

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360327

研究課題名(和文) 高密度エネルギー援用金属薄材マイクロ精密成形プロセスの開発

研究課題名(英文) Development of high-energy assisted processes for precise micro forming

研究代表者

楊明(Yang, Ming)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：90240142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)： 高密度エネルギー(HDE)素材表面成形技術を適用した高精度かつ高効率な加工プロセスを開発した。超音波振動などを利用して高密度エネルギーを素材表面に集中させることにより、表面局所に限定した材料変形を誘起し、素材表面の平滑化や微小パターンの転写加工に成功した。さらに、その変形メカニズムを明確にした。素材のマイクロ化に伴う比表面積増大及び熱容量の低減などの寸法効果を利用した最適プロセス設計を行った。

研究成果の概要(英文)： A highly precise and efficient process with assistance of high-density energy (HDE) was developed for micro surface forming. By concentrating high-density energy on the material surface using ultrasonic vibration etc., the plastic deformation limited to the surface can be induced, and the technique was applied successfully to smooth the surface, or to transfer micro patterns into surface of the materials. Furthermore, the mechanism for the deformation was clarified experimentally and numerically. The optimal process design using size effects accompanying demagnification of a material, such as increase of specific surface area and reduction of the heat capacity, was performed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：精密造形プロセス マイクロ成形 高密度エネルギー援用 超音波振動 通電加熱

1. 研究開始当初の背景

近年、IT 端末、電子機器の小型化、高密度化などの需要に伴い、微細金属部品の成形技術が進められている。半導体デバイスに替わって、バイオ分析やマイクロ医療などでの利用が期待される金属材料 MEMS も注目されている。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、量産技術としても期待されており、近年、研究も多くなされている。しかし、金属薄材の精密成形は素材の塑性流動には大きな荷重を必要とするため、金型と装置への負担が大きく、加工システムの信頼性や金型の耐久性などの問題が残されており、そのまま実生産に適用するには不十分である。

金属材料のマイクロ成形加工生産技術は、それらの問題を解決すべく新たな加工手法を導入する必要がある。従来のプレス加工技術に加えて、マイクロ化に適したプロセスの開発及び他の加工技術との融合・統合（コンバージェンステクノロジー）などの研究開発が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、高密度エネルギー（HDE）素材表面成形技術を適用した高精度かつ高効率な加工プロセスを開発する。金属薄板素材の表面粗さを矯正するインプロセス矯正プロセスおよび薄材に適した低荷重かつ高精度なマイクロ鍛造プロセスを導入することにより、高精度マイクロ成形プロセスを提案し、より高性能な金属マイクロポンプ・バルブ生産システムの確立を目的とする。

3. 研究の方法

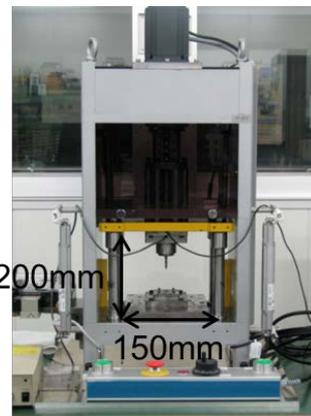
超音波振動などを利用して高密度エネルギーを素材表面に集中させることにより、素材の金型と接触する表面局部に限定した材料変形を誘起する変形メカニズムを実験的に明確にし、素材表面局部変形モデルの提案、コンピュータシミュレーションにより、素材のマイクロ化に伴う表面積対体積の比率及び熱容量の低減などの寸法効果を最大限に利用した最適プロセス設計を行う。また、これを適用した低荷重かつ高精度なマイクロ鍛造及び高い精度の表面矯正を実現する実験プロセスを開発する。さらに、素材の表面粗さ、平坦度、さらに成形後の表面粗さ増大など問題を解決すべくこれらのプロセスを導入することにより高精度なマイクロ成形を実現する。

4. 研究成果

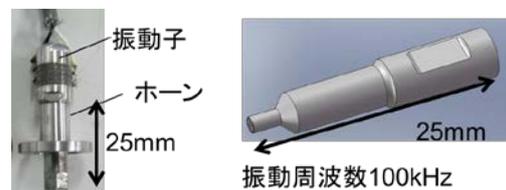
(1) 超音波援用による高精度マイクロ鍛造装置およびプロセス開発

マイクロプレス成形に超音波振動を適用するために、マイクロプレス成形に適した加振システムを開発した。図 1 にそのシステムの概要を示す。高剛性・高精度な卓上プレス

成形装置に 100kHz の高振動周波数かつコンパクトな超音波振動子を組み込み、成形中に高いエネルギーを成形部に付与することを可能にした。



(a) 小型超音波加振機能プレス成形機



(b) 超音波振動子

図 1 超音波振動援用卓上プレス装置概要

新規開発の装置を用いて、金属箔材プレス成形における表面粗さ低減および微細表面パターンの転写実験を行い、その効果について検証した。その結果を以下に示す。

(2) 箔材プレス成形における表面粗さ低減

各種金属箔材に対して、平頭パンチを用いて、箔材表面粗さ低減効果評価実験を行った。また、振動周波数による影響を評価するために振動周波数が $\sim 10\text{kHz}$ の piezoelectric vibrator による振動付与実験も行った。結果を図 2, 3 に示す。結果より、振動を付加することにより、素材表面アスペリティが変形し、表面粗さが低減されたことが分かる。図 2 と図 3 より、表面粗さの低減は付与する振幅に比例することが分かった。付加される振動の周波数に違いがあっても、その傾向が同様であった。形成前と成形後における原理間力顕微鏡 (AFM) 測定例を図 4 に示す。表面のアスペリティが平滑化されている様子が見られる。また、振動付加により、付加しない場合と比較して、0.5%程度のパンチ荷重で同様な表面粗さの低減効果が得られており、また、表面粗さを最大 75%低減することができ、効率の高いプロセスであるといえる。

(3) 超音波援用精密鍛造における表面変形メカニズムの解明

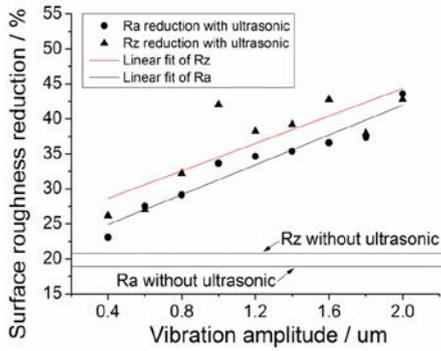


図2 振動援用マイクロ鍛造による箔材表面粗さの低減（振動周波数：100kHz，材料リン青銅 C5191）

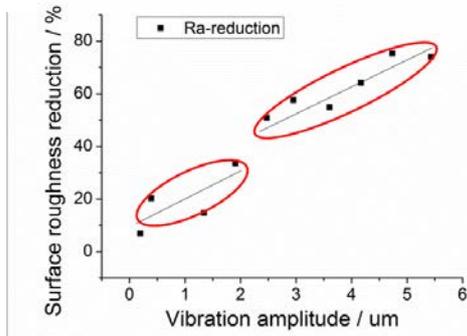
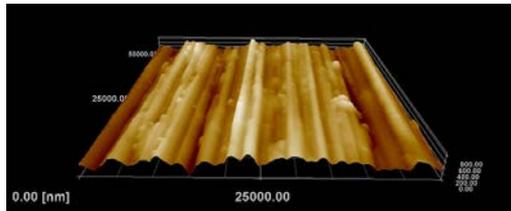
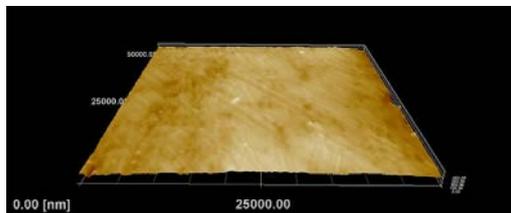


図3 振動援用マイクロ鍛造による箔材表面粗さの低減（振動周波数：1kHz，材料リン青銅 C5191）



(a) 成形前の表面形状



(b) 振動援用成形後の表面形状

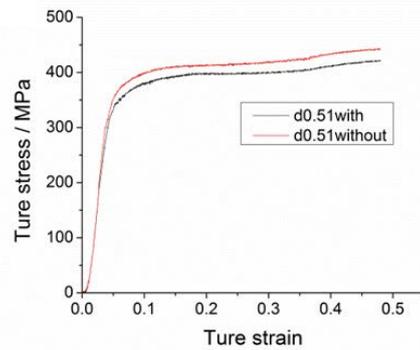
図4 材料表面形状の AFM イメージの一例（材料リン青銅 C5191）

振動援用プレス成形において，素材表面において，アスペリティが選択的に変形するメカニズムを解明するために寸法の異なる試験片を用いて，マイクロ据え込実験を行った．試験片寸法および実験条件を表1に示す．黄

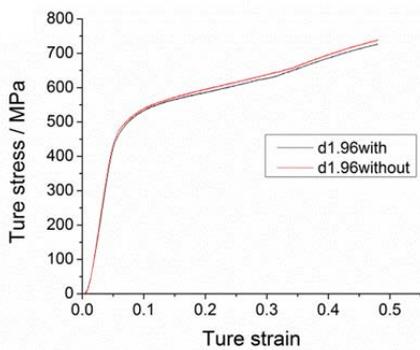
銅を用いた実験の結果を図5に示す．試験片寸法の縮小に伴い，素材の変形抵抗が低減し，振動援用の効果も相対的に増大することが分かった．これは一般的に表面付近の材料の変形抵抗が内部材料の変形抵抗より低いため，同程度の結晶粒径を有する素材の寸法が縮小するにつれ，全体の変形抵抗が低下する．また，振動付与により，転位の拡散などが促進され，素材の変形抵抗が低下するが，寸法が小さくなるほど，その低下量が大きいことが分かった．振動付与効果も寸法効果を有することが分かった．

表1 据え込実験試料寸法

No.	1	2	3	4	5
直径[mm]	0.51	0.71	1.0	1.4	1.96
高さ[mm]	0.51	0.71	1.0	1.4	1.96
ひずみ速度[s ⁻¹]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
パンチ速度[mm/s]	0.01	0.014	0.02	0.028	0.0392



(a) φ0.51mm 試験片の振動有無の結果比較



(b) φ1.96mm 試験片の振動有無の結果比較

図5 振動有無での据え込実験結果の応力ひずみ曲線

これらの実験データを用いて振動付与時の表面アスペリティの変形を有限要素法（コード：Abaqus V6.12）による数値シミュレーションを行った．その結果の一例を図6に示す．振動付加により，アスペリティの寸法効果および金型界面との摩擦低減の結果，応力

が集中し、変形が促進されることが分かった。振動援用成形加工において、主に素材の軟化による変形抵抗の低減効果 (Blaha 効果)、界面の平均接触圧力低減による摩擦低減効果、およびパンチと素材との衝突によるインパクト効果があると言われている。これらの効果に対して、物性値 (主に降伏応力) の異なる材料に対して、振動周波数、振幅、初期荷重などのプロセス条件がそれぞれの効果に対してどのように寄与するかを実験的に解明し、それぞれの寄与度を図 7 に示す。

これらの結果を元にプロセスパラメータから最終表面粗さを予測する以下のモデル式を提案し、それによる粗さ低減効果予測結果を図 8 に示す。モデルを用いた予測は大よそ実験結果と一致していることが分かり、目的に応じたプロセスパラメータの結果が可能となった。

$$\Delta R_a(A, \sigma_0, \sigma_s) = \Delta R_a(A, \sigma_0) \cdot \Delta R_a(\sigma_s) / 30.64$$

(4) 微細表面パターン転写への適用

振動援用成形をマイクロ転写加工に適用し、振動援用の効果について評価した。図 9 に示す V 溝 (幅 100 μ m, 200 μ m) を有するパンチを用いて転写加工を実施した。加工条件を表 2 に示す。押し込み速度を 0.01mm/s、パンチ荷重を 50N 負荷してから振動を開始した。転写結果について、幅 200 μ m のものを評価し、転写高さ 50 μ m 成形時の荷重比較および振動なし時と同荷重まで超音波振動付加で加工した際の転写高さ増加率比較を行った。材料は板厚 0.3mm の純銅を用いた。結晶粒径による影響を見るために、試料を窒素雰囲気中での焼きなまし処理を行い、図 10 に示す 3 種類の結晶粒径の材料を実験に用いた。

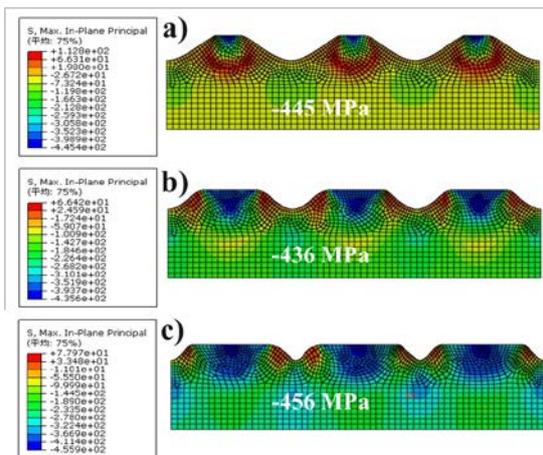
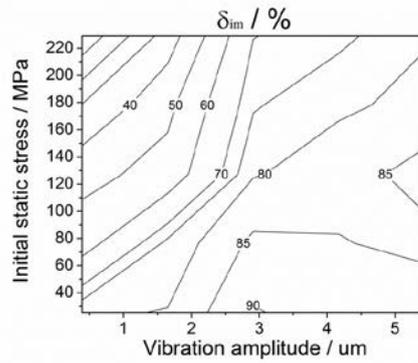
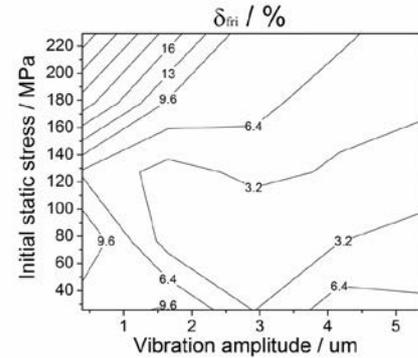


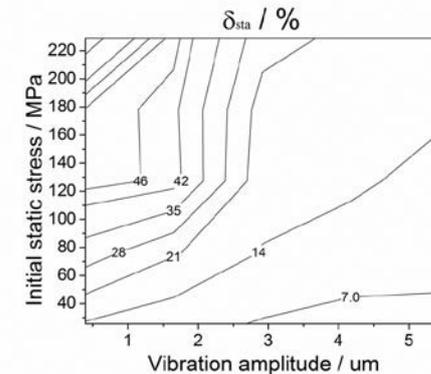
図 6 振幅付与による表面アスペリティの変形シミュレーション (パンチ圧力 27 MPa) 振幅 (a) 1.34 μ m (b) 2.47 μ m (c) 4.18 μ m



(a) インパクト効果の粗さ低減への寄与度



(b) 摩擦低減の粗さ低減への寄与度



(c) 平均パンチ荷重の粗さ低減への寄与度

図 7 各種プロセス因子の粗さ低減への寄与度

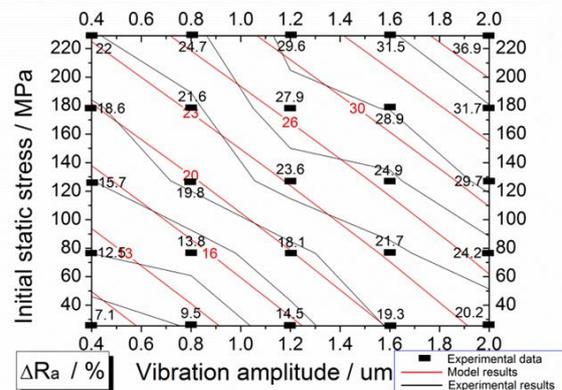


図 8 表面粗さ低減量 ΔR_a に関する実験値とモデル予測値の比較

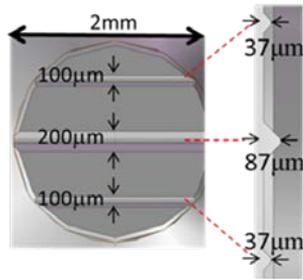


図9 転写加工用パンチ先端形状

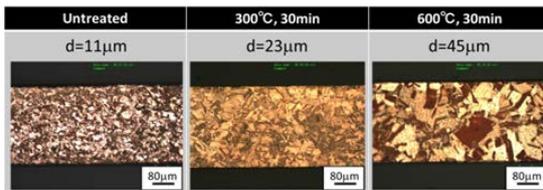
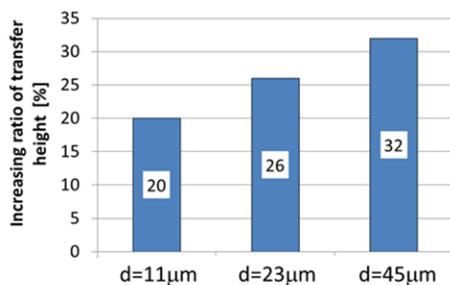
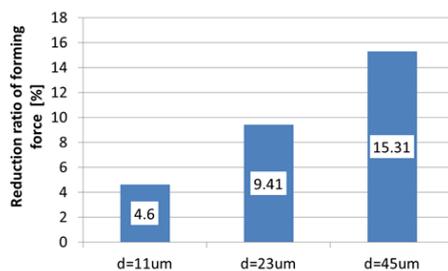


図10 試料の結晶粒径



(a) 試料結晶粒径と転写率向上の関係



(b) 結晶粒径と成形荷重低減の関係

図11 振動付与が転写性および転写荷重に及ぼす影響

マイクロ転写加工の結果を図11に示す。振動付加により、素材の流動性が向上し、マイクロなパターンへの流入が促され、転写率の向上および成形荷重の低減につながった。その傾向は試料の結晶粒径が小さいほど顕著であることが分かった。微細溝への転写加工において、結晶粒径が大きければ、材料の流入抵抗が大きくなり、転写が困難である結果が先行研究で分かっている。それに対して、超音波振動付与によって、素材の軟化による

変形抵抗の低減および金型界面との摩擦が低減されたことが成形高さの向上および形成荷重の低減につながり、結晶粒径の大きい素材に対しても、超音波付与により、マイクロ転写成形が可能であることを示唆した。

(5) 熱援用マイクロ成形プロセスの開発

高密度エネルギー付与のもう一つの手段として、通電加熱援用マイクロ成形も試みた。金型中に電極を挿入し、金属箔材試験片を通電加熱することにより、短時間、高効率な加熱を可能にするシステムを開発した。成形中は試験片中心温度をオンラインで測定し、パンチの接触による温度の低下に対して、温度を一定に保つように供給電源をリラタイムで制御した。開発したシステムをマイクロ絞り加工、曲げ加工、鍛造加工に適用し、各種評価実験を行った。成形中に加熱することにより、材料全体で塑性変形が起き、板厚方向に対する結晶粒数に起因した結晶粒個々の不均一変形は、材料の加熱によって均一化し、荷重の低減、成形性の向上だけでなく、表面粗さの低下にも寄与した。マイクロ成形における各種課題を解決する有効なプロセスであることを示した。

上述のようにマイクロスケールでの各種課題を考慮に入れ、高密度エネルギーを適用したマイクロ成形プロセスにより、生産効率を失うことなく、マクロな場合と同様な加工精度を実現することが可能であり、本研究開発成果は今後マイクロ成形加工の実用化を大きく前進させるものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

① Yang Bai, Ming Yang, Optimization of metal foils surface finishing using vibration-assisted micro-forging, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.214, Issue 1, 2014, pp.21-28, 10.1016/j.jmatprotec.2013.07.011

② Yang Bai, Ming Yang, Influence of vibration time and frequency on surface finishing using vibration-assisted micro-forging, Materials Science Forum, 査読有, Vols.773-774, 2014, pp.687-693, 10.4028/www.scientific.net/MSF.773-774.687

③ Yang Bai, Ming Yang, Investigation on mechanism of metal foil surface finishing with vibration-assisted micro-forging, Journal of Material Processing Technology, 査読有, Vol.213, Issue 3, 2013, pp.330-336, 10.1016/j.matprotec.2012.10.013

④ Yang Bai, Kenji Nishikawa, Ming Yang, Metal Surface Modification with Vibration-Aided Micro-Forging, Materials Transactions, 査読有, Vol.53, No.3, 2012,

pp. 489-494,
<http://www.jim.or.jp/journal/e/53/03/489.html>

⑤ Y. Bai, K. Nishikawa, M. K. Roy, M. Yang, Investigation on Deformation Characteristics of Surface Asperities of Metallic Foils Using Vibration-assisted Micro-forming, Steel research international, 査読有, 2011 Special Edition, 2011, pp. 956-961, http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2520/SRI_files/ICTP_Band_1/Special_Topics/956-961_Inv.pdf

⑥ T. Shimizu, S. Iwaoka, M. Yang, K. Manabe, Scale Dependence of Dry Friction in Micro Sheet Metal Forming, Steel research international, 査読有, 2011 Special Edition, 2011, pp. 979-984, http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2520/SRI_files/ICTP_Band_1/Special_Topics/979-984_Sca.pdf

⑦ H. Tabnabe, M. Yang, Design and Evaluation of Heat Assisted Microforming System, Steel research international, 査読有, 2011 Special Edition, 2011, pp. 1020-1024, http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2520/SRI_files/ICTP_Band_1/Special_Topics/1020-1024_D.pdf

[学会発表] (計22件)

① Tatsuya Aoyama, Tetsuhide SHIMIZU, Qiu Zheng, Ming YANG, Effect of Heating on Springback in Heat Assisted Microbending, 16th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2013), 2013年9月26日, 台湾・台北市・台北圓山大飯店

② Takashi IKUSHIMA, Tetsuhide SHIMIZU, Ming YANG, Tensile Property of Electrochemically Polished Titanium Alloy, 16th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2013), 2013年9月23日, 台湾・台北市・台北圓山大飯店

③ Yang Bai, Ming Yang, Aluminum Foils Surface Deformation Using Vibration-assisted Micro-forging, The 9th International Conference on Multi-material Micro Manufacture (4M 2012), 2012年10月10日, オーストラリア・ウィーン・EURO PLAZA Conference Center

④ Shingo Kosuge, Ming Yang, Improvement in processing accuracy of micro parts by ultrasonic vibration assisted forging, The 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2012), 2012年9月26日, オーストラリア・ウーロンゴン・Novotel Wollongong Northbeach Hotel

⑤ Yang Bai, Ming Yang, Investigation of surface deformation using vibration-assisted micro-forging, The 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2012), 2012年9月25日, オーストラリア・ウーロンゴン・Novotel Wollongong Northbeach Hotel

⑥ Ming Yang, Hiroyuki Tanabe, Tetsuhide Shimizu, High-density energy assisted micro forming for fabrication of metallic devices, The 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2012), 2012年9月24日, オーストラリア・ウーロンゴン・Novotel Wollongong Northbeach Hotel

⑦ Ming Yang, Micro forming with assistance of high-density energies, The 5th Asian Workshop on Micro/Nano Forming Technology (AWMFT 2012), 招待講演, 2012年8月24日, 中国・ハルビン市・Sinoway Hotel

⑧ Yang Bai, Ming Yang, Effect of low frequency vibration on metallic surface deformation, 4th Asian Workshop on Nano/Micro Forming Technology, 2011年10月27日, 豊橋市・ホテル日航豊橋

⑨ Hiroyuki Tanabe, Ming Yang, Application of heat assistance to microforming, 4th Asian Workshop on Nano/Micro Forming Technology, 2011年10月27日, 豊橋市・ホテル日航豊橋

⑩ Shingo KOSUGE, Ming Yang, Evaluation of deformation characteristic in ultrasonic vibration assisted foil bending, 4th Asian Workshop on Nano/Micro Forming Technology, 2011年10月27日, 豊橋市・ホテル日航豊橋

⑪ M. Yang, T. Aizawa, S. Nakano, K. Ito, Development of Precise Micro Press Forming System for Fabrication of Micro Parts, 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP2011), 2011年9月26日, ドイツ・アーヘン・Eurogress Convention Center

6. 研究組織

(1) 研究代表者

楊 明 (YANG, Min)

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