

ま え が き

近年、社会の急速な発展に伴い、さまざまなニーズが科学技術や産業技術に求められるようになってきた。中でも、人類の生活空間としての地球環境問題や省資源・省エネルギー問題、また、持続可能社会をいかに実現するかなどに関心が高まり、多様なニーズが日々発信されている。安心して安全な社会を築いていくために科学技術や産業技術に課せられる役割はますます大きくなっている。このような社会状況にあって、より性能に優れた高い信頼性の軽合金材料が広く求められている。例えば、自動車、高速鉄道車両、土木・建築、情報機器、航空宇宙、さらには、医療・福祉や日用品分野などにおいて、軽量で、高強度・高靱性、高機能の軽合金材料が不可欠のものとして、世界各国で精力的に研究・開発が行われている。現在、広く使われている代表的軽金属材料として、アルミニウム、マグネシウム、チタンがある。これらの金属はいずれもが鉄や銅に比べて人類とかわって来た歴史はきわめて浅く、成長途上にある若い金属といわなければならない。しかしながら、近年の軽金属材料研究の進展は目覚ましく、また、軽金属材料の用途も構造材料分野をはじめ機能材料分野、さらには医療・福祉分野などに広がっており、現代社会を支える不可欠の材料として活用されている。

材料はいうまでもなく、使われてはじめて「材料」としての意義がある。そのための製造技術、組織・構造解析技術および特性評価技術が三位一体となって発展することがきわめて重要である。なぜなら、これらの三要素は相互に深くかかわっているからである。さらに近年はこれらの三要素に加え、リサイクル性に優れた材料であることも重要な要素となっている。もちろん、材料として使われるためには、どこでも入手が可能であり、かつ、コストパフォーマンスに優れることも重要な点である。

軽金属材料には、アルミニウム、マグネシウム、チタン、ベリリウム、リチウムなどがあるが、本書では、工業的に広く使用されている代表的な軽金属として、アルミニウム、マグネシウムおよびチタンを取り上げている。これらの軽金属あるいは軽合金の性質としては、鉄鋼材料や銅合金材料と多くの共通点があるが、一方では軽合金材料としての特徴を多くもっている。本書ではこれらについて、全体的に俯瞰できるように構成に工夫をこらしている。特に、本書の構成として、軽合金材料の特徴・用途例、製造プロセス、合金の種類、組織・構造、性質・特性およびこれらにかかわる金属材料としての基礎現象について記述してある。また、代表的な実用合金材料については、諸性質や材料選択の指針についてもふれている。近年、さまざまな軽金属材料の研究・開発が進められ、今後、大きな飛躍が期待できる材料も多くある。これらの中で、実用化が始まっているもの、あるいはきわめて近い将来に実用化が期待できる材料が多くあり、これらを軽合金先進材料として取り上げた。本書は、基礎的事項を十分に念頭に置いて記述してあり、材料を学ぶ大学低学年から高学年へ、さらには大学院での勉強に十分に役立つように工夫した。また、製造現場の方々にも軽合金材料をより俯瞰的に知るうえで十分に役立つように工夫した。

本書が多くの方々に軽合金材料への興味を喚起し、また、軽合金材料を新たに活用するきっかけを提供することができれば、著者の大きな喜びとするところである。

最後に、貴重なデータや写真などを快くご提供していただいた方々、ならびに多くの資料などをご提供いただいた方々に深甚なる謝意を表します。本書の執筆に当たってはコロナ社にご助言やご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げる次第です。

2011年6月

里 達雄
(大岡山にて)

目 次

1. 軽金属および軽合金の特徴

1.1 はじめに	1
1.2 軽合金の性質	3
1.3 時代のニーズに応える軽合金材料	5
1.4 リサイクル	9
1.5 本書での扱いの特徴	11

2. アルミニウムおよびその合金

2.1 アルミニウムとは	12
2.2 アルミニウムの用途例および需要	13
2.3 アルミニウムの製造	18
2.3.1 製錬	18
2.3.2 精製	20
2.4 アルミニウム合金の分類	20
2.4.1 合金元素	20
2.4.2 展伸用合金および鋳物用・ダイカスト用合金	21
2.5 アルミニウムの調質	24
2.6 代表的製造プロセスと関連現象, およびマイクロ組織の特徴	26
2.6.1 素形材・製品製造プロセス	26
2.6.2 展伸材製造プロセス	27

2.6.3	鋳物およびダイカスト製造プロセス	33
2.6.4	製造工程における基礎現象およびマイクロ組織	40
2.7	アルミニウム合金の凝固	65
2.7.1	凝固現象—液相からの固相の核生成・成長	65
2.7.2	凝 固 組 織	68
2.7.3	凝固における溶質元素の分布	72
2.7.4	組成的過冷却	75
2.7.5	デンドライト組織の形成	76
2.7.6	改 良 処 理	77
2.8	アルミニウム合金の強化法	78
2.8.1	合金の性質と混合則	78
2.8.2	加工硬化特性	79
2.8.3	固溶硬化特性	81
2.8.4	結晶粒微細化（ホール・ペッチの関係）	82
2.8.5	析 出 硬 化	83
2.9	代表的実用合金および諸特性	86
2.9.1	展伸用アルミニウム合金	86
2.9.2	鋳物用・ダイカスト用アルミニウム合金	88
2.10	工業材料としての特性および選定指針	93
2.10.1	展 伸 用 合 金	93
2.10.2	鋳物用・ダイカスト用合金	96

3. マグネシウムおよびその合金

3.1	マグネシウムとは	100
3.2	マグネシウムの用途例および需要	103
3.3	マグネシウムの製造	106
3.4	マグネシウム合金の分類	108

3.4.1 展伸用合金	108
3.4.2 鋳物用・ダイカスト用合金	111
3.5 マグネシウムの調質	112
3.6 代表的製造プロセスと関連現象, およびマイクロ組織の特徴	113
3.7 製造工程における基礎現象およびマイクロ組織	115
3.7.1 Mg-Al, Mg-Al-Zn 合金状態図	116
3.7.2 回復・再結晶	118
3.7.3 熱処理および時効挙動	121
3.8 代表的実用合金および諸特性	134
3.8.1 展伸用合金	135
3.8.2 鋳物用・ダイカスト用合金	137
3.9 工業材料としての特性 (実用合金)	138
3.9.1 高温強度	140
3.9.2 疲労強度	142
3.9.3 結晶粒径の影響	143
3.9.4 減衰能	143
3.9.5 溶接性	144
3.9.6 耐食性	145
3.10 マグネシウムの安全対策	146

4. チタンおよびその合金

4.1 チタンとは	147
4.2 チタンの用途例および需要	149
4.3 チタンの製造	152
4.3.1 スポンジチタン (クロール法)	152
4.3.2 チタンインゴット	154
4.4 チタン合金の分類	155

4.4.1	工業用純チタン (CP チタン)	156
4.4.2	耐食チタン合金	156
4.4.3	チタン合金	156
4.5	チタンおよびチタン合金の調質・熱処理の基礎	159
4.5.1	焼なまし処理および溶体化処理	159
4.5.2	時効処理	160
4.6	代表的製造プロセスとマイクロ組織の特徴	160
4.6.1	展伸材の製造	160
4.6.2	精密鑄造の工程	162
4.7	代表的実用合金および諸特性	163
4.7.1	工業用純チタン (CP チタン)	163
4.7.2	α 合金	164
4.7.3	$\alpha + \beta$ 合金	164
4.7.4	β 合金	166
4.8	工業材料の諸特性	167
4.8.1	チタンおよびチタン合金	167
4.8.2	超塑性材料	168
4.8.3	粉末冶金合金	168
4.8.4	チタンの陽極酸化	169
4.8.5	耐食性	170
4.9	生体用および歯科用チタン合金	170

5. 軽合金先進材料

5.1	複合材料	172
5.2	粉末冶金合金	178
5.3	メカニカルアロイング合金 (MA 合金)	184
5.4	液体急冷合金 (液体急冷プロセス)	185

5.5 ナノ結晶材料	188
5.5.1 ナノ結晶分散アルミニウム合金	188
5.5.2 高強度ナノ結晶マグネシウム合金	190
5.5.3 ナノクラスター制御アルミニウム合金	191
5.6 強ひずみ加工法	194
5.7 ポーラス金属	196
5.8 ナノマルチ組織合金	198
付 録	199
引用・参考文献	203
索 引	210

1

軽金属および軽合金の特徴

1.1 はじめに

金属材料は紀元前より深く人類の生活にかかわり、さまざまな日用品や装飾品、武具などに活用されてきた。特に、銅や鉄は古い歴史をもち、大きな技術的発展を経て、現在も広く人類社会を支えている有用な金属材料である。一方、科学の発展に伴い、さまざまな金属が発見され、周期表には80種類以上もの金属元素の存在が示されている。これらの多くは新たな金属材料として現代の科学技術を支えている。中でも、近年の省資源・省エネルギーの必要性の観点から、軽い金属材料の活用が社会から広く求められるようになってきた。金属元素を密度（比重）の観点から並べると、表1.1に示すようになる。なお、表1.1には半金属と呼ばれるホウ素（B）やケイ素（Si）も含めている。

鉄（Fe）や銅（Cu）に比べて、例えばアルミニウム（Al）は密度がそれらの約1/3ときわめて軽い。表1.1において、チタン（密度 4.54 g/cm^3 ）を含め、これよりも密度の小さい金属を軽金属と呼んでいる。軽金属の中で、特に工業材料として広く使われているものはアルミニウム（Al）、マグネシウム（Mg）およびチタン（Ti）である。この他にも、最近はリチウムイオン電池の素材としてリチウム（Li）が使われている。本書では、アルミニウム、マグネシウムおよびチタンを代表的な軽金属と捉え、軽金属およびこれらの合金、すなわち軽合金を対象に軽合金材料として取り上げる。軽合金を構成する重要な合金元素には種々のものがあるが、代表的な元素としてSi、Cr（クロム）、Mn

2 1. 軽金属および軽合金の特徴

表 1.1 代表的金属元素の密度
(ただし, Si と B を含む)

元 素	密 度 [g/cm ³]
Li	0.534
Mg	1.738
Be	1.847 7
Si	2.329 6
B	2.34
Al	2.698 8
Ti	4.54
Zn	7.134
Cr	7.19
Mn	7.44
Fe	7.874
Cu	8.96
Ni	8.902
Ag	10.450
Pb	11.35
Au	19.32



57~71 ランタノイド La 138.905	58 セリウム Ce 140.12	59 プラセオジム Pr 140.908	60 ネオジム Nd 144.24	61 プロメチウム Pm (145)	62 スミチウム Sm 150.36	63 ユーロピウム Eu 151.96	64 ガドリウム Gd 157.25	65 テールビウム Tb 158.925	66 ジスプロシウム Dy 162.50	67 ホルミウム Ho 164.930	68 エルビウム Er 167.26	69 テールミウム Tm 168.934	70 イットリウム Yb 173.04	71 ルテチウム Lu 174.967
89~103 アクチノイド Ac 227.027	90 トランシウム Th 232.038	91 プロトアクチニウム Pa 231.036	92 ウラン U 238.029	93 ネプチウム Np 237.048	94 プルトニウム Pu (244)	95 アメリシウム Am (243)	96 キュリウム Cm (247)	97 ベルグビウム Bk (247)	98 カリフォルニウム Cf (251)	99 エーレンバウム Es (252)	100 フェルミウム Fm (257)	101 メンデレフium Md (258)	102 ノボリウム No (259)	103 ローレンシウム Lr (260)

- 面心立方晶 ◆ 体心立方晶 ● 最密六方晶 ○ 六方晶 ☆ ダイヤモンド格子
- 正方晶 △ 菱面体晶 ◇ 斜方晶 □ 複雑立方晶

図 1.1 代表的な軽金属元素 (Al, Mg, Ti) および軽金属への合金元素

(マンガン), Cu, Zn (亜鉛) などがある。図 1.1 に周期表と軽金属, および代表的な合金元素とをあわせて示す。各章で後述するように, アルミニウムにとっては, Mg, Si, Mn, Cu, Zn は重要な合金元素であり, また Cr や Ti は組織制御に不可欠な元素である。マグネシウムにとっては, Al, Zn, Mn は重要な合金元素であり, Si や Cu も有効に活用されている。一方, チタンにとっては, Al や V (バナジウム) はきわめて有用な合金元素として活用されている。このように, 軽合金材料として, アルミニウム, マグネシウム, チタンは相互に深く結び付き, 有用な材料として社会に貢献している。

1.2 軽合金の性質

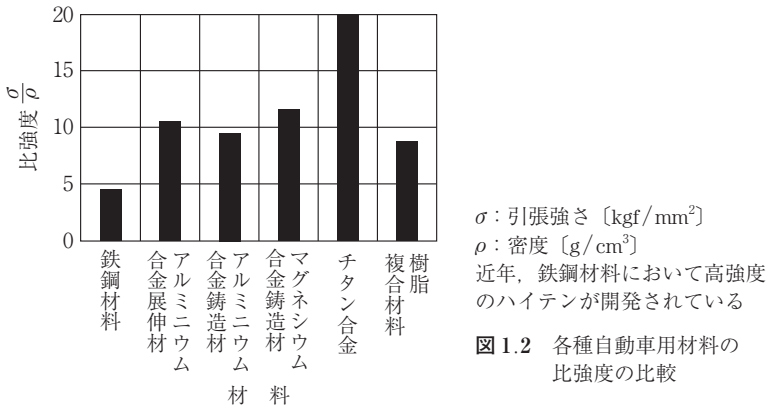
軽金属あるいは軽合金は軽量であること, すなわち, 密度が小さいことの他にさまざまな性質をもっている。表 1.2 に各種工業材料の諸特性を示す。鉄や銅以外に非金属材料も一部参考に示す。チタンは融点が高く, アルミニウムとマグネシウムは融点が近いこと, また, アルミニウムは導電率や熱伝導率が高いこと, チタンは熱膨張率が小さいことなどがこの表からわかる。表 1.2 には示していないが, 結晶構造はアルミニウムが面心立方晶 (FCC), マグネシウムが最密六方晶 (HCP) であり, チタンは 885°C で同素変態し, この温度以下では最密六方晶 (HCP), 以上では体心立方晶 (BCC) である。

構造材料として利用する場合, 軽くて強い材料が特に有用となる。これを表す因子に比強度がある。比強度とは材料の引張強さを密度で除した値である。図 1.2 に自動車用材料の比強度の例を示す。比強度で比較するとアルミニウム合金やマグネシウム合金は鉄鋼材料やプラスチック系複合材料よりも優れ, また, チタン合金は飛び抜けて比強度が高いことがわかる。なお, 近年, 鉄鋼材料でもハイテンと呼ばれる高強度鋼が開発され, 自動車用材料として期待されている。

また, 工業材料として考えるうえで, 資源的に豊富であるか否かは重要な点である。地殻での各元素の存在割合を表すものにクラーク数 (Clarke number)

表 1.2 アルミニウム、マグネシウム、チタンと他の工業材料との比較¹⁾

材 料	引張強さ (N/mm ²)	耐 力 (N/mm ²)	伸 び (%)	せん断強さ (N/mm ²)	縦弾性 係 数 (kN/mm ²)	比 重	溶 融 点 (°C)	導電率 (IACS%)	熱伝導度 (20°C) (W/m·°C)	縦膨張係数 (20°C) (10 ⁻⁶ /°C)
ベークライト板	65	—	2	69	6.9	1.33	(軟化点)160	—	0.3	25.2
ポリエチレン	12~31	—	20 ~100	11.6	0.55 ~1.03	0.92 ~0.96	(軟化点)42	—	0.46 ~0.54	10~18
ポリ塩化ビニル	35~62	—	2~4	—	2.11 ~4.12	1.38 ~1.47	(軟化点)60~80	—	0.1 ~0.5	50~185
木材 (硬質)	69	—	1.5	9.8	10.98	0.67	—	—	0.2	6.3
マグネシウム (鍛造品)	302	220	14	140	44.6	1.80	510~621	13	80	25.9
銅 (鍛造品)	268	96	10	137	44.6	1.82	404~599	12	70	26.7
亜鉛 (ダイカスト)	275	178	5	213	—	6.64	—	27	110	27.4
銅 (硬質)	343	309	6	192	117	8.90	1 065~1 082	100	390	16.8
銅 (熱間圧延材)	233	69	45	158	117	8.90	1 065~1 082	100	390	16.8
黄銅 (35%Zn)	522	309	7	295	103	8.46	904~935	26	120	18.4
青銅 (軟質)	309	86	50	227	103	8.46	904~935	26	120	18.4
銅 (硬質)	556	515	10	—	110	8.86	954~1 049	18	80	17.8
銅 (軟質)	323	515	64	—	110	8.86	954~1 049	18	80	17.8
モネル (硬質)	755	686	8	597	178	8.80	1 299~1 349	3.6	30	14.0
モネル (軟質)	549	240	40	316	178	8.80	1 299~1 349	3.6	30	14.0
鉄 (鍛造物)	206	172	0.5	302	96	7.10	1 093~1 316	2	50	10.1
鉄 (板)	350	213	21	288	192	7.65	約1 530	16	70	11.7
銅 (鍛造物)	515	288	24	412	206	7.86	1 466~1 510	11	50	11.7
銅 (熱間圧延材)	412	261	30	309	192	7.85	—	12	60	11.7
ステンレス鋼 (軟質)	618	275	55	460	199	7.90	1 427~1 471	2.4	20	17.3
ステンレス鋼 (硬質)	1 059	858	15	769	199	7.90	1 427~1 471	2.1	20	17.3
工業用純チタニウム	392	275	42	245	106.4	4.5	1 660	3.1	17	8.9
アルミニウム (1200-H18)	166	152	5	89	68.0	2.71	646~657	57	220	23.6
アルミニウム (7075-T6)	566	496	11	338	70.7	2.80	476~638	33	130	23.6



があり、これを表 1.3 に示す。クラーク数によれば、Al は 3 番目、Mg は 8 番目、チタンは 10 番目であり、資源的にきわめて恵まれていることがわかる。また、アルミニウム合金に広く添加される Si も豊富に存在する元素である。

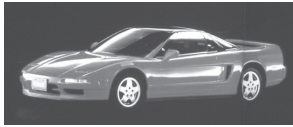
表 1.3 各種元素のクラーク数

順位	元素名	質量比	順位	元素名	質量比
1	酸素	49.5	9	水素	0.87
2	ケイ素	25.8	10	チタン	0.46
3	アルミニウム	7.56	11	塩素	0.19
4	鉄	4.70	12	マンガン	0.09
5	カルシウム	3.39	13	リン	0.08
6	ナトリウム	2.63	14	炭素	0.08
7	カリウム	2.40	15	イオウ	0.06
8	マグネシウム	1.93	16	窒素	0.03

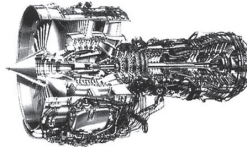
1.3 時代のニーズに応える軽合金材料

軽合金材料はさまざまなニーズに合致し、広く活用されている。特に、構造材料として考えると、自動車用、高速鉄道車両用、航空宇宙用などにはきわめて有用である。図 1.3 に軽合金材料の代表的な用途例を示す。例えば、自動車の場合には、軽量化により燃費効率が増大する。図 1.4 に自動車重量の燃費効率に及ぼす軽量化の効果を示す。重量を 10% 軽くすると、約 10% の燃費効率

6 1. 軽金属および軽合金の特徴



自動車



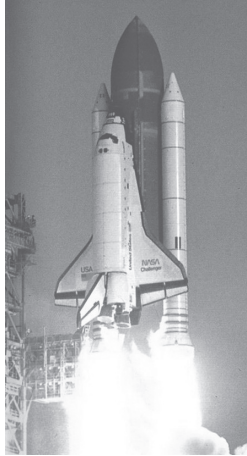
ジェットエンジン



新幹線



航空機



スペースシャトル



H-IIA ロケット

図 1.3 軽合金材料の代表的な用途例 (本田技研工業株式会社, 東海旅客鉄道株式会社, 株式会社 IHI, 三菱重工業株式会社 提供)

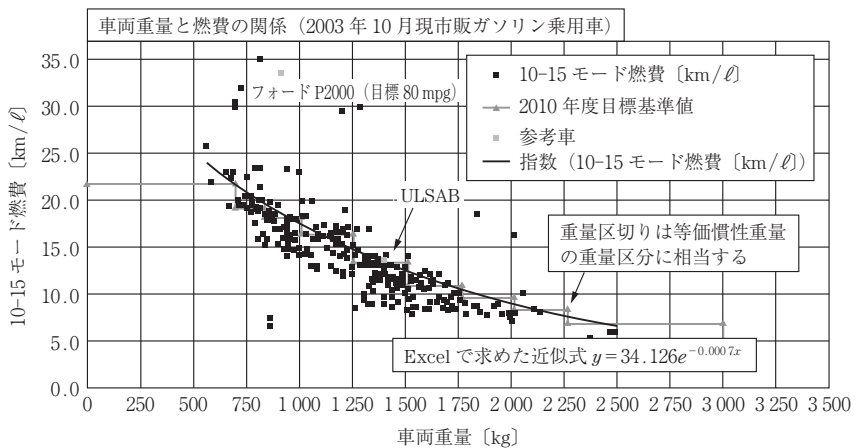


図 1.4 車両重量と燃費の関係 (日本アルミニウム協会)

索引

【あ行】		過飽和固溶体	50	【さ】	
		過冷却	75	再結晶	24, 41, 118
亜結晶粒	44	間接押出法	31	再生地金	9, 27
亜時効	84	【き】		最密六方晶	3
アトマイズ法	186	犠牲金属	145	サブグレイン	44
アモルファス相	188	機能性チタン合金	155	3次元アトムプローブ像	192
アルマイト	12	ギブズエネルギー	50	三層式電解精製法	20
アルミナ	18	逆拡散	56	【し】	
アルミニウム	12	凝固	65	シェル型法	34
安定相	60	凝固潜熱	66	歯科用チタン合金	171
異質核生成	67	強制固溶	186	時効硬化	50, 83
一方向凝固	73	強ひずみ加工	194	時効析出	50
鋳物用・ダイカスト用合金	21	均一核生成	52	しごき加工	32
		均質化処理	24, 46	自然時効	121
液体急冷法	185	金属粉末射出成形	169	重力鑄造法	35
応力腐食割れ	88	金属粉末射出成形プロセス	169	ジュラルミン	12, 87
押し出し	31	【く】		準安定相	59
オロワン機構	86	クラーク数	3	純チタン	156
【か】		クロール法	153	障壁エネルギー	52, 66
回復	41	【け】		消耗電極式アーク溶解	154
回復・再結晶	159	軽金属	1	ジョンソン・メール・	
改良処理	78	軽合金	1	アブラミの式	45, 58
拡散層	75	減衰能	143	シルミン	89
拡散相変態	50	【こ】		人工時効	121
核生成	51	高真空ダイカスト法	38	新地金	27
核生成速度	53	構造材料	3	侵入型固溶体	81
核生成頻度	53	固化成形体	196	【す】	
加工硬化	24, 80	固溶強化	81	水素化脱水素法	169
加工硬化指数	80	固溶硬化	81	スクイズダイカスト法	38
加工熱処理	160	コンフォーム押出法	31	スピノーダル線	54
過時効	84			スピノーダル分解	54
ガスアトマイズ法	169, 178				
型鍛造	31				
活性化エネルギー	46				

スプレーフォーミング法 186

スポンジチタン 152

【せ】

正拡散 56

静水圧押出法 31

生体適合性 7

生体用・医療用材料 149

生体用チタン合金 170

精密鑄造法 162

析出 50, 165

析出強化 50

析出硬化 83

セミノリッドダイカスト 39

セル状析出 57

【そ】

双ロール 186

組成的過冷却 75

その場製造法 176

【た】

ダイカスト 91

ダイカスト法 36

ダイカスト用合金 112

耐くぼみ性 7

大傾角粒界 44

体心立方晶 3

耐デント性 7

耐熱マグネシウム合金 138

多孔質金属 196

多重すべり 80

単一すべり 80

短繊維強化複合材料 172

単ロール 186

単ロール急冷凝固 179

【ち】

置換型固溶体 81

チクソキャスト法 39

チクソモールドイング法 114

チタン 147

中間相 59

柱状晶 68, 69

鑄造用アルミニウム合金 33

鑄造用合金 111

調質 24

長周期積層 190

超ジュラルミン 87

超塑性 157, 165, 168

超々ジュラルミン 12, 88

直接押出法 31

直接連続鑄造法 27

チル晶 68

【て】

低圧鑄造法 35

ティグ溶接 144

低速充填ダイカスト法 38

底面すべり 102

電解製錬法 12

電解法 108

展伸用合金 21

展伸用マグネシウム合金 108

デンドライト 70, 76

【と】

等応力負荷 173

凍結過剰空孔 59

等軸晶 68, 69

同素変態 3, 147

等ひずみ負荷 176

【な】

ナノクラスタ 62, 191

ナノ結晶 188

ナノマルチ組織 198

生砂型法 34

難燃化 142

【に】

二次地金 9

二段時効 62, 192

【ね】

熱間圧延 28

熱間加工 24

熱還元法 106

熱処理 24, 112

熱処理型合金 21, 93

【の】

ノジュラー析出 57

ノーズ温度 53, 124

【は】

パイノーダル線 55

パイヤー法 18

破壊靱性 148

発泡アルミニウム 196

半凝固鑄造法 39

半熔融鑄造法 39

半連続鑄造法 27, 113

【ひ】

比強度 3

ピジョン法 107

非底面すべり 102

ヒドロナリウム 90

非熱処理型合金 21, 93

疲労強度 142

【ふ】

不均一核生成 52, 53

複合材料 172

プラズマ回転電極法 169

プリカーサ 196

プレス成形 32

不連続析出 56, 123

粉末冶金 168

【へ】

平衡分配係数 72

ベガードの法則 81

変形機構領域図 140

偏析法 20

【ほ】

ポーキサイト	18, 27
ポーラスアルミニウム	196
ポーラス金属	196
ホール・エルー法	12, 19
ホール・ベッチの関係	82, 143

【ま行】

マグネシウム	100
ミグ溶接	144
マイクロ偏析	77

ミッシュメタル	138
無析出帯	47, 193
メカニカルアロイング法	184

面心立方晶	3
モル体積	52

【や行】

焼なまし	24
陽極酸化処理	12
陽極酸化法	169
溶質濃縮層	75
溶体化処理	24, 121

【ら行】

ラウタル	89
リサイクル	9
粒子分散強化複合材料	172
臨界サイズ	52, 66
冷間圧延	28
冷間加工	24
レオキャスト法	39
連続析出	123
連続繊維強化複合材料	172
ローエックス	91
ロストワックス法	162

【A～F】

ARB 法	196
BCC	3
CO ₂ 法	35
CP チタン	156
C 曲線	49
D0 ₁₉ 型規則構造	130
DC 鑄造法	27
Dow 法	108
ECAE 法	196
ECAP 法	196
FCC	3

【G～M】

GPB ゾーン	60
---------	----

GP ゾーン	59, 60, 133
Guinier-Preston Zone	60
HCP	3
HDH	169
HPT 法	194
IM 法	178
In-situ 製造法	176
LPO	190
MA 法	184
MIG	144
MIM	169
MIM プロセス	169

【P～Y】

PFZ	47, 193
Pidgeon 法	107

PM	168
PM 法	178
PREP	169
SAP	173
TIG	144
TTT 曲線	49, 53
Y 合金	90

【数字・ギリシャ文字】

3DAP 像	192
$\alpha + \beta$ 合金	156
α 合金	156
β 合金	156
β 変態点	165
ω 脆性	160

— 著者略歴 —

1974年 東京工業大学工学部金属工学科卒業
1979年 東京工業大学大学院博士課程修了（金属工学専攻）
工学博士
1979年 東京工業大学助手
1988年 マンチェスター大学（英国）客員研究員
1991年 東京工業大学助教授
1999年 東京工業大学教授
現在に至る

軽合金材料

Light Metals and Alloys

© Tatsuo Sato 2011

2011年8月12日 初版第1刷発行



検印省略

著者 里 達 雄
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04614-4 (金) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします