

令和元年6月18日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14440

研究課題名(和文)超高压振動付加マイクロチューブハイドロフォーミングプロセスの開発

研究課題名(英文)Development of Microtube Hydroforming Process Utilizing Incrementally Applied Ultra High Pressure

研究代表者

真鍋 健一(MANABE, Ken-ichi)

首都大学東京・システムデザイン研究科・客員教授

研究者番号：10145667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では金属マイクロ管の低い成形加工性の大幅な向上法として、高内圧負荷時の金型の型開き(弾性変形)を許容させる新発想から、摩擦・潤滑特性の改善と材料流動の促進を図り、成形性の大幅な向上を図る革新的な加工法の開発を目指した。その結果、摩擦抵抗の影響が顕著となる長いマイクロ管の十字成形において、高い内圧を負荷する成形中に金型の弾性変形を利用し型開きと型閉じを許容することによって、枝管部への材料流動が促進され大幅な成形性の向上と加工内圧の低減の可能性を示すことができた。その基礎研究では、これまで世界的にも成功例のない最小直径0.5mmのマイクロ管を用いた十字成形およびT成形に初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

摩擦係数が増加するマイクロ加工領域で摩擦抵抗を低減させる方法として、金型の弾性応答を利用して型開きを許容し材料流動性を高め、型閉じ過程での摩擦抵抗の向きの変化による材料流動制御の可能性を示した本成果は意義深い。また型開きと型閉じを繰り返す逐次成形に向けた有益な成果である。さらに従来の巨視的均質有限要素法が、肉厚方向の結晶粒数が十分な材料であれば、マイクロ領域での適用可能性を示せたことは学術的に意義深い。社会的意義としては低侵襲医療が叫ばれ医療器具のさらなるマイクロ化が要求されている中、低コストで高機能性をもつ金属製医療器具のマイクロ加工や低侵襲性に効果的な部品開発に寄与する成果といえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, as a method to greatly improve the low hydroformability of metal microtubes, an innovative new idea to allow the die opening (elastic deformation) to be actively permitted when high internal pressure was proposed. For a cross-shape hydroforming process of a long microtube where the influence of frictional resistance is remarkable, macroscopic homogeneous finite element simulation was carried out to confirm material flow behavior into the branch cavity by utilizing the elastic deformation of the die during process which applies a high internal pressure and allowing die opening and die closing processes. As a result, material flow was further improved, and the possibility of significant improvement of hydroformability and reduction of internal pressure could be shown. In the basic experimental work, cross shape forming and T-forming experiments using a micro tube with outer diameter of 0.5 mm, which has not been successful worldwide, have succeeded.

研究分野：機械工学 塑性加工学 マイクロ成形加工

キーワード：マイクロ塑性加工 チューブハイドロフォーミング マイクロチューブ 金型変形連成解析 型開き挙動 高圧繰返し負荷 マイクロ成形性 材料流動促進

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金属マイクロチューブ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が開発できればその応用分野や普及が大幅に広がるものと注目されている。なかでもマイクロスケールでは管内部からの金型工具を用いない柔軟性に富むハイドロフォーミングが期待されている。しかし通常サイズのマクロスケールのハイドロフォーミングに比べ、素管が相対的に厚肉になるため、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、微細なマイクロチューブ成形では管長さはハンドリング面から長くとるため長尺管になり、通常のマクロスケールの場合より金型との摩擦の影響を大きく受ける。さらに素管も強加工を受けているため寸法効果も受けて延性は大きく低下し、潤滑も寸法効果で厳しい条件となるマイクロトライボ特性を示す。そのため微細なマイクロチューブ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。その難加工性のマイクロチューブに対して、チューブ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トライボ特性を改善させる方法論や超高压の加工内圧をどのようにして低下させるかが大きな課題となり、その具体的なプロセス開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究では医療機器、通信・電子部品および MEMS、 μ TAS 部品などで用いられ今後大幅な需要が見込まれる微細な金属マイクロチューブを対象に、この低いハイドロフォーム性を大幅に向上させる方法として、金型の型開きを積極的に許容するというこれまでにない発想から、素管とのマイクロトライボ特性の大幅な改善と材料流動促進を図り、マイクロハイドロフォーム性の向上と加工内圧を低減させる革新な加工プロセス(図 1)を開発する萌芽性の高い研究を目的としている。具体的にはマイクロチューブは直径 0.5mm の医療用のステンレス鋼管とりん脱酸銅を用いて、研究代表者らの過去の実績[1]である直径の 1.1 倍以上の張出し高さ($h/D=1.1$)を超える直径の 2 倍以上の張出し高さ($h/D=2$ 以上)を実現する十字および T 字成形に挑戦する。あわせてその成形性向上メカニズム、マイクロトライボメカニズムおよび最適マイクロ加工条件の解明を試みる。

3. 研究の方法

図 1 に新成形原理を示す構想段階の成形プロセスを示す。図 1 (2)では、超高压の内圧と軸押しを同期して負荷したときに金型の型開き変形(弾性変形)を積極的に利用し、マイクロ管の材料流動性を高め、さらに図 1 (3)での完全型閉じの際にはマイクロトライボ特性のさらなる改善効果も含め張出し性の増加が期待できる。そのあとは、図 1 (4)、(5)では前の工程(2)、(3)を繰り返し、さらなる張出し性の向上を図るものである。

この新成形原理の革新チューブマイクロハイドロフォーミングプロセスの開発を目指し、本研究では実験と連成 FEM 解析から検討を加える。なお、摩擦の影響が顕著となる長尺マイクロ管と、その比較として通常長さレベルのマイクロ管を用いた。マイクロチューブは外径 0.5mm で肉厚 0.1mm のりん脱酸銅と SUS304 の 2 種類とした。本プロセスの有効性を確認するため、有限要素解析では、動的陽解法 LS-DYNA を用いた。解析モデルは対称性を考慮して 1/8 モデルとした。マイクロ管は弾塑性体とし、軸押しパンチとカウンタープレートは剛体とした。マイクロ管の成形挙動に及ぼす金型の型開き弾性変形の影響を確認

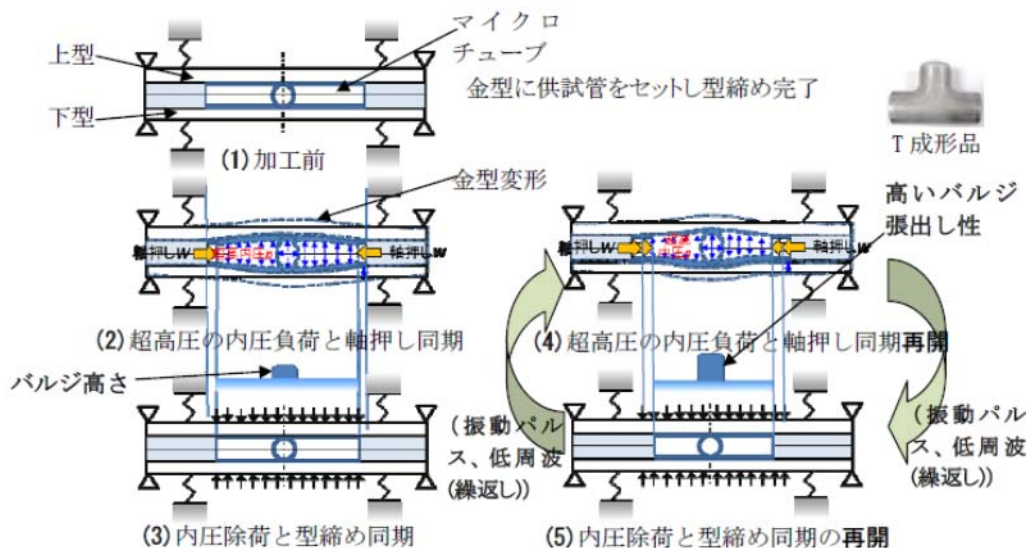


図 1 マイクロ金型の弾性変形を許容し高加工度を実現する本マイクロ成形原理 (T 成形の例)

するために、金型材料は剛体と弾性体の2条件で比較した。金型の境界条件としては、型開きを許容するモデルでは金型の端部のみ変位拘束を与えた。摩擦モデルはクーロン則を用い、摩擦係数 μ は0.01、0.05および0.10の3条件とした。マイクロ管はりん脱酸銅 C1220 を対象とし、引張試験で得られた塑性域の真応力・真ひずみ曲線を材料モデルに多直線近似で直接入力した。マイクロチューブの初期長さは32mmと100mmの2種類とした。マイクロチューブハイドロ実験には新たに改良した超高压発生装置を持つ試験装置[2]を用いた。

4. 研究成果

(1) 剛体金型によるマイクロハイドロ基礎実験と FEM 解析 (従来方式の十字及び T 成形)

新成形原理の可能性と有効性を示すため、従来方式の剛体金型でのマイクロチューブハイドロ成形における比較データを収集した。用いたマイクロ管長さは長尺管ではない通常長さの3.2mmとした。また従来成形事例がない最小外径0.5mmのマイクロ管でのハイドロ成形の可能性を調査した。

図2にマイクロ十字成形とT成形におけるプロセスウインドウを示す。高压側では破裂、破断による成形限界、低压側では座屈、しわによる限界線が存在し、その間の領域が成形可能領域である。その成形可能領域はT成形のほうが高压側にあり、十字成形では低压側になることが明らかになった。これはほぼ従来のマクロスケールでの成形と同じである。

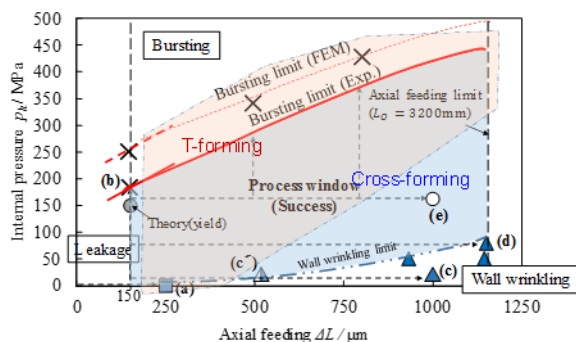


図2 マイクロ十字成形とT成形におけるプロセスウインドウ(実験結果)

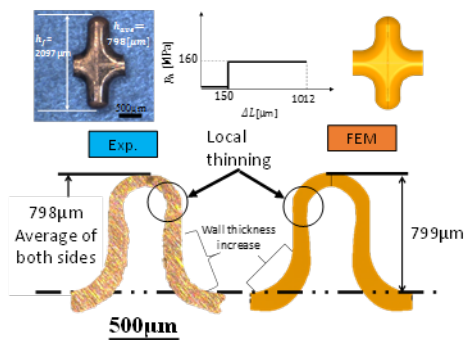


図3 マイクロハイドロ成形品の実験結果とFEM結果との比較(十字成形、C1220-H)

低压側で発生するしわに挙動に関して、材料特性の影響を調べるため、しわが発生しやすいT成形におけるりん脱酸銅(C1220-H)とSUS304との比較を行った。りん脱酸銅では張出し側と逆の管底部においてしわが早期に発生するが、SUS304では底部でのしわは発生することなく耐しわ性が高いことがわかった。材料選択が重要である。

巨視的均質FEMによる解析結果とマイクロ成形形状との比較を行った。図3に十字成形における肉厚分布と成形形状についてマイクロ成形実験とFEMとの比較結果を示す。材料はりん脱酸銅C1220である。肉厚分布も成形形状も両者はよく一致していることがわかる。

一般にマイクロ寸法までスケールダウンすると寸法効果によりFEM結果は一致しなくなることが指摘されている。しかし、本結果は予想以上の両者の一致である。

そこで、マイクロT成形($p_h = 50\text{MPa}$, $\Delta L_1 = 150\mu\text{m}$, $\Delta L_2 = 580\mu\text{m}$)によって成形されたマイクロT字管の異なる部位での材料組織を図4に示す。マイクロ管の材料組織は、成形前に平均粒径 $4.0\mu\text{m}$ の微細粒からなる層状組織が、成形後もあまり変化せず、初期の状態とほとんど変わらない。その結晶粒は肉厚方向に20以上観察され、寸法効果を考慮する必要のない材料であることがわかる。よって、従来の均質材のFEM解析で概ね評価が可能であることが確認できた。

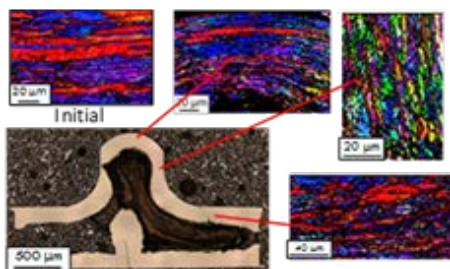


図4 マイクロT成形品の金属組織

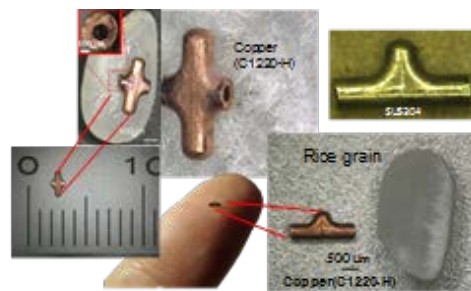


図5 マイクロ十字成形およびT成形品の外観

図5に従来方式の剛体金型を用いたマイクロチューブハイドロフォーミングで、初めて外径0.5mmのマイクロ管の十字成形およびT成形品の外観を示す。

(2) 弾性金型を用いた長尺マイクロ管の成形挙動と新成形原理の有効性

図6は、加工内圧を荷したときの成形金型の弾性変形による局所的に型開きを許容した場合の、金型対称面内面の要素Bにおける型開き挙動を示したものである。ここではカウンタープレートを用いずに、 $\mu=0.01$ の条件下で金型を弾性体としマイクロ管の弾塑性変形と同時に解析した結果である。加工内圧が急増する1s後から型開きが進行し本負荷条件下ではこのMTHFプロセス中に金型が時間とともに中心から275 μm ほど開いている。マイクロ管寸法と比較して、金型の弾性変形量は大きく、新プロセスにおけるこの型開き量の最適化は長尺マイクロ管では重要な課題であり、そのための金型の拘束条件の検討は今後取り組む予定である。

図7は、異なる摩擦条件と金型拘束条件におけるマイクロ管の管端部領域の材料の変形挙動と肉厚分布を示したものである。従来の剛体金型を用いた場合は長尺マイクロ管では摩擦係数の増加に伴い、管端部領域では軸圧縮による著しい増肉が進行している。 $\mu=0.10$ では管内径が潰れそうになるほど著しい。このように管材料が張出し部へ流動することなく変形が管端部領域に集中して圧縮による増肉が深刻になることがわかる。一方、局所的な型開きを許容する弾性金型モデルでは、肉厚もそれほど変化することなく軸押し込まれている。長尺マイクロ管でも材料流動が張出し部へと円滑に行われ、流動の促進効果があることがわかる。これは、金型の境界条件が金型端部のみ変位拘束を与え型開きしやすい構造のため、金型面圧が低く材料流動のための摩擦抵抗が減少するだけでなく、金型の型開きにより型内面が材料流動方向に対してわずかながらの傾斜が生まれ、その傾斜によって摩擦抵抗がより減少し流動しやすくなるものと考えられる。なお、管端部ではわずかながら軸対称座屈変形が進んでいるのが認められる。

次に同一の $\mu=0.10$ の条件における最大張出し高さや張出し形状について型開きを許容する効果を比較した場合の結果を図8に示す。剛体金型では62mm弾性金型による型開きさせたほうが4倍の高い張出し性が得られた。弾性変形による型開きを利用することで成形高さが向上することが理解できる。材料流動が改善されるためである。しかし、型開きを許容させた場合には図7の両端部に不整形変形が生じていた。この結果から型開きの場合には最大張出し高さより前の成形段階でカウンタープレートを用いさらに除荷して型閉じする必要性が確認された。

型開き後に再び液圧をゼロまで除荷して型閉じ工程までの1サイクルの負荷後の張出し高さを調べた結果、従来の型開きのない剛体金型の場合と比較して、型開きを許容した場合のほうが同じ軸押し込みで張出し高さが向上することが確認できた。

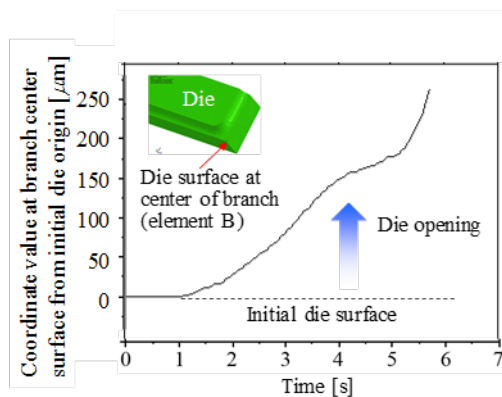


図6 マイクロ十字成形における金型中央部内面の型開き挙動 (要素 B)

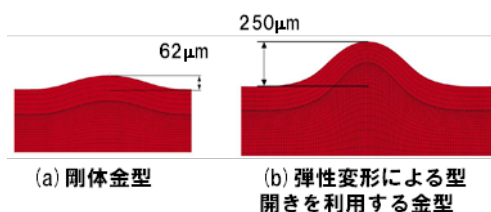


図8 金型の型開きを許容させる効果

Friction coefficient	Fixed rigid die	Elastic die-opening
$\mu=0.01$		
$\mu=0.05$		
$\mu=0.10$		

図7 マイクロ十字成形において異なる金型拘束条件におけるマイクロ管端部の変形状態の比較

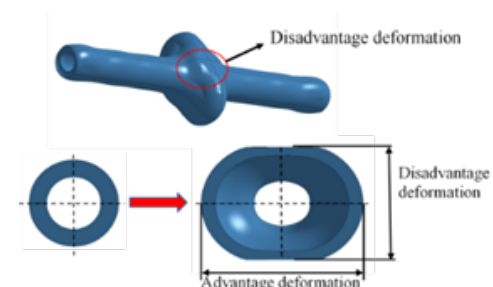


図9 金型の型閉じ時における不整形変形

しかし、許容する型開き量を大きく設定すると、完全に型閉じができず、割型の隙間に張出す変形やさらに十字成形中央部の盛り上がりなどの不整形変形が生じることになる(図 9)。このような不整形変形を抑止するためには、許容型開き量の最適化が必要である。すべての加工条件に関する最適化が必要であり、今後の課題である。

以上のように型開きと型閉じの一連のマイクロハイドロ成形において、不整形変形が生じない型閉じを完全に行いこのプロセスを繰り返すことによりさらに大きな張出し限界向上の可能性が期待できる。この結果からも成形に必要な加工内圧も低減できることが当然の結果として予測される。

<引用文献>

[1] H.Sato, D.Kobayashi, K.Manabe: Pro.TUBEHYDRO2015,(2015), pp.64-69

[2] 森茂樹、佐藤英樹、板井謙太、真鍋健一、マイクロチューブハイドロフォーミングシステムの開発と中空部材の十字成形、塑性と加工(日本塑性加工学会誌)、査読有、Vol.58、No.672、2017、pp.72-77

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Ken-ichi Manabe, Hideki Sato, Kenta Itai, Marko Vilotic, Kazuo Tada, Factors influencing the forming characteristics in micro tube hydroforming by ultra high-forming pressure, *Procedia Engineering*, 査読有, Vol.207, 2017, pp. 2334-2339. 10.1016/j.proeng.2017.10.1004
- ② 森茂樹、佐藤英樹、板井謙太、真鍋健一、マイクロチューブハイドロフォーミングシステムの開発と中空部材の十字成形、塑性と加工(日本塑性加工学会誌)、査読有、Vol.58、No.672、2017、pp.72-77

[学会発表] (計 7 件)

- ① 張 自成、真鍋 健一、古島 剛、高橋 智、局所型開きたわみ変形を許容する金型構造を用いたマイクロチューブハイドロフォーミング、日本機械学会関東支部 第 25 期総会・講演会、2019 年 3 月 18, 19 日、千葉工業大学 津田沼キャンパス、習志野市、千葉県
- ② Ken-ichi Manabe, Kenta Itai, Hideki Sato, Marko Vilotic, Satoru Takahashi, FE analysis of micro tube hydroforming process for cross- and T-shaped components, 8th International Conference on Tube Hydroforming, November 14-17, 2017, Bangkok, Thailand
- ③ 森 茂樹、板井健太、佐藤英樹、多田一夫、真鍋健一、高橋 智、極細銅管のマイクロハイドロ T 成形、第 68 回塑性加工連合講演会、2017 年 11 月 9-12 日、福井市、福井県
- ④ Ken-ichi Manabe, Hideki Sato, Kenta Itai, Marko Vilotic, Kazuo Tada, Factors influencing the forming characteristics in micro tube hydroforming by ultra high-forming pressure, 12th International Conference on Technology of Plasticity, September 17 – 22, 2017, Cambridge, UK
- ⑤ K. Manabe, M. Vilotic, K. Itai and K. Tada, FAILURES IN MICRO CROSS-SHAPED TUBE HYDROFORMING PROCESS, 14th International Conference on Fracture (ICF 14) June 18-23, 2017, Rhodes, Greece
- ⑥ Ken-ichi Manabe, Kenta Itai, Kazuo Tada, Fabrication of Micro T-shaped Tubular Components by Hydroforming Process, The 20th International ESAFORM Conference on Material Forming – ESAFORM 2017 – , April 26-28,2017
- ⑦ 板井謙太、佐藤英樹、真鍋健一、マイクロ銅管のクロス形ハイドロフォーミングにおける成形限界、平成 28 年度塑性加工春季講演会、2016 年 5 月 20-22 日、京都市、京都府

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者のみ

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。