

氏名	佐藤 英樹
所属	理工学研究科 機械工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	理工博 第206号
学位授与の日付	平成28年3月25日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	超高压を利用したマイクロ逐次シートハイドロフォーミングに関する研究 (英文)
論文審査委員	主査 教授 真鍋 健一 委員 准教授 高橋 智 委員 教授 楊 明 (システムデザイン研究科) 委員 教授 Zhengyi JIANG (豪・ウーロンゴン大学)

## 【論文の内容の要旨】

本文

近年、製品の性能向上や多機能かつコンパクト化のため、複雑形状、高精度なマイクロ金属部品の需要が高まっている。特に、細長い微細部品は医療、精密機器分野で需要が高く、優れた生産性を有するマイクロ塑性加工の利用が期待されている。しかし、微小化に伴いblank厚さ/結晶粒径比  $t/d$  が小さくなり延性および変形抵抗が低下し、潤滑効果の低下により摩擦が高くなるため、成形性は著しく低下することが知られている。さらに、微細金型は製造が困難であり、また細長い金型は座屈強度が低下するためその小型化には限界がある。

成形性の向上を目的に、マクロスケールでは熱、圧力、振動、摩擦などを利用した特殊プレス成形法が開発されている。しかし、それらをマイクロ塑性加工に適用しても、成形性の低下するマイクロスケールでは十分な成形性向上が望めない。一方、小型化、複雑形状化にはダイレス化が求められるが、一般に形状精度が低く、深い成形形状に対応できないため、実用化には多くの問題がある。

本研究では、ハイドロフォーミングの特徴であるプロセスの柔軟性、流体潤滑効果と摩擦保持効果、および逐次成形の有するひずみ配分原理による成形性向上を組み合わせるマイクロ逐次シートハイドロフォーミング(MISHF)法の概念を提案し、マイクロスケールにおける大幅な成形性の向上、高精度化、ダイレス化を図ることを目的とした。そのために、マイクロ対向液圧深絞り(MHDD)に着目して、液圧負荷による基本成形特性および寸法効果

を明らかにし、それらの知見を基に新たに超高压負荷による逐次成形原理を利用したマイクロ超深絞り (MUDD) を開発し、高細長比のマイクロカップ成形の可能性を有限要素解析 (FEM) および実験により検討した。

本論文は、以下の 6 章から構成される。

第 1 章では、本研究を取り巻く社会的背景を述べ、マイクロ加工分野における寸法効果、加工技術上の特徴および問題点を概観している。さらに、すでに開発されているマクロスケールでの特殊プレス成形法の加工原理と特徴を整理・比較し、マイクロスケールにおけるそれらの優位性および課題について論議する。以上から、マイクロスケールの諸問題を解決し得る超高压および逐次成形技術を組み合わせた MISHF 法の概念を提案し本研究の目的を述べている。

第 2 章では、微小化に伴い製造可能な最小ブランク厚さに対する相対工具寸法が小さくなることに着目し、MHDD における基本成形特性およびそのスケール依存性について FEM により検証している。FEM ではブランク厚さ  $t=50\mu\text{m}$  を一定にし、工具寸法をそれぞれ変更することで相対パンチ直径  $D_p/t$  および相対パンチ・ダイ肩半径  $r_p/t, r_d/t$  の影響を調査した。その結果、摩擦保持効果により材料への荷重負担が低減するため成形性を向上できるが、マイクロ化による  $D_p/t, r_d/t$  の減少に伴い、摩擦保持効果および流体潤滑効果に必要な負荷液圧が増加することを明らかにした。以上より、MHDD において 100MPa 以上もの超高压を負荷することでマイクロ流体潤滑や摩擦保持効果が生じ、成形性の向上が期待できることを検証した。

第 3 章では、第 2 章で明らかにしたマイクロスケールにおける超高压負荷の効果を実現できる、MHDD および MISHF システムを開発している。これらの装置では 1 ストローク成形 (多工程の同一軸化) を採用することで、材料の送り、位置決め制御をせずとも高精度な成形を実現した。MISHF システムに用いる、トリプルアクションサーボ式小型卓上プレスおよび設計液圧 400MPa の超高压発生装置を開発した。これらの装置を用い、ブランク厚さ 20, 50  $\mu\text{m}$  のりん青銅、ステンレス、純チタン箔を対象に MHDD 成形実験を行い、適切な液圧負荷により口辺しわの除去、摩擦力の低減、およびカップ形状精度も改善できることを実験的に示し、液圧負荷の優位性を実証した。

第 4 章では、MHDD における成形性の支配因子であるブランクと工具間の摩擦特性に着目し、その寸法効果を理論的に検討している。従来のマイクロトライボロジーでは、微小化に伴い工具と被加工材の接触面積のうち潤滑剤が排出される領域 (OPLs: Open Lubricant Pockets) の割合が大きくなり摩擦力が増大するが、MHDD では負荷液圧により OPLs においても潤滑剤を保持できることを実験的に明らかにした。この現象を基に新摩擦モデルを提案し、MHDD では微小化しても摩擦力の低減が可能であることを理論的に解明した。さらに、

ブランク厚さに対する相対工具寸法が小さい MHDD では、流体潤滑効果が生じる液圧は 100MPa 以上になることを見出した。以上の摩擦の寸法効果から、超高压負荷および OLPs の潤滑機構を利用することによって、マイクロ塑性加工で成形性向上を図る良好な潤滑状態が得られることを理論的に示した。

第 5 章では、前章までの金属箔材の変形挙動に及ぼす液圧の効果・特性に関する知見に基づき、超高压および逐次成形技術を組み合わせた MUDD プロセスを開発し、高細長比のマイクロカップ成形の実現を試みている。MUDD では二つのパンチが同一軸に組み込まれており、再絞り工程時にカップと外パンチ間に隙間を設け、超高压負荷によりその隙間を消滅させるようにダイ空孔部へ材料流動させる工程を、適切に制御しながら繰り返す逐次成形プロセスを開発した。FEM を用い MUDD の基本成形原理を検証し、ダイ空孔部への材料流動および摩擦保持効果により減肉を抑制でき、さらに外パンチを用いた逐次板鍛造効果により所望かつ均一なブランク厚さ分布が得られることを解明した。最終的に、FEM および実験において直径 0.5mm、細長比 4.6 のマイクロカップを 1 ストロークおよび 2 工程で成形できる可能性を見出した。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括して結論を述べ、残された課題および今後の研究展望についてまとめた。