岐阜県工業技術研究所研究報告 第6号 平成29年度

岐阜県工業技術研究所

目 次

機 械 ・ 金 属 関 連

レーザーによる顔料を使用しない金属製品への着色技術および、ぎふブランド製品の開発(第3 西村 太志、松原 早苗、堀部 嘉学*1、大竹 喜幸**2 *1 ^{有限会社 志津刃物製作所} *2 株式会社 シズテック	3報) - 1 -
プレス金型の故障診断手法の確立(第1報) 横山 貴広、松原 早苗	5 -
プレス金型の故障診断手法の確立(第2報) 松原 早苗、横山 貴広	8 -
刃物切れ味試験機の試験精度向上に関する開発研究(第1報) 田中 泰斗、松原 早苗	11 -
精密測定の信頼性評価に関する研究(第1報) 丹羽 孝晴、田中 泰斗	15 -
アルミダイカスト部品の高品質・低コスト化を実現する製造技術の開発(第2報) 水谷 予志生、細野 幸太、小寺 将也、新川 真人 ^{*3 *3 岐阜大学工学部}	19 -
工具鋼への複合表面処理効果についての研究(第2報) 細野 幸太、大川 香織、小寺 将也	23 -
鋳物に生じる内部欠陥の低減化に関する研究(第2報) 関 範雄、三原 利之、水谷 予志生、大平 武俊*4 *4 ^{産業技術センター}	27 -
水栓部品における脱亜鉛腐食の発生しやすい使用環境の解明(第2報) 三原 利之、関 範雄	31 -
鉄鋼製品に錆を生じさせない防食技術の開発(第2報) 大川 香織、横山 貴広、細野 幸太	35 -
アルミニウム合金のプレス成形性向上に関する研究(第3報) 小川 大介、柘植 英明	39 -
複 合 材 料 関 連	
CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発(第6報) 千原 健司、仙石 倫章、西垣 康広、鈴木 貴行	43 -
次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発(第3報) 西垣 康広、仙石 倫章、鈴木 貴行、山田 孝弘	45 -
次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発(第4報) 柘植 英明、小川 大介、山田 孝弘	49 -

機 械 · 金 属 関 連

レーザーによる顔料を使用しない金属製品への着色技術および、

ぎふブランド製品の開発(第3報)

西村 太志、松原 早苗、堀部 嘉学*、大竹 喜幸**

Development of color marking techniques on the metal surface by laser marking and unique products in Gifu (III)

Futoshi Nishimura, Sanae Matsubara, Yoshitaka Horibe* and Yoshiyuki Otake**

本研究では、ステンレスやチタンの表面にレーザー光で酸化膜を形成し、この酸化膜で反射した光の干渉によ る発色技術の開発を行っている。本年度は、イラストや写真等の画像から、印字加工データを簡便に作成する手 法を検討する。そして、この成果を応用したアプリケーションを作成する。また、本研究で使用したレーザーマ ーカーでは、美しい青系の発色が得られているが、他の色との差異を調査するため、酸化膜の化学結合状態や硬 さを調査する。

1. はじめに

レーザーによる刻印は、金属の極表面を酸化するため、 顔料を必要とする印刷に比べて摩耗等に対する耐久性に 優れている。このため、工具等の型番表示によく用いら れている。これまでレーザーマーカーは、ロゴやバーコ ード、型番等の単純な模様や文字を単色での印字に利用 されることが多かった。単色印字の場合、レーザーの発 振条件が1つであることや、画像も2値画像であるため、 1 色の領域を抽出するのみでよく、加工データの作成が 容易である。

これまでに報告¹⁻³があるように、本実験装置でもス テンレスやチタンに鮮やかな多色印字を行うことができ るようになった。前報⁴⁻⁵までに、酸化膜厚と発色の関 係や、表面状態の影響等を明らかにした。しかし、多色 になることで、画像を印字する色毎の領域を分け、各色 領域に対してレーザーの発振条件を設定する必要があり、 加工データ作成に多大な労力と時間が必要である。本研 究成果を普及させるには、この問題点の解決が不可欠で ある。

そこで、本研究では、イラストや写真等の画像から、 印字加工データを簡便に作成する手法を検討し、そのア プリケーションを試作し、印字した結果を報告する。酸 化膜の詳細を調査するため、化学結合状態や硬さを測定 した結果も報告する。

2. 手法

図1に実験装置を示す。レーザーマーカーはオムロン 製 MX-Z2000G である。当機器では、画像を各色の領域



図1 レーザーマーカー本体



図2 カラーサンプル (パターン8)

に対して、輪郭抽出を行い、DXF 形式の領域データと して出力する。そして、各領域データに、レーザーの発 振条件を設定し、重ね合わせ作成する。この印字加工デ ータの作成作業において、画像を各色の領域に分割し、

^{*}有限会社志津刃物製作所

^{**}株式会社シズテック







(b)n=0







(c)n=1(d)n=2図3 濃淡画像の入力画像と領域画像

(e)n=3



(a)モノクロ





(b)青系



(c)緑系 (d)赤系 図4 濃淡画像の印字結果

輪郭抽出する作業に多大な時間を必要とする。そのため、 イラストやロゴのような各色ベタ塗りの画像に制限され ていた。また、ベタ塗りであっても印字色数が増えるこ とで、領域数が増え、作業負担が増加する。そこで、本 研究では、入力された画像をソフトウェア上で自動的に 印字する色の領域に分割し、その輪郭を抽出する手法を 画像処理の技術を用いて開発した。この手法により、ベ タ塗りでない多階調の写真の画像の印字も可能となる。

処理の手順は、まず、画像上の色とレーザーの発振条 件を対応させたリストを作成し、画像をその色領域に分 割する。そして、各色領域の輪郭を抽出し、対応するレ ーザーの発振条件を設定し、重ねたデータを印字加工デ ータとして出力する。

2.1 カラーパレットの作成

画像は、各画素に対して RGB それぞれ 8bit(256 段 階)の値をもつことを想定し、以降、その値を RGB 値 と呼ぶ。また、レーザーの発振条件は、パターン(連続 発振するパルスの個数)、周波数(パルスの周期)、パ ワー(パルスの高さ)とする。ここでは、画像上の RGB

色番号	RGB 値	パターン	周波数	パワー
n	(R,G,B)		(kHz)	(%)
0	(0, 0, 0)	1	100	50
1	(85,85,85)	5	150	27
2	(170,170,170)	5	150	25
2	(055.055.055)			

ま1 図3に対するカラーパターン

値と、印字するレーザーの発振条件を対応させたリスト をカラーパレットと呼ぶ。印字する色数 N 分の行から なるリストとなる。

カラーパレットを作成する前に、レーザーの発振条件 と発色の関係をみるため、パターンを 1~12、周波数を 25~800Hz を 25Hz 刻み、パワーを 20~50%を 1%刻み で変えて出力したカラーサンプルを作成した。図2にパ ターン8のカラーサンプルを示す。左下の矩形をパワー 20%、周波数 25kHz とし、上方向はパワーを 1% ずつ上 げ、右方向は周波数を 25kHz ずつ上げて印字した。作 成したカラーサンプルを基に、目視により、画像上の RGB 値と、印字するレーザーの発振条件を対応付け、 カラーパレットを作成した。このパレットは、対象とす る画像に応じて作成することも、基本となる色で作成し たものを再利用することもできる。

2.2 領域分割と輪郭抽出

まず、入力画像を、カラーパレットで指定した色数 N の領域に分割する。分割方法は、入力画像の各画素に対 して、その RGB 値と、N 色あるカラーパレットの RGB 値との距離が最も近い色番号 n を求める。得られた色番 号 n を画素値とする領域分割画像を生成する。RGB 値 の距離はユークリッド距離を用いた。

領域分割画像に対して、色番号n毎に、輪郭抽出を行 い、輪郭を形成する連続する画素の座標値を、DXF 形 式の領域データとして出力する。座標値は、画像の左下 を原点として、右方向を X 軸、上方向を Y 軸とする。 印字する幅サイズを入力し、拡大縮小を行った座標値を 出力する。

2.3 印字加工データの出力

2. 2にて得られた各色の領域データ対して、カラー パレットに従い、レーザーの発振条件を設定し、全色重 ね合わせたものを印字加工データとして出力する。



(b)領域分割結果 図5 カラー写真画像の中間処理及び印字結果

3. 実験

3.1 濃淡画像

図 3(a)のグレースケール 256 階調の濃淡画像を入力と



図6 カラー写真用カラーパターン

して、表1に示すカラーパターンに従い、各色に分割した領域の画像を図3(b)~(e)に示す。濃淡画像の場合、 RGBの各値が同じ値となるため、RGB値が(d,d,d)の濃淡値をdと呼ぶとことする。図3(a)の画素の濃淡値が、 色番号 n=0, 1, 2, 3 に対応する濃淡値0, 80, 170, 255 に近い値、つまり、それぞれ0~42, 43~124,125~211,212~ 255の範囲になる画素を白、その他の画素を黒とした画像を、それぞれ図3(b)~(e)に示す。これらの画像から、 イラスト等のベタ塗りと異なり、複数の階調数を持つ画 像では、領域が散らばっており、複雑な領域データとなることがわかる。

生成された領域データに表1のカラーパターンに示す レーザーの発振条件を設定し、出力した印字加工データ を印字した結果を図 4(a)に示す。また、レーザーの発振 条件を変え、青系、緑系、赤系の色で印字した結果を、 それぞれ図 4(b), (c), (d)に示す。

3.2 カラー写真画像

カラー写真の画像に対しても同様の処理を行い、印字 する実験を行った。図 5(a)の入力画像に対して、カラー パターンに従い、領域分割した結果を図 5(b)に、印字加 エデータを作成して印字した結果を図 5(c)に示す。

カラー写真用に色数 N=26 のカラーパターンを作成 した例を図 6 に示す。図 6(a)は、カラーパターンにおけ る RGB 値を四角で描画したものである。図 6(b)は、3. 1にて作成したカラーパターンから、図 6(a)の RGB 値 と対応するレーザーの発振条件を目視にて決定し印字し たものである。このカラーパターンを用いて、カラー写 真の画像を印字した結果を図 5 の一番上の画像である。 その他の入力画像については、個々にカラーパターンを 作成した。

図 6(b)は、分割された領域の画素に、カラーパターン の色番号に対応する RGB 値を入力した画像である。領 域が正しく分割され、印字されていることがわかる。よ り鮮やかな発色が求められるが、カラーパターンを作成 した際、色相により印字できる明度、彩度の分解能にば らつきがあることがわかった。レーザーの発振条件と鮮 やかな印字手法について引き続き検討していく必要があ る。



3.3測色

図7に測色計(コニカミノルタ製 CM-2600d)でカラ ーマーキング(黄、青、赤、緑、黒)サンプルを測定し た結果を示す。横軸は光の波長、縦軸は反射率である。 SCE は正反射光を含まない、SCI は含んだ測定結果であ る。SCE ではどの色も反射率は 10%以下である。そし てこれは拡散光の反射なので、酸化膜そのものの反射率 である。SCI では色ごとに特定の波長の光が多く反射し ていることが分かる。黒の反射率は波長によらずほぼ 20%である。図8に測色値を示す。見た目に対応した測 色値(L*a*b*)が得られた。

3. 4化学結合

図9にX線光電子分光分析装置(アルバック・ファ イ製 PHI5000VersaProbeII)の測定結果を示す。横軸は 結合エネルギー、縦軸は光電子強度である。測定前に Ar イオンビームで表面をクリーニングしている。色に よらず同じ分布形状をしていることから、酸化膜の化学 組成はすべて同じである事が分かる。この分布形状から 酸化膜は Cr₂O₃、Fe₂O₃であることが分かる。

3.5硬さ

図 10 にナノインデンター(アジレントテクノロジー 製 G200)の測定結果を示す。横軸は前報で測定した酸 化膜の膜厚、縦軸は硬さである。硬さは連続剛性測定法 により得ている。膜厚が厚いほど硬い傾向がある。黒色 については膜厚が厚くても、青色程度の硬さである。こ れまでの研究⁵⁾で得られた色ごとの膜厚と長野ら⁶が示



している膜厚は異なっている。図9の結果から膜の化学 組成はすべて同じであるので、硬さの違いは密度の違い によるものと予想できる。この密度の違いは屈折率の違 いにも関係すると考えられる。よってカラーマーキング による発色の違いは、酸化膜の厚さだけでなく、屈折率 の違いも影響していると予想できる。

4. まとめ

(1)多階調の画像からカラー印字加工データを作成し、 印字することができた。

(2)カラーマーキングによる結果を測色計で測定できる。(3)本研究で印字したカラーマーキングは正反射光を含んだ解析で測色できる。

(4)発色の違いは酸化膜の厚みだけでなく、屈折率の違いも影響していると予想される。

- 1) 阪部, 天田財団助成研究成果報告書 No.27, pp172-214,2014
- 2) 品田ら,日本機械学会論文集 C 編 Vol.72 No.713, pp235-240,2006
- 3) 品田ら,日本機械学会論文集 C 編 Vol.72 No.722, pp3406-3411,2006
- 4) 西村ら,岐阜県工業技術研究所報告 No.4 pp1-2,2016
- 5) 西村ら,岐阜県工業技術研究所報告 No.5 pp1-4,2017
- 6) 長野ら、レーザ加工学会誌 Vol.23 No.1, pp76-79,2016

プレス金型の故障診断手法の確立(第1報) - 金型の製作とAEセンシングデータ解析 -

横山 貴広、松原 早苗

The establishment of failure diagnosis system for die (I) - Manufacture of dies and AE sensing data analysis -

Takahiro Yokoyama and Sanae Matsubara

プレス金型の故障には、金型の摩耗・かじり・焼付き・ピン折れなど、様々な形態が存在している。しかし、 金型は密閉構造でプレス機に装着されているため、これらの現象を早期に発見して故障と判断するには、金型の センシングデータを監視することが求められる。しかし、現時点でセンシングデータから金型故障の内容を正確 に判断することは困難である。さらに、金型は任意に故障を再現することができないため、故障時のデータを大 量に収集し、通常のデータと比較分析することが難しいという問題も存在する。本年度は上記の問題点を勘案し、 故障時におけるセンシングデータの特徴を捉えるために、深絞り試験機で任意の故障を再現できる金型の設計・ 製作を実施した。また、プレス加工(金型)の通常のデータを把握するため、県内の協力企業の生産プレス機に AE センサーを取り付けて、このセンシングデータの解析を行った。

1. はじめに

県内の自動車・航空機産業を支える機械部品の製造に は大量生産に適したプレス加工が必要とされている。プ レス加工は短時間で機械部品を製造するため、生産効率 が高い反面、金型に故障が生じると不良品が大量に発生 するという問題点を抱えている。この問題に対して、プ レス荷重をリアルタイムで監視し、荷重の閾値から故障 を判定する方法も徐々に取り入れられている。また、金 型の故障には摩耗をはじめ様々な形態が存在するが、セ ンシングデータから金型の故障内容を特定することは難 しいのが現状である。

本年度は金型の故障内容とセンシングデータとの対応 を模索すべく、深絞り試験機で任意の故障を再現できる 金型の設計・製作を実施した。また、金型故障の判定に は事前に正常時のセンシングデータの状態を把握する必 要がある。そのため、県内の協力企業の生産プレス機に AE センサーを取り付け、そのセンシングデータの解析 を行った。本報告書は上記2点について報告する。

2. 金型の設計・製作

プレス加工時に金型故障の有無を判断するためには通 常と故障のセンシングデータの比較が有効である。また この有効性を高めるためには、事前に多数の分類された 金型故障とセンシングデータを対比させて、その特徴を 把握しデータベース化することが適している。しかし、 金型故障のデータを採取しようとしても、実際に機械加 工を実施している生産機で金型の故障の発生はまれであ り、さらにプレスの加工条件の変更で金型故障を再現す ることは困難であるのが現状である。このため、任意に 金型故障を再現させることができる金型を設計・製作し



図1 深絞り試験機の外観



図2 製作した金型

故障の分類とセンシングデータを対比できるような試験 機の構築を目指した。

そのため、図1の深絞り試験機(35ton・f自動型万能 深絞り試験機:現東京衡機試験機製造)の金型を改造す ることで上記の目的を達成することを試みた。一般的に 機械部品の製造は深絞り加工のみではなく、複数の打抜 き加工や曲げ加工の組み合わせで構成している。本試験 機は深絞り試験の専用機であるが、金型を工夫すること によって、深絞り・打抜き加工に対応させた。

上記の要件を基にして製作した金型を図2に示す。本 金型は深絞り・打抜き加工をする際に、被成形材と金型 の間に強い荷重がかかる箇所を部品として脱着可能な構 造にしており、この部品に機械加工を施したり、故意に 破損させることによって、任意に金型故障を再現できる ことが特徴である。来年度以降は、この製作した金型を 利用して、故障の分類とセンシングデータ間の特徴を把 握すべく、プレス試験を実施する予定である。

3 生産プレス機におけるセンシングデータについて 3.1 測定条件

プレス金型の故障診断をするにあたって、事前に正常 時のセンシングデータを把握し、その特徴を捉えておく ことは非常に重要である。そのため、機械加工部品を製 造している県内企業に協力して頂き、実際に生産機とし て使用しているプレス機にセンサーを取り付けて測定し た。この測定方法のイメージ図を図3に、測定条件を表 1 に示す。生産プレス機における測定にはAE(アコー スティックエミッション)センサーを使用した。一般的 にAE センサーは振動センサーよりも、広帯域・高周波 領域の測定に適している特徴がある。

本報告書では AE センサーについて、生産プレス機で 得られたセンシングデータの特徴について報告する。な お、データの分析には多変量解析・時系列解析・周波数 解析など様々な手法が存在するが、振動センサーにおけ る周波数解析を中心とする内容は次報で報告する¹⁾。

3. 2 AEセンサーによるデータについて

最初、AE センサーはプレス機から適切なセンシング データの取得が可能かどうかという観点を重視した。測 定は表1のようにトランスファープレスを対象に、通常 運転と空運転(被成形材の有無)の2通りの測定を実施 した。通常運転のAE センサーから取得できる典型的な 測定波形を図4に示す。図より、プレスが下死点に達し パンチにより打抜きや絞り加工が行われる瞬間に最も強 度が高い主パルスが発生し、その前後には大きく変動し た波形が確認できる。それ以外にもパルスは存在するが、 1 ショット全般の波形を概観しても主パルスを超えるこ とはない。そのため、一般的にプレス金型が故障かどう かを判断するためには、この主パルス波形付近のデータ 解析の考察が最も重要な要素となる。また、その他の波 形は機械部品の品質にはほとんど影響を与えていないた め、データの重要度は低いと思われる。

この点について、センサーの位置(上部・下部)と運転状態(通常運転・空運転)の4通りに組み合わせた場合の AE センサーの波形を主パルス(青色)、主パルス以外のパルス(赤色)、ノイズの3種類の分類し、その AE エネルギー(積分値)の割合を比較した(図 5)。



図3 測定方法のイメージ図

表1 測定条件

使用センサー	・AEセンサー(東京精密製造:固定型センサー) 上部・下部それぞれ1箇所・
プレス機	・トランスファープレス
測定条件	 ・構成:AEセンサー、コントローラ、データロガー ・被成形材:通常運転(あり)・空運転(なし) ・測定回数:63ショット(通常運転)、112ショット(空運転) ・サンプリング間隔:20msec ・プレス周期:約3.66秒







図5 AE エネルギーの割合

その結果、主パルスは総エネルギーの約 20%前後しか 含まれておらず、ノイズが半分以上を占めていることが わかった。また、ショット毎の複数の波形を比較すると プレス加工は決められた繰り返し動作が行われるため、 1 ショット毎の AE 波形は同じような傾向が見られた。 よって、AE 波形の特徴の把握には、ある程度まとまっ たショット数の統計解析や時系列トレンドの解析が必要 となる。

そのため、まず統計解析から AE 総エネルギーの特徴 の把握を検討した。図6は前述4通りのAE総エネルギ ーの箱ひげ図を示す。この図を概観すると、通常運転は 空運転より総エネルギーが高く、ばらつきが大きい傾向 にある。これは実際に被成形材を加工する際は、空運転 より大きな振動が発生していることを意味している。ま た、センサーの上下位置については運転状態にも関わら ず違いが見られなかった。実際にこれらのデータを詳細 に分析したところ、4 通りの条件にはデータの相違があ り、等分散性がないことが確認できた(データの相違の 有無には KruskalWallis 検定、等分散性の有無には Levene 検定を採用²⁾)。このため、Bonferroni 多重比較 2)を実施したところ、センサーの上下位置に関係なく、 運転状態の違いにのみデータの相違が確認できた(異な る運転状態の組み合わせでは、すべて有意確率(P値) が 0.000 であった)。この知見はセンシングデータの統 計的な検定が生産プレス機の運転状態(材料の有無)の 監視に利用できる可能性を示している。

次に、AE エネルギーの時系列データの特徴について 調べた。図7、図8は運転状態の違いによる、プレス回 数を時間軸とした総エネルギーの時系列のグラフである。 両図より、図6の箱ひげ図からの知見と同様に、通常運 転はAE 総エネルギーが高く、箱ひげ図の縦幅に比例し てばらつきが大きいことが確認できる。その他として、 総エネルギーのトレンドに若干変化が現れた箇所が存在 した。これは加速度センサーを用いた最大周波数 50kHz までの周波数解析 ¹⁾でも、同様に変化のあることが確認 されている。よって、本測定結果はデータの積分値の分 布からでも 50kHz の低周波の周波数解析と同等程度の変 化を捉えることが可能であることを示している。このよ うに、プレス機の状態をAE センサーで測定し、そのデ ータ解析を実施することで、センシングデータの取得と 大雑把な特徴の把握が可能であることがわかった。

4. まとめ

プレス加工は生産条件の変更のみで任意の金型故障を 再現することは困難であるため、本年度は金型故障とセ ンシングデータの関係を把握する試験を実施するために 金型の設計・製作を実施した。また、プレス機からセン シングデータが適切に取得できるのかという観点から、 生産プレス機に AE センサーを取り付けて、そのセンシ ングデータを解析した。その結果、①AE センサーから 適切なセンシングデータの取得が可能であり、②データ 解析をした結果、センシングデータから生産プレス機の 状態の特徴の大枠を把握することができた。

今後、深絞り試験機によって金型故障の種類とセンシ ングデータを対比させて基礎データを収集する。これを 蓄積した生産データと比較することで、金型の故障診断 手法の確立とその精度を高めていく予定である。



【謝辞】】

本研究は生産プレス機のセンシングデータの測定に関 して、株式会社加藤製作所(可児市)のご協力を受けな がら実施しております。関係者の皆様方には深く感謝い たします。

- 松原ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 第6号, pp8-10,2018
- 2) 大澤,わかる&使える統計学用語,pp93,305,331

プレス金型の故障診断手法の確立(第2報) - ^{加速度の周波数解析} -

松原 早苗、横山 貴広

The establishment of failure diagnosis system for die (II) - Frequency analysis for acceleration -

Sanae Matsubara and Takahiro Yokoyama

本研究では、県内製造業の中核を担っているプレス加工企業を支援することを目的に、プレス機や金型にセンサを 取り付け、そのセンサデータを解析することで、早期に加工異常を検知する技術の開発を目指している。本年度は、 金型の摩耗と振動の変化の関係を評価するため、金型に加速度センサを取り付け、取得された加速度データを解析し た。その結果、ショット数の増加に伴い、加速度データの原波形は一部が鈍化すること、周波数分布はある範囲にお いて周波数強度が強くなることがわかったので報告する。

1. はじめに

金型を用いるプレス加工は、加工速度が速く、大量生 産に向くため、自動車や家電をはじめとして、広く使用 され、県内製造業でも多く行われている。プレス加工は、 高速に大量の製品を生産できる反面、金型に異常が発生 すると大量に不良品を生成してしまう課題がある。その ため、早期に金型の異常を検出する技術が求められてい る。現在、金型の異常を検出する方法としては、加工後 の製品の抜き取り検査を行い、製品にバリやキズなどの 異常が発生した場合、金型が摩耗した、損傷したと判断 する方法や、ショット数を管理し定期的にメンテナンス を行うことが行われている。抜き取り検査では、製品の 不良を発見するまでの間、大量に不良品を生成してしま う課題がある。また、定期メンテナンスでは、メンテナ ンスにかかるコストが大きいため、不良を発生しない範 囲で限界まで加工したいとの要望がある。そのため、金 型の摩耗、損傷等の状態を、稼働中にリアルタイムに取 得、可視化、異常検知する技術が求められているい。

金型の異常としては、金型の摩耗による製品のバリの 発生、パンチやダイの欠損、異物混入(主にカス上がり) による圧痕などがある。中でも、不良発生の原因として 発生頻度が高いのは、製品のバリの発生である²⁾。

本研究では、プレス機や金型にセンサを取り付け、そ のセンサデータを解析することで早期に加工異常を検知 する技術の開発を目指す。本年度は、金型の摩耗と振動 の変化の関係を評価するため、金型に加速度センサを取 り付け、取得される加速度データを解析した。その結果 から、ショット数の増加と、加速度データの変化につい て考察したので報告する。

2. 実験

本稿では、5 工程あるトランスファー型プレス機(図 1(a)) において、中央となる 3 工程目のダイ(図 1(b))



(a) プレス加工機図1 実験

(b)金型 実験環境

に、加速度センサを取り付け、加速度データを取得した。 この5工程は、打ち抜き工程、トリミング工程等を含む。 加速度センサは、PCB 社製 の Model No.352C65 を使用 し、図 1(b)に示すように、ダイの静止部(図中白丸の箇 所)に、真空グリースを使用し、専用のマグネット式の 治具で設置した。データロガーは、キーエンス社製の NR-600 を使用した。データの取得条件についての詳細 を表2に示す。

表2 データの取得条件

サンプリング間隔	10µsec
サンプリング周波数	100kHz
ショット間隔	2.47sec
金型の状態 (ショット数)	 (a)約 100 ショット目 (b)約 1,500 ショット目 (c)約 24,000 ショット目



(c)約 24,000 ショット目 図 2 加速度データの原波形

3.実験結果及び考察

3.1 振動と摩耗の関係について

金型の摩耗と振動の変化の関係を評価するため、金型 のメンテナンス後 100 ショットから、1,500 ショット、 24,000 ショットとショット数を増やし、3 つの状態にお いて加速度データを取得した。また、各時点から、連続 140 ショットのデータに対して解析した。

3.1.1 加速度の原波形

加工中に取得した加速度データを1ショットごとに切り出した原波形を図2に示す。図2において(a)は、金型のメンテナンスを行った直後から約100ショット目の 波形を示し、(b)はショット約1,500ショット目の波形、 (c)は約24,000ショット目の波形である。図2の波形は 加工過程で発生した振動と考えられる。ショット数が進



図3 周波数解析の結果

むにつれ、図中 A 部は、波形が鈍化している。また、B 部においては、(a)にはない小さな振動が、(b)、(c)にお いて発生する変化が生じた。この特徴は、(a)、(b)、(c) の各時点から連続140ショットにおいて、同様にみられ た。これらの変化と金型の摩耗に関係があるのではない かと考えられる。今後、この振動の変化と、金型の摩耗 状態、摩耗により発生する製品のバリ、キズ等の製品の 状態との対応を評価し、振動変化と金型、製品の状態の 関係性について考察を加える必要がある。

3.1.2 周波数解析

図 2 の原波形の全体に対して FFT を用いて周波数解 析を行った結果を図 3 に示す。図 2 と同様に(a)はメン テナンス後約 100 ショット目、(b)は約 1,500 ショット目、 (c)は約 24,000 ショット目の加速度データに対して周波 数解析を行った結果を重ねて示す。(a)、(b)、(c)を比較 すると、35kHz~45kHz 辺りの範囲においてショット数 が増えるに伴い、周波数強度が高くなっていることがわ かる。こちらにおいても、今後、周波数の変化と金型、 製品の状態の関係性について調べる必要がある。

3.1.3 スペクトログラム

図 4(a)に、約 100 ショット目から連続 140 ショット分 のスペクトログラムを示す。横軸がショット数を、縦軸 が周波数、各点の色は周波数強度を表している。1 ショ ットの周波数分布が、スペクトログラムの1列に対応し ており、図 3(a)で強度の強い 15kHz、35kHz 辺りで、図 4(a)においても強度が高い色となっていることがわかる。 図 4(a)は、約 100 ショット目から連続する 140 ショット 分の周波数分布を並べていることになるが、この間にお いては、周波数分布に大きな変化はなく、一定のパター ンが表れている。これにより、140 ショット程度の連続 加工においては、振動の変化がみられないと考えられる。

図 4 には、これまでと同様に(a)はメンテナンス後約 100 ショット目、(b)は約 1,500 ショット目、(c)は約 24,000 ショット目の各時点から連続 140 ショット分のス ペクトログラムを示す。それぞれ連続 140 ショットの間 では、周波数分布に大きな変化はみられないが、(a)、 (b)、(c)の比較では、特に 35kHz~45kHz の範囲におい て、ショット数が増えるに伴い、周波数強度が大きくな



(a)約100ショット目

- (b)約 1,500 ショット目 図 4 加工時の加速度の原波形
- (c)約 24,000 ショット目

る変化が生じている。連続140ショット程度の短期間で は、振動の変化は表れず、100ショット目から24,000シ ョット程度の長い期間では、振動に変化が表れている。 この結果から、周波数強度の変化が金型の摩耗と関係が あると考えられる。今後、実際の金型、製品の状態との 関係を評価していく必要がある。また、摩耗が発生する 長期間に対して連続したデータを収集し、連続的にどの ように振動が変化していくかを確認する必要がある。

3.2 プレス機停止の影響

メンテナンス後約100ショット辺りにおいて、プレス 機が一時停止した。その停止前後の加速データに対する スペクトログラムを図5示す。ショット数1~60が停止 前で、61~80 が停止期間、81~140 が停止後である。プ レス機の停止前後で、若干変化がみられる。35kHz 付近 にて停止後、強度が弱くなっている。また、25~30kHz 付近においても停止後の強度が弱くなっている。この停 止は生成された製品を受ける箱を取り換える目的であり、 試料の材質等に変更はない。そのため、停止前後の周波 数強度の変化は、プレス機が停止することにより、金型 の温度変化や、連続加工によるプレス機自身の振動の影 響等が考えられる。これについては、長時間の連続する データを収集し、停止前後のデータを複数回において比 較し、同様の特徴があらわれるかを評価する必要がある。 また、金型の温度や、プレス機自身の振動を計測するこ とで、この変化の原因について調べる必要がある。

4. まとめ

本年度は、プレス加工における金型の摩耗と振動の変 化との関係をみるため、金型に加速度センサを設置し、 加工中の加速度データを取得した。その結果、加速度デ ータの原波形においては、ショット数の増加に伴い、あ る範囲において、波形が鈍化する、新たな振動が発生す る変化があらわれた。また、周波数解析においても、シ ョット数の増加に伴い、ある範囲において強度が強くな



図5 プレス機停止前後のスペクトログラム

る変化がみられた。連続140ショット程度の短期間では、 周波数分布に変化がみられなかった。これらの結果から、 長期的に徐々に変化が起こっているため、振動の変化と 金型の摩耗に関係があるのではないかと推測される。今 後は、振動の変化と金型や製品の状態とを突き合わせ、 その関係性を評価する必要がある。また、金型のメンテ ナンス後から摩耗が発生するまでの連続したデータを取 得し、振動の連続した変化について評価を行う必要があ る。

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、データ収集においてご協力 を頂きました株式会社ツカダ様に深く感謝致します。

- 横山,岐阜県工業技術研究所研究報告 第5号, pp9-13,2017
- 2) 西本ら,第11回アコースティクエミッション総合 コンファレンス論文集,pp.195-198,1997

刃物切れ味試験機の試験精度向上に関する開発研究(第1報)

田中 泰斗、松原 早苗

Studies about improvement of test accuracy for cutlery tester (I)

Taito Tanaka and Sanae Matsubara

本研究では、開発中の切れ味試験機の実用化及び普及に向け、試験方法の標準化を図ることを目的として、試 験刃物の設置状態が切れ味試験結果に及ぼす影響について検討を行った。実験の結果、切れ味試験に使用する被 削材の固定軸と試験刃物の刃先方向の平行度を正確に一致させることが、切れ味の定量において非常に重要であ ることが分かった。また、試験刃物の設置状態を正確に制御したうえで行った切れ味試験では、同一ロットの複 数の刃物において相関の高い切れ味試験結果が得られた。

1. はじめに

岐阜県の刃物産業は全国1位のシェアを占めており、 世界でも有数の刃物生産地となっている。しかし、県内 刃物産業事業所数は、小規模事業所を中心に昭和40年 以降大幅に減少しており、刃物製造に関わる職人不足や 工程分業体制の崩壊が危惧されている。また、安価な海 外製品の流入により、国内で付加価値の低い製品を製造 することは困難な状況となっており、本県刃物産業には 製品の高品質化や生産工程の効率化などの取り組みが求 められている。

このような背景のもと、当所では刃物製品の品質維持 および向上を目的に刃物の切れ味を定量的に評価する新 たな切れ味試験機の開発に取り組んでいる¹⁻³。これま でに開発した切れ味試験試作機(以下、開発試験機)は、 従来の切れ味試験機と比較して大幅な自動化、省力化を 実現するとともに、切れ味の測定精度や再現性の面でも 優れた性能が期待でき、刃物関連企業からも実用化を期 待する声が寄せられている。

本研究は、開発試験機の実用化ならびに普及を図るた め、試験機の校正方法の確立、試験刃物の固定状態、試 験環境、被削材切断動作などが切れ味試験結果に及ぼす 影響を調査し、これらの知見をもとに切れ味試験の標準 化を図ることを目的としている。本年度は、試験刃物の 設置状態が切れ味試験結果に及ぼす影響について評価を 行った。

2. 試験機の構造と誤差要因

開発試験機における被削材固定部分及び刃物固定部分 の幾何学的位置関係を図1に示す。開発試験機において は、切断ストローク方向、被削材の切断方向および被削 材の固定軸は同一平面上にある(以下、試験平面と称 す)。また、切断ストローク方向と被削材の固定軸は並 行であり、何れも被削材の切断方向と直角である。開発 試験機の構造上、安定した切れ味試験結果を得るために は、試験刃物の刃線が試験平面上に存在し、切断ストロ



ーク方向と平行であること、並びに試験刃物のブレード 面が試験平面と平行であることが理想であるが、試験刃 物には様々な形状があるため、試験機への取り付け精度 の許容範囲を把握することが重要となる。切れ味試験精 度に影響を及ぼす要因は様々考えられるが、本報では刃 線の傾きおよび刃線のオフセット量に注目する。刃線の 傾きについては、従来から行われている本多式切れ味試 験においても留意されてきたことであるが、同試験は簡 便な試験方法であるため、傾きの影響は評価されていな い。また、刃線のオフセット量については、被削材を湾 曲固定する手法特有の問題であり、新たに影響を把握す る必要がある。

3 切れ味試験条件

3.1 被削材

被削材には、400 枚の紙を積層した、幅約 8mm 長さ

約 100mm の短冊状の紙束を使用した。使用した紙は、 クラフトパルプ紙であり、その紙厚は約 40µm である。 被削材固定機構の構造については、前報 ²で報告したと おりであり、実験ではφ25mm の円筒ピンと 60mm の間 隔で配置したφ16mm のローラによって被削材を湾曲し た状態で固定した。

3.2 試験刃物

極力同じ性能の刃物により比較を行うため、試験には 同一パッケージのカッター刃を用いた。使用したカッタ ー刃は、寸法 108mm×18mm、刃厚 0.5mm、刃渡り約 100mmのL刃であり、刃先角度は約 14deg であった。

3.3 試験刃物の固定

試験には図2に示す専用の刃物固定治具を用い、刃物 設置角度およびオフセット量を調整した。ここで刃物設 置角度は、試験平面の法線ベクトル周りの回転角であり、 切断ストローク方向と刃線のなす角である。試験刃物に は、この他にも切断ストロークを軸とする回転角や被削 材の切断方向まわりの回転角が生じるが、これらについ ては、固定治具により回転を抑制されているものとした。 刃物設置角度の測定には、画像測定機((株)ミツトヨ 製QVH3-H606P1L-C)を使用し、固定治具の基準面と 刃線のなす角度を百分の1度単位で測定した。なお、固 定治具には既知の直角度を有するアングル材を使用し、 固定治具基準面と試験平面は直交しているものとして扱 った。試験刃物のオフセット量は、固定治具に既知の厚 さの金属製のシムを挟むことで調整した。

3.4 切れ味試験条件

切れ味試験に伴う切断動作は、台形速度制御による位 置決めにより行い、切断ストロークは 10mm とした。



切断動作の平均速度は 20mm/s とし、台形速度制御のパ ラメータとしては 10mm の移動時間を 0.5sec、加減速時 間を 0.1sec とした。また、試験荷重については、切断 荷重 800g、被削材固定荷重は約 6.5kg とした。なお、切 れ味試験は、常に未使用の刃先で切れ味試験を行うよう、 試験区間をずらしながら行った。

4 結果及び考察

4.1 刃物設置角度が切れ味に及ぼす影響

図3に刃物設置角度が異なる刃物の切れ味曲線を示す。 図から被削材と試験刃物の刃線が平行でない場合、切れ 味が低下するとともにデータのばらつきが大きくなって いることが分かる。このため、切れ味データを平準化す ることを目的に100回の切れ味試験による被削材の累計 切断距離から設置角度の影響を評価することとした。

図4に刃物設置角度と切れ味比率の関係を示す。ここ で切れ味比率は、刃物設置角度 0deg の累計切断距離を 基準とし、各角度における切れ味を百分率で表した値で ある。図から、刃物の設置角度が 0deg 付近で切れ味が 最大となり、設置角度が大きくなるにつれ、切れ味が急 激に低下していることが分かる。今回の実験において切 れ味が最大となったのは、刃物設置角度が約 0.3deg と 小さな角度であることを考えると、試験刃物の設置角度



図3 刃物設置角度が異なる刃物の切れ味曲線



図4 刃物設置角度と切れ味比率の関係

を±1deg 程度でコントロールすれば、試験結果に大き な違いは生じないと考えられる。切れ味が最大となる刃 物設置角度が 0deg より若干ずれているが、これは開発 試験機における被研削材の支持機構が、切断ストローク に対して非対称であるためと考えられる。具体的には、 開発試験機においては、被削材を押し下げる方向には被 削材を支持する構造があるため切断動作の際に被削材の たわみが抑制されるが、被削材を押し上げる方向には、 たわみを抑制する構造が無いことから被削材と試験刃物









図7 切断回数と移動平均切れ味の関係

の相対ストロークに若干の違いが生じ、その結果として 切れ味に違いが出たものと考えられる。

刃物設置角度と標準誤差の関係を図5に示す。ここで 示した標準誤差は、実測したそれぞれの切れ味曲線につ いて求めた近似曲線(指数関数)に対する標準誤差であ る。刃物設置角度の増大に従って近似曲線の標準誤差が 大きくなっており、ここでも図3において認められた切 れ味データのばらつきの増加が裏付けられた。ばらつき が増加する原因としては、2 つの原因が考えられる。第 1には、被削材に対して斜めに試験刃物が切り込むこと によって、刃線と被削材の接触長さが変化し刃先にかか る切断荷重が変化することが考えられる。この現象は、 被削材の切断開始初期に顕著に表れると考えられ、図 3 の刃先設置角度 4.45deg のグラフからも確認できる。第 2 の原因としては、被削材に対して斜めに刃物が切り込 むことで、完全に切断されない試験紙が発生し、刃物側 面と切断済み被削材間に摩擦が発生することによって、 刃先にかかる切断荷重が減少したことが考えられる。

これらの結果から、切れ味試験においては刃物設置角 度が Odeg に近い状態で刃物を固定することが重要であ ることが明らかとなった。

4.2 刃物オフセット量と切れ味

刃物固定角度 0deg のときの試験刃物のオフセット量 と切れ味比率の関係を図6に示す。切れ味比率は、オフ セット量 0mm の時の切れ味に対する割合とした。今回 の実験条件では、刃物平面のオフセット量による明確な 切れ味の変化は認められなかった。これは、被削材を湾 曲固定する際の円弧が十分に大きく 1.5mm 程度のオフ セットでは切断荷重を減少させるような摩擦が発生しな かったものと考えられ、同様の条件で行う切れ味試験に おいては、目視でオフセット量を調整すれば、安定した 測定結果が得られるものと考えられる。

開発試験機で採用した被削材を湾曲固定する方法では、 試験刃物のオフセット量が大きくなることによって、刃 先の両側で摩擦にアンバランスが生じるため、刃先にか かる切断荷重が減少する可能性が高い。被削材の湾曲半 径を小さくした場合や刃先角度が大きい刃物を試験する 場合、被削材に比較的厚みのある紙を使用する場合など は、刃物オフセット量が切れ味試験結果に影響を及ぼす 可能性があるため、留意が必要であると考えられる。

4.3 切れ味試験結果の再現性

図7に同一ロットの異なる5枚のカッター刃を使用し、 100回の切れ味試験を行ったときの切れ味曲線を示す。 試験は、最も切れ味のばらつきが小さくなると考えられ る、刃物固定角度0deg、刃物固定オフセット0mmの条 件において行った。また、瞬間的な切れ味の変化を平滑 化するため3回の単純移動平均を求め、評価に使用した。 図から切れ味試験を繰り返しても、切れ味の最大値及び 最小値は平均値と大きく異なることは無く、概ね一定の 範囲内に収まっていることがわかる。試験に使用した全 ての刃物の切れ味データにおいて、切れ味平均曲線から の平均誤差は 0.217mm であった。切れ味試験結果から 推定すると、試験に使用したカッター刃の初期切れ味に は、最大で 0.5mm 程度の違いがあったと考えられ、刃 付けまたは保管状況などの違いがあったものと予想され る。従って、初期切れ味が同一の刃物を用いることがで きれば、切れ味平均との誤差はさらに小さくなる可能性 も考えられる。

切れ味試験において、完全に同一性能の刃物を準備す ることはできないため、正確な切れ味の測定精度を論じ ることは難しいが、本実験の結果から刃物設置角度とオ フセット量を正確にそろえることで、定性的な切れ味の 評価だけではなく、再現性の高い定量的な切れ味の評価 が可能であると考えられる。

5.まとめ

本研究では、開発中の新たな切れ味試験機について、 試験方法の標準化を図ることを目的とした。

本報では、試験刃物の設置状態が切れ味試験結果に及 ぼす影響について検討を行った。実験の結果、切れ味試 験に使用する被削材の固定軸と試験刃物の刃先方向の平 行度を正確に一致させることが、切れ味の定量化及び試 験結果のばらつきの軽減の面で重要であることが分かっ た。また、被削材の固定軸と刃物のオフセット量につい ては、厳密に固定位置を制御する必要性は低く、実験を 行った条件下においては、目視で刃物のオフセット量を 調整すれば、十分な測定精度が得られるものと考えられ た。刃物設置角度及び刃物固定オフセット量を正確に調 整した切れ味試験においては、同一ロットの複数の刃物 において、よく一致した切れ味試験結果が得られており、 開発試験機により安定した切れ味測定が可能であると予 想された。

今後は、試験機の校正方法、温湿度環境の影響などに ついて検討を行うとともに、様々な刃物の切れ味試験を 行い、開発試験機による切れ味試験方法を確立する予定 である。

【謝辞】】

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

- 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 第3号, pp1-pp4,2015
- 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 第4号, pp3-pp8,2016
- 3) 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 第5号, pp5-pp8,2017

精密測定の信頼性評価に関する研究(第1報)

丹羽 孝晴、田中 泰斗

Study on accuracy and reliability of measurement (I)

Takaharu Niwa and Taito Tanaka

三次元測定機においては、スタイラス形状、プロービング方法、測定力、測定速度などの条件を測定に応じて 選択する。その選択においては、測定結果に影響を与える測定条件や測定戦略の因子とその影響の大きさを正確 に把握することは簡単ではなく、測定者の経験や感覚に基づいて測定が行われる場合も多い。

本研究では、円筒度と同軸度を対象として、スタイラスの種類、スキャニング速度と測定力の条件の違いで、 測定結果への影響が異なることがわかり、円筒度は測定経路によっても異なることが確認できた。

1. はじめに

当県の平成 26 年の製造業における金属製品と輸送用 機械の割合は約 26%を占めており¹⁾、本県を代表する産 業となっている。近年の金属製品や輸送用機械部品の製 造においては、製品の高性能化のため、寸法のみならず 多くの幾何公差が指示されており、品質の評価も高度化 している。

品質評価項目の一つである精密測定では、主に製品の 寸法や幾何公差の測定を行うが、測定機器や測定条件、 測定戦略(測定手順等)により測定結果が変動すること が知られている²⁾。精密測定に広く用いられている三次 元測定機においては、スタイラス形状、測定力、プロー ビング方法、測定速度等の測定条件が測定に応じて選択 されるが、測定条件は、操作者の経験や各事業所の品質 管理の規格に基づいて選択されており、測定結果に影響 を与える測定条件や測定戦略の因子が適切に把握されて いない場合がある。近年求められる精密測定の要求にこ たえるためには、測定結果に寄与する測定条件や測定戦 略の因子を把握し、各測定に適した条件や戦略を選択す ることが求められる。

本研究では測定条件や測定戦略の違いによる測定結果 を変動させる因子を統計的に評価・把握し、精密測定の 信頼性向上、及び効率化を図る。

2. 測定方法

三次元測定機では、一般にポイント測定とスキャニン グ測定と呼ばれる二種類の方法で測定を行う。

ポイント測定は、測定対象に接触した時の座標値を測 定し、測定対象から離れて次の測定位置に移動するとい う、繰り返しの測定方式である。そのため、測定箇所が 増えれば増えるほど、測定時間が大幅に増加するデメリ ットがある。測定時間を短くするために、測定間隔をあ けて測定点数を減らす必要があるが、形状の変化を正確 に測定できない場合がある。よって既知の幾何形状に対 して用いられることが多い。 スキャニング測定は、測定対象に接触し、その形状を 倣いながらスタイラスを移動させ、連続的に座標値を測 定する測定方法(図 1)である。測定時間は、スタイラ スの移動速度に依存し、測定点の数には影響されないた め、多くの座標値を一度に取得できる。また、測定点の 間隔を細かく設定することができるため、未知の形状測 定や、形状の細かな変化を測定(図 2)することが多い。 しかしながら、測定時に加わる力として、測定面に対し て垂直な方向に働く力に加え、移動方向に向かう力も生 じることから、一般に座標値の精度の面ではポイント測 定に劣る。





図2 測定方法の違いによる形状の差

3. 実験内容

3.1 三次元測定機

実験には、カールツァイス製 PRISMO ULTRA 9/13/7 (図 3)を使用した。また、主な仕様を表 1 に示す。三 次元測定機の設置環境は 20±1℃、湿度 50±5%の恒温恒 湿室内である。



図3 三次元測定機

表1 三次元測正機の仕様			
二次二汇中地	PRISMO ULTRA 9/13/7		
二次兀側足機	(カールツァイス製)		
測字統田	X軸 900mm, Y軸 1,300mm		
侧足电凹	Z軸 650mm		
最大許容	MPE _P : 0.6μm		
指示誤差	MPE_{THP} : 1.5 μm		
プローブ	VAST GOLD		

長1 三次元測定機の仕様

3.2 測定条件

本研究では円筒スコヤ(φ60mm×150mm)を用いて円 筒度と同軸度を測定し、その測定結果を検証した。

円筒度とは形状の公差で、幾何学的に正確な形状に対 するばらつきを表す。同軸度とは位置の交差で、データ ムに関連した位置の狂いを表す。

測定は、円セグメント測定とスパイラル測定により行った。円セグメント測定とは、任意の位置で円筒を分割 する円断面を測定経路とする測定方法で、スパイラル測 定とはらせん状の経路により測定を行う方法(図4)で ある。



図4 測定経路

表2に測定条件として、スタイラスの種類、スキャニ ング速度、測定力を示す。スタイラス球径は、当所でよ く使用するものを2種類用意した。測定力は機械の推奨 値である 200mN と 100mN の 2 種類とした。スキャニ ング速度は、機械の推奨値である 6mm/s (直径の 1/10) と 48mm/s の 2 種類に条件を分け、測定間隔は 1mm と した。なお、測定高さは、スタイラス長さの制限から、 高さ 80mm とした。

また、同時にポイント測定を行い、この測定結果を円 筒度の参照値とするとともに、同軸度のデータムとして 使用した。なお、ポイント測定におけるスタイラス球径 はφ5mm、測定力は200mNとし、円周上を、1周1mm 間隔で189点、高さ方向を8mm間隔で測定した。

表2	測定条件	
111.68		

測定経路	円セグメント測定	スパイラル測定
スタイラス	球径:φ5mm 長さ:100mm シャフト径:φ3.5mm	球径:φ8mm 長さ:114mm シャフト径:φ6mm
スキャニング 速度	6mm/s	48mm/s
測定力	100mmN	200mmN

4. 結果及び考察

4.1 測定点数の違い

円セグメント測定では、高さが 80mm の円筒を、10 分割し測定を行った。分割は等分とし、分割位置は分割 数により異なる。

スパイラル測定では周回数を1周から10周まで変え て測定した。それぞれの測定点の数を表3、表4に示す。

表3 円セグメント測定点数

分割数	1	2	3	4	5
測定点数	378	567	756	945	1134
分割数	6	7	8	9	10
測定点数	1323	1512	1701	1890	2079

表4 スパイラル測定点数

		• •	0.47 = 11		
周回数	1	2	3	4	5
測定点数	205	386	572	759	946
周回数	6	7	8	9	10
測定点数	1134	1322	1511	1699	1887

円セグメント測定による円筒度及び同軸度の測定結果 を図5、図6に、スパイラル測定による円筒度及び同軸 度の測定結果を図7、図8に示す。



← \$ 200mN 6mm/s ← \$ 200mN 48mm/s

図5 円セグメント測定 円筒度







図7 スパイラル測定 円筒度



図8 スパイラル測定 同軸度

円セグメント測定の円筒度は、おおむね分割数に関係 することなく、安定した値を示した。同軸度は、同じ条 件の中では、分割数が少ない場合、同軸度の値が大きく なるが、分割数が増えるにつれて値が小さくなり、安定 していくことがわかった。

スパイラル測定の円筒度は、スキャニング速度が 48 mm/s の条件の時に値にばらつきが確認できた。同軸度 については、円セグメント測定と同様に、周回数が少な い場合、同軸度の値が大きくなり、周回数が増えるにつ れて値が小さく、安定することがわかった。同軸度の測 定には、評価長さも重要であるが、高さ方向の測定間隔 を細かくすることも、安定した測定結果を得るために必 要と考えられる。

次に、円セグメント測定とスパイラル測定を比較する。 測定点数を同じとするため、円セグメント測定では、円 筒を5分割する測定結果を、スパイラル測定では6周回 る測定結果を用いた。

4.2 測定経路の違いによる円筒度の比較

円筒度の測定結果について、円セグメント測定、スパ イラル測定及びポイント測定の結果を図9、図10に示 す。



図9 円セグメント測定 円筒度



図10 スパイラル測定 円筒度

測定結果より、スパイラル測定のほうが円セグメン ト測定に比べ、値のばらつきが少ないことがわかった。 また、スキャニング速度は 6mm/s の場合に、スタイラ ス径には φ8mm の場合に、測定力については 200mN の 場合にポイント測定と同等の値を取ることがわかった。 スタイラス径が大きいほどシャフト径も太く剛性があ り、測定力は、速度による遠心力や、測定物の表面粗さ などの影響を受けることなく、測定物に接触し続けるこ とができるたため、この結果になったと考えられる。









4.3 測定経路の違いによる同軸度の比較

同軸度の測定結果を図 11、図 12 に示す。同軸度のデ ータムは、ポイント測定の結果としているため、円筒度 の測定結果が0に近いほどポイント測定の測定結果と同 等の結果を得ることができたといえる。

測定結果よりスキャニング速度が 48mm/s の条件の時に 測定結果が大きく外れていることがわかる。また、スタ イラス径については φ8mm の場合に最も良好な結果が 得られた。

円筒度と違い、スキャニング経路の違いによる大きな 影響はなく、測定力についての影響も認められない。

連続的に形状の変化を測定するスキャニング測定のため、形状の公差である円筒度に、様々な条件が影響を与 えたのではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究では、スタイラス、スキャニング速度、測定力 の違いで、測定結果に影響が出ることが確認できた。特 にスキャニング速度は測定結果に大きな影響を与えてい ることがわかった。また、測定経路によっても測定結果 への影響が違っていることも確認できた。

今後は、今回評価した公差以外の測定や形状測定に対 して、測定経路が測定結果に与える影響の検討を行う。

- 1) 平成26年工業統計調査結果(確報),岐阜県
- 木村,野嶋,鳥取県産業技術センター研究報告 No.13, pp11-16, 2010

アルミダイカスト部品の高品質・低コスト化を実現する製造技術の開発(第2報)

水谷 予志生、細野 幸太、小寺 将也、新川 真人*

Development of manufacturing technique for aluminum die-casting due to high quality and cost reduction (II)

Yoshiki Mizutani, Kota Hosono, Masaya Kodera and Makoto Niikawa*

長寿命なアルミダイカスト金型を開発するため、ガス窒化とショットピーニングを複合させた表面処理を検討 した。ダイカスト金型材の SKD61 にガス窒化、ショットピーニング、およびこれらの複合処理を施した試験片 について、硬さの分布や残留応力を測定することで、それぞれの処理の効果を確認した。また、複合処理を施し た試験片をアルミニウム合金溶湯に浸漬させることで耐溶損性の評価も行った。複合処理を施した試験片におい て、耐摩耗性、耐溶損性の向上が確認された。今後、実際のダイカスト金型に応用し、鋳造性への影響、耐久性 を調査することが課題である。

1. はじめに

自動車の燃費規制が年々厳しくなる中、車体の軽量化 は自動車メーカーにとって必須の課題である。一般に、 100kg 軽量化すると約 1km/L の燃費向上に繋がると言わ れており、部材の高強度化による薄肉化、軽量素材への 変更等が行われており、さらなる研究開発も盛んに行わ れている¹⁴)。軽量素材としてはアルミあるいは樹脂が 主であり、一部高級車ではオールアルミのものも市販さ れている。しかし、これらの軽量化対策はコストアップ に繋がる場合が多く、実用化には製造コストの低減も重 要な課題である。

一方、生産性の高い製造方法で知られるダイカストは、 軽量金属であるアルミニウム合金を低コストで大量に生 産できることから、自動車の軽量化対策に有効であると 考えれる 5.0。ダイカストは、高温の金属溶湯を金型キ ャビティに高速・高圧で充填させ、急速に冷却・凝固さ せることでキャビティ形状を転写させた製品を短時間で 製造するプロセスである。このダイカストに用いられる 金型は、溶融金属との接触および高温高速流体の流れに よる溶損、高圧の負荷、加熱と冷却の繰り返しによる熱 疲労、等様々な過酷な負荷にさらされるため、定期的に 補修等のメンテナンスが必要となる。生産性の向上・低 コスト化には金型メンテナンス頻度を下げる事が重要で あり、金型の長寿命化対策として窒化やコーティング等 の表面処理技術が研究されている 7-15)。しかし、これら の手法は処理費用が高額であるものが多く、費用対効果 の高いプロセスが望まれている。

ダイカスト金型の表面処理として、窒化による窒化物 層の生成は焼き付きの抑制や耐溶損性に効果があるとさ れるが、熱衝撃・熱疲労によるヒートクラックが起こり やすい¹⁰⁻¹⁵。一方、ショットピーニングによる圧縮応力 の付与は、クラックの発生を抑えることが知られている

* 岐阜大学 工学部・機械工学科 准教授

^{16,17)}。そこで、窒化とショットピーニングを組み合わせ た複合表面処理を金型材に適用し、アルミダイカスト用 金型として適用可能かどうか検討した。

2. 実験方法

2.1 複合表面処理

平面研削加工した角 20×t3mm のダイス鋼(SKD61) に、ショットピーニング(以降 SP と略す)を行ったも の、SP 後ガス窒化(以降窒化と略す)を行ったもの、 SP+窒化+SP と複合処理を施したもの、を試験片とし て用意した。未処理も含めた4種類の試験片に対し、レ ーザー顕微鏡(VK9700/9710:キーエンス(株)製)に よる表面粗さ測定、断面の組織観察と窒化層の確認、マ イクロビッカース硬さ試験による深さ方向の硬さ分布測 定、残留応力測定(μ-X360s:パルステック工業(株) 製)、X線回折装置による表面層の構造分析を行った。

2.2 浸漬試験

φ10×長さ 120mm で表面を鏡面加工した SKD61 に、
 SP+窒化と SP+窒化+SP の 2 種類の複合処理を施した
 試験片を作成した。未処理も含めた 3 種類の試験片を、
 図1に示す浸漬試験装置でアルミニウムダイカスト合金

(ADC12) 溶湯に所定時間浸漬させ、耐溶損性の評価 試験を行った。るつぼ中のアルミ溶湯を電気炉で約



	Ra (µm)	Rz (µm)
未処理	0.44	3.98
SP	0.30	2.43
SP+窒化	0.31	2.36
SP+窒化+SP	0.36	2.84

表1 複合表面処理試験片の表面粗さ



図2 表面近傍のミクロ組織 (a)SP+窒化、(b)SP+窒化+SP

650℃に保持させ、SKD61 試験片を吊り下げた治具で蓋 をし、浸漬保持時間を 10、20、40、80 分と変化させた。 この時、試験片の先端約 20mm 程度が浸漬された。保 持後取り出した試験片にはアルミ合金が付着しており、 このまま切断して断面の SEM 観察と EDS による元素分 析を行った。また、約 80℃程度に加熱した 30%水酸化 ナトリウム水溶液に浸漬してアルミ付着物を完全に除去 し、重量を量ることで溶損量を評価した。

3. 結果及び考察

3.1 複合表面処理

各試験片の表面粗さをレーザー顕微鏡にて測定した結 果、表1のように SP を行うと Ra、Rz はどちらも減少 することが分かった。また、窒化後再び SP を施すと若 干大きくなる傾向であった。

図2に、ガス窒化を施したSP+窒化とSP+窒化+SP の試験片の断面ミクロ組織を示す。鉄素地はいずれもマ ルテンサイト組織であった。最表面側では、約10µm 以 下程度の領域で黒っぽくエッチングされており、白層と 呼ばれる化合物相やカモメマークは見られなかった。こ のことから、窒素拡散層が主であると考えられる。この 断面をSEM で観察し、EPMA による窒素のマッピング を行った結果を図3に示す。SP+窒化の試験片では、 図3(a)のように最表面の1µm 以下の領域に窒化物相と 思われる層が存在していた。一方、この状態にさらに SPを施した図3(c)のSP+窒化+SPの試験片では、この 最表面の層がほとんど無くなっていた。また、これらの 断面の窒素の分布を EPMA で分析したところ、図 3(b)(d)のように25~40µm 程度まで窒素が拡散している ことが分かった。

図4に各試験片の深さ方向の硬さ分布を示す。未処理の試験片は焼き入れ・焼き戻しにより調質されており、 500HV 程度の均一な硬さであった。これに SP を施した



図3 表面近傍の SEM 像(左)とN マッピング(右) (a)(b)SP+窒化、(c)(D)SP+窒化+SP





図5 最表面の XRD 図

試験片では、硬さの変化はほとんどなかった。これに窒 化を施した SP+窒化と SP+窒化+SP の試験片では、 表面硬度が一気に 900~1000HV まで硬化しており、内 部も 50µm 程度まで母材より硬い領域が存在していた。 これは図 3 の窒素拡散層の厚さとほぼ一致していた。

これらの最表面相を同定するため、XRD を行った結 果を図 5 に示す。未処理の試験片では α -Fe のピークの みであり、これに SP を施しても変化は無かった。一方、 これに窒化を施した SP+窒化の試験片では、 ϵ -Fe₂₋₃N の



図6 試験片表面の残留応力

ピークのみと変化していた。図 3(a)の 1 μ m 以下の層は、 窒化物であることが分かった。この試験片にさらに SP を施した SP+窒化+SP の試験片では、 ϵ -Fe_{2.3}N のピー クが消え、FeN と α -Fe のブロードなピークとなった。 硬くて脆い窒化層がある状態で SP を施したことで、こ の層の剥離が起こったと考えられる。

図6に各試験片表面の残留応力を測定した結果を示す。 測定はX、Y方向とも各2回測定を行い、平均値をプロ ットしている。未処理の試験片では、方向によって残留 応力値が異なっていたことから、研削加工の方向の影響 を受けていると考えられる。これにSPを施すと、圧縮 応力が増加した。さらに窒化を加えたSP+窒化、ある いはSP+窒化+SPでもさらに増加した。

3.2 浸漬試験

複合表面処理を施した試験片および未処理の試験片を 所定時間アルミ溶湯に浸漬させ、30%水酸化ナトリウム 水溶液でアルミ付着物を除去した試験片の外観を図7に 示す。未処理試験片に対し、SPと窒化を組み合わせた 複合処理試験片では、表面の荒れが少なくなっているの が分かる。また、いずれの試験片でも浸漬時間が長くな ると荒れが酷くなっており、アルミ溶湯による溶損・反 応が進行していると考えられる。

このアルミ除去後の試験片の重量を測定し、浸漬試験 前の重量との差を溶損重量として時間に対しプロットし たものを図8に示す。多少のバラツキはあるものの、浸 漬時間が長くなると溶損重量が大きくなる傾向であった。 未処理のものに対し、複合処理を施したものでは溶損重 量が 1/2~1/3 程度にまで低下しており、耐溶損性が向 上しているのが分かった。また、2 種類の複合処理では 有意な差は見られなかった。

図9に、浸漬試験後アルミが付着したまま切断した断面の SEM 観察像を示す。いずれも浸漬時間が最も長い 80 分の試験片の輪切り断面であり、図中右下側の明る い領域が SKD61 素材である。図 9(a)(b)の未処理材では、 SKD61 の表面から灰色の相が約 100µm 程度存在してい た。また、この灰色の相は図 9(b)の拡大図を見ると、 SKD61 の最表面側の 10µm 以下の領域は密であるが、



10mm

図7 アルミ付着物を除去した後の浸漬試験片外観



図8 浸漬時間と溶損重量の関係



図9 浸漬試験片断面の SEM 像 (a)(b)未処理、(c) SP+窒化、(d) SP+窒化+SP



図10 未処理の浸漬試験片断面の EDS 元素マッピング図

その先のアルミ側ではポーラスになっているのが分かる。 これは、アルミと鉄の反応相であると考えられる。この 未処理の試験片では、外周全てにほぼ均一な厚みで反応 相が存在していた。一方、複合処理を施した2種類の試 験片では、同様の反応相が存在する場所と存在しない場 所とがあった。図 9(c)は SP+窒化の試験片で、反応相 がなかった箇所の拡大図を示す。SKD61 の最表面にサ ブミクロンオーダーの薄い相が存在しているが、図 9(a)(b)のような 100µm 程もある分厚い層ではなかった。 また、図 9(b)と比べ、SKD61 の最表面に微小な凹凸が あり、SP によって表面が荒らされた結果ではないかと 考えられる。SP+窒化+SP とさらに SP を加えた試験 片では、図 9(d)に示すように、SKD61 の表面がやや大 きく凸凹になっていた。また、この箇所でも図 9(a)(b)と 同様に 100µm 程度の厚みの反応相が存在していた。

未処理の試験片で観察された反応相と思われるものの 成分を調べるため、EDS による元素マッピング結果を 図 10 に示す。約 100μm 程度の厚みの灰色の相からは、 Fe、Mn、Cr 等と一緒に Al も検出されており、主に Al と Fe の反応相であることが確認出来た。SKD61 を 80 分間アルミ溶湯に浸漬したことで、Al と Fe の反応相が 約 100μm 程度にまで成長したものと考えられる。

4. まとめ

アルミダイカスト金型の長寿命化のためキャビティ面 に施す表面処理技術として、ガス窒化とショットピーニ ング(SP)を複合させた方法を検討した。SKD61 試験 片にSP、SP+窒化、SP+窒化+SP と表面処理を組み合 わせ、性能の評価やアルミ溶湯との浸漬試験を行ったと ころ、以下のことが分かった。

・SPにより圧縮応力が付与された。

・ガス窒化により、最表面に 1µm 以下のε-Fe₂₋₃N 層が
 形成され、その下部には 25~40µm 程度の窒素拡散層
 が存在した。

・SP のみでは硬さに変化はないが、ガス窒化により 表面から 50µm 程度までの領域が硬化した。 ・ガス窒化後 SP 処理を追加することで、窒化物層が 除去され、圧縮応力がさらに増加した。

・アルミ溶湯とので反応性を調べるため、浸漬試験を 行ったところ、浸漬時間が長くなるにつれ、溶損重量 が増加した。

・溶損量は窒化を施した SP+窒化と SP+窒化+SP の試験片で 1/2~1/3 程度にまで低下しており、耐溶損性が向上しているのが分かったが、この 2 つでは有意な差は見られなかった。

 ・未処理の試験片では、80 分の浸漬でほぼ全面に約 100µm 程度の厚みのアルミと鉄の反応相が形成されたが、SP+窒化と SP+窒化+SP の試験片では一部のみであった。

【謝辞】

本研究の残留応力測定にあたり、ご協力いただいたパ ルステック工業(株)様に深く感謝致します。

- 1) 神戸, 素形材, Vol.50 No.9, pp2-7, 2009
- 2) 神戸, 素形材, Vol.53 No.3, pp34-38, 2012
- 3) 千葉, 素形材, Vol.56 No.7, pp31-35, 2015
- 4) 神戸, 素形材, Vol.57 No.3, pp2-7, 2016
- 5) 青山, 鋳造工学, Vol.76 No.12, pp985-990, 2004
- 6) 浅井ら, 鋳造工学, Vol.82 No.12, pp819-826, 2010
- 7) 藤木, 表面技術, Vol.52 No.8, pp535-539, 2001
- 8) 北川ら, 電気製鋼, Vol.78 No.4, pp341-346, 2007
- 9) 西, 精密工学会誌, Vol.77 No.7, pp648-651, 2011
- 10) 川久保, 電気製鋼, Vol.49 No.1, pp50-56, 1978
- 11) 西村, 精密機械, Vol.46 No.10, pp37-43, 1980
- 12) 佐野ら, 電気加工学会誌, Vol.31 No.68, pp1-10, 1997
- 13) 日原, 電気加工学会誌, Vol.35 No.78, pp1-11, 2001
- 14) 加藤ら, 表面技術, Vol.52 No.8, pp544-547, 2001
- 15) 八代, 塑性と加工, Vol.50 No.582, pp605-609, 2009
- 16) 飯田ら, 精密工学会誌, Vol.54 No.1, pp107-111, 1988
- 17) 原田ら, 砥粒加工学会誌, Vol.51 No.3, pp161-166, 201

工具鋼への複合表面処理効果についての研究(第2報)

細野 幸太、大川 香織、小寺 将也

Compound surface treatment effect of alloy tool steel (II)

Kota Hosono, Kaori Okawa and Masaya Kodera

高硬度転造ネジを作製する転造ダイスには、高硬度工具鋼が使用されている。この高硬度工具鋼に耐疲労特性 の向上が期待できるショットピーニング処置を最初に行い、その次に耐久性の向上が期待できる窒素をキャリア ーとする2種類の表面処理をそれぞれ行う複合表面処理を試み、その効果について検討した。

1. はじめに

近年の自動車産業分野において各種部材等の軽量化が 進められ、ネジやボルト類においてもダウンサイズ化と 低コスト化が求められている。ダウンサイズ化に伴い、 品質精度の観点から熱処理済みの高硬度ネジ素材及び高 硬度転造ネジダイス(ダイスと記す)が不可欠となって いる。しかし、高硬度ネジによりダイスの耐久性が低下 し、ダイスの取り換え、生産ライン停止等が問題となっ ている。そこで現在の対応策としては、ダイス表面にイ オン窒化等の表面処理 ¹⁾を施し、表面硬度を高くしてい る。しかし、イオン窒化は、処理面がスパッタリング作 用によりマイクロクラックなどの亀裂の起点が発生しや すく、表面層に脆い化合物層が生成される等の問題があ り、さらなる耐久性の向上が求められている。前報では 脆い化合物層を抑制するイオン窒化処理(IN)と脆い 化合物層を生成しない窒素拡散処理(DN)を試みネジ 転造数を評価したところ、DN のほうが IN よりネジ転 造数が向上することがわかった²⁾。また、耐疲労特性向 上が期待できる高硬度工具鋼へのショットピーニング処 理(SP)により、残留圧縮応力が未処理材よりも大幅 に向上した²⁾。本研究では、最初に疲労強度向上が期待 できる高硬度工具鋼への SP を行い、次に耐久性向上が 期待できる2種類の表面処理(IN 並びに DN) をそれぞ れ施した。これらの複合表面処理(SP+IN 及び SP+DN) について表面形状、窒素拡散層、硬さ並びに残留応力等 の効果について検討した。

2. 実験

2.1 ショットピーニング処理

平面研削した 20mm 角×4mm 厚の高硬度工具鋼板材 (870HV) について、硬さの異なる平均粒径 φ 50µm の 2 種類のスチール材 (A: 800HV と B: 900HV) と平均 粒径 φ 50µm の超硬材 (C: 1400 HV)によるエア式ショッ トピーニングを行った。それぞれのショットピーニング 処理について SP (A) 、SP (B) 、SP (C) と表記する。 ショットピーニング処理条件としては、投射材噴出ノズ ルから試験片までの距離を 200mm とし、試験片の送り 速度を 33.3mm/s とした。

2.2 複合表面処理

2.1 で 3 種類の SP (SP (A) 、SP (B) 、SP (C)) を施した各種工具鋼について、2 種類の表面処理 (IN 並びに DN) をそれぞれ施した。6 種類の複合表面処理 について、SP (A) +IN、SP (B) +IN、SP (C) +IN 、 SP (A) +DN、SP (B) +DN 、SP (C) +DN と表記す る。なお、IN 並びに DN は、前報と同じ処理条件で行 った²⁾。

3. 分析·評価

SP 後並びに複合表面処理後の最大高さ粗さ(Rz)を レーザー顕微鏡(VK9700/9710:(株)キーエンス製) で測定した。また、樹脂包埋した断面についてミクロ組 織の観察、硬さ分布、窒素分布状態、X 線回折装置によ る表面層の構造解析を行った。ミクロ組織の観察は、鏡 面研磨後、5%ナイタールで腐食し光学顕微鏡で行った。 硬さ分布については、深さ 10µm から 200µm までをマ イクロビッカース硬度計(HM-124: Akashi 製)を用い て荷重 0.49N で測定した。窒素分布は、電子線マイクロ アナライザ (EPMA: JXA-8530F: 日本電子(株)製) を 用い、窒素分布状態を面分析した。表面層の構造解析は、 X線回折装置(SmartLab:(株)リガク製)を用い、X線 源を Cu、管電圧 40kV、管電流 30mA で測定した。残留 応力は、残留応力測定装置(µ-X360s:パルステック工 業(株))を用いて、Cr-Ka線により Fe211 回折を傾斜角 35°で測定した。深さ方向の残留応力測定は、表面層 を電解研磨により逐次除去して行った。

4. 結果及び考察

4.1 表面形状

図1にそれぞれ未処理材、ショットピーニング後 (SP (A) 、SP (B) 、SP (C))の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像並びにレーザー顕微鏡で測定した Rz を示す。 転造ネジダイスでは、Rz が小さすぎるとネジ転造が困 難になるため、Rz を把握し制御することが必要となる。 同図より SP (A) 、SP (B) 後の Rz は、未処理材より も約半分程度になった。これらは投射粒子の衝突により 被処理材が塑性変形したためであると考えられる ^{3,4)}。 また SP(C)後では、未処理材よりも2倍以上 Rzが大 きくなり、SP(C)後の表面は灰色を呈していた。そこ で SEM を用いた元素分析(エネルギー分散型 X 線分析 : EDX)を行うと、投射材である超硬に含まれるタン グステン(W)並びに炭素(C)が表面に存在している ことがわかった。このことは、投射材の一部が被処理材 の表面及びその近傍に移着することが報告されており ^{3,4)}、SP(C)においても超硬投射材の一部が表面に移着 していると推察される。また、複合表面処理後の Rz は、 IN 処置後において、SP(A)+IN: 2.5µm、SP(B)+IN : 1.8µm、SP(C)+IN: 9.7µm となり SP のみの場合と ほぼ同程度の Rz であることがわかった。しかし、DN 処置後の Rz は、SP (A) +DN: 1.4µm、SP (B) +DN: 1.6µm 、SP (C) +DN: 7.9µm となり、SP のみの場合 より Rz が小さくなることがわかった。



図 1 未処理材並びに各種ショットピーニング処理 後(SP(A)、SP(B)、SP(C))の表面 SEM 像

4.2 断面組織・窒素分布状態・硬さ分布・表面層 構造解析

図 2 に複合表面処理後 (SP (A) +IN、SP (B) +IN、 SP (C) +IN)の断面組織観察像並びに EPMA による窒 素分布像を示す。表面から 20 μ m~30 μ m 程度まで素地 のマルテンサイト組織とは異なる組織が確認できた(図 2 (a)~(c))。これらの異なる組織は、窒素分布領 域にほぼ対応していることから窒素拡散層が主であると 考えられる(図 2 (d)~(f))。同図 2 (d)~(f) から窒素拡散層はそれぞれ、SP (A) +IN:35 μ m>SP (B) +IN:29 μ m>SP (C) +IN:23 μ m と算出した。IN のみにおける窒素拡散層は $50\mu m$ 程度であり²、SP+IN の複合表面処理では $15\mu m \sim 27\mu m$ 窒素拡散層が減少す ることから、SP後の IN は、窒素拡散を阻害すると考え られる。特に SP(C) は超硬投射材が表面に存在し、 SP(C) +IN における EPMA による断面面分析から W が表面から $2\sim 3\mu m$ 程度分布していることがわかった (図 3)。したがって、超硬投射材の存在が窒素拡散を 阻害している一因であると推測している。



図 2 各種複合表面処理材 (SP+IN) の断面組織観 察像((a)、(b)、(c))並びに窒素分布像 ((d)、(e)、(f))



図3 複合表面処理材 (SP (C) + IN) の断面 EPMA 分析 (W)



図 4 各種複合表面処理材 (SP+DN) の断面組織 観察像((a)、(b)、(c))並びに窒素分布像 ((d)、(e)、(f))

また、図 4 に複合表面処理後(SP(A)+DN、SP(B) +DN、SP(C)+DN)の断面組織観察像並びに EPMA による窒素分布像を示す。図 4 (a) ~ (c) において、 表面から 20µm~50µm 程度まで素地のマルテンサイト 組織とは異なる組織が確認でき、図 4 (d) ~ (f) の窒 素分布領域に対応していることから、表層は窒素拡散層 が主であると考えられる。同図から窒素拡散層はそれぞ \hbar , SP (A) +DN : 62 μ m > SP (C) +DN : 29 μ m > SP (B) +DN: 24µm と算出した。DN 単独処理における窒 素拡散層は 50µm 程度であることから ²⁾、SP(A)+DN では 12µm 窒素拡散層が増加し、それ以外の複合表面処 理では 21µm~26µm 窒素拡散層が減少した。よって SP +IN 処理とは異なり、SP(A) +DN は窒素拡散を促進 し、それ以外の SP (B) +DN、SP (C) +DN では SP +IN 処理と同様に窒素拡散を阻害することがわかった。 図 5 (a) 、 (b) に複合表面処理材の表面からの硬さ 分布結果を示す。すべての複合表面処理において表面側 が未処理材よりも硬くなり、SP(A)+DN の表面が最 も硬いことがわかった。硬化深さは、図2及び図4の窒 素分布像から算出した窒素拡散層に対応しており、窒素 拡散層が大きい程より内部まで硬くなることがわかった。

そこで各種複合表面処理について X 線回折装置によ る表面層の構造解析を行った(図 6 (a)、(b))。本 測定により表面から数 μm 程度の結晶構造がわかる。同 図 (a)より、SP+IN では窒素化合物 (ε-Fe_{2.3}N)の存在





を示す回折ピークがすべての複合表面処理で存在してい ることがわかった。また、SP(C) + IN では、元素分 析で確認した WC の存在を示す回折ピークがあること がわかった。さらに、 ϵ -Fe_{2.3}N の回折強度が超硬投射材 を用いた SP(C) + IN では、SP(A) + IN、SP(B) + IN より小さくなっている。したがって、SP(C) + IN の表面側の硬さが SP(A) + IN、SP(B) + IN より小さ くなったのは、表面側の ϵ -Fe_{2.3}N が少なくなった影響で あると考えられる。図 6 (b) より SP (A) +DN では、 窒素化合物 (γ '-Fe₄N) に対応する回折ピークが存在し、 それ以外の複合表面処理については、窒素化合物に対応 する回折ピークは存在しないことがわかった。また、 SP (C) +DN においても WC の存在を示す回折ピーク があることがわかった。SP (A) +DN において表面硬 さが最も硬くなったのは、表層に存在する γ '-Fe₄N の影 響であると考えられる。同図 (b) より α -Fe の半価幅は、 SP (B) +DN が最も小さいことが分かる。このことは 表面の結晶粒が大きくなった原因であると推測される。

4.3 残留応力分布

図7に未処理材 (Non-SP)、SP (A)、SP (B)、SP (C) 、 SP (A) +IN、 SP (B) +IN、 SP (C) +IN 、 SP (A) +DN, SP (B) +DN, SP (C) +DN, IN, DN () 表面近傍における残留応力分布を示す。SP(C)、SP (C) +IN、SP(C) +DN における表面の残留応力は超 硬投射材が存在しているため測定できなかった。したが って、表面から 20µm 以上の深さにおける残留応力分布 を示している。SP のみを行った被処理材は、表面から 20µm 程度の浅い深さにおいて圧縮残留応力が最大とな り、20µm 付近における最大値は、使用する投射材の硬 度とともに大きくなっている。SP(A)+IN、SP(B) +IN、SP(C)+IN においては、SP 単独処理よりも表面 から 40µm 以上まで圧縮残留応力が緩やかに減少してい る。同図より、IN のみの 40µm での圧縮残留応力が -460MPa であることから、IN の圧縮残留応力が寄与し ているためであると推測している。また、表面の圧縮残 留応力は、SP(A)+IN:-1692MPa>SP(B)+IN: -1509MPa>IN:-1382MPa となり、20µm 付近における INのみ、SP(C)+INの圧縮残留応力はそれぞれ、 -1310MPa、-1966MPa であることから SP+IN の複合表 面処理により表面側の圧縮残留応力が IN のみより付与 できることがわかった。すなわち SP による圧縮残留応 力付与の効果が表面側で維持されていると考えられる。 SP(A)+DN 表面の圧縮残留応力は、DN のみより減少 したが、DN のみと同じように 20µm で最大となり、内 部圧縮残留応力(20µm~110µm)が最も大きく推移し た。内部圧縮残留応力が最も大きく推移したのは、窒素 拡散層が DN のみより増加したためであると考えられる。 SP(B)+DN 表面の圧縮残留応力は DN のみより大き くなった。内部圧縮残留応力は、DN のみより小さくな りSP(B)+INと同様な傾向で緩やかに減少していくこ とがわかった。また、SP(C)+DNの圧縮残留応力は、 30µm で-1824MPa となり DN のみより大きくなるが、 40µm より内部では DN のみより小さくなることがわか った。したがって、SP(B)+DN、SP(C)+DN では、 SP による圧縮残留応力付与の効果が表面側で維持され、 窒素拡散層が DN のみより減少したために、内部圧縮残 留応力が DN のみより減少したと考えられる。



5.まとめ

 (1)表面の最大高さ粗さは、SP+IN では、SP のみと ほぼ同程度であり、SP+DN では小さくなった。

(2) SP+IN では、IN のみより、 ϵ -Fe_{2.3}N を含んだ窒素 拡散層が 15 μ m~27 μ m 減少することがわかった。また、 スチール投射材を用いた SP+IN により表面硬さ並びに 表面の圧縮残留応力を IN のみより付与できることがわ かった。超硬投射材を用いた SP+IN では、内部圧縮残 留応力を IN のみより付与できるが表面硬さは IN のみ より小さくなることがわかった。

(3) 800 HV のスチール投射材を用いた SP+DN では、 DN のみより γ'-Fe₄N を含んだ窒素拡散層が 12µm 増加 し、表面硬さ並びに内部圧縮残留応力が付与できること がわかった。また、900 HV のスチール投射材を用いた SP+DN では、DN のみより窒化物層を含まない窒素拡 散層が 26µm 減少し、表面硬さ並びに内部圧縮残留応力 が DN のみより小さくなることがわかった。さらに、 1400 HV の超硬投射材を用いた SP+DN では、DN のみ より窒化物層を含まない窒素拡散層が 21µm 減少し、表 面硬さは DN のみと同程度であり、内部圧縮残留応力が DN のみより小さくなることがわかった。

本研究により、複合表面処理(SP+IN、SP+DN)は、 高硬度工具鋼の耐疲労特性に影響する圧縮残留応力や耐 久性に影響する表面硬さを制御し、向上することも可能 な技術であることがわかった。

【謝 辞】

本研究を遂行するにあたり、株式会社岡本並びにパル テック工業株式会社にご協力頂きました。深く感謝の意 を表します。

- 1) 横井ら, Sanyo Technical Report, 15(1), pp53-61, 2008
- 細野ら,岐阜県工業技術研究所研究報告第5号, pp20-22,2017
- 3) 片山ら, 砥粒加工学会誌, 60(7), pp386-392, 2016
- 4) 横井ら, 日本金属学会誌, 80(2), pp114-120, 2016

鋳物に生じる内部欠陥の低減化に関する研究(第2報)

関 範雄、三原 利之、水谷 予志生、大平 武俊*

Study on reduction of internal defects in castings (II)

Norio Seki, Toshiyuki Mihara and Yoshiki Mizutani, Taketoshi Ohira*

レジンコーテッドサンド(RCS)にて造型された中子が 700~1100℃の溶湯に接触したときに発生するアンモニアを採取し、インドフェノール青の比色法により定量した。その結果、溶湯温度 700~800℃で中子 1g 当たり 0.24mg、1000~1100℃で 0.04mg のアンモニアが採取された。この採取量は、それぞれ RCS から発生する潜在的なアンモニア発生量の約 20%および約 3%に相当し、比較的少量であることがわかった。このことから中子が1000℃超の溶湯に接触したときに瞬時に発生する大部分のアンモニアは、外部に放出されることなく、瞬時にさらなる反応が進行し、他の窒素化合物に分解・変換されることが示唆された。

1. はじめに

鋳物は、溶湯(溶融した金属)を鋳型(生型等)に流 し込み、鋳型の中で金属を冷やし、固めて製造される (図 1)。鋳物に中空部を作るときには、鋳物内面を作 る目的で生型とは別に中子とよばれる鋳型を生型の中に 置き、溶湯が流し込まれる。このような鋳物の製造工程 では、金属の凝固、収縮過程で鋳型内に意図しない様々 な欠陥が発生しやすい。とりわけ"鋳巣(いす)"とよ ばれる内部欠陥(鋳物内部の気孔)は、鋳物業界で長年 の課題となっている。

鋳物に生じる鋳巣は、高温の溶湯が鋳型に流し込まれ たときに、鋳型に使われる樹脂から発生する熱分解ガス



(上) 注湯作業、(下) 湯口から出る熱分解ガス

図1 鋳造作業の様子

が原因の一つである。特に、レジンコーテッドサンド (RCS) で造型された中子からの熱分解ガスは多量に発 生するため、溶湯と反応して様々なガス欠陥を引き起こ す。

鋳造現場で使用されている RCS は、硅砂等の骨材、 ノボラックタイプの熱可塑性フェノール樹脂、硬化剤の ヘキサメチレンテトラミン (ヘキサミン)および滑剤から成る。樹脂は鋳物砂に対して概ね 1~3 %、ヘキサミ ンは固形分換算で樹脂添加量に対して 10~20%添加さ れている。これらの添加量が多いほど高強度、高融着点 の RCS となり、中子の生産性が高くなる。一方で、樹 脂添加量が増えると中子造型時や鋳造時にアンモニアや フェノール類などの発生ガスが増大し、鋳物内部欠陥が 発生しやすくなる。また、発生ガスは鋳造作業環境を悪 化させる発煙、臭気の原因物質であることから、その発 生量や特性の把握が望まれている。

これまでに我々のグループでは鋳造時に発生する熱分 解ガスを想定し、モデル化した加熱条件においてガス発 生挙動と特性を調査してきた¹⁴⁾。本研究では鋳造作業 時に発生するガス、具体的には鋳物砂が溶湯に接触した ときに発生するガスの発生特性を把握し、鋳物の内部欠 陥の低減を目指す。

鋳物の内部欠陥の発生メカニズムの1つに、溶湯が鋳 型に注湯されると、中子からの発生ガスが溶湯に吸収さ れ、その後散逸する途中でその一部が鋳物表皮に取り残 されることが考えられている。例えば、鋳鉄では溶湯中 の窒素による欠陥発生^{5,の}が昔から詳しく報告されてい る。鋳造時の発生ガス種であるアンモニアは、熱平衡状 態において高温かつ低圧条件のもとで水素と窒素へと分 解が促進される傾向にあることから、窒素発生源として 鋳物の内部欠陥発生に関与していると考えられる。そこ で本報告では、鋳造工程において中子に用いられる RCS の熱分解ガスであるアンモニアについて、注湯時 の発生量および発生特性について検討した。

^{*} 産業技術センター



2. 試験方法

2.1 材料

ノボラックヘキサミンタイプのフェノール系樹脂を珪砂にコートしたレジンコーテッドサンド(RCS、樹脂分:2.1%)を用いた。

2.2 中子の調製

図 2 に示すように円筒形中子造型器具の内径 (φ20mm)上部中央にガス排出用ステンレス管 (SUS306、外径 φ6mm、内径 φ3mm)を造型器具の底 から 25mm の位置に端部がくるように配置し、これを 260℃に加熱した後、造型器具上部から RCS 25gを投入、 180 秒保持した。その後、オーブンから造型器具を取り 出し、さらに粗熱を取り除いた後に造型された RCS を 取り出し、冷ました。RCS と排出用ステンレス管の隙 間を無機系耐熱接着剤(スリーボンドファインケミカル (株)製 Three Bond 3732)で埋め、乾燥した後、これ を溶湯投入分解法に用いる中子とした。

- 2.3 熱分解方法
- 2.3.1 昇温熱分解法

既報の方法¹⁾にて、RCS 70mg を加熱、分解した。

2.3.2 瞬間熱分解法

既報の方法²にて、RCS 140mg を加熱、分解した。

2. 3. 3 溶湯投入分解法

RCS から調製した中子をアルミナ製保護管((株) ニッカトー HB チューブ 外径 30mm 内径 24mm 長さ 600mm)に挿入した。保護管の片端には導入口が 2 ロ のフランジ((株) ヒートテック製 SNW30SW-40-304) を取り付けた。フランジの導入口にはステンレス管、も う一方の導入口にはアルミナ管を付けた。フランジに取 り付けたステンレス管の端は調製した中子のステンレス 管に繋ぎ、図3に示す溶湯投入管を作製した。溶湯投入



図3 溶湯投入管



図4 溶湯投入分解法の概要



図5 溶湯投入管の溶湯投入の様子

管のフランジの2つの導入口はテフロンチューブで合流 し、その先には分解ガスを吸収する吸収瓶を配置した (図 4)。吸収瓶は吸引ポンプに繋がり、分解ガスが溶 湯投入管からフランジの導入口を通り、吸収瓶に吸引さ れる。

電気炉にて 800℃および 1100℃に加熱したアルミニウ ム合金(ADC12)の溶湯に、作製した溶湯投入管の先 端部を中子部分が浸るように 30 秒投入した(図 5)。 また、溶湯投入管の溶湯投入と同時にポンプにて発生ガ スを吸引した。30 秒後、直ちに投入管を溶湯から引上 げ、さらにその 10 秒後に分解ガスの吸引を停止した。 溶湯投入からポンプを停止するまでの間、中子から発生 した分解ガスを吸収瓶に捕集した。

2. 4 アンモニア捕集および分析方法

2.4.1 アンモニア捕集方法

熱分解によって発生したアンモニアは、吸収瓶を用いて 5g/l ホウ酸水溶液に吸収させ、捕集した。昇温熱分解および瞬間加熱熱分解による発生アンモニアは、5g/l ホウ酸水溶液 60ml に吸収させた。溶湯投入分解では、5g/l ホウ酸水溶液 200ml が入った吸収瓶を4連結して、合計 800ml の捕集液に捕集した。

2. 4. 2 アンモニア分析方法

吸収瓶にてアンモニアを吸収したホウ酸水溶液中のア ンモニウムイオンをインドフェノール青吸光光度法[¬])に 従って、予め作成した検量線から定量した。インドフェ ノール青の吸光度は分光光度計(日本分光(株)製 V-530)にて測定した。アンモニウムイオンの検量線を図 6に示す。検量線は、アンモニウムイオンの検量線を図 6に示す。検量線は、アンモニウムイオン標準液(和光 純薬工業(株)JCSS 1000mg/mL)をホウ酸溶液で所 定の濃度に希釈して、同様にインドフェノール青の吸光 度を測定し、作成した。なおアンモニア量はアンモニウ ムイオン定量値(アンモニウムイオン 1mg に相当する アンモニアの質量(mg):0.944)から換算した。



図6 インドフェノール青吸光光度法によるアン モニウムイオンの検量線



図8 熱分解温度とアンモニア発生量(瞬間熱分解法)

3. 結果及び考察

3.1 熱分解温度とアンモニアの発生

不活性雰囲気下の昇温熱分解法で各温度域から発生した RCS 1g 当たりのアンモニア発生量を図 7 に示す。全アンモニア量の 77%が 250℃までの昇温時に発生し、750℃には 97%に達した。これまでの報告 ¹⁾から 250℃までの発生は RCS 中の樹脂未反応物の揮発によることから、実際の鋳造工程では溶湯が中子に接触した瞬間、溶湯の輻射が中子内部に達する前、および熱分解が進む前に、接触から数秒間の間に大部分のアンモニアが発生すると考えられる。

1000℃、1400℃の不活性雰囲気下の瞬間熱分解法で発 生した RCS 1g 当たりのアンモニア発生量を図 8 に示す。 1000℃でのアンモニア発生量は、昇温熱分解法の 1000 ℃までの全発生量と比べて約 60%と低く、1400℃時の それは 6%とさらに微量であった。昇温熱分解法に比べ て瞬間熱分解法のアンモニア発生量が低くなる理由は、 瞬間熱分解法では RCS が高温下に瞬間的に曝され、瞬 時にアンモニアが発生するが、さらに瞬時にアンモニア が逐次分解されたためと考えられた。瞬間熱分解法に用いた RCS 量が少量であることから 1400℃のような高温では発生したアンモニアの大部分が瞬時に分解されると考えられる。一方、1000℃、1400℃ともに酸化雰囲気下の瞬間熱分解法ではアンモニアの発生は確認されなかった。

3.2 溶湯接触時に中子から発生するアンモニア

溶湯投入分解法に用いた中子の RCS 量は、瞬間熱分 解法に用いたそれに比べて約 180 倍であり、大量の熱分 解ガスの発生が見込まれたため、アンモニアの捕集では、 余裕を持たせて4本連結した吸収瓶を使い十分な量の捕 集液(ホウ酸水溶液)を用いた。しかし、第一番目の吸 収瓶(捕集液 200ml)のみで捕集が可能であった。

溶湯投入分解法にて測定されたアンモニアの捕集量は、 700~800℃および 1000~1100℃の溶湯温度域において RCS 1g 当たりそれぞれ 0.24mg および 0.04mg であった (図 9)。不活性雰囲気下の昇温熱分解法で発生した全 アンモニア量と比較すると、これらは 20%および 3%で あった。このように捕集アンモニア量が低くなる理由は、 溶湯投入管に挿入した中子を溶湯内に投入する際に空気



図 9 熱分解温度とアンモニア採取量 (瞬間熱分解法)

が溶湯に巻き込まれ、中子の熱分解が酸化雰囲気になる ためであると考えられる。しかし、酸化雰囲気下の瞬間 熱分解法の場合には捕集されなかったアンモニアが、溶 湯投入分解法では少量ながらも確認された。これは溶湯 投入分解法に用いた中子の RCS 量が多く、瞬時にすべ て加熱されなかったため、また溶湯に投入した際に巻き 込んだ空気中の酸素が消費され中子近傍が無酸素雰囲気 になったためであると考えられる。

4. まとめ

RCS にて造型された中子が 700℃~1100℃に加熱され た溶湯に接触したときに発生するアンモニアを採取し、 インドフェノール青の比色法により定量した。その結果、 RCS の潜在的なアンモニア発生量(不活性雰囲気下の 昇温熱分解法で RCS から発生するアンモニア発生量) に対して、その採取量は溶湯温度 800℃で 20%、1100℃ では 3%であり、少量であることが分かった。このこと から中子から発生したアンモニアは、その大部分がアン モニアとして外部に放出されず、瞬時に溶湯または空気 と反応して分解または窒素化合物が生成されたと考えら れた。

- 1) 大平ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No. 2, pp 19 - 22, 2014
- 2) 大平ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No. 3, pp 20 - 23, 2015
- 3) 大平ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No. 4, pp 19 - 21, 2016
- 4) 大平ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No. 5, pp 23 - 24, 2017
- 5) 池田ら, 鋳物, 29, pp 499 507, 1957
- 6) 池田ら, 鋳物, 29, pp 631 637, 1957
- 7) JIS K0099: 排ガス中のアンモニア分析方法

水栓部品における脱亜鉛腐食の発生しやすい使用環境の解明(第2報)

三原 利之、関 範雄

Study on dezincification-prone corrosion environment for faucet parts (II)

Toshiyuki Mihara and Norio Seki

黄銅製の水栓部品に、1%塩化銅(Ⅱ)水溶液を1500時間まで循環させて脱亜鉛腐食試験を行った。水栓部 品の脱亜鉛腐食深さは、電子顕微鏡により断面を観察して測定したところ33-445µmの範囲だった。脱亜鉛腐食 深さは、504時間まで試験時間が経過するにつれて比例して増加しており、1時間あたりの脱亜鉛腐食速度は 0.61µmだった。試験時間と脱亜鉛腐食深さの間には高い相関(r:0.98)が得られたことから、脱亜鉛腐食は一定 の速度で安定して進行したと考えられる。また、実際に市場で使用され短期間に脱亜鉛腐食が進行した水栓部品 での脱亜鉛腐食速度(0.068µm)との比較から、今回の脱亜鉛腐食試験は、実際の環境で使用される水栓部品の 脱亜鉛腐食の少なくともおよそ9倍の加速試験を行うことができたと考えられる。

1. はじめに

銅と亜鉛の合金である黄銅は、水道水に対して高い耐 食性を持ち、安価でもあるため、水栓部品の主要な材料 の一つとなっている。また、黄銅は他の銅合金と異なり 鉛を含まないために、近年、環境に配慮した材料として も注目が集められており、今後、より多くの黄銅材料が、 水栓部品へ使用されることが期待されている¹⁾。

黄銅は、一般の水道水に対しては耐食性を持つ金属材 料であるが、酸性の水溶液中では腐食が進行し、銅より もイオン化傾向の大きい亜鉛が水溶液中に溶出する脱亜 鉛腐食が起きる。脱亜鉛腐食では、はじめに腐食溶液と 接触した黄銅表面に亜鉛の腐食生成物が生成され、この 腐食生成物が、腐食溶液中に溶解することで、黄銅表面 が再び腐食性溶液にさらされるため、黄銅中の亜鉛が継 続して溶液中に流出する。脱亜鉛腐食が進行した黄銅で は、黄銅中の亜鉛が失われ、微小な空洞を持つ多孔質な 銅のみが残される²⁾。このため、脱亜鉛腐食が進行し た黄銅製の水栓部品は脆くなり、衝撃等により破損し易 くなる。また、水栓部品の内部から進行した脱亜鉛腐食 が、水栓部品の表面まで達した場合には漏水が起きる。 このような水栓部品における脱亜鉛腐食は、日本の水道 水に多い中性の水道水中では起こりにくいが、日本の水 道水のうちのおよそ 20 %の水道水は弱酸性であり³⁾、 こうした使用環境で長期間にわたり使用される水栓部品 では、脱亜鉛腐食による漏水が起こる場合がある。実際 に、当研究所に県内の水栓部品メーカーからの黄銅製の 水栓部品の脱亜鉛腐食についての技術相談等では、使用 期間が 2~3 年程度で水栓の内部から外部まで脱亜鉛腐 食が進行したものがある。

日本工業規格では、水栓部品に使用される黄銅材料の 脱亜鉛腐食を評価するため、脱亜鉛腐食試験法(JIS H 5120)を規定しており⁴⁾、この試験は材料としての黄 銅の脱亜鉛腐食性を評価することを目的としているため、 試験には黄銅を材料から切り出し加工したものを試料と して評価に用いる。しかし、一般家庭等で実際に使用さ れる製品における脱亜鉛腐食の状態は、製品の部位、形 状、水流の流速等によっても異なり、金属材料そのもの の要因だけではなく、より多くの要因が複雑に絡んでい るため、材料自体の脱亜鉛腐食性を評価する既存の試験 方法で、実際の製品の脱亜鉛腐食性の評価をすることは 難しい。

これまでに当研究所では、黄銅製の水栓製品に腐食性 の飽和溶液を密封して脱亜鉛腐食が験を実施し、黄銅製 の水栓部品において脱亜鉛腐食の再現と評価について報 告している⁵⁰。さらに、実際の水栓部品の使用状況によ り近い水流のある条件で24時間水栓部品の脱亜鉛腐食 試験を行い、静止した腐食溶液中との脱亜鉛腐食試験の 結果と比較した。その結果、脱亜鉛腐食試験は、流水条 件で実施することで従来の静水条件より大幅に脱亜鉛腐 食が進行しやすいことが分かった⁶⁰。

今回の研究では、これまでに行った脱亜鉛腐食試験を より長時間行うことで、この脱亜鉛腐食試験の腐食速度 を求め、実際に一般家庭等で発生した脱亜鉛腐食と比較 することで、製品寿命を推定するための参考とすること を目的として、脱亜鉛腐食試験を行った。

2. 実験

2.1 供試材

本研究に用いた黄銅製の水栓部品を図1aに示した。 この水栓部品は、水栓の吐水部分に用いられる。給水口 から吐水口の長さ、管の外径および内径は、それぞれ 300 mm、16 mm、13 mm で、家庭等で使用される一般 的な仕様の水栓部品を試験に用いた。通常、黄銅の水栓 部品は、外側の表面にメッキがされているが、本試験に はメッキ前の黄銅製の水栓部品を用いて試験を行った。 水栓部品の化学組成は、銅と亜鉛の質量割合が、それぞ れ 65 %, 35 % であり、これは、水道部品に用いられる 黄銅の一般的な組成である。

2.2 脱亜鉛腐食試験

流水条件の試験の様子を、図 1b に示す。試験条件は、 腐食溶液に 75 ℃に保温された 1 % 塩化銅(Ⅱ) 水溶 液を試験液に用い、水流ポンプを用いて流量 0.15 L/min で、水栓部品に腐食溶液を循環させ、24 時間,48 時間, 120 時間,156 時間,336 時間,504 時間,1004 時間, 1500 時間ごとに取り出した。腐食試験の温度および腐 食溶液は、JIS H 5120「銅及び銅合金鋳物」付属書 A 「脱亜鉛腐食試験方法」に準じて決定した 4。1 %塩化 銅(Ⅱ)水溶液は、塩素イオン濃度に換算した場合 2 % の腐食溶液となり、これは海水(3 %程度)よりも低い 濃度である。また、これまでの研究で用いられた 56 % の塩化銅(Ⅱ)の飽和溶液と比較しても大幅に低く、よ



図1 a) 黄銅製の水栓部品,b) 脱亜鉛腐食試験の 様子,c) 脱亜鉛試験後の水栓部品の断面(下から 0h,24h,48h,120h,156h),d) 脱亜鉛試験後の水 栓部品の断面(下から336h,504h,1004h,1500h)

り実際の使用環境に近い塩素イオン濃度であると考えら れる。また、今回の脱亜鉛腐食試験の流水条件は、乱流 により黄銅表面に生成した腐食皮膜が物理的に剥離し、 層流の場合より大幅に腐食が進行する現象(エロージョ ン・コロージョン ⁷⁾)が起こらないように、流速(0.15 L/min)とした。この流速で水を流した場合のレイノル ズ数は、980となり、これは層流の限界値であるレイノ ルズ数 3000 よりも十分に低いため、水流は乱流とはな らず層流となる。実際に、脱亜鉛腐食試験を行った水栓 製品の内面を確認したところ、非常に脆い腐食生成物が 水栓部品の内面を覆っている様子が見られ、これらが水 流により剥離した様子は見られなかった。水流ポンプは、 10 L の腐食溶液を入れた溶液タンク(容量 20 L)から シリコンチューブを通して吸入し、水栓部品に導入した。 水栓部品から流れ出た腐食溶液は、再び腐食溶液の溶液 タンクに戻された。ここで、溶液タンクは恒温槽内で、



図2 水栓部品の断面の SEM 像(倍率 50 倍)

大気開放していたため、腐食溶液には大気圧により酸素 が供給されていたと考えられる。試験の期間中、水流ポ ンプを除く水栓部品、溶液タンクは、75℃に保持され た恒温槽内に静置し、腐食溶液の溶液温度は75℃に保 持した。腐食溶液は、塩化銅(Ⅱ)を蒸留水に溶解させ て調製した。水栓部品は、試験後、内部を蒸留水で洗浄 し、十分に乾燥させた後、ダイヤモンドソーを用いて水 栓部品の中央部を半円状の試料に切断したのち、導電性 の樹脂に埋め込み、その後研磨し、電子顕微鏡を用いた 断面の観察および元素分析を行うための試料とした。

2.3 脱亜鉛腐食深さの測定と観察

腐食試験を行った水栓部品の断面の観察は、高分解能 走査電子顕微鏡複合装置(日本電子(株)製 JIB-4600F) を用い、水栓部品の断面の二次電子(SEM)像の観察 と元素分析を行った。SEM像での観察結果と、元素分 析による結果から、脱亜鉛深さを測定した。

3. 結果及び考察

脱亜鉛腐食試験後の水栓部品の内面の写真を図 1c、 図 1d に、断面の SEM 像を、それぞれ図 2 に示す。流 水条件で試験した水栓部品の内面の観察から、水栓部品 の内面には、試験時間が長くなるほど、その表面全面に



図3 水栓部品の断面の元素分析結果(銅) (倍率50倍)

緑色の析出物が析出しており、特に 1004 時間以上では、 その量が多かった。断面の SEM 画像、銅および亜鉛の 元素分析結果を、それぞれ図3、図4、および図5に示 す。脱亜鉛腐食深さは、それぞれ 24 時間, 48 時間, 120 時間, 156 時間, 336 時間, 504 時間, 1004 時間, 1500 時間では、33 µm、52 µm、69 µm、121 µm、219 μm、287 μm、111 μm、と 445 μm だった。断面につい ての元素分析の結果から、最表面に見られた緑色析出物 は、主に銅と塩素で構成されており、腐食試験の間に、 腐食溶液中の塩化銅が析出したものであると考えられる。 また、緑色析出物の内側には、どの試料も銅が析出して おり、これは脱亜鉛腐食の過程で、溶液中の銅成分が、 水栓部品の内面に析出したものであると考えられる。脱 亜鉛腐食は、亜鉛が電子を放出し、イオン化することで 水溶液中に溶出し腐食が進行する。腐食溶液中の銅は、 腐食反応に必要な電子を受容する役割を果たしているた め⁸⁾、腐食反応が進行するにつれ溶液中の銅イオンが還 元されて、より多くの銅が析出したと考えられる。特に、 1004 時間、1500 時間のものは析出物が多く、504 時間 以下のものとは腐食の機構が異なると考えられたため、 これらは腐食速度の計算からは除外した。

図5に、試験時間と脱亜鉛腐食深さの関係を示す。今回の脱亜鉛腐食試験では、試験時間が経過するにつれて



図 4 水栓部品の断面の元素分析結果(亜鉛) (倍率 50 倍)

脱亜鉛腐食深さは比例して増加しており、1時間あたりの脱亜鉛腐食速度は、0.61 µm だった(r: 0.98)。このことから、今回の脱亜鉛腐食試験の条件では、脱亜鉛腐食は安定して一定の速度で進行したと考えられる。

脱亜鉛腐食による一般家庭からの回収品では、水栓部 品(厚さ 1.2 mm)が 2 年間の使用で内面から表面まで 脱亜鉛腐食が達した例があった。通常、水栓部品は 10 年以上の長期間にわたり使用されるが、この一般家庭で 使用された水栓部品の使用環境は、2 年間という比較的 短期間で脱亜鉛腐食が進行している。そのため、この水 栓部品の使用環境は通常よりも厳しい条件であったと思 われるが、この場合の脱亜鉛腐食速度は 1 時間あたり 0.068 µm となり、この腐食速度は今回の脱亜鉛腐食試 験のおよそ9倍だった。このことから、今回の脱亜鉛腐 食試験は、実際の環境で使用される水栓部品の脱亜鉛腐 食に対しておよそ 1/9 の短期間で、水栓部品の脱亜鉛腐 食についての評価を行うことができたと考えられる。

4. まとめ

今回の研究では、実際に使用される水栓部品で発生する脱亜鉛腐食により近い条件で脱亜鉛腐食試験を行うための最初のステップとして、水栓部品に低濃度の1%



図5 脱亜鉛腐食深さと試験時間の関係

塩化銅(II)水溶液を腐食溶液として循環させ脱亜鉛腐 食試験を 1500 時間まで行い、試験期間後電子顕微鏡に より断面を観察し、脱亜鉛腐食深さを比較した。今回の 脱亜鉛腐食試験の条件では、1時間あたりの脱亜鉛腐食 速度は、0.61 µm であり、脱亜鉛腐食試験時間と脱亜鉛 腐食深さは比例して増加した。脱亜鉛腐食試験時間と脱 亜鉛腐食深さの間には高い相関(r:0.98)が得られてお り、今回の脱亜鉛腐食試験方法をさらに改良していくこ とで、今後、より実用的な水栓製品の脱亜鉛腐食性の促 進評価方法の開発に活用できる可能性を見出すことがで きた。

その一方で、今回の脱亜鉛腐食試験では、その内面に 一般家庭で使用され脱亜鉛腐食した水栓部品には見られ なかった析出物の析出が見られており、今回の脱亜鉛腐 食試験は、市場で使用される環境よりもより厳しい条件 であると考えられる。今後、より実際に使用される水栓 部品の腐食環境に近い、より安定した腐食試験が実施で きるようになることが期待される。 水栓部品の脱亜鉛腐食は、製品の部位、形状、水流の 流速等によっても異なり、金属材料そのもの要因だけで はなく、使用の状況、使用される水質等にも大きく影響 されると考えられる。通常、水栓部品は 10 年以上の長 期間において使用されるため、その期間の間にゆっくり と進行する脱亜鉛腐食による水栓部品の漏水等を低減さ せていくためには、今後、水栓部品やその材料について より適切な脱亜鉛腐食性の評価を行うことに加え、発生 頻度の高い地域の把握やその地域の水質等を分析・解析 し、脱亜鉛腐食の発生する特定の環境を把握していく必 要があると考えられる。

【謝辞】】

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団 の研究補助金により実施しました。ここに深く感謝いた します。今回の研究にあたり、試験体をご提供いただい た関連企業様に深く感謝いたします。

- 1) 山田ら, 鋳造工学, No.87, pp830-835, 2015
- 2) 板垣ら,材料と環境, No.59, pp43-49, 2006
- 水道水質データベース,<u>http://www.jwwa.or.jp/mizu/</u>, 日本水道協会
- 4) 日本興業規格 JIS H 3250: 銅及び銅合金の棒
- 5) 足立ら,岐阜県工業技術研究所研究報告, No.3, pp27-30, 2016
- 三原ら,岐阜県工業技術研究所研究報告, No.4, pp29-32, 2017
- 7) Yabuki, Materials and Corrosion, 60, No.7, 2009
- 8) 長野博夫ら、よくわかる最新さびの基本としくみ、 秀和システム

鉄鋼製品に錆を生じさせない防食技術の開発(第2報)

大川 香織、横山 貴広、細野 幸太

Development of corrosion prevention technology on steel products (II)

Kaori OKAWA, Takahiro Yokoyama and Kota HOSONO

鉄鋼材料を劣化させる主な原因に腐食(錆)がある。製品に錆が発生すると、品質や性能・寿命を大きく損な う。鉄鋼材料は、水と酸素の存在下では錆が発生しやすく、いったん錆が生じると鉄の内部へ深く進行していく ため、効果的な防食法が求められている。本研究では、鉄鋼材の表面に存在するナノオーダーの酸化皮膜に有機 化合物を化学的に結合させることで極表面層を緻密な有機皮膜で覆い、錆発生の原因となる水および酸素を遮断 することで、鉄鋼材に対する簡便な防食法の確立を目指す。

1. はじめに

鉄鋼材料は資源量が豊富であり、安価で加工特性に優 れており、また様々な熱処理ができることから、世界で 最も使われている材料の一つである。しかしながら、鉄 は湿度と温度の影響を受けて、錆が非常に発生しやすい 材料である。錆を防ぐには、金属表面をいかに水および 酸素から遮断するかにかかっている。鉄鋼材を用いた製 品は保管時に錆が発生しないよう防錆油を塗布し、防錆 剤中の界面活性剤が鉄鋼材の表面に吸着して錆を防いで いる。しかしながら、鉄鋼材と界面活性剤は物理的に接 触しているだけで、鉄鋼材表面と油の間には、時間の経 過とともに水や酸素が浸入しやすくなる。その結果、防 錆効果は持続的ではなく、長期保管時には定期的な塗り 直しが必要で、かつ、使用前に脱脂工程が必須であり、 手間がかかるため、コスト増の一因となる。鉄鋼材表面 に錆を発生させない簡単な防食法の開発は、製造業界に とって大きなメリットがある。

金属表面へ有機分子を直接合成することは困難だが、 ある特定の有機化合物が化学吸着し、緻密な有機皮膜を 形成することが知られている^{1,2)}。これらの有機皮膜は 自発的かつ規則的に集積されることから自己組織化単分 子膜(Self-Assembled Monolayer、以下 SAM と略)と呼 ばれ、基材表面と強固な化学結合により固定化される。 これまでに当所において、カミソリ刃やメスに用いられ ているマルテンサイト系ステンレスである SUS420J2 表 面をはじめ、鉄鋼材表面(S55C)への化学結合による 撥水・撥油性を有する SAM 膜の形成を試み、基板表面 に撥水・撥油性を付与することができた^{3,4)}。しかしな がら、塩水中では未処理、処理基板いずれも腐食した。 S55C が合金なため、S55C 表面は不均一な酸化膜となっ ており、ホスホン酸の均一な皮膜が形成されていない可 能性が示唆された。

そこで本研究は、純金属である鉄材の表面に存在する ナノオーダーの酸化皮膜に有機化合物を化学的に結合さ せて、鉄材の表面を緻密な有機皮膜で覆い、錆発生の原 因となる水および酸素を遮断することで、定期的な塗り 直しが不要で簡便な防食法の可能性について検討した。

2. 実験

2.1 基板および試薬

基板には鉄(ケニス株式会社、純度 99.84%)を用いた。片側の表面を $\sharp400$ の SiC 研磨紙で湿式研磨した後、表面の有機汚染層を除去するために、ヘキサン、アセトン、純水の順で超音波洗浄して送風乾燥器で乾燥し、試験に供した。ホスホン酸誘導体は、1H,1H,2H,2H-Perfluoro-n-decylphosphonic acid ($C_{10}H_6F_{17}O_3P$) (以下 PFDPA と略) (東京化成工業)と Undecylphosphonc Acid ($C_{11}H_{25}O_3P$) (以下と UDPA と略) (東京化成工業)を用いた(図 1)。



2.2 基材へのホスホン酸皮膜の形成

1.0mM ホスホン酸 THF 溶液を調整し、基板を所定の 時間、大気雰囲気下で浸漬した。反応はすべて室温 (25℃)で行った。反応後、100℃で1時間加熱処理を した後、THF で洗浄して未反応のホスホン酸誘導体を 除去し、風乾して実験に供した。

2.3. 基板表面の評価

2.3.1 接触角測定による撥水性の評価

ステンレス製注射針を取り付けたマイクロシリンジを 使用し、室温 20°C で基板表面に純水を 1 μ または 2 μ 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。

2.3.2 X線光電子分光分析(X-ray Photoelectron Spectroscopy(XPS))による表面分析

アルバック・ファイ株式会社製 PHI 5000 Versa Probe

Ⅱ を使用し、処理基板および未処理基板の表面に存在す る元素の同定および化学状態分析を行った。励起 X 線 源は AlKα (hv=1486.6eV)を使用した。

2.4 基板の耐食性評価

2.4.1 塩水噴霧試験による耐食性評価

板橋理化工業株式会社製 BQ-I 型を使用し、塩水噴霧 試験を行った。条件は塩水濃度 50±1g/L、塩水タンク 温度 35±2℃、空気飽和器温度 47±2℃、pH6.5~7.2、 噴霧量 1.5±0.5ml/80cm²/h、試験槽内温度 35±2℃で 4 時間行った。

2. 4. 2 恒温恒湿下における耐食性評価

湿度の調整には湿度定点法を用いた。硫酸カリウム飽 和水溶液をデシケーター内に静置し、室温 25℃におけ る相対湿度 97%RH に調整した。ホスホン酸処理基板お よび未処理基板を静置し、経時変化を外観観察した。

3. 結果及び考察

3.1 接触角測定による撥水性の評価

洗浄した基板の純水に対する接触角測定時の画像をそ れぞれ図 2 に示す。未処理鉄基板の接触角は、77.9°で あった。これは未処理基板の場合、表面汚染により接触 角が高く出ているものと思われる 5。ホスホン酸誘導 体処理基板の場合、PFDPA 処理基板の純水に対する接 触角は 102.7°、さらに UDPA 処理基板の純水に対する 接触角は 100.2°であった。 撥水性を有する材料として よく知られているポリテトラフルオロエチレン (PTFE) の 104~114°よりも若干小さいものの、ホスホン酸誘導 体処理基板の表面は、高い撥水性を有していることが明 らかとなった。



C.A.=77.9

C.A.=102.7

図2 未処理鉄基板、PFDPA 処理鉄基板および UDPA 処理鉄基板の純水に対する接触角測定 (a)未処理、(b)PFDPA 処理、(b)UDPA 処理

3.2 XPS による基板表面の評価

図 3 に各基板の XPS ワイドスペクトルを示す。図 3(a)より、未処理基板の表面からは、724 eV および712 eV に鉄の 2p 電子(Fe2p)、530 eV に酸素の 1s 電子 (O1s)、285 eV に炭素の 1s 電子(C1s)の結合エネルギー を示すピークがそれぞれ確認された。一方、PFDPA 処 理基板のワイドスペクトル(図 3(b))からは、基板由来 の鉄、酸素以外に、689eV 付近に PFDPA に由来するフ ッ素の1s 電子(F1s) と190 eV と133 eV 付近にリンの 2s 電子(P2s)と 2p 電子(P2p)の結合エネルギーを示すピ ークが明確に認められた。また、UDPA 処理基板のワ

イドスペクトル (図3(c)) には C-C 結合に由来する 285eV に強いピークと 190 eV と 133 eV 付近にリンの 2s 電子(P2s)と 2p 電子(P2p)の結合エネルギーを示すピ ークが確認された。これらの結果から、ホスホン酸誘導 体は基板表面に存在していることがわかった。



図3 各基板表面の XPS ワイドスキャンスペクトル (a)未処理、(b)PFDPA 処理、(b)UDPA 処理

3.2 塩水噴霧試験による耐食性評価

塩水噴霧試験を4時間行った各基板の外観画像を図4 に示す。いずれの基板においても局部的な赤さびの発生 が見られ、さびの出方には大きな違いは認められなかっ た。鉄の表面は非常に薄い保護的な酸化膜で覆われてい るが、表面には介在物や欠陥が存在しているため、実際 には均一に覆われているわけではない。鉄が塩水と接触 すると、塩水中の塩化物イオンが欠陥等に吸着して、酸 化膜を破壊し、鉄イオンが溶けだしてしまう。試験中の 基板表面は常に塩水で濡れた状態にあるため、鉄イオン が溶けだしやすい状態となり、保護性でない赤さびが発 生すると考えられる °。ホスホン酸処理を行った場合に おいては、ホスホン酸は鉄基板表面の酸化膜で覆われて いない介在物や欠陥部分には結合することができない。 そのため、ホスホン酸処理の表面にはホスホン酸で被覆 されていない部分が残っており、そこが起点となって、

塩化物イオンの存在下で鉄基板から鉄イオンが溶けだし、 赤さびが生じているものと推察される⁹。



図4 塩水噴霧試験における各基板の外観変化 (a)未処理、(b)PFDPA処理、(b)UDPA処理

3.3.恒温恒湿下における耐食性評価

室温 25°C、相対湿度 97%RH に 2 日静置した各基板 の外観画像を図 5 に示す。未処理基板(図 5(a))には目 視ではっきりと確認できる赤さびが数か所発生している。 一方、PFDPA 処理基板(図 5(b))および UDPA 処理基 板(図 5(c))には認められない。さらに、12 日間静置 した各基板の外観画像を図 6 に示す。未処理基板(図 6 (a))には赤さびの数が増え、全面に発生しているが、 PFDPA 処理基板(図 6(b))および UDPA 処理基板(図 6(c))には認められなかった。

鉄が水中で赤さびを生じる反応は式(1)、式(2)および式 (3)で示される^{7,8)}。式(3)で生じた Fe(OH)2 は溶存酸素と 反応してオキシ水酸化鉄(FeOOH)となり、さらに酸 化や脱水反応を繰り返して最終的に Fe₂O₃ となる。これ らの反応は基板表面近傍で起こる。鉄の腐食は(2)式の 反応が全体を支配する "。今回の実験環境下では、湿度 が高いので、鉄表面の電気伝導性はあるものの導電率が 低いので、イオン伝導が難しい。そのため、基板表面で は(2)式の反応が進むことができる領域は対となる式(1) が生じているところに限定され、導電率が高い場合に比 べ、腐食速度は低下する %。さらに、鉄表面の酸化膜は 親水性であり、表面への水の吸着量は雰囲気の相対湿度 が 80%RH 以上で急増し、吸着した水分子は局所的なク ラスターを形成することが示唆されている %。以上のこ とから、未処理基板では、まだらに赤さびが生じている ものと考えらえる。一方、ホスホン酸処理基板の表面は、 ホスホン酸皮膜により疎水性となっており、表面には水 分が吸着しづらく、鉄がイオン化されにくい。その結果、 電子の移動が起こらず、式(1)、式(2)および式(3)が生じ ないため、赤さびの発生が抑制されていることが示唆さ れる。

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 2e^-$$
 (1)

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$
 (2)

$$Fe + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \to Fe(OH)_2$$
 (3)







図5 室温 25℃、相対湿度 97%RH に2日静置した 各基板の外観画像 (a)未処理、(b)PFDPA 処理、(b)UDPA 処理

これらの結果から、ホスホン酸誘導体による鉄基板への 表面処理は、電気伝導性の低い環境である屋内での赤さ び発生を抑制できる可能性が高い。鉄系材料を使用した 部品等を屋内保管する際の防錆剤として期待される。

4. まとめ

鉄基板にホスホン酸処理を施し、鉄表面を緻密な有機 皮膜で覆うことで、錆発生の原因となる水および酸素を 遮断し、鉄系材料に対する簡便な防食法の検討を行った。 その結果、屋内環境のような電気伝導性の低い環境での 赤さび発生を抑制できることがわかった。ホスホン酸誘 導体による表面処理は、鉄系材料を使用した製品を屋内 保管する際の防錆剤として期待される。







図6 室温 25℃、相対湿度 97%RH に 12日静置した各基板の外観画像 (a)未処理、(b)PFDPA 処理、(b)UDPA 処理

- 1) 杉村ら, 表面技術, 62(2), pp98-103, 2011
- 2) 高井ら, 表面技術, 55(12), pp758-763, 2004
- 3) 大川ら,工業技術研究所研究報告 No.3, pp9-11, 2015
- 4) 大川ら,工業技術研究所研究報告 No.4, pp33-36, 2016
- 5) 角田、オレオサイエンス、1(5)、pp525-531、2001
- 6) 原, J. Vac. Soc. Jpn., 44(10), pp860-865, 2001
- 7) 笛木, 色材, 39(6), pp286-296, 1966
- 8) 井上, ソルトサイエンスシンポジウム, pp1-4, 2012
- 9) 石川ら, 材料と環境, 40, pp540-544, 1991

アルミニウム合金のプレス成形性向上に関する研究(第3報)

小川 大介、柘植 英明

Study on press forming of aluminum alloy (III)

Daisuke Ogawa and Hideaki Tsuge

本研究では、アルミニウム合金の成形性について、電動サーボプレス機の特長であるモーション制御に着目し、 各種成形速度および温度(常温と 200℃)条件における成形実験を実施した。その結果、成形速度と絞り比の関 係が明らかになり、金型温度条件によっては絞り比が向上することを確認した。しかし、冷間(常温)成形と温 間(200℃)成形による真円度や板厚分布については、差異が無かった。また、深絞り成形後の材料集合組織の 解析によって、成形時に発生した塑性変形の様子を観察することができた。

1. はじめに

近年、環境問題や省エネルギーの観点から、軽量化の ニーズを受け、自動車用パネル材料など、鋼板に代わり アルミニウム合金の使用量が増大する傾向にある¹⁾。し かし、アルミニウム合金の延性は従来使用されてきた軟 鋼板の延性と比べて低いことが知られており、しわや割 れなどが発生し、成形性に課題がある。そのため、アル ミニウム合金の使用用途範囲は限定的である。

このアルミニウム合金の適用範囲拡大に向けた成形性 の改善手法の一つとして温間成形が挙げられる。この方 法は、あらかじめ材料を炉などで加熱することなく、加 熱した金型を用いて深絞り成形する方法で、冷間成形よ りも限界絞り比を向上することが可能とされている。ま た、この温間成形は、汎用の冷間プレス機を使用して実 施できることから設備投資は比較的少なくて済む可能性 があり、自動車部品への実用化の高い成形方法と考えら れている。

一方、プレス機械においては、油圧プレスや対向液圧 プレスなど様々なプレス機が存在する。なかでも、電動 サーボプレス機の登場により、プレスの途中までは高速 で駆動させ、下死点(加圧の最下点)に近いところで速 度を落として加工するなど、スライドの動きや速度、下 死点位置などを任意にかつ高精度に制御できるサーボプ レス機が生産性向上に貢献できると期待されている²⁾。

本研究では、アルミニウム合金のプレス成形性向上を 目指す。既報^{3,4}により、非熱処理型合金 A5052-O 材を 用いて冷間および温間プレス成形を行い、最適成形速度 が存在していることを示した。本年度は、調質が異なる A5052-H34 材および熱処理型合金 A2017-T3 を加え、プ レス成形速度に対する成形性への影響を調査した。

2. 実験装置および実験方法

本実験に使用した供試材は、板厚 1.0mm、非熱処理 型合金 A5052- H34 材、熱処理型合金 A2017-T3 を用い、 恒温雰囲気における引張試験および成形試験を行った。



図1 引張試験片

引張試験は万能試験機(Instron Corporation 製 5985 型) を用い、槽内温度を $25 \sim 200$ °Cに保ち、試験速度 2mm/min にて引張強さ、破断伸びを測定した。引張試 験片は、JIS Z 2241 による 13 号 B 号試験片(平行部 12.5mm×長さ 60mm、標点距離 50mm)とし、図 1 に示すように圧延方向(RD)を 0° 方向とし 0° 、45°、 90°(TD)方向にワイヤーカット切断機にて試験片を 作製した。

深絞り成形試験には、3 次元 CAD ソフト (Solid Works)を用い深絞り金型モデルを作成し、被成形材接触位置をあらかじめ検討し、成形加工条件に活用した。 プレス機には、電動サーボプレス機((株)放電精密加 工研究所製 ZENFormer MPS675DS)を用いた。プレス 成形条件として、V字1点変速制御によりプレス速度5 ~200mm/s、しわ押さえ板間隔 1.0mm、金型温度を常 温(冷間成形)と 200°C(温間成形)として深絞り成形 を行った。金型形状は、パンチ径 ϕ 25mm、パンチ肩半 径 R5mm、ダイス径 ϕ 27.5mm、ダイス肩半径 R5mm を 用いた。また、金型加熱には、ダイおよびしわ押さえ板 にカートリッジヒーターを用いた(パンチ部は加熱機構 なし)。被成形材は、 ϕ 40mm~ ϕ 57.5mm(絞り比: 1.6~2.3)をワイヤーカット放電加工機にて作製した。

深絞り成形後の形状精度評価には、真円度測定器 ((株)東京精密製 ロンコム 52B-510)を用いて、カ ップ外周底面から高さ H10mm から 3mm ピッチで測定 した。カップ板厚測定には、マイクロメーターを用いて カップ底中心から圧延方向に沿って 2mm ピッチに測定 した。そして、高性能走査電子顕微鏡複合装置(日本電 子(株)製 JIB-4600F)を用い、電子線後方散乱回折 (EBSD)法により成形前後の集合組織を解析した。

3. 結果及び考察

3.1 引張試験

アルミニウム合金 A5052-H34 の引張試験結果を図 2 に示す。この結果から、A5052-O 材の時と同様に雰囲 気温度が高いほど引張強さが低下し、25℃と比べ 200℃ の引張強さは 20%低下した。破断伸びについては、10 %弱の破断伸びが 35%程度まで劇的に向上することが 分かった。次に、A2017-T3 材の引張試験結果を図 3 に 示す。A5052-H34 材と同様に、引張強さは低下するが、 破断伸びはほとんど変化しないことが分かった。

3.2 深絞り試験結果

3.2.1 限界絞り比

A5052-H34 材における冷間および温間成形時の成形 速度と絞り比を変化させた場合の実験結果を図4に示す。 成形が可能であったものを○印、しわやき裂が入ったも のを△印、割れて成形できなかったものを×印と表記 した。A5052-O 材の結果と異なり、冷間成形時の限界 絞り比 2.16 (成形速度 50~100mm/s) が得られた。一方、 温間成形では限界絞り比 2.24 (成形速度 5mm/s) が得ら れ、限界絞り比の向上が確認できたが、速い成形速度に なるに従い、材料加熱によって深絞り成形時の材料引き 込み速度に追従できないため、割れが発生して成形でき なかった。

次に、A2017-T3 材における実験結果を図 5 に示す。 冷間成形時の限界絞り比 1.6 (成形速度 50~200mm/s) であったが、温間成形時の限界絞り比 2.3 (成形速度 5 ~10mm/s) が得られた。引張試験結果の機械的特性の 変化により限界絞り比の大幅な向上が確認できた。

各材料において、温間成形により限界絞り比は向上す るが、遅い成形速度でないと成形できない傾向があるこ とが分かった。

3.2.2 形状測定

冷間成形および温間成形における A5052-H34 材の絞 り比 2、A2017-T3 材の絞り比 1.6 および 2 の各プレス速 度に対する成形品の真円度測定結果を図 6、7 に示す。 A5052-H34 材の冷間成形については、既報 ^{3,4)}と同様に、 プレス成形速度が速くなるに従い真円度のばらつきが大 きくなり、カップ縁に近いほど悪くなっている。温間成 形における真円度は、冷間成形と比べ若干良くなってい るが、カップ高さ H16mm 以上の位置では、逆に真円度 が悪くなった。

絞り比 2.16、成形速度 100mm/s の板厚分布測定結果 を図8に示す。温間成形品は冷間成形と比べ板厚減少が 大きく、カップ縁部分は板厚増加に転じることが、真円 度結果を悪くした要因と考えられる。

A2017-T3 材については、絞り比 1.6 の条件で比較す ると、明らかな差異はみられなかった。絞り比 2 の温間 成形については、A5052-H34 材と同様に、カップ高さ H16mm 以上の真円度が悪化することがわかった。

絞り比 1.6 および 2、成形速度 100mm/s の板厚測定結



果を図9に示す。絞り比1.6に関しては、冷間と温間成 形共に、ほぼ同等の板厚であるのに対し、絞り比2につ













図9 板厚測定結果(A2017-T3)

いては、板厚減少が若干大きく、カップ縁に近いところ は、板厚が 1.25mm まで増加した。この要因は、温間成 形により料の引張強さや伸びなどの物性が変化したため と考えられる。

3.2.3 EBSD 測定

深絞り成形品(A5052-H34:絞り比 2、A2017-T3:絞 り比 1.6)の EBSD 法による側壁部圧延方向(RD)断面 の集合組織解析結果を図 10、11 に示す。深絞り成形の 塑性変形によって、結晶方位にむらが生じていることが 確認できた。また、A2017-T3 材については、結晶粒が 深絞り加工に引き伸ばされていることが分かった。また、 材料加熱による結晶粒粗大化は確認できなかった。

4. まとめ

アルミニウム合金の成形温度およびプレス成形速度に よるプレス成形性への影響を調査し、以下の結果を得た。

- 1) 各雰囲気温度条件による機械的特性が変化し、引張 強さおよび破断伸びが変わることを確認した。
- 2) 絞り比と成形速度の関係性について、最適性がある。
 冷間成形では、50~100mm/s、温間成形では、5~
 10mm/sの成形速度の時が、絞り比が最も良い。



図10 EBSD 測定結果(A5052-H34)



図11 EBSD 測定結果(A2017-T3)

- 3) A2017-T3 材において、金型温度 200℃の成形におい て、絞り比 2.3 を達成することができた。
- 4) 冷間成形と温間成形による真円度と板厚分布について、差異が無い。

【謝辞】】

本研究の一部は、公益財団法人遠藤斉治朗記念科学技 術振興財団の助成を受けたものである。ここに深く感謝 いたします。

- 1) 高田健,新日鉄技報第 393, pp104-109, 2012
- 2) 林央, 天田財団研究報告書, pp11-19,2008
- 3) 小川ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No. 4, pp35-36, 2016
- 4) 加賀ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No. 5, pp37-39, 2017

複 合 材 料 関 連

CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発(第6報)

- CFRTP 製下肢装具の実用化 -

千原 健司、仙石 倫章、西垣 康広、鈴木 貴行

Development of the ultralight lower extremity orthosis using Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (VI) - Practical orthosis using CFRTP -

Kenji Chihara, Tomoaki Sengoku, Yasuhiro Nishigaki and Takayuki Suzuki

県では、患者や障がい者等の生活の質の向上、及び医療福祉機器分野の産業振興を目的としてヘルスケア機器 開発プロジェクトを平成 26 年度から進めている。その中で当研究所では、加熱により再成形ができ、軽量、高 強度、高剛性の特長をもつ熱可塑性炭素繊維複合材料(以下、「CFRTP」)が、人体に合わせた調整が必要で軽 量化が望まれる装具に有効と考え、CFRTPを活用した下肢装具の開発を進めている。

平成 26~27 年度には、CFRTP の設計/成形/評価技術を確立し、平成 28 年度からは具体的な医療・福祉ニーズに基づいた開発に取り組んでおり、この内 2 点の CFRTP 製下肢装具が実用に至ったので報告する。

1. はじめに

炭素繊維は軽くて強く、鉄の約4分の1の比重で、 約10倍の比強度があると言われている。なかでも近年、 自動車等へ適用され始めた CFRTPは、加熱により材料 が軟化し再成形できることから、人体に合わせた調整 が必要で軽量化が望まれる装具に有効と考えられる。

これまで地域の産学官による開発体制と設備を整備 し¹⁾、CAE による形状設計ならびに、CFRTPの成形や 加工、試作の物性評価、臨床評価に取り組み、既製品 と同形状の下肢装具を試作し、評価することにより CFRTP 製下肢装具の基本的な特性を把握した²⁾。また、 昨年度は、本材料の特長の一つである再成形をする方 法を確立するために、再加熱及び再成形手順を探索し、 再成形後の材料強度及び内部観察により評価した³⁾。

本報では、これまでに確立した要素技術を活用して 進めている医療・福祉ニーズに基づいた開発の内、2 点の CFRTP 製下肢装具が実用に至ったので報告する。

2. 実用化した CFRTP 製下肢装具

2.1 脳卒中患者リハビリ用の長下肢装具

脳卒中急性期の患者は、できるだけ早く歩行リハビリ を始めることが予後に良いとされており、一般に長下肢 装具が用いられる。しかし、共同研究者の医師が県内病 院の 56 名の患者から使用状況を調査したところ、従来 の長下肢装具(図1左)は金属製で重く使いづらいうえ、 リハビリが進むと膝から上の部分が不要となり無駄が生 じていることが判明した(図2)。

そこで、CFRTP を用いパーツをモジュール化するこ とで継続して使用でき、従来よりも軽量で使いやすいリ ハビリ用下肢装具を新たに開発した(図1右)。開発品 の重量は約0.6kg であり、従来品の約1.5kg と比べ約60 %軽量化している。また、患者のリハビリが進み麻痺の



図1 脳卒中患者リハビリ用の長下肢装具 (左:従来品、右:開発品)



図2 回復期病棟へ転院した片麻痺患者の従来型 長下肢装具の使用状況(岐阜大学調査)

程度が軽くなれば、上部の CFRTP 部分を外すことによ り下部のプラスチック下肢装具をそのまま継続して使用 することができ、同時に上部の CFRTP 部分は新たな患 者の下肢装具へ再利用できるため経済的である。

従来の下肢装具と開発した下肢装具とをそれぞれ被験 者に装着した上で、歩行動作を取得、比較することによ り、下肢装具が適切に機能しているかどうかを評価した。 歩行動作は、床反力計(ATMI 社)と3次元動作解析シス テム(Oxford Metrics 社、VICON)を使用して取得した。 図3にVICONで処理した動作解析の様子と、従来品と 開発品との床反力比較結果を示す。これらにより被験者 の歩行動作は従来品と開発品で差がなく、開発した下肢 装具が適切に機能していることを確認した。

2.2 靴に容易に着脱可能な下肢装具

脳卒中患者は、病院を中心とした 3~6 ヶ月程のリハ ビリ期間を経ると麻痺の回復が鈍化し、それ以降は長期 にわたり軽装な下肢装具を装着して生活することになる 場合が多い。また、生まれつき足に障がいを持つ方も下 肢装具を使用する機会が多い。しかし、医師から処方さ れる下肢装具は一足限りであり、季節や天候等に応じて 外出する靴を選ぶことができない問題があった。

そこで、好みの靴を下肢装具として簡単に使用するこ とができるパーツを新たに開発した。パーツは主として 下腿部を固定し靴からの力を伝達する CFRTP 部分(図 4 右)と、これと靴とを連結するための樹脂性ソケット (図 5 上)からなる。ソケットは CFRTP 部品が簡単に 脱着可能な構造を持ち(図 5 下)、なおかつ軟らかい靴 底と硬い CFRTP 部材の係りあう力を緩和し、靴の破壊 を防ぐ役割がある。CFRTP を用いることにより装具部 分の重量は約 70g となり、金属を用いた従来品(図 4 左) の重量約 350g と比べて 1/5 に軽量化している。

開発にあたっては、CAE を活用して靴底に負担の掛からない形状に設計し(図6左)、汎用試験機による疲労耐久性評価の結果で挿入部分を改良する(図6右)など、これまでに培った要素技術を活用した。

3. まとめ

これまでに確立した要素技術を活用し、医療・福祉 ニーズに基づいて開発した CFRTP 製下肢装具 2 点につ いて報告した。

現在、脳卒中患者リハビリ用の長下肢装具は県内病 院にて月間 10 名程度の方が利用しており、軽くて使い やすいとの好評を得ている。また、靴に容易に着脱可能 な下肢装具は特許権を取得し、平成 29 年 10 月より市販 を開始している。

【謝辞】

脳卒中患者リハビリ用の長下肢装具は、岐阜大学医学 部附属病院および株式会社今仙技術研究所と共同し、株 式会社名光ブレースの協力を受けながら開発しました。

靴に容易に着脱可能な下肢装具は、ヒューマニック株式会社と共同して開発しました。

共同開発者の皆様に感謝いたします。



図3 3次元動作解析 (左:動作解析の様子、右:床反力の比較)



図4 外出用の下肢装具 (左:従来品、右:開発品)



断面の俯瞰図



図5 挿入用のソケット (上段:ソケットの外観、下段:着脱機構の説明)



図6 活用した要素技術の例 (左: CAE による設計、右: 疲労耐久性評価試験)

- 千原,道家,仙石,萱岡,田中,岐阜県工業技術研究 所研究報告 No.3, pp33-38, 2015
- 千原, 仙石, 道家, 萱岡, 岐阜県工業技術研究所研究 報告 No.4, pp41-44, 2016
- 千原,仙石,道家, 萱岡,岐阜県工業技術研究所研究 報告 No.5, pp40-43, 2017

次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発(第3報) - FRP-FRP 接合技術の開発2 -

西垣 康広、仙石 倫章、鈴木 貴行、山田 孝弘

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts (III) - Development of joining technology of FRP and FRP (II) -

Yasuhiro Nishigaki, Tomoaki Sengoku, Takayuki Suzuki and Takahiro Yamada

本研究ではFRPを効率良く、強固に接合する技術を開発することを目的とし、超音波溶着による接合技術、及び他の接合技術との複合化による接合技術を確立する。

超音波溶着技術により炭素繊維強化プラスチック(CFRTP)を接合する基礎研究として、昨年度はマトリック ス樹脂が結晶性樹脂であるナイロン66(PA66)のCFRTP(CF/PA66)の同種材を溶着する条件を検討したが、本 年度は非結晶性樹脂であるポリカーボネート(PC)のCFRTP(CF/PC)の同種材を溶着する条件を検討し、引張 せん断試験により溶着強度を評価した。その結果、CF/PCの同種材の超音波溶着による溶着強度は、ホーンの設 定圧力が0.5MPa、溶着時間が2秒と2.5秒において良好な溶着が可能であることがわかった。

1. はじめに

近年、CFRPやGFRP等のFRPは軽量化部材として、 金属材料が使用されている部品からの代替利用が検討 されている。特にCFRPは、軽量、かつ、高強度である という優れた特性を有し、次世代自動車・航空機産業 を中心に利用拡大に向けた製品開発が進められている。

これまで本研究所では、CFRTPの製品化に向けた支援を目的とし、「ぎふ成長産業強化プロジェクト」においてCFRTPの成形加工技術を確立してきた¹⁾。CFRTPの製品化においては、次の段階として、成形部品を他の部品(部材)と接合する技術が必要となっている。現在、FRP部品を他の部品(例えば金属部品)と接合するには、穴をあけてボルトで固定する「機械的締結」が中心となっている。しかし、穴あけ加工時にFRP部品やFRP中の炭素繊維を破損する危険性があるとともに工程数が多くなることが課題である。そこで、FRPの製品化に向けて、FRPに適した接合技術の確立が必要不可欠となっている^{2,3}。

本研究では、FRP を効率良く強固に接合する技術を 開発することを目的とし、超音波溶着による接合技術、 及び他の接合技術との複合化による接合技術を確立する。

超音波溶着による接合技術の基礎研究として、昨年 度はマトリックス樹脂が結晶性樹脂であるナイロン 66 の CFRTP (CF/PA66)を使用して、同種の CFRTP 板材 の溶着条件を検討し、引張せん断試験により溶着強度を 評価した⁴⁾。

本年度も昨年度と同様の目的において、マトリック ス樹脂が非結晶性樹脂であるポリカーボネートの CFRTP(CF/PC)の同種材を溶着する条件を検討し、引 張せん断試験により溶着強度を評価したので、その結果 について報告する。

2. 実験

2.1 試験片

試験材料は、炭素繊維クロス材とマトリックス樹脂が ポリカーボネートの複合材料である厚さ 1.8mm の CF/PC (Tencate 製)の板材をダイヤモンドソーにより 100mm×25mm に切り出した。なお、試験片の切り出し 角度は繊維の織目方向に対し90°とした。

2. 2 超音波溶着接合

超音波溶着による CF/PC の接合は、超音波溶着機 (精電舎電子工業(株)製 DΣG2210)を用いて、所定 の溶着条件において溶着した。溶着条件は、振幅は 30µm、ホーンの設定圧力を 0.1MPa、0.5MPa とし、溶 着時間は1秒、1.5秒、2秒、2.5秒、3秒、溶着後のホ ールド時間は10秒とした。なお、溶着時間は超音波を 加振した時間とし、溶着エネルギーは溶着時間中に試験 片に与えたエネルギーとした。

2.3 温度履歴測定

超音波溶着における基礎的な実験条件を検討するため に、温度履歴測定を行った。温度履歴測定用試験片は、 図 1 に示すように 100mm×25mm の CF/PC の端部から 25mm 重ね、下側の CF/PC の重なり部分の中心付近に ϕ 0.1mm の熱電対を埋め込み、データロガーを用いて 各溶着条件における試験片の温度変化を測定した。



2. 4 引張せん断強度測定

超音波溶着による CF/PC の同種材の溶着強度を把握 するために、シングルラップ継手試験を行った。CF/PC の溶着強度測定用試験片は、温度履歴測定用試験片と同 様の溶着条件で作製した。その後、万能材料試験機 ((株)島津製作所製 AG-IS 100kN) により引張せん断試 験を行い、溶着部が破壊する最大荷重を溶着強度とした。 なお、試験片のチャック部分の厚みが一定となるように 補助板として厚さ 1.8mm の 25mm×25mm の CF/PC の 板材を張り付けて引張試験を行った。また、引張試験後 の CF/PC の破壊した溶着面を観察することにより、マ ト リックス樹脂の溶融状態を評価した。

3. 結果及び考察

3.1 温度履歴測定

ホーンの設定圧力を 0.1MPa と 0.5MPa とし、溶着時 間が 3 秒の CF/PC の同種材を超音波溶着した温度履歴 を図 2 に示す。図 2 より、ホーンの設定圧力が 0.1 MPa では、超音波加振開始後約 2 秒で 500℃付近まで急激に 界面温度が上昇し、その後徐々に低下し、加振終了後は 急激に降下することがわかった。ホーンの設定圧力が 0.5MPa においても、界面温度は約 1 秒でピーク温度ま で上昇し、その後はホーンの設定圧力が 0.1MPa と同様 の温度履歴であり、溶着時間が 1 秒から 2.5 秒までの温 度履歴はいずれの設定圧力においても、溶着時間が 3 秒 の温度履歴と同様の傾向であった。

また、いずれの溶着時間においても超音波の加振開始 直後からピーク温度までの界面温度は、ホーンの設定圧 力が 0.5 MPa の方が速かった。これはホーンの設定圧力 が高い方が超音波振動が伝わりやすいため、溶着エネル ギーが大きくなったと考えられる。このため、加振開始 直後の界面温度の上昇が速く、ピーク温度も高くなった と考えられる。

3.2 溶着強度評価

各溶着条件で超音波溶着した同種材の CF/PC の溶着 時間と溶着強度の関係を図3に示す。図3より、ホーン の設定圧力が 0.1MPa では、溶着強度は溶着時間に比例 して高くなった。一方、0.5MPa では溶着時間が 2.5 秒 までは溶着強度は溶着時間に比例して高くなったが、3 秒では低下した。また、溶着時間が 2.5 秒まではホーン の設定圧力が 0.5MPa の方が溶着強度は高くなり、溶着 強度のバラつきについても小さいことがわかった。これ は、ホーンの設定圧力が 0.5MPa の方が界面温度は融点 以上である時間が長く、界面の樹脂が溶融している量も 多いため、溶着強度が高くなったと考えられる。

次に各溶着条件で超音波溶着した同種材の CF/PC の 溶着時間と溶着エネルギーの関係を図4に示す。図4よ り、いずれの設定圧力においても溶着時間が長くなると 溶着エネルギーは高くなり、比例関係があることがわか った。また、いずれの溶着時間においてもホーンの設定 圧力が 0.5MPa の方が、溶着エネルギーが高くなった。 これも溶着時間が長くなる程融点以上である時間が長く なるため、超音波振動による熱量も多くなることから溶 着エネルギーが高くなったと考えられる。

次に各溶着条件で超音波溶着した同種材の CF/PC の 溶着エネルギーと溶着強度の関係を図5に示す。いずれ の設定圧力においても、溶着エネルギーが高くなると溶 着強度も高くなる傾向が見られた。溶着エネルギーが 2000J 以下では、溶着強度のバラつきが大きく、溶着エ ネルギーが 2000J 以上では、そのバラつきは小さくなっ





図4 溶着時間と溶着エネルギーの関係



図5 溶着エネルギーと溶着強度の関係

た。更に溶着エネルギーが 2500J 以上では溶着強度は低 下し、そのバラつきは大きくなった。溶着強度のバラつ きは、設定圧力が 0.1MPa において顕著であった。これ はホーンの設定圧力が低い方が、溶着エネルギーが小さ く、界面でのマトリックス樹脂の溶融量が少ないためで あると考えられる。

溶着エネルギーが 2000J 以下では、マトリックス樹脂 の PC を溶融するエネルギーとして十分なエネルギーで はないため、PC が 100%溶融しておらず、これが原因 で溶着強度が低く、溶着強度のバラつきが大きくなった と考えられる。溶着エネルギーが 2000J 以上では、PC が溶融するエネルギーが十分であるため、溶着強度は高 く、溶着強度のバラつきも小さくなったと考えられる。

3.3 破断面観察

ホーンの設定圧力が 0.1MPa と 0.5MPa で作製した試 験片の引張試験後の試験片の破断面をそれぞれ図 6-a)、 -c)、-e)、-g)と図 6-b)、-d)、-f)、-h)に示す。図 6-a)より、 溶着時間が 1.5 秒では、試験片の端の一部のみが溶融し ており、図 6-c)と図 6-e)より、溶着時間が 2 秒、2.5 秒 と長くなるに従い、試験片の端部から溶融した溶着面積 は増加するが、試験片の中心部付近に存在する未溶着部 分は減少し、図 6-g)より、溶着時間が 3.0 秒では、界面 全面が溶融していることがわかった。

次に図 6-b)より、溶着時間が 1 秒では試験片が重なる 端部の周囲が溶融しており、図 6-d)から、溶着時間が 1.5 秒では図 6-e)と同様に中心部付近に未溶着部分が存 在するが、それ以外は溶融していた。図 6-f)と図 6-h)よ り、溶着時間が 2 秒と 2.5 秒では、界面全面が溶融して いることがわかった。このことからいずれの設定圧力に おいても、溶着時間が長くなると CF/PC の界面の溶融 面積は増加することから溶着時間と溶着面積は密接な関 係があると考えられる。また、図 5 より設定圧力が高い 方が、高いエネルギーが供給できるため、短い溶着時間 で溶着ができると考えられる。

最後に図 6-g)と図 6-h)より、界面が完全に溶融するための溶着時間はそれぞれ 0.1MPa では 3 秒、0.5MPa で



a)設定圧力 0.1MPa 溶着時間 1.5 秒



b)設定圧力 0.5MPa 溶着時間 1 秒



c)設定圧力 0.1MPa 溶着時間 2.0 秒



d)設定圧力 0.5MPa 溶着時間 1.5 秒



e)設定圧力 0.1MPa 溶着時間 2.5 秒





f)設定圧力 0.5MPa 溶着時間 2 秒



g)設定圧力 0.1MPa
 h)設定日
 溶着時間 3 秒
 溶着時間 3 秒
 溶着時間 3 秒

h)設定圧力 0.5MPa 溶着時間 2.5 秒

は 2.5 秒であり、図 4 からこの時の溶着エネルギーは約 2500J であった。また、図 5 から 2500J 以上の溶着エネ ルギーを CF/PC に与えると溶着強度が低下することか ら 2500J 以上のエネルギーは余剰なエネルギーであると 考えられる。これは図 6-h)より、はみ出した CF/PC 量 が多くなっていることからも推察できる。

以上のことから同種材の CF/PC を超音波溶着した時

の溶着エネルギーが約 2500J の時に溶着強度が最大になる。このため、安定した溶着強度を求めるためには、溶着エネルギーは 2000J 以上が望ましく、2500J で十分な 溶着強度が発現すると考えられる。

4. まとめ

同種材の CF/PC を超音波溶着する溶着条件を検討し、 次の結果を得た。

- 1) 温度履歴から、CF/PC を超音波溶着すると設定圧力 に関係なく、界面温度は急激に上昇し、その後、温 度が徐々に低下し、加振が終了すると急激に温度が 下降することがわかった。ホーンの設定圧力は 0.5MPa の方が 0.1MPa よりも初期の温度上昇は速 かった。
- 2) ホーンの設定圧力が 0.1MPa では、溶着強度は溶着 時間に比例し、0.5MPa では溶着時間が 2.5 秒まで の溶着強度は溶着時間に比例したが、3 秒では低下 した。また、溶着強度のバラつきは、設定圧力が 0.1MPa ではどの溶着時間においても 0.5MPa のそ れよりも大きかった。
- 3) いずれの設定圧力においても、溶着時間が長くなる と溶着エネルギーは高くなり、比例関係があること がわかった。同じ溶着時間で比べるとホーンの設定 圧力が 0.5MPa の方が、0.1MPa よりも高い溶着エ ネルギーを付与できることがわかった。

- 4)いずれの設定圧力においても、溶着エネルギーが高くなると溶着強度も高くなる傾向があり、溶着エネルギーが 2500J で十分な溶着強度が得られると考えられる。
- 5) 引張試験後の破断面の溶融面積と溶着強度には密接 な関係があり、2000J 以上の溶着エネルギーにおい て CF/PC 界面は十分に溶融し、溶着強度が高くな ることがわかった。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、共同研究先の岐阜大学工学部 仲井教授に、ご指導・ご助言をいただきましたことに深 く感謝いたします。

- 1) 道家ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp45-48, 2016
- 2) 原賀康介・佐藤千明, 自動車軽量化のための接着接 合入門, 日刊工業新聞社,2015
- 3) 中田一博, 異種材料接合, pp95-120, 日経 BP 社, 2014
- 道家ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp44-47, 2017

次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発(第4報) - 異種金属接合技術の開発 --

柘植 英明、小川 大介、山田 孝弘

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts (IV) - Development of joining technology of dissimilar metal materials -

Hideaki Tsuge, Daisuke Ogawa and Takahiro Yamada

本研究では、同種金属材料および異種金属材料の超音波接合における、ホーンおよびアンビルのローレットピッチの違いによる接合強度の差異と、加圧力、加振時間および振幅が接合強度に及ぼす影響について検討を行った。その結果、ローレットピッチが小さくなると、せん断引張強度がやや低下することがわかった。また、加振時間および振幅が増加するに従い接合強度は高くなる傾向が見られたが、加圧力の変化については接合材料の組み合わせによって接合強度への影響が異なっていた。更に、異種接合試料(純銅 C1100/アルミ合金 A5052)の接合断面について、電子顕微鏡によるミクロ観察を行った結果、加振時間と振幅の大きさによって接合界面の状態が異なっていることが確認された。

1. はじめに

輸送機器等の軽量化を行うためには、必要となる性能 を有する部材を適材適所に用いるマルチマテリアル化を 図る必要がある。マルチマテリアル化のためには、異種 材料の接合技術が重要となるが、金属材料の接合におい ては、リベット等による機械的接合や溶接・圧接等によ る冶金的接合が一般的に用いられている。中でも溶接は、 輸送機器の構造部品等の接合に用いられているが、異種 材料接合においては材料の組合せによって脆弱な金属間 化合物が形成されるために必要な接合強度が得られない ことが課題となっている¹⁾。

そこで、摩擦攪拌接合などの溶融を伴わない固相接合 法が盛んに研究されており、その中の一つとして超音波 接合法がある。超音波接合法は図1に示すように、超音 波接合用工具(ホーン)によって接合面に圧力を加え、 上側の材料に接合面と平行な向きに振動を印加すること で接合界面に摩擦を生じさせる。この摩擦とホーンの加 圧による塑性流動によって、金属表面の吸着分子や酸化 層が破壊されることで接合材料の金属原子同士が接近し、 原子間結合により接合が行われる。この時、下側の材料 は受け治具(アンビル)によって強固に保持されていな いと、接合材料間に相対摩擦を生じさせることができな いために接合ができなくなる²。

超音波接合法は、接合界面に脆弱な金属間化合物が形 成されないことや熱影響によるひずみが生じないなどの 優れた特長を有しているが、表面にホーンおよびアンビ ルによる圧痕ができることや、接合材料の表面状態に大 きく影響を受けるため、安定した接合強度が得られない などの課題がある。

昨年度は、アルミニウム合金 A5052、チタン合金 Ti-6Al-4V、冷間圧延軟鋼板 SPCC を用い、同種および異 種金属材料における超音波接合において、加振時間と接 合強度および振幅と接合強度の関係について基礎的な検 討を行った。その結果、加振時間は接合強度が最大とな る最適な時間が存在し、振幅については振幅が大きくな るに従い接合強度が高くなることがわかった。また、 A5052/SPCC および A5052/Ti-6Al-4V の異種材料接合で は、同種材料接合に比べて接合条件がより限定されるこ とが示された³。

本年度は、ホーン、アンビルのローレットピッチおよ びホーン加圧力が接合強度に及ぼす影響について検討し た。また、加振時間が接合強度に及ぼす影響については、 昨年度に最適時間があることが示されたが、さらに加振 時間を長くし、加振時間が接合強度に与える影響につい て再検討した。また、接合条件を変えて接合した異種接 合試料(純銅 C1100/アルミニウム合金 A5052)につい て、電子顕微鏡により接合界面のミクロ観察を行った。

2. 実験

2.1 実験装置および実験方法

接合には超音波金属接合機(日本アビオニクス(株)、 SW-3500-20/SH-H3K7)を用い、接合材料には板厚 1mm のアルミニウム合金 A5052、純アルミ A1100、冷間圧延



図1 超音波接合法の原理





図3 ホーンおよびアンビルのローレット形状

軟鋼板 SPCC および純銅 C1100 を、長さ 100mm、幅 15mm に切断した試料を用いた。また、図2に示すよう に、接合試料はアンビルの上に2枚の試料を 15mm 重 ね合わせるシングルラップ接合とした。

接合ホーンは、約 10×10mm の加圧面を有しており、 接合材料が動かないように図3に示すようなローレット 形状となっている。昨年度は、図3(a)に示す高さ 0.75mm、ピッチ1.5mm、頂点の角度90°の正四角錘形 状、今年度は、図3(b)に示す高さ0.5mm、ピッチ 1.0mm、頂点の角度90°の正四角錘形状のホーンおよ びアンビルを使用した。本実験における接合条件は、ホ ーンの全振幅64µm(100%)に対し、50%、70%、90% の振幅、加振時間0.3sec、0.5sec、0.7sec、0.9secを組み 合わせた条件で接合実験を行った。ホーンの加圧力につ いては、1300N、1500N、1700N、1900Nとした。

接合状態の評価として、せん断引張試験および接合界 面の断面観察を行った。せん断引張試験については、各 接合条件に対して3セットずつ接合試料を準備し、万能 材料試験機(インストロン 5985型)を用いて試験速度 2mm/min にて引張せん断試験を行った。断面のミクロ 観察には、フィールドエミッション電子プローブマイク ロアナライザ(FE-EPMA、日本電子(株)、JXA-8530F)を用い、加振時間と振幅を変えた条件で接合し た純銅 C1100 とアルミニウム合金 A5052 の異種接合試 料(C1100/A5052)について断面観察を行った。

3. 結果及び考察

3.1 ホーン、アンビルのローレットピッチの影響

同種材料接合(A5052/A5052)における、振幅と引張 せん断強度の関係を図 4(a)に示す。ローレットピッチ が 1mm と 1.5mm の引張せん断強度を比較すると、振幅 50%ではピッチ 1mm の方が高いが、振幅 70%以上では ローレットピッチ 1.5mm の方が高い引張せん断強度と なっている。図 4(b) の加振時間を変えた場合において も、ローレットピッチ 1.5mm の方が引張せん断強度が 高い傾向にある。これは、ローレットピッチ 1.5mm の 方が頂点の数が少ないために接合材料に大きな塑性変形 を生じさせ、表面の酸化層等がより破壊されることで、 大きな面積で金属原子同士の接合ができたためだと考え られる。しかし、接合時に大きな塑性変形を生じさせる ことは、接合材料の表面に大きな圧痕を形成させること になり、実際に適用できる製品が制限される。しかし、 圧痕の大きさはローレットピッチだけでなくローレット 形状にも左右されるため、ローレット形状が接合強度に 及ぼす影響については、今後さらに検討を行っていきた いと考えている。



3.2 ホーン加圧力の影響

ホーン加圧力と接合強度の関係を検討するために、同 種材料(A5052/A5052 および A1100/A1100)、異種材料 (C1100/A5052)を用い、加圧力を 1300N、1500N、 1700N、1900N と変化させて接合実験を行った。振幅 70%、加振時間 0.5sec においてホーン加圧力を変化させ たときの引張せん断強度を図 5 に示す。A1100/A1100 の













接合においては、加圧力に関係なく 2kN 程の引張せん 断強度となっているが、A5052/A5052 および C1100/A5052 においては、加圧力の影響を見いだすこと ができなかった。同種材料接合では、A5052/A5052 より も A1100/A1100 の方が引張せん断強度が高いのは、塑 性流動が生じ易いためと考えられ、これは材料の硬さに 起因していると思われる。加圧力と接合強度の関係は、 材料の硬さや接合する金属の組み合わせ等によって異な ってくると考えられるため、今後は超音波接合の実用化 が想定される異種金属材料の組み合わせに対して個別に 検討を行っていく必要がある。

3.3 加振時間及び振幅の影響

加振時間を 0.3~0.9sec まで変化させたときの、同種 材料 A1100/A1100、A5052/A5052 の加振時間と引張せん 断強度の関係を図 6(a)、異種材料 C1100/A5052 および A5052/SPCC の結果を図 6(b)に示す。同種・異種ともに、 加振時間が長くなるに従い引張せん断強度が高くなって いるが、0.7sec 以降はせん断引張強度が横ばいとなって いる。これは加振時間が 0.7sec 以降になると、引張せ ん断強度が材料の引張強度とほぼ同等の強度となり母材 破断となるためである。

次に、振幅を50~90%と変化させた場合の同種材料



(a) A1100、A5052 同種材料接合





A1100/A1100、A5052/A505 及び異種材料 C1100/A5052、 A5052/SPCC における振幅と引張せん断強度の関係を図 7 (a) (b) に示す。同種・異種に関係なく、振幅が大きく なるほど引張せん断強度が大きくなり、振幅 90%で材 料の引張強度と同程度の強度となっている。

C1100/A5052 の加振時間を 0.3~0.9sec まで変化させたときの接合断面の FE-EPMA による組成像を図8に示す(上側:C1100、下側:A5052)。図8(a)(b)(c)におい





(d)振幅 70%,加振時間 0.9sec



(e)振幅90%,加振時間0.5sec

図8 FE-EPMA による接合断面の組成像 (C1100/A5052) ては、断面に C1100 と A5052 が混在する明確な層は確 認できなかったが、図 8(d)では 0.2µm 程の C1100 と A5052 が混在する層が確認された。振幅が 90%の図 8(e)では、1µm 程度の C1100 と A5052 が混在した層が 観察された。この混合層は塑性流動や拡散により形成さ れたものと考えられ、加振時間が長くなるに従い混合層 が徐々に形成され、振幅が大きいほど混合層が厚くなる と推測される。

なお、今回のミクロ観察では、接合材料が混在した層 がどの様な結晶構造になっているかは分からなかったの で、今後更に詳細な検討を行う必要がある。

4. まとめ

ホーンおよびアンビルのローレットピッチの違いによ る接合強度の差異と、加圧力、加振時間および振幅が接 合強度に及ぼす影響について検討を行った。また、異種 接合試料(C1100/A5052)の接合断面についてミクロ観 察を行い、以下の結果を得た。

- ローレットピッチが小さくなると、せん断引張強度 がやや低下する。
- 2)加振時間および振幅が増加するに従い接合強度が増加する傾向にあるが、加圧力については接合材料の組み合わせによって傾向が異なる。
- 3) 異種材料 C1100/A5052 における超音波接合では、 加振時間が長くなると接合界面に混合層が生成され る。この混合層は、同じ加振時間では振幅が 70% よりも 90%の方が厚くなる。

- 高田ら,電子情報通信学会技術研究報告,107(167), pp47-51,2007
- 渡辺ら,溶接学会論文集 Vol.17, No.2, pp223-233, 1999
- 加賀ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp48-51,2017

平成30年5月発行

岐阜県工業技術研究所研究報告 第6号 平成29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.jp ホームページ:http://www.metal.rd.pref.gifu.lg.jp