

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

医療、精密機器、計測、電子、通信分野では機器の小型化および微小化が進み、マイクロ金属部品が多用されるようになってきている。しかし、微小化に伴い生じる寸法効果により、金属のマイクロ塑性加工性は低下し、マクロスケールの板成形で実現している高加工度の細長い高精度複雑形状部品の成形加工は困難となっている。そのため金属マイクロ成形加工は適用範囲が狭く、普及が進まない大きな要因となっている。したがって、マイクロ成形加工性の向上には、マクロスケールで援用する熱、圧力、振動、摩擦などの外部エネルギー付加による材料特性の大幅な向上、ならびに成形条件の最適化による金型転写性の飛躍的な向上が重要である。それと同時に製造が困難なマイクロ金型・工具を極力使わないセミダイレス化が要求される。よって、プロセスの柔軟性と高い金型転写性をともに満たすことが可能な柔軟工具として、液体による超高压を利用するマイクロハイドロフォーミングの適用が重要な鍵を握ると考えられる。

本研究ではまず、プロセスの柔軟性をもち、流体潤滑効果および摩擦保持効果による成形限界向上の二つの特長を持つハイドロフォーミングと、逐次変形のひずみ配分原理による大幅な成形性向上を組み合わせる多工程による新しい成形原理のマイクロ逐次シートハイドロフォーミング(MISHF)法を提唱している。その実証のため1工程のマイクロ対向液圧深絞り(MHDD)に着目し、基本成形特性に及ぼす液圧による超高压の効果および微小化に伴う相対工具寸法等の効果を明らかにしている。それらの成果を踏まえた再絞りに基づく新たな超高压逐次負荷によるマイクロ超深絞り(MUDD)の成形原理を考案し、それを実現するための超深絞りシステムを開発すると同時に、これまでにない高細長比のマイクロ超深絞りを実現する成形メカニズムと適正加工条件について実験と有限要素(FE)シミュレーションから検討することを目的としている。

2 研究の方法と結果

本研究では、超高压を利用した多工程に基づく新しい成形原理のMISHFの概念につながる基礎研究として、1工程のMHDDとそれに基づく発展形の再絞りによるMUDDに取り組んだ。まずMHDDでは、厚さ50 μm のステンレス鋼箔(SUS304-H)を用いて、成形挙動および成形性に及ぼすマイクロ化に伴う相対工具寸法の効果を実験、理論およびFE成形シミュレーションから検討した。その結果、マクロスケールと同様に、対向液圧負荷によりパンチの摩擦保持効果や流体潤滑効果による破断が抑制されマイクロ深絞り性及びカップ形状精度が向上することを確認した。さらに微細化に伴いより高い対向液圧が必要になり、100 MPa程度以上の超高压が必要になることを理論とFEシミュレーション結果から明らかにした。さらに理論では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、その寸法効果を表す新摩擦モデルを提案し、微小化しても液圧負荷により摩擦力の大幅な低減が可能であることを解明した。また、厚さ50 μm の純チタン、SUS304およびりん青銅

箔を用いた直径1.9 mmの1工程MHDD円筒絞り成形実験結果から、口辺しわが発生するブランク寸法条件では対向液圧負荷によりしわの除去、摩擦力の低減さらには絞りカップの形状精度を向上できることを実証した。しかし、大きな細長比のカップ絞りは破断の発生によりMHDDが困難となることを示した。

そこで、上記の知見を基に、新たに再絞りをを用いる超高压負荷による逐次深絞りを行うMUDDの成形原理を考案し、そのプロセス設計指針を得るためFE成形シミュレーションで高い細長比の超深絞りを実現する適正条件について検討した。その結果、厚さ50 μm の超微細粒鋼箔(SUS304)では第1絞りパンチ底部には30度の勾配を設け、第1パンチとダイ間に繰返し設ける隙間を50 μm として、200~380 MPaの超高压繰返し負荷の場合には、細長比4.6の深いマイクロ容器の絞りが可能となることを示した。また、第1パンチによる成形部の押圧によって、成形容器の厚さ分布が一様化し、その厚さ制御も期待できることを示した。

FEシミュレーションによる事前成形評価に基づき、新たに設計負荷液圧400 MPa超高压負荷装置を有する再絞りが1ストローク成形(多工程の同一軸化)で可能となる高精度トリプルアクションサーボ式精密プレスシステムを設計・開発した。それを用いた厚さ 50 μm 超微細粒鋼箔のMUDD実験から、高細長比のマイクロカップ成形の可能性を見出した。

3 審査の結果

本論文は、新しい成形原理のMISHFの概念に基づいて、従来の開発事例では限界細長比 H/D が0.6程度のマイクロカップ絞りを $H/D=4\sim 5$ 以上とするMUDDプロセスの開発に挑戦した先進的なものである。学術的にも意義ある研究といえる。

基礎研究としてMHDDにおけるスケールダウンに伴う寸法効果や相対工具寸法の効果については、理論、FEシミュレーションおよび実験の面から総合的に詳細に検討し多くの新たな知見と設計指針を得ている。理論ではMHDDにおける成形限界向上を図る破断抑制に対する摩擦保持効果、流体潤滑効果、周液圧効果に関する評価指標を示し、それらを相対工具寸法の因子で表す式を導出している。また寸法効果を表す新摩擦モデルを提案しマイクロスケールでは摩擦力の大幅な低減が可能であることなど、定量的に評価している。実験的にはMHDDにおける対向液圧負荷の効果を成形性と形状精度の面から初めて明らかにしている。これらの知見は装置設計やプロセス設計における指針となるもので評価に値する。

MHDDおよびMUDDの装置開発では、材料の順送方式で生じる位置精度の低下から1ストローク成形を採用して、位置決め制御をせずに再絞りにおいても高精度を実現する本マイクロ成形方式は工業的な面で非常に示唆に富むもので意義深い。

マイクロ成形への超高压利用はマイクロ領域でのみ成り立つ特徴を生かしたもので、その超高压と逐次変形を組み合わせる本プロセス自体にも高い独創性がみられる。

高細長比のMUDDに関して、実験により細長比 H/D が従来の1.5倍以上となる約0.9まで向上できることを実証し、今後の検討によってはさらなる向上が期待できることを示したことは金属マイクロ成形分野における工学的ならびに工業的にも価値ある成果といえる。

以上を総合的に判断した結果、本論文で得られた成果は博士（工学）を授与するに十分な価値あるものと判断できる。

4 最終試験の結果

本学学位規定に則り、論文審査委員による論文審査会を3回開催し、本論文の内容及び関連分野に関して、多角的な視点から審査委員による口頭及び筆答の試験を実施した。また、公開の論文発表会を2016年1月11日に開催し、学内外から多数の参加者を得て多角的な討論を行った。これらの結果を総合的に考慮し慎重に審査した結果、博士（工学）としての専門科目に関する十分な学力を有するものと認め、最終試験を合格と判定した。