

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560130

研究課題名(和文) マイクロ・メゾ成形中の工具/材料間摩擦力の直接測定

研究課題名(英文) Direct Measurement of Friction during Micro/meso-Scale Forming

研究代表者

牧野 武彦 (Makino, Takehiko)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70273315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、マイクロ・メゾスケールの成形中の工具/材料間摩擦力の分布と変化を、工具に設けた薄肉部とそれに接続したミラーにレーザーを反射させる工具微小ひずみ検出機構からなる測定体によって直接測定し、さらにその摩擦を決定する工具表面の材料の凝着状態を、仕事関数測定により高感度で観測することによって、摩擦状態分布の可視化を可能にする、新たな摩擦状態測定システムを構築することを目的とした。摩擦力直接測定装置は、測定体の校正用の二軸プレスによって垂直力と摩擦力を分解できることを示した。仕事関数測定は材料の初期状態と加工ストロークによる成形後の工具表面の凝着状態の違いを明確に検出することがわかった。

研究成果の概要(英文)：In the proposed method, the small deflection of a thin part fabricated at the other side of a flat tool surface is detected using laser reflection to decompose the normal and horizontal (frictional) forces. The loci of the laser enlarged by the optical lever were detected by two position sensitive detectors placed at both sides of the tool. The calibrations for each direction are performed using the two-axis press designed for this study. The locus of laser reflection on a detector showed both components. The values estimated from the locus were fairly close to the measured forces. The friction during forming strongly depends on the adhesion process. The process was studied by measuring the contact potential difference distribution of the tool surface after an injection-upsetting stroke. The effect of the annealing temperature of materials and the forming speed on the amount of adhesion was quantified by the measurements.

研究分野：塑性加工

キーワード：マイクロ・メゾスケール 成形加工 摩擦力直接測定 接触電位差測定

### 1. 研究開始当初の背景

近年、通信デバイスや医療機器などの小型化に伴い、高い精度と強度に対する高い信頼性を持つ微小な金属部品が求められている。金属部品を塑性加工（成形）すると、外形のみならず、内部組織の加工（強化）も行えるために、マイクロ・メゾ（マクロとマイクロの間、0.1~1 mm）スケール部品の精度と信頼性を追求できる。しかし、成形中は常に材料と工具が接触しているために、それらの間の摩擦状態が塑性変形へ与える影響が大きい。特に、マイクロ・メゾスケールの部品では、表面積が体積に占める比率が高いため、摩擦の不均一が材料の塑性流動に強い影響を及ぼし、内部組織の不均一を引き起こす。

我々は、摩擦の不均一とその影響について、結晶塑性を考慮した有限要素法と、第一原理電子状態計算によって作製した工具/材料間の原子間ポテンシャルを用いた分子動力学法を組み合わせ、マイクロ・メゾスケールの塑性加工解析法を構築し解析してきたが、比較すべき実験による詳細な情報がほとんどなく、その必要性を強く認識してきた。

成形中の工具/材料間の摩擦力は、従来、測圧ピン法によって直接測定を試みられてきたが、工具表面に不連続な部分ができってしまうために、成形自体に影響を与えてしまうこと、と測定用のピンと工具の間にも摩擦力が働くために、測定値の複雑な補正が必要であり、広く利用されるに至らなかった。近年、米山らにより、工具薄肉部とひずみ測定部をもち、垂直力と摩擦力を同時に測定できる方法が提案され、熱間押し出しの摩擦力測定に適用された。この方法は、工具の薄肉部の下に一体構造でビームと平板を加工し、薄肉部のひずみを、平板部に貼ったひずみゲージで測定するものである。この方法は、ひずみの検出部の大きさに測定部（薄肉部）の大きさが制限されるため、局所的な測定が困難である。またひずみの増幅にも限度があり、成形中の加工力が小さい、マイクロ・メゾ成形への適用は難しい。

本研究では、図1のように、工具表面下側に一つの突起部をもつ円状の薄肉部を放電加工により作成し、この突起部に図2のような両側にミラーのついた棒を接着し、ミラーに反射させたレーザー光を、離れたところに配置した位置検出器（PSD）で検出することによって、薄肉部の（特に摩擦力に対応する）ひずみを増幅して計測する機構を提案する。

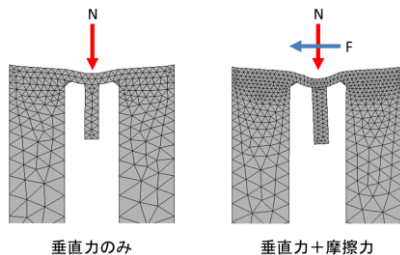


図1 薄肉部を利用した垂直・摩擦力同時測定法の工具部分

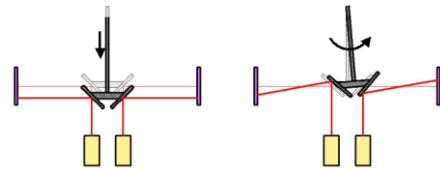


図2 薄肉部を利用した垂直・摩擦力同時測定法のひずみ測定機構部分

摩擦を決定する工具表面状態の精密測定には、表面状態によって非常に敏感に変化する仕事関数の測定によって行う。これらの実験結果を統合するのは、既に構築した塑性加工解析法である。この方法では工具への材料の凝着とその凝着状態での仕事関数値を計算できる。以上によって、摩擦に関する情報を得て、解析するシステムを構築できる。

これまでマクロスケールにおいても成形中の摩擦力測定法で広く普及するほど確立されたものは皆無と云ってよい。本研究で提案する摩擦力直接測定法は、構造が比較的簡単のため、広く研究や一般に使用される標準的な方法に発展する可能性が高い。この装置で得られる局所的な摩擦状態の結果は、成形技術の高度化に大きく寄与すると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、マイクロ・メゾ成形中の工具/材料界面の不均一な摩擦状態を実験的に直接測定する方法を開発し、摩擦力の空間的な分布と加工過程による変化を明らかにする。さらに、摩擦力直接測定の結果と表面状態測定の結果の相関を明らかにする。

### 3. 研究の方法

摩擦力直接測定には測定体の製作と校正法の確立が必要である。校正には2軸プレスが必要である。さらに、成形後の工具の表面状態を調べるために接触電位差測定を行う。

#### (1) 摩擦力直接測定装置の製作

ピンをダイセット上板の穴に固定したピンの直径とほぼ同じ径の穴をあけた透明アクリル板に垂直に立てて、ダイセット上板をゆっくりと下げていくことによって、ピンと突起の軸が合うことを確認して、ピンの先端に2液混合型の金属用接着剤を塗り、ピンと突起を接着した。ミラー部を、反射したレーザーが左右のPSDの中心付近を照射している状態で固定し、ミラー部の穴にピンを差し込んで接着した。

ミラーで反射させたレーザー光の位置検出には、2次元PSDを使用した。PSDの信号処理回路は、1つのPSDの4つの端子からの電流信号を、それぞれ電流-電圧変換後、それらを加減算と除算を経て、位置情報とする。加減算をオペアンプ回路によって行った後、16 bit AD変換モジュールを用いてマイクロコントローラに取り込んだ後に除算を行った。

## (2) 摩擦力直接測定法（校正法）の確立

摩擦力の校正のため、垂直方向のプレスと同時に動作する摩擦力方向（水平方向）の引張試験装置を作った。図3に、垂直力・摩擦力校正用2軸試験機の外観を示す。水平方向のプレスと平行な方向の左右にPSDが配置されている。両方向ともに、マイクロコントローラで制御したステッピングモータで台形ネジを回転させ駆動する。垂直力の測定は市販のロードセルを用い、摩擦力には引張試験片の形状のロードセルを設計し製作した。工具薄肉部の上に校正用ピンを立て、それを縦に圧縮しながら、横に引っ張る形式で校正を行う（図4）。

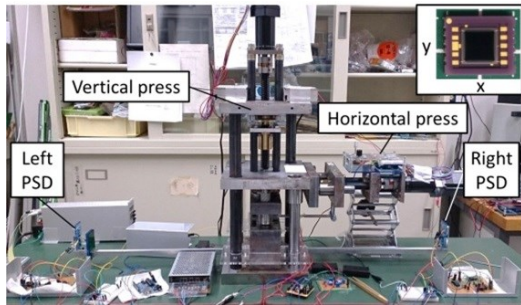


図3 垂直力・摩擦力校正用2軸試験機の外観

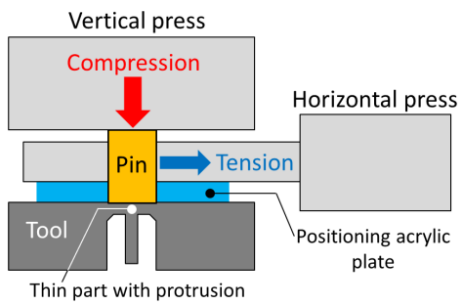


図4 校正実験の模式図

## (3) 工具表面状態測定法の確立

接触電位差は、プローブと試料表面（工具表面）の仕事関数の差として測定される。プローブとその測定値を数値化する部分、X-Yステージ駆動部、データ記録部、とPCからなる測定装置全体のうち、プローブとX-Yステージ駆動部の外観を図5に示す。

加工後の試料表面一つに対して、4 mm 四方の領域を0.5 mm 間隔で計64点の連続測定を行う。プローブは直径1.0 mmの円柱形の純銅である。プローブの振動周波数は114 Hzとした。測定値そのものは、プローブ端面の真下の工具表面の情報を平均したものである。そこで、プローブ表面と工具表面の仕事関数の差である測定値を「凝着面積率」（ $(\text{測定値} - \text{バックグラウンド値}) / (\text{材料のバルク表面の測定値} - \text{バックグラウンド値})$ ）に変換することにした。バックグラウンド値は、材料(A1)が接触していない部分の工具表面の測定値である。材料バルク表面の測定値は、A1 板材の研磨直後の表面を測定したものを採用した。

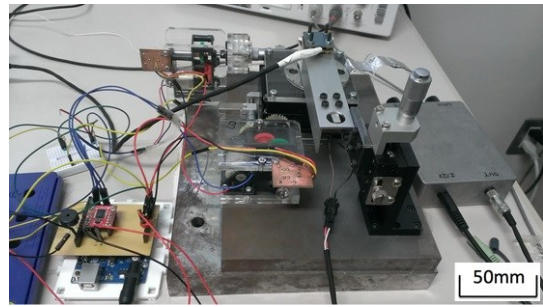


図5 接触電位差（仕事関数の相対値）測定装置の外観

## 4. 研究成果

(1) 摩擦力直接測定法の校正結果（学会発表：2, 5, 6, 8）

図6は、垂直力と水平力を別々にかけた校正の結果を示す。この場合、垂直力を400 Nにした後、垂直力を保持したまま、水平力をかけ始める。水平力が100 Nに達した後、水平力を除荷する。水平力が0になった後で垂直力を除荷する。この工程を(a)と(b)に示す。(c)は、左のPSD上のレーザーの軌跡が、原点「O」から右上方向に進み、「P」でほぼ90°曲がっていることを示している。ここまでの動きは、水平力が所定の荷重に達するところまでに対応している。除荷中は、この軌跡を逆にたどって原点に戻っている。一方、(d)は、右のPSDの軌跡が原点から左下に進んでいることを示している。しかし、この場合、垂直力と水平力による軌跡が重なってしまっている。

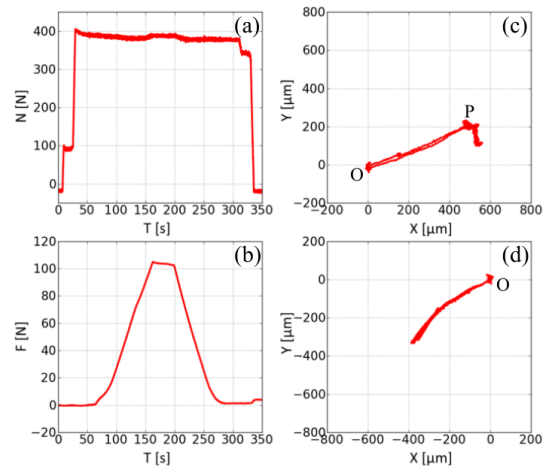


図6 垂直力と水平力を別々にかけた場合の(a)垂直力の時間変化、(b)水平力の時間変化、(c)左のPSD上の軌跡、(d)右のPSD上の軌跡

図7は、垂直力と水平力を同時にかけた校正の結果を示す。この場合、垂直力をかけながら、水平力もかけ始める。(c)は、水平力をかけ始めた時点に相当する「P」で軌跡の曲がりが見れていることを示している。水平力が一定の間、水平力による軌跡の変位が保持していることが示されている。

垂直力と水平力は2つのPSDの軌跡を使って分解すると考えていたが、実験結果からは、左の軌跡が垂直・水平方向に分解可能な両方



の成分を持っていることがわかった。

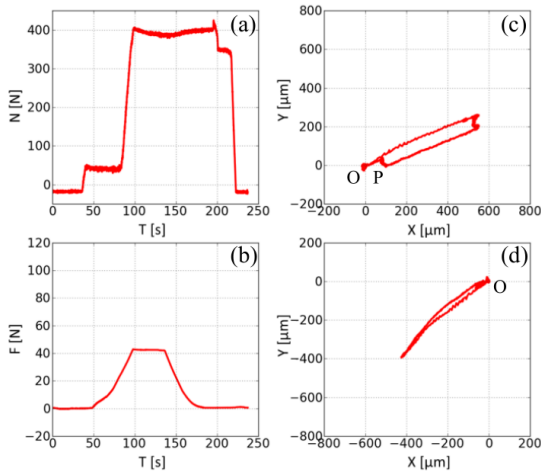


図7 垂直力と水平力を同時にかけた場合の(a)垂直力の時間変化、(b)水平力の時間変化、(c)左のPSD上の軌跡、(d)右のPSD上の軌跡

図7(c)の解析によって、軌跡から見積もられる垂直・水平それぞれの力は、測定したそれぞれの力にかなり近い値が得られた。

(2) 工具表面状態測定結果 (雑誌論文: 1, 学会発表: 1, 3, 4, 5, 6, 7)

図8は、押し出し据込み加工の各ストローク後の工具表面の凝着面積率の分布を示している。同じ行の隣り合う2つずつの図は、同じ条件の結果を示している。1行目のストローク1mmでは、どの条件においても明らかな違いはないが、ストローク2mmでは、焼鈍材以外は、より明確な形をもつ明るい領域がある。ストローク3mmでは、測定域の中央に明るい領域があり、それは、ストローク2mmの場合よりも大きくなっている。焼鈍温度と加工速度による分布の違いは、受け入れ材と350℃焼鈍材を比べると、特にストローク2mmの場合に、後者の凝着は明らかに少ない。加工速度6mm/minと12mm/minの受け入れ材を比べると、後者の凝着は、特にストローク3mmの場合に多い。

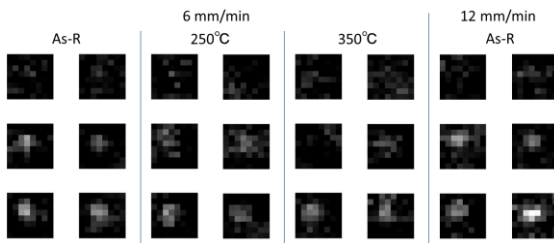


図8 押し出し据込み加工後の凝着面積率の分布 (上の行からストローク: 1, 2, 3 mm)

より簡単に比較するために、測定範囲の凝着面積率の最大値をストロークに対してプロットしたものを図9に示す。図中、各条件の最大値2つの平均値を直線で結んである。この図から、焼鈍温度が高くなると、最大値

が低くなることがわかる。加工速度が12mm/minの場合に、ストロークが長くなるほど最大値の分散が大きくなることがわかる。

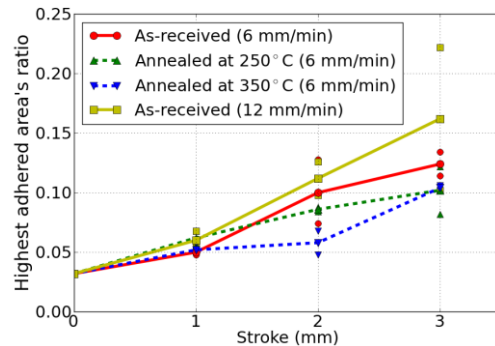


図9 凝着面積率最大値の加工ストロークによる変化

焼鈍温度が高くて材料が軟らかいと、接触面圧が下がり、材料の凝着量は小さくなると予想できる。実際の結果はこの予想に一致していることから、接触電位差の測定は、凝着量を定量評価していると考えられる。

### (3) 今後の展望

摩擦力直接測定は、校正実験が実行でき、垂直・水平力の分解が可能であることを確認できた段階であり、現在、実際の成形加工時の摩擦力直接測定が可能かどうかを調べている。加工後の凝着状態は、接触電位差を測定することによって定量可能であることを確認した。成形中の直接測定で得られる局所的な摩擦力の情報は、凝着の定量結果と比較することにより、不均一で加工中に変化していく摩擦を扱うことが不可欠なマイクロ・メゾ成形の塑性変形の解析における界面の扱い方を格段に進展させるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

1) Takehiko Makino, Toshinari Michimoto, Shinpei Moriyama, Tohru Kikuchi, "Contact potential difference measurement of adhesion process during micro/meso-scale injection upsetting", *Procedia Engineering*, 81 (2014), pp.444-449. (査読有)  
doi:10.1016/j.proeng.2014.10.020

[学会発表] (計8件)

1) 牧野 武彦, 道元 俊成, 森山 慎平, 「マイクロ・メゾスケール押し出し据込みにおける工具表面凝着過程の接触電位差測定」, 第65回塑性加工連合講演会講演論文集, (2014), pp. 271-272. (一般講演, 岡山市, 平成26年10月12日)

2) 牧野 武彦, 道元 俊成, 余語 祐弥, 「成形中の工具面摩擦力直接測定法の開発」, 第65回塑性加工連合講演会講演論文集, (2014), pp. 175-176. (一般講演, 岡山市, 平成26年10月12日)

3) 牧野 武彦, 川合 一矢, 邨瀬 允, 「マイクロ・メゾスケール押出し据込みにおける摩擦界面の挙動解析」, 第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2013), pp. 1-2. (一般講演, 吹田市, 平成 25 年 11 月 2 日)

4) 牧野 武彦, 道元 俊成, 「工具表面の凝着過程の接触電位差測定」, 第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2013), pp. 3-4. (一般講演, 吹田市, 平成 25 年 11 月 1 日)

5) 牧野 武彦, 「マイクロ・メゾ成形のトライボロジー」, 日本塑性加工学会 プロセス・トライボロジー分科会 第 139 回研究会 (招待講演, 福岡県八女郡, 平成 25 年 11 月 14 日)

6) 牧野 武彦, 「分子動力学による摩擦凝着挙動のモデル化」, 日本塑性加工学会 平成 25 年度 ナノ・マイクロ加工分科会 第 2 回セミナー (招待講演, 東京, 平成 25 年 12 月 20 日)

7) 牧野 武彦, 森山 慎平, 大槻 智也, 菊地 徹, 「工具表面の凝着過程の接触電位差測定による定量」, 第 63 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2012), pp. 223-224. (一般講演, 北九州市, 平成 24 年 11 月 5 日)

8) 牧野 武彦, 鈴木 将史, 豊 軒茵, 福井 雄太郎, 「マイクロ・メゾスケール強ひずみ加工後の棒状アルミニウムの引張試験」, 第 63 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2012), pp. 221-222. (一般講演, 北九州市, 平成 24 年 11 月 5 日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

牧野 武彦 (Makino, Takehiko)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70273315