

# 熱間多素材押し出し法による A7475 および A5056 パイプの成形

## —多素材押し出し法による中空品成形—

八戸工業大学 機械工学科

教授 高橋裕男

(平成2年度研究開発助成 AF-90008)

### 1. 研究の背景

中空品の新しい加工法として、多素材押し出し法を提案し、これまでに本加工法によるパイプ成形の際の基本的変形挙動について実験的に調べてきた<sup>1)~6)</sup>。その結果、本加工法により十分な接合強度を有する健全な中空品を成形することが可能であることがわかった。

ところで、ポートホールダイなどを用いるウェルディングチャンバー方式押し出し法では、主として素材分割を行なうダイブリッジ部の強度上の問題がある。そのため、A7000系アルミニウム合金のような、熱間加工温度範囲においても比較的高い強度を有する材料の中空品成形は工業的にはあまり行なわれていないようである。多素材押し出し法は素材分割過程を含まないので、ダイブリッジ自体が存在しない。したがって、高温強度の高い材料でも、多素材押し出し法においては比較的容易に中空品成形ができると思われる。これを確かめるために、強度が高く、接合性が悪いため、現行のウェルディングチャンバー方式押し出し法では中空品成形が普通困難である、アルミニウム合金 A7475 および A5056 を選び実験した。そして、多素材押し出し法によってこれらの材料の健全なパイプの成形が可能であることが確かめられた。同時に、これらの被加工材料を押し出す際の加工所要力、材料流れおよび製品パイプの接合強度に及ぼす押し出し比、加工温度などの影響についても調べた。

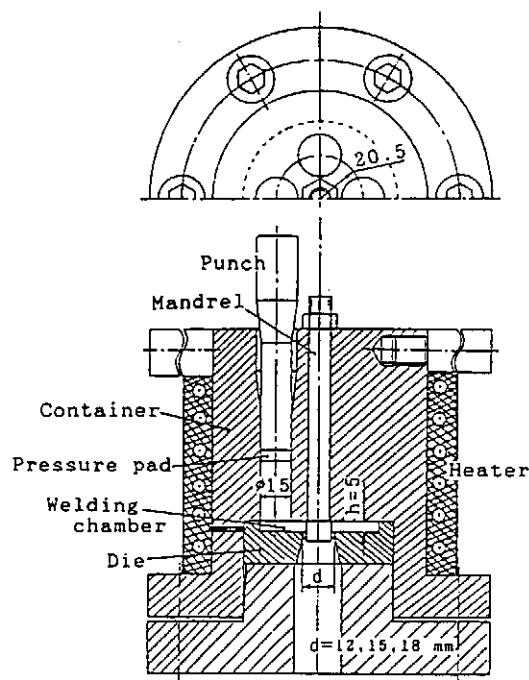


Fig. 1 Subpress for hot multi-billet extrusion

### 2. 実験条件および方法

実験に用いたサブプレスを図 1 に示した。コンテナ穴数は 4 とし、穴の直径は 15mm とした。ウェルディングチャンバーの直径はコンテナ穴の外接円直径と等しく 56mm とし、その深さは  $h = 5\text{mm}$  とした。他の押し出し条件は Table 1 に示した通りである。被加工材料には市販高力アルミニウム合金 A7475 (厚さ 30mm の熱間圧延板より切断した 30mm 角棒) および A5056 ( $\phi 25\text{mm}$  熱

Table 1 Extrusion conditions\*1

| Materials | A7475            |        |        | A5056    |        |          |
|-----------|------------------|--------|--------|----------|--------|----------|
|           | Pipes d × t / mm | 18 × 1 | 15 × 1 | 15 × 2.5 | 12 × 1 | 15 × 2.5 |
| R*3       |                  |        |        |          |        |          |
| T*2 / °C  | 13.2             | 16.1   | 7.2    | 20.5     | 7.2    | 16.1     |
| 400       |                  |        | ○      |          |        |          |
| 450       | ○                | ○      | ○      | ○        | ○      | ○        |
| 500       | ○                | ○      | ○      | ○        | ○      | ○        |
| 550       |                  |        |        |          | ○      | ○        |

\*1 Container holes were unlubricated, and die and mandrel were lubricated with graphite suspended oil (Deltaforge 182). Extrusion speed (punch speed)  $V_0 = 10 \text{ mm/min}$ .

\*2 T: Extrusion temperature.

\*3 R: Extrusion ratio defined as a ratio of sectional area of container holes to that of extruded pipe.

間押し丸棒)を用いた。これらの材料は400~450°Cで、鍛造によりφ18.5mmの丸棒に延した後、φ14.7×38mmの円柱ビレットに旋削した。押し速度(パンチ速度)は10mm/min一定とした。なお、押し出際に素材同士の接合に悪影響を及ぼす恐れから、コンテナ穴は無潤滑とした。ただし、押し残り部の押し出を容易にするため、ダイ(SKD61, HRc45)とマンドレル(SKD61, HRc45)にはコロイド状黒鉛(Deltaforge 182)を塗布した。

材料流れはウェルディングチャンバー内に押し残された被加工材料を適当な面で縦及び横に切断して、10%NaOH水溶液でマクロエッチする(70°C, 3~4min)ことにより調べた。

押し出したパイプの接合状態は、次のように調べた。まず、押し出したパイプの横断面において、素材どうしの接合部付近の組織を光学顕微鏡で調べた。一方、2種類の接合状態試験を行なった。接合状態試験片には、パイプの先端部約30mmは切

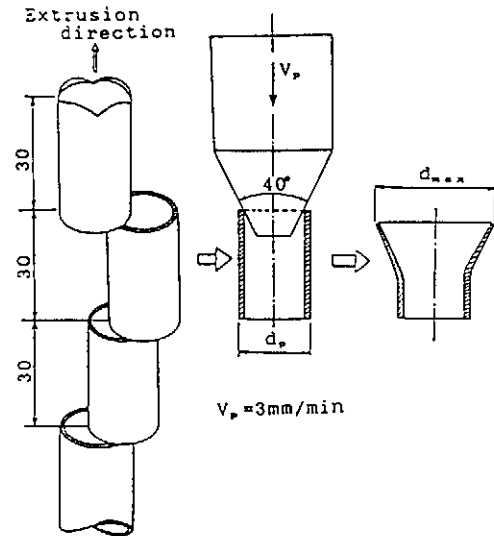


Fig. 2 Expanding test for extruded

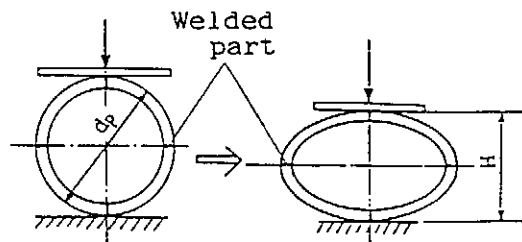


Fig. 3 Flattening test for extruded

り捨て、そこから長さ約30mmずつ切取ったパイプ試験片を用いた。接合状態試験の一つは押し広げ試験で、Fig. 2に示したように頂角40°の円錐パンチを試験片にクラックが生じるまで押し込んだ、パイプの接合性はその外径押し広げ率φ( $d_{max} = / d_p$ )で評価した。ここで、 $d_{max}$ はクラックが生じた時の試料の最大平均外径、 $d_p$ はパイプの元の実測外径である。他の一つは偏平試験である。この試験は上述のφが小さかったパイプについて、Fig. 3に示した方法で行なった。なお、押し広げ試験および偏平試験は室温で行なった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 加工所要力

押し出し荷重-ストローク曲線の形状は既報<sup>9)</sup>でA1050, A6063を被加工材料に用いた場合のそれ

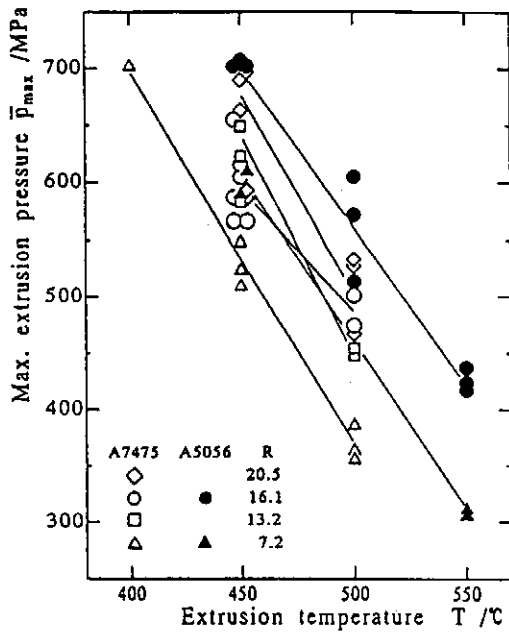


Fig. 4 Effect of temperature on maximum extrusion pressure.

とほぼ同じであるため、省略する。Fig. 4に最大平均押し圧力 $\bar{p}_{max}$ （最大押し荷重をコンテナ穴の総横断面積で割った値）に及ぼす温度の影響を示した。押し温度が高くなるとともに、 $\bar{p}_{max}$ は直線的に減少している。また、同じ押し温度に対し、被加工材料にA5056を用いた場合の方がA7475を用いた場合より $\bar{p}_{max}$ は15~20%高くなっている。これはA5056の方が400~500°Cで高温強度が高いためと思われる。

### 3.2 材料流れ

以下においてコンテナ穴中心軸を含む対称面をA対称面、素材どうしの接合面をB対称面と呼ぶことにする。Fig. 5はウェルディングチャンパー内に押残された被加工材料のA対称面、B対称面およびダイアプローチ面からの距離約4.5, 2.5および0.5mmの位置の横断面のマクロ組織と材料流れの様式図を示したものである。被加工材料はA7475で、押し比 $R = 16.1$ 、押し温度 $T = 450^\circ\text{C}$ の場合である。これらの図からチャ

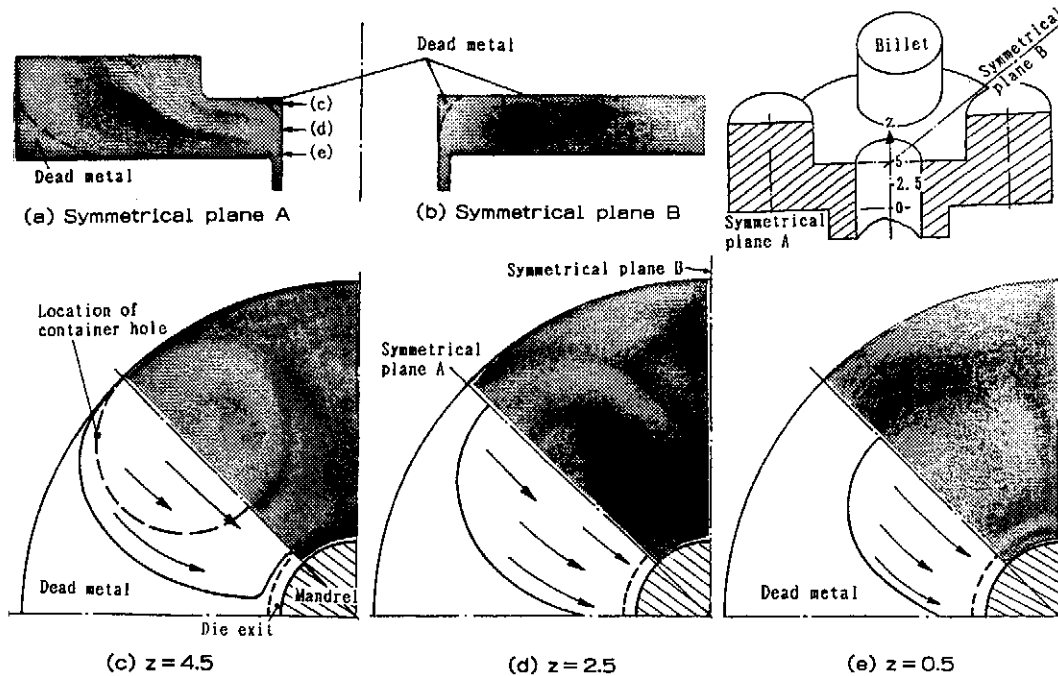


Fig. 5 Macrostructure on symmetrical planes A and B and cross sections of the remainder of billet in welding chamber. A7475,  $R = 16.1$ ,  $T = 450^\circ\text{C}$ . 10% NaOH solution,  $70^\circ\text{C}$ , 3~4 min.

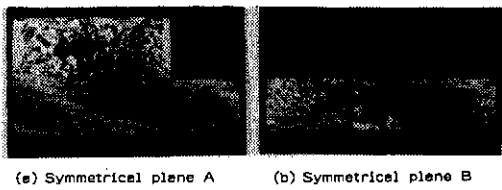


Fig. 6 Macrostructure on symmetrical plane A and B. A5056, R = 16.1, T = 450°C

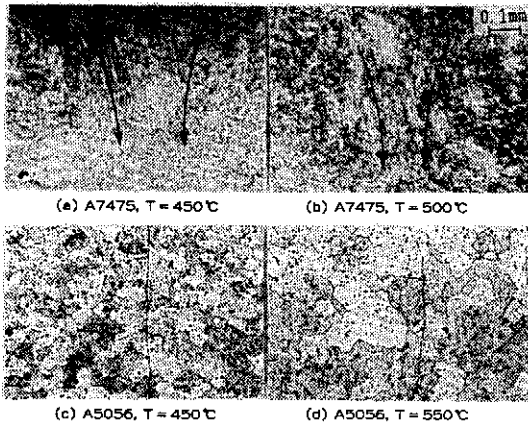


Fig. 7 Microstructure on cross section of extruded pipes, 60mm apart from the front end. R = 16.1.

ンバー内の材料流れについて次のことがわかる。  
 まず、AおよびB対称面 (Fig. 5 (a), (b)) における流れ模様を見ると、ダイの隅角部、マンドレルとコンテナー終端面との隅角部にある素材はほとんど流動していないようであり、これらの部分はデッドメタル領域であると思われる。Fig. 5 (c), (d), (e) のマクロ組織写真には、左半分に表示した実線付近にせん断変形帯が存在するように見える。この帯状領域はデッドメタルと塑性領域との境界領域と思われる。塑性変形領域は、一つの素材に対してその横断面形状が楕円状になっていて、全体では4つ葉クローバー状になっていると思われる。この形状は鉛を用いた既報<sup>9)</sup>の実験においても認められた。

Fig. 6は被加工材料にA5056を用い、R = 16.1, T = 450°Cで押出した場合について、AおよびB対称面におけるマクロ組織を示したものである。Fig. 5のような流れ線は見えず、粗大な結晶粒が見

Table 2 Expanding ratio of machined pipes.

| Material | A7475    |      |      |      | A5056  |        |
|----------|----------|------|------|------|--------|--------|
|          | d × t/mm | 12×1 | 15×1 | 18×1 | 15×2.5 | 15×2.5 |
| φ        |          | 1.22 | 1.25 | 1.24 | 1.21   | 1.37   |
|          |          | 1.22 | 1.25 | 1.23 | 1.17   | 1.36   |
|          |          |      |      | 1.16 |        |        |

られた。しかし、結晶粒の大きさやコントラストの差から、材料流れの様子が概ね推定でき、A7475を用いた場合 (Fig. 5 (a), (b)) の材料流れとほぼ同じと見ることができる。

### 3. 3 パイプの接合状態

Fig. 7は成形されたパイプ横断面における接合部付近の顕微鏡組織写真の代表例を示したものである。A7475パイプについては、溶体化処理温度以下の450°Cで押出した場合 (Fig. 7 (a)) も、それ以上の500°Cで押出した場合 (Fig. 7 (b)) も、結晶粒は細かく、素材どうしの接合位置がほとんど判別できない。なお、接合部付近に矢印で示した方向に流れ線が見える。一方、A5056パイプの場合 (Fig. 7 (c), (d))、結晶粒が等方的で、粗いことが分かる。550°Cで押出した場合は450°Cで押出した場合より結晶粒の粗大化が目立つ、また、接合シームが消失していないが、接合部を越えて結晶粒が成長しており、接合面付近に空洞や粗大不純物などは見当たらない。上述のことはA7475の場合もA5056の場合も接合状態がよいことを示唆している。

(a) 押広げ試験について JISにはA5000系溶接パイプについての偏平試験の基準 ( $H/d, \leq 0.75$ ) はあるが、A7000系の溶接パイプについての接合強度の試験基準はない。そこで、熱間鍛造したままの素材 ( $\phi 18.5\text{mm}$ , 2章参照) から旋削して作製した継目無パイプを標準試験片として、その押広げ率を調べ、パイプの接合強度を評価する基準とした。標準試験片の押広げ試験結果はTable 2に示した通りである。サイズにより変動がある

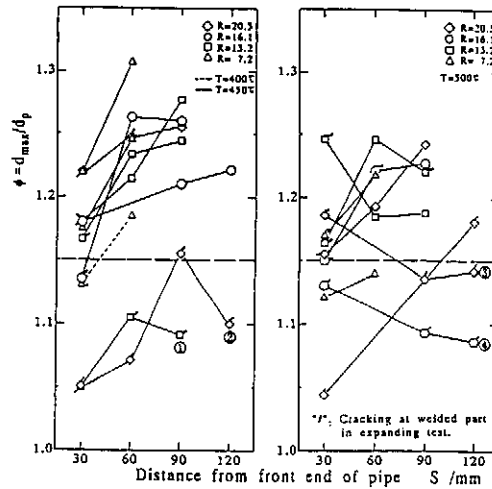
Table 3 Appearance of pipes after expanding test.

| Pipes<br>d×t<br>/mm | R    | T<br>/°C | S <sup>*)</sup> / mm |    |    |
|---------------------|------|----------|----------------------|----|----|
|                     |      |          | 30                   | 60 | 90 |
| φ15<br>×2.5         | 7.2  | 400      |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
| φ18<br>×1           | 13.2 | 450      |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
| φ15<br>×1           | 16.1 | 450      |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
| φ12<br>×1           | 20.5 | 500      |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
| φ15<br>×2.5         | 7.2  | 550      |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
| φ15<br>×1           | 16.1 | 500      |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |
|                     |      |          |                      |    |    |

\*) S: Distance of expanded end of specimen from the front end of extruded pipe.

が、A7475標準試験片の外径押広げ率は1.16~1.25、A5056素材パイプのそれは約1.36~1.48の範囲にある。したがって、押出されたパイプの外径押広げ率がA7475の場合では1.15~1.20、A5056の場合では1.35~1.40以上に達したものはほぼ素材と同程度の接合強度を有すると判断してよいであろう。

Table 3は押広げ後のパイプの外観写真の例を示したものである。押広げ試験によるクラックは先端から30mmの位置では接合部における引き裂きの形で生じる場合が多かったのに対し、先端から約60、90mm離れた位置では、接合部以外のところで生じる場合が多かった。



(a) T = 400, 450°C (b) T = 500°C

Fig. 8 Expanding ratio of extruded pipes for A7475.

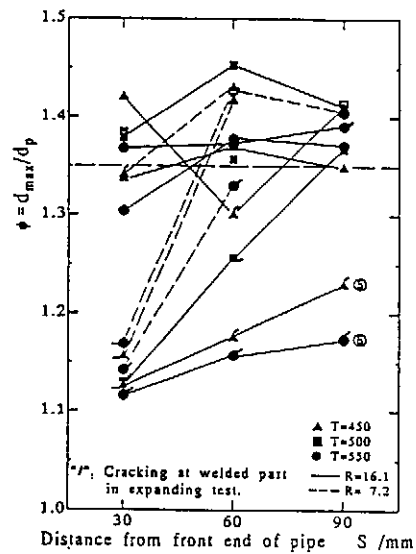


Fig. 9 Expanding ratio of extruded pipes for A5056.

Fig. 8はA7475を被加工材料に用いた場合について、押出されたパイプの外径押広げ率の製品長手方向に対する変化を示したものである。Fig. 8 (a)に見るように、400および450°Cで成形したA7475パイプの大部分は先端から約30mm離れた位置において、外径押広げ率 $\phi$ は1.15以上、先端から約60mm以上離れた位置において、 $\phi$ は1.20以上に達しており、素材と同程度の外径押広

げ率を有することが分かる。一方、 $\phi$ が1.20以上になったものと同じ条件で押出した場合でも、図中①、②で示した2本のパイプについては $\phi$ が比較的小さかった。これらの場合に $\phi$ が小さくなる理由は明らかではないが、潤滑剤など不純物が接合部に混入したことが考えられる。これらの場合でも先端から60mm以上に離れた位置では、 $\phi \geq 1.10$ であり、押広げによりある程度塑性変形していることが分かる。Fig. 8 (b)には500°Cで押出したA7475パイプの押広げ率を示した。Fig. 8 (a)  $T = 400, 450^\circ\text{C}$ と比べると、 $T = 500^\circ\text{C}$ の方は $\phi$ がやや低めではあるが、違いはそれほど大きくない。このことはA7475はその溶体化処理温度(約480°C)付近で成形されても、製品の接合状態などはあまり影響されないことを示唆している。

Fig. 9はA5056を用いて成形したパイプの外径押広げ率 $\phi$ を示したものである。押出されたパイプの先端から約30mm離れた位置で、 $\phi = 1.12 \sim 1.17$ のものが約半数あるが、 $S = 60\text{mm}$ の位置では、大部分はクラックが接合面以外のところで生じて、 $\phi$ が1.35以上に達しており、素材と同程度の外径押広げ率を持つことがわかる。また、450~550°Cの範囲内では、押し出し温度がパイプの接合状態に与える影響はほとんど認められなかった。

(b) 偏平試験についてFig. 8, Fig. 9に丸数字で示したパイプの場合、外径押広げ率が標準試験片と比べ低い。そこで、これらのパイプについては偏平試験を行なってみた。その結果をTable 4に示した。Table 4から押広げ率が比較的低いパイプであっても十分な偏平変形ができ、すべてJISに規定されている中・低強度のアルミニウム合金溶接パイプの偏平率規定値 $\omega \leq 0.75^*$ を十分満たしている。

### 3.4 パイプの寸法精度

成形されたパイプ外径の実測値 $d_p$ とダイの出口径 $d$ の差 $\Delta d = d_p - d$ をパイプの外径誤差と呼ぶことにする。Fig. 10はパイプの外径誤差 $\Delta d$ と押し出し比との関係を示したものである。押し出し比 $R$

Table 4 Results of flattening test for the pipes indicated by ①~⑥ in Fig. 8 and 9.

| Pipes<br>$d \times t$<br>/mm | R    | T<br>/°C | S** / mm               |         |                 |
|------------------------------|------|----------|------------------------|---------|-----------------|
|                              |      |          | 60~90                  | 120~150 | 150~180         |
| $\phi 18$<br>$\times 1$      | 13.2 | 450      | ① $\omega^{**} = 0.43$ |         |                 |
| $\phi 15$<br>$\times 1$      | 16.1 | 500      | ④ $\omega = 0.68$      |         | $\omega = 0.60$ |
| $\phi 12$<br>$\times 1$      | 20.5 | 450      |                        | ②       | $\omega = 0.48$ |
| $\phi 12$<br>$\times 1$      | 20.5 | 500      | ③ $\omega = 0.60$      |         | $\omega = 0.50$ |
| $\phi 15$<br>$\times 1$      | 16.1 | 450      | ⑤ $\omega = 0.19$      |         |                 |
| $\phi 15$<br>$\times 1$      | 16.1 | 550      | ⑥ $\omega = 0.20$      |         |                 |

\*1 S: Position of specimen from the front end of extruded pipe.

\*\*  $\omega$ : Flattening ratio:  $\omega = H/d_p$ .

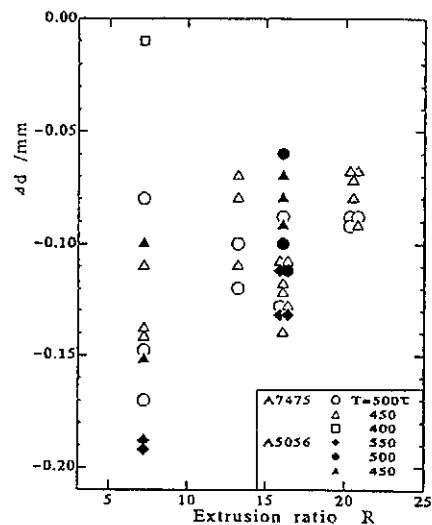


Fig. 10 Error in outer diameter of pipe,  $\Delta d (=d_p - d)$  related to extrusion ratio.

$= 7.2$ の場合、 $|\Delta d| < 0.20$ 、押し出し比 $R > 10$ の場合、 $|\Delta d| < 0.15$ となる。また、成形されたパイプについてA対称面 (Fig. 5参照) 内で測った外径とB対称面内で測った外径との差は $\pm 0.03\text{mm}$ 以下であり、偏肉も肉厚の5%以下であ

った。

#### 4. まとめ

ダイブリッジの強度上および製品の接合性の問題により従来のウェルディングチャンバー方式押し出し法ではほとんど中空品の成形が行われていない高強度アルミニウム合金円管の熱間素材押し出し成形の可能性、および成形の際の変形挙動を調べた結果、次のことがわかった。

- (1) 熱間多素材押し出し加工により A7475 および A5056 の健全なパイプを成形することができる。
- (2) 成形したパイプの大部分は、押し出された先端から約 30mm 離れた位置では外径押し広げ率が比較的低いが、先端から 60mm 以上離れた位置では、A7475 の場合  $\phi \geq 1.15 \sim 1.20$ 、A5056 の場合  $\phi \geq 1.35 \sim 1.40$  であり、素材と同程度の接合強度を有する。
- (3) 先端から 60mm 以上離れた位置で、外径押し広げ率が比較的低いパイプでも、偏平率は中・低強度アルミニウム合金の溶接パイプに対する JIS 規定値  $H/d_0 \leq 0.75$  を満たす。
- (4) A7475 および A5056 を被加工材料に用いた場合のウェルディングチャンバー内における材料流れ挙動は純鉛を用いた場合<sup>2)</sup> のそれとよく似ており、また、ウェルディングチャン

バー内における塑性領域の横断面形状は 4 つ葉クローバー状になっている。

なお、本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成金の補助を受けて行なったものであり、ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 村上 糺・謝 建新・高橋裕男：塑性と加工、31 - 351 (1990), 495.
- 2) 謝 建新・村上 糺・高橋裕男：同上、31 - 351 (1990), 502.
- 3) 謝 建新・村上 糺・高橋裕男：同上、31 - 352 (1990), 625.
- 4) 謝 建新・村上 糺・高橋裕男：同上、31 - 359 (1990), 1469.
- 5) 謝 建新・村上 糺・高橋裕男：同上、32 - 362 (1991), 354.
- 6) Takahashi, H., Murakami, T. & Xie, J.X. Advanced Technology of plasticity 1990, Vol. I, (1990), 323, JSTP.
- 7) 謝 建新・村上 糺・高橋裕男：39回塑加連講論、(1988), 307.
- 8) 日本規格協会：JIS ハンドブック・非鉄、(1986), JISH4312.