

微細長尺管のチューブハイドロフォーミング

芝浦工業大学 工学部機械工学課程

教授 吉原 正一郎

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021022-B3)

キーワード：チューブハイドロフォーミング，微細管，逐次ハイドロ成形，材料流動

1. 研究の目的と背景

THF とは、管材に内圧と軸押しを負荷して金型に沿った所望の形状を得る成形法であり、中空部品の一体成形や部品の軽量化など様々な利点を持っている。本研究が対象とする微細管の成形法であるマイクロチューブハイドロフォーミング(MTHF)は、THF の持つ優れた利点から小型部品への適用が期待されている¹⁾。しかし、MTHF は管材の小径化に伴い管長さ/外径比(L_0/D_0)が大きくなり、金型との摩擦抵抗の影響が増大するため材料流動の促進が阻害されるという課題がある。そこで、材料流動を積極的に促す手法として、成形時の型開閉を許容する逐次ハイドロ成形が提案された²⁾。これまでの逐次ハイドロ成形の先行研究では、外径 $D_0=0.5\text{mm}$ のマイクロ管を対象として、型開き/型閉じ工程における管材の変形挙動に及ぼす摩擦作用^{3),4)}や、より成形性を向上させる成形条件⁵⁾が調査された。しかし、逐次ハイドロ成形による成形性向上の効果が示された一方で、金型の変形挙動を考慮した管材の変形挙動メカニズムが明らかになっていない。金型の変形挙動によって金型－管材間の摩擦力は変化し、材料流動に影響が生じる。したがって、新たに金型および管材の各評価項目を定量的に評価し、管材の変形挙動メカニズムを明確にする必要がある。また、液圧軸押込みの先行研究では、 $D_0=2\text{mm}$ の微細管を対象に材料流動を促進させる条件が報告された⁶⁾。したがって、液圧軸押込みの先行研究と対応させるためには新たに $D_0=2\text{mm}$ の微細管を対象すべきである。

そこで本研究では、新たに $D_0=2\text{mm}$ の微細管を対象に逐次ハイドロ成形の効果を示し、型開き/型閉じ工程における管材および金型の変形挙動、金型－管材間に生じる摩擦力、管材の材料流動挙動を定量的に評価することで、逐次ハイドロ成形における管材の変形挙動メカニズムを明らかにする。

2. 解析方法

2・1 解析モデル

図 1 に THF の成形原理、図 2 に逐次ハイドロ成形の成形原理をそれぞれ示す。逐次ハイドロ成形は、内圧負荷の効果によって金型の局所的なたわみ変形を許容する型開き工程、金型を変形前の状態に戻すため、再び外部から金型を拘束する型閉じ工程で構成される。本成形法の FEM 解析には、動的陽解法 ANSYS LS-DYNA 3D を用いた。図 3 に使用した解析モデルを示す。解析モデルは、微細管

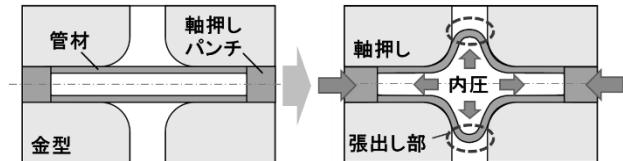


図 1 THF の成形原理

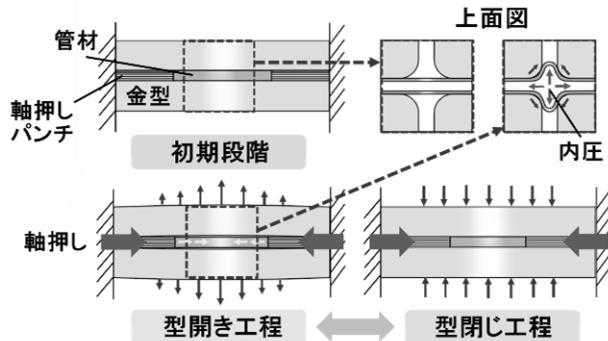


図 2 逐次ハイドロ成形の成形原理

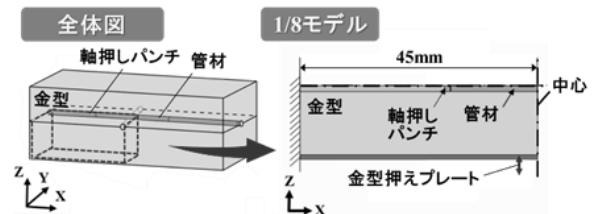


図 3 逐次ハイドロ成形の解析モデル

表 1 解析モデルの構成

	要素	ボディ
管材, 金型	ソリッド	弾塑性体
軸押しパンチ	ソリッド	弾性体
金型押えプレート	シェル	剛体

(C1020, 縦弾性係数 $E=49.2\text{GPa}$, 降伏応力 $\sigma_y=100\text{MPa}$, ポアソン比 $\nu=0.33$), 金型 (SS400, $E=206\text{GPa}$, $\sigma_y=245\text{MPa}$, $\nu=0.3$), 軸押しパンチ, 金型押えプレートで構成し、幾何学的対称性を考慮し 1/8 モデルとした。表 1 に解析モデルの構成を示す。微細管および金型は等方弾塑性体とし、微細管の塑性域は引張試験より求めた真応力－真ひずみ線図を多直線近似した。また、金型は接線係数を 1.45GPa として二直線近似した。接触定義は法線ラグランジュ法を用

いて、静摩擦係数 $\mu_s=0.1$ 、動摩擦係数 $\mu_k=0.05$ とした。また、管寸法は外径 $D_0=2\text{mm}$ 、肉厚 $t=0.2\text{mm}$ 、管長さ $L_0=40\text{mm}$ ($L_0/D_0=20$)とした。

2・2 解析条件

本研究で使用した負荷内圧 Ph および最大軸押し量 AL は先行研究にて用いられた 30MPa および 4mm とし、成形開始から一定に負荷した⁶⁾。

図 4 に金型押えプレートの Z 軸方向の移動サイクルを示す。金型押えプレートの Z 軸方向の最大移動量（開き量）は 0.04mm とし、プレートの開き量で金型のたわみ変形を制御した。また、金型押えプレートによる型開閉回数は 3 回とした。金型のたわみ変形挙動の評価では、図 4 に示す①および②のプレート開き工程（開き量 $0.02, 0.04\text{mm}$ ）、③および④のプレート閉じ工程（開き量 $0.02, 0\text{mm}$ ）における変位をプレート開閉 3 回それぞれで調査した。

3. 解析結果および考察

3・1 金型のたわみ変形挙動

逐次ハイドロ成形における金型のたわみ変形挙動を調査するため、図 5 に金型の原点 0 からの Z 軸方向変位をプレート開閉 3 回それぞれで評価した結果を示す。図 5 より、内圧負荷の効果で金型にたわみが発生し、プレートの開き量に伴い金型の開閉の制御が可能であることが分かる。一方、図中の A 部においては金型にごく僅かな塑性変形が生じていた。金型をたわませる逐次ハイドロ成形においては、パンチ形状や成形条件によって金型の一部に塑性変形が生じる可能性があるため、このような変形を防げる条件選択が実際の実験では重要である。また、プレートの最大開き量が 0.04mm に対して、金型の最大たわみ量は約 0.02mm と小さくなる傾向が見られた。したがって、金型押えプレートと金型の開閉サイクルは必ずしも一致しないことが推測される。

3・2 微細長尺管の変形挙動

金型を開閉することによって微細管の成形性にどのような影響が現れているかについて、従来の成形法と逐次ハイドロ成形の比較を行った。微細管の成形性としては、張出し高さの挙動と最も肉厚の増減が生じる管端部の肉厚を評価した。図 6 に従来の成形法および逐次ハイドロ成形を用いた場合の張出し挙動を示す。図 6 より、逐次ハイドロ成形を用いた場合、従来の成形法と比較して張出し高さが大きくなる傾向が見られた。図 7 に、従来の成形法および逐次ハイドロ成形を用いた場合の管端部の肉厚挙動を示す。図 7 より、逐次ハイドロ成形を用いた場合、従来の成形法と比較して、管端部の増肉化を抑えられる傾向が見られた。したがって、図 6 および図 7 より、逐次ハイドロ成形を用いることで、管材の成形性が向上する傾向が見られた。そこで、金型の変形挙動が管材の変形挙動に及ぼす

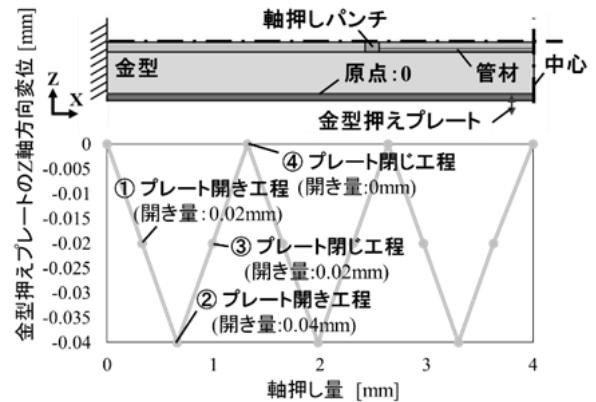


図 4 金型押えプレートの開閉サイクル

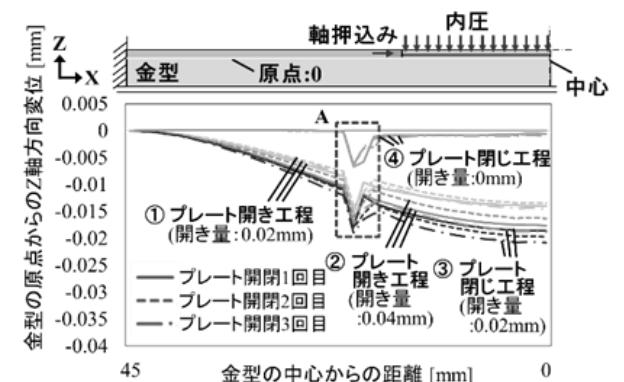


図 5 金型のたわみ変形挙動

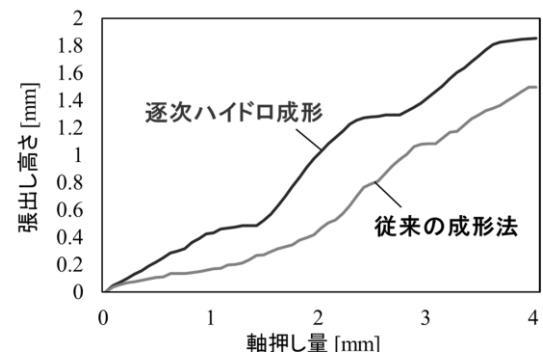


図 6 張出し挙動

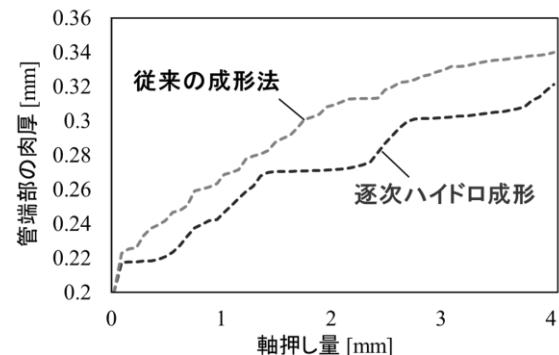


図 7 管端部の肉厚挙動

影響を詳しく調査する。

図4で示した金型の変形挙動が、管材の変形挙動に及ぼす影響を調査するため、図8に金型の変形挙動と照らし合わせた管材の張出し挙動および管端部の肉厚の変化を示す。図中において、金型と金型押えプレートが接せず、金型のたわみ量が増大する過程を型開き工程とした。また、金型と金型押えプレートが接し、金型の変形が元の状態に戻る過程を型閉じ工程とした。図8より、型開き工程では張出し高さが増加し、管端部の増肉が抑えられる傾向がある。一方、型閉じ工程では張出し高さの増大が抑制され、管端部が増肉する傾向が見られる。したがって、成形過程において張出し高さを増加させ増肉を抑える効果のある型開き工程が長いほど、より高い成形性を得られる可能性が示唆された。しかし、金型のたわみ量が大きくなることで、金型の隙間に材料が流入する噛みこみ変形などの成形不良が生じる可能性も存在する。よって、管材の成形性だけではなく、全体の管形状を考慮した成形条件の選択が重要であると考える。

3・3 成形過程における材料流動挙動

前節より、管材の変形挙動は、型開き工程では張出し高さが増加し管端部で増肉が抑えられる一方、型閉じ工程では張出し高さの増大が抑制され管端部で増肉が生じる傾向が見られた。この変形挙動の要因について、各工程における金型-管材間の摩擦力および材料流動挙動を調査した。図9に型開閉1, 2および3回目の型開き/型閉じ工程において、X軸方向約2mm間隔で評価した金型-管材間の摩擦力を示す。図9より、型開閉回数によらず、型開き工程よりも型閉じ工程において発生する摩擦力が大きくなる傾向が見られた。この結果は、型閉じ工程では管材が金型によって拘束され、管外表面に生じる面圧が増大するためだと考えられる。図9で示した摩擦力が材料流動に与える影響を調査するため、図10に管材の材料流動挙動として管材のX軸方向約2mm間隔で評価した速度ベクトルを示す。型開き工程では、摩擦力が型閉じ工程と比較して小さいため、図10より速度ベクトルが大きくなり材料流動が促進する傾向が見られた。一方、型閉じ工程では、金型-管材間で生じる摩擦力が型開き工程と比較して大きくなるため、型開閉回数によらず速度ベクトルは小さくなり材料流動が促進しない傾向がみられた。したがって、型開き工程では、金型のたわみ変形により摩擦力が低減され材料流動が促進するため、張出し高さが増加し管端部においても増肉が抑えられる傾向がある。一方、型閉じ工程では、管材が金型に拘束され摩擦力が増大し材料流動が停滞するため、張出し高さの増大が抑制され管端部で増肉が生じることが推察される。

3・4 型開き/型閉じ工程の繰返し効果

前節までの結果より、型開き工程では金型のたわみ変形により金型-管材間の摩擦力が低減するため管材の材

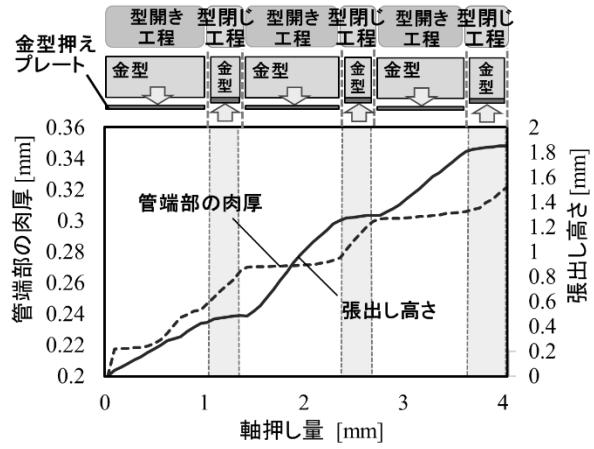


図8 管材の変形挙動

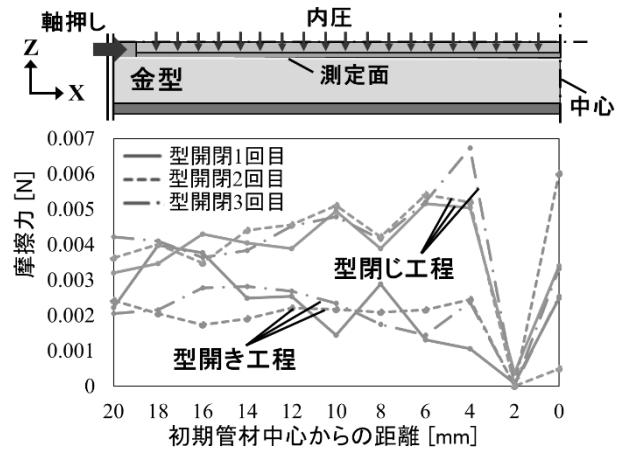


図9 逐次ハイドロ成形過程における摩擦力

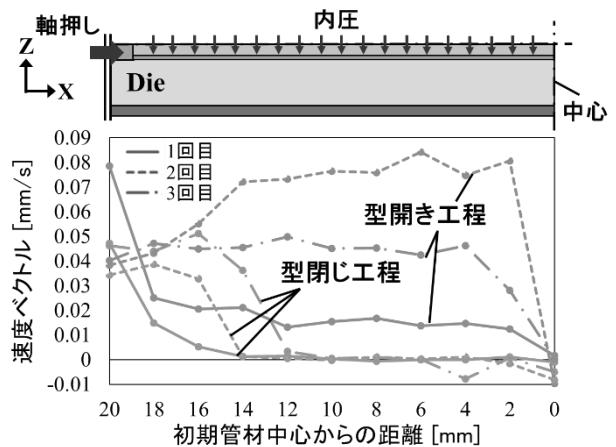


図10 逐次ハイドロ成形過程における材料流動挙動

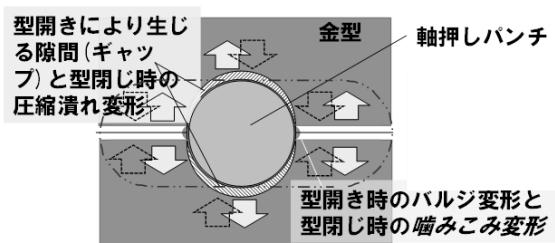


図11 噛みこみ変形の発生原理⁴⁾

料流動が促進し、張出し高さが増大、管端部における増肉が抑制され成形性向上の効果が見られた。一方で、型閉じ工程においては、管材が金型に拘束され摩擦力が増大することで材料流動が停滞し、張出し高さの増大が抑制され、管端部における増肉が進行し型開き工程とは異なる挙動が見られた。しかし、逐次ハイドロ成形における型閉じ工程には管形状を制御する役割がある。

図11に先行研究にて示された逐次ハイドロ成形における噛みこみ変形を示す⁴⁾。金型を開閉させる逐次ハイドロ成形においては、成形時の型開き量が大きくなることで金型間に材料が流入し、型閉じ時に管材が潰れる噛みこみ変形が生じる場合がある。噛みこみ変形の発生を抑制するには、型閉じ工程を適宜行うことによって管形状を制御することが必要である。また、型閉じ工程のその他の役割として、図12に管端部の断面挙動を示す。型閉じ工程には、型開き工程で僅かに楕円形になった断面形状を金型で拘束することにより初期の円形に戻すといった断面形状の制御の役割も存在する。したがって、型開き工程のみではなく型閉じ工程を適宜行うことによって全体の管形状を制御することが重要である。

図13に、これまでに調査した内圧・軸押し一定負荷の条件下における管材の変形挙動を示す。これまでの結果より、型開き工程では金型のたわみ変形により摩擦力が低減し材料流動が促進し管材の成形性が向上する一方、型開きにより管材の断面形状が僅かに変形することを示した。型閉じ工程では、金型-管材間の摩擦力が増大することで材料流動が停滞し、張出し高さの増大が抑制され管端部の増肉が進行したが、不整変形の抑制や断面形状の制御が可能であることを示した。したがって、それぞれ異なる効果のある型開き工程と型閉じ工程を繰り返すことによって、成形性が高く、寸法精度の高い成形品の実現が可能になると見える。

4.まとめ

本研究では、 $D_0=2\text{mm}$ の微細管を対象に逐次ハイドロ成形の効果を示し、金型および管材の各評価項目を定量的に評価することによって、逐次ハイドロ成形における管材の変形挙動メカニズムを明らかにした。

その結果、逐次ハイドロ成形を用いた場合、従来の成形法と比較して成形性が向上する傾向が見られた。また、型開き工程においては、摩擦力が低減され成形部まで軸押し速度前後で材料流動が促進し、成形性が向上する傾向が見られた。一方、型閉じ工程は、摩擦力が増大し材料流動が停滞（管端部以外で流動速度が約 0mm/s）するが、全体の管形状の制御のために適宜行うことが重要であるとした。したがって、それぞれ効果の異なる型開き/型閉じ工程を所望の形状まで繰り返すことによって従来は成形が困難であった微細長尺管の成形が可能になると見える。また、型閉じ工程において金型-管材間の摩擦力を低減することによってより高い成形性の実現が望まれる。

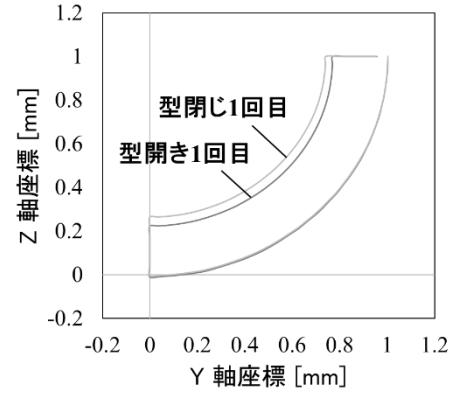


図12 管端部の断面挙動

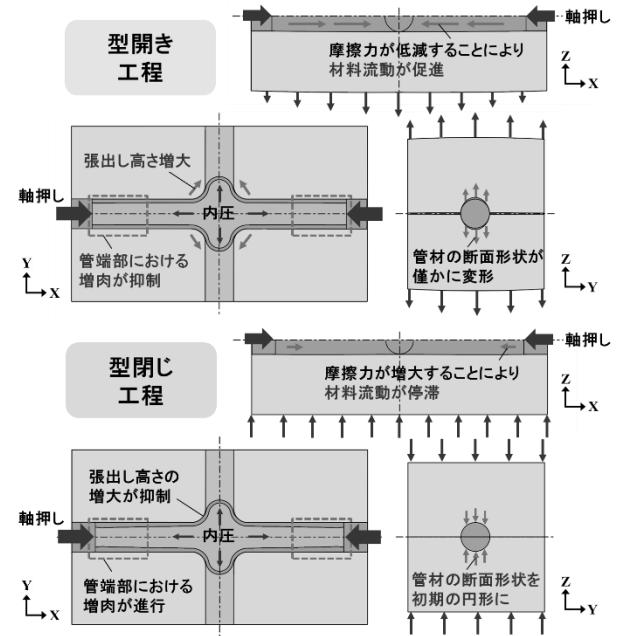


図13 内圧・軸押し一定負荷における管材の変形挙動

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団に助成を受けて実施されたものであり、深く感謝申し上げます。また、本研究で精力的にシミュレーション及び実験に取り組まれた本学大学院修士、田村紺梨氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森茂樹・佐藤英樹・坂井謙太・真鍋健一：塑性と加工, **58**-672(2017), 72-77.
- 2) 張自成・真鍋健一・古島剛・高橋智：日本機械学会関東支部第 25 期総会・講演会講演論文集, **190**-1(2019)
- 3) 大塚洋平・吉原正一郎・真鍋健一：第 72 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2021), 283-284.
- 4) 安井孟・吉原正一郎・真鍋健一・張自成：第 71 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2020), 371-372.

5) 田村緋梨・吉原正一郎・真鍋健一：第 73 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2022), 375-376.

6) 河野開・吉原正一郎・真鍋健一：第 72 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2021), 287-288.