

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007 ～ 2008

課題番号：19760072

研究課題名（和文）

マイクロ加工における自由表面あれ挙動のその場観察とメゾスコピック変形機構解析

研究課題名（英文）

Mesoscopic Deformation Behavior and In-situ Observation of Free Surface Roughening in Micro Forming

研究代表者

古島 剛（FURUSHIMA TSUYOSHI）

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：30444938

研究成果の概要：

本研究は、マイクロ加工における自由表面あれ変形機構を明らかにするため、引張変形における自由表面あれの進展挙動を観察した。その結果、ひずみが大きい範囲では表面の凹凸が引き伸ばされ、粗さが低減することがわかった。またその結果を踏まえて材料の不均質性を考慮したメゾスコピック有限要素解析を行い、自由表面あれ挙動の予測を行った。その結果、材料の不均質性が小さく、結晶粒径が小さい材料が自由表面あれが抑制できることを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
19年度	1,600,000	0	1,600,000
20年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	180,000	2,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：マイクロ加工，自由表面あれ，メゾスコピック変形機構，有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

近年，MEMS(Micro Electro-mechanical Systems)の発展に伴い，超微細なマイクロチューブは，マイクロマシン用の機械・構造部品，冷却用マイクロノズル，無痛注射針，マイクロ熱交換器など，多種多様な用途をもつマイクロ部材として期待されている。現在，マイクロチューブの製造方法は，金型や工具を用いるダイス引抜きが中心である。しかし

ながら，従来の引抜き加工では，微細・高精度ダイスやプラグの創製方法，ハンドリング，寸法効果などの面で，マイクロチューブを創成する上で様々な弊害をもたらすと考えられる。

このような背景のもと，申請者はガラス細工で利用される極細管の製造原理である微細結晶粒超塑性を利用し，微細金型・工具を全く用いることなくマイクロチューブを創

成する超塑性ダイレスマイクロ引抜き(図1)を提案し、外径190 μm 、内径91 μm のマイクロチューブの創成に成功した(図2)。また横断面に幾何学的相似則が成立しており、超塑性マイクロダイレス引抜きが超微細寸法のマイクロチューブを創成する方法として有効な手法であることを示した。

しかしながら、マイクロダイレス引抜きでは金型面の転写による表面の平滑化が期待できない。金型と接触していない自由表面では、変形に伴い表面粗さが増大することが報告されており、特にこれはマイクロスケールにおける成形品の精度・品質の上で致命的な欠陥になる。一方、自由表面あれの度合いは、材料の結晶粒径、結晶方位などの微視組織によって変化することが報告されている。すなわち、良好な平滑面を有するマイクロチューブの創成には、加工プロセスの視点よりも材料の微視組織の視点から変形による表面性状・精度の変化を把握し、これらの挙動に及ぼす因子を明らかにする必要がある。これまでに申請者は、Al-78Zn 超塑性合金を用いてマイクロダイレス引抜きを行い、表面粗さの挙動を調査した。その結果、従来得られている結果とは異なり、表面粗さは縮管工程の初期段階にて増加するものの、徐々に減少することがわかった。また材料の結晶粒径が微細なほど自由表面あれの発達を抑制できることがわかった。しかしながら、自由表面あれの挙動に及ぼす影響因子は結晶粒径以外に、チューブ表面近傍に存在する結晶粒個々の回転や結晶粒の方位差による不均一性が大きく関連していると考えられるが、その詳細なメカニズムを不明であるのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、自由表面あれの抑制・低減メカニズムを明らかにし、それをもとに材料の最適な微視構造を明らかにすることを目的とする。もし上記を達成できれば、自由表面における良好な平滑面をもつマイクロチューブを創成するための製造指針になる。そこで本研究では、

- (1) 材料の微視組織(結晶粒径や結晶方位など)の観点から表面粗さの挙動を観察
 - (2) (1)の結果をもとに自由表面あれの抑制メカニズムを解明することを目的とする。
- 図3に本研究の概要を示す。

3. 研究の方法

(1) 超塑性マイクロダイレス引抜きにおける自由表面あれの評価

超塑性マイクロダイレス引抜きによって創製したマイクロチューブの表面性状の評価を行う。熱処理によって結晶粒径などの微視組織を変化させた材料を用意し、材料の微視組織の違いが表面性状に及ぼす影響を調

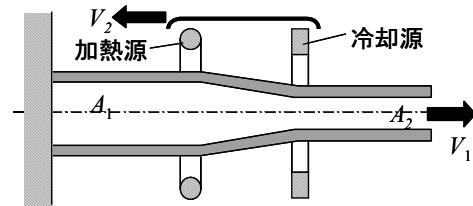


図1 超塑性マイクロダイレス引抜き概略図

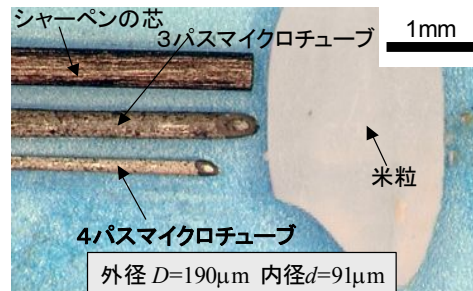


図2 マイクロチューブの外観写真

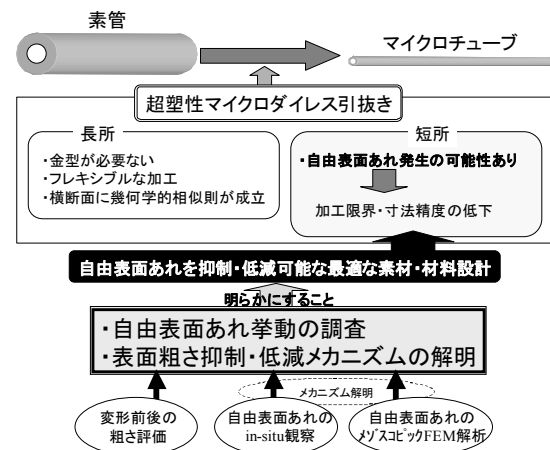


図3 本研究の概要

査し、基礎データを蓄積する。引抜きは既存設備の高周波誘導ダイレス引抜き装置を用いて行い、表面粗さの測定には、微細形状の3次元測定が可能な共焦点走査型レーザー顕微鏡を用いて表面性状の観察及び表面粗さの測定を行う。これらの結果を総括することによって、超塑性マイクロダイレス引抜き変形下における自由表面あれを抑制するための材料の条件を微視組織の観点から検討する。

(2) 不均質性を考慮したFEM解析による自由表面あれ挙動のメソスコピック解析

自由表面あれ挙動を解析するために結晶粒及び表面の凹凸を考慮したFEMモデルを作成する。表面粗さの発達挙動を力学的に取扱うためには、材料の微視的な不均一さを考慮する必要がある。本解析では材料内部に個々の結晶粒をモデリングし、各々の結晶粒(すなわち単結晶)の変形抵抗が結晶方位に

よって異なると仮定した不均質な材料モデルを用いる。結晶粒を考慮した不均質性モデルを図4に示す。すべての結晶粒の方位と変形抵抗の関係を解析に適用することは不可能に近いので、まずは任意の変形抵抗差を結晶粒に与えることによって解析を行う。以上のようにして作成した自由表面あれのFEMシミュレーションによって、微視構造（結晶粒径・結晶方位）が自由表面あれに及ぼす影響を定量的に調査し、自由表面あれの発達の抑制メカニズムをメゾスコピック解析によって明らかにする。

(3) 高温単軸引張試験中の自由表面あれ観察

自由表面に存在する結晶粒の変形挙動を顕微鏡を用いて観察する。チューブを用いた超塑性ダイレスマイクロ引抜きとの相関を考えた上で、試験片形状は表面粗さの測定が容易という観点から薄板を用い、ダイレス引抜きと同様の変形状態を再現した高温単軸引張試験を顕微鏡下で行った。この結果と前年度から得られた結果の比較を通して、自由表面あれの低減を実現化するために必要な表面付近の微視組織の適正条件を検討するとともに、自由表面あれの抑制メカニズムを解明する。

4. 研究成果

(1) 超塑性マイクロダイレス引抜きにおける自由表面あれの評価

図5は相当ひずみの増加に伴うAl-78Zn合金およびA6063-T5におけるチューブ内外面の表面粗さの変化を示したものである。3h焼戻し材($d_g=1.0\mu\text{m}$)および24h焼き戻し材($d_g=1.5\mu\text{m}$)は、それぞれ3パス目、4パス目を引抜くことができなかった。すべてのAl-78Zn合金は、1パス目($\epsilon_{eq}=1.098$)において表面粗さが増大するものの、2パス目($\epsilon_{eq}=2.196$)以降は減少し、ある一定値への収束がみられた。次に初期結晶粒径が、表面粗さに及ぼす影響について検討した。その結果、初期結晶粒径が大きな材料であるほど表面粗さは大きくなる傾向を示すことがわかった。特に素管($d_g=0.5\mu\text{m}$)の表面粗さは相当ひずみを付与しても初期表面粗さとほぼ変わらない値を示した。一方、A6063-T5材に関しては、相当ひずみの増加に伴い、表面粗さは減少することなく増大し、最終的に試験片は破断に至っている。

(2) 不均質性を考慮したFEM解析による自由表面あれ挙動のメゾスコピック解析

不均質性を考慮したFEM解析を行い、自由表面あれ挙動の調査を行った。その結果、図6のように不均質性を考慮することによって均質なFEMモデルでは表現できない表面

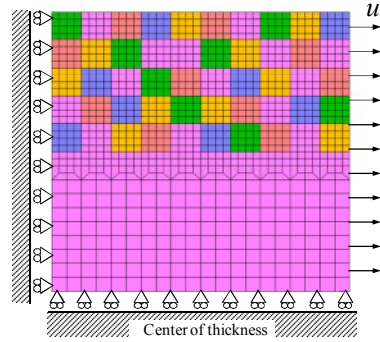
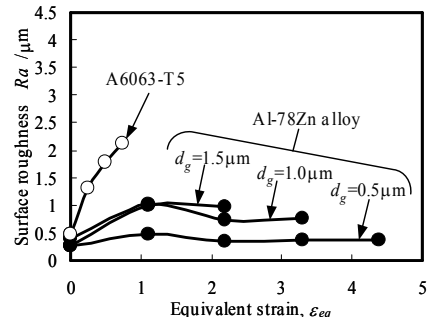
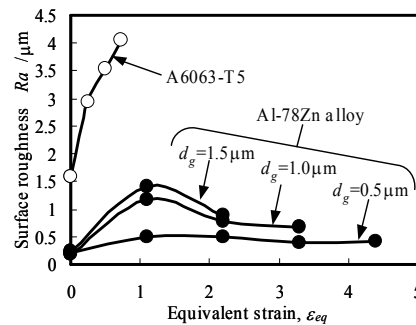


図4 不均質性を考慮したFEMモデル



(a) 内側



(b) 外側

図5 変形後のチューブ内外面の表面粗さ

凹凸の進展を表現することができた。ひずみ硬化依存性指数 n 値とひずみ速度依存性指数 m 値が自由表面あれ挙動に及ぼす影響を調査した。その結果、 n 値、 m 値が高い材料ほど自由表面あれ挙動が抑制されることを明らかにした。次に、結晶粒径が自由表面あれに及ぼす影響を調査した。その結果、結晶粒径が小さくなるにつれて自由表面あれも低減していることがわかった。また材料の不均質性が自由表面あれ挙動に及ぼす影響を調査した。不均質性を示す指標として材料内の各結晶粒の変形抵抗の標準偏差 σ_{sd} を用いて評価を行った。図7は相当ひずみと表面粗さの関係を示したものである。その結果、標準偏差 σ_{sd} が大きくなると、自由表面あれも大きくなり、標準偏差 σ_{sd} が小さくなると自由表面あれが小さくなることがわかった。

結晶方位に起因する材料の不均質性が自由表面あれに及ぼす影響を調査するために微視的な材料特性が評価可能な硬さ試験に

着目した。硬さのばらつきを評価した結果、マクロ的には均質な材料でもミクロ的には不均質であることがわかった。また材料の不均質性を考慮したメゾスコピック FEM 解析を用いて、不均質性が自由表面あれに及ぼす影響を調査した結果、材料が不均質であるほど、自由表面あれの度合いも大きくなることがわかった。

(3) 高温単軸引張試験中の自由表面あれ観察

図 8 は真ひずみの増加に伴う各超塑性材料の表面粗さの変化を最大高さ R_z の観点で比較したものである。その結果、表面粗さは A5083 合金の場合、ほぼ直線的に増加する傾向が見られた。一方 Zn-22Al 合金では低い増加割合で推移し、大変形域になるとほぼ一定の値へ向かう傾向が観られた。また、A5083 合金ではひずみ値が 1 を超えたあたりで破断しているのに対し、Zn-22Al 合金ではひずみが 2 を超えていても破断に至る事はなかった。また図 9, 10 は Zn-22Al 合金及び A5083 合金の試験片表面を観察したものである。Zn-22Al 合金では粗さの進展が抑制されているのに対し、A5083 合金では、結晶粒単位で粗さの凹凸が生じているのが確認できる。

一般に、相当ひずみの付与に伴い自由表面あれは以下の式によって表されることが知られている。

$$Ra = cd_g \varepsilon_{eq} + R_0 \quad (1)$$

ここで、 c : 材料定数、 R_0 : 初期表面粗さである。しかしながら、本実験結果は式(1)とは一致しなかった。これは式(1)が成立するのが $\varepsilon_{eq} < 0.6$ といわれているからである。今回用いた超塑性材料は巨大な延性を有しているため、式(1)の範囲で単純に比較することができない。一方、小坂田らは自由表面あれを考慮した式(1)に対して、さらに Fig. 5 に示すような表面積の変化を考慮した次式を提案している。

$$Ra = cd_g \frac{S_0}{S_1} \varepsilon_{eq} + R_0 \quad (3)$$

ここで S_0/S_1 は表面積の変化を考慮した係数で、単軸引張変形の場合 $S_0/S_1 = 1 - \varepsilon_{eq}/2$ である。この結果から引張変形による表面積の広がりを考慮することで、表面粗さの凸部が引き伸ばされて低下する現象を式(2)によって表現することができる。式(2)から表面粗さは極値をもつことがわかる。すなわち、極値に達するまでは表面積の変化による表面粗さの減少よりも自由表面あれが支配的であるため、表面粗さは増大する傾向を示すが、極値を超えると表面積の変化による影響が支配的になり、表面粗さは減少傾向を示すことになる。また結晶粒径によって表面粗さの増大割合が決まることも式(2)で説明することが

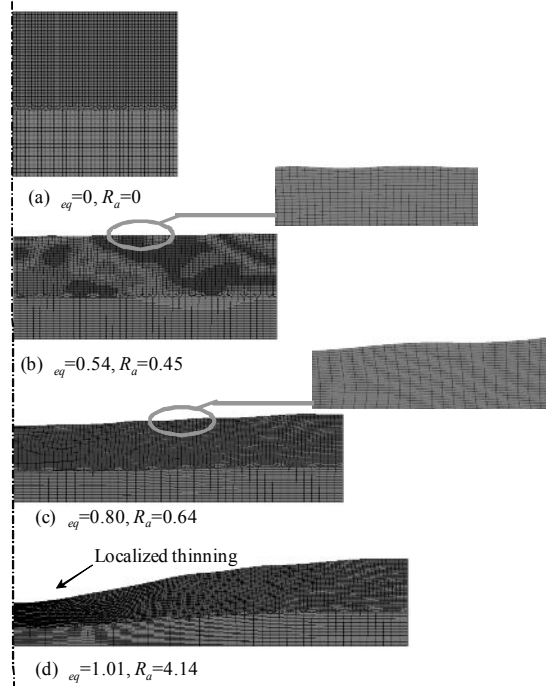


図 6 不均質性を考慮した FEM モデルにおける自由表面あれ挙動

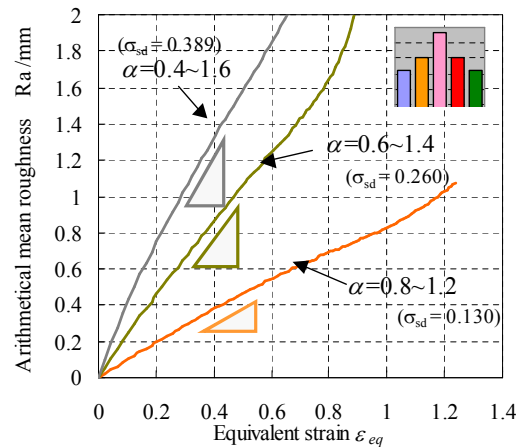


図 7 自由表面あれ挙動に及ぼす材料の不均質性の影響

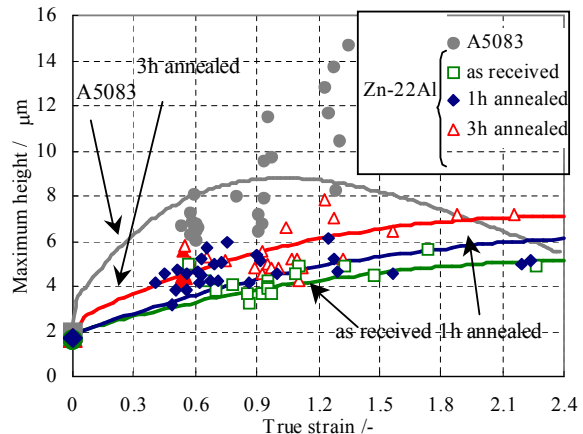


図 8 高温引張変形における自由表面あれ挙動

でき、結晶粒径が大なる材料ほど、表面粗さは大きくなる傾向を示すことがわかる。また初期の表面粗さが小さい材料ほど、変形後に得られる表面粗さも小さくなることも予測される。

以上の結果から、実験で得られた傾向は、小坂田らが提案する式(2)によって説明することができた。すなわち、ダイレス引抜きにおける超塑性材料の適用、特に微細結晶粒かつ良好な初期表面粗さを有する素管の選定は、加工性を向上させることだけでなく、超微細かつ高品位なマイクロチューブを創成する一つの指標であると考えられる。

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 2 件)

- (1) T. Furushima, K. Manabe, Experimental and Numerical Study on Deformation Behavior in Dieless Drawing Process of Superplastic Microtubes, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 191, pp. 59-63 (2007)査読有
- (2) T. Furushima and K. Manabe, Experimental Study on Multi-Pass Dieless Drawing Process of Superplastic Zn-22% Al Alloy Microtubes, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 187-188, pp. 236-240 (2007)査読有

[学会発表] (計 7 件)

- (1) T. Furushima, S. Aleksandrov, K. Manabe, Roughness Evolution on Free Surfaces of Micro Material with Strain Rate Sensitivity in Dieless Forming, Int. Conf. on New Forming Technology (2nd ICNFT), Bremen, Germany (2008)
- (2) T. Furushima, K. Manabe, S. Aleksandrov, FE Mesoscopic Analysis of Roughness Evolution on Free Surface of Thin Sheet Metals with Strain Rate Sensitivity, Asian Workshop on Nano/Micro Forming Technology, Hokkaido, Japan (2008)
- (3) 森井 暢、古島 剛、真鍋 健一、超塑性材料の引張変形における自由表面あれ挙動に関する研究、日本機械学会関東学生会 47 回卒業研究発表講演会、東京海洋大学越中島キャンパス (2008)
- (4) T. Furushima, K. Manabe, S. Aleksandrov, Effect of Statistical Distribution of Grain Properties on Development of Free Surface Roughness, The XXXVI International Summer School, Advanced Problems in Mechanics Conference, St. Petersburg, Russia (2008)

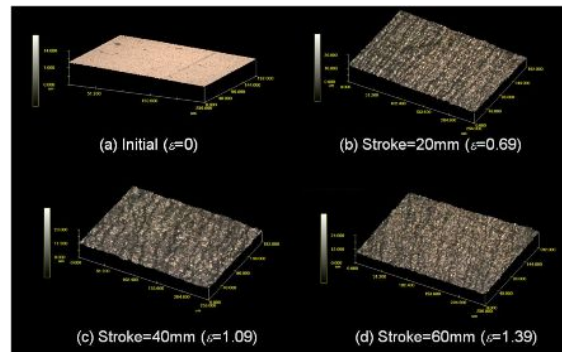


図 9 Zn-22Al 合金の表面観察写真

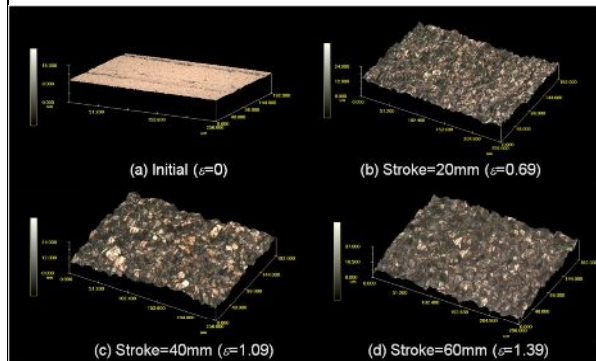


図 10 A5083 合金の表面観察写真

- (5) 古島 剛、森井 暢、真鍋 健一、超塑性材料の引張変形における自由表面あれ挙動に関する研究、平成 20 年度塑性加工春季講演会、習志野 (2008)
- (6) T. Furushima, K. Manabe, S. Aleksandrov, Effect of Microscopical Inhomogeneity of Material on Macroscopic Deformation Behavior, 第 58 回塑性加工連合講演会、東広島(2008)
- (7) 真鍋 健一、古島 剛、中田 浩司, S. Aleksandrov, 硬さ統計分布による材料の不均質性評価を用いた自由表面あれ予測モデリング、第 58 回塑性加工連合講演会、東広島(2008)

6. 研究組織

(1)研究代表者

古島 剛 (FURUSHIMA TSUYOSHI)
 首都大学東京・理工学研究科・助教
 研究者番号：30444938

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし