

# 1 高強度アルミニウムボルトの塑性加工プロセスと組織制御技術の開発

森下勇樹, 長岡 孝, 府山伸行, 横田浩一\*, 下川慎也\*, 勝山仁義\*

Development of metal forming process and microstructure control for aluminum alloy bolt

MORISHITA Yuki, NAGAOKA Takashi, FUYAMA Nobuyuki,  
YOKOTA Koichi, SHIMOKAWA Shinya and KATSUYAMA Jingi

The microstructural change in cold forging process of aluminum alloy bolts was investigated by upset forging and forward extrusion experiments using 7000 series aluminum alloy. After heat treatment of specimens obtained from both experiments, the microstructures were observed by optical microscope and grain sizes were determined by the linear intercept method. The grain size of aluminum alloy depends strongly on plastic strain and heat treatment. Upset forging significantly refined the grain size by inducing large plastic strain into the specimen, although coarse grain structure occurred under the condition of low plastic strain. Forward extrusion also considerably refined the grain size with increasing reduction of area. Furthermore, the fine-grained aluminum alloy bolt was manufactured by multistage forging process and following thread rolling. The bolt tensile test was conducted to measure mechanical properties such as tensile strength, proof stress and elongation. The mechanical properties of the manufactured aluminum alloy bolt are sufficiently superior to those of JIS specification.

キーワード：冷間鍛造, 据込み, 前方押出し, ボルト, アルミニウム合金, 結晶粒微細化

## 1 緒 言

アルミニウム合金は比重が小さく軽量であるため、燃費向上が求められる自動車など各種輸送用機器に幅広く用いられている<sup>1)</sup>。自動車分野の用途としてはシリンダーブロック、トランスミッションケースなどのダイカスト鋳造品でアルミニウム合金の使用量が多く、今後はボディー部品にも適用拡大が期待されている<sup>2),3)</sup>。アルミニウム合金製の機械・構造物の組み立ては鋼製ボルトによる締結が一般的であるが、このようなボルト締結体では異種金属接触腐食や温度変化に伴う熱応力の発生が懸念され、接合技術としての課題が指摘されている<sup>4)</sup>。一方、ボルト素材をアルミニウム合金に置換した場合は同種金属であるため弾性率や線膨張率など力学特性が同じとなり、ボルト締結体の安定性向上が図られることが示されている<sup>5)</sup>。最近では締結部品に対しても軽量化への関心が高まり、自動車用ボルト向けのアルミニウム合金線材の開発が行われている<sup>6),7)</sup>。しかしながら、アルミニウム合金の比強度は鉄鋼材料よりも高いものの絶対強度や疲労強度は低いため、アルミニウム合金製ボルトの実用化に向けては加工熱処理により材質を制御して機械的特性を向上させる必要がある。

アルミニウム合金製ボルトは冷間鍛造工程で製造され、円柱状素材からボルト形状への成形加工は、前方押出し鍛造、据込み鍛造、頭部成形、ねじ転造の組合せにより

行われる<sup>5)</sup>。特に前方押出しや据込みといった鍛造成形では加工率を高くすることによって素材に大きなひずみを導入することが可能であり、ボルトの組織微細化が図られ、材料特性を改善することができると考えられる。

本研究は熱処理型アルミニウム合金を対象材料として、変形様式の異なる鍛造方法について種々の加工率で成形した試料の組織変化を検証する。本稿では、ボルト成形の主要な鍛造方法である据込み鍛造および前方押出し鍛造について加工率と溶体化処理後の回復・再結晶組織との関係を調査した。そして、多段鍛造工程で組織制御したアルミニウムボルトの機械的性質を調査したので報告する。

## 2 実験方法

### 2.1 供試材

実験で用いた材料は時効硬化型合金の7000系(Al-Zn-Mg-Cu系)アルミニウム合金である。供試材には鋳造ビレットを繰り返し圧延により内部組織を均一化し、引抜き加工により直径12mmに仕上げられたアルミニウム合金線材を使用した。鍛造成形の試験片は供試材の線材から円柱状に20mmの長さに切り出したものを用いた。

### 2.2 成形条件

据込みおよび前方押出しの実験には油圧プレスを用いた。据込み鍛造の模式図を図1に示す。据込み鍛造は材

\*松本重工業株式会社

料を軸方向に圧縮して断面積を増す加工法である。実験では油圧プレスに取り付けられた上下一對の平行な工具の間で円柱試験片を圧縮し、油圧プレスのストロークを調整して所定の高さになるまで成形した。ここで、圧縮率  $\Delta h / h_0$  は下記の式(1)で定義される。圧縮率は 0% から 10% 刻みで 80% までとした。

$$\Delta h / h_0 (\%) = (h_0 - h) / h_0 \times 100 \quad (1)$$

$h_0$  : 圧縮前の試験片高さ

$h$  : 圧縮後の試験片高さ

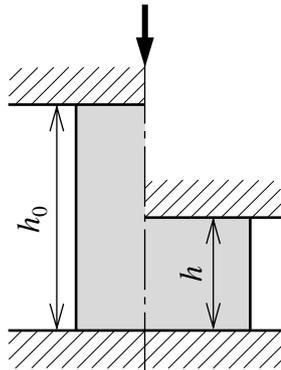


図1 据込み鍛造の模式図

前方押し鍛造の模式図を図2に示す。前方押し鍛造は金型内に挿入した材料を工具によって加圧し、金型の穴から材料を工具の進行方向に流出させる加工法である。ここで、断面減少率  $RA$  は試験片の元の断面積と押し出された部分の断面積との差の元の断面積に対する百分率であり、下記の式(2)で定義される。本実験の断面減少率は 22, 40, 80% の3条件とした。

$$RA (\%) = (\phi_0^2 - \phi^2) / \phi_0^2 \times 100 \quad (2)$$

$\phi_0$  : 成形前の試験片直径

$\phi$  : 押し出された部分の直径

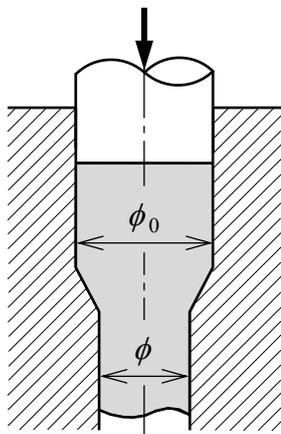


図2 前方押し鍛造の模式図

## 2.3 組織観察方法

据込みおよび前方押しを行った各試験片は、溶体化処理後に焼入れし、人工時効する T6 処理を施して組織観察用試料とした。鍛造成形によるアルミニウム合金の組織変化と結晶粒径を調査するため、光学顕微鏡を用いて組織観察を行った。観察面は試料の軸平行断面であり、結晶粒径の測定は顕微鏡組織写真から切断法により求めた。

## 2.4 試作ボルトの強度評価

据込みと前方押しのそれぞれの鍛造方法で試作したアルミニウムボルトについて、強度特性を評価するため引張試験を行い、引張強さ、耐力および伸びを測定した。試作ボルトの強度特性が JIS B 1057 非鉄金属製ねじ部品の機械的性質<sup>8)</sup>を満たしているかどうか調査した。

## 3 実験結果および考察

据込みおよび前方押しによるアルミニウム合金の組織変化を図3に示す。図中の矢印は加工方向を示す。供試材の顕微鏡組織写真を図3(a)に示す。供試材はアルミニウム合金線材を製造する過程の引抜き加工によって軸方向に伸長した結晶粒が観察され、平均結晶粒径は  $30\mu\text{m}$  であった。圧縮率 80% で据込みを行った試料の顕微鏡組織写真を図3(b)に示す。強加工を施した試料は等軸の再結晶組織となっており、均一で微細な組織が観察された。平均結晶粒径は  $10\mu\text{m}$  以下であり、供試材と比較して結晶粒が約 1/3 程度に微細化した。断面減少率 80% で前方押しを行った試料の顕微鏡組織写真を図3(c)に示す。断面組織観察により円柱試験片が絞られている部分のメタルフローを確認した結果、試料表面の巻き込みや内部の割れなどは存在していなかった。押し出された部分の結晶粒の形状は粒状であり、押し出し方向に引き伸ばされた加工組織にはなっていない。加工組織は熱処理により再結晶して粒状になったと考えられる。

次に据込み鍛造における圧縮率と平均結晶粒径の関係を図4に示す。結晶粒径の測定は圧縮前の供試材と圧縮率 10%~80% の範囲で行った。組織観察の結果から圧縮率が 10% になると結晶粒が粗大化する傾向を示したものの、圧縮率を大きくすることによって平均結晶粒径は次第に小さくなる結果となった。圧縮率が 20% になると平均結晶粒径は  $20\mu\text{m}$  となり、圧縮率が 40% に達すると平均結晶粒径は  $10\mu\text{m}$  以下まで小さくなった。しかし、40% 以上の圧縮率からは結晶粒の大きさはほとんど変化しておらず、平均結晶粒径は  $10\mu\text{m}$  とほぼ一定値を示すことが明らかになった。

前方押し鍛造における断面減少率と平均結晶粒径の関係を図5に示す。前方押し実験は断面減少率が22, 40, 80%の3条件のみであり、断面減少率の条件間隔が広いので、据込み鍛造で見られた結晶粒の粗大化傾向が存在するかどうか分からなかった。平均結晶粒径は断面減少率の増加に伴い単調に小さくなっている。供試材の平均結晶粒径が30 $\mu\text{m}$ であったのに対し、断面減少率が40%になると平均結晶粒径は15 $\mu\text{m}$ 以下になり、さらに断面減少率が80%になると平均結晶粒径は10 $\mu\text{m}$ 以下になる結果となった。前方押しでは断面減少率を大きくすることによって微細な結晶粒を得ることが可能であるが、ボルトの冷間鍛造で断面減少率が大きくなると厳しい加工条件になる。このため鍛造工程設計では材料の成

形性や鍛造金型への負荷などを考慮する必要があると考えられる。

本研究では各種鍛造方法で組織制御したアルミニウムボルトを試作して、引張試験により機械的性質を測定した。その結果、試作したボルトは、JIS B 1057 非鉄金属製ねじ部品の機械的性質(材質区分AL6)に規定されている引張強さ510MPa, 耐力440MPa, 伸び7%以上を満たしていることを確認した。

## 4 結 言

本研究は各種鍛造方法による7000系アルミニウム合金の組織変化を調査するため、据込みと前方押しとの2

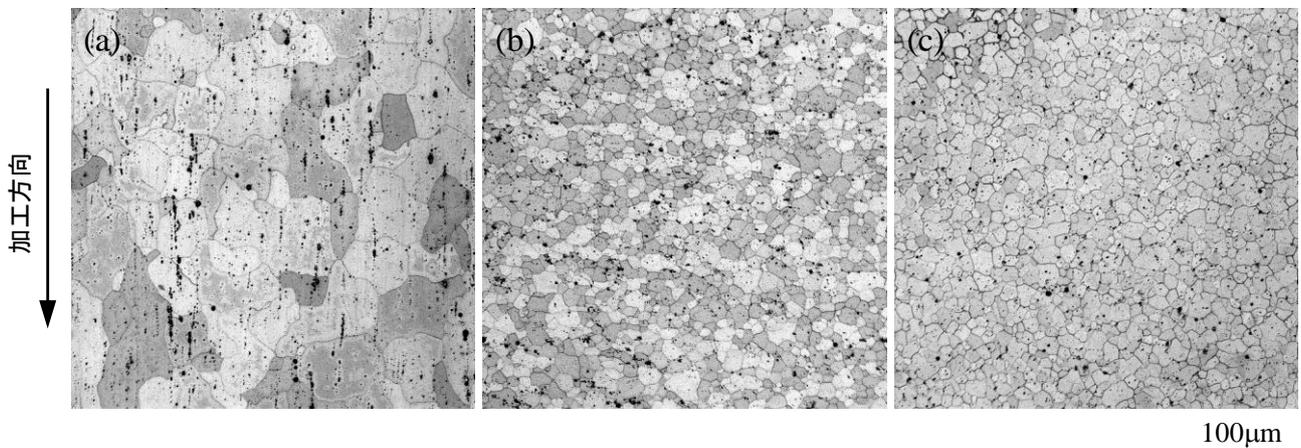


図3 アルミニウム合金の組織変化 (a) 供試材 (b) 据込み鍛造 (c) 前方押し鍛造

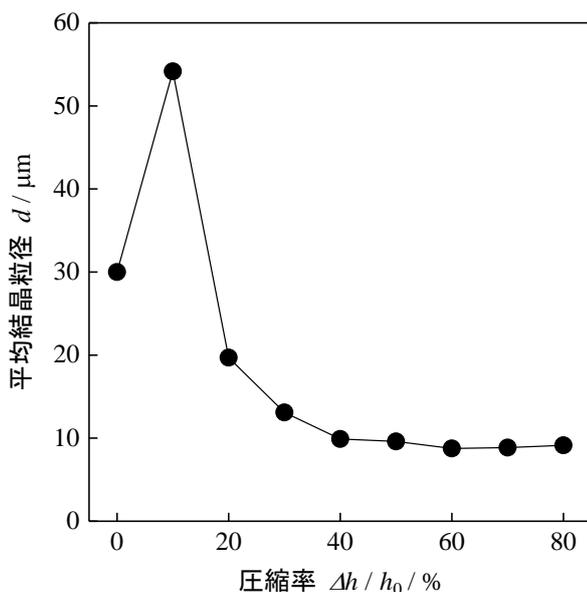


図4 据込み鍛造における圧縮率と平均結晶粒径の関係

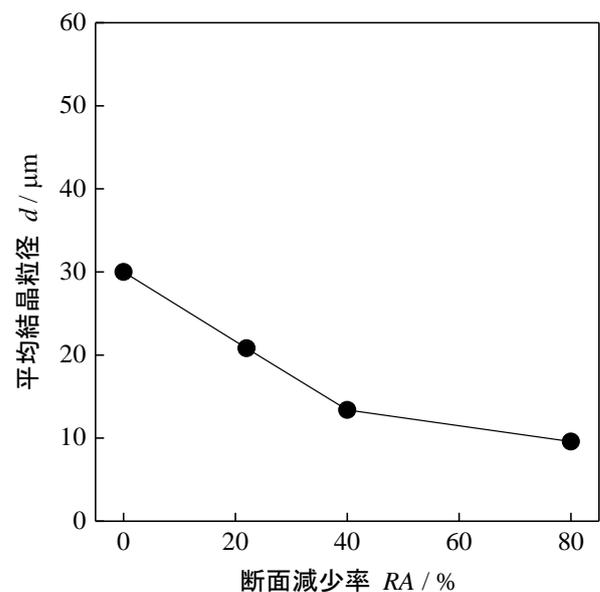


図5 前方押し鍛造における断面減少率と平均結晶粒径の関係

つの鍛造成形を行い、T6 処理した試料の結晶粒径に及ぼす加工率の影響について検証した。据込み実験では低い圧縮率で粗大結晶粒が観察されたが、高い圧縮率で成形することにより粗大粒の発生を抑制し、結晶粒微細化を図ることができた。前方押し実験では断面減少率の増加に伴い結晶粒径は単調に小さくなった。これらの鍛造成形は加工率を高くして材料に大きなひずみを導入することにより、平均結晶粒径が 30 $\mu\text{m}$  の供試材に対して 10 $\mu\text{m}$  以下まで微細化することができた。また、据込みや前方押しを繰り返し行う多段鍛造で試作したアルミニウムボルトの引張試験を行った結果、試作ボルトは JIS 規格に基づく機械的性質を満たしていることを確認した。

## 文 献

- 1) Hirsch : Materials Transactions, 52-5 (2011), 818
- 2) 西 : まてりあ, 53-12 (2014) , 589
- 3) 櫻井 : 軽金属, 68-9 (2018) , 487
- 4) 松木 : 日本ねじ研究協会誌, 26-1 (1995) , 6
- 5) 久保田他 : 塑性と加工, 42-486 (2001) , 642
- 6) 岩山他 : SEI テクニカルレビュー, 183 (2013) , 78
- 7) 小畑他 : 軽金属, 68-2 (2018) , 65
- 8) JIS B 1057 (2001) , 日本工業規格, 非鉄金属製ねじ部品の機械的性質