

岐阜県工業技術研究所研究報告

第2号 平成25年度

岐阜県工業技術研究所

目 次

機 械 部

- 熱可塑性樹脂部材のレーザ加工・超音波溶着技術の開発 1
小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦
- 加工と溶着を可能とするハイブリッド・レーザ加工機の開発 5
小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦
- ハイアスペクト形状の精密座標測定を可能とする回転振動型ハイアスペクトタッチプローブの開発 10
西嶋 隆、田中 泰斗、今井 智彦

金 属 部

- 長寿命化に向けた金型への表面処理技術の開発（第1報） 15
細野 幸太、原 民夫*、大川 香織、大津 崇
- 鋳物製品の内部欠陥の低減に関する研究（第1報） 19
大平武俊、水谷 予志生、足立 隆浩
- 固体潤滑剤を鑄ぐるんだ潤滑プレートの開発（第2報） 23
水谷 予志生、足立 隆浩
- 自己組織化膜による刃物の表面改質技術の開発（第1報） 27
大川 香織、細野 幸太、大津 崇

複 合 材 料 部

- 製品表面形状の高感性化と高機能化に関する研究 31
千原 健司、安藤 敏弘
- 熱可塑性 CFRP（炭素繊維複合材料）の立体成形技術の確立（第1報） 35
道家 康雄、西垣 康広、千原 健司、萱岡 誠、西村 太志
- 熱可塑性 CFRP の切削・研削加工技術の確立（第1報） 39
柘植 英明、加賀 忠士、萱岡 誠
- 薄板のプレス焼入れ技術に関する研究（第1報） 43
小川 大介
- CFRP の異方性を考慮した高精度・高能率加工に関する研究 47
加賀 忠士

機 械 部

熱可塑性樹脂部材のレーザ加工・超音波溶着技術の開発

小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦

Development of laser beam machining and ultrasonic welding 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。

回転ヘッドを組み込んだハイブリッド・レーザ加工機は、トレパニング（穴開け）加工において、従来ヘッドよりも熱影響を小さく出来、加工時間を短くすることができた。さらに、CW モードより PW モードの方が、熱影響が小さい。最適な出力のパルス波で短時間に加工することが、熱影響を最小限にする条件である。

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 エラストマー効果測定

エラストマーシートは、PC 機器の放熱用としても利用されるなど、ヒートシンク効果が期待される。使用し

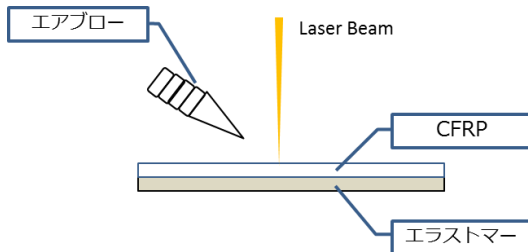


図1 レーザ照射時のエラストマーの使い方

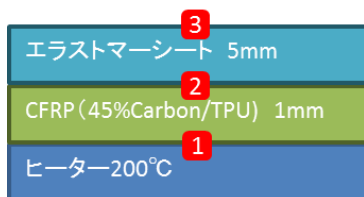


図2 エラストマーの吸熱測定

たエラストマーシート（株式会社タナック製衝撃吸収ゲル）の成分については、非公開のため詳細は不明であるが、シリコン系の素材で、粘着性と耐衝撃性を有する。

実際のレーザ加工では、図1に示すようにエラストマーシート上にワークを置き、上部からレーザビームを照射する。先ずその吸熱効果を調べるため、図2のようにレーザの代わりにヒーターを用い、1~3箇所を熱電対を貼り、それぞれの温度変化を計測する。

2.2 トレパニング加工

表1 実験条件と実験材料

モード	CW	PW
出力	150 - 700W	800 - 1004W
直径	φ 10mm	φ 5 - 15mm
周波数	—	2 - 500Hz
デューティ比	100%	2.3 - 17.0%
回転数	160 - 1000rpm	500 - 800rpm
照射時間	0.8 - 30sec	5 - 50sec
CFRP マトリックス	TPU	TPU/PA66
板厚	1.0mm	1.0mm/0.5mm

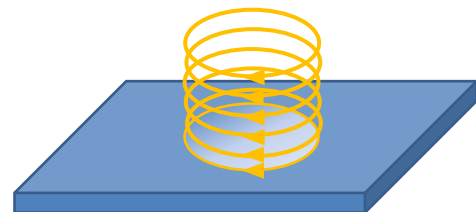


図3 回転ヘッドを用いたトレパニング加工

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、トレパニング加工を中心にレーザ切断性能について評価実験を行う。実験条件は表1に示すとおり。

3. 結果及び考察

3. 1 エラストマー効果

CFRP のエラストマーシートによる吸熱特性について、実験結果を図3に示す。これよりエラストマーがCFRPの表面温度上昇を遅らせていることが確認できる。従って短時間であれば、レーザの熱影響を下げる効果があると推定する。また、硬さ及び粘度の違うエラストマーシートを使って計測したが、それによる効果は見られなかった。

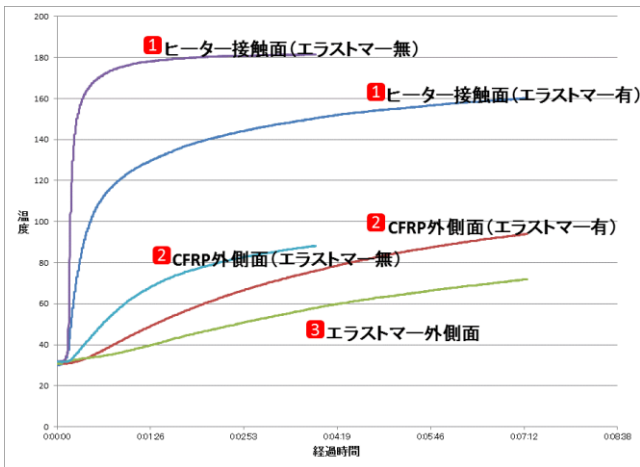


図4 エラストマーの吸熱特性

実際のCFRPの加工において、エラストマーシート有無の比較実験を行った例を図5に示す。この結果からエラストマーシートに熱影響を抑える効果を確認した。


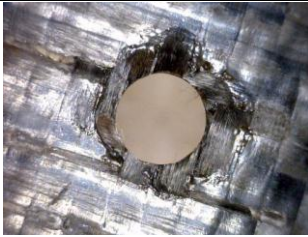
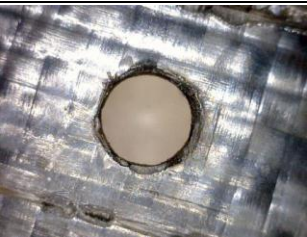

レーザ照射面 (表)	レーザ照射面 (裏)
エラストマー：無	
	
溶融痕幅 (max)2.279mm	溶融痕幅 (max)2.463mm
エラストマー：有	
	
溶融痕幅 (max)0.72mm	溶融痕幅 (max)0.766mm

図5 CFRP 切断時のエラストマー効果

3. 2 トレパニング加工試験結果

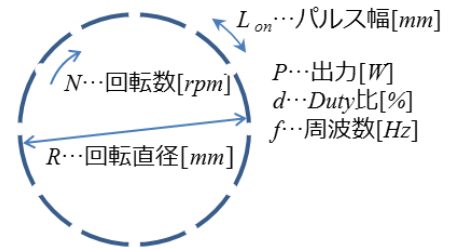


図6 トレパニング加工パラメータ

$$v = \frac{\pi RN}{60} [\text{mm/s}] \dots\dots\dots(1)$$

$$L_{on} = \frac{1}{f} \times \frac{\pi RN}{60} \times \frac{d}{100} [\text{mm}] \dots\dots(2)$$

$$t_{on} = \frac{d}{f \times 100} [\text{sec}] \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta_{on} = \frac{6N}{f} \times \frac{d}{100} [\text{deg}] \dots\dots\dots(4)$$

$$L_{off} = \frac{1}{f} \times \frac{\pi RN}{60} \times \frac{(100 - d)}{100} [\text{mm}] \dots\dots(5)$$

$$t_{off} = \frac{(100 - d)}{f \times 100} [\text{sec}] \dots\dots\dots(6)$$

$$\theta_{off} = \frac{6N}{f} \times \frac{(100 - d)}{100} [\text{deg}] \dots\dots(7)$$

上記に加工速度、1回のパルス幅、時間、角度の計算式を示すが、トレパニング加工においては、加工速度vとレーザ出力Pが大きく、照射時間t_onが小さい程、熱影響層（以下HAZという）を小さくできる。また、パルス幅L_onが大きい程、加工時間は短くなる。何故なら、強いレーザ出力が照射されると、時間と共にHAZが成長し、表面のみならず内部にまで熱影響による欠陥が拡張する（図7参照）。特に熱溶融の伝搬速度が速い樹脂やCFRP等の素材程顕著である。

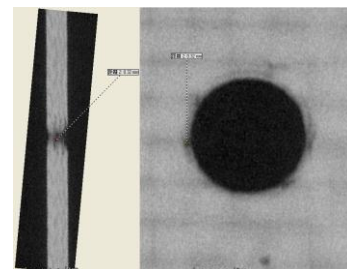


図7 X線CTによる内部欠陥評価

ここで、回転ヘッドと従来ヘッドの仕様を比較すると、加工速度は、回転ヘッド>従来ヘッドの関係にあり、さ

らに前者は、加工時ワークの振動は殆ど無いなどの利点を有する反面、加工できる直径は 22mm 以下と小さい。

実際にトレパニング加工を行い、回転ヘッドによる加工の方が従来ヘッドに比べて、短時間で加工でき、HAZ が小さいことが確認された。

ここで、HAZ は工具頭微鏡を用いて図 8 に示す方法で計測した。

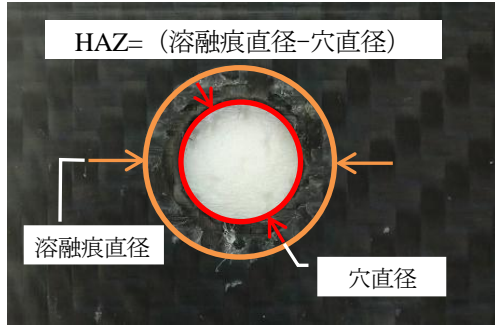


図 8 溶融痕の評価方法

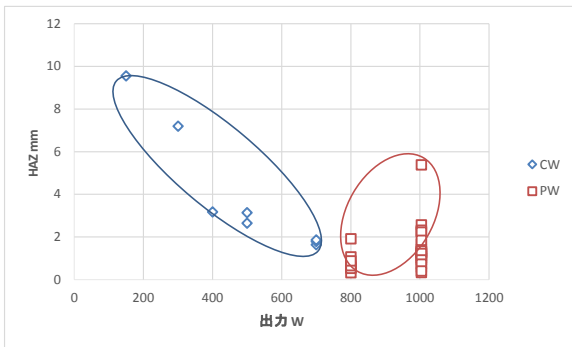


図 9 CW/PW モードによる HAZ の比較

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ために、本研究では、HAZ を出来るだけ小さくする方法を究明し、実用上問題ない範囲内（目標値は 100μm 以下）に抑える技術の確立が最も重要であると考えている。加えて加工時間と加工精度についても合わせて検討しなければならない。

表 1 に示す条件でトレパニング加工を行い、CW と PW による HAZ について測定した。

結果は図 9 に示す様に、CW モードより PW モードの方が、HAZ が小さい。これは、エネルギー密度が CW > PW の関係にあり、熱影響が大きいと推測される。また、超短パルスレーザが樹脂材料等を加工する際に熱影響を全く及ぼさないで切断できる理由からも分かる。

しかしながら PW モードでは切断深さが浅いため、照射を繰り返す必要があり、その結果、さらに熱影響層が広がることになる。そのため、総合的に評価して良い条件を見つける必要がある。

さらに PW モードによる実験を行い、得られた実験データについて統計解析を行った。その結果を図 10 ～ 11 及び表 2 に示す。

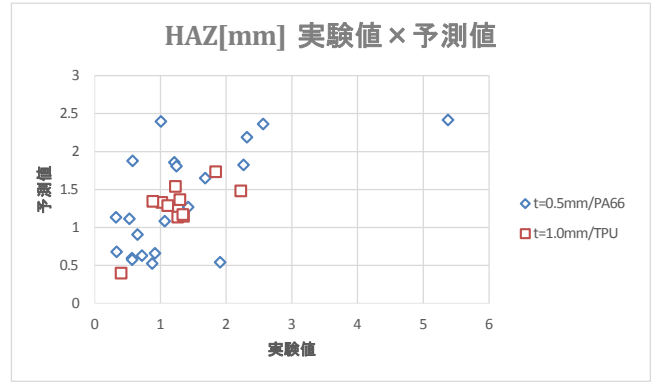


図 10 回帰分析結果

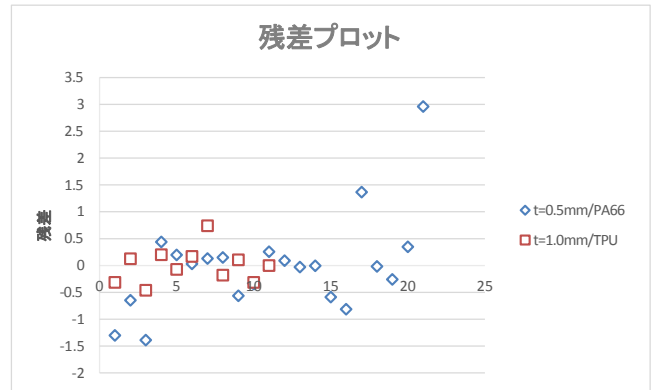


図 11 残差プロット

表 2 回帰式の精度と有意性

	t=0.5mm/PA66	t=1.0mm/TPU		
重相関係数R	0.6017	0.7276		
決定係数R ²	0.3621	0.5294		
有意F	0.1946	0.4501		
a ₁ 係数/t値	-4.3801	-1.5221	1.9045	2.9946
a ₂ 係数/t値	0.0063	2.5196	0	—
a ₃ 係数/t値	0.0770	1.0595	-0.0277	-0.6673
a ₄ 係数/t値	-0.0048	-0.8563	0.0032	1.0459
a ₅ 係数/t値	-0.1624	-0.8761	-0.0605	-1.7621

$$\text{回帰式: } HAZ = a_1 + a_2P + a_3d + a_4f + a_5s$$

- P : 出力 [W]
- d : Duty 比 [%]
- f : 周波数 [Hz]
- s : 照射時間 [sec]

トレパニング加工の結果として、代表的パターンは図 12 に示す 4 つで、最も良いのは、①の熱影響が少なく穴が開くもの、反対に最も悪いのは、④の熱影響が大きい穴が開かないものとなる。図 12 から分かることは、①は、照射時間が最も短い、熱影響は大きい。①と③の違いは、周波数のみ①の方が小さく、(3)式と(4)式から L_{on} と t_{on} が① > ③ の関係にあり、①は丁度切断できるエネルギーであったことを意味する。さらに①は、

◎より周波数が大きく、 L_{off} と t_{off} が◎>④の関係となり、停止時間が短く、連続照射に近い状態で熱影響が積算されたため、HAZが大きくなったと考えられる。





	結果画像	レーザ条件
◎ 良好		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 2.3% 周波数 500Hz 照射時間 50sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 0.3999mm
③ 熱影響大		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 18.4% 周波数 104Hz 照射時間 6sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 1.1850mm
◎ 空かない		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 2.3% 周波数 1300Hz 照射時間 50sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 0.1753mm
④ 空かない & 熱影響大		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 2.3% 周波数 5000Hz 照射時間 50sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 0.9875mm

図 1 2 トレパニング加工パターン

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、本研究で以下の基礎的知見を得た。

まず切断においては、焦点位置に合わせる事が重要である。そして CW モードより PW モードの方が熱影響を小さくできる。しかし加工時間は長くなる。

トレパニング加工では、回転ヘッド機構を設けることで PW モードでも高速に複数パスが可能で優位である。

また、レーザ照射時、ワークの下にエラストマーシートを敷くとヒートシンク効果により吸熱される。短時間の照射であれば有効であるが、長時間照射を続けると逆にエラストマー自体が高温になりワークに対しても影響する。

また、トレパニング加工におけるレーザ条件と HAZ の影響について、実験結果を回帰分析したが、決定係数は低く回帰式の精度はそれ程高いとは言えない。また F 検定及び t 検定からも有意性を示す結果は得られていない。この点はさらに検討を進めなければならない。今後は、PW モードを中心に、レーザ出力、Duty 比、周波数、照射時間の各条件が HAZ にどう影響するかについて、補足実験を繰り返し、検証する予定である。

【参考文献】

- 1) 小河ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.2,Vol.1, 2014

加工と溶着を可能とするハイブリッド・レーザ加工機の開発

小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦

Development of the hybrid laser beam machine which enables cutting and welding

Hiroshige Ogawa, Tomoyuki Tanaka, Tomohiko Imai

難削材である炭素繊維複合材料（以下 CFRP という）を高精度に加工する方法としてレーザ加工が注目を浴びている。レーザ加工には主に切断加工と接着する加工（溶着加工）があるが、それぞれの加工に用いるレーザの特性が異なるため、それぞれ専用の加工機械が必要であり、設備投資コストの問題がある。

本研究では、切断用のシングルモードファイバーレーザ加工機をベースに、レーザヘッドを回転・摺動することによりレーザ溶着が可能となるレーザ加工機を構築した。具体的には、トレパニング加工において、熱影響層（HAZ: Heat affected Zone）を小さくすることができ、溶着加工においては、素材表面に熱影響を及ぼさない溶着条件を探索し、CFRP+PET 及び CFRP+PC の溶着試験を実施したところ、引張試験において接合部で破断すること無く、引張剪断荷重約 80kgf を得た。

1. はじめに

通常レーザで切断加工するには、レーザビームが高品質で、レーザ集光性の良いガウスビーム形状のシングルモードが使われる。一方溶着加工を行うには、フラットトップビーム形状のマルチモードが使われる。

本研究においては、レーザヘッド駆動方法を変えることにより、切断と接合（溶着）の両方の加工が 1 台で可能となる加工機を開発し、その加工条件を究明する。具体的には、切断用のシングルモードファイバーレーザ加工機をベースに、レーザ溶着が可能となるレーザ加工機を構築する。これを用いて航空機・次世代自動車産業で期待される CFRP の加工への応用を図る。

2. ハイブリッド・レーザ加工機と予備実験

2. 1 レーザ照射方法及び発振器仕様

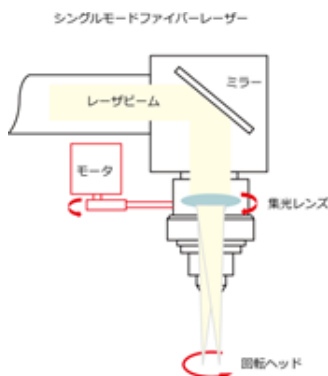


図1 ハイブリッド・レーザ加工機

ハイブリッド・レーザ加工機は、図1に示す様に、集光レンズを回転させることでレーザビームが円運動し、さらに掃引させることで（図7参照）、レーザ照射面積を大きくし、マルチモードに近い加工を実現するものである。発振器仕様については表1に示すとおり。

表1 レーザ発振器仕様

Model	Rofin-Baasel FLO10S
Excitation	Laser diodes
Nominal power	1000W
Power range	10 - 100%
Laser beam quality	≤ 0.4mm mrad
Wavelength	1080±10nm
Laser diameter	20μ m / 回転ヘッド40μ m
Focal length	160mm / 回転ヘッド320mm

2. 2 従来ヘッドと回転ヘッドの切断比較

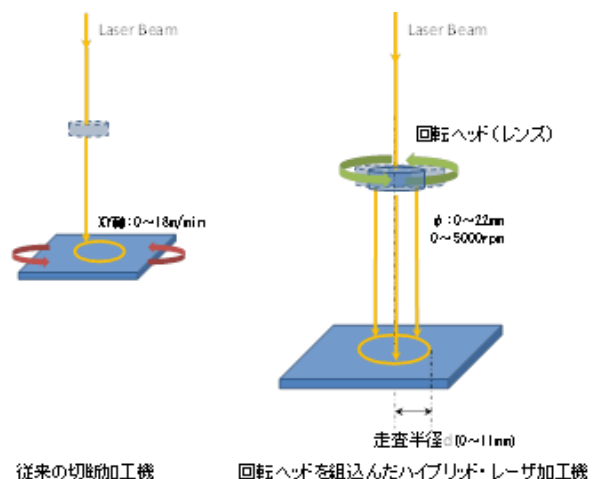


図2 トレパニング加工方法の違い

最初に、ハイブリッド・レーザ加工機と従来ヘッドについて、機械的動作精度、回転径、位置精度、回転速度等の検証を行い、使用上の問題点及び切断加工性能の違いを把握するため、切断比較試験を行った（図3～6）。

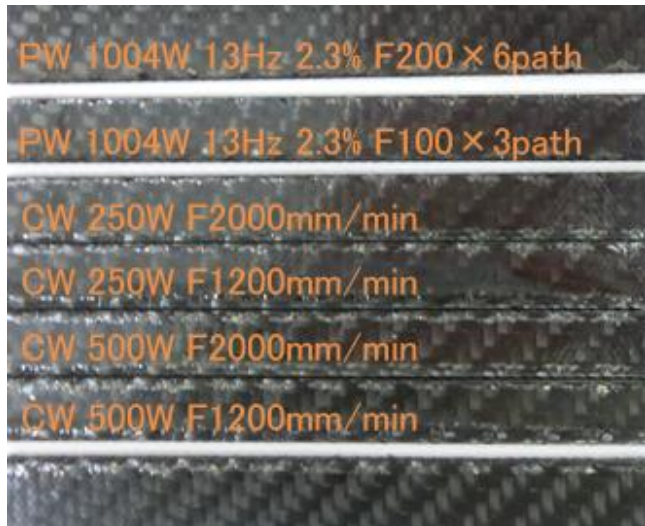


図3 回転ヘッドによる切断



図4 従来ヘッドによる切断



図5 回転ヘッドによるトレパニング加工



図6 従来ヘッドによるトレパニング加工

CFRP 材は、Carbon45%綾織、マトリックス TPU、厚み 1mm を使用。

結果としては、CFRP の切断に関しては大きな HAZ は見られるが、直線切断は双方とも同程度、トレパニ

ング加工は回転ヘッドの方が優位であることが確認できた。トレパニング加工については、図2に示すように加工方法に違いがあり、φ22 穴の場合、回転ヘッド：従来ヘッド=1000path：6path が切断結果に出ている。

3. 実験

3.1 レーザ溶着加工方法

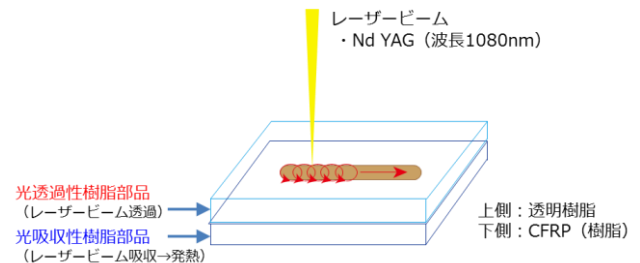


図7 レーザ透過溶着法による加工

本装置を用いて、異種材料の溶着についてレーザ加工法での基礎研究データを収集する。この結果を基に、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究明する。

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、最適な組合せを探索する。

CFRP と各種樹脂の溶着については、図7に示すレーザ透過溶着法（ファイバーレーザ 1080nm の吸収の無い材料は透過し、吸収の有る材料表面で熔融発熱することで溶着する）による手法を用いて行う。

表2 実験条件

CFRPマトリックス	TPU,PA66/vol55%
被溶着材	PET,PMMA,PC,SUS430
モード	CW
回転数	800rpm
回転径	φ 2mm
出力	30~60W
移動速度	3~40mm/min
焦点	0~40mm

3.1.1 CFRP と樹脂の溶着

2種類の材料で、上側にはレーザを透過する材料、下側にはレーザを吸収する材料を重ねて上からレーザを照射し、CFRP の樹脂分を熔融させ溶着させる。

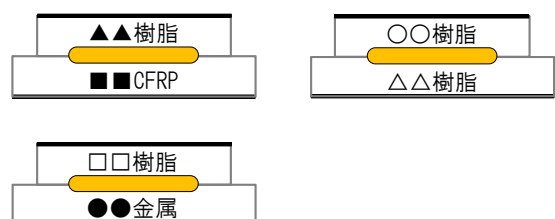


図8 各種材料の溶着試験

3. 1. 2CFRP と金属の溶着

金属と CFRP については、双方ともレーザを透過すること無く吸収する材料なので、透過溶着法ではできない。そのため、金属側を直接レーザ照射により暖め、その熱で近接する CFRP の樹脂分を溶融させ溶着させる方法による。



図9 金属と CFRP の溶着試験

3. 2 引張試験

引張試験片は図10に示すように、レーザ溶着した試験片を作成し、図11にて評価する。

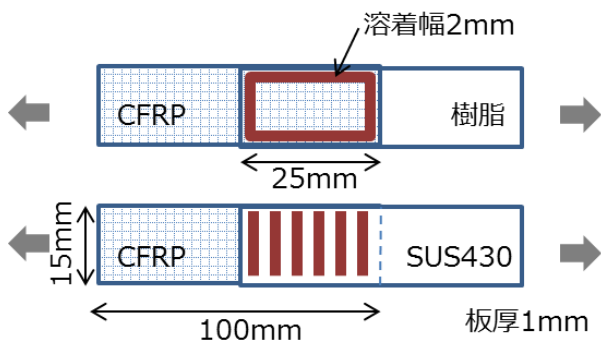


図10 引張試験片と溶着箇所



図11 引張試験

4. 結果及び考察

4. 1 透過率測定

レーザ透過溶着法を用いるため、材料の吸収率を測定したので図12～13に示す。それによると1080nmの透過率は、透明のポリスチレン、ポリカーボレートが89.0%で、次に乳白色のABS17.0%、ポリエチレン1.11%で、CFRPは0.0%と全く透過しないという結果であった。

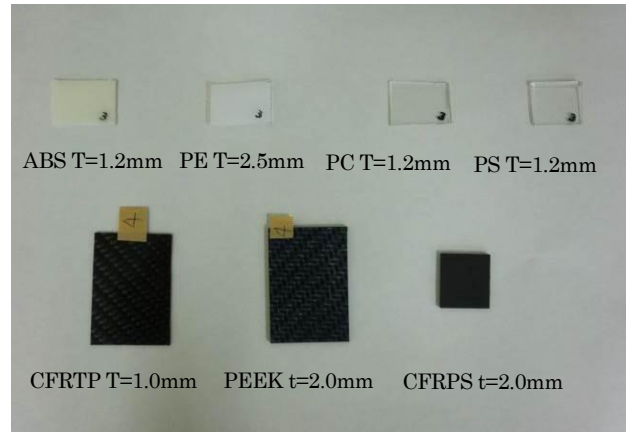


図12 透過率測定に用いた材料

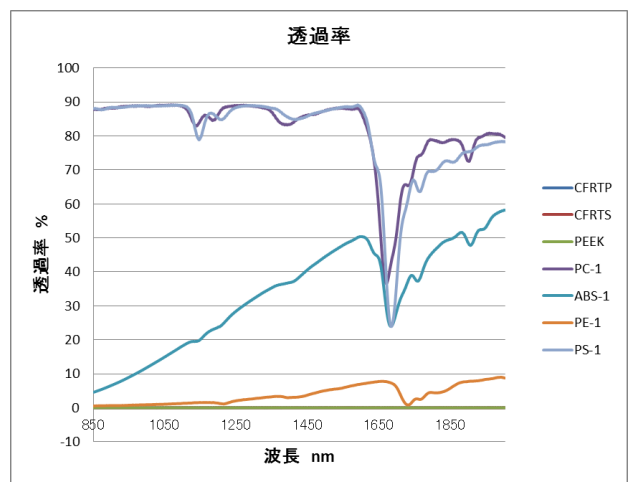


図13 近赤外吸光度特性

4. 2 溶着試験と引張試験結果

CFRP と樹脂及び CFRP と金属のレーザ溶着加工を行った結果を表3及び図14～15に示す。

通常レーザ切断では、ワーク表面に焦点を結んで加工するが、溶着加工においては、オフフォーカス状態でレーザ照射させた方が溶着強度を向上させることが基礎実験の結果判明し、この点も考慮に入れて実験した。

引張試験の結果、No.1,2,3,4,6,7 の条件下では、レーザ接合部は剥離していない。図14～15で引張試験後もCFRP上に樹脂が残っていることが確認できる。

また、No.5,8,9,10 (表3の塗り潰し部分) の条件下では、レーザ接合部で剥離しているのが確認できる。

剥離した CFRP のマトリックス樹脂は PA66 で TPU より成形温度が高いため、レーザ照射条件が同じであると十分な熔融温度に達していなかったものと思われる。

また、No.8,9,10 については、SUS430 表面にレーザ照射しており、樹脂素材に比べて熱伝導が良いため、長時間のレーザ照射の影響により熱変形や部分的に焦げなどが発生している。

表3 各種材料の溶着条件と引張強度試験結果

No	CFRP	被溶着材	mode	回転数	回転径	出力	速度	焦点	引張強度	破断状態
1	TPU	PET	CW	800rpm	φ 2mm	30W	20	0	80.7kgf	PET部で破断
2	TPU	PMMA	CW	800rpm	φ 2mm	30W	20	0	48.3kgf	一部接合部で剥離
3	TPU	PMMA	CW	800rpm	φ 2mm	30W	10	0	70.7kgf	PMMA部で破断
4	TPU	PET	CW	800rpm	φ 2mm	33W	40	+40	73.1kgf	PET部で破断
5	PA66	PET	CW	800rpm	φ 2mm	33W	40	+40	36.1kgf	接合部で剥離
6	TPU	PMMA	CW	800rpm	φ 2mm	33W	40	+40	63.7kgf	PMMA部で破断
7	TPU	PC	CW	800rpm	φ 2mm	33W	40	+40	82.4kgf	PC部で破断
8	PA66	SUS430	CW	800rpm	φ 2mm	60W	10	+30	49.5kgf	接合部で剥離
9	TPU	SUS430	CW	800rpm	φ 2mm	50W	3	+30	82.0kgf	接合部で剥離
10	TPU	SUS430	CW	800rpm	φ 2mm	50W	5	+30	10.01kgf	接合部で剥離

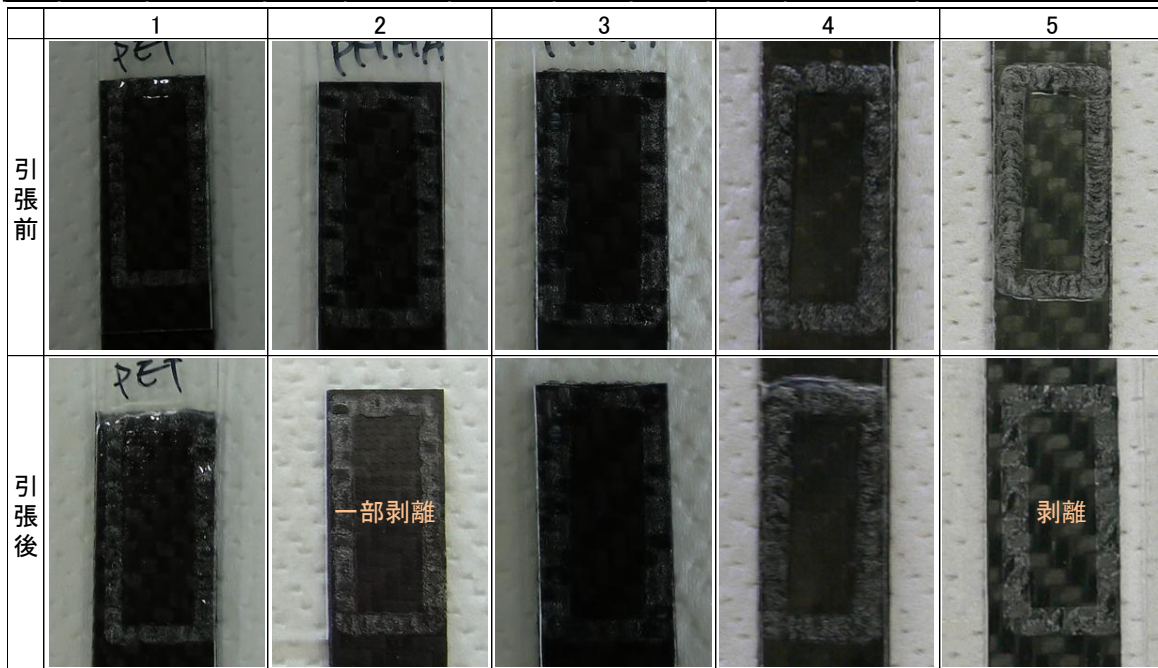


図14 条件1～5の溶着試験及び引張試験結果

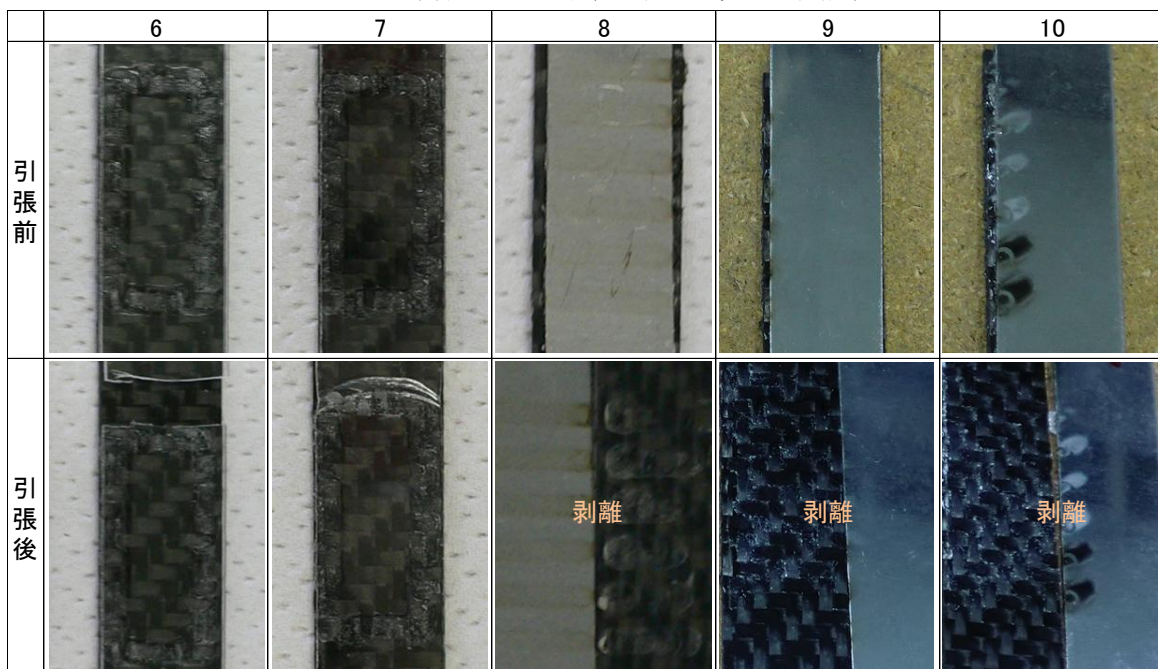


図15 条件6～10の溶着試験及び引張試験結果

5. まとめ

シングルモードファイバーレーザー加工機に、回転ヘッド機構を設けたハイブリッド・レーザー加工機でCFRPの切断が可能であり、特にトレパニング加工については、回転ヘッドによる加工の方が、熱影響も少なく、高速に加工できるなど優位性を示す結果を得た。この理由として、回転ヘッドの方が、高速回転しているため、短時間でのレーザー照射距離が長く、且つ繰り返し回数も大きいと推測される。結論として、本装置による切断加工は、実用上問題ないと考えられる。

CFRPのレーザー溶着については、透明樹脂部材との溶着に関しては、レーザー透過溶着法が利用可能であり、レーザー照射条件について把握することができた。それによる引張強度は、CFRP+PETで約80kgf、CFRP+PMMAで約70kgf、CFRP+PCで約80kgfで、接合部で剥離しない条件を得た。

接合（接着）強度から言うと、レーザー接合部で剥離することは、接着力<素材の関係にあり、逆にレーザー接合部で剥離していないことは接着力>素材の関係にあることを意味しており、後者であれば接合強度は充分であると言え無くないが、今後は、使用

環境、耐久性等も含め評価して行きたい。

また、CFRPと金属部材との溶着については、上述の手法が使えないため、金属部材側をレーザー照射し熱することで、近接するCFRP表面の樹脂部材を熱溶解させて接合する方法を用いる。しかし、金属表面は熱伝導が良く高温に達するが、局所的に熱変形を引き起こし圧着部分に隙間を生じてしまい、溶着を妨げる力が働き、十分な溶着強度を得るための加工条件の把握まで至っていない。今後は試料の圧着方法を改善し、さらなる加工条件等の解明について検討する方向である。

【謝 辞】

本研究は、平成24年度独立行政法人科学技術振興機構研究成果最適展開支援プログラムA-STEP[FS]ステージ探索タイプにて研究助成金をいただきました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 小河ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.2,Vol.1, 2014

ハイアスペクト形状の精密座標測定を可能とする回転振動型 ハイアスペクトタッチプローブの開発

西嶋 隆、田中 泰斗、今井 智彦

A high-aspect ratio shape ultrasonic vibration touch probe for a coordinate measurement of high-aspect shape objects

Takashi Nishijima, Taito Tanaka and Tomohiko Imai

本研究では、機上計測や三次元測定機において使用するハイアスペクト形状のタッチプローブの開発を行った。現用のタッチプローブは非常に細長い形状のラインナップが少ないため、深い細溝や細穴の測定ニーズに対応することが困難となっている。当所では本課題について、圧電素子による超音波振動で共振するプローブを用いたハイアスペクト形状のタッチプローブを提案している。平成 24 年度はプローブ水平方向の接触感度を向上させるために、プローブ先端が円周運動するモードを利用したタッチプローブを試作した。本年度はハイアスペクト化を進め、先端径 1mm、プローブ軸径 0.7mm、長さ 50mm の非常に細長い形状のタッチプローブを試作し、プローブ軸方向の接触検出位置の繰り返し精度 (2 σ) が 0.2 μ m 以下、水平方向は 1.3 μ m 以下の結果を得た。

1. はじめに

近年の型彫り型放電加工技術の進展に伴い、深い細溝や細穴の加工が可能となってきたことから、金型製造等において細溝や細穴の精密座標測定の要望がある。しかしながら、現用の接触式タッチプローブは先端径が 1mm 程度以下の物については、プローブ長さが数十 mm 程度のハイアスペクト形状の物はほとんど市販されていない。

この課題に対し当所では、圧電素子による超音波振動を用いたハイアスペクトタッチプローブの開発を行っている¹⁾。平成 23 年度には、プローブ軸方向の縦波を利用するタイプのもの、平成 24 年度にはプローブの水平方向の接触感度を高めることを目的としたプローブ先端を円運動させるタイプの回転振動型プローブを提案し、先端径 1mm、プローブ軸径 0.7mm、プローブ長さ 37.5mm のハイアスペクトタッチプローブを試作した。

本年度は、回転振動型のタッチプローブの更なるハイアスペクト化を図り、先端径 1mm、プローブ軸直径 0.7mm、プローブ長さ約 50mm のハイアスペクトタッチプローブを試作した。

本報告では、提案するハイアスペクト形状の回転振動型タッチプローブについて、有限要素法による振動モード解析及びその検証実験によって得られた、プローブの共振周波数とモード形状について示す。試作機の開発に関しては、プローブ本体とセンサ回路の概要を示す。また、試作したプローブについて、プローブ先端が自由な状態と接触状態における振動検出用圧電素子のアドミタンスと位相を測定した結果をもとに、本タッチプローブの接触検出原理について述べる。最後に試作機の接触検出位置の一方方向繰り返し精度の評価とリングゲージ内径を測定した結果について報告する。

2. 振動モード解析

2. 1 解析条件

プローブ先端に円周運動を発生させる条件を調べるため、有限要素法によるモード解析を行った。解析用ソフトウェアは Femtet (ムラタソフトウェア) を使用し、圧電解析の調和解析機能を用いた。加振周波数は 1kHz ~ 100kHz の範囲を 100Hz ステップとし、圧電素子の印加電圧の片振幅を 5V、要素数は 3 万程度の条件で行った。図 1 に、プローブの振動体部分の有限要素モデルを示す。プローブの振動体には、リング形状の加振用圧電素子と振動検出用圧電素子を設置した。解析モデルの物性値は試作機と同様とし、プローブ軸、バックリング、ホルダは SUS304、プローブ軸は超硬とし、圧電素子の給電用電極は黄銅、圧電素子は富士セラミックス製の C-6 材とした。加振用と振動検出用圧電素子の電極は、リング形状の圧電素子を円周方向に 4 分割した構造としている。詳細は前報告²⁾を参照されたい。

2. 2 解析結果

プローブ先端の水平方向変位と加振用圧電素子の加振周波数の関係の解析結果を図 2 に示す。解析した周波数範囲において、プローブ先端の振動変位が増大する周波数が複数あることが示され、例えば、7.6kHz、26.4kHz、33.1kHz において共振する。図 3 にこれらの周波数にお

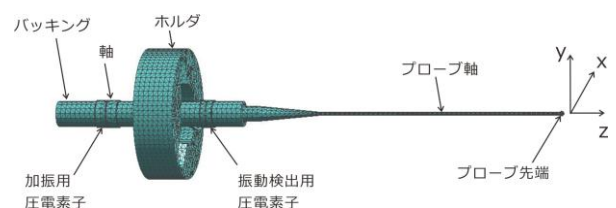


図 1 プローブの振動体の有限要素モデル

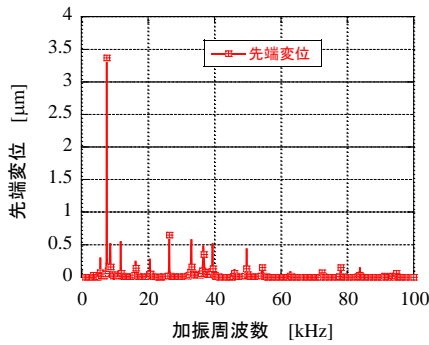


図2 解析結果 (加振周波数と先端の水平方向変位の関係)

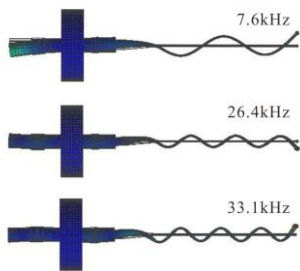


図3 解析結果 (モード形状)

けるモード形状を示す。この解析から 7.6kHz よりさらに低い周波数域に低次のモードがあると考えられる。

さらに低次のモードについては低周波数域を解析することにより把握可能と考えられるが、本プローブでは可聴域を避けるために 20kHz ~ 40kHz 程度の振動モードを利用することとした。

3. 試作

3. 1 プローブ本体

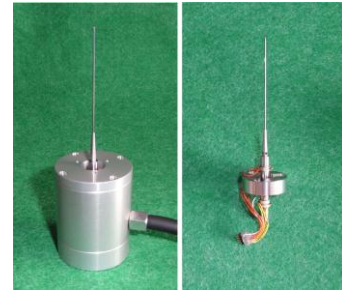
試作したセンサ全体とプローブの振動体部分の写真を図4に示す。プローブの振動体は本体の内部に収められており、振動体のホルダ部分で一意的な位置に固定されている。プローブ形状は先端径 1.0mm、プローブ軸径 0.7mm、プローブ長さ 50mm とした。

3. 2 センサ回路

汎用電子デバイスやマイコンを用いて、センサ回路を試作した。センサ回路は、主にプローブを励振するための加振部、プローブの共振を検出する共振検出部、接触を検出するための接触検出部からなる。また、パソコンと Bluetooth を用いて通信し、センサ回路のパラメータ設定、動作命令、モニタリングをする機能を設けた。センサ回路の概要図を図5に示す。

加振部は DC~100kHz 程度の範囲を 1Hz の周波数分解能で周波数スイープや一定周波数での加振を行う。出力電圧範囲±10V、出力電流範囲±0.3A である。

共振検出部では振動検出用圧電素子の出力を RMS-DC 変換後、マイコンの AD コンバータでサンプリングする。共振周波数の検出は、センサ起動時に加振周波数



(左) センサ全体 (右) 振動体

図4 試作機の写真

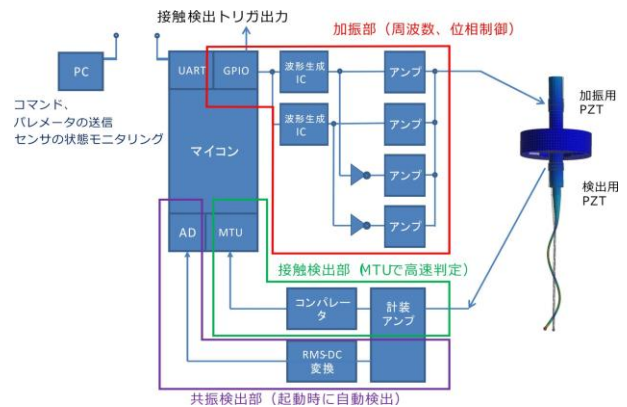


図5 センサ回路の概要図

を掃引し、ピークを得ることにより自動設定する。

接触検出部では、加振電圧信号と検出用圧電素子の出力電圧の位相差を閾値と比較し、その結果に応じて接触のトリガ信号を出力する。

3. 3 モニタ用ソフトウェア

センサ回路の動作命令や加振周波数等の動作パラメータの設定を外部のパソコンから操作するソフトを Microsoft visual c#にて試作した。同ソフトはプローブの共振周波数の検出時における、周波数と振動検出用圧電素子の出力実効値をグラフ表示やデータ保存の機能も設け、各種のプローブの共振特性の比較を容易にした。

4. 検証

4. 1 振動モードの検証

試作したプローブを用いて、解析結果に対する検証実験を行った。検証実験では加振周波数とプローブ先端の振動変位 (軸水平方向) の関係を測定した。プローブ先端の軸水平方向の振動変位は、ヘテロダイン方式レーザ変位計 (ST-3761 岩通計測) を使い、3 方向 (図1の x-y 面における 0°、45°、90° 方向) から測定し、その平均値を用いた。加振周波数は 50Hz ステップで DC~100kHz の範囲で測定した。結果を図6に示す。同図には、振動検出用圧電素子の出力電圧の実効値 (AD 変換値) も示す。

同図より、プローブ先端の水平方向の振幅はおよそ、8kHz、27kHz、32kHz 近辺にピークがあり、解析で示された、7.6kHz、26.4kHz、33.1kHz のモードに対応すると考えられる。振動検出用圧電素子の出力は、8kHz 近辺より 27kHz、32kHz 近辺において増大した。これは圧電素子の位置とモード形状に依存すると考えられる。

次に、8kHz、27kHz、32kHz 近辺でのモード形状をヘテロダイン方式レーザ変位計にて測定した。測定方法は、プローブ先端から根本に向かって2mm ピッチでプロ

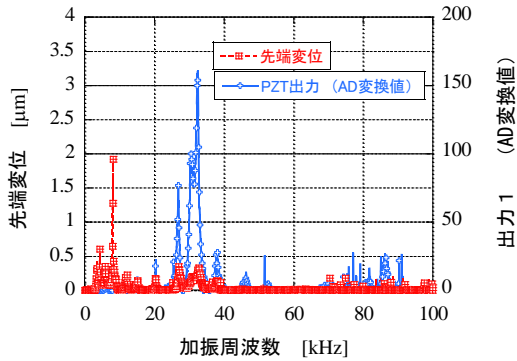
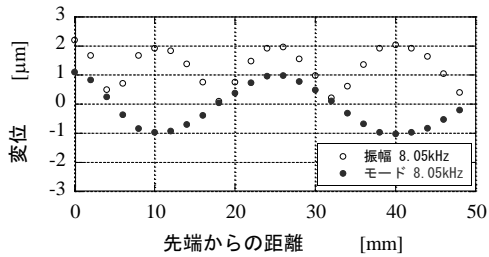
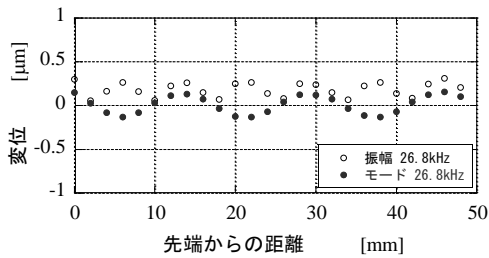


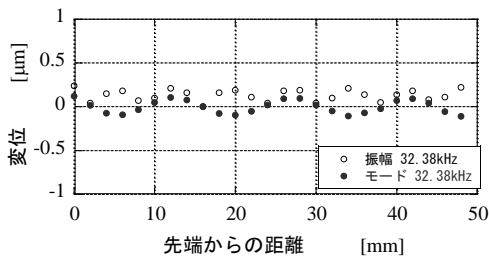
図6 加振周波数と先端変位及び振動検出用圧電素子の出力の関係



(a) 8.05kHz



(b) 26.80kHz



(c) 32.38kHz

図7 振幅の測定結果とモード形状

ブの軸水平方向の振幅を計測しモード形状を得た。加振周波数は、振幅が大きく得られる 8.05kHz、26.80kHz、32.38kHz とした。

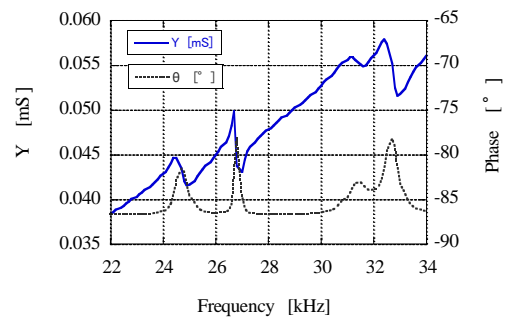
結果を図7に示す。同図には、計測した振幅及び、振幅値から振動の節と腹の位置を考慮して得たモードを併せて示す。モード形状の測定結果においても、解析結果と形状がほぼ一致する結果が得られ、解析結果の有効性が示された。

4. 2 圧電素子のアドミッタンスと位相の測定

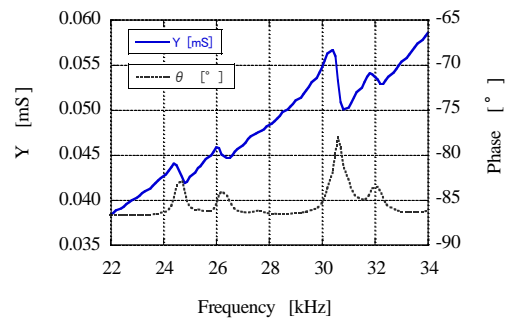
本タッチプローブの接触検出原理は、プローブ先端が自由な状態から接触状態となる際に振動体の共振周波数が変化することを利用している。本センサ回路では、先端が自由な状態における共振周波数で励振し、加振電圧と振動検出用圧電素子の出力電圧の位相差をモニタリングし、位相差の変動を検出することで接触判定を行う。

ここでは位相の変動を把握するために、試作したプローブを用いて振動検出用圧電素子の4分割した1つの電極とグランド(筐体)間のアドミッタンスと位相をインピーダンスアナライザ(IM3570 日置電機)を用いて測定した。

結果を図8に示す。接触前(先端自由)の図8(a)から、振動体の共振周波数として主に、27kHz、32.5kHz 近辺に確認できる。この時の共振時の位相はどちらの周波数においても、約-80°程度である。接触状態では図8(b)に示すように27kHz、32.5kHzでは約-85°へと変化することが確認できる。実際には本センサは、リング形状の振動検出用圧電素子の円周方向に4分割した電極を設け、対向する電極の差動出力を得ているため、この



(a)接触前



(b)接触後

図8 振動検出用圧電素子の位相とアドミッタンス



図9 接触位置検出の一方方向繰り返し精度の測定装置

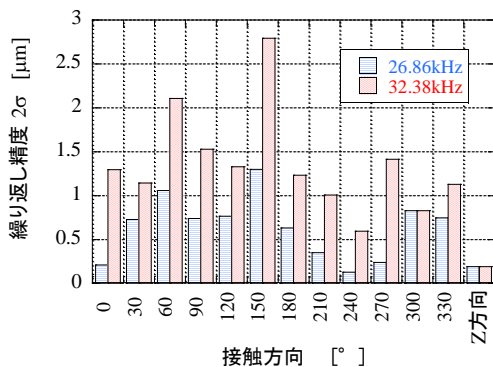


図10 接触位置検出の一方方向繰り返し精度

検証は必ずしもセンサの構成とは同一ではないが、およその接触時の位相変化を確認することができる。

本センサ回路では、このような位相変化を振動周期毎に閾値と比較して接触判定を行う。

5. 評価試験

5.1 接触検出位置の一方方向繰り返し精度

センサに物体が接触する際の検出位置の繰り返し精度を評価するため、図9に示す実験装置を構成した。本実験では、タッチプローブは固定されており、その先端にPZT駆動精密ステージ上に設置した金属プレートが、1mm/sの速度で接触する。この際、タッチプローブの接触検出トリガでヘテロダインレーザ変位計にて金属プレートの位置を取得する。この測定を20回繰り返し評価した。また、タッチプローブをプローブ軸中心に回転させながら30°毎に12方向からの接触を測定することで、プローブ軸水平方向の一方方向繰り返し精度を評価した。併せて、プローブ軸方向(z方向)の接触についても評価した。

本実験では試作したセンサ回路が実験実施時に検出した26.86kHzと32.38kHzのモードで行った。

結果を図10に示す。結果より軸方向の繰り返し精度は0.19μmが得られ、水平方向の接触に関しては、角度によるばらつきが認められたが26.86kHzでは、全方位において1.3μm(2σ)より低い値となり比較的良好な結果が得られた。

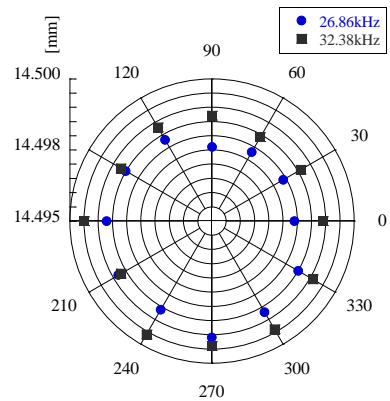


図11 リングゲージ内径測定の結果

5.2 リングゲージ内径測定

試作したタッチプローブを用いてリングゲージの内径(30mm)を測定した。測定方法はタッチプローブの先端を下向きにして画像測定機のヘッドに取り付け、プローブをリングゲージ内径の中心から半径方向に移動させ、接触した位置の座標を記録した。座標値は画像測定機の読みを記録し、接触時は0.1μmステップで接近させた。

結果を図11に示す。同図には26.86kHzと32.38kHzのモードにおける結果を示す。本測定値のプローブ先端の半径分のオフセット(1mm)を補正し、各方向の内径の平均からリングゲージ内径を求めると、26.86kHzと32.38kHzの場合それぞれ、29.9967mm、29.9979mmの結果が得られた。本結果よりμmオーダの測定は困難であるが、10μmオーダの測定には利用可能と考えられる。

6. まとめ

本研究では、深い細溝や細穴等の測定を可能とするハイアスペクト形状のタッチプローブの実現を目指し、プローブ先端が円周運動をする振動モードで動作する超音波振動プローブを試作した。また、解析及び試作機の評価実験により振動モードについて把握した。

先端径1mm、プローブ長さ50mm、プローブ軸径0.7mmのプローブ本体と専用のセンサ回路を試作し、評価試験を行った結果、26.86kHzの振動モードを用いた場合、接触検出位置の一方方向繰り返し精度は1.3μm(プローブ軸水平方向)、0.19μm(プローブ軸方向)が得られ、内径30mmのマスタリングゲージ測定では、29.9967mmの測定結果が得られた。

【謝辞】

本研究は平成24年度独立行政法人科学技術振興機構研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラムA-STEP【FS】ステージ探索タイプにて行いました。

【参考文献】

- 1) 西嶋, 超音波テクノ, Vol.25, No.5, pp78-83, 2013
- 2) 西嶋ら, 岐阜県工業研究所研究報告, No.1, pp1-4, 2013

金 属 部

長寿命化に向けた金型への表面処理技術の開発 (第1報)

細野 幸太、原 民夫*、大川 香織、大津 崇

Surface modification of hard metal dies for long-life

Kota Hosono, Tamio Hara*, Kaori Okawa, Takashi Otsu

コバルト量の異なる2種類の超硬合金材料への窒素原子拡散による表面処理を試みた。550℃、650℃ならびに700℃の処理温度で、それぞれ6時間表面処理を試みたところ、すべての処理温度で、窒素が表面から内部へ拡散していることが分かった。さらに、窒素拡散領域は、処理温度が高くなるほど深くなり、700℃の処理条件における拡散深さは約80nmであることが分かった。また、拡散した窒素は化合物層を形成していないと評価された。

1. はじめに

金型の長寿命化はコストダウンに直結する部分であり、様々な材料改質ならびに表面処理が行われている。その中で特に重要視される機能の1つが、耐摩耗性の向上である。超硬合金製の金型は、ダイス鋼やハイス鋼よりも耐摩耗性が期待できる材料の1つであり、難加工性材料であるチタン合金やマグネシウム合金の成形加工に用いられている。さらなる耐摩耗性向上を目的に、金型表面に例えば窒化チタン系の被膜をPVD (Physical Vapor Deposition) 法¹⁾やCVD (Chemical Vapor Deposition) 法²⁾で形成することが行われている。そのほかの表面処理では窒化処理³⁾等が行われている。窒化処理については、WC-Co系超硬合金へのイオン窒化が行われ、メカニズムの詳細は明らかになっていないが、硬度向上によるパンチ寿命の向上が報告されている。一方、我々は、イオン窒化と異なる原理により窒素原子を拡散させる窒化処理方法によってステンレス材 (SUS420J2) の硬度ならびに耐摩耗性を向上できることを見出した⁴⁾。また、本手法では、素材表面の形状を変化させない特徴を持っていることから、寸法精度が厳しく求められる金型においても鉄の窒化被膜層を形成せず、硬度向上が期待できるため、耐摩耗性向上に有効な手法の1つであると考えられる。そこで、本研究では、WC-Co系超硬合金材料への窒素原子拡散による表面処理を試み、その効果について検討した。

2. 実験

2.1 供試材

(株)シルバーロイ製の20×20mm角(厚さ2mm)のCo添加量の異なる2種類のWC-Co超硬合金(G5、G7)を試料として使用した。試料の組成、比重、硬度ならびに抗折力を表1に示す。また、同試料の平均表面粗さ

(Ra)ならびに最大高さ粗さ(Rz)は、(株)キーエンス製のレーザー顕微鏡(VK9700/9710)で測定したところ、G5 (Ra) = 0.5μm, G5 (Rz) = 7.7μm, G7 (Ra) = 0.4μm, G7 (Rz) = 8.1μmであった。

表1 超硬材料の特性

種類	WC (wt%)	Co (wt%)	比重 (g/cm ³)	硬度 (HRA)	抗折力 (kg/mm ²)
G5	87	13	14.2	87.5	300
G7	80~82	18~20	13.5	84.0	330

2.2 表面処理装置

本研究で用いた表面処理装置の概略図を図1に示す。被表面処理物を装置内に導入したのち真空排気を行い(10⁻³Pa程度)、放電領域に不活性ガス(アルゴン)を導入し、アルゴンプラズマを生成する。その後アルゴンプラズマから電子ビームを引き出し、窒素ガスを励起させることで高濃度の窒素原子を生成させ、被表面処理物の表面から窒素原子を拡散させる方法である。また、被表面処理物を設置する石英ガラス製真空容器の外部には放射型ヒーターが設置されており、処理中は一定の試料温度に保たれている。本研究では、保持温度を550℃、650℃、ならびに700℃とし、処理時間は6時間とした。

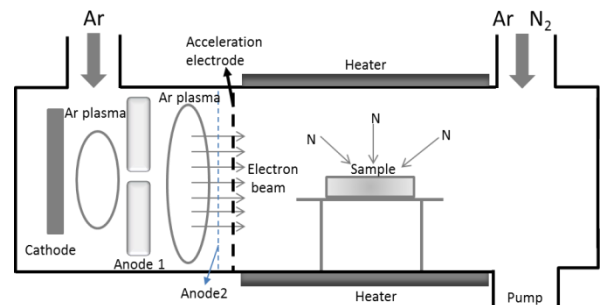


図1 表面処理装置概略図

2.3 オージェ電子分光分析

窒素が被表面処理物内に存在するのか、存在するなら

* 豊田工業大学

ば窒素拡散層の深さはどの程度かを調べるために、各処理温度で作製した試験片を、アルバック・ファイ株式会社 (PHI700Xi) のオージェ電子分光装置を用いて分析した。

2. 4 電子プローブマイクロアナライザー (EPMA)

試料中の窒素拡散の様子を調べるために、日本電子株式会社 (JXA-8530F) の EPMA による元素分析を行った。

2. 5 自動 X 線回折測定 (薄膜法)

窒素拡散層が化合物層等を形成しているか否かを調べるために、株式会社リガク (SmartLab) の自動 X 線回折 (XRD) による薄膜測定を行った。X 線源は Cu であり、 $2\theta = 20^\circ \sim 90^\circ$ とした。

3. 結果及び考察

図 2 (a), (b) は、それぞれ G5 未処理材と表面処理材 (700°C) のオージェ電子分光装置による元素分析結果である。未処理材においてはカーボン (C)、酸素 (O) ならびにタングステン (W) が検出されたが、窒素 (N) は検出されなかった。表面処理材 (700°C) では、C、O ならびに N を検出した。したがって、本研究で用いた表面処理装置により、G5 材の窒化処理を行った結果、最表面には窒素が存在していることが分かった。また、

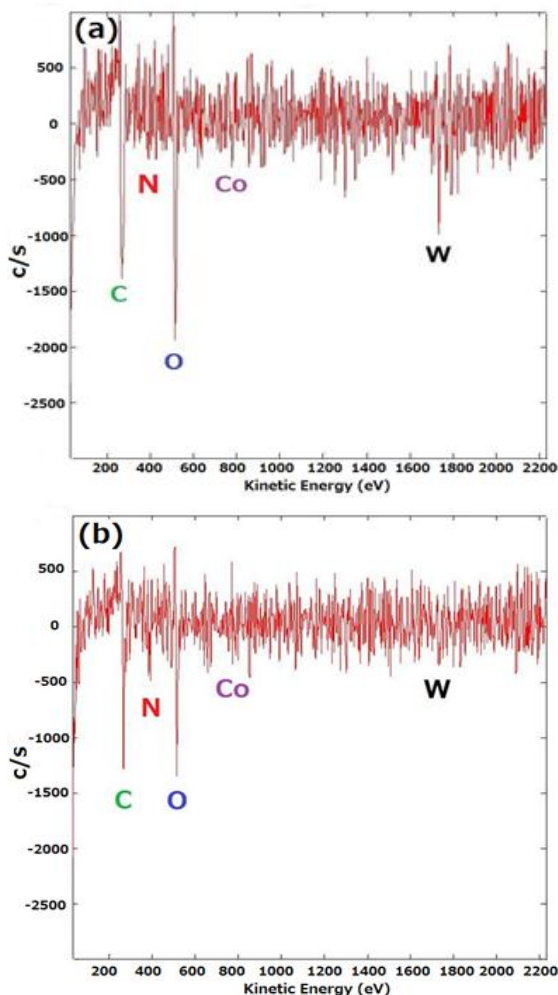


図 2 オージェ電子分光装置による元素分析 (G5)

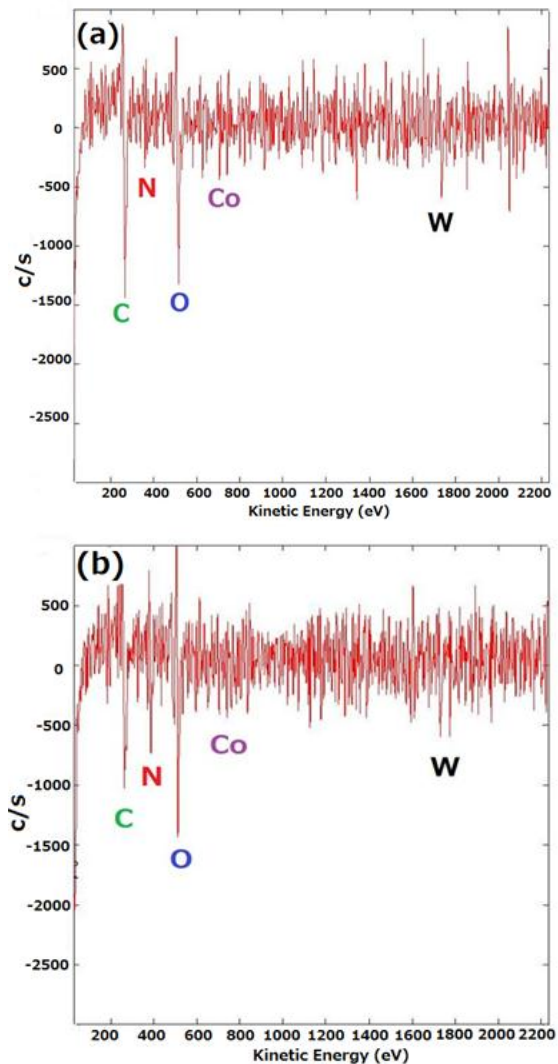


図 3 オージェ電子分光装置による元素分析 (G7)

図 3(a), (b) は、それぞれ G7 未処理材と表面処理材 (700°C) のオージェ電子分光装置による元素分析結果である。図 2 同様、未処理材においては、窒素が検出されていないが、表面処理材 (700°C) では窒素が検出された。さらに、G5, G7 の 550°C ならびに 650°C の表面処理材においてもともに窒素が検出されることを確認した。これらの結果は、超硬合金が本装置により窒化されたことを示している。

次に EPMA 分析装置で表面処理材 (700°C) の元素分析を試みた結果を図 4 に示す。オージェ電子分光装置は最表面から深さ数 nm 程度までの元素分析であるのに対して、EPMA 分析では表面から数 μm 程度の深さまでの元素分析を行っている。同図に示されるように、窒素が明確に検出されていることから窒素が表面からある程度深く拡散していると期待される。

そこで、どの程度の試料深さまで窒素が拡散しているのかを評価するために、アルゴンイオンスパッタリング機能を持つオージェ電子分光装置による深さ分析を試みた。図 5 は各処理温度で窒化を行った G5 試験片の深さ

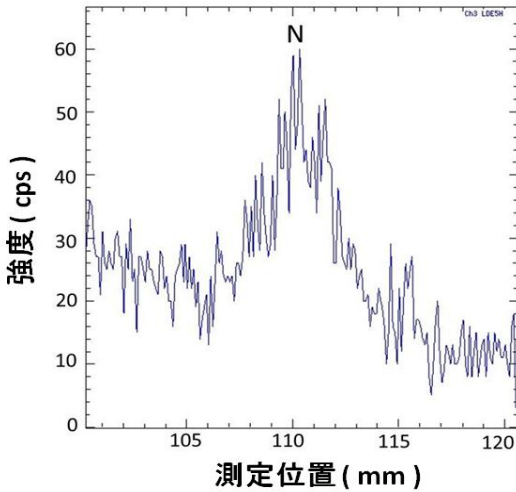


図4 EPMAによる元素分析 (G5,700°C)

分析結果である。ただし、横軸の深さについては、シリカのアルゴンガスによるエッチング量である 5.8nm/min で換算した。窒素拡散深さは、550°Cでは約 10nm、650°Cでは約 40nm、700°Cでは約 80nm であると評価された。同じように図 6 に各処理温度で表面処理を行った G7 の深さ分析結果を示した。窒素拡散深さは、550°Cでは約 20nm、650°Cでは約 40nm、700°Cでは約 70nm であると考えられる。以上のことから Co 量に関係なく、処理温度を高くすることにより窒素拡散領域が増加し、最大で約 80nm であると評価された。

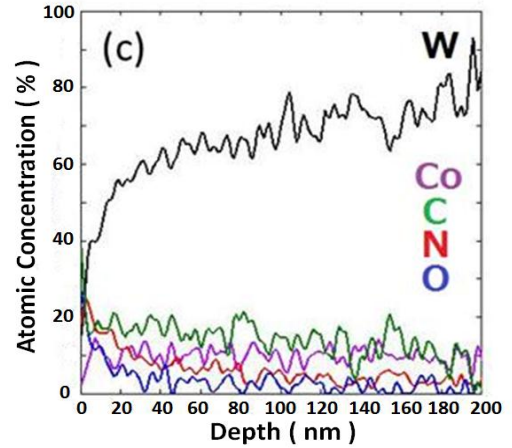
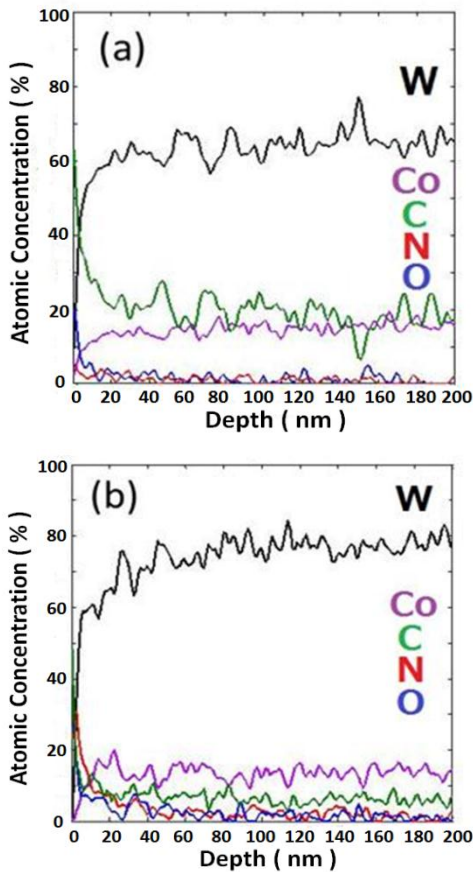


図5 オージェ電子分光装置による深さ分析 (G5)
(a)550°C, (b)650°C, および(c)700°C

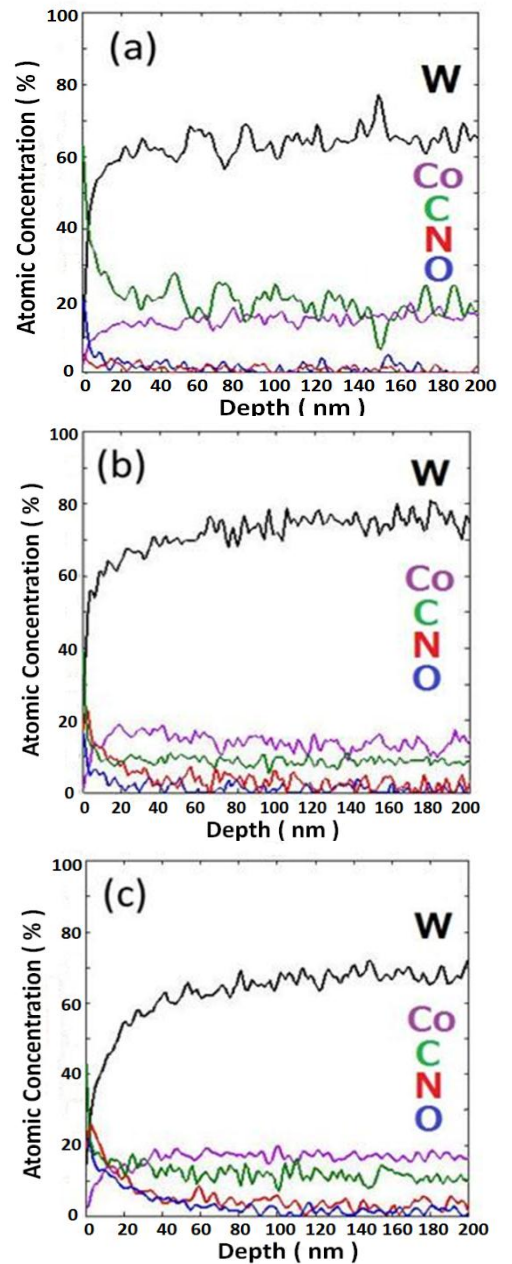


図6 オージェ電子分光装置による深さ分析 (G7)
(a)550°C, (b)650°C, および(c)700°C

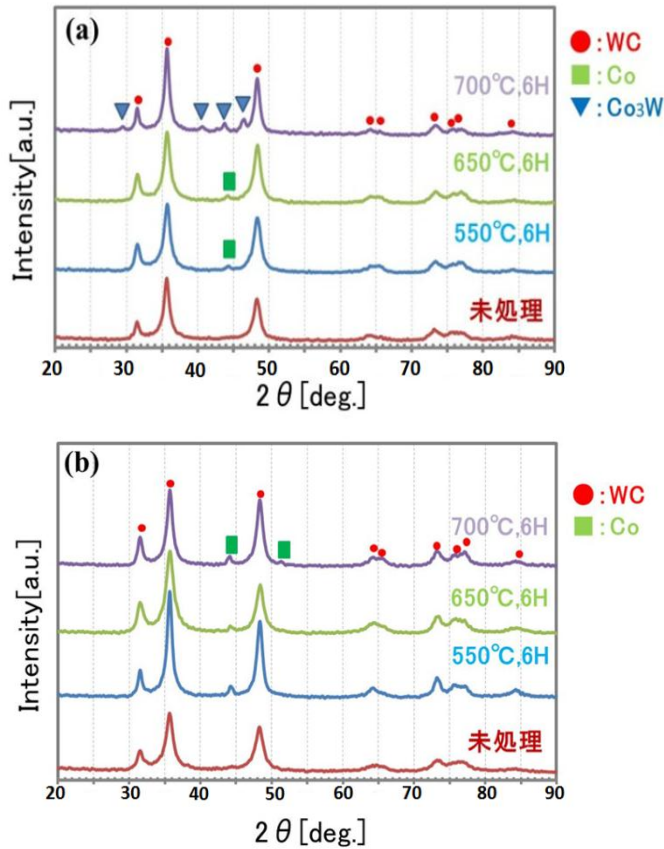


図7 自動 X 線回折測定 ((a)G5, (b)G7)

そこで、次に窒素拡散領域で窒素化合物層等の有無を調べるために XRD による薄膜測定を試みた。G5 に関するその結果を図 7(a)に示す。この図より、窒化処理温度 550°C、650°Cでは、未処理材と比較すると Co に対応する回折線が目立つようになったが、W や Co との窒素化合物に対応する回折線は確認できなかった。また、700°Cにおいては Co_3W に対応する回折線が確認できた。この結果は、結合層である Co の析出硬化が進行したことによると考えられる。しかし、700°Cにおいても窒素化合物層に対応する回折線は確認できなかった。また、図 7(b)で示されるように Co 量の多い G7 においてもす

べての処理温度において窒素化合物層に対応する回折線は確認できなかった。ただし、G5 で見られた結合層の析出硬化は見られないことが分かった。

窒素が WC 結晶中へ拡散しているならば残留応力値が変化すると考えられるため、自動 X 線回折装置を用いて残留応力を測定した。X 線源はコバルト (Co) を使い、回折面、回折角度はそれぞれ、WC(112)、 123.8° で行った。G5 未処理材の残留応力値は -1.36MPa であり、ほとんど応力が存在していないことが分かった。また、700°Cで表面処理した G5 の残留応力値は -0.08MPa であり、未処理材の値と大差なく、窒素拡散による残留応力変化は確認できなかった。残留応力測定の実験領域(深さ方向)は、表面から $5\mu\text{m}$ 程度の深さまでであり、測定値はこの領域の平均応力値であると考えられる。オージェ電子分光装置による深さ分析結果によると、700°Cで表面処理した G5 の窒素拡散領域は $0.1\mu\text{m}$ 未満であり、本測定の影響域に比べてわずかであるために残留応力値に変化が見られない可能性も考えられる。

4. まとめ

Co 量の異なる超硬合金材への窒素原子拡散による表面処理を $550^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ の温度範囲で変化させて行ったところ以下の結果を得た。1) 窒素は、すべての処理温度で拡散していることが分かった。2) 窒素拡散領域は、処理温度が高くなるにつれて深くなることが分かった。3) 窒素拡散層では、窒素の化合物層は形成していないと考えられた。

【参考文献】

- 1) 鈴木寿ら,日本金属学会誌 第 48 巻, 第 2 号, pp214-219,1984
- 2) 高原一樹ら,R&D 神戸製鋼技法 Vol.55, No.2, pp100-104,2005
- 3) 特開 2002-210525 (株デンソー, 株カナック)
- 4) 特開 2013-82976 (学校法人トヨタ学園, 岐阜県, フェザー安全剃刀(株))

鋳物製品の内部欠陥の低減に関する研究 (第1報)

大平武俊、水谷 予志生、足立 隆浩

Study on Reduction of Internal Defects in Castings (I)

Taketoshi Ohira, Yoshiki Mizutani, Takahiro Adachi

鋳造時に発生する内部欠陥の低減化のために、粘結剤からの熱分解ガスの分析方法の検討及びその分析を行った結果、フェノール系粘結剤から発生するガスの種類に応じた捕集方法及び分析方法を確立し、その熱分解ガスは、アンモニア、フェノール類、BTX類、メタン、二酸化炭素、水素等様々な化合物があり、温度域ごとで発生するガスの種類や発生量の特性を把握した。

1. はじめに

鋳物製品はその製造過程で、鑄巣が発生し、材料強度の低下や破損、仕上げ加工後にこの鑄巣が表面に現れることによる不良品等が発生させ、鋳物業界では長年の大きな課題となっている。鋳物の製造工程は、砂を樹脂で結合させた砂型に溶融した金属を流し込む(注湯)方法で、注湯時に高温の溶融金属からの熱伝導による加熱で樹脂が熱分解して大量のガスが発生し、このガスが鋳物製品の内部に欠陥を発生させる原因のひとつとなっている。

本研究では、この内部欠陥の低減化のために、粘結剤からのガスの発生特性について検討する。

本年度は、粘結剤からの熱分解ガスの分析方法の確立及びその分析を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 供試品

本試験には、フェノール系樹脂を砂にコートしたコートサンドを2種類(以下 CS-A, CS-B)用いた。

2.2 TG/MS分析

発生ガス状況を把握するために、供試品 70mg をアルミナパンに入れ、示差熱天秤/質量分析同時測定装置(BrukerAXS(株)製 TG-DTA2020SA / MS9610)にて、熱分解及びその熱分解ガスの質量分析を行った。試験条件を表1に示す。

表1 TG/MS試験条件

昇温条件	室温 - 20°C/min to 1000°C
キャリアガス	ヘリウム(エア・リキッド工業ガス(株)アルファガス②)
流量	150ml/min
測定質量数	1~400 amu

2.3 熱分解試験

アルミナパンに 70mg の供試品を入れ、示差熱天秤(BrukerAXS(株)製 TG-DTA2020SA)にて熱分解試験を行った。採取方法は、示差熱天秤のガス排出口に PTFE チ

ューブ及び PTFE 三方コックを取り付け、それぞれのガス種に応じて、捕集袋に直接採取または固相・液相吸着により採取した。また、流路を切り替えることで所定の温度区分ごとの採取を行った。熱分解条件を表2に示す。

表2 熱分解試験条件

昇温条件	室温 - 50°C/min to 250°C - 100°C/min to 1000°C
キャリアガス	ヘリウム
流量	150ml/min(吸着採取時)、75ml/min(気体採取時)

2.4 発生ガス分析方法

2.4.1 水素分析方法

水素測定装置は、質量分析装置(BrukerAXS(株)製 MS9610)の導入用キャピラリーカラムに水素分離用にパックドカラム(GLサイエンス製 Molecular Sieve 13X 30/60Mesh を充填したステンレスカラム)を、その前段にアンモニア等の除去用にプレパックドカラム(GLサイエンス(株)製 Silicagel 30/60Mesh をステンレス管に充填したカラム)を接続し、これらパックドカラムをオープン((株)島津製作所製 CTO-10ASVP)に入れて、さらにそのプレカラムの前段にステンレス製三方継手を接続し、一方に GC 用セプタムを取り付け簡易注入口とし、もう一方にキャリアガス管を接続し、分析装置として組み上げ、分析に供した。捕集袋(GLサイエンス(株)製 スマートバッグ PA)に捕集した検体から 1mL 採取し、本装置に注入することにより分析した。分析条件は表3に示す。標準として、水素(GLサイエンス(株)フッ缶タイプ標準ガス)を、ヘリウムガスを充填した捕集袋に希釈することにより所定の濃度に調整して、分析に用いた。

表3 水素分析条件

GC条件	ヘリウム 50ml/min
キャリアガス	42°C
オープン条件	
MS条件	
MS測定モード	EI, Scan
イオン源温度	200°C
スキャンレンジ	2-4amu
定量イオン	水素 2

2. 4. 2 メタン・二酸化炭素分析方法

捕集袋により捕集した検体から1 mL 採取し、ガスクロマトグラフ質量分析計 (サーモフィッシャーサイエンティフィック (株) 製 TRACE GC Ultra/ITQ1100) (以下 GC/MS) にて分析した。分析条件を表3に示した。標準ガスとして、メタン (GL サイエンス (株) プッシュ缶タイプ 標準ガス)、二酸化炭素 (GL サイエンス (株) プッシュ缶タイプ 標準ガス) を、ヘリウムガスを充填した捕集袋に希釈することにより所定の濃度に調整して分析に用いた。

表3 GC/MS 試験条件

GC条件	
使用カラム	Rt-Qbond 30m×0.32mm×10μm
注入口温度	200°C
注入量	1mL スプリット比 50:1
キャリアガス	ヘリウム コンスタントフローモード 41kPa
オープン条件	40°C(2min)-10°C/min to 150°C-(5min)
トランスファーライン温度	200°C
MS条件	
MS測定モード	EI, Scan
イオン源温度	200°C
スキャンレンジ	10-200amu
定量イオン	メタン 16, 二酸化炭素 44

2. 4. 3 ベンゼン・トルエン・キシレン類 (BTX) 分析方法

活性炭充填管 (柴田化学 (株) 製 カーボンピースアクティブ) に吸着させ、吸着させた活性炭を取り出し、二硫化炭素 (和光純薬工業 (株) 作業環境測定用) 1mL 加え、振とう後2時間放置し、ナフタレン d8 (和光純薬工業 (株) 環境分析用) を二硫化炭素で 1000 μg/mL に調整した溶液を内部標準として 10 μL 添加し、GC/MSで測定した。分析条件を表4に示す。

標準溶液は、ベンゼン (和光純薬工業 (株) インフィニティピュア)、トルエン (和光純薬工業 (株) インフィニティピュア)、o-キシレン、m-キシレン、p-キシレン (和光純薬工業 (株) 和光特級) を二硫化炭素で所定の濃度に希釈し、1mL 採取し検体と同様に分析に用いた。

表4 GC/MS 試験条件

GC条件	
使用カラム	DB-1ms 30m×0.25mm×0.25μm
注入口温度	200°C
注入量	1μL スプリット比 20:1
キャリアガス	ヘリウム コンスタントフローモード 1.0ml/min
オープン条件	40°C(1min)-10°C/min to 200°C-(2min)
トランスファーライン温度	220°C
MS条件	
MS測定モード	EI, Scan
イオン源温度	200°C
スキャンレンジ	75-140amu
定量イオン	ベンゼン 78 トルエン 92 キシレン 106

2. 4. 4 フェノール類分析方法

固相吸着カートリッジ (waters (株) 製 Sep-Pak Plus PS-2 Cartridge) にフェノール類を吸着させて採取し¹⁾、下段に脱水用カートリッジ (GL サイエンス (株) InertSep Slim-J DRY) を接続し、酢酸エチル (和光純薬工業 (株) 残留農薬・PCB 試験用) 4mL で抽出・脱水し、5mL にメスアップ後、1mL 分取し、誘導体化試薬 (GL サイエンス N, O-

Bis (trimethylsilyl) trifluoroacetamide (BSTFA)) 20 μL 添加後1時間放置し、フェナントレン d10 (和光純薬工業 (株) 環境分析用) を酢酸エチルで 1000 μg/mL に調整した溶液 10 μL を内部標準として添加し、GC/MSで測定した。分析条件を表5に示す。

標準溶液は、フェノール、o-, m-, p-クレゾール (関東化学 (株) 特級) 2,3-キシレノール (関東化学 (株) 鹿特級)、2,4- (関東化学 (株) >95%GC)、2,5-, 2,6-, 3,4-キシレノール (関東化学 (株) 鹿特級)、3,5-キシレノール (和光純薬工業 (株) 和光一級) を酢酸エチルで所定の濃度に希釈し、1mL 採取し検体と同様に分析に用いた。

表5 GC/MS 試験条件

GC条件	
使用カラム	DB-1ms 30m×0.25mm×0.25μm
注入口温度	240°C
注入量	1μL スプリット比 50:1
キャリアガス	ヘリウム コンスタントフローモード 1.0ml/min
オープン条件	50°C(2min)-10°C/min to 260°C-(5min)
トランスファーライン温度	240°C
MS条件	
MS測定モード	EI, Scan
イオン源温度	200°C
スキャンレンジ	50-400amu
定量イオン	フェノール 151 クレゾール 165 キシレノール 179

2. 4. 5 アルデヒド類等分析方法

アルデヒド類は、吸着用固相吸着カートリッジ (waters (株) 製 Sep-Pak DNPH Silica Cartridge) の前段にオゾンスクラバー (waters (株) Sep-Pak Ozone Scrubber Potassium Iodide) を接続し捕集した。捕集したカートリッジの下段に強カチオン交換樹脂カートリッジ (東ソー (株) TOYO PAK IC-SP) 及び脱水用カートリッジを接続し、アセトニトリル (和光純薬工業 (株) アルデヒド分析用) 5mL で抽出・脱水し、窒素吹き付け濃縮後酢酸エチル 1mL に転溶し、ジフェニルアミン (和光純薬工業 (株) 悪臭物質試験 (GC 用)) を酢酸エチルで 10 μg/mL に調整した溶液を内部標準として 100 μL 添加し、GC/MSで測定した。分析条件を表6に示す。

標準試薬は、2種アルデヒドDNPH混合標準液 (和光純薬工業 (株) 大気汚染物質測定 (GC 用)) を酢酸エチルで所定の濃度に希釈し、1mL 採取し内部標準を添加して分析に用いた。

表6 GC/MS 試験条件

GC条件	
使用カラム	DB-1ms 30m×0.25mm×0.25μm
注入口温度	240°C
注入量	1μL スプリットレス(1min)
キャリアガス	ヘリウム コンスタントフローモード 1.0ml/min
オープン条件	50°C(2min)-15°C/min to 200°C-3°C/min to 260°C-(5min)
トランスファーライン温度	240°C
MS条件	
MS測定モード	EI, Scan
イオン源温度	200°C
スキャンレンジ	50-400amu
定量イオン	ホルムアルデヒド 210 アセトアルデヒド 224

2. 4. 6 アンモニア分析方法

吸収瓶（柴田化学(株)製 ガス洗浄瓶）にホウ酸（和光純薬工業(株)試薬特級）溶液 5g/L を 60mL 入れ、発生ガス中のアンモニアをホウ酸溶液に吸収させ、インドフェノール法²⁾にて吸光度を分光光度計（日本分光(株)製 V-530）にて測定することにより分析した。標準溶液は、アンモニア標準溶液（和光純薬工業(株)JCSS 1000mg/mL）をホウ酸溶液で所定の濃度に希釈し、検体と同様に測定した。

3. 結果及び考察

3. 1 TG/MS分析

TG/MS分析によるマスクロマトグラムの結果を図1、図2に示す。

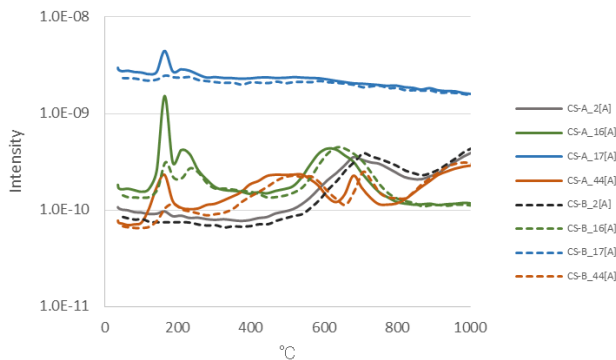


図1 TG/MSによるマスクロマトグラム (1)

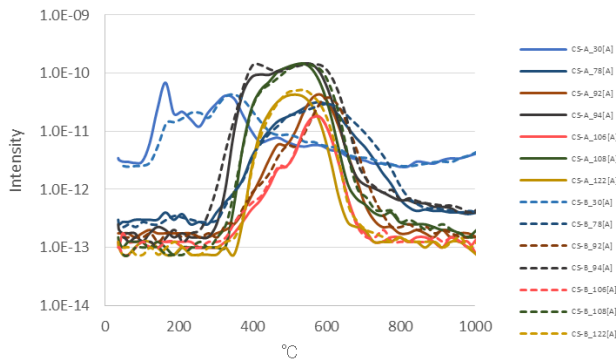


図2 TG/MSによるマスクロマトグラム (2)

本装置にはカラムによる分離がなく、マスクロマトグラムは、複数の化合物が同時に発生した場合、複数の化合物の質量数とそのフラグメントが同時に検出されるため、この分析では測定されたマスクロマトグラムがその質量数の化合物の発生状況と必ずしも一致するとは限らないが、今回は発生ガス種及びその発生状況を推定するために用いた。その結果、200℃付近の質量数 17 のピークはアンモニア、700℃付近の質量数 16 のピークはメタン、700, 1000℃付近の質量数 2 のピークは水素、500, 700, 1000℃付近の質量数 44 のピークは二酸化炭素、

180, 350℃付近の質量数 30 のピークはホルムアルデヒド、400～600℃付近の質量数 92, 94, 106, 108, 122 のピークはそれぞれベンゼン、フェノール、トルエン、キシレン、クレゾール、キシレノールと推察された。これらの他の質量数にもマスクロマトグラムのピークは観測されたが、本測定結果及びフェノール系樹脂ということから、今回の分析の対象化合物を、水素、メタン、フェノール類、アンモニア、アルデヒド類、BTX類とした。

3. 2 TG分析

供試品のTG測定結果を図3に示す。

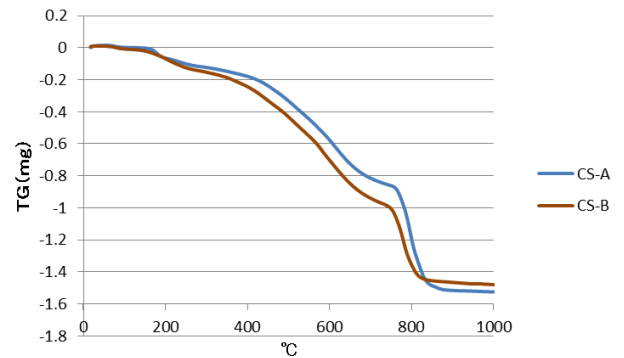


図3 熱分解による重量変化

TGの結果、重量減少は 400～750℃付近で最も多く、次いで 750～850℃付近で、200℃付近でも僅かに起きていることがわかる。また、CS-A と CS-B では、熱重量変化が類似している。そこで、今回は、採取区分を 50～250℃ (区分Ⅰ)、250～750℃ (区分Ⅱ)、750～1000℃ (区分Ⅲ) とし、それぞれの区分で採取することとした。

3. 3 定量分析結果

それぞれの採取区分ごとの定量分析結果を表7に示す。また、その種類ごとの質量を図4に示す。

区分Ⅰでは、アンモニアとアルデヒドを検出し、そのほとんどを占めるアンモニアの発生量が CS-A より CS-B の方が多く、差が見られた。その他の化合物が検出されないことから、未反応のモノマーが揮発してきたものと考えられ、フェノール樹脂自体の分解はしていないと考えられる。

区分Ⅱではフェノール類が最も多く発生し、次いで、メタン、二酸化炭素、アンモニア、水素等多くの化合物が検出された。樹脂の種類による大きな差は見られなかった。また、フェノール類は、測定総質量中の半分以上を占めており、区分Ⅱの温度域では樹脂の分解過程でモノマー単位への分解が多く進むためと考えられた。

区分Ⅲでは、区分Ⅱに比較して、発生量が 1/8 程度に減少し、樹脂の種類による大きな差は見られなかった。特にフェノール類は大きく減少し、BTX類も検出されなかったが、水素は2倍弱増加しており、また、二酸化

炭素は区分Ⅱと同程度であった。フェノール類が減少したことは、区分Ⅱでフェノール樹脂のほとんどが分解するか、残留していても区分Ⅲでは高温のため、さらに分解が進むためと考えられる。これに対し、水素が増加したことは、区分Ⅲは区分Ⅱより高温ため、還元雰囲気での炭化水素からの水素発生が容易となったためと考えられる。

表7 発生ガスの定量分析結果

樹脂の種類 区分名	CS-A			CS-B		
	I	II	III	I	II	III
	50 ~ 250	250 ~ 750	750 ~ 1000	50 ~ 250	250 ~ 750	750 ~ 1000
水素	-	12.4	22.2	-	12.9	23.0
メタン	-	43.3	6.7	-	42.6	6.91
二酸化炭素	-	16.9	14.9	-	22.0	20.2
アンモニア	67.2	17.8	2.64	23.6	18.6	2.97
ホルムアルデヒド	3.37	1.52	0.08	1.44	1.03	0.19
アセトアルデヒド	-	0.08	-	-	0.10	-
ベンゼン	-	7.84	-	-	8.05	-
トルエン	-	18.6	-	-	16.9	-
m,p-キシレン	-	9.66	-	-	1.04	-
o-キシレン	-	-	-	-	-	-
フェノール	-	95.8	2.18	-	119	1.87
o-クレゾール	-	73.5	1.46	-	71.1	0.81
m-クレゾール	-	-	-	-	-	-
p-クレゾール	-	38.9	0.89	-	41.4	-
2,5-キシレノール	-	-	-	-	-	-
2,4 & 3,5-キシレノール	-	19.6	-	-	24.0	-
2,6-キシレノール	-	11.3	-	-	13.3	-
2,3-キシレノール	-	-	-	-	-	-
3,4-キシレノール	-	-	-	-	-	-
合計	70.57	367.2	51.05	25.04	226.92	32.95

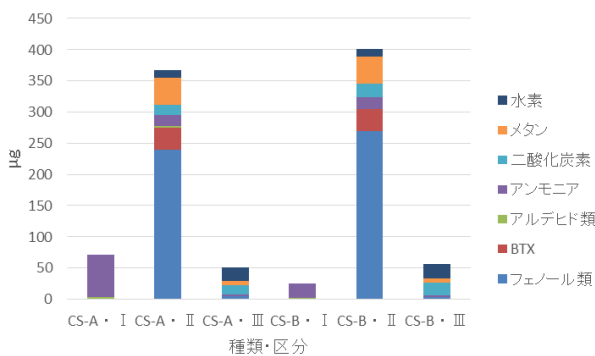


図4 発生ガスの種類別質量

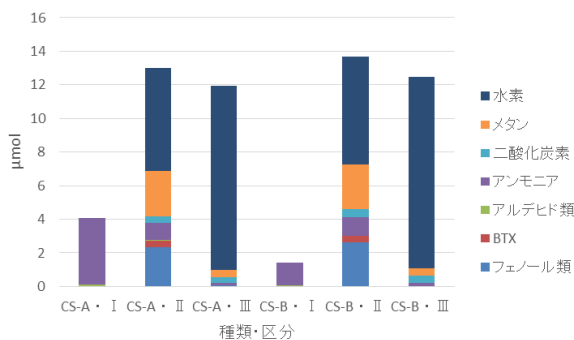


図5 発生ガスの種類別物質質量

発生量を物質量としたものを図5に示す。化合物のモル比は気体状態での体積比と同じであるため、ガス発生時の化合物の体積の状況を比較することができる。その結果、区分Ⅱで発生した体積が最も多く、区分ⅢはⅡよりやや少ないものの同程度で、樹脂の種類には関係なかった。区分Ⅰでは、区分Ⅱに比較してCS-Aは1/3程度、CS-Bは1/10程度であり樹脂の種類による差があった。

区分Ⅱでは質量ではフェノール類がその半分以上を占めていたが、体積では1/5程度と低く、それに対し、水素は質量では3%程度であったが、体積としては区分Ⅱ全体の半分弱を占めている。メタンについては質量では1/10程度であったが体積としては1/4を占めている。

区分Ⅲでは、区分Ⅱに比較して、合計した質量では1/8程度と少なかったが、水素の量が区分Ⅱのそれより倍程度あるため、その体積比は同程度であった。

4. まとめ

粘結剤からの熱分解ガスの分析方法の検討及びその分析を行った結果は次のとおりであった。

- 1) 粘結剤から発生するガスの種類に応じた捕集方法及び分析方法を確立した。
- 2) 熱分解ガスは、温度域ごとでガスの発生種類や発生質量が異なり、50~250℃では主にアンモニア、250~750℃ではフェノール類をはじめBTX類、メタン、アンモニア、二酸化炭素、水素等様々な化合物、750~1000℃では主に水素、メタンが発生していた。
- 3) 発生したガスの体積量は、250~750℃、750~1000℃ともに同程度で、250~750℃で水素が半分程度、次いでメタン、フェノール類がそれぞれ2割程度で、750~1000℃で水素がそのほとんどを占めていた。

【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) 細野, 埼玉県公害センター研究報告 研究報告, pp19-25, 1993
- 2) JIS K0099 排ガス中のアンモニア分析方法

固体潤滑剤を鑄ぐるんだ潤滑プレートの開発 (第2報)

水谷 予志生、足立 隆浩

Development of solid lubricants-enveloped casting (II)

Yoshiki Mizutani and Takahiro Adachi

金属基盤に固体潤滑剤を埋め込んだ、あるいは焼結法により複合化した無給油潤滑材と呼ばれるものがプレス機等機械装置の摺動部に使われている。これを従来製法と異なり、鑄造法である鑄ぐるみ法を用いて簡易に同等品を作製できないか検討した。これまでは、鑄鉄切粉、黒鉛粉、発泡剤に黒鉛棒も混入させることで多孔質面を作製したが、比較的大きな空隙をもち、強度の低いものしか出来なかった。多孔質部の結合を強固にするため、鉄より融点の低いアルミニウムまたは銅の粉末をブリケットに混ぜた。また、空隙を小さくするため、使用する原料粉末を小さくすることで密にし、発泡剤を入れることで溶湯が進入する経路を確保した手法による作製を検討した。

1. はじめに

プレス機等産業機械装置の摺動部では、金属と固体潤滑剤を複合化させた無給油潤滑材を消耗品として用いている。この無給油潤滑材は、金属基盤上の穴に固体潤滑剤(黒鉛や二硫化モリブデン(MoS₂)等)を埋め込む方法や、金属と固体潤滑剤の粉末を混合して焼結する方法等によって製造されている。しかし、埋込型では機械加工後に固体潤滑剤を埋め込む手間、焼結型では長時間の熱処理がネックとなる。そこで本研究では、より簡易に製造できるような手法として、鑄ぐるみ法に注目した。鑄造法の一つである鑄ぐるみは、異なる物質を鑄造時に一気に一体化して複合化させることができ、さまざまな特性を鑄物に付与させることができる。この手法を用いて固体潤滑材を鑄造時に一度に複合化することで、無給油潤滑材の作製を試みた。

前報では、鑄鉄切粉、黒鉛粉、発泡剤等を混ぜ、フェノール樹脂で円盤状に固化させたブリケットを作製し、これを鑄ぐるみ実験を行った。しかし、細かい切粉と黒鉛粉を押し固めた密なブリケットの場合、ほとんど溶湯が含浸しなかった。そこで、原料粉を大きくし、発泡剤も混入させたところ、ようやく一部分で一体化させることができた。しかし、まだまだ溶湯の含浸が不十分であり、多孔質の部分の接合不足で容易に崩れてしまうようなものしかできていない。そこで、鑄鉄溶湯の熱で容易に溶解し、鑄鉄切粉同士を接合できるように低融点金属粉を混入させることを試みた。このような手法で、新しい無給油潤滑材を開発することを目的とした。

2. 実験方法

図1(a)~(f)に使用した原料粉を、表1にブリケット作製のための混合条件と試料名を示す。これらの粉末を体積比で均等割合になるよう秤量し、バインダーとなるアルカリフェノールを体積比で数~25%程度混ぜ合わせ

て直径65mm×厚さ約15mmの円盤状に成形・固化させた。図2に作製したブリケットの例として、(a)試料Cと(b)試料Dの外観写真を示す。これを十分乾燥させた後、砂鑄型内にセットし、FC250片状黒鉛鑄鉄用溶湯を注湯することで鑄ぐるみ実験を行った。鑄物の大きさは直径80~90mm×高さ50mmであり、鑄造方案は押し上げ式でキャピティ上面にブリケットを貼り付けている。また、このブリケット直上には押し湯も配してある。得られた鑄物の断面を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、エネルギー分散型X線分析装置(EDS)による成分元素のマッピングも行った。また、得られた鑄物を機械加工し、無給油潤滑プレートの試作を行った。

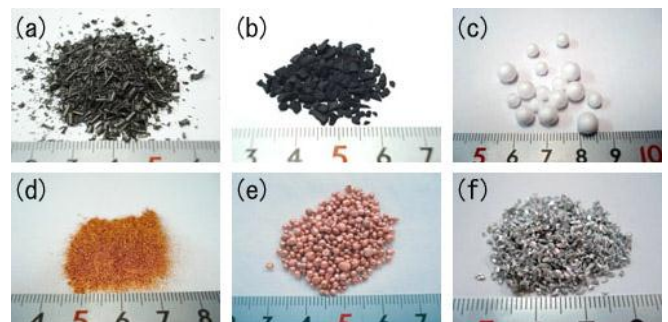


図1 原料粉外観、(a)FC250 鑄鉄切粉、(b)黒鉛粉、(c)発泡剤、(d)Cu 微粉末、(e)Cu 粒、(f)Al 切粉

表1 ブリケット作製条件

試料 No.	鑄鉄切粉+黒鉛粉+発泡剤に加えて
A	+Cu 微粉末
B	+Cu 粒
C	+Al 切粉
D	+Al 切粉+Cu 粒

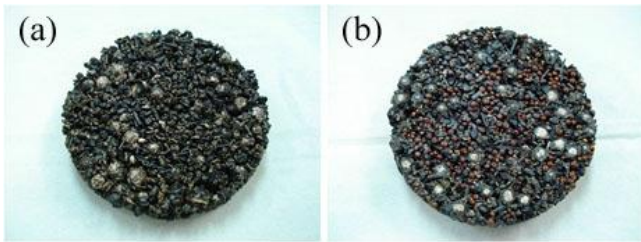


図2 作製したブリケット外観、(a)試料 C、(b)試料 D

3. 結果及び考察

表1の4種類のブリケットを用いて鑄ぐるみを行ったところ、試料 A では溶湯が十分に浸透しなかった。このブリケットは Cu の微粉末を用いており、これがブリケット全体をコーティングするような状態であった。鑄造時の熱と気化した樹脂成分により Cu 粉末が酸化し、鑄鉄溶湯とのなじみが悪くなったのではないかと考えられる。比較的溶湯が充填した B~D の鑄物について、2つに切断した断面写真を図3に示す。(a)の試料 B では、ブリケット中の Cu 粒が鑄鉄溶湯と溶け合わず、Cu 粒のまま存在しているものが多数見られた。銅より融点の低い Al 切粉を用いた(b)の試料 C では、Al 切粉のみのような部分は見られておらず、鑄鉄溶湯と一体化したように見られる。Cu 粒と Al 切粉を混ぜた(c)の試料 D では、Cu 粒の形状が大きく変形しているが銅の茶褐色を呈している部分と、真鍮のような黄金色に近い黄色を呈している部分とが混在していた。Al 切粉が入ったことで融点が低下し、合金化したのではないかと考えられる。また、いずれの試料も潤滑の役目をする黒鉛粉が残っており、潤滑油を保持するための空隙も多数存在していた。

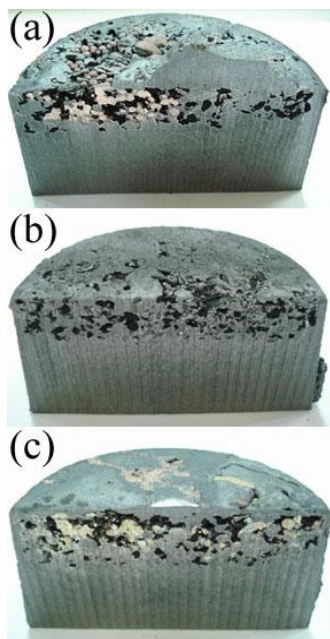


図3 鑄ぐるみ後の試料断面、(a)試料 B、(b)試料 C、(c)試料 D

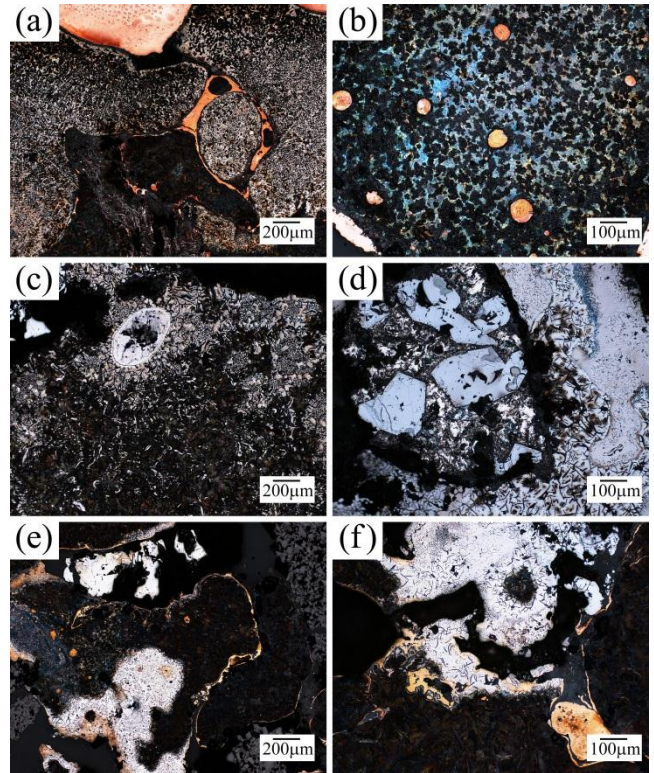


図4 鑄ぐるみ後の試料断面のマイクロ組織、(a),(b)試料 B、(c),(d)試料 C、(e),(f)試料 D

B~D の試料断面のマイクロ組織写真を図4に示す。Cu 粒のみを用いた試料 B では、Cu 粒の形状が鑄鉄を取り囲むように変形している箇所も見られるため、一部溶けていると考えられるが、鑄鉄に取り込まれても球状に Cu が晶出していた。Al 切粉を用いた試料 C では、Al 切粉の形状のままのものは見られず、鑄鉄に溶け込んでいると考えられるが、Al と Fe が反応し、化合物が形成されたと思われるものもあった。Cu 粒と Al 切粉を混ぜた試料 D では、鑄鉄素地組織中に晶出した球状の Cu や、鑄鉄切粉の周りを薄く取り囲んだものがより多く見られるようになった。これらは、Al 切粉の添加により融点が低下した結果であると考えられる。

これらの試料断面について、EDS により元素マッピングを行った結果を図5~7に示す。図5の試料 B では、Fe, Cu, C, O についてのマッピングを示した。Fe と Cu のマッピングを見ると、Fe と Cu はほとんど混じり合っておらず、鑄鉄素地の中に Cu が入り込んだとしても数~10 μ m 程度の球状に分離しているのが分かる。Fe-Cu 二元系状態図は二相分離型となっており、ほとんど固溶せず、Fe 中から球状の Cu が晶出した結果と一致している。また、鑄鉄切粉の周りには酸化物も多く存在していた。次に、図6の試料 C では、Fe, Al, C, O についてのマッピングを示した。Al は Cu の場合と異なり、Fe が存在している箇所にも存在しており、その存在割合が異なっているものがいくつかあるように見える。Fe-Al 二元系状態図には金属間化合物が複数存在するため、こ

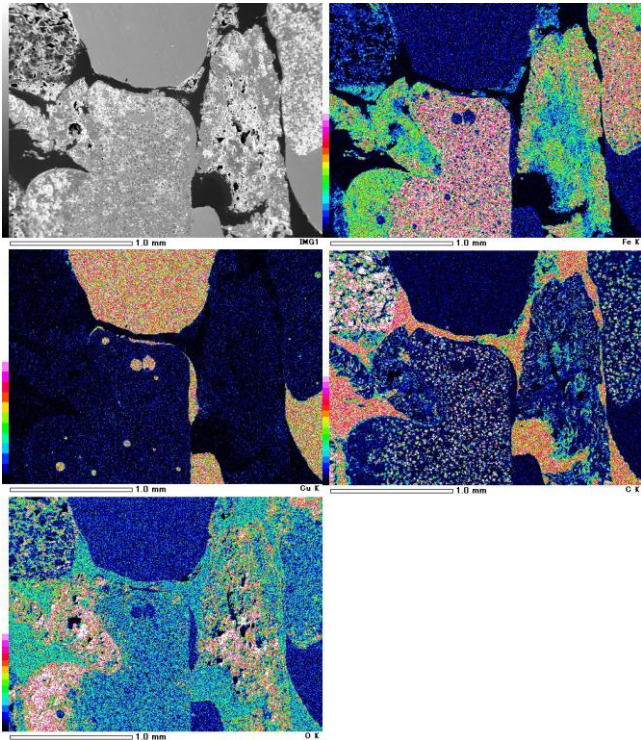


図5 試料B断面のEDS マッピング

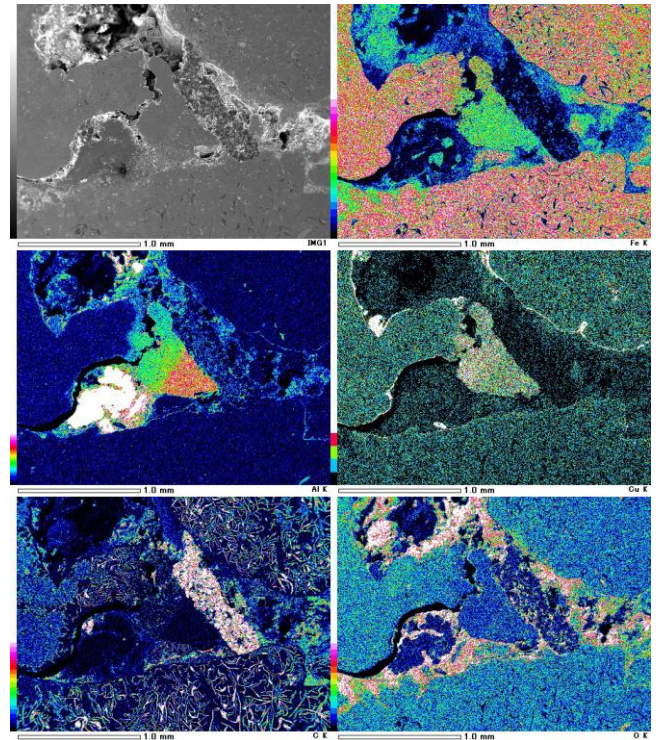


図7 試料D断面のEDS マッピング

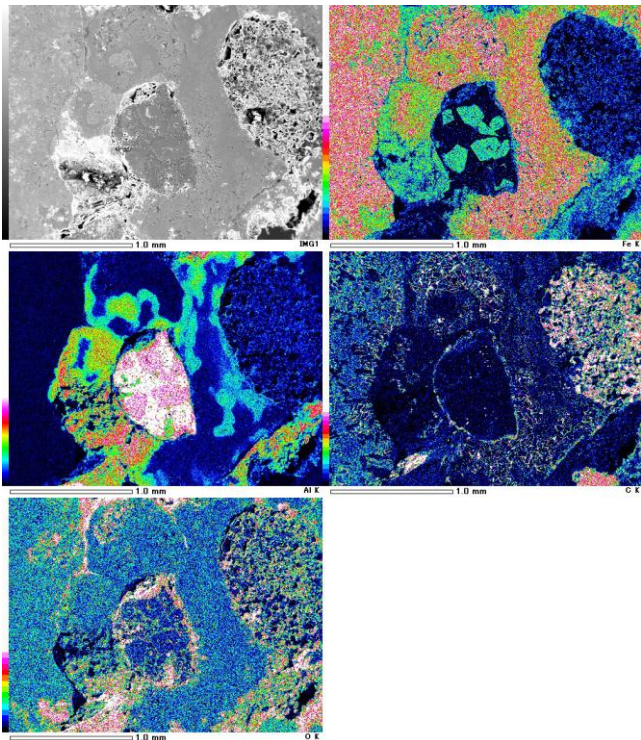


図6 試料C断面のEDS マッピング

のうちのどれかが形成されたと考えられる。また、この試料ではAlの周りにも酸化物が見られている。図7の試料Dでは、Fe, Al, Cu, C, Oと全てのマッピングを示した。図5の試料Bではほぼ分離していたFeとCuが、Alが存在することでFe-Al-Cuの化合物が形成されたと見られる箇所があった。Al-Cu二元系状態図にも金属間

化合物が複数存在するため、Alが添加されたことでCuとの反応性が高くなったと考えられる。また、FeがなくAlとCuのみが検出される箇所も存在していた。

今回作製した鑄ぐるみ試料の中では、Al切粉を添加した試料CとDが鑄鉄切粉をよく接合しているようであった。しかし、まだ空隙の割合が大きく、強度が低いものであったため、Al切粉だけでなくAl粉末も混入し、より密な鑄物が作製できないか試みた。図8(a)は鑄鉄切粉、黒鉛粉、発泡剤に加えてAl切粉とAl粉末を混入したブリケット、(b)は(a)にCu粒を追加したブリケットを鑄ぐるんだ試料を30×30×7mmの板形状に機械加工した試作品の外観写真を示す。これらの試作品は、いずれも前述の試料A~Dと同形状の鑄物からフライスで機械加工しているが、ブリケットを鑄ぐるんだ箇所は加工時の応力で容易に崩壊してしまうものであった。ブリケット最下部の最も溶湯に近い2~3mm程度の箇所ですら、ようやく図8の試作品が作製できた。これらの機械加工面の空隙部の面積率を算出するため、平面の画像写真より、空隙部を黒塗りにした画像を図8の右側にそれぞれ示した。それぞれの空隙率は、図8(a)で約43%、(b)では約57%であり、依然として大きすぎる値であった。さらに、加工面に現れた黒鉛の量はわずかなものであり、固体潤滑材としての機能が果たせないと考えられる。黒鉛率を20~30%に、空隙率を10%以下にするのが理想であるため、よりブリケットを密に作る必要があるが、溶湯を単純に注湯する今回の手法のままでは達成困難であると考えられる。ブリケットに溶湯を強制的に浸透さ

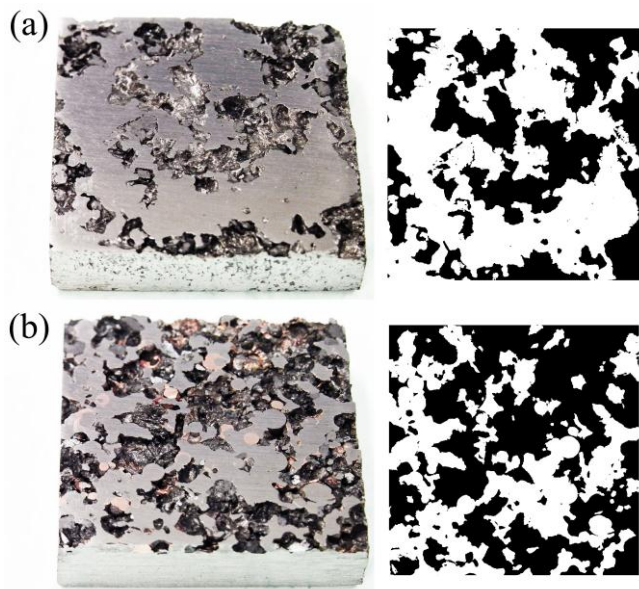


図8 板形状試作品と空隙率図、
(a)Al切粉+Al粉末、(b)Al切粉+Al粉末+Cu粒

せるような力を加えることが必要であると考えられ、溶湯鍛造法や遠心鑄造法等であれば可能性があるのではないかと考えられる。

4. まとめ

固体潤滑剤として黒鉛粉末を使用し、鑄鉄切粉と混ぜ合わせて作製したブリケットを鑄ぐるむことで無給油潤滑材の試作を行った。

鑄鉄切粉の鑄鉄溶湯への溶け込みが不十分であったことから、より低融点の金属であるアルミニウムあるいは銅を混入させたブリケットを鑄ぐるむことを検討したが、厚さ約15mmのブリケットのうち、2~3mm程度でしか固体潤滑材板を試作することができなかった。この試作品の空隙の面積率は40~60%もあり、強度が不十分であった。また、黒鉛率も不十分であったことから、ブリケットの配合や原料となる切粉・粉の大きさを再検討しなければならない。しかし、さらに密なブリケットになると、鑄鉄溶湯の浸透がより困難になると考えられるため、今回のような重力鑄造法ではなく、溶湯に力を加えることができる、溶湯鍛造法や遠心鑄造法の方が適していると考えられる。

【謝 辞】

本研究を行う上で、鑄造実験および研究全般にわたり多大なご協力を頂きました株式会社岡本の西垣功一様、幅司様、若原正敏様、須田貴志様に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 水谷ら,岐阜県工業技術研究所研究報告, No.1, pp10-12, 2013

自己組織化膜による刃物の表面改質技術の開発 (第1報)

大川 香織、細野 幸太、大津 崇

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

Kaori Okawa, Kouta Hosono and Takashi Otsu

金属製品表面への強固な有機皮膜形成による撥油・撥水性の発現をめざし、金-硫黄結合を利用して、フルオロアルキル基を有するアルカンチオールを用いて金めっき表面への自己組織化膜の形成を検討した。

1. はじめに

金属製品の撥油性・撥水性は、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。

これまでに当所において、大気圧プラズマジェット処理により、メスの側面に CF_3 皮膜を形成し、撥水・撥油性を付与することに成功した¹⁾。大気圧プラズマジェットは簡単な装置を用いて皮膜形成を行え、ピンホールフリーであることが利点だが、膜厚調整が容易でなく、ジェットであることから形成膜の形状が円形に限られ、膜中央が厚くなってしまふ。また、成膜できる製品はほぼ平板に限定される。

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、ち密な有機皮膜を形成することが知られている^{2,3)}。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。SAM はナノオーダーの膜厚調整が可能であり、被覆対象物の立体形状に影響を与えないため、形状が性能に影響を及ぼす製品への処理に最適である。また、金属製品の多くは、貴金属めっきを施せることから、これらを組み合わせることにより、金属表面への撥油性・撥水性を持った高密着性有機皮膜の形成を検討した。

2. 実験

2. 1 基板および試薬

基板として、25mm×47mm の鉄製替刃にニッケル-金めっきを施したものを使用した (金めっきの厚みは約 1 μm)。表面の有機汚染層を除去するために、Piranha 溶液に 1 時間浸漬後、純水で洗浄し窒素で風乾して使用した。アルカンチオールとして、1H,1H,2H,2H-Perfluorodecanethiol ($\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SH}$) (以下 PFDT と略) (Sigma-Aldrich) を用いた。

2. 2 基板表面の評価

2. 2. 1 金基板への PFDT 皮膜の形成

基板を窒素雰囲気下で 1.0mM の PFDT のエタノール溶液に所定の時間浸漬した。反応はすべて 20°C で行った。

2. 2. 2 オージェ電子分光分析

アルバック・ファイ製オージェ電子分光分析装置 PHI 700Xi を使用し、未処理金めっき基板および PFDT 処理した金めっき基板のオージェスペクトルを測定し、表面の定性分析を行った (加速電圧: 5kV、照射電流: 10nA、倍率: 2000 倍)

2. 2. 3 接触角測定

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 1 μl または 2 μl の液を滴下し、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. 4 PFDT 皮膜の表面張力

ぬれ性を評価するため、PFDT 皮膜の表面張力を算出した⁴⁾。接触角の大きさは固液界面に働く三つの張力に依存する。三つの張力は、固体の表面張力 γ_s と液体の表面張力 γ_L および固液界面張力 γ_{SL} からなり、接触角はこれらが均衡を保った状態での数値である。この状態は、式(1)(Young の式)で表される。

$$\gamma_s = \gamma_L \cdot \cos\theta + \gamma_{SL} \cdots (1)$$

θ : 接触角

γ_s : 固体表面の表面張力

γ_L : 接触角測定液の表面張力

また、固体と液体が接着する状態は、式(2)(Dupre の式)で表される。

$$\gamma_s + \gamma_L = W_{SL} + \gamma_{SL} \dots (2)$$

$$W_{SL} = \gamma_L(1 + \cos \theta) \dots (3)$$

式(1)と式(2)より、Young-Dupre の式(3)が導かれる。さらに、下記に示す拡張 Fowkes の式(4)から、PFDT 皮膜の分散力成分 γ_s^d 、双極子成分 γ_s^p 、水素結合成分 γ_s^h を算出した。さらに、これらの値から PFDT 皮膜の固体表面張力 γ_s を求めた。 γ_s は、分散力成分 γ_s^d 、双極子成分 γ_s^p 、水素結合成分 γ_s^h の和(5)として表される。

$$\gamma_{SL} = \gamma_s + \gamma_L - 2(\gamma_s^d \cdot \gamma_L^d)^{1/2} - 2(\gamma_s^p \cdot \gamma_L^p)^{1/2} - 2(\gamma_s^h \cdot \gamma_L^h)^{1/2} \dots (4)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p + \gamma_s^h \dots (5)$$

式(4)を用いて、PFDT の各成分値を算出するために、各成分のエネルギーが既知である超純水、n-ヘキサデカンおよびヨウ化メチレンを使用し、接触角 θ を測定した。各溶液の各エネルギー値を表1に示す。

表1 液体の表面張力

	γ_L (mN/m)	γ_L^d (mN/m)	γ_L^p (mN/m)	γ_L^h (mN/m)
超純水	72.8	29.1	1.3	42.4
ヨウ化メチレン	50.8	46.8	4.0	0
n-ヘキサデカン	27.6	27.6	0	0

3. 結果及び考察

洗浄した金めっき基板および金めっき基板を 1.0 mM の PFDT エタノール溶液に 20 時間、浸漬した場合の水に対する接触角測定の画像をそれぞれ図1(a)および(b)に示す。

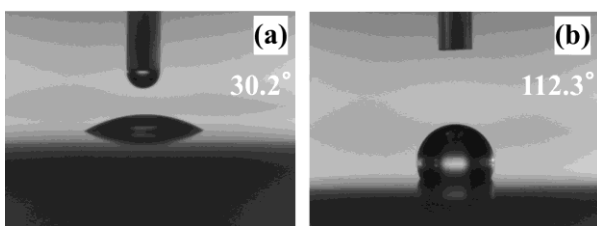


図1 金めっき基板(a)および PFDT 処理金めっき基板(b)の水に対する接触角

図1(a)より、金めっき基板の水に対する接触角は 30.2°であるが、PFDT 溶液に浸漬した基板では 112.3°と高い撥水性を示した(図1(b))。さらに、金めっき基板を、PFDT エタノール溶液に所定の時間浸漬した場合の水に対する接触角を図2に示す。浸漬15分後で 112.5°と高い撥水性を示し、ほんのわずかな時間で基板上へ PFDT 皮膜が形成されている。その後、30分後に一番大きい値である 115.4°を示し、その後は約 112°に安定した。これは、初めに、PFDT 分子が無秩序に金めっき上へ結合し、その後、PFDT 同士の Van

der Waals 力が強く働くことで、基板表面上で PFDT 分子の配列が早くなり、規則正しく配向した PFDT 皮膜が形成されていると考えられる。このことから、安定した皮膜を得るには、浸漬時間を長くすればいいことがわかる。

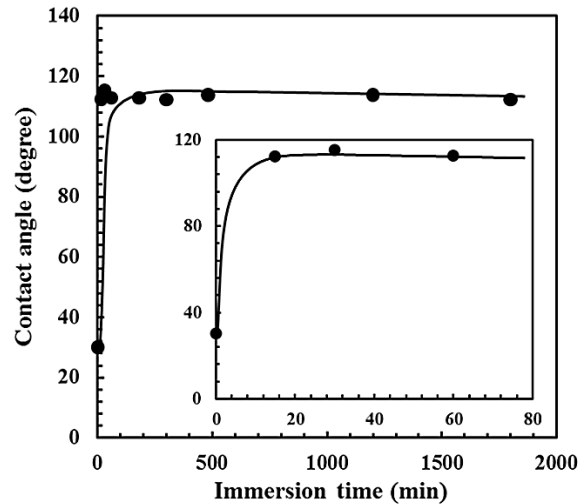


図2 PFDT 溶液に所定の時間浸漬した金めっき基板の接触角

次に、未処理の金めっき基板および PFDT 溶液に 20 時間浸漬した金めっき基板のオージェスペクトルを図2(a)および図2(b)に示す。図2(a)より、未処理の金めっき基板には、汚染層由来の炭素と硫黄、めっき由来の金のピークが認められる。一方、図2(b)より、PFDT 処理金めっき基板のオージェスペクトルには、659 eV 付近にフッ素に由来するピークが認められた。オージェ電子は、数 nm の深さからのみ発生するため、極表面層

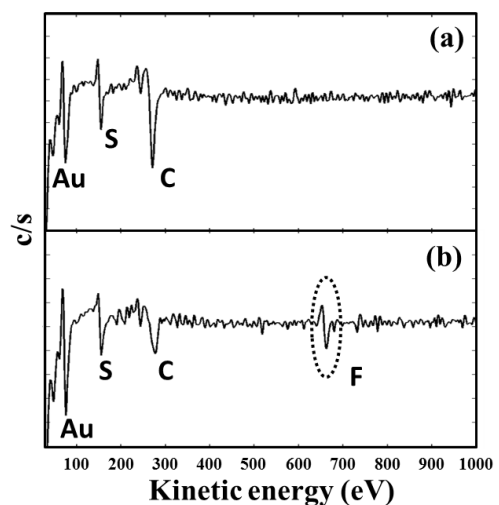


図3 金めっき基板(a)および PFDT 処理金めっき基板(b)のオージェスペクトル

に PFDT が存在していることがわかった。

表2に 1.0mM の PFDT 溶液に 20 時間浸漬した金めっき基板の純水、ヨウ化メチレンおよび 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。PFDT 処理基板の接触角はいずれの溶液においても、PTFE よりも大きい値を示し、PTFE よりも高い撥水・撥油性を有することがわかる。

表2 PFDT 処理基板と PTFE の各溶液に対する接触角

		PFDT 処理基板	PTFE
接触角	純水 (°)	112.3	104~114
	ヨウ化メチレン (°)	93.3	88
	n-ヘキサデカン (°)	73.7	34~45

さらに、得られた値を用いて、式(4)から、PFDT 皮膜の分散力成分、双極子成分、水素結合成分を求めた結果と、参考に PTFE の値⁹⁾を表3に示す。式(5)より、金めっき基板上の PFDT 皮膜の固体表面張力 γ_s は 11.9 mN/m と算出された。表3より、PFDT 皮膜の固体表面張力の方が PTFE よりも値が低いのは、PTFE の構造は CF₂ が連なっているため、PTFE 最表面は CF₂ で覆われているのに対し、PFDT の末端は CF₃ で、表面自由エネルギーは -CF₂ より -CF₃ の方が小さいためである⁷⁾。これらの結果から、PFDT 処理金めっき基板の最表面は、CF₃ 基で完全に覆われていることを示している。

表3 PFDT 皮膜および PTFE の表面自由エネルギー

	γ_s (mN/m)	γ_s^d (mN/m)	γ_s^p (mN/m)	γ_s^h (mN/m)
PFDT	11.9	11.3	0.2	0.4
PTFE	21.5	19.4	2.1	0

このように、表面を撥水・撥油性にするには -CF₂ や -CF₃ などの表面自由エネルギーの小さい官能基を基板に対して垂直に配向させることが有効である。

4. まとめ

金-硫黄結合を利用した金めっき表面への自己組織化膜の形成を検討した結果、フルオロアルキル基を有するアルカンチオールを用いて、金属表面へ撥水・撥油性を付与できた。防汚性を付与するためには、水の接触角が 150°以上なければならぬが、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よそ 115-120°である。150°を越える接触角を示す超撥水表面は、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、限りなく面-液面が多い点で水を接触させる構造を付与しなければならない^{7,9)}。

さらに、皮膜を刃物に施した場合は、皮膜の耐久性が重要となる。金-硫黄結合は 45kcal/mol と、準共有結合並みの安定な結合を形成することがすでに見いだされている¹⁰⁾ が、刃物への適応には、直線摺動式試験機での静摩擦係数・動摩擦係数測定など、皮膜の耐久性評価を行う必要がある。

【謝 辞】

基板を供試頂いたフェザー安全剃刀株式会社に深謝します。

【参考文献】

- 1) 特開 2013-151587,
- 2) 杉村博之 他, 表面技術, 62(2), pp98-103, 2011
- 3) 高井治 他, 表面技術, 55(12), pp758-763, 2004
- 4) 石原清貴 他, J. Jpn. Soc. Colour Mater., 79(9), pp404-409 2006
- 5) 藤田英二, ダイキン工業 テクニカル資料
- 6) 小林秀樹, 色材, 68(12), pp735-740, 1995
- 7) 宮下徳治, ネットワークポリマー, 25(1), pp34-43, 1995
- 8) 四分一敬, J. Soc. Powder Technol., Japan, 37(4), pp260-272, 2000
- 9) 小林元康 他, 表面科学, 31(6), pp276-282, 2010
- 10) Dubois, L. H.; Nuzzo, R. G. Annu., Rev. Phys. Chem. 1992, 43, 437.

複 合 材 料 部

製品表面形状の高感性化と高機能化に関する研究

—包丁を使いやすくする柄の表面形状の触覚による官能評価—

千原 健司、安藤 敏弘*

Study on achieving both high sensitivity and high performance by the product surface shape
- Results of sensory evaluation by tactile sense of the handle's surface shape to make kitchen knife easy to use-
Kenji Chihara, Toshihiro Ando*

使いやすい包丁を機能的に設計することを目的に、柄の表面形状に着目し、手のサイズに関わらず使いやすさを向上させる2つの特長的なシボを触覚により官能評価した。この結果、各々のシボについて使いやすく感じられる表面形状のスケールを見出した。また、接する部位により使いやすく感じる形状に違いがあること、滑りにくさは、温冷感、硬軟感、粗滑感及び乾湿感を説明変数として定式化が可能であることを確認した。

1. はじめに

使いやすい包丁を機能的に設計するために、著者らはこれまで、包丁の使い方実験¹⁾により包丁の握り方を分類し手の大きさとの相関を明らかにしたり、評価グリッド法により包丁の評価構造モデルを作成²⁾したり、評価構造モデルの中で、柄の握りやすさに着目し、使いやすい柄の太さと手の大きさとの関係を明らかにした。³⁾ これらにより、複数のサイズの柄を準備することが望ましいという結果を得ている。

しかし服や靴等と異なり、包丁は1つのサイズで提供されるということが現状である。このため今回、柄の表面形状に着目し、手のサイズに関わらず、使いやすさを向上させる表面形状（以下、「シボ」という。）について評価方法を検討し、2つの特長的なシボについて触覚により官能評価を行った結果について報告する。

2. 実験

2.1 シボの設定

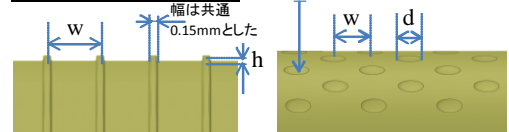
包丁のほか、様々な道具のグリップ表面形状を観察した結果、主に滑り止めの効果を図ったと考えられる縦格子状のシボ（以下、「縦格子シボ」という。）と、触感の良さを図ったと考えられる円形に窪んだシボ（以下、「ディンプルシボ」という。）の2つの基本的かつ特長的なシボについて評価を行うことにした。

試料数は、縦格子シボは、段差間隔4水準と段差高さ2水準を組合せた4×2の8条件を設定した。ディンプルシボは、窪みの径3水準と窪みの水平間隔2水準を組合せた3×2の6条件を設定した。試料片の構成を表1に示す。

縦格子シボの水準値設定の考え方は、指紋の高さが約0.1mm、幅約0.3~0.5mmであり、これらのスケールにおいて指先の触感の変化を与える閾値が存在するという研究⁴⁾を散見するため、このスケールを基準とし、また、2点弁別閾（2点を認識できる距離）が指先と比べて一

表1 試料の構成

縦格子シボ			ディンプルシボ		
試料番号	段差間隔 w [mm]	段差高さ h [mm]	試料番号	窪みの径 d [mm]	窪み間隔 w [mm]
1	0.5	0.1	1	1	4
2	1.0	0.1	2	2	4
3	2.0	0.1	3	3	4
4	4.0	0.1	4	1	3
5	0.5	0.3	5	2	3
6	1.0	0.3	6	3	3
7	2.0	0.3			
8	4.0	0.3			



般的に大きいとされている手掌による触感も、今回、評価するために、この基準を対数的に増大させて水準値を設定した。なお、対数的に増大させるのは、「知覚認識は対数変換した物理量を知覚することにより行われている」というフェヒナーの法則⁵⁾を考慮している。

ディンプルシボの水準値の考え方は、同様のシボをソフトフィール硬質面として、触知覚現象と生成メカニズムの研究をしている佐野らによる知見⁶⁾を概ねの基準（試料5）とし、この基準の前後に水準値を設定した。

2.2 評価試料の製作

前節により設定した試料の内、特に間隔の狭い縦格子シボを切削加工で製作することは困難であるため、県内企業が有する3Dプリンター（米3D Systems社、ProJet3500）により全ての試料を製作した。材料はUV硬化型アクリル樹脂を使用し、積層方向ピッチ0.016mmで積層した。製作した試料の一部を図1に示す。レーザー顕微鏡で仕上がりを確認したところ、ほぼ設計値どおりに製作できていることを確認した（図左）。

2.3 被験者

心身ともに健康な12名（全員右利き）を対象にした。被験者の基礎データを表2に示す。手のサイズ等に関わらず、柄のシボにより包丁の使いやすさを向上させることが本研究の目的であるため、年齢、性別、握り内径や握り方¹⁾が様々な被験者を対象とした。

* 岐阜県商工労働部産業技術課

2. 4 試験方法

2. 4. 1 評価方法

今回の評価では、類似するシボの微妙なスケールの差を評価する必要があることから、例えばSD (Semantic Differential) 法のように1試料毎に被験者が持つ絶対的な基準により評価することは困難が想定される。このため、シェッフェの一对比較の中屋の変法を用いた。本法は、全ての被験者が、全ての試料の組合せ毎に互いを比較し、相対評価を行うもので、1試料の評価回数も多くなることから信頼性の高い評価が期待できる。

2. 4. 2 評価項目

著者らが包丁の評価構造モデル²⁾により導き出した、包丁の柄の表面形状が使いやすさに影響し得る項目から、次の3つを選択し、総合的な評価項目とした。

- 滑りにくさ (滑りにくい⇔滑りやすい)
- 触感の良さ (触感が良い⇔触感が悪い)
- フィット性 (フィットする⇔フィットしない)

また、永野らは触覚によって材質感を構成する評価次元に関する研究動向を広域に調査し、5つの評価次元を主要な次元として見出している⁷⁾。この内、今回の評価では、大きな凹凸の次元を除く次の4つの次元を基本的な評価項目とした。

- 温冷感 (温かい⇔冷たい)
- 硬軟感 (硬い⇔柔らかい)
- 粗滑感 (粗い⇔滑らか)
- 乾湿感 (乾いた⇔湿った)

これらの項目を、スケールの違いを主要因とする有意差検定することに加えて、総合評価項目を目的変数、基本評価項目を説明変数として、重回帰分析を試みる。

2. 4. 3 試験手順

試験の概要説明を図2に示す。上面2mmをフライス盤で削ってある樹脂丸棒(長さ70cm, 径30mm)を用いて、図左上に示すように、A部分とB部分に削った分と同形の2種類の比較する試料片をテープで固定し、被験者が交互に触れたり擦ったりして、前節の7項目について7段階尺度により評価をし、図右のシートに○を記載する。これを縦格子シボの場合は ${}_8C_2=28$ 通り、ディンプルシボの場合は ${}_8C_2=15$ 通り評価する。なお、視覚の影響を除くために、被験者には試験片を見ないようにお願いし、別の試験者が試料片を貼り換えて、評価を繰り返した。

また、手内の部位による感じ方の違いを知るため、親指と、中指~小指下の手掌(図左下)の2か所の部位により評価した。

2. 5 データ処理

前節の評価シートを元に、評価項目毎に左から3点、2点、1点、0点、-1点、-2点、-3点と重みを付けて、量的データに変換し、Excelにより統計処理をした。

3. 結果及び考察

3. 1 縦格子シボ

縦格子シボの総合評価項目の結果要旨を図3に示す。左列は親指での評価結果、右列は手掌での評価結果を示

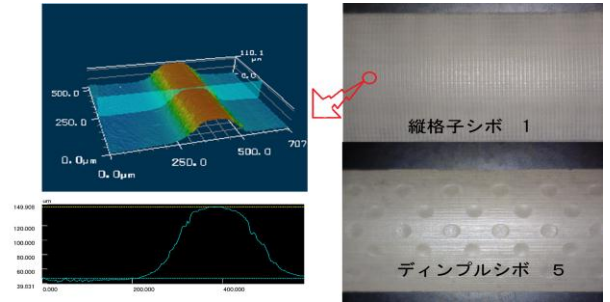


図1 製作した試料の一部

表2 被験者の基礎データ

	平均値	標準偏差	最小値	最大値
年齢 [年]	40.6	7.5	30	53
包丁使用歴 [年]	22.3	11.7	6	40
握り内径(示指)[mm]	44.3	2.5	40.4	47.8
男女の内訳	男6名、女6名			
握り方の内訳	握り形7名、柄元握り型1名、人差し型1名、人差し指押さえ型1名、親指押さえ型1名			

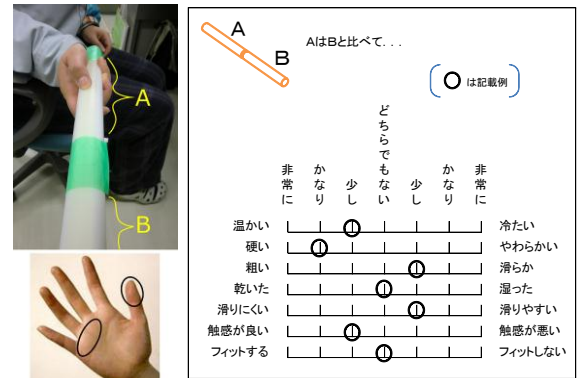


図2 試験の概要

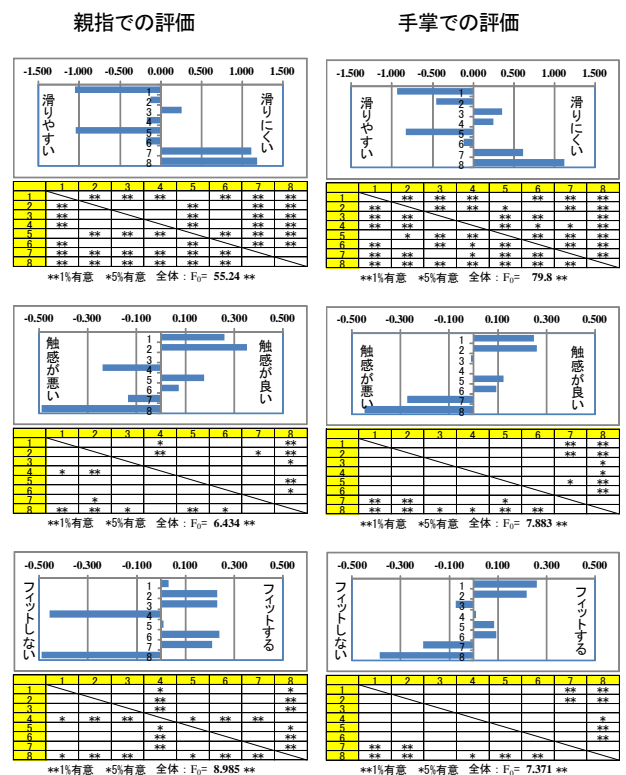


図3 縦格子シボの総合評価項目の結果

す。棒グラフは、全試験による得点を平均化したもので、試料1～8の各々をどのように感じるか、またその程度を比較できる。下表は、スケールの違いを主効果とする各試料間の有意差の検定結果である。これにより以下の考察ができる。

【親指での評価】

- ・試料7および試料8のスケールが他と比較して、ほぼ同等に有意に滑りにくいと感じられている。
- ・試料7は試料8と比較して、有意ではないものの触感が悪くない傾向があり、また、有意にフィットすると感じられている。
- ・この結果、この種のシボで親指の部位では、試料7の段差間隔2mm、段差高さ0.3mmのスケールが総合的に使いやすいスケールであることが推測される。

【手掌の部位について】

- ・試料8のスケールが他と比較して有意に滑りにくいと感じられている。
- ・試料7の評価は、前出の親指の部位による評価と違い、触感およびフィットの両面で、他と比較して悪いと感じられている。
- ・この結果、この種のシボで手掌の部位では、滑りにくさを重視するのであれば試料8のスケールを、触感およびフィット性を重視するのであればその他（例えば試料2）のスケールを選択すると良い。

以上の結果より、手に接する部位により、使いやすさを感じる適切なスケールに違いがあることが分かる。

3.2 ディンプルシボ

ディンプルシボの総合評価項目の結果要旨を図4に示す。図表の配列等は図3と同様である。これにより以下の考察ができる。

- ・この種のシボでは、全ての総合評価が高いのは試料6の窪みの径3mm、窪み間隔3mmのスケールであることが推測される（ただし、このスケールの水準値は端値であるため、より評価の高い窪みの径は3mm以上、窪み間隔は3mm以内にある可能性は否定できない）。
- ・親指と手掌の評価傾向は同様であるものの、手掌の感じ方の程度は弱い。

3.3 重回帰分析

総合評価項目を目的変数、基本評価項目を説明変数として重回帰分析をする。代表して、縦格子シボを親指で評価した結果により分析結果を説明する。図5に、同評価の全ての評価項目の結果要旨を示す。まず、この結果を俯瞰すると、以下の点が興味深い。

- ・試料8が、有意に冷たいと感じられている。
 - ・試料1と5が、有意に柔らかいと感じられており、試料7と8が、有意に硬いと感じられている。
 - ・試料7と8が、有意に乾いたと感じられている。
- 一見すると、基本評価項目と総合評価項目の間に、何らかの相関があるように思われる。

表3に、目的変数として、滑りにくさを T_1 、触感の

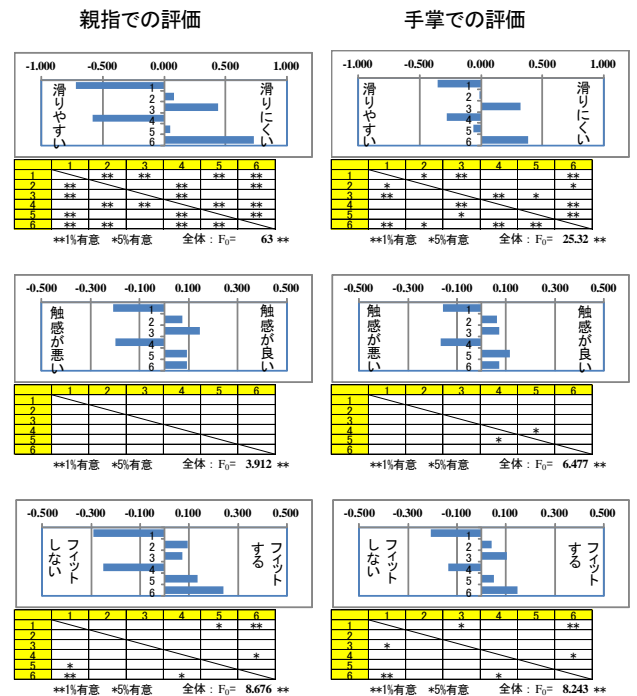


図4 ディンプルシボの総合評価項目の結果

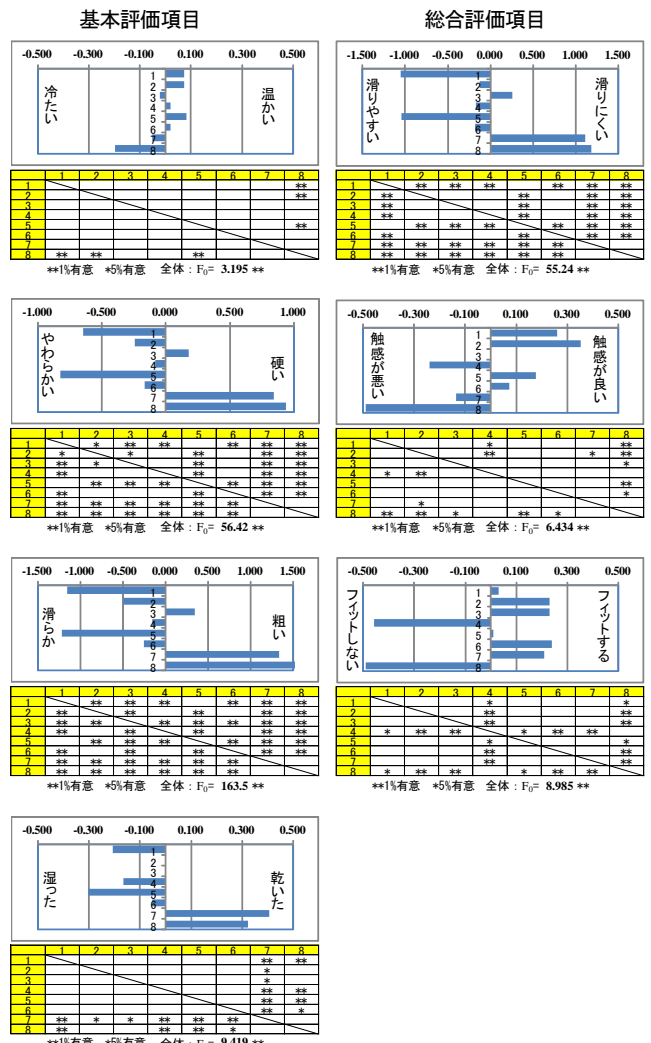


図5 縦格子シボ（親指での評価）の全評価結果

良さを T_2 、フィット性を T_3 とし、説明変数として、温冷感を B_1 、硬軟感を B_2 、粗滑感を B_3 、乾湿感を B_4 とし、重回帰分析を行った結果を示す。これにより以下の考察ができる。

- 滑りにくさ T_1 は、 $B_1 \sim B_4$ の説明変数により定式化した結果、決定係数が高く ($R^2=0.861$)、十分に予測することが可能であり、より効果的に機能設計ができる可能性がある。

- 触感の良さ T_2 とフィット性 T_3 は、 $B_1 \sim B_4$ の説明変数により定式化した結果、決定係数がそれぞれ低く ($R^2=0.295$ と 0.181)、十分な予測は困難である。

これらの原因としては、各評価項目に主に寄与する要因の違いが考えられる。表4に、一対比較法の有意差検定の過程で作成した $T_1 \sim T_3$ の分散分析表を示す。決定係数の高い T_1 では、主効果の寄与率が高いが、 T_2 、 T_3 では、個人差と誤差の寄与率が高い。このために十分な予測が困難であったと考えられる。

3. 4 その他の考察

当初は、試料片を電動ステージに取り付け、自動で往復運動する試料の表面に指を触れることにより各官能評価を実施する予定であったが、実際に試作して試験したところ、うまく評価することができなかった。これは、人の触覚による知覚は、自ら能動的に対象物に触れ、この応答により判断するという、所謂、アクティブセンシングであることに起因すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、使いやすい包丁を機能的に設計することを目的に、柄の表面形状に着目し、手のサイズに関わらず、使いやすさを向上させる2つの特長的なシボについて、評価を行い、以下の知見を得た。

- 縦格子シボは、親指の部位において、段差間隔 2 mm、段差高さ 0.3 mm のスケールが、総合的に機能を高める。
- 同シボは、手に接する部位により、機能を向上させるスケールに違いがある。
- ディンプルシボでは、窪みの径 3 mm、窪み間隔 3mm のスケールが、総合的に機能を高める傾向がある。
- 滑りにくさは、温冷感、硬軟感、粗滑感及び乾湿感を説明変数として、十分に定式化することが可能である。

【謝 辞】

試験に参加頂きました被験者の皆様に感謝致します。

【参考文献】

- 1) 安藤ら,岐阜県機械材料研究所研究報告 No.3, pp9-12,2010
- 2) 安藤ら,岐阜県機械材料研究所研究報告 No.3, pp13-15,2010
- 3) 安藤ら,岐阜県機械材料研究所研究報告 No.5, pp5-13,2012

表3 各総合評価の回帰分析結果

T_1 の回帰分析結果

回帰統計		係数	標準誤差	t	P-値	
重相関 R	0.928	切片	0.000	0.035	0.000	1
重決定 R ²	0.861	B_1	0.399	0.153	2.606	0.011 **
補正 R ²	0.854	B_2	-0.189	0.074	-2.558	0.012 **
標準誤差	0.344	B_3	0.865	0.055	15.694	0.000 **
観測数	96	B_4	0.314	0.110	2.858	0.005 **

(分散分析表)

	自由度	変動	分散	分散比	有意 F
回帰	4	66.35	16.587	140.459	0.000 **
残差	91	10.75	0.118		
合計	95	77.09			

T_2 の回帰分析結果

回帰統計		係数	標準誤差	t	P-値	
重相関 R	0.544	切片	0.000	0.052	0.000	1
重決定 R ²	0.295	B_1	0.648	0.228	2.836	0.006 **
補正 R ²	0.264	B_2	-0.170	0.110	-1.539	0.127
標準誤差	0.513	B_3	-0.172	0.082	-2.091	0.039 *
観測数	96	B_4	0.609	0.164	3.720	0.000 **

(分散分析表)

	自由度	変動	分散	分散比	有意 F
回帰	4	10.03	2.507	9.541	0.000 **
残差	91	23.91	0.263		
合計	95	33.94			

T_3 の回帰分析結果

回帰統計		係数	標準誤差	t	P-値	
重相関 R	0.425	切片	0.000	0.058	0.000	1
重決定 R ²	0.181	B_1	0.871	0.253	3.443	0.001 **
補正 R ²	0.145	B_2	-0.236	0.122	-1.933	0.056
標準誤差	0.568	B_3	0.067	0.091	0.735	0.464
観測数	96	B_4	0.368	0.182	2.027	0.046 *

(分散分析表)

	自由度	変動	分散	分散比	有意 F
回帰	4	6.49	1.622	5.023	0.001 **
残差	91	29.39	0.323		
合計	95	35.88			

表4 各総合評価の分散分析表

T_1 の分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	F_0	寄与率
主効果	478.8	7	68.39	55.24 **	0.500
主効果×個人	138.0	77	1.792	1.448 *	0.045
組合せ効果	37.3	21	1.774	1.433	0.012
誤差	286.0	231	1.238		0.443
総平方和	940.0	336			

T_2 の分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	F_0	寄与率
主効果	52.4	7	7.479	6.434 **	0.079
主効果×個人	219.1	77	2.846	2.448 **	0.231
組合せ効果	22.0	21	1.047	0.900	0.000
誤差	268.5	231	1.162		0.691
総平方和	562.0	336			

T_3 の分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	F_0	寄与率
主効果	63.0	7	9.006	8.985 **	0.103
主効果×個人	224.0	77	2.909	2.902 **	0.269
組合せ効果	27.5	21	1.308	1.304	0.012
誤差	231.5	231	1.002		0.617
総平方和	546.0	336			

- 4) 例えば、渡辺ら,精密工学会誌 Vol.71, No.11, pp1421-1425, 2005
- 5) 大山 今井 和気編,新編 感覚・知覚心理学ハンドブック,誠信書房,1994
- 6) 佐野ら,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集,2P1-L03,2009
- 7) 永野ら,日本バーチャルリアリティ学会論文誌,Vol.16, No.3, pp343-353, 2011

熱可塑性 CFRP (炭素繊維複合材料) の立体成形技術の確立 (第 1 報)

道家 康雄、西垣 康広、千原 健司、萱岡 誠、西村 太志

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

Yasuo Doke, Yasuhiro Nishigaki, Kenji Chihara, 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を取り扱っていなかった企業が参入を検討している。熱可塑性CFRPを単純に曲げる技術は存在するが、3次元的な曲面形状を成形することは難しく、先行して成形技術を確認することが必要である。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、評価試験片成形用金型（以下、「モデル金型」と表記）を作製し、電動サーボプレスを用いて市販の熱可塑性CFRPのプレス成形条件を検討した。この結果、材料加熱温度は280℃以上、プレス速度は200mm/s（装置の最高速度）、金型温度は80℃で良好に成形できることを確認した。

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が、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^{1,2)}。

これまで熱硬化性CFRPについては、成形方法から切断・穴あけ等の機械加工、表面処理まで、各企業や研究機関で技術開発が進み、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開発で、CFRPの穴あけ装置を開発した³⁾。しかしながら、熱可塑性CFRPは、現段階では一般市場に普及していない最先端の材料であることから、成形や加工および評価技術に関して研究開発情報が不足しており、関係業界でどのような製品に応用できるかを模索している段階である。これまで、熱可塑性CFRPの切削技術については研究を進めてきた⁴⁾が、今後、熱可塑性CFRPの製品化を検討する上で、成形技術、特に曲面立体形状を成形する技術が重要となる。

本研究では、熱可塑性CFRPの成形加工基礎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評価を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 試験片

材料は、炭素繊維クロス材とPA66の複合材料である熱可塑性CFRP (Bond-Laminates製 TEPEX dynalite201、以下「CF/PA66」と表記) を用いた。各実験に用いる試験片は、ダイヤモンド

ソーによりCF/PA66板材から100mm×100mm×2mmと130mm×130mm×2mmのサイズに切り出した（以下、前者を「100mm角CF/PA66試験片」、後者を「130mm角CF/PA66試験片」と表記）。

2.2 材料加熱方法

2.2.1 材料加熱源の検討

IRオープン(ヤマト科学(株)製DIR631)で加熱し、材料温度の変化を測定した。100mm角CF/PA66試験片を2枚重ね、その中間に熱電対を設置して温度を測定した。なお、加熱源として、「熱風による雰囲気加熱のみ」、「IRヒーター加熱のみ」、及び「IRヒーターと熱風の併用」の3種類で実験を行い、材料温度の上昇を比較した。

2.2.2 加熱冷却による材料の変化の検討

100mm角CF/PA66試験片をIRオープンにより280℃に加熱した直後、水中で急冷した試験片の変化を検討するために、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)により内部構造を観察した。また、加熱後の材料の化学的な変化を検討するために、FT-IR((株)島津製作所製IRPresige-21)により、赤外吸収スペクトルを測定した。

2.3 成形モデル金型

2.3.1 金型仕様設計

別途、秘密保持契約を締結した自動車部品製造企業の協力のもと、自動車部品成形に必要な成形条件を検討するためのモデル金型を設計した。

2.3.2 金型製作

仕様を基本として、別途、共同研究契約を締結した(株)岐阜多田精機と共同でモデル金型の詳細設計を行った。また、本設計に基づき、同社において金型を製作した。

2. 4 プレス成形

2. 4. 1 プレス成形実験

130mm 角 CF/PA66 試験片を成形治具に挟んだ状態で IR オープンにて加熱し、モデル金型を取り付けた電動サーボプレス ((株)放電精密加工研究所製 ZENFormer MPS675DS) (図 1) を用いてプレス成形した。なお、加熱温度は、260℃、280℃、300℃、320℃、プレス速度は、10mm/s、100mm/s、200mm/s、金型温度は 30℃、80℃の各条件を、適宜、組合せて実験をした。



図 1 電動サーボプレス
(株)放電精密加工研究所製
ZENFormer MPS675DS

2. 5 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 材料加熱方法

3. 1. 1 材料加熱方法の検討

IR オープンにより材料を加熱する際、材料温度がどのように上昇するか解明を試みた。ヒーター設定温度を 350℃とし、材料温度が 280℃以上に上昇するまでの結果を図 2 に示す。熱風のみによる雰囲気制御では、材料の温度上昇が非常に遅く、60 分間経過後も 250℃に達する程度であった。一方、IR ヒーターと雰囲気制御の両方を利用すると、280℃に達する時間が約 14 分間まで短

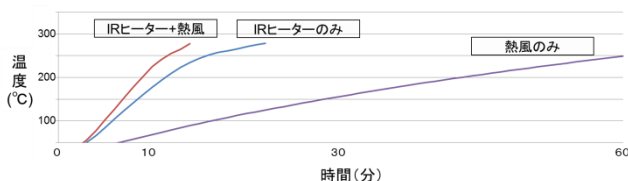
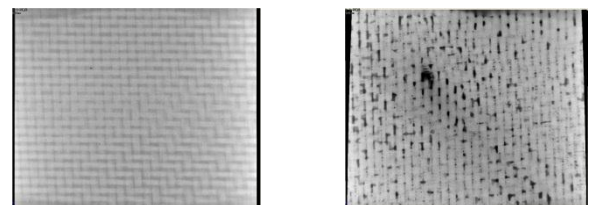


図 2 IR オープン加熱による材料温度変化
(ヒーター設定温 : 350℃)

縮することができた。このことから、CF/PA66 を短時間で加熱するためには、IR ヒーターが有効であることを確認した。

3. 1. 2 加熱冷却による材料の変化の検討

IR オープンによる加熱急冷後の CF/PA66 試験片の X 線 CT 画像を図 3 に示した。未処理試験片では、炭素繊維クロスの織り目は整然としており、繊維間の隙間が少なかったのに対し、加熱急冷後では炭素繊維間の隙間が多く観察された。これは、加熱によりマトリックス樹脂 (PA66) が軟化して炭素繊維間が広がり、織り目が乱れた状態のまま急冷により樹脂が固化したため、炭素繊維間の空隙が多くなったと考えられる。この炭素繊維の乱れや空隙は、試験片が軟化している状態でプレス成形することで減少させることができると考えられる。また、IR オープンによる材料加熱では、加熱温度が高くなると材料表面に茶色い着色が認められた。これは材料の酸化劣化によるものと考えられる。そこで、材料表面の赤外吸収スペクトルを測定した結果を図 4 に示す。材料が酸化劣化した場合、1750 cm^{-1} 付近 (図 4 丸印付近) に吸収ピークが現れるが、本測定では明確なピークが認められなかった。つまり、目視で確認できる程度の着色は認められるが、材料を大きく劣化させるような変化ではないと考えられる。



未処理 280℃
図 3 IR オープンによる加熱急冷後の CF/PA66

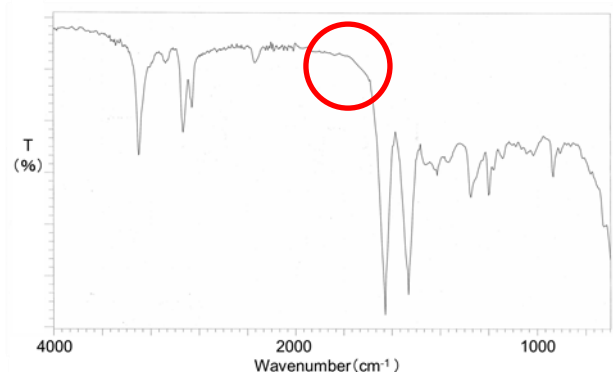


図 4 加熱急冷した CF/PA66 表面の
赤外吸収スペクトル

3. 2 プレス成形

3. 2. 1 金型及び治具

作製したモデル金型の概要図を図 5 に示す。本金型を用いて、CF/PA66 板材を $\phi 30\text{mm}$ の半

球形状にプレス成形することが可能であることを確認した。また、図5中の成形治具は材料の加熱後の運搬を容易にするとともに、材料の温度低下を防ぐ効果があった。今回のプレス成形では材料の温度管理が重要であるため、本成形治具の利用は非常に有意義であると考えられる。

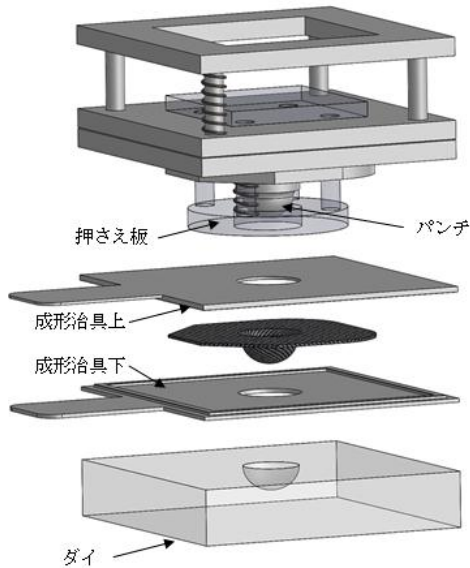


図5 モデル金型概要図

3. 2. 2 材料加熱温度の効果

プレス速度を 200mm/s と一定とし、材料加熱温度を変化させた成形品の外観を図6に示す。加熱温度 260℃では成形品周辺に大きな折れ皺が発生した。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ある。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。PA66の融点は約 265℃であり、融点以上に充分加熱することが必要である。今回の材料(CF/PA66)では、材料の運搬時の熱損失も考慮して、280℃以上に加熱すれば立体成形が可能となることがわかった。しかしながら、成形した試験片は底部表面が光沢不良となった。これは立体成形によりマトリックス樹脂が塑性変形し、金型底面のマトリックス樹脂が不足したことにより、底面に十分なプレス圧が伝わっていないことが原因と考えられる。加熱温度を高くすることにより樹脂の流動がよくなり、少しは改善が見られた。しかし、加熱が高温すぎると材料表面が着色(酸化)するという問題があり、光沢不良は加熱温度の調節だけでは改善できなかった。その他、光沢不良対策として、成形品底部分のマトリックス樹脂不足を補う方法として試験片の厚みを増加さ

せる、また、金型に成形品部分の隙間厚を調整できる機能を持たせる等が考えられ、今後、更なる検討が必要である。

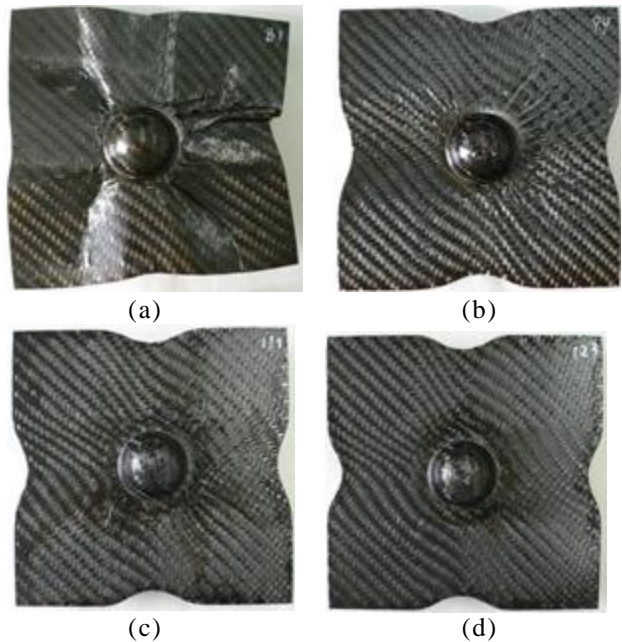


図6 加熱温度の違いによるCF/PA66成形品
プレス速度：200mm/s、加熱温度：260℃(a)、
280℃(b)、300℃(c)、320℃(d)

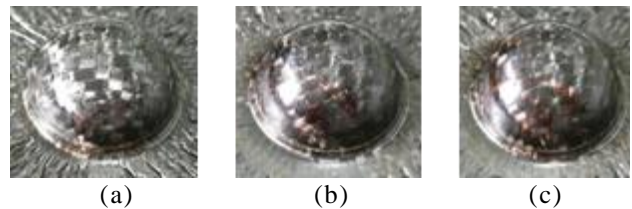


図7 プレス速度の違いによるCF/PA66成形品
加熱温度：280℃、プレス速度：10mm/s(a)、
100mm/s(b)、200mm/s(c)

3. 2. 3 プレス速度の効果

加熱温度を 280℃と一定とし、プレス速度を変化させた成形品の外観を図7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、プレス速度 200mm/sにおいて比較的良好な成形品を成形することができた(前述のとおり、半球形状底部において、マトリックス樹脂の不足による光沢不良は認められる)。事前加熱によるプレス成形では、材料を金型に設置すると材料温度が降下し、プレス時に上部金型が材料に接触すると、更に温度が降下する。温度が低くなると材料が変形しにくくなるため、短時間でプレス可能な条件が良いと考えられる。今回の実験ではプレス速度は材料の温度変化に大きく影響しており、高速での成形が有利となると考えられる。

3. 2. 4 金型温度調節

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 8 に示す。いずれも半球形状への成形は可能であったが、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ることがわかった。前述のとおり、CF/PA66 の立体成形では、成形時の材料温度が成形性に大きく影響している。材料の温度低下を防ぎ、マトリックス樹脂が十分に軟化している状態でプレス成形するためには、金型温度も高い方が有利である。本実験から、金型温度を 80℃にすることは成形性の改善に有効であることがわかった。材料の成形可能温度を考慮すると、金型温度は更に高い方が有利であると考えられるが、高温では成形品の固化が不十分となることが予想される。金型温度の設定では、成形性の優位性と成形品の固化条件を考慮して検討する必要がある。

3. 2. 5 成形品内部の評価



図 8 金型温度の違いによる CF/PA66 成形品
加熱温度：280℃、プレス速度：200mm/s
金型温度：30℃(a)、80℃(b)

本実験において、最も外観が良好であった成形品（加熱温度：280℃、プレス速度：200mm/s、金型温度：80℃）の X 線 CT 像を図 9 に示す。炭素繊維層間の剥離による空隙は認められず、内部においても良好な成形品であることが示された。一方、成形品の切断面観察写真を図 10(a) に示す。炭素繊維層間の剥離は認められず、成形品内部は綺麗な層構造を維持している。これは X 線 CT の結果と一致しており、非破壊検査による内部層構造評価が妥当であったことがわかる。また、成形品底部の切断面（図 10(a)丸印）を拡大した金属顕微鏡観察画像を図 10(b)に示す。同一層内において、炭素繊維束が一様に分布している部分と、炭素繊維の密度が低下している部分が観察されたが、炭素繊維と樹脂との界面剥離による空隙は認められなかった。製品強度をシミュレーションするには、炭素繊維と樹脂との界面剥離が無いだけでなく、炭素繊維の分布が均一となる必要があると考えられる。今後、成形条件を確立するにあたり、成形品内部の炭素繊維分布状態も評価する必要がある。



図 9 成形品（加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の X 線 CT 像

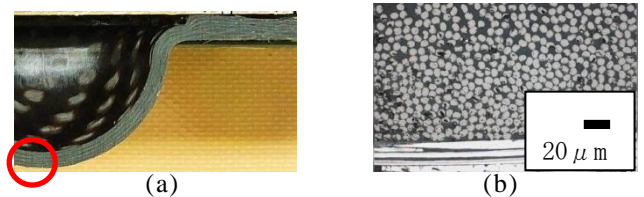


図 10 成形品（加熱温度:280℃、プレス速度:200mm/s、金型温度:80℃）の切断面観察写真(a)及び金属顕微鏡観察画像(b)

4. まとめ

本研究により次の結果を得た。

- 1) 熱可塑性 CFRP の加熱方法において、IR ヒーターが加熱時間の短縮に有効であることを確認した。
- 2) 加熱により材料表面が変色するが、IR 測定では検出ができない程度であった。
- 3) 熱可塑性 CFRP のプレス成形条件を検討するために、φ30mm の半球形状を成形するためのモデル金型を作製した。
- 4) モデル金型による熱可塑性 CFRP (CF/PA66) のプレス成形において検討した条件の中では、材料加熱温度は 280℃以上、プレス速度は 200mm/s、金型温度は 80℃において良好な成形品を得ることができた。

【謝 辞】

本研究遂行にあたり、共同で金型製作していただいた(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) 高橋ら,持続可能社会に向けた次世代熱可塑性 CFRP 入門 セミナー資料,Science & Technology, 2012
- 2) 熱可塑性 CFRP の最新プレス加工技術, プレス技術, Vo;51, No.7, pp17-39,2013
- 3) 柘植ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.1, pp20-23,2013
- 4) 加賀ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.1, pp24-27,2013

熱可塑性 CFRP の切削・研削加工技術の確立 (第1報)

柘植 英明、加賀 忠士、萱岡 誠

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

Hideaki Tsuge, Tadashi Kaga and Makoto Kayaoka

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)を実施し、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、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基礎的な検討を行った。その結果、切削加工においては、加工条件と加工面性状について把握することができたが、冷風による明らかな効果は見られなかった。研削加工においては、回転数および送り速度が大きくなると、工具に樹脂が溶着することにより加工が困難になることがわかった。

1. はじめに

熱可塑性 CFRP は、板材を加熱後にプレス成形することにより、短時間で製品形状を付与することができる。このため、コストを抑えることが必要不可欠な自動車部品等の量産部品に適した材料として注目されており、実用化に向けた研究が盛んに行われている^{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材料である。さらに、加工時の発熱によりマトリックス樹脂が溶融して、所定の形状確保が難しくなることや、工具への溶着により加工性能が低下するといった熱可塑性 CFRP 特有の問題が考えられる。また、熱可塑性 CFRP は、近年注目されてきた新しい材料であることから加工データは皆無なため、切削および研削加工における加工データの収集が必要となっている。

そこで本研究では、熱可塑性 CFRP の切削加工および研削加工によるトリム加工を行い、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している。本年度は、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風の効果およびダイヤモンド電着砥石を用いた研削加工によるトリム加工の基礎的な実験を実施したので報告する。

2. 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。この熱可塑性 CFRP の主な仕様は表1のとおりである。この材料は板厚が2mm であるため、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 の板厚にした。この試料を、55×45mm の大きさに切断し、さらに固定用の

穴あけ加工を行ってトリム加工実験用の試験片を作製した。作製した試験片の外観写真を図1に示す。

3. 実験方法

3.1 切削加工における冷風の影響

本実験に用いた熱可塑性 CFRP の樹脂材である PA66 は、融点が 265℃と低く、熱変形温度はさらに低いため、加工時に発生する加工熱により溶融・変形する可能性がある。これにより、被削材にバリが発生することや工具への溶着により加工性能が低下することが懸念される。そこで、冷風発生装置を用いて冷風を試料にあてながら加工する手法の有効性を検討した。

加工実験では、切削動力計の上部に試験片を固定する治具を取り付け、冷風が試験片の中央付近にあたるように風向を調整した。加工実験の様子を図2に示す。工具は、φ12 のダイヤモンドコーティング超硬エンドミルを使用した。用いたエンドミルの主な仕様を表2に示す。

表1 被削材料の主な仕様

繊維	樹脂	繊維体積比	引張強度
カーボン	PA66	45%	785MPa



図1 試験片の外観

加工実験は、固定した試験片をエンドミル側面で二つに切断し(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、且つ完全にエンドミルを貫通)、その加工面を評価した。なお、冷風は気温に対しておおよそ15℃程低い冷風を発生する条件に設定した。加工条件は、回転数を6000、9000、12000、15000min⁻¹とし、送り(1刃あたりの切込量)を、0.02、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5mm/toothと変化させて加工実験を行った。表3に加工実験条件を示す。

切削力および研削力の測定には、3軸方向の加工力を計測することができる切削動力計(キスラー、9257B)を用いた。また、加工面の評価として、マイクロSCOPEによる観察と、加工面粗さ(算術的平均粗Ra)の測定を行った。

3. 2 研削によるトリム加工

熱硬化性CFRPのトリム加工ではバリが発生するために、ダイヤモンド電着工具や超硬等のルーターを用いて仕上げ加工を行っている。熱可塑性CFRPの加工においてもバリが発生するため、仕上げ加工が必要となる。今年度はダイヤモンド電着工具による仕上げ加工の可能性について基礎的な検討を行った。用いたダイヤモンド電着工具は、直径φ10mm、ダイヤモンド粒度は#60である。トリム加工実験は径方向の切込みを1mmとし、表4に示す加工条件で加工実験を行った。

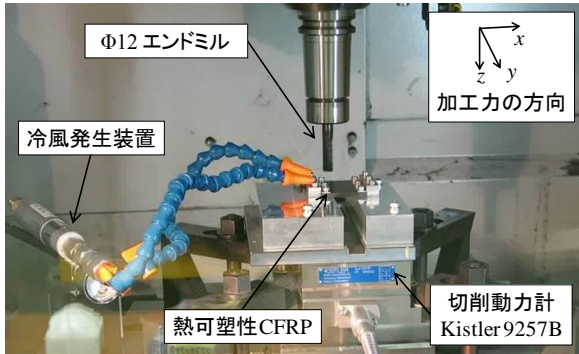


図2 加工実験の様子

表2 エンドミルの仕様

工具材種	超硬(ダイヤモンドコーティング)
直径	12mm
刃数	4枚刃
すくい角	12°
ねじれ角	10°

表3 加工実験の条件(切削加工)

回転数[min^{-1}]	6000、9000、12000、15000
送り[mm/tooth]	0.02、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5
冷却方法	有/無

表4 加工実験の条件(研削加工)

回転数[min^{-1}]	1000、2000、4000
送り速度[mm/min]	50、100、200
ダイヤモンド粒度	#60

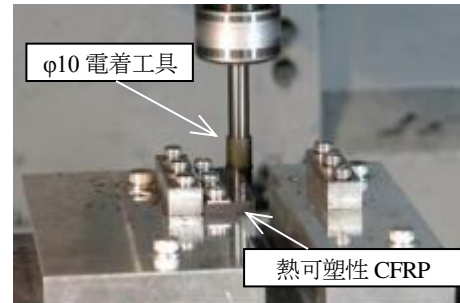
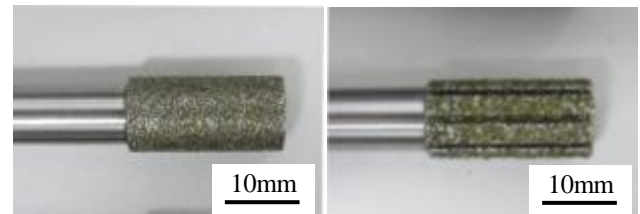


図3 研削加工の様子



スリット無し(#60) スリット有り(#40)

図4 電着工具の外観

図3に研削加工実験の様子を示す。また、比較として、工具に深さ1mm、幅1.5mmのスリットを設けた工具とスリット無しの工具(ダイヤモンド粒度#40)を用いて、工具回転数2000min⁻¹、送り速度100および200mm/minの加工条件にて加工特性の差異を比較した。図4に用いた電着工具の外観写真を示す。

4. 結果及び考察

4. 1 切削加工における冷風の影響

図5に、一例として0.1および0.4mm/toothにて切削加工した場合の加工面の様子を示す。加工面はエンドミルの送り方向に対して左側の加工面がダウンカット、右側がアップカットとなる。図からダウンカットとアップカットでは加工面性状に大きな差は見られなかった。

切削加工による切りくずを図6に示す。送りが大きくなるにしたがって切りくずが溶融していることがわかる。また、図7に示すように、15000min⁻¹、0.1mm/toothの加工条件における切りくずには、冷風の有無による差異は見られなかった。

加工面粗さについては、図8に示すように送りが0.1mm/toothまではRa値が1μm以下であるが、送りが0.2mm/toothからはRa値が1μmを超え、その後は送りが大きくなって粗さに変化は見られなかった。熱可塑性CFRPの場合、樹脂の溶融によって表面が平滑化され加工面粗さが改善されるために、送りが大きくなって粗

さが大きくなると考えられる。

図9に切削加工における平均切削力を示す。この平均切削力は、加工中のXYZ方向の切削力の合力を算出し、平均した加工力である。図9から、冷風がある場合の方が僅かに平均切削力が大きくなっているが、有意な差があると判断することは難しい。以上から、冷風の有無による差異については、図7の切りくずの様子、図8の加工面粗さおよび図9の平均切削力から、今回の加工条件においては冷風の明らかな効果は見られなかった。しかし、今回と異なる加工条件や工具の耐久性については、冷風が有効である可能性があるため、今後は必要に応じて検討を行う。

4. 2 研削によるトリム加工

研削によるトリム加工における加工面の一例として、

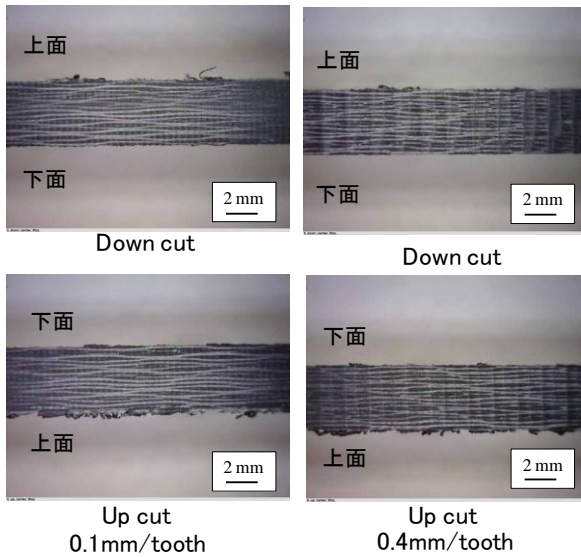


図5 加工面の様子



図6 送り変化による切りくずの様子
(回転数一定：6000min⁻¹)

図10に単位回転あたりの送りが同じになる工具回転数1000min⁻¹、送り速度50mm/minと工具回転数2000min⁻¹、送り速度100mm/minおよび工具回転数4000min⁻¹、送り速度200mm/minにおける加工面の様子を示し、図11に加工後の電着工具の作用面(白枠内)を示す。単位回転あたりの送りが同じであっても、工具回転数および送り速度が高くなるほど、熔融した樹脂が工具に付着し、研削加工が困難となる。このことから、熱可塑性CFRPの研削加工では、加工速度を上げることによって発生する加工熱が大きくなるため、加工速度を高くすることが困難であると言える。加工熱の発生要因としては、加工条件と工具の仕様が考えられるため、今後更に検討する必要がある。

工具の目づまりが加工性能に及ぼす影響について検討するために、スリット有および無し電着工具を用いて、工具回転数2000min⁻¹、送り速度100および200mm/minの条件で加工実験を行ったところ、スリットの有無に関

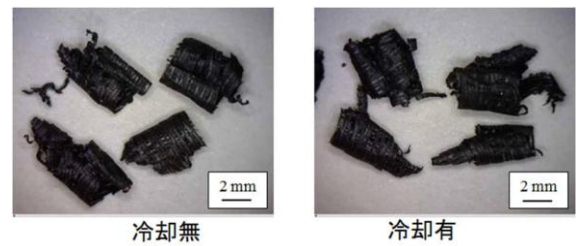


図7 冷風の有無による切り屑の相違

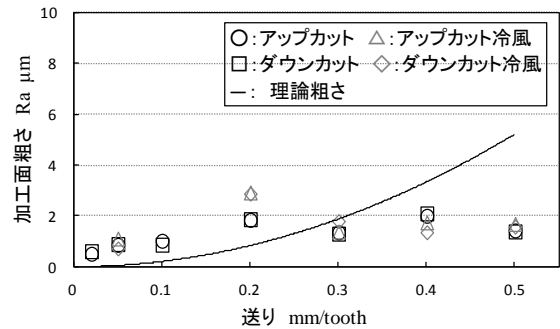


図8 送りと加工面粗さの関係

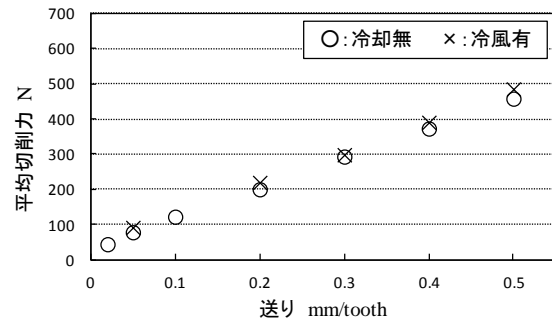


図9 送りと切削力の関係



a) 工具回転数 1000 min⁻¹、送り速度 50mm/min

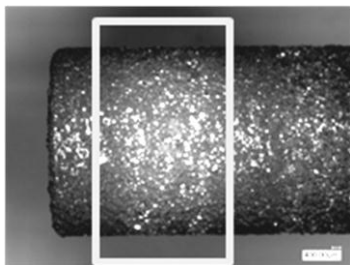


b) 工具回転数 2000 min⁻¹、送り速度 100mm/min

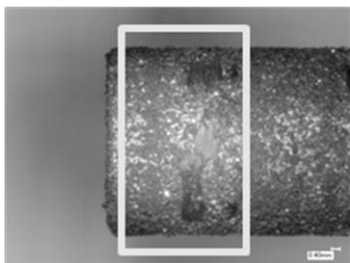


c) 工具回転数 4000 min⁻¹、送り速度 200mm/min

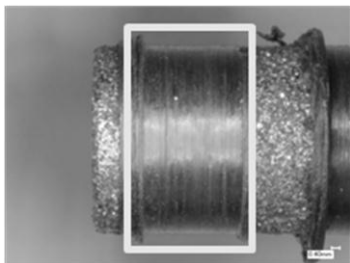
図 10 研削加工面および加工後の工具の様子
(※加工方向は左から右。)



a) 工具回転数 1000 min⁻¹、送り速度 50mm/min



b) 工具回転数 2000 min⁻¹、送り速度 100mm/min



c) 工具回転数 4000 min⁻¹、送り速度 200mm/min

図 11 工具作用面の様子

表 5 加工面粗さ Ra μm

送り速度 回転数	50	100	200
1000	11.4	8.0	-
2000	-	11.4	×
4000	-	×	×

係無く回転数が大きくなると加工面にケバが発生した。このことから、切りくずの排出が加工性能に大きく影響を及ぼしているとは考えにくく、樹脂の熔融により徐々に作用面に切りくずが溶着することの影響が大きいと考えられる。

加工面粗さを測定した結果を表 5 に示す。ここで、表中の‘×’はケバが中央付近に発生したために粗さ測定ができなかった試料である。粗さを測定することができた 3 つの加工条件については、Ra 値が 8~12μm の範囲内であり、加工条件による差異は見られなかった。加工力については、ケバ立ち無が発生することなく加工できた工具回転数 1000 min⁻¹、送り速度 50mm/min の加工条件では、x 方向の最大加工力が 49N であったのに対して、ケバが発生した条件では徐々に加工力が増加し、最大加工力は 100N を超えた。

以上から、熱可塑性 CFRP の研削加工では、加工によって発生する熱を抑える工夫が必要となるため、今後更に加工による熱を抑制できる加工条件および工具仕様について検討する必要がある。

5. まとめ

熱可塑性 CFRP のトリム加工について切削および研削による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、加工条件と加工面性状について把握することができたが、本実験条件では冷風による明らかな効果は見られなかった。
- 2) 研削加工においては、加工によって発生する熱により樹脂が工具に溶着することで加工が困難となり、加工面にケバが発生する。

今後は、他のマトリックス材料の熱可塑性 CFRP についても検討し、加工面性状に優れた高効率な加工条件について検討していく予定である。

【参考文献】

- 1) 前田豊:炭素繊維の応用と市場,シーエムシー出版, 2008
- 2) 伊牟田守:航空機用構造材料の技術研究開発動向, SOKEIZAI,51,11, 2010
- 3) 加賀、安藤,岐阜県工業技術研究所研究報,No.1, pp24-27,2013

薄板のプレス焼入れ技術に関する研究 (第1報)

小川 大介

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

Daisuke Ogawa

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、加工特性を検討した。打抜き用金型を作製し、金型冷却の有無による被成形材の冷却速度を評価することによって、部材の焼入れ特性について評価を行った。金型冷却方法として、一般的な圧縮空気を利用したエアジェットクーラを用いた。その結果、本金型冷却方法を用いることで水焼入れと同等の冷却効果があることが確認でき、被成形材の硬度および組織観察結果も良好な結果を得ることができた。

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材の高強度化・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の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、自動車のボディ成形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、打抜き金型を作製し、金型冷却の有無による実験を行った。被成形材の温度計測や硬度測定および組織観察を行い、金型冷却特性や加工条件の観点から加工特性評価を行った。

2. 実験

2.1 試験条件

実験には、(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、プレス速度(1~200mm/s)を変えることによるプレス荷重を計測した。また、被成形材および金型の温度計測には、熱電対を用いた。

被成形材は、80×80×2mmの炭素工具鋼(SK85)を焼鈍したものを用いた。成分を表1に示す。被成形材を、825℃の電気炉で10分間加熱し、打抜きと同時にスライドの下死点保持制御により、金型内で一定時間ホールドすることで、被成形材の冷却を行った。

図1に実験に使用した金型の形状を示す。パンチ径φ15mm、ダイス径φ15.6mmを用いた。

まず、金型材料の熱伝導率を利用し、プレス焼入れによる冷却効果を評価するため、一般的に使用される金型材料であるオーステナイト系ステンレス(SUS304)、合金工具鋼材(SK593)、機械構造用炭素鋼(S45C)、一般構造用圧延鋼材(SS400)をそれぞれ用い、比較を行った。

次に、金型冷却の有無による品質特性を評価するため、プレス焼入れによって発生する熱履歴を抑制する外部冷却機構として、金型の板押さえ部分に冷却用配管を加工し、圧縮空気を利用した(株)ミスミ社製のエアジェットクーラ(型番:PAJC450)を用いて金型冷却を行った。

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

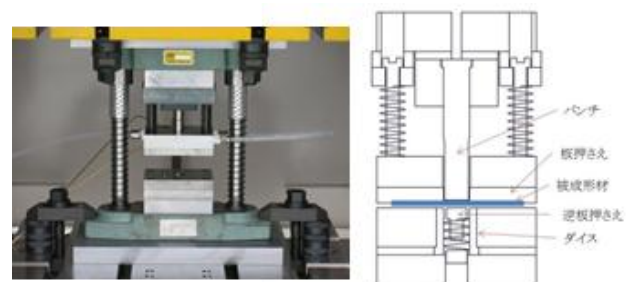


図1 金型断面モデル

2.2 評価方法

プレス焼入れ後の被成形材を切断、埋込みを行い、マイクロビッカース硬度試験機によって断面硬度測定をHV0.2にて行った。また、埋め込みした試料を5%硝酸アルコール溶液(ナイタール)によってエッチングし、断面の組織観察によって評価を行った。

3. 結果及び考察

3. 1 金型素材によるプレス焼入特性

熱伝導率が異なる金型材料 (SUS304、SKS93、S45C、SS400) を用いることによる、被成形材冷却特性の違いについて、検討を行った結果を、図 2 に示す。

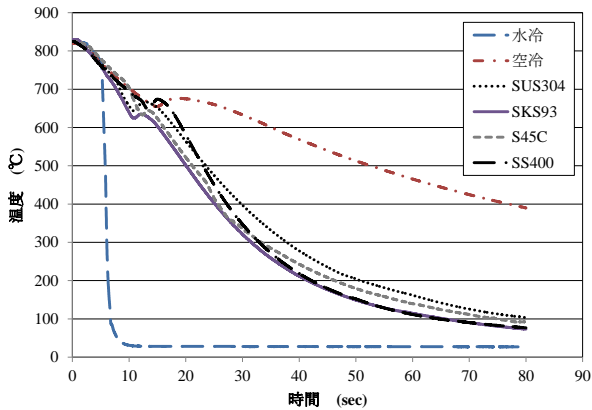


図 2 金型材料毎の被成形材冷却温度

熱伝導率の異なる金型材料によって被成形材の冷却特性を評価した結果、いずれの金型材料で冷却した場合も、約 2°C/s の冷却速度で温度が低下していることが得られた。しかし、金型材料の熱伝導率のみでは、焼入れ可能となる冷却速度に達しないことがわかった。

次に、プレス焼入れ後から 10 分経過後の金型表面温度の計測結果を表 2 に示す。

表 2 プレス焼入れ後の金型表面温度

金型材料	金型表面温度(°C)
SUS304	85.6
SKS93	76.0
S45C	68.6
SS400	58.6

熱伝導率の良い金型材料の方が、金型表面温度が低い結果が得られたが、初期温度と比べると依然として高い状態であることがわかった。プレス焼入れによって金型の熱履歴が影響することによって、製品硬度の低下を招くため、金型を一定温度に設定する必要性があり、生産性悪化の要因になると考えられる。

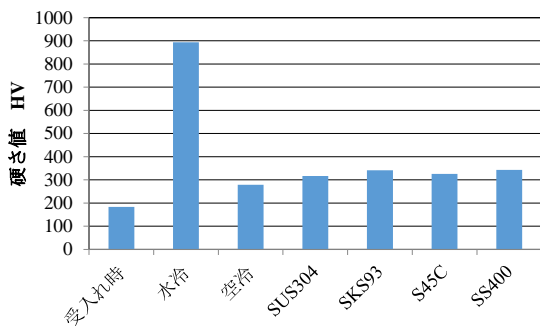


図 3 硬度計測結果

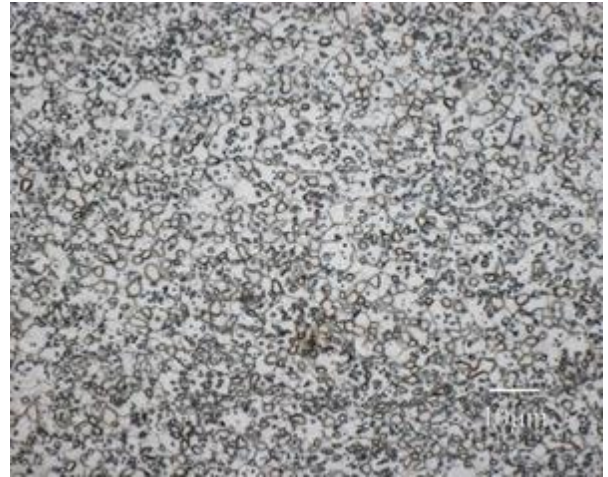


図 4 受入れ時の SK85 組織

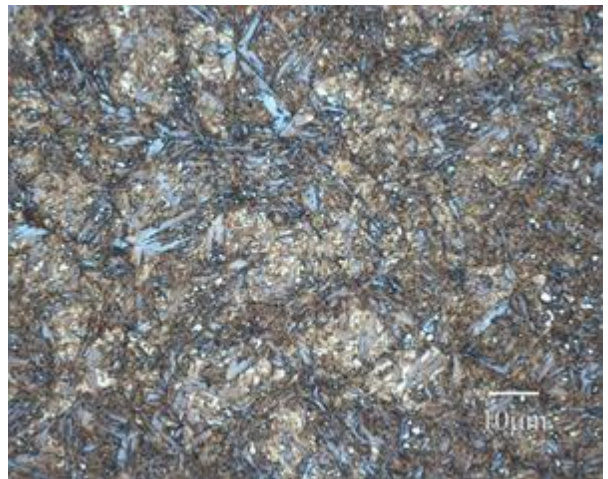


図 5 水冷による SK85 組織



図 6 金型材料 SS400 を用いた
プレス焼入れ SK85 組織

次に、断面硬度および組織観察結果を図 3~6 に示す。断面硬度は、受入れ時より硬くなっているが、水焼入れ時と比べると焼入れできているとは言えない状態である。また、組織観察結果からもわかるように、水冷時のようなマルテンサイト組織にならない結果となった。

3. 2 金型冷却によるプレス焼入特性

金型の冷却効果を向上させるため、圧縮空気を利用した冷風を金型内に流すことによって被成形材の冷却速度を早くする金型に設計を変更して実験を行った。金型の板押さえ部品に冷却用の貫通穴を加工し、エアジェットクーラを用いて、約-3℃冷却された圧縮空気を金型内に流した。金型冷却による被成形材の冷却温度計測結果を図7に示す。

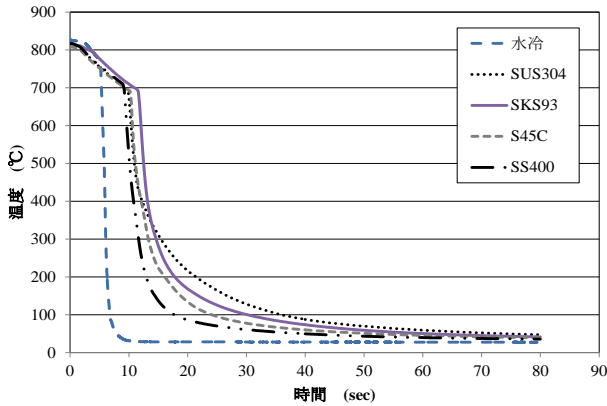


図7 金型冷却による被成形材冷却温度

圧縮空気による金型冷却機構を用いることで、被成形材の急速冷却が得られることが明らかとなった。金型が十分に冷やされていることから、水焼入れと同等の冷却

表3 金型冷却によるプレス焼入れ後の金型表面温度

板押さえ材料	金型表面温度(°C)
SUS304	15.6
SKS93	14.2
S45C	14.4
SS400	13.5

能力があることが確認できた。

次に、プレス焼入れ後から10分経過後の金型表面温度の計測結果を表3に示す。

金型を強制的に冷却することによって、被成形材の冷却速度が向上すると同時に、金型温度も初期状態温度に早く戻るようになった。つまり、金型冷却が早くなることによって、生産能力向上に寄与することが確認できた。

次に、硬さ試験結果及び組織観察結果を図8、9に示す。この結果より、金型冷却を用いたプレス焼入れによって、被成形材の断面硬さは水焼入れと同等の硬さを得ることができた。また、断面組織観察結果より、水焼入れと同様に、マルテンサイト組織を得ることができた。つまり、プレス焼入れ用金型に冷却機構が必要になることを確認でき、良好なプレス焼入特性を得ることが可能であることが明らかとなった。本実験において、圧縮空気を冷却用媒体としたが、熱伝達効率の高い水や油を用

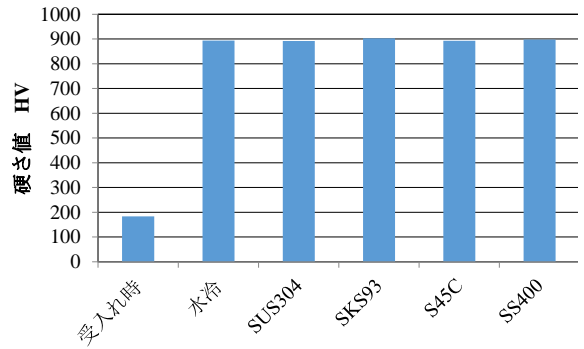


図8 金型冷却による被成形材断面硬さ

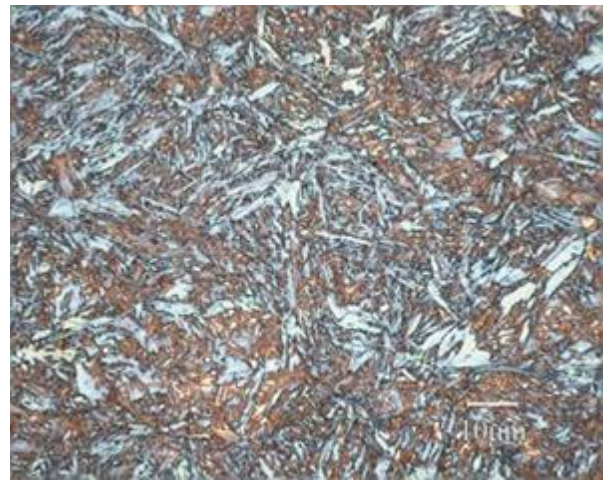


図9 金型冷却によるプレス焼入れSK85組織

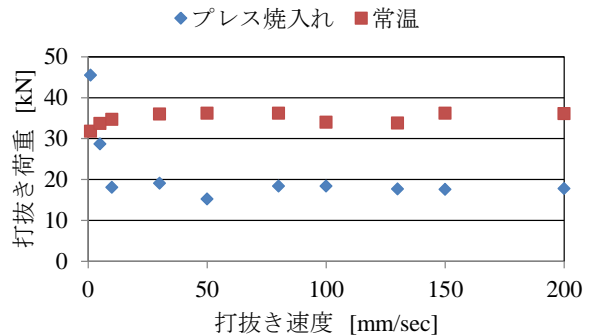
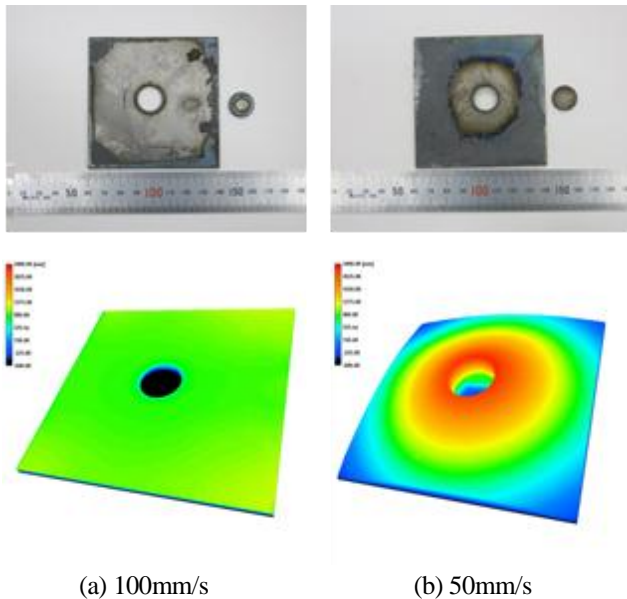


図10 打抜き荷重計測結果

いることにより、プレス焼入特性の向上および金型冷却時間の短縮につながると考えられる。

電動サーボプレス機の荷重データを計測することで、打抜き時のプレス荷重をプロットした結果を図10に示す。受入れ時の被成形材を常温で打抜いた時の荷重は、打抜き速度に依存せず、約35kN程度であったのに対し、オーステナイトまで加熱した被成形材をプレス焼入れすることで、打抜き荷重が約半分の18kN程度に低下する結果が得られた。これにより、鋼材が熱せられた状態では、打抜き荷重が低減できたことを確認できた。しかし、打抜き速度が10mm/s以下になると、打抜き速度より早



(a) 100mm/s (b) 50mm/s

図 11 プレス焼入れによる打抜きサンプル

くプレス焼入れによって被成形材が硬くなり、打抜き荷重が上昇していることがわかる。

プレス焼入れによる打抜きを行った被成形材写真と(株)キーエンス社製のレーザー変位計(型番:KS-1100)を用いて形状計測した結果を図 11 に示す。

この結果より、100mm/s で打抜いた場合は、変形しないが、50mm/s で打ち抜いた場合、被成形材に湾曲変形が生じ、全体に焼入れができていないことがわかる。

打抜き速度を変えることによって、被成形材の変形の有無について評価した結果を表 4 に示す。

加熱した被成形材を急速に冷却するため、パンチ加工中にも素材は収縮する。そのため、ある一定のパンチ速

表 4 打抜きによる被成形材変形有無

打抜き速度[mm/s]	1	5~50	50~200
変形(焼付)有無	無	有	無

度域において、素材の収縮が早く、パンチに焼嵌めされた状態となることから、素材を変形させてしまうことが、今回の実験で明らかとなった。これにより、打抜きプレス焼入れにおける適正な速度およびモーションが必要である。

4. まとめ

プレス成形品の高強度化することを目的に、プレス焼入れ技術による加工特性評価を行った。実験用金型として打抜き金型を試作し、金型材料および金型冷却機構による冷却特性を検討した。

常温金型材料による冷却特性では、十分なプレス焼入れを得ることができなかったが、金型冷却機構を付加することにより、水焼入れと同等な良好なプレス焼入特性を得ることが確認できた。また、打抜き特性の評価として、電動サーボプレス機の特性を活かした、速度設定に関して、最適速度およびモーション設定が必要となることがわかった。

【参考文献】

- 1) 中村克昭ら,型技術者会議 2012 講演論文集, pp94-95,2012
- 2) 池内健義ら,東京大学生産技術研究所 生産研究, pp967-969,2009

CFRP の異方性を考慮した高精度・高能率加工に関する研究

加賀 忠士

Study on high-precision and high-efficient machining of CFRP with considering anisotropic material property

Tadashi Kaga

エンドミルによる CFRP のトリミングにおいて、剥離を防ぐ方向に力が働くような工具姿勢を選ぶことで、加工能率と工具寿命を飛躍的に向上する”2分割傾斜エンドミル加工法”を提案した²⁾。そして、従来条件に対し数十倍の加工能率の向上および十倍程度の工具寿命の延長を示す研究成果を得るに至っている。本研究では、”2分割傾斜エンドミル加工法”の更なる高能率化を目指し、工具姿勢変化が切削抵抗および工具摩耗に与える影響について検討した。その結果、次のことがわかった。リード角が大きくなると、主分力および背分力の比切削抵抗は低くなることから、切削速度増加による能率向上の可能性はある。また、リード角が大きくなると、工具摩耗量が減少することから、材料の異方性の影響がある。

1. はじめに

近年、航空機は環境適合性および高性能化の要求にともない、これまで主要材料として適用されていたアルミ合金に比べ、比強度（重量当たりの強度）および比弾性率（重量当たりの弾性率）の高い炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）の使用率が、増加の一途をたどっている¹⁾。

この CFRP を部品として使用するためには、一体成形した後、切削、穴あけなどの二次加工が必要となる場合が多い。しかし、工具摩耗が非常に激しいことや、単一材とは異なる材質のため、その切削機構も金属材料とは異なることから、良好な仕上げ面が得にくいといった問題がある。

これらの問題に対し、著者らはエンドミルによる CFRP のトリミングにおいて、剥離を防ぐ方向に力が働くような工具姿勢を選ぶことで、加工能率と工具寿命を飛躍的に向上する”2分割傾斜エンドミル加工法”を提案している。そして、従来条件に対し数十倍の加工能率の向上および十倍程度の工具寿命の延長を示す研究成果を得るに至っている²⁾。この研究において、図1に示すように工具進行方向に対し工具を傾斜する実証試験を行う中で、工具姿勢変化（積層方向に対する切削方向の角度の変化）により切削抵抗に異方性があることを把握した（図2）。

高能率加工を目指し単純に切削速度を上昇させることは、CFRP 樹脂部の軟化を誘発し、その結果工具に樹脂が付着し切削不良を引き起こす。この工具への樹脂付着については、切削による発生熱が主要因と考えられ、これは切削プロセスで発生する熱量に比例する。この熱量は、単位時間あたりに消費されるエネルギー（切削動力）に等しく、切削運動の方向の力と切削速度の積で表わされる。ここで、CFRP が工具姿勢（積層方向に対する切削方向の角度）により切削抵抗に異方性があることに着

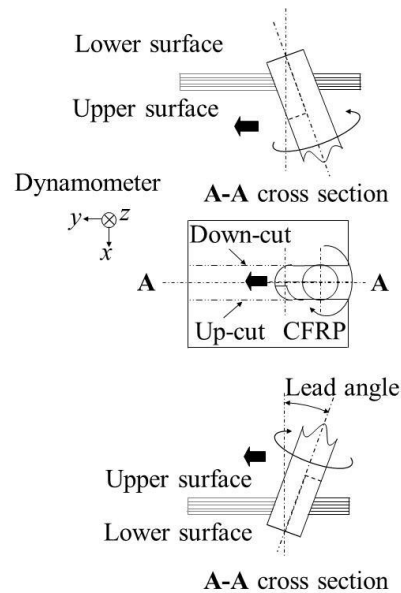


図1 工具傾斜実験方法

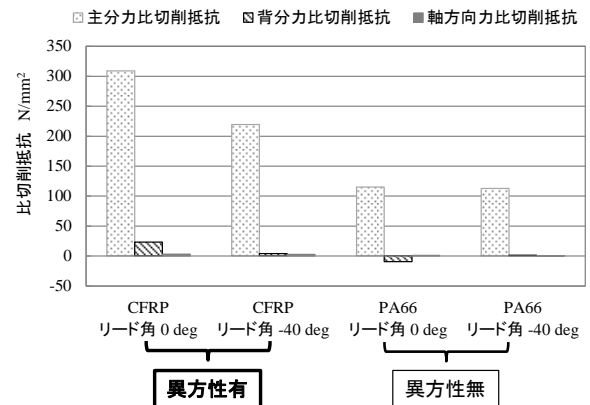


図2 比切削抵抗の異方性 ($\phi 12$ エンドミル, 外周すくい角 12 deg, ねじれ角 0 deg, 回転数 6000min⁻¹)

目すると、より切削抵抗が低くなる姿勢を選択すれば、切削速度を増加することで能率向上が期待される。
 一方、工具の機械的摩耗にも直接的に材料の異方性の影響があると予測され、これを明らかにする必要がある。
 本研究では、“2分割傾斜エンドミル加工法”の更なる高能率化を目指し、工具姿勢変化が切削抵抗に与える影響および工具の機械的摩耗に与える影響を検討した。

2. 実験

2. 1 実験装置および実験方法

被削材の CFRP としては、180 °C硬化樹脂を炭素繊維に含浸させた一方向プリプレグ 28 層とガラス繊維のクロス材プリプレグをその最外層に積層し硬化させた長方形板 (厚 5.5×44×55 mm) を準備した。この被削材は 3 成分切削動力計 (キスラー製 9257B) を介し、5 軸マシニングセンター (ヤマザキマザック製 VARIAXIS630-5XII) 上に固定し、1 枚刃コーティング無し超硬エンドミル (直径 12 mm) を用いて、図 1 に示すように加工実験を行った。半径方向切込みはエンドミル直径と同じ 12 mm (スロットイング)、板厚方向切込みは被削材の板厚と同じ 5.5 mm (完全にエンドミルを貫通)、回転数 9000 min⁻¹、エンドミルの進行方向に対する前傾および後傾の角度 (リード角 γ) -40~0 deg (後傾から垂直まで)、エンドミル回転軸を紙面に垂直に見たとき、紙面に投影される送り量 C_γ を 0.6 mm/tooth とし、それらの影響について検討した。実験の様子を図 3、実験条件を表 1 に示す。

3. 結果及び考察

3. 1 切削力

本実験において、切削力を測定している。この結果をもとに、各切削条件における工具の比切削抵抗値を求めた。今回の計算では、繊維方向による異方性は考慮せず、刃の削り始めの工具回転角度 φ を 0 deg とし、切り取り厚さ h を、一刃あたりの送り量 C_γ と工具回転角度 φ の sin

表 1 実験条件

被削材	CFRP
エンドミル名	直刃エンドミル
工具材質	超硬(コーティング無し)
刃数	1
外周すくい角 deg	0
ねじれ角 deg	0
送り C _γ mm/tooth	0.6
工具回転数 min ⁻¹	9000
径方向切込み量 mm	12
板厚方向の切込み量 mm	5.5(完全にエンドミルを貫通)
リード角 γ deg	-40, -20, 0

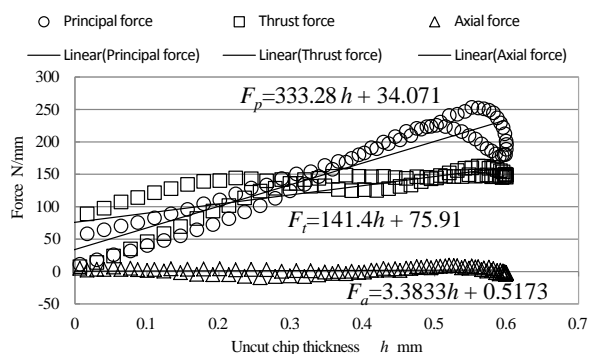


図 4 切削力解析結果 (工具回転数 9000 min⁻¹、リード角 γ=0 deg、送り量 C_γ=0.6 mm/tooth)

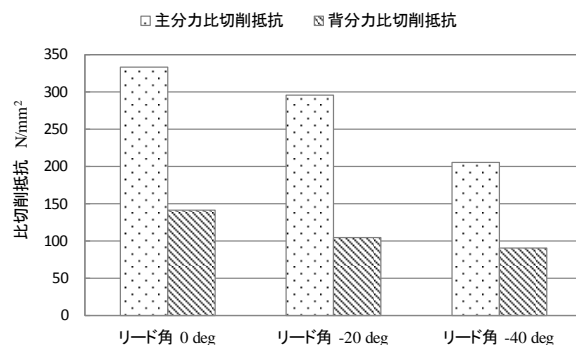


図 5 リード角変化における各成分の比切削抵抗

関数の積で近似 ($h \approx C_{\gamma} \sin \phi$) している³⁾。そして、各工具回転角から切削力測定で得られた x、y、z の 3 方向の平均の力を主分力、背分力、軸方向力に変換し、切り取り厚さ h と各成分の切削力の関係をグラフ化した。一例として工具回転数 9000 min⁻¹、リード角 γ=0 deg、送り量 C_γ=0.6 mm/tooth の時の結果を図 4 に示す。この結果から、主分力/背分力/軸方向力の比切削抵抗はそれぞれ 333.28/141.4/3.3833 N/mm² と求めた。ただし、軸方向力に関しては、本実験では、ねじれ角ゼロを用いているため、軸方向の比切削抵抗は非常に小さく、ここで

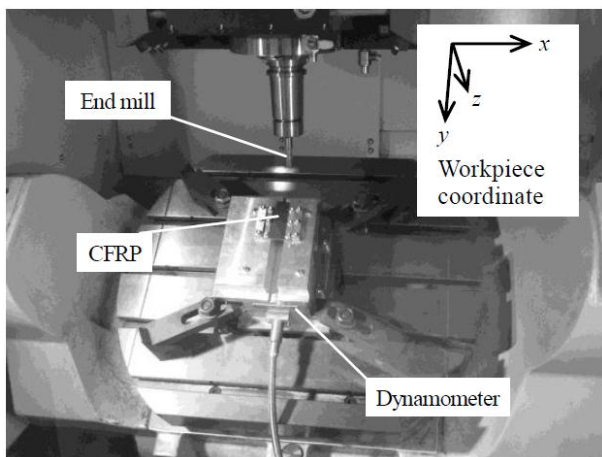


図 3 実験の様子

は評価しない。

送り量 $C_v=0.6 \text{ mm/tooth}$ の各切削条件における主分力および背分力の比切削抵抗の結果を図5に示す。主分力および背分力の両方とも、リード角が大きくなると比切削抵抗が低くなっていることがわかる。

3. 2 工具摩耗

CFRP 板 1 枚の加工後、エンドミルの逃げ面摩耗の観察を行い、図6に示すように、最大の逃げ面摩耗幅を測定した。

リード角変化における逃げ面工具摩耗量の結果を図7に示す。この結果をみると、リード角が大きくなると工具摩耗量が減少していることがわかる。CFRP の切削では、切り残された繊維が切れ刃の下に弾性変形し、工具逃げ面を擦過することで工具摩耗が進行する⁴⁾との報告があることから、比切削抵抗の結果と合わせると、リード角が大きくなることにより、工具を押さえつける繊維の力が弱くなったために工具摩耗が抑制されたと考えられる。

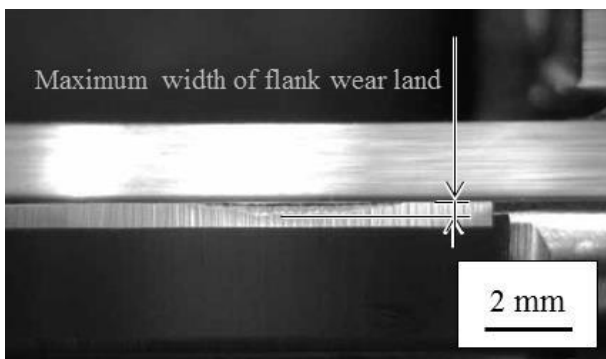


図6 エンドミルの逃げ面摩耗測定の様子

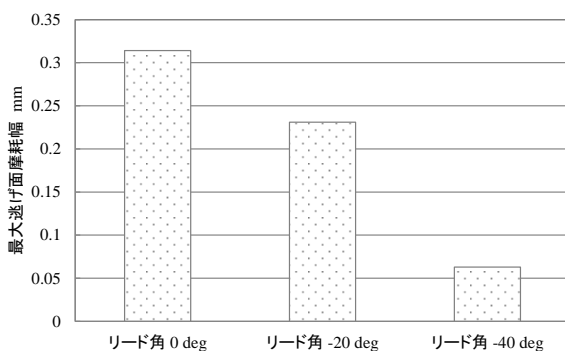


図7 リード角変化における工具摩耗量

4. まとめ

”2分割傾斜エンドミル加工法”の更なる高能率化を目指し、工具姿勢変化が切削抵抗および工具の機械的摩耗に与える影響について検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) リード角が大きくなると、主分力および背分力の比切削抵抗が低くなる。このことにより、切削速度増加による能率向上の可能性はある。
- (2) リード角が大きくなると工具摩耗量が減少する。このことにより、材料の異方性の影響がある。

【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 社本英二教授のご指導を頂き、厚くお礼申し上げます。

本研究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) 中島正憲,航空機機体の製造技術,精密工学会誌 No.75,Vol.8,pp941-944,2009
- 2) 加賀忠士ら,CFRP の高能率トリミングを実現する2分割傾斜エンドミル加工法,精密工学会誌 No.80,Vol.2, pp183-190,2014
- 3) 社本英二,切削機構を理解しよう,日本機械学会講習会テキスト,pp1-14,2008
- 4) 佐久間敬三ら,炭素繊維強化プラスチックの切削における工具摩耗(工具材種の影響),日本機械学会論文集(C編)No.49,Vol.10,pp656-666,1985

平成26年6月 発行

岐阜県工業技術研究所研究報告 第2号 平成25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/

