ISSN　0919-6676
CODEN：SFHPFE

試 験 研 究 報 告

平成３０年度

福島県ハイテクプラザ
FUKUSHIMA TECHNOLOGY CENTRE

平成３０年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告

目　　次

○企業支援業務

新製品・新技術開発促進事業

○技術開発業務

チャレンジふくしま「ロボット産業革命の地」創出事業

産総研連携強化型技術開発事業

福島県オリジナル清酒製造技術の開発

基盤技術開発支援事業

産業廃棄物減量化・再資源化技術支援事業

科学技術調整会議共同研究事業

外部資金等活用研究事業

本試験研究報告の研究区分は、以下のとおりです。

１　企業支援業務

（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製品開発を支援します。（記載内容はハイテクプラザが独自に取り組んだ研究であり、応募企業との共同研究ではありません。）

２　技術開発業務

（１）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立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。

（２）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。

（３）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検証を行います。

（４）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する地域産業の振興のため、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。

（５）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、産業廃棄物排出事業者へ技術面から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。

（６）科学技術調整会議共同研究事業

県内の７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。

（７）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研究資金制度等の外部資金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問題の解決に繋げます。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。

黒檀、紫檀材の白色斑点除去技術の開発

Development of white spots removal technology for blackwood and rosewood

技術開発部 工業材料科　矢内誠人　伊藤弘康　松浦和俊
応募企業　株式会社保志

輸入した黒檀材、紫檀材に見られる斑点状の白色物を除去する方法を開発した。白色物の分析結果から、白色物はカルボン酸カルシウム塩であると推測された。これより、難溶性のカルボン酸カルシウム塩の溶解実験を行い、エチレンジアミン四酢酸四ナトリウム塩四水和物（EDTA-4NA）の効果が高いことが分かった。この結果を基に白色物を除去する実験を行ったところ、EDTA-4NA 水溶液に浸漬させることにより木材中の白色物が減少しているのが分かった。また、木材中の白色物はＸ線ＣＴにより観察できることが分かった。

Key words: 木材、カルシウム塩、定性分析

１．緒言

黒檀、紫檀は古くから家具や仏具の高級品に使用され、未だ根強い人気がある（図１）。しかしながら近年は、生育数の減少から希少価値が高まり、これら木材の入手が困難になっている。そこで、製造者では黒檀、紫檀に類似した木材を調達している。調達先は中国から東南アジア、南アメリカなど世界に及んでおり、様々な木材が輸入され、使用されている。

図１　黒檀（左）と黒檀を使用した仏壇（右）

輸入した黒檀材、紫檀材を使用する際、製材した木材の表面に白い斑点が出現することがある（図２）。この場合、製造者では白い部分を切除して使用するため、購入した材料が無駄になってしまう。さらに、加工した表面に白色物が露出することがある。この場合、製品として使用することができない。このようなことから、白色物を除去する方法、または白色物の分布を加工前に把握する手法が望まれている。

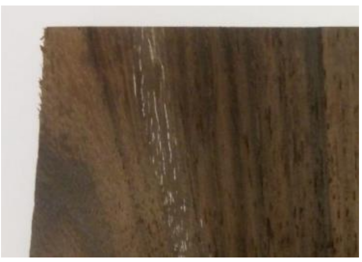


図２　ソノケリン表面の白色物

本事業では、黒檀材、紫檀材中の白色物を除去する方法を開発した。初めに白色物の素性を明らかにし、これに対して除去するための実験を行った。また、Ｘ線ＣＴにより、木材内部の白色物を観察した。

２．実験

２．１．実験に使用した木材

黒檀材、紫檀材として、ソノケリン、パープル、タガヤサンを用いて行った。実験に使用した木材の写真を図３に示した。

図３　実験に使用した木材
（左からソノケリン、パープル、タガヤサン）

２．２．白色物の定性分析

白色物の定性は、走査型電子顕微鏡（SEM-EDX）、フーリエ変換型赤外分光分析（FT-IR）を用いて行った。

２．３．カルシウム塩の溶解実験[1)]

難溶性のカルボン酸カルシウム塩として、しゅう酸カルシウム（溶解度　0.063mg／100mL）を使用した。試薬 0.5g を精秤し、各種溶液 100mL を加えて軽く振とうしたのち、２４時間静置した。その後、ろ液を回収し、イオンクロマトグラフでろ液中のカルシウムイオンを測定した。実験に使用した溶液を表１に示した。実験に使用した試薬のうち、エチレンジアミン四酢酸二水素二ナトリウム塩二水和物を EDTA-2NA、エチレンジアミン四酢酸四ナトリウム塩四水和物を EDTA-4NA と表記した。

事業課題名「木材改質処理方法の検討」

表１　溶解実験に用いた溶液

試薬名	濃度（重量%）	溶液の pH
水	―	5.4
EDTA-2NA	3%	4.7
EDTA-4NA	3%	10.8
クエン酸一水和物	3%	2.6
DL-リンゴ酸	3%	3.0
こはく酸	3%	2.8

２．４．木材の溶出実験

木材を 50mm 幅に切断し、密封できる容器に入れ、そこへ 100mL の水、または 5%EDTA-4NA 水溶液を加えて密封した。これを二つ用意し、一方は室温、もう一方は 80℃の恒温水槽中で２４時間放置した。その後、木材を溶液から取り出し、80℃で十分乾燥させた。浸漬前後の色調の変化を確認するため、木材の色度測定を行った。

２．５．木材中の白色物の観察

木材をＸ線ＣＴで観察した結果、白色物を確認することができた（図４）。画像処理ソフト（Simpleware ScanIP）を用い、Ｘ線ＣＴの観察結果から木材と白色物それぞれの体積を算出した。体積の計算結果から白色物の含有率を求め、溶出実験前後の値を比較した。

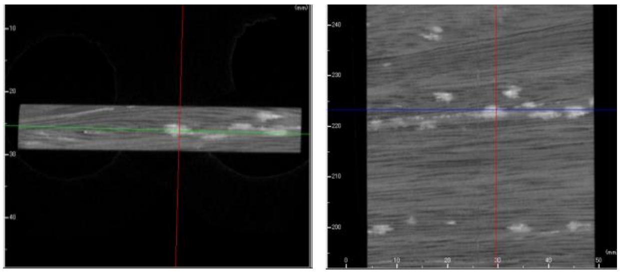


図４　ソノケリンのＸ線ＣＴ観察結果

３．結果

３．１．白色物の定性分析

SEM-EDX 分析により、白色物は C,O,Ca を主とする元素で構成されていることが分かった（図５）。白色物はソノケリン、パープル、タガヤサン、いずれの木材にも見られたが、SEM-EDX 分析の結果はおおむね一致していた。白色物を採取し、FT-IR 分析を行ったところ、3500cm^{-1} 付近に水酸基由来と思われる吸収と、1600cm^{-1} 付近にカルボン酸塩由来と思われる吸収が見られた（図６）。これらの結果から、白色物はカルボン酸カルシウム塩であると推測した。カルボン酸カルシウム塩には、しゅう酸カルシウムなど、水に溶解しにくい性質のものがある。カルボン酸は植物の代謝過程で発生することがあるため、木材中の道管内で代謝物と水中のカルシウムが反応して難溶性の塩を形成し、堆積したものと推測した。

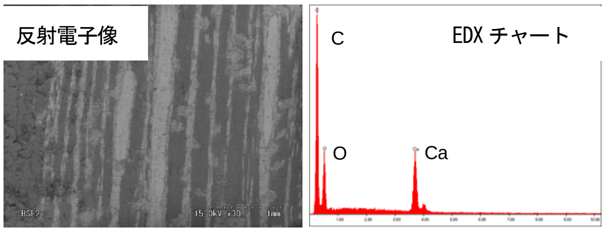


図５　ソノケリン白色物の SEM-EDX 分析結果
（左：反射電子像、右：白色物の EDX チャート）

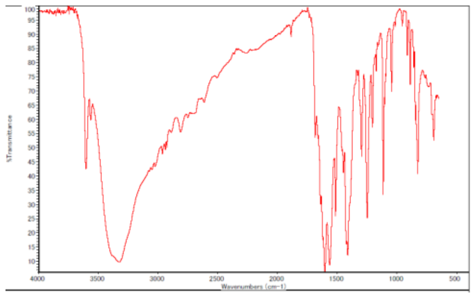


図６　ソノケリン白色物の FT-IR 分析結果

３．２．カルシウム塩の溶解実験

ろ液中のカルシウムイオン濃度を図７に示した。しゅう酸カルシウムは水にはほとんど溶解しないが、各種試薬の添加により、溶解量が増大することが確認された。この中で、溶解液に EDTA-4NA を使用した場合は、その他の溶液と比較し、カルシウムイオンのピーク位置、形状ともに大きくずれる結果となった。これは、この溶液のみアルカリ性であり、カラム内での分離が正常ではなかったためと推測される。溶解量は、それらを補正した結果を示した（図７中※）。

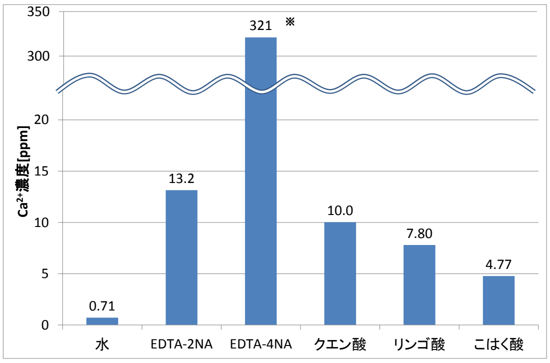


図７　しゅう酸カルシウムの溶解実験結果

３．３．木材の溶出実験

各条件で浸漬し、乾燥させた試料の観察結果を表２に示した。いずれの溶液においても、80℃で浸漬した試料は、表面の白色物が概ね除去できていることを確認した。ソノケリンの浸漬前後の写真を図８に示した。

パープルは表面の白色物が見つけにくいため、浸漬による変化は見られなかった。

図８　ソノケリンの浸漬前後の表面写真
（左：浸漬前、右：EDTA-4NA/80℃浸漬後）

表２　浸漬による白色物の除去効果（目視による評価）

浸漬条件	ソノケリン	パープル	タガヤサン
水/常温	×	－	×
水/80℃	○	－	○
EDTA-4NA/常温	×	－	×
EDTA-4NA/80℃	○	－	○

浸漬により木材の色調が変化しているのが分かった。色差計による測定結果を図９、１０に示した。図９よりいずれの試料も80℃に加熱した試料の色差⊿E が大きかった。また、図１０より80℃に加熱した試料の色差⊿L がマイナスに変化していることから、浸漬前より暗くなっていることが分かった。

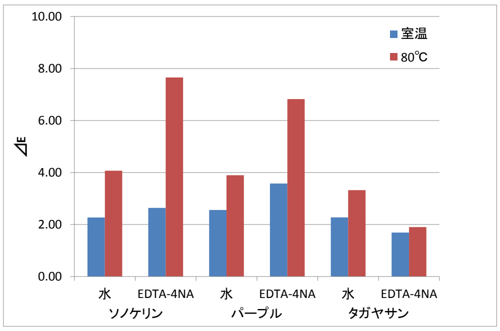


図９　浸漬後の色差⊿E

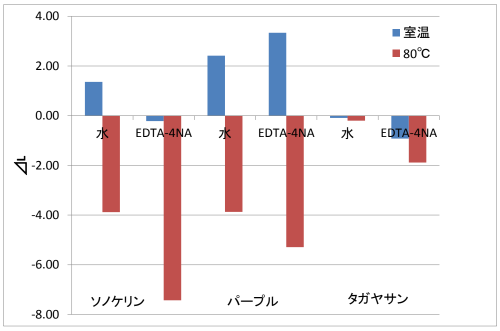


図１０　浸漬後の色差⊿L

３．４．木材中の白色物の観察

ソノケリン、パープル、タガヤサンをＸ線ＣＴで観察した結果を図１１に示した。図のように、白色物が他より白く映っていることが分かる。また、木材内部にも白色物が存在していることが分かり、種類によって白色物の分布が異なることが分かった。この観察手法を用い、溶出実験前後の白色物の体積を求めた。

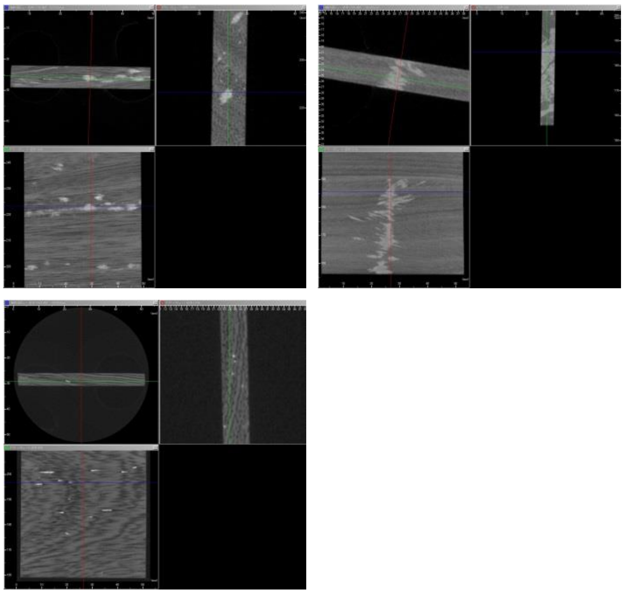


図１１　ソノケリン（左上）、パープル（右上）、タガヤサン（左下）のＸ線ＣＴ観察画像

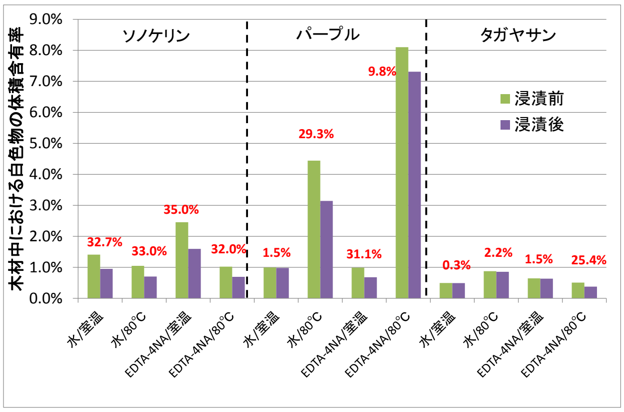


図１２　木材中の白色物体積比率
（図中赤字は白色物の減少率）

すべての実験条件で白色物の体積率が減少していることが分かった（図１２）。木材の種類にもよるが、80℃に加熱した方が白色物の除去率が高く、溶液にEDTA-4NA を使用した方が白色物を除去する効果が高い傾向が見られた。Ｘ線ＣＴ観察により、木材内部の白色物は減少していることが確認できたが、完全に取り除くことはできなかった。パープルのＸ線ＣＴ観察画像により、表面から0.5mm の深さまでしか白色物が除去できないことが確認された（図１３）。これは木材

に水が浸透しにくいことが影響していると考えられる。特に黒檀材､紫檀材は一般的な木材よりも密度が高く、緻密な構造を取っているため、水が浸透しにくいためと考えられる。

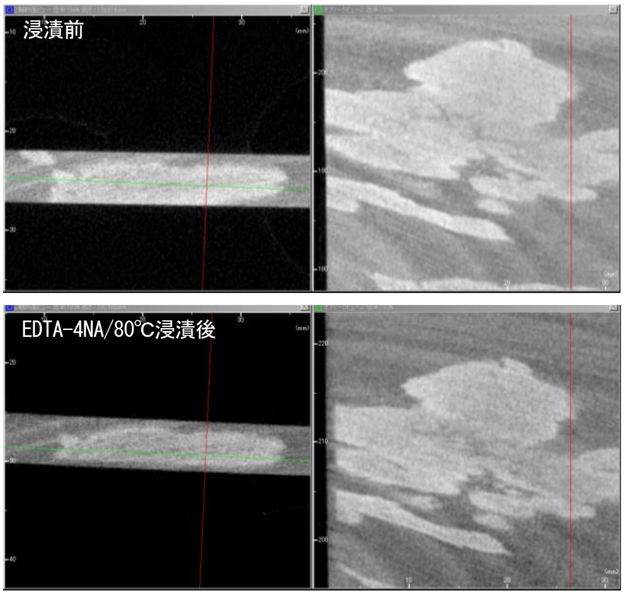


図１３　パープルの浸漬前後の比較
（上段：浸漬前、下段： EDTA-4NA/80℃浸漬後）

４．結言

黒檀材、紫檀材に見られる白色物は、Ｘ線ＣＴで観察できることが分かった｡この白色物は､分析の結果、難溶性のカルボン酸カルシウム塩であると推測された。分析の結果を基に、難溶性のカルボン酸カルシウム塩であるしゅう酸カルシウムを用いた溶解実験により、EDTA-4NA 水溶液が最も溶解しやすいことが分かった。このEDTA-4NA水溶液を用いて木材を処理したところ、表面の白色物を除去することができた。処理する水温を高くし､EDTA-4NAを使用した方が白色物を除去できることが分かった。

参考文献

１）中島博志. “食品・医薬品製造におけるシュウ酸カルシウムスケール除去について”, 腐食センターニュース. 2013, No.065, p.11-27.

3D プリンタで造形したネイルチップへの漆塗装技術の開発

Development of oriental lacquer painting technology for nail chip molded by 3D printer

技術開発部 工業材料科　矢内誠人
会津若松技術支援センター 産業工芸科　堀内芳明　原朋弥　須藤靖典
応募企業　太陽漆器株式会社

3D デジタイザで個人の爪の形状を取得し、3D プリンタでネイルチップを造形する事業がある。この事業に漆塗りのデザインを提案するため、3D プリンタ造形品に漆を塗装する技術を開発した。漆を直接塗装すると密着しないが、透明なアクリルウレタン樹脂を下塗り材として用いることで密着した。この方法で作成したネイルチップに温水浸漬繰り返しの負荷を与えたところ、一部塗膜のはく離が発生した。これは造形品の表面に残留するサポート材の影響であることが分かった。

Key words: 3D プリンタ、漆、塗装

１． 緒言

ネイルチップは、デザインされた爪型のチップを両面テープや専用の接着剤で爪に固定して使用する。爪に接着したネイルチップは、温水に浸漬することではがせるため、繰り返し使用することができる。マニキュアやジェルネイルに比べ、デザインの変更や除去が容易であるため、時間や場所に合わせて利用できる。このような利点から、ネイルチップの国内市場は徐々に増えており、海外にも使用者は多い。

普及しているネイルチップは、使用者の爪の形と合わずに脱落してしまうことがある。この課題を解消するため、3D デジタイザで個人の爪の形状を取得し、3D プリンタでネイルチップを造形する事業[1)]が開始された。この新しい事業では、全国のネイリストが加飾を行っており、オリジナル性の高い商品になっている（図１）。

以前、ハイテクプラザで漆塗りのネイルチップの開発を行った[2)]。この研究では、ABS 樹脂に漆を塗装する方法を検討したが、3D プリンタ造形品については知見がない。そこで、3D プリンタ造形品に漆を塗装する方法を検討した。ネイルチップは温水に浸漬して取り外し、繰り返し使用するため、この負荷に耐えることが求められる。また、ネイルチップは薄く反った形状をしているため、塗料硬化時の収縮によりネイルチップが過剰に反ってしまう恐れがある。これらについて検証した。

図１　3D プリンタ造形品を用いたネイルチップ[1)]

２． 実験

２． １． 実験に使用したネイルチップ

新しい事業で使用されているネイルチップを入手し、実験に使用した（以下、新事業品と称する）。塗装によるネイルチップの反りを測定するため、新事業品の STL データを用い、ハイテクプラザ所有の 3D プリンタ（AGILISTA-3200：（株）キーエンス製）で造形したネイルチップ（以下、ハイテク造形品と称する）と、射出成形で製造されたネイルチップ（以下、射出成形品と称する）を実験に用いた。

これら３種の造形品（図２）は、FT-IR 分析の結果、いずれもアクリル樹脂であった。

図２　実験に使用したネイルチップ
（左：新事業品、中央、ハイテク造形品、右：射出成形品）

２． ２． 密着性試験

ネイルチップの表面と小口面を塗装し、爪との接着面は塗装しなかった（図３）。新事業品に塗装を行い、基盤目試験（３マス×３マス）により評価した。セロハンテープによるはく離試験を行い、はく離したマス目で評価した。

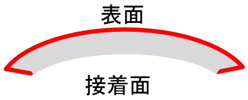


図３　ネイルチップの塗装箇所（断面図中赤線部）

事業課題名「ネイルチップ事業参画に向けた塗装仕様の検討」

２．３．塗装前後の反り評価

Ｘ線ＣＴを用い、ネイルチップの形状を取得した。塗装前後のネイルチップをＸ線ＣＴで撮影し、撮影結果から STL データを作成した。塗料は、溶剤揮発型アクリルウレタン樹脂塗料と、紫外線硬化型アクリル樹脂塗料の２種類を使用した。専用の 3DCAD ソフト（GOM Inspect）を用いて塗装前後の STL データを重ねあわせ、塗装前のデータを基準としたときの変化量を求めた。

２．４．温水浸漬繰り返し試験

新事業品に漆を塗装した試料を 50℃の水に２分間浸漬させた。浸漬後に水から引き揚げ、付着している水分を拭き取り、室温に戻るまで冷却した。この作業を１００回繰り返した。１０回ごとに試料の状態を目視で確認した。

３．結果

３．１．密着性試験

以下に塗装方法と密着性試験の結果を示した（表１、図４）。3D プリンタ造形品に漆を塗装すると密着しないが、透明なアクリルウレタン塗料を下塗りとして用いることで密着した。また、顔料入りアクリルウレタン塗料では十分な密着が確保できなかった。

表１　密着性試験結果

番号	ネイルチップ	下塗り	上塗り	試験結果
No1	新事業品	なし	漆	0/9
No2	新事業品	顔料入りアクリルウレタン塗料	漆	5/9
No3	新事業品	透明アクリルウレタン塗料	漆	9/9

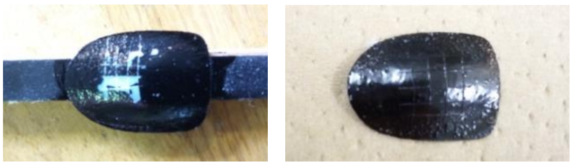


図４　碁盤目試験結果（左：No2、右：No3）

３．２．塗装前後の反り評価

3DCAD ソフトにより求めた変化量を図５左に、その最大値、最小値を図６に示した。この結果から、紫外線硬化型アクリル樹脂塗料を用いた方が、ネイルチップの反りが大きいことが分かった。STL データを重ねあわせた断面の観察から、塗装した面が収縮する方向に反っていることが分かった（図５右）。造形方法による差は、ハイテク造形品の反りが大きい結果となった。

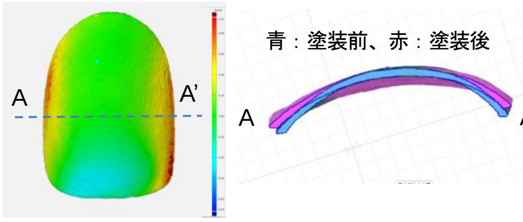


図５　3D プリンタ造形品の塗装後の反り評価
（左：塗装前後の変化量、右：左図 A-A' 直線の断面）

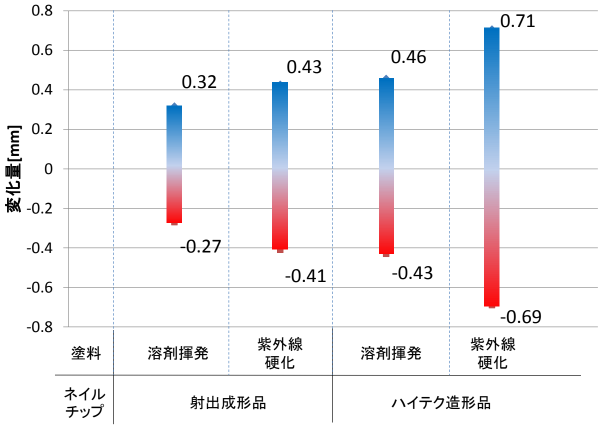


図６　塗装による変化量の最大値と最小値

３．３．温水浸漬繰り返し試験

密着性試験の結果より、表１中の No3 の方法で塗装した試料を２つ作製した。この試料を用いて温水浸漬繰り返し試験を行った。試験後の試料を図７に示した。２つのうち、１つは３０サイクル終了後に塗膜のはく離を確認した。この試料はサイクル数を重ねるにつれてはく離面積が拡大した。別の試料は１００サイクル終了後にもはく離は見られなかった。漆膜は２つの試料とも変化は見られなかった。

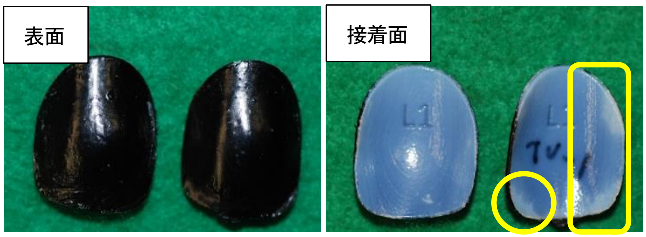


図７　温水浸漬繰り返し 100 サイクル終了後の試料
（接着面の白い部分は塗膜のはく離によるもの）

４．考察

４．１．3D プリンタ造形品と漆の密着について

3D プリンタで造形する場合、サポート材が必要になる。サポート材は造形する際に必要で、造形後は水や有機溶剤に浸漬して取り除かれる（図８）。新事業品の場合、塗装面はサポート材を用いて造形した部分になる。FT-IR の分析により、塗装面から造形樹脂とは異

なるスペクトルが得られたことから、塗装する面にサポート材が残留していると考えられる。これにより、新事業品と漆の密着性が低下していると考えた。3D プリンタで造形した試料に塗装する場合、顔料を含まない、樹脂分の多い塗料を下塗りとして用いる必要がある。

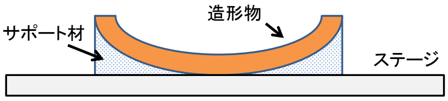


図８　3D プリンタの造形方法（断面の模式図）

４．２．塗装後の反りについて

ネイルの加飾には紫外線硬化型樹脂塗料が一般的に用いられている。樹脂の硬化が早く、ネイル加飾の時間を短縮することができるためである。しかし、紫外線硬化型樹脂塗料は硬化収縮が大きい傾向があるため、ネイルチップに塗装した場合、ネイルチップが反ってしまうことがある。実験により、溶剤揮発型に比べ、紫外線硬化型塗料の反りが大きいことが分かった。漆の乾燥は紫外線硬化型塗料に比べて反応が遅く、硬化収縮の程度は低いと考えられ、ネイルチップの反りに対する影響は軽微であると考えられる。

造形方法の違いについては、3D プリンタ造形品の方が反りやすい傾向が見られた。これは、成形時の応力、形状の非対称性、造形物の厚さなど様々な要因が考えられる。

４．３．温水浸漬繰り返し試験時のはく離

温水浸漬によりはく離した塗膜のはく離面を FT-IR で分析したところ、サポート材と考えられる成分が検出された（図９）。このことから、温水浸漬により造形樹脂と残留したサポート材の界面ではく離が発生していると考えられる。3D プリンタによる造形終了後にサポート材は取り除かれるが、除去しきれないサポート材が残留している可能性が高い。溶剤浸漬などの通常作業では取り除けていないため、塗装前に研磨による除去が必要になる。ネイルチップの場合、造形物が小さく、研磨できない場合があるため、透明アクリルウレタン樹脂塗料を下塗りとして用いる必要がある。

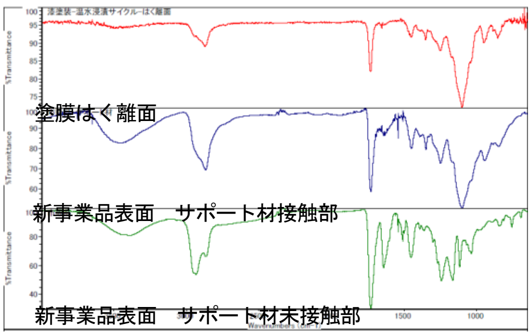


図９　塗膜はく離面と新事業品表面の FT-IR 分析結果

５．結言

3D プリンタで造形したネイルチップに漆を塗装する方法を開発した。透明アクリルウレタン樹脂を下塗りとすることで、温水浸漬に耐えられる漆塗りのネイルチップが製造可能である。新事業品の場合、サポート材を用いて造形した面を塗装する。この場合、サポート材の影響が大きく、密着性、耐温水浸漬繰り返し性に影響を与えることが分かった。造形面を研磨してサポート材を完全に除去する、下塗りを全面に行うなど、サポート材の影響をなくす工夫が必要である。

参考文献

１）OpenNail ホームページ. https://opennail.jp/, （参照 2019-03-27）.
２）須藤靖典. 若年齢層に提案できる漆器製品の開発, 平成２４年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2013, p104-105.

アルミ鋳造製品の実体強度評価法の提案

Proposal of substantial strength evaluation method for aluminum casting products

技術開発部 工業材料科　穴澤大樹　工藤弘行　西村将志
応募企業　株式会社ミウラ

応募企業は冷やし金を適切に配置した低圧鋳造により、欠陥が少なく良好な強度特性を持つ大型鋳造品を製造しているが、有効な強度評価手法が確立されていない。実製品から試験片を採取し強度試験を行うことが理想であるが、大型製品の場合や小ロット生産の場合、試験コストが割高となる。そこで、本事業では応募企業が行う大型アルミ鋳造品の小ロット生産に適した実体強度試験ならびに強度評価手法の検討を行った。その結果、より信頼性の高い強度評価手法を提案することができた。

１．緒言

鋳物の強度試験には、①別鋳込み試験片による試験、②本体付き試験片による試験、③実体強度試験の３種類がある。

①別鋳込み試験片とは、本体とは別の鋳型を用い理想的な条件で作製するもので、小ロット製品でよく用いられる。本体と異なる形状であり、鋳込み時の冷却速度や熱処理の効きも違うため、機械的性質も異なる。大型の製品ではこの差が大きくなると見込まれる。製品の評価というより、溶湯の良し悪し、合金組成の影響を評価するための試験と見なせる。

②本体付き試験片は本体に強度試験片を採取するための部位を付着させ、一体化して鋳込み作成する試験片であり、大型の鋳物でよく用いられる。別鋳込み試験片に比べ、本体に近い条件で作成され、本体表面部とはほぼ同じ機械的特性を持つと見られる。しかし、本体中心部と比較すると、冷却速度の違いなどにより機械的性質が異なる。また、本体付き試験片を付すことで本体強度に影響を与える可能性がある。

③実体強度試験は本体から試験片を採取するため、本体の機械的特性を直接評価できる試験であり、大ロット製品の試験に用いられることが多い。製品を１つ破壊しての試験となるため、小ロット製品では割高であり、通常行われない。

JISで定められている鋳鉄品とアルミ鋳造品の強度試験を比較すると、鋳鉄品では３手法全ての規定があり、③実体強度試験に関しては板厚別に細かく強度の規定がある[1]。一方、アルミ鋳造品は①、③の２手法のみ規定され、強度は板厚別ではなく、熱処理、鋳型種類による規定である[2]。アルミ鋳造品は鋳鉄品の代替として検討されることが多いが、強度評価方法について統一的な考えが定まっていない点が課題となっている。

そこで、本事業ではアルミ鋳造品の実体強度を板厚の違いに着目して調べた。また、本体付き試験として、引張試験ではなく曲げ試験を採用し、大型アルミ鋳造品への適用を検討した。さらに強度評価手法について理論的な検討を加えるため、金属組織観察を行いアルミ鋳造組織の特徴量であるデンドライトアームスペーシング値（以下DAS値）を算出し、機械的特性との関係性を調べた。

なお、当所では金属材料の機械的特性は合金組成と材料組織によって決定づけられる[3]という基本的な考えのもと、製造条件－組織－特性の関係性についてのデータベースの構築や、画像処理技術の活用に継続的に取り組んでおり、その成果の一部を本事業にも活用した。

２．実験

２．１．供試体作製

元素組成や溶湯の状態の影響をなるべく受けずに板厚の違いによる組織、強度の違いを調べるため、板厚の異なる部位を持つ供試体を応募企業より提供いただいた。板厚は60、80、100、120mmの４条件とした。また、それぞれの板厚に長さ 50mm、幅 20mmの本体付き試験片を付した。供試体の写真を図１に、図面を図２に示す。材種は AC4CH とし、砂型に冷やし金を配置し、鋳込んだ。その後、熱処理として T6処理を行った。

図１　供試体（実物写真）

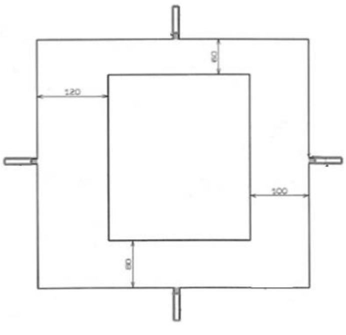


図２　供試体（図面）

２．２．強度試験

事業課題名「小ロット大型アルミ鋳造製品の実体強度信頼性の評価技術」

２．２．１．　実体強度試験（引張試験）

図３に示す通り、供試体の各板厚から表面部と中心部を区別し、引張試験片を採取した。サンプル名は A～L とした。今回は溶湯等の条件を揃えるために単一の供試体から全ての引張試験片を採取した。引張試験片は図４に示すように、全長 220mm（うちつかみ部 70mm×2）、直線部の直径を 14mm、つかみ部の直径 21mm の丸棒試験片とした。直線部の中央に 5mm 長のひずみゲージを貼付し、0.2%耐力測定を行った。また、破断伸びを突き合わせ伸びにより測定した[4]。

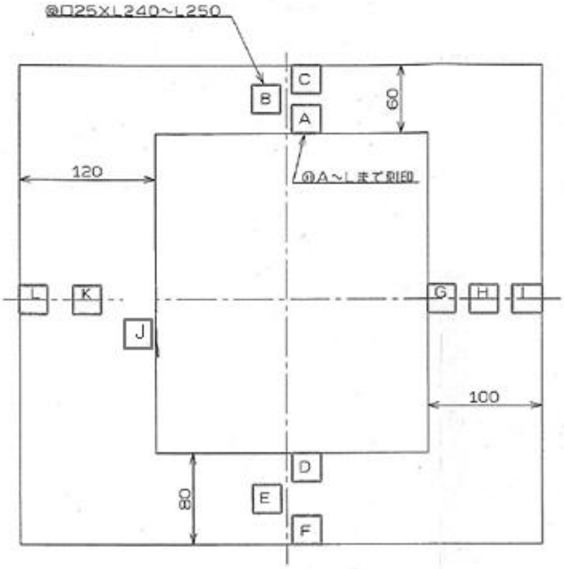


図３　引張試験片採取位置（試験片 A～L）

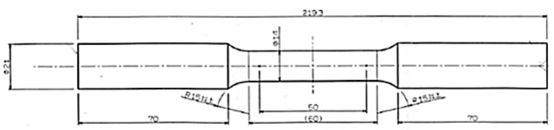


図４　引張試験片寸法

２．２．２．　本体付き試験片（曲げ試験）

本体付き試験片の採取位置は図５に示すとおり、高さ方向に３区分、本体からの距離に応じて４区分を区別した。サンプル名は（実体部厚み）（採取位置（A,B,C））－（採取位置（1,2,3,4））とした。

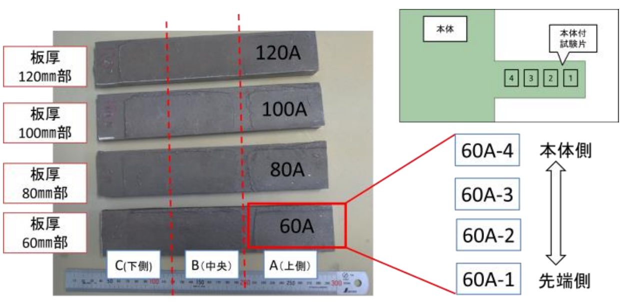


図５　本体付試験片（曲げ試験片）採取位置

曲げ試験片は幅 8mm、高さ 8mm、長さ 70mm 程度の直方体として、R1mm のボールエンドミル切削加工により、片側の中央部に長さ 1mm のＵ字形状の切欠きを入れた。試験片形状を図６に示す。

曲げ試験は、精密万能試験機（AG-10kNE）で、３点曲げ治具を用い、支点間距離は 50mm として実施した。押し治具は R5mm のものを用いた。曲げ応力は切欠きによる寸法の減少を加味し、高さを 7mm の直方体として計算を行った。

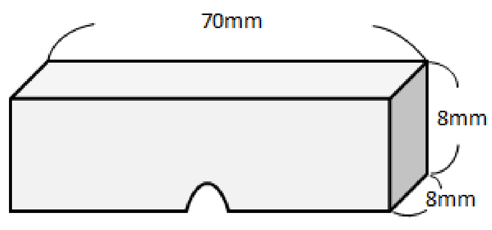


図６　曲げ試験片形状寸法

２．２．３．ＤＩＣ測定、ＣＡＥ解析

本事業では、引張試験、曲げ試験を行う際に、非接触ひずみ測定システム（VIC-3D）を用いてデジタル画像相関（DIC）法によりひずみ測定を行った。DIC 法は試験片表面に付与したランダムパターンをデジタルカメラで撮影し、画像処理によって微小なひずみ、変位量を測定するものである。

VIC-3D では解析範囲の二地点の距離を基に、仮想的な「伸び計」測定が可能であるため、引張試験では、この「仮想伸び計」の測定値から、荷重－ひずみグラフを算出した。同一試験片でひずみゲージ測定と DIC 測定を比較できるよう、ひずみゲージとは反対側の面に DIC 用のランダムパターンを塗布した。

また、曲げ試験から耐力などの物性値を算出するため、CAE により弾塑性解析を行った。

２．３．組織観察

供試体上部の表面部（A、D、G、J）と中心部(B、E、H、K)にあたる部分、本体付き試験片の中心部から組織観察用の試料を採取した。

組織観察試験片をそれぞれ20mm角程度に切断を行い、樹脂包埋、研磨、エッチングを行った。エッチング液は 1%ふっ酸水溶液を用い 90 秒間液中に浸漬した。

組織観察は、試料の中心部を高倍率金属顕微鏡(GX-71)にて明視野観察した。観察は DAS の測定に合わせ、本体付き試験片部を 200 倍、表面部と中心部を 100 倍で観察した。DAS 測定は２次枝法を用い、手計算[5]にて行った。測定では浮遊晶を除外した。

３．結果及び考察

３．１．強度試験結果

３．１．１．実体強度試験結果（引張試験）

図７は全てのサンプルの引張試験の結果を荷重－ひずみグラフとして重ねて示したものである。多少の例外を除き、多くの条件で初期の直線や非線形挙動への遷移などの特徴が似ているグラフとなった。これは同一供試体から試験片を採取したことが理由と考えられる。

図８は荷重－ひずみグラフから、耐力点荷重を算出する過程を図示したものである。金属材料では、一般的に、0.2%の塑性ひずみが生じた時点を基準とする。このため、初期の直線を平行に0.2%ひずみスライドした直線と、荷重－ひずみグラフの交点の荷重を用いて、耐力点を算出する。

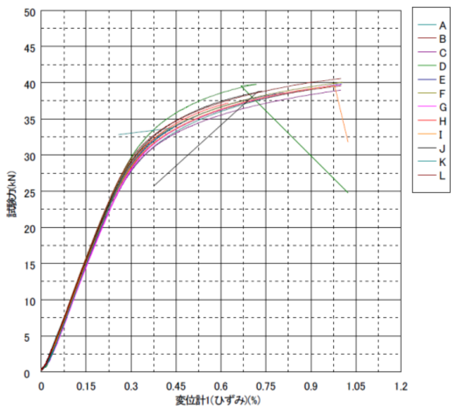


図７　引張試験結果（荷重－ひずみグラフ）

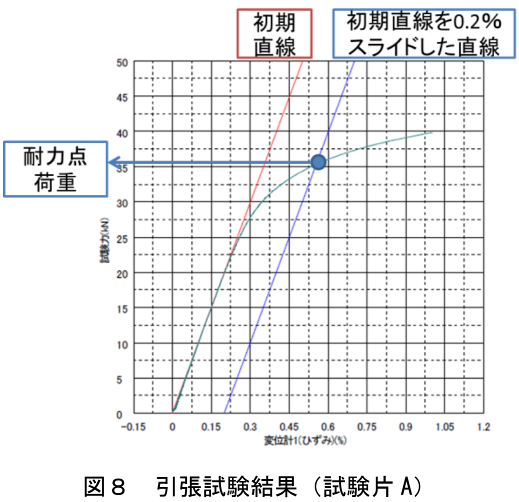


図８　引張試験結果（試験片 A）
（耐力点荷重の算出例）

表１は引張強度（表中最大点_応力）、0.2%耐力（表中耐力点1_応力）を示したものであるが、0.2%耐力、引張強度ともに多少の変動があることが確認できる。これは図７の結果と0.2%耐力の算出方法から想定される通りの結果である。

表２に破断伸びの測定結果を示す。今回の破断伸びのばらつきは大きいが、鋳造材では破断位置の違いや鋳造欠陥の影響により元々ばらつきが大きく、今回の結果も鋳造材としては一般的と考える。

表１　引張試験結果

名前	最大点_試験力	最大点_応力	耐力点1_試験力	耐力点1_応力
パラメータ			0.2 %	0.2 %
単位	kN	N/mm2	kN	N/mm2
A	41.84	271.	35.40	230.
B	40.12	259.	35.44	229.
C	41.73	270.	34.79	225.
D	39.78	258.	37.94	246.
E	38.61	249.	35.88	232.
F	41.09	267.	35.66	231.
G	40.08	260.	35.57	231.
H	37.23	241.	36.23	235.
I	39.60	257.	35.41	229.
J	38.81	253.	36.68	239.
K	33.78	219.	-.-	-.-
L	41.27	267.	36.34	235.

表２　破断伸び測定結果

サンプル名	伸び(%)	破断位置	サンプル名	伸び(%)	破断位置
A	1.8	B	G	2.3	A
B	1.8	B	H	1.6	B
C	2.2	A	I	1.7	B
D	1.7	A	J	2.1	B
E	1.9	B	K	1.7	B
F	2.1	B	L	2.1	B

引張強度に及ぼす板厚（60、80、100、120㎜）や採取位置（表面、中心）の影響を検討するため、図９に板厚毎、採取位置毎の引張強度を図示する。この結果から、板厚が厚いほど全体的に強度が低下していることが分かる。これは冷却速度の影響と考えられる。鋳造材では一般に冷却速度が速いほど強度が高くなることが知られている。

次に表面部と中央部の違いに着目すると、表面部の強度は板厚によらずあまり変化しないが、中心部は板厚の増大に伴い強度が低下することが分かる。これは最終凝固位置が原因と考えられる。最終凝固位置はボイドやマイクロポロシティなどの欠陥が発生しやすく、強度が低下することが知られる。板厚が厚い部位の中心部は冷却速度が遅い上に最終凝固位置になりやすいため強度が低いと考えられる。一方で表面部については冷やし金の存在により板厚による冷却速度の差が生じず、凝固開始位置であるため強度にも差が生じないと考えられる。

また、中心部は表面に比べて、強度だけでなく、伸びが低い傾向が見られた。そこで、図１０に各板厚の内、中心部のみを抜き出して応力－ひずみグラフを示した。グラフが重なって見づらいため、図中に破断点を板厚と併せて図示した。この結果から、この４条件のカーブは、ほぼ同一カーブとなる挙動を示すこと、板厚が厚いほどより早い段階で破断したことを確認した。これは、ボイドなど欠陥の影響により強度低下する場合に現れる特徴である。サンプル K で耐力が測定できなかった原因もボイドなど欠陥の影響で早期に破断したためと考えられる。

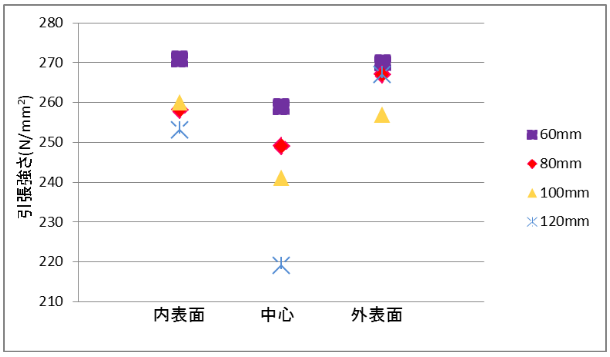


図９　引張強度の変化（板厚、採取位置の影響）

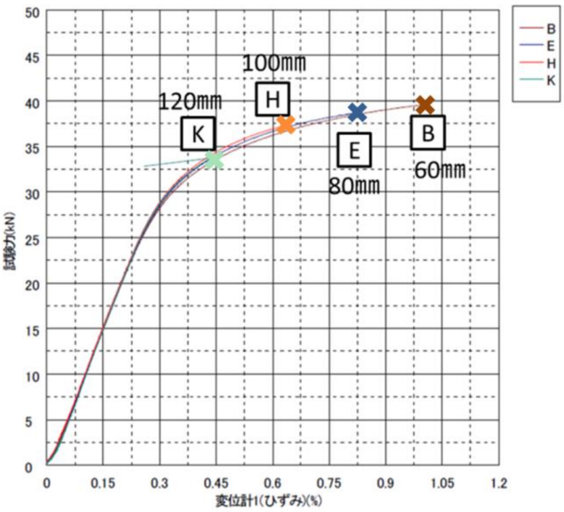


図１０　中央部サンプルの荷重－ひずみグラフ
（板厚の影響）

３．１．２．本体付き試験片試験結果（曲げ試験）

図１１は全てのサンプルの曲げ試験の結果を、荷重－変位グラフとして重ねて示したものである。多少の例外を除き多くの条件で類似のカーブとなった。

曲げ試験では弾性変形を前提とした曲げ応力を求めるため、塑性変形が小さい範囲でのみ妥当な計算となる。本事業では図１２に示すように塑性変形開始時の応力として耐力点応力を算出し、表３に最大荷重から算出した応力とともに示した。

この結果、いずれの応力値も板厚の影響をあまり受けないことが確認できた。本体付き試験は製品を代表する組織、特性を持つことが理想なので、好ましい結果と言える。

なお、曲げ試験から求められた耐力は、前述した実体採取引張試験の引張強度に比べて高い値を示しているが、２つの試験は、引張・曲げという試験方式の影響と、実体採取と本体付きという採取位置の影響が混在しており、今回の試験だけからは区別することはできないため、引張試験の結果と直接比較すべきではない。なお、本体付き試験片部は板厚が薄いため冷却速度が速く強度が出やすく、曲げ試験は微小な領域での破壊となるため欠陥の影響を受けづらく強度が出やすい。

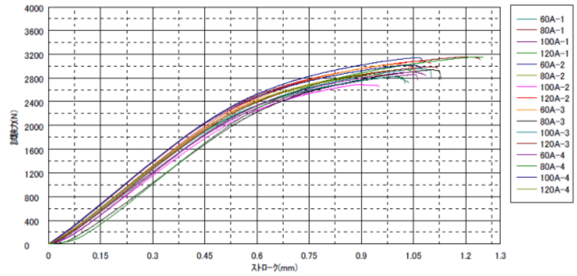


図１１　曲げ試験結果（荷重－変位グラフ）

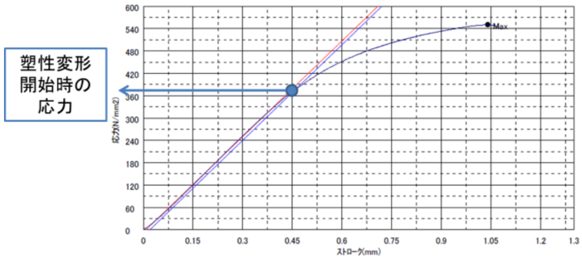


図１２　曲げ試験結果（応力－変位グラフ）
（耐力点算出例）

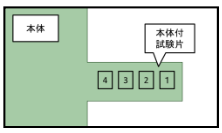
表３　曲げ試験結果

名前	最大点_試験力	最大点_応力	耐力点1_応力
ﾊﾟﾗﾒｰﾀ			0.02%
単位	kN	N/mm2	N/mm2
60A-1	2.957	562	397
80A-1	3.161	594	396
100A-1	2.861	558	396
120A-1	2.820	543	387
60A-2	3.144	553	376
80A-2	2.949	559	395
100A-2	2.697	517	388
120A-2	3.087	550	378
60A-3	3.041	540	381
80A-3	2.940	546	393
100A-3	2.822	533	381
120A-3	2.990	563	393
60A-4	2.905	535	376
80A-4	3.154	550	373
100A-4	3.017	550	379
120A-4	2.862	542	391

次に、サンプル採取位置の影響を調べるため、板厚によらず採取位置で平均値を算出した結果を表４に示した。この結果、採取位置①と②～④とで曲げ応力に差が生じた。これは①が②～④よりも砂型との接触面積が大きく、冷却速度が速いためだと考えられる。よって、本体付き試験としては採取位置②～④の位置が望ましい。

表４　曲げ試験結果（採取位置の影響）

採取位置	最大点応力(N/mm^2)
1	564
2	545
3	546
4	545



３．１．３．ＤＩＣ測定結果、ＣＡＥ解析結果

DIC 解析結果例として、図１３に試験片 C の Y 軸方向（引張方向）ひずみの分布を図示した。ここでは破断直前、破断直後の他、破断伸びを測定する時と同様に破面を突合せた「突合せ状態」の３時点について示した。

図左のグラフは、図右のひずみ分布中の白色線（ラインカーソル）上の結果を抽出し、横軸にひずみ、縦軸に Y 軸座標のグラフとして図示したものである。この結果、破断部のひずみは最大 0.025～0.03 程度と、周囲のひずみ 0.012～0.013 程度に比べて２倍以上大きいことが確認できる。破断がどの位置で生じるかは最大の欠陥の位置などに左右される偶発的な事象であるため、標点区間外で破断することも多い。区間外の破断では、破断点周辺の大きな伸びは破断伸びに反映されないので、破断後は小さくなる。

以上のようにアルミ鋳造材の引張試験において、破断伸びのばらつきの要因は、破断部周辺の大きなひずみが標点区間に含まれるかどうかに大きく影響されるためであることを示した。一般的に、鋳造材の引張試験では、圧延材のように目に見えるような「くびれ」は見られないが、DIC 解析では破断部周辺の変形の状況をひずみ分布により特徴づけることが可能である。

図１４は、サンプル A、B、C について、DIC 解析により求めた荷重－ひずみグラフ（点）を、ひずみゲージ測定の結果（実線）と併せて図示したものである。DIC 解析の結果は、ひずみゲージの測定とほぼ同一のカーブとなることを確認した。0.2％耐力を算出するための交点付近（ひずみ 0.005 前後）では DIC とひずみゲージの差は最大でも数％程度と十分な精度を持つ。

サンプリング速度が十分大きいひずみゲージ測定に比べると、撮影速度が毎秒 5 フレーム（当所が保有するカメラの性能上の制限）と小さい点が弱点であるが、一般的な試験速度で、0.2％耐力を測定するのには十分である。

次に、曲げ試験を対象とした DIC 解析結果例として、図１５に切欠き近傍のひずみ分布を示す。ここでは破断直前と破断直後の２時点の結果を示す。今回の試験では、急激な荷重低下を伴う不安定亀裂進展が生じた。亀裂は板厚の 1/2～2/3 程度まで進展した状態で停止した。引張試験では破断時に試験片が分離するのに対し、曲げ試験では完全には分離しないため、破断後や破断直前の状態で試験を終了し、組織観察することで、組織と強度の関係性をより深く調査できると考えられる。

亀裂開口変位（COD）による測定例として、図１６に COD－時間グラフ、図１７に荷重－COD グラフを示す。いずれもノイズの少ない安定した結果が得られた。COD による評価は既報[6] のとおりであるため、詳細は省略する。

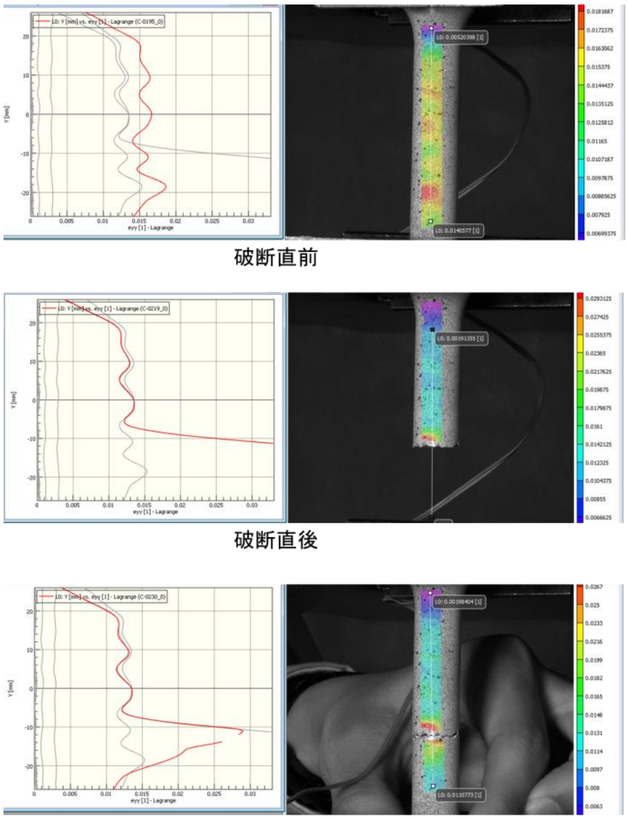


図１３　引張試験に対する DIC 解析例
（左：ひずみ－Y 座標グラフ　右：ひずみ分布）

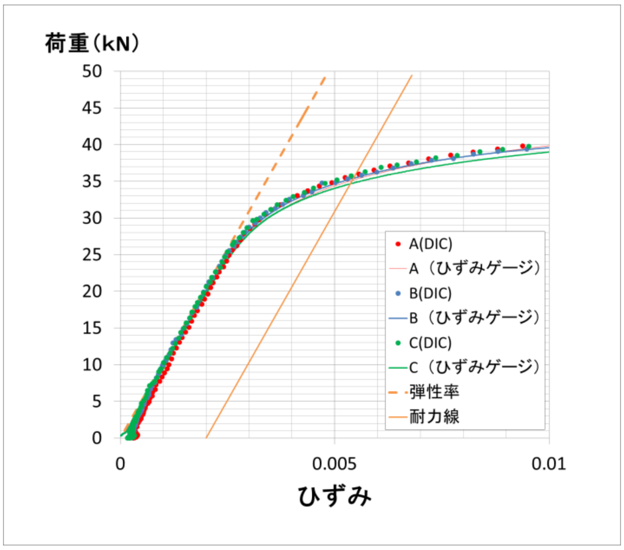
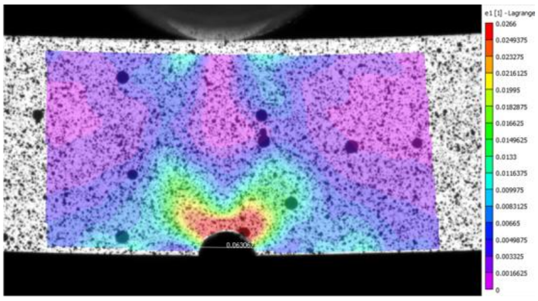
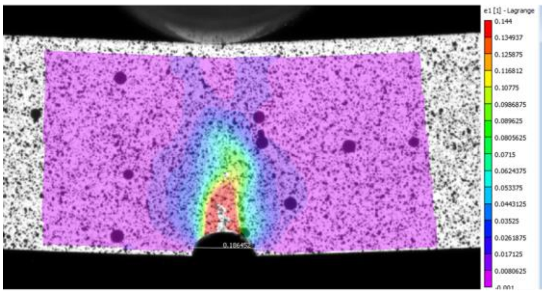


図１４　荷重－ひずみグラフ
（ひずみゲージと DIC の比較）



破断直前



破断直後

図１５　曲げ試験時の DIC 解析例
（主ひずみ分布）

図１８に CAE 解析により求めた荷重－変位グラフを実験結果と併せて図示する。ここでは未知の弾塑性変形に関わるパラメータについて、複数の条件で計算を行い、実験結果に最も近い条件から未知のパラメータを特定する逆解析手法を用いた。この例では CAE 結果と実験結果は破断点直前までほぼ重なっている。CAE では応力－ひずみグラフを二直線で近似する材料モデルを用いており、逆解析により求められたパラメータは弾性率 70GPa、弾性限度 235MPa、接線係数 4500MPa である。これから算出される 0.2%耐力は 244MPa、引張強度は図１０に示すように破断のタイミングで変動するが破断伸び 1.5%として推定すると 300MPa である。

なお、実験結果のグラフにおいて破断点直前で荷重低下するのは亀裂が生じたためと考える。荷重低下が始まってから、破断が生じる間に試験を停止し、その試験片の組織観察を行えば、き裂の発生が材料のミクロ組織のどの部分で生じるかを調べることが可能と思われる。

図１９は CAE 解析により求めた破断直前のひずみ分布を DIC 解析結果と併せて図示したものである。両者の分布はほぼ同等であり、CAE 解析結果は妥当であると考える。

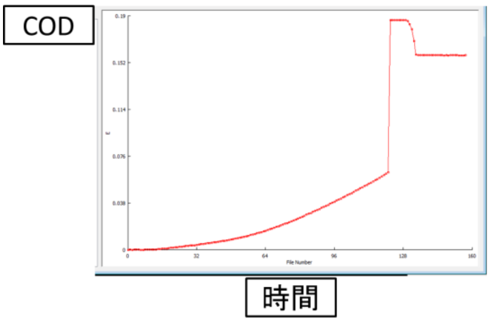


図１６　DIC 解析により求めた COD－時間グラフ

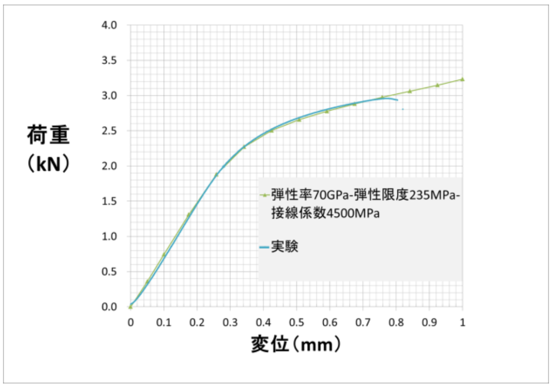


図１８　CAE 解析により求めた荷重－変位グラフ

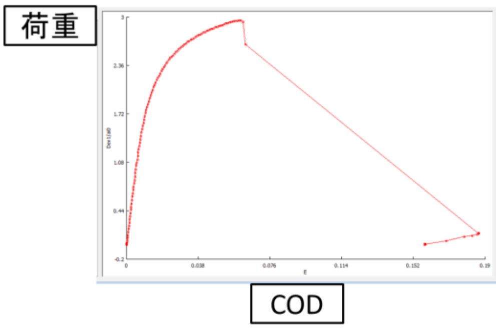


図１７　DIC 解析により求めた荷重－COD グラフ

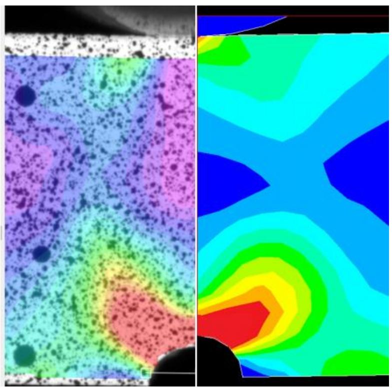


図１９　切欠き周辺のひずみ分布の比較
（左：DIC 解析、右 CAE 解析）

３．２．組織観察結果

図２０に凝固組織におよぼす凝固速度の効果を表す模式図を示した[7)]。この図は凝固速度が小さいほど、デンドライトや共晶 Si など組織因子の寸法が粗大となること、またボイド等の欠陥が発生しやすくなることを示している。本事業ではこの図を参考に考察を行っている。

図２１に各部位の組織写真を示す。また、DAS 測定結果を写真左下の丸の中に示した。DAS は組織因子のうち最も大きな初晶デンドライトに関する特徴量である。組織の緻密さを表す指標であり、単位はμm である。

この結果、表面部は板厚の影響があまりないこと、中心部では大まかな傾向として板厚が厚くなるほど DAS 値が大きくなっていることが確認できた。これは冷却速度(凝固速度)による違いと理解できる。

次に採取位置の違いに着目すると、本体付き試験片→表面部→中心部の順に DAS 値が大きくなる傾向が確認できる。本体付き試験片は冷却速度が最も速いと考えられる。

図２２に示すように DAS 値は強度、伸び、硬さの高い相関があることが知られている。本事業でも図２３に示すとおり、DAS 値と引張強度について良い相関式を得ることができた。より幅広い DAS 値のサンプルでより多くのデータが得られれば DAS 値から強度、伸びを精度よく予測できるようになると期待できる。

次にボイド発生状況に着目すると、板厚が厚い部位の中心部において、図２４に示すようにボイドが連なるように密集して存在する部分があった。これらは、強度低下の大きな要因と考えられる。

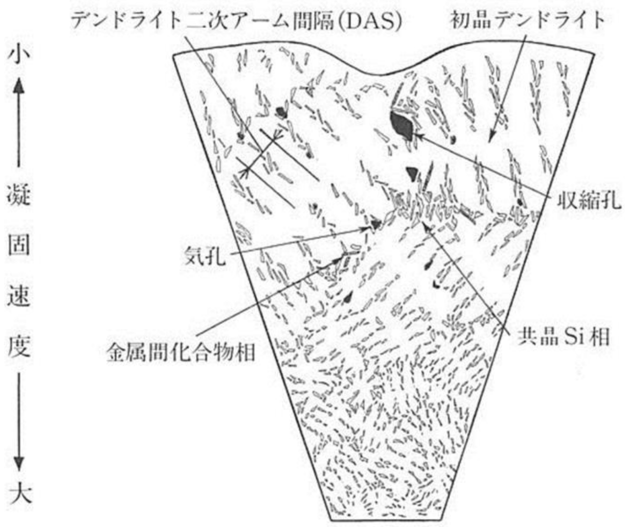


図２０　凝固組織におよぼす凝固速度の効果[7)]

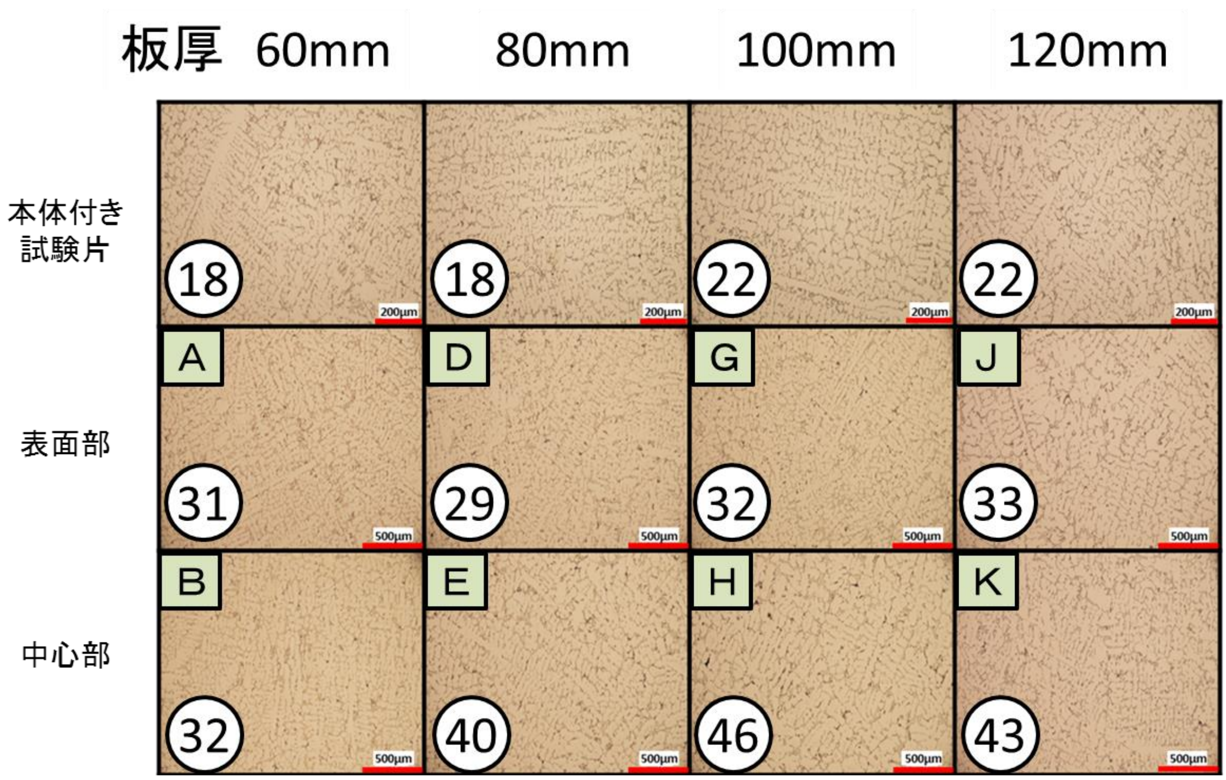


図２１　組織観察写真と DAS 測定結果（単位：μｍ）

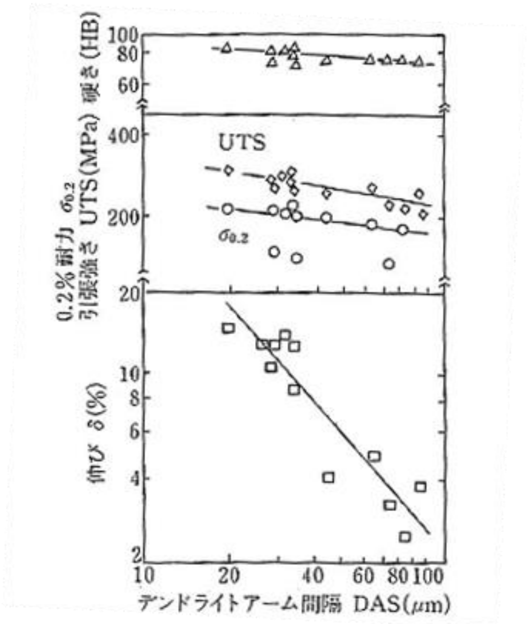


図２２　物性値に及ぼす DAS 値の影響[7)]

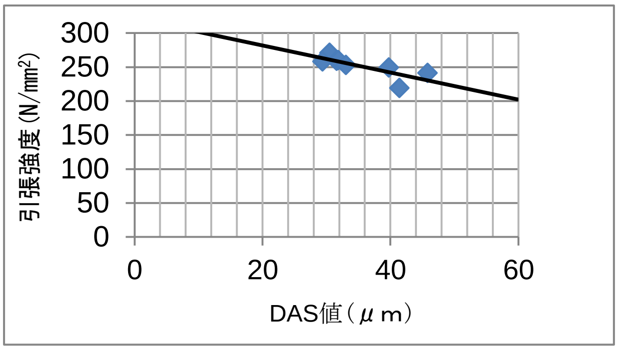


図２３　DAS 値と引張強度の相関

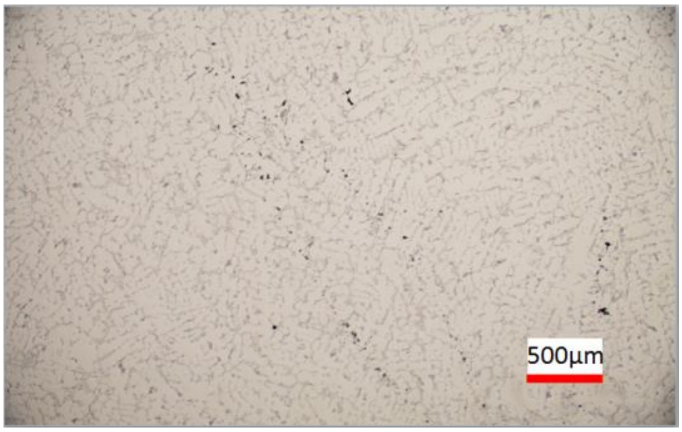


図２４　ボイド観察部（120mm 中心部）

３．３．強度信頼性手法の提案

本事業で得られた結果を踏まえ、大型アルミ鋳造品の小ロット生産に適した強度信頼評価の手法の検討を行った。

図２５にアルミ鋳造における製造条件－組織－特性に関する因子の関係性を示す。この図は材料科学分野の共通認識と思われる知見に我々研究グループの解釈を加えたものである。図中赤で示したのは本事業で興味対象と定めた因子であり、青は試験・分析の評価項目である。

この図から分かる通り凝固速度は極めて重要な因子であるが実測するのは困難である。さらに同一の鋳造製品であっても部位により凝固速度は異なる。DAS 測定の真の価値は、凝固速度との相関性を頼りに、その部位の凝固速度を組織観察から類推できることにあると考える。

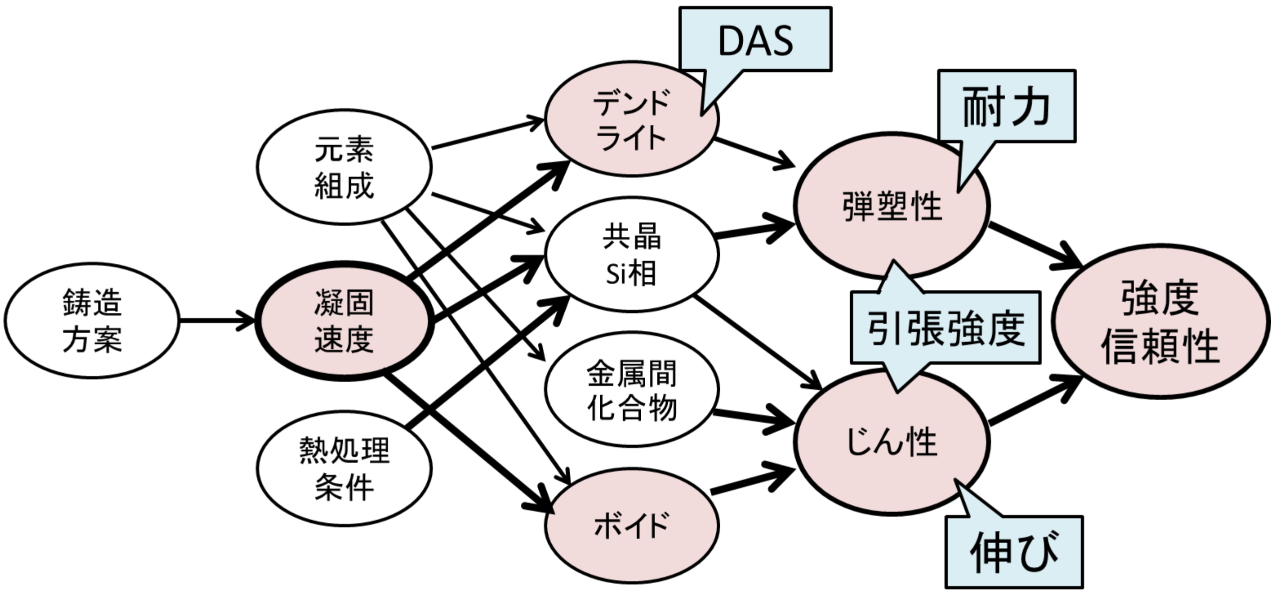


図２５　アルミ鋳造における製造条件－組織－特性に関する各因子の関係性

応募企業は、鋳造 CAE ソフトを所有しており、鋳造方案の立案に活用している。CAE を用いれば、鋳造品の任意の部位について冷却過程を温度－時間グラフとして算出することが可能である。図２６は本事業で作成した供試体の解析結果を示したもので、各板厚の中心部（実体採取試験片の B,E,H,K サンプルの位置に該当）の４点について、冷却過程をプロットしている。このグラフにおいて 605℃付近の変曲点は初晶デンドライトの晶出の開始に伴う起動であり、565℃付近の変曲点は共晶 Si の形成の終了に関連する挙動であることが知られている。よって、この区間（605℃→565℃）のグラフの傾きは凝固過程における冷却速度（単位：℃/秒）であり、凝固速度（単位 mm/秒）とかなり近い意味を持つと考えることができる。

また、図２６には各冷却曲線によって得られた組織の DAS 値も丸の中に図示した。この表記方法は熱処理における CCT 曲線の表現に倣った表現である。鋳造 CAE であれば製品中の全ての地点の冷却曲線を求めることができるため、予め多数の実測データを収集し、冷却速度と DAS 値の関係性を示すグラフを作成しておけば、製品中の全ての地点について DAS 値の推定が可能となる。

以上のことより、我々が提案する強度評価手法は以下のとおりである。

(i)　本体付き試験片で曲げ試験を行う。
(ii)　曲げ試験に関する弾塑性 CAE 解析により、引張強度、耐力、伸びを推定する。
(iii)　鋳造 CAE で、本体付き試験片と評価対象部位の凝固過程における冷却速度を求める。
(iv)　冷却速度－DAS グラフと(iii)で求めた冷却速度を照合し、各部位の DAS を推定する
(v)　DAS－強度グラフと(iv)で求めた DAS から、各部位の強度を推定する。

今後は、冷却速度－DAS グラフ、DAS－強度グラフのデータ数を増やしていく。また、ボイドの影響など、他の因子についても取り組んでいく必要があると考えている。

今後、実験を行うだけでなく、製造条件－組織－特性の関係性にかわる大量の解析データ、いわば「材料・製造分野におけるビッグデータ」を短時間で効率よく収集する技術へつながる可能性がある。

４．結言

本事業では、アルミ鋳造品から採取した試験体に対して、引張試験、曲げ試験、組織観察、DAS 測定を実施した。これらの結果から下記の知見が得られた。

① 板厚の異なる供試体から採取した試験片で、系統的な引張試験を行い、実体強度試験結果を得た。この結果から、引張強度と板厚や採取位置との関係が分かった。
② 実体付き試験として小体積でも可能な曲げ試験片を採用し、妥当性を検証した。冷却速度が速く、理想的な強度が得られる特徴を確認した。
③ DAS 値（冷却速度）と強度との相関について確認できた。シミュレーションにより冷却速度が計算できれば本体付き試験片による試験から信頼性の高い強度評価ができると期待できる。

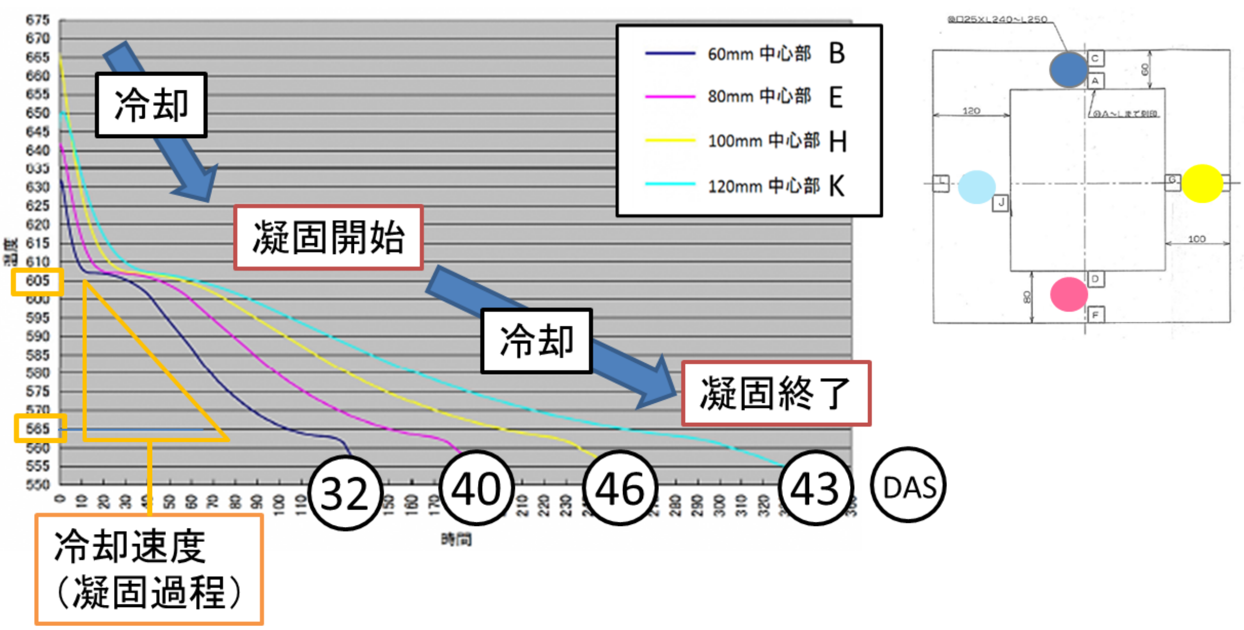


図２６　鋳造 CAE により求めた冷却曲線と、鋳造組織の DAS 値の関係

参考文献

１）JIS G 5501, 1995, ねずみ鋳鉄品
２）JIS H 5202, 1999, アルミニウム合金鋳物
３）日本鋳造工学会．鋳造工学便覧．丸善株式会社, 平成１４年, p.717, ISBN 4-621-04953-4 C 3057
４）JIS Z 2241, 1998, 金属材料引張試験方法
５）軽金属学会 鋳造・凝固部会．デンドライトアームスペーシング測定手順, 軽金属, Vo1.38(1), 1998, p.54-60.
６）工藤弘行．画像解析を活用したアルミ鋳造製品の実体強度評価, 平成２８年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, p.1-5.
７）小林俊郎．アルミニウム合金の強度．第１版, 株式会社内田老鶴圃, 2001, p.324, ISBN 4-7536-5503-2 C 3057

ＣＦＲＰ製品連結部の強度評価

Development of strength evaluation method of CFRP product connection part

技術開発部 工業材料科　工藤弘行　菊地時雄　石川睦
応募企業　ゼビオ株式会社

応募企業ではトレッキングザック（登山時に用いる袋状の装備具）にCFRP部品を使用することを検討している。CFRP部品には穴加工を施し他の部品と連結する構造を検討しているが、連結部周辺が強度上の弱点になると予想される。本研究では構想設計段階で早めに強度試験を実施し、その結果をフィードバックすることで製品開発期間の短縮することを目的にCFRP部品の穴連結部で必要な３様式の荷重試験方法を検討した。その結果、荷重試験中にひずみゲージ、Webカメラ撮影、DIC画像処理を併用することで、より多くの情報を取得できることを確認した。

１．緒言

一般的な工業製品では、決まった部位の決まった方向に荷重がかかることが多いため、それを根拠に設計や強度試験を行うことができる。これに対し、応募企業が開発するアウトドア・スポーツ製品の多くは人が身に付けて使用するため、ユーザーの体格や使用方法などにより、製品への負荷が大きく変動することが特徴である。さらに実使用時の部品への負荷を実測するのも困難である。このような理由から、アウトドア・スポーツ製品の強度設計・強度保証は、トラブルがあってから対策を行う事後対策的な手法が主流であり、製品強度試験の規格も基本的、限定的なものであることが多い。

また､開発品で使用を想定するCFRP部品の連結部は､破壊レベルの変形を評価対象とした場合、強度試験、CAE解析が困難であると見込まれる。これは連結部の接触応力場の寸法に対して、CFRPの微視構造の寸法が無視できない大きさを持っているためである。近年、CFRPや軽量金属材料を適材適所に用いて製品全体で最適化を図る「マルチマテリアル」という新しい考え方が広まりつつある。ここでも同じような理由から、CFRPと他の部品の接合部には、新しい試験、設計手法が必要であり､それにはCAE解析が重要になるというのが共通認識になっている。

以上より、本事業では応募企業から提示された部位を対象に、構想設計から最終製品の荷重試験まで、製品開発のそれぞれの段階で役立つ強度試験について検討を行った。試験対象としたのは、①丸穴連結部の面内せん断荷重、②丸穴連結部の面外荷重、③長穴部の面内荷重の３条件である。試験結果から多くの情報を得るため、荷重試験と併せて、ひずみゲージ測定、画像処理ひずみ・変位測定の利用についても検討した。

なお、本事業は試験方法の検討が目的であるため、試験自体はプラスチック材料を用い、CFRP部品の試験において注意すべき事項を考察した。

２．実験

２．１．強度試験機の選定

強度試験として多用されるのは引張試験と圧縮試験である。両者は、いずれも前後左右方向に均衡した状態で軸方向に荷重を与える試験であり、破壊まで安定した負荷を掛けることができるため、結果として大荷重での試験となる。これに対し、開発品の強度試験は複数の部品が連結する部位を対象とするため、前後左右方向が不均衡で荷重線が一致せず偶力が生じ、比較的低荷重となると見込まれる。以上より、本事業では島津製作所製精密万能試験機(オートグラフ,AG-10kNE)を使用することとした。本装置はロードセルを交換することなく荷重測定範囲を切り替えることで幅広い範囲の荷重を精度良く測定することができ、ロードセルの接続部にユニバーサルジョイントを備え、荷重線のずれの影響を低減させることができるため、本開発品の強度試験に向いている。

また、門型の構造で前後方向に広いスペースがありカメラ撮影を行うことが可能である。つかみ具の取付け方法を変えることで板材の最も広い面を正面に向けて試験できる点も、カメラ撮影に好都合である。

２．２．丸穴連結部の引張せん断試験

「引張せん断試験」は、試験機のセッティングが引張試験と同一で、接合面の応力状態がせん断ということに由来し、スポット溶接や接着部の試験方法として一般的なものである。図１に引張せん断試験状況の写真を示す。試験片はポリプロピレン（PP）製で幅 30 mm、長さ 180 mm、厚さ２mm程度の板材２枚の端部を約 30 mm程度重ねて、M5ボルトで締結したものである。試験中の変形挙動を把握するため、ひずみゲージ測定とデジタル画像相関法（以下、DIC）による変位・ひずみ測定、Web カメラ撮影を行った。ひずみゲージはゲージ長１mmのゲージを 0/45/90°の３方向に配置し、材料力学計算から主ひずみの大きさと方向を求めるロゼ

事業課題名「トレッキングザック用ＣＦＲＰ部品の強度試験」

ット解析を用いた。図２にひずみゲージ貼付位置を示す。ひずみ測定には、共和電業製ユニバーサルレコーダ EDX-100A を用いた。

デジタル画像相関法は、図３に示したような白黒のランダムパターンを頼りに試験前後の同一部位のパターンマッチングを行うことで、変形挙動を把握する手法である。

荷重負荷は破断に至らない程度の荷重を与えた後に除荷して試験片の状態を確認する作業を複数回繰り返した後、最終的に破断まで試験を続行した。

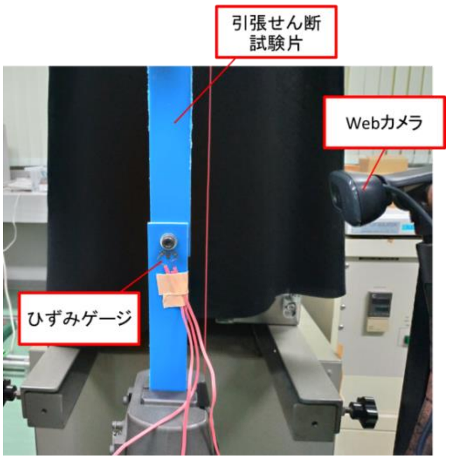


図１　穴連結部の引張せん断試験

図２　ひずみゲージの貼付位置

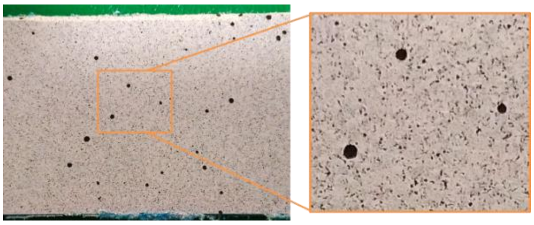


図３　DIC 用のランダムパターン塗布状況
（左：全幅を含んだ図　右：拡大図）

２．３．穴連結部の面外荷重試験

図４に示すように、面外せん断試験は短冊状の試験片を用い、片持ちはりの曲げ変形を与えた。穴連結部は固定治具を介してクロスヘッドに固定し、もう一方の端部を荷重点とした。荷重点の支持方法として、図５に示すように、L 字型ブラケット材による支持と、金属フープ材による支持を比較した。L 字型ブラケット材は全長 120 mm、幅 20 mm、板厚 0.8 mm程度である。金属フープ材は全長 200 mm、幅 5 mm、板厚 0.16 mm程度で、両端を重ねて把持具で把持した。引張せん断試験と同様に、ひずみゲージ測定と DIC による変位・ひずみ測定、Web カメラ撮影を行った。図６に DIC 撮影状況を示す。

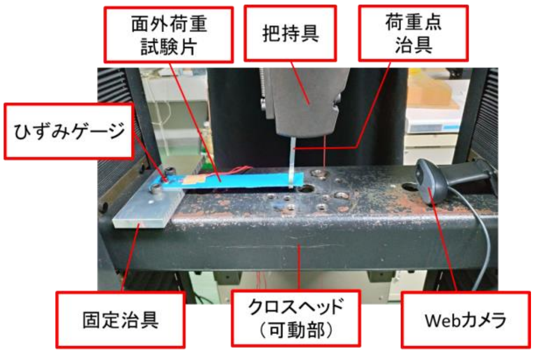


図４　試験状況（ひずみゲージ測定時）

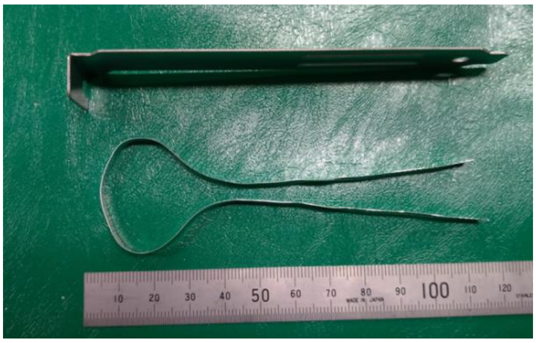


図５　荷重点支持に用いた治具
（上：L 字型ブラケット、下：金属フープ材）

図６　試験状況（DIC 画像処理測定時）

２．４．長穴部の面内荷重試験

開発品は肩ベルトや腰ベルトを通すための長穴がある。長穴部はベルトを介して荷重を受けるのが前提であるため、ベルトを通した状態で強度試験を行うべきである。図７に試験片形状ならびに取り付け状態を示す。材質は ABS であり、長穴部は機械加工により作製した。実使用では様々な方向に荷重がかかる可能性があるが、本事業では最も基本的な変形様式である面内

荷重を与える方法とした。試験中はDIC画像処理によるひずみ測定を行い、破断まで行った。また、図８にDIC撮影状況を示す。

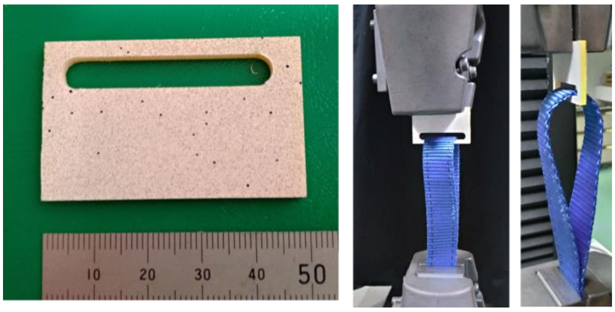


図７　試験サンプルとサンプル取り付け状態

図８　試験状況（DIC画像処理測定時）

３．結果及び考察

３．１．丸穴連結部の引張せん断試験

図９から図１２は代表的な２つのサンプル（A、B）の引張せん断試験の結果を示したものである。

図９はサンプル A に対し、破断に至らない 500N～600N の荷重を３回負荷した時の荷重－変位グラフである。サンプルAに対する１回目のグラフ（図中A-1）には50N付近で、一旦典型的なカーブからストロークが増加する方向に逸脱し、やがて標準的なカーブに復帰する挙動が見られた。この挙動は、いずれのサンプルでも１回目の負荷のみに生じ、２回目以降の負荷には生じないという特徴があった。丸穴連結部のねじ部と穴部には0.5mm前後のクリアランスがあるため、荷重付与によりクリアランスが小さくなる方向にすべりが生じ、クリアランス分の遊びが無くなった後に、荷重が増加したと考えられる。

図１０はサンプルAに対し、計５回の繰り返し荷重を与え破断した過程について、３回目から５回目までのカーブを図示している。３回目の負荷（図中 A-3）の 600N の近くでグラフの傾きが大きく減少しほぼ水平になった。これは、材料の弾性限界を超え損傷や破壊が生じた場合や、試験体の一部が破壊した場合、接触・支持状態が変わった場合に共通して現れる挙動であるが、荷重－変位グラフだけから、どの現象が起きたかを特定することは困難である。

次に、４回目、５回目の負荷に注目すると、両者のグラフはほぼ同一となっていること、初期の傾きは３回目より減少したことが分かる。これは３回目の負荷で一定以上の材料の損傷・破壊の発生や接触・支持状態の変化が生じた後、４回目、５回目の途中までは、ほぼ維持されていたことを意味する。

以上より、適切な試験方法としては、以下の手順が好ましいと考える。

- １回目にすべり挙動が出現する負荷を掛けた後除荷することで、穴部のクリアランスの個体差の影響を除去する。
- １回目負荷の上限は、非線形挙動が生じない範囲にとどめるべきである。
- 繰り返しの荷重負荷を与える試験の場合は、１回目負荷は、その上限荷重まで付与するのが望ましい。
- ２回目以降を製品の真の性能を表す試験として取り扱う。

この考えのもとに､サンプルBは400Nの荷重を２回負荷した後、３回目で破断試験を行い、その結果を図１１に示した。２回目、３回目のグラフ（図中 B-2、B-3）はほぼ同一のカーブとなっている。

また、図１２は、適切な試験方法とした場合のサンプルA､Bの比較を示したものであるが､途中までほぼ同一のカーブとなっている。

以上より、本事業で提案した方法を用いれば、穴部クリアランスの影響を除去した再現性の良い試験となり、異なるサンプル間でも適切な性能比較の実現が期待できる。

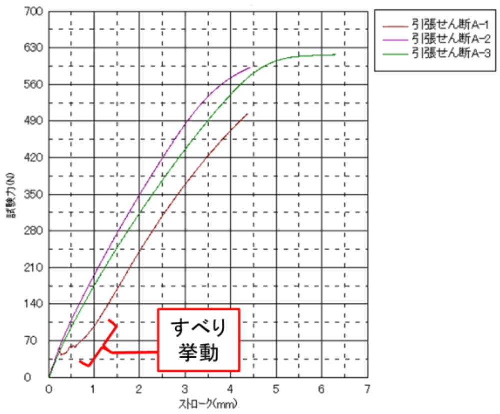


図９　荷重－変位グラフ（A-1,2,3）

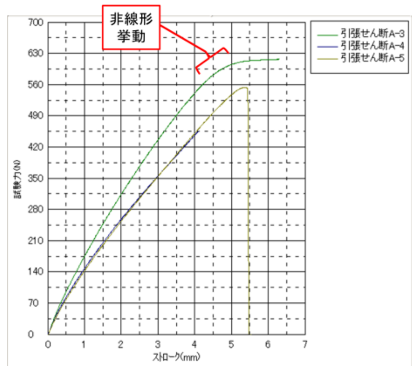


図１０　荷重－変位グラフ（A-3,4,5）

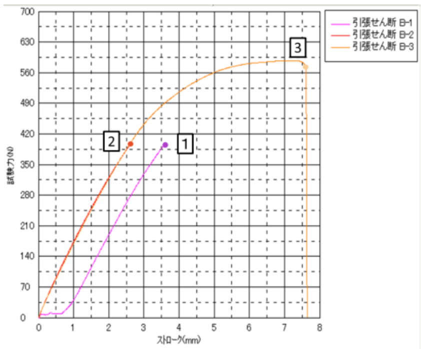


図１１　荷重－変位グラフ（B-1,2,3）

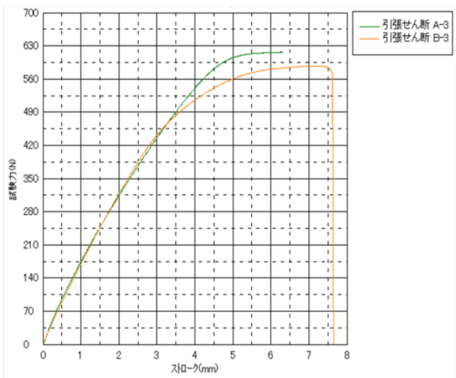


図１２　荷重－変位グラフ（A と B の比較）

本事業では、共和電業製ひずみ測定ソフト DCS-100、101 を用いてひずみ測定・解析を行った。このソフトではカメラ収録機能と四則演算機能を追加することが可能である。図１３に試験中画面例を示すが、通常のひずみ測定と同一ソフトウェア上で、Web カメラ画像を取り込んでリアルタイム表示することが可能である。

Web カメラの利用例として、サンプル A の連結部の状況の変化を図１４に示す。A-3 の非線形挙動や A-5 の破断直前では連結部が傾いている様子を確認できる。これは板１枚分の把持部のアンバランスにより製品の偶力が生じたためで、この試験方法共通の挙動である。また、A-3 除荷後に着目すると、完全に開始前の状況には戻っておらず、連結部の下側で２枚の板に隙間が生じていることが分かる。

図１５はサンプル A の破断後の様子である。破断位置は穴形状による応力集中が生じる位置であり概ね理論通りであるが、き裂の進展は僅かに傾き、途中で曲がることが分かった。また、穴部左側にはワッシャ接触部に「座面陥没」が、右側には過大変形に伴う「白化現象」が確認された。なお、サンプル A が最終的に破断に至った時の荷重は555N で、３回目の荷重値618N より小さかったが、これは連結部の損傷が理由と思われる。

以上より、引張せん断試験の荷重 - 変位グラフの非線形挙動は、ワッシャ部の座面陥没や損傷など連結部の局所的な変形が原因であり、破壊現象に大きな影響があることを明らかにした。座面陥没や損傷は CFRP のミクロ構造と関わりが深いため、CFRP の試験では一段と注意して調べる必要があり、試験中の Web カメラ撮影は、引張せん断試験において極めて重要である。

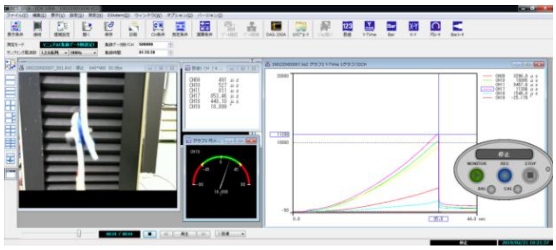


図１３　試験中の解析ソフト画面の例

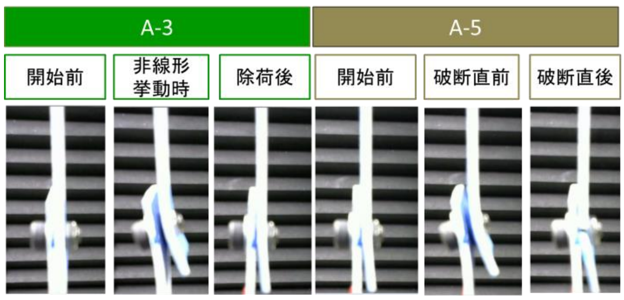


図１４　引張せん断試験中の連結部の状態の変化

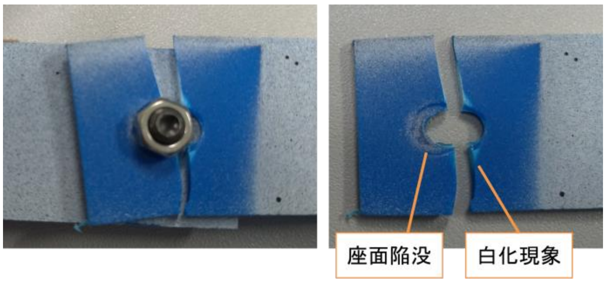


図１５　破断部の状況（左：直後、右：ねじ取外し後）

次にひずみゲージによる測定例として、図１６にサンプル A の５回目の負荷時（図１０の A-5）の結果を示す。上から３つのグラフは、順に図２のゲージ a、b、c の結果である。測定の結果、破断時のひずみは CH10(45°方向)で 10,000με(≒1.0%伸び)程度が最大であった。これは、材料試験で測定されるポリプロピレンの破断伸びより一桁以上小さい数値であり、破壊のきっかけとなる変形はひずみゲージの測定地点とは異なる接触部と推定される。

図１６中 CH17、18 は CH9、10、11 の測定値を基に、解析ソフト DCS-101 のロゼット関数でリアルタイム演算した結果を示した最大主ひずみと最小主ひずみ、CH19 は 0°方向ゲージと主ひずみ方向とのなす角度（対象は最大主ひずみ、最小主ひずみの近い方で、－45°～＋45°の範囲で表示する仕様）である。

本事業のひずみゲージの貼付は荷重方向と 45°方向を一致させたもので、主ひずみ方向は 45°となるのが理想であるが、破断時の主ひずみ方向とのなす角度は最小主ひずみ方向に対して-26°、最大主ひずみとは 64°と傾いた状態であった。これはサンプル寸法や、取付けのばらつきが理由と考える。試験機初期を除けば、主ひずみ方向は安定し、最小主ひずみの増加は小さく、最大主ひずみのみ単調に増加する挙動は、引張せん断試験の安定性を示すものである。

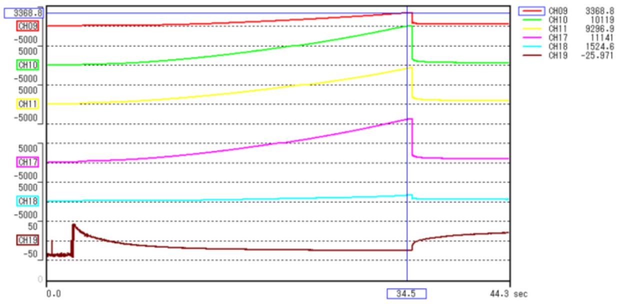


図１６　サンプル A ５回目負荷のひずみ測定結果

次にサンプル B に対する DIC 画像処理測定の結果を示す。DIC では２台のカメラから、製品の３次元形状、変位、ひずみを得ることができる。

図１７は、サンプル形状の Z 方向座標を示したもので、穴連結部の板の重なりの様子を定量的に捉えている。左が２次元表示、右が３次元表示の結果である。２次元表示は実画像にカラーコンターを重複して表示するため、視覚的に分かりやすいのが利点である。３次元表示は任意の視点からデータを可視化できるのが利点である。

図１８は Z 方向変位の結果で、図右が変位分布図、図左は分布図中央白線（ラインカーソル）上の変位を縦軸 Y 方向座標－横軸 Z 方向変位でプロットしたものである。破断直前まで徐々に傾きが増加し、破断直後に回復するという特徴を捉えることができる。

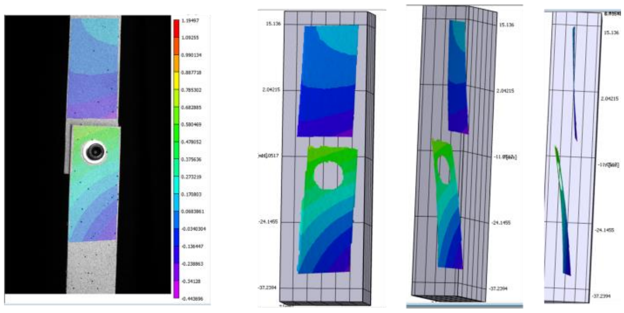


図１７　DIC 表面形状解析（Z 方向座標分布）の結果
（左：2 次元表示、右：3 次元表示）

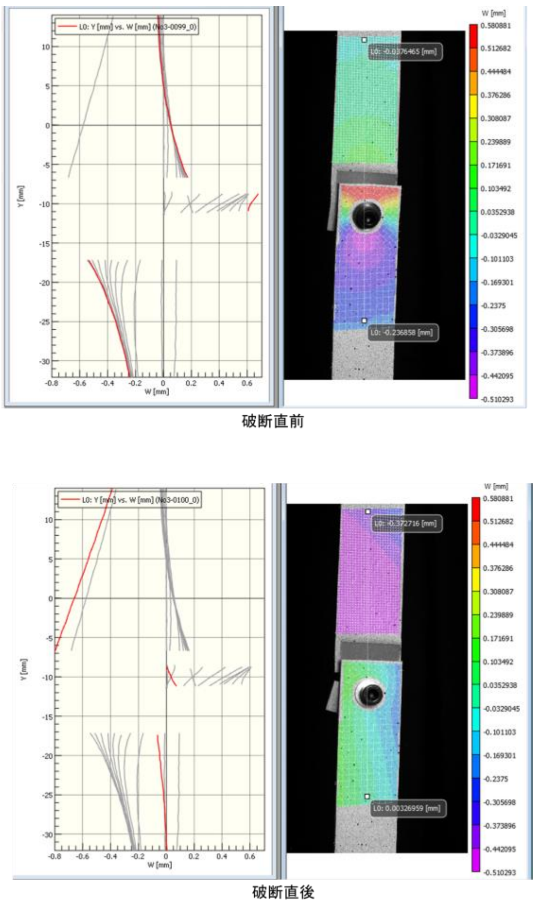


図１８　DIC 面外変位分布解析の結果
（上：破断直前、下：破断後）

図１９は連結部近傍の主ひずみ分布結果である。図

左が破断直前、図右は破断直後の分布図である。破断直前の分布は複雑であるが、DIC 測定により実験的に定量測定することが可能である。

以上のとおり、本試験の変形は比較的大きいので、DIC で良好な測定が可能であることを確認した。DIC は単一の測定で形状、変位、ひずみを測定することが可能であり本試験の測定に有用である。

しかし、カメラで撮影できない部位の測定はできないので、連結部品周辺の応力状態を知るには CAE 解析が必須であると思われる。

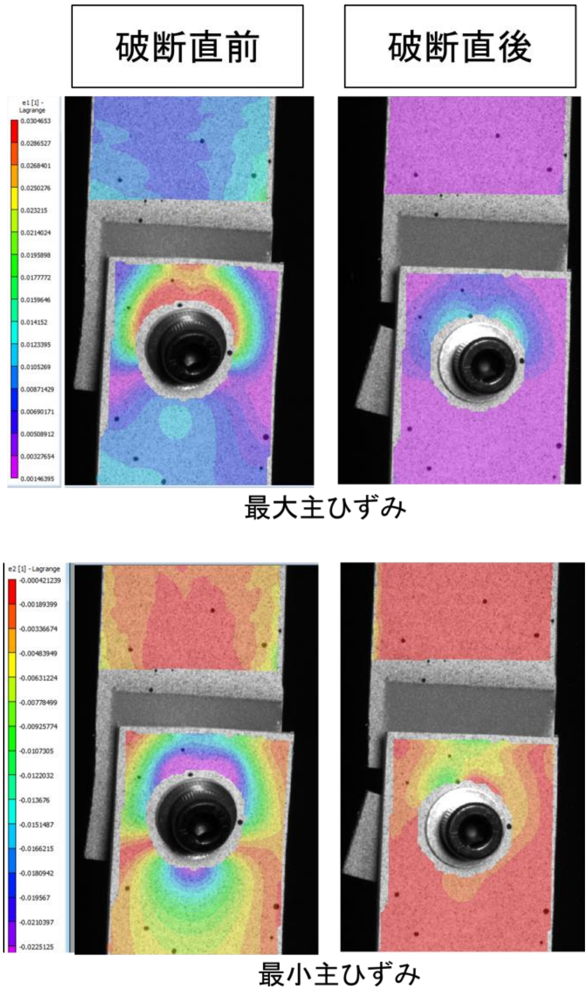


図１９　DIC ひずみ測定結果

３．２．穴連結部の面外荷重試験

図２０に面外荷重試験の荷重－変位グラフを示す。L 字型ブラケット材、金属フープ材いずれの支持でも 40 mm程度の変位を与えることが可能で、ほぼ同一の荷重－変位グラフを得た。フープ材は非常に薄いため、製品の隙間に差し込むことや、製品の幅などに合わせて、形状を調整することが容易である。広い部位に平均的に変位を与える場合に有効と考える。一方、L 字型ブラケット材は、製品の限定された場所に変位を与えることができるため、平均的ではないアンバランスな変形を与えるのに向いており、アウトドア・スポーツ用品の強度試験としては両方必要と考える。

図２１にはひずみゲージ測定結果を示す。面外試験では荷重に対して比例的なひずみが発生した。また、主ひずみ方向も 45°（あるいは - 45℃）付近で安定していた。ひずみ測定ソフト DCS-100 では測定値を図２２のような円メータで表示できるため、適切な主ひずみの範囲を黄色で区分すれば、試験中に適切な変形が生じているかどうかを、視覚的、直感的に判断することが可能で試験を大いに助ける。

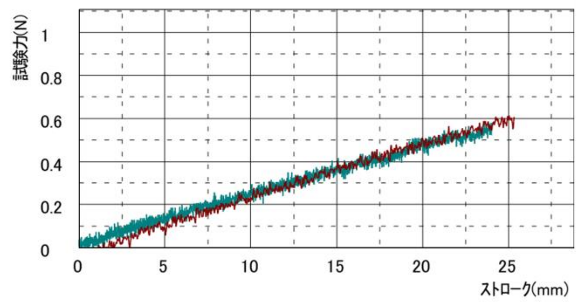


図２０　面外荷重試験の荷重－変位結果

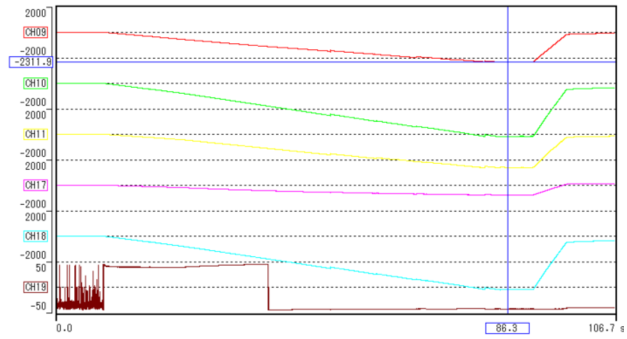


図２１　面外荷重試験のひずみ測定結果

図２２　主ひずみ方向の円メータ表示

次に面外試験の DIC 測定結果例として、図２３に面外変位分布測定を示す。また、図中白線（ラインカー

ソル）上の面外変位を縦軸面外変位（Y 方向変位）-横軸 X 座標のグラフを併せて示した。面外試験の変位量は最大 40 ㎜程度と大きい上、支持点が少なくシンプルな変形となるため、DIC で良好に測定可能であった。なお、ひずみ測定は測定下限に近いため、あまり有効ではないと結論付けた。

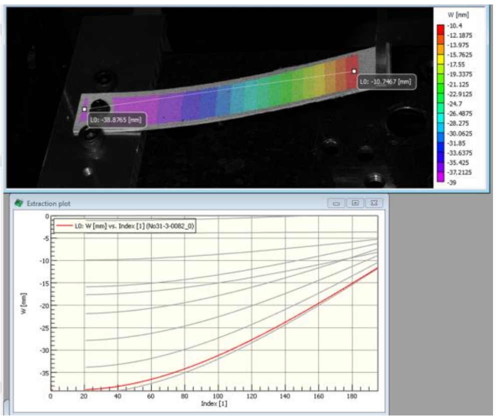


図２３　DIC 面外変位分布測定結果

３．３．長穴部の面内荷重試験

図２４に長穴部の面内荷重試験の荷重－変位グラフを示す。グラフは比較的シンプルな挙動となり、ピーク付近で僅かに荷重低下した後に破断した。図２５に破断後のサンプルの状況を示す。

図２６に DIC ひずみ分布、変位分布測定結果を示す。本試験では大変形となったため、かなり良好に測定できた。ひずみゲージとの比較で考えた場合、長穴部の各寸法は非常に小さく、ひずみゲージを貼付できない点、ひずみゲージでは 10%以上の測定は困難である点で DIC の優位性が際立つ。

図２７は破断部の直径 0.5 ㎜の範囲の平均値で荷重－ひずみグラフをプロットしたものである。製品試験の局所であるにもかかわらず、材料試験と同様な滑らかなグラフを得ることが可能であった。

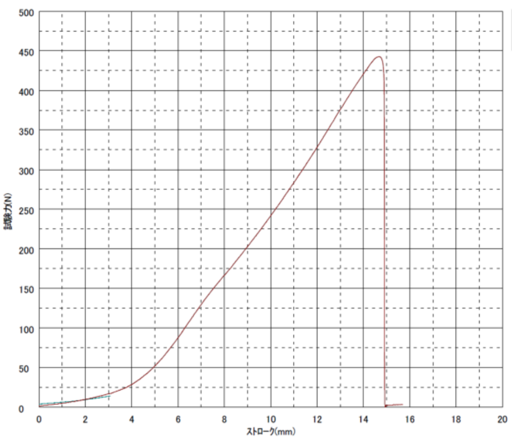


図２４　長穴部の面内荷重試験の荷重－変位グラフ

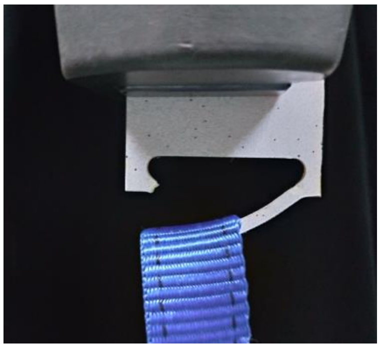


図２５　破断後のサンプル

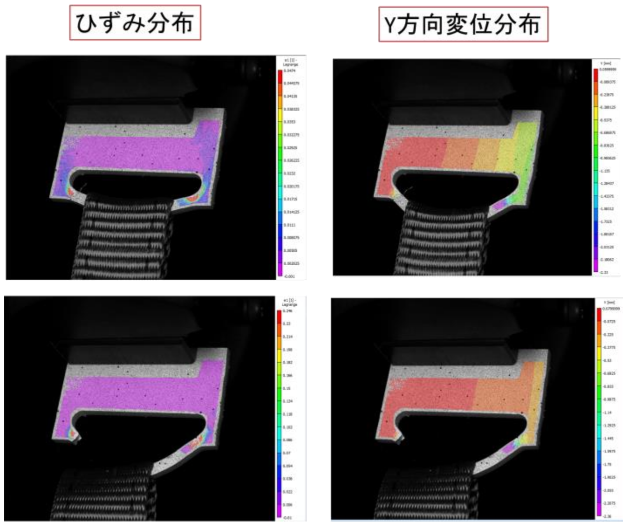


図２６　DIC によるひずみ分布、Y 方向変位分布図
（上：破断直前、下：破断直後）

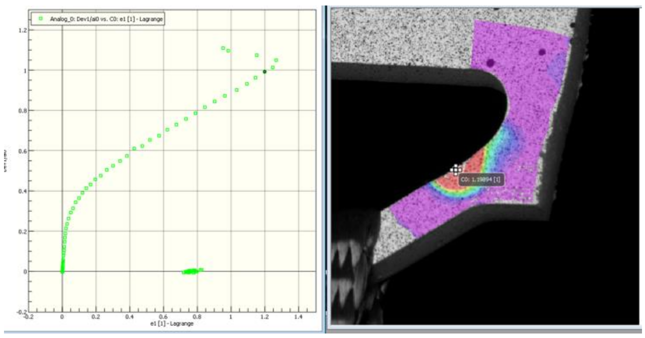


図２７　破断部のひずみ測定結果
（左：荷重－ひずみグラフ、右：ひずみ分布図）

４．結言

本事業では、CFRP 部品の穴連結部で必要な３様式の荷重試験方法を検討した。また、荷重試験中にひずみゲージ、Web カメラ撮影、DIC 画像処理を併用する手法について有効性を検証し、以下の結果が得られた。

① 引張せん断試験について、すべり挙動が出る程度の低荷重を負荷した後に本試験をすれば、再現性

の良い試験が可能であることが分かった。

② 面外荷重試験について荷重点を支持する方法を検討し、L 字型ブラケット材、金属フープ材のいずれも適正に試験できることを確認した。前者は局所的な荷重負荷に、後者は平均的な荷重負荷に向いていると考える。

③ 長穴荷重試験について、ベルトを介した荷重負荷により破壊まで安定して試験できることを確認した。

④ 0/45/90° の３方向に配置したひずみゲージ測定を行い、試験中にリアルタイムで主ひずみ方向が分かれば、試験が妥当に行われているかの判断に利用できる可能性を確認した。

⑤ 荷重試験中に Web カメラ撮影を併用して、引張せん断試験の接合部などの挙動を記録することで、荷重試験だけでは得られない重要な情報を得ることができる。

⑥ 本事業が対象とする板形状部品は、安定した DIC 測定が可能であり、特に、製品形状、変位、ひずみの３情報を単一測定で把握できる点が利点である。強度試験において積極的に活用すべきと考える。

⑦ DIC 測定で測定可能なのは製品表面のカメラ撮影できる部位に限定されるため、連結部内部の応力状態を把握するには CAE 解析が必要である。

胚培養ディッシュ金型の素材選定とイオンミリングの適用

Material selection and ion-milling application for mold of embryo culture dish

技術開発部 生産・加工科　三瓶　義之

応募企業　有限会社乾メディカル

ヒト受精卵（胚）の培養に用いられるディッシュの金型素材の重金属溶出量を測定し、金型素材の選定を行った。また金型の表面仕上げ手法として化学研磨、レーザー照射、イオンミリングについて評価した。その結果、ディッシュのNi移行量は定量下限値未満であり、金型素材にNiフリー素材を用いる必要がないことを確認した。またイオンミリングを用いることで金型素材を問わず表面を研磨できることを確認した。

Key words: 成形品への重金属移行、微細構造、表面仕上げ

１．緒言

ヒト受精卵（以下胚）の培養では、ディッシュと呼ばれる容器が用いられる。提案企業では（株）ナガヨシと共同でディッシュ内の胚培養区画に微細構造を形成し、培養液の恒常性を高める機能を持たせたディッシュの開発に成功している。

現在、ディッシュの量産及びマウスの胚を用いた評価に向けて試作を行っており、金型から成形品へのNi等の重金属の移行がないことの確認及び金型表面の加工痕の除去が課題となっている。

そこで、本事業では、金型から製品に移行した重金属量の評価とそれに基づく金型素材の選定、及び微細な凹凸を持った金型の表面仕上げ手法を開発したので報告する。

２．実験

２．１．重金属の移行量の評価

胚の培養を行う際､用いるディッシュにはNiをはじめとする重金属が存在していないことが望ましい。しかし、開発中のディッシュの金型には表面の平滑性向上のためにNiめっきが施されており､金型材自体にもNi等の合金元素が含まれている。そのため、金型からディッシュへの Ni の移行と培養液への溶出について懸念がもたれている。

そこで､表面がNiめっきの金型を用いて成形されたディッシュ､及び市販品のディッシュについてNiが移行しているか評価を行った。

試料にはディッシュを入れたビーカーにH_2O 30ml, HCl 2ml,HNO_3 2mlを加え､ホットプレート上で200℃, 1hの加熱抽出を行い、放冷後に蒸留水で50mlに定容したものを用いた。

分析はICP発光分析装置を用いて測定し、検量線法にて定量分析を行った。分析の結果を表１に示す。

表１　ディッシュから溶出したNiの定量結果

	試料No.1	試料No.2	試料No.3
	Ni量(mg/l)	Ni量(mg/l)	Ni量(mg/l)
市販品	定量下限値未満	定量下限値未満	定量下限値未満
開発品	定量下限値未満	定量下限値未満	定量下限値未満

定量下限値：Ni 0.02mg/l

表１より､開発品及び市販品からのNi溶出量はいずれも定量下限値未満であった。このことから、Niめっき表面やNiを含む金型素材からディッシュへのNiの移行は極めて少なく､金型素材にNiフリー素材などを用いる必要がないことが分かった。

２．２．異なる金型素材での微細突起加工

前項の結果より、ディッシュの成形に用いる金型素材は加工性や耐食性を考慮して選択することが可能である。そこで、微小突起部の加工性について評価を行った。

金型素材には、金型部材としての入手性及び(株)ナガヨシでの加工実績を考慮し、ダイス鋼（SKD61）、ハイス鋼（SKH51）及びステンレス鋼（SUS440C）を用いた。

これらの鋼材について、(株)ナガヨシにおいてディッシュの胚培養部と同じ直径0.2mmの突起が0.4mm間隔で直線状に配置された形状の加工を行った。

加工された突起部分についてSEM観察を行い、形状及び加工痕の状態について比較を行った。得られたSEM観察像について図１に示す。

図１より、加工した３種の鋼材はいずれも目的の突起の形状を加工できていることが確認できる｡しかし、凸部先端部の斜面には加工痕が、凸部側面と斜面の境界部には加工時のバリが確認された。

このことから、いずれの鋼材を使用した場合においても加工痕を減少させる加工条件の探索やバリの除去をふくむ表面仕上げが必要となると考えられる。その

事業課題名「世界初のヒト受精卵培養用Microfluidic dishを作製する金型素材の選定並びに製品の重金属溶出量の評価」

ため、金型素材選定については加工後の表面粗さの向上手法への適性についても考慮しなければならないことが分かった。

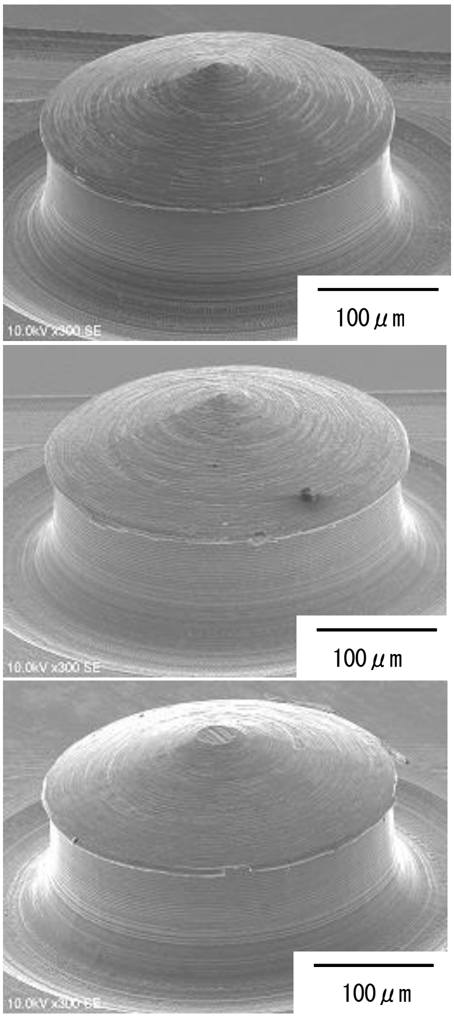


図１　加工した突起部の SEM 観察像
（上：SKD61，中：SKH51，下：SUS440C）

２．３．金型表面処理手法の評価

前項までの結果をうけ、加工後の金型の表面処理手法について評価を行った。

一般的に加工痕やバリを除去する手法としては、機械的な研磨をはじめ、化学研磨や電解研磨などいくつかの手法が挙げられる。

しかし、今回の様な微細な凸形状を持った面を研磨する場合、機械的研磨では微細形状を保ったまま加工することが難しい。また、電解研磨は凸部が優先して溶解が進行する作用を利用しているため、やはり適用することが難しい。

そこで、薬品による溶解作用を利用した化学研磨手法、レーザーを照射し表層を溶解させて平滑化を図る手法及びイオンミリングにより金型表面を処理する手法について検討を行った。

２．３．１．化学研磨による表面処理の評価

まず、金型の表面平滑化手法として化学研磨について評価した。

加工した金型試料と同じ SKD61 について平板状の試料を作製し、220 番の耐水研磨紙で表面を研磨したものを試料として用いた。

化学研磨液には 40%フッ酸 5g:30%過酸化水素水 10g：蒸留水 85g を混合したフッ酸-過酸化水素系の化学研磨液を用い、常温で１分間の浸漬を行ったものを試料とした。処理品と未処理品の試験片について図２に示す。

図２　化学研磨を行った SKD61
（左：未処理，右：処理済）

図２より、処理した試験片は研磨されず、いわゆる黒染めのような状態になっていることが観察され、不適切な薬液あるいは処理条件で処理されたことを示している。

今回金型素材の候補として挙げられている鋼材はいずれも含まれる合金元素の異なる鋼材であることから、単一の研磨液で処理しその良否を比較することはできない。また、鋼材やその加工履歴に合わせて研磨液や処理条件を細かく変更するというのも実際の金型製造では困難である。このことから、今回の金型の表面平滑化手法として化学研磨を利用するのは難しいと考えられる。

２．３．２．レーザー光照射による表面処理の評価

ついで、金型表面にレーザー光を照射し表面を僅かに溶解させることで表面の加工痕を平滑化させる手法について評価を行った。

試料には前項と同じ SKD61 材を用い、表面を研磨したもの、レーザー光吸収膜としてカーボンコーティング処理を行ったもの及び前項の黒化処理を行ったものを用いた。

カーボンコーティングには日立ハイテクノロジーズ製の E-1045 型イオンスパッター及びカーボンコートユニットを用い、電流値 20A でのコーティングを４回行った。

未処理品、カーボンコーティング、化学処理での黒

化の試料の外観を図３に示す。

図３　表面処理を行った SKD61 材
（左：未処理，中：カーボンコート，右：化学処理）

これらの試料についてレーザー光照射による平滑化処理を試みた。

レーザーは SMART DIY Shop 製 FABOOL Laser Mini の波長 455nm の 3.5W レーザー搭載のものを使用し、レーザー出力 100%、スキャン速度 50mm/min. で試料の 3mm 角の範囲に照射を行った。

照射中の装置の様子を図４に、照射後の試料の全体を図５に、照射部の顕微鏡観察画像を図６に示す。

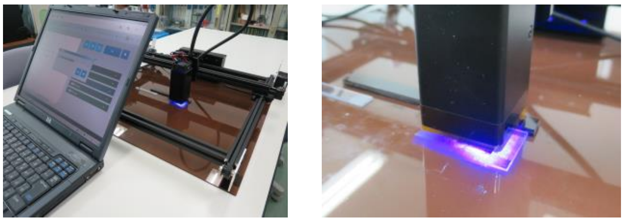


図４　照射中の様子（左：装置外観，右：照射部）

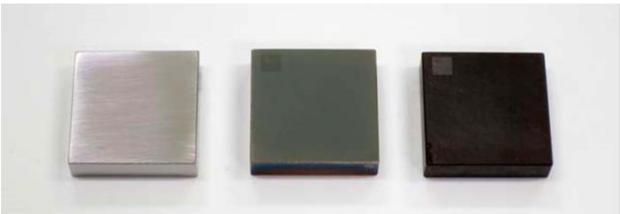


図５　照射後の試料
（左：未処理，中：カーボンコート，右：化学処理）

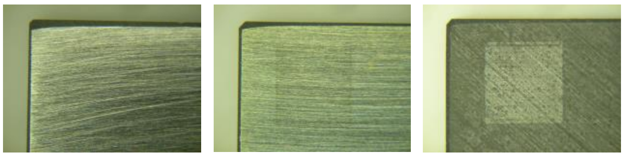


図６　照射部の拡大図
（左：未処理，中：カーボンコート，右：化学処理）

図５及び６より、未処理の試料では照射の有無で表面に変化は観察されなかった。カーボンコーティングを施した試料では照射部に変色が見られたものの表面の粗さに差異は見られなかった。黒染め加工を行ったものでは表面の黒化層が一部除去されたものの表面に変化は見られず、平滑化の効果は見られなかった。

今回の加工条件は装置の最大出力であり、カーボンコーティングなどのレーザー光の吸収層を設けても表面の溶融が見られなかったことから、使用したレーザーでは平滑化を行うためには出力が不足していると考えられる。したがって、この手法で平滑化を実現するためには高出力のレーザーが必要であると考えられる。

２．３．３．イオンミリングによる表面処理の評価

加えて、イオンミリングによる表面の処理について検討を行った。これは、イオンビームを試料に照射して加工を行う手法である。試料に応力を加えずに加工が行うことができる手法である反面、その加工量については微小であり、研磨できても加工バリの除去などが十分に行えない可能性がある。

そこで、微細な凸部の加工された金型に対して加工を行い、加工バリの除去及び表面の平滑化を試みた。

イオンミリングには(株)日立ハイテクノロジーズ製イオンミリング装置 IM4000Plus を用い、フラットミリングモードで処理を行った。処理条件については表２の通り、処理時間については SKD61 と SKH51 は 30 分及び 60 分、SUS440C はそれに加えて 90 分及び 120 分の処理を行った。

それぞれの素材の金型の処理後の SEM 観察像について図７～９に示す。

表２　イオンミリング処理条件

放電電圧	1.5kV
加速電圧	6kV
放電ガス	Ar
ガス流量	0.08 sccm
試料シフト量	1mm
ビーム入射角度	試料面から10°
試料回転	25rpm

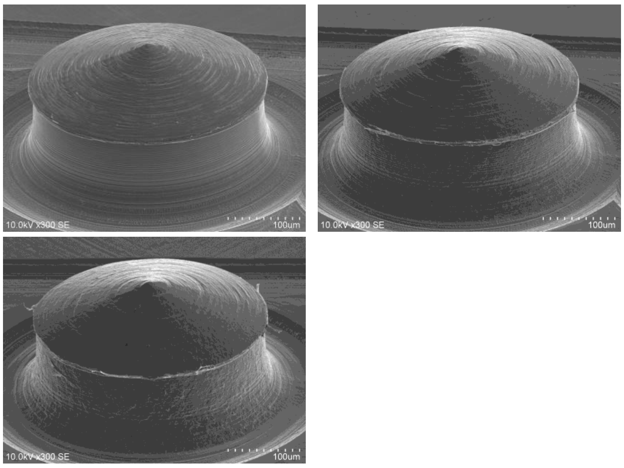


図７　SKD61 のミリング処理後の SEM 観察像
（上段左：未処理，上段右：30 分処理，下段左：60 分処理）

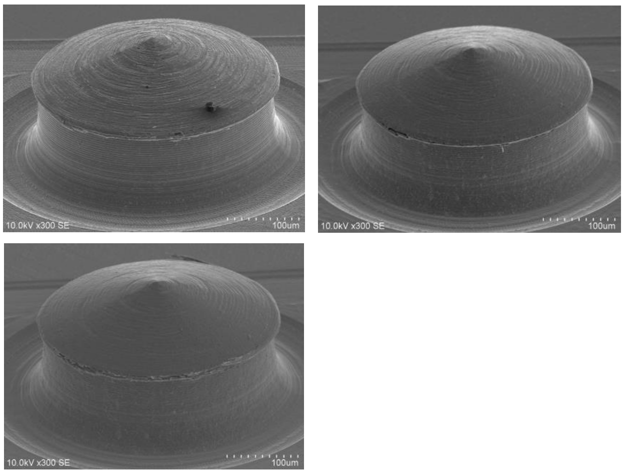


図８　SKH51 のミリング処理後の SEM 観察像
（上段左：未処理，上段右：30 分処理，下段左：60 分処理）

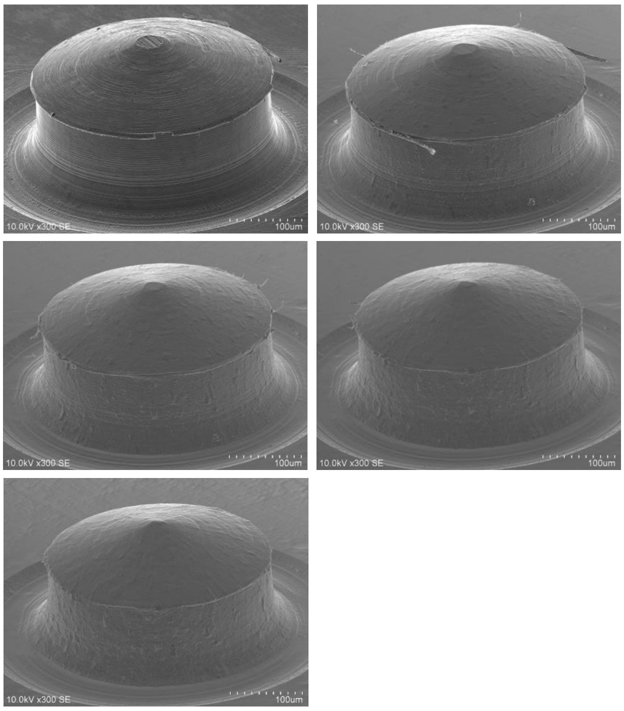


図９　SUS440C のミリング処理後の SEM 観察像
（上段左：未処理，上段右：30 分処理，中段左：60 分処理
中段右：90 分処理，下段左：120 分処理）

図７～９より、イオンミリング処理によって、表面の加工痕及びバリが除去されているのが確認できる。また、金型素材間で加工の程度には大きな差が見られないことから、ミリングによる処理は金型素材を問わず行えることが分かる。

しかし、処理時間が長すぎた場合には、素材中の結晶粒や微小介在物のミリング加工速度の差によって表面に凹凸が発生する事象も見られることから、イオンミリングだけで試料の表面すべてを鏡面に仕上げるということは難しいと考えられる。

また、電子顕微鏡下で観察される金型の凹凸の評価は、作製した成形品を顕微鏡下で使用した場合の見え方と一致するとは限らないため、実際の成形品の観察によって状態を評価する必要もあると考えられる。

３．結言

本事業では、金型素材から製品に移行した重金属量の評価及び金型素材の選定と微細な凹凸を持った金型の表面平滑化手法について以下の実験を行った。

- ICP 発光分析を用いたディッシュへの Ni 移行量の評価
- 異なる素材で作製された金型の SEM 観察
- 金型表面処理手法として、化学研磨、レーザー照射、イオンミリングについての評価

これらの結果より、以下の知見を得た。

- 金型素材からの重金属の移行量はきわめて少なく、定量下限値以下である
- 金型金属の選択は、含有元素よりも加工性に着目して選択する必要がある
- 微細な構造を持った金型の表面処理手法として、素材や形状による問題が発生しにくい点でイオンミリングは有効に使用できる可能性がある。しかし、処理時間が長すぎると金属の内部構造に由来する凹凸が発生する懸念がある。

本事業で作製した SUS440C の金型に関しては、(株)ナガヨシでディッシュを成形し提案企業において評価を行う予定である。ハイテクプラザでは引き続き処理手法のリファインなどについて、技術相談などで対応を行う予定である。

樹脂材料における正面フライス加工の高能率化

High efficiency of face milling in resin materials

技術開発部 生産・加工科　夏井憲司
応募企業　東北江南株式会社

算術平均粗さ 0.2μm 以下という社内規格を満たした上で、正面フライス加工の能率向上を図るために、工具や加工条件の検討を行った。PCD 製さらい刃インサートを使用した加工実験の結果、表面粗さの社内規格を満たした上で、送り速度 1800 mm/min を達成した。その時の算術平均粗さ 0.176μm であった。

Key words: 正面フライス、表面粗さ、熱可塑性樹脂、さらい刃

１．緒言

応募企業である東北江南株式会社の製品の中には、切削加工によって作られる半導体製造装置用の熱可塑性樹脂部品がある。半導体製造装置では高い気密性が必要となるため、応募企業では一部の樹脂部品に対して、算術平均粗さ Ra で 0.2μm 以下という厳しい社内規格を設定している。

この社内規格を達成するために、正面フライス加工の工程では、加工条件の送り速度を 120 mm/min と小さく設定している。しかし、それでは樹脂部品の全長が 2～3 m の場合、加工時間が数十分に及ぶことになるため、正面フライス加工の能率向上が大きな課題となっている。

そこで本技術開発では、表面粗さの社内規格を満たした上で、正面フライス加工の能率向上を図るために、工具や加工条件の検討を行った。

２．実験方法

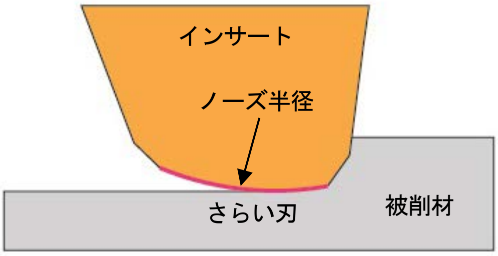
２．１．工具の選定

刃先交換式の正面フライス工具に使用されるインサートには、仕上げ面を創生する前切れ刃が、直線形状のものとノーズ半径値を持った円弧形状のものが存在する（図１）。以降、直線形状の前切れ刃を直線前切れ刃、円弧形状の前切れ刃をさらい刃とする。

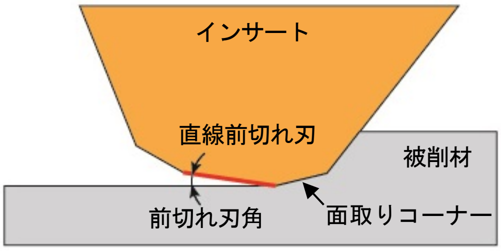
正面フライスのような多刃工具では、最も突き出した１枚の切れ刃で、１回転当たりの仕上げ面が創生される[1]。そのため、最も突き出したインサートの前切れ刃がさらい刃だとすると、粗さ曲線の最大高さRzに相当する理論粗さは、次式により計算される[2]。

$$R_{th} = \frac{f^2}{8R} \times 1000 \qquad (1)$$

ここで、Rth:理論粗さ[μm]、f:1 回転当たりの送り[mm/rev]、R:ノーズ半径[mm]である。



（ａ）さらい刃のインサート



（ｂ）直線前切れ刃のインサート

図１　正面フライス工具に使用されるインサート

直線前切れ刃のインサートについては、前切れ刃角が 0°の場合は、理論粗さも 0μm となるが、実際には手作業によるセッティングのため、前切れ刃には若干の角度が付いてしまう。前切れ刃角が β°の時の仕上げ面生成の幾何学的な関係を図２に示す。

ここで、γ:インサートをセッティングした状態での面取りコーナーの角度である。

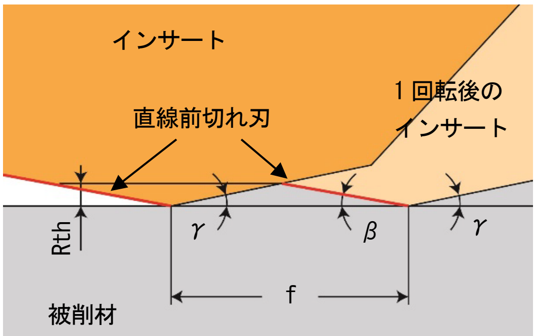


図２　直線前切れ刃による仕上げ面の形成

事業課題名「熱可塑性樹脂の正面フライス加工における加工能率の向上」

図２から導出した理論粗さを次式に示す。

$$R_{th} = \frac{f}{\cot\beta + \cot\gamma} \times 1000 \qquad (2)$$

式（1）及び式（2）から計算される理論粗さと送りの関係を図３に示す。さらい刃のノーズ半径は 50mm、直線前切れ刃の前切れ刃角は 0.1°、面取りコーナーの角度は 22.4° とした。

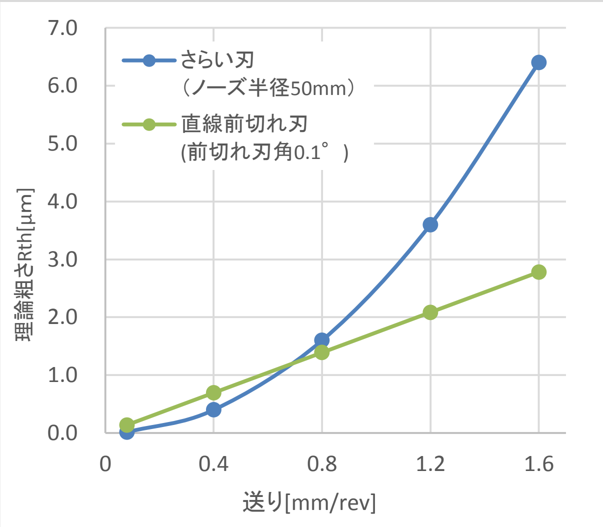


図３　理論粗さと送りの関係

前切れ刃角に 0.1° という小さな値を設定したが、それでも送りが小さい領域では、さらい刃の方が直線前切れ刃に比べて、理論粗さが小さくなった。インサートのセッティングは手作業で行われるため、実際の前切れ刃角はもっと大きな値になり、それに合わせて表面粗さも悪化すると考えられる。

そこで本技術開発では、前切れ刃角の調整を必要としないさらい刃インサートをセッティング可能な正面フライスカッタを実験に使用した。工具を図４に、主な諸元を表１に示す。

図４　正面フライスカッタ

表１　正面フライスカッタの諸元

有効径	100 mm
刃数	8
切込み角	85.5 °
アキシャルレーキ角	+13 °
ラジアルレーキ角	+7 °
その他	刃先高さ調整機構付

２．２．実験装置

加工実験には、３軸立型マシニングセンタ（三菱重工(株)M-V5B）を使用した。被削材は、図５に示すように、マシンバイスに固定して正面フライス加工を行った。

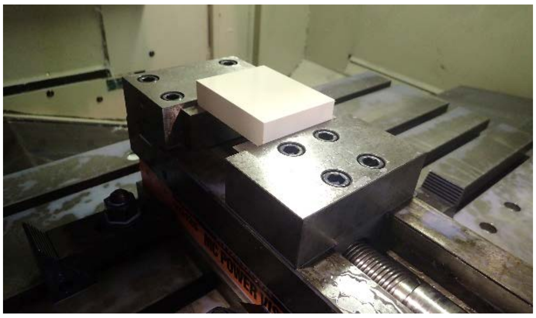


図５　被削材の固定方法

２．３．インサートのセッティング

工具材種の違いによる表面粗さへの影響を調べるために、２種類のさらい刃のインサートを使用して加工実験を行った。インサートのセッティングを図６に示す。なお、ノーズ半径は工具メーカーより公表されていなかったため、マルチセンサ測定機（カールツァイス(株)O-INSPECT 442）のカメラセンサを使用して測定した。インサートの刃先高さの調整には、ツールプリセッタ（(株)日研工作所 WASP）を使用した。

２．４．加工条件

選定した正面フライスカッタが対象とする被削材に熱可塑性樹脂が含まれていなかったため、アルミニウム合金の推奨切削条件を参考に、加工条件を決定した。加工条件を表２に示す。

表２　加工条件

1	切削速度	250 ～ 2000 m/min
2	送り	0.08 ～ 1.2 mm/rev
3	切込み	0.05 ～ 1.5 mm
4	冷却	水溶性切削液
5	被削材	ポリ塩化ビニル

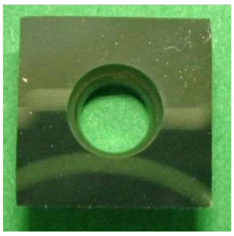
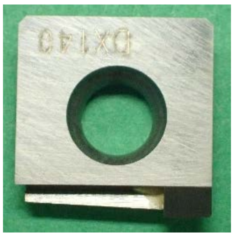
	セッティングの仕様	インサート外観
A	超硬製インサートを 8 枚使用 ノーズ半径 42mm 刃先高さの振れを 10μm 程度に調整した。	
B	セッティング A から 1 枚だけ PCD 製インサートに変更 ノーズ半径 65mm PCD 製のインサートを他のインサートより 30μm 程度突出させた。	

図６　インサートのセッティング

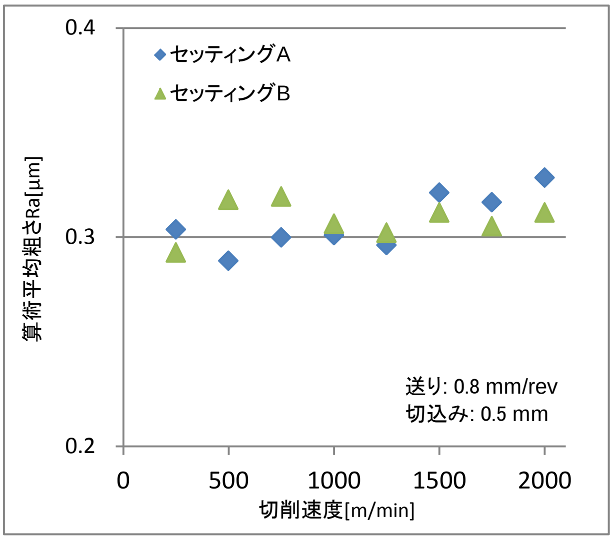


図７　表面粗さと切削速度の関係

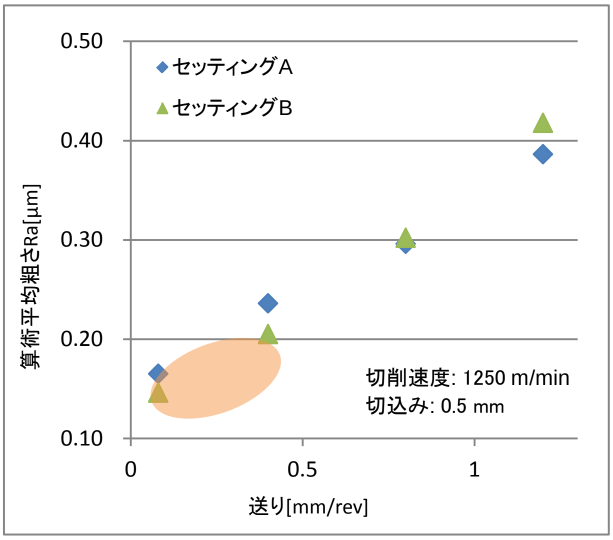


図８　表面粗さと送りの関係

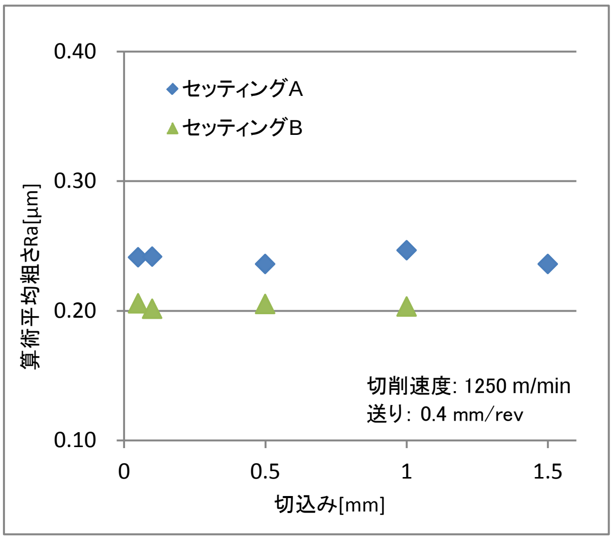


図９　表面粗さと切込みの関係

３．結果及び考察

３．１．加工条件と表面粗さの関係

仕上げ面の評価には、社内規格と同じ Ra を用いた。表面粗さの測定には、表面粗さ・輪郭形状統合測定機（(株)東京精密 SURFCOM3000A）を使用した。表面粗さは、送りの方向と平行に３か所測定し、その平均値を測定結果とした。

送りと切込みを一定にして、切削速度を変化させて加工した時の仕上げ面の Ra を図７に示す。切削速度が変化しても、Ra の値に大きな違いは見られず、平均して 0.3μm 程度となった。切削速度と Ra には、明確な相関は見られなかった。

切削速度と切込みを一定にして、送りを変化させた時の Ra を図８に示す。式（1）が示すように、送りが小さくなるほど Ra も減少する傾向がみられた。送りが 0.4 mm/rev 以下の領域では、セッティング B の方が A に比べて、Ra の値が小さくなった。

切削速度と送りを一定にして、切込みを変化させた時の、Ra を図９に示す。切込みを変化させても Ra の値に、ほとんど違いは見られなかった。送りを 0.4 mm/rev に固定したことにも関係するが、セッティング B の方が、A に比べて全体で Ra が小さくなった。

この実験より、図８に楕円形で示した送りが 0.4 mm/rev 未満の加工条件を用いれば、Ra を社内規格値以下に抑えられることが分かった。また、その加工条件の範囲では、セッティング A より B の方が Ra を低減できることが分かった。

３．２．さらい刃の観察

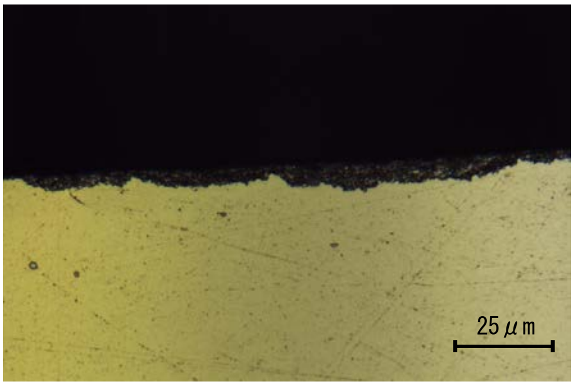
送りが 0.4 mm/rev 以下の場合、セッティング B の方が A に比べて、Ra の値が小さくなった理由を調べるために、さらい刃の観察を行った。観察には、走査型レーザ顕微鏡（レーザーテック（株）HYBRID L3）を使用した。それぞれのインサートのさらい刃の観察画像を図１０に示す。セッティング A で使用した超硬製インサートは、さらい刃のエッジが欠けていることが分かる。それと比較して、セッティング B で使用した PCD 製インサートは、一部欠けは見られるが、比較的良好なエッジ形状になっていた。

仕上げ面は、原理的には工作機械によって与えられた相対運動軌跡に沿って、工具の輪郭が転写されることによって生成される[3)]。そのため、さらい刃の形状精度の良かったセッティングBの方が、Raが低くなったと思われる。このことから、表面粗さを低減させるためには、さらい刃や直線前切れ刃のエッジ形状の良好なインサートを使用することが重要であるということが分かった。

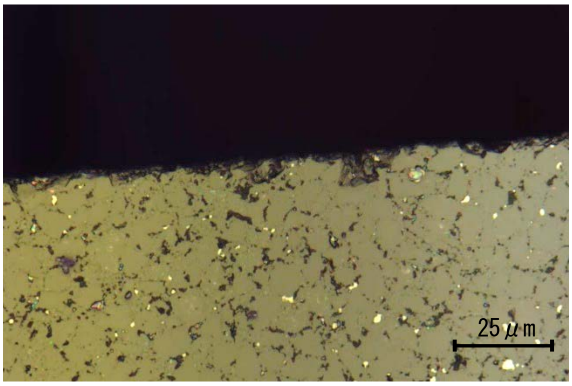
３．３．詳細な加工条件の選定

社内規格を満たす加工条件をより詳しく調べるために、セッティング B を使用した追加の加工実験を行った。なお、選定した加工条件を製造現場で活用しやすいように、切削速度の設定を[m/min]から主軸回転数[rpm]に変更して実験を行った。また、３．１節にて Ra と切削速度にはあまり相関がないことが分かったため、加工能率の指標である送り速度[mm/min]を高くすることのできる高主軸回転数の条件を設定した。

主軸回転数と送りを変化させた時の Ra を図１１に示す。この実験では、実施したすべての条件で社内規格である Ra 0.2 μm 以下を達成した。その中で、最も送り速度の大きい、主軸回転数 6,000 rpm、送り 0.3 mm/rev を推奨加工条件とした。この条件での送り速度は 1800 mm/min となり、その時の Ra は 0.176 μm であった。



（a）超硬製インサート（セッティング A）



（b）PCD 製インサート（セッティング B）

図１０　さらい刃の観察画像

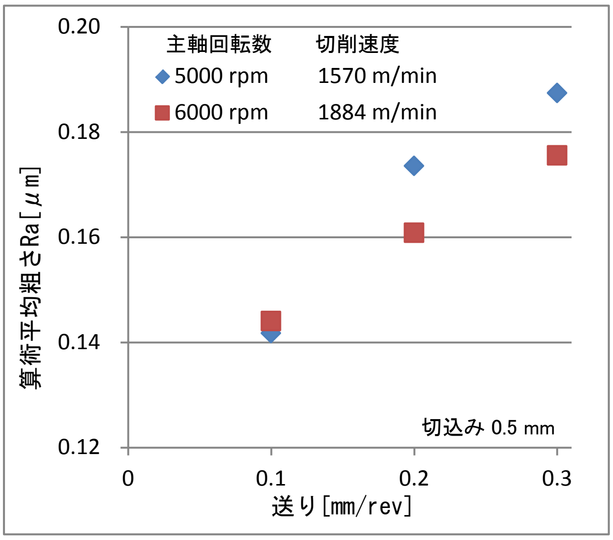


図１１　主軸回転数・送りを変化させた時の表面粗さ

４．結言

工具や加工条件の検討を行った結果、PCD 製のさらい刃インサートを使用することにより、主軸回転数 6000rpm、送り速度 1800 mm/min の加工条件で算術平均粗さ 0.176 μm を達成した。また、本実験の範囲内で以下の知見を得た。

1）送りが小さな場合は、直線前切れ刃よりさらい刃の方が、理論粗さは低くなる。

2）表面粗さを低減させるには、前切れ刃の形状精度のよいインサートを使用することが有効である。

参考文献

1）西嶋祐. “切削加工は測定から始まる”. 現場で役立つ切削加工の勘どころ　－西嶋祐切削塾からの提言－. 日刊工業新聞社, 2012, p.117-123.

2）西嶋祐. “フライス加工”. 続　現場で役立つ切削加工の勘どころ　－「削り屋」からのモノづくり提言－. 日刊工業新聞社, 2006, p.153-159.

3）森脇俊道. “超精密切削”. 切削加工大全. 日刊工業新聞社, 2018, p.238-241.

切削振動解析システムを利用した加工条件の最適化手法の確立

Establishment of optimum method on processing conditions using cutting vibration analysis system

技術開発部 生産・加工科　小林翼　小野裕道
応募企業　株式会社中野製作所

提案企業では、半導体製造装置などに使われるアルミニウム合金の切削加工を行っている。今回、新規に主軸回転数が高く、高速加工が可能な加工機を導入したが、現在所有している知見では高速加工の条件設定が困難であり、条件選定までの実験回数の増加が予想される。本技術開発において切削振動解析システムを用いた加工条件の選定手順を検討した結果、切削量と主軸負荷から最適な切削条件を少ない実験回数で、２時間程度の短時間に設定することができた。

Key words: 切削加工、マシニングセンタ、高能率加工、アルミニウム合金加工、びびり振動

１．緒言

切削加工、特にアルミニウム合金加工において、低コスト化のために加工効率の向上が求められている。加工条件の選定は工具のカタログスペックを基に実際に複数の条件で加工を行い、作業者が加工中の音や加工結果から条件を評価し決定している。しかし、設定した加工条件が最適かどうかの判断方法がなく、作業者の経験に頼る部分が大きい。そのため、条件選択までの加工実験回数が多くなることが課題である。

提案企業では、アルミニウム合金の切削加工を行っている。今回、主軸の最高回転数が 14,000rpm の新型の５軸マシニングセンタを導入したが、今までの加工機では 8,000rpm が最高回転数のため、それ以上の回転数での切削条件の選定に知見が少ない。そのため、条件選択までに多くの実験を行う必要がある。

そこで、本技術開発ではこの５軸マシニングセンタを対象に、切削振動解析システム（CutPRO）を用い、工具まわりの振動特性を測定し、安定限界線から最適な切削条件を選定する手法[1]を試みた。これにより、少ない実験回数で、最適な切削条件を短時間で選定することができたので報告する。

２．実験

２．１．切削振動解析システム（CutPRO）について

びびり抑制についての安定ローブ理論を基に安定して加工できる切削条件をシミュレーションするシステムである。具体的な使用方法を次に示す。

工具まわりの振動特性（図１）を測定し、工具形状、径方向の切込み及び送り速度から、主軸回転数に対しどこまで軸方向の切込みを設定できるかを示す安定限界線（図２）を作成する。

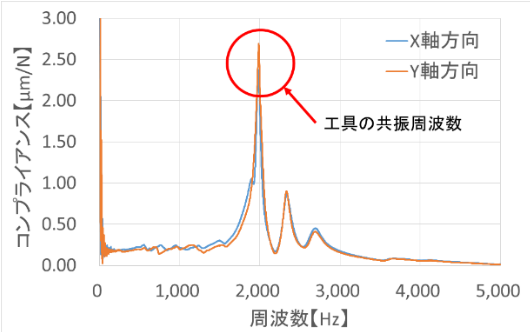


図１　工具まわりの振動特性

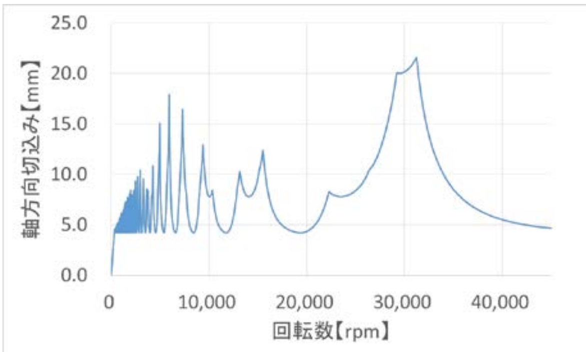


図２　安定限界線

切込み量が安定限界線以上の条件ではびびり振動が発生し、それ以下なら安定した加工が行える。これにより、あらかじめびびり振動の起きない回転数、切込み量を予測することができ、切削条件設定に必要な加工実験回数の削減が狙える。

２．２．振動特性の測定

マシニングセンタに工具をセットし、ハンマリング試験により振動特性を測定した。加工機の仕様を表１に、工具諸元を表２に示す。

事業課題名「切削振動解析システムを利用した加工条件の最適化手法の確立」

表１　加工機の仕様

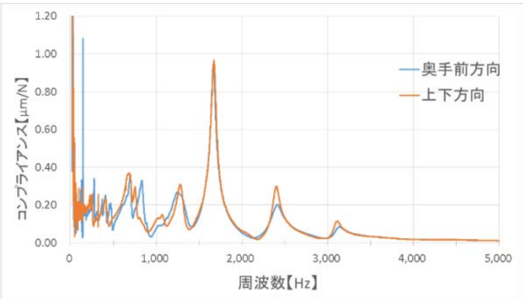
５軸制御横型マシニングセンタ	
移動量（B)【度】(テーブル回転)	360
移動量（C)【度】(テーブル傾斜)	180
パレットの大きさ【mm】	500×500
最大積載質量【kg】	400
主軸回転数【rpm】	50～14,000
主軸テーパ穴	BT40

表２　工具諸元

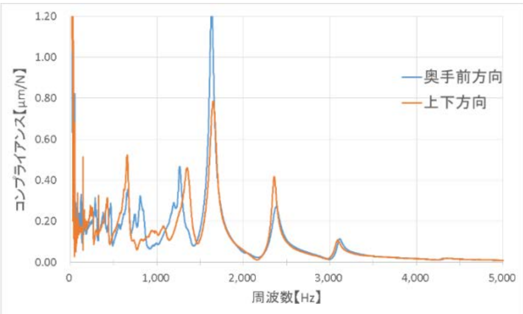
形式	チップ交換式エンドミル	チップ交換式エンドミル
直径【mm】	φ33	φ26
刃数	3	3
突出し量【mm】	120	90
工具推奨切削条件		
主軸回転数【rpm】	1,930～14,475	2,450～12,250
送り量【mm/t】	0.1～0.35	0.1～0.3

測定は同型機種の２台（A 号機及びおよび B 号機）それぞれに２種類の工具をセットし行った。

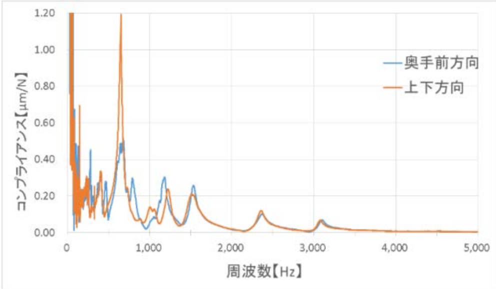
CutPRO により解析した振動特性を図３に示す。



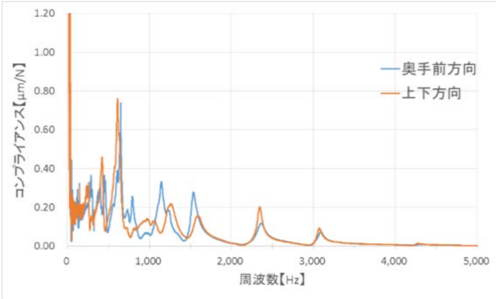
(a）A 号機　φ26mm



(b）B 号機　φ26mm



(c）A 号機　φ33mm



(d）B 号機　φ33mm

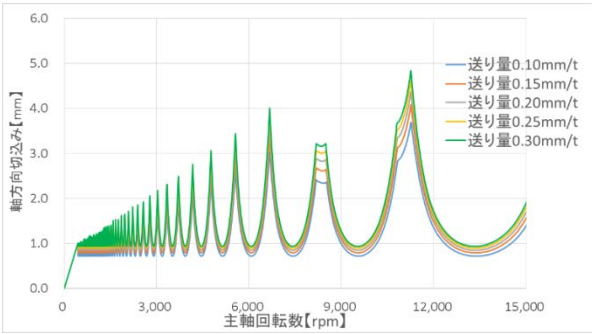
図３　工具まわりの振動特性

同型機種のため A 号機、B 号機の振動特性に大きな違いはなかった。

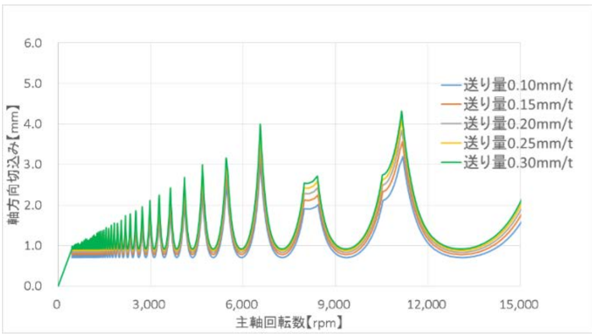
２．３．安定限界線の作成と実験条件の選定

測定した振動特性を基に、工具情報を入力し、安定限界線を作成した。

工具直径がφ26mm の安定限界線を図４に、φ33mm の安定限界線を図５に示す。

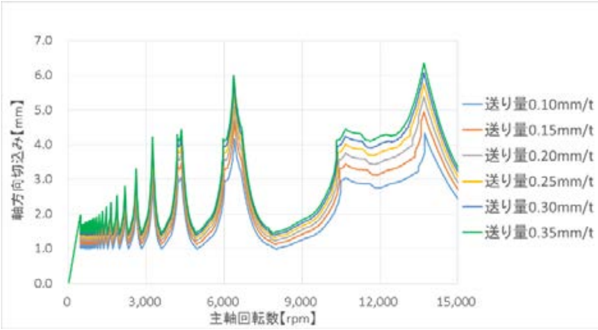


(a）A 号機　φ26mm

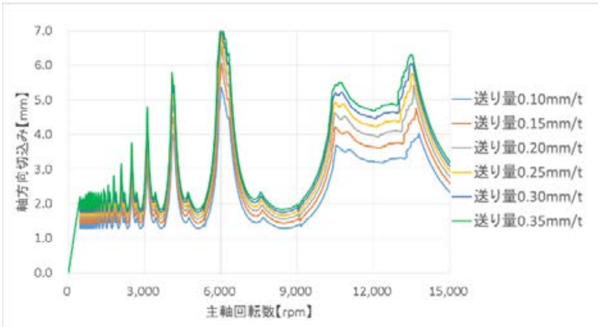


(b）B 号機　φ26mm

図４　φ26mm 安定限界線



(a) A号機　φ33mm



(b) B号機　φ33mm

図５　φ33mm 安定限界線

送り速度を１刃当たり 0.1mm から 0.35mm まで変化させてシミュレーションを行った。

シミュレーション結果から送り量が増加するに従がって軸方向の切込みも増加することがわかった。

安定限界線を基に機械の最高回転数に近い回転数で、表３、表４の加工条件を選定し、A 号機で加工実験を行った。また、A 号機、B 号機で同じ加工条件を選定するため、A 号機の実験結果を基に B 号機の加工実験を行った。B 号機の加工条件を表５に示す。

表３　A 号機　φ26mm 加工条件

φ26	主軸回転数【rpm】	送り【mm/min】	軸方向切込【mm】
1	11,260	5,067	4.083
2	11,260	6,756	4.353
3	11,260	8,445	4.596
4	11,260	10,134	4.797

表４　A 号機　φ33mm 加工条件

φ33	主軸回転数【rpm】	送り【mm/min】	軸方向切込【mm】
1	10,670	8,000	4.015
2	10,670	9,600	4.015
3	13,700	8,220	5.369
4	10,490	6,294	4.618
5	10,490	7,868	4.933

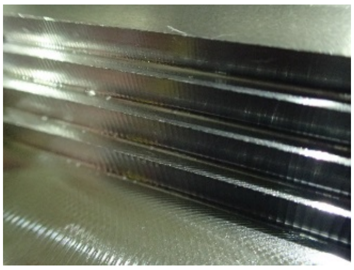
表５　B 号機　加工条件

B	主軸回転数【rpm】	送り【mm/min】	軸方向切込【mm】
φ26	11,200	10,080	4.00
φ33	10,600	8,000	4.50

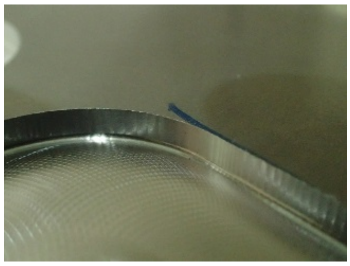
２．４．加工実験

加工材料は 450mm×250mm×65mm のアルミニウム合金（A5052）、四隅をボルトでパレットに固定し、100mm×110mm×最大軸方向切込みのポケット加工を行った。

工具直径がφ26mm において、表３、表５の条件で加工を行った加工面を図６に示す。



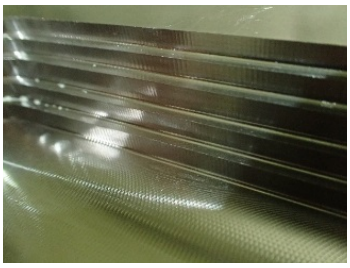
(a) A 号機　φ26mm



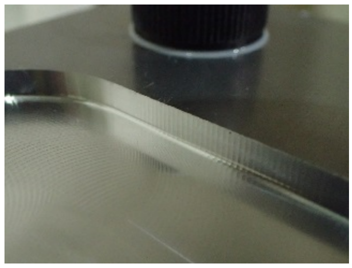
(b) B 号機　φ26mm

図６　φ26mm 加工面

また、φ33mm において、表４、表５の条件で加工を行った加工面を図７に示す。



(a) A 号機　φ33mm



(b) B 号機　φ33mm

図７　φ33mm 加工面

両加工機のどの条件においても加工面にびびり痕は確認されなかった。

３．結果・考察

今回の加工実験における各条件の単位時間当たりの切り屑排出量と加工中の最大主軸負荷の比較を行った。A 号機のφ26mm の結果を図８に、φ33mm の結果を図９に示す。

工具直径がφ26mm では、想定通り送り速度の増加に伴い主軸負荷が増加したが、いずれの条件でも主軸への影響を考慮して設定した上限値の 80%を超えることはなかった。４番の条件が最も排出量の多い加工効率の高い条件であった。

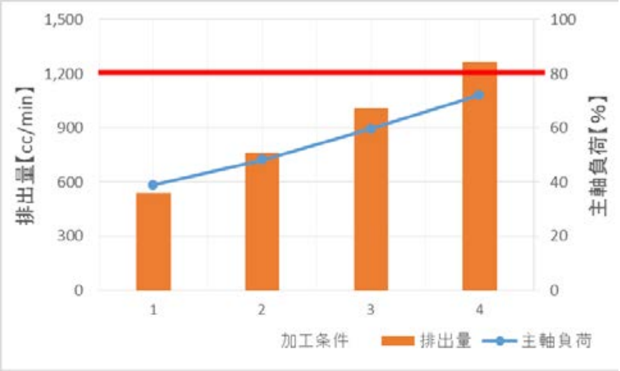


図８　A 号機　φ26㎜加工結果

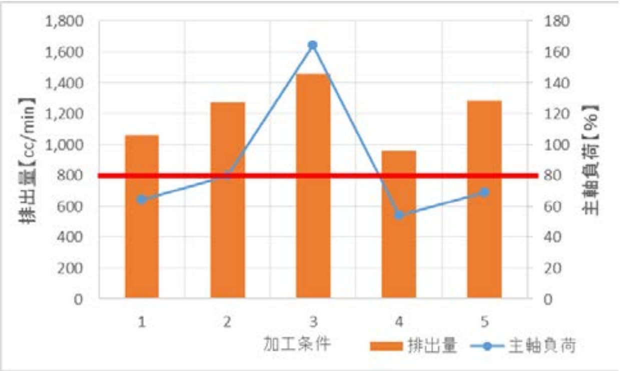


図９　A 号機　φ33㎜加工結果

φ33㎜においても、送り速度の増加に伴う主軸負荷の増加は同じであったが、主軸回転数の高い３番の条件では負荷が 100%を超えてしまった。これは、主軸回転数の増加に伴い切削負荷が増加し、主軸出力(kW)が減少したため主軸負荷（%）が増加したと考えられる。主軸負荷 80%以下で５番の条件が最も排出量が多い効率の高い条件であった。

A 号機での両工具結果を基に、実際の加工現場で使用しやすい数値を丸めた条件を検討し、表５の加工条件を設定し B 号機で実験を行った。結果を表６に示す。

表６　B 号機加工結果

B	主軸負荷【%】	排出量【cc/min】
φ26	69.63	1,048
φ33	75.39	1,188

B 号機の実験でも主軸負荷は設定した上限を超えず、1,000cc/min を超える高い排出量の結果を得られた。

また、最大主軸負荷はスロット加工時に発生しており、ポケットを広げる際のダウンカットでは常時半分程度の負荷にとどまっていた。

今回の実験で、工具１本当たり振動特性の測定に 30 分、安定限界線の作成・加工条件の選択に 30 分、加工実験に１時間、合わせて２時間程度で行えることがわかった。

４．結言

新規に導入した５軸マシニングセンタに対して、最適な切削条件を短時間で選定する手順を検討し、次の知見を得た。

- 切削振動解析システムを用いて工具まわりの振動特性を測定し、安定限界線から最適な切削条件を選定する手順を確立した。
- この手順は工具まわりの振動特性測定から加工実験まで１工具当たり２時間で実施可能であった。
- 切削条件はびびり振動の発生の有無の他に、マシニングセンタの主軸負荷が条件の上限として重要であることがわかった。

これにより、切削条件を加工実験５回で選定し、時間は２時間程度で行えるようになった。今後、提案企業では、今回の加工条件を使用することになった。

参考文献

1）鈴木教和ら: 強制・自励型びびり振動を回避するエンドミル加工条件の統合的検討. 精密工学会誌, 75, 7(2007), 908-914

AI・IoT 技術を用いた人物検出と遠隔監視の組み合わせ技術の開発

Development of combination technology of person detection and remote monitoring using AI and IoT technology

技術開発部 生産・加工科　稲葉勉　太田悟　尾形直秀
応募企業　日本クリーンシステム株式会社

ゴミドラムの対外保安のため、投入・排出口付近に設置した監視カメラから人物を検出し、算出した人数をクラウド型データベース（DB）に登録・グラフ化するシステムを開発した。これは、AI 技術のひとつであるディープラーニングによる人物検出システムと、IoT 技術の一つであるクラウド型データベース（DB）との連携により実現した。

Key words: AI、IoT、YOLO、ThingSpeak、物体検出

１．緒言

応募企業の日本クリーンシステム社は、「ゴミック」および「ゼロ・ゴミック」というシリーズで、国内外で１，５００件を超えるゴミドラムの納入実績（２０１８年１１月現在）があり、同製品の開発の他に保守・監視サービスも提供している[1]。

ゴミドラムとは、ゴミの圧縮・減容化による省スペース化と、自動排出等による省電力化の機能を有する安全かつ衛生的なゴミ貯留装置である。ゴミドラムは、ゴミの搬入搬出時に投入口や排出口で大型の鉄製扉や専用のゴミ容器が動作するため、周囲に人が存在する状態で動作すると危険である。

しかし、現時点でのゴミックの安全対策は、ゴミドラム動作中にパトライトが点灯し周囲に注意を促すのみに限られている。このため、ゴミックには人身事故防止に向けた更なる安全性向上対策が求められている。

本研究では、AI 技術に基づく物体検出システムが検出した人の数を算出するシステムを開発した。さらに、その算出された人数を、IoT 技術に基づくクラウド型 DB システムに登録しグラフ化する AI と IoT の連携システムの開発を行った。

２．実験と結果

本研究は、ゴミドラム周辺に現れる人を検出・計測し、その結果を蓄積することを目的とする。

ゴミドラム周辺に設置する監視カメラ画像の人物検出にはYOLO[2, 3]を利用した。また、その検出結果を登録するDBには、クラウド型DBであるThingSpeak[4]を利用した。

YOLO が画像フレーム単位で推論する人物検出結果を利用して、画像フレーム単位の検出人数（瞬間値）、単位時間毎の検出人数(最大値／平均値)を算出する。これらの結果を ThingSpeak に登録する機能を開発した。開発環境は以下の通りである。

なお、Keras[5, 6]は、TensorflowやTheanoなどのテンソル計算を高速に行うディープラーニング用フレームワークをバックエンドに持つ、ディープラーニング向けの上位ライブラリである。

OS	Ubuntu16.04TLS
メモリ	16GB
CPU	INTEL　XEON E5-1620v4@3.50GHZx8
GPU	GeForce GTX1080 Ti/PCIe/SSE2
OS 種別	64bit
ディスク	500GB
CUDA	V9.0.176
物体検出	Keras 版 YOLO-v3
クラウド DB	ThingSpeak
Web カメラ	Buffallo BSWHD06M

２．１．ＹＯＬＯ

YOLOは、リアルタイム物体検出アルゴリズムである。Darknet[7]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のモデルを図１に示す。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、同時に行ってしまう点にある[8]。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、Kerasで実装されたYOLO-v3[9]をgithubサイト[10]からダウンロードして利用した。検出対象は人間のみであるため、学習モデルを新たに作成する必要はないと判断し、Darknet版YOLOの実装者であるJoseph Chet Redmon氏のWebサイト[11]からダウンロードした学習モデルを利用した。ただし、この学習モデルは、Darknetで学習したモデルである

事業課題名「AI 人物検出と IoT 遠隔監視の連携技術の開発」

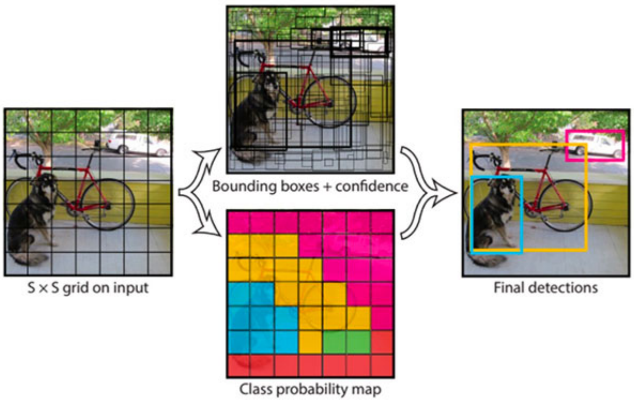


図１　YOLO のモデル

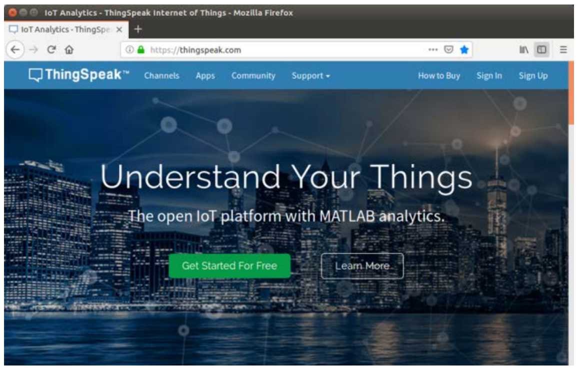


図２　ThingSpeak トップサイト

ため、Keras 用にコンバートしてから利用する。

また、Keras 版 YOLOv3 を動かすには、以下に示す依存ライブラリの導入が必要である。

・Keras-2.2.4　　・Tensorflow-gpu-1.5.0
・numpy-1.16.2　　・matplotlib-3.0.3
・pillow-5.4.1　　・OpenCV-3.3.0

２．２．ThingSpeak

ThingSpeak は、図２に示す MathWorks 社の提供するクラウド型のデータベースサービスである。HTTP/HTTPS プロトコル経由で IoT データをインターネット上に蓄積し、グラフ化して閲覧することが可能なアプリケーションである。

インターネットを介して ThingSpeak へデータを登録する際には、API Key と呼ばれる英数字からなる１６文字のセキュリティキーを利用する。登録されたデータを元にして、フィールドと呼ばれる領域にグラフを作成することでグラフ化する。

ThingSpeak は、利用形態に応じて表１に示すように４つのライセンス形態が用意されている。ただし、個人利用でかつ小規模プロジェクトの場合に限り無償で利用することができる。無償版には、１日当たりの通信回数やメッセージの更新間隔に制限が設けられている。今回は、この無償版を用いて開発および検証を行った。

２．３．追加機能開発

本研究で開発した新機能を以下に示す。

２．３．１．人物検出評価

YOLO による動画の物体検出は、動画を構成する個々のフレーム画像毎に実施される。このため、人物検出は以下に示す値を算出することとした。

・瞬間値

動画を構成する全てのフレーム画像について、検出された人数を個々に取得する。

表１　ThingSpeak のライセンス形態

ライセンス形態	対象用途
Standard	商用、官庁、役所、その他組織
Academic	教育、学術研究、学位授与機関
Student	学位授与機関の学生
Home	個人的利用のみ（上記以外）

・最大値

指定したフレーム画像数（以後、解析サイクルと呼ぶ）単位で、その間に検出された人数の最大値を取得する。なお、解析サイクルは可変とした。

解析サイクルが 100 の場合、100 枚のフレーム画像で検出された人数の最大値が取得される。

・平均値

指定した解析サイクル間に検出された人数の平均値を取得する。解析サイクルが 100 の場合、100 枚のフレーム画像で検出された人物数の平均値が取得される。

２．３．２．ThingSpeak へのデータ登録

ThingSpeak では、外部からのデータ登録のために HTTPS ベースの API が提供されている。そこで、ネットワーク経由のファイルダウンロードやアップロードを実施するための curl コマンドを用いて、以下のフォーマットで ThingSpeak へのデータ登録を実施する。

ここで、API Key は、インターネットを介して ThingSpeak へデータを登録する際に利用するセキュリティキーであり、ThingSpeak の利用画面から確認できる。

［データ登録フォーマット］
curl https://api.thingspeak.com/update?￥
api_key=”API Key” &field1=”登録するデータ”

なお、ThingSpeak では、検出データを複数まとめて登録することも可能である。例えば、ThingSpeak のフィールド１に検出人数の瞬間値、フィールド２に最大値、フィールド３に平均値を登録する場合、API Key

が“abadefgh1234ijkl”であるとすれば、以下のようにして登録することが可能である。

[データ登録コマンド例]

```
curl https://api.thingspeak.com/update? ¥
api_key=” abadefgh1234ijkl &field1=2 ¥
&field2=3 ¥&field3=2.1
```

本開発では、Python からの呼び出しとして実装したため、上記のコマンドを文字列として変数 cmd で受け、subprocess.call を用いて以下のように実装した。

```
subprocess.call(cmd.split())
```

なお、subprocess は Python から外部コマンドを実行するモジュールであり、call メソッドを利用して外部コマンドを実行する。この際、cmd に文字列として格納されている実行コマンドは、split メソッドにより配列として与えられる。

２．４．動作検証

試作したシステムを実際にゴミドラム近辺に設置することができなかったため、別途取得した監視カメラの動画（録画）をもとに評価した。

図３は、ゴミドラムの投入口前に現れた人を検出したことを示す画像である。体の一部であっても人であることを認識し、それを Bounding Box（図中の青枠）で囲み、人であると判断した確率と共に画面上に表示される。

図４～６は、動画から検出された人数の瞬間値、最大値、平均値を ThingSpeak へ登録した結果のグラフである。解析サイクルは 600 で実施した。YOLO の処理速度が約 10fps であることから、ThingSpeak への登録は約 1 分毎に実施される。検出された人数の瞬間値、最大値、平均値が正しく登録されていることが確認できた。

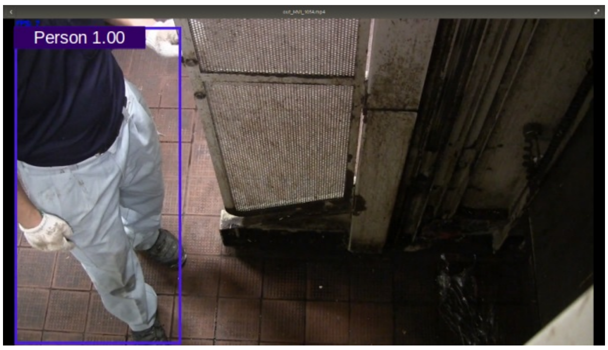


図３　人物検出結果画面の例

図４　検出人数（瞬間値）のグラフ

図５　検出人数（最大値）のグラフ

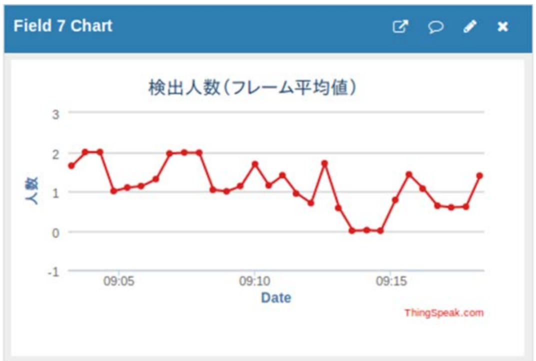


図６　検出人数（フレーム平均値）のグラフ

また、Web カメラで撮影した動画においても、リアルタイムで上記と同様に動作することを確認しており、本システムの実現可能性を確認した。

３．結言

本研究では、ゴミドラム付近に設置した監視カメラの映像を用いて、ゴミドラムの投入・排出口近辺に現れた「人」を YOLO により検出し、その数をクラウド型 DB である ThingSpeak 上に登録するシステムを開発した。「人」の検出数は、動画を構成する画像フレーム毎の評価値である「瞬間値」、任意の数のフレーム数における「最大値」、および「平均値」として取得することができる。

これらの検出結果を利用してゴミドラムの動作を制御することにより、ゴミドラム周辺における作業員等の人身事故防止等、ゴミドラムの安全性を向上させることが可能となった。

参考文献

１）“日本クリーンシステム株式会社　ウエブサイト”. http://www.jcs-co.com/, (参照 2019-04-05).

２）“YOLO　ウェブサイト”. https://pjreddie.com/darknet/yolo/. (参照 2019-04-03).

３）Redmon, Joseph, et al. “You only look once: Unified, real-time object detection.” arXiv preprint arXiv: 1506. 02640, 2015.

４）“ThingSpeak　ウエブサイト”. https://thingspeak.com/.(参照 2019−04−05).

５）“Keras Web サイト”. https://keras.io/. (参照 2019-04-05).

６）“Keras 日本語版 Web サイト”. https://keras.io/ja/. (参照 2019-04-05).

７）“Darknet Web サイト”. https://pjreddie.com/darknet/. (参照 2019-04-05).

８）藤田一弥, 高原歩: 実装ディープラーニング,オーム社, (2016).

９）Joseph Redmon and Ali Farhadi.”Yolo9000: Better, faster, stronger”. arXiv preprint arXiv: 1612. 08242, 2016.

１０）“Keras-yolo3 GitHub サイト”. https://github.com/qqwweee/keras-yolo3/. (参照 2019−04−05).

１１）“Joseph Chet Redmon Website”. https://pjreddie.com/media/files/yolov3.weights/. (参照 2019−04−05).

PLD を用いたユーザビリティの高い電源装置用 UI の開発

Development of high usability UI for power supply device using PLD

技術開発部 プロジェクト研究科　菅野雄大　吉田英一
応募企業　有限会社エイチ・エス・エレクトリック

応募企業ではベルトコンベア上の不良部品等の仕分け機に使われるモータの電源装置を開発している。この装置は、モータの加減速制御のために、ROM に書き込まれた電流制御パターン（８パターン）をロータリディップスイッチにより変更する仕様である。しかし、設定パラメータの表示機能が無いため、設定状態が分かりにくいという課題があった。そこで、プッシュボタンによりパラメータの値を変更でき、７セグメント LED に設定値を表示し、電源を切っても設定パラメータを記憶できる、従来よりもユーザビリティの高いユーザインターフェースを開発した。

Key words: UI、PLD、EEPROM、MAX10

１．緒言

応募企業は工場の製造ラインにおいて、ベルトコンベア上を流れてくる不良部品等を排出するための仕分け機に使われるアクチュエータ（モータ）の電源装置を開発している。この装置は、モータの加減速制御のために、図１のように電流の立ち上がり時間 T_1[ms]、ピークの継続時間 T_2[ms]、立ち下がり時間 T_3[ms]のパラメータで電流制御パターンを設定する仕様である。制御には Intel 社(旧アルテラ社)製 CPLD　(Complex Programmable Logic Device)「MAXⅡ」を使用し、あらかじめ ROM に書き込まれた８つの電流制御パターンをロータリディップスイッチにより変更するユーザインターフェース（以下 UI）であった。図２に本装置の制御基板を示す。しかし、以下に示す課題があり、ユーザビリティの高い UI が求められていた。

＜課題＞

１） 設定パラメータの表示機能が無いため、設定状態が分かりにくい。

２） 設定パラメータは予めプログラムされた８つの制御パターンのみ使用可能であり、それ以外のパターンへの変更・保存ができない。

３） CPLD「MAXⅡ」が、最新の PLD に比べコストが高い。

表１に要求仕様を示す。上記の課題を解決するため、最新の Intel 社製 FPGA「MAX10」の使用を提案した。比較的安価な上、CPLD に比べ多機能な FPGA を使用することで今後の開発の幅を広げることが可能となる。図１に示すモータの電流制御パターンをプッシュボタンにより設定し、パラメータの値は、７セグメント LED に表示し、電源を停止しても設定パラメータを記憶する UI を試作開発した。

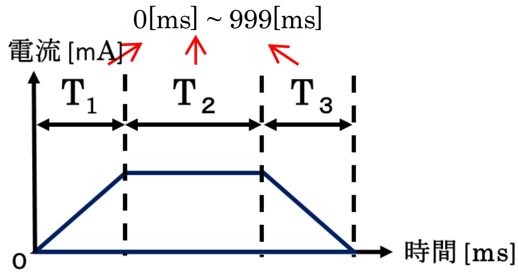


図１　電流制御パターンと設定時間パラメータ

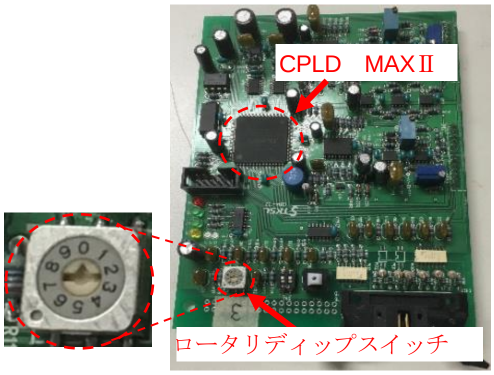


図２　制御基板

表１　課題と要求仕様の対応関係

No.	課題	要求仕様
1	電流制御パターンの表示	・設定した電流設定値パターンを表示できること
2	設定パラメータの変更・保存	・数値による設定変更ができること ・電源を停止しても設定パラメータを記憶すること
3	制御基板のコスト	・安価な FPGA MAX10 を搭載 ・周辺デバイスを搭載

事業課題名「PLD を活用した電源装置用ユーザインターフェースの開発」

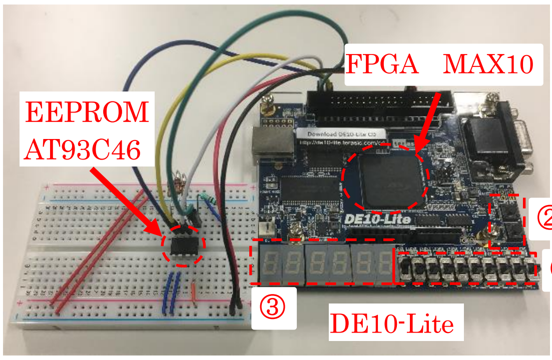


図３　試作回路の外観

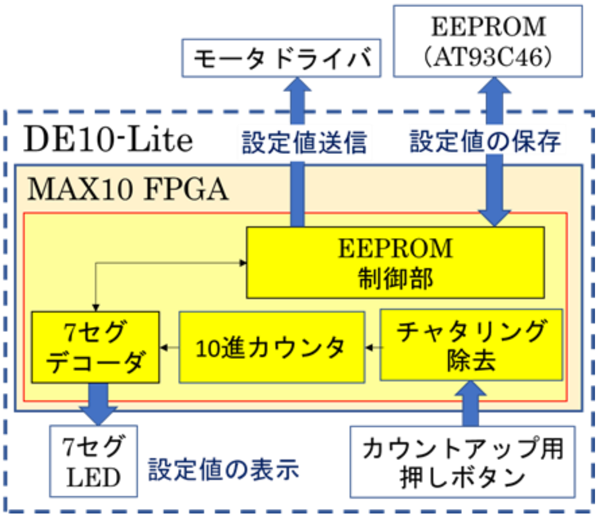


図４　UI のシステム構成

２．実験と結果

２．１．使用機器

本事業では、表１に示す要求仕様を満たすため、以下の機器を使用した。

試作回路の外観を図３に、システム構成を図４に示す。

・制御基板

制御基板は、Terasic 社製 DE10 - Lite を使用した。DE10-Lite は、不揮発性 FPGA である Intel 社製の MAX10 を搭載し、USB ケーブルにより電源供給やプログラムの書き込みが可能である。MAX10（型番:10M50DAF484C7G）は、プログラマブルロジックエレメント数 50K、メモリを 1638K ビット搭載している。また、周辺回路には６桁の７セグメント LED、２個のプッシュボタン、１０個のスライドスイッチ、４０ピンの汎用入出力（以下 GPIO）拡張ヘッダピン、１０個の LED 等を搭載している[1)]。これらの７セグメント LED や入力デバイスを使い、電流の立ち上がり時間 T_1[ms]、ピークの継続時間 T_2[ms]、立ち下がり時間 T_3[ms]を表示・設定変更する。

・不揮発性メモリ

８つの電流制御パターンの設定パラメータ値やユーザ設定値を記憶する不揮発性メモリとして、アトメル社製シリアルEEPROM（Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory）「AT93C46」を使用した。EEPROM は、プログラムからデータの書き込みと読み出しができるため、プログラム実行中にデータを変更し、電源をOFFにしてもデータの内容を保持することができる。AT93C46は1Kビットの記憶領域を持つEEPROMで、1バイトのデータを128個記憶することができる。

MAX10 内蔵の ROM（不揮発性メモリ）の使用も可能だが、FPGA 内に演算処理装置（CPU）に相当する回路を組む必要があり、Intel 社のソフトコアプロセッサ Nios II を搭載する必要がある。応募企業ではこれまで Nios II を使用していないことから、納入後のメンテナンスを考慮し、今回は EEPROM を使用する。

・通信

DE10-Lite の４０ピン GPIO 拡張ヘッダピンを介して MAX10 と EEPROM を接続し、3.3V 給電して Microwire 通信で読み書き制御を行う。

・誤動作防止機構

電源投入時の誤動作書き込み防止のため、図３のブレッドボード上にプルアップ抵抗を実装し、デバイス不使用時はチップ・セレクトを無効にする。

２．２．プログラミング

回路のプログラミングとデバッグは、Intel 社が無償提供している統合開発環境 Quartus Prime17.1 を利用し、ハードウェア記述言語である VHDL 言語により回路を記述した。

２．３．試作回路の機能及び動作確認

図５①のスライドスイッチ（以下 SW）(1)～(7)使用し、表２に示すとおり、EEPROM へのデータを書き込む「書き込みモード」と、「読み取りモード」の変更や、設定パターンと設定値の変更を行う設計とした。なお、誤設定を防ぐため、SW(3)～(7)の２つ以上が High のときは設定が反映されないようにした。

以下に機能ごとの操作手順について述べる。

１）設定パターン及び時間パラメータの変更

SW(3)を High にし、図３及び図５②のプッシュボタンを押すことで８つの設定パターン（P1～P8）を切り替えることができる。同様に SW(4)を High にした時は時間パラメータを変更できるようにした。ただし、７セグメント LED に表示する都合上、図６のように、時間 T_1 は A、T_2 は b、T_3 は C と表示する設計とした。

２）設定パラメータの表示

SW(1)が Low の時は読み取りモードとなる。

EEPROMから読み込んだ設定値を７セグメントLEDに表示し、前述の１）の操作により、設定パターン及び時間パラメータを表示することができる。

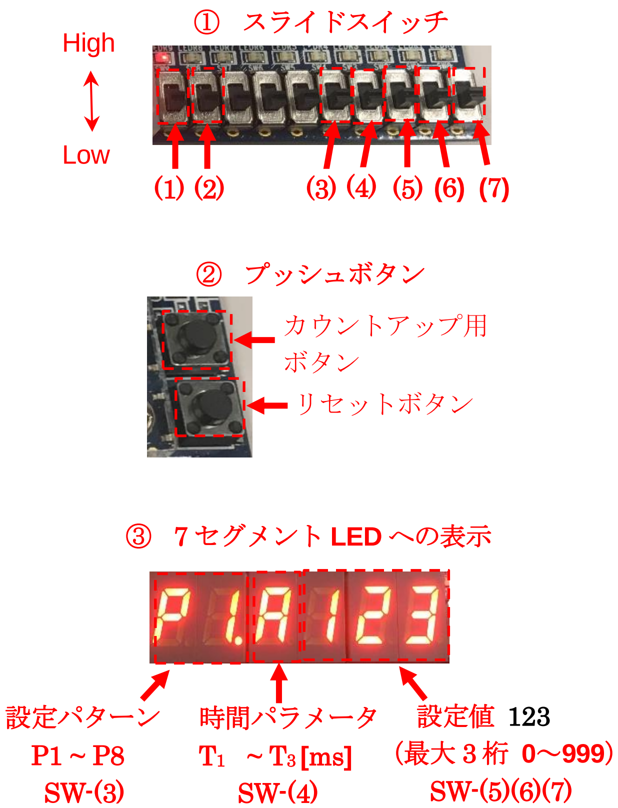


図５ 操作仕様

表２ スライドスイッチ（SW）の対応関係

SW	SWの状態がHigh時の動作
(1)	書き込みモード
(2)	設定値をROMへ書き込み（SW(1)がHighの時）
(3)	設定パターンの変更
(4)	時間パラメータの設定・表示の変更
(5)	設定値３桁目の設定・変更
(6)	設定値２桁目 〃
(7)	設定値１桁目 〃

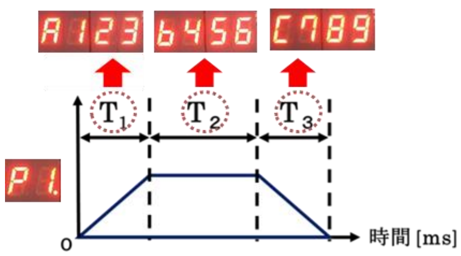


図６ 時間パラメータと７セグメントLED表示の対応関係

表３ EEPROM書き込み用アドレス番地

Pattern	1桁目	2桁目	3桁目	
1	0 番地	1 番地	2 番地	A (T1)
	3 番地	4 番地	5 番地	b (T2)
	6 番地	7 番地	8 番地	C (T3)
2	9 番地	10 番地	11 番地	A (T1)
	12 番地	13 番地	14 番地	b (T2)
	15 番地	16 番地	17 番地	C (T3)
8	63 番地	64 番地	65 番地	A (T1)
	66 番地	67 番地	68 番地	b (T2)
	69 番地	70 番地	71 番地	C (T3)
	72 番地	73 番地	74 番地	
	A (T1)	b (T2)	C (T3)	

３）設定値の変更

SW（1）がHighの時は書き込みモードとなる。上記①の操作とSW(5)～(7)により、時間パラメータを0～999[ms]まで設定値を変更できる。SW(7)がHighの時に図５②のプッシュボタンを押すことで、設定値の１桁目をカウントアップして変更することが可能である。同様にSW(6)、(5)が設定値の２桁目、３桁目に対応しており、各桁0～9までの値を変更できる。７セグメントLEDに表示された設定値のEEPROMへの書き込みは、SW(1)がHighの状態で、SW(2)をHighにすることで行う。

４）パラメータ設定値の記憶

表３に示すとおり、EEPROMのアドレス0～2番地には、設定パターンP1の時間パラメータT_1(表示はA)の1～3桁目の設定値を、また、72、73、74番地には、各々７セグメントLED上に時間パラメータのA、b、Cと表示するためのデータを書き込む設計とした。

※ ７セグメントLEDでは、大文字のBは数字の８と同じ表示となるため、小文字のbを使用。

Ⅰ～Ⅳの操作により、図５③のように、スライドスイッチ及びプッシュボタンを使用して、設定パターンをP1、時間パラメータをA、設定値を123と設定し、それらが７セグメントLEDに表示されることを確認した。また、EEPROMを使用した設定値の書き込み及び読み込みが可能であることを確認した。

３．結言

本事業では、Intel社のMAX10を使用し、以下の機能を有するUIを開発した。

- 電流制御パターン（電流の立ち上がり時間T_1[ms]、ピークの継続時間T_2[ms]、立ち下がり時間T_3[ms]

のパラメータ）を設定が可能。

- プッシュボタンによりパラメータ値の変更が可能。
- ７セグメントLEDに設定値を表示。
- 電源を停止しても設定パラメータがメモリに記憶される。

さらに、従来の回路に比べ、MAX10 を使用することでコスト削減が図られ、設定値の表示機能や、設定値の書き換えが可能となり、より分かりやすく、操作性の良いUIを開発することができた。

応募企業では、今回試作開発した回路を参考にユーザビリティの高い UI の回路設計及び開発を行う予定である。

参考文献

１）“DE10-Lite User Manual”, Terasic 社, http://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archiva.pl?Language=English&CategoryNo=234&No=1021&PartNo=4, (参照 2018-10-10).

ROS と Gazebo を用いたドローン制御シミュレーション環境の構築

Construction drone controlling simulation using ROS and Gazebo

技術開発部 プロジェクト研究科　柿崎正貴　菅野雄大
応募企業　株式会社日本アドシス

PC 上で容易にドローンの飛行シミュレーションが可能で、シミュレーションと同一プログラムにより実機を制御し実験することが可能な統合テスト環境の構築を行った。また、実機を用いた飛行試験を行い、飛行経路とデータ伝送周期の測定を行った。飛行経路を測定した結果、実飛行とシミュレーションの飛行共に、プログラムで指定した経路の飛行が可能であった。また、データ伝送周期を測定した結果、シミュレーション上では一定の伝送周期であるのに対し、実機では制御 PC との距離に依存した伝送周期の低下が見られた。

Key words: シミュレーション、ドローン、インフラ点検、プラントメンテナンス

1. 緒言

株式会社日本アドシスでは、ドローンで撮影した動画を用いた構造物検査（鉄塔・ビル壁面検査、太陽光パネル検査等）のビジネス展開を見据え、技術開発を行っている。しかし、ドローンを飛ばして実験するための試験場を近隣に容易に確保できないという課題があり、本事業へ応募があった。

図１に無人航空機の飛行の許可が必要となる空域[1]を示す。改正航空法によると、重量 200g 以上の無人航空機において、下記の空域を飛行する際は国土交通省への申請が必要となる。

- 空港等の周辺（進入表面等）の上空の空域
- 150m 以上の高さの空域
- 人口集中地区の上空

また、それ以外の区域においても、土地所有者の許可を受けた上で飛行する必要がある。

他方、応募企業は構造物検査を、ドローンの自動制御・自律制御により行うことを目指している。そのためには、搭載したセンサ情報から姿勢推定や加減速制御等を行う制御方法を確立し、ソフトウェアに実装する必要がある。また、センサの故障や突風等の外力による影響、衝突等の想定外の事象に対する例外処理のプログラムを的確に実装しなければ、実験や実運用時の事故等のリスクが高い。そのため、実際の飛行実験の前に、シミュレーションを用いて制御方法やシステム全体を十分に検証する環境が必要である。

そこで、PC 上で容易に飛行シミュレーションが可能で、シミュレーションと同一のプログラムにより実機制御が可能な統合テスト環境の構築を行った。さらに、実飛行とシミュレーションの一致度を確認するため、実際のドローンを用いた試験を行い、飛行経路とデータ伝送周期について比較を行った。

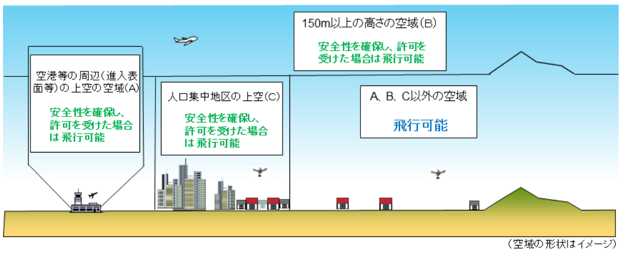


図１　無人航空機の飛行の許可が必要となる空域[1]

2. 実験

2. 1. 使用する機器とソフトウェア

2. 1. 1. ドローン

ドローンの機体は、Parrot 社の AR.Drone 2.0[2]を使用した。表１に本機体の仕様を示す。選定した理由は以下の点である。

- プログラムによる自動制御が可能。
- 画像・映像を取得するためのカメラが搭載。
- 比較的安価に入手可能。

2. 1. 2. ソフトウェアフレームワーク

制御システムを構築する際、ロボットシステム開発用のオープンソースソフトウェアフレームワークである Robot Operation System[3]（以下、ROS）を使用した。理由は以下の点である。

- AR.Drone 2.0 が ROS に対応（メーカが公式に ROS パッケージを提供[4]）。
- オープンソースのフリーウェアであり、コーディングの自由度が高い。
- BSD ライセンス（一部コードを除く）のため、商用利用可能。
- ハイテクプラザに知見がある。

ROS では、「ノード」と呼ばれるプログラムを複数実行し、ノード間でデータの送受信を行うことで一つのシステムを構成する。本事業では、シミュレーションや制御、データ送受信等、機能毎にノードを作成し

事業課題名「オープンソースソフトウェアを活用したドローン制御手法の検証とシミュレーション環境の構築」

表１　AR.Drone 2.0の仕様

重量	420g（屋内ハル装着時）
サイズ	520 x 520 x 110mm（屋内ハル装着時）
プロセッサ	ARM Cortex A8 1GHz 32-bit プロセッサ DSPビデオ 800MHz TMS320DMC64x
OS	Linux 2.6.32
先端カメラ	1280 × 720pixel（HD）, 30fps
底部カメラ	320 × 240pixel（QVGA）, 60fps
コーデック	H.264
モータ	14.5W（11.1V） × 4
バッテリー	1000mAh（Elite Editionに付属）
最大飛行時間	12min
通信	Wi-Fi - IEEE802.11b/g/n
最大接続距離	50m
センサ	加速度(3軸)、角速度(3軸)、磁気(3軸)、 気圧、超音波(高度計測用)

た。ドローンに搭載するカメラやセンサデバイスのデータは、ROS で規定される各種データ型に変換したうえで、ノード間の送受信を行った。

２．１．３．シミュレータ

シミュレータは、Gazebo[5]を使用した。Gazeboはオープンソースでライセンスフリーな３次元動力学シミュレータである。ROS と同様に Open Source Robotics Foundation[6] が開発・保守しており、ROS との親和性が高く、シームレスな連携が可能である。

本事業では、Gazebo を用いたシミュレーション環境を構築し、ROS で開発した制御プログラムを実行することにより、シミュレーションを行った。なお、この制御プログラムは、そのまま実機の制御に用いることが可能である。

２．２．シミュレーション環境の構築

シミュレーション環境の構築にあたり、Hongrong Huang らが開発した tum_simulator[7] を利用した。これは、クワッドローター用のシミュレータを AR.Drone 2.0 向けにカスタマイズしたもので、Gazebo 上に AR.Drone 2.0 の 3D モデルを構築し、ROS との通信をエミュレートするプログラムである。本事業では、このプログラムをベースに、構造物検査へ向けた飛行実験のシミュレーション環境を構築した。

図２にシミュレーション環境の表示画面を示す。図２左ウィンドウには、PC 上に構築した仮想空間を表示している。この空間にドローンの 3D モデルを配置

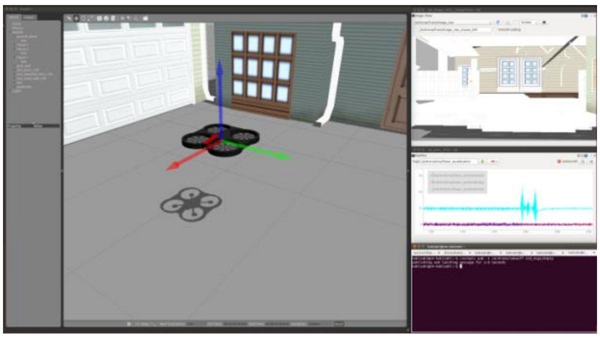


図２　シミュレーション環境の表示画面

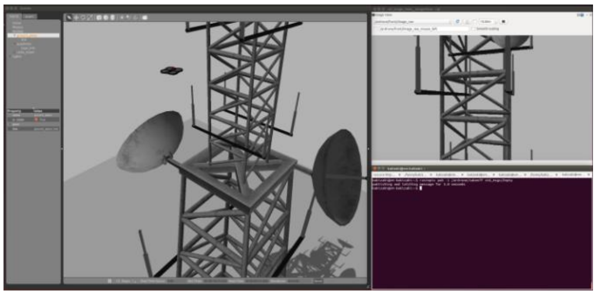


図３　鉄塔（電波塔）の模擬検査環境

し、プログラムを実行することにより飛行シミュレーションを行う。図２右上ウィンドウは、シミュレーション上でドローンが取得したカメラ画像である。機体先端に搭載されているカメラは、実機と同様に 1280×720pixel の画像を 30fps で取得している。取得した画像は、画像表示用のノードにより可視化した。

また、機体の動作解析を行うため、シミュレーション上のドローンに搭載されたセンサから伝送されるデータの可視化を行った。図２右中段のウィンドウは、3 軸加速度センサの値を時間経過でプロットしたグラフを表示している。加速度センサから伝送されるデータレートは実機と同様の 200Hz に設定し、グラフ表示用のノードにより可視化した。

ドローンの制御方法は、以下に示す方法を検証し、各々の方法で制御可能であることを確認した。

- Character User Interface(以下、CUI)制御
  コマンド制御。離着陸や加減速の制御が可能。
- コントローラ制御
  制御 PC に USB 接続した PS3 コントローラによる制御。離着陸、加減速制御が可能。
- プログラムによる自動制御
  TUM の J. Engel らにより開発された tum_ardrone[8] を用いた制御。単眼カメラと慣性センサの情報から状態推定を行う。離着陸や加減速制御に加え、位置制御、姿勢制御が可能。スクリプト実行で自動飛行が可能。

また、鉄塔（電波塔）をシミュレーション上に模擬した環境を図３に示す。図中左ウィンドウが仮想空間、右上ウィンドウがドローンのカメラ画像である。図に示すように、様々な構造物検査を模擬したシミュレーションが可能となった。

２．３．実機を用いた動作確認

シミュレーションと同様の実機の制御が可能であるか確認した。実機の制御には、SFU の Mani Monajjemi らにより開発された ardrone_autonomy[9] に含まれる ardrone_driver を用いた。機体との通信は Wi-Fi (IEEE 802.11n) で行い、制御 PC (Dell Inspiron 14 5000) からデータの送受信を行った。

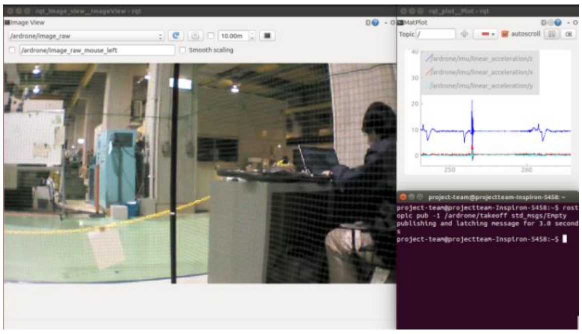


図４　制御 PC の表示画面

制御方法について、CUI 制御、コントローラ制御、およびプログラム制御を検証し、それぞれ制御が可能であることを確認した。図４に制御 PC の表示画面を示す。図４左ウィンドウでは、ドローン先端に搭載されたカメラからの映像を画像表示用のノードにより可視化している。また、図４右上ウィンドウには、ドローン搭載の３軸加速度センサの値をグラフ表示している。

２．４．実飛行とシミュレーションの比較

２．４．１．飛行経路

自動制御による実飛行の経路とシミュレーションの飛行経路について、制御プログラムで指定した飛行経路との差をそれぞれ比較した。制御には tum_ardrone を使用し、以下に示す①～⑤のターゲット地点を辿るスクリプトを作成、実行することで比較を行った。

①　x=0.0m,　y=0.0m
②　x=1.0m,　y=0.0m
③　x=1.0m,　y=1.0m
④　x=0.0m,　y=1.0m
⑤　x=0.0m,　y=0.0m

図５に実飛行経路を測定するための実験環境を示す。実験は無風の屋内空間で行い、実飛行の動作解析にはモーションキャプチャシステム（Vicon Bonita B10）を使用した。なお、飛行範囲を 1m×1m に限定したうえ、z 方向（高度）の評価を行わなかった理由は、モーションキャプチャシステムの測定範囲の制限によるものである。また、シミュレーションの動作解析は、Gazebo から出力されるドローンの３次元座標をもとに行った。

図６は、実飛行経路（青）とシミュレーションの飛行経路(赤)をそれぞれ２次元プロットした図である。x=0.0m,　y=0.0m を開始地点として、離陸後 1m 上空でホバリングしたのち、上記①~⑤の地点（図６緑）を辿るよう制御を行った。結果、ターゲット地点へ向かう加減速制御はプログラム通り実行されたが、各々の地点で飛行経路にズレが生じた。③ x=1.0m, y=1.0m ターゲット地点通過時、実飛行で最大 23.4cm、シミュレーションで最大 21.1cm となった。

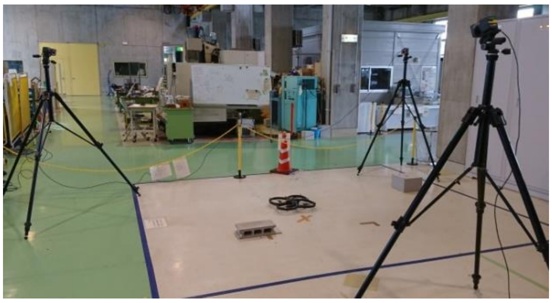


図５　実験環境

飛行経路にズレが発生した理由は、姿勢推定の精度低下に由来すると考えられる。カメラ画像による姿勢推定では、移動量をカメラ画像の画素移動から算出しているが、短距離の移動ではカメラ画像に差が生じにくいため、推定精度が低下する。また、IMU センサによる姿勢推定では、ノイズやオドメトリ算出時の累積誤差が原因となり、推定精度が低下する。さらに、姿勢推定の計算は 30～50Hz 程度で行われるため、これに由来する制御周期の遅延も推定精度低下の要因だと考えている。tum_ardrone を用いてより高い精度で飛行するためには、プログラムの各種パラメータが姿勢推定や飛行制御にどのような影響を及ぼすか調査し、実機に合わせてチューニングを行う必要がある。

２．４．２．データ伝送周期

シミュレーションでは一定周期でカメラや各センサからデータ取得を行っているが、実機からのデータ取得はドローンと制御 PC の通信状態に依存すると考えられる。そこで、データ伝送について実飛行とシミュレーションの間で差異が生じるか確認するため、実機に搭載されたカメラと IMU センサのデータ伝送周期を測定した。

測定は図７に示すように、地面に設置したドローンから水平方向に距離をとり、ドローンと制御 PC 間の距離に対するデータ伝送周期の変化を測定した。カメラと IMU センサについて、以下のデータを１つの単位として、制御 PC で取得可能な伝送周期を測定した。

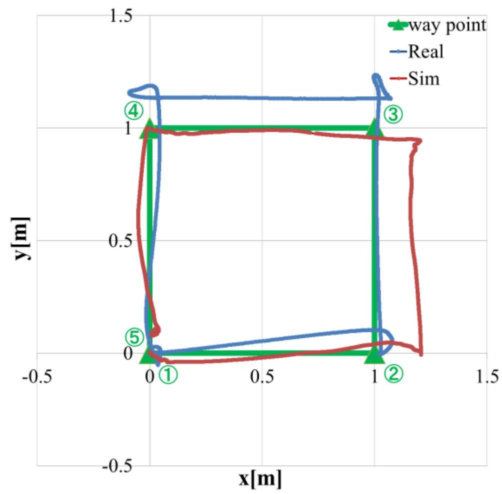


図６　飛行経路の比較

図７　データ伝送周期の測定環境

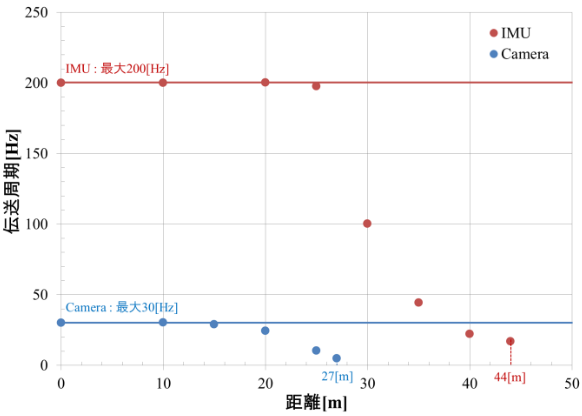


図８　データ伝送周期

- カメラ：1280×720pixel の画像データ
  (8bit データ　× 1280 × 720, 30fps)
- IMU　：加速度・角速度・オドメトリデータ
  (64bit データ　× 10, 200Hz)

図８に、ドローンと制御 PC 間の距離に対するデータ伝送周期の変化を示す。図中青点はカメラ、赤点は IMU センサデータの伝送周期を表している。結果、画像データは距離 15m 地点から伝送周期が低下し始め、27m 地点で受信が途切れた。また、IMU センサは距離 25m 地点から伝送周期が低下し始め、44m 地点で受信が途切れた。ただし、AR.Drone 2.0 の公称最大接続距離 50m 地点においては、ネットワーク接続が確立されていることを確認した。

ドローンと制御PC間の距離が見通し15m以内であれば、データ伝送周期に変化はないため、実飛行とシミュレーションの飛行との一致度が高いと考えられる。一方、距離が 15m 以上離れた場合や、障害物等によって通信が妨害された場合には、データ伝送周期の低下に由来する制御周期の遅延が発生することにより、実機の飛行精度が低下すると考えられる。

３．結言

PC 上で容易にドローンの飛行シミュレーションが可能なテスト環境の構築を行った。

また、実飛行とシミュレーションの飛行の一致度を確認するため、実際のドローンを用いた試験を行った。さらに、飛行経路とデータ伝送周期について比較を行った。

ROS と Gazebo を用いてシームレスなシミュレーション環境とすることで、シミュレーションで用いた制御プログラムの実機制御への適用が可能となった。また、ardrone_autonomy と tum_ardrone を用いて、同一のプログラムで実飛行とシミュレーションの飛行が可能であることを確認した。

さらに、実飛行とシミュレーションの飛行共に、プログラムで指定する経路に沿った飛行が可能であることを確認した。ターゲット地点と飛行経路のズレは双方に発生し、実飛行では最大 23.4cm、シミュレーションの飛行では最大 21.1cm であった。

伝送周期の比較では、シミュレーション上では一定の伝送周期であるのに対し、実機では制御 PC との距離に依存した伝送周期の低下が見られた。

今後、実飛行とシミュレーションの一致度を更に高めるため、気流等の外力やセンサノイズ等、飛行制御に影響を及ぼす因子をシミュレーション環境に反映してゆく。

参考文献

１）“航空：無人航空機の飛行の許可が必要となる空域について-国土交通省”. 国土交通省. http://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000041.html, (参照 2019-02-12).

２）“Parrot AR.Drone 2.0 Elite Edition | Parrot Store Official”. Parrot SA. https://www.parrot.com/jp/doron/parrot-ardrone-20-elite-edition?ref=#parrot-ardrone-20-elite-edition, (参照 2019-02-12).

３）“ROS.org | Powering the world's robots”. OpenSource Robotics Foundation. http://www.ros.org/, (参照 2019-02-12).

４）“Parrot for Developers”. Parrot SA. https://developer.parrot.com/, (参照 2019-02-12).

５）“Gazebo”. Open Source Robotics Foundation. http://gazebosim.org/, (参照 2019-02-12).

６）“Open Robotics”. Open Source Robotics Foundation. https://www.openrobotics.org/, (参照 2019-02-12).

７）“tum_simulator - ROS Wiki”. Open Source Robotics Foundation. http://wiki.ros.org/tum_simulator, (参照 2019-02-12).

８）“tum_ardrone - ROS Wiki”. Open Source Robotics Foundation. http://wiki.ros.org/tum_ardrone, (参照 2019-02-12).

９）“Reading from AR-Drone — ardrone_autonomy indigo-devel documentation”. https://ardrone-autonomy.readthedocs.io/en/latest/reading.html, (参照 2019-02-12).

自動織機へ適用可能な真綿織物設計手法の開発

Development of silk wadding fabric design method applicable to automatic loom

福島技術支援センター 繊維･材料科　長澤浩
応募企業　染織工房おりをり

現在、応募企業では、タテ・ヨコ糸に真綿を使用した織物で洗顔パフを作製して販売を行っているが、製品は全て手織り機を使用した手作りによるものである。しかし、手作りでは生産性に限界があるために今後の量産化に向けて自動織機を使用した製品作りを考えている。そこで、今回の事業で自動織機による製品作りの条件を探るために 6 種類の試作品を作り自動化に向けた織物規格を提案した。

Key words: 真綿、織物設計、絹糸、スリップ、絹紡糸

１．緒言

応募企業では、タテ・ヨコ糸に真綿を使用した織物で洗顔パフを作製して販売を行っているが、製品は全て手織り機を使用した手作りによるものである。しかし、手織りでは生産効率が悪いため、自動織機を使用した製品作りを考えているが、応募企業では自動織機による製織技術が無い。また、真綿を自動織機で製織する場合、タテ糸では毛羽による繊維の絡みや綜絖での摩擦による糸切れ問題、ヨコ糸では繊度（糸の太さ）が大きい等で杼への収納問題等があり、非常に困難とされている。そこで、当所がこれまで行ってきた絹織物の試織開発による製織技術を活用して素材や製織条件を見直し、自動織機で製織できる織物設計を行う。開発手順としては、先ず当所で織物の素材（タテ、ヨコ糸の糸種）、織物の組織等の織物設計を提案し、応募企業で試織開発を行う。試織結果から真綿洗顔パフ用織物に最適な織物設計を決定し、自動織機による製品化を目指す。

２．内容と結果

２．１．タテ糸生糸による織物試織開発

２．１．１．実験方法

従来の真綿パフ製品はタテ糸、ヨコ糸両方に真綿を使用しているが、自動織機で製織する場合、タテ糸に真綿を使用すると繊度ムラが大きく、織機の綜絖、筬に糸が入りにくく毛羽にもなりやすい。そこで、糸の表面が平滑で繊度ムラのない生糸を使用し、ヨコ糸と組織を変えた３種類の織物を試織した。

表１にヨコ糸を除いた３種類の織物（織物①～③）の織物設計表を示す。

２．１．２．織物試織と結果

表２－１に試織内容を、表２－２に試織結果を示す。また、図１に各織物の表面観察した写真を示す。タテ糸に生糸を使用した織物①～③は、タテ方向にスリップが発生している。これは、タテ糸に使用した生糸が平滑で引っ掛かりが無い糸のため発生したと考えられ、スリップの防止が課題となった。

表１　織物設計表（織物①～③共通）

項　目	内　容
経糸	生糸
織巾	20（cm）
筬密度	5（羽/cm）
筬羽数	100（羽）
経糸１羽引込本数	1（本）
経糸本数	100（本）

表２－１　試織内容

試料名	ヨコ糸	組織	目　　的
織物①	真綿	平	平組織は丈夫で摩擦に強くスリップがしにくい半面、糸の交叉点が多いためにタテ糸が真綿を覆うため風合いを損なう恐れがある
織物②	真綿 絹紡糸	平	ヨコ糸に真綿と絹紡糸を用いることで素材の凹凸や、太さの違うヨコ糸を一本交互に打ち込むことでタテ方向に凹凸が生じ、スリップの発生を防ぐ
織物③	真綿	綾	真綿の風合いと肌触りの良さが引き出せるように糸の交叉点の少ない綾組織を使用する

事業課題名「真綿洗顔パフ用織物の自動織機による試織開発」

表２－２　試織結果

試料名	結　　果
織物①	・組織の影響か風合いが硬い織物となった ・織物に手で触ると簡単にスリップが発生する ・製品として使用できない
織物②	・風合いが硬い ・織物に手で触ると簡単にスリップが発生する ・製品として使用できない
織物③	・風合いは柔らかく肌触りが良い ・織物に手で触ると簡単にスリップが発生する ・製品として使用できない

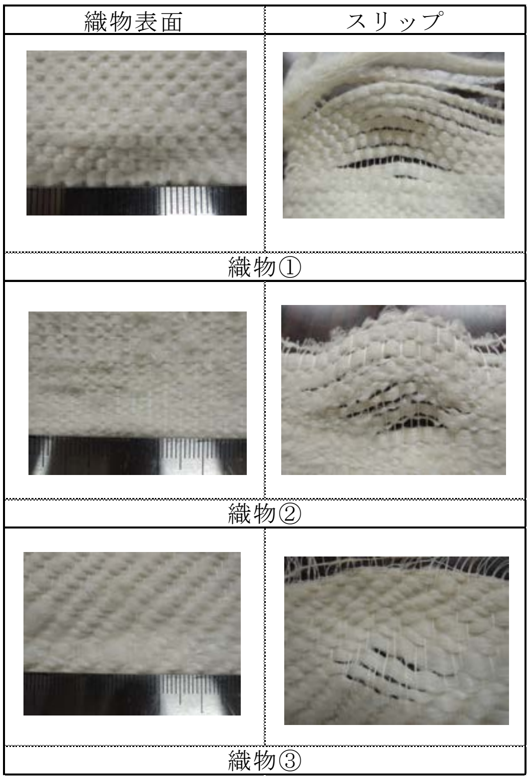


図１　織物①～③の表面観察とスリップ写真

２．２　タテ練糸と絹紡糸による織物試織開発

２．２．１．　実験方法

タテ方向のスリップを防止するために、練糸と絹紡糸を一本交互に配列することにした。練糸は柔らかくヨコ糸の真綿に馴染むためにスリップ防止に効果があると考えた。更に諸糸にすることによりタテ方向の摩擦が大きくなりスリップ防止効果が期待できる。また、絹紡糸は細いながらもリング加工が施されており風合いとスリップ防止が期待できる。

タテ糸に練糸と絹紡糸を使用して、ヨコ糸と組織を変えた３種類の織物設計を行った。

表３にヨコ糸を除いた３種類の織物（織物④～⑥）の織物設計表を示す。

表３　織物設計表（織物④～⑥共通）

項目	内容
経糸	①練糸 ②絹紡糸
織巾	20（cm）
筬密度	5（羽/cm）
筬羽数	100（羽）
経糸１羽引込本数	1（本）
経糸本数	100（本）

２．２．２．織物試織と結果

表４－１に試織した織物の試織内容を、表４－２に試織結果を示す。

また、図２に織物の２種類のタテ糸を、図３に織物④～⑥の表面観察写真を示す。

表４－１　試織内容

試料名	ヨコ糸	組織	目　　的
織物④	真綿	平	スリップが発生しにくく頑固な組織である平組織を用いる。半面、組織により交叉点が多いためにタテ糸が真綿の良さを損なう欠点もある
織物⑤	真綿 絹紡糸	平	ヨコ糸に真綿と絹紡糸で素材の凹凸と太さの違うヨコ糸を一本交互に打ち込むことによりタテ方向に凹凸が生じ、スリップが発生しにくくする
織物⑥	真綿	綾	真綿の風合いと肌触りの良さが引き出せるように交叉点の少ない綾組織を使用する

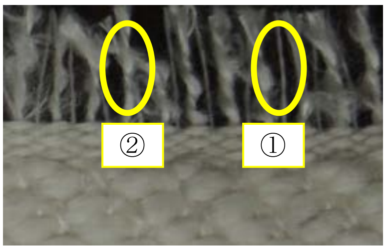


図２　タテ糸（①練糸、②絹紡糸）

表４－２　試織結果

試料名	結　　果
織物④	・織物①と比較して柔らかい織物となった これは、タテ糸が硬い生糸から柔らかい練糸になったことが原因と考えられる ・織物に手を触れてずらしてもスリップは発生しない ・製品として使用できる
織物⑤	・風合いは柔らかく洗顔パフとして期待できる ・織物に手を触れてずらしてもスリップは発生しない ・製品として使用できる
織物⑥	・綾組織により真綿が表面に多く出現することにより、肌触りが良く風合いも良い ・この織物は洗顔パフの他にベビー用品等他の製品にも応用できる ・織物に手を触れてずらしてもスリップは発生しない ・製品として使用できる

織物④

織物⑤

織物⑥

図３　織物④～⑥の表面観察写真

試織した織物にはスリップの発生がなく、風合いも現行の真綿洗顔パフ用織物に近い仕上がりとなっていることから、織物④～⑥の設計を提案することにした。

３．結言

今回は手織り機によって製品化されている真綿パフ織物を自動織機で織るための織物設計を検討した。
製織性を優先してタテ糸には生糸を使用することで問題なく製織することができたが、試織した織物にはタテ方向にスリップが発生し製品としては使用できない織物となった。そこで、タテ糸に練糸と繊度の異なる絹紡糸を交互に配列することで、スリップの発生がしにくい上に、タテ糸に生糸を使った織物より肌触り、風合いが良い織物となり、自動織機でも製織できる織物となった。

今後応募企業では、④～⑥の織物設計を基に自動織機で真綿洗顔パフ用の織物を製織し、商品の量産化を図る予定である。

染色用ウルシのかぶれ抑制技術の開発

Development of rash control technology for dyeing lacquer tree paint

福島技術支援センター 繊維・材料科　中島孝明　伊藤哲司
応募企業　齋藤産業有限会社

直接触れると皮膚炎を起こす可能性があるウルシ材を、安全に染色材として使用する方法を検討した。皮膚炎の原因となるウルシオールは、加熱により硬化することから、170℃で１時間以上ウルシ材を加熱することでウルシオールの溶出量は約１０分の１になることを確認した。また、加熱したウルシ材と未処理ウルシ材で染色したハンカチの色差ΔE*(ab)は 3.0 以下であることから、ウルシ材を加熱処理しても染色材として問題なく使用できることを確認した。

Key words: ウルシ材、染色、ウルシオール、標準添加法

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で染色された製品が注目されている。応募企業でも既に、絹織物を桜材や藍などで染色した商品の製造・販売を行っており、新たな染色材としてウルシ材を考えている。しかし、ウルシ材は染色作業者が直接触れると皮膚炎を起こす可能性があるため、ウルシ材を手軽に染色材として使用する方法があるか検討して欲しいと依頼があった。

皮膚炎の原因となるウルシオールは、150℃以上の加熱により重合し硬化[1]することで不溶化する。そこでウルシ材を加熱処理することでウルシオールの溶出量が減少するか、混合物中の定量測定に適した標準添加法で検証を行った。

また、ウルシ材の加熱処理が染色性に及ぼす影響について、染色試験を行い確認した。

２． 実験

２． １． 試料

染色材の試料として、ウルシの材木（喜多方市高郷産、伐採後１か月）を粉砕したものを用いた（図１）。

図１　粉砕したウルシの材木

２． ２． 加工条件

加熱には恒温乾燥機（PHH-101　エスペック(株)製）を用いた。ウルシ材 10.0g を 300mL ビーカーに量り取り、表１の条件で加熱した。

表１　加熱条件

試料名	加熱条件
A	なし
B	170℃　１時間
C	170℃　２時間

２． ３． 溶出量測定

ウルシ材の抽出液には、ウルシオール以外にも様々な物質が含まれているため、標準添加法によりウルシオールの溶出量測定を行った。

標準物質として用いるウルシオールは、くろめ漆から抽出して用いた。くろめ漆は、ウルシオールの他にゴム質等を含んでいる。ウルシオールを精製するため、くろめ漆 10mL をアセトン(特級　富士フイルム和光純薬(株)製) 50mL に溶解し、ひだ折りしたろ紙（5C　東洋濾紙(株)製）でろ過した。抽出液を 50℃に設定したホットプレート上で加熱し、アセトンを揮発させ、残留物をフーリエ変換赤外分光光度計（Nexus670　サーモ ニコレー・ジャパン(株)製）で測定し、ウルシオールと確認した(図２)。

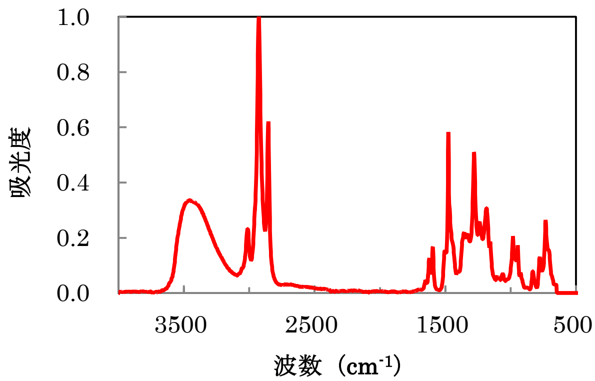


図２　精製したウルシオールの赤外分光スペクトル

事業課題名「ウルシ材による染色方法の検討」

測定試料は、ウルシ材のエタノール抽出液 10mL にウルシオールの濃度が段階的になるように標準物質を加え、エタノールで総量が 20mL となるように調製した。濃度の算出は、測定値から作成した検量線が直線であると仮定し、近似直線の x 軸切片値で行った。

２．２．で加工した各ウルシ材にエタノール（特級 富士フイルム和光純薬(株)製）50mL を加え、90 分浸漬し、ひだ折りしたろ紙（5C　東洋濾紙(株)製）でろ過、抽出を行った。ウルシオールの濃度測定には分光光度計（UV-2500PC　(株)島津製作所製）を使用し、吸光度のピーク値から濃度を算出した。ウルシオールの濃度表示は、溶媒のエタノールに対する精製したウルシオールの質量パーセント濃度で表した。標準溶液は精製したウルシオールをエタノールで希釈し 100ppm 程度にしたものを用いた。また、測定する抽出液は、有効な吸光度が得られるよう希釈して測定を行った。抽出と測定は複数回行い、平均値を用いて比較・評価をした。

２．４．染色

染色材には、２．２．の表１に示した試料 A 及び試料 C をそれぞれ 120g 用い、不織布の袋に入れ、口をゴムで止めた。ステンレス鍋に 1.5L のイオン交換水を入れ沸騰させ、ウルシ材の入った袋を投入した。再沸騰後火を止め、２０分間浸漬後袋を取り出し染色液とした。ハンカチ（5g　絹 100%）を１枚入れ、３０分間浸漬かくはんした。再び加熱し沸騰したところでハンカチを取り出し、４L の洗い桶で５回水を入れ替えてすすぎ、常温で乾燥させた。

２．５．測色

測色は、測色計（NF-999　日本電色工業(株)製）を使用し、光源D65、視野 10°で測定、$L^*a^*b^*$表色系を使い比較を行った。ハンカチを４つ折りにし４枚重なったところを１０回測定し、平均をサンプルの値とした。

３．結果

３．１．溶出量測定

図３はウルシ材試料 A、B、C 抽出液の吸収スペクトルである。各試料の抽出液は測定する際に、吸光度が 1.0 程度になるよう希釈を行った。ウルシ材抽出液は 280nm 付近にピークを持つことが確認できた。

280nm の吸光度で標準添加法による１回目の測定結果を表２～４及び図４～６に示す。図４～６で示すように直線性の高い結果が得られたため、ウルシ材抽出液中のウルシオール濃度を定量することができた。

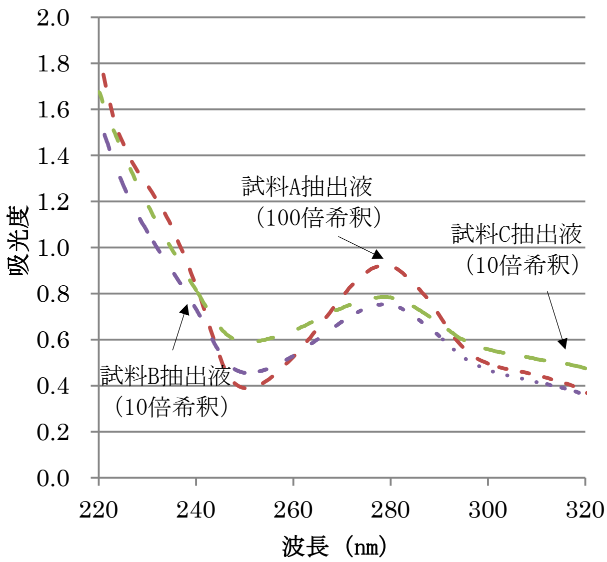


図３　ウルシ材抽出液の吸収スペクトル

表２　試料 A の分光測定結果（１回目）

標準液濃度(ppm)	0.0	16.5	33.1
吸光度(280nm)	0.45	0.60	0.75
抽出液希釈倍率	100 倍		

表３　試料 B の分光測定結果（１回目）

標準液濃度(ppm)	0.0	12.7	25.3	50.7
吸光度(280nm)	0.36	0.47	0.59	0.81
抽出液希釈倍率	10 倍			

表４　試料 C の分光測定結果（１回目）

標準液濃度(ppm)	0.0	8.3	16.5	33.1
吸光度(280nm)	0.39	0.46	0.52	0.66
抽出液希釈倍率	10 倍			

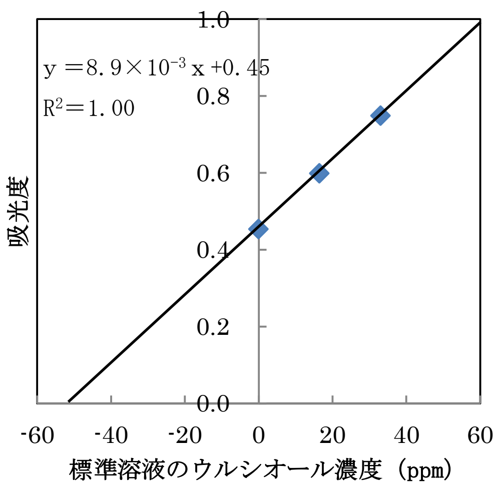


図４　試料 A の抽出液を標準添加法で定量（１回目）

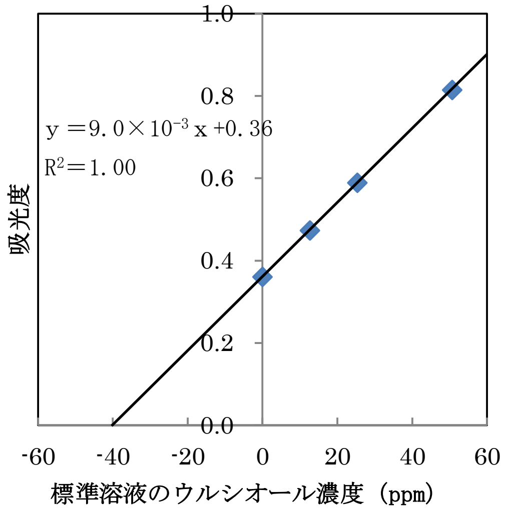


図５　試料Ｂの抽出液を標準添加法で定量（１回目）

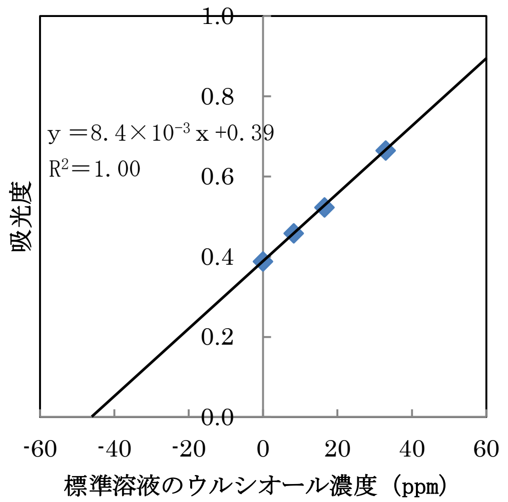


図６　試料Ｃの抽出液を標準添加法で定量（１回目）

試料 A、B、及び C からエタノールで抽出したウルシオール濃度の平均値を比較した結果が図７である。試料 A から 5090ppm のウルシオールが溶出したのに対し、試料Ｂとｃの溶出量は１０分の１以下になった。170℃で１時間以上ウルシ材を加熱することでウルシオールの溶出量を低減できることが分かった。

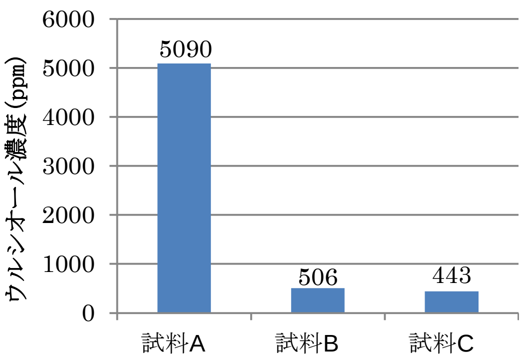


図７　ウルシオールの溶出量（平均値）

３．２．測色測定

測色測定結果を表５に示す。加熱したウルシ材（試料C）は、未処理ウルシ材（試料A）との色差ΔE*(ab)が 3.0 以下であった。色差が 3.0 以下の場合、目視では離間して比べると色の違いが判別できないため、加熱したウルシ材は未処理のウルシ材とほぼ同色に染色することができた。

図８　染色サンプル（ハンカチ）
（上：2 時間加熱ウルシ材染色、下：未処理ウルシ材染色）

表５　染色サンプルの測色結果

試料名	L*	a*	b*	⊿E*(ab)
試料 A 染色	72. 8	-0. 1	26. 1	–
試料 C 染色	74. 0	0. 8	24. 2	2. 4

４．結言

ウルシ材から溶出するウルシオールの定量測定は、分光光度計による標準添加法で測定でき、ウルシ材を 170℃で１時間以上加熱すると、ウルシオールの溶出量が大幅に減ることが確認できた。また、ウルシ材を加熱処理しても染色材として問題なく使用できることを確認した。

なお、ウルシオールはウルシの樹皮から分泌されるので、材を粉砕するときには、分別して排除する方が好ましいことを申し添える。

謝辞

本研究を遂行するにあたり助言を頂いたハイテクプラザ渡部副所長、工業材料科矢内主任研究員、試験試料を提供して頂いた産業工芸科池田科長、志鎌副主任研究員、須藤専門員、出羽専門員に感謝します。

参考文献

1）矢内誠人，長谷川隆 他．漆の精製と高機能化．平成２１年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告，2011，p.38.

輸出に適した酒類製造用酵母の育種

Breeding of sake brewing yeast suitable for exported product

会津若松技術支援センター 醸造・食品科　中島奈津子
応募企業　末廣酒造株式会社

酒類の海外輸出増加に対応するため、輸出国の一部で規制されているカルバミン酸エチルの前駆体である尿素を生成しないオリジナル酵母の育種を試みた。親株には末廣酒造株式会社にて使用されている蔵付き酵母（T-1）を使用し、選択培地による選抜育種の結果、尿素を生成しない酵母を取得した。今後この酵母を用いた清酒、また清酒をベースにしたリキュールの製造が期待される。

Key words: 蔵付き酵母、尿素非生成酵母、輸出

１．緒言

県産清酒の輸出量は年々増加傾向にあり、今後もさらなる増加が見込まれる。輸出国が多岐にわたる中、酒類中に含まれるカルバミン酸エチル濃度に規制値を定める国では、輸出入の際にカルバミン酸エチル濃度の提出が求められることがある。カルバミン酸エチルは、清酒以外の醸造酒や蒸留酒にも含まれており、一般に酒類では、酵母の生成する尿素とエタノールが反応することにより生成すること、ウメやサクランボなどの核果の種に含まれるシアン配糖体から醸造中に分解されたシアン化合物とエタノールが反応することにより生成することが知られている[1)]。また、カルバミン酸エチルは、国際がん研究機関（IARC）にて平成１９年にグループ 2A（おそらく発がん性がある）に分類された物質で、食品の成分等に関する国際規格を定めるコーデックス委員会等でもカルバミン酸エチルについて議論されている[1)]。

清酒中のカルバミン酸エチルは、尿素を含む清酒が火入れや貯蔵といった工程でエタノールと反応し、生成量が増えることが報告されており、解決方法のひとつとして清酒中の尿素の低減化が知られている。具体的には、原料処理による低減やウレアーゼ処理による分解も報告されているが、最も広く実用化されているのが尿素非生成酵母の使用である[1、2、3)]。

これまで、アルギナーゼ遺伝子の破壊により尿素非生成酵母が取得できること、さらに、CAO 培地を用いることで親株に変異処理を施さなくともアルギナーゼ遺伝子の自然変異株が高効率で取得できることが報告されている[2、3)]。CAO 培地を用いた変異株の取得は広く活用され、各都道府県からもオリジナルの尿素非生成酵母の育種と実用化が報告されている[2、3、4)]。

本報告においても、蔵付き酵母から CAO 培地を用いた尿素非生成酵母の選抜育種を試み、得られた酵母で製造した製成酒に尿素が含まれないことを確認したので報告する。

２．研究方法

２．１．使用酵母

末廣酒造株式会社より寄託された蔵付き酵母（T-1）[5)] を親株として使用した。

２．２．培地による尿素非生成変異株の選抜育種

- 寒天培地：YPD 寒天培地（2%グルコース、1%酵母エキス、2%ポリペプトン、2%寒天）
- 前培養培地：麹汁培地（Brix.11）
- CAO 培地：0.17% Yeast nitrogen base w/o amino and ammonium sulfate(Difco)、10ppm L-カナバニン（SIGMA)、5mM L-オルニチン塩酸塩（WAKO)、1mM L-アルギニン塩酸塩(WAKO)、2% グルコース、2%寒天
- Arg 培地：0.17% Yeast nitrogen base w/o amino and ammonium sulfate(Difco)、1mM L-アルギニン塩酸塩（WAKO)、2% グルコース、2% 寒天
- Orn 培地：0.17% Yeast nitrogen base w/o amino and ammonium sulfate(Difco)、5mM L-オルニチン塩酸塩（WAKO)、2% グルコース、2% 寒天

寒天培地にてコロニー形成させ、コロニー一植菌耳を前培養培地 5mL にて 30℃、２日間静置培養した菌体を遠心分離にて集菌した。0.1M リン酸緩衝液(pH7.0)にて３回洗浄したのち、生理食塩水に懸濁した菌体を CAO 培地に塗布した。30℃でコロニー形成が見られるまで３週間培養し、成育した候補株を Arg 培地と Orn 培地にスポットし、Arg 培地で成育できず、Orn 培地で成育ができる株を選抜した。

２．３．製成酒の製造及び分析

末廣酒造株式会社にて実規模試験醸造を実施した。日本酒度およびアルコール分は SD 式迅速アルコール測定システム（京都電子工業㈱）、酸度およびアミノ酸

事業課題名「輸出に適した酒類製造用酵母の育種」

度は総酸・アミノ酸滴定システム（京都電子工業㈱）を用い、国税庁所定分析法[6]に準拠して測定した。尿素は、F-kit 尿素/アンモニア(Roche Diagnostics GmbH, Germany)を用い、キット添付のマニュアルに従って測定した。

３．結果及び考察

３．１．培地による尿素非生成変異株の選抜育種

9㎜Φシャーレ１枚当たり10^6個の菌体を塗布し培養後、３週間で形成するコロニーは２０個程度で、コロニー出現率は2×10^{-5}であった。コロニー径 1mm 以上のもの全てを釣菌し、Arg 培地及び Orn 培地にスポットした。約１５００株のコロニーを釣菌、スポットしたところ、Arg 培地での成育が微弱で、Orn 培地での成育が良好な３株（B9、C7、G5）の候補株を取得した。最終的な選抜効率は4×10^{-8}であった。

CAO 培地による選抜は、親株の性質や親株の取得経緯によって取得効率が異なり、親株の種類によっては自然変異による取得が困難なことがある。そのため、効率的な選抜のため条件検討を行う場合もある[3]。今回は、菌体内含有窒素の除去を目的に、CAO 培地への塗布前に緩衝液による菌体の洗浄を増やしたこと、また候補株の母数を増やすことで取得に成功したと考える。

なお、エチルメチルスルホン酸（EMS）により変異を誘導したのち CAO 培地に塗布する試験区も実施したが、目的株は得られなかった。

また、より高効率な選抜の可能性に期待し、EMS による変異処理を行ったが、目的株は得られなかった。遺伝子変異を誘発すると、親株の持つ発酵特性が変化する事例も見られる[2、4]が、本試験で得られた尿素非生成株は全て自然変異によるものであり、発酵特性への大きな影響は少ないことが期待される。

３．２．製成酒の分析結果

取得した３株を使用して末廣酒造株式会社にて試験醸造した製成酒（辛口本醸造、原酒、平成３０年１２月製成）の成分値を表１に示す。

表１　製成酒の成分値

試料	日本酒度	アルコール	酸度	アミノ酸度	尿素
火入前	+22.8	18.8%	2.5	1.5	N.D.＊
火入後	+22.9	18.8%	2.4	1.5	N.D.＊

＊ N.D.:検出限界値（0.02mg/L）未満

親株として使用した蔵付き酵母（T-1）は高発酵力、高アルコール耐性が特徴で[5]、主に辛口清酒の製造のために用いられてきた。今回取得した酵母も、親株の持つ高発酵力、高アルコール耐性を保持し、日本酒度のキレやアルコール生成、酸度やアミノ酸度といった味わい、もろみ経過についても親株の特徴を失うことなく、親株使用時と同等の成分値に仕上がり、尿素はいずれの試料でも検出限界値以下であった。

なお、製成酒中の尿素が非検出であることから、ここからカルバミン酸エチルが生成される可能性は極めて低い。海外で人気の高い長期熟成酒、また、幅広い展開が期待されるリキュールのベースとなる普通酒、本醸造酒など輸出用酒類製造への本酵母の利用が見込まれる。

４．結言

・輸出用酒類製造に向け、カルバミン酸エチル低減効果のある尿素非生成酵母の選抜育種を行った。
・蔵付き酵母を親株とし、CAO 培地による自然変異によって３株の尿素非生成酵母を取得した。
・取得した尿素非生成酵母は、高発酵力、高アルコール耐性といった親株の特徴を保持した。

参考文献

１）蓮田寛和.“きょうかい酵母清酒用尿素非生産性高エステル酵母 1901 号（KArg1901）について”. 醸協. 2014, p.576-581.
２）宮田俊輔, 森本聡.“EK-1 酵母からのウレア非生産性変異株の分離”. 愛媛県産業技術研究所研究報告. 2011, p.6-9.
３）渡部貴志,高橋仁恵,増渕隆.“輸出用に適した群馬清酒酵母の育種に関する研究”. 群馬県立産業技術センター研究報告. 2016. p.11-14.
４）谷本昌太, 藤井一嘉.“広島吟醸酵母の尿素低生産株の育種”. 愛媛大学教育学部紀要. 2009. p.269-276.
５）芦沢長, 小林照正.“優良清酒酵母の探索とその応用”. 会津短期大学学報. 1983. p.85-94.
６）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, p.307.

老香（ひねか）を低減するための清酒管理方法の開発

Development of brewing method of sake to reduce hine-ka

会津若松技術支援センター 醸造・食品科　菊地伸広　松本大志
応募企業　有賀醸造合資会社

老ねにくい清酒の醸造方法を検討するため、異なる酵母を用いた小仕込みを行い、酵母の違いによる清酒の老ねやすさの評価を DMTS-pp の測定により行った。酵母の死滅が進んだ結果、アミノ酸度と DMTS-pp の値が高くなる傾向が見られた。これらのことから、清酒の老ねやすさに酵母の違いは直接関係しないが、酵母の死滅により DMTS-pp の生成が促進されるため、酵母に負荷をかけない醪管理が重要であることが考えられた。

Key words: 清酒、DMTS-pp、アミノ酸度

１．緒言

清酒は時間の経過とともに香味が変化し、老香と呼ばれる香りが生じることがある。特に漬物様の香りはフレッシュな酒質設計の場合には敬遠される。この香りの主成分とされるジメチルトリスルフィド（DMTS）は、原料米の違いや醪中の酵母の死滅度合の違いなどにより生成量が異なることが報告されている[1)2)]。フレッシュな酒質の保持や輸出を視野に入れる場合、老ねにくい清酒を製造することは重要であるが、県オリジナル酵母である「うつくしま夢酵母」や「うつくしま煌酵母」などについてはこれまで老ねやすさについての検討をしていない。

今回、酵母の違いが清酒の老ねやすさに与える影響について検討を行った。

２．実験方法

２．１．供試試料

総米 200g（麹米（山田錦、精米歩合 40％）40g、掛米（夢の香、精米歩合 50％）160g、汲水歩合 150％）で、福島県オリジナル酵母やきょうかい酵母などの１７種類の酵母をそれぞれ添加して小仕込み（醪期間２８日、温度 12℃一定）を行い、上槽した製成酒を分析試料とした。試料は上槽後、-5℃で分析まで保存した。

２．２．測定方法

試料を 70℃で１週間静置し、既報[3)]に従い、stir bar sorptive extraction（SBSE）により抽出し、ガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS, アジレントテクノロジー（株））を用いて DMTS を測定し、老ねやすさの指標である DMTS 生成ポテンシャル（DMTS-pp）[4)]とした（表１）。

また、国税庁所定分析法[5)]に従って成分分析を行い、さらに高速アミノ酸分析計（（株）日立ハイテクサイエンス、L-8900）を用いてアミノ酸組成を測定した。

表１　GC/MS 分析条件

ツイスター	10mm,55μL PDMS
ガスクロマトグラフ	Agilent 7890B GCsystem
カラム	DB-WAX（Agilent） 30m×0.25mm　i.d.0.25μm
キャリアガス	ヘリウム,1.0mL/min,定速モード
TDU温度	20℃,60℃/min,250℃
CIS温度	10℃,12℃/sec,250℃
オーブン温度	40℃（5min）→5℃/min →240℃（15min）
質量分析計	Agilent 5977B MSD
Mode SIM m/z	126,79

３．結果及び考察

酵母の異なる小仕込みから上槽した製成酒の成分分析及び DMTS-pp の測定結果を表２に示す。

表２　成分分析及び DMTS-pp 測定結果

酵母	アルコール（%）	日本酒度	酸度	アミノ酸度	DMTS-pp(ppb)
F7-01	19.2	23.0	3.02	2.39	28.5
TM-1	19.2	19.4	2.87	2.39	36.6
TUA	18.7	16.5	3.35	2.28	36.3
701-g31	19.3	20.4	2.90	2.24	22.3
901-A113	19.3	22.0	3.02	2.14	18.3
701-15	19.9	20.8	2.62	1.98	20.3
901-A113④	19.6	23.9	3.09	1.74	10.9
701-15①	19.4	23.7	3.07	1.74	13.2
701-15⑥	19.5	23.7	3.03	1.76	12.6
52-5s-38	19.1	22.7	3.94	1.41	7.1
701	19.6	24.0	3.37	1.58	6.7
901	19.5	25.2	3.34	1.52	18.1
1001	18.9	24.4	3.34	1.46	15.9
1401	18.9	24.3	3.82	1.39	9.8
1601	18.9	23.7	3.10	1.62	10.8
1801	20.1	23.9	2.69	1.64	13.6
M310	18.8	24.0	3.24	1.58	16.2

事業課題名「老ねにくい清酒の醸造方法」

アルコールが19%を超え、日本酒度が高いとアミノ酸度とDMTS-ppの値が高くなる傾向が見られた。特に福島県オリジナル酵母である F7-01、TM-1、TUA、701-g31、901-A113、701-15は顕著で、それに対して、「うつくしま煌酵母」の改良株である 901-A113④、701-15①、701-15⑥はアミノ酸度がやや低減され、DMTS-ppも半分程度となった。

多酸生成酵母である 52-5s-38 は酵母の活性が弱いため、アルコールが高くなると死滅し、自己消化によりアミノ酸度が高くなり、DMTS-pp も高くなると予想していたが、アミノ酸度もDMTS-ppも低かった。

きょうかい酵母である701、901、1001、1401、1601、1801 や鑑評会で多用される M310 はアルコールや日本酒度が高くなってもアミノ酸度はそれほど高くならず、DMTS-ppも低かった。

これらのことから、福島県オリジナル酵母においては、きょうかい酵母と比べて、発酵が進み、アルコールが高くなることで酵母が死滅し、その結果、DMTS が生成しやすくなると考えられた。そのため、福島県オリジナル酵母を用いる際には、アルコールを出しすぎず、酵母に負荷をかけないような醪の経過を辿ることが特に重要であると考えられた。

「うつくしま煌酵母」の改良株については、アミノ酸度やDMTS-ppの低減が見られたことから、酵母が死滅しにくく、老ねにくい酵母としての使用が期待できた。

次に、アミノ酸度の高い製成酒ほどDMTS-ppが高い傾向がみられたため、アミノ酸組成とDMTS-ppとの関係性をみると、表３で示すようにほぼ全てのアミノ酸と高い正の相関があった（赤色が濃いほど正の相関が高いことを示す)。

DMTS 生成経路にはメチオニン再生経路が関与していると考えられており[6]、製成酒中の含硫アミノ酸と正の相関がある[1]。今回、小仕込み製成酒のアミノ酸組成を測定した結果でも同様にDMTS-ppとメチオニンはr=0.674と正の相関がみられた。一方で、ヒスチジン、アスパラギン酸、リジンなどメチオニンよりも高い正の相関があったものもみられた。これは、今回酵母の死滅率を測定していないが、醪期間中に酵母が死滅し、自己消化が進んだためと考えられた。今回の試験条件では、特に福島県オリジナル酵母の死滅率が高くなったためにDMTS-ppが高くなったと推察された。

４．結言

老ねにくい清酒の醸造方法を検討するため、異なる酵母を用いた小仕込みを行い、酵母の違いによる清酒の老ねやすさの評価をDMTS-ppの測定により行った。

福島県オリジナル酵母はきょうかい酵母と比較してアルコールが19%を超え、日本酒度が高くなり、酵母の死滅が進んだ結果、アミノ酸度とDMTS-ppの値が高くなる傾向が見られた。一方で、「うつくしま煌酵母」の改良株については、アミノ酸度やDMTS-ppの低減が見られたことから、酵母が死滅しにくく、老ねにくい酵母としての使用が期待できた。

これらのことから、清酒の老ねやすさには酵母の違いは直接関係しないが、酵母の死滅によりDMTS-ppの生成が促進されるため、酵母に負荷をかけない醪管理が重要であることが考えられた。

老ねにくい清酒を製造するためには、低アルコール・低アミノ酸度で上槽するといった酵母が死滅しにくい醪管理や、割水などによる希釈、上槽後の速やかなオリ引きによる酵母の除去などが有効と推察された。

表３　製成酒のアミノ酸組成とDMTS-ppとの関係性

	F7-01	TM-1	TUA	701-g31	901-A113	701-15	901-A113④	701-15①	701-15⑥	52-5s-38	701	901	1001	1401	1601	1801	M310	平均	DMTS-ppとの相関係数
Asp	101	110	94	78	75	72	39	39	39	35	34	29	31	35	31	37	32	54	0.886
Thr	57	56	55	46	47	38	29	30	28	23	25	22	23	23	27	36	27	35	0.871
Ser	86	85	80	72	71	64	48	49	48	41	42	36	39	39	46	52	43	55	0.857
Asn	97	95	93	79	92	78	78	81	76	57	63	70	73	65	71	100	77	79	0.706
Glu	265	272	243	213	214	193	171	174	169	135	151	157	141	136	183	174	134	184	0.860
Gln	111	107	111	94	97	90	77	78	74	79	66	66	66	75	75	74	64	83	0.824
Gly	133	125	132	116	114	110	104	103	100	88	100	98	89	100	103	87	85	105	0.797
Ala	320	308	317	340	329	313	309	298	295	208	243	259	195	216	220	243	196	271	0.568
Val	121	111	125	122	104	112	123	85	137	72	56	58	51	59	60	61	56	89	0.535
Cys	73	70	70	0	33	49	0	64	0	0	34	33	57	38	69	103	59	44	0.376
Met	75	62	70	37	33	39	44	44	45	12	15	8	30	26	59	32	36	39	0.674
Ile	100	86	99	73	68	66	70	68	66	35	39	33	35	35	55	45	39	60	0.759
Leu	193	182	187	152	146	131	114	112	111	74	82	72	69	64	99	92	79	115	0.840
Tyr	149	111	159	123	120	100	134	131	125	75	73	71	55	70	92	68	58	101	0.538
Phe	114	85	114	74	71	62	71	68	67	29	33	29	25	23	53	38	30	58	0.745
Trp	51	17	56	28	45	28	71	75	70	24	27	0	44	18	35	44	42	40	-0.047
Lys	219	213	207	176	163	130	113	119	113	92	109	99	117	104	138	124	127	139	0.892
His	54	52	52	41	45	37	34	34	34	28	31	30	34	30	32	34	34	37	0.901
Arg	464	381	433	379	375	363	335	320	306	201	293	261	252	297	354	315	335	333	0.728
Pro	192	202	200	186	195	164	186	175	187	194	170	195	185	192	167	177	159	184	0.465
総アミノ酸量	3489	3129	3296	2873	2898	2658	2597	2622	2561	1855	2014	1929	1961	1955	2343	2328	2039	2503	0.784

赤色が濃いほど正の相関が強いことを示す。　(mg/L)
Asp：アスパラギン酸、Thr：スレオニン、Ser：セリン、Asn：アスパラギン、Glu：グルタミン酸、Gln：グルタミン、Gly：グリシン、Ala：アラニン、Val：バリン、Cys：シスチン、Met：メチオニン、Ile：イソロイシン、Leu：ロイシン、Tyr：チロシン、Phe：フェニルアラニン、Trp：トリプトファン、Lys：リジン、His：ヒスチジン、Arg：アルギニン、Pro：プロリン

参考文献

1）奥田将生: 原料米の窒素及び硫黄化合物が清酒貯蔵後の香気変化に及ぼす影響, 日本醸造協会誌, 105, P.262-272, 2010.

2）Nishibori,N., et.,al：Yeast Cell enhances dimethyl trisulfide formation in sake, J Biosci Bioeng, 118, p.526-528, 2014.

3）磯谷敦子, 宇都宮仁, 神田涼子, 岩田博, 中野成美：市販酒の老香に関与する成分, 日本醸造協会誌, 101, p.125-131, 2006.

4）Isogai,A., et al.,: Screening and identification of precursor compounds of dimethyl trisulfide in Japanese sake, J Agric Food Chem, 57, p.189-195, 2009.

5）注解編集委員会編：第４回改正国税庁所定分析法注解, 日本醸造協会発行, 2006.

6）Wakabayashi,K., et al.,: Involvement of methionine salvage pathway genes of *Saccharomyces cerevisiae* in the production of precursor compounds of dimethyl trisulfide, J Biosci Bioeng, 116, p.475-479, 2013.

陶胎漆器と金属を調和させたワイングラスの試作

Trial production of wine glass that harmonized TOHTAI lacquer ware and metal

会津若松技術支援センター　産業工芸科　堀内芳明　原朋弥　須藤靖典　齋藤勇人　池田信也
応募企業　株式会社流紋焼

ワイングラス形状の陶胎漆器の実用性と量産性を高めるため、ステム（軸）を金属製として新たな意匠を考慮しながら、異種材の接合方法や転倒しにくい形状を検討した。量産のための石膏型による成形については、更に形状を検討する必要があったが、転倒しにくくかつ接合部について十分な強度を持つ試作品を作製することができた。

Key words: 陶胎漆器、3Dプリンタ、異種材接着

１．緒言

応募企業である株式会社流紋焼（以下、「応募企業」という）は、会津美里町に立地し、陶磁器の製造・販売を行っている。

近年、消費の低迷に伴い応募企業を取り巻く環境は厳しいことから、伝統的な風合いを保ちつつ、新しいデザインや新たな用途の開発に業界全体で積極的に取り組んでいる。

このような状況の中、平成２８年に放送されたテレビドラマにより、陶器と漆を組み合わせた「陶胎漆器（とうたいしっき）」が注目され、平成２９年には、当所の産業工芸科、会津漆器協同組合及び会津本郷焼事業協同組合が共同で陶胎漆器を作製し、会津ものづくりフェアで公開して好評を得たため、平成３０年においても、ワイングラスの形態をした陶胎漆器を作製して展示（図１）した。

図１　展示されたワイングラス

平成２９年作製のものは、ぐい飲み及び盃であったため、強度等は問題にならなかったが、ワイングラスにおいては、ボウル（碗）の底の部分と、樹脂製であったステム（軸）及びフット（台）の部分の接合に苦労し、展示物としては好評だったが、接合方法が確立されないままとなっていた。

応募企業では、このワイングラスを商品化するための試作を行ってきたが、接合方法やステムの材料についてノウハウを持たないため、商品化が遅れていた。

そこで、当所においてガラス製のワイングラスに実例のある金属製のステムを用いてボウルの部分とフットを接合し、接合強度を向上させるための方法や意匠等を検討した。

２．実験方法

２．１．ワイングラスのデザイン

２．１．１．ボウルとフット

ガラス製のワイングラスにおいて、一般的に市販されている製品の全高が16cmから20cm程度であること、そして、ボウルの３分の１程度（125ml 程度）でテイスティングするということから、ボウルのサイズを検討した。

また、ステムを接合する部分は、ボウルの形状に沿って受け皿のような形を掘り込み、ステムを接合したとき段差が出ないような形状とすることとした。

フットについては、図１のワイングラスでは樹脂製であったが、重量バランスを考慮して、ボウルと同じ陶器製とすることとした。更に、意匠性も考慮し、単に平滑な面ではなく、アーチ型になるようなデザインとすることとした。

２．１．２．成形型による成形

コストの軽減や量産化を視野に入れていることから、石膏型での成形を検討することとした。そのため、ハイテクプラザのプロジェクト研究科で所有する３Dプリンタ（株式会社キーエンス　AGILISTA-3200）を利用して雄型を作成し、それをもとに石膏型を製作することとした。石膏型については、当所では作成できないため、応募企業で製作することとした。

２．１．３．ステム

強度や重量バランスを考慮して金属製のステムとし

事業課題名「新規陶胎漆器のデザイン及び製造工程の検討」

たいとの要望が応募企業からあったが、ハイテクプラザでは製作できないため、三条市地場産業振興センターから紹介された企業へ試作を委託した。表面の仕上げは、鏡面(#600)仕上げとヘアライン仕上げの２種とした。

２．２．接合について

２．２．１．接合方法

新たなワイングラスを製作するに当たり、金属と陶器の接合のための方法を検討した。

ボウルの中心部に穴を開け、ステムをボルトで止めたあと、内側を樹脂等で抱埋し成形する方法と、接着剤を使用する方法について検討し、素焼きの状態で穴を正確に開けても、本焼きの際に穴の形状が変わってしまうことが予想されることや、工程が複雑になってしまうことから、接着剤を使用する方法で接合することとした。

そのため、接着剤の選定が重要となったことから、複数の接着剤を使用した試験を行うこととした。

２．２．２．接着剤の選定

今回使用する接着剤の性能の必要条件として、後工程を考慮して短時間で硬化が始まること、硬化後、ヒケなどの形状の変化が少ないことを条件として、表示の「適用材料」に、金属及び陶磁器が含まれている接着剤として表１の３種を選定した。

表１　接着剤の品質表示内容

種類		成分
A社	化学反応型接着剤	変成シリコーン樹脂（95%）、合成樹脂（5%）
B社	溶剤系接着剤	合成樹脂(38%)、塩化ビニル樹脂・ウレタン樹脂、有機溶剤（62%）、メチルエチルケトン、イソプロパノール
C社	化学反応系接着剤	A剤(主剤)/エポキシ樹脂(100%)、B 剤（硬化剤）/変性ポリアミド（100%）

２．２．３．引張試験

陶器とステムの接合強度の検討を行うために、図２のような陶器と外径 10㎜ のステンレスの丸棒を接着した試験片（図３）を作製してモデル試験を行った。

図２の陶器は、漆が外側に塗装されることを想定して、釉薬がかかっていないものを使用した。

ステンレス製の丸棒の接着面は、アセトンで洗浄した後、紙やすり（#600）で研磨したものを用いた。

接着剤はどれも、硬化時間が２４時間から４８時間程度とされていた。そのため、接着してから25℃の恒温器中で４０時間静置したのち試験を行った。引張試験には、オートグラフ(株式会社島津製作所 AG-2000E)を用い、試験条件は、負荷速度 5mm/min とした。

今回の目標は、接着力の数字の大きさだけでなく、接着部において接着剤のみの剥がれが起きないことであり、丸棒と接着部が接合した状態のまま、陶器の部分だけ割れるあるいは剥がれることが目標である。

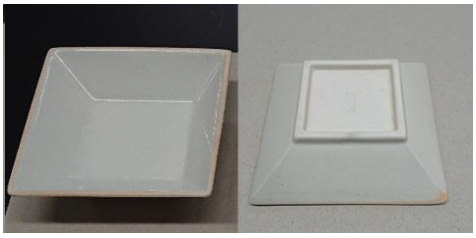


図２　試験に使用した陶器（上面だけ釉薬がかけてある）

図３　陶器とステンレス棒の接着状態

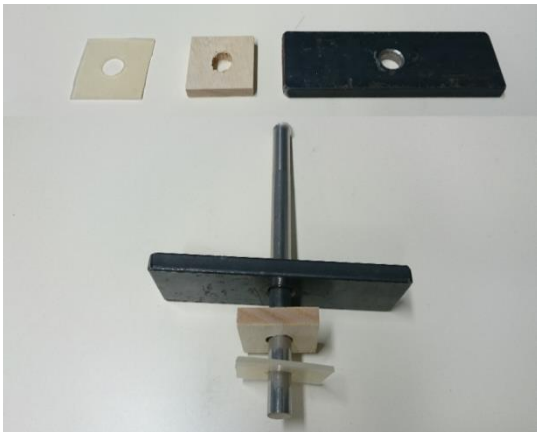


図４　治具の部品（左からシリコンゴム、木片、鉄）

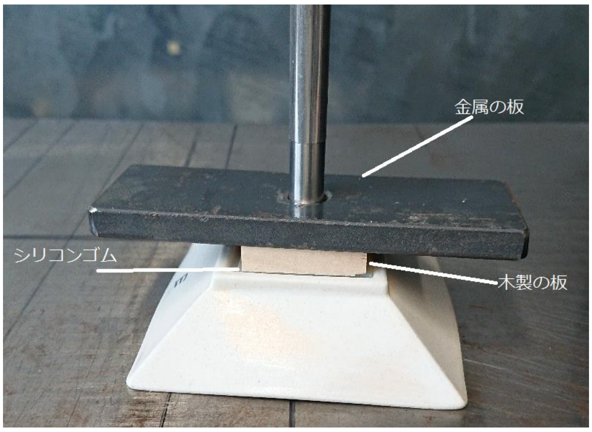


図５　冶具の様子

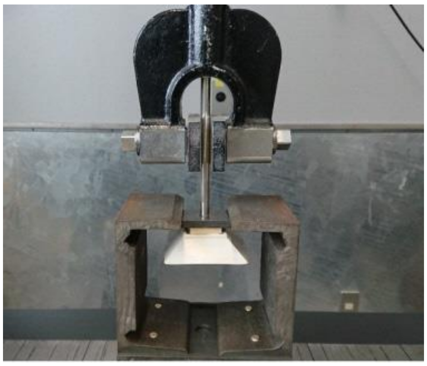


図６　試験機に設置した状態

引張試験に用いた試験片は、単純な平板でなかったため、小皿の高台の形状に合わせて平板のシリコンゴムを切り、その上に木片を載せ、更にその上に鉄製の板を載せて試験を行うこととした。それぞれの冶具は図４のとおり。それぞれを重ね合わせて、図５、図６のようにして装置に固定した。

３．結果

３．１．デザイン

応募企業が試作したボウルから、全体の形状を再考し、図７のような形状、サイズとした。ボウルの内容量は約 360ml である。

実際に製作する際に、本郷焼で使用する粘土においては、本焼きの後、18%縮小することが判明しているため、３Dプリンタ用の設計図は、実際に作製するサイズよりも 18%大きいサイズで作製した。

ステムの形状については、接着面を広くするための工夫として、ボウル側は受け皿のような形状とした（図８）。また、フット側の底部は、単純な平面とした。

実際に加工されたステムは、図９のとおりである。

３．２．接合部の引張強度について

接合部の引張試験は、図６のような状態で行い、その結果は表３のとおりとなった。この結果から、C社製エポキシ系接着剤の接合部の強度が最も高かった。

また、破断面の目視による観察から陶器が壊れるまで剥がれない強度を持つことがわかった（図１０）。

表３　引張試験結果（単位：N）

A 社製	100.889
B 社製	49.4513
C 社製	280.469

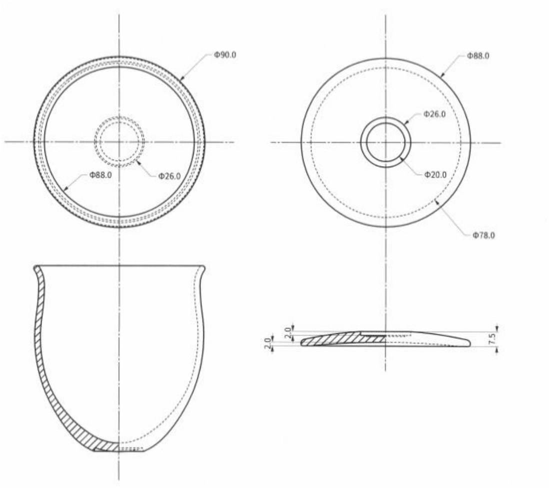


図７　ボウルとフットの形状（単位:mm）

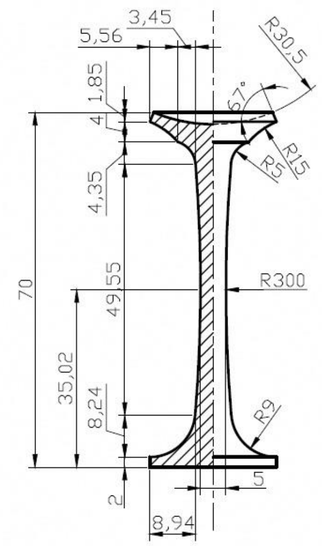


図８　ステムの形状（単位:mm）

図９　ステム（左：ヘアライン仕上げ、
右：鏡面仕上げ）

図１０　陶器表面が剥離した状態

他の２種類については、同様の観察から接着面で接着剤のみの剥がれが起きていた。また、塩化ビニル系は、エポキシ系接着剤の５分の１程度の強度しかないことがわかった。

目標としていた、丸棒と接着部が接合した状態のまま、陶器の部分だけ割れるあるいは剥がれたのはエポキシ系接着剤のみだったため、今回の試作にはエポキシ系接着剤を使用することとした。実際に接着を行い、組みあがった状態を図１１に示す。

図１１　全体写真

４．結言

ワイングラス形状の陶胎漆器について、ボウルとフットのバランスや機能などを考慮した新たなデザインを検討した。また、ボウルとフットをつなぐステムを金属製として、接着剤による接合を検討した。引張試験などの結果から、エポキシ系接着剤が最適であることがわかった。

重量については、ボウルが 285.8g、ステム 38.5g、フット 93.6g となり、合計で 417.9g となった。中ぐらいの湯飲みが 200g 程度であること、ワイングラスであることを考慮すると、軽量化については更に検討の余地があると考えられる。

また、成形型での作製に関しては、何度か型を作り直したものの、成形型を完成することができなかった。

成形型については、口の部分が直線的な形状であれば、作れることがわかっているが、口当たりの部分を当所がデザインした形状にしたいとの要望であり、そのことが商品の価値を高めることができることから、応募企業では、形状はそのままで検討を進めることとした。

謝辞

本開発にご協力いただいた公益財団法人燕三条地場産業振興センター産業振興部 技術開発課 椿様、有限会社上村製作所様（新潟県燕市）並びに株式会社山﨑研磨工業（新潟県燕市）に感謝申し上げます。

天然木を原料とした消臭剤の品質向上

Quality improvement of deodorants made from natural woods

会津若松技術支援センター　産業工芸科　齋藤勇人　池田信也
会津若松技術支援センター（県産品加工支援センター）高橋亮
応募企業　株式会社光大産業

天然木を乾燥する際の排気中の香気成分を利用して消臭剤を開発した企業から、製品の品質安定化について相談があり、加熱処理の温度及びエタノール添加量について検討した。微生物検査と官能評価を行い、無処理のものと比較して、アルコール添加量0.5%及び１%と熱処理（65℃30 分）を合わせた区分は、他と比べ良好な評価であるという結果を得た。

Key words: 消臭剤、天然木、ひのき、香気成分

１．緒言

応募企業である株式会社光大産業（以下、「応募企業」という）は、本宮市に立地し、木製DIY（組み立て家具）製品の製造・販売を行っている。

当社は、平成３０年１０月に、ヒノキの乾燥時の排気から、天然木の香気成分が含まれた蒸留水（以下、「天然木蒸留水」という）を取り出し、消臭剤として販売を開始した。

記者発表と同時に配布した試作品は、企業、個人とも評価は好評であった。

また、排気の利用であるため製造コストが低く抑えられることから、他の先行商品と比べ安価にできること、各種試験から消臭効果が認められたことなどから、訴求力の高い商品となると考えられた。しかし、乾燥する木材の体積や産地、乾燥時間が毎回異なることや、天然木蒸留水に静菌及び殺菌効果がないことが抗菌試験の結果から判明したため、製造管理や製品の品質コントロールが課題となってきた。

クリーンルームのような環境で作業している状況ではなかったため、微生物による汚染も心配された。

そこで今回は、微生物のコントロール方法と、それによる香りへの影響を考慮した品質安定化方法の検討を行った。

２．実験

２．１．サンプリング

天然木蒸留水の製造フローは、木材乾燥機からの排気を起点として冷却塔へ誘引することから始まる。冷却塔で凝集された液体はタンク１で一時的に貯留され、上澄みの油分と下澄みの蒸留水に１次分離される。タンク１の時点では、まだ下澄みの蒸留水に油滴が多く含まれているため、この下澄みの蒸留水を下部のドレンより抜き取って、タンク２に移送して２次分離する。

その後、タンク２の下澄みの蒸留水を下部のドレンより抜き取って、タンク３に貯留して、それを天然木蒸留水としている。タンク３に貯留された天然木蒸留水はポンプ移送で、持ち運び可能なタンク４に移し替えて、工場内で保管される。

事前に行った工場内の視察と乾燥工程の調査で、乾燥開始から約１時間後に、回収した排気から蒸留水ができ始めることがわかったので、サンプリングするタンク及び乾燥開始からの時間（経過時間）は表１のとおりとした。

サンプリングには、120℃で 15 分間蒸気滅菌したガラスボトルのほか、50ml のプラスチック製で電子線滅菌されたチューブも利用した。

また、参考品として、９月頃にほぼ同じ乾燥条件で作られた天然木蒸留水（No.8）についても、試験することとした。

表１　サンプリングしたタンク・経過時間

No.	タンク名	経過時間	備考
1	タンク１	2：00	経過時間による差
2	タンク１	3：30	経過時間による差
3	タンク１	5：00	経過時間による差
4-1	タンク１	8：30	同一時間で別な場所
4-2	タンク３	8：30	同一時間で別な場所
5	タンク１	24：00	経過時間による差
6	タンク１	48：00	経過時間による差
7	タンク４	51：00	乾燥終了時
8	保管品	－	

（サンプリングは、平成３０年１２月１２日開始）

２．２．微生物試験

微生物試験は、標準寒天培地を利用し、混釈平板培養法で行った。試験は、サンプリング直後（初発）と 30℃、30 日間恒温槽で保管したサンプルで行った。No.８については、サンプリング直後に試験した結果が 3.3×10^{3} 個/g となったため、13 日目にも試験を行った。

事業課題名「天然木香水製品の香りに配慮した品質安定化方法の検討」

２．３．加熱処理及びエタノール添加

天然木蒸留水中の香気成分が、比較的低沸点であると予想されたため、香りに影響が少ないように、65℃30分の低温殺菌及び85℃15分の中温殺菌を採用することとした。

また、エタノールの添加は香りに直接影響を与えることから、食品に静菌目的で添加する際の目安である3%以下とすることとし、それぞれの処理区分を表２のとおりとした。

表２　加熱処理及びエタノール添加処理区分

区分	加熱温度・時間	エタノール％
1	−	−
2	65℃・30min	−
3	85℃・15min	−
4	−	0.5
5	−	1.0
6	−	3.0
7		0.5
8	65℃・30min	1.0
9		3.0
10		0.5
11	85℃・15min	1.0
12		3.0

２．４．官能試験

加熱処理を行った場合、熱による香気成分の化学変化や飛散のため、無処理のものに比べて香気成分が変化する可能性がある。また、エタノールは固有の香りを持つことや自身の蒸発の際､他の香気成分との相乗効果など、混合による大きな影響がある。

そのため、日頃この天然木蒸留水を扱っている応募企業の従業員の方々に、無処理の蒸留水との差がどれぐらいあるか評価していただく官能試験を行った。

評価サンプルは、表２の処理区の１２区分のうち、研究員が事前に調査し、差が比較的明確だった１、４、５、６、７、８、９の区分、７種類で実施した。

それぞれ50mlのキャップ付きネジロ瓶に入れ、１回毎にキャップを開け判断していただく方法とした。評価項目は表３のとおりとし、参考事項として性別、年齢(年代のみ) の記載をお願いした。

表３　官能試験記入項目等

エタノール臭気強度	1しない　2　3エタノール弱　4　5エタノール強
香りの変化	1悪い　2少し悪い　3標準とおなじ　4少し良い　5良い

試験場は、応募企業の食堂を利用し、電子式温湿度計で室温24.1℃、湿度35%以下 (表示は「L0」) の条件で、図２のような形で行った。

３．結果

３．１．サンプリング

採取時間については、当初、乾燥が午前８時３０分から開始されることから、No.１は午前１０時３０分（２時間後）ごろと想定していたが、実際には遅延し、No.２以降はほぼ予定どおりとなった (表４)。なお、１回目の採取はタンク１に､目視で10cmほど溜まってから採取した。

図２　応募企業内での試験風景

表４　蒸留水のサンプリング時間

No.	採取日・経過時間	
1	12月12日	2:50
2	12月12日	3:30
3	12月12日	5:00
4-1	12月12日	8:30
4-2	12月12日	8:30
5	12月13日	23:50
6	12月14日	47:50
7	12月14日	51:20

※No.8は保管品のため記載せず

３．２．微生物試験

一般細菌は、No.８を除いて、今回サンプリングした蒸留水からは、初発及び３０日保管後も微生物は検出されなかった。

また、No.８については、無処理の区分１で10^5個/gを越えたこと、加熱処理及びエタノールの効果について明確な差が出たことから､１３日保管後の試験で終了した。No.８の結果は表５のとおりである。

今回サンプリングした蒸留水から微生物が検出されなかった理由としては、冬期間だったことから、元々微生物が繁殖しにくい環境であったためと考えられた。

また、表５のとおり、エタノールを添加した区分でも

微生物の減少が見られたが、微生物数が大幅に減少したのは、加熱処理をした２、３、７、８、９、１０、１１、１２の区分であった。

表５　No.８の試験結果(単位：個/g)

区分	サンプリング直後	30℃保管 13日間経過後
1	3.3×10^{3}	1.0×10^{5}
2	30以下	30以下
3	30以下	30以下
4	−	1.4×10^{5}
5	−	5.0×10^{4}
6	−	1.9×10^{4}
7	−	30以下
8	−	30以下
9	−	30以下
10	−	30以下
11	−	30以下
12	−	30以下

３．３．官能試験

検査は合計１０名で行い、男性６名、女性４名であった。年齢は１０代が１名、２０代２名、３０代３名、４０代１名、５０代が３名であった。

エタノール臭気強度に関しては男性が強く感じる傾向があったが、全体的に、添加割合による大きな差はみられなかった。

次に、香りの変化に対しては、エタノールの濃度が高くなるにつれて、評価が高くなる傾向が見られた。その傾向は、加熱処理を行ったサンプルも同様であった。

全体的には大きな差はみられなかったが、「良い」と評価した人数が最も多かったのは、アルコール添加量1%で加熱処理（65℃30分）した区分で３名であった。また、「少し良い」では、0.5%添加で加熱処理（65℃30分）した区分で４名であった。しかし、同じ条件で「良い」をつけたものは一人もいなかった。

また、3%添加では、「良い」評価をしたものが１名いたが、「やや悪い」としたものが５名と他に比べ多かった。

４．結言

ヒノキなどの乾燥時の排気から、天然木の香気成分が含まれた蒸留水を消臭剤として販売するに当たり、主に微生物に関する品質管理手法を検討するため、加熱処理とエタノール添加について検討した。

結果として、今回採取したサンプルの微生物検査では、微生物は検出されなかった。

しかし、過去に採取、保管された天然木蒸留水に微生物が確認されたことから、タンク４までの間では微生物の混入はないが、濾過中及びその後の工程で微生物の混入が起こる可能性があることが推察された。

微生物が検出されたサンプルによる微生物試験においては、アルコール添加単独では、減少は見られたものの大きな効果はなかったが、加熱処理は有効であった。

また、官能試験では、各試験区において大きな差はみられなかったが、アルコール添加量0.5%及び1%と加熱処理（65℃30分）を合わせた区分は、他と比べ良好な評価であることがわかった。

液相製造管理における迅速簡便な濃度及び組成分析手法の開発

Development of rapid and simple analysis method for concentration
and composition of liquid in liquid phase production control

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三酸化クロムと硫酸の混合処理液中にステンレス材を浸漬して着色される。しかし、その最適な製造条件は現場の職人の経験と勘に頼るため、工業的な再現性の確保、技術の伝承、及び代替技術検討が困難であった。そこで本事業では製造工程の数値管理化をはかり実験室スケールで、その製造条件の再現を行った。また、着色処理液に対し蛍光エックス線分析による簡易で迅速な定量法について検討した。その結果、実験室スケールでカラーステンレス化学着色を再現し、高濃度処理液の簡易で迅速な定量分析が可能となった。

Key words: カラーステンレス、三酸化クロム、硫酸、液体試料定量、XRF-EDX、自動検出

１．緒言

カラーステンレスは、塗装ではなくステンレス表面の酸化皮膜を利用した化学着色法である。この発色の仕組みは光の干渉によるものでステンレス表面の酸化皮膜上で反射した光と、皮膜とステンレス界面で反射した光との光路差により光が干渉するために発現するとされている。また酸化皮膜の厚さを変えることにより様々な色調が生み出される（図１）。

現在、カラーステンレスはブラックに着色されたステンレスネットがスポーツ競技場のバックネットや、動物園の檻や鳥類の人工巣などに採用されている。

また、屋外に露出しているカラーステンレスが数十年経っても色調が変わらない特長があり、素材ステンレスを溶解する塩化鉄溶液に対しても、カラーステンレスは高い耐食性を有する。そのため今後はより幅広い活用が期待されるが、その製法、性能の詳細は、まだまだ未解明な部分がある。

化学着色カラーステンレスは、ステンレスを適切な温度と時間、着色液（高濃度の三酸化クロムと硫酸の混合液）に浸漬することで製造される。浸漬するとステンレス表面に酸化皮膜が生成し、徐々に皮膜が成長し、その皮膜の厚さで色調を調整する。

図１　カラーステンレス

応募企業は、ステンレス材（SUS304）を高濃度クロム酸と硫酸の混合液槽に浸漬し、その浸漬時間を調整して顧客から要求された色に職人の目で色調確認をすることでカラーステンレスを受注生産している。

しかし、カラーステンレスは干渉色を応用した製品であることから見る位置（角度）、光源の位置、光源の色、カラーステンレスに映りこむ周囲の色調の影響を受け色調が変化する。故にその都度、職人の目で色見を合わせているが、実情としては職人の経験と勘に頼り製造するため一品一様の製品となっている。

そこで本事業では、実験室スケールの小型カラーステンレス製造プラントを製作し、各分析機器により最適な製造条件のデータを取得することにより実験室スケールで再現性の高い着色が可能となるよう、職人の経験と勘を数値管理化して工業的な生産を目指した。

２．実験と結果

２．１．着色液と硬膜液の２液処理による製造

カラーステンレスを商業ベースにのせた工法は古く、1972年カナダのインターナショナル・ニッケル（通称INCO)社発表の着色皮膜を強化する硬膜処理法による。これは具体的にはステンレスを着色液と硬膜液の２液の処理液に浸漬して製造する方法で概要は以下の通りである。

２．１．１．着色処理

ステンレス基材を、三酸化クロム（CrO_3）及び硫酸（H_2SO_4）の混合水溶液（着色液）に浸漬して発色させる。この浸漬時間の長短により色調が、アンバー、ブルー、ゴールド、レッド、グリーンへと変化する。この時ステンレス表面には透明な酸化皮膜が形成されるとされ、その皮膜の厚みは 100～300μmの厚さとされている。

事業課題名「液相製造法における伝承技術の数値管理化及びその製造条件最適化の検討」

２．１．２．硬膜処理
着色後のステンレス基材をCrO_3及びリン酸（H_3PO_4）の混合水溶液（硬膜液）に通電しながら浸漬して皮膜の硬度を向上させる（INCO法）。

２．２．制御因子
２．２．１．着色をするステンレス材料
SUS304 系のステンレスには着色可能とされているが、ステンレスの成分、形状、表面積、表面粗さ、温度が影響し着色できなかったり、発色する色調が変わってしまうことが知られている。

また、加工時に高温になった部分や加工変形した部分にも発色異常が起きることから、ステンレスの結晶相も着色には影響すると考えられる。

本事業では、実験に使用するステンレスを鋼種 SUS304、厚み 0.5㎜、BA 材、大きさ 5cm 角の平板とし、試料条件（ステンレス鋼種、形状、表面積、表面粗さ）と温度条件を統一して行った。

ここで、着色液の温度を揃えて着色を行うが、無垢の材料の場合は、比熱により液温と温度の同一化ができないため液温と短時間で温度が同じになる薄板を対象とした。

２．２．２．処理液の成分
製造には前述の２種類の処理液を使用するが、着色液と硬膜液は共にステンレスを腐食する強酸性を有する液であるものの、ステンレス化学着色後には処理液成分の注ぎ足しのみで入れ替え更新しない製法である。

ここで着色を何度も繰り返すとステンレスに付着して槽外に排出される硫酸由来の硫黄（S）と三酸化クロム由来のクロム（Cr）の濃度が低下し、またステンレスから溶出する成分 Cr、鉄（Fe）、ニッケル（Ni）や夾雑物の微量成分（銅（Cu）、亜鉛（Zn）他）などが製品の着色効果に影響を与えていると考えられる。

本事業では着色液に対し SUS304 のみを投入し、複数回着色前後の濃度変化を分析した。

２．３．小型カラーステンレス製造プラント
カラーステンレス着色の実験は、現行設備の大型槽を実験室スケールに小型化するための参考文献がなく基本検討が必要だった。そのため、大型槽を模した小型製造プラントを作るために、３D-CAD を使用しコンピューター上で材料強度と実験操作のシミュレートを行い、この結果から設計をし、小型製造プラント実機を組み立てた（図２）。尚、３Dデータを作成したことでプラントをコピー、再構築に必要な設計情報として管理が可能になった。

本実験では、この小型カラーステンレス製造プラントを用いて前述のステンレス基材に、基材の成分、形状、表面積（表面粗さ）、温度の条件は固定し、着色液の電圧変化を読み取りながら各色調のカラーステンレスを試作した（図３）。

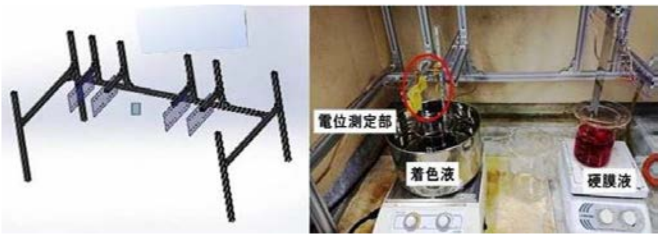


図２　小型カラーステンレス製造プラントの設計と実機

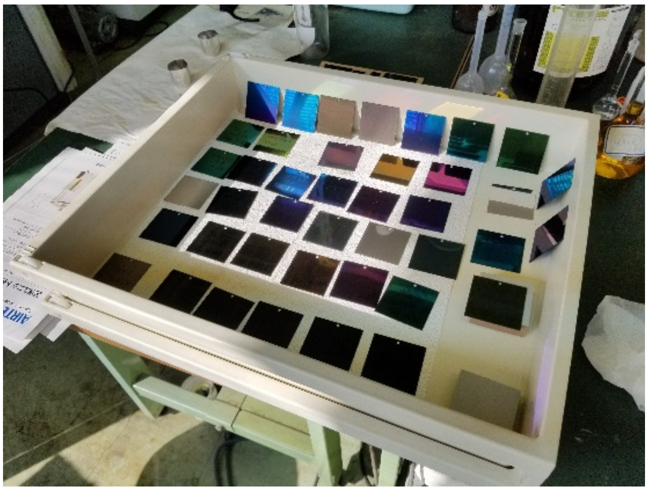


図３　試作したカラーステンレス

２．４．蛍光エックス線分析による液体試料分析
２．４．１．液体試料定量の問題点
通常、液体試料である処理液の組成や濃度の分析は ICP 分析等を行う。しかし、これらで高濃度液体試料を分析するには前処理が煩雑な方法が多い。例えば、内標準法や標準添加法は、試料に内標準物質（イットリウム(Y)等)や測定元素の正確な添加操作を要する。また、これらよりも単純な絶対検量線法においても試料を 1000～10000 倍に大きく希釈するため希釈誤差が拡大する。これらはいずれも熟練した操作と長時間を要するため簡便で迅速な分析は困難であった。

そこで前述の２．２．２．の処理液の主成分について、現場に早く結果が反映できる、より簡便で迅速な手法を検討するため、以下のエネルギー分散型蛍光Ｘ線分析(XRF-EDX)による液体試料の定量分析を試みた。

２．４．２．XRF-EDX による定量
処理液中の高濃度の三酸化クロム（Cr 量を定量）と硫酸（S 量を定量）を XRF-EDX 装置（SII ナノテクノロジー製 SEA5120A）で定量した。尚、本装置の管球はロジウム（Rh）で測定可能元素は Na～U までである。

ここで、XRF-EDX 法は金（Au）メッキ液の濃度分析には活用事例はあるが、Au よりも軽元素である Cr や S

の分析事例は殆どない。その理由として蛍光収率の低さがあり、その発生する Cr 及び S の Kα 線の強度は Au の半分以下である（図４）。

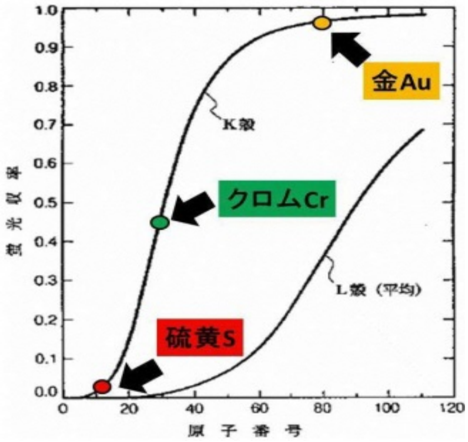


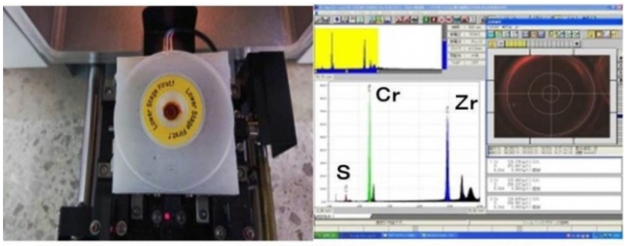
図４　原子番号と蛍光収率の関係[1)]

また液体試料のため真空雰囲気での分析はできず、大気中で分析するため、Cr と S の Kα 線は空気により更に減弱されるため、定量の難易度は高い。

２．４．３．実際の XRF-EDX による定量

前述の問題を軽減する手段としてメッキ液測定セルを用いた（図５）。このセルは樹脂製で中央の凹部の液溜まりに液体試料を少量（1mL 以下）滴下し、透明な薄膜フィルムの窓材で覆い分析する治具である。またこの治具には試料との距離や XRF 強度の変動を補正するための金属製の底板が外標準物質として液溜りの底面に敷かれている。今回はその底板には硫酸からの耐食性と強度の強さからジルコニウム（Zr）製の底板を用いた。更に窓材も硫酸による耐腐食性からポリエステル（PET）に代わってポリプロピレン（PP）を用いた。液体試料も、処理液の原液はほぼ飽和した高濃度なため、溶質の再析出を防ぐために２倍希釈したものを分析した。ここで分析モードはバルク検量線法で行い、条件は定量に最適なデッドタイムになる管電圧 50kV、管電流８μA にて行った（図６）。

図５　メッキ液測定セル



条件:バルク検量線法　管電圧50kV　管電流8μA

図６　XRF-EDX 定量様子とその分析条件

次に検量線は、三酸化クロムと硫酸の濃度を段階的に変えた標準液５点、及びブランク（蒸留水）の計６点の検量線を作成した（表１及び図７）。この時、各試料の積算時間は XRF 強度が安定する 300sec とした。

表１　検量線作成用の各標準液

標準液(STD)	蒸留水	STD1	STD2	STD3	STD4	STD5
CrO3換算値(g/L)	0	100.6	110.2	120.1	130.3	141.0
H2SO4換算値(g/L)	0	200.6	220.6	240.0	260.3	280.1

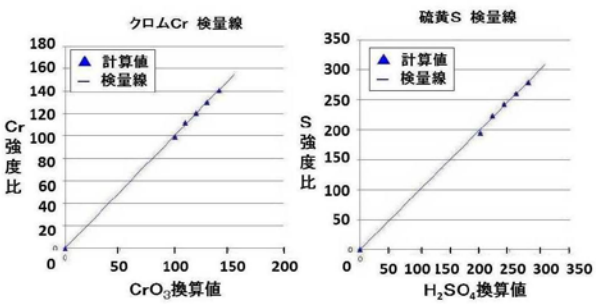


図７　各標準液による検量線作成

この検量線を用いて実試料の２倍希釈着色液の定量を日にちを変えてそれぞれ５回行い、その平均値や変動係数、誤差率を算出した（表２）。その結果、変動係数は最大で約２％、誤差率も５％以内に収まる定量値が得られた。ただし、装置起動直後や日によって Rh 管球の出力変動や検出器のドリフトはあるため、濃度既知の標準液も平行して分析し補正する必要がある。

表２　XRF-EDX による定量分析結果

◆標準液の1回目定量

分析回数	1	2	3	4	5	平均値	変動係数	誤差率(%)	標準液(g/L)
CrO3換算値(g/L)	126.4	126.0	126.4	126.4	125.8	126.2	0.2	1.0	125.0
H2SO4換算値(g/L)	253.9	254.2	254.6	254.4	253.1	254.0	0.3	1.6	250.2

◆標準液の翌日2回目定量

分析回数	1	2	3	4	5	平均値	変動係数	誤差率(%)	標準液(g/L)
CrO3換算値(g/L)	129.9	130.7	131.2	131.6	132.8	131.2	0.6	5.0	125.0
H2SO4換算値(g/L)	256.9	261.2	262.0	261.5	263.8	261.1	2.0	4.4	250.2

２．４．４．XRF-EDX による定量の注意点

本手法はエネルギー分散型の装置であるため、定量には特有の注意を要する。即ち各元素のピークの重なりや妨害により定量値に異常値が出る場合がある。具体的には Cr-Kα 線にはバリウム Ba-Lγ 線とバナジウム V-Kβ 線の重複ピーク、及び塩素 Cl-Kα 線のサムピ

ークが妨害ピークとなる。またS-Kα線にもモリブデンMo-Lα線が重なるので注意を要する。

また液体試料のため、分析箇所に気泡が存在していると強度が低下し、分析値が低めの誤差要因となる。

2．5．着色処理の電圧ピーク自動検出技術

ステンレスを着色液に浸漬するとステンレスを電極として起電する（図２の電位測定部を参照)。このとき発生する電圧は浸漬時間とともに変動するが、この電圧はステンレスの成分、形状、表面積（表面粗さ）の影響で変動する。

これまでは職人がペンレコーダーに描画される曲線を注視し、ステンレス材料の状態、温度、類似の過去実例の着色結果などを加味し、浸漬時間を経験と勘で人為的に決めてきた。

着色処理時の代表的な電圧変化グラフを図８に示す。

着色処理時の電圧変化には特徴的な２つのピークＡ点、Ｂ点が見られる。ここでＡ点とはゼロ点と呼ばれ、元々ステンレス表面に成膜していた酸化被膜が剥がれた時点と言われている。またＢ点とは開始点とも呼ばれ、新たに酸化被膜が成膜していく端緒となる時点と言われている。

色調を変えていく場合の指標として浸漬時間を長くすると色調が変わっていくがＡ点、Ｂ点が確認できない場合は時間を決めて引き上げる。

Ａ点からＢ点に電圧が変動する時間は、処理液に浸漬されたステンレス素材表面の不動態が除去されているという説があるが、実際に不動態が無い状態を観察した研究報告は無いと思われる。

Ａ点、Ｂ点は着色する材料の表面状態などの要因でばらつくが、これらを正確に測定することで着色処理の再現性を向上させることができる。

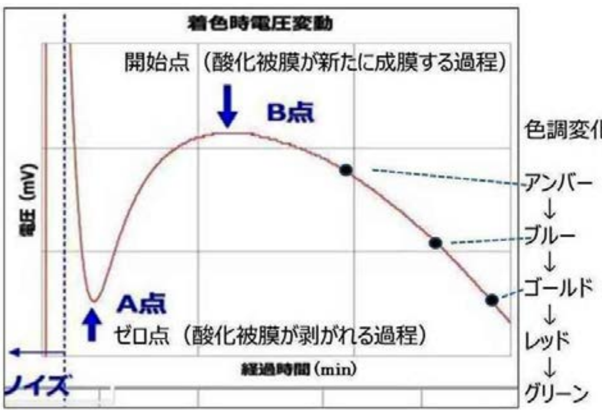


図８　着色処理時の電圧データ

デジタル計測によるデータを抜粋して図９に示す。着色処理は数十分間要することからサンプリング１秒で数千行のデータとなる。

時間（秒）	電圧（mV）	温度（℃）
33.00	240.30	17.2
34.00	237.50	17.2
35.00	234.90	17.2
36.00	232.50	17.2
37.00	230.30	17.2
38.00	228.30	17.2

数千行

図９　データロガーデータ抜粋

グラフ波形には上下を繰り返すノイズが含まれており、最大値、最小値検出による一般的なデータロガー機能ではピーク検出ができない。

そこで今回、表計算ソフト（マイクロソフト社エクセル）とパソコン、データロガー（グラフテック社GL-220ダイレクトエクセル対応測定器）を使用することで、以下の３点を実現した。

１つは波形とデジタルデータのリアルタイム計測、２つ目はデータ価値が無価値なノイズの除外、３つ目はＡ点及びＢ点の自動検出技術である。

これによりエクセルによるリアルタイム計測が可能になり、関数を組み合わせることで高額なプログラムが無くても自動検出が実現できた。その結果を表３に示す。

表３　エクセルによる自動検出結果

ピーク点	判定方法	電　圧	浸漬時間	液　温
A点	手動（従来目視判定）	197.6 mV	1分 30秒	17.1 ℃
	自動（エクセル検出）	197.6 mV	1分 31秒	17.1 ℃
B点	手動（従来目視判定）	205.7 mV	5分 34秒	17.0 ℃
	自動（エクセル検出）	205.7 mV	5分 23秒	17.1 ℃

またデジタル計測により、ペンレコーダーによる波形データを目算で読み取る場合より再現性の高い測定、着色処理が可能になった。

更にペンレコーダーによる紙ベースの波形データと異なりデータ分析がパソコンで行えるデータ取得が可能になった。

３．結言

本事業では現場職人の経験と勘に基づき製造されてきたカラーステンレスの製造に対し、製造工程の数値管理化を図り、最適な製造条件を再現すべく実験室スケールの試作を行った。また、これに伴った着色方法、混合液の分析方法の検討をした。その結果、以下の知見を得た。

（１）　高濃度の処理液をメッキ液測定セルを用いてXRF-EDX装置で分析することで、少量の液体試料でも簡易で迅速な定量が可能であった。

（2） Au よりも軽元素の Cr 及び S であっても、条件を最適化すれば液体試料の大気中での分析が可能で、かつ Zr 板を用いた外標準法により定量することで、その定量値に精度と正確さが増した。

（3） 一般的な表計算ソフト（エクセル）を用いてパソコンで計測値の自動検出が実現できた。その結果、実験室スケールで着色の再現性が向上した。

今後はこれらのことを実際に製造現場に活かしカラーステンレスの生産性の向上に役立てる予定である。

参考文献

1）飯田博美編. 放射線概論－第一種放射線試験受験用テキスト. 2005.

形状に制限のある金属粉末レーザ積層材料の引張強さ試験手法の開発

Development of tensile strength test method for laser melted metal powder laminate material with limited shape

いわき技術支援センター 機械・材料科　渡邊孝康　橋本政靖　佐藤善久
応募企業　株式会社エービー

金属粉末レーザ積層造形法により作製した高硬度金属材料の解析技術を確立するため引張試験方法の検討を行った。日本工業規格の比例試験片に則った試験片と治具を試作した。また、試作した試験片と治具の妥当性を確認するために引張試験を行った。その結果、試験片中央で破断する妥当な結果を得た。併せてデジタル画像相関法による解析で試験片平行部に均等なひずみ分布が生じていることを確認した。

Key words: 金属粉末レーザ積層造形法、金属 3Dプリンタ、高硬度金属材料、デジタル画像相関法

1．緒言

金属粉末レーザ積層造形法(SLM)は金属粉末の材料をベースプレートに一定の厚みで薄く敷き、レーザビーム照射により所望の領域を溶融・凝固させることを繰り返し積層させることで、三次元形状を造形するアディティブ･マニュファクチャリングの１つである[1]。金属材料を三次元形状に加工でき、従来の機械加工では製作が困難な複雑形状の金属製品を製作することができるため、様々な分野での応用が期待されている。

応募企業では金属粉末レーザ積層造形機で金型製品等を製造している。従来の加工法で成形された製品と同様に利用していくために、積層造形した金属材料の強度を知ることが重要となっている[2]。

金属材料の強度を調べるために重要な引張試験については日本工業規格の JIS Z 2241（金属材料引張試験方法)に試験片の形状と試験方法が規定されている。

SLM は急速な溶融凝固現象に伴い、金属組織の異方性が発生するため、図 1 に示すようにベースプレートに対して、0[°]、45[°]及び 90[°]の方向に引張試験片を造形する必要がある。しかし、SLM の造形機でそれぞれの方向で規格に則った試験片を用意し、試験を実施するには課題がある。

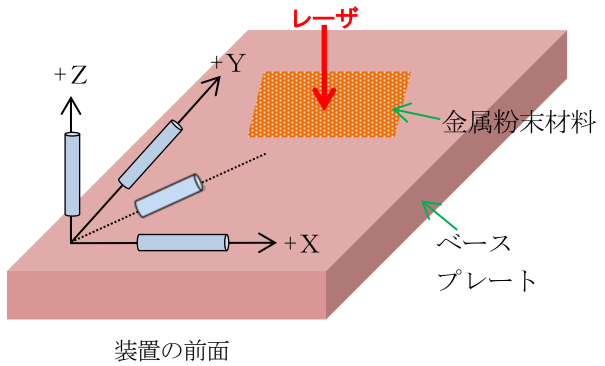


図１　ＳＬＭによる引張試験片の造形

課題の一つは Z 軸方向に加工制限があり、Z 軸方向を引張方向とした JIS 定形試験片を作製できないことである。JIS Z 2241 で規定のある定形試験片は、標点距離が 50[mm]以上しかなく、今回は SLM の加工機による Z 軸方向の加工制限で、必要な長さの試験片を積層することができない。

もう一つの課題は、積層造形する材料が硬いと、試験機の治具で把持できないことである。通常、引張試験を行う際には万能材料試験機のつかみ歯と呼ばれる治具で、試験片を直接挟み込む。試験機メーカ標準のつかみ歯が適用できる試験片の硬さはロックウェル硬さ 35HRC 以下である。一方、プラスチック射出成型量産用の金型には一般的に 40HRC を超える高硬度金属材料が使用される。SLM でも 40HRC 以上を超える硬さの高硬度材料の開発が進められており、本検討で積層した試験片も汎用のつかみ歯では試験できない。試験機メーカからは 40HRC までの材料に対応した特注の高硬度用つかみ歯が市販されているが、使用できる試験片には一定の長さが必要で、SLM の加工機では Z 軸方向には必要な長さの試験片を作製することができない。

以上のように、Z 軸方向を引張方向とした、40HRC 以上の高硬度材料で造形した引張試験片は、従来試験することができなかった。そこで今回は高硬度金属材料の板状試験片と把持用治具の検討を行い、Z 軸方向を引張方向とした試験方法を検討した。

2．実験方法

Z軸方向を引張方向とした試験片で試験を実施するには、試験片を造形機の加工範囲内、かつ試験機で把持できる長さで作製する必要がある。また従来の試験片を直接つかみ歯で把持する方法では、試験片が硬く把持できない。そこで、今回は試験片の肩部をテーパ形状に加工し、治具にもテーパ形状の溝掘り加工を施し、試験時には試験片を治具の溝にはめ込み把持する方法を検討した。設計にあたってはくさびのつり合い式[3]を参考に治具に発生するせん断応力を考慮した。

事業課題名「高硬度金属材料の解析技術」

試験片平行部の形状はJIS Z 2241に規定のある14B号比例試験片を参考に万能材料試験機の容量とつかみ治具の寸法を考慮し作製した。

模擬試験片の材質は金型用の材料として広く普及し加工性が良いNAK80(大同特殊鋼製プリハードン鋼[4])で作製した。治具の材質は、作用するせん断応力と入手コストを検討し、一般構造用圧延鋼材（SS400）とした。図２に設計した試験片の形状を示し、図３に実際に試作した試験片と治具を示す。

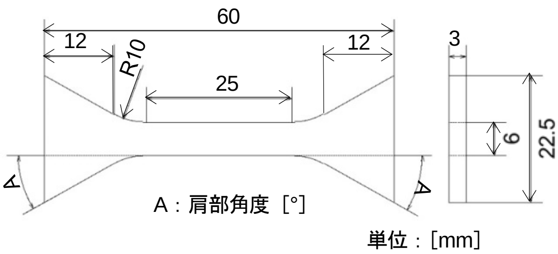


図２　検討した試験片の形状

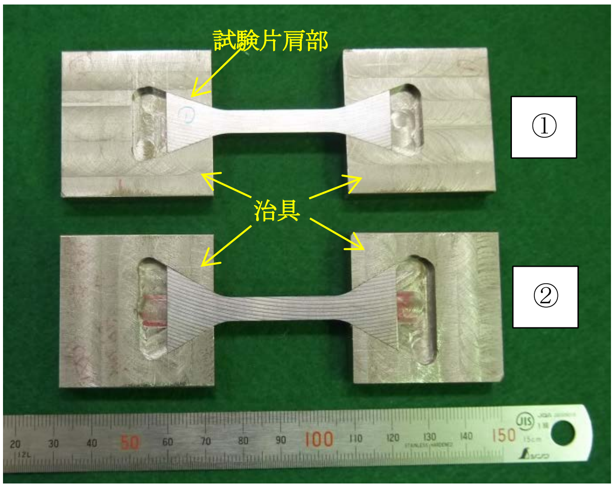


図３　試作した①肩部 20°試験片と治具及び②肩部 30°試験片と治具

肩部の角度によって、治具に発生するせん断応力は大きく異なる。治具の材料強度等を検討の結果、20[°]と 30[°]で作製した。試験片全長は加工機の制限と試験可能な試験片長さを検討の結果 60[mm]とした。試験片平行部の厚さは3[mm]、幅6[mm]、標点間距離は 25[mm]とした。試験には万能試験機(島津製作所製 AG-100kNX)を用いた。試験速度は、20[MPa/s]とした。0.2%耐力は、ビデオ伸び計を用いて取得した公称応力-公称ひずみ曲線より求めた。また、試験片の硬さをロックウェル硬度計Cスケールで測定し、硬さ換算表による相関関係について確認した。

試験の妥当性評価のために、試験片に25[mm]で標線をひき、破断位置を確認した。併せて、デジタル画像相関法(DIC)でひずみ分布解析を行った。DICは試験片表面に付与したランダムパターンの微小な変位量をカメラで測定することで、試験片のひずみ分布を観察する方法である。実際の試験状況を図４に、ランダムパターンを付与した試験片を図５に示す。

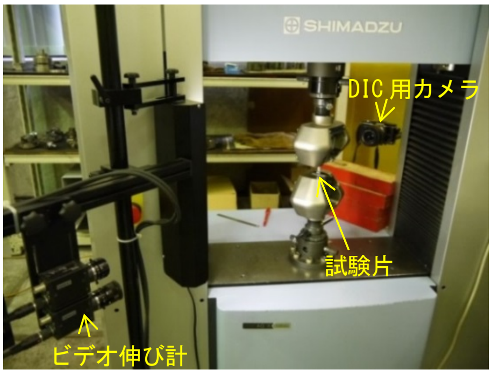


図４　引張試験状況

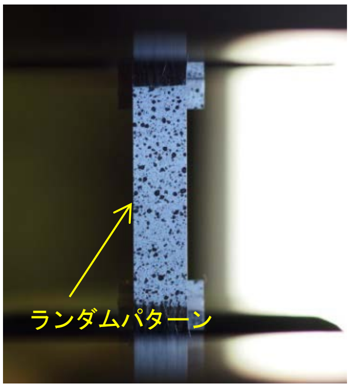


図５　DIC 用微小試験片

３．結果及び考察

試験の結果、①肩部 20°試験片では治具が変形し破断まで試験できなかった。一方、②肩部 30°試験片は破断まで試験できた。試験後の試験片を図６、試験結果を表１に示す。

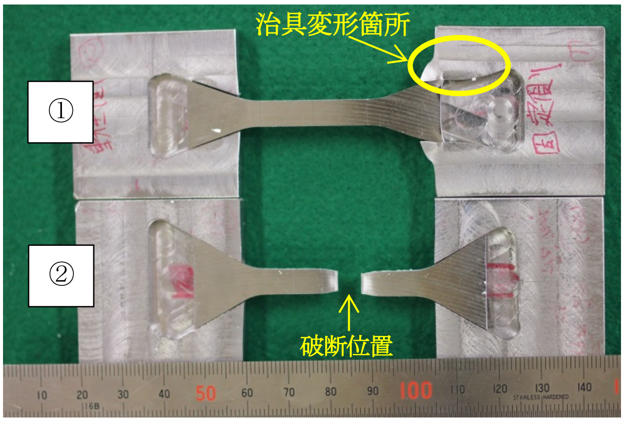


図６　試験後の①肩部 20°試験片と治具及び②肩部 30°試験片と治具

表１　②肩部 30°試験片試験結果

0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	突合せ伸び [%]	破断位置	HRC
1050	1280	16.4	A	41.1

DIC による応力解析を行った結果を図７に示す。

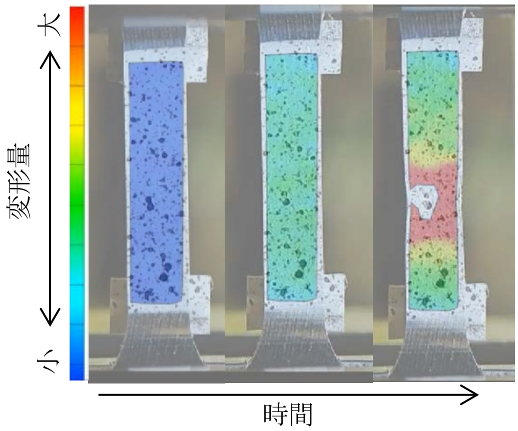


図７　DIC 解析結果

図７の結果から、初期は平行部全体に均一に微小な変形が生じ、試験が進行して平行部全体で変形量が大きくなり、最終的には中心部付近で局所変形が生じ、破断に至る様子が確認できた。赤色部は変形量が大きい箇所を示しており、破断直前の画像上で一部色が欠損している箇所は、試験片の変形量が大きくなったため、ランダムパターンが一部剥がれたと考えられる。試験片の破断位置は中央、JIS Z 2241 で規定のあるA破断である。また、大同特殊鋼のNAK80 の機械的性質[4]は、37～43HRC、0.2%耐力が 1000[MPa]、引張強さが1250[MPa]であり、表１に示した今回の試験結果とよく一致した。以上のことから、今回の試験片と治具を用いた試験は妥当である。また、試験片硬さ 41.1HRCを硬さ換算表[5]で換算すると引張強さが 1295[MPa]で、実測値とよく一致しており、硬さと引張強さに相関関係が認められる。

①肩部 20°試験片が変形した理由を考察する。NAK80 の引張強さ実測値から、治具にかかるせん断応力を計算すると、①肩部 20°試験片では 205[MPa]、②肩部 30°試験片では 157[MPa]であった。治具に使用したSS400 の機械的性質は降伏点応力が 215[MPa]以上（板厚 40～100[mm]の場合）、引張強さが 400～510[MPa]である。ここで、工業製品の強度設計でよく用いられる安全率について検討する。安全率は、基準強さを許容応力で割った値で、製品の変形や破壊に対する安全性を表す。一般的に安全率が大きいほうが、製品の強度としては安全である。しかし、安全率を大きくすることは、高価な強い材料を使用することや製品の形状を大きくすることに繋がり、経済的なコストが問題となる。そのため、安全率の設定では強度と経済性のバランスが重要となる。今回の場合は治具に作用したせん断応力を許容応力、SS400 の降伏点応力を基準強さとし計算すると、肩部 20°試験片では、安全率が 1.0、肩部 30°試験片では安全率が 1.4 であった。理論的にはどちらの形状であっても治具は強度が十分であると想定したが、材料の強度のばらつき等の影響で肩部 20°試験片では発生したせん断応力が許容応力を超え、変形を生じたと考えられる。よって、同じ材料でも、肩部 30°試験片は発生するせん断応力を小さくでき、安全率を大きくできることから、肩部の形状は 30[°]がよいと考えられる。また治具の材料は、少なくとも安全率が 1.4 以上となる降伏点応力をもつ材料で作製すればよいと考えられる。

４．結言

本事業では、SLM による高硬度金属材料の解析技術を確立するため、引張試験方法について検討を行った。

その結果、以下の知見を得た。

① 全長 60[mm]の肩付きの JIS14B 号比例試験片と治具を試作し、肩部 30°試験片と治具を用いて、試験片中央で破断しひずみ分布も一様な Z 軸方向の引張試験方法を確立した。

② 治具材料の強度は肩部 30°試験片の場合、安全率 1.4 以上が必要である。

参考文献

１）角谷晃司. ハイブリット金属３Dプリンタ LUMEX と LUMEXCAM の特長と活用技術. 機械技術. 2019, Vol67, No1, p65-69.

２）京極秀樹, 池庄司敏孝. “造形条件の探索と材料評価”. 図解金属３D積層造形のきそ. 日刊工業新聞社, 2017. p.133-139.

３）井上順吉他. “摩擦”.機械工学便覧. 第６版, 日本機械学会, 1968, p33-39.

４）大同特殊鋼株式会社.“NAK80”. https://www.daido.co.jp/products/tool/pdf/nak55_80.pdf, (参照 2019-2-14).

５）日本規格協会. “９.硬さ換算表”. ＪＩＳハンドブック鉄鋼Ｉ. 第１版, 日本規格協会, 2017, p2602-2610.

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１報）

Development of localization system by GPS and other sensors (1st report)

技術開発部 プロジェクト研究科　吉田英一　菅野雄大
技術開発部 生産・加工科　　　稲葉勉　　太田悟

本研究では、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。今年度は自己位置推定に利用するGNSS受信機の測位実験を行い、マルチパスの影響を多く受ける壁際での測位精度を検証した。また、障害物を回避するためYOLOによる物体検出モデルの作成と検出実験を行った。その結果、壁際のGNSS測位では、衛星数の減少及び衛星配置の偏りにより、測位精度が低下することを確認した。さらに、物体検出では人工物の認識において、高い認識率を示した。

Key words: GPS、自己位置推定、GNSS、マルチパス、物体検出、YOLO

１．緒言

労働人口減少に伴いGPSトラクターや農作物の無人運搬機、警備ロボットなど、屋外で稼働する自律走行型ロボットの実用化が期待されている。

これら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を利用している。しかしながら、みちびきに対応した数cm精度のGPS受信機は百万円以上と高価で、安価なGPS受信機では数m程度の誤差が生じる。また、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ってしまう。

一方、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てロボットの位置を推定するシステムを開発する。

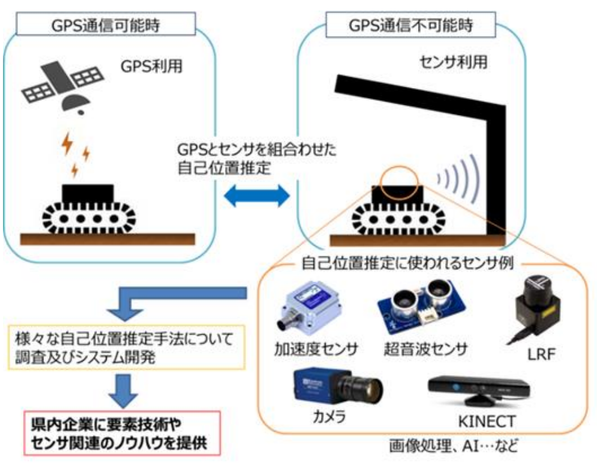


図１　研究概要

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。

２．実験と結果

今年度は自律走行ロボットの自己位置推定に利用するセンサのGNSS受信機について、センサ単体で測位実験を行った。

２．１．自己位置推定システムの開発

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。位置推定にはさまざまな手法があり、使用されるセンサも異なっている。

GNSS（Global Navigation Satellite System）は、米国のGPS、日本の準天頂測位衛星みちびき、ロシアのGRONASS、欧州のGalileoなどの全球測位衛星システムの総称のことで、GNSS受信機を利用して屋外の広い範囲で緯度、経度、高度などの位置情報を取得することができる。しかし、建物や壁に反射した信号を受信するマルチパスや電離層の影響などの誤差要因により、5m～10m程度の誤差が生じることが位置推定の欠点となっている。

ベイズフィルタ系の位置推定手法はパーティクルフィルタやカルマンフィルタを用いた推定手法で、LRFを利用して高精度な位置推定が可能だが、環境地図が必要であることや、レーザで認識できる目標物がないと位置推定できないなどの欠点がある。

自律航法はロボットに搭載した慣性センサやホイールエンコーダを用いて位置を逐次的に推定する手法で、衛星信号が届かないような屋内でも使用可能だが、ホ

事業課題名「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」

イールエンコーダはタイヤの滑りを検出できない、慣性センサは誤差が蓄積するなどの欠点がある。

以上より、使用する位置推定手法とそれぞれの利点、欠点をまとめたものを表１に示す。

表１　位置推定手法

	GNSS	ベイズフィルタ	自律航法
使用センサ	GNSS 受信機	LRF	慣性センサ エンコーダ
利点	屋外の広範囲で使用可能	高精度な位置推定が可能	屋内外で利用可能
欠点	測位誤差 建物内で使用不可	地図や目標物が必要	スリップや外乱による誤差が蓄積

また、自律走行の実現には自己位置推定のほかに、地図生成、障害物検出、経路・動作計画などの機能をロボットに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[1) 2)] (Robot Operating System) を使用し、自律走行機能を持つ ROS パッケージと GNSS や自律航法の位置推定手法を組み合わせて自己位置推定システムを開発する。

また利用するセンサは位置推定や障害物検出に使用する 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。

２．２．YOLO を用いた物体検出の開発

自己位置推定システムを搭載した自律走行ロボットは、搭載された各種センサを用いて周囲に存在する物（モノ）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、または検出物体を回収するなどの動作を判断するために重要である。

しかし、採用した各種センサで判断可能なのは周囲に何らかの物が存在することまでであり、それが何であるかを判断することは難しい。

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。

２．３．GNSS 受信機による測位実験

屋外で GNSS センサを使用する際、建物や木の付近では、受信可能な衛星数の減少、衛星配置の偏り、また、GNSS 信号の電波が建物や木に反射し、それを受信することで誤差が生じるマルチパスの影響により測位精度が劣化する可能性が高い。本実験では、それらの影響を確認した。また、測位方式の違いによる測位精度の影響を確認するため、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。

２．３．１．GNSS 実験方法

ハイテクプラザ敷地内の壁際（マルチパス環境）や壁から離れた周囲に障害物が無いオープンスカイ環境で、GNSS 受信機を手にした人が歩き、単独測位と RTK 測位を行った。測位結果の解析は 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。図２に示すように、グーグルマップに緑の点線で示す測位結果（GNSS 受信機を手にし人が歩いた軌跡）を張り付け測位状況を確認した。また、測位時の衛星数や衛星の配置（DOP）を確認した。

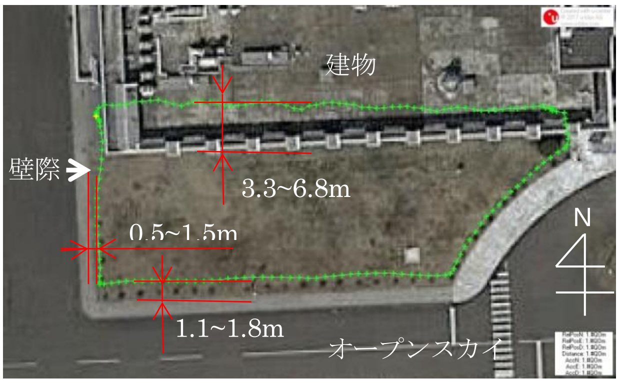
RTK 測位時は、基準局を図３のように、壁から十分離れた位置（オープンスカイ）に配置した。

以下に実験条件を示す。

＜実験条件＞
日時：平成 30 年 6 月 19 日（火）15:45 - 17:07
場所：ハイテクプラザ敷地内芝生（図２、図３）
使用 GNSS 受信機：u-blox 社製 C94-M8P
（RTK 測位時は 2 台使用）
衛星：GPS、GLONASS
測位方式：単独測位、RTK 測位

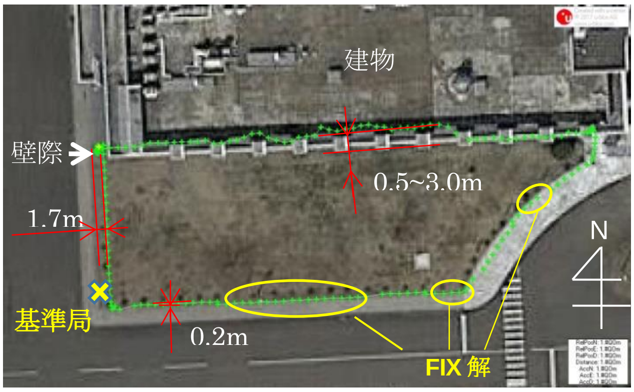
２．３．２．GNSS 実験結果

単独測位した結果を図２に、RTK 測位した結果を図３に示す。また、壁際とオープンスカイ環境で単独測位、RTK 測位した時の測位結果を表２に示す。



画像©2018 Google

図２　単独測位結果



画像©2018 Google

図３　RTK 測位結果

図４　センサ評価基板

表２　測位結果（最大誤差）

	オープンスカイ	壁際
単独測位	1.8m 衛星数：19 PDOP　：1.3	6.8m 衛星数：14 PDOP　：2.5
RTK 測位	1.7m 衛星数：18 PDOP　：1.4	3.0m 衛星数：13 PDOP　：2.6

壁から遠い縁石付近（図の下方）では、ずれ 1.8m 以下で測位できたが、壁際（図の上方）では最大 6.8 mのずれが生じた。また、表２に示すとおり壁際では、衛星数の減少や、衛星配置による精度低下率の指標である位置精度低下率 PDOP（Position Dilution Of Precision）の値が大きくなっている。これは、壁により衛星電波が遮られたことや衛星配置に偏りが生じたことにより、測位精度が低下したことがわかる。

この結果より、GNSS センサのみでロボットの自己位置推定を行うと、壁際では誤差が大きくなることを確認した。このような壁際では、GNSS とそれ以外の LRF、カメラ等の各種センサを組み合わせて使う必要がある。今後は、LRF と組み合わせ壁までの距離に応じて GNSS センサと LRF を切り分けて使用可能な自己位置推定システムを開発する予定である。

２．４．開発環境の構築

２．４．１．センサ評価基板の製作

屋外環境下でロボットを自律走行させたときの、GPS センサ、慣性センサ、電子コンパス等のセンサデータ取得と評価を行うため、図４に示すセンサ評価基板を設計・製作した。製作したセンサ評価基板は、ラズベリーパイ 3B の 40 ピンの汎用入出力ピンと接続して、ラズベリーパイ側でデータ取得できるように設計した。

センサはドローンでの利用実績が多い GNSS モジュール NEO-M8N、慣性センサ MPU9250、電子コンパス HMC5883L を選定したほか、日本の準天頂測位衛星みちびきに対応した GNSS モジュール NEO-M8U や、慣性センサ MPU9250 の後継となる ICM-20948、BNO055、BMX055 を脱着して搭載できる設計とした。

センサ評価基板に搭載できるセンサリストを表３に示す。

表３　搭載するセンサリスト

センサ	型番	メーカ	通信方式
GPS センサ	NEO-M8N NEO-M8U	Ublox	SPI, UART
慣性センサ	MPU9250 ICM-20948	TDK	SPI
慣性センサ	BNO055 BMX055	BOSCH	I^2C
電子コンパス	HMC5883L	Honeywell	I^2C

２．４．２．センサ評価ロボットの製作

ロボットの自己位置推定に必要となる GNSS センサ、LRF、カメラについて、屋内及び太陽光やロボットの振動等の外乱のある屋外環境での精度及び屋外環境でロボットの自己位置推定の精度を評価するための車輪型センサ評価用ロボットを設計し、製作した（図５）。センサ評価用ロボットの仕様を表４に示す。

ロボットに搭載する LRF は、一般的に障害物検出用と自己位置推定に必要となる地図作成用とあり、障害物検出用は、ロボット前方の地面にある障害物（縁石や人等）を検出するため、上方から任意角で斜め下を向くように設置し、地図作成用の LRF は広範囲の領域（本ロボットは 270°）を測位可能な位置に取り付ける。この取付け位置や取付け角度の違いにより、センサへの太陽光やロボットの振動等の外乱を受け、自己位置推定の精度に影響を及ぼす。今回製作したセンサ評価ロボットは、センサの取付け位置や取付け角度の条件を変えてセンサ精度の評価が可能である。

また、本ロボットにはツジ電子社製の T-frog 二軸ブラシレスモータドライバ「TF-2MD3-R6」を搭載した。TF-2MD3-R6 は、オープンソースの移動ロボット走行

図５　センサ評価用ロボット

表４　センサ評価用ロボットの仕様

最大外形	L700mm×W490mm×H730mm
重　量	20kg
使用センサ	GNSS アンテナ、LRF、カメラ
車輪	4 輪（前方 2 輪が駆動輪、後方 2 輪が従動輪）
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 12V、容量 12Ah）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
モータドライバ基板	ツジ電子社製 TF-2MD3-R6

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[3)]。

今後は、YP-Spur や ROS を使用したロボットの自己位置推定システムを構築し、センサ評価基板によるセンサ評価及びセンサ評価ロボットによるシステムの評価実験を行っていく予定である。

２．５．　YOLO を用いた物体検出の開発

２．５．１．物体検出の開発

自律走行ロボットの走行対象場所を屋外一般とした場合、検出対象物が膨大になる。このため、本研究では自律走行ロボットの走行対象場所をハイテクプラザ中庭に限定し、検出すべき対象物を鉄製マンホールなど後述する１６種類に限定した。

図６に自律走行ロボットの概念図を示す。自律走行ロボットに設置されるカメラは、高さ 70cm、角度 45°で走行面を見下ろす位置に設置され、ロボットは速度 15cm/s で走行するものと想定した。

２．５．２．YOLO

YOLO[4) 5)]は、リアルタイム物体検出アルゴリズムである。Darknet[6)]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 のモデルを図７に示す。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、同時に行ってしまう点にある[7)]。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[8)]を github のサイト[9)]からダウンロードして利用した。

初期の YOLO-v1 では、物体の候補領域のサイズに制限がないことから、様々なサイズの候補領域を計算するため検出処理に時間を要していた[8)]。

一方、YOLO-v2 では Bounding Box のアスペクト比を K-means 法により決定した５つに制限することで、処理の高速化を実現している[8)]。この Bounding Box は、Anchor Box と呼ばれる。

YOLO を実行するには、OpenCV[10) 11)] (Open Source Computer Vision Library)の導入が前提である。本研究では、OpenCV 3.3.0 を採用した。YOLO は OpenCV のバージョンとの相性があり、異なるバージョンをインストールすると不具合が発生する場合があるので注意が必要である。

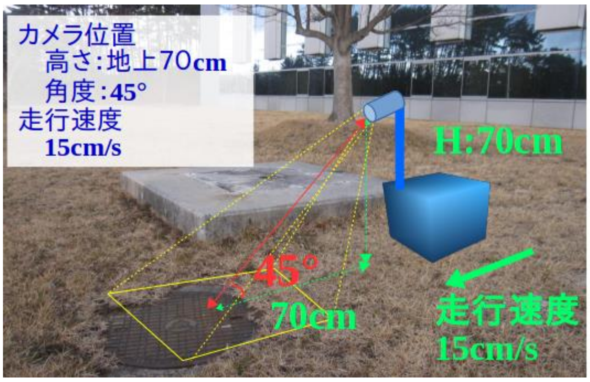


図６　自律走行ロボットの概念図

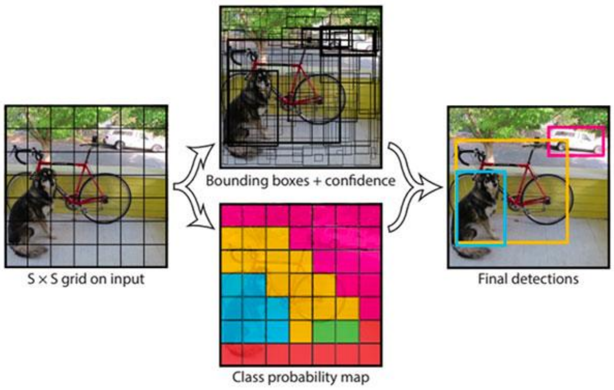


図７　YOLO のモデル

２．５．３．学習モデルの作成

自律走行ロボットの認識対象物体を選定し、YOLO で認識させるための学習モデルを作成した。本節では、データセット作成と YOLO での学習手順を示す。

２．５．３．１．検出対象物

実験場所であるハイテクプラザ中庭において１６の検出対象物を選定し、各々の写真を取得した。写真は左右反転することでデータセット写真を２倍とし（データ拡張）、合計 1,790 枚とした。検出対象物と写真数を表５に、検出対象物のサンプル写真を図８に示す。

２．５．３．２．　データセットの作成

YOLO のデータセットは、検出対象物の撮影された写真と、その中に映る検出対象物の位置情報である。検出対象物の位置情報は、BBox-Label-Tool[12] を用いて作成した。

BBox-Label-Tool では図９に示すように、検出対象の個々の写真をウインドウ上に呼び出し、手動で検出対象物を選択（Bounding Box）し、その座標情報を得る。この座標情報を垂直・水平方向に正規化し、Bounding Box の中心座標（X ， Y)と幅 W、高さ H としたものが YOLO のデータセットとなる。この作業を全ての写真（1,790 枚）に対して繰り返す。

２．５．３．３．学習モデルの作成

Darknet 版 YOLO-v2 を利用して、作成したデータセットで学習を行った。学習に用いたサーバスペックは以下のとおりである。

表５　検出対象物とその取得した写真数

No	検出対象物	数	No	検出対象物	数
01	鏡の柱	200	09	ツツジ	204
02	鉄柱	264	10	排水口	102
03	コンクリート台	100	11	コンクリート縁（グレー）	110
04	コンクリート縁（ピンク）	230	12	木の幹	72
05	草	34	13	支線（緑）	32
06	鉄製マンホール	142	14	コンクリート排水溝	64
07	コンクリートマンホール	14	15	段差	48
08	壁タイル	92	16	支棒	80

OS	Ubuntu16.04TLS
メモリ	12GB
CPU	Intel Corei7 cpu975@3.33GHZx8
GPU	Quadro K220/PCIe/SSE2
OS 種別	64bit
ディスク	2.0TB
CUDA V9.0.176	
物体検出	Darknet 版 YOLO-v2

図８　検出対象物のサンプル写真

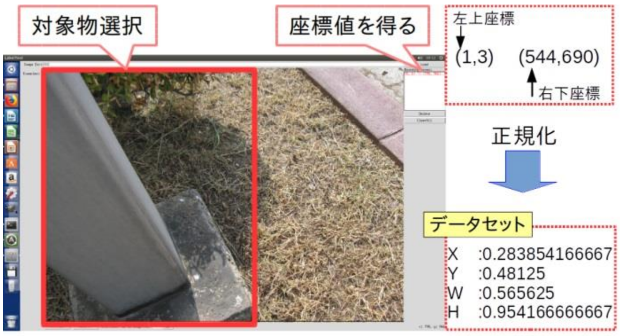


図９　BBox-Label-Tool によるデータセット作成

繰り返し学習数であるエポック数は、YOLO のデフォルト値に従い 80,200 とした。この結果、約１２日間の学習時間を要した。

YOLO による学習の評価は、IoU の平均値である Avg IoU で評価する。IoU は Intersection Over Union の略で、図１０に示すように予測した領域と正解領域の重なり具合を示し、数値が大きいほど精度は高い。

学習の結果、80,200 エポック後の Avg IoU は 0.930447 に達した。一般に、Avg IoU の値が 0.9 程度にまで大きくなれば、検出性能は十分にあることが知られているため[7]、次節ではこの学習モデルを用いて評価する。

２．５．４．評価

作成した学習モデルをテストデータにより評価した。テストデータは、データセットとは別に取得した写真と動画を用いた。これらは、自律走行ロボット上の想定する位置に設置したカメラを用いて撮影したものである。評価結果の一部を図１１から図１４に示す。

図１１は排水溝、コンクリート排水溝を正しく認識したが、コンクリート縁（グレー）は一部しか認識できていない。長さの不定な物体は、データセットの作成段階で様々な長さの写真を用意する必要がある。

図１２では、ツツジを認識できていない。学習時と評価時の写真の撮影時期が異なったため、紅葉による

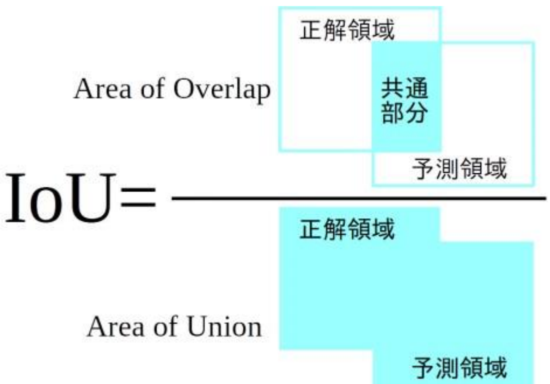


図１０　IoU（Intersection Over Union）

色の違いが影響したと考えられる。紅葉中の写真でも低い確度でツツジを認識した写真も存在したため、色の異なる写真を学習させることで対応できると考えられる。

図１３は、木の幹（24%）よりも鉄柱（49%）の方が確度が高く評価された。両者の違いを正しく認識できていないため、より違いが際立つ特徴的な画像を学習させる必要がある。

図１４は、草叢に存在する木の幹をツツジと誤認識した。植物等の天然物は、撮影位置や時期、時間帯により色や形が変形するため精度良く認識させることは難しい。自律走行ロボットとして判断すべき天然物は、想定できる様々な環境下での画像を採取し、学習に用いる必要がある。

２．５．５．まとめ、ならびに今後の課題

自律走行ロボットに物体検出機能を付加する目的で、YOLO を用いて物体検出モデルを作成した。評価の結果、人工物は高い認識率を示すものの、木や草などの自然物の認識は非常に難しいことが分かった。

今後は、今回の評価で得られた知見を踏まえたデー

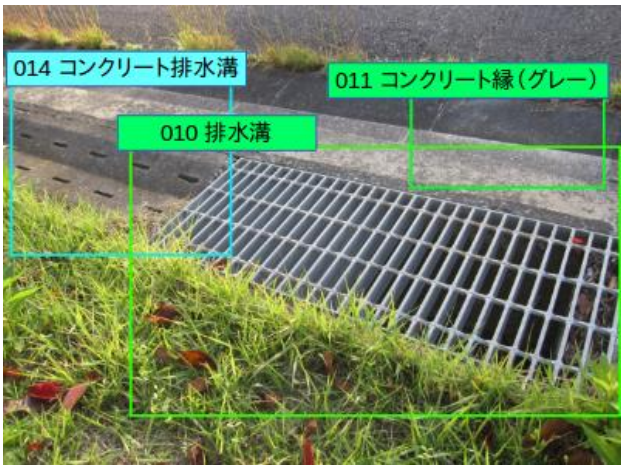


図１１　評価結果の例（１）

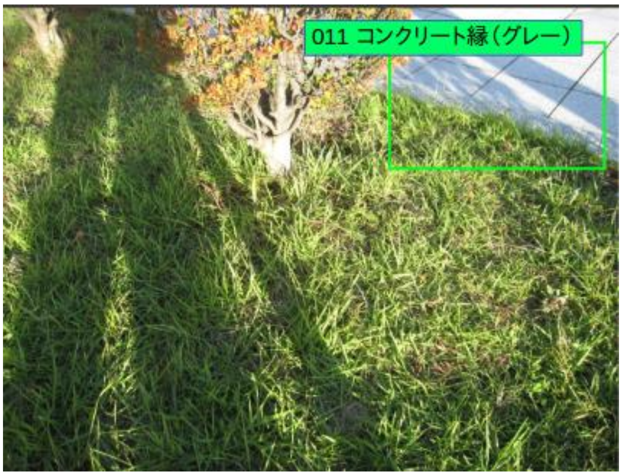


図１２　評価結果の例（２）

図１３　評価結果の例（３）

図１４　評価結果の例（４）

タセット画像を追加学習させると共に、より検出精度の高い YOLO-v3 での学習および評価を実施する。

３．結言

今年度は自己位置推定に利用する GNSS 受信機について、オープンスカイや壁際などの環境条件の違い、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。評価の結果、人工物の認識は比較的容易である反面、木や草などの自然物の認識は非常に難しいことが明らかになった。

今年度得た知見を利用して、今後は LRF、カメラ、センサ評価基板のセンサを使用した ROS による自己位置推定システムの開発と、センサ評価用ロボットによる屋外検証を行い､壁際など GNSS 測位精度が低下する条件下でも位置推定可能なシステムを構築していく予定である。

また、深層学習による物体検出システムについても今年度の評価結果を用いて、次年度は自然物の認識率向上に取り組む予定である。

参考文献

１）原　祥尭, “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）“YOLO ウェブサイト”. 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）“Darknet ウェブサイト”. 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）“darknet 実装版 YOLO-v2 github サイト”. https://github.com/pjreddie/.
１０）“OpenCV ウェブサイト”. https://opencv.org/.
１１）“OpenCV 日本語ウェブサイト”. http://opencv.jp/.
１２）“BBox-Label-Tool github サイト”. https://github.com/puzzledqs/BBox-Label-Too/. (参照 2019-04-03).

配管内洗浄ロボットの開発（第３報）

Development of in-pipe washing robot (3rd report)

技術開発部 プロジェクト研究科　柿崎正貴　安藤久人　菅野雄大　本田和夫

インフラメンテナンスや有害物質除去に活用するため、配管内部の洗浄及び検査を行うロボットシステムを開発した。配管内を自走するための駆動機構と、管内を高圧洗浄し排水を回収する洗浄・回収機構を統合したプロトタイプ機の製作を行った。また、駆動機構の走破性を評価し、曲管走行時の引っ掛かりの原因を解明した。さらに、駆動機構はモジュール３機連結時、垂直設置の直管走行時において 55.0±6.5 [N]の押込み力を発揮できることが分かった。そして、プロトタイプ機による洗浄実験では、直管及び曲管を走破し、管内の汚染物（粉体）の洗浄及び排水回収（回収率 98.7 [%]）を実現した。

Key words: ロボット、配管、洗浄、除染、点検・検査

１．緒言

高度経済成長期に建設されたインフラやプラント設備の老朽化が社会問題となる一方、少子高齢化の進行による熟練技術者の引退や若手技術者の減少等により、設備保守・安全管理の実務を担う技術者の不足が深刻な課題である。この課題に対応するためには、大規模施設の検査やメンテナンスを自動化し、人的作業を省力化するロボット開発が急務である。また、東日本大震災によって発生した地震や津波による工場等の被災においては、人が立ち入れない極限環境や狭窄部での初動調査等の復旧作業を行う災害対応ロボットが必要とされた。

このような背景から当所では、平成２６年度に「大規模災害に係る有害化学物質洗浄技術実用化モデル事業」として、配管外周面を高圧洗浄し、排水を回収するシステム[1]を開発した。この成果を展示会やビジネスマッチング会等に出展するなかで、配管内面の洗浄や、配管内面の放射性物質等の除染が産業界から強く求められていることが分かった。

そこで本事業では、平時にはインフラのメンテナンス、下水管の洗浄等の産業用途、災害等の有事には有害物質除去や、人の立ち入れない極限環境・狭窄部の調査等に活用するために、配管内部の洗浄及び検査を行うロボットシステムを開発した。事業期間は、平成２８年度から平成３０年度までの３カ年である。

平成２８年度から平成２９年度まで、高圧水の噴射反力を動力とする洗浄機構[2]を設計・試作し、内径 105 [mm]の管内洗浄が可能となった。また、推進力を補うため、モータを動力として配管内を自走する駆動機構[3]を開発し、直管（内径 105 [mm]）及び曲管（90° ロングエルボ、内径約 100 [mm]）の管内走行を実現した[4]。

ただし、駆動機構は曲管走行中の引っ掛かりが課題であった。また、洗浄機構は、サイズが大きく曲管内を通過できない課題があり、有害物質や排水を配管外へ漏らさず回収する機構を新たに開発する必要があった。

平成３０年度は、これまでに開発した駆動機構について、管内走破性の向上へ向けた改良を行い、押込み力測定及び走破性評価を行った。また、排水回収機能を有する洗浄・回収機構を開発し、駆動機構と統合することでプロトタイプ機を製作した。さらに、洗浄実験を行い、管内洗浄及び排水回収の機能検証を実施した。

２．実験

２．１．配管内部の洗浄及び検査を行うロボットシステムの概要

ロボットによる管内洗浄及び排水回収方法の概念図を図１に示す。配管の端部からロボットを管内に投入し、「駆動機構」によって配管内を自走する。さらに、機体先端に搭載した「洗浄・回収機構」によって管内面を高圧水洗浄するとともに、排水及び有害物質等を配管の外へ漏らすことなく回収する。洗浄用水は、後段の高圧ポンプから機体中央に備えられた耐圧ホースを通って洗浄・回収機構へ供給する。排水及び汚染物は後段の吸引ポンプによって機体中央の吸引用ホースを通り回収される。

また、機体から洗浄・回収機構を取り外し、カメラ等の画像センサを機体先端に搭載することで、配管内面の目視検査を行う。図２に、管内検査方法の概念図を示す。駆動機構により管内を自走し、かつ画像センサにより得られる配管内面の画像を後段のモニタ PC で監視する。これにより、洗浄前の汚れの状態や、洗浄後の残留物、管内面の腐食や減肉、ピンホール等の不具合をカメラで確認することが可能となる。

事業課題名「配管内洗浄ロボットの開発」

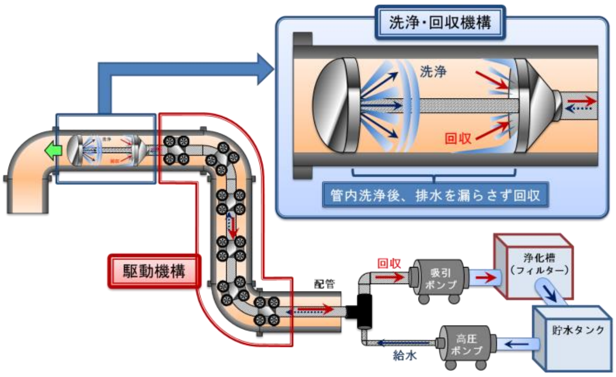


図１　管内洗浄及び排水回収方法の概念図

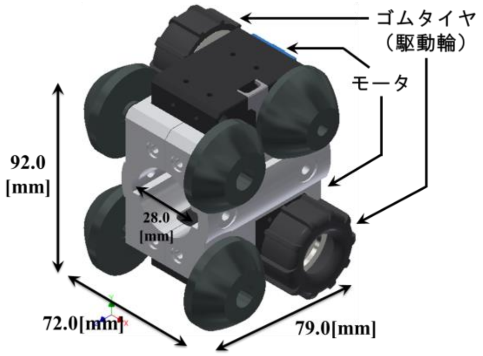


図３　改良した駆動機構の３次元モデル

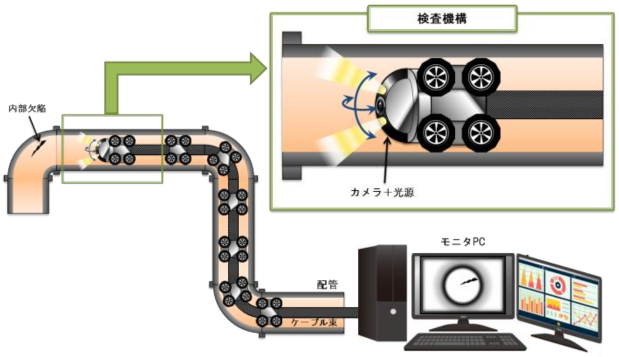


図２　管内検査方法の概念図

図４　モジュール連結時の駆動機構の３次元モデル

２．２．駆動機構の改良

これまでに設計・試作したモジュール型の駆動機構[3]をベースとして、管内走破性の向上と性能評価の実施へ向けた改良を行った。図３に、改良した駆動機構の３次元モデル及び図４にモジュール連結時の駆動機構の３次元モデルを示す。以下に主な改良点を示す。

(1) 機体強度に影響のない部分を肉抜きすることで、軽量化・小型化を実施。
(2) ボディやホイールの設計を変更し、部品加工と組立が容易な構造に改良。
(3) モータの配線を内装化することで、ケーブル損傷を防止。
(4) ROBOTIS 製 Dynamixel AX-12A を Dynamixel XL430-W250-T に変更することで、小型化を実施。また、ソフトウェアの改良も併せて実施し、モータの負荷トルクを取得して可視化。
(5) 慣性センサ搭載により、モジュール毎の走行状態を監視。

駆動機構を制御するためのシステムについて、図５に接続ブロック図を示す。機構に搭載したモータは有線のカスケード接続とし、末端のモータへ電源(+12[V], GND) と信号線を接続した。信号線はモータドライバを経由し制御 PC へ有線で接続した。制御 PC として Raspberry Pi 3B を使用することにより、モータ、カメラ及びセンサを１デバイスで制御可能なうえ、コンパクトなシステムを構築した。

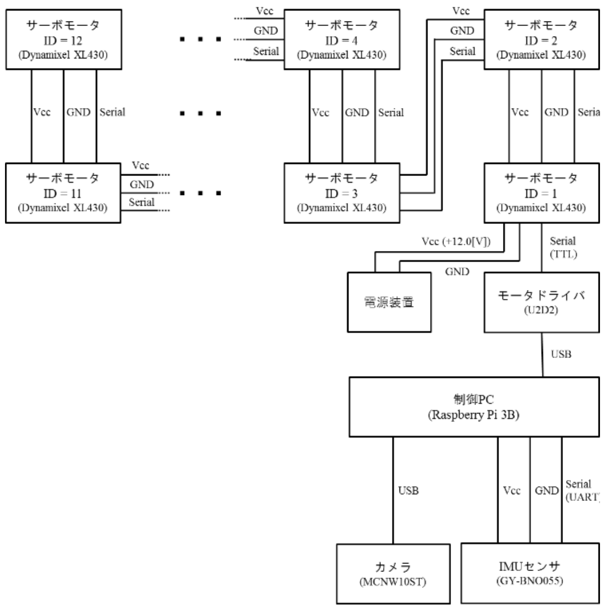


図５　制御システムの接続ブロック図

制御 PC の OS は Linux (Ubuntu16.04)、ミドルウェアは Robot Operation System[5] (ROS kinetic) を採用することで、新たなセンサデバイスの追加や制御デバイスの追加・変更が容易な、拡張性の高いシステム構成とした。さらに、機構に搭載した各々のモータを個別に制御し、各モータからのフィードバック情報(回転角、回転数、モータ負荷等) をリアルタイムで取得

し可視化・記録するソフトウェアを開発した。これにより、モジュール毎の走行状態をモニタリングし、駆動機構の走破性評価を実施可能なシステムとした。なお、Dynamixel XL430-W250-T のモータ負荷は、トルクセンサの測定値ではなく、回転数の指令値と測定値の差分をもとに計算される値である[6)]。計算はモータ内蔵のマイコンで実施される。モータに限界トルクがかかった状態を負荷率 100 [%]とした相対値としてマイコンからデータが出力されるため、それを制御 PC で取得しモニタリングした。

２．３．駆動機構の評価

２．３．１．走破性の評価

曲管内で駆動機構が引っ掛かる課題の原因を調べるため、走破性の評価実験を行った。

２．３．１．１．実験方法

図６に実験環境を示す。水平設置の直管（アクリル、内径 105 [mm]、長さ 2 [m]）に曲管（90° ロングエルボ（JIS K 6739 - LL100）、内径約 105 [mm]）を接続し、さらに垂直設置の直管（アクリル、内径 105 [mm]、長さ 1 [m]）を接続した。水平直管の端部から駆動機構を投入し、約 20 [mm/s]で走行させた。

２．３．１．２．結果と考察

モジュール１機で走行した際、曲管内で引っ掛かり、走行不能になる場合があった。図７に、モジュールに搭載した２つのモータ①及び②について、曲管内で引っ掛かりが発生した際のモータ負荷率を示す。

図７に示すように、曲管部に進入した後、モータ①及び②の負荷率がともに上昇し、モータ①の負荷率が 100 [%]になった後、モータ①が停止した。結果、曲管内での引っ掛かりは、モータの出力軸に締結された駆動輪に過負荷がかかったことによってモータが停止することが原因であった。

過負荷の原因は、走行抵抗の増加であると考える。管内走行時、モータ①及び②は等速で回転し、一定の速度で進行する。しかし、駆動輪が図８に示すような向きで曲管内面に接触する場合、モータ①及び②それぞれの駆動輪は走行経路が異なるため、内輪と外輪の走行距離に差が生じ、モジュール自体が曲管内面の外側に押し付けられる。これにより走行抵抗が増加し速度が遅くなり、走行距離が短い内輪に過剰な負荷がかかってモータが停止したと考える。

一方、モジュールを３機連結して走行した際の先頭モジュールのモータ①及び②について、曲管内を走行中のモータ負荷率を図９に示す。モジュールを複数連結することによりモータ負荷が改善され、引っ掛かることなく走行した。これは、曲管内に進入した先頭のモジュールが、直管内に残っている後方のモジュールによって押込まれ、走行にかかる推進力が増加したためと考える。

ただし、モジュールを連結した際も曲管内で引っ掛かりが発生する場合もあるため、タイヤの伸縮機構の

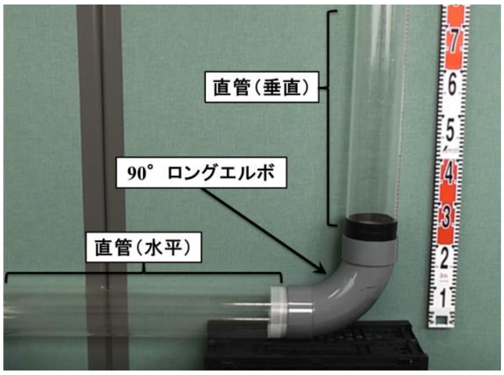


図６　走破性評価の実験環境

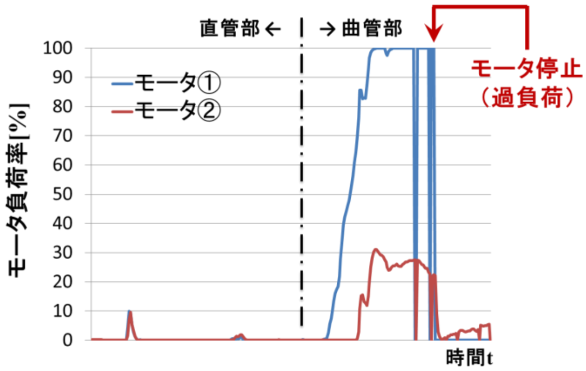


図７　管内走行中のモータ負荷率
（モジュール１機）

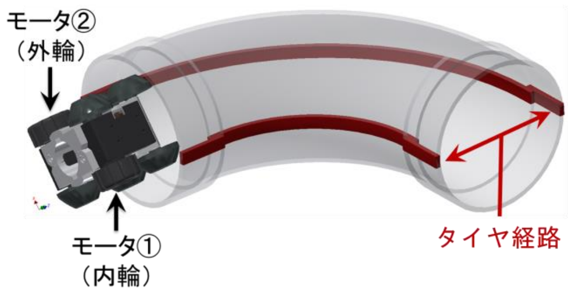


図８　曲管走行時のタイヤ経路

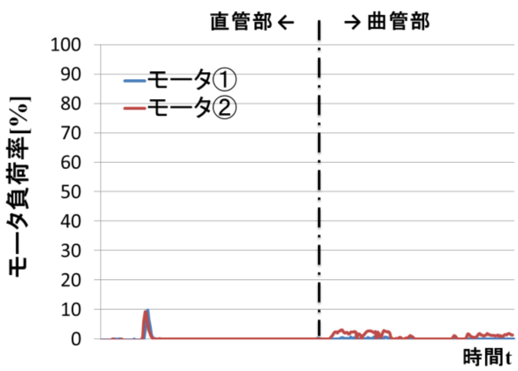


図９　管内走行中の先頭モジュールのモータ負荷率
（モジュール３機連結）

付与やモータ負荷情報を用いたフィードバック制御等により、走破性の更なる向上を図る必要がある。

２．３．２．押込み力の測定

駆動機構について、先端に搭載した洗浄・回収機構を管内に押込むための力を測定した。

２．３．２．１．実験方法

押込み力測定の実験装置を図１０に示す。直管はJIS K 6741 に規定される VU100 を、曲管（90° ロングエルボ）はJIS K 6739 に規定されるLL100を使用した。駆動機構は管内で約 20 [mm/s]の速度で走行し、ロードセルによって配管軸方向にかかる力を測定した。曲管走行時の押込み力測定は、直管を曲管に変更して同一の測定を行った。また、立て管走行時の押込み力測定は、直管を垂直に設置したうえで同一の測定を行った。さらに、複数のモジュールを連結した際の押込み力測定は、曲管内を通過するのに支障がないよう、図４に示すようにモジュールを 100 [mm]間隔かつモジュールの向きを 90° 回転させた状態で連結したうえで、同一の測定を行った。測定は各々の条件で 20 回実施し、平均値及び測定の繰り返しによる不確かさ（信頼水準 95 [%]）を算出した。

２．３．２．２．結果

モジュール１機のみで走行させた際の最大押込み力を図１１に示す。水平設置の直管を縦向きに走行した場合（図１１参照）の最大押込み力は 17.9±1.4 [N]、横向きに走行した場合（図１１参照）の最大押込み力は 16.1±2.8 [N]となった。また、曲管内を縦向きに走行した場合（図１１参照）の最大押込み力は 16.3±1.4 [N]となった。さらに、垂直設置の直管を走行した場合の最大押込み力は 14.3±2.7 [N]となった。

複数のモジュールを連結して走行した場合の最大押込み力を図１２に示す。水平設置の直管を走行した際の最大押込み力は、モジュール２機連結時は 36.5±9.5 [N]、モジュール３機連結時は 61.9±9.1 [N]となった。また、垂直設置の直管を走行した際の最大押込み力は、モジュール２機連結時は 39.8±3.3 [N]、モジュール３機連結時は 55.0±6.5 [N]となった。

モジュールを連結することで押込み力が増加することを確認し、モジュール３機連結の場合、駆動機構にかかる走行抵抗が 48.5 [N]以下であれば、管内走行が可能であることが分かった。

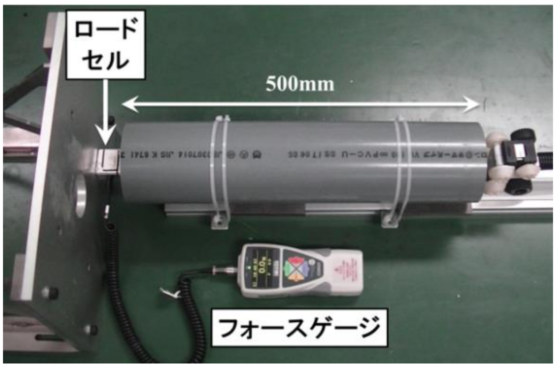


図１０　押込み力測定の実験装置

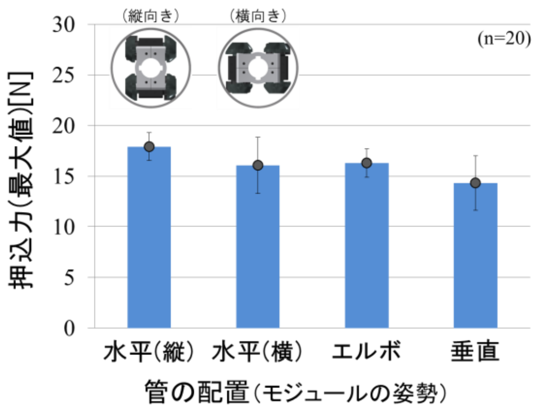


図１１　モジュール１機の最大押込み力

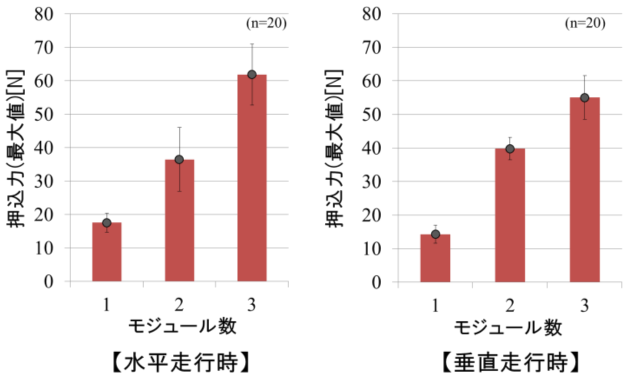


図１２　複数モジュール連結時の最大押込み力

２．４．洗浄・回収機構の開発

これまでに設計・試作した洗浄機構[1]を再設計し、排水及び汚染物の回収機能を付与した洗浄・回収機構の開発を行った。図１３に洗浄・回収機構の３次元モデルを、図１４に洗浄・回収機構の断面図を示す。

図１４に示すように、洗浄・回収機構は機構前方及び後方の遮水用ブラシに挟まれた空間内（以下、遮蔽空間）で配管の内面洗浄及び排水の回収を行う。機構中央の高圧洗浄ノズルは水圧によって回転し、円筒形状の管内面を洗浄することができる。洗浄によって発生する排水及び汚染物は、機構の中心軸を通る排水回収用ホース（内径 21 [mm]，外径 27 [mm]）によって遮

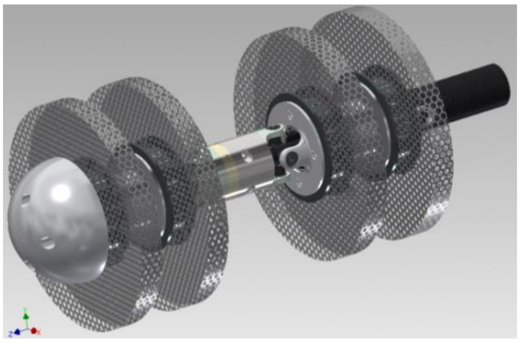


図１３　洗浄・回収機構の３次元モデル

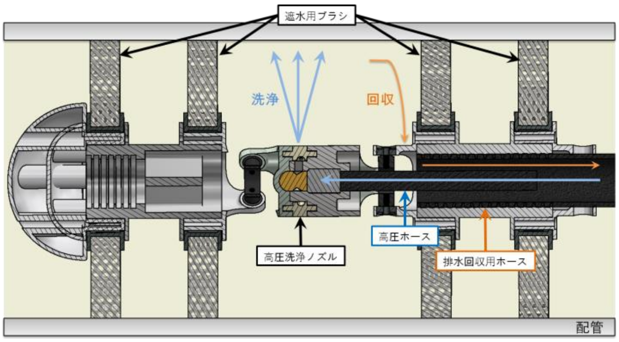


図１４　洗浄・回収機構の断面図

蔽空間内から吸引され､配管外のタンクに収容される。なお、遮蔽空間内は吸引ポンプにより負圧となり、遮水用ブラシに隙間が生じた場合でも隙間から空気を取り込むため、遮蔽空間からの漏水は抑制される。

高圧洗浄ノズルに接続される高圧ホース（外径 12 [mm]）は排水回収用ホースの内部に同軸に配置されている。また、遮水や高圧洗浄等、機能毎にパーツを分割する設計とし、連結することで、機構全体が柔軟性を持ち曲管内で引っ掛かり難い機構とした。

２．５．プロトタイプ機の開発

駆動機構及び洗浄・回収機構を統合するため、基本設計をベースとした詳細設計と、実験用プロトタイプ機の製作を県内企業に委託した。図１５左図に配管内洗浄ロボットのプロトタイプ機（委託品）の外観を示す。さらに、ブラシのサイズや配置を変更し、改良を行ったプロトタイプ機を図１５右図に示す。

プロトタイプ機製作にあたり、ボディやホイール、高圧ホース等を金属化し､機体強度を向上した。また、高圧洗浄ノズルを小型化し、押込み力向上のためにモジュールを６機連結した。さらに、洗浄・回収機構について、管内面と接触する部分をＲ加工し、パーツ間を高圧ホースを軸にして接続した。これを用いて粉体（ナノ粒子）やヘドロ、スラッジを模擬した泥が洗浄可能であるか実験を行った。

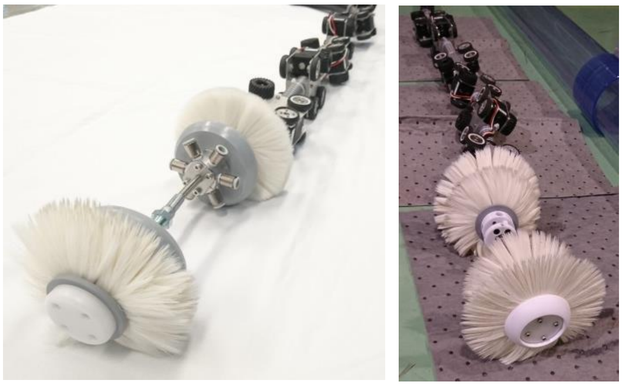


図１５　配管内洗浄ロボットプロトタイプ機
（左図：委託品、右図：改良後の機体）

２．６．洗浄実験

ターゲットとなる管径は、上下水道やプラント等で広く用いられている呼び径 100A（内径 100 [mm]程度）とした。また、実際の作業現場での活用を想定し、直管に加えて曲管(90°ロングエルボ､内径約 100 [mm]）の洗浄を目標とした。洗浄対象物質は、東日本大震災発生時に被災した化学プラントの事例を想定し、管内面に物理的に付着したカーボンブラック等の粉体（ナノ粒子）とした。また、配管内に堆積したヘドロやスラッジの除去というニーズが大きいことから、これらを模擬した泥も洗浄対象とした。

２．６．１．実験方法

図１６及び図１７に洗浄実験の実験環境を示す。図１６が粉体を洗浄する実験環境、図１７が泥を洗浄する実験環境である。粉体の洗浄実験では、水平設置の直管（塩化ビニル、内径 107 [mm]、長さ 2 [m]）に曲管（90°ロングエルボ（JIS K 6739 – LL100)、内径約 105 [mm]）を接続し、さらに水平設置の直管（塩化ビニル、内径 107 [mm]、長さ 2 [m]）を接続した管路を作成した。さらに､酸化チタン(粒径 100～200 [nm]）をソルミックス AP1 に 1:10 の割合で分散し､曲管走行前の直管（図１６①）と走行後の直管（図１６②）の内面に、約 300 [mm]の幅で塗布して乾燥させた。また、泥の洗浄実験では、直管(塩化ビニル､内径 107 [mm]、長さ 2 [m]）の内部に、泥を幅約 300 [mm]、高さ約 10 [mm]で堆積させた。この環境下でプロトタイプ機を動作させ、管内洗浄及び排水回収が可能であるか検証を行った。

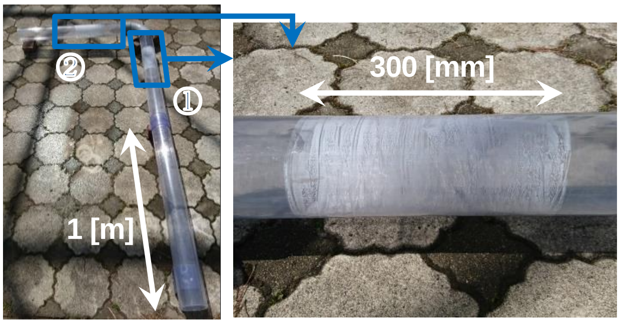


図１６　粉体洗浄の実験環境

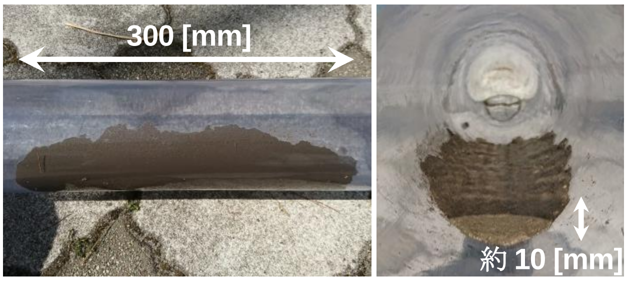


図１７　泥洗浄の実験環境

２．６．２．結果と考察

粉体の洗浄実験の様子を図１８に示す。プロトタイプ機は約 33 [mm/s]の速度で管内を走行させた。t = 10 [s]から t = 20 [s]の間に図１６①の洗浄を行った。その後 t = 20 [s]から t = 40 [s]の間に洗浄・回収機構が曲管を通過した。また、t = 40 [s]から t = 50 [s]の間に図１６②の洗浄を行い、t = 60 [s]の時点で駆動機構が曲管内を通過し終えた。高圧ポンプの稼働時間は 72 [s]、洗浄水の総流量 7.96 リットルに対し回収した排水は 7.85 リットルとなり、排水回収率は 98.7 [%]であった。また、図１９に洗浄後の直管（図１６①）の外観を示す。図１９に示すように、管内の粉体が除去されていることを目視で確認した。

課題として、曲管通過時に先端のブラシから排水漏れが発生した。これは図２０に示すように、曲管通過時にブラシがめくれることが原因である。

泥の洗浄実験の様子を図２１に示す。プロトタイプ機は約 5.5 [mm/s]の速度で管内を走行させた。t = 0 [s]から t = 80 [s]の間に、幅約 300 [mm]で堆積した泥を除去しながら洗浄した。t = 80 [s]から t = 115 [s]の間に、遮蔽空間内に巻き込んだ泥と排水を回収した。結果、泥が堆積した環境でも直管内面の洗浄、排水の回収が可能となった。また、図２２に示すように、先端ブラシ前方に一部の泥が滞留したものの、遮蔽空間内に入った泥の回収が可能となった。

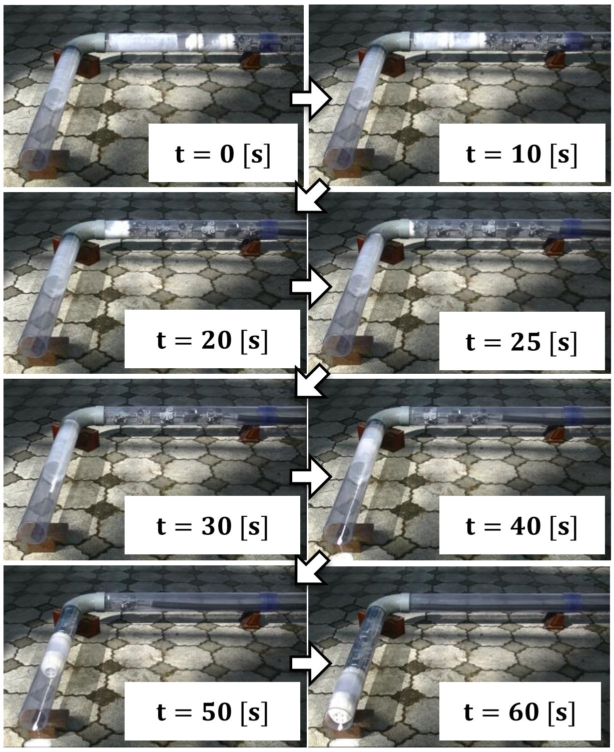


図１８　粉体の洗浄実験

図１９　洗浄後の直管（図１６①）

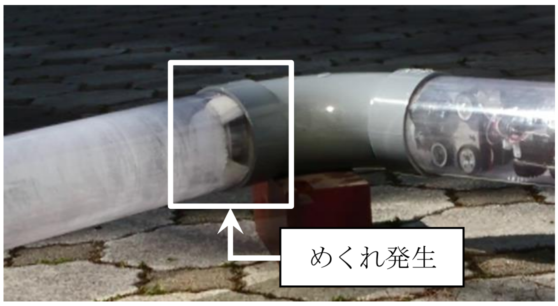


図２０　曲管通過中の先端ブラシの形状

曲管通過時のブラシ変形や、泥の滞留の課題を解決するためには、ブラシの毛質や毛量の変化によって走行中のブラシ形状がどのように変化するか調査し、ブラシによる遮蔽力や走破性への影響を評価したうえで、設計にフィードバックする必要があると考える。

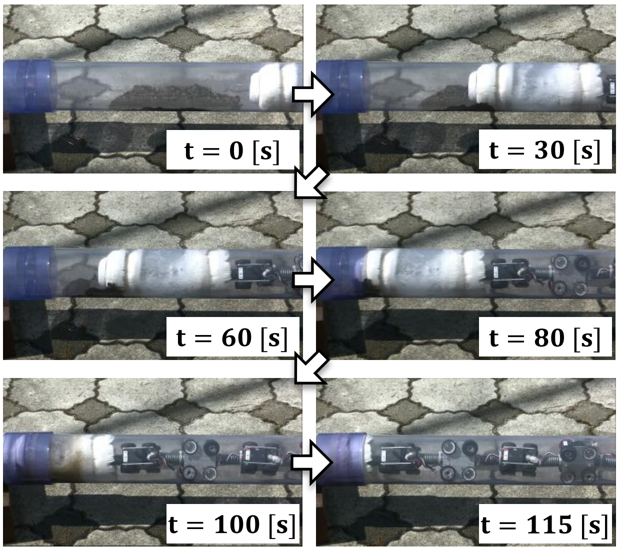


図２１　泥の洗浄実験

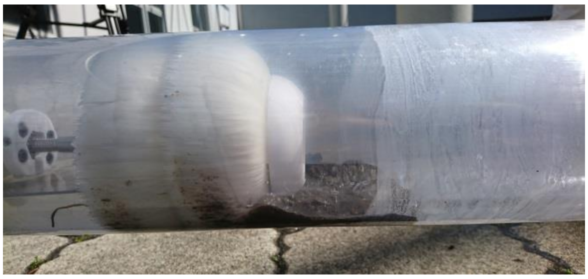


図２２　先端ブラシ前方に滞留した泥

３．結言

本事業では、インフラメンテナンスや有害物質除去等に活用するため、配管内部の洗浄及び検査を行うロボットシステムを開発した。

管内を自走する駆動機構はモジュール型の設計とし、機構自体に柔軟性を持たせることで、直管のみならず曲管内部の走行を実現した。また、モータのフィードバック情報（負荷トルク、回転数等）や慣性センサの情報を取得するシステムを構築することで、モジュール毎の走行状態をモニタリングし、走破性評価を実施した。

駆動機構の走破性評価を行った結果、曲管走行中、内輪のモータが過負荷で停止して引っ掛かりが発生することが分かった。また、モジュールを複数連結することで、モータ負荷が改善されることが分かった。そのため、モジュール型の機構設計は曲管走行に適した形状であり、連結数を増やすことで曲管内を走行可能であることが分かった。

駆動機構の押込み力の測定を行った結果、走行抵抗が最も大きい垂直設置の直管走行時において、モジュール１機では14.3±2.7[N]、モジュール３機連結時は55.0±6.5[N]の押込み力となった。モジュール３機連結の場合、駆動機構にかかる走行抵抗が 48.5[N]以下であれば、管内走行が可能であることが分かった。

管内を高圧洗浄し排水を回収する洗浄･回収機構は、回転ノズルによって管内面を高圧洗浄するとともに、排水を配管外部に漏らすことなく回収することが可能な設計とした。また、機能毎に分割したパーツをホース等により連結することで､機構全体が柔軟性を持ち、曲管内の通過が可能となった。さらに、駆動機構と洗浄・回収機構を統合し、プロトタイプ機の製作を行った。

プロトタイプ機を用いた洗浄実験では、水平設置の直管及び曲管を進行し、直管内面に物理的に付着した粉体（ナノ粒子）を洗浄するとともに、98.7 [%]の回収率で排水回収を実現した。また、泥が堆積した管内の走行、内面洗浄、排水回収及び泥の一部回収を実現した。

駆動機構については、依然として曲管内で引っ掛かりが発生するため､走破性の更なる向上が課題である。また、洗浄・回収機構は、曲管通過時のブラシ変形や泥の滞留の課題が残ったため、ブラシの毛質や毛量を変えた際の影響を調査し､機構を改良する必要がある。さらに今後、実際のプラント等を用いたフィールド試験を実施する必要があると考える。

参考文献

１） 安藤久人，本田和夫 他，大規模災害に係る有害化学物質の洗浄技術の実用化－配管円筒面の高圧洗浄･回収システムの開発－，平成２６年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告，2014，pp.33-36.

２） 安藤久人，柿崎正貴 他，配管内洗浄ロボットの開発，平成２８年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告，2016，pp.43-45.

３） 柿崎正貴，安藤久人 他，配管内洗浄ロボットの開発（第２報），平成２９年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告，2017，pp.38-41.

４） 柿崎正貴，安藤久人，“小口径配管の内部洗浄を考慮した配管内移動機構の開発”，第１９回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集，大阪，2018-12-13/15，公益社団法人計測自動制御学会，2018，pp.1911-1914.

５） “ROS.org | About ROS”,Open Source Robotics Foundation，https://www.ros.org/about-ros/,（参照 2019-04-19).

６） “XL430-W250”, ROBOTIS, http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel_x/xl_series/xl430-w250.htm#bookmark34,（参照 2019-04-19).

水素社会実現のためのプラント運転管理・点検技術開発

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　塚本遊　太田悟　夏井憲司

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、リスクベースメンテナンスの考えを用いて点検優先度の高い３部品を絞り込み、各々の部品について不具合現象のメカニズムを踏まえたセンシングにより早期故障診断する手法を検討した。この結果、液体水素用バルブの点検についてはフランジ部の温度を測定する方法が、蓄圧器の点検では圧力-変位グラフの傾きの変化を測定する方法が有望であることを確認した。

Key words: ＩｏＴ、予知保全、デジタルツイン、ＣＡＥ、破壊力学

１．緒言

福島県では、福島新エネ社会構想の一環として、再生可能エネルギーで発電した電気を使って水を電気分解することによって水素を得る CO_2 フリー水素を製造する実証研究や世界最大級の水素製造工場の建設などが進み、水素エネルギー活用に関する実証拠点となっている。平成３１年３月には、いわき市に県内初の商用定置式水素ステーションが開所するとともに、民間企業を中心に２０台を超える FCV が導入されるなど、福島県における水素活用が一段と進んでいる。

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。

そこで、当所では IoT や AI、ビッグデータ解析を活用した新しい点検手法に着目した。図１に代表的な点検手法を列記する。最も一般的な定期点検(時間基準点検)は完全には故障を防げないことや過剰交換が課題であった。近年、IoT 技術により製品の状態をセンシングすることが容易になり、今後は各々の製品の状態を基準とする「状態基準保全(CBM)」が有望視されている。さらに、近年のデータサイエンス技術の発展を背景に、様々な場所に点在する同一装置の情報を集約してビッグデータ化した上で、AI 等データ解析により故障や異常が生じる前に予兆を検知する「予知保全(PM)」が有望視されている。

経済産業省では、産業保安のスマート化を推奨して高度なメンテナンスにインセンティブを与える制度の制定を進めている。例えば、近年、新設された「スーパー認定事業所」制度では、IoT、ビッグデータ等の新技術の導入を要件とし、リスクを定量化するリスクベースメンテナンス手法を用いることで、通常では年１回必要な保安検査を最大８年に１回の自主検査に置き換えることができるため、大幅な保守コストの削減が可能である。今後は水素エネルギー分野や再生可能エネルギー分野でも同様の施策が普及すると見込まれる。

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した運転管理・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。２年目となる平成３０年度は、移動式水素ステーションで使用される蓄圧器や配管継手について実験モデルを作成するとともに点検技術を検討した。

図１　プラント点検手法の変化

２．実験ならびにＣＡＥ解析

２．１．点検対象とする不具合現象の絞り込み

本研究では経済産業省が平成２７年に公開した水素ステーションの事故状況に関する資料[1)]を参考にして点検すべき部品を絞り込んだ。統計によると水素ステーションで最も多いのが配管継手からの漏洩で 68%、次いで圧力容器、機器本体からの漏洩で 18%である。資料では水素ステーションはまだ実証段階なので事故報告に至ってはいないが、CNG など既存技術より高圧であるために疲労現象による漏洩が増えると指摘している。事故統計には初期設計ミスによるものもあるが設計の改善により今後生じる可能性が少ないため点検対象からは除外した。また普及期で多発すると予想される車両の誤発や運転ミスやシール管理不良や締結管理不良など人為的関与が支配的な事象は除外した。

水素運搬形態としては、高圧ガスの他に液体水素がある。バルブを製造する企業からの聞き取り調査によ

事業課題名「水素社会実現のためのスマートＯ＆Ｍ技術の開発」

り異常低温による動作不良の懸念があることが分かっているため、点検対象に加えた。

表１に本研究が点検対象とする部品をリスクベースメンテナンスの考え方を用いて整理した。この手法は、部品ごとに故障の発生確率と故障の影響度を数段階に区分し、発生確率と影響度の掛け算でリスクを定量化するのが特徴で合理的にメンテナンスを可能にする。

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

近年、データサイエンス手法を用いて運転管理、メンテナンスを行う事例が増えているが、その多くはプラント全体を対象とした「ブラックボックス」的手法であるため、不具合現象の特定や個々の部品の改善に至らないことが課題である。当所は中小企業との関りが深く、部品単位のトラブル解決の経験が多いため、本研究では、各々の部品について不具合現象のメカニズムを理解し、それに適したセンシングにより早期故障診断することを目指して点検手法を提案した。以下にその概略を示す。

（i）配管継手・・・継手としては溶接継手と機械式（ねじ式）継手がある。現状は機械式継手がほとんどだが、将来は徐々に溶接継手が増えると見込まれている。溶接接手では疲労き裂をきっかけとする漏洩、機械式継手では圧力変動や温度変動により締結力低下に起因する漏洩の危険性が高い。本研究では、移動式水素ステーションの配管継手を対象に振動による緩みに起因する振動特性の変化を６軸慣性センサで検知する手法を用いる計画である。

（ii）圧力容器（蓄圧器）・・・容器製作時に容器内面に生じた傷などをき裂が生じて繰り返し荷重に応じて徐々にき裂が進展し、表面に達することで漏洩が生じることが知られる。点検手法としては破壊力学に基づいたき裂進展評価が適していると考えられる。水素環境下では、いわゆる「水素脆化」の影響により大気環境下に比べてき裂進展速度が３０倍になることが知られており、継続的に点検する必要性が高い。本研究では、き裂の進展に伴うコンプライアンス（荷重−変位グラフの傾き）の変化を捉える手法を用いる。

（iii）バルブ・・・液体水素の沸点は-253[℃]であり、大気温度との温度差が非常に大きいことから、温度変動による熱応力や、異常低温による動作不良が考えられる。温度変化は比較的緩やかで単調的なので、IoT センシングで長期的に温度を観測することで異常検知することが有効とみられる。本研究では IoT センサデータを基にした CAE 解析により、センサでは測定できない製品内部の温度分布の高精度推定を行う「CAE バーチャルセンサ」技術の活用を目指す。

２．２．液体水素用バルブの冷却伝熱実験

液体水素の沸点は-253 [℃]であり、大気温度との温度差は 270 [℃] 前後と非常に大きいことから、液体水素用バルブは通常のバルブに比べて、ハンドルと筐体をつなぐ部品（以下、首下部と呼ぶ。）の長さが 200 [mm]以上と、非常に長いことが特徴である。これは単一バルブ製品の中で生じる大きな温度差を緩やかに傾斜分布させるのが目的と考えられる。初年度に実施した冷却伝熱試験では、この首下部の一部に露や霜が発生した。大きく成長した霜層は断熱作用があることが知られるため、バルブの異常冷却に大きく関与するとみられる。露や霜の発生には、周囲温度の影響が大きいことから、今年度は屋内、無風の同一場所で夏季、秋季、冬季に試験を行った。この時、周囲温度は 9～28[℃]であった。

図２に試験に用いた液体水素用バルブ実験モデルを示す。このモデルは液体水素貯蔵型水素ステーションの液体水素貯槽底部の払い出し配管を模したものである。本モデルは大野ベロー工業(株)が製造したもので、バルブは実際の水素ステーションで使用される製品と同一のものである。

当所では液体水素を使用した試験ができないため、代わりに沸点-196[℃] の液体窒素を使用した。漏斗を介して注入口から断続的に液体窒素を流入することで実験モデルを冷却し、その冷却過程をサーモカメラ(シナノケンシ(株)製 PLEXLOGGER PL-3) で撮影した。撮影速度は 60 フレーム/秒、解像度は横 320 画素×縦 240 画素である。撮影時間は 25 分程度とし、一連の冷却過程に対し複数回の撮影を繰り返した。

昨年度はバルブ１をのみ開口して冷却を行ったが、本年度は冷却開始時にバルブ１をのみ開口して予冷した後に、２つのバルブとも全開とした状態で液体窒素を注入して冷却を行った。この方法では排出口から液体窒素が排出されるが、回収タンクで回収後、冷却を繰り返した。

図３に試験開始から６０分程度経過した時点のサンプルの外観写真を示す。冷却が進むと２つのバルブともに筐体表面に霜が発生・成長するが、測定中は霜を除去せずに試験を実施した。

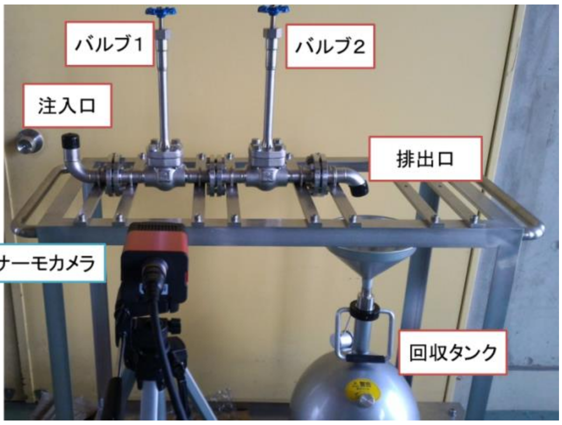


図２　液体水素用バルブ実験モデル

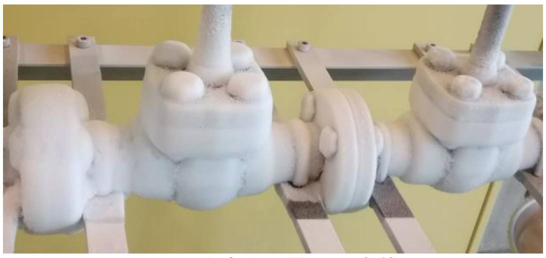


図３　試験中の霜の発生状況

２．３．バルブ実験モデルのＣＡＥ伝熱解析

実験モデルの冷却伝熱試験時の温度分布を把握するため、ANSYS Mechanical Enterprise を用いて過渡伝熱解析を実施した。

図４に解析モデルを示す。対称性を考慮し２分の１モデルとした。解析精度を高めるため、実験モデルの形状寸法を３次元デジタイザ等で測定し、昨年度より正確な形状のモデルを作成した。ボルト、ナットなどは異なる物体としてモデル化し、物体間の接触面で伝熱条件を与えた。接触部の伝熱条件は理想的な接触としたが、ボルトねじ山面は実験結果を踏まえて、弱い伝熱条件を設定した。

図５に境界条件の例を示す。配管内部の流路となる面（図中黄色）と、外表面で外気に触れる面全てに伝熱条件を与えた。伝熱条件は雰囲気温度と熱伝達係数の２パラメータを設定するものである。本解析では配管内部の雰囲気温度は液体水素と液体窒素を仮定し-253[℃]と-196[℃]の２条件を計算した。熱伝達係数は定常解析にて逆解析手法を用いて実験結果に合致する条件入力パラメータを同定し、過渡解析に適用した。冷却条件は１分間のみ冷却とし、10 分経過するまでの計算を行い、上部フランジ、下部フランジ、筐体底部の温度変化を求めた。

本研究では、IoT センサデータを基に高精度な CAE 解析を行うことで仮想的な測定とみなす「CAE バーチャルセンサ」技術を提案しているが、過渡解析を基に霜の発生・成長の予想や霜層の断熱効果の CAE への反映手法を検討した。

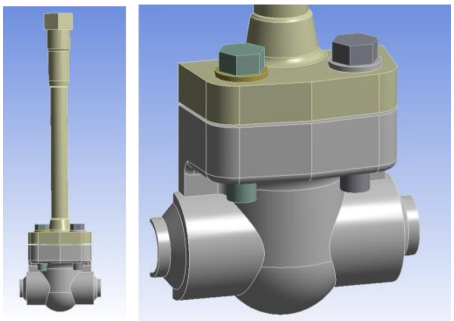


図４　ＣＡＥ解析モデル
（左:全体図、右：筐体部拡大図）

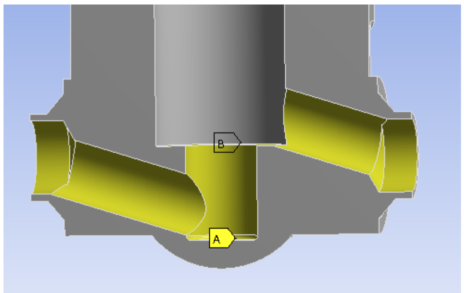


図５　境界条件（筐体内流路面）

２．４．蓄圧器のＣＡＥ破壊力学解析

き裂が生じた場合の蓄圧器の変形の特徴を調べるため、ANSYS Mechanical Enterprise を用いて破壊力学解析を実施した。

図６はき裂が無い場合の蓄圧器モデルである。対称性を考慮した４分の１モデルとした。直径は 400[mm]、板厚は 30[mm]、長さは 1250[mm]である。

ANSYS Mechanical Enterprise は、き裂モデルを作成する機能があり、き裂が無いモデルを基本形状とした上で、図７に示すように任意の座標に座標系を作成し、楕円き裂の長径、短径、要素分割条件を入力することで、き裂を有するモデルを作成できる。これにより様々な大きさのき裂部の解析を効率よく実施することができる。き裂部の応力分布は要素分割に大きく影響されるが、本ソフトを用いることで、図７右下に示すように統一的な要素分割を行い、異なるモデルであっても妥当な比較が可能となる。

本研究では、き裂が無いモデルと、き裂長さが 10[mm]のモデルに対し、内圧条件を 70[MPa]として解析を行い、変位分布を比較した。

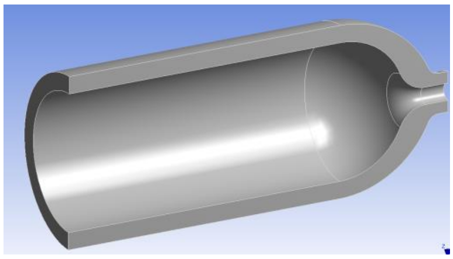


図６　蓄圧器モデル

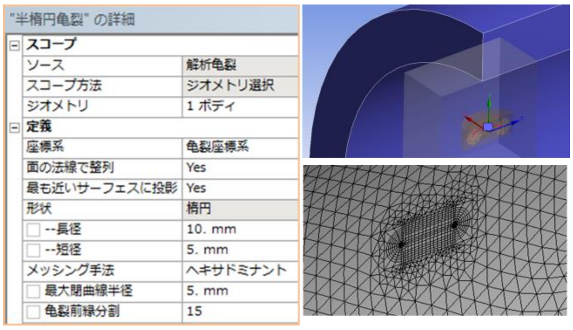


図７　き裂作成過程と要素分割図

２．５．円弧試験片の荷重試験、ＣＡＥ解析

破壊力学に基づく材料強度試験では、荷重-変位グラフにおける傾きであるコンプライアンス（荷重に対する変形量の比）を、き裂の発生や進展に紐づけて評価することがあり「コンプライアンス法」と呼ばれる。本研究では「コンプライアンス法」を蓄圧器の内面き裂を検知する点検技術に応用することを検討した。

図８に破壊力学の標準的試験片形状を示した。コンパクトテンション（通称 CT 試験片）は最もスタンダードなもので、水素環境下の試験結果も豊富である。本研究では蓄圧器の破壊形態に近いことから円弧試験片を採用した。円弧試験片は蓄圧器のき裂部を切り出したものと捉えることができる。なお、破壊力学では、き裂先端の応力場が同じであれば等価と扱えるため、異なる試験片による結果でも相互利用できる。

図９に荷重試験状況と円弧試験片の模擬き裂部の拡大図を示す。試験片は板幅 15[mm]、板厚 15[mm]、円弧外径 130[mm]で材質は炭素鋼である。模擬き裂の長さは板厚の 1/4 程度とし、機械加工により模擬き裂を作製した。荷重試験は、精密万能試験((株)島津製作所製 AG-10kNE)を用いて、一定速度で変位を与え、最大 500[N]まで荷重を付与した。同一のサンプルの３回の試験を実施した。

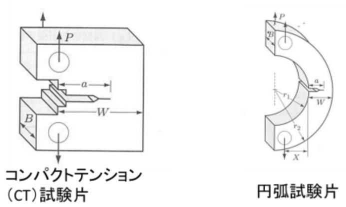


図８　破壊力学の標準試験片[2)]

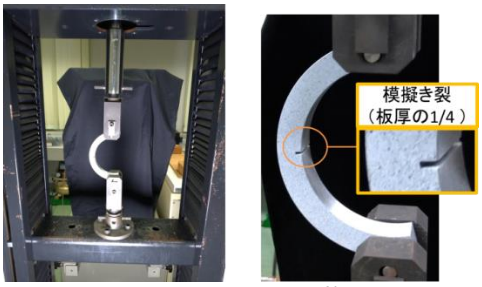


図９　（左）荷重試験状況（右）模擬き裂部拡大図

３．実験結果ならびにＣＡＥ解析結果

３．１．バルブ実験モデルの冷却伝熱実験結果

様々な周囲温度でバルブ実験モデルの冷却伝熱実験を実施した結果、共通した特徴が確認できた。本報告では代表して外気温 28[℃]、無風状態の条件で定常冷却状態のサーモカメラ画像を図１０に示す。２つのバルブとも全開とした状態で液体窒素を注入することで、昨年度より速く定常状態まで冷却を進めることが可能であった。バルブを開けた試験では２つのバルブとも左右対称の温度分布となった。そこでバルブ中心部にラインカーソル（図中 SE１、SE2）を配置し、温度分布の特徴を代表するグラフとして抽出した。

図１１にラインカーソル上の温度分布を示したもので、横軸が上下方向座標、縦軸が温度である。この結果、２つのバルブは類似の温度分布グラフを持つことが確認できた。また、温度分布グラフの左側は滑らかな曲線となっているが、ほぼ一定となる温度は、周囲温度から 3～5[℃]ほど低いという共通の傾向が見られた。これらの特徴は伝熱工学の基本問題である放熱フィンの温度分布の特徴と共通する。

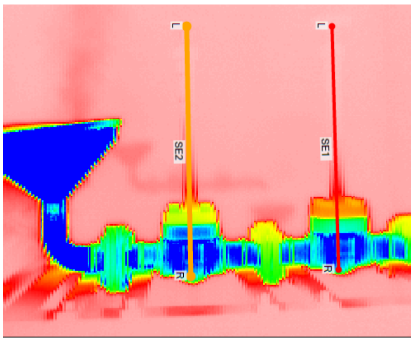


図１０　冷却伝熱試験中のサーモカメラ画像

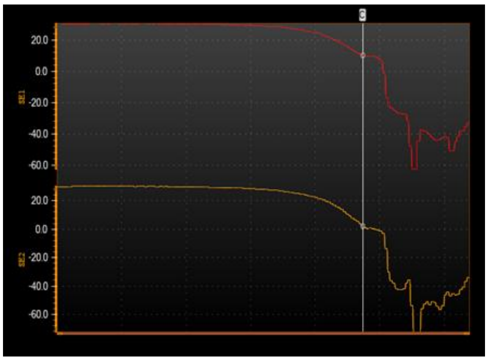


図１１　ラインカーソル上の温度分布
（上）右側バルブ　（下）左側バルブ

次に試験中の温度分布の変化に着目し、予冷を終了したバルブ１開弁時から起算し 3、17、20 分後の結果を図１２に示す。比較しやすいように２つのラインカーソルの温度分布グラフを重ね描きしている。グラフ右にはサーモカメラ画像のも併せて示した。この結果から、温度分布はバルブの形状や伝熱の法則に基づき、決まった範囲の変化を示すことが分かった。

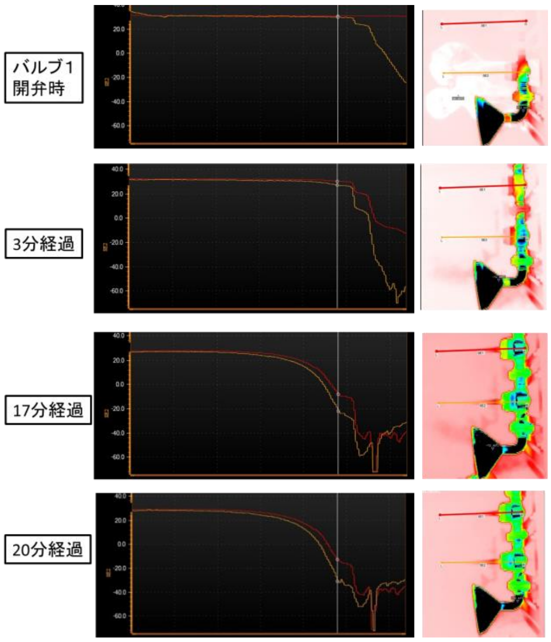


図１２　試験中の温度分布の経時変化

以上の結果を踏まえ、本研究では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判断し、IoT センサの測定点と決定した。熱電対の取付けは、フランジ部に直径 2[mm]、深さ 3[mm]程度の下穴を加工した後に、金属粉を含有させたエポキシ樹脂で固定した。この固定方法は極低温の強度試験で実績のあるものである。図１３にフランジ部の熱電対取付け状況を示す。フランジ部は十分な厚みがあるため、穴加工の影響が小さく、サーモカメラ画像でも明瞭に測定できるなど好都合である。今後は長期測定試験を行い固定方法の妥当性を検証する予定である。

図１４に本研究で想定する IoT 点検システム統合のイメージを示す。IoT センシングは既に技術的に成熟した安価なデバイスを利用する計画である。

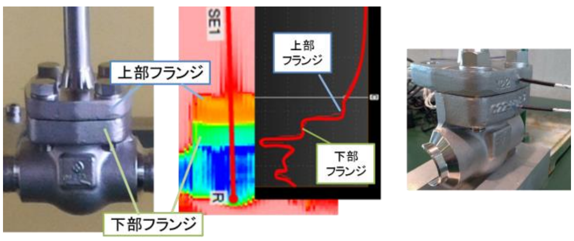


図１３　フランジ部への熱電対固定状況

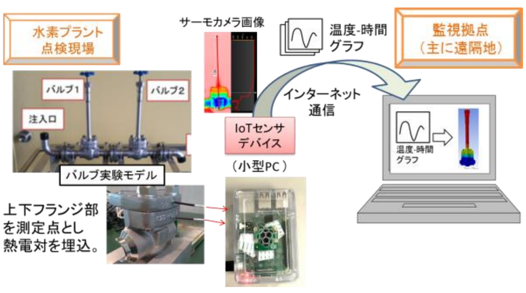


図１４　IoT 点検システム統合イメージ図

３．２．バルブ実験モデルのＣＡＥ伝熱解析結果

初めに熱伝達パラメータの設定のために実施した定常解析結果を３次元形状測定データ、サーモカメラ画像と併せて図１５に示す。昨年度より正確な形状で CAE モデルを作成しているため、実物形状やサーモカメラ画像との統一感が高まり、点検に活用するのに十分なレベルと考える。

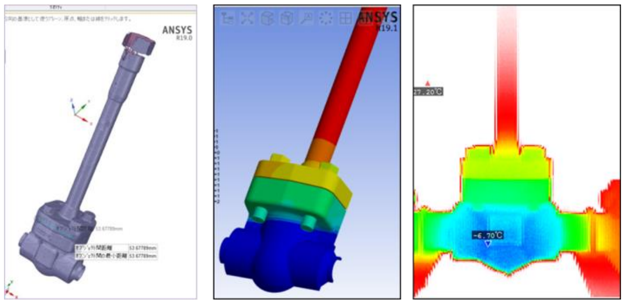


図１５　定常解析結果
（左）形状データ（中央）CAE 結果（右）サーモカメラ画像

次に過渡解析の結果として、上部フランジ、下部フランジ、筐体底部の３地点の温度変化グラフを図１６に示す。いずれも冷却が終了した１分後から２分後にかけて最低温度のピークを示した後になだらかに室温に復帰した。また、ピークを示す時刻は流路から遠ざかるほど遅くなった。これは冷却伝熱試験の測定結果と同様の傾向である。

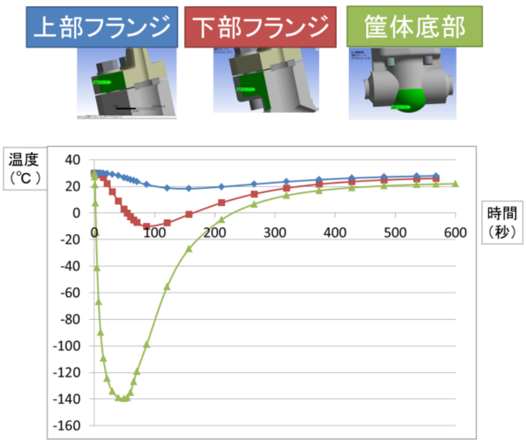


図１６　過渡解析結果

本研究では IoT センサで得られた温度情報を基に CAE 解析により製品内部の情報を補完し、仮想的な測定とする「CAE バーチャルセンサ」技術の活用を検討している。本年度は、「CAE バーチャルセンサ」技術の新たな発展として、将来の温度予測の手法を検討した。

表２に過渡解析の結果から求められる各部の最低温度や氷点下滞在時間を示した。霜は筐体表面が氷点下温度になった時に生じ、その発生量は時間の関数であることが知られている。従って上部フランジでは霜は生じないこと、筐体底部の霜が成長することが分かるだけでなく、CAE 結果から製品表面の全ての地点で霜

成長の可能性を定量化できる。図１７に、本研究が想定する温度予測のイメージ図を示す。CAE 解析を用いれば霜層の断熱効果の影響や製品内部の異常低温トラブルのリスクを定量化して予測できる。このような予測は単なるデータサイエンス手法では困難と見られ、物理現象に基づく CAE 解析の大きな利点である。

なお、ここで実施した CAE 解析は製品表面の熱伝達条件を変化させて計算した。図１８は試験中に霜層の一部を取り除いた直後のサーモカメラ画像であるが、霜層内部に温度分布が生じている。従って、より正確な解析を行うには、霜層を固体としてモデル化する手法が望ましいと考える。

表２　各部の最低温度と氷点下滞在時間

	上部フランジ	下部フランジ	筐体底部
最低温度（℃）	10.1	-99.7	-139.7
氷点下滞在時間（sec）	0	100	250

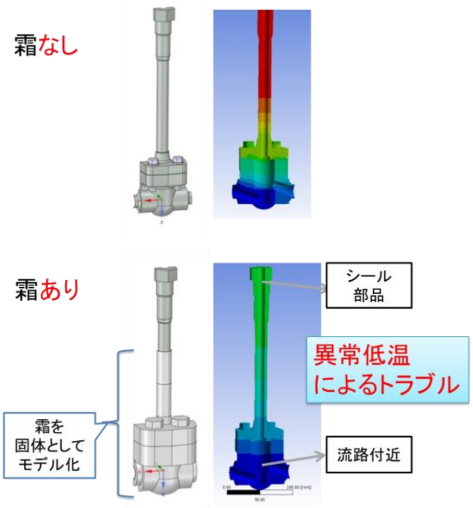


図１７　霜の断熱効果を反映した温度予測イメージ図

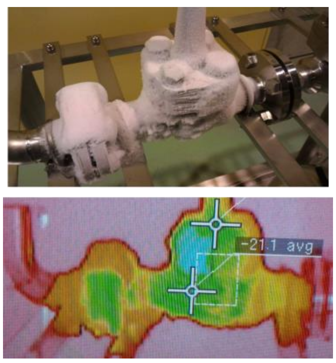


図１８　霜層内部の温度分布

３．３．蓄圧器のＣＡＥ破壊力学解析結果

70[MPa]の内圧かけた場合の CAE 解析結果として、円筒座標系の円周方向変位分布図を図１９に示す。また、図には蓄圧器外表面の同一地点での変位も示した。この結果、き裂が存在することによって、変位が 0.159[mm]から 0.169[mm]に増加することが分かった。蓄圧器の内圧と外表面変形量の関係を長期的にデータ収集すれば、き裂の存在を検知できると考えられる。

ANSYS Mechanical Enterprise では、き裂モデルの破壊力学パラメータ解析を計算することが可能である。図２０に、き裂長さ 10[mm]の応力拡大係数の分布図を示すが、最大値は 34[MPa√m]であった。図２１は疲労き裂進展特性の測定例[3]であるが、34[MPa√m]負荷された場合のき裂進展速度は 1E-6[m/cycle]前後である。近年は、鋼種別に大気・水素ガス環境下の疲労き裂進展特性のデータが揃ってきたため、CAE 破壊力学解析により、鋼種や水素脆化の影響を反映したき裂進展予測も可能である。

水素ステーション点検技術へ応用としては、FCV 充填回数を踏まえたき裂進展量の予測や、き裂進展量の予測に基づく点検間隔の設定が有望である。

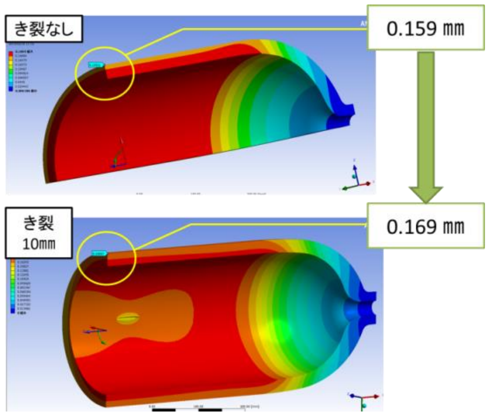


図１９　き裂の有無による蓄圧器変形の変化

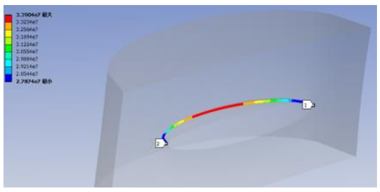


図２０　き裂先端の応力拡大係数分布結果

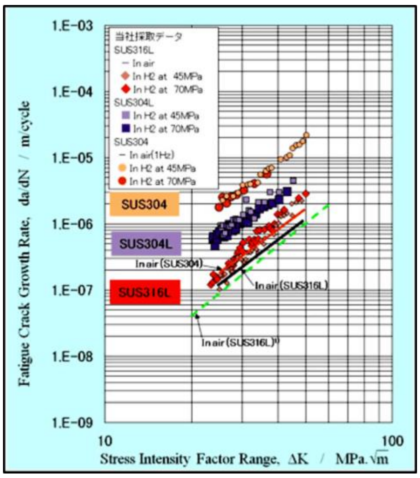


図２１　疲労き裂進展特性グラフ[3]

３．４．円弧試験片の荷重試験、ＣＡＥ解析結果

図２２に円弧試験片に関する CAE 解析結果を示す。500[N]の荷重を与えた時のピン部変位の変化に着目すると、き裂発生初期(き裂発生からき裂長さ 1/4t まで)に相当する増分が 0.03[mm]なのに対し、き裂発生中期（き裂長さ 1/4t から 1/2t)にかけての増分は 0.1[mm]と大きい。蓄圧器点検の目安となるき裂長さは 1/4t 程度が望ましいと考える。

円弧試験片の荷重試験は比較のため、き裂なしの試験も実施した。図２３に荷重試験で得られた荷重 - 変位グラフを示す。なお、ピン治具のクリアランスの影響を排除するため、荷重 50[N]から記録を開始した。同一サンプルで３回繰り返し試験を行ったが、ほぼ同一のグラフを描いた。き裂がある場合は、き裂なしの場合に比べて､傾き (=荷重/変位) が約 10%減少した。なお、実験結果と CAE 結果の変位が若干異なるのは、試験結果には試験機自体の変形や治具間のクリアランスも含まれるためと考えられる。

以上により､き裂長さが 1/4t 程度あればコンプライアンス法により、き裂を検知できることを実験的に確認した。今後は、この技術を実稼働する蓄圧器の点検技術として発展させる予定である。

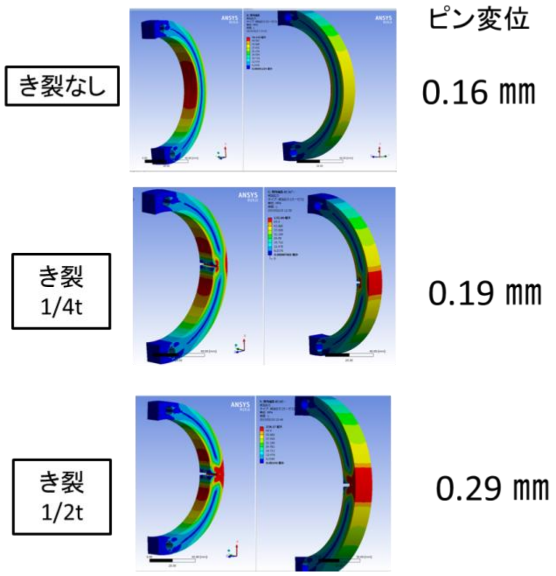


図２２　円弧試験片の CAE 解析結果（応力分布図）

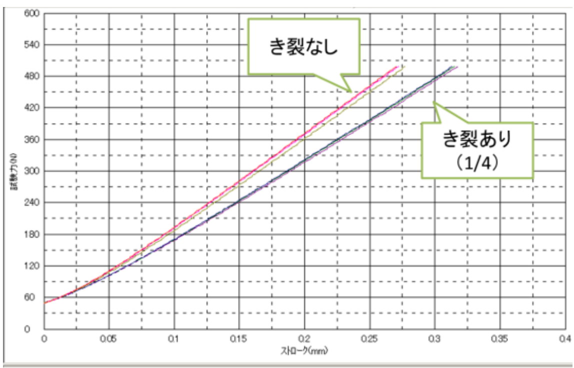


図２３　円弧試験片の荷重-変位グラフ

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設備を模擬したバルブ実験モデルの冷却伝熱試験、CAE 伝熱過渡解析を実施した。また、蓄圧器に関する CAE 破壊力学、円弧試験片の荷重試験を実施し、以下の知見を得た。

① バルブ実験モデルの冷却伝熱実験を実施し、実験モデルの温度分布はバルブ形状や伝熱の法則に基づき、決まった範囲内の変化を示すことが分かった。
② 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判断し､IoT センサの測定点と決定した。フランジ部に下穴を加工し、熱電対をエポキシ樹脂で取付ける方法を採用した。
③ バルブ実験モデルの CAE 過渡伝熱解析を実施し、バルブ各部の温度－時間グラフが得られること、実験と類似の傾向が見られることを確認した。
④ 蓄圧器の CAE 破壊力学解析により、き裂が存在することにより、同一圧力であっても、容器の変形が増加することを確認した。
⑤ CAE 破壊力学解析で応力拡大係数を算出できることを確認した。別途実施された疲労き裂進展特性グラフを参照して、き裂進展量の推定が可能である。
⑥ 蓄圧器の一部を模した円弧試験片の荷重試験により、肉厚の 1/4 程度のき裂の存在を荷重－変位グラフの傾きにより検知できることを確認した。

参考文献

１）経済産業省 産業構造審議会 高圧ガス小委員会, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/koatsu_gas/007.html, (参照 2019-5-7).
２）森北出版(株): 破壊力学 基礎と応用, (2011).
３）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 2019-5-7).

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 生産・加工科　小野裕道　三瓶義之　小林翼
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　福田哲生　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　　小倉英之　草間智

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させ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㎜ 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発熱を効率的に放熱させる設計を行い、定格電流 12A を流しても薄型ダイオードの温度上昇を 70℃以下に抑えることができた。今後は製品試験を行う。

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多量に導入された。特に太陽光発電の導入量の増加は大きく、その設置場所も自動車車載用や建材一体型など多様化している。

現在の太陽電池パネル（以下：モジュール）は裏面に凸部となるジャンクションボックスがある。そのため、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迂回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、表裏面の凸部を無くした意匠性に優れた薄型太陽電池モジュールの生産は難しい。

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の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、太陽電池モジュールを摸擬しこれを内蔵し、電流を迂回させた場合に、バイパスダイオードが異常に過熱しないよう放熱設計した結果を報告する。

２． 実験

２． １． 薄型バイパスダイオードの開発

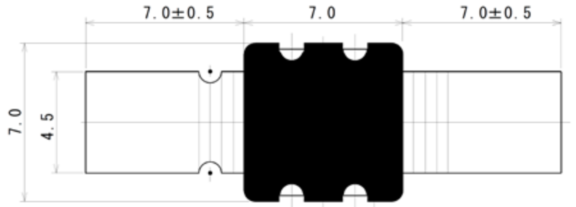
太陽電池モジュールは、太陽電池セルにタブ線と呼ばれる電極をはんだ付けし直列に接続させ回路を形成する。これをエチレン・酢酸ビニル共重合体（Ethylene-vinyl acetate copolymer 以下EVA）フィルムを封止材として、真空加熱ラミネーターを用いてラミネートして作製する。回路内に厚い部分があれば気泡などが残り、故障を起こす原因となることから薄型ダイオードもセルと同程度の厚みである必要がある。そこで厚みの目標をタブ線付きのセルと同程度の 1㎜ 以下とした。

太陽電池モジュールに影などがかかり発電しないセルが発生すると、セルの内部抵抗による電圧降下が発生し、発熱してホットスポットとなる。この電圧降下がダイオードの順方向電圧より大きくなれば、電流はバイパスダイオードを迂回しセルのホットスポットを解消する。開発する薄型ダイオードは、電流迂回時には順方向に 10A 程度の電流が流れる。この際、バイパスダイオード側でも内部抵抗などのため発熱する。この発熱による温度分布が生じると、発電セルとタブ線、ダイオードの線膨張係数の違いにより熱応力が発生する。この熱応力を緩和するため、ダイオードの端子部分にバネ構造を付与した。

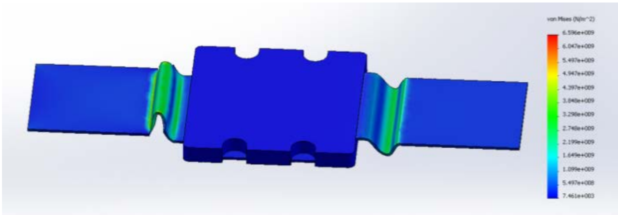
薄型ダイオードの端子部に設けたバネ構造を複数考案し、それぞれに対し構造解析を実施した。その中から採用した形状を図１（a）に、熱変形を摸擬した変位を薄型ダイオードに付与した場合の応力分布を（b）と（c）に示す。端子のバネ部分が変形して変位量の吸収が可能であることを確認した。薄型ダイオード端子のバネ形状はプレス加工により製作した。

開発した薄型ダイオードの外観を図２に、その仕様を表１に示す。端子のバネ構造を含めて厚さは 0.7㎜ であった。このダイオードは価格上優位なショットキーバリアダイオードを採用した。その順方向定格電流は 12A と 15A の２種類とした。

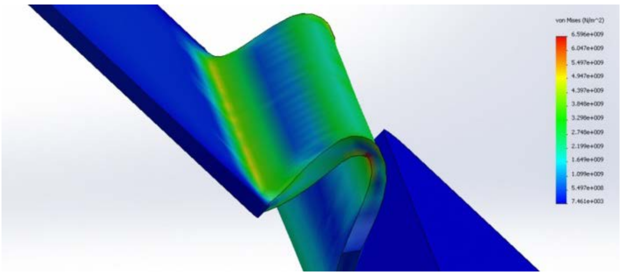
事業課題名「バイパス回路内蔵太陽電池パネルの実装技術の開発」



(a)　薄型ダイオードの形状

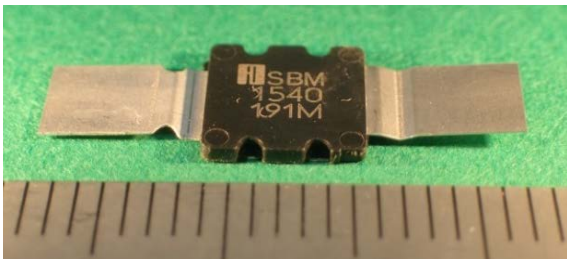


(b) 応力分布

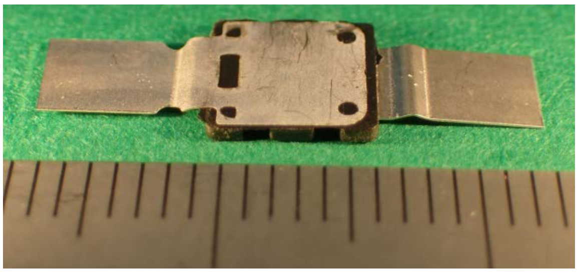


(c) 応力集中部

図１　薄型バイパスダイオード端子形状の設計



(a)　モールド側



(b)　カソード端子側

図２　薄型ダイオードの外観

２．２．ダイオードのラミネート試験

開発した薄型ダイオードをタブ線にはんだ付けし、太陽電池モジュールを模擬して EVA フィルムではさみ

表１　薄型バイパスダイオードの性能

型式	SBM1240	SBM1545
順方向電流	12A	15A
逆方向耐電圧	40V	45V
動作接合温度範囲	-55℃から150℃	-55℃から175℃

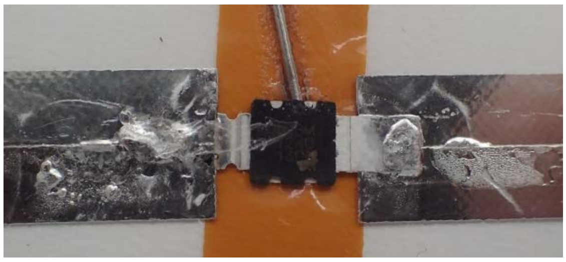


図３ ラミネート試験

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。図３に示すように、薄型ダイオード周辺にも気泡なくラミネートできることを確認した。試料はダイオードに定格電流を流した際の温度上昇を測定するため、カソード電極面にシース型熱電対をラミネートしている。

２．３．ダイオードの熱抵抗の測定

太陽電池モジュールではバイパスダイオードに電流が迂回するとバイパスダイオードは発熱する。薄型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日中の日向に設置され、ラミネートされた薄型ダイオードから発熱があったとしても、動作温度範囲内である 150℃以下に保つ必要がある。このためには、電流が薄型ダイオードに迂回した場合でも、充分に放熱できることが求められる。一般に、電子回路の熱設計は、素子の消費電力ごとの温度上昇を測定し、消費電力と温度上昇の傾きである熱抵抗 K/W を算出して評価する。これは薄型ダイオードの周辺の伝熱の状況により変わり、値が小さいほど放熱性に優れていることを示す。薄型ダイオードの発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。熱抵抗の測定のため、ダイオードとはんだ付けするタブ線の幅を 1.5mm と 6mm、12mm の３種類の試料を作製した。また、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についても、試料を作製した。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に示す条件で電流を流し、熱電対でダイオードカソード端子側の温度上昇を測定した。消費電力と薄型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。幅 12mm の熱抵抗は 24.2K/W で、12A

表２　通電実験の実験条件

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

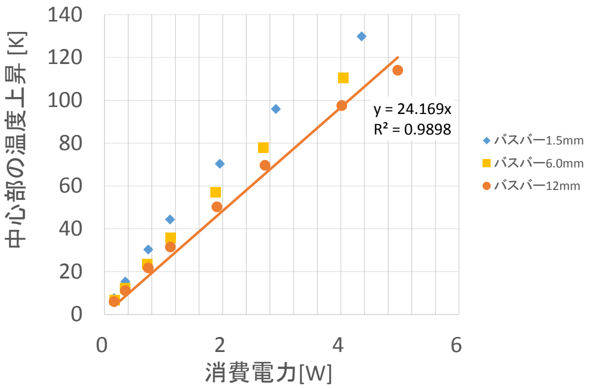


図４　消費電力と薄型ダイオードの温度上昇

を通電した際 120℃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℃以上であれば、動作温度の 150℃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。

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 14K/W であった。薄型ダイオードを太陽光モジュールにラミネートした場合も、外付けのジャンクションボックス内のダイオードと同程度の温度上昇に抑制することを目標とした。

２．４．薄型ダイオードの並列配置

薄型ダイオードが通電した際の発熱量を抑制するためには電流を減らすことが有効である。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いため、ダイオードを並列に配置すれば電流値と電圧値共に減少し、発熱量を抑制することが可能である。

図５に示すように薄型ダイオードを並列配置して、温度上昇を測定した。表２の条件で電流値ごとのラミネートしたダイオード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を抑制し、熱抵抗は 16.9K/W であった。

２．５．薄型ダイオードとタブ線の熱伝導性の改善

薄型ダイオードが通電した際の熱を発散するためには、タブ線へ伝熱する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の温度勾配が

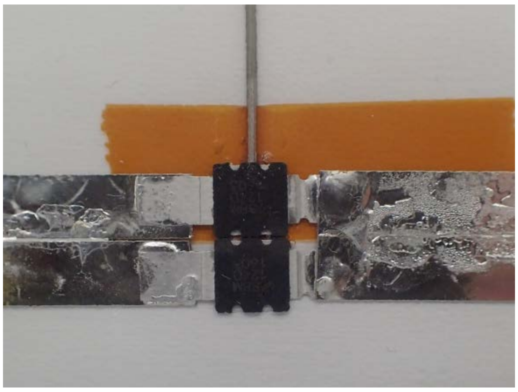


図５　薄型ダイオードの並列配置

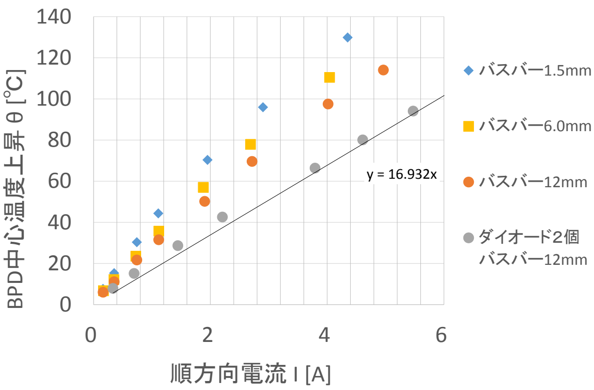


図６　並列配置した薄型ダイオードの温度上昇

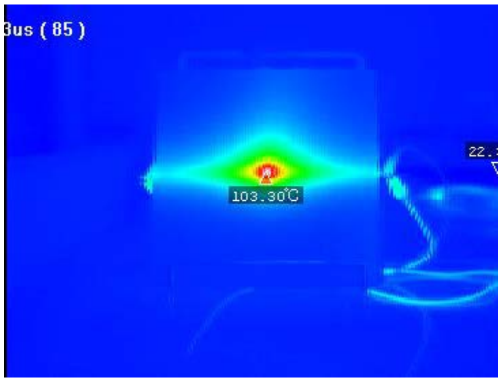


図７　ガラス表面の温度分布

急であることが分かる。この原因を探すため、ダイオードから内部配線までをモデル化し CAE により温度分布を解析したところ、図８に示す大きな勾配の温度分布が算出された。この原因は発熱体であるダイオードとタブ線の接続を薄型ダイオードの電極板としたため、この部分で伝熱量が制限されたと考えらえる。薄型ダイオードは樹脂成型した厚さを 0.7mm とするため、その電極板の厚みはタブ線より薄い。電極厚さ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、伝熱量は増加し図９に示すよう温度勾配は解消した。

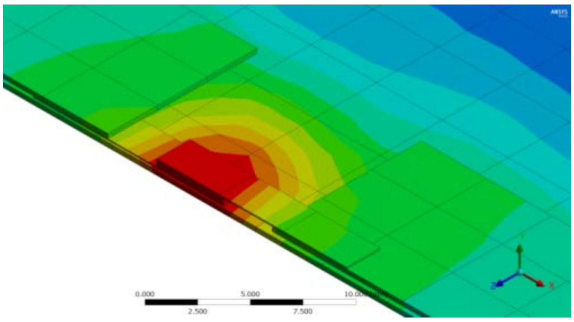


図８　ダイオード周辺の温度分布

以上のように、薄型ダイオードの電極が熱伝導の律速である可能性があることから、薄型ダイオードとタブ線を熱的に接続することを試みた。図２に示したとおり、薄型ダイオード中央部分は樹脂成型されているものの、カソード側の電極は樹脂成型されていなく端子が表れている。図１０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放熱量の上昇が期待できる。はんだ付けやろう付けが熱伝導性に優れているが、薄型ダイオード内もはんだ付けされた部分があり再加熱することで内部はんだの再溶融が懸念される。そのため、温度上昇を伴わない導電性エポキシ接着剤を使用した。

３．結果

３．１．熱抵抗測定実験

薄型ダイオードの温度上昇を抑制するため、上記の対策をとり、図１１に示す試料を作製した。この諸元を表３に示す。タブ線の幅は 12mm とし、ダイオードのカソード電極と導電性エポキシ接着剤で熱的に接続させた。作製した試料は、薄型ダイオードの温度測定のため、カソード側に熱電対をラミネートした。

この薄型ダイオードに対し、太陽光発電所の定格運転中に電流を迂回させることを想定し、表２に示す条件で電流を通電した。電流値ごとのダイオードの電圧降下とダイオードの温度を測定した。電圧降下から算出した消費電力と裏面接着したダイオードの温度上昇を図１２に示す。12.5A を通電した際、ダイオードの温度上昇は SBM1240 では 75.1℃、消費電力あたりの温度上昇から求めた熱抵抗は 14.8K/W であり、SBM1545 では 84.2℃、熱抵抗は 14.5K/W であった。裏面の熱接続を取らなかった場合に比べ、温度上昇を低くできたものの、従来の外付けジャンクションボックスでのバイパスダイオードの熱抵抗に届かなかった。

３．２．模擬モジュールの温度抵抗測定実験

薄型バイパスダイオードと単結晶シリコン太陽電池セルをラミネートした太陽電池模擬モジュールを試作した。この模擬モジュールの諸元を表４に、外観を図

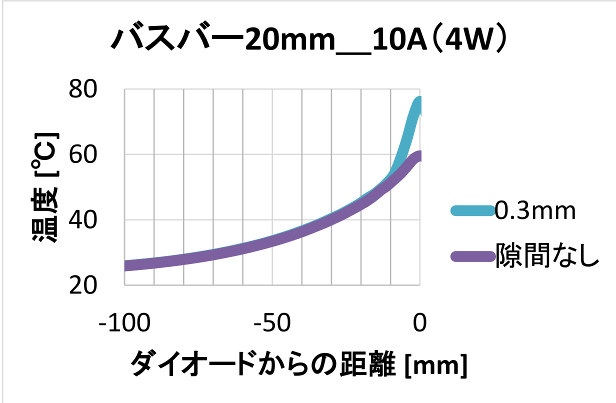


図９　薄型ダイオードとタブ線の温度勾配

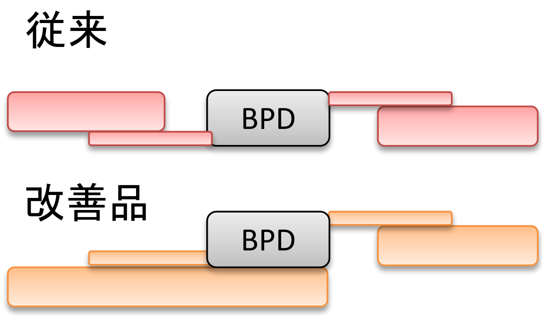


図１０　カソード側電極熱接続の模式図

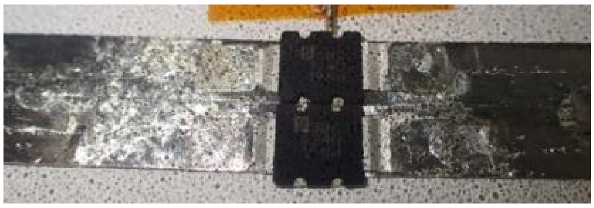


図１１　裏面を熱接続した薄型ダイオード

表３　薄型ダイオードのラミネート試料の諸元

ダイオード	薄型バイパスダイオード (1)　12A SBM1240 2個並列 (2)　15A SBM1545 2個並列
ラミネート構造	ガラス板 – EVA – セル（又はモジュール） – EVA – バックシート

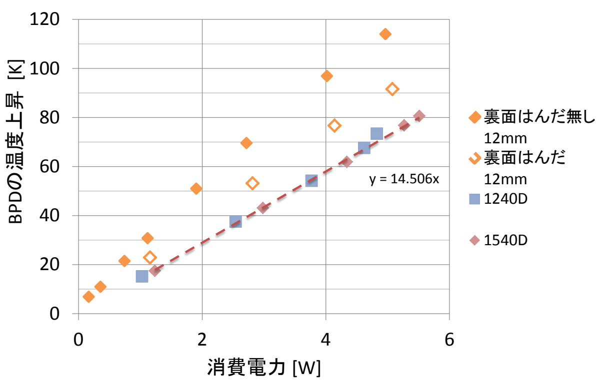


図１２　消費電力と裏面接着ダイオードの温度上昇

１３に示す。単結晶シリコンの発電セルは１枚とし、バイパスダイオードは２個を並列して配置した。ダイオードの放熱のため横タブ線の太さは 12mm とした。バイパスダイオードの裏面に、熱電対をラミネートし、ダイオードの温度上昇を測定できるようにしている。

この模擬モジュールのバイパス回路に対し、前述の表２に示す条件で電流を通電し、電流ごとの薄型ダイオードの電圧降下と温度上昇を測定した。

先に示した通り、電流毎の電圧降下から消費電力を算出し、模擬モジュール内のダイオードの温度上昇を図１４に示す。比較のため、先の実験結果も合わせて示す。12.5A を通電した際、ダイオードの温度上昇は 68.9℃に抑えることができ、熱抵抗は 12.4K/W を得た。これは従来の外付けのジャンクションボックスでのバイパスダイオードの熱抵抗と同程度である。表５に示すとおり、薄型ダイオードの温度上昇抑制のため、並列設置やカソード端子の熱接続などの試料を作製しそれぞれの熱抵抗を求めた。

４．考察

薄型ダイオードに電流が迂回した場合、ダイオードの発熱による温度上昇が課題であった。太陽電池セルと薄型ダイオードを共にラミネートした太陽電池モジュールでは、伝熱面積を増やすことができ、薄型ダイオードの発熱による温度上昇を 70℃まで抑制することができた。

この際、ガラス板から空気への単位面積あたりの熱伝達は、ガラス板と空気の温度差に依存する。そのためガラス板の温度分布から、より多くの熱量を空気に放熱する対策を取ることが可能であると考えられる。薄型ダイオードに電流を与え、ガラス板の温度分布をサーモカメラにより測定した結果を図１５に示す。

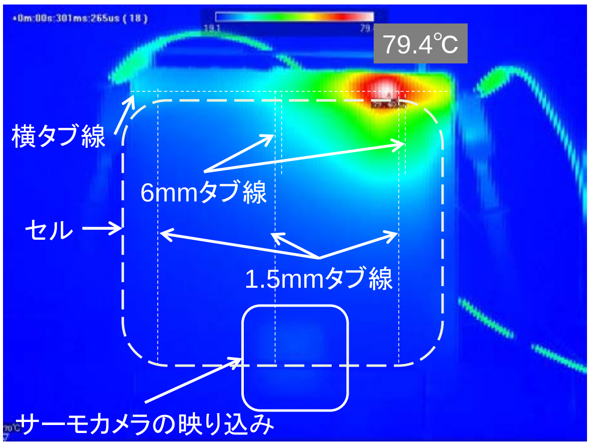


図１５　ダイオード内蔵モジュールの表面温度分布

表４　太陽電池模擬モジュールの諸元

太陽光セル	単結晶シリコンセル
ダイオード	薄型バイパスダイオード SBM1545 2個並列
ラミネート構造	ガラス板－EVA－ セル（又はモジュール） －EVA－バックシート

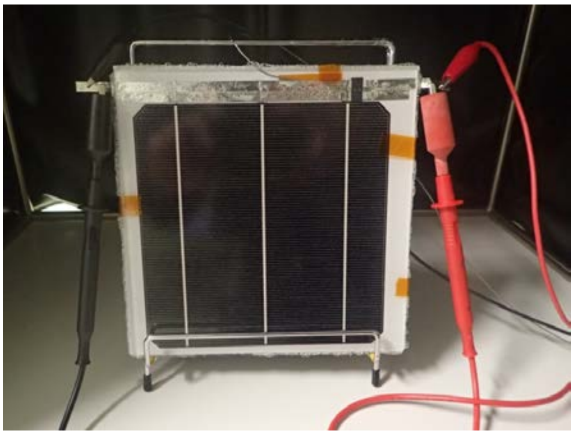


図１３　太陽電池模擬モジュール

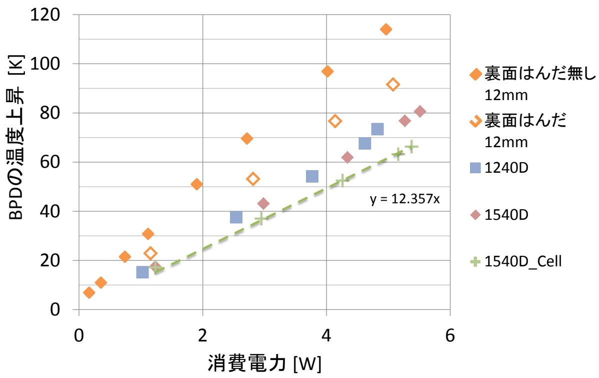


図１４　消費電力と模擬モジュール内ダイオードの温度上昇

表５　試料毎の熱抵抗

試料名	熱抵抗 [K/W]	温度上昇 [K]
ダイオード 1個	24.2	132（10A）
並列 2個	16.9	111（12A）
並列 2個 カソード熱接続	14.5	103（12.5A）
並列 2個 カソード熱接続 太陽電池セル	12.4	68.9（12.5A）

この場合、内蔵されたバイパスダイオードで発生した熱は、幅 12mm の横タブ線により伝熱されていることが分かる。また熱伝導を高めるため、セルの裏面に配置した 6mm のタブ線により伝熱され、セルが配置された部分のガラス板も温度上昇していることが分かった。この温度分布はセルにも熱応力が発生しているものと考えられるため、この後のヒートサイクル試験などではセルも含めた状態で実施する必要があることが分かった。

５．結言

フルサイズの単結晶シリコン太陽電池セルに適応した定格電流 15A の厚さ 0.7mm の薄型バイパスダイオードを試作し、太陽電池パネルを模擬したパネルにラミネートした。バイパス回路への通電時にラミネートした薄型バイパスダイオードの温度上昇を、動作範囲温度以下に抑えるため、放熱経路を設計し順方向電流 12A を流しても、外付けのジャンクションボックスに取り付けたダイオードと同等の温度上昇 70℃以下に抑えることができた。今後は、この設計の太陽電池モジュールを試作し、使用環境を摸擬した環境試験を実施する。

福島県オリジナル清酒製造技術の開発（第３報）

－県産市販酒の調査報告（２）－

Development of original sake brewing technology in Fukushima prefecture (3rd report)

- Survey report on commercial sake producted 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　菊地伸広　猪俣有唯　松本大志　鈴木賢二

平成２９年度から平成３１年度まで福島県オリジナル清酒酵母と県産酒造好適米を使用した品質の高い県オリジナル清酒製造を安定的に行うための技術開発に取り組んでいる。本年も県産市販酒の現状を把握する目的で４８点の県産市販酒の調査と成分分析を実施した。その結果、県オリジナル酵母や県産酒造好適米の使用状況、成分分析値から見出された官能評価結果と成分値の関係、県酵母による香気特性の差異について知見を得たので報告する。

Key words: 県オリジナル酵母、県産酒造好適米、県産市販酒

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。県産酒の課税移出数量は平成２３年の東日本大震災以降、微減傾向が続いている中、特定名称酒の課税移出数量は増加傾向にあり、特に純米酒や純米吟醸酒が顕著に伸びている。県酒造組合のまとめによると、平成２９年度課税移出数量における特定名称酒比率は平成２２年度の約４０%から６６％にまで増加している。また、県が実施する酵母頒布事業においても、県内酒造場への酵母頒布本数がこの１０年で２倍以上に増えている。特に、県オリジナル酵母であるうつくしま夢酵母(F7-01)[1]、うつくしま煌酵母[2)3)]を中心とした県酵母の頒布本数は全体数の８割以上を占め、純米酒や純米吟醸酒を中心に広く活用されている。

このような中、福島県オリジナル酵母と県産酒造好適米を使用した県オリジナル清酒に対する期待が特に高まっており、その品質向上と安定化が求められている。

本研究では､平成２９年度～平成３１年度にわたり、県酵母の発酵特性試験と香味特性の分析、県産酒造好適米の特性分析、酵母と原料米の相性に関する発酵特性試験と分析、また、清酒中のオフフレーバー軽減に関する試験研究を実施する。最終的にそれらの結果を福島県市販酒製造マニュアルとしてまとめ、県内酒造場に広く情報提供することによって､県産酒の多様化、高品質化、安定化の実現につなげていく。

本年は、酵母の糖発酵性・資化性試験、酵母と県産酒造好適米を組み合わせた小仕込み試験、そして県酒造組合の協力をいただき、県産市販酒の調査及び官能評価、成分分析を実施した。

市販酒分析の結果、酵母による香気特性の差異、また良好な官能評価結果を得る清酒の特性について知見を得たので報告する。なお、酵母の糖発酵性・資化性試験の結果については別報で報告する。また、酵母と酒造好適米の小仕込みの結果については、現在解析中のため、改めて報告する。

事業課題名「福島県オリジナル清酒製造技術の開発」

２．調査方法

２．１．県産市販酒の調査

福島県酒造組合主催の県市販酒審査会(平成３０年１０月２６日開催)に出品された市販酒４８点(普通酒２点、本醸造酒０点、純米酒２８点、純米吟醸１７点)について、出品申込票により、以下の項目の調査を実施した。

なお、本審査会は県産酒の品質向上を目的として開催され、出品酒は各蔵元がこれから力を入れて販売したいと考えている市販清酒とし、酵母や米といった原料の指定は特に行っていない。

調査項目：原料米、精米歩合、使用酵母、火入れの回数、酒母製造方法

２．２．県産市販酒の分析

上記２．１．に示した市販酒について、以下の項目の分析を実施した。

分析項目：日本酒度、アルコール分、酸度、アミノ酸度、グルコース濃度、香気成分（カプロン酸エチル、酢酸イソアミル、酢酸エチル、アセトアルデヒド、n-プロピルアルコール、i-ブチルアルコール、i-アミルアルコール）

官能評価：審査員１３名。１:良好～５:難点ありの５段階による評点方式。アンバーグラス

により暗番にて実施した。

日本酒度およびアルコール分はSD式迅速アルコール測定システム（京都電子工業㈱）、酸度およびアミノ酸度は総酸・アミノ酸滴定システム（京都電子工業㈱）を用い、国税庁所定分析法[4)]に準拠して測定した。グルコース濃度は、グルコースC-IIテストワコー（和光純薬工業㈱）を用い、添付のマニュアルに従って測定した。香気成分は、ガスクロマトグラフ（GC）を用い、内部標準法にて測定した。

３．結果及び考察

３．１．県産市販酒の調査

３．１．１．出品酒の酒母製造方法と火入れの有無

酒母製造方法は、表１のとおり。また、火入れ処理を行っていない清酒は１点のみであった。

表１　酒母製造方法の割合

	2017		2018	
	点数	割合(%)	点数	割合(%)
速醸	37	76	39	80
酵母仕込み	8	16	6	12
山廃生酛	2	4	2	4
その他	2	4	1	2

昨年度実施時とほぼ変わらず、主に普通速醸酒母が用いられている。酵母仕込みによる作業の省力化傾向も変わらない。また、山廃・生酛や白麹使用酒母などで個性を重視した製造方法により、酒質の多様化や差別化が図られている。

３．１．２．県産酒使用原料米の内訳

純米系市販酒に使用されている原料米を表２、精米歩合の分布を図１に示した。

表２　純米系市販酒の原料米

	純米			純米吟醸		
	単独	混合	計	単独	混合	計
五百万石	5	4	**9**	4	3	**7**
夢の香	7	1	**8**	3	2	**5**
山田錦	1	0	**1**	2	0	**2**
美山錦	3	1	**4**	0	2	**2**
ﾁﾖﾆｼｷ	3	2	**5**	0	1	**1**
華吹雪	1	0	**1**			
まいひめ	1	0	**1**			
出羽燦々	1	0	**1**			
ﾀｶﾈﾐﾉﾘ	0	1	**1**			
めんこいな	0	1	**1**			
吟の精	0	1	**1**			
ｺｼﾋｶﾘ				1	1	**2**
酒未来				1	0	**1**
彗星				1	0	**1**
ﾋﾒﾉﾓﾁ				0	1	**1**
		混合使用：6社			混合使用：5社	

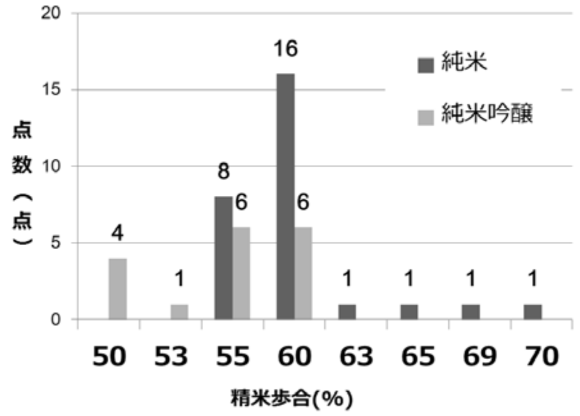


図１　純米系市販酒の精米歩合の分布

表２より、平成２９年度の市販酒審査にて、県産市販酒で広く使用されている原料米は夢の香（県オリジナル酒造好適米）と五百万石が中心であることがわかる。本年度の調査でも同様に、各酒造メーカー主力製品の原料には夢の香と五百万石が使用されており、特に、純米酒において、夢の香は単独で使用される割合が高かった。これは、夢の香が県産酒のブランドとして定着していることを表していると考えられる。

また、図１より、純米系市販酒の精米歩合は５５～６０％が中心であった。これは昨年度と同様の傾向であり、県内酒造場では、引き続き純米吟醸酒への関心が高まっていると考えられる。なお、本年度に行った酵母と県産酒造好適米の小仕込み試験には、精米歩合５０％の原料米を使用した。この試験結果については、酵母の発酵特性に関する知見と併せて現在解析を進めているところであり、改めて報告する。

米の特性についてさらに詳細な情報提供を行うことによって、これまで使用していなかった原料米への挑戦による酒質の多様化が見込まれる。また、長年使用してきた原料米についても、より深い知識を持ち、製造への取り組めるものと期待される。

３．１．３．純米系市販酒の使用酵母内訳

純米系市販酒４５点(純米酒２８点､純米吟醸酒１７点)の使用酵母の内訳を表３に示した。酒母製造時に複数の酵母をブレンドする、異なる酵母でそれぞれもろみを製造し、それぞれの製成酒を調合するなどといった方法により、複数の酵母を混合使用した製成酒も見られている。純米酒では､酢酸イソアミル系２８点（８０％)、カプロン酸エチル系６点（１７％）と大半が酢酸イソアミル系となっている。その中でも県酵母であるF7-01の使用数が最も多かった。また、純米吟醸酒では酢酸イソアミル系が１４点（５６％)、カプロン酸エチル系が９点（３６％）で、純米酒と同様に酢酸イソアミル系酵母の使用が多い。

表３　純米系市販酒の使用酵母内訳

			純米酒			純米吟醸酒		
			単独	混合	計	単独	混合	計
酢酸イソアミル系	県酵母	F7-01	9	4	13	3	4	7
		TM-1	3	3	6	0	2	2
		TUA	1	0	1	1	0	1
	きょうかい酵母	K7・K701	3	0	3			
		K9・K901	3	0	3	0	2	2
		K1401	0	1	1	1	1	2
		K1601	0	1	1			
カプロン酸エチル系	県酵母	901-A113	0	2	2	1	2	3
		701-15	1	1	2	2	2	4
	きょうかい酵母ほか	K1801	1	0	1	0	2	2
		M310	0	1	1			
その他		自社	1	0	1	0	2	2

（点）

昨年度、酢酸イソアミル系とカプロン酸エチル系の酵母ブレンドによる香気成分の変化について報告したが、純米酒では６社（２１％）、純米吟醸酒では８社（４７％）で酵母のブレンドが行われていた。ブレンドの内訳は、純米酒ではF7-01とTM-1、K1401、K1601、煌酵母 701-15、煌酵母 901-A113、また TM-1 と煌酵母 901-A113、M310であった。純米吟醸酒では、F7-01とTM-1、K901、煌酵母901-A113、煌酵母701-15、また、TM-1とK901､煌酵母の複数ブレンドなど多様な組み合わせが見られた。

酵母ブレンドにより複雑な香味が付与され、商品の個性化に役立っているものと考えられる。昨年よりも酵母ブレンド清酒の比率は増えており、製造場に合ったブレンド比や添加時期について、技術相談等により最適な条件を検討している製造場もあり、今後も増加していくものと予想する。

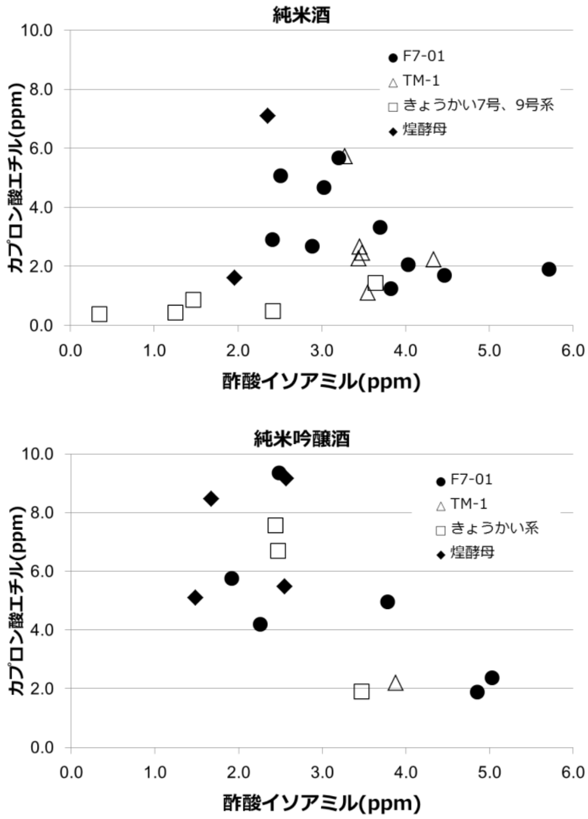


図３　酵母による香気特性の違い

３．２．県産市販酒の分析

３．２．１．酵母による香気成分特性

酵母による香気特性を把握するため、県オリジナル酵母を使用した純米系市販酒の香気成分分析を行った（図３）。

純米酒において、県酵母はきょうかい系酵母に比べ香気生成量が高いことが分かる。また、F7-01 は、酢酸イソアミルの幅が2.4～5.7ppmと広く、一部ではカプロン酸エチルが 5ppm 以上生成されたものも見られた。一方、TM-1 は酢酸イソアミルが 3.3～4.3ppm と F7-01 に比べてその幅が狭い。この傾向は昨年度と同様であることから、香気の生成に関する県酵母の特徴のひとつであると考えられる。製造方法や原料等の違いが香気の差に影響しやすい酵母とそうでない酵母があることを示唆しており、今後、詳細な検証を進めていきたい。

また、純米吟醸酒では全体的に香気成分が高く、特に煌酵母を使用した清酒でカプロン酸エチルの高さが目立った。また、酵母ブレンドにより酢酸イソアミルとカプロン酸エチルの両方が高い大変華やかなタイプがみられる一方で、酢酸イソアミルに特化したインパクトの高い清酒もあり多様化が著しい。

３．２．２．一般成分分析

市販酒分析の成分分析の平均値を表４に示した（日本酒度、カプロン酸エチル、酢酸イソアミル以外の香気成分は非表示）。なお、評点区分は、官能評価における審査員の評点平均とし、1.0～1.9（上位）、2.0～2.9(中位)、3.0～(下位)の３区分とした。

平成２９年度の調査から、高評価を得るためのポイントとして、純米酒は低アミノ酸、高香気、また純米吟醸は低アミノ酸、甘味、高香気であることが明らかになり、この結果を県酒造講習会等で各酒造場に周知した。今年度の結果でも、高評価となる清酒は低酸、低アミノ酸、高香気の傾向であることがわかる。

今年度は昨年に比べ全体的に、純米酒、純米吟醸酒ともアミノ酸が低くなり、グルコース濃度も高く甘味が増している。また、香気成分については、吟醸香（酢酸イソアミル、カプロン酸エチル）の濃度が顕著に増加していた。以上のことから、各酒造場が品質向上のポイントを押さえ、全体的に酒質が向上していることが伺える。

表４　県産市販酒の成分分析の平均値

		Alc.		酸度		アミノ酸度		グルコース		カプロン酸エチル		酢酸イソアミル	
	評点区分	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
純米													
	全体	**16.2**	**16.1**	**1.45**	**1.41**	**1.45**	**1.42**	**1.93**	**2.00**	**1.3**	**2.5**	**1.6**	**2.9**
	1.0～1.9	16.2	15.8	1.37	1.27	1.21	1.16	2.09	2.60	1.4	3.6	2.1	3.3
	2.0～2.9	16.1	15.8	1.40	1.40	1.49	1.28	1.61	1.80	1.1	2.3	1.3	3.2
	3.0～	16.3	16.7	1.57	1.58	1.66	1.86	2.08	1.90	1.5	1.6	1.4	2.0
純米吟醸													
	全体	**15.9**	**16.1**	**1.35**	**1.39**	**1.40**	**1.33**	**1.97**	**2.13**	**1.8**	**5.3**	**1.5**	**3.3**
	1.0～1.9	15.7	16.5	1.40	1.39	1.27	1.38	2.03	2.26	1.2	4.5	1.8	4.6
	2.0～2.9	16.4	16.1	1.35	1.44	1.24	1.25	2.10	2.29	1.9	6.5	1.3	2.2
	3.0～	15.8	15.4	1.31	1.32	1.69	1.41	1.78	1.66	2.3	4.5	1.3	3.2

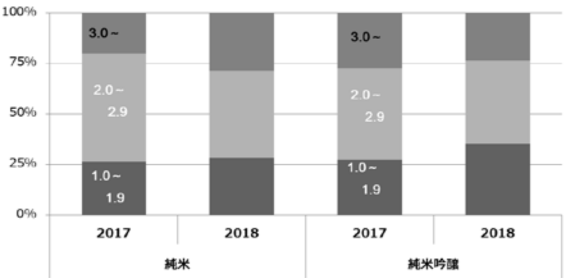


図４　官能評価平均点の分布割合

昨年度と今年度の官能評価の評点の割合を図４に示した。各評点の割合の変化をみると、純米吟醸酒は、1.0～1.9、2.0～2.9 の割合が増加し、3.0～の割合が減少した。その結果、評点平均は 2.41 から 2.31 へ 0.1 ポイント改善した。また、純米酒は 1.0～1.9 の割合が増加している一方、3.0～の割合もふえているが、評点平均は 2.42 から 2.41 へわずかながら改善した。

また、審査員からのコメントについて、評点の高い清酒については、甘味、まとまり、きれい、ガス感、フレッシュ、といった指摘が多く、反対に評点の低いものには、酸ウキ、味ウス、老香、ジメチルトリスルフィド（DMTS）、カビ臭、ろ過グセ、甘重、脂肪酸臭、アミノ酸といった指摘が多かった。蔵クセや移り香に起因するオフフレーバーを改善することができれば、全体的な酒質はさらに向上すると考えられる。

４．結言

市販酒審査の結果、純米、純米吟醸ともに低アミノ酸、甘味、高香気が達成され、全体的な評点平均も良くなり、昨年明らかになった高品質化のポイントがクリアされ、より品質が向上したことがわかった。

また、昨年に引き続き、県産市販酒の大半で県産酒造好適米と県オリジナル酵母が使用されており、県産資源の活用が各蔵元でさらなる広がりをみせていることがわかった。

来年度も県産市販酒の調査と分析を実施し、県産市販酒の動向について解析し、今年度までの分析結果と併せて県内酒造場に周知し、酒質の向上を図る。

また現在、移り香等の改善を目指し、オゾンによる消臭殺菌方法について検証している。また、ガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS）を用いたカビ臭や DMTS といったオフフレーバーの分析方法について検証を進めている。分析方法の確立後、オフフレーバー発生原因を特定し改善することによって、県産市販酒のオフフレーバーの低減につなげていく。

謝辞

県産酒の動向に関する資料と市販酒審査会の検体酒を提供してくださった福島県酒造組合様に感謝します。

参考文献

１）遠藤浩志ほか.“清酒用新酵母の造成６”. 福島県ハイテクプラザ会津若松技術支援センター試験研究報告（食品部）. 1992, p.63-71.
２）大野正弘ほか. “福島県産ブランド清酒の開発”. 平成１６年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2005, p.78-79.
３）中島奈津子ほか. “福島県オリジナル酵母の改良”. 平成２８年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2017, p.39-42.
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, p.307.

福島県オリジナル清酒製造技術の開発（第４報）

－清酒酵母の糖類の発酵と利用に関する試験－

Development of original sake brewing technology in Fukushima prefecture (4th report)

- Test on saccharide fermentability and assimilation of sake yeast -

会津若松技術支援センター 醸造・食品科　中島奈津子　菊地伸広　猪俣有唯　松本大志　鈴木賢二

平成２９年度から平成３１年度まで福島県オリジナル清酒酵母と県産酒造好適米を使用した品質の高い県オリジナル清酒製造を安定的に行うための技術開発に取り組んでいる。本報では酵母の発酵特性把握を目的とし、県内酒造場で使用されている酵母について、糖発酵性・資化性に関する試験を網羅的に実施した。その結果、酵母が発酵・生育に利用できる糖に違いがあることがわかったので報告する。多様な清酒製造ならびに安定醸造に向けた酒質設計や発酵管理への活用が期待される。

Key words: 県オリジナル酵母、糖発酵性・資化性

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。県産酒の課税移出数量は平成２３年の東日本大震災以降、微減傾向が続いている中、特定名称酒の課税移出数量は増加傾向にあり、特に純米酒や純米吟醸酒が顕著に伸びている。県酒造組合のまとめによると、平成２９年度課税移出数量における特定名称酒比率は平成２２年度の約４０％から６６％にまで増加している。また、県が実施する酵母頒布事業においても、県内酒造場への酵母頒布本数がこの１０年で２倍以上に増えている。特に、県オリジナル酵母であるうつくしま夢酵母(F7-01)[1)]、うつくしま煌酵母[2) 3)]を中心とした県酵母の頒布本数は全体数の８割以上を占め、純米酒や純米吟醸酒を中心に広く活用されている。

このような中、福島県オリジナル酵母と県産酒造好適米を使用した県オリジナル清酒に対する期待が特に高まっており、その品質向上と安定化が求められている。

本研究では､平成２９年度～平成３１年度にわたり､県酵母の発酵特性試験と香味特性の分析、県産酒造好適米の特性分析、酵母と原料米の相性に関する発酵特性試験と分析、また、清酒中のオフフレーバー軽減に関する試験研究を実施する。最終的にそれらの結果を福島県市販酒製造マニュアルとしてまとめ、県内酒造場に広く情報提供することによって､県産酒の多様化、高品質化、安定化の実現につなげていく。

本年は、酵母の糖発酵性・資化性試験、酵母と県産酒造好適米を組み合わせた小仕込み試験、そして県酒造組合の協力をいただき、県産市販酒の調査及び官能評価、成分分析を実施した。

本報告では､酵母の糖発酵性･資化性試験について、県内酒造場が使用する１７種類の酵母における糖の資化性･発酵性の有無に関する知見を得たので報告する。なお、県産市販酒の調査結果については、別報にて報告する。また、酵母と酒造好適米の小仕込みの結果については、現在解析中のため、改めて報告する。

２．研究方法

２．１．酵母の糖発酵性・資化性試験

２．１．１．菌株

本県で開発されたオリジナル酵母ならびに当所のディープフリーザーにて試験研究用に保管している下記の１７種類の酵母を使用した。

- 福島県オリジナル清酒酵母１０種
  うつくしま夢酵母(F7-01)、
  TM-1、TUA、
  うつくしま煌酵母(701-g31、901-A113、701-15)、
  うつくしま煌酵母改良株(901-A113④、701-15①、701-15⑥)、多酸酵母 52-5S-38
- きょうかい酵母６種
  (K701、K901、K1001、K1401、K1601、K1801)
- その他１種
  (明利酵母 M310)

２．１．２．培地

寒天培地：
　YPD 寒天培地 (2%グルコース、1%酵母エキス、2%ポリペプトン、2%寒天)

前培養培地：
　YPD 培地 (2%グルコース、1%酵母エキス、2%ポリペプトン)

発酵性・資化性試験培地(pH7.2)：
　1%炭素源、0.2% Yeast nitrogen base w/o amino and ammonium sulfate(Difco)、0.5%塩化ナトリ

事業課題名「福島県オリジナル清酒製造技術の開発」

ウム、0.03%リン酸一水素カリウム、0.003%ブロモクレゾールパープル

炭素源：

グルコース、マルトース、イソマルトオリゴ糖、ガラクトース

２．１．３．方法

寒天培地にてコロニー形成させ、コロニー一植菌耳を前培養培地 5ml にて 30℃、２日間静置培養したものを酵母培養液とした。酵母培養液 0.1ml を、ダーラム管を入れ滅菌した発酵性試験培地 10ml に添加し､滅菌済みの流動パラフィン 1.0ml を上層し嫌気条件としたものを、10℃と 20℃で１１日間培養し、培地の変色とダーラム管内のガスの発生有無を観察した。

ブロモクレゾールパープルの pH による変色領域(紫 6.8～黄 5.2)を用い、糖を利用し有機酸を生成し培地が黄変したものを資化性あり、また、ダーラム管内の炭酸ガス生成で発酵性の有無を判断した。なお、酵母培養液を添加しないものをブランクとした。

３．結果及び考察

10℃培養９日目の培地の様子を図１に示した。グルコースは全ての酵母で資化され、培地が黄変しているが、マルトースやイソマルトオリゴ糖は酵母によって変色にバラつきがあり、初期の糖資化性に差があることが分かる。また、ガラクトースはどの酵母でもほとんど資化性を示していない。なお、既報[4)]にて報告した予備試験では、発酵性試験培地に 0.2%ポリペプトンを添加したが、今回これを Yeast nitrogen base w/o amino and ammonium sulfate に変えたことにより、培地が無色となり、ブロモクレゾールパープルによる呈色の判別が明確になった。

10℃培養ならびに 20℃培養について、５日目、９日目、１０日目（朝・夕)、１１日目について観察した結果を図２に示す。

20℃では酵母による発酵性・資化性の差は見られないが、10℃では顕著な差が確認できた。酵母による糖発酵性・資化性は低温培養時特有のものであることが示唆される。

10℃はもろみの発酵温度を想定した低温培養環境である。この温度で、グルコースについてはほとんどの酵母で培養初期から資化性と発酵性が確認できたが、マルトースやイソマルトオリゴ糖については酵母によって資化性の有無、また発酵性の有無に特徴を有すること明らかになった。

もろみ中では、米由来のデンプンが麹菌の糖化酵素によって分解され、分解された糖を酵母が発酵に利用する。二糖類やオリゴ糖のようなデンプン由来の未分解な糖類を始めとする多様な糖類の高い資化性・発酵

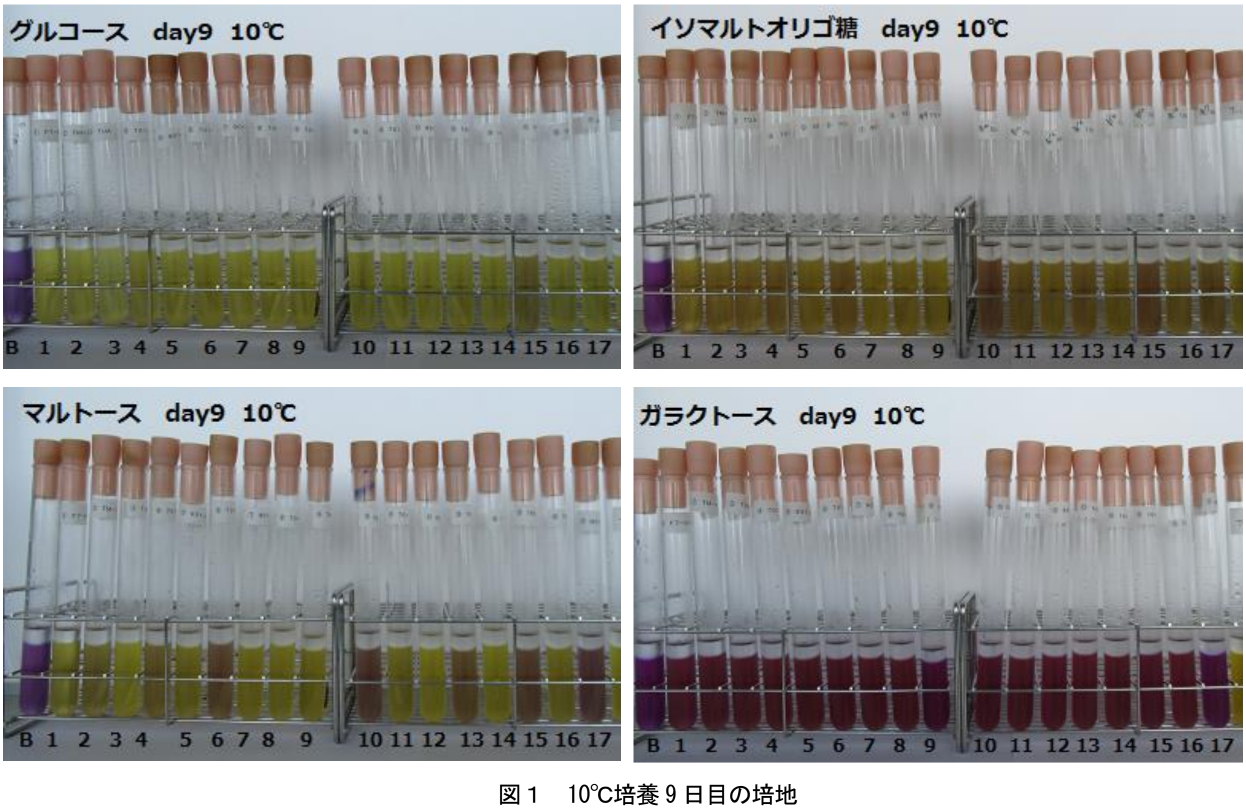


図１ 10℃培養９日目の培地

B:ブランク、1:F7-01、2:TM-1、3:TUA、4:701-g31、5:901-A113、6:701-15、7:901-A113④、8:701-151①、9:701-15⑥、10:52-5S-38、11:K701、12:K901、13:K1001、14:K1401、15:K1601、16:K1801、17:M310

性を有する酵母は、もろみ初期での増殖が旺盛になり十分な酵母数を確保しやすく、反対に、マルトースやオリゴ糖の資化性・発酵性が乏しい酵母では増殖が緩やかになり、酵母数が少なくなると考えられる。

今回試験を行った１７種類の酵母について、酢酸イソアミル系の県酵母 F7-01 と TM-1 ではマルトース、イソマルトオリゴ糖の資化性において異なる挙動を示し、TM-1 はマルトースやイソマルトオリゴ糖の資化性が乏しかった。つまり、もろみ中の増殖力は TM-1 よりも F7-01 の方が優位であることが推測される。また、煌酵母については、701-15 でマルトース資化性が弱かったものの、改良株の 701-15①、701-15⑥ではいずれも資化性が向上しており、改良株ではもろみ初期での増殖力が強まっていることが示唆された。また、発酵力が弱い多産酵母 52-5S-38 についても、マルトースやイソマルトオリゴ糖の資化性が弱いことが、発酵力の弱

20℃		グルコース					マルトース					イソマルトオリゴ糖					ガラクトース				
	培養日数	5日	9日	10日	10日	11日	5日	9日	10日	10日	11日	5日	9日	10日	10日	11日	5日	9日	10日	10日	11日
1	F7-01	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	+	+
2	TM-1	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	+	+
3	TUA	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-
4	701-g31	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	+
5	901-A113	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-
6	701-15	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-
7	901-A113④	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-
8	701-15①	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-
9	701-15⑥	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-
10	52-5S-38	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
11	K701	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	+	+	+
12	K901	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-
13	K1001	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
14	K1401	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	+	++	++	++	-	-	-	-	-
15	K1601	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	+	+
16	K1801	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	-	-	-	+	+
17	M310	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-

資化性（生育に使用） 無 ⟷ 有　　発酵性（Alc生産に使用） - ± + ++ 無 ⟷ 有

10℃		グルコース					マルトース					イソマルトオリゴ糖					ガラクトース				
	培養日数	5日	9日	10日	10日	11日	5日	9日	10日	10日	11日	5日	9日	10日	10日	11日	5日	9日	10日	10日	11日
1	F7-01	+	++	++	++	++	-	+	+	+	++	-	-	-	±	±	-	-	-	-	-
2	TM-1	+	++	++	++	++	-	-	-	±	+	-	-	-	±	±	-	-	-	-	-
3	TUA	+	++	++	++	++	-	+	+	++	++	-	±	±	±	±	-	-	-	-	-
4	701-g31	+	++	++	++	++	-	-	-	±	+	-	-	-	±	±	-	-	-	-	-
5	901-A113	+	++	++	++	++	-	+	+	+	+	-	±	±	±	±	-	-	-	-	-
6	701-15	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	901-A113④	+	++	++	++	++	-	±	+	+	++	-	±	±	±	±	-	-	-	-	-
8	701-15①	+	++	++	++	++	-	±	±	+	+	-	±	±	±	±	-	-	-	-	-
9	701-15⑥	+	++	++	++	++	-	+	+	+	++	-	±	±	±	±	-	-	-	-	-
10	52-5S-38	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	K701	+	++	++	++	++	-	+	+	++	++	-	±	±	±	±	-	-	-	-	-
12	K901	+	++	++	++	++	-	+	+	+	++	-	-	±	±	±	-	-	-	-	-
13	K1001	+	++	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	K1401	±	+	+	++	++	-	+	+	++	++	-	-	±	±	±	-	-	-	-	-
15	K1601	-	±	+	+	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	K1801	±	±	+	++	++	-	+	+	+	+	-	±	±	±	±	-	-	-	-	-
17	M310	±	+	+	++	++	-	-	-	±	±	-	-	-	±	±	-	-	-	-	-

資化性（生育に使用） 無 ⟷ 有　　発酵性（Alc生産に使用） - ± + ++ 無 ⟷ 有

図２　酵母の培養温度による糖資化性・発酵性の違い

さと濃糖状態で増殖が抑制される原因の一つと推測される。

もろみ初期での酵母の増殖が不十分となった場合、酵母数が足りず、もろみ期間が延びる傾向がある。一般的に、このような場合は粕臭や酵母臭といったオフフレーバーの付与を招くことが多く、高品質な清酒が得られにくいことから、もろみ初期で十分な酵母数を確保することが安定醸造ならびに品質向上に必要である。

糖化酵素の力価が弱い場合、もろみ初期ではオリゴ糖が多くグルコースが少なくなる。そのため、もろみ初期で十分な酵母数を確保する方法として、本県では高い酵素力価を持った麹を造り十分な酵素を供給し、もろみ中のグルコース濃度を増やすこと、また追い水により濃糖環境を回避することなどの方法で管理することを助言してきた。今回、県内酒造場が使用する酵母の特性が明らかになったことから、今後は使用する酵母に合わせた酒質設計や、仕込み配合の検討、より細やかなもろみ管理などに活用できると考える。

４．結言

県内酒造場が使用する清酒酵母１７種類について、グルコース、マルトース、イソマルトオリゴ糖、ガラクトースの４種類の糖を用い、10℃、20℃の２種類の試験区における糖の発酵性・資化性を試験した。

その結果、酵母による糖の発酵性・資化性は低温環境下でより顕著に差が表れていた。

これまでは、県酵母の発酵力の違いについては経験的にしかわからず、酒質設計やもろみ管理のための指針となるものがなかったが、本研究によって、低温環境下における糖発酵性・資化性の有無と強度が明らかになった。県内酒造場で使用する酵母について網羅的に解析を行ったのは本研究が初めてであり、酵母の基礎的な性質を知ることは、研究開発のみならず、酒造場における酵母の選択にも役立てられるものと考える。

また、本研究から県酵母のマルトースとオリゴ糖の資化性の違いが明らかになったが、これまでに、県酵母９種類の全ゲノム解析(NGS 解析)を実施し、きょうかい７号酵母と比較した変異箇所を特定している（データ未発表)。現在、今回の結果をふまえ、糖の資化性と関連のある変異箇所を中心に発酵特性解析を進めている。

さらに、本年実施した酵母と酒造好適米を組み合わせた小仕込み試験には、今回使用した１７種の酵母を用いている。現在、製成酒６８点の糖組成について解析を進めており、マルトースやオリゴ糖の資化性が弱い酵母を用いて製造した製成酒にこれらの糖が最終的に残存しているかどうか､大変興味深いところである。

本県では、これまでに県内酒造場で製造された麹の糖化酵素力価を分析し、健全な発酵管理はもちろん、酒質の向上に役立ててきた。麹の糖化酵素力価はもろみの糖生成に直接的に関与し、もろみ中の糖組成に大きな影響を与える。本研究の結果で酵母によって糖の資化性・発酵性に差があることが分ったため、麹の酵素力価は、目的とする酒質設計やもろみ管理のためにも重要な項目であることがわかった。今後、引き続き麹の酵素力価分析を行い、最適な製麹技術を追求することはもちろん、今後、研究の発展によって酵母と相性の良い種麹の種類などが明らかになれば、さらなる酒質の安定化・多様化に寄与すると期待される。

参考文献

１）遠藤浩志ほか.“清酒用新酵母の造成６”. 福島県ハイテクプラザ会津若松技術支援センター試験研究報告（食品部）. 1992, p.63-71.

２）大野正弘ほか. “福島県産ブランド清酒の開発”. 平成１６年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. 2005, p.78-79.

３）中島奈津子ほか.”福島県オリジナル酵母の改良”. 平成２８年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. 2017. p.39-42.

４）中島奈津子ほか. ”福島県オリジナル清酒製造技術の開発（第２報）”. 平成２９年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. 2018. p.67-68.

フィールドロボットが受ける実環境負荷のデータ測定・再現試験技術の開発

Development of data measurement and reproduction test technology
under actual environment load received by the field robot

技術開発部 工業材料科　工藤弘行　矢内誠人

フィールドロボットは過酷な環境で利用されるため、ロボットに搭載される電子デバイスの信頼性を確保するには環境試験が必要であるが、その前提となる実環境負荷データの蓄積が不十分である。本研究ではフィールドロボットが受ける実環境負荷データを測定し、振動試験機などの台上試験で再現試験する技術の開発を行った。本年度は熱電対による温度測定の基礎実験や、ハイスピードカメラやサーモカメラによる、センサデータ補正手法を検討した。その結果、カメラ挙動解析を併用した加速度想定により、ドローン着陸時独特の回転挙動を確認した。

Key words: 信頼性評価、振動試験、衝撃試験

１．緒言

近年、屋外使用を前提としたフィールドロボットの産業利用が期待されている。これらは室内ロボットに比べて過酷な環境で利用されることが特徴である。利活用が進むにつれ、防塵性を高めると排熱が悪くなり筐体内部が想定以上に高温になるなど、フィールドロボット共通の設計課題も明確となってきている。

ロボットは、センサ、カメラ、アクチュエータ、バッテリーなど多数の電子デバイスを搭載するため、これらの電子デバイスは使用環境に応じた信頼性試験（環境試験）が必要である。しかし、フィールドロボットの産業利用は歴史が浅いため、ロボットが実使用時に受ける環境負荷「実環境負荷データ」の蓄積が不十分であるため、現時点では適切な信頼性試験方法が定着していない。また、ロボット開発者にとっても、実環境負荷データは重要な基礎データであると共に、開発品の動作検証のために実環境負荷データに基づいた台上再現試験も重要と考えられる。

現在､最も産業利用が進んだフィールドロボットは､ドローンである。近年では、国土交通省が ICT 活用を前提とする「i-Construction」を推進していることもあり、特に建築土木分野での活用が飛躍的に増えている。一方で、ドローンの利活用については落下事故など、安全性に関する懸念がある。事故に関する正確な統計は無いもの、保険会社の試算によると事故率は２割程度[1]と予想されており、今後、事故率の低減が必要である。ドローンの自律飛行では着陸時において地表面の気流の乱れの影響を受けるため、制御手法の良否によって、着陸時にドローン機体が受ける機械的負荷は大きく変動する[1]。

以上より、本研究では、フィールドロボットへの過酷負荷の代表例としてドローンの着陸時の負荷を評価対象とし、フィールドロボットの実環境負荷データを測定し、それを振動試験機などの台上試験で再現する技術の開発を行った。昨年度は加速度測定の妥当性検証や着陸模擬試験の検討を行った。本年度は熱電対温度測定の妥当性検証やセンサデータ補正のためのカメラ挙動解析の活用を検討した。

２．実験

２．１．温度サイクル試験（ケーブルレス熱電対測定の妥当性検証）

工業製品の温度測定手法としては、熱電対を用いた測定が一般的である。通常は、熱電対の他にロガー、レコーダ、アンプなどと呼ばれる計測器本体が必要である。広い範囲を動作するフィールドロボットでは、ケーブル接続や計測器取付けのスペースや重量が障壁となり測定の自由度が大きく制限される。そこで、本研究ではフィールドロボット筐体に取り付けて測定するのに適したケーブルレス測定が可能な計測器を用いて、温度測定の妥当性を検証した。

図１に測定に用いたケーブルレス測定ユニットを示す。本研究では ADVANTEST 製 AirLogger を用いた。AirLogger はセンサユニットと通信ユニットで構成される。通信ユニットは PC に USB 接続し、測定ユニットから無線通信で受信したセンサデータを PC に記録する。測定ユニットとしては、2ch 温度測定用、7ch 温度測定用、ひずみ測定用があり、本試験には 2ch 温度測定用の WM2000TA を用いた。WM2000TA の外形寸法は、幅 45[mm]、奥行き 45[mm]、高さ 17.5[mm]である。なお、WM2000TA は、小容量のメモリを内蔵することで、電波環境が悪くデータ転送が不安定な場合でも、データを一時保管し測定後に復元可能である。一つの通信ユニットは、最大 100 個のセンサユニットと通信接続可能であるが、本測定では１個のセンサユニットで測定試験を行った。測定間隔は 100[msec]～10 [min]まで選択できるが、本試験は 10[sec]とした。

図２に測定に用いたドローン機体と熱電対の測定点

事業課題名「実環境データを再現した迅速耐久試験」

を示す。本研究ではDJI社製SPARKを測定対象とした。プロペラ支持部を除いた部分の外形寸法は、幅約50[mm]、奥行き約50[mm]、高さ約50[mm]と、産業用途で使用されるドローンに比べると小型な機体である。

フィールドロボットでは、バッテリーやモータ、電子基板などが熱源となり、放熱が重要となるため、温度測定点は放熱を担う通気口とバッテリー側面の2地点とし、フィルム状のK型熱電対を用いて測定した。熱電対は耐熱性の保護テープで貼付した。

図3に恒温槽内の試験状況を示す。ここで重要なのはドローン機体だけでなく測定ユニットも恒温槽の中に設置することである。測定ユニットの使用可能温度は-40～100[℃]であり、ドローン機体の周囲環境の温度がこの範囲であれば、正しい測定が期待できる。本研究では、ドローンが冬季に使用される場合や、夏季に直射日光を受けて使用される場合を踏まえ、温度サイクル試験の温度条件として低温側保持温度を-10[℃]、高温側保持温度を60[℃]とした。保持時間、移行時間ともに1[h]とし、2サイクルの試験を行った。

図1　ケーブルレス測定ユニット

図2　測定に用いたドローン機体と熱電対測定点

図3　恒温槽内の状況

2．2．片支持落下試験

ドローン機体へのケーブルレス加速度センサユニットの取付けについては、図4に示すとおり、プロペラとの干渉を避けるため、取付け位置が限定される。これらセンサ取付け位置の制限を克服するため、本研究では、中央部センサの加速度測定値から、前部や後部の加速度を推定する手法を検討した。

片支持落下試験では、図5に示すようにブロック治具に機体後部（バッテリー側）を持ち上げる姿勢に設置した後、治具を引き抜くことで規定の高さから落下させた。落下高さは 5、10、20[mm]の3条件とした。同一高さで5回の落下試験を行った。

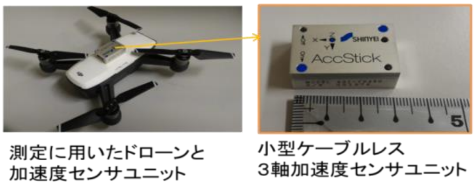


図4　加速度センサユニット取付状況

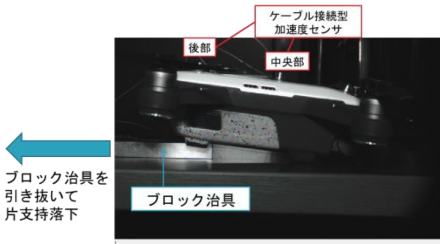


図5　ブロック治具を用いた片支持落下試験

2．3．カメラ挙動解析の活用

実際のドローンの着陸は片支持落下試験とは異なり、地面に支持することなく衝撃を受けるため、ハイスピードカメラなどカメラ挙動解析を実環境データ測定のデータ補正に活用する手法を検討した。

斜め姿勢での着陸挙動を模擬するため、図6に示すように金属フープ材で機体を吊り上げた後に落下させた。シナノケンシ(株)製 PLEXLOGGER PL-3 によりハイスピードカメラ撮影を行った後に、カメラ本体とは別の PC に測定データを移行し、付属ソフト PLEXLOGplus Ⅱによりトラッキング解析を実施した。トラッキングポイントは前部、後部の2地点とし、垂直方向変位と速度を解析した。

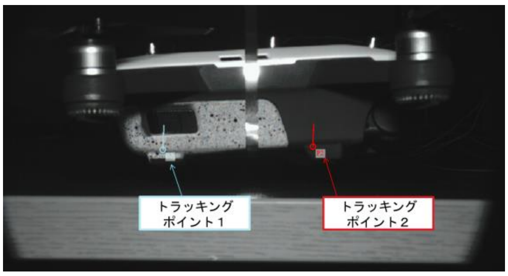


図6　斜め着陸模擬試験時のトラッキング解析の例

３．実験結果及び考察

３．１．温度サイクル試験（ケーブルレス熱電対測定の妥当性検証）

図７に温度サイクル試験の測定結果を示す。なお、試験開始時の槽内温度は約 40[℃]で、２サイクル終了後は運転停止し自然に常温復帰する過程を測定した。

測定の結果、２つの測定点で概ね同等の温度変化となることを確認した。バッテリーの温度が一定となるのが遅いのは、バッテリー部の方が樹脂成形品と見られる通気口部より熱容量が大きいためと考えられる。

保持時の終期に各部の温度が安定した時点で３分間の平均値を算出し表１に示した。いずれの地点でも再現性良く、妥当な測定ができていることを確認した。なお、この結果には恒温槽自体の温度精度の影響も含まれている。

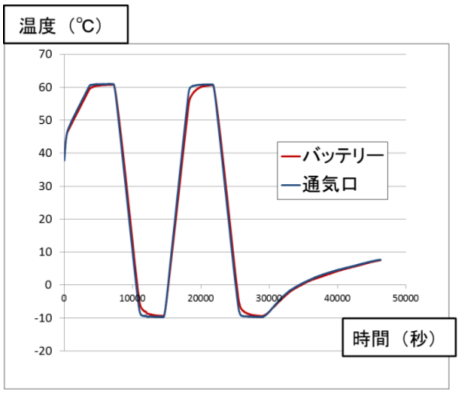


図７　温度サイクル試験結果

表１　温度保持時の測定データ

	測定点の3分平均温度(℃)	
	通気口	バッテリー
1サイクル目 高温保持	60.9	60.7
1サイクル目 低温保持	−9.7	−9.4
2サイクル目 高温保持	60.9	60.6
2サイクル目 低温保持	−9.7	−9.4

３．２．片支持落下試験

表２に片支持落下試験の結果を示す。落下高さに応じて、衝撃加速度も大きくなることを確認した。また、落下高さが大きくなるほど、バラツキが大きくなる傾向が見られた。これは、ブロック治具を引き抜く際に、機体の姿勢が乱れたことが原因と考えられる。

次に、各落下の中心部センサ測定値と後部センサの測定値の相関関係を図８に示す。落下高さに関わらず、両者の衝撃加速度のグラフは一次の近似式で近似できることを確認した。以上より、片支持落下試験において中央部の加速度測定しかできない場合であっても、近似式を用いて後部の衝撃加速度を推定できることを示した。

表２　衝撃加速度測定結果

落下高さ (mm)	衝撃加速度(m/s^2)			
	中央部		後部	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
5	72.9	15.9	29.0	4.2
10	189.3	12.8	69.4	7.8
20	411.6	54.4	170.5	21.9

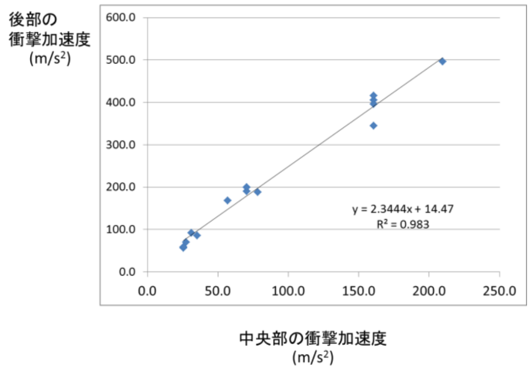


図８　中央部と後部の衝撃加速度の相関

３．３．カメラ挙動解析の活用

斜め着陸模擬試験に対するトラッキング解析例として、図９に着陸前後 0.25 秒間の解析結果を示す。また、落下前、衝撃時、衝撃後（図中 A、B、C）の解析画像も併せて示す。解析の結果、衝撃時（時刻 B）の直前に落下現象に伴う放物線挙動や等加速度挙動が確認できた。また、時刻 B から C にかけては、２つのトラッキングポイントの垂直方向変位に差異がみられる。これは解析画像からも明らかなとおり、機体が時計回りに回転したためである。

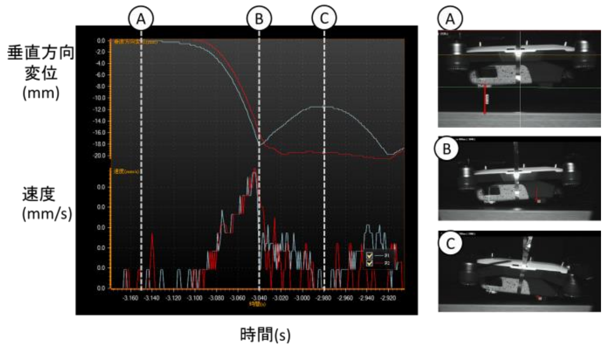


図９　トラッキング解析結果（図左）と各時刻の解析画像（図右）

次に衝撃時（時刻 B）の加速度波形を図１０に示す。この試験では後部（CH3）が着陸し最初のピークを生じてから 7.7[msec]経過した後に、前部（CH1）で２つ目のピークが生じ加速度が最大となった。

以上の測定結果から、ドローンが傾いた状態で着陸した時に予想される機体の挙動の模式図を図１１に示す。この挙動はドローン着陸独特のものであり、ドローンが受ける負荷を検討する際に極めて重要である。

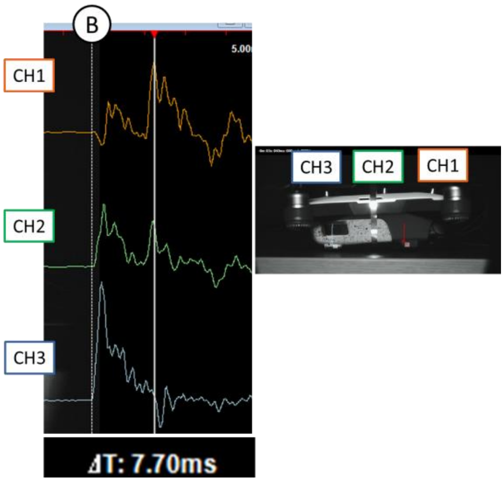


図１０　加速度波形の例（時刻 B）

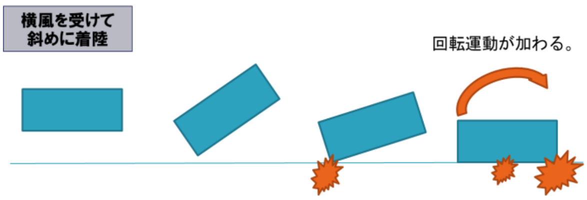


図１１　ドローン斜め着陸の模式図

４．結言

本研究では、フィールドロボットが受ける実環境負荷データを測定し、振動試験機などの台上試験で再現試験する技術の開発を行い、以下の知見を得た。

① ドローン機体に対して温度サイクル試験を実施し、ケーブルレス型熱電対センサユニット等の測定の妥当性を確認した。
② ドローン機体に対して片支持落下試験を実施し、落下高さに応じて、衝撃加速度が増加することを確認した。
③ 片支持落下試験において、落下高さに関わらず、中央部センサと後部センサの衝撃加速度のグラフは一次の近似式で近似できる。これにより、中央センサ測定値から、後部の衝撃加速度の推定が可能である。
④ 斜め着陸模擬試験のハイスピードカメラ撮影やトラッキング解析から、斜め着陸に生じる独特な回転運動を確認した。ドローンが受ける負荷を検討する際に極めて重要である。

参考文献

１） NTS(株)：飛躍するドローン, (2016)

三次元デジタイザによる寸法測定条件の最適化

Optimization of dimensional measurement condition by 3D digitizer

技術開発部 生産・加工科　近野裕太　緑川祐二　夏井憲司
技術開発部 工業材料科　　矢内誠人

三次元デジタイザから得られる寸法の測定精度を向上させるとともに、精密なＣＡＤデータを作成するため、品質工学的手法を用いて、測定精度の向上に影響を与える測定条件を検討した。この結果、①ターンテーブル１回転あたりのカメラ撮影数、②ターンテーブル回転中心からの距離、③露光量、④参照点の有無の４つのパラメータが特に精度向上に影響を与えることが分かった。それらのパラメータを組み合わせた最適条件での測定では、これまで設定していた条件に比べ、寸法のずれを半分以下に抑えることができた。

Key words: 三次元デジタイザ、品質工学

１．緒言

近年､過去に作成した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三次元点群を作成するため、寸法の測定精度はそれほど高くなく、接触式三次元座標測定機程の測定精度を得ることはできていない。このため、産業界のニーズはあっても、精密な寸法測定の用途に利用できていない。

本研究は､三次元デジタイザの測定精度を明確にし、品質工学を用いた手法[1)2)]で測定精度の向上に影響を与える測定条件の要素の絞り込み等を行い、従来よりも精度良く測定できる手法を確立することを目的とした。

なお、本研究は２か年の計画で進める。このうち今年度は、品質工学的手法を用いて三次元デジタイザによる測定の際の最適な測定条件を設定し、現状の測定時の寸法のずれを１／２以下に抑えることを目標とした。

２．実験と結果

２．１．品質工学的手法を用いた最適条件の検討

２．１．１．現状の測定方法

本研究では、三次元デジタイザは GOM 社の ATOS Compact Scan 5M を使用した。測定に用いるレンズは３種類存在し、その測定範囲等を表１に示す。本研究では、使用頻度が高い MV300 のレンズを使用した。

表１　レンズ毎の測定範囲

レンズ名称	測定範囲（横幅×縦幅×奥行）[mm]	点間ピッチ [mm]	測定距離 [mm]
MV150	150×110×110	0.062	590
MV300	300×230×230	0.124	590
MV600	600×450×450	0.250	590

三次元デジタイザによる測定は、測定物を複数回撮影したデータを、三次元デジタイザのシステム上で参照点、又は測定物の特徴的な形状を基準としたベストフィットにより合成し、三次元データを作成する。当所における通常の測定では、浸透探傷用の現像液を塗布した測定物をターンテーブル上に配置し、カメラ角度や露光量等のパラメータを調整後、測定物が測定範囲内に収まるようにした上で、ターンテーブルで回転させながら複数回撮影している。

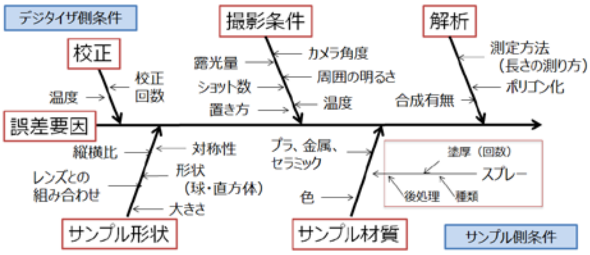


図１　特性要因図

測定精度に関連があると思われるパラメータを図１に示す。このように、三次元デジタイザの測定には多数のパラメータが関連しているため、測定精度に影響を与えるパラメータを特定することが難しい。

２．１．２．品質工学的手法の活用

多数のパラメータが存在することから、品質工学の直交表により実験計画を立て、各条件にて測定を行うこととした。測定値から各パラメータのＳＮ比を算出することで、測定精度に影響を与えるパラメータの絞り込みを行った。

本研究ではＬ１８直交表を用いる。８つのパラメータのうち、１つが２水準、７つが３水準あるとしたとき、全ての条件を組み合わせて実験すると、4,374 通

事業課題名「三次元デジタイザを用いた非接触測定手法について」

りの実験が必要となる。一方、品質工学の直交表を用いることにより、１８条件のみの組み合わせで実験を完了させることができ、実験効率を向上させることができる。

ＳＮ比は、機能の安定性を評価するものであり、信号量Ｓと誤差Ｎの比を示す。本研究においてＳＮ比が大きいということは、測定結果と測定物の寸法とのずれが少ないことを示す。そのため、直交表に基づき条件毎に測定を行い、その結果からＳＮ比を計算することで、測定結果と測定物の寸法とのずれに対して、どのパラメータが関係しているかを評価することとした。

ＳＮ比の算出方法は以下のとおりである[2)]。

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

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

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

y：出力(測定値)　　n：データ数

S_m：一般平均　　Ve：誤差分散

η：ＳＮ比[dB]

２．１．３．実験に用いる測定物及び測定箇所

測定物は、ミツトヨ社製のセラミック製45[mm]ブロックゲージを用いた。測定する箇所は、精度保証されている両端面の平面とし、その両端面間の寸法を評価することにした。寸法は、三次元デジタイザにより両端面を三次元的に測定し、二つの測定平面をシステム上で作成した後、片方の測定平面のあるポイントから他方の測定平面までの垂直投影距離を求めることとした。なお今回の実験では、浸透探傷用の現像液の塗布による測定結果への影響を排除するため、測定物への塗布はせずに測定することとした。

２．１．４．パラメータの検討及び水準の調整

Ｌ１８直交表を作成する際に使用するパラメータは、測定時に頻繁に調整する①校正有無、②ショット数、③測定物位置、④カメラ角度、⑤露光量、⑥寸法測定箇所、⑦参照点有無の７つとした。イメージを図２に示す。

直交表を作成する際の、パラメータの水準の割り振りは表２のとおりとした。各パラメータのうち、ショット数はターンテーブル１回転あたりのカメラ撮影数、測定物位置はターンテーブル回転中心からの距離、寸法測定箇所は測定平面上の寸法測定を行う位置を表す。測定物位置及び参照点有無については、３Ｄ ＣＡＤにより設計、３Ｄプリンターで作成した図３のような治具の組み合わせにより水準の調整を行った。参照点の有無については、参照点を貼ったものと貼らないものの二つの円柱を用意し、入れ替えを行った。また参照点の有無のうち、特徴形状については、ベストフィットによる合成がしやすいような非対称となる大小二つの腕を左右に配置するようにした。

次に露光量の水準を図４で説明する。露光量通常の値は、ステージ中心に測定物を配置し、測定平面中央にカメラ焦点が合うようカメラ角度毎に水平アーム長さ及びカメラ高さを調整した後、測定に最適となるよう三次元デジタイザのシステム上で自動調整される値とした。露光量多・少については、三次元デジタイザのシステム上で露光過多・過少になる限界点付近の値に調整した。各角度における露光量を表３に示す。

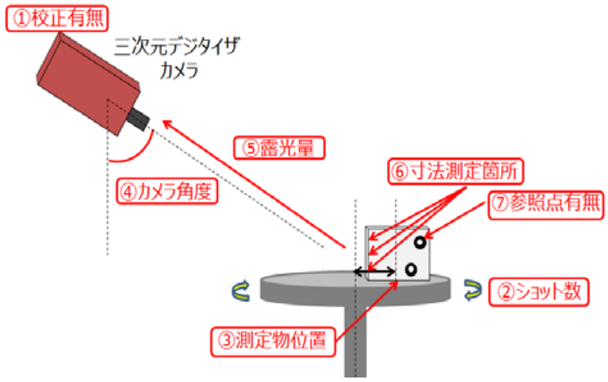


図２　パラメータ概念図

表２　パラメータ条件の割り振り

パラメータ	水準１	水準２	水準３
校正	あり	なし	－
ショット数	8	12	24
測定物位置	中心	中心から5cm	中心から10cm
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)

２．１．５．直交表の作成（実験条件の検討）

表２の割り振りに従い作成したＬ１８直交表を表４に示す。各条件で３回測定し、そこからＳＮ比を計算する。パラメータの一つである誤差は、繰り返し誤差等の、パラメータの水準によらない普遍的な誤差を意味する。この誤差から算出されるＳＮ比と、ショット数等の他のパラメータのＳＮ比とを比較することで、そのパラメータが測定精度に影響を与えるかどうかを判断することができる。

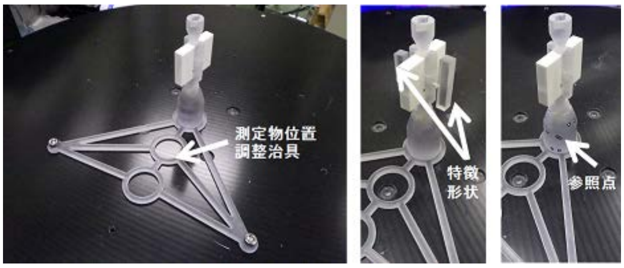


図３　調整治具等

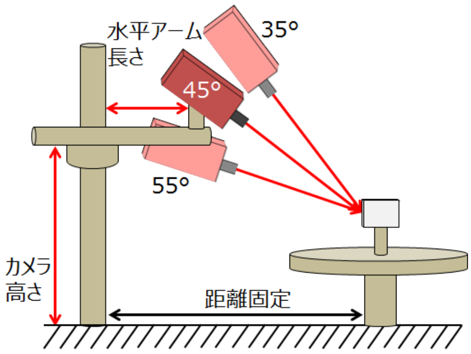


図４　露光量調整イメージ

表３　角度毎の露光量

カメラ角度	水平アーム長さ[cm]	カメラ高さ[cm]	露光量 通常 [ms]	露光量 少 [ms]	露光量 多 [ms]
45°	36.3	87.9	8.29	2.48	11.28
55°	30.0	78.5	8.50	1.50	8.75
35°	44.3	97.0	12.60	4.00	14.50

２．１．６．測定結果及びパラメータのＳＮ比の導出

測定結果を基に、式（1）から式（3）を用いて算出した各パラメータの水準毎のＳＮ比を図５に示す。このＳＮ比は、各パラメータの水準毎に、関係している試験Ｎｏ．のＳＮ比を平均した値である。

各パラメータの内、測定精度に関係するものは①ショット数、②測定物位置、③露光量、④参照点有無であることが分かった。また上記以外のパラメータについては､誤差のＳＮ比の上下幅とほぼ同一であるため、精度向上に影響しないことが分かった。

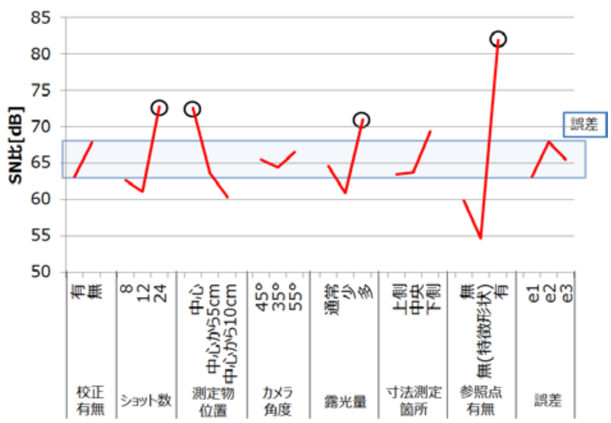


図５　ＳＮ比の要因効果図

表４　Ｌ１８直交表への割付け

	パラメータ（制御因子）							
試験 No.	校正	ショット数	測定位置	カメラ角度	露光量	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 5cm	55°	少	下側	無(特徴形状)	e2
3	有	12	中心から 10cm	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 10cm	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 5cm	35°	少	上側	有	e1
9	有	24	中心から 10cm	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 5cm	45°	通常	中央	有	e2
12	無	12	中心から 10cm	55°	少	上側	無	e3
13	無	8	中心	55°	多	上側	有	e2
14	無	8	中心から 5cm	35°	通常	下側	無	e3
15	無	8	中心から 10cm	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 5cm	45°	多	上側	無(特徴形状)	e3
18	無	24	中心から 10cm	55°	通常	下側	有	e1

２．１．７．実験の妥当性の確認

導出した条件の妥当性を確認するため、図５に示す各パラメータのＳＮ比が高い水準の組み合わせを最適条件、低いものの組み合わせを最悪条件とし、前回と同様のセラミック製 45[mm]ブロックゲージの測定を実施した。

実験結果から計算したＳＮ比を表５に示す。このとき、表５の計算値は図５に示すＳＮ比の値から計算したＳＮ比であり、また実験値は今回の実験の測定結果から計算したＳＮ比である。最適条件、最悪条件ともに計算値と実験値との差が±30[%]以内であるため、導出した最適条件には再現性があり、実験は成功したことを確認した。

２．２．最適条件を用いた測定実験

これまで測定時に設定していた通常条件と本研究において導出した最適条件との精度比較をするため、通常条件及び最適条件に設定した三次元デジタイザによる金属製の凸型ブロックの測定実験を行った。

測定する寸法箇所を図６に示す。この時、各寸法をカールツァイス社製の接触式三次元座標測定機（UPMC550 CARAT）により測定し、その測定値を各寸法の真値として採用した。

凸型ブロックに浸透探傷用の現像液を塗布し測定を行った。測定時の各パラメータの値と測定結果を表６、表７に示す。通常条件に比べ、最適条件での測定では、Ａ部では 0.093[mm]から 0.036[mm]、Ｂ部では 0.094[mm]から 0.037[mm]と、誤差を半分以下に抑えることができた。

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の向上に影響を与える測定条件について検討した。実験により導出した最適条件を用いて測定を行った結果、これまでの測定と比較して寸法のずれを１／２以下に抑えることができた。

次年度は、浸透探傷用の現像液の塗布状態や使用するレンズの違いによる測定精度への影響等を確認する。

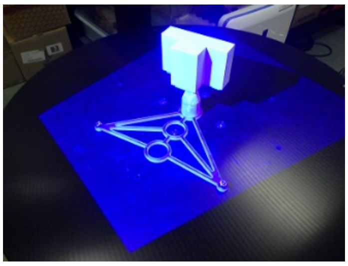
参考文献

１）田口玄一, 横山巽子, “ベーシック品質工学へのとびら”, 一般財団法人日本規格協会, 2007, p.195.

２）広瀬健一, 上田太一郎, “Excel でできるタグチメソッド解析法入門 ”, 株式会社同友館, 2003, p.246.

表５　最適条件及び最悪条件におけるＳＮ比検証結果

最適条件	ＳＮ比	最悪条件	ＳＮ比
計算値[dB]	108.96	計算値	39.64
実験値[dB]	89.74	実験値	54.60
誤差[%]	-21	誤差	+27



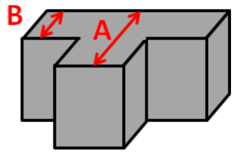


図６　左　凸型ブロック　右　寸法測定箇所

表６　通常条件及び最適条件のパラメータ

パラメータ	通常条件	最適条件
校正有無	有	有
ショット数	8	24
測定物位置	中心	中心
カメラ角度	45°	45°
露光量	少（6.60[ms]）	多（13.18[ms]）
寸法測定箇所	中央	中央
参照点有無	無	有

表７　測定結果

		A[mm]	B[mm]
UPMC550 CARAT		50.007	25.018
デジタイザ通常条件	1	50.084	25.096
	2	50.111	25.123
	3	50.105	25.116
	平均	50.100	25.112
	誤差	0.093	0.094
デジタイザ最適条件	1	50.033	25.045
	2	50.049	25.061
	3	50.046	25.058
	平均	50.043	25.054
	誤差	0.036	0.037

県産味噌の品質向上に向けた原料大豆の評価

Evaluation of raw material soybeans 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、品種や産地の異なる原料大豆の特性や、それら大豆が、仕込んだ味噌の品質に及ぼす影響について評価した。原料大豆の蒸煮後の Y 値は、福島県「里のほほえみ」、宮城県「ミヤギシロメ」が高かった。しかしながら、味噌にした場合の Y 値は、平均値よりも低かった。このことから、味噌の色調の観点からは、蒸煮方法のみならず、原料大豆の選定が重要と考えられた。またアルコールや、アミノ酸、ペプチド類等の旨味に関与する成分が多い味噌は、官能評価が高まる傾向があった。今回供試した原料大豆においては、北海道「ユキホマレ」、福島県「アヤコガネ」、宮城県「タンレイ」 の評価が高かった。

Key words: 大豆、品種、味噌、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６年連続で全国一になる等、大きな話題となっている。そうした中、味噌製造業においても酒造業の躍進に刺激を受け、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、大豆の品種や産地の違いが、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

大豆は、2017 年に各産地で栽培された、品種及び産地の異なる９種類を供試した（表１）。製麹用の米は、2017 年に福島県会津地方で栽培された「ひとめぼれ」を供試した。食塩は並塩(（株）日本海水)、微生物は耐塩性酵母（ *Zygosaccharomyces rouxii* ）および耐塩性乳酸菌　（ *Tetragenococcus halophilus* ）((株)ビオック）を供試した。

２．２．原料大豆の分析方法

浸漬後重量増加比は 20℃で 17 時間浸漬後の重量を、また蒸煮後重量増加比は浸漬大豆を 0.75kg /cm2・30 分間加圧蒸煮後の重量をそれぞれ測定し、求めた。蒸煮大豆の水分は、105℃・17 時間乾燥法、色調は色差計（日本電色工業、ZE2000)により測定した。

２．３．製麹方法

10℃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。製麹は、麹蓋法により 45 時間行った。

２．４．味噌の仕込と熟成方法

品種及び産地の異なる大豆を用い、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、麹歩合、目標水分、目標塩分を同一にし、９試験区で行った。大豆は 20℃で 3 時間浸漬し、加圧煮法により処理した。冷却後、９つの試験区分で各原料を混合し、味噌の仕込みを行った。乳酸菌および酵母は、仕込み開始時に酵母（ 終濃度 2.0×10^5／g)および乳酸菌（終濃度 1.0×10^6／g ）を添加し、20℃で 20 日間、30℃で 60 日間熟成させた。

表１　原料大豆の品種及び産地と、味噌の仕込配合

	品種	産地
A	里のほほえみ	山形県
B	ユキホマレ	北海道
C	里のほほえみ	福島県
D	あやこがね	福島県
E	タチナガハ	福島県
F	タチナガハ	宮城県
G	ミヤギシロメ	宮城県
H	タンレイ	宮城県
I	COLBY	カナダ

仕込総量(kg)	4.08
麹歩合(歩)	10
目標水分(%)	46.5
目標塩分(%)	11.0
対水食塩濃度	19.1
酵母	○
乳酸菌	○

○は添加を示す。

２．５．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９名、女性１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。

２．６．一般成分の分析方法

味噌の一般成分は、基準みそ分析法[1)]により分析した。色調は色差計（日本電色工業、ZE2000）により測定した。アミノ酸は、高速アミノ酸分析計((株)日

事業課題名「県産味噌の品質向上に向けた最適な原料及び微生物の解明」

立ハイテクサイエンス、 L-8900 ）により測定した。

３．結果及び考察

３．１．原料大豆の特性

表２に品種及び産地の異なる各大豆の特性を示す。各大豆の特性は、品種や産地により大きく異なった。蒸煮後の重量増加比は、E（福島県「タチナガハ」）が最も大きく、次いで B（北海道「ユキホマレ」）、C（福島県「里のほほえみ」）の順だった。一方、G（宮城県「ミヤギシロメ」）、H（同「タンレイ」）、I（カナダ「COLBY」）は比較的小さかった。

蒸煮大豆の水分は、B（北海道「ユキホマレ」）が最も高く、次いで E（福島県「タチナガハ」）及び H（宮城県「タンレイ」）だった。また同様に、硬さは、C（福島県「里のほほえみ」）が最も軟らかく（427g）、I（カナダ産「COLBY」）は最も硬かった（708g）（９種の平均値は 529ｇ）。蒸煮大豆の適正な硬さは、500g 前後とされており[2)]、このことから、C やＩの大豆を使用する場合、吸水及び蒸煮時間に留意が必要と考えられた。一方、蒸煮大豆の色調 Y は、C（福島県「里のほほえみ」）が最も高く（35.65）、次いで G（宮城県「ミヤギシロメ」）（35.04）だった。

表２　品種及び産地の異なる大豆の特性

	100粒重 (g)	浸漬後の 重量増加比	蒸煮後の 重量増加比	蒸煮大豆					
				水分 (%)	硬さ (g)	変動係数	色　調		
							Y	x	y
A	37.9	2.40	2.20	57.2	482	0.07	33.23	0.387	0.387
B	33.6	2.38	2.24	58.6	515	0.08	34.26	0.383	0.382
C	46.1	2.44	2.22	57.8	427	0.09	35.65	0.383	0.383
D	36.7	2.42	2.16	57.8	506	0.09	34.31	0.393	0.392
E	38.3	2.46	2.28	58.2	522	0.12	33.65	0.393	0.394
F	37.8	2.36	2.16	57.8	514	0.11	33.97	0.392	0.392
G	44.5	2.26	2.03	56.4	570	0.10	35.04	0.385	0.386
H	34.4	2.34	2.09	58.2	515	0.10	33.91	0.389	0.389
I	20.9	2.34	2.06	57.2	708	0.17	34.34	0.390	0.391
平均	36.7	2.38	2.16	57.7	529	0.1	34.26	0.388	0.388

３．２．官能評価

表３に、品種及び産地の異なる各大豆で仕込んだ味噌の官能評価の結果を示す。総合評価は、B（北海道「ユキホマレ」）が最も高く、次いで、D（福島県「あやこがね」)、H（宮城県「タンレイ」）の順だった。総合以外の項目では、B（北海道「ユキホマレ」）は、特に組成の評価が高かった。なお、データは示していないが、これら総合評価の高かった味噌は、参考出品した全国味噌鑑評会においても、格付が「秀」（格付の中で最上位）の評価を受けた。

原料大豆の特性との関連性においては、総合評価で高い評価を受けた試験区（B、D、H）は、蒸煮大豆の水分が比較的高く、また硬さは500g前後だった。このことから、原料大豆は充分な水分保持力と適正な硬さを備えていることが、味噌にした場合の評価に結びつく条件であることが伺えた。

表３　試醸した味噌の官能評価

試験区	色	香り	味	組成	総合
A	1.60	1.70	1.65	1.55	1.60
B	1.65	1.45	1.35	1.25	1.40
C	1.75	1.70	1.60	1.55	1.70
D	1.40	1.50	1.50	1.55	1.50
E	1.80	1.70	1.70	1.70	1.80
F	1.35	1.70	1.70	1.45	1.70
G	1.85	1.65	1.65	1.90	1.75
H	1.50	1.70	1.85	1.75	1.56
I	2.15	1.95	1.85	2.55	2.45
平均	1.67	1.67	1.65	1.69	1.72

３．３．試醸した味噌の遊離アミノ酸組成

表４に試醸した味噌の遊離アミノ酸組成を示す。

表４　試醸した味噌の遊離アミノ酸組成（mg/100g）

アミノ酸	試験区								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Asp	533	482	536	535	514	498	517	546	495
Thr	178	171	179	182	180	173	178	185	173
Ser	261	243	262	264	248	243	249	262	248
Glu	596	547	602	615	588	576	577	626	578
Gln	122	110	128	125	119	116	118	135	119
Gly	121	116	120	122	120	117	119	125	116
Ala	247	232	248	249	247	239	243	259	235
Val	231	215	229	227	221	215	217	231	215
Cys	34	32	35	34	33	31	33	34	34
Met	49	52	49	53	52	52	53	57	47
Ile	242	228	239	243	235	227	233	250	221
Leu	407	378	407	412	387	379	387	411	382
Tyr	246	237	246	239	233	250	231	246	232
Phe	275	255	269	273	266	262	260	286	252
Trp	27	28	12	13	26	14	26	14	13
Lys	309	295	312	319	302	296	300	324	306
His	52	54	52	53	53	53	50	53	56
Arg	403	380	406	417	389	383	387	427	385
Pro	437	391	446	453	433	417	427	463	429
Total	4770	4444	4778	4831	4645	4540	4606	4935	4535

官能評価において総合評価の高かった D（福島県「あやこがね」）及び H（宮城県「タンレイ」）は、旨味に関与するグルタミン酸及びアスパラギン酸が多かった。また、甘味を有するアミノ酸であるセリン、プロリンも同様に多かった。このことから、遊離アミノ酸が多い味噌は、官能評価での評価が高まる傾向があることが伺えた。

３．４．試醸した味噌の色調と一般成分

表５－１、表５－２に試醸した味噌の色調と一般成分値を示す。色調は、Y 値が 10.90～14.47、x 値が 0.48～0.50、y 値が 0.40～0.41 だった。B（北海道「ユキホマレ」）は明るさの指標となる Y 値が、９試験区中最も高く、このことが官能評価に少なからず好影響を及ぼしたものと推察された。赤みの指標となる x 値、黄色みの指標となる y 値は今回の試験区間では大差なかった。

表５－１　試醸した味噌の色調と一般成分

	水分	食塩	対水食塩濃度	直接還元糖	アルコール	色　調		
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	Y	x	y
A	45.1	10.8	19.3	15.7	1.41	11.63	0.49	0.40
B	46.3	10.9	19.1	14.9	1.45	14.47	0.49	0.41
C	44.7	10.9	19.6	15.4	1.26	10.90	0.50	0.40
D	45.3	11.0	19.6	15.0	1.40	10.92	0.50	0.40
E	45.7	10.9	19.2	15.5	1.40	12.39	0.49	0.41
F	45.2	10.9	19.4	15.6	1.39	12.72	0.49	0.41
G	45.3	11.1	19.7	15.7	1.21	11.80	0.50	0.40
H	45.4	11.0	19.6	15.6	1.40	10.26	0.50	0.40
I	45.2	11.0	19.6	15.6	1.33	13.45	0.48	0.41
平均	45.4	11.0	19.5	15.4	1.36	12.06	0.49	0.40

一方、蒸煮大豆（表２）で Y 値が高かった C（福島県「里のほほえみ」）及び、G（宮城県「ミヤギシロメ」）は、味噌にした場合、各 10.90、11.80 と平均値（12.06）よりも低く、他試験区よりも仕込後に急速に褐変が進んだ。これらの結果から、蒸煮の際に原料大豆の Y 値を高めることが、必ずしも味噌の Y 値に結びつかないことが明らかとなった。味噌の色調の観点からは、蒸煮方法のみならず、原料大豆の選定が重要と考えられた。各大豆の褐変速度の差については、糖組成の差も一因と推察されるが、これらについては今後検討する。

また他成分では、官能評価で評価の高かった B（北海道「ユキホマレ」）、D（福島県「あやこがね」）、H（宮城県「タンレイ」）は、比較的アルコール濃度が高かった。アルコール濃度が高いと、香気成分全般が揮発しやすくなると考えられ、官能評価に好影響を及ぼしたものとも推察される。

表５－２　試醸した味噌の一般成分

	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)
A	2.11	1.35	0.49	64.3	23.2	596
B	1.99	1.26	0.46	63.4	23.2	547
C	2.19	1.39	0.49	63.5	22.5	602
D	2.22	1.39	0.49	62.5	22.0	615
E	2.05	1.32	0.48	64.3	23.2	588
F	2.05	1.29	0.46	63.0	22.6	576
G	2.10	1.33	0.48	63.3	22.7	577
H	2.22	1.43	0.51	64.3	22.8	626
I	2.00	1.27	0.46	63.5	23.1	578
平均	2.10	1.34	0.48	63.6	22.8	590

タンパク質系の成分（表５－２）では、官能評価において総合評価の高かった D（福島県「あやこがね」）及び H（宮城県「タンレイ」）は、遊離アミノ酸組成と同様、水溶性窒素、ホルモール窒素が高かった。このことから、水溶性窒素、ホルモール窒素等の旨味に関与する成分が多い味噌は、官能評価が高まる傾向があることが伺えた。一方、官能評価で最も評価の高かった B（北海道「ユキホマレ」）は、これら水溶性窒素、ホルモール窒素は必ずしも高くなかったが、Y 値が高く、色調が明るかったことや、組成が評価され、高評価となったと推察される。

４．結言

県産味噌の品質向上を目的に、品種や産地の異なる原料大豆の特性や、それら大豆が、仕込んだ味噌の品質に及ぼす影響について評価した。原料大豆の蒸煮後の重量増加比は、北海道「 ユキホマレ」、福島県「タチナガハ」 が大きく、Y値は、福島県「里のほほえみ」、宮城県「ミヤギシロメ」が高かった。しかしながら、味噌にした場合、他の大豆よりも褐変の進行が早く、最終的なY値は、平均値よりも低かった。このことから、味噌の色調の観点からは、蒸煮方法のみならず、原料大豆の選定が重要と考えられた。また、アルコールや、水溶性窒素、ホルモール窒素等の旨味に関与する成分が多い味噌の方が、官能評価は高まる傾向があった。ただし、北海道「 ユキホマレ」のように、官能評価における組成や、色調（Y値）が大きな影響を及ぼしていると考えられるものもあった。

今回供試した原料大豆においては、北海道「ユキホマレ」、福島県「アヤコガネ」、宮城県「タンレイ」の評価が高かった。

今後は、味噌の品質向上に向け、微生物や加工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. p.2-35, (1995).
２）みそ技術ハンドブック．全国味噌技術会．p.19, (1995).

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

3DProposal of manufacturing method of traditional crafts by digital fabrication

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

本開発は、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、職人の手仕事と３Ｄプリンタ等のデジタルファブリケーション機器を組み合わせたデジタル製造技術を開発することを目的としている。初年度は県内２企業の協力を得ながら、３次元測定と測定データをもとにした試作品の製作を行った。その結果、３次元スキャンのノウハウと実製造現場に活用可能な製造方法を開発した。

Key words: ３Ｄスキャナ、伝統工芸、デジタルファブリケーション機器

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による技術の伝承問題がある。

本開発では、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、データをもとに職人の手仕事とＮＣ加工機や３Ｄプリンタ等のデジタルファブリケーション機器を組み合わせた、伝統産業向けのデジタル製造技術を開発することを目的とする。

開発期間は、平成３０年度から令和２年までの３年間である。初年度は、現地・現物調査を行い、対象物に合わせた３Ｄスキャン方法を検討し、測定した３次元データを編集して、デジタルファブリケーション機器を使用して試作品を製作した。

２．実験と結果

本開発を進めるにあたり、会津若松市で仏壇を製造している（株）保志と白河市でだるまを製造している白河だるま総本舗にご協力いただいた。協力企業と打ち合わせを行いながら、製造技術の開発対象となる製品を選定し、開発を進めた。

２．１．仏壇関連製品（（株）保志）

現在、職人の手仕事で製造されているが、加工が難しく、時間と手間がかかるものとして、位牌の部品の一部である「蓮華座」と仏壇の「欄間」の製造技術開発を行った。

２．１．１．蓮華座の製造技術開発

２．１．１．１．蓮華座の測定

本所所有の非接触３Ｄ測定システム（Vialux 製 zSnapper Portable）で測定したが、蓮華座（図１）は蓮華の花が重なりあった形状で、測定ができない影の部分が多いため、X 線 CT（東芝 IT コントロールシステム（株）製 TOSCANER-32251μhd）で形状の測定を行った。３ＤＣＡＤソフトウェア上で扱い易いように、測定したデータを３Ｄ画像処理及びサーフェス作成ソフトウェア（Synopsys, Inc 製 Simpleware ScanIP）を用いて STL データに変換を行った。

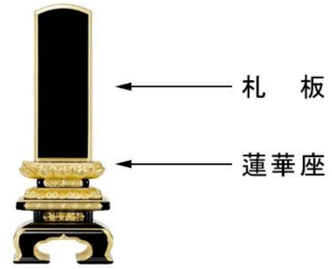


図１　蓮華座について

２．１．１．２．測定データの編集

測定データを確認すると、手作業による仕上げのため、形状が正確に左右対称になっていなかった。しかし、協力企業から嵌合性を高めるためには、左右対称になった方が望ましいとの要望があり、測定データをもとに、３ＤＣＡＤソフトウェアの Robert McNeel & Associates 製 Rhinoceros 5 を使用して、新規に左右対象な３Ｄモデルを作成した。今回は、製造方法として、ＮＣ加工機で荒削りを行い、ＮＣ加工機のエンドミルで加工できない箇所や蓮華の花びらの成形等を手加工で仕上げを行うこととした。まず、ＮＣ加工機で荒削りを行って本体の形状の寸法精度と他部品との嵌合性を高める。その後、職人の手作業による仕上げを行うことで、仕上がりの違いによる手作り感を付加した製品とすることが可能となる。花びらの部分は先端部に行くほど、厚みが薄くなり、ＮＣ加工機で加工する際に、欠損する可能性があるため、仕上げ作業を行う際の削り代を約 1～2mm 持たせてモデリングを行った（図２）。

事業課題名「伝統工芸分野における３Ｄスキャナを活用したデジタル製造技術の確立」

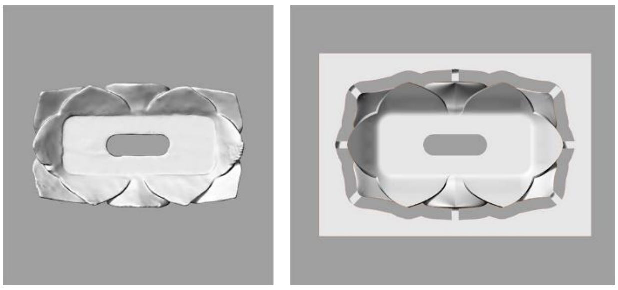


図２　測定結果（左）と３Ｄモデル（右）
※共にRhinoceros 5での表示

２．１．１．３．試作

卓上型ＮＣ加工機（Roland DG製MDX-40A）を使用して、試作（荒削り）を行った。素材にサンモジュールを使用し、R1.5mmのボールエンドミルで荒削りから仕上げの切削を行った。ボールエンドミルの半径が短いもので切削を行えば、より細部を加工することは可能だが、切削時間の長期化と仕上げを手作業で行うことから、一本のエンドミルで切削を行った。荒削り後、カッターナイフを使用して、本体半分のみを簡単な仕上げ加工を行った（図３）。

試作品を協力企業にて確認したところ、表面処理の良さと札板を乗せる部分の平面が精度良く出ていることから、実製品として導入が見込めるため、実製品に使用する素材と製造現場で試作を行うこととなった。

図３　既存製品（左）と試作品（左半分仕上げ加工済）（右）

２．１．２．欄間の製造技術開発

２．１．２．１．欄間の測定

蓮華座同様に、非接触３Ｄ測定システムで測定したが、蓮華座同様に、形状が入り組んでおり、測定ができない影の部分が多いため、平成２９年度に新製品・新技術開発促進事業で行った「デジタル技術による漆器の立体加飾（蒔絵）の開発」[1)]を応用して開発を行った。この手法はRGBのグレースケール画像から３Ｄモデルを作成できるため、オフィス向け複合機のスキャナ機能で欄間の外形のイメージスキャンを行った。

２．１．２．２．３Ｄモデルの製作

欄間のスキャン画像から、Adobe製Illustrator CCで外形線をトレースし、Adobe製Photoshop CCを用いて、グレースケールの着色を行った（図４）。グレースケール画像から３Ｄモデルを作成するソフトウェア（Ransen Software製 Photo to Mesh）は白色（R:255,G:255,B:255）から黒色（R:0,G:0,B:0）までの中間色を３Ｄモデルにおける縦方向の高低差に置き換える。白色が最も高く、黒色が最も低い（高さ:0）ものとして置き換えられる。３Ｄモデルに変換されたデータをRhinoceros 5で編集を行い、欄間の３Ｄモデルを作成した(図５)。

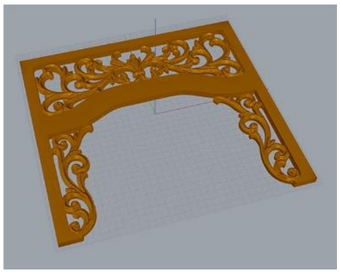


図４　グレースケール画像　　　図５　３Ｄモデル

２．１．２．３．試作

作成した３ＤデータからＦＤＭ方式の３Ｄプリンタ（Creality製 CR-10 S4）を使用して試作を行った（図６）。スライサーソフトウェアはUltimaker製Curaを使用し、積層ピッチは0.08mmに設定し、素材は木粉が配合されたPLA樹脂で出力を行った。

図６　試作品

試作品を協力企業にて確認したところ、３Ｄプリンタ特有の積層段差が確認できるが、素地の上から塗装を行うため段差を隠すことが可能とのことだった。グレースケールで描画するだけで、３Ｄモデルが作成できることから、現在、試作品への塗装と欄間のグレースケール画像の製作依頼を行っている。

２．２．だるまの量産用型（白河だるま総本舗）

現在、だるまの量産方法の主流は、紙と水を混ぜた原料を用いて、量産用型を使用した真空成型法で製造される。量産用型の製造は、白河だるま総本舗内で製作しているが、量産用型製作技術の継承や製作技術の難易度が課題となっており、新しい製造方法を模索されていたため、本開発にご協力いただいた。

２．２．１．測定

量産用型ではなく、赤色に塗装する前の白色のだるま本体を非接触三次元デジタイザ(GOM製ATOS Compact Scan 5M) で測定した。だるま自体が球体の形状をしており、測定が難しい箇所もなく、精度良く３次元測定を行うことができた。
測定データの編集を容易にするために、測定した点郡データは３D Systems 製 Geomagic 5 を使用してサーフェスデータに変換した。

２．２．２．データ編集

測定したダルマの３次元データから量産用型の３Dモデルの製作を行った。量産用型の設計は３ＤＣＡＤソフトウェアのRhinoceros 5を使用し、現在、使用されている量産用型の仕様に合わせて設計を行った。型は正面部と背面部の２つの割型で構成されており、割型の境界はRhinoceros 5で表示された抜き勾配を確認しながら、境界を設定した。今後、サイズ違いの量産用型の設計と技術移転した際の３ＤＣＡＤの操作を簡素化するために、量産用型に配置する水抜き用の穴を自動配置するプログラムをRhinoceros 5上で動作するGrasshopperで作成した（図７）。現状の量産用型に空いている穴径と穴の間隔が入力されており、穴を配置させたいサーフェスモデルをプログラム上に入力することで自動配置される。現状の量産用型に位置ずれ防止のダボ穴が幾つか配置されているが、より位置ズレを防止するために､だるまの外周を囲う凹凸を設けた。

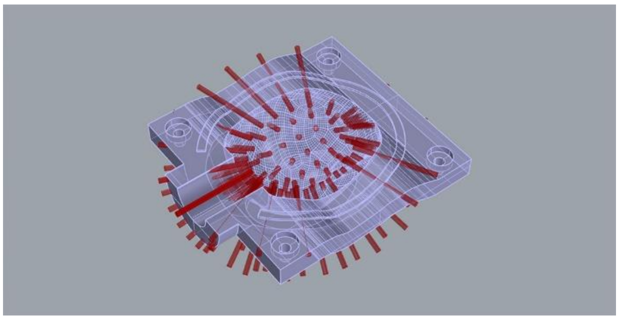


図７　水抜き用穴配置プログラムの結果

２．２．３．試作

作成した３DデータからFDM方式の３Dプリンタを使用して試作を行った（図８）。スライサーソフトウェアのCuraを使用し、積層ピッチは0.1mmに設定し、素材は実製造を考慮し､強度のあるPETG樹脂で出力を行った。

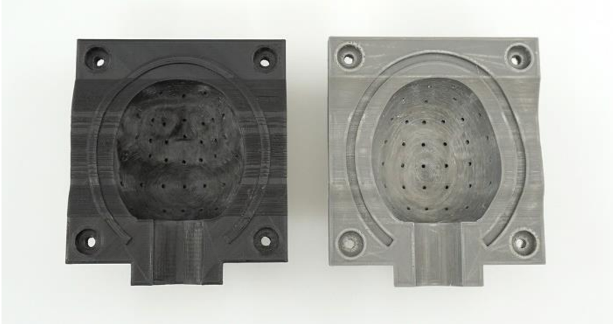


図８　試作品

試作品を確認すると、嵌合性は十分であった。ただし、水抜き用の穴の直径が大きいことから、穴の中にサポートが作られるため、ドリル等で穴をくり抜く後処理が必要となる。サポートが作られない穴径を把握するために、今後、穴径の異なる試作品を製作し確認を行う予定である。また試作品が真空成型時にかかる圧力に耐えるか試験を行う。

３．結言

初年度は、ハンディスキャナの他、X線CTを使って３次元測定を行い、３次元データをそのまま活用した製造技術の開発と、測定した３次元データをもとに新規３Dデータを作成し、そのデータを活用した製造技術の開発を行った。編集したデータをもとに、本所所有のFDM方式の３Dプリンタと卓上型ＮＣ加工機を使用して試作品の製作を行った｡3点の試作をとおして、新たなスキャンのノウハウを得ることができた。
また、試作品は、協力企業から実製造現場での活用の可能性が高いとの評価を得た。
次年度は、現場に取り入れたいという要望に応えるため、製造方法の改良を行い、製造現場に導入できる技術の開発を行う。

謝辞

本開発にご協力いただいた（株）保志様と白河だるま総本舗様に感謝申し上げます。

参考文献

１）出羽重遠, 堀内芳明. デジタル技術による漆器の立体加飾（蒔絵）の開発, 平成２９年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2018, p.27-29.

食品企業の利用を前提とした雪下野菜の特性評価

Characterization of snow covered vegetables as premise on using food campanies

会津若松技術支援センター 醸造･食品科　鈴木英二　遠藤敦史
農業総合センター 会津地域研究所　星 佳織
農業総合センター 生産環境部流通加工科　関澤春仁

雪下キャベツにおいて冠雪前と雪下後では甘味である糖度はほぼ保持され、渋味の原因と言われる硝酸態窒素（硝酸イオン）濃度は減少した。その結果、より強く甘味が感じられたと推測された。また雪室キャベツにおいて出荷後の流通温度の影響として、１℃、１０℃温度区では糖度はほぼ５日間変化なく保持していたが、２０℃温度区では１日で糖度が減少した。流通温度において１０℃以下での流通環境が望ましいことが推測された。

Key words: 雪下キャベツ、味覚センサー、硝酸態窒素、流通温度

１．緒言

福島県内の積雪量が多い会津地域などでは、冬期間の雪を利用して雪下キャベツが生産されている。雪下キャベツは雪中で栽培･貯蔵すると、慣行栽培に比べて甘みが増し味が向上する[1)]といわれている。

雪下キャベツの生産方法は、雪下栽培と雪室（ゆきむろ）貯蔵が行われ、雪下栽培は、キャベツを積雪前の収穫となるように栽培し、未収穫のまま雪を冠雪させ１～２ヶ月後に雪の中から掘り出し雪下キャベツとして出荷する。雪室貯蔵はキャベツを積雪前に栽培・収穫しコンテナに集積した後、雪で覆い雪室という形で１～２ヶ月貯蔵する。

雪下内の気象環境については、積雪深が 20～40cm 以上になると温度はほぼ 0℃と安定し、湿度は積雪深に関わらず冠雪とともにほぼ 100%に達する。積雪深が 40～50cm以上になると光の透過率は 0%に達すること[2)]が報告されている。このような雪下条件下で生産された雪下キャベツは、慣行栽培のキャベツに比べて「雑味や青臭さが少なく甘みが強い」[1)]と言われている。

本試験では積雪量が多く雪下キャベツの生産地である猪苗代町および会津坂下町のほ場にて試験栽培を行った（図１）。猪苗代町ほ場では雪下前後のキャベツの成分および味覚変化について試験した。また会津坂下町ほ場では雪室キャベツ出荷後の流通温度の影響を把握するために 1℃、10℃、20℃の３温度区で流通試験を行い、雪室キャベツの成分変化を把握した。ここでは雪下キャベツの味の客観的評価を行うために、味の強度を数値化する味覚センサーを用いて味覚の経時変化の数値化を行った。さらに雪下キャベツを用いた試作も行った。

表１　猪苗代町生産農家ほ場での試験栽培

栽培地	品種	生産方法	採取日
耶麻郡猪苗代町ほ場	ふゆみつ 彩音 よしき	雪下栽培	2018年11/27, 2019年1/15,2/14
福島県農業総合センター 会津地域研究所ほ場	ふゆみつ	雪室貯蔵	2018年12/26, 2019年1/9,1/23,2/6/,2/21

図１　猪苗代町での雪下キャベツ栽培・試験ほ場

２．試験方法

２．１．試験試料

猪苗代町生産農家のほ場でキャベツ品種「ふゆみつ」、「彩音」、「よしき」を雪下栽培したものを試験試料とした。また農業総合センター会津地域研究所ほ場にてキャベツ品種「ふゆみつ」を試験栽培し、これを雪室貯蔵し試料とした（表１）。

２．２．分析方法

２．２．１．糖度・各糖濃度の測定

試料キャベツは、地上部を採取し外葉を取り除き結球部を得て、この結球部を 1/2 分割しフードプロセッサーで粉砕した。粉砕した試料を脱脂綿でろ過し、得られたろ液を糖度計（PR-101α、PR-201 ㈱ATAGO）にて糖度を測定した。グルコース、果糖、ショ糖の遊離糖濃度は高速液体クロマトグラフィ装置（HPLC）にて測定を行った。

２．２．２．硝酸態窒素濃度及び GABA の測定

試料キャベツを同様に処理したろ液を硝酸イオンメータ（B-74X,NO3-11 ㈱堀場製作所）にて硝酸態窒素濃度（硝酸イオン濃度）を測定した。また試料キャベツの遊離アミノ酸 GABA（γ-アミノ酪酸）を HPLC にて測定した。

事業課題名「食品企業での利用を前提とした雪下野菜の特性評価」

２．２．３．味覚センサーによる味覚値測定

試料キャベツの粉砕試料に重量で３倍量の蒸留水を添加し撹拌した後、遠心分離（3500rpm,10min）し得られた上澄みを測定試料とした。これを(株)インテリジェントセンサーテクノロジー社製の味認識装置（TS-5000Z）を用いて食品評価用の味覚センサーにより「苦味(先味･後味)」、「渋味(先味･後味)」、「旨味(先味･後味コク)」について測定を行った。

２．２．４．雪下キャベツおよびその試作品の抗酸化能 ORAC 値の測定

食品の機能性成分の一つである、抗酸化能を示す ORAC 値の測定を行った。キャベツの ORAC 値においては親水性抗酸化物質の寄与率が高いので、H-ORAC 値の測定を行った。

測定方法として、検体を裁断・真空凍結乾燥後微粉砕し測定試料とした。これをMWA液(メタノール:水:酢酸=90:9.5:0.5)により抽出を行い、H-ORAC値を沖ら[3]の方法により蛍光検出マイクロプレートリーダーを用いて、100g新鮮重当たりのTrolox相当量として測定を行った。

２．２．５．雪下キャベツからの乳酸菌の分離

雪下キャベツを用いた特徴ある試作品作成のために、雪下キャベツおよびそのザワークラウトから乳酸菌の分離を行った。ＧＹＰ白亜寒天培地を用いて乳酸菌の分離を行った。

２．２．６．雪下キャベツを用いた試作品の作製

雪下キャベツを真空凍結乾燥しミルにて乾燥粉末を調整し、その後いくつかの試作品を作製した。

３．結果および考察

３．１．冠雪前キャベツと雪下キャベツの成分変化および味覚評価

猪苗代町生産農家のほ場で試験栽培を行ったキャベツ品種「ふゆみつ」、「彩音」、「よしき」において、冠雪前のキャベツと雪下キャベツの成分及び味覚の経時変化を試験した。

３．１．１．冠雪前キャベツと雪下キャベツの糖度・硝酸態窒素濃度の経時変化

雪下キャベツ３品種における、糖度の経時変化を図２に示した。各品種においてそれぞれ冠雪前の糖度を雪下２週間後、６週間後でもほぼ保持していた。同様に硝酸態窒素（硝酸イオン）濃度の経時変化を図３に示した。硝酸態窒素濃度において冠雪前の硝酸態窒素濃度と比較すると雪下２週間後で約1/2 量の減少が見られた。また野田らは、ホウレンソウなどに含まれる硝酸イオンは苦味･雑味の味覚と正の相関があり、野菜のおいしさ評価を硝酸イオン含量から推定できる[4]ことを示している。よって硝酸イオンは濃度が高いと苦味･渋味の味覚が増加することを示唆している。雪下後では甘味である糖度はほぼ維持され、苦味･渋味に影響する硝酸態窒素濃度(硝酸イオン濃度)は減少していた。

さらに雪下２週間後の雪下キャベツの試食を行ったところ、冠雪前キャベツと糖度が同等にもかかわらず、雪下キャベツのほうが甘味が強く感じられた。硝酸イオンが減少したことにより渋味･苦味が減り、その結果より強く甘味が増したと推測された。

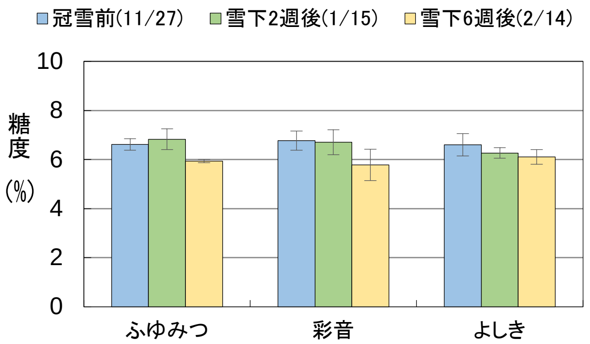


図２　糖度の経時変化（品種:ふゆみつ･彩音･よしき）

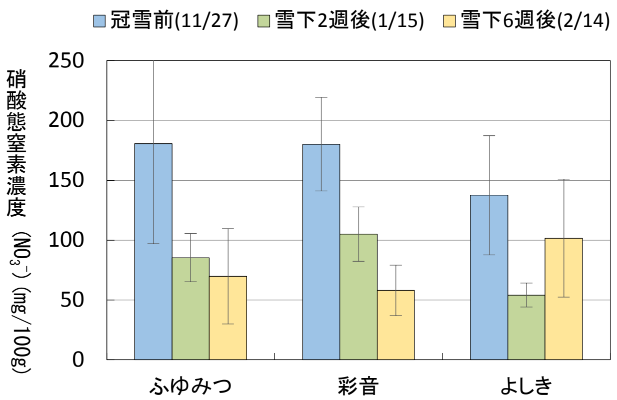


図３　硝酸態窒素（硝酸イオン）濃度の経時変化

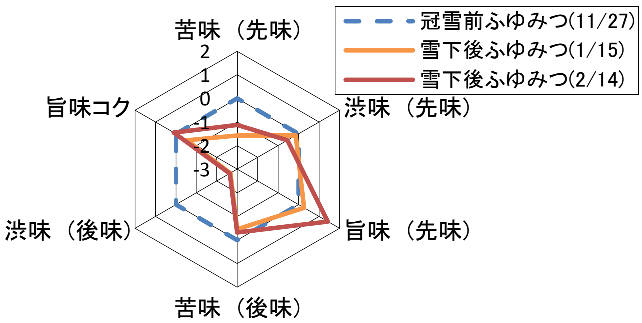


図４　冠雪前ふゆみつを基準にした雪下後ふゆみつの味覚センサーによる経時評価

３．１．２．冠雪前キャベツと雪下キャベツの味覚センサーによる味覚評価

「ふゆみつ」において冠雪前と雪下後の味覚差を味覚センサーを用いて評価した。冠雪前「ふゆみつ」(2018年11月27日採取）の味を基準0に、2019年1月15日と2019年2月14日に採取した雪下「ふゆみつ」の味覚の強弱を数値化したものを図４に示した。冠雪前と比較すると、雪下後は渋味(後味)や苦味(先味)が少なく、旨味(先味)が次第に増加していく味覚評価となった。また渋味(後味)の減少は硝酸態窒素（硝酸イオン）濃度の減少によるものと推測された。

３．２．雪室貯蔵キャベツ出荷後の流通温度の違いによるキャベツの成分および味覚評価の影響

会津地域研究所のほ場で栽培したキャベツ品種「ふゆみつ」において２８日間雪室貯蔵を行った。その後雪室キャベツ出荷後の流通温度の影響を把握するために 1℃、10℃、20℃の３温度区で５日間の流通試験を行い、雪室キャベツの成分および味覚の経時変化を試験した。

３．２．１．雪室キャベツの 1℃、10℃、20℃温度区での糖度および各糖濃度の経時変化

雪室キャベツ出荷後に 1℃、10℃、20℃温度区にて５日間の流通保存を行い、雪室キャベツの糖度の経時変化を図５に示した。1℃、10℃温度区では糖度はほぼ５日間変化なく保持していたが、20℃温度区では１日で糖度が減少した。さらに20℃温度区でのフルクトース、グルコース、スクロース各糖濃度の５日間における経時変化を図６に示した。

冬キャベツにおいて 5℃以下の低温環境にさらされることにより糖を蓄積し、凍結を防ぐ耐凍性を獲得する低温順化[5] がおきると言われる。逆に低温順化により糖を蓄積した冬キャベツは、外気温が 10℃より高くなると耐凍性を解除し糖を減少させ、脱順化[5] が約６～10時間の間におきると言われている。今回も雪室キャベツにおいて 20℃温度区で脱順化がおき耐凍性に関与される糖が１日間で減少したと推測された。

３．２．２．雪室キャベツの 1℃,10℃,20℃温度区での硝酸態窒素濃度および GABA の経時変化

雪室キャベツ出荷後の 1℃、10℃、20℃温度区の５日間の硝酸態窒素（硝酸イオン）濃度の経時変化を図７に示した。1℃温度区では渋味の原因となる硝酸イオンはほぼ５日間変化なかったが、20℃温度区では１日で硝酸イオンが倍以上の増加がみられ、その後高い濃度で推移した。

アミノ酸の一種であるGABAは、血液降下作用や抗ストレス作用の機能性を示すアミノ酸[6]として知られている。雪室キャベツ出荷後の 1℃、10℃、20℃温度区の５日間のGABAの経時変化を図８に示した。1℃温度区ではGABAはほぼ５日間変化はなかったが、20℃温度区では１日で半減しその後も低い濃度で推移した。

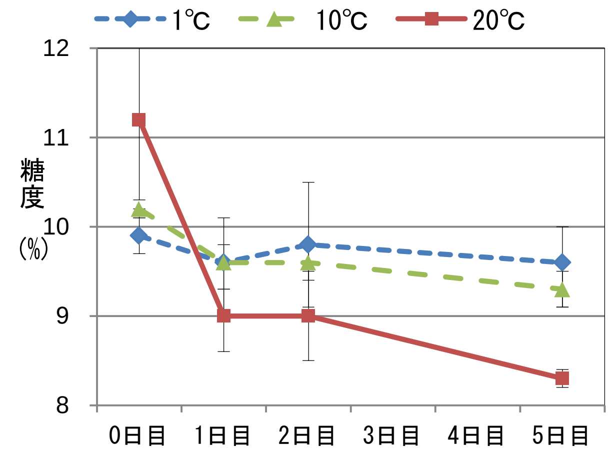


図５　1℃、10℃、20℃温度区での雪室キャベツの５日間の糖度の経時変化

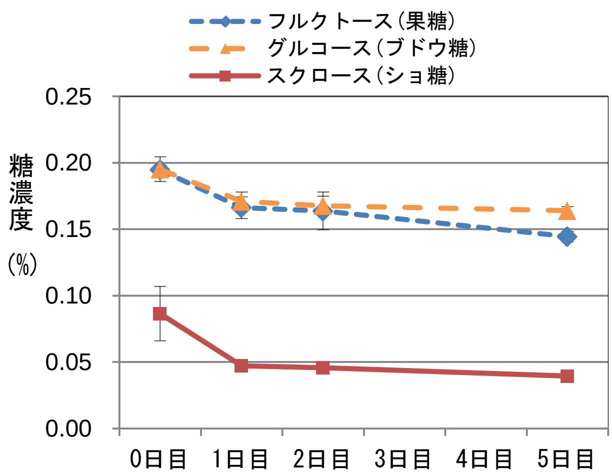


図６　20℃温度区各糖濃度の５日間の経時変化

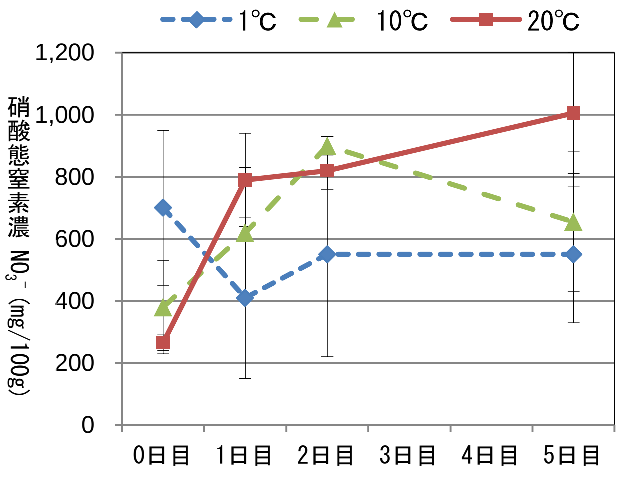


図７　1℃、10℃、20℃温度区の５日間の硝酸態窒素濃度の経時変化

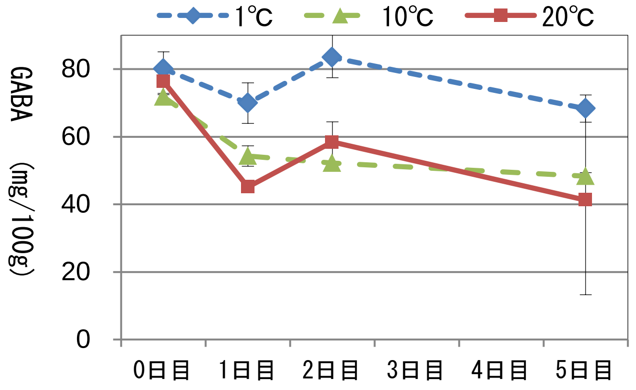


図８　３温度区の５日間の GABA の経時変化

３．３．雪下キャベツを用いた試作

３．３．１．雪下キャベツからの乳酸菌の分離

雪下キャベツを用いた特徴的な試作品を作製するために、雪下キャベツから分離した乳酸菌合計 330 菌株から豆乳発酵に優れた乳酸菌２菌株 A-24、F-47 を選択した。グラム陽性球菌、芽胞形成なし、カタラーゼ反応陰性を確認し DDBJ(日本ジーンデータバンク)の BLAST 検索を行った結果、*Leuconostoc mesenteroides* と 99%の相同性が示された。

図９　雪下キャベツを原料とした試作品

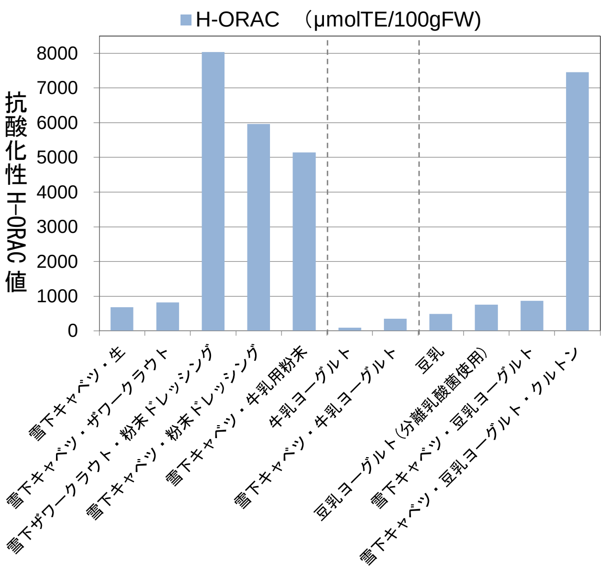


図１０　試作品の抗酸化性を示す H-ORAC 値の測定結果

３．３．２．雪下キャベツを原料とした試作品

雪下キャベツを使用した試作品及び雪下キャベツ分離乳酸菌使用の豆乳ヨーグルトを図９に、また試作品の抗酸化性を示す H-ORAC 値を図１０に示した。抗酸化性が強く且つ雪下キャベツの甘味が強く感じられる試作品を作製した。

４．結言

雪下キャベツは雪中で貯蔵すると甘味が増し味が向上すると言われている。キャベツにおいて、冠雪前と雪下後では甘味である糖度はほぼ保持され、渋味の原因と言われる硝酸態窒素(硝酸イオン)濃度は減少していた。冠雪前キャベツと糖度が同等にもかかわらず、雪下キャベツの方が甘味が強く感じられた。これは硝酸イオンが減少したことにより渋味・苦味の味覚が減り、その結果、より強く甘味が増したと推測された。また味覚センサーの結果からも冠雪前と比較すると、雪下後は渋味(後味)や苦味(先味)が少なく、旨味(先味)が次第に増加していく味覚評価となった。雪下キャベツにおいて「甘味があり雑味が少なく旨味がある」ことが確認できた。

２８日間雪室貯蔵を行った雪室キャベツにおいて、その後出荷後の流通温度の影響を把握するために 1℃、10℃、20℃の３温度区で５日間の流通試験を行った。1℃, 10℃温度区では糖度はほぼ５日間変化なく保持していたが、20℃温度区では１日で糖度が減少した。フルクトース、グルコース、スクロースの合計値も糖度と同じように 20℃温度区では１日で Total 糖濃度が減少していた。雪室キャベツにおいて 20℃温度区で耐凍性を解除する脱順化がおき耐凍性に関与される糖が 1 日間で減少したと推測された。また渋味の原因となる硝酸イオンにおいて、20℃温度区では１日で倍以上の増加がみられ、その後高い濃度で推移した。これらの事から出荷後は 10℃以下での流通環境が望ましいことが推測された。

参考文献

1）松村兼生, 野菜の雪中貯蔵方法とその実証, 北陸農業試験場報告２９号, p.75-94, (1987).

2）村松謙生, 野菜の雪中貯蔵に関する研究, 日本雪氷学会誌, 48, p.149-157, (1986).

3）沖 智之 他, ORAC 法, 食品機能性評価マニュアル集第Ⅱ集, 食品機能性評価支援センター検討委員会編集. p.79-86, (2008).

4）野田博行, 幕田武広,味覚センサーで測定したコマツナおよびホウレンソウの味覚値に及ぼす硝酸イオン含量の影響, 科学・技術研究第４巻２号, p.117-181, (2015).

5）佐々木英和, キャベツの耐凍性獲得および消失に関する研究, 野菜茶業研究所研究報告,p.213-244, (2003).

６）藤林真美 他, GABA経口摂取による自律神経活動の活性化, 日本栄養・食糧学会誌, vol.61, p.129-133, (2008).

地域在来作物の栄養・機能性を活かした加工技術の開発

Development of processing technology making use of nutrition
and functionality by regional traditional vegetables

会津若松技術支援センター 醸造・食品科　遠藤敦史　鈴木英二
農業総合センター 生産環境部 流通加工科　馬淵志奈　関澤春仁

会津地方の地域在来作物１３品目での抗酸化能(H-ORAC)はアザミゴボウが最も高く、宇津野カブの葉や茎立菜など葉物野菜で高い傾向を示した。また、抗酸化能と総ポリフェノール含量は高い正の相関が認められた。更に、地域在来作物の特徴を活かした加工技術について調査し、アザミゴボウの粉末加工には乾燥前のブランチングが必要であることや、慶徳タマネギ外皮の抽出液を使用して機能性を付与できることなどを明らかにした。

Key words: 地域在来作物、栄養・機能性、抗酸化能、H-ORAC

１．緒言

県内の食品企業や６次産業化に取り組む農産加工業者は、県産素材を用いた特色ある加工食品づくりを目指している。また近年、全国的に各地域で古くから栽培されてきた地域在来作物を後世に残すとともに、地域振興につなげようとする動きが見られる。これらの地域在来作物には栄養・機能性の面で特徴を持つものも存在する[1]。一方、消費者の健康に対する関心の高まりから、食品の持つ「栄養性」、「嗜好性（おいしさ）」の他、体の調子を整えて健康の維持・増進に寄与する「生体調節機能（機能性）」が注目されている。

このため、本県の地域在来作物における栄養・機能性についての特徴を見出し、それらを活かした加工食品の開発に資することを目的として、平成２８年度から３０年度にかけて会津地方の地域在来作物の栄養・機能性を明らかにするとともに、特徴を活かした加工方法の調査を行った。

２．実験方法

２．１．対象品目

本課題では、「会津伝統野菜」と呼ばれる会津地方の地域在来作物１３品目(慶徳タマネギ､赤筋ニンニク、余蒔キュウリ、会津丸ナス、小菊カボチャ、アザミゴボウ、赤筋ダイコン、宇津野カブ、会津サトイモ、会津地ネギ、荒久田茎立、ちりめん茎立、真渡ウリ）を対象として研究を実施した。

２．２．地域在来作物の栄養・機能性の評価

地域在来作物の生鮮での栄養・機能性について調査を行った。地域在来作物１３品目計１４点（宇津野カブについては「葉」と「根（胚軸）」に分けたため計２点）の抗酸化能、総ポリフェノール含量を測定した。慶徳タマネギ、赤筋ニンニク、余蒔キュウリ、会津丸ナス、小菊カボチャ、アザミゴボウ、赤筋ダイコン、宇津野カブ、会津サトイモ、会津地ネギの１０品目については糖・遊離アミノ酸組成も測定した。また、一部の品目については一般品種との比較も行った。

２．２．１．分析試料の調製

供試した生鮮作物は可食部を乾燥に適した大きさに細断し、真空凍結乾燥した後に粉砕機により粉末化して分析試料とした。

２．２．２．抗酸化能の測定

今回、抗酸化能はH-ORAC法を用いて測定した。ORACはラジカル消去活性を抗酸化能として評価する手法であり、中でもH-ORACは食品中の親水性抗酸化物質に由来する抗酸化能を示している。野菜類ではORACにおける親水性抗酸化物質の寄与率が親油性抗酸化物質より高いことが報告されており[2]、従って本試験ではH-ORACのみを測定した。

渡辺らの方法[3]に従い蛍光測定が可能なマイクロプレートリーダー（Infinite F200 PRO（TECAN社製））を用いて測定しTrolox相当量として示した。以下、H-ORACを抗酸化能として扱う。

２．２．３．総ポリフェノール含量の測定

総ポリフェノール含量をFolin-Ciocalteu法により測定し、抗酸化能との関連性を調査した。

２．２．４．一般品種との比較による抗酸化能の評価

慶徳タマネギ、赤筋ニンニク、余蒔キュウリ、会津丸ナス、小菊カボチャ、アザミゴボウの６品目について、一般品種と抗酸化能を複数年で比較した。なお、アザミゴボウは畑栽培及び水田転換畑栽培でそれぞれ比較した。

２．２．５．糖・遊離アミノ酸組成の測定

分析試料に蒸留水を加え超音波抽出し、その上澄み液を定容して測定試料とした。

糖組成については、測定試料を適宜希釈した後、ス

事業課題名「地域在来作物の栄養・機能性を活かした加工技術の開発」

クロース、グルコース、フルクトースをHPLC（L-2000（日立ハイテクサイエンス社製））により測定した。

遊離アミノ酸組成については、測定試料にトリクロロ酢酸を加えて除タンパクした後、アミノ酸分析計（L-8900（日立ハイテクサイエンス社製））を用いて測定した。

２．３．地域在来作物の特徴を活かした加工技術

生鮮での機能性や加工品の原料としてのニーズを考慮して、アザミゴボウ、慶徳タマネギ、小菊カボチャの３品目を選択し、これらを使用した加工技術の開発を進めた。

２．３．１．分析試料の調製

試作した加工品は目的に応じ、真空凍結乾燥または熱風乾燥を行った後に粉砕機で粉末化した。液体試料は分析に適した濃度に希釈した。

２．３．２．アザミゴボウ加工の前処理の最適化

アザミゴボウの利用のため、汎用性の高い粉末への一次加工について調査した。試験区の構成は、酵素失活を目的とした前処理（ブランチング：蒸煮、10分）の有無、乾燥方法によって表１のとおりとし、アザミゴボウ３個体をそれぞれ各試験区に分割した。調査項目はゴボウ特有の機能性成分であるクロロゲン酸含有量と抗酸化能とした。クロロゲン酸含有量は、粉末試料に80%メタノールを加えて超音波抽出したものをHPLCで分析した。

試料は可食部をそれぞれの方法で前処理・乾燥した後、粉砕機で粉末化したものを用いた。また、二次加工を想定して粉末に加水し、分析のために再び凍結乾燥・粉末化したものについても抗酸化能を測定した。

表１　アザミゴボウ粉末化前処理の試験区

試験区	ブランチング	乾燥方法
①	なし	真空凍結乾燥
②		熱風乾燥
③	あり	真空凍結乾燥
④		熱風乾燥

※熱風乾燥：室温→85℃(30分)→60℃(8時間)→40℃

更に、乾燥時の前処理が二次加工品に与える影響を確認するため、アザミゴボウ粉末を用いてクッキーを試作し抗酸化能を比較した。なお、本試験で用いた個体は区により異なるため、原料の抗酸化能は異なる。また、アザミゴボウ粉末を加えない対照区を設けた。

クッキーの材料の割合は、表２のとおりとした。

表２　アザミゴボウクッキーの配合

ｱｻﾞﾐｺﾞﾎﾞｳ粉末添加	ｱｻﾞﾐｺﾞﾎﾞｳ粉末	薄力粉	砂糖	BP	食塩
あり	10g	60g	10g	3g	0.4g
なし(対照)	―	70g	10g	3g	0.4g

※BP:ベーキングパウダー
※上記材料に、蒸留水25ml とサラダ油20ml を加えた

２．３．３．慶徳タマネギ外皮の機能性と抽出液を利用した加工品

慶徳タマネギ外皮の機能性を評価するため、タマネギ特有の機能性成分であるケルセチン含有量と抗酸化能を測定した。ケルセチン含有量は、試料を塩酸酸性エタノール中で加水分解したものをHPLCで分析し、アグリコン相当量で換算した。

続けて、慶徳タマネギ外皮の機能性を付与した加工品の開発に取り組んだ。粉砕した慶徳タマネギ外皮粉末10gに蒸留水を加え、沸騰水中で時々振とうしながら10分間抽出した。これを計３回繰り返した後、上清を500mlに定容して抽出液とした。更に、表３の配合のとおり浅漬液を作製し、厚さ約1.5cmの輪切りまたは半月切りにした余蒔キュウリ全体が浸かる程度に加えて冷蔵庫で一晩（約16時間）漬けた。対照区では抽出液の代わりに蒸留水を使用した。

表３　慶徳タマネギ外皮抽出液使用浅漬液の配合

試験区	外皮抽出液	蒸留水	食酢	食塩	砂糖
抽出液区	400ml	―	80ml	80g	40g
対照区	―	400ml	80ml	80g	40g

２．３．４．慶徳タマネギペーストの抗酸化能とその利用

試料には慶徳タマネギ３個を用いた。可食部（外皮を除いた部分）を１６分割した中から約80gをビーカーに移し、食塩0.2g、蒸留水30gを加え、電気コンロで加熱した後フードプロセッサによりペースト化した。得られた試料については、ペースト化前後の抗酸化能を比較した。

また、作製したペーストを利用した二次加工品としてフリーズドライ味噌汁を試作し、慶徳タマネギペースト混和の有無による抗酸化能を比較した。なお、１食のフリーズドライ味噌汁の容積を約40ml（摂食時に160mlの湯で希釈）と設定し、２０食分作製した。材料の配合は出汁入り味噌約300g、タマネギペースト184gに蒸留水を加え約800mlに定容した。これを湯煎しながら攪拌し均一化した後、２０区画のトレーに分注・放冷し、真空凍結乾燥を行った。対照区はタマネギペーストを除いて同様に調製した。

２．３．５．小菊カボチャペースト作製時のオートマチックシノア利用による効率化の調査

小菊カボチャを下記のとおり２区分してペースト化し、原料に対する収率（重量ベース）を比較した。

① 試験区

小菊カボチャ４個体を供試した。各カボチャを縦方向に１２分割し、種子を取り除いた後スライサーを使用し厚さ約 5mm に切断、ブランチング（蒸煮）した。それら全てを皮付きのままオートマチックシノア（裏ごし機）を使用しペースト化した。

② 対照区

小菊カボチャ３個体を供試した。カボチャを縦方向に１２分割し、種子を取り除き、ブランチング（蒸煮）後、手作業により皮を除去し、個体ごとにフードプロセッサによりペースト化した。

３．結果と考察

３．１．地域在来作物の栄養・機能性の評価

３．１．１．抗酸化能の測定と総ポリフェノール含量との関連性

地域在来作物１３品目計１４点の抗酸化能を図１に示す。その結果、アザミゴボウが最も高い値を示し、宇津野カブ（葉）や荒久田茎立、ちりめん茎立の葉物野菜で高かった。

また、抗酸化能と総ポリフェノール含量は高い正の相関を持つことが分かった（図２）。

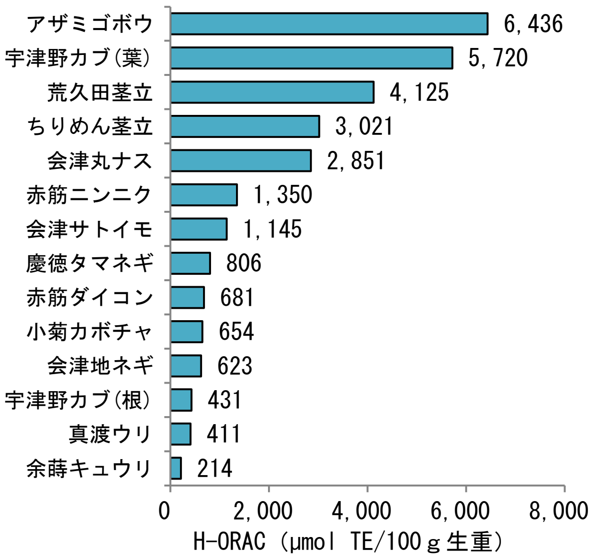


図１ 地域在来作物の抗酸化能

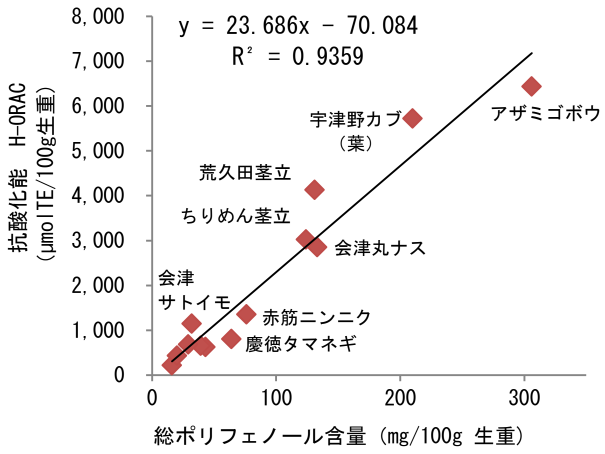


図２ 抗酸化能と総ポリフェノール含量の相関

３．１．２． 一般品種との抗酸化能の比較

図３は一般品種との抗酸化能の比を表しており、地域在来作物の H-ORAC 値を一般作物の H-ORAC 値で除した数値を掲載している。数値が１より大きい場合は地域在来作物の抗酸化能が一般品種と比較して高く、１より小さい場合は低いことを示している。

地域在来作物６品目の抗酸化能を複数年にわたり一般品種と比較したところ、年次間差が大きく、抗酸化能の高低に明確な差は見出せなかった。

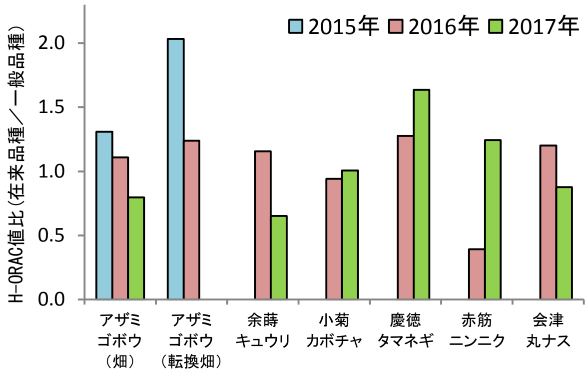


図３ 地域在来作物と一般品種との抗酸化能の年次比較

※H-ORAC 値比 0.0 は比較無し

３．１．２．地域在来作物の糖・遊離アミノ酸組成

糖含量を比較すると、畑でのみ差があり、白肌ゴボウ（一般ゴボウ）がアザミゴボウよりも高かったが、転換畑では差が無かったため、品種による差とは判断できなかった。ニンニクにはオリゴ糖が多く含まれているが、今回、多糖についてはスクロースしか測定していないため低い値を示していると考えられた。糖組成については、カボチャのスクロース含量に有意差があった。カボチャは保存によってスクロースが増加することが確認されているため、保存の影響も考えられる。ダイコンのスクロース含量は個体差が大きく、有

意差は確認されなかった（図４）。

本試験では、在来作物と一般品種の糖組成には明確な差は見出せなかった。

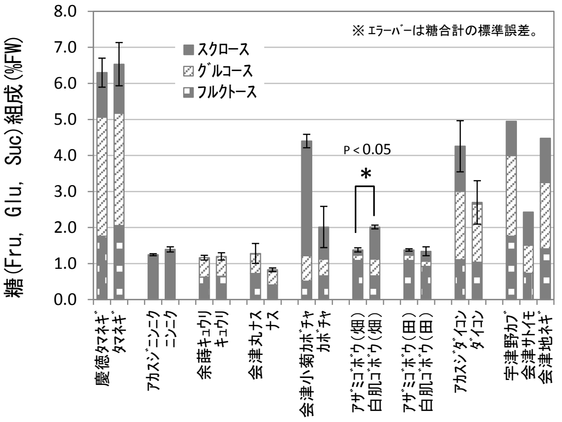


図４　糖含量と組成（フルクトース, グルコース, スクロース）

遊離アミノ酸の組成については、いずれの品種も概ね同様の組成を示していた。ニンニクでは一般品種の方が全体的に高い遊離アミノ酸含量を示していた。今回調査したニンニクは一般品種の水分含量が多いことから、収穫後の乾燥による濃縮ではなく元来の含量が高いと考えられた。キュウリでは一般品種のグルタミンとシトルリンが高く、ゴボウではアザミゴボウのアスパラギンとアルギニンが高かった（表４）。しかし、在来作物と一般品種の遊離アミノ酸組成には明確な差は見出せなかった。

３．２．地域在来作物の特徴を活かした加工技術

３．２．１．アザミゴボウ加工の前処理の最適化

乾燥粉末のクロロゲン酸含有量、抗酸化能は全ての区において有意差は確認されず、前処理の有無、乾燥方法の違いによる影響は無いと考えられた（図５）。

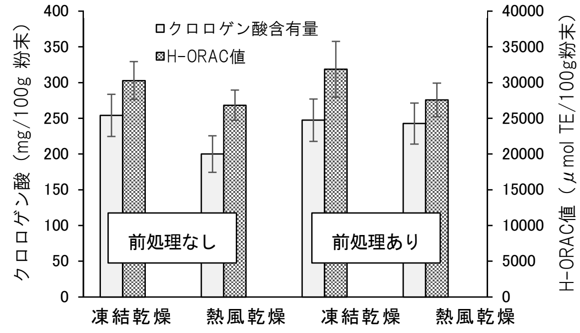


図５　アザミゴボウ粉末のクロロゲン酸含有量、抗酸化能の比較

加水前後での変化を調査すると、抗酸化能については、前処理なしの区では加水後に有意に低下したが、前処理ありの区では加水の前後で有意差は確認されなかった（図６）。また、前処理なしの区は加水により褐変したが、前処理ありの区は加水後も色調が保持されていた（図７）。

以上のような加水前後での変化は、アザミゴボウ粉末中に残存した酸化酵素が原因と考えられる。前処理としてブランチングを行うことにより酸化酵素が失活し、抗酸化能と色調が保持できたと推測される。

表４　遊離アミノ酸含量

品目	Asp	Thr	Ser	Asn	Glu	Gln	Ala	Cit	Val	Met	Ile	Leu	Tyr	Phe	GABA	Orn	Lys	His	Car	Arg
慶徳ﾀﾏﾈｷﾞ	6	3	3	11	12	35	6	0	3	2	2	6	6	3	2	1	12	3	5	40
ﾀﾏﾈｷﾞ	10	5	5	29	15	62	8	5	8	1	5	10	9	5	4	2	17	5	5	90
ｱｶｽｼﾞﾆﾝﾆｸ	40	9	39	334	91	36	56	－	8	5	6	7	7	22	4	7	54	7	10	878
ﾆﾝﾆｸ	28	20	62	590	81	64	101	9	40	11	13	12	20	22	5	15	87	20	9	1374
余蒔ｷｭｳﾘ	3	2	4	3	1	35	2	4	2	1	2	2	2	2	5	0	1	1	2	3
ｷｭｳﾘ	5	4	12	4	3	112	5	25	5	3	3	5	3	5	9	0	3	2	2	10
会津丸ﾅｽ	3	1	1	4	－	6	2	－	2	1	1	2	0	2	10	1	2	1	4	2
ﾅｽ	3	1	1	4	1	9	1	－	3	1	1	1	1	3	9	1	2	1	4	3
会津小菊ｶﾎﾞﾁｬ	59	2	6	14	0	12	7	－	4	3	5	4	8	5	26	2	3	2	6	7
ｶﾎﾞﾁｬ	47	5	16	30	8	69	5	0	4	7	15	9	10	14	45	3	6	6	9	98
ｱｻﾞﾐｺﾞﾎﾞｳ(畑)	18	5	4	209	3	25	5	－	2	0	5	5	－	17	4	4	7	4	13	302
白肌ｺﾞﾎﾞｳ(畑)	19	3	3	131	4	18	5	－	－	1	3	3	－	13	4	2	4	4	8	207
ｱｻﾞﾐｺﾞﾎﾞｳ(田)	17	5	4	257	－	23	6	－	3	－	7	7	－	16	3	3	7	5	10	333
白肌ｺﾞﾎﾞｳ(田)	20	4	4	213	3	20	5	－	2	1	－	5	6	19	4	4	11	9	22	409
ｱｶｽｼﾞﾀﾞｲｺﾝ	18	13	15	8	6	96	15	－	18	1	8	4	2	10	53	1	5	3	3	38
ﾀﾞｲｺﾝ	13	6	10	9	3	69	4	－	11	0	5	2	2	7	16	0	－	3	4	17
宇津野ｶﾌﾞ	5	5	3	10	5	35	4	－	10	3	5	7	4	7	28	1	6	1	2	4
会津ｻﾄｲﾓ	12	3	13	7	11	7	8	－	6	2	4	7	7	21	0	2	5	2	3	10
会津地ﾈｷﾞ	7	25	21	50	23	126	26	－	21	2	14	30	21	22	4	0	14	9	3	8

※　単位はmg/100g FW。

※※網掛け部分は5%水準で有意差があり、かつ一方の含量が10mg以上のものを示した。

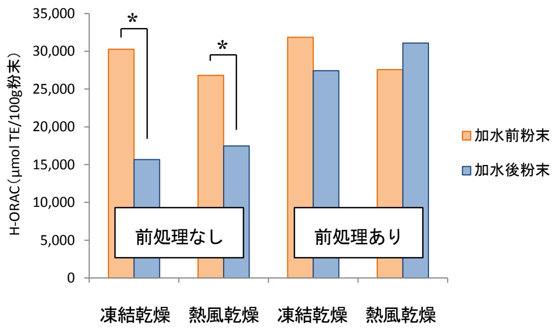


図６　アザミゴボウ粉末化前処理による加水前後の抗酸化能の比較

※*は 5%水準で有意差あり（t 検定）

図７　アザミゴボウ粉末への加水による色調変化の比較

更に、アザミゴボウ粉末の二次加工品としてクッキーを試作した。その結果、蒸煮なし真空凍結乾燥粉末を使用したものでは褐変により暗褐色になったのに対して、蒸煮あり熱風乾燥粉末のものでは明るい色調が保持されていた（図８）。

次に、試作したクッキーの抗酸化能を測定し、投入したアザミゴボウ粉末の割合から推定した期待値に対する残存率で評価した。蒸煮なし真空凍結乾燥粉末を使用したクッキーでは、期待値の 40%程度まで減少していたのに対し、蒸煮あり熱風乾燥粉末を使用したものでは 70%程度の抗酸化能を保持していた（表５）。

以上より、アザミゴボウを粉末化する際は乾燥前にブランチングすることで、二次加工品での抗酸化能の損失を抑制し、色調を保持できることが示唆された。

図８　アザミゴボウ粉末を使用したクッキー外観

表５　アザミゴボウ粉末を使用した加工品の抗酸化能（H-ORAC）　（μmol TE／100g）

	原料アザミゴボウ粉末	クッキー（期待値比）	期待値
蒸煮なし凍結乾燥	39, 202	1, 738（約 40%）	4, 344
蒸煮あり熱風乾燥	22, 497	1, 734（約 70%）	2, 475
対照	―	N. D.	―

※期待値：クッキーに含まれるアザミゴボウ粉末の割合（約 11%）から算出した抗酸化能

３．２．２．慶徳タマネギ外皮の機能性と抽出液を利用した加工品

慶徳タマネギ外皮は、可食部と比較して非常に高い機能性を有することが明らかとなった（表６）。そこで、慶徳タマネギ外皮抽出液を利用して機能性を付与した加工品の開発を行った（図９）。

表６　慶徳タマネギ可食部及び外皮の機能性

	ケルセチン含有量（μmol/100g）	抗酸化能（H-ORAC）（μmol TE/100g）
可食部（生）	54	806
外皮	3, 301	94, 824

※ケルセチン含有量：アグリコン相当量での換算

図９　慶徳タマネギ外皮粉末（写真左）と抽出液（写真右）

慶徳タマネギ外皮抽出液の抗酸化能は、H-ORAC 用抽出溶媒の約 80％であり、これに調味料を加えて作製した浅漬液においても抗酸化能が残存していた（表７）。

続いて、浅漬加工前後での抗酸化能の変化を調査した。慶徳タマネギ外皮抽出液を使用した浅漬では原料と比較して約 3.6 倍の抗酸化能を示したが、対照の浅漬は加工前後で抗酸化能は殆ど変化しなかった。従って、対照の浅漬液が抗酸化能へ与える影響は小さく、慶徳タマネギ外皮由来の成分が浅漬液を介して余蒔キ

ュウリに移行することで抗酸化能が増加したと考えられた（図１０）。

ケルセチン含有量については、余蒔キュウリにはケルセチンが殆ど含まれなかったが、慶徳タマネギ外皮抽出液を使用した浅漬に加工することでケルセチンが移行し、含有量が増加した（表８）。

慶徳タマネギ外皮抽出液使用浅漬は、外皮の持つ色が染み込むので暗橙色に変化した（図１１）。しかし対照浅漬と味に大きな違いは感じられなかった。

表７　慶徳タマネギ外皮及び抽出液の抗酸化能（H-ORAC）

	（μmol TE/100ml 液体）
MWA 抽出液	1,897
熱水抽出液	1,463
熱水抽出液使用浅漬液	917

※MWA 抽出液：H-ORAC 用抽出溶媒（メタノール 90：水 9.5：酢酸 0.5）

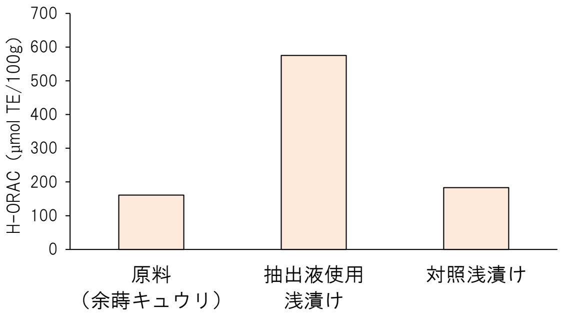


図１０　原料及び試作した浅漬けの抗酸化能（H-ORAC）

表８　原料及び試作した浅漬けのケルセチン含有量

	（μmol /100g）
原料（余蒔キュウリ）	N.D.
抽出液使用浅漬け	8.54
対照浅漬け	N.D.

※アグリコン相当量での換算

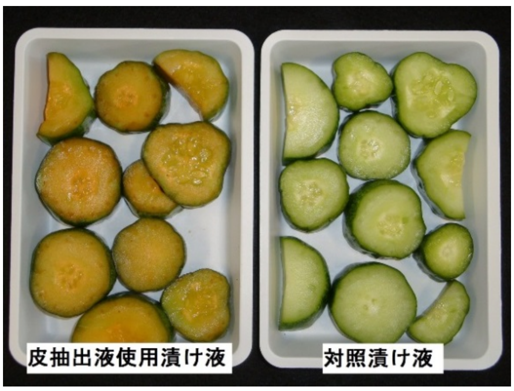


図１１　慶徳タマネギ外皮抽出液を使用した余蒔キュウリの浅漬け（写真左）と対照浅漬け（写真右）

３．２．３．慶徳タマネギペーストの抗酸化能とその利用

慶徳タマネギペーストの抗酸化能は加工前の生のものと同程度であり、抗酸化能が保持されることが分かった。なお、作製したペーストの水分についても加工前と同程度であった（表９）。

表９　慶徳タマネギペーストの抗酸化能（H-ORAC）と水分

	H-ORAC（μmol TE/100g）	水分（%）
加工前（生）	814	89.4
加工後（ペースト）	877	89.6

一方、慶徳タマネギペーストを混和したフリーズドライ味噌汁は、乾物重あたりの抗酸化能は対照区と同程度であったが、比重が高いため１食あたりの抗酸化能は対照区に比較してやや高かった（図１２，表１０）。味噌自体も抗酸化能を有しているが、タマネギペーストの混和により抗酸化能を高められると考えられた。

図１２　慶徳タマネギペーストを混和したフリーズドライ味噌汁（容積：約 40ml）

表１０　慶徳タマネギペースト混和フリーズドライ味噌汁の抗酸化能（H-ORAC）

	（μmol TE）		
	乾物 100g	１食	１食重（g）
ペースト混和区	8,718	744	8.5
対照区	8,774	648	7.4

３．２．４．小菊カボチャペースト作製時のオートマチックシノア利用による効率化の調査

オートマチックシノアを使用した小菊カボチャペーストの収率は、フードプロセッサ使用と同程度であり、収量の優位性は見出せなかった（表１１）。

しかし、連続的にペースト化が可能であることから、大量にペーストを作製する場合には、作業の効率化が期待できる。なお、この検証には作業時間を考慮する必要がある。

表１１小菊カボチャペーストの製法別収量比較

	原料重（g）	ペースト収量（g）	収率（%）
オートマチックシノア	2,989	1,927	64
フードプロセッサ（３個体合計）	1,757	1,085	62

４．結言

供試した地域在来作物の中ではアザミゴボウの抗酸化能が最も高く、葉物野菜も高い値を示した。また、抗酸化能と総ポリフェノール含量は高い正の相関を持つことが分かった。

また、在来品種と一般的に流通している品種で抗酸化能、糖・遊離アミノ酸組成を比較したが、個体差や年次間差が大きく、明確な差異を見出すことはできなかった。

加工品に関しては、抗酸化能の最も高かったアザミゴボウを粉末に一次加工する際は、乾燥前にブランチングすることで二次加工品の抗酸化能の損失を抑制し、褐変を防いで色調を保持できることが明らかとなった。

また、慶徳タマネギは外皮が高い機能性を持ち、その抽出液を使用することで抗酸化能を付与した加工品を開発できることが分かった。

その他、慶徳タマネギの可食部のペーストを使用したフリーズドライ味噌汁では若干の抗酸化能の増加が確認できたことや小菊カボチャペースト作製に当たってはオートマチックシノアによる作業効率の向上への可能性が残されるなどの成果が得られた。

参考文献

１）山口智子, 原初枝, 西本登志, 的場輝佳,高村仁知. 大和野菜の一般成分および抗酸化力の評価. 日本調理科学会誌. 2012, vol.45, p.197-203.

２）菊崎泰枝. “食品の抗酸化力統一指標を用いた野菜の抗酸化力の評価と食事管理への活用に関する研究”. 科学研究費助成事業データベース. https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-23300270/, (参照 2016-04-04).

３）渡辺純, 沖智之, 竹林純, 山崎光司,津志田藤二郎. 抗酸化能測定法である H-ORAC 法の室間共同試験. 日本食品科学工学会誌. 2010, vol.57, no.12, p.525-531.

ＵＶ漆製品への蒔絵技術の確立

Establishment of MAKIE lacquer technique for the UV lacquer products

会津若松技術支援センター　産業工芸科　原朋弥　堀内芳明　須藤靖典
応募企業　株式会社ユーアイヅ

福島県有特許である「特許第 3833202 号 光重合性インキ組成物及びその乾燥方法」を活用し、代用粉や金属粉、金属箔で加飾した後に密着性評価（クロスカット法（JIS K 5600 5-6））を行った。その結果、ウレタン塗膜に対しては代用粉と金属粉を用いた場合に「分類０」を達成することができた。また、ＵＶ漆塗膜に対しては代用粉を用いた場合にのみ「分類０」を達成することができた。

Key words: ＵＶ漆[注1)]、光重合性インキ[注2)]

１．緒言

伝統的な蒔絵の技法では、刷毛や筆を用いて漆で図柄を描いた後、室（ムロ）と呼ばれる乾燥室で温度と湿度を加えて漆を一時的に乾燥させる。粉蒔きや箔貼りを行うために漆の適切な乾燥状態を作り、粉、箔を蒔き付ける。その後、蒔き付けた粉や箔を固着させるため、再度、室に入れ乾燥させる。粉蒔きや箔貼りを行うために適切な乾燥状態を官能的に判断することは熟練を要する作業である。

一方で、福島県有特許である「特許第 3833202 号 光重合性インキ組成物及びその乾燥方法」を活用した光重合性インキは、紫外線の照射で硬化することから、指で触れて乾燥状態を確認するなどの官能的な判断が不要になると同時に、乾燥時間の大幅な短縮を行うことができる。光重合性インキは伝統的な蒔絵の技法を工業的に再現するために開発されたインキである。

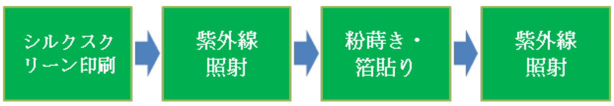


図１　光重合性インキの加飾工程

このインキを用いて図１に示す工程により、シルクスクリーン印刷で図柄を印刷し、その後、紫外線を照射することで粉蒔きや箔貼りに適切な乾燥状態にすることができる。また、粉蒔き、箔貼りを行った後に再度、紫外線を照射することで光重合性インキが硬化し、さらに粉や箔を固着させることができる。

本研究では、ＵＶ漆製品の加飾工程に光重合性インキを活用することで、現在製造販売するＵＶ漆製品のブランド力向上と市場拡大を目指し、量産化するための基礎データ収集として粉蒔き、箔貼り後の密着性評価を行ったので報告する。

２．実験方法

２．１．試験板の作製

ＵＶ漆製品の加飾工程としては、ウレタン塗膜の上に加飾を行い、ＵＶ漆を塗布する場合（図２）と、ＵＶ漆塗膜の上に加飾を行う場合（図３）の２つの工程が想定される。

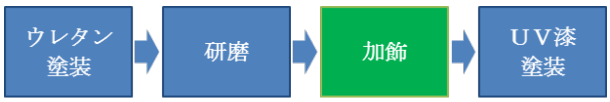


図２　ウレタン塗膜への加飾工程

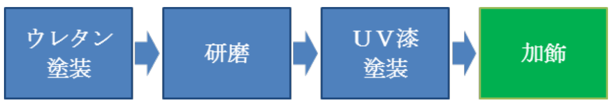


図３　ＵＶ塗膜への加飾工程

ウレタン塗膜への加飾を想定した試験板の作製工程は表１の通りである。また、ＵＶ漆塗膜への加飾を想定した試験板の作製工程は表２の通りである。加飾の際に蒔き付ける粉として、代用粉（エルジーneo [注3)] SILVER #100、325、500、RED #325、BLUE #325（尾池工業（株））と金属粉（金粉、銀粉、錫粉）、箔としては各種金属箔（金箔、銀箔、銅箔、アルミ箔）を用いた。

表１　試験板作製工程（ウレタン塗膜に加飾）

下地	アクリル板
工程　1	ウレタン（ブラック）
工程　2	研磨（#800）
工程　3	シルクスクリーン印刷 （光重合性インキ）
工程　4	粉蒔き・箔貼り

事業課題名「UV 漆製品への加飾技術の確立」

表２　試験板作製工程（ＵＶ漆塗膜に加飾）

下地	アクリル板
工程 1	ウレタン（ブラック）
工程 2	研磨（#800）
工程 3	UV漆（クリヤー）
工程 4	シルクスクリーン印刷 （光重合性インキ）
工程 5	粉蒔き・箔貼り

２．２．評価方法

それぞれの試験板に対して、密着性評価を行った。密着性評価にはクロスカット法（JIS K 5600 5-6）を用いた。本研究ではカットの間隔は 2mm とした。

３．結果

３．１．ウレタン塗膜への密着性評価結果

図２の工程で作製したウレタン塗膜へ加飾を行った各試験板の密着性評価後の写真と判定結果は図４の通りである。

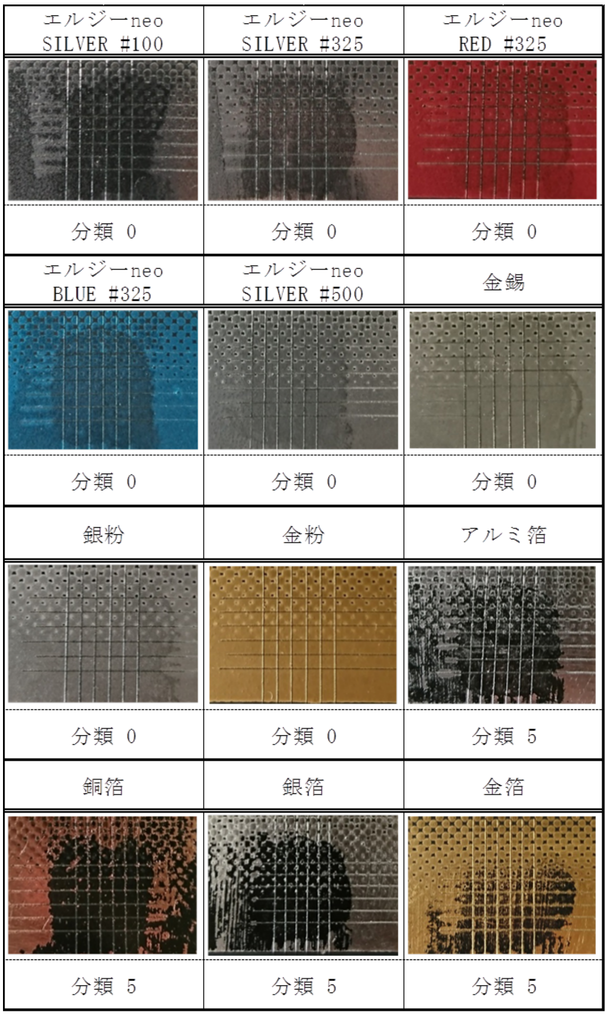


図４　密着性評価結果（ウレタン塗膜に加飾）

ウレタン塗膜に対する密着性評価結果では代用粉と金属粉で「分類０」という結果が得られた。金属箔ではいずれも「分類５」という結果であり、密着性は確認できなかった。

３．２．ＵＶ漆塗膜への密着性評価結果

図３の工程で作製したＵＶ漆塗膜へ加飾を行った各試験板の密着性評価後の写真と判定結果は図５の通りである。

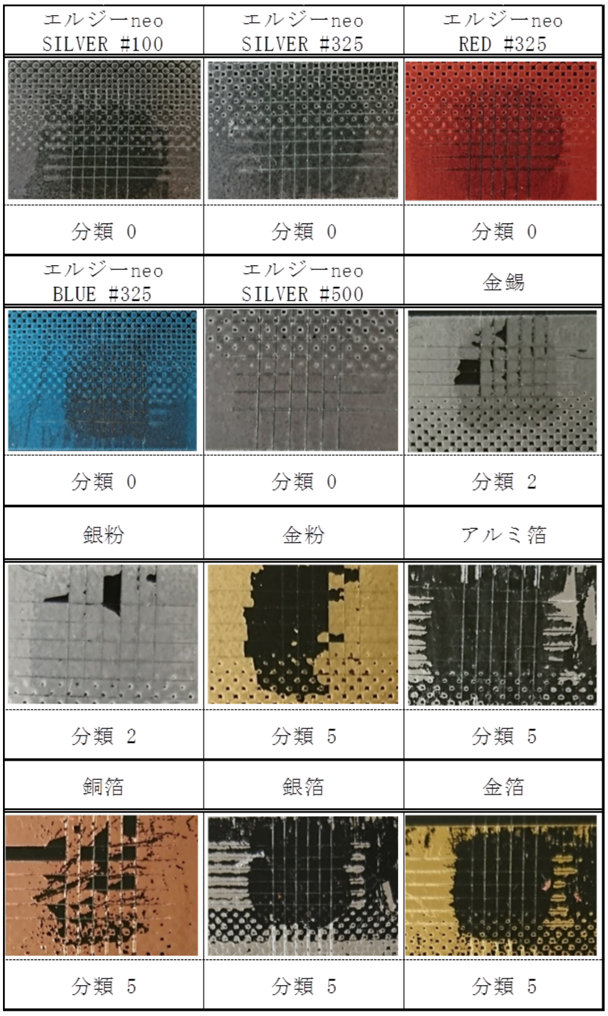


図５　密着性評価結果（ＵＶ漆塗膜に加飾）

ＵＶ漆塗膜に対しては、ウレタン塗膜同様に代用粉で「分類０」という結果が得られた。しかし、金属粉では錫粉と銀粉で「分類２」、金粉で「分類５」という結果になった。金属箔ではいずれの試験板で「分類５」の判定であり、ウレタン塗膜への加飾と同様に密着性は確認できなかった。

３．３．加飾後の塗膜表面観察

加飾後の各試験板表面をデジタルマイクロスコープ（KH-7700　（株）ハイラックス）で観察を行った。ウレタン塗膜へ加飾した各試験板表面の観察結果は図６

の通りである。また、ＵＶ漆塗膜へ加飾した各試験板表面の観察結果は図７の通りである。

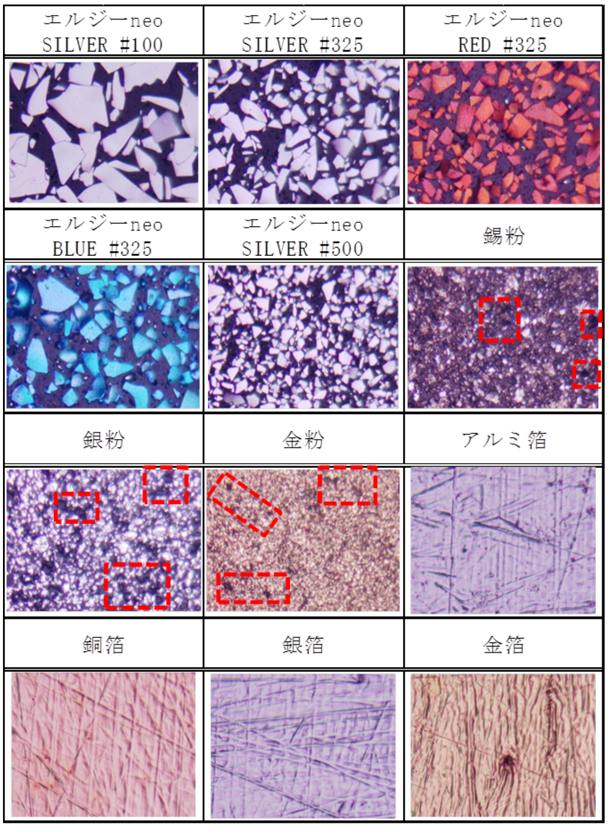


図６　加飾後の塗膜表面（ウレタン塗膜）

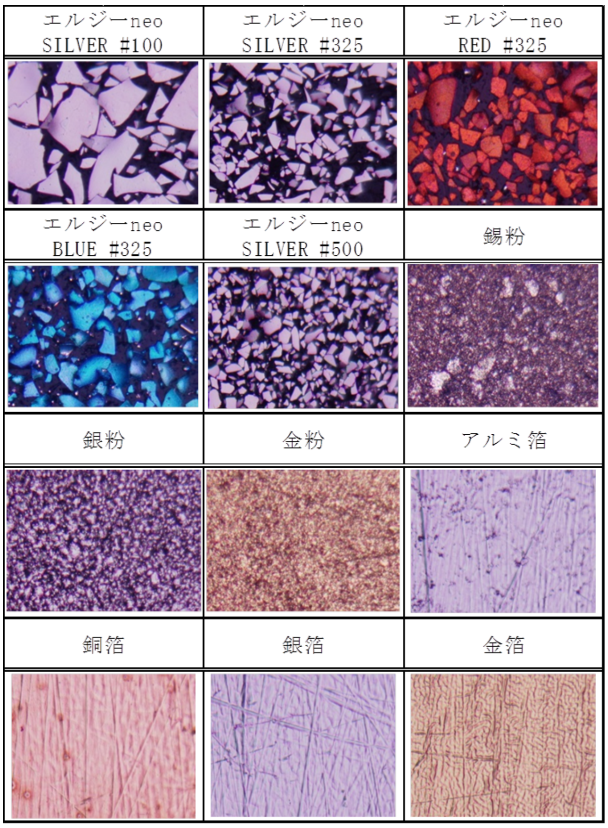


図７　加飾後の塗膜表面（ＵＶ漆）

代用粉を蒔いた各試験板では粉と粉の間に間隙（黒色部分）が観察された。また、ウレタン塗膜へ金属粉を蒔いた場合でも間隙（赤い点線で囲われた部分）が観察された。これらの試験板は密着性評価で「分類０」であったことから、間隙が有ることで、２回目に照射した紫外線が粉と粉の間を通過し、光重合性インキを硬化させ、粉を固着させることができたと考えられる。

ＵＶ漆塗膜に対して金属粉で加飾した各試験板では、粉と粉の間に間隙が観察できなかった。間隙が無いことで２回目に照射された紫外線が光重合性インキまで到達せず、光重合性インキが硬化しなかったため、粉を固着できなかったと考えられる。金属箔で加飾した試験板の密着性評価が「分類５」という結果になったのも同様であり、箔には紫外線を通過させる間隙が無いことから、光重合性インキが硬化せず、密着性が無かったと推察できる。

４．結言

本研究では、ＵＶ漆製品の加飾工程に光重合性インキを活用し、量産化するための基礎データ収集を目的とした。代用粉を用いることでウレタン塗膜、ＵＶ漆塗膜いずれにおいてもクロスカット法における判定基準として「分類０」を達成することができた。また、ウレタン塗膜への加飾であれば研磨することで金属粉でも「分類０」を達成することができた。光重合性インキを用いる場合の密着性は、下地の状態や蒔き付ける粉のサイズに影響されることが分かった。

用語解説

注１）漆と紫外線硬化樹脂を掛け合わせた塗料。
注２）漆と紫外線硬化樹脂を掛け合わせたインキ。
注３）高輝度なメタリックパウダー。代用粉。

着用性に優れたシルクデニット編地の開発

Research of silk knit-de-knit fabric with excellent wearability

福島技術支援センター 繊維・材料科　東瀬慎　中村和由
福島県ファッション協同組合　三品清重郎
東北撚糸株式会社　佐藤源一

本研究では、福島ゆかりの原蚕種をベースに三種類の新品種を交配(一代交雑種)し、酸精練技術と、ハイテクプラザが保有するシルクデニット糸の加工技術[1) 2) 3) 4)]を組み合わせることで、新シルクデニット糸及びデニット編地の開発を行った。その結果、新シルクデニット編地は、衣服圧が小さく着用性に優れ、中でも新品種(支 122 号×青熟)は、現在主流の国産蚕種(春嶺×鐘月)に比べ、ソフト感と嵩高性に優れることが分かった。

Key words: シルク、デニット[注1)]、酸精練[注2)]

1．緒言

江戸から昭和期にかけては､福島県内で独自に交配、育成された数多くの蚕（明治３２年には２４４品種）が日本を代表する蚕品種として生産された経緯がある。隣県の繊維産地では、現在も独自の蚕品種を育成し、地域のブランドとなる絹繊維製品の製造や、その観光資源化を積極的に推し進めているが、福島産地にはかつてを代表する蚕品種は残存していない。そこで、本研究では、技術協力機関に冷蔵保管されている福島ゆかりの原蚕種をベースに､新しい蚕品種の交配(一代交雑種)に取り組み､さらに酸精練技術とハイテクプラザが保有するシルクデニット糸(以下デニット糸)の加工技術(特許申請済み)を組み合わせることで、新しいシルク加工糸及びそのシルクデニット編地(以下デニット編地)の開発を行った。本年度は、前年度の成果であるデニット糸の製造条件を活用し、下記の３項目の目標に取り組んだ。

目標①：デニット糸製造の基盤技術の確立と酸精練技術の導入
目標②：新規交配した福島ゆかりの蚕品種(三種類)と対照区に関する物性評価
目標③：②による製品試作と 3DCAD を活用した着用性(衣服圧)シミュレーション

2．試験方法

2．1．原料

表１の福島ゆかりの原蚕種をベースとした３種類の新品種(比較区)と１種の従来品種(対照区)を、表２の条件で繰糸し、表３の条件でデニット用絹加工糸を作製した。

表１　福島ゆかりの比較区(新品種)と対照区

品種	以下呼称	種別	生繭重 kg	生糸量 kg	糸歩
支 122 号×小石丸	小石	比較区	22.2	2.9	13%
支 122 号×青熟	青熟		25.7	3.4	13%
支 122 号×日 122 号	日支		25.8	4.3	17%
春嶺×鐘月	普通	対照区	15.7	2.8	18%

表２　繰糸条件

繰糸方法	繰糸繊度(d)	繰糸速度	煮繭
自動繰糸 小型自動繰糸機 (1 釜 10 枠)	27	低速繰糸 170～180 回転/分 (108m～115m/分)	真空式煮繭 時間約 20 分 最高温度約 96℃

表３　撚糸条件

原糸	中国産 21 中		国産生糸 27 中 3 片
撚数(t/m)	無撚	2800	1600
撚方向	–	Z	Z

2．2．加工条件

次に、表４の条件でデニット用リリヤーン加工糸を作製し、表５の条件で精練加工及び表６のマイクロ波加熱を行った後､表７の条件でデニット糸を作製した。

表４　リリヤーン糸作製条件

装置名	新ブレーダーマシーン((株)小塚コーポレーション製 KT-8)	
新ブレーダーマシーン	スピンドル回転数(Hz)	2000
	巻取速度(Hz)	1.5～5.0
	針本数(本)	8、16

表５　各種精練条件

	試薬	界面活性剤	浴比	精練温度	精練時間
アルカリ精練	炭酸ナトリウム(和光純薬工業株式会社)5%owf	スコアロール 700(北広ケミカル株式会社) 0.1g/L	1：50	90℃	0.5H
酸精練	クエン酸(和光純薬工業株式会社)30～100%owf		1：30～100	95℃	0.5～1.0H
酵素精練	キヌコン(洛東化成(株))6g/l		1：50	55℃	12H

表６　マイクロ波加熱条件

装置名	(株) 松下電器産業製業務用電子レンジ(NE-1900S)
マイクロ波加熱装置	1900W

表７　デニット条件

解編本数(本)	3～7
解編装置	六つ穴ガイド(ヤーンテンション装置)
判別センサー	レーザー判別変位センサー ((株)キーエンス製透過型デジタルレーザセンサ IG-010)
巻取速度(m/H)	500～1100

事業課題名「国産シルクを活用した新シルクデニット糸に関する研究開発」
（一般財団法人大日本蚕糸会　貞明皇后蚕糸記念科学技術研究助成事業）

２．３．評価方法

さらに、デニット糸の物性及び機能性評価を表８、またデニット編地の編成を表９の条件で行った。

表８　物性評価及び機能性評価条件

	測定機器	測定条件
強伸度測定	(株)島津製作所製万能抗張力試験機 AGS-10kNG	掴み間隔 200mm、引張速度 100mm/min、n=3
色差測定	日本電色工業(株)製 NF-999	光源：ハロゲンランプ 照明条件：D65、n=4 白度式：JIS L 1916：2000
風合い測定	(株)カトーテック製風合い試験機 KES-FB1-AUTO,FB2,FB3,G3	日本繊維機械学会　風合い計量と規格化研究委員会準拠
3D シミュレーション	(株)島精機製作所製 APEX3	3D シミュレーションソフト 3DModelist

表９　試作用編地の編成条件

装置名	ゲージ	組織	ループ長	ニット糸繊度	仕上	原料
FIRST183S12G (株)島精機製作所	12G	天竺	5.8mm	国産蚕品種 244d、絹紡糸 225d、練糸 230d	45℃洗い後乾燥処理	シルクデニット糸、練糸、絹紡糸

３．結果と考察

３．１．デニット糸製造の基盤技術の確立と酸精練技術の導入

３．１．１．絹無撚糸×絹強撚糸のデニット複合糸

従来の撚糸加工では、シルクの光沢感やしなやかさを優先すると、撚糸数を低く抑える必要がある。しかし、その後の編織加工、着用時後のメンテナンス等に配慮するあまり、光沢感、しなやかさを許容の範囲内で犠牲とせざるを得ない。このことが撚糸条件や風合い設定を難しいものにしている。そこで、デニット糸が図１に示す複数本のループに集束する特徴を活かし、従来の撚糸加工とは異なる、表１０に示す無撚糸と強撚糸を組み合わせたデニット複合糸を作製し、その物性と白度及び適正繊度の検討を行った。

表１０　構成糸と物性試験結果

	種別	試作糸①	試作糸②	試作糸③	試作糸④
構成糸（外国産使用）	無撚糸（本）	3	2	1	0
	強撚糸（本）	0	1	2	3
物性試験	破断強度(N)	4.7	3.3	4.2	4.5
	破断伸度(%)	115.2	64.3	60.4	72.3
	白度	71.8	71.1	69.4	65.9

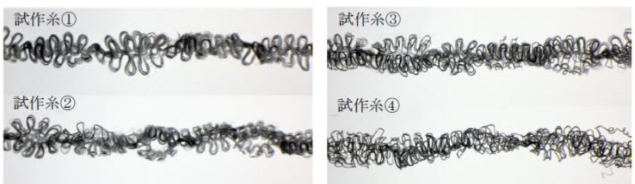


図１　デニット複合糸の側面図

結果①：試作糸②③は試作糸①④に対し、破断強度は最大３割、破断伸度は最大５割の低下を示した。白度は複合化する無撚糸の本数と共に増加傾向にあり、無撚糸なしの試作糸④は最も低い値を示した。

結果②：一般に絹糸の場合、強撚糸は無撚糸に比べ撚り縮を起因とする伸度に優れるが、試作糸①は試作糸④に対し破断伸度が４割増加を示した。その理由として無撚糸は精練後の撚り縮がほぼ無いため、デニット後に大きく折りたたまれたクリンプが、撚糸に依存しない新たな伸縮構造を発現していると推察される。

結果③：表１１から、デニット糸は構成糸と解編本数の選択により、太いニット糸(3G)から細いニット糸(21G)に対応した繊度の調整が可能と言える。また作製されたデニット複合糸は、無撚糸(光沢感、しなやかさ)と、強撚糸(シャリ感、コシ感)の長所を併せ持つ。

表１１　デニット糸の繊度範囲

		シルクデニット糸繊度(d)				
構成糸 21 中(本)		1	2	3	4	5
解編本数(本)	3	95	142	189	236	284
	5	158	236	315	394	473
	7	221	331	441	551	662

３．１．２．巻取速度を改善する解編治具の見直し

解編治具(ガイド)は、糸コブを解消し安定した巻取りを実現するための重要なガイドである。解編速度を向上させるため、これまでの固定ガイド径を見直し、デニット後の糸径に適合した、表１２及び図２に示す解編ガイドを作製し、巻取り速度の改善を検討した。

結果①：固定ガイドを表１２検討①に示す、デニット糸径の２倍サイズ（１６本時は 1.6㎜、８本時は 0.8㎜)へ変更した結果、糸コブ発生を大幅に抑制できることが分った。ただし巻取り速度は最大でも 500～600m/h 前後が限界域となった。

表１２　解編ガイドの見直し

	従来		検討①		検討②	
巻取荷重(g/d)	≦破断荷重 2g/d×0.8					
解編本数(本)27 中×3 片	3	5	3	5	3	5
デニット繊度(d)	243	405	243	405	243	405
固定ガイド径(㎜)	3	3			3	3
検討ガイド径(㎜)			0.8	1.6	0.8	1.6
連続運転	×		△		○	
巻取速度(m/h)	≦400		≦600		≦1100	

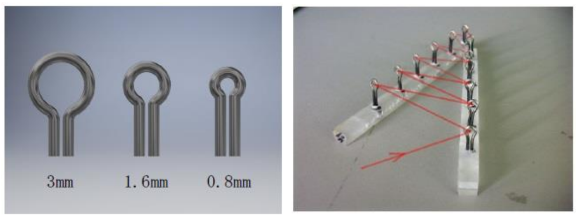


図２　解編冶具の比較検討

結果②：表１２検討①に示す固定ガイドを前段に、表１２検討②のガイドを後段に取り付け、段階的にデニットした場合は、最大 1100m/h(巻取速度 Hz を 5～17Hz)まで高速化できることが分った。

３．１．３．酸精練の特性とマイクロ波による処理時間の短縮化

常圧酸精練の溶液濃度と精練率、及び処理時間の関係を検証し、次に表６の条件でマイクロ波(2.4GHz)を熱源とした精練処理の時間短縮化を検討した。

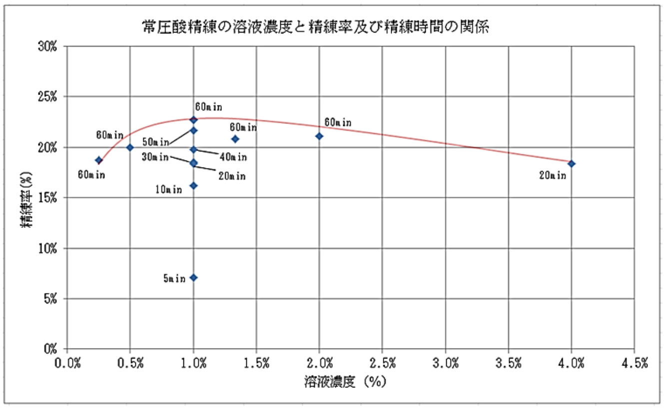


図３　常圧酸精練の精練特性

結果①：図３より常圧酸精練時のクエン酸濃度は1.0%(50%owf、浴比 50:1)で精練率のピークを示し、

常圧酸精練（溶液濃度 1.0%)は約 40 分で 80%、約60 分で 95%の精練が完了できる。

結果②：従来方法の酸精練は、密閉容器内で 120～130℃に上昇するのに対し、常圧酸精練は 95℃前後で作用する結果、微量のセリシンが残留し過精練に至らない利点があるため、適度な腰、ハリ、弾性を残すことができる精練方法と考えられる。

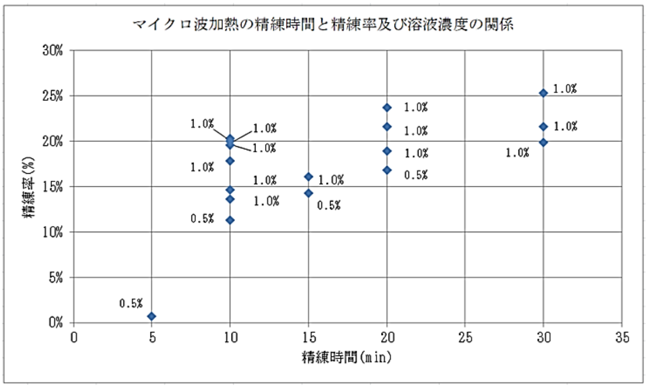


図４　マイクロ波加熱による処理時間の短縮

結果③：図４に示すマクロ波加熱を用いた常圧酸精練（溶液濃度 1.0%)は約 10 分で 75%､約 20 分で 99%の精練が完了でき、従来の湯浴による常圧酸精練に比べ､精練処理時間を 1/3 に短縮することが可能である。デニット糸の場合、実用可能な精練率を 20%とすると、マクロ波加熱により約 15 分で精練が完了できる。以上のことから､マイクロ波加熱は従来の間接加熱に比べ､内部、均一加熱と応答速度、熱効率に優れ、化石燃料を使わないクリーンなエネルギーとして優位性があると考えられる。

３．２．福島ゆかりの蚕品種（３種）と対照区に関する物性評価

３．２．１．比較品種と対照区におけるデニット糸物性評価

表４の条件でリリヤーン加工を行い、表５の条件で精練加工を行った後、表８の評価方法で物性評価を行った。評価結果を図５、６に示す。

結果①：青熟は他品種に比べ、アルカリ、酸、酵素すべての試薬に対し、低い精練率を示した。これはフィブロインに隣接した難溶性セリシンの含有量が多いためと推測される。

結果②：常圧酸精練は、アルカリ精練法に比べ精練率が 10%以上低下するが、酵素法とほぼ同程度の精練率を示した。

結果③：常圧酸精練法は、アルカリ、酵素法に比べ精練後の糸の収縮（酸縮）が大きく、デニット糸としては、捲縮性の発現に有利と推察される。

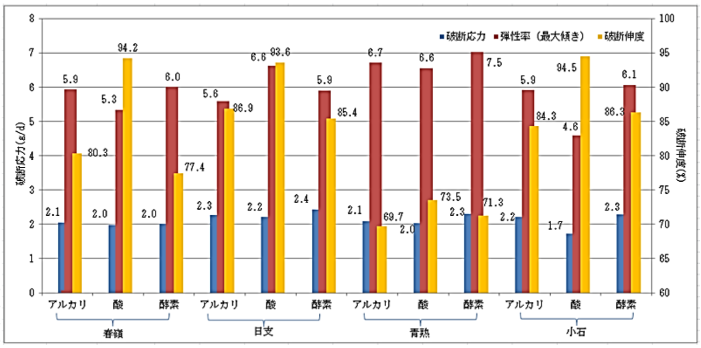


図５　各種精練別の物性評価結果

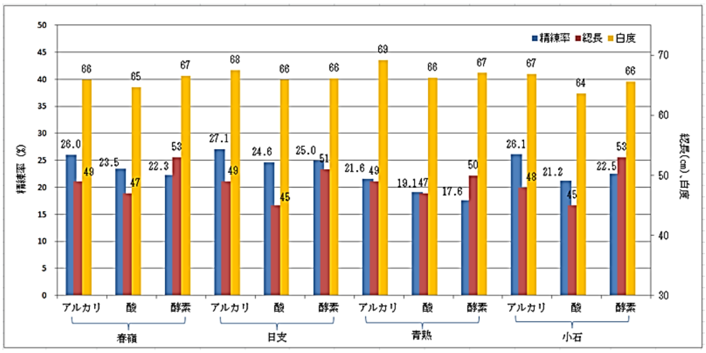


図６　各種精練別の精練率、綛長、白度の結果

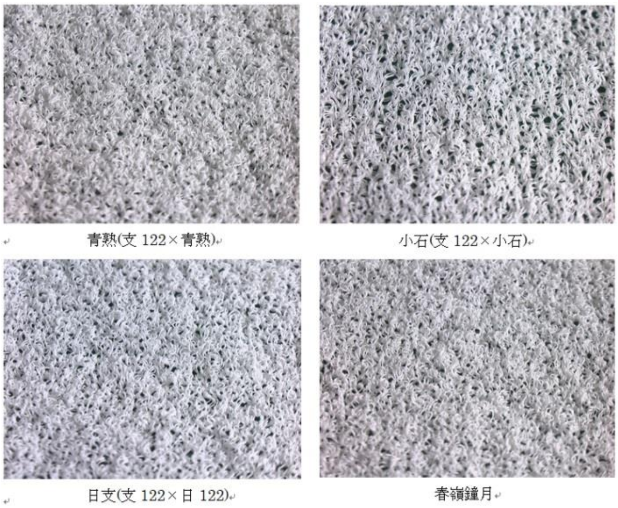


図７　デニット編地

３．２．２．デニット編地の圧縮試験結果

表９に示す条件で、図７、８に示すデニット編地を編成し、表８の計測装置で KES 風合い試験(圧縮試験)を行った結果を表１３に示す。

表１３　KES 風合い試験(圧縮試験)結果

	LC	WC	RC	TO	TM	WC/TO	(TO-TM)/TO
青熟	0.415	1.293	50.470	1.971	0.709	0.656	0.640
普通	0.402	1.155	46.337	2.134	0.984	0.541	0.539
日支	0.412	1.128	45.490	2.101	1.004	0.537	0.522
小石	0.430	0.978	39.100	1.899	0.988	0.515	0.480
絹紡	0.391	0.566	47.657	1.103	0.493	0.513	0.553
練糸	0.416	0.514	49.413	1.050	0.491	0.490	0.532

LC:値が小さいほど編地の圧縮初期特性が柔らかい
WC:値が大きいほど編地にソフト感、嵩高性がある
RC:値が大きいほど荷重除去後の回復性が良い
TO:値が大きいほど編地に厚みがある
TM:値が大きいほど編地が潰れ難い
WC/TO:単位厚み当たりの圧縮仕事量、値が大きいほどソフト感、嵩高性に優れる
(TO-TM)/TO:単位厚み当たりの圧縮率、値が大きいほどふんわり感が高い

結果①：表１３より TO 値を比較すると、同じ繊度、編成条件の天竺組織であっても､デニット編地は練糸、絹紡糸の編地に比べ約 1.9 倍の厚みを示した。

結果②：TM 値を比較すると、デニット編地は練糸、絹紡糸の編地に比べ厚み方向に潰れ難く、中でも青熟が練糸、絹紡糸に比べ約３割良好な結果を示した。

結果③：WC/TO 値を比較すると、青熟が最も高く、ソフト感、嵩高性に優れる結果を示した。(TO-TM)/TO 値で比較した場合でも、青熟は最もソフト感とバルキー性に優れる傾向を示した。

図８　デニット編地(最上段)と従来編地

３．３．製品試作と 3DCAD を活用した着用性(衣服圧)シミュレーション

３．３．１．3D シミュレーション(衣服圧)結果

表１４の標準ボディに、表１５、１６のシミュレーション用編成条件、物性条件を適用させた際の衣服圧のシミュレーション結果を図９に示す。図９のカラーチャートは着用時の衣服圧(着圧) を示し、赤味が多いほど衣服圧(着圧)が高いことを表している。

表１４　標準ボディ

	身長	バスト	ウェスト	ヒップ
標準ボディ体型(cm)	162	83	64	92

表１５　シミュレーション編成条件

	素材	組織
シルクデニット編地	シルクデニット糸(青熟)	2×2 リブ
比較編地(丸編地)	コットン 100%	1×1 リブ

表１６　シミュレーション物性条件

	伸度(50g/cm)EMT(%) WARP	伸度(50g/cm)EMT(%) WEFT	曲げ硬さ B(曲率 1)	目付(g/㎡)	生地厚(mm)
シルクデニット編地	81.9	382.4	0.020	188	1.5
比較編地(丸編地)	12.1	63.1	0.064	165	1.1

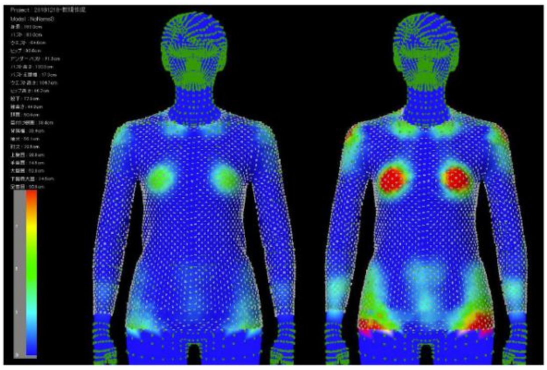


図９　シミュレーション結果
(左：デニット編地、右：綿 100%比較編地)

結果①：図９左側のデニット編地と右側の比較編地について、肩、バスト、ウェスト付近に発生する衣服圧(着圧) を比較すると、デニット編地は比較編地に対して全体的に低い値を示すことから、型崩れ無くボディにフィットし、ソフトで伸縮性に優れた着用性を示すことがシミュレーション結果から予想された。

３．３．２．製品試作

図７、８に示すデニット編地は天竺柄でリンクス柄(梨地)の表面凹凸が再現でき、かつ軽量性とソフト感に優れたニット製品(図１０)の実現を示唆している。

図１０　デニット編地の製品試作(ストール)

４．結言

本研究により福島ゆかりの新品種を原料としたデニット糸の製造技術を確立した。また開発したデニット糸の３品種の中では、特に「青熟×支 122」が従来品種「春嶺×鐘月」に比べ、軽さと嵩高性に優れた着用特性を示すことが分った。

今後は県内企業へ本技術の技術移転を進め、ニット製品に限らず織物製品へも展開できる加工技術と、製品化へ向けた技術支援を進めて行く。

謝辞

本研究を進めるにあたり、一般財団法人大日本蚕糸会蚕糸科学研究所長の清水重人氏、研究員の花之内智彦氏、同じく蚕業技術研究所長の新保博氏、及び(株)宮坂製糸所専務の高橋耕一氏にご助言と技術協力を頂きましたことに深く感謝の意を表します。

参考文献

１）嵩高加工糸およびその製造方法(特開 2005-336653)
２）ニットデニット糸の製造方法(特開 2001-098433)
３）捲縮糸の製造法(特開昭 52-148250)
４）異色杢調ニットデニット糸の製造方法(特開昭 49-132349)

用語解説

注１）編地を編成した後、逆工程で編み解いた糸。
注２）蚕糸科学研究所が保有する、有機酸を用いたセリシンを除去する精練方法。歩練り調整、セリシンの均一除去、白度等がアルカリ精練に比べ優れている。

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１報）

Development of automatic defect detection technology for polishing finish part in welding (1st Report)

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

企業から提供された試験片の分析・計測によって、検出する必要がある欠陥を直径 50μm 以上、かつ、10°以上の角度を有する窪みと定義した。検出能力を検証するために三次元微細レーザ加工装置を用いて直径約 50μm、傾き約 14°の疑似欠陥を試作した。欠陥を自動検出するために、画像探傷装置を導入して検出実験を行い、試作した疑似欠陥を自動検出できると考えられるグレースケール値を得た。

Key words: 溶接、研磨仕上げ、目視検査、欠陥検出、マシンビジョン

１．緒言

ステンレス鋼板を溶接してから研磨仕上げした部分に残存する欠陥を、目視で検出する目視検査には特殊な技能が必要である。しかし、最近の少子高齢化に伴い、目視検査のための人材の確保が困難となり、製造現場での大きな問題になっている。そこで、人による検査よりも高速で見落としがない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。

はじめに、欠陥の成因や形態を解析するために、X 線マイクロアナライザを有する走査型電子顕微鏡を用いて、共同研究企業が提供した試験片上の欠陥の観察と分析を行った。同様に、レーザ顕微鏡を用いて、欠陥の断面プロファイルを測定した。それらの結果から、検出する必要がある欠陥を定義づけた。

次に、検出能力を検証する実験で使用するために、微細加工用のレーザ加工装置を用いて疑似欠陥を試作した。疑似欠陥の試作は、検出する必要がある欠陥の定義に従って行った。

そして、疑似欠陥の検出実験を行うために、マシンビジョンを活用した画像探傷装置を導入した。画像探傷装置を用いて、試料の傾きに対する画像探傷装置の特性を検証した。その後に検出実験を行い、試作した疑似欠陥とその周辺の健全な研磨仕上げ部とのグレースケール値を比較した。

２．実験と結果

２．１．欠陥の成因と形態

提供された試験片は、目視検査によって欠陥の存在が指摘されたものである。電子顕微鏡で観察と分析を行った結果、欠陥は図１に示すように、比較的に表面が滑らかな楕円状の窪み、または、図２に示すように、表面に凹凸がある窪みの２種類の窪みであることが分かった。

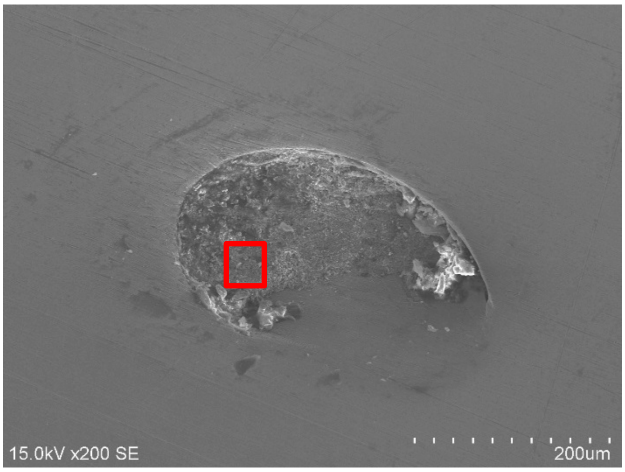


図１　楕円状の窪みの例と分析箇所（赤枠）

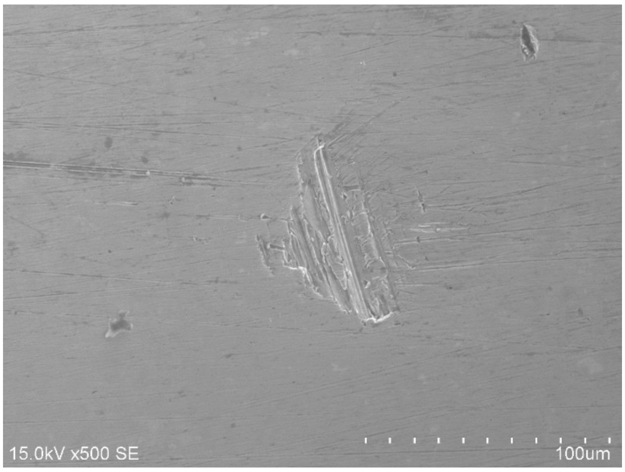


図２　表面に凹凸がある窪みの例

図３の分析結果に示すように、図１の分析箇所からは Al が検出された。Al は研磨工程で使用されている研磨剤に含まれている。提供された試験片は実製品と同じように、①仮付け溶接、②修正、③本溶接、④研磨、の各工程が順に行われているので、検出された Al は研磨剤が残存したものと考えられる。よって、楕円

事業課題名「溶接における研磨仕上げ部の自動欠陥検出技術」
（公益財団法人 JKA 公設工業試験研究所等が主体的に取組む共同研究補助事業）

状の窪みは、研磨工程で表面の一部が除去されることによって、仮づけ溶接または本溶接時に発生したブローホールが露出したものと考えられる。

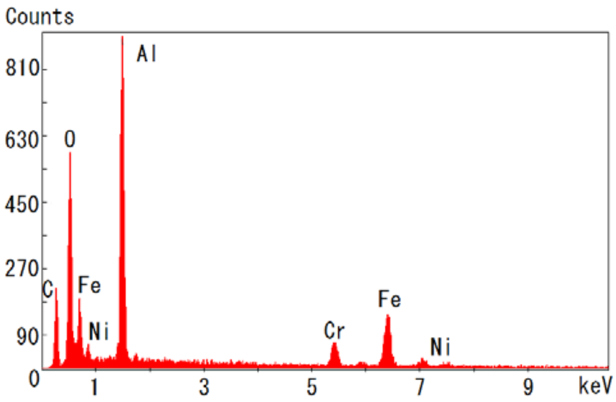


図３　楕円状の窪みの分析結果

それに対して、表面に凹凸がある窪みには丸みを帯びた部分は少ない。仮付け溶接の工程では目違いが発生することがあるので、そのために修正工程がある。修正工程では金属製のハンマを用いて溶接線やその周辺に打撃が加えられるために、凹凸がある打痕が形成される。仕上げとして行われる研磨には、粒径が小さな研磨材が含まれる研磨剤が用いられる。一般的に、研磨材の粒径が小さくなるほど､切削能力も低下する。そのために、凹凸を取り除いて平滑にすることができずに、打痕が欠陥として残存したものと考えられる。

２．２．欠陥の断面の寸法形状と定義づけ

図４の例に示すように、レーザ顕微鏡を用いて欠陥の断面の寸法形状を測定した。測定は、直交する２つの断面について行った。

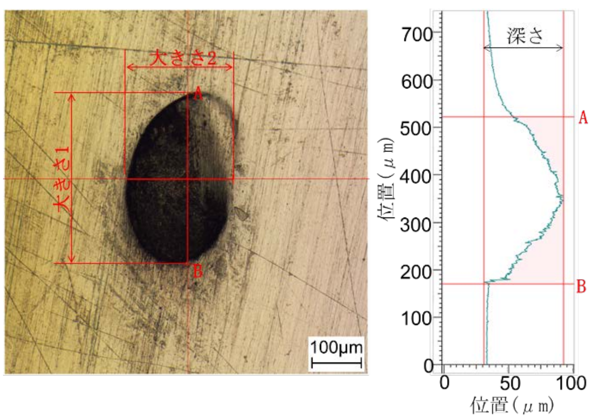


図４　欠陥の大きさと深さの測定例

分析や測定の結果から、検出する必要があると判断した欠陥を選定して、大きさと深さを求めた。その結果を図５に示す。

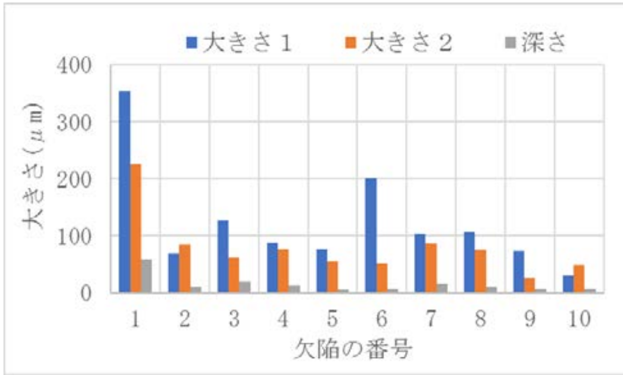


図５　欠陥の大きさと深さ

欠陥の断面は曲率や凹凸がある複雑な形状を示す場合がある。しかし、欠陥は研磨面に対して深さがある窪みであり、生産の現場では大きさ（その欠陥の最大値）と深さのみで捉えられることも多い。三角形は大きさと深さで表すことができる。そこで、三角形の断面を有する円錐状の窪みとして、欠陥を抽象化することができると考えた。これによって、図６に示すように、表面に対する欠陥の傾きとして、２つの等しい角度を求めることもできる。マシンビジョンの活用において、傾きは光の変化要因である伝搬方向に大きな影響を与える重要な要素である。図５において、最も小さな欠陥の大きさは約 50μｍであることが分かった。また、大きさと深さから求めた最も小さな角度は約 10°であることが分かった。以上の結果より、検出する必要がある欠陥を直径が 50μｍ以上で 10°以上の角度を有する円錐状の窪みと定義した。

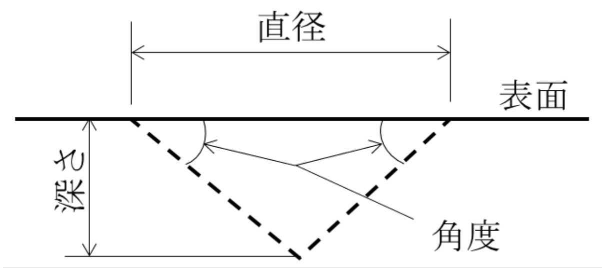


図６　欠陥の断面形状

２．３．疑似欠陥の試作

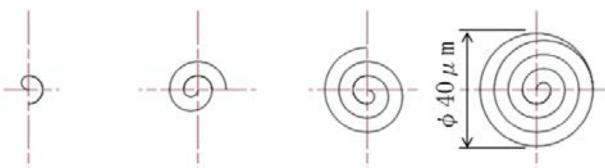
疑似欠陥の試作は、図７に外観と表１に主な仕様を示す三次元微細レーザ加工装置を用いて、研磨仕上げされた試験片の表面に行った。目標とした疑似欠陥の形状は定義された欠陥としては直径と角度が最小で、最も検出が難しいと考えられる､直径 50μｍ､角度 10°の円錐状の窪みとした。

図７　三次元微細レーザ加工装置の外観

表１　三次元微細レーザ加工装置の主な仕様

レーザ波長　(nm)	532
出　力　(W)	200
パルス幅　(ps)	15
ビーム品質	M^2＜1.3
最大加工サイズ　(mm)	200×200

試作に用いた加工パスを図８に示す。加工パスは半円を組み合わせて、間隔を５μｍにした渦巻き状である。試作は各パスの中心を開始点として、１から４の順に各パスを１回ずつ重ねることで行った。レーザ加工装置の主な加工条件は表２に示す。



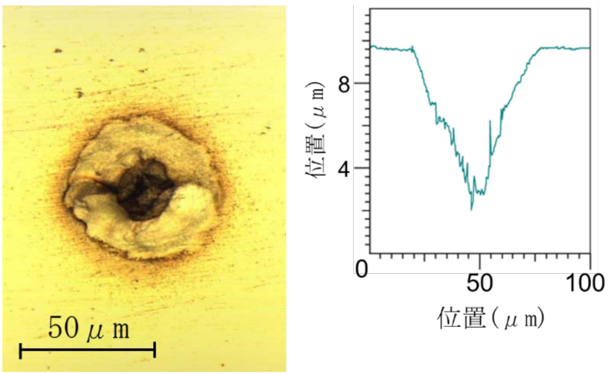
（パス１）　（パス２）　（パス３）　（パス４）

図８　加工パス

表２　主な加工条件

設定出力　(%)	4
加工速度　(mm/sec)	100
周波数　(kHz)	200
焦点位置	試験片の表面

試作した疑似欠陥の外観と断面形状を図９に示す。今回の試作によって、直径約 50μｍで約 14°の角度を有する疑似欠陥を作製することができた。



（外観）　（断面形状）

図９　試作した疑似欠陥

２．４．検出実験

２．４．１．画像探傷装置

図１０に画像探傷装置を示す。

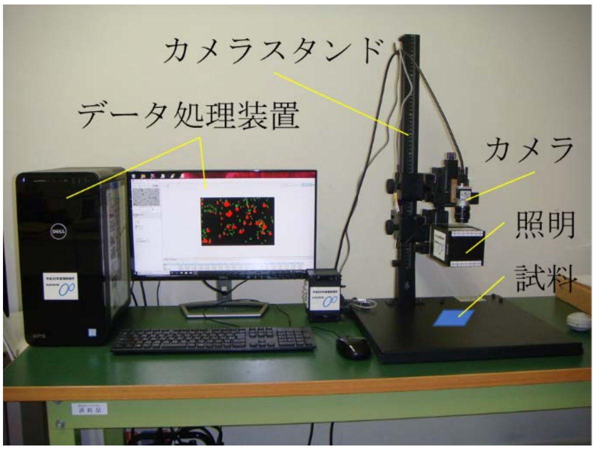


図１０　画像探傷装置

カメラは 20mm×30mm の長方形の視野を有し、画素ごとにビット深度８ビットのグレースケール値を出力することによって、データ処理装置にモノクロの画像を表示することができる。分解能は 0.1mm あたり４画素である。照明を設置するために、カメラに装着されているレンズの先端と試料との距離は約 190mm である。データ処理装置は LabVIEW と画像解析用モジュールによって、画像認識及び画像計測機能を有する。特にマシンビジョンで重要な役割を担う照明には、カメラとの位置を正確に設定するために、同軸照明を用いた。また、欠陥と研磨部分とのコントラストを強調するために、波長の短い青色の光に比べて表面が滑らかに見える赤色の光（ピーク発光波長 630nm）を用いている。

研磨仕上げされたステンレス鋼の表面は粗さも細かくて鏡に近い状態なので、強さや方向を保存した状態で光を反射する。健全な研磨面からの反射光がカメラに入射した場合には明るい画像が得られ、画素ごとのグレースケール値も大きくなる。しかし、反射する光

の方向は試料の傾きに伴って変わるので、試料の傾きによっては反射光がカメラに入射せず、グレースケール値も低下して暗い画像になる。画像探傷装置はこれらの性質を利用することによって、角度（傾き）を有する欠陥を、グレースケール値が小さい点の集まりとして表示することができる。そこで、試料の角度とグレースケール値との関係を明確にして、画像探傷装置の特性を検証することが重要になる。

２．４．２．傾きに対する画像探傷装置の特性

カメラ・照明・ミラーは図１１に示すように、同軸となるように配置されている。また、ゴニオステージの回転軸をミラー表面の中央に設けることで、ミラーを傾けても中心の高さは変動しない。ミラーの表面が、カメラと照明の軸に対して直角な場合の傾きを0°とした。

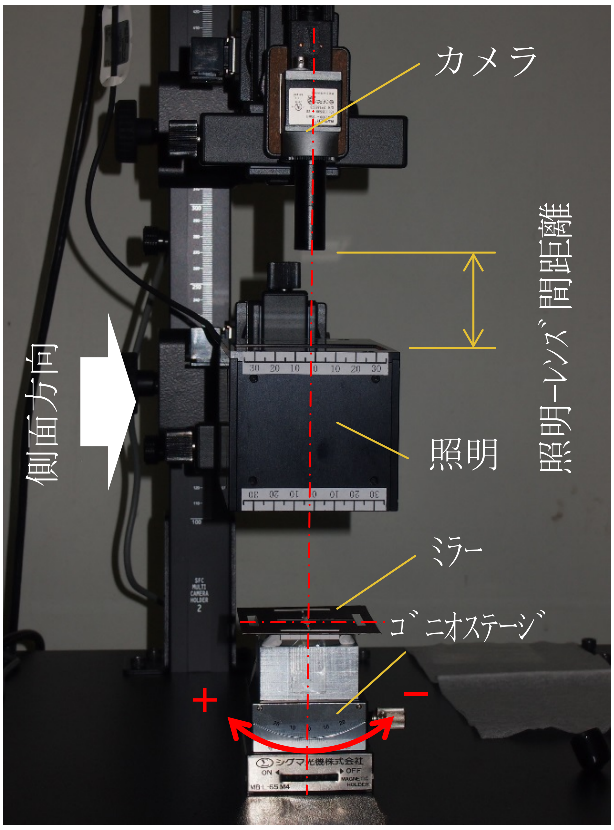


図１１　検出できる傾きの測定（正面方向）

このようにして、ミラーの傾きごとに、ミラーの中央に相当する画素のグレースケール値を測定した。なお、あらかじめ、照明の光量はミラーの傾きが0°の状態で、グレースケール値が飽和しない範囲で最大の値をとるように調整した。また、照明－レンズ間距離を0mm、50mm、100mmとすることで、照明－レンズ間距離の影響も検証した。それらの結果を図１２に示す。

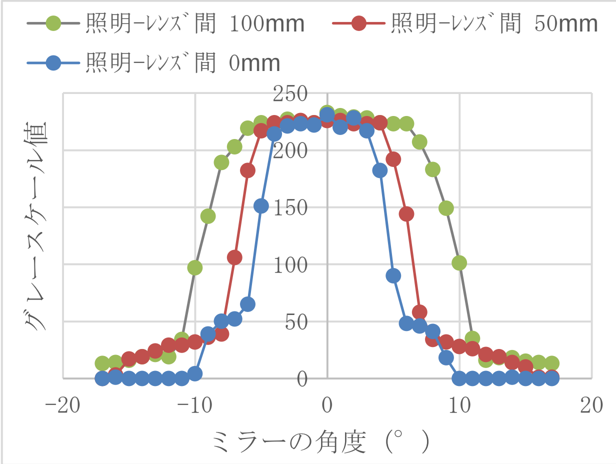


図１２　ミラーの傾きとグレースケール値（正面方向）

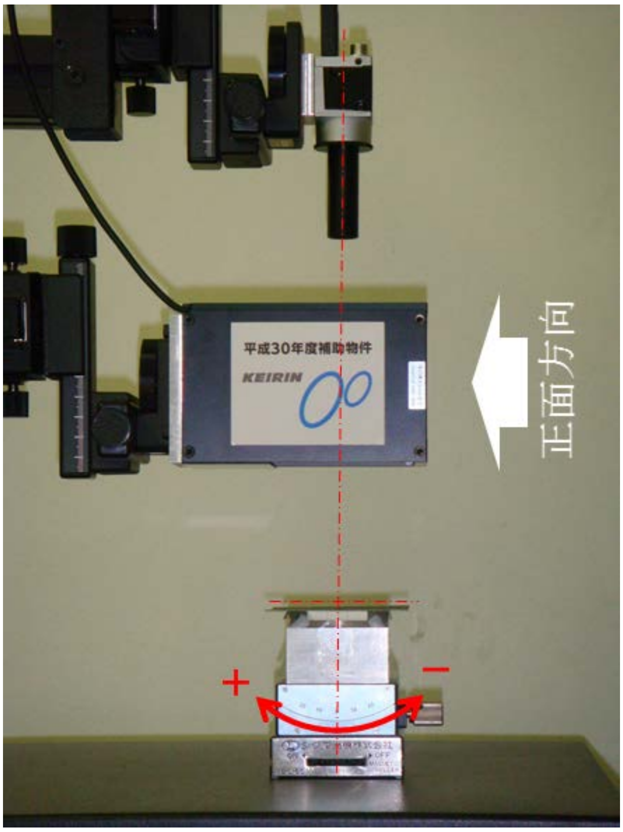


図１３　検出できる傾きの測定（側面方向）

また、図１３に示すように、正面方向と直交する側面方向についても同様の方法でグレースケール値を測定した。それらの結果を図１４に示す。

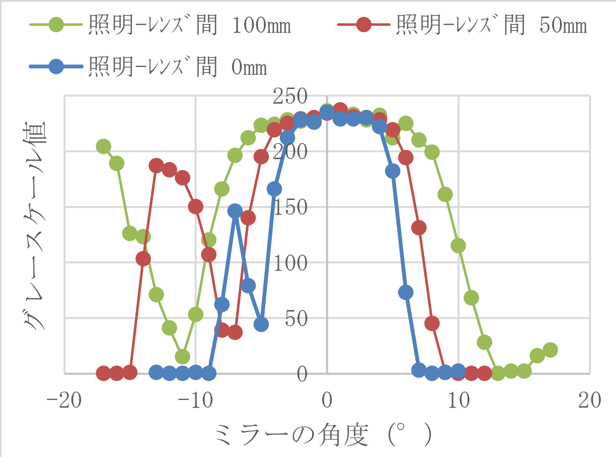


図１４　ミラーの傾きとグレースケール値（側面方向）

測定の結果、正面方向及び側面方向共に、特定のミラーの角度を超えた場合に、グレースケール値が低下することがわかった。特に照明－レンズ間を 0mm としてミラーの角度が正負共に 4° を超えた場合に、最も急激にグレースケール値が低下している。また、側面方向の測定では、ミラーの角度が負の方向の場合に、一旦はグレースケール値が低下するが、その後に増加する場合が見られる。この理由は、照明からの光の一部が通常とは異なる光路でミラーに入射したためである。照明は平面状の面光源とハーフミラーを内蔵している。通常は面光源からの光がハーフミラーに反射することによって、カメラと同じ方向から光を照射することができる。しかし、一部の光はハーフミラーに反射せず、直接にミラーに照射されることがある。これらは、本来であれば、低いグレースケール値を示すべき角度を有する欠陥を見落とす可能性があることを示しており、特に、照明－レンズ間の距離が小さい場合に、影響が大きい。

以上の結果、ミラーの角度が±4° を超えた場合にグレースケール値の低下が最も急峻で、面光源からの光が直接にミラーに入射する影響がもっと小さい 0mm を最適な照明－レンズ間の距離と考えて検出実験を行うことにした。

２．４．３．検出実験の結果

検出実験には、研磨仕上げを行ったステンレス鋼板上に疑似欠陥を設けた試験片を用いた。図１５に画像探傷装置による疑似欠陥の画像を示す。

疑似欠陥は、研磨仕上げを行ったステンレス鋼板上に目印を設けた後に、設けた。画像全体でグレースケール値が飽和しない範囲で最大値になるよう照明の光量を設定した後、疑似欠陥の上に画像解析用のラインマーカを設定した。

解析の結果、図１６に示すように、疑似欠陥と健全な研磨仕上げ部には、８ ビットのビット深度に対してグレースケール値に 150 以上の差があることが分かった。

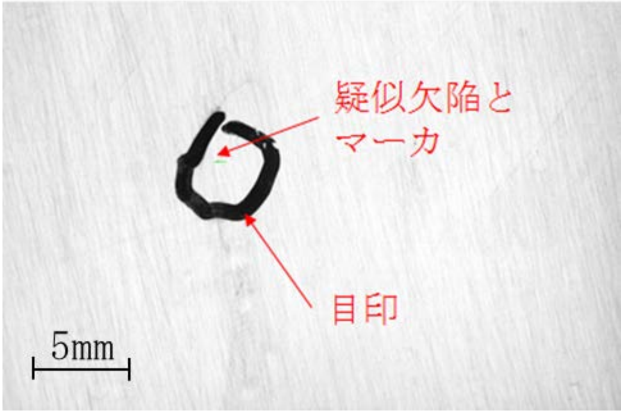


図１５　検出実験の図

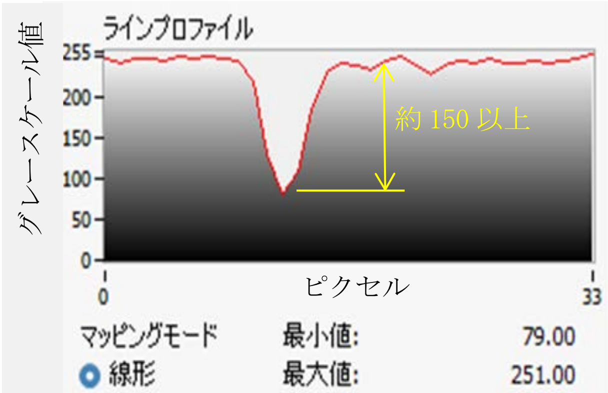


図１６　検出実験の結果

３．結言

企業から提供された試験片の分析・計測によって、検出する必要がある欠陥を直径 50 μm 以上､かつ､10° 以上の角度を有する窪みと定義した。検出能力を検証するために、三次元微細レーザ加工装置を用いて直径約 50 μm、傾き約 14° の疑似欠陥を試作した。欠陥を自動検出するために、画像探傷装置を導入して検出実験を行い、試作した疑似欠陥を自動検出できると考えられるグレースケール値を得た。

福島県ハイテクプラザ試験研究報告

平成３０年度（２０１８年度）

令和元年８月発行

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
ＦＡＸ	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
繊維・材料科	０２４－５９３－１１２２
ＦＡＸ	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
ＦＡＸ	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

代表	０２４４－２５－３０６０
機械加工ﾛﾎﾞｯﾄ科	０２４４－２５－３０６０
ＦＡＸ	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字杭出作２３番地の３２

代表	０２４６－４４－１４７５
機械・材料科	０２４６－４４－１４７５
ＦＡＸ	０２４６－４３－６９５８

編集

福島県ハイテクプラザ　企画管理科

URL http://www4.pref.fukushima.jp/hightech/index-pc.html

E-mail hightech-info@pref.fukushima.lg.jp