

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月19日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560118

研究課題名（和文） マイクロ・メゾスケール成形加工解析法の構築

研究課題名（英文） Development of Micro/meso-Scale Forming Analysis

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

研究成果の概要（和文）：マイクロ・メゾスケールの成形で生じる塑性と摩擦の寸法効果を同時に考慮できる解析法を構築した。結晶方位ごとの摩擦係数を、第一原理電子状態計算によって作成した界面の原子間ポテンシャルを用いた分子動力学計算によって見積もり、結晶塑性を考慮した有限要素法（有限要素多結晶モデル）に適用した。これは、局所的に異なり、加工の過程によっても異なる界面の状態を考慮した成形加工解析法である。また、この方法の検証のために、接触電位差を用いた凝着状態測定法と、工具表面に働く摩擦力の直接測定法を開発した。

研究成果の概要（英文）：A forming analysis method considering size effects of deformation and friction appearing in micro/meso-scale has been developed. Molecular dynamics calculations using interatomic potentials for tool/material interfaces that were determined by first principles electronic state calculation were used to estimate the friction coefficients for each crystallographic orientation of material surface. These friction coefficients were applied to the finite-element-polycrystal-model method considering crystal plasticity. The developed method can analyze the effect of locally and historically different friction states on deformation anisotropy. For verification of this analysis method, a measuring method for adhesion process using contact potential difference and a direct measuring method for friction force acting at tool surface were also developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：塑性加工

キーワード：マイクロ・メゾスケール，成形加工，結晶塑性解析，摩擦界面挙動，分子動力学解析

1. 研究開始当初の背景

マイクロ・メゾとは、マクロとマイクロの中間を指す。今後開発が期待される医療用マイクロマシンには、高い信頼性、強度、耐久性が要求される微小金属部品の加工が不可欠である。どれだけ小さな金属部品を高精度

に塑性加工できるかという問題には、塑性変形と工具/材料間の摩擦の「寸法効果」が大きく関わる。

マクロな材料の塑性変形は連続体近似で扱える。しかし、結晶粒径と比較可能なほど材料の外形寸法が小さく（1 mm 程度以下に）

なると、塑性変形本来の結晶塑性そのものを考える必要が生じてくる。さらに結晶方位の分布状態によって、材料の変形に強い異方性が生じることがわかっている。これが塑性変形の寸法効果である。

一方、工具/材料間の摩擦の寸法効果は、材料の大きさに対応して工具の表面状態を制御することが困難であることから生じる。工具/材料界面の摩擦挙動は、特に微小部品の加工では、材料全体の塑性変形におよぼす影響が大きくなる。塑性変形中の界面の問題は、マクロな材料を扱う（連続体近似をする）場合においても、一定と仮定した摩擦係数によって界面の移動を決めているのが現状であり、界面の本質に基づく新たな解析法が強く求められている。

これらの塑性変形と摩擦の寸法効果を考慮して、マイクロ・メゾスケールの塑性加工の解析法を開発することは、今後積極的な機能部品の提案につながる。

2. 研究の目的

本研究は、結晶のサイズと方位分布を扱える有限要素多結晶モデルと、原子レベルで界面の挙動を扱える分子動力学法を結合し、微小部品の塑性加工の広範囲な問題を扱える解析法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

解析にはできるだけ実験値を用いず、実験ではできるだけ直接的な測定を行うことを目指した。そこで以下のような方法を用いた。

(1) 工具/材料界面を表現する分子動力学解析法の確立

異種界面を連続体と仮定して解析することは困難である。原子間の相互作用を第一原理電子状態計算から求めることができれば、任意の工具/材料の組み合わせに対応できる。工具に硬質被膜を適用することを考えれば、遷移金属炭化物・窒化物は、種類が多く、結晶構造が単純で単一（岩塩構造）であるため、解析においては良い対象となる。本研究では、15種類の遷移金属炭化物・窒化物を工具表面として、材料として Al のみ 1 種類を用いた。

(2) 分子動力学法の摩擦界面の挙動を有限要素多結晶モデルの各結晶粒の摩擦係数として計算する方法の確立

高橋らの有限要素多結晶モデル（「多結晶塑性論」、高橋寛，コロナ社，1999年）に、界面の結晶方位によって異なる摩擦係数を適用した。

(3) 解析結果を検証するための摩擦挙動測定法の開発

成形加工中の摩擦界面の材料の挙動を実

験的に直接観察することは、石英ガラスなどの透過性の高い硬質工具を用いる以外、困難である。そこで、解析との比較が可能のように、加工直後の工具表面の材料の凝着状態を高感度で測定することにした。また、現段階ではマクロスケール用ではあるが、摩擦挙動の結果である摩擦力を直接測定する方法を開発した。

(以下、4の(1)、(2)、(3)は、3の(1)、(2)、(3)に対応している。)

4. 研究成果

(1) 工具のバルクとしての性質（格子定数、体積弾性係数）と、表面の性質（仕事関数）を報告されている実験値と比較し、電子状態計算の精度を確認した後、工具表面に材料原子を近接させた状態のエネルギー値をポテンシャル関数にフィッティングして（図1）、原子間ポテンシャルを作成した（図2）。

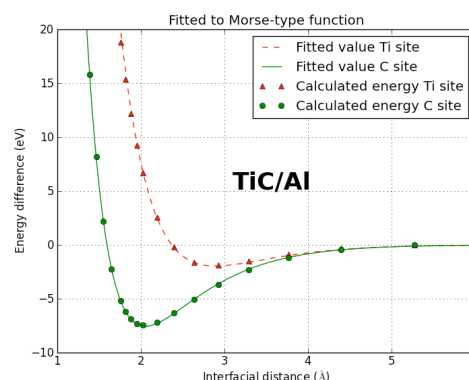


図1 電子状態計算の結果をポテンシャル関数へフィッティングした結果（TiC/Alの例）

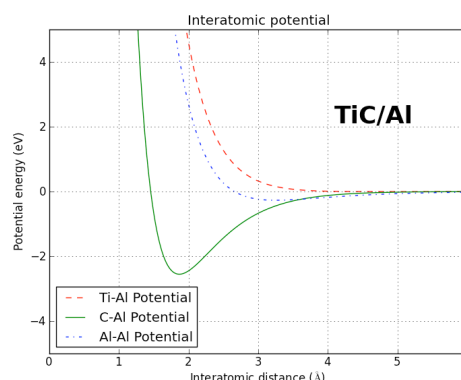


図2 得られた原子間ポテンシャル（TiC/Alの例）

これらのポテンシャルを用いて、材料が変形しながら摩擦する状態（しごき加工）での原子挙動を調べた（学会発表：1, 6, 7, 12）。この計算機実験から、界面の摩擦を左右する材料の工具への凝着は、工具表面に接触する1層目の原子の密度が高い場合（図3）、2層目以降の進展が阻まれることがわかった。

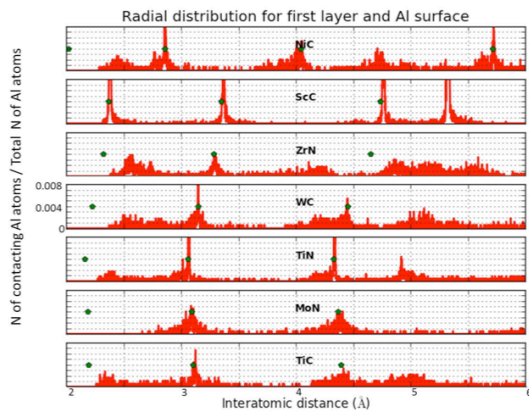


図3 分子動力学計算によって得られた工具表面1層目のAl原子の配置(上方の工具ほど耐凝着性が高い)

また,材料の初期結晶方位を種々変えて摩擦した時に界面にかかる力から摩擦係数を算出した(図4).多数の結晶方位に対して摩擦係数を得て,これらの関係を用いて,界面の局所的な摩擦状態を表現できるようにした(学会発表:5,11).

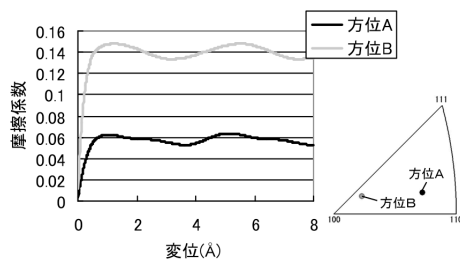


図4 結晶方位と摩擦係数

(2)有限要素多結晶モデルを用いて,摩擦係数一定の条件で,マイクロ・メソスケールの塑性変形の異方性が初期状態(加工履歴)の違いでどのように変わるかを示してきた(雑誌論文:7,学会発表:13).このモデルで各結晶を表す各要素の工具と接触する面の摩擦係数が,結晶方位によって異なる値をとる設定にすることによって,局所的で,かつ加工過程で変化する摩擦状態を考慮した解析が可能になった.押し出し据込み加工(図5)を行った場合の端面形状は,均一な摩擦係数の場合(図6)は等方的だが,結晶方位によって異なる摩擦係数の場合(図7)は異方性が現れている(学会発表:5,11).

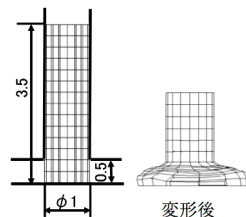


図5 押し出し据込み加工の説明図

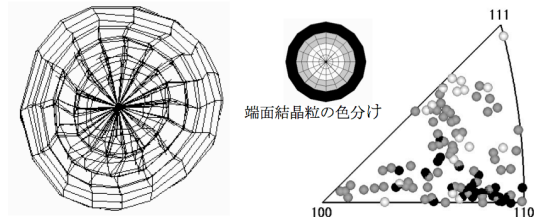


図6 均一な摩擦係数を適用した場合の端面形状と結晶方位分布

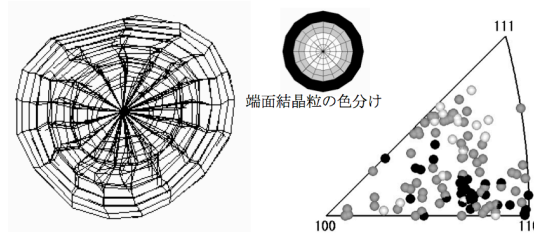


図7 結晶方位によって異なる摩擦係数を適用した場合の端面形状と結晶方位分布

(3)解析手法において工具表面の電子状態計算の検証に用いた仕事関数は,表面の状態に非常に敏感である.この相対値は,ケルビン法によって,接触電位差として実測可能である.本研究では,自作のケルビンプローブ(プローブ径1.0mm)を用いて,工具表面への材料の凝着過程を測定し(学会発表:3),凝着の初期段階を追跡できることがわかった(図8).

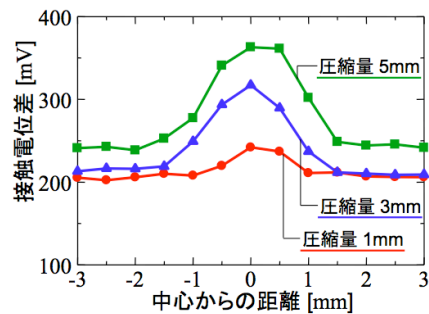


図8 押し出し据込み加工後の接触電位差分布(被膜なし工具)

構築した解析法では,局所的な摩擦係数を設定した.これらの値が妥当なものであるかは,工具に働く局所的な摩擦力および垂直力を測って比較する必要がある.工具を放電加工して作った微小な薄膜部とそのひずみを高感度で検出するレーザー光による「光てこ」を用いた機構によって測定する方法を考案し,実際に製作した(学会発表:4).今後,この摩擦力直接測定装置をマイクロ・メソスケールでも使えるようにし,解析結果と比較できるようにするために研究を継続する.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1) Futamura, M., Ishitani, A., Makino, T. and Dohda, K., "Proposal of a Ball Burnishing Method with Forced Rotation", Tribology Online, 6 (2011), pp. 199-206. (査読有)

2) Futamura, M., Ishitani, A., Makino, T. and Dohda, K., "Frictional Behavior of Ball Rotation with Plastic Deformation", Tribology Online, 6 (2011), pp. 193-198. (査読有)

3) Cao, J., Dohda, K., Zhou, R., Makino, T. and Futamura, M., "An investigation on bump formation in forming of micro dimple", Steel research international, Vol.81, No.9 (2010), pp. 1160-1164. (査読有)

4) Futamura, M., Dohda, K., Makino, T. and Suzuki, T., "Micro-Dimple Forming for Inner Surface of Pipe", Transactions of NAMRI/SME, Vol.38 (2010), pp. 515-522. (査読有)

5) 二村優・堂田邦明・牧野武彦・鈴木哲哉, 「パイプ内面のマイクロディンプル加工法の開発」, 塑性と加工, Vol.50, No.580 (2009), pp. 434-438. (査読有)

6) "TRIBO-CHARACTERISTIC OF COATED DIE AGAINST MAGNESIUM IN IRONING PROCESS" Kuniaki Dohda, Takehiko Makino, Hideaki Katoh, Int J Mater Form (2009) Vol. 2 Suppl 1:243-246. (査読有)

7) "ANISOTROPY OF PLASTIC DEFORMATION IN MICRO/MESO-SCALE METAL FORMING - DEVELOPMENT OF TESTING METHOD -" Takehiko Makino, Kuniaki Dohda, Akihiro Ishitani and Hualing Zhang, Transactions of North American Manufacturing Research Institution of SME vol.37 (2009) 333-340. (査読有)

[学会発表] (計 14 件)

1) 「原子論的モデルによる工具被膜の耐凝着性評価手法」牧野武彦, ペニガラパティ・ジョセフ・アジェイ・アンリタラジ (発表者) 第 62 回塑性加工連合講演会 (一般講演, 豊橋市, 平成 23 年 10 月 29 日)

2) "Measurement of Mechanical Property of Material Formed in Micro/Meso-Scale Analysis of Micro/meso-Scale" Takehiko Makino, Hin Yen Fung (発表者), Yutaro Fukui, 4th Asian

Workshop on Nano/Micro Forming Technology (一般講演, 豊橋市, 平成 23 年 10 月 27 日)

3) 「表面電位差測定による焼付き発生の検出」牧野武彦, 堂田邦明, 菊地徹 (発表者) 第 61 回塑性加工連合講演会 (一般講演, 米沢市, 平成 22 年 10 月 16 日)

4) 「接触界面の摩擦力直接測定法の開発」堂田邦明, 牧野武彦, 高森庸平 (発表者) 第 61 回塑性加工連合講演会 (一般講演, 米沢市, 平成 22 年 10 月 16 日)

5) "Analysis of Micro/meso-Scale Forming considering Local Change in Friction Coefficient" Takehiko Makino, Kuniaki Dohda, Man Kwan Ng (発表者), 第 61 回塑性加工連合講演会 (一般講演 (優秀論文講演奨励賞), 米沢市, 平成 22 年 10 月 15 日)

6) 「焼付き発生機構の物理的要因」牧野武彦 日本塑性加工学会 第 2 回鍛造分科会 工具表面ワークショップ・プロセストライボロジー分科会第 125 回研究会 (招待講演, 熊本市, 平成 22 年 3 月 2 日)

7) 「焼付き発生メカニズムに関する原子論的アプローチ」牧野武彦 日本塑性加工学会 鍛造分科会 工具表面・CAE・高温精密鍛造研究班 合同会議 (招待講演, 名古屋市, 平成 21 年 11 月 9 日)

8) 「温間マグネシウム成形における工具被膜への凝着と摩擦係数の関係」加藤英明 (発表者), 堂田邦明, 牧野武彦, 野沢照章 第 60 回塑性加工連合講演会 (一般講演, 長野市, 平成 21 年 11 月 2 日)

9) 「マイクロプレスを用いて成形した円錐形状の精度」堂田邦明, 牧野武彦, 一木秀仁 (発表者), 笠原賢一 第 60 回塑性加工連合講演会 (一般講演, 長野市, 平成 21 年 11 月 1 日)

10) 「マイクロディンプル成形における金属表面の変形挙動」二村優 (発表者), 堂田邦明, 牧野武彦, 鈴木哲哉 第 60 回塑性加工連合講演会 (一般講演, 長野市, 平成 21 年 11 月 1 日)

11) 「マイクロ・メゾ成形における工具・被加工材界面変形挙動の解析」牧野武彦, 堂田邦明, 石川将之 (発表者) 第 60 回塑性加工連合講演会 (一般講演, 長野市, 平成 21 年 11 月 1 日)

12) 「界面焼付き挙動の分子動力学解析」牧野武彦 日本塑性加工学会 プロセッシング

計算力学分科会 第 25 回セミナー（招待講演，名古屋市，平成 21 年 9 月 11 日）

13) 「加工履歴がマイクロ塑性変形の異方性に及ぼす影響」牧野武彦（発表者），堂田邦明，石谷彰浩，張華玲 平成 21 年度塑性加工春季講演会（一般講演，京都市，平成 21 年 5 月 31 日）

14) 「金属平面上のマイクロディンプル成形」二村優（発表者），堂田邦明，牧野武彦，鈴木哲哉 平成 21 年度塑性加工春季講演会（一般講演，京都市，平成 21 年 5 月 30 日）

〔図書〕（計 1 件）

1) T. Makino and K. Dohda, “Chapter 3 - Modeling and Analysis at Micro-scales”, *Micro-Manufacturing*, edited by Muammer Koc and Tugrul Ozel, John Wiley & Sons Inc., (2011), pp.43-70. (第 3 章担当)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧野 武彦 (Makino Takehiko)

研究者番号：70273315