

自動車用アルミニウム板材の加工法

上野 洋一*, 八野 元信**, 紀藤 航*, 渡邊 貴道***, 鳥飼 岳*

Processing Method of Automobile Aluminum Panel

Yoichi Ueno*, Motonobu Hachino**, Ko Kito*, Takamichi Watanabe*** and Gaku Torikai*

Keywords: automobile aluminum panel, press processing, CAE, press oil

1. はじめに

近年、欧州ではCO₂排出量の削減、北米では燃費の低減が強く求められており、規制をクリアできない自動車会社に対して罰則が課せられるという非常に厳しい状況となっている。一方、自動車には、安全性の確保や快適性の向上なども求められ、これらの機能は車両重量を増加させる一因となっている。また、燃費向上のため、自動車を電化すれば、電子部品の車載により車両重量は増加する。最近では、自動運転の実用化も視野に入り、センサー類や制御装置による車両重量の増加も予想される。車両重量の増加は、CO₂排出量の増加と燃費の悪化を招き、厳しい規制をクリアするための障害となる。これらの規制をクリアするには、車両重量の軽量化が必要となる。

車両重量を軽量化するには、従来材料である鋼板の薄肉化や低密度材料への材料置換が挙げられる。鋼板の薄肉化では、非常に高い強度を有する高張力鋼板が開発された。また、鋼板に比べて密度が1/3であるアルミニウム板材が自動車のフードやドア、トランクなど蓋ものの部品に適用されるようになってきている¹⁾。蓋ものの部品は張り剛性などの曲げ変形を受けるものが多く、曲げ変形では板厚が剛性や強度に大きく影響するため、アルミニウム板材は鋼板の1.44倍の板厚で材料置換でき、50%の軽量化が可能となる²⁾。最近発売されたFORDのピックアップトラックF-150を例に挙げても、鋼板からアルミニウム素材に材料置換することで、

先代比でおよそ320 kgもの軽量化を達成している。

ところが、アルミニウム板材は鋼板に比べて延性が低いため、複雑な形状や大きな変形を要するプレス加工をすると、加工中に材料が破断する。また、ヤング率が鋼板の1/3であるため、プレス加工後の形状凍結性が悪いという欠点もある。プレス加工時に発生したアルミ摩耗粉が凝集し、プレス品の外観を損ねる懸念もある。これらの問題を解決するためにも、工法や潤滑油などに注意が必要である。また、試作費を削減するため、精度の高い板成形シミュレーションが必要であるが、材料特性や摩擦特性が鋼板と大きく異なり、鋼板と同程度の精度で解析を行うのは難しい。

本論文では、アルミニウム板材の特性について解説し、アルミニウム板材の加工法やアルミニウムに適した板成形シミュレーションについて紹介する。また、プレス加工時に発生するアルミ摩耗粉を分散させる機能を有した当社独自開発のプレス油を紹介する。

2. アルミニウム合金板材のプレス成形性

2.1 機械的特性

Table 1に代表的な各種アルミニウム合金板材および鋼板(深絞り用冷延鋼板:SPCE)の機械的特性を示す³⁾。アルミニウム合金板材は鋼板と比較して、全伸び(特に局部のび)およびr値が小さく、これらがプレス成形性に劣る理由として挙げられる。加工硬化指数n値については、鋼板よりも高い値を有する合金-調質

* (株)UACJ 技術開発研究所 第三研究部
No. 3 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

** (株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部
No. 6 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

*** (株)UACJ 技術開発研究所 第五研究部
No. 5 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

Table 1 Mechanical properties of typical aluminum alloy and steel sheets ³⁾.

Materials	Tensile strength	0.2% Proof stress	Total elongation	Uniform elongation	Local elongation	n-value	r-value
	MPa	MPa	%	%	%		
1100-O	94	32	43.3	33.3	10.0	0.29	0.85
1100-H24	143	140	10.0	-	-	-	-
3004-O	175	62	26.5	22.0	4.5	0.28	0.71
3004-H24	220	181	9.0	7.8	1.3	0.12	0.70
5052-O	210	106	27.5	25.3	2.3	0.32	0.74
5052-H24	263	212	17.5	14.0	3.5	0.13	1.05
5182-O	261	121	29.8	27.0	2.8	0.32	0.61
5182-H24	337	255	13.8	12.5	1.3	0.13	0.75
6061-O	124	44	31.0	25.8	5.3	0.28	0.66
6061-T4	276	190	24.0	20.8	3.3	0.20	0.74
SPCE	306	185	44.8	22.3	22.5	0.21	2.00

もあるが、ひずみ量に対して一定の値をとらず、変化することが知られている。高ひずみ域では転位密度の増大によって動的回復の頻度が増加するので、n値は次第に低下する。また、アルミニウム合金板材のひずみ速度感受性指数m値はほとんどゼロか5000系では負の値であるのに対して、鋼板のm値は0.015程度である⁴⁾。鋼板の場合、塑性不安定以降において、拡散くびれにより変形領域が局在化して、局所的にひずみ速度が増加しても、変形抵抗が大きくなり、周辺領域で変形を受け持つので、局部くびれの発生が遅延し、その結果として、局部伸びが大きいと考えられる。しかし、アルミニウム合金板材では、m値は鋼板と比べて低いことと、高ひずみ域でのn値の低下によって、変形領域が局在化すると、周辺領域で変形を受け持たず、局部くびれの発生が早くなり、局部伸びが低下すると考えられる。

通常の引張試験は、JIS5号(標点距離:50 mm, 平行部長さ:60 mm) 或いはJIS13号B(標点距離:50 mm, 平行部長さ:60 mm) の試験片を用いて、クロスヘッド速度を $(0.83 \sim 3.33) \times 10^4$ m/sとして行われ、板成形シミュレーションではこれらの結果が一般に用いられている。一方、実際のプレス成形では0.1~0.5 m/sの速度で成形が行われている。金型設計から部品取得までのトライコストを低減させるためには、板成形シミュレーションの高精度化が求められており、実際のプレス成形の速度域での機械的特性について把握する必要がある。そこで、サーボプレスを用いた引張試験が実施された⁵⁾。試験片はJIS5号(標点距離:50 mm, 平行部長さ:60 mm)とし、引張速度は0.005~0.5 m/s(初期ひずみ速度は0.083~8.333s⁻¹)とした。Fig. 1に各種アルミニウム合金板材および高張力鋼板(高延性型:JAC590T, 低降伏比型:JAC590Y)の引張強度に

及ぼすひずみ速度の影響を示す⁵⁾。高張力鋼板と比べるとアルミニウム合金板材の引張強度のひずみ速度依存性は小さい。しかしながら、本試験のひずみ速度域においては、5182-Oの引張強度はひずみ速度と負の相関があり、高張力鋼板の傾向とは異なる。ひずみ速度が増大すると、異符号転位の合体消滅による動的回復が抑制されるので、変形抵抗が増加するはずであるが、5182-Oの場合では、固溶Mgによるコトトレル雰囲気形成が抑制される効果の方が大きいと、結果として変形抵抗が低下すると考えられる。また、5182-Oでは引張強度だけでなく、ひずみ分布、極限変形能もひずみ速度の影響を受けていることから、板成形シミュレーションにおけるひずみによる破断判定の際に留意する必要がある。

2.2 深絞り性

深絞り成形はフランジ部をダイ穴内に絞り込んで底付柱状容器に成形する方法で、フランジ部における、円周方向の縮み変形と半径方向の伸び変形が主要な変形である。材料が縮みフランジ変形し、ダイ穴内に流入するのに必要な力が成形力で、この成形力がパンチ肩部近傍での破断力より大きい場合、パンチ肩部近傍で破断が生じ、この時が深絞り限界となる。従って、成形力を低下させるか、破断力を向上させると、深絞り性が改善される。深絞り性は、円筒成形の場合、材料の流入量の度合いで表され、一般には絞り比=素板直径/パンチ直径が用いられる。破断することなく成形できる最大素板直径のときの絞り比を限界絞り比LDR (limiting drawing ratio) という。

各種アルミニウム合金板材のLDRをFig. 2に示す³⁾。アルミニウム合金板材のLDRは2.0前後であり、同じ成形条件の鋼板(SPCE)と比較して0.3~0.4低い値に

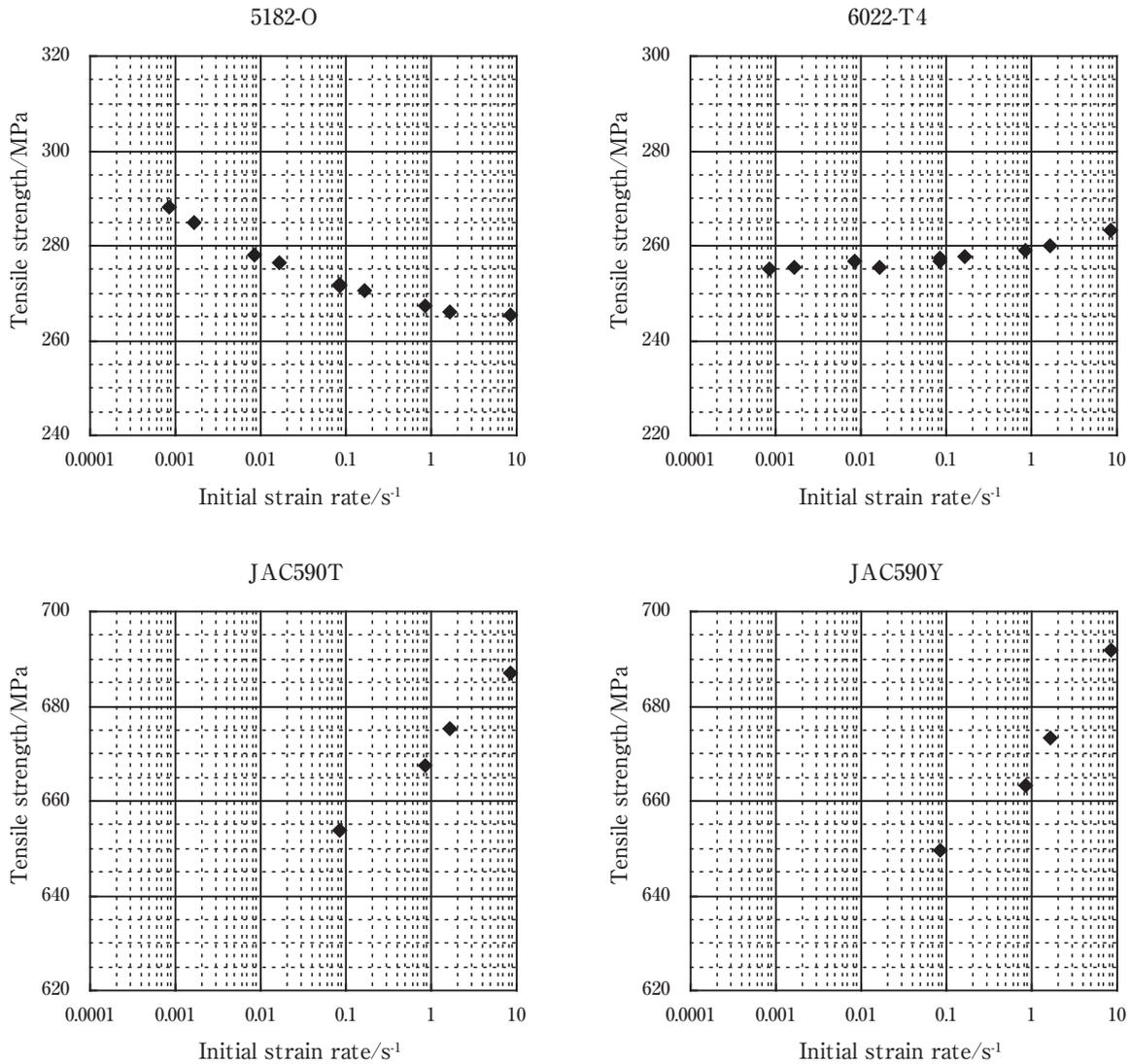


Fig. 1 Effects of initial strain rate on tensile strength of the aluminum alloy and steel sheets⁵⁾.

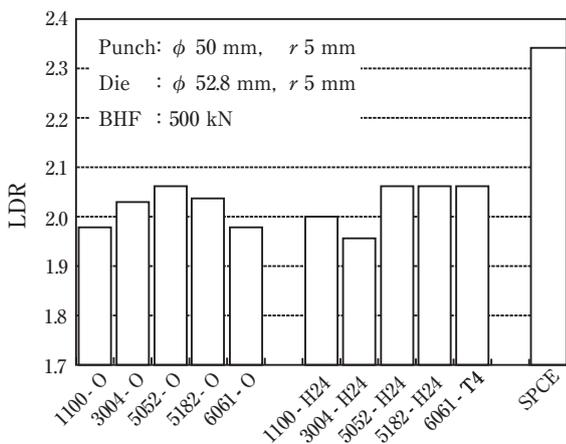


Fig. 2 LDR of typical aluminum alloy and steel sheets³⁾.

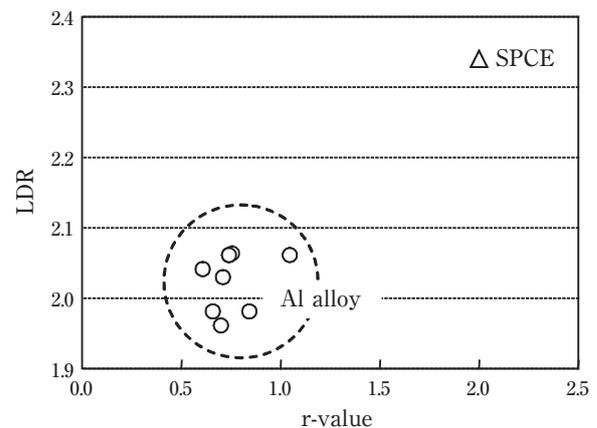


Fig. 3 Correlation between r-value and LDR³⁾.

なる。鋼板ではLDRとr値の相関が高いと言われていたが、アルミニウム合金板材ではr値自体が大きく変

化しないこともあり、限界絞り比との相関は明確にはなっていない (Fig. 3)。近年、圧延時の温度やロール

Table 2 Mechanical properties and LDR of asymmetric warm-rolled and conventional cold-rolled sheets ⁶⁾.

Asymmetric ratio warm / cold	Tensile direction	Tensile strength	0.2% Proof stress	Total elongation	n-value	r-value	LDR
		MPa	MPa	%	e:10%-15%	e=15%	
250% warm	0°	236	115	29.0	0.28	0.66	2.18
	45°	230	112	32.1	0.28	1.07	
	90°	234	114	29.2	0.26	0.81	
	Ave.	232	113	30.6	0.27	0.90	
100% cold	0°	231	119	28.9	0.27	0.64	2.06
	45°	225	113	34.6	0.29	0.28	
	90°	224	113	31.2	0.27	0.67	
	Ave.	226	115	32.3	0.28	0.47	

周速などを制御することにより、アルミニウム合金板材のr値を改善する研究が行われている。小山ら⁶⁾は温間異周速圧延を施した6000系アルミニウム合金板の深絞り性を調査し、アルミニウム合金板材においてもr値を高くすることによって、LDRが向上することを報告している (Table 2)。

2.3 張出し性

張出し成形は、パンチ頭部に接した材料に伸び-伸び変形を与える成形方法で、成形の進行とともに材料の表面積は増加し、板厚は必然的に減少する。

各種アルミニウム合金板材の限界張出し高さを Fig. 4 に示す³⁾。すべてのアルミニウム合金板材において、H24材およびT4材よりもO材の方が高い張出し性を示す。1100-Oは軟鋼板と同等の張出し性を有する。限界張出し高さと同様の引張試験の各種パラメータ (耐力、引張強さ、伸び、n値、r値) の相関を調べると、伸びと正の相関が認められると報告されている。

一軸引張試験における機械的特性に及ぼすMg量の影響を Fig. 5 に、成形限界線図 (FLD) に及ぼすMg量

の影響を Fig. 6 に示す^{7), 8)}。一軸引張試験において、Mgをわずかに添加すると伸びは低下するが、さらにMgを添加して2%以上になると伸びは増加する。しかし、二軸変形においては、Mgを2.5%から5.5%に増加させた場合、最大主ひずみが低下することが報告され

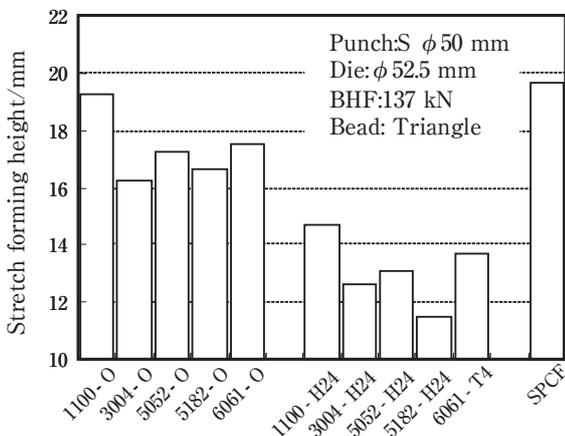


Fig. 4 Spherical stretch height of typical aluminum alloy and steel sheets ³⁾.

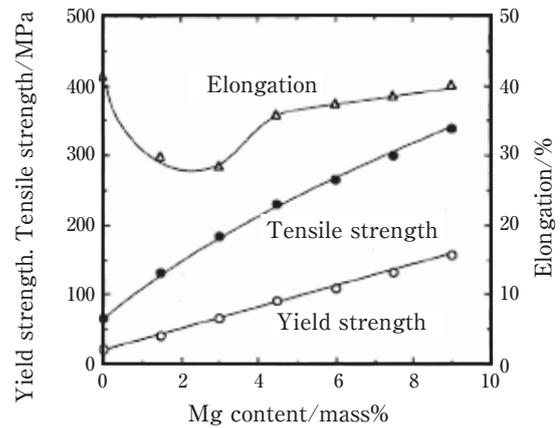


Fig. 5 Effect of Mg content on mechanical properties (L-direction) ⁷⁾.

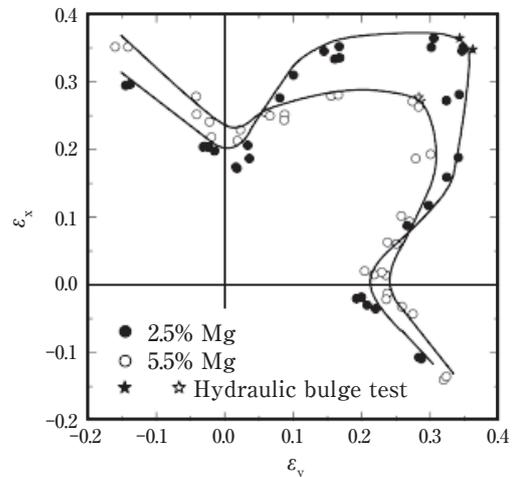


Fig. 6 Forming limit curves (FLCs) of 5000 series aluminum alloys with different magnesium contents ⁸⁾.

ており、延性に及ぼすMgの影響が一軸変形と二軸変形で異なることを留意する必要がある。

2.4 伸びフランジ性

伸びフランジ成形は、パンチを用いて素板を曲げると同時に、素板を周方向に伸ばす成形方法である。伸びフランジ成形の代表的な加工例として、素板の穴に穴より大きなパンチを押し込んで、穴縁をパンチに沿わせて広げる穴拡げ加工がある。伸びフランジ性の評価指標として、この穴拡げ加工による穴広がり率が用いられる。また、素板穴径をダイ穴径までに広げて、縦壁を形成する加工をバーリング加工と呼び、これも伸びフランジ加工の代表例とされる。

穴拡げ加工では、パンチ、ダイおよび素板の形状・寸法の組み合わせで多様な変形状態となり、穴縁端部の応力状態は円周方向に引張応力が発生し、半径方向の応力はほとんどゼロであるため、単軸引張変形に近いとされている⁹⁾。Fig. 7に打ち抜きにより穴加工を行った各種アルミニウム合金板材の穴広がり率と全伸びの関係を示す³⁾。穴広がり率は全伸びと概ね正の相関がある。穴広がり率が全伸びよりも大きくなるのは、穴周辺部では半径方向に応力勾配が存在し、穴縁端部で微視的なくびれが発生しても、その外側では応力が低いので、巨視的なくびれには至りづらいからである。アルミニウム合金板材の穴広がり限は0.2～0.8であり、同じ成形条件の軟鋼板(穴広がり限1.5)と比較して、か

なり低い値を示す。

2.5 曲げ性

曲げ成形は外側が引張変形、内側が圧縮変形を受ける成形方法である。曲げ性は90°曲げあるいは180°曲げで、外側で割れを発生することなく曲げることができる最小曲げ半径で評価される。曲げ成形では板厚方向の応力勾配が存在するが、伸びフランジ成形における半径方向の応力勾配よりも大きい。外側での割れは局所的な大変形による破壊と捉えることができ、局所的な延性即ち極限変形能と相関があるとされる⁹⁾。また、曲げ性は金属組織の影響を受け、曲げ割れの発生を抑制するためには、Cube方位の増大、2 μm以上の第2相粒子の形成を抑制させることが有効とされている^{10)~13)}。

Table 3にアルミニウム合金板材の曲げ性の一例を示す³⁾。全てのアルミニウム合金板材において、O材では密着曲げ(内側曲げ半径:0R)が可能である。H24材やT4材では密着曲げが困難な材料が多い。

2.6 形状凍結性

曲げ成形ではスプリングバックによる形状不良が問題となる。スプリングバックは曲げ変形を受けた材料が除荷時に弾性回復して、曲げ角度の変化が生じる現象である。Fig. 8はハット曲げにおけるパンチ肩R部とダイ肩R部のスプリングバックの測定結果である¹⁴⁾。アルミニウム合金板材のヤング率は鋼板と比べて小さいことから、スプリングバックが大きい。

3. 成形技術

3.1 冷間成形

アルミニウム合金板は鋼板に比べて、プレス成形性に係わる伸びや引張強さ、r値などの機械的特性が劣る

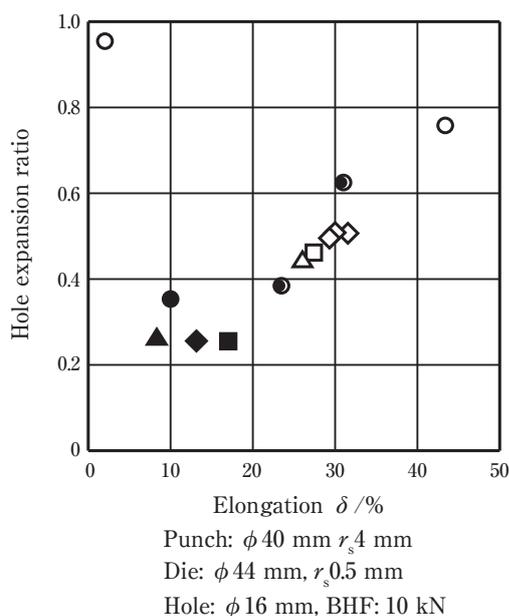


Fig. 7 Correlation between total elongation and hole expansion ratio³⁾.

Table 3 Bendability (thickness=1.0 mm, 180° bending)³⁾.

Materials	0R	0.5R	1R	1.5R	2R
1100-O	○/○				
1100-H24	○/○				
3004-O	○/○				
3004-H24	○/×	-/×	-/○		
5052-O	○/○				
5052-H24	×	×	×	○/-	
5182-O	○/○				
5182-H24	×	×	×	×	○/-
6061-O	○/○				
6061-T4	×	×	×	○/○	
SPCE	○/○				

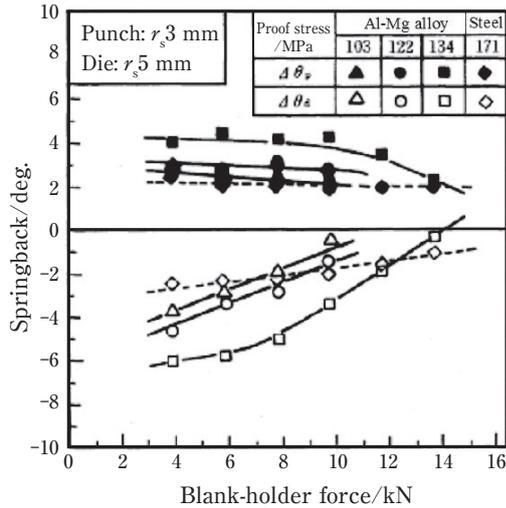


Fig. 8 Springback in hat bending¹⁴⁾.

ため、成形中にしわが発生しやすく、破断もしやすい。冷間プレス成形においては、ダイキャビティ内の材料をいかに均一に変形させるかが重要であり、特に、自動車プレス部品のような複雑な形状の場合は、成形中の材料の変形挙動を制御することが重要である。

しわの発生を抑制するためには、金型の成形面におけるポンチ中央からポンチとしわ押さえ面との境界に至る断面線長が、金型の全周に渡って周囲より極端に減少する部分をつくらないことが重要である。これは、成形後の形状についてのみならず、成形途中についても重要である。そのためには、成形中の材料の型への接触タイミングに注意して、しわ押さえ面および余肉形状を最適化する必要がある¹⁵⁾。

また、しわ押さえ面からの材料流入を制御するためにドロービードを使用する場合、鋼板と同じビード形状では、肩Rが小さすぎてビード自体で破断してしまう恐れがある。アルミニウム合金板においては、ビード肩半径を極力大きくし、かつビード高さを高くする、凹ビード溝幅を小さくするなどして、材料のビードへの巻き付き角を最大限増加させるのがよいとされている¹⁶⁾。

一方、破断の抑制については、アルミニウム合金板は鋼板に比べて、延性や引張強さ、r値が低いことから、金型成形面の張出し成形部と絞り成形部では、次の対策をとるのがよい。前者では、Fig. 9に示すように、金型成形面において、断面線長と材料の元線長の比である断面線長比を小さくする必要があり、そのためには、製品形状のR拡大や高低差を小さくすること、壁を開くなどの対策が有効である。また後者では、流入抵抗が高く、ポンチ肩部などの荷重負担部で破断し

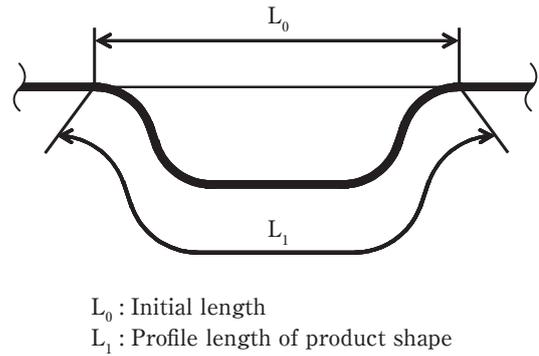


Fig. 9 Schematic illustration of cross-sectional profile length ratio.

やすいため、この荷重負担部を分散することが重要である。荷重負担部の分散の例としては、Fig. 10に示す飲料缶の製造工程における再絞りが挙げられる。平板絞りした容器を、それより小さい径のポンチで再度深絞りすることで、荷重負担部が変わり、平板絞りでは得られないような深い容器を成形することが可能となる¹⁷⁾。

プレス成形品の形状凍結不良は、プレス成形によって生じた応力分布が離型後に解放されて弾性変形することで生じる。アルミニウム合金板は、鋼板に比べて縦弾性係数が小さいため弾性変形量が大きく、形状凍結不良が生じやすい。

対策としては、型見込み、剛性向上、応力制御の3つが用いられる。型見込みとは、残留応力によって弾性変形した状態で正規寸法になるように金型寸法を補

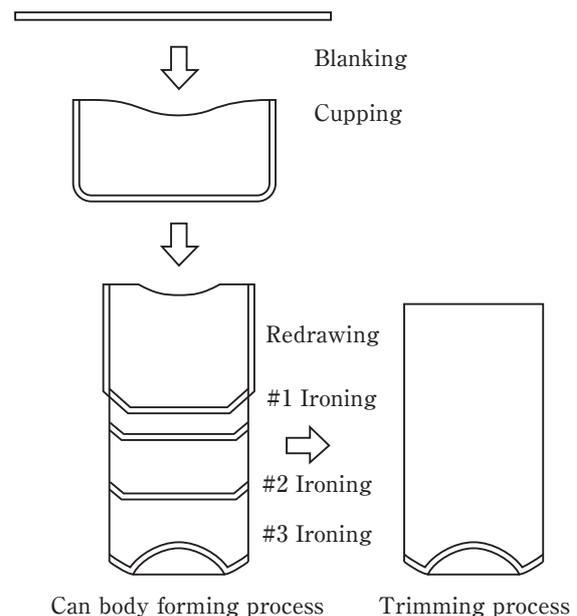


Fig. 10 Can body forming process¹⁷⁾.

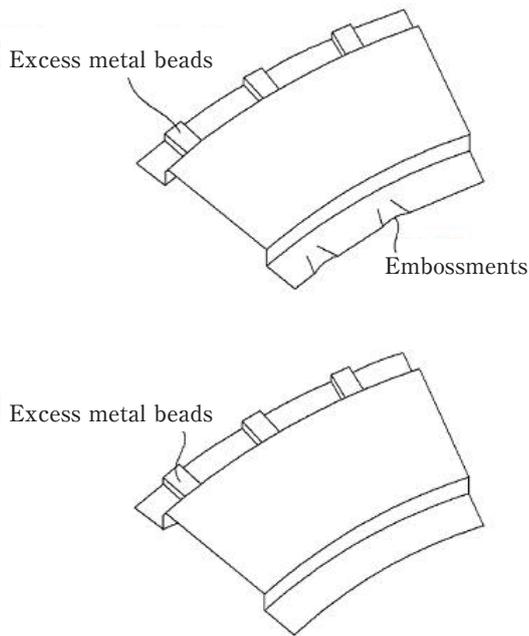


Fig. 11 Example of the stress control technique in a press-forming method¹⁸⁾.

正する技術である。また、剛性向上とは、製品形状にリップ形状などを付与することで断面二次モーメントを高め、形状凍結不良の要因となる残留応力で弾性変形し難くする技術である。これら2つの技術は一般的によく用いられるが、特に前者は、見込み量が大きいと、成形性への影響が大きくなり、新たな問題が発生する懸念がある。一方、応力制御とは、形状凍結不良の要因となる応力が発生している部位を特定し、これを緩和あるいは除去する方法であり、アルミと同様に形状凍結不良が生じやすい高張力鋼板を中心に適用されている。Fig. 11に一例を示す。この例では、ハット形状プレス成形において、縮んで圧縮変形する部位に余肉ビードを付け、引張変形を加えることで圧縮応力を低減させている。さらに、伸びて引張変形する部位にエンボス（潰しビード）を成形の第1工程で形成し、第2

工程でこのエンボスを潰して圧縮変形を加えることで引張応力を低減させている。このようにして、プレス成形品の残留応力をゼロに近づけることで形状凍結不良を生じ難くしている¹⁸⁾。このような、応力制御技術がアルミニウム合金板のプレス成形では必要とされている。

3.2 温間成形

アルミニウム合金はFig. 12のように、温度の上昇とともに変形抵抗が低下する¹⁹⁾。温間成形は、この特性を利用して、フランジ部を200～300℃に加熱する一方で、パンチとの接触部を加熱しない、もしくは冷却してプレス成形する方法である。装置の概略図をFig. 13に示す²⁰⁾。この方法によって、素板のパンチ肩部近傍部では強度を維持したまま、フランジ部での変形抵抗を低下させることによって、深絞り性が向上する。Fig. 12に示すとおり、5000系合金では温度の上昇とともにセレーションが抑制されることから、外観不良となるストレッチャーストレインの抑制に有効である。この方法では加熱設備が必要なこと、潤滑剤の選定などの課題はあるが、汎用のプレス装置でも成形が可能である。

3.3 超塑性成形

5083のようなMg添加量の多い5000系合金の場合、結晶粒が10 μm以下の微細粒組織で、500℃程度の高温において、 10^{-3} 程度のひずみ速度で変形すると超塑性と呼ばれる現象が発現し、300%超の巨大な伸びが得られる²¹⁾。超塑性による成形限界線図²²⁾をFig. 14に示す。一軸から等二軸の全領域で成形限界を大幅に拡大させることができ、製品設計の自由度が高い。この特性を利用して成形を行う例としてブロー成形がある。ブロー成形装置の概略図をFig. 15に示す。超塑性成形はガス圧によって成形するため、金型はオス型もしくは

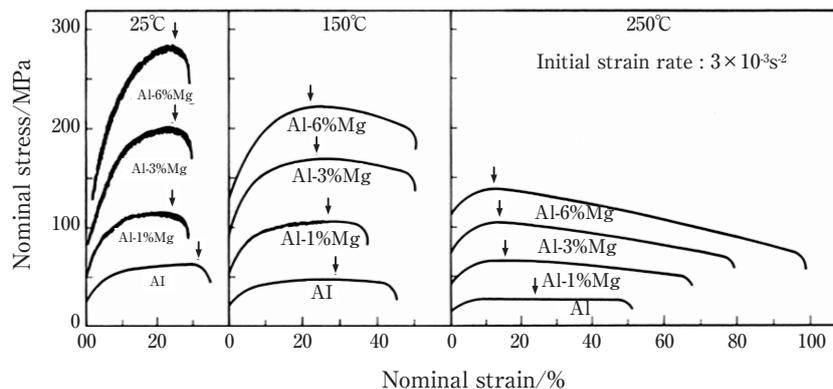


Fig. 12 Effects of temperature on stress-strain curves¹⁹⁾.

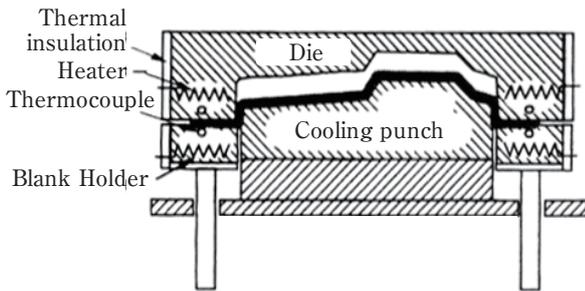


Fig. 13 Schematic diagram of warm forming²⁰⁾.

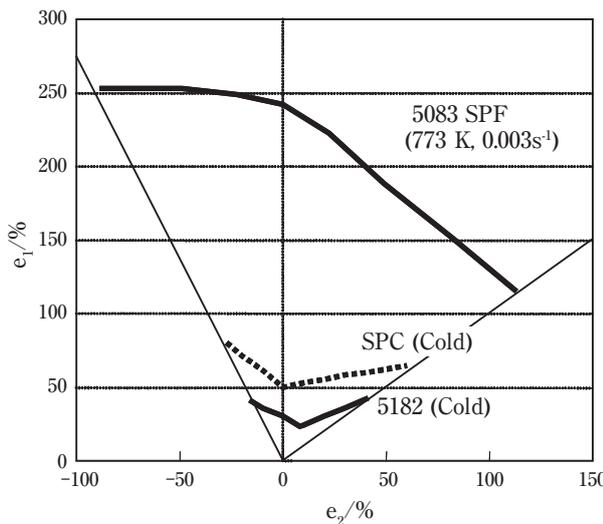


Fig. 14 Forming limit diagram of the superplastic formable 5083 aluminum alloy²²⁾.

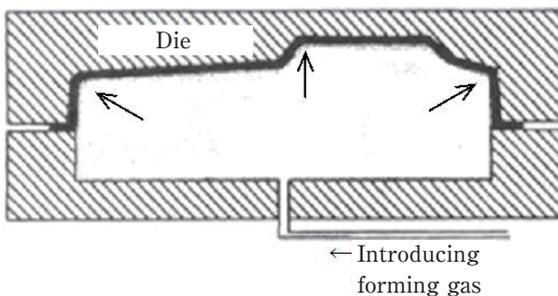


Fig. 15 Schematic diagram of blow forming²⁰⁾.

はメス型のどちらか一方で成形されるため、金型費が節約できる。しかし、超塑性成形は完全張出し成形であるため、製品内の板厚分布を制御するためには、昇圧パターンの精密な設定が必要である。

超塑性成形は生産性が低いことから、生産量が少ない航空機用部品に用いられていたが、近年、タクトタイムを低減させた高温高速ブロー成形技術が開発されており、自動車パネルにも適用例 (Fig. 16) がある²³⁾。



Fig. 16 High-temperature blow-formed trunk lid inner of the Honda Legend²³⁾.

4. 板成形シミュレーション

4.1 背景

板材成形品の生産現場においては、生産準備段階の設計、試作を繰り返し量産可能な成形条件を求める。その際に、板成形シミュレーションを行うことで、多大な工数の削減が可能である。

アルミニウム合金板は前章までの解説の通り、成形性、形状凍結性に劣り、成形難易度が高いことから、生産現場における生産準備段階の実工数の増大が避けられない。そのため、板成形シミュレーションによる成形不良現象の予測において、より高い精度が求められる。しかしながら、アルミニウム板材は鋼板などに対し検討例に乏しいのが現状である。

板成形シミュレーションの構成要件は、入力条件、解法、成形不良現象の発生予測である。高精度なシミュレーションを行うためには、板材の変形特性を正確に入力することと、成形不良現象を正確に評価することが求められる。そこで本章では、成形不良現象としてアルミニウム合金板材における大きな課題である割れおよびスプリングバックに着目し、アルミニウム合金板材に適した成形シミュレーションモデルの検討事例について紹介する。

4.2 成形不良現象の発生予測と対策手法

4.2.1 割れ

板成形シミュレーションでは、成形限界を規定し、板材の各要素の値が限界値を超えたときに割れと判定する方法が一般的である。割れ対策については、成形限界を超えないように成形条件を調整する形で実施される。成形限界については、前章で解説したFLDがよく用いられており、シミュレーションで求めた各要素の最大主ひずみ、最小主ひずみ値を、実験で求めた

FLD上にプロットし、成形限界線を越えた要素を割れと判定する。また、近年3次元局所分岐理論に基づいた応力FLDによる割れ予測手法が提案されており²⁴⁾、当手法によれば、従来のFLDでは予測できない角筒絞り成形のコーナーカットによる壁割れを予測することが可能となる (Fig. 17)。

4.2.2 スプリングバック

プレス成形不良のひとつに、スプリングバックによる形状精度不良がある。スプリングバックはプレス成形後の除荷の際に生じる弾性変形であり、プレス成形によって板材に生じる応力を駆動力とする。ヤング率の低いアルミ合金板は、鋼板に比べスプリングバック量が大きくなる。スプリングバック対策としては、除荷前応力分布の適正化、パネル剛性の向上による変形の抑制、形状見込みなどが実施されている。

除荷前応力分布の適正化については、成形シミュレーションで求めた応力分布に対し、部分的に応力を除去した状態でスプリングバックシミュレーションを行うことで、要因となる応力を求め、その部分に対策を施す手法が提案されている²⁵⁾。

4.3 アルミニウム合金板材のモデリング

4.3.1 材料構成式

4.3.1.1 降伏関数

降伏関数とは、単軸引張応力から純粋せん断、平面ひずみ引張、等二軸引張などの多軸応力状態での降伏応力を求めるものである。また、材料の変形特性が方向によって異なることを異方性という。圧延された板材の場合、異方性の主軸は圧延方向とその直角方向となる。降伏関数において異方性を考慮することで、成形中のひずみ分布および応力分布の解析精度が向上し、割れおよびスプリングバックをより正確に予測できる。アルミニウム合金板材の場合、等二軸引張試験か

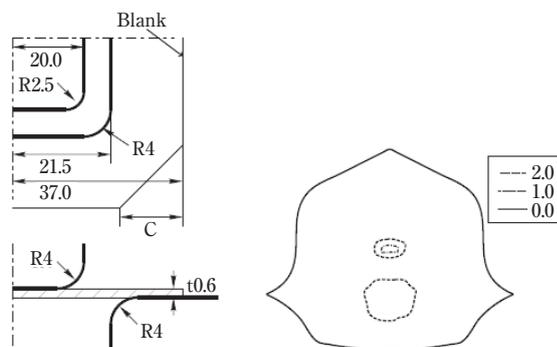


Fig. 17 Evolution of instability factor under square cup forming process²⁴⁾

ら得られる等塑性仕事面の形状が Fig. 18 に示すように二軸引張方向に尖った形状となるため、高次降伏関数である Yld2000-2d 降伏関数の選択による高精度化 (Fig. 19) が提案されている²⁶⁾。

4.3.1.2 流れ則

流れ則とは、塑性ひずみ増分の方を規定するものであり、塑性ポテンシャル関数とは、塑性ひずみ増分の方を法線方向として表現する関数である。板材には降伏応力の異方性の他に変形異方性 (r 値) が存在し、塑性ポテンシャル関数において異方性を考慮すること

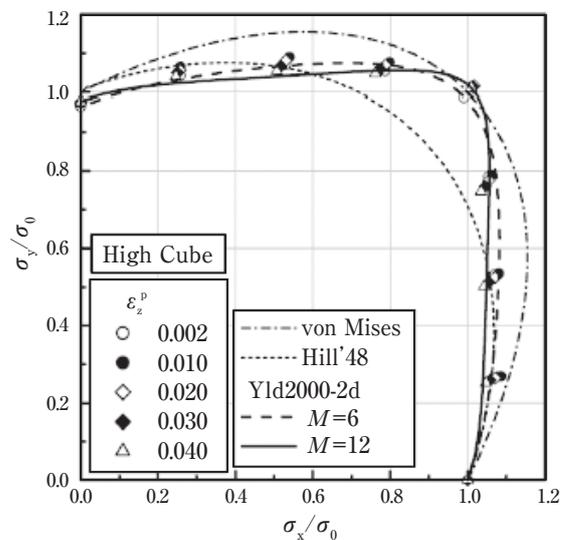


Fig. 18 Measured stress points comprising contours of plastic work, compared with theoretical yield loci. Each symbol corresponds to a contour of plastic work for a particular value of ϵ_z^p . The Yld2000-2d yield functions are determined using the uniaxial and biaxial tensile stress data for $\epsilon_z^p=0.002$ ($M=6$ for HC) and 0.040 ($M=12$ for HC)²⁶⁾.

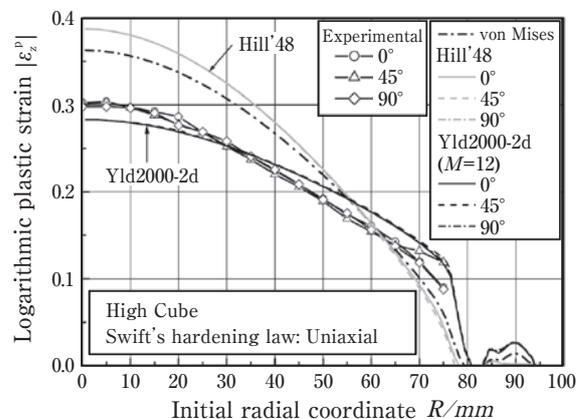


Fig. 19 Measured thicknesses strain along the meridian lines of hydraulic bulge specimens, compared with those calculated using finite element analysis with selected yield functions²⁶⁾.

によって解析精度が向上する。

塑性ポテンシャル関数と降伏関数が一致すると仮定したものが関連流れ則であり、一般的に用いられている。関連流れ則の場合、塑性ポテンシャル関数の役割を降伏関数が担うため、降伏応力および変形の異方性の正確な表現のためには降伏関数の高次化は避けられない。そこで、降伏関数と塑性ポテンシャル関数を個々に規定する非関連流れ則を用いた構成式による高精度化が提案されている²⁷⁾。

4.3.1.3 加工硬化

加工硬化特性においては、バウシinger効果を考慮することによって、スプリングバックの予測精度が向上する。ハット曲げの縦壁部は曲げ曲げ戻しの反転応力が与えられるため、予測が難しいが、吉田・上森モデル (Fig. 20)²⁸⁾ による高精度化 (Fig. 21) が提案されている²⁹⁾。

4.3.2 摩擦特性

板材成形においては金型と板材の間の摩擦状態が板材の流動に影響を与えるため、摩擦係数の正確な入力によって割れ、スプリングバックの予測精度が向上する。板成形シミュレーションにおいては、クーロンの摩擦則に則った摩擦係数を入力するのが一般的である。しかし、鋼板などに比べて硬度の小さいアルミニウム合金板の場合、接触面圧に対する板材表面凹凸の変形が大きく、プレス成形の面圧域でも摩擦係数の変化が大きいと考えられる。そこで、摩擦係数の面圧依存性 (Fig. 22) を考慮することによってシミュレーションを高精度化する (Fig. 23) 手法が提案されている³⁰⁾。

また、特別な表面仕上げを行わないミルフィニッシュ材の場合、圧延方向に伸びた筋状の表面凹凸によって摩擦係数に摺動方向依存性が生じることが報告されており³¹⁾、さらなる高精度化の可能性が示されている。

5. 潤滑油

5.1 アルミニウムのプレス加工におけるトライボロジー

板材のプレス加工では、その加工条件、加工部位に応じて、流体潤滑、境界潤滑、乾燥摩擦のそれぞれの摩擦潤滑状態が考えられる。プレス加工において、潤滑油は冷却作用と共に加工する接触界面に介在して工具、被加工材の直接接触を防ぐために用いられる。加えて、実用上は冷却・潤滑の主要要求特性以外にも、被洗浄性、揮発性、耐劣化性、廃液処理性など、種々の

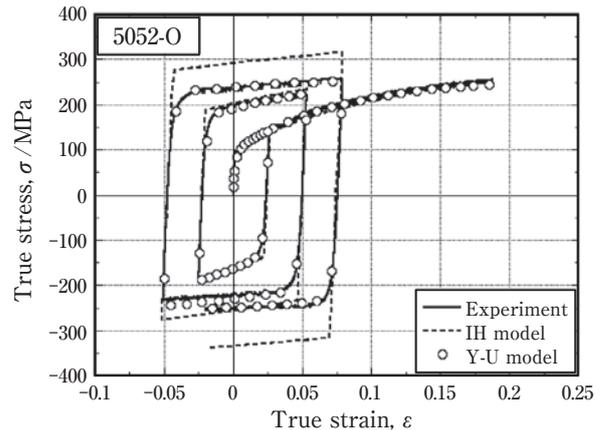


Fig. 20 Cyclic stress-strain curves, experimental results and simulations by IH and Y-U models for 5052-O²⁸⁾.

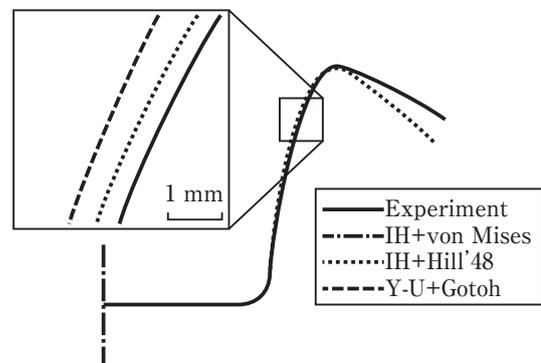


Fig. 21 Comparison of final shapes after springback between experimental and calculated results by several constitutive models for 5052-O²⁹⁾.

要求特性を勘案して使用することが重要となる。

アルミニウムの場合、緻密な酸化被膜を形成するため、美しい金属面をそのまま、あるいは軽度の表面処理を行った状態で製品として使用する場合が多く、表面の疵や汚れに対する要求水準が高い。一方で鋼材や銅と比較し、軟らかくかつ工具面に凝着しやすいため、加工時に Fig. 24 に示されるような摩耗粉が工具面、材料面に堆積しやすく、それによる摩擦の増大、堆積物の脱落による製品表面欠陥などの懸念もあり、アルミニウムに適した潤滑油の使用が非常に重要である。当社のアルミニウム展伸材の圧延などの製造プロセスでもトライボロジー技術は非常に重要であり、長年研究開発が行われてきている。培われてきた豊富な蓄積技術をプレス加工へ適用し、アルミ摩耗粉の分散性を特徴とした潤滑油を開発し、生産性、製品品質向上へ寄与した事例を紹介する。

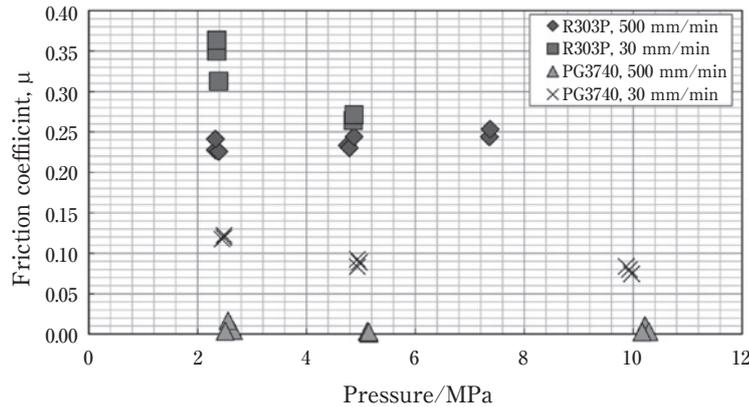


Fig. 22 Sliding test results³⁰⁾.

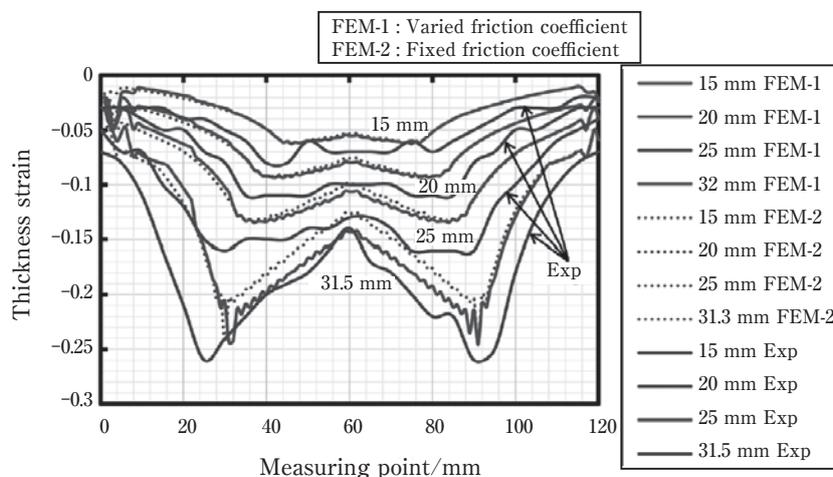


Fig. 23 Thickness strain distribution on each punch stroke, FEM-1; varied friction coefficient, FEM-2; fixed friction coefficient³⁰⁾.

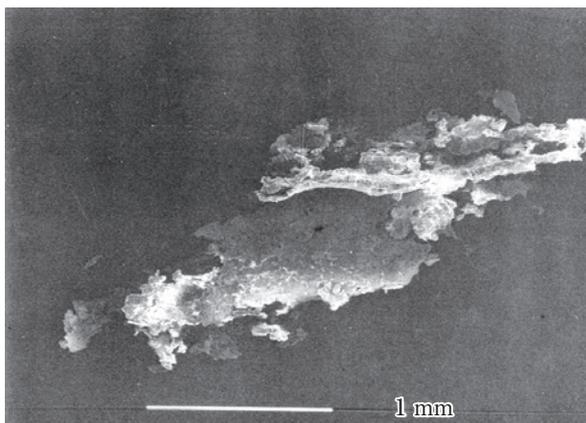


Fig. 24 SEM micrographs of typical wear debris.

5.2 特徴

金型への摩耗粉の凝着および堆積を抑制するためには、通常、潤滑油としては粘度を高め摩擦面へ導入される油膜厚を増すことや金属表面へ吸着する油性剤を用いて金属新生面の直接接触を極力低減することが行

われるが、塑性加工の過酷な摩擦条件では、完全な抑制は不可能である。このため潤滑油の吹き付け法の工夫や金型の定期的な研磨により、摩耗粉を排出する必要がある。近年の加工の複雑化、生産性の向上に伴い、市販潤滑油では、堆積摩耗粉の抑制および排出が困難になり金型の手入れ回数が増加し生産性の低下が問題視される例が増加している。開発潤滑油³²⁾は、対象のプロセスに合わせた潤滑性、被洗浄性を設計し、加えて非常に摩耗粉分散性に優れた添加剤を用いている。このためFig. 25に示すように、摩耗粉が凝集することなく潤滑油中に均一に分散した状態で保つことが可能となる。本潤滑油を用いることでプレス加工時に発生した摩耗粉を金型に堆積させることなく潤滑油と共に排出することができる。Fig. 26に実際の生産に適用した事例を示す。開発油により金型手入れ回数の大幅な低減を実現している。

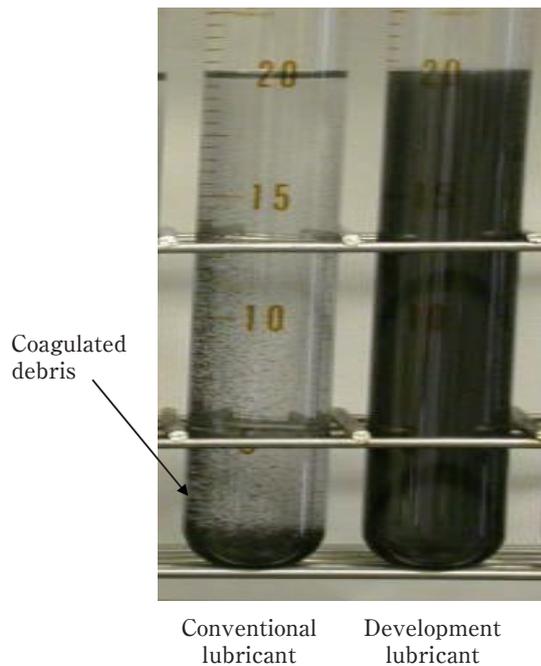


Fig. 25 Effect for dispersion of wear debris in the press lubricant.

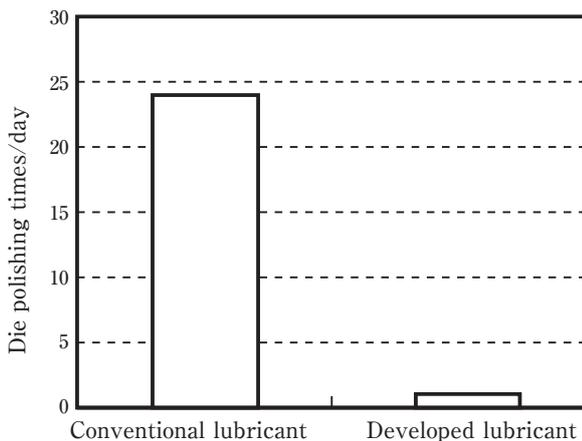


Fig. 26 Effect for die polishing times on sheet forming with the developed press lubricant.

6. おわりに

本論文では、アルミニウム板材の特性およびアルミニウム板材の加工法やアルミニウムに適した板成形シミュレーションについて解説した。また、当社独自で開発したプレス時に発生するアルミ摩耗粉を分散させる機能を有するプレス油について紹介した。車両重量を軽量化するため、今後益々、自動車パネルのアルミ化が必要になると考える。そのため、自動車会社および自動車部品会社とコミュニケーションを深め、アル

ミメーカーならではの視点から適用技術を発展させ、自動車のアルミ化を促進していきたい。

参考文献

- Motor Fan illustrated, **53** (2011), 58-61.
- 八木三哉, 小宮山恭弘, 峯憲一郎:自動車技術, **55** (2001), 29-34.
- 軽金属学会 研究委員会 アルミニウムボディシート成形技術部会編: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, 軽金属学会, (1996).
- M, Usuda, K.Hasimoto, T, Amaike, T, Katayama, Y, Abe and M. Yoshida: SAE, No950924, (1995).
- 日本塑性加工学会 サーボプレス利用技術研究委員会編:サーボプレスの利用技術 研究成果報告書, 日本塑性加工学会, (2011).
- 小山克己, 小松原俊雄:塑性と加工, **50** (2009), 211-215.
- 内田秀俊, 吉田英雄:軽金属, **45** (1995), 193-197.
- 桑原利彦, 梅村昌史, 吉田健吾, 黒田充紀, 平野清一, 菊田良成:軽金属, **56** (2006), 323-328.
- 薄鋼板成形技術研究会編:プレス成形難易ハンドブック第3版, 日刊工業新聞社, (2007).
- 浅野峰生, 内田秀俊, 吉田英雄:軽金属, **52** (2002), 448-452.
- 浅野峰生, 箕田 正, 小関好和, 吉田英雄:軽金属, **56** (2006), 371-375.
- S. Ikawa, M. Asano, M.Kuroda and K. Yoshida: Materials Science and Engineering, **A528** (2011), 4050.
- 竹田博貴, 日比野旭, 高田 健:軽金属, **60** (2010), 231-236.
- 野口 修, 阿部佑二:第84回軽金属学会春期大会講演概要, (1993), 307-308.
- 薄鋼板成形技術研究会編:プレス成形難易ハンドブック第3版, 日刊工業新聞社, (2007).
- 軽金属学会 研究委員会アルミニウムボディシート成形技術部会編: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, 軽金属学会, (1996).
- 野口 修:Furukawa-sky Review, **9** (2013), 3-10.
- 新日鐵住金株式会社, 米村 繁, 上西朗弘, 有賀 高:形状凍結性に優れたプレス成形方法およびその装置, 特許第5380890号, 2012. 01. 08.
- Robert A. Ayres: Metallurgical Transactions A, **10A** (1979), 849-854.
- 軽金属製品協会編:アルミニウムの加工法と使い方の基礎知識, 軽金属製品協会試験研究センター, (2004)
- Furukawa-Sky Review, **4** (2008), 66-69.
- 岩崎 源, 田形 勉, 馬淵 守:軽金属第102回春期大会講演概要 (2002), 213-214.
- 東海林 了, 浅見重則:プレス技術, **47** (2009), 18-24.
- 伊藤欣一, 植村 元, 近藤哲也, 森 尚達:日本塑性加工学会平成18年度(第37回)塑性加工春季講演会 講演論文集 (2006), 111-112.
- 平山治郎, 卜部正樹, 石渡亮伸, 占部俊明, 吉田総仁:塑性と加工, **56** (658) (2015), 955-960.
- 彌永大作, 桑原利彦, 上間直幸, 浅野峰雄:軽金属, **62** (2012), 7-13.
- 安富 隆, 白神 聡, 吉田 亨, 伊藤欣一, 植村 元, 森 尚連:第65回塑性加工連合講演会講演論文集, (2014), 323-324.
- 田村翔平, 澄川智史, 上森 武, 濱崎 洋, 吉田総仁:軽金属, **61** (2011), 255-261.

- 29) 上森 武, 澄川智史, 中 哲夫, 麻 寧緒, 吉田総仁: 軽金属, **65** (2015), 582-587.
- 30) 西田進一, 栗原亮典, 奥島綾介, 麻生逸人, 佐藤由貴, 藤田 大: 軽金属, **65** (2015), 573-577.
- 31) 太田英一, 与語康宏, 岩田徳利, 蔦森秀夫: 第66回塑性加工連合講演会講演論文集, (2015), 45-46.
- 32) (株)UACJ, 細見和弘, 渡邊貴道: プレコートアルミニウム合金板用のプレス用潤滑油及びそれを用いたプレコートアルミニウム合金板のプレス方法, 特許第5000905号, 2012.08.15.



上野 洋一 (Yoichi Ueno)
(株)UACJ 技術開発研究所 第三研究部



八野 元信 (Motonobu Hachino)
(株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部



紀藤 航 (Ko Kito)
(株)UACJ 技術開発研究所 第三研究部



渡邊 貴道 (Takamichi Watanabe)
(株)UACJ 技術開発研究所 第五研究部



鳥飼 岳 (Gaku Torikai)
(株)UACJ 技術開発研究所 第三研究部