

岐阜県工業技術研究所研究報告

第3号 平成26年度

岐阜県工業技術研究所

目 次

機 械 ・ 金 属 関 連

刃物ブランドの維持・向上に資する計測・評価装置の開発研究（第1報）	1
田中 泰斗、西嶋 隆、田中 等幸	
水質が脱亜鉛腐食に与える影響に関する研究（第1報）	5
足立 隆浩、水谷 予志生	
自己組織化膜による刃物の表面改質技術の開発（第2報）	9
大川 香織、細野 幸太、林 亜希美	
レーザーマーキングによる多階調画像形成技術に関する研究	12
田中 等幸、細野 幸太、堀部 喜学*、大竹 嘉幸*、小河 廣茂	
水栓設備によるエネルギーハーベスティング技術に関する研究（第1報）	16
西嶋 隆、田中 泰斗	
鋳物製品の内部欠陥の低減に関する研究（第2報）	20
大平 武俊、水谷 予志生、足立 隆浩	
摩擦攪拌接合の異種材接合への応用（第1報）	24
水谷 予志生、足立 隆浩	
薄板のプレス焼入れ技術に関する研究（第2報）	28
小川 大介、佐藤 丈士	

複 合 材 料 関 連

CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発（第1報）	33
千原 健司、道家 康雄、仙石 倫章、萱岡 誠、田中 等幸	
CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発（第2報）	35
仙石 倫章、千原 健司、道家 康雄、萱岡 誠、田中 等幸	
熱可塑性 CFRP（炭素繊維複合材料）の立体成形技術の確立（第2報）	39
道家 康雄、千原 健司、仙石 倫章、萱岡 誠、西村 太志	
熱可塑性樹脂部材のレーザー加工技術の開発	43
小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦	
ウォータージェットによる CFRP 加工効率化に関する研究（第1報）	47
西村 太志、小河 廣茂	

熱可塑性 CFRP の切削・研削加工技術の確立（第 2 報）	49
柘植 英明、加賀 忠士、萱岡 誠	
CFRP とチタン合金の共穴加工に関する研究.....	53
加賀 忠士	

機 械 ・ 金 属 関 連

刃物ブランドの維持・向上に資する計測・評価装置の開発研究（第1報）

田中 泰斗、西嶋 隆、田中 等幸

Development of evaluation apparatus for the cutlery, which aim to promote the cutlery brand (I)

Taito Tanaka, Takashi Nishijima and Tomoyuki Tanaka

本研究では、県内産刃物製品の品質維持または品質向上を支援するため、刃物の切れ味を定量的に評価可能な新たな試験機を開発することを目指している。本報告では、刃物の切れ味評価手法として広く利用されている本多式切れ味試験と ISO 規格の刃物の鋭さと刃先耐久性試験の相違点を明らかにするとともに、開発試験機の開発方針を示した。また、被削材を連続的に切断するためのクランプ機構を設計・試作し、基礎的な検討を行った。試験の結果、試作クランプ機構は、被削材連続切断時に刃先にかかる試験荷重の安定化に効果的であることが判った。

1. はじめに

日本の刃物ブランドを代表する関の刃物は、切れ味の良さや耐腐食性、意匠性などから北米、ヨーロッパを中心として海外からも高い評価を受けている。また、これらの特徴を前面に打ち出した高級品を中心に海外展開を図る企業も増えつつある。刃物製品のブランド構築という点では、岐阜県関刃物産業連合会が地域団体商標「関の刃物」を取得し、刃物産地としての認知度の向上に取り組んでいるほか、個別企業においても企業ブランドまたは製品ブランドの確立に向けた新たな商品開発の取り組みが進められている。このように県内刃物産業においては市場開拓のための様々な取り組みが行われており、今後も優れた機能や品質、意匠を背景に、国内外の新たな販路を開拓していくことが重要と考えられる。

一方で岐阜県内の刃物産業事業者数は、小規模事業所を中心に近年大幅に減少しており、職人の高齢化や後継者不足も相まって、従来どおりの工程分業による刃物生産を維持することは困難になりつつある。このことは、刃物製品の品質低下に直結する恐れがあり、将来を見据えた対応が必要である。刃物の性能として第1に考えられるのは切れ味とその持続性であり、国内においては、図1に示す本多式切れ味試験機（以下、本多式試験機）による評価が主流である。しかし、本多式試験機は、長

年にわたって改良機が開発されておらず、県内企業からは測定自動化や省力化、耐久試験への対応、測定結果の再現性の改善などを求める声がある。

そこで、本研究では、県内産刃物製品の品質維持または品質向上を支援するため、刃物の切れ味を定量的に評価可能な新たな試験機を開発することを目指す。本報告では、刃物の切れ味評価手法として広く利用されている本多式切れ味試験と ISO8442-5 について試験方法の概要を説明・比較するとともに、試験機の開発方針を示す。また、効率的な切れ味耐久試験を実現するために試作した被削材クランプ機構について報告する。

2. 刃物の切れ味評価手法と課題

国内における刃物の切れ味評価手法としては、本多式切れ味試験（以下、本多式試験）が広く利用されている。本多式試験では、短冊状に切断した和紙またはクラフト紙の束を被削材に用い、試験刃物と被削材を一定荷重で押し当てた状態でどれか一方を往復運動させる。このとき切断された被削材の枚数を計数し切れ味として定量化するものである。国内で長年利用されている試験であるが、試験方法が考案された1920年頃以降、規格化されることなく現在に至っているため、試験機の保有組織毎に異なる方法で評価されている。現在利用されている本多式試験機の多くは、モータによる切断動作と切断サイクル数のカウントが自動化された装置であり、測定者は1ストロークの切断動作の度に被削材を取り外し、切断された被削材を計数する必要がある^{1) 2)}。

国際規格としては、ISO 8442-5（以下、ISO 試験）が制定されており、規格に準拠した装置を英国 CATRA が販売している。ISO 試験も本多式試験と同様に紙を被削材に用いるが、刃物の耐久性評価に特化していること、被削材の切断運動や切れ味の評価方法など相違点も多い。

2. 1 本多式試験と ISO 試験の比較

本多式試験は規格化されていないため、本報告では当



図1 本多式切れ味試験機

表1 被削材の仕様

	本多式試験	ISO 試験
種類	クラフト紙	ケミカルパルプ紙
填料	なし	シリカ
坪量	30g/m ²	200±10g/m ²
紙厚	約 0.04mm	0.31±0.02mm
形状	短冊状の紙束	短冊状の紙束
積層厚	約 16mm (400 枚)	50mm (約 160 枚)
短冊幅	8mm	10±0.1mm
前処理	指定無し	C-24h/20±2°C/ (55±5) %RH

表2 試験装置の主要諸元

	本多式試験	ISO 試験
試験荷重	約 7.4N (750g)	50N (約 5.1kg)
被削材クランプ圧	指定無し	130±2.5N
切断ストローク	20mm	40mm
切断速度	30mm/s (max) 20mm/s (ave)	50mm/s 45±0.5mm/s (ave)
直動機構	往復スライダ・クランク機構	ボールネジ等によるスライド機構

研究所が保有する本多式試験機の諸元及び一般的な試験方法と ISO 試験で定められた試験方法を比較する。

2. 1. 1 被削材

本多式試験と ISO 試験で使用する被削材の主な仕様を表 1 に示す。何れの試験方法においてもケミカルパルプを主要原料とする紙を被削材として使用するが、その機能や性状は異なる。本多式試験で使用する被削材の原料は 100%パルプからなるが、ISO 試験では、シート重量に対して 5%のシリカ粉末を加えた専用シート使用することとしており、積極的に刃先を摩耗させる事による加速劣化試験を意図している。また、本多式試験で使用する被削材の紙厚は 0.04mm と一般コピー用紙の半分程度であるのに対し、ISO 試験では 0.31mm となっており、シートの剛性が大きく異なる。本多式試験では切れ味を被削材の切断枚数で評価するため、薄い被削材の方が詳細な切れ味を評価し易いこと。被削材の両端をクランプすることにより保持する方法をとっており、剛性のある厚い紙では、試験刃物の側面と切断済み被削材の摩擦の影響が大きくなるためと考えられる。一方 ISO 試験では、切れ味を被削材の切断距離により評価することとしており、紙厚が切れ味に直接影響を与えることは無い。また、被削材の固定方法としては、一端をクランプする機構を採用しており、自重で被削材が垂れ下がることを回避するためには、ある程度の剛性を持った厚みのあるシートを被削材とする方が都合がよいと考えられる。

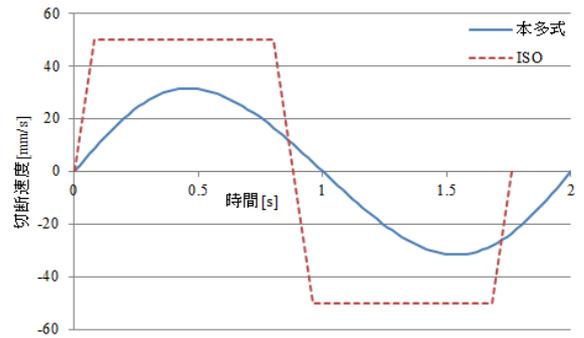
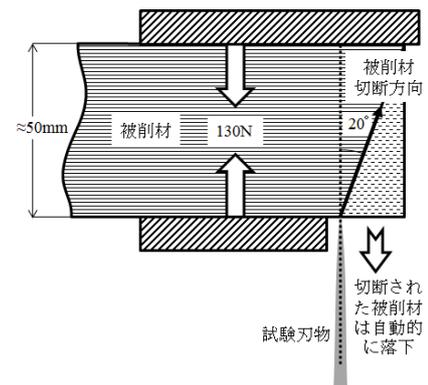
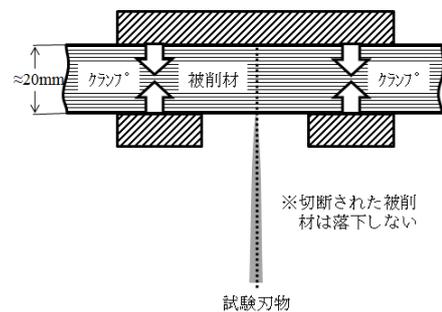


図2 切断動作の速度波形



(a) ISO 試験



(b) 本多式試験

図3 被削材クランプ機構

2. 1. 2 試験装置

本多式試験機と ISO 試験装置の主要諸元を表 2 に示す。ISO 試験の試験荷重は、被削材の短冊幅あたりに換算して本多式試験の約 5.4 倍となっており、切断動作のストロークは 2 倍となっている。切断動作の速度波形を図 2 に示す。本多式試験では往復スライダ・クランク機構により、被削材または刃物を駆動するため、1 サイクルの速度波形は正弦波状になる。ISO 試験では、約 50m/s の等速運動により、刃物を駆動することとしており、切断ストロークの始点及び終点で急激な加減速を伴う台形速度制御等により切断動作を行う。被削材のクランプ機構にも違いがある (図 3)。ISO 試験では被削材の端を固定せず、切断済みの被削材を自由に落下させるとともに、被削材の切断面と刃物側面が約 20° の角をなすように試験刃物の位置を制御することとしている。これは、切

断面を切り込み方向に対して傾けることによって、切断済みの被削材と刃物側面の摩擦を避けるためであり、連続切断によって切り込み量が増加しても刃先のみで試験荷重を加えることが可能になる。本多式試験では、被削材の両端を固定した状態で被削材を切断することとしており、試験刃物の切り込み量の増加に伴い、試験刃物の側面と切断済み被削材の摩擦が生じ刃先にかかる試験荷重が減少することとなる。このため、連続的に切断動作を行いながら切れ味を測定することはできず、切断動作の繰り返しによる切れ味の変化を測定するためには、切断動作の度に刃物と被削材の接触位置を変える必要があり、測定に労力がかかるという問題がある。

2. 1. 3 切れ味の評価方法

ISO 試験では、被削材の切断長さを 0.1mm 以上の精度で測定することにより、切れ味を定量化している。本多式試験では 0.04mm 厚の被削材の切断枚数により定量化しており測定方法は異なるが、何れの試験においても削材の切断長を指標としていることは同じであり、測定精度についても大きな違いは無いと考えられる。

ISO 試験では、試験刃物を A,B の 2 タイプに分類し、それぞれについて試験サイクル数を定めるとともに、表 3 に示す切れ味の基準値を定めている。ここで、A タイプは研ぐことを前提とした刃物であり、B タイプはセラミックスなど研ぐことの無い刃物を指す。ICP (Initial cutting performance) は、初期切れ味を示す指標であり、試験を開始してから 3 サイクル分の累計切断長さである。CER (Cutting edge retention) は、刃先の耐久性を示す指標であり、試験サイクル数が終了するまでに切断された被削材の累計長さで表される。また、B タイプの試験刃物は A タイプの刃物より高い耐久性が設定されている。

本多式試験では、統一的な刃物の性能評価方法は規定されておらず、当所では、刃物に要求する性能に応じ、20 回から数百回程度切断操作を繰り返すことによって切れ味劣化傾向を評価することが一般的である。

この他、檜の木片に試験刃物を押しつけ切断動作を繰り返し行う専用の耐久試験機を用いた切れ味耐久試験の研究事例がある。この研究では、耐久試験機による操作回数と本多式試験機で測定した切れ味の関係を指数関数で近似したうえで、被削材の切断枚数が規定枚数になるまでの累計切断枚数を計算し、切れ味耐久性評価の指標としている³⁾。ただし、耐久試験機は市販されておらず、試験方法として普及していない状況にある。

2. 2 切れ味試験機の開発方針

ISO 試験は切れ味の耐久試験を主目的としており、試験荷重、被削材の切断動作など本多式試験とは大きな違いがある。本多式試験機を保有している企業からは、これまで品質管理等に利用してきた試験結果と一定の互換性を持った試験機を利用することを望まれており、ISO 試験に準拠した試験機での対応は不可能である。また、刃付け状態の善し悪しの確認や医療用刃物やカミソリの

表 3 ISO 試験における切れ味の評価指標

タイプ	試験サイクル数	最小 ICP [mm]	最小 CER [mm]
A	60	50	150
B	200	50	1,500

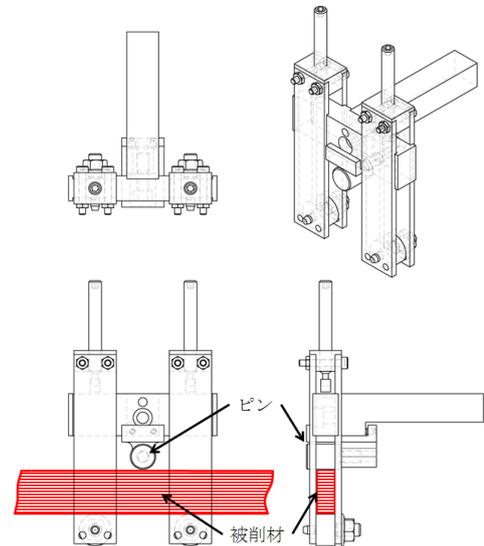


図 4 試作クランプ機構

ように刃先角度の小さい薄刃の刃物の試験では、小さな力で被削材を鋭利に切断できることを確認することが重要であり、ISO 規格に定められた試験荷重は過大である。このため、本研究では、本多式試験をベースとし、測定の省力化を図った装置を開発することとし、主に次の事項について改善を図る。

- 1) 被削材の連続切断
- 2) 被削材の自動交換
- 3) 被削材切断長の自動計測

被削材の連続切断は、試験刃物の側面と切断済みの被削材との摩擦を回避し、刃物と被削材の接触位置を変えずに刃先にかかる試験荷重を一定に保つことによって連続的な被削材切断を可能にする機能を指す。被削材の自動交換は、連続切断により切り込み可能な被削材長さが減少したとき、自動的に被削材を排出するとともに新たな被削材に交換する機能を指す。被削材切断長の自動計測は、試験刃物の被削材への切り込み量を自動計測する機能を指し、本多式試験における切断済み被削材の計数作業を自動化するものである。また、開発試験機の普及を図るため、使用するセンサやアクチュエータの数を削減するなど、極力安価な試験機の開発を目指す。

3. 被削材の連続切断

3. 1 概要

被削材の連続切断機能について基礎的検討を行うため、図 4 に示す被削材クランプ機構を試作し実験を行った。試作機構では、中央にピンを設けるとともに紙押さえ部を円筒形状とし、被削材に局所的な荷重がかかることを

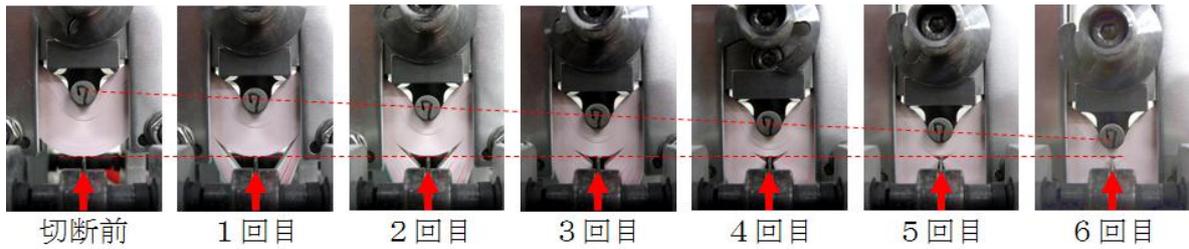


図5 切断回数と切断済み被削材の動き

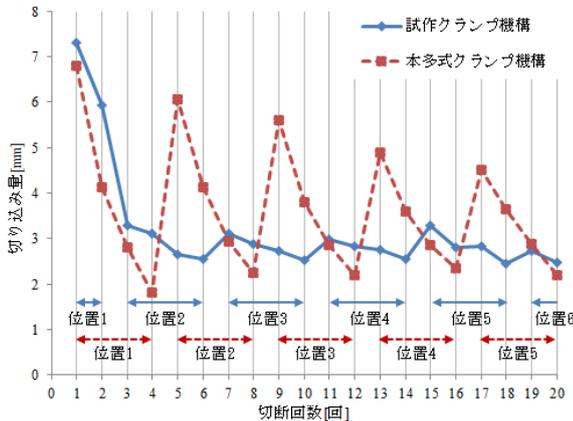


図6 被削材切断回数と切り込み量の関係

回避している。この機構により、クランプされた被削材は円弧状に屈曲した状態で固定される。試験刃物により切断された被削材は中央の円筒ピンと紙押さえ部を結ぶ直線に対して概ね垂直となる方向に移動するため、被削材と試験刃物側面との摩擦を排除することが可能と考えられる。

3.2 実験

試作クランプ機構による効果を検証するため、本多式試験機の可動部に試作機構を取り付けた。実験は、被削材に切り込み可能な残量がある限り、被削材を取り外すことなく切断動作を繰り返すことにより行った。連続切断を行いながら被削材の切断枚数を計数することは困難であるため、刃物の切り込み長さを切れ味に相当する値として、1 ストローク毎の切り込み量をレーザ変位計 (OPTEXFA 製 CD4-85J) により計測した。試験には市販のカッター刃を用い、通常の本多式試験機に使用する被削材を使用した。なお、試作機構の試験では約 850g であり通常の本多式試験機の荷重と異なる。試作機構の試験荷重の増加は、既存の本多式試験機に追加した部品による重量増によるものである。

3.3 結果と考察

図5に試作クランプ機構を用いた切り込みの様子を例示する。切断動作の度に、切断された被削材が試験刃物から離れており、摩擦による試験荷重の減少を軽減できていると考えられる。

通常の本多式試験機の機構で被削材を連続切断した試験と試作機構により連続切断を行った場合の試験結果を図6に示す。試験刃物の刃先状態が異なるため、切れ味

の比較はできないが、本多式クランプ機構による試験では同一位置での切断動作の度に切り込み量が大きく減少し、被削材の位置を変更することにより切り込み量が回復している。試作クランプ機構を用いた場合も同様の傾向が認められるが、切り込み量の変化は比較的軽微であり、被削材と刃物側面の摩擦が大きく減少していることが分かる。よって、試作クランプ機構を用いることは、刃先にかかる試験荷重の安定化に効果的であると考えられる。

4. まとめ

本報告では、刃物の切れ味評価手法として広く利用されている本多式切れ味試験と ISO 試験についてその概要を説明・比較するとともに、試験機の開発方針を示した。また、効率的な切れ味耐久試験に必要な被削材の連続切断機能を実現する方法として、被削材を円弧状に屈曲させた状態で固定する被削材クランプ機構を設計・試作した。試作クランプ機構を本多式試験機に取り付けた連続切断実験の結果、従来試験機のクランプ機構により被削材を連続切断した場合と比べ、切断済み被削材と試験刃物側面の摩擦が大幅に減少している予想され、提案したクランプ機構は、刃先にかかる試験荷重の安定化に効果的であると考えられた。

今後は、切れ味試験機の開発方針に基づき、各種動作を確認しながら新たな切れ味試験機の開発を進める。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、各種治具の設計製作並びに試験機の自動化についてご協力いただきました (株) 丸富精工様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 平田, 岐阜県金属試験場業務報告, pp.43-pp.46, 1961
- 2) 加藤ら, 刃物あれこれ-金属学から見た切れ味の秘密, pp.85-92, 2013
- 3) 竹腰ら, 岐阜県製品技術研究所研究報告 No.3, pp.88-97, 2002
- 4) ISO 8442-5, Materials and articles in contact with foodstuffs –Cutlery and table hollowware– Part 5: Specification for sharpness and edge retention test of cutlery

水質が脱亜鉛腐食に与える影響に関する研究（第1報）

足立 隆浩、水谷 予志生

Influence of water quality on the dezincification corrosion for brass alloy (I)

Takahiro Adachi, Yoshiki Mizutani

本研究では、比較的通常使用時に近いと思われる条件下での黄銅水栓製品の脱亜鉛腐食の評価を行った。脱亜鉛腐食は未だ発生条件の全容が明らかになっておらず、その対策が難しい腐食である。本研究では腐食に関わる環境条件のうち水質に着目し、いくつかの水質環境下において腐食促進試験を行い、それぞれの影響を調べた。また、腐食の評価手法に関しても検討を行った。その結果、評価手法に課題は残るものの、有機酸および金属塩化物溶存下で脱亜鉛腐食が進行することを確認した。

1. はじめに

脱亜鉛腐食は黄銅製品に見られる不良であり、合金中の亜鉛成分が脱落することで強度不足に陥り、水漏れなどが発生する現象として知られている。特に水栓部品においてこのような不良が時折見られ、水栓メーカーではその対策が課題となっている。しかし、この腐食のメカニズムは未だ明確にはされておらず¹⁾、また腐食の起こる使用条件が温度の違いや浄水器の使用の有無など多種多様であることから、腐食対策は困難なものとなっている。

材料の耐脱亜鉛性の評価の手法としては、塩化銅水溶液による腐食促進試験が行われているが²⁾、本研究では実際の水栓製品による実際の使用環境により近い比較的温和な水質環境下での腐食条件を検討する。また本研究においては、長くても数か月間という、環境試験としては短期間の試験により腐食の評価を行うことを目標とする。そのため、腐食量が比較的小さくなることが予想されるため、腐食条件の最適な評価法の確立についても検討する。

2. 実験

2. 1. 1 黄銅片を用いた予備試験

φ8mmの黄銅棒から長さ約10mmの小片に切り出し、重量を測定した。次に、生活の身近に存在する弱い酸としてクエン酸、酒石酸を、一般的に腐食を起こしやすいと考えられる塩化物イオンを含む試薬として塩化カルシウム(CaCl₂)、塩化マグネシウム(MgCl₂)を、炭酸源として炭酸カルシウム(CaCO₃)のそれぞれを蒸留水に溶解させた。このうちクエン酸、酒石酸、CaCl₂、MgCl₂は、室温にて蒸留水を用いて飽和溶液へと調整した。またCaCO₃は水への溶解度が他の試薬と比べ小さい(1.5mg/100ml水)ため、過剰に加え沈殿が残る状態で上澄みを試験に供した。

これらの溶液と何も溶解させない蒸留水単独をそれぞれ30mlずつ試験液として黄銅試験片を浸漬させ、容器に

ふたをして乾燥機中で65°Cに保持し腐食促進試験を行った。30日後試験片を取り出し、蒸留水にて洗浄・乾燥後、重量の測定を行い、重量変化を調べた。

2. 1. 2 黄銅片腐食試験結果

黄銅片を使用した腐食試験の重量変化について表1に示す。なお、減少量及び減少率が負の値であるものは試験後重量が増加したことを示している。

表1 黄銅片による腐食試験前後の重量変化

	試験前重量(g)	試験後重量(g)	減少量(g)	減少率(%)
クエン酸	4.330	4.291	0.040	0.91
酒石酸	4.857	4.831	0.027	0.55
CaCl ₂	3.677	3.673	0.003	0.09
MgCl ₂	4.693	4.690	0.003	0.07
CaCO ₃	3.312	3.314	-0.001	-0.04
蒸留水	4.097	4.098	-0.001	-0.03

この結果、クエン酸・酒石酸といった有機酸の試験液を用いた場合に比較的大きな重量減少が見られた。また、CaCl₂、MgCl₂といった金属塩化物溶存試験液を用いた場合も重量減少を確認できた。また重量減少した試験体は、いずれも試験前と比べやや表面が赤みを帯びた色になっていることから、脱亜鉛腐食による亜鉛の脱落とそれに伴う銅の露出が起こったと考えられる。蒸留水のみを用いた場合に重量減少が起らなかったことから、これらの有機酸や金属塩化物が腐食による減肉に何らかの影響を及ぼしていることが考えられる。

2. 2 実際の水栓製品を用いた試験

実際の水栓製品を用い、腐食促進試験を行った。

まず、新品の水栓製品試験体(黄銅製、長さ300mm、パイプ外径16mm)の重量をそれぞれ測定した。試験溶液は、クエン酸、酒石酸、CaCl₂、CaCO₃および蒸留水を用いた。試験液の調整方法は2.1と同様とした。次に、試験体である製品の中にホールピペットを用いて試験溶

液を 30ml 注入し、シリコンゴムにて栓をした。これらを図 1 の状態で 65°C の乾燥機中で保持し、腐食促進試験を行った。また、内部が空の状態の製品をブランクとして一緒に保持した。35 日後試験体を取り出し、それぞれの試験溶液をプラスチック容器に取り保管した。また、溶液を取り出したのちに内部を蒸留水で洗浄し、十分に乾燥して重量を測定した後、種々の分析に供した。

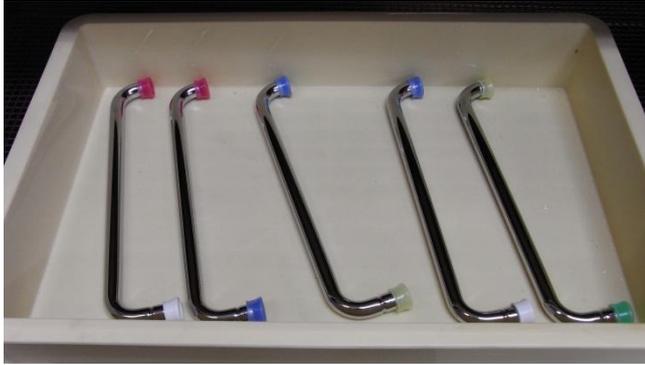


図 1 腐食促進試験中の試験体

3. 結果及び考察

3. 1 水栓製品腐食試験 重量変化測定

実際の水栓製品を使用した腐食試験後の試験体の重量変化について表 2 に示す。

なお、いずれの試験体も試験中に腐食による液漏れは起こさなかった。

表 2 製品試験体による腐食試験前後の重量変化

	試験前重量(g)	試験後重量(g)	減少量(g)	減少率(%)
クエン酸	103.347	103.166	0.181	0.18
酒石酸	104.924	104.908	0.016	0.02
CaCl ₂	104.925	104.902	0.023	0.02
CaCO ₃	103.825	103.828	-0.003	0.00
蒸留水	105.228	105.231	-0.004	0.00

予備試験と同様、クエン酸を用いた場合に比較的大きな重量減少が見られた。一方で酒石酸試験体は予備試験の結果から予想されるよりも重量減少は小さく、CaCl₂ 試験体と同等の減少率を示した。

3. 2. 2 水栓製品腐食試験 断面観察

試験後の試験体がどのような状態であるかを考察するため、検体を切断し、その内部写真を図 2 に示した。最も重量減少が大きかったクエン酸試験体は一部にのみ銅色部が見られたが、それより減少率が小さかった酒石酸試験体では試験体内部全面が銅色となっていた。また、酒石酸試験体に関しては白色の粉状異物が見られた。CaCl₂ 試験体についてもほぼ全面に銅色が現れていた。一方重量が増加した CaCO₃、蒸留水試験体に関してはブランクと同様に内部は黄色のままであり、黄銅中の亜鉛がマクロ的には脱落していないことが確認できた。

酒石酸試験体の内壁に現れた白色異物をエネルギー分散 X 線分光法 (EDX) により定性分析を行ったところ、亜鉛のほか酸素が多量に検出された。これは、脱落した亜鉛が酸素と反応し、酸化亜鉛となり内壁に付着したものと推測される。このように腐食試験中に生成した異物が付着する場合があるので、重量変化のみで腐食の評価を行うことは難しいと考えられる。

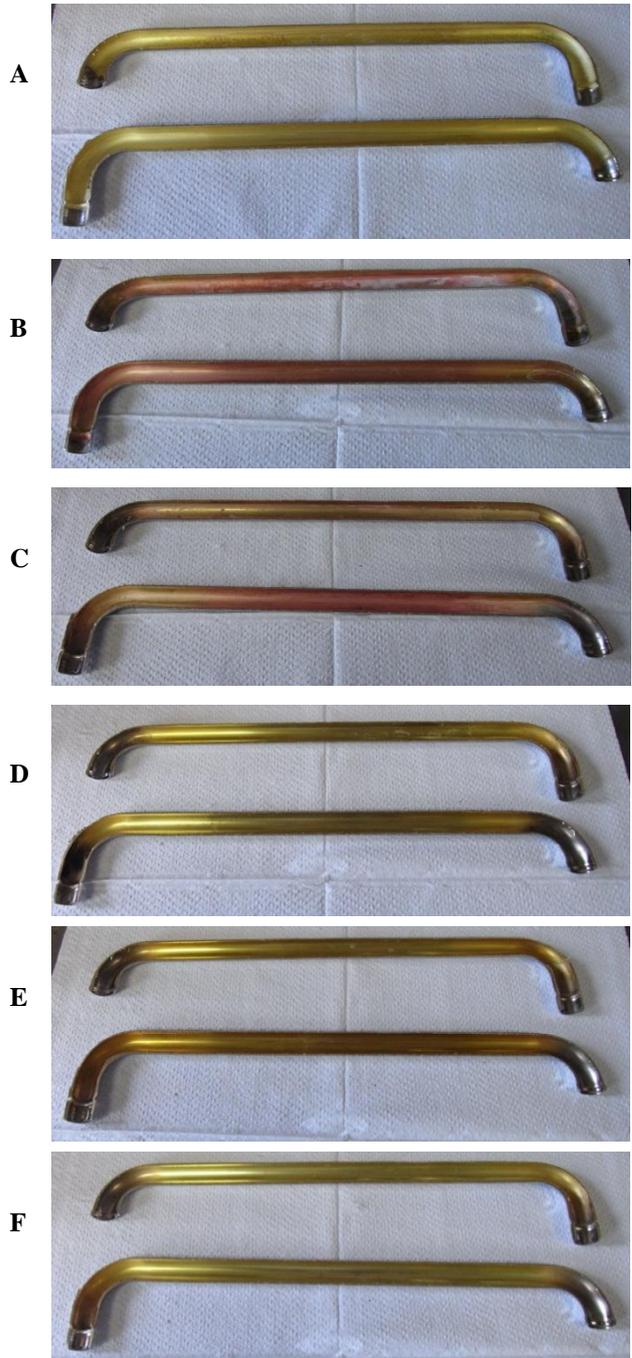


図 2 腐食試験後の試験体の内部

A:クエン酸、B:酒石酸、C:CaCl₂
D:CaCO₃、E:蒸留水のみ、F:ブランク

また、これらのうち重量が減少したクエン酸、酒石酸、 CaCl_2 の各試験体およびブランクのそれぞれについて光学顕微鏡を用いた断面観察を行い、脱亜鉛層が認められるかを確認した。結果を図3に示す。倍率1000倍の観察ではクエン酸試験体の断面には脱亜鉛層は確認できなかった。酒石酸試験体の断面には約 $5\mu\text{m}$ の脱亜鉛部位が広く薄く見られた。 CaCl_2 試験体の断面には約 $5\mu\text{m}$ の脱亜鉛部位が点在して確認された。

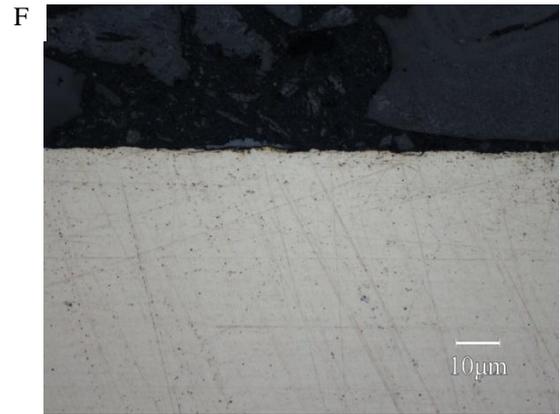
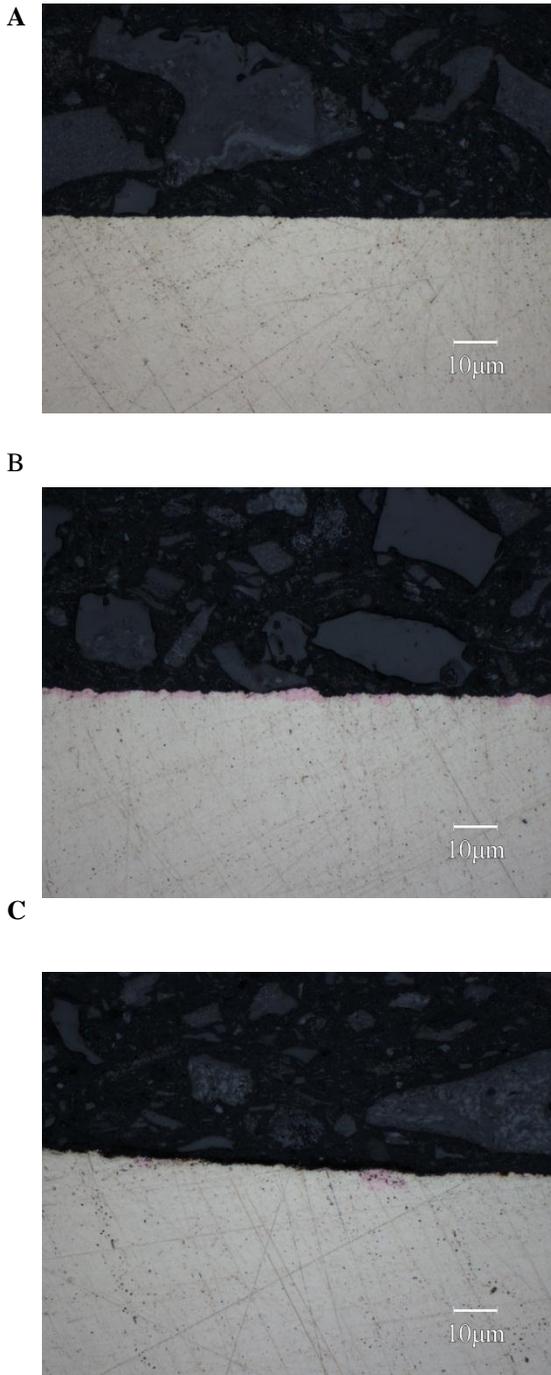


図3 断面観察結果 (倍率: 1000倍)
A:クエン酸、B:酒石酸、C: CaCl_2 、F ブランク

また、クエン酸試験体の断面サンプルについて、波長分散X線分光法(WDX)により表層部の銅と亜鉛の分布を調べた。また、比較のためブランクについても同様の測定を行った。結果を図4、図5に示す。

図4のチャートにおいて、銅のピークに対し亜鉛のピーク位置が約 500nm 内部側にあることから、表面から 500nm ($0.5\mu\text{m}$) の深さにおいて亜鉛の一部分が脱落していることが検出された。

以上の結果から、本試験においては腐食条件が穏やかであるため従来の手法²⁾である脱亜鉛層深さをを用いた評価では腐食の評価が困難となることが分かった。これに関しては、試験温度などを変化させ、可能な限り短時間で腐食をより促進させる条件を発見する必要がある。また、溶出した金属イオンの定量を試みるなど、他の評価手法も検討する必要がある。

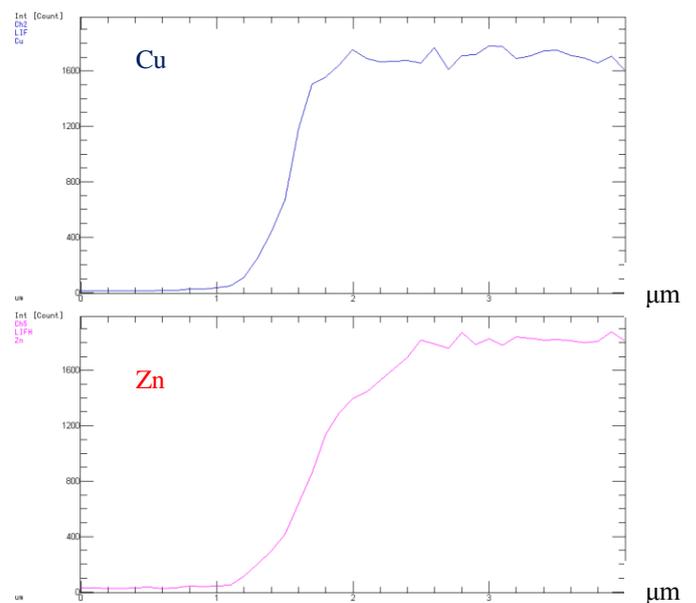


図4 クエン酸試験体表面の線分析結果

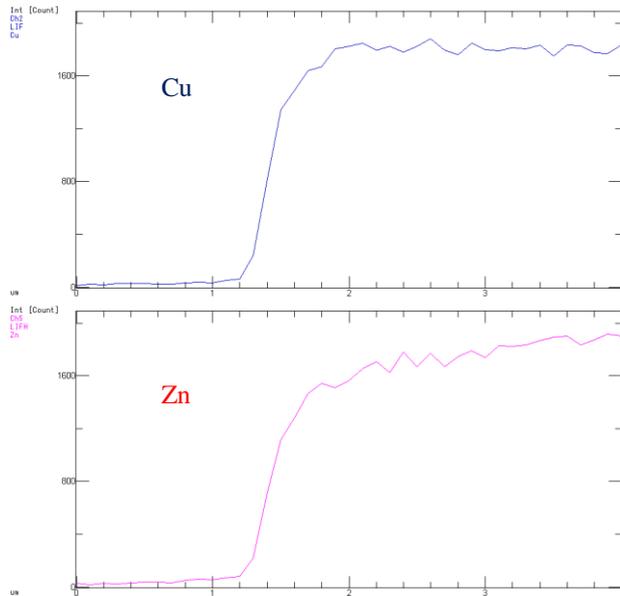


図5 ブランク表面の線分析結果

3. 1. 2 水栓製品腐食試験 試験液分析

腐食試験後に取り出した試験溶液を図6に示す。試験前はいずれも無色透明であったが、クエン酸・酒石酸に関しては試験後それぞれ青色・茶色に変色した。これらの試験体はどちらも腐食試験後に重量減少が見られ、また内面観察より脱亜鉛発生が確認できたため、有機酸が黄銅中の成分に何らかの影響を与えたことが予想された。

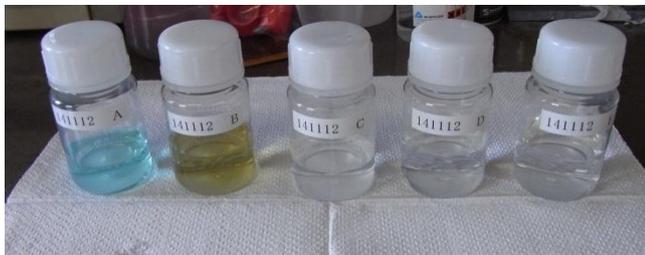


図6 腐食試験後の試験液
左から、クエン酸、酒石酸、CaCl₂、
CaCO₃、蒸留水のみ

そこで、同じく脱亜鉛腐食が見られたCaCl₂の試験液ともに、溶媒を蒸発乾固させ、得られた結晶を蛍光X線分析にて定性分析を行った結果を。図7に示す。クエン酸、酒石酸、CaCl₂いずれの試験液から得られた結晶からも亜鉛が検出された。このことから、これらの水質条件においては脱亜鉛腐食を起こすということがこの分析からも確認できた。また、クエン酸、酒石酸試験液については銅も検出された。これは、それぞれの腐食発生要因物質と黄銅中の銅が反応したことにより銅化合物として脱落したものか、もしくは黄銅中の亜鉛が脱落したことにより銅が疎な状態となり、銅単独で脱落し試験液に混合したもののいずれかであると推測される。

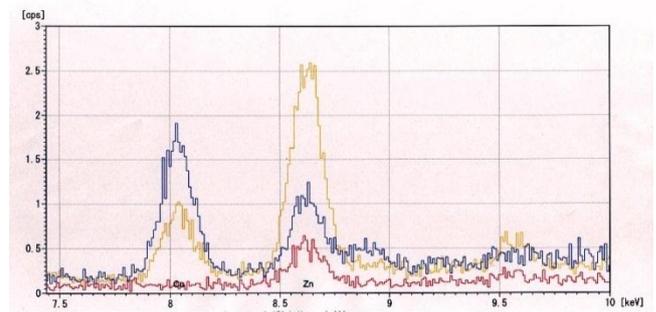


図7 各試験液より得られた結晶の蛍光X線分析結果
青：クエン酸、橙：酒石酸、赤：CaCl₂

4. まとめ

黄銅製品の脱亜鉛腐食試験を検討した結果、約一か月の腐食試験において有機酸および金属塩化物溶存下での脱亜鉛腐食が確認された。しかし、その腐食の多寡の評価手法については課題が残る結果となった。今後は、試験温度の上昇・試験期間の延長や評価手法のさらなる検討などを行う予定である。

【参考文献】

- 1) 松島巖, 腐食防食の実務知識, オーム社
- 2) JIS H 3250, 銅及び銅合金の棒

自己組織化膜による刃物の表面改質技術の開発（第2報）

大川 香織、細野 幸太、林 亜希美

Development of surface modification for cutlery by self-assembled monolayer (II)

Kaori Okawa, Kouta Hosono and Akemi Hayashi

ステンレス製刃物表面への強固な有機皮膜形成による撥水・撥油性の発現をめざし、ステンレスの不動態被膜の水酸基と化学的に結合できるホスホン酸誘導体に着目した。フルオロアルキル基を有するホスホン誘導体を用いて、ステンレス表面への化学結合による撥水・撥油性を有する自己組織化膜の形成を検討した。

1. はじめに

金属製品の撥水性・撥油性は、表面に表面自由エネルギーの低い物質をコーティングすることで発現している。表面自由エネルギーの小さい物質として、飽和フルオロアルキル基を有するフッ素系有機化合物がもっとも適している。現在、金属上への有機皮膜の形成には、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を中心とした、フッ素系ポリマーが用いられており、フッ素系ポリマー粒子懸濁液を表面に塗布した後、焼き付けて皮膜化しているため、密着性が弱く、被削物との抵抗が大きい製品、例えば刃物では皮膜がはがれやすい問題がある。また、膜厚を薄くすることができないため、形状が変わると性能に影響を及ぼす製品への処理には向かない。さらに、県内刃物業界は、低価格な外国製品の台頭により差別化に迫られており、刃物表面への機能性有機皮膜の形成技術の開発が強く望まれている。

金属表面へ有機分子を直接合成することは困難だが、貴金属表面には、ある特定の有機化合物が化学吸着し、緻密な有機皮膜を形成することが知られている^{1,2)}。これらの有機皮膜は自発的かつ規則的に集積されることから自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer、以下 SAM と略) と呼ばれ、基材表面と強固な化学結合により固定化される。これまでに当所において、金めっきを施したカミソリ刃表面へ、フルオロアルキル基を有するアルカンチオール皮膜を金-硫黄結合による SAM の形成により、撥水・撥油性を付与することに成功した³⁾。しかしながら、貴金属は高価であり、商品化を考えた場合、コスト高になってしまう。

そこで、ステンレスの不動態被膜の水酸基と反応することができるホスホン酸誘導体に着目した。A. Raman らは、この反応を利用し、オーステナイト系ステンレスである SUS316L 表面への SAM 膜の形成を報告している⁴⁾。本研究では、カミソリ刃やメスに用いられているマルテンサイト系ステンレスである SUS420J2 表面へ化学結合による撥水・撥油性を有する SAM 膜の形成を試みた。

2. 実験

2. 1 基板および試薬

基板として、10mm×20mm の SUS420J2 を使用した。試験片表面はバフ研磨して鏡面に仕上げた後、実験に供した。表面の有機汚染層を除去するために、アセトンで洗浄後、メタノールで 30 分間超音波洗浄し、さらに熱メタノール中で 10 分間洗浄した。送風乾燥器で乾燥後、実験に供した。撥水・撥油性を付与するため、フルオロアルキル基を有するホスホン誘導体は、1H,1H,2H,2H-Perfluoro-n-decylphosphonic acid (C₁₀H₆F₁₇O₃P) (以下と PFDPA 略) (Apollo Scientific Ltd.) を用いた (図 1)。

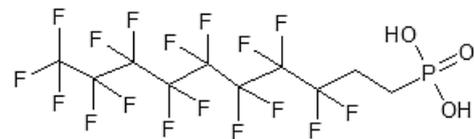


図 1 PFDPA の構造式

2. 2 基板表面の評価

2. 2. 1 SUS420J2 基板への PFDPA 皮膜の形成

1.0mM PFDPA の THF 溶液を調整し、基板を所定の時間、大気雰囲気下で浸漬した。反応はすべて室温 (20°C) で行った。反応後、100°C で一時間加熱処理をした。

2. 2. 2 接触角測定による撥水・撥油性の評価

ステンレスまたはテフロンコーティングした注射針を取り付けたマイクロシリンジを使用し、室温 20°C で基板表面に純水または n-ヘキサデカンを 1μl または 2μl 滴下し、協和界面科学株式会社製接触角計 DMs-200 を用いて接触角を測定した。5 回の平均値を接触角 θ とした。

2. 2. 3 高周波グロー放電発光分光分析による表面分析

堀場製作所製マーカス型高周波グロー放電発光表面分析装置 (RF-GD-OES) を使用し、未処理基板および PFDPA 処理した基板の表面を Ar プラズマによりスパッタリング測定し、深さ方向の元素分析を行った。

3. 結果及び考察

3. 1. 接触角測定による撥水・撥油性の評価

洗浄した SUS420J2 基板を 1.0 mM の PFDPA 溶液に 20 時間浸漬した場合の、純水および n-ヘキサデカンに対する接触角測定時の画像をそれぞれ図 2 (a) および (b) に示す。

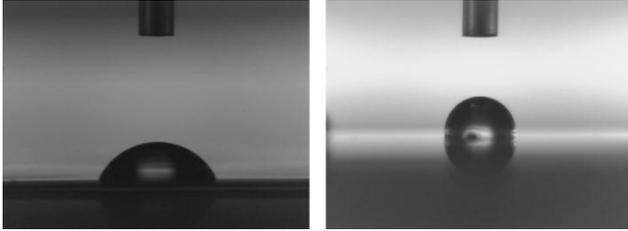


図 2 (a) 未処理 420J2 基板および PFDPA 処理 420J2 基板の純水に対する接触角

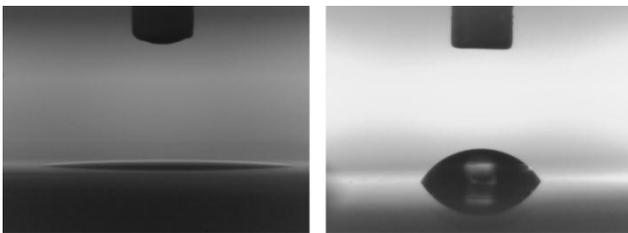


図 2 (b) 未処理 420J2 基板および PFDPA 処理 420J2 基板の n-ヘキサデカンに対する接触角測定に対する接触角

さらに、表 1 に PFDPA 処理した基板の純水および n-ヘキサデカンに対する接触角測定の結果と、参考に PTFE の接触角^{5,6)}を示す。未処理 SUS420J2 基板の対水接触角は、57.9°であったが、PFDPA 処理基板の純水に対する接触角は 100.5°と、未処理基板よりも撥水性を示したが、PTFE の 104~114°よりも若干小さい値を示した。未処理 SUS420J2 基板に n-ヘキサデカンを滴下するとただちに濡れ広がり、3.8°と非常に低い接触角を示したが、PFDPA 処理基板は 58.0°と高い値を示した。この値は、PTFE の 34~45°よりも大きいことから、PFDPA 処理基板の表面は、PTFE よりも高い撥油性を有していることが明らかとなった。

表 1 PFDPA 基板と PTFE の各溶液に対する接触角

		PFDPA 処理基板	PTFE
接触角	純水	100.5	104~114
	n-ヘキサデカン	58.0	34~45

また、PFDPA 処理基板を室温で大気中に放置したのちに、接触角を測定した結果を図 3 に示す。処理から 5 ヶ月経った後でも接触角の値に大きな変化は見られ

なかったことから、半年程度では、表面の PFDPA の構造には変化が起こらないことが示唆された。

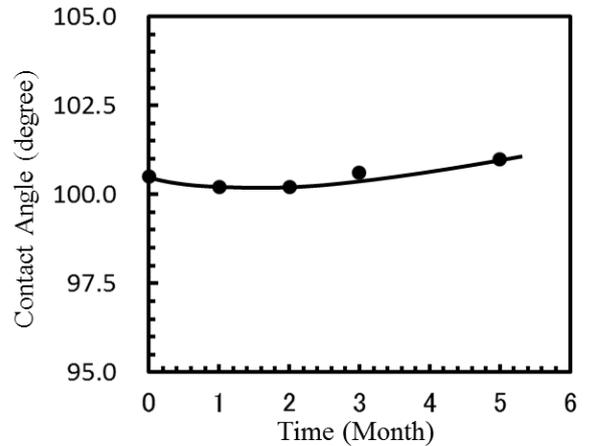


図 3 PFDPA 処理 SUS 420J2 基板の純水に対する接触角の経時変化

3. 2. 高周波グロー放電発光分光分析による表面分析

PFDPA 処理 420J2 基板の RF-GD-OES による深さ分析の結果を図 4 に示す。図 4 (a) より、スパッタリング

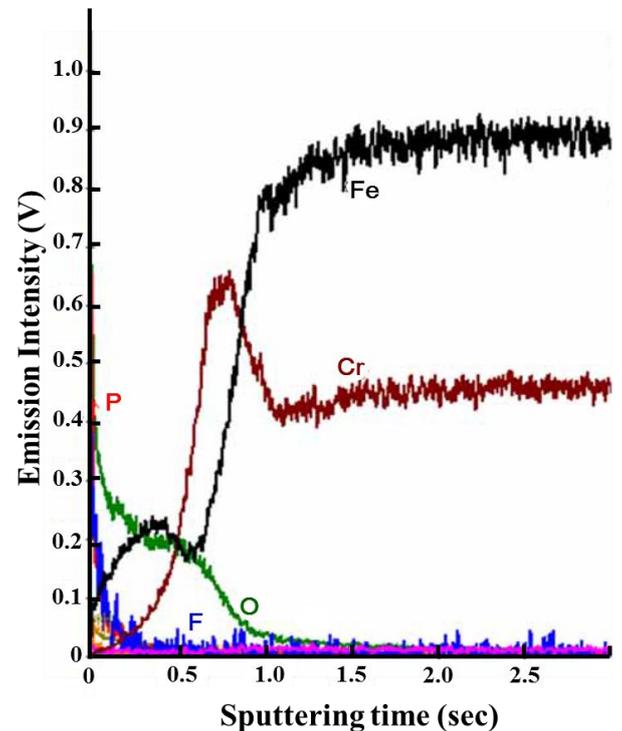


図 4 (a) PFDPA 処理した基板の RF-GD-OES による深さ方向分析

時間が 0.8 秒あたりに、クロムと酸素の濃化が認められ、SUS420J2 の不動態被膜の存在がはっきりとらえられている。さらに、スパッタリング時間を 0.3 秒まで拡大し

た図4 (b) より、0.05 秒までの間に、PFDPA に由来するフッ素と酸素およびリンの濃化が確認され、界面の状態をよくとらえている。これらの結果から、不動態被膜の上に PFDPA が存在していることがわかった。

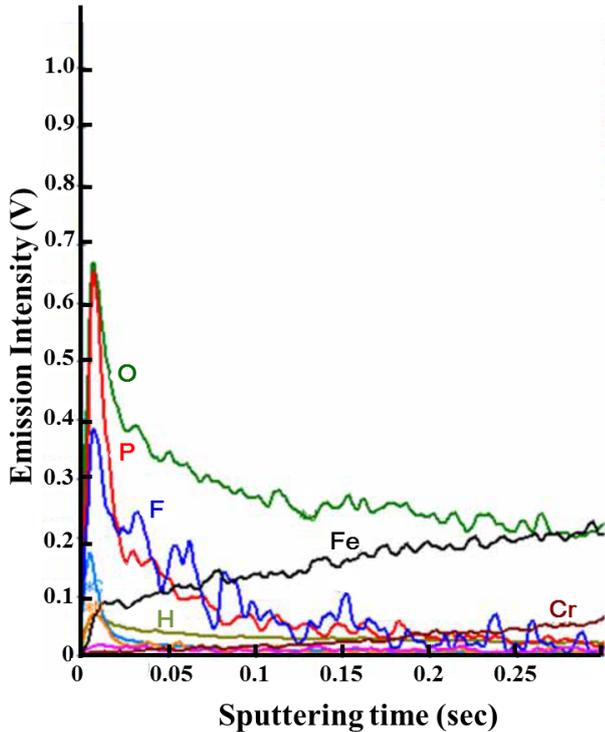


図4 (b) PFDPA 処理した基板の RF-GD-OES による
深さ方向分析

4. まとめ

SUS420J2 表面へ撥水・撥油性を付与することができた。防汚性を付与するためには、水に対する接触角が 150° 以上の超撥水表面でなければならないが、平滑な固体表面における水の接触角の理論上の限界はおおよそ $115\text{--}120^\circ$ である。超撥水表面は、表面エネルギーを低くするだけでは発現できず、金属表面に凹凸を作り、面一液面が多い点で水を接触させる構造を表面へ付与しなければならない⁷⁻⁹⁾。また、カミソリ刃やメスへの適応には皮膜の耐久性評価も必要である。今後、直線摺動式試験機での静摩擦係数・動摩擦係数測定などを行い、加えて、カミソリ刃やメスに処理を施し、切れ味試験などの評価も行う予定である。

【謝 辞】

SUS 基板を御提供頂いたフェザー安全剃刀株式会社および RF-GD-OES 測定を行った株式会社堀場製作所に深謝します。

【参考文献】

- 1) 杉村ら, 表面技術, 62 (2), pp.98-103, 2011
- 2) 高井ら, 表面技術, 55 (12), pp.758-763, 2004
- 3) 大川ら, 工業技術研究所研究報告 第 2 号, pp.27-29, 2014
- 4) A. Raman, et.al, Langmuir, 22 (15), pp.6469-6472, 2006
- 5) 藤田, ダイキン工業 テクニカル資料
- 6) 小林, 色材, 68 (12), pp.735-740, 1995
- 7) 宮下, ネットワークポリマー, 25 (1), pp.34-43, 1995
- 8) 四分, J. Soc. Powder Technol., Japan, 37 (4), pp.260-272, 2000
- 9) 小林ら, 表面科学, 31 (6), pp.276-282, 2010

レーザーマーキングによる多階調画像形成技術に関する研究

田中 等幸、細野 幸太、堀部 喜学*、大竹 嘉幸*、小河 廣茂

A Study on Multi-level Gradation Method for Laser Marking

Tomoyuki Tanaka, Kota Hosono, Hirotaka Horibe, Yoshiyuki Otake and Hiroshige Ogawa

レーザーマーキングは文字や記号等を被加工物に印字する加工技術である。この加工法を利用して金属材料を発色する試みが行われているが、任意の色に発色することは難しく、その用途は文字の黒色印字に限られている。

本研究では、レーザーマーキングにおける産業用途の拡大を目指し、多階調の発色技術を確立する。本稿では、ステンレス鋼を対象として、ナノ秒レーザーによる発色加工の基礎的実験を行った。レーザー加工実験と薄膜干渉モデルによる発色シミュレーションとの比較対比によって加工条件と発色との関係について検討した。その結果、レーザーマーキングによる発色は酸化皮膜の厚さが影響し、その厚さはパルスエネルギーによってコントロールできることを確認した。

1. はじめに

レーザーマーキングとは、材料にレーザー光を照射することで表面に物理的変化（変質、熔融または蒸発など）を発生させ、被加工物に文字や記号等を印字する加工技術である。材料に対する物理的な加工法は、スタンプ、ラベリングまたはプリント印刷と比べて剥がれや消失がない。また、インクや溶剤などの廃棄物による環境負荷がないこと、ランニングコストを必要としないなどの優位性がある。これらの特徴を利用して製品のロット番号の印字、トレーサビリティを目的とする製品コード記録、あるいは伝統工芸品の墨入れの代替技術等多くの産業分野への応用が期待されている。

刃物をはじめとする金属製造業界では、レーザーマーキングを用いた機能性の向上やスタイル、美観を高める製品開発が模索されている。レーザーマーキングを用いて文字やロゴマークの黒色印字は既に実用化されている。しかしながら、任意のカラー色を再現よく発色することは難しい。このため審美的なアピールには欠け、その利用用途は印字に限られている。

そこで本研究では、レーザーマーキングの産業用途の拡大を目指し、マスキングや顔料を用いない多階調の発色加工技術を確立する。具体的には、金属表面への発色プロセスを定量的に解明し、発色が可能な色域について検討する。さらに、発色マーキングの実用化に向け、耐摩耗性や耐腐食性等の検討を行い、付加価値ある金属製品の開発を目標とする。

本稿では、ステンレス鋼をターゲットとして、ナノ秒レーザーによる発色プロセスの基礎実験を行った。レーザー加工実験と発色解析との比較対比によって加工条件と発色との関係について検討したので報告する。

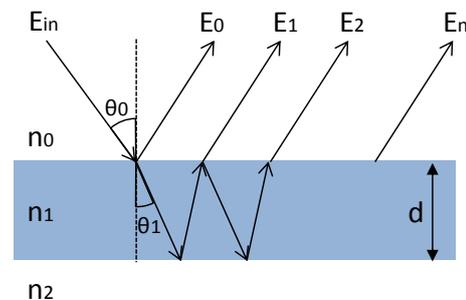


図1 薄膜干渉モデル

2. ステンレス鋼表面の酸化被膜と発色

2. 1 発色現象

金属への着色法は塗料塗布が一般的に利用されているが、散乱や回折など複雑な光学現象を利用した金属の発色方法が知られている。ステンレス鋼を発色させる方法の一つに高温酸化がある¹⁾。ステンレス鋼を高温で酸化すると表面にFe酸化物など酸化層が成長し、不均一な透明の酸化皮膜を形成する。この表面上に形成されたナノ構造の酸化皮膜に光が入射すると、光の干渉現象が起こり、観察者は色を認識することができる。この現象は酸化皮膜による微細な構造によって発色と考えられ構造色と呼ばれている²⁾。構造色は酸化皮膜の厚さに依存し、酸化皮膜の表面による反射光と、素材と酸化皮膜の界面による反射光との光路長差から反射率が最も大きい波長によって決定される。

本研究では、この現象をレーザーマーキングによって実現する。レーザー光をステンレス鋼の表面に集光し、急速に加熱することで酸化皮膜の厚みを精密にコントロールし多階調の発色を試みる。

2. 2 発色モデル

酸化皮膜と発色との関係は、図1に示す薄膜干渉モデルとして説明できる。レーザー光の照射によって高温にさ

* (株) シズテック

表1 供試材の化学成分 %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.07	0.54	0.77	0.03	0.007	8.04	18.08

表2 加工条件

Output wavelength	1064 nm
Beam mode	Uniform distribution
Laser power	13 W
Spot diameter	50 μm
Scanning velocity	20 - 250 mm/s
Focused position	± 0mm

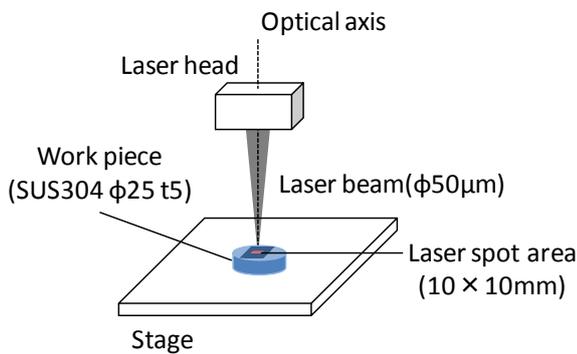


図2 加工実験概略図

らされたステンレス鋼表面は、厚さ d の酸化皮膜が被覆した状態になると仮定する。入射媒質、皮膜、出射媒質の屈折率はそれぞれ、 n_0 、 n_1 、 n_2 とする。なお、皮膜は吸収せず、屈折率の波長分散は考慮しない。酸化皮膜に入射した光は皮膜表面と金属表面で多重反射を繰り返し、これらすべての反射波を足し合わせると反射波 E_r は次の無限級数として表わされる。

$$E_r = E_0 + \sum_{n=1} E_n \quad (1)$$

$$E_0 = r_{0,1} E_{in} \quad (2)$$

ここで、 E_{in} は入射波、 E_0 は酸化皮膜表面での最初の反射波である。屈折率 n_i から n_j への界面での反射係数および透過係数をそれぞれ $r_{i,j}$ 、 $t_{i,j}$ とすると、振幅反射率 r は次式で示される。

$$\begin{aligned} r &\equiv \frac{E_r}{E_{in}} = r_{0,1} + \sum_{n=1} t_{0,1} r_{1,2} (r_{1,0} r_{1,2} e^{i\delta})^{n-1} t_{1,0} e^{i\delta} \\ &= r_{0,1} + \frac{t_{0,1} r_{1,2} t_{1,0} e^{i\delta}}{1 - r_{1,0} r_{1,2} e^{i\delta}} \\ &= \frac{r_{0,1} + r_{1,2} e^{i\delta}}{1 + r_{1,2} r_{0,1} e^{i\delta}} \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、位相差 δ は酸化皮膜を往復するときの位相の遅れで式 (4) として示される。

$$\delta = \frac{4\pi n_1 d \cos \theta_1}{\lambda} \quad (4)$$

式 (3) の振幅反射係数 $r_{i,j}$ は式 (5)、(6) で示すフレネルの公式によって計算され、光のエネルギー反射率は振幅反射率 r の 2 乗によって求められる。

$$r_{i,j} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \quad (5)$$

$$r_{i,j} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j} \quad (6)$$

3. 実験

3. 1 発色加工実験

供試材料はステンレス鋼 SUS304 (φ25mm 厚さ 5mm、表面粗さ $Ra=0.0068\mu\text{m}$) を用いることとし、エタノールで脱脂した。表1に供試材料の化学成分を示す。

図2は加工実験の概略図である。熱源には固体レーザー (波長 1064nm) を用いた。レーザー光の照射角度による影響をなくするため、レーザーヘッドから照射されるレーザービームの光軸上に試料の中心を固定した。加工実験は、矩形領域 (10×10mm) に対して 31.8μm 間隔で一方向かつ1回のみ走査した。その間のレーザー出力は 9.1W、走査速度は 20 - 250mm/s の間で変化させた。また、焦点距離は試料表面とし、13°Cの大気環境下で加工した。表2に加工条件を示す。

3. 2 発色評価法と表面観察

レーザーマーキングの加工領域に対して、分光測色および、形状観察を行った。構造色は客観的に定量評価するため、分光測色計 (KONICA MINOLTA 社、CM-3600d) を用いた。拡散照明方式 (D65 標準光源、入射光角度 8°、視野 2°、測定径 φ8mm) の条件で可視領域 (波長 360nm-730nm、10nm 間隔) の反射率を測定し、 $L^*a^*b^*$ 表色系によって評価した。 a^* 、 b^* は色相の評価値である。 a^* 軸、 b^* 軸はマイナスからプラスに変化するのに従って、色相はそれぞれ緑色から赤色へ、青色から黄色へと変化することを意味する。また、原点に近いほど彩度が低いと評価する。なお、 L^* は明るさの評価値であるため、今回は評価の対象としない。加工表面の形状測定はレーザー顕微鏡 (KEYENCE 社、VK9700/9710) を用いた。

4. 結果及び考察

4. 1 発色評価と表面観察

図3はレーザーの走査速度を変化させたときの加工結果の一例である。走査速度が速くなるにつれて順に青紫系、赤橙系そして黄緑系に変化する様子が分かる。また、走査速度 160 mm/s までの試料は、目視する方向によって色調は異ならないが、鮮やかさが変化した。一方、走査速度 160 mm/s を超える試料は、目視する方向によって著しく色調が変化した。

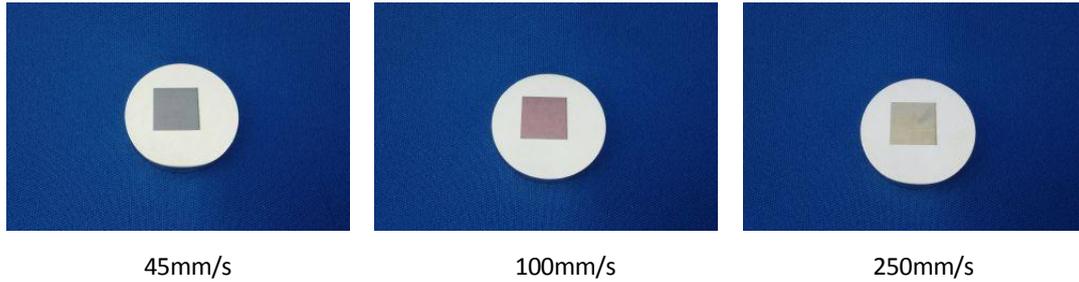


図3 加工結果

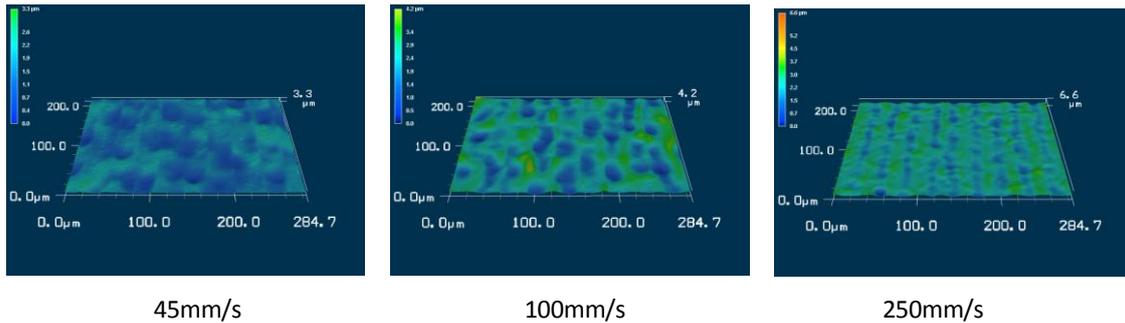


図4 表面形状

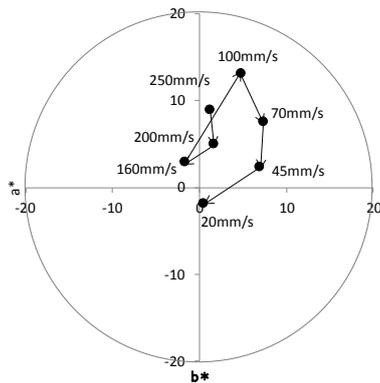


図5 加工試料の色相

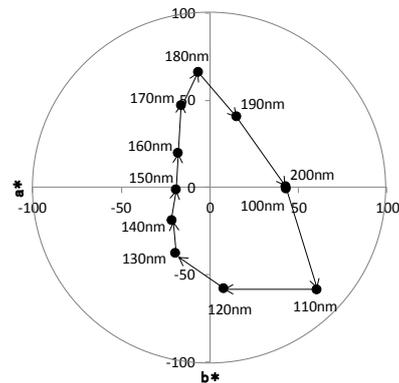


図6 発色シミュレーション

図4は、図3で示した試料の表面形状の一部をレーザー顕微鏡によって測定した画像である。いずれの走査速度においても、レーザー光の導波路上には溶融による溝が形成されており、加工領域に周期的な凹凸形状が観察された。走査速度の違いによる溝の深さはいずれも1.5 μ m程度であった。走査速度が遅い条件では光導波路周辺の起伏は滑らかであった。一方、走査速度が速い条件では、レーザー光が照射されない素地が次第に出現するとともに、光導波路周辺の起伏が粗れる傾向にあった。この結果から、走査速度によって試料表面の溶融の程度が変化し、異なる凹凸形状が形成すると考えられる。

図5は、試料の色相をa*-b*平面にプロットした色相分布である。色相は走査速度が速くなるにつれ右回転方

向かつ渦状に変化した。いずれの加工条件においても高い彩度は得られず、淡い色を呈していた。これは走査回数(1回)が形成する酸化皮膜の厚みの限界と考えられる。

4. 2 レーザマーキングによる発色プロセス

2. 2節で示した発色モデルによって計算される色相変化と加工実験によって得られた色相変化を比較対比し、酸化皮膜と発色との関係を考察する。

ステンレス鋼の酸化皮膜は数十nmと極めて薄いのが、発色に至る酸化皮膜の厚みは数百nm程度と考えられている³⁾。そこで、ステンレス鋼の表層にFeO(屈折率n=2.5)の酸化皮膜が形成すると仮定し、膜厚100-200nmに変化させたときの色相をシミュレーションした。図6は波長

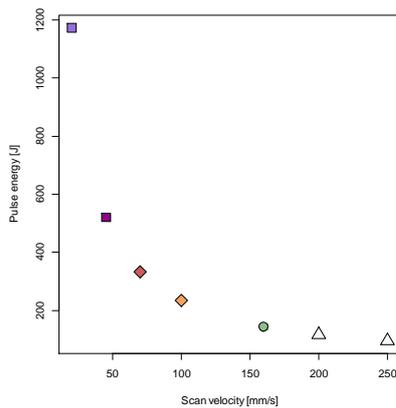


図7 パルスエネルギー-走査速度の関係

範囲 380nm - 780nm、5nm 間隔でエネルギー反射率を計算し、膜厚ごとに色相をプロットした散布図である。厚さ 10nm の違いで大きく色相が異なった。したがって、広範な構造色を得るためには、加工条件を含む緻密な加工制御によって皮膜を形成させる必要がある。膜厚が厚くなるに従って黄緑系、赤橙系、青紫系の順に変化した。この色相の推移は、図3のレーザ走査速度が遅くなる変化の向きと一致し、走査速度と皮膜の厚さとの関係が示唆された。しかしながら、加工結果の色相とシミュレーション結果の色相は大きく異なる。菊池ら⁴⁾はステンレス鋼の高温特性として、酸化皮膜の構造はCr量によって異なり、Fe酸化層に加えてCr酸化層も形成されると報告している。本実験における発色シミュレーションでは1層の薄膜モデルを仮定しており、実際の構造とは異なることが要因として考えられる。また、発色モデルでは皮膜の厚さは一定として計算しているが、皮膜の厚さはレーザ光の照射ポイントによって異なると考えられる。その他、凹凸形状による拡散反射も色相に影響を及ぼしていると考えられる。

図7はパルスエネルギーと走査速度の関係における構造色(目視評価)をプロットした図である。走査速度が速くなるに従ってパルスエネルギーは指数的に低下し、

青紫系(四角形)、赤橙系(菱形)、黄緑系(丸形)、識別不可(三角形)の順に変化した。したがって、高エネルギーであるほど試料表面の熔融領域が広がるとともに酸化皮膜も徐々に成長し、膜厚の厚さに応じた構造色に変化すると考えられる。一方、レーザ走査速度が速い場合は、酸化皮膜が成長するための十分なエネルギーが得られず、発色しにくくなると考えられる。レーザマーキングによる発色は、高温酸化現象と同様に酸化皮膜の厚さが影響し、その膜厚はパルスエネルギーによってコントロールできることが確認された。

実験では、発色モデルと加工結果との比較対比からレーザパルスエネルギーによる色相と酸化皮膜との関係を推定した。しかしながら、酸化皮膜の構造、正確な厚さ、および発色モデルの妥当性については十分に検証できていない。また、レーザが走査した周期的な凹凸形状が色相に与える影響についても検証する必要がある。今後、レーザマーキングによる多段階の発色加工技術を確立するために、発色可能な色域について検討したい。

5. まとめ

本研究では、レーザマーキングによる多段階の発色技術の確立を目指し、まずはステンレス鋼をターゲットとしてナノ秒レーザを用いた発色マーキングの加工実験、および発色モデルを用いた解析を行った。加工実験による分光測色結果と発色モデルによる解析結果との比較対比から、レーザマーキングによる発色は酸化皮膜の厚さが影響し、その厚さはパルスエネルギーによってコントロールできることを確認した。

【参考文献】

- 1) A Pérez del Pino ら, Sur. Coat. Technol, No.1, Vol.187, pp.106-112, 2004
- 2) 木下, 生物ナノフォトニクス-構造色入門-, 朝倉書店, 2010
- 3) 品田ら, 日本機械学会論文集(C論), No.722, Vol.72, pp.336-341, 2006
- 4) 菊池正夫, Sanyo Technical Report No.1, vol.21, pp.11-27, 2014

水栓設備によるエネルギーハーベスティング技術に関する研究（第1報）

西嶋 隆、田中 泰斗

Energy-harvesting technology for water supply products (I)

Takashi Nishijima, Taito Tanaka

岐阜県の岐阜地区、中濃地区は全国的な水栓バルブの産地であり、平成24年の当県の給排水用バルブ・コックの出荷額は全国のおよそ34.4%の規模である。地場産業である水栓バルブ業界の発展には、より付加価値の高い製品や省エネ機能を付加した環境配慮型の製品開発が望まれている。本研究では、電子デバイスの超低消費電力化や発電デバイス技術に伴い発展してきた「エネルギーハーベスティング（以下EH）技術」（身の回りの環境に分散する未利用エネルギーを電気エネルギーに変換して利用する技術）の動向に注目し、EH技術を導入した付加価値の高い水栓関連の製品の提案を試みる。

1. はじめに

岐阜県の水栓バルブ産業は岐阜地区、中濃地区の代表的な地場産業である。平成24年における「給排水用バルブ・コック」の全国の出荷額は128,851百万円に対し、うち当県における出荷額は44,326百万円であり、全国のおよそ34.4%の規模¹⁾を占める。当県における水栓バルブの生産は数量で全国1位（シェア28.7%）であり、地域を代表する製造業となっている。同業界の発展には、製品の素材や機能面における品質を高く維持しつつ、更なる高付加価値化が望まれている。

当県内に事業所を有する水栓バルブメーカーにおいても、センサや電磁弁を用いた自動吐水機能を付加した製品や、水流による自己発電機能を用いて電磁弁を駆動する、環境配慮志向の製品も開発されている²⁾。今後も更に、新たな価値を創造する製品開発が必要と考えられる。

近年注目されているEH技術は、環境にある未利用の振動、熱、光、電波等のエネルギーを回収し、 $\mu\text{W}\sim\text{mW}$ 程度の小規模な電気エネルギーに変換して利用する技術である。この技術は、近年の電子デバイスの超低消費電力化や、多様な発電素子の技術的な発展により可能となってきた。今後の「モノのインターネット」時代においては、各種センサ類がインターネットに繋がり、ビッグデータとして処理・活用されることが予想されており、EH技術は多数のセンサ端末の電力として、ボタン電池に代わる電源として期待されている。

現在、EH技術の適用分野として、BEMS（ビルエネルギーマネジメントシステム）やHEMS（家庭用エネルギーマネジメントシステム）における、無線センサネットワーク用の自立電源としての活用がある。これは家庭・業務部門における消費エネルギーの増加³⁾を抑制するための適用である。その他にも、老朽化する社会インフラのモニタ用センサ電源としての適用等、社会的課題に対する適用が進められている⁴⁾。今後もEH技術が有

効となる用途開拓や、EH技術のビジネスモデルが確立され、市場が発展していくと期待されている。

本研究では、当県の地場産業である水栓バルブ業界の扱う水栓設備から、水流や熱の未利用エネルギーが得られる点に着目し、前述のような将来的発展が期待されるEH技術を導入した付加価値のある水栓設備の提案を試みる。

2. EH技術動向

2.1 主な研究動向

以下に近年のEH技術関連の主な研究動向を記す。2007年に（独）科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センターにより開催された「希薄分散エネルギー活用技術に関する科学技術未来戦略ワークショップ」において、大学、研究機関、企業で個々に進められている当該技術分野の研究を一つの研究分野として位置づけ、基盤技術の集積や情報交換が効果的であると取りまとめられた⁵⁾。

2006年から2009年にかけては、（独）新エネルギー産業技術総合開発機構とJR東日本コンサルタンツが東京駅の改札口やサッカースタジアムの観客席に発電床を設け実証実験を実施した。この社会実験では圧電素子による発電素子の実利用における耐久性や発電量の知見が得られ、 25m^2 の発電床により1日当り940kW秒の発電、5週間の利用後に95%の発電量を維持する耐久性が得られている⁶⁾。

2010年には、（株）NTTデータ経営研究所を事務局とする国内企業数十社によるエネルギーハーベスティングコンソーシアムが設立され、関係企業の情報共有、共同活動の推進等を行うプラットフォームとして活動しており、市場創造や国際標準化等に向けた取り組みが期待されている⁷⁾。

2011年度～2014年度には、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構と技術研究組合NMEMS技術研究機構

によって、「社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト（グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト;H24年度まで）」が実施され、センサデバイスの無線通信機能、自立電源機能、超低消費電力機能を搭載する革新的センサの開発やそれらを用いた環境計測、エネルギー消費量の見える化を行う研究開発が実施された⁸⁾。

他にも東京大学、オムロン（株）、旭硝子（株）等の産学連携で、「環境発電アライアンス」を設立し、エレクトレット振動発電機の啓蒙普及に取り組んでいる⁹⁾。

EUにおいても、ドイツ、デンマーク、スペイン、フィンランド、オーストリアの研究機関、大学、企業によるコンソーシアムがファンディングする NanoCaTe (Nano-carbons for versatile power supply modules) プロジェクトが 2013 年から 2017 年まで実施され、室温から 100° C で動作するナノカーボン等を用いた熱電発電デバイスの研究、無線通信、センサインタフェース関連の研究が実施されている。学際的には PowerMEMS 国際会議が、国内外で開催され、EH 技術に関する研究も活発になされている。

米国においても、MIT において圧電素子を用いた MEMS デバイスの開発研究¹¹⁾ やジョージア工科大による水圧リップルを利用した圧電素子による発電¹²⁾ 等、数多くの研究が報告されている。

このように、EH 技術を対象とした研究開発が近年盛んに行われている。特にセンサネットワーク用途への応用が有望視されており、省エネルギー分野、社会インフラ維持管理分野、介護看護分野等における社会的課題に対応することが期待されている。

2. 2 発電デバイスの動向

EH 技術で用いられる主なエネルギー源は、振動・水流、熱（温度差）、光、電磁波であり、エネルギー変換デバイスとしては、圧電素子、マグネットコイル、磁歪素子、エレクトレット、ペルチェ素子、太陽電池、レクテナが代表的である。

圧電素子は、PZT のセラミックス系のもの、PVDF を用いた柔軟な素材のもの、MFC (Micro Fiber Composite) 等が開発されてきており、太陽電池は従来のシリコン単結晶から、色素増感型、薄膜 GaAs 等柔軟に変換効率の高い太陽電池が開発されてきている。

磁歪素子では、米国海軍研究所 (Naval Research Laboratory) で開発された鉄ガリウム合金 (Galfenol) が注目されており、機械特性や加工性の良さ、磁歪定数の高さから、エネルギーハーベスタとしての研究がなされている¹³⁾。

熱を利用した発電デバイスとしては、小規模なものはゼーベック効果を用いたものが代表的であり、その他、スピンゼーベック効果によるもの、有機熱電材料¹⁴⁾ が

開発されている。熱電発電デバイスの製品例としては、(株) KELK 社¹⁵⁾、ヤマハ (株)¹⁶⁾、Micropelt GmbH¹⁷⁾ 製のものなどが知られている。

2. 3 周辺デバイスの動向

EH 技術は、発電素子のみならず周辺電子デバイスの低消費電力化により進展してきた。現在では、EH 用途をターゲットとした DC-DC コンバータ IC が海外メーカー (Linier Technology 社、Texas Instruments 社、Analog Devices 社、STMicroelectronics 社等) から、製品化されるようになった。入力電圧が 1V 未満で動作するものや、最大電力を引き出すための最適動作を自動調整する MPPT (Maximum Power Point Tracking) 機能を有するもの、二次電池に蓄電する機能を有するものも製品化されてきている。

マイクロコンピュータにおいても、動作電流が数十～数百 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 、待機電流が $1\mu\text{A}$ 以下の低消費電力型の製品が販売されており、オペアンプ、コンパレータ、基準電圧 IC においても $1\mu\text{A}$ 以下で動作可能な、低消費電力の電子デバイスが製品化されている¹⁸⁾。

EH 技術による自立電源で動作する無線デバイスとして、電波法で定められた技術基準適合証明のある、EnOcean 無線通信規格や ZigBee 無線通信規格による製品も市販されてきており、これらを利用したセンサネットワークを構築する環境が整ってきている。

3. 水栓設備への適用

本課題の対象とする水栓設備には、水流の運動エネルギーや温水の熱エネルギーがあるため、EH 技術を導入し、より付加価値の高い製品を提供可能である。

その実例として、水流による羽根車から発電し、電磁弁の動力とする製品が知られている。考案レベルではあるが、水流に発生するカルマン渦による振動を用いた発電¹⁹⁾のほか、水圧リップルにより積層型圧電素子を加振して発電するハーベスタの研究²⁰⁾も報告されている。

本研究では、現時点で一般的に入手可能なデバイスを利用した軽便な構造の発電装置を試作することを目指し、温水と常温水の温度差を利用した温度差発電をターゲットとした。ペルチェ素子のゼーベック効果による温度差発電を浴室や洗面化粧台に導入する考案として、INAX 社の特許公開²¹⁾があるが未審査請求によるみなし取下となっている。

3. 1 開発提案

本報では、一般家庭に使われる混合栓（お湯と水を混ぜて温水を出す製品）に「熱水吐出警告機能」を付加する製品を提案し、その可能性を確認する。混合栓に流入する熱水側の温度は一般に約 60°C であり、吐水によるやけどの可能性がある。この点については (社) 日本バルブ工業会において注意喚起が行われている²²⁾。

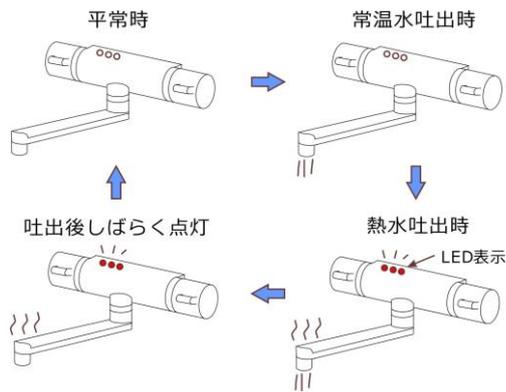


図1 熱水吐出警告表示機能の動作イメージ

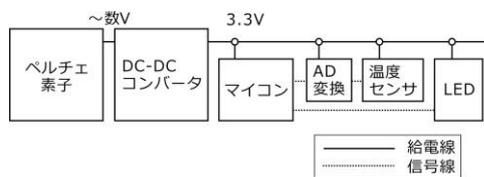


図2 構成図

表1 構成部品

デバイス	型式	メーカー
ペルチェ素子	TEC1-12706	-
DC-DCコンバータ	TPS61200	TI
マイコン	LPC810	NXP
AD変換IC	PCF8591	NXP
温度センサ	S-8120C	SII
LED	OSWT3166B	OptoSupply

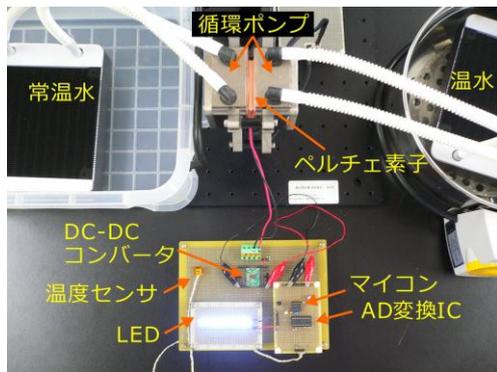


図3 実験の様子

開発案としては、ペルチェ素子を混合栓内に導入し、熱水側と常温水の温度差により発電し、マイコンやセンサを駆動し、吐出水温の計測と水温に応じたLEDの点滅表示を行う。図1に提案する「熱水吐出警告表示機能」の動作イメージを示す。

3.2 構成

本提案を実現するための発電装置の構成図を図2に示す。表1に構成部品を示す。LEDは定電流ダイオードを付加し、10個を並列接続しトランジスタでスイッチングした。

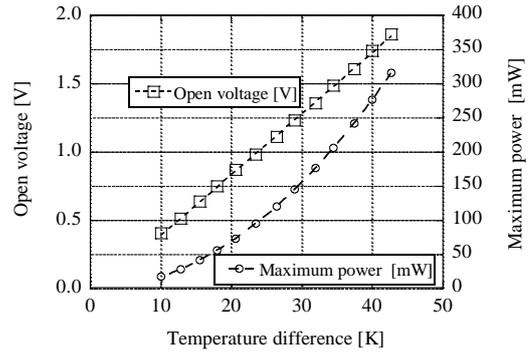


図4 温度差と開放電圧の関係

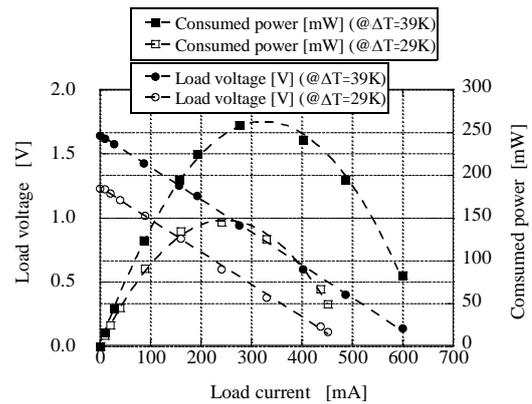


図5 負荷電流、負荷電圧、消費エネルギーの関係 (温度差29K時と39K時)

4. 実験

図3にペルチェ素子に温度差を与えた実験の様子を示す。高温側の温水と低温側の常温水を市販のCPU水冷クーラー(循環ポンプ)によって循環させ、ペルチェ素子の各面を加熱・冷却し温度差を与えた。実験にはペルチェ素子単体(1枚)を用いた。

一般的な混合栓の高温側は約60℃であるため、常温水との温度差は年間を通して、少なくとも最大35K程度は得られると仮定する。

4.1 ペルチェ素子の特性

図4左縦軸は使用したペルチェ素子の温度差と開放電圧である。ここで表した温度差はペルチェ素子表面の温度差ではなく水温の温度差である。結果、温度差 $\Delta T[K]$ と開放電圧 $V_{OPEN}[V]$ は、およそ $V_{OPEN} = 0.04\Delta T$ の関係が得られた。

次にペルチェ素子に負荷(可変抵抗)を接続し、負荷を変えながら、負荷電流 I_L と負荷電圧 V_L を測定し、消費電力を求めた。温度差は29Kと39Kの条件とした。

結果を図5に示す。負荷電圧と負荷電流の関係は線形となり、消費電力が最大の時の負荷電圧は、開放電圧(負荷電流が0の時)の1/2の時となる。

以上を考慮し、図4の温度差と開放電圧の関係と図5の結果から、最大消費電力 P_{MAX} は温度差 ΔT より概算でき、 $P_{MAX} = 173 \times 10^{-6} \Delta T^2 [W]$ となる。この関係を図4の右縦軸に示す。

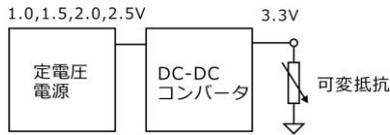


図6 DC-DC コンバータの効率測定時の構成

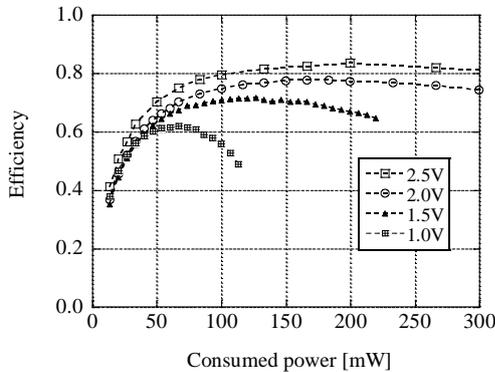


図7 負荷の消費電力と効率の関係

4. 2 DC-DC コンバータの特性

図6に示すように、DC-DC コンバータと負荷を模擬した可変抵抗を用いて、負荷を変化させた時の負荷の消費電力と DC-DC コンバータの効率の関係を実測した。なお DC-DC コンバータの一次側電圧は定電圧源を用いて 1.0、1.5、2.0、2.5V の条件とした。

結果を図7に示す。同図より、DC-DC コンバータの入力電圧が高い程、広い負荷範囲において変換効率が高く、消費電力が少ない領域において効率は低くなる。

4. 3 動作確認

提案する熱水吐出警告は、熱水の温度に応じて LED の点滅速度を変化させる方法とした。また、DC-DC コンバータの負荷となるマイコン・AD 変換 IC・LED 等で構成する負荷の総消費電力は LED のダイナミック点灯等で変動し、最大で約 36mW であった。

試作した回路では、低温側と高温側の温度差が約 17K 以上で動作することを確認した。

この動作状態は DC-DC コンバータの効率が低い状態であるため、今後は発電素子の出力電圧を上昇させることや、温度差が大きい時に余剰電力を蓄電する機能を追加することが有効と考えられる。

5. まとめ

本研究では、岐阜県の地場産業である水栓バルブ製品の 高付加価値化として、近年の EH 技術動向に着目し、入手容易なペルチェ素子や EH 関連の電子デバイスを用いて、混合栓の「熱水吐出警告機能」を提案した。

基礎的な実験として、混合栓の内部の温度領域における、ペルチェ素子の出力特性や DC-DC コンバータの効率を調べ、試作回路を試作し動作を確認した。

今後は EH 関連技術の動向を調査し、水栓バルブ関連

企業との連携を図り、新たな応用についても検討したい。

【参考文献】

- 1) 平成 24 年工業統計表「品目編」データ,経済産業省
- 2) 三栄水栓,自動水栓(発電仕様) 品番 EY506HE-13
- 3) エネルギー白書 2014,経済産業省資源エネルギー庁
- 4) ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「スマートなインフラ維持管理に向けた ICT 基盤の確立」,総務省
- 5) 希薄分散エネルギー活用技術に関する科学技術未来ワークショップ報告書, JST 研究開発センター
- 6) NEDO 成果報告書,「エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー使用合理化技術実用化開発/ 駅・建物等における省エネルギーのためのエネルギー変換技術の研究開発」
- 7) エネルギーハーベスティングコンソーシアムホームページ, <http://www.keieiken.co.jp/ehc/index.html>
- 8) NEDO 社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト (平成 23 年度～平成 26 年度) http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100021.html
- 9) 環境発電アライアンスホームページ, <http://electret.jp/index-j.html>
- 10) NanoCaTe Project, <http://nanocate.eu/>
- 11) Hajati, Arman, and Sang-Gook Kim, Ultra-wide Bandwidth Piezoelectric Energy Harvesting, American Institute of Physics, Applied Physics Letters 99.8, 2011
- 12) Kenneth A. Cunefare, Hydraulic Pressure Energy Harvesting for Wireless Sensing, Control design, 2014
- 13) Behrooz Rezaeealam, Toshiyuki Ueno and Sotoshi Yamada, Finite Element Analysis of Galfenol Unimorph Vibration Energy Harvester Magnetics, IEEE Transactions on, 48 (11) : 3977-3980 2012-10-18
- 14) (独) 産業総合技術研究所ホームページ, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120831/pr20120831.html
- 15) (株) KELK ホームページ, <http://www.kelk.co.jp/Company/outline.html>
- 16) ヤマハ (株) ホームページ, http://www.yamaha.co.jp/product/thermoelectric_cooler/
- 17) Micropelt 社ホームページ, <http://www.micropelt.Com/index.php>
- 18) トランジスタ技術 2 月号 (2015)
- 19) 特許第 4923245 号,特開 2001-157433
- 20) Kenneth A. Cunefare, Hydraulic Pressure Energy Harvesting for Wireless Sensing, Control Design, 2014
- 21) 特開 2003-070659, 特開 2003-102638
- 22) (社) 日本バルブ工業会, http://www.j-valve.or.jp/suisen/seihin_anzen/yakedo.pdf

鋳物製品の内部欠陥の低減に関する研究（第2報）

大平 武俊、水谷 予志生、足立 隆浩

Study on Reduction of Internal Defects in Castings (II)

Taketoshi Ohira, Yoshiki Mizutani, Takahiro Adachi

鋳造時に砂型や中子から発生するガスに起因する内部欠陥を低減するために、ガス発生量の少ない粘結剤の開発が望まれている。粘結剤から発生するガスの種類・量を分析するための瞬間熱分解法の検討及びその分析を行った。その結果、管状炉を用いたガス置換雰囲気下での瞬間熱分解法により、粘結剤からの発生ガスの分析手法を確立した。また、瞬間熱分解法は、従来の昇温熱分解法と比べ、発生ガスの種類や量が大きく異なっており、注湯時のガス発生状況を解析する手段として有益と考えられる。

1. はじめに

鋳物はその製造過程で、“鋳巣（いす）”とよばれる内部欠陥（鋳物内部の気孔）が発生し、材料強度の低下や破損等に繋がる。また、機械加工後に内部に隠れた鋳巣が表面に現れることで外観不良となる等、鋳巣の発生は鋳物業界で長年の大きな課題となっている。この製造過程において、熔融した金属を流し込むための砂型や中空部を作るための中子は、砂を樹脂（粘結剤）で固めてあるため、高温の熔融金属からの熱伝導による加熱で樹脂が熱分解し、大量のガスが発生することで鋳物の内部に鋳巣を発生させる原因の一つとなっている。本研究では、この砂型や中子から発生するガスに起因する内部欠陥の低減のために、粘結剤からのガスの発生特性について検討する。

昨年度は、発生ガスの分析方法の確立と熱分析装置を用いた昇温熱分解法による発生ガスの分析を行った¹⁾。しかし、実際の注湯時には、砂型および中子は高温の溶湯との接触や輻射熱により瞬時的に加熱されるため、昨年度行った昇温熱分解法では実際のガス発生状況を再現していないと考えられる。そのため、本年度は管状炉を用いて瞬間的に熱分解する機構を考案し、瞬間熱分解法による発生ガスの分析手法の確立、およびそのガス分析を行ったので報告する。

2. 瞬間熱分解法の確立

2. 1 瞬間熱分解装置

瞬間熱分解装置の写真を図1に示した。両端にフランジ（株）ヒートテック製 SNW30SW-40-304）を取り付けた炉心管（株）ニッカー HB チューブ 外径 30mm 内径 24mm 長さ 600mm）を、管状炉（株）東洋製作所製 FUT532TB）にて加熱する。フランジの導入側変換ピース（2穴）（株）ヒートテック製 SNW40-4-2-316）の一方を雰囲気ガスの導入口、もう一方をサンプル導入口とした。サンプル導入口には石英管（外径 8mm 内径 6mm 長さ 600mm）を接続し、端はユニオン継手で密閉した。出口側変換ピース（1穴）

（株）ヒートテック製 SNW40-4-1-316）の排出口には PTFE 三方コックを接続したアルミナ製保護管（株）ニッカー製 SSA-S 保護管 外径 6mm 内径 4mm 長さ 300 mm）を炉心管出口側より 200mm 中心部に向けて挿入した。この三方コックには、一方にガス採取用の捕集袋¹⁾または捕集管¹⁾を、もう一方にはガス置換用に真空ポンプ（アルバック機工（株）製 DAP-6D）を接続した。ガス採取に際しては、マスフローコントローラー（コフロク（株）製 FLOW COMPO FCC-3000-G1）を用いることで流量制御を可能としている。

サンプルを高温部に導入するためのサンプル導入管は、先端を加工したアルミナ製保護管（株）ニッカー製 SSA-S 保護管 外径 5mm 内径 3mm 長さ 400mm）を用い、その保護管末端には鉄製のネジを無機接着剤で接着し、ネオジウム磁石（φ5×15mm）を取り付けた。

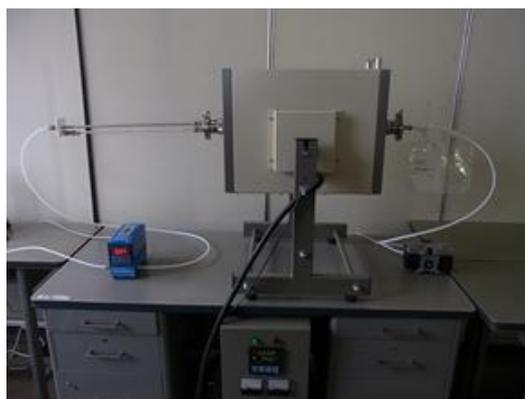


図1 瞬間熱分解装置全景

2. 2 試料導入方法

次の手法により試料導入方法とした。

粉末状のサンプルを入れたサンプル導入管を飛散防止のためセラミック繊維（イライト工業（株）製 イケール 1400バルク）で覆い、サンプル導入管の先端を炉心管側にして導入石英管に挿入し、石英管末端を密閉する。この時、

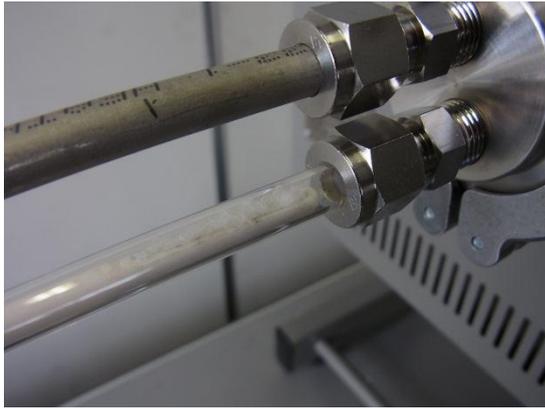


図2 サンプル導入管セット状況

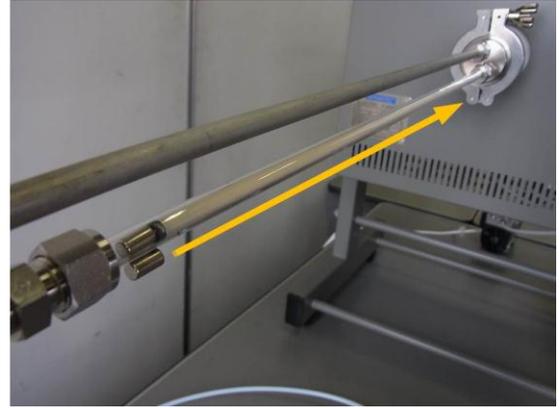


図3 サンプル導入管の導入方法

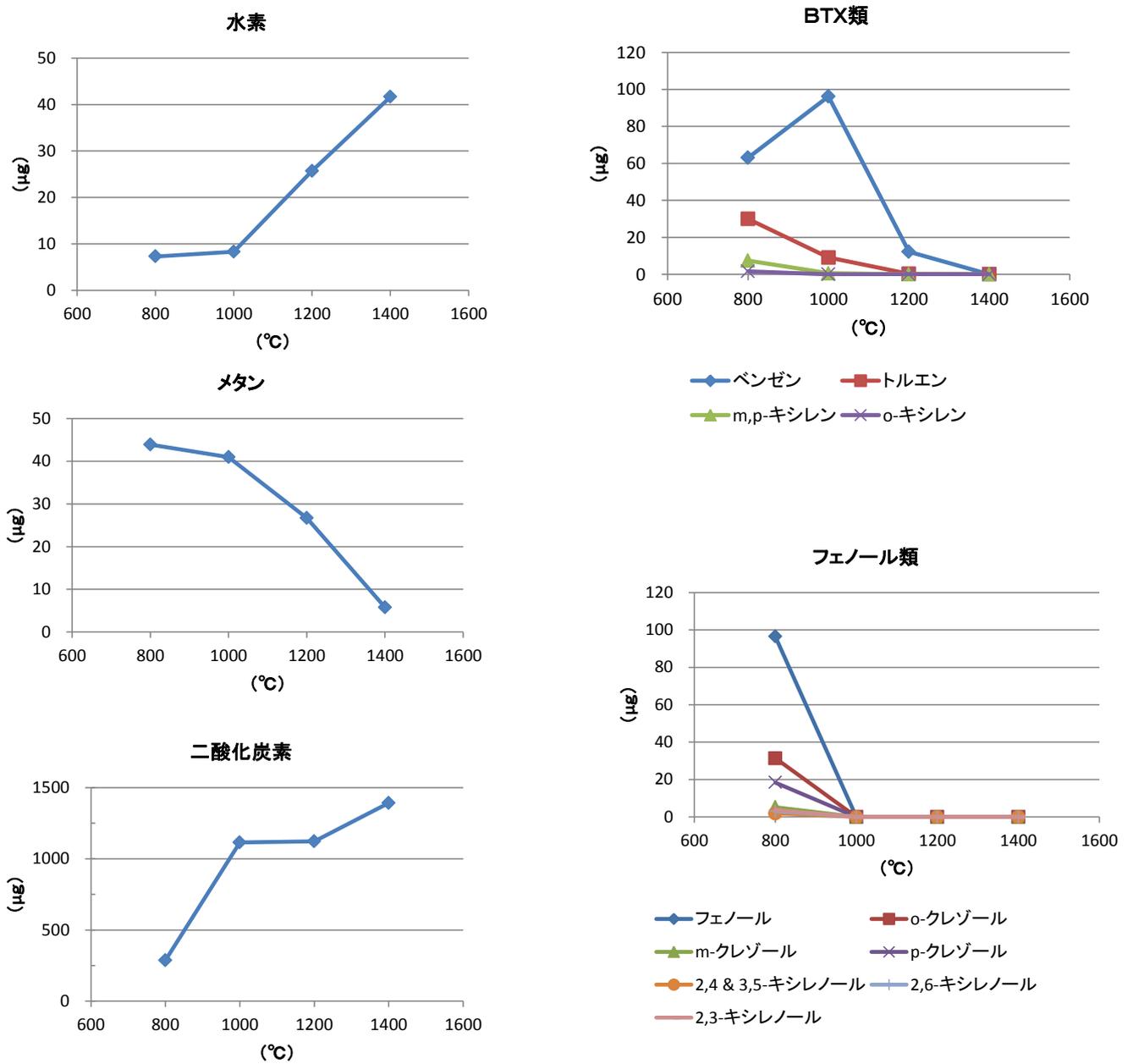


図4 瞬間熱分解温度における発生質量

サンプル部は炉心管の導入口より外側になる位置にする(図2)。管状炉中心が所定の温度になった後、導入石英管の外側から別のネオジウム磁石を用いて、内部のサンプル導入管のネオジウム磁石を磁力で動かし、サンプルが管状炉中心にくるよう瞬時に移動させ(図3)、瞬間加熱を可能としている。

2.3 瞬間熱分解方法

供試品として、コーテッドサンド(CS-B¹) 70mg を用いた。系内をヘリウムガス¹) で置換後、ヘリウムガス流量を 600 ml/min とし、三方コックで流路を切り替えて採取開始し、10秒後にサンプルを炉心管中央に導入して、70秒後に採取終了とした。管状炉の設定温度は、800℃、1000℃、1200℃、1400℃とした。

2.4 分析方法

瞬間熱分解法の検証とガス発生量の概要を把握するため、昨年度に行った昇温熱分解法にて発生量の多かった水素、二酸化炭素、メタン、フェノール類、BTX類の発生ガスについて捕集、分析を行った。また、捕集方法および分析方法は前報¹) のとおりとした。

3. 結果及び考察

3.1 瞬間熱分解法

水素、メタン、二酸化炭素、BTX類、フェノール類の各瞬間熱分解温度における発生質量を図4に示す。

それぞれの化合物を炉内温度ごとにみると、水素では、800℃、1000℃では 10μg 程度と少なく、1200℃、1400℃

と高温になるにつれて発生質量が増加した。メタンは、800℃、1000℃では 40μg 程度と多く、1200℃、1400℃と高温になるにつれて発生質量が減少した。二酸化炭素は、800℃では、300μg 程度と他の化合物に比べ多く、1000℃、1200℃、1400℃においては 1000μg 以上と増加した。BTX類ではベンゼンが最も多く、次いでトルエンであり、m,p-キシレン、o-キシレン、スチレンはやや少なかった。また、ベンゼンは 800℃では 60μg 程度であったが、1000℃では 100μg 程度と減少せず、1200℃、1400℃と温度が高くなるにつれ減少していた。これに対し、トルエン、キシレン類は、800℃から温度が高くなるにつれ減少している。これは 800℃でベンゼンとトルエンに分解している割合に対し、1000℃ではメチル基のないベンゼンへの分解がやや優位になっているためと考えられる。フェノール類は 800℃で検出されたが、1000℃以上では不検出であった。また、800℃でフェノールが最も多く、次いでクレゾール類、キシレノール類であった。

発生ガスの種類別質量を図5に、発生ガスの種類別物質質量を図6に示した。温度ごとの発生総質量は、800℃では 600μg 程度であったが、1000℃、1200℃、1400℃では 1200~1400μg 程度と倍増していた。800℃では、フェノール類が 160μg 程度と全体の 1/4 を占めていたが、1000℃以上ではほとんど発生していなかった。BTX類は、800℃、1000℃で 100μg 程度で、1200℃、1400℃では減少した。二酸化炭素は、800℃では全体の 1/2 を占めていたが、1000℃、1200℃、1400℃では、全体の 8割以上を占めていた。水素、メタンは質量としては合わせても全体の 1/10 程度と少なかった。

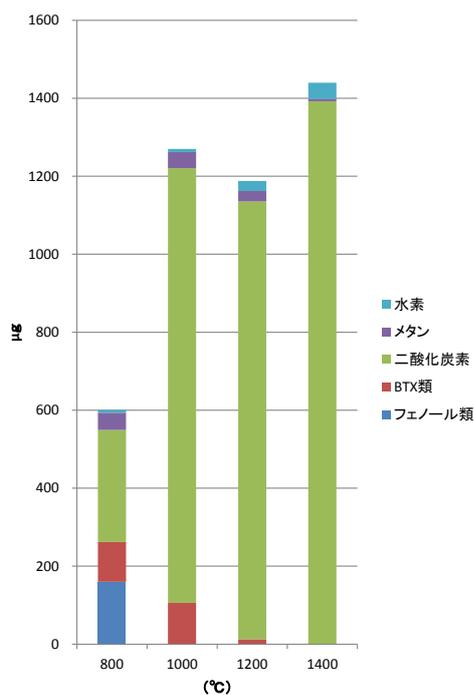


図5 発生ガスの種類別質量

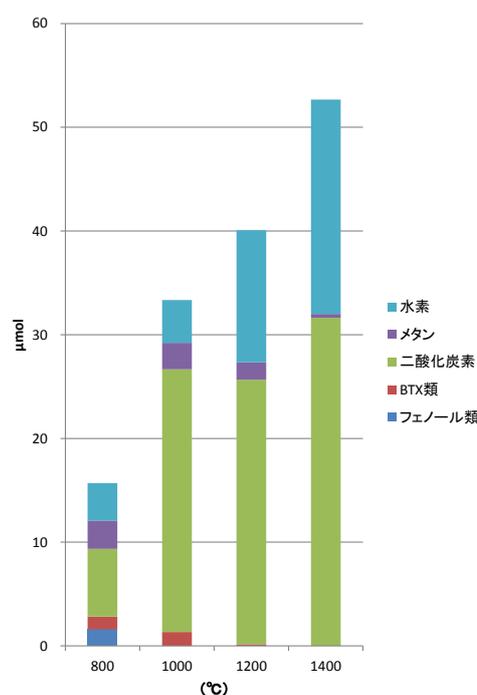


図6 発生ガスの種類別物質質量

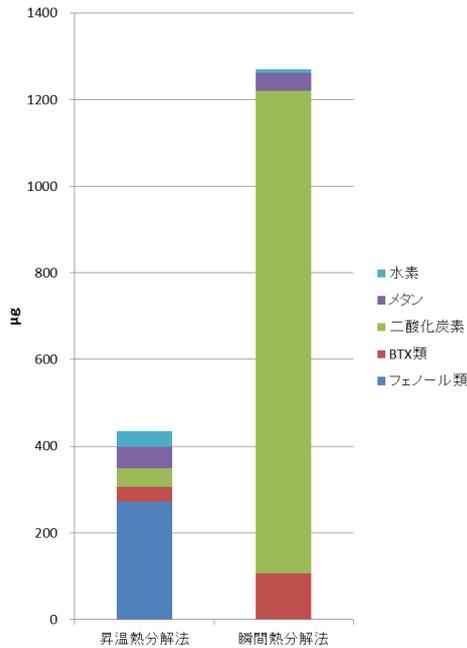


図7 分解法比較 (質量)

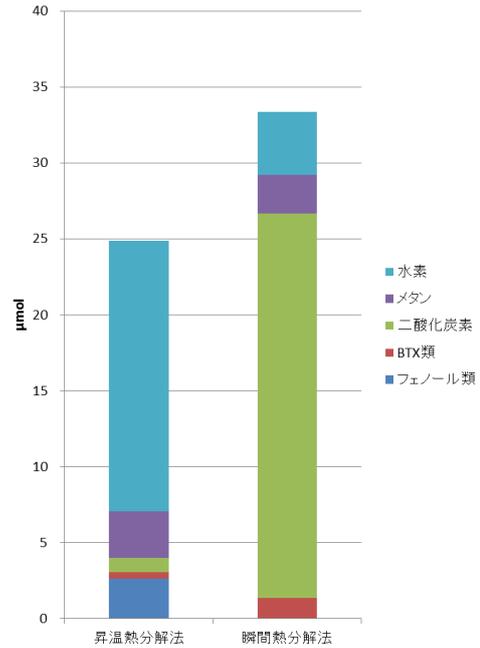


図8 分解法比較 (物質質量)

発生物質量では、800℃から 1400℃へと温度が高くなるにつれて、徐々に増加していた。その主な増加ガスは、800℃から 1000℃では、二酸化炭素であり、1000℃から 1200℃、及び 1200℃から 1400℃では水素であった。物質量の比は気体の体積比と同等であるので、分解温度が高くなるにつれて体積が増加していることがわかる。

これらは、分解温度として 800℃では低温のために高級炭化水素化合物までの分解が多く、1000℃では高温のため低級炭化水素・二酸化炭素への分解が進み、さらに高温の 1200℃以上では水素までの分解が進んだためと考えられる。

3. 2 昇温熱分解法と瞬間熱分解法の比較

前報での昇温熱分解法による室温～1000℃までと、今回の瞬間熱分解法 (1000℃) の主な発生ガスの比較を図7、図8に示した。

図7の発生ガスの質量については、フェノール類が昇温熱分解法で多くを占めているが、瞬間熱分解法では検出されていない。これに対し、BTX類は、同じ芳香族類でありながら昇温熱分解法より瞬間熱分解法の方が3倍程度検出された。二酸化炭素は、昇温熱分解法では僅かであるが、瞬間熱分解法では発生質量の約90%を占めていた。メタンは、昇温熱分解法、瞬間熱分解法とも同程度であった。総発生質量は、瞬間熱分解法の方が昇温熱分解法に比べ約3倍であった。

図8の発生ガスの物質質量については、水素が昇温熱分解法で多くを占めているが、瞬間熱分解法では全体の1/8程度しか占めていない。二酸化炭素は、昇温熱分解法では僅かであったが、瞬間熱分解法では約3/4を占めていた。発生物質量の合計は、瞬間熱分解法の方が昇温熱分

解法に比べ3割程度多かった。

昇温熱分解法では、徐々に加熱されることから、中温域での分解が進み、高分子のモノマー単位であるフェノール類への分解が優位になるのに対し、瞬間熱分解法では瞬間的に高温にさらされるため、フェノールよりも小さな分子に分解されることが優位になるためと考えられる。また、昇温熱分解法と瞬間熱分解法の質量合計に大きな差があることは、昇温熱分解法では、徐々に加熱されるため、比較的大きな分子として飛散している可能性が考えられる。

4. まとめ

粘結剤の瞬間熱分解法の確立及びその分析を行った。

- 1) 管状炉を用いたガス置換雰囲気下での粘結剤の瞬間熱分解法を確立した。
- 2) 瞬間熱分解法による発生ガスは、主に二酸化炭素、水素、メタンであった。また、温度域ごとに発生ガスの種類や物質質量が異なっていた。
- 3) 瞬間熱分解法は、従来の昇温熱分解法にと比べ、発生ガスの種類や量が大きく異なっており、実際の注湯時の発生状況解析の手段として有益となると考えられる。

【謝 辞】

本研究に際し、試験体を提供いただきました株式会社マツバラ、株式会社瓢屋に対し感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 岐阜県工業技術研究所研究報告 第2号, pp.19-22, 2014

摩擦攪拌接合の異種材接合への応用（第1報）

水谷 予志生、足立 隆浩

Application of Friction Stir Welding to Dissimilar material Joining (I)

Yoshiki Mizutani and Takahiro Adachi

摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：FSW）による異種材接合として、それぞれ板厚 3mm のアルミニウム展伸材（A6061-T6）と鋼板（SS400）との突き合わせ接合を試みた。ツールの回転数と移動速度を変化させて接合強度への影響を調査したところ、回転数が大きくなると接合面に割れが生じてしまった。移動速度については、速い方が接合強度が高くなる結果であったが、破面や断面形状を見ると設定通りの位置をツールが移動したのかどうか疑問が残る。鋼板側の破面には、アルミ合金のディンプルが観察されている箇所もあることから、理想的にはアルミの母材破断が起こる接合強度が得られると考えられる。

1. はじめに

自動車に代表される輸送機器では、低燃費と排ガスの低減を実現するため軽量化が不可欠である。そこで、鉄鋼材料からアルミニウム合金等軽金属材料への変更が活発に進められており、近年ますます使用される部品点数が増加している。それに伴い、アルミニウム合金同士、あるいはアルミと鉄等の接合の要望が増えており、さまざまな手法が開発・実用化されつつある。

その一つである摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：以降 FSW）技術^{1,2)}は、従来溶接が困難であったアルミニウム合金同士の接合を容易にし、かつ優れた機械的特性を有した接合法であることから、電車車両・自動車等の構造材に急速に実用化が進んできている³⁻⁷⁾。また、被接合材であるアルミニウム合金板を付き合わせて線接合するのが本来の FSW であるが、板材同士を上下に重ね合わせて点接合する摩擦点接合（Friction Spot Joining：以降 FSJ）⁸⁾と呼ばれる接合法も開発され、実用化が進んでいる。

しかし、FSW および FSJ による異種材接合については、研究室レベルでの報告例⁹⁻¹²⁾はあるが、実用化例はまだ少なく、接合方法、接合条件と接合強度の関係等不明な点は多い。本研究では、特に要望の高いアルミニウム合金板と鋼板との突き合わせ接合に着目し、接合条件と強度について調査することを目的とした。

2. 実験方法

本実験では、それぞれ 50×250×3mm の板状のアルミニウム展伸材（A6061-T6）と鋼板（SS400）を接合用試料とし、図1のようにツール進行方向の左側（AS 側）に鉄、右側（RS 側）にアルミを配して FSW を行った。FSW には、位置制御方式である自動摩擦溶接機（株式会社設備エンジニアリング社製、SHH204-718 型）を使用した。本装置にはツールの冷却機構が付いておらず、エアブローのみとなっている。FSW ツールにはハイス鋼を用いて

おり、φ12mm のショルダー先端に M5 の逆ネジ状プローブ（長さ 2.5mm）が付いた形状となっている。ツールは前進角として 3°傾け、これを板厚 3mm に対し 2.7mm まで挿入する設定とした。このため、ツールのショルダー部が鋼板表面にごくわずかに侵入することになる。また、ツール挿入位置は、突き合わせ面よりアルミ側とし、プローブ側面にごくわずかに（約 0.2mm）だけ鋼板の側面に当たるように調整している。ツールの回転速度と移動速度を変化させ、接合強度への影響を調査した。

接合後の試料は、マイクロフォーカス X 線 CT 装置（東芝 IT コントロールシステム（株）製、TOSCANER-32300μFD）により透過像を観察し、アルミへの鉄片の分散状況や欠陥の有無を観察した。その後、図2のように接合箇所が平行部に入るようにワイヤカッターを用いて引張試験片を作製し、万能試験機（Instron Corporation 製、5985 型）にてクロスヘッドスピード 5mm/min で引張強度を測定した。この時、図2のように FSW 時のバリはそのままにしている。比較として、A6061-T6 同士を FSW した試料についても同様に引張強度を測定した。引張試験後の破面観察および成分分析を実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分光法（SEM-EDS）にて行い、接合断面のマイクロ組織観察も行った。



図1 FSW 実験装置図

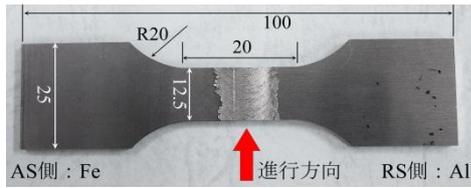


図2 引張試験片形状

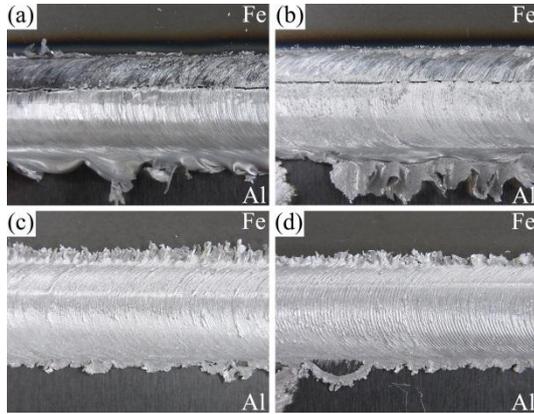


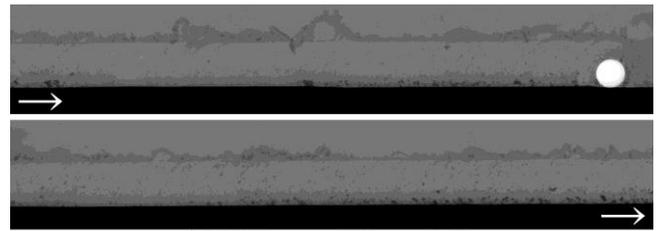
図3 FSW後の試料表面拡大写真

- (a) 2000rpm, 100mm/min、 (b) 1000rpm, 100mm/min、
 (c) 500rpm, 100mm/min、 (d) 500rpm, 200mm/min

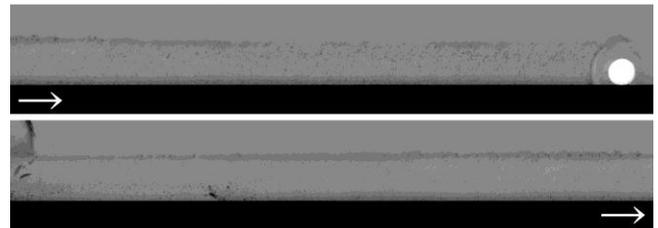
3. 結果及び考察

図3に、回転数500~2000rpmでFSWした場合の試料表面の拡大写真を示す。回転数2000rpmで加工した図3(a)では、接合時にアルミと鉄の境目に溝が生じてしまっており、良好な接合が得られなかった。また、回転数1000rpmの場合には、接合直後においては欠陥は見られなかったが、その後時間が経過すると図3(b)のように割れが生じてしまう場合もあった。回転数を500rpmに落とした場合には、図3(c)のように表面上には欠陥は見られなかった。本実験条件では、1000rpm以上の回転数では入熱量が過多であると考えられる。回転数500rpmのまま移動速度を200mm/minに上げた場合でも、図3(d)のように欠陥は見られなかった。

良好な接合外観が得られた回転数500rpmの試料について、内部欠陥の有無等を調べるためX線透過観察を行った結果を図4に示す。試料長250mmに対し、230mmに渡ってFSWした試料のほぼ全域を示している。ツールは下図左側から上図右にかけて移動しており、最終位置が右上に確認できる。いずれの試料も白く映る空洞のような内部欠陥は観察されなかった。一方、ツールのショルダー底面やプローブ側面が鋼板に当たっていることから、鉄がごくわずかに削られるようになっており、黒く映る鉄の薄片がアルミの中に分散しているのが観察された。本実験では、図4(a)の移動速度100mm/minの方が大きい鉄片が分散していた。また、いずれの試料でもツールの移動に伴い、アルミ側への鉄片の分散が粗な部分と密な部分が存在していた。ツールの鋼板への侵入量が0.2mmとごくわずかな設定であるため、試料やツールの



(a)500rpm, 100mm/min



(b)500rpm, 200mm/min

図4 FSW後の試料のX線透視画像

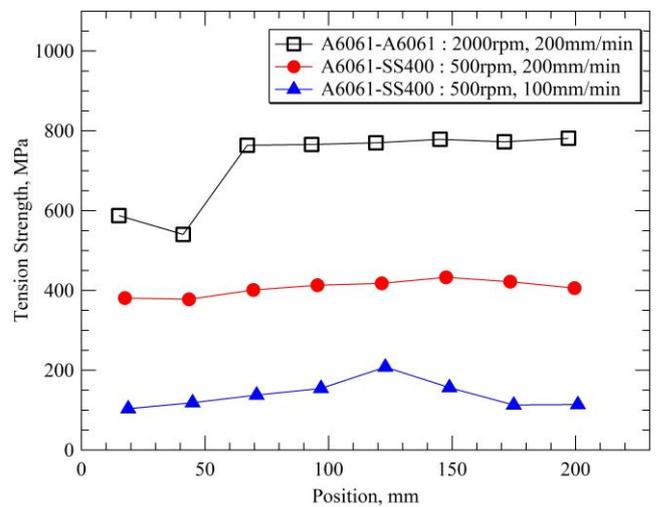


図5 FSW後の引張試験片採取位置と引張強度の関係

熱膨張やソリ、試料の固定位置のズレ、装置の剛性等によって、実際の侵入量に変化している可能性があり、これを反映しているのではないかと考えられる。

FSWを行った長さ230mmの接合試料から、図2の形状の引張試験片を8本作製し、万能試験機にて引張試験を行った。図5は、FSWの開始点を原点とした引張試験片の採取位置を横軸に、各位置での引張強度を縦軸にプロットしている。鉄とアルミの異種材接合については、回転数500rpm、移動速度はそれぞれ100と200mm/minでFSWした2つの試料について示す。比較としてA6061-T6同士の回転数1000rpm、移動速度200mm/minでFSWした試料についても同様に示した。破断位置は、アルミ同士では接合部の外側であったが、鉄とアルミの異種材FSWの場合はいずれも接合部の突き合わせ面であった。いずれの試料でも、FSWの初期では強度が低い傾向であり、特にアルミ同士の試料では初期段階とそれ以降で強度の差が大きかった。70mm以上FSWした後で

は強度が安定していたが、鉄とアルミを FSW したものはアルミ同士より大幅に低く、移動速度 200mm/min の試料では約半分、100mm/min の試料では約 1/4 以下の値であった。これらの強度が低かった原因を調べるため、引張試験後の破面を実体顕微鏡および SEM にて観察した。それぞれの試料で強度が最大であった試験片の鋼板側の破面について、実体顕微鏡によるマクロ写真を図 6 に示す。それぞれ、上側に FSW による加工痕が観察され、そこから (a) では約 1/4、(b) では約半分程度の領域でアルミと思われる銀色の物質が付着していた。それより下側では、鋼板素地の色および赤茶の鉄錆のような色が観察され、ほとんど接合されていないと考えられる。これと同じ試料を SEM で観察した結果を図 7 に示す。図 6 で最も銀色に見えた箇所には、(a) では約 150 μ m、(b) では約 750 μ m 程度の幅の帯状に、延性破壊を示すディンプルが観察される領域が存在していた。また、この領域のすぐ上側にはややフラットな面が存在し、最上部にはディンプル状の破面をもつ波状の領域が存在した。前者は鉄か Fe と Al の化合物であり、後者は FSW の塑性流動で SS400 の表面に付着したアルミではないかと思われる。これらの構成元素を確認するため、EDS による元素マッピングを行った結果を、それぞれ図 8、9 に示す。いずれもディンプルが観察された内部の帯状の箇所では Al が検出されていることから、鉄とアルミが強く結合され、アルミの母材側で破断した領域であると考えられる。また、図 8 の 100mm/min の試料では、このアルミの領域中に粒状の Fe が多数検出されている。これは、図 4 の X 線透過像で、(a) の 100mm/min の試料の方が黒い鉄の粒が多く観察されたことに合致する結果である。この鉄

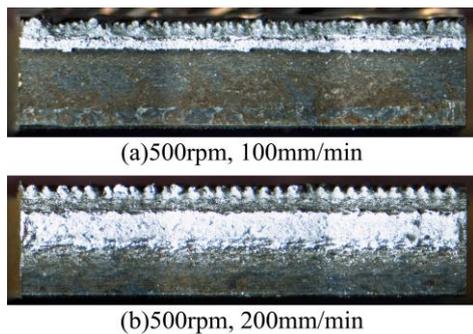


図 6 引張試験後の SS400 側の破面マクロ写真

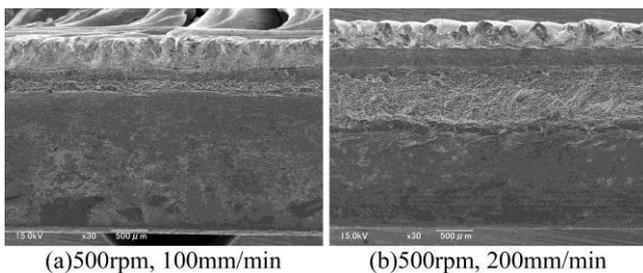


図 7 図 6 の破面の SEM 写真

片の周りでは Al も重なって検出されている領域があることから、反応して化合物ができていている可能性がある。この領域のすぐ上側のフラットな面には、主に Fe と O が検出され、一部 Al も検出されている。大部分が Fe で O も検出されていることから、破断位置は鉄とアルミの界面であり、この領域では Fe-Al の結合が弱いと考えられる。これらの結果から、ショルダー直下には Fe-Al の結合が弱い領域があり、その下側に強い結合の領域ができることが分かった。このさらに下側ではほぼ Fe と O が検出されただけであり、図 6 のマクロ写真からも鉄の素地および鉄錆であると思われる。この領域ではほとんど接合されておらず、接合強度に寄与していないと考えられる。そこで、鉄とアルミの接合が十分なされていたと思われる領域の面積を図 6 のマクロ写真から算出し、全ての領域でこのような接合がなされていたと仮定して図 5 の引張強度を補正すると、100mm/min の試料では約 570MPa、200mm/min の試料では約 630MPa となった。これは、アルミ同士の平均値である 720MPa の 8 割程度と

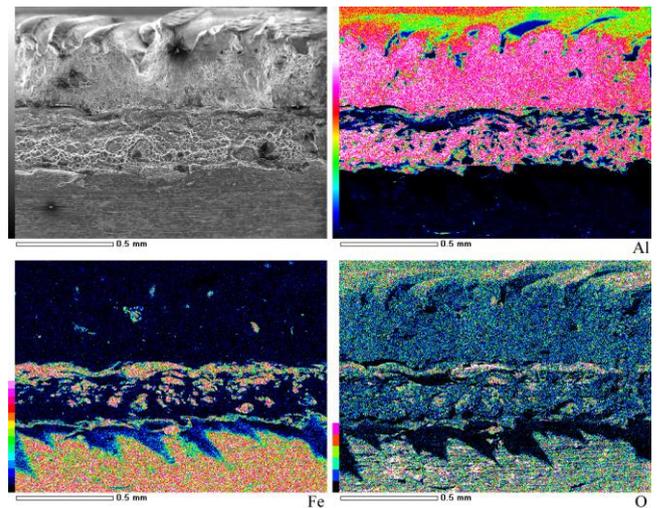


図 8 図 7 (a) の破面の EDS マッピング

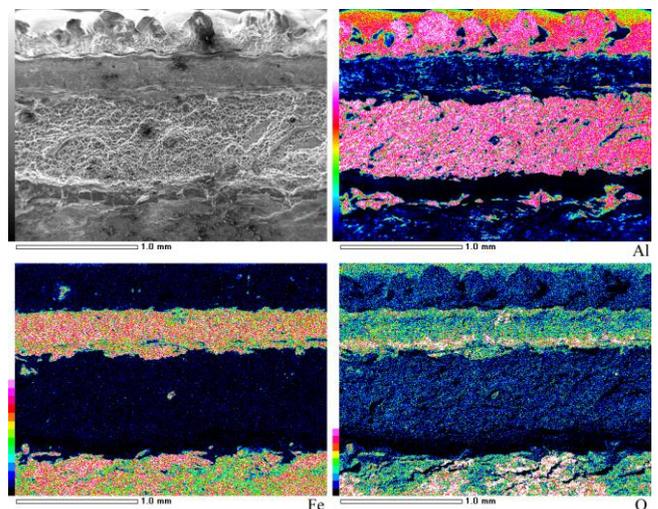


図 9 図 7 (b) の破面の EDS マッピング

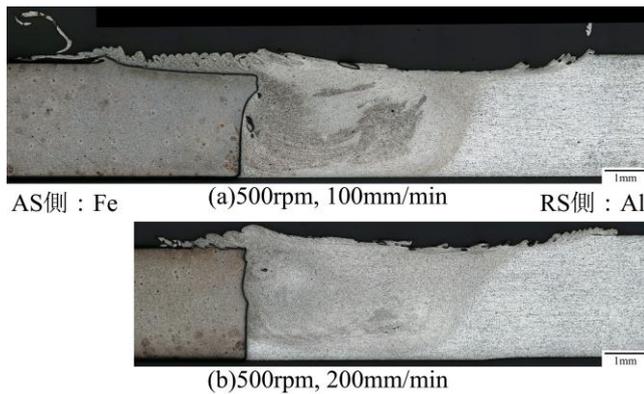


図10 FSW後の試料の断面マクロ組織

なり、理想的な接合が可能となれば、十分な強度が達成できるものと考えられる。今回、設定では板厚方向の9割までプローブが侵入し、鋼板の側面を削るはずが、結果では約1/4から半分程度しか接触していないように見える。そこで、実際にツールが侵入した量を調べるため、この2種類の試料について断面観察を行った。

図10にFSW加工位置が130mm付近の断面のマクロ組織を示す。この図では、紙面手前から奥に向かってツールが移動しており、図中左側がAS側でSS400となり、右側がA6061となっている。図10(a)に示した移動速度が100mm/minの試料では、鋼板の表面にツールショルダーが約270 μ m侵入し、その分塑性変形した鉄がアルミ側に押し出されるような形状になっている。このため、プローブにはアルミ側に押されるような力が働き、張り出した鉄の下側を削ることができなかったのではないかと考えられる。一方、図10(b)の200mm/minの鋼板の表面側は、若干波打っただけでショルダー全体が侵入してはいなかった。また、側面側は最大0.1mmの幅で深さ1.4mm程度が削られたようになっているが、プローブの長さ2.5mmには達していない。加工条件の設定に起因するもの、あるいは試料やツールの熱膨張やソリ、装置の剛性等によって実際の侵入量に変化した可能性が考えられる。この原因を調査し、設定通りの加工が行えるような条件を調査することが課題である。

4. まとめ

FSWによる異種材接合として、板厚3mmのアルミニウム展伸材(A6061-T6)と鋼板(SS400)との突き合わせ接合を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 回転数500~2000rpmでFSWを行ったところ、回転数1000rpm以上ではクラックが発生してしまった。低回転数の500rpmではこのような欠陥は発生しなかったことから、入熱量が多すぎると接合不良になることが分かった。
- 2) 本実験で異種材を回転数500rpmでFSWした試料の引張強度は、アルミ同士をFSWしたものの半分程度しか得られなかった。この破面および断面組織を見ると、ツールのプローブ側面が鋼板の側面に十分に当たっていなかったことが分かった。
- 3) 接合に寄与していたと思われる箇所の面積で強度を補正すると、アルミ同士の8割程度の値となった。理想的な接合が可能となれば十分な強度が達成できるものと考えられ、加工条件の最適化が課題である。

【参考文献】

- 1) 佐藤ら, まてりあ, Vol.42, pp.214-220, 2003
- 2) 藤井, 金属, Vol.83, pp.5-10, 2013
- 3) 福田, 金属, 73, pp.330-335, 2003
- 4) 酒井, 軽金属, 56, pp.584-587, 2006
- 5) 玄道ら, 日本金属学会誌, 70, pp.870-873, 2006
- 6) 江角ら, 金属, Vol.83, pp.25-33, 2013
- 7) 篠田, 軽金属, 64, pp.196-202, 2014
- 8) 藤本, 金属, Vol.83, pp.11-16, 2013
- 9) 福本ら, 溶接学会論文集, 22, pp.309-314, 2004
- 10) 安井ら, 溶接学会論文集, 23, pp.469-475, 2005
- 11) 時末ら, FSWの基礎と応用, 日刊工業新聞社, pp.40-44, 2005
- 12) 宮川ら, 溶接学会論文集, 26, pp.42-47, 2008

薄板のプレス焼入れ技術に関する研究（第2報）

小川 大介、佐藤 丈士

Study on the press quenching technique of a steel sheet (II)

Daisuke Ogawa and Joji Sato

本研究では、プレス成形品を高強度化することを目的として、プレス加工と同時に焼入れを行うプレス焼入れ技術について、加工特性を評価した。穴抜き用金型を作製し、金型冷却時間（ホールド時間）による焼入れ特性について評価を行った。また、クリアランスの検討として、プレス焼入れ時におけるせん断面や形状精度について評価を行った。この結果、ホールド時間が5秒程度でも焼入れ硬度が得られ、ホールド時間を短くすることによって金型表面温度に約10℃の差が生じることが分かった。そして、クリアランスの最適条件として、小さいクリアランスの方が、だれ量も小さく、良好な切口面を得ることが確認できた。

1. はじめに

自動車などの輸送機器においては、環境問題から燃費向上を目的とした軽量化や、衝突安全性の向上を目的とした部品の高強度化・衝撃吸収性（高延性化）が求められている¹⁾。このため、高強度が必要となる部品には浸炭、窒化など表面硬化処理が必要となり、コスト増だけでなく、熱処理ひずみも問題になっている。

そこで、鋼材の高強度化を目的として、プレス加工と焼入れを同時に行うプレス焼入れ技術（ダイクエンチプレス）が注目されている。低い成形荷重で、成形性の向上や高硬度化が可能となる利点を生かし、自動車の構造部品等に適用されつつある。

この加工法は、成形不良の解決や焼入れによる硬度の向上が見込まれるが、金型の温度上昇により焼入れ不足が発生し、品質の悪化など課題がある。そこで、冷却速度や加工中の部品や金型温度変化といったプレス焼入れの良否を左右する諸特性を把握する必要がある²⁾。

本研究は、プレス焼入れにおける種々の加工特性を評価することを目的として、昨年度作製した穴抜き用金型を用い、金型冷却時間の依存性やパンチとダイスとの隙間（クリアランス）条件による形状精度や切口面について評価を行った。

2. 実験

2. 1 被成形材

本実験に使用した被成形材は、80×80×t2mmの炭素工具鋼（SK85）を焼鈍したものである。表1に被成形材の成分を示す。

2. 2 プレス加工条件

実験に用いたプレス機および金型モデルを図1に示す。プレス機には、（株）放電精密加工研究所製の電動サーボプレス機（型番：ZENFormer MPS675DS）を用いた。金型冷却機構として、圧縮空気を利用するエアジェットクーラーを用いた。

表1 炭素工具鋼（SK85）成分（%）

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.82	0.23	0.41	0.016	0.005	0.02	0.02	0.11

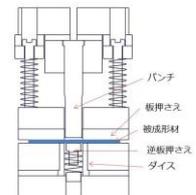


図1 プレス機および金型モデル

825℃の電気炉で加熱した被成形材をプレス速度：180mm/sにて穴抜きと同時に下死点停止制御（モーション制御）により、金型内で一定時間ホールドすることで、被成形材をプレス焼入れする実験を行った。

2. 2. 1 ホールド時間による評価

プレス焼入れの生産効率（サイクル数）に関する評価を行うため、金型冷却時間に関係する下死点停止時間（ホールド時間）が短くなることによる、プレス焼入れ特性の違いについて調査を行った。ホールド時間は、5、10、20、30、45、60秒として実験を行い、金型条件は、パンチ径：φ15.0mm、ダイス径：φ15.6mmを用いた。

2. 2. 2 クリアランスによる評価

穴抜き加工において、せん断切口面の状態と形状精度が特に重要視されている。せん断加工は、図2のようにパンチとダイスによりせん断加工を行い、所定の形状を得る加工法である。この場合、パンチとダイスの間には適当な隙間C（クリアランス）を与えておくことが重要である。クリアランスは、材質、板厚、材料硬さなどにより最適条件を選定しなくてはならない。図3にはせん断加工により得られる切口面を図式的に示した。せん断加工された切口面は、切削品のように一様ではなく、一

一般的にだれ、せん断面、破断面、バリ（かえり）によって構成されている。クリアランスによって、切口面に差異があり、クリアランスが大きいほどバリや破断面、だれが多くなる。逆に、クリアランスが過小の場合、せん断面が多くなりだれが少なくなる。そこで、冷間穴抜きとプレス焼入れ穴抜きの、最適クリアランスについて調査を行った。クリアランスとして、板厚比 5%、10%、15%を用い、切口面および形状への影響について評価を行った。

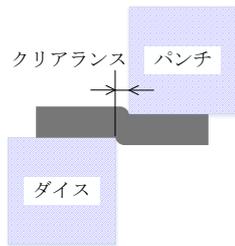


図2 せん断加工モデル

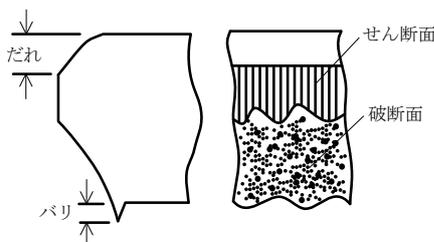


図3 せん断切口面モデル

2. 3 評価方法

被成形材の評価については、穴抜き加工した被成形材を切断、埋込みを行い、マイクロビッカース硬さ試験機によって断面硬度測定をHV0.2にて行った。また、切口面については、キーエンス（株）製デジタルマイクロスコープを用いて観察を行った。

形状測定は、直径を（株）ミットヨ製画像測定器QVH3-H606P1L-Cを用いて測定し、真円度については、（株）東京精密 ロンコム 52B-510を用いて、板厚の中心付近を測定した。

3. 結果および考察

3. 1 ホールド時間による評価

プレス焼入れ時間に係る条件として、下死点停止時間（ホールド時間）によって生じる素材の冷却特性について、評価を行った結果を図4に示す。

ホールド時間による、被成形材の硬度を評価した結果、5秒でも焼入れ硬度になっていることを確認した。また、ホールド時間が30秒以降は、被成形材の硬度が約880HVで推移していることが分かった。

次に、ホールド時間毎の金型表面温度の状態について

評価した結果を図5に示す。経過時間0秒については、金型初期状態温度である。ホールド時間を短くすることによって金型表面温度に約10℃の差が生じることが分かった。また、被成形材が接触した金型は、一時的に高温になるため、エアジェットクーラーを用いて強制冷却しているが、約2.4℃/minの冷却速度であることから、被成形材の金型接触時間を短くすることによって金型冷却サイクルを短くすることが可能であると考えられる。

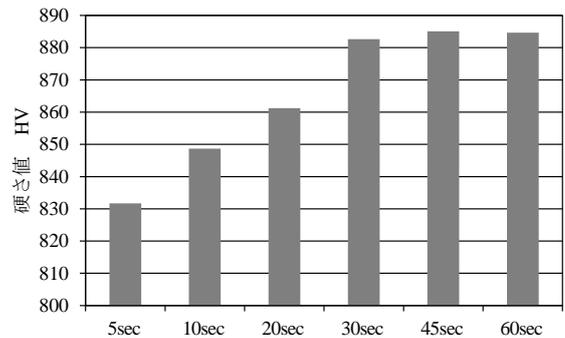


図4 硬度試験結果

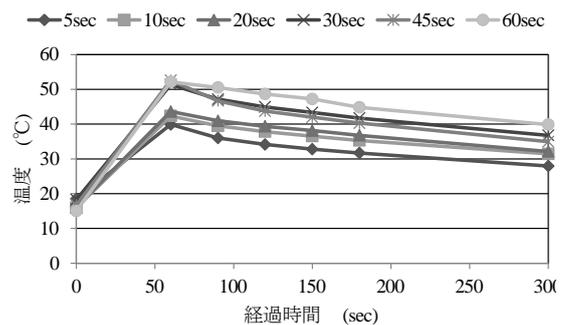


図5 金型表面温度測定結果

表2 直径および真円度測定結果

クリアランス (%)	15	10	5
直径 (mm)	14.872	14.879	14.887
真円度 (μm)	31.3	56.8	28.4

3. 2 クリアランスによる評価

パンチとダイスのクリアランスによる、穴抜き加工した直径と真円度の結果を表2に示す。

穴の直径は、パンチ径φ15.0mmで加工しているため、同径になるのが通例である。プレス焼入れによって直径が小さくなる要因として、鉄鋼材料の熱膨張係数が約 $11.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であることから、オーステナイト域まで加熱した状態から、金型で穴抜きと同時に急冷して焼入れを行うため、被成形材の加熱時の熱膨張よりプレス焼入れによる収縮の方が大きいため、直径が小さくなったと考えられる。クリアランスを小さくすることによって、

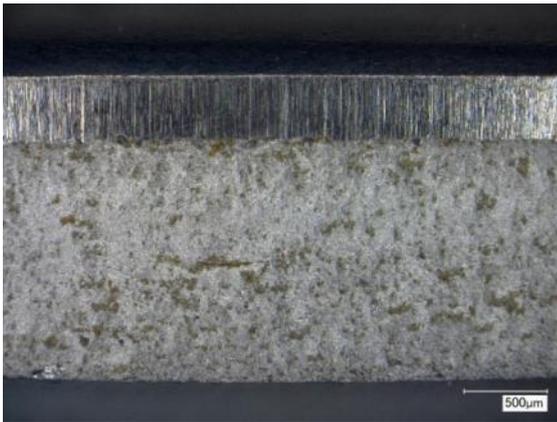
直径収縮を抑制することはできるが、直径で $100\mu\text{m}$ 程度の誤差が生じることが分かった。

真円度測定結果についてはクリアランス 10%時が一番大きくなっていることが分かった。せん断面の凹凸や熱収縮時の収縮量の違いなどが真円度の結果に影響されたと考えられる。

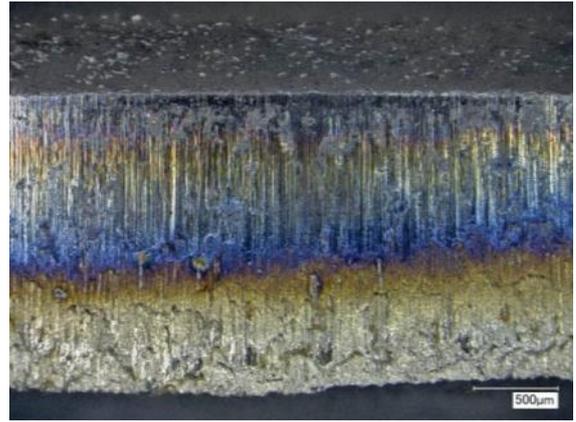
次に、冷間穴抜き加工後の切口面の観察結果を図6に示す。冷間穴抜き加工時における切口面は、クリアランスが 15%時は図3のような切口面が得られ、適正クリア

ランスであることが分かった。クリアランスを小さくするにつれ、二次せん断面が現れている。二次せん断面は、パンチとダイス刃先より発生するクラックが一致しないことが原因し、この現象が発生する場合は、金型にチッピングなどが発生する恐れがあるため最適とは言えない。

同じクリアランスの金型を用いて、プレス焼入れ穴抜き加工した切口面の観察結果を図7に示す。クリアランス 15%の場合、冷間穴抜き加工した切口面と比べ、せん断面長さが大きくなっている。しかし、被成形材をオー



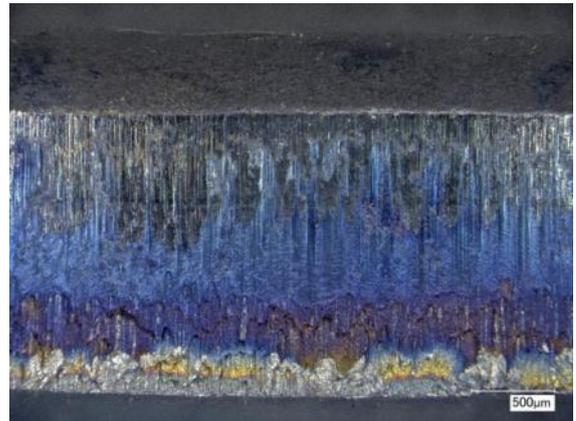
(A) クリアランス 15%



(A) クリアランス 15%



(B) クリアランス 10%

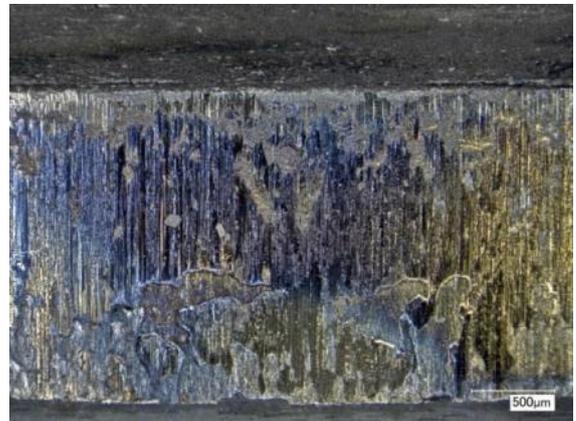


(B) クリアランス 10%



(C) クリアランス 5%

図6 冷間穴抜き切口面



(C) クリアランス 5%

図7 プレス焼入れ穴抜き切口面

ステナイト域まで加熱していることもあり、穴抜き時にパンチが接触と同時に被成形材が引き込まれ、だれが多く発生してしまうことが明らかとなった。クリアランスを小さくすることによって、だれが小さくなっていることを確認できた。また、クリアランス 5%については、切口面がせん断面になっているが、部分的には破断している箇所も見受けられた。

4. まとめ

プレス成形品の高強度化することを目的に、プレス焼入れ穴抜き加工による特性評価を行った。プレス焼入れ時間を左右するホールド時間による検討と穴抜き加工精度に関する調査を行った。

ホールド時間によるプレス焼入れ特性については、5

秒程度でも十分に焼入れ硬さが得られることが確認できた。また、金型接触時間が短くなるため、金型への熱伝達温度が変わるため約 10℃の差が生じることが分かった。プレス焼入れ穴抜き加工における、クリアランスは小さい方が良好な切口面および形状精度が得られた。しかし、高温時に穴抜き加工を行うため、だれ量が多くなる結果となった。

【参考文献】

- 1) 中村ら, 型技術者会議 2012 講演論文集, pp.94-95, 2012
- 2) 池内ら, 東京大学生産技術研究所 生産研究, pp.967-969, 2009

複 合 材 料 関 連

CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発（第1報）

—開発環境の整備および下肢装具の試作—

千原 健司、道家 康雄、仙石 倫章、萱岡 誠、田中 等幸

Development of the ultralight lower extremity orthosis using Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (I) Preparing development system and First prototype of lower extremity orthosis using CFRTP

Kenji Chihara, Yasuo Doke, Tomoaki Sengoku, Makoto Kayaoka and Tomoyuki Tanaka

県では、医療福祉機器分野等を成長産業として位置づけており、当所では軽量・高強度で有望な材料である CFRTP の成形技術等を蓄積するため各研究を実施している。CFRTP は、再加熱により材料が軟化し再成形が可能であることから、義肢装具士による調整が必須な装具に対しても適用が有効であると考えられる。

本報では最初に、本研究開発を効果的に実施するための連携体制ならびに装具特有の少量多品種生産のための設計・成形等を実現するための設備を選定し、整備したことについて報告する。次にそれらにより、CFRTP を活用した短下肢装具を適切に設計・試作できることを確認したので、この概要について報告する。

1. はじめに

県では成長雇用戦略の中で、航空宇宙分野や医療福祉機器分野を成長産業として位置づけており、当所では平成 25 年度より、主に航空機や次世代自動車への活用が有望であり、軽量で高強度な材料である熱可塑性炭素繊維複合材料（以下、「CFRTP」という）の成形・加工技術等を蓄積するため「ぎふ成長産業強化プロジェクト」の中で各研究開発を実施している¹⁾。

一方、リハビリ支援や不自由さを軽減するための補助器具（以下、「装具」という）においても、身体に装着するため、軽量化は機能向上に直結しており、マグネシウム合金や熱硬化性炭素繊維複合材料（以下、「CFRTS」という）を活用する等の研究開発が盛んに行われている。しかしながら、これらの材料は、加工が困難であるばかりでなく、再成形が困難であり、患者等の身体に応じて調整が必要な場合は、構造部材を一から作り直す必要がある。

ここで我々が技術蓄積を図っている CFRTP は CFRTS に比べ、成形時間が短く、リサイクル性も有利であり、再加熱することにより再成形が可能であることから、義肢装具士による調整が必須な各種装具への適用が有効であると考えられる。本材料を活用し装具の軽量化を図ることにより、患者や障がい者、高齢者の QOL 向上を図るとともに、県が成長産業として位置づけている医療福祉機器分野の産業振興を目的として、本年度より県が立ち上げた「ヘルスケア機器開発プロジェクト」の中で、本研究開発を開始した。

本報では最初に、本研究開発を効果的に実施するための医工・産学官連携体制ならびに装具特有の少量多品種生産のための設計や成形等を実現するための設備を選定し、整備したことについて報告する。次にそれらの体制・設備により、CFRTP を活用した短下肢装具を適切に設計・試作できることを確認したので、この概要につ

いて報告する。

2. 開発環境の整備

2.1 開発体制

医療福祉機器は、ものづくりと臨床評価の両面から開発を行なう必要があり、どちらかのシーズあるいはニーズによって一方的に行なうよりは、当初から開発を一体的に行なうことでより効果的に開発することができる。本研究開発においても、約 1 年前からメーカーならびに医療関係者に打診を行い、本年度から 5 年間の共同研究契約を締結し、研究開発を開始した。図 1 に共同体制ならびに各機関の役割を示す。これらの医工・産学官連携体制により研究開発を行い、技術移転、製品化、製品の利活用までシームレスに移行させていく予定である。

2.2 開発設備

図 2 に、新たに導入したダイヤフラム成形機（MEMBRA6, 独 Ring Maschinenbau GmbH 製）とこれによる成形プロセスを示す。材料を 1mm 厚程度のシリコンゴムシートに挟み、別の加熱機により 5 分程加熱した後に、成形機内に設置した凸型の上に設置し、機器を始動すると、上部から超弾性体（本装置ではメンバー

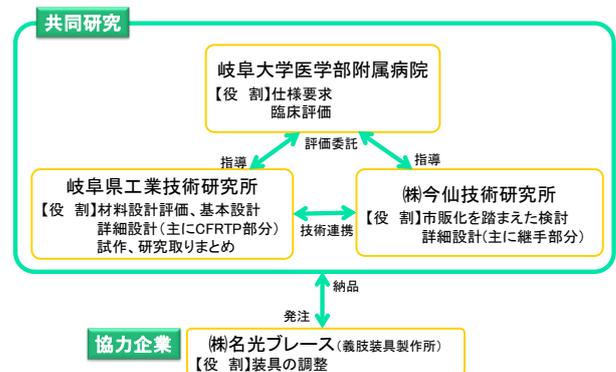


図1 開発体制

という)が覆いかぶさり、その外側から最大 0.6MPa の圧力を 1 分間程度与えて材料を型形状に成形する。型は雄型もしくは雌型のどちらか1つあれば成形でき、材質もアルミ合金など安価なもので十分であるため、少量多品種の成形に適している。サイズは幅奥行き 300mm 程度、高さは 200mm 程度のものまで成形することができる。図3に成形例を示す。同形状にて様々な材料 10 種類程度を成形し、形状測定および曲げ特性を測定し、賦形性を確認した。形状は型よりやや大きく成形されており、曲げ強度ならびに曲げ剛性は、概ね各材料のカタログ値の 8 割程度の値であった。この結果の詳細は、別の機会に報告する予定である。

次に、複合材料による装具を効果的に設計するために、新たに CAD/CAE を導入した。CAD はミッドレンジの SolidWorks Premium2014 を、CAE は、設計者の利便性を考慮し、CAD モデルをそのまま使用でき、なおかつ積層材のシミュレーションが可能な Solidworks Simulation Premium2014 を導入した。これらのシミュレーションの精度を確認した結果については、著者らが別に報告²⁾しているので参照にされたい。

この他、義肢装具製作所が使用する、ギブスカッターや電動ヤスリなど、2次加工のためのハンドツールを準備した。

3. 下肢装具の試作

導入した CAD/CAE により、変位や強度を確認しつつ軽量化を図りながら設計した例を図4左に示す。また、導入した設備により試作した例を図4右に示す。繊維配向やトリミングにより、全体剛性などの特性が変わるが、試作で定性的にこれらの特徴が現れており、適切に設計・試作できることを確認した。これら以外にも複数の下肢装具を設計試作しており、これらのデザインや評価等については、別の機会に報告する予定である。

4. まとめ

CFRTP を活用した超軽量下肢装具を開発するにあたり整備した体制ならびに設備について紹介し、これらによる試作の概要について報告した。

今後は、共同する病院にて試作の臨床評価を行い効果の検証をするとともに、市販化に向けて材料や形状、成形条件等を探求していく予定である。

【謝 辞】

本研究開発は平成 26 年度より、株式会社今仙技術研究所ならびに岐阜大学医学部附属病院と共同し、株式会社名光ブレースの協力のもと実施しています。共同研究者ならびに関係者の皆様に感謝いたします。

ダイヤフラム成形機を導入するにあたり、ご指導頂きました同志社大学生命医科学部生命医工学科の田中和人教授に感謝いたします。

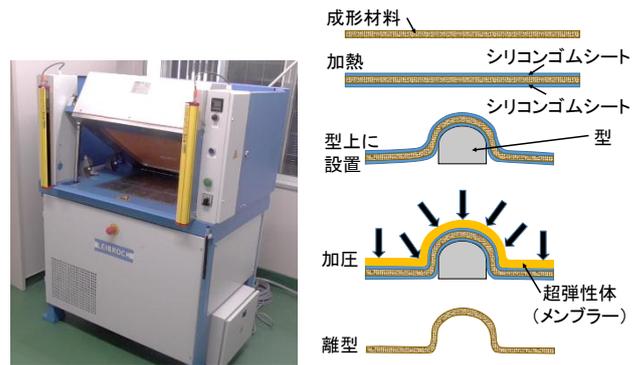


図2 ダイヤフラム成形機 (左) と成形プロセス (右)

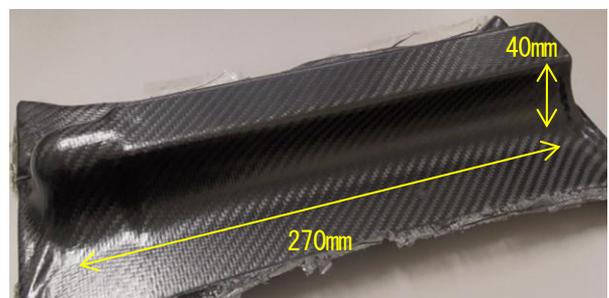


図3 成形例 (CFRTP,樹脂は PA66,厚み 2mm)

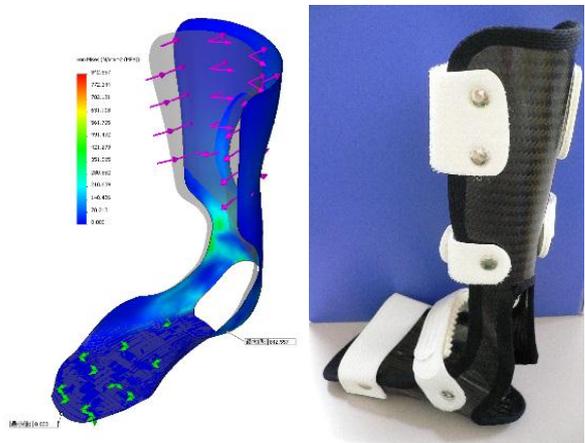


図4 設計例 (左) と試作例 (右)

【参考文献】

- 1) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 2 号, pp.35-42, 2014
- 2) 仙石ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 3 号, pp.35-38, 2015

CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発 (第2報)

—CFRTP 織物材の材料試験及びシミュレーション評価—
仙石 倫章、千原 健司、道家 康雄、萱岡 誠、田中 等幸

Development of the ultralight lower extremity orthosis using Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (II) Material testing and simulation evaluation of cross type Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics

Tomoaki Sengoku, Kenji Chihara, Yasuo Doke, Makoto Kayaoka and Tomoyuki Tanaka

CFRTP は軽量・高強度な材料で、加熱しプレスすることで短時間に製品を成形することができる。また成形した後も再度、加熱することにより再成形が可能である。このことは人体に合わせて調整が必要な装具への適用が有効であると考えられる。しかしながら、実際に製品に応用するには難しく、設計・評価技術に関する開発情報が不足しているのが現状である。そこで本研究では、異方材かつ積層材である CFRTP を主部材とし、バリエーションが多い装具を、CAE を用いて効果的に設計するために、シミュレーションに必要な物性値を取得する各試験を実施し、シミュレーションの精度を評価した。結果、シミュレーションと試験において、標準試験片による曲げの変位と強度の結果を比較し、大差がないことを確認した。

1. はじめに

軽量、高強度、高剛性といった特徴をもつ炭素繊維複合材料 (以下、「CFRP」と表記) は、古くはレジャー・スポーツ用途から近年では航空宇宙・自動車等において、製品に多用されるようになってきた。特に熱可塑性 CFRP (以下、「CFRTP」と表記) は熱硬化性 CFRP に比べ、成形時間が短く、リサイクル性も有利であり、再成形 (2次成形) が可能であることから、今後さらなる製品への応用が期待されている。

しかしながら、CFRTP は金属等の等方材と異なり、繊維方向に特に強度を発揮する異方材であり、また積層された材料を用いることが多いため、実際に製品に応用するには難しく、設計および評価技術に関する開発情報が不足しているのが現状である。

そこで我々は、CFRTP の製品開発を効率的に行うために、設計者によるシミュレーション (CAE) の活用が有効であると考えた。本研究では、まず CFRTP 材料から試験片を切り出し、引張試験と圧縮試験を行い、材料の物性値を取得する。次に、これらの得られた物性値を用いて曲げのシミュレーションをし、実際の曲げ試験と比較することにより、シミュレーションの精度について評価した。

2. 試験方法

2.1 試験片

材料は、炭素繊維織物と PA66 の複合材料である CFRTP (Bond-Laminates 製 TEPEX dynalite201) を用いた。各試験に用いる試験片は、各 JIS 規格に準拠し、主にウォータージェット加工機 (Flow International Corporation 社製 FlowMach3 1313b-XD) により切り出した。試験片は2時間以上真空乾燥機に入れ、その後温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\% \pm 10\%$ の環境下で48時間以上、状態調節した。

2.2 引張特性

JIS K7164¹⁾ に準拠し、タイプ2の試験片を準備して、疲労試験機 (Instron 製 8802 型) により、引張試験を行った。試験片は、油圧チャックにより固定した (図1)。油圧チャックは、測定者によらず試験片の締め付け力が安定し、測定誤差が小さくなるメリットがある。引張速度は $1\text{mm}/\text{min}$ とし、試験片が破断するまでの引張荷重と変位を測定した。また引張弾性率とポアソン比を計算するために、十字型の歪ゲージ (KYOWA 製 KFG-10-120-D16-11L1M2S) を試験片の中央部の表と裏に1枚ずつ張り付けて (図1中央)、制御用ソフトウェア (KYOWA 製 PCD-30A) を使用し、歪を測定した。

2.3 面内せん断特性

JIS K7019²⁾ に準拠し、織目方向に対し45度に切り出した試験片を準備して、疲労試験機 (Instron 製 8802 型) により引張試験を行った。引張速度は $2\text{mm}/\text{min}$ とし、試験片が破断するまでの引張荷重と変位を測定した。

2.4 面内圧縮特性

JIS K7018³⁾ に準拠し、A 試験片を準備した (図2左)。万能試験機 (Instron 製 5985 型) に圧縮治具 (ASTM D 695、図2右) を用いて圧縮試験を行った。圧縮速度は $1\text{mm}/\text{min}$ とし、試験片が破断するまでの圧縮荷重と変位を測定した。



図1 歪ゲージを貼り付けてチャックした試験片

2. 5 シミュレーションの評価

シミュレーションは、設計者の利便性を考慮し、CADモデルをそのまま使用でき、なおかつ積層材のシミュレーションが可能な Solidworks Simulation Premium2014 を使用した。これにより、繊維方向に対して 0° に切り出した試験片形状と、 45° に切り出した試験片形状において、中央部に曲げ荷重が作用した場合を想定したシミュレーションを行い、実際の曲げ試験との結果を比較することにより精度について評価した。

曲げ試験は JIS K7017⁴⁾ に準拠し、試験片を準備して、電磁力微小試験機（株）島津製作所 MMT-500NV-10）を使用して、3点曲げ試験（A法）を行った（図3）。圧子の半径は5mm、支点の半径は2mm、支点間距離は80mm、試験速度は5mm/minとした。

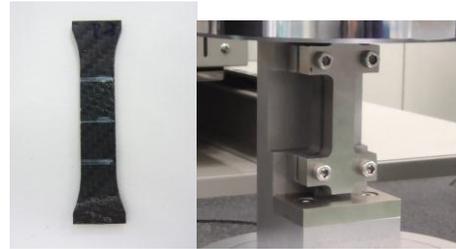


図2 圧縮 A 試験片と圧縮治具

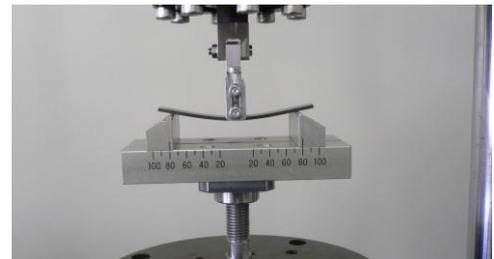


図3 曲げ試験の様子

3. 試験結果

3. 1 引張弾性率、ポアソン比および引張強さ

引張試験により測定した応力-歪曲線を図4に示す。引張弾性率は応力-歪曲線において、歪が0.0005と0.0025の応力から傾き（応力/歪）を計算し、求めた。結果、引張弾性率は51.7GPa（5点平均値、 $\sigma=0.73$ ）を得た。カタログ値は53GPaであり若干低い値であった。ポアソン比は縦横の歪みの比から計算し、0.0453を得た。

引張強さは、測定した最大荷重を試験片の初期断面積で割る事により算出した。測定した応力-変位の曲線を図5に示す。結果、引張強さは662.5MPa（5点平均値、 $\sigma=15.1$ ）を得た。カタログ値は785MPaであり2割近く低い値となった。

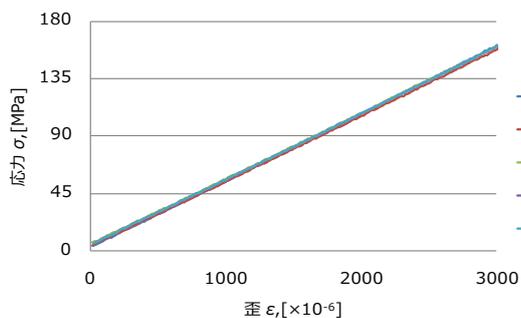


図4 応力-歪曲線

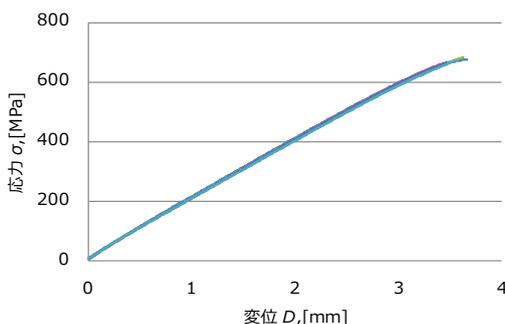


図5 応力-変位曲線

3. 2 面内せん断弾性率および面内せん断強さ

測定したせん断応力-せん断歪曲線を図6に示す。面内せん断弾性率は、せん断歪が0.001と0.005のせん断応力から傾き（せん断応力/せん断歪）を計算し、求めた。結果、面内せん断弾性率は1324MPa（5点平均値、 $\sigma=73.6$ ）を得た。

面内せん断強さは、試験片が破壊した時の最大荷重を、試験片の初期の断面積の2倍で割る事により算出した。測定したせん断応力-変位の曲線を図7に示す。結果、127.5MPa（5点平均値、 $\sigma=2.21$ ）を得た。

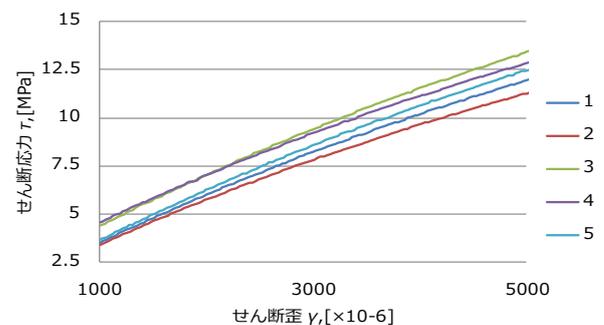


図6 せん断応力-せん断歪曲線

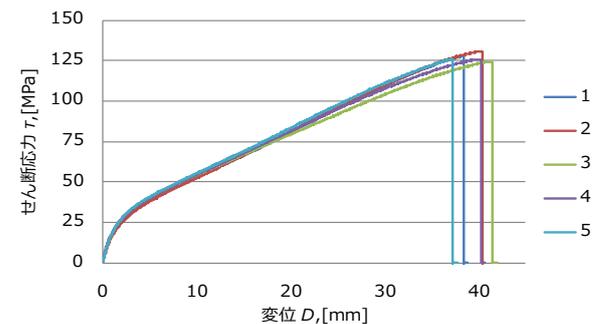


図7 せん断応力-変位曲線

3.3 面内圧縮強さ

規格によると、圧縮強さは試験片が破壊した時に測定した最大荷重を、試験片の初期の断面積で割る事により算出する。測定した圧縮応力-変位の曲線を図8に示す。これによると圧縮強さは392.2MPa(5点平均値、 $\sigma=41.3$)であった。しかし、本結果は後述する曲げ試験での強度(圧縮破壊)と大きな隔たりがある。このため、シミュレーションにより比較検討した。

図9に示すように、圧縮試験による破壊箇所(ダンベル形のくびれている部分)の応力が中央部分と比較して1.9倍程高く応力が集中していることがシミュレーション解析により明らかになったため、この分を割増した742.1MPaを圧縮強さと推定した。

3.4 シミュレーションの評価

3.4.1 結果の概要

シミュレーションに入力した物性値を表1に示す。主に前節3.1~3.3で得られた物性値を使用し、不足分は一般的な値を使用した。なお、本材料は直交異方性材料であるため、X方向とY方向における各物性値は同じ値を入力した。

繊維方向に対して0°に切り出した試験片の3点曲げ試験のシミュレーション結果の抜粋(荷重300kN時の変位)を図10に、繊維方向に対して45°に切り出した試験片の3点曲げ試験のシミュレーションの結果の抜粋(荷重50kN時の変位)を図11に示す。両試験片ともに中央部分の負荷した箇所を中心に変位しているが、45°に切り出した試験片は、0°に切り出した試験片と比較して、6分の1の荷重にも係らず大きくたわんでいる。これは異方性材料の特徴によるものであり、シミュレーションにより再現されていることが分かる。

3.4.2 0°切り出し試験片での比較

図12に、0°切り出し試験片における、試験およびシミュレーションにより得られた荷重-変位線図を示す。シミュレーション値は試験値に対して約10~15%小さくなる結果であった。また変位が大きくなるにつれて、試験値とシミュレーション値の差も大きくなっている。

図13に、0°切り出し試験片における、試験およびシミュレーションにより得られた曲げ強度の分布を示す。試験では、破断時に測定した最大荷重を用いて式(1)に

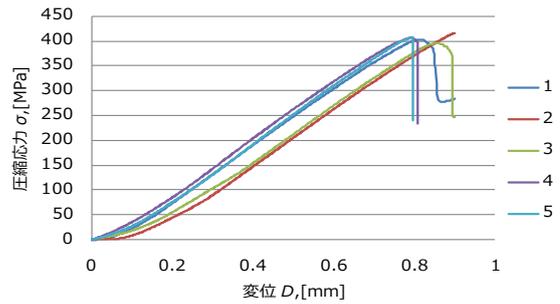


図8 応力-変位曲線

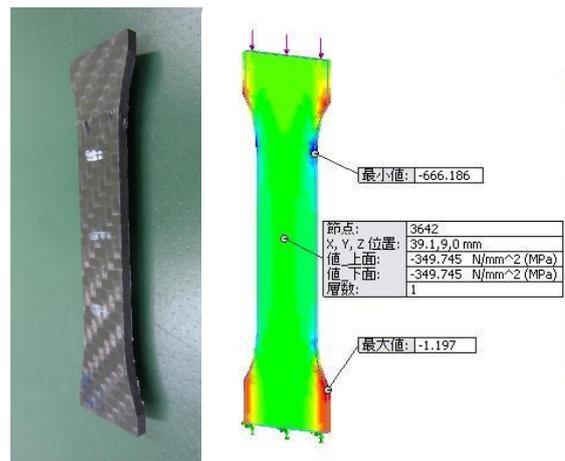


図9 圧縮試験片の破壊様相(左)と応力シミュレーション(右)

表1 シミュレーションに入力した物性値

物性	値	単位	備考
X方向の弾性係数	51700	N/mm ²	試験値
Y方向の弾性係数	51700	N/mm ²	試験値
Z方向の弾性係数	10000	N/mm ²	
XY内面のポアソン比	0.0453	-	試験値
YZ内面のポアソン比	0.25	-	
XZ内面のポアソン比	0.25	-	
XY面内のせん断弾性係数	1323.6	N/mm ²	試験値
YZ面内のせん断弾性係数	3000	N/mm ²	
XZ面内のせん断弾性係数	3000	N/mm ²	
X方向の引張強さ	662.5	N/mm ²	試験値
Y方向の引張強さ	662.5	N/mm ²	試験値
X方向の圧縮強さ	742.1	N/mm ²	試験値
Y方向の圧縮強さ	742.1	N/mm ²	試験値
XY面内のせん断強さ	127.5	N/mm ²	試験値

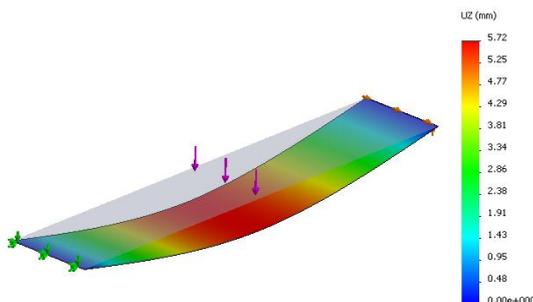


図10 シミュレーション(0°切出し試験片)

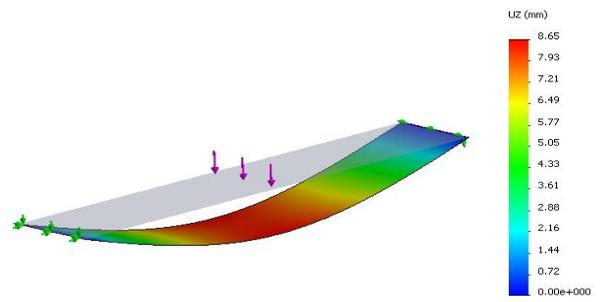


図11 シミュレーション(45°切出し試験片)

より計算した。ここで σ_f は曲げ応力 [MPa]、 F は荷重 [N]、 L は支点間距離 [mm]、 b は試験片の厚さ [mm]、 h は試験片の幅 [mm]、 S ははりの中央がたわんだ距離 [mm] である。規格では、たわみが大きい場合の非線形性を補正する式が場合分けされており、本式はこれに該当する。

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \left(1 + 6 \left(\frac{S}{L} \right)^2 - 3 \left(\frac{Sh}{L^2} \right) \right) \dots\dots\dots (1)$$

シミュレーションでは、Tsai-Wu 破損則を用いて安全率が1の時の荷重を曲げ強度とした。シミュレーション値は、試験値と比較してほぼ同等の値となった。

3. 4. 3 45° 切り出し試験片での比較

図14に、45° 切り出し試験片における、試験およびシミュレーションにより得られた荷重—変位線図を示す。荷重 50kN を境に、試験値とシミュレーション値が同等になっている。試験では、荷重が増すにつれて加速的に変位が大きくなっており、また除荷した後も大きく歪みが残留していたことから、この方向の変形に対する剛性は樹脂が支配的な要因であり、荷重が増すにつれて塑性変形していると考えられる。

3. 4. 4 シミュレーション結果の考察

今回使用したシミュレーションのソルバーでは、微小変形領域における線形解析を基本としている。このため、大きくたわんだ場合や、塑性変形する場合においては、非線形の影響を受けて、誤差が大きくなる傾向がみられた。しかしながら、誤差は最大でも30%程であり、通常、安全率3~4を見込んで設計する場合においては問題がなく、今後、設計に十分に活用できる。

4. まとめ

CFRTPを用いた製品開発を効率的に行うために、CAEの活用が有効であると考え、シミュレーションの精度について評価し、次の結果を得た。

- 1) シミュレーションに必要な物性値を取得する試験を実施し、方法を確立した。
- 2) シミュレーションでの計算値と実際の試験値を曲げ特性により比較し、互いの変位および強度は大差がないことを確認した。

今後は、使用する材料に応じて物性値を取得する試験ならびにシミュレーションを行い、効率的に下肢装具等のCFRTP製品設計を実施していく予定である。

また、試験方法に関しては、産業技術連携推進会議ナノテクノロジー・材料部会、高分子分科会共同研究におけるラウンドロビン試験により精度を再確認し、シミュレーションに関しては、今回使用したソルバーと別のソルバーについても引き続き評価する予定である。

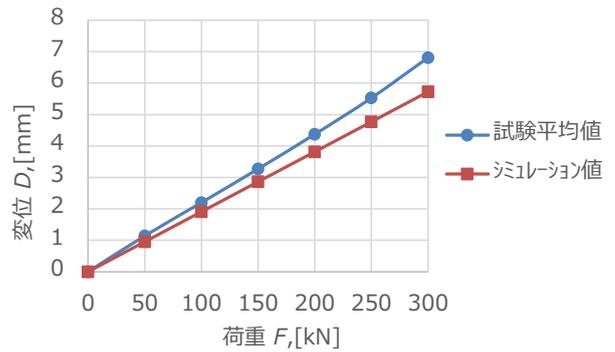


図12 荷重—変位曲線図 (0° 切り出し試験片)

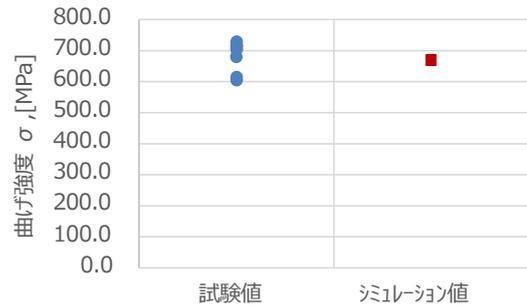


図13 曲げ強度結果 (0° 切り出し試験片)

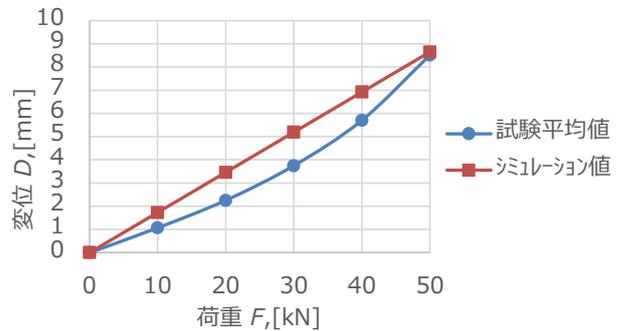


図14 荷重—変位曲線図 (45° 切り出し試験片)

【謝 辞】

本研究開発「CFRTPを活用した超軽量下肢装具の開発」は平成26年度より、株式会社仙技術研究所ならびに岐阜大学医学部附属病院と共同で実施しています。共同研究者ならびに関係者の皆様に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) JIS K 7164, プラスチック—引張特性の試験方法—
- 2) JIS K 7019, 繊維強化プラスチック—±45° 引張試験による面内せん断特性の求め方—
- 3) JIS K 7018, 繊維強化プラスチック—積層板の面内圧縮特性の求め方—
- 4) JIS K 7017, 繊維強化プラスチック—曲げ特性の求め方—

熱可塑性 CFRP（炭素繊維複合材料）の立体成形技術の確立（第2報）

道家 康雄、千原 健司、仙石 倫章、萱岡 誠、西村 太志

Study of the three-dimensional molding of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (II)

Yasuo Doke, Kenji Chihara, Tomoaki Sengoku, Makoto Kayaoka and Futoshi Nishimura

熱可塑性CFRPは、易加工性・短時間成形・リサイクル性等の優位点があり、従来、熱硬化性CFRP製品を加工していなかった企業が参入を検討している。本研究では熱可塑性CFRPの立体成形技術の確立と蓄積を目的とし、プレス成形条件を検討する。本年度は、半球モデル金型と電動サーボプレスを用い、クロス材熱可塑性CFRP（以下、「クロス材CFRTP」と表記）のφ65mm円試験片をプレス成形した。昨年度の130mm角試験片のプレス成形と同様、材料の予備加熱温度はマトリックス樹脂の融点以上、金型温度は80℃、プレス速度は200mm/s、において良好な成形品を得ることができた。

また、同様の設備により一方向性熱可塑性CFRP（以下、「UD-CFRTP」と表記）のプレス成形を行い、クロス材CFRTPの結果と比較したところ、予備加熱温度及び金型温度は同様の条件で良好な成形品を得た。しかし、プレス速度はUD-CFRTPでは10mm/s（実験条件中の最低速度）で、良好な成形品となる傾向があった。熱可塑性CFRPの成形では、炭素繊維の構成を考慮し、温度とプレス速度の条件を組み合わせた成形条件の設定が必要である。

1. はじめに

炭素繊維複合材料（CFRP）は、軽量で高強度という特性を活用して、航空宇宙分野や風力発電、スポーツ用品等に利用されている。近年、航空機・次世代自動車産業を中心に、CFRPの更なる利用拡大に向けて研究開発が進められている。特に熱可塑性CFRPは、従来の熱硬化性CFRPと違い、短時間での成形が可能であるとともに、リサイクルにも適しているため、量産製品への応用が期待されている¹⁾。

これまで熱硬化性CFRPの加工技術（成形・切削・穴あけ等）は、企業や研究機関で技術開発が行われ、ノウハウが蓄積されてきた。当所においても、文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム事業における研究で、CFRPの穴あけ装置を開発した²⁾。しかし、熱可塑性CFRPは現段階では一般に普及していない最先端の材料であることから、加工技術や評価方法の情報が不足している。特に製品化にあたっては、曲面立体形状の成形技術が重要な課題となっている。

本研究では、熱可塑性CFRPの基礎的な成形技術の確立とデータの蓄積を目的とし、モデル金型を用いたプレス成形条件の検討と成形品の評価を行っている。昨年度、クロス材CFRTPの基礎的なプレス成形技術として、130mm角試験片を半球モデル金型と電動サーボプレスを用いてプレス成形した結果を報告した³⁾。クロス材CFRTPのプレス成形条件設定に必要な指針を得ることはできたが、多様な成形例に対応するためには、更なるデータの蓄積が必要である。本年度は、クロス材CFRTPのφ65mm円試験片及びUD-CFRTPの130mm角試験片でプレス成形した結果を報告する。

なお、本報告は第63回高分子討論会（高分子学会）

及び第22回秋季大会（プラスチック成形加工学会）における発表^{4) 5)}をまとめた内容である。

2. 実験

2. 1 クロス材CFRTPのプレス成形

2. 1. 1 試験片

クロス材CFRTPは、マトリックス樹脂がPA66である熱可塑性CFRP（Bond-Laminates製TEPEX dynalite201、以下、「CF/PA66」と表記）の板材（厚さ2mm）を用いた。試験片は、ウォータージェット加工機（Flow international corporation製FlowMach3 1313b-XD）によりφ65mm円形に切り出した（以下、「φ65mm円CF/PA66試験片」と表記）。

2. 1. 2 プレス成形

φ65mm円CF/PA66試験片を成形治具で挟み、IRオーブン（ヤマト科学（株）製DIR631）で予備加熱した後、半球モデル金型（図1）と電動サーボプレス（（株）放電精密加工研究所製ZENFormer MPS675DS）を用いてプレス成形した。予備加熱温度は、260℃、280℃、300℃、320℃、金型温度は、30℃、80℃、プレス速度は、10mm/s、100mm/s、200mm/sの各条件を、適宜、組合せて実験をした。

2. 2 UD-CFRTPのプレス成形

2. 2. 1 試験片

マトリックス樹脂がPA6であるUD-CFRTP（以下、「CF/PA6」と表記）のシート材（TenCate製UD-CARBON/PA6 TAPE）を130mm角に切断し、炭素繊維の方向が「0°/90°/90°/0°」となるように4枚重ね、この操作を4回繰り返すことで16枚のシートを

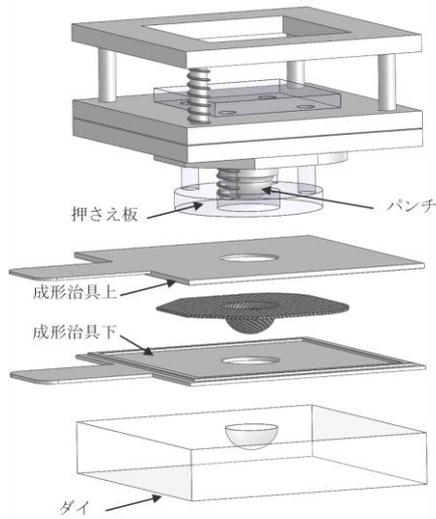


図1 半球モデル金型概要図

積層した。積層シートを熱プレス（240℃、10分間予備加熱後 1MPa で 1分間保持）することで厚さ 2mm の CF/PA6 積層板を作製し、成形用試験片（以下、「130mm 角 CF/PA6 試験片」と表記）とした。

2. 2. 2 プレス成形

130mm 角 CF/PA6 試験片を成形治具で挟み、IR オープンで予備加熱した後、半球モデル金型と電動サーボプレスを用いてプレス成形した。マトリックス樹脂が PA6（融点 225℃）であることを考慮して、予備加熱温度は、220℃、240℃、260℃、280℃、金型温度は、30℃、80℃、プレス速度は、10mm/s、100mm/s、200mm/s の各条件を、適宜、組合せて実験をした。

2. 3 成形品の評価

成形品外観及び切断面は、目視により評価した。成形品内部は X 線 CT システム（エクストロン・インターナショナル（株）製 Y.CT PrecisionS）により非破壊検査をした。また、成形品内部の炭素繊維を観察するため、樹脂に埋設して研磨した試験片を、金属顕微鏡（（株）ニコン製 光学顕微鏡 LV-UDM）により観察した。

3. 結果及び考察

3. 1 φ65mm 円 CF/PA66 試験片のプレス成形

3. 1. 1 予備加熱温度の効果

プレス速度を 200mm/s、金型温度を 80℃と一定とし、予備加熱温度を変化させた成形品の外観を図 2 に示す。予備加熱温度 260℃では半球部周辺に大きな折れ皺が発生するとともに、半球底部に割れが発生した。これは、材料温度が低く十分に軟化していなかったため、成形時、試験片に負荷がかかり、無理な変形をしたためで

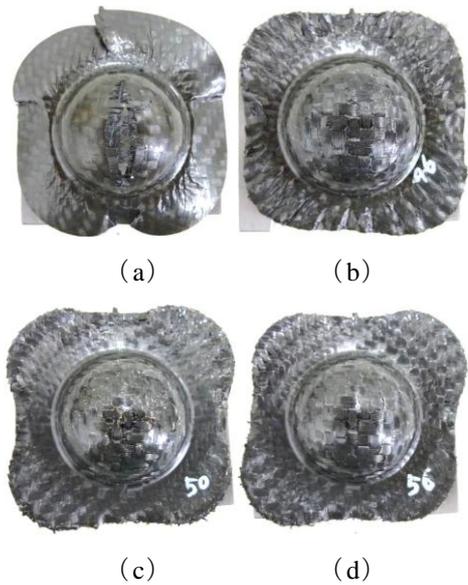


図2 予備加熱温度の違いによる CF/PA66 成形品
プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃、
予備加熱温度:260℃ (a) , 280℃ (b) ,
300℃ (c) , 320℃ (d)

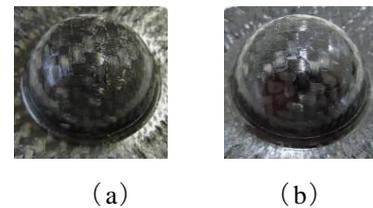


図3 金型温度の違いによる CF/PA66 成形品
予備加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、
金型温度:30℃ (a) , 80℃ (b)

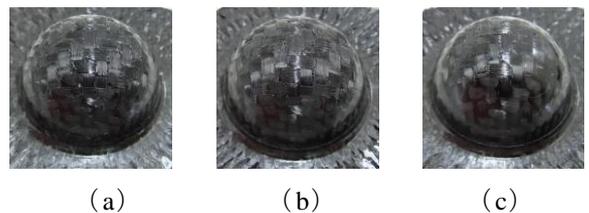


図4 プレス速度の違いによる CF/PA66 成形品
予備加熱温度:280℃、プレス速度:10mm/s (a) ,
100mm/s (b) , 200mm/s (c)

ある。予備加熱温度が 280℃以上では、割れることなく半球状に成形が可能であった。この結果は CF/PA66 の 130mm 角試験片（以下、「130mm 角 CF/PA66 試験片」と表記）と同様であり、φ65mm 円試験片においても PA66 の融点（265℃）以上に充分加熱することで立体成形が可能であることがわかった。

3. 1. 2 金型温度の効果

予備加熱温度を 280℃、プレス速度を 200mm/s で一定とし、金型温度を変化させた成形品の外観を図 3 に示す。半球底部の光沢を比較すると金型温度が 80℃における成形品の方が良品であった。本結果も 130mm 角 CF/PA66 試験片と一致しており、金型温度は高温である方がプレス成形には有利である。

3. 1. 3 プレス速度の効果

予備加熱温度を 280℃、金型温度を 80℃に一定とし、プレス速度を変化させた成形品の外観を図 4 に示す。プレス速度にかかわらず、半球形状への成形は可能であったが、半球底部の光沢を比較すると、プレス速度 200mm/s における成形品が最も良品であった。本結果も 130mm 角 CF/PA66 試験片と一致しており、良好な成形品を得るためには、試験片形状によらず、短時間でのプレス成形が有利であると考えられる。

3. 1. 4 成形品内部の評価

本実験において外観が良好であった成形品の一例（加熱温度：280℃、プレス速度：200mm/s、金型温度：80℃）の X 線 CT 像を図 5、切断面観察写真を図 6 (a)、切断面を拡大した金属顕微鏡観察像を図 6 (b) に示す。炭素繊維層間の剥離空隙は認められなかったが、炭素繊維と樹脂の界面の一部に空隙を確認した。

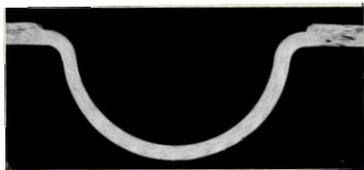


図 5 成形品（予備加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の X 線 CT 像

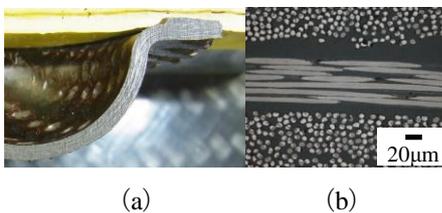


図 6 成形品（予備加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の切断面観察写真 (a) 及び金属顕微鏡観察画像 (b)

3. 2 130mm 角 CF/PA6 試験片のプレス成形

3. 2. 1 予備加熱温度の効果

プレス速度を 10mm/s、金型温度を 80℃と一定とし、予備加熱温度を変化させた成形品の外観を図 7 に示す。予備加熱温度 220℃では、半球周



(a) (b)



(c) (d)

図 7 予備加熱温度の違いによる CF/PA6 成形品
プレス速度:10mm/s、金型温度:80℃、
予備加熱温度:220℃ (a) , 240℃ (b) ,
260℃ (c) , 280℃ (d)



(a) (b)

図 8 金型温度の違いによる CF/PA6 成形品
予備加熱温度:240℃、プレス速度:10mm/s、
金型温度:30℃ (a) , 80℃ (b)



(a) (b) (c)

図 9 プレス速度の違いによる CF/PA6 成形品
予備加熱温度:240℃、金型温度:80℃、プレ
ス速度:10mm/s (a) , 100mm/s (b) , 200mm/s

辺部で炭素繊維が大きく乱れた成形品となった。これはクロス材 CFRTP と同様、材料温度が低く、マトリックス樹脂の流動性が低い状態でプレス成形したため、試験片が無理な変形をしたと考えられる。予備加熱温度が 240℃以上では、半球周辺部で炭素繊維が大きく乱れることなく成形が可能であった。本試験片のマトリックス樹脂は PA6 であり、その融点は 225℃である。予備

加熱温度が融点以上で成形が可能であったことは、マトリックス樹脂が PA66 (融点 265℃) であったクロス材 CFRTP と同様の結果となった。

3. 2. 2 金型温度の効果

加熱温度を 240℃、プレス速度を 10mm/s で一定とし、金型温度を変化させた成形品の外観を図 8 に示す。成形品底部の光沢を比較すると金型温度が 80℃における成形品の方が良品であり、金型温度は高温が有利であるというクロス材 CFRTP の結果と一致した。

3. 2. 3 プレス速度の効果

予備加熱温度を 240℃、金型温度を 80℃ に一定とし、プレス速度を変化させた成形品の外観を図 9 に示す。プレス速度によらず、半球形状への成形は可能であった。しかし、半球底部の光沢を比較すると、クロス材 CFRTP では試験片形状によらず 200mm/s において相対的に良好な成形品を得たのに対し、本試験片 (UD-CFRTP) では 10mm/s において良好な成形品を得た。これは、炭素繊維素材の構成の違いが原因であると考えられる。プレス成形では、マトリックス樹脂が容易に変形できる温度の保持が必要であるため、一般に高速成形が有利である。今回、遅いプレス速度 (10mm/s) で外観の光沢が最も良好な成形品が作製できたことは、単に材料温度の優位性だけで成形条件を設定してはいけないことを示唆している。CFRTP の最適なプレス成形条件を考えるためには、素材構成ごとに温度とプレス速度の条件を組み合わせたデータを蓄積する必要がある。

3. 2. 4 成形品内部の評価

本実験において、外観が良好であった成形品の一例 (加熱温度: 240℃、プレス速度: 10mm/s、金型温度: 80℃) の X 線 CT 像を図 10、切断面観察写真を図 11 (a)、切断面を拡大した金属顕微鏡観察像を図 11 (b) に示す。炭素繊維層間の剥離は認められなかったが、金属顕微鏡観察において多くの微細な空隙を確認した。CFRTP のプレス成形では、外観上、良好な成形品であっても、内部に空隙が多い場合があるため、成形品の外観と内部の両方を評価し、成形条件を検討する必要がある。

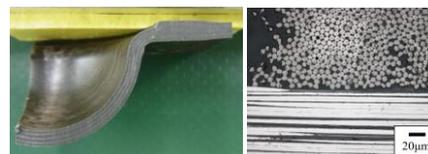
4. まとめ

本研究により次の結果を得た。

- 1) クロス材 CFRTP である $\phi 65\text{mm}$ 円 CF/PA66 試験片のプレス成形では、検討した条件中、予備加熱温度は 280℃以上、金型温度は 80℃、プレス速度は 200mm/s において良好な成形品を得ることができ、同素材の 130mm 角試験片と同じ結果となった。同素材の半球モデル金型によるプレス成形では、試験片形状に関わらず成形条件の設定指針は同じで良いことがわかった。



図10 成形品 (予備加熱温度:240℃、プレス速度:10mm/s、金型温度:80℃) の X 線 CT 像



(a) (b)

図11 成形品 (加熱温度:240℃、プレス速度:10mm/s、金型温度:80℃) の切断面観察写真 (a) 及び金属顕微鏡観察画像 (b)

- 2) UD-CFRTP である 130mm 角 CF/PA6 試験片のプレス成形では、検討した条件中、予備加熱温度は 240℃以上、金型温度は 80℃、プレス速度は 10mm/s において良好な成形品を得ることができた。この結果を 130mm 角 CF/PA66 試験片と比較すると、予備加熱温度はマトリックス樹脂の融点以上、金型温度は高温ということで、同様の傾向が見られたが、プレス速度については逆の結果となった。これは、熱可塑性 CFRP の素材構成の違い (クロス材と一方向性材) による炭素繊維の動き易さが一因と考えられる。熱可塑性 CFRP のプレス成形では、素材構成ごとに温度条件とプレス速度条件を組み合わせた成形条件の設定とデータの蓄積が必要である。

【謝 辞】

本研究遂行にあたり、金型製作にご協力いただいた (株) 岐阜多田精機様に深く感謝いたします。

本研究遂行にあたり、関連情報を提供していただいた太平洋工業 (株) 様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 熱可塑性 CFRP の最新プレス加工技術, プレス技術, Vol.51, No.7, pp.17-39, 2013
- 2) 柘植ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 1 号, pp.20-23, 2013
- 3) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 2 号, pp.35-38, 2014
- 4) 道家ら, 高分子学会予稿集, Vol.63, No.2, pp.7722-7723, 2014
- 5) 道家ら, 成形加工シンポジウム'14 予稿集, pp.471-472, 2014

熱可塑性樹脂部材のレーザ加工技術の開発

小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦

Development of laser beam machining technology of a thermoplastic resin component

Hiroshige Ogawa, Tomoyuki Tanaka, Tomohiko Imai

炭素繊維複合材料（以下 CFRP という）は、硬い積層材料であるため加工が容易ではなく、切削加工やウォータージェットでの様々な問題点が指摘されている。そのため、精密加工が可能で、メンテナンス性に優れ、異種金属や非導電性材料の加工が可能なファイバーレーザ加工機を用いて、レーザの熱影響について、加工条件と加工状態の関係を明らかにし、熱影響を最小化できる種々の方法について検討した。

レーザ切断では、パルスモードを使い、Duty 比を小さく、周波数を大きくすることで、熱影響部（以下 HAZ という）が小さくなる傾向にあることが分かった。φ10mm の穴に対して HAZ0.159mm まで抑えることができた。

レーザ溶着は、レーザ透過溶着法（LTW : Laser Transmission Welding 以下 LTW という）を用いて行い、適度な圧力で試料を押しつけることが重要で、レーザ照射エネルギー密度と接合力は密接に関係しており、エネルギー密度を高めるために、移動速度を遅くし、回転数を早くするのが良い。CFRP と PET のレーザ溶着試験では、引張剪断荷重 788.8N（接合部以外で破断）の結果を得た。

1. はじめに

ボーイング 787 で本格的に実用化された CFRP は、航空機や次世代自動車産業向けの市場が拡大する傾向にあるが、切断・穴あけ加工については、現状ではダイヤモンドカッター、ウォータージェットが使われており、刃先摩耗、粉塵の影響、産業廃棄物処理、ランニングコスト等の問題を抱えている。また、CFRP の用途拡大に向け、CFRP 等を含む樹脂同士の溶着や、樹脂と金属の接合（溶着）が求められている。そのため、精密加工が可能で、メンテナンス性に優れ、異種金属や非導電性材料の加工が容易なレーザ加工に期待が高まっており、本研究ではファイバーレーザを用いて実用的な加工条件を究明する。

2. 実験

2. 1 トレパニング加工シミュレーション

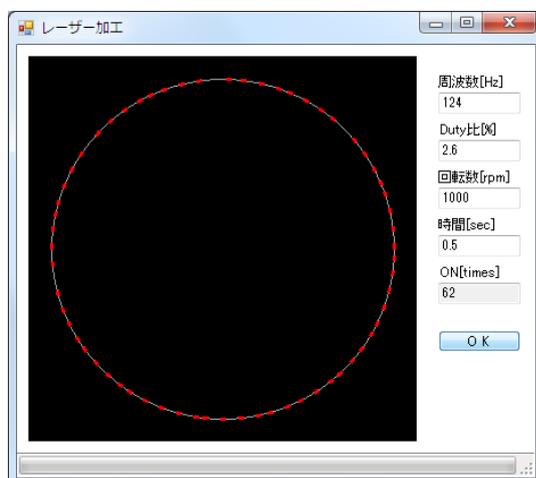


図1 トレパニング加工シミュレーション

実験を進める上で、周波数、Duty 比、回転数、照射時間の組合せによっては、同じ場所を繰り返し照射するだけで、全周が照射できない条件が存在する。そこでトレパニング加工シミュレーションを行い、事前にレーザ条件が良いか否かを判定する必要があり、プログラムを作成し確認した（図1）。

2. 2 トレパニング加工

本研究においては、レーザ加工機による CFRP の加工方法を検討し、CFRP 切断面を評価し、熱影響等を小さくするための最適加工条件を究明する。併せて、実用化を目指した加工時間、加工精度の問題点を抽出し、生産現場において利用可能なレーザ加工技術を確立する。

今回は、回転ヘッドによるトレパニング加工（図2）を中心にレーザ切断性能について評価実験を行う。

表1 実験条件

発振器	Rofin-Baasel FL010S
モード	PW
出力	1000W 設定可能範囲: 100~1000W
直径	φ 10mm 設定可能範囲: φ 0~22mm
繰返周波数	49, 124, 524, 1024, 2048Hz 設定可能範囲: 0~5000Hz
Duty比	2.6, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 16.0% 設定可能範囲: 2.6~100%
回転数	800, 1000, 2000rpm 設定可能範囲: 0~5000rpm
照射時間	10sec (2secON+1secOFF) × 5
CFRP マトリックス	TPU
板厚	1.0mm

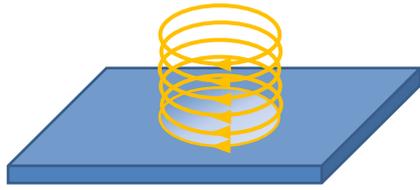


図2 回転ヘッドを用いたトレパニング加工

2. 3 穴あけ試験片引張試験

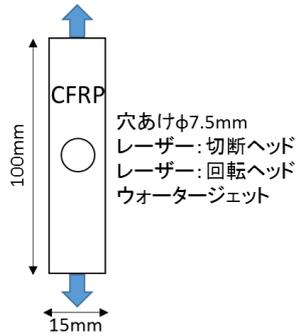


図3 引張試験片

レーザ切断性能については、HAZ 幅及び引張強度試験によって評価する。
引張試験片については図3の形状に加工したもので行う。ここでは3種類の加工方法の優位性を検証する。

2. 4 レーザ溶着試験

本装置を用いて、レーザ加工法による異種材料の溶着について研究する。今回は、樹脂 PET と CFRP の接合を中心に LTW 法を用いて加工する。

LTW の原理は、レーザービームを透過させる光透過性樹脂部品を、レーザービームを吸収させる光吸収性樹脂部品の上に重ね、接合したい面に圧力を加え、レーザービームを照射する。光透過性樹脂部品を透過したビームは、まず光吸収性樹脂部品の境界面付近で発熱し、熔融する。次にその熱は、熱伝導によって光透過性樹脂部品に伝わり熔融し、熔融プールを形成し、接合する。

CFRP の表面は光吸収性樹脂であり、この方法を用いてレーザ溶着実験を行い、接合面の欠陥及び強度向上の改善点を明らかにし、高品質な加工ができる条件を探索する。加工条件として、レーザの出力、周波数、摺動速度、回転速度、回転径及び焦点距離について、引張試験による評価を行って、最適な加工条件を究明する。

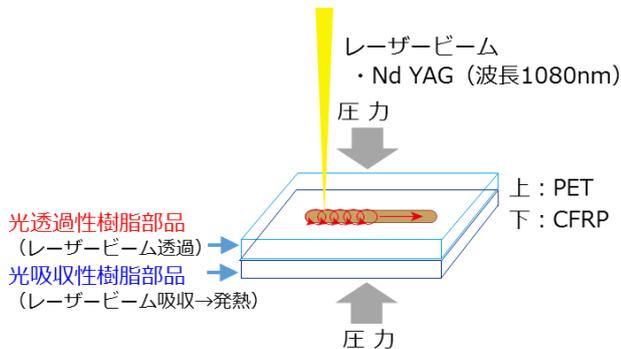


図4 レーザ溶着加工

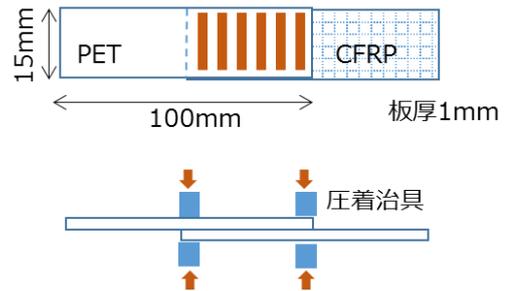


図5 レーザ溶着試験片



図6 レーザ溶着用圧着治具



図7 レーザ溶着試験片の引張試験

3. 結果及び考察

3. 1 トレパニング加工試験結果

レーザ加工では HAZ を全く無くすることはできない。必ず加工部周辺に熱影響が発生する。CFRP の加工において HAZ は実用上問題ない範囲内(目標値は $100\mu\text{m}$ 以下)に抑える必要があると考えている。

HAZ は工具顕微鏡を用いて図8のとおり計測した。



図8 溶融痕の評価方法

表1に示す条件でトレパニング加工を行い、HAZ に対する重回帰分析を行った。その結果を表2に、散布図を図9に示す。

表2 重回帰分析結果

目的変数	HAZ	
説明変数	周波数、Duty比、回転数	
重回帰式	$HAZ = a_1f + a_2d + a_3r + a_4*$	
寄与率	0.65452	
重相関係数	0.80902	
残差正規性のSW検定確率	0.2279	
F検定値	42.94167	
重回帰式の有効性の検定	有効	

* ただし、表中に示す重回帰式の各パラメータは、

HAZ: 熱影響域[mm]
 a_1 : 0.0001, f : 周波数[Hz]
 a_2 : 0.0376, d : Duty比[%]
 a_3 : 0.0001, r : 回転数[rpm]
 a_4 : 0.1146

である。

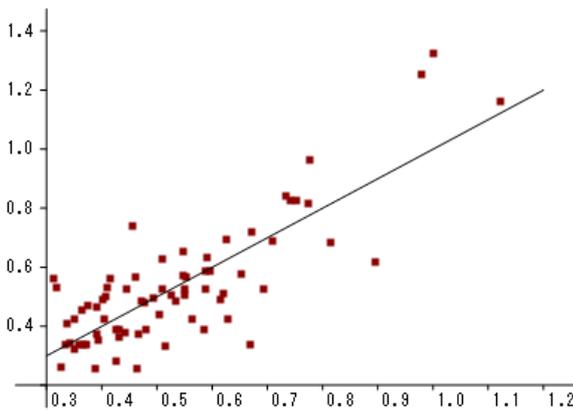


図9 実測/予測散布図

実験では、出力、照射時間は同一条件とした。この結果から、HAZはDuty比に最も影響を受け、周波数・Duty比・回転数の組合せにより、小さく出来る条件が存在する。

さらに表3に示す実験を行い、次の知見を得た。

No.1~3よりDuty比を上げるとHAZは大きくなる傾向にある。No.7~9より周波数を上げるとHAZは小さくなる傾向にある。ただしDuty比が大きい(10%以上)と周波数を上げてもHAZは小さくならない(No.3,4)。ただし、この中でNo.1及びNo.9は開孔していない。

表3 Duty比・周波数・HAZの関係性評価

No.	Duty比[%]	周波数[Hz]	HAZ[mm]	その他の条件
1	2.6	124	0.244	回転数1000rpm 2秒間1000W照射、1秒間休み、2秒間900W照射、1秒間休み・・・、2秒間600Wの合計10秒間照射 穴径φ 10mm
2	5	124	0.251	
3	10	124	0.675	
4	2.6	49	0.159	
5	5	49	0.358	
6	10	49	0.599	
7	5	124	0.251	
8	5	524	0.197	
9	5	1024	0.251	

3. 2 トレパニング加工方法の違いによる強度比較

比較したトレパニング加工方法は、以下の3種類で、①切断ヘッド・・・Duty比8%、周波数124Hz、出力1000W、パス数8回、加工速度1000mm/min、②回転ヘッド・・・Duty4%、周波数124Hz、出力1000W、回転速度1000rpm、照射時間(2秒ON+1秒OFF)×5=10秒、③アブレイションウォータージェット(WJ)・・・水圧350MPa、切断速度1000mm/minの条件加工で、同じ形状、穴径はφ7.5mmに加工した(図3)。それについて、引張強度の比較試験を行い、結果を図10に示す。

この結果、若干の差が生じているが、どの加工方法でも引張強度は同じ位であると見なせる。さらに言うならば、回転ヘッドを用いた方が、強度試験の測定値誤差の範囲が最も小さく、加工が均一で再現性が良いと推察できる。

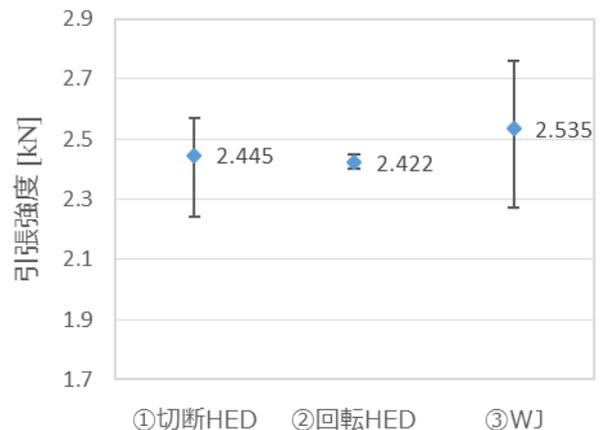


図10 トレパニング加工の違いによる引張試験結果

3. 3 レーザ溶着試験結果

異種材料の溶着においては、溶着面以外つまり引張強度の低い方の材料側で破断することが目標となる。表4に示す条件でレーザー溶着加工を行い、引張試験による評価を行った。今回は、素材として厚み1mmのCFRP(カーボン45%/TPU綾織り)と樹脂PETに絞って、加工条件を探索した。この結果、いずれの試験片も溶着面が剪断破壊に至ること無く、樹脂側で破断された。最も大きい強度が得られた加工条件は、図11より移動速度20mm/min、回転数4000rpmであった。即ちエネルギー密度が大きい条件であることが分かった。ただし、レーザー出力に応じて加工する移動速度は適正範囲があり、出力が大きい、或いは試料の厚みが小さい場合には、移動速度が遅すぎると、レーザー照射面が局部的に熱せられ、熱的破壊に至る。今回の実験条件は1)報の基礎実験結果を踏まえて、熱的破壊に至らない条件で行った。

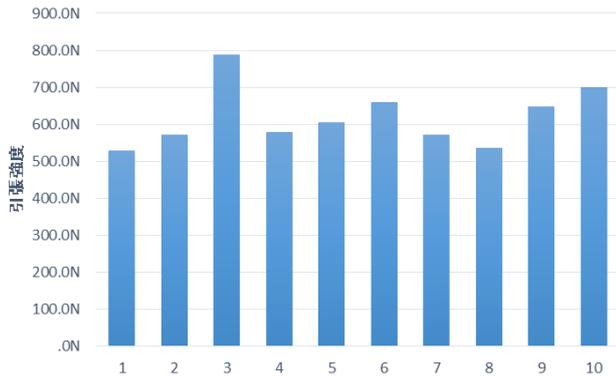


図1-1 溶着試験片の引張試験結果

4. まとめ

CFRP のレーザによる切断加工は可能であるが、熱影響層を全く無くすることはできないため、それを出来るだけ小さくし、且つ加工時間を短くする手法の実現が期待されており、本研究で最適条件の探索を行った。

切断・穴空け加工においては、どちらも試料を切取る加工であり、加工条件の究明としては同じ課題として扱えるので、今回は穴空け加工に絞って実験した。HAZ への影響については、Duty 比を上げると大きくなり、パルス波の繰返周波数を上げると小さくなる傾向にあることが分かった。このことはレーザエネルギー密度に起因しており、Duty 比を上げる或いは周波数を下げるということはエネルギー密度を大きくするということであり、これが大きいと HAZ も大きくなるということは容易に想像できる。ただし実験の結果から Duty 比が 10%以上になると周波数を上げてても HAZ はそれ程小さくならな

った。つまり周波数よりも Duty 比の影響の方が大きいからである。重回帰分析結果からも裏付けられている。

結論として、材料種類や厚みによって今回の条件をそのまま適用出来ないが、Duty 比を低めにし、図1のシミュレーションで確認しながら周波数、照射時間をそれぞれ決定することで、HAZ を小さくできる条件が見つかる。

また、CFRP の切断加工によく用いられる WJ と比較した実験より、穴空け加工試験片の引張強度は、大きく差が出た訳では無く、HAZ を抑えたレーザ加工条件であれば、利用可能であると考えられる。

CFRP と異種材料とのレーザ溶着について、今回は、CFRP と PET に絞ってレーザ溶着加工試験片の評価を行った。

適度な圧力で押しつけることが非常に重要で、1) 報の実験では無かった圧着治具を使って加工した結果、接合力に大幅な改善が見られた。表4に示した条件全てにおいて、引張試験の際、接合部分から破断すること無く、PET 側で破断した。CFRP1mm と PET1mm のレーザ溶着では、CW 出力 30W、移動速度 20mm/min、回転数 4000rpm の加工条件が最も良く、引張剪断荷重 788.8N を得た。エネルギー密度を大きくすることが重要で、適度なレーザ出力で、移動速度は遅く、回転速度は速く、の組合せが良い傾向にある。

【参考文献】

- 1) 小河ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第2号, pp.1-4, 2014

表4 各種材料のレーザ溶着条件と強度試験結果

条件	CFRP マトリックス	相手材	Mode	出力	速度	回転数	回転径	焦点距離	引張剪断荷重
1	TPU	PET	CW	40W	F100mm/min	800rpm	φ 2mm	JUSTFocus	529.6N
2	TPU	PET	CW	100W	F2000mm/min	800rpm	φ 2mm	JUSTFocus	573.0N
3	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	4000rpm	φ 2mm	JUSTFocus	788.8N
4	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	0rpm	φ 2mm	out2mm	579.2N
5	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	0rpm	φ 2mm	out5mm	605.9N
6	TPU	PET	CW	35W	F100mm/min	800rpm	φ 2mm	out5mm	659.2N
7	TPU	PET	CW	100W	F2000mm/min	800rpm	φ 2mm	out5mm	570.9N
8	TPU	PET	CW	35W	F100mm/min	4000rpm	φ 2mm	out5mm	536.3N
9	TPU	PET	CW	35W	F20mm/min	800rpm	φ 2mm	out5mm	648.7N
10	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	4000rpm	φ 2mm	out5mm	700.0N

ウォータジェットによる CFRP 加工効率化に関する研究 (第1報)

西村 太志、小河 廣茂

A study of abrasive water jet to cut CFRP structures efficiently (I)

Futoshi Nishimura and Hiroshige Ogawa

ウォータジェット加工機は添加する研磨剤等により運転経費が高いため、これまで一般的には利用されていなかった。しかし、硬い金属でも柔らかい樹脂でも加工できる汎用性の高さから、今後の利用拡大が期待される。本研究ではウォータジェット加工機による加工面の精度を評価するため、表面粗さとバリの高さを調べた。厚さ50mmまでの材料であれば表面粗さはフライス削り程度の粗さになることが確かめられた。延性の高い材料ほど、バリの高さも大きくなることが分かった。

1. はじめに

経済産業省平成24年度補正予算事業「地域新産業創出基盤強化事業」により当所に設置されたウォータジェット加工機は高圧の水を細いノズルから噴射した噴流に研磨剤を添加して金属などの切断や穿孔が可能な加工機である。研磨剤が比較的高価であるが、①材料の変形・歪が少ない、②発熱しないので熱影響がない、③水で濡れるので粉じん飛散がない、④任意の点で加工開始・終了ができるなどの他の加工にない特徴を併せ持つ。このような特徴から炭素繊維を積層させた炭素繊維複合材（以下、CFRP）などへの適用が期待されるが、本報では金属の加工特性を明らかにする。

松井ら¹⁾は約200MPaで170mm厚のSUS304を切断し、目視による切断面の観察から、他の切断法との優位性を述べている。清水ら²⁾がジェットの水滴速度を測定し、断面の傾きと研磨剤量の関連を指摘している。沢村ら³⁾は水滴と研磨剤それぞれの速度を測定し、加工量の大きくなる研磨剤添加量を考察している。しかしこれまでのところ、切断面の仕上がりについて数値的な評価はあまり行われていない。

本研究では様々な金属材料をウォータジェット加工機で切断し、その断面粗さやバリの大きさ、断面の傾きを測定する。これらからウォータジェット加工機の仕上がりを数値的に評価する。

2. 実験

2.1 ウォータジェット加工機

図1にウォータジェット加工機で材料を切断している様子を示す。加工機はFlow製 FlowMach3 1313b-XDであり、最大圧力350MPaに加圧した水を0.254mmのノズルから噴射し、これに研磨剤を添加している。

2.2 切断サンプル

図2に加工面の粗さ、傾きを調べるための試験片を示す。赤で示した面を切断する。材質はSUS303, SS400, S45C, A2017, A5052, 純チタンである。図には示さないが、



図1 チタン切断の様子

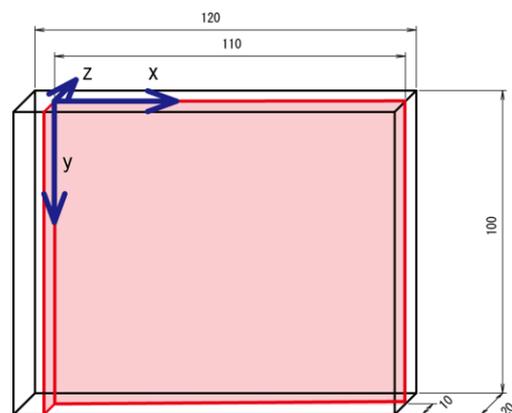


図2 切断サンプルの寸法

厚さ1mmのSUS304,A5052,純チタンをJIS Z 2241の13B号試験片に加工し、発生したバリ高さを調べる。

2.3 硬さ、表面粗さ、バリ高さの測定

硬さ測定には(株)アカシ製AVK-C0を用いる。表面粗さ測定にはテイラーホブソン(株)製フォームタリサーフシリーズ2 S4Cを用いる。バリ高さ測定には(株)キーエンス製レーザ変位計LK-G5000(±3mm,繰り返し精度0.02μm,スポット径25μm)を用いる。

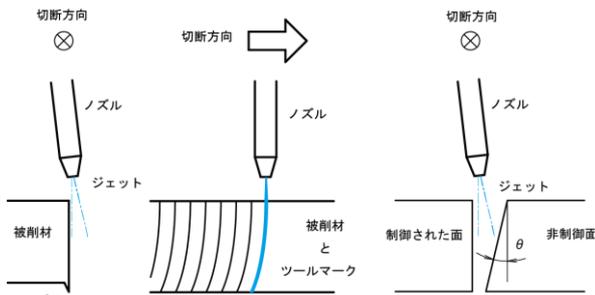


図3 バリ・ツールマーク・面の傾き

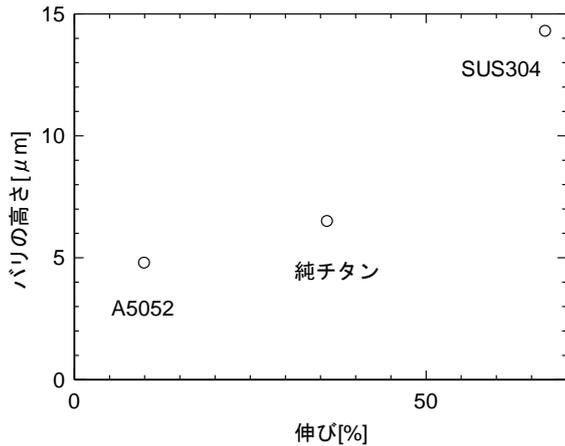


図4 バリの高さと材料の破断伸びの関係

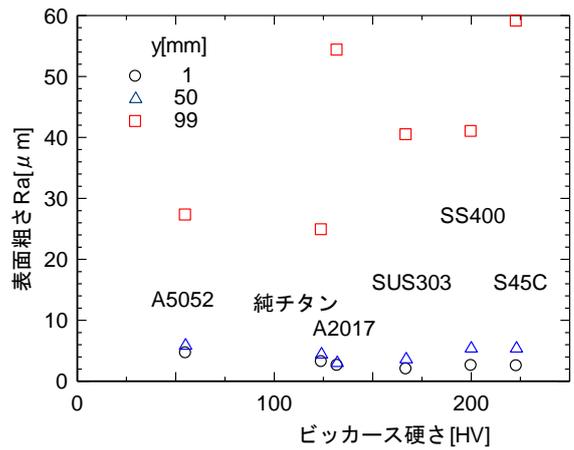


図5 表面粗さと材料硬さの関係

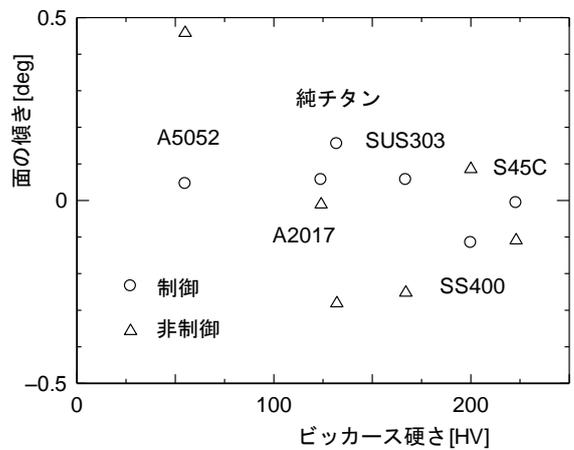


図6 切断面の傾きと材料硬さの関係

3. 結果及び考察

3.1 バリ高さ

ウォータージェット加工では図3左側に示すようにバリが発生する⁴⁾。薄板は切断後にそのまま板金加工や溶接されることが多く、バリが問題となる。図4に薄板のバリの高さと引張り試験から得られる破断伸びの関係を示す。破断伸びが大きい材料ほどバリが高いことがわかる。

3.2 切断面の表面粗さ

笹原⁵⁾が指摘しているように、ウォータージェット加工では厚い材料ほど噴流の直進性が失われ、切断面の粗さが大きくなる(図3中)。厚板から部品の荒取りを行った後、マシニングセンタ等で仕上げられる。このため、表面粗さが注目される。図5に厚さ100mmの材料を切断したときの表面粗さ結果を示す。ノズルに近いところでは粗さが小さく、フライス削りの粗さ(一般にRa=0.8~6.3μm)に相当する。反対側では急激に大きくなり、火炎による切断(Ra=12.5~25μm)相当になっている。

3.3 切断面の傾き

ウォータージェット加工機では切断時間を短縮するため、傾き補正を行っている(図3右)。このとき製品側(傾きが制御された側)では断面が直角となる。残された側(非制御側)は任意の角度になる。この結果を図6に示す。どの材料でも制御側では直角になっていることがわかる。

4. まとめ

ウォータージェット加工機による加工面の仕上がりが明らかになった。

- (1) バリ高さは破断伸びの大きさに比例する。
- (2) 表面粗さはノズルから離れるほど大きくなる。
- (3) 傾き補正機能により切断面は直角になる。

【参考文献】

- 1) 松井ら, 溶接学会全国大会講演概要 第44集, pp.258-259, 1989
- 2) 清水ら, 日本機械学会論文集(B編) Vol.70, No.691, pp.629-639, 2004
- 3) 沢村ら, 日本機械学会論文集(B編) Vol.66, No.641, pp.50-56, 2000
- 4) 北嶋, バリ取り・エッジ仕上げ大全, 日刊工業新聞社, 2014
- 5) 笹原, 機械と工具 No.6, pp.10-16, 2010

熱可塑性 CFRP の切削・研削加工技術の確立 (第2報)

柘植 英明、加賀 忠士、萱岡 誠

Establishment of the cutting and grinding processing technology of CFRTP (II)

Hideaki Tsuge, Tadashi Kaga and Makoto Kayaoka

熱可塑性 CFRP は、ホットプレス成形により短時間で成形を行うことができるため、自動車等の量産部品に適した材料として注目されている。本研究では、熱可塑性 CFRP の切削および研削加工による端面加工（トリム加工）を行い、熱可塑性 CFRP の加工特性を把握するとともに、熱可塑性 CFRP の加工に適した加工技術の確立を目指す。今年度は、熱可塑性 CFRP に適した切削工具仕様の検討およびダイヤモンド配列砥石を用いたトリム加工について基礎的な検討を行った。その結果、切削加工においては、熱可塑性 CFRP に適した工具のすくい角およびねじれ角を把握することができた。また、研削加工においては、ダイヤモンド配列砥石の加工性能がダイヤモンド電着砥石よりも非常に優れていることが明らかとなった。

1. はじめに

熱可塑性 CFRP は、ホットプレス成形により、短時間で成形を行うことができるため、量産が必要となる自動車部品等に適した材料として注目されており、実用化に向けた取り組みが行われている^{1)~3)}。しかし、プレス成形後に製品外周部の端面加工が必要となることがあるが、熱可塑性 CFRP は、熱硬化性 CFRP と同様に工具摩耗やバリ等の欠陥が生じやすい難削材料である。また、熱可塑性 CFRP は、新しい材料であることから加工データは蓄積されておらず、切削および研削加工における加工データの収集が必要不可欠となっている。

昨年度は、ダイヤモンドコーティング超硬エンドミルを用いたトリム加工における冷却の影響およびダイヤモンド電着砥石を用いたトリム加工について加工条件が加工面性状に及ぼす影響について検討した⁴⁾。

そこで本年度は、熱可塑性 CFRP に適した工具仕様を検討するために、工具形状と加工条件を変えた場合の加工力を理論計算することによって工具仕様を絞り、工具を試作して加工性能を評価した。また、ダイヤモンド配列砥石を用いた研削加工における加工性能を評価したのでこれを報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置および被削材料

加工実験には5軸 NC 加工機（ヤマザキマザック、VARIAXIS630-5X）を用い、熱可塑性 CFRP は、BOND LAMINATES 社の TEPEX201を用いた。加工実験用の被削材として、切削加工実験においては厚さ2mmの板材をそのまま用い、研削加工においてはホットプレス（Pinette Emidecau Industries、ONE DOWN-ACTING SINGLE ACTION 500）を用いて、2枚を重ね合わせて4mm厚にした板材を用いた。この試料を、55×45mmの大きさに切断し、固定用の穴を左右に3穴ずつ設けた。

2.2 エンドミルによる切削加工

熱可塑性 CFRP に適した切削工具の仕様を検討するために、図1に示すような、ねじれ角0°、すくい角0°、工具径φ12mmの2枚刃超硬エンドミルを用いて、リード角0°、工具回転数6000min⁻¹、送り0.2mm/tooth（送り速度2400m/min）のトリム加工（半径方向の切込みは、エンドミル直径と同じ12mmのスロットニングで、試験片を2つに分割）による切削力測定実験を行った。加工実験の様子を図2に示す。ここで得られた加工力データを基に、工具形状および加工条件による加工力の概算を行うことで工具仕様を絞り込んだ。その後、工具を試作して加工実験を行った。図2に、切削加工実験の様子を示す。

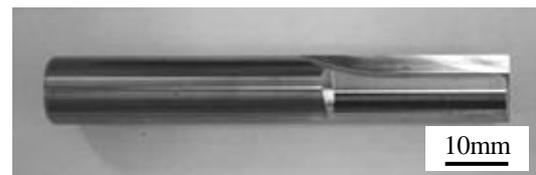


図1 切削工具の外観

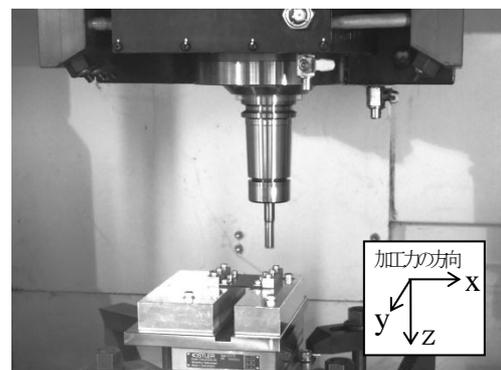


図2 切削加工実験の様子

2. 3 砥石による研削加工

昨年度に実施したダイヤモンド電着工具によるトリム加工実験では、工具回転数 1000 min^{-1} 、送り速度 50 mm/min の加工条件以外では加工が困難であった。その理由として、研削加工においては、 1 mm の径方向切込量は大き過ぎるために目詰まりが生じたことが考えられる。そこで、径方向切込量を 0.5 mm として、図3に示す直径 $\phi 10 \text{ mm}$ 、ダイヤモンド粒度#60 のダイヤモンド電着砥石を用いて加工実験を行った。なお、加工条件については、昨年度実施した条件のうち、単位回転あたりの送りが同じになる、工具回転数 1000 min^{-1} 、送り速度 50 mm/min と工具回転数 2000 min^{-1} 、送り速度 100 mm/min 、工具回転数 4000 min^{-1} および送り速度 400 mm/min 、工具回転数 8000 min^{-1} 、送り速度 200 mm/min の4条件にて加工実験を実施した。図4に加工実験の様子を示す。



図3 ダイヤモンド電着砥石の外観

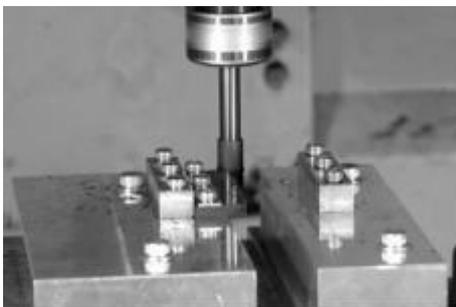


図4 研削加工の様子



(a) 粒度#60



(b) 粒度#80

図5 ダイヤモンド配列砥石の外観

熱硬化性 CFRP の加工においては、ダイヤモンド配列砥石の研削能力が一般的なダイヤモンド電着砥石よりも優れていることが明らかとなっている⁵⁾ので、熱可塑性 CFRP への適性についても検討した。用いたダイヤモンド配列砥石の外観を図5に示す。粒度は#60、砥粒ピッチは 0.8 mm である。ダイヤモンド砥粒の配列は、加工面に研削痕が目立たないようにするために円周方向に対して僅かに傾けてダイヤモンド砥粒を配置している。

3. 結果及び考察

3. 1 切削加工における工具形状の検討

工具形状と加工条件を変えたときの加工力を求める切削理論は既に確立されており^{6) 7)}、本研究においても、この手法を用いて加工力の概算を行う。

加工力を概算するために、ねじれ角 0° 、すくい角 0° 、工具径 $\phi 12 \text{ mm}$ の超硬工具を用いたトリム加工(半径方向の切込みは、エンドミル直径と同じ 12 mm のスロットニングで、試験片を2つに分割)における切削実験を行い、加工力を計測した。計測した加工力を図6に示す。なお、加工力の F_x 、 F_y 、 F_z の方向は図2に示すとおりである。この加工実験から得られた加工力のデータから、円周方向の切り取り厚さと加工力の関係を得ることができ、加工力の概算に必要な単位切れ刃長さあたりのエッジフォース(刃先の丸みに起因する切削力)、摩擦角、せん断面せん断応力の各係数を同定し、各ねじれ角における3方向の比切削抵抗を求めている。これらの係数を用いた加工力概算が、実際の加工力と一致しているかどうかを確認するために、リード角を -40° にした場合の実際に切削したときの加工力と加工力概算を比較した。その結果、図7に示すように、実切削時の加工力と加工力概算の結果は、ほぼ合致していることを確認した。

次に、熱可塑性 CFRP に適した工具仕様を検討するために、上記で得られた単位切れ刃長さあたりのエッジフォース、3方向の比切削抵抗を用い、ねじれ角、すくい角を変えたときの加工力の概算を行った。

加工条件を含めた工具の基本仕様の決め方は、板材のばたつきを少なくすること、つまり、板厚方向に働く力の変動幅が小さくなることを主眼に置いている。本研究では、加工力の概算結果を基に、工具の基本仕様を絞り込み、6種類の工具を試作して加工性能を評価した。

一例として、すくい角 7° 、ねじ角 10° の試作工具 No.4 の工具を用いて、リード角 0° 、工具回転数 6000 min^{-1} 、送り 0.2 mm/tooth の条件における加工面を図8に示す。この図からわかるように、バリの発生していない良好な加工面となっている。加工面粗さについては、 R_a が $2 \mu\text{m}$ を下回る値となっている。また、昨年度実施した市販のダイヤモンドコートエンドミルによる加工面(図9)と比較すると、試作した工具による加工面はバリがほとんど発生していない良好な加工面となっており、試作工具の有用性が示された。

3. 2 研削加工におけるダイヤモンド配列砥石の検討

図10に、ダイヤモンド粒度#60のダイヤモンド電着砥石を用いて、単位回転あたりの送りが同じになる、工具回転数 1000 min^{-1} 、送り速度 50 mm/min と工具回転数 2000 min^{-1} 、送り速度 100 mm/min 工具回転数 4000 min^{-1} 、送り速度 200 mm/min 、および工具回転数 8000 min^{-1} 、送り速度 400 mm/min の条件におけるトリム加工面を示す。ダイヤモンド電着砥石では、工具回転数 4000 min^{-1} 、送り速度 200 mm/min の加工条件からは加工が困難となっていることがわかる。これに対して、ダイヤモンド配列砥石では、図11に示すように、工具回転数 8000 min^{-1} 、送り速度 8000 mm/min においても加工が可能である。また、表面粗さについては、ダイヤモンド電着砥石は、加工が可能であった工具回転数 2000 min^{-1} 、送り速度 100 mm/min において、 R_a 値が $10.9 \mu\text{m}$ であったのに対して、ダイヤモンド配列砥石においては、工具回転数 8000 min^{-1} 、送り速度 2000 および 4000 mm/min においては R_a 値が $0.9 \mu\text{m}$ 、送り速度 8000 mm/min では $1.5 \mu\text{m}$ と良好な加工面になっている。以上から、熱可塑性CFRPの研削加工において、ダ

イヤモンド配列砥石はダイヤモンド電着砥石と比べ20倍以上の加工速度で加工が可能であることが明らかとなった。図12および13にダイヤモンド電着砥石およびダイヤモンド配列砥石の加工後の砥石作用面を示す。ダイヤモンド電着砥石では目詰まりが僅かに生じているが、ダイヤモンド配列砥石は目詰まりが全く見られない。このことから、耐久性についても優れていると考えられる。

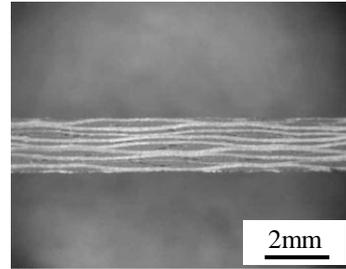


図8 試作工具No.4における加工面（アップカット側）
(6000 min^{-1} , リード角 0 deg , 0.2 mm/tooth)

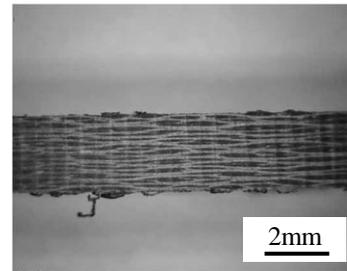


図9 市販エンドミルによる加工面（アップカット側）
(6000 min^{-1} , リード角 0 deg , 0.2 mm/tooth)

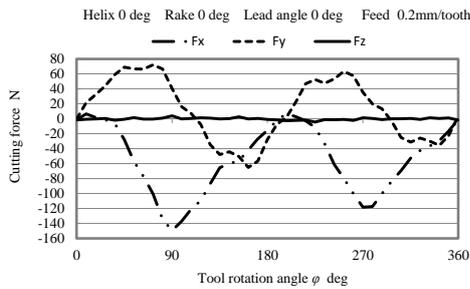
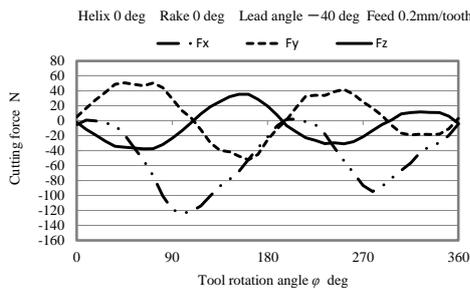
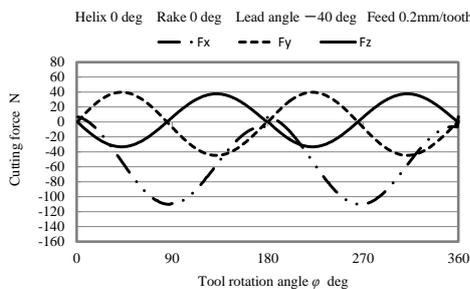


図6 トリム加工（リード 0° ）における実際の加工力

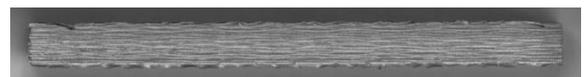


(a) 実際の加工力

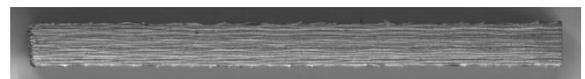


(b) 概算した加工力

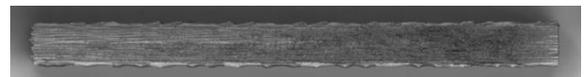
図7 トリム加工（リード -40° ）における切削力



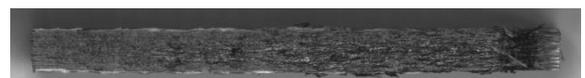
(a) 工具回転数 1000 min^{-1} 、送り速度 50 mm/min



(b) 工具回転数 2000 min^{-1} 、送り速度 100 mm/min

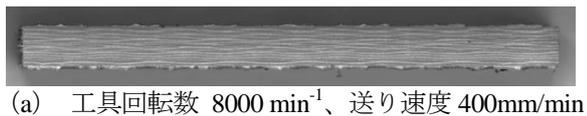


(c) 工具回転数 4000 min^{-1} 、送り速度 200 mm/min

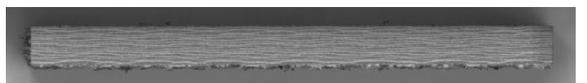


(d) 工具回転数 8000 min^{-1} 、送り速度 400 mm/min

図10 ダイヤモンド電着砥石による研削加工面

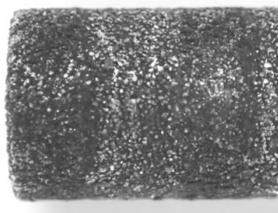


(a) 工具回転数 8000 min⁻¹、送り速度 400mm/min

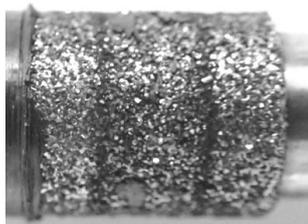


(b) 工具回転数 8000 min⁻¹、送り速度 800mm/min

図1.1 ダイヤモンド配列砥石による研削加工面



(a) 工具回転数 2000min⁻¹、送り速度 100mm/min



(b) 工具回転数 4000min⁻¹、送り速度 200mm/min

図1.2 加工後のダイヤモンド電着砥石の作用面

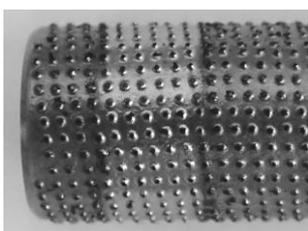


図1.3 加工後のダイヤモンド配列砥石の作用面
(工具回転数 8000min⁻¹、送り速度 800mm/min)

4. まとめ

熱可塑性 CFRP の切削および研削加工によるトリム加工実験を行った結果、下記の結論を得た。

- 1) 切削加工においては、熱可塑性 CFRP に適した工具仕様を検討するための加工実験を行い、工具を試作した。試作した工具を用いてトリム加工を行った結果、一般的なエンドミルによる加工と比べ、バリがほとんど発生しない良好な加工面となることが確認できた。
- 2) ダイヤモンド配列砥石による加工性能は、#60 ダイヤモンド電着砥石の 20 倍以上の加工速度で加工が可能であることが明らかとなった。

今後は、熱可塑性 CFRP に適した切削工具の仕様および研削加工技術について更に検討を行い、熱可塑性 CFRP の加工技術の確立を目指す。

【謝 辞】

本研究の一部は、株式会社 エムテック様との共同研究により実施しました。ご協力を頂きました皆様に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 青木, CFRP の自動車分野への応用の現状と課題, 機械技術, Vol.62, No.13, pp.24-28, 2014
- 2) 加賀ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 1 号, pp.24-27, 2013
- 3) 前田, 炭素繊維の応用と市場, シーエムシー出版, 2008
- 4) 柘植ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 2 号, pp.39-42, 2014
- 5) 柘植ら, 砥粒加工学会誌, Vol.58, No.3, pp.168-172, 2014
- 6) 社本ら, 切削機構を理解しよう, 日本機械学会講習会テキスト, pp.1-14, 2008
- 7) 社本ら, 3次元切削機構に関する研究(第1報), 精密工学会誌, Vol.68, No.3, pp.408-414, 2002

CFRP とチタン合金の共穴加工に関する研究

加賀 忠士

Study on drilling of stacked plates of CFRP and Titanium Alloy

Tadashi Kaga

チタン合金の切りくず処理について、旋盤を用いた二次元切削実験を行い、チップブレイカによる切りくず分断化の検討を行った。その結果、切取り厚さ 0.05mm では、切りくずの分断はみられなかった。一方、切取り厚さ 0.1mm および 0.15mm では分断する条件があったものの、切りくず処理として期待できる細かさに至らなかった。この結果から、従来のドリル+リーマー加工に代わる新たな穴あけ加工法の開発は、切りくずの分断化処理から連続化処理へ方針を変更する。

1. はじめに

航空機産業分野では燃費向上のため軽量化が図れる炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）の利用が拡大している。これに伴い、CFRP と組み合わせるアルミニウム合金の問題点が指摘されており、CFRP と接触するアルミニウム合金ではガルバニック腐食が生じること、また、飛行中の温度と地上との温度差において 100 度近くに達する場合もあり、これを繰り返すと熱膨張率の差が大きいアルミニウム合金と CFRP ではズレ、ファスナーの緩みなどを生じやすくなることからチタン合金の利用が拡大している。

このようにチタン合金が多く使用される中、機体の製造工程の組立時に、CFRP からチタン合金への共穴加工が必要となる。この場合、チタン合金の切りくずが CFRP の穴内面を傷つけてしまう問題がまず挙げられ、次に CFRP 切削で生じた急激な工具摩耗の状態ではチタン合金を切削すると、スラスト力増加により CFRP とチタン合金間で隙間が発生し、そこにチタン合金切りくずが入り込む問題や、チタン合金の切削熱増加が CFRP にダメージを与えてしまう問題が指摘されている。これらの問題に対し、生産現場ではドリル加工後リーマー加工を行う 2 段階の工程と、頻繁な工具交換を実施するという能率の悪い方法で製造している。そこで、より高能率加工法の検討が望まれている。

従来のドリル加工では、切りくずが穴の内面に接触して排出されるため、切りくずが穴内面を傷つけてしまうことは避けられない。また、チゼル部があるため、工具中心部付近は負のすくい角になっていること、また工具中心では切削速度がゼロになっていることから、穴の中心付近では、穴の外周部付近と比較して大きなスラスト力が生じてしまう¹⁾ことも避けられない。

そこで、本研究では、従来のドリル+リーマー加工に代わる新たな穴あけ加工法を検討している。本報告では、第一段階として、チタン合金の切りくず処理に着目し、旋盤を用いた二次元切削実験を行い、チップブレイカによる切りくず分断化の検討を行った。

よる切りくず分断化の検討を行った。

2. 実験

2.1 実験装置および実験方法

被削材は、Ti-6Al-4V のチタン合金（板厚 1.7mm）、実験装置は汎用旋盤（株）池貝 AM-20）を用いた。実験装置の概要を図 1 に示す。被削材のチタン合金は治具を介して回転軸側に固定され、一方、工具は刃物台上に 3 成分切削動力計（キスラー製 9257B）を介し設置している。実験は、刃物台が回転軸に向かって進行しながら板厚の全幅を切削する外周断続切削を行った。なお、切削実験はミストを吹き付けた状態で行った。

2.2 実験工具

工具の写真を図 2 に示す。工具材種は超硬でノンコート、形状はすくい角 20 度、逃げ角 5 度、刃幅 5mm、そして、すくい面上に 45 度のチップブレイカを刃先の先端から任意の距離（以下、PCB と表記する）に配置できる構造を準備した。

本研究で行った実験条件を表 1 に示す。

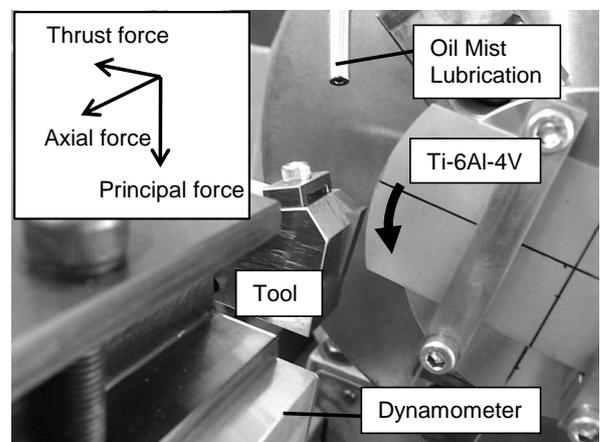


図 1 実験装置の概要

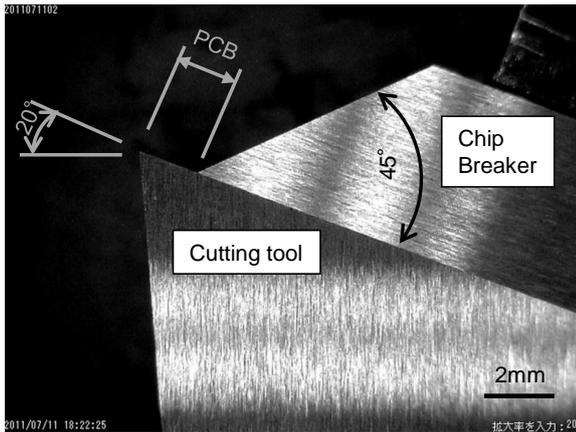


図2 工具の概要

表1 実験条件表

被削材	Ti-6Al-4V
被削材の板厚 mm	1.7
工具材質	超硬(ノンコート)
刃幅 mm	5
すくい角 deg	20
逃げ角 deg	5
チップブレーカの角度 deg	45
切削速度 m/min	15
切り取り厚さ mm	0.05, 0.1, 0.15
チップブレーカの刃先からの距離PCB mm	0.072 - 1.702

3. 結果及び考察

3.1 切りくずの分断化

切り取り厚さ 0.05mm におけるチップブレーカの刃先からの距離（以下、PCB）を変化させた時の切りくずの様子を図3に示す。これらの結果から、切りくずの分断はみられなかった。一方、切り取り厚さ 0.1mm、0.15mm においては、チップブレーカを刃先に近づけることによって切りくずの分断がみられた。これらの切りくずの様子を図4に示す。しかし、穴あけ加工時の切りくず処理を考慮すると、本実験条件で分断できた切りくずの大きさでは、新たな穴あけ加工法を検討するのに必要な細かさに至らなかった。

3.2 切削力

各切り取り厚さにおけるPCBを変化させたときの各成分の切削力の結果を図5に示す。この結果から、チップブレーカを刃先に近づけると、主分力および背分力は増加することがわかる。つまり、切りくずの分断を実現するためには、チップブレーカを刃先に近づける必要があるが、それに伴い、加工力が増加することがわかった。

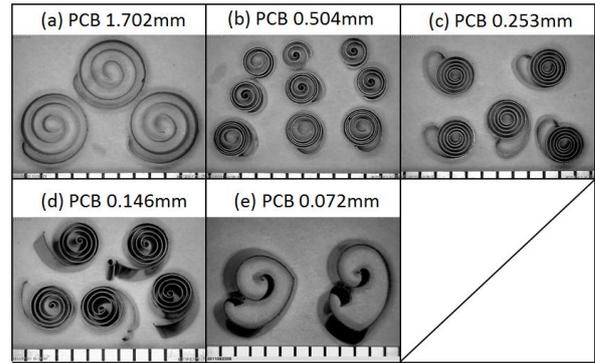


図3 PCB 変化に伴う切りくず形態変化の様子 (切り取り厚さ 0.05mm)

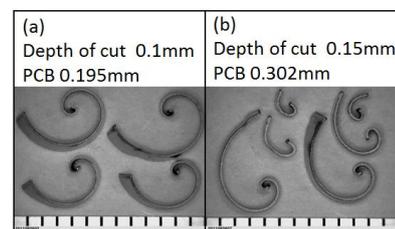


図4 分断した切りくずの様子

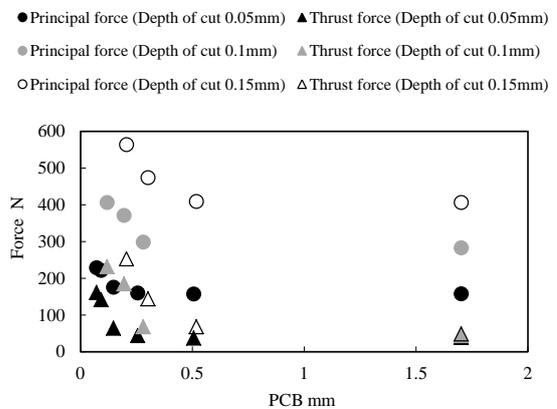


図5 PCB と各成分の切削力との関係

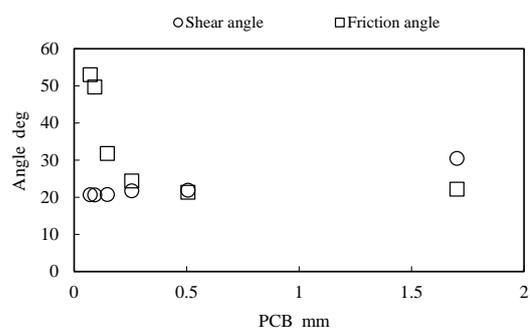


図6 PCB とせん断角およびすくい面の摩擦角との関係

3.3 せん断角と摩擦角

切りくずの厚み測定の結果からせん断角、各成分の切削力の測定結果からすくい面の摩擦角を求めている。図6に切り厚さ 0.05mm における PCB を変化させたときのせん断角およびすくい面の摩擦角の結果を示す。この結果から、チップブレイカの位置を刃先に近づけると、せん断角は減少し、摩擦角は増加することがわかる。これらのことから、切りくずの分断を実現するためには、チップブレイカを刃先に近づける必要があるが、それに伴い、せん断角は減少し、摩擦角は増加することがわかった。

3.4 切りくずの連続化への検討

上記3.1節から3.3節の結果から、チップブレイカの刃先からの距離における切りくず分断化の条件および切削特性を把握した。しかし、新たな穴あけ加工法の検討をするのに必要な切りくずの細かさに至っていないと判断した。

このような切りくずが分断されにくい結果に対し、切りくずを分断する考えとは逆に切りくずを制御することで連続的に処理していく手法が提案されている²⁾。今後は、切りくずの分断化処理から連続化処理へ方針を変更することにする。

4. まとめ

チタン合金の切りくず処理に着目し、チップブレイカによる切りくず分断化の検討を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 切り厚さ 0.05mm では、切りくずの分断はみられなかった。一方、切り厚さ 0.1mm および 0.15mm では分断する条件があったものの、切りくず処理として期待できる細かさに至らなかった。
- (2) チップブレイカの位置を刃先に近づけると、主分力および背分力は増加する。
- (3) チップブレイカの位置を刃先に近づけると、せん断角は減少し、摩擦角は増加する。
- (4) 上記結果から、新たな穴あけ加工法は、切りくずの分断化処理から連続化処理へ方針を変更する。

【謝 辞】

本研究を遂行するにあたり、名古屋大学大学院工学研究科 社本英二教授からのご指導、大見工業(株)様からの工具提供、そして、川崎重工業(株)様からの助言を頂き、厚くお礼申し上げます。

本研究の一部は、公益財団法人マザック財団の助成により行われました。

【参考文献】

- 1) 小川, 現場で役立つドリル加工の勘どころ, 日刊工業新聞社, pp.37-40, 2011
- 2) 社本ら, 切りくず連続処理と引張り切削に関する研究, 精密工学会誌, Vol.77, No.5, pp.520-524, 2011

平成27年6月 発行

岐阜県工業技術研究所研究報告 第3号 平成26年度

編集発行 岐阜県工業技術研究所

所在地：〒501-3265 関市小瀬 1288

電話：(0575) 22-0147 FAX：(0575) 24-6976

E-mail：info@metal.rd.pref.gifu.lg.jp

ホームページ：http://www.metal.rd.pref.gifu.lg.jp/