

# 部分軟化熱処理を施したアルミニウム合金板の対向液圧成形

大同大学 機械工学科

教授 西脇 武志

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017025)

キーワード：深絞り，対向液圧，アルミニウム，溶体化，部分軟化

## 1. 研究の目的と背景

アルミニウム合金板は鋼板に比べて深絞り性に劣っており、深い容器形状の製品を慣用のプレス加工法で成形することは難しい。そのため、成形性を向上させる技術として、対向液圧成形法<sup>1)</sup>や部分軟化成形法<sup>2)</sup>などの特殊加工法が開発されている。対向液圧成形法は、1工程の成形で深い容器形状部品を得ることができる。しかしながら、液体を使った特殊な金型を使用するため、再絞りなどの多工程の加工が難しく、1工程でさらに複雑な成形を行うことが望まれている。一方、部分軟化成形法としては、これまでもブランクの周辺部を焼鈍することで軟化させる周辺軟化成形法<sup>3)</sup>や中央部を時効処理によって硬化させる中央硬化成形法<sup>4)</sup>が提案されている。また、レーザーによる走査型の熱処理によって、アルミニウム合金板に強度分布を与える方法は、Tailored Heat Treated Blanks (THTB)として研究されている<sup>5)</sup>。しかしながら部分軟化成形法の成形性は、軟質部の強度差に依存するため、更に成形性を向上させることは難しい。

そこで、アルミニウム合金板の成形性を更に向上させるために両者の成形法の組み合わせを試みる。部分軟化成形法は、他の特殊加工法と異なり、成形前の素材の改質技術である。そのため、加工に関しては慣用のプレス加工法に限定されない。対向液圧成形法とも組み合わせられる可能性があり、両者の組み合わせによって、深絞り性が向上することが、成形シミュレーションにおいては報告されている<sup>6)</sup>。しかしながら、実験的に検証された報告はなく、対向液圧成形のような高い絞り比での成形において、本当に成形性が向上するかどうか明らかになっていない。本論文では、部分軟化成形法と対向液圧成形法を組み合わせ、円筒深絞り試験を行って成形限界を調べたので報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

部分的に軟化した板を作製するため、人工時効処理した硬質なアルミニウム合金板に局所的な溶体化を施すこととし、供試材として熱処理型合金の A6061-T6 板を用いた。表 1 に化学成分を示す。

表 1 A6061 合金板の化学成分 (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.63	0.3	0.27	0.06	1.0	0.18	0.06	0.03

また、表 2 に硬質材 (T6) と溶体化した軟質材 (W) の機械的特性値を示す。溶体化処理については、後述する方法で全域を溶体化した後、JIS5 号試験片に加工を施し、引張試験を行った。

表 2 A6061 合金板の機械的特性値

	YS /MPa	TS /MPa	伸び /%
A6061-T6	292	315	10.6
A6061-W	99	188	20.3

### 2.2 部分軟化熱処理方法

局所溶体化処理の方法として、高温に加熱した金型との接触熱伝達により供試材を加熱し、溶体化処理する方法を用いた。局所溶体化処理装置の概略図を図 1 に示す。加熱金型には円形溝加工を施し、中央部が加熱されず、フランジ周辺部のみ加熱されるようにした。局所溶体化処理する際は、加熱金型の中央部の表面温度が 500°C になるように加熱し、供試材を挟み込んで、25kN で 0.9 秒間加压保持した。その後、除圧し直ちに水冷した。

加熱金型は、円形溝の直径寸法  $D_{in}$  が異なるものを用意した。成形工程で使用するパンチ径  $D_p$  と円形溝の直径寸法  $D_{in}$  の比率  $D_{in}/D_p$  が、1.2, 1.4, 1.6, 1.8 となるような円形溝加工を施した加熱金型と、円形溝無しの 5 種類を使用した。以後、この比率を硬質領域比 ( $D_{in}/D_p$ ) と称する。硬質領域比は、その数字が大きくなるほど、局所溶体化処理後の硬質領域が広くなることを意味している。

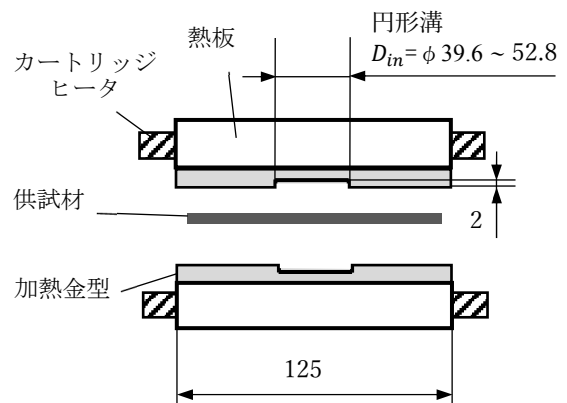


図 1 局所溶体化熱処理装置の概要

部分軟化熱処理後の硬さ分布を図 2 に示す。硬質領域比が異なる加熱金型を用いて熱処理したブランクは、硬さ分布が異なっており、軟化領域の作り分けができています。ま

た、比較のため、全体が硬質な T6 材と軟質な W 材の硬さ分布を合わせて示すが、部分軟化したブランクの硬質部は T6 材と同じ 105HV 程度であり、軟質部は、W 材と同じ 60HV 程度であった。また、硬質部と軟質部の間には硬さが連続的に変化する 10mm 程度の幅の遷移領域があることが分かる。

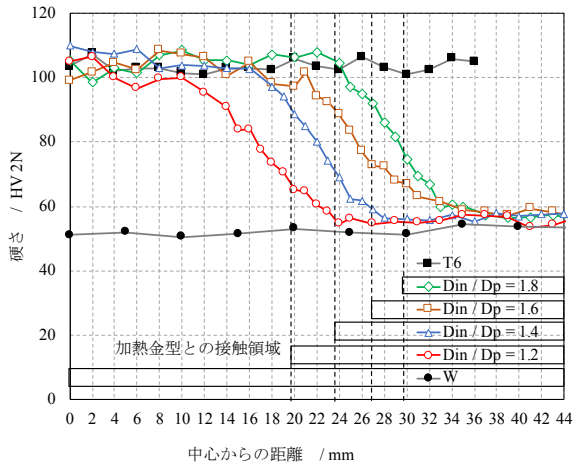


図 2 局所溶体化後の硬さ分布

### 2・3 対向液圧成形試験方法

本研究で用いた対向液圧試験機は、図 3 に示す対向液圧成形用ダイセット、液圧制御ユニット、および駆動源としての引張試験機から構成されている。

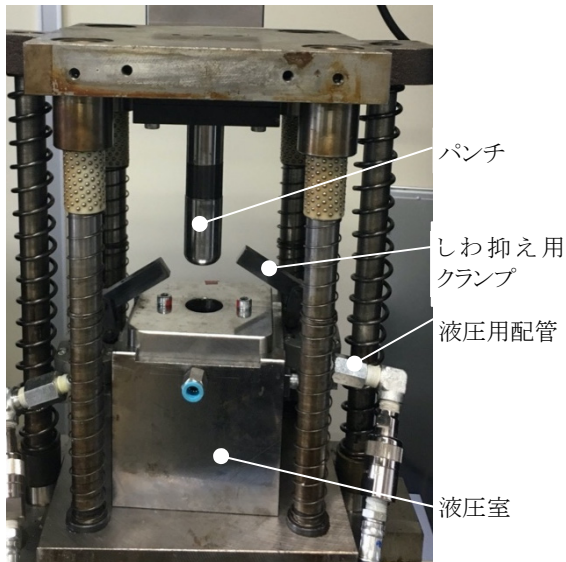


図 3 対向液圧成形器具ダイセット

対向液圧の媒体には水を用いており、水圧回路に取り付けたリリーフバルブによって保持液圧は一定となるように制御される。また、液圧の加圧方法は、液圧室の体積減少による自然加圧を用いて行っているが、10MPa までは、水圧回路に取り付けられた水圧ポンプによる強制加圧も併用し、成形初期の液圧増加率を制御している。図 4 に成形時の液圧—パンチストローク曲線の 1 例を示す。対向液

圧成形時の保持液圧  $P_H$  および液圧増加率  $P_H/S_H$  が液圧負荷の条件となる。ここで、 $S_H$  は保持液圧に達するパンチストロークである。本実験では、 $P_H$  は 5~20MPa、 $P_H/S_H$  は 1MPa/mm として対向液圧成形を行った。

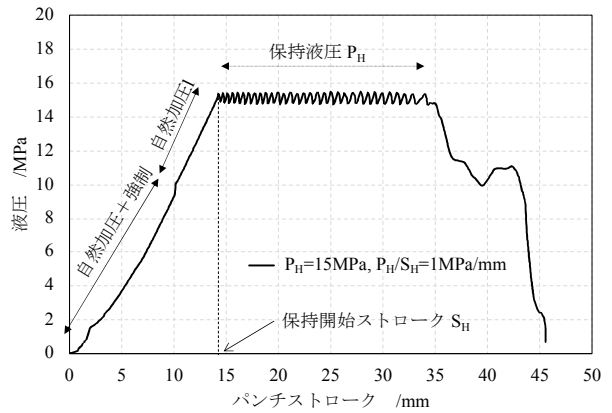


図 4 成形時の液圧—パンチストローク曲線の例

また、円筒深絞り工具を用いて成形試験を行った。成形試験治具の模式図を図 5、成形工具の寸法を表 3 に示す。パンチ速度は、6mm/min とし、しわ抑え力は、ブランク直径が  $\phi 66\text{mm}$  以下では 1.3kN、 $\phi 68\text{mm}$  以下以上では、2.4kN とした。また、しわ抑え力は、油圧クランプにて負荷している。部分軟化熱処理を施した板の加熱領域の中心とブランク中心が同心円になるように、ブランクを加工した。部分軟化した板については、絞り成形 (Deep Drawing, DD) と対向液圧成形 (Hydro-mechanical Deep Drawing, HDD) を実施した。また、比較のため、T6 材および W 材を用いた試験も行った。

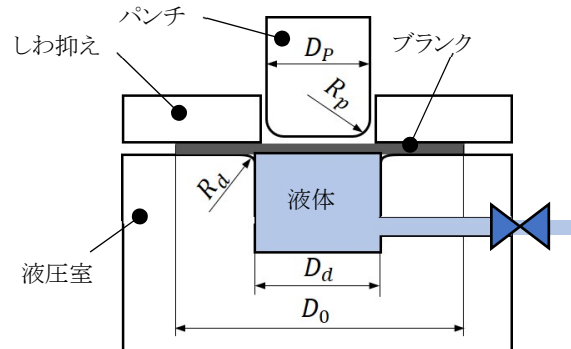


図 5 対向液圧試験治具の模式図

表 3 工具及びブランク寸法

パンチ	直径 $D_p$ /mm	33.0
	肩半径 $R_p$ /mm	10.0
ダイ	直径 $D_d$ /mm	37.1
	肩半径 $R_d$ /mm	5.0
ブランク	直径 $D_0$ /mm	$\phi 62 - 85$
	硬質領域比 $D_{in}/D_p$	1.2, 1.4, 1.6, 1.8

### 3. 実験結果

#### 3・1 限界絞り比に及ぼす成形法の影響

慣用法の絞り成形法 (DD), 対向液圧成形法 (HDD) および部分軟化成形法 (THTB), 部分軟化対向液圧成形法 (HDD of THTB) の 4 種類の成形法において, 各々限界絞り比 (LDR) を求めた。結果を図 6 に示す。ここで, 比較試験である深絞り成形および対向液圧成形は, T6 材を用いての成形試験であり, 部分軟化成形および部分軟化対向液圧成形では, 硬質領域比  $D_{in}/D_p = 1.4$  の部分軟化ブランクを用いた。また, 図 7 に各成形法での LDR の結果を比較してグラフに示す。T6 材は, 深絞り成形では LDR が 1.88 と低く, 対向液圧成形でも LDR は 1.94 と成形性の向上はほとんどない。それに対し, 部分軟化成形では, 2.24 と成形性が大きく向上しており。さらに部分軟化対向液圧成形では 2.42 となり, 深絞り成形と比較して LDR が 0.54 向上している。以上のことから, 部分軟化熱処理と対向液圧成形の組み合わせで, 成形性が大きく向上することが分かった。





	深絞り DD	対向液圧成形 HDD	部分軟化 THTB ( $D_m/D_p=1.4$ )	部分軟化対向液圧 HDD of THTB ( $D_m/D_p=1.4$ )
ブランク径	φ62	φ64	φ74	φ80
LDR	1.88	1.94	2.24	2.42
成形限界				

図 6 各種成形法の成形限界での成形品写真

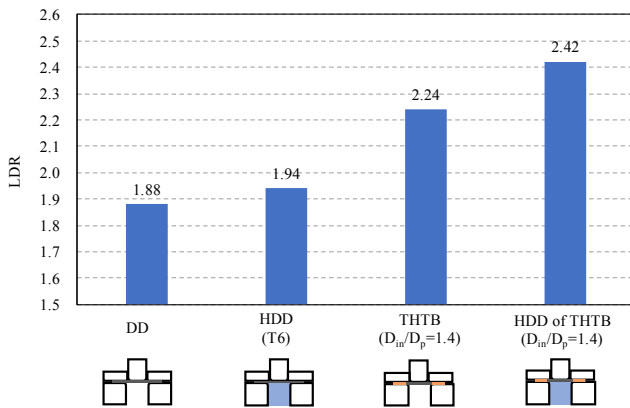


図 7 各種成形法の限界絞り比の比較

#### 3・2 成形性に及ぼす溶体化領域の影響

図 8 に, 異なる溶体化領域の部分軟化ブランクを用いて対向液圧成形を実施したときの各々の LDR を示す。ブランク中央に硬質部を存在させることで, LDR は向上し, 硬質領域比  $D_{in}/D_p$  が 1.4 の部分軟化ブランクを対向液圧成形したときに最も成形性が向上した。  $D_{in}/D_p = 1.4$  の LDR は, T6 材を用いた対向液圧成形の LDR と比べ, 0.48 向上し, 全域溶体化ブランクと比べても 0.30 向上している。さらに硬質領域を増やしていくと逆に LDR は低下を

始め,  $D_{in}/D_p$  が 1.8 のように硬質領域が広い場合, 成形性向上にあまり効果がないことが確認できた。

φ64 の部分軟化ブランクのパンチ荷重-ストローク量曲線を図 9 に示す。成形荷重は硬質領域が最も広い T6 材のときに最も高く, W 材のときに最も小さくなっている。部分軟化したブランクは, 硬質領域比  $D_{in}/D_p$  の値が小さくなるほど, 成形荷重も小さくなっている。これは, 軟化領域が広いとフランジ部が軟質部のみで構成されるようになり, 全域溶体化ブランクと同じ変形抵抗で縮みフランジ変形をするためであると考えられる。

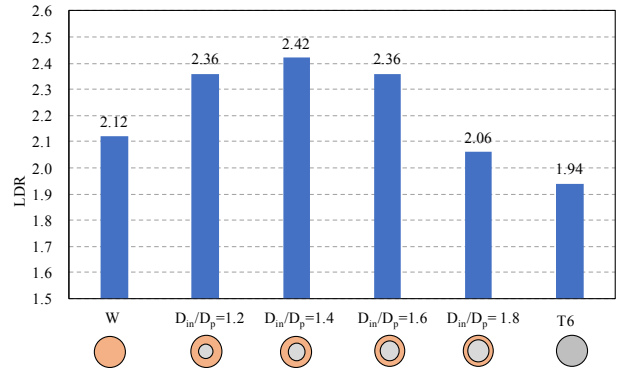


図 8 軟化領域の異なるブランク材の限界絞り比

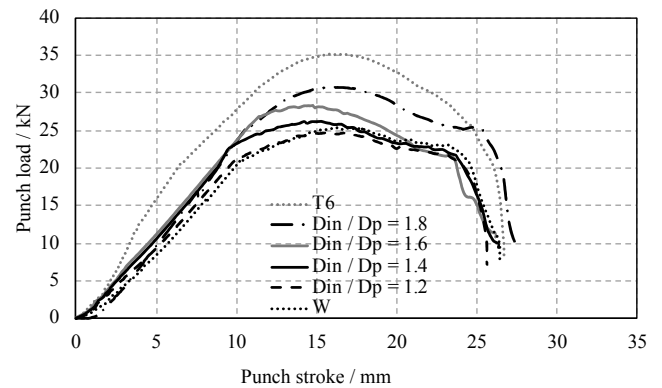


図 9 様々な部分軟化領域のブランクを用いた対向液圧成形時のパンチ荷重-ストローク曲線 ( $D_0 = \phi 64$ )

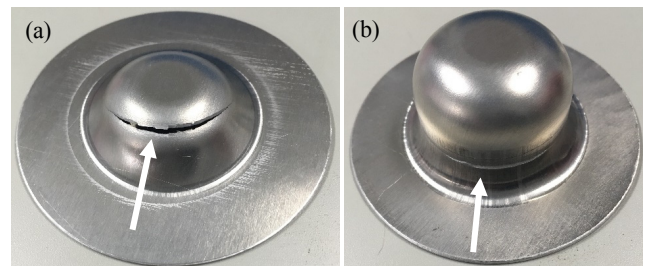


図 10 2 種類の破断形態 (a) パンチ肩破断 ( $D_{in}/D_p=1.6$ ,  $D_0 = \phi 80$ ), (b) 縦壁部破断 ( $D_{in}/D_p=1.4$ ,  $D_0 = \phi 82$ )

また, 部分軟化対向液圧成形時に見られる 2 通りの破断形態を図 10 に示す。硬質領域比  $D_{in}/D_p$  が 1.6, 1.8 の部分軟化ブランクを用いた成形では, 図 10(a) に示したようなパンチ肩部での破断を示した。一方, 硬質領域比  $D_{in}/D_p$  が

1.2, 1.4 の部分軟化ブランクを用いた成形では、図 10(b) に示したような縦壁部での破断を示した。これは、液圧を用いない部分軟化成形の結果と同じであり、パンチ肩部での破断は、硬質領域が広範囲であるためフランジ部での変形抵抗が大きいことが原因と考えられる。また、パンチ側壁部での破断は硬質部と軟化部の境界部付近で発生しており、溶体化による破断耐力の低下が原因であると考えられる。実験において LDR が最大となった部分軟化領域は、 $D_{in}/D_p = 1.4$  のときであり、2 種類の破断限界の境となる硬質領域比のときに、最も成形性が向上すると考えられる。

### 3・3 成形性に及ぼす保持液圧の影響

図 11 に、異なる保持液圧で、部分軟化対向液圧を行ったときの LDR を示す。保持液圧が高くなるほど LDR は向上し、 $P_H=20\text{MPa}$  のとき LDR が 2.55 となり、 $10\text{MPa}$  の条件と比べ、0.13 向上した。 $D_{in}/D_p = 1.4$  の条件では、縦壁部破断が生じて成形限界に達するが、保持液圧の増加により、パンチ側面においても摩擦保持効果が働き、破断を抑制したと思われる。この実験の液圧の範囲内では、液圧増加に対する LDR の上限値を調べることはできなかったが、液圧を高くすれば LDR が向上する可能性がある。

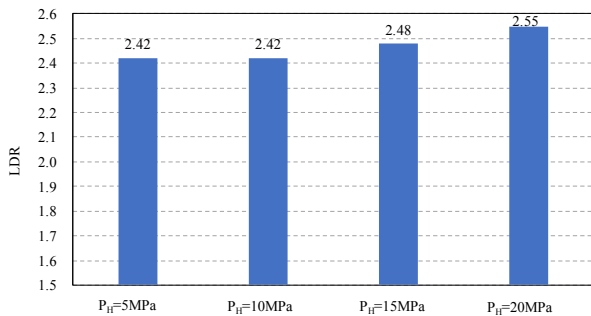


図 11 部分軟化対向液圧成形の LDR に及ぼす保持液圧の影響 ( $P_H/S_H=1.0\text{MPa}/\text{mm}$ ,  $D_{in}/D_p = 1.4$ )

## 4. 数値解析方法および結果

### 4・1 解析条件

対向液圧成形時の軟化領域の影響を調べるため、数値解析を行った。ソルバーには LS-DYNA を用いた。アルミニウム合金板は弾塑性体とし、加熱金型との非接触領域を硬質部、接触領域を軟質部として各々に T6 材と W 材の材料パラメータを割り当てた。また、工具は剛体とした。いずれもシェル要素を用いた。材料モデルには、Hill の降伏関数を用い、硬化則として Swift 則を用いた。そのパラメータを表 4 に示す。工具寸法及び成形条件は実験と同様とした。

表 4 Swift 硬化則のパラメータ

Parameters	T6	W
$F$ [MPa]	383.8	339.1
$\epsilon_0$	0.002	0.001
$n$	0.06	0.234

### 4・2 解析結果

実験と同じ硬質領域比の部分軟化ブランクを用いて成形解析を行い、LDR を求めた。数値解析における成形限界の判定には、要素の異常変形をもって割れが生じたのみなし、絞り成形の可否を判断した。図 12 に、実験および数値解析の LDR を比較して示す。数値解析においては、硬質領域比  $D_{in}/D_p$  が 1.4~1.6 において最大の LDR を示し、それより軟化領域が広い場合や狭い場合では、LDR が低下した。これは実験結果と同じ傾向である。また部分軟化したブランクでは、いずれも均質な T6 材や W 材よりも大きな LDR を示し、数値解析においても部分軟化対向液圧成形法によって成形性が向上することが確認できた。

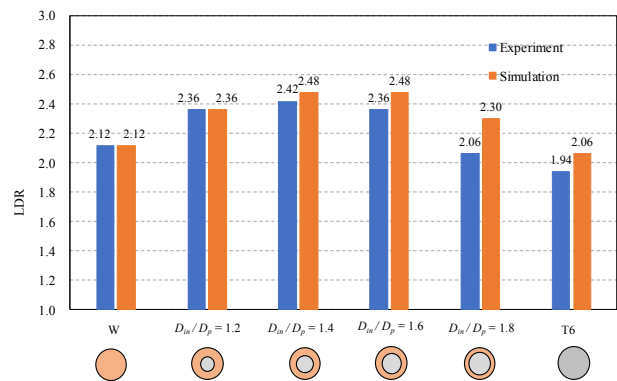


図 12 様々な軟化領域での実験と数値解析の LDR の比較 ( $P_H=10\text{MPa}$ ,  $P_H/S_H=1.0\text{MPa}/\text{mm}$ )

## 5. 結言

局所溶体化処理を施した部分軟化ブランクを用いて、対向液圧成形を行った。また、部分軟化をモデル化したブランクを用いて対向液圧成形の数値解析を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 部分軟化成形法と対向液圧成形法を組み合わせることで、単独の場合と比べて深絞り性が大きく向上した。
- 2) 深絞り性向上に最適な軟化領域が存在し、硬質領域比が 1.4 のとき最適であった。

## 謝辞

本研究は公益財団法人天田財団平成 29 年度一般研究開発助成により実施したものであり、感謝の意を評します。

## 参考文献

- 1) 中村和彦:塑性と加工, 25-284 (1984), 831-838.
- 2) 西脇武志・金武直幸:軽金属, 55-1 (2005), 33-36.
- 3) 戸沢康寿:塑性と加工, 1-1 (1960), 23-28.
- 4) 藤岡敏行・菅又信・金子純一:塑性と加工, 27-311 (1986), 1363-1368.
- 5) Geiger M., Merklein M., Vogt U.: Prod. Eng. 3 (2009), 401-410.
- 6) Piccininni A., Michele G. D., Palumbo G., Sorgente D., Tricarico L.: Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.) 28-12 (2015), 1482-1489