

プレス成形用アルミニウム板材の諸特性

The Properties of Aluminum Sheet for Press Forming

野口 修
Osamu Noguchi

概要 アルミニウム板材は年間130万トンの需要があり、その内の60%程がなんらかの形でプレス成形され製品に加工されると考えられる。アルミニウム板材と言っても強度向上のために各種元素を添加したアルミニウム合金板材、さらに調質により強度を調整したアルミニウム合金板材も広く使用されている。ここでは成形用アルミニウム板材の合金や調質による成形特性、特に深絞り性について解説する。

Abstract : Aluminum sheet materials have 1.3 million tons of demands in a year. And it is considered, approximately 60% of these materials are press worked to be processed into products. Though the aluminum sheet materials, the strength improved aluminum alloy sheet materials by adding various elements, and also the intensity adjusted aluminum sheet materials by temper are widely used. Here, the forming characteristics by alloying and tempering the aluminum sheet materials for fabrication, especially deep-draw ability are explained.

1. はじめに

アルミニウムの電解製錬方法（ホール・エルー法）が1886年に確立してから今年で127年、工業製品として比較的新しい材料である¹⁾。

アルミニウムは、「比重2.7と軽い」、「展延性に優れ加工性が良い」、「大気中では耐食性に優れる」、「電気伝導性や熱伝導性に優れている」、「非磁性である」、「毒性がない」、「リサイクル性に優れている」などの特徴がある。それらを活かして多岐にわたる分野に利用され、アルミニウム板材を基にした製品も数多く流通している。

アルミニウム板材を基にした製品として、古くは鍋、釜、弁当箱などからはじまり、現在ではアルミニウム缶に代表されるようにプレス加工によって形作られるものが多い。また、一口にアルミニウム板材と言っても強度向上のために各種元素を添加したアルミニウム合金板材、さらに調質により強度を調整したアルミニウム合金板材も広く使用されている。

ここでは成形用アルミニウム板材の合金や調質による成形特性、特に深絞り性について述べる。

2. アルミニウム板材の種類

2.1 アルミニウム板材の需要

国内のアルミニウム製品総需要の約7割を板や押し出し材などの展伸材が占め、その内、約130万トン／年を板材が占めている。プレス成形用のアルミニウム板材の量は正確には把握されていない。図1にアルミニウム板材出荷量と需要分類を示す²⁾。この中で缶材容器、電気・機械（熱交材含む）、自動車、輸出（主に缶材と熱交材）などは主にプレス成形材であることから、アルミニウム板材の60%以上がプレス成形用であると推察される。

2.2 合金の分類

アルミニウム展伸材の合金記号は4桁の数字で表され、第1位の数字は合金系を、第2位は改良合金を、第3位と第4位は個々の合金の識別を示している。なお、純アルミニウム（1000系）の第3位と第4位合金はアルミニウム純度を表している。

アルミニウム合金は添加成分の作用により非熱処理合金と熱処理合金の2つに分けられる。

非熱処理合金は主に添加成分の固溶体強化や加工硬化

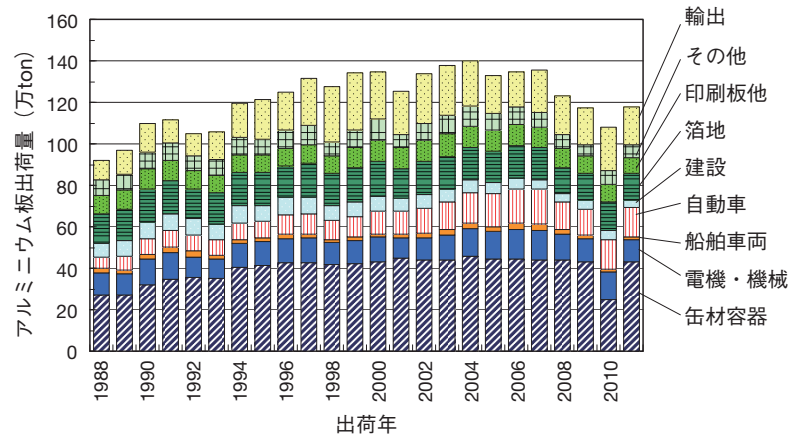


図1 アルミニウム板材出荷量と需要分類²⁾

Fig. 1 Shipping volume and demands classification of aluminum sheet materials.

および焼きなましにより強度を調整する合金で、主要な添加成分はMn, Mg, Siなどである。なお、純アルミニウム(1000系)も非熱処理合金に含まれる。

熱処理合金は添加成分による析出で強度を調整する合金で、添加成分は主にMgとCu, あるいはMgとSi, ZnとMgなどである。表1にアルミニウム展伸材の合金分類を示す³⁾。

アルミニウム展伸材の中でプレス成形に適用される主なアルミニウム板材の化学成分を表2に示す³⁾。

2.3 調質

アルミニウム合金では冷間圧延や焼きなまし, 焼入れ, 焼もどしなどにより, 所定の強度や特性を得ることを調質といい, 調質の種類を質別という。

プレス成形用板材の主な質別記号を表3に, 質別調整の製造工程の概略を図2に示す³⁾。

非熱処理合金は主に冷間圧延率や焼きなまし温度などにより調質することから, 質別記号Hで表される。

また, 熱処理型合金は焼入れや焼もどし, 時効処理により調質することから, 質別記号はTで表される。

3. プレス成形特性

3.1 機械的特性

図3にA3003合金板材の質別3種類の応力ひずみ線図を示す。A3003合金は純アルミニウムに近い延性と中強度の材料である。図3の質別による伸び(EL)はO材で約40%, H14材で約17%, H18材で約6%と変化する。

O材以外のH14, H18などの低伸び材も形状に制限はあるが成形用材料として一般的に使用されている。

アルミニウムハンドブック³⁾のアルミニウム板材の引張強さと伸びの標準値をグラフ化して図4に示す。図4には成形用材以外の板材も含んでいるが, 引張強さと伸

表1 アルミニウム展伸材の合金分類³⁾

Table 1 The alloy classification of wrought aluminum materials.

大分類	合金呼称
非熱処理合金	純アルミニウム (1000系)
	Al-Mn系合金 (3000系)
	Al-Si系合金 (4000系)
	Al-Mg系合金 (5000系)
熱処理合金	Al-Cu-Mg系合金 (2000系)
	Al-Mg-Si系合金 (6000系)
	Al-Zn-Mg系合金 (7000系)

びは反比例の関係にあり, 伸びが30%を超える材料では強度は150 MPa以下と低強度である。

表4にアルミニウム板材の機械的性質の例を示す^{4),5)}。鋼板と比較すると強度は僅かに小さい程度の合金板もあるが, 伸びが大幅に小さく, 特に局部伸びが小さい。この他n値は同等以上で大きい, r値は1未満と小さい。

微小区間でのn値, すなわち, 瞬間n値(n*)を図5に示す⁶⁾。図5より, ε=0.05以上では純アルミニウムや鋼板のn*は一定であるが, 5000系や6000系板材のn*はひずみ依存性が大きく, 減少している。このほか, アルミニウム板材のひずみ速度感受性指数(m値)は図6に示す⁶⁾ようにゼロかあるいは5000系ではマイナスであり, n*やm値の挙動がアルミニウム合金板材の局部伸びが小さい一因と考えられる。

$$n^* = \frac{d\sigma/\sigma}{d\varepsilon/\varepsilon}$$

$$\sigma = F\varepsilon^n \varepsilon^m$$

表2 アルミニウム合金の化学成分規格³⁾

Table 2 The chemical compositional standard of aluminum alloys.

(mass%)

種類 (JIS)	化学成分 (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A1050	≦0.25	≦0.40	≦0.05	≦0.05	≦0.05	—	≦0.05	≦0.03	99.50以上
A1100	≦1.0		0.05~0.20	≦0.05	—	—	≦0.10	—	99.00以上
A1200	≦1.0		≦0.05	≦0.05	—	—	≦0.10	≦0.05	99.00以上
A3003	≦0.6	≦0.7	0.05~0.20	1.0~1.5	—	—	≦0.10	—	残部
A3004	≦0.30	≦0.7	≦0.25	1.0~1.5	0.8~1.3	—	≦0.25	—	〃
A5052	≦0.25	≦0.40	≦0.10	≦0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	≦0.10	—	〃
A5454	≦0.25	≦0.40	≦0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	≦0.25	≦0.20	〃
A5182	≦0.20	≦0.35	≦0.15	0.20~0.50	4.0~5.0	≦0.10	≦0.25	≦0.10	〃
A5083	≦0.40	≦0.40	≦0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	≦0.25	≦0.15	〃
A6016	1.0~1.5	≦0.50	≦0.20	≦0.20	0.25~0.6	≦0.20	≦0.20	≦0.15	〃
A6061	0.40~0.8	≦0.7	0.15~0.40	≦0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	≦0.25	≦0.15	〃

表3 JIS規格で用いられる質別記号³⁾

Table 3 Temper symbols used in JIS standard.

記号	定義・意味	
F	—	製造のままのもの
H	H1	加工硬化だけのもの
	H2	加工硬化後軟化熱処理したもの
	H3	加工硬化後安定化処理したもの
	H18	断面減少率約75%冷間加工したもの
	H14	引張強さがOとH18の間のもの
	H24	
H34	引張強さがOとH24の間のもの	
H22		
O		最も軟らかい状態に焼きなましたもの
T	T4	溶体化処理焼入れ後自然時効したもの
	T6	溶体化処理焼入れ後人工時効したもの

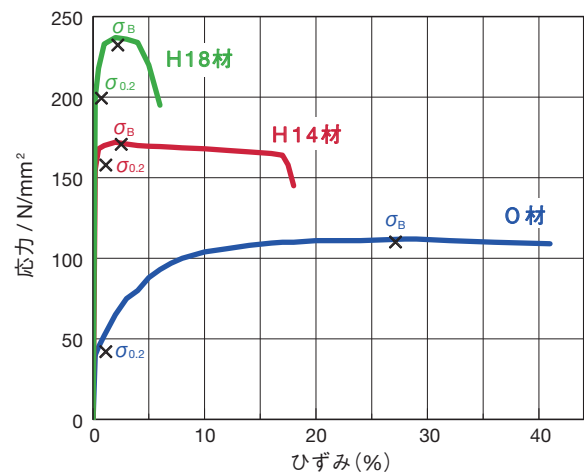


図3 A3003板材の応力ひずみ線図³⁾

Fig. 3 The stress strain diagram of A3003 alloy sheet.

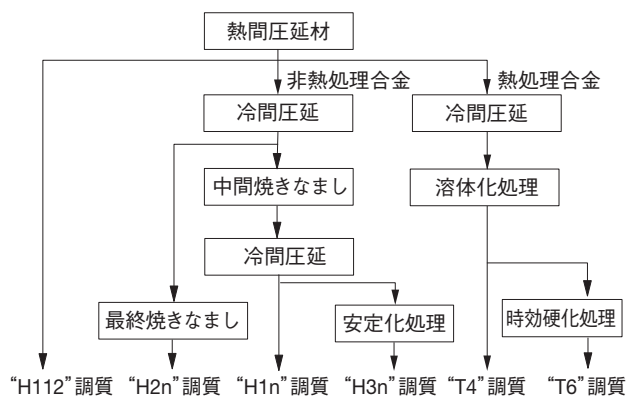


図2 調質のフローチャート³⁾

Fig. 2 The flow chart of temper.

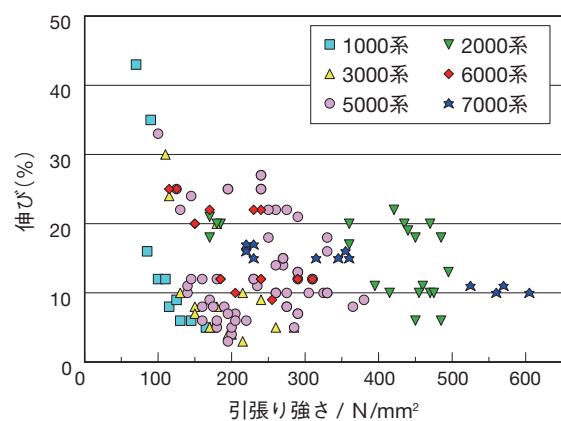


図4 アルミニウム板材の引張強さと伸びの関係³⁾

Fig. 4 The relation between strength and elongation of aluminum alloy sheet.

表4 アルミニウム板材の機械的特性^{4),5)}

Table 4 The mechanical property of aluminum alloy sheets.

合金系	合金・質別	引張強度 TS (MPa)	耐力 YS (MPa)	伸び EL (%)	n値	r値	エリクセン値 Er (mm)
1000系	A1100-O	94	32	43	—	—	10.8
3000系	A3004-O	175	62	27	—	—	8.7
5000系	A5052-O	206	98	23	0.26	0.66	9.6
	A5182-O	284	137	28	0.30	0.79	9.6
6000系	A6016-T4	235	127	28	0.26	0.70	—
鋼板	SPCC	314	176	42	0.23	1.39	11.9

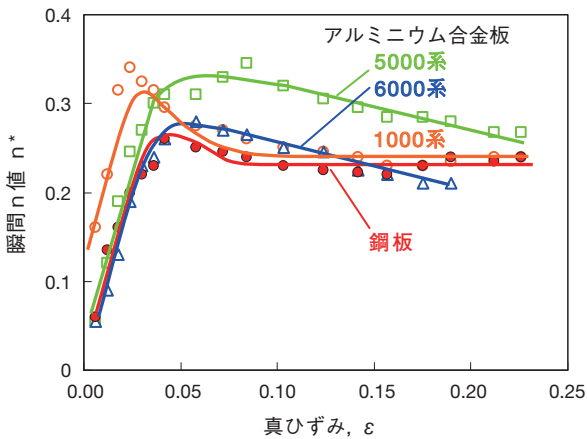


図5 真ひずみと瞬間n値 (n*)⁶⁾

Fig. 5 The relation between true strain ϵ and moment n values of aluminum alloy sheets and a steel sheet.

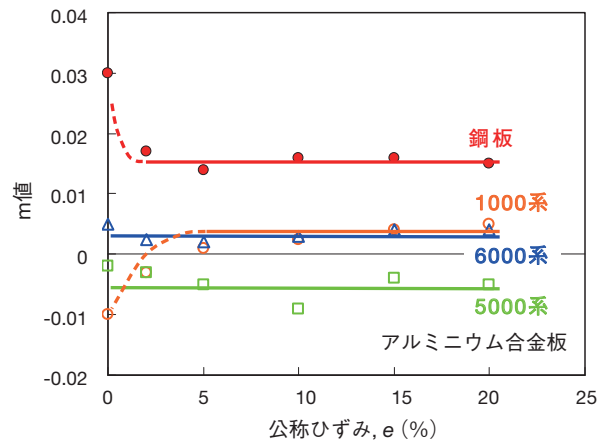


図6 公称ひずみとひずみ速度感受性指数m値⁶⁾

Fig. 6 The relation between nonuniform strain e and m values of aluminum alloy sheets and a steel sheet.

3.2 深絞り性

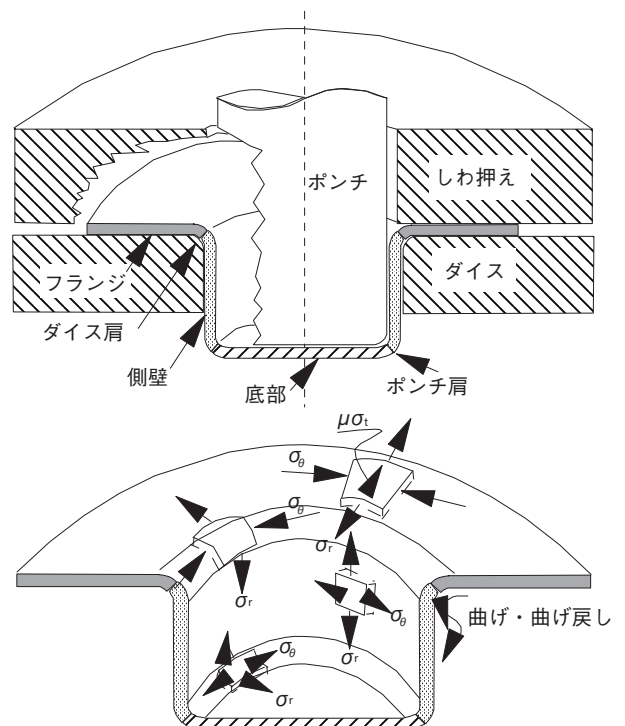
3.2.1 円筒深絞り

深絞り成形は有底容器形状を作る方法として多用され、形状により円筒深絞りや角筒絞り、複雑形状絞り、異型絞りなどがあり、絞り回数により平板絞りと再絞りと区分されている。深絞りはフランジ部の材料をダイス穴内に絞り込むことにより成形高さを得る成形で、ポンチによる半径方向引張応力がフランジ部材料に円周方向圧縮応力を発生させ、円周方向に縮み変形させる。主要変形部はダイス穴径より外側のフランジ部とダイスR部の材料である。また、ポンチからの成形力は成形されたカップ底部および側壁部材料を介して伝えられる。成形中はカップ内で主要変形部と成形力伝達部との別の役割の部分が存在する。これを図7に示す。

アルミニウム板材の合金と質別に円筒深絞り性とダイスRとの関係を図8に、ポンチRとの関係を図9に示す⁷⁾。なお、円筒深絞り性はLDRで評価した。

※LDR (limiting drawing ratio : 限界絞り比 = 深絞り可能な最大blank径 / ポンチ径)

図8および図9よりLDRには金型形状が大きく影響することが分かる。LDRを大きくするにはダイス肩R半径を板厚(t)に対し $R/t > 4$ とする必要がある。ポンチ肩R半径の影響は材料の質別で異なり、O材では $R/t > 5$,



σ_r : 半径方向、軸方向応力

σ_θ : 円周方向応力

σ_t : 板厚方向応力

図7 円筒深絞りの応力状態

Fig. 7 The stress state of deep drawing.

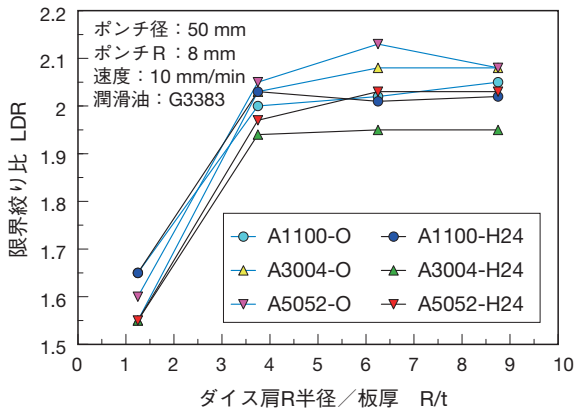


図8 ダイス肩RとLDRの関係⁷⁾
Fig. 8 The relation between the die shoulders R and LDR.

H24材では $15 > R/t > 5$ の範囲とすることで大きなLDRが得られる。また、成形条件により一概には言えないが、本成形条件下では、H24材よりもO材の方が深絞り性に優れる傾向があり、O材では $A5052 > A3004 > A1100$ と引張強さの高い材料の方が大きなLDRを示す。

3.2.2 角絞り

ライターケースやリチウムイオン電池ケースのような小さな深い角容器の場合は円筒絞りから数段の加工で徐々に角絞りに変化させる方法が採用されている。平面寸法の大きな角容器や角パネルの場合が角絞りの対象となる。角絞りでは四隅のコーナー部は円筒絞りの一部分と同じで絞りりと曲げおよび曲げ戻し変形を受け、直辺部は曲げと曲げ戻し変形を受けるので、コーナー部の変形応力が大きくなり、破断もコーナー部で発生する。アルミニウム板材A1050材のH材とO材についてコーナーrと直辺の比とポンチ面摩擦の影響による角絞り性を図10に示す⁸⁾。図中の限界絞り対辺比は、角絞りにおける限界絞り比を表す。図10の限界絞り対辺比はrc/Lにより複雑な変化をする。角筒化 (rc/L減少) では、H材のほうがO材より限界絞り対辺比Lc/Lが大きく、角絞り性が良い。円筒化 (rc/L増加) ではO材の方が角絞り性が良い。H材はポンチ面高摩擦 (μ_p 大) の方が低摩擦 (μ_p 小) より良く絞れる。O材は角筒化すると低摩擦 (μ_p 小) の方が、円筒化すると高摩擦 (μ_p 大) が良い。これらの結果はポンチ角隅部に集中しやすい変形抵抗やポンチ肩部負担能力の周方向一様化の差とされている。

図10に比べてポンチ短辺長さが5~10倍の場合の絞り性については図11に示す^{9), 10)}。図11(c)のコーナー部半径は図10のrc/L: 0.03~0.13 (L=300の場合) に相当する。コーナー半径の増加に伴い絞り性が急激に増加する点などは類似している。しかし、質別による傾向は異なりO材が良好である。図11(a)では引張り強さと逆相関で、図11(b)では45°方向のr値と正相関がある。図11

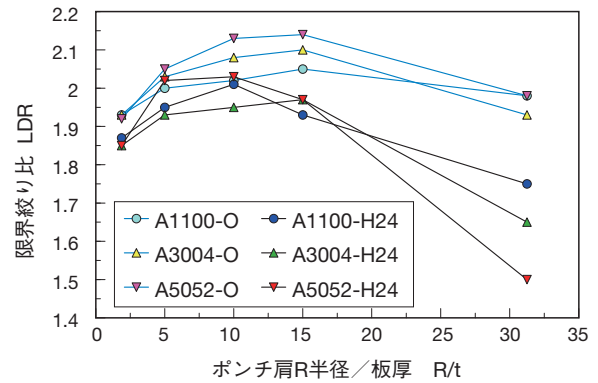


図9 ポンチ肩RとLDRの関係⁷⁾
Fig. 9 The relation between the punch shoulders R and LDR.

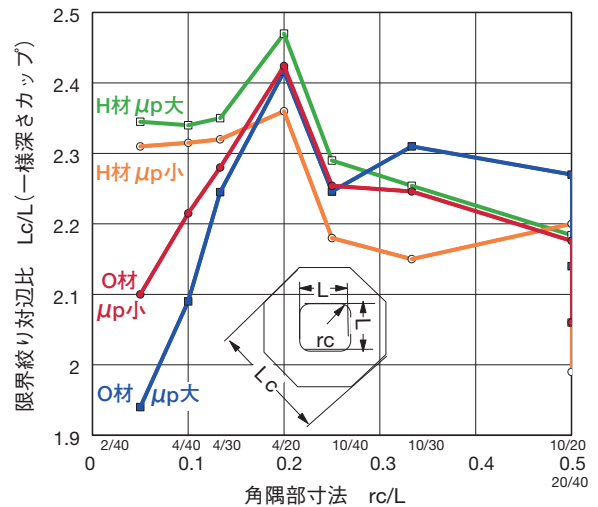


図10 一様深さカップでの限界絞り対辺比に及ぼす角隅部寸法の影響⁸⁾
工業用純アルミニウム板A1050 (板厚0.8 mm),
H材: H18
フランジ面潤滑: 鈹油+ポリエチレン膜
ポンチ面潤滑: μ_p 大: 鈹油, μ_p 小: 鈹油+ポリエチレン膜
Fig.10 Influence of the corner part dimension exerted on the limiting drawing ratio of square in a uniform depth cup.

ではコーナー肩rが大きい点がコーナー部のポンチ負担能力を均一化する効果がありO材や低強度材が良好となったと推定される。

3.2.3 再絞り

再絞り成形は平板絞りでは得られないような深い容器形状を作る加工法で、平板絞りした容器形状の材料を再度深絞りする方法ある。深い容器では再絞り回数も多く、リチウムイオン電池ケースなどでは10回近い再絞りを行うケースもある。このほか、アルミニウム飲料缶胴やコンデenserケース、コピードラムなど実際の適用例は多い。代表的な再絞り方法としては絞り方向から順方向と逆方向、ダイス形状から平面ダイスとテーパードイスに分けられている。図12に再絞りの代表的な方式を示す。

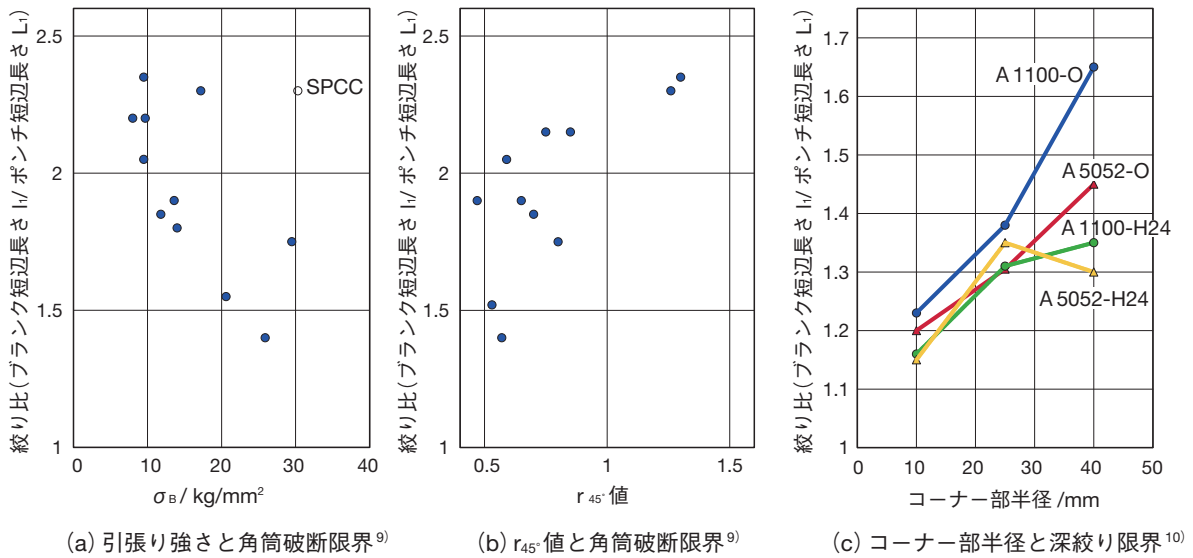


図 11 各種アルミ板材の角筒破断限界
 供試材板厚 1.0 mm, ポンチ: 面サイズ 200×300, コーナー r40 mm (c) 10, 20, 40 mm,
 コーナー肩 r10 mm, 直辺部肩 r5 mm, クリアランス 1.2 mm, プレス油使用

Fig. 11 Rectangular shell fracture limit of aluminum alloy sheets.

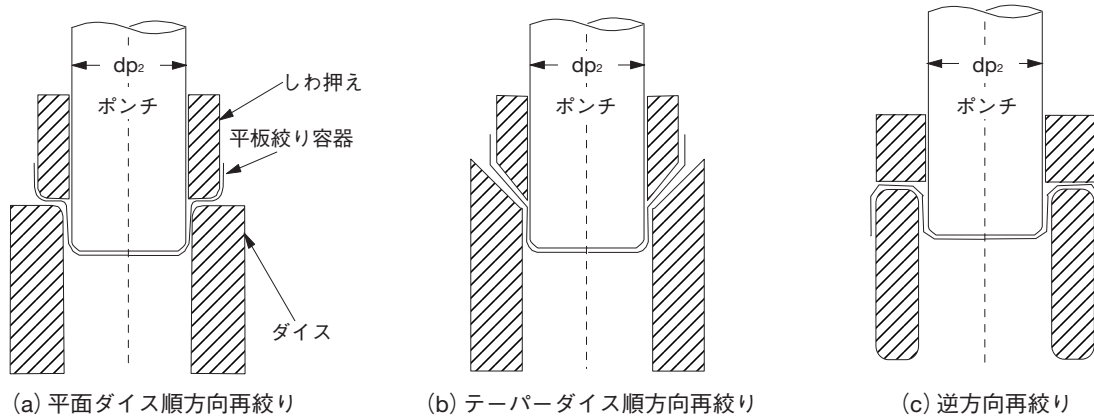


図 12 再絞り方法概略
 Fig. 12 The redrawing method outline.

図 13 に再絞りの代表的な応用例として飲料缶の製造工程を示す¹¹⁾。カップング後に再絞りをを行い連続して3段のしごき加工を加える。

3.2.4 深絞りにおける潤滑の影響

アルミニウムは鋼板に比べて鉄や工具鋼の金型に凝着しやすい性質を持っている。また、アルミニウム板材は特に要求ある場合を除いて通常、鋼板のように防錆油を塗布しないで販売する。プレス成形する場合、プレス現場で適当な潤滑剤を使用する必要がある。アルミニウム板材に潤滑剤を使用した場合、潤滑剤によって成形性の変化が大きい。各種潤滑剤による成形性と脱脂性を表 5 に示す¹²⁾。成形性に関してはアルミニウムと工具が直接接触しないような WAX や樹脂皮膜、樹脂フィルムなどが良好な性能を示している。なお、図 14¹³⁾ に示すように鉱油タイプの潤滑剤は成形速度と粘度の増加に従

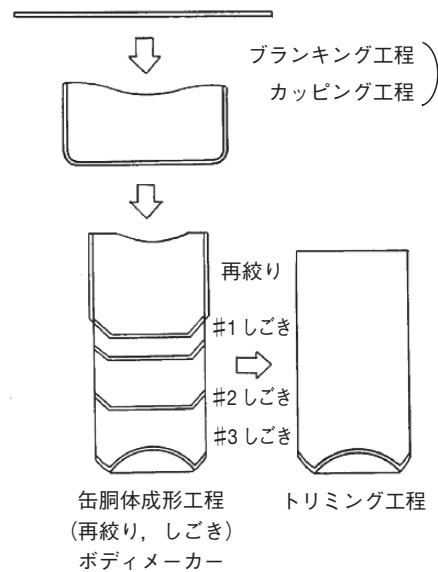


図 13 キャンボディ成形工程¹¹⁾
 Fig. 13 Can body forming process.

い良好な深絞り性を示すが、WAXなどでは速度効果が少ないなど、潤滑剤の種類により効果が大きく異なる点も注意が必要である¹²⁾。

表5 成形性に及ぼす潤滑剤の影響¹²⁾

Table 5 Influence of lubricant on formability.

潤滑剤		成形性		脱脂性
種類	粘度	LDR	エリクセン値	
防錆油	16 cSt	1.98	8.8	○
プレス油	20 cSt	2.02	9.5	○
	94 cSt	2.08	9.5	△
	373 cSt	2.02	9.8	×
Wax	—	2.06	9.9	△
樹脂皮膜	—	2.08	9.3	○
	—	2.12	9.6	○
塩ビフィルム	—	2.13	10.1	○

供試材 AA5022 O材 板厚 1.0 mm

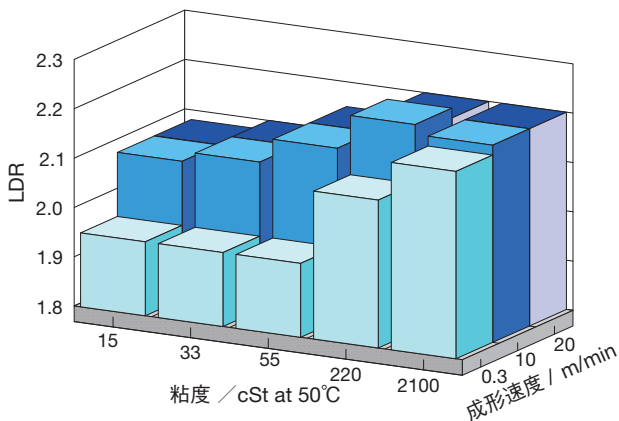
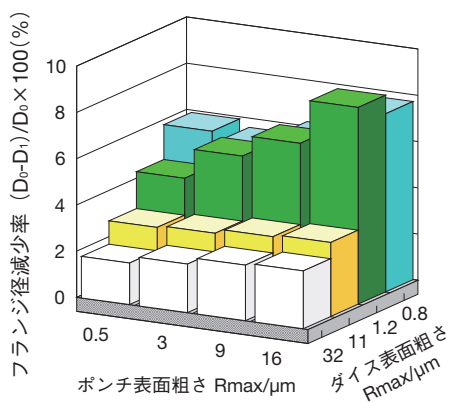
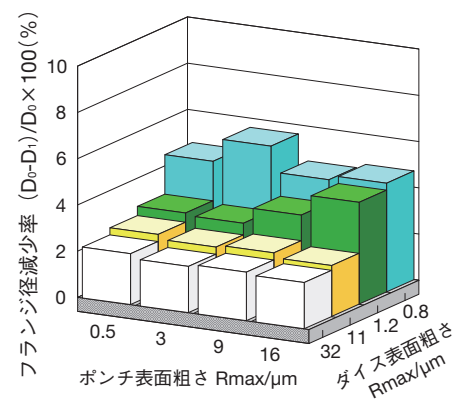


図14 成形速度とプレス油(基油+油性剤)の粘度によるLDR¹³⁾

Fig. 14 LDR by forming speed and press oil viscosity.



(a) パラフィン系鉱油 (200 cSt), MF材 (Rmax1.1 ~ 0.8 μm)



(b) パラフィン系鉱油 (35 cSt), MF材 (Rmax1.1 ~ 0.8 μm)

図16 円筒深絞りにおけるポンチおよびダイスの表面粗度によるフランジ径減少率¹⁴⁾

ポンチ径32 mm, ポンチ肩r3 mm, ダイス肩r5 mm, クリアランス1.2 mm/片側
供試材A1100-O 板厚0.8 mm, プランク径70 mm, 絞り速度230 mm/min, BHF100 kg一定

Fig. 16 Flange diameter decrease rate by die and punch surface roughness in cup drawing.

絞り性の向上を図るにはフランジ部材料を絞り込みやすくし、ポンチラジラス部の材料の荷重負担能力を高める必要がある。フランジ部を低摩擦とし、ポンチラジラス部を高摩擦と低摩擦とした実験結果を図15に示す⁸⁾。硬質材では平頭ポンチでポンチラジラス部の摩擦の差が絞り性の差として現れているが、材料の張出し性が低いので球頭化すると絞り性の差がなくなる。しかし、軟質材では摩擦による絞り性の差は明確である。

3.2.5 深絞りにおける金型粗さの影響

アルミニウム板材は弾性係数が小さいため金型表面粗さの凹凸に対して変形しやすく、傷つきやすい。そのため、一般に金型表面は滑らかに仕上げている。図16は

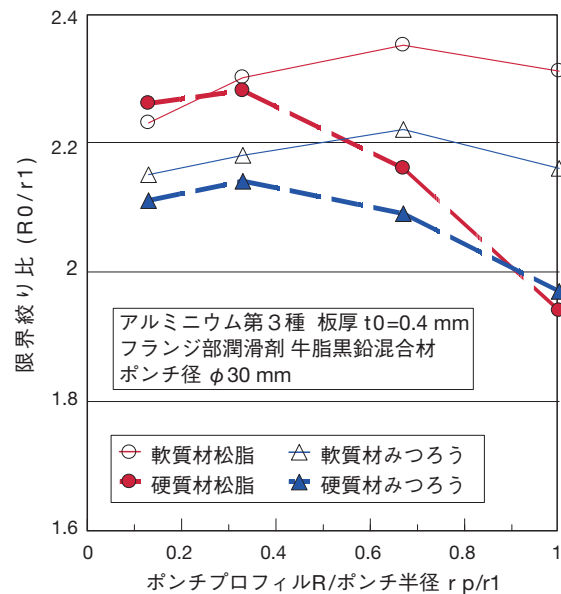


図15 ポンチプロファイルの潤滑差の影響⁸⁾

Fig. 15 Influence of the lubricous difference of a punch profile.

ポンチおよびダイスの表面粗さを切削時のバイト目の粗さで一定とした工具による試験結果の一部である¹⁴⁾。

成形性はフランジ径減少率で評価している。ポンチ表面粗さは粗い方が、ダイス表面粗さは滑らかな方が、また潤滑剤は高粘度の方がフランジ径減少率が大きく、成形性が良いことが示されている。ただし、ポンチ表面粗さをあまり粗くするとポンチへのアルミニウムの凝着、削り粉の発生などが起こるので注意が必要である。金型製造時に必要な部分を滑らかにすることはノウハウとして実施されているが、アルミニウムは弾性係数が小さいことから金型表面粗さの影響を受けやすいと考えられ、今後、アルミニウム板材の成形においては金型の一部の表面粗さを成形性の向上に利用する方法の検討も必要であろう。

4. おわりに

近年、板連続熱処理炉の導入と合金設計により、アルミニウム板材の成形性は向上した。また、材料の成形性を評価する手法は材料開発や使用時の材料選択に重要であり、多くの実験的な研究報告が発表されている。今後、さらに検討が進みアルミニウム板材に適した成形性の評価方法が見いだされるものと期待する。同時にアルミニウムに適した成形法も開発されつつあり、材料と成形方法の両面から成形性の改善が行われるものと思われる。その結果、アルミニウム板材の用途が拡大し、多くの人々に役立つことを願う。

参考文献

- 1) 日本アルミニウム協会webサイト：アルミニウムの歴史
- 2) 日本アルミニウム協会webサイト：アルミ板類需要部門別出荷推移(2012)
- 3) 日本アルミニウム協会編：アルミニウムハンドブック(2007).
- 4) 阿部佑二, 吉田正勝, 野口修, 松尾守, 小松原俊雄：塑性と加工, 33-375 (1992), 365.
- 5) 軽金属学会成形部会：研究部会報告書, 自動車車体用アルミニウム合金薄板の成形性データブック, (1996)
- 6) M. Usuda, K. Hasimoto, T. Amaike, T. Katayama, Y. Abe and M. Yoshida : SAE, No950924, (1995) .
- 7) 軽金属学会成形部会：研究部会報告書, アルミニウム合金薄板のプレス加工データブック, (1991)
- 8) 河合望：新版塑性加工学(1995), 207, (朝倉書店) .
- 9) 藤倉潮三, 山崎淳：58回軽金属春講概, (1980), 41.
- 10) 藤倉潮三, 山崎淳：55回軽金属春講概, (1978), 75.
- 11) 藤倉潮三：軽金属, 40 (1990), 239.
- 12) 阿部佑二, 吉田正勝, 野口修, 松尾守, 小松原俊雄：塑性と加工, 33-375 (1992), 365.
- 13) 木村茂樹：軽金属学会第5回金属成形セミナー, (1987), 106.
- 14) 阿部佑二, 岡田健三：20回軽金属シンポジウム, (1982), 30.



野口 修 (Osamu Noguchi)
技術研究所