押出による 1050 アルミニウム円管と穴あきリブの接合

諸井 努*・久保木 孝**・仙崎 泰慎***・村田 眞**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 58, No. 6 (2008), pp. 246-250

Joining of 1050 aluminum circular tube and holed rib by extrusion

Tsutomu MOROI*, Takashi KUBOKI**, Yasunori SENZAKI*** and Makoto MURATA**

Tubes that have the rib internally are used as car parts, for example, structural component, radiator, shock absorbers, and so on. The existence of some holes at the rib enhances the function and value of the tubes. But, the tube with holed rib can not be formed by conventional extrusion. Then, we propose a method that extrudes with a ready made rib. The rib is a machined sheet metal with holes. While the tube is extruded, the rib is fed through a slit of mandrel. Tube and sheet are joined at the same time during extrusion. The mandrel has slit and guide. A guide position h that is a distance from die surface to front edge of the guide is a dominant parameter in this research. When guide position h is controlled, metal flow can be adjusted. We carried out an experiment to clarify the effect of guide position on joining by using A1050. Then, a tensile test clarified that joining strength between tube and rib is 40% of base material. Moreover, flatness was observed in measuring the outside diameter and the inside diameter of the tube.

(Received December 21, 2007 Accepted February 29, 2008)

Keywords: extrusion, joining, joining strength, 1050 aluminum

1. 緒 言

アルミニウム円管はその多くが押出加工によって製造されており、複雑な断面形状を1工程で成形することが可能である。中でも、管の内部にリブを有する製品は、強度、衝撃吸収性、熱伝達性能に優れている¹⁾。さらに、管内のリブに穴が存在していれば、次のような効果が期待できる。

- (1) 構造部材として用いれば、適切な位置に穴が存在することで、強度の確保と管材の軽量化の両立が可能。
- (2) 衝撃吸収用部材として用いれば、座屈モードの設定が可能。
- (3) 熱交換器に用いれば、装置の熱伝達性能を向上させ、省スペース化を図ることが可能。

しかし、単一ピレットから製造される従来の押出加工法では、製品形状はダイス形状によって一意に決められるため、上記のような製品を作製することができない。そこで、筆者らは、管と穴の開いたリブの押出接合を提案した²⁾。本加工法は、管を押出加工によって成形し、同時に、リブとなる板材を供給し、接合させる方法である。リブはあらかじめ作製し、接合時に供給するため、リブと管を異なる材質とすることができ、管材の高機能化を図ることも可能である。筆者らは、鉛を用いた実験により、**Fig. 1** に示す形状が押出加工で成形可能であることを示した²⁾。本加工法の実用化に向け、アルミニウムで成形を試みる必要がある。そこで本研究では、

管およびリブとなる材質に 1050 アルミニウムを用いて押出接合を行い、その接合面付近の断面を観察した。また、リブと管の接合強度を評価するため、引張試験を行った。所望の形状・品質を有する成形品を得るためには、変形特性などの加工特性を定性的・定量的に把握する必要がある。そこで、成形品の外径・内径を実験条件ごとに測定し、管のへん平について検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 加工原理

考案した押出接合加工の加工原理を **Fig. 2** に示す。管形状に成形するためにマンドレルを用いているため、ピレットは中空である。マンドレルには内部に板を供給するためのスリットが設けられている。また、マンドレルのスリットから板が供給される箇所にガイドを設けてあり、板が受けるピレットからの圧力を防ぐと同時に、ガイド下方に板を挟み込むためのメタルフローを生じさせる。このガイド付きマンドレルを用いて、マンドレル内部から供給される板を管と同時に押出、接合させる。**Fig. 3** にガイド位置 h (**Fig. 2** に示すガ

Fig. 1 Tube with holed rib.

*電気通信大学大学院 知能機械工学専攻大学院生 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)。Graduate student, The University of Electro-Communications, Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems (1-5-1, Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585).

**電気通信大学 知能機械工学科 (調布市)。The University of Electro-Communications, Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems (Chofu-shi, Tokyo).

***電気通信大学 知能機械工学科学部生 (調布市)。Under graduate student, The University of Electro-Communications, Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems (Chofu-shi, Tokyo).

イド先端とダイス面との距離)に応じたメタルフローの変化を示す。ガイド位置が高くなる(ガイドとダイスの隙間が大きくなる)とガイド下方にメタルが流れ込み、押出す管の断面形状が変化する。Fig. 4 に押出後の管の断面形状を示す。Fig. 4(a) に実際に板を挟み込んだ状態を示し、Fig. 4(b), (c), (d) に押出中に板を供給せず、ガイド付きマンドレルを用いたときの管断面の変化を示す。なお、Fig. 4(a) は Fig. 2(a) に示す X-X 断面であり、Fig. 4(b), (c), (d) は Fig. 3(a), (b), (c) の破線で囲まれた領域を示す。ガイド下方のメタルフローによってできる管の断面形状(ガイドマーク)を、ガイド位置 h に応じて、次の 3 種類に分類した。

(1) ガイド位置とダイス面が同じ位置にある状態 (Fig. 4(b)) : ガイド下方のメタルフローは起こらず、ガイドマークはガイドと同一形状となる。

(2) ガイド位置がダイス面よりも上部にある状態 (Fig. 4(c)) : ガイド下方のメタルフローによってできるガイドマークは、(1) よりも深さ、幅ともに小さくなる。

(3) ガイド位置が (2) よりさらに上部にある状態 (Fig. 4(d)) : ガイド下方のメタルフローがダイスベアリング部に達する前に充填し、ガイドマークは閉じる。

状態 (1) では、ガイドマークの寸法が板よりも大きくなるため、接合は不可能である。状態 (2) と状態 (3) では板の接合が可能である。ガイド位置 h によって接合強さ・状態が変化する可能性がある。以下では、ガイド位置 h が管と板の接合強度と成形品形状に及ぼす影響を調べた。

2.2 押出実験装置

リブとなる板が供給されている間、接合に適したメタルフローを定常に保つには、ガイド位置 h を押出中に常に一定に保つ必要がある。すなわち、マンドレルとダイスの位置関係

Fig. 2 Principle of extrusion joining.

が押出中に一定である必要がある。そこで、マンドレルとラムを独立して制御することが可能な、CNC 押出実験装置³⁾を使用した。Fig. 5 に装置の構成を示す。本押出実験装置は駆動部・計測部・押出工具により構成される。ラム、マンドレルの駆動源として、位置決め制御が容易で、位置決め精度の高い AC サーボモータを採用した。ラム、マンドレルの位置は各々に取り付けた AC サーボモータ (Fig. 5 ①, ⑤) によって制御されるため、互いの位置や速度によらず、独立して制御することが可能である。ラム、マンドレルの移動条件をパーソナルコンピュータに入力し、AC サーボモータのアンプにパルス信号として送ることにより、ラム、マンドレルの操作を行う。ガイド位置 h の設定は、マンドレル側の AC サーボモータで行い、押出中は固定とした。ラム側の AC サーボモータが移動すると、マンドレルとダイスの位置関係 (Fig. 5 ①と Fig. 5 ③) を保ったまま押出が行える。

2.3 実験方法

押出工具 (Fig. 5 ③) の構成を Fig. 6 に示す。マンドレルは、マンドレルホルダ部 (Holder) とマンドレル先端部 (Mandrel cap) に分割可能である。マンドレル先端部の寸法を Fig. 7 に示す。マンドレル先端部には合金工具鋼 SKD61 の焼入れ材を用い、スリット加工には放電加工機を用いた。マンドレルのホルダ側には軸受鋼 SUJ2 を、コンテナ、ダイス、ダミーブロックには SKD61 を用いた。リブとなる板材は A1050 圧延板をシャーリングによって切断して作製した。板材の寸法は厚さ 0.5mm, 幅 12mm, 長さ 130mm とした。また、板の穴の直径は 6mm, その中心間距離は 10mm とした。ビレットは A1050 の丸棒を旋削して作製した。ビレットの寸法は内径 20.5mm, 外径 39.5mm, 高さ 50mm とした。ダイス内径は 20mm, マンドレル先端直径は 10mm であるため、押出される管は外径 20mm, 内径 10mm となる。その結果、押出比は 4 となる。ビレットの加熱は、コンテナにヒータを設置して行った。コンテナに付けた熱電対によって温度を測定し、400°C まで加熱後、温度を 10 分間一定に保ち、押出を行った。リブとなる板材はマンドレル内部に挿入されており、押出と同時に供給される。板材には張力等は加えず、押出のメタルフローのみによって供給される。ビレットを均一に加

Fig. 4 Cross section of extruded tube.

Fig. 3 Photograph of metal flow.

Fig. 5 Composition of CNC extrusion machine.

熱するため、棒状のヒータを3本、120°ピッチでコンテナ内に配置し、ホイール状ヒータでコンテナを覆った。ホイール状ヒータは保温も兼ねている。押出後、材料の剥離を容易に行うため、ビレットとコンテナ、ビレットとマンドレルの間に二硫化モリブデンを薄く塗布した。押出後はコンテナが冷えるまで室温に放置後、ビレットを取り出した。ラム速度は0.1mm/sとし、ラムのストローク量が35mmになるまで押出を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 断面観察

押出した管の断面を、リブのある場合とない場合でそれぞれ観察した。Fig. 8(a)~(e)にガイド位置が成形品断面形状に及ぼす影響を示す。各図において、左側がリブを接合させて押出した管、右側がリブを接合せずに押出した管を示す。 $h=2.0\text{mm}$ では管とリブがほとんど接触しておらず、定常部では管とリブは接合されていない。管とリブがほとんど接触していないにもかかわらず、板が供給された。この原因は、押出初期において、メタルフローが定常時よりも半径方向中心向きに入り込み、板の先端において接合されたためである。 $h=3.5, 4.0\text{mm}$ では、管のみの押出において、管の内壁が内側に張出している。これは、ガイド位置 h の増加によってメタルが半径方向中心向きに流れ、マンドレル先端のスリット部に入り込むためである。ガイド位置 h が上昇するに従い、リブと管との隙間が小さくなり、接合状態は良好になる。しかし、 $h=4.0\text{mm}$ ではリブに座屈が見られる。

板と管の接合部付近断面を光学顕微鏡で観察した。結果をFig. 9に示す。板と管の接触面積は、ガイド位置 h が大きくなるに従って、大きくなる傾向にあり、接合状態が向上している。

3.2 引張試験

引張試験には、穴のないリブを押出により接合した管を使用した。引張試験に用いた装置類をFig. 10に示す。押出後の管を10mmの長さに切断し、Fig. 10(a)に示す形状に加工した。治具を用いてFig. 10(b)に示すように試験装置に設置した。試験装置は、インストロン万能試験機を使用した。また、母材強度との比較のため、焼なましを行ったA1050板の引張試験を行った。ストローク速度は 1.0mm min^{-1} とした。

Fig. 6 Extrusion tools.

Fig. 7 Detail of mandrel.

管と板の接合面積をFig. 10(c)に示す。接合面積は、板幅12mm、管内径10mmより接合幅1mm。板厚0.5mm、試験片長さ10mmより、 $(1+0.5+1) \times 10 = 25\text{mm}^2$ とした。接合面積は母材である板の断面積よりも大きく、接合が十分であれば、母材での破断も起こりえる。引張試験の結果をFig. 11に示す。縦軸は、試験によって得られた荷重を、Fig. 10(c)に示す板の断面積で除した値を示す。すべての条件において、管とリブはその接合部で破断した。最大の接合強度は $h=4.0\text{mm}$ の条件で、母材の40%程度である。ガイド位置 h が高くなることで、接合面積が増加し、接合強度が上昇する。ガイド位置 h が3.5mmから4.0mmに変化しても引張強度に変化はない。管とリブが隙間なく接合していても、酸化膜の影響などで接合強度が上がらず、接合部で破断したと考えられる。本加工法を摩擦圧接⁵⁾、FSW⁶⁾、圧延による接

Fig. 8 Cross section observation of tube with holed rib and without rib.

Fig. 9 Optical micrographs of joining zone between sheet and tube.

合⁷⁾などと比較する。これらの接合方法は材料同士の変形量が大きく、酸化膜が除去されやすい。しかし、リブと管の押出接合は、リブとなる板の変形量が小さく、酸化膜などが十分除去されていないと考えられる。以上のことと、接合部の観察より、リブと管は金属学的には接合されていない。

3.3 成形品形状

$h=3.5\text{mm}$ で押出を行った成形品の外観をFig. 12に示す。管の側面を切削し、中のリブの様子を観察した。管内部のリ

(a) Test piece of tensile test

(b) Tensile test equipment

(c) Joined area between tube and sheet

Fig. 10 Tensile test tools.

Fig. 11 Relationship between guide position h and tensile strength.

ブに座屈は見られず、接合強度、接合状態の点から、 $h=3.5\text{mm}$ が最も良好な条件であるといえる。

成形品の内外径を測定した結果をFig. 13, Fig. 14に示す。設定外径（ダイス直径）を D_0 、設定内径（マンドレル直径）を d_0 とした。リブがある方向の外径 D_1 は、リブがない方向の外径 D_2 よりも大きく、管はへん平している。内径も同じ傾向を示す。リブを接合しない場合の成形品の外径・内径も同様の傾向を示すことから、管のへん平にはリブの有無とは別の要因が考えられる。また、ガイド位置が高くなるにつれて D_2 は設定値に近づくことから、管の外径はガイド位置の影響を受けていることがわかる。 h が低いほど D_2 が小さくなる原因は、押出後の管断面形状にあると考えられる。Fig. 8の断面を観察すると、 $h=2.0\sim 3.0\text{mm}$ はFig. 4で説明したガ

Fig. 12 Photograph of extruded tube ($h=3.5$ mm).

Fig. 13 Outer diameter of extruded tube.

Fig. 14 Inner diameter of extruded tube.

Fig. 15 Image of tapered mandrel.

イドマークが残り、リブがある方向の内径が大きくなる。 $h=3.5, 4.0$ mm ではガイドマークが管内径側に張出し、リブのある方向の内径が小さくなる。押出後の管は、 $h=3.0$ mm 以下ではガイドマークがあるためにリブのある方向と垂直な方向につぶれ、へん平する。一方、 $h=3.5$ mm 以上ではガイドマークがないため、へん平はガイド位置 h による影響を受けなくなる。

管内径はマンドレルの先端直径によって決まるが、マンドレル先端部には板を挿入するためのスリットが設けてある。押出中にマンドレルは圧力を受け、マンドレル先端が閉じる方向に力が働く。押出中にマンドレルがへん平するため、成形品の断面もへん平する。マンドレル先端が閉じるイメージ図を Fig. 15 に示す。マンドレルは、リブ板厚方向にテーパ状に変形する。リブ板厚方向においては、テーパマンドレルを用いた押出と同様の現象が生じる。テーパマンドレルを用いた押出においては、メタルは円管の半径方向中心向きに流れ込み、成形品外径と内径がそれぞれダイス直径、マンドレル直径より小さくなる^{3),4)}。管のへん平の許容値は、JIS H 4080⁸⁾ によると、管外径 20 mm の押出管では、指定された径と平均径（任意の箇所互いに直角に測った 2 箇所の測定値の平均値）との差が、 ± 0.49 mm である。実験結果より、平均外径は $1/2(20.08+19.42)=19.75$ mm で、平均径との差は ± 0.33 mm となる。

4. 結 言

1050 アルミニウムのビレットと板を用いて押出接合を行い、本研究において、初めてリブに穴を有するアルミニウム管の押出成形に成功した。その際、管断面の観察、接合強度評価、成形品形状評価を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) ガイド位置が低いと管と板の間に隙間が生じ、接合が不十分となる。

(2) ガイド位置が高くなるほど接合状態はよくなるが、リブが変形する。

(3) 接合強度は母材強度よりも小さい。

(4) 接合強度、リブの形状の点から、最もよい条件は $h=3.5$ mm で、そのとき、母材に対して 40% 程度の引張強さが得られ、座屈もほとんどない。

(5) 管外径、内径ともに、リブのある方向に比べ、それと垂直な方向に小さくなる。

謝 辞

本研究の一部は社団法人日本アルミニウム協会のアルミニウム研究助成金により行われた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 村上 哲：塑性と加工，**41** (2000)，460–465.
- 2) 諸井 努，久保木孝，高岡大和，村田 眞：塑性と加工，**48** (2007)，234–238.
- 3) 牧山高大，村田 眞，久保木孝：塑性と加工，**45** (2004)，737–741.
- 4) 原 薫，大竹尚登，加藤和典：塑性と加工，**46** (2005)，150–155.
- 5) 時末 光，加藤数良：軽金属，**52** (2002)，378–383.
- 6) 平野 聡，岡村久宣，青田欣也，岡本和孝，稲垣正寿：塑性と加工，**43** (2002)，596–601.
- 7) 日本塑性加工学会編：接合，コロナ社，(1990)，33–35.
- 8) 日本規格協会：JIS ハンドブック，(2006)，413–428.