技術解説

アルミニウム合金の特性と成形加工

Material Properties and Sheet Metal Forming of Aluminum Alloys

上野　洋一
Yoichi Ueno

小山　克己
Katsumi Koyama

概要　本稿では，缶材や自動車ボディーシートの成形加工に使用される3000（Al-Mn）系合金，5000（Al-Mg）系合金および6000（Al-Mg-Si）系合金の特徴や成形加工の現状について紹介する。

Al-Mn系合金が使用されるキャンボディ材の深絞り（drawing）工程では集合組織制御による耳の発生防止が，しごき（ironing）工程ではMn系金属間化合物がダイスに凝着したアルミ粉を除去し，缶表面光沢低下防止が図られている。Al-Mg系合金が使用されるキャンエンドでは，高加工部分であるカウンターシンク部の成形時の割れや2次バックリングによる亀裂の発生の抑制策が取られている。

Al-Mg-Si系合金が使用される自動車のボディアウターパネルのヘム加工では粗大な第2相粒子数の削減による割れ抑制が，加工度の大きい張り出し成形加工では結晶方位制御によるリジング（表面不具合）の防止が図られている。

アルミニウム合金板材の深絞り成形性を向上させるために，温間異周速圧延による集合組織の改善が検討され，高温域で発現する高延性を利用した高温ブロー成形技術も実用化されている。さらに，金型表面への潤滑皮膜コーティング技術やサーボプレス機の利用により，アルミニウム合金板材の難加工部品への適用が期待されている。

Abstract: The 3000-series (Al-Mn), 5000-series (Al-Mg), and 6000-series (Al-Mg-Si) aluminum alloys are applied to can stocks and automotive body sheets. The material properties of these aluminum alloy sheets and the present situations of sheet metal forming will be presented in this paper. In the drawing process of can body stocks for which Al-Mn alloys are used, the textures are controlled in order to suppress earing. And, in the ironing process, Mn-based intermetallic compounds prevent the built-up of aluminum flakes on the ironing die, avoiding the galling on can body surfaces. In the can ends in which Al-Mg alloys are used, various countermeasures are implemented to prevent cracking at the countersink part which is strongly deformed, and also to suppress cracks at buckling.

In the hemming process of automotive body outer panels in which Al-Mg-Si alloys are used, cracks on the surface of the hemming ridgelines are suppressed by reducing the number of coarse-sized second-phase particles. And in large stretch forming, crystal orientation is controlled in order to prevent ridging (i.e., surface defects).

To improve the deep drawability of aluminum alloy sheets, texture control by asymmetric warm rolling has been studied. Also, the high temperature blow forming technology using high ductility that appears at elevated temperatures has been put into practical use. Additionally, helped by the application of servo press and lubricant coating to die faces, the usage of aluminum alloy sheets to complex deep-drawn components is expected to increase.

1. はじめに

アルミニウムは，1886年に工業的精錬の基礎が構築されて以来，世の中で利用され始めた比較的若い金属である。アルミニウムは，比重が2.7であり，鉄や銅の約1/3と軽量であることから，当初から特に航空機用素材として注目されていた。また，電気や熱の伝導性が高く，光や熱に対する反射性に優れ，高耐食性を有し，かつアルマイトなどの表面処理性に富んでいる。さらに延性が高く優れた塑性加工性を示し，極低温における脆化もなく，融点が比較的低くリサイクル性に富み，非磁性など鋼材にはない特徴を有している。

これらの特徴は，純度が高いアルミニウムほど際立つが，純アルミニウムは耐力値が低く軟らかい。このため，上記特徴を極力損なうことなく，強度向上が図れる添加元素の探索研究が多く行われた。その結果，現在では主に純アルミニウムの1000系から超々ジュラルミンで知られる7000（Al-Zn-Mg）系合金までの各種アルミニウム合金が生まれた。本稿では，プレス成形用のアルミニウム合金板材として使用される3000（Al-Mn）系合金，5000（Al-Mg）系合金および6000（Al-Mg-Si）系合金について，その特徴や用途を紹介するとともに，プレス成形の現状と課題およびその検討状況について概観する。

2. 各種プレス成形用アルミニウム合金板材の研究動向

代表的なプレス成形用アルミニウム合金板材の機械的性質及び代表的な成形性試験値[1]を**表1**に示す。この中から，缶材や自動車ボディシートの成形加工に使用される3000（Al-Mn）系合金，5000（Al-Mg）系合金および6000（Al-Mg-Si）系合金の特徴や成形加工の現状について次に紹介する。

2.1 3000（Al-Mn）系合金

3000（Al-Mn）系合金は，Mnを添加することにより純アルミニウムの加工性および耐食性を低下させることなく強度を増加させた合金である。家庭用器物，キャップ，飲料缶・ビール缶のキャンボディ材，屋根材などの適度な強度，成形性さらに耐食性を要求される用途に幅広く使われている。主要製品の1つである飲料・ビール缶のキャンボディの成形工程および成形時の課題を**図1**に示す[2]。板厚約0.3 mmのキャンボディ材（3004-H19）に2段の深絞り（drawing）工程と3段のしごき（ironing）工程を経て所定の高さのいわゆるアルミニウムDI缶がつくられる。その後，成形高さを切りそろえるトリミング加工と開口部を縮径化する多段のネッキング加工および巻き締め用の縁拡げを行うフランジ加工が施される。

深絞り工程では，材料の面内異方性に起因した耳と呼ばれる成形高さの不揃いが生じる。この山谷が大きいとトリミング時に一部欠肉が生じる。また，しごき成形時に耳の先端部がちぎれダイス内に飛び込み，ピンホールやテアオフ（破胴，缶切れ）の原因となる[2]。そのため，この耳を低く抑えることが求められる。大きな加工度の冷間圧延では，圧延方向に対して45°の位置に4つの耳が生じるいわゆる圧延集合組織が発達する。この45°方向の耳を打ち消すため，冷間圧延前の段階で0/90°方向の耳が生じる立方体方位の再結晶集合組織を発達させる必要がある。これまでは立方体方位を生じさせる再結晶処

表1　各種アルミニウム合金板材の機械的性質および成形性試験値
Table 1 Mechanical properties and forming properties of various aluminum alloy sheets.

合金記号（JIS）	引張試験値						成形性試験値	
	引張強さ σ_B MPa	降伏強さ σ_Y MPa	降伏比 σ_Y/σ_B	全伸び ε_B %	n値	r値	エリクセン値 ErV	限界絞り比 LDR
1100-O	98.9	32.3	0.33	37.0	0.25	0.87	11.0	2.30
1200-H14	134.0	125.0	0.93	6.3	–	–	7.9	2.10
3003-O	115.0	40.2	0.35	30.0	0.24	–	10.7	2.16
3004-O	166.0	67.6	0.41	20.0	0.20	–	9.1	2.19
3003-H14	170.0	157.0	0.92	5.0	0.07	0.50	6.1	2.10
3004-H19	290.0	271.0	0.94	4.2	0.03	0.46	2.5	2.07
5005-H16	257.0	253.0	0.98	2.0	–	–	4.9	1.94
5052-O	202.0	91.1	0.45	26.0	0.21	0.71	9.9	2.06
5052-H251	276.0	235.0	0.85	7.3	0.04	0.32	6.0	2.13
5154-O	235.0	137.0	0.58	26.0	–	–	–	2.0以上
5082-O	289.0	147.0	0.51	24.0	0.23	0.63	9.5	2.14
5082-H38	362.0	289.0	0.80	9.9	0.04	0.42	4.2	1.82
5083-O	314.0	145.0	0.46	24.2	0.21	0.58	8.3	2.07
6061-T4	229.0	112.0	0.49	18.0	0.21	0.74	9.2	2.12

理を別途施していたが，現在では冷間圧延前の熱間圧延工程で，立方体方位が高密度で生じる条件を設定することで，中間の熱処理を施すことのないシンプルな製造工程が主流となっている[3]。

深絞り加工に引き続くしごき加工は，狭いダイス間隙に缶側壁を通して板厚を薄くする加工で，高いダイス面圧がかかる厳しい加工である。加工により表面の酸化膜が千切れて生じるアルミニウムの新生面が活性なため，面圧の高いダイス表面に凝着し，缶表面の光沢を奪う。3004合金に添加されているMnは，金属間化合物を形成し，この金属間化合物にはダイス表面の凝着物をはぎ取るクリーニング作用があるとされている[4]。この作用は，不純物元素であるFeやSiの含有量や均質化処理条件の影響を受けるため，最適化の検討が進められている[5]。

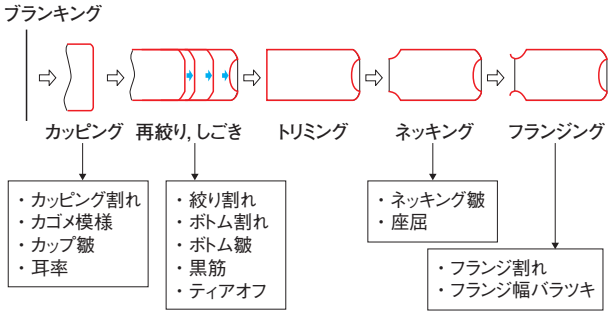

図1　キャンボディの成形工程の模式図と課題
Fig.1　Schematic diagram and problems of the forming process for can body.

2.2　5000 (Al-Mg) 系合金

5000 (Al-Mg) 系合金は，Mgを添加して固溶硬化を付与することで強度の向上を図っている。また，Mgの添加は，加工硬化性を上げることから，両者を組み合わせることで，幅広い強度のバリエーションが得られる。Mgの添加は，耐食性，成形性および溶接性を向上させることから，5000 (Al-Mg) 系合金の用途は特に広く，使用量も多い。1％前後の少量のMgを添加した合金としては，装飾品や高級器物に用いられる5N01合金，車両用内装天井，建材あるいは器物に用いられる5005合金がある。約2.5%の中程度のMgを添加した5052合金は，一般板金，船舶，車両，建築，陰圧用キャンエンドなどに用いられている。約4.5%までMg添加量を増した5083合金は，船舶，車両，低温用タンク，圧力容器などの溶接構造材として，また5182合金は内圧が高い炭酸飲料用のキャンエンド材として用いられている。

図2に一般的なキャンエンドと内圧に対してふくらみ難いキャンエンドの断面形状[6]を示す。キャンエンドは比較的浅い絞り加工が中心であるため，全体としては特に高い成形性を要求されないが，例えば，タブを取り付けるリベット加工部，およびスムーズに開口に導くための溝のスコアー部などが局所的に厳しい加工を受ける。また，薄肉化にともなう耐圧強度の低下を補うため，蓋の外周部と中央の平坦部の間にあるカウンターシンクを深くする傾向があり，成形をより難しいものとしている。この部位の成形時の割れ，あるいは耐圧試験時の変形による亀裂の発生の抑制には，不純物元素の含有量を規制し，最終冷間圧延率を低減させることが有効である[6]。

飲料・ビール缶における軽量化対策として，これまで進められてきたキャンボディのネック部の縮径化は，キャンエンド材の必要面積の削減とともに耐圧強度向上による薄肉化が図れるため，特に有効である。一方，Mg，Cuなどの固溶強化成分を増すことで得られる素材の高強度化による薄肉化の検討も継続されている。しかし，高強度化にともなう延性の低下が，製造時の不良率の上昇や市場における缶自体の信頼性の低下をもたらす懸念もあることから，昔よりも慎重に進められているようである。

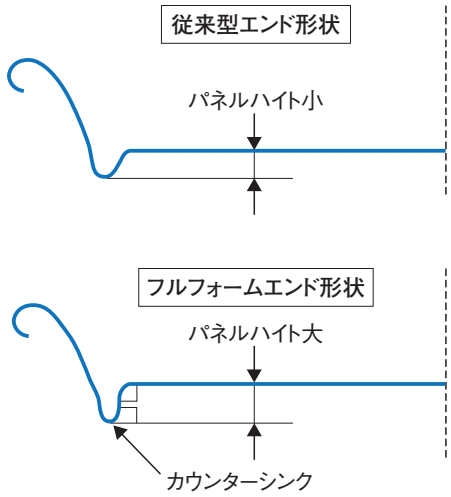

図2　キャンエンドの断面形状
Fig.2　Cross-sectional shapes of can end.

2.3　6000 (Al-Mg-Si) 系合金

6000 (Al-Mg-Si) 系合金は，溶体化・焼入れおよび時効処理を施すことによって強度向上を図る析出硬化型合金である。中程度の強度を有し，かつ耐食性も良好なことから，アルミサッシなどの建材，あるいは鉄道車輌用押出形材として多く使われる合金である。近年，連続焼鈍ラインによる熱処理を施したAl-Mg-Si系合金板材が自動車のボディパネルに用いられるようになった。Al-Mg-Si系合金板材は，プレス成形後の170～200℃で短時間の塗装焼付処理により時効処理を置き換えることが可能で，優れたプレス成形性と強度向上を両立させることができる。また，Al-Mg-Si 系合金では，Al-Mg系合金板材において問題となるリューダース帯と呼ばれるプレス品表面

のひずみ模様が発生し難いことから，現在では自動車用ボディシートの主流になっている[7]。また，欧米では，これまで高強度が得られる2000（Al-Cu-（Mg））系合金が自動車ボディシートに適用されていた[7]が，Cu添加合金は塗装との界面を進む腐食（糸錆）の発生が懸念されることから，日本においては使用されていない。最近では6000系合金の中の少量のCuの添加をも控えることを要求する自動車メーカーが多い[7]。

自動車のボディパネルは，アウターパネルの縁部でインナーパネルの外周部を挟み込むことで一体化するヘム加工が施される。製造直後の初期状態においても時効硬化型の合金であるAl-Mg-Si系合金板材は，従来自動車用ボディシートとして使われていたAl-Mg系合金板材と比較してヘム加工性が劣る。さらに自動車用6000系合金板材を長期間保管すると自然時効が進み，ヘム加工性が悪化する。このため，6000系合金板材を自動車用ボディシートとして実用化する段階においては，塗装焼付時の時効硬化性の向上とともにヘム加工性の改善が重要課題となった。**図3**にSiとFe量を変えた合金板のヘム加工相当の曲げ部外観[8]を示す。6000系合金の曲げ部は，SiあるいはFe量が多い合金ほど亀裂および割れの発生が多くなることが分かる。ヘム加工性の問題を解決するため，ヘム加工用の金型形状の見直しとともに，ボディシート材内部に粗大な第2相粒子が生成しないように合金組成や製造条件を制限することや，集合組織[9]や時効状態[10]の制御による取り組みが進められた。

また，6000系合金板材においても加工度の大きい張り出し成形を施すと数mmの間隔で圧延方向に伸びた筋模様の起伏であるリジングと呼ばれる表面不具合[11]が生じる。光学顕微鏡で確認できる結晶の粒径とはサイズが対応しないが，優先剪断変形方向を支配する結晶方位に関連した現象であると理解して改善が進められている[12]。

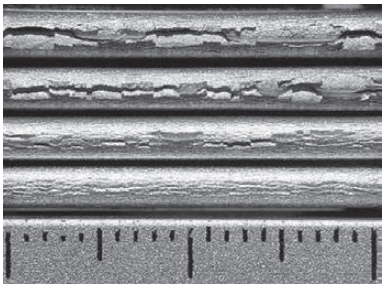

図3　6000系合金のヘム加工部外観に及ぼすSiおよびFe量の影響
Fig.3　Effects of Si and Fe content on the appearance of hemming ridgelines in 6000-series alloys.

3. 軽量化が求められる製品へのアルミニウム合金板材の活用動向

航空宇宙分野では，機能特性上の要求から素材の軽量化が必須要件であった。航空機の発達の歴史のなかでジュラルミンを代表とした高強度アルミニウム合金が使用され，民間航空機の主要な素材として位置づけられた[13]。一方，自動車車体は，低価格な鋼板が用いられてきた。しかし，昨今の資源枯渇や地球温暖化防止の観点から，自動車の燃費向上が強く求められ[14]，軽量化のための軽量素材への置換が改めて検討されるようになった。軽量化が機能向上に直接貢献するフードやトランクリッドのように上下に開閉するいわゆるクロージャーパネルにおいてアルミニウム合金板材の適用は進んでいるが，その他の部材への適用は遅れている[15]。これは，素材コストの差が大きく影響しているものと思われるが，アルミニウム合金の特性上の制約も見られる。すなわち，一般的にアルミニウム合金板材は，鋼板と比較してヤング率が小さいため剛性や形状凍結性に劣り，塑性異方性指標のr値が低く，成形可能領域が狭いことからプレス成形性に劣る[16]。このため，アルミニウム合金板材の自動車部品への適用の範囲は必然的に限られたものとなっている。

アルミニウム合金板材のr値を大幅に高めることを目的に，鋼板に匹敵するプレス成形性を獲得する革新的アルミニウム合金板材の製造プロセスの検討がNEDOプロジェクトとして進められた[17]。**図4**に示す上下の圧延ロールの周速を変えられる異周速圧延機[17]を用いて，アルミニウム合金圧延板に強い剪断変形を与えることにより，鋼板に近い集合組織が得られつつある。まだ，実用化には至っていないが，通常の自動車用アルミニウム合金板材のr値の約2倍に当たる1.2を超えた材料が得られ，難加工部品への適用が期待されている[17]。

一方，特殊な加工技術として，高温域で得られる高延性に注目した高温ブロー成形が検討され，量産車の自動車ボディの一部に適用された。**図5**[18]に示すように，通

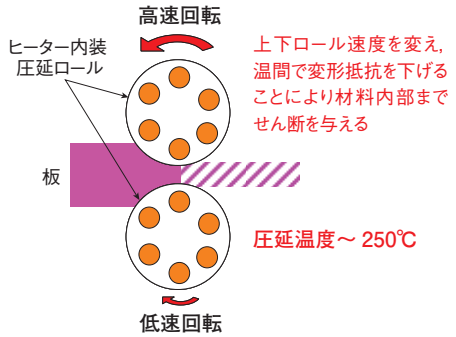

図4　温間異周速圧延
Fig.4　Asymmetric warm rolling.

常アルミニウム合金板材の冷間プレスでは一体成形できないような難成形部品であるトランクリッドとフェンダーが産み出された。本成形法では材料を400～500℃に加熱して強加工を施すため，結晶粒の粗大化が起こり強度低下や外観不良が発生する。そのため，成形方法の検討とともに，新材料[19]の開発が必要であった。本技術は形状意匠性を高める効果もあり，今後の普及拡大が期待される。

図5　ホンダレジェンドと高温ブロー成形されたトランクリッドインナー
Fig.5　High-temperature blow-formed trunk lid inner of the Honda Legend.

4.　金型および加工装置への期待

鋼板と比べてプレス成形性に劣るアルミニウム合金板材は，既述のように活性な金属であるため，金型表面への凝着が発生し易い。金型表面へのアルミニウムの凝着は，成形品の表面品質を低下させるだけでなく，多くの場合，成形割れなどのきっかけともなる。したがって，ラップ仕上げによる滑らかな金型表面を必要とし，部分的に強い面圧がかかって潤滑油膜切れが生じないように注意が求められる。一方でアルミニウムの表面は硬い酸化皮膜に覆われているため，金型の摩耗も意外に早い。アルミニウム合金板材のプレス成形ではこのような問題を抱えているが，昨今の環境負荷の低減，作業環境の改善などの観点から潤滑油量の削減あるいはなくすための検討も一方では行われている。これまでの潤滑油に代えて，アルミニウム合金板材表面への固形潤滑剤の塗布，あるいは金型表面へのDLC（diamond like carbon）などの被覆を施すことによって効果が得られることが報告されている。

このようなアルミニウムの凝着に絡む金型の問題とともにプレス装置についても改善が行われている。自動車メーカーではサーボモータ駆動のプレス機への置き換えが始まっている。このプレスは，成形過程全体の速度だけでなく，成形途中で速度を変えることができる。このため，素材の加工速度とは無関係に，成形をしていない空走工程のスライド速度を上げることができるので，生産性の向上を図ることができる。また，金型が接触する段階においてスライド速度を落とすことにより騒音が軽減し，作業環境の向上が図れるとされている[20]。高張力鋼板では成形途中で金型をブランクシートから離すことによって，摺動状態が改善されて深絞り性を向上させている[21]。一方サーボプレスを用いたアルミニウム合金板材の成形試験では，高速で成形すると深絞り成形性が改善される結果が得られている[22]。さらに，サーボプレスによる高張力鋼板やアルミニウム合金板材の形状凍結性改善の取り組み[23), 24]も見られ，今後の進展や量産適用に期待したい。

アルミニウム合金板材自体の成形性向上の取り組みとともに，ここで紹介したような金型に絡む技術や新たな成形装置を活用した検討が進むことによって，成形可能領域が拡大し，これまで適用できなかった難加工部品へもアルミニウム合金板材が適用されることを期待している。

5.　おわりに

種々の優れた特性を持つアルミニウム合金板材は，缶材をはじめとした様々な用途に用いられている。その中でもアルミニウムの優れた軽量性は，航空機の発達に大いに貢献した。そして現在地球温暖化防止の観点から，改めて，幅広い輸送分野においてアルミニウム材料への置換による軽量化が求められている。このような状況において，特に自動車車体への適用を阻む要因として，アルミニウムの素材コストとともに成形可能領域が狭く，形状凍結性に劣っていることが挙げられている。これに対して，アルミニウム素材メーカーでは，延性向上やヘム加工性の改善，あるいは異周速圧延を用いた高r値材の実用化に向けた取り組みが進められている。一方で，アルミニウム合金板材の得失を考慮した金型や成形方法の検討も求められている。近年のサーボプレスの普及によって，各種材料および各種成形様式に合わせた最適な成形条件を設定できるようになったことから，アルミニウム合金板材を使いこなすための利用加工技術の発達にも期待したい。

本稿は日刊工業新聞社の型技術2010年10月号（第25巻第10号）の特集「部材軽量化に向けた難成形材の特性と加工技術」に「アルミニウム合金板材の特性とプレス成形における留意点」として掲載された原稿を一部修正して転載したものです。

参考文献

1) (社)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）
2) 鈴木他：Furukawa-Sky Review **No.1**（2005), 3.
3) 小山他：古河電工時報 **102**（1998), 76.
4) 土田他：住友軽金属技報 **31**（1990), 268.
5) (社)軽金属学会：アルミニウムの製品と製造技術
6) 鈴木他：古河電工時報 **104**（1999), 94.
7) (社)軽金属学会：自動車軽量化のための生産技術
8) 日比野他：軽金属, **53**（2003), 534.
9) 竹田他：軽金属, **60**（2010), 231.
10) 日比野他：軽金属, **53**（2003), 516.
11) 村松：軽金属, **53**（2003), 490.
12) 高木他：軽金属学会第116回春期大会講演概要(2009), 127.
13) 小山：Furukawa-Sky Review **No.6**（2010), 7.
14) 湊：JAMAGAZINE,(1999-6),1.
15) 櫻井：神戸製鋼技報 **59**（2009), 121.
16) H. Inoue et al.：Proceedings of International Body Engineering Conference 2003, Society of Automotive Engineers of Japan, Inc., Tokyo（2003), 471.
17) 地球温暖化防止新技術プログラム「自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術の開発」成果報告書 NEDO技術開発機構ナノテクノロジー・材料技術部(2007)
18) 東海林他：プレス技術 **47**（2009), 18
19) Furukawa-sky Review **No.4**（2008), 66
20) 西村他：塑性と加工, 50（2009), 986
21) 玉井他：塑性と加工, 51（2010), 450
22) 上野他：軽金属学会第116回春期大会講演概要(2009), 149
23) 上野他：軽金属学会第117回秋期大会講演概要(2009), 217
24) 菅沼：プレス技術 **47**（2009), 37

上野　洋一　(Yoichi Ueno)
技術研究所

小山　克己　(Katsumi Koyama)
技術研究所