

## 一般社団法人 日本アルミニウム協会

〒104-0061 東京都中央区銀座4-2-15 塚本素山ビル  
TEL.03-3538-0221 FAX.03-3538-0233  
<http://www.aluminum.or.jp/>

# アルミニウムとは

ALUMINIUM



(一社)日本アルミニウム協会

## はじめに

優れた製品を作り出すには、優れた材料が必要になります。これまでにない性能を追求するために、たくさんの材料のなかから、より品質の優れた、高い機能を持つ材料が選ばれています。

このような理由で採用されている金属材料があります。軽くて強く、錆びにくいというに、数々の特性を持つアルミニウム。その優れた特性は多くの製品に生かされ、性能向上に役立っています。

アルミニウムは工業化されてから130年という、鉄や銅に比べると若い金属ですが、特性が注目されるにつれ急速に普及しました。最近では環境ニーズに応える材料として、アルミニウムの軽量化効果やリサイクル特性が着目され、多分野で活躍しています。

いま、時代の最先端を走る製品や技術が、アルミニウムとともに生まれています。多くの分野から注目されるアルミニウム。その特性と広がる可能性について紹介します。

## アルミニウムとは

### C O N T E N T S

<b>時代をかけるアルミニウム</b>	3
輸送 / 3	
電子・電気 / 5	
建築 / 7	
暮らしと環境 / 9	
<b>アルミニウムってどんなもの？</b>	11
原料は土 / 11	
わずか200年 / 13	
わずか3% / 15	
<b>アルミニウムの特性</b>	17
<b>アルミニウムの製造</b>	25
アルミニウムの製造工程 / 25	
アルミ地金および加工用鋳塊 / 29	
アルミニウム合金 / 31	
圧延 / 35	
押出・引抜 / 38	
鍛造 / 42	
鋳造・ダイカスト / 43	
<b>アルミニウムの成形・加工</b>	47
成形・加工 / 47	
接合 / 50	
表面処理 / 54	
<b>参考資料</b>	57

次代へむけて、猛スピードで駆け抜ける  
アルミニウムとともに。



「E5系はやぶさ」

### より速く、快適な走りを支える アルミ車両

東京～新青森間を結ぶ東北新幹線の新しい車両「E5系はやぶさ」が登場し、注目を集めています。車両は営業運転では国内最速となる時速320km走行を視野に入れて設計されました。かつてないスピードに耐えるため車両には数々の新技術が投入さ

れ、15mにおよぶロングノーズはトンネル高速走行時の騒音低減をめざした形状となっています。そのはやぶさの車両はアルミニウム製。高速走行を実現するには、軽くて強いアルミニウムがかかせません。はやぶさだけでなく、新幹線をはじめ地下鉄や通勤電車など、多くの車両がアルミニウムでできています。より速く、快適な走りはアルミニウムが支えているのです。



ロングノーズのシャープな流線形が特徴のオールアルミ車両。写真はE5系の量産先行車両

### 輸送にかかせないアルミニウム

鉄道車両だけでなく、軽量なアルミニウムは輸送分野に不可欠な材料です。

たとえば自動車は、最近、環境性能がますます重要視されていますが、軽量化効果の大きいアルミニウムを採用すると、燃費改善が期待できるため、積極的にアルミ部品が使われています。

航空・宇宙分野でもアルミニウムは活躍しています。1911年にジュラルミン(2000系アルミ合金)が実用化され航空機に使用されてから、以降、アルミニウ

ムは航空機に使用されています。また人工衛星打ち上げ用ロケットの主要材料はアルミニウムです。機体のほとんどの構造体に軽量で高強度なアルミニウムが活躍しています。

さらに船舶にもアルミニウムは使用されています。たとえば巡視船や旅客船、漁船など。また低温に強いアルミニウムは、LNG(液化天然ガス)船のタンク材として使用されており、マイナス162℃という極低温のLNGを安全に運んでいます。



軽量化、燃費改善をめざして、自動車部品のアルミ化が進んでいる



航空機の主要材料としてアルミニウムは長い実績を持つ



人工衛星打ち上げ用ロケットの主要材料はアルミニウム



LNG船のタンク材にアルミニウムが使用されている

その品質は、世界のニーズを満たす  
アルミニウムとともに。

アルミハードディスク材

## 世界で圧倒的なシェア 日本製アルミハードディスク材

パソコンなどの記録メディアとして活躍するハードディスク。ハードディスクとは、ドーナツ状の磁気記録メディアで、一般的には数枚を重ね合わせてハードディ

スクドライブ(HDD)として使用されます。記録できる情報は年々大幅に増加し、大容量化しています。HDDの中の、ハードディスクと磁気ヘッドの間は $0.02\mu\text{m}$ しか離れていないため、ディスク材にはわずかな凹凸も許されません。ディスク材はガラス製とアルミ製があり、全体の約半数をアルミ製が占めています。高い技術を持つ日本は、きわめて高い平坦度(板表面の平らさ)のアルミディスク材を安定して生産しており、その品質の高さから世界100%のシェアを誇っています。



打ち抜かれたディスク材はコンベアに乗って次の工程へつぎつぎと流れていく。ディスク材はわずかな凹凸も許されないため、品質の高い日本製アルミディスク材が世界で使用されている。ディスク材は表面を研削した後Ni-Pめっきを施し、その上に磁性膜をつけるとハードディスクが完成する

パソコンに不可欠な  
HDD

## 電気機器に、導電材料に多用されるアルミニウム

軽量で、熱伝導性や導電性に優れるアルミニウムは、電気機器に多用されています。たとえば家庭用・業務用エアコンの熱交換器のフィンには、熱伝導性に優れたアルミニウムが使用されています。フィン材は防食、親水性、低臭化を図るため、あらかじめ表面処理を施したプレコート材の採用が進んでいます。最近人気のデジタル家電では、液晶やプラズマテレビのバックパネルに放熱性の高いアルミニウムが役

立てられています。またデジタルカメラや携帯電話のボディーにアルミニウムが採用され、美しい光沢を放っています。

また、導電性に優れるアルミニウムは高圧送電線に使用されています。アルミニウムは銅の約3分の1の重量のため、電線の軽量化を図ることができ、1881年に初めて送電線として開発されてからアルミニウムは導電材料として140年近くの実績を持ちます。

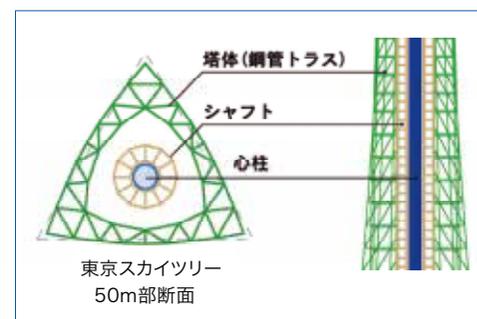
熱伝導性、耐食性に優れるアルミニウムは  
エアコン用フィンに使用されている放熱性の高いアルミニウムは液晶やプラズマ  
テレビのバックパネルとして活躍しているアルミニウムは送電線材料として  
長い実績を持つ

# 新しいランドマークは天をめざす アルミニウムとともに。



## 世界一高い自立式電波塔 東京スカイツリー®とアルミニウム

自立式電波塔としては世界一の高さ 634m を誇る東京スカイツリー。この鉄骨の塔の中央にある「シャフト」は、エレベーターや配線、配管などが通る重要な部分となります。シャフトの壁にはアルミハニカムパネルのカーテンウォールが採用されています。建物の構造体に、カーテンのように包み込み貼り付ける外壁のことをカーテンウォールといいますが、とくにアルミハニカムパネルを使用したカーテンウォールは軽量・高強度で耐食性や意匠性に優れるため外装材に多用されています。



\*スカイツリーの構造は鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造



シャフトを外側からみた様子。エレベーター部はガラス張りとなっている



シャフト内部

## 建築物を支えるアルミニウム

軽量で耐食性に優れ、加工しやすいアルミニウムは、住宅やビル、店舗、エクステリア、土木資材など、あらゆる建築分野で活躍しています。たとえばアルミサッシは私たちの暮らしの身近なところで使用されているアルミ建材です。また最近の高層ビルには、



ビル外壁を彩るアルミ建材

ビル用サッシやカーテンウォールにアルミニウムが多用され、デザイン性の高い外観をつくっています。さらに耐食性、耐久性に優れたアルミニウムはメンテナンスが容易であることから、橋梁や防護柵、都市景観製品などにも使用され、長期間の使用において変わらぬ品質を保っています。



アルミトラス構造体が採用された大屋根

サッシ・エクステリア製品にアルミニウムが多用されている



橋の高欄にもアルミニウムが使用されている

また会う日まで、なんどでも生まれかわる  
アルミニウムとともに。

### リサイクルの優等生アルミニウム

アルミニウムはリサイクルに適した金属です。スクラップをリサイクルして再生地金をつくるのに必要なエネルギーは、原料からまったく新しい地金をつくる時に比べて、わずか3%で済むといわれています。つまりアルミニウムをリサイクルすることで97%ものエネルギーを節約することができます。最近ではその環境特性が注目され、アルミニウムを積極的に採用するケースが増えていきます。とくにリサイクルが進んでいるアルミ飲料缶のリサイクル率は90%超。缶から缶へ、なんどでも生まれかわっています。

### 食品にかかせないアルミニウム

アルミニウムは熱伝導性が高く、急速に冷えるという特性から飲料缶に多用されています。日本では、ビールや清涼飲料などに、年間約224億個のアルミ缶が生産されています。缶胴の側壁部に凹凸模様を加工(エンボス加工)した缶、キャップの付いた缶(ボトル缶)など、缶の形やデザインはバラエティーに富み、人気を集めています。



飲料缶

## これからのエコな暮らしに、アルミニウム

最近では、地球温暖化防止をめざしたCO<sub>2</sub>の削減や、かぎりある資源の有効活用が、ますます重要なテーマとなっています。

リサイクル特性だけでなく、さまざまな優れた特性を持つアルミニウムは、その特性をうまく発揮することで、環境負荷の低減に役立ちます。たとえばアルミニウムの軽さは、製品の軽量化に役立ち、省資源や省エネルギーなどに役立っています。

暮らしに身近なところでは、環境にやさしい照明として注目されるLED電球があります。このLED電球に熱を伝えやすいアルミニウムが放熱部材として使用されています。

また、自然エネルギーの利用として期待される太陽電池にもアルミニウムが使用されています。軽量で耐食性に優れていることからモジュールのフレームとして活躍しています。



LED電球



太陽光発電モジュール

アルミニウム  
ってどんなもの？

# 原料は 土

## 赤いボーキサイトからアルミが生まれる

アルミニウムの原料は「ボーキサイト」という赤茶色の鉱石で、オーストラリア、ブラジル、中国などで多く産出されます。じつは地球の表面にある金属元素のうちいちばん量が多いのはアルミニウムです。

赤茶色のボーキサイトを細かく砕き、薬品と混ぜ合わせて分離すると、「アルミナ」という真っ白な粉ができます。このアルミナは、アルミニウムと酸素が結びついた状態なので、次に電気分解によってアルミナから酸素を取り除きます。こうして銀色のアルミニウムが誕生します。



Red  
[ボーキサイト]



White  
[アルミナ]



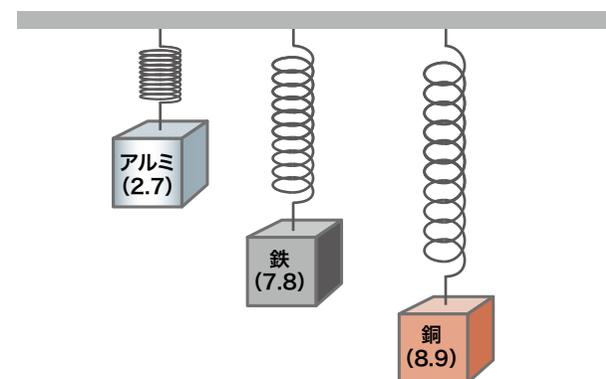
Silver  
[アルミニウム]

## いろいろな特長を持つアルミニウム

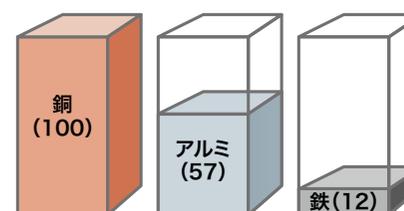
アルミニウムにはいろいろな特長がありますが、最大の特長は比重が小さいことです。同じ大きさの鉄の重量を1とすると、アルミニウムはわずかに3分の1しかありません。そのため、アルミニウムでできた製品は軽く、たとえば自動車や鉄道車両などでは車体の軽量化ができるので省エネルギーにつながります。

### アルミニウムと他金属との比較

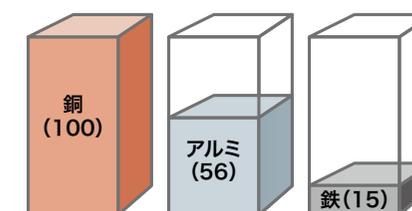
#### 同じ大きさでの重さの比較(比重)



#### 電気伝導率



#### 熱伝導率



#### 物理的性質

金 属		引張強さ* (N/mm <sup>2</sup> )	縦弾性係数* (KN/mm <sup>2</sup> )	比 重	溶融温度範囲 (°C)	導電率 (IACS%)	熱伝導度 (20°C, W/m°C)	線膨張係数 (20°C, 10 <sup>-6</sup> /°C)
アルミニウム	1100-H18	166 (16.9)	68 (6930)	2.7	646~657	57	220	23.6
	7075-T6	566 (57.7)	71 (7210)	2.8	476~638	33	130	23.6
銅	硬 質	343 (35.0)	117 (11900)	8.9	1065~1082	100	390	16.8
鉄	熱間圧延材	412 (42.0)	192 (19600)	7.8	1466~1510	12	60	11.7

\* ( )はkgf/mm<sup>2</sup>の場合



1934(昭和9)年、日本で初めて作られたアルミニウム地金

# わずか200年

## 急速に普及したアルミニウム

アルミニウムの元素が発見されたのは1807年、工業生産が始まったのは1886年のことです。それから約130年がたち、アルミニウムは鉄に次ぐ第二の金属として、いろいろな製品に使用されています。同じ金属でも、紀元前から使われてきた鉄や銅に比べると、アルミニウムは短い期間に急速に成長し、普及しました。

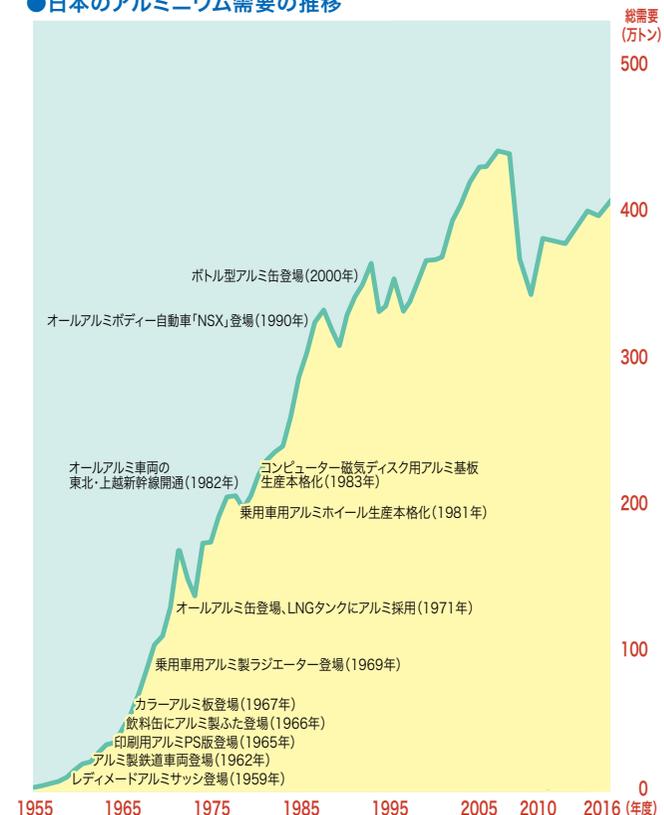
### アルミニウムの歴史

1782年	フランスの化学者 A.L. ラボウジエ	明ばん石(ばん土、今日のアルミナ)は金属の酸化物である可能性が大きいという説を発表、これをアルミーヌ(Alumine)と命名
1807年	イギリスの電気化学者 H.デービー	明ばん石を電気化学的な方法で分離を試み、金属アルミニウムの存在を確認、アルミアム(Alumium)と命名 この後、呼称はアルミナム(Aluminum)、アルミニウム(Aluminium)と変わる(米国では現在でもアルミナムと呼ぶ)
1855年	フランスの化学者 H.E.SC. ドビル	化学還元法によりアルミニウム製錬を開始
1886年	アメリカのC.M.ホール	電解製錬法を発明
	フランスのP.L.T.エルー	ホールより数か月遅れて電解製錬法を発明 *これにより電解製錬法(ホール・エルー法)確立
1887年	オーストリアのK.J.バイヤー	湿式アルカリ法によるアルミナ製造法を発明。これにより、ホール・エルー法とあわせて、現在のボーキサイトからアルミニウムまでの製造法が確立された
1929(昭和4)年	アルマイト処理の発明(日本)	
1934(昭和9)年	日本でのアルミニウム製錬開始	
1936(昭和11)年	超々ジュラルミンを開発(日本)	
1959(昭和34)年	レディメードアルミサッシ登場(日本)	
1969(昭和44)年	総需要100万トン突破(日本)	
1971(昭和46)年	オールアルミ缶登場(日本)	
1990(平成2)年	オールアルミボディー自動車「NSX」登場(日本)	
1996(平成8)年	総需要400万トン突破(日本)	
2000(平成12)年	ボトル型アルミ缶登場	

### 日本のアルミ需要は年間400万トン

日本では、1894(明治27)年に初めてのアルミニウム製品が作られました。その後、1934(昭和9)年には国内初のアルミニウム製錬が行われました。第二次世界大戦中には、戦闘機や軍需用製品にも多く使われました。その後、戦後の復興とともに民間需要を伸ばし、高度経済成長期には製品需要が飛躍的に拡大しました。1970年代以降、国内のアルミニウム製錬業が撤退したものの、現在では年間400万トン規模の需要量を維持し、金属材料では鉄に次いで2番目に多くなっています。

#### ●日本のアルミニウム需要の推移



### 最も多いのは輸送機器向け

現在のアルミニウム総需要の内訳をみると、約4割が自動車や鉄道などの輸送機器向けとなっており、その他では建築向けや食品向けが多くなっています。



乗用車



鉄道車両



飲料缶

### 日本のアルミニウム産業の構造

日本では、使用するアルミ新地金の全てを輸入しており、年間200万トン近くのアルミ新地金をオーストラリアやロシア、アラブ首長国連邦などから輸入しています。日本におけるアルミニウム産業には、アル

ミニウム地金製造業(1次製錬、2次製錬)、アルミ板材、押出材、箔などを製造する圧延業、鍛造・鋳造・ダイカスト業、製品(電線、建材、飲料缶など)製造業、商社などの会社が含まれます。

# わずか 3%

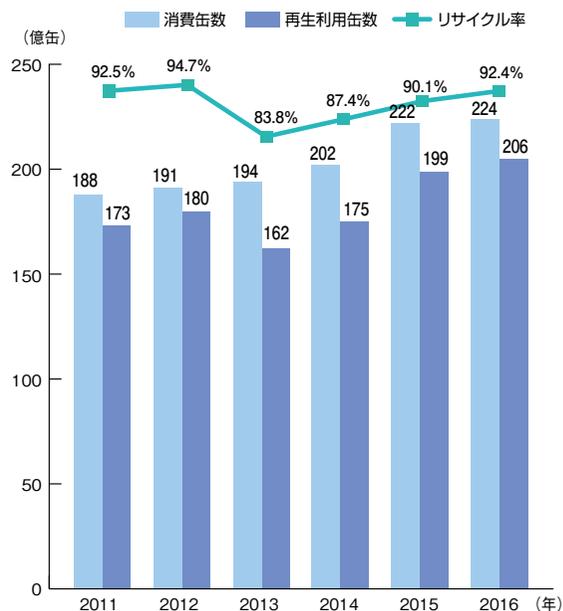
## 少ないエネルギーで再生できる循環型金属

アルミニウムをリサイクルする時に必要なエネルギーは、アルミ新地金を製造する時に比べてわずか3%で済みます。またリサイクルしたアルミ再生地金は新地金とほとんど同じ品質となり、資源の有効利用が図れます。日本国内には、アルミ需要7年分のアルミ製品が都市鉱山として備蓄されていると言われており、今後もリサイクルの拡大が期待されます。

### リサイクルが進むアルミ缶

アルミ製品の中でも、とくにリサイクルが進んでいるのが飲料缶です。循環型容器としてのアルミ缶は、リサイクルによって省エネルギーに大きく寄与するうえ、アルミ缶からアルミ缶へ繰り返しリサイクル(CAN TO CANリサイクル)ができるという特長を持っています。飲料用アルミ缶のリサイクルは以前から、自治体の分別収集や集団回収、拠点回収などによって進められており、リサイクル率は約90%に達しています。

#### ●アルミ缶リサイクル率の推移



注: リサイクル率は、消費量に対する再生利用重量の割合です

# アルミニウムの 特 性

私たちの暮らしのなかで活躍する身近な製品から、社会のさまざまな分野にいたるまで活躍のフィールドを広げているアルミニウム。これはアルミニウムの持つ優れた特性が、多くの用途や目的に合わせてうまく利用されているからにほかなりません。ここにアルミニウムが持つさまざまな特性を紹介します。

# アルミニウムの特性

材料へのニーズが多様化し、いっそう高度になる今日では、アルミニウムもまた従来よく知られている特性にとどまらず、新たな機能を付加して、先端分野で活躍しています。

## ● アルミニウムの物理的性質

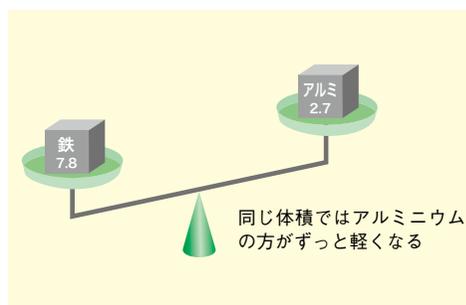
● 室温における純アルミニウム（99.996%）の性質

項目	数 値	
	CGS系	SI単位系
原子量	26.98	
原子番号	13	
結晶構造	面心立方	
格子定数	4.0496×10 <sup>-8</sup> cm	
密度	2.70g/cm <sup>3</sup>	
線膨張係数	23.7×10 <sup>-6</sup> /deg	23.7×10 <sup>-6</sup> /k
融点	660.4℃	
融解熱	94.6cal/g	10.7KJ/mol
沸点	2470℃	
蒸発熱	2576cal/g	291KJ/mol
比熱	0.215cal/(g·deg)	24.3J/(K·mol)
熱伝導率	0.566cal/(cm·S·deg)	237W/(m·K)
電気伝導率	37.66m/(Ω·mm <sup>2</sup> )	37.66Sm/mm <sup>2</sup>
比抵抗	0.02655Ω·mm <sup>2</sup> /m	
抵抗の温度係数	4.2×10 <sup>-3</sup>	
電気化学当量	0.3354g/(A·h)	
磁化率	0.61×10 <sup>-6</sup> cm <sup>3</sup> /g	
ヤング率	6.97×10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	68.3×10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
剛性率	2.60×10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	25.5×10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
ポアソン比	0.34	

## ● アルミニウムの特性

### (1) 軽い

アルミニウムの工業材料としての最大の長は「軽い」ということです。アルミニウムの比重は2.7。鉄（7.8）や銅（8.9）と比べると約3分の1です。軽量化による性能向上が時代のニーズとなっているいま、とくに自動車、鉄道車両、航空機、船舶、コンテナなどの輸送分野で多くのアルミニウムが使われています。また軽さを生かして、各種機械の高速回転部品やしゅう動部品の作動効率を高めたり、装置の大型化による重量増加を抑えるなど、さまざまな効果をもたらしています。



新幹線N700系



スポーツカー

### (2) 強い

アルミニウムは比強度（単位重量当りの強度）が大きいため、輸送機器や建築物などの構造材料として多く使用されています。

純アルミニウムの引張強さはあまり大きくありませんが、これにマグネシウム、マンガン、銅、けい素、亜鉛などを添加して合金にした

り、圧延などの加工や、熱処理を施したりして、強度を高くすることができます。最近では、リチウムを添加した低密度、高剛性の合金が開発され、航空機や大型構造物用の材料として注目されています。



### 発泡アルミニウム

アルミニウムの最大の特長である「軽さ」を飛躍的に高め、さらに従来にない機能を発揮するのが発泡アルミニウムです。これはアルミニウムの中に無数の独立気泡を発生させたもので、比重はアルミニウムの約10分の1、鉄の約30分の1という超軽量を誇っています。

また加工性、断熱性、耐火性に優れているほか、電磁波シールド効果も高いのが特長です。用途は防音材や吸音材、各種建材、構造部材に用いられるサンドイッチパネルの芯材、電磁波シールド材などがあげられます。



発泡アルミニウム

### (3) 耐食性がよい

アルミニウムは空気中では、ち密で安定な酸化皮膜を生成し、この皮膜が腐食を自然に防止します（皮膜の自己修復作用）。

耐食性をさらに高め、強度も兼ね備えたアルミ合金は各種の用途に採用されており、とくに建築、自動車、船舶、海洋開発などの分野ではこの特性が大いに活かされています。



転落防止柵

### (4) 磁気を帯びない

アルミニウムは非磁性体で、磁場に影響されません。この特長は、アルミニウムの他の特性である、軽い、耐食性に優れている、加工性がよい、などと組み合わせることによって、さまざまな製品に生かされます。おもな製品としては、計測機器や電子医療機器、メカトロニクス機器などがあげられますが、さらにはリニアモーターカーや超電導関連機器にいたるまで、その用途が広がっています。



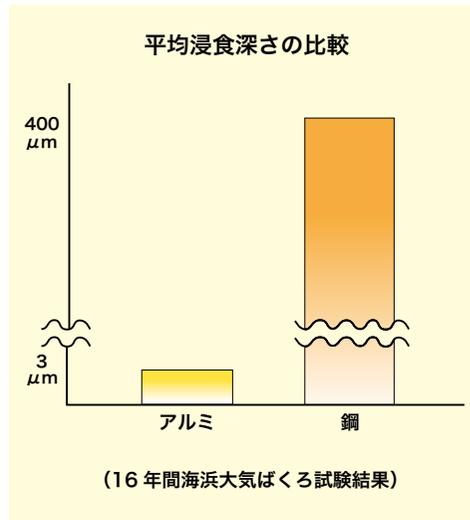
航空計器

### (5) 電気をよく通す

アルミニウムは導電体としてきわめて経済的な金属です。電気伝導率は銅の約60%ですが、比重が約1/3であり、そのため同じ重さの銅に比べて2倍もの電流を通すことができます。現在では高電圧の送電線に使用されるとともに、導体（板・管）などに広く使われており、エネルギー利用、エレクトロニクス分野での需要が大きく伸びてきています。最近では自動車のワイヤーハーネスにも使用され始めています。



送電線



### (6) 熱をよく伝える

アルミニウムの熱伝導率は鉄の約3倍。熱をよく伝えるということは急速に冷えるという性質にもなります。そのため冷暖房装置、エンジン部品、各種の熱交換器、ソーラーコレクター、また、飲料缶などにもこの特性が生かされています。最近の高密度化した機器、システムの過熱防止のための放熱フィンやヒートシンクとしても使われています。

また、この性質を利用して、プラスチックやゴムの成形用金型などの新分野にもアルミニウムが使われます。



自動車用熱交換器

### (7) 低温に強い

アルミニウムは鉄鋼などと違って液体窒素（マイナス196℃）や液体酸素（マイナス183℃）の極低温下でも脆性破壊がなく靱性が大きいのが特長です。低温プラントやLNG（マイナス162℃）船のタンク材として使われているうえ、宇宙開発やバイオテクノロジー、極低温の超電導関連といった最先端分野でもこの特性が脚光を浴びています。



LNG船

### (8) 毒性がない

アルミニウムは、無害・無臭で衛生的。万々なんらかの化学作用で金属が溶出したり化合物をつくったとしても、重金属のように人体を害したり土壌をいためたりしません。この特性を生かして、食品や医薬品の包装、飲料缶、医療機器および家庭用器物などで広く使用されています。



薬品包装

### 包装容器の多様化を支えるアルミニウム箔

食品や医薬品の包装に、多くのアルミ箔が使われています。

紙のように薄いアルミ箔は、毒性がなく腐食しにくい。ためたいへん衛生的で、また他材料と接合しやすいので、フィルムと貼り合わせて複合材にすることができます。表面が美しく、しかも気密性が高いため食品や医薬品の品質を守ることができます。



アルミ箔製品

### (9) 光や熱を反射する

よく磨いたアルミニウムは、赤外線や紫外線などの光線、通信機器から発する電磁波、さらに各種熱線をよく反射します。純度の高いアルミニウムほどこの性質は優れており、純度99.8%以上のアルミニウムは放射エネルギーの90%以上を反射します。この特性を生かしたのが暖房器の反射板、照明器具、および宇宙服などで、アルミニウムに鏡面加工を施してこの特性をいっそう高め、ポリゴンミラーをはじめとした光エレクトロニクス製品にもよく使われています。



ポリゴンミラー

### (10) 表面処理しやすい

アルミニウムは素地のままでも美しい金属ですが、陽極酸化皮膜処理（アルマイト処理）などさまざまな表面処理を施すことによってより美しくなり、また表面を硬くしたり、防食効果を高めたりすることができます。陽極酸化皮膜処理の際に染色や電解着色などによってアルミニウムに多彩な色をつけることが可能であり、電気製品外筐、建築外装や包装材などデザイン性が強く求められる分野に最適の材料です。



エクステリア

### DVDにもアルミニウム

CDやDVDにはアルミニウムが活躍しています。これは蒸着やスパッタリングといった方法で、ディスクの表面にアルミニウムの膜を生成させ、アルミニウムの持つ光の反射性などの特性を生かしたものです。



DVD

### (11) 鋳造しやすい

アルミニウムは融点が低く、溶けた状態でも表面が酸化皮膜で覆われガスを吸収しにくいので、湯流れがよい性質を持っています。このため薄肉の鋳物や、複雑な形状の鋳物をつくることができます。アルミ鋳造品はピストン、エンジンブロック、ホイールなどの自動車部品、また各種産業機械部品など幅広い分野で使用されています。



自動車エンジンブロック

### (12) 加工性がよい

アルミニウムは塑性加工がしやすく、さまざまな形状に成形することが可能です。たとえば、紙のように薄い箔や、複雑な形状の押出型材を容易に製造することができることから、きわめて広い用途で使用されています。

また、できあがった製品素材をさらに成形加工したり、製品の表面などに精密加工を施したりすることも比較的容易です。また切削加工性にも優れており、金型などの工具類や機械部品に使われています。



押出型材

### (13) 接合しやすい

溶接、ろう付け、リベット接合、接着など、さまざまな方法で容易に信頼性の高い継手が得られます。これらの接合技術の進歩はめざましく、近年では摩擦攪拌溶接やレーザービーム溶接が車両をはじめとする構造部材の接合に活用されています。



鉄道車両

## (14) 真空特性がよい

アルミニウムを真空装置の材料に使ったとき、ガス放出率が非常に小さく真空到達性能が他の材料に比べてたいへん優れています。

そこで、各種の高真空ポンプや配管、高真空半導体装置、理化学実験装置などに活用されています。



真空チャンバー（大型放射光施設SPRING-8）

## (15) 再生しやすい

アルミニウムは他の金属と比べると腐食しにくく、融点が低いため、使用後のアルミ製品を溶かして、簡単に再生することができます。しかも二次地金（再生地金）をつくるのに必要なエネルギーは、新地金をつくる場合と比べてわずか3%で済むといわれています。

また品質的にも、新地金とほとんど変わらないものが製造できるため、たいへん経済的な材料だといえます。

とくに飲料缶では、空き缶を回収し再資源化しようというリサイクル運動が全国各地で行われており、回収率（90%以上）も年々高まっています。省資源・省エネルギーを果たすとともに、地球環境保護の推進にも大きな役割を担っています。



アルミ缶スクラップ

# アルミニウムの 製 造

優れた特性を持つアルミニウムが、私たちの暮らしや社会の中でさまざまな形となって登場するまでには、幾多の工程を経る必要があります。製造工程の一つひとつ、細部にいたるまで、品質の向上をめざした技術の向上が図られており、高い製造技術から高品質なアルミ製品が生まれています。

# アルミニウムの製造工程

大きく分けて3つの工程を経て、アルミ製品素材ができます。

## ボーキサイトからアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) へ

採掘したアルミニウムの原料であるボーキサイトを、か性ソーダ液で溶かしてアルミン酸ソーダ液をつくり、そこからアルミナ分を抽出します。

## アルミナからアルミニウム (Al) へ

アルミナを溶融氷晶石の中で電気分解することによりアルミ地金を製造します。

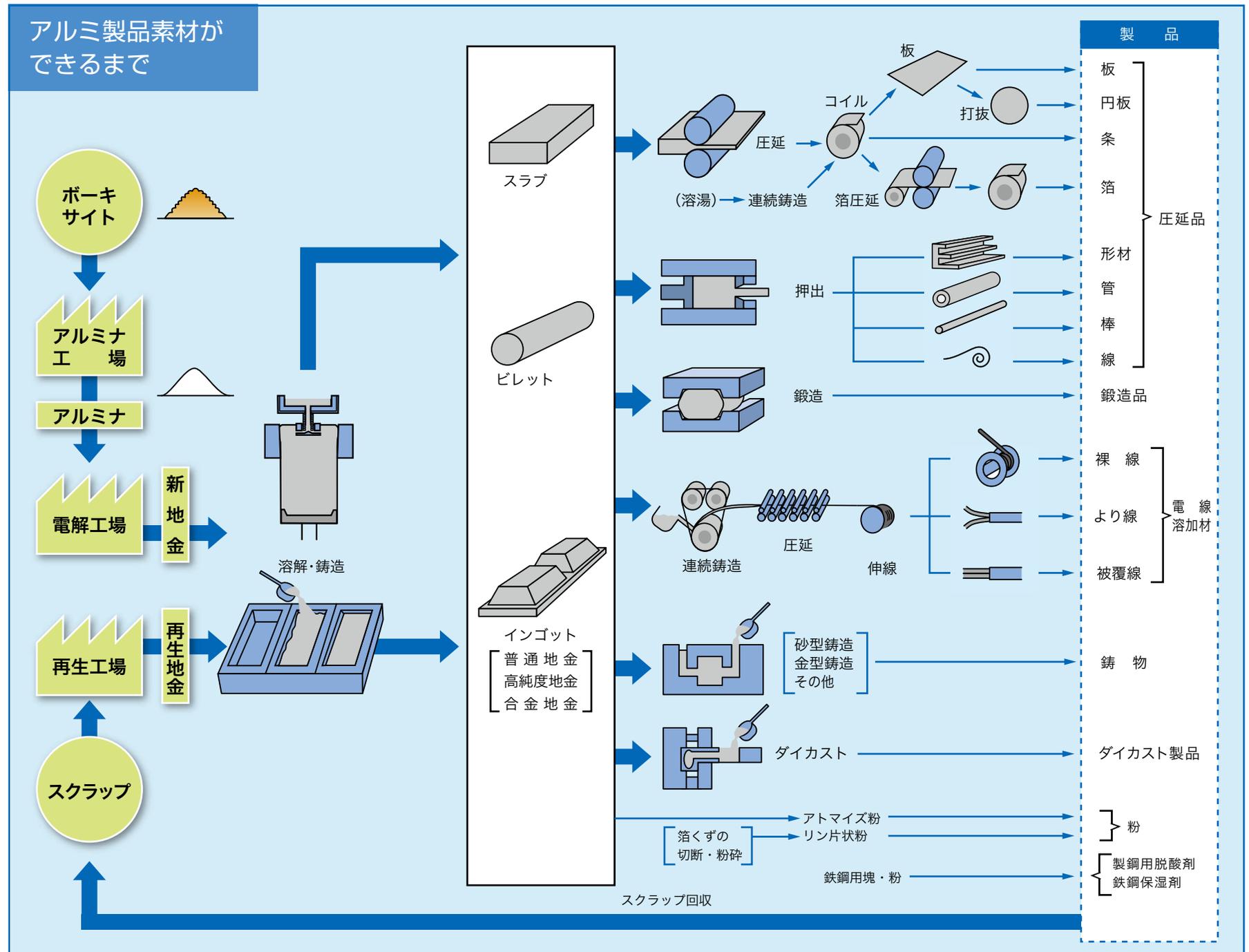
## アルミニウム (地金) から製品素材へ

地金を原材料として圧延・押出・鍛造・铸造などの加工を行い、いろいろな形の製品素材に成形します。



電解炉

## アルミ製品素材ができるまで



## ● ボーキサイトからアルミナへ

アルミニウムの原料は、ボーキサイトと呼ばれる赤褐色の鉱石で、これから水酸化アルミニウム、アルミナなどになり、最後に銀色のアルミニウムがとられます。

現在、アルミナは1887年にオーストリアの化学者カール・バイヤーが発明したバイヤー法（湿式アルカリ法）によって製造されています。その工程はつぎのとおりです。

粉碎されたボーキサイトにか性ソーダなど

を混合し加圧加熱すると、ボーキサイト中のアルミナ分が溶け出していきます。この中から、溶けない不純物を除去したあと攪拌、冷却すると、水酸化アルミニウムの結晶が析出していきます。この結晶を真空ろ過機により取り出し、約1000°C前後の温度で焼成すると、純白のアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が誕生し、つぎにアルミニウムの電解製錬工程へと送られます。

## ● 水酸化アルミニウムとアルミナ

水酸化アルミニウムとアルミナは白い粉末で、アルミニウムの原料としてだけでなく化学工学、窯業などさまざまな用途に使用されています。

水酸化アルミニウムは結晶水を含み、約200°Cから脱水分解を開始する性質を持ち、また酸やアルカリに溶けやすいなどの特徴があることから難燃化剤や工業用化学薬品の原料として広く使われています。またアルミナ

は、水酸化アルミニウムを焼成してつくられるもので、たいへん硬い、融点が2050°Cと高い、電気絶縁抵抗が大きい、化学的に安定しているなどの特徴があり、研磨材や耐火物、セラミックスなどの原料として使われています。このほかにも、身近な生活の中でのいろいろな形で使われており、そのおもなものは次のとおりです。

- 飲料水：水道水の濁り除去用無機凝集剤（水酸化アルミニウム）
- 液晶テレビ：画面ガラス部の原料（アルミナ・ローソーダアルミナ）
- 洗剤：無リン洗剤用合成ゼオライトの原料（水酸化アルミニウム）
- キッチン：人造大理石の原料（高白色水酸化アルミニウム）
- 自動車：スパークプラグの碍子部の原料（ローソーダアルミナ）
- 電子機器：ICパッケージの原料（ローソーダアルミナ）

水酸化アルミニウムやアルミナはアルミニウム製錬以外の用途が年々広がっています。

### アルミナの用途

アルミナは化学的に安定で、融点が高い、機械的強度が大きい、電気絶縁抵抗が大きいなど、多くの特性を持ち、セラミックス材料や研磨材、耐火物原料など幅広い分野に使用されています。なかでもファインセラミックスは従来のセラミックスとは



ファインセラミックス部品

異なり不純物がきわめて少ない天然材料を精製した原料（アルミナ、窒化アルミ、シリコニア、炭化けい素など）を用いたもので、品質の均一化、高純度化により抜群の特性を發揮します。IC基板やICパッケージ、コンデンサー、コンピューター配線基板、切削・研削工具、糸道、スパークプラグ、医療用材料、人工骨、人工歯根などに使用されています。

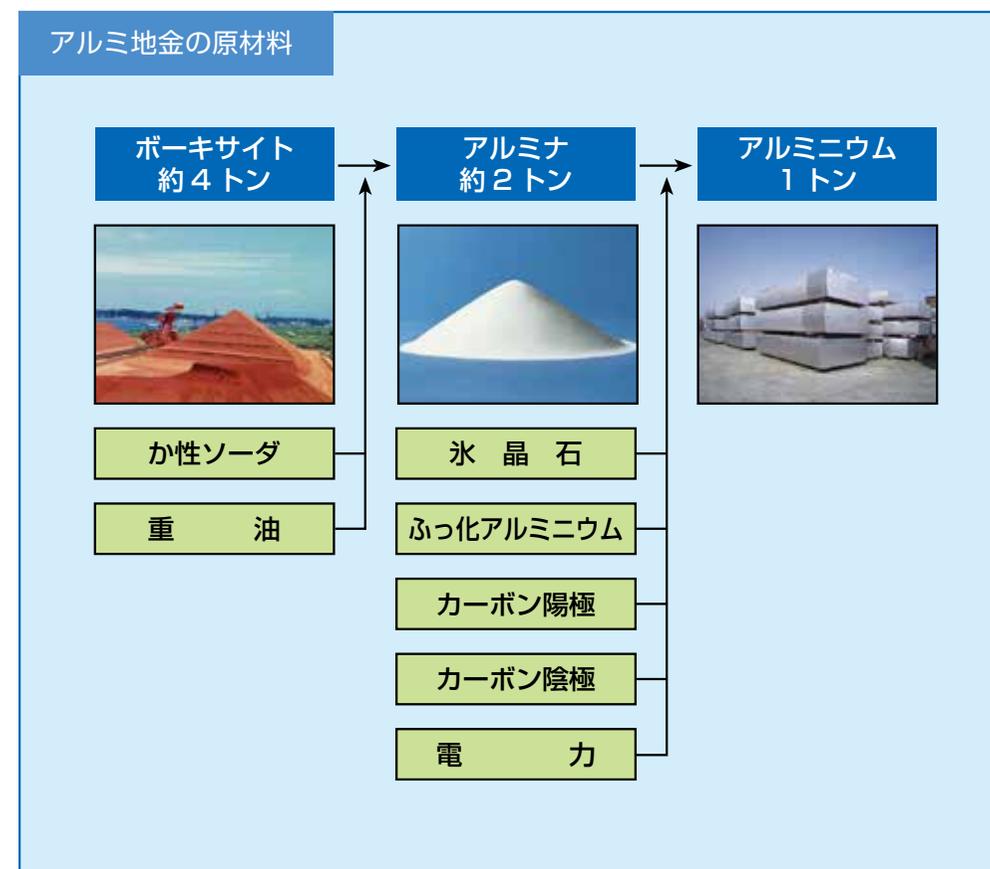
## ● アルミナからアルミニウムへ

現在最も経済的に優れた工業的手法として、世界中で採用されているのがホール・エール法（1886年発明）と呼ばれる電気分解による製錬法です。その工程は以下のとおりです。

まず、アルミニウムの酸化物であるアルミナを、氷晶石やふっ化アルミニウムを高温で溶かしたものに混合します。これはアルミナの融点が高いため、電気分解が可能な温度（約

1000°C）で溶解させるためです。これを電解炉に入れ、電気分解によって還元すると、アルミナはアルミニウムと酸素とに分解され、溶けたアルミニウムは、電解炉の底にたまりま

す。この溶けたアルミニウムを取り出し、保持炉に移して必要な成分・純度に調整し、用途に応じてインゴットあるいはスラブ、ビレットに鑄造されます。



# アルミ地金および加工用鋳塊

アルミ地金は、純度や成分によって普通純度地金、高純度地金、合金地金に分類されます。また、形状や用途からはインゴット（一般原材料用鋳塊）、スラブ（圧延用に調整された鋳塊）、ビレット（押出用に調整された鋳塊）などに区別できます。

## ● 普通純度地金

一般に純度99.0～99.9%のものを指し、アルミ加工メーカーが溶解するのに使いやすいような形状になっています。

通常の製品素材（板材、押出材、鋳造品、鍛造品、線材、箔など）はこの地金を用いて製造されています。

## ● 高純度地金

普通純度地金よりも純度が高く、純度99.95%以上のものをいいます。この地金は、いったん電気分解して取り出したアルミニウムを、もう一度三層式電解法、または偏析法などで精製してつくります。

## ● 合金地金

合金地金は、アルミニウムにあらかじめ何種類かの金属元素を添加して、種々の合金にしてある地金で、加工メーカーでは、これをそのまま再溶解して鋳造品などの製造に用います。



高純度アルミニウム

## 高純度アルミニウム

純アルミニウム（純度99.0～99.9%）中の鉄、けい素などの不純物を取り除き、純度99.95%以上に高めたものが、高純度アルミニウムです。これは不純物が少ないため反射率、導電性、展伸性、耐食性に優れ、また均一な酸化皮膜の生成が可能という特長をもっています。

代表的な用途としてパソコンに多用されるアルミ電解コンデンサーがあります。これはアルミ箔にち密なエッチングが施され、酸化皮膜を誘電体として形成されるため、エッチング性や化成皮膜処理性に優れた高純度アルミ箔が不可欠となっています。また、純度を99.999%（5N）まで高めた高純度アルミニウムはスパッタリングターゲット材や蒸着材などエレクトロニクス分野を中心に使用されています。



スパッタリングターゲット材

## ● インゴット

加工メーカーが目的に応じて自由に溶解して使えるような形状寸法にしたアルミニウム塊の名称です。普通純度地金、高純度地金、合金地金も一般にインゴットの形で取引されます。普通に使われるインゴット（地金）は、重量25kgにつくられており、他に展伸加工工場向けでは500kgと700kgなどもあります。

（欧米では、ビレット、スラブも含めてインゴットと呼ぶ場合があります。）



インゴット

## ● スラブ（圧延用鋳塊）

大型の直方体の形状につくられた圧延用鋳塊の名称で、加熱して高温で板状に圧延します。スラブはビレットと同じく、あらかじめ成分を調整して半連続鋳造法でつくられ、その重量は目的および圧延設備の仕様などに応じて決められます。一般には厚さ200～600mm程度で、おおよそ2～28トンの重量のものとなっています。最近のスラブ鋳造技術としては超音波振動や電磁振動などを利用した結晶粒の微細化が検討され、実用化されています。



スラブ

## ● ビレット（押出用鋳塊）

ビレットはおもに円柱形に鋳造し、押出加工用に切断した塊の名称で、押出機にかけて高温で押し出し、管、棒、あるいは種々の断面をした型材をつくるためのものです。

ビレットはアルミニウム、または種々のアルミ合金として成分を調整し、半連続鋳造法によって直径150～600mmの円柱形につくられます。これを押出機の仕様にあわせて長さ100～1,500mmに切断します。



ビレット

# アルミニウム合金

アルミニウムのうち純度99%以上のものを純アルミニウムと呼び、また種々の元素を添加して強度を高めるなどの性質を改善したものをアルミニウム合金と呼んでいます。アルミニウム合金は、最終製品の要求や用途に必要な性質によって、展伸材用合金と鋳物用合金に大別され、また、それぞれ非熱処理型合金と熱処理型合金として分類できます。

## 1. 展伸材用合金

展伸材用合金は、圧延加工や押出加工によって、板、箔、型材、管、棒などのいろいろな形状に加工される合金で、鍛造品もこれに含まれます。

アルミニウム合金のおもな性質は、添加元素の種類と添加量によって影響されます。これらは次のような合金系に区分され、合金系ごとに類似した性質をもちます。したがって、材料の選択にあたっては、使用目的に応じて最適な性質をもつ合金を選ぶことが必要です。

### ●純アルミニウム(1000系アルミニウム)

1000番台の表示は工業用純アルミニウムを示し、1100、1200が代表的です。いずれも微量のFeとSiを特性に応じて調整した純度99%以上の純アルミニウム系の材料です。ただし、1100だけはアルマイトとして知られている陽極酸化処理後の光沢をよくするために微量のCuが添加されています。1050、1070、1085の下二桁の数字はアルミニウムの純度を表し、それぞれ純度99.50、99.70、99.85%以上の純アルミニウム材料であることを示します。この系の材料は加工性、耐食性、溶接性および電気や熱の伝導性に優れており、家庭用品、日用品、電気器具、送配電用材料、放熱材などに多く使用されています。しかし、強度が低い材料としては適していません。

### ●Al-Cu系合金(2000系アルミニウム合金)

ジュラルミン、超ジュラルミンの名称で知られる2017、2024合金が代表的なもので、鋼材に匹敵する強度があり、構造用材や鍛造材として使用されています。しかし、比較的多くのCuを添加しているため耐食性に劣り、厳しい腐食環境にさらされる場合には十分な防食処理を必要とします。航空機用材料として表面に耐食性の良い純アルミニウムの板を重ね合わせて圧延加工した合せ板として使用されることもあります。

### ●Al-Mn系合金(3000系アルミニウム合金)

代表的なものは3003合金で、Mnの添加によって純アルミニウムの加工性、耐食性を低下させることなく、強度を少し増加させたものです。器物、建材、容器などに広い用途があります。3003に相当する合金にMgを1%程度添加した3004、3104合金は、さらに強度を高めることができるので、カラーアルミ、屋根板、アルミ缶などに多く使用されています。

### ●Al-Si系合金(4000系アルミニウム合金)

この系の合金は、比較的多くのSiを添加した合金で溶融温度が低いので、主としてブレージングろう材、溶接ワイヤとして使用されています。また、熱膨張係数が低く耐熱性、耐摩耗性に優れており、鍛造ピストン材料として用いられている4032合金もあります。

### ●Al-Mg系合金(5000系アルミニウム合金)

この系の合金は、耐食性や溶接性が良いことから比較の種類が多く、広い用途があります。5110A(5N01)や5005合金のようにMg添加量の少ないものは、装飾用材、建材、器物用材に、5052合金のように中程度のMg添加量の場合は強度も中程度で自動車ホイール等に使われます。Mg添加量が約4.5~5%の5182合金や5083合金はこの系で最も高い強度を持ち、5182合金は飲料缶蓋材、5083合金は溶接構造材料として船舶、LNGタンク、大型構造物などに使われます。

### ●Al-Mg-Si系合金(6000系アルミニウム合金)

この系の合金は、強度、耐食性とも良好で構造用材として多用されています。アルミサッシに多量に使用されている6063合金および鉄道車両、自動車部品に使用されている6005C(6N01)合金は、押出加工性に優れた複雑な断面形状の型材が得られます。また、少量のCuを添加して構造用鋼材に相当する耐力を有する6061合金など多くの種類があります。

### ●Al-Zn-Mg系合金(7000系アルミニウム合金)

この系の合金は、Cuを含まない溶接構造用合金とCuを添加したアルミニウム合金のなかで最も高い強度をもつ合金とに分類できます。Al-Zn-Mg-Cu系合金の代表的なものは、日本で開発された超々ジュラルミンの呼称で知られる7075合金で、航空機、スポーツ用品類に使用されています。Cuを含まないAl-Zn-Mg系合金の代表的なものに、7204(7N01)、7003合金があります。比較的高い強度があり、しかも溶接部の強度は常温に放置するだけで母材に近い強度まで回復するため溶接構造用材料として鉄道車両などに使用されています。

### ●その他の合金(8000系アルミニウム合金)

これまでの合金系に属さないその他の材料で、急冷凝固粉末冶金合金や低密度・高剛性材として開発されたAl-Li系合金などがあります。日本では、Feを添加することによって強度と圧延加工性を付与したアルミ箔用合金8021、8079が、電気通信用や包装用として使用されています。

## 2. 鋳物用合金

鋳物用アルミニウム合金は、各種鋳造法を利用して鋳物をつくるための合金ですが、適用する鋳造法によって要求特性が異なるので規格では鋳造法別に分類規定されています。

鋳物用アルミニウム合金には、砂型・金型鋳物用合金とダイカスト用合金の二つの系統があります。

### (1)砂型・金型鋳物用合金

後述のダイカストとは異なり、鑄型に溶湯(溶解したアルミニウム)を鑄込む際に特別な圧力を加えないため、重力鋳造法と呼ばれています。合金の種類によって鑄造性、強度、耐摩耗性、高温強さなどの特性が異なるため、その特性を生かす限られた用途に使用されています。

#### ●Al-Cu系合金(AC1B)

鋳物用アルミニウム合金の中で韌性に優れた合金であり、切削性がよく、電気伝導性に優れているため架線用導電部品、自転車用部品、航空機用油圧部品等に使用されています。しかし、耐食性が劣るため腐食環境での使用は適していません。

#### ●Al-Cu-Si系合金(AC2A、AC2B)

Al-Cu系の合金よりもCuの添加量を減らして韌性を若干犠牲にしても、Siを添加することによって鑄造性の改善を図った合金であり、自動車用エンジン部品などに多く使用されています。

#### ●Al-Si系合金(AC3A)

この合金は、Siだけを合金元素として添加したもので、鑄造性に優れています。強度は高くありませんが伸びは大きく、熱膨張係数が小さく、耐食性もよいという特長があります。したがって、強度はあまり必要とせず、薄肉で複雑な形状や模様住宅エクステリア製品やカーテンウォールなどに適しています。

#### ●Al-Si-Mg系合金(AC4A、AC4C、AC4CH)

この系の合金は、前記のAl-Si系合金のSi量を減らし、Mgを少量加えた合金であり、優れた鑄造性を維持したまま機械的性質を改善した合金です。おもな用途は、エンジン部品、車両部品、船舶用部品などがあげられます。AC4CH合金はAC4C合金の韌性の向上を意図して不純物の量を厳しく規制したものであり、自動車用ホイールなど保安要求が高い部品に多く使用されています。

#### ●Al-Si-Cu系合金(AC4B)

この合金は、Al-Si系合金のSi量を減らして、Cuを添加した合金です。耐食性はCuを含有するため劣りますが、鑄造性に優れ強度も高いので、自動車用、電気機器用、産業機械用部品など広い分野で利用されています。

#### ●Al-Si-Cu-Mg系合金(AC4D)

この合金は、Al-Si-Mg系AC4C合金のSi量を若干低くして、Cuを添加した合金です。鑄造時の引け特性に優れているため耐圧性、耐熱性があり、シリンダーブロックやクランクケースなどエンジン部品や油圧機器部品に使用されています。

#### ●Al-Cu-Ni-Mg系合金(AC5A)

この合金は、高温下での使用でも硬さを保つように改善した合金であり、耐食性は劣りますが切削性や耐摩耗性に優れています。従来はエンジン用部品として使用されていましたが、現在は、切削性と耐摩耗性に注目され、精密加工を要するしゅう動部品などに使用されています。

#### ●Al-Mg系合金(AC7A)

この合金は、代表的な耐食性合金で強さも伸びも高く、切削性に優れています。しかし合金の化学組成から熱処理によって強度を向上させることはできません。また、溶湯は酸化やガスを吸収しやすいため鑄造性が悪いという欠点があります。

おもな用途は、架線金具、船舶用品、建築金具、事務機器部品などです。

#### ●Al-Si-Ni-Cu-Mg系合金(AC8A、AC8B、AC8C)

この系の合金は、Al-Cu-Ni-Mg系合金のピストンとしての不十分な特性を改善するため、Cu量を半減させSi添加量を大幅に増やして熱膨張係数を小さくし、耐摩耗性を高めた剛性の高い合金です。エンジン用ピストンなどに使用されています。

#### ●Al-Si-Cu-Mg-Ni系合金(AC9A、AC9B)

この系の合金は、Si量が最も多く、AC9A合金は23%Si、AC9B合金では19%Siを含有しています。前記のAl-Si-Ni-Cu-Mg系合金よりもさらに熱膨張係数を小さくした合金であり、高い剛性と耐摩耗性があることから2サイクルエンジン用ピストンやディーゼルエンジン用ピストンなどに使用されています。

## (2)ダイカスト用合金

ダイカスト用アルミニウム合金は、加圧力を作用させて金型に高速で溶湯(溶解したアルミニウム)を注入させるのに都合のよいもの選ばれています。複雑な形状の部品を一工程でニアネットシェイプ(最終製品に近い形状)につくるため、溶湯には高い流動性が求められ、また、金型への焼付きを予防するため、砂型・金型用合金では不純物とされる少量のFeを故意に添加しています。

なお、ダイカストは溶湯を高速で金型内へ射出注入するため空気を巻き込みやすく、つくられた铸件に高温加熱を行うと巻込まれた空気が膨張してブリストアと呼ばれる内部欠陥を発生するため、通常は熱処理をしないで使用されています。

ダイカスト用金型は冷却能が大きく、速い冷却速度で成形(急冷凝固)されることによって微細な組織が得られ、高い機械的性質の製品をつくることができます。また、急冷凝固は機械的性質に及ぼす不純物の影響を受け難くしているため、多くの再生地金が使用されます。

### ●Al-Si系合金(ADC1)

この合金は、前述の砂型・金型用合金のAC3Aと同じような組成の合金であり、铸造性と耐食性に優れ、高い強度を要求しない薄肉・複雑形状の铸件に適しています。

### ●Al-Si-Mg系合金(ADC3)

この合金は、砂型・金型用合金のAC4Aと同類の合金であり、機械的性質と耐食性がよいため自動車や自転車用部品として使用されることがあります。

### ●Al-Mg系合金(ADC5、ADC6)

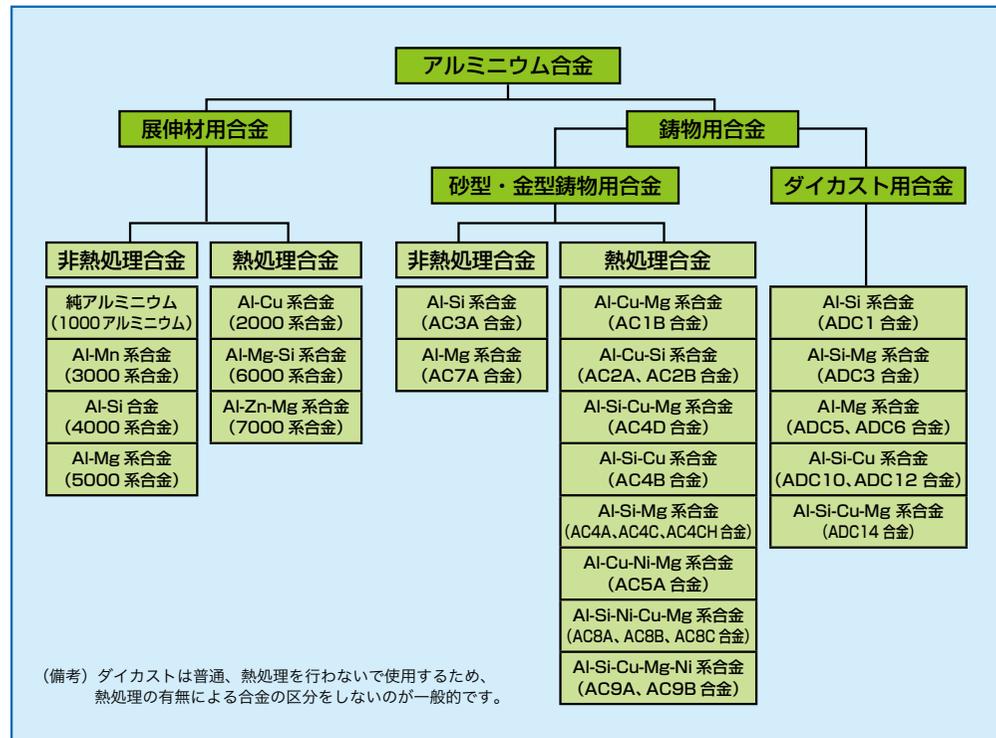
この合金は、砂型・金型用合金のAC7Aと同じような組成の合金であり、適度な強度と伸びを有し、衝撃値が高く、耐食性もよいので、釣具や自動車の車体部品などに適しています。

### ●Al-Si-Cu系合金(ADC10、ADC12)

この系の合金は、砂型・金型用合金のAC4Bに相当する合金で、多量のSi添加で铸造性を改善し、Cuの添加で強度を高めた合金です。ダイカスト用合金の中で特性を総合して見た場合、铸造性に優れた高力合金として位置づけられており、その用途は広く、使用量も多くなっています。とくに自動車エンジン部品や電気機器部品におけるシェアが高くなっています。

### ●Al-Si-Cu-Mg系合金(ADC14)

この合金は、当初はエンジンブロックの軽量化を目的として開発されたもので、強度、耐摩耗性に優れ、熱膨張係数が小さいのが特長です。自動変速機用オイルポンプボディやハウジングクラッチなどに使用されています。



## アルミ合金記号の表し方

JIS規格では、個々のアルミニウム合金に番号を付けてその種類を区分しています。圧延用アルミニウム合金については、22か国・24団体の協定によって国際合金記号化制度がとられており、日本からは、日本アルミニウム協会がこの制度に参加しております。この合金記号は4桁の数字方式によって表され、合金を構成する添加元素の種類とその添加量および管理不純物元素の種類とその許容限界値の違いによって細かく区分されており、現在、四百数十種類のアルミニウムおよびアルミニウム合金が登録、管理されています。したがって、たとえばJIS規格の'A5052'合金とヨーロッパ規格の'EN AW-5052'合金の4桁の数字部分(5052)が同じであれば、合金の化学成分はまったく同じであることを表します。このようにアルミニウムの展伸材用合金は、他の金属材料では見られない国際性を備えた材料といえます。

一方、铸件用アルミニウム合金については、まだ展伸材用合金のような国際合金登録制度がとられていないため、その合金記号は各国それぞれです。

### ■展伸材用合金記号の例

1位	2位	3位	4位	5位	6位
A	5	0	5	2	P

1	工業用純アルミニウム	5	Al-Mg系合金
2	Al-Cu系合金	6	Al-Mg-Si系合金
3	Al-Mn系合金	7	Al-Zn-Mg系合金
4	Al-Si系合金	8	その他の合金

記号	意味	記号	意味
P (PS)	板、条、円板 (同左特殊級)	TWA	アーク溶接管
PC	合せ板	S (SS)	押出形材 (同左特殊級)
BE (BES)	押出棒 (同左特殊級)	FD	型打鍛造品
BD (BDS)	引抜棒 (同左特殊級)	FH	自由鍛造品
W (WS)	引抜線 (同左特殊級)	H	箔
TE (TES)	押出継目無管 (同左特殊級)	BY	追加棒
TD (TDS)	引抜継目無管 (同左特殊級)	WY	溶接ワイヤ
TW (TWS)	溶接管 (同左特殊級)		

#### 【第1位】

アルミニウムおよびアルミニウム合金を表す'A'で、JIS独自の接頭語です。第2位～第5位の4桁の数字は、国際登録合金番号です。

#### 【第2位】

純アルミニウムについては数字'1'、アルミニウム合金については主要添加元素によって左表のとおり数字'2'～'8'に区分します。

#### 【第3位】

数字'0'～'9'を用い、次に続く第4位および第5位の数字が同じ場合は、'0'は基本合金を表し、'1'～'9'まではその改良型合金を登録の順に付けます(たとえば、2024合金の改良型合金を2124、2224、2324合金と表します。)。なお、日本独自の合金は'N'を付けて表します。6N01合金は国際合金登録され6005Cという名前が付きしました。

#### 【第4位および第5位】

純アルミニウムについては、アルミニウムの純度小数点以下2桁(たとえば、1050は、純度99.50%Alを表します)、合金については、とくに意味はありません。

#### 【第6位】

4桁の数字に続いて1～3個のローマ字が付されますが、これは製造方法とも関係する材料の形状を表す記号であり、左表のような意味があります。

## 急冷凝固アルミ粉末冶金合金

溶解状態のアルミ合金を噴霧して急冷し、高濃度で均一な合金成分を含んだ粉末を利用して作られた合金です。この粉末を成形、加工して耐熱性、耐摩耗性、強度などに優れた材料が実現します。微細粉末製造技術と粉末成形技術の向上により、アルミ合金設計の自由度がいちだんと広がり、また多種の材料との複合化も容易になりました。さらに実際に使用される製品の最終形状に近いニアネットシェイプの成形が可能のため、加工コストの軽減が可能です。用途としては、航空機用部材や自動車用部材、家電・OA機器用部材などがあげられます。



シリンダーライナー

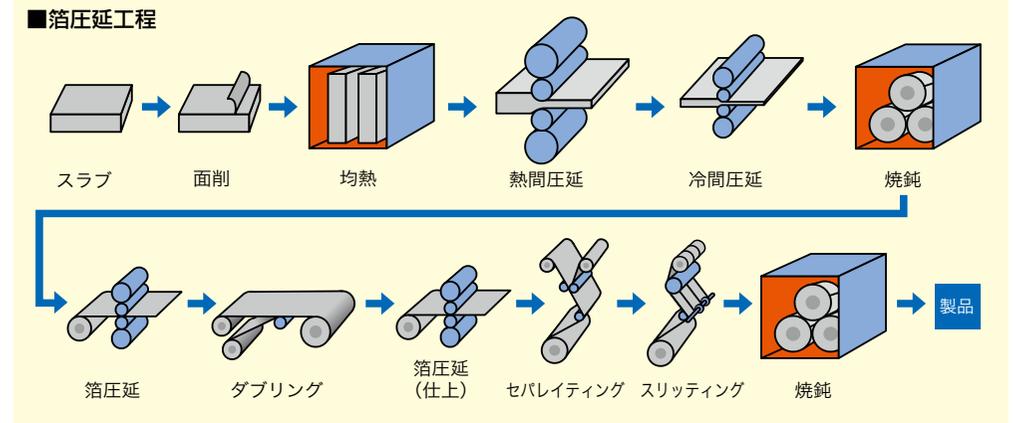
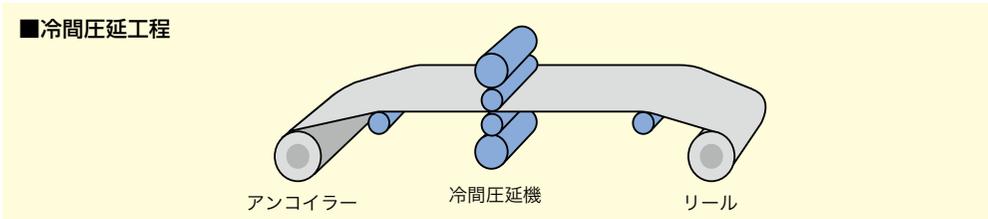
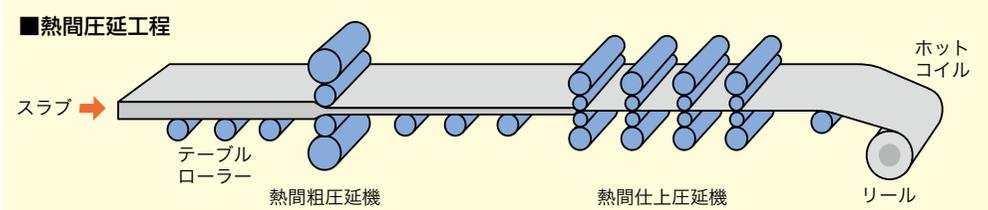
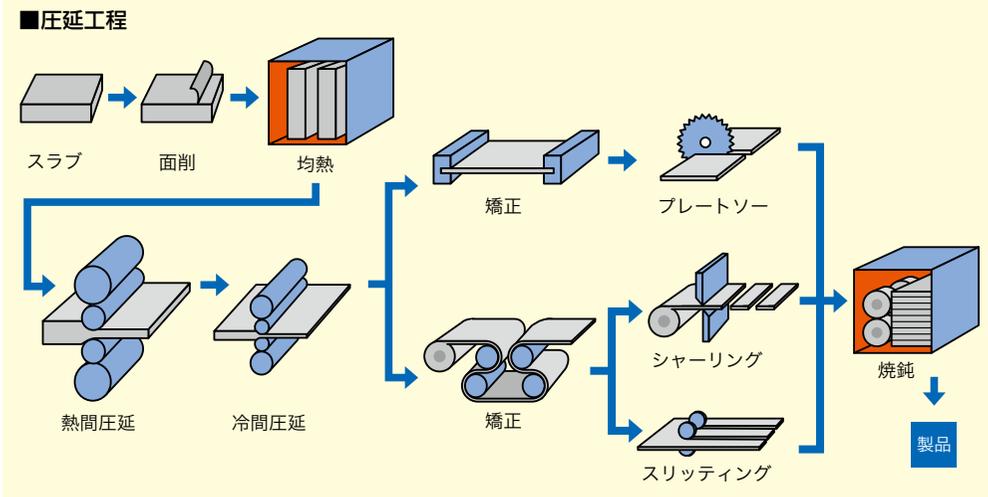
# 圧延

圧延は、アルミニウムの加工のなかでも押出と並んで最も重要な展伸加工法です。板材は圧延によって製造されます。圧延は平行におかれた一对のロールを回転させ、このロールとロールの間に直方体のスラブ（鋳塊）を通して薄くする加工方法です。スラブは進行方向に長く延びて薄くなり、所定の厚さの板材になります。

## ● 熱間圧延と冷間圧延

圧延加工は、熱間圧延（スラブを加熱して加工する）と冷間圧延（コイルを室温で加工する）の2つに大きく分けられます。熱間圧延はアルミニウムの再結晶温度以上で行うもので、通常約400℃以上の高温で行い容易に材料を薄く伸ばすことができます。同時にスラブの鑄造組織を厚板の圧延組織にかえます。

冷間圧延は普通室温で行うもので、一般に熱間圧延の後に薄板の仕上げとして行われます。これらの圧延作業を経て、厚いスラブから薄い板へと加工されていきます。こうして製造された薄板には、必要に応じて焼なましや安定化処理を施します。



圧延

## 厚板・薄板・箔

圧延加工によって製造される板は、その厚さによって厚板（プレート、6mm以上）、薄板（シート、6mm未満）、箔（ホイル、0.006～0.2mm）に分類されます。また、長い寸法の板を連続的に圧延したものを条（ストリップ）、巻き取ったものをコイルと呼びます。その中で、一般にアルミ板としてなじみの深いものは厚さ0.2～2mmの薄板で、飲料缶、住宅やビルの外装、鉄道車両の構体・内外装材、自動車やトレーラーのボディー外板、台所用品をはじめいろいろな用途に利用されています。厚板は、船舶・航空機・LNGタンクや化学容器、半導体製造装置用チャンパーなど、箔は包装容器やラベル、家庭用ホイル、電解コンデンサー用、リチウムイオン電池集電体用などとして幅広く活用されています。

# 押出・引抜

複雑形状を精度よくつくることができるのはアルミニウムならではの特長です。押出加工などによって、他の加工法では製造が難しい形状の製品が高精度につくられています。

## ● 押出加工

押出加工はアルミニウムやアルミ合金を400~500°Cの熱間で押出す加工方法です。一般には円柱の鋳塊（ビレット）を押し機を用いて、強い圧力を加えて各種の形状をもつダイス穴から押出して、細長い加工製品（押出材）をつくります。

この方法によると、他の加工法では製造することがむずかしい中空品や複雑な断面形状の製品でも、1回の押出工程で容易につくることが可能です。また寸法精度の非常にきびしい形状の製品をつくることもできます。

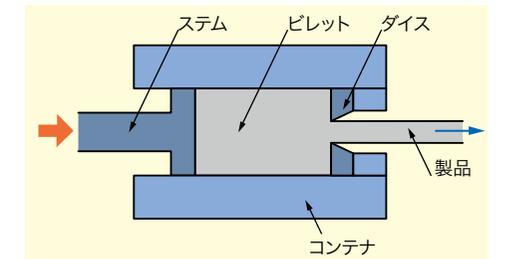


押出形材

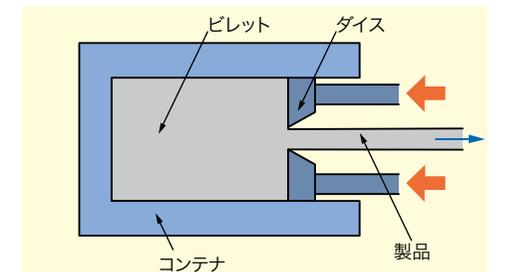
## ● 直接押出と間接押出

一般的に行われている直接押出法では、ビレットが押出される際にコンテナの内壁に摩擦が生じ、押出す力の3分の1がこの摩擦によって失われてしまいます。これに対し、間接押出法ではビレットを押出すと同時にコンテナを徐々に動かし、発生する摩擦力を最小限に抑えているためビレットの変形がきわめて小さくなります。したがって押出加工中の押出圧力が一定し、低温度での押出加工が可能となるので、寸法精度に優れ均一な組織を持つ高品質の押出製品を得ることができます。また、直接押出ではうまく適用できなかった高力アルミ合金（7075合金など、一般にハードアロイといわれる合金の種類）でも、効率よく押出ができます。このような特徴を生かし、おもに産業機械やエレクトロニクス機器の高精度部品に用いる管・棒材が製造されています。

### ● 直接押出



### ● 間接押出



## ● 圧延機の種類

圧延機の種類は、使用されるロール本数によって分けられます。アルミニウムの圧延では、一對のワークロールを駆動し、その上下に大径のバックアップロールを設けた4段圧延機および中間ロールを設けて平坦度制御、板クラウン制御能力を高めた6段圧延機が多く用いられます。一般に、4段以上の多段圧延機では高圧力下で圧延し、板の厚さと平坦度の精密な制御を可能にしています。また2機以上の圧延機を連続して設置し、効率よく圧延を行うタンデム圧延機もあります。

圧延の方式は、従来スクリーで上下のロールギャップを調整する方式がほとんどでしたが、最近では板厚、形状の制御応答性のよい油圧圧下方式が用いられています。さらに自動板厚制御装置（AGC）、自動板形状制御装置（AFC）などの設備により、いっそう高品質な板の生産が行われています。

圧延機のロール幅は、大きなものでは熱間圧延4,320mm、冷間圧延2,750mm、圧延速度は最高1,800~2,000m/分にも達します。

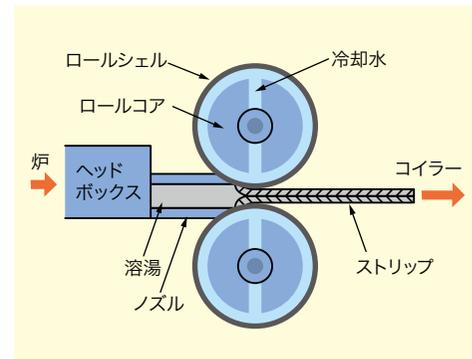
## ● 連続鋳造圧延法

この方法ではスラブを鋳造することなく、アルミ溶湯から板を直接作り出します。一對のロールを鋳型として用いる場合が多く、FATA HUNETR社のSuper CasterやSpeed Caster、NOVELIS社のJumbo 3Cや3CMが有名です。鋳造板厚は3~10mmと薄く、スラブを用いた板材の製法と比べて鋳造後の面削り均質化処理、熱間圧延の工程を省略でき、歩留りも向上します。また、急冷効果により金属組織が微細になりますが、一方で板厚の中心に合金元素が偏析しやすいといった特徴もあります。

ロールの代わりにベルトを鋳型として用いた方法として、Hazelett法などがあります。ロール式と比べて生産性は10倍程度になり

ますが、鋳造板厚が20mm程度と厚いため熱間圧延を必要とする場合が多くなります。

### ● 連続鋳造圧延

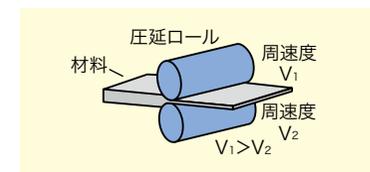


## 技術トピックス

### 温間異周速圧延によるアルミ合金の成形性向上

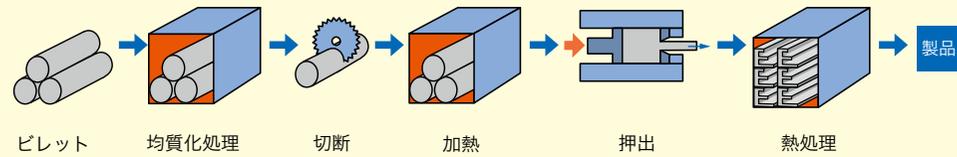
アルミニウムは自動車の軽量化に貢献する材料ですが、鋼板に比べプレス成形性に劣るといった課題があります。そこで、アルミ合金（6000系）の成形性向上を目指して、温間異周速圧延による集合組織の改善が研究されました。通常の圧延機は上下圧延ロールが同径で、等速で圧延するのに対して、異周速比、圧下率などの条件を最適化し温間異周速圧延を施すことによって、鋼板の集合組織とほぼ同様なせん断集合組織を得ることができました。これを再結晶熱処理することにより、深絞り成形性が改善できる集合組織が得られました。

### ● 温間異周速圧延の概念図



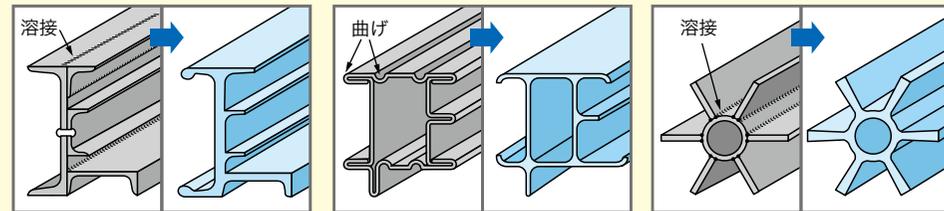
深絞り性の比較

## ■ 押出工程



## ■ 一般的製造法と押出による製造法

押出による製造法を採用すると、溶接や曲げなどの工程を省き、複雑な形状のものを連続してつくり出すことができます。

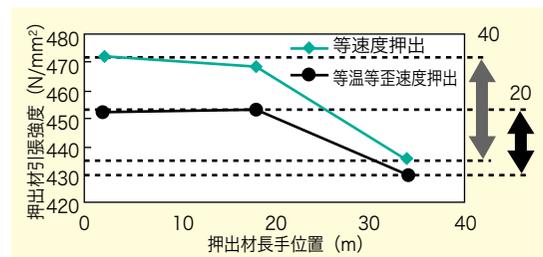


## 技術トピックス

### 品質と生産性の向上をめざした等温・等歪速度押出技術

押出加工によって、ビレットから一工程で複雑な断面形状の形材をつくることができますが、押出加工では押出材の先端から後端にわたって機械的特性（強度、伸び特性）が変化してしまうことがあります。そこで、押出材の均一品質（歩留まり向上）と押出時間の短縮（生産性向上）を両立させるために、押出速度の変化とビレット段階加熱をバランスよく行う技術が開発されました。これらは等温・等歪速度押出技術と呼ばれ、実操業において生産性の向上、押出前後端の機械的特性のばらつき低減に効果を発揮しています。

#### ● 等温・等歪速度押出技術による耐力ばらつきの改善



## ● 押出機

押出機には、動力源として油圧あるいは水圧を利用する2つの方式があり、コンテナおよびシステムが水平になった横型（水平方向に押出する）が多く使用されています。最もポピュラーな横型油圧押出機では、直接押出法と呼ばれるコンテナの前に固定したダイスに、予め加熱したビレットを押し付けて押出す方式を採用しています。押出機は押出能力が500～3,000トン級のもの、一般的に多く使用されていますが、大型押出機に対する関心も高まっています。わが国には最大9,500トン（使用ビレット径24インチ）の横型油圧押出機が稼働中ですが、世界中では14,000トンといった水圧式大型押出機もあります。



押出機

## ● 引抜加工

引抜加工とは、素材を加熱することなく室温で素材をダイスの狭い孔を通して引抜くことによって加工する冷間加工方法です。引抜く素材は一般に押出材が多く用いられます。

引抜は一般的に押出形材よりも細くて寸法

精度がよく、表面のきれいな製品をつくることができます。この方法によって主として管、棒がつくれますが、これらは引抜材と呼ばれています。

## 技術トピックス

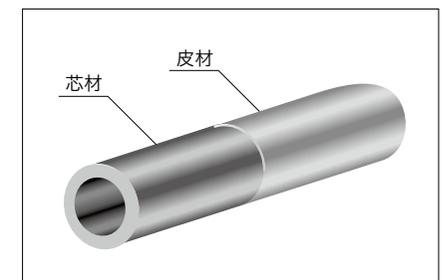
### 押出加工によるクラッド材

押出は、1種の方法だけでなく、複数の材料を組み合わせることで押出加工することができます。これによって単一材料では成し得ない複合機能をもたせることができます。このように素材（芯材）の表面を異なる材料（皮材）で被覆した材料のことをクラッド材と呼びます。

クラッド材は、芯材となるビレットに皮材を被せてともに押出すことで、芯材と皮材は金属結合して一体となります。

棒もしくはマンドレル管などは製作できませんが、ポートホール押出には不向きです。

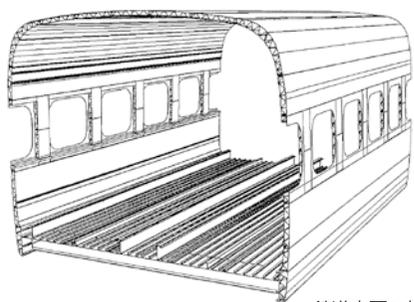
皮材はアルミニウムの場合、機能上2種類あり、芯材を保護する犠牲陽極材とろう材になります。



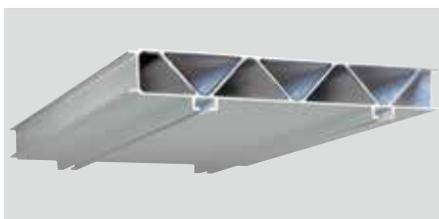
クラッド管

## 鉄道車両を変えた押出技術

1962年に初めて登場したアルミ車両は、従来の鋼材をそのままアルミニウム合金に置き換えた骨組みと外板を溶接して作っていました。その後、溶接性・押出性のよい合金開発、大型薄肉押出型材の生産技術の向上、そして車両製作に必要な接合技術の開発が進み、アルミ車両が広く普及するようになりました。最近では、中空押出型材によるダブルスキン構造の開発や、FSW(摩擦攪拌溶接)の開発などにより、より高い生産性やコストダウンを達成することができています。現在では、新幹線や地下鉄に広くアルミ車両が採用されており、軽量化による省エネ効果が得られています。



鉄道車両の構体



ダブルスキン型材

# 鍛造

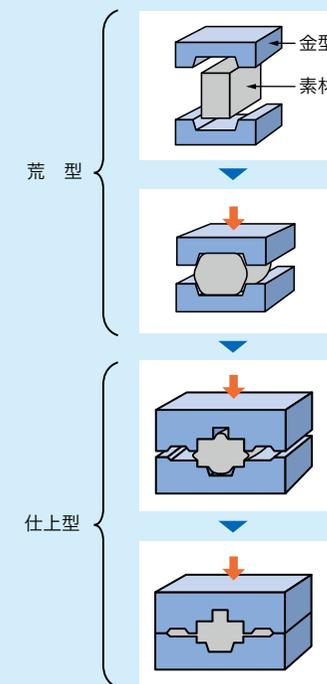
素材を油圧または機械プレスあるいはハンマーなどで鍛錬し、粘り強さを与えながら必要な形にしていく方法を鍛造といいます。鍛造によって作られた製品は強度が高く衝撃や繰り返し応力にもよく耐えることができ、信頼性の高い製品をつくることができます。この特性を生かして航空機用部品や自動車部品、そのほか強度や耐熱性が必要な機械部品に使用されています。鍛造方法を大きく分類すると熱間鍛造と冷間鍛造があり、製品材質および製品形状、数量などにより選択されています。ここではおもに熱間鍛造について紹介します。

## 自由鍛造と型鍛造

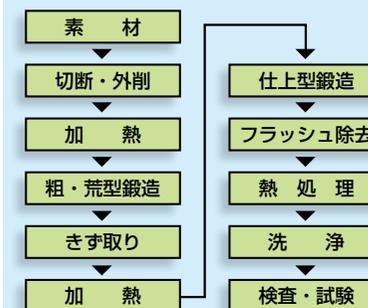
熱間鍛造には大きく分けると「自由鍛造」と「型鍛造」の2つがあります。このうち自由鍛造は加熱した材料に工具などで変形圧力を加えて成形する方法で、製品が大型の場合や生産量が少ない場合、各種加工用の元素材として用いられます。

一方、型鍛造は目標とする製品の形状に加工した金型を使用して、加熱したアルミニウムに変形圧力をかけながら金型にそって製品の形状に成形していきます。最も一般的に行われている熱間鍛造では、製品の大まかな形に鍛造する「荒型」から、細かな部分まで成形する「仕上型」まで、いくつかの金型を使って段階的に成形していきます。この後、熱処理や切削などの仕上加工を施し、製品ができあがります。型鍛造は、同じ金型を繰り返して使うことができるため、大量に生産する場合に適しています。

## ■鍛造品の製造工程



## ●型鍛造工程例

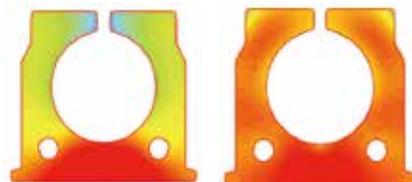


## 技術トピックス

### ダイス設計へのシミュレーション技術の導入

押出は、押出金型(ダイス)の設計技術、押出用合金設計技術、押出生産技術の3要素で成り立っています。なかでもダイスの設計は経験によるところが大きいため、難易度の高い製品や開発品などの押出は初回で良好な形状を得ることが難しく、ダイスの修正とテスト押出を繰り返す場合があります。そのため最近では数値シミュレーションを利用したダイス設計が活発に研究されています。たとえば塑性流動シミュレーションを活用し、メタルフローを変化させることで押出性が良好なダイス構造を考案できます。このようにシミュレーション結果の信頼性が確認されるようになり、難易度の高い形状に対する適用が進められています。

●シリンダー材の塑性流動シミュレーション結果



押出初期

押出終期



自動車サスペンションアーム

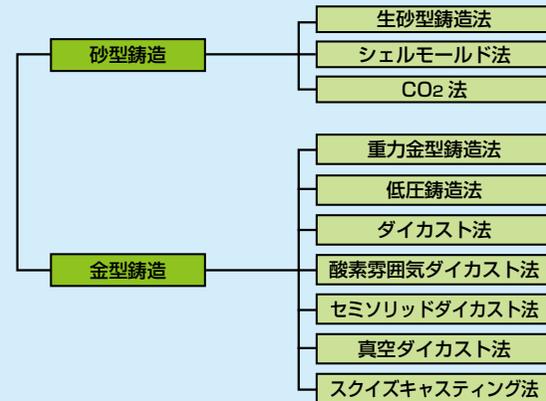


15,000トン鍛造プレス

# 鑄造・ダイカスト

溶融状態のアルミ合金(アルミ溶湯)を鑄型に流し込んでそのまま冷却し、所定の形状の製品を作る方法を鑄造といい、その製品を鑄物といいます。鑄造の代表的な方法には砂型鑄造・金型鑄造などがあります。

## おもな鑄造法



## ● 砂型鑄造

### ◆ 生砂型鑄造法

鑄造法の中では最も古くから行われている方法で、粘土分をほとんど含まない天然ケイ砂、人工ケイ砂などに粘結剤を混ぜて、木型に詰めて固めた砂型にアルミ溶湯を流し込み、凝固させて製品をつくる方法です。鑄型を一回ごとに作る必要がありますが、比較的

大きな製品を安価に作るができます。しかし金型鑄造やダイカストに比べて冷却速度が小さいので、ミクロ組織が大きく、凝固時に放出される水素ガスによるピンホールも生成しやすくなります。

### ◆ シェルモールド法

砂型鑄造法の一つでケイ砂にフェノール樹脂を添加し、熱硬化させて作った薄いシェル型を用いる方法です。シェルモールドは砂型でありながら金型鑄造と同等の寸法精度が得られる特徴があります。またシェルモールドは強く吸湿性がないため長期保存ができ、型の運搬も容易で、中空鑄物の中子としても使われています。比較的小さな鑄造製品を、ある程度量産するのに適した方法です。



航空機エンジン用ギアボックス

## ● 金型鑄造

### ◆ 重力金型鑄造法

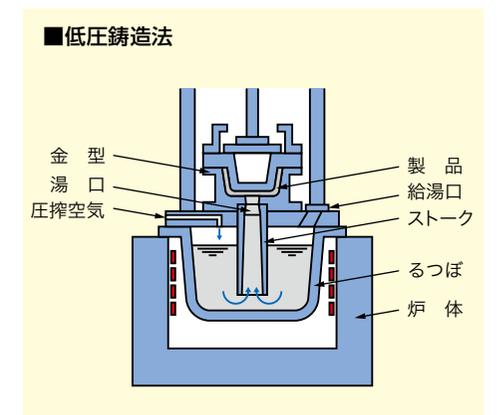
鑄鉄や耐熱合金鋼で作られた金型を用いる鑄造方法で、アルミ溶湯の重力のみによって鑄造するため重力金型鑄造法とも呼ばれています。砂型鑄造法に比べて、凝固時の冷却速度が速く、製品表面(鑄肌)が美しく、寸法精度の良い緻密な鑄物ができる特長を持っています。また金型は砂型に比べ製作費がかかりますが、繰り返し使用できるため量産に適した方法といえます。



金型鑄造

### ◆ 低圧鑄造法

金型鑄造法の一つで、炉内の溶湯面に低い圧力を加えてアルミ溶湯を押し上げ注入し、注湯完了と同時に圧力を加えたまま凝固させる方法です。溶湯を静かに金型内に充填させるため、欠陥の巻き込みが少なく歩留まりの良い製品をつくることができます。

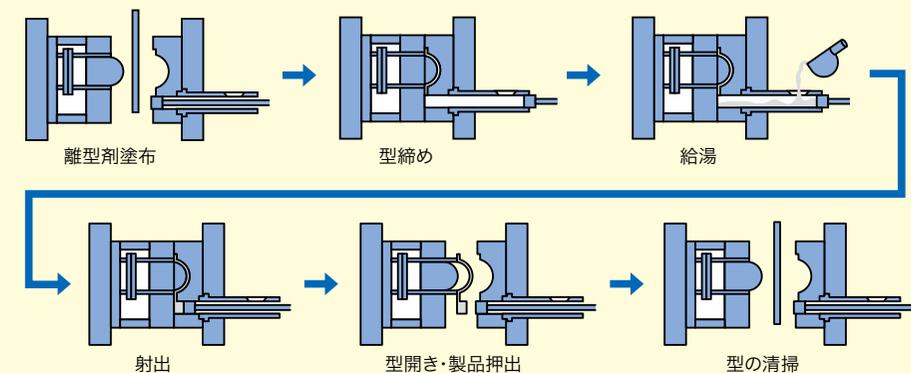


### ◆ ダイカスト法

あまり大型な製品は少ないのですが、鑄造品の大量生産に適した方法です。耐熱合金鋼で作られた複雑な形状の金型に、アルミ溶湯を高速・高圧で注入します。製品の鑄肌が極めて美しく寸法精度に優れた薄肉鑄物を短時間で大量生産することができます。しかし溶湯を金型に高速で注入するため、空気や酸化

物を巻き込んで鑄物の中に気孔(鑄巣)ができやすく、熱処理や溶接等の後加工が必要な製品には向いていません。しかし最近では、気孔を少なくするための方法がいろいろ開発され、以下に示すいくつかの新しいダイカスト法が実用化されています。

### ■ ダイカストマシンの動作工程



### ・酸素雰囲気ダイカスト法(PF法)

通常のダイカスト金型に铸込む前に、活性酸素ガスで铸型内の空気を置換しておきます。この铸型内の酸素は、注入時にアルミ溶湯と反応して酸化アルミニウムとなり、それが溶湯中に分散して凝固します。製品内にガス体が残らず、気孔として存在しないので、加熱しても膨れは発生せず、T6熱処理や溶接が可能になります。



ダイカスト製品

### ・セミソリッドダイカスト法

金型铸造法の一つで、アルミニウムが熔融状態ではなく、半熔融状態でダイカストする方法です。半熔融とは固体結晶と液体金属が共存する状態を指します。これまでの熔融金属を用いたダイカスト法に比べて空気の巻き込みによる気孔や引け巣(溶湯充填後収縮により発生する孔)や偏析がきわめて少ないのが特長です。また低温铸込みのため金型寿命も向上します。

### ・スクイズキャスト法

溶湯鍛造法、高圧铸造法とも呼ばれる製造方法で、金型内に充填されたアルミ溶湯に、500MPa以上の高圧力を熔融状態から凝固完了まで作用させて凝固させる方法です。そのため铸肌・寸法精度・耐圧洩れ性に優れており、なおかつT6熱処理や溶接が可能な高品質な铸物を得られる方法の一つです。

### ・真空ダイカスト法

真空ダイカスト法は、金型内の空気やガスの巻き込みを防ぐために、溶湯を充填する直前に金型内の空気を真空ポンプで吸引し、減圧状態にした後に溶湯を充填する方法です。真空度の保持と射出タイミングの制御が難しく、さまざまな方法が開発されています。

これらの真空ダイカスト法でも、T6熱処理は可能でしたが溶接は困難でした。しかし最近では数kPaの高真空が得られる高真空ダイカスト法が開発されており、Vacural法として実用化され、自動車の足回りやボディー部品などに、T6熱処理や溶接をして使われ始めています。

# アルミニウムの 成形・加工

アルミニウムの板や押出型材などは、さまざまな加工を施すことによって、最終製品になります。アルミニウムの加工技術には成形（曲げ・絞りなど）、切削、切断、接合、表面処理などがあります。これらの加工技術は近年めざましい進歩を遂げており、アルミ製品の信頼性を高め、新しい付加価値を生み出す重要な役割を担っています。

# 成形・加工

二次元の板から三次元の形へ変える曲げや絞り、アルミニウムの代表的な加工方法です。その他、切断や切削など、用途に合わせて加工が施されます。

## ● 曲げ

アルミニウムの板は簡単に折り曲げたり、円筒状にすることができます。曲げ加工は絞り加工と並ぶアルミニウムの代表的な加工方法です。基本的には純粋曲げ、型曲げ、巻き付け曲げの3つの形式があります。

曲げ加工は、板材ばかりでなく、管や棒、押出型材などの成形にも適しており、引き曲げ、圧縮曲げ、突き曲げ、押し曲げ、ロール曲げ、引張り曲げなどの方法が用いられます。

また、材料の形状や寸法、曲げの半径や角度などの条件に合わせて、簡単な手曲げから、プレスやロールベンダー、ロールフォーミング（ロール成形）などの機械曲げまで、さまざまな方法があります。ロールフォーミングは、コイル状に巻いた長い寸法の薄板を連続成形ロールに通すことにより、屋根材、外壁材などの量産に適した方法です。

## ● 絞り

絞り加工は、アルミニウムの優れた展伸性を生かした成形加工方法で、深絞り加工やへら絞り加工などの方法があります。

深絞り加工は、素材をダイスの上に置き、ポンチでダイス孔の中に絞り込んで成形する方法です。深い底付き容器などを効率よく生産できる方法で、飲料缶や鍋などの台所用品をはじめ、各種工業製品の成形加工に幅広く用いられています。

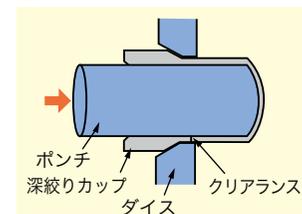
なお、深絞り加工で得たカップを、さらに薄くて深い製品にするため、クリアランス（すきま）の小さいダイスとポンチを用いてカップの側壁を高さ方向にしごき出す加工を、しごき加工と呼んでいます。この方式で作った缶類をD1缶と

称し（D: Drawingは絞り、I: Ironingはしごきの略）、ビール、その他の飲料用アルミ缶は、その代表的な製品です。

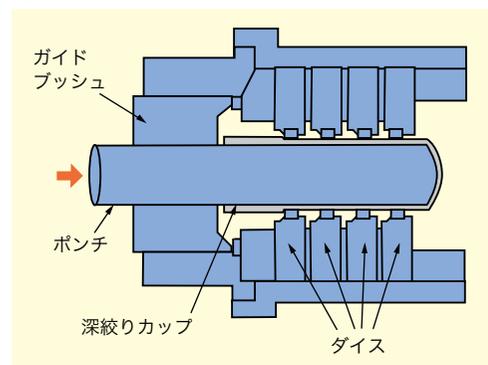
また、強度や耐食性と塑性加工性に優れたプレス用アルミ合金も開発され、自動車の車体や部品をはじめ複雑な形状を効率よく成形できます。

へら絞り加工は、素材またはある程度成形してある中間薄板製品を専用のへら絞り旋盤に取り付けた型といっしょに回転させ、へら棒やローラーを工具として押し付け成形する方法です。ろくろ加工に似たこの方法は、外周が円形の比較的底の浅い容器や、反射鏡、自動車用ホイールなどの成形に用いられます。

## ● しごき加工



## ● タンデムしごき加工



## ● 切断

機械的に切断する場合には、シャー、丸のこ、帯のこ、ジグソーなどを使用します。

また、効率よく切断する方法として、プラズマアークやティグアーク、レーザービームなどによる溶断技術やウォータージェットが開発されています。



穴開け加工

## リチウムイオン電池に使用されるアルミニウム

携帯電話やノートパソコンなど、最近の小型で高性能なモバイル機器で活躍しているのがリチウムイオン電池です。エネルギー密度が高いため、電池の大幅な小型・軽量化を図ることができ、モバイル機器に欠かせない存在となっています。このようなリチウムイオン電池のケースにはアルミニウムが使用されています。角形電池ケースは深絞り加工で成形されるため、高い成形性と強度を兼ね備えたアルミ板材が開発されています。またリチウムイオン電池の正極の集電体には耐食性、導電性の高いアルミ箔が使用されています。



リチウムイオン電池用アルミケース

## 技術トピックス

### 電磁成形によるバンパーシステムの製造

アルミ押出材（2次元）を自動車部材に使用するには、3次元形状化する低コストで生産性の高い加工法が求められます。このような要求に応える方法としてバンパーシステムのレインフォースを支持するステイに電磁成形法が用いられています。電磁成形法とは、大容量・高電圧のコンデンサーで発生させた放電電流をコイルに流し瞬間的に生じる磁場を利用した、高エネルギー・高速度加工で、3次元での成形加工が可能になります。

バンパーシステムは、レインフォースとそれを支持するステイで構成されますが、従来からアルミ化されていたレインフォースに加えて、電磁成形によってアルミステイの製造が可能となり、これによってアルミパイプとフランジを一体成形・かしめ加工することができ、溶接工程の削減、低コスト化を実現しています。



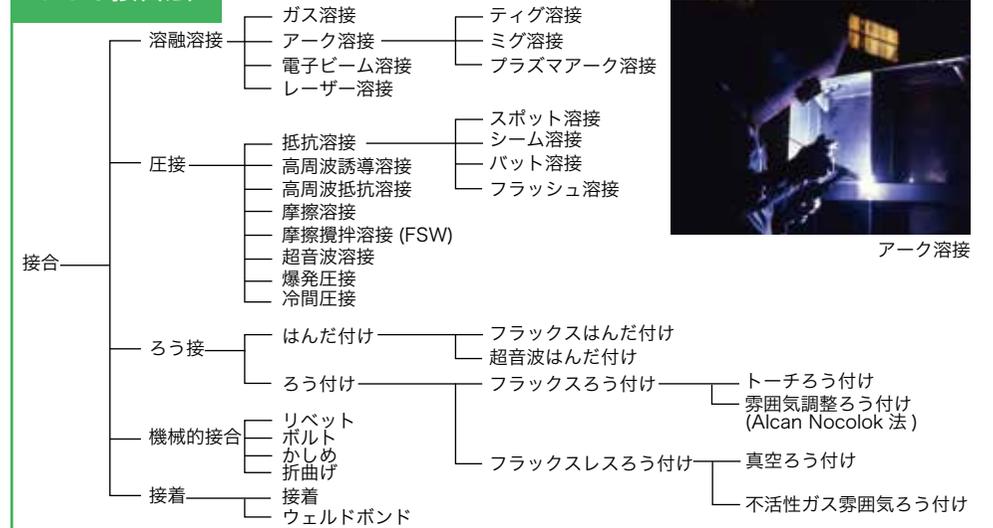
電磁成形ステイ

# 接 合

接合は信頼性が第一でなおかつ複雑な形状の構造物など、いろいろな製品を作る場合に欠くことのできない重要な技術です。

アルミニウムの接合法は大別して、①溶融溶接②圧接③ろう接④機械的接合⑤接着の5つに分類することができます。

## おもな接合法



アーク溶接

## ● 切削

フライス、バイト、ドリルなどの機械工具で削って仕上げる加工方法で、フライス盤、旋盤、マシニングセンターなどが用いられます。

とくに管や棒の場合は、切削用に開発された快削アルミ合金がよく使用されます。この合金は簡単に切削でき、発生する切りくずが細かく、切りくずの処理も容易です。

切削加工のなかで最もよく使われるのは旋削加工です。これは旋盤に取付けた材料に鋭い切削バイト（刃物）を押し付け、回転させながら材料の表面を切削するもので、精密な寸法形状が得られます。

最近、ロボットのハンド（手の部分）やプラスチック射出成形機の金型などの新しい機器

部材、治具にアルミ合金（おもに7000系合金）が使われています。



切削加工

## ● 鏡面切削加工

アルミ製品の表面をダイヤモンドバイトなどの精密加工用工具で切削することにより、鏡のように高い反射性を得ることができます。このような精密切削加工によって表面の粗さが少なく、平坦で寸法精度に優れた製品ができます。

鏡面切削加工を施したアルミ製品としては、複写機用感光ドラム、レーザープリンター用ポリゴンミラーなどがあります。



鏡面切削

## 感光ドラム用高精度アルミ管

複写機やレーザープリンターの感光ドラムは、光学系の核となる部品であり、その品質が装置の性能を大きく左右します。これに使用されるのが、優れた表面特性をもつ高精度アルミ管です。

押出管を引抜加工したアルミ管の表面に、鏡面切削加工を施し、優れた表面特性、寸法精度を発揮することができます。

また、複写機の多様化するニーズにこたえて、無切削ドラムやDIドラム、EIドラムなどいろいろな新製品が開発されています。DIドラムはアルミ板材から深絞りとしごき加工を利用してつくったもの、EIドラムは押出管にしごき加工を加えてつくったものです。



感光ドラム

## ● 溶融溶接法

アルミニウムの接合法の主流を占めるのが溶融溶接法（以下、溶接法）です。一般に鋼など他の金属材料に用いられている溶接法が、アルミニウムにも適用されますが、なかでも広く使用されるのはイナートガスアーク溶接です。

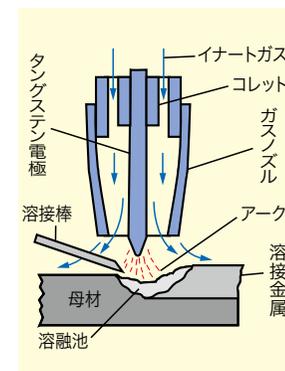
イナートガスアーク溶接法は、右図のように接合される材料（母材）と電極との間にアークを発生させ、電極の周囲からイナートガス（アルゴンやヘリウムなどの不活性ガス）を流し、溶融部を大気から保護して行う溶接法です。これにはティグ（TIG）溶接と、ミグ（MIG）溶接の2種類があります。

ティグ溶接は、細いタングステン棒を電極とし、母材との間にアークを発生させ、そのアークにより母材と溶接棒（溶加材）を溶かしながら継手を形成

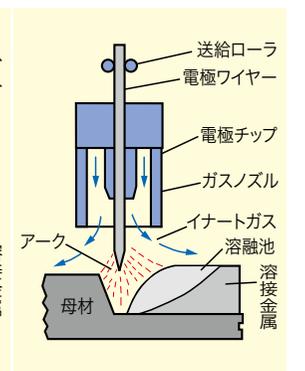
する溶接法です。

ミグ溶接は、アルミニウムの細いワイヤーを電極とし、母材との間にアークを発生させ、そのアークにより電極ワイヤー（溶加材）と母材を溶かして継手を形成する溶接法です。

### ● ティグ溶接の原理



### ● ミグ溶接の原理



レーザー溶接は、発信器から出たレーザー光を集束光学系にて高エネルギー密度の微小スポット熱源として、被加工物に照射する方法です。レーザー光が照射された被加工部は溶解されて、溶接部を形成することとなります。

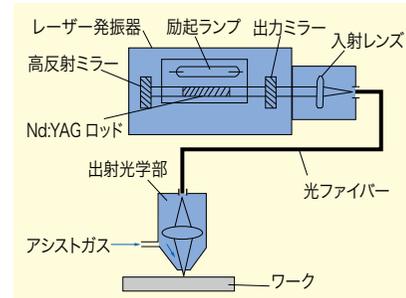
## ● 圧接法

圧接法の代表的な接合方法である抵抗スポット溶接は、重ね合わせた母材を電極ではさみ、電流を流してそのジュール発熱で母材を溶融させる方法で、車両・自動車・家庭用品等多くの分野で使用されています。アルミニウム材は電気抵抗が小さく、熱伝導がよいため、鋼材の抵抗スポット溶接よりも、大電流・短時間通電が必要です。そのため電極の損耗が激しく、連続打点性に課題があります。また英国溶接研究所(TWI)で開発された摩擦攪拌溶接(FSW)も、新しい圧接法として注目されています。この溶接方法は図に模式

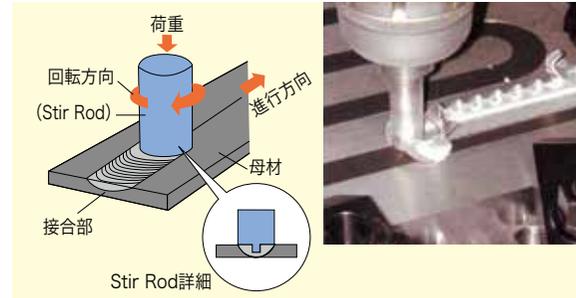
近年のレーザー溶接には、YAGレーザー溶接が多く用いられます。レーザー光の伝送に光ファイバを用いるため、自動機との組み合わせが容易となり、3次元の溶接が可能となります。

的に示すように、高速で回転するツール(Stir Rod)を被溶接材中に挿入して、移動させることによって接合する方法です。回転ツールと被溶接材との間で発生する摩擦熱を利用して接合する方法であり、摩擦熱により可塑化された材料が、ツールの回転によって混合され、ツールの移動によって後方に押し込まれることによって接合されます。従来の溶融溶接では接合が困難であった複合材およびAl-Li合金が溶接可能であり、すべてのアルミニウム合金に適用可能です。

### ● 光ファイバを利用したYAGレーザー溶接装置の基本的構成



### ● 摩擦攪拌溶接(Friction Stir Welding)法の概略図



## 技術トピックス

### 自動車アルミボディへのFSW適用

FSW(摩擦攪拌溶接)の実用化は海外では船舶、日本では鉄道車両で進んでいますが、最近では自動車部品にも使用が広がりつつあります。

FSWは自動車ボディに対して、テールブランクとスポット溶接の二つの溶接において有望視されています。テールブランクとは板厚や材質の異なる複数の素材を接合してからプレス成形する技術で、自動車ボディにアルミ合金を使用するにはこの技術の導入が課題の一つとなっています。このテールブランクの接合には熱影響部が少なく、継手形状が滑らかでプレス成形に影響の少ないFSWが適しており、量産車への適用が期待されています。また、FSW点接合は自動車ボディにアルミ合金を使用する場合、従来の抵抗スポット溶接では大電流を必要とするため、省エネルギーの図れるFSWが利用されるようになってきています。



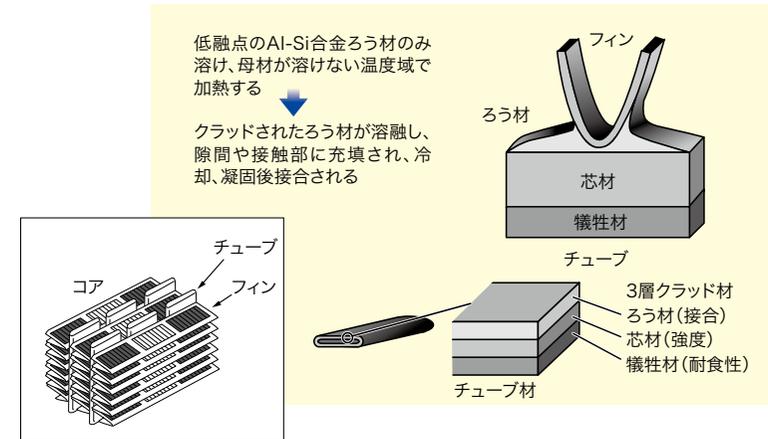
FSW点接合ロボット(複動式)

## ● ろう接法(ろう付けおよびはんだ付け)

ろう接とは、接合しようとする母材よりも融点の低い合金(はんだ、ろう材)を、接合部に溶かし込んで接合する方法で、合金の融点が約430℃以上の場合をろう付け、430℃未満の場合をはんだ付けとして区別しています。ここでは、ろう付けについて紹介します。

ろう付けには、主にAl-Si系合金がろう材として用いられ、目標とする接合部近くに配置し、それをろう材の融点以上でなおかつ、母材の融点以下の温度に加熱して接合する方法です。一回の加熱で多数の継手を一括して接合させることができるため、熱交換器などの製造に広く用いられています。熱交換器を製造する場合、クラッド圧延によって、ろ

う材を片面あるいは両面に熱間圧延で貼り合せたブレイジングシートを用いてチューブ、プレート、フィンなどからなるコアを組み、全体を炉中で加熱して接合させます。アルミニウム材をろう付けする際には、その表面の自然酸化皮膜を除去したり、ろう付け中の酸化皮膜の成長を抑える必要があります。これに塩化物やフッ化物のフラックスを使う方法、フラックスを用いずに真空中で接合する方法などが開発されてきました。現在ではフッ化物系の非腐食性フラックスを使用し、窒素ガス等の雰囲気中で加熱するノコロックろう付け(Alcan Nocolock法)が主流になっています。



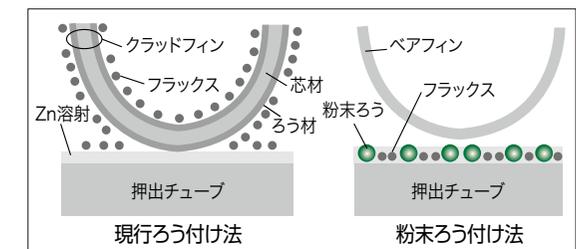
## 技術トピックス

### 粉末ろうを用いた自動車用熱交換器材料のろう付け

アルミ製自動車用熱交換器は、一般的にろう材を貼ったブレイジングシート(クラッド材)を用いてフィンと押出チューブをろう付けし接合します。しかし近年では、熱交換器のいっそうの薄肉化やコストダウンが求められ、またグローバル供給の必要性も高まっていることから、粉末ろう材を使用した粉末ろう付け法が検討されています。粉末ろう付け法では、チューブ表面に粉末ろう材、フラックス、バインダからなる塗膜を形成するため、フィンにろう材を貼り合わせる必要がなく、フィン材を調達しやすいベア材(アルミ合金の素地がむき出しになった材料)を使用することができ、薄肉化を図ることが可能となります。

そこで、粉末ろう付け法を自動車用熱交換器材料へ適用した場合のろう付け性や耐食性が調べられ、実用が開始しています。

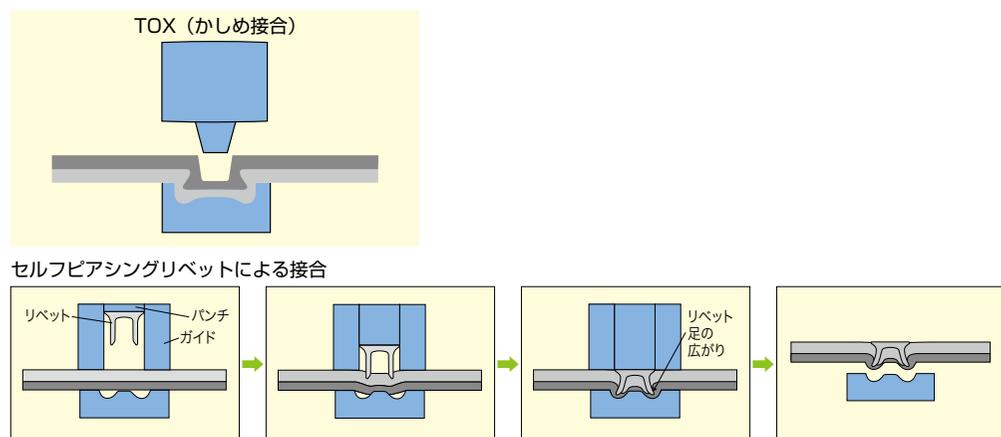
#### ● 現行ろう付け法と粉末ろう付け法の比較



## ● 機械的接合法

リベットやボルトなどの締結材を用いて接合する方法や、接合材同士をかしめる方法などがあり、溶融させないため異種金属の接合にも使用できます。図に代表的なかしめ方法であるTOX社のTOX接合法とセルフピアシングリベット(SPR)の原理を示します。機械的接合は熱影響がないので、抵抗スポット溶接より疲労強度が高い傾向があります。

### ● 機械的接合法の例



## ● 接着法

接着剤を接合面に塗布して接合する方法です。最近では接着剤の性能が向上し、信頼性のある継手が得られるようになってきました。また、接着と抵抗スポット溶接を併用したウェルドボンド法が航空機や自動車産業で実用化されています。

# 表面処理

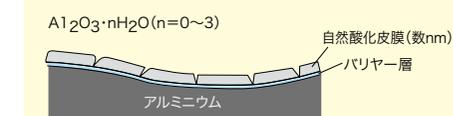
アルミニウムはもともと美しい地肌と優れた耐食性を持っている金属ですが、さまざまな表面処理を施すことによってこれらの特性をさらに高めたり、新しい特性を付加したりすることができます。

## ● 化学的性質

アルミニウムは、実用金属の中ではマグネシウムに次いで化学的に活性な金属ですが、実用環境中では安定な表面状態が維持されるため、表面処理なしでも多くの用途に使用されています。その理由は、空気中では常に緻密な自然酸化皮膜が形成して表面を保護しているためです。乾いた空気中で形成する自然酸化皮膜は、数nmと極めて薄い皮膜です

が、緻密なバリアー層があり、腐食物質とアルミニウムの反応を抑制しています。

### ● アルミニウムの自然酸化皮膜



## ● 表面処理の種類

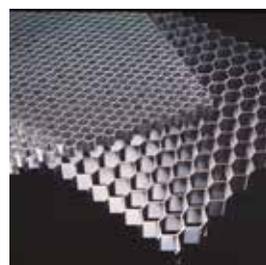
アルミニウムのおもな表面処理には、陽極酸化処理、化成処理、塗装、めっきがあります。これらの表面処理は、製品の装飾、耐食性の向上および放熱性等の特殊機能の付与を目的に行われています。表面処理の下地調整には、プラスト等の機械的前処理と脱脂等の化学的前処理が行われます。化学的前処理では、アル

ミニウム表面の酸化皮膜や油分等の汚れを十分に除去することが大切になります。アルミニウムの表面処理の大きな特徴は、陽極酸化処理で硬く厚い酸化皮膜が形成できることです。陽極酸化処理は、容器類、サッシ等の建材、電気製品外筐等で幅広く用いられています。

## アルミハニカムコア・パネル

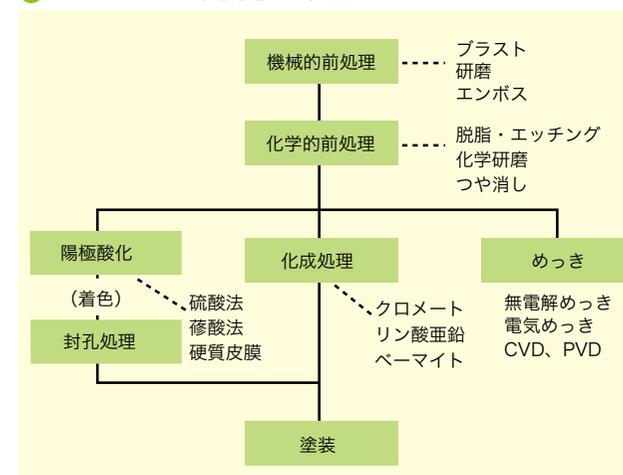
ハニカム構造のコア(芯材)を両面からはさみ、接合したアルミ材料です。コアは、アルミ箔でできた六角柱集合体。これをアルミ材で両面からサンドイッチした構造となっているため、単位重量当りの強度および剛性は、他の構造用の材料に比べはるかに大きいのが特長です。その他にも耐久性や耐候性、防音性、衝撃吸収性、断熱性に優れています。

コアとアルミ板の接合は、従来は接着剤によっていましたが、最近はろう付けによるものが登場し、接合部の信頼性を高めるとともに、板材や押出型材のような成形、表面処理などの加工が可能となっています。用途としては建築パネルや車両パネル、各種機械の筐体、各種構造部材などがあげられます。



ハニカムコア材

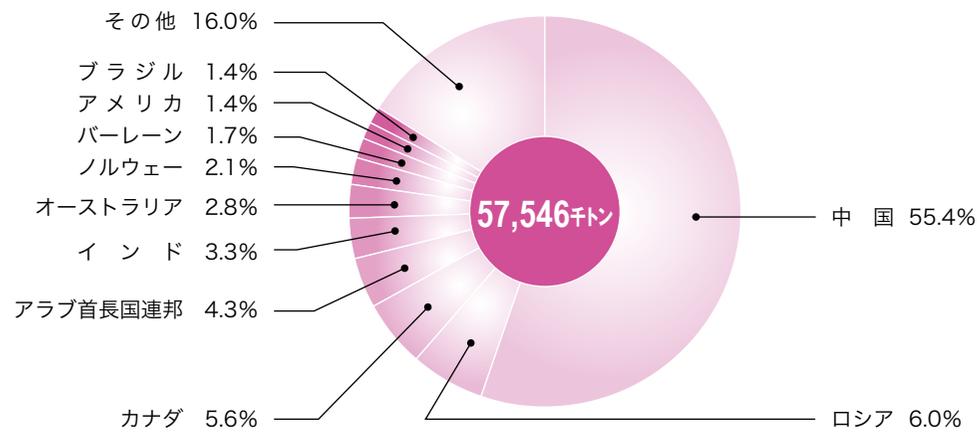
### ● アルミニウムの表面処理の種類



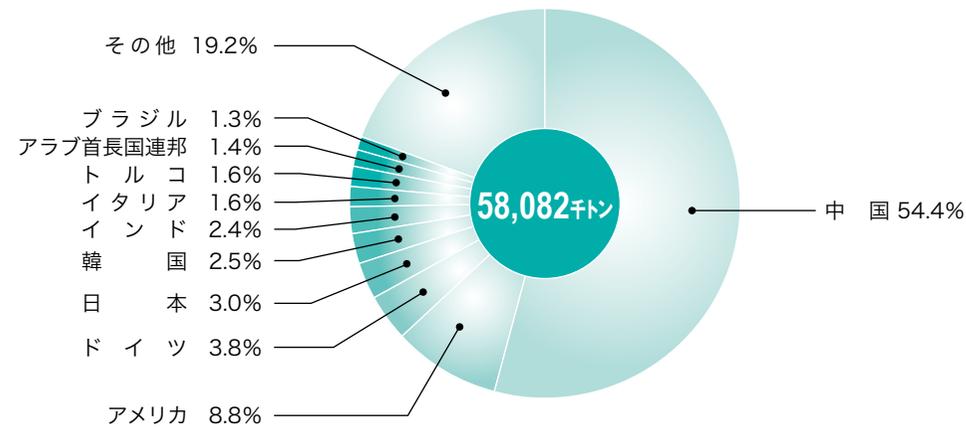


# 参考資料

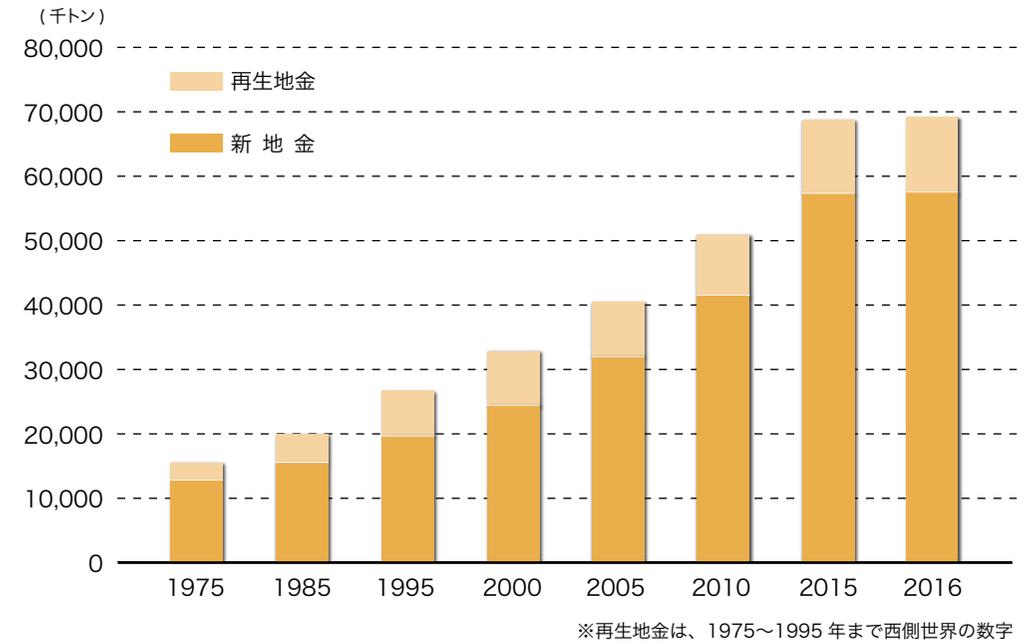
### 主要国のアルミ新地金生産構成比(2016年)



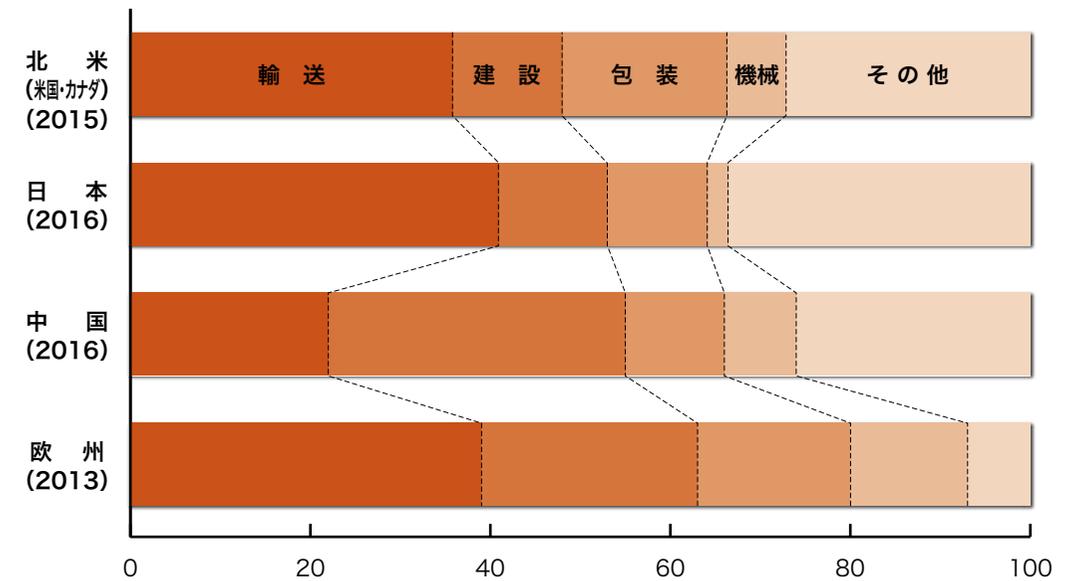
### 主要国のアルミ新地金消費構成比(2016年)



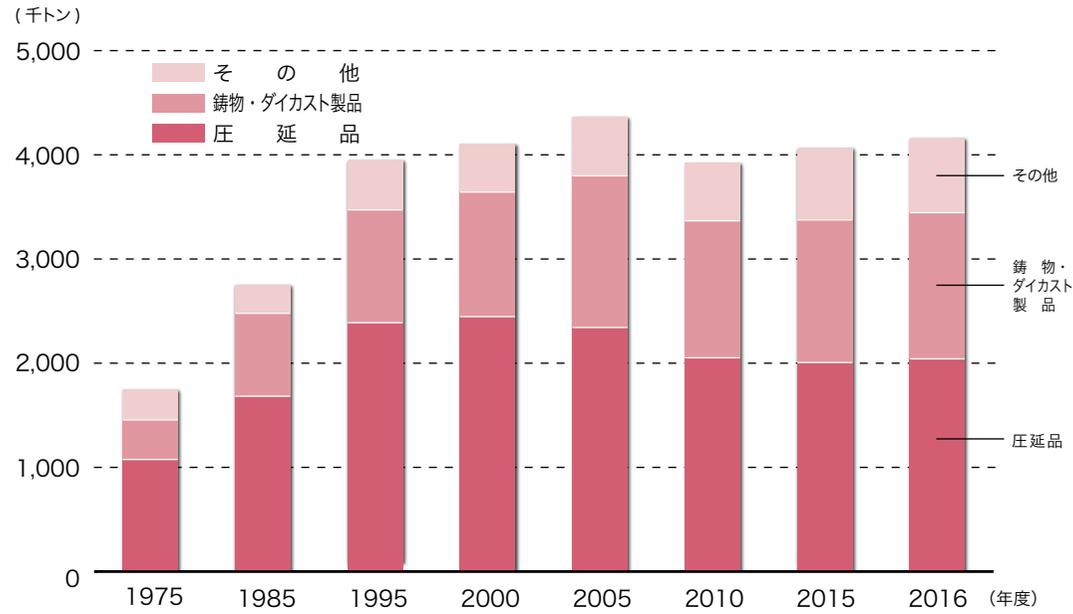
### 世界のアルミ地金生産の推移



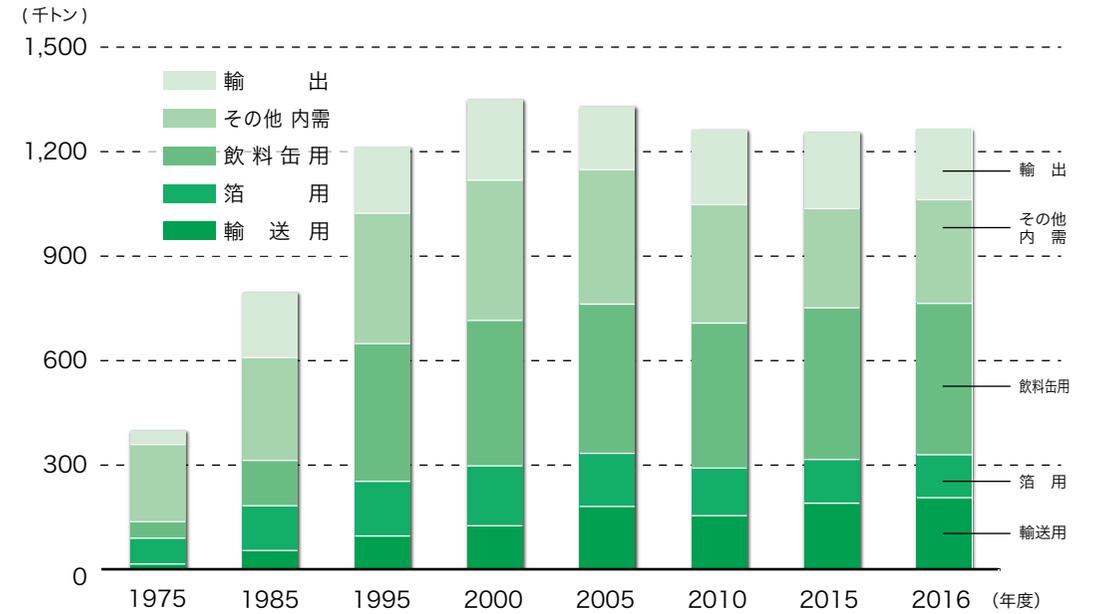
### 主要国のアルミニウム需要構成



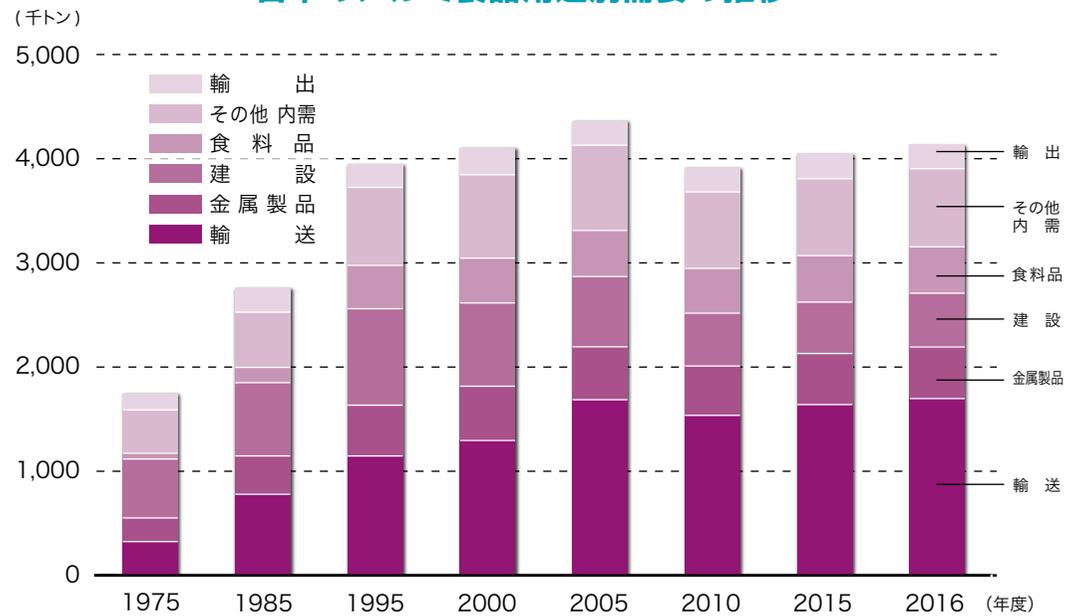
### 日本のアルミ製品総需要の推移



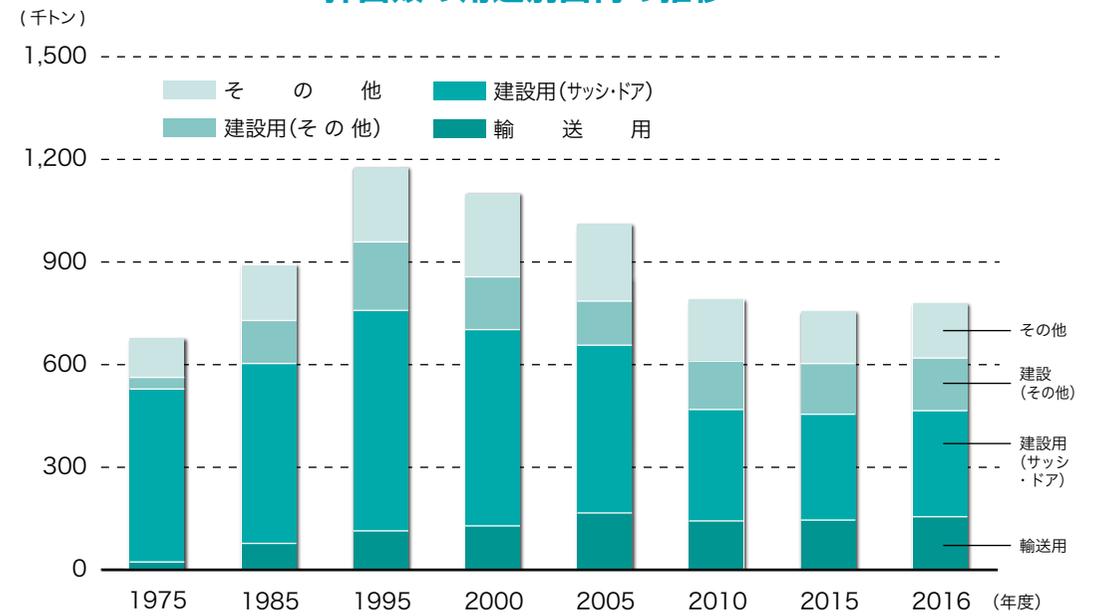
### 板類の用途別出荷の推移



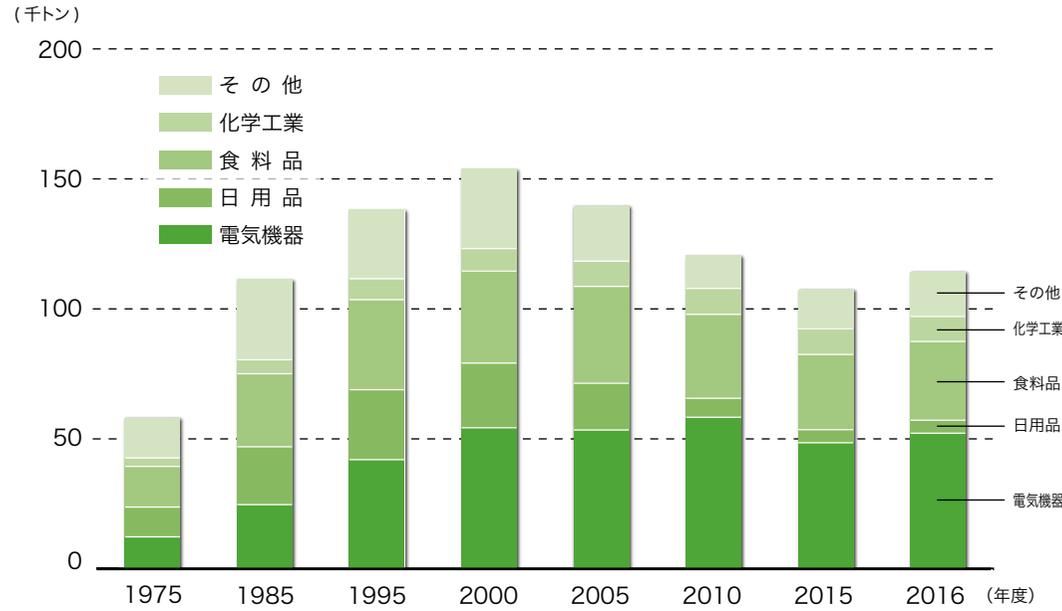
### 日本のアルミ製品用途別需要の推移



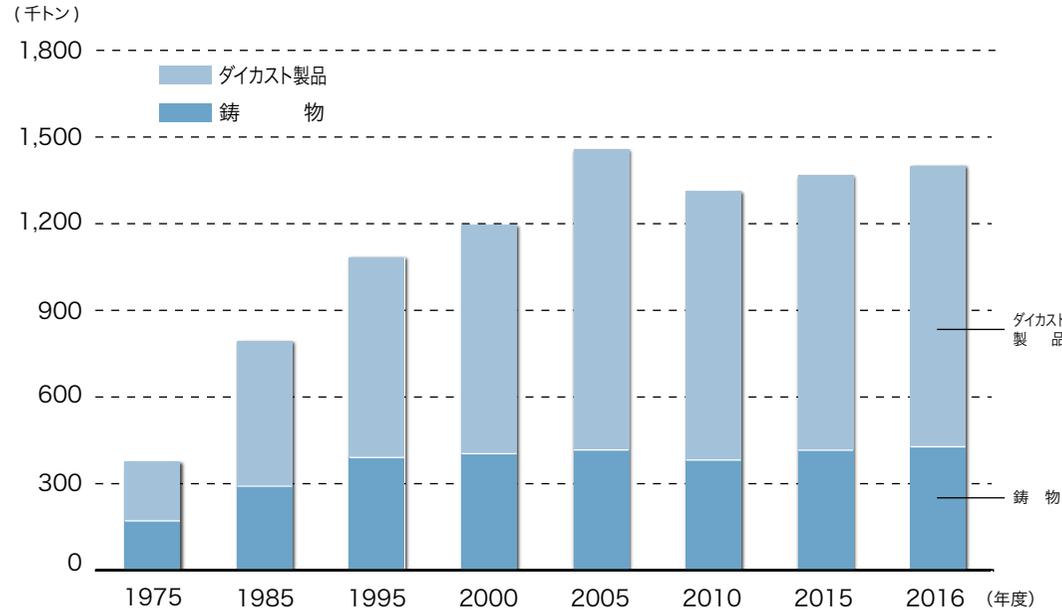
### 押出類の用途別出荷の推移



### 箔の用途別出荷の推移



### 鋳物・ダイカスト製品の需要の推移



### 代表的な展伸材用アルミニウム合金

合金系統	合金呼称		材料特性の概要	用途例
	JIS	AA		
純アルミニウム系	1060	1060	導電材で61%IACS保証。強度を必要とするときは6101を使用する。	ブスバー、電線
	1085 1080 1070 1050 1230A (1N30)	1085 1080 1070 1050 1230A	純アルミニウムのため強度は低いが、熱伝導度および電気伝導度は高く、成形性、溶接性および耐食性がよい。	日用品、銘板、照明器具、反射板、装飾品、化学工業タンク類、フィン、溶接線、導電材、箔地、印刷版
	1100 1200	1100 1200	Al純度が99.0%以上の一般用途のアルミニウム。陽極酸化処理後の外観が、やや白っぽくなる以外は上記と同じ。	一般器物、フィン、キャップ、建材、熱交換器部品
	1100A (1N00)	1100A	1100に比べて若干強度が高く、成形性も優れる。その他の特性は1100と同等。	日用品
	Al-Cu系	2011	2011	快削合金。切削性が優れ、強度も高いが、耐食性が劣る。耐食性が要求される場合には、6262系合金を使用する。
2014 2017 2024		2014 2017 2024	Cuを多く含むため、耐食性はよくないが、強度が高く、構造用材として使用される。鍛造品にも適用される。	航空機、ギヤー、油圧部品、ハブ
2117		2117	溶体化処理後かしめを行うリベット用材として常温時効速度を遅くした合金。	リベット
2018 2218		2018 2218	鍛造用合金。鍛造性に優れ、高温強度が高いので、耐熱性が要求される鍛造品に使用される。耐食性は劣る。	シリンダーヘッド、ピストン、VTRシリンダー
2618		2618	鍛造用合金。高温強度に優れるが、耐食性は劣る。	ピストン、ゴム成形用金型、一般耐熱用途部品
2219		2219	強度が高く低温および高温特性が優れ、溶接性も優れるが耐食性は劣る。	低温用タンク、航空宇宙機器
2025		2025	鍛造用合金。鍛造性良好で強度は高いが、耐食性は劣る。	プロペラ、磁気ドラム
2032 (2N01)		2032	鍛造用合金。耐熱性があり、強度も高いが、耐食性は劣る。	航空機エンジン、油圧部品
Al-Mn系	3003 3203	3003 3203	1100より強度が約10%高く、成形性、溶接性、耐食性に優れる。	一般器物、フィン、化粧板、複写機ドラム、船舶用材
	3004 3104	3004 3104	3003より強度が高く、成形性に優れ、耐食性も良好である。	アルミ缶ボディ、電球口金、屋根板、カラーアルミ
	3005	3005	3003に比べて強度が約20%高く、耐食性も比較的良好である。	建材、カラーアルミ
	3105	3105	3003に比べ若干強度が高く、その他の特性は3004に類似。	建材、カラーアルミ、キャップ
Al-Si系	4032	4032	耐熱性、耐摩耗性に優れ、熱膨張係数が小さい。	ピストン、シリンダーヘッド
	4043	4043	湯流れよく、凝固収縮が少ない。硫酸陽極酸化処理により灰色に自然発色をする。	溶接線、建築パネル、ブレーシング皮
Al-Mg系	5005 5050	5005 5050	3003と同程度の強度があり、加工性、溶接性、耐食性がよい。陽極酸化後の仕上りが良好で、6063形材とよくカラーマッチする。	建築用内外装、車両の内装、船舶の内装
	5052	5052	中程度の強度をもった最も代表的な合金で、耐食性、溶接性、成形性がよい。とくに強度のわりに疲労強度が高く、耐海水性が優れている。	一般板金、船舶、車両、建築、缶エンド、ハニカムコア
	5154	5154	5052より強度が約20%高い。その他の特性は5052と同様。	5052と同様、圧力容器
	5254	5254	5154の不純物元素を規制して、過酸化水素の分解を抑制した合金で、その他の特性は5154と同等。	過酸化水素容器
	5454	5454	5052に比べ強度が約20%高い。5154とほぼ同等の特性を示すが、厳しい環境での耐食性は5154より優れる。	自動車用ホイール
	5056	5056	耐食性に優れ、切削加工による表面仕上り、陽極酸化処理性とその染色性がよい。	カメラ鏡胴、通信機器部品、ファスナー
	5082	5082	5083に近い強度をもち、成形性、耐食性がよい。	缶エンド

合金系統	合金呼称		材料特性の概要	用途例
	JIS	AA		
Al-Mg系	5182	5182	5082に比べて、約5%強度が高く、その他の特性は5082と同等。	缶エンド
	5083	5083	溶接構造用合金。実用非熱処理合金の中で最も強度の高い耐食合金で溶接構造に適する。耐海水性、低温特性もよい。	船舶、車両、低温用タンク、圧力容器
	5086	5086	5154より強度が高く、耐海水性の優れた非熱処理系溶接構造用合金。	船舶、圧力容器、磁気ディスク
	5110A(5N01)	5110A	強度は3003と同等であるが、光輝処理後の陽極酸化処理で高い光輝性が得られる。成形性、耐食性も良好である。	台所用品、カメラ、装飾品、銘板
	5041(5N02)	5041	リベット用合金。耐海水性良好。	リベット
Al-Mg-Si系	6061	6061	熱処理型の耐食性合金。T6処理によりかなり高い耐力値が得られるが、溶接継手強度が低くなるためボルト、リベット構造用に使われる。	船舶、車両、陸上構造物、圧力容器
	6005C(6N01)	6005C	中強度の押出用合金。6061と6063の中間の強度を有し、押出性、プレス焼入性とも優れ、複雑な形状の大型薄肉形材が得られる。耐食性、溶接性もよい。	車両、陸上構造物、船舶
	6063	6063	代表的な押出用合金。6061より強度は低いが、押出性に優れ、複雑な断面形状の形材が得られ、耐食性、表面処理性も良好。	建築、ガードレール、高欄、車両、家具、家電製品、装飾品
	6101	6101	高強度導電用材。55%IACS保証。	ブスバー、電線
	6151	6151	とくに鍛造加工性が優れ、耐食性、表面処理性もよく複雑な鍛造品に適する。	機械、自動車部品
	6262	6262	耐食性快削合金。2011に比し耐食性、表面処理性が一段と優れ、6061と同等の強度を有する。	カメラ鏡胴、気化器部品、プレーキ部品、ガス器具部品
Al-Zn-Mg系	7072	7072	電極電位が低く、防食的クラッド皮材として主用されるが、犠牲陽極作用を利用して熱交換器フィンにも適用される。	アルミニウム合金の合せ材の皮材、フィン
	7075	7075	アルミニウム合金中最高の強度を有する合金の一つであるが、耐食性は劣る。7072とのクラッドにより耐食性は改善されるがコストが高い。	航空機、スキーストック
	7475	7475	7075を高純度化してFe、Si量を抑え、破壊靱性を向上させた合金。特殊な加工熱処理を施すことにより、超塑性を発現する。	航空機
	7050	7050	7075の焼入れ性を改善した合金で耐力力腐食割れ性に優れる。厚板、鍛造品に適している。	航空機、高速回転体
	7204(7N01)	7204	溶接構造用合金。強度が高く、しかも溶接部の強度が常温放置により、母材強度に近いところまで回復する。耐食性もかなり良好。	車両、その他の陸上構造物、航空機
	7003	7003	溶接構造用押出合金。7N01より強度は若干低いが、押出性がよく、薄肉の大型形材が得られる。その他の特性は7N01とほぼ同様。	車両、オートバイリム
Al-Fe系	8021	8021	高Feを含有することで、1230A(1N30)以上の高強度と伸びおよび箔圧延性を付与した箔用合金。	包装用、電気通信用
	8079	8079	FeおよびSiを含有することで、1230A(1N30)以上の強度と伸びおよび箔圧延性を付与した箔用合金。	包装用、電気通信用

## ■鋳物用アルミニウム合金

種類の記号	対応ISO記号	合金系	鋳型の区分	合金特性	代表的用途
AC1B	AlCu4MgTi	Al-Cu系	金型砂型	強度、靱性、切削性良	架線用部品、自転車部品、電装品、航空機部品
AC2A	AlSi5Cu3Mn	Al-Cu-Si系	金型砂型	鋳造性、引張強さ良、伸び小、一般用	マニホールド、デフキャリア、ポンプボディー、シリンダーヘッド、自転車部品
AC2B	AlSi5Cu3Mn	Al-Cu-Si系	金型砂型	鋳造性良、一般用	バルブボディー、クランクケース、クラッチハウジング
AC3A	AlSi12(b)	Al-Si系	金型砂型	流動性、耐食性良、耐力小	ケース、カバー、ハウジング等の薄肉複雑形状のもの、カーテンウォール

種類の記号	対応ISO記号	合金系	鋳型の区分	合金特性	代表的用途
AC4A	AlSi10Mg	Al-Si-Mg系	金型砂型	鋳造性、靱性良、強さの必要な大型鋳物用	プレーキドラム、ミッションケース、クランクケース、ギヤボックス、船舶車両用エンジン部品
AC4B	AlSi8Cu3	Al-Si-Cu系	金型砂型	鋳造性、引張強さ良、伸び小、一般用	クランクケース、シリンダーヘッド、マニホールド、航空機用電装品
AC4C	Al-Si7Mg	Al-Si-Mg系	金型砂型	鋳造性、耐圧性、耐食性良	油圧部品、ミッションケース、フライホイールハウジング、カーテンウォール、小型船用エンジン部品
AC4CH	AlSi7Mg0.3	Al-Si-Mg系	金型砂型	鋳造性、機械的性質良、高級鋳物用	自動車用車輪、架線金具、航空機用エンジン部品
AC4D	Al-Si5Cu1Mg	Al-Si-Cu-Mg系	金型砂型	鋳造性、機械的性質、耐圧性良	水冷シリンダーヘッド・ブロック、クランクケース、燃料ポンプボディー、航空機用油圧部品
AC5A	—	Al-Cu-Ni-Mg系	金型砂型	高温の引張強さ良、鋳造性劣	空冷シリンダーヘッド、ディーゼル機関用ピストン、航空機用エンジン部品
AC7A	AlMg5	Al-Mg系	金型砂型	耐食性、靱性、陽極酸化性良、鋳造性劣	架線金具、船用部品、彫刻素材、事務機器、電装品
AC8A	AlSi12CuMgNi	Al-Si-Ni-Cu-Mg系	金型	耐熱性、耐摩耗性、引張強さ良、熱膨張係数小	自動車、ディーゼル機関用ピストン、船用ピストン、プーリー、軸受
AC8B	—	Al-Si-Ni-Cu-Mg系	金型	耐熱性、耐摩耗性、引張強さ良、熱膨張係数小	自動車用ピストン、プーリー、軸受
AC8C	—	Al-Si-Ni-Cu-Mg系	金型	耐熱性、耐摩耗性、引張強さ良、熱膨張係数小	自動車用ピストン、プーリー、軸受
AC9A	—	Al-Si-Cu-Mg-Ni系	金型	耐熱性、耐摩耗性良、熱膨張係数小、鋳造性、切削性劣	ピストン（空冷2サイクル用）
AC9B	—	Al-Si-Cu-Mg-Ni系	金型	耐熱性、耐摩耗性良、熱膨張係数小、鋳造性、切削性劣	ピストン（ディーゼル機関用）、空冷シリンダー

## ■ダイカスト用アルミニウム合金

種類	記号	合金系	合金特性	代表的用途
アルミニウム合金ダイカスト1種	ADC1	Al-Si系	耐食性、鋳造性がよい。耐力が幾分低い。	自動車メインフレーム・フロントパネル、自動製パン器内釜
アルミニウム合金ダイカスト3種	ADC3	Al-Si-Mg系	衝撃値および耐力が高く、耐食性もADC1とほぼ同等で、鋳造性がADC1より若干劣る。	ホイールキャップ、二輪車クランクケース、自転車ホイール、船外機プロペラ
アルミニウム合金ダイカスト5種	ADC5	Al-Mg系	耐食性が最もよく、伸び、衝撃値が高いが、鋳造性が悪い。	農機具アーム、船外機プロペラ、釣具レバー・スプール
アルミニウム合金ダイカスト6種	ADC6	Al-Mg-Mn系	耐食性はADC5に次いでよく、鋳造性はADC5より若干よい。	二輪車ハンドレバー・ウインカーホルダー、船外機プロペラ・ケース・ウォーターポンプ、磁気ディスク装置
アルミニウム合金ダイカスト10種	ADC10	Al-Si-Cu系	機械的性質、被削性、鋳造性がよい。	自動車キャブレター・シリンダーブロック、二輪車ショックアブソーバー・サイドカバー・クランクケース、農機具ギヤケース・クランクケース・シリンダーブロック、VTRフレーム、電動工具カバーケース、釣具ボディー、ガス機器ケース・カバー、エスカレータークリート
アルミニウム合金ダイカスト10種Z	ADC10Z	Al-Si-Cu系	ADC10より耐鋳造割れおよび耐食性が劣る。	
アルミニウム合金ダイカスト12種	ADC12	Al-Si-Cu系	機械的性質、被削性、鋳造性がよい。	
アルミニウム合金ダイカスト12種Z	ADC12Z	Al-Si-Cu系	ADC12より耐鋳造割れおよび耐食性が劣る。	
アルミニウム合金ダイカスト14種	ADC14	Al-Si-Cu-Mg系	耐摩耗性がよく、湯流れ性がよく、耐力が高く、伸びが劣る	自動変速機用オイルポンプボディー、二輪車インサート・ハウジングクラッチ

## SI：国際単位系

- 語 源：（仏語）Le Système International d'Unités  
（英語）International System of Units
- 定 義：基本単位 [m, kg, s, A, K, mol, cd]、補助単位 [rad, sr]、組立単位\*および  
接頭語\*\*からなる一貫した単位系で国際的に統一されたもの。  
\*組立単位 (1) 基本単位の組立単位 :  $m^2, m/s, m/s^2$  など。  
(2) 固有名称をもつ組立単位 : N, Pa, J, Hz など。  
\*\*接頭語 SI単位の10の整数乗倍を構成するための記号。  
G (ギガ,  $10^9$ ), M (メガ,  $10^6$ ), k (キロ,  $10^3$ ), m (ミリ,  $10^{-3}$ ) など。

【表 1】 非鉄 JIS で使用されるおもな SI 単位

量の名称	規格の特性値名称	SI 単位				従来単位の記号
		記号	読み方	定義	実用記号	
質量	質量	kg	キログラム	—	kg	kg
力	荷重	N	ニュートン	$1N = 1kg \cdot m/s^2$	N, kN	kgf
応力	引張強さ、耐力	N/mm <sup>2</sup>	—	$1N/m^2 = 1Pa = 10^{-6}N/mm^2$	N/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>
圧力	水圧、空圧	Pa	パスカル	$1Pa = 1N/m^2 = 10^{-6}N/mm^2$	MPa	kgf/cm <sup>2</sup>

【表 2】 従来単位から SI 単位への換算

特性値の名称	換 算 式	特性値の丸め方
荷重	$Y (N) = 9.80665 \times X (kgf)$	有効数字 3 桁に丸める。
引張強さ、耐力	$Y (N/mm^2) = 9.80665 \times X (kgf/mm^2)$	整数に丸める。
水圧、空圧	$Y (MPa) = 0.0980665 \times X (kgf/cm^2)$	原則として小数以下 1 桁に丸める。

【表 3】 SI 単位から従来単位への換算

特性値の名称	換 算 式
荷重	$Y (kgf) = X (N) \div 9.80665$ $= X (N) \times 0.101972$
引張強さ、耐力	$Y (kgf/mm^2) = X (N/mm^2) \div 9.80665$ $= X (N/mm^2) \times 0.101972$
水圧、空圧	$Y (kgf/cm^2) = X (MPa) \div 0.0980665$ $= X (MPa) \times 10.1972$