

岐阜県工業技術研究所研究報告

*Reports of
Industrial Research Institute of Gifu Prefecture*

2013 No.1

岐阜県工業技術研究所

目 次

機 械 部

超音波振動を用いた三次元接触センサに関する研究（第2報）	1
------------------------------------	---

西嶋 隆、西村 太志、今井 智彦

薄型な高精度フレキシブル静電リニアエンコーダの研究（第2報）	5
--------------------------------------	---

田中 泰斗、今井 智彦、田中 等幸

金 属 部

固体潤滑剤を鑄ぐるんだ潤滑プレートの開発	10
----------------------------	----

水谷 予志生、足立 隆浩

複 合 材 料 部

マイクロカテーテル用潤滑性コーティング材の開発	14
-------------------------------	----

道家康雄、西村太志

CFRP の機械加工技術に関する研究.....	20
-------------------------	----

柘植英明、小川大介、佐藤丈士

熱可塑性 CFRP の切削加工に関する研究	24
-----------------------------	----

加賀忠士、安藤敏弘

CFRP 表面改質技術の開発.....	28
---------------------	----

西垣康広、萱岡誠、道家康雄

機 械 部

超音波振動を用いた三次元接触センサに関する研究 (第2報)

西嶋 隆、西村 太志、今井 智彦

A high-aspect-ratio touch probe using ultrasonic vibration (II)

Takashi Nishijima, Futoshi Nishimura and Tomohiko Imai

本研究では、深い細溝や細穴の精密座標測定を可能とする非常に細長い形状の三次元接触センサ（ハイアスペクトタッチプローブ）の開発を行う。昨年度はプローブの縦波の共振を利用する方式により、先端径 1mm、プローブ軸径 0.7mm、測定長さ 37mm の形状のハイアスペクトタッチプローブを開発したが、プローブ軸水平方向の接触検出位置の繰り返し精度に課題が残った。本年度は新たに、プローブ先端に回転する振動を生成する方式のハイアスペクトタッチプローブを開発し、プローブ軸水平方向の接触検出位置の繰り返し精度の向上を図った。評価実験をしたところ、試作したプローブにおいてプローブ軸方向の一方向繰り返し精度 (2σ) は $0.11\mu\text{m}$ 、プローブ軸水平方向の一方向繰り返し精度 (2σ) は $0.75\mu\text{m}$ が得られた。また、本プローブを画像測定機のヘッドに取り付け、内径 30mm のリングゲージを内径測定したところ 29.9984mm の測定結果を得ることができた。

1. はじめに

近年、放電加工機等により、比較的高精度な深彫り加工が可能となってきていることから、加工された深い細溝や細穴の寸法や形状に対する精密座標測定へのニーズが生じている。精密座標測定は、主に接触式プローブを用いた機上測定や三次元測定機にて行われているが、測定対象である細溝や細穴の奥に入れることが可能なハイアスペクトタッチプローブはあまり提供されていない。

接触式以外の測定方式として、レーザ光を用いた光切断法による測定も知られているが、測定精度は接触式には及ばないのが普通であり、マイクロメートルオーダーの精密測定には接触式が主流となっている。

本研究では、高い感度で接触を検出する振動プローブの先行研究¹⁾を参考に、機上測定や三次元測定機で用いる非常に細長いタッチプローブの開発を目指している。

昨年度においては、プローブ軸方向の縦波の共振を利用する（以降、縦波型とよぶ）タッチプローブを開発した²⁾。試作した縦波型タッチプローブの形状は、先端径 1mm、軸径 0.7mm、測定長さ 37mm と非常に細長い形状であり、接触検出位置の繰り返し精度 (2σ) はプローブ軸方向で約 $0.4\mu\text{m}$ と現用の普通形状のタッチプローブに劣らない性能が得られたが、プローブ軸水平方向では約 $8.0\mu\text{m}$ となり、プローブ軸水平方向の精度の向上が課題として残された。

本年度は、上述の課題に対し、プローブ軸水平方向の接触検出の感度を高める方法として、プローブ先端がプローブ軸水平方向に円周運動する振動を生成する方式（以降、回転振動型とよぶ）のハイアスペクトタッチプローブを開発した。本報では、この回転振動型ハイアスペクトタッチプローブの概要、振動モード解析、解析の検証及び試作機の実験、評価について報告する。

2. 回転振動型ハイアスペクトタッチプローブ

2. 1 概要

図1に回転振動型ハイアスペクトタッチプローブの振動体部分の概要図を示す。プローブ軸にはリング状の圧電素子二個を一組とした加振用と振動検出用の圧電素子をねじで締結する。圧電素子の重なり合う面の電極は四分割しており、加振用圧電素子には四相の交流電圧を印加し、適切な周波数においてプローブ先端が同図のように微小な円周運動する振動が発生する。本方式では、このような振動モードを利用し、プローブ軸の水平方向からの接触に対し、プローブが大きく撓む前に敏感に接触を検出する。

2. 2 接触検出の判定方法

図1に示すように、振動検出用圧電素子の電極も加振用と同様に四分割する。振動中は対向する電極間の電位は逆位相となると考えられるため、同図に示すように、これらの差動信号と加振電圧の位相差の変化を検出することで接触の判定を行う。

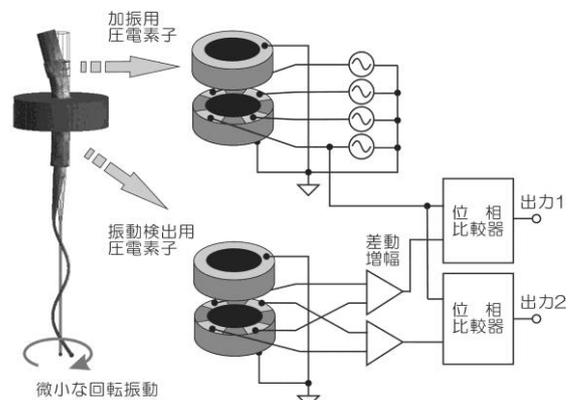


図1 回転振動型タッチプローブの概要図

位相差の変化の検出は、汎用マイコンの多機能タイマを利用し、加振周波数に同期して、位相差の変化が閾値を超えた時に接触と判定する。すなわち、接触判定は加振周波数の周期で逐次実行することにより高速な接触判定を行う。

3. 解析

回転振動型の振動モード及び、加振周波数に対するプローブ先端変位の関係を把握するために、有限要素法による解析を行った。解析ソフトウェアには Femtet (ムラタソフトウェア) を使用し、圧電解析における調和解析の機能を用いた。

解析における材料や圧電素子の物性値は、試作するタッチプローブと同様とした。但し、金属部材の機械的 Q 値は適切に見積もることが困難であったことから本解析では無視 ($1/Q=0$) することとし、減衰は圧電素子部分のみにあることとした。

図 2 に加振周波数とプローブ先端変位 (大きさ) の解析結果を示す。この結果より複数の周波数で先端の変位

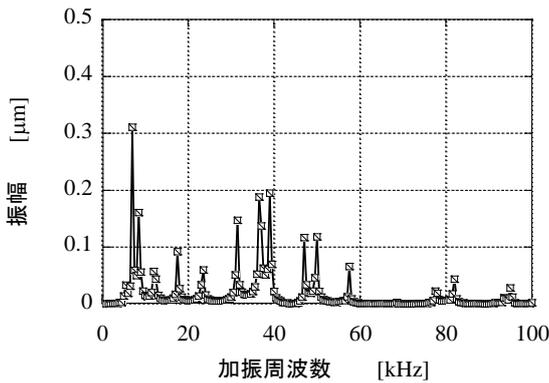


図 2 先端変位と加振周波数の関係 (解析結果)

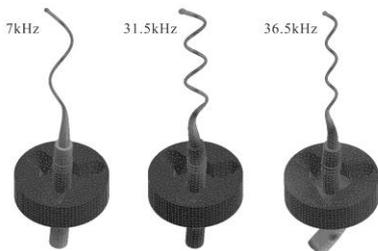


図 3 代表的な振動モード (解析結果)

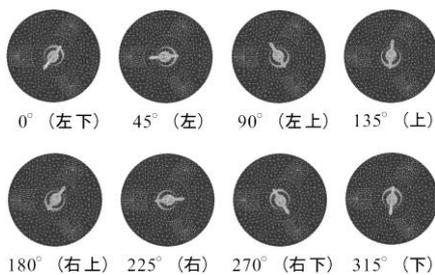


図 4 先端変位の動き (解析結果)

が大きくなることが確認できる。図 3 に例として、振幅が大きくなる 7kHz、31.5kHz、36.5kHz 時のモードを示す。図 4 に 31.5kHz 時のプローブ先端方向から見た、先端の変位方向と加振電圧位相の関係を示す。これらの結果からプローブ先端は円を描くように回転しながら振動することが確認できる。

4. 解析の検証

4. 1 加振周波数と先端振幅の関係

解析の検証としてプローブの先端変位と加振周波数の関係を調べた。実験では加振周波数を掃引し、ヘテロダイナミクス変位計 ST3761 (岩通計測) を用いてプローブ先端の水平方向の変位を計測した。同時に振動検出用圧電素子の出力 (AD 変換値) を計測した。結果を図 5 に示す。同図から先端の振幅は 7.65kHz、30.6kHz 等で増大し、複数の周波数で振幅が得られることが確認できた。また、圧電素子の出力は最大振幅が得られる 7.65kHz ではピークが認められず、30.6kHz や 37.5kHz にて増加した。なお、これらの周波数では先端の変位も増大することが確認できる。

4. 2 振動モード

振動モード解析の検証として、プローブ先端から根本に向かって 2mm 間隔でプローブ軸の水平方向の振幅を測定した。測定時の加振周波数は先端振幅が増大する 7.65kHz、30.6kHz とした。結果を図 6、図 7 に示す。同図には各点において計測した振幅及び、その値を半分にして位相を考慮してモード (形状) を示した点をプロットする。これらの結果から解析と同様の波長の振動モード

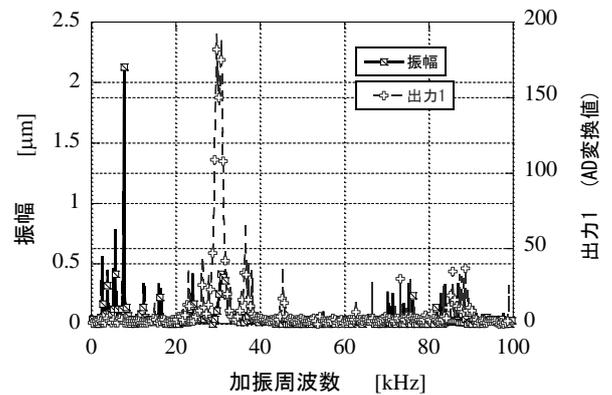


図 5 先端変位・出力 1 の振幅と加振周波数の関係

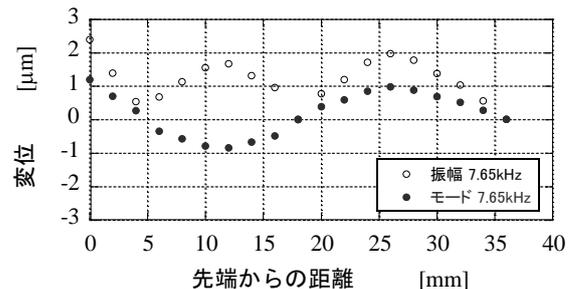


図 6 7.65kHz 時のプローブの振幅とモード

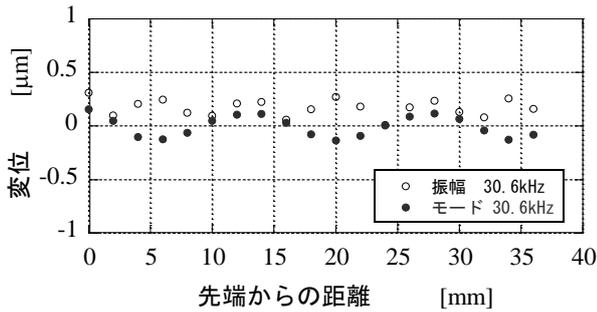


図7 30.6kHz時のプローブの振幅とモード

ドが計測され、解析の有効性が示された。

5. ハイアスペクトタッチプローブの試作

5.1 本体の試作

試作した回転振動型ハイアスペクトタッチプローブの構造図を図8に示す。筐体内部に振動体となる部分（プローブ、軸、ホルダ、圧電素子の連結構造）が設置されている。ホルダは片面から3本のプランジャによって押されており、反対面にある3本のV溝と筐体内部にある3本のピンで位置決めされている。

プローブ部分は先端径1mm、軸径0.7mm、測定長さは37mmのハイアスペクト形状とした。圧電素子は内径3.5mm、外形5.5mmのリング形状で加振用には厚さ2mm、振動検出用には厚さ1mmの形状とし、素材は富士セラミックス製のC-6材を用いた。

図9に用いた圧電素子と給電用電極（黄銅 t=0.2mm）と軸部分の写真を示す。圧電素子の分割電極はイオンスパッタリングにより金を蒸着した。

組立方法は軸に対してリング状の圧電素子をねじで締結する。なお、締結の際は電極や圧電素子の間に加速度ピックアップ用のグリスを挟んで密着性を高めている。

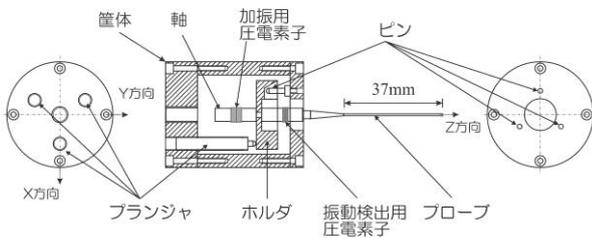


図8 試作機の構造図

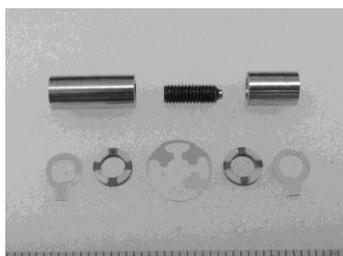


図9 圧電素子と給電用電極と軸

図10にタッチプローブの全体と内部の振動体の写真を示す。

5. 2 センサ回路の試作

センサ回路は、図1に示すように主に圧電素子を加振する4相発振器及び、振動を検出し接触を判定する回路が必要となる。今回は、これらの回路を汎用のマイクロコンピュータや波形発生用の集積回路等を用いて製作した。

本センサではプローブの共振を利用することから、振動検出用圧電素子の出力から共振周波数を検出する機能や、接触判定を加振周波数の周期毎に判定する機能を実装した。

6. 評価実験

6.1 接触検出位置の一方向繰り返し精度

タッチプローブの接触検出位置に関する、一方向繰り返し精度を評価した。本実験では、タッチプローブを固定しておき、プローブ先端に金属プレートを接触させ、接触判定位置のばらつきを評価する。実験の様子を図11に示す。

金属プレート位置は圧電素子駆動の精密ステージで制御し、試作したタッチプローブから出力される接触判定トリガにて、接触時のステージ位置をヘテロダイン方式レーザー変位計にて計測する。この操作はDSPシステムで構成した実験システムにて自動で行い、手動による測定ばらつきを排除する。

金属プレートをタッチプローブに接触させる方向は、

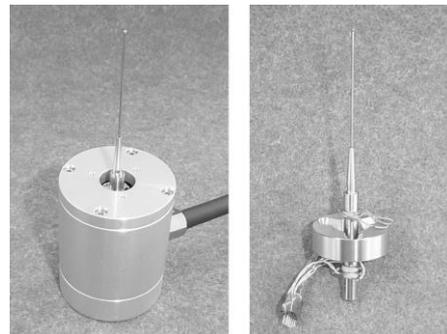


図10 全体と内部の振動体の写真

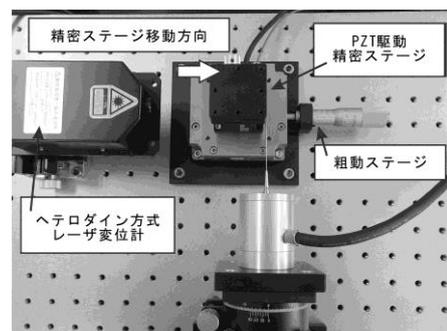


図11 X-Y方向の一方向繰り返し精度の実験の様子

プローブの軸方向 (図8中のZ方向) 及び、プローブの軸の水平方向 (図8中のX-Y方向) とし、水平方向は30° 間隔で測定した。金属プレートの接触速度は1mm/sとし、測定回数は各方向から20回行い、2σを求めた。なお、加振周波数は圧電素子の出力が最大となる30.6kHzと二番目のピークである37.5kHzで行った。

垂直方向 (Z方向) の結果を表1に、水平方向 (X-Y方向) の結果を図12に示す。表1より、軸方向の繰り返し精度はサブマイクロメートルオーダーとなり良好な結果が得られた。この方向はプローブの撓みが少ない方向であるためであると考えられる。一方、図12のプローブの水平方向においては、圧電素子の出力がピークとなる30.6kHzにおいては、繰り返し精度(2σ)が最大3.85μmとなり、良好な結果が得られなかったが、37.5kHzの場合は最大0.75μmと良好な結果が得られた。

6. 2 リングゲージの内径測定

リングゲージ内径 (30mm) を試作したハイアスペクトタッチプローブで測定することで、二次元における測定精度について評価した。

測定方法は、画像測定機 QVH3-H606PIL-C (ミットヨ) のヘッドに試作したハイアスペクトタッチプローブを取り付け、最初にリングゲージ内径4点を測定し原点を定める。原点からプローブを極座標系で半径方向に動作させ接触判定位置の座標を画像測定機に表示される座標値から得た。測定方向は30° 刻みとし、プローブの接触点付近での移動ステップを0.1μmとして測定した。なお、ここでは37.5kHzのモードを用いて測定した。

図13に、測定データ (プローブ先端半径の補正を行っていない) を示す。同図においてリングゲージ半径は、プローブの半径を補正してないため理論値としては14.5mmである。これに対し本結果は14.5mmより小さい値となった。これはプローブ先端の振幅のためであると考えられる。同図の結果より、プローブ先端径(1mm)を補正して得られる測定結果は29.9984mmとなった。

7. まとめ

本報告では、プローブ軸水平方向の接触検出の感度を高めるために、プローブ先端に円周運動する振動モードを生成させることを提案し、この振動モードの有限要素解析及びその検証実験を行い、提案する振動モードが生成可能であることを示した。

試作した先端径1mm、軸径0.7mm、測定長さ37mmのハイアスペクトタッチプローブにおいて、プローブ軸方向及び水平方向の接触検出位置の一方向の繰り返し精度(2σ) はそれぞれ0.11μm、0.75μmが得られた。本プローブを画像測定機のヘッドに取り付け、内径30mmのリングゲージの内径測定を行ったところ、29.9984mmの測定値を得ることができた。

表1 軸方向の一方向繰り返し精度

軸方向の繰り返し精度 2σ	
30.6kHz時	0.22μm
37.5kHz時	0.11μm

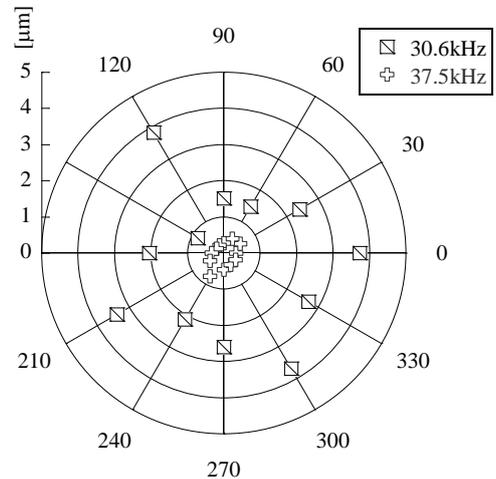


図12 X-Y方向の一方向繰り返し精度

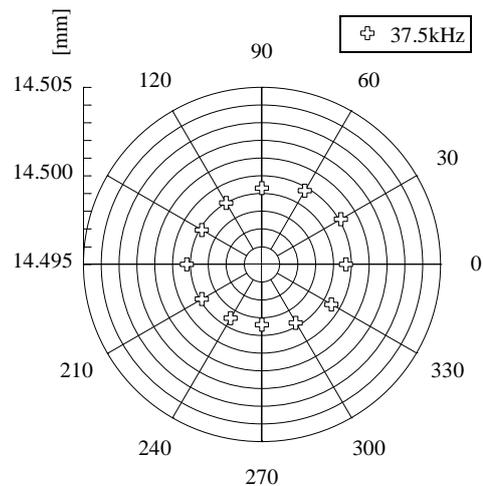


図13 リングゲージ内径測定結果

【謝辞】

本研究の一部は平成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) 例えば, 石津ら, 精密工学会誌 Vol.74, No.3, pp235-238, 2008
- 2) 西嶋ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.5, pp25-28, 2012

薄型な高精度フレキシブル静電リニアエンコーダの研究 (第2報)

田中 泰斗、今井 智彦、田中 等幸

Study on high precision angle measuring system using thin and flexible electrostatic linear encoder (II)

Taito Tanaka, Tomohiko Imai and Tomoyuki Tanaka

静電リニアエンコーダはセンサ素子としてフレキシブルプリント基板を使用しており、一般的に使用されている光学式や磁気式のリニアエンコーダと異なり、薄型・柔軟という特徴を有している。本研究では、静電リニアエンコーダを利用した円弧状摺動面の回転角計測システムの開発を目的としており、これまでに静電リニアエンコーダを動作させるための基本回路を試作し、試作回路による回転角の測定精度について評価を行った。本年度は、実利用の観点から静電リニアエンコーダシステムを構築するため、昨年度までの研究で得られた知見を元に3相交流発生回路、矩形波変換回路及び位相差計測回路からなる汎用的なシステムを新たに試作し、試作システムにおいても同等の測定精度が得られることを確認した。

1. はじめに

機械部品の高精度化や生産システムの自動化の流れのなか、各種位置決めセンサの市場規模は増加する傾向にあり、今後も産業上の重要度は増していくと予想される。

本研究で試作する静電リニアエンコーダは、移動子と固定子からなる一対のフレキシブルプリント基板フィルム (FPC フィルム) 間に生じる静電容量の変化を検出することにより、フィルムの相対的な位置関係を計測するものである。また、センサとして使用する FPC フィルムは、薄型・柔軟であるため、平面における位置計測のみならず、これまで各種位置決めセンサの設置が困難であった曲面や円弧状の摺動面などでの利用が期待できる¹⁾。

これまで筆者らは、円弧状の摺動面を模した実験装置を試作し、静電リニアエンコーダを安定動作させるために必要な移動子と固定子の接触圧や回転角の測定精度など、基本的な動作について評価を行ってきた²⁾³⁾。

本年度は、静電リニアエンコーダシステムの実利用に向け、これまでに得た知見をもとに新たに周辺回路の試作を行い、動作を確認した。なお、静電リニアエンコーダの動作原理や角度計測への適用性等に関する詳細については、参考文献を参照願いたい。

2. 静電リニアエンコーダシステム

2.1 全体構成

昨年度までに試作した静電リニアエンコーダシステムでは、任意波形発生装置やマルチファンクションフィルタ、安定化電源など比較的高価な機器を利用し、各種動作の確認や円弧状摺動面における回転角測定精度の評価などを実施してきた。本研究の最終目的は、静電リニアエンコーダを製造現場や加工機械、各種計測・制御システム等で利用可能な汎用機器とすることにあるため、実利用の観点から安価なシステムを構成する必要がある。そこで、これまでの知見を元に汎用電子デバイスとマイコンを用いた3相交流発生回路、矩形波変換回路及び位相差計測回路を試作した。

図1に試作した静電リニアエンコーダシステムの全体構成を示す。本研究では、静電リニアエンコーダを円弧状摺動面に適用することを目的としているが、これまでの研究において、平面や円弧など FPC フィルムの設置条件にかかわらず静電リニアエンコーダが動作することを確認しており、図では簡略化のため静電リニアエンコーダを平面に設置している。

2.2 3相交流発生回路

3相交流発生回路は、静電リニアエンコーダの固定子

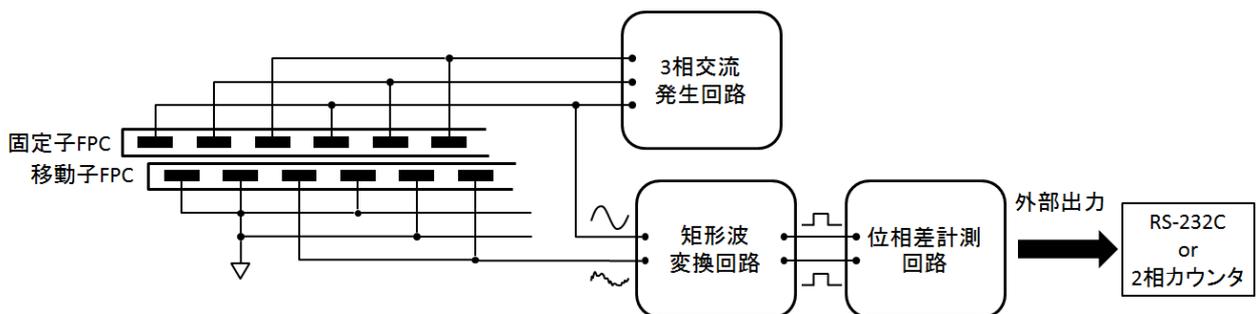


図1 静電リニアエンコーダシステムの全体構成

に信号を供給するための回路である。移動子及び固定子として使用する FPC フィルムの静電容量は電極間距離や面積の組み合わせにより異なるため、様々な条件下で静電リニアエンコーダを安定的に動作させるためには、周波数や出力電圧を自由に調整可能な 3 相交流発生回路が必要となる。そこで、ダイレクト・デジタル・シンセサイザ (ANALOG DEVICES 製 AD9834、以下、DDS) を利用した 3 相交流発生回路を試作した。図 2 及び表 1 に試作した 3 相交流発生回路の構成及び主要スペックを示す。試作回路では、パソコンなど上位システムからの命令により 3 相交流の周波数と位相を任意に変化させることを可能とするため、ARM マイコン (NXP セミコンダクターズ製 LPC1114) が上位システムからの命令を受け取り、バス接続された 3 つの DDS を SPI 通信によりコントロールする構成とした。試作回路では、ARM から各 DDS に対して信号出力命令を同時送信することにより、正確な位相差の正弦波を出力することができる。また、上位システムから指令が無い場合は、20kHz の 3 相交流を発生させることとしている。

DDS から出力される電圧は、600mV_{p-p} 程度であり、DDS の動作原理に基づくスプリアスが生じる。このため、試作回路ではローパスフィルタ (LPF) でスプリアスを除去するとともに、オペアンプを用いた 1 次アクティブ LPF により静電リニアエンコーダの駆動に不要な高周波雑音を除去した。また、3 相交流の出力電圧は、1 次アクティブ LPF の帰還回路に設置したボリュームにより調整可能である。

2. 3 矩形波変換回路

静電リニアエンコーダシステムは、移動子電流と固定子電圧の位相差を検出することにより、移動子と固定子の相対位置関係を計測する。移動子と固定子から得られる正弦波と同期した矩形波を得るため、図 3 に示す矩形波変換回路を試作した。矩形波変換回路の基本構成は

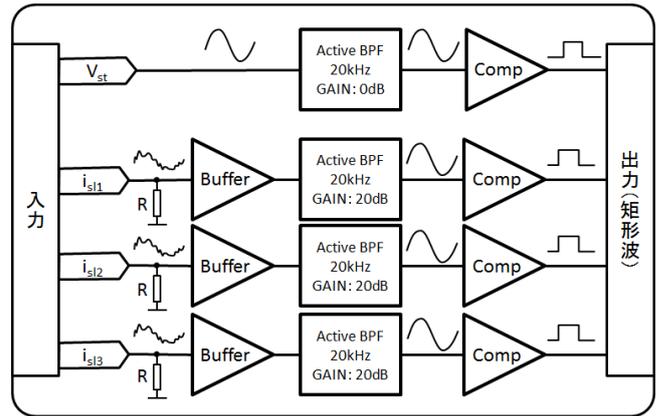


図 3 矩形波変換回路の構成

これまでの研究で試作した位相差変換回路と同様であり、オペアンプを用いた 2 次アクティブ・バンドパスフィルタにより、微弱な移動子信号からノイズを除去し正弦波を得た後、コンパレータにより矩形波に変換するものである。本年度試作した回路では、複数の静電リニアエンコーダの同時動作や単一の静電リニアエンコーダから複数の移動子信号を入力することなどの拡張性を持たせるため、3 つの移動子電流 (i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}) と 1 つの固定子信号 (v_{st}) を接続可能な構成とした。バンドパスフィルタの中心周波数は 20kHz とし、コンパレータには、約 50mV のヒステリシス幅を与えることにより矩形波変換時のノイズによる発振を防止している。なお、試作した矩形波変換回路では、バンドパスフィルタの中心周波数及びゲインを調整することはできず、3 相交流の周波数を変更する場合は、矩形波変換回路を変更する必要がある。

2. 4 位相差計測回路

2. 4. 1 基本動作

位相差計測には、これまでの研究と同様にマイコン (ルネサスエレクトロニクス製 SH7125) を利用し矩形波変換回路で変換された固定子矩形波信号 (V_{st}) と移動子矩形波信号 (V_{sl}) の位相差をマイコンのタイマ機能で計測することとした。図 4 に位相差計測の動作チャートを示す。

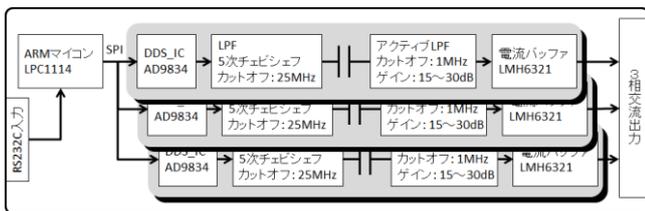


図 2 3 相交流発生回路の構成

表 1 3 相交流発生回路の主要スペック

出力波形	サイン波
周波数範囲	50Hz~300kHz 程度
出力電圧	±10V (最大値)
出力電流	±300mA (最大値)
電源	+3.3V (マイコン、DDS) ±12V (アナログ部)

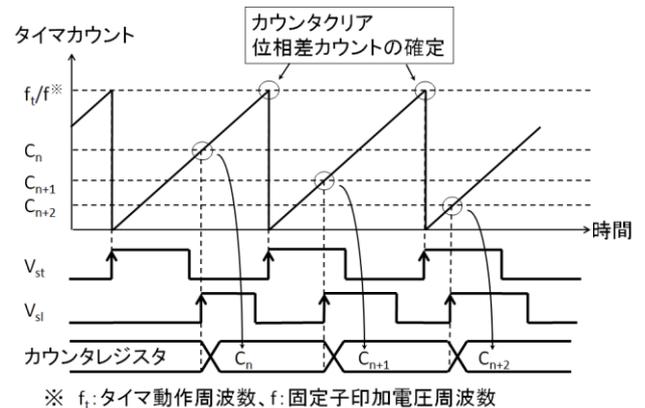


図 4 位相差計測の動作チャート

固定子と移動子の相対位置関係と連動し V_{st} と V_{sl} の位相差は変化するため、 V_{sl} の立ち上がりエッジでタイマカウンタを取得する設定とした。また、タイマカウンタは V_{st} と同期してクリアする設定とし、カウンタクリアのタイミングで割り込みを発生させ、位相差を確定することとした。このように動作させることにより、固定子印加電圧周波数 f で、位相差を計測することが可能になる。また、計測される位相差は、固定子と移動子の間に FPC フィルム電極 3 ピッチ分の相対的な移動が生じる度に不連続となることから、位相差カウンタの他にフィルム電極 3 ピッチ相当の移動量をカウントし、初期位置からの移動量の計測を可能としている。位相差回路の動作原理から、マイコンのタイマの動作周波数 f_i を大きくすることにより位相差計測の分解能は高くなるが、移動子電流は外来ノイズの影響を受けやすく静的な状態でも若干の変動が生じる。このため、安定した計測のためには、静電リニアエンコーダの動作環境や所望の測定精度に応じた適切なタイマ周波数を設定することが重要となる。なお、試作システムでは f_i を約 390kHz、1.562MHz、6.25MHz、25MHz の 4 段階で変更することが可能である。

2. 4. 2 移動量の外部出力

各種アクチュエータや計測制御機器と本システムを接続し利用するためには、エンコーダカウンタ出力に要する時間遅れを可能な限り小さくするとともに、一定の実時間性を保証することは非常に重要である。昨年度までに試作したシステムでは、RS-232C 通信によりエンコーダカウンタ値を外部に出力したが、送信に要する時間遅れが大きいことや独自の通信フォーマットを使用していることから、用途は移動量の外部表示やロギングなどに限られた。そこで、より高速にエンコーダ値を出力するため、2 相カウンタ出力機能を実装した (図 5)。実装した 2 相カウンタ出力は、位相差カウンタの確定と同時に発生する割り込み処理で、直前の位相差カウンタ値と

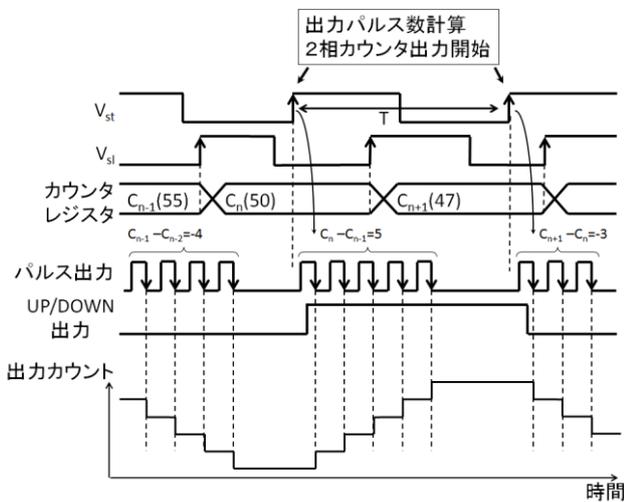


図 5 2 相カウンタ出力動作

の差を求め、差の符号に応じた UP/DOWN 信号と必要数のパルスを出力するものである。

既に述べたとおり、本研究で提案する静電リニアエンコーダシステムでは、固定子電圧と同じ周期 T で位相差が更新されるため、実際に生じた移動子の移動に対して、最大 T の時間遅れが生じる。2 相カウンタ出力パルスの周波数を f_c 、直前の位相差カウンタ値との差を C_{diff} すると、カウンタ出力に要する時間 T_c は C_{diff}/f_c となり、 $T_c < T$ であれば、位相差の確定に要する時間遅れと合わせて最大 $2T$ の時間内で移動量を外部に出力することが可能になる。一方、 $T_c > T$ の場合は、パルス出力の遅延が累積し位置情報の実時間性を担保できないこととなる。このため、2 相カウンタ出力より移動量を外部出力する場合、想定される移動子の最大移動速度、固定子電圧の周波数、位相差計測タイマの動作周波数、2 相カウンタ出力パルスの周波数等のバランスを考慮しパラメータを設定する必要がある。

3. 静電リニアエンコーダシステムの動作例

試作した静電リニアエンコーダシステムを用いた、回転角の計測例を示す。実験では電極間ピッチ 160 μ m の FPC フィルムを使用し、固定子に 20kHz、20V_{pp} の 3 相交流を印加した。また、円盤の駆動には、昨年度同様、図 6 に示す実験装置を利用した。

静的状態における動作の安定性を確認するため、円盤を停止させた状態で位相差カウンタの偏差を測定した結果を表 2 に示す。なお、標準偏差は 0.1sec 毎に 100 回の移動量を測定した結果から求めた。表から分かるように、実験環境では 1.562MHz 程度のタイマ周波数で移動量を計測すれば標準偏差は約 1 カウントとなり、外来ノイズの影響をほぼ無視することができる。1.562MHz の

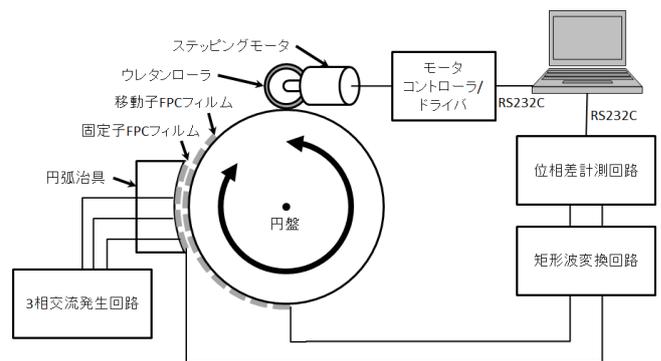


図 6 動作実験装置

タイマ周波数 [MHz]	標準偏差 [カウント]
25	17.91
6.25	3.97
1.562	0.83

タイマ周波数では、固定子電圧の1周期 T に相当する相対移動量を約 78 カウントで測定することができる。また、2 相カウンタ出力のパルス周波数を 200kHz とすると、 $T=1/20\text{kHz}$ の間に出力可能なパルスは 10 パルスとなり、移動子と固定子の相対速度が約 1.2m/sec となるまでは遅延なく移動量を出力することが可能となる。なお、位相差カウンタの感度は、タイマ周期に比例して減少することから、予め高いタイマ周波数で静的状態における位相差カウンタの変動を計測すれば、最適な動作周波数を容易に類推することができる。

位相差検出回路のタイマ周波数は 1.562MHz とし、円盤の回転角を計測した結果を図 7 に示す。図の横軸は、円盤の駆動に使用したステッピングモータへの制御量を回転角に換算した値である。実験装置の制約からローラと円盤の滑りやローラ自体の変形など誤差などが含まれるが、動作原理に基づく非線形性の誤差が観察されるとともに、巨視的に見て円盤と静電リニアエンコーダの回転角の関係には高い線形性が認められた。また、測定結果から求めた線形近似直線との誤差は、最大で約 0.03deg であり、従来研究と同等の精度で回転角が計測可能であることを確認した。

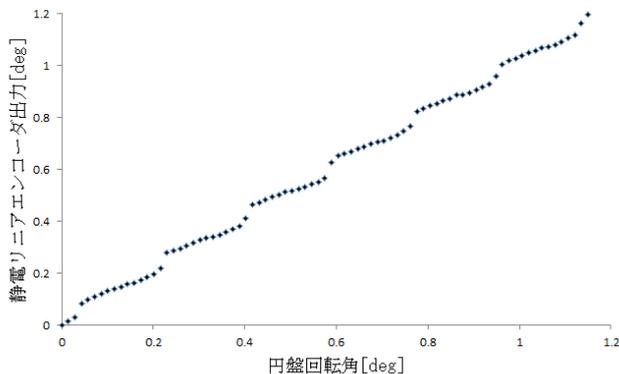


図 7 円盤回転角と静電リニアエンコーダ出力

4. まとめ

静電リニアエンコーダの実利用に向け、汎用電子デバイスとマイコンを用いた 3 相交流発生回路、矩形波変換回路及び位相差計測回路からなる静電リニアエンコーダシステムを試作した。また、FA 機器等の周辺機器に静電リニアエンコーダシステムで計測した移動量を高速に出力するため、位相差計測回路に 2 相カウンタ出力機能を実装した。動作試験の結果、試作したシステムにおいても、任意波形発生装置やマルチファンクションフィルタ等の高価な機器を使用し構成したシステムと同様の回転角測定精度が得られており、本システムにより静電リニアエンコーダが動作することを確認した。

本研究で提案する静電リニアエンコーダでは、移動量等の測定周期が固定子印加電圧の周波数に依存することから、実時間で位置計測を行うことはできない。また、試作システムでは、高速な移動量の出力方法として 2 相カウンタ出力機能を実装したが、カウンタパルスの出力周波数は接続する周辺機器に合わせる必要があり、極端に高速化することは難しい。2 相カウンタ出力のパルス周波数を低くするためには、固定子印加電圧の周波数を低くし測定周期を長くするか、位相差計測の分解能を低くすることが必要であり、静電リニアエンコーダシステムの実利用に際しては、個々の利用場面に応じたパラメータ調整が必要である。

【参考文献】

- 1) Nishijima T. *et al.*, 2009 Meas. Sci. Technol. 20, 045205,2009
- 2) 田中ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.4,pp22-24, 2011
- 3) 田中ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.5,pp29-31, 2012

金 属 部

固体潤滑剤を鑄ぐるんだ潤滑プレートの開発

水谷 予志生、足立 隆浩

Development of solid lubricants-enveloped casting

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。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フェノール樹脂で固化したブリケット成形体を作製した。これを砂鑄型内にセットして鑄造することで、黒鉛粉末を含み、ポーラスな表面を持った無給油潤滑材が作製できないか検討した。

1. はじめに

プレス機等の摺動部に使われる無給油潤滑材は、基盤となる金属材料(鉄または銅)と潤滑特性に優れた固体潤滑剤とを複合化させ、耐摩耗と潤滑特性の両方の特性を引き出している。また、この固体潤滑剤が適度にポーラスであることから、最初に潤滑油を含浸させることで、使用中に追加給油する必要のない、メンテナンスフリーなものとなっている。この主な種類としては、基盤金属に穴を空けて固体潤滑剤(黒鉛や二硫化モリブデン(MoS₂)等)を埋め込んだ埋込型(図1(a))、金属と固体潤滑剤の粉末を混合して焼結した焼結型(図1(b))、片状黒鉛鑄鉄(ねずみ鑄鉄)に熱処理を繰り返して黒鉛を粗大化させた成長黒鉛鑄鉄¹⁻³⁾、等がある。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がかかることや、焼結型・成長黒鉛鑄鉄では熱処理に時間がかかることがネックとなっている。

一方、鑄造法の一つである鑄ぐるみは、鑄物と異なる特性を持った物質を、鑄造時に一気に一体化して複合化させる手法である。この手法を用いて固体潤滑剤を鑄物製造時に一度に複合化することで、製造コストを削減することができないかと考えた。しかし、固体潤滑剤として黒鉛を鑄鉄で鑄ぐるむ場合、鑄鉄溶湯が高温であることから、黒鉛が燃えてしまうことが考えられる。そこで、通常は再溶解に回す切粉と黒鉛粉末を混合して鑄ぐるむことで、これを回避できないかと考えた。このように、粉末等を用いた鑄ぐるみ法により新しい無給油潤滑材を開発することを目的とした。

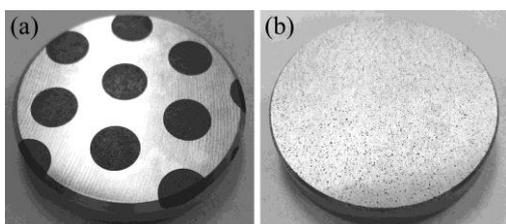


図1 無給油潤滑材製品例、(a)埋込型、(b)焼結型

2. 実験方法

今回は安価であることから、固体潤滑材として黒鉛を用いることとした。図2に原料として用いた黒鉛粉末、FC250 鑄鉄切粉大・小の外観写真を示す。黒鉛粉末は約5mm以下、鑄鉄切粉小は数mm程度の針状、大は数mmからcmオーダーの板状となっている。これらを混ぜ合わせ、バインダーとなる接着剤としてフェノール樹脂を添加して固めることで、固体潤滑材を含んだブリケットを作製した。これを砂鑄型内にセットし、片状黒鉛鑄鉄(FC250)用溶湯を注湯することで鑄ぐるむ事を検討した。

φ50mm×厚み10mm以上の無給油潤滑材の作製を目指し、ブリケットの大きさはφ60~70mm、鑄物の大きさはφ80~90mmとした。ブリケット作製のための原料粉の混合割合や形状、鑄物の大きさや鑄造方法等により固体潤滑材を鑄ぐるんだ鑄鉄鑄物の作製を検討した。

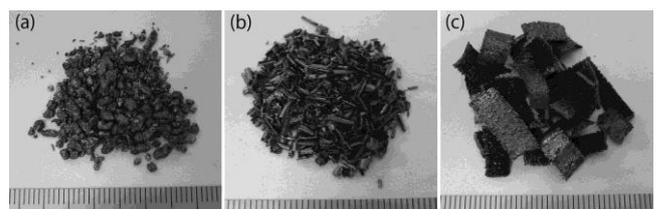


図2 原料粉末外観、(a)黒鉛、(b)FC250 鑄鉄切粉小、(c)FC250 鑄鉄切粉大

3. 結果及び考察

鑄鉄切粉小に黒鉛粉末を30%混合させた混合粉末に、フェノール樹脂を約5wt.%添加してφ70の金型内に充填し、アムスラーで5分間加圧(12t)することでブリケット成形体を作製した。この外観写真を図3(a)に示す。作製したブリケットの寸法はφ70×高さ35mmとなっている。これを砂鑄型の上型内にセットし、φ110×高さ50mmの鑄物に鑄ぐるむ実験を行った。鑄物外観を図3(b)に、その断面を(c)に示す。図3(b)の鑄物手前下側に付いているのがゲートであり、ここから溶湯が入り、下から充填

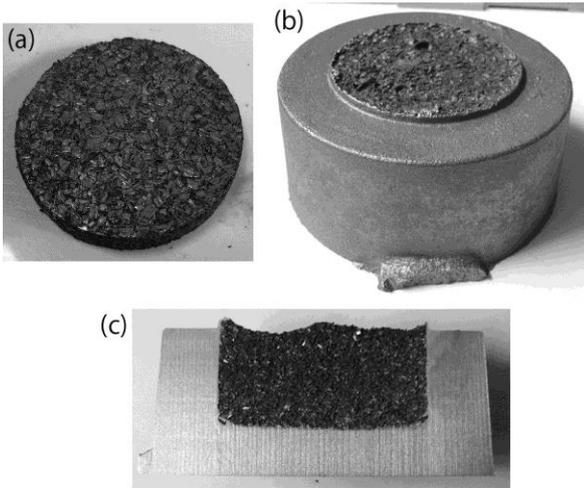


図3 (a)作製したブリケット(鑄鉄切粉小+黒鉛粉末)、
(b)(a)のブリケットを鑄ぐるんだ鑄物、(c)(b)の断面図

していく方案となっている。図3(b)(c)の上部にセットしたブリケットがほぼそのまま存在しており、ブリケットへの溶湯の進入や鑄鉄切粉の再溶解はほとんど起こっていないことが分かった。また、黒鉛粉末が十分残っていることから、溶湯の熱で燃えて無くなってしまふ恐れは少ないということが分かった。

多孔質のブリケットに溶湯の進入がほとんど起きていなかったことから、よりポーラスにするために、大きい切粉を使うこと、成形時の圧縮力を小さくすること、鑄造時に空間となる発泡剤を混ぜることを検討した。今回はブリケットへの溶湯の進入を見るために、黒鉛粉末は混入していない。鑄鉄切粉大+フェノール樹脂 10wt.%で成形したブリケット(φ70×20mm)を図4(a)に、鑄鉄切粉大+発泡剤+フェノール樹脂 20wt.%で成形したもの(φ70×15mm)を(b)に示す。これらの成形時には図3(a)の時と異なり 12t の加圧は行わないことにしたが、十分形を保ったブリケットを成形できた。これらを用いて、図3(b)と同様に鑄ぐるみ実験を行った結果を図5に示す。図4の(a)(b)のブリケットを用いて鑄ぐるみ断面を、それぞれ図5の(a)(b)に示す。図5(a)の切粉大のみを用いた場合は、大部分の切粉がそのまま残っており、容易に剥がれ落ちてしまった。切粉間の隙間が大きくても溶湯があまり進入していかない結果となってしまった。一方、図5(b)では鑄物と切粉の明確な界面は見られず、これらが大部分で一体化していた。これは、図4(b)のブリケットには発泡剤が体積割合で約40%混入してあり、これが溶解・気化して大きな空隙ができたことで溶湯が進入しやすくなったと考えられる。これらの溶湯と切粉との反応を見るために、断面の組織観察を行った。切粉と溶湯の境界部分について、図5(a)(b)のマクロ組織をそれぞれ図6(a)(b)に示す。ブリケットにあまり溶湯が進入しなかった図5(a)の鑄物でも、外側の溶湯と接した部分は不連続な組織ではなく、連続的に変化した傾斜組織となって

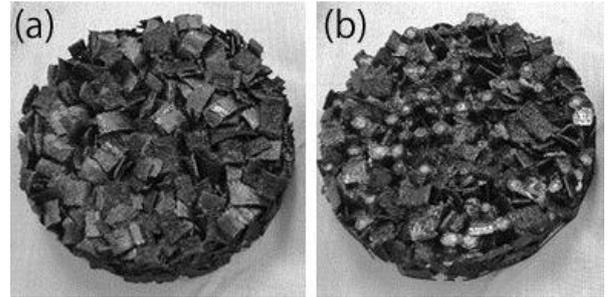


図4 作製したブリケット、
(a) 鑄鉄切粉大のみ、(b)鑄鉄切粉大+発泡剤

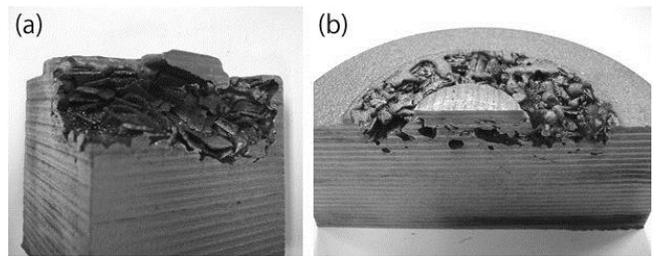


図5 図4のブリケットを用いて鑄ぐるみ断面、
(a)図4(a)のブリケット、(b)図4(b)のブリケット

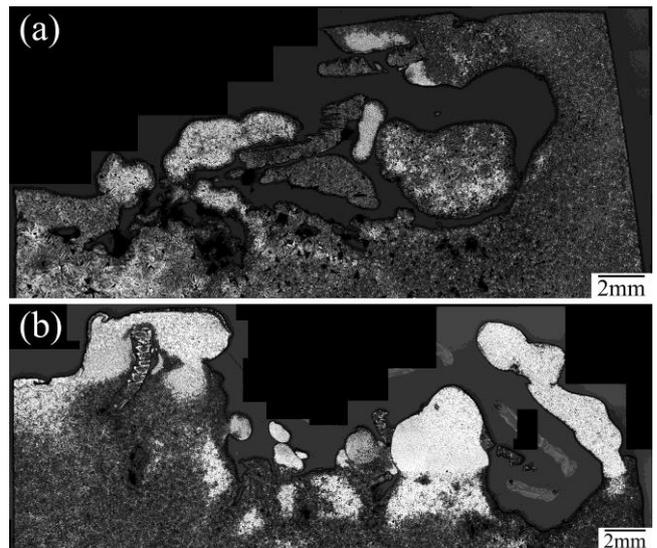


図6 切粉と溶湯境界部のマクロ組織、
(a)図5(a)の鑄物、(b) 図5(b)の鑄物

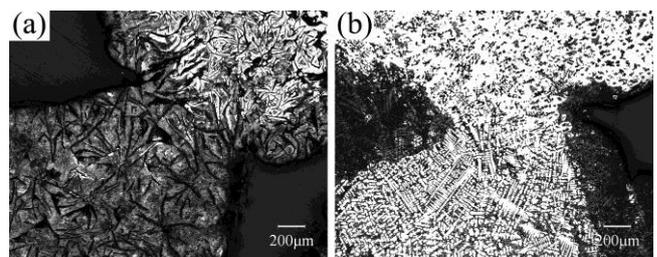


図7 切粉と溶湯境界部のミクロ組織、
(a)図5(a)の鑄物、(b) 図5(b)の鑄物

いた。外周部が一部再溶解・再凝固したためと考えられ

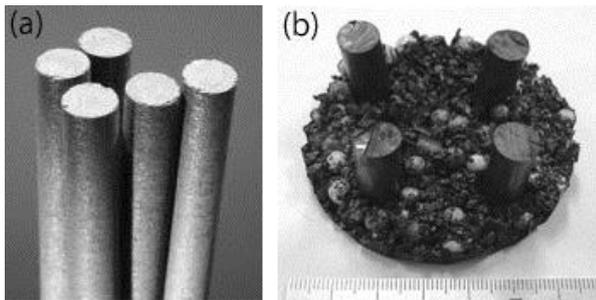


図8 (a)黒鉛棒とそれを用いた(b)ブリケット(黒鉛棒+ 鑄鉄切粉大+黒鉛粉末+発泡剤)

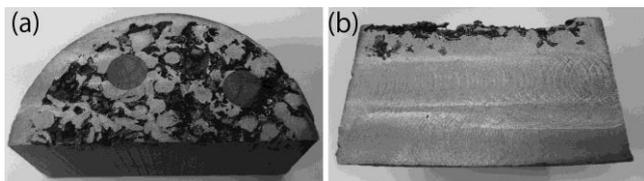


図9 図8(b)のブリケットを鑄ぐるんだ鑄物研削面、 (a)表面、(b)断面

る。また、特に図6(b)の組織で、切粉の部分の素地組織に白い部分が多くなっていた。この白い組織の硬さをマイクロビッカーズで調べたところ、約180HVとなっており、FC250の素地であるパーライト組織の約280~300HVより軟らかくなっていた。そこで、この組織はフェライトであると考えられる。鑄造時の溶湯の熱により、脱炭した可能性がある。図6(a)(b)の断面を拡大したマイクロ組織を図7(a)(b)に示す。図7(a)では、素地組織がパーライトからフェライトへ変化しているものの、片状黒鉛は繋がっているように見られる。一方、図7(b)では、切粉側からフェライトのデンドライトが下側に向かって成長しているのが見られた。従って、ここまでは溶湯がきていた、あるいは切粉が再溶解することで液相が生じ、デンドライト成長したと考えられる。

これまでは図1(b)の焼結型の代替品を作ることを目指して原料に粉末を用いた実験を行ったが、図1(a)の埋込型のような大きな黒鉛が金属基盤中に点在するような無給油潤滑材の作製も試みた。図8(a)に示したようなφ

10mmの黒鉛棒を25mm程度に切断し、鑄鉄切粉大、黒鉛粉末、発泡剤を混合した厚さ5~10mm程度のブリケットで根元を固定したようなもの(図8(b))を作製した。これを用いて鑄ぐるみ実験を行った鑄物の断面を図9(a)(b)に示す。図9(a)は表面側を約4mm程度研削した面を示しており、丸い黒鉛棒と空隙が多数存在するポラス面になっていた。この黒鉛棒が溶湯の熱で燃えて細くなることも危惧されたが、ほとんど起きていないことが分かった。観察された空隙は、鑄鉄切粉の隙間、あるいは黒鉛粉末や発泡剤が存在していたところであると考えられる。これだけ大きな空隙では摺動時に切粉が剥離してしまう可能性が高いので、もっと小さな空隙にする必要がある。そこで、使用する粉末(切粉および黒鉛)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を今後検討したい。

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。細かい切粉と黒鉛粉末を押し固めたブリケットの場合、ほとんど溶湯が進入しないことが分かった。そこで、大きい切粉と発泡剤を混合して大きな空隙を作ることで溶湯がブリケットに進入しやすくなり、一体化させることができた。これにφ10mmの黒鉛棒を組み合わせることで、φ10mmの黒鉛が存在した多孔質な表面を作ることができた。しかし、この多孔質面の空隙では大きすぎるため、もっと小さな空隙をもった多孔質面を作製できるように検討したい。

【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) 梶山ら：鑄物，第45巻，pp98-104，1973
- 2) 相馬ら：鑄物，第55巻，pp199-205，1983
- 3) 相馬ら：鑄物，第62巻，pp908-913，1990

複 合 材 料 部

マイクロカテーテル用潤滑性コーティング材の開発

コーティング前処理技術と潤滑性評価技術の開発
道家康雄、西村太志

Development of lubricating coating material for micro catheters

Development of pretreatment technique and the system to measure the frictional force for micro catheters

Yasuo Doke and Futoshi Nishimura

本研究では医療機器である「カテーテル」の高機能化を目指し、血管内でマイクロカテーテルを挿通する時の摩擦を軽減する潤滑層の耐久性向上を目的としている。本年度は、潤滑性付与材のコーティングを行う前処理として真空紫外 (VUV) 光、大気圧プラズマ、および、 ω -STAR¹⁾を検討し、コーティング後の表面摩擦試験を行った。前処理無しでコーティングをしたサンプルと連続摩擦測定結果を比較し、潤滑層の耐久性を評価したところ、 ω -STARによる前処理が潤滑層の耐久性向上に効果があることがわかった。また、カテーテル製品の使用感を数値化する装置の応用技術開発を目的とし、独自開発システムによる測定方法について検討した。

1. はじめに

現代医療において、カテーテルは心臓や血管内の病気治療に大変有用な医療器具である。手術では安全かつ迅速な作業は絶対条件であり、そのため、現場の要望を忠実に実現できる素材や製品が開発されてきた。

マイクロカテーテルでは、血管内をスムーズに挿通可能とするために潤滑性を付与する表面処理が施されている。この潤滑層は、挿通の繰り返しにより損失することがあり、耐久性が高い処理技術が要望され、その対応策が検討されている²⁾。また、表面処理により付与した潤滑性評価において、マイクロカテーテル製品形状で測定可能な技術は確立されておらず、客観的な評価システムの開発が必要となっている^{3,4)}。

本課題を解決するために、平成 21~23 年度に文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム (都市エリア型) 岐阜県南部エリア「モノづくり技術と IT を活用した高度医療機器の開発」における共同研究において「耐穿刺性・潤滑性を有するカテーテルの開発」を遂行した⁵⁾。これまで高分子重合を用いた表面処理技術を検討してきたが、カテーテル製造メーカーにおいて、現状を考慮した緊急課題として、現在使用しているコーティング材の密着性を向上させる方法の検討が必要となった。そこで本研究ではマイクロカテーテル表面における潤滑層の耐久性向上を実現するための表面処理技術開発を目的とし、ナイロン基板表面の前処理方法の検討を行ったので報告する。また、マイクロカテーテル製品の潤滑性評価システムによる測定技術を確認するため、各種測定条件を検討したので併せて報告する。

2. 実験

2. 1 コーティング前処理方法の検討

2. 1. 1 試料

マイクロカテーテル素材であるナイロンペレット ((株) グッドテック提供) を熱プレス (200℃、2MPa)

によってフィルムとした。なお、作製したフィルムは、デシケーター保存とした。

2. 1. 2 前処理方法

各フィルムは、エチルアルコールにて脱脂処理をした。前処理装置として、VUV光照射装置 ((株) エキシマ 製 E100N-172-200V型)、大気圧プラズマ ((株) イー・スクエア製 Preciseシリーズ)、 ω -STAR (メイリツコンポーネント (株) 製2011-S-001型) を用いた。VUV光照射装置は、0.1MPa 下10分間照射した。大気圧プラズマはクリーンドライエアーを標準ガスとして、試料の走査速度は17mm/secで1往復処理した。 ω -STARは、キャリアエアーを2L/minとし、試料の走査速度は765mm/secで1往復を1回として処理した。

2. 1. 3 試験片作製方法

2.1.2の前処理後、通常カテーテルに潤滑性を付与するためのコーティング処理 ((株) グッドテックにて実施) を行ったフィルムから、10mm×50mmの短冊形状を切りだし試験片とした。

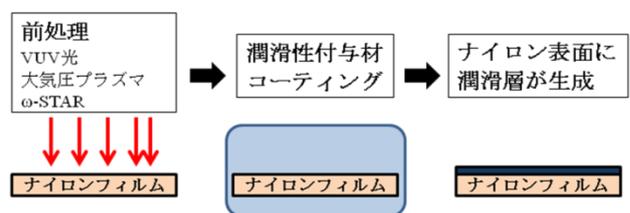


図1 試験片作製のイメージ図

2. 1. 4 潤滑層の耐久性評価

表面摩擦試験機 (新東科学 (株) 製 トライボギア TYPE38 型) を使い、試験片の表面摩擦を連続反復測定することにより潤滑層の耐久性を評価した。摩擦ジグは「金属ボール (10φ)」を用い、荷重 200gf、走査速度 6mm/秒、走査距離 30mm とし、最高 1000 往復まで測定した (図2)。また、カテーテルが液体中で利用される

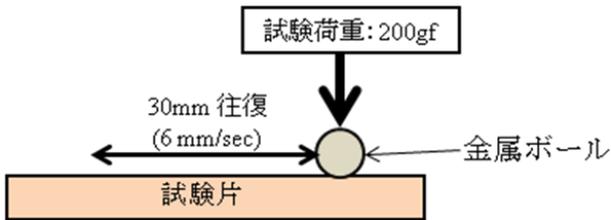


図2 潤滑層の耐久性試験イメージ図

ことを考慮して水中 (23℃) にて試験を行った。

2. 2 ω-STAR による前処理条件の検討

2. 2. 1 試料

2.1.1 同様の手順で、フィルムを作製した。

2. 2. 2 前処理方法

各フィルムは、エチルアルコールにて脱脂処理をした。ω-STAR により、試料走査速度は 765mm/sec で 1 往復を 1 回とし、処理回数は 3 回、5 回、10 回とした。また、キャリアーエアを 4L/min とし、試料の走査速度は 765mm/sec で 1 往復 (1 回) 処理した。

2. 2. 3 試験片作製方法

2.1.3 と同様、コーティング処理を行ったフィルムから、10mm×50mm の短冊形状を切りだし試験片とした。

2. 2. 4 潤滑性の耐久性評価

表面摩擦試験機を用い、試験片の表面摩擦を連続反復測定することにより潤滑性の耐久性を評価した。摩擦ジグは「金属ボール (10φ)」形状を用い、水中 (23℃) にて、荷重 200gf、走査速度 6mm/秒、走査距離 30mm とし、最高 6000 秒 (1000 往復) まで測定した。

2. 3 マイクロカテーテル製品の摩擦力評価装置

マイクロカテーテル製品の潤滑性 (摩擦力) を数値化するために独自開発したシステムにおいて、測定条件や測定方法の検討を行った。

3. 結果および考察

3. 1 コーティング前処理方法の検討

図3に各前処理によって作製した試験片の表面摩擦試験の結果を示した。摩擦抵抗が増加し、一定値を示すようになった時点で潤滑性が無くなったと考え試験を終了した。ブランクとして、前処理していない試験片では、最初、表面摩擦抵抗力が 0.1N 程度で安定していたが、230 往復を越えたあたりから増加し、0.7N を上回り定常状態となった。初期の低摩擦状態は表面の潤滑層の効果によるものであり、その後、摩擦力が増加したのは潤滑層の損失によるものである。最終的に相対的に高い摩擦力で安定したのは、潤滑層が無くなった状態であると考えられる。この摩擦力変化の状態を基準として、前処理の効果を検討した。VUV 光処理した場合、70 回程度から摩擦力が増加した。ブランクと比較し、潤滑層の損失が早かったことから、VUV 光による前処理は密着性が悪くなったと考えられる。大気圧プラズマ処理した場合、250 往復まで低摩擦力を維持し、少しではあるが潤滑層

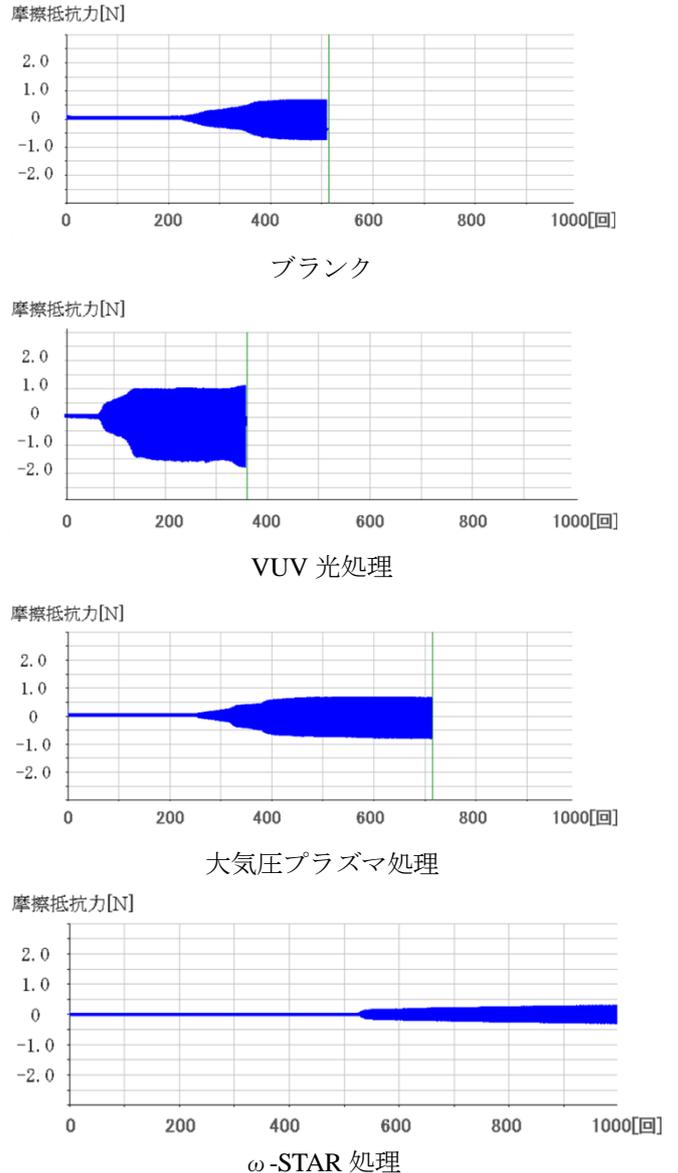


図3 前処理した試験片の表面摩擦試験結果

の耐久性を向上することができた。しかしながら、ブランクに比べて、顕著な優位性は無かった。

一方、ω-STAR により 1 回処理した試験片はブランクとの優位性は無かったが、2 回処理した試験片は、500 往復以上まで低摩擦力を維持した。これは、ブランクと比べ潤滑層の耐久性が向上したためであると考えられ、本素材とコーティング材との密着性を良くする表面改質技術として期待できる。

表1 24 時間水中放置後の表面摩擦試験結果 (表面摩擦抵抗が増加し始めた摩擦回数)

前処理方法	ブランク	VUV 光	大気圧プラズマ	ω-STAR
摩擦抵抗が増加した回数 (回)	<200	1	<200	<300

また、本実験では水中で測定をしているため、水中の滞在時間が潤滑層の耐久性に影響する可能性がある。そこで、試験片を装置に設置し、24時間水中にて放置した後、表面摩擦測定を実施した。低摩擦抵抗値が増加し始めた回数、すなわち、潤滑層の機能が低下し始めた回数を表1に示した。水中で長時間放置することにより、潤滑層が損失し易くなった（ブランクおよび大気圧プラズマ）。特に、VUV光処理した試験片では、試験開始直後から、高い摩擦力を示した。これは、水中に放置しておくだけで、潤滑層が損失したと考えられ、かなり密着性が低下していたと考えられる。一方、ブランクおよび大気圧プラズマ処理した試験片は、試験片設置直後の結果よりも摩擦抵抗値が上昇する回数が小さくなっている。これは水中に放置することで、潤滑層が損失し易くなったためであると考えられる。水中放置後の表面摩擦試験では、測定値のバラツキが大きかったため単純な比較は難しいものの、大気圧プラズマ処理が潤滑層の耐久性向上に優位性があるとは言えない結果となった。一方、 ω -STARにおける1往復処理試験片では、水中放置後においても、ブランクより潤滑層の耐久性に優位性が確認できた。基質の材料やコーティング材の種類にもよるが、少なくとも今回の実験系において、 ω -STARによる表面改質が潤滑層の耐久性向上に有効であることが示唆された。

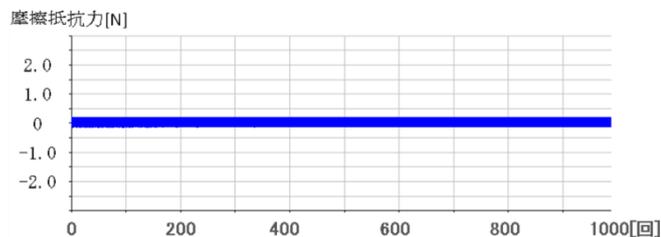


図4 前処理 (ω -STAR) 10回の試験片における表面摩擦試験結果

3.2 ω -STARによる前処理条件の検討

前処理により潤滑層の耐久性を更に向上させるためには、処理時間（処理回数）の増加が有効であると考えられた。処理回数が多いほど効果が高いと考えられたが、 ω -STARで長時間処理するとフィルムが熱変形することを考慮して、10回の処理とした。図4に前処理10回の試験片の表面摩擦試験結果を示した。ブランクでは230往復程度までであった低摩擦抵抗を1000往復まで維持した。これは、本測定中、基板表面における潤滑層を維持したことを示しており、ブランクより潤滑層の耐久性が向上したと言える。また、前処理10回の試験片では、更に500回の表面摩擦試験においても低摩擦力を維持した。更に、24時間水中放置した後の表面摩擦試験においても、図4と同様、1000往復まで低摩擦抵抗を維持した。これらの結果から、 ω -STARによる10回の前処理によ

り、ブランクと比べかなり潤滑層の耐久性が向上したと考えられる。

ω -STARによる10回の前処理では十分な効果があることがわかったが、本処理では熱が加わるため、試験片への損傷を少なくするためには処理回数が少ない方が良い。前処理回数を2回、3回、5回とした試験片により、表面摩擦抵抗を測定した結果を図5に示した。1回、2回処理では530往復程度までしか維持できなかった低摩擦抵抗が、3回、5回では1000往復まで維持した。また、キャリアーエア流量を2倍（4L/min）として前処理を2回した試験片の表面摩擦測定結果を図6に示した。本結果においても、1000往復まで低摩擦抵抗値を維持しており、潤滑層の耐久性が向上したことがわかった。処理回数が一定であっても、キャリアーガスの流量を増やすことで処理能力を高くする効果があったと考えられる。

形状やコーティング方法が違ってくるため、マイクロカテーテル製品に今回の結果がそのまま利用できるとは限らないが、潤滑性付与材のコーティングを行う前に ω -STARにより処理することで、潤滑層の耐久性向上が期待できることがわかった。実際の製品では、フィルム試験片における効果をもとに、製品形状やコーティング条件を検討していく必要がある。

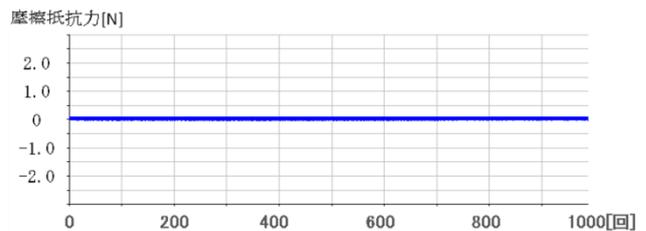
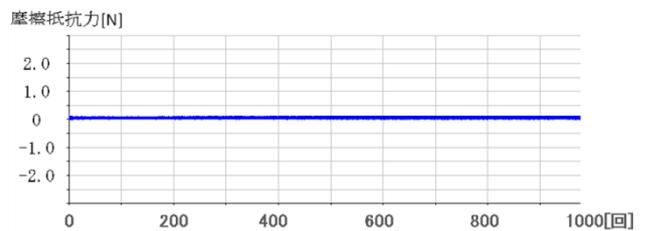


図5 ω -STARによる処理回数（上図：3回、下図：5回）の違いによる表面摩擦試験結果

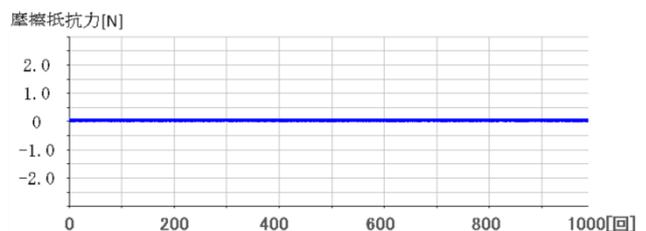


図6 ω -STAR処理におけるキャリアーエアを4L/minとした試験片の表面摩擦試験結果



図7 摩擦評価装置

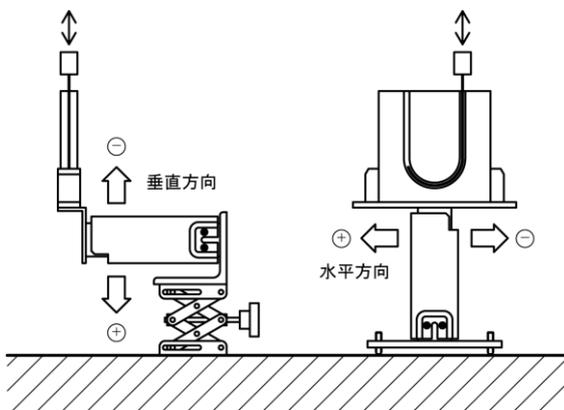


図8 センサの設置方法

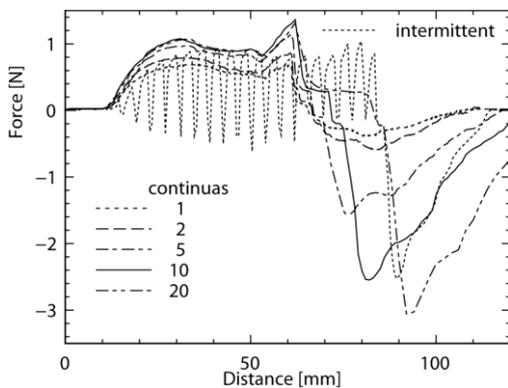


図9 速度を変えたときの摩擦

擬血管部は血管形状の溝を掘った 100×100×20mm のアクリル板と内径 3mm のチューブでできている。塩ビ、またはシリコン製のチューブはアクリル板に掘られた溝にはめられる。チューブ中は蒸留水が満たされている。摩擦抵抗検出部に使用されているセンサは、容量 0～600g のロードセルである。このロードセル上に模擬血管部をのせる。図 8 のようにセンサを設置すると、模擬血管に作用する力を垂直（左側）と水平（右側）方向に分離して測定できる。トラバース部によりカテーテルを模擬血管部に出し入れしたときに生じる摩擦抵抗力をこのセンサで検出する。また、検出した摩擦抵抗力は PC に記録される。本試験機では医師が行う操作方法と同じようにカテーテルを挿入することができる。

模擬血管にステンレスワイヤを抜き差ししたときの摩擦抵抗力の変化を図 9 に示す。横軸はカテーテルの移動距離、縦軸は摩擦抵抗力である。本試験機では模擬血管が下向きに押された時に正の力が作用するとしている。挿入するときの速度を変えたときの結果と、間欠的に挿入するときの結果を示している。どの場合も距離 0～10mm までは力はほぼゼロである。10～70mm では、カテーテルは血管の曲線部に到達する。このとき、血管内壁にワイヤがこすれ、模擬血管には正の力が加えられる。70～120mm ではワイヤが血管から抜かれている。このときは負の力が模擬血管に加えられる。速度が増すにつれ、距離 60mm に現れるピークは大きくなる。

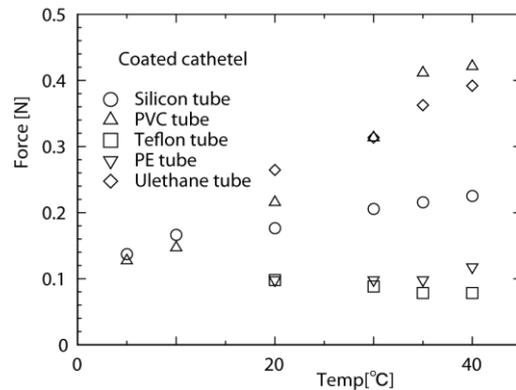


図10 温度を変えたときの摩擦

3.3 マイクロカテーテル製品の摩擦力評価装置

3.3.1 評価装置概要

図 7 に自作したカテーテル用摩擦試験機の外観図を示す。左側は測定部であり、右側は制御部である。測定部はさらに三つの部分に分かれている。測定部上側からトラバース部、模擬血管部、摩擦抵抗検出部である。トラバース部はカテーテルを上下に移動することができる。移動速度は 1～20mm/s で変えることができ、ストロークは 200mm である。カテーテルの固定部品はモーターに接続されており、カテーテルの軸周りに回転できる。模

擬血管材質の影響を調べるため、図 10 にカテーテルを模擬血管に差し込んだときのピーク値（図 9 で距離 60mm 近傍）の温度依存性を示す。横軸は温度、縦軸はピーク値である。装置の測定部（トラバース部、模擬血管部、摩擦抵抗検出部）を恒温恒湿機の中に入れ、測定部雰囲気温度を制御する。シリコン、塩ビ、ウレタン製の模擬血管では温度が高くなるとピーク値も高くなる。テフロンやポリエチレン製模擬血管では温度依存性はみられない。温度一定であれば、材質によりピーク値が異なる。これを利用し、模擬したい血管の状態（健康な場合、動脈硬化の場合など）を模擬できると考える。

模擬血管直径の影響を調べるため、図 11 に模擬血管の太さを変えたときの抵抗力を示す。温度は 35 度の雰囲気の中、シリコンチューブの内径を 2,2.5,3mm としている。カテーテルが挿入されるときは、血管内径に依存していない。抜けるとき、内径が小さいほど抵抗を大きく受ける。

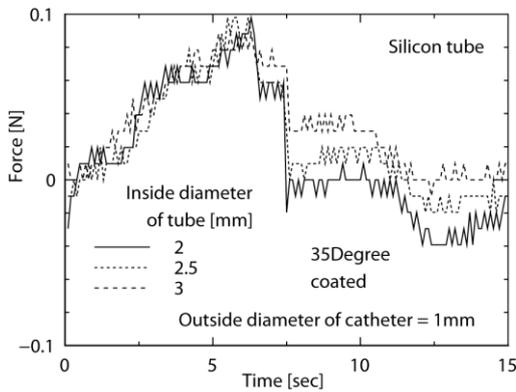


図 1 1 内径の影響

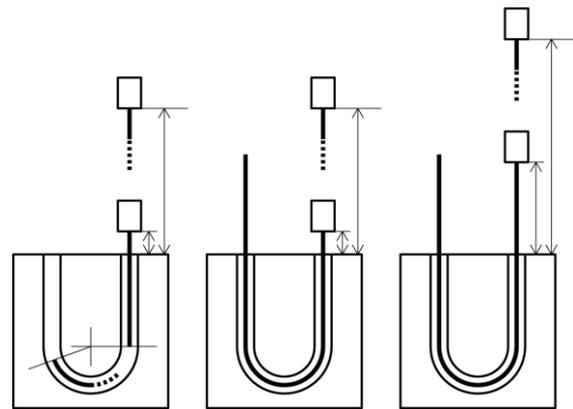


図 1 2 カテーテルの長さの影響

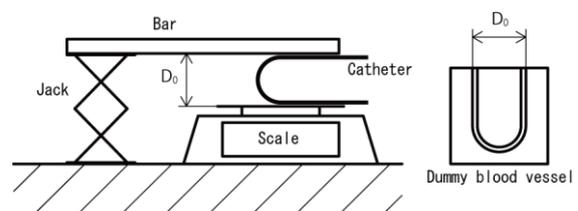


図 1 3 速度を変えたときの摩擦

3. 3. 2 摩擦係数測定

カテーテルを設計するとき、製造したカテーテルの品質管理を行うとき、摩擦係数を測定し、検査することが重要である。しかしこれまでは官能検査が主体であり、客観的な検査は行われていなかった。そこで本研究ではマイクロカテーテル用の摩擦係数測定法を提案する。

図 12 にカテーテルの長さと同様血管の位置関係を示す。それぞれの図で黒い実線はカテーテルを、白抜きの四角はカテーテルのチャッキング部を表している、左はカテーテルが短く、模擬血管の奥まで押し込んだときでもカテーテル先端が模擬血管内にとどまる。中央はカテーテルが十分長く、先端が模擬血管から突き出している様子を示している。右はカテーテルが十分長く、押し込んだときでもチャッキング部が模擬血管から十分離れている様子を示している。左の状態では先端の影響が、中央では見かけの剛性の影響が摩擦力に現れる。摩擦係数を測定するとき、これらの影響がないように、右側の状態でカテーテルを模擬血管に挿入する。

摩擦係数を測定するとき、U字型に曲がったカテーテルが広がろうとして模擬血管を押す。このとき摩擦が発生し、模擬血管に力が作用する。そこで図 13 のようにはかりとジャッキに固定した棒により広がる力を測定する。はかりの上面と棒の間隔は模擬血管と同じにする。

図 12 の右側の状態でカテーテルを出し入れしたときの摩擦力を図 14 に示す。実線は垂直力、波線は水平力である。ここで測定された摩擦力を図 13 で測定した力で割り、求めた摩擦係数を表 2 に示す。静摩擦はポリエチレン製模擬血管が最も小さいことがわかる。

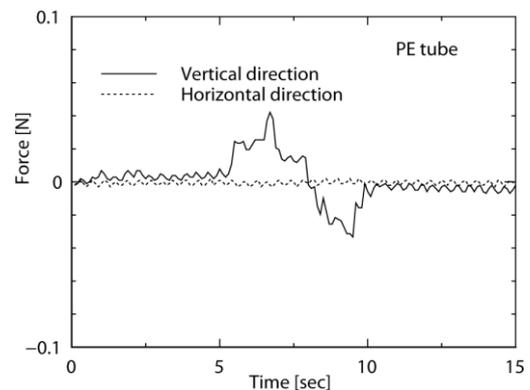


図 1 4 速度を変えたときの摩擦

表 2 摩擦係数

	静摩擦	動摩擦
シリコンゴム	0.121	0.81
塩ビ	0.172	0.49
ポリエチレン	0.077	0.73
テフロン	0.091	0.68

4. まとめ

マイクロカテーテルにおけるコーティング前処理技術および潤滑性評価技術を検討し、次の結果を得た。

・前処理方法として、VUV 光、大気圧プラズマ、および、 ω -STAR を検討した結果、コーティングした潤滑層の耐久性は VUV 光 < ブランク < 大気圧プラズマ < ω -STAR の順であった。

・今回の実験系における ω -STARによる前処理では、処理回数を増やす、また、処理におけるキャリアーエアの供給量を増加することにより、潤滑層の耐久性を向上させる効果があった。

・開発したマイクロカテーテル用摩擦試験機では、挿通速度、温度、模擬血管の形状等の条件を変えることで、測定される摩擦力が変化することがわかった。

・模擬血管の材質により測定される摩擦係数が違うことがわかった。材質を変えることで、実際の血管の状況に合わせた模擬血管を想定することが可能となる。

なお、本報告における前処理の効果については、今回検討した材料系における結果である。基板となる材料やコーティング材の種類によって処理の効果が違うと考えられるため、実用に際しては、個別の条件に適した前処理方法を検討していく必要がある。

【謝 辞】

本研究遂行にあたり、客員研究員としてご指導・ご助言をいただきました京都大学化学研究所の辻井敬亘教授に深く感謝いたします。

本研究遂行にあたり、素材や関連情報をご提供いただいた(株)グッドテック様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 許根泰, ω -STAR とは何か, 慶星大 学校出版部
- 2) 大西誠人ら, 公開特許公報, 特開平 5-309131
- 3) 葛谷昌之, 薬学雑誌, 126(7), pp.439 - 454
- 4) 新東科学(株), ホームページ
- 5) 道家ら, 文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム(都市エリア型) 岐阜県南部エリア事業報告書 pp23-25, 2012

CFRP の機械加工技術に関する研究

— ジャイロ式穴あけ法による穴あけ加工技術の開発 —
 柘植英明、小川大介、佐藤丈士

Research on the machining technique of CFRP
- Development of the drilling technique with gyro-driving grinding wheel system -
Hideaki TSUGE Daisuke OGAWA and Joji SATO

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の穴あけ加工において、2 軸回転砥石による新規穴あけ加工法 (以降、ジャイロ式砥石穴あけ加工法) を提案し、その加工原理について説明する。また、その基礎的な加工特性を把握するためにジャイロ式砥石穴あけ装置を製作し、CFRP の穴あけ加工実験を行った。その結果、ジャイロ式砥石穴あけ加工法における CFRP の穴あけ加工では、ケバや剥離がほとんどない良好の加工が行えることを確認した。また、C/CG 砥石およびダイヤモンド電着砥石の耐久性について知見を得ることができた。

1. はじめに

現在、航空機や自動車産業を中心とした輸送機産業において、燃費向上等による CO₂ の排出量削減が喫緊の課題となっている。この課題に対する解決策として、機体や車体の軽量化が必要不可欠であり、軽量でかつ高強度の材料である炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) の利用が進んでいる¹⁾。

当研究所においては平成 20 年度より、図 1 に示すジャイロ式砥石穴あけ加工法を提案し、ジャイロ式砥石穴あけ加工技術の研究を行ってきた。図 1 に示すように、ジャイロ式砥石穴あけ加工法とは、砥石回転軸とシャフト回転軸の 2 軸によって回転運動を行う工具を被加工物である CFRP に貫通させることによって穴あけを行う加工法のことである。なお、円盤砥石の回転を砥石回転、シャフト軸まわりの回転をジャイロ回転と定義する。本加工法では、切りくずが排出され易いことと、研削する砥石面が常に入れ替わるために、工具の研削による加工熱が抑えられることが特徴となる²⁾³⁾。また、用いる砥石によっては、穴あけ加工コストを抑えることが可能となる。

2. ジャイロ式砥石穴あけ装置の開発

本加工原理の有効性を確認するために、平成 20 年度には図 2 に示す小型実験装置を製作した。この小型実験機は、卓上旋盤 (コスモキカイ (株)、L-4000 型) の往復台の上に、自動送り機能を有する円盤砥石が固定され、主軸台には CFRP が固定できるようになっている。また、粉塵の飛散を防ぐために、主軸台をアクリル板によって覆い、集塵機にて切りくずの集塵を行っている。本実験機では、被加工材料である CFRP 自身を回転させることにより、CFRP の回転軸 (ジャイロ回転軸) と円盤工具である砥石の回転軸 (砥石回転軸) が直交するジャイロ式砥石穴あけ加工法を実現している。小型実験機においては、ジャイロ回転数 100~2000rpm、砥石回転数 100~5000 rpm、送り速度 1~50mm/min の範囲内で任意に加工条件を設定することができる。加工穴径サイズは、φ30mm である。この小型実験機により CFRP の穴あけ加工を行ったところ、剥離やバリがほとんど生じない良好な穴あけ加工ができることが確認できた。そこで、平成 21 年度には、図 3 に示すジャイロ式砥石穴あけ装置-1 号機を開発した。

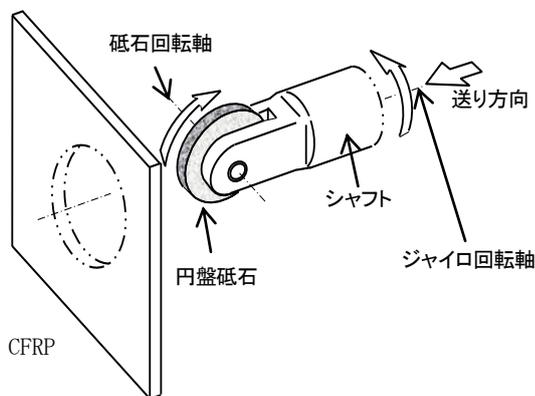


図 1 ジャイロ式砥石穴あけ加工法の原理

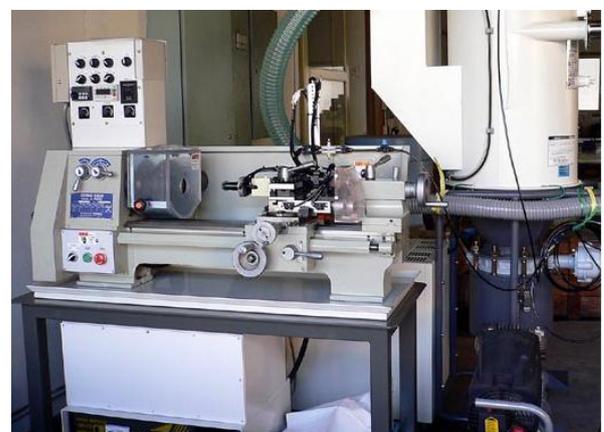


図 2 小型実験装置の外観写真

このジャイロ式砥石穴あけ装置-1号機は、ジャイロ加工を実現するジャイロ加工ヘッドが上下に駆動する主軸コラムに取り付けられており、このヘッドが下降することによって穴あけ加工を行う。ジャイロ加工ヘッド部の全長は約410mm、重量は約15kgであり、ヘッド上部にあるモーターからの駆動力を複数の歯車を用いてジャイロ回転と砥石回転に振り分けている。この歯車を交換することによって砥石回転とジャイロ回転の回転比率を約2:1から6:1に変えることができる。砥石の最大回転数は7500rpm、ジャイロ最大回転数は約3750rpm、加工穴径はφ20mmである。また、内部から圧縮空気を噴出させることで、ヘッド内部への粉塵の侵入を防いでいる。なお、送り速度となる主軸コラムの下降速度は、1~50mm/minの範囲内で任意に設定可能である。被加工材であるCFRPの周りをアクリル板によって覆い、発生する粉塵を集塵機によって集塵している。この1号機の開発によって、ジャイロ式砥石穴あけ加工が可能な加工装置の実現が達成できた。平成22年度には、加工穴径の小径化を目指して、ジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機を試作した。試作したジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機のジャイロ加工ヘッド部を図4に示す。このヘッド部の全長は約440mm、重量は約11kg、加工穴径はφ10mmである。1号機と比べて重量が約4kg軽量化できたのは、駆動モーターを小型高出力タイプに変更したこと、砥石回転とジャイロ回転の回転比を固定すること、更には本体の材質の変更による軽量化を行ったことによるものである。更なる加工穴径の小径化を検討したが、歯車やベアリングおよび工具軸本体の強度が加工力に耐え得るように設計することが困難だったため断念した。



図3 ジャイロ式砥石穴あけ装置-1号機

平成23年度には今までの試作装置によるノウハウを踏まえ、実用化を検討するためのプロトタイプとして、ハンディータイプ型のジャイロ式砥石穴あけ装置-3号機を開発した。図5に可搬部の外観写真を示す。この3号機は、駆動モーターをジャイロ加工ヘッドから外してフレキシブルシャフトにより駆動力を伝えることで軽量化を図ったため、可搬部の内部に送り機構および送り用モーターを組み込んでいるにも関わらず、可搬部の重量は約15kgとなっている。なお、加工時は専用の治具に可搬ヘッドをロックして加工を行う。

3. 実験

ジャイロ式砥石穴あけ加工法の加工特性および砥石の耐久性の評価を行うために、C/GC 砥石およびダイヤモンド電着砥石を用いてCFRPに穴あけ加工実験を行った。

3.1 実験装置

穴あけ加工実験には、ジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機を使用した。よって、加工穴径はφ20mmとなる。

3.2 被削材 (CFRP) の主な仕様

被削材であるCFRP (天龍コンポジット(株)製) は、引張弾性率 230GPa の PAN 系の炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させた 厚さ 0.25mm の一方向性炭素繊維ブ



図4 ジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機のジャイロ加工ヘッド部



図5 ジャイロ式砥石穴あけ装置-3号機の可搬部

リプレグ (UD プリプレグ) を 0/90° 方向に積層し、オートクレーブにて加熱硬化させている。試験片の寸法は、100×100mm である。但し、C/GC 砥石の加工実験には板厚 3mm、ダイヤモンド電着砥石の加工実験には板厚 5mm の試料を用いた。図 6 に、C/GC 砥石による加工実験の様子を示す。

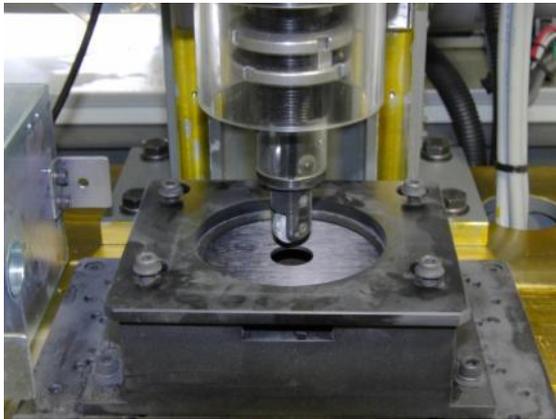


図 6 C/GC 砥石による加工実験

3. 3 加工用砥石

3. 3. 1 C/GC 砥石

研削砥石の性能を決める主要要素としては、砥粒の種類、粒度、結合剤 (ボンド剤)、組織 (砥粒率) および結合度 (砥石強度) の5つの要素がある⁴⁵⁾。本実験に用いた砥粒は、黒色炭化ケイ素質研磨材 (カーボランダム : C) と緑色炭化ケイ素質研磨材 (グリーンカーボランダム : GC) を複合化した C/GC砥粒を用いた。C/GC砥粒の粒度は#100であり、結合剤は砥粒の保持力と適度な自生作用をもつビトリファイド(V)とした。組織は目詰まり防止を目的として砥粒率が低くなるような粗な組織とし、結合度は中間結合度(K)とした。砥石の直径は20mm、厚さは3mmであり、砥石の中心には12.7mmの穴があいている。この中央の穴に、金属製のV溝プーリが一体となったホイールを差し込み、エポキシ系接着剤によって砥石と接着している。C/GC砥石の加工面を図7(1)に示す。

3. 3. 2 ダイヤモンド電着砥石

用いた電着砥石中央部の直径は20mm、厚さは3mm、砥石加工面は半径9mmの円弧状となっている。砥石の中心には12.7mmの穴があいており、C/GC砥石と同様のホイールを差し込んで、エポキシ系接着剤を用いて接着を行っている。図7(2)に、ダイヤモンド電着砥石の加工面を示す。ダイヤモンド砥粒の粒度は#80であり、250μm程度のダイヤモンド粒子が砥石加工面に接着されていることが確認できる。

3. 4 加工条件

C/GC 砥石を用いた穴あけ加工条件は、砥石回転数を 6000rpm、ジャイロ回転数を 1000rpm、送り速度を 5mm/min とし、ダイヤモンド電着砥石を用いた穴あけ加工では、砥石回転数を 7800rpm、ジャイロ回転数を 2800rpm、送り速度を

10mm/min とした。予備実験から、C/GC 砥石にてダイヤモンド砥石と同一の加工条件で穴あけを行うと、加工負荷が大きいため C/GC 砥石の破損が生じたため、加工負荷が小さくなる加工条件とした。

4. 結果及び考察

C/GC 砥石では、17 穴目の途中で砥石の破損が生じた。ジャイロ式砥石穴あけ加工法では、通常の研削と異なり砥石に横方向からの力が加わることになる。本実験において使用している砥石の厚みは 3mm と薄いために、横方向の加工負荷に耐えることができなかったものと考えられる。一方、ダイヤモンド電着砥石では、40 穴まで穴あけ加工を行ったが砥石の寿命は迎えておらず、これ以降も穴あけは可能な状態である。図 8 に、加工距離と加工穴径の変化を示す。図から C/GC 砥石では、10mm 加工あたり約 22.4μm 穴径が減少しているのに対して、ダイヤモンド電着砥石では約 3.8μm 穴径が減少している。C/GC 砥石のように砥石加工面が平型形状の場合は、砥石エッジによる加工が主体となるために、砥石エッジの摩耗が急速に進む。穴径は対角エッジの距離となることから、穴径は急速に小さくなる。しかし、加工面形状が円弧形状の C/GC 砥石を用いて穴加工を行うと、砥石の目詰まりにより 1 穴しか加工することができず、C/GC 砥石の砥石形状と加工穴径の減少についての検討を行うことは困難であった。



(1) C/GC 砥石

(2) ダイヤモンド電着砥石

図 7 砥石加工面の様子

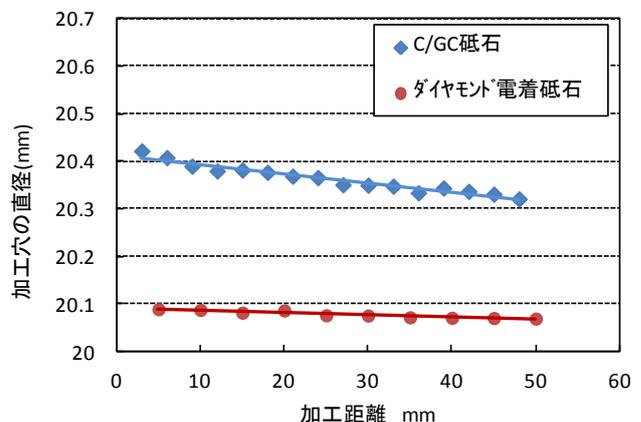
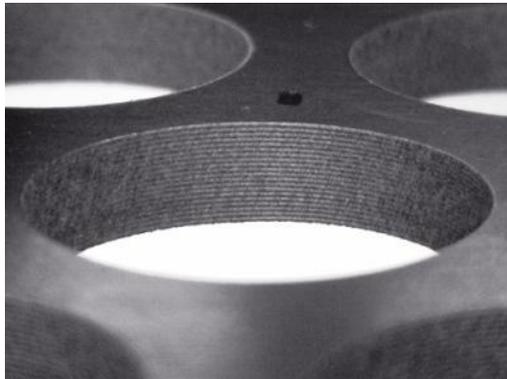
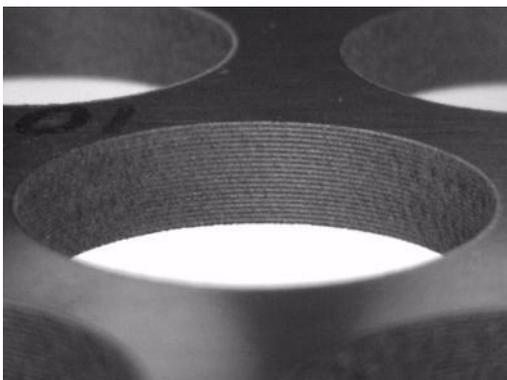


図 8 加工距離と加工穴径の変化

図9(1)にダイヤモンド電着砥石による5mm加工後(1穴加工後)の加工面、図9(2)に50mm加工後(10穴加工後)の加工面の様子を示す。加工距離が増加すると、僅かに入り口側の盛り上がりが大きくなっているが、層間剥離は見られなかった。また、バリも小さなバリが僅かに見られる程度であった。同様に、C/GC砥石について



(1) 1穴加工後(加工距離: 5mm)



(2) 10穴加工後(加工距離: 50mm)

図9 CFRP穴あけ加工面の様子

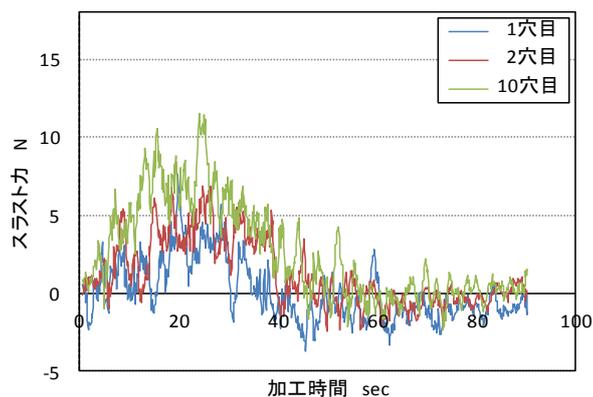


図10 CFRP穴あけ加工面の様子

も大きなバリや層間剥離は見られなかった。しかし、ダイヤモンド電着砥石における加工力(スラスト力)については、図10に示すように加工毎に徐々に増加している。これは、電着砥石におけるダイヤモンド砥粒の摩耗と砥石の目詰まりが原因だと推察される。

5. まとめ

CFRPの穴あけ加工において、2軸回転砥石による新規穴あけ加工法(ジャイロ式砥石穴あけ加工法)を提案し、その基礎的な加工特性を把握するためにジャイロ式砥石穴あけ装置を製作し、CFRPの穴あけ加工実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) ジャイロ式砥石穴あけ加工法を用いたCFRPの穴あけ加工法では、バリや層間剥離が生じない良好な加工面となることが確認できた。
- 2) C/GC砥石による耐久試験では、加工距離が48mmで砥石の破損が生じた。一方、ダイヤモンド電着砥石は40穴まで穴あけを行ったが、穴あけの限界には至っておらず、40穴以降も十分に穴あけ可能である。
- 3) C/GC砥石では、10mm加工あたり約22.4 μ m穴径が減少しているのに対して、ダイヤモンド電着砥石では約3.8 μ m穴径が減少する。
- 4) ダイヤモンド電着砥石の加工力は、加工距離が長くなるほど増加する。これは、ダイヤモンド砥粒の摩耗と砥石の目詰まりが原因であると推察される。

【謝 辞】

本研究は、文部科学省、地域イノベーション戦略支援プログラム(グローバル型)「東海広域ナノテクものづくりクラスター」において行われた研究成果の一部である。ここに感謝の意を表します。

【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) 渡辺義見他: CFRPの新規穴あけ加工技術—傾斜機能砥石を用いたジャイロ式穴あけ加工—日本機械学会誌, Vol.115, No.1118, pp61, 2012
- 3) 柘植英明他: 2軸回転砥石を用いたCFRPの新規穴あけ加工法の提案, 砥粒加工学会誌, Vol.56, No. 9, pp 612-617, 2012
- 4) 河村末久他: 切削加工と砥粒加工, 共立出版株式会社, 1991
- 5) (社)砥粒加工学会編, 砥粒加工技術のすべて, 工業調査会, 2006

熱可塑性 CFRP の切削加工に関する研究

加賀忠士、安藤敏弘

Study on cutting of carbon fiber reinforced thermo plastics

Tadashi Kaga and Toshihiro Ando

熱可塑性 CFRP は、高靱性および短時間成形性の観点から航空機産業および自動車産業等への適応材料として注目されている。しかし、熱可塑性樹脂の特性上、切削加工時の発熱により樹脂が熔融する可能性が高く、所定の寸法及び形状の確保の難しさや樹脂の刃具への溶着による切削性能の低下が問題視されている。本研究では、穴あけ加工について、冷風冷却およびミスト冷却による影響を調査した。そして以下の結果を得た。1) 冷風冷却に比べ、ミスト冷却の冷却能力が高い、2) 冷却の有無により工具摩耗に差はみられない、3) ミスト冷却のスラスト力は若干大きくなる、4) 冷却の有無により穴品質に差はみられない。

1. はじめに

熱可塑性 CFRP は熱硬化性 CFRP に対して、高い靱性を発現できる点と、成形温度は高いものの短時間で成形できる点がメリットとして挙げられ、高靱性は航空機構造の軽量化、短時間成形は自動車産業のコスト低減に寄与する材料として注目されている。

この熱可塑性 CFRP は、既に著者が扱った熱硬化性 CFRP¹⁾と同様に、製品として完成させるためには、穴あけ加工や、トリム加工などの二次加工が必要となる。熱可塑性 CFRP は熱硬化性 CFRP と同様に、切削において工具摩耗が激しいことや、単一材料とは異なる材質のため良好な仕上面が得にくい材料である。このことに加え、熱可塑性樹脂の特性上、切削加工時の発熱により樹脂が熔融する可能性が高く、所定の寸法および形状の確保の難しさや樹脂の刃具への溶着による切削性能の低下が問題視されている。

参考に、熱硬化性 CFRP と熱可塑性 CFRP に対し、同じ条件でドリル加工した時の切りくずの様子を図 1 に示す。このように熱硬化性 CFRP の切りくずは細かく分離しているのに対し、熱可塑性 CFRP は連続型の切りくずを呈している。このことから明らかに性質の違う材料であることがわかる。

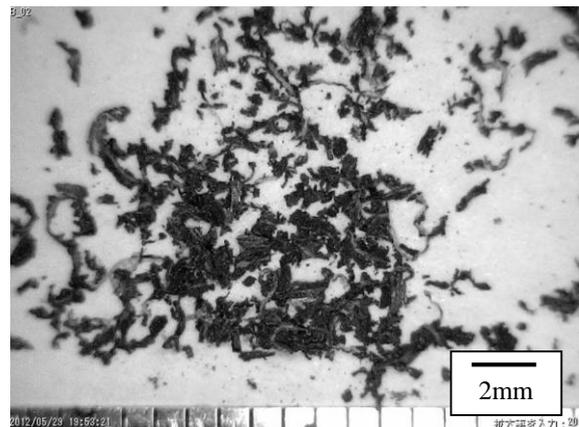
本研究では、熱可塑性 CFRP の穴あけ加工について、冷風冷却およびミスト冷却による影響を調査したので、ここに報告する。

2. 実験

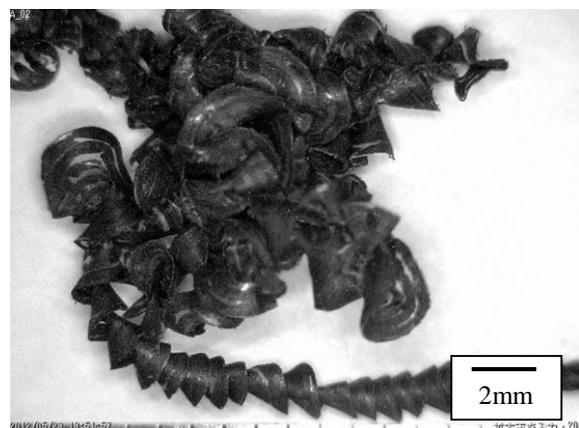
2. 1 実験装置および実験条件

実験に用いた熱可塑性 CFRP について、強化繊維はカーボンの織物、マトリックス樹脂は PA66 の厚み 2 mm の板材を使用した。これを重ねてホットプレスし厚み 4 mm の被削材を準備した。加工機械は 3 軸マシニングセンター ((株) 池貝 TV4) を使用し、テーブル上に切削動力計 (Kistler JZ90012A) を配置し、その上に治具を介して

被削材を固定し加工実験を行った。穴あけ加工に用いたドリルはφ3 コーティング無しの超硬を用いた。その様子を図 2 に示す。冷却は、冷風を吹き付ける方式と水のミストを吹き付ける方式の 2 種類を準備した。どちらの冷却方式とも、2 本のノズルを使用し、穴加工



(a) 熱硬化性 CFRP



(b) 熱可塑性 CFRP

図 1 ドリル加工における切りくずの様子

における入口側と出口側のそれぞれを冷却することを行った。また穴加工中の被削材の表面温度を赤外線カメラ（株）アピステ FSV-1100-H16）を用い測定した。実験条件を表1に示す。

2.2 評価方法

加工後の穴の様子を図3に示す。この図から、穴周辺部の盛り上がりや切り残された繊維がわかる。ここでは、盛り上がり部に着目し、穴径中心からみた最大の盛上幅を評価値とした。次に、シリンダーゲージを用いて設定穴径に対する加工後の穴径の差を評価した。最後に加工後の穴に対し、被削材を切断し断面観察ならびに表面粗

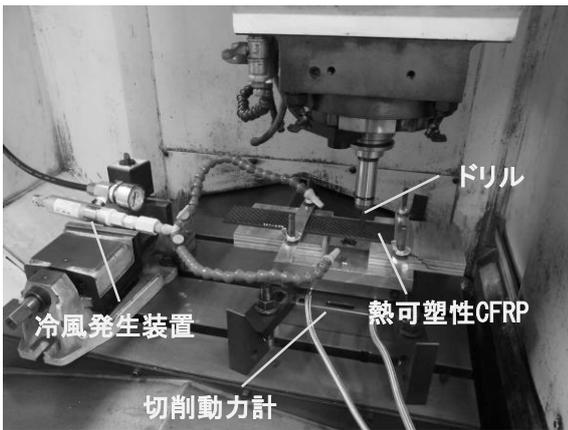


図2 実験装置の概要

表1 実験条件

被削材	熱可塑性CFRP (マトリックス PA66)		
ドリル材種	超硬 (コーティング無)		
刃径 φ mm	3		
刃数	2		
ねじれ角 deg	30		
回転数 min ⁻¹	6000		
送り mm/rev	0.05		
冷却方法	無	冷風	ミスト

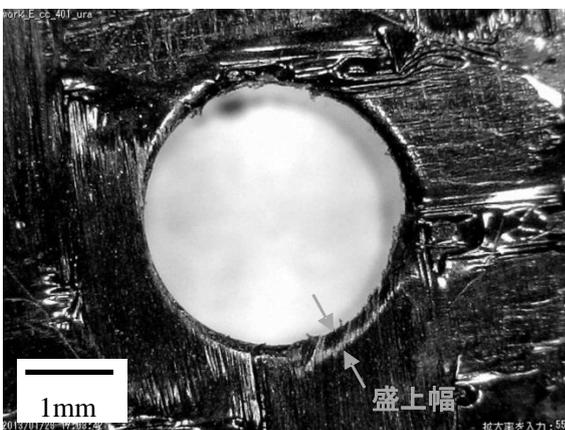


図3 穴加工後の表面の様子

さを測定した。

3. 結果及び考察

3.1 被削材温度

加工時の各穴数に対する被削材の最高温度の関係を図4に示す。3条件とも、穴数が増加するにつれて温度が増加しているが、冷却無し、冷風、ミストとその温度に差異があり、ミスト冷却の冷却能力が一番高いことがわかる。今回の実験では冷却無しでも 100 °C程度であり、すべての加工実験において、被削材の連続耐熱温度 130 °Cより低い状態で加工していることがわかった。

3.2 工具摩耗

本実験では穴加工後、ドリルの底刃の逃げ面摩耗幅を測定している。穴数と逃げ面摩耗幅の関係を図5に示す。この結果から、3条件とも穴数が増加するに従い摩耗幅も増加していることがわかる。しかし、増加の傾向に差異はみられない。このことは、工具の摩耗の主要因は硬質炭素繊維による機械的摩耗が主である²⁾ことから冷却の有無による差異がなかったと考えられる。

3.3 スラスト力

加工中のスラスト力も測定している。穴数とスラスト力の関係を図6に示す。3条件とも穴数が増加するに従いスラスト力も増加していることがわかる。この原因は上記工具摩耗の進行と考えられる。また 600 穴以上でミストのスラスト力が他の2条件に比べ若干大きくなっている。このことは、前述のワーク最高温度結果を含めて

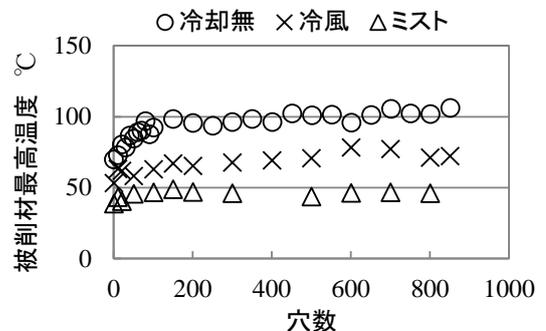


図4 穴数と被削材最高温度の関係

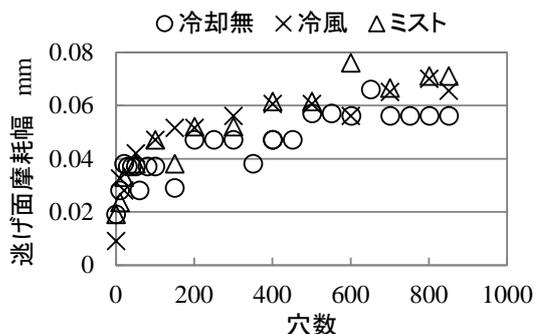


図5 穴数と逃げ面摩耗幅の関係

考察すると、ミストの冷却により、マトリクス樹脂の軟化が低く抑えられたことが原因と考えられる。

3. 4 穴品質

加工後の穴周辺部の穴径中心からみた最大盛上幅の測定結果について、穴数と最大盛上幅との関係を図7に示す。入口側、出口側とも穴数が増加するに従い盛上幅も大きくなっていることがわかる。また、冷却による差異は認められないが、わずかであるが入口側でミストの数値が大きいものがみられる。

加工後の穴径寸法について、穴数と設定穴径寸法に対する加工後の穴径の差の関係を図8に示す。穴数が増加するに従い、穴径が小さくなっていることがわかる。また、冷却による違いはみられない。

被削材を切断し断面観察を行った。顕著な差が見えた断面観察の結果を図9に示す。この断面観察では、冷却の差はみられず、むしろ各穴数における切削面の様子に違いがあり、1穴目では各種層繊維の様子ははっきりとわかるが、穴数の増加に伴い明瞭に見えなくなっている。これは、穴内面の表面が溶融することと、工具摩耗の進行に伴い刃先が鈍くなった工具で切削したためと考えられる。

穴数と穴内面の表面粗さの関係を図10に示す。穴加工開始時は穴数が増加していくと表面粗さ値は減少し、冷却無し 201穴、冷風 51穴、ミスト 101穴のとき、それぞれの最小値を示す。そして、それ以降は増加していることがわかる。このとき、冷却無しの増加部分の変化が冷風およびミストに比べ大きいことがわかる。このように冷却による差がみえるが、後述する品質基準で評価した場合、この違いが品質に影響を与えていることはない。

最後に、今回の実験結果を航空機組立における穴公差や穴周りの品質³⁾を参考に評価すれば、欠損・剥離幅 0.8 mm、穴径 0 ~ +0.076mm、表面粗さ Ra 3.2 μm の品質基準に対し、盛上幅および表面粗さは品質基準を満たしていた。しかし、穴径においては1穴目のみ品質を満たしているものの、11穴目以降は基準に到達していない結果であった。このことについては、図8の結果が示すように、穴数が増加した時の穴径寸法が一定になっていることから、ドリル径を大きくすることで品質基準を満たすことが可能である。

4. まとめ

熱可塑性CFRPの穴あけ加工について、冷風冷却およびミスト冷却による影響を調査した結果以下のことがわかった。

- 1) 冷風冷却に比べ、ミスト冷却の冷却能力が高い。
- 2) 冷却の有無により工具摩耗に差はみられない。
- 3) ミスト冷却のスラスト力は若干大きくなる。
- 4) 冷却の有無により穴品質に差はみられない。

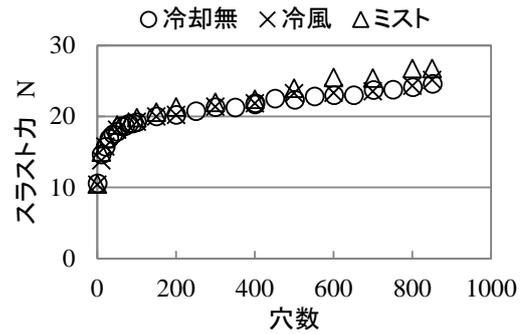
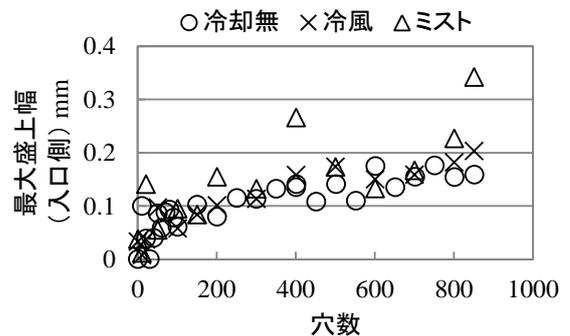
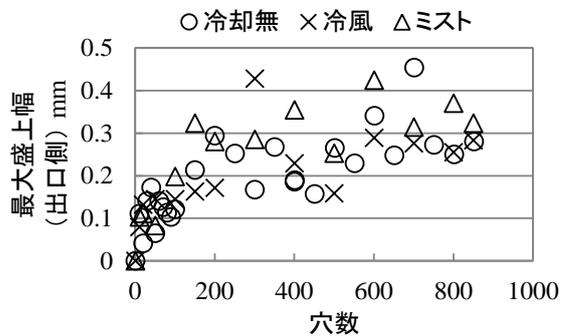


図6 穴数とスラスト力の関係



(a) 入口側



(b) 出口側

図7 穴数と最大盛上がり幅の関係

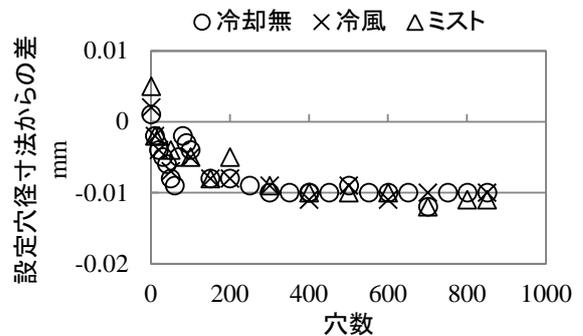
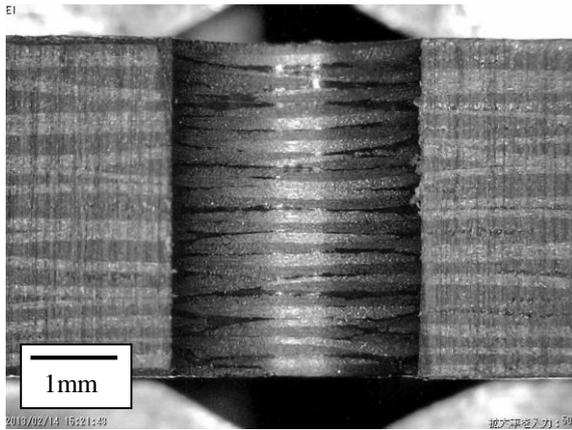
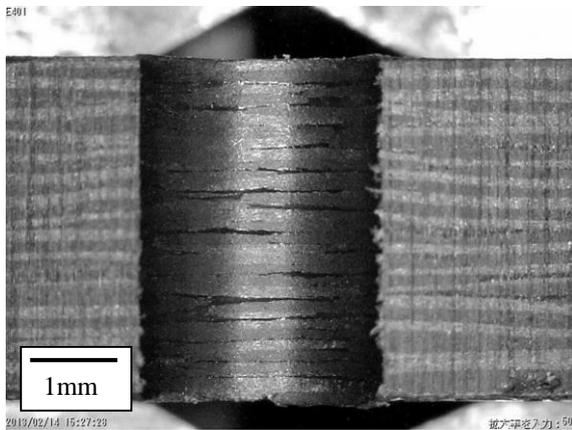


図8 穴数と設定穴径寸法からの差の関係



(a) ミスト冷却1穴目



(b) ミスト冷却401穴目
図9 穴加工後の断面観察写真

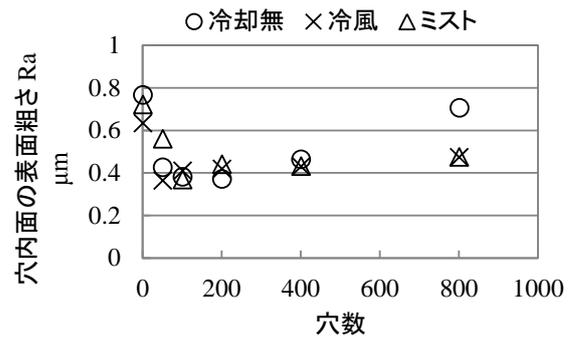


図10 穴数と穴内面の表面粗さの関係

【参考文献】

- 1) 加賀ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.2, pp13-16, 2009
- 2) 佐久間ら, 日本機械学会論文集 No.463, Vol.51, pp656-666, 1985
- 3) 深川, 日本機械学会誌 No.1128, Vol.115, pp28-32, 2012

CFRP 表面改質技術の開発

西垣康広、萱岡誠、道家康雄

Development of surface modification technique for CFRP

Yasuhiro Nishigaki, Makoto Kayaoka and Yasuo Doke

航空機部品に使用される熱硬化性CFRPは、オートクレーブ成形時に表面仕上げ等の理由から、カウルプレートと呼ばれる治工具（当て板）が使用されており、成形後にCFRP製品（成形品）から剥がすために離型性能が求められている。現状は手作業で離型剤を成形前に毎回治工具に塗布し、乾燥させている。このため、オートクレーブ成形毎に、離型剤塗布作業が不要となるようなカウルプレートの候補材料として熱可塑性CFRP及び熱可塑性樹脂板を使用した。その上に熱硬化性CFRPのプリプレグを積層し、オートクレーブ成形後、離型性試験を行い、離型性能を評価した。その結果、熱可塑性CFRP (PEEK、PA66)と熱可塑性樹脂板 (PEEK、PPS、PA66、PP)をカウルプレートとして使用した場合の離型性能は良好であることがわかった。

1. はじめに

現在、航空機や自動車をはじめ、強度に優れ、かつ軽量化製品が求められる分野では、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の使用が増加している。特に航空機用途においては、繊維配向と樹脂含有率を厳しく制御できるプリプレグのオートクレーブ成形¹⁾が主流となり、熱硬化性CFRPの使用が多くなってきている。図1に示すようにプリプレグを用いた熱硬化性CFRPの成形は、型の上にプリプレグを積層し、形状精度や表面仕上げのためにカウルプレートと呼ばれる治工具をかぶせ、オートクレーブ成形している。

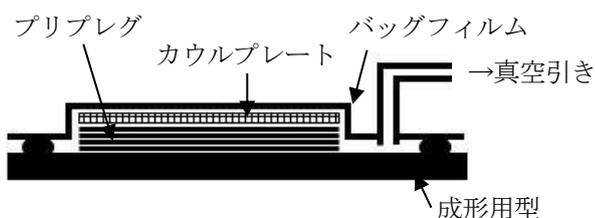


図1 オートクレーブ成形の概要

プリプレグ積層用の型やカウルプレート等の治工具は、従来金属製が多かったが、治工具重量が重いことと製品との熱膨張差が大きいことから、最近では治工具重量が軽量で製品と熱膨張差が小さいCFRP製の型やカウルプレートの使用が増加傾向にある。

また、熱硬化性CFRPの成形毎に治工具に離型剤を塗布し、乾燥させる作業を数回繰り返し行っており、更にコスト削減の面から作業時間の短縮が望まれている。また、離型剤が有機溶剤系の場合は、人体に悪影響を及ぼすことから作業環境の改善が必要となっている。

CFRPの成形、加工等に関する研究^{2,3)}はいろいろと行われているが、CFRP成形において離型性能を有する成形用治具の開発に関する研究はほとんど無く、CFRP製

成形用治具表面に離型機能を持たせる研究⁴⁾が行われているのみである。

このため、本研究では熱硬化性CFRPのオートクレーブ成形毎に離型剤塗布作業が不要となるようなカウルプレートの候補材料として、熱可塑性CFRP及び熱可塑性樹脂を使用し、その離型性能を評価した。

2. 実験

カウルプレートの候補材料とした熱可塑性CFRP (PEEK:厚さ4mmとPA66:厚さ2mm)および熱可塑性樹脂板 (厚さ2mm) を100mm×100mmにカットし、その上に、100mm×50mmにカットしたプリプレグ (熱硬化性CFRP: 東邦テナックス製クロス材) を、0°/+45°/+45°/0°となるように4層積層した。これらを真空パックした後、オートクレーブ ((株) 芦田製作所製小型オートクレーブAC-900X1000L) を使用し、室温から180℃まで昇温し、その後0.5MPaの圧力下で2時間加熱した。

使用した熱可塑性CFRPは、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) とポリアミド66 (PA66) であり、熱可塑性樹脂板はPEEK、PA66とポリフェニレンサルファイド (PPS)、ポリプロピレン (PP)、ポリカーボネート (PC)、およびポリエチレンテレフタレート (PET) である。

2.1 熱分析

2種類の熱可塑性CFRPと6種類の熱可塑性樹脂板の熱特性は、示差走査熱量計 (NETZSCH社製DSC 200F3) により、50mL/分で窒素ガスを流しながら、10℃/分の昇温速度で測定を行い、把握した。熱可塑性CFRP (PEEK) と熱可塑性樹脂板 (PEEK、PPS) は、20℃~450℃、熱可塑性CFRP (PA66) と4種類の熱可塑性樹脂板 (PA66、PP、PC、PET) は、20℃~300℃まで測定を行った。

2. 2 熱可塑性CFRPの離型性試験

2種類の熱可塑性CFRP(PEEK:TENCATE社製、PA66:BOND LAMINATES社製)をカウルプレートとして使用し、プリプレグをオートクレーブ成形後、離型性試験を1回行い、離型性能を評価した。

2. 3 熱可塑性樹脂板の離型性試験

6種類の熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS、PA66、PP、PC、PET)をカウルプレートとして使用し、プリプレグをオートクレーブ成形後、離型性試験を1回行い、離型性能を評価した。

3. 結果及び考察

オートクレーブ焼成後の代表的なカウルプレートと成形品を写真1～4に示す。カウルプレートはそれぞれ熱可塑性CFRP(PEEK)、熱可塑性樹脂板(PEEK、PP、PET)である。



写真1 熱可塑性CFRP(PEEK)と成形品



写真2 熱可塑性樹脂板(PEEK)と成形品



写真3 熱可塑性樹脂板(PP)と成形品

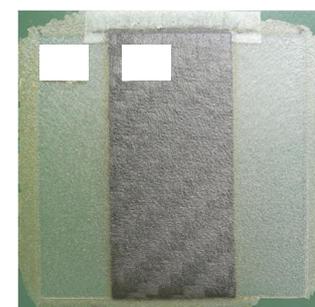


写真4 熱可塑性樹脂板(PET)と成形品

写真1～3から、オートクレーブ成形によりプリプレグは硬化し、プリプレグから染み出したエポキシ樹脂はカウルプレート上の成形品の周囲に固着していることがわかった。また、他の熱可塑性CFRP(PA66)、熱可塑性樹脂板(PPS、PA66、PP、PC)をカウルプレートとしてオートクレーブ成形した成形品も同様な状態であった。

熱可塑性樹脂板(PET)をカウルプレートとしてオートクレーブ成形した成形品は、写真4から熱可塑性樹脂(PET)に被覆されていることがわかった。

次にオートクレーブ成形後の熱可塑性CFRP(PEEK、

PA66)と熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS、PA66)製のカウルプレートのエッジは写真1、2から、熔融しておらず、変形していなかった。一方、写真3、4から熱可塑性樹脂板(PP)製カウルプレートのエッジは熔融し、変形していることがわかった。また、熱可塑性樹脂板(PC)も同様な状態であり、熱可塑性樹脂板のエッジは熔融し、変形していた。

3. 1 熱分析測定結果

2種類の熱可塑性CFRPと6種類の熱可塑性樹脂板の融点の測定結果をそれぞれ表1、2に示す。

熱可塑性CFRP(PEEK、PA66)の融点は、それぞれ、345.9℃、261.4℃であった。また、熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS、PA66、PP)の融点は、それぞれ342.8℃、279.1℃、259.3℃、169.4℃であり、熱可塑性樹脂板(PC、PET)は融点が存在しなかった。

融点の測定結果、樹脂の色等から、本研究で使用した熱可塑性樹脂(PEEK、PPS、PA66、PP)は結晶性の樹脂であり、熱可塑性樹脂(PC、PET)は非結晶性の樹脂であると考えられる。

表1 熱可塑性CFRPの融点

	PEEK	PA66
融点/℃	345.9	261.4

表2 熱可塑性樹脂板の融点

	PEEK	PPS	PA66	PP	PC	PET
融点/℃	342.8	279.1	259.3	169.4	—	—

3. 2 熱可塑性CFRPの離型性試験結果

熱可塑性CFRP(PEEK)をカウルプレートとしてオートクレーブ成形した成形品を離型した結果、容易に離型することができ、離型性能は良好であった。

また、熱可塑性CFRP(PA66)製カウルプレートにおいても熱可塑性CFRP(PEEK)と同様に離型性能は良好であった。



写真5 成形品離型後の熱可塑性CFRP(PEEK)

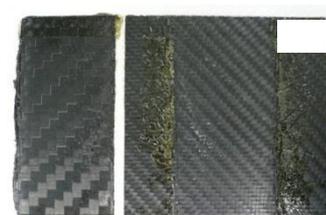


写真6 成形品離型後の熱可塑性CFRP(PA66)

熱可塑性CFRP(PEEK、PA66)をカウルプレートとしてオートクレーブ成形した成形品とカウルプレートの離型後のそれぞれの離型面を写真5、6に示す。

写真5、6からどちらの離型面も平滑であることが

わかった。

3. 3 熱可塑性樹脂板の離型性試験結果

熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS、PA66、PP、PC、PET)の離型性試験の結果と離型面の状態を表3に示す。熱可塑性樹脂板をカウルプレートとそれを使用してオートクレーブ成形した成形品の離型後のそれぞれの離型面を写真7～12に示す。

表3 離型性試験結果

	PEEK	PPS	PA66	PP	PC	PET
離型性能	◎	◎	◎	○	○	×
離型面	◎	◎	○	×	×	—

熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS)をカウルプレートとしてオートクレーブ成形した成形品を離型した結果、容易に離型でき、離型性能は良好であった。写真7、8からどちらのカウルプレートの離型面も平滑であることがわかった。

耐熱性に優れるスーパーエンジニアリングプラスチックと呼ばれる熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS)の融点は、熱分析の測定結果からそれぞれ342.8℃と279.1℃であった。これらの樹脂の融点は、オートクレーブでの焼成温度の180℃よりも高いため、どちらの熱可塑性樹脂板も変形が確認されず、離型面は平滑であったと考えられる。

次にエンジニアリングプラスチックと呼ばれる熱可塑性樹脂板(PA66)製カウルプレートとそれを使用して、オートクレーブ成形した成形品を離型した結果は、熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS)と同様、容易に離型でき、離型性能は良好であった。写真9からカウルプレートの離型面は平滑であることがわかった。

熱分析の測定結果から熱可塑性樹脂板(PA66)の融点は259.3℃であり、これはオートクレーブでの成形温度の180℃よりも高温である。このため、オートクレーブでの成形温度では熱可塑性樹脂板(PA66)は熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS)と同様、熱可塑性樹脂板は変形も確認されず、離型面は平滑であったと考えられる。

次に熱可塑性樹脂板(PP)製のカウルプレートとそれを使用してオートクレーブ成形した成形品を離型した結果、容易に離型でき、離型性能は良好であった。写真10より、カウルプレート側の離型面は、カーボンクロス材の模様が深く転写されており、離型面に大きな凹凸が観察された。これは熱分析の測定結果から熱可塑性樹脂板(PP)の融点が169.4℃であり、オートクレーブ成形を行う180℃よりも低いため、オートクレーブ成形中に熱可塑性樹脂板(PP)が軟化したことと、成形圧力が0.5MPaであることが起因して、カーボンクロス材の模様が強く転写されたと考えられる。しかし、熱可塑性樹脂板(PP)はオレフィン系の樹脂であるため、容易に他の樹

脂とは接着しない性質があるため、成形品はオートクレーブ成形時にカウルプレートに埋もれたが、離型できたと考えられる。

熱可塑性樹脂板(PC)製カウルプレートとそれを使用してオートクレーブ成形した成形品を離型した結果、離型は可能であったが、写真11より、熱可塑性樹脂板(PC)は溶融しており、成形品側の離型面一面を被覆していることがわかった。ここで、熱可塑性樹脂板(PC)は融点が存在しない樹脂であり、熱分析の測定結果からも融点は存在しなかった。熱可塑性樹脂板(PC)のガラス転移温度は153.3℃であり、オートクレーブでの成形温度の180℃では、熱可塑性樹脂板(PC)は軟化しており、成形品を被覆したと考えられる。

最後に熱可塑性樹脂板(PET)をカウルプレートとしてオートクレーブ成形した成形品は、写真12から熱可塑性樹脂(PET)で被覆されていた。熱分析の測定結果から、ガラス転移温度は77.1℃であった。これは、オートクレーブでの成形温度の180℃よりも低温であるため、オートクレーブでの成形温度では熱可塑性樹脂板(PET)は軟化し、流動化していると推察され、成形品を被覆したと考えられる。

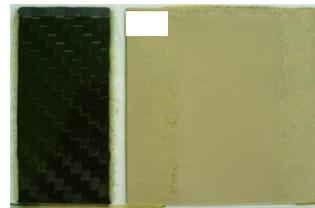


写真7 成形品離型後の熱可塑性樹脂板(PEEK)

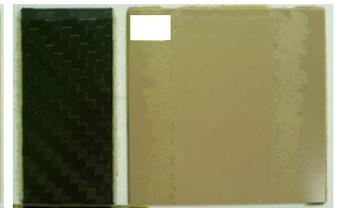


写真8 成形品離型後の熱可塑性樹脂板(PPS)

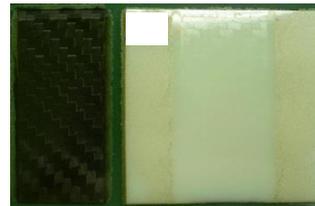


写真9 成形品離型後の熱可塑性樹脂板(PA66)

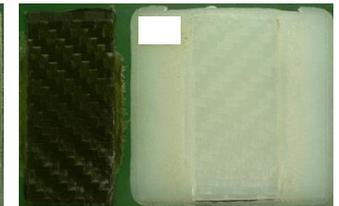


写真10 成形品離型後の熱可塑性樹脂板(PP)

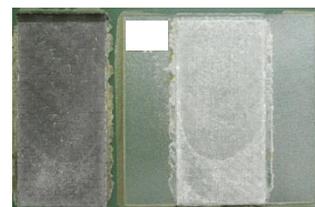


写真11 成形品離型後の熱可塑性樹脂板(PC)

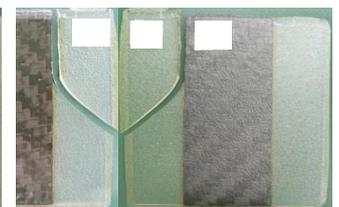


写真12 成形品離型後の熱可塑性樹脂板(PET)

4. まとめ

熱可塑性CFRPと熱可塑性樹脂板をカウルプレートとしてその上に熱硬化性CFRPのプリプレグを積層し、

オートクレーブ成形により成形した。カウルプレートと成形品の離型性試験から離型性能の評価を行った。その結果は以下のとおりであった。

(1) 熱可塑性CFRP(PEEK、PA66)の1回の離型性能は、どちらも良好であった。また、カウルプレート側の離型面はどちらも平滑であった。

(2) 熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS、PA66、PP、PC、PET)の1回の離型性試験は、熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS、PA66、PP)において良好であった。カウルプレート側の離型面は、熱可塑性樹脂板(PEEK、PPS、PA66)において平滑であったが、熱可塑性樹脂板(PP)では成形品のカーボクロスの様相が強く転写されていた。

(3) 熱可塑性樹脂板(PC)は成形品と離型はできたが、成形品表面は熱可塑性樹脂(PC)で一面被覆されていた。

(4) 熱可塑性樹脂板(PET)は成形品と離型ができず、離型作業中に割れてしまった。

【謝 辞】

本研究は、文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム(グローバル型)東海広域ナノテクものづくりクラスター創成事業の一環において研究を行ったものである。関係各位に感謝します。

【参考文献】

- 1) 浅田, CFRP/CFRTP の加工技術と性能評価, p37, 2012
- 2) 石川ら, 複合材料学会誌, 13(2), pp63-71, 1987
- 3) 佐久間ら, 日本機械学会論文集(C編), 49(446), pp1799-1807, 1983
- 4) 深川ら, プラスチック成型加工学会予稿集, pp128, 2012

平成25年5月 発行

岐阜県工業技術研究所研究報告
2013 No.1

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.jp/