

アルミニウム合金の 基礎と成形技術

日本塑性加工学会 編

コロナ社

■「アルミニウム合金の基礎と成形技術」出版部会

部会長 松田健二（富山大学）
幹事 船塚達也（富山大学）
委員 浅井一仁（豊田工業高等専門学校）
(50音順) 笹田昌弘（同志社大学）
浜 孝之（京都大学）

執筆者 池田賢一（北海道大学）：1章
西 直美（ものづくり大学名誉教授）☆：2.1～2.3節
平田直哉（株式会社日立産業制御ソリューションズ）：2.4節
櫻井健夫（一般社団法人軽金属学会）：3.1節～3.4.1項
桑原利彦（東京農工大学）☆：3.4.2項
吉田健吾（静岡大学）：3.4.3項
高辻則夫（富山大学名誉教授）☆：4章
船塚達也（富山大学）：4章
前田将克（日本大学）：5章
阿相英孝（工学院大学）☆：6章
菊地竜也（北海道大学）：6章
柳下 崇（東京都立大学）：6章

（執筆順，☆印は章のとりまとめ役，所属は編集当時）

ま え が き

本書『アルミニウム合金の基礎と成形技術』は、コロナ禍の2021年7月に塑性加工学会出版事業委員会にて企画されました。このたび、ようやく発刊できる運びとなりましたことを関係者一同、本当に嬉しく思っております。

さて、1974年のオゾン層破壊の発見に端を発した地球温暖化問題。1980年代からそれに関する問題提起が始まり、1990年の京都議定書で「温室効果ガスを削減する数値目標と目標達成期」が合意されたことはもう遠い記憶になってしまったのではないのでしょうか。温暖化対策、地球・環境保全等に関連して、各国の「ものづくり」に対する規制が日に日に厳しくなる中で、2015年に国連でSDGsなる目標が提唱されました。各国の政治や経済に関連する部分も十分に影響しているものと推測されますが、「ものづくり」に関わる技術者、研究者の立場から俯瞰すると、科学立国・技術立国としての我が国の担う部分が非常に大きいことは想像に易いと思われれます。

特にCO₂排出量削減の急先鋒として、自動車等の陸上輸送車両の軽量化によるガソリン消費量の軽減、それに伴う排気ガス量の低減が目標として掲げられて世界的に大きく動き出し、加えてハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車等への転換期をも迎え、「軽量化」は欠かせないキーワードになったと思われれます。そのような中で軽量の金属であり、比較的低温の熱処理と容易な加工で所望の強度が得られる「アルミニウム」、正確には「アルミニウム合金」は、軽量化を実現するのに欠かせない金属材料であると再認識されたのだと思われれます。資源のない日本で、今後、自動車に限らず、どのようにアルミニウム製品を製造していくのか、社会と一体化したリサイクルの仕組みなども含め、2030年以降の持続可能な社会において求められている解であると思われれます。

本書はまさにそのような解を得るためのバイブル的存在となることを目指して企画され、「1. アルミニウムの特性とその合金化」, 「2. アルミニウムの製造加工」, 「3. アルミニウムの圧延・板成形」, 「4. アルミニウムの押し出し加工」, 「5. アルミニウムおよびその合金の接合」, 「6. アルミニウムの表面処理」の六つの分野の第一線で、国内外でご活躍の研究者・技術者の皆様に執筆をご快諾いただきました。今までこの分野に携わられてこられました皆様はもちろん、学生の皆様や今からアルミニウムの製造に関与されます企業の新入社員の皆様への導入書籍としても、ご満足いただける書籍であると自負しております。日本がアルミニウムの分野で世界をリードしていくものづくり立国として邁進していくことを願いつつ、末永くご愛読いただければ幸いです。

最後に、今一度、本企画を立案いただいた一般社団法人日本塑性加工学会に御礼申し上げます。ご執筆いただきました著者の皆様方、出版をご担当いただいた株式会社コロナ社ならびに関係各位に、心より御礼を申し上げます。

本書籍の企画にご尽力され、発刊前にご逝去されました、著者の高辻則夫富山大学名誉教授に哀悼の意を表します。

2024年9月

松田 健二

目 次

1. アルミニウムの特徴とその合金化

1.1	アルミニウムの特徴	1
1.2	アルミニウムの用途	3
1.3	アルミニウム合金	4
1.3.1	合金元素の役割	4
1.3.2	アルミニウム合金の分類	5
1.3.3	アルミニウム合金の加工熱処理（調質）	13

2. アルミニウムの鋳造加工

2.1	鋳造の基礎	16
2.1.1	鋳造法とは	16
2.1.2	鋳造法の特徴	17
2.1.3	鋳造の基本的な原理・原則	19
2.2	鋳造法の種類	23
2.2.1	鋳造法の分類	23
2.2.2	砂型鋳造法	25
2.2.3	フルモーールド鋳造法	30
2.2.4	Vプロセス鋳造法	31
2.2.5	精密鋳造法	34
2.2.6	重力金型鋳造法	36
2.2.7	低圧鋳造法	38
2.2.8	ダイカスト法	40
2.2.9	遠心鋳造法	43
2.2.10	連続鋳造法	45

2.3 鋳造合金と特性, 用途	46
2.3.1 アルミニウム合金鋳物の種類, 特性, 用途	46
2.3.2 アルミニウム合金ダイカストの種類, 特性, 用途	49
2.4 鋳造シミュレーション	52
2.4.1 鋳造シミュレーションの種類	53
2.4.2 鋳造シミュレーションの事例	55

3. アルミニウムの圧延・板成形

3.1 アルミニウム板製造技術の基礎	58
3.1.1 アルミニウム板製造技術（上工程：均質化処理から熱間圧延まで）	60
3.1.2 アルミニウム板製造技術（下工程：冷間圧延から最終熱処理, 板製品になるまで）	64
3.2 アルミニウム合金板の成形加工	71
3.2.1 応力-ひずみ曲線	72
3.2.2 変形と転位	74
3.2.3 アルミニウム板成形加工の基礎	76
3.3 アルミニウム板成形の応用技術（実製品技術）	85
3.3.1 アルミニウム箔圧延技術	86
3.3.2 アルミニウム飲料缶の成形技術	87
3.3.3 自動車部品用アルミニウム合金板の成形技術	89
3.4 アルミニウム板の成形シミュレーション技術	95
3.4.1 板成形シミュレーションの事例	96
3.4.2 板成形シミュレーションの高精度化のための材料試験方法	97
3.4.3 結晶塑性シミュレーション	102

4. アルミニウムの押し出し加工

4.1 押し出し加工の基礎	114
4.1.1 押し出し加工とは	114
4.1.2 押し出し加工の原理	115
4.1.3 押し出し性を支配する因子	120

4.1.4	金型設計の基礎	122
4.2	押出し型材用アルミニウム合金	128
4.2.1	アルミニウム合金の性質	128
4.2.2	押出し性による分類	130
4.3	押出し製品の品質	131
4.4	押出し加工のシミュレーション	135
4.4.1	シミュレーションにおいて注意すべき項目	135
4.4.2	押出しシミュレーションの事例	136
4.5	今後のアルミニウム押出し加工	143

5. アルミニウムおよびその合金の接合

5.1	接合の定義と技術の概要	146
5.2	接合の原理と付随現象	148
5.3	アルミニウムおよびその合金が接合困難である理由	150
5.4	残 留 応 力	152
5.5	アルミニウムおよびその合金に用いられる接合技術	156
5.5.1	溶 融 溶 接	156
5.5.2	ろ う 付 け	158
5.5.3	固 相 接 合	159

6. アルミニウムの表面処理

6.1	アルミニウムの用途と表面処理	162
6.2	前 処 理	163
6.2.1	脱 脂	163
6.2.2	機 械 研 磨	165
6.2.3	化学研磨, 化学エッチング	166
6.2.4	電解研磨, 電解エッチング	167
6.3	陽極酸化処理	168
6.3.1	バリアー型陽極酸化皮膜	168

6.3.2	ポラス型陽極酸化皮膜	170
6.3.3	硬質皮膜	175
6.3.4	封孔処理	176
6.3.5	プラズマ電解酸化皮膜	177
6.3.6	着色	178
6.3.7	濡れ性制御	180
6.3.8	表面機能化	180
6.3.9	陽極酸化処理の応用	183
6.4	化成処理	185
6.5	塗装	187
6.6	めっき	187
6.7	表面処理における環境対応	188
引用・参考文献		189
索引		197

1.

アルミニウムの特性とその合金化

1.1 アルミニウムの特徴

アルミニウムは、鉄や銅に比べてきわめて新しい金属である。鉄や銅が紀元前 5000 ~ 3000 年に登場しているのに対し、金属アルミニウムの存在が確認されたのは 1807 年である。工業的にアルミニウムが製造され始めたのは 1886 年のことであることから、急速に人類の生活に欠かせない金属の一つに成長したといえる。その理由としては、以下に示す優れた種々の性質を有するからである。本節では、アルミニウムの中でも工業的にも使用される純アルミニウムの性質を中心に示す。

アルミニウムは、原子番号 13、面心立方 (FCC : face centered cubic) 構造の結晶構造をもつ元素である。私たちの身のまわりに用いられているアルミニウムやアルミニウム合金の一般的な特徴としては、「軽い」「電気伝導性が良い」「熱伝導性が良い」「加工性が良い」「铸造性が良い」「強い」「非磁性である」「耐食性が良い」「リサイクル性が良い」が挙げられ、実用材料として広く用いられている理由となっている。

表 1.1 に高純度アルミニウム (99.996 mass%) と普通純度アルミニウム (99.5 mass%) のおもな物理的性質^{1)†}を示す。両者の密度の違いは、不純物として含有する鉄 (Fe) の量に起因しているが、アルミニウムの密度は鉄や銅の約 3 分の 1 であり、さまざまな構造材料の軽量化に役立っている。導電率や

† 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を示す。

2 1. アルミニウムの特性とその合金化

表 1.1 高純度アルミニウム (99.996 mass%) と普通純度アルミニウム (99.5 mass%) のおもな物理的性質

性 質	高純度アルミニウム	普通純度アルミニウム
原子番号	13	
原子量	26.981 5	
結晶構造	面心立方構造	
格子定数 (20℃) [nm]	0.404 96	0.404
密度 (20℃) [Mg/m ³]	2.698 4	2.71
融点 [℃]	660.1	～ 650
線膨張係数 [/℃]		
(20～100℃)	24.58×10^{-6}	23.5×10^{-6}
(100～300℃)	25.45×10^{-6}	25.6×10^{-6}
縦弾性係数 [GPa]	70.6	68.6
横弾性係数 [GPa]	26.2	25.7
熱伝導度 [W/m·K]	238	225 (軟質)
導電率 [%IACS]	64.94	59 (軟質) 57 (硬質)
比抵抗 [nΩ·m]		
(660℃)	240	200
(20℃)	26.548	29.22 (軟質) 30.25 (硬質)

電気抵抗で示される電気伝導度は、不純物の量に影響を受けるため、普通純度アルミニウムの導電率が低い。これは、不純物の存在によって結晶格子がひずみ、伝導電子が散乱されることが原因である。一般に金属の熱伝導度は、電気伝導度にほぼ比例することから、導電率の値を用いて熱伝導率を求めることができる。アルミニウムの場合も、表 1.1 に示すように普通純度アルミニウムの熱伝導度のほうが低い値である。

本書では、アルミニウムとアルミニウム合金の成形技術を各章で詳細に説明するが、加工性の良いことがさまざまな加工法を適用できる理由である。アルミニウムは展伸性に富むので、板、箔、棒、管、線、型材などさまざまな形状の製品を種々の加工法によって製造できることから、広い用途で使用されている。また、強度は純アルミニウムに合金元素を添加することや加工熱処理工程

によって、固溶強化や析出強化などの強化機構が適用できるため、さまざまな引張強さを有する素材を作製できる。したがって、用途に応じて適切な素材を選択可能である。

一方、化学的性質についても良好な特性を有している。アルミニウムは、大気中で自然に耐食性の良い酸化皮膜が形成されるため、自己防護に優れた耐食性を有している。また、6章で詳細に述べるが、アルミニウムは無色透明な酸化皮膜を表面に形成させるアルマイト処理により、金属光沢を維持したまま耐食性、耐摩耗性を改善させることができる。さらに、電解発色、自然発色、染色などの方法により、さまざまな色調を与えることができるため、電化製品や建築物の内外装なども多く使用されている。リサイクル性に関してアルミニウムは、スクラップの再生が他の金属に比べて容易であることから、資源の有効活用、廃棄物公害防止にも役立っている。

このようにアルミニウムは人類の生活に役立つ多くの特徴を有していることから、輸送機関のエネルギー消費改善および効率の向上、生活水準の向上による耐久消費の需要拡大、リサイクルによる省資源の促進などに、最も期待されている金属材料とされている。

1.2 アルミニウムの用途

アルミニウムやアルミニウム合金は、私たちの生活に欠かせない金属材料である。特に最近用途が増えている例としては、自動車用部品が挙げられる。自動車軽量化の背景としては、地球環境への配慮を目的としたCO₂排出量規制の強化、衝突安全基準の向上による安全性の確保のため自動車の電動化、衝突防止機能や自動運転化などの技術の進化に伴い、車両重量が増加する傾向になるため、車体をより軽量化することが求められていることによる²⁾。車体の外板・内板材だけでなく、エンジン、熱交換器およびサスペンション部品など、押し出し成形、板成形やダイカストなど本書で取り扱うさまざまな成形技術により作製された部材としてアルミニウム合金が活用されている。さらに、新幹線

4 1. アルミニウムの特性とその合金化

やリニアモーターカーなどの高速鉄道車両，航空機，ロケット，高層タワーなど，軽量性，耐食性，高比強度，美麗などの点や新たな成形技術の発展もあり，広く利用されている。

上記のような大型構造物だけでなく，アタッシュケースや医薬品・食料品用パッケージ材，飲料用アルミニウム缶などにも広く用いられている。さらに，メモリディスク材などの機能材料としてもアルミニウム合金が用いられている。

アルミニウムとアルミニウム合金の用途が拡大していることは，日本のアルミニウム製品の総需要量の推移^{2),3)}からも明らかである。1970年には年間121万トンであった総需要量は，現在では年間400万トンを超える需要となっている。内訳としては圧延材やダイカストが半数以上を占めているが，これは自動車を中心とする輸送機器分野に加え，建設，容器包装用の需要が多いことによる。

このようにアルミニウム製品の需要がこれまで以上に高くなることが予想され，地金から製品にするための成形技術の重要性はさらに高まることになる。2章以降では，アルミニウム製品を作製するための各成形技術を詳細に解説する。

1.3 アルミニウム合金

アルミニウムは，工業製品としても広く使用されているが，さまざまな用途および要求に応えるために合金化される。本節では，アルミニウム合金の主要元素の役割やアルミニウム合金の分類，調質（加工熱処理）について簡潔に紹介する。各成形技術などに関連する合金については，各章で詳細に説明されているため，該当箇所を参照されたい。

1.3.1 合金元素の役割

アルミニウムに添加されるおもな元素としては，銅（Cu），マグネシウム（Mg），ケイ素（Si），マンガン（Mn），亜鉛（Zn）が挙げられる。これらの元

素がアルミニウムに単独もしくは複数添加されることで、機能を発現することになる。表 1.2 は、アルミニウム合金の特性発現のための添加元素をまとめたものである。強度を増加させるためには、固溶強化を用いる場合は Mn や Mg を、析出強化の場合は Cu-Mg, Zn-Mg, Mg-Si などが合金元素となる。一方、鑄造性を上げるためには Si の添加が有効であり、さらに耐摩耗性の向上にも効果が高い。Ti や B などの微量添加は凝固組織の微細化に寄与して、材料強度などを改善する。

表 1.2 アルミニウム合金の特性発現のための添加元素一覧

特 性	元 素
強度・固溶強化	Mn Mg Cu
強度・析出強化	Cu-Mg Mg-Si Zn-Mg Li-Cu-Mg
導電率+強度	Mg-Si Zr
耐熱性	Cu-Ni Si-Cu-Ni
耐食性	Mn Mg Mg-Si
鑄造性	Si Ti-B Na Si Sb
耐摩耗性	Si
被削性	Mg Cu Pb Bi

1.3.2 アルミニウム合金の分類

実用材料として用いられるアルミニウム合金は、展伸用合金と鑄物・ダイカ

索 引

<p>【あ】</p> <p>アーク溶接 156</p> <p>圧着不良 133</p> <p>アニオン 168</p> <p>アノード酸化 168</p> <p>アルマイト 173</p> <p>アルミニウム合金鋳物 46</p> <p>アルミニウム合金 ダイカスト 49</p> <p>合わせ込み 57</p> <p>【い】</p> <p>イオン伝導 169</p> <p>鋳物 16</p> <p>鋳物砂 27</p> <p>鋳物・ダイカスト用合金 9</p> <p>鋳物用合金 10</p> <p>インベスメント鋳造法 34</p> <p>【え】</p> <p>永久変形 73</p> <p>エリクセン試験方法 82</p> <p>エリクセン値 82</p> <p>遠心鋳造 55</p> <p>遠心鋳造法 43</p> <p>【お】</p> <p>応力-ひずみ曲線 72</p> <p>送り曲げ 85</p> <p>押さえ曲げ 84</p> <p>オートマチックゲージ コントロール 65</p> <p>【か】</p> <p>化学研磨 166</p> <p>拡面処理 167</p> <p>加工熱処理 13</p>	<p>ガス硬化性鋳型 28</p> <p>化成処理 185</p> <p>カチオン 168</p> <p>可動型 42</p> <p>簡易二軸応力試験方法 102</p> <p>間接押出し加工 116</p> <p>【き】</p> <p>機械学習 57</p> <p>機械研磨 165</p> <p>機械的締結 147</p> <p>キーホール 157</p> <p>逆極点図 104</p> <p>凝固 19</p> <p>凝固形態 21</p> <p>凝固収縮 20,55</p> <p>凝縮 19</p> <p>極点図 103</p> <p>均質化処理 60</p> <p>【く】</p> <p>クラウン 63</p> <p>クリアランス 78</p> <p>グレーングロス 133</p> <p>【け】</p> <p>傾斜式鋳造機 36</p> <p>欠陥評価指標 56</p> <p>結晶塑性モデル 102</p> <p>結晶方位分布関数 106</p> <p>【こ】</p> <p>工業用純アルミニウム 6</p> <p>降伏 73</p> <p>降伏点 73</p> <p>固相率 23</p> <p>固定型 42</p>	<p>コールドチャンバー マシン 41</p> <p>【さ】</p> <p>最大外接円 121</p> <p>最適化 55</p> <p>細分記号 14</p> <p>材料試験方法 97</p> <p>【し】</p> <p>仕上げ工程 70</p> <p>シェルモールド 29</p> <p>自硬性鋳型 29</p> <p>自己規則化 173</p> <p>自己組織化 180</p> <p>自然発色法 179</p> <p>絞り成形 77,90</p> <p>集合組織 104</p> <p>十字形試験片 98</p> <p>重力金型鋳造法 36</p> <p>粥状型凝固 22</p> <p>昇華 20</p> <p>消失模型鋳造法 30</p> <p>蒸発 19</p> <p>しわ感受性 90</p> <p>【す】</p> <p>水和酸化物 176</p> <p>ストレッチャー式 70</p> <p>砂型鋳造 16</p> <p>砂型鋳造法 25</p> <p>スマット 167</p> <p>スラブ 58</p> <p>【せ】</p> <p>成形シミュレーション 95</p> <p>静水圧押出し加工 119</p> <p>精密鋳造法 34</p>
--	--	--

	【や】	溶接	146	レーザー溶接	157
		溶体化処理	67	連続焼鈍炉	69
焼入れ処理	68	横型遠心鑄造法	43	連続鑄造法	45
焼きなまし処理	67			【ろ】	
ヤング率	72	【り】		ろう付け	158
	【ゆ】	リニア摩擦圧接	160	ローエックス	49
融解	19	粒子法	55	ロストワックス鑄造法	34
	【よ】	流動停止固相率	23	ローラーレバラー式	70
陽極酸化	168	【れ】			
		冷間圧延	64		

	【A】	Al-Si-Cu-Mg 系合金	12,52	【M】	
AC1B	10	Al-Si-Cu 系合金	11,12,52	MIG	156
AC2A	10	Al-Si-Mg 系合金	10,11,50	【R】	
AC2B	10	Al-Si 系合金	8,10,11,48,50	r 値	80
AC3A	10	Al-Zn-Mg-Cu 系合金	8	【S】	
AC4A	10	Al-Zn-Mg 系合金	8	Schmid 則	106
AC4B	11	【B】		【T】	
AC4C	10	BHF	77	TIG 溶接	156
AC4CH	10	【C】		【V】	
ADC1	11,50	CAE	53	V プロセス鑄造法	31
ADC3	11,51	CAO	55	【数字】	
ADC5	11,51	【D】		4 タンデム式	63
ADC6	11,51	DC 鑄造法	58	1000 系アルミニウム	6
ADC10	12,52	DI 加工	86,88	2000 系アルミニウム合金	7
ADC10Z	12	【E】		3000 系アルミニウム合金	7
ADC12	12,50	Euler 角	105	4000 系アルミニウム合金	8
ADC12Z	12	【G】		5000 系アルミニウム合金	8
ADC14	12,52	GUI	54	6000 系アルミニウム合金	8
AGC	65	【L】		7000 系アルミニウム合金	8
Al-Cu-Mg 系合金	7	LDR	80		
Al-Cu-Si 系合金	10				
Al-Cu 系合金	10,47				
ALE 法	135				
Al-Mg-Si 系合金	8				
Al-Mg 系合金	8,11,49,51				
Al-Mn 系合金	7				

アルミニウム合金の基礎と成形技術

Basics and Forming Technology of Aluminum Alloys

© 一般社団法人 日本塑性加工学会 2024

2024年11月7日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人
日本塑性加工学会
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 壮光舎印刷株式会社
製本所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04691-5 C3053 Printed in Japan

(柏原)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。