UACJ Technical Reports, Vol.11 (2024), pp. 98-105

技術展望・技術解説

アルミニウム合金板の成形加工特性 *

八野　元信 **

Characteristics and Formability of Aluminum Alloy Sheets*

Motonobu Hachino **

1．はじめに

アルミニウム合金は，軽量で高強度を得ることができ，耐食性，表面処理性，加工性，導電性，熱伝導性，低温特性などに優れることから，輸送機用材料，宇宙・航空機用材料，建築用材料，家庭用品など，幅広い用途で使用されている。特に最近では，脱炭素社会の実現に向けて，アルミニウム合金の軽量化効果やリサイクル性が着目されており，今後も使用量の拡大および用途の拡大が期待されている。

近年，自動車においても，車体軽量化による燃費向上や運動性能向上などを目的にアルミニウム合金板の使用量が増えているが，置換元材料である軟鋼板に比べると成形加工特性が劣るため，難成形材料とされている。材料を成形加工する上で，その特徴や特性を把握しておくことは重要と考える。そこで，本稿ではアルミニウム合金板の特徴および成形加工特性について，軟鋼板と比較しながら解説する。

2．アルミニウム合金板の特徴

2.1　アルミニウムの物理的性質

純アルミニウムおよび純鉄の物理的性質を**Table 1**[1)]に示す。アルミニウムの密度は約2.7g/cm^{3}であり，鉄（約7.87g/cm^3）の約3分の1であるため，張り剛性を等価とした場合，鉄部品に比べて重量を約2分の1に削減できる。一方，アルミニウムの縦弾性係数（ヤング率）は約70GPaであり，鉄（約211GPa）の約3分の1であるため，成形後のスプリングバック（ゴー）が大きく，形状凍結性を得難い。また，熱を利用した成形を想定した場合，アルミニウムの熱伝導度は約238W/m・℃であり，鉄（約78W/m・℃）の約3倍であるため，熱し易く，冷め易い。また，アルミニウムの線膨張係数は約23.5×10^{-6}/℃であり，鉄（約12.1×10^{-6}/℃）の約2倍であるため，温度変化に対する寸法の変化が大きくなる傾向がある。

Table 1　Physical properties of aluminum and iron[1)].

	Aluminum	Iron
Atomic weight	26.98	55.85
Atomic number	13	26
Crystal structure	face-centered cubic (fcc)	body-centered cubic (bcc)
Density (g/cm^3)	2.7	7.87
Coefficient of thermal expansion (/℃)	23.5×10^{-6}	12.1×10^{-6}
Melting point (℃)	660	1536
Specific heat capacity (J/kg・℃)	917	456
Thermal conductivity (W/m・℃)	238	78.2
Modulus of elasticity (GPa)	70.6	211.4

2.2　アルミニウム合金板の種類と質別

アルミニウム合金は，板材や押出材に用いられる展伸用合金と鋳物用合金に分けられる。展伸用合金については，JIS規格で個々のアルミニウム合金に記号（JIS H0001）をつけており，その合金の種類や製品形状，質別（製造条件の概略）が分かるようになっている。アルミニウム合金の分類を**Fig. 1**に，材料記号の意味を**Fig. 2**に示す。合金分類の第1位の数字は合金系を示す。純アルミニウムでは1を用い，1000系と呼ばれる。第1位が2～8の数字の場合，添加元素による合金系を示し，2000（Al-Cu，Al-Cu-Mg）系，3000（Al-Mn）系，

*　本報の主要部は素形材　**64**-2（2023），8-14 に掲載。
Main parts of this review has been published in SOKEIZAI **64**-2 (2023), 8-14.

**　（株）UACJ　板事業本部　福井製造所　製品技術部
Product Design & Technology Department, Fukui Works, Flat Rolled Products Division, UACJ Corporation.

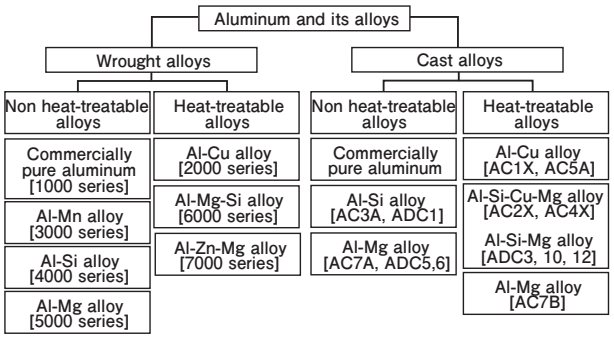

Fig. 1　Classification of aluminum and its alloy.

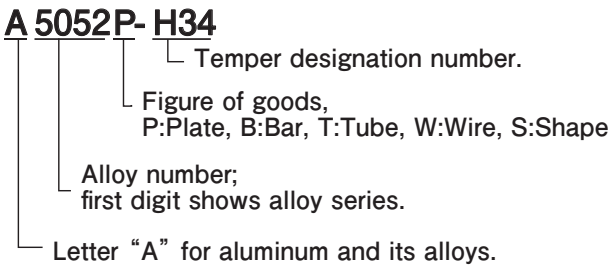

Fig. 2　Wrought aluminum designation system.

4000（Al-Si）系，5000（Al-Mg）系，6000（Al-Mg-Si）系，7000（Al-Zn-Mg，Al-Zn-Mg-Cu）系，8000（その他合金）系のアルミニウム合金を表す。

アルミニウム展伸材では，1000，3000，4000，5000系を非熱処理型合金，2000，6000，7000系を熱処理型合金として区別する。アルミニウム合金は冷間加工度や種々の熱処理により，強度，成形性，耐食性などの様々な性質を調整することができる。製造条件を適切に選定し，所定の性質を得ることを調質といい，調質の種類を質別という。質別記号にはF，O，Wなど単独で用いられるものと，HやTのようにその後に数字を伴って用いられるものがある。非熱処理型合金は主に冷間加工度の調整によって強度を得るため，F，O，Hのいずれかが用いられる。一方，熱処理型合金は溶体化処理，人工時効処理によって強度を得るため，F，O，W，Tのいずれかが用いられる。**Fig. 3**にアルミニウム合金の製造条件と質別記号の関係，各質別記号の意味を示す。

2.3　アルミニウム合金板の機械的性質

Table 2[2]に代表的なアルミニウム合金板および軟鋼板の機械的性質を示す。アルミニウム合金板は軟鋼板と比較して，全伸び（特に局部伸び）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）は，軟鋼板よりも高い値を有する合金-質別もあるが，ひずみ量に対して一定の値を取らず，高ひずみ域では低下することが多い。高ひずみ域におけるn値の低下は，動的回復による加工硬化能の低下を意味し，全伸びが小さくなる理由として挙げられる。また，アルミニウム合金板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，軟鋼板のm値は0.015程度である[3]。軟鋼板の場合，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

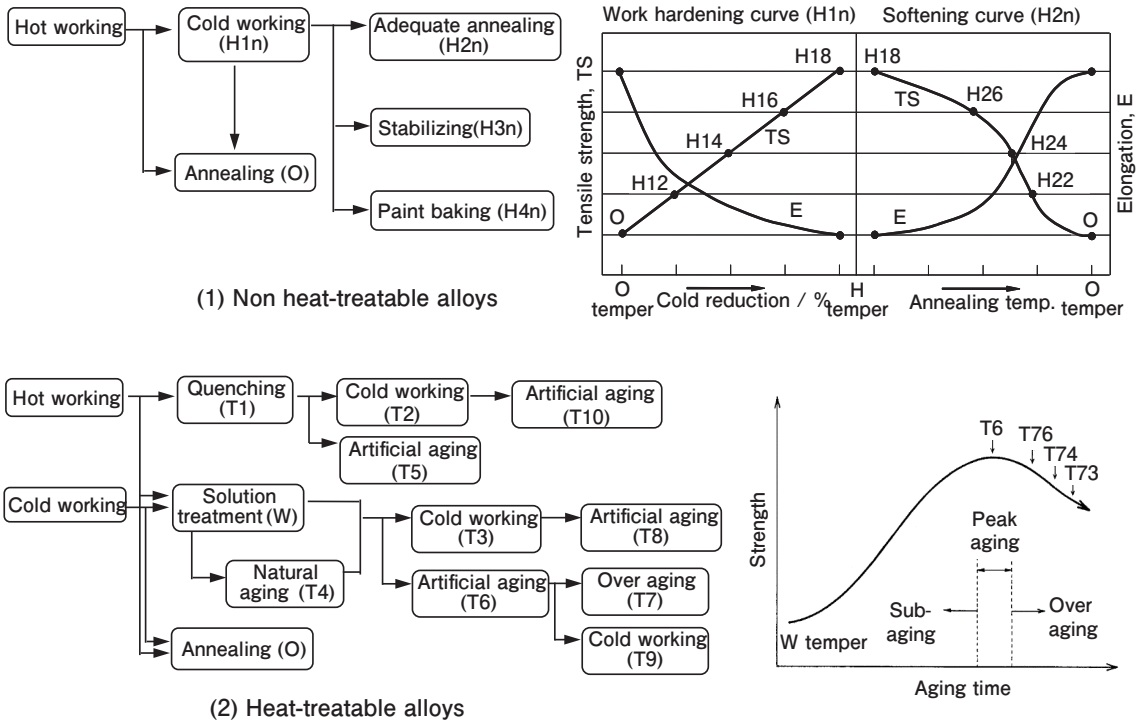

Fig. 3　Relations between production procedures and temper designations with properties diagram for wrought aluminum alloys.

Table 2　Mechanical properties of aluminum alloy sheets[2].

Alloy-Temper	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Total elongation (%)	Uniform elongation (%)	Local elongation (%)	n-value	r-value
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

* Steel plate cold deep drawn extra

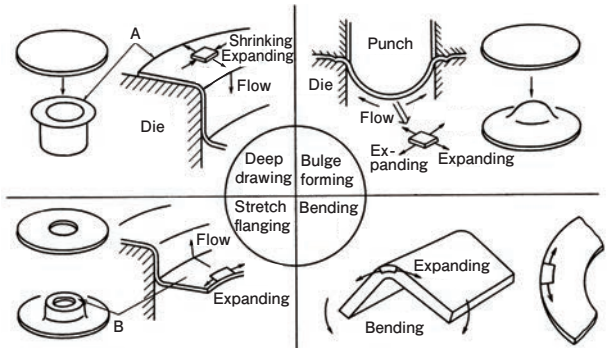

Fig. 4　Four elements of press forming and characteristics of material deformation[4].

度が増加しても，変形抵抗が大きくなり周辺部が変形を受け持つことで局部くびれの発生が遅れるため，局部伸びが大きいと考えられる。一方，アルミニウム合金板材は，m値が低いため，変形領域が局在化すると周辺部で変形を受け持てず，局部くびれの発生が早くなるため局部伸びが小さいと考えられる。

また，同じ合金では軟質材（O材）と比較して，半硬質材（H24材）の方が強度は高く，伸びは低下する。これは，H24材では冷間加工により導入されたひずみが残存しているためである。

3．アルミニウム合金板のプレス成形性

板材のプレス成形は**Fig. 4**[4]に示す4種類に分類することが出来る。それぞれの特徴については後述するが，いずれの成形区分においても，アルミニウム合金板は軟鋼板と比較して課題が多い。そのため，今も尚，各成形区分における割れの発生メカニズム解明や成形性改善に向けた研究・開発が行われている。

3.1　深絞り成形

深絞り成形は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。円筒深絞り成形の場合，フランジ部における円周方向の縮み変形からなる絞り変形により，パンチ肩部には垂直応力が作用するが，これが材料強度より大きい場合，パンチ肩部近傍で破断が生じて深絞り成形の限界となる。従って，フランジ部の縮みフランジ変形抵抗を低下させるか，材料強度を向上させることで深絞り性が改善される。深絞り性の指標としては，円筒深絞り成形において，破断することなく素板を最後まで絞り込める最大の絞り比（素板直径／パンチ直径）を限界絞り比（LDR，Limiting Drawing Ratio）という。各種アルミニウム合金板の限界絞り比を**Fig. 5**[2]に，限界絞り比とr値の関係を**Fig. 6**[2]に示す。アルミニウム合金板の限界絞り比は2.0前後であり，同じ成形条件の軟鋼板（SPCE）と比較して0.3 ～ 0.4低い値である。軟鋼板では限界絞り比とr値との相関が高いと言われているが，アルミニウム合金板ではr値自体が大きく変化しないこともあり，一般には限界絞り比との相関は認められない。

近年，圧延時の温度やロール周速などを制御することにより，アルミニウム合金板のr値を改善する研究が行われている。小山らは温間異周速圧延を施した6000系アルミニウム合金板について深絞り性を調査し，**Table 3**[5]の通り，アルミニウム合金板においてもr値を高くすることによって限界絞り比が向上することを報告している。

3.2　張出し成形

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，板厚は減少する。各種アルミニウム合金板の限界張出し高さを**Fig. 7**[2]に示す。全てのアルミニウム合金板において，H24材およびT4材よりもO材

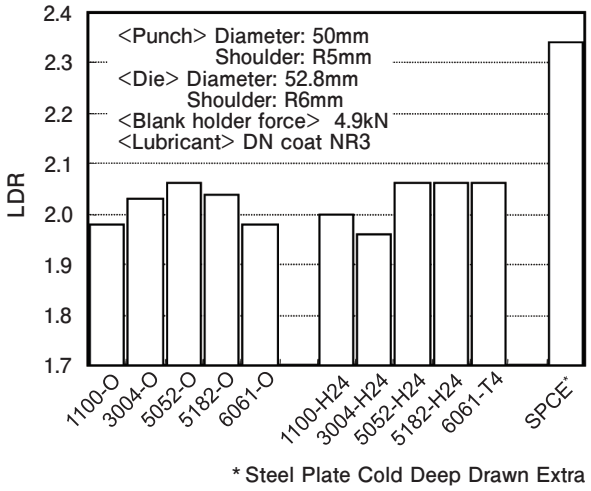

Fig. 5　Limiting drawing ratio (LDR) of various aluminum alloy sheets[2].

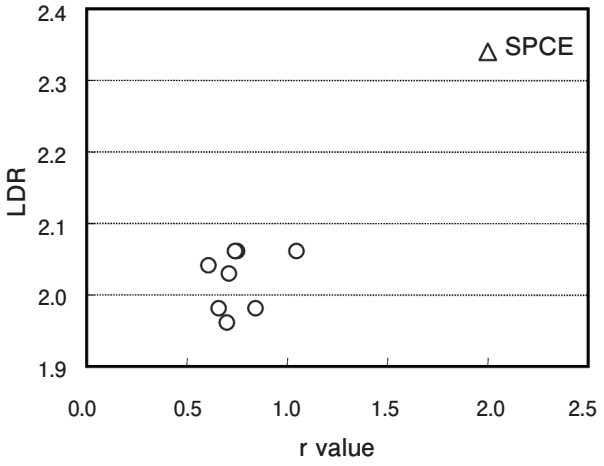

Fig. 6　Relationship between limiting drawing ratio (LDR) and r value[2].

Table 3　Mechanical properties of asymmetric warm-rolled and conventional cold-rolled sheets[5].

Asymmetric ratio	Tensile direction	Tensile strength (MPa)	0.2% yield strength (MPa)	Elongation (%)	r-value	LDR
250% (warm)	0°	228	115	29	0.97	2.24
	45°	232	112	31	1.41	
	90°	238	119	30	1.13	
	Average	233	115	30	1.23	
100% (cold)	0°	231	120	28	0.73	2.06
	45°	230	118	29	0.50	
	90°	230	118	27	0.75	
	Average	230	119	28	0.62	

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。限界張出し高さと機械的性質（耐力，引張強さ，伸び，n値，r値）との相関を調べると，伸びと正の相関が認められると報告されている。全伸びと限界張出し高さの関係を**Fig. 8**に示す。

近年，結晶塑性論を用いた数値解析により，成形限界線図（FLD）には集合組織が大きく影響を及ぼすことが分かってきている。各結晶方位の成形限界線図（FLD）を**Fig. 9**[6]に示す。吉田らはCube方位に高集積したアルミニウム合金板で高い張出し性が得られることを報告している。

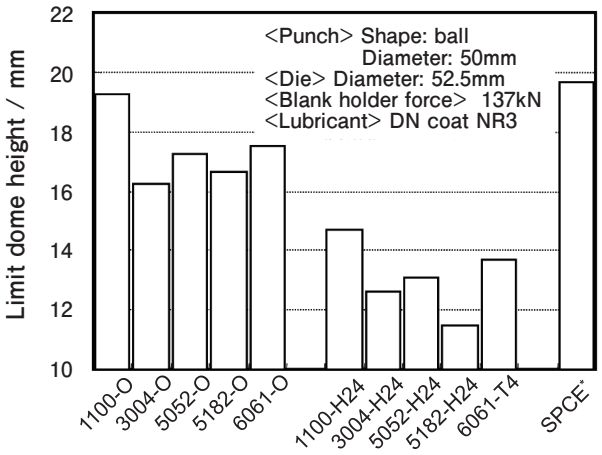

Fig. 7　Limit dome height of various aluminum alloy sheets[2].

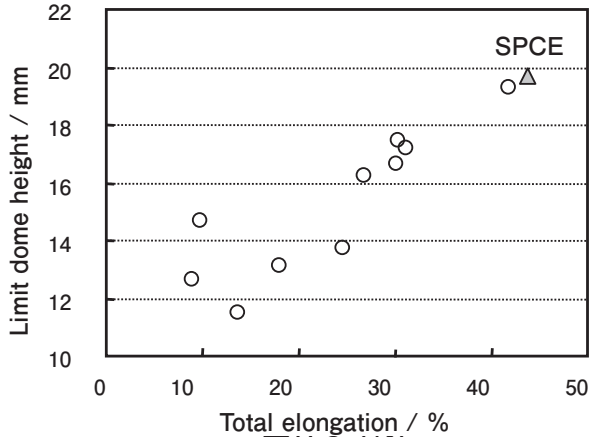

Fig. 8　Relationship between limit dome height and total elongation[2].

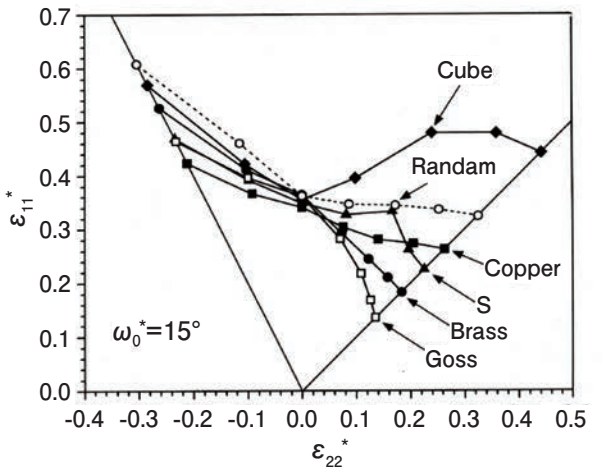

Fig. 9　Comparison of computed forming limit diagrams (FLDs) for the five texture components[6].

3.3　伸びフランジ成形

伸びフランジ成形は素板の端部を周方向に伸ばす成形方法であり，代表例としては，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広げ成形がある。伸びフランジ成形性の評価指標としては，限界穴広げ率 $\lambda = (d_1 - d_0)/d_0$（$d_0$：加工前の穴径，$d_1$：穴縁のクラックが素板板厚を貫通した時の穴径）が用いられる。穴広げ成形における穴縁端部の応力状態は，穴縁方向（円周方向）に引張応力が発生し，半径方向応力はほぼゼロであるため，単軸引張変形に近いとされている[7]。打抜き穴加工を行った各種アルミニウム合金板の全伸びと限界穴広げ率との関係を **Fig. 10**[2] に示す。限界穴広げ率は全伸びと概ね正の相関がある。限界穴広げ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の限界穴広げ率はおよそ0.2～0.8であり，同じ成形条件の軟鋼板（限界穴広げ率1.5）と比較してかなり低い。

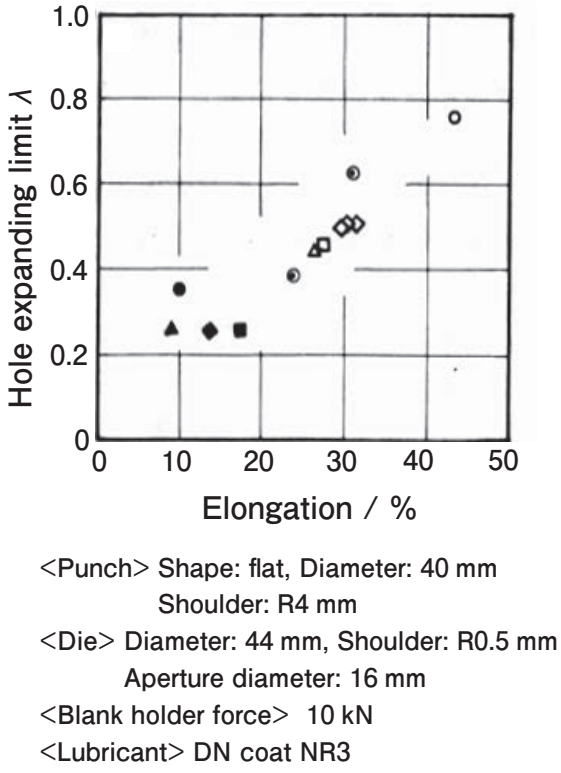

Fig. 10　Relationship between hole expanding limit and elongation[2].

一方，アルミニウム合金板の穴広げ性（伸びフランジ性）は，穴加工を打抜き加工から切削加工に変更することで大幅に改善される。また，**Fig. 11**[8] に示すように，高木らは5000系合金である5052，5154，5182板材を打抜きにより穴加工した後に焼鈍を行うことで，穴広げ率が向上することを報告している。以上のことから，打抜き時の穴縁部の加工硬化が穴広げ性に大きく影響を及ぼすことが分かる。

3.4　曲げ成形

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。曲げ性は全伸びのみでは評価できず，材料組織や加工履歴などに影響される局所的な延性，局部伸びや極限変形能を考慮する必要がある。また，曲げ成形では板厚方向に大きな応力勾配（ひずみ勾配）が存在するため[7]，曲げ性は90° 曲げあるいは180° 曲げで，曲げ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。**Table 4**[2] にアルミニウム合金板の曲げ限界の一例を示す。全てのアルミニウム合金板において，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。曲げ性は板厚に大きく依存し，アルミニウム合金板の製造条件が大きく影響を及ぼす

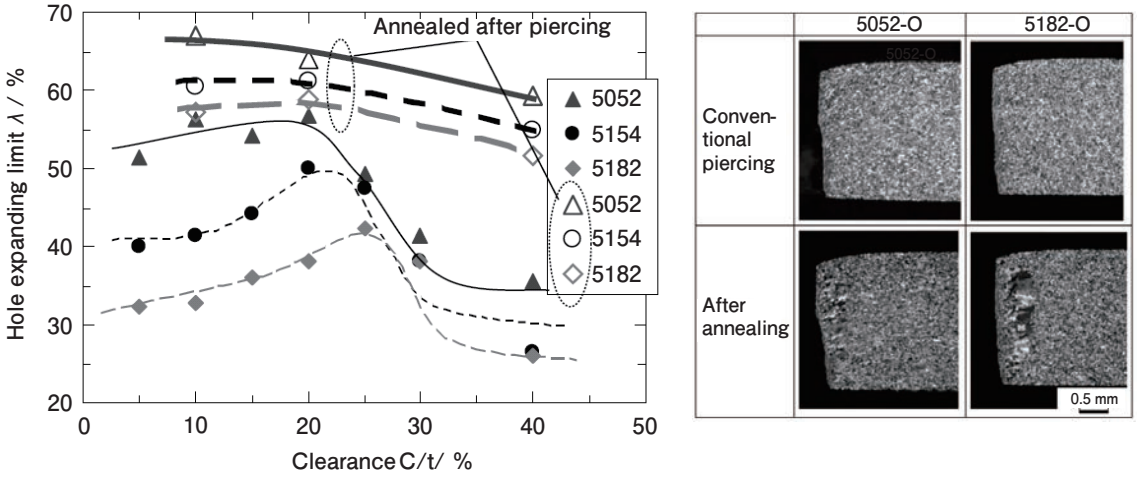

Fig. 11　Variation of hole expanding limit λ and cross sectional microstructures near the edge of hole with or without annealing after piercing[8].

Table 4　Bending limit of aluminum alloy sheets (180° bending)[2].

Alloy-Temper	Bending radius (○: No cracks, ×: Cracks)				
	0mmR	0.5mmR	1mmR	1.5mmR	2mmR
1100-O	○/○				
1100-H24	○/○				
3004-O	○/○				
3004-H24	○/×	—/×	—/○		
5052-O	○/○				
5052-H24	×/×	×/×	×/○	○/—	
5182-O	○/○				
5182-H24	×/×	×/×	×/○	×/—	○/—
6061-O	○/○				
6061-T4	×/×	×/×	×/×	○/○	
SPCE	○/○				

Sheet thickness: 1.0mm
(L direction)/(LT direction): Bending moment direction

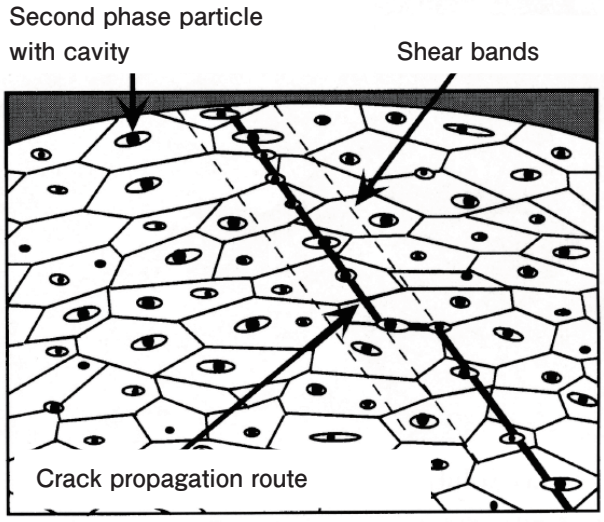

Fig. 12　Schematic diagram for cause of the crack by bending process[9].

ため，使用に際しては事前に確認することが望ましい。

アルミニウム合金板の曲げ性に関しては，曲げ割れの発生メカニズムが提案されている。曲げ割れ発生メカニズムを**Fig. 12**[9]に示す。浅野らは曲げ割れの発生を抑制するためには，2μm以上の第2相粒子（金属間化合物）の形成を抑制し，粒界析出を抑制すること，もしくは曲げ成形時のせん断帯の形成を抑制することが必要であると報告している。また，曲げ成形時のせん断帯の形成には固溶元素や集合組織などが影響することを報告している[10)~12)]。

4．アルミニウム合金板の成形加工技術

アルミニウム合金板は，軟鋼板に比べて成形加工特性が劣っていることから，これを補うための成形加工技術の開発が不可欠である。プレス成形性を補う手段

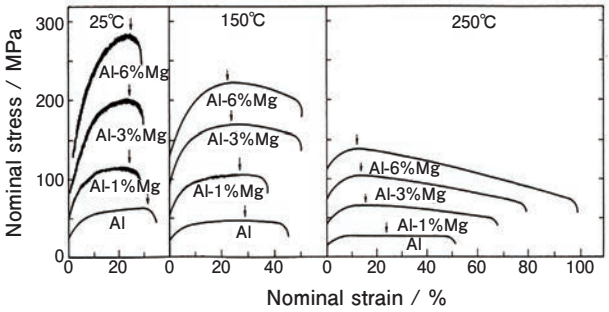

Fig. 13　Effect of Mg content and tensile test temperature on the stress-strain curve of annealed Al-Mg alloys[13].
* The arrows indicate the maximum uniform strain.

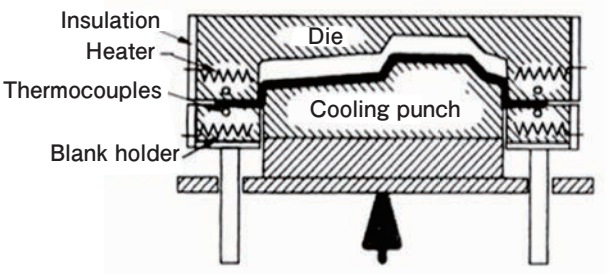

Fig. 14　Schematic drawing of warm forming equipment[16].

の一例としては，アルミニウム合金板の高温特性を利用する方法が挙げられる。

アルミニウム合金板の高温特性を利用した成形加工方法はいくつか実用化されている。5000系O調質材の応力-ひずみ線図に及ぼすMg量と引張試験温度の影響を**Fig. 13**[13]に示す。5000系合金O調質材の高温（250℃）における引張性質は，室温（25℃）に比べて引張強さおよび耐力が低くなり，伸びが増加する。この特性を利用し，オイルパンやドアインナ等の難成形部品を温間深絞り成形することが試みられている[14)~15)]。装置の概略を**Fig. 14**[16]に示す

また，結晶粒径を約10μm以下に微細化すると，400～500℃の温度で著しく伸びが増加する超塑性特性を示す[17]。超塑性による成形限界線図を**Fig. 15**[18]に示す。冷間成形能に比べ，非常に大きな成形能であることが分かる。この特性を利用した熱間ブロー成形では，加熱したアルミニウム合金板をガス圧によって膨らませ，金型に馴染ませて成形することで，通常のプレス成形では成形できない形状も成形可能となる。熱間ブロー成形の模式図を**Fig. 16**[19]に，熱間ブロー成形品の例を**Fig. 17**[20]に示す。金型はオス型もしくはメス型のどちらか片側のみで成形できるため，金型費が節約できる。一方，熱間ブロー成形は完全張出し成形であるため，板厚減少や製品内の板厚分布制御が課題である。本来，航空機など少量生産のために開発された成形技

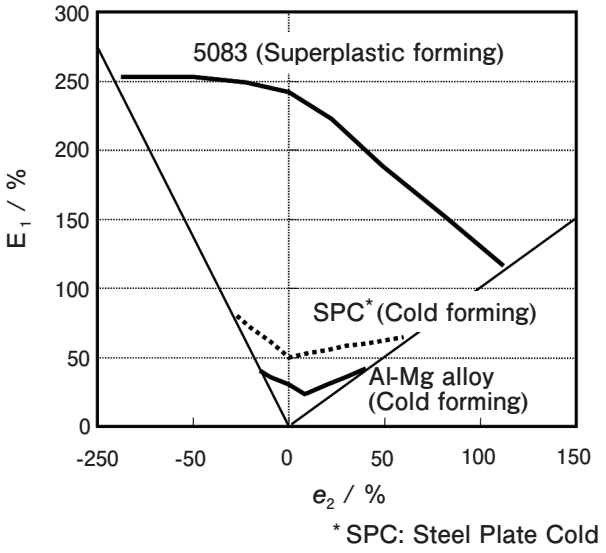

Fig. 15　Superplastic forming limit diagram[18].

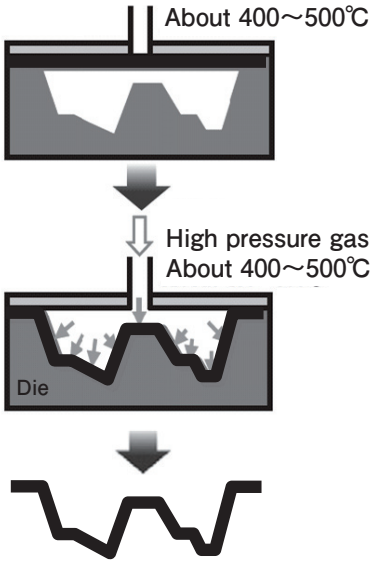

Fig. 16　Schematic drawing of typical hot blow forming[19].

術であるが，成形方法の改善によりタクトタイムを低減させ，5083や5182のアルミニウム超塑性材料を自動車ボディパネルへ適用した事例がある[21)～23)]。

高温特性を利用した他の成形方法として，近年，高張力鋼板に多く使用されているホットスタンプが挙げられる。ホットスタンプは，加熱した板材を常温のプレス金型に投入し，プレス成形と同時に金型への伝熱によって焼き入れを行うプレス成形方法である。高温時の高い伸びによる成形性の確保と低い強度（低い変形抵抗）による優れた形状凍結性の両方を得ることができる。特に，7000系合金等の高強度合金は，室温での伸びが低く冷間での成形が難しいため，この成形方法が有効である。また，アルミニウム合金板の優れた熱伝導性により，室温程度の温度域の金型であれば，接触による熱伝達によって速い冷却速度が得られる。そのため，加熱温度をその合金の溶体化温度（例えば400～500℃）とすることで，板製造工程における溶体化処理および焼入れ処理の工程が不要となる利点がある。一方，最高強度を得るためには，焼入れ後に人工時効処理（T6処理）を行う必要があり，この場合，プレス成形後に熱処理工程を追加する必要がある。ホットスタンププロセスの模式図を**Fig. 18**[24)]に，ホットスタンプ成形品の例を**Fig. 19**[25)]に示す。

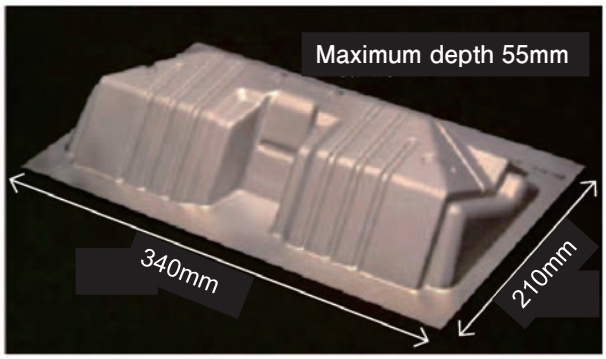

Fig. 17　Hot blow formed product[19].

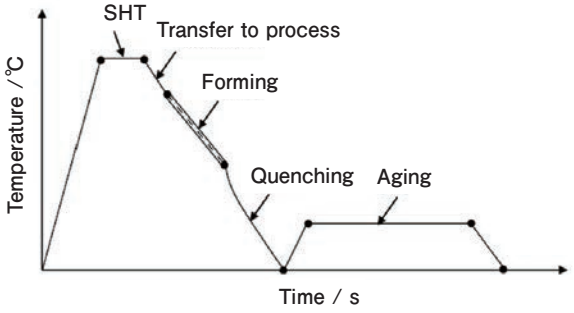

Fig. 18　Hot stamping (HFQ®) process[24].
(HFQ®: Hot Form and Quench)

Fig. 19　Products (high strength 6000 series alloy) formed by hot stamping (HFQ®)[25].

5．今後の展望

アルミニウム合金板は，これまで成形加工特性向上のために様々な研究開発が行われ，その適用範囲は拡

大しており，今後も世界的に大幅な需要増加が見込まれている。最近では，脱炭素社会の実現に向けてアルミニウムのリサイクル性が着目されている。スクラップ分別を厳格にし，合金別に回収することができれば特性劣化なしに同一合金板へ再生することが可能であるが，現状は難しい場合が多い。このため，従来よりも不純物元素の許容量を拡大し，リサイクル性を高めたアルミニウム合金板も実用化されている[26]。しかし，不純物元素の増加によって，金属間化合物の数が増加するため，特に延性や耐食性の低下が生じるという課題がある。これらのリサイクルアルミニウム合金板を使いこなすには，更なる研究開発が必要となろう。重要なのは，材料の特性を把握したうえで，それに合った成形加工方法を選択することである。

参考文献

1）日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック，第7版（2007），35.
2）軽金属学会：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），10-36.
3）M, Usuda et al.: SAE, No950924, (1995).
4）林　豊：第40回塑性加工学講座（塑性加工学会）力学コース「板材成形」テキスト,（1985），55.
5）小山克己ほか：塑性と加工，**50**（2009），211-215.
6）K. Yoshida et al.: Acta Mater., **55** (2007), 4499.
7）薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック第3版,（2007）．81-108
8）高木康夫ほか：R&D 神戸製鋼技報，**57**-2（2007），51.
9）浅野峰生ほか：軽金属，**52**（2002），448-452.
10）浅野峰生ほか：軽金属，**56**（2006），371-375.
11）S. Ikawa et al.: Mater. Sci. Eng., **A528** (2011), 4050.
12）竹田博貴ほか：軽金属，**60**（2010），231-236.
13）R.A. Ayres: Metallugical Transactions A, **10A** (1979), 849-854.
14）山崎　淳：塑性と加工，**33**（1992），404-410.
15）阿部佑二ほか：軽金属，**50**（2000），7-11.
16）軽金属製品協会：アルミニウムの加工方法と使い方の基礎知識,（2004）.
17）M.A. Kulas et al.: Metallugical and Materials Transactions A, **36A** (2005), 1249-1261.
18）岩崎　源ほか：軽金属第102回春季大会講演概要（2002），213.
19）工藤智行：UACJ Technical Reports, **1** (2014), 131-133.
20）Furukawa-sky Review, **7** (2011), 30-31.
21）中尾敬一郎ほか：アルミニウム，**10**（2003），103-105.
22）柴田勝弘：アルトピア，35（2005），9-14.
23）J.G. Schroth: Advances in Superplasticity and Superplastic Forming edited by E.M. Taleff, P.E. Krajeuski, P.A. Friedman, R.S. Mishra and J.C. Schroth, 133rd Annual Meeting & Exhibition of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), (2004), 9-20.
24）M.S. Mohamed et al.: International Journal of Machine Tools and Manufacture, **53** (2012), 27-38.
25）Impression Technologies Ltd: https://hfqtechnology.com/case-studies/
26）西川直樹ほか：TOYOTA Technical Review（和文），**66**（2021），92-95.

八野 元信（Motonobu Hachino）
（株）UACJ　板事業本部　福井製造所　製品技術部