

工業技術研究報告書

Report of the Industrial Research Institute of NIIGATA Prefecture No.45 2015

No. 45 平成 27 年度



新潟県工業技術総合研究所

Industrial Research Institute of NIIGATA Prefecture

〒950-0915 新潟県新潟市中央区鋳西 1-11-1
1-11-1 Abumi-nishi, Chuo-ku, Niigata City, Niigata 950-0915, Japan

平成 28 年 6 月

目 次

I 研究論文

1. フェライト系ステンレス鋼の窒素熱処理に関する研究	3
2. 伝統的工芸品の世界販売戦略を支援するためのバーチャルショウケースの研究開発	11
3. マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械特性評価に関する研究	17
4. 決め押し加工シミュレーション技術の開発	25
5. 人工光リーフレタス栽培における遠赤色光が生育と品質に及ぼす影響	32

II ノート

1. LIB 用タブリード材製造工程におけるリード材表面皮膜処理のインライン化	39
2. 超精密微細加工技術の開発	41
3. 超高張力鋼板加工技術の開発	44
4. 高硬度材切削用被膜の開発	46
5. 高圧クーラントによる析出硬化系ステンレス鋼の高能率旋削加工	48
6. チタンアルミ合金の切削加工技術開発	51
7. 真空装置用ステンレス製大型容器の多様な形状に対応する新加工技術の開発	54
8. シミュレーションを用いた不等ピッチメタルソーにおける刃型最適化設計技術の開発	57
9. 高出力の熱音響エンジンの開発	59
10. 異種金属材料の非溶融接合技術の開発 ～アルミニウムと鋼板の接合～	62
11. 簡易なグレースケールマスクを使用したリフロー法によるマイクロレンズアレイの作製	64
12. 人工光レタス栽培における反射材が光強度と生育に与える影響	68
13. 低温排熱用スターリングエンジンの理論的側面からの理解と実現可能性に関する検討	71
14. 鋼材の球状化焼鈍しについて	73
15. レーザ顕微鏡および粗さ測定機による表面粗さの比較	77
16. ヌーブ硬さ試験について	82
17. ビデオ伸び計による変位測定	84

18. 蛍光X線分析におけるFP法定量分析の検討・	87
19. イオンミリング法による電子顕微鏡観察用断面試料の作製・	91

Ⅲ 調査・報告

1. 3次元ものづくり製造技術とその市場に関する調査研究・	98
2. 熱音響機関に関する調査研究・	101
3. 炭素化繊維利用に関する調査研究・	104
4. 精密微細加工技術の分析分野への応用に関する調査研究・	107
5. 新材料創生に関する調査研究・	111
6. ビッグデータを活用したものづくりに関する調査研究・	115
7. センシング技術の農業分野への応用に関する調査研究・	118

※ 平成 27 年度に実施した研究 130 テーマのうち、研究成果を公表できるものを報告しています。

I 研究論文

フェライト系ステンレス鋼の窒素熱処理に関する研究

三浦 一真* 岡田 英樹**

Study on Nitrogen Heat Treatment of Ferritic Stainless Steel

MIURA Kazuma* and OKADA Hideki**

抄 録

フェライト系ステンレス鋼の代表的な鋼種である Fe-16~18Cr (SUS430 以後, Fe-18Cr) の耐食性向上を目的に窒素熱処理に関する研究を行った。素材を窒素雰囲気中で処理したところ、窒素含有率は処理温度とともに高くなり、1100℃で最大 0.6 mass%もの窒素が添加された。1100℃で処理した場合は処理前に比べ硬くなり、処理後の組織はオーステナイトとマルテンサイトの2相からなることが明らかとなった。耐食性はオーステナイト系ステンレス鋼の代表鋼種である Fe-18Cr-8Ni と同等程度の耐食性レベルを確保した。

1. 緒 言

ステンレス鋼は耐食性を向上させる目的でクロム (Cr) が約11mass% (以後mass%を省略) 以上添加した鋼をいい、家庭用、建材、一般機械、産業機械、化学・食品プラント、車両・自動車などの輸送機器、電気機器など多方面の分野で用いられ、先端分野、腐食環境製品を中心に要求される特性が厳しくなっている¹⁾。

ステンレス鋼は従来からオーステナイト系を中心に希少金属であるニッケル (Ni)、モリブデン (Mo) を含んだ鋼種が多く存在する。さらに、最近では耐食性、加工性、溶接性の改善を目的にニオブ (Nb)、チタン (Ti) をはじめとする希少金属を微量添加した鋼種が数多く開発されている。ところが、これらの希少金属は有限で、産出地域が偏在しており、価格も変動しやすい。

ステンレス鋼は2006~2007年にかけて、Niの高騰によるオーステナイト系の価格上昇と鋼材不足を招き、代替鋼種として、18Cr以上の

フェライト系ステンレス鋼が数種開発された²⁾。

このような状況のもと、我々はステンレス鋼の特性を改善するための添加元素として、資源的制約がなく安定供給可能でステンレス鋼の局部腐食である孔食を防止する元素の一つである窒素に着目し、誘導加熱と真空ガス置換による窒素熱処理技術を開発した^{3)~5)}。この技術を用いて、Fe-22Crの高Cr系フェライト系ステンレス鋼の窒素添加に関する研究を行い、約1%の添加で金属組織がフェライトからオーステナイトに変態し、耐食性をはじめとする優れた特性を見出すとともにいくつかの知見を得ている。

これに加え、さらに流通量が多く、価格も安定な Fe-13Cr 中心のマルテンサイト系ステンレス鋼や Fe-16~18Cr 中心のフェライト系ステンレス鋼の付加価値を高めることを目的にこれら Cr 系ステンレス鋼の窒素添加に関する研究を行っている^{6)~8)}。

我々は、ステンレス鋼のなかで最も使用されているオーステナイト系の代表鋼種である Fe-18Cr-8Ni の代替を目的に Fe-16~18Cr のフェライト系ステンレス鋼の窒素添加の研究に着

* 中越技術支援センター

** 下越技術支援センター

手し、金属組織に影響のない焼き鈍し温度域での処理について研究を行った。その結果、金属組織や硬さに変化はないものの、窒素の添加量はわずかであり、耐食性の改善はわずかであった⁸⁾。そこで、Fe-18Cr-N系について窒素の含有率と温度を変えたときの金属組織の変化を計算状態図で予測するとともに、熱処理温度を高温域を中心に広範囲に拡大した。本報告では窒素熱処理温度と窒素含有率との関係および耐食性との関連について研究を行い、得られた研究結果と実用化へ向けての課題について述べる。

2. 実験方法

2.1 窒素熱処理

窒素熱処理に用いた素材はフェライト系ステンレスの代表鋼種で SUS430 に相当する Fe-18Cr であり、化学組成を表 1 に示す。この素材は特性改善を目的としたレアメタルなどの微量添加元素を含んでいない。

窒素熱処理は誘導加熱方式の真空ガス置換機構付加熱装置 (SK メディカル電子(株)製, MU-1700D) で行った。装置外観を図 1 に示す。処理可能なサンプルの大きさは 50×50mm までである。本研究では厚さ 0.8mm の板材を用いた。処理手順は、前処理として、有機系溶液に

表 1 処理に用いた素材の化学組成 (wt. %)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Fe-18Cr	0.05	0.27	0.14	0.023	0.003	16.14	0.03

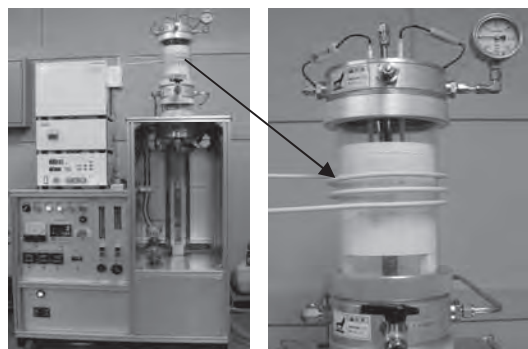


図 1 真空ガス置換機構付加熱装置

よる脱脂洗浄後、リン酸系溶液による酸洗と無機系溶液による処理を行った後、サンプルを炉内に設置し、真空排気によるガス置換を行い、窒素ガス充填後、大気圧窒素雰囲気にて加熱を開始した。所定の処理温度に到達した後、最長で 1h 保持した。加熱終了後は窒素ガスで冷却した。処理温度は 600～1150℃とした。

処理後の板材について、波長分散型蛍光 X 線分析装置 (S8 TIGER 4kW, (ブルカー・エイエックスエス(株)製)を用いて検量線法による窒素の定量分析を行った。また、金属組織は、表面に近い部分について鏡面まで研磨を行い、金属顕微鏡 (オリンパス光学工業(株)製, BX-60M-53MB), 走査型電子顕微鏡 (日本電子(株)製, JSM-6060A) による組織観察や X 線回折装置 ((株)リガク製, RINT-UltimaIII) における相同定を行うとともに、マイクロビッカース硬度計 ((株)明石製作所製, MVK-G2500) による硬さ測定を行った。

2.2 耐食性評価方法

耐食性の評価は孔食電位を測定する試験 (JIS G 0577『ステンレス鋼の孔食電位測定方法』に準拠)を行った。図 2 に試験装置の概略図と実験装置の外観を示す。

試験用サンプルは試験前に耐水研磨紙 #600 で研磨を行った後、アセトンで洗浄し、硝酸による不動態化処理を行った。試験前に 1cm² の

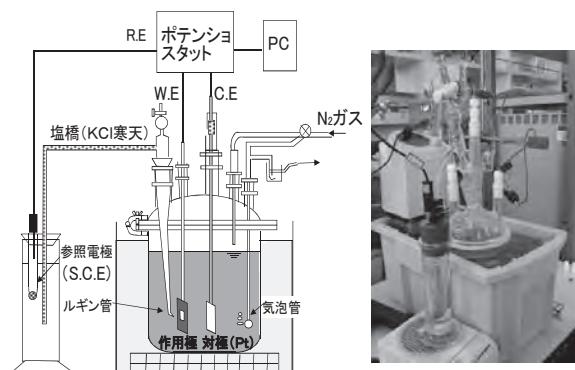


図 2 試験装置概略と装置外観

電極面を確保し、それ以外をエポキシ樹脂にてコートし乾燥後、試験面を再度#600 の耐水研磨紙で研磨し、サンプルを電解槽内にセットした。試験溶液は 5.5%NaCl 水溶液を使用し、脱気は高純度窒素ガスを用いて行った。設定液温は 30℃である。また、電位掃引速度は 20mV/min に設定した。

試験は電流値の変化を見るものである。典型的な変化は、電位を上げると途中で電位の変化にかかわらず電流値が一定になる不動態域に入り、さらに電位を上げたときにある電位で急激に電流値が高くなる。この電流値が立ち上がる際の電位が孔食電位であり、このとき素材が激しく溶け出して食孔が形成される。この電極に発生した食孔をデジタルマイクロスコープ（株）キーエンス製、VHX2000/1100）を用いて観察した。さらに、耐食性メカニズムの解明には、ステンレス鋼の耐食性に関係する不動態皮膜（酸化皮膜）に着目し、この皮膜を含む表面について、グロー放電発光分光装置（GD-OES：（株）堀場製作所製、GD-Profilier2）と X 線光電子分光分析装置（XPS、サーモフィッシャーサイエンティフィック（株）製、K-Alpha で分析を行った。

3. 結果と考察

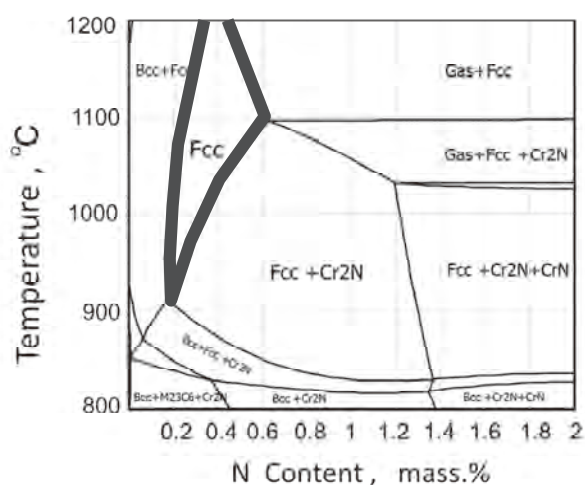


図 3 Fe-18Cr-N の垂直断面平衡状態図

3.1 窒素熱処理プロセス

窒素熱処理プロセスの研究に先立ち、Fe-18Cr に窒素の添加量を変化させたときの温度による金属組織の予測を目的にする熱力学計算により状態図を作成した。

図 3 は状態図計算ソフト「Pandat」と熱力学データを用いて、Fe-18Cr に窒素を添加した時の横軸に窒素濃度、縦軸に温度をとり、1 気圧のガス（N₂）相を考慮した垂直断面平衡状態図である。この状態図によると、焼き鈍し温度の上限値である 850℃以下では基材は bcc（フェライト）であり、窒素は窒化物（Cr₂N）として存在することが予想される。900℃を超えてくると、窒素が 0.2%あたりから fcc（オーステナイト）相が現れる。図中太字で囲んだ部分が fcc 単相領域となる。1000℃に温度を上げた場合、窒素が 0.2～0.4%で fcc 相となり、1100℃まで温度を上げた場合では fcc 領域で最大 0.6%の窒素添加が予測される。図 3 の状態図で示された温度と窒素含有率変化に伴う相変化を参考に量産設備の常用上限温度を考慮し、検討範囲を 600～1150℃として窒素熱処理を行い、処理温度と窒素含有率との関係を調査した。その結果を図 4 に示す。温度が高くなるにつれて、窒素含有率は高くなる。800℃で窒素含有率は約 0.1%，1000℃で約 0.4%，1100℃では

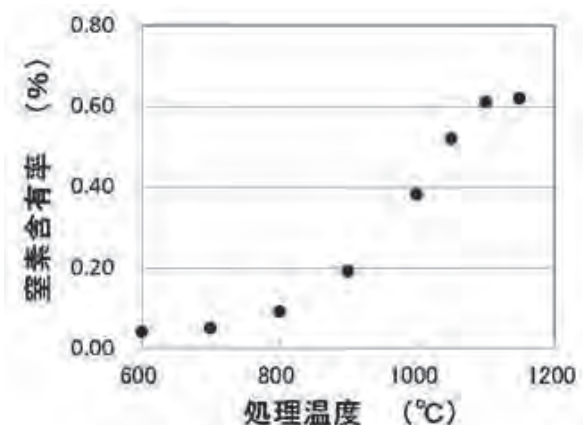


図 4 窒素熱処理における温度と窒素含有率との関係（処理時間：1h）

0.6%となった。900～1100℃にかけての急激な窒素の増加は bcc 相から fcc 相への金属組織変化が影響していると考ええる。窒素熱処理後の金属組織を解析したところ、処理温度が 800℃までは金属組織はフェライトであり、硬さも 150～175HV_{0.1} の範囲で板材の規格値である 200HV 以下となった。これより処理温度を高くすると、窒素含有率、硬さとも高くなっていく。900℃の場合は、フェライトに加え一部オーステナイトやマルテンサイトが晶出し、硬さも 400HV_{0.1} を大きく超える。図 5 は Fe-18Cr フェライト系ステンレス鋼を 1100℃で 1h 窒素熱処理を行った後の組織の X 線回折パターンおよび金属組織を示す。窒素含有率が 0.6%の 1100℃で処理した場合の X 線回折結果では、fcc と準安定相の α' (マルテンサイト) が固定され、マルテンサイト変態が起こって α' 相が一部発生したため、520HV_{0.1} と非常に硬くなった。

窒素熱処理後の金属組織における窒素の挙動を調べるために、鏡面研磨面について高倍で SEM 観察を行った。結果を図 6 に示す。800℃

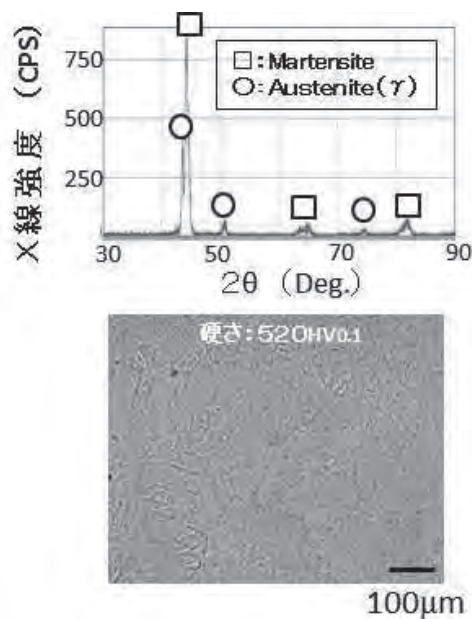


図 5 窒素熱処理後の組織の X 線回折パターンおよび金属組織

で処理した図 6(a)をよく見ると、以前の研究では確認できなかった微細な点が散在している⁸⁾。代表的な点 A 部分を EDS 分析したところ、窒素が 4.6%，Cr が 62.1%，Fe が 28.6%であった。分析値そのものは半定量で軽元素である窒素の分析感度も低くなっているため、実際には窒素の含有率は分析値よりも高いと考える。分析結果より、微細な化合物は Cr 窒化物と思われる。それに対して、1100℃処理した図 6(b)では、(a)で観察された微細な化合物は観察されなかった。したがって、添加された窒素は固溶していると考ええる。

本研究では窒素熱処理前に処理前の脱脂・洗浄・酸洗を行った。この一連の前処理により、最表面の汚染層は除去され、さらに、不動態皮膜も一定厚さ除去されている可能性がある。本研究で用いた熱処理設備は真空排気～窒素ガス導入を 2 回行うことで酸素をはじめとする不純物ガス濃度を低く抑えていることから、サンプルからのアウトガスの影響は少ないと考える。

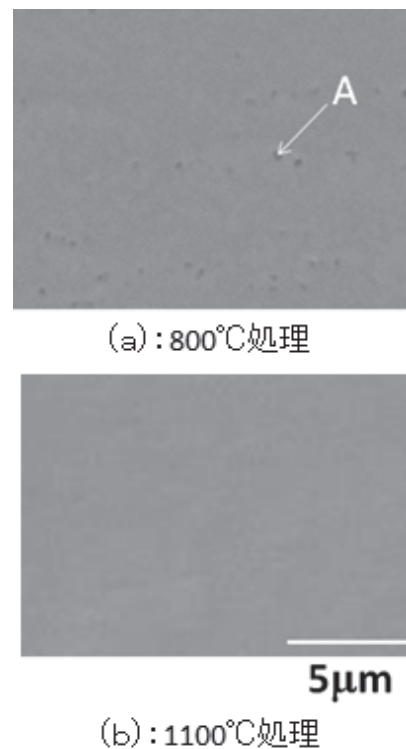


図 6 電子顕微鏡による窒素熱処理後の金属組織観察結果

したがって、800℃で 0.1% 弱の窒素が添加されているのは前処理の効果によるものと考えられる。その一方で平衡状態図と熱力学計算からフェライト相における窒素の固溶限は含有率の 1% にも満たないほど低い。したがって、添加された窒素のほとんどは窒化物として存在していると考えられる。

処理温度が 1000～1100℃の高温域では表面状態の影響は受けにくいと考える。800～1100℃で 0.4～0.6%の窒素含有でオーステナイト単相領域に入る。窒素熱処理後窒化物は形成されないが、オーステナイト単相ではなく、一部マルテンサイトが認められ、硬度も 500HV_{0.1}を超えた。

3.2 孔食電位および表面分析結果

JIS 準拠の孔食電位測定結果であるアノード分極曲線を図 7 に示す。1100℃で窒素熱処理した Fe-18Cr (図 7(D)) と比較のための未処理材 (図 7(A))、およびオーステナイト系ステンレス鋼である Fe-18Cr-8Ni (図 7(B)、SUS304 に相当) と Fe-18Cr-12Ni (図 7(C)、SUS316 に相当) の結果を示す。

アノード分極曲線において、電流値が立ち上がる際の電位が孔食電位であり、このとき素材が激しく溶け出し図 7 の写真に示す食孔が形成される。窒素熱処理後の窒素含有率が約 0.6%である 1100℃処理材(D)の孔食電位の値は 0.23V であり、未処理材(A)(0.1V)を大きく上回り、Fe-18Cr-12Ni (図 7(C)、0.32V) には及ばないものの、Fe-18Cr-8Ni(C)と同等(0.21V)であった。

図 8 は孔食電位と窒素熱処理温度との関係を示す。それぞれの温度で 3 回の測定を行った。処理温度が 1100℃の場合は、孔食電位は 0.20～0.25V であるのに対し、処理温度が低くなると電位は低くなり、900℃、1000℃ではばらつきが見られた。処理温度が 800℃の場合は未処理の場合よりは高いものの、その差は小さくなっている。

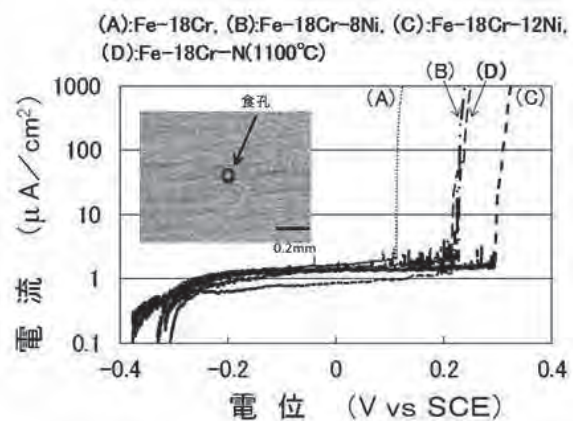


図 7 孔食電位測定結果と食孔観察の一例

窒素含有による孔食電位の増加，すなわち耐食性の向上は窒素が寄与すると考えられるが，その原因を解明するため，ステンレス鋼の耐食性に関係する不動態皮膜（酸化皮膜）に着目し，この皮膜を含む表面について，GD-OES と XPS で分析を行った。

図 9 は GD-OES による Fe-18Cr 材（未処理材，窒素熱処理材）の分析結果で表面からの深さプロファイルを示す。図 9 の上段は Fe, Cr, O, C の深さプロファイルで未処理材の例である。なお，窒素熱処理したものについても同様のプロファイルを示すことから，今回は未処理の例を示した。表面の C の立ち上がりは汚染膜に由来するものと考えられる。O と Cr, Fe のプロファイルより不動態皮膜は 5nm 弱形成されている。下段は窒素の深さプロファイルを示し，未処理，800℃，および 1100℃処理の結果を示す。

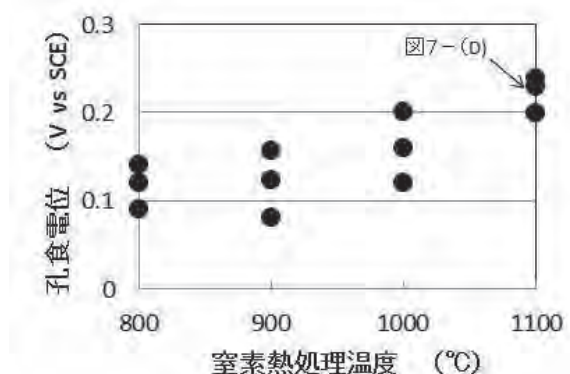


図 8 窒素熱処理温度と孔食電位との関係

これより、処理により不動態皮膜中に窒素が含まれている。1100℃処理ではバルクと同じ約0.6%窒素濃度を示すが、800℃処理の濃度は低く、未処理よりわずかに高いレベルとなっている。

不動態皮膜の化学結合に関する情報を得るために極表面近傍の不動態皮膜部分についてXPSによる分析を行った。図10にFe-18Crの未処理材に関して最表面から1.5nm（酸化タンタル換算）のFe (Fe2p)、O (O1s)、およびCr (Cr2p)の分析結果を示す。これより、ステンレス鋼の不動態皮膜を主に構成しているCr酸化物、Cr水酸化物の他にFeの水酸化物、酸化物が同定され、不動態皮膜にはFe系の酸化物・水酸化物が含まれることがわかった。

図11は800℃処理(a)と1100℃処理(b)の表面から同じ1.5nm深さの窒素の表面分析結果を示す。(a)、(b)ともに窒化物を示すピークはなく(a)、(b)ともに397eV付近に窒素のピークを示している。800℃処理ではそのピークはノイズレベルであり、不動態皮膜中に窒素が存在して

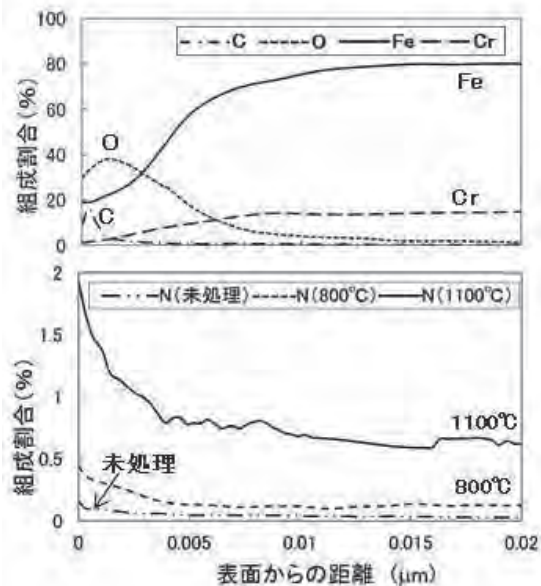


図9 Fe-18Cr材のGD-OES深さプロファイル（上段：C、O、Fe、Cr（未処理）下段～N：未処理材と窒素熱処理材）

いるとは断定できないのに対して、1100℃処理では窒素のピークが明瞭であることから、不動態皮膜中に窒素は固溶していると考ええる。

オーステナイト温度域である1100℃の窒素熱処理で約0.6%の窒素が添加された。この値はFe-18Cr-Nの垂直断面平衡状態図における上限値と一致している。ステンレス鋼の耐食性は最表面から数nmに存在する不動態皮膜による

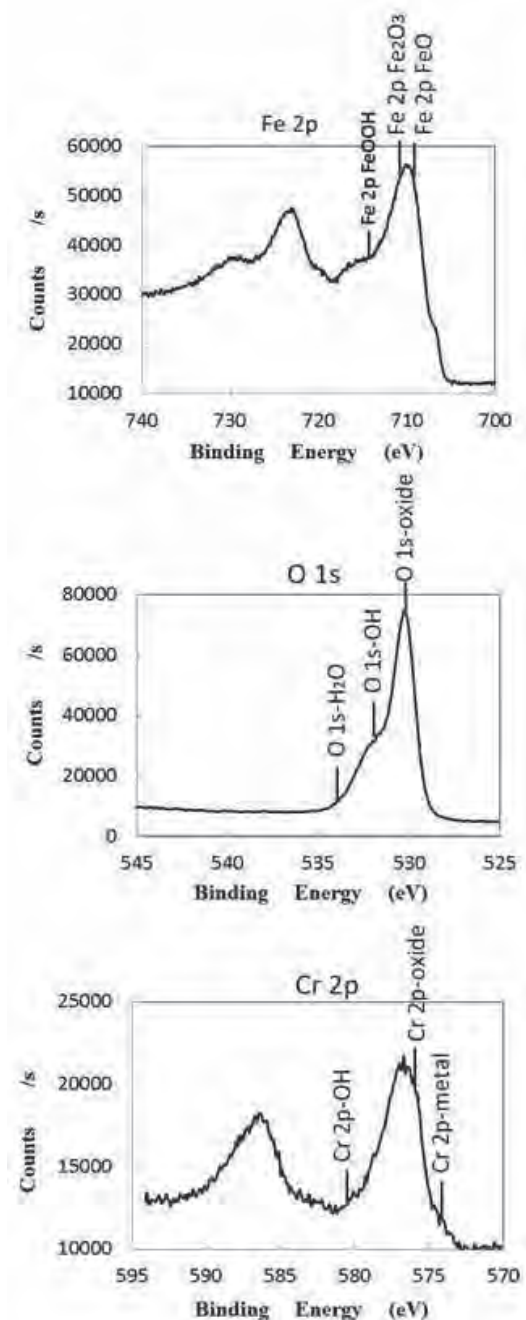


図10 XPSによる未処理材表面分析結果

もので主に Cr 酸化物や Cr 水和物から構成されるが、Fe 系の酸化物や水酸化物も認められる。ステンレス鋼の耐食性は素材に含まれる Cr, Mo, 窒素の含有率に密接に関係し、 $\%Cr + 3.3 \times \%Mo + n \times \%N$ (N: 窒素, $n: 8 \sim 30$: 多くは $n=16$) で求められる孔食指数(PRE)が高いほど高くなるが、これは不動態皮膜に起因するものとする^{9),10)}。孔食指数の Mo や窒素は固溶しているものが対象でこれらの元素の固溶により、破壊された皮膜の修復機能や皮膜自体が耐久性が増すものとする。化合物(例えば窒化物)は耐食性向上に寄与せず、腐食環境が厳しくなると、局部腐食の起点になる懸念がある。処理温度を下げると窒素含有率が低くなり、皮膜中に固溶される窒素が減少するとともに一部窒化物になるため、耐食性改善の効果は薄れる。

窒素の含有率の増加はオーステナイト相の現出によるが、一部マルテンサイト相が現れるため硬くなる。一般にステンレス鋼の Cr 組成が低くなるとマルテンサイト変態を起こす傾向にある。

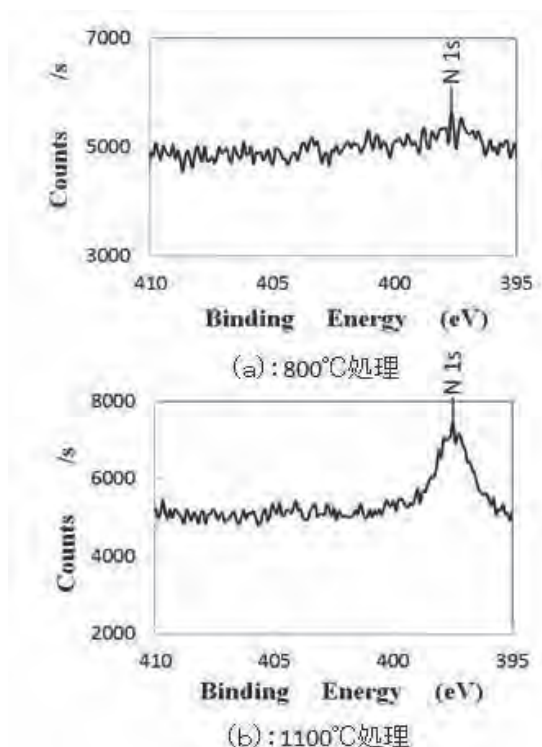


図 11 XPS による窒素の表面分析結果

Fe-18Cr ステンレス鋼の窒素熱処理に関する研究例は少ない。加圧雰囲気での窒素熱処理でオーステナイト化による耐食性改善の例があるが、その場合も素材の硬さは高くなっている^{11),12)}。不動態皮膜のみに窒素を固溶させる処理ができれば硬さや組織を処理前と同等で耐食性をあげることが可能となる。今後更なるプロセス開発が必要と考える。

4. 結 言

- (1) Fe-18Cr 系ステンレス鋼を窒素熱処理を行ったところ、処理温度とともに窒素含有率は上がり、1100°Cの処理で最大 0.6%の窒素が添加される。焼き鈍し温度域の 800°Cでは 0.1%以下となった。
- (2) 1100°Cの処理材の金属組織はオーステナイトとマルテンサイトの 2 相からなり 500HV を超える硬さとなる。
- (3) 窒素熱処理材の耐食性は窒素含有率と関係がある。窒素含有率が 0.6%を示した 1100°C処理材の孔食電位は処理前を大きく上回り、Fe-18Cr-8Ni オーステナイト系ステンレス鋼と同等であった。
- (4) 窒素処理材の表面分析を行ったところ、窒素はバルク中の含有率とほぼ同じ割合で不動態皮膜中にも固溶して存在しており、これが耐食性向上の要因と推察される。

なお、本研究の一部は(国研)科学技術振興機構からの委託研究「研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)、平成 27 年度 FS ステージ探索タイプのテーマ「窒素添加によるクロム系ステンレス鋼の耐食性向上に関する研究」中で行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 根本力夫, “ステンレス鋼の選び方・使い方とトラブル対策”, (株)情報技術セン

- ター主催講演資料，2007，pp.8-21.
- 2) 三浦一真，“ニッケルフリーステンレス鋼の特性と開発動向”，プレス技術，Vol.45，No.15，2007，pp.37-41.
 - 3) 三浦一真，“窒素含有ニッケルフリーステンレス鋼の実用化研究”，新潟県工業技術総合研究所研究報告書，No.39，2010，pp.33-40.
 - 4) 黒田大介，岡村一伯，中村晃規，大澤康暁，三浦一真，白木原香織，“冷間圧延した Fe-24Cr-2Mo-1.2N の機械的性質”，Journal of JACT，Vol.14，No.3，2009，pp.29-34.
 - 5) 三浦一真，林成実，中川昌幸，岡田英樹，中津山國雄，“窒素含有ステンレス鋼の耐孔食性に及ぼす微量元素の影響”，日本金属学会誌，Vol.79，No.7，2015，pp.376-383.
 - 6) 三浦一真，林成実，“窒素含有汎用クロム系ステンレス鋼の実用化研究”，新潟県工業技術総合研究所研究報告書，No.41，2012，pp.14-21.
 - 7) 三浦一真，林成実，“汎用クロム系ステンレス鋼の窒素吸収処理に関する研究”，新潟県工業技術総合研究所研究報告書，No.42 2013，pp.19-25.
 - 8) 三浦一真，林成実，“クロム系ステンレス鋼の窒素添加に関する研究”，新潟県工業技術総合研究所研究報告書，No.44，2015，pp.11-15.
 - 9) 松橋透，高橋明彦，梶村治彦，“Mo フリーフェライト系ステンレス鋼 NSSC180 の特性と適用”，新日鉄技法，No.389，2009，pp.20-25.
 - 10) 根本力男，“ステンレス鋼の基礎と上手な使い方”，日本工業出版（株），2009，pp.14-15.
 - 11) Hajime MITSUI and Shinsuke KURIHANA, “Solution Nitriding Treatment of Fe-Cr-Alloys under Pressurized Nitrogen Gas ”，ISIJ International, Vol.47，2007，pp.479-485.
 - 12) 福島県ハイテクプラザ：“窒素固溶によるステンレス鋼の高機能化に関する研究開発”，平成 20 年度福島県ハイテクプラザ研究報告書（公募型新事業プロジェクト），2009，pp.1-35.

伝統的工芸品の世界販売戦略を支援するための バーチャルショウケースの研究開発

阿部 淑人* 大野 宏** 長谷川 直樹*** 中部 昇*** 木嶋 祐太****

Development of Virtual Showcase for Worldwide Promotion of Traditional Handicrafts

ABE Yoshito*, OHNO Hiroshi**, HASEGAWA Naoki***, NAKABE Noboru*** and KIJIMA Yuta****

抄 録

質感の高い伝統的工芸品の販売を支援するためのバーチャルショウケースの開発を行っている。企画から設計・製造の流れを改善するための取り組みとしてデジタルプロトタイピング技術の開発に取り組んだ成果を活用して、より一層写実的なコンピュータグラフィクス（CG）を簡便に生成し容易に観察できるシステムを構築することとした。

本年度は、総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業（通称 SCOPE）の採択を受けた3ヵ年の研究開発計画の初年度として予備実験やプロトタイプ試験などを実施した。主に、全体概要および個々の技術要素の研究開発構想と当面の研究成果について報告する。

1. 緒 言

新潟県の伝統的工芸品は、村上木彫り堆朱や新潟漆器、燕鋤起銅器など13地域で16品目が指定されている。品目数は全国で第2位の地位であるが、生活スタイルの変化や人口減少などにより需要は減少傾向にある。また、一方では、後継職人の確保や早期育成という人材面の課題もある。

国内市場の縮小に対する策として、広く海外に販路を求めることが急務となっている。伝統的工芸品について、世界各地に製品フルラインナップのショールームを設置することには、コストの増大や輸送あるいは在庫の確保など様々な困難が伴う。その解決には、ICT（情報通信技術）を活用し、CGによるバーチャルショウケースを構築することが効果的であると考えた。

本研究開発は、伝統的工芸品を、いつでもどこでもウェブ・ブラウザなどから自由に製品画像が見られ、製品を高い質感再現性で疑似展示できるバーチャルショウケースの実現を目的とする。サーバにデジタルコンテンツとしてのバーチャル製品を全数揃えることで、各提携ショップ内に当該商品の在庫がなくても顧客や売主は正確なアピランスを把握することができる。

また、この延長線上には、ユーザが直接ウェブサイト上で製品ページを見て購入できる電子商取引（EC）の為のオンラインカタログや、さらにはオンラインカスタマイズ（ユーザ自らウェブサイト上で形状や模様などを自在にアレンジして発注）などへの発展形が期待できる。また、製造業者は単品生産のデジタルアーカイブとして記録を残すことができ、品目管理や若手職人への育成指導などにも活用できる。

前記の目的に対して、平成23～24年度に創造的研究で取り組んだ「質感の測定技術・表現技術の研究」¹⁾²⁾の成果をベースとして、コンテンツの生成に係る技術と、鑑賞・操作に係る技術

* 素材応用技術支援センター

** 下越技術支援センター

*** 研究開発センター

**** 中越技術支援センター

について研究を開始した。開発要素ごとに分割すると、

- A 写実的コンピュータ・グラフィックス³⁾⁴⁾に必要なテクスチャマッピングのためのマップデータの分析・合成をおこなう「テクスチャツール」
- B 写実性を高めるために背景画像モデルを取得する「バックグラウンドツール」
- C ウェブ経由で高い操作性を備えて写実的表示できるようにする「ディスプレイツール」
- D 汎用のパネルディスプレイ表示に代えて、より臨場感や拡張現実感・没入感が高く表示できる「プレゼンスツール」

の4つになる。AとBはコンテンツとなるCGの素材生成にかかる技術で、CとDはユーザがディスプレイでCGを鑑賞する際の表現力と操作性にかかる技術である。これらを開発し、システム全体として3年後に実環境下で試験運用できることを目標としている。

2. 研究開発内容

前記の4つのツールについて順に列記する。

2.1 テクスチャツール

テクスチャツールは、伝統的工芸品をCGで再現する際に必要な色彩・模様データ（テクスチャマップ）を生成するためのサブシステムである。

開発目標は、実製品同様の模様を施したテストピースを専用の撮像装置で実写し、それを計算機に取り込んで解析することで、自動的にCGで使用するテクスチャマップ（色彩マップ・光沢マップ・法線マップ）を生成できるシステムを構築することである。なお、CG合成に必要な形状データ(3Dデータ)については、光学式の3次元スキャナなどによって製品そのものから取得するか3次元CADソフトウェア（またはCGの3次元モデリングソフトウェア）で造形することとした。

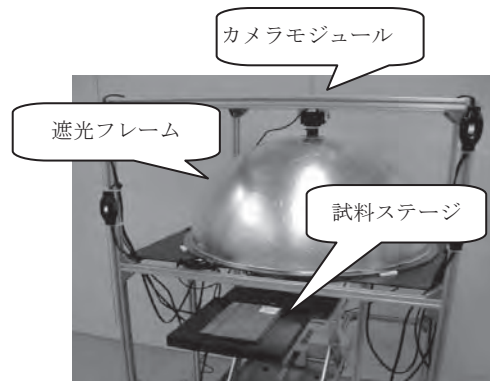


図1 撮像デバイス

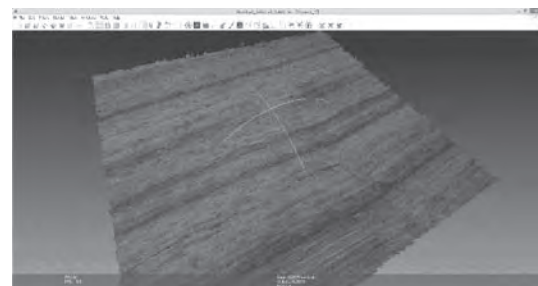
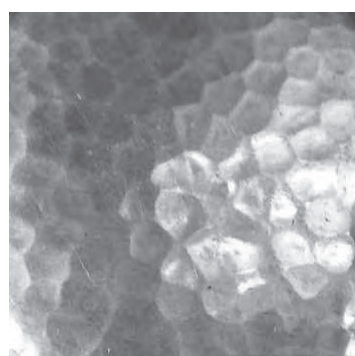


図2 木製テストピースのカラー点群データ

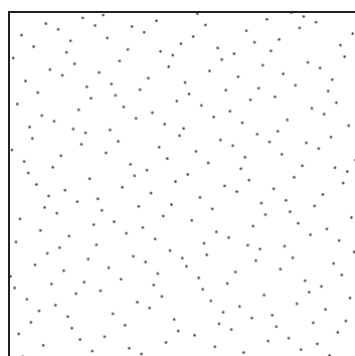
図1は、撮像デバイスの外観である。陰影のない色彩画像および光沢画像を取得することと、単眼カメラで凹凸情報を算出するためのステレオ画像を取得することを目的としたものである。外乱光を遮蔽するためにアルミ箔を貼付したアクリル半球を外部に設け、その内側には散乱光を照射するための半透明半球を内蔵した。半球の天頂部には開口を設けて、カメラモジュールによって試料ステージに載せたテストピースを撮像できるようにした。2つの半球の間には拡散照明として機能するための高演色性LED光源を上向きに装備した。また直射式の方位照明として機能するための高演色性LED光源を、半透明半球の斜め上方に開口して装備した。

図2は試験的に木製のテストピースを撮像して得られた画像から模様色彩と凹凸を取得した結果を図示したものである。撮像後に1024×1024画素を切り出してからステレオ画像マッチングを行って凹凸情報を算出するのに、CPUクロック2.4GHzのPCで11分30秒を要した。

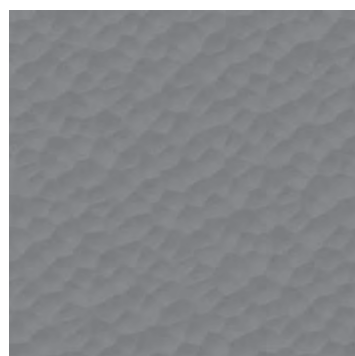
今後、点群データからメッシュデータへの効



実画像



中心位置特徴



合成した法線マップ

図 3 鋳起銅器の打叩模様

果的な変換方法などを検討し、実際の伝統的工芸品模様を施したテストピースによって多数の実画像データを蓄積する予定である。

撮像した画像を元にして、テクスチャマッピングに使用する色彩マップと光沢マップと法線マップの3画像を生成することが必要で、それぞれの画像は大表面を覆った際にもつぎはぎとにならないように循環対称であることが求められる。

図3には鋳起銅器の典型的な鋳目模様を写し

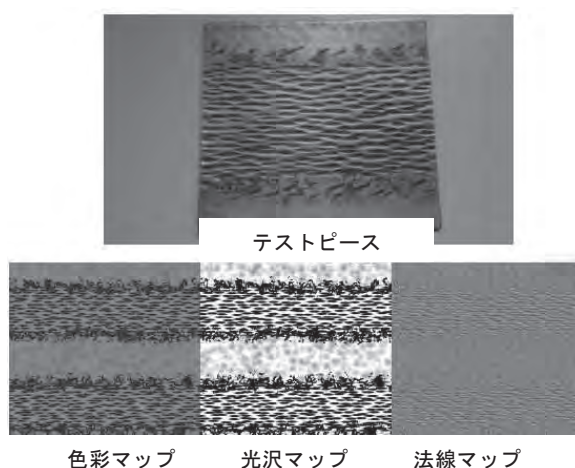


図 4 複合模様のテストピースと生成結果

た写真と、それを元に生成した打叩位置情報、その位置に金鋳で打叩するようにして画像処理して得た法線マップを示す。単純鋳目については、適切に打叩位置を発生することで自動合成が可能となった。複雑な模様については、加飾形状による領域分割などいくつかの分析合成手続きが必要であり、今後の課題である⁵⁾。

図4には、複合模様の鋳目を有するテストピースと、そのために専用書き下ろしたソフトウェアで生成したテクスチャを示している。個々にソフトウェアを書き下ろすことなく自動的に生成できるようにすることが目標である。

また、本研究課題では、燕鋳起銅器のほか村上木彫堆朱と新潟漆器も対象にしているが、過去に開発したテクスチャからの進展がなかったためここでは説明を省略する。

2.2 バックグラウンドツール

バックグラウンドツールは、CGによる製品画像を実写空間にバーチャル配置するための全周画像取得を目的としたサブシステムである。大衆に向けて配給上映される商業映画や商業フィルムにおいてもCGによるVFX（バーチャル・エフェクト）の利用は枚挙に暇がなく、外周など背景画像についてはイメージ・ベース・ライティング（IBL）やイメージ・ベース・レンダリング（IBR）という技術を利用

用して実写画像と CG 画像が融合されている。
大規模な映像プロダクションでは数百万円～数千万円程度のパノラマカメラ（例えば PanoScan®や SceneCam®, iStar®など）を用いて周囲の背景画像を取得しているが、これらは極めて高額な装置であるため、より安価な装置で撮像できることと、室内などの近景を対象にするため距離データの同時取得をめざした。

3 カ年計画の初年度の目標としては、ステレオカメラなどによって簡易的に外周の距離画像と色彩画像および光沢画像を取得するための予備実験を完了することを掲げた。

図 5 には、Ricoh 社製の THETA S という 2 眼式全周画像カメラ（画像サイズは $360^{\circ} \times 180^{\circ}$: 5376×2688 画素）を 2 台縦列配置したデバイスを示している。これを用い縦列ステレオとなる全周画像を取得して距離画像の生成を試みた。

図 6 は、会議室のテーブル上に撮像デバイスを設置して取得した全周画像の例である。床には長机と椅子が多数配置されていて、これらの形状が正確に取得できれば、外周画像と製品画像を合成する際に背景と製品の位置関係がずれることが少なくなる。

図 7 は、上下ステレオ画像から算出した距離データを元に外周形状を生成したものであるが、距離データの不正確さに由来する歪みと、雑音的な凹凸が認められることから改善が必要である。

2.3 ディスプレイツール

ディスプレイツールは、あらかじめ用意した製品の形状データとテクスチャデータそして外周データを元に写実的 CG を簡便な操作で見られるようにするシステムである。一般的な PC やスマートフォン、ゲームコンソールなどのウェブ・ブラウザに表示できるように開発を進めている。今期はゲームエンジンと呼ばれるソフトウェア開発ツールを用いて、リアルタイムに写実的な CG を表示し製品やテクスチャの変更あるいは視点の移動などができるサブシステム



図 5 全周撮像デバイス



図 6 全周画像

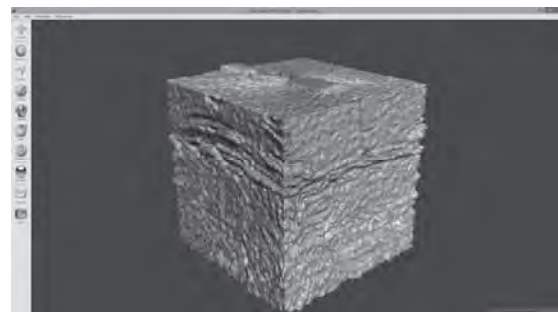
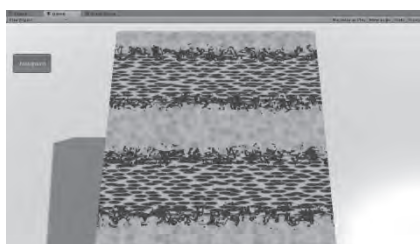


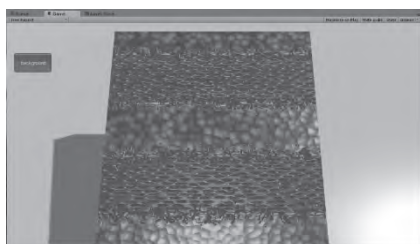
図 7 算出した外周形状

のプロトタイプソフトウェアを制作した。当研究所内の LAN 環境下に用意した既設のウェブサーバに、ゲームエンジンで制作したアプリケーションソフトウェアと、製品の形状データ・テクスチャデータを格納し、LAN 経由で別の PC からウェブ・ブラウザで製品の CG を表示し、着せ替えや視点移動などの操作ができるようにした。

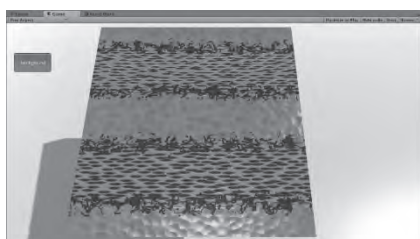
図 8 には、制作したソフトウェアで、図 4 に示したテクスチャを表示した結果を示す。表示装置側でのリアルタイムレンダリングであるが、マッピングとパラメータの調整により概ね良好な表示ができるようになった。今後、機能性や



色彩マップのみ適用



光沢マップも適用



金属パラメータを調整

図8 テクスチャマッピング結果

操作性に関する開発の進行と合わせて表示品質と表示速度の一層の改善も行っていく予定である。

図9には、急須の形状データにテクスチャをマッピングして表示した様子を示した。マウス操作などによって視点移動などを容易に試すことができ、FullHD 解像度で30フレーム毎秒程度のスループットが得られた。また、4K 解像度のテレビジョンモニタに出力した場合にも7フレーム毎秒程度のスループットが得られた。今後は、表示品質の向上をはじめとして品目・データの登録管理など多くの機能追加を行うことを予定している。

2.4 プレゼンスツール

プレゼンスツールは、通常のパネルディスプレイ表示よりもっと写実性や没入感を高める



図9 レンダリング結果

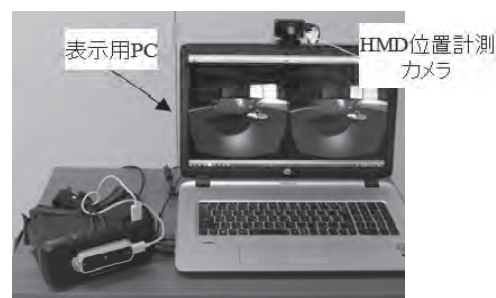
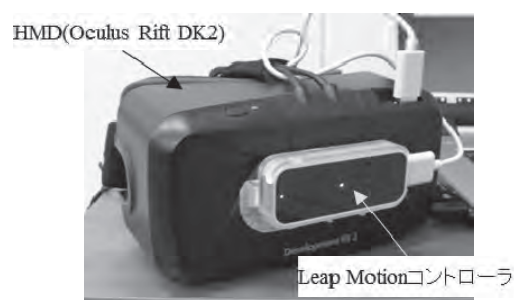


図10 ヘッドマウントディスプレイとジェスチャデバイス

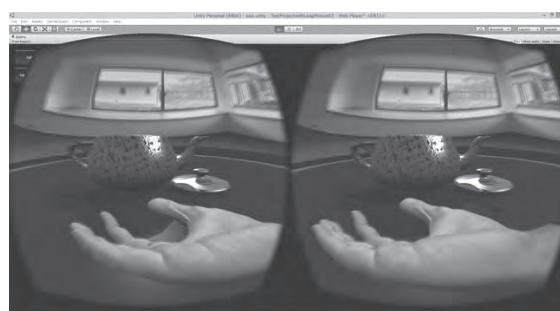


図11 HMD への手の表示

ために、プロジェクションマッピングやヘッドマウントディスプレイを活用する表示システムである。

図10に示したようなヘッドマウントディス

プレイ HMD (Oculus-Rift DK2) とポインティングデバイス (Leap Motion) を用いて、ハンドジェスチャによって視点を変更する没入型表示について検討した。現状では 20FPS 以上のフレームレートが出ているため、視点や視線の移動はストレスなく行うことができた。フレームレートと独立の問題として、自然な印象を目指して、図 11 に示したように被験者の手を模擬的に表示すると逆に違和感が出ることがわかった。

今後は、距離情報付き全周背景画像を適用した場合フレームレートの低下が懸念されるため、10 フレーム毎秒を下回らないための手法について検討を行い、併せてプロジェクションマッピング方式のプレゼンスツールの開発にも着手する。

3. 結 言

- (1) 伝統的工芸品を始めとする質感製品のバーチャルショウケースを構築するための技術開発を開始した。
- (2) 3 カ年の研究計画で以下の 4 つのパートについて研究開発を行なっている。
 - A 写実的コンピュータ・グラフィックスに必要なテクスチャマッピングのためのマップデータの分析・合成をおこなう「テクスチャツール」
 - B 写実性を高めるために背景画像モデルを取得する「バックグラウンドツール」
 - C ウェブ経由で高い操作性を備えて写実的表示できるようにする「ディスプレイツール」

D 汎用のパネルディスプレイ表示に代えて、より臨場感や拡張現実感・没入感が高く表示できる「プレゼンスツール」

- (3) 初年度は、過去の研究¹⁾²⁾の成果と課題をもとに主に予備実験や基礎検討を行なった。
- (4) 次年度以降は、今年度の成果をもとに研究開発を本格化する予定である。

なお、本研究は、総務省から戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) 平成 27 年度課題名「伝統的工芸品の世界販売戦略を支援するためのバーチャルショウケースの研究開発 (課題番号 1654467)」として委託をうけたものである。

参考文献

- 1) 阿部，中部，橋詰，“質感の測定技術・表現技術の研究”，工業技術研究報告書，No.42，2013，pp.68-71.
- 2) 阿部，中部，橋詰，“質感の測定技術・表現技術の研究（第 2 報）”，工業技術研究報告書，No.43，2014，pp.19-25.
- 3) T. Akenine-Moeller and E.Haines, *Real-Time Rendering Second Edition*, A. K. Peters, Ltd, MA, 2002.
- 4) M. Phar and G. Humphreys, *Physically Based Rendering Second Edition*, Morgan Kaufmann, MA, 2010.
- 5) 阿部淑人，“鎚起銅器の CG 再現のためのマッピングテクスチャ生成”，映像メディア処理シンポジウム 2015 予稿集，2015 年 11 月

マルチスケールシミュレーションによる
CFRP 製品の機械特性評価に関する研究

片山 聡* 田村 信* 櫻井 貴文*

Study on the mechanical properties evaluation of CFRP products by Multi-Scale Simulation

KATAYAMA Satoshi*, TAMURA Makoto* and SAKURAI Takafumi*

抄 録

CFRP 製品の設計技術力強化を目的に、マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械的特性評価手法の有効性や問題点について検討した。基本形状を用いた UD 材（単一方向性材料）の強度シミュレーションを実施し、繊維弾性率や繊維体積含有率などの特性値だけでなく、マイクロモデルにおける繊維配列も計算結果に影響を与えることを示した。

1. 結 言

炭素繊維複合材料（以下 CFRP と略す）は「軽くて強い」特徴から、次世代の先端材料として注目されている。これまで航空・宇宙分野やスポーツ分野が市場を形成してきたが、近年では環境や安全性に対する関心の高まりから風力発電用ブレード、圧力容器、土木建築など一般産業用途において需要が増加してきている¹⁾。将来的には自動車分野における量産部品への適用も期待されている²⁾。

当研究所では平成 20～25 年度に CFRP に関する調査研究、CFRP 研究会を実施し、CFRP の素材特性や成形技術に関する情報を県内企業へ提供してきた。その一方で CFRP の持つ異方特性を活用した設計技術については研究実績がなく、県内企業の製品開発に対し、十分な支援を行えなかった。

そこで本研究では CFRP 製品の設計技術力強化を目的に、マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械的特性評価手法の有効性や問題点について検討した。

2. マルチスケールシミュレーション

CFRP 製品のマルチスケールシミュレーションの流れを図 1 に示す。まず、CFRP のマイクロモデルに対する数値材料試験をシミュレーション上で行い、マイクロモデル全体としての等価物性値（密度、弾性率など）を算出する（均質化解析）。その後、等価物性値を適用した強度シミュレーション（マクロ構造解析）を行い、必要に応じてマクロ構造解析結果から抽出した任意

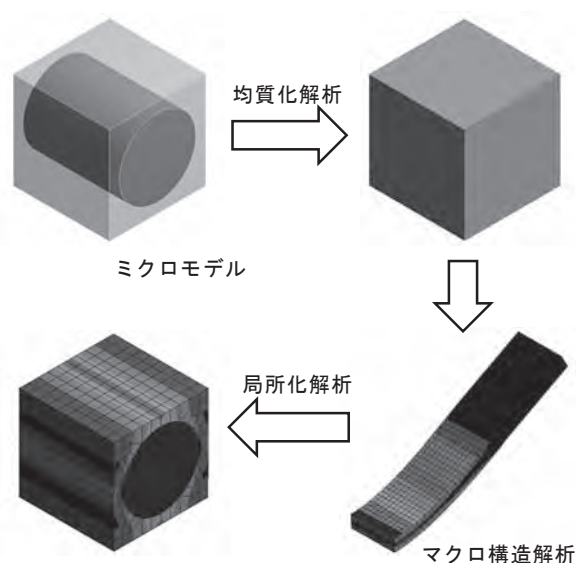


図 1 マルチスケールシミュレーションの流れ

* 研究開発センター

の要素をマイクロモデルに置き換えて応力解析（局所化解析）を実施する。このように、マルチスケールシミュレーションでは、等価物性値を用いることでマクロ構造解析前後にて要素の簡略化，詳細化を切り替えるところに特徴がある。

本研究では，マルチスケールシミュレーションソフトウェアとしてサイバネット（株）製 Multiscale.Sim 6.0 を，マクロ構造解析ソフトウェアとして ANSYS 社製有限要素法解析ソフトウェア ANSYS Workbench 16.1 を用いた。

3. UD 材を用いた均質化解析

CFRP に使用される繊維弾性率および体積含有率により等価物性値がどのように変化するかを確認するため，UD 材（単一方向性材料）を用いた均質化解析を実施した。使用した CFRP の物性値を表 1 に示す。また，図 2 に示すように UD 材の断面では必ずしも等間隔に繊維（白色部）が並んでいるとは限らないことから，代表的な繊維配列パターンとして図 3 に示す立方体基準の直線配列モデル，格子配列モデルを作成し，等価物性値への影響を調べた。

均質化解析結果を図 4, 5 に示す。繊維方向の縦弾性率は繊維配列の影響を受けず，各繊維弾性率において理論値³⁾に近い値を示した。一方で，繊維直交方向の縦弾性率は繊維配列による違いが現れ，直線配列のほうが大きな値を示した。また，その違いは繊維体積含有率が大きいほど顕著となった。

表 1 CFRP の物性値

項目		値
弾性率 (GPa)	繊維	200,300,400
	樹脂	3.50
ポアソン比	繊維	0.20
	樹脂	0.35
繊維体積含有率(%)		50,55,60

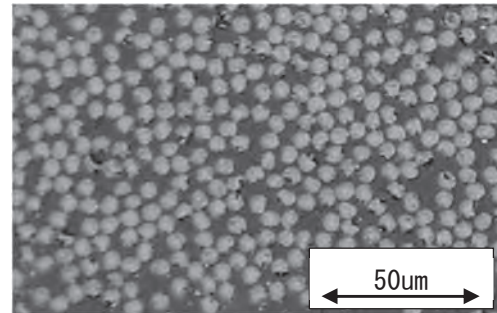
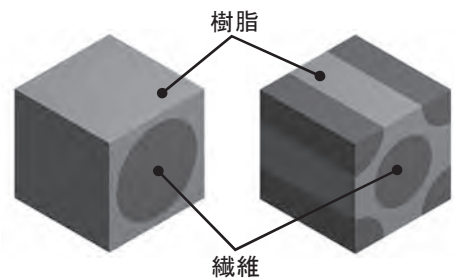
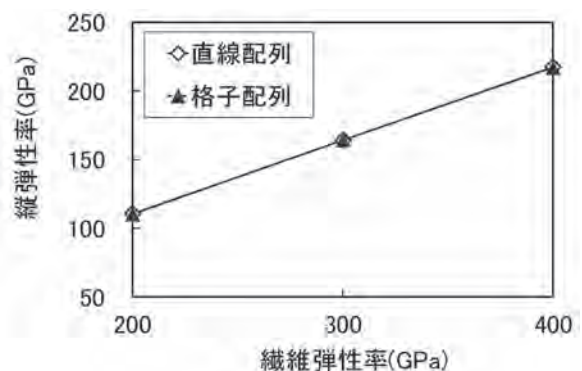


図 2 UD 材の断面

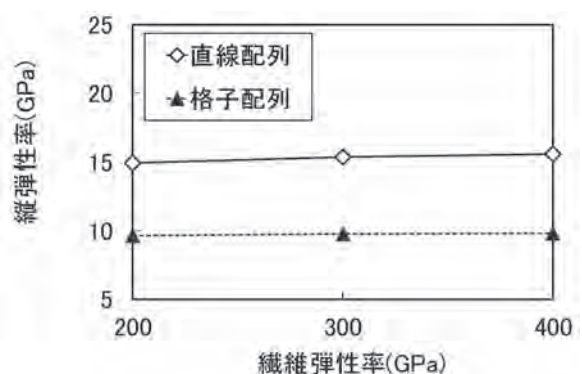


(1) 直線配列 (2) 格子配列

図 3 繊維配列モデル

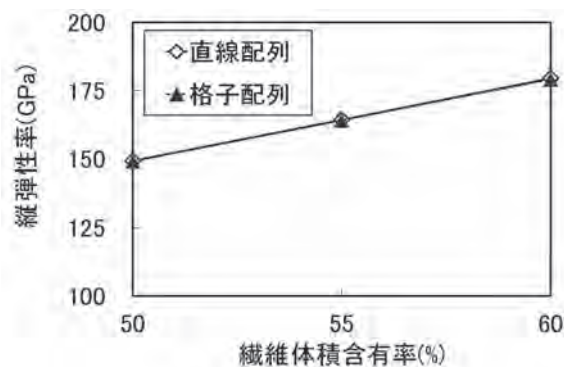


(1) 繊維方向

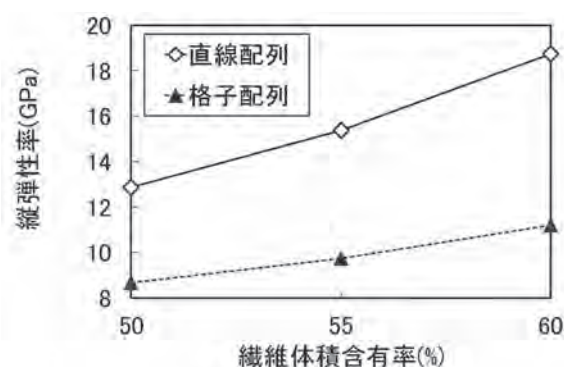


(2) 繊維直交方向

図 4 繊維弾性率と縦弾性係数の関係
(繊維体積含有率 55%)



(1) 繊維方向



(2) 繊維直交方向

図5 繊維体積含有率と縦弾性係数の関係
(繊維弾性率 300GPa)

4. マクロ構造解析

4.1 平板の引張試験シミュレーション

等価物性値を用いて平板の引張試験シミュレーションを実施した。試験片は幅 12.5mm×厚さ 1mm×長さ 80mm の一様形状とし、片側端部を完全固定、反対側端部を 1mm 強制変位させた際の固定部反力を求めた (図 6)。要素は 8 節点 4 辺形要素 (高次シェル要素) として作成し、繊維方向は ANSYS Workbench の積層機能により定義し、試験方向を角度基準方向 (繊維 0° 方向) とした。繊維角度は図 6 において反時計回りに 0° ~90° となる。

図 7 にシミュレーション結果を示す。繊維弾性率 (E_f) の影響は繊維角度 0° では顕著であるが、繊維角度 30° からはほぼ見られなくなった。繊維配列の影響はほぼ見られないが、わずかながら直線配列のほうが大きな値を示した。

4.2 平板の曲げ試験シミュレーション

曲げ試験シミュレーションでは JIS K 7017 に準拠した 3 点曲げ試験モデルを作成し (図 8)、試験片を 1mm 曲げた際の圧子反力を計測した。試験片寸法は引張試験と同一とした。

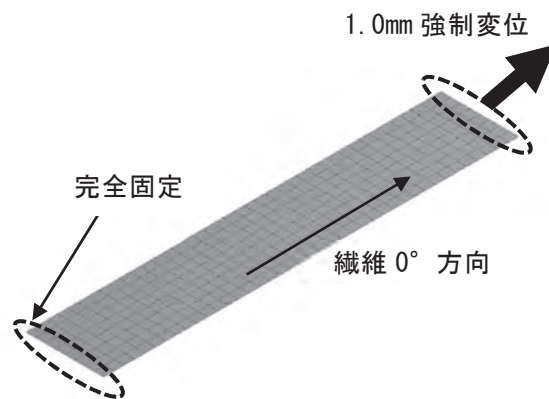
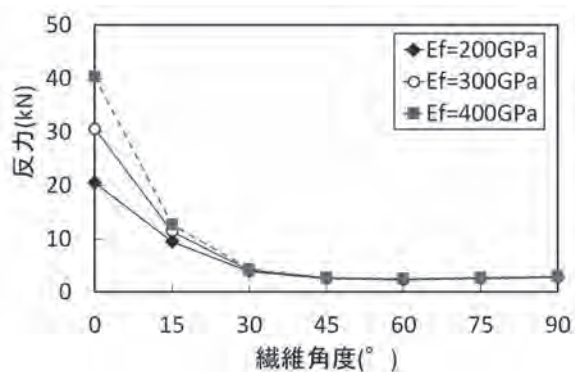
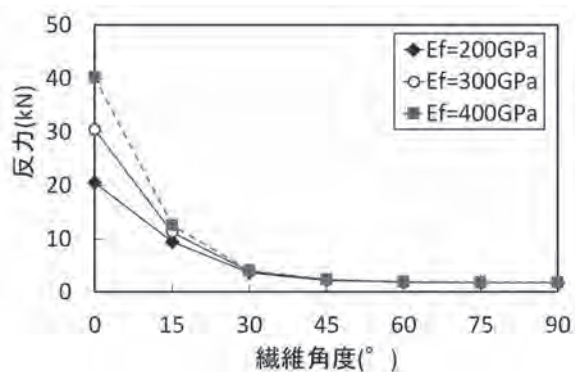


図6 引張試験シミュレーションの概要



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図7 引張試験シミュレーション結果
(繊維体積含有率 55%)

シミュレーション結果を図9に示す。引張試験シミュレーション同様、繊維弾性率の影響は繊維角度 0° では顕著であるが、角度が大きくなるとともに小さくなった。繊維配列の影響はほぼ見られないが、わずかながら直線配列のほうが大きな値を示した。

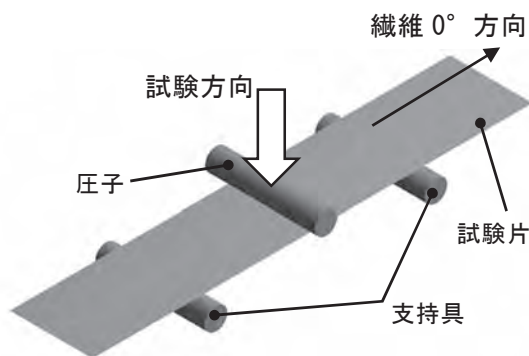


図8 曲げ試験シミュレーションの概要

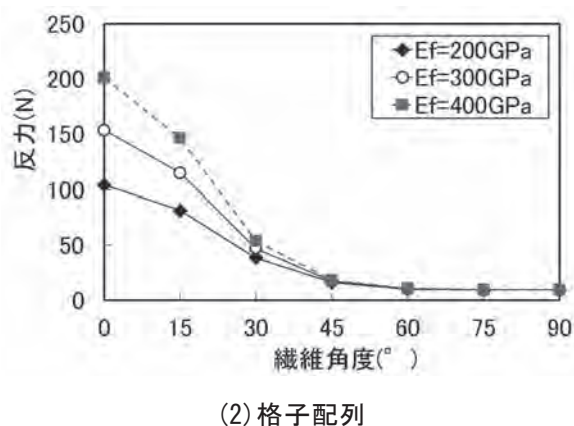
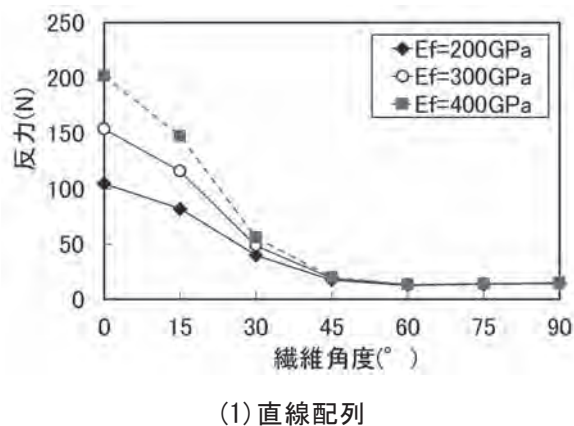


図9 曲げ試験シミュレーション結果
(繊維体積含有率 55%)

4.3 円管の曲げ試験シミュレーション

図10に示す3点曲げモデルを作成し、円管の曲げ試験シミュレーションを実施した。円管寸法は外径 16mm×厚さ 1mm×長さ 300mmとした。試験ジグ寸法は圧子先端半径 75mm, 支持具半径 30mm, 支持具支点間距離 200mmとした。試験方法, 評価方法は平板の曲げシミュレーション方法に準じた。

角度基準方向(繊維 0° 方向)は円管軸と平行とし、局所座標系処理を行うため、ANSYS Workbench の積層機能に加え、「要素の向き」コマンドを使用して定義した。これにより各要素上に局所座標系が作成され、積層機能にて入力した繊維角度が正しく反映される(図11)。

シミュレーション結果を図12に示す。全体の傾向としては平板の引張シミュレーション結果(図7)に近く、繊維角度が大きくなるほど

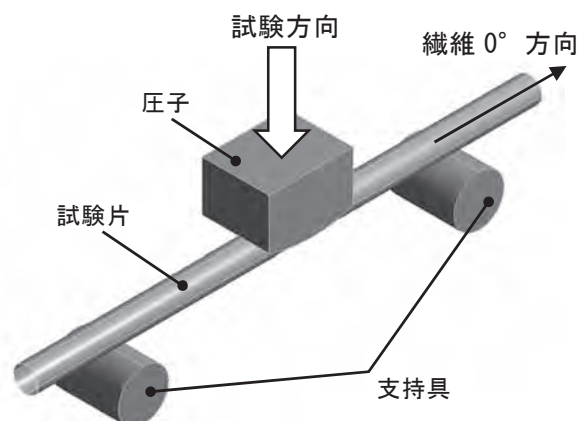


図10 曲げ試験シミュレーションの概要

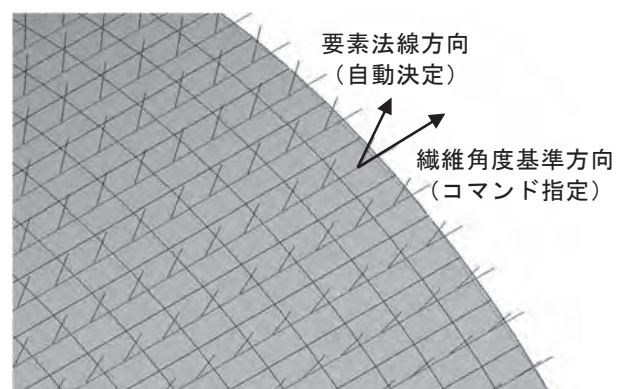
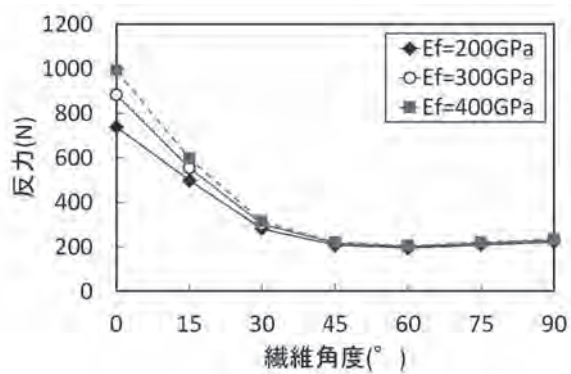
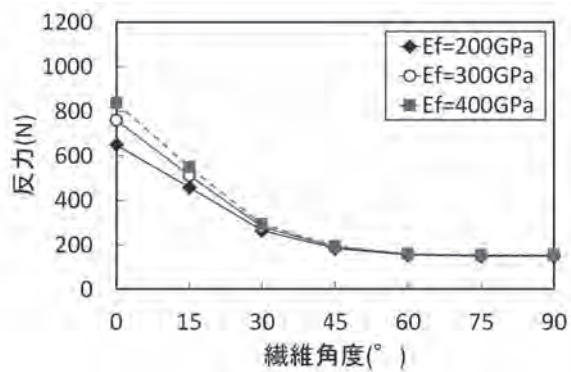


図11 要素上に作成される局所座標系

繊維弾性率の影響が見られなくなった。ただし、平板よりも繊維配列の影響が大きく現れている。また、繊維弾性率による反力の変化率は平板よりも小さくなっている。



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図 12 曲げ試験シミュレーション結果
(繊維体積含有率 55%)

4.4 円管の扁平試験シミュレーション

図 13 に示す計算モデルを用いて、円管の扁平試験シミュレーションを実施した。円管寸法は外径 16mm×厚さ 1mm×長さ 10mm とし、試験片を 1mm 変形させた際の圧子反力を計測した。

シミュレーション結果を図 14 に示す。全体の傾向としては平板の曲げシミュレーション結果(図 9)を左右反転させた形状となっている。同じ円管を対象にしたシミュレーションであるが、図 12 とは異なり、繊維配列の影響はわずかであった。

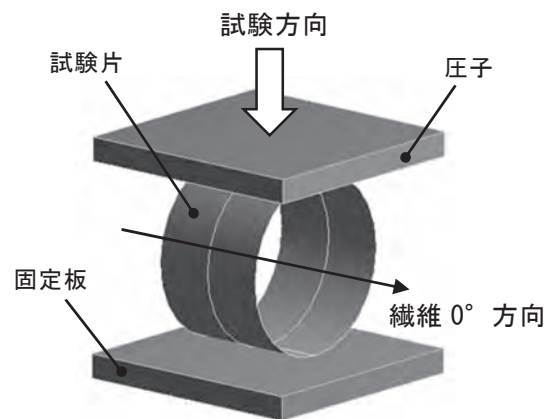
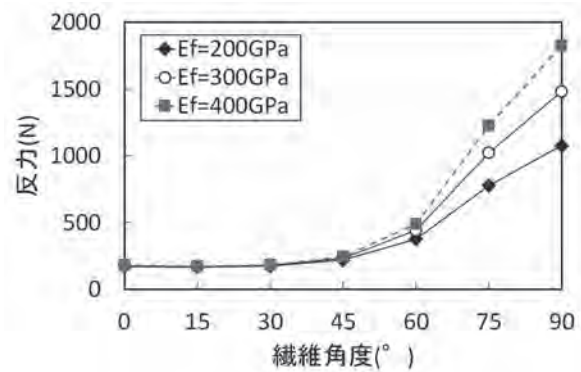
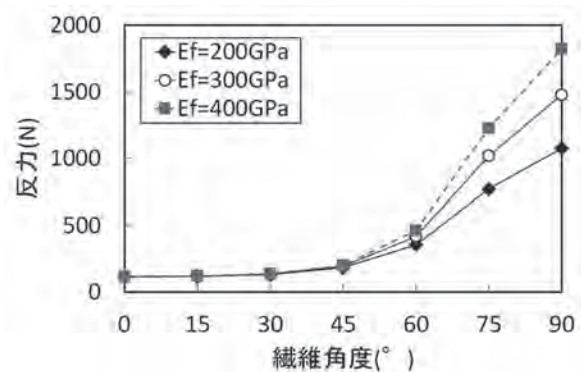


図 13 扁平試験シミュレーションの概要



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図 14 扁平試験シミュレーション結果
(繊維体積含有率 55%)

4.5 円管のねじり試験シミュレーション

図 15 に示す計算モデルを用いて、円管のねじり試験シミュレーションを実施した。円管寸法は外径 16mm×厚さ 1mm×長さ 300mm とした。

ねじり角度は 5° とし、ねじり部の変位拘束は(1)軸方向自由、(2)軸方向固定の2条件とした。評価項目は完全固定部の円周方向反力とした。

計算結果を図 16, 17 に示す。ねじり部の変位拘束条件を軸方向自由とした場合には繊維方向 45° で、軸方向固定とした場合には繊維角度

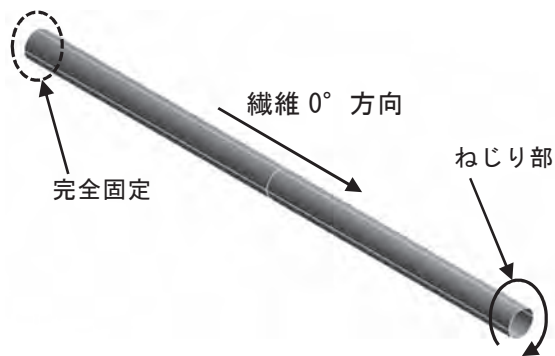
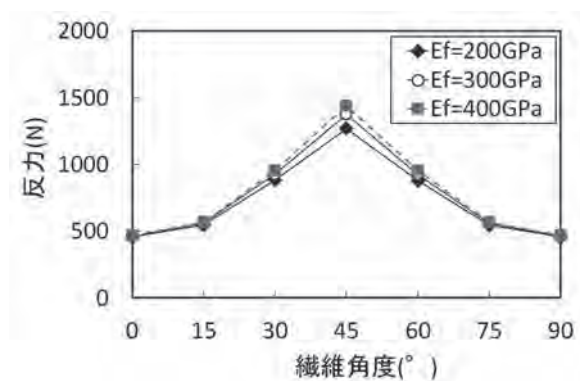


図 15 ねじり試験シミュレーションの概要

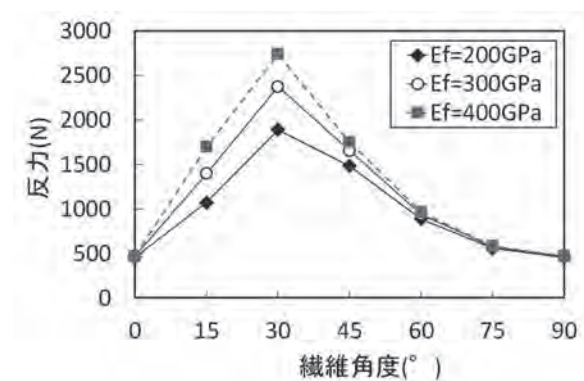
30° にて反力の最大値を示した。繊維配列の影響は強く現れ、直線配列のほうが大きな値を示した。また、繊維弾性率の影響は軸方向固定条件のほうが大きくなった。

4.6 考察

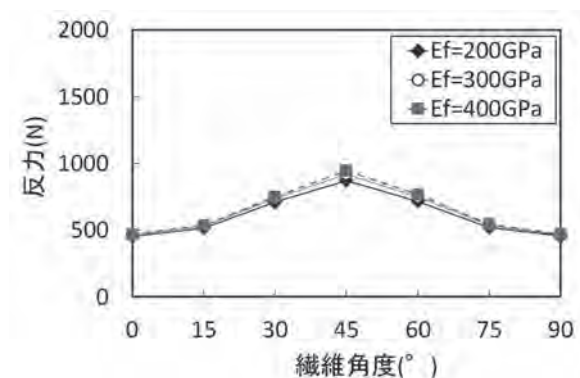
UD 材の等価物性値を用いたマクロ構造解析では、円管の曲げ試験シミュレーションとねじり試験シミュレーションにて繊維配列による影響が大きく現れた。この2つのシミュレーションにおいて、試験片は試験方向への単純な変形ではなく、曲げ試験シミュレーションでは曲げと扁平の複合変形（図 18）、ねじり試験シミュレーションではねじり角度との差によるせん断変形を生じる。そのため、他のシミュレーションよりも繊維直交方向の縦弾性率、せん断弾性



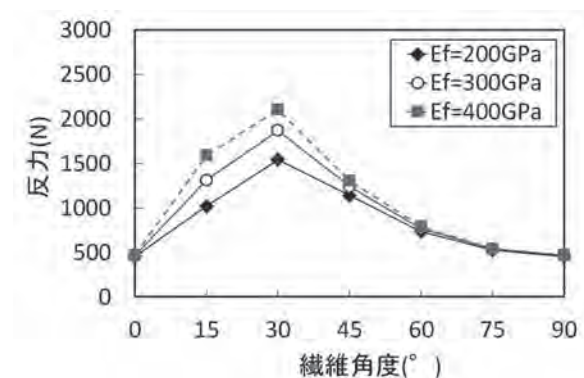
(1) 直線配列



(1) 直線配列



(2) 格子配列



(2) 格子配列

図 16 ねじり試験シミュレーション結果
(繊維体積含有率 55%：軸方向自由)

図 17 ねじり試験シミュレーション結果
(繊維体積含有率 55%：軸方向固定)

率の影響を受けることになり、繊維配列による違いが大きくなったと考えられる。

実際の CFRP 製品の変形挙動はさらに複雑であることから、計算精度を低下させないためにも繊維配列については可能な限り正確にモデル化する必要があるといえる。特に、物性値を過剛性とする繊維配列モデルの採用には注意が必要である。

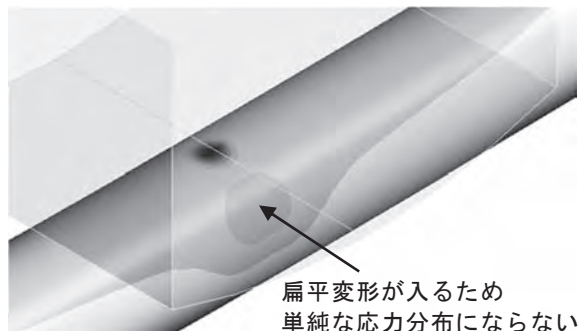


図 18 円管の曲げシミュレーション結果
(繊維 0° 方向：相当応力分布)

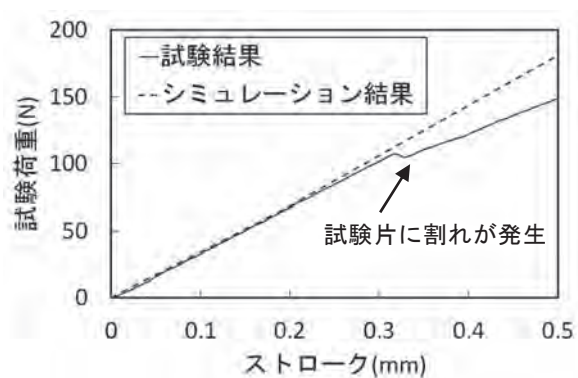


図 19 曲げ試験結果（繊維 0° 方向）

要である。

また、CFRP の強度試験より物性値を得ようとする場合には、繊維配列の影響を得られるよう、複数の試験を組み合わせる必要があるといえる。

5. 試験結果からの物性値同定結果

UD 材を用いた繊維角度 0° 、 45° の円管を作成し、曲げ試験、扁平試験と同試験シミュレーションを実施した。なお、試験に用いた UD 材は樹脂物性値が非公開となっており、シミュレーション実施においては、まず繊維角度 0° の曲げ試験結果より物性値を同定することとした。

繊維角度 0° の曲げ試験および同シミュレーション結果を図 19 に示す。実際の試験において、試験片にはストローク 0.3mm で割れが発生したが、そこまでの線形領域にて樹脂特性を同定した。繊維配列には、格子配列を用いた。

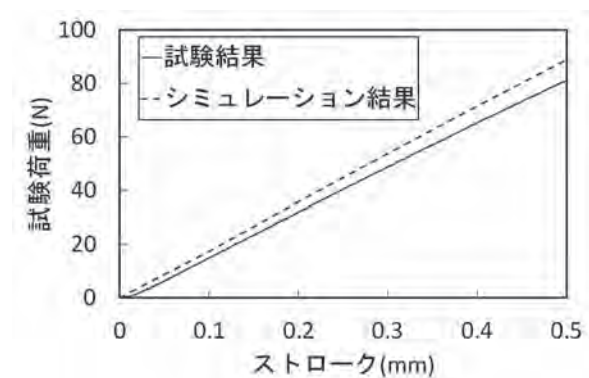


図 21 扁平試験結果（繊維 0° 方向）

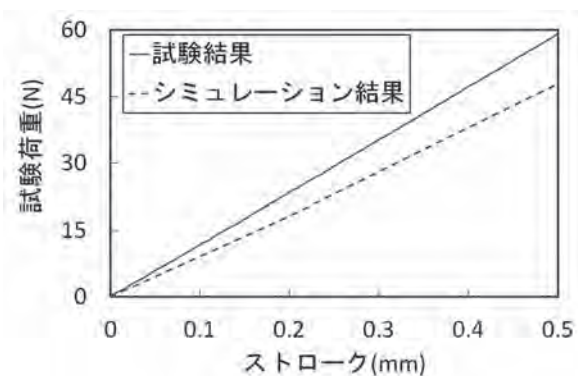


図 20 曲げ試験結果（繊維 45° 方向）

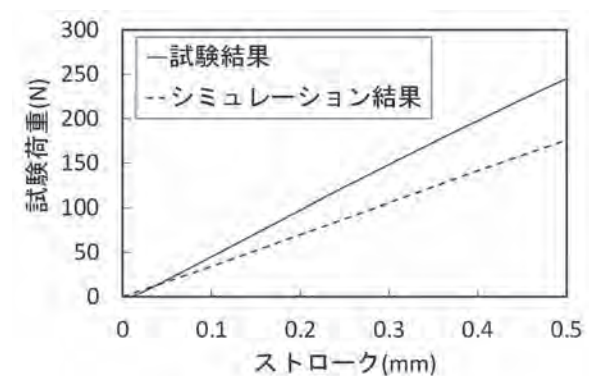


図 22 扁平試験結果（繊維 45° 方向）

同定した樹脂特性を用いたシミュレーション結果を各々の試験結果と合わせて図 20~22 に示す。繊維角度 0° の結果は比較的良好一致したが、繊維角度 45° の結果はシミュレーションのほうが低い値を示した。これには CFRP の成形時における角度や寸法のバラツキ、試験におけるジグと試験片の平行度などが影響したものと考えられる。また、繊維配列も完全な格子配列であるとは限らず、その影響も少なからず現れていると考えられる。

6. 今後の課題

本研究で実施したマクロ構造解析は線形範囲に限定されている。CFRP 製品の設計において安全性を確保するためには破壊や層間剥離のモデル化は重要となるため、これらの点については今後も研究を進めたい。

なお、本研究で用いた ANSYS Workbench には円筒座標系による変位出力、全体座標系と一致しない繊維配列モデルにおける直交異方性特性値の出力、多層ソリッドシェル要素作成時の法線処理など、ソフトウェア上の不具合がいくつか存在した。今後の改善を期待したい。

7. 結 言

- (1) UD 材を用いた均質化解析を実施し、繊維配列により繊維直交方向の等価物性値が変化することを確認した。
- (2) マクロ構造解析により、等価物性値や繊維配列が与える影響を調査した。その結果、試験方向以外の変形成分が生じる条件下では、繊維配列の影響が大きくなることを見出した。
- (3) UD 材による曲げ試験、扁平試験と同試験シミュレーションを実施し、比較的良好一致した解を得た。

参考文献

- 1) 前田 豊, “炭素繊維の最先端技術”, シーエムシー出版, 2007, pp.159-253.
- 2) 井塚 淑夫, “炭素繊維 複合化時代への挑戦”, 繊維社, 2012, pp.117-128.
- 3) 山岸暢, 吉田光則, 鈴木耕裕, “FEM による異方性複合材料構造体の構造解析”, 北海道立工業試験場報告, No.298, 1999, pp.77-83.

決め押し加工シミュレーション技術の開発

櫻井 貴文* 片山 聡* 田村 信*

Development of Computer Simulation Technology for Bottoming

SAKURAI Takafumi*, KATAYAMA Satoshi* and TAMURA Makoto*

抄 録

シェル要素を用いた決め押し加工シミュレーションの精度向上を目的に、LS-DYNA の新型シェル要素とリスタート機能を用いたシミュレーション技術を開発した。新型および従来型シェル要素定式の切り替えを用いた V 曲げおよびハット曲げの決め押し加工シミュレーションを行い、開発したシミュレーション技術の有効性を確認した。また、曲げ試験の結果との比較を行い、実際のプレス加工に適用可能であることを示した。

1. 緒 言

プレス成形におけるスプリングバックを抑制する加工技術の一つとして、決め押し加工が用いられている^{1)・2)}。これをプレス成形シミュレーションで計算しようとした場合、一般的に用いられるシェル要素では板厚方向の応力を考慮できないため、決め押し加工の効果を予測することはできない。また、シェル要素をソリッド要素に置き換えて計算した事例もあるが、計算時間が膨大となるほか、要素細分化や材料モデルの汎用性にも問題を抱えているため、現実的な手法ではない³⁾。

2009年よりLSTC社製動的陽解法有限要素法ソフトウェアLS-DYNAに搭載されたシェル要素の新型要素定式 (ELFORM=26) は板厚方向の応力を考慮できるものの、面内方向応力への応答が過敏であり、しわの予測精度が著しく低いという課題を抱えている⁴⁾。

そこで本研究ではLS-DYNAのリスタート機能を用いた要素定式の切り替えにより、シェル要素にて精度良く決め押し効果を予測できるシミュレーション手法を開発し、実験との比較検討を行った。

2. 決め押し加工シミュレーション

2.1 シミュレーションの流れ

決め押し加工シミュレーションの流れを図 1 に示す。実際の加工では曲げ・決め押し・スプリングバックが一連の工程（現象）となっているが、シミュレーションではそれぞれの工程（現象）ごとに一旦シミュレーションを終了させる。決め押し加工の前後で要素定式を変更し、ソフトウェアのリスタート機能を用いて前工程を引き継いで計算を行い、一連の決め押し加工シミュレーションとする。

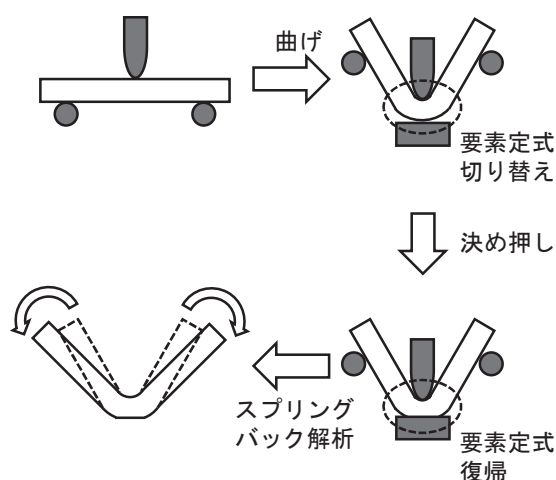


図1 シミュレーションの流れ

* 研究開発センター

本研究では、プリポストソフトウェアとして LSTC 社製 LS-PrePost 4.1 を、一連の決め押し加工シミュレーションソフトウェアとして LSTC 社製動的陽解法有限要素法ソフトウェア LS-DYNA を用いた。

2.2 有限要素モデルと要素定式

3 次元モデル（シェル）と、比較のため 2 次元モデル（平面ひずみ）でシミュレーションを行った。3 次元モデル（シェル）については、ELFORM=16（完全積分要素，以下 F16）と ELFORM=26（板厚方向の応力を考慮できる完全積分要素，以下 F26）の 2 種類の要素定式を用いて計算を行った。F16 は計算が高速であるが、板厚方向の応力を考慮できないため板を潰すような現象を扱うことができない。一方、F26 は板厚方向の応力を考慮できるため板を潰すような現象を扱うことができるが、しわの予測精度が著しく低いことと、F16 に比べて計算速度が遅いという短所がある。

2.3 材料モデル

金型はすべて剛体とし、試験片は異方性を考慮しない等方性弾塑性体とした。試験片は、SPCC（公称板厚 1.0mm）および SUS304（公称板厚 1.0mm）の 2 種類を用いた。これらの

材料について、比較実験で使用する板材を圧延方向に対して 0° の方向に JIS Z 2241 による 13B 号試験片を採取し、（株）島津製作所製万能材料試験機 AG-250kNI を用いて引張試験を行った。この結果を基に、材料特性を表 1 のように設定した。

2.4 接触モデル

接触面はすべて面－面型接触とし、静摩擦係数および動摩擦係数ともに 0.15 とした。他はソフトウェアのデフォルトとし、特殊なオプションは加えていない。

2.5 計算方法

2 次元モデルと 3 次元モデルそれぞれのシミュレーション方法を図 2 に示す。一般的なシミュレーションでは計算途中で要素定式を変更しないが、本研究では計算途中で要素定式の変更

表 1 材料特性

	SPCC	SUS304
質量密度 (kg/m ³)	7850	7850
ヤング率 (GPa)	200	200
ポアソン比	0.3	0.3
降伏応力 (MPa)	260	320
接線係数 (MPa)	680	1200

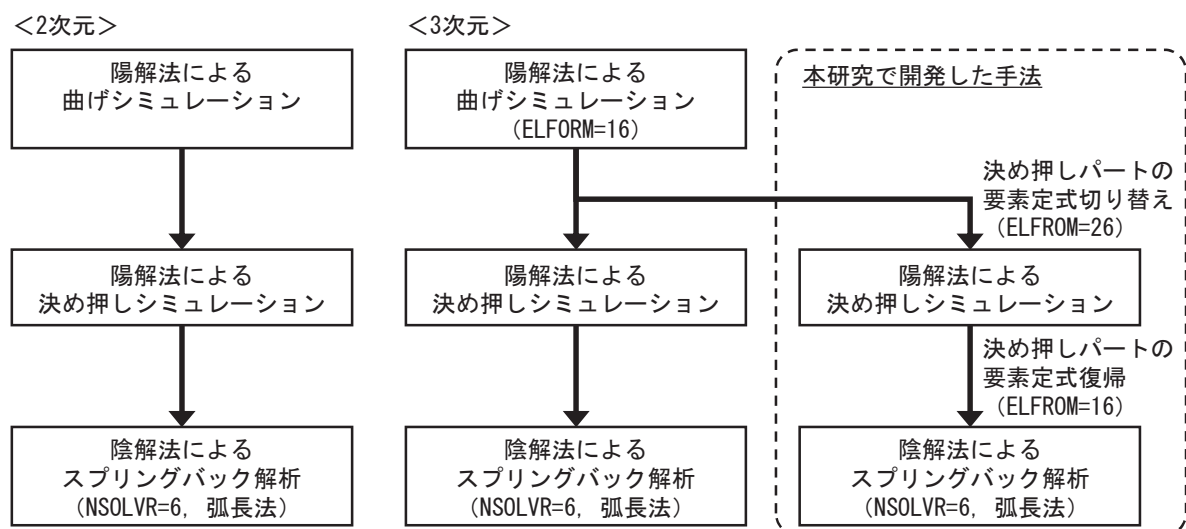


図 2 シミュレーションの流れ

と復帰を行う。まず、第1工程として試験片の曲げシミュレーションを行う。第1工程終了時に出力されるリスタートファイルを引き継いだうえで要素定式を F26 に変更し、第2工程の決め押し加工シミュレーションを行う。第2工程終了時には、出力されるリスタートファイルをファイルを引き継いだうえで要素定式を F16 に復帰し、スプリングバック解析を行う。この手法を用いることにより、一般的には相反する高速性と計算精度を両立させることができる。V 曲げの決め押し加工シミュレーションについて、F16 の計算時間を 1 とした場合の各モデルの計算速度比を図 3 に示す（値が小さいほど計算速度が速い）。

3. 曲げ

3.1 V 曲げシミュレーション

2 次元モデルの計算モデルを図 4 に、3 次元モデルの計算モデルを図 5 に示す。形状の対称性を考慮し、2 次元モデルは 1/2 モデルとし、3 次元モデルは 1/4 モデルとした。試験片（フルモデル寸法）は、幅 20mm×長さ 100mm×厚さ 1.0mm の一様形状とした。なお、3 次元モデルについて、決め押し加工により応力がかかる部分は、ほかの部分よりもメッシュサイズを小さくした。

図 6 に決め押し工程でのパンチストロークと板厚の比較を示す。2 次元モデルはパンチストロークと板厚が近い値を示しており、板厚減少が適切に計算されている。一方で、3 次元モデ

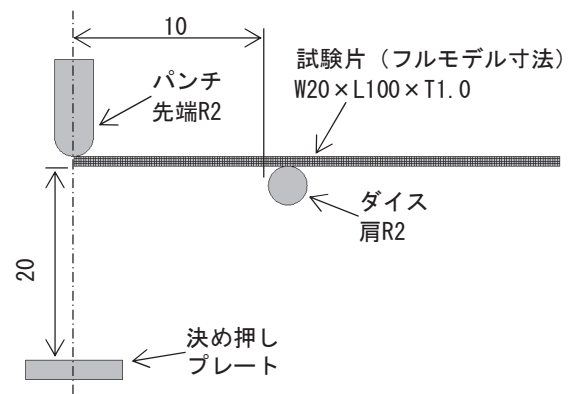


図 4 計算モデル（2 次元）

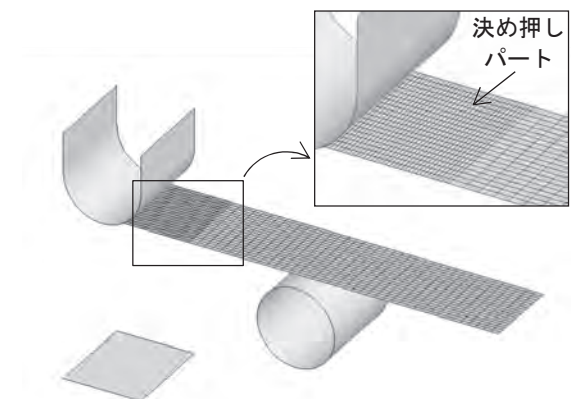
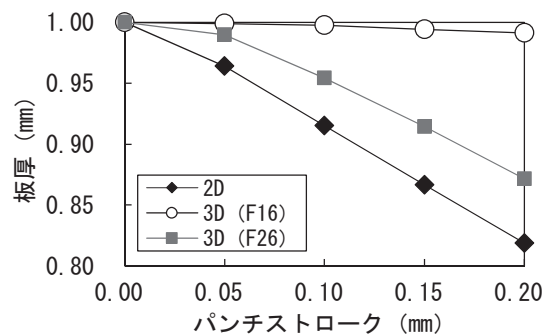
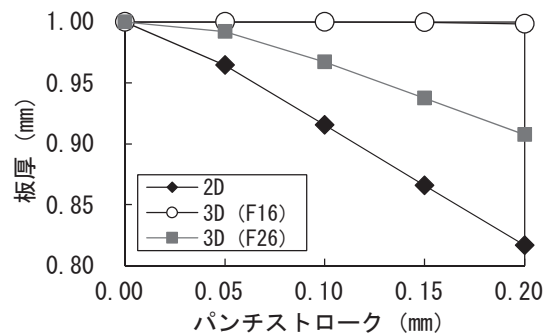


図 5 計算モデル（3 次元）



(a) SPCC



(b) SUS304

図 6 パンチストロークと板厚の比較

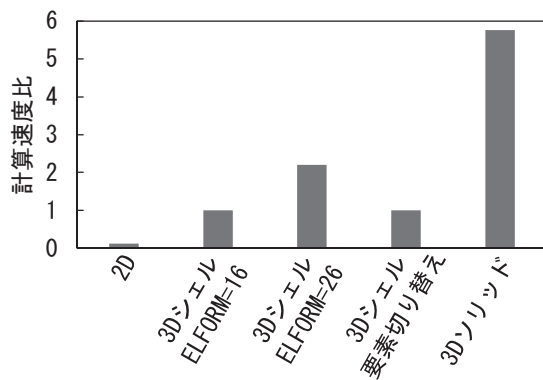


図 3 計算速度の比較

ル (F16) はパンチストロークが大きくなっても板厚の変化は微小であり、板厚減少が適切に計算されていない。3次元モデル (F26) はストロークの半分程度の板厚変化となっている。

図7にパンチストロークと曲げ角度の比較を示す。2次元モデルおよび3次元モデル (F26) はパンチストロークが大きくなると曲げ角度が狭くなっており、決め押し加工の効果が計算されている。両者の間には差異が見られるが、板厚減少量 (= 決め押し加工量) が異なるためと考えられる。一方で、3次元モデル (F16) は曲げ角度が狭くなっておらず、決め押し加工を適切に計算できていない。

3.2 V曲げ実験

V曲げ実験について、図8に実験の様子と試験後の試験片を示す。実験ジグは計算モデルと同じ寸法で製作し、万能材料試験機に取り付けて実験を行った。

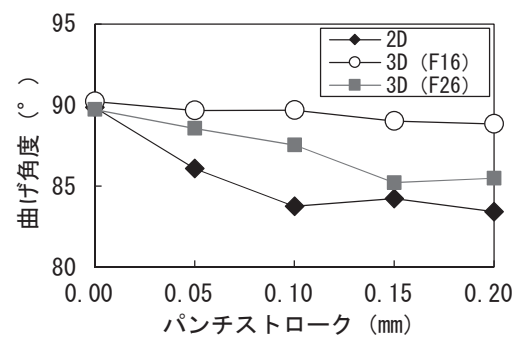
3.3 結果の比較

図9に決め押し加工シミュレーションおよび実験における板厚減少量と曲げ角度の比較を示す。3次元モデル (F16) は板厚減少が計算されていないため、比較対象から除いた。3次元モデル (F26) で計算された曲げ角度は2次元モデルや実験値と近い値となっている (最大誤差 0.7°)。このことから、3次元モデル (F26) は決め押し加工シミュレーションに適用できると考えられる。

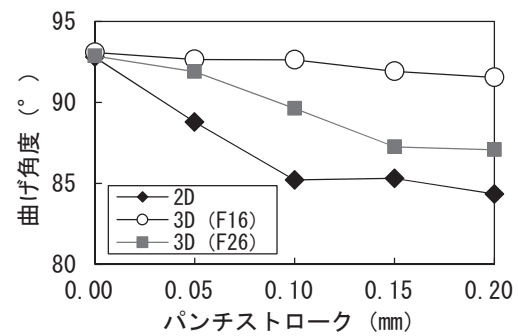
4. ハット曲げ

4.1 ハット曲げシミュレーション

2次元モデルの計算モデルを図10に、3次元モデルの計算モデルを図11に示す。形状の対称性を考慮し、2次元モデルは1/2モデルとし、3次元モデルは1/4モデルとした。試験片 (フルモデル寸法) は、幅20mm×長さ100mm×厚さ1.0mmの一様形状とした。板押さえは一定のすきま量 (0.1mm) を与え、試験片に張力

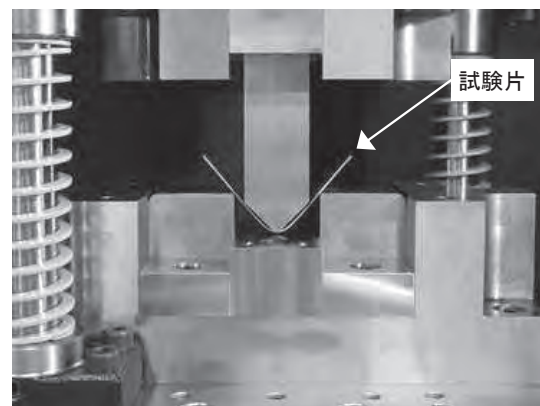


(a) SPCC

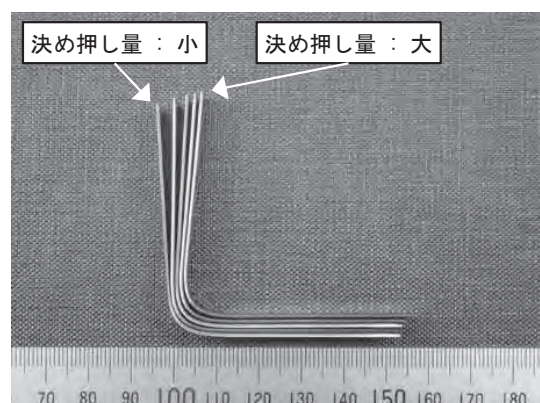


(b) SUS304

図7 パンチストロークと曲げ角度の比較



(a) V曲げ実験の様子



(b) V曲げ後の試験片

図8 V曲げ実験

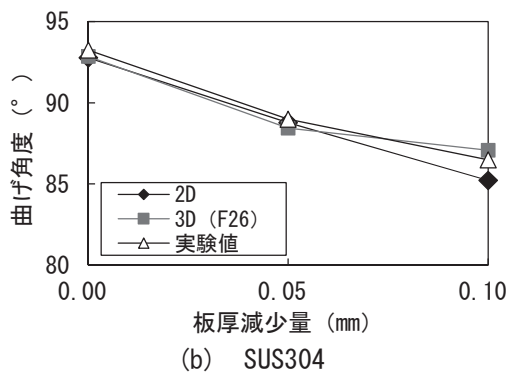
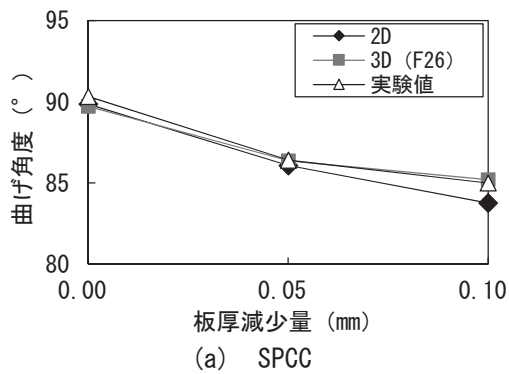


図 9 板厚減少量と曲げ角度の比較

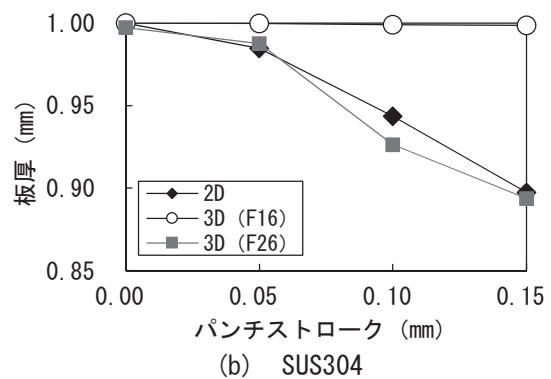
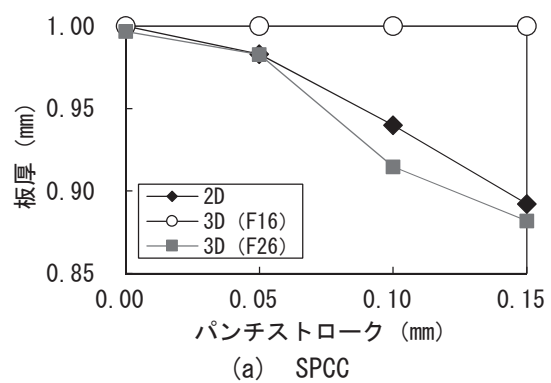


図 12 パンチストロークと板厚の比較

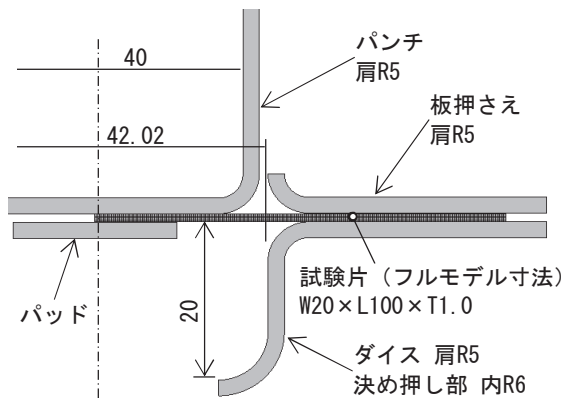


図 10 計算モデル (2 次元)

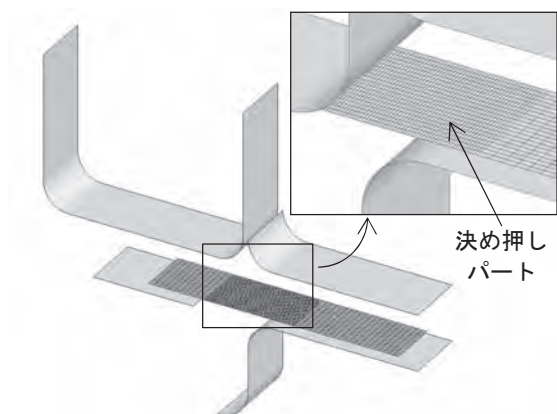


図 11 計算モデル (3 次元)

が生じないようにした。また、パッドの押し付け力は 200N とした。なお、3 次元モデルについて、決め押し加工により応力がかかる部分は、ほかの部分よりもメッシュサイズを小さくした。

図 12 に決め押し工程でのパンチストロークと板厚の比較を示す。2 次元モデルおよび 3D モデル (F26) はパンチストロークが大きくなるにつれて板厚が減少している。先述の V 曲げと比較すると、圧縮された材料が移動する場所 (すきま) が少ないため要素の食い込みが生じており、板厚減少量はパンチストロークよりも小さな値となっている。一方で、3 次元モデル (F16) はパンチストロークが大きくなっても板厚の変化は微小であり、板厚減少が適切に計算されていない。

図 13 にパンチストロークと曲げ角度の比較を示す。2 次元モデルおよび 3 次元モデル (F26) はパンチストロークが大きくなると曲げ角度が狭くなっており、決め押し加工の効果が計算されている。両者の間には差異が見られ

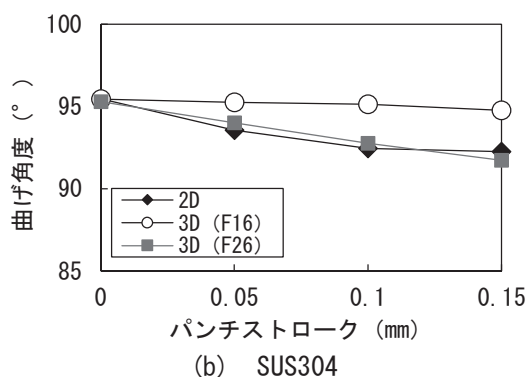
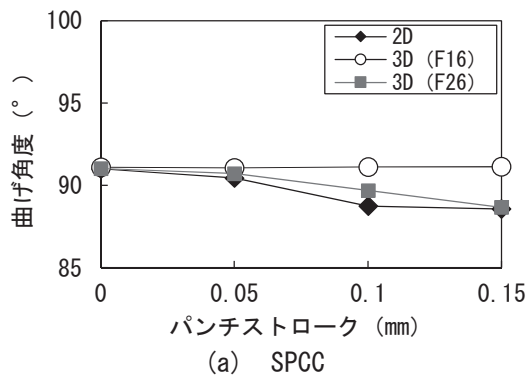


図 13 パンチストロークと曲げ角度の比較

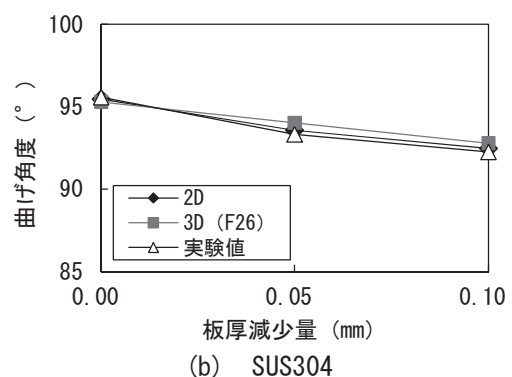
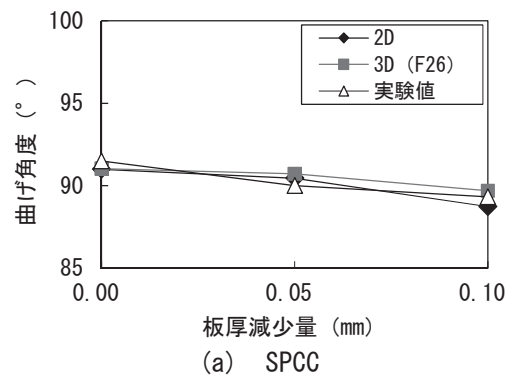
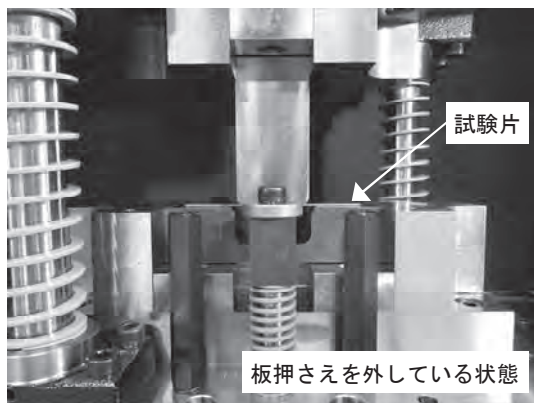
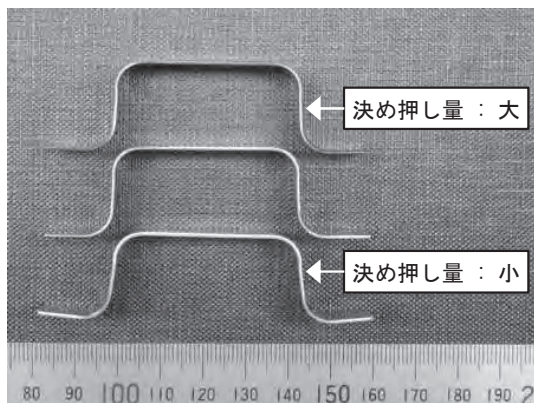


図 15 パンチストロークと板厚の比較



(a) ハット曲げ実験の様子



(b) ハット曲げ後の試験片

図 14 ハット曲げ実験

るが、板厚減少量（＝決め押し加工量）が異なるためと考えられる。一方で、3次元モデル（F16）は曲げ角度が狭くなっておらず、決め押し加工を適切に計算できていない。

4.2 ハット曲げ実験

ハット曲げ実験について、図 14 に実験の様子と試験後の試験片を示す。実験ジグは計算モデルと同じ寸法で製作し、万能材料試験機に取り付けて実験を行った。

4.3 結果の比較

図 15 に決め押し加工シミュレーションおよび実験による板厚減少量と曲げ角度の比較を示す。3次元モデル（F16）は板厚減少が計算されていないため、比較対象から除いた。3次元モデル（F26）で計算された曲げ角度は2次元モデルや実験値と近い値となっている（最大誤差 0.5° ）。このことから、3次元モデル（F26）は決め押し加工シミュレーションに適用できると考えられる。

5. 結 言

- (1) LS-DYNA のリスタート機能を用い，要素定式の切り替えと復帰を行う決め押し加工シミュレーション技術を開発した。
- (2) V 曲げの決め押し加工シミュレーションと実験を行い，開発したシミュレーション技術が 2 次元モデル（平面ひずみ）や実験値と近い値となることを確認した。
- (3) ハット曲げの決め押し加工シミュレーションと実験を行い，開発したシミュレーション技術が 2 次元モデル（平面ひずみ）や実験値と近い値となることを確認した。

参考文献

- 1) 岩谷二郎，“高強度鋼板の実用化のためのプレス成形技術”，神戸製鋼技報，Vol.52，No.3，2002，pp.23-27.
- 2) 吉田亨ら，“高強度鋼板の形状凍結性改善技術”，新日鉄技報，No.378，2007，pp.25-29.
- 3) 小川孝行，“高張力鋼板のプレス加工における決め押しがスプリングバック抑制に及ぼす効果”，広島大学学位論文（博士（工学）），2011，pp.32-66.
- 4) www.lancemore.jp/report/report_006.html

人工光リーフレタス栽培における 遠赤色光が生育と品質に及ぼす影響

種村 竜太* 大川原 真* 石井 治彦* 木嶋 祐太**

Effects of far-red light on growth and quality of lettuce

TANEMURA Ryota*, OKAWARA Makoto*, ISHII Haruhiko* and KIJIMA Yuta**

抄 録

完全人工光リーフレタス栽培における最適光環境条件を明らかにするため、遠赤色光が生育と品質に及ぼす影響について検討した。遠赤色光の照射は、葉の縦伸長を促進し、地上部生体重を増大させる効果があることを明らかにした。一方、品質については葉色の淡色化や硝酸イオン濃度の上昇、光強度によっては節間伸長の促進による抽苔などマイナスに働くこともあることが明らかとなった。

1. 緒 言

光・温度・湿度・CO₂濃度などの環境条件を植物に最適な条件で制御することが可能な完全人工光植物工場（以下、「植物工場」）は、成長産業と位置づけられ、参入企業は増加傾向にある。また、植物工場野菜の特徴としては無農薬、洗わずにそのまま食べられる、長持ちする、えぐみや苦みが少なく食べやすい、ロスが少ないなどが挙げられ¹⁾、消費者や食品加工業者へ浸透しつつある。しかし、植物工場に関する技術は発展途上であり、装置や生産コストの低減技術や、生産性向上技術の開発が求められている¹⁾。

植物工場で用いられる光源はこれまで主に蛍光灯であったが、近年は長寿命で消費電力が少なく、発光波長を調節することにより植物に最適な光質を作ることが可能なLEDに移行している。植物の光合成は、クロロフィルが光を吸収することにより行われ、光吸収スペクトルが赤色光と青色光の波長にピークがあることから、最適な光質については赤色や青色LEDを用いて様々な試験が行われてきた^{2~6)}。近年は遠赤

色光LEDを用いた研究も行われ^{7~9)}、生育促進効果が報告されているが、硝酸イオン含量など品質に与える影響については明らかにされていない。

そこで、本研究では、完全人工光リーフレタス栽培における遠赤色光が生育と品質に及ぼす影響について検討した。

2. 材料および方法

2.1 光環境条件

育苗時は昼白色のHf蛍光灯（パナソニック（株）、FHF32EX-N-H）を用い、光量子束密度（PFD） $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、明期16時間とした。定植後は、色温度4200Kの白色、ピーク波長660nmの赤色、ピーク波長740nmの遠赤色が組み込まれ、色ごとに調光可能なパネル式LED（オリンピア照明（株））を使用した。明期を18時間、定植面におけるPFDを $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とし、白色と赤色の比率（PFD比）を1:1とした。試験区は遠赤色光を照射しない対照区（白100, 赤100）、遠赤色12.5 μmol 区（白93.8, 赤93.8, 遠赤12.5）、25 μmol 区（白87.5, 赤87.5, 遠赤25.0）の3

* 下越技術支援センター

** 中越技術支援センター

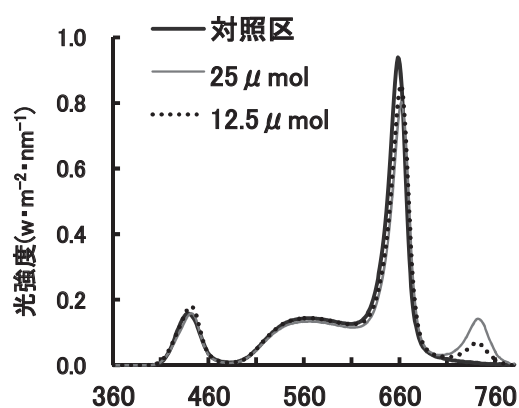


図1 分光特性

試験区を設けた。図1に各試験区の分光特性を示す。

2.2 栽培方法

試験は室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $70 \pm 5\%$ の室内で行った。品種は‘ハンサムグリーン’（横浜植木）を供試した。8月8日にウレタンキューブ（ $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 3.0\text{cm}$ ）に播種し、発芽後はOAT A 処方 1/4 濃度（EC 0.7dS/m ）の培養液により育苗した。8月25日にプラスチックコンテナ（ $W390 \times D540 \times H90\text{mm}$ ）に8株ずつ定植し、湛液式水耕栽培（培養液量：8L）により試験を行った。定植後の培養液はOAT A 処方 1/2 濃度（EC 1.4dS/m ）とし、植物の吸水による減水分を随時水道水で補充し、2～3日ごとに肥料を追加してECを 1.4dS/m に調整した。定植後は培養液の循環や更新は行わず、栽培終了まで通気処理を行った。

2.3 調査方法

9月16日に収穫し、地上部と調整葉（黄化

した葉などを取り除いた可食部の重量）の生体重・全葉数・生葉数（黄化した葉などを取り除いた葉数）・草丈の測定を行った。生育調査終了後は -40°C で凍結したのちに凍結乾燥および粉碎し、80%熱エタノール抽出を行い、硝酸イオン含有量をCataldo法、糖含有量をフェノール硫酸法により測定した。また、80%アセトン抽出法により葉のクロロフィル含量を測定した。

3. 結果および考察

遠赤色光照射による障害発生は認められなかった。地上部重や調整葉重は遠赤色光の照射により対照区と比較して20%程度重くなったが、 $12.5\mu\text{mol}$ 区と $25.0\mu\text{mol}$ 区に差はなかった（図2、表1）。出荷規格を80gと想定した場合、遠赤色光照射により栽培期間を2日程度短縮することが可能と考えられる。地上部の乾物率（地上部の乾物重/生体重）は遠赤色光の照射により対照区と比較して低くなり、地上部乾物重は差がみられなかった（表1）。最大葉長は、無処理区では15.1cmであったのに対し、 $12.5\mu\text{mol}$ 区では17.8cm、 $25\mu\text{mol}$ 区では20.7cm

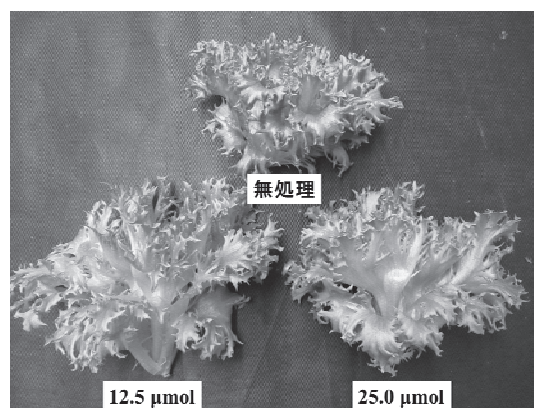


図2 調整後の状況

表1 遠赤色光が生育に及ぼす影響

遠赤色光	地上部重 (g/株)	調整葉重 (g/株)	最大葉長 (cm)	全葉数 (枚/株)	生葉数 (枚/株)	葉面積 (cm^2 /株)	地上部乾物重 (g/株)
無処理	79.6 b ^z	76.6 b	15.1 c	15.8 b	11.8 a	593.7 b	3.3 a
$12.5 \mu\text{mol}$	96.9 a	93.2 a	17.8 b	16.3 b	11.8 a	715.9 a	3.4 a
$25 \mu\text{mol}$	97.8 a	90.6 a	20.7 a	18.0 a	13.0 a	665.4 ab	3.3 a

z: 同一アルファベット間は、Tukey法により5%水準で有意差なし

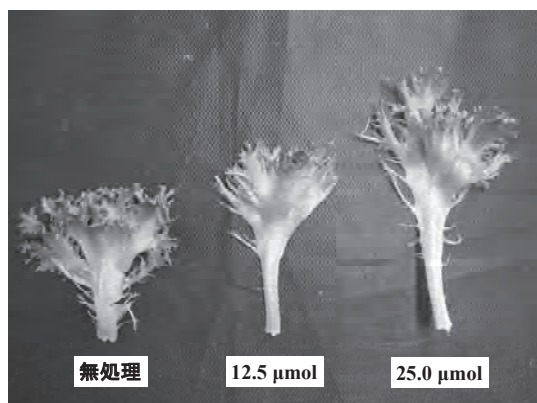


図 3 最大葉の状況

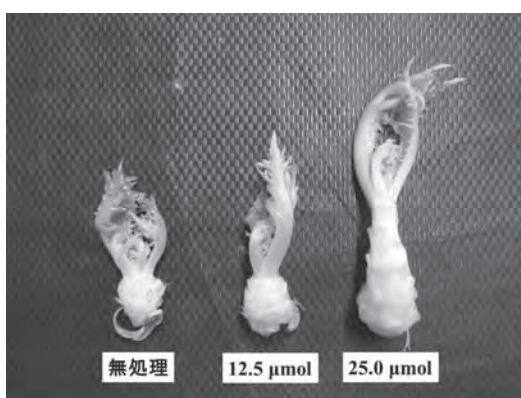


図 4 抽苔の状況

であり、遠赤色光の照射量が多いほど長くなる傾向がみられた（表 1，図 3）。遠赤色光の照射により葉全体の伸長が促進されるのではなく、主に中肋部の伸長が促進されることによって葉長が長くなり、葉の形態が大きく変化していた（図 3）。25μmol 区では無処理区や 12.5μmol 区と比較して全葉数は多かったが、黄化葉も多かったため生葉数は差がなかった（表 1）。葉面積は、12.5μmol 区で大きく、対照区と 25μmol 区では差がなかった（表 1）。25μmol 区では、節間が長く抽苔していた（図 4）。遠赤色光の付加照射による生長促進効果についてはレタス、コマツナ、チンゲンサイなどで報告されている⁷⁻⁹⁾。本試験においても遠赤色光の照射により生体重が増加していた。12.5μmol 区では、対照区と比較して生葉数に差がなく葉面積が増加していたことから、1 枚の葉が大きくなることによって生体重が増加し、25μmol

区では葉面積に差がなく生葉数が多かったことから葉数が増加することによって生体重が増加していたと考えられる。遠赤色光の照射による伸長促進効果は赤色光と遠赤色光の比率の変化によってフィトクロム光平衡が変化し、茎や葉脈の伸長速度が増大するために茎長、節間長、葉面積が増加することによる¹⁰⁾。遠赤色光の光合成への寄与は無視できると考えられるため¹⁰⁾、生体重増加の原因は遠赤色光自体が光合成を促進するのではなく、茎長や葉脈の伸長が促進し、植物の光源への接近や受光葉面積の増大などにより受光量が増加し、光合成量が増加したためと考えられる。遠赤色光の照射による生育促進効果には品種間差が大きいことから⁹⁾、品種ごとに効果を検証する必要がある。

調整葉の硝酸イオン含量は、対照区で 350mg/100gFW 程度であったのに対し、12.5μmol 区および 25μmol 区では約 10%高い 380mg/100gFW 程度であった（図 5）。本試験で使用した培養液の窒素成分のうち約 90%が硝酸態窒素である。根から吸収された硝酸イオンは硝酸還元酵素（NR）により亜硝酸イオンへ、亜硝酸還元酵素（NiR）によりアンモニアへ還元され、この硝酸還元には光合成で生成される NADPH が関与している¹¹⁾。窒素の栄養条件が十分な場合、遠赤色光を照射して赤色光と遠赤色光の比率を変化させても NR 活性は変化しない¹²⁾。一方、乾物率と硝酸イオン濃度には負の相関がある⁴⁾。本試験では、遠赤色光

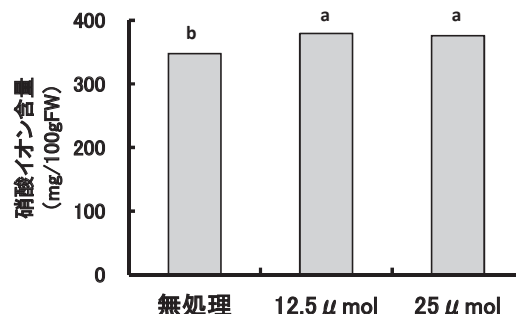


図 5 調整葉の硝酸イオン含量

同一アルファベット間には、Tukey 法により 5%水準で有意差なし

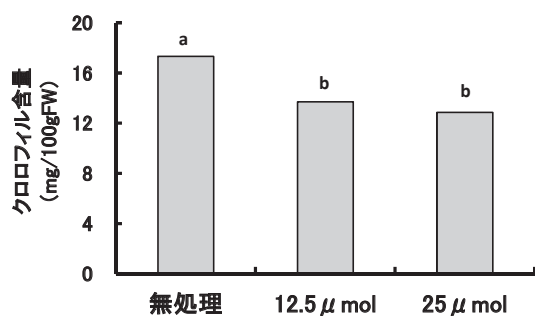


図6 調整葉のクロロフィル含量

同一アルファベット間には、Tukey 法により 5%水準で有意差なし

の照射により葉に占める中肋部の割合が増大したために乾物率が低下し、硝酸イオン濃度が高くなったと思われる。

葉のクロロフィル含量は、対照区では 17.3mg/100gFW であったのに対し、12.5μmol 区および 25μmol 区では 13.7mg/100gFW、12.8mg/100gFW であり葉色が淡かった（図 6）。遠赤色光の照射によって葉色が淡くなる傾向についてはコマツナにおいても報告されている¹³⁾。クロロフィル量の減少はフィトクロームを介した赤色光と遠赤色光の比により制御されており、赤色光の比率が低下することによって下位の古い葉の老化が促進され、葉が老化していく過程でクロロフィルなどの色素量が減少する¹⁴⁾。そのため、本試験では遠赤色光照射により赤色光の割合が低下したためにクロロフィル含量が低下し、25μmol 区では黄化葉が増加したと考えられる。

以上のことから、人工光リーフレタス栽培において遠赤色光の照射は、葉の縦伸長を促進し、地上部生体重を増大させる効果があることが確認された。しかし、本試験での照射方法では葉色の淡色化や硝酸イオン濃度の上昇など品質にはマイナスに働く傾向を示しており、照射強度や照射方法などについてはさらに検討が必要である。また、リーフレタスは葉の形態や葉色のバリエーションが豊富で、遠赤色光に対する生育反応には品種間差が大きいと思われるため、品種ごとに検証する必要があると考えられる。

5. 結 言

- (1) 人工光リーフレタス栽培において遠赤色光の照射は、葉の縦伸長を促進し、地上部生体重を増大させる効果がある。
- (2) 遠赤色光の比率が高いと節間伸長が促進され、抽苔が早まる。
- (3) 葉色の淡色化や硝酸イオン濃度の上昇など品質にはマイナスに働くこともある。

参考文献

- 1) 高辻正基，“完全制御型植物工場の現状”，植物環境工学，22 巻，1 号，2010，pp2-7.
- 2) 庄司和博，後藤英司，橋田慎之介，後藤文之，吉原利一，“赤色光と青色光がレッドリーフレタスのアントシアニン蓄積と生合成遺伝子の発現に及ぼす影響”，植物環境工学，22 巻，2 号，2010，pp.107-113.
- 3) 斎藤裕太，清水浩，中島洋，宮坂寿郎，大土居克明，“LED を使用した搔レタス栽培における赤色光をベースとした光質の影響”，植物環境工学，24 巻，1 号，2012，pp.25-30.
- 4) 松本拓也，伊藤博通，白居祐希，白石斉聖，宇野雄一，“光質がレタス生長と野菜中硝酸イオン濃度に及ぼす影響”，植物環境工学，22 巻，3 号，2010，pp.140-147.
- 5) 森康裕，高辻正基，“LED と LD 光がサラダナ生育に及ぼす影響”，植物工場学会誌，11 巻，1 号，1999，pp.46-49.
- 6) 大嶋泰平，大橋敬子，大野英一，渡邊博之，“レッドリーフレタス生産に適した赤色と青色発光ダイオードの光混合条件の検討”，植物環境工学，27 巻，1 号，2015，pp.24-32.
- 7) 佐々木晴美，富田依里子，小西淳，“遠赤色（FR）がレタスの生育に与える影響”，日本生物環境工学会 2013 年大会 講演論文要旨，2013，pp.266-267.
- 8) 野末はつみ，野末雅之，“遠赤色光が光合成活性および生育に及ぼす影響について”，日

- 本生物環境工学会 2014 年大会 講演論文要旨, 2014, pp.52-53.
- 9) 宮寄航, 吉田英生, 福田直也, “LED を使用した連続照明条件下における光質中の遠赤色光がリーフレタスの形態形成ならびに成長に及ぼす影響”, 園芸学研究, 14 (別 2), 2015, pp.214.
- 10) 村上克介, 洞口公俊, 柴田治男, 森田政明, 相賀一郎, “植物栽培用人工光源の開発に関する考察”, 生物環境調節, 30(4), 1992, pp.135-141.
- 11) 田口亮平, 植物生理学大要, 養賢堂, 1995, pp.216-219.
- 12) 壇 和弘, 大和陽一, 今田成雄, “光強度および赤色光/遠赤色光の違いがコマツナ硝酸イオン濃度および硝酸還元酵素活性に及ぼす影響”, 園学雑, 4 巻, 3 号, 2005, pp.323-328.
- 13) 日高千里, 霜村雅昭, 堀慧, 伊澤侑美子, 大谷有理, 位田晴久, , 日本生物環境工学会 2014 年大会 講演論文要旨, 2014, pp.200-201.
- 14) 小野清美, 永野聡一郎, “葉の老化に影響を与える環境要因と葉の老化の制御機構”, 日本生態学会誌, 63, 2013, pp.49-57.

II ノート

LIB 用タブリード材製造工程における リード材表面皮膜処理のインライン化

中部 昇* 佐藤 健* 櫻井 貴文* 中川 昌幸** 渡邊 亮** 本多 章作*** 桂澤 豊*
山口 貴史**** 上村 忠**** 坂詰 智裕**** 沢中 純一**** 嶋 優仁****

Development of In-line Coating Process for Tab Lead Material of Litium Ion Battery

NAKABE Noboru*, SATO Takeshi*, SAKURAI Takafumi*, NAKAGAWA Masayuki**,
WATANABE Ryo**, HONDA Syosaku***, KATSURAZAWA Yutaka*, YAMAGUCHI Takashi****,
KAMIMURA Tadashi****, SAKAZUME Tomohiro****, SAWANAKA Junichi**** and SHIMA Yuji****

1. 緒 言

ラミネート型リチウムイオンバッテリー (LIB) 用タブリードは、電池の正・負極端子として使用する部材である。図 1 に示すように一端は電解液中にありながら他端は外部に露出するため、電池の密封性を高める目的でリード材である Al, Cu 薄板の両面に絶縁フィルムを溶着した構造を有する。リード材とフィルムには高い密着性が要求されることから、リード材には表面皮膜処理を行う必要がある。従来、タブリードの製造工程はリード材をプレス加工で切断した後、バッチ処理にて洗浄、表面改質、表面皮膜の順に処理を行った後、フィルム溶着を行っていたが、LIB の需要拡大に伴いより生産能力を高め、かつ低コストでの製造が必要である。

そこで本研究では、タブリードの一貫生産ラインの構築を目的として、タブリード材の表面改質および表面皮膜処理工程のインライン化を図った。

2. バリ取り、表面改質技術の確立

タブリードの材料となるロール材表面の油脂を洗浄し、同時に両端のスリッターバリを除去

* 研究開発センター

** 下越技術支援センター

*** 素材応用技術支援センター

**** 株式会社山口製作所

する超音波処理装置を開発した。また、表面皮膜の密着性を高めるための表面改質方法について検討し、改質液の最適化を図ることで処理を迅速化し、その結果インライン処理においても所定の濡れ性を達成することができた。

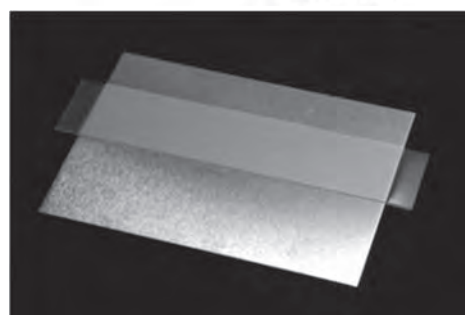
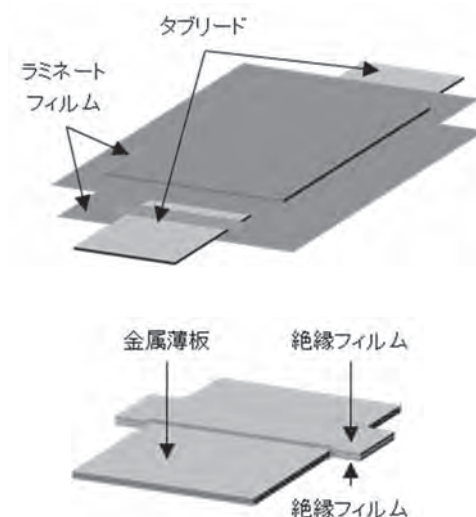


図 1 ラミネート型 LIB 用タブリード



図2 構築したテストライン

3. 表面皮膜処理技術の確立

インライン処理を想定した表面皮膜液塗布装置および乾燥装置を開発した。また、製造時における品質管理では膜厚の検査が必要となるが、膜厚に対しリード材表面の凹凸が大きいことから直接測定は困難である。そこで、膜厚計測方法について検討を行い、化学分析を応用した膜厚計測手法を確立した。

4. テストラインの構築

開発した表面改質、表面皮膜処理技術を用いてテストラインを構築した。テストラインは図2に示すようにバリ取り、表面改質、表面皮膜、プレス切断で構成され、実験の結果、目標とする送り速度で製造が可能なことを確認した。今

後は、後工程としてタブフィルム溶着と検査工程を付加することにより、タブリード製造の一貫生産ラインを構築する予定である。

5. 結 言

- (1) ロール材表面の油脂の洗浄とスリッターバリを除去する超音波処理装置を開発した。
- (2) 表面改質について、改質液の最適化を図ることで所定の濡れ性を得ながらも処理を迅速化することができた。
- (3) 表面皮膜手法および品質管理を考慮した膜厚検査方法を確立した。
- (4) 開発した技術を基にテストラインを構築し、目標とする送り速度で製造が可能なことを確認した。

超精密微細加工技術の開発

樋口 智* 天城 和哉* 宮口 孝司* 桂澤 豊* 菅野 明宏*

Development of Ultra-Precision Machining Technology

HIGUCHI Satoru*, AMAKI Kazuya*, MIYAGUCHI Takashi*,
KATSURAZAWA Yutaka* and KANNO Akihiro*

1. 緒 言

現代のものづくりにおいて，“金型”は非常に重要な役割を担っており，その材質も用途により多岐にわたっている。

プラスチック成型品の中でも特に光学部品用金型においては，その表面は非常に高度な鏡面状態が求められるが，プラスチック金型用鋼に対する切削加工による高度な鏡面加工は難易度が高いため，後工程として手作業による磨きを行うのが一般的となっている。しかし，磨き作業は熟練した高度な技術が必要であるうえ，職人の高齢化，後継者不足などの課題も抱えている。こうした中，磨き工程の負荷を軽減させるために切削加工による加工面の品質を向上させることが重要となっている。

そこで本研究では，プラスチック金型用鋼に対し，切削加工条件が加工面の表面粗さにおよぼす影響について調べた。

2. 平面切削加工実験

2.1 実験概要

切削条件を表1に示す。

工具にはバインダレス cBN ボールエンドミル（マイクロ・ダイヤモンド製，R0.5mm）を用いた。

被削材にはステンレス系焼入鋼（日立金属工具鋼製 HPM38，硬さ：54 HRC）を用いた。

表1 切削条件

主軸回転数	60,000min ⁻¹
送り速度	150mm/min
径方向切込み	0.009mm
軸方向切込み	0.003mm
クーラント	なし（ドライ）
主軸傾斜角	15°，40°
切削方向	アップカット ダウンカット

加工機にはエアタービンスピンドルを搭載した超精密ナノ加工機（ファナック製 ROBONANO-α0iA）を使用した。

主軸回転数と送り速度から一刀あたりの送り量は 2.5μm となる。

cBN 工具はヒートショックによるチッピングが生じやすいため，クーラントは使用せずにドライ加工とした。加工面の表面粗さには工具摩耗が大きく影響するが，小径 cBN エンドミルにおける工具摩耗の抑制には，切削速度を上げることが有効であることが知られている¹⁾。そこで，本実験では工具傾斜角を変えることで切削速度を変化させた。なお，工具傾斜角 15°の場合の切削速度は 49m/min であり，40°の場合は 121m/min である。これら主軸傾斜角と切削方向の違いとの組み合わせで以下のように条件を設定した。

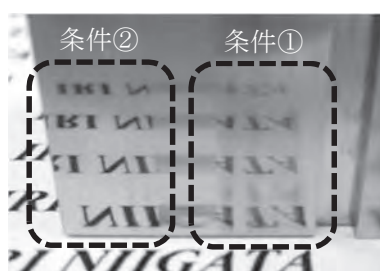
条件①：工具傾斜角 15°，アップカット

条件②：工具傾斜角 15°，ダウンカット

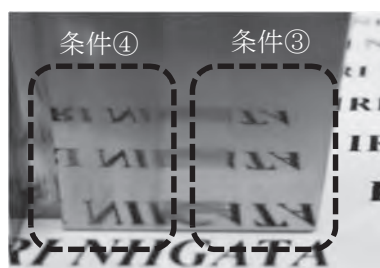
条件③：工具傾斜角 40°，アップカット

条件④：工具傾斜角 40°，ダウンカット

* 研究開発センター



(a) 条件①(右)と条件②(左)



(b) 条件③(右)と条件④(左)

図1 切削加工面の様子

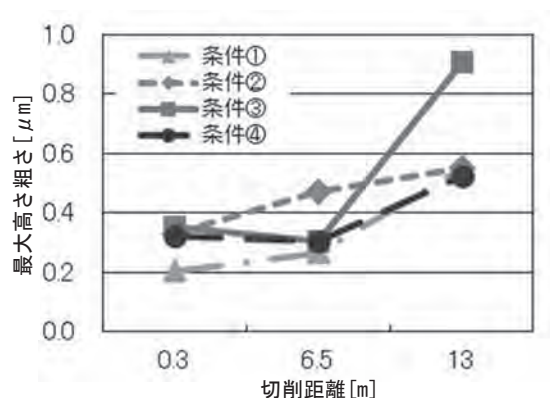


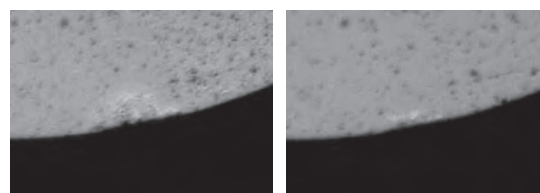
図2 表面粗さ測定結果 (Rz)

2.2 実験結果および考察

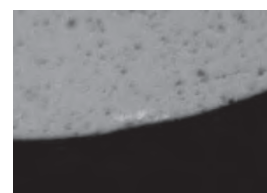
加工面に文字を反射させた様子を図1に示す。各条件ともある程度は反射しているが、中でも条件②による加工面がより鮮明に反射しているのがわかる。

次に、加工面の最大高さ粗さ (Rz) 測定結果を図2に示す。測定には、非接触三次元測定装置 (三鷹光器製 NH-3SP) を使用し、基準長さと測定長さはそれぞれ、0.08mm、0.8mmとした。切削距離 6.5mm 付近では各条件とも明確な差異はないが、切削距離 13mm 付近では条

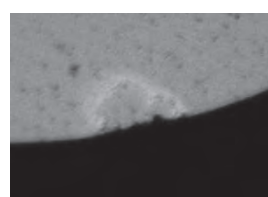
件③による加工面の表面粗さが他の条件に比べ悪化した。ただし、加工面に文字を反射させた様子からは、条件③が突出して面性状が悪いという印象はないため、この程度の数値差は見た目への影響は少ないと考えられる。



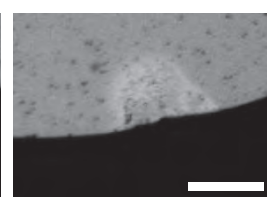
(a) 条件①



(b) 条件②



(c) 条件③



(d) 条件④

図3 切削加工後の工具

また、加工後の工具をすくい面側から観察した拡大写真を図3に示す。どの条件においてもすくい面に損傷がみられ、特に条件③では切れ刃稜線に比較的大きなチッピングがみられる。これが表面粗さの悪化につながったと推察される。主軸傾斜角で比較した場合、40°傾斜させた (条件③, 条件④) ほうが工具損傷が大きい結果となった。小径 cBN エンドミルの工具摩耗を抑制するための手段の一つとして、切削速度を増加させることがあるが、おそらくこれはオイルミストをクーラントとして使用した場合であり、ドライ切削時の摩耗形態がアブレイシブ摩耗であること²⁾を考慮すると、単純な切削速度の増加には注意が必要である。

3. 結 言

バインダレス cBN 工具を用いたステンレス系焼入鋼の切削加工を実施し、以下の結果が得られた。

- (1) 主軸を 15° 傾斜させダウンカットすることで反射像が確認できる程度の鏡面が得られた。
- (2) ドライ切削状況下では、切削速度を上げると工具損傷が大きくなり表面粗さを悪化させる。

参考文献

- 1) 浜口和也, “バインダレス cBN 製マイクロエンドミルの切削特性に関する研究”, 兵庫県立工業技術センター研究報告書, 第 23 号, 平成 26 年, pp.18-19.
- 2) 平石誠ほか, “cBN エンドミル工具による鉄系材料の鏡面加工 (第 2 報)”, 工業技術研究報告書, No.39, 2010, pp.41-46.

超高張力鋼板加工技術の開発

片山 聡* 白川 正登** 田村 信* 櫻井 貴文* 桂澤 豊*
石川 一輝*** 吉田 元之*** 山崎 卓*** 松原 克浩***

Development of Sheet Metal Forming Process for Ultra High Tensile Strength Steel Sheets

KATAYAMA Satoshi*, SHIRAKAWA Masato**, TAMURA Makoto*, SAKURAI Takafumi*,
KATSURAZAWA Yutaka*, ISHIKAWA Kazuki***, YOSHIDA Motoyuki***, YAMAZAKI Suguru***
and MATSUBARA Katsuhiro***

1. 緒 言

自動車の軽量化は燃費向上を図るうえで最も重要な技術課題であり、その解決策のひとつとして高張力鋼板の採用が進められている。近年では引張強さが 1,000MPa を超える超高張力鋼板を自動車部品に適用する例も見られるようになったが、超高張力鋼板が延性に乏しい難成形材料であることから、その適用部位はまだ限定的である。また、超高張力鋼板は成形性を向上させるために金型を高温にする温間・熱間プレス成形にて加工することが多く、その場合には設備や加工時間が問題となる。

このような背景のもと、本研究では(株)野島製作所の強みであるプレス成形技術を高度化し、軽量化への提案に繋げることでできる超高張力鋼板を用いたシートフレーム部品の冷間加工技術の確立を目指した。

は 13B 号、試験機は(株)島津製作所製精密万能材料試験機 AG-250KNI を使用した。ひずみ計測には非接触型ビデオ伸び計とひずみゲージを併用した。

引張試験より得られた応力-ひずみ曲線を図 1 に示す。超高張力鋼板は一般的に使用される鋼板よりも破断伸びが小さく、6%前後で破断した。また、降伏後の加工硬化が小さいという特徴があることも分かった。

r 値の算出においては JIS Z 2254 に規定される評価ひずみ値に達しないため、同規格 10b) に記される計算方法などにより弾性ひずみを排除する必要があることが分かった。

2. 研究結果

2.1 超高張力鋼板の材料特性評価

プレス成形シミュレーションにて利用可能な材料モデルを作成するため、引張試験により超高張力鋼板の機械的特性を求めた。

引張試験方法は JIS Z 2241 に準拠し、試験片

2.2 プレス成形シミュレーションによるシートフレーム部品の成形性評価

プレス成形シミュレーションソフトウェア

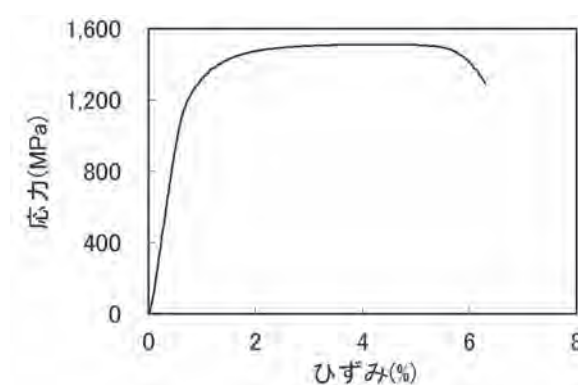


図 1 応力-ひずみ曲線

* 研究開発センター

** 下越技術支援センター

*** 株式会社野島製作所

ESI 社製 PAM-STAMP, LSTC 社製 LS-DYNA を用いて、金型形状および成形方法による成形性の違いについて検証した。超高張力鋼板の材料モデルは図 1 の応力-ひずみ曲線より作成した吉田-上森モデル¹⁾を用いた。同モデルのパラメータ同定には(株)CEM 研究所製 MatPara を用いた。

シミュレーションの結果、超高張力鋼板は比較的小さな曲率であっても曲げ成形が可能であること、絞り成形では引張応力場にて板厚が激しく減少することが分かった。

以上の結果をもとに、目標とするシートフレーム部品に対し、成形中に発生する張力を低減させる方法を考案し、金型形状へフィードバックした。

2.3 シートフレーム部品金型による成形試験

既存金型を用いた成形試験により、材料の破断位置が成形シミュレーションとよく一致することを確認した。

プレス成形シミュレーション結果を元に作成した金型形状では、図 2 に示す形状を破断することなく成形することができた。



図 2 成形試験結果

3. 結 言

- (1) 超高張力鋼板の引張試験を実施し、材料特性を把握した。また試験結果より、プレス成形シミュレーション用材料モデルを作成した。
- (2) プレス成形シミュレーションを用いて目標形状に対する成形方法を考案し、金型形状へフィードバックした。
- (3) 成形試験により、考案した成形方法にて超高張力鋼板の冷間加工が可能であることが確認した。

参考文献

- 1) 吉田亨, 上西朗弘, 磯貝栄志, 佐藤浩一, 米村繁, "高強度鋼板のスプリングバック予測精度向上のための材料モデル", 新日鉄技法, 第 392 号, 2012, pp.65-71.

高硬度材切削用被膜の開発

石川 淳* 相田 収平* 田村 信* 須藤 貴裕*
桜井 雅彦** 和田 雷太** 大矢 正人**

Development of Coating Film for Hardened Steel Cutting Tool

ISHIKAWA Atsushi*, AIDA Shuhei*, TAMURA Makoto*, SUTOH Takahiro*,
SAKURAI Masahiko**, WADA Raita** and OYA Masato**

1. 緒 言

高硬度難削材料である粉末ハイス鋼の切削加工において、加工の高能率化や工具寿命延伸のための工具コーティング被膜が求められている。そこで、市場で実績のある被膜をベンチマークとして、より工具寿命延伸が可能となる被膜開発を目的に被膜の試作開発を行い、ミーリングによる工具寿命試験を実施し、性能を評価した。

2. 試作開発被膜について

粉末ハイス鋼の切削加工用エンドミル被膜として試作開発した被膜の模式的な断面を図 1 に示す。耐摩耗層と母材の間に密着層と二層の傾斜層を設けた多層構造とすることで、高硬度でかつ密着性の高い被膜を狙いとしている。

3. 試験条件について

本被膜開発においてターゲットとする切削加工条件を含めた試験条件を表 1 に示す。本条件において、表 2 に示す試作開発被膜をはじめとした 3 種類の被膜について、それぞれベース工具にコーティングし、切削寿命試験を行った。試験は図 2 に示すとおり、粉末ハイス鋼ブロック上面について、ブロック外側から内側に向かって平行渦巻き状に切削した。ブロック一面

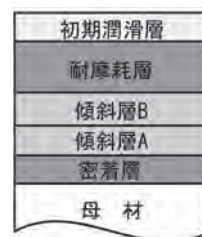


図 1 試作開発した被膜の断面模式図

表 1 試験条件

被削材料	粉末ハイス鋼 (SKH40相当 65HRC)
ベース工具	R5超硬ボールエンドミル
工具回転数 (min ⁻¹)	3,000
送り速度 (mm/min)	800
切込深さ 軸/径 (mm)	0.1 / 0.3
切削方向	ダウンカット
クーラント	エアブロー
使用加工機械	静岡鐵工所製立形マシニングセンター SMV-520PA

表 2 試験に供した被膜

被膜種	硬さ(HV)
試作開発被膜	3,500
ベンチマーク被膜	3,200
既存被膜	3,700

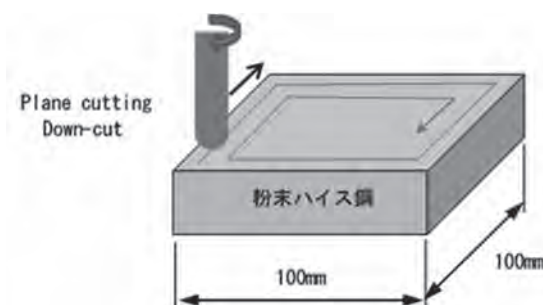


図 2 切削寿命試験の模式図

* 研究開発センター

** J F E 精密株式会社

(切削距離 35m) を加工するごとに工具刃先逃げ面の最大摩耗幅 V_{bmax} を測定し、工具寿命の目安として、おおよそ $V_{bmax}=0.15\text{mm}$ に達するまで試験を継続した。

4. 試験結果

図 3 に切削寿命試験の結果である切削距離と工具逃げ面最大摩耗幅 V_{bmax} の関係を示す。また、各被膜の工具逃げ面の摩耗の進行を比較した写真を図 4 に示す。

試作開発した被膜による工具寿命は 420m に達しており、ベンチマーク被膜 (175m) や既存被膜 (80m) よりも優れていた。これはひとつに、試作開発被膜の硬さが高く耐摩耗性に優れていたことが要因と考えられる。さらに試作開発被膜は他の被膜と比較すると摩耗部の変色が比較的少ない (他は黒っぽくなっている) ことから、母材の露出が抑制されていることが推測され、このことから試作開発被膜はその構造において、傾斜層を二層設けたことによる膜の密着性が有効に働いていると考えられる。なお、摩耗が進行していくと摩耗線に「がたつき」が顕著に観察されることから、被膜に耐チッピング性を付与することにより、さらなる高性能化が期待できる。

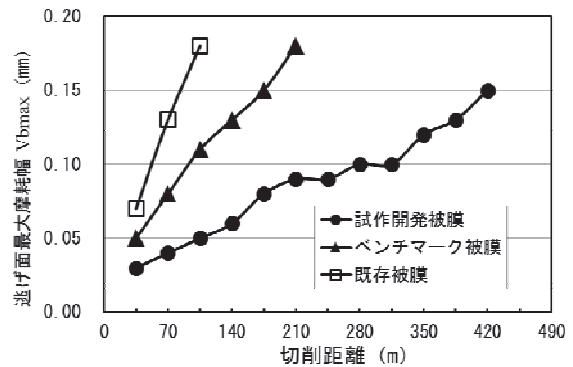


図 3 切削距離と V_{bmax} の関係

	切削距離35m	切削距離105m	切削距離210m	切削距離315m
試作開発被膜				
ベンチマーク被膜				切削距離175mで寿命
既存被膜			切削距離80mで寿命	

図 4 工具逃げ面の摩耗状態の比較写真

5. 結 言

- (1) 高硬度難削材料である粉末ハイス鋼のエンドミル加工について、試作開発した被膜がベンチマークとした被膜よりも工具寿命試験において約 2.4 倍の切削距離を達成した。試作被膜の高硬度に起因する耐摩耗性が優れていたことや、被膜構造に

おいて傾斜層を二層設けたことによる密着性が有効に働いていたことが推測される。

- (2) 摩耗の形態観察から、今回の試作開発被膜に耐チッピング性を付与することにより、さらなる高性能化が期待できる。

高圧クーラントによる析出硬化系ステンレス鋼の 高能率旋削加工

田村 信* 石川 淳* 須藤 貴裕* 相田 収平*

High Efficiency Turning of Precipitation Hardening Stainless Steel with High Pressure Coolant

TAMURA Makoto*, ISHIKAWA Atsushi*, SUTOH Takahiro* and AIDA Shuhei*

1. 緒 言

航空機産業を中心に析出硬化系ステンレス鋼、チタン合金、ニッケル基超耐熱合金などの難削材の加工が増加している。これら難削材の加工では加工能率の向上が求められているが、いずれの材料も熱伝導率が小さく、切削熱が刃先に蓄積し局部的に高温になるため、切削速度を上げて加工能率を高めることが難しい。

このような材料を高能率に加工する技術として、近年、高圧クーラント援用旋削加工が注目されている。この技術はクーラントを加圧してチップ先端に向けて供給する方法で、期待される効果は、①刃先の強制冷却によるチップ寿命延伸と高能率加工の実現、②切り屑の強制排出による面品位向上と無人運転化などである。

当所では平成 27 年度航空機産業参入推進事業において、高圧クーラントユニット付き旋削加工装置を導入し、難削材加工の高能率化を目標に高圧クーラント援用旋削加工技術の開発を進めている。

本報は、この装置を用い、析出硬化系ステンレス鋼 SUS630 を供試材としてチップの寿命試験を行い、高圧クーラント援用による高能率化を検証した結果を紹介する。

2. 高圧クーラントユニット付き旋削装置

図 1 に実験に用いた装置の外観写真と構成図、表 1 に主な仕様を示す。クーラント吐出圧力

(以下、クーラント圧)は最大 15MPa であり、NC により任意に設定可能である。ポンプで加圧されたクーラントは配管により旋盤本体に送られ、ホルダに取り付けたノズルから切削加工点に向け供給される。

高圧クーラントユニット NC 旋盤

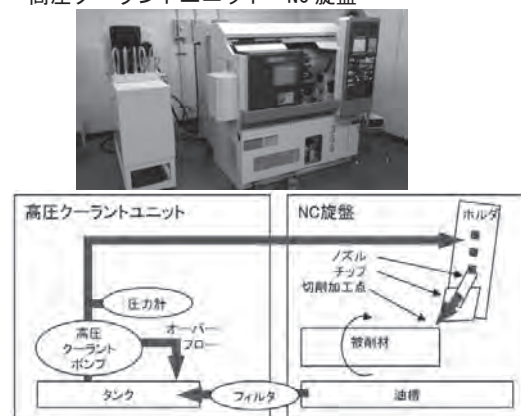


図 1 外観写真(上)と構成図(下)

表 1 高圧クーラントユニット付き旋削装置の主な仕様

NC 旋盤	
メーカー/型番	(株) 滝澤鉄工所 / TCN-213J
最大加工径/長さ (mm)	370 / 301
主軸回転数 (min^{-1})	100~5000
軸移動量 X/Z (mm)	210 / 370
切削送り速度 X/Z (m/min)	0~20 / 0~24
高圧クーラントユニット	
メーカー/型番	小倉クラッチ (株) / OJ150BB37-BF
最大吐出圧力 (MPa)	15
最大吐出量 (L/min)	35

* 研究開発センター

3. 試験方法

3.1 供試材

析出硬化系ステンレス鋼は、耐食性、耐摩耗性、高強度が要求される航空機材料として広く使われている。本研究では、その代表鋼種である SUS630 の中実丸棒（直径 75mm，長さ 120mm）を使用し、供試材には、固溶化熱処理後（1038℃/AC），析出硬化熱処理（482℃/AC，H900）を施した。硬度は 42HRC である。

3.2 工具

チップは（株）タンガロイ製 CNMG120404-SM-T6130 を用いた。これは頂角 80° のステンレス鋼加工用である。図 2 にホルダおよびノズルの外観を示す。ホルダは（株）タンガロイ製 高圧クーラント用ホルダ PCLNR を用いた。このホルダには、チップすくい面に加圧されたクーラントを供給するためのノズルが取り付けられている。ここで、図 3 にクーラント圧とクーラント流量およびノズル出口におけるクーラント流速の関係を示す。流量は実測した値、流速は流量より計算により求めた値である。いずれもクーラント圧が高いほど大きな値を示す傾向がみられる。

3.3 チップ寿命試験方法

表 2 に試験条件を示す。高能率化を検証する際の基準条件は、工具カタログ¹⁾に記載されている標準切削条件を参考に、切削速度を $V=100\text{m/min}$ ，クーラント供給を通常外部クーラントとした（条件 1）。なお、通常外部クーラントは一般的に用いられる外部供給方式のクーラントを示す。

条件 2～4 は、切削速度を条件 1 に比べ 1.5 倍の加工能率となる $V=150\text{m/min}$ ，クーラント供給を、それぞれ、通常外部クーラント、10MPa，15MPa の高圧クーラントとした。

チップ寿命試験は各条件において供試材外径を旋削加工し、切削距離 60～90m ごとにチップの摩耗状態をマイクロスコープにより観察した。

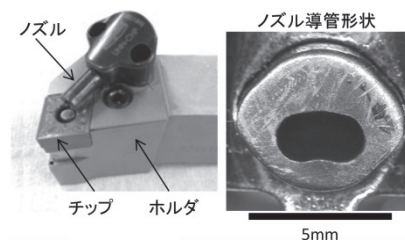


図 2 ホルダおよびノズルの外観

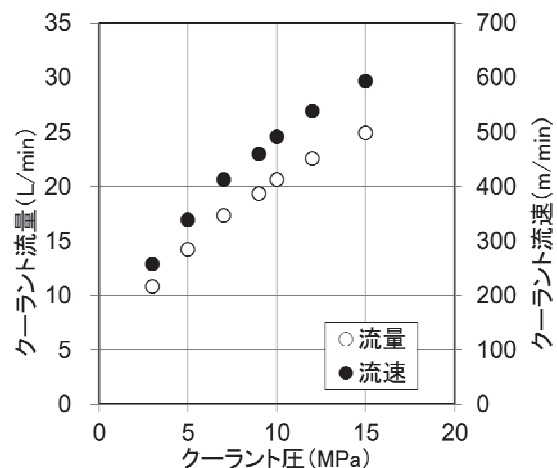


図 3 クーラント圧と流速，流量の関係

表 2 寿命試験条件

	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
切削速度 V (m/min)	100	150		
クーラント 供給 (MPa)	通常外部 クーラント	高圧クーラント		
		10	15	
送り f (mm/rev)	0.2			
切り込み ap (mm)	1.0			
クーラント液	Blaser Vasco5000 (水溶性) 10 倍希釈			

チップ寿命は、チップの逃げ面の最大摩耗幅 V_B が 0.2mm に達した時点とした。

4. 試験結果

通常外部クーラントにおけるチップ寿命を把握するために、条件 1 と条件 2 の試験を実施した。図 4 に切削距離と V_B の関係を示す。条件 1 におけるチップ寿命は約 700m，条件 2 は約 60m であった。基準条件に対して切削速度を 1.5 倍にすると寿命が 1/10 以下に低下することがわかる。

次に高圧クーラント援用による高能率化を検証する目的で、条件 3 と条件 4 の試験を実施した。図 5 に切削距離と V_B の関係を示す。条件 3 におけるチップ寿命は約 1100m、条件 4 は約 1600m であり、クーラント圧が高いほど長寿命であった。またこれら寿命は、基準である条件 1 に比べてそれぞれ約 1.6 倍（条件 3）、約 2.3 倍（条件 4）となり、1.5 倍の切削速度にもかかわらず、高圧クーラントを援用することでチップ寿命が延伸することがわかる。

以上より、高圧クーラント援用が高能率化とチップ寿命の延伸に寄与することがわかった。より高能率な加工を実現するためには、チップ寿命とクーラント流量および流速との相関や被削材種の影響などを明らかにする必要があることから、次年度も継続して研究を行う予定である。

5. 結 言

- (1) SUS630 の外径旋削加工において、基準条件（ $V=100\text{m/min}$ ）に対して、高圧クーラントの援用により 1.5 倍の高能率化（ $V=150\text{m/min}$ ）と 2 倍のチップ長寿命化の両立が可能である。
- (2) SUS630 の外径旋削加工において、高能率化、チップ寿命の観点から高圧クーラントを援用する場合のクーラント圧は、高いほど効果的である。

参考文献

- 1) 切削工具カタログ，株式会社タンガロイ，（2013-2014），p.2-6.

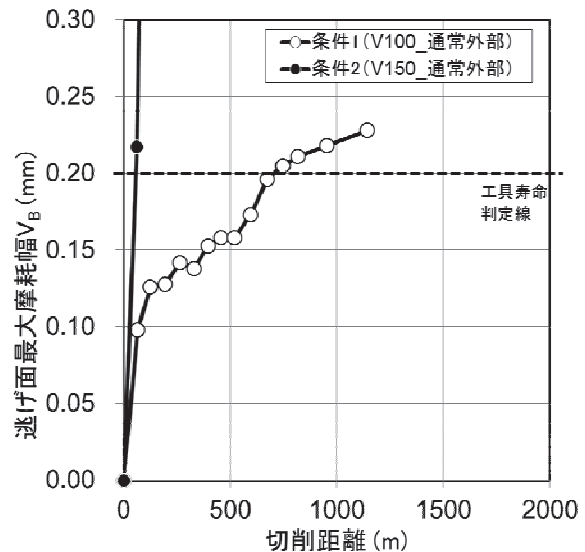


図 4 切削距離と逃げ面最大摩耗幅 V_B の関係（通常外部クーラント）

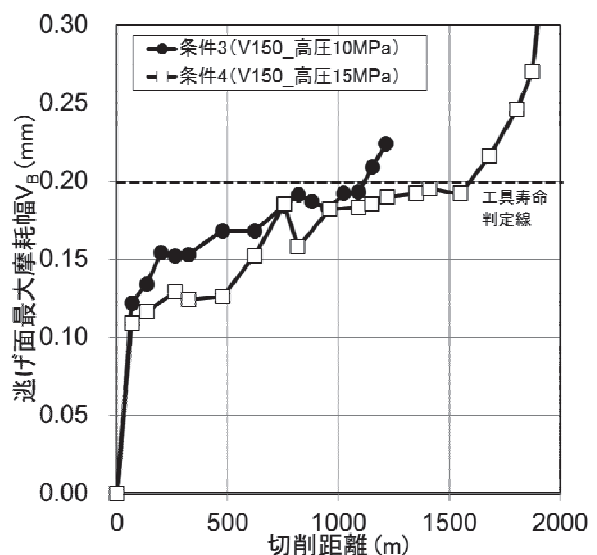


図 5 切削距離と逃げ面最大摩耗幅 V_B の関係（高圧クーラント， $V=150\text{m/min}$ ）

チタンアルミ合金の切削加工技術開発

石川 淳* 相田 収平* 須藤 貴裕* 大川原 真**

Development of Milling Technology for TiAl Alloy

ISHIKAWA Atsushi*, AIDA Shuhei*, SUTOH Takahiro* and OKAWARA Makoto**

1. 緒 言

チタンアルミ合金は、比重が4程度とNi基超耐熱合金の約1/2であるにもかかわらず同程度の高温強度を有していることから、近年航空機エンジン用素材として注目されている。しかし、低熱伝導率、低延性、工具材料との化学的親和性が高いなどの性質も有していることから難削材料として認識されている¹⁾。その適用拡大を図るためには、チタンアルミ合金の効率的な加工方法を確立することが重要である。

本研究では、「戦略的基盤技術高度化支援事業」において、環境対応型先進 UAV 用ターボジェットジェネレーターのタービブリスにチタンアルミ合金を適用することを目的に、その製作に必要となる小径ボールエンドミルによる高能率・高速・高精度切削加工技術の開発を目指した。

2. 加工条件の検討

本研究では、加工能率 $1\text{cm}^3/\text{min}$ 以上を維持しながら、工具寿命は 30min 以上を達成できる加工技術の実現を開発目標としている。ところで、工具寿命を重視したこれまでの基礎試験において導出した切削条件では、加工能率は $0.43\text{cm}^3/\text{min}$ であり目標を満たしていない。そこで、表 1 に示すとおり、これまでの基礎試験での導出条件におけるパラメータを基準として、加工能率 $1\text{cm}^3/\text{min}$ 以上を満たす A~D の 4 通り

表 1 切削加工条件案

	基礎 試験 導出 条件	条件案 (基礎試験導出条件を1とした場合の比率)			
		A	B	C	D
最大切削速度 V_c	1	1.33	1	1	1.17
1刃当たりの送り f_z	1	1.8	1.5	1.8	2
軸方向切込深さ a_p	1	1	1.2	1.2	1.2
径方向切込深さ a_e	1	1	1.4	1.2	1.2
加工能率 (cm^3/min)	0.43	1.02	1.00	1.03	1.00

の加工条件を提案した。

条件 A は基礎試験導出条件に対して、最高切削速度 V_c と 1 刃当たりの送り f_z を増加させることにより、加工能率を $1.02\text{cm}^3/\text{min}$ としている。同様に条件 B と条件 C は 1 刃当たりの送り f_z と軸方向切込深さ a_p と径方向切込深さ a_e を、条件 D はすべてのパラメータを増加させることにより、加工能率が $1\text{cm}^3/\text{min}$ 以上となるような条件となっている。

これら 4 通りの加工条件について、工具寿命が 30min 以上に達するか、平面切削試験を行い検証した。切削試験は図 1 に示すとおり平面寸法 $72\text{mm} \times 110\text{mm}$ のチタンアルミ合金ブロック材を用いて、一方向に平面切削を行った。工具については、本事業で開発した試作工具 (R1.5mm ボールエンドミル) を用い、各加工条件においてブロック材一断面切削ごとに工具逃げ面最大摩耗幅 $V_{b\max}$ を測定した。本切削試験の経過を切削時間と工具逃げ面最大摩耗幅 $V_{b\max}$ の関係としてまとめたグラフを図 2 に示す。 $V_{b\max}=0.1\text{mm}$ を工具寿命の判断基準とした場合、いずれの条件において 90min 切削して

* 研究開発センター

** 下越技術支援センター

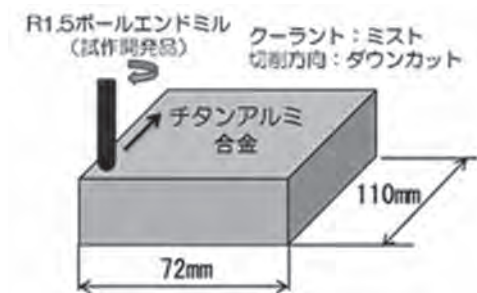


図 1 切削試験の概要

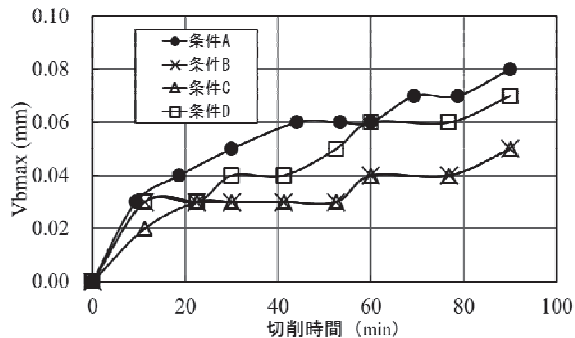


図 2 切削時間と Vbmax の関係

も工具寿命には達していない。また、条件 A の Vbmax が一番大きく推移し、次に条件 D が大きい。条件 B と条件 C はほぼ同じで、相対的に Vbmax は小さいことから、工具寿命に対して有利な加工条件であることがわかる。

ここで、一般的な工具寿命に対する切削条件パラメータの影響は、切削速度が一番大きく、送り、切込深さとその影響は小さくなることが知られている²⁾。本試験では表 1 に示したとおり、ベースとなる切削条件から加工能率を上げるために切削条件パラメータを複数組み合わせ上げていますが、試験結果から図 3 に示すとおり、切削条件パラメータが工具寿命に与える影響を整理してみると、チタンアルミ合金に対する本開発技術においても、工具寿命に対する切削条件パラメータの影響は切削速度が一番大きく、送り、切込深さとその影響は小さくなる傾向があるといえる。

さらに工具寿命に至るまでの切削時間を確認するために、条件 C について切削試験を継続し、切削時間と工具逃げ面最大摩耗幅 Vbmax の関係を求めたグラフを図 4 に示す。切削時間 300min

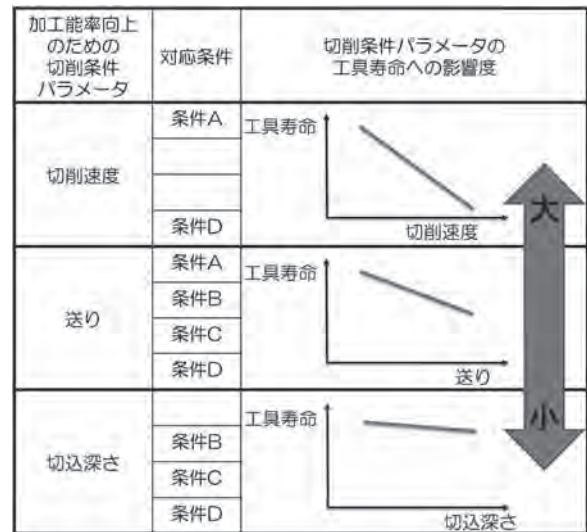


図 3 切削条件パラメータの工具寿命への影響

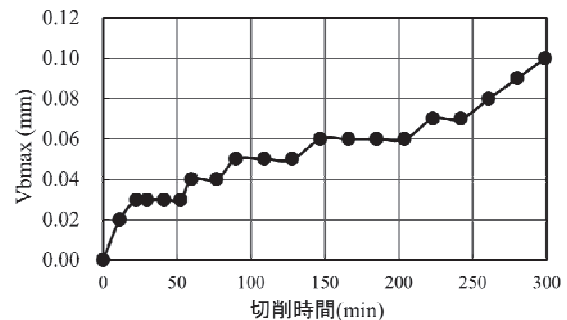


図 4 工具寿命までの切削時間と Vbmax の関係 (条件 C)

において工具寿命の判定とする $Vb_{max}=0.1\text{mm}$ に達している。このことから難削材であるチタンアルミ合金ではあるが、工具開発と適切な切削加工条件の設定により、長時間の切削加工が実現できることが明らかとなった。

2. 加工形状精度の検証

これまで開発してきたチタンアルミ合金の切削加工技術による加工物が、目標とする形状精度を満たすかを確認するために、図 5 に示すジェットエンジンのタービン翼を想定したモデル形状を切削加工し、その形状精度を評価した。幅 40mm×高さ 50mm×厚さ 7mm のチタンアルミ合金ブロック素材を用いて、荒加工により図 5 に示すようにモデル形状に対して翼部の余肉が片側 1.5mm となるような素材形状とした。その

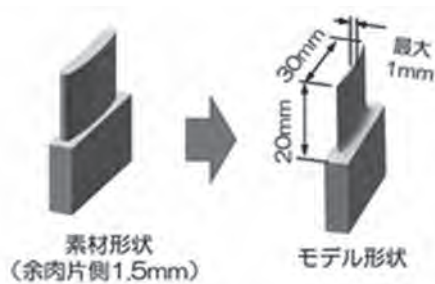


図 5 加工形状精度評価用モデルの形状

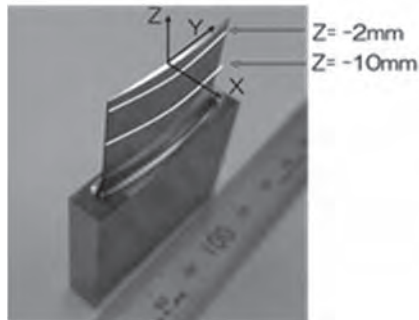


図 6 加工した翼モデルと形状評価位置

後，開発技術を基にした切削加工条件にて，約 10 分程度で，仕上がり翼弦長 30mm×翼高さ 20mm×最大翼厚 1mm の翼部を加工した。加工した翼モデルの外観写真を図 6 に示す。この翼面について，モデル CAD データを設計値として，Z=-2mm ならびに Z=-10mm の断面形状を三次元測定機（ZEISS 製 UPMC550）を用いて測定し，設計値と測定値の照合を行い，誤差を評価した。

三次元測定機による形状誤差の測定評価結果を表 2 にまとめた。形状誤差としては翼断面 Z=-2mm においては最小-12.9 μ m，最大 10.3 μ m，また翼断面 Z=-10mm においては最小-16.9 μ m，最大 15.1 μ m であった。このことから本開発技術による加工形状精度が目標である $\pm 30\mu$ m 以内を満たすことを確認した。

表 2 加工した翼モデルの形状誤差測定結果

測定断面	形状誤差(μ m)	
	最小	最大
Z= -2mm	-12.9	10.3
Z= -10mm	-16.9	15.1

3. 結 言

- (1) チタンアルミ合金の切削加工に適する R1.5mm ボールエンドミルを試作開発し，加工能率 1cm³/min 以上かつ工具寿命 30min 以上を満たす加工条件を把握した。
- (2) 本開発技術においては，工具寿命に対して切削速度が最も影響し，送り，切込深さの順にその影響が小さくなる傾向にあり，加工条件を最適化することにより，前記加工能率において加工時間 300min（切削除去量 300cm³）の切削加工が可能となった。
- (3) 本開発技術によりタービンブレード翼モデルを切削加工し，ブレード翼断面の形状精度評価を行った結果，目標とする形状精度 $\pm 30\mu$ m 以内であることを確認した。

参考文献

- 1) Priarone P.C., Rizzuti S., Rotella G., Settinieri L., “Milling Experiments on γ -TiAl”, X Con-vegno AlTeM, Napoli, 12-14 settembre 2011.
- 2) 横山明宜，元素から見た鉄鋼材料と切削の基礎知識，日刊工業新聞社，2014，pp.201.

真空装置用ステンレス製大型容器の多様な形状に対応する新加工技術の開発

菅野 明宏* 本田 崇* 山崎 栄一** 桂澤 豊*
菅井 謹一*** 藤岡 智裕*** 森田 順平*** 押野谷 明則***

Development of Flexible Forming Technology for Large-size Stainless Container for Vacuum Equipment

KANNO Akihiro*, HONDA Takashi*, YAMAZAKI Eiichi**, KATSURAZAWA Yutaka*,
SUGAI Kinichi***, FUJIOKA Tomohiro***, MORITA Junpei*** and OSHINOYA Akinori***

1. 緒 言

真空装置用の SUS304 製大型容器は、多様なサイズや肉厚差のある形状へのニーズがあり、かつその一体構造化が求められている。しかし、そのような容器形状（大型・肉厚差）であることに加えて難加工材であることから、現状では鍛造によるニアネットシェイプ化が困難であり、切削工法または溶接工法により製造されている。しかし、これらの従来工法では材料歩留まりが悪いうえに工程数も多く、コスト高となることから、その解決が求められている。

そこで、本研究では前述のような容器を一体成形可能で、かつ多様な形状に対応できるブレークスルー技術として、リング鍛造と加工中の温度制御を取り入れた熱間フローフォーミングを組み合わせた新しい複合加工技術の開発を行った。この開発により、高品質な一体構造の SUS304 製大型容器（外径約 300mm）の成形を可能にするとともに、材料ロスの削減と短納期化、低コスト化の実現を目指す。図 1 に本研究で開発した新加工技術の概要を示す。

鍛造での内径の異形化に取り組んだ。金型形状や鍛造条件を検討して最適化した結果、フローフォーミング成形に適した中間素材形状を実現した。図 2 に開発した中間素材の外観を示す。

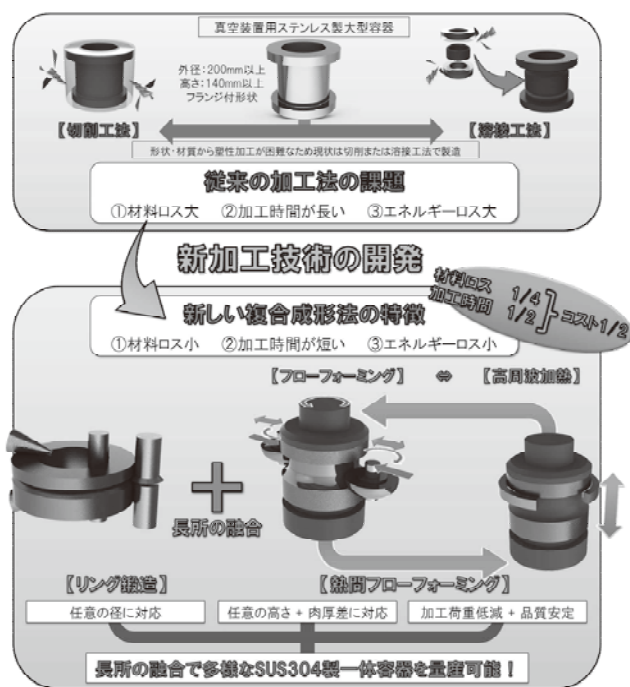


図 1 新加工技術の概要

2. 新加工技術の開発

2.1 リング鍛造による中間素材形状の検討

使用する素材の重量を削減するためにリング

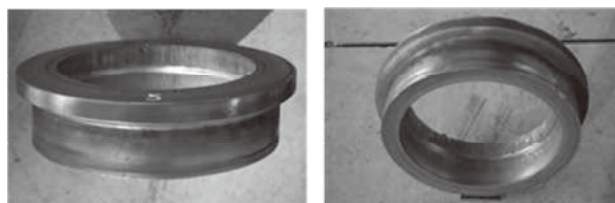


図 2 リング鍛造による中間素材

* 研究開発センター

** 企画管理室

*** タンレイ工業株式会社

2.2 シミュレーションを活用した開発

はじめに、適切な成形温度範囲を把握するため、SUS304 の高温材料試験を行い、材料特性に対する温度と試験速度による影響を調べた。試験結果の一例を図 3 に示す。それらの結果を分析して SUS304 の高温領域の変形抵抗を調べた。

次にフローフォーミング（図 4）で発生する加工装置自体の変形、加工荷重を把握するための荷重・変位測定システムを開発するとともに、基礎成形試験を行い、加工ローラーの形状とモーションの違いによる材料の流れを把握した。

一方、成形条件を効率的に検討するために、フローフォーミングシミュレーション手法の確立に取り組んだ。フローフォーミングのような大変形に対応した計算を実現するためには、加工に伴う要素のゆがみを解消するリメッシュが必要である。しかし現在、主なソフトウェアに実装されているリメッシュ手法では計算精度に課題がある。そこで精度のよい 6 面体リメッシュ

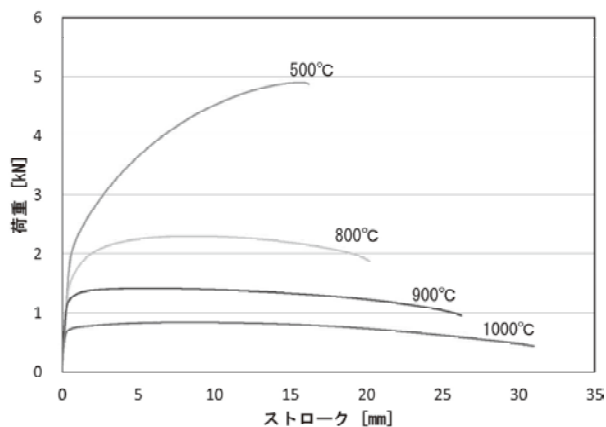


図 3 SUS304 高温材料試験の結果

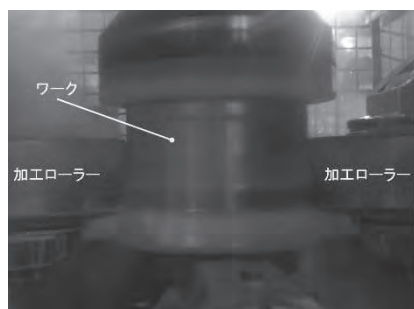


図 4 熱間フローフォーミングの様子

技術を開発した。図 5 に従来と本開発によるリメッシュ技術の比較を示す。また図 6 に、開発したリメッシュ技術による要素形状の修正例を示す。

開発したシミュレーション手法を活用し、基礎成形試験で得た知見をもとに、最適なローラー形状と材料流れを得る新加工法を開発した。図 7 に新加工法の計算結果と、実際に成形した成形品の外観を示す。

	従来技術		開発技術	
	リメッシュなし	4面体リメッシュ	6面体リメッシュ	
計算可否	×	○	○	
計算精度	—	△	◎	
計算時間	—	×	○	

図 5 従来と本開発のリメッシュ技術の比較

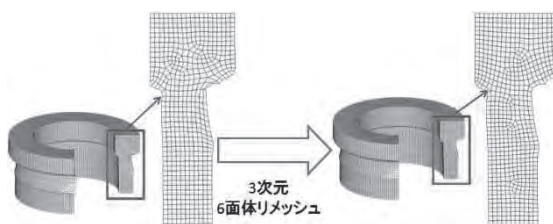
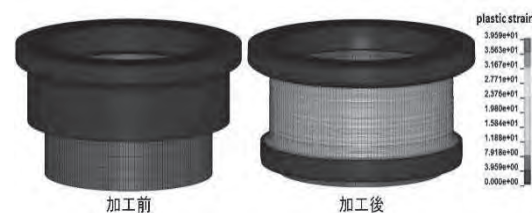
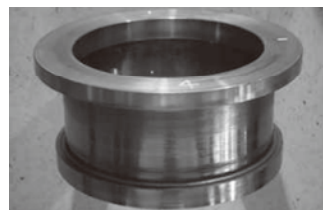


図 6 リメッシュによる要素形状の修正例



(a) 計算結果



(b) 成形品

図 7 開発した新加工法（計算結果と成形品）

2.3 最適な加熱条件の検討

短時間でワークを高温へ加熱するために高周波加熱装置を開発した（図 8）。また熱画像装置による温度測定と加熱条件の検討により，最適な温度分布への加熱を実現した。

2.4 実用化技術の開発

実用化に向けて図 9 に示すような試作用ラインを開発した。試作試験の結果，目標とするサイクルタイムが実現できることを確認した。

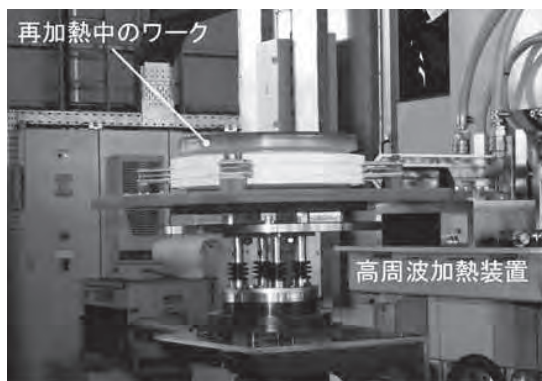


図 8 高周波加熱装置



図 9 開発した試作用ライン

3. 新加工技術による結果

本研究で開発した新加工技術により，目標値である切断重量 21.5kg 以下，加工時間 10 分以内で，出荷形状にて黒皮（削り残し）のない製品の加工を実現した。図 10 に新加工技術による成形品を出荷形状に旋削した製品の外観を示す。加えて，必要な検査項目および検査方法で本技術による成形品の検証を行い，良好な品質であることを確認した。

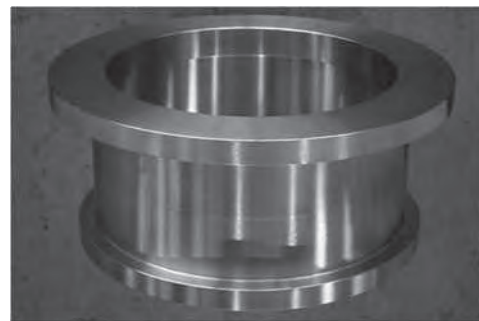


図 10 開発した新技術で加工した製品

4. 結 言

- (1) フランジ付きの SUS304 製大型容器を一体構造で目標形状に成形ができた。
- (2) 目標とした材料ロス削減と加工時間の短縮ができた。
- (3) 多様なサイズのフランジ付き形状の容器にも適用可能な成形技術を確立した。

なお，本研究は，経済産業省による平成 25 から 27 年度戦略的基盤技術高度化支援事業で実施したものである。

シミュレーションを用いた不等ピッチメタルソー における刃型最適化設計技術の開発

片山 聡* 櫻井 貴文*

Development of Optimization Design Technology of Unequal Pitch Metal Saw by Computer Simulation

KATAYAMA Satoshi* and SAKURAI Takafumi*

1. 緒 言

不等ピッチを採用した回転工具は、加工時に発生する振動を抑制し、加工効率や品質、工具寿命を向上させる¹⁻²⁾。メタルソーはエンドミルに比べ刃数も多く、ピッチの組み合わせは無限に近い数が想定される。そのため、刃型の最適設計は非常に困難であり、基本形状から手探りで設計しているのが現状である。

そこで本研究では、不等ピッチメタルソーの最適刃型設計技術におけるシミュレーション技術の活用方法について検討した。

2. 研究結果

2.1 切削実験による加工時の振動および周波数成分の分析

同じ刃数を有す等ピッチメタルソー、不等ピッチメタルソーによる切削実験を行い、工具動力計（日本キスラー（株）製 9257B）、動ひずみ測定器（（株）共和電業製 EDX-1500A-16AD）にて切削荷重を測定した。測定された切削荷重は動ひずみ測定器付属の FFT 分析機能にて、周波数毎の強度（Magnitude）を分析した。

図 1 に切削荷重の FFT 分析結果を示す。等ピッチでは刃数×回転数の成分とその倍数成分が現れている。不等ピッチでは等ピッチと同じ周波数のほか、その前後にも波形が現れていることが分かる。

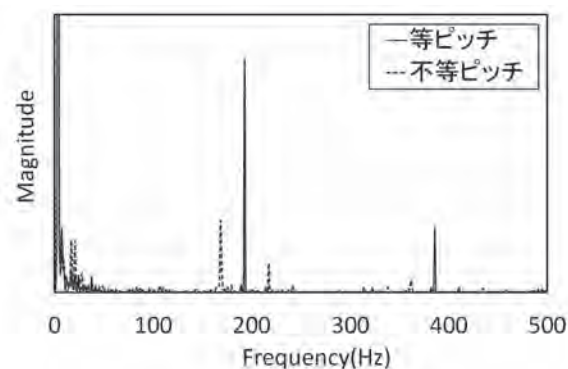


図 1 切削荷重の FFT 分析結果

2.2 切削時の振動周波数解析

LSTC 社製の動的陽解法有限要素法ソフトウェア LS-DYNA を用いて、不等ピッチメタルソーの振動周波数（ワークとの接触頻度）を簡易的な接触シミュレーションより求めた。FFT 分析には LSTC 社製 LS-PrePost4.2 を用いた。

切削実験とシミュレーションとの FFT 分析結果を図 2 に示す。振動周波数の傾向はよく一致しているが、シミュレーション結果では切削実

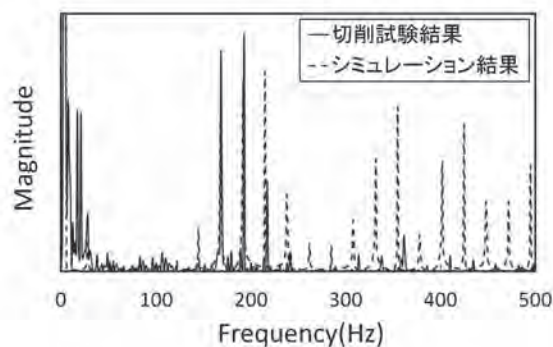


図 2 切削実験とシミュレーションとの比較

* 研究開発センター

験よりも高周波成分が大きくなった。これは切削における減衰効果（ワークの塑性変形に費やされるエネルギーなど）を考慮せず，接触荷重を求めたためと考えられる。切削シミュレーションソフトウェアを用いればこの問題は解決すると考えられるが，刃型により振動周波数がどのように変化するかを定性的に求めるには本研究にて実施した簡易的な接触シミュレーションでも十分な精度を有しているといえる。

なお，事前にモーダル解析を実施し，接触周波数と共振周波数が十分に離れていると確認された場合には，振動周波数は表計算ソフトウェアなどでも求められることも分かった。FFT 分析における処理点数を多くとれないという問題はあるが，簡易的な手法としては有効である。

2.3 刃型の最適化

接触シミュレーションにて刃型形状による振動周波数とその強度の変化を求めたところ，同じ刃数であってもピッチにより結果が異なることが分かった。不等ピッチメタルソーにおいても，基本的には刃数×回転数の成分が最も大きくなるが，適切な刃型設計によりそれを低減で

きることをシミュレーションにより確認した。

3. 結 言

- (1) 切削実験における振動挙動を再現する簡易的なシミュレーション手法を考案した。
- (2) 最適な刃型設計により振動周波数を低減できることが分かった。それをシミュレーションにより予測できることが分かった。
- (3) シミュレーション技術を活用することで刃型設計を迅速に行えることを示した。

参考文献

- 1) 社本英二，景山和宏，森脇俊道，"不等ピッチエンドミルによる再生型びり振動の抑制:解析モデルの構築とピッチ角の最適化"，一般社団法人日本機械学会関西支部講演会講演論文集 2002 (77)，2002，pp."3-5"-"3-6".
- 2) 小島拓也，鈴木教和，社本英二，"不等ピッチ／リードエンドミルによるびり振動の抑制:安定限界に対する半径方向切込みの影響"，精密工学会学術講演会講演論文集 2011A (0)，2011，pp.315-316.

高出力の熱音響エンジンの開発

大野 宏* 大川原 真* 須貝 裕之** 平石 誠** 本多 章作***

Development of High Power Thermoacoustic Engine

OHNO Hiroshi*, OKAWARA Makoto*, SUGAI Hiroyuki**, HIRAISHI Makoto**
and HONDA Syosaku***

1. 緒 言

管の中に入った細いパイプの束（蓄熱器）の両端に温度差を与えると、中の気体は不安定になり振動を始め音波が発生する。これは熱音響現象と呼ばれ、この現象を利用し熱から音波を発生させる装置が熱音響エンジンである。熱音響現象は、古くから知られていたが、熱力学や流体力学の発展とともに、音波が発生する原理が解明され、工場の未利用熱や太陽熱から音波を発生させる熱音響エンジンを利用し、冷熱や電気に変換して活用する技術の研究開発が盛んになっている。

本研究では、熱音響エンジンの実用化を目的として、ループ状の進行波型熱音響エンジンを製作した。また、エンジンの数を増やし、多段型にして高出力化に取り組んだ。さらに、熱音響エンジンが熱源から離れていても、ヒートパイプで熱が輸送できれば音波が発生するか実験した。

2. 熱音響エンジンの概要

細いパイプの束である蓄熱器を管の中に入れ、この両端に温度差を与えると中の気体は不安定になり、振動を始め音波が発生する。この原理を図1に示す。細いパイプの束から1本のパイプを取り出し、これを拡大して表示した。細い

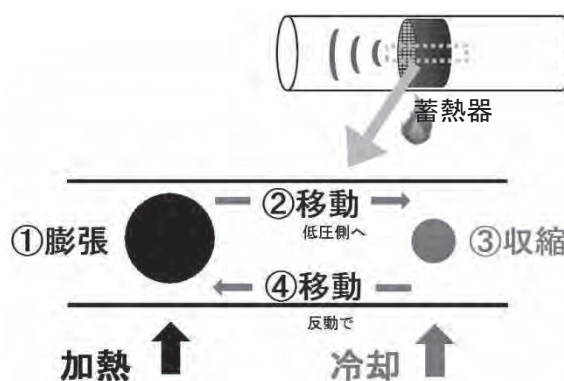


図1 音波が発生する原理

パイプの中の気体は、①加熱されて膨張し圧力が高くなり、②圧力の低い反対側に移動し、③ここで冷却されて収縮し圧力が下がり、④さらに右側の気体より圧力が下がるため押し返され、最初の位置に戻る。この気体の移動が振動源となって音波が発生する。この音波を発生させる装置が熱音響エンジンである。逆に蓄熱器に音波を当てると、粗密波として蓄熱器の中を気体は振動し、①細いパイプで強制的に収縮されて放熱し、②振動により反対側に移動し、③膨張して吸熱し、④振動により最初の位置に戻る。蓄熱器の片方で放熱し反対側で吸熱するため、その両端に温度差が発生する。

3. 熱音響エンジンの製作と実験

3.1 進行波型熱音響エンジン

図2に製作した進行波型熱音響エンジンの外観を示す。管をループ状にし、発生する音波の腹と節は時間とともに移動するので、進行波型

* 下越技術支援センター

** 中越技術支援センター

*** 素材応用技術支援センター

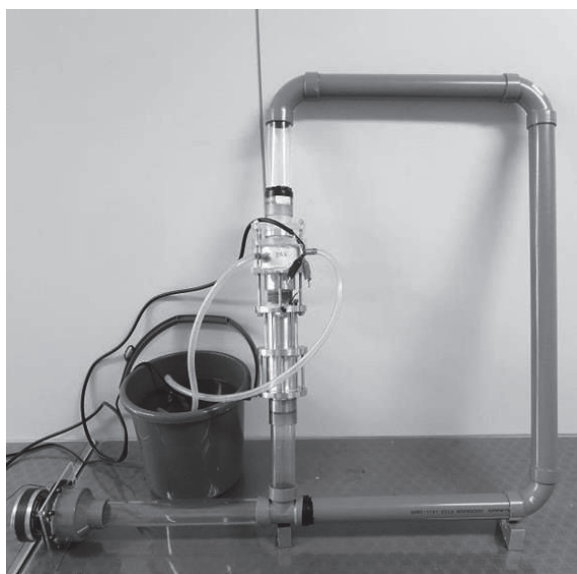


図2 進行波型熱音響エンジン

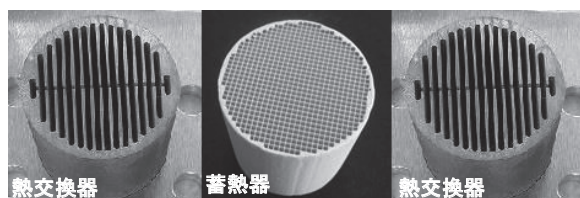


図3 熱音響エンジン中心部

と呼ばれている。発生する音波の一部を出力として取り出しスピーカで発電させ、残りを熱音響エンジンに戻して増幅させる。音波を発生させる熱音響エンジン中心部は図3に示すように、直径0.6mmの細いパイプの束の蓄熱器の両側にフィン式の熱交換器を設置し、一方を電熱線で加熱し、もう一方を循環水で冷却する。進行波型熱音響エンジンと、昨年度製作した直管式の定在波型熱音響エンジン²⁾の発電電力を測定し比較した。その結果を図4に示す。縦軸に発電電力、横軸に加熱を開始からの時間を示すが、300Wの電熱線で加熱した。加熱を開始して15分後に蓄熱器の両端の温度差は、定在波型と進行波型で差があるものの約200℃になった。この時、進行波型は定在波型の2倍の電力が得られた。熱音響エンジンの仕事 W は式(1)に示すとおり、発生する音波の圧力 P と流速 U とその位相差 θ 、および管の断面積 A の積で表される³⁾。

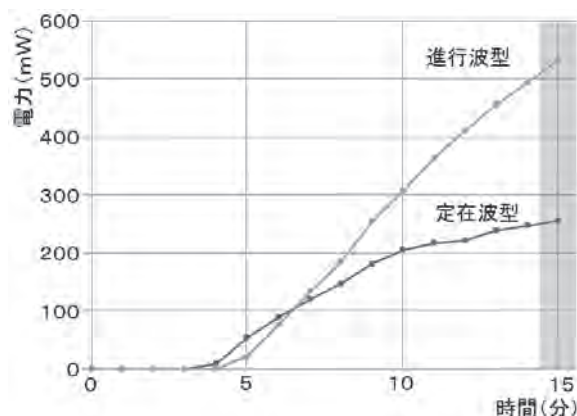


図4 進行波型と定在波型の発電電力の比較

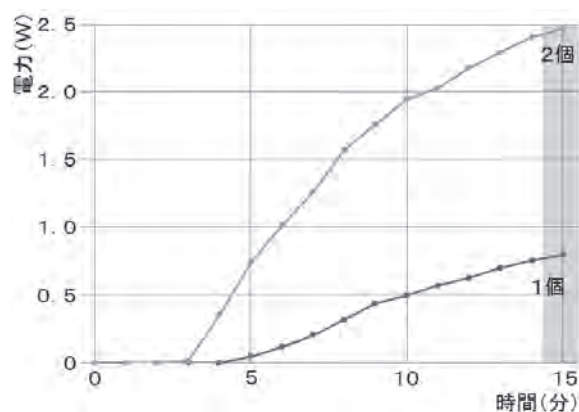


図5 エンジン個数による発電電力の比較

$$W = \frac{1}{2} A P U \cos \theta \quad (1)$$

直管の定在波型エンジンの音波の圧力と流速に位相差が生じ、ループ状の進行波型エンジンは両者の位相差がゼロになるため、後者の方が仕事は大きくなり、発電電力も大きくなる。

次に、進行波型熱音響エンジンでエンジンの数が1個と2個の時の発電電力を比較した。その結果を図5に示す。縦軸に発電電力、横軸に加熱を開始からの時間を示す。各エンジンとも400Wの電熱線で加熱し、加熱を開始して15分後に蓄熱器の両端の温度差は、各エンジンで差があるものの約280℃になった。エンジン2個の投入電力は400W×2の800Wで発電電力は2倍になると予想したが、15分後の発電電力は3倍に増加した。当初の予想より発電電力が大きく増加したため、管内の圧力と流速



図 6 熱輸送実験装置

を測定し詳しい解析を行う予定である。また、より出力を大きくするため 1MPa のヘリウムガスを封入したエンジンを設計し製作中である。ヘリウムは分子量が小さいため流速が早くなり、高圧にすることで出力が大きくなることが期待できる。

3.2 熱輸送実験

熱音響エンジンでは高温側熱交換器と熱源が離れている場合もあるが、熱を損失なく輸送できれば、音波を発生させることができる。昨年度ヒートパイプを使用した熱輸送装置⁴⁾を製作したが、今年度はこの先に熱音響エンジンを取り付け、音波が発生するか確認した。実験装置の外観を図 6 に示す。ホットプレートを熱源にして受熱板で集熱し、長さ 70cm のヒートパイプで右上の熱音響エンジンの高温側熱交換器に熱を輸送する。ヒートパイプは外部へ熱が逃げないように断熱材を巻いた。ホットプレートは 300℃で温度上昇が停止する設定にした。動作させてからのプレートと熱音響エンジンの高温側熱交換器と低温側熱交換器の温度変化、音波の発生時間を図 7 に示す。ヒートパイプで熱が輸送されるが、熱音響エンジンの高温側熱交換器の温度はホットプレートに比べてゆっくりと上昇し、250℃で一定になった。熱音響エンジンの高温側熱交換器が 156℃まで上昇すると音波が発生し、熱音響エンジンを駆動させるための熱が輸送されていることを確認した。なお、この時の低温側熱交換器は 22℃で蓄熱器両端の

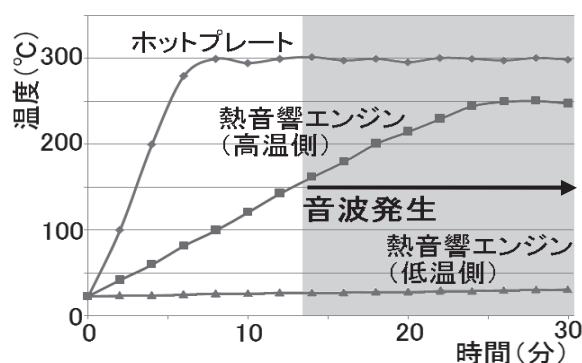


図 7 ホットプレートと熱音響エンジンの温度変化

温度差は 134℃であった。

4. 結 言

- (1) 進行波型熱音響エンジンを製作し、スピーカで発電させたところ、定在波型熱音響エンジンの 2 倍の電力が得られた。また、進行波型熱音響エンジンでエンジンの数を 1 個から 2 個に増やしたところ、発電電力は 3 倍になり、出力が大きくなった。
- (2) ヒートパイプを使った熱輸送装置を製作し、熱源と熱音響エンジンが離れていても、これを駆動するために必要な熱が輸送されることを確認した。

参考文献

- 1) 富永昭, “熱音響工学の基礎”, 内田老鶴圃, 1998, pp.9-11.
- 2) 大野宏, 平石誠, 須貝裕之, 本多章作, 石井啓貴, “熱音響機関技術研究会報告”, 新潟県工業技術研究報告書, No.44, 2014, pp.64-66.
- 3) 琵琶哲志, 高尾景, “複数蓄熱器による音響パワー増幅”, 低温工学, Vol.47, No.1, 2012, pp.42-46.
- 4) 大野宏, 平石誠, 須貝裕之, 本多章作, 石井啓貴, “高出力の熱音響機関エンジンの開発”, 新潟県工業技術研究報告書, No.44, 2014, pp.35-38.

異種金属材料の非溶融接合技術の開発 ～アルミニウムと鋼板の接合～

平石 誠* 中川 昌幸**

Non-melting Joining of Dissimilar Metals
～Joining between Aluminum Alloy and Steel Sheet～

HIRAISHI Makoto* and NAKAGAWA Masayuki**

1. 緒 言

機械装置を構成する材料には様々な材料特性が求められるが、中でも「軽さ」は省エネルギー化や機械装置の性能の向上、取り扱いの容易さなどの観点から重要な特性の一つである。ただし、多くの場合、強度あるいは耐食性、加工性などの複数の特性を併せ持つことが必要となるため、これを実現する方法として異なる特性を持つ材料をつなぎ合わせる接合技術が注目されている。しかし、従来の部材を溶かす「溶接」を行った場合、金属間化合物の生成に伴う脆化や割れの発生により接合が困難であるため、非溶融接合技術の開発に向けた研究がなされている。本研究では継手形態として汎用性の高い点接合を対象として、非溶融接合の一種である摩擦圧接の原理を応用した鋼板とアルミニウム合金の接合技術の開発に取り組んだ。

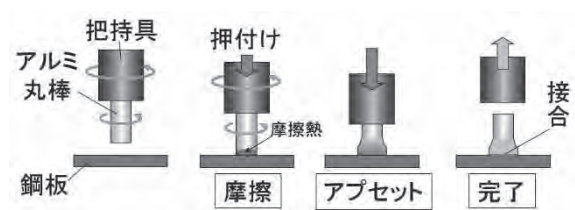


図1 接合原理

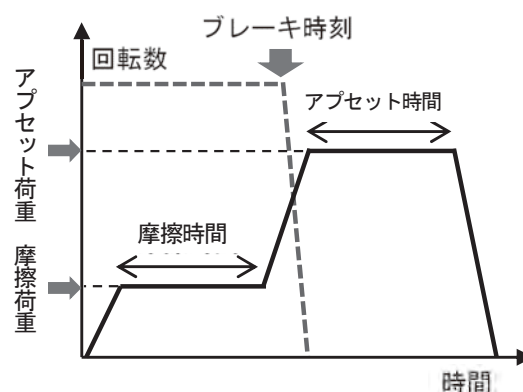


図2 接合工程

2. 実験方法

製作した摩擦圧接機を用いてアルミニウム合金丸棒（A5052，φ6 mm）と冷間圧延鋼板（SPCC，厚さ1 mm）の接合実験を行った。

図1は接合原理を表したものである。回転させたアルミニウム丸棒を鋼板に押し付けて摩擦熱を発生させ（摩擦過程）、適正な時間だけ保持して接合部周辺の材料を軟化させた後に回転を急停止し、これとほぼ同時に押付荷重を増し材料を圧縮変形（アプセット過程）させて接合を完了する。押付荷重と回転

数の時間変化をグラフ状に表すと図2のようになる。

接合実験では摩擦時間やアプセット荷重が接合強さに及ぼす影響を調べた。接合条件を表1に示す。

接合部の強さを評価するために引張試験を行った。引張荷重の負荷方向は接合面に垂直方向（引張強さ）とした。

表1 接合条件

回転数	50 s ⁻¹
摩擦荷重	1.7 kN
摩擦時間	1.0～5.0 s
アプセット荷重	1.7～3.1 kN
アプセット時間	5.0 s

* 中越技術支援センター

** 下越技術支援センター

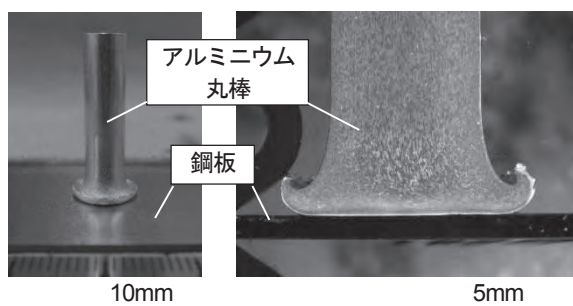


図3 接合した試験片

3. 実験結果

接合された試験片の外観および断面を図3に示す。アルミニウム丸棒は接合部付近で拡がり、その先端はカールしてバリを形成した。バリは主にアプセット過程に形成されたもので、接合界面に沿った塑性流動によるものである。

接合面の裏側に当たる鋼板表面に線径0.3 mmのK熱電対を取り付け、接合時の温度を測定した(図4)。接合部の温度はアルミニウム丸棒が鋼板に接触すると同時に上昇し、アプセット荷重に切り替わると410℃に達した。そしてブレーキをかけ摩擦発熱量が小さくなると急速に低下した。塑性流動を生じやすい高温状態でアプセット荷重付加を付加するためにはブレーキとのタイミングが重要となる。

接合条件が接合強さに及ぼす影響を調べた結果の一例を図5に示す。アプセット荷重の増加とともに接合強さは増加した。併記した寄代(アルミニウム丸棒の長さ変化量でバリの排出量と同義)も同様の傾向を示しており、寄代が接合強さの指標となることを示唆している。なお、摩擦時間(1.0~5.0 s)が接合強さに及ぼす影響は少なかった。

引張試験後の破断部では図6のように鋼板が大きく変形した。破断面を電子顕微鏡で観察すると、黒い筋状の未接合部(図7(a) 矢印)が観察されたが、延性破面(図7(b))が広い面積に認められ、強固な接合がなされていることが確認された。

4. 結 言

鋼板とアルミニウム合金丸棒の非溶融接合技術の開発に取り組み、接合部の温度変化および摩擦圧接条件が接合強さに及ぼす影響を把握した。

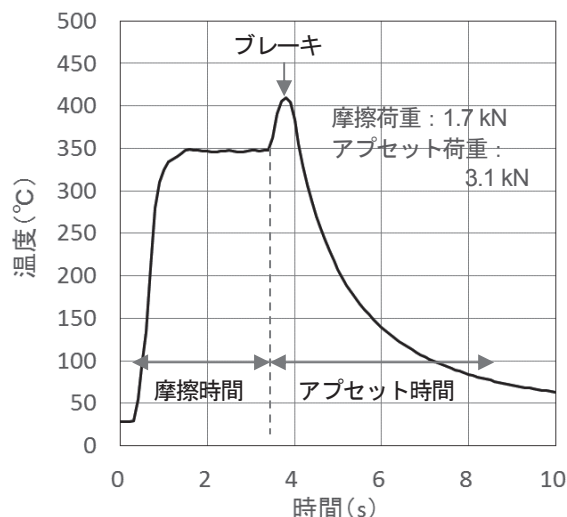


図4 接合部付近の温度変化

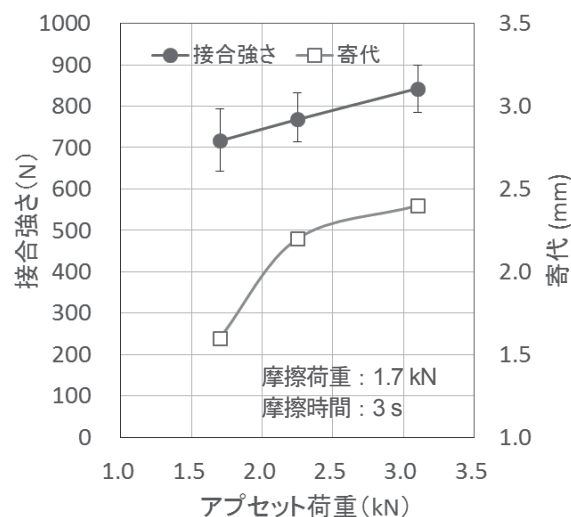


図5 接合強さの変化

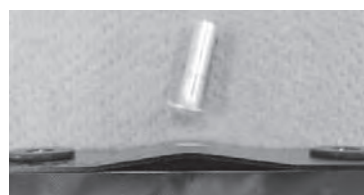


図6 破断部の様子

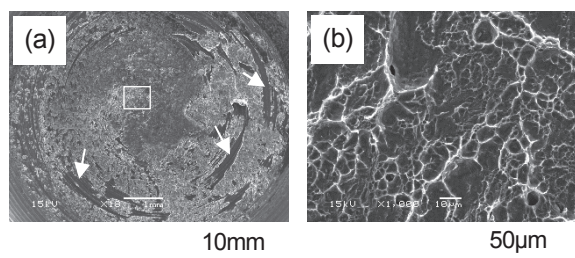


図7 破面の電子顕微鏡像

((b)は(a)の囲み部の拡大)

簡易なグレースケールマスクを使用したリフロー法によるマイクロレンズアレイの作製

佐藤 健* 宮口 孝司*

Fabrication of Micro-lens Array by Reflow Method Using Simple Gray-scale Mask

SATO Takeshi* and MIYAGUCHI Takashi*

1. 緒 言

マイクロレンズアレイ（以下，MLA）は直径数 $10\mu\text{m}$ のマイクロレンズを多数配列したもので，CCD 撮像素子や液晶プロジェクターなどの光学部品として利用されている。

石英やガラスなどに直接レンズ形状を加工する方法の一つにリフロー法がある。

フォトリソグラフィーで円柱状のレジストパターンを形成し，加熱でフォトリソレジストを溶解・流動させて表面張力で球面を形成する。これをドライエッチングすることで基板にレンズ形状を形成する方法である（図 1 参照）。レジストと基板の選択比が 1 となる条件でエッチングを行うとレジスト形状がほぼそのまま基板に転写される。

比較的容易な方法であるが，アスペクト比の小さいレンズ（径に対して高さの低い形状）については，レジストが十分に流動せず球面が形成されないという課題がある。図 2 は当研究室の試作例で，レジストが中央部まで流動せず頂点が凹形状となっている。球面が形成される前にレジストが硬化したことが原因と考えられる。

本研究ではスパッタリング装置で簡易なグレースケールマスクを作製し，リフロー法への適用を検討した。図 3 のようにグレースケールマスクでレジストを階段状にパターニングすることで，レジストの流動を容易にし，上記課題の改善を試みたので報告する。

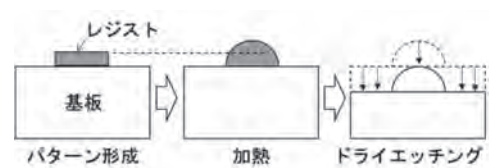
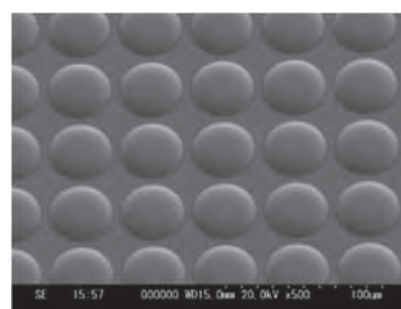
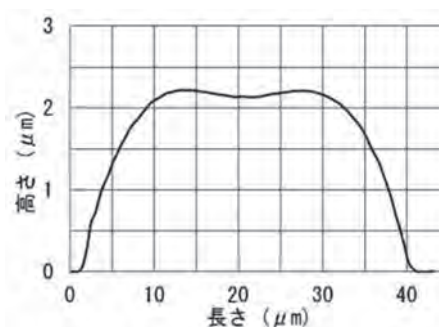


図 1 リフロー法



(a) 外観



(b) 断面形状

図 2 試作した石英製 MLA

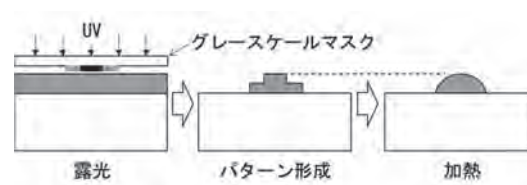


図 3 グレースケールのパターン形成

* 研究開発センター

レーザー・ナノテク研究室

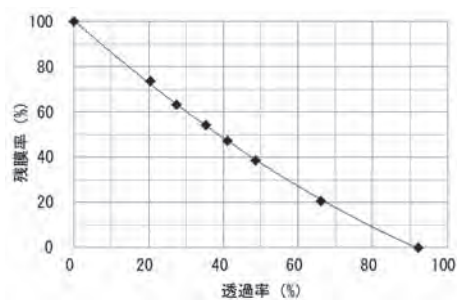


図 4 UV 透過率とレジストの残膜率

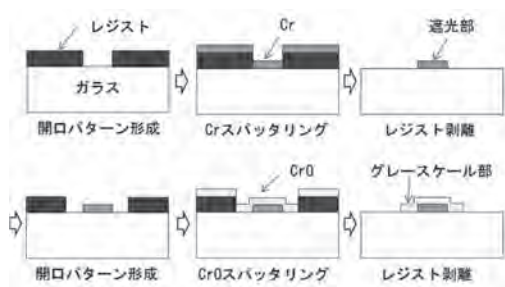


図 5 グレースケールマスクの作製フロー

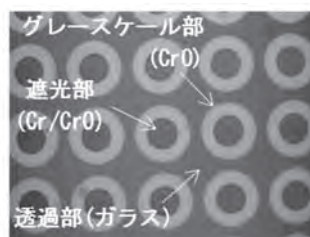


図 6 グレースケールマスクの外観

2. 実験

2.1 レジストの階調性評価

レジスト OFPR800LB（東京応化工業（株））を用いて UV 透過率に対するレジストの残膜率を測定した。

ソーダガラスに CrO を時間を変えてスパッタリングし、20～70%の範囲で 6 階調の透過率の領域を形成し、遮光領域とソーダガラスのみの領域（透過率 92%）も加えて 8 階調の評価用マスクを作製した。マスクアライナー PEM-800（ユニオン光学（株））で露光し、UV センサー UVD-405PD（ウシオ電機（株））で各領域の透過率を測定した。UV センサーの受光部は ϕ 1mm であるため、各領域は幅 2mm 以上で形成

し、直接透過率を測定した。

レジストを Si 基板にスピコートし、ホットプレートで 110℃2min のベークをして 3.1 μ m の厚さに成膜した。上記の評価用マスクを使用し、照射エネルギー 97mJ/cm² でコンタクト露光を行い現像した。レジスト表面に薄い反射膜を形成した後、非接触三次元測定機 NH-3SP（三鷹光器（株））で膜厚を測定し残膜率を算出した。その結果、図 4 に示すとおりレジストの階調性が確認された。

2.2 フォトマスクの作製

ϕ 38 μ m の MLA 用にグレースケールマスクとバイナリーマスク（光の透過の有無のみでパターン形成する 2 値のマスク）を作製した。

グレースケールマスクは図 5 のようにリフトオフプロセスを 2 回繰り返すことで作製した。

先ずソーダガラスにレジストでレンズの直径よりも小径の開口パターンを形成し、100nm 厚の Cr をスパッタリングした後、レジストを剥離して遮光部を形成する。遮光部は、 ϕ 18, 24, 30 μ m の 3 種類とし、リフロー後のレジスト高さのパラメータとした。

次にレンズの直径と同じ ϕ 38 μ m の開口パターンを形成し、CrO をスパッタリングした後レジストを剥離し、遮光部の周囲にグレースケール部を形成する。CrO は図 4 におけるレジスト残膜率 60%を目安に、透過率 30%となるスパッタリング条件で成膜した。作製したマスクの外観を図 6 に示す。

バイナリーマスクは、120nm 厚の Cr を ϕ 38 μ m にパターンニングして作製した。

2.3 実験方法

レジスト OFPR800LB を Si 基板にスピコートし、ホットプレートで 100℃2min のベークをして成膜する。グレースケールマスクでパターンニングする試料はレジスト厚を 3.1 μ m とし、バイナリーマスクの場合は、レジスト厚を 1.7, 1.9, 2.2 μ m の 3 種類とした。露光エネルギー

ギー97mJ/cm² でコンタクト露光を行い、現像後、ホットプレートで 210℃5min の加熱をしてレジストをリフローさせた。

2.1 項と同様にレジスト表面に反射膜を形成した後形状を測定した。機器に内臓されたプログラムで円に近似し、フィッティングの可否で流動性を判断した。

2.4 結果

2.4.1 リフロー後のレジスト形状

図 7 にグレースケールマスクで形成したレジストの断面形状を示す。遮光部 $\phi 18\mu\text{m}$ の試料で高さ $2.4\mu\text{m}$ となった。

図 8 は同じ試料の断面を円に近似した図であり、端部でわずかにずれがあるもののフィッティングは良好である。図示はしていないが $\phi 24$, $30\mu\text{m}$ の試料の近似も良好で、表 1 のように近似した円の半径を求めることができた。

バイナリーマスクのレジスト形状を図 9 に示す。レジスト厚 $2.2\mu\text{m}$ の試料のみ高さ $3.2\mu\text{m}$ の球面が形成されたが、その他の試料ではレジストの流動が不十分で凹形状となった。

したがって、低アスペクト比の球面形状を作製する場合にはグレースケールマスクの方が有利であるといえる。

2.4.2 グレースケール部のレジスト形状

グレースケールマスクを使用した場合のリフロー前の断面形状を図 10 に示す。縦軸の高さは規格化して表示した。グレースケール部の高さは図 4 の階調性評価の結果から 0.6 程度と想定されたが、実際にはこの値からずれており、凹凸のある面となった。これは、光の回折や反射などの影響で透過光に強度分布が生じたことが原因と考えられ、2.1 項で使用したマスクと異なり、グレースケール部の領域が微小なパターンでは影響が大きい。

3. 結 言

(1) リフロー法による MLA 作製において、3 階

調の簡易なグレースケールマスクを使用することで、従来法に比べレジストの流動性が向上し、よりアスペクト比の小さいレンズ形状を形成できることがわかった。

(2) 微小なグレースケール部では光の回折などの影響により、レジストの残膜率において想定値からのずれが生じた。

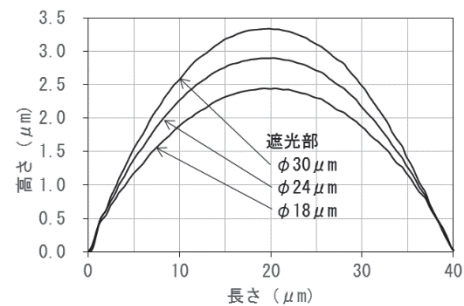


図 7 断面形状（グレースケールマスク）

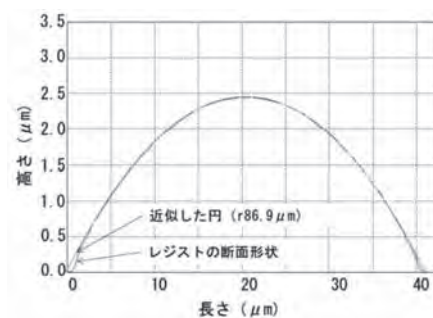


図 8 円への近似（遮光部 $\phi 18\mu\text{m}$ ）

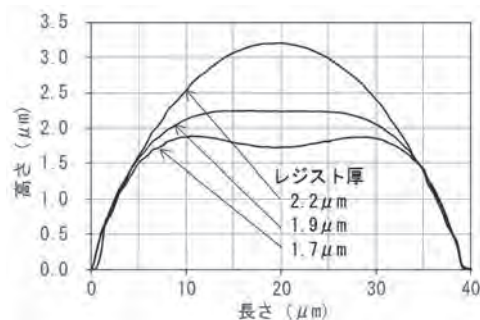


図 9 断面形状（バイナリーマスク）

表 1 レジスト高さと近似した円の半径

	遮光部の直径 (μm)	$\phi 18$	$\phi 24$	$\phi 30$
	レジスト高さ (μm)	2.4	2.9	3.3
グレースケールマスク	近似した円の半径 (μm)	86.9	71.5	60.8
	レジスト厚 (μm)	1.7	1.9	2.2
	レジスト高さ (μm)	-	-	3.2
バイナリーマスク	近似した円の半径 (μm)	-	-	66.6

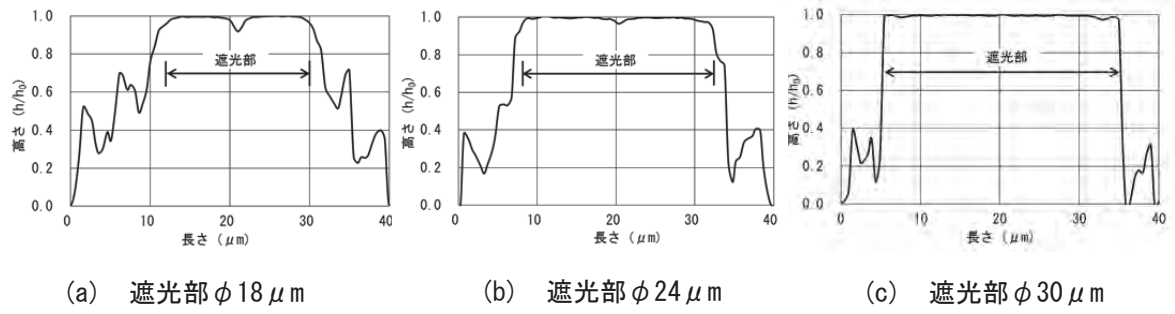


図 10 リフロー前のレジストの断面形状

人工光レタス栽培における 反射材が光強度と生育に与える影響

石井 治彦* 種村 竜太* 小林 豊* 大川原 真*

Efficiency on agricultural environment using reflective material

ISHII Haruhiko*, TANEMURA Ryota*, KOBAYASHI Yutaka* and OKAWARA Makoto*

1. 緒 言

天候に左右されず、栽培条件を制御することが可能な完全人工光植物工場が注目されている。その一方で、導入時の初期コストや生産コストが高いことが課題となっている。栽培環境要素のひとつとして、光環境がある。従来は蛍光灯を光源として用いていたが、近年では長寿命で省電力な LED に置き換わってきた。省電力効果や光利用の高効率化を求めて、LED の波長がレタスの生育に及ぼす影響についての報告がされている¹⁾³⁾。現状では、LED の光が栽培領域から漏れ、植物に利用されていない光がある。そのため、反射材を利用することで、光の効率的な利用や LED にかかる電力の削減につながると考えられる。

しかし、LED の光を有効に使うために反射材を利用した栽培の報告例はみられない。本研究では、LED 照明の効率的な利用を目的とした、反射材の設置による光環境の変化およびレタスの生育に及ぼす影響について検討した。

2. 材料及び方法

2.1 栽培方法

品種はフリルアイスを供試した。平成 27 年 12 月 21 日にウレタンキューブ (2.5cm×2.5cm×3.0cm) に播種し、育苗した。平成 28 年 1 月 8 日に栽培ベッド (W59cm×L88cm×H3cm) に定植 (8 条千鳥植え) し、1 つの試験区とした。

培養液は、OAT アグリオ (株) の A 処方を用いた。発芽後は 1/4 濃度 (EC 0.7dS/m) で育苗し、定植後は 1/2 濃度 (EC1.4dS/m) で管理した。試験は湛液式水耕で行い、植物の吸水による減水分を随時水道水で補充し、2～3 日毎に EC を 1.4dS/m に調整した。

育苗時の光源には、昼白色 Hf 蛍光灯 (パナソニック (株), FHF32EX-N-H) を用い、光強度 (光合成有効光量子束密度: PPFD) を $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、明期を 12 時間とした。定植以降は白色 LED (シャープ新潟電子工業 (株), 色温度 5000K, 20W) を使用し、明期は 16 時間とした。

2.2 試験区の設定

反射材は反射率が約 90% のタイベック 700AG (丸和パイオケミカル (株)) を用いた。波長別の反射率を図 1 に示す。白色 LED を各試験区に 4 本配置し、栽培装置の側面に反射材を吊り下げて開口高さをそれぞれ 10cm, 5cm, 0cm とした 3 試験区と、反射材を設置しない無処理区を設けた。いずれの試験区ともに LED の上面には反射材を設置した。

図 2 に各試験区の模式図を示す。

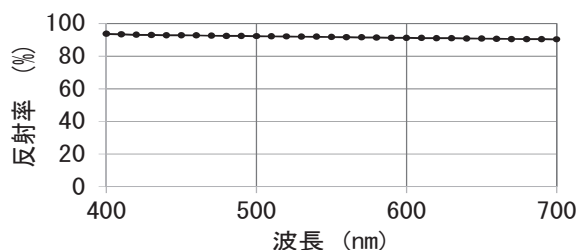


図 1 反射材の光反射率

* 下越技術支援センター

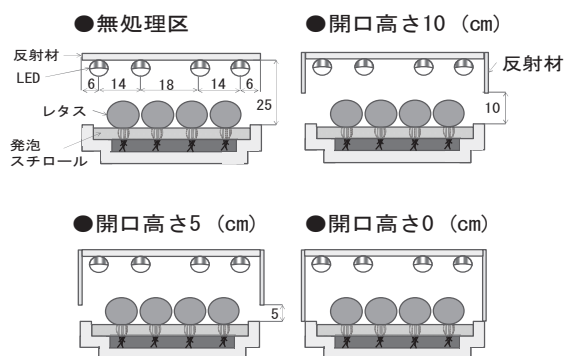


図2 各試験区の模式図
(側面反射材の高さを変化)

2.3 調査方法

定植面における光強度を Light Meter (LICOR, LI250A) を使用して長手方向、幅方向に8点ずつ合計64点測定した。

1月28日に収穫し、黄化葉などを取り除き可食部だけにした状態に調整し、調整葉重量と生理障害の一種であるチップバーンの発生株率を調査した。

3. 結果及び考察

3.1 開口高さと光強度の関係

光強度の測定結果を図3、4に示す。無処理区、10cm区、5cm区と開口高さが低くなるにつれ、全体的に光強度が上昇した。そして、5cm区と0cm区では有意差は見られなかった。無処理区と比較して、0cm区では平均値で69%の光強度が増加した。栽培装置の側面に反射材を設置することで光強度が上昇したことから、効率的なLEDの利用につながると考えられる。また、開口高さが低いほど光強度のばらつきは大きくなる傾向であった。一方、幅方向(LED照明と垂直の方向)の光強度のばらつき(光強度の幅方向の最大値と最小値の差)を図3と同様に端部からの距離で比較したところ、開口高さが低いほどばらつきが小さくなる傾向が見られた(図5)。反射材を配置することで端部の光強度が上がったことが要因と考えられる。

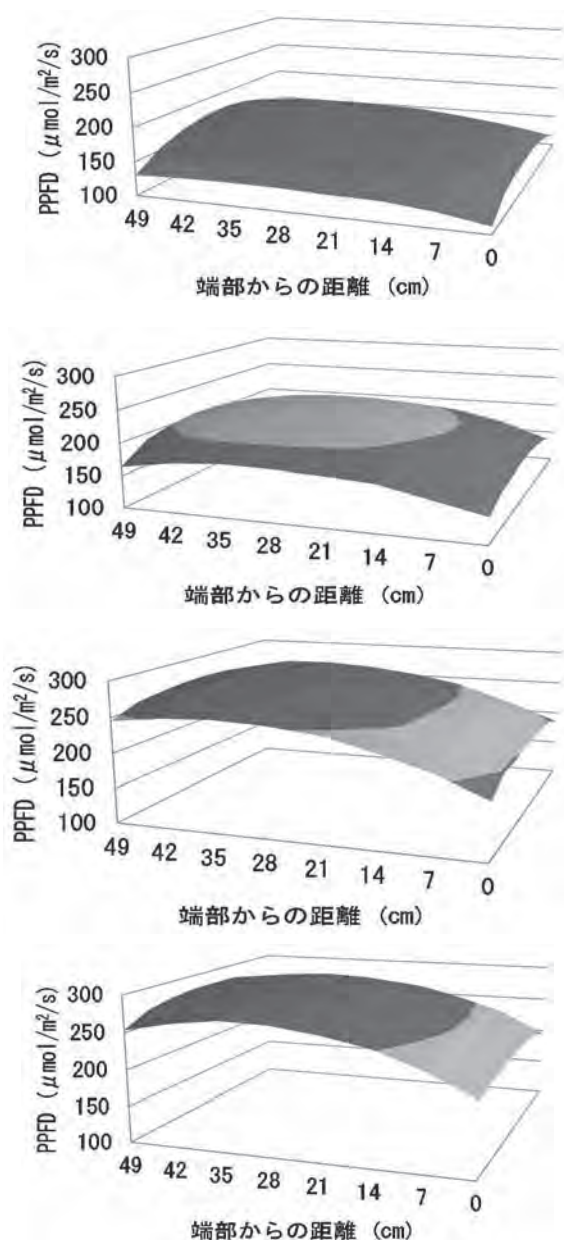


図3 各試験区の光強度分布
(上から、無処理区、10cm区、5cm区、0cm区)

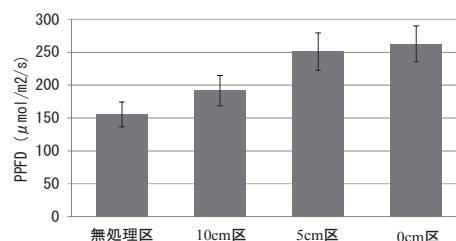


図4 光強度の平均値(エラーバーは標準偏差)

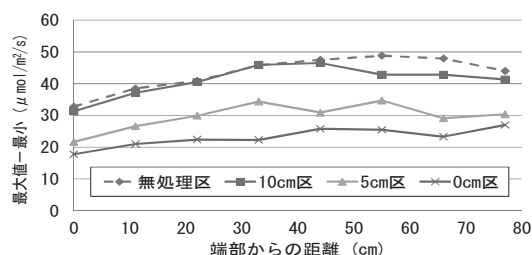


図5 幅方向における光強度のばらつき

3.2 開口高さとレタスの生育の関係

調整葉重量は、無処理区と10cm区では差がなかったが開口高さを5cm以下とすることにより無処理区と比較して増加し、0cm区では14%増加した(図6)。開口高さが小さくなり、定植後のレタスが受ける光強度が増加することで、生育が促進されたと考えられる。光強度が69%増加しているのに対し、レタスの重量増加が14%にとどまったことについては、レタスの生育によりレタスが反射材の一部を覆うことで、光の反射量が抑えられたと考えられる。

チップバーン発生は、反射材を設置することで発生株率が増加した(図7)。チップバーンはカルシウム欠乏症状の一種で、葉からの蒸散が抑制されることでカルシウムの転流が抑制され、局所的に欠乏状態となって発生する⁴⁾。そのため、反射材を設置したことにより、空気の流れが妨げられ、レタスの蒸散が抑制されていたと考えられる。レタスのチップバーンについては、送風処理を行うことで発生を抑制できることが報告されている⁵⁾。今後、レタスの蒸散を考慮した栽培環境の最適化について検討することが必要である。

以上の結果から、開口高さを5cm以下になるよう反射材を設置することで、レタスの重量増が見込めると考えられる。

4. 結 言

- (1) 反射材を側面に設置することによって光強度は最大69%増加する。
- (2) 幅方向の光強度のばらつきは減少する。

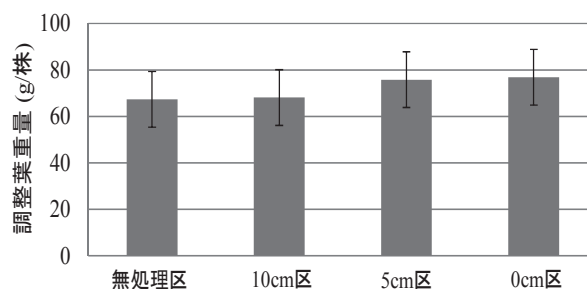


図6 調整葉重量(エラーバーは標準偏差)

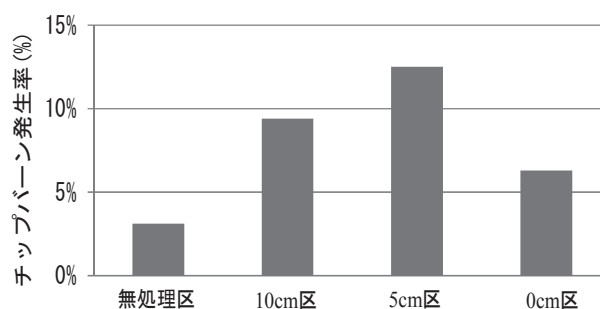


図7 チップバーン発生株率

- (3) 調整葉重量は最大14%増加する。
- (4) 反射材を設置することにより、チップバーンは発生率が増加する傾向がみられた。

参考文献

- 1) 高辻, “完全制御型植物工場の現状”, 植物環境工学(J.SHITA), 22(1), 2010, pp.2-7.高辻ら, “可視発光ダイオードによる植物栽培実験”, 植物工場学会誌(JOURNAL OF SHITA), 7(3), 1995, pp.163-165.
- 2) 大竹ら, “人工光型植物工場における赤青LEDと蛍光灯使用時の植物成長および消費電力の評価” 植物環境工学(J.SHITA), 27(4), 2015, pp.213-218.
- 3) 日本施設園芸協会/日本養液栽培研究会, “養液栽培のすべて”, 2012, pp.264.
- 4) 吉田ら, “暗期中補光栽培における送風および低カリウム培養液処方が水耕レタスおよびシュンギクのチップバーン発生に及ぼす影響”, 園芸学研究第14巻別冊1, 2015, pp.175.

低温排熱用スターリングエンジンの理論的側面からの理解と実現可能性に関する検討

須貝 裕之*

Theoretical and Feasibility Study of Stirling-engine

SUGAI Hiroyuki*

1. 緒 言

工場などから排出される低温排熱を利用して電気エネルギーを作り出す低温排熱用スターリングエンジンは、低炭素社会の実現に貢献する技術であり、県内企業においても実用化に向けて開発が進められている。スターリングエンジンは内部の作動ガスの熱力学的変化を利用して動作する。従って出力向上には運転中の作動ガスを最も効率の良い状態に近づけることが重要となる。そこで本研究では、最初に開発中のスターリングエンジンについて熱力学や伝熱工学などの理論的側面から検討し、理想的な運転状態とそのときの理論的な出力について検討する。次に、運転中のエンジンの内部状態を実測する実験装置を作成し、理論からの乖離を調べ、装置性能向上の方向性を明らかにする。

2. スターリングエンジンについての熱力学・伝熱工学的検討

スターリングエンジンの運転状態を理論的に解析する方法の一つにシュミット理論¹⁾がある。この理論により開発中の 500W 級スターリングエンジンの解析を行い、理論上の運転出力を計算する。図 1 にシュミット理論により解析するスターリングエンジンの概略構造を示す。企業にて開発中のエンジンはフリーピストン型であるが、この形式のエンジンはディスプレイサの運動抵抗が複雑になるため、ここではフリーピ

ストンに近く、解析が容易な β 型スターリングエンジンとして解析を行った。本エンジンは開発中であるため、エンジンの仕様や詳細な動作条件は記載しないが、加熱側の温度は 200℃、冷却側の温度は 20℃として計算を行った。

図 2 にシュミット理論により求めた P-V（圧力-体積）線図を示す。計算の結果、理論熱効率は 38%、理論出力は 950W であった。ただし、実際の出力は熱交換器の能力や再生器の効率、内部摩擦やディスプレイサによる損失などにより理論値の半分程度²⁾となる。しかしこれを

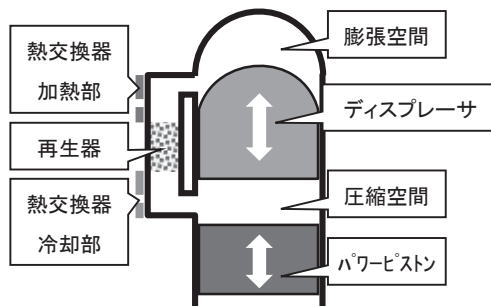


図 1 β 型スターリングエンジン

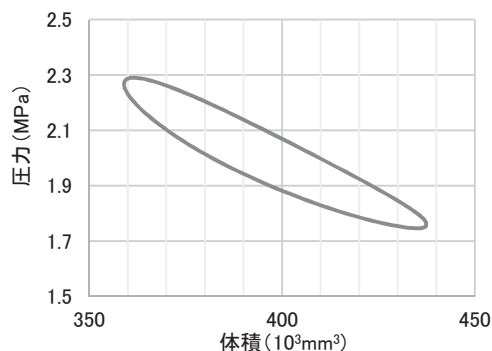


図 2 開発中のスターリングエンジンの P-V（圧力-体積）線図

* 中越技術支援センター

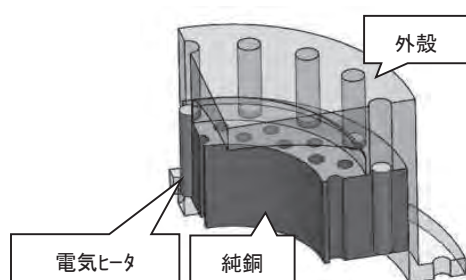


図3 固体型熱交換器による実験装置

考慮しても開発中のスターリングエンジンは500Wに近い出力を発揮できる可能性がある。

3. 運転中のエンジン内部状態の調査

作動ガスの加熱に使用されているサーモサイフォン型熱交換器は、現在未完成のため所定の伝熱能力を発揮できていない。このような状態でエンジンの内部状態（作動ガスの圧力変動、熱交換器出入り口と再生器での温度）を測定すると、それがエンジン自体の問題なのか、熱交換器の能力不足によるものなのか切り分けが困難である。そこで本研究では、高い熱伝導率をもつ純銅で伝熱を行う熱交換器を考案した。図3に概略を示す。装置は円筒形状であるが、構造をわかりやすくするため、1/4モデルで示してある。本装置は外周に取り付けられた電気ヒータで純銅を加熱し、内周穴を通過する作動ガスと熱交換を行う。設計においては、有限要素法シミュレーションによる伝熱解析を行い、ヒータの温度を215℃に制御することで、内周の穴から合計5kWの熱が作動ガスに供給されても、内周穴壁面の温度を200℃に維持できることを確認している。すなわちこの装置は、サーモサイフォンが所定の能力を発揮した状態を再現できる。

本装置で発電実験を行った結果、同形状・同条件のサーモサイフォン型熱交換器に対して、2.5倍の出力（約90W）が得られた。これにより、固体型熱交換器がその機能を発揮できていることと、現状の熱交換器がその能力を十分に発揮していないことが確認できた。

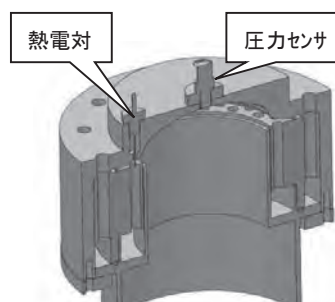


図4 エンジン内部状態測定センサーの設置

次にこの実験装置を改造し、運転中の内部状態を測定する。図4に構想図（装置断面）を示す。図1に示す膨張空間頭頂部に圧力センサを取り付ける。また、作動ガスが通過する熱交換器加熱側出口には熱電対を設置する。熱電対はこの他にも再生器中央部と冷却側熱交換器出口に同様の方法で設置する。

今後の予定としては、上記装置を製作し、運転時の基礎的なデータを収集を行う。その後、圧縮空間側の圧力と、パワーピストンとディスプレイサの位相も測定できるようにさらに装置を改造する。これによってスターリングエンジンの運転時の内部状態を完全に測定し、性能向上の方向性を明らかにすることを目指す。

4. 結 言

- (1) シュミット理論による解析を行った結果、開発中のスターリングエンジンは950Wの理論出力を発生する。従って、実機においても500Wに近い出力を発生できる可能性がある。
- (2) 固体型熱交換器を製作して発電実験を行った結果、サーモサイフォンの2.5倍の出力が得られた。今後は装置を改造し、運転時内部状態の測定を目指す。

参考文献

- 1) 山下巖ほか，“スターリングエンジンの設計”，パワー社，2000，pp.42.
- 2) 山下巖ほか，“スターリングエンジンの設計”，パワー社，2000，pp.70．pp.223.

鋼材の球状化焼鈍しについて

齋藤 雄治*

Spheroidizing annealing for Steel

SAITO Yuji*

1. 緒 言

炭素工具鋼鋼材 SK105 は、約 1%の炭素を含む炭素鋼で、刃物などに使用されている。この鋼材は材料出荷前に球状化焼鈍しを行い、鋼材として最も軟らかい状態にしている。球状化焼鈍しを行うと、金属組織はフェライト地に無数の球状の炭化物が一様に分布した状態となる。これにより、容易に機械加工することができ、しかも焼入れしたときに変形が少なく高い耐摩耗性をもった製品・部品にすることが可能となる。

当センターにおいて、企業から持ち込まれた鋼製の刃物や工具などの金属組織観察や硬さ試験を行うことがある。その結果、焼入れ前の金属組織が問題であると推測されることもあるが、さほど知見がないため、試験結果の客観的な評価や企業への結果説明が十分でないことがある。

ここでは、熱処理条件と炭化物の球状化の関係について実験を行った。実験で用いた供試材（炭素工具鋼鋼材 SK105）は、購入した状態で炭化物が球状化しているため、これを焼ならしして層状の炭化物にした後、各種の条件で球状化焼鈍しを行い、硬さと金属組織を調べた。これにより、熱処理条件と金属組織や硬さのデータを蓄積し、上記の技術相談により迅速に対応できるようにすることを目的とする。

2. 実験条件

試験片には、炭素工具鋼鋼材 SK105、サイズ（19 mm×19 mm×20mm）を用いた。この試験片について、以下の熱処理と評価を行った。

* 県央技術支援センター

2.1 熱処理条件

供試材について、焼ならし（950℃に 1 時間保持後に空冷）を行った後、以下①～⑧の 8 種類の条件で焼鈍しを実施した。

①完全焼鈍し

770℃で 1h 保持，770℃から 600℃まで 8.5h で徐冷，600℃から常温まで炉冷

②等温焼鈍し I

770℃で 3h 保持，770℃から 720℃まで炉冷，720℃で 8h 保持後に炉冷

③等温焼鈍し II

770℃で 3h 保持，770℃から 720℃まで 2.5h で徐冷，720℃で 16h 保持後に炉冷

④焼入れ＋高温焼戻し

850℃で 15 分保持後に水冷，720℃で 5h 保持後に炉冷を 2 回

⑤焼入れ＋繰返し加熱冷却 I

850℃で 15 分保持後に水冷，750℃で 30 分保持と 700℃で 30 分保持を三回繰返して炉冷

⑥焼入れ＋繰返し加熱冷却 II

850℃で 15 分保持後に水冷，750℃で 30 分保持と 700℃で 30 分保持を三回繰返し後，720℃で 16h 保持して炉冷

⑦上記③を 2 回

⑧焼入れ＋変態点直下保持＋上記③を 3 回

850℃で 30 分保持後に水冷，700℃で 4h 保持後に空冷，上記③を 3 回

2.2 評価項目

・硬さ試験…試験片断面を鏡面研磨後，マイ

クロビッカース硬度計で試験（HV0.5）

- ・金属組織観察…試験片断面を鏡面研磨および腐食後、金属顕微鏡で観察

2.3 試験機器および腐食液

実験に用いた試験機器および腐食液は以下のとおりである。

- ・電気炉：（株）東洋製作所製 電気マッフル炉 KM-420
- ・硬度計：（株）ミットヨ製 マイクロビッカース硬度計 MVK-G1
- ・金属顕微鏡：（株）ニコンインステック製 倒立型金属顕微鏡 TME3000U-NR 型
- ・腐食液：硝酸-アルコール溶液（配合：HNO₃—3ml，エチルアルコール 97ml）

3. 実験結果および考察

3.1 供試材の試験片の金属組織と硬さ

供試材の金属組織を図 1 に示す。大きさ 2～3μm の球状炭化物が一様に分布している。基体組織はフェライトで、硬さは 167HV0.5 と低くなっている。

3.2 焼ならし後の試験片の金属組織と硬さ

供試材を焼ならしした金属組織を図 2 に示す。ほぼ全面がパーライト組織になっており、一部の旧オーステナイト粒界に網状炭化物が見られ

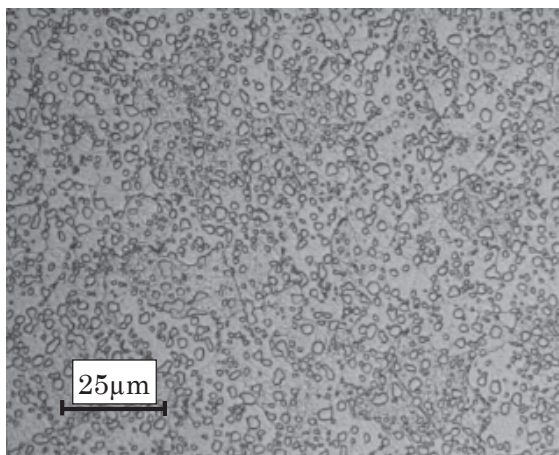


図 1 供試材（硬さ 167HV0.5、フェライト、球状炭化物）の金属組織

る。硬さは 348HV0.5 と納入状態に比べてかなり高くなっている。

3.3 各種熱処理後の試験片の金属組織と硬さ

①完全焼鈍し（図 3）：大きさ 1～2μm 程度の細かい球状炭化物と、細かい炭化物（色が濃い部分）が見られる。硬さは 198HV0.5 と焼ならし後に比べて低くなっているが、納入状態ほど低くない。図 1 に比べて図 3 の金属組織が硬いのは、単位面積あたりの炭化物の数が少ないと硬さが低下する¹⁾ためと考えられる。

②等温焼鈍し I（図 4）：焼鈍し①に比べて球状炭化物が大きくなっているが、一方で

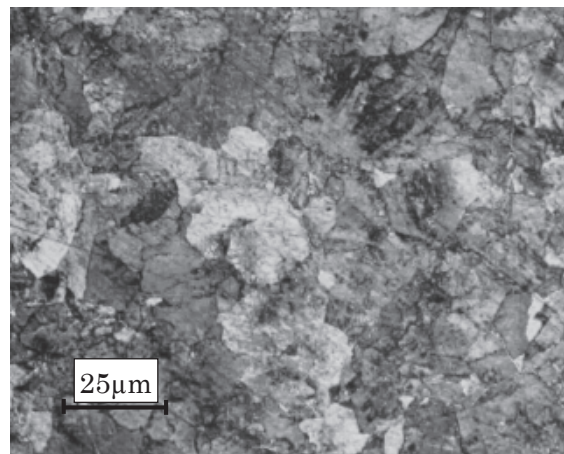


図 2 焼ならし後（硬さ 348HV0.5、パーライト、網状炭化物）の金属組織

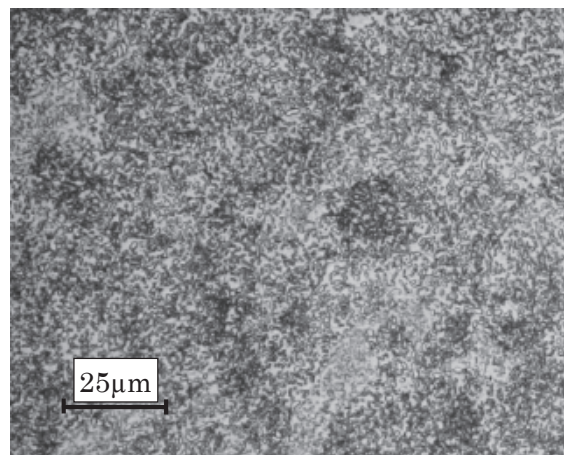


図 3 ①完全焼鈍し（硬さ 198HV0.5、フェライト、球状炭化物）の金属組織

細かい炭化物の密度が高まったように見える。球状炭化物が大きい部分は軟らかく、細かい炭化物がある部分は硬いと考えられるが、硬さ試験による圧痕の大きさは $70\mu\text{m}$ 程度のため、これらの平均的な硬さを試験していると考えられる。

硬さは $195\text{HV}0.5$ と焼鈍し①の金属組織とほぼ同じとなった。

③等温焼鈍しⅡ（図 5）：焼鈍し②に比べて球状炭化物が大きくなるとともに、細かい炭化物のある部分が少なくなっている。このため、硬さは $185\text{HV}0.5$ と焼鈍し②の金属組織より 10 程度低くなっている。

④焼入れ＋高温焼戻し（図 6）：大きさ $1\mu\text{m}$ 程度の細かい球状炭化物が均一に分布して

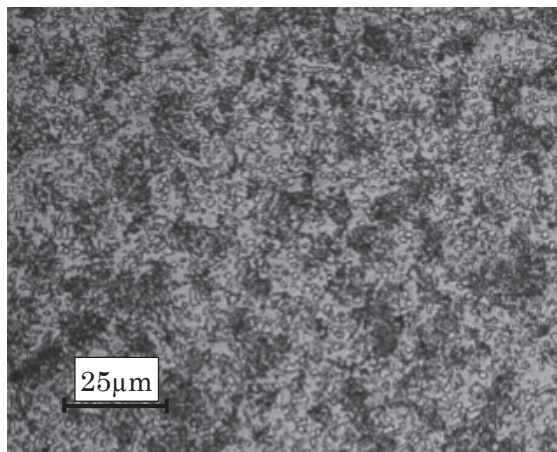


図 4 ②等温焼鈍しⅠ（硬さ $195\text{HV}0.5$ 、フェライト、球状炭化物）の金属組織

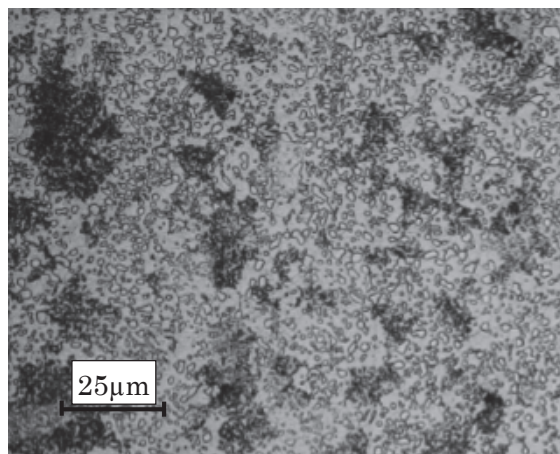


図 5 ③等温焼鈍しⅡ（硬さ $185\text{HV}0.5$ 、フェライト、球状炭化物）の金属組織

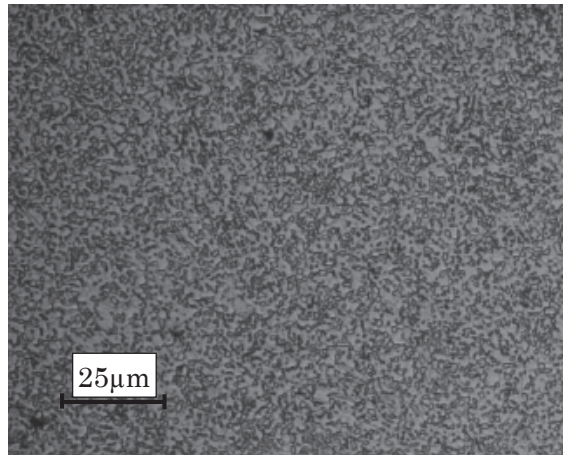


図 6 ④焼入れ＋高温焼戻し（硬さ $214\text{HV}0.5$ 、フェライト、球状炭化物）の金属組織

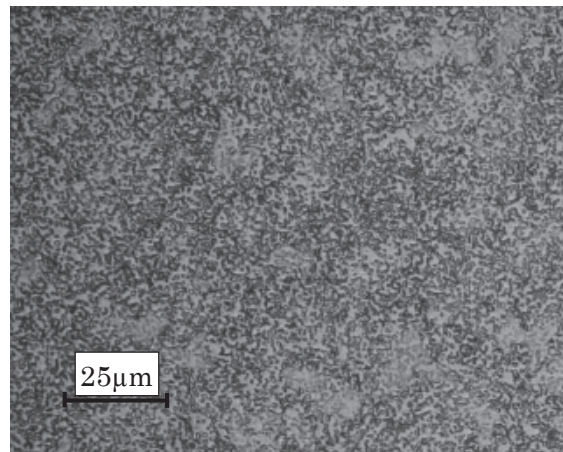


図 7 ⑤焼入れ＋繰返し加熱冷却Ⅰ（硬さ $206\text{HV}0.5$ 、フェライト、球状炭化物）の金属組織

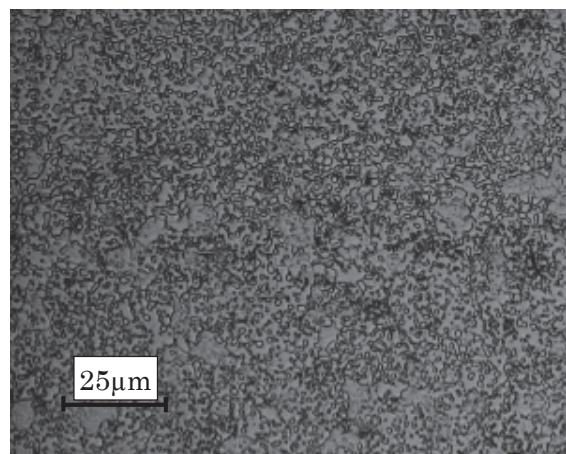


図 8 ⑥焼入れ＋繰返し加熱冷却Ⅱ（硬さ $186\text{HV}0.5$ 、フェライト、球状炭化物）の金属組織

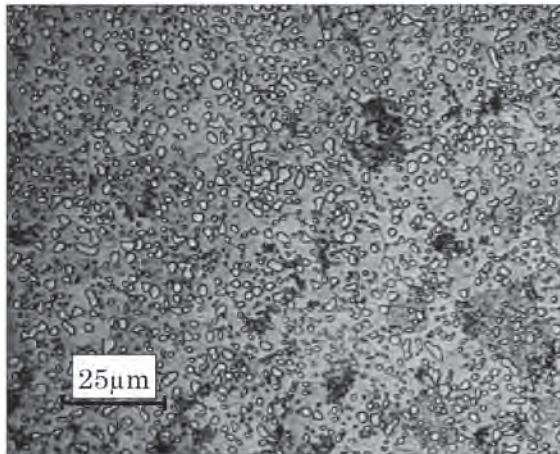


図 9 ⑦等温焼鈍しⅡを二回（硬さ 176HV0.5、フェライト、球状炭化物）の金属組織

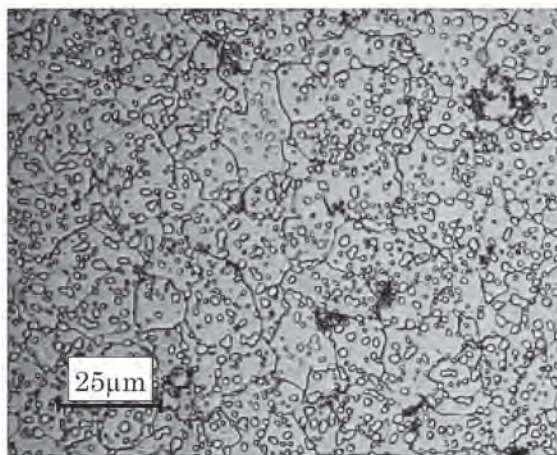


図 10 ⑧焼入れ＋変態点直下保持＋等温焼鈍しⅡを三回（硬さ 173HV0.5、フェライト、球状炭化物）の金属組織

いる。硬さは 214HV0.5 とやや高くなっている。これは、細かい炭化物が均一に分布しているためと考えられる。

⑤焼入れ＋繰返し加熱冷却Ⅰ（図 7）：短時間で球状化する熱処理を行った結果である。大きさ 1μm 程度の細かい球状炭化物が均一に分布している。硬さは 206HV0.5 と焼鈍し④の組織より若干低くなっている。

⑥焼入れ＋繰返し加熱冷却Ⅱ（図 8）：焼鈍し⑤の繰返し加熱冷却の回数を増やした結果である。焼鈍し⑤に比べ球状炭化物が大きくなり、186HV0.5 と焼鈍し⑤の組織より 20 程度低くなった。

⑦上記③を 2 回（図 9）：焼鈍し③を二回行った結果である。炭化物が大きくなり、地のフェライト組織もよく見える。しかし、細かい炭化物がある部分も若干残っている。硬さは 176HV0.5 と焼鈍し⑥の組織より 10 程度低くなった。

⑧焼入れ＋変態点直下保持＋上記③を三回（図 10）：焼入れ後に変態点直下保持と等温焼鈍しⅡを三回行ったものである。焼鈍し⑦に比べて炭化物がさらに大きくなり、地のフェライト組織もよく見える。細かい球状炭化物の部分はごくわずかとなり、硬さは 173HV0.5 となった。

なお、本報告書の実験結果については当研究所のホームページに掲載している²⁾。

4. 結 言

- (1) 変態点（723℃）直下での長時間保持により、球状炭化物の粒径が大きくなった。（焼鈍し②，③，⑦，⑧）
- (2) 焼入れ後に変態点（723℃）付近での昇温降温を繰り返すことで、短時間で球状炭化物が得られた。（焼鈍し⑤，⑥）
- (3) 細かい球状炭化物が少なく、かつ、球状炭化物の粒径が大きくなると、硬度が低下した。（焼鈍し③，⑦，⑧）
- (4) 焼鈍し⑧の金属組織と硬さは、納入状態に近い結果が得られた。

参考文献

- 1) https://unit.aist.go.jp/cpiad/ci/techno_kw/monokyohon_pdf/technote014.pdf，ヤスリ製造技術マニュアル，「国立研究開発法人 産業技術総合研究所ホームページ」，平成 27 年 10 月 26 日。
- 2) <http://www.iri.pref.niigata.jp/news/27new27.html>，炭素工具鋼鋼材（SK105）の球状化焼鈍し，「新潟県工業技術総合研究所ホームページ」，2016 年 1 月 19 日。

レーザ顕微鏡および粗さ測定機による表面粗さの比較

堀田 優* 吉田 正樹* 斎藤 雄治*

Comparison of the surface roughness by the laser microscope and the stylus method

HOTTA Yu*, YOSHIDA Masaki* and SAITO Yuji*

1. 緒 言

表面粗さを測定する方法には、大きく分けて「接触式」と「非接触式」の2つの方式がある。「接触式」は触針が試料を直接なぞることにより表面の凹凸を測定するもので、表面粗さ測定に最も広く用いられている。これに対して、「非接触式」は光を使用したものであり、共焦点方式を利用したレーザ顕微鏡、白色干渉方式を利用した白色干渉計などがある。これらの測定値は試料の表面状態、反射率、形状などに影響されやすいものの¹⁾、試料を傷つけることなく表面粗さを測定できるメリットがある^{2) 3)}。

しかし、同一試料を接触式と非接触式で測定した場合、測定値がどの程度一致するのか検証したデータは少ない²⁾。

そこで本研究では、接触式と非接触式で表面粗さの異なる複数の試料を測定し、測定値がどの程度一致するのか検討した。

2. 実験方法

2.1 測定条件

表面粗さの測定は接触式の規格 (JIS B 0633: 2001) に準拠して行った。測定試料は 23 種類とし、各試料につき 10 回測定した。測定方向は、加工方向が一定の試料は加工方向に対して直交方向に測定を行い、加工方向が不定の試料は任意の方向に測定を行った。粗さパラメータは算術平均粗さ Ra 、最大高さ粗さ Rz を算出し、10 個の平均値および Student の t 分布による 95%信頼限界を求めた。

2.2 測定試料

機械構造用炭素鋼 S45C ϕ 20mm 丸棒を長さ 10mm に切断して樹脂込めを行い、切断面を #80, #220, #500, #1000, #2000, #4000 の SiC 研磨紙で表面仕上げした試料、ステンレス鋼板 SUS304, ステンレス鋼板 SUS430, チタン合金板を各種表面仕上げした試料を測定した。図 1 に SUS304 鋼板, SUS430 鋼板, チタン合金板の表面仕上げの概要を示す^{4) 5)}。

2.3 測定機器

本研究では、接触式としてアメテック (株) 製粗さ測定機 (フォームタリサーフ PGI430), 非接触式としてオリンパス (株) 製レーザ顕微鏡 (LEXT-OLS4100) を使用した。

接触式では先端半径 $2\mu\text{m}$, 円錐角 60° のダイヤモンド製触針を使用した。高さ方向の測定分解能は 0.8nm である。

非接触式は対物レンズの高さを変えながら集光したレーザで走査することで、試料を水平に輪切りにしたような画像を取得し、これを重ね合わせることで立体画像を構築する顕微鏡である。立体画像には 1 画素ごとに高さ情報が含まれており、真上からみた立体画像に任意の直線を引くことで、その直線上の断面形状を表す曲線を得ることができる。この曲線に対して接触式の規格 (JIS B 0632: 2001) に基づいた解析を行うことで各種粗さパラメータを算出する。集光したレーザは接触式の触針に相当するもので、本研究における理論径は $0.43\mu\text{m}$ (倍率 $50\times$, 開口数 0.95 の対物レンズ使用時) である。対物

* 県央技術支援センター

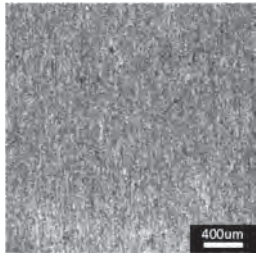
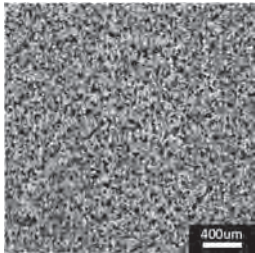
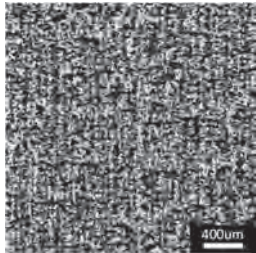
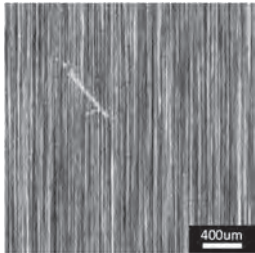
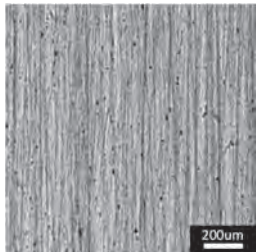
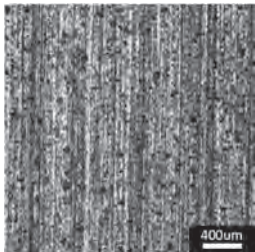
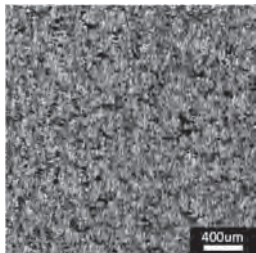
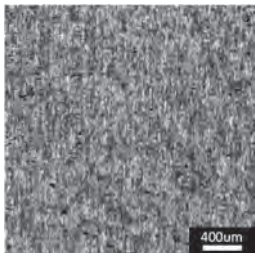
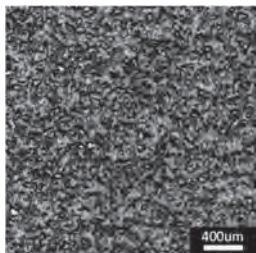
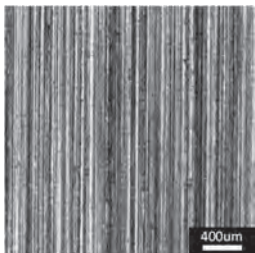
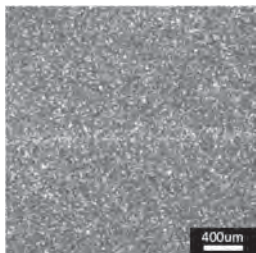
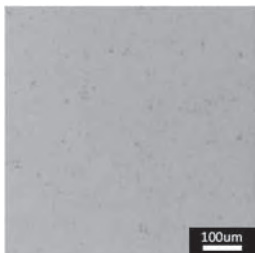
	No.2D ・ SUS304 鋼板 冷間圧延後，大気焼鈍，酸洗したもの。		No.2D-S ・ チタン合金板 冷間圧延後，大気焼鈍，ソルト焼入れ，酸洗したもの。
	No.2B ・ SUS304 鋼板 ・ SUS430 鋼板 ・ チタン合金板 No.2D 仕上げ後，スキンパス圧延したもの。		No.4 ・ SUS304 鋼板 ・ SUS430 鋼板 #150～#180 で研磨したもの。
	#400 バフ ・ SUS304 鋼板 ・ SUS430 鋼板 No.2B 仕上げ後，#400 相当の反射率を持つようバフ研磨したもの。		No.7 ・ チタン合金板 #400 バフ仕上げより反射率が良いようバフ研磨したもの。
	BA ・ チタン合金板 冷間圧延後，真空焼鈍したもの。		BA-S ・ チタン合金板 冷間圧延後，真空焼鈍，スキンパス圧延したもの。
	DS ・ SUS430 鋼板 冷間圧延後，大気焼鈍したもの。		HL ・ SUS304 鋼板 ・ SUS430 鋼板 適当な粒度の研磨剤で連続した磨き目が付くよう研磨したもの。
	ブラスト ・ チタン合金板 アルミナ，サンド，ガラスビーズなど投射材によりブラスト仕上げしたもの。		電解複合研磨 ・ SUS304 鋼板 電気化学的な研磨と研磨剤による物理的な研磨を複合したもの。

図 1 測定した SUS304 鋼板，SUS430 鋼板，チタン合金板の表面仕上げの概要
各図は試料表面のレーザ顕微鏡像を示す。

レンズの高さ方向の移動分解能は 10nm である。

3. 実験結果および考察

図 2 に接触式と非接触式による粗さ曲線の代表例を示す。(a)SUS430 鋼板 DS 仕上げと(b)チタン合金板 No.2B 仕上げの粗さ曲線は類似しているのに対して(c)SUS430 鋼板 電解複合研磨では大きく異なっていることがわかる。

表 1 に接触式と非接触式による粗さパラメータの平均値とその 95%信頼限界を示す。数値の右肩に短剣符 (†), 二重短剣符 (‡) が記載されているものは接触式と非接触式による 95%信頼区間が重ならない試料であることを示す。SUS304 鋼板 電解複合研磨を除き, 接触式と非接触式による粗さパラメータはほぼ一致

していた。SUS304 鋼板 電解複合研磨の粗さ曲線, 粗さパラメータが大きく異なる理由としては, 非接触式の対物レンズの高さ方向の移動分解能に近い微小な凹凸であることなどが考えられる。

表 1 の結果を用いて接触式と非接触式による粗さパラメータを比較したものを図 3 に示す (95%信頼区間が重ならない試料を除く)。図中の白丸は粗さパラメータの平均値をプロットしたもの, 直線は最小二乗法により求めたものである。 Ra , Rz とともに, 直線の勾配が 1 に近い値を示したことから, 非接触式による測定値は接触式による測定値と概ね一致していることがわかる。

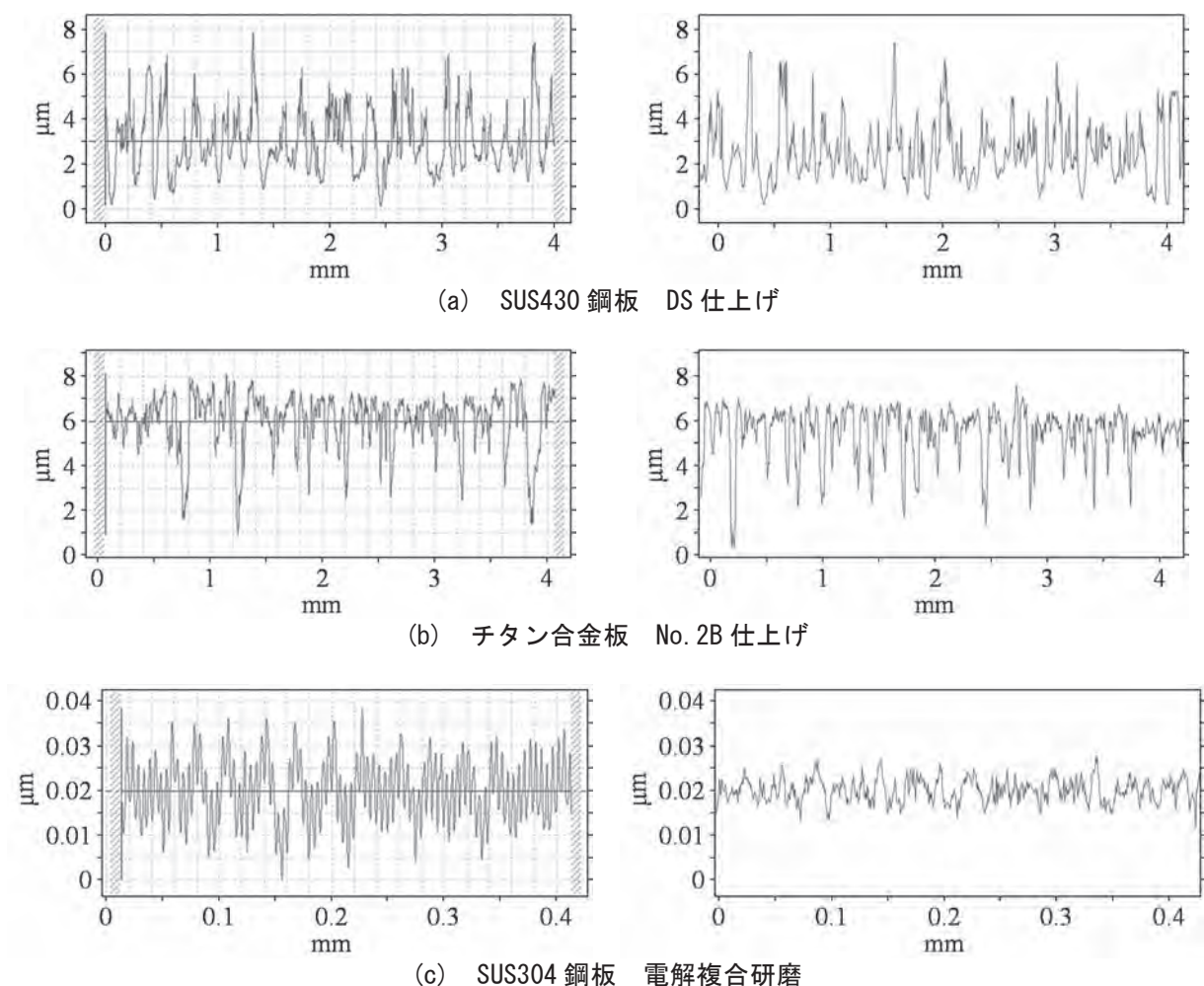
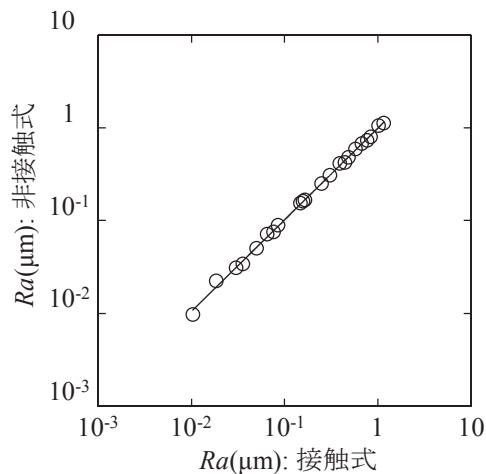


図 2 接触式と非接触式による粗さ曲線の代表例 (左: 接触式, 右: 非接触式)

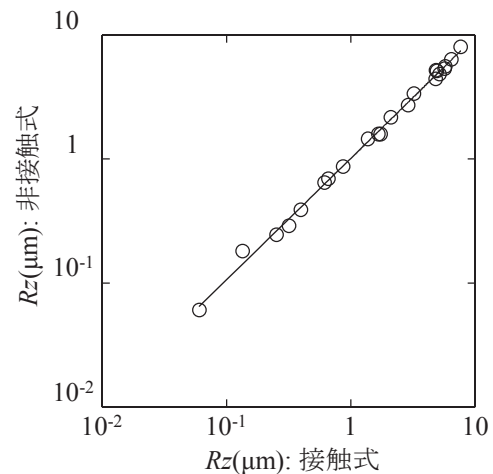
表 1 接触式と非接触式による粗さパラメータの平均値とその 95%信頼限界

数値の右肩に短剣符（†），二重短剣符（‡）が記載されているものは
接触式と非接触式による 95%信頼区間が重ならない試料であることを示す。

		算術平均粗さ $Ra(\mu\text{m})$		最大高さ粗さ $Rz(\mu\text{m})$	
		接触式	非接触式	接触式	非接触式
S45C	#80	0.837±0.324	0.798±0.322	5.74±2.48	5.59±1.66
	#220	0.305±0.103	0.306±0.069	2.90±1.84	2.73±0.95
	#500	0.084±0.018	0.089±0.012	0.657±0.218	0.699±0.197
	#1000	0.076±0.020	0.076±0.013	0.614±0.194	0.648±0.174
	#2000	0.018±0.004	0.022±0.005	0.134±0.050	0.181±0.053
	#4000	0.010±0.002	0.010±0.003	0.060±0.017	0.061±0.014
SUS304 鋼板	HL	0.441±0.075	0.422±0.042	4.80±1.73	4.43±0.84
	No.4	0.164±0.018	0.167±0.019	1.73±0.43	1.60±0.34
	No.2D	0.147±0.014	0.154±0.016	1.37±0.24	1.46±0.26
	No.2B	0.064±0.013	0.072±0.018	0.864±0.286	0.874±0.215
	#400 バフ	0.030±0.005	0.031±0.004	0.252±0.092	0.246±0.050
	電解複合研磨	0.006±0.001†	0.002±0.001†	0.033±0.006‡	0.009±0.003‡
SUS430 鋼板	DS	1.16±0.25	1.12±0.24	6.42±0.71	6.37±0.64
	HL	0.480±0.043	0.481±0.039	4.94±0.66	5.14±0.65
	No.4	0.157±0.011	0.161±0.014	1.66±0.24	1.60±0.35
	No.2B	0.050±0.006	0.050±0.010	0.396±0.128	0.392±0.160
	#400 バフ	0.036±0.006	0.034±0.006	0.317±0.175	0.290±0.109
チタン 合金板	ブラスト	1.01±0.07	1.05±0.10	7.66±0.66	8.07±1.35
	No.2B	0.767±0.222	0.731±0.168	5.17±1.71	4.86±1.05
	No.7	0.668±0.096	0.675±0.094	5.67±1.03	5.36±1.06
	No.2D-S	0.569±0.126	0.590±0.152	4.84±0.74	5.21±1.09
	BA	0.386±0.049	0.411±0.080	3.22±1.06	3.37±1.08
	BA-S	0.247±0.044	0.250±0.040	2.09±0.58	2.18±0.57



(a) Ra の比較



(b) Rz の比較

図 3 接触式と非接触式による粗さパラメータの比較

白丸は粗さパラメータの平均値をプロットしたものを示す。

(表 1 95%信頼区間が重ならない試料を除く)

直線は最小二乗法により求めた。

4. 結 言

接触式と非接触式により S45C, SUS304 鋼板, SUS430 鋼板, チタン合金板を各種表面仕上げした試料の表面粗さを測定した。その結果, SUS304 鋼板 電解複合研磨を除き, 粗さ曲線の形状は類似し, 粗さパラメータはほぼ一致した。

参考文献

- 1) <http://microscopelabo.jp/trend/009/>, レーザー顕微鏡による非接触表面粗さ計測, 「OLYMPUS ホームページ」, 平成 28 年 3 月 14 日.
- 2) 藤井章弘ら, “3D 測定レーザー顕微鏡 OLS4000 による 3D 表面性状計測”, OplusE 6 月号, 2009, pp.1-5.
- 3) 佐藤壽芳, “超精密非接触表面形状測定法について”, 生産研究 第 39 巻 第 6 号, 1987, pp.201-208.
- 4) (株) 日本金属工業, “表面仕上げ記号の摘要”, NTK ステンレス鋼表面仕上げサンプルブック.
- 5) (株) 神戸製鋼所, “表面仕上げ記号の摘要” チタン表面仕上げサンプルブック.

ヌープ硬さ試験について

齋藤 雄治*

Knoop Hardness Test

SAITO Yuji*

1. 緒 言

一般に、ビッカース硬さ試験機は圧子を付け替えることにより、ビッカース硬さとヌープ硬さの両方を試験することができる。これら二つの試験によるくぼみを図 1 に示す。ビッカース硬さのくぼみは正方形で、ヌープ硬さのくぼみは細長いひし形になっていることが分かる。ヌープ硬さのくぼみの長手の対角線長さはビッカース硬さのくぼみの約 3 倍と長く、硬さの変化に敏感である。さらに、ヌープ硬さのくぼみの深さはビッカース硬さのくぼみの約 1/2 と浅いため、ビッカース硬さに比べてより表面に近い部分の硬さの評価に向いている¹⁾。

ここで、ヌープ硬さはビッカース硬さに近い値をとることが知られているが、実際に比較したデータがほとんどない。このため本研究では、ビッカース硬さ基準片をビッカース硬さとヌー

プ硬さで比較試験して、両者の関係を調べた。

2. 実験条件

表 1 に試験条件を示す。ビッカースとマイクロビッカースの二台の硬さ試験機について、硬さ基準片のビッカース硬さとヌープ硬さを試験した。各硬さ試験機について、試験力を一定にした。各硬さ基準片について 5 点の硬さ試験を行った。

3. 実験結果

表 2, 3 にビッカース硬さ試験機とマイクロビッカース硬さ試験機による試験結果をそれぞれ示す。いずれの試験機についても、ヌープ硬さはビッカース硬さに近い値をとっていることが確認できた。

ただし、ヌープ硬さはビッカース硬さに比べ

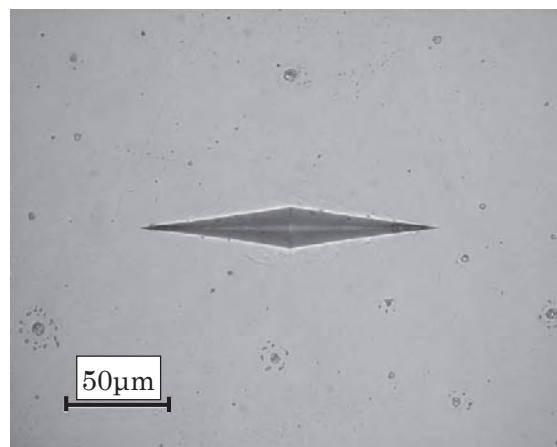
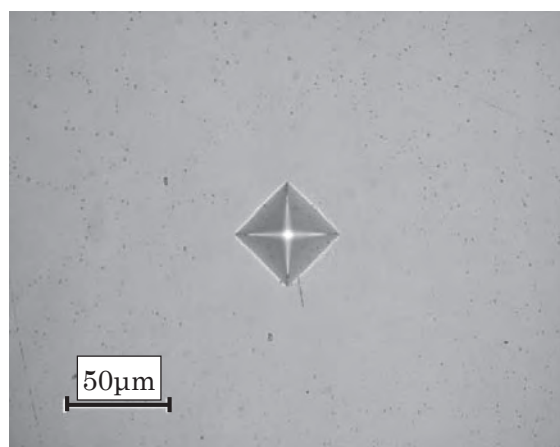


図 1 ビッカース硬さ試験とヌープ硬さ試験による 695HV1 基準片のくぼみ
(試験力 9.807N, 左: ビッカース, 右: ヌープ)

* 県央技術支援センター

表 1 試験条件

試験機器	ビッカース硬さ試験機 (株) ミットヨ製 HV-115	マイクロビッカース硬さ試験機 (株) 明石製作所製 MVK-G1
圧子	51576 (ビッカース) K45514 (ヌープ)	34971 (ビッカース) K19796 (ヌープ)
試験力	9.807N	0.9807N
基準片	(株) 山本科学工具研究社製 281-573 (694HV1) 281-871 (508HV1) 280-644 (204HV1)	(株) 山本科学工具研究社製 725-269 (705HV0.1) 725-172 (505HV0.1) 719-792 (198HV0.1)

表 2 ビッカース硬さ試験機による試験結果

基準片		試験力 N	5 点の平均値と標準偏差 (カッコ内)	
番号	硬さ値 HV		ヌープ硬さ HK	ビッカース硬さ HV
281-573	694	9.807	663.8 (1.1)	689.6 (1.1)
281-871	508		508.0 (2.2)	499.8 (1.3)
280-644	204		217.8 (1.5)	201.6 (0.5)

表 3 マイクロビッカース硬さ試験機による試験結果

基準片		試験力 N	5 点の平均値と標準偏差 (カッコ内)	
番号	硬さ値 HV		ヌープ硬さ HK	ビッカース硬さ HV
725-269	705	0.9807	741.8 (5.6)	711.6 (3.7)
725-172	505		541.2 (8.9)	505 (3.5)
719-792	198		217.2 (3.1)	199.4 (3.2)

て、ばらつきを表す標準偏差が大きい傾向があった。この理由としては、ヌープ硬さのくぼみは細長いため、どこまでがくぼみであるかが分かりにくいことに加え、ヌープ硬さはビッカース硬さに比べて、硬さ値がくぼみの幅の変化に敏感であることが挙げられる。

なお、本報告書の試験結果については当研究所のホームページに掲載している²⁾。

4. 結 言

- (1) ヌープ硬さはビッカース硬さに近い値を取ることを確認した。

- (2) ヌープ硬さはビッカース硬さに比べて、ばらつきを表す標準偏差が大きい傾向があった。

参考文献

- 1) <http://sts.kahaku.go.jp/diversity/document/system/pdf/054.pdf>, 小賀正樹, 材料試験硬さ技術の系統化調査, 「国立科学博物館 産業技術史資料情報センターホームページ」, 平成 27 年 12 月 15 日.
- 2) <http://www.iri.pref.niigata.jp/news/27new30.html>, ビッカース硬さ試験とヌープ硬さ試験, 「新潟県工業技術総合研究所ホームページ」, 2016 年 1 月 19 日.

ビデオ伸び計による変位測定

齋藤 雄治*

Displacement Measurement using Video Extensometer

SAITO Yuji*

1. 緒 言

材料試験機を使って試験片の引張試験を行う際、耐力などの測定をするために試験片の変位を伸び計で測定することがある。引張試験でよく使用する伸び計として、接触伸び計とビデオ伸び計が挙げられる。

接触伸び計は図 1 に示すように試験片に直接取り付けられるもので、試験片の伸びを精度よく測定することができる。しかし、伸び計の破損を防ぐため、試験片が破断する前に取り外す必要がある。一方、ビデオ伸び計は図 1 右に示すように試験片の標点の間隔をビデオカメラで測定するものである。非接触で変位を測定するため接触伸び計に比べて一般的に測定精度は劣るが、ゴムや薄板など接触伸び計では測定が困難な試験片の変位を破断まで測定することができる。

さて、引張試験を行う際、事前に伸び計の変位の測定精度を確認したいことがある。接触伸び計については、校正器と呼ばれる器具に伸び計を取り付けて、校正器で与えた変位と伸び計の指示値を比較することによって精度を確認することができる。しかし、ビデオ伸び計については、ビデオカメラが材料試験機に固定されているため、校正器を使った変位の測定は困難である。このため、接触伸び計、ひずみゲージ、ビデオ伸び計の測定データを比較した事例が報告されている¹⁾。

ここでは、ビデオ伸び計の精度を現場で簡易的に確認するため、材料試験機のカロスヘッド変位の変化量だけ標点距離が変化するジグを使って、ビデオ伸び計の精度を簡易的に確認した事例を紹介する。

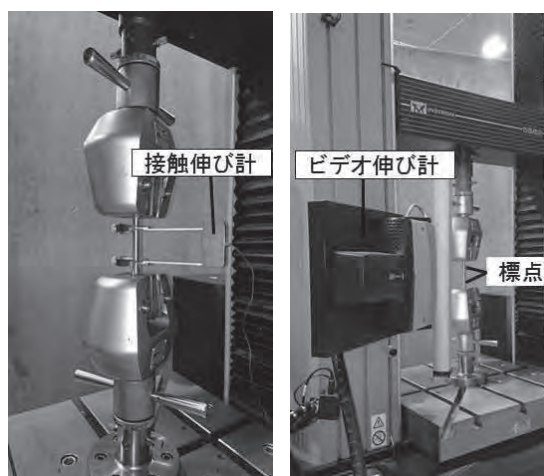


図 1 接触伸び計（左）とビデオ伸び計（右）

2. 実験条件

ビデオ伸び計の変位を測定するために、図 2 に示すようなジグを用いた。このジグは、接触伸び計の校正器のスライド部を材料試験機のチャックに取り付けられるように改造したものである。このジグをチャックに取り付けてクロスヘッドを移動させると、試験力を加えることなくジグの一部をスライドさせることができる。

このジグを図 3 に示すように、材料試験機の引張チャックに把持した状態でクロスヘッドを一定速度で上昇させながら、クロスヘッド変位に対するジグのスライド量をビデオ伸び計で測定した。実験条件は次のとおり。

- ・材料試験機：インストロンジャパンカンパニーリミテッド製 万能材料試験機 5582
- ・ビデオ伸び計：レンズ f25, 画角 100mm, 照明アレイ 500mm
- ・クロスヘッド移動速度：5mm/min
- ・サンプリング間隔：0.05s
- ・変位の測定範囲：0～25mm

* 県央技術支援センター



図2 伸び計の精度確認のためのジグ

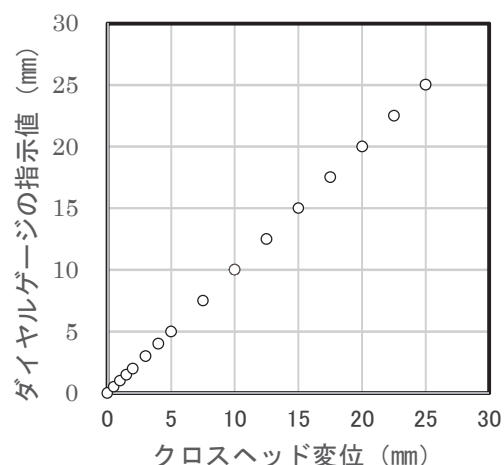


図4 試験機のクロスヘッド変位に対するダイヤルゲージの指示値



図3 伸び計の変位の測定

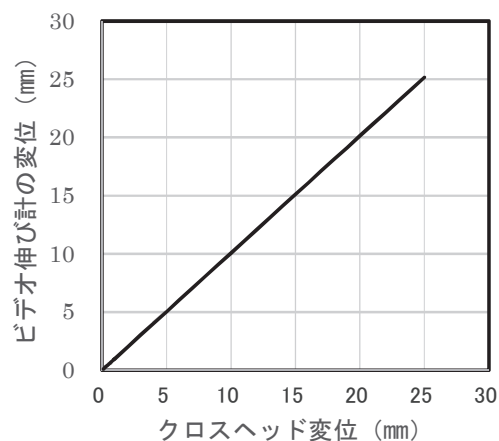


図5 試験機のクロスヘッド変位に対するビデオ伸び計の変位

なお、この測定を行ったクロスヘッドの移動範囲について、クロスヘッド変位とダイヤルゲージ（（株）ミットヨ製 ダイヤルゲージ Code No. 543-474B）の指示値を比較した結果、両者は 1/100mm 以内で一致していることを確認している。図4にクロスヘッド変位に対するダイヤルゲージの指示値の測定結果を示す。

3. 実験結果

図5に、クロスヘッド変位に対するビデオ伸び計の変位を測定した結果を示す。この図のデータに最小二乗法を用いて当てはめた直線の勾

配を求めたところ 1.006 となった。このことから、ビデオ伸び計の変位はクロスヘッド変位とほぼ一致していることが分かる。この方法を使えば、ビデオ伸び計の精度を現場で簡易的に確認できると考えられる。

なお、本報告書の実験結果については当研究所のホームページに掲載している²⁾。

4. 結 言

クロスヘッド変位と伸び計の変位はほぼ一致することが確認できた。

参考文献

- 1) 高久康弘, “ビデオ伸び計によるひずみ測定”, IIC REVIEW, No.46 (2011), pp.57-63.
- 2) <http://www.iri.pref.niigata.jp/news/27new32.html>, ビデオ伸び計の簡易的な精度確認, 「新潟県工業技術総合研究所ホームページ」, 2016年2月4日.

蛍光 X 線分析における FP 法定量分析の検討

毛利 敦雄*

Investigation of Fundamental Parameter Method in X-Ray Fluorescence Analysis

MOURI Atsuo*

1. 緒 言

ファンダメンタルパラメータ法（以下 FP 法）は、X 線測定強度から化学成分の含有量を理論強度計算により求める手法である。本研究では鉄系材料（ステンレス鋼（SUS304）、クロムモリブデン鋼（SCM435）、ねずみ鋳鉄（FC300））、非鉄金属材料（銅合金鋳物（Cu 合金）、アルミニウム合金鋳物（Al 合金））を対象として、他分析法と FP 法定量分析結果（以下 FP 法結果）との対比を行うとともに、表面粗さが FP 法結果に及ぼす影響の検討を行った結果を報告する。

2. 実 験

2.1 試 料

依頼試験などで当所に持ち込まれた試料を試験に供した。これらの試料について、蛍光 X 線検量線法、炭素硫黄分析（鉄系材料）、ICP（Si 以外の Al 合金、Cu 合金）、湿式重量分析（Al 合金中 Si）で分析を行った。結果を表 1 に示す（以下分析結果）。これにより Cu 合金は鉛入り青銅鋳物材の CAC406（旧 BC6）に、Al 合金は Al-Cu-Si 系合金の AC2B に近い材質であることを確認した。

2.2 試料調整

鉄系材料についてはベルト研磨（#120、砥粒コランダム（ Al_2O_3 ））を、非鉄金属材料については旋盤加工を行った。これらは文献¹⁾で推奨する試料調整である。これに加えて、耐水研磨（#220、砥粒 SiC）と鏡面研磨（砥粒 $3\mu m$ ダイヤモンド

* 県央技術支援センター

表 1 試料分析結果

鉄系材料(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SUS304	0.06	0.57	0.97	0.029	0.008	8.52	18.1	0.23	0.11
SCM435	0.34	0.29	0.81	0.010	0.005	0.13	1.19	0.17	0.13
FC300	3.23	1.83	0.82	0.056	0.058	---	0.03	0.01	0.47

銅合金鋳物(%)

	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Si
Cu合金	4.13	5.28	6.92	0.20	0.26	0.01

アルミニウム合金鋳物(%)

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Cr
Al合金	1.80	4.32	0.84	0.77	0.79	0.13	0.04	0.06	0.05

表 2 算術平均粗さ (Ra) (μm)

	SUS304	SCM435	FC300	Cu合金	Al合金
鏡面研磨	0.007	0.006	0.11	0.010	0.031
旋盤加工	---	---	---	0.15	0.14
耐水研磨(#220)	0.19	0.52	0.24	0.59	0.81
ベルト研磨(#120)	1.8	1.2	1.3	---	---

表 3 蛍光 X 線分析 FP 法定定条件

SEA6000VX

測定条件	管電圧 (kV)	管電流 (μA)	フィルタ	照射域 (mm $\square$)	雰囲気	測定時間 (s)
1	50	1000	ユニ	3	大気	30
2	50	1000	Pb用		大気	30
3	15	83	なし		Heパージ	30

S8 TIGER 4kW

測定条件	分光結晶	管電圧 (kV)	管電流 (mA)	フィルタ	照射径 (mm ϕ)	雰囲気	走査角度 (°)
1	LiF200	60	67	Cu200 μm	18	真空	5.5-24.6
2		60/50	60/50	なし			3.4-142.2
3	PET	30	135	なし			51.7-148.5
4	XS-55	30	135	なし			17.0-53.9

またはシリカ懸濁液)を行った。試料調整後の表面粗さを算術平均粗さ (Ra) として求めた。表面粗さ測定装置はアメテック (株) 製フォームタリサーフ PGI430 である。5 回測定の平均値を表 2 に示す。

2.3 蛍光 X 線分析

(株) 日立ハイテクサイエンス製 SEA6000VX と、ブルカー・エイエックスエス (株) 製 S8 TIGER 4kW の 2 種類の蛍光 X 線分析装置を使用した。前者は W 管球, エネルギー分散型で検出対象元素は Na~U, 後者は Rh 管球, 波長分散型で, 検出対象元素は O~U である。両者の FP 法測定条件を表 3 に示す。測定後, 得られたチャートから元素を取捨選択し, FP 法計算を行った。測定は各条件 5 回行い平均値を求めた。

2.4 結果と考察

2.4.1 鉄系材料

鉄系材料の FP 法結果を表 4 に示す。FP 法では分析実施元素以外の成分も検出されたが, Fe 以外の元素は除外した。

表 4 からは, S8 TIGER 4kW の FP 法結果は SEA6000VX よりも分析結果に近いこと, SEA6000 VX では軽元素である Si, Mo (SUS304, SCM435), Cr (FC300) など, 含有量の低い成分で分析結果との差が大きくなる傾向が見られた。これは SEA6000VX では, S8 TIGER 4kW よりも波長分解能が低いこと, Si など軽元素の感度が低いことなどが原因と考えられる。

蛍光 X 線分析では, X 線強度は表面粗さの影響を受けることが報告されているが²⁾, 表 4 からは粗さと FP 法結果の傾向は特に見られなかった。図 1 に SUS304 の算術平均粗さ (Ra) と, 規格化

表 4 鉄系材料 FP 法測定結果

SUS304 (%)											
成分		Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
分析結果		---	0.06	0.57	0.97	0.029	0.008	8.52	18.06	0.23	0.11
FP法結果 SEA6000VX	鏡面研磨	71.21	---	1.15	0.97	---	---	7.81	19.53	0.43	---
	耐水研磨紙(#220)	70.26	---	1.08	0.97	---	---	7.90	19.36	0.43	---
	ベルト研磨(#120)	70.26	---	1.01	0.96	---	---	7.82	19.51	0.43	---
FP法結果 S8 TIGER 4kW	鏡面研磨	70.72	---	0.54	0.94	---	---	8.45	18.71	0.23	0.12
	耐水研磨紙(#220)	70.86	---	0.53	0.94	---	---	8.38	18.64	0.23	0.11
	ベルト研磨(#120)	70.94	---	0.52	0.95	---	---	8.46	18.52	0.23	0.12
SCM435 (%)											
成分		Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
分析結果		---	0.34	0.29	0.81	0.010	0.005	0.13	1.19	0.17	0.13
FP法結果 SEA6000VX	鏡面研磨	96.30	---	0.74	1.03	---	---	0.08	1.36	0.37	0.11
	耐水研磨紙(#220)	96.30	---	0.73	1.04	---	---	0.09	1.35	0.38	0.11
	ベルト研磨(#120)	96.11	---	0.90	1.05	---	---	0.08	1.38	0.37	0.12
FP法結果 S8 TIGER 4kW	鏡面研磨	97.29	---	0.32	0.85	---	---	0.05	1.22	0.15	0.12
	耐水研磨紙(#220)	97.20	---	0.34	0.84	---	---	0.05	1.22	0.15	0.12
	ベルト研磨(#120)	97.31	---	0.28	0.84	---	---	0.06	1.22	0.15	0.12
FC300 (%)											
成分		Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
分析結果		---	3.23	1.83	0.82	0.056	0.058	---	0.03	0.01	0.47
FP法結果 SEA6000VX	鏡面研磨	95.93	---	2.43	1.09	---	---	---	0.11	---	0.43
	耐水研磨紙(#220)	95.84	---	2.47	1.10	---	---	---	0.12	---	0.43
	ベルト研磨(#120)	95.87	---	2.49	1.10	---	---	---	0.11	---	0.42
FP法結果 S8 TIGER 4kW	鏡面研磨	96.75	---	1.73	0.89	---	0.083	---	0.03	---	0.49
	耐水研磨紙(#220)	96.70	---	1.83	0.89	---	0.067	---	0.03	---	0.43
	ベルト研磨(#120)	96.75	---	1.70	0.90	0.063	0.074	---	0.03	---	0.44

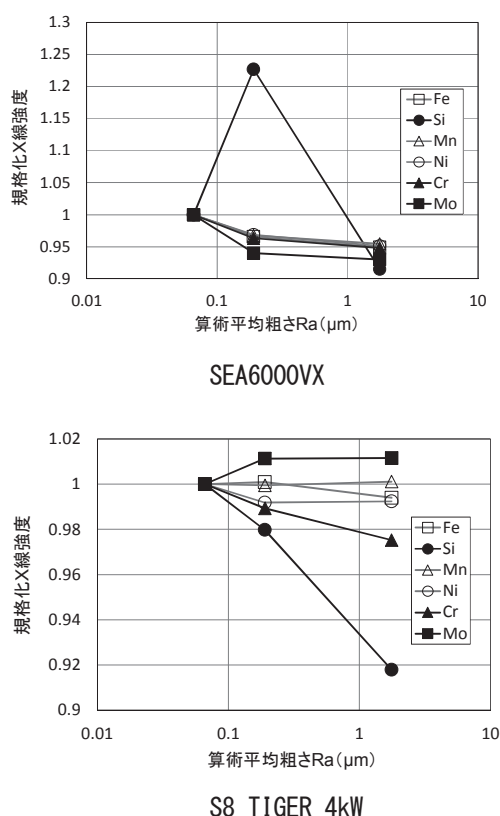


図1 算術平均粗さと規格化 X 線強度 (SUS304)

X 線強度（鏡面研磨を 1 とした時の相対値，5 回測定平均）の関係を示す。SEA6000VX では，研磨剤（SiC）の影響が見られる耐水研磨紙処理の

Si を除き，粗さが増すほど X 線強度が低下する傾向があった。FP 法では，検出された元素全体の合計が 100%となるように各元素の含有量を計算する。このため，FP 法結果は粗さの影響を受けにくくなるものと考えられる。

S8 TIGER 4kW では，蛍光 X 線エネルギーが低く X 線の透過長が短い Si, Cr 以外の重元素では，規格化 X 線強度に顕著な違いは見られなかった。これは，S8 TIGER 4kW では管球出力が SEA6000VX の数十倍あり，試料に侵入する X 線量が大きくなって粗さの影響を緩和するためではないかと考えられる。

2.4.2 非鉄金属材料

今回使用した Cu 合金 (CAC406) では Sn, Zn, Pb が数%添加されている。このうち Sn, Zn は Cu に固溶し α 相を形成するが，Pb は固溶せず Cu マトリックス中に Pb 相が分散する。また Al 合金 (AC2B) では Cu, Si が数%，Mg が 1%未満添加されているが， α 相のマトリックス中に，固溶化しきれない Cu, Si などが Al_2Cu 相，共晶 Si 相などとして分散する³⁾。

Cu 合金，Al 合金の FP 法結果を表 5 に示す。なお，SEA6000VX による Al 合金の分析では， $AlK\alpha$

表 5 非鉄金属材料 FP 法測定結果

Cu合金 (%)		Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Si
成分		Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Si
分析結果		---	4.13	5.28	6.92	0.20	0.26	0.01
FP法結果 SEA6000VX	鏡面研磨	83.49	4.07	3.95	7.00	0.28	0.43	0.78
	旋盤加工	84.71	4.11	2.39	7.14	0.27	0.44	0.93
	耐水研磨紙(#220)	84.17	4.13	3.31	7.03	0.28	0.43	0.65
FP法結果 S8 TIGER 4kW	鏡面研磨	84.33	4.09	3.91	6.98	0.22	0.31	---
	旋盤加工	85.60	4.18	2.53	7.06	0.22	0.31	---
	耐水研磨紙(#220)	84.87	4.18	3.26	7.02	0.22	0.31	---

Al合金 (%)		Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Cr
成分		Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Cr
分析結果		---	1.80	4.32	0.84	0.77	0.79	0.13	0.04	0.06	0.05
FP法結果 SEA6000VX	鏡面研磨	89.00	1.57	7.65	---	0.69	0.76	0.14	0.03	---	0.05
	旋盤加工	88.92	1.73	7.39	---	0.76	0.84	0.15	0.04	---	0.04
	耐水研磨紙(#220)	89.28	1.56	7.33	---	0.69	0.78	0.14	0.03	---	0.05
FP法結果 S8 TIGER 4kW	鏡面研磨	90.59	1.55	5.39	0.63	0.71	0.72	0.13	0.04	0.05	0.05
	旋盤加工	91.42	1.55	4.49	0.67	0.72	0.74	0.13	0.04	0.06	0.05
	耐水研磨紙(#220)	90.87	1.56	5.01	0.66	0.72	0.74	0.13	0.04	0.06	0.05

線と MgK α 線が明確に分離しなかったため Mg は非検出とした。表 5 からは鉄系材料の場合と同様に、粗さが FP 法結果に及ぼす影響は特に見られなかった。また、Cu 合金の Pb, Al 合金中 Si など、マトリックスと別相を形成する元素、Cu 合金の Si (SEA6000VX) などの軽元素で分析結果と FP 法結果の差が大きかった。FP 法では試料が均一であるとの前提で計算を行うため、含有量が比較的多く、マトリックスと別相を形成するこれらの元素では、分析値と FP 法結果との差が大きくなったものと思われる。

別途、非鉄金属表面の走査型電子顕微鏡 EDX 分析を行ったところ、Cu 合金 Al 合金とも Pb, Al がマトリックス相と別相となっていることを確認した。また研磨によっては、これらの相のだれ、脱落が観察された。これらも FP 法結果に影響を及ぼしていることが推察される。

3. 結 言

- (1) 表面粗さによる FP 法結果への影響は認められなかった。
- (2) エネルギー分散型である SEA6000VX では、鉄系材料、非鉄金属材料ともに、Si などの軽元素、含有量の少ない元素で FP 法結果と分析結果との差が大きかった。
- (3) 非鉄金属材料では、マトリックス金属と別相を形成する元素で、FP 法結果と分析結果の差が大きくなることを確認した。

参考文献

- 1) 中井泉, “蛍光 X 線分析の実際”, 朝倉書店, 2005, pp.68.
- 2) 中井泉, “蛍光 X 線分析の実際”, 朝倉書店, 2005, pp.63.
- 3) (財)素形材センター編, “素形材の組織”, 日刊工業新聞社, 1988, pp.79-97.

イオンミリング法による電子顕微鏡観察用 断面試料の作製

林 成実* 斎藤 雄治*

Application of Ion milling to Sample Preparation for Cross-section Analysis by SEM Observation

HAYASHI Narumi* and SAITO Yuji*

1. 緒 言

走査電子顕微鏡（以下 SEM）による試料の断面観察分析を行う際、試料の前処理が重要である。通常、組織や形状を確認するための断面作製法は、樹脂包埋後、機械式研磨を行っている。しかし、めっき、塗装などの表面処理材や複合材料では、ダレや欠けなどが発生し観察分析ができない場合がある。また、吸水や汚染されやすい試料では研磨が難しい。これらの問題を解決する方法として、イオンミリングによる断面作製がある¹⁾。これは、機械的な力を加えずにアルゴンイオンビームを使用し、断面を加工する方法である。

本報告では、機械式研磨や刃物による切断では観察が困難な、表面処理した金属、紙やプラスチックなどの軟質材料の断面を弊所所有のイオンミリング装置で作製し、SEM 観察分析を行った事例を紹介する。

2. 試料断面作製

2.1 使用装置

イオンミリング装置として、日本電子（株）製クロスセクションポリッシャ IB-09020 を使用した（図 1）。本装置は、試料直上にスパッタリング速度の遅い遮蔽板を置き、その上からアルゴンのブロードイオンビームを照射してエッチングを行うことで、遮蔽板の端面に沿った断面を作製することができる（図 2）。

2.2 試料および前処理

断面作製用として、下記の試料 5 種を用いた。

- ・めっき処理板：ニッケルめっき銅板、クロメート鋼板（ワッシャ）
- ・複合多層材料：電子基板、CFRP 板
- ・紙系材料：耐水研磨紙（#80, 220, 1000 を 3 枚重ねたもの）



図 1 クロスセクションポリッシャ

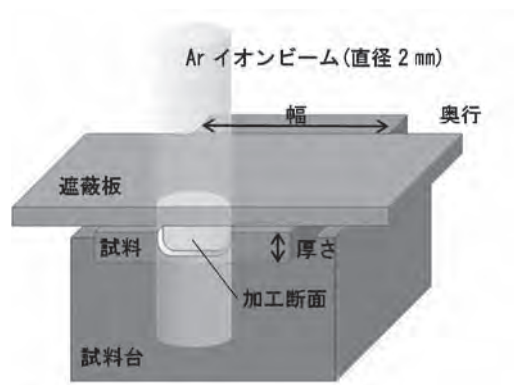


図 2 断面作製の概要

* 県央技術支援センター

断面を作製するには、図 2 のとおり最大試料寸法は厚さ 2mm×幅 11mm×奥行 10mm となる²⁾。また、試料の上下両面が平滑で、加工断面が直角であり、バリや窪みがないサンプルが必要である。そのため前処理として、めっき処理板および電子基板については、精密切断機を用いて約 8mm 角に加工した後、平面研磨機で加工断面を平坦に加工した。CFRP および耐水研磨紙についてはエポキシ樹脂で包埋後、サンプルの上下面が平坦で断面厚さが 2mm 以下になるように研磨し試料とした。材質や加工する厚さに応じ、加速電圧 4~6kV にて、6~12 時間程アルゴンイオンビーム照射を行い加工した。

3. 断面観察結果

各試料の断面について、SEM による反射電子組成像観察およびエネルギー分散型 X 線分光装置（以下 EDX）による分析を行った。

以下に試料ごとの断面観察結果を示す。

3.1 ニッケルめっき銅板

図 3 に断面の SEM 観察画像を示す。厚さ 0.5mm 銅板の表面に約 1.8 μ m のニッケルめっき層が確認された。また、銅基材には結晶組織の方位の違いを示すチャネリングコントラストが確認された。

3.2 クロメート鋼板（ワッシャ）

図 4 にクロメート鋼板断面の SEM 観察画像を、図 5 にその全面の元素分析結果を示す。厚さ 0.8mm のクロメート鋼板であるワッシャの表面には、亜鉛めっき層が確認され、元素分析の結果では、クロメートの Cr およびストライクめっきの Cu も確認された。また、銅基材より明瞭ではないが、鉄基材でもチャネリングコントラストが確認された。

3.3 電子基板

図 6 に電子基板および断面観察部を示す。その断面の SEM 観察画像を図 7、8 に、図 8 の元

素マッピング結果を図 9 に示す。はんだ接合部から基材までの多層構造体の断面をダレもなく確認できた。また図 9 より銅めっき層とはんだの境界面にニッケルめっき層が確認された。

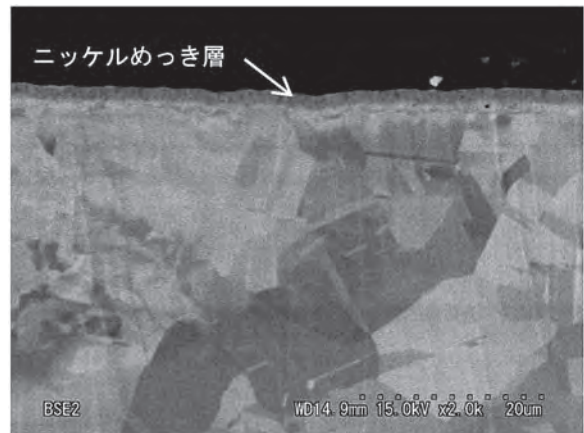


図 3 ニッケルめっき銅板の SEM 観察画像

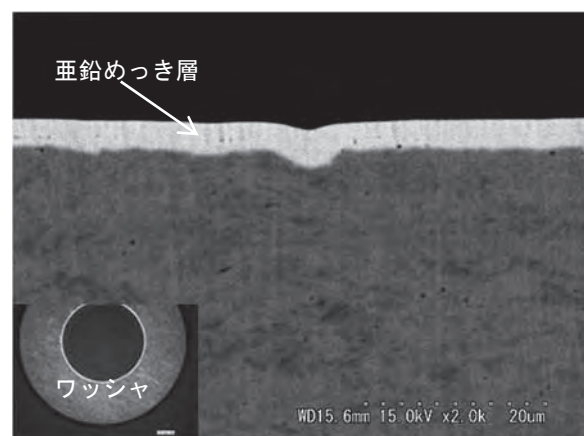


図 4 クロメート鋼板の SEM 観察画像

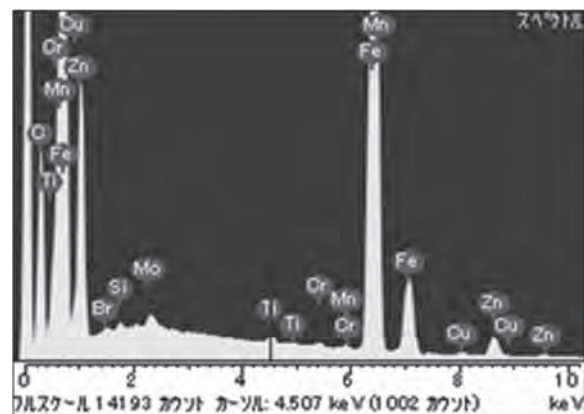


図 5 図 4 全面の元素分析結果

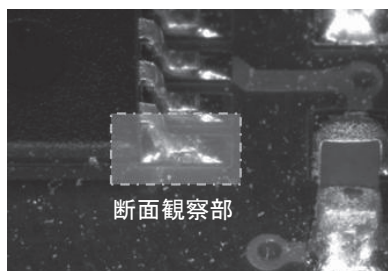


図 6 電子基板と断面観察部



図 10 CFRP の表面画像

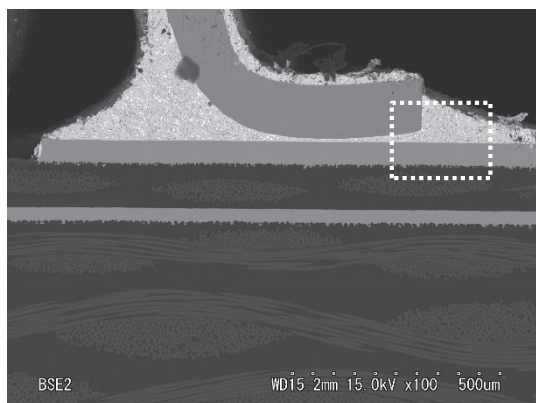


図 7 断面の SEM 観察画像

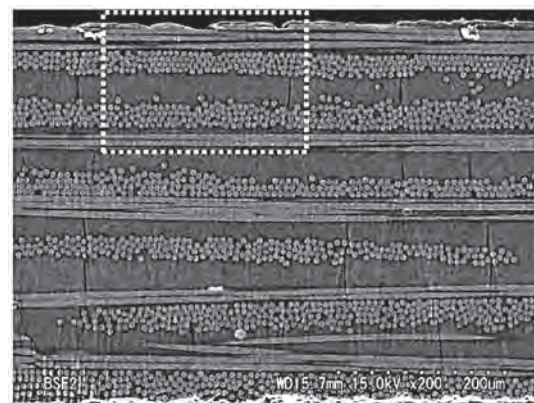


図 11 断面の SEM 観察画像

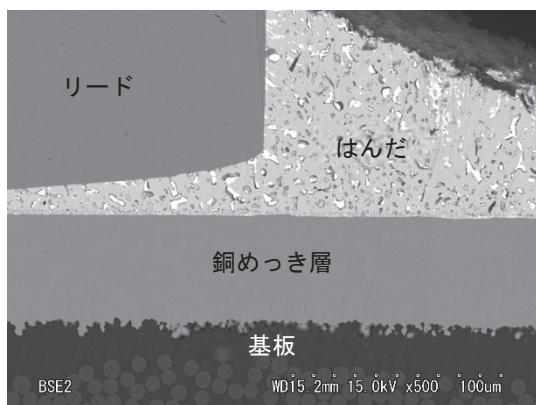


図 8 図 7 資格部の SEM 観察画像

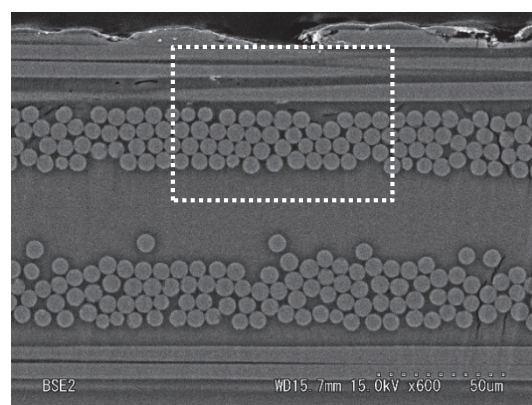


図 12 図 11 四角部の SEM 観察画像

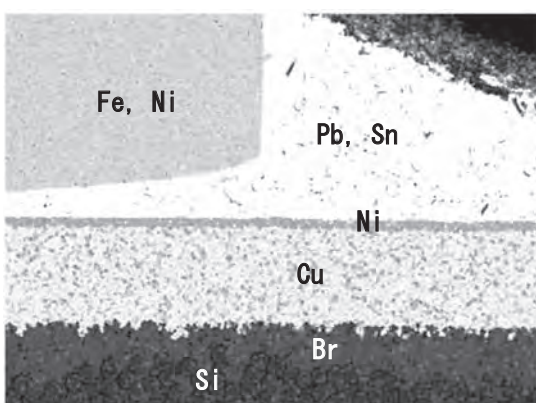


図 9 図 8 の元素マッピング結果(合成像)

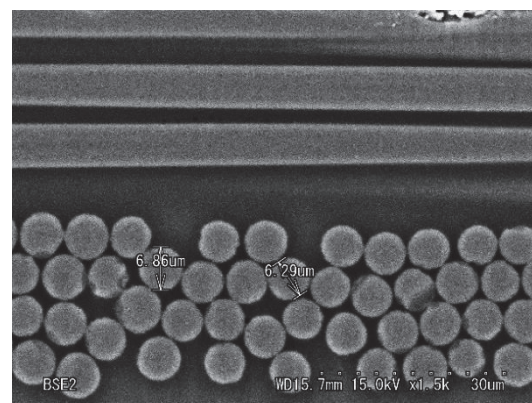


図 13 図 12 四角部の SEM 観察画像

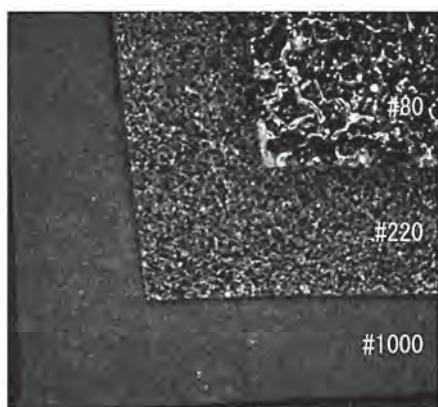


図 14 断面作製した各種耐水研磨紙

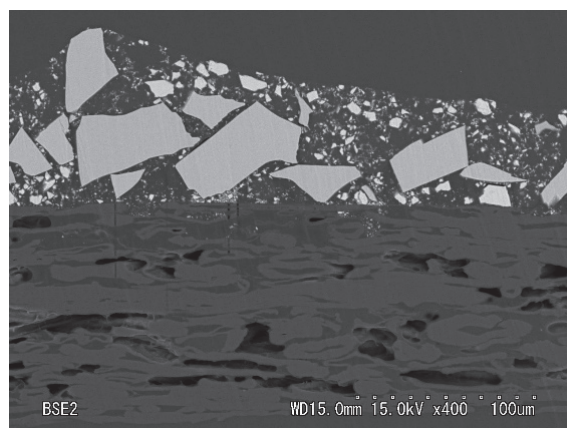


図 16 耐水研磨紙#220 の拡大 SEM 画像

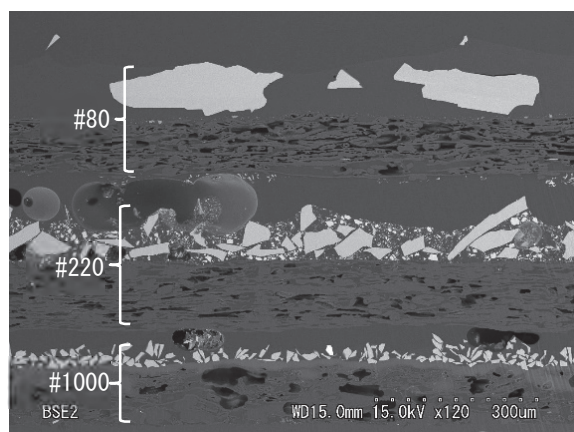


図 15 重ねた種耐水研磨紙の SEM 観察画像



図 17 図 16 の元素マッピング結果(合成像)

3.4 CFRP

図 10 に表面から見た CFRP を，断面の SEM 観察画像を図 11, 12, 13 に示す。格子状に編み込んだカーボン繊維の断面が層状になっていることが確認された。また，カーボン繊維の直径は約 $7\mu\text{m}$ であることが確認された。

3.5 耐水研磨紙

図 14 に断面作製した各種耐水研磨紙を，重ねた耐水研磨紙の断面 SEM 観察画像を図 15 に示す。また，#220 の拡大画像を図 16 に，その元素マッピング結果を図 17 に示す。研磨材，接着剤，基材紙ともダレることなく形状が確認された。また，粒度の違いによる研磨材の形状および分布状況が確認できた。

4. 結 言

- (1) 本装置による断面作製により，めっき層厚さや組成を確認できた。また，電子基板や CFRP，耐水研磨紙など，金属，樹脂，紙などが複合し，多層の構造を持つ材料もダレることなく形状が確認された。
- (2) 金属材料では，結晶方位の違いに起因するチャネリングコントラストを確認した。

参考文献

- 1) 材料技術教育研究会編，“改訂版 金属組織の現出と試料作製の基本”，（株）大河出版，2016，pp.273.
- 2) “IB-09020CP クロスセクションポリッシュ取扱説明書”，日本電子（株）

Ⅲ 調査・報告

工業技術総合研究所 研究会活動報告

工業技術総合研究所では、新分野や新産業、新技術を調査し、研究開発テーマの創出を目的として各種研究会を開催している。この研究会活動を通じて参加企業とのコンソーシアムを形成し、研究開発体制を構築することにも取り組んだ。

研究会活動は、主として「ものづくり技術連携活性化事業」によって実施した。対象とする市場や技術の動向を調査し、会員企業へ情報提供を行うとともに、県内企業による研究開発の可能性を模索するため、平成 27 年度は、以下の7テーマについて研究会を立ち上げて実施した。

1. 3次元ものづくり製造技術とその市場に関する調査研究
2. 熱音響機関に関する調査研究
3. 炭素化繊維利用に関する調査研究
4. 精密微細加工技術の分析分野への応用に関する調査研究
5. 新材料創生に関する調査研究
6. ビッグデータを活用したものづくりに関する調査研究
7. センシング技術の農業分野への応用に関する調査研究

なお、研究会主催のセミナーには、講師として各界の専門家を招聘し、市場や技術動向等の最新情報の紹介などを行った。

3次元ものづくり製造技術とその市場に関する調査研究

中部 昇* 片山 聡* 斎藤 雄治** 天城 裕子***
馬場 大輔**** 渋谷 恵太***** 阿部 淑人*****

A Report of Manufacturing Technology Utilizing Three-dimensional Shape Data

NAKABE Noboru*, KATAYAMA Satoshi*, SAITO Yuji**, AMAKI Yuko***,
BABA Daisuke****, SHIBUYA Keita***** and ABE Yoshito*****

1. 緒 言

製造現場における 3D-CAD の普及や 3D プリンタなどを活用した試作技術の高度化、迅速化が進む中で、入力、編集・設計、出力といった 3D データによるものづくりのワークフロー改善が求められている。3D プリンタを活用した試作の迅速化はある程度普及してきたが、3D データの入力や編集・データ交換に関する運用技術を普及させる必要があるため、前年度の 3 次元アプリケーション研究会から継続して調査研究活動を行った。

2. 講習会開催概要

「3 次元デジタルものづくり技術高度化のための人材育成事業」として、以下に示す講演会を実施した。本事業は、県内製造業界において 3 次元 CAD 自体は導入が進みつつあるが、実体から 3 次元データを生成したり、実体と 3 次元データの照合を行うシステムの導入やその運用はまだ普及していないことから、設計や品質保証に従事するエンジニアが、実体形状を計測して 3 次元設計や検査に利用するためのスキルを身につけられるよう、実技講習による人材育成を行うことを目的とする。図 1 に示す 3D スキャナおよびリバーシブルエンジニアリングソフトウェア

ア Geomagic Capture for Design X (スリーディ・システムズ・ジャパン製) を導入し、その周知と講習を実施した。

2.1 3次元スキャナによるものづくり講習会

平成 28 年 2 月 2, 3, 10 日の 3 日間、実技を伴う講習会を、各回 5 名の定員として同じ内容で実施した。内容は以下のとおり。

(1) 「3 次元スキャナと 3 次元ソフトウェアによるものづくりの概要」

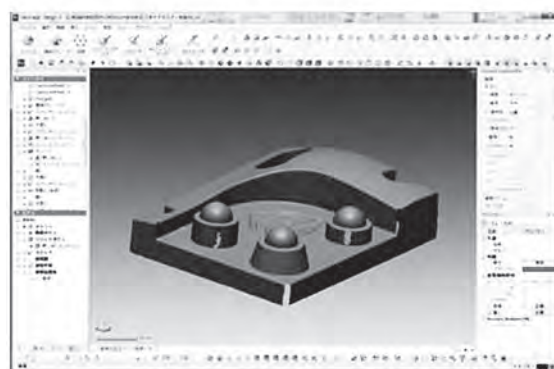


図 1 3D スキャナおよびソフトウェア

- * 研究開発センター
- ** 県央技術支援センター
- *** 中越技術支援センター
- **** 上越技術支援センター
- ***** 素材応用技術支援センター

(2) 「3次元スキャニング実習」

形状計測，データ編集を行いポリゴンモデル作成までの手順を体験した。

(3) 「3次元ソフトウェア」

ポリゴンモデルからの自由曲面抽出，CADモデル作成について説明した。

2.2 3D スキャナ・3D プリンタ講演会

導入したシステムの周知を図るため，装置の紹介とデモンストレーションを目的として平成28年3月16日に実施した。併せて3次元プリンタの活用に関する講演を行った。内容は以下のとおり。

(1) 「3D スキャナと 3D ソフトウェアによるものづくり」 (研究開発センター 中部)

3Dスキャナおよびリバーサエンジニアリングソフトウェアについて説明した。

(2) 「3次元データは図面に非ず～3D プリンタの表裏～」 (素材応用技術支援センター 阿部)

デジタルものづくりを，3次元データという仮想物体として制作することから開始するという観点で，様々な3Dプリンタの分類や従来の加工技術との類似，相違などについて説明した。

(3) 「3D プリンタの医療分野への応用」 (新潟大学 尾田雅文教授)

術前検討に用いる，患者個々の疾患部位の3次元モデルを，医療画像や3Dスキャナ，3Dプリンタを用いて製作するプロセスや臨床応用例について紹介した。

3. 調査・研究内容

3.1 3D プリンティング技術動向

3Dプリンティング技術は，従来の切削，研削などの除去加工，プレスなどの塑性加工に対する第3の加工法であり，現在ASTM Internationalにおいて付加製造；アディティブマニュファクチュアリング（Additive Manufacturing, AM）技術という名称で国際標準化が進められ，ISO/ASTMによって造形方式別に7種類に分類されている¹⁾。樹脂3Dプリンタでは特に結合剤

噴射方式，材料噴射方式といったインクジェット方式について，近年中に基本特許が切れることからHPなど2Dプリンタで実績のある複数企業の参入が発表されており，造形速度に優れることから低価格化により大きく普及することが予想される。液槽光重合方式（SLA）についても紫外光をプロジェクタ的に1層分を一度に照射することにより造形速度が大幅に改善されることで，インクジェット方式と並び普及していくものと思われる。粉末焼結積層方式（SLS）についても低価格化が進み，組み立てキットながら5千ユーロ程度の装置が市販されている。

金属AM装置はSLSを中心に製造台数が前年の約2倍以上に増加しており，適用はZimmerやStrykerなどによるカスタムフィットインプラントや人工骨製造といった医療分野，GE，ボーイング，エアバスといった航空・宇宙分野が多い。金型分野においても，冷却用水管を自由に設計できることや，深溝や薄肉のリブが造形できるなどの利点があり適用が進んでいる。また，金属AMにおける製造工程では，ワイヤカットによる造形物の取出しに始まり熱処理や研磨などの後工程が必須であることから，今後はモジュール構成など，これら後工程を考慮した統合的な製造機として普及していくものと思われる。

一方，造形材料についても製品製造を考慮して多様化が進み，複合材料や高付加価値材料の開発が進むと予想される。例えば，熔融物堆積方式ではPLA材に木材，カーボン，金属などを混合した材料やPEEK材などエンジニアリングプラスチックへの対応が進んでいる。SLAでは樹脂のみならずセラミックス系材料なども提案されている。インクジェットにおいてもセラミックス，金属粉の混合，柔軟材料，基盤造形が可能な導電材・絶縁材などが注目されている。

3.2 3D データ入力技術動向

3Dデータの入力に用いる光学式3Dスキャナは実物の表面形状をカメラ（一般にステレオカメラ）で撮影し，その3次元座標を点群として

入力する装置である。製造現場などで使われるミドルレンジ機、ハイエンド機については、一般にラインレーザー光を走査する光切断方式と画角全体に格子パターンを照射するパターン照射方式に分類されるが、近年は高速でリアルタイム計測が可能な後者が主流となっている。これとは別に、10万円以下のローエンド機として、前出の光切断方式、あるいはMicrosoft Kinectで実用化されたPrimeSenseや、Intel製RealSenseなど距離画像センサを応用したハンディスキャナなどがあり、1mm単位の精度であるもののコンシューマー向けのCGモデル作製や人体のフィギュア化などに活用されている。

今後はカメラの高解像度化や処理能力の高速化と共に低価格化が進むことによって、製造現場においてもより普及していくものと推察される。

3.3 県内企業の動向

3Dプリンタについては多くの企業が試作、開発評価やジグ製造目的で活用しており、また、3Dプリンタを保有しない企業からの試作、少量生産についての相談も多く、装置の低価格化に伴いその傾向が拡大していくものと思われる。また、3Dスキャナについては前述のように講習会を開き周知を行ったが、希望者が多く追加講習を実施するなど、関心が高いことが窺えた。

3.4 市場参入時の課題とその対応

AM装置の活用については、当初の試作(Rapid Prototyping)、ジグやガイドなどの製造(Rapid Tooling)から、現在は製品の製造(Rapid Manufacturing)に移行しつつある時期であり、AMによる従来工程の効率化や製品の高性能化の可能性は大いにあると思われる。ただし、単純に従来工程をAMに置き換えてもメリットはなく、対象となる分野は限られてくる。例を挙げると、①カスタムメイドなどの少量生産品、量産品でも②形状・構造が複雑で部品点数の削減により軽量化・低コスト化が見込める

もの、③内部構造を有するもの、④傾斜構造や複合材料といった、AMで製造することで新たな機能付加が期待される分野への参入が望ましい。

一方、設計技術においても、3次元データを活用することで従来工程に対して大幅な簡略化が期待できる場合がある。例えば、個別対応の必要な医療福祉分野向けの義肢義足・義歯などの製造過程における3次元データの利用などが挙げられる。また、前述のようにAMにより従来の製造工程では不可能であった構造を製造できるようになり、設計技術についても従来と異なる技術が要求される。例えば、構造最適化シミュレーション技術を応用した、傾斜機能構造をなすための内部構造設計や、金属AM製造における溶融熱の制御など、AMを想定した設計技術の開発が新たな研究課題として挙がるものと思われる。

4. 結 言

- (1) 金属AM装置による製品製造は、医療分野や、航空・宇宙分野、金型分野で適用が進んでいるが、単純に従来工程をAMに置き換えてもメリットは少なく、AMによって従来工程の効率化や製品の高性能化が得られる分野に限定される。
- (2) AMにより、従来の製造工程では不可能であった構造の製品を製造できるようになり、製品の設計技術自体についても内部構造の設計など従来と異なる方法論が要求されてくる。

最後に、本研究のうち、「3次元デジタルものづくり技術高度化のための人材育成事業」は(公財)JKAの補助(27-77)を受けて実施したことを記す。

参考文献

- 1) 阿部淑人他，“3次元データの工業利用に関する研究調査”，工業技術研究報告書，44，2015，pp.78-80.

熱音響機関に関する調査研究

大野 宏* 大川原 真* 須貝 裕之** 平石 誠** 本多 章作***

Report of Market and Technology Trend of ThermoAcoustics Technology

OHNO Hiroshi*, OKAWARA Makoto**, SUGAI Hiroyuki**, HIRAISHI Makoto**
and HONDA Syosaku***

1. 緒 言

熱音響機関は、工場の未利用熱や太陽熱から音波を発生させ、これを電気や冷熱に変換して有効活用する技術である。細いパイプの束（蓄熱器）の両端に温度差を与えると、中の気体が膨張・収縮してパイプ内を移動し、温度差がある一定以上になるとこの動作が繰り返され、気体の移動が振動源となって音波が発生する。これを電気に変換したり冷熱として取り出したりして、有効利用できることがわかってきたり。

本研究会は、熱音響機関の実用化を目的として、啓蒙普及のための講演会を開催し、技術動向や県内企業の動向を調査した。また、高熱から音波を発生させ、これを冷熱に変換する熱音響冷凍機を実用化するため、適した用途を考え公募事業に提案した。

2. 活動概要

2.1 研究会の開催

熱音響機関の概要、技術動向および実用化の課題を知るため、セミナー形式の研究会を開催した。

・第1回（平成27年8月17日）

「排熱を有効活用する熱音響エンジン」

東海大学工学部 講師 長谷川真也氏

細いパイプの束（蓄熱器）の両端に温度差を

与えると音波が発生する。細いパイプの中の気体は、加熱されて膨張し、圧力の低い反対側に移動し、冷却されて収縮し、最初の位置に戻る。この気体の移動が振動源となって音波が発生する。逆に蓄熱器に音波をあてると粗密波として振動するため、細いパイプで強制的に圧縮され放熱するため温度は上がり、反対側に移動しながら収縮して吸熱するため温度は下がり、最初の位置に戻る。この現象を利用して発生する音波を電気に変換したり、冷熱として利用したりするデバイスが熱音響機関である。

他の熱電変換技術である、バイナリ発電、熱電変換素子、スターリングエンジンと比較すると、発電量当たりの価格が安い、高温域の変換効率が高い、保守性が良いことなどが特長として挙げられるが、現状では体積当たりの出力が低く、低温域における高効率化が課題となっている。

熱音響エンジンの動作条件は、無数のパラメータがあるため、最適化が難しい。動作条件の予想や最適化には数値計算が有効であり、長谷川研究室では熱音響工学の理論方程式を解析的に解くことで、熱音響エンジンの動作条件と性能の予測、最適化を可能とした。2012年に、多段化進行波型エンジンと進行波型クーラにより熱源温度140℃で-40℃の冷凍を実現した。

熱音響機関の課題は、蓄熱器を低コストで実現できる製造技術と、熱交換器へ効率的に入熱する方法である。また、音波の発生や成長を阻害する要因の解明など、まだ分からないことも

* 下越技術支援センター

** 中越技術支援センター

*** 素材応用技術支援センター

多い²⁾。

・第2回（平成27年1月28日）

《講演1》

「実用スターリングエンジンの開発動向と用途事例」

明星大学理工学部 教授 濱口和洋氏

スターリングエンジンは他のエンジンにくらべ軸出力当たりの熱効率が低い。気体を高熱と冷熱で収縮・膨張させてピストンを動かし仕事をさせる。出力を電力として取り出す方法は2通りあり、キネマティック方式は回転運動に変換して取り出し、フリーピストン方式は直線運動をリニア発電機で取り出す。スターリングエンジンの出力は、スターリングサイクルを圧力Pと体積Vを測定することで予測できる。

実用化は海外のほうが進んでおり、世界で一番数が出ている機種はMicro-Gen社製の1kWフリーピストン型エンジン発電機で、年6,000台程度出荷されているが動作温度が高い。また、日本の潜水艦で使われているのはKockums社製の75kWエンジンである。

国内では木質ペレットとの組み合わせのことが多い。日本製エンジンは海外製にくらべると耐久性が低い。最も多く生産されている百瀬機械設計のエンジンは出力200Wと小型である。また、模型エンジンに関する書籍が多く、教育用としては良い教材であるが、耐久性がないため、製品化を安易に考えるのは危険である。

《講演2》

「スターリングエンジンの作り方」

工業技術総合研究所 専門研究員 大野宏

大気圧で動作する模型スターリングエンジンの作り方について解説した。特に製作が容易なものは、水柱をピストン代わりに使ったフルイダイン（水スターリングエンジン）で、動作周波数は1Hzとゆっくり動作する。また、ガラス製の注射器を使った模型エンジンが数万円で入手でき、書籍でも製作方法が紹介されているが、長時間加熱するとシリンダーが変形してしまい耐久性はない。

2.2 技術動向

東海大学が数値計算で熱音響機関の性能を予測する手法を確立し、高効率の装置が開発できるようになった。熱源温度300℃で-108℃の冷凍を実現し、変換効率も18%と実用化レベルに達している。本手法は、国内の研究者の標準になっている。

熱音響冷凍機で利用する場合、音波を発生させるループと冷凍されるループのインピーダンスが合わないとう出力が低下するため、4mという長い管が必要になり、装置全体が大きくなってしまふ。一方、リニア発電機を使い発電装置として利用する場合は、発電機のインピーダンスを調整することで長い接続管が不要になる。冷凍機にも機械的な振動装置でインピーダンスを合わせられれば、装置全体を小さくできる。

高出力の熱音響機関を実現するためには、分子量の小さいHeを高気圧で封入する必要がある。銅製の熱交換器と耐熱性のあるステンレスパイプを溶接する必要がある。しかし、銅とステンレスの溶接は難しく、ただ接合するだけでなく気密性も保たなければならない。製品化には、低コストで銅とステンレスを溶接する技術が必要である。

2.3 県内企業の動き

県内にはファンヒーターメーカーがあるが、温風を送るファンは商用電源で駆動しており、熱から電気を取り出せないか、以前から検討していた。今年度、カセットコンロメーカーと共同で熱電変換素子を用いたカセットガスファンヒーターを製品化した。熱電変換素子は変換効率が低く高価のため、取り出せる電力は非常に小さいが、カセットガスの熱量が大きいので、ヒーターとしては十分使えるものになっている。

研究会に参加した企業の内、化学プラント、鋳物、鍛造、食品など、工場の未利用熱からのエネルギー回収について興味を持っている企業は多い。また、機械設備工事を主な業務とする企業にも、自社製品の開発に積極的で熱音響機

関の開発に興味を持つ企業が見受けられた。

2.4 公募事業への提案

熱音響機関の利用方法は、熱音響機関で高熱から冷熱を発生させ冷凍機として使用する方法と、熱音響機関で発生する音波をリニア発電機で電気に変換して利用する方法がある。熱音響冷凍機はループ状のパイプの中に 2 個蓄熱器を配置するという簡単な構造のため、まずは冷凍機として公募事業へ提案することを検討した。

新潟県では、冬季に降った大量の雪を保存し、夏季の冷房に使ったり食料の冷蔵庫として利用したりしている。課題は導入コストが高いことで、大量の雪を保存しておく雪室、冷たい空気を各部屋まで送る配管と送風ファンの設置に約 500 万円がかかる³⁾。その半分为雪室の設置費用であるが、太陽熱を熱源とした熱音響冷凍機で雪室を冷却すれば、雪融けを遅らせ雪室容積を小さくして雪冷房の導入コストを削減できる。また、雪冷房に必要な雪の量を削減できるため、それほど雪が降らない地域でも導入可能となり、利用地域の拡大が期待できる。開発する装置の概要を図 1 に示す。太陽熱が強い時ほど雪も解けるが、熱音響冷凍機の冷凍能力も大きくなるため、非常に適した利用方法と言える。

一般家庭で雪冷房を使う場合、雪室に約 30 トンの雪を貯蔵する必要があるが、出力 1kW の熱音響冷凍機を 6 か月間運転した場合、その冷凍

能力は雪 12.5 トンに相当し、雪室の容積を 41.7%削減できる。また、汎用のプレハブ冷蔵庫に使われている断熱壁を雪室用に改良することで、従来の雪室用の断熱材より安価になり、これも加えて導入コスト 17%の削減が見込める。この内容で、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)再生可能エネルギー熱利用技術開発事業に、「太陽熱を利用した熱音響冷凍機による雪室冷却装置の開発」で提案し採択された。この事業は、再生可能エネルギー熱を使ったシステムの導入コストが高いため、従来の 10%削減を目指すもので、熱音響冷凍機の理論と設計を担当する東海大学、装置の製造を担当する県内企業とともに 3 年間の予定で研究開発を実施する。

3. 結 言

- (1) 熱音響機関は構造が簡単で可動部がないため、メンテナンスの必要がなく低コストという特徴がある。工場の未利用熱や太陽熱を冷熱や電気に変換する装置の研究開発が大学や企業で進められている。
- (2) 熱音響機関は他の外燃機関にくらべて効率は高いが、装置全体が大きいなどの課題がある。そのため、小型化の研究開発も進められている。
- (3) 大学や企業と連携し、太陽熱を利用した熱音響冷凍機の開発で NEDO の事業に提案し採択された。この研究開発をすすめ熱音響冷凍機の実用化に取り組む。

参考文献

- 1) 富永昭, “熱音響工学の基礎”, 内田老鶴圃, 1998, pp.9-11.
- 2) 杉本信正, “熱流の不安定性と熱音響現象”, ながれ 33, 2014, pp.181-194.
- 3) 新潟県産業観光労働部産業振興課新エネルギー資源開発室, “雪冷熱エネルギー住宅建築のためのガイドライン”, 2009, pp.13.

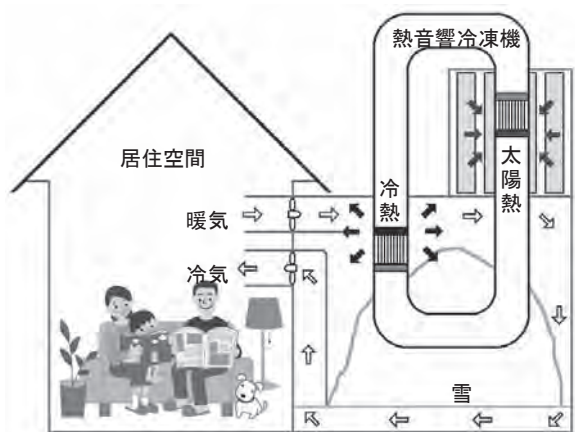


図 1 熱音響冷凍機による雪室冷却装置

炭素化繊維利用に関する調査研究

古畑 雅弘* 渋谷 恵太* 河原 崇史* 笠原 勝次**
岡田 英樹** 三浦 一真*** 桑原 理絵***

Report of Market and Technology Trends of Activated Carbon of Fibers

FURUHATA Masahiro*, SHIBUYA Keita*, KAWAHARA Takashi*, KASAHARA Katsuji**,
OKADA Hideki**, MIURA Kazuma*** and KUWAHARA Rie***

1. 緒 言

綿，レーヨンなど汎用繊維を炭素化させた「炭素化繊維」は，比表面積が大きく優れた吸着性能や導電性，電磁波シールド性など様々な特徴を持つことが知られている。また，炭素化後も繊維の特徴である軽量・柔軟性を有することもメリットの一つである。昨年度は吸着性能や電気二重層キャパシタへの適用について調査研究を行ったが¹⁾，今年度も引き続き行くとともに新たに県内企業からニーズの高かった電磁波シールド材への適用について，技術動向や課題，適用の可能性について調査研究を行った。

2. 活動概要

2.1 研究会の開催

炭素化繊維の概要や電気特性を活かした用途として近年注目されている導電性繊維の市場動向および技術的課題について講演会を開催し，25名の参加を得た。図1に講演会の様子を示す。アンケート調査では，導電性繊維の情報収集を目的とした参加者が多く，講演内容には「非常に参考になった」または「参考になった」と概ね好評であった。講演内容は以下のとおり。

開催日：平成28年3月9日

演題：「導電性繊維の開発動向と今後の市場性」

* 素材応用技術支援センター

** 下越技術支援センター

*** 中越技術支援センター



図1 講演会の様子

講師：東京工業大学 名誉教授 谷岡明彦氏

概要：米国では国家プロジェクトとして兵員向けの軍服や装着品をはじめとした軍事用途で盛んに研究が行われている。人間の利便性・安全性を高める電子ツールとしてウェアラブルデバイスが注目されているが，デバイスが人間を取り巻く環境に入っていくためには，「軽量，薄型，柔軟，大面積，低コスト」が課題である。また，衣料用途へ展開するためにはストレッチ性や耐洗濯性も必要である。国内ではアラミド繊維を活用した切れない電線やヒーター，熱電変換デバイス，電池関連などで実用化され始めている。テキスタイルを活用した事例では，衣料のほかにカーテン，壁紙，カーペットなどへの展開に向けて研究が行われている。

2.2 市場や県内企業の動き

電気二重層キャパシタの電極に賦活化したヤ

シ殻活性炭が使用されており，電圧，エネルギー密度の向上など一層の高性能化が求められている。比表面積の大きい炭素化繊維を活用した研究も行われているが，現状では大幅なコスト高となり，新たな機能性の付与や特殊な用途でない限り，ヤシ殻活性炭の代替として活用することは難しい。こうした中で綿炭素化繊維を用いた電気二重層キャパシタ電極が開発されたという報道は注目に値する²⁾。このほかに炭素化繊維を活用した事例としては，比較的発熱量の小さい面状発熱体などがある。

県内企業では，現在使用している電磁波シールド材の代替としての活用や電磁波シールド性を付与した樹脂製品の開発など，電磁波シールド材への適用について強いニーズがあった。

3. 工業技術総合研究所の取り組み

汎用繊維による炭素化处理実験を行い，素材による特徴や課題，吸着性能，電磁波シールド特性などを把握した。ここでは各繊維の炭素化実験について示し，各種機能性の評価を行った結果を報告する。

3.1 繊維の炭素化处理

管状炉を用いて炭素化处理および賦活化処理をさまざまな条件で行い，綿，レーヨン，絹の炭素化繊維を作製した。代表的な炭素化处理条件を図2に示す。綿，レーヨンは比較的容易に炭素化することができたが，絹は素材に含まれるタール，不純物が多く，部分的に塊状に固化するなどうまく炭素化することが難しかった。

3.2 炭素化繊維の各種性能評価

前項で作製した炭素化繊維の各種特性を把握するため，吸着特性，電気特性および電磁波シールド特性などについて試験を行った。以下に測定した結果の一部を示す。

3.2.1 液相吸着性能

液相における活性炭の吸着性能を評価する方

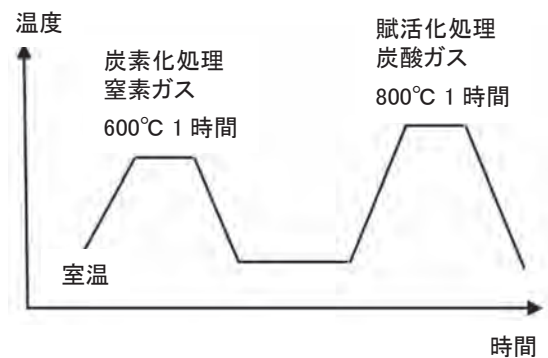


図2 炭素化および賦活化処理条件

法としてメチレンブルー溶液の脱色程度を測定する手法があり，試験方法が「JIS K 1474 活性炭試験方法 7.1.2.3 メチレンブルー吸着性能」に規定されている。作製した各種炭素化繊維および市販の活性炭についてこの方法に準拠して試験を行い，吸着性能を評価した。試験を行った中では賦活化処理を行った綿炭素化繊維が最も高い吸着性能を示した。

3.2.2 気相吸着性能

気相における吸着性能の評価試験として，悪臭物質である酢酸，酪酸の消臭性能をガスクロマトグラフを用いて測定した。その結果，炭素化繊維の中には市販の活性炭よりも高い消臭性能を示すものもあった。また，液相吸着性能の結果と合わせて考えると，炭素化繊維中の細孔径と捕集物質の分子の大きさの関係が吸着性能の良し悪しに影響を及ぼしている可能性が示唆された。

3.2.3 電気抵抗率

電磁波シールド材や面状発熱体の性能は，炭素化繊維の電気特性に影響を受ける。そこで各素材の炭素化处理温度による表面抵抗率を測定した。あわせて炭素化繊維の厚さを測定し表面抵抗率との関係を求めた。図3に結果の一部を示す。表面抵抗率はいずれも3~15Ω/□で，厚さと負の相関があった。また，処理温度が高いほど表面抵抗率が小さかった。

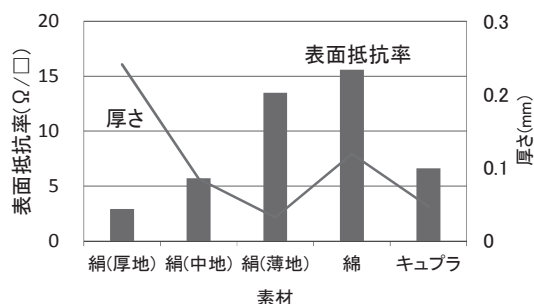


図3 表面抵抗率と厚さ

3.2.4 電磁波シールド特性

シールド材の性能評価法として同軸管法が知られている。これは図4に示すような同軸管にドーナツ型試料を挿入し、ネットワークアナライザを使用して反射特性と透過特性を測定する方法である。測定可能周波数範囲は45MHz～3GHzである。試料は外径47mm、内径5mmのドーナツ状で、その加工精度や治具に装着する際の電氣的接触不良などが測定値に大きく影響する。絹を1,300℃で炭素化した試料の電磁波シールド測定結果を図5に示す。減衰率は約30～35dBで測定範囲全域で比較的平坦な結果が得られた。一般的に電磁波シールド材の減衰率は30dB以上必要といわれており、炭素化繊維がシールド材として適用可能であることが分かった。

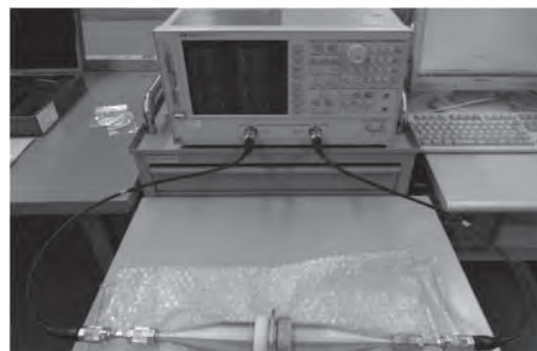


図4 電磁波シールド測定器の外観

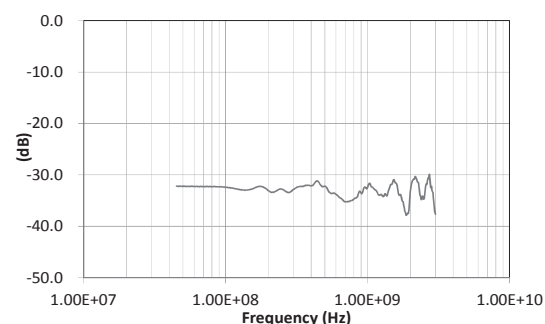


図5 電磁波シールド測定結果

4. 結 言

- (1) 炭素化繊維の用途について調査し、吸着材、電磁波シールド材、電気二重層キャパシタへのニーズがあることが分かった。特に電磁波シールド材への適用ニーズが高かった。
- (2) 吸着材および電気二重層キャパシタへの適用は、市販活性炭に比べコストが高く、炭素化繊維の特徴を活かした用途でなければ活用が難しい。

- (3) 絹炭素化繊維の電磁波シールド性能を測定した。その結果、減衰率は30～35dBで、45MHz～3GHzの広い周波数範囲にわたって比較的平坦な減衰効果があることが分かった。

参考文献

- 1) 明歩谷英樹, 渋谷恵太, 笠原勝次, 岡田英樹, 三浦一真, 依田毅, “炭化繊維利用研究会報告”, 工業技術研究報告書, No.44, 平成26年度, pp.71-73.
- 2) 日刊工業新聞, 2014.3.27.

精密微細加工技術の分析分野への応用に関する調査研究

宮口 孝司* 佐藤 健* 天城 裕子** 種村 竜太*** 樋口 智*

Report of Market and Technology of Micro Chemical Analysis Using Micro Fabrication

MIYAGUCHI Takashi*, SATO Takeshi*, AMAKI Yuko**, TANEMURA Ryota*** and HIGUCHI Satoru*

1. 緒 言

マイクロ加工を応用した微細なマイクロ化学チップによって、これまで複雑で手間のかかる化学分析を安価かつ短時間に行うことのできる μ -TAS（マイクロタス, Micro Total Analysis System）あるいは Lab-on-a-chip と称される分析手法が実用化の段階に差し掛かっている。

そこで本調査研究では、精密微細加工技術を応用した分析装置に関する①講演会開催による情報提供、②技術動向と企業における技術課題の調査、③加工実験などによる要素技術の蓄積を行い、県内企業の高付加価値分野への参入を促すとともに、共同研究や公募型研究事業への研究課題の提案をすることを目的に活動した。

2. 活動概要

2.1 講演会の開催

NPO 法人長岡産業活性化協会 NAZE「にいがたナノ基盤技術実践会」が主催した平成 27 年度 第 2 回「にいがたナノ基盤技術実践会」講演会を共催した（平成 27 年 12 月 7 日）。

講演内容は以下のとおり。

講演①「MEMS カンチレバー構造を用いた多機能センサデバイスとその応用」

講師：新潟大学 工学部 機械システム工学科 助教 寒川 雅之 氏

IoT（Internet of Things），スマートヘルスケ

ア（健康寿命の増進，在宅医療，POCT(Point of Care Testing)，ロボット手術）などで必要とされるシリコン製マイクロカンチレバー構造を応用した力センサ，触覚センサ，バイオセンサや Ti 製微小針の作製とその特性評価について講演した。

講演②「MEMS 製造におけるプラズマ加工技術の役割」

講師：サムコ株式会社 取締役常務執行役員 技術開発統括部長 山葉 隆久 氏

プラズマを使った主にシリコンのドライエッチング技術について、その歴史と原理および方式による加工特性の違いを概説した。

マイクロ分析やそれに関連する微細加工技術の動向について、先進的な取り組みを会員企業などと共有することができた。

2.2 市場や県内企業の動き

マイクロ化学チップはガラスやシリコンなどの上に微細な流路を形成することで、混合や分離、反応などを手のひらサイズのチップ上で行うことができる。マイクロ化学チップを用いた分析手法としては、

①試薬による蛍光発色・吸光度分析

②電気泳動

③抗原抗体反応による蛋白質などの分析

④フローサイトメトリ

などがある。これらを単独もしくは組み合わせで分析を行う。これらの特徴としては、

①サンプルが極少量（数 μ L 程度）

②測定時間が短い

* 研究開発センター

** 中越技術支援センター

*** 下越技術支援センター

③温度の急上昇，急下降が可能

④小型

⑤低装置コスト

⑥低分析コスト

などが挙げられる。温度の急上昇，急下降が可能な点は，DNA 増幅，化学操作の迅速化や化学反応時の副生成物の割合を下げるなどによって都合が良い。

極少量の血液などで分析が可能であることから，患者の身体的負担を抑えた病気診断や遺伝子情報の解析などが簡便・迅速に行えると期待されているほか，罹患する確率が高いがんや疾患を個人が知ることでできる遺伝子発現解析は，すでにビジネスに発展している^{1)~4)}。

このような状況のなか，米国大統領は，2015年の一般教書演説の中で，Precision Medicine Initiative を推進すると発表した⁵⁾。これまでの治療法の多くは「平均的な患者（average patient）」向けにデザインされたものであったが，遺伝子，環境，ライフスタイルに関する個人ごとの違いを考慮した予防や治療法を確立することで，より良いがんの治療法の開発・提供を行うというもので，100 万人またはそれ以上のボランティアからなる全米研究コホートの創設を行うとした。2016 年度の大統領予算案は 2.15 億ドルである。日本でも，今後同様の動きがあると思われ，この動きに適合する製品として，DNA チップなど個人の遺伝情報を計測する装置の需要が増えると考えられている。

農業分野や環境分析においても，連続分析や迅速・低コスト分析への要求は高まっており^{6)~8)}，マイクロ化学分析は有力な解決手段になると考えられている。

このような状況のなか，県内企業や大学などと連携体を構築し，関連する機器の開発を検討した。

3. フィジビリティスタディ

微細加工を応用した分析装置として，マイクロ流体チップを用いた電気泳動分析が有望であ

ると考え，関連するフィジビリティスタディを行った。

3.1 ガラス流体チップの試作

化学分析に使用するマイクロ流体チップの作製に関して，課題を把握するため，ウェットエッチングによる試作を行った。

図 1 に流路の作製手順を示す。流路の材質はほうけい酸ガラスである。流路の深さ目標値は $50\mu\text{m}$ とした。流路の幅は深さと同じ $50\mu\text{m}$ が望ましいが，エッチング液の回り込みを考慮して，形状の基となるフォトマスクの幅は目標の $50\mu\text{m}$ より狭くした。しかし，狭すぎるとエッチング液がうまく浸透しないことから，フォトマスクの幅は $20\mu\text{m}$ とし，深さのみを目標にウェットエッチングを行った。

始めに，Au と Cr をウェットエッチングしてエッチングマスクを形成した。次いでガラスを 48% フッ酸を用いて 8.5 分間エッチングしたのち，レジスト，Au，Cr を順に剥離して，マイクロ流体チップを作製した。

図 2 に作製した流路の断面形状を示す。深さは $42.5\mu\text{m}$ であり，幅は一番広い部分で $180\mu\text{m}$

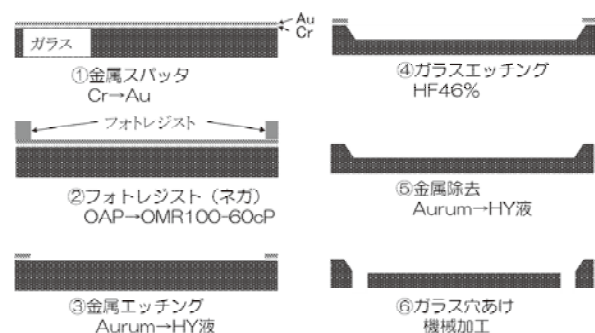


図 1 流路の作製手順

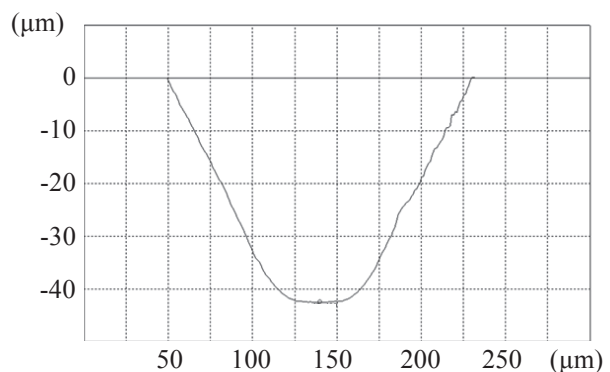


図 2 流路の断面形状

であった。

図 3 に作製した流路の外観を示す。流路は十字に交差しており、末端は研削加工によって貫通穴が開いている。ガラス基板の寸法は 50mm×100mm×t0.7mm である。

次に、流路のふたになるガラス基板に、電極を形成した。材質は、流路基板と同じほうけい酸ガラスである。

図 4 にふたへの電極形成手順を示す。金属膜の形成にはリフトオフを用いた。リフトオフでは、エッチングによる方法とは逆に、金属膜を成膜する前にフォトリソでパターンニングを行う。その上に Ti および Pt を成膜し、レジストを除去することによって電極を形成した。

3.2 非接触電気伝導度検出器用アンプの試作

電気泳動装置の検出装置の一種である、非接触電気伝導度検出⁹⁾ (C⁴D : Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection) は、検出する電解液に電極が触れないことから、電極の消耗や金属などの堆積がないため安定した測定が可能であるうえ、感度が高いため注目されている。

検出器には、ロックインアンプが使われる。ロックインアンプは、検出電極部のインピーダンス変化に敏感なアンプであり、ノイズの多い微弱な信号を検出することが可能である。検出感度を最大にするためには位相の補正が必要であることから、本研究では位相の補正機能を有するロックインアンプを試作した。

図 5 に試作したロックインアンプの出力波形を示す。350kHz の正弦波を入力し、ローパスフィルターを通す前の出力波形を撮影した。位相の補正を行っているため、波形はきれいに揃っている。

3.3 ラマン分光分析による検出方法

本項ではラマン分光分析による金属イオン検出の検討を行った。ラマン分光分析の利点としては、測定プローブ（レーザー照射径）が 1μm

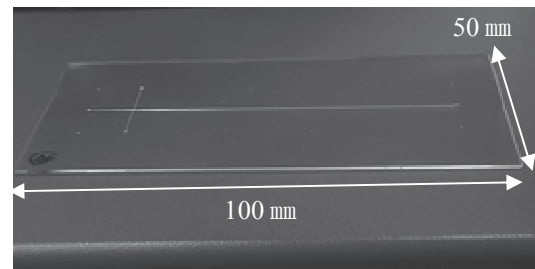


図 3 作製した流路の外観

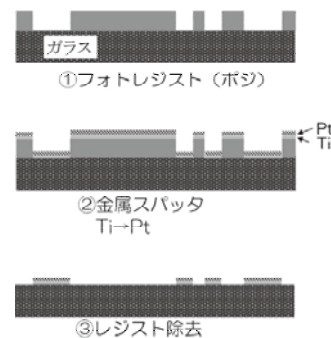


図 4 ふたへの電極形成手順

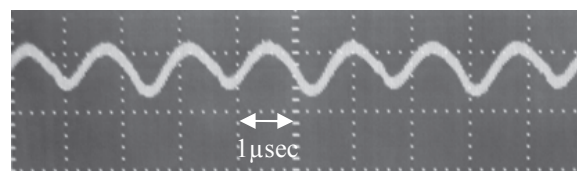


図 5 ロックインアンプの出力波形

程度、所要サンプル量が数 μL 程度以下であり、マイクロ流路の溶液サンプルに十分対応可能であることがあげられる。また、水溶液サンプルの大半を占める水の影響が少ないこと、ガラスやアクリルなどの可視光に対して透明な物質を透過した分析が可能であることもラマン分光分析の利点である。

本研究では、昨年度と同様に金属キレート溶液にナノコロイド溶液添加による表面増強ラマンスペクトル (SERS : Surface-Enhanced Raman Spectroscopy) の効果について検討した。キレート剤は 4-(2-Pyridylazo)resorcinol(PAR)を用いた。

昨年度の調査において、微量金属イオンを対象とした PAR の金属錯体について、Au ナノコロイド添加による SERS スペクトルについて報告し、金属イオン濃度でサブ ppm 程度まで検出可能であり、かつ、10, 50, 100nm の 3 種類のうち 50nm がもっとも安定した SERS 効果を発現することが確認されている。

今回は Au ナノロッドおよび Ag ナノコロイドについて、同様に Fe-PAR 錯体で測定を行い、材質および形状による SERS 効果について検証した。Fe イオンの濃度は 0.2ppm であり、PAR が Fe イオンと同モルになるよう混合した。Au および Ag の結果をそれぞれ図 6, 7 に示す。Ag ナノコロイドにおいても、Au ナノコロイドと同様に代表的な長さが 50nm 付近を用いた場合の SERS スペクトルが比較的明瞭である。Au ナノロッドについても長径が約 50nm のサンプルが SERS 効果が最も高かった。分子との吸着効果や、表面プラズモン共鳴と励起レーザー波長との関連性が考えられるが、詳細は不明である。

4. 結 言

- (1) 微細加工を用いたマイクロ流体チップの適用分野および現状技術を調査し、バイオ・医療、農業、環境など様々な分野で活用され始めていることが分かった。
- (2) 電気泳動を行うための装置の一部として、ガラスチップのウェットエッチングによって流路を形成した。さらに流路のふたにリフトオフによって電極を形成した。
- (3) 非接触電気伝導度検出器用の位相補正機能を有するロックインアンプを試作し、350 kHz の入力信号に対して位相補正が可能であることを確認した。
- (4) SERS 効果を安定的に発揮する粒子径や代表的な長さは、金および銀で形状は問わず 50nm 付近であった。

参考文献

- 1) https://mycode.jp/landing/a12_f.html?src=pc_se_adw_000004412&gclid=CNPVjNXO2ssCFdgjvQodeaYGLg.
- 2) 北森武彦, “平成 26 年度第一回微細加工研究会配布資料”。
- 3) 日刊工業新聞, “薬剤費節減個別化医療で追及”, 平成 27 年 11 月 13 日。
- 4) 横山ほか, “マイクロフリュイディクス技

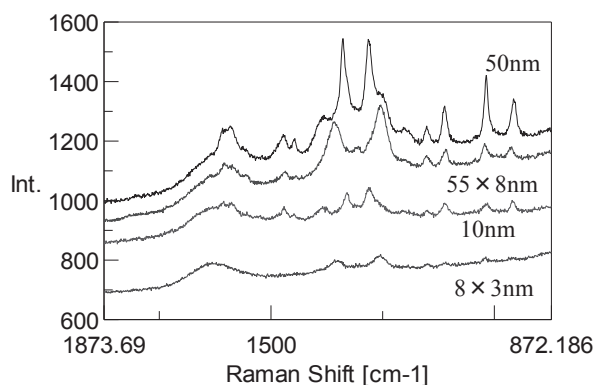


図 6 Fe-PAR SERS スペクトル (Au)

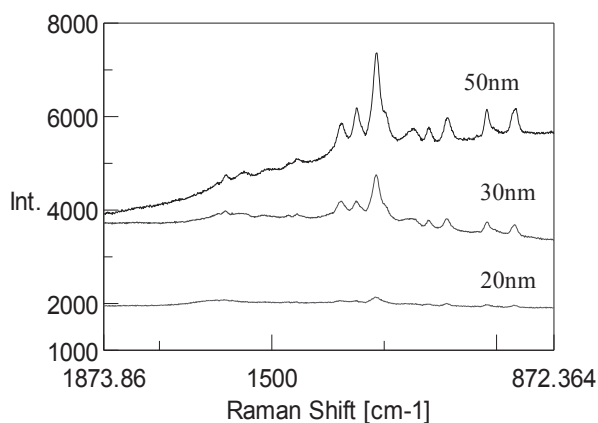


図 7 Fe-PAR SERS スペクトル (Ag)

術を用いた全自動免疫測定装置ミュータスワコーi30, “生物試料分析, Vol.33, No.3, 2010, pp.201.

- 5) <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryou/genome/dail/siryou04.pdf>
- 6) 佐藤ほか, “キャピラリー電気泳動法によるイチゴの糖組成分析”, 福岡県農業総合試験場研究報告, 28, 2009, pp.56.
- 7) 溝口, “土壌センサーを用いたフィールドモニタリングの基礎と応用”, <http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/seminar/130516/abstract/1.mizo.pdf>.
- 8) 高速処理自動比色分析装置カタログ, ビーエルテック (株)。
- 9) M. Galloway, et. al., “Contact Conductivity Detection in Poly(methyl methacrylate)-Based Microfluidics Device for Analysis of Mono- and Polyanionic Molecules”, *Analytical Chemistry*, Vol.74, No.10, 2002, pp.2407-2415.

新材料創生に関する調査研究

岡田 英樹* 小林 豊* 中川 昌幸* 森田 渉* 幸田 貴司**

Report of Market and Technology Trends of Creation of New Materials

OKADA Hideki*, KOBAYASHI Yutaka*, NAKAGAWA Masayuki*,
MORITA Wataru* and KODA Takashi**

1. 緒 言

自動車、ロボット、エレクトロニクスや医療など、各種産業分野において新しい機能材料が求められている。特に自動車では、軽量化が進む中でその重量の 10% 程度がプラスチック材料に置き換わっており、世界的に省エネルギー化、温室効果ガス削減が加速する中、今後も自動車には低燃費化・高効率化が求められる。プラスチック材料の使用率は高くなるものと予想され、より高性能なプラスチック材料が必要となる。

プラスチック材料を高性能化する手法として合成による新しい分子構造を持つプラスチックの開発が行われてきた。しかし、新しい特性を持ったプラスチック材料はもはや単一の素材だけでは達成されるものではなくなりつつあり、コンポジットやアロイと呼ばれる複合材料、あるいは特殊なマイクロ構造体から創生されるものと考えられている。特に複合材料は素材の組み合わせや製造方法の選択によって無限の組み合わせがある。

そこで、本調査研究では、新材料創生のためにプラスチック材料の複合化に関して、市場の動向、技術動向、そして成形のための技術課題とその対策についての調査を行った。また、県内企業へのアンケートや聞き取り調査により、新材料に関する取り組み状況や今後の取り組み予定、そして課題について調べたので併せて報告する。

* 下越技術支援センター

** 企画管理室

2. 活動概要

2.1 講演会開催

新しい材料開発の手法として樹脂の複合化技術（ポリマーブレンドとポリマーアロイ）にターゲットを絞り、基礎から応用事例、さらに実用化に関するセミナーを開催し、企業から 33 名の参加があった。概要は以下のとおり。セミナーの様子を図 1 に示す。

・第 1 回樹脂の複合化技術セミナー（平成 27 年 12 月 16 日）

講演 1：「「混ぜる」の話し」（三菱樹脂（株）開発推進部 担当部長 川東 宏至氏）

導光板用のポリカーボネート（以下 PC）では、わずか数千 ppm のポリメチルメタクリレート（以下 PMMA）を添加することによって全光線透過率が 89% から 91.5% になり、波長特性も PMMA に近づけることに成功し、スマートフォンのディスプレイなどでかなり使用されているとのことだった。また、変性した PMMA を PC



図 1 第 1 セミナーの様子

に添加して、成形する際、表面に PMMA が高濃度化することで傷がつきにくい PC を開発した事例の紹介があった。ポリマーブレンドやポリマーアロイでは、異なる材料を微量に添加することによって、元々の物性を大きく変えることができることや成形時の流動や硬化過程を制御することで必要な物性を得ることができるという内容であった。

講演 2：「全自動小型高せん断加工装置」による分散事例「PC-PMMA 透明・他」の紹介」

（（株）ニイガタマシントテクノ 成形部国内営業グループ 専任部長（大宮駐在） 吉沢 行雄氏）

2007 年より高せん断成形加工機の開発に携わるようになった。高せん断成形加工技術は、（国研）産業技術総合研究所との共同開発によるものである。高せん断成形加工機の特徴は、そのスクリュの構造にあり、スクリュの真ん中に帰還穴と呼ばれる穴があることである。流動した樹脂がこの穴を通して、再度入り口側に戻り、強いせん断流動を維持することが可能となる。透明な PC と PMMA を混合すると、通常は二つのプラスチックの屈折率の違いにより、その界面で光の散乱が起こり、不透明なものしか作ることができなかったが、この装置を使用すると、ナノレベルまで二つのプラスチックを混合することが可能となり、光の散乱を抑え、透明なプラスチックを作り出すことに成功した。さらに興味深いのは高せん断成形加工機による試作を行なって、特許を取得している企業が既にあるということだった。

2.2 県内企業の動き

県内企業の材料に関する要望や新材料を創生するための新しい技術などに関して調査を行なった。個別のヒアリング結果については割愛するが、全体的には材料に対するニーズとして、高強度化はもちろんのこと、充填剤として添加している材料の高分散化に関する要望が多かった。また、表面の高硬度化、接着性の改善など

の要望もあった。さらには高分散化するだけでは目的の特性が発現できず、むしろ高分散状態ではなく中分散程度が良いといった話もあった。

2.3 プラスチック材料の技術課題と対策

各産業分野からプラスチック材料のさらなる高機能化が求められている。その手法の一つとして、合成によって新しい分子構造を持つプラスチック材料の開発が行われ、エンジニアリングプラスチック、スーパーエンジニアリングプラスチックと世の中に生み出されていった。しかし、多様化・高度化している市場の要求を満足できるような新しい特性を持たせることは、もはや単一の素材だけで達成することは容易でなく、開発コストも大きいため、異なる性質の二種類以上の材料を複合化することが試みられてきた。このような複合化による新材料開発は、素材の組み合わせや製造方法で無限の組み合わせがある。二種類以上のプラスチック材料を複合化したものはポリマーブレンドもしくはポリマーアロイと呼ばれており、1950 年ごろから開発が始まっていて歴史は古い。通常、プラスチック材料同士を混練する場合、混ざり合わないとお互いの長所を併せ持つことができず、逆に短所を併せ持つような材料になってしまう恐れがある。第一世代では耐衝撃性ポリスチレン（HI-PS）に始まり、アクリロニトリルブタジエンスチレン共重合体（以下 ABS）といったブロック共重合体やグラフト重合体に代表されるポリマーアロイだった。第二世代になると相溶系ポリマーアロイに発展し、PC/ABS や PS/ポリフェニレンエーテルが開発されて、ポリマーアロイの進展に大きく貢献した。第三世代では、プラスチック材料のほとんどは簡単には混ざり合わないものが多く、これら非相溶系のポリマーアロイの開発へと進んでいく。相容化剤と呼ばれる界面活性剤のような働きをするものを添加して相溶化する方法である。また、混練中にお互いの分子同士を反応させて相溶化する手法も開発された（リアクティブプロセッシング

グ)。しかし、相容化剤の設計が複雑であったり、相容化剤そのものが不純物や欠陥になる場合があるため、相容化剤を使わず非相溶系のポリマーアロイを相溶化できるプロセスの開発が望まれていた。

2009 年に（株）ニイガタマシンテクノが（独）産業技術総合研究所と共同で開発した高せん断成形加工装置を発表し、相容化剤を使用することなく、非相溶系のポリマーアロイが相溶化した材料の製造が可能になった。この装置は、特殊なスクリュ形状によって強いせん断を材料に与えることで、ナノレベルまで分散・混合できることが特徴である。プラスチック材料同士だけではなく、プラスチック材料に金属やガラス、セラミックスといった無機材料なども分散混合することができる可能性がある。ただし、この装置を開発した清水博氏によれば、高せん断成形加工という非平衡状態で作成したナノ構造が、再溶融しても熱的に緩和しない点は、現時点では解明できておらず、理論的解釈が必要であると報告している¹⁾。また、この高せん断成形加工のパラメータであるスクリュ回転数や高せん断を付与する時間などが、生み出される材料の特性に対してどのように作用するのかは、加工してみないと分からないため、今のところこの加工方法で新しい材料を生み出すことは容易ではない。また、仮に高性能なプラスチック材料が開発できたとしても、現状この装置の製造能力は低く、自動車産業などで使用される材料を製造するためには、製造能力の向上が求められおり、処理能力の高い装置開発も進められている。

ポリマーアロイと呼ばれるプラスチック材料同士を複合化して高機能化する方法の他に、プラスチック材料にガラスやセラミックス、金属といった無機材料（フィラー）を混ぜ合わせて複合化し目的の特性を得る方法がある。プラスチック材料同士では改善しにくい特性を向上させるために添加されることが多く、機械的特性や熱的特性の向上やフィラーの持つ特殊な機能

を付与する目的が多い。さらにポリマーアロイにフィラーを添加することでより高機能な材料を創成することも行われている。

プラスチック材料の構造には、化学結合によってのみ変えることができる一次構造（コンフィグレーション）、C-C 結合のように回転可能な結合の回転による二次構造（コンフォメーション）、さらには分子鎖同士の配列による非晶や結晶といった三次構造、その配列同士の配置による四次構造がある²⁾。これら高次構造は、プラスチック材料を成形加工する際や熱履歴、凝固過程などによって複雑に変化して材料の物性を大きく左右する。したがって、高機能なポリマーアロイを開発するためには、一次構造から高次構造の制御まで含めた形で材料設計が求められる。それ故、プラスチック材料の高次構造の解析は、材料特性の発現を理解するうえで、欠かせない技術である。構造のサイズによって様々な解析手法²⁾があり、二次構造と分子間相互作用（数 nm スケール）の解析が重要だが、分子の回転のみによる効果を調べる方法がないため、踏み込んだ考察ができなかった。そこで、せん断応力をサンプルに与えてわずかに分子を動かしてやり、その前後のコンフォメーションの変化を調べることで、やや長距離的な情報を得ることができる解析手法を開発した³⁾。この手法を用いることで、プラスチック材料の構造解析を一次構造から四次構造まで連続的に行うことが可能となり、材料の機械的な特性と構造の関係を調べることができ、材料開発や材料設計の指針を得ることができる。

2.4 高せん断成形加工による確認試験

（株）ニイガタマシンテクノが実施している高せん断成形加工装置による受託加工を活用し、PC 単体での高せん断成形加工の影響について検討した。

（株）三菱エンジニアリングプラスティックの PC（S-3000）を用いて、破断応力、破断伸び、降伏応力に及ぼす高せん断成形加工の影響につ

いて検討した。試験片の成形は歯科技工用成形器セレクトミニ（東伸洋行（株）製）を用いた。高せん断加工は高せん断成形加工装置 NHSS8-28（（株）ニイガタマシンテクノ製）を使用した。高せん断スクリュの回転数と高せん断を付与している時間をパラメータとした。スクリュの回転数は、500、1500、2500rpm、時間は 10、20sec とした。

高せん断成形加工による影響について、破断応力の変化を図 2、破断伸びの変化を図 3、降伏応力の変化を図 4 に示す。高せん断成形加工を行なうと、破断伸びが大きく減少し、それに伴って破断応力も減少した。このことから、高せん断成形加工を行なうことによってプラスチック材料の物性が変わることが分かった。しかし、今回の実験条件では破断応力や伸びといった特性を向上させるような加工条件を見つけないことができなかった。一方、2500rpm-20sec の条件では、破断強さや破断伸びが最も小さいものの、降伏応力は未処理よりも高くなった。高せん断の加工条件を最適化することによって材料特性の改善が期待できる。

3. 結 言

- (1) 新しい材料開発の手法として樹脂の複合化技術（ポリマーブレンドとポリマーアロイ）にターゲットを絞り、基礎から応用事例、さらに実用化に関するセミナーを開催し、企業から 33 名の参加があった。
- (2) 新潟県内企業を訪問し、材料に対するニーズ調査を行った結果、プラスチック材料の高強度化はもちろんのこと、高硬度化、接着性の改善、フィラーの高分散化や高充填化といったところからさらには分散状態の制御といったニーズがあった。
- (3) これらニーズを解決する技術として（株）ニイガタマシンテクノが開発した高せん断成形加工機が有効である可能性が実験結果から示唆された。

参考文献

- 1) 清水博, Yongjin Li, “高せん断成形加工技術により創製した新規ナノコンポジットの構造と物性”, 高分子論文集, Vol. 71, No. 3, 2014, pp. 69-88.
- 2) （社）プラスチック成形加工学会編, “プラスチック成形品の高次構造解析入門”, 日刊工業新聞社, 2006, pp. 1-16.
- 3) 永井直人, 岡田英樹, 櫻井貴文, “新しいナノ切削装置によるソフトマターの表面構造解析技術の開発”, 新潟県工業技術総合研究所研究報告書, No. 42, 2013, pp. 14-18.

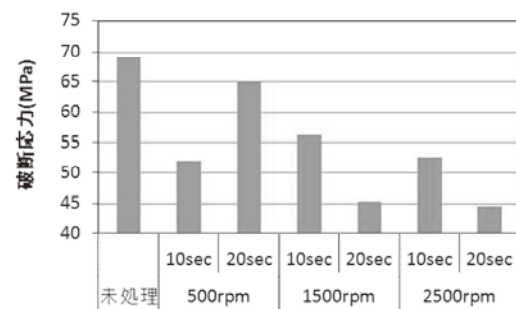


図 2 破断応力への影響

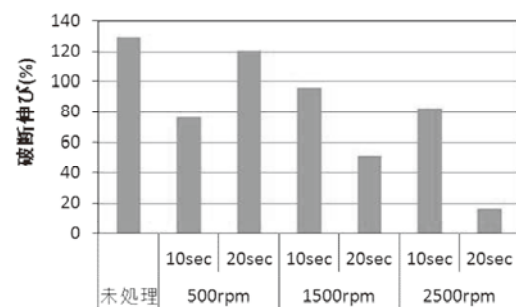


図 3 破断伸びへの影響

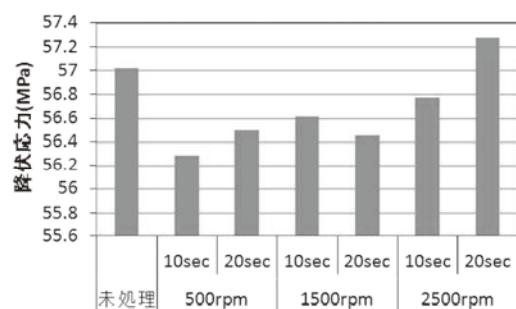


図 4 降伏応力への影響

ビッグデータを活用したもののづくりに関する調査研究

菅家 章* 長谷川 直樹* 石井 啓貴** 木嶋 祐太***

Report of Market and Technology Trends of Manufacturing by Using Big Data

KANKE Akira*, HASEGAWA Naoki*, ISHII Hirotaka** and KIJIMA Yuta***

1. 緒 言

情報通信技術の普及とともに、SNS、音声、センサ、位置、ログ情報など、多様で大量のデータをリアルタイムに収集・蓄積・分析して活用するビッグデータが着目され、事業運営の効率化、新商品の開発やサービスの提供、社会的課題への対応に活用されている。さらに、IoT（Internet of Things:モノのインターネット）、ビッグデータ、AI（Artificial Intelligence:人工知能）を用い、現実世界の情報をコンピュータ上のサイバー世界で分析・判断し、現実世界を制御する CPS（Cyber Physical System）を活用して、データ駆動型社会へ産業構造を大きく変革しようとする動きが世界中でみられる。

米国ではインターネットへ接続された産業機器のデータを分析して高度な自動制御を可能にする Industrial Internet を GE 社が提唱し、Cisco 社、IBM 社、Intel 社など、60 社以上でコンソーシアムを形成して大きな変革へ対応している。ドイツでは IoT を活用し、開発・製造・流通プロセスを最適化する Industrie 4.0 を 2011 年に採択し、国策として大きな変革へ対応している。これらの大きな変革は第 4 の産業革命（第 4 次産業革命）と日本で呼ばれ、大きな変革への対応が産学官の広い分野で取り組まれている。

米国やドイツなどの産業先進国では既に取り組み、日本においても取り組みが始まったデータ駆動型社会への大きな変革について、本調

査研究では、産学官の動向や先進事例を調査しながら県内企業へ情報提供し、ものづくりの大きな変革を企業のチャンスへ結びつけることを目的とした活動を実施した。

2. 活動概要

2.1 セミナー開催

ビッグデータ、Industrie 4.0、IoT、CPS、人工知能の最新動向を県内企業へ情報提供するため、セミナーを 2 回開催し、各々 2 名の講師からご講演をいただいた。セミナーの様子を図 1 に、内容を以下に示す。

第 1 回セミナー：

「ビッグデータがもたらす次世代の

ものづくり」セミナー

開催日：平成 27 年 10 月 16 日（金）

参加者：22 社・団体、36 名

講演：「Industrie 4.0 による産業制御

システムの変革」



図 1 セミナーの様子

* 研究開発センター

** 企画管理室

*** 中越技術支援センター

講師：（株）カスペルスキー
ビジネスデベロップメント

マネージャー 松岡 正人 氏

Industrie 4.0, IoT, CPS に関する説明に続き、それらに関する日本の現状について講演いただいた。また、サイバー脅威に関する事例説明の後、セキュリティ対策と教育について講演いただいた。

講演：「ビッグデータ・オープンデータ
+IoTを活用した県内外の事例」

講師：（株）muku

代表取締役 田中 えいじ 氏

オープンデータ、ビッグデータ、IoT に関する説明に引き続き、世界と国内の事例、新潟県内の事例、次世代のものづくりについて講演いただいた。

第2回セミナー：

「人工知能がもたらす次世代の
ものづくり」セミナー

開催日：平成28年3月7日（月）

参加者：30社・団体，51名

講演：「経営に貢献するIT活用とは」

講師：日本アイ・ビー・エム（株）

テクニカル・リーダーシップ

中野 千春 氏

多くの企業の経営者は新たなITサービス活用による差別化戦略を重要視している。そこで、地域創生の原動力となるIoT、ビッグデータ活用など、先進テクノロジーについて分かりやすく紹介いただいた。

講演：「IoTやコグニティブ技術を使ったアプリケーション開発～新ビジネスの創出を目指した弊社の取り組み～」

講師：日本情報通信（株）

新ビジネス開発グループ

浜谷 貞祐 氏

IoTやAI関連技術について、社内外でのハッカソンなどの取り組み内容と、その経験から得たことを紹介いただいた。

2.2 技術動向調査

IoT、ビッグデータ、CPS、AIに関する技術動向について、県内外の展示会・セミナーなどで調査・情報収集を実施した。また、（公財）にいがた産業創造機構主催の「IT新技術フェア」へ出展し、本調査研究の取り組みを紹介しながら来場者の聞き取り調査を実施した。出展の様子を図2に示す。

2.3 県内企業と大学の訪問調査

変化の激しいIT業界の動向を把握するため、6月と半年後の11～12月に新潟県IT産業ネットワーク21の幹事企業を数社訪問し、IT業界やITに関わる県内企業の動向を調査した。また、IoT、ビッグデータ、CPS、AIについて、本調査研究開催のセミナーなどで興味を示された企業を訪問し、企業の取り組みについて調査を実施した。調査により、大きな変革への県内企業の対応と課題などを知ることができた。訪問した企業1社から平成28年度共同研究のご提案をいただいた。

県内の大学についても、大学連携新潟協議会の「ビッグデータ・オープンデータ活用研究会」やセミナーへ参加し、取り組み状況を調査した。

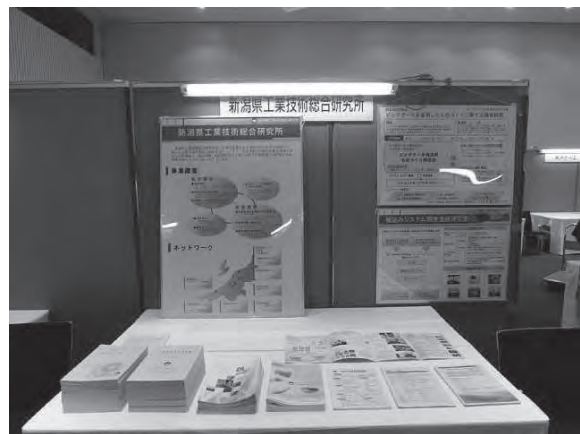


図2 「IT新技術フェア」出展の様子

2.4 工業技術総合研究所の取り組み

IoT, ビッグデータ, CPS, AI, ロボットなどの技術を活用したものづくりでは, モノから情報を収集・蓄積し, 分析して制御する組込みシステムの利用が活発化している。

当所では「組込みシステム開発支援研究室」を平成 24 年 4 月に開設し, 組込みシステム開発の技術支援に取り組んでいる。組込みシステム開発支援研究室の活動を図 3 に示す。図 3 は IoT の技術支援の一例である。当所では, 組込みシステムの設計・試作・製品化の技術支援をするばかりでなく, 県内企業の間で仕事に結びつけられるよう, 設計・試作をしている県内企業を紹介し, 製品化の場合は県内の製造工場を紹介している（リンケージ）。また, 当所の測定機器や試験機器を開放し, 企業の技術開発で活用していただくサービス（機器貸付）や, 測定機器や試験機器を用いて当所が試験・検査・分析するサービス（依頼試験）を提供している。これらのサービスを必要に応じて組み合わせながら, 県内企業の組込みシステム開発の支援に取り組んでいる。

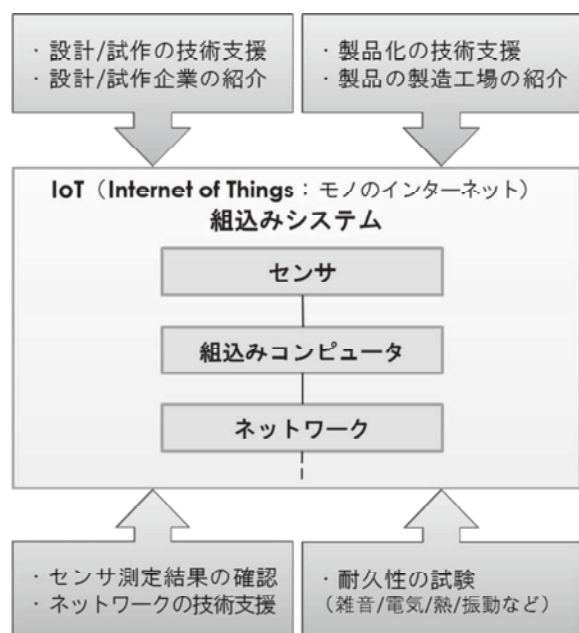


図 3 組込みシステム開発支援研究室の活動

2.5 県の取り組み

平成 28 年度新潟県当初予算では, AI や IoT の活用の促進に向け, 企業や大学などによる研究会の開催や, 実装モデルの研究開発, 実証を通じた効果検証を実施する「AI・IoT 活用ビジネス創出事業」が計上されている。

2.6 農業分野の調査研究と技術連携

本調査研究は平成 27 年度ものづくり技術連携活性化事業「センシング技術の農業分野への応用に関する調査研究」と連携し, IoT に関わる装置の設計・試作に協力している。組込み Linux のワンボードマイコンや無線通信装置が組み込まれたワンチップマイコンを使った計測データの収集方法や制御方法を提案し, 装置の設計と試作, プログラムの試作に協力した。また, 農場の実験時に発生した計測装置の不具合について, 計測データ, OS 記録, 気象情報を比較しながら不具合の原因を分析した。

本調査研究では製造業の調査に加え, 農業分野における技術支援を試みた。ビッグデータは全産業に関わることから, 製造業でつくられた製品を活用するばかりでなく, 製造業の技術が他の分野で活用され, 相互の産業の活性化に結びつけられるよう, 今後も技術支援や人材育成に取り組むたい。

3. 結 言

- (1) ビッグデータに関して, 産学官の動向や先進事例を調査しながら県内企業へ情報提供し, ものづくりの大きな変革を企業のチャンスへ結びつける活動を実施した。
- (2) IoT, ビッグデータ, CPS, AI に関するセミナーを 2 回開催し, 企業を訪問調査した。うち 1 社から平成 28 年度共同研究のご提案をいただいた。
- (3) 製造業の調査に加え, 農業分野における IoT の技術支援を試みながら, 技術支援や人材育成の方法について検討した。

センシング技術の農業分野への応用に関する調査研究

種村 竜太* 小林 豊* 大川原 真* 石井 治彦* 木嶋 祐太**

Report of Market and Technology Trends of Sensing Technology in Agriculture

TANEMURA Ryouta*, KOBAYASHI Yutaka*, OKAWARA Makoto*,
ISHII Haruhiko* and KIJIMA Yuta**

1. 緒 言

農業では高品質安定生産のために気象条件や生育状況に応じた細かな栽培管理が重要であるが、生産者の経験やカンに基づいた作業管理がされていることが多い。そのため生産者間での生産性や品質に大きな差が生じ、規模拡大や新規参入の抑制要因となっている。また、工業分野では産業用ロボットなどの普及により生産工程や出荷調整工程の自動化が進んでいるのに対し、農業分野においては稲作で一部機械化されている工程もあるが、多くは人の手によって管理されている。

そこで、本調査研究では工業分野で普及しているセンシング・画像処理技術を農業分野へ応用し、生産技術のデータ化および生産工程などの自動化に関する市場の動向、技術動向、そして自動制御装置開発に向けた技術課題とその対策についての調査を行った。

2. 活動概要

2.1 研究会の開催

植物工場研究会と共催で新潟大学農学部元永佳孝准教授を講師に招聘し、セミナーを開催した（農業分野へのセンシング技術利用セミナー、平成 28 年 1 月 14 日）。会場は新潟県工業技術総合研究所で、参加人数は 52 名であった。講演内容は以下のとおり。

* 下越技術支援センター

** 中越技術支援センター

演題：「農業分野におけるセンシング技術・ICT 利活用の現状と課題」

講師：新潟大学農学部准教授 元永佳孝氏

内容：農業分野における ICT 利活用は、国の IT 総合戦略本部においても分科会が設置されるなど、注目される分野である。農業分野で IT 技術を利用し情報を集積することで、農産物の品質向上や生産効率の向上に結びつくことが期待されている。ICT の利活用として、トヨタ自動車、クボタ、富士通、（国研）農業・食品産業技術総合研究機構などの取り組み状況について紹介いただいた。センシング技術に関しては、農業で得られた経験値を科学的データと結びつける技術のひとつとしてとらえ、トレーサビリティシステムへの発展性が示された。また、生産者へ普及している事例として、果実の成熟度を判別するためのカラーチャートが紹介された。

農業分野における ICT 活用については期待される技術であることから、幅広い業種の企業から参加いただき、活発な意見交換が行われた。アンケート調査の結果についても概ね好評であった。

2.2 市場や研究動向

2.2.1 環境情報のセンシング

圃場に設置した各種センサから収集した環境情報を遠隔からリアルタイムでモニタリングできるクラウド型サービスが既に始まっている。

センサで温度・湿度・照度などの測定を行う「子機」と、そのデータを集約しインターネットサーバに送信する「親機」、インターネットサーバ上のデータを PC・スマートフォンで確認・管理するための「ウェブサービス」で構成されているケースが多い。栽培環境や栽培状況を離れた場所の PC や携帯端末でモニタリング可能で、栽培環境の異常やトラブルを遠隔 PC に警告画面表示したりメール送信する。すでに市販されているセンサーが取り付けられている製品が多く、土壌水分や電気伝導率などもオプションで取り付けることが可能な製品もある。

2.2.2 「Kinect」による生体情報センシング

「Kinect」は Microsoft 社が開発した赤外線プロジェクターと赤外線カメラからなる距離画像センサーで、PC に接続できるユニットが販売されており、安価で性能が良いことから医療など各種産業分野で利用が進んでいる。農業分野においても比較的安価で RGB 画像だけでなく深度距離情報を面的に取得できることから、深度データを保存するプログラムを作成して園芸施設に設置し、作物のモニタリングに応用する研究がおこなわれている^{1~3)}。

2.2.3 画像認識の技術動向

画像データは 2 次元の座標とその位置での色や明るさのデータであり、センシングツールとして利用するためにはこの画像データから植物体を認識させる必要がある。画像認識には特徴抽出と識別の工程がある。特徴抽出とはある物体の特徴が明確になるパラメータを決めて、そのパラメータを取り出す工程で、識別とは取り出したパラメータにより判定する工程である。例えば 1 枚の画像から植物体を認識するための方法として「色で判定し」、「色のグリーン値が 200 以上だと植物」と決めた場合、前者が特徴抽出で後者が識別の工程である。機械学習とはテンプレートの画像をソフトウェアがあらかじめ学習しておいて、その結果を利用する手法

である。例えば前述の識別の「色のグリーン値が 200 以上」という 200 という数値を人間が決めるのではなく、学習した画像からその数値を決めることになる。特徴抽出や識別を人間が決定することには限界があり、問題が複雑になると良い結果が得られなくなる。機械学習はその限界を突破する方法であり、時には人間以上の結果を得られる可能性があるが、テンプレート画像を学習させるのにコストがかかってしまう。

カメラによる生体情報センシングのために機械学習の導入は有効であるが、この分野での学習データはそろっていないため、導入には高い壁がある。機械学習やデータ収集について研究を行い知見やデータが得られることは、今後の新潟県の農業にとって強みとなる可能性がある。

2.2.4 県内企業の動きと市場参入時の課題

現在、圃場モニタリングやセンサーネットワークに関するシステムを提供している県内企業はないが、こちらからの情報提供やセミナーを開催することによって生体情報センシングや、制御装置の開発に関心を示す企業が出てきている。気象情報のモニタリングシステムについては既に多くの企業が提供しており、性能や価格の面で優位性を持ったシステムを開発する必要がある。現状のモニタリングシステムについては、装置やランニングコストが高すぎることや取得したデータを生産者が十分に活用できないなどの課題があることが明らかとなった。

3. 工業技術総合研究所の取り組み

3.1 イチゴ栽培における植物体センシング

ワンボードマイコン「Raspberry Pi 2 Model B」と専用カメラモジュールからなる試作装置をイチゴ施設に設置して鉛直方向からセンシングした。設置位置は、葉かきや収穫などの栽培管理や病害虫防除のための薬剤散布の際に邪魔にならないように定植面から 80cm（地面から 180cm）とした。試作装置で生育の変化を十分にとらえることができ、画像処理を行うことに



図1 画像処理による群落葉の抽出

より受光葉面積を算出可能であることが分かった(図1)。しかし、背景によっては葉の部分だけを正確に抽出することができないケースもあり、撮影位置の地面に白色のシートを敷くなどの工夫が必要と思われる。また、撮影時の光条件によって、葉色が異なって映し出されるため、今回用いた装置では葉色による栄養診断などは困難と思われる。

3.2 マイクロスコープによるセンシング

植物の水分状態によって茎径が変化することから、レーザー変位計を用いた自動水分制御装置などが報告されているが⁴⁾、農業生産者への普及を考えると低コスト化が必要である。そこで、USB マイクロスコープを用いてトマトの茎径の計測が可能かどうかを検証した。試作した装置は「Raspberry Pi 2 Model B」とUSB マイクロスコープからなり、背景を白色にすることによって茎径を検出することができた(図2)。今回試作した装置では0.1mmの分解能で茎径を算出することが可能であり、測定結果も安定していた。カメラの位置をさらに植物体に近づけることが可能なため、より高い精度で算



図2 茎径のセンシング状況

出することができると思われる。今後は、茎径変化・土壌水分状態・葉のしおれ程度などを同時にセンシングし、データ解析する必要がある。

4. 結 言

- (1) 「センシング技術農業利用研究会」を立ち上げ、セミナーを開催した。幅広い業種の企業から多くの方に参加いただき、活発な意見交換が行われた。農業分野におけるICT活用については期待される技術であり、参加者からは概ね好評であった。
- (2) 温湿度や日射量など環境情報については遠隔からリアルタイムでモニタリングできるクラウド型サービスを多くの企業が展開している。一方、生体情報のセンシングについては開発途上である。
- (3) 「Raspberry Pi」とWebカメラやマイクロスコープを用いることにより、群落葉面積や茎径などの生体情報のモニタリングが可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 黒崎秀仁ら，“Kinect センサを利用した植物の成長モニタリング”，日本生物環境工学会 2014 年大会 講演論文要旨，2014，pp.284-285.
- 2) 浜本浩ら，“Kinect for Windows の深度情報から作物の受光体勢を評価する”，園芸学研究，13 (別2)，2014，pp.223.
- 3) 浜本浩ら，“Kinect (キネクト) の深度情報を利用した作物個体群の受光体勢の評価”，植物環境工学，27 (2)，2015，pp.97-101.
- 4) 大石直記，“トマトの養液栽培における水分ストレスに応じた給液制御システムの開発”，生物環境調節，40 (1)，2002，pp.81-89.

工業技術研究報告書

No.45 平成27年度

平成28年6月 発行

編集発行人 新潟県工業技術総合研究所

所在地 〒950-0915
新潟市中央区鑑西1丁目11番1号
TEL 025-247-1301

印刷所 株式会社 新潟フレキソ
TEL 025-385-4677