アルミニウムの薄板成形

藤倉 潮三*

The press forming of aluminum sheet

Chozo FUJIKURA*

1. はじめに

成形用アルミニウム薄板は、最近の薄肉化、高強度化の動きのなかで、3000系、5000系あるいは熱処理系などの合金系材料、H n4~N n9などの硬調質系材料の占める割合がますます高くなっている。これに伴い成形限界、寸法精度、形状凍結性、表面性状など成形品に要求される品質レベルは高くなり、より優れた材料、成形法の開発が望まれている。

アルミニウム薄板の成形性について、基本的なところはすでに述べられているので^{1)~7)}、本講座ではまず最近のデータを中心として、特に破断限界を主たる対象として成形材料、成形技術の研究、開発状況を概説する。次に具体的なアルミニウム薄板成形品について使用材料、成形法の現状を説明する。

2. 成形性向上の考え方⁵⁾

2.1 成形区分と試験法

薄板成形では成形品寸法、形状、金型などの機械的成形条件により応力状態、変形形式、破断形態が多種多様

な変化を示すので、薄板成形に関する技術的な問題を検討するためにはその合理的な区分が必要となる。

成形品を形づくる主なる変形部の変形形式とそこに生ずる破断の組合わせにより、プレス成形は図1⁸⁾に示すように深絞り、張出し、伸びフランジ、曲げの4種類の基本成形に分類される。この分類に対応する破断現象を図2に、カップ試験などシミュレート試験法を図3に示す。

2.2 破断限界の向上

深絞り成形では図4に示すように、フランジ部の流入に要する抵抗力の最大値(P_m)と、この成形力を受けもつポンチ肩部に接している材料部分の破断強度(P_z)の大小関係で成形の可否が決定される。 P_m が P_z に等しくなったときが破断限界である。

P_m は素板フランジ部の縮み変形抵抗、しわ押え力による摩擦抵抗、ダイ肩部での曲げ抵抗の和である。 P_z は素材の破断力と、素材、ポンチ間の摩擦抵抗の和である。したがって深絞り限界を向上させるためには、素材の面からも成形条件の面からも P_m の各要素の抵抗力を下げる、 P_z については逆に上げる条件を採用すればよ

図1 プレス成形の基本的な分類⁸⁾

図2 各種破断不良

* 古河アルミニウム工業(株)技術研究所(日光市)。Technical Research Laboratory, Furukawa Aluminum Co., Ltd. (Nikko-shi, Tochigi).

受理日：平成2年1月12日

10

図3 各種成形性試験方法

い。

張出し成形あるいは伸びフランジ成形では、伸び変形の最も大きい部分から破断が発生する。これら破断限界を向上させるためには、素材の延性を向上させることと、ひずみ分布の均一性を確保することが必要である。後者は変形が局部に集中することを避け、できるだけ素板全体に分散する条件を適用することである。

3. 成形材料と成形技術

3.1 円筒深絞り

3.1.1 合金、調質条件と深絞り性（平頭ポンチ）

3000, 5000系の非熱処理合金系の代表的な合金の軟質材および半硬質材の限界絞り比（LDR）を図5に示す⁹⁾。3003, 3004, 5454（Al-Mn, Al-Mn-Mg, Al-Mg-Mn）はほとんど類似した深絞り性を示すが、Al-Mg系

(a) 軟質(O)材

図4 絞りカップの各部の名称など

で5005, 5052, 5082とMg添加量が増えると向上する傾向にある。

3003, 3004合金についてMnAl₆の析出状態と加工硬化の残留度を変化させた材料の限界絞り比を図6に示す¹⁰⁾。3003の析出処理材は加工硬化が一部残存した中間強度で極大を示すが、3004は軟質材が常に優れた成形性を有する。5052, 5083合金について圧延調質材、焼鈍調質材の限界絞り比を図7に示す¹¹⁾。5052は焼鈍調質材が優れ、さらに中間強度で最大値となる傾向にあるが、5083は5052と異なり軟質材が最も優れ、さらに同一強度では圧延調質材が優れる。

1000, 3000, 5000系の4種の合金について、圧延のまま(H18)およびH28~H26相当の低温加熱を行った材料について、潤滑条件を変えて限界絞り比を測定した結果を図8に示す¹²⁾。潤滑性が良好な場合は合金による傾向は図5と類似しているが、潤滑性が劣る場合は、強度の高い3004, 5052が優れ、加熱温度を変えてもほとんど変化しない。

(b) H24, H34材

図5 アルミニウム合金板の限界絞り比（平頭ポンチ）⁹⁾

||||| 10

(a)

(b)

図6 限界絞り比と引張強さの関係¹⁰⁾
(a) 3003合金 (b) 3004合金

(a)

(b)

図7 Al-Mg系合金の調質材の引張強さと限界絞り比の関係¹¹⁾
(a) 5052合金 (b) 5083合金

最終焼鈍
(a) 鉱油

最終焼鈍
(b) 水溶性油 (5%)

図8 限界絞り比に及ぼす最終焼鈍の影響¹²⁾

10

一方熱処理合金系2000, 6000, 7000系の合金2036, 6061, 7N01について、時効状態で種々の強度に変化させた材料の限界絞り比を図9に示す¹³⁾。焼入れ直後や軟質材の成形性が良好であることは各合金に共通している。6061合金では時効硬化材の限界絞り比の低下が少ない。2036合金では比較的低温の時効処理で軟質材よりむしろ向上し、時効硬化材を深絞り加工する利点がある。

2036よりCu, Mg添加量の多い2024について時効時間と限界絞り比の関係を図10に示す¹⁴⁾。この場合には軟質材が最良で時効材は時効時間により単調に劣化する。時効条件によって破断形式が4種類に変化している。

以上の合金、調質条件などと深絞り性の関係について、これらに影響を及ぼす金属組織、引張特性は以下が考えられている。

- (1) 立方体集合組織の存在量^{10), 11), 13)}。
- (2) 塑性異方性指数 r 値の平均値 $\bar{r}$ ^{15), 16)}、最小値 $r_{\min}$ ¹³⁾。あるいは破断形式を考慮し加工硬化指数 n 値の範囲に応じ $\bar{r}$, $r_{\min}$ あるいはその組合わせ^{9), 17)}。
- (3) 潤滑性が良好な場合は n 値、劣る場合は引張強さ¹²⁾。
- (4) ダイ肩近傍での破断（口辺せん断など）が主体の場合には、面内せん断破断ひずみと r 値の組合わせ¹⁴⁾。

なお、ここでは平頭ポンチによる深絞り（純粹深絞り）の結果のみを述べた。球頭ポンチ（複合深絞り）の場合には異なった挙動を示し、延性評価値（破断伸び、 n 値など）と相関の強い傾向となる。

3.1.2 成形条件（潤滑油、成形速度）と深絞り性

薄板成形の成形速度は液圧プレスでは通常数 m/min

図9 2036, 6061, 7N01合金の引張強さと限界絞り比の関係¹³⁾

図10 2024合金の時効時間と限界絞り比（平頭ポンチ）¹⁴⁾

以下、一般的なメカニカルプレスでは平均速度として通常10~30 m/min 前後、特殊な高速プレスでは100~200 m/min 前後である。

粘度を変えたパラフィン系鉱物油を潤滑油として用い、絞り加工速度を0.2 m/min から60 m/min に変化した条件で、1100-O, H24, H18 の限界絞り比を求めた結果を図11に示す¹⁸⁾。高粘度あるいは高速成形の場合、限界絞り比は高い値を示す。低粘度では速度効果が著し

図11 1100各種調質板における潤滑剤粘度、絞り速度と限界絞り比の関係¹⁸⁾
(40°Cにおける粘度 VG32: 31 cst, VG380: 383 cst)

いが、高粘度では緩やかになる。

この低粘度油を基油として油性向上剤の効果を検討した結果を図12^{19),20)}に示す。いずれの脂肪酸添加も限界絞り比の向上効果が大きく、高粘度化した場合と類似の挙動を示す。

潤滑剤を油性潤滑剤（マシン油）、固体潤滑剤（ジョンソンワックス（J. W. 700））、成形速度を0.8～530 mm/s（0.05～30 m/min）とした場合の各種アルミニウム合金の軟質材、半硬質材の限界絞り比を図13に示す²¹⁾。油性潤滑剤では速度と共に限界絞り比は上昇するが、固体潤滑剤では逆に劣化している。

深絞り性の速度依存性について、まずフランジ部の材料の硬化度がポンチ肩部より小さいことが考えられる。花木ら²¹⁾は理論解析および実測値から、成形速度を変えても上記2領域では同オーダーのひずみ速度で変形が進行する結果を得ており、硬化度の差異はないと予想している。そして両領域での工具と加工材の相対速度の推測から、速度効果の第1因はフランジ部の摩擦係数 μ の速度による減少と結論づけている。

後藤ら²²⁾はフランジ部に牛脂、黒鉛混合剤を用いた場

図12 工業用純アルミニウム O, H18 調質板の限界絞り比に及ぼす油性向上剤と絞り速度の影響

合に成形速度により深絞り性が低下する理由として、粘弾性的効果でせん断抵抗が増し潤滑性能が劣下するためと推定している。図13の固体潤滑剤も同様の理由で劣化したものと考えられる。

3.1.3 成形限界向上成形法

2.2で述べた深絞り成形における破断限界の向上法を積極的に活用した成形法として、対向液圧成形法^{23)~25)}、周辺加熱成形法^{26),27)}、変圧しわ押え法²⁸⁾、超音波成形法²⁹⁾、極低温成形法³⁰⁾などが実用化あるいは提案されている。ここでは最初の2成形法について説明を加える。

(1) 対向液圧成形法

対向液圧成形法の基本的な成形工程を図14に示す²⁵⁾。まず液体を液圧室に供給した後、素板をダイ面上におき（図14(a)）、しわ押え力を作用させる（図14(b)）。その後ポンチを押し込み成形を行う（図14(c), (d)）。このとき液圧室内はポンチによって加圧され、素板はポンチに押しつけられる。

このため成形中は図15(a)²⁵⁾に示すように素板とポンチの間に摩擦力が発生し、成形力の一部負担が行われる。ダイ面上にパッキンなどのシール材を用いない場合には、図15(b)に示すように金型外に流出する液体によってフランジ部やダイ肩部の摩擦抵抗が減少する。さらに図15(c)に示すようにポンチを若干浮かして素板に逆方向の張出し変形を与えると、パンチ肩部近傍の板厚増加が得られる。

これら三つの破断抑制効果により破断限界を向上させることができる。図16は対向液圧成形法の効果をダイ肩

図13 種々のアルミニウム材料の絞り速度、潤滑による限界絞り比の変化²¹⁾

図14 対向液圧成形行程図²⁵⁾ 図15 対向液圧成形法の破断抑制効果²⁵⁾ 図16 限界絞り比に及ぼすダイ肩半径 (r_d) の影響²³⁾ 図17 周辺加熱・中央部冷却深絞り装置²⁶⁾

半径をパラメーターに測定した結果である²³⁾。1050-O材で限界絞り比は最大2.9程度で、通常法の約1.4倍の成形が可能である。

さらに大幅な成形限界の向上が図れる新成形法として周液圧深絞り法が発表されている³¹⁾。

(2) 周辺加熱成形法

ブランクの周辺部と中央部に温度差を与えて、フランジ部の相対的な変形抵抗を積極的に低下させて深絞り性を向上させる方法は、加熱法、冷却法などを含めて種々

試みられている²⁷⁾。

図17に示された周辺加熱、中央部冷却深絞り装置²⁶⁾は、ヒーターを内蔵したダイとしわ押え板で周辺部を加熱し、中央部は水冷ブロックを押しつけて冷却している。本装置により、常温で成形性の劣る材料を含めた各種合金について、フランジ部の加熱温度と限界絞り比の関係性を求めた結果を図18に示す²⁶⁾。各材料ともほぼ直線的に深絞り性が向上し、250℃では室温よりもおよそ1.3倍の成形性を示す。

図18 周辺加熱・中央部冷却による限界絞り比の向上 (黒鉛グリース使用)²⁶⁾

なおフランジ部、中央部を均一に加熱して成形した場合には、深絞り性は変わらないかあるいは低下する³²⁾。

成形中の加熱ではなくブランク周辺部と中央部にあらかじめ変形抵抗の勾配を与えておく方法として、加工硬化材の周辺部を軟質とする方法、溶体化材の中央部のみを時効硬化させる方法、時効材で周辺部を過時効処理する方法³³⁾なども報告されている。

3.2 再絞り

再絞り成形は図19³⁴⁾に示すように、1回の深絞り成形では得られない比較的深い容器を得る目的に用いられる。常温で通常のプレス機械が適用できるので、プレスあるいは金型を連続に並べて使用すれば生産速度は損われない。容器の深さによっては多数回の再絞りを行う場合もある。

1100, 3004, 5182の軟質材と比較材について図19の平面ダイとテーパードイを用い、種々の初回絞り比に対する限界再絞り比 (初回絞りポンチ径/再絞りポンチ径) を求め、これらの結果から最大総絞り比 (ブランク径/再絞りポンチ径) と適正再絞り比を整理した結果を表1に示す³⁴⁾。アルミニウム板材ではテーパードイの方が再絞り比も総絞り比も大きく再絞り性に優れている。これ

図19 再絞り成形法³⁴⁾

はテーパードイ絞りは再絞り荷重が小さく、ポンチ肩部板厚ひずみと成形品壁部半径方向ひずみが小さいためと推定されている。

1100板材について種々の強度の H1n, H2n, H3n 調質材と軟質材について、限界絞り比、限界再絞り比 (LRR), 最大総絞り比 (LTR) を求め、引張強さで整理した結果を図20に示す³⁵⁾。限界絞り比は調質条件に依存せず強度の高い材料ほど向上していることが注目される。限界絞り比に対する効果とは異なり、硬質材の H19, H39材は特に優れた再絞り性を示す。この原因として強度が高くなるほどカップ側壁の加工硬化度が小さくなることが掲げられる。特に Hn9 材は素板強度より低く加工軟化をおこしている。

3.3 角筒絞り

角筒絞りの割れ限界は円筒絞りと同様に限界絞り比 (限界対辺比) で表示する。たとえば角形ブランクを用いる場合、成形可能な最大ブランクの一辺の長さを、対

表1 各材料の最大総絞り比、適正再絞り比³⁴⁾

絞り方法	項目	材料				
		A1100P	A3004P	A5182P	7-3Brass	Hiten
平面ダイによる再絞り	最大総絞り比	2.39	2.56	2.75	2.53	2.84
	適正再絞り比	1.22	1.25	1.35	1.25	1.37
テーパードイによる再絞り	最大総絞り比	2.64	2.86	3.04	2.63	3.04
	適正再絞り比	1.43	1.33	1.43	1.25	1.39

10

図20 引張強さと LDR, LRR, および LTR の関係³⁵⁾

応する角形ポンチの辺の長さで除した値である。

11種類のアルミニウム合金軟質材と半硬質材について、長方形プランクにより限界絞り比を求め、引張強さで整理した結果を図21に示す³⁶⁾。半硬質あるいは合金化で強度を増すと角筒絞り性は低下する。これは素板板厚とポンチ径の比率が小さい場合には、成形荷重のポンチ肩部での負担がコーナー部に集中し、このため角筒絞り性は素板のコーナー部方向の伸びあるいは r 値により左右されることに起因している^{36), 37)}。

しかしながら8角形プランクを用いた結果では、条件によっては硬質材の方が軟質材よりも成形性に優れる結果³⁸⁾も示されており説明が必要である。

図22はポンチコーナー部寸法 (r_c) と角筒絞り性の関係を求めた結果である³⁹⁾。 r_c がポンチの辺の長さの10%程度で最大値を示し、それより小さくなると絞り性は急激に低下する。

3.4 張出し

張出し性は通常図3に示す剛体ポンチによるエリクセン値で表示される。液圧バルジ試験での破断時のバルジ高さ H あるいはバルジ係数 ω^2 ($\omega = H/a$) を用いることもある。 a はダイス半径である。

3000, 5000系の代表的合金の軟質材および半硬質材のエリクセン値を図23に示す⁹⁾。軟質材では強度の低い3003が高い値を示し、強度の高い5082が低い張出し性を示している。半硬質材は全般的に劣化する。熱処理合金

素板厚0.8 mm, 長方形プランク
(プランク短辺 L_1 , 長辺 L_2)
ポンチ短辺 (l_1) 200 mm
長辺 (l_2) 300 mm
ポンチコーナー部半径 40 mm

図21 引張強さと角筒破断限界の関係³⁶⁾

工業用純アルミニウム板, O材, 0.8 mm 厚, 正方形素板
 $l=80$ mm, $r_p=4$ mmR

図22 正四角筒絞り性に及ぼす角隅部寸法および異方性の影響³⁹⁾

系の2036, 6009, 6061, 7N01について、時効状態で種々の強度に変化させた材料のバルジ高さを求めた結果を図24に示す⁴⁰⁾。6009合金が高い張出し高さを示している。以上のような張出し高さについては n 値や伸びなどの延性指標値が相関を示すが、特に均一伸びや破断伸びが良好な対応関係にある⁹⁾。

||||| 10

図23 アルミニウム合金、調質とエリクセン値 (2研究室での測定値)⁹⁾

図24 2036, 6061, 6009, 7N01 合金の引張強さと最大バルジ高さとの関係⁴⁰⁾

3000, 5000系の代表的合金の軟質材の成形限界曲線 (FLC)⁴¹⁾を図25^{9),15)}に示す。エリクセン値、バルジ高さなどは、板面上のたとえば圧延方向とその直角方向の2軸に対してはほぼ等ひずみの変形下での割れ限界値である。FLCは実際の成形の場にあらわれる種々のひずみ比での破断ひずみを、面内の主ひずみ軸に対してプロットしたもので、各種ひずみ比での変形能の評価に用いられる。

FLCは変形経路によっても影響される。図26⁴²⁾は、単一変形経路 (ひずみ比一定) の場合と、等二軸引張変形を行った後一軸引張変形を行った場合の FLC を比較

図25 代表的アルミニウム合金軟質材の成形限界曲線^{9),15)} (データが複数のものは破断限界大を採用)

図26 1050-Oの成形限界曲線に対する変形経路の影響⁴²⁾
実線: 2段階変形経路
点線: 単一変形経路

した結果である。後者が平面ひずみ領域 (最小ひずみ ≈ 0) の成形限界を増大させるのがわかる。

3.5 しごき

しごき成形は図27(a), (b)に示すような深絞り円筒容器の側壁部あるいは穴抜き成形品の立上り壁部を薄肉化し、径に対し高い円筒形状を得る場合に適用される。素材の使用量を最少にして必要な高さが得られるため、素材の薄肉化あるいは成形品の軽量化に好適な加工法である。前者はDIキャン、コピードラム、後者は空調用フィンの成形加工に用いられている。前者のしごき成形前の容器は通常深絞り、再絞り加工されたカップが使用され、しごき回数は3回あるいはそれ以上である。しごき成形では、しごき部の加工力がしごき終了部の破断力に

10

図27 深絞り容器および穴抜き（バーリング）成形品の壁部のしごき加工模式図

$$\text{しごき率} = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100 (\%)$$

等しくなった場合にしごき限界となる。

3.5.1 合金，調質条件としごき性

1050, 1100, 3004のH1n, H2nおよびO材について，25%の穴拡がり率でストレートな立上り部を得た後，限界しごき率（LIR）を求めた結果を図28に示す⁴³⁾。いずれの材料についてもO材が最もしごき性に優れ，硬質になるに従い低下し，Hn6相当強度以上ではほとんど変化しない。これらの結果と引張特性との関係を求めた結果によると， n 値との比較的よい相関が認められ n 値が高くなるほどしごき性が優れる。

高速量産プレスであるDIキャンボディメーカーを用いて1100, 3004, 5052のO, H18, H19のしごき性を求めた結果を表2に示す⁴⁴⁾。しごき前のカップは深絞り，再絞り成形されたもので総絞り比2.34である。しごき加工は1段のみを用いている。表2によると合金，調質によらず同等のしごき性を示している。

同様にDIキャンボディメーカーを用いて，1100, 3004, 5052のO, H24, H18のしごき性を求めた結果を表3に示す⁴⁵⁾。この場合にはしごき前のカップは総絞り比2.36と表2と類似であるが，しごき加工は3段とし3

図28 各種調質材の引張強さとしごき性⁴³⁾

段目のしごき率を変えている。表3によると3004-H18が最も優れ，5052-O, H24が劣っている。碓井ら⁴⁵⁾は1段しごきでの限界しごき率の評価も行っており，表3およびこれらの結果から1段しごき加工においては n 値の大きい材料の方がしごき性が優れる傾向にあり，一方加

表3 DI機による3段目のしごき加工における成形限界⁴⁵⁾

材 料		しごき率 (%)			
		46	49	52	55
1100	H18	○ ○ ○	○ ○ ○	○ × ×	× × ×
	H24	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×	× × ×
	O				
3004	H18	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×
	H24	○ ○ ○	○ ○ ○	○ × ×	× × ×
	O	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×	× × ×
5052	H18	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×	× × ×
	H24	○ ○ ○	○ × ×	× × ×	× × ×
	O	○ ○ ○	○ × ×	× × ×	× × ×

○ 成形可 × 破断

表2 合金，調質としごき限界⁴⁴⁾

材料		しごき率 (%)			
		25	37	43	48
1100	-O	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×
	-H18	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×
3004	-O	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×
	-H19	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×
5052	-O	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×
	-H19	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	× × ×

○ 成形可 × 破断

図29 3rd しごき加工限界と基油粘度の関係⁴⁸⁾

工硬化が進む多段しごき加工においては逆に n 値が小さい方がしごき性が向上すると推定している。

以上のようにしごき成形性には、しごき成形前の予変形の形態（応力比、ひずみ比、変形経路など）、予変形

表4 成形速度と円筒カップの限界しごき率（％）⁴⁹⁾

α		1 段しごき	2 段しごき
15°	高速	68.0	56.7→68.7
	低速	37.0	37.0→58.8
8°	高速	65.3	55.7→82.7
	低速	56.7	56.7→69.0

α ：ダイ半角

量、さらには金属間化合物の分布、相⁴⁶⁾、加工中の回復のしやすさ⁴⁷⁾も影響している可能性が大きく、今後の解明が必要である。

3.5.2 成形条件（潤滑油、成形速度）としごき性

3004-H19 の限界しごき率に及ぼすエマルジョン系潤滑剤の基油粘度の影響を図29に示す⁴⁸⁾。潤滑剤濃度は7％である。限界しごき率は絞り、再絞りカップを3段しごき加工し、3段目のしごき率を変えることによって求めた。基油粘度が高くなるほどしごき限界は向上する。

表5 代表的アルミニウム薄板成形品に関する成形要素とアルミニウム材料⁵²⁾

成 形 品		成形要素(◎:重要特性と考えられるもの)								代表的なアルミニウム材料		
		打 抜 き	絞 (再 絞り)	し ご き	張 出 し	口 絞 り	伸 フ ラン ジ	曲 げ	カ ー リ ン グ	そ の 他	品 種 ・ 調 質	板 厚
飲 料 缶	(1)ボデ ィ	○	◎	◎	○	○	○	—	—	—	3004-H19	0.3～0.5 mm
	(2)エンド	○	○	—	◎	—	—	—	○	スコア ◎	5052 } 5082 } 5182 } —H19	0.2～0.4 mm
	(3)タブ	○	—	—	—	—	◎	◎	—	—	5082 } 5182 } —H19	0.25～0.4 mm
熱交換器用 フ ィ ン	(1)ドロータイプ	○	◎	—	◎	—	◎	○	◎	—	1100 } 1200 } O, H22	0.11～0.25 mm
	(2)ドローレスタイプ	○	—	◎	○	—	◎	○	○	—	特殊合金-H24, H26	0.10～0.15 mm
キ ャ ッ プ		○	◎	—	—	—	—	—	—	ミシン目 ローレット○ コイニング	1200 } 3003 } 5257 } H24, 他	0.2～0.8 mm
コンデンサーケース		○	◎	◎	—	—	—	—	—	インパクト○	1100-O 1070-O	0.3～0.4 mm 2～4 mm
器 物		○	◎	—	○	○	—	○	○	—	1100 } 3004 } 5052 } O, H24	0.5～5 mm
自動車ボディパネル		○	○	—	◎	—	◎	◎	—	—	5182-O 特殊合金-T4	0.8～1.2 mm
箔 容 器		○	◎	—	◎	—	—	—	○	—	3003 } 3004 } O	0.05～0.15 mm

10

基油粘度が高くなる被加工材と工具間の摩擦係数が低減し、しごき力が減じた効果によるものと考えられる。

1050-Oの浅絞り円筒カップを用い、高速（600 m/min）および低速（0.006 m/min）における1段しごきおよび2段しごきでの限界しごき率を求めた結果を表4に示す⁴⁹⁾。ダイス側はスピンドル油を用い、ポンチ側は無潤滑としている。表4によれば高速の方が低速より10～30%限界しごき率が高い。高速化により成形性が向上する最大の要因は、被加工材のカップ底面がポンチ底部より先進することにある。このような先進が生ずれば、ポンチによる壁部の引張破断が生じない。高速で先進が生じやすい理由は①潤滑油の流体動力学的効果によるダイス面の摩擦の低減、②断熱的塑性変形による発熱のための素材の相対的軟化、③ポンチ面と素材内面の断熱的摩擦による発熱のための摩擦増加、などが考えられ

ている。

なおしごき成形においても破断限界のほか、被加工材表面性状、工具の焼付きなどが重要特性である。これらについては文献^{45),46),48),50),51)}を参照されたい。

4. 薄板プレス成形品

アルミニウム薄板のほとんどは曲げ加工を中心として何らかのプレス成形加工を受けているが、深絞り、張出し、伸びフランジ、しごき成形など高度の成形加工を受けている製品の代表例が飲料缶、熱交換器用フィン、キャップ（クロージャー）、コンデンサーケース、器物、自動車パネル、箔容器などである。

これらについて成形要素と使用されている代表的アルミニウム材料をまとめて表5に示す⁵²⁾。成形要素は複数にわたっているものがほとんどで多方面から成形性を考

表6 アルミニウム薄板プレス成形品におけるプレス機械、金型、潤滑油の適用例^{52)～55)}

成 形 品		プ レ ス 機 械					金 型		潤 滑 油	
		名 称 (駆動機構)*1	能力 (トン)	ストローク		平均速度 (m/min)	材 質	寿 命 (×10 ⁴ 個)	種 類	濃度 粘度 (40℃)
				長さ (mm)	数 (spm)					
飲料缶	ボ デ ィ	カップングプレス	40	127	120～250	15～32	WC, SKD11	600	水溶性	15～30%
		ボディメーカー	4.5	450～650	120～250	160～230	WC, SKD11	20～40	水溶性	4～12%
	エ ン ド	ベージックエンドプレス	60	25～75	400	20～60			ワックス	
		コンバージョンプレス	50	35	450	32				
	タ ブ		35	50	150～300	15～30			鉱油系	
熱 交 フ ィ ン	ドロタイプ		45	50	120～300	12～30	SKD11, SKD9	2000	鉱油系	10 cst
	ドロレスタ イ						SKH9, WC			
キ (ク ロ ー ジャ ー)			60	89～100	120～200	24～36	SKD11, WC	[2年]	ワックス シリコン オイル	
コンデンサーケース			5～20	40～150	80～230	18～24	SKS55, WC SKD11	[4ヶ月]	鉱油系	
器 物			300	350	20～40	14～28	SK3, S55C クロムめっき	[1年]	鉱油系	20～400 cst
自 動 車 パ ネ ル			2000	300	8～15	5～9	FC25 クロムめっき		洗浄油	
箔容器	深絞り型	[クランクレス, リンク]	35～60	60～120			SKD11, SK3 S55C	100	シリコン オイル	
	張出し型	[油圧, 空気圧]	3	45						

*1 特に記述のないものはクランク機構

慮する必要があることがわかる。アルミニウム材料は非熱処理合金1000, 3000, 5000系のO~H19材がほとんどで、板厚は0.1~0.5 mmの薄板が主力を占めている。あらかじめ塗装された状態で成形加工をうけるものはキャンエンド材（膜厚15 μm 以下）、キャップ材（5~20 μm ）、熱交フィン材の一部（0.5~1.5 μm ）である。

これらの成形品についてプレス機械、金型、潤滑油の適用例を表6に示す^{52)~55)}。プレス機械はほとんどがメカニカルプレスで平均成形速度は通常10~30 m/min前後、DIキャンボディメーカーでは100~200 m/min前後の高速加工となる。

金型材料には普通铸铁（FC25）、炭素鋼（S55C）、炭素工具鋼（SK3）、低合金工具鋼（SKS55）、高合金工具鋼（SKD11）、高速度工具鋼（SKH9）、超硬合金（WC）などが用いられ、後者ほど耐摩耗性に優れる。表6から製品の寸法が比較的小さく、大量生産の場合に超硬合金（WC）の使用が多く、特にしごき加工を必要とする場合はすべて超硬合金が使用されている。製品の寸法が中~大で少量生産の場合クロムめっきが用いられている⁵⁵⁾。

潤滑油はキャンボディのように冷却性を特に必要とするものはエマルジョンタイプの水溶性潤滑油が用いられ、キャンエンド、キャップ、箔容器のように食品衛生上毒性がないことを要求される場合にはワックスそのもの、あるいはワックス系、ポリマー系（シリコンなど）の水溶性潤滑油が適用される。その他の一般的な成形加工は鋳油系で、用途に応じて適切な粘度が選定される。

以下にキャンボディ、キャンエンド、熱交用フィン、自動車パネルについて若干説明を加える。

4.1 キャンボディ

シームレスボディ（缶胴）とイージーオープンエンド（蓋）からなる2ピースオールアルミ缶は、容量135 mlから1000 mlまで多種にのぼり飲料缶の主力となっている。

図30にキャンボディの成形工程を示す。カッピングプレスで深絞りされた容器は、4枚のダイスがタンデムに配列されたボディメーカーで再絞り、#1~#3 しごき成形そして底部の張出し成形を1ストロークで受ける。図では作図の便宜上縁部を一致させて描いてあるが、実際には1枚のダイスを抜けてから次のダイスに入る。絞り（Draw）としごき（Ironing）により成形されるのでDIキャンと呼ばれる。トリミング工程で縁切りされた容器は洗浄、乾燥、塗装、焼付工程を経て、エンド取付用に縁部にネッキング、フランジ加工を受ける。

キャンボディに必要な特性は、破断（破胴、フランジ割れ）がないこと、表面欠陥（ゴーリング⁴⁶⁾、黒ずじ⁵⁶⁾）がないこと、寸法精度（真円度など）に優れること、必要な缶強度を有することなどである⁵⁷⁾。缶強度としては内圧をかけた場合の缶底の耐圧強度、缶体に軸圧縮力をかけた場合の円筒部の座屈強度（コラム強度）である。これら特性をバランスよく満足するアルミニウム材料として3004-H19, H39材が適用される。

コスト低減のための合理化は常に追求しなければならないテーマであるが、キャンボディについても素材の薄肉化、広幅化、成形速度の増速など多方面の努力が続けられている。現在350 ml用で素板板厚0.32~0.30 mm、キャン側壁部肉厚0.12~0.11 mmが一般的に用いられており10年で15%程度の薄肉化が達成されている。

図30 キャンボディ成形工程

このような薄肉化による耐圧強度、コラム強度の低下を補償するために、高強度材、缶底形状、ネッキング加工法⁵⁸⁾の開発などを必要とする。いずれも成形性が厳しくなる方向であるため、素材、形状設計、加工条件、新加工法開発などの総合的なアプローチを必要としている。

4.2 キャンエンド

キャンエンドの成形工程の模式図を図31に示す⁵⁹⁾。シートあるいはコイルで塗装されたエンド材は、まずベリックエンドプレスで周縁部にカール部とカウンターシンク部を絞り成形される。次いでコンバージョンプレスにより数工程をかけてタブ接合用のリベット部の成形、補強ビードなどの張出し成形、開口線となるスコア加工(図32(a)⁵⁹⁾、そしてタブ接合加工が行われる。リベット部は図32(b))に示すように張出し、絞り加工に、中央部への肉寄せを目的とした平坦部の圧縮加工(コイニング)を使用して成形される。成形の最も厳しい部分である。

成形上からはこのリベット部に割れが生じないことと、周縁部の加工が軽度であるため蓋全面の平坦度が良好であることが要求される。内圧のかからないキャンエンドには5052-H19, H39, 内圧のかかる場合には5082, 5182-H19, H39が適用され、変形能、金属間化合物、面内異方性の制御が行われている。

キャンエンド材はこれまで薄肉化よりも径を小さくすることにより軽量化を達成してきたが、これも限界に達し素材の薄肉化が進められている。現在内圧のかかるタイプでは0.29~0.30 mmであるが、近い将来0.24 mmも予想されている⁵⁹⁾。キャンボディの薄肉化と同様の取り組みを必要としている。

図31 エンドの成形過程の模式図⁵⁹⁾

(a)

(b)

図32 5182エンドのスコア部(a), リベットの成形過程(b)の断面図⁵⁹⁾
(スコア部はりん酸エッチ (×165))

4.3 熱交換器用フィン

ルームエアコンには銅パイプとアルミニウムフィンとの組合わせからなる熱交換器が使われている。フィンの成形上のポイントはカラーとよばれる銅パイプを挿入する立上り穴部で、内径9 mm 前後、高さ2 mm 前後で先端がカールされた形状になっている。銅パイプとの熱伝達、上下フィンのスペーサーの役割を有する。

フィンの成形方法には、図33⁶⁰⁾に示すようにドロー方式とドローレス(しごき)方式がある。前者は張出し、絞り、伸びフランジ成形により形状を得る方法である。張出し成形を含むためにアルミニウム素材は1100, 1200-H22 などの変形能に富む材料が適用される。耐力

〔カラー部成形ドロウ方式例〕
(3/8 インチの場合) 〔カラー部成形しごき方式例〕
(2.5/8 インチの場合) 図33 熱交フィンのカラー部の成形過程例⁶⁰⁾

が低いので成形時のコイルでの材料送り,あるいはフィンとしての剛性の点から板厚は0.12 mm 以上となる。

ドロレス方式はドロウ方式の短所を克服し薄肉化を目的として開発された方法で,まず伸びフランジで高さの低い立上り部を成形した後しごき加工に必要な高さを得,さらに伸びフランジで最終形状とする方法である。素材にはしごき性,伸びフランジ性,さらにはフィン全体に波型形状をつける場合にはある程度の張出し性も要求される。このため Mn, Zr, Tiなどを微量添加した特殊合金の H24, H26材が使用されている^{61)~63)}。板厚は0.10~0.12 mm で,現在はこのドロレス方式が主力となっている。

フィン材は薄肉化についてもさらに検討されているが,最近の動向は耐食性,浸水性向上を目的としたプレコートフィンの実用化である^{61),62)}。浸水性の付与はフィン間の水滴付着防止による熱交性能の向上にある。現在採用あるいは検討されている表面処理の種類を表7に示す。膜厚はおおよそ0.5~1.5 μm である。

成形加工においてはこれら皮膜の影響も考慮する必要がある。有機系,無機系コーティングについて検討した

表7 エアコン用アルミニウムフィンの表面処理法

性能	皮膜処理法	下地処理法
耐食性	クロメート	なし
	有機樹脂	なし又はクロメート
耐食性 + 親水性	ペーマイト	なし
	水ガラス又はシリカ, 又は両者の混合	なし又はクロメート
	親水性有機樹脂	
	親水性有機樹脂+水ガラス	
	〃 +シリカ	

結果⁶⁴⁾では有機系ではペー材と同等の加工性を示す。これに対し,無機系では成形品のきず,金型摩耗に問題を生ずるため,金型材質を高速度鋼から超硬への変更が必要であると結論している。

4.4 自動車ボディーパネル

自動車のアルミニウム材料の使用は,軽量化による燃費向上,性能向上を目的として着実に伸びてきている。最近では自転車の高性能化,高級化に伴う車両重量増加の軽減対策として,さらには軽量化そのものによる運動機能の向上⁶⁵⁾など積極的に走行性能を向上させる手段としてアルミ化が加速される見通しである。

このような動きのなかで現在の使用量はわずかであるが,フード(ボンネット),トランクリッド,ドアさらには車両全体のパネル部品へのアルミニウム薄板の採用が期待されている。

アルミニウム薄板によるボンネットの絞り型の構造および加工工程を図34および図35に示す⁶⁶⁾。長さ,幅の寸法は1500 mm 前後である。従来のアルミニウム薄板では経験の少ない非対称形状の大型品である。このようなボディーパネルの成形は絞り成分も含まれるが,主体は張出し,伸びフランジ加工であり,素材の延性が要求され

図34 アルミニウム製ボンネットインナーの成形過程⁶⁶⁾

(a) ドロウ, (b) トリム&ピース, (c) ピース, (d) リストライク&ピース

表 8 自動車ボディパネル用アルミニウム合金の主要化学成分と機械的性質

合 金		化学成分(%)				機 械 的 性 質		
		Si	Cu	Mn	Mg	耐 力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)
Al-Cu	2002-T4	0.4	2.0		0.8	18.3	33.7	26
	2036-T4		2.6	0.3	0.4	19.9	34.7	24
	2008-T4	0.7	0.9		0.4	12.7	25.3	28
Al-Mg	5182-0			0.3	4.5	13.3	28.1	26
Al-Mg-Si	6009-T4	0.8	0.3	0.5	0.6	12.8	23.5	25
	6010-T4	1.0	0.3	0.5	0.8	17.3	29.6	24
	AC120-T4	1.2	0.1	0.1	0.4	12.7	23.4	28

		材質	表面処理
1.	パンチ	FC25	な し
2.	ブランクホルダー(下)	"	"
3.	" (上)	"	"
4.	ダ イ	"	硬質クロムメッキ

図35 ポンネットレインフォースメントドロー型構造⁶⁶⁾

る。さらにゆるやかな曲率をもった平面部が型通りの形状になること、他部品との接合時に寸法誤差の少ないことなど、形状凍結性、寸法精度が重要特性となる。海外で現在使用あるいは開発されている本用途用の合金と機械的性質を表8に示す。国内ではAl-4.5Mg-1.5Zn系、Al-Mg-Cu系のT4材が実用あるいは検討されている^{66)~68)}。これらの合金はいずれも軟鋼板と同程度の30 kgf/mm²前後の引張強さを有するが伸び値は劣っている。このため工程数の増加、絞り成形要素の増、金型肩半径の増、クロムめっきの採用などの対策を必要としている⁶⁶⁾。今後素材面では延性の高い材料開発が待たれている。

5. おわりに

最近のデータを中心としてアルミニウムの薄板成形に

ついて概説したが、材料要因、トライボロジーの要因との関連などの考察過程が省略されている。必要に応じて引用文献を参照していただきたい。本講座が薄板成形の理解に参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 軽金属学会第7回シンポジウム予稿, 1975, 同シンポジウムまとめ 田中, 藤倉: 軽金属, **25** (1975), 436.
- 2) 馬場, 土田: プレス技術, **16** (1978), 61.
- 3) 第3回講習会テキスト, 軽金属学会, 1979.
- 4) 河合, 森: 軽金属, **30** (1980), 580.
- 5) 藤倉: 軽金属, **30** (1980), 664.
- 6) 軽金属学会第20回シンポジウム予稿, 1982, 同シンポジウムまとめ 西村, 藤倉: 軽金属, **32** (1982), 604.
- 7) Alcoa Forming Aluminum.
- 8) 高橋, 須藤, 小嶋: 金属, **4** (1972), 59.
- 9) 軽金属学会研究部会報告書 (1985), No. 12.
- 10) 金子, 菅又, 竹島: 軽金属, **35** (1985), 12.
- 11) 菅又, 橋本, 金子, 青木: 塑性と加工, **21** (1980-2), 144.
- 12) 碓井, 稲葉: 軽金属, **34** (1984), 236.
- 13) 竹島, 金子, 菅又, 青木: 軽金属, **30** (1980), 574.
- 14) 河合, 森, 井上, 劉: 日本機械学会論文集 (C編), **52** (1986-5), 1989.
- 15) 軽金属学会研究部会報告書 (1982), No. 7.
- 16) 河合, 森, 林, 江口: 日本機械学会論文集 (C編), **50** (1984-4), 716.
- 17) 河合, 森, 野崎: 同上, **49** (1983-1), 116.
- 18) 村田, 高橋: 軽金属, **31** (1981), 761.
- 19) 村田, 高橋: 同上, **32** (1982), 413.
- 20) 村田, 高橋: 同上, **32** (1982), 175.
- 21) 花木, 加藤: 日本金属学会誌, **47** (1983), 533.
- 22) 後藤, 堂田, 山下: 昭和63年度塑性加工春期講演会 (1988), 5.
- 23) 中村, 中川: 塑性と加工, **25** (1984-9), 831.

- 24) 谷澤：プレス技術，**25** (1987)，83.
25) 中村：同上，**25** (1987)，101.
26) 菅又，金子：同上，**25** (1987)，36.
27) 町田：同上，**25** (1987)，18.
28) 真鍋，浜野，西村：塑性と加工，**29** (1988-7)，740.
29) 岡崎：ある，**9** (1989)，22.
30) 浅尾，小林：塑性と加工，**30** (1989-3)，398.
31) 中村，中川：同上，**26** (1985-1)，73.
32) 金子，菅又，鈴木：同上，**28** (1987-4)，375.
33) 菅又：アマダ技術ジャーナル，**91** (1985)，10.
34) 阿部，吉田：同上，**91** (1985)，19.
35) 畑，東海林，藤倉：第72回軽金属学会春期大会講演概要 (1987)，77.
36) 藤倉，山崎：第58回軽金属学会春期大会講演概要 (1980)，41.
37) 山崎，藤倉：第61回軽金属学会秋期大会講演概要 (1981)，97.
38) 平岩，近藤：日本機械学会論文集 (C編)，**49** (1983-4)，695.
39) 河合，森，林：同上，**50** (1984-8)，1522.
40) 竹島，菅又，金子：軽金属，**33** (1983)，610.
41) 小原：軽金属，**30** (1980)，44.
42) 小原，勝田，青木：軽金属，**31** (1981)，602.
43) 萩原，藤倉：第60回軽金属学会春期大会講演概要 (1981)，165.
44) 岡本，土田：住友軽金属技報，**20-1, 2** (1979)，23.
45) 碓井，稲葉：軽金属，**34** (1984)，317.
46) 深田，溝内，平田，松尾：第74回軽金属学会春期大会講演概要 (1988)，87.
47) 加藤，左海，杉本，斉藤：第36回塑性加工連合講演会 (1985)，329.
48) 今津：同上，325.
49) 後藤，山下，堂田：塑性と加工，**30** (1989-3)，391.
50) 斉藤，済木，河合：日本機械学会論文集 (C編)，**52** (1986-5)，1670.
51) 河合，堂田，斉藤，林，王：第39回塑性加工連合講演会 (1988)，77.
52) 谷川，稲葉，碓井：軽金属学会第5回金属成形セミナー (1987)，35.
53) 坂口，阿部：同上，59.
54) 藤倉：同上，91.
55) 坂口，阿部：プレス技術，**26** (1988)，85.
56) 稲林，小山，神林，藤倉：第76回軽金属学会春期大会講演概要 (1989)，47.
57) 今津：第126回塑性加工シンポジウム (1989)，63.
58) 今津：塑性と加工，**26** (1985-4)，368.
59) R. E. Sanders, Jr, D. J. Lege and T. L. Hartman: Aluminium, **65** (1989)，941.
60) 萩原，藤倉：古河電工時報，**75** (1985)，223.
61) 野世溪，前田，竹島，知念，西野，森山：住友軽金属技報，**28** (1987)，101.
62) 谷川：アマダ技術ジャーナル，**87** (1984)，29.
63) 碓井，沢田：R & D 神戸製鋼技報，**35** (1985)，105.
64) 辻：軽金属学会第4回金属成形セミナー (1986)，84.
65) 高須賀：軽金属協会国際シンポジウム「輸送機関へのアルミニウムの利用」(1989).
66) 西山：軽金属学会第31回シンポジウム (1987)，23.
67) 宇野，吉田：住友軽金属技報，**27** (1986)，22.
68) 日野：アルトピア，**12** (1989)，9.
69) 西村，土田：アマダ技術ジャーナル (1984)，15.