

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05719

研究課題名(和文) マイクロ・メゾ成形中の摩擦界面挙動の定量とモデル化

研究課題名(英文) Measurement and modeling of interfacial phenomena in 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)・准教授

研究者番号：70273315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ・メゾ成形による金属部品の精度と信頼性に大きな影響を及ぼす工具/材料間の摩擦界面挙動を定量化し、モデル化することを目的とした。摩擦力直接測定では、無潤滑条件で円柱圧縮を行った場合に、成形加工中の垂直・水平力の変化を捉えることができた。摩擦界面の原子スケール計算では、各種皮膜(TiN, VC, CrN)近傍のAl-Al同志のポテンシャルを求めた。これらのポテンシャルを用いて、Al原子の凝着挙動を解析した。各種皮膜上のAlの凝着量の接触電位差測定では、いずれも同じ傾向を示していて違いは現れなかった。原子スケール計算との比較を行うため、現在は、真空中で加工と測定を連続して行う装置を開発している。

研究成果の概要(英文)：The interfacial phenomena between tool and material during micro/meso-scale forming are measured and modeled. The direct measurement of friction force during a cylinder compression using a developed apparatus showed that the changes in vertical and horizontal force at the frictional interface was successfully captured. The Al adhesion on the various coatings (TiN, VC, CrN) are calculated in atomistic scale by using a developed potential sets extracted from the energy change obtained by first-principles calculations for various arrangements of Al atoms on the coating surfaces. The measurements of contact potential difference showed that the tendency of Al adhesion on above coatings was almost same. The apparatus in which a forming and measurement can be done continuously will be developed.

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、身に着ける小型の通信機器や医療機器の実用化に伴い、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、内部も加工されて強化できるために部品の信頼性が向上するが、成形中は材料と工具が常に接触しているために、それら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（マクロとマイクロの間、0.1~1 mm）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に、摩擦の工具面上の不均一（図1）と成形中の変化が、材料の塑性流動に影響を及ぼし、外形精度の悪化と内部組織の不均一を生じさせる。成形中の摩擦の変化の原因となるのが、材料の工具への凝着である。

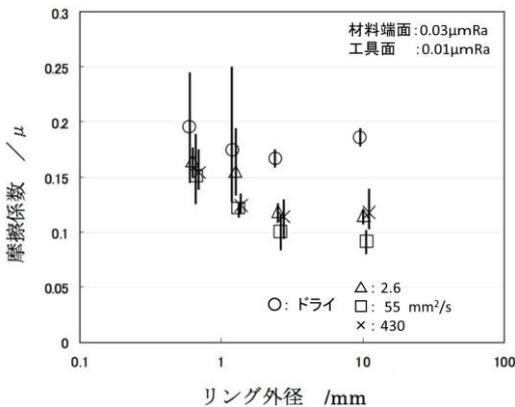


図1 リング状試験片（銅）の外径と摩擦係数の関係（堂田ら，2007）

この不均一かつ変化する摩擦界面の挙動について、研究代表者（筆者）は、図2の各手法を用いて系統的に研究を行ってきたが、成形中の工具/材料界面を直接調べられないことを克服しなければならない。工具を工具鋼から透明石英に置き換えると潤滑油と材料の流動を観察することができるが、凝着が起こるのは工具と材料の金属同士が直接接触している領域であるため、本来の工具鋼と材料の間の挙動を詳細に調べる手法の確立が求められてきた。

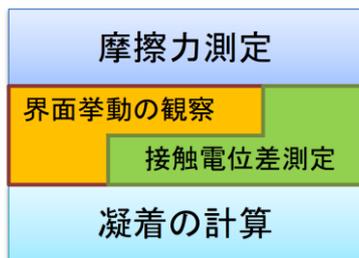


図2 成形中の摩擦界面の研究手法（牧野，2013）

接触電位差測定は、表面状態の変化に非常に敏感な仕事関数（表面から電子を取り出すのに必要な最低のエネルギー）を間接的に測

定する方法であり、筆者らは、既に測定装置を自作し、マイクロ・メゾスケールの押出し据込み加工直後の工具表面の凝着量の定量に成功している。接触電位差は顕微鏡観察や表面形状測定では検出できない微量な凝着を捉えており、加工の経過とともに、凝着量が増加することを明らかにしている（図3）。また、加工前の材料の焼鈍温度や加工速度を変えると、それに応じて凝着量も変化していることがわかった（図4）。

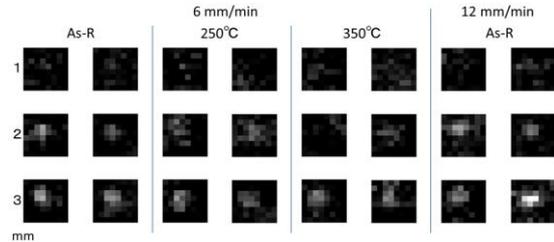


図3 接触電位差測定による凝着の定量（Makinoら，2014）

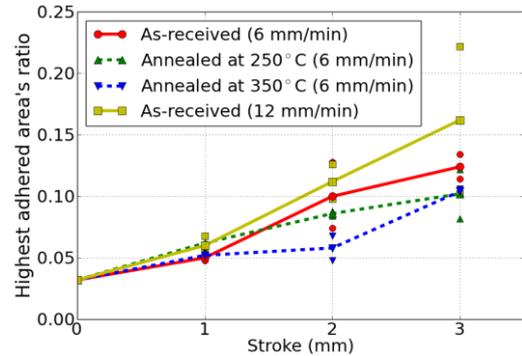


図4 図4の各図の最大値をストロークに対してプロットした（Makinoら，2014）

この手法を利用して、成形前の材料の状態、潤滑条件など様々な条件下の凝着過程を定量化し、さらにこれらを利用して界面状態をモデル化できれば、単なる境界条件ではなく、成形加工の解析において最も重要な構成要素となる。

マクロスケールの塑性変形を解析する場合、界面の摩擦は均一で一定と仮定するのが一般的で、このように仮定した摩擦を、加工力と、変形した材料の形状から逆に推定することがよく行われている。工具面に加わる垂直力と摩擦力を分離して測定し摩擦係数を実験的に求めることができるのは、工具形状が切削加工の場合に近く、加工度が低い、しごき加工に限られていた。申請者らが最近提案した摩擦係数測定法は、鍛造タイプの成形中に平面工具に加わる力を、工具に設けた微小な領域の薄肉部に設置した二つの鏡に当てて反射したレーザーの変位から、垂直成分と水平（摩擦方向の）成分に分離するものである。この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。

2. 研究の目的

本研究は、マイクロ・メゾ成形による金属部品の精度と信頼性に大きな影響を及ぼす工具／材料間の摩擦界面挙動を定量化し、成形の解析のためのモデル化を行うことを目的とする。界面挙動の定量は、工具表面の凝着量についての接触電位差測定を所定量ごとの成形後に行い、モデル化は、この定量結果と工具表面に加わる摩擦力の測定を成形中に行った結果を比較して行う。最終的に、成形前の材料状態の結果として成形中に変化する境界条件を、成形の解析に適用する。

3. 研究の方法

(1) 摩擦力の直接測定 (学会発表: 1, 5, 8)

摩擦力の直接測定は、切削工具のように摩擦力の方向に工具全体が変位する場合は可能であり、成形においても、切削に近い様式のしごき加工では、工具部分の変位を取り出すことが可能である。しかし、一般的な成形加工では、工具全体は固定されているため、工具の一部が変位するように工夫しなければならない。工具面に垂直方向と傾斜させた穴をあけ、その穴に通した微小なピンの変位を測定する測圧ピン法以外には、工具の一部に薄肉部を設けてその変位を検出する方法として、米山らの摩擦センサがある。摩擦センサは、薄肉部に垂直に二つの梁を立てて、それらの間に平板が橋渡ししている構造を持つ。平板に貼った二枚の歪みゲージの情報から垂直力と摩擦力を分解する。

筆者らは、より単純な工具形状と局所的な測定を目指して、レーザの反射による「光てこ」を利用した薄肉部変位検出法の測定体(図5)を考案した。放電加工によって形成した、円形の薄肉部(直径 1.5 mm)の中央に立てた突起にピンを接着し、この先に水平に対して 45° 傾いた微小な鏡 2 つをつける。これらの鏡に反射したレーザ光の軌跡を十分に離れたところに設置した PSD (位置検出素子) で検出し、薄肉部の微小変位を測定する。

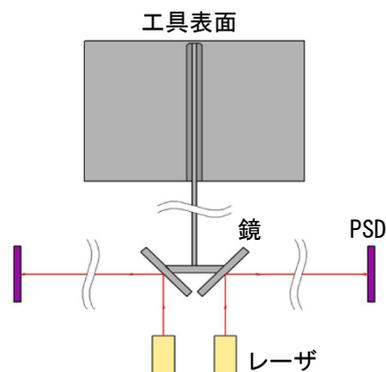


図5 測定体の模式図

図6に、測定体校正用の二軸プレス装置を兼ねた摩擦力直接測定装置の外観を示す。校正試験では、工具鋼製の校正用ピンに垂直力を加えて保持したまま、摩擦力を加える(図7)。

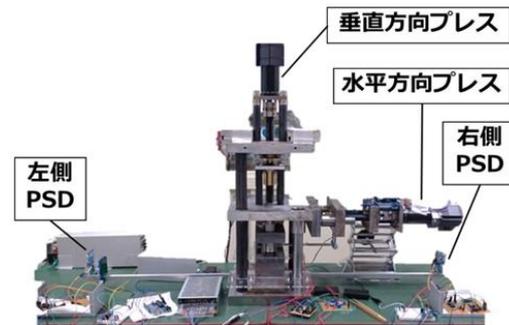


図6 測定体校正用の二軸プレス装置の外観

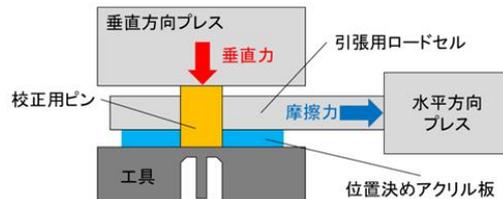


図7 校正試験の概略図

(2) 摩擦界面の原子スケール計算 (学会発表: 2, 4, 7)

工具と被加工材に密閉された界面の挙動を成形中に観察することは原理的に不可能である。その代わりに、界面挙動をできるだけ前提(実験結果)を用いない計算手法で追跡できれば有効である。界面挙動を調べるために、工具皮膜／被加工材界面の異種原子間の相互作用にさかのぼる。実験結果と比較するために、具体的には工具皮膜表面への被加工材の凝着挙動を明らかにする。このために重要なのは、いかに異種原子間の相互作用を決定するかである。同種原子同士の原子間相互作用は、単体材料の格子定数、ヤング率、硬さに相当する体積弾性率などのマクロな実験値から解析的に求めることができる。しかし、異種原子同士の場合は、金属間化合物などの原子配列が規則正しい場合を除いて、上記の実験値が得られないため、原子間相互作用を解析的に求めることができない。そこで、原子間の相互作用を決めている電子の状態を計算する手法の活用を考える。

第一原理電子状態計算は、究極的には材料の構成原子の原子番号、それらの原子の配置から、その系の全エネルギーを計算する方法である。しかし、この方法で扱えるのは数十程度の原子数に限られ、成形加工を想定した規模の系を扱うのは困難である。原子間相互作用までを第一原理電子状態計算で得て、それを、分子動力学計算で利用することによって成形加工を想定した規模の系を扱うこと

にした。

実際には、図8のように、真空層を含む計算セル（スーパーセル）を設定して、工具皮膜表面と被加工材原子との距離を変えながら、全エネルギーの計算を行う。その後、図9のように、横軸の原子間距離が大きい場合の全エネルギーを0としたエネルギー差のプロットにポテンシャル関数をフィッティングした。

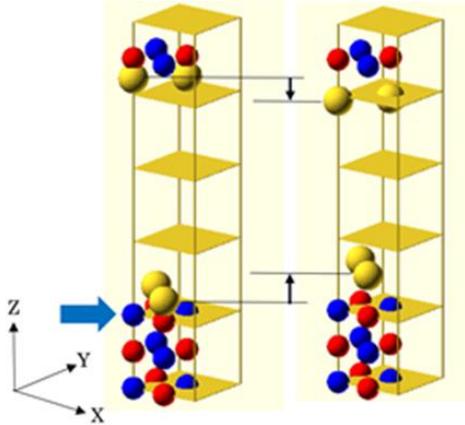


図8 工具表面上の被加工材原子のエネルギー変化を得るための原子配置

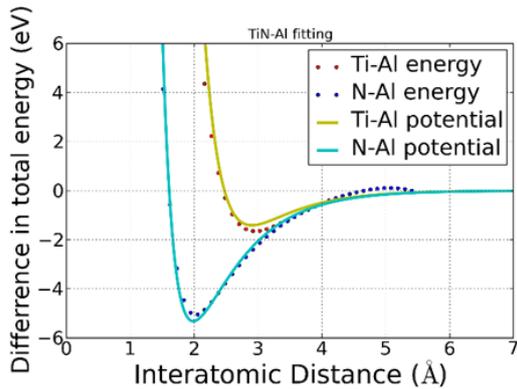


図9 図8のエネルギー変化（点）にポテンシャル関数（曲線）をフィッティングする

(3) 仕事関数（接触電位差）測定（学会発表：3）

表面に吸着や凝着が生じれば、表面近傍の数原子層での電子状態は非常に敏感に変化する。実験的に表面の電子状態を調べることができれば、表面の状態を原子スケールで知ることができる可能性がある。そのような電子状態の変化を反映するものとして、仕事関数がある。仕事関数は、材料表面から真空中へ自由電子一つを取り出すのに必要なエネルギー（真空準位とフェルミ準位の差）である。この値は、電子状態計算を行うことによって比較的容易に計算できる。

仕事関数を実験的に測定する方法の一つが接触電位差法である。試料表面とプローブ表面の間でコンデンサを構成させて、それぞ

れの表面の仕事関数の差を、プローブに加える電位から求める。プローブの電位を変化させながら、試料に近接させたプローブを振動させ、コンデンサが放電しなくなり、プローブからの電流が検出できなくなった時のプローブにかけている電位が、試料表面の電位と等しいとみなせる。プローブ表面の仕事関数がわかっているならば、試料表面の仕事関数の絶対値が得られる。これは大気中の実験が可能であり、装置も比較的単純なものである。プローブ径を小さくすれば、局所的な情報を得ることができる。ただし、測定は成形中の界面ではなく、成形後の工具表面に対して行うことになる。接触電位差測定によって得られた値は、表面の電子状態計算の結果と直接比較できるため、工具面への凝着に実験と計算の両面からアプローチできる。

4. 研究成果

(1) 摩擦力の直接測定（学会発表：1, 5, 8）

校正試験の結果、図10のように、垂直力による変位成分と摩擦力による変位成分を分解することができた。この測定体を用いて低融点合金の円柱圧縮を無潤滑条件で行うと、図11のように、加工中の垂直力と摩擦力の変化が測定できることが明らかになった。

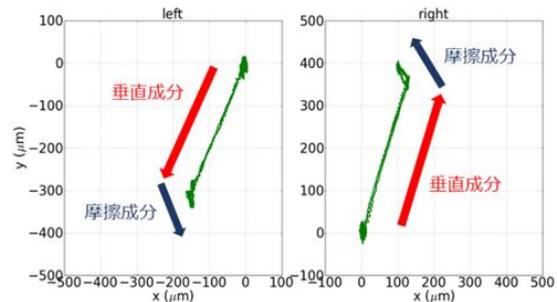


図10 校正試験時のPSD面上のレーザの軌跡

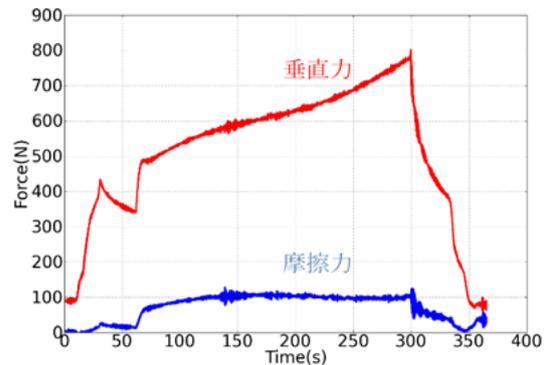


図11 垂直力・摩擦力の測定結果
(Sn-Bi 合金の円柱試料)

(2) 摩擦界面の原子スケール計算（学会発表：2, 4, 7）

図12に、皮膜近傍のAl-Alポテンシャルを求めるための原子配置を示す。これらの配置の電子状態計算の結果から得られたポテ

ンシャルを図 13 に示す。原子配置のバリエーションに対するポテンシャルの違いは大きくないことがわかった。

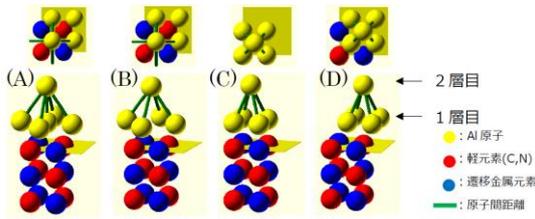


図 12 界面近傍の Al-Al ポテンシャルを求めるための原子配置

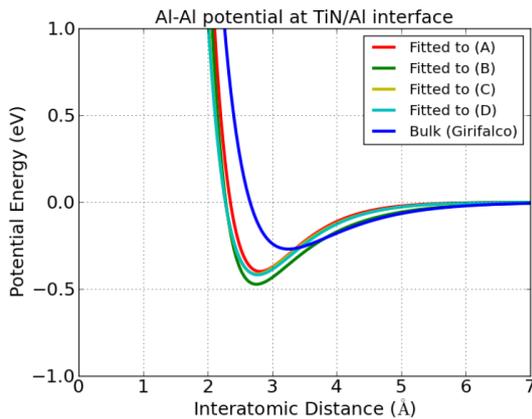


図 13 得られたポテンシャル曲線 (TiN/Al の例)

図 14 は、しごき加工を想定した分子動力学計算の様子を示している。図の上方で傾斜した直線状の原子配列は、工具皮膜の 1 層分を表している。この工具が左から右へ平行移動する。しごき加工を選択したのは、工具への被加工材原子の凝着原子を判別するために、工具の移動速度と原子の平行移動の速度の比較が利用できるためである。図 14 で、紙面に垂直な方向には、周期境界条件を課した。様々な種類の工具皮膜を比較する場合、皮膜材の格子定数と被加工材の格子定数の違いによる不整合をできるだけ小さくするように、両者の格子の数を決めている。

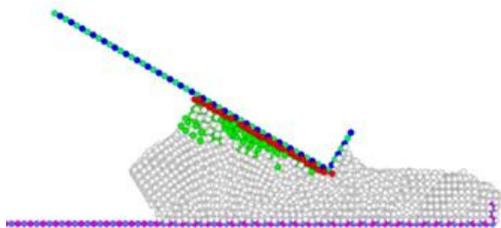


図 14 しごき加工を想定した原子配置による分子動力学計算

図 14 の工具皮膜直上の一層目の凝着原子を点線、二層目以降の凝着原子を実線で示すと、凝着原子数の割合 (凝着原子/全被加工材原子) は、しごき加工中に、図 15 (TiN/Al

の例のみを示す) のような変化を示す。TiN と CrN に比べて、VC は一層目の凝着が多くないために、二層目の凝着がほとんどないことがわかった。CrN は TiN に比べて一層目の変化が安定しており、二層目の増加の立ち上がりがあった。

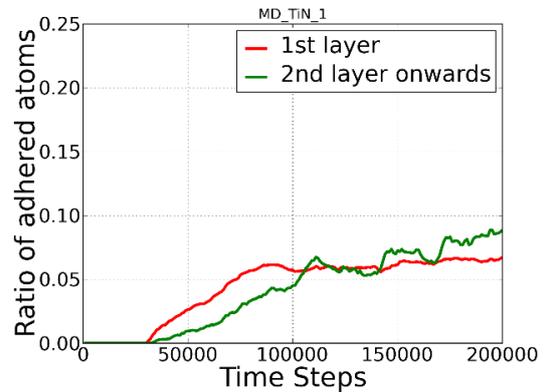


図 15 TiN/Al の Al の凝着量の変化

図 16 は工具面に垂直な方向から加工中の凝着原子の配置を見たものである。凝着量の多い CrN/Al は、TiN/Al に比べて一層目 (濃い黒丸) の原子配置が整っている。凝着の成長が一層目の原子配置に依存することを示している。

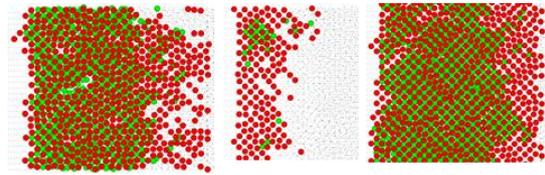


図 16 凝着原子の配置 (左から TiN/Al, VC/Al, CrN/Al)

(3) 仕事関数 (接触電位差) 測定 (学会発表: 3)

図 17 は、直径 1.0 mm の Al 材を押し据込み加工した、各種の皮膜を施した工具表面の測定で得られた接触電位差を、バックグラウンド値と純 Al 表面の接触電位差を用いて規格化した凝着面積率の分布を示している。

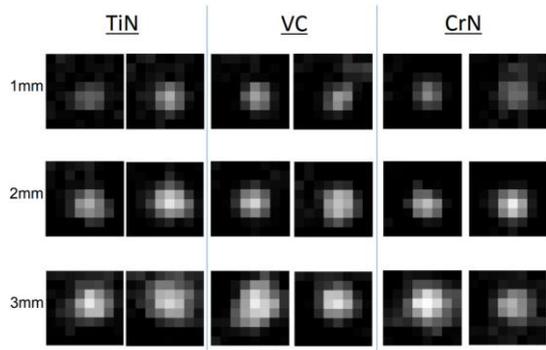


図 17 各種工具皮膜上の Al の凝着面積率の分布

少なくともこの条件の加工では、各種皮膜による凝着面積率の違いは明確ではなかった。

(4) 今後の展望

摩擦力直接測定では、校正実験を実行し、垂直・水平力の分解が可能であることを確認した。さらに、無潤滑条件で円柱の圧縮を行った場合に、成形加工中の垂直・水平力の変化を捉えることができた。この変化は試料端面の仕上げ状態に敏感であるため、今後、その状態を統一した場合の摩擦力直接測定を進める。

摩擦界面の原子スケール計算では、皮膜構成原子とAlの間のポテンシャルだけでなく、皮膜近傍のAl-Al同志のポテンシャルを得た。これらのポテンシャルを用いた、各種皮膜上のAl原子の凝着挙動について解析をさらに進める。

接触電位差測定で得られた各種皮膜上のAlの凝着量の変化は、いずれも同じ傾向を示していた。凝着の最初期を想定している原子スケール計算との比較を行うため、現在は、真空中でAlを凝着させる加工を行い、そのまま真空中で連続的に接触電位差を測定する装置を開発している。

最終的には、成形中に変化する境界条件を、成形の解析に適用する。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計8件)

1) 牧野武彦, 善積亮太, 「円柱圧縮中の摩擦力の直接測定」, 第68回塑性加工連合講演会講演論文集 (2017), pp. 421-422.

2) 牧野武彦, 夏目隼次, 「各種工具皮膜上の凝着素過程の原子スケール計算」, 第68回塑性加工連合講演会講演論文集 (2017), pp. 419-420.

3) 牧野武彦, 小保田麻暉, 青松明宏, 「各種工具皮膜上の凝着過程の接触電位差測定」, 第67回塑性加工連合講演会講演論文集 (2016), pp. 295-296.

4) 牧野武彦, 加田静香, アジェイ・アンリタラジ, 「各種工具皮膜上の凝着量の原子スケール計算」, 第67回塑性加工連合講演会講演論文集 (2016), pp. 293-294.

5) 牧野武彦, 余語祐弥, 道元俊成, 「成形中の摩擦力の直接測定」, 第66回塑性加工連合講演会講演論文集 (2015), pp. 211-212.

6) 牧野武彦, 小保田麻暉, 「マイクロ・メゾスケール押し据込みにおける工具皮膜上の凝着過程の接触電位差測定」, 第66回塑性加工連合講演会講演論文集 (2015), pp. 209-210.

7) Takehiko Makino, Penigalapaty Joseph Ajay Amrithraj, Masayuki Ishikawa and Shota Kohmura, “Atomistic calculation of

adhesion during forming”, XIII International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS XIII, 2015) (Barcelona, Spain) International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE)

8) Takehiko Makino, Yuya Yogo, Toshinari Michimoto, Yohei Takamori, “Direct measurement of friction force during forming”, 4th Asian Symposium on Materials Processing (ASMP 2015) (Lombok, Indonesia), 日本機械学会他

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・
准教授
研究者番号：70273315