

補助事業番号 2024M-460

補助事業名 2024年度多様な断面形状の管材製造を可能とする拡管抽伸加工の開発補助事業

補助事業者名 電気通信大学大学院情報理工学研究科 梶川翔平

1 研究の概要

本研究では、拡管抽伸加工を用いて、多角形管および偏肉管の成形技術を開発した。多角形プラグを用いた実験と解析により、プラグの角数や半角、周長などの形状が成形性に与える影響を明らかにし、JIS規格に準拠した四角形管の成形に成功した。三角形管や六角形管など、異なる角数の成形にも適用可能であった。偏肉管の成形では、偏心プラグの偏心量により偏肉率を制御でき、20%程度までの偏肉率を有する偏肉管の成形が可能であることを示した。また、プラグのテーパ長さを適正化すると、成形限界と偏肉率が上昇することを明らかにした。この成果は、高能率管材の製造技術として、自転車やモーターサイクルなどの部品製造への適用が期待される。

2 研究の目的と背景

自転車やモーターサイクルの構造部材や排気管は、様々な形状の管から製造されている。所望の機能やデザインを満たすにあたっては、あらゆる断面形状の管を製造する必要があるが、多角形管や周方向に肉厚分布を有する偏肉管など、現状の工法では加工が難しい形状がある。このような形状が求められる場合、多工程にて徐々に変形させる、または、複数部品を接合することによって製造する。しかしながら、工程数の増加にともなう工具や部品点数、人件費の増加が問題であり、少ない工程で効率的に加工することが望まれる。

本研究では、多角形管や偏肉管など、現状の管の加工方法では効率的に製造することが難しい断面形状を有する管を製造する方法として、拡管抽伸加工を提案する。提案工法によって、円管から高精度な多角形管や様々な偏肉率を有する偏肉管を成形するため、工具形状を適正化する。

3 研究内容

(1) 拡管抽伸による多角形管の成形 (<http://www.mt.mce.uec.ac.jp/jka.html>)

多角形管の成形に対する拡管抽伸加工の適用を検討した。図1に加工の概要を示す。まず、四角形管の成形を対象として、適正なプラグ形状の調査を行った。図2に、有限要素解析にて確認された成形不良の例を示す。プラグの周長 l_p が適正な場合、四角形管を成形可能である一方、 l_p が小さすぎる場合は、図2(a)に示すように、プラグと管の間に隙間 g 、 l_p が大きすぎる場合は、図2(b)に示すように、角部にて局所的な減肉が生じた。したがって、隙間と局所減肉の発生が抑制する必要がある。図3に、プラグ半角 β が減肉率 γ および隙間 g の最大・最小値に及ぼす影響を示す。 γ に着目すると、 β の増加にともなって、最大値と最小値の差が大きくなり、角部において局所的に減肉しやすくなった。 g に関しても、 β の増加にともなって増加する傾向を示した。以上の

結果より、局所的な減肉や隙間を抑制するにあたって、 β は小さい方が良い。解析結果に基づき、多角形管の成形実験を行った。図4に得られた成形品の断面を示す。適正形状のプラグを用いる

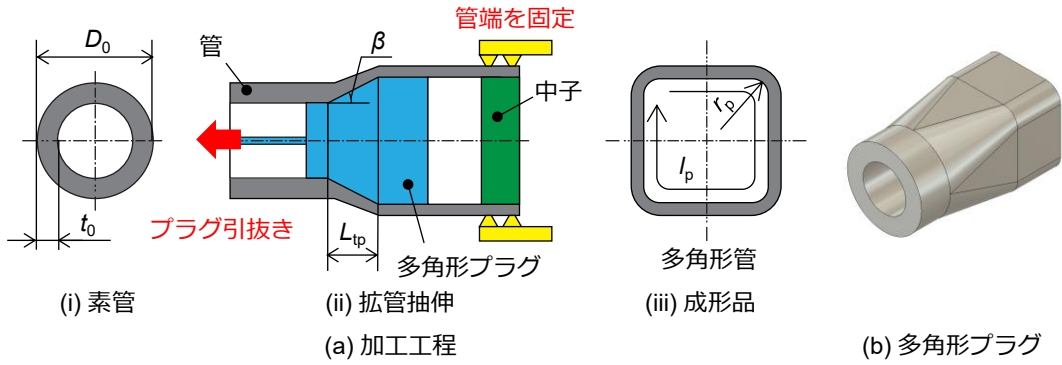


図1 拡管抽伸による多角形管の成形

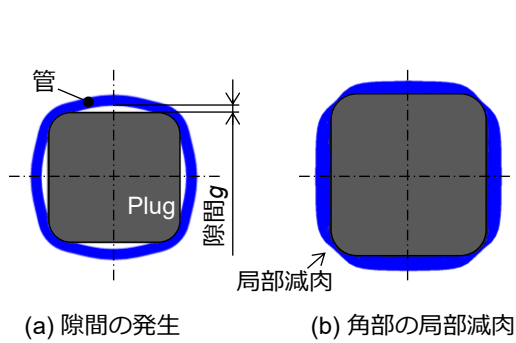


図2 多角形管成形において生じる不良

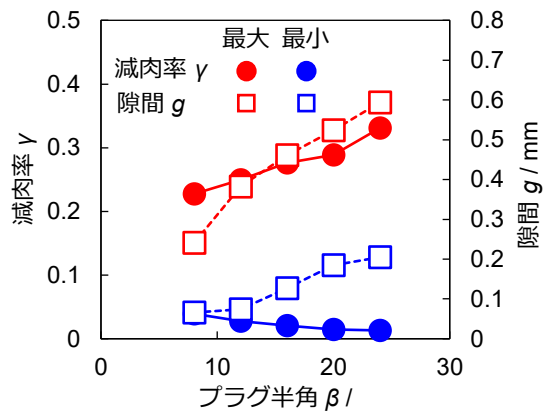


図3 減肉率 γ および隙間 g の最大・最小値に及ぼすプラグ半角 β の影響 (アルミニウムA1070, 四角形, プラグ周長 $l_p = 97$ mm, プラグコーナ半径 $r_p = 4$ mm)

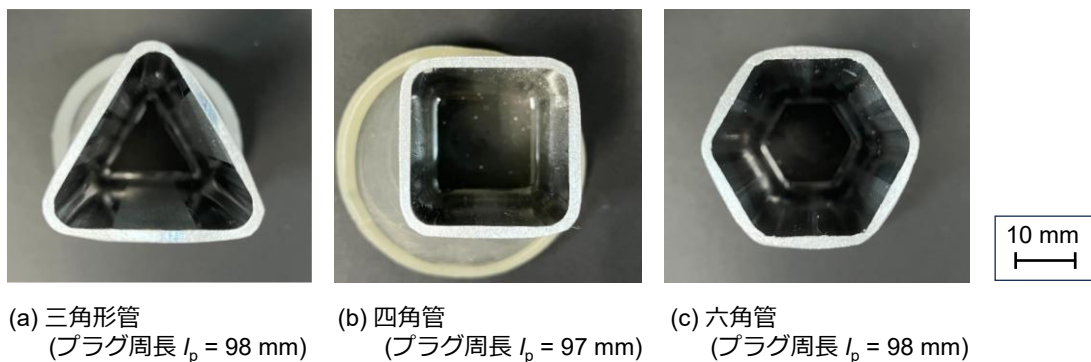


図4 実験にて得られた多角形管の断面(プラグ半角 $\beta = 8^\circ$, プラグコーナ半径 $r_p = 4$ mm)

ことよって、JIS G 3466に規定されている一般構造用角形鋼管の精度を満たす四角形管を成形できた。三角形管や六角形管に関しても、四角形管成形における適正プラグと同様の周長 l_0 および半角 β のプラグを用いることよって、成形が可能であった。

(2) 拡管抽伸による偏肉管の成形 (<http://www.mt.mce.uec.ac.jp/jka.html>)

偏肉管の成形に対する拡管抽伸加工の適用を検討した。図5に加工の概要を示す。偏心拡管プラグは、先端部の軸に対して後端部の軸を e_p ずらした形状となっている。周方向に偏肉を有する管壁を周方向に伸ばす場合、薄肉部にて変形が集中するため、より薄肉化し、結果として偏肉が促進される。このため、偏肉管を成形するにあたって、拡管抽伸加工は適した工法である。プラグ形状が成形性や偏肉率に及ぼす影響を調査した。

図6に、偏肉拡管プラグを用いて拡管抽伸によって成形した管の断面を示す。周方向に肉厚が変化する管を成形できた。図7にプラグの偏心量 e_p が偏肉率 λ に及ぼす影響を示す。プラグ偏心量 e_p の増加にともなう λ は増加し、 $e_p = 1.8$ mmの際に $\lambda = 0.19$ の偏肉管を成形できた。また、

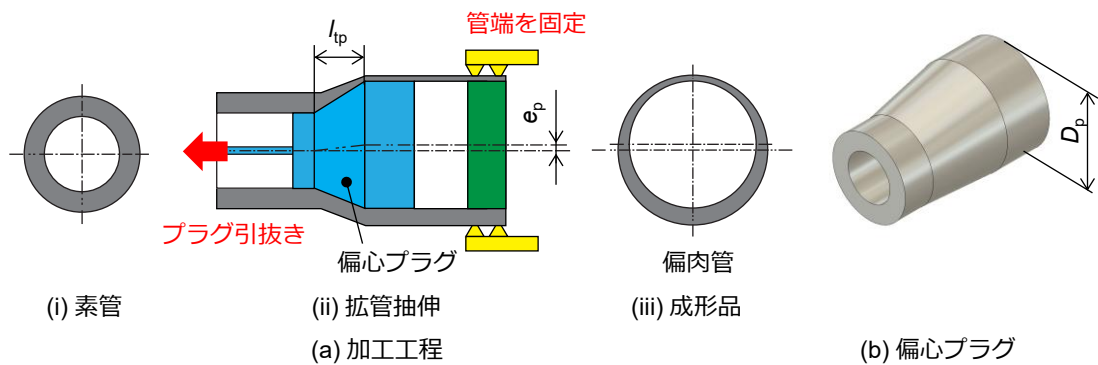


図5 拡管抽伸による偏肉管の成形

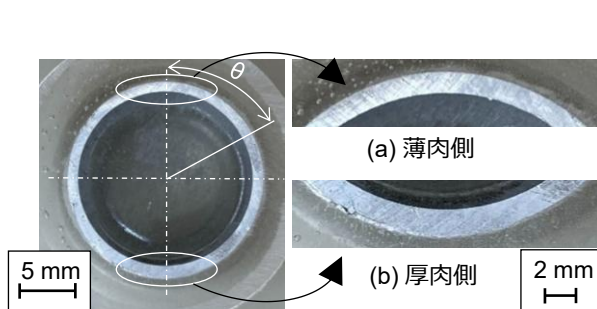


図6 偏肉管の断面形状 (プラグ径 $d_p = 30$ mm, プラグ偏心量 $e_p = 1$ mm, プラグテーパ長さ $l_{tp} = 10$ mm)

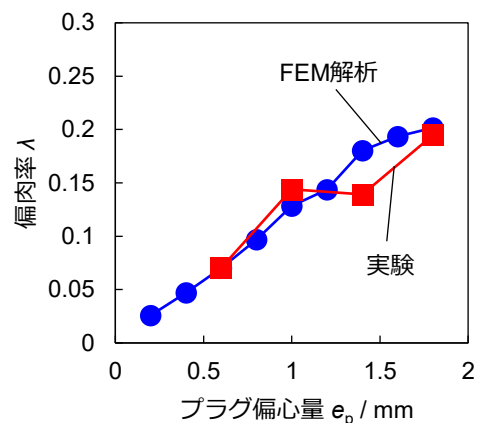


図7 プラグ偏心量 e_p が偏肉率 λ に及ぼす影響 (プラグ径 $d_p = 30$ mm, プラグテーパ長さ $l_{tp} = 10$ mm (実験) および9.4 mm(FEM))

FEM解析と実験結果は同様の傾向を示した。以上の結果より、拡管抽伸加工を用いることによって、高い偏肉率を有する偏肉管を成形可能であるとともに、プラグの偏心率 e_p を調整することによって、様々な偏肉率を有する偏肉管を成形可能であることが明らかになった。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

多角形管や偏肉管など、従来工法が苦手としていた形状を、提案工法によって効率的に加工することによって、自動車やモーターサイクルの部品の高機能化やデザイン性の向上が期待できる。また、製造時における工程数や部品点数を削減できるため、工具費や人件費の削減にともなう製品のコストダウンが期待できる。特に、偏肉管を活用すると、強度が必要な部位を厚肉、強度が不要な部分を薄肉にするなど、適材適所に材料を配分できるため、車体の軽量化や高機能化、省資源化が実現できることに加え、曲げなどの二次加工における成形性向上も期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業者は、塑性加工を中心とした生産加工を専門としており、様々な加工技術に関する研究に取り組んできた。2017年頃から拡管抽伸加工のための加工機を開発し、薄肉円管を成形するにあたって、適正な工具形状に関する検討を行ってきた。本補助事業においては、薄肉円管に加え、新たに多角形管や偏肉管の成形にも取り組み、拡管抽伸による効率的な多角形管および偏肉管成形が可能であることを示した。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

①知財

- (1) 拡管型抽伸加工用の偏心拡管プラグ、偏心拡管プラグを用いた拡管型抽伸加工方法、及び、偏肉管, 特願2024-168545, 国立大学法人電気通信大学, 梶川 翔平, 久保木 孝, 高柳 大樹, 張 世良

②学術雑誌論文

- (1) S. Zhang, T. Kuboki, M. Akiyama, S. Kajikawa, Effect of plug geometry on forming accuracy in tube expansion drawing process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 137, 2743–2759 (2025).
- (2) Y. Kato, S. Zhang, T. Kuboki, M. Akiyama, S. Kajikawa, Effect of plug shape on forming square tube by expansion drawing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 136, 3367–3385 (2025).
- (3) S. Zhang, T. Kuboki, M. Akiyama, S. Kajikawa, Influence of mechanical properties of tube on forming limits and deformation characteristics in expansion drawing process, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 146 (7), 71005, (2024).

③学会発表

- (1) 梶川 翔平, 張 世良, 加藤 優亮, 高柳 大樹, 久保木 孝, 秋山 雅義, 様々な断面形状を有する管材製造のための拡管型抽伸加工, 日本鉄鋼協会第189回春季講演大会, CAMP-ISIJ (38), 63–66 (2025).
- (2) 加藤 優亮, 張 世良, 久保木 孝, 秋山 雅義, 梶川 翔平, 拡管型抽伸加工による四角管成形において角部のコーナ半径が成形性に及ぼす影響, 第75回塑性加工連合講演会講演論文集, 255–256 (2024).
- (3) 高柳 大樹, 張 世良, 久保木 孝, 梶川 翔平, 拡管型抽伸加工による偏肉管の成形, 第75回塑性加工連合講演会講演論文集, 251–252 (2024).
- (4) 梶川 翔平, 加藤 優亮, 張 世良, 久保木 孝, 秋山 雅義, 拡管型抽伸加工による多角形管の成形, 2024年度塑性加工春季講演会講演論文集, 201–202 (2024).
- (5) 張 世良, 久保木 孝, 秋山 雅義, 梶川 翔平, 拡管型抽伸加工における成形性に及ぼす素管の径厚比の影響, 2024年度塑性加工春季講演会講演論文集, 199–200 (2024).

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

学術雑誌論文「Effect of plug geometry on forming accuracy in tube expansion drawing process」(<https://doi.org/10.1007/s00170-025-15320-5>)

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2025) 102:2769–2784
<https://doi.org/10.1007/s00170-025-15320-5>

ORIGINAL ARTICLE

Effect of plug geometry on forming accuracy in tube expansion drawing process

Shihong Zhang¹, Takashi Kubota¹, Masayoshi Akijama¹, Shufei Kojima²

Received: 2 October 2024 / Accepted: 24 February 2025 / Published online: 8 March 2025
© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Limited 144, part of Springer Nature 2025

Abstract The use of thin-walled tubes is an effective lightweighting approach in manufacturing. This paper presents an efficient method for the manufacturing of thin-walled tubes, namely, the expansion drawing process. The present process pulls the plug through the tube in the axial direction, causing the tube to expand. A series of experiments and finite element method analyses were conducted to investigate the effects of the plug part and corner section geometry on the plugs with the aim of optimizing the circumferential thickness distribution, wall-thickness uniformity and corner diameter accuracy of the formed tube. The results show that the plug part can effectively reduce the thickness deviation in the circumferential direction, within the measurement range considered in this study, the larger the plug part, the more uniform the circumferential thickness distribution. Moreover, because smaller the plug corner radius increased. A plug with a corner radius of 20 mm represented the optimum, leading to a maximum of 0.018 mm. These results suggest that optimizing the plug geometry can significantly improve the shapeability of thin-walled tubes during the expansion drawing process. By optimizing the shape of the plug, a tube with the highest precision according to European industrial standards was realized. This study provides a reference for the design and manufacturing of high-precision thin-walled tubes through the expansion drawing process.

Keywords Thin-walled tubes · Cold-chamber · Bending deformation · Dimensional accuracy

1 Introduction

Tubes manufactured using the tube drawing process are widely used in industrial machinery, aerospace parts, and other fields where weight reduction is critical. Tubes have largely replaced steel bars owing to their superior cross-sectional strength per unit weight [1, 2]. Tube drawing is

a secondary processing method for manufacturing tubes and is commonly used to reduce the required size using a general-sized parent tube. During tube drawing, a parent tube is drawn through the die with a diameter smaller than that of the parent tube [3–7]. However, thin-walled tubes cannot be manufactured using dies alone. The manufacturing of thin-walled tubes requires the use of internal tooling (plug or mandrel), and the thickness of the drawn tube is controlled by adjusting the gap between the die and internal tooling. Drawn tubes are required to possess several properties, including dimensional precision. Tube accuracy is generally defined as the outer diameter accuracy and thickness uniformity. Many studies have been conducted to improve the dimensional precision of formed tubes. Regarding the outer diameter accuracy, Kim et al. investigated the tube drawing process and reported that the outer diameter of the formed tube was smaller than the hole diameter of the outer die [8]. Kim et al. compared two outer die shapes and found that the outer diameter of the outer die was the smallest when the outer die had a corner shape [9]. Subsequently, they investigated the effect of the outer die geometry on the

Shihong Zhang
shihongzhang@sjtu.edu.cn
Takashi Kubota
tkubota@sjtu.edu.cn
Masayoshi Akijama
masayoshi.akijama@sjtu.edu.cn
Shufei Kojima
shufei@sjtu.edu.cn

¹ Department of Mechanical and Design Process Engineering, The University of Shanghai for Science and Technology, 100087 Shanghai, China
² School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 200240 Shanghai, China
e-mail: shihongzhang@sjtu.edu.cn

