

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630369

研究課題名(和文) プレスモーション材料流動制御を応用したマイクロハイドロ温間超深絞りプロセスの開発

研究課題名(英文) Development of warm micro ultra deep drawing process based on blank material flow control with press motion and ultra high fluid pressure

研究代表者

真鍋 健一 (MANABE, Ken-ichi)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：10145667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では再絞りと超高压の対向液圧効果を活かした複合サーボプレスモーション制御による新たなマイクロ温間超深絞り法の開発に挑んだ。まずFEM解析を用いて再絞り工程で第一絞りパンチ増分 s だけ引き上げてカップ間に隙間を設けそこで対向液圧を負荷し、それらを繰り返す新たな成形原理を考案した。次に実証用に最大400 MPaの超高压と、高機能なマイクロ対向液圧深絞りシステムを開発した。動的な効果がある場合は細長比10倍以上のマイクロ超深絞りを、動的効果がない場合でも直径0.56mm、細長比5程度をFEMで達成し、実験的検証では直径0.5mmで細長比0.9のSUS304製マイクロカップ成形に成功した。

研究成果の概要(英文)：The goal of study is to challenge in the development of a new warm micro-ultra-deep drawing (MUDD) process based on servo press motion control combining the hydro-mechanical pressure effect of ultra-high fluid pressure and the redrawing. In this study, the new fabrication principle of MUDD process is proposed, in which after redrawing, incremental deformation and material flow by press motion and ultra high fluid pressure can produce a high aspect ratio drawn cup. For the experimental confirmation, a high-performance MUDD system was developed with ultra-high pressure up to 400 MPa. In the simulation, MUDD process for the slenderness ratio 10 or more has achieved in case of a dynamic process. Even if there is no dynamic effect, a drawn cup of diameter 0.56mm and the slenderness ratio of about 5 is successful in FEM. In the experimental verification, a stainless steel SUS304 drawn cup with 0.5mm diameter and its slenderness ratio of 0.9 is successful in the MUDD process.

研究分野：機械工学、塑性工学、マイクロ工学

キーワード：マイクロフォーミング 対向液圧深絞り マイクロ超深絞り 超高压 プレスモーション 逐次成形
材料流動制御 再絞り

1. 研究開始当初の背景

通常のマクロスケールで1行程で高い成形限界を得るためには、圧力、熱、振動などを利用する特殊深絞り法が用いられる。対向液圧深絞り法は「め型」がないのが特徴で型工具の製作が難しいマイクロ成形では有利である。深絞りにおける破断抑制機構としてパンチへの摩擦保持効果とフランジ部の摩擦低減効果により高い加工限界が得られる。それに周液圧付加する場合はさらに向上する。再絞りは多工程になるほど金型製作が複雑になるが最終的には極めて深い絞り品を得ることができる特徴がある。周辺加熱深絞り法は適切な温度分布が実現できれば大きな加工限界が得られる。(超音波)振動深絞り法はプラハ効果(超音波の場合)、摩擦低減効果、フランジ部の送り込み効果としわ発生抑制効果等により、通常の1.1~1.2倍向上するといわれている。しわ抑え力制御深絞り法はプランクホルダー制御によって摩擦抵抗を変化させフランジ材料流入制御を行って加工限界の向上を図るものである。

しかし、これらの特殊深絞り法はそれぞれ独自に高い加工限界を有しているが、マイクロスケールに適用するには金型製作の困難さ、スケールダウンに伴う一般的な摩擦係数増加や材料強度低下と延性低下などのスケール効果、および加工プロセス自体に要求される高いプロセス精度と微細寸法による材料等のハンドリングの困難さによって、極めて厳しい形状の超深絞り成形を実現する大きな壁となっている。そのためマイクロ超深絞りに関する研究は世界でも皆無である。これらのスケール効果に伴う微小領域におけるマイクロフォーミングの困難さを克服するためには、学術的には特殊深絞りにおける伝熱特性を含めた上記スケール効果の解明および特性理解とそこでの課題解決のためのメカニズム応用による新たな複合プロセスの開発が課題である。

2. 研究の目的

薄肉三次元構造をもつ形状難成形部品のマイクロ金属成形技術は、スケールダウンに伴う寸法上の制約から、複雑な構造の金型製作が難しく、また加工限向上に効果のある多工程化や圧力、熱、振動のエネルギーなどを用いる特殊な要素技術の導入が難しいため、その開発が立ち遅れている。本研究では複雑三次元構造部品の成形に効果の大きい対向液圧成形を利用したマイクロシートハイドロ成形技術を基盤として革新的な高度マイクロシートハイドロ成形技術の開発に挑戦するものである。そのため、新たに高い加工度を実現するため対向液圧のシートハイドロ成形に周辺加熱深絞り法を組み合わせた温間対向液圧深絞り法に再絞り法を導入し、パンチの進行とともにフランジ部への周液圧付加による圧縮力と対向液圧効果を交互に作用させる複合サーボプレスモーション制御によって、世界最細 0.18mm の無痛注射針ナノパス 34G(商品名)を超えるマイクロ超深絞り法の開発にチャ

レンジする。

3. 研究の方法

新マイクロ成形プロセスの基本原理は、**図1**に示すように再絞り法を導入し、対向液圧成形の優れた成形性向上の効果を利用し、逐次プレスモーション制御と逐次超高压負荷とを組み合わせ、その材料流動を円滑に行うために温間での超深絞り成形の実現を目指すものである。

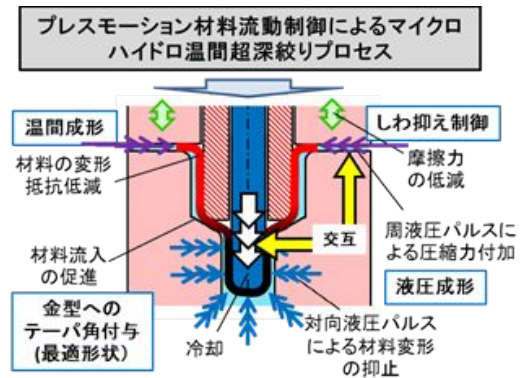


図1 新マイクロ成形プロセスの基本原理

3. 1 マイクロ超深絞り装置システムの設計試作・開発

既設置のマイクロ対向液圧深絞り装置システムに超高压の負荷が可能で、マイクロ超深絞り用周辺加熱・動的対向液圧制御が可能システムに改良した。室温下でシステムの基本動作を確認し種々のマイクロ成形の実験からマイクロ超深絞りの基礎データを収集した。**図2**に示すように、再絞りを含めた多工程の同一軸化、対向超高压・周液圧、しわ抑えの荷重・位置制御を特殊な金型構造とし、また**図3**に示すトリプルアクションサーボプレスを用いて実現し、高精度かつ逐次制御可能なマイクロ超深絞りシステムを開発した。一方、超高压発生装置はシリンダー内の液圧媒体を万能試験機に取り付けたピストンにより圧縮して、高压を発生させるシンプルな単動形シリンダー構造とし、設計内圧は400MPaとし200MPaまでの昇圧を行い問題ないことを確認した。超高压発生装置全体は120×120×120mmのコンパクトな大きさとした。

3. 2 MUDD プロセスの成形シミュレーション

FEM 解析には動的陽解法の LS-DYNA ver. 971 を用いた。材料はソリッド要素、その他はシェル要素、1/4 軸対称モデルとした。材料は初期板厚 $t=20\mu\text{m}$ および $50\mu\text{m}$ の SUS304 微細粒鋼を用いた。**表1**に示す材料特性は引張試験から得た。**図4**に対象とした MUDD における金型寸法緒元を示す。慣性力が現れる動的な成形プロセスの検討の場合を除き、準静的な成形の場合はプランク端部上方に材料の上昇を防ぐためにストッパーと呼ばれる工具を設置した。プランク底面とプランク端面にそれ

それぞれ対向液圧 P_c と周液圧 P_r を定義した。第1パンチは上下量 Δs で変位制御を行い、フランジ部の増肉箇所が初期板厚に戻る程度の押圧を加えた。第2パンチとストッパーは荷重制御によりストロークを与えた。金型工具との摩擦はクーロン摩擦を仮定し、材料と工具間の静・動摩擦係数はそれぞれ $\mu_s=0.02$ 、動摩擦係数 $\mu_d=0.01$ とした。金型テーパ形状やストッパーの有無、初期板厚などの条件を変え、これらが成形不良に及ぼす影響を調査した。

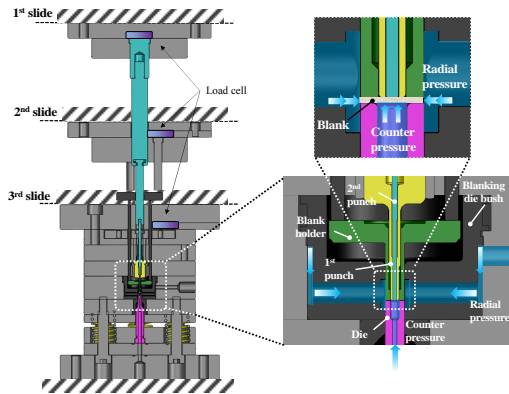


図2 超深絞り用金型

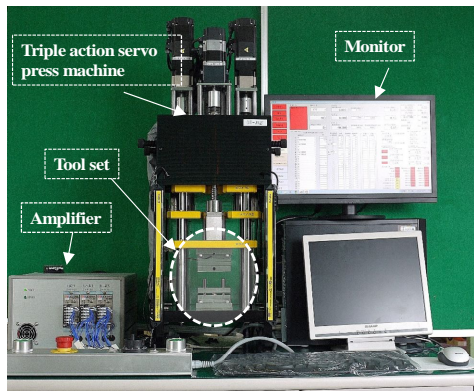


図3 開発した MUDD システム

表1 供試材の材料特性値

Young's modulus, E [MPa]	Yield stress, σ_y [MPa]	Tensile strength, σ_B [MPa]	Elongation, δ [%]
197	589	790	26.0

1 st and 2 nd drawing ratios, $DR_1 \times DR_2$		1.8 × 3.0	
Blank diameter, D_b [μm]		2400	
Blank thickness, t [μm]		20 50	
Drawing punch	1 st punch diameter, D_{p1} [μm]	1330	
	2 nd punch diameter, D_{p2} [μm]	444	
	1 st punch shoulder radius, r_{p1} [μm]	300	
	1 st punch inside shoulder radius, $r_{in,p1}$ [μm]	60	
	2 nd punch shoulder radius, r_{p2} [μm]	222	
Drawing die	1 st die shoulder radius, r_{d1} [μm]	200	
	2 nd die shoulder radius, r_{d2} [μm]	320 350	
	3 rd die shoulder radius, r_{d3} [μm]	50 50	
	Taper angle, α [°]	30 0.30	
Clearance between die and 1 st punch, C_1 (2.0 σ_y) [μm]		40 100	
Clearance between die and 2 nd punch, C_2 (2.0 σ_y) [μm]		40 100	

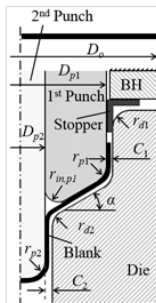


図4 MUDD における金型モデル

4. 研究成果

4.1 動的超高压負荷の効果

上記 FEM モデルを用いて提案した新マイクロ成形プロセスにおける超深絞りの可能性について検討した。その結果、250MPa(2,500 気圧)もの超高压を短時間に動的に負荷することにより、圧力分布が生じ適切な摩擦保持効果が生じ、図5に示すように細長比 $H/D > 14.8$ の極細長マイクロカップの成形ができることを示した。

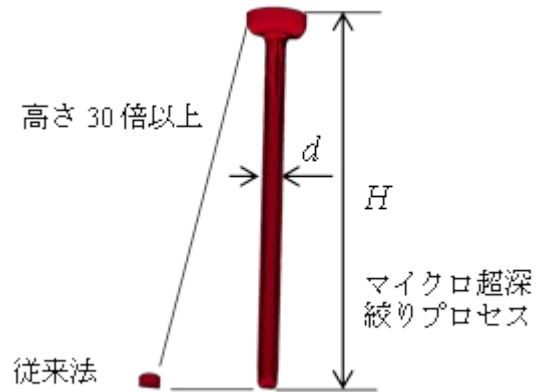


図5 超高压動的負荷の場合のマイクロ超深絞り成形例

4.2 準静的な超高压負荷における適形成条件の検討

準静的な超高压を負荷した場合、種々の摩擦条件でも対向液圧を負荷した場合に負荷と同時にカップ円筒部全体がパンチの進行と逆向きに移動することが判明したため、カップ端部が自由に動かないようにストッパーを設けて移動を防いだ。図6に本マイクロ超深絞りプロセスを示す。

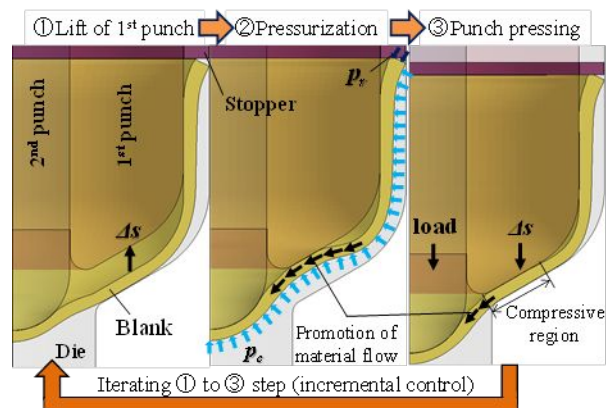


図6 準静的な超深絞りの成形工程

第1・第2絞工程を同一軸で行うために第2パンチが第1パンチを貫通する金型構造とした。はじめに第1絞を行い、材料をカップ形状に成形する。次に工程で第1パンチをパンチ上下量 Δs だけ上げ、パンチとカップ間に隙間を設ける。工程では、超対

向・周液圧 (p_c, p_r) を負荷し、設けた隙間を消滅させるように材料をダイ穴に流入させながらパンチに転写する。工程 1 では、第1・第2パンチを同時に降下させ、第1パンチとダイの間で材料にフランジ押圧を与えて材料流動を起こす。工程 2 から 4 を1成形サイクルとして逐次的に繰り返すことで変形の局所化が実現でき、深いカップが成形できる。また、超高圧とフランジ押圧負荷により材料流動を積極的に起こしてパンチおよび材料の負担荷重を低減する。以上から、次のパンチ形状(テーパ角度)、ストッパー有無、パンチ上下量 Δs 、初期肉厚、摩擦係数、カウンター圧の影響について検討した。

4.2.1 摩擦係数の影響

図7に、 $DR=5.4$ 、フラットパンチ ($\theta=0^\circ$)、ストッパーなし、 $\Delta s=0.05\text{mm}$ 、 $p_c=p_r=200\text{--}380\text{MPa}$ 、板厚 $t=50\mu\text{m}$ 、各パンチとプランク間の摩擦係数が異なる条件下での液圧負荷時の子午線方向応力分布を示す。摩擦係数が低い場合には、カップ端部が上下するだけでダイ内部への材料流入が起きず、第2パンチ肩で局所的に減肉した。一方、摩擦係数が高い場合には、摩擦保持によりカップ肩部の変形が拘束されて引張応力が低減したものの、カップ側壁部に引張応力が集中して局所的減肉が生じた。以上の結果から、従来の MUDD プロセスは、カップ側壁部に子午線方向引張応力が生じるために破断する危険性を有していたことがわかる。また、摩擦保持効果だけでは減肉抑制には不十分であり、さらなる減肉抑制効果が必要となる。

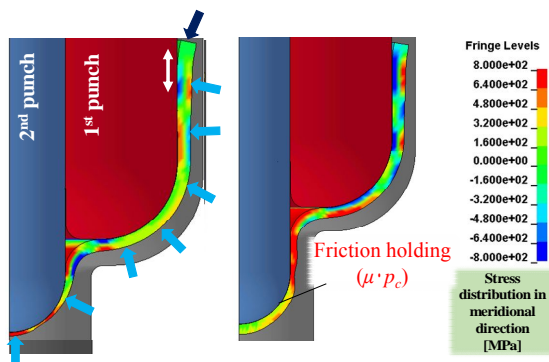


図7 摩擦係数による成形挙動の変化(子午線方向応力分布)

4.2.2 ストッパーによるカップ端部拘束の影響

カップ端部にストッパーを設置し、その効果を検討した。ストッパーを設けると、カップ端部のダイ内部への流入が促進され、また液圧負荷時の子午線方向応力の圧縮応力が支配的になりカップ側壁部の引張応力を大幅に低減することが明らかになった。しかし、フランジ部において子午線方向の過度な座屈が生じ、材料が流動しなくなることで過度な増肉が起き、その適正化が課題となった。

4.2.3 第1パンチテーパ角度の影響

フランジ部での過度な増肉を抑制するため、第1パンチをテーパ形状にした場合の液圧負荷時の子午線方向応力分布を調査した。その結果、フランジ部付近の材料の剛性低下により材料流動が均一に生じ、過度な増肉が抑制された。また、成形カップの板厚ひずみ分布の変化を調べた結果、第2絞り工程を通して第2パンチ肩部での減肉抑制が可能であることがわかった。加工条件適正化により、破断の危険性のない成形プロセスが可能であることがわかった。

4.2.4 初期板厚の影響

初期肉厚が 0.05mm よりさらに薄い $t=0.02\text{mm}$ を用いた場合のマイクロ成形挙動を調べた結果、肉厚が薄いと9サイクル目のダイ肩部付近で応力分布が不均一となり、円周方向にしわが発生することが判明した。MUDD ではしわ抑えの働きをする工具が存在しないため、縮みフランジ変形によるしわの発生を拘束できない。フランジ押圧領域に生じるしわは圧縮力負荷により潰すことができるもの、フランジ押圧領域を過ぎたダイ肩で生じるしわは潰すことができず、過度なしわへと成長する。よって、しわを抑制するためには、厚い材料が適することがわかる。

4.2.5 適正加工条件の提案

上記結果から、テーパパンチ、ストッパーあり、 $\Delta s=0.05\text{mm}$ 、 $p_c=p_r=200\text{--}380\text{MPa}$ 、 $t=50\mu\text{m}$ 、各パンチとプランク間の摩擦係数 $\mu_s = 0.35$ 、 $\mu_d = 0.30$ 、以上を適正加工条件として行った解析により得られたカップを図8にまとめる。上記条件により成形不良なく細長比 7.9をもつ極細長容器形状を成形できる可能性を確認した。超深絞りに関する設計指針の概略を示すことができた。

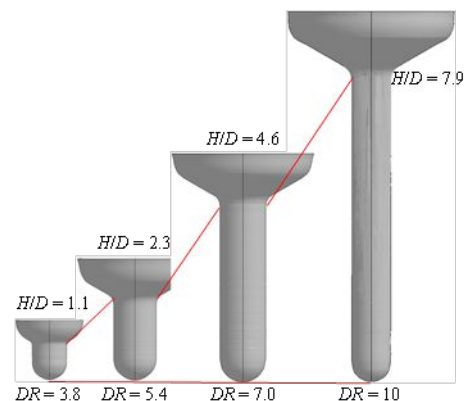


図8 FEMにより得られた超深絞りカップ

4.3 成形実験による極細長容器の成形可能性検討

図9に適正加工条件に基づく成形実験により得られたカップ外観を示す。細長比 0.92を有するカップを成形できたことから、MUDD プロセスによる極細長容器の成形実現性を確認した。細長比 5.0 のカップ成形では途中で破断が生じたが、これは金型の弾性

変形などによりストッパーを用いたカップ端部上昇の拘束が十分に機能せず、第2パンチ肩部に子午線方向引張応力が生じたことが原因として考えられる。以上の結果から、金型の弾性変形を考慮したストッパー制御により、今回提案した破断の危険性のない成形メカニズムを実機にて実現することで、細長比5以上の極細長容器形状を成形できる可能性が示唆された。

温間成形に関しては実験で温間条件を実現することが極めて難しかったため、室温下で軟質無酸素銅箔 C1020 による実証実験と FEM 解析で検討した。FEM では容易に実現でき、その結果によれば本プロセスによる超深絞りの可能性が高い。しかし、その環境の実現はかなり難しく今後の課題である。

	FEM $DR=1.8 \times 2.1$, $r=50\mu\text{m}$, stopper, taper punch, $\Delta s=0.03\text{mm}$, $p=180\text{--}360\text{MPa}$	EXP. $DR=1.8 \times 2.1$, $r=50\mu\text{m}$, stopper, taper punch, $\Delta s=0.05\text{mm}$, $p=80\text{--}100\text{MPa}$	EXP. $DR=2.0 \times 3.3$, $r=30\mu\text{m}$, stopper, taper punch, $\Delta s=0.05\text{--}0.08\text{mm}$, $p=80\text{--}130\text{MPa}$
1st drawing			
2nd drawing	 $DR_2=5.4$, $\alpha=1.27$	 $DR_2=5.4$, $\alpha=0.92$	 $DR_2=7.0$, $\alpha=5.0$ (fracture)

図9 マイクロ超深絞り実験で得られた成形品の例

以上の成果は以下のとおりまとめられる。

(1) マイクロ超深絞り成形原理の開発：再絞り工程で第一絞りパンチ増分 Δs だけ引き上げてパンチとカップ間に隙間を設けそこで対向液圧を負荷する、それらを繰り返す新たな成形原理を考案した。FEM で検討した結果、動的な効果がある場合は直径の10倍以上のマイクロ超深絞りが可能だけでなく、動的効果がない場合でも総絞り比で3.8で、直径の2倍以上の細長い深絞りの可能性を示した。

(2) マイクロ対向液圧深絞り装置システムの開発：新装置システムの設計・試作を行い、既設置のマイクロ対向液圧深絞り装置に最大400MPaの超高圧と、周液圧、周辺加熱・動的対向液圧制御が可能なシステムに改良した。

(3) 最適成形条件の検討：対向/周液圧、パンチストローク増分、材料初期板厚、摩擦係数、テーパ角度、材料の拘束条件などの諸因子の影響を検討した。その結果、それらの最適化により FEM では直径0.56mm、細長比5程度のカップが得られた。実験的検証では細長比0.9、直径0.5mmのSUS304製マイクロカップの成形には成功した。

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 5件)

(1) 佐藤 英樹、真鍋 健一、Dongbin WEI, Zhengyi JIANG: マイクロ対向液圧深絞りにおける変形挙動に及ぼす相対工具寸法の効果、塑性と加工(日本塑性加工学会誌) 査読有、57-665(2016-7).掲載ページ未定.

(2) Hideki Sato, Ken-ichi Manabe, Dongbin Wei, Zhengyi Jiang, Sergei Alexandrov: Tribological behavior in micro-sheet hydroforming, *Tribology International*, 査読有、Volume 97(2016), pp. 302-312 doi:10.1016/j.triboint.2016.01.041

(3) Hideki Sato, Ken-ichi Manabe, Dongbin Wei, Zhengyi Jiang and Daiki Kondo: Micro Sheet Hydroforming Process of Ultra-Thin Pure Titanium Foil, *Key Engineering Materials*, 査読有、Vol. 626 (2015) pp. 397-401. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.626.397

(4) Hideki Sato, Ken-ichi Manabe, Dongbin Wei, Zhengyi Jiang, and Daiki Kondo: Potential of fluid pressure use for achieving high formability in micro sheet forming process, AIP Conference Proceedings, 査読有、1618, (2014) pp.327-330. doi:10.1063/1.4897740

(5) Hideki Sato, Ken-ichi Manabe, Daiki Kondo, Dongbin Wei, Zhengyi Jiang: Formability of Micro Sheet Hydroforming of Ultra-fine Grained Stainless Steel, *Procedia Engineering*, 査読有、81 (2014) pp.1463-1468. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.174

〔学会発表〕(計14件)

(1) 眞野俊行、佐藤英樹、近藤大輝、真鍋健一: 超高圧とパンチモーションとの逐次制御によるマイクロ超深絞り過程における適正加工条件の有限要素解析、第66回塑性加工連合講演会、2015年10月29日~2015年10月31日、いわき市、福島。

(2) T. Mano, H. Sato, D. Kondo, K. Manabe: FEM-Base Investigation of Micro Ultra-Deep Drawing, The 8th Asian Workshop on Micro/ Nano Forming Technology (AWMFT2015), 2015年10月14日~2015年10月17日、Suwa, Nagano, Japan.

(3) Liang Luo, Zhengyi Jiang, Dongbin Wei, Xianming Zhao, Di Wu, Ken-ichi Manabe, and Hideki Sato: Numerical Study of Micro Hydro Deep Drawing, The 7th International Conference of Tube Hydroforming

(TUBEHYDRO2015), 2015年9月9日～2015年9月11日、Xian, China .

(4) H. Sato, D. Kobayashi, K. Manabe : Numerical and Experimental Investigations of Cross Shaped Micro Tube Hydroforming, The 7th International Conference of Tube Hydroforming (TUBEHYDRO2015), 2015年9月9日～2015年9月11日、Xian, China .

(5) H. Sato, D. Kondo, K. Manabe, K. Ito : Study on Micro Extra Deep Drawing Process with Ultrahigh Fluid Pressure and Press Controls, The 4th International Conference on New Forming Technology (ICNFT2015), 2015年8月6日～2015年8月9日、Glasgow, Scotland, UK

(6) 佐藤英樹、近藤大輝、眞野峻行、真鍋健一 : 超高压とパンチモーションとの逐次制御によるマイクロ超深絞りの FEM シミュレーション、平成 27 年度塑性加工春季講演会、2015 年 5 月 29 日～2015 年 5 月 31 日、慶應義塾大学、横浜市 .

(7) D. Kondo, H. Sato, K. Manabe: Development of Triple Action Servo Press Machine for Micro Hydromechanical Deep Drawing, The 7th Asian Workshop on Micro/ Nano Forming Technology (AWMFT2014), 2014年11月9日～2014年11月12日、Taipei, Taiwan.

(8) H. Sato, K. Manabe, D. Wei, Z. Jiang: Numerical Study on Geometrical Size Effect in Micro Sheet Hydroforming, The 7th Asian Workshop on Micro/ Nano Forming Technology (AWMFT2014), 2014年11月9日～2014年11月12日、Taipei, Taiwan.

(9) 佐藤英樹、真鍋健一 : マイクロシートハイドロフォーミングにおける板厚スケール因子の効果、第 65 回塑性加工連合講演会、2014 年 10 月 11 日～2014 年 10 月 13 日、岡山大学、岡山 .

(10) 近藤大輝、佐藤英樹、真鍋健一、伊藤國吉 : トリプルアクションサーボ式マイクロ対向液圧深絞り装置の開発、第 65 回塑性加工連合講演会、2014 年 10 月 11 日～2014 年 10 月 13 日、岡山大学、岡山 .

(11) 佐藤英樹、真鍋健一 : 微細粒鋼のマイクロ対向液圧深絞りにおける成形特性、第 65 回塑性加工連合講演会、2014 年 10 月 11 日～2014 年 10 月 13 日、岡山大学、岡山 .

(12) Formability of Micro Sheet Hydroforming of Ultra-Fine Grained Stainless Steel

Hideki Sato, Ken-ichi Manabe, Daiki Kondo, Dongbin Wei, Zhengyi Jiang
The 11th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2014) , 2014年10月19日～2014年10月24日 , Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan .

(13) Sato, H., Manabe, K., Wei, D., Jiang, Z., Kondo, D. : Micro Sheet Hydroforming Process of Ultra-Thin Pure Titanium Foil, The 12th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Applications (AEPA2014), 2014年9月4日～2014年9月8日 , Kaohsiung, Taiwan.

(14) Sato, H., Manabe, K., Wei, D., Jiang, Z. : Experimental and Numerical Investigation of Micro Sheet Hydroforming of Stainless Steel Foil, The 5th JSME/ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P2014), 2014, 2014年6月9日～2014年6月13日, Detroit, USA.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 1 件)

名称 : 成形体の製造方法及び成形体の製造装置
発明者 : 真鍋健一、佐藤英樹
権利者 : 首都大学東京
種類 : 特許
番号 : 特願 2014-214838
出願年月日 : 2014-10-21
国内外の別 : 国内

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等 なし

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

真鍋 健一 (MANABE KENICHI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号 : 10145667

(2) 研究分担者

古島 剛 (FURUSHIMA TSUYOSHI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・助教
研究者番号 : 30444938