1070 アルミニウム H26 薄板の深絞り加工に及ぼす CO₂ レーザによる局部焼なまし効果

中村 和彦*・高橋 宏由**・中村 正美***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol 55, No. 10 (2005), pp. 494-499

Effect of local annealed area by CO₂ laser irradiation on deep drawability of a 1070-H26 aluminum sheet

Kazuhiko NAKAMURA*, Atsuyoshi TAKAHASHI** and Masami NAKAMURA***

Deep drawing is examined as an example of applying the local annealing method by the CO₂ laser. The deep drawing limit of the local annealed blank is obtained at the intersection in two kinds of breaking limit lines generated by expanding the annealed area. The limiting drawing ratio of the cylindrical shell shows $D_{0\max}/d_p=2.88$ (1.29 times the O blank) with $D_{AF}/d_p=1.90$. The deep drawing limit of the square shell improves by using the whole circumference annealed blank from the corner part annealed blank. The value shows $D_{0\max}/s_p=2.54$ (1.22 times the H26 blank) with $D_{AF}/s_p=1.78$. The drawn shell of uniform strength is obtained by using the local annealed blank that does the outer part from area ($D_{AF}/d_p \geq 1.54$) where the O blank is done in deep drawing and it reached the hardness of the H26 blank in annealed. Moreover, the limiting drawing ratio can be enlarged more than the O blank and the H26 blank. When strength of shell is made uniform in deep drawing of the square shell, the corner part annealed blank is effective because the work hardening of the straight side is a little.

(Received May 16, 2005)

Keywords: deep drawing, annealing, CO₂ laser, aluminum sheet, heat treatment

1. 緒 言

深絞り加工では、縮み変形を受けるフランジ部の変形抵抗をパンチ肩部および成形側壁部より小さくできる素板を用いると破断限界が向上することが知られている。戸澤¹⁾は、厚さ 1.0 mm の工業用純アルミニウム板（加工硬化状態： $\sigma_B=143$ MPa, $\sigma_{0.2}=130$ MPa, $HV=33$, 完全焼なまし状態： $\sigma_B=70$ MPa, $\sigma_{0.2}=24$ MPa, $HV=19$) を用い、非焼なまし部分をアスベスト板で両面より押さえて 500°C の塩浴炉に 5 秒浸けたのち直ちに水冷する方法で素板外周部のみを焼なましして強度差のある素板を作製し、円筒絞り ($d_p=49.4$ mm, $r_p=7.5$ mm, $d_0=52.4$ mm, $r_0=7.5$ mm) の限界絞り比 ($D_{0\max}/d_p$) に及ぼす D_{AF}/d_p (完全焼なまし領域内径/パンチ直径) の影響を調べている。この方法によると熱伝導により完全焼なまし領域と非焼なまし領域との境界に 10 mm 程度の不完全焼なまし領域が存在し、 $D_{AF}/d_p=1.82$ で全領域完全焼なまし状態および全領域加工硬化状態の素板の 1.25 倍の $D_{0\max}/d_p=2.59$ が得られることを明らかにしている。また、西脇ら²⁾は、板厚 1 mm の 6061 アルミニウム合金 T6 板を用い、500°C に加熱した金型を 35 kN で素板に 0.6 秒間押付け、除圧後水冷する局所溶体化法³⁾ で円筒絞り ($d_p=33.0$ mm, $r_p=10$ mm, $d_0=36.2$

mm, $r_0=5$ mm) 用の周辺軟化素板を作成し、溶体化処理内径がパンチ直径の 1.4~1.6 倍で限界絞り比 2.58 (T6 板の 1.29 倍, 溶体化板, 焼なまし板の 1.22 倍) が得られることを報告している。

一方、著者らは、既報⁴⁾において板厚 0.8 mm の 1070 アルミニウム H26 板を用いて CO₂ レーザによる薄板の局部焼なまし特性を調べている。CO₂ レーザ焼なまし法では、熱伝導によって生じる不完全焼なまし領域を 2~5 mm に狭め、一回の照射で照射走行方向と直角の幅方向に 2~10 mm の間で完全焼なまし領域 w_a を選ぶことが可能であること、また、幅方向の焼なまし領域の拡大には、逐次平行移動させてレーザを照射することにより可能であり、局部的に強度差のある任意の素板を作製できることを明らかにしている。

そこで本報では、CO₂ レーザ焼なましの応用例として、円筒絞りにおける局部焼なまし領域と深絞り限界との関係を再検討するとともに直辺部と曲辺部で変形が異なる正四角筒絞りにおける局部焼なまし領域と深絞り限界との関係を明らかにする。また、均一強度（硬さ）分布を持つ容器の成形法の観点から局部焼なまし素板による成形品の硬さ分布を調べ、素板の焼なまし領域と容器の硬さ分布との関係を明らかにする。

* 千葉工業大学工学部機械サイエンス学科 (〒 275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)。Chiba Institute of Technology (2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275-0016).

** 千葉工業大学大学院生 (習志野市) [現在：京葉ブランピング工業(株) (市原市)]。Graduate student, Chiba Institute of Technology (Narashino-shi, Chiba) [Present: KEIYO BLANKING KOGYO CO., LTD. (Ichihara-shi, Chiba)].

*** 千葉職業能力開発短期大学校 (千葉市)。Chiba Polytechnic College (Chiba-shi, Chiba).

Table 1 Mechanical properties of test materials

Material (Thickness) (mm)	Angle to rolling direction	σ_B (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	n value	r value	HV
A1070-H26 ($t_0=0.8$)	0°	134	101	9	0.07	—	42~45
	45°	131	105	2	0.02	—	
	90°	141	94	5	0.01	—	
A1070-O ($t_0=0.8$)	0°	79	23	42	0.29	0.77	22~24
	45°	71	17	56	0.28	1.27	
	90°	75	19	51	0.28	0.93	

Table 2 Experimental conditions of annealing

Laser type	CW-CO ₂
Out put, P	400 W
Lens focus distance	128.5 mm
Defocus distance, Z	85 mm
Traverse speed, V	400 mm/min
Assist gas (Gas pressure, G)	Air (0.1 MPa)
Irradiation pitch	6 mm

Table 3 Conditions of cutting

Laser type	Pulse-CO ₂
Out put, P	1500 W
Frequency	2000 Hz
Duty	60%
Defocus distance, Z	0 mm
Traverse speed, V	1000 mm/min
Assist gas (Gas pressure, G)	Air (0.6 MPa)

2. 局部焼なまし素板

2.1 作製方法

供試板は、公称板厚 0.8mm の 1070 アルミニウム H26 板で、その機械的性質を電気炉により 380°C で 1 時間保持、その後、炉冷した O 板とともに **Table 1** に示す。円筒、角筒絞りとも素板は、最大出力 1.5kW の CO₂ レーザ加工機を用いて低次マルチモードによるデフォーカスビーム法で局部焼なましを行い、その後、レーザ切断した円形素板を用いた。**Table 2** に焼なまし条件、**Table 3** に切断条件を示す。なお、素板表面にはレーザ光の反射防止と熱吸収率向上のために黒鉛系の黒染着色剤を塗布している。照射ピッチは、今回用いたレーザ照射条件により得られた w_a が 6mm であったため 6mm とした。焼なまし領域は、**Fig. 1** に示す素板中心を中心とする同心円を内側から外周縁まで描く全周焼なましと、角筒絞りのみ、曲辺部中心を中心として内側から素板外周縁まで 1/4 円を描く曲辺部焼なましについて検討を加えた。

2.2 硬さ分布

素板直径 $D_0=135$ mm、レーザ照射開始直径 $D_{AS}=80$ mm とし全周焼なましを行った半径方向の硬さ分布例を **Fig. 2** に示す。レーザを照射するとレーザ照射開始位置より 3mm ($w_a/2$ に相当) 内側の半径 37mm から外周縁まで $HV=22\sim24$

(a) Whole circumference annealing

(b) Corner part annealing

Fig. 1 Feeding method of laser for annealing of local zone. **Fig. 2** Hardness distribution of whole circumference annealed blank.

Table 4 Dimensions of deep drawing tools (mm)

Cylindrical shell	Punch	Diameter, d_p Profile radius, r_p	49.4 5
	Die	Diameter, d_D Profile radius, r_D	51.8 5
Square Shell	Punch	Side length, l_p Corner radius, r_{CP} Profile radius, r_p	44.9 10 6
	Die	Side length, l_D Corner radius, r_{CD} Profile radius, r_D	46.9 11 5

○ : Success
 ▲ : Fracture at boundary of annealed area and unannealed area
 ● : Fracture at punch profile radius

Fig. 3 Influence of full annealed area on deep drawing limit of cylindrical shell.

を示し、完全焼なましが行われている。一方、内側は、半径方向に 5mm 程度の不完全焼なまし領域が存在するが、半径 32mm 以内で H26 の硬さ $HV=42\sim45$ を保っている。

3. 深絞り限界

深絞り実験は、複動油圧プレスに **Table 4** に示す金型を取付けて行った。潤滑は、焼なまし時に塗布した黒染着色剤を拭き取った後、フランジ部のみに市販の高粘度不水溶性プレス工作油（動粘度 40°C, 550 mm²/s）を塗布した。しわ抑え力 H は、しわが発生しない程度とし、円筒絞りで $H=19\text{ kN}$ 、角筒絞りで $H=10\text{ kN}$ 一定とした。なお、角筒絞りにおいては、完全焼なまし板の高 r 値方向である圧延 45° 方向を対角線方向に一致させて成形を行った。

3.1 円筒絞り

Fig. 3 に H26 素板と O 素板の限界絞り比とともに全周焼なまし素板の限界絞り比に及ぼす完全焼なまし領域内径 D_{AF} の影響を示す。 D_{AF} が小さすぎると完全焼なまし領域内径部が側壁部に絞り込まれるまでに受ける縮み変形量が少なすぎて、その部分の加工硬化が H26 状態に達することができない。そのため完全焼なまし領域内径部の破断抵抗力が非焼なまし領域の破断抵抗力を上回ることができず、焼なまし領域と非焼なまし領域の境界で破断（焼なまし境界破断）が発生する。

(a) H26 blank (b) O blank (c) Whole circumference annealed blank ($D_{AF}/d_p=1.90$)

$D_0/d_p=2.18$ 2.23 2.88

Fig. 4 Comparison of height of cylindrical drawn shells obtained by various blanks.

□ : Success
 ▲ : Fracture at boundary of annealed area and unannealed area in straight side
 ● : Fracture at boundary of annealed area and unannealed area in corner side
 ■ : Fracture at punch profile radius in straight side
 ◆ : Fracture at punch profile radius in corner radius

Fig. 5 Influence of full annealed area on deep drawing limit of square shell.

この焼なまし境界破断で限界絞り比が支配される領域では、 D_{AF}/d_p を大きくすると側壁部に絞り込まれた焼なまし領域の破断抵抗力が増加するため限界絞り比は向上する。しかし、 D_{AF}/d_p が大きすぎるとフランジ部の変形抵抗が増加しすぎ、焼なまし境界部が側壁を形成する前に非焼なまし部のパンチ肩部で破断が発生し限界絞り比を低下させる。そのため、焼なまし境界破断線とパンチ肩部破断線の交点 $D_{AF}/d_p=1.90$ で最大限界絞り比が得られている。その値は、H26 素板の 1.32 倍、O 素板の 1.29 倍の $D_{0\max}/d_p=2.88$ を示す。**Fig. 4** に各素板の深絞り限界での成形品例を示す。

3.2 角筒絞り

工業用純アルミニウム板の角筒絞りは、直辺部の成形力負担割合を増加させると曲辺部の応力集中が緩和され破断限界が向上する。そのため O 素板よりも半硬質板の限界絞り比が高くなる傾向がある⁵⁾⁶⁾。本実験でも O 素板の成形限界が、曲辺部パンチ肩部破断に支配され $D_{0\max}/s_p=2.04$ (s_p : パンチ対角線長さ) を示したのに対し、H26 素板では、直辺部パンチ肩部破断に移行し、 $D_{0\max}/s_p=2.08$ とわずかではあるが増加している。

Fig. 5 に全周焼なまし素板と曲辺部焼なまし素板の限界絞

り比 $D_{0\max}/s_p$ に及ぼす D_{AF} の影響を H26 素板と O 素板とともに示す。角筒絞りにおいても円筒絞りと同様に局部焼なまし効果が現れ、H26 素板、O 素板に比べ限界絞り比が向上し、最大限界絞り比を示す最適 D_{AF}/s_p の存在が見られる。

全周焼なまし素板では、 D_{AF}/s_p を小さくすると焼なまし境界部が直辺部のダイ肩部を通過して側壁を形成するときに完全焼なまし領域内径部の加工硬化不足により焼なまし境界破断が発生する。一方、 D_{AF}/s_p を大きくするとフランジ部の絞り抵抗の増加により非焼なまし部の直辺部においてパンチ肩部破断が発生し、それによって限界絞り比が支配される。そのため円筒絞りと同様に二つの破断限界線の交点 $D_{AF}/s_p=1.78$ で最大限界絞り比 $D_{0\max}/s_p=2.54$ (H26 素板の 1.22 倍) を得ている。

縮み変形が集中する曲辺部のみを焼なましした曲辺部焼なまし素板では、直辺部が加工硬化した状態であるため直辺部の強度が全周焼なまし素板より高い。そのため D_{AF}/s_p が小さい領域では、全周焼なまし素板と異なり加工硬化が不足して発生する曲辺部焼なまし境界破断によって破断限界が支配されるようになり全周焼なまし素板より限界絞り比が高くなる。一方、 D_{AF}/s_p が大きい領域では、曲辺部の焼なまし境界部が側壁を形成する前に H26 素板、全周焼なまし素板と同様な直辺部パンチ肩部破断が発生し成形限界に至る。しかし、その値は、直辺部の変形抵抗が高い分、全周焼なまし素板に比べて直辺部への材料流入が拘束されるため、全周焼なまし素板より低下している。曲辺部焼なまし素板の最大限界絞り比は、 $D_{AF}/s_p=1.41\sim1.49$ で得られ $D_{0\max}/s_p=2.40$ (H26 素板の 1.15 倍) と全周焼なまし素板の 0.94 倍にとどまっている。Fig. 6 に各素板の深絞り限界での成形品例を示す。

4. 深絞り成形品の硬さ分布

4.1 均一強度素板からの成形品

深絞り成形品は、絞り深さによってひずみ量が異なる。また、曲辺部と直辺部で変形が異なる角筒容器等では、周方向のひずみ量も異なる。そのため、深絞り成形品には、加工硬化による強度差が生じる。特に O 素板を用いた深絞り加工では、均一強度分布を持つ容器を得ることは難しい。

Fig. 7 に H26 素板と O 素板の限界絞り比付近での円筒容器の硬さ分布を、Fig. 8 に O 素板の限界絞り比付近での角筒容器の硬さ分布を示す。H26 素板では、 n 値の平均値が 0.03 と小さいため、深絞り変形を与えてもさらなる加工硬化が進まず、底部から容器口辺部まではほぼ一定な硬さを示している。

しかし、O 素板を用いると円筒、角筒ともひずみの少ない底部では、加工硬化が進まないため硬さに変化が見られないものの、パンチ肩部から徐々に加工硬化が進み、円筒容器で素板中心から 38mm ($1.54d_p/2$) 以上の領域、角筒容器の曲辺部中心線上で素板中心から 42mm ($1.52s_p/2$) 以上の領域で H26 素板と同一の硬さ ($HV=42\sim45$) を示し、容器深さによって強度差が生じる。また、角筒容器の直辺部中心線上は、曲辺部からの材料流れにより周方向に多少縮み変形を受けるものの主な変形がダイ肩部による曲げ変形となるため曲辺部に比べ加工硬化が少なく容器口辺部付近で、 $HV=36\sim37$ にとどまり、角筒容器の周方向にも強度差が生じている。

4.2 局部焼なまし素板からの円筒成形品

Fig. 9 に $D_0/d_p=2.63$ で、 $D_{AF}/d_p=1.42$ と 1.54 の全周焼な

Fig. 6 Comparison of height of square drawn shells obtained by various blanks.

(a) H26 blank

(b) O blank

Fig. 7 Hardness distribution of cylindrical drawn shells.

Fig. 8 Hardness distribution of square drawn shell by full annealed blank (O blank).

Fig. 9 Hardness distribution of cylindrical drawn shells by whole circumference annealed blanks.

し素板を深絞り加工したときの容器の硬さ分布を示す。 $D_{AF}/d_P=1.42$ 素板は、O 素板を深絞り加工したときに H26 素板の硬さを示した 38mm ($1.54d_P/2$) より 3mm 内側から焼なましをしている。そのため、不完全焼なまし領域である 33mm から完全焼なまし領域である 38mm までが H26 素板の強度に達していない。しかし、O 素板を深絞り加工したときに H26 素板の硬さを示した領域から外側を焼なました $D_{AF}/d_P=1.54$ 素板では、レーザ照射開始位置の焼なまし領域部も加工硬化により H26 素板の強度に達し、均一な強度分布を持つ容器が得られている。このことは、H26 素板を用いて深絞り加工を行う場合、O 素板を深絞り加工して H26 素板の硬さに達した直径から外側領域を焼なますことにより深絞り限界の向上と容器強度の均一化が図れることを意味している。局部焼なまし素板で最大の限界絞り比 $D_0/d_P=2.88$ を得た容器は、 $D_{AF}/d_P=1.90$ であるため、容器全体が H26 素板の硬さである $HV=42\sim45$ の値を示し、強度分布の均一化が図られている。

4.3 局部焼なまし素板からの角筒成形品

Fig. 10 は $D_0/s_P=2.40$, $D_{AF}/s_P=1.85$ の全周焼なまし素板を、Fig. 11 は $D_0/s_P=2.40$, $D_{AF}/s_P=1.56$ の曲辺部焼なまし素板を深絞り加工した容器の曲辺部中心線方向と直辺部中心線方向の硬さ分布を示す。

全周焼なまし素板の曲辺部中心線方向は、O 素板を深絞り加工したときに H26 素板の硬さに達した $1.52s_P$ より外側を焼なまししているためレーザ照射開始位置も H26 素板の強度を示す。しかし、全周焼なまし素板の直辺部中心線方向は、最大の限界絞り比が得られた $D_{AF}/s_P=1.78$ より外側を焼なまししているにもかかわらず加工硬化が不足し、H26 素板の強度に達

Fig. 10 Hardness distribution of square drawn shell by whole circumference annealed blank.

Fig. 11 Hardness distribution of square drawn shell by corner part annealed blank.

していない。なお、このときの焼なまし領域部の受けたひずみ量は、相当ひずみ $(\epsilon_r^2 + \epsilon_\theta^2 + \epsilon_z^2)^{1/2}$ で曲辺部中心線方向が 1.2 以上、直辺部中心線方向が 0.2~0.8 である。

一方、曲辺部焼なまし素板は、直辺部が加工硬化した状態であり、曲辺部も $D_{AF}/s_P=1.56$ と絞り変形により H26 素板の強度に達する領域のみ焼なまししているため、容器全体で H26 素板の硬さである $HV=42\sim45$ を示し、均一強度分布を持つ角筒容器が得られている。このことは、角筒絞りにおいて均一強度容器を得ようとするなら、全周焼なまし素板に比べ限界絞り比は多少劣るものの曲辺部焼なまし素板が優れていることを意味している。

5. 結 言

CO₂ レーザ局部焼なまし法の適用例として 1070 アルミニウム H26 板を用い、円筒と角筒絞りの限界絞り比向上に及ぼす焼なまし領域の影響と均一強度容器の成形法としての可能性について検討を加え以下の結論を得た。

(1) 円筒の深絞り限界は、 D_{AF}/d_P の小さい領域に発生する焼なまし境界破断と大きい領域に発生するパンチ肩破断に支配され、その両方の破断限界線の交点で最大限界絞り比が得られる。その値は、 $D_{AF}/d_P=1.90$ で $D_{0\max}/d_P=2.88$ (O 素板の 1.29 倍) を示す。

(2) 全周焼なまし素板を用いた角筒の深絞り限界は、

D_{AF}/s_P が小さい領域は直辺部焼なまし境界破断, 大きい領域は直辺部パンチ肩破断に支配され, 最大限界絞り比は, $D_{AF}/s_P=1.78$ で $D_{0max}/s_P=2.54$ (H26 素板の 1.22 倍) を示す。

(3) 曲辺部のみ焼なましした曲辺部焼なまし素板を用いると直辺部の変形抵抗が高いため D_{AF}/s_P が小さい領域は曲辺部焼なまし境界破断, 大きい領域は直辺部パンチ肩破断に支配され, 最大限界絞り比は均一強度素板より向上するものの, $D_{AF}/s_P=1.41\sim1.49$ で全周焼なまし素板の 0.94 倍の $D_{0max}/s_P=2.40$ にとどまる。

(4) O 素板を深絞り加工して H26 素板の硬さに達した領域 ($D_{AF}/d_p\geq 1.54$) より外周部を焼なましした H26 素板を用いると, O 素板や H26 素板よりも限界絞り比を大きくでき, かつ容器

全体を H26 素板と同一硬さにすることができる。

(5) 角筒絞りにおいて均一強度を得たい場合は, 直辺部の加工硬化が少ないため, 曲辺部焼なまし素板が有効である。

参 考 文 献

- 1) 戸澤康寿: マシナリー, **22** (1959), 161-168.
- 2) 西脇武志, 金武直幸: 軽金属, **55** (2005), 33-36.
- 3) 西脇武志, 金武直幸: 軽金属, **54** (2004), 425-429.
- 4) 中村和彦, 中村正美, 高橋宏由, 吉岡俊朗: 軽金属, **53** (2003), 421-426.
- 5) 平岩正至, 近藤一義: 日本機械学会論文集 (C 編), **49** (1983), 695-703.
- 6) 森 敏彦, 河合 望, 丸茂康男: 日本機械学会論文集 (C 編), **54** (1988), 1144-1149.