なしの場合と同様に水、窒素、酸素、二酸化炭素のピークが観察され、特に水のピークが大きいことがわかる。

これらのピーク間の強度比に関してほぼ同等の比率を示していることから、残留ガスの大部分は試料表面に吸着した水によるものであり、汚染物質に由来するものは非常に少ないと考えられる。このことから、試料表面に吸着している水を排気中にベーキングにより脱離させることで放出ガス量をさらに低減させ、到達圧力をさらに低下させることができると考えられる。

2. 4. ベーキングによる放出ガス低減

試料1及び2について真空中でベーキングを行い、表面に吸着している水を脱離させて到達圧力を低下させることを試みた。ベーキングは試料への通電による抵抗加熱で行い、試料1は高温ベーキングとして18[V]で150[分]通電、試料2は低温ベーキングとして10[V]で60[分]通電の条件で行った。ベーキング中の到達温度は試料表面に張り付けた熱電対で測定を行った。加熱後、排気を続けながら20[時間]冷却し、到達圧力を測定した。ベーキング前後の到達圧力及びベーキング時の試料表面の到達温度を表3に示す。

表3 ベーキング前後の到達圧力及び試料表面温度

試料	ベーキング前 到達圧力 [10 <sup>-5</sup> Pa]	試料表面 到達温度 [°C]	ベーキング後 到達圧力 [10 <sup>-5</sup> Pa]
試料1	1.6	146	0.85
試料2	1.3	42	0.81

表3よりベーキングにより到達圧力が半分程度に低下していることがわかる。このことから、ベーキング

によって水を脱離させることで到達圧力を低くできることが確認できた。

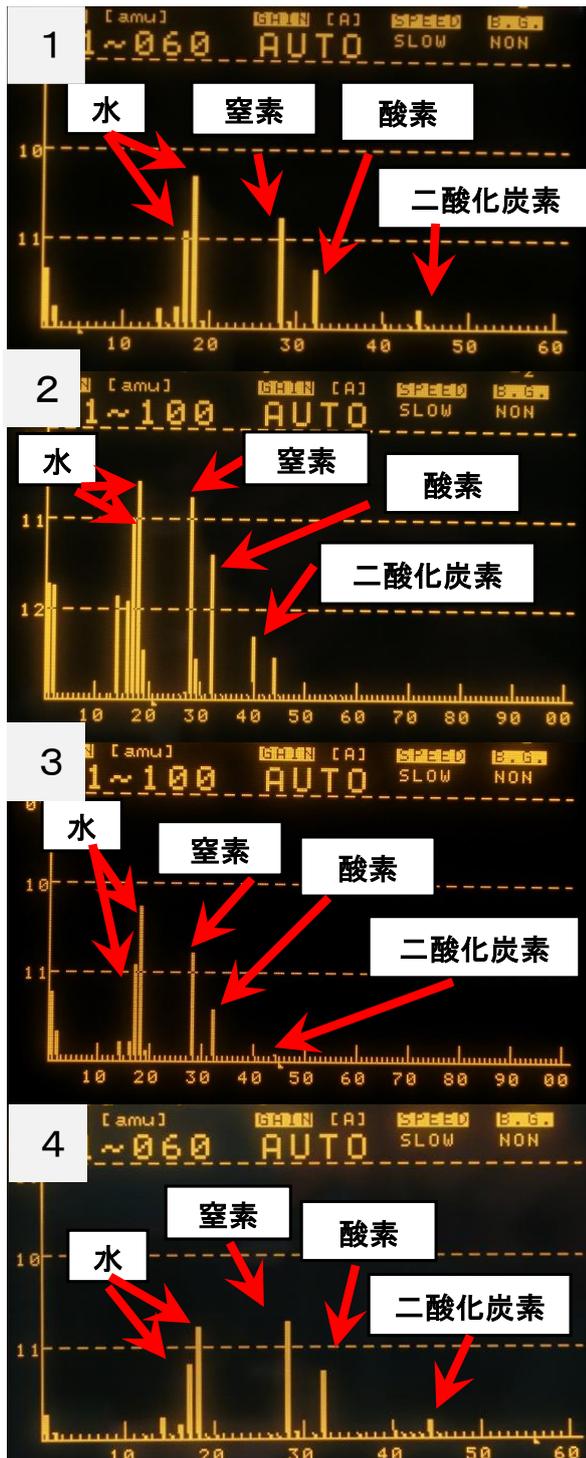


図4 到達圧力下での残留ガスの質量分析結果  
 (1 : 試料1+ガラス, 2 : 試料2+ガラス,  
 3 : ガラスのみ, 4 : 試料なし)

また、試料1ではベーキング時の試料表面の到達温度が146[°C]に達したが、冷却後の到達圧力は試料2と差が見られなかった。これは真空中では対流による熱伝導が起きないために試料内部で温度の不均一が

発生し、ベーキングが不十分であった可能性が考えられる。ベーキングは高温の方が効果的と考えられるが、過熱された場合には部品あるいは周辺部材の熱分解を招く恐れもある。そのため、ベーキング条件については装置組付け時の熱伝達の状態も考慮してベーキングの条件を検討する必要があると考えられる。

### 3. 結言

洗浄による真空用部品の表面の汚染物質の除去及び洗浄に起因する新たな残渣の発生がないことを確認するため、異なる方法で洗浄した真空用部材を真空チャンバー内に入れ、一定時間排気した後の圧力の測定及びチャンバー内部に残留している放出ガスの質量分析を行った。

また、部品を真空中でベーキングすることで放出ガスを低減させ、到達真空度を低下させることを試みた。その結果、以下の知見を得た。

- ・ニッコーシ株式会社で手法を変えて洗浄した部品はいずれも放出ガスが少なく、汚染物質に由来する放出ガスの成分も検出されなかった
- ・高真空下で部品から放出されるガスは大気から部品表面に吸着したガス成分であり、特に水の影響が大きいことが確認できた。
- ・ベーキングは表面に吸着しているガス成分の脱離に効果があり、到達圧力の低下に効果があることが確認できた。
- ・ベーキングの加熱手法、加熱時間については部品に使用されている素材や、組み付け状態に応じて検討する必要がある。

# ドライフラワー製品の残留塩素の低減処理

## Reduction of residual chlorine in dried flower products

福島技術支援センター 繊維・材料科 佐藤優介 中島孝明 伊藤哲司  
提案企業 東北花材株式会社

塩素漂白処理後のドライフラワーに対する残留塩素量の確認方法と残留塩素の低減方法を調べた。DPD 法によりドライフラワーから 0.05-0.10[ppm]程度の残留塩素を検出することができた。チオ硫酸ナトリウム水溶液に浸漬させることでドライフラワーの残留塩素が低減することが分かり、効率の良い処理条件も判明した。また、企業の作業現場で残留塩素の測定と脱塩素処理ができることを確認した。

Key words: 黄変、残留塩素、脱塩素、DPD 法

## 1. 緒言

塩素漂白処理を行ったドライフラワー（図1）を数か月保管すると黄変してしまう。黄変には製品に残留した塩素が起因している恐れがあるため、漂白処理後における残留塩素量の確認方法と残留塩素の低減が必要である。

残留塩素とは、次亜塩素酸イオン( $\text{ClO}^-$ )等の遊離残留塩素、アミンやアンモニアと結合したクロラミンと呼ばれる状態の結合残留塩素があり、遊離残留塩素と結合残留塩素を合わせたものである。また、残留塩素は酸化反応を起こし易い塩素で、付着した物は変色の原因となり易い。

今回は、残留塩素の脱塩素処理と作業現場で使用できる残留塩素の確認方法について調べ、提案を行うこととした。



図1 アジサイのドライフラワー

## 2. 実験

### 2. 1. 残留塩素の脱塩素処理

残留塩素の測定方法には、電流滴定器による測定やヨウ素滴定法、硫酸第一鉄アンモニウム (FAS) による滴定法、ジエチルパラフェニレンジアミン (DPD) による呈色反応を利用した DPD 法がある。

DPD 法は、操作が簡便で試薬の保存性が高く、測定に係るコストが低い。また、遊離残留塩素と結合残留塩素をそれぞれを分別定量できるため、東北花材(株)で塩素漂白処理を行ったアジサイ製品の残留塩素を、DPD 法を使用した市販の残留塩素測定器(柴田科学(株)製)を用い測定した。その結果、結合残留塩素が 0.05~0.10[ppm]となり DPD 法で測定できることが分かった。

脱塩素処理は水道水のカルキ抜きとして使用されるチオ硫酸ナトリウム水溶液を用いて行い、残留塩素は

DPD 法で求めた。

### 2. 1. 1 脱塩素処理条件

試料は東北花材(株)で塩素漂白を行ったアジサイを用いた。脱塩素処理は、蒸留水 100[ml]に対してチオ硫酸ナトリウム五水和物(特級 MW=248.18 富士フィルム和光純薬(株)製)を添加した水溶液を作成し、試料 0.4[g](浴比 1:250)を浸漬させた後、蒸留水で洗浄し恒温乾燥機(PHH-101 エスペック(株)製)を用い 50[°C]で乾燥させた。浸漬条件は、室温で水溶液の濃度と浸漬時間を変化させた。処理条件を表 1.1、表 1.2 に示す。

表 1.1 浸漬条件(浸漬時間を一定)

試料 No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 添加量[mmol]	0.01	0.03	0.06	0.19	0.32	0.64	1.27
浸漬時間[分]	60						

表 1.2 浸漬条件(添加量を一定)

試料 No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
浸漬時間[分]	5	15	30	60	120	180	300	1440
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 添加量[mmol]	0.64							

### 2. 1. 2 測定方法

脱塩素処理を行った試料 0.4[g]を取り、蒸留水 100[ml]に浸漬させた(浴比 1:250)。

浸漬した蒸留水を DPD 法で呈色させ、分光光度計(UV-2500PC (株)島津製作所製)で吸光度を測定した。

DPD 試薬は、10[ml]測定用に個包装された DPD 試薬(柴田科学(株))を使用した。測定手順は、試料の浸漬液から 10[ml]分取し、DPD 試薬を 1 包添加し溶解させた後ヨウ化カリウム(特級 富士フィルム和光純薬(株)製) 2[g]を添加し十分溶解させた。溶液を 2 分間静置後、光路長 10[mm]の石英セルに分取し測定した。脱塩素処理を行わない試料 0.4[g]を 100[ml]の蒸留

水に 24 時間浸漬させた浸漬液を、上述の測定手順で測定したところ、550[nm]付近にピークが見られたため 550[nm]にて吸光度を測定した。

### 2. 2. 作業現場で使用できる残留塩素量の確認方法

東北花材(株)の加工現場では井戸水を使用しているため、本研究では脱塩素処理及び残留塩素の測定に使用する水に、当所で使用している井戸水を使用した。

脱塩素処理は「3. 1. 残留塩素の脱塩素処理」の結果を基に、チオ硫酸ナトリウム水溶液を用い、残留塩素は DPD 法を使用した市販の残留塩素測定器(柴田科学(株)製)にて測定した。

#### 2. 2. 1 脱塩素処理条件

東北花材(株)で塩素漂白を行ったアジサイ 8[g]を、チオ硫酸ナトリウム水溶液 2,000[mL] (1.58[g/L] 浴比 1:250 当所の井戸水で調整)に 2 時間浸漬させ、井戸水で洗浄した後、恒温乾燥機を用い 50[°C]で 1 時間乾燥させた。乾燥後、井戸水 2,000[mL]に試料を 24 時間浸漬させた。比較対象として別の試料 8[g]を、脱塩素処理を行わず井戸水 2,000[mL]に 24 時間浸漬させた。

#### 2. 2. 2 測定方法

試料を浸漬させた井戸水 10[mL]をサンプルホルダーに入れ、DPD 試薬 1 袋とヨウ化カリウム 0.2[g]を加える。2 分静置した後に比色用樹脂版(柴田科学(株)製)により目視で残留塩素濃度を測定した。また、事前に井戸水の残留塩素濃度測定も行った。

## 3. 結果

### 3. 1. 残留塩素の脱塩素処理

表 2. 1 及び図 2. 1 は浸漬時間を 60 分とし、チオ硫酸ナトリウム添加量を変化させ各添加量で吸光度を測定した結果を示す。表 2. 2 及び図 2. 2 はチオ硫酸ナトリウム添加量を 0.64[mmol]とし、浸漬時間を変化させて吸光度を測定した結果を示す。

表 2. 1 浸漬時間 60 分での添加量と吸光度変化

試料 No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 添加量[mmol]	0.01	0.03	0.06	0.19	0.32	0.64	1.27
吸光度	0.028	0.026	0.018	0.017	0.014	0.012	0.012

表 2. 2 添加量が 0.64[mmol]での浸漬時間と吸光度変化

試料 No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
浸漬時間 [分]	5	15	30	60	120	180	300	1440
吸光度	0.016	0.013	0.012	0.012	0.010	0.008	0.007	0.007

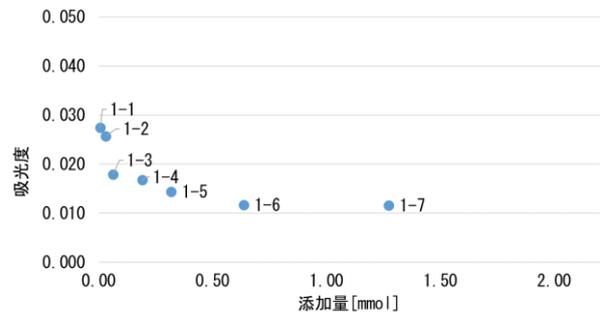


図 2. 1 浸漬時間が 60 分での添加量と吸光度変化

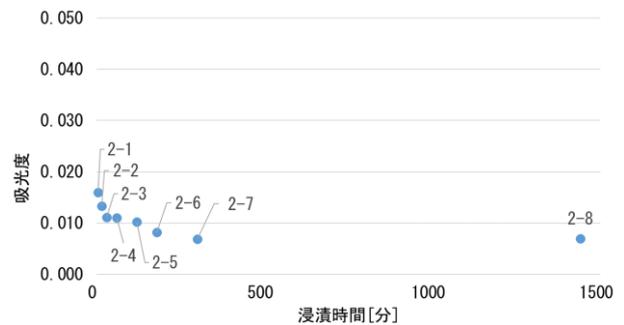


図 2. 2 添加量 0.64[mmol]での浸漬時間と吸光度変化

が低下することが分かった。処理条件は、チオ硫酸ナトリウムの添加量が 0.64[mmol]で 120 分浸漬させた条件 2-5 が良好であった。この条件でドライフラワー 1[g]を処理するには、濃度 1.58[g/L]のチオ硫酸ナトリウム水溶液に 2 時間浸漬させることで、同等の脱塩素処理条件となる。

### 3. 2. 残留塩素量の確認

井戸水には残留塩素は確認されなかった(0.05[ppm]未満)(図 3. 1)。

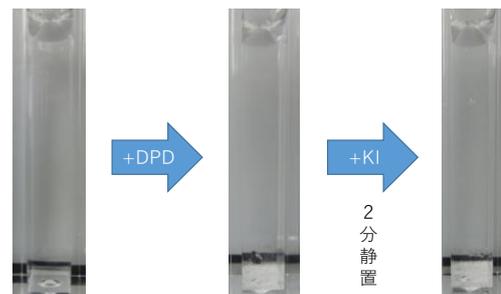


図 3. 1 井戸水の残留塩素濃度測定

脱塩素処理を行わないアジサイを浸漬した井戸水からは、残留塩素が確認された(0.05-0.10[ppm])(図3.2)。

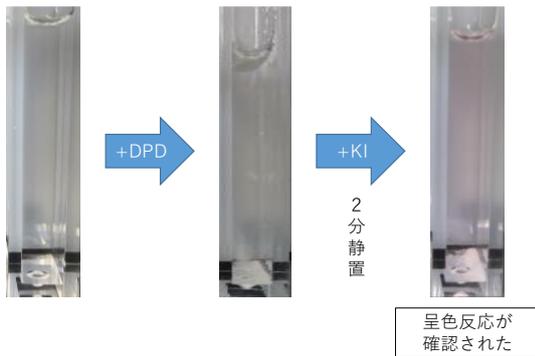


図3.2 脱塩素処理を行わないドライフラワーを浸漬した井戸水の残留塩素濃度測定

また、井戸水で脱塩素処理を行ったアジサイからは残留塩素が確認されなかった(0.05[ppm]未満)(図3.3)。

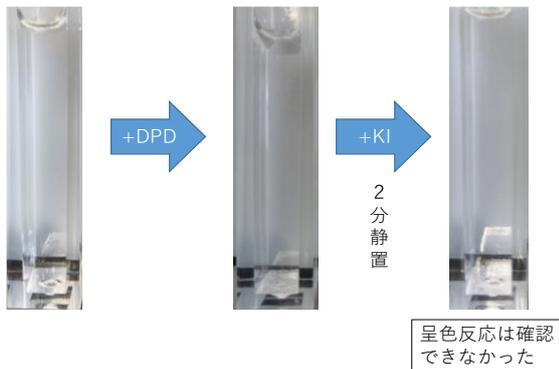


図3.3 脱塩素処理を行ったドライフラワーを浸漬した井戸水の残留塩素濃度測定

井戸水を使用したチオ硫酸ナトリウム水溶液で脱塩素処理を行い、市販の残留塩素測定器を使って残留塩素を確認したところ、残留塩素の減少が確認できた。(0.05-0.1[ppm] → 0.05[ppm]未満)

#### 4. 結言

- ・残留塩素の確認方法にはDPD法を用いることで、脱塩素処理に井戸水を使用した場合でも簡便に測定可能であることが分かった。
- ・ドライフラワーの残留塩素には、次亜塩素酸などの遊離残留塩素はほぼ存在せず、全て結合残留塩素であった。結合残留塩素は、漂白に使用した塩素がアジサイや地下水に僅かに含まれるアンモニアと結合しクロラミン等として残留してしまう。この結合残留塩素は、遊離残留塩素ほど酸化力はないが、黄変の原因となることが考えられる。
- ・残留塩素の低減にはチオ硫酸ナトリウム水溶液への

# カラーステンレスの液相着色法における新構造電極の開発

Development of new electrode structure in liquid phase coloring method of color stainless steel

いわき技術支援センター 機械・材料科 吉田正尚  
 応募企業 株式会社クリナップステンレス加工センター

カラーステンレスは、ステンレス基材を着色液と硬膜液の液相に順次浸漬して製造される。着色処理を行う際は着色管理のための電極で電圧測定を行っている。しかし、現在使用している電極は、有害な鉛を含有した鉛ガラスを使用していることや溶着加工技能を持つ外注先の熟練職人の不足により、電極の製作ができない状態にある。

そこで本研究では上記問題を解決し、カラーステンレス着色用の電極の必要要件の分析、材料の選定を行い従来型電極と同様に着色管理を行える新構造電極を試作開発した。

Key words: カラーステンレス、液相製造法、白金電極、鉛ガラス、電圧変化、電位計測

## 1. 緒言

現在、カラーステンレスは内装材や建材用途に普及している(図1-(a))。その製造方法は、ステンレス基材を着色液と硬膜液に順次浸漬して製造される。ステンレス着色処理を行う際の重要なデバイスとして着色管理用の電極を使用するが、破損した場合は交換が必要になる。

しかし、応募企業ではいろいろな問題を抱えており現在電極の製作ができない状態にある。この電極の白金線と白金溶接部は外界から保護するために、保護ガラスには溶着加工に必要な低融点の鉛ガラスが使用されている(図2-(b)の管部と溶着部)。鉛はRoHS指令の環境有害物質であり、鉛溶出による環境汚染のリスクがある。このため、鉛ガラス自体が調達困難になっている。更に、溶着加工には外注先(白金加工業)の熟練職人の技能も必要で、熟練職人の退職や職人が使用する加工機材の損耗等で現在と同一仕様の電極の製作ができない。

そこで本事業では、環境に配慮し鉛を使用しない材料及び熟練職人による加工が不要な構造を検討し、新構造電極を試作した。また、ステンレス材テストピース(SUS304 BA t0.5×50[mm]角)を小型着色処理プラント(図1-(b))で一定の電圧条件で着色処理を行い、従来型電極と新構造電極の性能比較を行った。

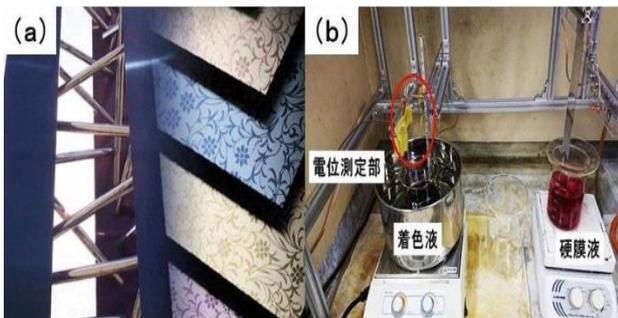


図1 カラーステンレス製品例(a)と小型処理プラント(b)

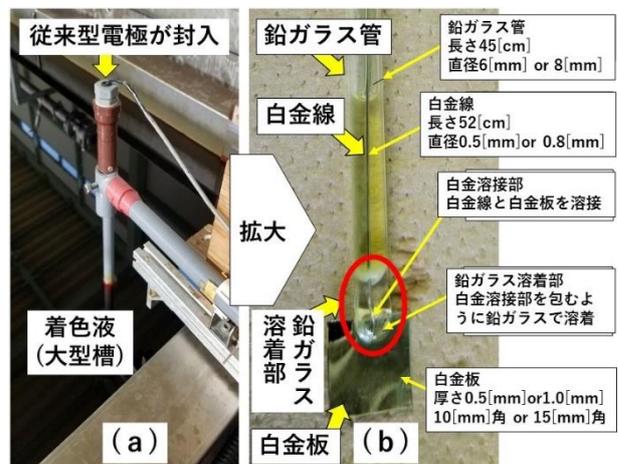


図2 従来型電極の設置現場(a)と仕様(b)

## 2. 新構造電極の仕様検討

### 2. 1. 従来型電極の仕様の確認

従来型の電極は、白金線を溶接した白金板からなり、鉛ガラス管に白金線を通し、白金線と白金板の溶接部を鉛ガラスで包み込むように溶着した構造(図2-(b)の赤丸の箇所)である。

ここで使用されるガラスは、溶着加工を可能にするために低融点の鉛ガラスを使用しなければならない。

### 2. 2. 新構造電極の仕様と試作

新構造電極の試作にあたっては、製造依頼した白金部材メーカーから指摘された以下の①～②を考慮した。

- ① 円筒状など多種形状の電極が生産されているが、カラーステンレス用電極としては、耐腐食性、電圧特性が未確認で推奨しない。
- ② 現在仕様のカラーステンレス用電極を、白金部材メーカーが製造する場合(a)～(c)の問題がある。
  - (a) 白金に溶着可能な鉛ガラスが、現在は入手困難である。

(b) 溶着に必要なバーナーなど専用の加工器具類が現在は、老朽化し使用不可能である。

(c) 溶着加工ができる熟練職人が退職していない。また、新構造電極の設計では、以下の③～⑥を考慮した。

- ③ 強酸性である着色液（三酸化クロム (CrO<sub>3</sub>) 及び硫酸 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) の混合水溶液) に 100[°C]で長期間浸漬しても変質しないこと。
- ④ 着色液中で従来型電極と同等に安定して、電極部を保持できる構造を持つこと。
- ⑤ 白金線と白金板を溶接する構造は従来型電極と同じ仕様とする。
- ⑥ 鉛ガラスは、環境に有害な元素の鉛 (Pb) を含有し調達が難しいため使用しない。

上記①～⑥の条件を満たす様々な材料を比較検討した結果、新構造電極は、従来型電極の鉛ガラス管の代替にはテフロンを用い、また白金板を固定していた鉛ガラス溶着部の代替にセラミックス（アルミナ 99.5[%]）製ねじで固定する設計（図3）として、新構造電極を試作した（図4）。

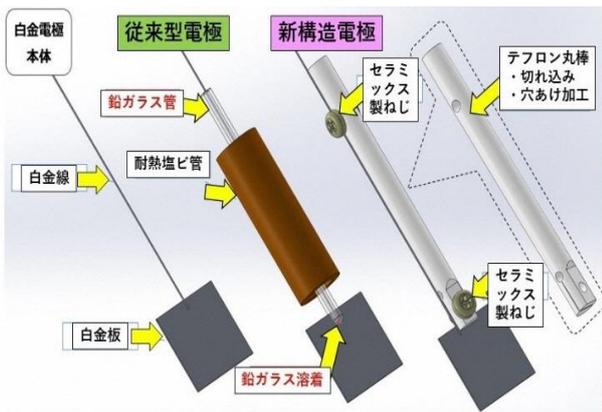


図3 従来型電極と新構造電極の構造図解

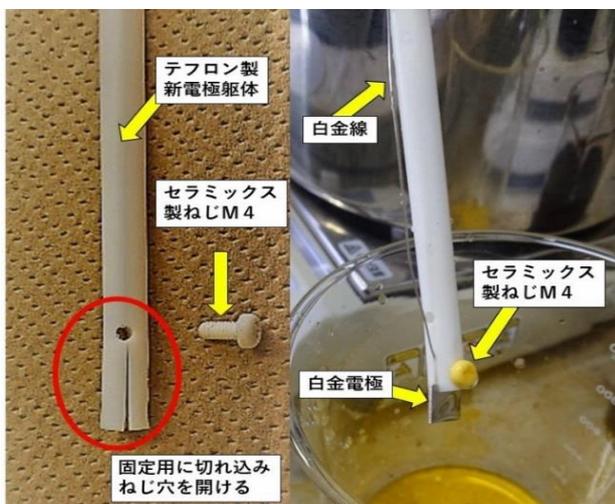


図4 試作した新構造電極

### 3. 新構造電極の評価

#### 3. 1. カラーステンレス着色処理時の電圧分析

ステンレスを着色液に浸漬することで色調が発現する。この浸漬時間の長短で色調が変化し、着色管理は白金電極とステンレス間に生じる電圧を目安とする。一般的には、着色処理で図5のように電圧が変化し、2つの変曲点（A点及びB点）が見られる。A点は、元々ステンレス表面に成膜していた不動態被膜が剥がれた時点とされ、B点は新たに不動態被膜が成膜していく端緒となる時点とされている。

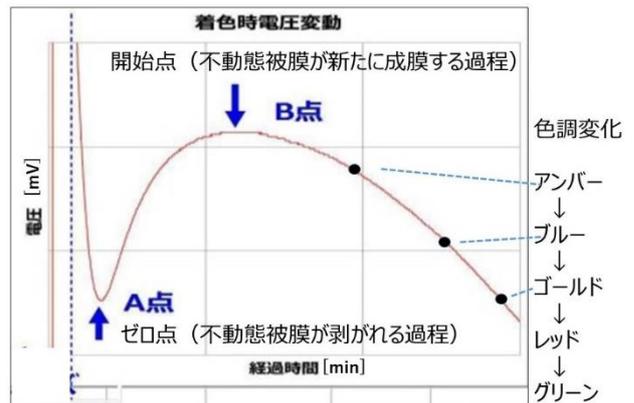


図5 着色処理時の電圧変化

#### 3. 2. 従来型電極と新構造電極との電位変化比較

前述の3. 1. で、従来型電極と新構造電極をそれぞれ使用して、カラーステンレスを製造（3回）した。この時の電圧を測定し、その波形の比較（図6）を行った。その結果、新構造電極は、従来型と同様に着色管理を行えることを確認した。新構造電極の優位点はノイズが少なく、変曲点（A点及びB点）でのバラツキが少ない特長（図6-(b)）があった。しかし、新構造電極は、電圧が約10[mV]高くなる現象（波形全体が上昇している）があり、実用上、不具合の原因になる可能性があるため、今後は上昇の原因を解明する必要がある。

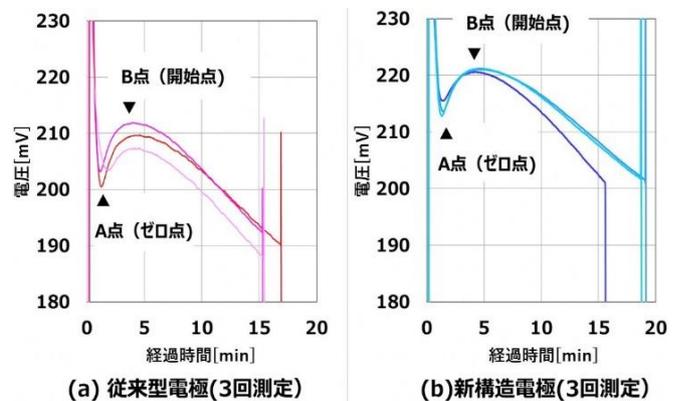


図6 従来型電極と新構造電極の電圧変化比較

### 3. 3. 電極板面積の影響

電極板面積の広狭の影響についても検討した。新構造電極の白金板を、15[mm]角(450[mm<sup>2</sup>])と10[mm]角(200[mm<sup>2</sup>])の両電極を前述の3.1.と同様に実験し、その電圧変化の比較(図7)を行った。その結果、15[mm]角電極の方が電圧波形のバラツキが少ないことが分かった(図7-(b))。しかし、A点とB点の電圧の差が小さいため、基材条件が異なる(表面が鏡面ではないへアライン模様や平板ではない立体形状)場合は、それら変曲点が分かりにくくなる懸念があることが分かった。

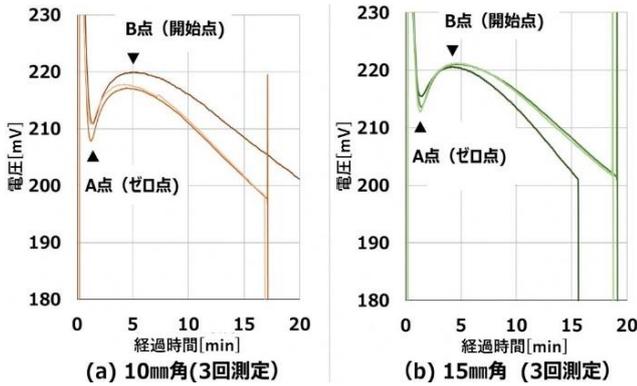


図7 電極板面積の電圧変化比較

### 3. 4. カラーステンレス表面の分析

新構造電極で製造した、カラーステンレス表面をエネルギー分散型蛍光X線分析(XRF-EDX)により分析した。定性分析(加速電圧50[kV]、照射直径2.5[mm]、真空雰囲気)を行い、試料はカラーステンレス着色時の電圧を変えた以下の4条件の試料について実施した。①SUS304(ブランク材)、②着色ステンレス(B点からの電圧降下2.0[mV])、③同(同11.4[mV])、④同(同19.5[mV])、の各試料を分析した。

その結果、表面にはステンレス由来の多量の鉄(Fe)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)、及び硫黄(S)が検出された(図8)。硫黄(S)の強度[cps]はカラーステンレス着色時の電圧[mV]と相関があった(図9)。

新構造電極と従来型電極で着色した板は、硫黄(S)の強度[cps]はほぼ同じであったことから、電極構造が異なっても同じ着色皮膜が成膜されたと判断した。

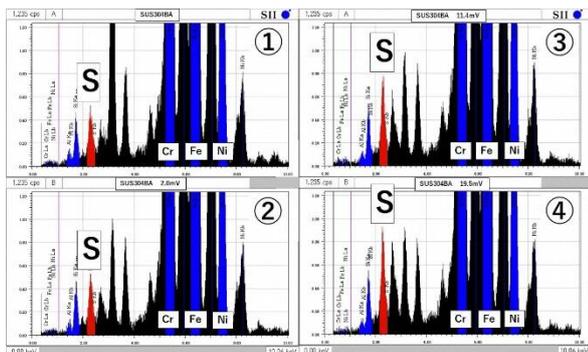
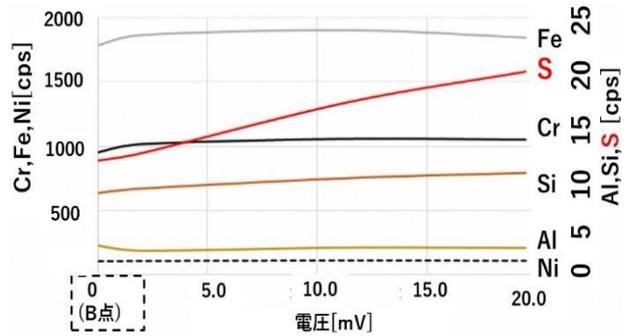


図8 カラーステンレス表面の定性分析

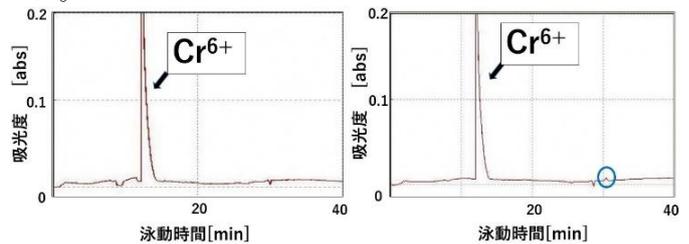


着色膜が薄い ⇔ 着色膜が厚い

図9 着色処理電圧と検出元素の強度の相関関係

### 3. 5. 着色液の成分分析

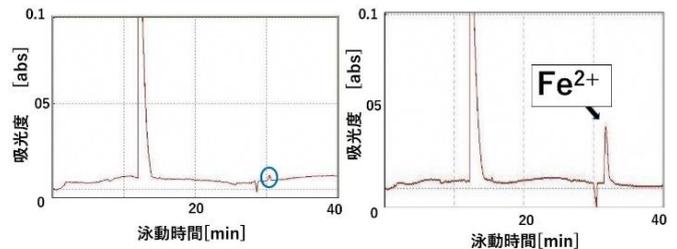
今後の電極交換による着色液の成分変化への影響を管理するため、キャピラリー電気泳動装置による液分析を検討した。具体的には、着色処理前の新液と複数回製造使用した着色液(処理液400[ml]に対し、800[cm<sup>2</sup>]の面積の着色処理を、電極板面積が10[mm]角と15[mm]角の電極を交互に16回使用した液)の比較を行った(図10)。着色液の構成物質である酸化クロム由来の六価クロム(Cr<sup>6+</sup>)が検出されたが、三価クロム(Cr<sup>3+</sup>)の検出は無く、着色処理においては六価クロムが三価クロムに還元されることはないことを確認した。



(a) 着色液(新液) (b) 着色液(16回製造後)

図10 陽イオンのフェログラム

また、着色を繰り返した後の処理液では、泳動時間32分の箇所小さなピーク(図10-(b)の青丸の箇所)が見られたが、これは硫酸第一鉄(FeSO<sub>4</sub>)を微量添加するとピークが成長することから二価の鉄(Fe<sup>2+</sup>)であり、ステンレス基材から微量溶出しているものと思われる(図11-(b))。



(a) 着色液(16回製造後) (b) 着色液(硫酸第一鉄添加)

図11 硫酸第一鉄を添加したフェログラム

一方、陰イオン側では、硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) のみが検出された (図 1 2)。着色を繰り返した処理液は、硫酸イオンの強度が低くなった (図 1 2-(b))。これは、 $\text{SO}_4^{2-}$  は着色皮膜が成膜される過程で膜成分として  $\text{SO}_4^{2-}$  が消費された可能性と、着色処理終了後に洗浄排水として流出した可能性が考えられる。

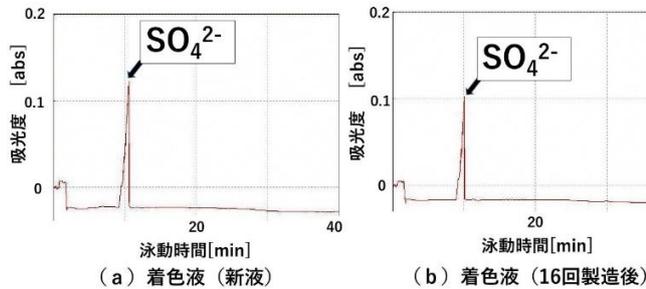


図 1 2 陰イオンのフェログラム

#### 4. 結言

本研究では、カラーステンレス着色過程で使用する電極について、新構造の検討、試作、新構造電極による着色処理を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 熟練職人の技能を必要としない構造を採用し、環境有害物質も含有しない材料からなる新構造電極を試作した。
- (2) 新構造電極は、カラーステンレス着色処理で従来型電極と同様に電圧変化を得ることができ、小型着色処理プラントで着色管理に使用できることを確認した。
- (3) 電極板は、面積が狭い 10[mm]角よりも 15[mm]角のほうが、電圧波形の変曲点 A 点と B 点のバラツキが小さいことを確認した。
- (4) 新構造電極は、従来型電極より検出される電圧が全体的に 10[mV]程度高くなる点、また変曲点 A 点と B 点間の電圧差が小さくなる傾向があった。

今後は、新構造電極で確認した電圧変化の波形全体の上昇、及び変曲点のバラツキの差について原因を究明し、カラーステンレス製造に及ぼす影響を検討する。また、新構造電極の耐久性についても追加検証を行う予定である。

# 三次元デジタイザによる寸法測定条件の最適化（第2報）

## Optimization of dimensional measurement condition by 3D digitizer (2nd report)

技術開発部 生産・加工科 清野若菜 近野裕太

技術開発部 工業材料科 矢内誠人

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 夏井憲司

いわき技術支援センター 機械・材料科 緑川祐二

三次元デジタイザによる形状測定から得られる寸法値の精度を明確化し、向上させることを目的として、品質工学的手法により測定精度に影響を与える条件の最適化を行った。測定物表面の塗布物を酸化チタン粉末に変更してL18直交表による実験を行った結果、カメラ角度及び参照点の有無が測定精度に大きく影響することが分かった。設定した最適条件を用いた金属製凸型ブロックの測定では、従来の条件に比べて寸法測定誤差を大幅に改善することができた。

Key words: 三次元デジタイザ、品質工学

表1 センサ設定

カメラ間距離 [mm]	300
レンズ名称	MV300
測定範囲 (横幅×縦幅×奥行) [mm]	300×230×230
点間ピッチ [mm]	0.124
参照点の径 [mm φ]	1.5
測定距離 [mm]	590
カメラ間角度 [°]	25

## 1. 緒言

図面のない金型等の現物からCADデータを作成するリバースエンジニアリングの用途として、非接触三次元デジタイザによる形状測定が行われている。三次元デジタイザは、複雑な形状を短時間で三次元的に測定できるメリットがある一方、カメラの撮影画像から3Dデータを作成するため、寸法の測定精度は高くない。三次元デジタイザを用いて、精度よく寸法を測定したいという産業界のニーズはあるものの、測定値に影響する要素が多数あるため、精密な寸法測定の利用には利用されていない。

三次元デジタイザによる形状測定から得られる寸法値の精度を明確化し、向上させることを目的として本研究を実施した。

今年度は、測定物表面への塗布物を従来の浸透探傷用現像液から、より粒径の小さい酸化チタン粉末に変更し、品質工学的手法を用いた実験により、測定精度に影響を与える条件の最適化を行った。

## 2. 実験と考察

### 2. 1. 測定原理

測定機は非接触三次元デジタイザ（ATOS Compact Scan 5M：GOM製）を使用した。測定原理は、パターン投影方式とステレオ方式を組み合わせたエリア計測方式である<sup>1)</sup>。本測定機には、中央にプロジェクタレンズとその左右にカメラレンズが設置されており、プロジェクタから青色光による格子パターンを投影し、測定物の表面形状によって変形した状態を左右のカメラで撮影する。1回の撮影で取得できる座標点数は約500万点であり、左右の画像の視差から三角測量により奥行方向の距離を測定し、測定物表面の点群データを取得する。ターンテーブルを回転させて複数の角度

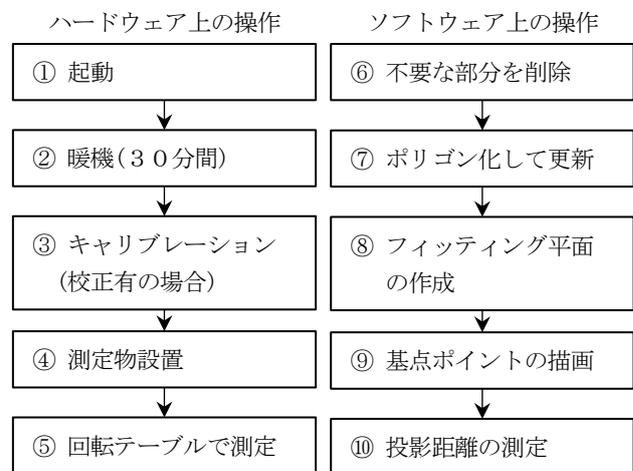


図1 寸法測定の流れ

から撮影し、参照点の座標値又は特徴形状を基準としたベストフィットにより合成することで、測定物全体の3Dデータを作成している。

表1にセンサの設定を示す。測定に用いるレンズは、測定範囲の異なる大中小の3種類が存在するが、本研究では最も使用頻度の高いMV300(中)を使用した。

図1に本研究での形状及び寸法測定の流れを示す。測定した点群データはソフトウェア上でポリゴン化し、測定面に沿ったフィッティング平面の作成と基点ポイントの描画を行った後、基点から平面までの投影距離

を測定した。

2. 2. 酸化チタン粉末を用いた際の最適条件の導出

2. 2. 1. 実験に使用した測定物

セラミック 45[mm]ブロックゲージ ((株) ミットヨ製) を使用し、測定面は精度保証された両端面とした。測定時は、無水エタノール中に分散させた酸化チタン粉末を、エアブラシを用いて測定物表面に塗布した。

2. 2. 2. L18直交表の作成

測定精度に影響を与えるパラメータを明らかにするため、品質工学のL18直交表を作成し、実験を行った。直交表に割り付けるパラメータ及び水準を表2に、パラメータの概念図を図2に示す。これらは昨年度の設定項目と同じにした。ショット数はターンテーブル1回転当たりの撮影数、測定物位置はターンテーブル回転中心からの距離を示す。カメラ角度及び露光量は、測定物がターンテーブル中心に設置され、かつ測定面中央に焦点が合った状態で設定した。なお露光量は、ソフトウェア上で自動調整される値を通常とし、露光過多・過少になる限界点をそれぞれ多・少とした。寸法測定箇所は、測定物平面上で投影距離を測定する位置を示す。参照点の有無は、測定物の土台及び左右腕部に参照点を貼付した場合を有、貼付しない場合を無とした。特徴形状は、測定物左右に非対称形状のパーツを取り付けた。

表2 パラメータ条件の割振り

パラメータ	水準1	水準2	水準3
校正有無	有	無	-
ショット数	8	12	24
測定物位置	中心	中心から 5[cm]	中心から 10[cm]
カメラ角度[°]	45	55	35
露光量	通常	少	多
寸法測定箇所	中央	上側	下側
参照点有無	有	無	無(特徴形状)

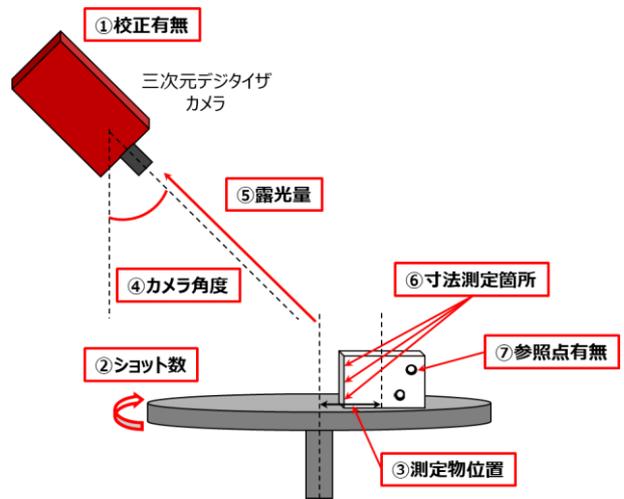


図2 パラメータ概念図

表3 L18直交表への割付け

試験No.	パラメータ (制御因子)							
	校正	ショット数	測定物位置	カメラ角度[°]	露光量	寸法測定位置	参照点	誤差
1	有	12	中心	45	通常	上側	無	e1
2	有	12	中心から 5[cm]	55	少	下側	無(特徴形状)	e2
3	有	12	中心から 10[cm]	35	多	中央	有	e3
4	有	8	中心	45	少	下側	有	e3
5	有	8	中心から [5cm]	55	多	中央	無	e1
6	有	8	中心から 10[cm]	35	通常	上側	無(特徴形状)	e2
7	有	24	中心	55	通常	中央	無(特徴形状)	e3
8	有	24	中心から 5[cm]	35	少	上側	有	e1
9	有	24	中心から 10[cm]	45	多	下側	無	e2
10	無	12	中心	35	多	下側	無(特徴形状)	e1
11	無	12	中心から 5[cm]	45	通常	中央	有	e2
12	無	12	中心から 10[cm]	55	少	上側	無	e3
13	無	8	中心	55	多	上側	有	e2
14	無	8	中心から 5[cm]	35	通常	下側	無	e3
15	無	8	中心から 10[cm]	45	少	中央	無(特徴形状)	e1
16	無	24	中心	35	少	中央	無	e2
17	無	24	中心から 5[cm]	45	多	上側	無(特徴形状)	e3
18	無	24	中心から 10[cm]	55	通常	下側	有	e1

作成したL18直交表を表3に示す。実験は、各試験No.当たり3回ずつ測定した。直交表第8列の誤差は、各試験No.間の繰り返し測定誤差を示す。

### 2. 2. 3. SN比の算出及び結果

SN比の要因効果図を図3に示す。各パラメータの水準別SN比は、関係する試験No.のSN比を平均した値である。誤差のSN比の上下幅とはほぼ同一のパラメータは、測定精度への影響が小さい。このことから、測定精度に影響を与えるパラメータは、カメラ角度及び参照点有無であることが分かった。なおこのSN比は、信号量Sと誤差Nの比であり、SN比が大きいほどばらつきが少なく、寸法値に対する誤差が小さいことを表している。SN比の算出式を以下に示す<sup>2), 3)</sup>。

$$\eta = 10 \log \left( \frac{1}{n} \cdot \frac{S_m - V_e}{V_e} \right) \quad (1)$$

$$S_m = \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (2)$$

$$V_e = \frac{(\sum y - \bar{y})^2}{n - 1} \quad (3)$$

y : 出力(測定値)      n : データ数  
 S<sub>m</sub> : 一般平均      V<sub>e</sub> : 誤差分散  
 η : SN比 [dB]

### 2. 3. 実験の妥当性の確認

導出したSN比の妥当性を確認するため、各パラメータのSN比が高い水準の組み合わせを最適条件、低い水準の組み合わせを最悪条件とし、セラミック製45[mm]ブロックゲージの測定実験を行った。

実験結果から導出したSN比を表4に示す。計算値のSN比は、L18直交表による実験結果から導出したSN比の全平均と各水準のSN比の差分を求め、それらの差分の合計に全平均を加えたものである。最適条件及び最悪条件ともに、計算値と実験値の差が±30[%]以内であったため、導出した最適条件は妥当であるといえる。

### 2. 4. 最適条件を用いた測定実験

#### 2. 4. 1. 実験に使用した測定物

測定物は金属製凸型ブロックを使用した。寸法測定箇所を図4に示す。測定物の寸法の真値は、CNC三次元座標測定機 (UPMC550CARAT : カールツァイス製) で測定した値を用いた。

測定物表面には、低圧スプレーガンを用いて酸化チタン粉末を一様に塗布した。塗布液は、酸化チタン粉末 1[g]及び無水エタノール 50[mL]をプラスチック製のボトルに入れ、超音波洗浄装置にて5分間攪拌したものを使用した。

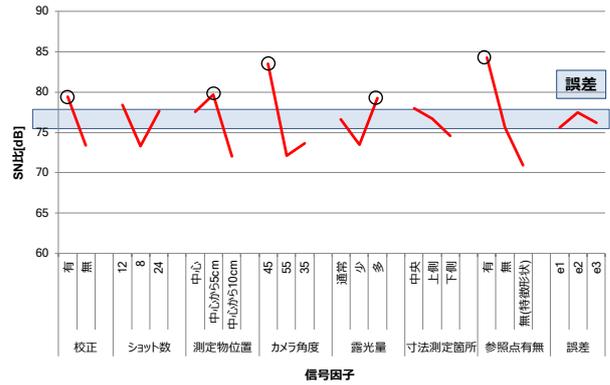


図3 SN比の要因効果図

表4 SN比検証結果

	最適条件	最悪条件
計算値SN比[dB]	103.92	51.23
実験値SN比[dB]	80.48	67.71
誤差[%]	-29	+24

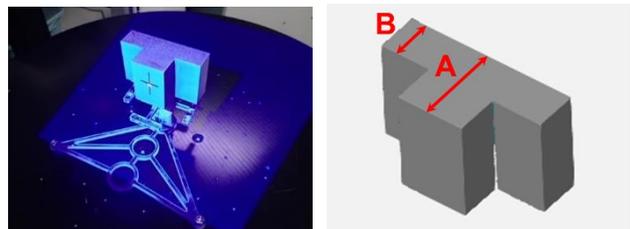


図4 左 金属製凸型ブロック 右 寸法測定箇所

表5 最適条件のパラメータ設定

パラメータ	最適条件
校正有無	有
ショット数	12
測定物位置	中心
カメラ角度 [°]	45
露光量	多 (9.50[ms])
寸法測定箇所	中央
参照点有無	有

### 2. 4. 2. 最適条件のパラメータ設定

最適条件として設定したパラメータを表5に示す。露光量は、ソフトウェア上で露出過多とならない最大値として、9.50[ms]に設定した。参照点は、ターンテーブル及び測定物下部に取り付けたパーツに貼付した。測定物位置は、繰り返し誤差と比較してSN比が小さく測定精度への影響が少ないことから、配置が容易な中心とした。

### 2. 4. 3. 測定結果

最適条件を用いた測定実験の結果を表6に示す。通常使用している浸透探傷用現像液を塗布した状態での最適条件及び通常条件の結果は、昨年度の値である。

酸化チタン粉末を塗布した状態での最適条件の誤差は、A部で0.010[mm]、B部で0.012[mm]となった。通常条件での誤差との比は、当初の目標である3分の1を下回った。

## 2. 5. 塗布物の観察

浸透探傷用現像液を塗布した状態よりも、酸化チタンを塗布した状態での測定誤差が小さくなった理由を調べるため、走査型電子顕微鏡 (S-3700N: (株)日立ハイテク製) を用いて塗布物の表面観察を行った。サンプルは、浸透探傷用現像液及び酸化チタン粉末をそれぞれブロックゲージの表面に塗布し、電子顕微鏡用カーボンテープに転写させた後、スパッタリング装置 (JUC5000: 日本電子(株)製) を用いて白金をコーティングした。電子顕微鏡での観察条件は、焦点距離6[mm]、加速電圧10[kV]とした。観察結果を図5、図6に示す。図5は倍率2000倍、図6は7000倍で撮影した画像であり、1目盛の値は前者が2.0[ $\mu\text{m}$ ]、後者が0.5[ $\mu\text{m}$ ]である。図5から、浸透探傷用現像液は粒の大きなものと小さなものが混在していることが分かる。粒子の大きさは最大で約10~20[ $\mu\text{m}$ ]であることが確認された。一方、図6から酸化チタン粉末の粒子の大きさはほぼ一様で、0.5[ $\mu\text{m}$ ]以下であることが分かった。

測定物表面に塗布物を塗布した場合、測定物自体の寸法は真値よりも膜厚の分大きくなる。そのため、浸透探傷用現像液を塗布した状態での最適条件の結果には、粉末の粒径以上の誤差が含まれていたと考えられる。一方、今年度使用した酸化チタン粉末の粒径は、浸透探傷用現像液よりも十分に小さいことから、測定物寸法の真値からのずれが最小限に抑えられ、測定誤差が小さくなったと考えられる。

## 3. 結言

品質工学的手法を用いて、三次元デジタイザの測定精度に影響を与える測定条件の最適化を行った。測定物表面への塗布物を従来の浸透探傷用現像液から酸化チタン粉末に変更し、L18直交表による実験から導出した最適条件を用いて金属製凸型ブロックを測定した結果、従来の条件と比較して寸法測定誤差を大幅に改善することができた。

## 参考文献

- 1) 吉澤徹. “エリア計測方式による三次元計測”. 最新光三次元計測. 朝倉書店, 2006, p.31-58
- 2) 広瀬健一, 上田太郎. Excel でできるタグチメソッド解析法入門. 同友館. 2003, 246p.
- 3) 田口玄一, 横山巽子. ベーシック品質工学へのとびら. 日本規格協会. 2007, 195p.

表6 測定結果

		A [mm]	B [mm]
三次元測定機(真値)		50.011	25.020
最適条件 (酸化チタン)	1	50.023	25.034
	2	50.020	25.033
	3	50.013	25.024
	4	50.015	25.026
	5	50.032	25.044
	平均	50.020	25.032
	誤差	+0.010	+0.012
最適条件 (浸透探傷用現像液)	誤差	+0.036	+0.037
通常条件 (浸透探傷用現像液)	誤差	+0.093	+0.094

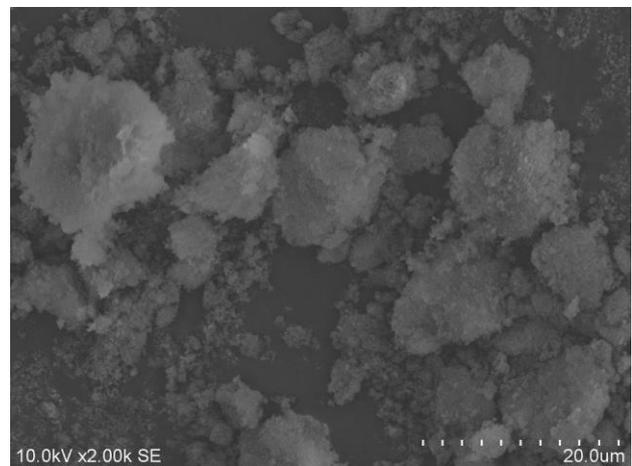


図5 浸透探傷用現像液の観察結果

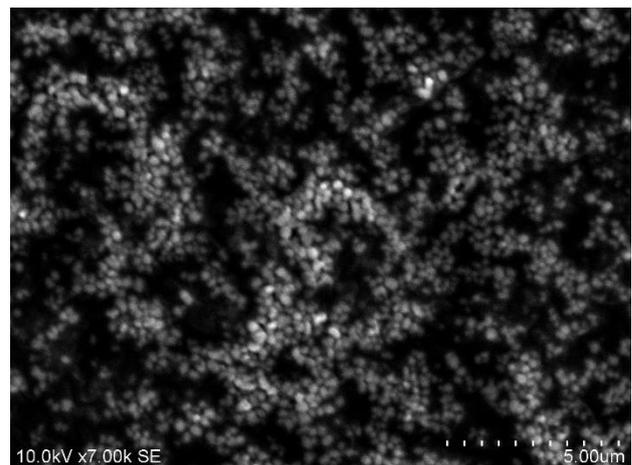


図6 酸化チタン粉末の観察結果

# 溶接における研磨仕上げ部の自動欠陥検出技術の開発（第2報）

## Development of automatic defect detection technology for polishing finish part in welding (2nd Report)

いわき技術支援センター 機械・材料科 佐藤善久  
タニコー株式会社 渡部秀紀 中野光太郎

プログラムを作成して画像探傷装置に組み込むことで、欠陥の自動検出システムを構築した。構築したシステムを用いて欠陥の自動検出実験を行った結果、疑似欠陥や、それに相当する窪みや汚れを自動的に検出できた。今後の開発に向けて、目視検査の担当者から意見を求めた。その結果、構築したシステムは十分に小さな欠陥まで検出できるが、実用化には、溶接線のトレース方法の確立等も必要であることが分かった。

**Key words:** 溶接、研磨仕上げ、目視検査、欠陥、自動検出

### 1. 緒言

平成30年度に引き続き、人による検査よりも高速で見落としがちな自動検査システムを開発して製造現場に導入することを目指して、要素技術の開発に取り組んだ。

今年度は第1報で得た成果を基に、欠陥を自動で検出するための自動検出システムを構築した。自動検出システムは、NATIONAL INSTRUMENTS社のLabVIEWで作成したプログラムを、画像探傷装置に組み込むことで構築した。今回作成したプログラムは、画像処理を行った画像の表示等、検査に必要な機能を有する。また、検査を支援するため、自動で照明を調整する調光機能や、液体レンズで焦点位置を調整する焦点調整機能を有する。そして、自動検出システムを用いて疑似欠陥の自動検出実験を行った結果、欠陥が自動で検出できることが分かった。

その後、生産工程での検証として、目視検査の担当者に、自動検出システムについての感想や改善すべき点に関する意見を求めた。その結果、実用化に向けた要望が得られた。

### 2. 自動検出システムの構築

#### 2. 1. 自動検出システム用プログラム

##### 2. 1. 1. 欠陥の表示と自動検出機能

目視検査は長時間に及び集中を要するので、担当者の負担は心身共に大きい。ヒューマンエラーによる検査結果や生産への影響も排除できないため、最終的には完全自動化が理想である。しかし、完全自動化には検査に対する高い信頼が必要であり、完全自動化の前には、関係者による十分な検証が必要である。そこで、自動検出システム用プログラム（以下、「プログラム」と呼ぶ）は、自動で欠陥を検出すると同時に、検査の結果を担当者が検証できるものにした。

今回作成したプログラムは、二つの画像を並べて同時に表示できる。一方は画像処理をせずに、画像探傷

装置のカメラからの画像を表示するものである。もう一方は、三段階の画像処理を加えて、欠陥を自動検出した結果を表示するものである。一段階では、欠陥の可能性のある画素を選択している。欠陥のグレースケール値は、研磨面に比べて小さくなる。そこで、グレースケール値に閾値を設けることによって、閾値以下の画素を選択している。しかし、一段階だけでは、欠陥の大きさを考慮できない。カメラで観察している領域の広さと、画像センサーの画素数は決まっている。そのため、図1に示すように、隣り合っている画素の集合体を一つの粒子とすると、欠陥の大きさは粒子に含まれる画素数に大凡等しいと考えた。そこで二段階では、一段階の結果に加えて、粒子を選別する。選別では、粒子が含む画素数に閾値を設けることによって、閾値以上の数の画素が含まれる粒子を欠陥として選択する。三段階では、担当者が欠陥の存在を確認するために、当初は、二段階で選択した粒子に着色することにした。しかし、粒子に含まれる画素はわずか数画素で小さい場合もあるため、検査の担当者が見落としとして検証できない恐れがあると考えた。そこで、三段階では、図2に示すように、粒子の周りに画素を加えることによって、欠陥をハイライトすることにした。なお、ハイライトする際には、加える画素数と着色に用いる色は任意に指定できる。以上のように、並べて同時に表示される二つの画像によって、担当者は自動検出の結果を検証できる。

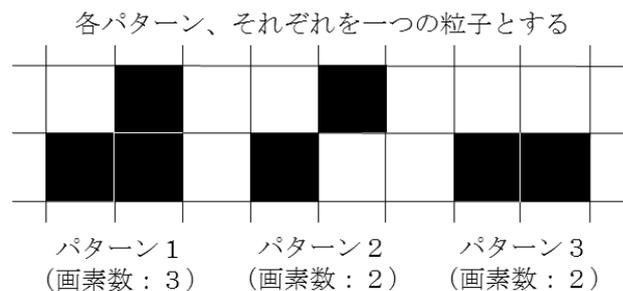


図1 粒子の例

加える画素数が1、着色に用いる色が■の場合

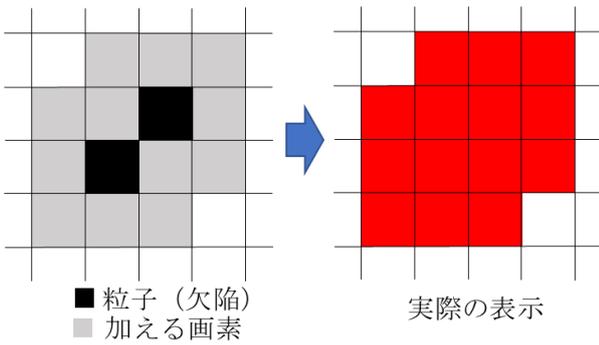


図2 欠陥のハイライト

## 2. 1. 2. 調光機能

画像探傷装置のカメラは、入射する光の量に応じて、画素ごとに信号を出力する。しかし、光の量が画素の上限以上になった場合、出力も上限に達して変化せずに飽和する。飽和すると光の量に応じた信号が出力できないので、飽和しないように照明を調整する必要がある。また、今回のように、グレースケール値の差を利用して画素や粒子を選択する場合は、グレースケール値の差を最大にすることが、検査精度の向上に重要である。しかし、グレースケール値を監視しながら、担当者が検査中に照明を調整することは、作業効率の点からも難しい。そこで本プログラムでは、照明の出力を自動的に調整する調光機能について検討した。

適正な照明の調整について検討するため、画像探傷装置と、研磨面上に疑似欠陥を設けた試験片を用いて、照明の設定値とグレースケール値との関係を検討した。その結果、図3に示すように、飽和する直前と考えられる照明の設定値で、グレースケール値の最大値（研磨面）と最小値（疑似欠陥）との差を最大にできることが分かった。よって、飽和しない範囲でグレースケール値が最大となるように、照明の出力を調整する必要があることが分かった。

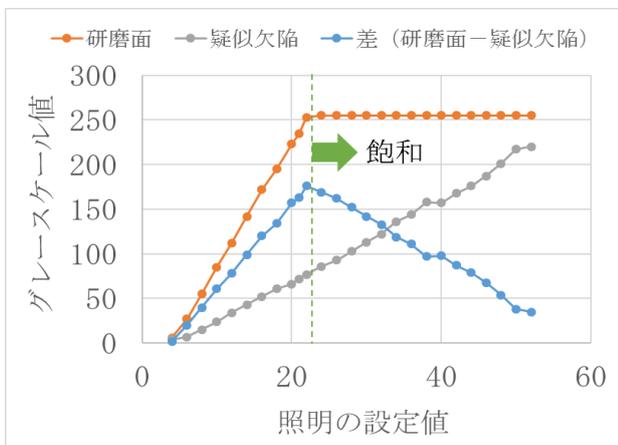


図3 照明とグレースケール値の関係

当初は、グレースケール値が飽和するまで、照明の設定値を自動的に一段階引き上げることで光の量を増加させ、逆に、飽和した場合は自動的に一段階引き下げて、光の量を減少させるようにした。しかし、この動作では、飽和した瞬間に光量は減少するが、次には光量を増加させて飽和する動作を繰り返すため、頻繁に光量に変化して検査に支障があることが分かった。そのため、照明の設定値の一段階あたりの変化量を考慮したうえで、下限値も設定することで、グレースケール値が適切な範囲に調整されるようにした。これによって、調光機能を起動している間は、飽和しない範囲でグレースケール値がほとんど最大となるように、照明の出力を自動的に調整することができる。

## 2. 1. 3. 焦点調整機能

自動検出システムでは、画像を用いて欠陥を検出するため、焦点位置を適正に調整する必要がある。当初は、固定焦点レンズのみを用いたため、レンズまたは検査対象を移動させることによって焦点位置を調整した。しかし、焦点位置の調整には、検査箇所を移動する度に、精密な位置決めが必要なため、検査の担当者にも大きな負担となる。そこで、液体レンズを用いた自動の焦点調整機能について検討した。液体レンズは、印加する電圧に伴って焦点位置が移動する、エドモンド・オプティクス・ジャパン社の液体レンズ実装固定焦点レンズ（焦点距離 50[mm]）を用いた。

液体レンズの焦点位置を決定するパラメータを検討するため、画像探傷装置に装着した液体レンズの印可電圧を固定して、研磨面上に疑似欠陥を設けた試験片を観察した。はじめに、疑似欠陥の画像が最も鮮明に見えるように、研磨面を移動することで焦点位置を調整し、その位置のデフォーカス量を 0[mm]とした。なお、デフォーカス量は、研磨面をレンズから遠ざける方向を正とした。同じく、研磨面をレンズに近づける方向を負とした。

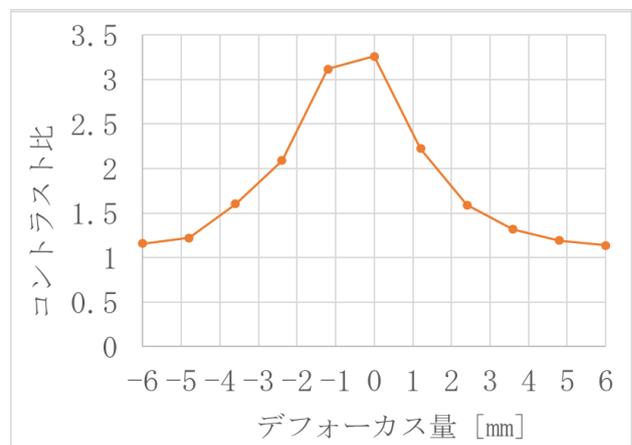


図4 コントラスト比と焦点位置の関係

各画素のグレースケール値から求めた、画像のコントラスト比（最大値／最小値）とデフォーカス量との関係を図4に示す。その結果、コントラスト比はデフォーカス量0 [mm]で最大となることが分かった。そこで本プログラムでは、コントラスト比によって焦点位置を調整する焦点調整機能を設けた。焦点調整機能は、起動する度に、次の（1）～（2）の動作を一回のみ行う。

- (1) 液体レンズに印加する電圧を変化させて、焦点位置を移動させる度に、コントラスト比を比較する。なお、焦点位置を移動させる範囲は任意に設定できる。また、移動させるピッチは約0.01 [mm]である。
- (2) コントラスト比が最大となる位置を焦点位置として、その時の電圧を液体レンズに印加することによって、自動で焦点位置を設定する。

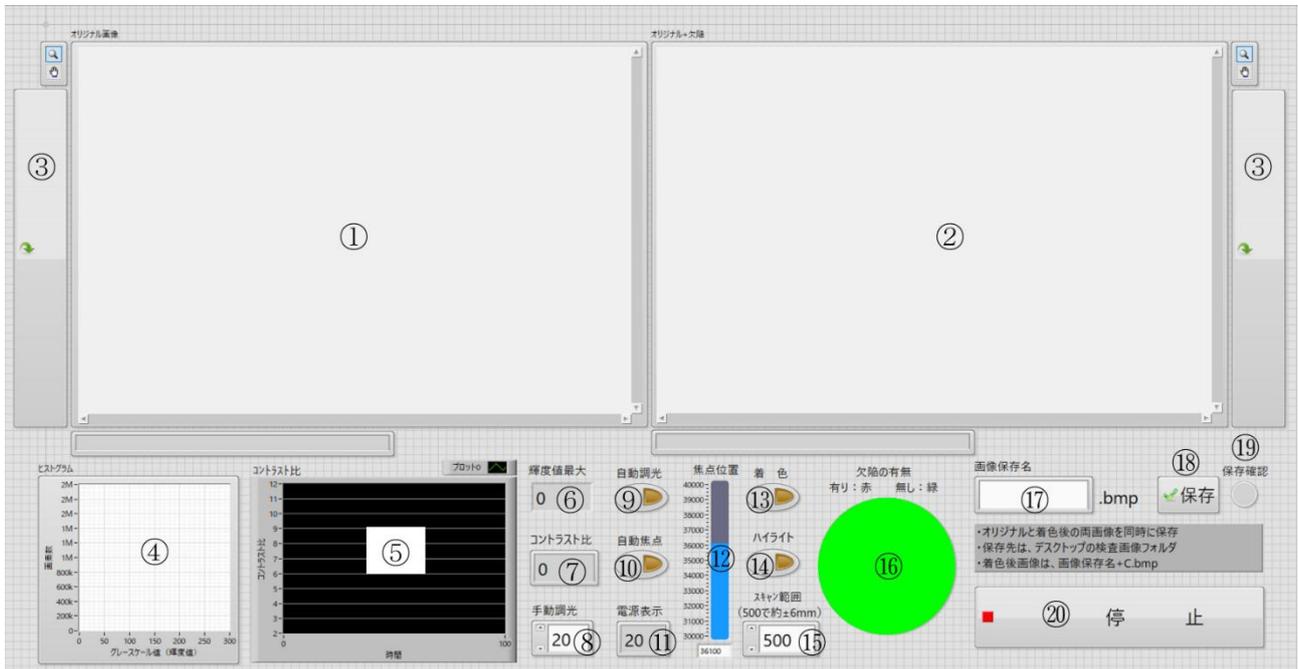
### 2. 1. 4. 実行画面と主な操作方法

図5にプログラムの実行画面である、フロントパネルを示す。(以下、丸数字は図5に示す名称または機能のこと)

①は画像探傷装置のカメラからの画像を、画像処理

を加えずに表示する。②は、三段階の画像処理を加えて、欠陥を自動検出した結果を表示する。欠陥が検出された場合は、⑩が緑色から赤色に変わることで、欠陥の存在が分かる。⑨の起動によって、照明の設定値が自動で調整される。⑫をマウスで操作することで、大凡の焦点位置が設定できる。⑩によって、焦点調整機能が起動する。焦点位置を移動させる範囲は⑮で設定する。焦点位置が設定されると、⑩が解除され、焦点位置の調整が終了する。

①と②に表示された各画像は、⑮をマウスでクリックすることによって、⑮に登録した名称で同時に保存される。特に②の画像は、名称の末尾に「+C」が加えられる。ファイルの保存が成功した場合には、⑮が青色に点灯することで、画像が確実に保存されたことを確認できる。⑮は登録したショートカットを用いることでも、同等の保存動作ができる。自動検出した結果の検証を支援するため、①及び②の画像は拡大表示もできる。画像の任意の箇所にマウスカーソルを合わせてクリックする度に、クリック箇所を中心に拡大される。そして、拡大された画像は、③をクリックすることによって、初期の大きさに復帰できる。



- |               |              |              |               |
|---------------|--------------|--------------|---------------|
| ① 画像表示部(処理無し) | ⑥ 最大グレースケール値 | ⑪ 照明出力表示     | ⑯ 欠陥無(緑)→有(赤) |
| ② 画像表示部(処理有り) | ⑦ コントラスト比    | ⑫ 手動焦点調整     | ⑰ ファイル名指定欄    |
| ③ 画像復帰        | ⑧ 手動調光       | ⑬ 欠陥着色起動・停止  | ⑱ ファイル保存      |
| ④ グレースケール値の分布 | ⑨ 調光起動・停止    | ⑭ ハイライト起動・停止 | ⑲ 保存確認        |
| ⑤ コントラスト比-時間  | ⑩ 焦点調整起動     | ⑮ スキャン範囲設定   | ⑳ 緊急停止        |

図5 フロントパネルと各部の名称または機能

### 2. 2. 自動検出実験

検出能力を確認するため、構築した自動検出システ

ムを用いて、疑似欠陥が設けられた研磨面の自動検出実験を行った。自動検出実験には、第1報の検出実験

と同様に、研磨仕上げを行ったステンレス鋼板上に目印並びに目印の内側に直径約 50 [μm] の疑似欠陥を設けた試験片を用いた。図 6 に実験の様子を示す。

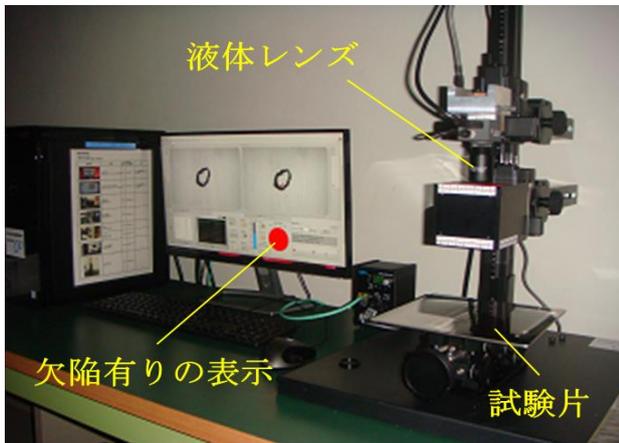


図 6 自動検出実験の様子

実験は、次の (1) ~ (4) の手順で、暗室にて行った。

- (1) 照明の出力を自動的に調整 (⑨を起動)
- (2) 手動操作による、焦点位置の設定 (⑫を操作)
- (3) 焦点位置を自動的に調整 (⑩を起動)
- (4) 欠陥の自動検出

はじめに、画像処理を加えない①画像表示部の画像を、図 7 に示す。図 7 から、目印の内側に疑似欠陥が確認できる。他にも、グレースケール値が小さい、いくつかの点があることが分かる。

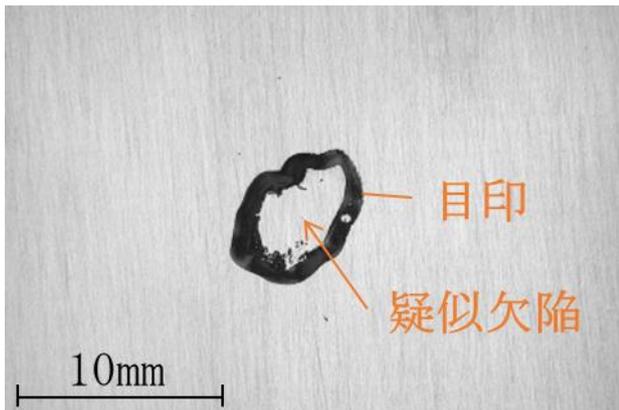


図 7 検出実験の結果 (画像処理無し)

次に、画像処理を加えた②画像表示部の画像を図 8 に示す。疑似欠陥が自動検出され、指定した色である赤でハイライトされていることが分かる。欠陥が存在する場合は緑から赤に点灯する⑬も赤く点灯している。また、疑似欠陥以外にも数か所がハイライトされ、欠陥として検出されていることが分かる。

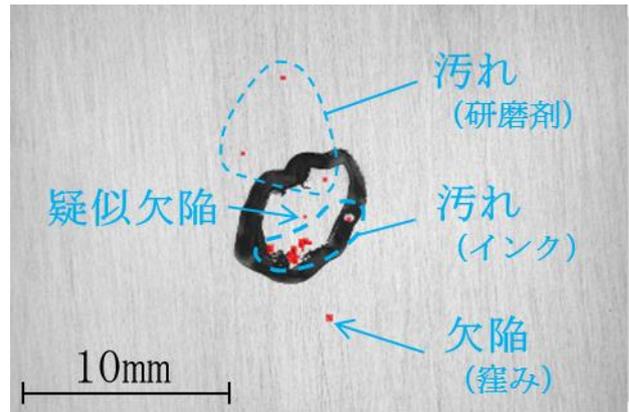


図 8 検出実験の結果 (画像処理有り)

それらの欠陥は、グレースケール値が小さい点として、図 7 でも確認できる。更に、実体顕微鏡等での観察によって、それぞれ、窪み・インク・研磨剤であることが分かった。窪みは欠陥に相当するものであった。インクは、油性ペンを用いて目印を書き込んだ際の滲みであった。目印や滲みは実験のために特別に設けたものであり、通常は存在しない。また、試験片は実験用に試作したため、洗浄工程が省かれていた。そのため、本来は洗浄で取り除かれる研磨剤が残存したものであった。しかし、残存して欠陥に相当する場合は、研磨剤も検出する必要がある。以上より、自動検出システムは、疑似欠陥と欠陥に相当する窪みや汚れを自動検出したことが分かった。

### 3. 生産工程での検証

企業から、実際に目視検査を行っている担当者 7 名を含む、計 10 名が出席した会議を開催して意見を求めた。その結果、主に次のような意見や実用化に向けた要望を得た。

- ・構築したシステムが、十分に小さな欠陥まで検出できることが分かった。
- ・溶接線のトレース方法の確立、ハンド（携帯）タイプの開発並びに曲面への対応も必要である。

### 4. 結言

平成 30 年度に引き続き、要素技術の開発に取り組んだ。プログラムを作成して画像探傷装置に組み込むことで、欠陥の自動検出システムを構築した。構築したシステムを用いて欠陥の自動検出実験を行った結果、疑似欠陥や、それに相当する窪みや汚れを自動的に検出できた。今後の開発に向けて、目視検査の担当者から意見を求めた。その結果、構築したシステムは十分に小さな欠陥まで検出できるが、実用化には、溶接線のトレース方法等の検討も必要であることが分かった。

# オールシーズン対応可能な改質リネン編地の開発

## Research and development of modified-linen knit fabric for all seasons

福島技術支援センター 繊維・材料科 東瀬慎 中村和由  
応募企業 (株)シラカワ二本松工場

本事業では、天然繊維(リネン)と機能性(保温性、吸放湿性等)の関係を明らかにし、両機能性(保温率 $\geq 20$ [%]、吸放湿能力 $\angle MR \geq 25$ [%])を兼ね備えた改質リネンの素材構成を提案した。

Key words : 改質リネン<sup>注1)</sup>、吸放湿能力 $\angle MR$ <sup>注2)</sup>、保温率<sup>注3)</sup>

## 1. 緒言

麻素材(リネン、ラミー)<sup>注4)</sup>は、繊維のハリ(硬さ)と吸湿性の高さに特徴がある。主に夏用素材として麻100[%]、または異素材と複合化することで様々な衣料素材に使用されている。応募企業では、麻素材の中でも繊細でしなやかな「リネン」に着目し、市販のリネン糸を特殊加工(柔軟性、伸縮性及び撥水性を付与)した改質リネン糸の開発に取り組んでいる。

今後、改質リネン糸を現在主流の夏用素材に限定せず、夏は涼しく冬温かいオールシーズン対応のヘルスケア素材として幅広く展開したいと考えている。

しかし、社内における糸状の物性と風合い評価には限界があり、改質リネン糸を使ったニット素材の機能性を評価するには、糸の改質から編地の作製(柄組、編成、試作、評価)まで膨大な開発期間を要することが技術課題の一つになっている。

そこで、改質リネン糸を使ったニット素材と機能性(保温性、吸放湿性等)の関係を、予め知見できれば、今後の開発スピードを短縮する上で有効な手段になると考えられる。なお麻素材の先行文献には、吸放湿性と速乾性に関するものは大川<sup>1)</sup>により示されているが、併せて保温性との組み合わせについて報告された文献は見当たらない。

<研究目的>

改質リネンと機能性の関係を求め、オールシーズン対応可能な素材構成を提案すること。

<研究目標>

改質リネンの吸放湿性、吸放水性及び保温性を明らかにし、両機能(保温率 $\geq 20$ [%]、 $\angle MR \geq 25$ [%])を兼ね備えた試作品(改質リネン横編地)を作製すること。

## 2. 試験方法

### 2. 1. 原料

使用した繊維原料を表1に示す。①②が対照区、それ以外が比較区となる。

①は応募企業より提供された改質リネン 60 番の単糸、②は改質リネンに撥水処理を行った加工糸を示す。

表1 繊維原料

	糸状	混率 [%]	織度 [D]
①	紡績糸	100	234
②			234
綿			252
毛+リネン		80+20	288
絹		100	216
毛			306
PET	長繊維		396

### 2. 2. 試験片作製

試験片用の横編地の作製条件を表2に示す。

表2 横編地の作製条件

	組織	ゲージ	ループ長 [mm]	目数 コース ウェール	編機
編成条件	袋天竺	12	6.0	250 350	(株)島精機 製作所製 FIRST-183S

### 2. 3. 機能性試験

保温率は、保温性試験機(JIS L 1096 保温性 A 法 準拠)の恒温板(36[°C])に横編地を 2[H] 放置し、放散される熱損失 A を求めた。また横編地のないブランク状態で放散される熱損失 B を求め、下記により保温率を算出した。

$$\text{保温率}[\%] = (1 - A/B) \times 100$$

保温率の値が高いほど、衣服を着用した際に外気への熱損失が少なく体温の低下を防ぐことができる。

一方、含気率は横編地の見かけの体積内に含まれる空気の割合を下記により算出した。

$$P = (V - V_r) / V$$

P : 含気率 [%]

V : 横編地の見かけ体積 [cm<sup>3</sup>]

V<sub>r</sub> : 横編地に含まれる繊維実質の体積 [cm<sup>3</sup>]

また安田等<sup>2)</sup>の文献を参考に、図1に示す編地に含まれる水分量を、表3に区分けし、編地の浸漬後に含まれる水分量[最大吸水量]を A+B、また繊維内部に含

まれる吸水量 B を B1+B2+B3 と定義した。

表3 糸状または編地に含まれる水分量の定義

水分 (最大吸水率)	A: 繊維間隙の吸水量(最大吸水率-飽和吸水率)	
	B: 繊維内部の吸水量 (飽和吸水率)	B1: 飽和吸湿量(40[°C], 95[%RH])
		B2: 繊維の内部構造に含まれる水分量
		B3: 繊維表面の吸着する吸水量

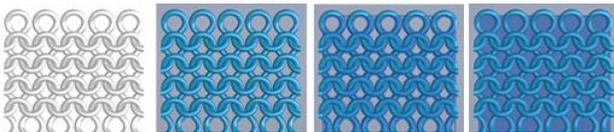


図1 水分量の定義(イメージ)

(左から絶乾状態、B1: 飽和吸湿状態、B: 飽和吸水状態、A+B: 最大吸水状態)

各吸水量、吸湿量は JIS L 1051 の絶乾質量に対する相対割合で算出した。

次に△MR は、絶乾状態(105[°C]、12[H]以上)の重量と霧囲気 X (20[°C]、65[%RH]、12[H]以上)及び霧囲気 Y (40[°C]、95[%RH]、12[H]以上)の重量から各霧囲気の吸湿率を下記により求め算出した。

霧囲気 X の吸湿率[%] =

$$\frac{\text{(霧囲気 X の絶乾重量)} / \text{絶乾重量} \times 100}{}$$

霧囲気 Y の吸湿率[%] =

$$\frac{\text{(霧囲気 Y の絶乾重量)} / \text{絶乾重量} \times 100}{}$$

吸放湿能力△MR[%] =

$$\frac{\text{(霧囲気 Y の吸湿率)} - \text{(霧囲気 X の吸湿率)}}{}$$

△MR[%]は、数値が大きい方ほど衣服を着用した際に、体表面から生じる不感蒸泄[気相の水分]を吸収する能力に優れ、特にインナーウェア等における快適性の目安となる。

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. 各種繊維と保温率、保温率/厚み、及び厚みとの関係

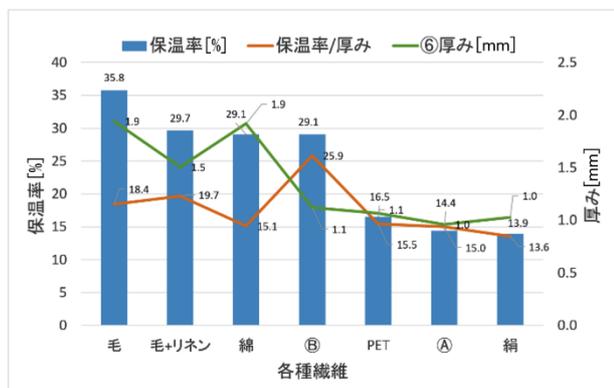


図2 保温率と厚みとの関係

④は応募企業より提供された改質リネン 60 番の単糸、⑥は改質リネンに撥水処理を行った加工糸を示す。図2より合成繊維 PET、④、絹は他の繊維素材に比べ保温率が約 1/2 程度に留まる。⑥の保温率は毛には及ばないものの、毛+リネン及び綿と同等の値を示した。⑥の単位厚み当たりの保温率は、他の繊維素材を上回る結果を示した。

#### 3. 2. 改質リネン④⑥を複合化した際の保温率、保温率/厚みの関係

④、⑥に続く数値は編成時の糸本数を示し、数値が大きいくほど厚い編地となる。数値を含まない④、⑥は単糸で編地を編成したことを示す。

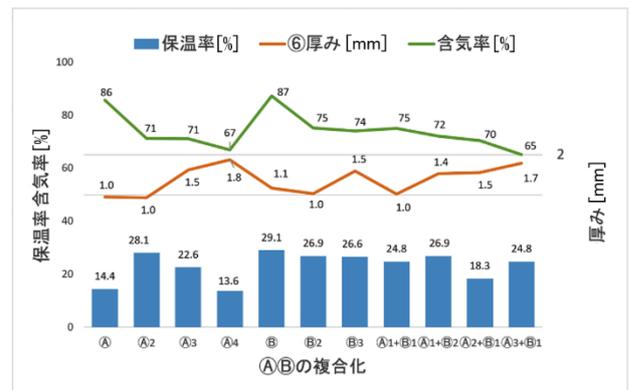


図3 改質リネン④⑥の複合化と保温率の関係

図3より、④は2本編成、⑥は単糸編成時に最も高い保温率を示した。これは編地の含気率が高いほど保温率が高い傾向を示す松平<sup>3)</sup>の結果と一致する。一方、保温率は編地の厚みとは相関が低いことを示唆している。④⑥を複合化した編地は、④2及び⑥の中間的な保温率を示す結果となった。

#### 3. 3. 各種繊維の最大吸水率と飽和吸湿率、飽和吸水率-飽和吸湿率、及び繊維間隙吸水率の関係

図4より、繊維間隙吸水率は、綿が最も高く発汗時の吸水性に優れる素材と言える。飽和吸水率-飽和吸湿率においても、綿、絹は繊維内部及び表面に液相の水分を取り込み易いことを示している。

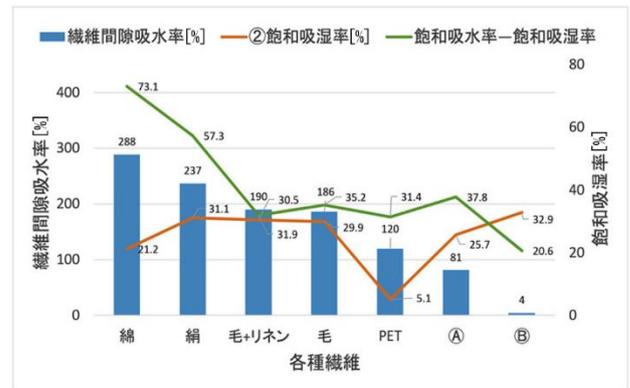


図4 繊維間隙吸水率と飽和吸湿率の関係

合成繊維 PET は、飽和吸湿率が最も低い値を示すことから、着用時の蒸れ感を引き起こし易い素材と推察される。

一方、⑧の繊維間隙の吸水率は極めて低い値を示す。これは合成繊維 PET の約 1/30、④の約 1/20 に相当し、多量の発汗や降雨による吸水、及び浸水後にも服地が重くならないことが示唆される。

よって速乾性が要求されるスポーツ分野、または多く水分を含んだ服地が長時間体温を奪うことが問題視される登山、救難等の衣料として可能性が期待される。

他方、⑧が合成繊維 PET と大きく異なる点は、気相の水分を最も高い割合で吸収することから、着用時の蒸れ感を抑制できる点を兼ね備えていることが挙げられる。

### 3. 4. 各種繊維と標準状態水分率、吸放湿性 $\Delta$ MR 及び飽和吸湿率の関係



図5 標準状態水分率、 $\Delta$ MR 及び飽和吸湿率の関係

吸放湿性 $\Delta$ MR は、標準状態(20[°C]、65[%RH])と多湿状態(40[°C]、95[%RH])により算出した。 $\Delta$ MR[%]は、数値が大きいほど衣服を着用した際に、体表面から生じる不感蒸泄(気相の水分)を吸収する能力に優れ、特にインナーウェア等における快適性の目安となる。図5より、⑧は最も $\Delta$ MRの値が大きく、合成繊維 PET の約5倍、毛の約2倍、絹の約1.4倍の快適性を示す。これは着用時の蒸れ感を抑制する飽和吸湿率が極めて高いことに裏付けられている。

### 3. 5. 各種繊維の最大吸水率と乾燥時間[未脱水、8分脱水]の関係

図6より最大吸水率が最も高いのは綿、最も低いのが⑧となる。発汗時の吸水率に優れる綿は、その反面発汗後の濡れ感、汗冷えが不快感を増し、未脱水から標準状態までの乾燥時間は約14時間、また8分脱水後でも約8時間程度の乾燥時間を要する。

一方、⑧は最大吸水率が最も低く、未脱水から標準状態までの乾燥時間は、合成繊維PETよりも短い約1.4時間、8分脱水後も約1時間程度で乾燥することを示

す。

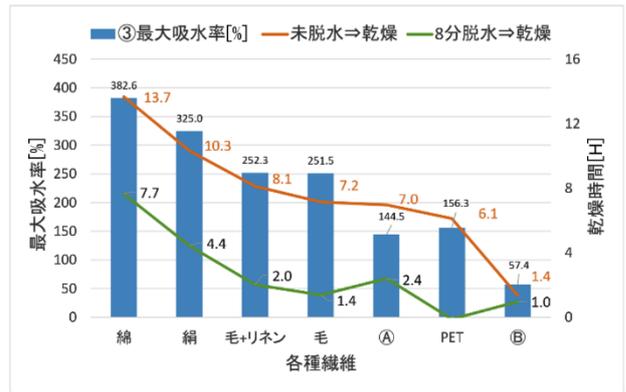


図6 最大吸水率と乾燥時間の関係

### 3. 6. 改質リネン横編地の試作

以上の結果から、単位厚み当たりの保温率 $\geq$ 20[%]、 $\Delta$ MR $\geq$ 25[%]を満たし、併せて高い速乾性を兼ね備えた改質リネン糸⑧を使用した下記の試作品を作製した。



図7 改質リネン横編地の試作品  
(7[G]リンクス柄ホールガーメント、重量:360[g])

## 4. 結言

本研究により、改質リネン+撥水处理を施した⑧単独または改質リネン④を複合化することで、綿、毛、毛+リネン、絹、PET素材よりも優れた単位厚み当たりの保温率 $\geq$ 20[%]、 $\Delta$ MR $\geq$ 25[%]を満たし、併せて高い速乾性が達成できると推測される。

### 参考文献

- 1) 大川治次: 繊維機械学会誌, P77-84, Vol. 33, 1(1980).
- 2) 安田, 田中, 山内, 渡辺: 繊維製品消費科学会誌, P150-152, Vol. 4, 3(1963).
- 3) 松平光男: 金沢大学教育学部紀要(自然科学編), P44(2000).

## 用語解説

注 1) 改質リネン

市販のリネン素材に特殊加工を施し、柔軟性と伸縮性及び撥水性を付与した加工糸。

注 2) 吸放湿能力△MR

△MR は、絶乾状態(105[°C]、12[H]以上)の重量と雰囲気 X (20[°C]、65[%RH]、12[H]以上)及び雰囲気 Y (40[°C]、100[%RH]、12[H]以上)の重量から各雰囲気の吸湿率を下記により求め算出した。

雰囲気 X の吸湿率[%] =

(雰囲気 X の絶乾重量) / 絶乾重量 × 100

雰囲気 Y の吸湿率[%] =

(雰囲気 Y の絶乾重量) / 絶乾重量 × 100

吸放湿能力△MR[%] =

(雰囲気 Y の吸湿率) - (雰囲気 X の吸湿率)

注 3) 保温率

保温性試験機(JIS L 1096 保温性 A 法準拠)の恒温板 36[°C]に横編地を 2[H]放置し、放散される熱損失 A を求めた。また横編地のないblank状態で放散される熱損失 B を求め、下記により保温率を算出した。

保温率[%] = (1-A/B) × 100

注 4) 麻素材(リネン、ラミー)

麻は天然繊維に分類され、植物の茎を利用したじん皮繊維のこと。衣料の「麻」は麻(リネン)と苧麻(ラミー)の二種類のみ。

# コーティング繊維織物を活用した杳調（柾目）織物の開発

The development of quarter-sawn Kasuri textile which utilize coated yarns

福島技術支援センター 繊維・材料科 中村和由 東瀬 慎  
 応募企業 アルテクロス株式会社

応募企業が持つ技術シーズである2色押出成形技術および広幅織物製織技術と、織物シミュレーション技術を活用することによって、「柾目」調の緋織物の開発を行い、エクステリア対応型カバーシートと木製構造物用化粧シートの試作を行った。今後、風化や腐食、腐朽から防御する木製構造物用の化粧シートとしての活用を検討していきたい。

Key words: 2色押出成形、織物シミュレーション、コーティング繊維、「柾目」調織物

## 1. 緒言

応募企業は、企業シーズであるコーティング繊維及び広幅織物製織を活用することで、インテリアからエクステリア用途を視野に入れた、幅広い素材開発に取り組んでいる。本研究で開発を目指す織物は、織物設計と製織後の熱処理を組み合わせることで、通気量、透水量、遮光率をコントロールできるため、屋外用織物シートとして、また構造物を風化や腐食、腐朽から防御する化粧シートとして、今後、市場ニーズが期待できる。

例えば、公園や遊歩道、キャンプ場、または店舗や住宅等の屋外に設置されているベンチ、デッキ類の木製構造物は「木目」独特の質感と景観が広く好まれるものの、およそ数年で紫外線や風雨による風化や菌類による腐朽で劣化が進み、耐候性、耐久性に劣るものが数多く見られる。

そこで、屋外用途の木製構造物の表面に、耐候性と耐久性に優れたPVC織物シート(化粧シート)を「木目」調(杳調)に製織し、木製構造物の劣化を防御することができれば、長期の製品寿命とデザイン性を付与することが可能である。

一方、「木目」の一つである「柾目」は模様織物の「緋織」に相当し、これを実現するには「杳糸」(複数本の色糸を撚り合わせた糸)、または「緋糸」(複数色に染め分けた糸)と呼ばれる加工糸を作製する必要がある。仮に「杳糸」「緋糸」をPVCコーティング繊維で再現できれば、耐候性と耐久性、デザイン性を兼備した高付加価値な織物シートの提供が可能となり、幅広い用途展開が期待できる。

## 2. 実験

### 2.1. 実験内容

本研究の研究内容を表1に示す。

表1 研究内容

	研究目標	技術課題	解決策
①	杳調のコーティング繊維の開発	従来、緋織物に使用される「杳糸」または「緋糸」は多段階の糸加工を必要としているため、製造コストが高くなる。	二色押出成形機により、一段階で杳調のPVCコーティング繊維を製造できる条件を検討する。
②	「柾目」模様の「緋織」を実現する織物の開発	コーティング繊維を経糸と緯糸に使用すると、製織後、経糸に大きなクリンプが発生し、柾目調織物になりにくい。	経糸のクリンプを小さくするために、緯糸および緯糸密度を見直した織物設計を行う。

### 2.2. 実験試料

本研究で使用した実験試料は表2のとおりである。

表2 実験試料一覧

	素材	製造メーカー
芯材	モノフィラメントPET (織度: 250[dtex])	NANYA
シーズ材	ポリ塩化ビニル(重合度: 700) (※企業と樹脂メーカーで共同開発中の樹脂)	信越ポリマー(株)

### 2.3. 使用機器

本研究で使用した機器は表3のとおりである。

表3 使用機器一覧

	機器名	評価項目	条件
2色押出成形機	RS/PVC2 (RAIHSING)	コーティング繊維試作	仕上り外径: 0.50[mm]
アパレルCADシステム	APEX3 (株)島精機製作所	糸加工、織物シミュレーション	
レピア織機	G6500 (SULZER)	織物試作	製織速度: 180[rpm]
リリヤン加工機	K-5 ((有)小塚コーポレーション)	緯糸用試作糸加工	針本数: 4[本]

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1. 空調のコーティング繊維の開発

##### 3. 1. 1. 織物シミュレーションによる撚糸条件の検討 (アパレル CAD システム)

###### (1) シミュレーション技術の活用

応募企業でコーティング繊維織物を製造する場合、コーティング繊維の製造から織物の製織まで約1か月かかる。さらに製品開発においては、コーティング繊維の押出条件から織物の設計条件まで、複数の製造段階で製造条件の検討を行う必要があり、織物の試作回数も膨大になるため、企業では人的およびコスト面で大きな課題となっている。

そこで本研究では、アパレル CAD システムにより、糸および織物のデザインをシミュレーションし、製造条件を選定することによって、短期間に効率よく、柎目調織物を開発することを目指した。

###### (2) 空調のコーティング繊維および織物のシミュレーション結果

柎目調織物を製造するためには、経糸に撚りをかけた空調のコーティング繊維の開発が必要である。

そこでアパレル CAD システムを活用して、撚糸回数 [T/m] を変えた空調コーティング繊維と織物をシミュレーション (条件は表4、表5に示す) し、柎目調織物に必要な経糸の撚糸回数および緯糸の条件を検討した。

表4 撚り回数シミュレーション条件

繊維の太さ (外径) [mm]	0.50 (0.25mm(白)と0.25mm(黒)のモノフィラメント糸を合わせた。)
撚糸条件範囲 [T/m]	0 ~ 200
撚り方向	S

表5 織物シミュレーション条件

織物組織	平組織
製織密度 [本/cm]	経 : 20、緯 : 7
糸織度 (外径) [mm]	経糸 : 0.50、緯糸 : 0.35

なお、撚糸回数シミュレーションについては、色違いの2本のモノフィラメントを合わせ、1本の2色コーティング繊維とみなしてシミュレーションを行った。(図1、図2)

織物シミュレーションの条件について、織物組織は基礎的な組織である平組織、経糸密度については細密である 20[本/cm]、また緯糸は透明糸 (柎目調織物には、整経時の経糸の配列を維持し、緯糸は目立たないことが必要であるため) を使用した。

まず、図1より撚糸回数を 0[T/m] (無撚)、50[T/m]、100[T/m]、200[T/m] に設定し、経糸の撚糸回数の違いにより織物表面の経縞の変化について比較した。その結果、撚糸回数 50[T/m] 以上では、柎目調の縦縞を再現し難いことが分かった。

そこで撚糸回数を減らし、再度条件を検討した。その結果、10[T/m] 以下の条件において、柎目調の規則的な経縞 (図2) になることが分かった。この条件を定量化するため、1m<sup>2</sup> 当たりのカラーリピート (2色の切り替え回数 : 経糸本数 [本/cm] × 100 [cm] × 撚糸回数 [T/m]) を求めた結果、2~20 × 10<sup>3</sup> [回/m<sup>2</sup>] の範囲が柎目調織物を開発するための条件であることが分かった。

よって本研究では、この範囲を満たす経糸用コーティング繊維の試作を行った。

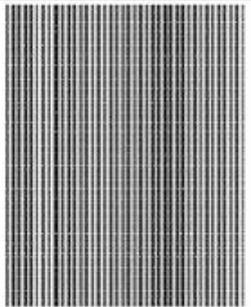
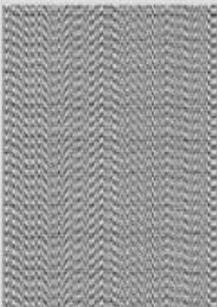
経糸の撚糸回数 [T/m]	0	50	100	200
シミュレーション結果				
カラーリピート [回/m <sup>2</sup> ]	0	100 × 10 <sup>3</sup>	200 × 10 <sup>3</sup>	400 × 10 <sup>3</sup>

図1 撚糸回数 (0[T/m]~200[T/m]) を変えた織物シミュレーション結果

経糸の撚糸回数 [T/m]	1	2.5	5	7.5	10
シミュレーション結果					
カラーリピート [回/m²]	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^3$	$10 \times 10^3$	$15 \times 10^3$	$20 \times 10^3$

図2 撚糸回数 (10[T/m]以下) を変えた織物シミュレーション結果

### 3.1.2. 2色押出成形機による空調のコーティング繊維の試作

一般に空糸を製造するためには、撚糸加工等の多段階の糸加工が必要になるが、応募企業が保有するクロスヘッドタイプの押出成形機を活用することによって、一段階で撚糸回数を制御した空調のコーティング繊維が製造できると考えた。

本研究では、表6の条件でコーティング繊維 (撚り方向:S、撚糸回数:約4.5[T/m]) を試作した (図3)。

表6 コーティング繊維の押出条件

成形温度 [°C]	150~175
巻き取り速度 [m/s]	600
冷却距離 [cm]	40
目標外径 [mm]	0.50
押出量の比率	ホッパーA : ホッパーB = 50 : 50

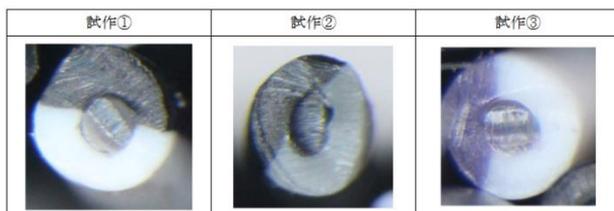


図3 試作コーティング繊維断面

図3に示す試作コーティング繊維の断面を観察すると、加工条件が同じにも関わらず、試作②と試作③は繊維断面の比率に差があることが分かった。これはカラーバッチの違いが影響したと考えられる。

### 3.2. 「柁目」模様の「緞織」を実現する織物の開発

#### 3.2.1. 「柁目」調織物を実現するための緯糸の検討

本研究においては、新たに図4の織物設計を検討した。この織物の特徴は、経糸に対して緯糸のみがクリンプするため、規則的な経縞模様を表現する柁目調織物を開発することができると考えた。

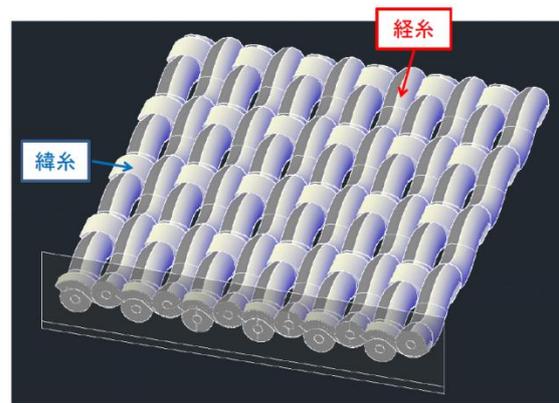


図4 本研究で開発を目指す熱処理後の織物

緯糸は、経糸に対して柔軟で、細く、経縞模様に影響しない透明な糸を使う必要があるため、マルチフィラメントのPETを使用することとした。

次に織物組織はシミュレーションで検討した平組織 (表5) に対して、応募企業と検討した結果、裏面により多く緯糸が配置され、表面に規則的な経縞を表現できる織物組織 (図5) を採用し、そのシミュレーション結果は図6のとおりである。

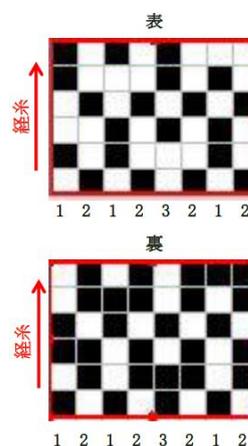


図5 本研究で製織した織物組織

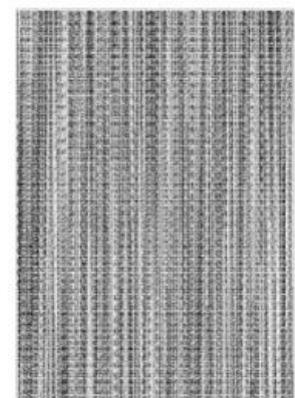


図6 図5の織物組織による織物シミュレーション結果 (設計条件は表5と同じ)

また緯糸密度は、織物構造を形成できる下限値の5[本/cm]から緯糸挿入の上限値である12[本/cm]の範囲において図7に示す織物シミュレーションを行った。

その結果、この範囲内では、経糸の規則的な経縞模様を表現できることが分かった。

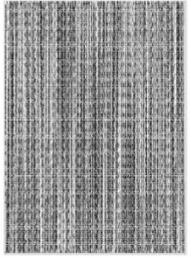
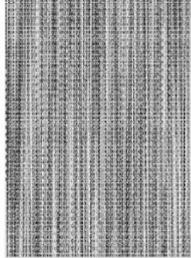
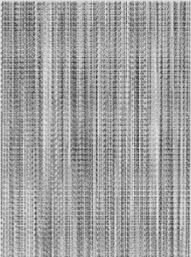
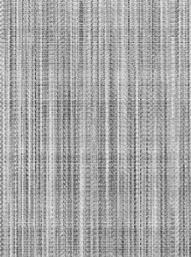
緯糸密度 [本/cm]	5	7
シミュレーション結果		
緯糸密度 [本/cm]	10	12
シミュレーション結果		

図7 シミュレーションによる変化組織(図5)の緯糸密度の検討結果(経糸密度:20[本/cm]、経糸の撚糸回数:5[T/m])

実際には、経縞の柄と織物の軽量化を重視して表7に示す製織条件で試作を行い、規則的な経縞模様を表現した柎目調織物(図8、図9)を開発することができた。なお、開発した柎目調織物の仕様は表8のとおりであり、耐候性について応募企業と樹脂メーカーで耐候性試験を進めている。

表7 製織条件

織組織	変化組織(図5)
織密度 [本/cm]	経:20、緯:6
使用糸	経糸:コーティング繊維(5[T/m]、0.50[mm]) 緯糸:PETマルチフィメント33[D]

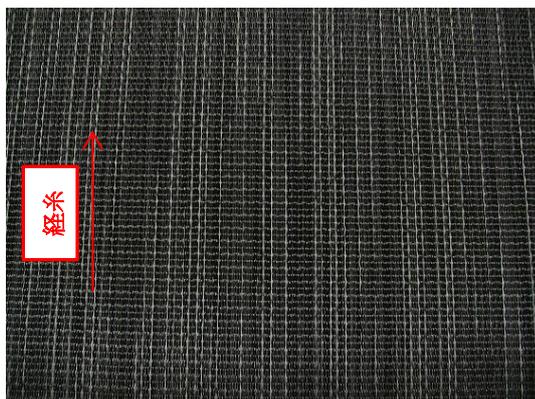


図8 試作した織物の外観

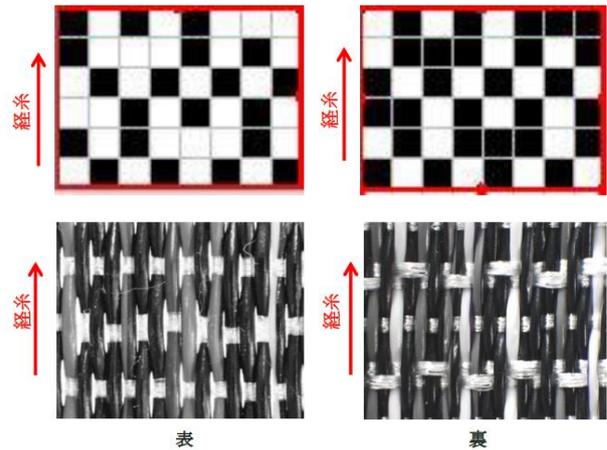


図9 織物組織と試作織物

表8 試作柎目調織物の仕様

厚み [mm]	目付 [g/m <sup>2</sup> ]	通気度 [cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ・s]	耐候性
0.97	591	48.3	チョーキングなし (試験機:スーパーUVテスター 紫外線照度:150±8[mW/cm <sup>2</sup> ] 試験時間:300[h])

一方で、織物シミュレーションでは分からなかった織物の経糸間の隙間が発生し、柎目調の縦縞を再現できないことが分かった。

そこで新たにPETに熱融着糸(ナイロン、56[D])を組み合わせ、熱処理により織物の経糸間の隙間の解消に取り組んだ。

緯糸は製織時の糸のばらけ防止を目的に、収束性に優れたリリヤーン加工(図10)を行った。

再試作の結果を図11に示す。緯糸のPETに熱融着糸を組み合わせ、熱処理を行うことによって、経糸間の距離が縮まり、織物の経糸間の隙間を解消することができた。

また、図12に示す緯糸断面を観察すると、経糸に対して緯糸のみがクリンプしており、本研究で目指した柎目調織物を開発することができた。



図10 緯糸用リリヤーン糸(加工後織度:560[D])  
(PET+熱融着糸)

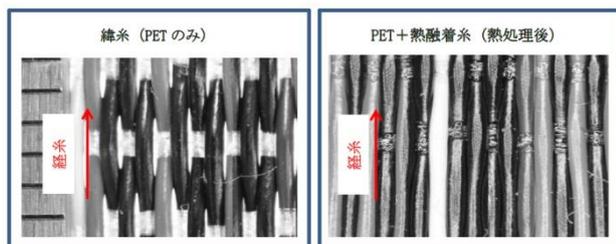
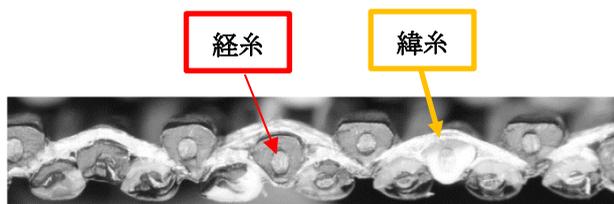


図1.1 熱処理後の柎目調織物表面

図1.2 熱処理後の柎目調織物の経糸断面  
(緯糸：PET+熱融着糸)

### 3.2.2. 柎目調織物の試作事例

開発した柎目調織物を活用して、エクステリア対応型カバーシートと木製構造物用化粧シートの試作を行った(図1.3、図1.4)。

その結果、①織物を裁断しても熱融着により末端がほどけずに、自由形状に加工できる、②織物の緯糸方向が柔軟であるため、製品の曲率が大きい部分等においても、その形に追従して試作できることが分かった。



図1.3 エクステリア対応型カバーシート

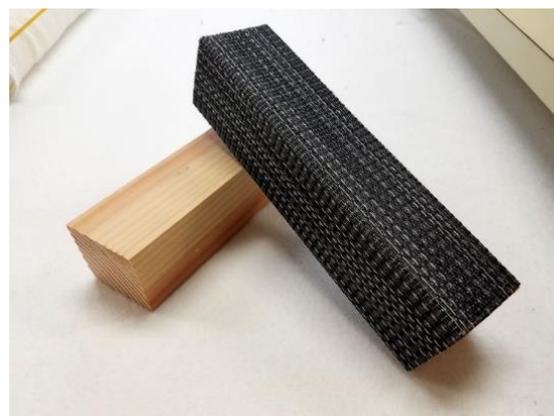


図1.4 木製構造物用化粧シート

## 4. 結言

### 4.1. 空調のコーティング繊維の開発

- ・従来、多段階の糸加工が必要だった空糸について、応募企業の技術シーズ(クロスヘッド型の押出成形機)によって、一段階で撚糸回数を制御した空調のコーティング繊維を製造することができた。
- ・柎目調織物を製織するためには、単位面積当たりのカラーリピートを、 $2\sim 20 \times 10^3$  [回/m<sup>2</sup>]の範囲に設定することが重要であることが分かった。

### 4.2. 「柎目」模様の「緋織」を実現する織物の開発

- ・織物シミュレーションを活用することによって、短期間で柎目調織物の開発を行うことができた。
- ・経糸に対して緯糸のみがクリンプする織物設計を行った。さらに、緯糸にPET+熱融着糸のリリヤーン糸を使用し、製織後熱処理することによって、織物の経糸間の隙間を解消することができた。

## 5. 参考文献

- 1) 特開昭 58-191243 「天然木意匠木目織物」
- 2) 特許 4698763 「複雑な柄の製織方法」

# 縫製企業の接着工程における最適条件の検討と工程改良の提案

Consideration of optimal conditions and the proposal for process improvement of fabric bonding process

福島技術支援センター 繊維・材料科 中村和由 佐藤優介 東瀬 慎  
 応募企業 永山産業株式会社

製品の仕立て映え性を左右する接着芯の接着条件について検討した結果、短時間に効率よく目標の剥離強度を満たす接着条件を見つけることができた。また、紙製位置決めシートに替わる材質を検討した結果、技術課題を解決した新規の位置決めシートを提案した。

Key words: 仕立て映え、接着芯、芯貼機

## 1. 緒言

応募企業は、紳士、婦人用の高級シャツを製造している縫製企業である。高級シャツを構成する複数のパーツの中には、カラー(襟)、カフス(袖口)、ラベル(前立)と呼ばれる、仕立て映え性を左右する主要な三つのパーツがある(図1)。このパーツの接着工程(図2)では、表生地と接着芯の最適な条件で熱接着することが要求されるが、申請企業では表1に示す技術課題(図3)を抱えており、量産体制の構築に影響を及ぼしている。



図1 Yシャツの芯貼部位

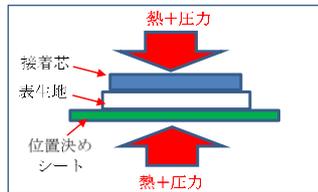


図2 接着工程の概略図



図3 バインダーの残留

表1 研究内容

内容	技術課題
接着芯地の最適な接着条件の提案	樹脂バインダーの種類ごとに接着芯の接着条件を検討するためには、十分な人的、時間的資源を割く必要があり、応募企業単独では困難である。また応募企業が行っている評価方法(最大剥離強度)とJIS規格(JIS L 1086)の評価方法との差が不明である。 ※目標値: 4.9[N] (500[grf])
表面剥離性と接着性低下を考慮した新規位置決めシートの提案	申請企業が使用している紙製の位置決めシートの場合、接着後にシート表面にバインダーが残留(図3)し、他の表生地を汚染する問題がある。

表2 実験試料一覧

	詳細	備考
表生地	レーヨン98[%]、綿2[%] (260[D] (毛番2/72))	平織物 (経糸: 20[本/cm]、緯糸: 25[本/cm])
接着芯A	企業で問題となった接着芯	
接着芯B	圧力と剥離強度の関係性を検証するために使用した既知の接着芯	樹脂バインダー: ポリアミド

表3 使用機器一覧

	装置名	評価項目	条件
芯貼機	JR-1200LTS (アサヒ繊維機械(株))(応募企業で保有)	剥離試験	接着面積: 25[mm]×150[mm]
アイロンテスター	TSI-100 ((株)大栄科学機器製作所)	剥離試験	接着面積: 40[mm]×100[mm]
万能抗張力試験機	AGS-10kNG ((株)島津製作所)	剥離強度測定	JIS L 1086: 2013 7.10 剥離強さに一部準拠
バネ秤		剥離強度測定	応募企業が剥離強度を測定するために使用中
顕微FT-IRラマンシステム	Nexus670+ Continuum[μm]/Almega (サーモニコレー・ジャパン(株))	バインダーの種類同定	FT-IR透過法
DSC(熱分析装置)	DSC3100S ((株)マックサイエンス)	バインダーの融点測定	昇温速度: 10[°C/min]、 温度域: 20[°C]~300[°C]

## 2. 研究

### 2.1. 研究内容

本研究の研究内容を、表1に示す。

### 2.2. 実験試料

本研究で使用した実験試料は、表2のとおりである。

### 2.3. 実験機器

本研究で使用した機器は、表3のとおりである。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1. 接着芯地の最適な接着条件の提案

##### 3.1.1. 樹脂バインダーの種類同定と融点測定

応募企業で課題となった接着芯 A の樹脂バインダーの種類同定と融点の測定を行った結果、バインダーはポリエチレンで、融点が 129[°C]であることが分かった。(表4)、(図4)、(図5))

表4 樹脂バインダーの種類と融点

	測定結果	測定方法	備考
バインダーの種類	ポリエチレン	FT-IR	ドットタイプ (25ドット /25[mm])
バインダーの融点[°C]	129	DSC	

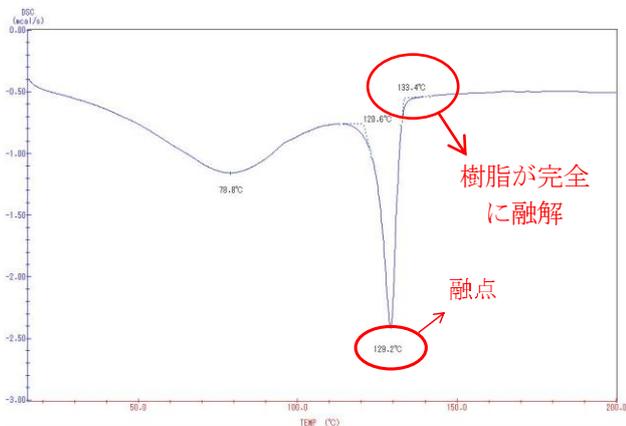


図4 樹脂バインダーの融点 (DSC) 測定結果

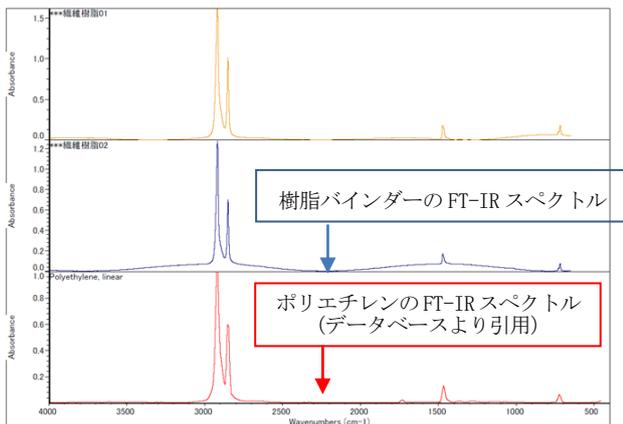


図5 樹脂バインダーのFT-IR 測定結果

##### 3.1.2. 加熱時間と加熱温度による剥離強度の影響

応募企業の芯貼機により融点 (129[°C]) を中心に、接着条件 (140[°C]は芯貼機の限界温度) を変えて剥離試験を行った (図6)。

橙色の領域は今回試験した条件で目標値を超える値を計測した領域であり、赤色の領域は目標値を満たすと推定される領域である。また、目標値を満たす加熱

温度は融点付近以上で、135[°C]ではさらに剥離強度が上昇した。

DSC 測定結果と剥離強度を比較した結果、樹脂の融解が終了する約 133[°C]を超えた加熱温度 (135[°C]) で十分な剥離強度を示すことが分かった。また、生産効率から考えると、短時間に目標値を達成できる 135[°C] (10[s]) が最適条件だと考えられる。

一方で、アイロンテスターと芯貼機の剥離強度を比較 (図7) すると、芯貼機の方が 130[°C]で約 1.3 倍、135[°C]で約 2.0 倍であった。この剥離強度の違いについては、装置の圧力の違いと加熱温度の影響も出ていると考えられるため、引き続き検証が必要であると考えられる。また、本研究で行った接着条件 (加熱温度、加熱時間) の範囲においては、接着不良 (生地寸法変化、テカリ、バインダーの染み出し) は発生することはない。

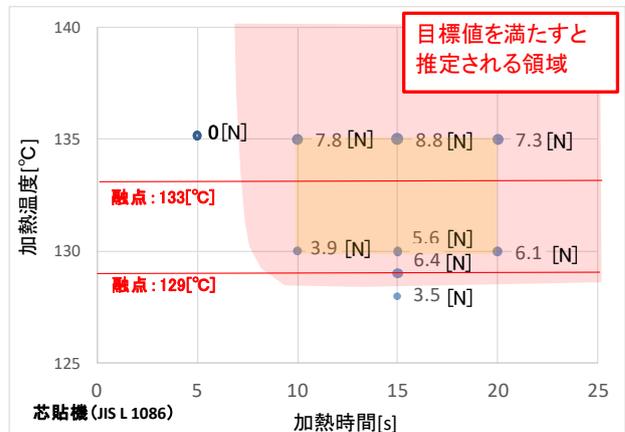


図6 加熱温度と加熱時間による剥離強度の変化 (芯貼機)

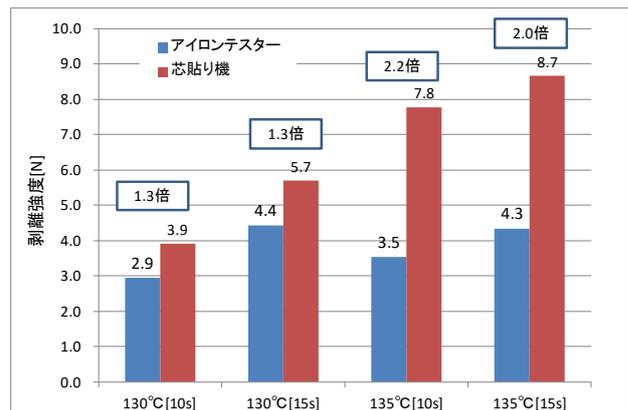


図7 接着芯 A の剥離強度比較 (芯貼機とアイロンテスター)

### 3.1.3. 圧力による剥離強度の影響

接着条件において3つのパラメーター（①温度、②時間、③圧力）を検討するが、申請企業の芯貼機とハイテクプラザのアイロンテスターでは、圧力に違いがある。その影響を検証するため、接着芯 B（樹脂バインダー：ポリアミド）を用いてアイロンテスターを使用し、加熱温度（75[°C]）と加熱時間（15[s]）が一定下で、圧力だけを変えて剥離試験を行った（図8）。

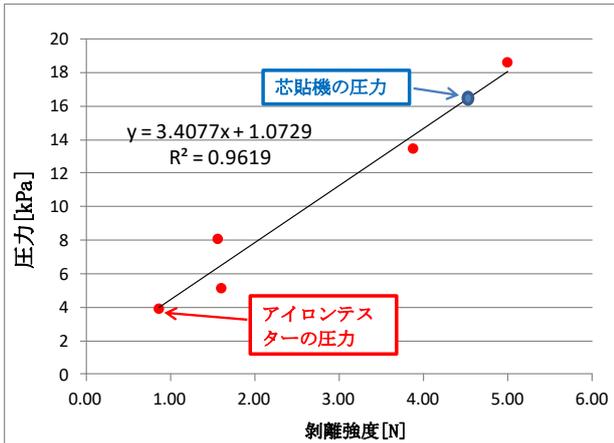


図8 圧力による接着強度の影響

同様に、芯貼機を用いてアイロンテスターと同じ接着条件（75[°C]、15[s]）でサンプルを作製し、剥離強度（4.6[N]）を求め、図8のグラフから得られた近似式より、企業で使用している芯貼機の圧力（16.8[kPa]）を換算した結果、圧力差が約4倍であることが分かった。

しかし、接着芯 B（接着条件：75[°C]、15[s]）を用いて、芯貼機またはアイロンテスターを使用したときの剥離強度の違いを求めた結果、約5倍の差があることが分かった。これは、3.1.2. で行った接着芯 A（樹脂バインダー：ポリエチレン）の剥離強度の差（130[°C]で1.3倍、135[°C]で2倍）と大きく異なっており、剥離強度は圧力差に比例するわけではなく、そのときの加熱温度と樹脂バインダーの種類も併せて影響すると考えられる。

### 3.1.4. 測定方法による剥離強度の違い

本研究では、応募企業が用いているバネ秤りによる最大剥離強度を測定する方法と「JIS L 1086 接着芯地及び接着布試験方法 7.10 剥離強さ」に準拠した測定を行い、測定値を比較した。JIS L 1086 の試験方法は測定結果の中で極大点3点と極小値3点の計6点の平均値により評価する方法である（図9）。

その結果、最大剥離強度と比べると、JIS L 1086 準拠の測定結果は平均して約 25[%]低いことが分かった。

このことから、委託元から提供される縫製仕様書等

で接着芯の接着強度の目標値を JIS L 1086 規格で指定された場合、申請企業で評価している最大剥離強度に換算するためには、JIS 規格の強度の+約 25[%]が目安になると考えられる。

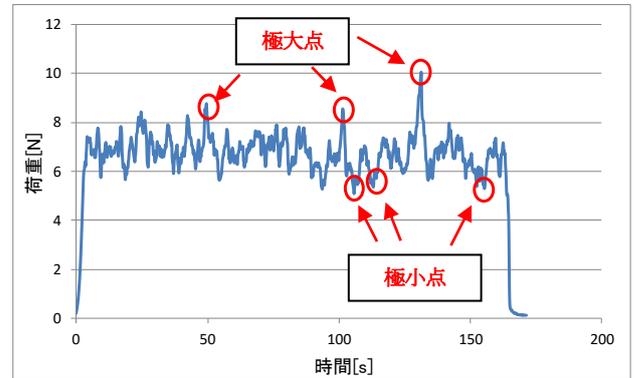


図9 JIS L 1086 剥離強さの測定方法

## 3.2. 表面剥離性と接着性低下を考慮した新規位置決めシートの提案

現在応募企業で使用している紙製の位置決めシートの場合、接着後シート表面にバインダーが残留し、別の表生地を汚染する課題がある。そこで紙製の位置決めシートに代わる新たな材質のシートを検討するために、複数の材質のシートの表面剥離性と形状安定性の評価し、その後、位置決めシートとして使用したときの表生地と接着芯の剥離強度を評価することによって、申請企業に現在の紙製の位置決めシートに代わる新たな材質の位置決めシートの提案を目指した。

### 3.2.1. 材質の異なるシートの評価結果

まず選定したそれぞれの材質について、表面剥離性と形状安定性を評価し現在使用中の位置決めシートと比較した（表5）。その結果、表面剥離性については、剥離強度が 0.8[N]以下であるグラシンシートとテフロンシート（80[μm]、100[μm]、120[μm]）が良好で、接着後にバインダーの残留がなかった。また、形状安定性についてテフロンシート（厚み：100[μm]、120[μm]）は全く変形がなく、グラシンシートについては一部変形が発生したが繰り返し使用できる範囲内ではあった。

2つの項目で評価した結果、現在使用しているシートと比較してグラシンシートとテフロンシート（100[μm]、120[μm]）が良好な結果となった。

表5 材質の異なるシートの評価結果

	位置決めシート(現在使用中)	アルミシート	グラシンシート	テフロンシート			備考
				80	100	120	
厚み[μm]	80	11	100	80	100	120	
表面剥離性[N]	8.7	6.5	0.2	0.4	0.6	0.8	接着条件 1) 加熱温度: 130[°C] 2) 加熱時間: 15[s] 3) 機器: アイロンテスター 4) 樹脂バインダー: 接着芯A
形状安定性	○	×	△	×	○	○	芯貼機に通した後に、シートの形状が保持できるか検証。 (○: 変形無、△: 一部変形、 ×: 全体が変形)

※グラシンシート: パルプを原料とした紙に光沢をつけ半透明に仕上げた薄紙。

※表面剥離性: シート表面に直接接着芯を貼り剥離試験にて評価。数値が小さいほど表面にバインダーが残留しにくい。

### 3. 2. 2. 位置決めシートとして使用したときの表生地と接着芯Aの剥離強度評価結果

実際に接着工程で使用したときを想定して、それぞれの材質のシートを位置決めシートとして使用し、表生地と接着芯Aを芯貼機で接着試験を行い、剥離強度を評価した(図10)。その結果、テフロンシート(100[μm])が剥離強度の目標値(4.9N)を満たし、かつ現在使用中の紙製の位置決めシートよりも剥離強度が向上した。グラシンシートよりもテフロンシート(100[μm])のほうが、剥離強度が向上した理由は、テフロンシート(100[μm])は形状安定性(剛性)の高いため、表生地と芯地の密着性がより高く、その結果接着強度が向上したと考えられる。

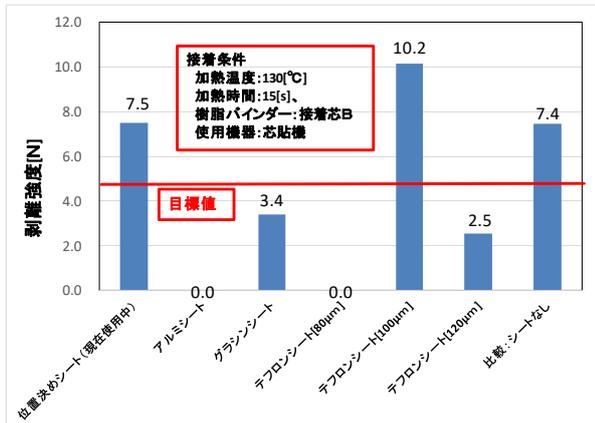


図10 各シートを使用したときの表生地と接着芯地Aの剥離強度

## 4. 結言

### 4. 1. 接着芯地の最適な接着条件の提案

- ・接着芯Aの樹脂バインダーの種類と融点を特定し、最大剥離強度を示す加熱温度と加熱時間の最適条件(135[°C]、10[s])を導くことができた。
- ・樹脂バインダーが完全に融解する温度の+約2[°C]程度で剥離強度を検証することが有効である。
- ・JIS規格の剥離強度から申請企業で評価している最大剥離強度に換算するためには、+約25[%]が目安になると考えられる。
- ・本研究の研究成果より、剥離強度が不十分な樹脂バインダーについては、図11のフローに従い検証することによって、最適な接着条件を求めることが可能となる。

### 4. 2. 表面剥離性と接着性低下を考慮した新規位置決めシートの提案

選定した6種類のシートを評価した結果、表面剥離性、形状安定性、表生地と芯地の接着性についてテフロンシート(100[μm])が最も良好な結果を示したので、応募企業に新規位置決めシートとして提案した。

## 5. 参考文献

- 1) 田村新十郎, 接着芯地について, 繊維製品消費科学, 1987, p18-22.

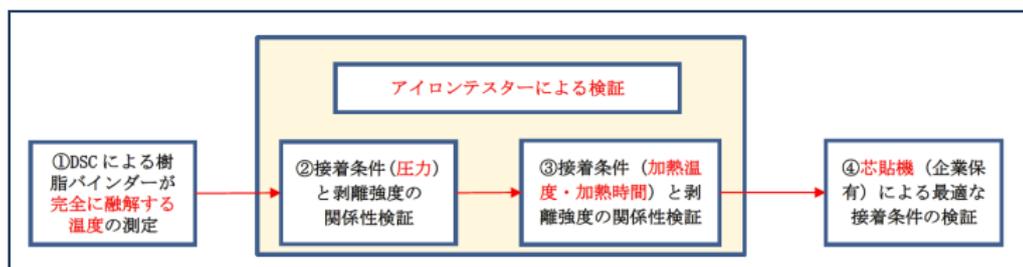


図11 剥離強度が不十分な接着芯の検証フロー

# カプロン酸エチル高生成焼酎酵母の育種及び実用化に関する研究

Study on breeding and practical application of *shochu* yeast with high yield of ethyl caproate

会津若松技術支援センター 醸造・食品科 高橋 亮  
応募企業 合同会社ねっか

うつくしま煌酵母はカプロン酸エチルを高生産するが、清酒酵母であるため焼酎醸造では発酵条件が異なり、意図した香りバランスに制御することが難しい。そこで本研究では吟醸香（カプロン酸エチル）生成能に特化しつつ、焼酎製造条件に適性の高い新規焼酎酵母の育種を行い、吟醸香の高い焼酎を再現性良く製造することを可能とした。

**Key words:** 焼酎、酵母、カプロン酸エチル

## 1. 緒言

合同会社ねっかでは、清酒用の麹菌と酵母を使用し、焼酎製造に清酒醸造技術を導入することで、清酒特有の吟醸香の成分であるカプロン酸エチルが非常に高いフルーティーな米焼酎を開発し、他社との差別化を図っている。一方、使用している県オリジナル酵母であるうつくしま煌酵母 701-15 は、清酒醸造を想定した選抜条件で育種されており、焼酎醸造という異なる発酵条件、さらに蒸留による香りバランスの変化などが考慮されておらず、焼酎製造に適しているとは言いがたい。そこで本研究では吟醸香の高い焼酎を再現性良く製造するため、焼酎製造条件に適性が高く、吟醸香生成能に特化した新規焼酎酵母の育種を試み、製品化の見通しを得たので報告する。

## 2. 研究方法

### 2. 1. 対照菌株

対照株として合同会社ねっかにて使用されている煌酵母 701-15、カプロン酸エチル高生成酵母である県酵母の 901-A113、701-g31 を供試した。

### 2. 2. 有望株の取得および選抜

カプロン酸エチル高生成株育種における変異株の取得および酵母選抜手法が、過去に実施した煌酵母の開発<sup>1)</sup>と一部重複することから、この時の最終選抜直前まで残ったカプロン酸エチル高生成株である 8 株の有望株を本研究に活用することで変異株取得プロセス及び 1 次選抜を省略でき、本研究の効率化が図られた。これらの有望株は清酒醸造条件では最終選抜に残らなかったが、焼酎製造環境という異なる環境では実用化が期待できる。有望株を対照株とともに表 1 に示す。

表 1 供試菌株

	701-a1	701-a23	701-a58
有望株	701-b33	701-g28	701-g35
	701-g37	701-g53	
対照 煌酵母	701-15	701-g31	901-A113

なお、有望株はセルレニン耐性株の分離により 1049 株取得し、麹汁培地および小仕込み試験による各種成分分析、官能評価等により選抜した酵母である<sup>1)</sup>。

### 2. 3. 仕込み試験

小仕込み試験は、一次仕込みにて米麹（五百万石：精米歩合 60[%]）40[g]、汲水 50[mL]、乳酸 0.1[g]、二次仕込みにて掛米（精米歩合 70[%] α 化米）100[g]、汲水 195[mL] の配合で合同会社ねっかにて行った。なお、一次醪は 15[°C] にて 5 日間、二次醪は 15[°C] にて 1 4 日間とした。減圧蒸留はウォーターバスにて 45[°C] に加熱し、ロータリーエバポレーターを用いて醪量に対する留液の割合が 35[%] となるまで蒸留を行った。なお、使用した麹は合同会社ねっかにて常法どおり造った清酒用の黄麹を用いた。また、酵母はあらかじめ麹汁培地 (Brix. 11) で前培養した酵母を麹汁培地 (Brix. 11) に添加し、30[°C] にて 3 日間静置培養を行った後、3,000[rpm]、10 分間遠心分離を行い、殺菌水で洗浄したものを  $1 \times 10^6$  [cells/mL] となるよう一次仕込み時に添加した。また、小仕込み試験の結果により選抜した 3 株については同様の配合比で合同会社ねっかの焼酎製造設備にて総米 210[kg] の実規模醸造試験を行った。

### 2. 4. 分析方法

アルコール分は SD 式迅速アルコール測定システム（京都電子工業株）を用い、国税庁所定分析法<sup>2)</sup> に準拠して測定した。香り成分分析はアルコール分 20[%] に調整し、ガスクロマトグラフィー（アジレント・テクノロジー株製）を用い、ヘッドスペース法にて行った。

## 3. 結果及び考察

### 3. 1. 小仕込み試験結果

小仕込み試験結果を図 1、2 及び表 2 に示す。アルコール分 20[%] に希釈した留液のカプロン酸エチル濃度は、対照菌株の現在使用している煌酵母 701-15

よりもすべての有望株が高い値となり、約 1.3~2.3 倍となった(図1)。なお、酢酸イソアミルは約 0.4~1.6 倍と幅があり、さらにカブロン酸エチルとの比についても幅があり、有望株ごとに多様な香りバランスの酒質設計が可能であった。また、原料あたりの焼酎生成量に大きく影響する蒸留直前の醪のアルコール度数は 701-15 との比で 92~106[%]となり、同等あるいはやや低い結果となった(図2)。有望株のうち 701-a1、701-g28、701-g37 の 3 株を選抜株とした。701-a1 は、カブロン酸エチル濃度が 701-15 と比較して約 2 倍と高く、一方で酢酸イソアミルが 0.4 倍と低いため、カブロン酸エチルがマスクされずに華やかに香り、官能評価結果が最も高く、目標とする商品コンセプトに合致すると評価され選抜した。醪のアルコール度数は有望株のうち唯一 701-15 より高い値を示し、アルコール生成能においても優れていることが示唆された。醪のアルコール度数は 701-15 と比較して 701-g28 は同程度、701-g37 は低い、ともにカブロン酸エチル生成能、官能評価結果が高いことから選抜株とした。

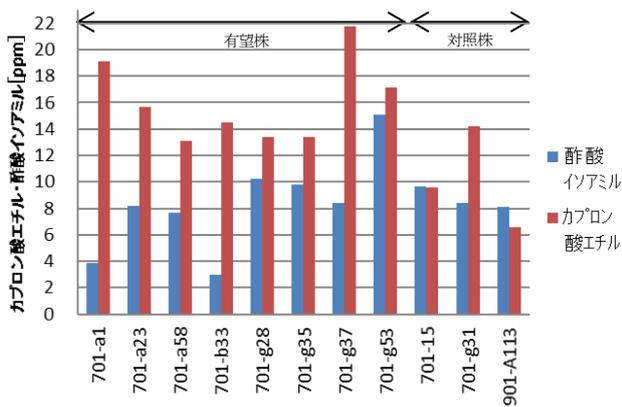


図1 蒸留後の香り成分分析結果

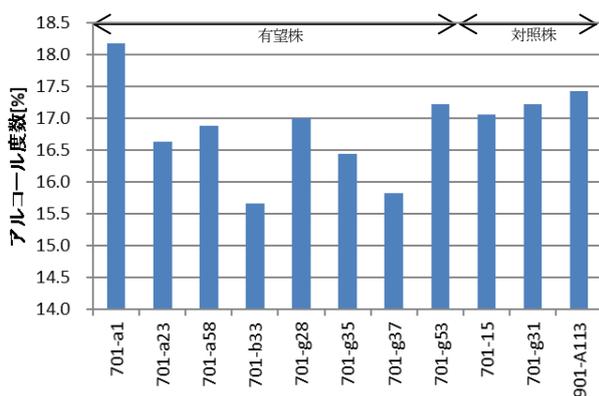


図2 醪のアルコール分析結果

表2 官能評価結果

対照菌株	5点法	供試菌株	5点法
701-15	3.0	701-a1	1.3
焼酎母		701-a23	3.3
701-g31	3.7	701-a58	3.3
901-A113	3.7	701-b33	2.3
		701-g28	2.0
		701-g35	2.0
		701-g37	1.7
		701-g53	2.7

### 3. 2. 実規模試験結果

選抜した 3 株を実規模試験に供試した結果を表 3 に示す。701-a1 がカブロン酸エチルを高生産し、吟醸香が華やかに香るという商品コンセプトに最も近い酒質となり最終選抜株とした。データは示していないがアルコール取得率についても 701-15 より高い値となり実規模醸造に対応できる醸造適性が示唆された。

さらに実規模にて香り生成の再現性試験を行った。従来酵母である 701-15 にて 6 回、最終選抜酵母である 701-a1 にて 5 回仕込んだ結果を図 3 に示す。カブロン酸エチル濃度は従来酵母の 701-15 と比較して平均 2.2 倍以上と有意に高い値となり再現性が確認された。

表3 実規模による選抜酵母の香り分析結果

香り成分	701-a1	701-g28	701-g37
アセトアルデヒド*	44	66	55
ノルマルプロピルアルコール	71	69	101
イソブチルアルコール	121	144	128
イソアミルアルコール	279	307	316
酢酸エチル	68	67	70
酢酸イソアミル	6.4	5.3	6.1
カブロン酸エチル	13.8	9.8	8.0

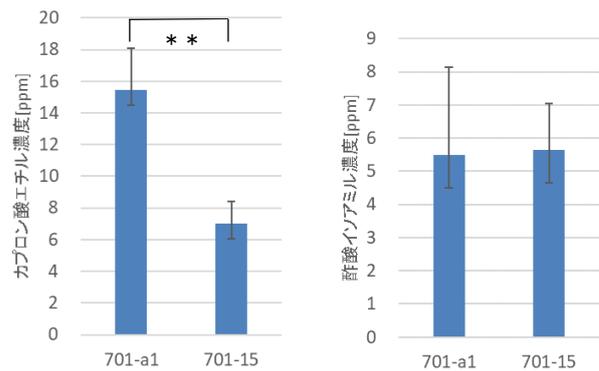


図3 実規模による香り生成の再現性試験結果

### 4. 結言

- ・吟醸香であるカブロン酸エチル生成能に特化し、焼酎製造条件に適性の高い新規焼酎酵母の育種を行った。
- ・取得した 701-a1 は、従来酵母 701-15 と比較してカブロン酸エチル濃度が平均 2.2 倍以上と吟醸香が高く、実規模においても再現性良く製造可能であった。
- ・以上の結果から 701-a1 を使用し製品化を実施する。

### 参考文献

- 1) 大野正博ら。“福島県産ブランド清酒の開発－吟醸酒用優良酵母の育種－”. 福島県ハイテクプラザ試験研究報告. 平成 16 年度, p.78-79.
- 2) 財団法人日本醸造協会注解編集委員会編. 第四回改正国税庁所定分析法注解. 第四版, 財団法人日本醸造協会, 2006

# マロラクティック発酵用乳酸菌からの新規山廃酒母乳酸菌の選抜

## Search for new YAMAHAI SHUBO lactic acid bacteria from lactic acid bacteria for Malolactic fermentation

会津若松技術支援センター 醸造・食品科 齋藤嵩典 猪俣有唯 鈴木賢二  
応募企業 合名会社大木代吉本店

新たな風味を付与した清酒製造のため、ワイン醸造用として市販されているマロラクティック発酵用乳酸菌 1 1 株から、酒母製造に適した乳酸菌の選抜を行った。その結果、濃糖状態の酒母においても生育可能で、アルコール耐性が低く、独特の風味を付与する乳酸菌 1 株を選抜した。

**Key words:** マロラクティック発酵、山廃酒母、火落ち菌、乳酸菌

## 1. 緒言

近年、高温糖化山廃酒母を用いた酒造りが行われている<sup>1)</sup>。清酒製造過程における酒母には、清酒製造に必要な酵母を大量に純粋培養することに加え、醪の初期の雑菌汚染を防止するために多量の乳酸を生産することが求められる。現在は、醸造用乳酸を添加することで酒母を酸性状態にし、雑菌の増殖を抑制する速醸系酒母が主流となっている。一方、生酏系山廃酒母は、昔ながらに行われてきた酒母の製造方法で、乳酸菌が乳酸を生産することによって酸性状態を作り上げる。

応募企業の(名)大木代吉本店は、清酒用の乳酸菌を添加し、乳酸を生産させる生酏系山廃酒母による清酒醸造を行っている。今回、清酒用の乳酸菌ではなくワイン製造で用いられているマロラクティック発酵用乳酸菌スターターを添加することで、これまでの清酒にない独特の風味を付与できないかと相談があった。マロラクティック発酵とは、乳酸菌が保持するマロラクティック酵素の作用により、醪中のリンゴ酸が脱炭酸され、乳酸に変換される現象のことである。甘味が少なく酸味が目立ちやすいワインにおいて、その酸味を和らげ味をまろやかにするという役割を果たす。加えて、乳酸菌が造る香味が加わることでワインの香りに複雑さが付与されることも期待される。一方、清酒においては、火落菌のようにアルコール耐性が強く清酒を白濁させ風味を損ねる乳酸菌は嫌われるが、ワイン用に市販されているマロラクティック発酵の乳酸菌は、清酒の酒母や醪における生育性やアルコール耐性について検討されていない。そこで、我々はマロラクティック発酵特有の風味が付与され、かつ清酒酒母製造に適した乳酸菌の選抜を行った。

## 2. 実験方法

### 2. 1. 使用菌株

供試乳酸菌スターターとして、1 1 種の市販製品；MBR 0-MEGA、MBR PN4、MBR VP41、MBR ML PRIME、

MBR 31、MBR ALPHA、MBR BETA (以上 7 株は Lallemand 社製)、LACTOENOS B7 DIRECT、LACTOENOS B16、LACTOENOS 450 PreAc (以上 3 株は Laffort 社製)、Viniflora NoVA (以上 1 株は Chr. Hansen 社製)を用いた。本稿では、それぞれ 0-MEGA、B7 DIRECT、NoVA のように略称する。乳酸菌株は、市販のフリーズドライ粉末状の乳酸菌を BD Difco™ Lactobacilli MRS Broth 培地 (和光純薬工業 (株)) (以下、MRS 培地とする) にて静置培養し、以下の培養試験に供した。また、対照として (名) 大木代吉本店にて使用している清酒用乳酸菌の *Lactobacillus sakei* を用いた。

### 2. 2. 培地及び生育性試験

#### ・麴汁生育性試験

麴汁調製培地：麴 4.5[kg] に水 20[L]、酵素剤グルコチーム #20000 (ナガセケムテックス株式会社) 70[g]、リン酸二水素カリウム 10[g] を加え、55[°C] で 7 時間糖化後、ろ過により固形分を除去した麴汁を、蒸留水にて各 Brix に希釈し培地とした。

#### ・アルコール感受性試験

MRS 培地を 1/2 濃度で調製した培地<sup>2)</sup> (以下、1/2MRS 培地とする) に、エタノールを 0、5、7.5、10[%] になるように添加した。

#### ・濃糖耐性試験

1/2MRS 培地にグルコースを 2、10、20、25、30[%] になるように添加した。

乳酸菌株は、市販のフリーズドライ製品を MRS 培地にて 35[°C] 3 日間静置培養したものを乳酸菌培養液とした。各試験は、乳酸菌培養液 0.1[mL] を各試験培地 10[mL] に接種し、35[°C] にて 3 日間静置培養後、生育性の判定を行った。

生育性の判定は、培地の濁度 (OD 600[nm]) により増殖量を判断<sup>3)</sup> し、生育に要した日数と合わせて行った。

麴汁調製培地における麴汁成分中での生育性試験では、3 日間で増殖が著しいもの (濁度 3.000 以上) を

++、3日間で増殖がみられたもの(濁度 3.000 未満)を+、増殖がみられなかったものを-と判定した。アルコール感受性試験では、35[°C]にて3日間静置培養後、エタノール 0[%]の 1/2MRS 培地と同程度の増殖がみられたものを++、増殖の抑制あるいは増殖に3日間以上要したものを+、増殖がみられなかったものを-、エタノール 0[%]においても増殖がみられなかったものを×と判定した。濃糖耐性試験では、35[°C]にて3日間静置培養後、グルコース 2[%]の 1/2MRS 培地と同程度の増殖がみられたものを++、増殖の抑制あるいは増殖に3日間以上要したものを+、増殖がみられなかったものを-、グルコース 2[%]においても増殖がみられなかったものを×と判定した。

### 2. 3. 酒母小仕込み試験

表1に示す配合で、小仕込み試験を行った。添加酵母は福島県オリジナル清酒酵母 TM-1 を用いた。また、酒母の操作は表2に従って行った。

表1 小仕込み仕込配合

総米	122.8[g]
麴米	52.8[g] (夢の香 精米歩合 60[%])
掛米	70[g] (五百万石 精米歩合 50[%])
汲み水	290[ml]
乳酸菌	1.0[ml]
酵母	1.0[ml] (TM-1)

表2 酒母経過

日数	操作	時間[h]	品温[°C]
1日目	糖化	5	55
	乳酸菌添加	48	35
2日目			35
3日目	酵母添加	72	28
4日目			28
5日目			28
6日目	枯らし		8
7日目			8
8日目			8

### 2. 4. 酒母中仕込み試験

表3に示す配合で、中仕込み試験を行った。また、酒母の操作は表2に従って行った。

乳酸菌はMRS 培地にて35[°C] 3日間静置培養後、濁度を1.000 に合わせた培養液 6.0[ml]を遠心分離し、上清を生理食塩水に置換したものを添加した。

表3 中仕込み仕込配合

総米	245.6[g]
麴米	105.6[g] (夢の香 精米歩合 60[%])
掛米	140[g] (五百万石 精米歩合 50[%])
汲み水	580[ml]
乳酸菌	6.0[ml]
酵母	2.4[ml] (TM-1)

### 2. 5. 製成酒母評価方法

製成した酒母は遠心分離にて上清を採取し、以下の項目について評価を行った。乳酸菌数及び酵母数は遠心分離前の酒母を用いた。

分析項目：アルコール分、日本酒度、酸度、アミノ酸度、乳酸菌数、酵母数

官能評価：当センター酒造担当職員4名と共同研究企業1名の計5名。1：良-2：普通-3：難ありの3段階による評点方式。

アルコール分及び日本酒度はSD 式迅速アルコール測定システム DA-155 (京都電子工業 (株))、酸度及びアミノ酸度は総酸・アミノ酸滴定システム AT-710 (京都電子工業 (株))、を用い、国税庁所定分析法<sup>4)</sup>の諸法に基づいて測定した。

乳酸菌数は、BCP 加プレートカウントアガール (日本製薬 (株)) に 0.5[%]炭酸カルシウムを加えた培地にて試料 1.0[ml]を混釈し、固化後さらに BCP 加プレートカウントアガールを重層した。35[°C]にて3日間培養後、周囲が黄変し透明になったコロニー数を計数した。

酵母数は、麴汁培地 (Brix 11) に 1.5[%]寒天、0.2[%]プロピオン酸ナトリウム、100[μg/ml]クロラムフェニコールを加えた麴汁寒天培地に平板塗抹し、30[°C] 2日間培養後、TTC 上層培地<sup>5)</sup>を重層し、30[°C] 2時間培養後、赤色を呈したコロニーを清酒酵母として計数した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1. 培養条件及び酒母小仕込み試験における乳酸菌の選抜

表4に各試験培地における増殖性の結果を示した。また、酒母小仕込み試験における分析値を表5及びその様子を図1に、官能評価結果を表6及びその様子を図2に示した。

麴汁成分中での生育は、いずれの菌株も増殖可能であることがわかった。特に、酒母の濃糖状態においても生育可能であると期待される Brix 15 の麴汁培地でも増殖が旺盛な4株 (No. 2、4、8、11) を選抜候補と

した。アルコール感受性試験では、火落ち性や腐造性の可能性が低いと期待されるアルコール耐性の低い乳酸菌を選抜する目的で、エタノール 10[%]で生育しない6株 (No. 1、2、3、5、7、10) を選抜候補とした。濃糖耐性試験では、酒母の濃糖環境でも生育可能であると期待されるグルコース濃度 25[%]でも増殖可能な5株 (No. 2、3、4、8、11) を選抜候補とした。

加えて、酒母小仕込み試験 (図1) において、酵母添加前の酒母の pH が 5 以上もしくは酸生成過多で酵母の増殖が抑えられアルコール不足となっているもの以外の3株 (No. 3、7、9) を選抜候補とした。さらに、これらの結果と官能評価による結果を合わせて、特徴的な香味を持ち合わせた VP41 (No. 3)、B16 (No. 9)、450 PreAc (No. 10) の3株を選抜した。

表4 各種試験結果

No.	菌株	麹汁生育性※1			アルコール感受性※2			濃糖耐性※3			
		Brix			EtOH			Glc			
		5	10	15	5[%]	7.5[%]	10[%]	10[%]	20[%]	25[%]	30[%]
1	O-MEGA	+	+	+	++	+	-	++	+	-	-
2	PN4	++	++	++	++	++	-	++	++	++	++
3	VP41	+	+	+	++	++	-	++	++	++	++
4	ML PRIME	+	+	++	++	++	+	++	++	++	++
5	31	-	+	+	++	++	-	++	-	-	-
6	ALPHA	+	+	+	×	×	×	++	-	-	-
7	BETA	+	+	+	+	-	-	++	+	-	-
8	B7 DIRECT	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++
9	B16	+	+	+	++	++	+	++	++	+	-
10	450 PreAc	+	+	+	-	-	-	++	-	-	-
11	NoVA	++	++	++	++	++	+	++	++	++	+
12	対照	+	+	+	-	-	-	++	++	+	-

35[°C]で3日間静置培養後、濁度を測定した。

※1 ++…3日間で増殖 (濁度 3.000 以上)、+…3日間で増殖 (濁度 3.000 未満)、-…増殖がみられなかった

※2 ++…EtOH 0[%]と同程度の増殖、+…増殖の抑制あるいは遅延、-…増殖がみられなかった、×…EtOH 0[%]で増殖がみられなかった

※3 ++…Glc 2[%]と同程度の増殖、+…生育遅延、-…増殖がみられなかった、×…Glc 2[%]で増殖がみられなかった

表5 製成酒母の一般分析結果

No.	菌株	Alc. [%]	日本酒度	酸度 [ml]	アミノ酸度 [ml]
1	O-MEGA	8.38	-44.02	3.40	1.53
2	PN4	5.37	-71.37	10.84	1.94
3	VP41	6.47	-61.17	8.43	1.72
4	ML PRIME	5.80	-67.96	9.48	1.76
5	31	8.30	-44.63	3.38	1.53
6	ALPHA	10.12	-21.96	3.59	1.41
7	BETA	9.19	-34.97	9.41	1.69
8	B7 DIRECT	5.59	-66.77	13.71	1.76
9	B16	7.86	-44.87	4.97	1.89
10	450 PreAc	8.90	-36.05	3.32	1.42
11	NoVA	5.26	-70.58	12.45	1.75
12	対照	6.82	-59.58	5.95	1.85
13	ブランク	8.33	-42.38	3.33	1.46



図1 小仕込み試験



図2 官能評価

表6 製成酒母の官能評価結果

No.	菌株	平均点	寸評
1	O-MEGA	1.8	特徴香強い、青臭い、酸味さわやか、軽い、後味えぐい
2	PN4	2.2	4MMP、酸臭強い、酸ハル、後味くどい
3	VP41	1.8	香り特徴的、やや4-VG、酸味強い、甘旨味
4	ML PRIME	2.2	酸味強くインパクトあり、特徴香穏やか
5	31	2.0	4-VG、香り難あり、香味バランス悪い、味丸い
6	ALPHA	2.2	特徴香穏やか、苦みあり、酸味穏やか
7	BETA	2.2	香り穏やか、酸臭、酸味強くインパクトあり
8	B7 DIRECT	2.2	酸臭、香りゆたか、酸味多くバランス欠く
9	B16	1.2	香味上品、さわやか、マスカット系、酸穏やか、まとまり
10	450 PreAc	1.6	香りゆたか、甘味強い、バランス良好、上品
11	NoVA	2.4	酸臭、ジアセチル、酸味強く粗い
12	対照	1.4	特徴香穏やか、酸カドなくまとまり、無難

※3点法（1：良-2：普通-3：難あり）

### 3. 2. 酒母中仕込み試験

3.1.で選抜した3株と対照の合わせて4株について中仕込み試験を行った。酒母作製3日目の酵母添加前における乳酸菌数は $2.1 \times 10^7 \sim 1.8 \times 10^8$  [CFU/g]であり、マロラクティック発酵が生起される菌濃度に達していることを確認した<sup>6)</sup>。

製成酒母の成分分析の結果を表7に示した。酸度は、VP41 (No. 3) が6.88[m1]、B16 (No. 9) が2.93[m1]、450 PreAc (No. 10) が2.79[m1]と差がみられた。今回の試験では乳酸菌添加48時間後に酵母を添加したが、乳酸菌株によって酸生成量をみながら酵母添加のタイミングを計ることや、乳酸菌培養期間の温度を変更する必要性が示唆された。また、枯らし後8日目の酒母における酵母数は $4.1 \sim 5.2 \times 10^7$  [CFU/g]と対照区とほぼ同程度であることが分かった。しかし、アルコール分をみると対照区に比べどの菌株においても1[%]以上低い値だった。酵母添加後、アルコール分の生成量によって酒母の経過を長く取る必要性が示唆された。

製成した酒母を遠心分離し、上清を官能評価した結果を表8に示した。450 PreAc (No. 10) の香味が、他

の乳酸菌株に比べバランスが良好で上品であったため、最終的に450 PreAcを選抜した。

### 3. 3. 考察

選抜した450 PreAc (No. 10) を用いて製成した酒母は、酸度が低く、アルコール生成量も十分ではなく、最適な酒母操作を検討する必要がある。今後、450 PreAcの最適な前培養条件を検討し、酒母への添加量を検討するとともに、清酒の酒母として適した酒母経過になるよう乳酸菌培養温度及び期間の検討を行うこととする。

表7 中仕込み酒母の一般分析結果

No.	菌株	Alc. [%]	日本酒度	酸度 [ml]	アミノ酸度 [ml]	乳酸菌数 [CFU/g]	酵母数 [CFU/g]	選抜
3	VP41	3.26	-97.84	6.88	2.16	$1.2 \times 10^8$	$4.7 \times 10^7$	
9	B16	3.69	-81.13	2.93	2.25	$6.2 \times 10^4$	$4.6 \times 10^7$	
10	450 PreAc	3.58	-98.43	2.79	2.32	$2.8 \times 10^4$	$5.2 \times 10^7$	*
12	対照	4.82	-85.27	5.24	2.20	$1.0 \times 10^3$	$4.1 \times 10^7$	

表8 製成酒母の官能評価結果

No.	菌株	平均点	寸評
3	VP41	2.4	ジアセチル、やや4-VG、味噌くさい、4MMP、酸ハル、えぐみ
9	B16	1.8	ややカス臭、糖化臭、甘重い、コクあり
10	450 PreAc	1.7	香り厚みあり、糖化臭、香味バランス良好、甘味きれい、上品、味重
12	対照	1.6	ヨーグルト様香、特徴香穏やか、インパクト、酸高い、味わい軽快

#### 4. 結言

新たな風味を付与した清酒製造のため、ワイン醸造のために市販されているマロラクティック発酵用の乳酸菌スターター11株から、酒母製造に可能な乳酸菌の選抜を行った。濃糖状態の酒母においても生育可能で、アルコール耐性が強くなく、かつ酒母において独特の風味を有する1株の乳酸菌450 PreAc (No. 10)を選抜した。今後は、応募企業が求める酒母経過になるよう乳酸菌添加量や温度を検討し、再現性試験を行うことで、安定的な酒母製造を可能とする。

#### 参考文献

- 1) 佐々木隆浩, 國府加奈子, 星佳宏. 県内醸造食品から分離した乳酸菌の生酏系清酒への利用に向けた特性把握. 栃木県産業技術センター研究報告, 2017, no.14, p.99-101.
- 2) 藤原朋子, 藤井一嘉, 外菌寛郎. 酒母製造に利用可能な乳酸菌の選抜. 広島県立総合技術研究所食品工業技術センター研究報告, 2011, no.26, p.7-16.
- 3) 稲橋正明. 清酒製造工程及び清酒から分離された乳酸菌(火落菌、腐造性乳酸菌)のマロラクティック発酵(MLF)としての性質. 日本醸造協会誌, 2016, vol.111, no.1, p.14-21.
- 4) 財団法人日本醸造協会注解編集委員会編. 第四回改正 国税庁所定分析法注解. 第四版, 財団法人日本醸造協会, 2006, 307p.
- 5) 古川敏郎, 秋山裕一. 清酒醸造の微生物学的管理(第4報) TTC重層法による酵母の分別について(1). 日本農芸化学会誌, 1963, vol.67, no.7, p.398-402.
- 6) 横塚弘毅. ワイン製造(その3), 2000, vol.95, no.1, p.17-22.

## 福島県オリジナル清酒製造技術の開発（第5報）

—福島県オリジナル酒造好適米「福乃香」の精米及び醸造特性試験—

Development of original sake brewing technology in Fukushima prefecture (5<sup>th</sup> report)

- Rice milling test and fermentation characteristic analysis of new sake-making suitable rice "FUKUNOKA"

development in Fukushima prefecture -

会津若松技術支援センター 醸造・食品科

中島奈津子 高橋亮 猪俣有唯 松本大志 斎藤嵩典 鈴木賢二

令和元年に誕生した福島県の新しい酒造好適米「福乃香（ふくのか）」について、新たに導入した精米機を用いて扁平精米試験を実施し、高精白可能かつ優良な精米が得られる条件を確立した。また、精米形状の違いが米の粗タンパク質やカリウム濃度に及ぼす影響について試験を行い、「福乃香」を用いた扁平精米では、低精白において効果的に粗タンパク質が低減できること、カリウム濃度は精米形状の影響を受けないことを明らかにしたほか、「福乃香」の品種特性に合わせた適切な原料処理条件を確立した。

Key words: 県オリジナル酒造好適米、扁平精米、原料処理

### 1. 緒言

福島県産酒は、全国新酒鑑評会をはじめとする各種鑑評会やコンテスト等でこれまで数多くの優秀な成績を収めており、県産酒への注目がますます高まっている。また、近年は県産酒造好適米を用いた特定名称酒の製造量が増加し、その中でも特に純米酒や純米吟醸酒の製造量の増加が著しい。福島県では、平成12年に初めての県オリジナル酒造好適米となる「夢の香」が誕生して以降、これに続く新しい酒造好適米の開発へのニーズが高まっていた。これを受け、福島県農業総合センター（以下、農業総合センターと略す）を中心に新しい酒造好適米の育種が進められ、当所では、育種系統の醸造特性試験や試験醸造を行うことで、栽培特性や醸造特性に優れた品種の選抜に携わってきた。その結果、令和元年に新しい福島県オリジナル酒造好適米「福乃香」が誕生した。今後、「福乃香」が県内酒造場で広く活用されるためには、酒造現場で再現性の良い酒質を得るための知見の蓄積が必要である。そこで、新たに扁平精米試験を実施し、「福乃香」の精米適正を確認し、酒造好適米としての可能性を検証した。また、精米形状が異なる原料米について、精米による成分の変化や特徴、また醸造特性を比較した。

### 2. 「福乃香」について

農業総合センターにて平成16年に「誉富士」を母系統、「出羽の里」を父系統として交配して得た系統の後代として育種が始まり、平成21年に「郡系酒893」の系統番号が付与された。小仕込み試験やパイロットスケールでの仕込み試験を経て、酒質が優れるこ

とから平成29年に「福島酒50号」の地方番号が付与され、令和元年に奨励品種に採用された。「福乃香」は、親の特徴を引き継ぎ、タンパク質含有量が少なく、軽快かつ上品な酒質になりやすい特徴を有しているほか、白米1tあたりから取得できるアルコール量（酒化率）も多いなど、今後の福島県オリジナル品種としての幅広い活用が期待されている。しかし、他の品種に比べ心白発現率が高く、心白体積が大きいという特徴のため、高度な原料処理技術が必要である。

### 3. 方法

#### 3. 1. 精米機の性能試験

搗精ステップ	歩留(%)	回転数(rpm)	電流値(A)
1	0	980	0
2	97	1100	17
3	90	1200	17
4	85	1000	17
5	78	800	16
6	70	700	16
7	65	700	15
8	60	680	15
9	55	650	14
10	50	650	14
11	45	630	14
12	40	630	13

「福乃香」の扁平精米条件を決定するための予備試験として、表1のプログラムで扁平精米を実施した。玄米及び得られた精米の形状分析と水分測定を行った。  
精米機：醸造用精米機 ED-15A（株サタケ）  
ロール：#60  
原料米：令和元年産「福島酒60号」（農業総合センター）

精米歩合：40[%]

形状分析：玄米 1000 粒の長さ、幅、厚みを穀粒判別機 RGQI90A (株サタケ) で測定し、精米 1000 粒の長さ、幅をグレインスキャナー 2 RSQI 10B (株サタケ)、精米 100 粒の厚みをデジタルノギスで測定した。

水分：所定分析法<sup>1)</sup>に基づいて測定した。

### 3. 2. 「福乃香」の扁平精米試験

表2 「福乃香」を用いた精米プログラム

搗精ステップ	歩留[%]	回転数 (rpm)	電流値 (A)
1	0	980	0
2	95	1100	17
3	90	1200	17
4	85	1000	17
5	78	800	16
6	70	700	15
7	65	700	15
8	60	680	15
9	55	680	15
10	50	680	15
11	45	680	15
12	40	660	15

表2に示すプログラムを用い、以下の条件で精米を実施した。

精米機：醸造用精米機 ED-15A (株サタケ)

ロール：#60

原料米：令和元産「福乃香」(福島県産)

精米歩合：40[%]

### 3. 3. 異なる精米方法で得られた原料米の形状及び成分分析

精米方法の違いによる形状、成分、醸造特性への影響を明らかにするため、扁平精米と原形精米の試料を用いた比較試験を行った。試料は、2. 2で行った扁平精米試験に用いた玄米及び、各歩留まり時に採取した扁平精米(精米歩合 80[%]、60[%]、50[%]、46[%]、40[%])、そして県内酒造場から提供された原形精米(精米歩合 70[%]、58[%]、50[%]、45[%])を用いた(品種はすべて「福乃香」)。

形状分析は米粒の長さ、幅、厚みを穀粒判別機 RGQI90A (株サタケ) で測定し、精米 1000 粒の長さ、幅をグレインスキャナー 2 RSQI 10B (株サタケ)、精米 100 粒の厚みをデジタルノギスで測定した。測定した米粒の長さ(L)、幅(W)、厚さ(T)の値を用いて以下3種類の原形指数(LW、WT、LT)を算出した。

$$LW = (\text{精米 } L / \text{精米 } W) / (\text{玄米 } L / \text{玄米 } W)$$

$$WT = (\text{精米 } W / \text{精米 } T) / (\text{玄米 } W / \text{玄米 } T)$$

$$LT = (\text{精米 } L / \text{精米 } T) / (\text{玄米 } L / \text{玄米 } T)$$

成分分析は所定分析法に従い、粉碎機(アドバンテック製 T1-100 型)を用いて粉碎試料を得た。粉碎試料を用い、粗タンパク質はケルダール法、カリウムは原子吸光光度法で測定した。

### 3. 4. 異なる精米方法で得られた原料米の醸造特性試験

精米歩合 50[%]の扁平精米及び原形精米試料を用いて水温 5[°C]、10[°C]における吸水率を測定し、初期吸水速度を比較した。試料 10[g]をステンレス製浸漬管に取り、水温を調整した冷却槽に浸漬し、吸水させた試料を浸漬管ごと遠心分離機にて 3000[rpm]で 5 分間遠心したのち精秤し、吸水率[%]を求めた。

## 4. 結果及び考察

### 4. 1. 精米機の性能試験

令和元年 1 2 月に株式会社サタケ製の醸造用小型精米機 ED-15A を新たに導入した。本機は扁平精米が可能なロールを有しており、新たに扁平精米の実施を行うことができる。ただし、本機は設置にあたりタンク容量等、装置の仕様を一部改良した。そこで、本機を用いた高品質な扁平精米が実施可能であることを検証するため、新たに精米プログラムを設定し、「福島酒 60 号」を用いた扁平試験精米を実施することとした。なお、「福島酒 60 号」は、農業総合センターと共同で実施している「福島県オリジナル酒造好適米育成加速化事業」において選抜途中の優良系統の一つである。

玄米 273[kg]を用いて行った精米記録を表 3 に示す。精米歩合 40[%]を得るために要した時間は 27 時間 30 分だった。精米歩合 50[%]付近から碎米が増え始め、最終的に得られた精米の真精米歩合は 48.4[%]、碎米率は 30.3[%]とやや高い結果となった。また、精米の工程で水分は 14.81[%]から 9.95[%]に減少した。

得られた精米の形状を表 4 に示す。扁平精米の指標の一つである原形指数 1.0 以上を大きく超えたことから、本機および精米プログラムを用い、扁平精米が可能であることがわかった。

表3 「福島酒 60 号」を用いた精米記録

ステップ	歩留[%]	回転数 [rpm]	電流値 [A]	米温度 [°C]	時間	白米重量 [kg]
1	100	979	12	12	0:04	273
2	96.7	1098	15	12	0:01	264
3	89.7	1200	17	39	4:00	245
4	84.9	1002	17	39	0:30	232
5	77.6	800	16	38	0:51	212
6	69.9	702	15	34	1:13	191
7	64.8	703	15	32	0:42	177
8	59.7	682	15	30	1:03	163
9	54.9	652	14	28	1:39	150
10	49.8	651	14	28	3:22	136
11	44.6	630	13	27	4:19	122
12	39.9	630	10	27	9:46	108

27:30:00

表4 「福島酒 60 号」の精米形状 (精米歩合 40[%])

	幅 (W)	厚さ (T)	W÷T
白米	2.73	1.60	1.71
玄米	3.12	2.08	1.50
原形指数 WT	1.14		

4. 2. 「福乃香」の扁平精米試験

4. 1. の結果から、本機を用いた扁平精米が実施可能であることがわかった。しかし、「福乃香」は産地平均 97[%]程度と他の品種に例を見ないほど高い心白発現率を示す。また、心白米は無心白米に比べ、碎米率が高い<sup>2)</sup>ことが知られており、「福乃香」はより丁寧な精米が求められる。よって、心白発現率の高い「福乃香」の精米に適した精米プログラムを新たに構築し、碎米率の低減を試みた。「福乃香」の玄米 366[kg]を精米歩合 40[%]まで精米した際の精米記録を表 5 に示す。

精米時間は 37 時間 33 分で、水分は精米終了までに 14.95[%]から 9.70[%]に減少した。また、各歩留まりで採取した精米歩合における見かけの精米歩合、真精米歩合、碎米率を表 6 に示す。精米終了まで徹底して低い碎米率が保たれていることがわかる。「良好な精米」<sup>3)</sup>を示す碎米率は、 $\text{碎米率}(\%) \leq -0.12 \times \text{見かけの精}$

米歩合+10.2 の式で近似でき、これを用いると、見かけの精米歩合 50[%]の場合の碎米率は 4.2[%]以下、45[%]の場合は 4.8[%]以下と求められる。今回の精米の碎米率を比べると、ほとんどの精米歩合において良好な精米であることが示された。これまで、原形精米で精米歩合 50[%]までの高精白試験を行った際の碎米率は 4.4[%](平成 27 年産)、7.8[%](平成 28 年産)であった。同年の「五百万石」が 7.8[%]、15.3[%]であったことから、他品種に比べ「福乃香」は高精白に耐える品種であるとされていた。しかし、今回確立した精米プログラムで扁平精米を実施した場合、さらに低い碎米率で高精白が可能であった。

表 5 「福乃香」を用いた精米記録

ステップ	歩留[%]	回転数 [rpm]	電流値 [A]	米温度 [°C]	時間	白米重量 [kg]
1	100	982	10	11	0:06	366
2	94.8	1099	8	27	2:21	347
3	89.8	1200	17	37	4:57	329
4	84.9	1002	17	38	0:48	311
5	77.8	800	16	34	1:23	285
6	69.9	699	15	29	2:12	256
7	64.7	699	15	27	1:21	237
8	59.8	678	15	25	1:43	219
9	54.9	652	14	23	3:13	201
10	49.7	682	15	36	10:38	182
11	44.8	682	15	35	5:07	164
12	39.9	682	10	31	3:45	146

37:33:00

表 6 「福乃香」の扁平精米試験結果

見かけの精米歩合 [%]	真精米歩合 [%]	碎米率 [%]
80	80.1	0.9
60	59.0	3.4
50	52.8	4.1
46	48.3	4.0
40	45.4	8.1

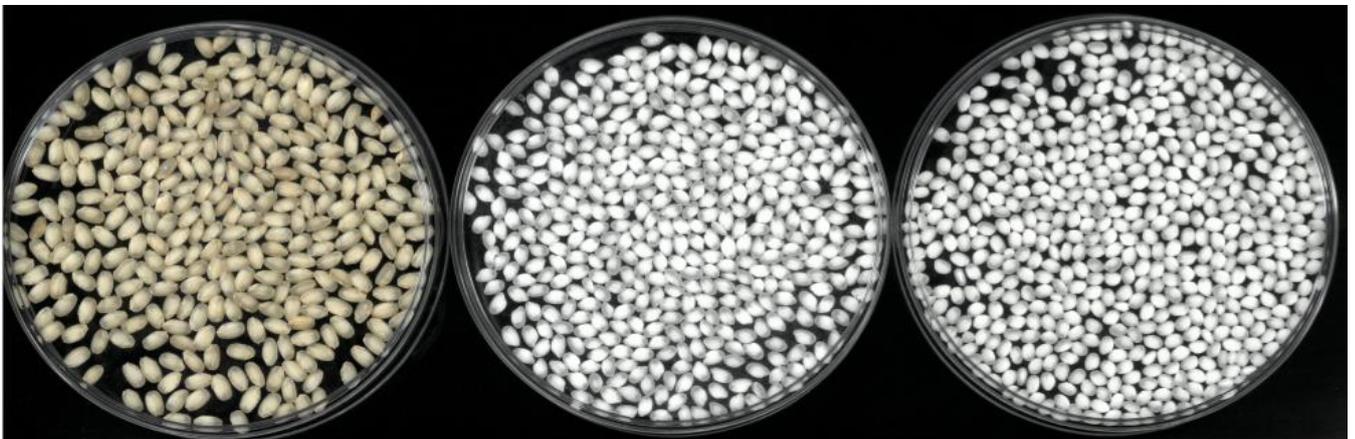


図 1 令和元年産「福乃香」の玄米および精米（精米歩合 50[%]）  
左から玄米、扁平精米、原形精米

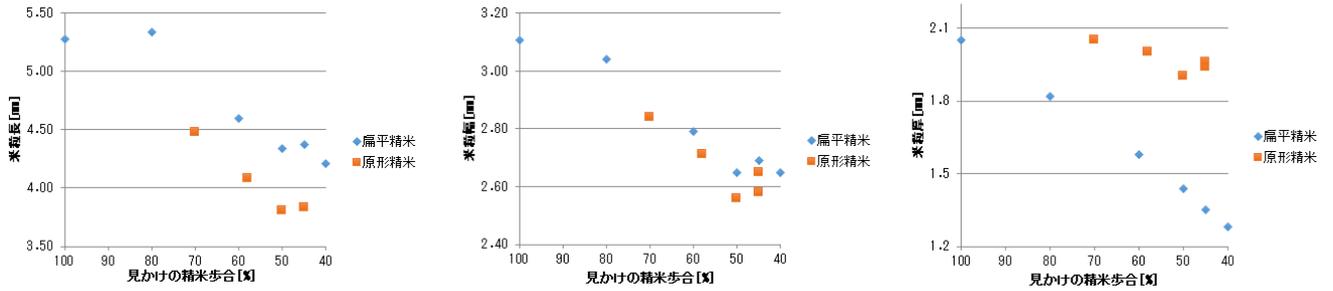


図2 精米歩合と米粒各部の計測値の関係

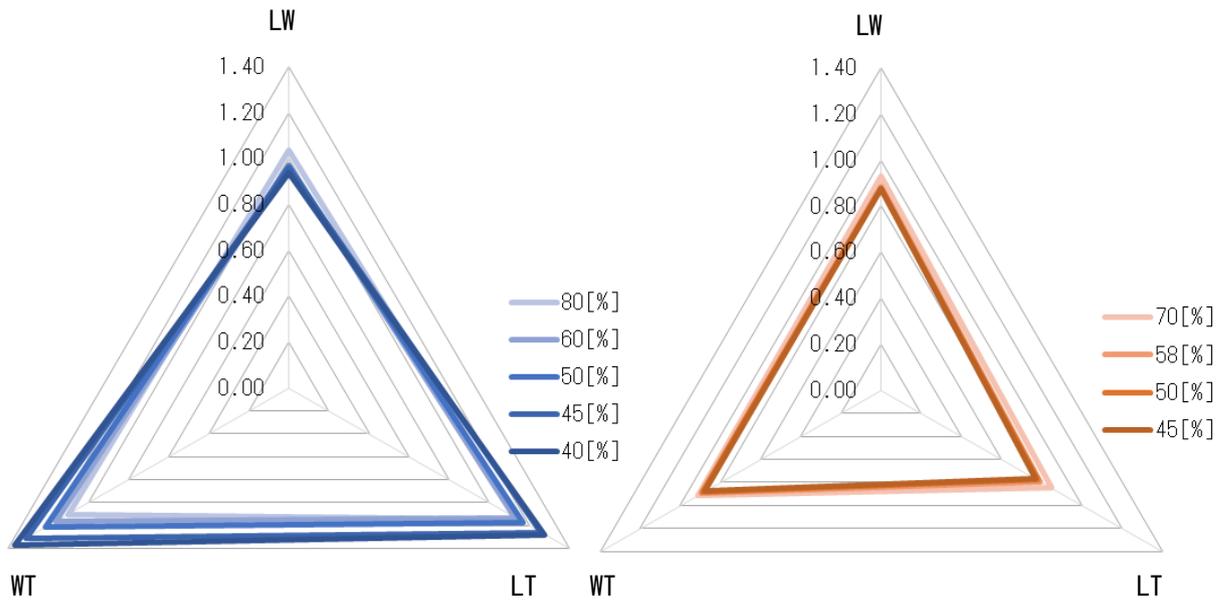


図3 異なる精米方法で得られた精米の形状分析結果

左：扁平精米、右：原形精米

#### 4. 3. 異なる精米方法で得られた原料米の形状及び成分分析

4. 2. で得られた玄米及び精米試料を図1に示す。原形精米では全体的に米粒の角が取れている一方、扁平精米では精米歩合 50[%]まで削っても、胚芽部分の窪みが残っていることがわかる。また、原形精米に比べ扁平精米は米粒が薄く、心白以外の部分が明らかに透過して見える。また、精米歩合 80[%]の扁平精米では胚芽の残存が確認された。

扁平精米及び原形精米の各試料の形状を測定した結果を図2に示す。精米歩合が小さくなるにつれ、原形精米では米粒の長さや幅が小さくなるが、米粒の厚みは変わらない。一方、扁平精米では長さや幅の減少は少なく、米粒の厚みが直線的に顕著に小さくなっている。

精米の米粒長(L)、米粒幅(W)、米粒厚(T)を用いて算出した原形指数 LW、WT、LT の値をレーダーグラフで示

す(図3)。原形精米では、精米歩合が小さくなるにつれ LW は 0.93 から 0.85、LT は 0.85 から 0.76、WT は 0.91 から 0.89 にそれぞれわずかに減少したものの、グラフの形はほとんど変わらない。これは、長さ、幅、厚みが均等に削られ、形状を保ったまま均一に精米されていることを示している。一方、扁平精米では精米歩合が小さくなるにつれて LW は 1.03 から 0.94 に減少、LT は 1.14 から 1.28 に、WT は 1.10 から 1.37 に顕著に増加し、レーダーグラフの形は精米歩合に伴い大きく変化している。これは、精米に伴って米の厚みが薄くなっていることを示し、一般的な精米方法とは明らかに異なる精米形状であることを示している。

精米形状が異なる試料を用いて粗タンパク質を測定した結果を図4に示す。粗タンパクは表皮付近に多く存在することが知られており、精米によって減少する。今回、扁平精米の粗タンパク質は原形精米よりもやや低い傾向を示した。扁平精米では米の腹面から削られ、厚みが減っていくことから、この結果は米のタンパク

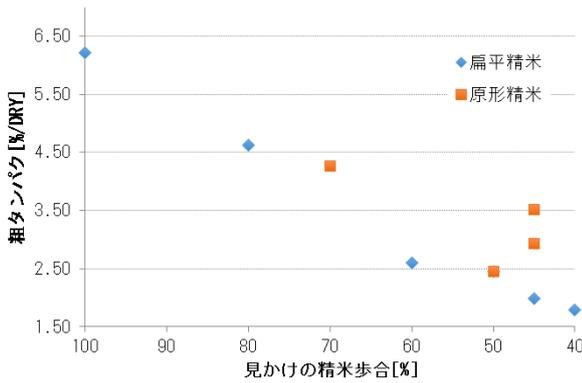


図4 精米歩合と粗タンパク質との関係

質が腹面に存在していることを示唆している。すなわち、扁平精米は効果的に玄米中の粗タンパク質を減らすことができる精米方法であるといえる。しかし、精米歩合 60[%]以下になると精米による粗タンパク質量の減少幅は、精米形状による差とともに小さくなっている。よって、扁平精米による粗タンパク質の低減効果は低精白に対して有効であり、反対に、高精白の場合は精米形状に依らず減少していくため、精米方法による差は生じなくなる可能性がある。なお、「福乃香」はもともと粗タンパク質が少ない品種である。近年は低精白米を用いた低コストかつ満足度の高い清酒の製造が望まれている。扁平精米によって効果的に粗タンパク質を減らすことによって、低精白米を用いた場合でも他品種の高精白米で製造した清酒に匹敵するような上品な酒質を実現できる可能性がある。

一方、カリウムは扁平、原形いずれの精米においてもほぼ同じ挙動を示した(図5)。また、精米歩合 50[%]以下ではほぼ一定の値となった。これはカリウムが表皮周辺に集中的に分布している以外に、米粒中にほぼ均一に分布していることを示唆し、米粒のカリウムの分布を EDX による元素分析で観察した結果と一致する(データ非公表)。

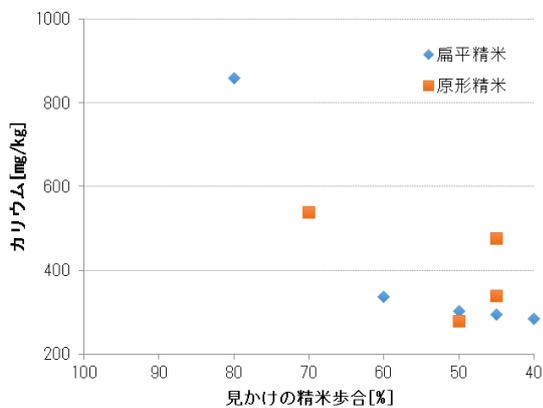


図5 精米歩合とカリウム含量の関係

カリウムは麹菌の生育に必要なミネラルで、極端に減少すると製麹の操作や仕上がりに大きく影響する。今回の結果から精米方法の違いは「福乃香」のカリウム濃度にほとんど影響がないことがわかった。また「福乃香」において、精米歩合 50[%]のカリウム量は、精米歩合 70[%]のカリウム量の約 50~60[%]であり、それ以上精米してもほとんど減少しないことがわかった。これは精米歩合 50[%]になると「福乃香」の精米はほとんどが心白となることが関係していると考えられる。無心白または心白が小さい品種や心白発現率の低い品種の場合にはこの限りではない可能性があり、「福乃香」以外の品種についてのカリウム濃度については、今後の試験等で明らかにしていく必要がある。また、心白部分にカリウムが存在するか否かについては未確認であったため、機会があれば測定を行いたい。

なお、原形精米 45[%]で粗タンパク質及びカリウムの価が高くなっているが、これは試料の真精米歩合がおおよそ 60[%]と高かったことが影響していると考えられる。「福乃香」は心白発現率が高く、心白体積も大きいため、高精白が困難である。農業総合センターと共同で行ってきた実規模精米試験では、精米方法を検討した結果、精米歩合 40[%]を実現し、碎米率も低く良好な精米が得られていた。しかし、今年は台風 19 号の影響で実規模試験精米を行ってきた精米工場が被災し、県内酒造場で使用する「福乃香」は県内外の様々な精米工場で精米された。新しい品種のため精米のノウハウの共有が不足していたこと、また登熟期の高温により例年以上に心白発現率も高く、碎米になりやすい品質であったことが真精米歩合に影響した原因であると推察する。生産年による品質の変化や、精米方法の共有については今後さらなる検討が必要である。

#### 4. 異なる精米方法で得られた原料米の醸造特性試験

精米形状の異なる精米歩合 50[%]の試料を用いた初期吸水速度を表したグラフを図 6 に示す。水温 5[°C]においては、精米形状によらず、浸漬 6 分までの初期吸水速度に差は見られなかった。しかし、6 分以降は扁平精米の吸水率が高くなった。浸漬中の米粒を観察すると、扁平精米は浸漬後 2 分頃から縦割れを起こしていた。このことから、後半になって吸水率が増加したのは、縦割れにより表面積が増加したことが影響しているのではないかと考えている。

また、水温の違いによる吸水速度への影響について、10[°C]と 5[°C]の扁平精米を比較すると、吸水率 25[%]までにかかる時間は 10[°C]で約 7 分、5[°C]で約 13 分となり、約 2 倍の差があることがわかった。一般に、心白が大きいと吸水速度は速くなり、「福乃香」もその傾向が強い。そのため、吸水過多になるなど原料処理が難しいと考えられていた。しかし、この結果から、

浸漬に使用する水温を低くすることによって吸水速度の調整が可能であることが示された。

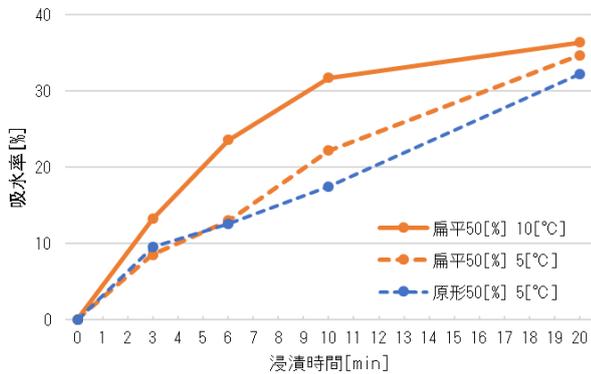


図6 精米形状の異なる試料を用いた初期吸水速度

## 5. 結言

新しい福島県オリジナル酒造好適米「福乃香」について、新たに導入した精米機を用いて扁平精米用ロールによる「福乃香」の扁平精米試験と精米の成分分析、醸造特性試験を行った。

心白が大きく、割れやすい米に対応した最適な精米プログラムを確立させ、精米歩合 40[%]までの高精白を実現した。碎米率も低く、得られた精米の形状は、精米歩合が低くなるほど扁平となり、精米歩合 40[%]時には玄米の6割程度の厚さとなった。

原形精米と扁平精米試料を用い、精米形状の違いが福乃香の粗タンパク質含量とカリウム含量に及ぼす影響について分析を行い、その結果、扁平精米は、低精白米において粗タンパク質を効果的に減少させることが示唆された。また、カリウム含量は精米方法の影響は少なく、精米歩合とともに減少することがわかった。

また、精米形状の違いが初期吸水速度に影響を及ぼすことがわかった。吸水速度は扁平精米の方がやや早い傾向があり、浸漬時に割れが生じるのもわずかに早かった。「福乃香」は吸水が早く、浸漬時に割れやすいため、高度な技術が必要である。しかし、浸漬時の水温を低温にすることで、吸水速度が緩やかになる。緩やかな吸水は浸漬割れを防ぐのにも効果的である。

精米方法の異なる原料米が清酒製造に及ぼす影響については、扁平精米と原形精米の比較を中心に、現在様々な機関において研究が進められており、多くの知見の蓄積が期待されている。本県においても、精米形状の異なる「福乃香」を用いた小仕込み等を行い、精米形状の違いがもろみの発酵経過や製成酒の一般成分や香気製成に及ぼす影響について調べていく。また、原料処理条件設定のための試験を継続し、最適な条件を確立させ、県オリジナル酒造好適米「福乃香」の広い普及につながるよう、県内酒造場への情報提供を行

っていく。

## 謝辞

精米プログラムの構築にご協力をいただきました株式会社サタケの平田氏をはじめ、関係各位に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国税庁所定分析法注解委員会編. 第4回改正国税庁所定分析法注解. 1993, p. 150-165.
- 2) 柳内敏靖ほか.” 酒米特性に及ぼす酒造好適米の心白の影響”. 生物工学会誌. 1996, p. 97-103.
- 3) 日本醸造協会編. 清酒製造技術. 1990, p189.

# 県産味噌の品質向上に向けた微生物の評価

## Evaluation of microorganisms for quality improvement of miso produced in fukushima prefecture

会津若松技術支援センター 醸造・食品科 小野和広 松本大志

県産味噌の品質向上を目的に、添加する微生物（耐塩性酵母及び乳酸菌）が、仕込んだ味噌の品質に及ぼす影響について評価した。酵母及び乳酸菌株の違いにより、味噌のアルコールや直接還元糖等の量に顕著に差があり、味噌の特徴が大きく異なった。また、酵母単独よりも乳酸菌と併用した方が官能評価における「色」や「総合」の評価が高まる傾向があった。今回供試した酵母においては、A、Fの評価が高かった。

Key words: 味噌、酵母、乳酸菌、官能評価

### 1. 緒言

本県は全国有数の醸造処であり、古くから数多くの酒造業や、味噌製造業が営まれている。近年、清酒は業界の取組みや当所の技術支援等により品質が大きく向上し、全国新酒鑑評会において金賞受賞数が7年連続で全国一となる等、大きな話題となっている。またそうした躍進に刺激を受けた醤油製造業においても、業界一丸となって品質向上に取り組み、令和元年度の全国醤油品評会において入賞数が全国一（福岡県と同数）となった。そうした中、味噌製造業においてもこうした他業種の取組みを受け、さらなる品質向上への気運が高まっている。このような背景を下に、本研究では、味噌の品質向上を目的に、添加する酵母や乳酸菌の違いが、仕込んだ味噌の品質に及ぼす影響について評価した。

### 2. 実験方法

#### 2. 1. 供試材料

麴用の米は、2018年に福島県会津地方で栽培された「ひとめぼれ」を、また味噌の仕込み用の大豆は、2018年に北海道で栽培された「ユキホマレ」および福島県で栽培された「あやこがね」を供試した。食塩は並塩（株）日本海水）、微生物は、種麴メーカーから味噌用として市販されている耐塩性酵母（*Zygosaccharomyces rouxii*）（4社、7株）および耐塩性乳酸菌（*Tetragenococcus halophilus*）（4社、5株）を供試した。

#### 2. 2. 製麴方法

10[°C]で16時間浸漬吸水させた精白米を、無圧で抜け掛け法により50分間蒸きょうした。製麴は、麴蓋法により45時間行った。

#### 2. 3. 味噌の仕込と熟成方法

仕込んだ味噌の仕込配合を表1に示す。仕込配合

は、仕込総量、麴歩合、目標水分、目標塩分を同一にし、添加する酵母及び乳酸菌株が異なる14試験区分で行った（表2）。大豆は20[°C]で3時間浸漬し、加圧煮法により処理した。冷却後、各原料を混合し、味噌の仕込みを行った。酵母および乳酸菌は、仕込開始時に表1で示した酵母（終濃度 $2.0 \times 10^5 / g$ ）および乳酸菌（終濃度 $2.0 \times 10^6 / g$ ）をそれぞれ添加し、30[°C]で40日間、20[°C]で30日間熟成させた。

表1 味噌の仕込配合

仕込総量[kg]	4.13
麴歩合 [歩]	10
目標水分 [%]	46.9
目標塩分 [%]	11.0
対水食塩濃度	19.0
酵母	○
乳酸菌	○

○は添加を示す。

表2 試験区分

試験区	酵母	乳酸菌	大豆
1	A		ユキホマレ
2	B		ユキホマレ
3	C		ユキホマレ
4	D		ユキホマレ
5	E		ユキホマレ
6	F		ユキホマレ
7	G		ユキホマレ
8	F	a	ユキホマレ
9	F	b	ユキホマレ
10	F	c	ユキホマレ
11	F	d	ユキホマレ
12	F	e	ユキホマレ
13	F	d	あやこがね
14	B	a	ユキホマレ

#### 2. 4. 官能評価

官能評価は、試醸した味噌について当所の職員10名（男性7名、女性3名）により、色、香り、味、組成、総合の5項目について、3段階評価（1(良い)～3点(悪い)）し、平均評点を求めた。

#### 2. 5. 一般成分の分析方法

味噌の一般成分は、基準みそ分析法<sup>1)</sup>により分析した。色調は色差計（日本電色工業（株）、ZE2000）に

より測定した。遊離アミノ酸は、高速アミノ酸分析計（株）日立ハイテクサイエンス、L-8900）により、また乳酸は F-キット（株）J.K. インターナショナル）を用い、測定した。HEMF（4-hydroxy-2(or 5)-ethyl-5(or 2)-methyl-3(2H)-furanone）は、菅原ら<sup>2)</sup>の方法に準じて測定した。

### 3. 結果及び考察

#### 3. 1. 官能評価

表3に、異なる酵母及び乳酸菌株で仕込んだ味噌の官能評価の結果を示す。総合評価は、試験区11、13が最も高く、次いで、試験区10、12の順だった。一般的に酵母のみを用いた試験区（1～7）よりも、酵母と乳酸菌を用いた試験区（8～14）の方が評価が高かった。

表3 試験した味噌の官能評価

試験区	色	香り	味	組成	総合
1	1.75	1.45	1.40	1.35	1.60
2	1.70	2.00	1.80	1.25	1.80
3	1.75	1.95	1.70	1.25	1.85
4	1.80	1.85	1.85	1.25	1.95
5	2.05	1.95	1.80	1.35	1.95
6	1.60	1.40	1.70	1.35	1.56
7	1.85	1.70	1.80	1.25	1.80
8	1.75	1.55	1.75	1.40	1.70
9	1.75	1.70	1.95	1.30	1.90
10	1.75	1.40	1.40	1.40	1.45
11	1.50	1.30	1.45	1.20	1.40
12	1.40	1.50	1.60	1.35	1.45
13	1.70	1.50	1.55	1.40	1.40
14	1.65	2.05	2.00	1.45	2.15
平均	1.71	1.66	1.70	1.33	1.71

パネル10名 1(良い)～3点(悪い)

酵母のみ用いた試験区間では、試験区1、2、6、7の「総合」評価が高かった。また「色」では、試験区1、2、3、6の評価が高かった。一般的に味噌の鑑評会において、色調は重要な要素の一つとされており、「色」の評価の高かったこれらの味噌は鑑評会においても有利であると考えられる。一方、酵母と乳酸菌を併用した試験区は、酵母のみ使用した試験区よりも一般的に評価が高い傾向があった。しかしながら、その中において、試験区9、14の「総合」評価は低かった。これらの味噌は、「味」の評点も低く、審査コメントとして「酸味を感じる」としたパネルが複数名いた。その要因として、これらの試験区は他試験区よりも乳酸量が1オーダー以上多く（データは示していない）、乳酸が過多に

産生されたために香味のバランスを崩したためと推察される。

なお、これら「総合」評価の高かった味噌、特に酵母と乳酸菌を併用した試験区の多くは、参考出品した全国味噌鑑評会においても、格付で「秀」（格付の中で最上位）の評価を受けた。また、平成30年度全国味噌鑑評会において「秀」の格付けを受けた味噌のうち、使用された大豆の約7割が北海道産（ユキホマレを含む）だったが<sup>3)</sup>、昨年度の報告<sup>4)</sup>において評価の高かった福島県「あやこがね」は、今年度においても北海道「ユキホマレ」と同等の評価となり、年度によらず北海道「ユキホマレ」と遜色ない大豆であることが確認された。

#### 3. 2. 試験した味噌の一般成分

表4-1、表4-2、表4-3に試験した味噌の一般成分値及び遊離アミノ酸組成を示す。

表4-1 試験した味噌の色調と一般成分

試験区	水分	食塩	対水食塩濃度	直接還元糖	アルコール	pH	色調		
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		Y	x	y
1	47.1	11.3	19.4	15.39	1.01	5.32	15.86	0.47	0.41
2	46.2	11.3	19.6	16.26	0.76	5.40	14.98	0.48	0.41
3	46.0	11.4	19.9	17.46	0.64	5.40	15.02	0.48	0.41
4	45.0	11.3	20.0	17.88	0.21	5.43	14.54	0.48	0.41
5	45.4	11.3	20.0	17.54	0.50	5.41	15.04	0.48	0.41
6	47.1	11.5	19.7	16.08	0.97	5.25	14.39	0.48	0.41
7	45.7	11.5	20.1	17.38	0.43	5.39	14.48	0.48	0.41
8	45.8	11.5	20.1	16.01	0.90	5.19	13.65	0.49	0.41
9	45.4	11.6	20.4	15.46	1.06	4.93	14.44	0.49	0.41
10	45.1	11.7	20.5	15.89	0.91	5.28	13.06	0.49	0.41
11	44.9	11.6	20.6	16.32	0.78	5.28	13.16	0.49	0.41
12	44.9	11.7	20.6	16.41	0.75	5.34	13.14	0.49	0.41
13	45.9	11.6	20.2	16.09	0.88	5.26	14.19	0.48	0.41
14	44.7	11.4	20.4	17.86	0.16	4.93	16.41	0.48	0.41
平均	45.7	11.5	20.1	16.6	0.7	5.3	14.5	0.48	0.41

試験した味噌のアルコール濃度は、酵母のみ用いた試験区（1～7）では、試験区1、2、6が比較的高かった（0.76～1.01[%]）。これらアルコール濃度の高い味噌は官能評価における「総合」評価が高い傾向があった。アルコール濃度が高いと、香气成分全般が高まると考えられ、官能評価に好影響を及ぼしたものと推察される。また、酵母と乳酸菌を併用した試験区間（8～14）では、試験区14を除き概ね大差なかった（0.75～1.06[%]）。一方、試験区14のアルコール濃度は0.16[%]と、

14 試験区中最も低かった。その要因として、試験区14の味噌は他試験区よりも乳酸量が顕著に多く（データは示していない）、pHも低かったことから、酵母によるアルコール代謝が阻害を受けたものと推察される。またpHは、酵母のみを用いた試験区よりも、酵母と乳酸菌を併用した試験区の方が全般的に低かった。その要因として、これらの味噌は、酵母のみ用いた試験区の味噌よりも、乳酸菌により乳酸等の有機酸がより多く生成されたためと考えられる。一般的に適度な乳酸は、味噌の押し味の付与、塩なれ促進や、色のさえ等に関与し<sup>5)</sup>、好ましい影響を及ぼすと考えられている。これら酵母と乳酸菌を併用した試験区の味噌は、官能評価においても高評価を受けていることから、添加する微生物は、酵母単独よりも乳酸菌との併用が望ましいと考えられた。しかしながら、過剰に乳酸が産生されると試験区14のように香味のバランスを崩してしまうこともあることから、酵母と乳酸菌株の選定や添加する菌数には留意が必要と考えられる。

表 4-2 試験味噌の一般成分

試験区	TN	水溶性N	ホルモールN	タンパク溶解率	タンパク分解率	グルタミン酸
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[mg/100g]
1	1.91	1.02	0.40	53.5	20.7	461
2	1.82	1.03	0.40	56.5	22.0	449
3	1.84	1.08	0.38	58.6	20.7	448
4	1.80	1.08	0.40	59.8	22.0	467
5	1.83	1.03	0.37	56.3	20.2	439
6	1.84	1.09	0.40	59.5	21.8	461
7	1.85	1.08	0.39	58.3	21.4	466
8	1.98	1.10	0.40	55.6	20.4	477
9	1.99	1.12	0.40	56.3	20.1	500
10	2.01	1.13	0.40	56.4	19.9	479
11	1.97	1.09	0.39	55.5	19.8	463
12	1.97	1.13	0.40	57.3	20.5	477
13	1.92	1.07	0.38	55.6	20.0	452
14	1.86	1.00	0.37	54.0	19.8	445
平均	1.90	1.07	0.39	56.7	20.7	463

旨味にかかわるタンパク質系の成分（表 4-2）では、酵母のみ用いた試験区（1～7）では、試験区5の味噌におけるホルモール窒素及びタンパク質分解率が比較的低かった。また酵母と乳酸菌を併用した試験区間（8～14）では、同様に試験区14の味噌におけるホルモール窒素及びタンパク質分解率が低かった。

また、これら試験区 5、14 の遊離アミノ酸（表 4-3）は、旨味に関与するグルタミン酸及びアスパラギン

ン酸、甘味を有するアミノ酸であるセリン、プロリンも同様に少なかった。試験区 14 においては乳酸生成過多によるタンパク質の分解抑制の可能性も考えられるが、これらの要因については今後検討する。

表 4-3 試験した味噌の遊離アミノ酸組成 [mg/100g]

アミノ酸	試験区													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Asp	400	406	369	387	355	412	418	417	399	388	421	429	402	363
Thr	128	126	125	127	122	130	128	130	123	133	122	131	127	112
Ser	204	205	202	207	197	208	208	210	196	214	200	211	202	183
Glu	461	449	448	467	439	461	466	477	500	479	463	477	452	445
Gln	105	105	104	102	102	107	113	115	108	117	108	117	110	100
Gly	96	97	96	100	94	99	100	98	94	99	97	98	97	88
Ala	186	184	181	187	178	189	187	192	198	194	191	192	187	180
Val	169	166	167	171	163	176	172	178	179	178	173	175	173	159
Cys	23	23	23	24	23	23	23	26	27	25	26	25	25	22
Met	54	54	52	54	51	55	54	57	58	57	55	56	54	49
Ile	176	173	169	173	167	180	175	185	186	184	178	181	177	157
Leu	316	308	303	310	300	326	316	334	342	336	324	330	320	290
Tyr	188	179	187	187	180	197	186	195	194	191	194	198	195	157
Phe	212	208	202	207	200	218	211	227	229	226	219	221	216	185
Trp	46	50	52	52	50	28	46	31	19	32	31	31	44	28
Lys	252	249	244	253	242	264	258	273	284	271	265	269	260	251
His	49	51	50	52	48	50	51	50	50	49	48	48	49	51
Arg	330	323	316	325	313	346	336	347	373	355	343	351	339	329
Pro	150	146	149	149	148	156	151	164	160	164	165	160	152	142
Total	3543	3500	3439	3535	3372	3626	3600	3704	3719	3690	3622	3702	3582	3289

なお、データは示していないが、味噌の主発酵酵母 *Zygosaccharomyces rouxii* により生成され、味噌の特徴的な香気成分<sup>2)</sup>の一つとされる HEMF について、今回、試験区 1～7 における生成量について調査した。その結果、味噌中の HEMF 濃度は、菌株により顕著な差が認められた。酵母 A、F、G を用いた味噌（試験区 1、6、7）からは多く検出される一方、これらの味噌と比較し、酵母 E を用いた味噌（試験区 5）では 1 オーダー以上低く、さらに酵母 B、C、D を用いた味噌（試験区 2、3、4）からは、ほとんど検出されなかった。本研究において HEMF 濃度の高かった味噌は、官能評価においても比較的「総合」評価が高い傾向があり、各パネルに好ましい影響を及ぼしたものと推察される。

#### 4. 結言

県産味噌の品質向上を目的に、添加する酵母や乳酸菌株の違いが、仕込んだ味噌の品質に及ぼす影響について評価した。酵母及び乳酸菌株の違いにより、アル

コール生成量や直接還元糖等の量に差があり、味噌の特徴が大きく異なった。アルコール生成量は、酵母A、B、Fを用いた試験区が比較的高かった。これらアルコール生成量の高い味噌は、官能評価における「総合」評価が高い傾向があった。アルコール濃度が高いと、香気成分全般が高まると考えられ、鑑評会等での評価を高める上で有利と考えられた。また、酵母単独よりも乳酸菌と併用した方が官能評価における「色」や「総合」の官能評価が高まる傾向があった。一方乳酸菌株の違いによる差は明瞭ではなかったが、これらについては今後さらに検討する。今回供試した酵母においては、官能評価や成分値の観点から、A、B、Fが良好であると考えられた。

今後は、味噌の品質向上に向け、加工方法（大豆の処理方法）等による影響について評価し、より高品質な製造技術の確立につなげていく予定である。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、ご助言を賜りました一般社団法人中央味噌研究所、ならびに福島県味噌醤油工業協同組合に深謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 基準みそ分析法. 全国味噌技術会, 1995, p. 2-35.
- 2) 菅原悦子. みそ熟成中の香気成分の変化. 日本食品工業学会誌, 1991, 38, p. 23-27.
- 3) 中央味噌研究所報告, 2019, 40, p. 10.
- 4) 小野和広, 松本大志. 県産味噌の品質向上に向けた原料大豆の評価. 平成30年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2018, p. 119-122.
- 5) みそ技術ハンドブック. 全国味噌技術会, 1995, p. 19.

# 福島県産果実の品質・加工適性評価

Evaluation of characteristic and aptitude for food processing of fruits made in Fukushima prefecture

会津若松技術支援センター 醸造・食品科 馬淵志奈 猪俣有唯 齋藤嵩典  
農業総合センター 流通加工科 渡邊ゆきの 古川鞠子

県内加工業者による県産果実の利用を促進するため、リンゴの品種ごとに総合的な加工適性を評価した。福島県オリジナル品種を含むリンゴ8品種について、生果の成分や加熱後の物性等を分析し、混濁ジュースとソリッドパックを試作して官能評価を実施した。今後は試作する加工品の品目を変えて同様の調査を行い、それぞれの品種に適した加工方法を明らかにする。

**Key words:** リンゴ、糖、リンゴ酸、ポリフェノール、褐変、水溶性ペクチン、混濁ジュース、ソリッドパック

## 1. 緒言

本県では地元農産物を利用した加工品の開発が活発であり、その中でも生産量の多い果実はその加工用途が広く多彩な加工品が作り出されている。果実は様々な品種が生産されており、外観や味は個性に富んでいる。長野県や青森県ではリンゴの品種ごとに加工適性が報告されており<sup>1) 2)</sup>、食品製造業者が果実加工品を開発する際の一助となっている。しかし、福島県内で栽培されるリンゴについて、品種に着目して成分の特徴や加工適性を詳細に調査した事例は少ない。また、同一の品種であっても産地が異なると成分等の特徴も変化する場合があり、必ずしも他県で得られた知見が本県産の果実に適用できるとは言えない。

更に近年、生鮮のリンゴとしては初の機能性表示食品が発売され注目を集めている。県産果実の機能性に関する知見は、生産者に対するPRや製品の高付加価値化への活用が期待される。

本研究では、リンゴの福島県オリジナル品種や県内で多く栽培されている品種を中心に成分や物性、機能性といった特徴を明らかにし、加工適性を総合的に評価することを目標としている。最終的には食品製造業者にとって利用しやすい形態で成果を提示して、県産果実の利用に繋げる。

## 2. 研究方法

### 2. 1. 供試材料

福島県農業総合センター果樹研究所にて令和元年度に収穫されたリンゴを供試材料とした。調査品種は「紅玉(収穫日10月2日)」「福島7号(同10月7日)」「会津のほっぺ(同10月10日)」「シナノスイート(同10月10日)」「こうとく(同10月31日)」「玉林(同11月7日)」「ふじ(同11月21日)」「べにこはく(同12月3日)」の8品種とした。このうち「会津のほっぺ」「べにこはく」

は福島県オリジナル品種で、「福島7号」は福島県の品種登録検討系統である。

### 2. 2. 加工品

いずれの品種も1[°C]で貯蔵し、収穫から1週間以内に加工した。

#### 2. 2. 1. 混濁ジュース

剥皮・除芯した果肉に原料の重量に対して0.1[%]のアスコルビン酸を加え、ジューサー(J-100、株式会社エフ・エム・アイ)で搾汁した。残った搾りかすはさらし袋に入れ、圧搾機により更に搾汁した。得られた果汁は鍋で85[°C]、15分間加熱して酵素を失活させ、ビンに入れて更に85[°C]、15分間加熱し殺菌した。

#### 2. 2. 2. ソリッドパック

加熱後の果肉の物性を分析する破断荷重測定用の試料と官能評価用の試料を調製した。

破断荷重測定用の試料は、剥皮した果肉を2等分し、真空包装機(HPS-300A-G、ホシザキ電機株式会社)で真空包装してスチームコンベクションオープン(TSC0-4EBN3、タニコー株式会社)で90[°C]、40分間加熱した。官能評価用の試料は、剥皮・除芯した果肉を8等分し、破断荷重測定用と同様に真空包装してスチームコンベクションオープンで90[°C]、20分間加熱した。

### 2. 3. 原料果の分析

#### 2. 3. 1. 糖組成・リンゴ酸含量

細断した果肉を電子レンジで60秒間加熱し、蒸留水を加えてホモジナイザー(PT3100、KINAMATICA)で破碎した。遠心して得られた上清を適宜希釈した後、HPLC(L-2000、株式会社日立ハイテク)で測定した。糖については、フルクトース、グルコース、スクロース、ソルビトールの組成を調査した。

#### 2. 3. 2. ポリフェノール組成

クロロゲン酸及びプロシアニジン類の一種であるブ

ロシアニジンB 2をShojiら<sup>3)</sup>の方法を参考に測定した。

細断した果肉を電子レンジで60秒間加熱し、80[%] MeOHを加えてホモジナイザーで破碎した。遠心して得られた上清を適宜希釈した後、HPLC (EXTREMA 4000Model、日本分光株式会社)で測定した。

### 2. 3. 3. 褐変特性

すりおろした果肉を直ちに測定用のセルに詰め、測色色差計 (ZE-2000、日本電色) で色差 $\Delta E$ の60分間の経時変化を測定した。測定時の室温及び品温は25[°C]に統一し、最初の10分間は20秒ごと、10分を経過した後は1分ごとに測定した。最初の20秒間における $\Delta E$ 変化量の傾きを初期褐変速度 [ $\Delta E/\text{min}$ ]、測定終了時の $\Delta E$ を褐変度とした。

### 2. 3. 4. 水溶性ペクチン

各品種の水溶性ペクチン及び貯蔵した「べにこはく」の水溶性ペクチンの変化を調査した。

細断した果肉 50[g]を精秤し、99[%] EtOHを200[mL]加え沸騰水中で15分間還流させた後、ろ過した。得られた残渣をミキサーで破碎し、吸引ろ過しながらフェノール-硫酸法で洗浄液の糖の反応が陰性になるまで70[%] EtOHで洗浄した。その後、80、90、99[%] EtOH、ジエチルエーテルで順次洗浄した。この風乾物を50[mg]精秤し、蒸留水を加え30分間振とうしてから12時間以上静置した。100[mL]に定容後、ろ過した液を用いてカルバゾール法により水溶性ペクチンを定量した。

## 2. 4. 加工品の分析と評価

### 2. 4. 1. 混濁ジュースの歩留まり及び糖度・酸度

2. 2. 1. で加工した混濁ジュースについて、1回目の加熱終了時の重量を原料の重量で除して混濁ジュース加工時の歩留まりを算出した。

製品の糖度・酸度についてはポケット糖酸度計 (PAL-BX|ACID5、株式会社アタゴ) で測定した。更に、糖度の値を酸度の値で除して糖酸度を算出した。

### 2. 4. 2. ソリッドパックの破断荷重

2. 2. 2. で調整したソリッドパックについて、テクスチャーアナライザー (TA.XT plus、英弘精機株式会社) で破断荷重を測定した。直径5[mm]の円柱プランジャーを使用し、測定速度1[mm/sec]で1.5[cm]まで貫入させ、最初に現れたピークに係る荷重を破断荷重とした。

### 2. 4. 3. 官能評価

混濁ジュース及びソリッドパックの官能評価は、当

所では醸造・食品科職員8名 (男性5名、女性3名)、農業総合センターでは流通加工科職員6名 (男性3名、女性3名) の計14名のパネルにより実施した。

混濁ジュースは外観、香り、食感、甘味、酸味、総合の5項目について、ソリッドパックは混濁ジュースの調査項目に食感を加えた6項目について、5段階評価 (甘味及び酸味は1:弱い~5:強い、それ以外の項目は1:良い~5:悪い) で評価を行った。

## 3. 結果及び考察

### 3. 1. 原料果の分析

#### 3. 1. 1. 糖組成・リンゴ酸含量

糖組成の結果を図1、リンゴ酸の結果を図2に示す。

甘味度が高いフルクトースは「福島7号」に最も多く含まれていた。品種ごとの糖組成については、8品種のうち6品種ではフルクトース、スクロース、グルコース、ソルビトールの順に含まれていたが、「紅玉」ではフルクトース、グルコース、スクロース、ソルビトール、「べにこはく」ではフルクトース、スクロース、ソルビトール、グルコースの順で含まれていた。リンゴのみつ入り果にはソルビトールが多く蓄積することが報告されており<sup>4)</sup>、みつ入りが良好とされる「べにこはく」は相対的にソルビトールの割合が高くなったと考えられた。

リンゴ酸含量は「紅玉」「べにこはく」が多かった。この2品種はもともと酸味が強いことで知られており、それに準じた結果となった。

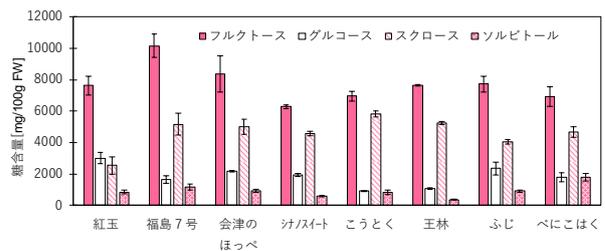


図1 各品種の糖組成 (n=3)

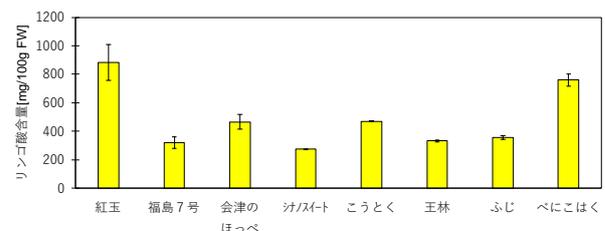


図2 各品種のリンゴ酸含量 (n=3)

### 3. 1. 2. ポリフェノール組成

ポリフェノール組成の結果を図3に示す。ポリフェ

ノール組成は品種ごとに異なり、クロロゲン酸は「福島7号」に、プロシアニジンB2は「紅玉」「ふじ」「べにこはく」に特に多く含まれていた。

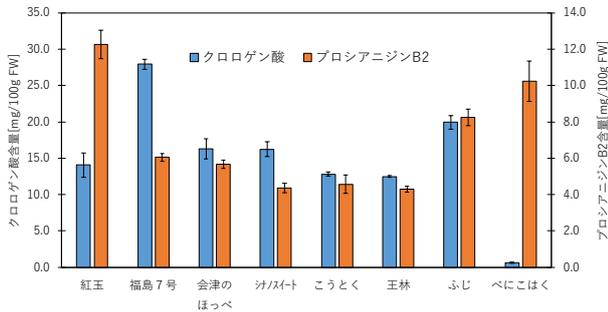


図3 各品種のポリフェノール組成 (n=3)

### 3. 1. 3. 褐変特性

初期褐変速度及び褐変度の結果を表1、褐変による色相の経時変化を図4に示す。いずれの項目においても品種ごとに違いが確認され、初期褐変速度が速いものは褐変度も大きくなる傾向が見られた。しかし「福島7号」は初期褐変速度が速かった一方、褐変度は最も低かった。

「こうとく」のみつ入りはみつ無しと比較して初期褐変速度及び褐変度が小さく、同じ品種である

ってもみつの有無で褐変特性が異なる可能性が示された。

リンゴのポリフェノールオキシダーゼはポリフェノール類を基質として酸化反応を促進し、褐変を誘引することが知られている。クロロゲン酸含量と初期褐変速度の関係を図5に示す。これらの数値の相関係数は0.66であり、正の相関を持つことが分かった。「福島7号」の初期褐変速度が速いのはクロロゲン酸含量が多いことが要因の一つと考えられた。

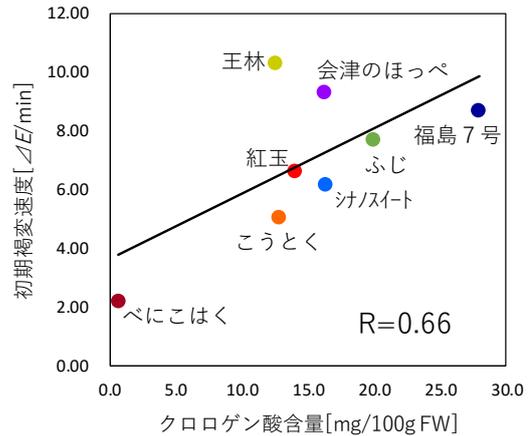


図5 初期褐変速度とクロロゲン酸含量の関係

表1 各品種の褐変特性 (n=3)

	紅玉	福島7号	シナスイート	会津のほっぺ	こうとく (みつ入り)	こうとく (みつ無し)	王林	ふじ	べにこはく
初期褐変速度 [ΔE/min]	6.60	8.69	6.14	9.30	4.67	5.44	10.29	7.70	2.14
褐変度	18.34	8.99	19.71	16.38	11.12	12.04	17.75	19.23	11.70

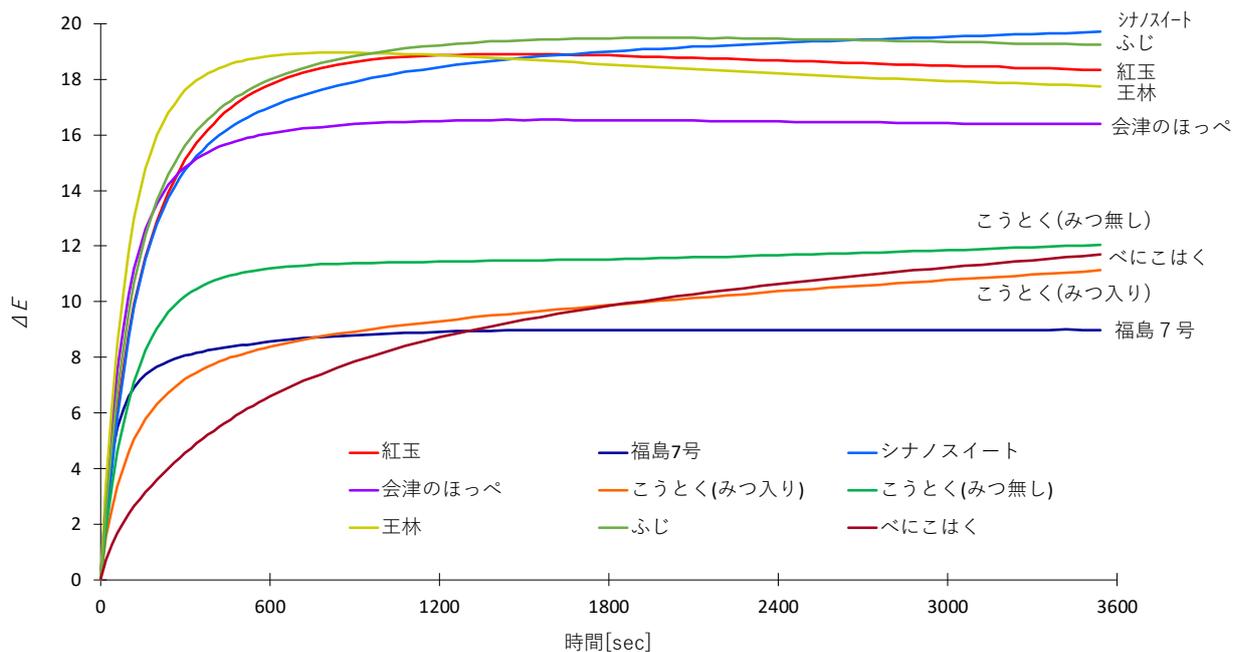


図4 褐変による色相の経時変化 (n=3)

### 3. 1. 4. 水溶性ペクチン

各品種の水溶性ペクチンの結果を図6、貯蔵した「べにこはく」の水溶性ペクチンの変化を図7に示す。水溶性ペクチンは「福島7号」が最も多く、その次に「紅玉」が続いた。「べにこはく」は貯蔵期間が長くなるほど水溶性ペクチンが増加する傾向が確認された。

水溶性ペクチンはジャムの物性に影響を与えることが報告されており<sup>5)</sup>、今回の結果からリンゴの品種や貯蔵期間によってジャムへの加工適性が異なる可能性が示唆された。

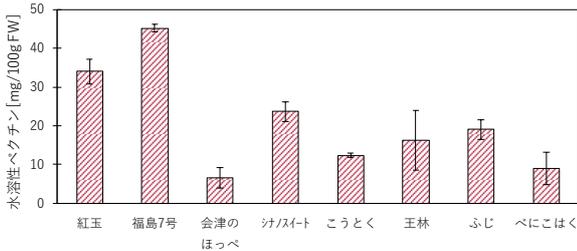


図6 各品種の水溶性ペクチン (n=3)

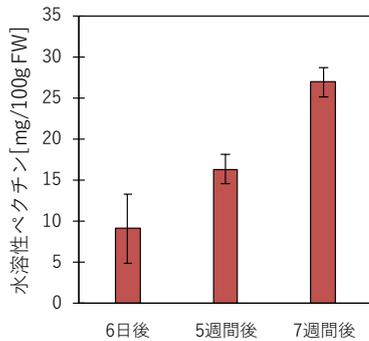


図7 貯蔵した「べにこはく」の水溶性ペクチンの変化 (n=3)

### 3. 2. 加工品の分析と評価

#### 3. 2. 1. 混濁ジュースの歩留まり及び糖度・酸度

混濁ジュース加工時の歩留まりを表2、糖度・酸度の結果を図8に示す。歩留まりは殆どの品種で50[%]台であったが、「べにこはく」のみ50[%]を下回った。これは、「べにこはく」が小型な品種であることから、皮や芯などの廃棄率が相対的に高くなったためと考えられる。

リンゴジュースにおいて食味に大きな影響を与える糖酸度は、2.5～3.5の範囲のものが最も好まれるとされる<sup>6)</sup>。今回加工した混濁ジュースで糖酸度が2.5～3.5だったのは「福島7号」「シナノスイート」「こうとく」「ふじ」で、「会津のほっぺ」「王林」もその範囲に近い値を示していた。

表2 混濁ジュース加工時の歩留まり

	紅玉	福島7号	会津のほっぺ	シナノスイート	こうとく	王林	ふじ	べにこはく
歩留まり[%]	52	54	55	57	55	52	57	48

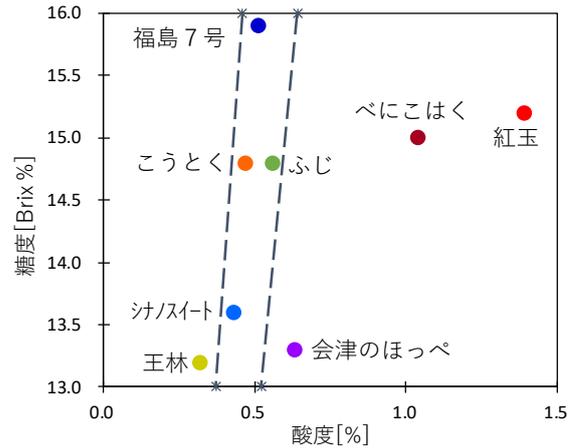


図8 混濁ジュースの糖度及び酸度 (点線で囲った部分は糖酸度2.5～3.5の範囲を示す)

#### 3. 2. 2. ソリッドパックの破断荷重

ソリッドパックの破断荷重の結果を図9に示す。破断荷重は「会津のほっぺ」が最も高く、「紅玉」「王林」で低い結果となった。

続いて、生果の硬度と加熱後の物性の関係について調査した。福島県農業総合センター果樹研究所で収穫時に測定した生果の硬度とソリッドパックの破断荷重の関係を図10に示す。これらの数値の相関係数は0.12であり、生果の硬度と加熱後の物性に明確な相関関係は確認されなかった。

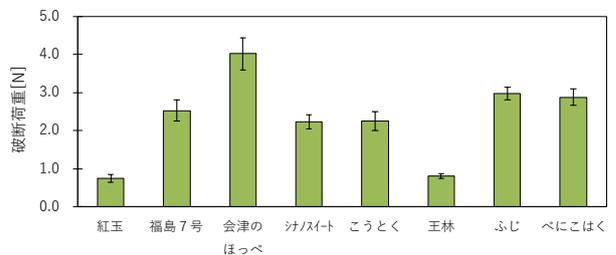


図9 ソリッドパックの破断荷重 (n=3)

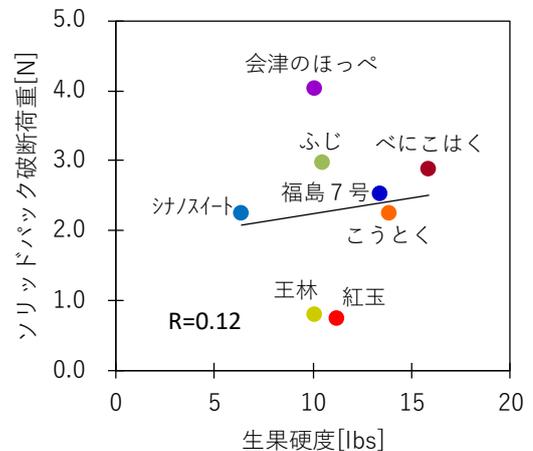


図10 生果硬度とソリッドパック破断荷重の関係 (生果硬度は福島県農業総合センター果樹研究所のデータ)

### 3. 2. 3. 官能評価

混濁ジュースの官能評価結果を表3、ソリッドパックの官能評価結果を表4に示す。

混濁ジュース及びソリッドパックのどちらも「こうとく」の総合評価が最も高かった。「こうとく」は3.2.1.で示したとおり甘味と酸味のバランスが優れていることに加え、加熱後の食感や香りも良好であることが確認された。

「王林」については混濁ジュースの総合評価が高かった一方、ソリッドパックの総合評価が低かった。3.2.2.の結果から「王林」は加熱後に果肉が著しく軟化したため食感の評価が低くなり、それに伴って総合評価も低くなったと考えられた。

「福島7号」のソリッドパックは色調のくすみを指摘するコメントが散見された。3.1.3.の結果から「福島7号」は初期褐変速度が速く、加工品の色調にも影響を与えたと推測された。味や香り、食感については良好とするコメントが多かったため、今後は色調を保持する加工方法について調査する。

「会津のほっぺ」「シナノスイート」は混濁ジュース、ソリッドパック共に香りの評価が特に低く、加熱によりオフフレーバーの原因となる揮発性成分が生じた可能性が考えられた。

リンゴ酸含量が多く酸度が高い「紅玉」「べにこはく」は、酸味が強く混濁ジュースの総合評価が低い結果となった。しかし、「べにこはく」のソリッドパックについては食感の評価が高く、総合評価も「こうとく」に次いで2番目に高かった。このことから、「べにこはく」はソリッドパックへの加工適性が高いと推測された。

表3 混濁ジュースの官能評価

	紅玉	福島7号	会津のほっぺ	シナノスイート	こうとく	王林	ふじ	べにこはく
外観	3.2	2.5	2.1	2.4	2.1	2.7	2.5	1.6
香り	3.6	3.1	3.2	3.3	2.0	2.1	2.4	3.4
甘味	2.1	4.6	3.4	3.8	3.7	4.0	4.0	2.4
酸味	4.5	1.9	2.7	2.2	3.1	2.3	2.9	4.5
総合	4.4	3.3	3.2	3.0	1.8	2.1	2.4	3.9

※甘味及び酸味は1:弱い~5:強い、それ以外の項目は1:良い~5:悪い

表4 ソリッドパックの官能評価

	紅玉	福島7号	会津のほっぺ	シナノスイート	こうとく	王林	ふじ	べにこはく
外観	3.9	4.8	2.6	3.0	1.6	2.9	2.6	1.9
香り	2.6	2.7	3.9	4.1	1.9	2.7	2.6	2.6
食感	2.9	2.8	2.9	3.1	2.2	3.9	2.7	2.3
甘味	1.9	3.9	2.1	2.8	3.1	2.8	3.6	2.5
酸味	4.6	1.9	2.2	2.1	2.8	1.9	2.2	3.6
総合	3.6	3.5	3.9	3.9	1.7	3.1	2.6	2.6

※甘味及び酸味は1:弱い~5:強い、それ以外の項目は1:良い~5:悪い

## 4. 結言

県産果実を利用した加工品開発を促進するため、本研究では県産リンゴ8品種の成分や物性、機能性を調査し、総合的な加工適性を評価することを目標とした。

原料果の成分や褐変特性は品種ごとに特徴が異なっており、クロロゲン酸含量と初期褐変速度は正の相関を示した。「べにこはく」の水溶性ペクチンは貯蔵によって増加する傾向が確認された。

加工品については混濁ジュース及びソリッドパックを試作し、各種測定値と官能評価の結果を比較した。

「こうとく」は混濁ジュース及びソリッドパックのどちらも総合評価が高かった。「王林」は混濁ジュースの総合評価が高かったが、ソリッドパックについては加熱後に果肉が著しく軟化したため食感の評価及び総合評価が低かった。一方、「べにこはく」は酸味が強く混濁ジュースの総合評価が低かったが、ソリッドパックは食感が良好で総合評価も高い結果となった。以上から、リンゴは品種によって加工適性が異なることが示された。

今後は別の加工品を試作して同様の調査を行うこととしている。また、「福島7号」の褐変を抑制する加工技術の確立を目指す。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、果実を提供いただいた福島県農業総合センター果樹研究所の皆様、プロシアニジンの測定方法についてご教示いただきました福島大学食農学類升本早枝子准教授、加工品試作の際に協力いただいた福島県農業総合センター農業短期大学校研修部の皆様に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 竹内正彦. “果実・果汁飲料と機能性成分(18) リンゴの加工—品種別加工適性および高品質化”. 食品と容器. 2014, p340-345.
- 2) 石川正行. “リンゴの嗜好と品種育成の方向”. 東北農業研究 別冊. 1990, p61-70.
- 3) T. Shoji, Y. Akazoe, T. Kanda, M. Ikeda. “The toxicology and safety of apple polyphenol extract”. Food and Chemical Toxicology. 2004, p959-967.
- 4) 田中福代、岡崎圭毅 他. “リンゴみつ入り果の官能特性と香味成分プロファイルおよびその形成メカニズム”. 日本食品科学工学会誌. 2016, p101-116.
- 5) 新妻和敏、山内富士男、小野美代子. “ナツハゼ果実中のペクチン含有量は、採取時期や加工処理条件により変化する”. 東北農業研究. 2009, p223-224.
- 6) 竹内正彦、白澤隆史、滝沢潤、後藤哲久. “長野県オリジナルリンゴ品種(‘シナノスイート’、‘秋映’及び‘シナノゴールド’)の果汁への加工適性”. 日本食品保蔵科学会誌. 2015, p65-69.

# 木製履物の設計のための FEM 解析の評価

## Evaluation of FEM analysis for wood footwear design

会津若松技術支援センター 産業工芸科 齋藤勇人 出羽重遠  
 応募企業 佐原桐材店

FEM 解析を使用した木製品の設計を行うことを目的に、実試験(DIC)と FEM 解析の結果を比較する手法で木製品に対する FEM 解析の有用性を評価した。小試験片の圧縮試験では DIC によるひずみ測定結果と FEM 解析の結果の両者に傾向の一致が確認でき、木繊維と直交する方向のひずみの集中位置は木材の割裂破壊の位置と同じであった。また、実製品に荷重を加える境界条件を指定した FEM 解析の結果から得られる木製品の各部の変位は、DIC による変位の測定結果と傾向が一致した。

Key words: 木製品、FEM 解析、DIC

### 1. 緒言

応募企業の佐原桐材店では桐下駄の進化形の履物の開発に取り組んでいる。その履物は内部が空洞になった構造(図1)になっており、木製の履物ながらクッション性を有している特徴がある。(特許番号:特許第6345362号)しかし、履物の形状は実際に製作してみて強度や使用感を確かめながら試行錯誤で決めているため、製品開発に非常に手間がかかっている。



図1 開発している履き物の例

そこで、応募企業は有限要素法(Finite Element Method; FEM)解析を使用した手法で形状のブラッシュアップを効率的に行い、新製品開発のスピードアップを図りたいと考えた。コンピュータシミュレーションで応力や変形・ひずみの計算などの構造計算を行う FEM 解析は、工業製品の設計の精度向上には欠かせない技術である。FEM 解析の結果を利用すると製品試験を模擬できるため、試作回数の削減や、過剰設計の抑制、トータルの工期の短縮化が期待できる。しかし、木製品を対象にして FEM 解析を行うことは福島県内の木製品加工業者の間ではあまり普及していない。木材は繊維が束ねられた構造になっており、金属やプラスチックなどの均質な材料とは異なり、部材の方向によって機械物性が異なるため、解析条件や、実際と解析結果の一致性などのノウハウ的な情報に乏しいのが現状であった。

また、履物に荷重が加わったときに各部に生じるた

わみをどの程度に想定して設計すれば、履物が適度なクッション性を得ることができるのかが不明であった。つまり、履物の FEM 解析による設計の指標が明らかでないことが理由で、取り組むことができなかった。

そこで本技術開発では、木製履物の製品開発のスピード向上及び品質向上に資することを目標として、木質材料を素材とした実物の履物について、実際に荷重を加える実試験を行って設計の指標を得るとともに、その実試験の結果と FEM 解析の結果の一致性を確かめることとした。FEM 解析と実試験の結果に一致性が得られるのであれば、従来からある製品試験で強度や使用感を確かめる製品開発に、FEM 解析を活用することが可能となる。

### 2. 実験

FEM 解析を使用した木製品の設計を行うことを目的に、実試験と FEM 解析の結果を比較する手法で木製品に対する FEM 解析の有用性についての評価を行った。実試験では精密万能試験機による圧縮試験を行うと同時にデジタル画像相関法(Digital Image Correlation; DIC)を使用してひずみ測定を行った。一方で、FEM 解析については解析ソフトウェア群“ANSYS”(ANSYS 社製)を使用して実施することにした。DIC は測定対象の変形前後の画像を解析演算することでひずみ・変形を計測する手法である。木質材料に DIC を使ってひずみ測定を行った例<sup>1), 2)</sup>はあり、いずれもひずみゲージの測定結果とよく一致している。

そこで、FEM 解析が木製品の設計に対しても有効であるか調べるために、単純化した小試験片について FEM 解析と実試験の結果の比較を行い、一致性が良好であることを確かめたのちに、実際の履物の変形挙動について実試験と FEM 解析で比較を行い、実用性を確かめることとした。

## 2. 1. 小試験片の圧縮試験

図2の形状のコの字型試験片について木繊維の走る方向を変えた2種類を製作した。この試験片の開口端から5[mm]の位置を中心として、半径5[mm]の半円筒型の治具でクロスヘッドの送り速度1[mm/min]で圧縮した。試験には精密万能試験機(島津製作所製 Auto Graph AG-10kNE)を使用し、このときに圧縮中の試験片をカメラ撮影して、DICによるひずみの測定を行った(図3)。なお、ANSYSに入力する材料物性は直交異方性材料として、物性値は文献値を補足して対応した(表1)。金属やプラスチックなどの均質の工業材料と木材が、機械物性面で大きく異なるのが、この直交異方性材料である点にあり、セルロースを主成分として作られた木繊維が、接着剤の役割を果たすリグニンにより年輪状に束ねられて木材を造っているために、繊維の走る方向と、繊維に直角する方向かつ年輪に直交する方向、年輪の接線方向の3方向で機械物性が著しく異なる。試験片を木繊維の方向を変えて2種類製作したことも、このような理由による。

表1 FEM解析用の桐の材料物性

記号	概要	物性値	
$E_L$	ヤング率 L 方向 (繊維方向)	5880[MPa]	※1
$E_R$	ヤング率 R 方向 (半径方向)	580[MPa]	※1
$E_T$	ヤング率 T 方向 (接線方向)	245[MPa]	※1
$\mu_{LR}$	ポアソン比 LR 面 (柀目面)	0.4	※1
$\mu_{RT}$	ポアソン比 RT 面 (木口面)	0.69	※2
$\mu_{LT}$	ポアソン比 LT 面 (板目面)	0.6	※1
$G_{LR}$	せん断弾性率 LR 面 (柀目面)	512[MPa]	※3
$G_{RT}$	せん断弾性率 RT 面 (木口面)	376[MPa]	※3
$G_{LT}$	せん断弾性率 LT 面 (板目面)	118[MPa]	※3

※1 木材工業ハンドブックより引用<sup>3)</sup>および単位換算した。

※2 広葉樹 20 種類の平均値を採用した。<sup>4)</sup>

※3 以下の実験式から推定した。<sup>4)</sup>

$$G_{LR}/E_L = 0.087, G_{LT}/E_L = 0.064, G_{RT}/E_L = 0.020$$

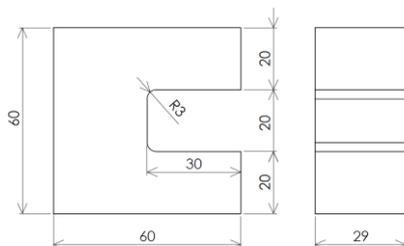


図2 コの字型試験片



図3 測定機器

## 2. 2. 履き物の変形挙動の解析

佐原桐材店提供の履物を精密万能試験機(島津製作所製 Auto Graph AG-2000E)にて図4に示す治具を使って圧縮試験を行った。この治具にはバネを使用した簡易の荷重計を2つ取り付けてあり、これらの圧縮量をカメラ画像より測定することで2か所に作用している荷重を推定できるようにした。また、木材に直接接する部分を金属などの硬質な材料にしてしまうと、木材に部分的な永久変形を生じさせてしまい、FEM解析の結果と比較する場合に不都合が生じると考えられるため、接触面には半径20[mm]の半円筒形状のウレタン発泡材を取り付けた。なお、圧縮試験では30[mm/min]のクロスヘッドの送り速度で最大700[N]の荷重がかかるまで圧縮し、この試験と同時にDICによるひずみ測定を行い、荷重が加わった時の履物の変形挙動の確認を行った。試験品の履物は図5の試験写真に示す形状で、かかと部分が切り離されていてたわみやすい構造となっており、踏み面に荷重がかかると片持ちで変形しながら、くびれ部分と切り欠き部分が上下で接触してストッパーの役割を果たし、大きく変形するが亀裂などの物理的な破壊が生じにくい構造になっている。なお、2か所で荷重を加えて変形を確認する意義は、歩行時の足裏圧力の時間変化例の報告<sup>5)</sup>を参考にして歩行の1コマを考え、2か所にピークが得られる圧力分布を想定した。このときDICで得られた結果1コマの変位と荷重の条件をもとにFEM解析を行った。

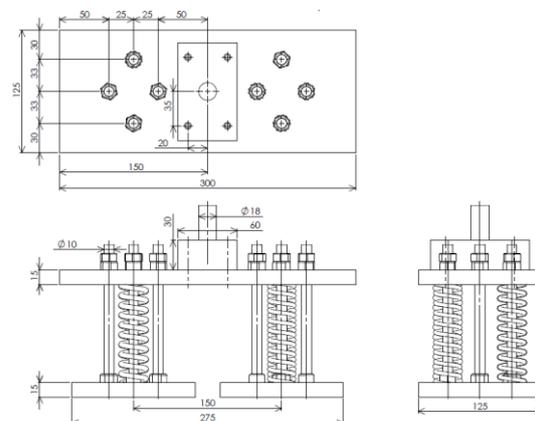


図4 圧縮試験に使用した治具



図5 圧縮試験の様子

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. 小試験片の圧縮試験

2種類のコの字型試験片について、それぞれ実試験とFEM解析の結果を比較した。まずは木繊維が水平方向に走った試験片について、試験機にて圧縮荷重を加える実試験と同時にカメラ撮影を行ってDICによるひずみ測定を実施した。特徴が現れた鉛直方向のひずみを表示させた結果を図6の上の図に示す。ひずみはコの字型の外周側で引張ひずみ、内周側で圧縮のひずみが生じており、試験片を上下で引き裂く方向に作用していることがわかる。実際に破壊するまで圧縮すると、図6の右下の図のようにDICにより鉛直方向のひずみが集中している位置で引き裂くように破断した。このときの状態を、下面を固定、実試験と同じ圧縮位置に同じく治具の解析モデルを作成して、1[mm]の強制変位の境界条件でFEM解析したところ、図6の左下のようDICによく類似したひずみの分布がみられた。

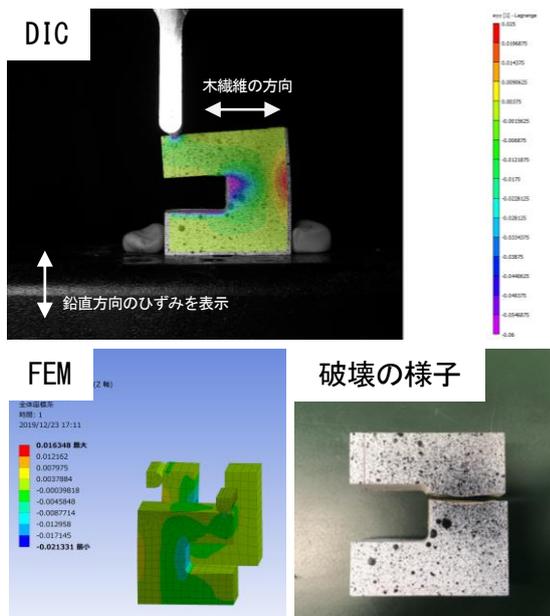


図6 木繊維が水平方向の場合の試験結果

また、木繊維が鉛直方向に走った試験片について、試験機にて圧縮荷重を加える実試験と同時にカメラ撮

影を行ってDICによるひずみ測定を実施した。特徴が現れた水平方向のひずみを表示させた結果を図7の上の図に示す。図6の結果と対照的に圧縮した辺の上面に圧縮のひずみ、その下面に圧縮のひずみのピークが現れ、圧縮した辺の付け根部分を引き裂く方向に作用していることがわかる。また、実際に破壊まで圧縮すると、図7の右下の図のようにDICにより水平方向のひずみが集中している位置で引き裂くように破断した。このときの状態を、下面を固定、実試験と同じ圧縮位置に同じく治具の解析モデルを作成して、1[mm]の強制変位の境界条件でFEM解析したところ、図7の左下のようDICによく類似したひずみの分布がみられた。

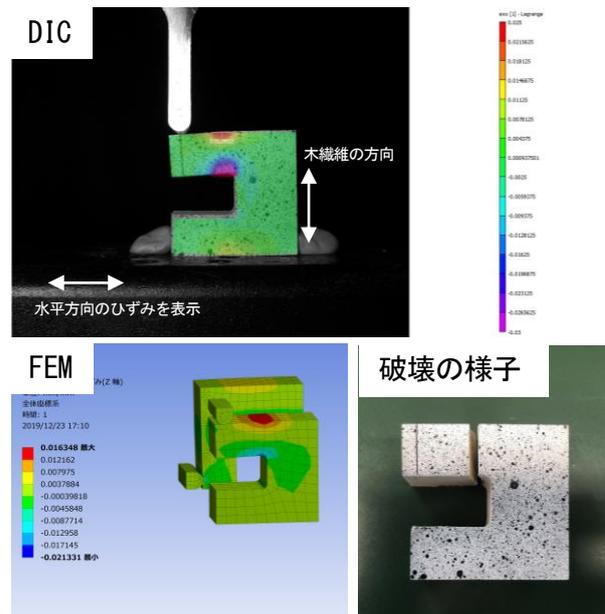


図7 木繊維が鉛直方向の場合の試験結果

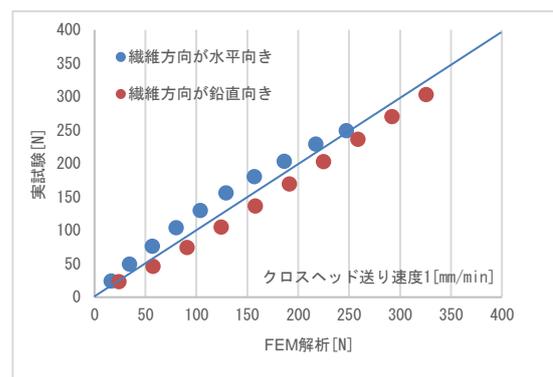


図8 FEM解析と実試験の荷重の比較

さらにFEM解析上で1[mm]の圧縮の計算を10分割して計算し、実試験も10[N]の荷重が加わったところを原点として0.1[mm]間隔で、それぞれ治具にかかる反力を比較した結果を図8に示す。実試験とFEM解析で治具にかかる反力は、加わった荷重の大きさにあまり左右されずに、50[N]以内の差分の範囲で一致してい

ることを確認した。木製品の製品開発においては最終的に製品試験が要求されていることを考慮すると、この差分の範囲で結果が一致していることは、FEM 解析の結果が製品開発の効率化に寄与するに足ると考える。

このように木繊維の方向の異なる試験片では、異なるひずみの分布および破壊挙動を示したが、いずれも適切な材料物性をもとに FEM 解析を行うことで、実試験と類似した解析結果を得られることが分かった。また、木繊維の方向と直交した方向のひずみは木材の割裂に関係があることが実験結果として示された。この知見は木製品の破壊箇所の予測に生かせるため、設計段階での形状のブラッシュアップの工程において非常に有用に活用できると期待される。

### 3. 2. 履き物の変形挙動の解析

試験品の履物の実試験 (DIC) を行い、図 9 に示す 2 点間 5 組の荷重を加えているときの変位を測定した。その 2 点間 5 組の変位の測定結果を示したのが図 10 であり、試験開始から約 1.5 秒後に④くびれや⑤かかと側の区間に変曲点がみられるが、この理由は、くびれの部分で接触が生じて変形のモードが変化したことによる。試験終了まで片足で全体重を支える 700 [N] を加えたことから、図 10 の試験終了直前にあたる 87 秒の位置を比較位置として各区間の変位を読み取った結果を表 2 に示す。この値をもとに FEM 解析を行った。

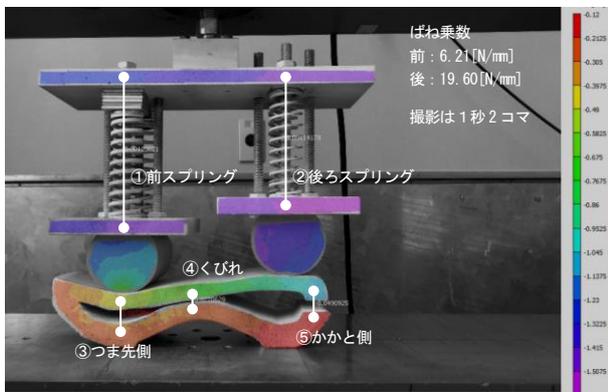


図 9 DIC による変位の測定位置

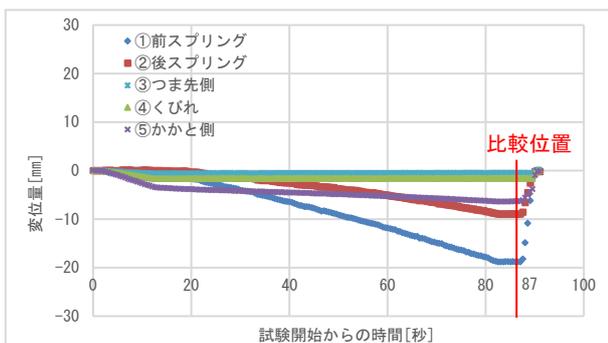


図 10 DIC による 2 点間の変位量

表 2 DIC の結果

2 点間の概要	開始時からの 変化量 [mm]	推定される 荷重 [N]
①前スプリングの圧縮量	-18.82	233.7
②後スプリングの圧縮量	-8.97	351.6
③つま先側	-0.45	/
④くびれ	-1.57	
⑤かかと側	-6.35	

FEM 解析の 3D モデルには 3D スキャナを使用して試験品の履物から取得した点群データを基にサーフェスモデルを作り、さらにリバースエンジニアリングソフトウェアである Geomagic DesignX (3D Systems 社製) に取り込んでデータの修正および簡略化した。その後、データを IGES 形式へ変換したのちに ANSYS へ取り込み解析した。

#### 3. 2. 1. 変位指定の境界条件による計算

FEM 解析の境界条件は、つま先部分の接地面を固定、かかと部分の接地面を変位指定 (鉛直方向に 0 [mm]、他をフリー) とし、くびれ部分とかかと部分は接触問題が生じると思われるので、摩擦なし接触の条件を指定した。また、解析モデルのつま先側の加重位置の変位を 0.45 [mm]、かかと側の加重位置の変位を 6.35 [mm] として試験的に計算したところ、くびれ部分の接触は生じず、実試験と FEM 解析の結果が大きく異なった。この原因は 3D スキャナから得たデータをもとに、サーフェスモデルを作り直す簡略化の処理を行ったため、実物形状と解析モデルの形状に差異が生じてしまったことであると考えられる。特に、くびれ部分の隙間の形状は精密さを要求すると考えられ、2 点で変位を指定する計算では実際の状態を再現することは困難である。

#### 3. 2. 2. 荷重指定の境界条件による計算

3. 2. 1. と同様の拘束の境界条件で、つま先側の加重位置に 233.7 [N]、かかと側の加重位置に 351.6 [N] の荷重を加える条件で計算したところ、くびれ部分の接触が生じて、実試験の結果と同じモードの変形が得られた。また、FEM 解析上の荷重の境界条件に対応する反力は、つま先側 248.4 [N]、かかと側 352.8 [N] となり、DIC から推定した値とよく一致する結果が得られた。さらに、その時の FEM 解析により計算された変位を表示したところ図 11 となり、つま先の負荷位置の変位で約 0.27 [mm]、かかと部分で約 5.1 [mm] の変位と、表 2 に示す DIC の結果とそれぞれ 0.18 [mm]、1.25 [mm] 小さい値が得られたが、木製品の設計に使用することを考慮すると、十分に使用可能な結果と考えられた。また、この FEM 解析の結果の傾向は、つま先と下半分の変位は 1 [mm] 以下となって、上

半分はつま先からかかとにかけて段階的に変位量が大きくなっており、DIC から得られた変位の測定結果(図 1 2) の傾向ともよく類似した。

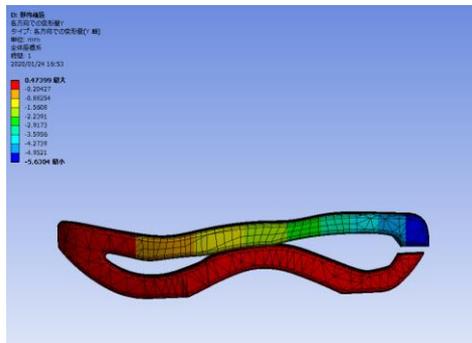


図 1 1 FEM 解析による変位の計算結果

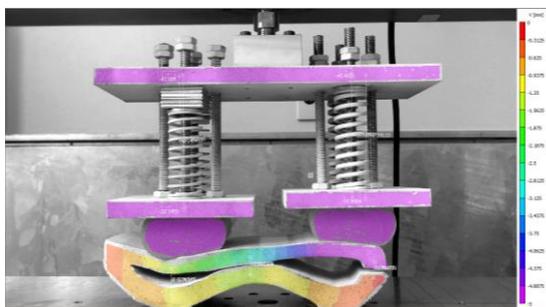


図 1 2 DIC による変位の測定結果

DIC の結果を確認しながら、同じ結果が出るように変形挙動を FEM 解析で再現する検証作業を行った結果、変位による境界条件の指定を行った FEM 解析の結果では、実物形状と解析モデルの差異が原因して、実用に耐えうる一致性で変形挙動を再現することができなかった。

一方で、荷重による境界条件の指定を行った FEM 解析の結果では、解析モデルに少々の差異があっても目的の変形挙動を実用可能な程度まで再現することができた。荷重条件で計算を行って実用的な結果が得られることにはメリットがあり、履く人の体重を想定した上で設計条件を設定することができると考える。また、歩行時の足裏の圧力分布は知られているところなので、この条件を FEM 解析に落とし込むことで設計を行えることが示唆された。

#### 4. まとめ

本事業では木製品について FEM 解析を使用して設計することを検討し、以下の結果が得られた。

① コの字型の小試験片の圧縮・破壊試験を行い、実試験 (DIC) によるひずみ測定の結果と FEM 解析の結果に類似性が得られた。また、この結果から DIC

による木繊維と直交する方向のひずみの集中が木材の割裂に寄与する因子であると直感的に理解できることから、木製品の破壊箇所の予測にも役立つことが分かった。

② 木製の履物の実試験 (DIC) の結果を商用の FEM 解析ソフトに落とし込んで計算を行ったところ、変位による境界条件では、実試験の状態を再現できず、荷重による境界条件では実用に耐える結果が得られた。変位による境界条件が実試験を再現しなかった理由は、用意した解析モデルが実物形状と微妙に差異があったことが原因と考えられた。

#### 参考文献

- 1) 田村功二, 増田稔, 宇京斉一郎. デジタル画像相関法による木材のひずみ分布解析. 可視化情報学会論文集, Vol. 25, No. 9, 2005, p. 57-63.
- 2) 並木博一. デジタル画像相関法を用いた木材の割裂性状に関する研究. 日本工業大学研究報告, 第 45 巻, 第 1 号, 2015, p. 217-220.
- 3) 林産試験場. 木材工業ハンドブック. 丸善株式会社, 第 5 版 4 刷, 1970, p. 163-165.
- 4) 澤田稔. 木材の変形挙動. 「材料」, 第 32 巻, 第 359 号, 1983, p. 2-11.
- 5) 井上勝夫, 木村翔, 前原暁洋, 渡辺秀夫, 松岡明彦. 床歩行時の足裏各部の衝撃力特性. 日本建築学会計画系論文集, 第 477 号, 1995, p. 1-10.

# デジタルファブ리케이션による伝統工芸品の製造手法の提案（第2報）

## 3D Proposal of manufacturing method of traditional crafts by digital fabrication( 2nd report )

会津若松技術支援センター 産業工芸科 堀内芳明 出羽重遠

本研究は、伝統産業の今後の技術継承に向けて、3Dスキャナ等で測定したデータをもとに、3Dプリンタ等のデジタルファブ리케이션機器と職人の手仕事を組み合わせたデジタル製造技術を提案することを目的としている。今年度は県内2企業の協力を得ながら、製造現場で試作品の製作及び成形実験を行い、量産化に向けての製造方法を確立した。

**Key words:** 伝統産業、デジタルファブ리케이션機器、3Dモデリング、

### 1. 緒言

県内の伝統産業界では、職人不足による生産数の減少や後継者不足のため技術の伝承が困難になりつつあるという問題が顕在化している。

本研究では、伝統工芸品を中心に3Dスキャナ等で3次元データを取得し、そのデータをもとに、NC加工機や3Dプリンタ等のデジタルファブ리케이션機器を活用して、職人の手仕事を組み合わせた、伝統産業向けのデジタル製造技術を提案することを目的としている。

また、本研究事業は、これまでデジタル製造技術を活用したことがない県内の伝統産業界に対して、デジタル製造技術の有効性の理解と導入を促進させることもねらいとしている。導入を促進させるためには、研究活動と日々の技術支援等を通して活用事例を増やし、活用範囲の幅を広げ、デジタル製造技術の敷居を下げる必要がある。そのためには、県内の様々な伝統産業の製品を対象とした開発事例作りが重要であると考えられる。

今年度は、量産化に向けて、製造現場での試作と実験を行った。また、開始から2年間で得たノウハウや成果を普及するため、県内の伝統産業界を対象にした、3Dスキャナの基礎知識を解説する講習会と本研究事業の成果中間発表会を開催した。

### 2. 製造手法

製造手法は、選定した伝統工芸品の製造工程を伺い、デジタル製造技術を導入できる可能性のある工程を協力企業と協議しながら研究を進めた。3DスキャナやX線CTを用いて3次元測定し、取得した3次元データを導入が想定される工程やその後の工程等を考慮してデータの編集を行う。編集したデータをデジタルファブ리케이션機器で試作を行い、協力企業の製造工程への導入を検証する。

データの編集では、精度を余り求めないものや単品で製品になるものは取得した3次元データをそのまま

活用し、精度を求めるものや複数の部品と組み合わせるものは、取得した3次元データを参考に新たに3Dモデルを作成した。

### 3. 試作と結果

製作するものとして、蓮華座とだるまを選定した。

協力企業と打ち合わせを行いながら、量産化に向けて試作と実験を行った。

#### 3. 1. 蓮華座の試作

##### 3. 1. 1. 試作

位牌の部品の一つである蓮華座は、他の部品と組み合わせるため精度が必要な部品であるため、X線CTを用いて取得した蓮華座の3次元データを参考に3DCADソフトウェアのRobert McNeel & Associates製Rhino 5を使用して、加工用データを作成した。加工用データの作成方法は以下の通りである。蓮華座を上面から見ると上下左右対称の形状をしているため、図1のとおり4分の1の形状を作成し、上下左右の反転複製を行い全体の形状を作成した（図2）。

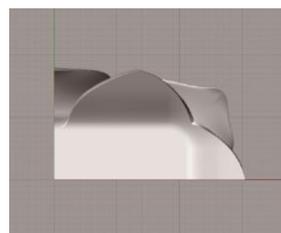


図1 4分の1の形状

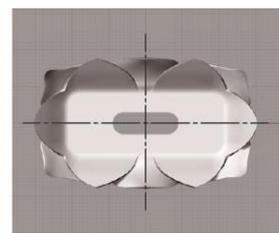


図2 全体の形状

各々の花びらの作成は、花びらの中心を通る筋に当たる部分の稜線とその稜線から鉛直方向に伸び、花びらに膨らみを与える稜線、花びらの形状を決める外形線を作成する。その後、作成した線群を元に花びらの形状を作成した。また、線対称の形状をした花びらは片側の形状を作成し、その形状を反転複製することで形状を作成した。作成した加工用データを製造現場のNC加工機で読み込み、製品に使用する木材を用いて試作を行った（図3）。

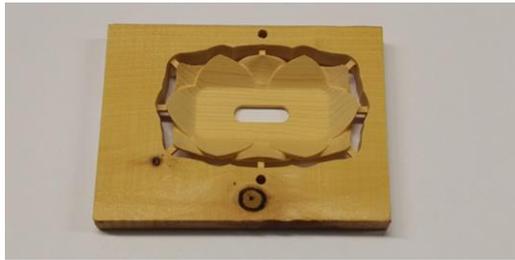


図3 実製品に使用する木材を用いた試作品

### 3. 1. 2. 改良

試作品の仕上がりを目視で確認したところ、蓮華の花びら6か所に凹みの筋が入っていた。作成した加工用データも併せて確認したところ、同様の凹みを確認した。製品の仕上げ工程を考慮すると、形状が凹んでいるより、膨らませて厚みを持たせた方が良いとのこと、加工用データの修正を行った。当所にて、凹みの原因となった膨らみを与える稜線の角度を外側に向く角度に修正し、形状を作成した(図4)。

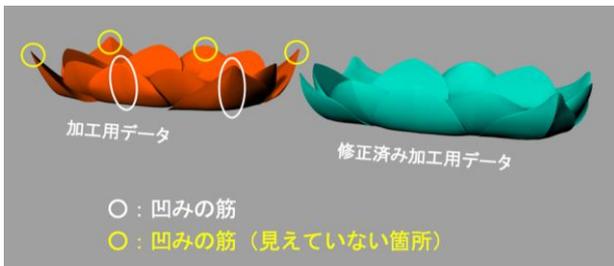


図4 凹みの筋の修正

今後、修正したデータを使用して、協力企業にて実際にNC加工機での試作と試作品に表面加飾を施し、品質の確認をする予定である。

### 3. 2. だるまの量産用型の製作

初年度は、だるまについて3Dスキャナを用いて3次元測定を行い、取得した3次元データを元に3Dプリンタ(Creality製 CR-10 S4)を使用して、従来の量産用型の再現方法を確認した(図5)。また、量産用型の製造工程を短縮するために水抜き穴を自動で配置するプログラムをRhinoceros 5のプラグインであるGrasshopperで新たに開発した。



図5 量産用型の試作品

### 3. 2. 1. 改良

協力企業に試作した量産用型の仕上がりや剛性を確認したところ、代替品として利用可能とのことであり、より簡単に量産用型の製作のために、型の厚みを薄くして、金網を張らない量産用型の開発を行った。型の厚みを10[mm]から5[mm]に変更した。水の吸引の減圧に耐えるか実験を行うために、だるまの高さを45[mm]にした量産用型を設計し、3Dプリンタを使用して試作を行った。水抜き穴の直径が小さかったことにより、穴の内側にサポートが成形されなかったが、穴の貫通具合にばらつきがあったので、全ての水抜き穴に千枚通しを通して貫通させた。製造現場で、容易に実験ができるように、専用の木製外枠も設計し、製作を行った(図6)。



図6 改良した量産用型と木製外枠

### 3. 2. 2. 成形実験

製造現場にて改良した量産用型を使用して、だるまの成形実験を行った。型の厚みを薄くした量産用型でも、水の吸引の減圧に耐え、だるまを成形することができたが、成形されただるまは原材料のパルプが水抜き穴に入り込み、だるま全体に刺状の突起がついた形状になった(図7)。



図7 成形されただるま

### 3. 2. 3. 水抜き穴の大きさの実験

突起の原因は、水抜き穴の直径が大きいため、原材料が水抜き穴に入り込んだためである。そこで原材料が水抜き穴に入りこまない穴径を検討した。実験用型として、直径0.7[mm]、0.8[mm]、0.9[mm]の水抜き穴を約4mmピッチで配列した各々の型を3Dプリンタで製作し、穴の貫通具合の確認と出力したものに水を入れ、水の通り具合を確認した。3Dプリンタの設定は、水抜き穴の仕上がりの良さから、使用するフィラメン

トを PETG から PLA に変更し、積層ピッチはこれまでと同様に 0.08[mm] に設定した (図 8)。



図 8 実験用型

穴の貫通具合は、直径 0.35[mm] の 3D プリント用クリーニングニードルを各穴に通して確認を行った。0.9[mm] の実験用型では、全ての水抜き穴にニードルを通すことができたが、その他の型はニードルが通らない箇所が多々あった。水の通り具合は、凹みに水を入れ水抜き穴からの水の出具合を確認した。0.9[mm] の実験用型では、各穴から水がしみ出した。その他の型では、内側から圧力をかけないと水がしみ出さなかった。今後、水抜き穴径が 0.9[mm] の量産用型を製作し、製造現場でだるまの成形実験を行う。

#### 4. 結言

今年度は、蓮華座では、作成した NC 加工用データを用いて製造現場での試作を行った。試作品に不具合のある箇所があったため加工用データの修正を行った。今後、修正したデータを用いて、協力企業が量産化に向けて製品開発を行う予定である。

だるまの量産用型の製作では、より簡単に量産型を製作するために、金網を不要とする改良を加えた量産用型の試作を行った。3D プリントで出力した試作の量産用型でだるまの成形はできたが、水抜き穴にパルプが入り込み、だるま全体に刺状の突起が付いたことから、パルプが入り込まない水抜き穴を開発するために実験を行い、水がしみ出してくる穴径を検証した。今後、実験結果を元に、水抜き穴の径を変更した量産型の設計及び試作を行い、製造現場での成形実験を行う予定である。

また、デジタル製造技術の普及のために、令和 2 年 2 月 21 日に、平成 29 年度から整備してきたデザイン支援関連機器 (3D CAD 搭載 PC、レーザー式精密加工機、卓上 NC 加工機等) に加え、今年度、新規導入したフルカラー 3D ハンディスキャナの機器利用講習会及び研究成果中間発表を行った。会津地域の企業を中心に 21 名の参加があった。機器利用講習会は、(株) ケイズデザインラボの大関淳也氏を講師に招聘し、3D スキャナの方式や 3 次元データの種類等の基礎的な知識と 3 次元測定後の 3 次元データの編集方法、

伝統工芸分野での 3D スキャナの活用方法を解説いただいた。その後、研究成果中間発表として、県内の伝統産業における手仕事とデジタル製造技術を組み合わせた商品開発の可能性と南相馬技術支援センターで行った X 線 CT を使用した 3 次元測定の実例紹介を行った。

本研究事業に協力いただいた幾つかの県内企業の中には、事業を切っ掛けとして、従来の製造技術に加え、新しい製造技術の確立のために、3D スキャナやデジタルファブリケーション機器を活用したデジタル製造技術の先行開発事業が立ち上がった。今後、事業が進めば、企業独自の製造技術が確立され、様々な製品に活用される可能性がある。本研究事業は、特定の製品の製造技術開発であるが、協力を切っ掛けとして企業内で事業立ち上げまで繋がった。

今回研究している伝統産業へのデジタル製造技術の導入は、製造工程の削減や安定した品質の製品を製造に繋がる。全て手仕事で行っていた製作工程の一部をデジタルファブリケーション機器に任せることにより、手仕事を必要とする仕上げの工程などに、多くの時間をかけることができようになるため、より質の高い製品を製造できる利点がある。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、様々なご協力をいただきました県内の協力企業の皆様と講演会講師を引き受けていただいた株式会社ケイズデザインラボの大関淳也様に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 堀内芳明, 出羽重遠. デジタルファブリケーションによる伝統工芸品の製造手法の提案, 平成 30 年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2019, p.123-125.

# 福島県ハイテクプラザ試験研究報告

令和元年度（2019年度）

令和2年7月発行

令和3年7月改訂

## 福島県ハイテクプラザ

〒963-0297 郡山市待池台1丁目12番地

代	表	024-959-1741							
企	画	管	理	科	024-959-1736				
産	学	連	携	科	024-959-1741				
工	業	材	料	科	024-959-1737				
生	産	・	加	工	科	024-959-1738			
プ	ロ	ジ	ェ	ク	ト	研	究	科	024-959-1739
F	A	X	024-959-1761						

## 福島県ハイテクプラザ福島技術支援センター

〒960-2154 福島市佐倉下字附ノ川1番地の3

代	表	024-593-1121				
織	維	・	材	料	科	024-593-1122
F	A	X	024-593-1125			

## 福島県ハイテクプラザ会津若松技術支援センター

〒965-0006 会津若松市一箕町大字鶴賀字下柳原88番1

代	表	0242-39-2100				
醸	造	・	食	品	科	0242-39-2977
産	業	工	芸	科	0242-39-2978	
F	A	X	0242-39-0335			

## 福島県ハイテクプラザ南相馬技術支援センター

〒975-0036 南相馬市原町区萱浜字新赤沼83番

代	表	0244-25-3060						
機	械	加	工	ロ	ボ	ット	科	0244-25-3060
F	A	X	0244-25-3061					

## 福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター

〒972-8312 いわき市常磐下船尾町杭出作23番32号

代	表	0246-44-1475				
機	械	・	材	料	科	0246-44-1475
F	A	X	0246-43-6958			

編集

福島県ハイテクプラザ 産学連携科

URL <https://www.pref.fukushima.lg.jp/w4/hightech/>

E-mail [hightech-info@pref.fukushima.lg.jp](mailto:hightech-info@pref.fukushima.lg.jp)