

# 超塑性材料の成形技術に関する研究

三戸 正道, 小林 政義, 安田 星季

## Study of Superplastic Forming Technology

Masamichi MITO, Masayoshi KOBAYASHI, Seiki YASUDA

### 抄 録

過熱水蒸気を用いた超塑性アルミニウム合金ブロー成形装置の開発を行った。本成形装置はブロー成形の加圧ガスとして過熱水蒸気を用いる事により、アルゴン及び窒素を用いる従来のブロー成形に比べて、成形コストを低減する事が可能である。本成形装置を用いて超塑性アルミニウム合金の成形試験を行った結果、成形圧力が高い成形条件及び成形温度が高い成形条件では成形所要時間が短い事が分かった。また、成形温度が低い成形条件及び成形圧力が高い成形条件では成形品の精度が良い事が分かった。

キーワード：超塑性アルミニウム合金, 超塑性成形, 過熱水蒸気

### Abstract

Superplastic blow form equipment using superheated steam for the superplastic aluminum alloy was developed. By using superheated steam, this equipment is possible to reduce the molding cost in comparison with conventional Superplastic blow form equipment using argon and nitrogen. Molding and test by this equipment was carried out. As the result, next fact was proven. In the forming by high forming pressure, high forming-temperature, the molding time is short. And the molding accuracy is good in the forming by low forming-temperature, high forming pressure.

KEY-WORDS : Superplastic aluminum alloy, Superplastic forming, Superheated steam

## 1. はじめに

超塑性材料の1つである超塑性アルミニウム合金は、500℃前後で引張り変形を与えた時、ネックングを生じることなく数百%以上の巨大な伸びを示す材料である。多くの場合、不活性ガスを加圧ガスとするブロー成形による成形が行われ、複雑な形状の一体成形が可能である。これまでは航空機等に使用されてきたが、近年は軽量化とデザインの両立を目的として自動車ボディにも使用されており、今後の需要増加が期待される。しかし、一般材料のプレス成形と比較して成形速度が遅い事や、超塑性アルミニウム合金の価格が通常材料の1.2~1.3倍である事等により、その用途は高付加価値品や少

量生産品に限定されている。本研究は、過熱水蒸気を加圧ガスとする超塑性アルミニウム合金ブロー成形装置を開発する事により成形コストを低減するとともに、金型設計及び成形に必要なデータの収集を図る。

## 2. 成形装置の開発

### 2.1 成形装置Aの製作

縦200mm×横200mm×高さ55mmの直方体の成形を行う成形装置を製作した。成形圧力1MPa, 成形温度600℃, 型締め力100kN迄の成形に対応可能で、給水装置, キャビティを有する上型, 過熱水蒸気により加圧を行う下型, 油圧ジャッ

事業名：一般試験研究

課題名：超塑性材料の成形技術に関する研究

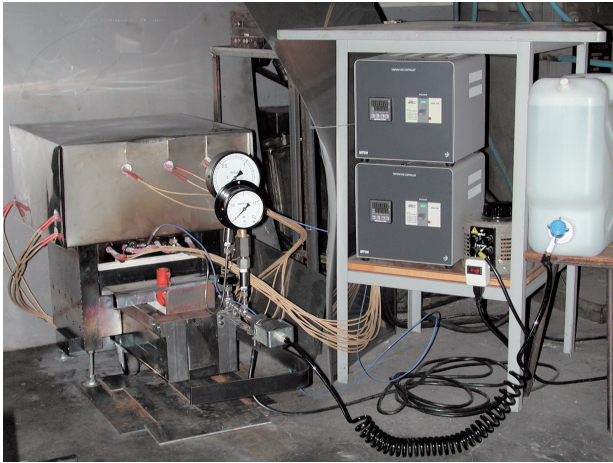


図1 成形装置Aの外観



図3 給水装置の構成

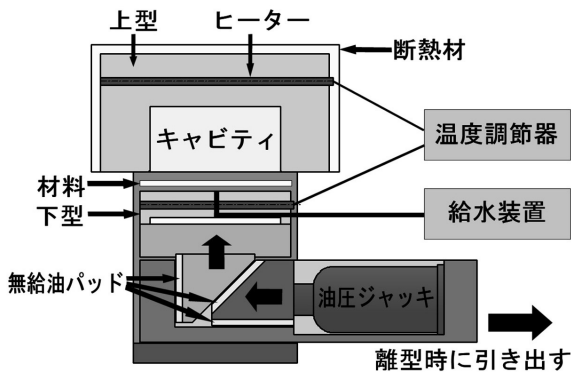


図2 成形装置Aの模式図

キによる型締め機構、金型温度の制御を行う温度調節器により構成される。本成形装置は、上型と下型の間（パーティング面）に成形材料を挟み、下型の過熱水蒸気の圧力により成形材料を上型に押し付ける事により成形を行う。また、成形装置の小型化を目的として、金型と型締め機構を一体化するとともに、成形品の離型空間を確保するため、下型と型締め機構の一部を手前に引き出す構造とした。成形装置Aの外観を図1、模式図を図2に示す。

### 2.1.1 型締め機構

水平に設置された油圧ジャッキ（定格荷重100kN）の推力を45°の斜面を有するブロック2個で上下方向に変換し、上型パーティング面に下型を押し付ける事により型締めを行う。型締めにより荷重がかかる摺動面には銅合金に黒鉛を埋め込んだ無給油パッドを使用し、摩擦の低減及び焼き付き防止を図った。また、型締め機構は上型を支持するフレームに水平方向からはまり合う構造になっており、離型の際に型締め機構を横に引き出して上型下部の空間を確保する。

### 2.1.2 給水装置

給水装置は給水タンク（容量10L）、電磁ポンプ、絞り弁、圧力計で構成され、給水タンクから供給された水を電磁ポン

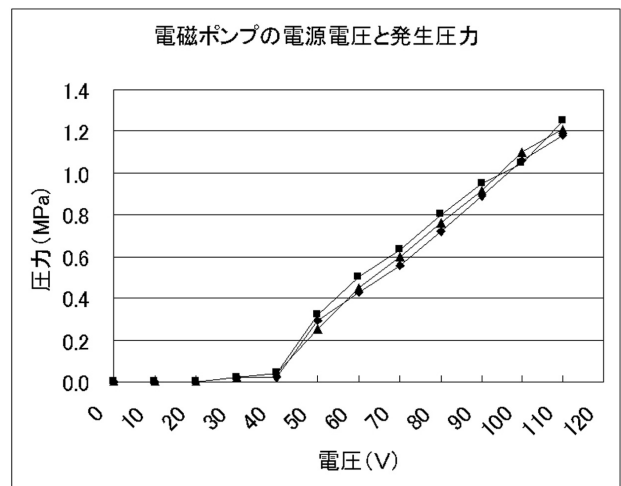


図4 電磁ポンプの電源電圧と発生圧力

プで成形圧力（最大1 MPa）に加圧し、金型（下型）への給水を行う。ブロー成形の際、金型の温度は500°C前後に保たれている為、金型に給水された水は金型の熱で加熱されて過熱水蒸気となり、その圧力によって成形が行われる。この時、水圧と金型内の圧力との差により給水が行われ、金型内の圧力が水圧とつり合ったときに給水が停止する事により成形圧力が一定に保たれる。給水圧力は電磁ポンプに供給する電源電圧をスライダックで調節する事により、任意に設定する事が出来る。給水装置を図3、電磁ポンプの電源電圧と発生圧力のグラフを図4に示す。

### 2.1.3 温度調節器

温度調節器は上型用と下型用それぞれ1台、合計2台使用した。制御方式はON-OFF制御及びPID制御（オーバーシュート抑制機能付）が可能で、本成形装置では主にPID制御（オーバーシュート抑制機能付）を使用した。定格は三相交流200 V、30Aである。

### 2.1.4 上型

上型は外形縦350mm×横350mm×高さ180mmの直方体で、材質はS55Cである。パーティング面中心に縦200mm×横200mm×深さ55mmのキャビティを有し、その左右には上型を支持し、型締め機構とはまり合うフレームを有している。上型はパーティング面を除く全面を断熱し、上型に取り付けたカートリッジヒータ及び熱電対と温度調節器により成形温度に保たれる。

### 2.1.5 下型

下型は縦230mm×横230mm×高さ50mmの直方体で、材質はS55Cである。カートリッジヒータ及び熱電対が取り付けられており、温度調節器により成形温度に保たれる。また、型締め機構と接する部分には厚さ10mmの断熱材を取り付け、型締め機構への熱の流出を防いでいる。給水装置から供給された水は、下型と断熱材の間に設置されたM形のステンレス管（直径4mm、内径2mm、長さ500mm）で予熱後、下型内部の水路で加熱されてパーティング面中心の穴（直径6mm）から過熱水蒸気となって噴出し、成形を行う。パーティング面外周に幅2mm高さ1mmの矩形断面の線状の突起を2本加工した。これを成形材料に食い込ませる事により成形材料の絞り込み防止、成形圧力の封止を行う。

### 2.1.6 成形試験

成形装置Aを用いて成形試験を行った。成形材料には古河スカイ(株)の超塑性アルミニウム合金板「アルノービ・1」(JIS A5083P相当品)、板厚1～3mmを縦230mm×横230mmの大きさに切断したものをを用いた。成形温度、成形圧力、加圧時間、予熱時間の組み合わせについて検討を行い一定の成果を得たが、成形品の角の部分の成形が不十分であった。また、成形装置の断熱が不十分であった事から各摺動部の焼き付き、油圧ジャッキのオイルシール破損等のトラブルにより成形試験の続行が困難となり、基本構造から見直す事となった。成形品の例を図5に示す。



図5 成形装置Aの成形品

## 2.2 成形装置Bの製作

成形装置Aの結果から、成形装置と金型を分離し、断熱を徹底する事により金型から成形装置への熱の流入を最小限度に止める事とした。また、型締め機構の焼き付きを防止する為、構造を出来るだけシンプルなものとした。本成形装置は型締め装置、給水装置、温度調節器で構成され、成形圧力1MPa、成形温度600℃、型締め力100kN迄の成形に対応可能である。成形装置外観を図6に、模式図を図7に示す。



図6 成形装置外観

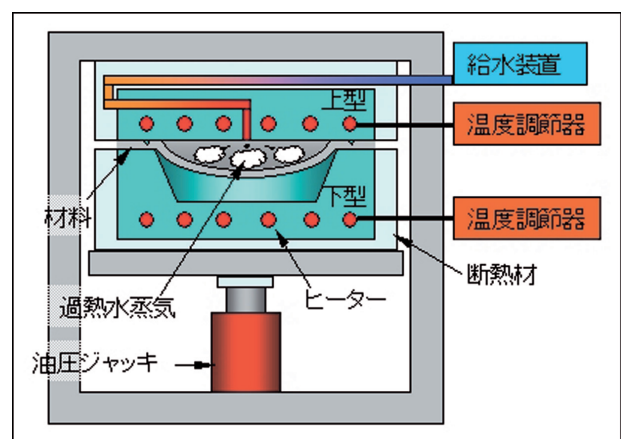


図7 成形装置模式図

### 2.2.1 型締め機構

型締め機構は金型の位置決めと開閉、型締めを行う部分で、フレーム、金型の支持を行うテーブル、可動側テーブルを滑らかに上下させる為の案内部、型締め力を発生する油圧ジャッキ





図8 型締め機構

キ（定格荷重100kN）で構成される（図8）。型締め機構は成形圧力、型締め力に対応する強度及び剛性が求められる。型締め機構の剛性が不足していると、成形圧力によって金型パーティング面と成形材料との間に隙間が出来、過熱水蒸気の漏れ、成形材料の絞り込みによる成形不良が発生する。本成形機ではフレーム断面形状の最適化、可動テーブル中心を油圧ジャッキで直接押す機構等により、型締め方向の剛性向上を図った。また、金型は500℃前後の高温であり、断熱を行っても成形装置への熱の流入は避けられないことから、温度上昇による型締め機構の損傷防止を目的に以下の対策を行った。

- ・放熱面積を確保する為、フレームを溝形鋼で構成した。
- ・油圧ジャッキの過熱を防ぐ為、可動テーブルと油圧ジャッキの接点に断熱材を配置するとともに、油圧ジャッキ周囲に空間を設けた。
- ・可動テーブル案内部の耐熱性向上の為、ガイドピンと高温仕様無給油ブッシュによって上下動を案内するとともに、カムフォロアとレールによって回り止めを行う構造とした。

これにより摺動部の焼き付き、油圧ジャッキ破損等のトラブルが解消するとともに、操作性及び作業性が向上した。

## 2.2.2 給水装置及び温度調節器

成形装置Aと同じものを使用した。

## 2.3 金型

金型の材質はS55Cで、キャビティを有する下型と、過熱水蒸気を発生し材料の加圧成形を行う上型で構成される。また、パーティング面を除く全面を断熱し、金型に取り付けたカートリッジヒータ及び熱電対と温度調節器により成形温度に保たれる。

### 2.3.1 上型

上型は縦200mm×横200mm×高さ40mmの直方体で、給水装置から供給された水を過熱水蒸気に変換する機能と、成形材料の絞り込み防止及び成形圧力の封止を行う機能を有している。給水装置から供給された水は、上型のパーティング面と反対側の面と断熱材の間に設置されたM形のステンレス管（直径4mm、内径2mm、長さ500mm）で予熱された後、上型内部のH形の水路で加熱されて過熱水蒸気となり、4つの穴（直径1.2mm）を通してパーティング面から噴出、その圧力によって成形を行う。また、パーティング面に直径176mmと180mmの同心円上に高さ0.5mmの三角形断面の突起を設け、これを成形材料に食い込ませる事により成形材料の絞り込み防止及び成形圧力の封止を行う。更に、成形中の過熱水蒸気との伝熱面積を増やす目的でパーティング面中央部に同心円及び放射線状の溝を加工した。上型の外観を図9に示す。

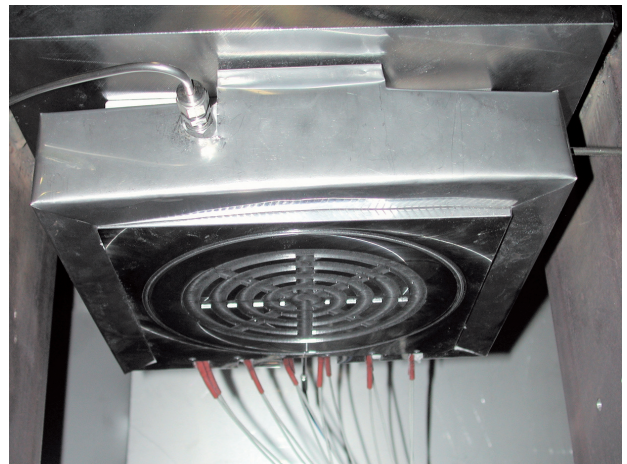


図9 上型の外観

### 2.3.2 下型

下型は縦200mm×横200mm×高さ70mmの直方体で、パーティング面中央に直径140mm、深さ40mmの円形のキャビティを有する。キャビティ底面には成形性評価の目的で幅3mm、深さ0.4mm、半径3mmの半円断面の溝による模様を加工するとともに、この溝の中心線上に直径1mmのキャビティ内の空気を逃がす為の穴を11個設けた。更に、キャビティ内面を研磨材付きバフで磨き、成形材料とキャビティの摩擦減少による成形性向上を図った。図10に下型の外観、図11に成形装置Bの成形品を示す。





図10 下型の外観



図11 成形装置Bの成形品

### 3. 試験方法

#### 3.1 金型昇温試験

成形装置Bの金型を成形温度に昇温する時の所要時間について検討を行った。金型を10mm程度開いた隙間からデジタル温度計のセンサ（直径3.2mm，長さ250mm）を差し込んで上型パーティング面中心部の温度を測定し，加熱開始から1分間隔，60分のデータを収集した。尚，加熱0分のデータは試験開始直前の温度である。試験条件は以下の通りである。

- ON-OFF制御，設定温度550℃。
- PID制御（オーバーシュート抑制付），設定温度550℃。
- PID制御（オーバーシュート抑制付），設定温度450℃。

#### 3.2 成形試験

成形装置Bと金型を用いて成形試験を行った。成形材料には古河スカイ㈱の超塑性アルミニウム合金板「アルノービ・1」（JIS A5083P相当品），板厚1mmを200×200mmの大きさに切断したものをを用いた。成形試験の工程は以下の通りである。

- (1) 成形材料の両面に窒化ホウ素系スプレー離型剤を塗布する。
- (2) 成形材料を下型パーティング面に載せ，型締めする。
- (3) 5分間放置し，金型の熱により成形材料を予熱する。
- (4) 給水装置から成形圧力に加圧した水を供給し，加圧を開始する。
- (5) 加圧開始から加圧時間（2～10分）が経過した時点で給水を停止するとともに金型を開く。
- (6) エアブローにより成形品を冷却後， tong で成形品を取り出す。

成形温度及び成形圧力と成形所要時間の相関を調べる為，以下の成形条件により成形試験を行った。尚，成形温度及び成形圧力以外の条件による影響を排除する為，成形材料予熱時間及び離型剤を一定とした。成形条件を以下に示す。

- 成形温度：450，500，550℃
- 成形圧力：0.2，0.4，0.6，0.8MPa
- 加圧時間：2，4，6，8，10分
- 成形材料予熱時間：5分
- 離型剤：窒化ホウ素系スプレー

### 4. 試験結果

#### 4.1 金型昇温試験

設定温度550℃のON-OFF制御とPID制御（オーバーシュート抑制付）のデータを比較した結果，加熱所要時間はON-OFF制御が約30分，PID制御（オーバーシュート抑制付）は約18分であった。また，温度の安定性はON-OFF制御では548℃と550℃の間で上下しているのに対して，PID制御（オーバーシュート抑制付）では550℃と551℃の間ではほぼ一定の温度を保っていることから，昇温速度，温度の安定性とも，ON-OFF制御よりもPID制御（オーバーシュート抑制付）の方が優れている事が分かった。また，設定温度450℃，PID制御（オーバーシュート抑制付）の加熱所要時間は約15分であった。一般的にON-OFF制御の方が短時間で加熱出来ると言われており，PID制御（オーバーシュート抑制付）の方が短時間となった理由について，温度調節器に表示されるヒーター付近の温度から検討してみた。ON-OFF制御のヒーター付近の温度は金型パーティング面よりも早く設定温度に達した。しかし，ヒーターのON-OFFと実際の温度変化のタイムラグによりヒーター付近の温度の変動が大きく，結果的にヒーターの稼働率が低下したと思われる。一方，PID制御（オーバーシュート抑制付）ではヒーター付近の温度が設定温度に達してからの変動が小さく，加熱効率が高まったと思われる。実験データを図12，13，14に示す。

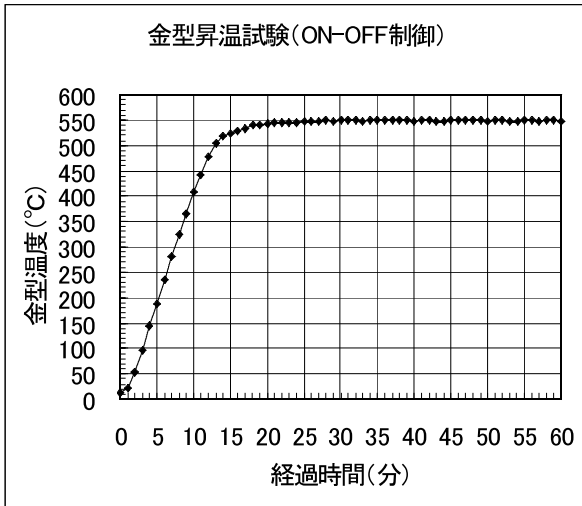


図12 設定温度550°C, ON-OFF制御の金型温度

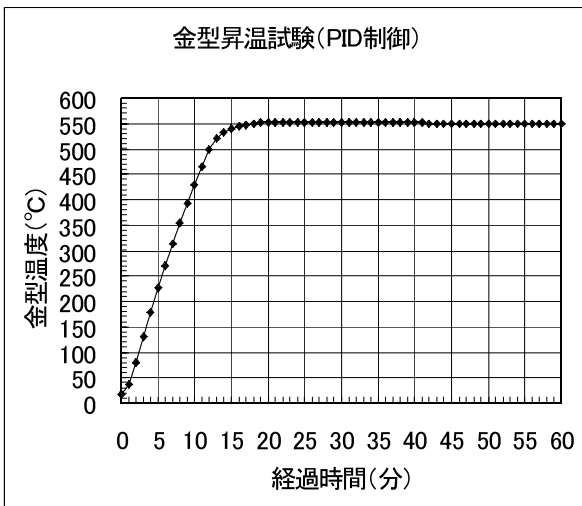


図13 設定温度550°C, PID制御（オーバーシュート抑制付）の金型温度

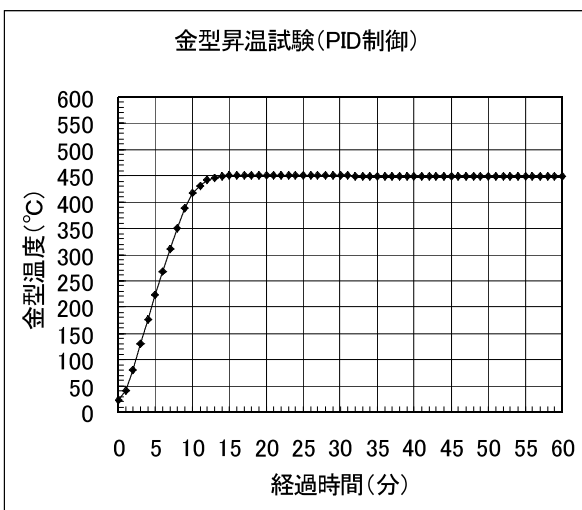


図14 設定温度450°C, PID制御（オーバーシュート抑制付）の金型温度

## 4.2 成形試験

### 4.2.1 成形条件による成形所要時間

成形品の形状及び模様等の目視観察により成形の進捗度を判断し、成形温度、成形圧力による成形所要時間について検討を行った。その結果、成形圧力及び成形温度が高い程短い加圧時間で成形可能となる傾向が見られた。その理由として、成形材料の温度が高くなる事により変形抵抗が低下する為と思われる。これにより、成形所要時間は成形温度及び圧力が最も高い成形条件で最短となり、成形温度550°C、圧力0.8MPa、加圧時間2分であった。成形条件による成形進捗度を図15, 16, 17に示す。

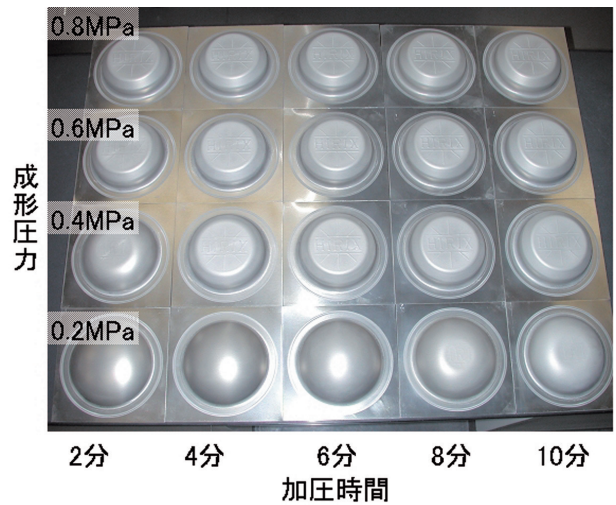


図15 成形温度450°Cの成形品

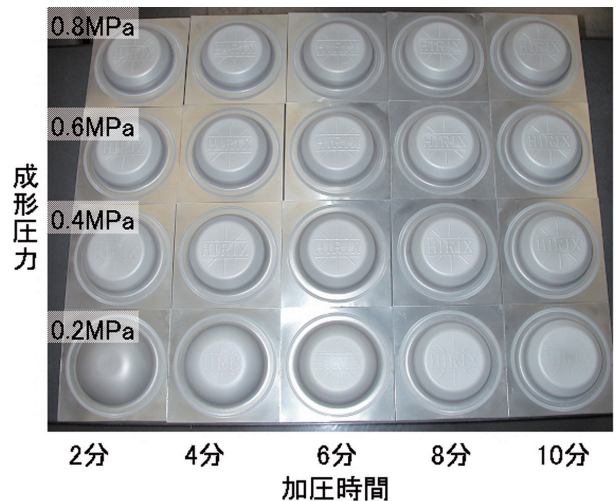


図16 成形温度500°Cの成形品



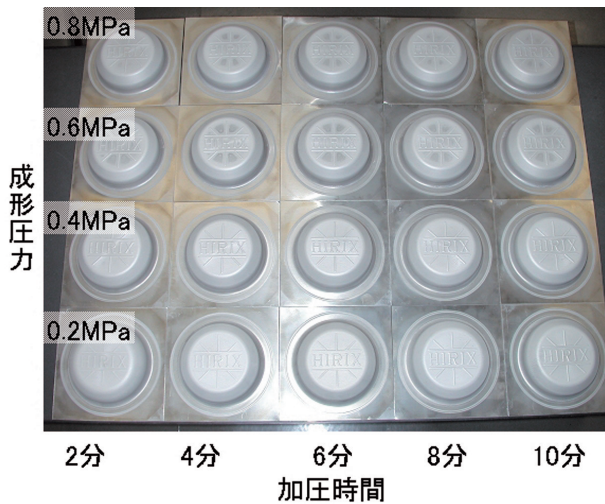


図17 成形温度550°Cの成形品

#### 4.2.2 成形条件と成形品の精度

成形品を三次元測定機，二次元画像測定機等で測定し，形状精度及び成形収縮率と成形条件の相関について検討を行った。測定は室温20°Cの恒温室で行い，成形品を室温に十分慣らしてから行った。図18に示すA，B，Cの真円度を形状精度の判定基準として検討した結果，成形温度が低い程，成形圧力が高い程，真円度の数値が小さく，真円に近い事が分かった。成形条件による成形品の真円度を図19に示す。また，成形収縮率は測定箇所によるばらつきが大きく，平均値は成形温度450°Cで約0.6%，500°Cで約0.65%，550°Cで約0.7%であり，成形温度により一定の値を示す事が分かった。これは，成形温度ではキャビティと成形品は同じ寸法だが，金型と成形品で熱膨張係数が異なる（鉄の熱膨張係数：約 $12.1 \times 10^{-6}$  (1/°C)，アルミニウム：約 $23.5 \times 10^{-6}$  (1/°C)) 事により室温（20°C）では成形品の寸法が金型より小さくなる為で，成形温度が高い程寸法差が大きくなる。成形材料の成形条件による成形収縮率を図20に示す。

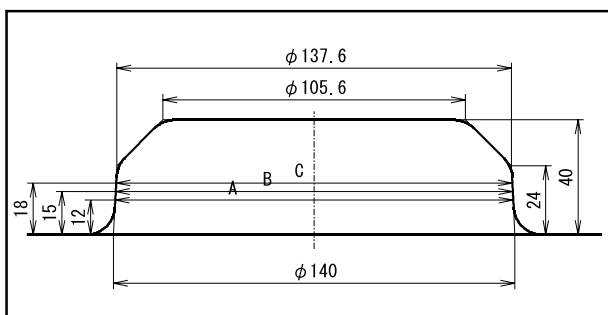


図18 真円度測定箇所

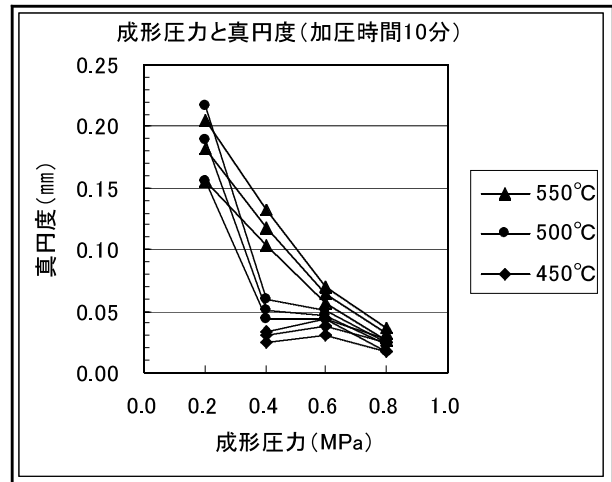


図19 成形条件と真円度

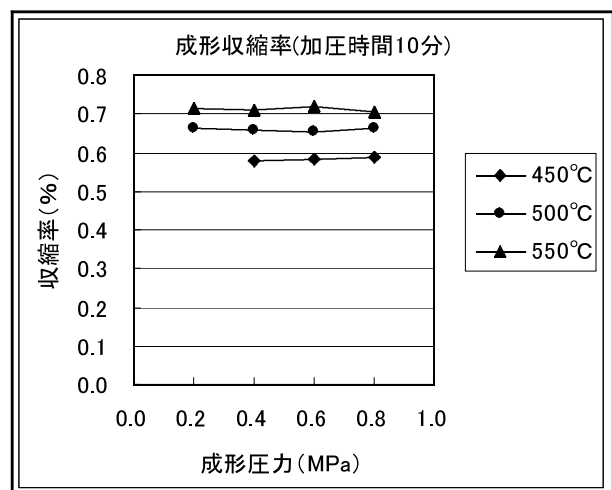


図20 成形条件と成形収縮率

## 5. 成形コストの検討

### 5.1 検討方法

超塑性アルミニウム合金のブロー成形について，本研究の成形法と従来の成形法の成形コストの比較を行った。本法と従来法で大きく異なる点は加圧ガスで，従来法は窒素，アルゴン等の不活性ガスを使用するのに対し，本法は過熱水蒸気を使用する。そこで，加圧ガスの原料コストについて検討を行い，大気圧，500°Cのガスを1 m<sup>3</sup>作るのに必要な水及び窒素ガスの20°Cに於ける体積と価格を調べた。

### 5.2 検討結果

500°Cの窒素ガス1 m<sup>3</sup>を20°Cに冷却したときの体積Vは，シャルルの法則の式： $V = V_0(1 + \theta/273)$ を変形して

$$V = V_0 / (1 + \theta/273)$$

$V_0$ ：500°Cに於ける気体の体積

$\theta$ ：気体の温度の変化量

$$V = 1/(1+480/273) \\ = 0.362550 \text{ m}^3$$

窒素ガス 1 m<sup>3</sup>の価格を450円としたとき、窒素ガスの原料価格は163.15円である。

また、500℃の過熱水蒸気を20℃に冷却したときの体積Vは、500℃の水蒸気の比重0.275kgf/m<sup>3</sup>と20℃の水の比重998.2kgf/m<sup>3</sup>から

$$V = 0.275/998.2 \\ = 0.000275 \text{ m}^3$$

水 1 m<sup>3</sup>の価格を147.3円としたとき、過熱水蒸気の原料価格は0.04円である。以上により、過熱水蒸気を加圧ガスとする本研究の成形法が、窒素ガスを加圧ガスとする成形法に比べて低コストに成形出来る事が確認出来た。

※窒素ガス 1 m<sup>3</sup>の価格は7 m<sup>3</sup>入りガスボンベで購入した場合の価格。

※水 1 m<sup>3</sup>の価格は平成19年の「家事用または口径13mmの1か月使用量別料金」10 m<sup>3</sup> (税込) の全国平均：1,473円から算出した。

## 6. まとめ

過熱水蒸気を加圧ガスとする成形圧力 1 MPa、成形温度 600℃の超塑性アルミニウム合金ブロー成形装置の開発を行った。また、過熱水蒸気の生成を行う上型と、直径140mm、深さ40mmのキャビティを有する下型を製作し、これらを用いて金型昇温試験及び成形試験を行った。その結果は以下の通りである。

### 金型昇温試験

- ON-OFF制御とPID制御（オーバーシュート抑制）を比較した結果、加熱所要時間及び目標温度での安定性についてPID制御（オーバーシュート抑制）の方が優れている事がわかった。

### 成形試験

- 成形所要時間について、成形温度及び成形圧力が高い程短縮される傾向が見られた。
- 成形品の形状精度については成形温度が低い程、また成形圧力が高い程向上する傾向が見られた。
- 成形収縮率については成形圧力に関係なく成形温度により一定の数値を示し、450℃：約0.6%、500℃：約0.65%、550℃：約0.7%であった。

### 成形コスト

- 過熱水蒸気を用いる本成形法と窒素ガスを用いる従来の成形法について加圧ガスの原料コストを比較した結果、過熱水蒸気の方が低コストである事が分かった。

今後、多様な形状の成形への対応を目的として成形装置及び金型の検討を行い、企業への普及を図る予定である。

## 謝辞

本研究で使用した三次元測定機及び二次元画像測定機は、財団法人JKAの補助事業により整備されました。記して感謝いたします。