

機関番号： 22604  
研究種目： 基盤研究（B）  
研究期間： 2008～2010  
課題番号： 20360336  
研究課題名（和文） マイクロ金型の機能性表面創製とそのトライボロジー特性評価システムの開発  
研究課題名（英文） Fabrication of functional surface of micro dies and development of equipment for evaluation of its tribological characteristics  
研究代表者  
楊 明 (YANG MING)  
首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・教授  
研究者番号： 90240142

## 研究成果の概要（和文）：

金属材料のマイクロ成形，型内組立てを実現するために，マイクロ金型に適した表面仕上げ技術および表面コーティング技術を研究開発した．マイクロ成形プロセストライボロジー特性評価に適した評価装置を開発し，加工寸法のマイクロ化に伴う各種トライボロジー現象を解析し，マイクロ成形に適した金型および材料表面設計に関する知見と課題を体系的に整理した．今後，これらの知見を高精度マイクロ成形加工に適用し，高精度・低コストのマイクロデバイス製造技術に適用していく．

## 研究成果の概要（英文）：

Surface treatments technology including surface finishing and surface coating on micro dies for the micro metal forming were developed in this study. Equipment for evaluation tribological characteristics during micro forming processes was developed. Various tribological phenomena according to down-sizing of the materials and dies were analyzed. Experiments with various materials and conditions were carried out to clarify the issues in micro forming processes and to be applied to a highly accurate, low-cost micro devices processing technology in the future.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 材料工学・材料加工・処理

キーワード： 精密造形プロセス，マイクロ金型，表面処理，精密計測，トライボロジー

## 1. 研究開始当初の背景

近年，MEMS (Micro Electrical Mechanical Systems) 関連の研究開発が急速な発展を遂げてきた．特に生物学や化学分野への応用に関するものが多く見られた．ただし，生物学や化学分析，医療などの分野において，廉価の生産技術や，耐腐食性や生体適合性の材料などの要求から，従来の半導体材料及びその加工技術の適用には限界がある．

一方，金属材料はヤング率や強度が高く，耐薬品性や生体適合性も優れている．また，材料の延性を利用した成形加工は生産効率が高く，低コストであることから，量産技術としては大変優れた技術であり，近年，研究も多くなされている．金属材料のマイクロ成形は，マイクロ部品，機能性デバイスの生産加工技術としての期待が大きく，今後の MEMS や各種マイクロ部品の普及のための重要な位置

づけになると予想される。しかしながら、現状での国内外の研究開発は素材あるいは金型部材に関する基礎的なものであり、実生産に適した加工プロセス及び生産システムに関する研究が少なく、また、実生産のための金型の創製、金型表面処理、及び金型寸法精度が製品に及ぼす影響も明らかにされておらず、実用段階までには、またかなり時間を要するものと思われる。

## 2. 研究の目的

本研究では、マイクロ成形、型内組立てを実現するためのマイクロ金型の微細形状加工技術、表面処理技術を確立すると同時に、成形プロセス及び製品精度に及ぼす影響を明確にし、マイクロ成形に必要な適切な金型精度と表面性状の加工手法及びその評価法を明確にする。さらに金型の耐久性評価手法を確立し、実生産のためのプロセス設計、マイクロ金型設計、製造、評価技術の確立を目的とする。

## 3. 研究の方法

上述研究目的に対して、以下のような方法で研究を実施した。

### (1) マイクロ金型表面仕上げ加工技術の開発

プラズマイオンなどの高エネルギービームを利用した超微細粒子超硬材料金型の微細形状の加工及び表面処理におけるイオン分子と材料表面との相互作用及び加工特性のメカニズムに関する研究を行い、高精度NC機械加工とレーザ、プラズマイオンを組み合わせたマイクロ金型加工手法の確立と加工条件の最適化を行う。

### (2) DLCコーティングによるマイクロ金型の潤滑性、耐摩耗性表面機能の付与

金型表面に多層DLC薄膜をコーティングし、潤滑性、耐摩耗を実現するための膜設計システムを開発する。金型表面処理を施し、マイクロ金型の潤滑性、耐摩耗性を付与する機能性表面形成を行う。

### (3) マイクロプレス成形プロセストライボロジー特性評価装置の開発

マイクロ金型に適した表面機械特性及びトライボロジー特性評価システムを確立し、マイクロプレス成形プロセストライボロジー特性を適切に評価する。

### (4) マイクロプレス成形プロセストライボロジー特性評価とデータの蓄積

加工寸法のマイクロ化に伴う各種トライボロジー現象を解析し、マイクロ成形に適した金型および材料表面設計に関する知見と

課題を体系的に整理する。これらの知見を高精度マイクロ成形加工に適用し、高精度・低コストのマイクロデバイス製造技術に適用していく。

## 4. 研究成果

上述した研究方法に対応して、得られた研究成果を以下のようにまとめる。

### (1) マイクロ金型表面仕上げ加工技術の開発

超微細粒子超硬材料などの金型材料を用いて、プラズマイオンビーム加工 (ECR 装置、エリオニクス社製) を適用し、イオンビーム照射が金型表面に及ぼす影響を調べた。Ar イオンを用いて適切な照射エネルギー及び照射角度を用いることにより、機械加工された金型表面粗さを低減することができた。図1にマイクロ金型の表面仕上げ結果の一例を示す。イオン照射により、金型表面の機械加工痕が除去され、表面が平滑化し、表面粗さが31%程度に低減した。ただし、マイクロ抜き加工試験を用いてその耐摩耗特性評価を行った結果、粉末冶金で製造された超硬材料に対して過度なイオン照射が表面組織の劣化を招き、耐摩耗性が低下することが分かった。表面粗さの低減及び表面物性の劣化がトレードオフの関係にあり、適切な照射時間の制御が重要である。

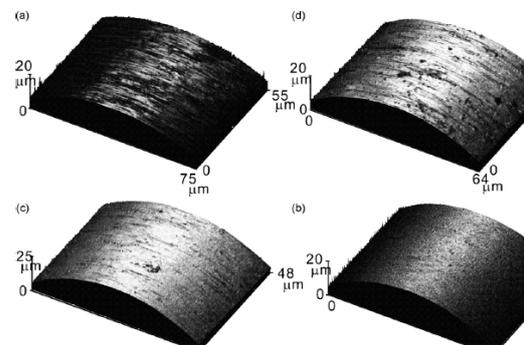


図1 イオン照射による円筒パンチ (φ01.5 mm) の表面仕上げ結果, (a)機械加工後表面 (表面粗さ  $Ra=0.251 \mu\text{m}$ ), (b) 30min イオン照射後 ( $Ra=0.124 \mu\text{m}$ ), (c) 1hr イオン照射後 ( $Ra=0.087 \mu\text{m}$ ), (d) 2hr イオン照射後 ( $Ra=0.080 \mu\text{m}$ )

### (2) DLCコーティングによるマイクロ金型の潤滑性、耐摩耗性表面機能の付与

表面が支配的になるマイクロ成形加工では、金型表面にナノオーダーの平滑面及び高い機械強度が求められる。

本研究では、イオン化蒸着法を用いてマイクロ超硬金型表面にDLCのコーティングを実施した。原料ガス ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) をイオン化電源に

よってイオン化し、基板に印加されたバイアス電圧によって引き付けて堆積した。また、コーティングしたマイクロ金型に対して、成形プロセスと同程度の応力負荷を与え、耐摩耗性評価を行った。その時のDLCコーティング膜が受けた損傷をダメージ度として評価した。その結果、硬質なDLC膜は耐摩耗が高いが、マイクロクラックが発生しやすく、それに起因する剥離によって、膜が大きいダメージを受ける。一方、軟質なDLC膜はマイクロクラックに起因する剥離が発生しにくい、耐摩耗性が低い。マイクロ成形プロセスにおいて、金型表面に大きな応力が負荷されるだけでなく、素材の表面粗さ等に起因する接触状態の不均一性によって、その応力が大きく変動することが原因であると考えられる。その対応策として、耐衝撃性に強い高靱性特性を有するDLCのコーティングが有効である。また、素材と接触する表面層と基盤との間の中間層の特性を変化させる多層DLC薄膜を設計・コーティングすることにより、高い耐摩耗性と耐衝撃性を可能にしたDLC膜の開発に成功した。

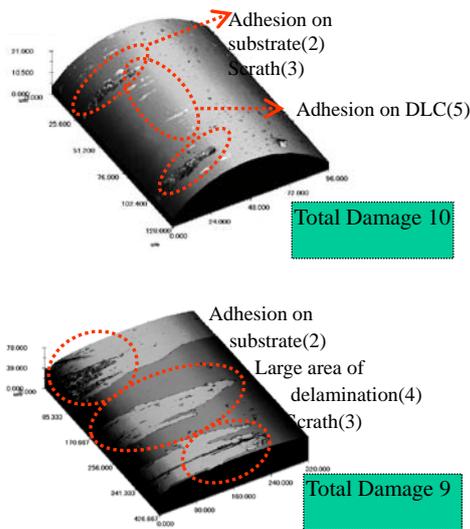


図2 DLC膜のダメージ度評価

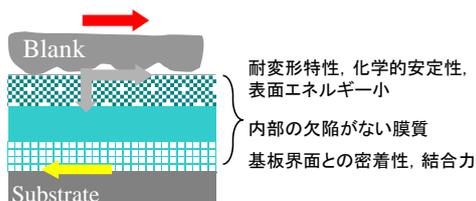


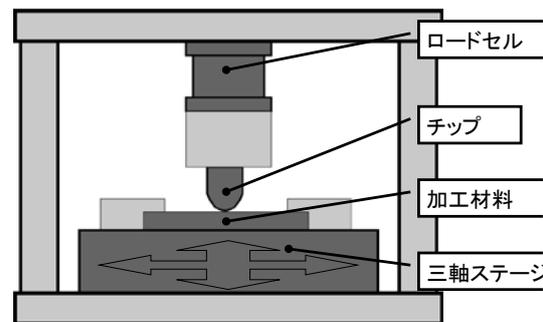
図3 マイクロ金型用多層DLC膜

### (3) マイクロプレス成形プロセストライボロジー特性評価装置の開発

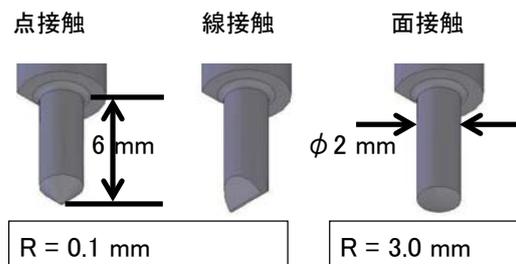
マイクロ成形加工プロセスにおける摩擦・摩耗を適切に評価するために、2種類のトライボロジー評価装置の開発を行った。

#### ユニバーサル潤滑性、耐摩耗性評価装置の開発

精密3軸ステージと3軸荷重センサーを組み合わせたマイクロ金型の潤滑性、耐摩耗性評価装置を開発した。素材表面粗さなどに起因する圧力の変動を再現できるように、金型と素材との接触状態をダイナミックに変化させ、そのときの摩擦状態をモニタリングすることが可能にした。装置の概要および使用するマイクロ金型先端形状を図4に示す。加工材料とパンチを接触させた状態で、ステージを動かすことにより、金型先端を素材表面で摺動させる。3軸ステージの動きを制御することにより、接触時の圧力をダイナミックに変動させることができる。また、金型先端形状を変えることにより、金型表面が受ける面圧が大きく変えることができる。



(a)



(b)

図4 ユニバーサルトライボロジー特性評価装置概要 (a) 及び評価用金型先端形状 (b)

**高精度小型摺動試験機**：素材の寸法効果がトライボロジー特性に及ぼす影響を調べる卓上型高精度小型摺動試験機を開発し、素材の材質、板厚、結晶粒径などの寸法効果を調べた。図5に箔材引抜型摩擦試験機の概要を示す。極薄材料 ( $t=20 \mu\text{m}$ ) に対しても、摺動摩擦試験を可能にする精密構造と高精度な動作制御を実現した。

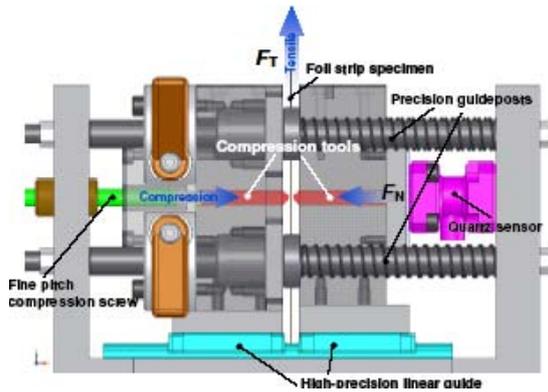


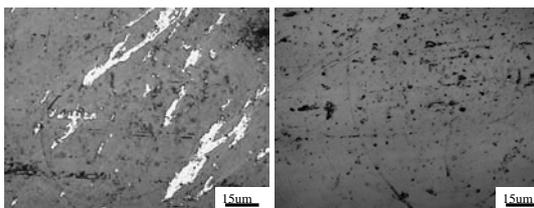
図5 箔材引拔型摩擦試験機の概要

(4) マイクロプレス成形プロセストライボロジー特性評価とデータの蓄積

2種類のマイクロ成形加工プロセストライボロジー評価装置を用いて、各種マイクロ金型の表面仕上げや保護膜コーティングに関するトライボロジー特性評価を行った。

マイクロ成形プロセストライボロジー特性評価:

マイクロ成形加工では、素材の表面粗さや平坦度などに起因するプロセス時の非連続的な接触状態を再現し、そのトライボロジー特性を評価した。接触状態が周期的に変動するモードで摺動試験を行い、接触状態が一定の場合での摺動実験との比較を行った。平均摩擦係数は一定モードと比較して、変動モードのほうが低下することが分かった。金型表面DLCコーティングの耐摩耗性については、一定モードでは、せん断による摩耗に対して、変動モードでは、DLC膜に微細クラックが多く発生し、剥離に至るケースが多い。この現象は、金型と素材との接触面積が小さくなるにつれて顕著である。これを踏まえて、クラックの発生を抑制する靱性の高い膜コーティングを施し、耐摩耗性向上につながったことを実証した。図6にフッ素を添加したDLC膜 (F-DLC) と通常のDLC膜の耐衝撃荷重特性評価の試験結果を示す。明らかにF-DLCは通常のDLC膜より衝撃荷重に対して、クラックの発生が抑制されていることが分かった。



(a) (b)

図6 DLC膜の耐衝撃特性評価結果 (a) 通常のDLC膜, (b) F-DLC膜

箔材引拔型摩擦試験によるメゾトライボ特性評価:

マイクロ板材成形におけるドライ摩擦の寸法効果を評価し、寸法の微小化に伴って、摩擦係数が低下する寸法効果を実証した。マイクロトライボロジーにおける寸法効果理論を元に、メゾ寸法領域における乾燥摩擦の寸法効果を分類し、メゾ寸法領域では、主に接触面にトラップされる摩耗粉に起因した掘り起こし項の寸法効果が支配的であることを理論的に明らかにした。マイクロ深絞り加工における寸法による接触挙動の違いを、実験的、数値解析的に詳細な検討を行い、箔材引拔型摩擦試験によって得られたメゾトライボ特性の実加工現象における適用範囲を検討し、その有用性を実証した。

新たに開発した箔材引拔型摩擦試験機を用いて、幾何学的に相似寸法をもつ3種の異なる寸法領域において、無潤滑摩擦の寸法効果を検証した。その結果、図7に示す通り、寸法の微小化に伴って、摩擦係数が低下することを示した。有限要素解析 (FEM 解析) による本実験における代表接触長さの計算および、マイクロトライボロジーにおける寸法効果理論に基づいて、上記摩擦係数の低下が接触面内にトラップされる摩耗粉の相対数による寸法効果に起因していることを定量的に明らかにした。

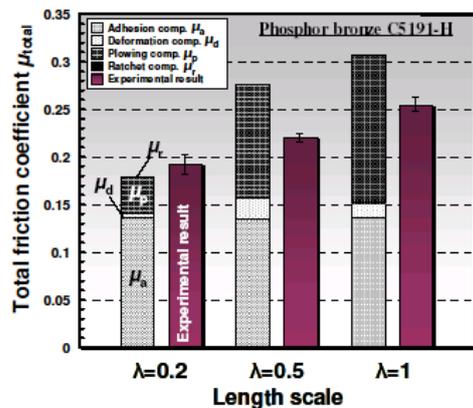


図7 実験結果とFEMシミュレーション結果との比較によるドライ摩擦における寸法効果の評価

さらに被加工材のバルク変形状態がトライボ挙動に及ぼす影響を検証するため、板厚/接触長さ、 $L_c/t_0$ および面圧を変化させて、箔材引拔型摩擦試験を行った。その結果、 $L_c/t_0$ の大きい極薄箔においては、面圧の増加と共に摩擦係数が低下する点、表面層および箔材全体の塑性変形量が、 $L_c/t_0$ の小さい薄板材と比較して顕著に大きくなることを示し

た。FEM 解析による、内部応力一ひずみ状態の検証から、 $L_c/t_0$ の違いにより、導入されるひずみ量が大きく違う点、また極薄箔における板厚方向のせん断ひずみ勾配が大きい点が、上記トライボ挙動の変化に影響していることを示した。

**ドライマイクロ深絞り加工におけるメゾトライボ特性評価：**上記摩擦試験で得られたメゾ寸法領域における無潤滑摩擦特性の実加工における検証を目的として、既報にて開発を行ったマイクロ深絞り試験システムを用いて、幾何学的に相似寸法をもつ三種の異なる寸法領域におけるマイクロ深絞り試験を行った(図 8)。引拔型摩擦試験結果と対応して、寸法の微小化に伴う摩擦係数の低下が観察された。FEMを用いて各寸法領域における代表接触長さおよび面圧が詳細に計算され、摩耗粉の相対数による寸法効果の影響が大きい点が示された。

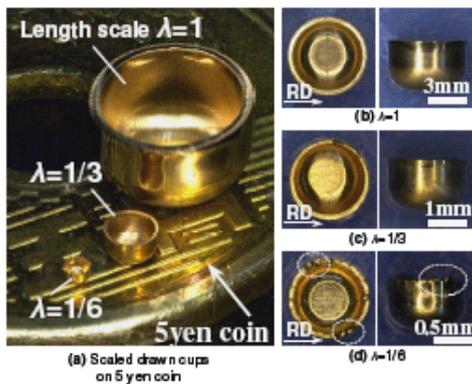


図8 相似則に沿った各種寸法のマイクロカップの写真イメージ

このように、メゾ寸法領域におけるトライボ特性に摩擦挙動が大きく関連していることに基づいて、さらに 300 回の連続マイクロ深絞り試験によって摩擦挙動の遷移および、被加工材の摩擦挙動および金型への摩擦粉の凝着挙動の遷移を観察した。実験結果および FEM による相対摩擦量の評価から、微小寸法領域における摺動距離が絶対的に短いことに大きく起因して、マイクロ加工においては、摩耗量が極めて低いことを明らかにした。さらに応用例として板厚  $20 \mu\text{m}$ 、直径  $700 \mu\text{m}$  の極小カップ成形において、関連パラメータとして、被加工材材料特性および金型・材料表面特性が、成形荷重および製品精度へ及ぼす影響をそれぞれ検証した。これらの実験結果およびこれまで得られた知見に基づいて、

図 9 に示すような表面設計指針構築のためのプロセスウィンドウを作成し、ドライマイクロ加工における表面の幾何学的設計の重要性を示した。

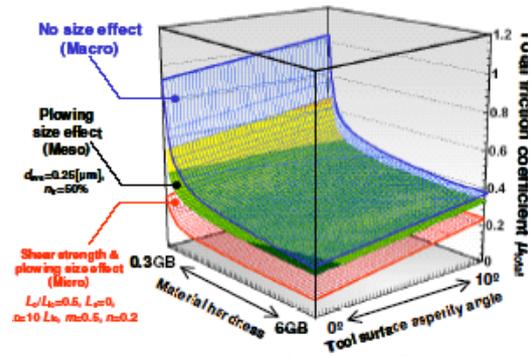


図9 マイクロ成形プロセストライボロジー(ドライ摩擦)の寸法効果まとめ

**マイクロ鍛造金型の表面処理およびその効果の検証：**マイクロ精密鍛造用金型表面に DLC コーティングを施し、摩擦力低減、耐摩耗性向上及び成形した製品の精度向上の効果について評価を行った。その結果、成形加工に適した耐荷重 DLC コーティングを施すことにより、摩擦力の低減効果に加えて、耐摩耗性が向上した。また、振動付加精密鍛造の結果から、摩擦力の低減および振動付加による素材表面へのエネルギー集中効果により、静荷重の低減だけでなく、素材表面粗さが 76% の低減したことが分かり、金型表面処理が大変有効であることが実証された。

上述のような研究開発成果は、今後マイクロ成形の実用化のための基本的なマイクロ金型加工技術、表面処理技術及びその評価技術を定量評価し、マイクロ塑性加工技術を確立させるものである。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① T. Shimizu, K. Manabe, M. Yang, Deformation Behavior of Ultra-Thin Metal Foils in Strip Drawing Friction Test, Key Engineering Materials, 査読有, Vol. 443, 2010, 110-115.
- ② T. Shimizu, Y. Murashige, K. Ito, K. Manabe, Influence of Surface Topographical Interaction between Tool and Material in Micro-deep Drawing, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol. 3-2, 2009, 397-408
- ③ Ming Yang, Atsushi Osako, Application

of Ion Irradiation for Surface Finish of Micro Forming Die, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol. 201, 2008, 315-318.

- ④ K. Manabe, T. Shimizu, H. Koyama, M. Yang, K. Ito, Validation of FE Simulation Based on Surface Roughness Model in Micro Deep Drawing, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol. 204, 2008, 89-93.
- ⑤ Ming Yang, Surface Treatment of Micro Dies for Improving Tribological Properties, Journal of Steel research International, 査読有, Vol. 2, 2008, 421-426.

[学会発表] (計 16 件)

- ① K. Nishikawa, Surface Modification of Metallic Foils by Vibration-Assisted Micro Forging, The 6th International Conference of MicroManufacturing (ICOMM2011), 2011年3月9日, 東京電機大学 (東京都)
- ② Tetsuhide Shimizu, Transitional Adhesion Behavior of Stainless Steel Foils in Dry Progressive Micro Deep Drawing Process, The 6th International Conference of MicroManufacturing (ICOMM2011), 2011年3月9日, 東京電機大学 (東京都)
- ③ Ming YANG, EVALUATION OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS FOR MICRO DIES, International Forum on Micro Manufacturing 2010 (IFMM'10), 2010年10月22日, 長良川国際会議場(岐阜県)
- ④ M. Yang, Surface Modification of Sheets Metal by Vibration-Assisted Micro Forging, The 3rd Asian Workshop on Nano/Micro Forming Technology (AWMDT-2010), 2010年10月8日, ラマダ・プラザ・ホテル (済州・韓国)
- ⑤ 西川 顕二, 鍛造によるチタン薄材表面の微細成形, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010年9月8日, 名古屋工業大学 (愛知県)
- ⑥ T. Shimizu, Plastic Deformation in Surface Layer of Metal Foil in Strip Drawing Test, The 4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP2010), 2010年6月14日, Acropolis exhibition centre (ニース・フランス)
- ⑦ T. Shimizu, Deformation Behavior of Ultra-thin Metal Foils in Strip Drawing Friction Test, The 9th Asia-Pacific Conference on Materials Processing (APCMP2010), 2010年6月9日, University of New South Wales, (シドニー・オーストラリア)
- ⑧ 清水 徹英, 金属極薄材の帯板引抜き型摩擦試験における変形挙動の実験的評価, 平成22年度塑性加工春季講演会, 2010年5月29日, 電気通信大学 (東京都)
- ⑨ K. Nishikawa, Surface Modification of Titanium Sheets Metal by Micro-forging, The 5th International Conference on MicroManufacturing (ICOMM/4M 2010), 2010年4月7日, University of Wisconsin (マディソン・アメリカ)
- ⑩ T. Shimizu, Adhesive Wear on Dry Sliding Surface in Miniaturization of Deep-drawing Process, International Conference on Materials Processing Technology 2010, MAPT2010, 2010年1月, (バンコク・タイ)
- ⑪ 清水 徹英, りん青銅極薄箔材のマイクロ深絞り性に及ぼす内部結晶組織の影響, 日本伸銅協会 銅及び銅合金技術研究会第49回講演大会, 2009年11月, 京都テルサ (京都府)
- ⑫ M. Yang, A Precise Forming System for Fabrication of Micro Metallic Devices, AWNFT-2009, 2009年10月, (長沙市・中国)
- ⑬ 木村 悠, マイクロ金型のトライボロジー特性評価, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009年9月, 岩手大学(岩手県)
- ⑭ 清水徹英, アルミニウム合金箔材の表面特性が及ぼすマイクロ深絞り性への影響, 第59回塑性加工連合講演会, 2008年11月9日, 広島大学 (広島県)
- ⑮ Ming Yang, Design and Fabrication of Metallic MEMS, The 9th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2008), 2008年9月10日, Hotel Hyundai (慶州・韓国)
- ⑯ 清水徹英, マイクロ深絞り成形性に及ぼす金型表面性状の影響に関する実験的検討, 平成 20 年度塑性加工春季講演会, 2008年5月24日, 日本大学津田沼キャンパス (千葉県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

楊 明 (YANG MING)

首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・教授

研究者番号： 90240142

### (2) 研究分担者

真鍋 健一 (MANABE KEN-ICHI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号： 10145667