

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360355
 研究課題名（和文） 微細結晶超塑性を利用した極細異形集合マイクロチューブの創製法開発
 研究課題名（英文） Development of creation method of extra fine strange appearance set microtube using minute crystal superplasticity
 研究代表者
 真鍋 健一
 首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：10145667

研究成果の概要：

本研究は金型工具を用いることなく、単に局部加熱だけを行って引抜く加工法の特徴である「横断面幾何学的相似変形原理」を応用し、それに適した超塑性特性を持つ管材料を用いて、従来にない複雑断面形状の極細異形集合マイクロチューブを創製する加工法の開発を目的とした。その結果、四角管と平角管からなる外管寸法が $533\mu\text{m} \times 923\mu\text{m}$ 、内管の一辺が $335\mu\text{m}$ の二つの穴をもつ微小な異形集合管の創製に成功し、その加工を実現するための方法と技術課題を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
平成19年度	2,700,000	810,000	3,510,000
平成20年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	10,300,000	3,090,000	13,390,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：マイクロチューブ、ダイレス引抜き、超塑性、異形管、集合管、FEM、幾何学的相似変形原理、伝熱

1. 研究開始当初の背景

現在、ナノ・マイクロテクノロジー全盛であり、マイクロからナノオーダーの材料開発を踏まえ、MEMS 関連の研究開発が活発である。実用レベルでは特に生化学分野への適用が多い。これまでの製造法は半導体技術に基づいたものが大半であり、材料的にはシリコン等で製造した型を用いるポリマー材料の射出成形が主流となっている。これらは確かに生化学業界で要求される使い捨てマイ

クロ機器部品などには格好であるが、ポリマー材料は金属材料に比べて耐薬品性等だけでなく、力学的性質の剛性・強度、疲労強度・寿命、信頼性の面でも MEMS 部品などの要求に十分に答えるのが難しい実情である。これに対して、上記の強度・機能特性を満たす金属を用い、金属の延性を利用する高い生産性と低コストを実現するマイクロ金属塑性加工技術が今後大いに重要になると考えられている。

しかしながら、それらのマイクロ金属塑性加工に関する研究開発はかなり立ち遅れている現状である。特に、棒材、板材を除いたチューブ材料を対象とした場合には、国内外といえども超塑性を利用したダイレス引抜きによる極細マイクロチューブの製造法は申請者の知る限りではまだ開発されていないだけでなく、着手すらされていない。

2. 研究の目的

上記の背景から、本研究の全体構想では「微細結晶粒超塑性を利用したダイレス引抜き原理による高品位マイクロ中空構造体の創製法開発」を目指している。その一環として、本研究では3年間で、先の科学研究費萌芽研究とその後の研究において、単一円管に対して解明・実現した超塑性ダイレスマイクロ引抜きの特徴である「横断面幾何学的相似変形原理」を応用し、従来にない高い生産効率を有する極細異形マイクロチューブの最適創製条件を解明し、それと超塑性の優れた拡散接合性を組合せて、これまでにない複雑断面形状のダイレスマイクロ極細異形集合マイクロチューブの創製開発を目的としている。

本研究では、まず原理検証のため Al-78Zn 超塑性合金を用い、また主研究対象としては生化学/医療機器、MEMS 部品用に、比較材としてステンレス SUS 材及び銅材を用いる。異形形状としては正方形断面を採用し、原理検証実験では一辺が $300\mu\text{m}$ のマイクロ角チューブの創製を目標とする。異形集合形状はそれを2個組合わせた日型断面のマイクロチューブを対象とする。今後、開発要求が増すと考えられる種々の断面形状、肉厚分布を有するマイクロチューブやそれらを組み合わせた集合(複合)マイクロチューブ/中空構造体の製造指針構築の基礎資料とする。

3. 研究の方法

本研究では、異形形状としては代表的な角管を取り上げる。またその集合管は基本となる2本の角管を束ねたものを対象とする。初年度は主として、ダイレス引抜きによる超塑性マイクロ角チューブの創製法と、超塑性の優れた拡散接合性を最大限利用した集合マイクロ角チューブの創製法に関する原理検証を行う。そのため、初年度の研究では、適する低温超塑性に優れ、過去での研究実績がある Al-Zn 系合金管(SPZ)を用いる。実験装置は科研費で購入した既設設備の高周波誘導ダイレス引抜き装置を用いて、単一のチューブは $300\mu\text{m}$ 角のマイクロ角チューブを目指す。

①各種管及び集合管のFEM変形シミュレーション

単一管と集合管に対して、加工中の熱伝達、

加熱冷却部の移動、材料のひずみ速度依存性を考慮したFEMモデルを作成しそれに基づく高度な熱-変形連成解析を行った。三次元モデルで、集合管では外管、内管との接触が伝熱特性に大きな影響を及ぼすので、それぞれ独立にモデル化した。使用した有限要素コードは市販の Marc-Mentat である。

②微細結晶超塑性管及びその集合管のダイレスマイクロ引抜き実験

角管とその多穴異形管(日型断面)及び2本の角管を束ねた異形集合管のダイレス引抜き実験を行った。局所加熱装置は既設設備の高周波誘導装置と新たに設計試作した柔軟性に富むレーザー加熱装置を用いた。供試材料は主として SPZ を、比較材として SUS 材と銅管 C1220 を用いた。

超塑性材の SPZ チューブは市販で流通していないため、直径 10mm の丸棒を購入し、それに直径 4mm の穴をドリルで開け、それを 250°C で押し出し後に、そのあと所定寸法まで引抜きをして、外角管と内角管をそれぞれ製造した。加熱装置は最大出力 2kW、周波数 2.2MHz のトランジスタ式高周波誘導加熱装置を使用し、加熱幅が変形挙動に及ぼす影響を調査するため、加熱コイル幅 HL が 6mm と 16mm の2種類の加熱コイルを用意した。温度に関しては試験片を耐熱の黒スプレーで塗り放射率を 90%として放射温度計で加熱コイルの中心に位置する部分を測定し、フィードバック制御によって 260°C に設定した。また冷却方法は、加熱幅の影響を顕著にするため、HL が 6mm では水冷とし、16mm では空冷とした。速度条件は、 V_2 を 0.1mm/s、引張速度 V_1 を 0.25mm/s に固定して行った。断面減少率 r の理論値は 60%である。実験では適正加工条件と限界断面減少率、多工程による限界寸法、集合管の可能性などを検討した。

③小型レーザーダイレスマイクロ引抜き装置の設計・試作とそれを用いたダイレス引き抜き加工

柔軟性が高く、スポット的な局所加熱までが可能な幅広い応用展開が期待できるように、半導体レーザー (35W) を搭載した小型ダイレスマイクロ引抜き装置を新たに設計・試作を行った。レーザー照射はその取り扱いが容易で照射位置や照射領域を自在に制御できるなど優れた特徴を有している。

マイクロ引抜きを対象とするため一方向照射の場合について単管及び集合管のダイレス引抜きの可能性について検討した。

④ダイレス引抜き加工の高速化と加工限界向上法について

実用化の観点から生産性を向上するためには、高速化が重要課題であるため、単管を

対象とした高速化の方法についての可能性に関する検討を行った。

⑤ダイレス引抜きチューブの評価について

本加工原理の妥当性を検証するため、「横断面幾何学的相似変形原理」の成立の可否を調査するため、断面形状・寸法、結晶組織を精密に計測しその相似則成立条件を検討した。

4. 研究成果

①ダイレス引抜ききのFEMシミュレーションモデルの妥当性

各種材料で種々の寸法・形状をもつ管に対して、ダイレス引抜きに対する理解と興味を高めるため、FEMによる熱・変形連成解析を行った。その結果について、FEMと実験結果について変形形状、荷重、温度分布等を総合的に比較した結果、その解析モデルは妥当であることを示した。

②微細結晶超塑性管及びその集合管のダイレスマイクロ引抜き実験

円管に対して成り立つ断面形状の「幾何学的相似変形原理」は一体管であれば角管を含めた他の断面形状や日型断面形状でも成り立つことを実験結果から確認した。**Fig.1(a), (b)**はHLを6mmにして、SPZをそれぞれ断面減少率60%で3回引抜いた後の横断面形状である。四角管は、初期の形状を維持したまま引抜かれているため、幾何学的相似則を満たしているといえる。一方、平角管は1パス後の形状が丸みをおびており、初期形状とは異なった形状で変形している。

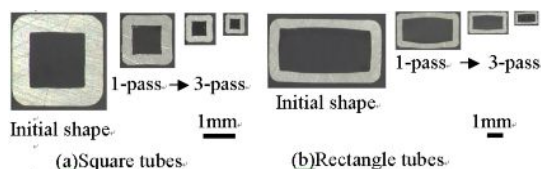


Fig.1 単管のダイレスマイクロ引抜き後の断面形状

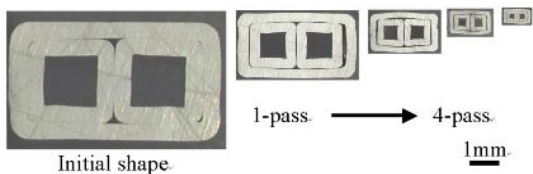


Fig.2 集合管のダイレスマイクロ引抜き後の断面形状(加熱コイル幅 HL=6mm)

Fig.2 は集合管(複合管)のダイレスマイクロ引抜き後の断面写真である。これより、複雑

断面形状の集合管では、隙間が見られることがわかった。このように一旦隙間が現れると、構成する管同士が強く接触せず伝熱特性が大きく変化することから適正温度分布を作り出すことが難しく、それが直接接合状況に影響を及ぼすことが明らかになった。そのため、異形集合管の創製には断面内の伝熱を考慮した適正温度分布を解明することの重要性が示すことができた。接合性は十分でないが本研究の提示したアイデアをほぼ満たすものであり、断面減少率60%を4回繰り返すことで、外管の形状が533×923μm、内管が一边335μmの微小な集合管の作製に成功した。

また、平角管、集合管に対してHLが変形挙動に及ぼす影響を調査した結果、**Fig.3**に示すようにHLが広い方が前の形状を維持することを示したが、幾何学的相似則の成立には至らなかった。

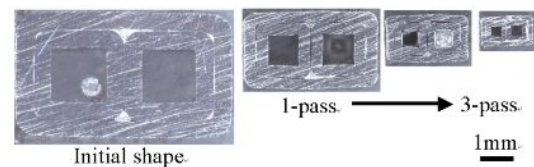


Fig.3 集合管のダイレスマイクロ引抜き後の断面形状(加熱コイル幅 HL=16mm)

③小型レーザーダイレスマイクロ引抜き装置の設計・試作とそれを用いたダイレス引き抜き加工

Fig.4に新たに設計試作した加熱源固定式のレーザーダイレスマイクロ引抜き装置の外観を示す。

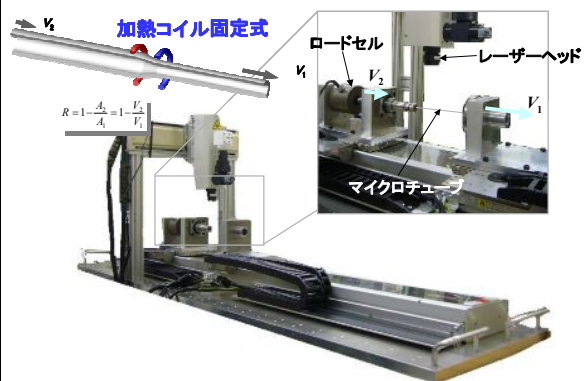


Fig.4 レーザーダイレスマイクロ引抜き装置の外観

外径520μmで肉厚が2種類の100μmと130μmのSUS304管と、外径500μmで肉厚130μmの銅管C1220を用いて一方向照射によるレーザー引抜きの可能性を検討した。その結果、両材料ともにダイレス引抜きに成功し

た。なお、レーザー加熱特有の課題として、高い熱伝導率の銅管は表面を黒体にしてエネルギー吸収を高めないと加熱しにくくその限界断面減少率が低くなることが明らかになった。高品質なダイレス引抜きには一方向レーザー照射は不十分で、周方向に均一加熱する照射方法の開発が必要との結論に達した。

集合管のレーザーダイレス引抜き実験は昨年度実績のSPZ材料で試みたが、初期角管の寸法がレーザー照射面積より大きく、加熱むらを生じた為に成功には至らなかった。

④ダイレス引抜き加工の高速化と加工限界向上法について

実用化の観点から高速加工の実現可能性を検討した。その結果、加工初期の不整形(不安定変形)を回避するように引抜き速度を徐々に加速する方法を採用することで高速化が可能になり、それによって加工限界も向上することを明らかにした。

また、集合管に関して適正加工条件をFEMで検討した。その集合管のモデリングでは外・内管の間に摩擦が存在しており、その摩擦力の評価とその接触を考慮した熱・変形連成解析には困難さが伴った。しかし得られた解析結果からは、接触状況の把握の重要性が明らかになり、熱的問題としては未接触領域がある場合、内部まで熱が伝わらない、また万が一熱が伝わった場合には逆に内部は冷却できない、等がわかり、伝熱制御の難しさが明らかになった。よって温度分布及び加工条件を確立する適正加熱方法・条件の解明には至らなかった。

最後に3年間の研究総括をした。本来は超塑性材料の高い拡散接合性を応用することを狙っていたが、接合界面を作り出すことが極めて難しくその実現には結び付けられなかった。将来に向けての課題としておきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

① Tsuyoshi Furushima, Syuhei Hirose and Ken-ichi Manabe, Effective Temperature Distribution and Drawing Speed Control for Stable Dieless Drawing Process of Metal Tubes, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 3, pp.236-246 (2009), 査読有。

② T. FURUSHIMA and K. MANABE: FE Analysis of Size Effect on Deformation and Heat Transfer Behavior in Microtube Dieless Drawing, Journal of Materials Processing Technology, 201, pp.123-127 (2008), 査読有

③ Tsuyoshi Furushima and Ken-ichi Manabe: A

Novel Processing for Microtubes – Superplastic Dieless Drawing Technique –, Proc.9th International Conference on Technology of Plasticity (9th ICTP 2008),(2008),CD-ROM, 査読有。

④ Tsuyoshi Furushima, Syuhei Hirose, Ken-ichi Manabe: Effective Temperature Distribution and Drawing Speed Control for Stable Dieless Drawing Process of Metal Tubes, Proc. 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P 2008), (2008),CD-ROM, 査読有。

⑤ T.FURUSHIMA and K. MANABE: Experimental and numerical study on deformation behavior in dieless drawing process of superplastic microtubes, Journal of Materials Processing Technology, 191, pp.59-63 (2007) 査読有。

⑥ 古島 剛、真鍋健一: アルミニウム合金押出異形中空材のダイレス引抜き、第57巻, pp. 351-356 (2007), 査読有。

⑦ T. Furushima and K. Manabe: Experimental study on multi-pass dieless drawing process of superplastic Zn-22%Al alloy microtubes, Journal of Materials Processing Technology, 187-188, pp. 236-240 (2007), 査読有。

⑧ T. Furushima and K. Manabe: FE ANALYSIS OF SIZE EFFECT ON DEFORMATION AND HEAT TRANSFER BEHAVIOR IN MICROTUBE DIELESS DRAWING, Proceedings of the 10th Advances in Materials and Processing Technologies, pp. 275-283 (2007), 査読有。

⑨ 古島剛、真鍋健一、新井淳、石橋明彦、日名子伸明、白井 崇: ダイレス引抜き加工の内面溝付銅管への適用、銅と銅合金、46巻 pp.111-115 (2007), 査読有。

⑩ 古島 剛、真鍋 健一: ひずみ速度感受性の温度依存性を考慮した超塑性ダイレスチューブ引抜きの熱-変形連成 FEM 解析、日本塑性加工学会誌 (塑性と加工)、第48巻 552号, pp. 51-55 (2007), 査読有。

⑪ 古島 剛、真鍋 健一、酒井 孝: 超塑性ダイレス引抜きによるマイクロチューブの創成実験、日本塑性加工学会誌 (塑性と加工)、第47巻 548号, pp.870-874 (2006), 査読有。

⑫ T. Furushima and K. Manabe: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON DEFORMATION BEHAVIOR IN DIELESS DRAWING PROCESS OF SUPERPLASTIC MICROTUBES, Proceedings of Int. Conf. On Advanced Materials & Processing Technol. AMPT 2006,(2006) CD-ROM 査読有。

[学会発表] (計7件)

① 古島 剛、野田雄太、真鍋健一: 金属マ

マイクロチューブのレーザーダイレス引抜きに関する研究、第59回塑性加工連合講演会講演論文集、(2008年11月9日)、広島大学(東広島市)

② 古島 剛、白崎 篤、真鍋健一：異形管の超塑性ダイレス引抜きに関する検討、平成20年度塑性加工春季講演会論文集、(2008年5月26日)、日本大学 生産工学部、(習志野市)

③野田雄太、古島 剛、真鍋 健一：マイクロチューブのレーザーダイレス引抜きに関する研究、日本機械学会関東学生会47回卒業研究発表講演会、(2008年3月) 東京海洋大学 越中島キャンパス

④白崎 篤、古島 剛、真鍋 健一：異形複合管の超塑性ダイレス引抜きに関する研究、日本機械学会関東学生会47回卒業研究発表講演会、(2008年3月) 東京海洋大学 越中島キャンパス

⑤ 古島 剛、真鍋 健一：マイクロチューブのダイレス引抜きにおける変形及び伝熱挙動に及ぼす寸法効果、平成19年度塑性加工春季講演会論文集、(2007年5月) 名古屋大学

⑥ 古島 剛、真鍋 健一、新井 淳：内面溝付銅管のダイレス引抜き加工、第57回塑性加工連合講演会講演論文集、pp. 439-440 (2006年11月)

⑦ 古島 剛、真鍋 健一：アルミニウム合金異形押し出し管材のダイレス引抜き、軽金属学会第111回秋期講演大会講演概要集、pp.35-36 (2006年5月)。

・吉原正一郎(YOSHIHARA SHOICHIRO)
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授
研究者番号：00311001

6. 研究組織

(1)研究代表者

真鍋 健一(MANABE KENICHI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：10145667

(2)研究分担者

・高橋 智(TAKAHASHI SATOSHI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：80260785
・古島 剛 (FURUSHIMA TSUYOSHI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：30444938
(平成19年度より参加)

(3)連携研究者(平成20年度のみ、平成18、19年度は研究分担者)

・楊 明 (YANG MING)
首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・教授
研究者番号：90240142