

金属極細管の空引きにおける変形挙動と表面粗さ進展

早稲田大学 基幹理工学研究科

教授 鈴木 進補

(2022年度 一般研究開発助成 AF-2022016-B2)

キーワード：金属極細管，空引き，表面粗さ

1. 研究の目的と背景

外径 2 mm 以下の金属極細管は、無痛注射針やマイクロ熱交換器等の様々な用途への適用に向けて開発が進められている。現在、高性能化を目的として、薄肉化・細径化・表面の平滑化を実現する金属極細管の製造技術が強く求められている。従来、伸管方法として、空引きはプラグ引きよりも細径化に適しているが、薄肉化が課題であった。近年、伸管加工条件の自由度が高いノンスリップ型伸線機が開発され、従来困難であった金属管長さの変化率の高精度制御が可能になり、薄肉化が実現された¹⁾。現在、金属極細管の製法は、極細化への可能性が拡大され、新展開を迎えており、最近の当該分野の動向は 岸本ら²⁾の解説記事に詳しい。

ダイレス、セミダイレス引抜きとして、古島ら³⁾により、局所加熱によるダイレス、セミダイレス（ダイスなし、マンドレル使用）引抜きの研究（表面あれを含む）が精力的に進められている。空引きにおける表面あれとして、吉田ら⁴⁾により、直径約 1.5 mm、肉厚約 0.2 mm の金属細管の空引きにおける表面あれが示してきた。

極細管の肉厚は、数十 μ m 程度であり、結晶粒径と同程度である。したがって、結晶粒ごとに変形挙動が異なり、その影響を大きく受ける。具体的には、同じ応力場において、降伏しやすい結晶粒が存在し、巨視的には降伏応力に達していないくとも、局所的に降伏する⁶⁾。したがって、ノンスリップ型伸線機を用いた場合に与えた前方・後方張力により、ダイス内以外でも塑性変形を生じる⁶⁾。また、結晶粒ごとの変形挙動の違いが表面粗さ進展を生じる⁷⁻⁸⁾。さらに、結晶の異方性を大きく受け、肉厚ひずみに対する周ひずみで定義されるランクフォード値が大きいほど引細りが顕著に発現する⁶⁾。このようなマイクロ効果を考慮した変形の詳細な解明が要求されている。

空引きは、内面が自由表面となり、粗さを制御するのが困難である。一方、外表面はダイスに拘束されており、かつ肉厚方向の結晶粒も限定的であることから、内面は、外表面の変形の制約を受けると予想される。このように、拘束された外表面により、自由表面の変形を制御するセミダイレス加工と考えることができ、その方法論確立が求められる。加工条件の決定や、製品特性の予測には、上述のような結晶方位と表面粗さ進展の関係、変形量（塑性ひずみ）と表面粗さの関係の定式化が必要となる。

よって本研究は、空引きによる金属極細管加工において、変形挙動と結晶方位に基づいた表面粗さ発達の基礎的特

性を、巨視的および微視的視点から明らかにすることを目的とした。具体的には、下記を明らかにする。

1. 定量的評価による表面粗さ進展および内外面の相関（巨視的）：空引き工程を入口側、ダイス中、および出口側に領域分割し、粗さ（算術平均粗さ R_a ）の変化、内外面での R_a の相関を明らかにする。
2. 変形量（塑性ひずみ）と表面粗さ進展との関係（巨視的）：1 で得られた結果を、各工程での塑性ひずみ量と粗さの関係式による定式化を試みる。
3. 結晶方位と表面粗さ進展の関係（微視的）：実験により、高さ分布と結晶方位分布との関係を明らかにする。さらに、結晶塑性有限要素解析(CPFEM)により、沈み込みや盛り上がりを生じる周囲の方位との関係を明らかにする。

本報告書の内容は、すでに二件の論文⁹⁻¹⁰⁾として発表している。本報告では、その要点をまとめた。

2. 表面粗さ進展および内外面の相関の定量的評価

プラグ引きにより作製した SUS304 極細管（外径 1.50 mm、肉厚 0.045 mm）を 1273 K で 60 min 保持により焼鈍し、厚さ方向に結晶が 1 個程度になるようにしたものを素管として用いた。図 1 に示すノンスリップ型伸線機を模したドローベンチを用い、入口側に対する出口側の速度を 1.14 倍に高精度制御し、前方および後方張力を測定しながらダイス半角 4° のダイスで空引きを行い、極細管を得た。また、伸管の途中止め実験も行った。

素管、途中止め材および伸管材の内面および外面上における高さ分布をレーザー顕微鏡（KEYENCE 社、VK9510）により測定した。途中止め材については、ダイスの入口側、ダイス内、出口側をレーザー顕微鏡で観察し、引抜き過程の凹凸変化を観察した。測定領域のスキャナ長は、垂直方向 286.7 μ m、水平方向 213.5 μ m とした。高さ分布を求める際に、管の曲面を二次曲線として補正した。

素管、途中止め材、および伸管材の周方向断面を 3D 顕微鏡(KEYENCE、VHX-5000)により観察した。外径を MATLABTMにより計算した。内径と外径におけるピクセル数を、スケールが取得された画像のピクセル数を使用して寸法に変換した。計算した内径と外径から、定常体積の法則を用いて伸管方向のひずみ量を計算した。

内外表面の不均一性の対応関係を評価するために、伸管方向断面を観察した。内外表面は研磨中の変形を抑制するためにメッキした。管に樹脂を充填後、断面が管の中心を

通過するように研磨し、3D顕微鏡を使用して撮影した。内面および外面を鏡面研磨し、Electron Back Scatter Diffraction Pattern (EBSD, TSL ソリューションズ株式会社, OIM7) により解析し、逆極点図結晶方位マップを得た。円周方向(CD)および引抜き方向(DD)に垂直な断面上の粒子を観察した。円周および厚さの断面の逆極図(IPF)マップは EBSD によって得た。円周方向と肉厚方向の各粒子の円相当径は、OIM 解析(EDAX, ver.7.3.1)によって計算した。

円周方向と肉厚方向の結晶粒サイズはそれぞれ $41.3 \mu\text{m}$ と $33.3 \mu\text{m}$ であった。円周方向の断面に対して、約 30 個、肉厚方向には 1.6×10^5 個の粒子が見積もられた。円相当径分布は正規分布に近かったため、計算には正規分布の 95% 信頼区間を使用した。

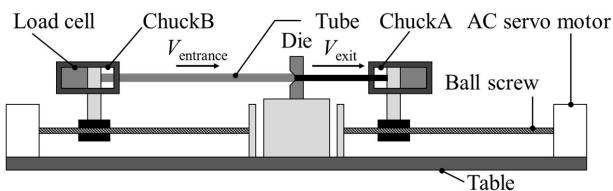


図 1 ドローベンチ概略図^{9)*1}

代表的な実験結果として、図 2 に 3D 顕微鏡で撮影した途中止め材外表面および内表面を、図 3 にそれに対応するレーザー顕微鏡で取得した高さ分布を示す。本実験結果から、下記を明らかにした。

- (1) 内外表面のダイス入口側では、単軸引張により表面粗さが増加する。内外表面の凸面と凹面の組み合わせ領域を分割した結果、素管では、結晶粒サイズよりも小さい領域となり配置は不規則である。一方、ダイス入口側における凸面および凹面部分の最大サイズは結晶粒サイズよりも大きくなる。
- (2) ダイス内の管内外表面の高さの相対頻度分布とその相関は、外表面において凹凸が抑制された高さが最高値となることを示す。
- (3) ダイス内では、外面がダイスとの接触によって滑らかにされる。内外面の高さ分布の形状に違いがないことから、同時に内面の粗さの増加も抑えられている。
- (4) ダイス出口側の凹凸の最終的な高さは、内面と外面で同量のひずみを伴う単軸引張試験の値(3.で説明)よりも低い。内面と外面の高さの組み合わせを示す面積は、金型出口側の粒径よりも小さい。

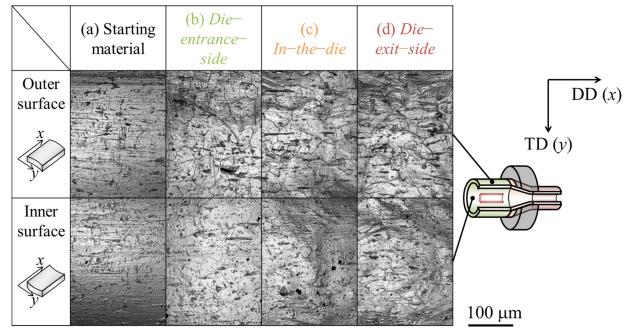


図 2 3D 顕微鏡で撮影した途中止め材外表面および内表面^{9)*1}。 (a) 素管, (b) ダイス入口側, (c) ダイス内, (d) 出口側。 DD : 伸管方向, TD : 肉厚方向。

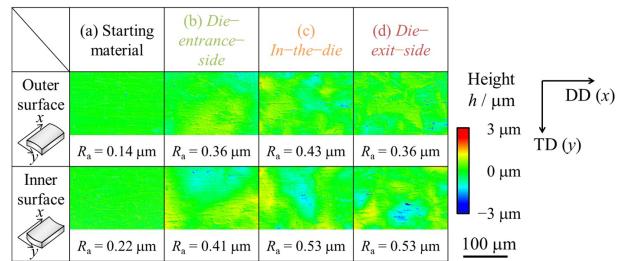


図 3 レーザー顕微鏡で取得した途中止め材外表面および内表面における高さ分布^{9)*1}。 (a) 素管, (b) ダイス入口側, (c) ダイス内, (d) 出口側。 R_a : 算術平均粗さ, DD : 伸管方向, TD : 肉厚方向。

3. 変形量と表面粗さ進展との関係

最大ひずみ時の塑性ひずみを測定するため、万能試験機(島津製作所、オートグラフ AG-25TB)を使用して、素管の負荷-除荷引張試験を実施した。結晶粒数が非常に少數である極細管のスプリングバックが、単軸引張変形後の除荷の際に非線形となる¹⁰⁾ため、除荷後のひずみから塑性ひずみを求めるために行った。初期のチャック間距離は 100 mm に設定し、5 kN 細線つかみ具(島津製作所、343-07529-01)を用いて試料をチャックした。試験速度は 5 mm/min および 300 mm/min とした。試験力は 5 kN のロードセル(島津製作所、SLBL-5kN)により測定した。クロスヘッド変位をストロークとし、上記の伸管材の引張方向におけるひずみと同じになるように 8 mm または 14 mm に設定した。

試験力は、伸管時にダイス入口側で 50–55 N であるため、45–60 N に設定した。試験力が最大値に達した後は、変位を制御している油圧ポンプを停止させ、徐々に減少させた。引抜き方向の塑性ひずみ量を 0.08 および 0.14、初期長さを 100 mm とした。負荷-除荷試験後の試料における内面および外面の高さ分布も伸管材同様に測定した。

図 4 に一例として最大試験力を 50N として負荷-除荷試験で得られた真応力-真ひずみ曲線を示す。また、図 5 に外表面における算術表面粗さ R_a と塑性ひずみ ε_p との関係を示す。

*1 © 2024 by Sakaguchi H., Kishimoto T., Suematsu S., Tashima K., Kano K., Kajino S., Gondo S., Suzuki S.. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

本研究の結果により、ダイス入口側および出口側では、単軸引張と同様の表面粗さ増加傾向がみられ、空引きにおけるダイス入口側および出口側における R_a は、塑性ひずみ ε_p の 1 次関数で近似できることを示した。これは、すでに報告されている板材の引張変形における関係¹¹⁾と一致する。

4. 結晶方位と表面粗さ進展の関係

先行研究¹³⁾と同様の結晶塑性有限要素解析プログラムを使用した。実験で使用した SUS304 は面心立方構造(FCC)を有するため、FCC すべり系は{111}<101>とした。また、従来と同様に計算の簡略化と計算コストの低減のため、直方体内に円筒を埋め込み、このモデルを 4 分割して解析するモデルを作成した¹²⁾。本研究の管材は内外面ともに曲面を有するが、計算の簡略化のため、両面の曲率は無視した。加工硬化を考慮するため転位密度増加モデルを適用した。材料定数は上記の引張試験から得た。モデルとメッシュの生成には、ABAQUS StandardTM (Ver. 6.14, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay) を使用した。作成したモデルを 2130 個の要素に分割した。

モデルでは、伸管方向と円周方向にそれぞれ 1.14 倍と 0.909 倍の変位を与えた。外面方向はダイスとの接触により拘束される。また、変形の対称性を考慮し、円柱を含む切断面における伸管方向(DD)と周方向(TD)は固定し、 x 方向と z 方向の変位は 0 に固定した。次に、作成したモデルに結晶粒を割り当て、特定の方位を持つ結晶粒が均質体に埋め込まれたモデルを作成した。均質体は、各要素に乱数から生成されたランダムな方位を割り当てることで作成した。中央の埋め込み結晶粒には、表面粗さを抑制する方位の一つと考えられる{102}方位¹⁴⁾を適用した。

CPFEM 解析の結果、下記を明らかにした。

- (1) ND に対して垂直な{102}の結晶粒は、周囲に比べて弾性変形が少ないため、周囲よりも滑らかとなる。
- (2) 肉厚方向の要素数によって引き起こされると考えられていたねじれ変形は、本研究では見られなかった。したがって、ソリッド要素を用いて計算する際、対称面の変位がゼロに固定されていれば、ねじれ変形は発生しない。
- (3) 従来研究にて表面粗さを抑制する方位は、解析においても周囲に対して平滑である。また、1/4 に分割したモデルでは、分割した領域に与えられた境界条件から、分割面では変位が 0 になるため過拘束が生じる。
- (4) 肉厚方向に含まれる要素数が多いほど、管内の表面粗さを正確に模擬できる。本研究においては、肉厚方向の要素数が 6 個の時が、管内の表面粗さを模擬するために最適な条件であった。

5. 結言

ダイス中における管の表面粗さは、外面の平滑化に伴い、内面も表面粗さ増加が抑制された。これにより、空引きに

おける算術平均粗さ変化の予測の指針となる R_a と塑性ひずみ ε_p の一次式の関係を見出した。

表面粗さを抑制する方位{102}は、周囲がランダムな結晶方位を持つ多結晶体であるにもかかわらず、表面粗さ{102}の周囲が沈み込む変形となると明らかにした。

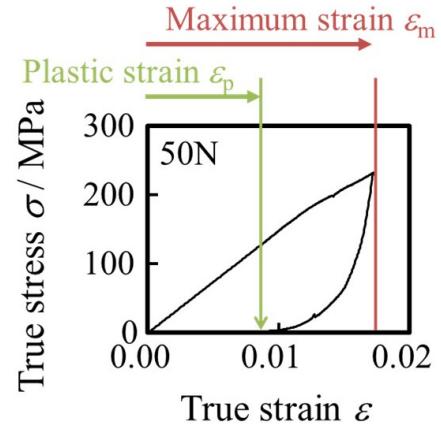


図 4 最大試験力を 50N として負荷一除荷試験で得られた真応力-真ひずみ曲線^{9)*1}。最大試験力におけるひずみを ε_m とし、除荷後のひずみを塑性ひずみ ε_p とした。

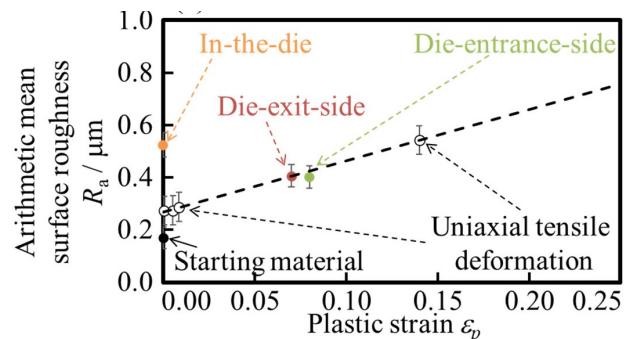


図 5 外表面における算術表面粗さ R_a と塑性ひずみ ε_p との関係^{9)*1}。色プロット：ダイス入口側、白プロット：単軸引張。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2022 年度一般研究開発助成(AF-2022016-B2)の多大なるご支援を受け実施いたしました。ここに謝意を表します。また、本研究は主として、当時早稲田大学基幹理工学研究科に在学していた坂口颯博士（現 東京大学）が博士学位論文として推進しました。本研究を遂行するにあたり、名古屋工業大学 岸本拓磨助教、京都大学 浜孝之教授、早稲田大学 浅川基男名誉教授、産業技術総合研究所 梶野智史研究員、権藤詩織研究員、(株)エフ・エー電子 竹本康介会長、田島憲一社長、(株)富士精工 酒本藤雄社長、村松雄基様、早稲田大学 三野峻様はじめ材料評価にご協力くださった技術職員の皆様、京都大学大学院 那須翔太様、洞田真佑様、鈴

木研卒業生 末松咲希様、狩野弘一様、行宗進太郎様に多大なご尽力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kishimoto T., Gondo S., Takemoto K., Tashima K., Suzuki S., J. Manuf. Sci. Eng., Transactions of the ASME, 141 (2019), 111008.
- 2) Kishimoto T., Sakaguchi H., Suematsu S., Tashima K., Kajino S., Gondo S., Suzuki S., Metals, 10 (2020), 1315, 1-26.
- 3) 岸本拓磨・古島 剛: ぶらすとす, 5-55(2022), 432.
- 4) 古島剛・真鍋 健一: 塑性と加工, 50-586 (2009), 981.
- 5) 吉田一也: 塑性と加工, 46-533 (2005), 432.
- 6) Kishimoto T., Suematsu S., Sakaguchi H., Tashima K., Kajino S., Gondo S., Suzuki S., Mater. Sci. Eng. A, 805 (2021), 140792.
- 7) Suematsu S., Kishimoto T., Sakaguchi H., Tashima K., Kajino S., Gondo S., Suzuki S., Conf. Proc. METAL 2021 - 30th Anniv. Int. Conf. Metall. Mater., (2021), 282.
- 8) Kishimoto T., Sakaguchi H., Suematsu S., Tashima K., Kajino S., Gondo S., Suzuki S., Outer diameter and surface quality of micro metal tubes in hollow sinking, Proc. Manuf., 47 (2020), 217.
- 9) Sakaguchi H., Kishimoto T., Hama T., Tashima K., Suzuki S., Mater. Sci. Forum, 1116(2024), 3.
- 10) Sakaguchi H., Kishimoto T., Suematsu S., Tashima K., Kano K., Kajino S., Gondo S., Suzuki S., Materials, 4320(2024), 1.
- 11) Mahmudi R., Mehdizadeh M., J. Mater. Process Technol. 80-81(1998), 707.
- 12) 末松咲希・坂口颯・岸本拓磨・浜孝之・鈴木進補: 日本機械学会第 29 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2021) 講演論文集, (2021), 301.
- 13) Hama T., Yagi S., Tatsukawa K., Maeda Y., Takuda H., Int J Plast. 137(2021), 102913.