

柔構造金型を利用した微細管の高圧液圧成形

芝浦工業大学 デザイン工学部デザイン工学科 吉原 正一郎

1. はじめに

金属微細管は金属のもつ優れた機械的・機能特性を有し、高精度で生産性の優れた塑性加工法が開発できれば、その特徴を生かした応用分野並びにその普及が促進されるものとして注目されている。しかし、通常サイズのハイドロフォーミングに比べて、素管が相対的に厚肉になり、要求される成形圧力は、管の肉厚/直径比(t/D)に比例して高くなり、材料により 400MPa(4000 気圧)を超える超高压負荷が必要となる場合がある。さらに、微細管の成形では管長さは用途面とハンドリング面から、より長尺となり、通常寸法の管より寸法効果で金型との摩擦の影響を大きく受ける。また、微細管は強加工を受けて寸法効果により延性は大きく低下する。そのため微細管のハイドロフォーム性は低く、難加工となり、高加工度の成形は困難となっている。

その難加工性の微細管に対して、ハイドロフォーム性の大幅な向上を図るため、素材の材料流動を阻害するマイクロライボ特性を改善させる方法論や超高压の加工内圧を如何に低下させるかが課題となり、その解決を図るプロセス開発が重要となっている。

2. 目的

本研究は、上記の研究背景を踏まえ、成形性に劣る長尺微細管の液圧成形において、さらなる高加工度を実現するために新たな加工プロセスの開発を目指すものである。そこで、本研究では微細管の液圧成形における代表的な枝管成形の十字成形を対象とした。その新たな成形原理として、これまでの剛体金型を対象とした考え方を改めて、成形中に金型の変形を積極的に許容し、摩擦・潤滑を改善して材料流動を促進するように柔構造とする金型を用いる成形法の開発を試みるものである。具体的には、新たな成形原理の実現を確認するために、まず有限要素 (FE) 解析で微細管に対応した本原理の金型設計法の確立を目指し、成形挙動の解明と重要な成形パラメータを明らかにするとともに、本成形原理の有効性を解明することを目的とする。

3. 実用的な価値、実用化の見込みなど

従来寸法の管のハイドロフォーミングでは長い管も用いられるが管径に対する長さ L/D はそれほど長い管ではない。管径に対して長い大きな L/D を持つ従来寸法の長尺管を用いると、長尺になるほど成形装置も巨大化するため現実的でなく、あまり用いられない。ところが微細管のマイクロ管になれば、管の長さが短くても管径に対する管長さ L/D は

相対的に大きくなり、管径に対して長い長尺管が用い易くなる。長尺マイクロ管のハイドロフォーミングで高加工度成形を実現させるためには、可動金型を利用する方法¹⁾と本提案の柔構造金型を利用する方法²⁾が考えられる。例えば、長尺管に分岐する枝管が多数ある真直ぐ、また曲がったリード管、マルチューズ(図1³⁾)のような複雑形状部品は医療機器部品など、内部に液体等を通す部品の需要がある。現在は溶接構造で製造されているが溶接無しで製造が可能になれば、他分野での利用も期待されて需要がさらに高まるものと見込まれている。

本研究での成果により溶接レスマイクロチューブ一体化逐次高圧液圧成形の機運も高まり実用化へ向けて進展するものと期待される。

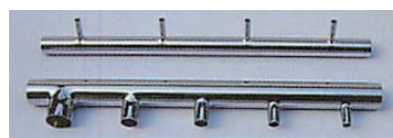


図1 長尺のヘッダー管の例³⁾

4. 研究内容の詳細

4.1 柔構造金型を利用した長尺微細管の新しい逐次高圧液圧成形プロセスの成形原理

図2に新しい長尺マイクロ管の逐次高圧液圧成形原理を示したものである。図中の工程(2)において、内圧と軸押しを负荷するときに「型締め」をしないで金型の拘束を緩めて積極的に金型の弾性変形による型開き変形を生じさせ、より大きな管の膨出変形を許容する。工程(3)では、内圧を除荷し(または内圧負荷中に)外部からの型締めを同期して完全に変形前の状態に戻す。この柔構造金型を用いることで剛構造よりも同じ軸押込みでも型開きの効果でさらに大きな加工度が得られ、また次の金型を初期状態に戻す「型閉じ」工程で、管両端部の変位拘束でさらに金型キャビティ内へ流動しより大きな膨出変形が期待できる。この工程(4)および(5)の工程を繰り返すことによって、枝管の張出し高さが逐次増加するため加工限界の大幅な向上が図れるという原理である。また、加工内圧の低減の可能性も期待できる。従来は金型を剛体として構造・金型設計するが、本設計思想を根本から覆し、微細金型に対して弾性変形を許容して積極的にその変形挙動を成形プロセス中に活用する斬新な設計思想を取り入れている。

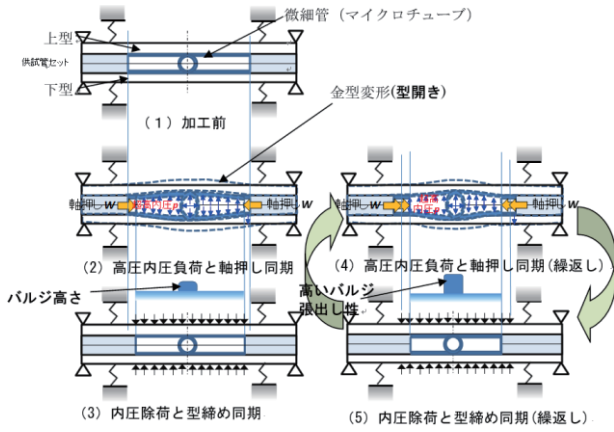


図2 提案する柔構造金型を用いるマイクロ管材の逐次液圧成形加工原理

4.2 加工原理の解析モデル

本解析には動的陽解法 ANSYS LS-DYNA 3D (Ver. 19.2) を用いた。弾性金型も考慮した FE モデルは外径 $D=0.5\text{mm}$ 、内径 $t=0.1\text{mm}$ のマイクロ管の十字成形における幾何学的対称性を考慮し 1/8 モデルとした(図3)。マイクロ管、金型、パンチにはソリッド要素を用いて、金型は弾性体(ヤング率 $E=177\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、密度 $\rho=8.0\text{g/cm}^3$)とし、軸押しパンチはソリッド要素、剛体とした。金型支持ローラーと金型押えプレートはシェル要素で剛体とした。マイクロ管は 10 節点要素を用いた。マイクロ管は等方弾塑性材料とし、材料特性は引張試験より求めた真応力-真ひずみ図から、多直線近似して入力した。解析で用いた材料特性は既報 4),5)での実験で用いた無酸素銅を対象とし、密度 $\rho=8.89\text{g/cm}^3$ 、ヤング率 $E=118\text{GPa}$ 、降伏点 $\sigma_y=324.5\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。

FE 解析では、法線ラグランジュ法を使用して接触状態を定義した。クーロン則を用いて静摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_k の組み合わせは、 $\mu=0.025$ と $0.01, 0.1$ と $0.05, 0.2$ と 0.15 の 3 条件を基本として摩擦係数の影響を調べた。管の長さの影響を調査するため、管の全長 L は $3.2\text{mm}, 10\text{mm}, 20\text{mm}$ の 3 種類(長さ/直径比: $L/D=6.4, 20, 40$)とした。

基本の成形負荷経路としては、既報 4),5)と同様に、階段状負荷経路とした。型開き/型閉じの負荷経路は所定の型開き量に達すると保持した後、型閉じの工程に入る経路としてそれを繰り返す経路とした。

4.3 結果および考察

4.3.1 型開きなし弾性金型を用いた場合の長尺マイクロ管の十字成形

全長 $L=3.2\text{mm}$ の無酸素銅マイクロ管の十字成形の結果 4)と比較して、成形挙動に及ぼす摩擦係数と管長さの影響を調べる。図4に全長 $L=10\text{mm}$

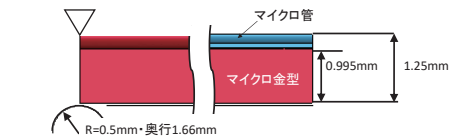
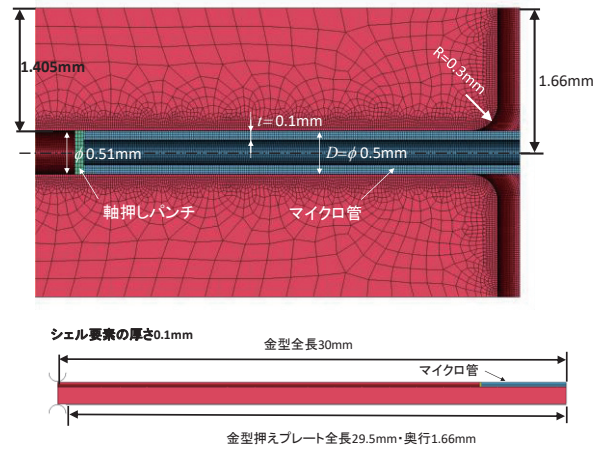


図3 柔構造金型を用いる長尺マイクロ管の逐次十字液圧成形モデルと諸寸法

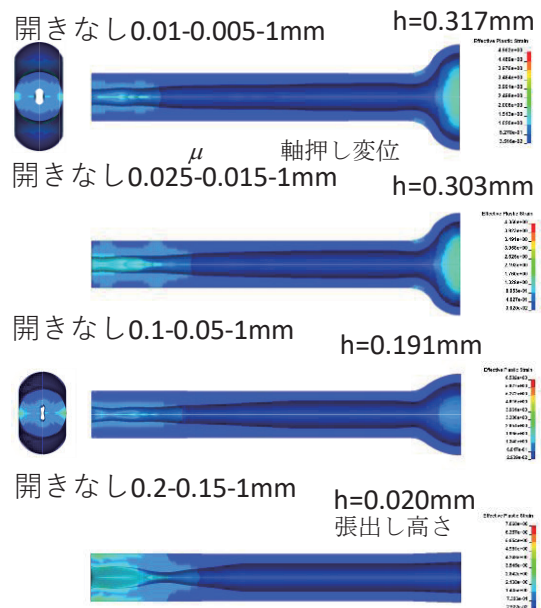


図4 長尺マイクロ管十字成形における管の変形と相当ひずみ分布に及ぼす摩擦の影響

のマイクロ管における十字成形形状と相当ひずみ分布を示す。 $p_h=160\text{MPa}$ 、軸押し込み $\Delta L=1\text{mm}$ の条件下における種々の摩擦係数に対する FEM 解析結果である。この $L/D=20$ の長尺管でも摩擦係数 μ が小さい $\mu_s-\mu_k=0.01-0.005$ の場合、管材料は軸方向に押し込まれながら十字金型へと流動し、十分に張り出し成形が行われている。 μ が徐々に大きくなるに従い、張出し高さは減少し、逆に軸押し込みによる管端部付近の局部的な変形域が目立ち、 $\mu_s-\mu_k=0.2-0.15$ の場合はほとんど張出すことなく管端部域は特異な変形状態が見られるようになる。十字成形の場合、同図左に示す管側面図から次のことがわかる。肉厚は半径方向によらず初期の

0.1mmより増加しているものの、金型内への流動が大きい上下方向管端部肉厚は、直交する左右方向の肉厚より薄くなっており、内面の形状は縦長の長円のように細長くなっている。その断面内の相当ひずみは金型に接する外周側が低く、直交する左右方向の外周面が大きくなる。

横断面の内面形状にも摩擦の影響が現れ、 μ が大きくなると十字金型への材料流動と直交する方向の増肉がより大きくなり内面は凹んだような形になる。さらに、軸押し込みを進めると管胴部の軸方向の一部内面が完全に潰れ、一つの成形限界とみなすことができる状態となる。

4.3.2 弾性金型を用いた型開き/型閉じによるマイクロ十字逐次成形

(a)型開き/型閉じ1サイクル成形

図5に $p_h=160\text{MPa}$, $\mu_s-\mu_k=0.01-0.005$, 軸押し量を1mmとして型開き/型閉じ1サイクル後における管の変形に及ぼす型開き量の影響を示す。型開き量を増加させると、その型開き・型閉じの間に管の張出し高さおよび変形状態に影響を及ぼすことがわかる。具体的に本条件では、型開き量を0.05以上では型開きの時に軸押しパンチと弾性金型の型開きで生じる隙間に材料が流入し型閉じで軸方向に押し出されて図5の上から3番目と4番目の図のように管端部の割り型分割面に爪状つばが形成されるようになる(同図左側管端部の黄色部分)。このようなつばが形成されないような金型内面と軸押しパンチ外面の間の隙間を最小にすることが課題である。この材料挙動は摩擦や材料物性などとの兼ね合いでも生じるものであり、それらの最適化が必要である。

以上より、本報告では型開き量は不整形変形が生じることなく張出し量が最大となる型開き量は0.01mmとした。

(b)型開き/型閉じの複数サイクル逐次成形

図6に、これまでと同様、内圧は成形サイクル中に負荷し続けながら型開き/型閉じの3回サイクルを終えた後における成形形状に及ぼす摩擦係数の影響を示す。摩擦が低いほど拡管量は増加している。逐次成形による成形性の向上の効果が確認できる。またこれまでと同様に摩擦が大きくなれば型内への材料流動が抑えられ、管端部付近の圧縮変形が著しくなる。

(c)型開き/型閉じの複数サイクル逐次成形における負荷経路の影響

さらなる成形性向上の可能性を探るため、上述までの成形条件の影響を調べる。その中で、成形内圧は繰返しサイクル中も負荷し続けていたが、実際の実験手順を考慮して型閉じ中は内圧をゼロに除荷し、次の成形サイクル開始時に改めて内圧を負荷する成形経路の影響を調べた。図7に型閉じの際の内圧をゼロ(除荷)にするサイクルを3回繰り返して成形した後の成形形状に及ぼす摩擦係数の

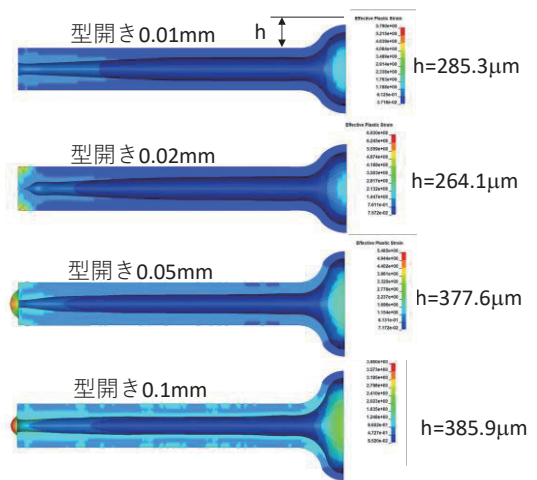


図5 型開き/型閉じ1サイクル後の十字成形形状に及ぼす型開き量の影響

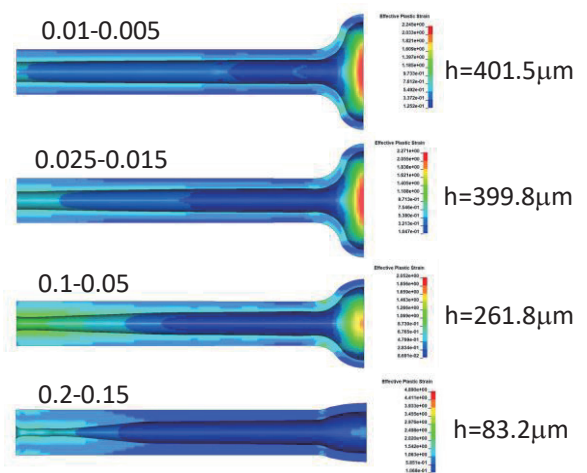


図6 型開き/型閉じ3サイクル後の十字成形における張出し高さに及ぼす型開き量の影響

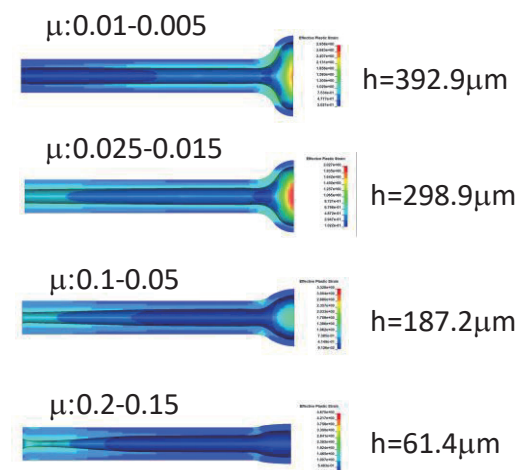


図7 成形条件として型閉じ工程で内圧を除荷する負荷経路としたときの3回サイクル後の成形形状に及ぼす摩擦係数の影響

影響を示す。これまでと同様に、摩擦が低いほど大きく拡管できるが、内圧の除荷効果はあまり変わら

ない場合もある。また、高摩擦下での型開きのない従来法より拡管向上効果が見られそうであるが、これらのメカニズムの検討が必要である。

次に、型閉じ中の軸押しを停止する効果について検討した結果を図8に示す。この場合は結果的に7回の繰返し成形が行われている。その逐次成形効果が大きく表れているかどうかは不明であるが、最も高い拡管が実現できている。やはりこれまでと同様に摩擦が低いほどより張出し性は著しい。

これまでの上記の成形法について成形性向上の効果を比較するため整理すると、型閉じ中の軸押ししない逐次成形が最も成形性向上効果が大きいのがわかった。ただし、繰返しによる逐次成形の効果であるかどうかは今後の検討課題である。より多くプロセスを繰返すことによって、成形性がさらに向上する可能性は大いに期待できる。今後、各種成形条件の最適化および成形メカニズムの解明が必要である。

5. まとめ(結言)

本研究では成形性の低い長尺マイクロ管のハイドロフォーミング法として新たな金型の弾性変形を利用した型開き/型閉じを可能にする柔構造金型を利用した微細管の高圧ハイドロ逐次成形の可能性について材料流動に着目して検討した。得られた成果と課題を以下にまとめる。

- 1) 金型弾性変形による型開き/型閉じを繰り返す柔構造金型を用いることによって、成形性の低いマイクロ長尺管の高成形度を可能にする新逐次ハイドロ成形法の有効性を明らかにした。適切な型開き量を設定して型開き/型閉じを繰り返す逐次成形によって、型開きのない従来構造金型の場合より成形性が向上することを示し、繰返し数の増加によってさらなる向上が期待できる。しかし、条件によっては逆に成形性が低下する場合があることも示し、最適化の必要性を指摘した。
- 2) マイクロトライボ特性として、型開きと型閉じ工程での摩擦力の向きが金型内への材料流動を促進するように作用する場合もあれば、逆に阻止する

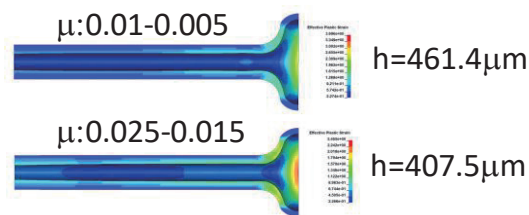


図8 成形条件として型閉じ中の軸押し込みを停止する負荷経路において7回サイクル後の成形形状に及ぼす摩擦係数の影響

向きに作用する場合は考えられる。この逐次成形プロセスの中で生じているマイクロトライボ挙動は複雑で未解明である。成形性を効果的に向上させるマイクロ管の材料物性も含めた材料流動メカニズムの解明が要求される。実験による検証も今後の課題であり、引き続き継続する計画である。今後、成形圧力の低減にも本逐次ハイドロ成形法が期待される。

最後に、本研究は公益財団法人金型技術振興財団平成30年度研究開発助成を受けて実施されたものであり、謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 安井孟, 吉原正一郎, 山田隆一, 伊藤安海: 塑性と加工, 60-707 (2019), 346-351.
- 2) 張自成, 真鍋健一, 古島剛, 高橋智: 日本機械学会関東支部総会講演会, (2019), No.190-1(2019), 18D03.
- 3) 津山ステンレスネット高純度流体用ティーズカタログ
- 4) 森茂樹, 佐藤英樹, 板井謙太, 真鍋健一: 塑性と加工, 58-672(2017), 72-77.
- 5) H. Yasui, S. Yoshihara, S. Mori, K. Tada, K. Manabe: *Metals*, 10, 199 (2020), doi:10.3390/met10020199.