展伸用アルミニウム合金

江藤武比古*

Wrought aluminum alloys

Takehiko ETO*

1. はじめに

展伸用アルミニウム合金は、純アルミニウムあるいは種々の添加元素を加えたアルミニウム合金鑄塊に圧延や押出し、鍛造等の熱間加工や冷間加工の塑性加工と熱処理とを組合わせて、板、形材、管、棒、線、鍛造品等の所望の展伸材として使用される合金である。この塑性加工中に、鑄塊組織は再結晶、未再結晶等の加工組織等のマクロ的变化および熱処理により転位密度の調整や析出物が生成したり等のミクロ組織的变化が生じ、機械的性質、材料特性が変化する。

したがって、所望の展伸用アルミニウム合金を得るには化学成分と加工組織、熱処理等のプロセスによるマクロ、ミクロ組織制御と材料特性の関係 (microstructure-property relationship) に関する基本的ことがらを理解する必要がある。

本稿では、展伸用合金の基本事項を合金の分類、強化機構、開発の経緯を中心にその合金の理解に必要な図表を中心に述べる。

誌面には限りがあるが、幸いホールとエールによるアルミニウムの工業化から100年を経た今、名著が多いので参考にされるとよい^{1)~10)}。より深く理解するためには、軽金属学会の40周年記念出版に掲載の各合金の解説が最適で、アルミニウム合金の解説では優れたものなのでぜひ参考にされたい¹⁾。

2. 合金の種類

展伸用アルミニウム合金の分類を図1に示す。合金は4桁で表され、その第1位の数字は合金系を表す。1000系は純度99.00%以上の純アルミニウムで、他の合金系はMg, Mn, Cu, Si, Zn等の主要元素が添加されている。展伸用アルミニウム合金は合金の強化法で、非熱処理型合金と熱処理 (時効処理) により強化される熱処理型合

図1 展伸用アルミニウム合金の分類

金の二つに大別される。合金が強いのか弱いのかは転位の移動がスムーズに行われるかどうかで決まり、したがって転位に対する抵抗をいかにして上げるかが強化法のポイントとなる³⁾。

非熱処理型合金は、アルミニウムとの原子半径の差によるひずみ (ミスフィットひずみ) の大きいMg, Mn, Si等を添加し、これらの原子のまわりのひずみ場が転位の障害になることによる固溶体強化、あるいはこれらの原子が転位に固着し、移動の障害になることによる固着効果、あるいは焼なまし状態 (転位密度約 $10^8/\text{cm}^2$) からの転位の増加による加工硬化 (転位密度約 $10^{10}\sim 10^{12}/\text{cm}^2$) により強化された合金で、1000, 3000, 4000, 5000系合金がある。

熱処理型合金は、Cu, Mg, Si, Zn等の高温ではわりと固溶度が大きく室温では固溶度の小さい元素を、高温から焼入れし、時効処理でG.P. ゾーンや中間相等の析出物を形成し、これらの析出物が転位の移動の障害になることから強度を得る (析出強化) 合金で、2000, 6000, 7000系合金がある。なお、これら調質の詳細は本講座の

* (株)神戸製鋼所アルミ研究部アルミ基礎研究室 (神戸市)。Fundamental research section, Aluminum research section department, Kobe Steel, Ltd. (Kobe-shi, Hyogo)。

受理日: 平成6年8月29日

表1 製品形状を示す主なJIS記号

記号	意味	記号	意味
P	板, 条, 円板	TW	溶接管
PC	合せ板	TWA	アーク溶接管
H	箔	S	押出型材
BE	押出棒	FD	型打鍛造品
BD	引抜棒	FH	自由鍛造品
W	引抜線	PB	圧延板導体
TE	押出継目無管	SB	押出板導体
TD	引抜継目無管	TB	管導体

「アルミニウムの熱処理」等を参考にされたい。

3. 展伸材の呼称

展伸材は種々の形態、調質、強度、その他の特性で販売されるので、JIS では以下のような表示で呼称している。

A5052P-H34 (非熱処理型合金の例)

A6063TE-T5 (熱処理型合金の例)

最初のAはアルミニウム合金を示し、続く4桁の数字は合金分類を示す。この4桁の数字は国際アルミニウム合金名にならって表示され、第1位の数字は合金系を、第3, 4桁目の数字は個々の合金の識別を示すが、1000系すなわち純アルミニウム材料の場合は純度を示す。第2位の数字は第3, 4位で識別された合金の改良または派生合金であることを示す。ただし、わが国で開発され、国際アルミニウム合金に相当する分類を見出せない場合は、第2位の数字に代えてNを記す。

4位の数字に続いて、1~3個のローマ字が付されるが、これは材料の形状記号、寸法許容度を示す等級記号である。

ハイフンに続くHまたはTを冠した数字は材料の加工硬化状態または熱処理状態などの調質を示す質別記号であるが、他にF, O等の文字が使用される。質別記号の詳細は本講座の「アルミニウムの熱処理」を参考にされたい。展伸材の形状を示す呼称の記号とその意味を表1に示す。

4. 合金系の特徴および一般的性質

代表的展伸用アルミニウム合金の化学組成を表2に、機械的性質を表3に示す。また、一般的性質を表4に示す。以下に各合金系の特徴および一般的性質を述べる。

4.1 工業用純アルミニウム (1000系)

工業用純アルミニウムは純度99.00%以上のアルミニウムで、不純物としてFe, Siを主として含有し、Cu,

図2 冷間圧延による1100材の強度と伸びの変化¹²⁾

図3 75%冷間圧延した1100材の焼鈍軟化曲線¹²⁾

Znを微量含有する。FeとSiの含有量やその含有比率はもとより、存在形態まで制御して、必要な強度、加工性、成形性、表面処理性等を制御する。図2および図3は1100の加工硬化と焼なましによる機械的性質の変化を示す¹²⁾。この結果と表3とから製造条件が最適化されている。1000系の代表的なものは、純度99.00%以上の1100, 1200, 99.5%以上の1050, 99.7%以上の1070, 99.8%以上の1080などがある。1100系の材料は加工性、耐食

5

表2 代表的展伸用アルミニウム合金の化学組成

種類 (JIS 呼称)	化 学 成 分 ⁽¹⁾ (%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti		Al
1N99	0.006	0.004	0.008	—	—	—	—	—		99.99以上
1N90	0.050	0.030	0.050	—	—	—	—	—		99.90以上
1085	0.10	0.12	0.03	0.02	0.02	—	0.03	0.02		99.85以上
1080	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	—	0.03	0.03		99.80以上
1070	0.20	0.25	0.04	0.03	0.03	—	0.04	0.03		99.70以上
1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	—	0.05	0.03		99.60以上
1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	0.05	0.03		99.50以上
1230 ⁽²⁾	0.7		0.10	0.05	0.05	—	0.10	0.03		99.30以上
1N30	0.7		0.10	0.05	0.05	—	0.05	—		99.30以上
1100	1.0		0.05~0.20	0.05	—	—	0.10	—		99.00以上
1200	1.0		0.05	0.05	—	—	0.10	0.05		99.00以上
1N00	1.0		0.05~0.20	0.05	0.10	—	0.10	0.10		99.00以上
2011	0.40	0.7	5.0~6.0	—	—	—	0.30	—	{ Pb 0.20~0.6 Bi 0.20~0.6	残部
2014	0.50~1.2	0.7	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	0.25	—	Zr+Ti 0.20	"
2017	0.20~0.8	0.7	3.5~4.5	0.40~1.0	0.40~0.8	0.10	0.25	—	Zr+Ti 0.20	"
2117	0.8	0.7	2.2~3.0	0.20	0.20~0.50	0.10	0.25	—		"
2018	0.9	1.0	3.5~4.5	0.20	0.45~0.9	0.10	0.25	—	Ni 1.7~2.3	"
2218	0.9	1.0	3.5~4.5	0.20	1.2~1.8	0.10	0.25	—	Ni 1.7~2.3	"
2618	0.10~0.25	0.9~1.3	1.9~2.7	—	1.3~1.8	—	0.10	0.04~0.10	Ni 0.9~1.2	"
2219	0.20	0.30	5.8~6.8	0.20~0.40	0.02	—	0.10	0.02~0.10	{ Zr 0.10~0.25 V 0.05~0.15	"
2024	0.50	0.50	3.8~4.9	0.30~0.9	1.2~1.8	0.10	0.25	—	Zr+Ti 0.20	"
2025	0.50~1.2	1.0	3.9~5.0	0.40~1.2	0.05	0.10	0.25	0.15		"
2N01	0.50~1.3	0.6~1.5	1.5~2.5	0.20	1.2~1.8	—	0.20	0.20	Ni 0.6~1.4	"
3003	0.6	0.7	0.05~0.20	1.0~1.5	—	—	0.10	—		"
3203	0.6	0.7	0.05	1.0~1.5	—	—	0.10	—		"
3004	0.30	0.7	0.25	1.0~1.5	0.8~1.3	—	0.25	—		"
3104	0.6	0.8	0.05~0.25	0.8~1.4	0.8~1.3	—	0.25	0.10	Ga0.05, V0.05	"
3005	0.6	0.7	0.30	1.0~1.5	0.20~0.6	0.10	0.25	0.10		"
3105	0.6	0.7	0.30	0.30~0.8	0.20~0.8	0.20	0.40	0.10		"
4032	11.0~13.5	1.0	0.50~1.3	—	0.8~1.3	0.10	0.25	—	Ni 0.50~1.3	"
5005	0.30	0.7	0.20	0.20	0.50~1.1	0.10	0.25	—		"
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	—		"
5652	0.40		0.04	0.01	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	—		"
5154	0.45		0.10	0.10	3.1~3.9	0.15~0.35	0.20	0.20		"
5254	0.45		0.05	0.01	3.1~3.9	0.15~0.35	0.20	0.05		"
5454	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	0.25	0.20		"
5056	0.30	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.6	0.05~0.20	0.10	—		"
5082	0.20	0.35	0.15	0.15	4.0~5.0	0.15	0.25	0.10		"
5182	0.20	0.35	0.15	0.20~0.50	4.0~5.0	0.10	0.25	0.10		"
5083	0.40	0.40	0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0.25	0.15		"
5086	0.40	0.50	0.10	0.20~0.7	3.5~4.5	0.05~0.25	0.25	0.15		"
5N01	0.15	0.25	0.20	0.20	0.20~0.6	—	0.03	—		"
5N02	0.40	0.40	0.10	0.30~1.0	3.0~4.0	0.50	0.10	0.20		"
6101	0.30~0.7	0.50	0.10	0.03	0.35~0.8	0.03	0.10	—	B 0.06	"
6003 ⁽³⁾	0.35~1.0	0.6	0.10	0.8	0.8~1.5	0.35	0.20	0.10		"
6151	0.6~1.2	1.0	0.35	0.20	0.45~0.8	0.15~0.35	0.25	0.15		"
6061	0.40~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15		"
6N01	0.40~0.9	0.35	0.35	0.50	0.40~0.8	0.30	0.25	0.10	Mn+Cr 0.50	"
6063	0.20~0.6	0.35	0.10	0.10	0.45~0.9	0.10	0.10	0.10		"
7003	0.30	0.35	0.20	0.30	0.50~1.0	0.20	5.0~6.5	0.20	Zr 0.05~0.25	"
7N01	0.30	0.35	0.20	0.20~0.7	1.0~2.0	0.30	4.0~5.0	0.20	Zr 0.25, V0.10	"
7050	0.12	0.15	2.0~2.6	0.10	1.9~2.6	0.04	5.7~6.7	0.06	Zr 0.08~0.15	"
7072 ⁽⁴⁾	0.7		0.10	0.10	0.10	—	0.8~1.3	—		"
7075	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~5.6	0.20	Zr+Ti0.25	"
8021 ⁽⁵⁾	0.15	1.2~1.7	0.05	—	—	—	—	—		"
8079 ⁽⁵⁾	0.05~0.30	0.7~1.3	0.05	—	—	—	0.10	—		"

注 (1) 範囲で示していない数字は、最大値を示す。

(2) 2024合せ板の皮材に用いる (アメリカ, アルミニウム協会合金名)。

(3) 2014合せ板の皮材に用いる (アメリカ, アルミニウム協会合金名)。

(4) 7075合せ板の皮材に用いる (アメリカ, アルミニウム協会合金名)。

(5) 1994年に JIS 制定予定 (アルミニウム合金箔)。

表 3 代表的展伸用アルミニウム合金の機械的性質

材 質	引 張 性 質				ブリネル 硬さ (HBS10/500)	せん断 強さ (N/mm ²)	疲れ強さ*1 (N/mm ²)	縦弾性 係数*2 ×1000 (N/mm ²)
	引張強さ (N/mm ²)	耐 力 (N/mm ²)	伸び (%)					
			板 (1.6 mm 厚)	棒 (φ12.7 mm)				
1060-O	70	30	43	—	19	50	20	70
1060-H12	85	75	16	—	23	55	30	70
1060-H14	100	90	12	—	26	65	35	70
1060-H16	110	105	8	—	30	70	45	70
1060-H18	135	125	6	—	35	75	45	70
1100-O	90	35	35	45	23	65	35	70
1100-H12	110	105	12	25	28	70	40	70
1100-H14	125	120	9	20	32	75	50	70
1100-H16	150	140	6	17	38	85	65	70
1100-H18	170	155	5	15	44	90	65	70
2014-O	190	100	—	18	45	125	90	75
2014-T4, T451	435	295	—	20	105	265	140	75
2014-T6, T651	490	420	—	13	135	295	125	75
2014-O 合せ板	175	70	21	—	—	125	—	74
2014-T3 合せ板	445	280	20	—	—	260	—	74
2014-T4, T451 合せ板	430	260	22	—	—	260	—	74
2014-T6, T651 合せ板	480	420	10	—	—	290	—	74
2017-O	185	70	—	22	45	125	90	74
2017-T4, T451	435	280	—	22	105	265	125	74
2024-O	190	75	20	22	47	125	90	75
2024-T3	490	350	18	—	120	290	140	75
2024-T4, T351	430	330	20	19	120	290	140	75
2024-T361	505	400	13	—	130	295	125	75
2117-T4	300	170	—	27	70	195	100	72
2219-O	175	75	18	—	—	—	—	75
2219-T42	365	190	20	—	—	—	—	75
2219-T31, T351	365	255	17	—	—	—	—	75
2219-T37	400	325	11	—	—	—	—	75
2219-T62	420	295	10	—	—	—	105	75
2219-T81, T851	465	360	10	—	—	—	105	75
2219-T87	485	400	10	—	—	—	105	75
3003-O	110	40	30	40	28	75	50	70
3003-H12	135	125	10	20	35	85	55	70
3003-H14	155	150	8	16	40	100	65	70
3003-H16	185	175	5	14	47	105	70	70
3003-H18	205	190	4	10	55	110	70	70
3004-O	180	70	20	25	45	110	100	70
3004-H32	220	175	10	17	52	120	105	70
3004-H34	245	205	9	12	63	125	105	70
3004-H36	265	230	5	9	70	140	110	70
3004-H38	290	255	5	6	77	150	110	70
4032-T6	385	323	—	9	120	265	110	80
5005-O	125	40	25	—	28	75	—	70
5005-H12	140	135	10	—	—	100	—	70
5005-H14	160	155	6	—	—	100	—	70
5005-H16	185	175	5	—	—	105	—	70
5005-H18	205	195	4	—	—	110	—	70
5005-H32	140	120	11	—	36	100	—	70
5005-H34	160	140	8	—	41	100	—	70
5005-H36	185	170	6	—	46	105	—	70
5005-H38	205	190	5	—	51	110	—	70
5052-O	195	90	25	30	47	125	110	72
5052-H32	230	195	12	18	60	140	120	72
5052-H34	265	220	10	14	68	150	125	72
5052-H36	280	245	8	10	73	160	135	72
5052-H38	295	260	7	8	77	170	140	72

5

表 3 代表的展伸用アルミニウム合金の機械的性質 (つづき)

材 質	引 張 性 質				ブリネル 硬さ (HBS10/500)	せん断 強さ (N/mm ²)	疲れ強さ*1 (N/mm ²)	縦弾性 係数*2 ×1000 (N/mm ²)
	引張強さ (N/mm ²)	耐 力 (N/mm ²)	伸 び (%)					
			板 (1.6 mm 厚)	棒 (φ12.7 mm)				
5056-O	295	155	—	35	65	185	140	72
5056-H18	445	415	—	10	105	240	155	72
5056-H38	420	350	—	15	100	225	155	72
5083-O	295	150	—	22	—	175	—	72
5083-H321, H116, H117	325	230	—	16	—	—	160	72
5086-O	265	120	22	—	—	160	—	72
5086-H32, H116, H117	295	210	12	—	—	—	—	72
5086-H34	230	260	10	—	—	190	—	72
5086-H112	275	135	14	—	—	—	—	72
5154-O	245	120	27	—	58	155	120	72
5154-H32	275	210	15	—	67	155	125	72
5154-H34	295	230	13	—	73	170	135	72
5154-H36	315	255	12	—	78	185	140	72
5154-H38	335	275	10	—	80	195	150	72
5154-H112	245	120	25	—	63	—	120	72
5182-O	295	150	21	—	—	—	—	—
5182-H34	335	235	18	—	—	—	—	—
5182-H38	390	315	9	—	—	—	—	—
6061-O	125	55	25	30	30	85	65	70
6061-T4, T451	245	150	22	25	65	170	100	70
6061-T6, T651	315	280	12	17	95	210	100	70
6061-O 合せ板	120	50	25	—	—	75	—	70
6061-T4, T451 合せ板	230	135	22	—	—	155	—	70
6061-T6, T651 合せ板	295	260	12	—	—	190	—	70
6063-O	91	50	—	—	25	70	55	70
6063-T1	155	110	20	—	42	100	65	70
6063-T4	175	90	22	—	—	—	—	70
6063-T5	190	150	12	—	60	120	70	70
6063-T6	245	220	12	—	73	155	70	70
6063-T83	260	245	9	—	82	155	—	70
6063-T831	210	190	10	—	70	125	—	70
6063-T832	295	275	12	—	95	190	—	70
6262-T9	410	385	—	10	120	245	90	70
7050-T7451	535	480	—	10	—	310	—	73
7075-O	230	105	17	16	60	155	—	73
7075-T6, T651	585	515	11	11	150	335	160	73
7075-O 合せ板	225	100	17	—	—	155	—	73
7075-T6, T651 合せ板	535	470	11	—	—	325	—	73
7003-T5	320	260	(形)	15	85	180	127	73
7N01-T4	365	225	16	—	95	—	—	73
7N01-T5	350	300	(形)	15	100	185	130	73
7N01-T6	370	300	15	—	100	195	130	73

(注) *1 回転曲げ, 5×10^8 回, 10000 rpm

*2 引張り, 圧縮の平均値, 圧縮の場合は, 引張りよりおよそ 2 % 高い。

性, 溶接性, また, 電気および熱の伝導性が優れており, 導電体, 熱交換器に利用されている。純度が高いほど, 耐食性は向上する。また, 強度を上昇するには加工硬化を用いる。一般に, 純アルミニウムは強度が低く,

構造材には適さないが, 家庭用品, 日用品, 電気器具, 箔, フィン, コンデンサ, 反射版, 各種容器, 建築物の内外装板, 銘板などに多く用いられる。図 4 は電解コンデンサ用の (100) 方位量の異なる箔のエッチング形態を

表 4 代表的展伸用アルミニウム合金の一般的性質

合 金	質 別	(1) 耐 食 性	(1) 耐食 応力 割れ 腐性	(1) 成 形 性	(2) 切 削 性	(1) ろ う 付 性	溶接性 ⁽¹⁾			(1) 鍛 造 性
							ガ ス	アル ゴン	抵 抗	
1050	H24	A	A	A	D	A	A	A	A	—
1100	O	A	A	A	E	A	A	A	B	A
	H24	A	A	A	D	A	A	A	A	A
	H18	A	A	C	D	A	A	A	A	A
2011	T3	D	C	C	A	D	D	D	D	—
	T8	D	A	D	A	D	D	D	D	—
2014	T4	D	C	C	B	D	D	B	B	C
	T6	D	C	D	B	D	D	B	B	C
2017	T4	D	C	C	B	D	D	B	B	—
2024	T4	D	C	C	B	D	D	B	B	—
2218	T72	D	C	—	B	D	D	B	B	D
3003	O	A	A	A	E	A	A	A	B	A
	H24	A	A	B	D	A	A	A	A	A
	H18	A	A	C	D	A	A	A	A	A
3004	O	A	A	A	D	B	B	A	B	—
	H32	A	A	B	D	B	B	A	A	—
	H34	A	A	B	C	B	B	A	A	—
	H36	A	A	C	C	B	B	A	A	—
4032	H38	A	A	C	C	B	B	A	A	—
	T6	C	B	—	—	D	D	B	C	—
5005	O	A	A	A	E	B	A	A	B	—
	H34	A	A	B	D	B	A	A	A	—
	H38	A	A	C	D	B	A	A	A	—
5052	O	A	A	A	D	C	A	A	B	—
	H34	A	A	B	C	C	A	A	A	—
	H38	A	A	C	C	C	A	A	A	—
5154	O	A	A	A	D	D	C	A	B	—
	H34	A	A	B	C	D	C	A	A	—
	H38	A	A	C	C	D	C	A	A	—
5154	O	A	A	A	D	D	C	A	B	—
5083	O	A	B	B	D	D	C	A	B	—
5086	O	A	A	A	D	B	B	A	B	—
	H32	A	A	B	D	B	B	A	A	—
	H34	A	B	B	C	B	B	A	A	—
	H36	A	B	C	C	B	B	A	A	—
5056	H38	A	B	C	C	B	B	A	A	—
	O	A	B	A	D	D	C	A	B	—
5056	H38	A	C	C	C	D	C	A	A	—

合 金	質 別	(1) 耐 食 性	(1) 耐食 応力 割れ 腐性	(1) 成 形 性	(2) 切 削 性	(1) ろ う 付 性	溶接性 ⁽¹⁾			(1) 鍛 造 性
							ガ ス	アル ゴン	抵 抗	
5N01	O	A	A	A	E	A	A	A	B	—
	H24	A	A	A	D	A	A	A	A	—
6063	T5	A	A	C	C	A	A	A	A	—
	T6	A	A	C	C	A	A	A	A	—
6N01	T5	A	A	C	C	A	A	A	A	—
	T6	A	A	C	C	A	A	A	A	—
6061	T4	B	B	B	C	A	A	A	A	D
	T6	B	A	C	C	A	A	A	A	—
7003	T5	B	B	C	B	D	D	A	A	D
7N01	T4	B	B	C	B	D	D	A	A	B
	T5	B	B	C	B	D	D	A	A	D
	T6	B	C	C	B	D	D	A	A	—
7075	T6	C	C	D	B	D	D	C	B	D

注 ⁽¹⁾ 良好なものから順に A～D の 4 ランクにわけ
 ている。A および B のものは実用上ほとんど問
 題がないが、C および D のものには何らかの
 対策が必要か、あるいは制約条件に注意を要す
 る。成形性、ろう付性、溶接性が D の場合は、
 一般にそれらの施工を行わないほうがよい。

⁽²⁾ 良好なものから順に A～E の 5 ランクにわけ
 ている。A は切屑処理が容易である。ランクが下
 位になるほど切削速度などの条件の制約が厳し
 くなる。

示す¹³⁾。容量を大きくするために、(100)方位を多くす
 る制御が行われる。1060 合金は導電率が Cu の 61%
 IACS と高く、電線やブスバーに使用されている。

4.2 Al-Cu 系合金 (2000系合金)

Al-Cu 系合金は1911年に Wilm によって時効硬化現象
 が発見された合金系で、いわゆるジュラルミンとして知
 られる2017 合金 (Al-4.0%Cu-0.6%Mg-0.5%Si-0.7%
 Mn, 本稿では mass% を % と略す) がこれに当たる。図
 5 に Silcock らの有名な Al-Cu 合金の時効曲線を示す¹⁴⁾。
 1953年当時は硬度と X 線による成果であったが、最近
 では電子顕微鏡により図 6¹⁵⁾のように、大きき数10 nm
 の微細析出物の存在が確認され、析出物が微細なほど強
 度が高いという図 5 の強度との関係が明らかになり、材
 料開発に大きく寄与している。2017合金は現在ではリベ
 ットが主用途になっている。2017合金をさらに高強度に
 する目的で、現在最も多く使用されている Al-Cu-Mg

5

図4 電解コンデンサ用箔材の(100)方位とエッチング形態¹³⁾

系合金の2014合金 (Al-4.4%Cu-0.5%Mg-0.8%Si-0.6%Mn) や2024合金 (Al-4.4%Cu-1.5%Mg-0.6%Mn, 超ジュラルミン) が相次いで開発された。また, 2219合金 (Al-6.3%Cu-0.3%Mn) は時効処理により鋼に匹敵する強度が得られる。本合金系ではCuを多く含有するために, 耐食性は劣り, 腐食かつ応力が存在する環境下では応力腐食割れが発生する。このために, 航空機の胴体外板に用いられる2024合金では防食を目的に表面に純アルミニウムを重ねて圧延したクラッド材 (合せ材) が用いられる。また, 析出硬化材のため, 接合はリベット, ボトル接合, スポット溶接により行われ, リベット接合用には常温時効硬化性を低下させるために, Cuを大幅に減量した2117合金 (Al-2.6%Cu-0.35%Mg) が開発されている。また, Pb, Biを添加し, 切削性を向上させた2011 (Al-6%Cu-0.4%Pb-0.4%Bi) があり, ボリューム軸, 光学用品, ねじ類に使用される。このほか, 鍛造用合金として2018 (Al-4.0%Cu-0.6%Mg-2.0%Ni) 系合金がある。この合金はAl₃(Fe, Ni)を分散粒子として含み高温強度が高いので, 耐熱性が要求されるシリンダヘッド, ピストンVTRシリンダ等の鍛造品に使用される。また, 最近の耐疲労特性, 高靱性化の要求の中で, 靱性を低下させるCu₂FeAl₇, Mg₂Si等の晶出物を低下させるために2024合金の高純度化を図った2124, 2224, 2324等の高靱性アルミニウム合金が開発されている^{16), 17)}。

図5 Al-Cu合金の時効硬化曲線および形成される相の構造¹⁴⁾

4.3 Al-Mn系合金 (3000系合金)

Al-Mn系合金は添加元素Mnにより, ①Mnの原子半径 (金属結合半径) はAlより約20%も小さいことに基づく固溶体硬化, および②MnAl₆の形の分散粒子 (dispersoids) として存在させ, 分散粒子回りの加工硬化と焼なましの組み合わせで強度を調整した合金である。1906年に3003合金 (Al-1.25%Mn-0.12%Cu) が開発され, 3003-H18材の強度は205 N/mm²と1100-H18材よりも30 N/mm²上昇し, 加工性, 耐食性に優れる。一般に添加元素は耐食性を損ねるが, Mnは耐食性の犠牲なしに強度の向上が図れるので, 3000系合金では主要元素として, また2000, 5000, 6000, 7000系合金では分散粒子として工業用アルミニウム合金に今日広く用いられている。1929年に3003合金の強度向上と耐食性維持を目的に開発されたのが, 3004合金 (Al-1.25%Mn-1.05%Mg) である。この合金はMgの固溶体強化 (Mgの原子半径はAlより12%も大きい) を付与したものでH38材の強度は285 MPaに達した。1980年代に入り, 3004-H19材は強度が高く, 絞り, しごき性が優れ, 耐食性も良好との理由から, 飲料缶のボディ材に使用され, 国内外を問わず, アルミニウム板材の最大使用合金に成長した¹⁸⁾。Al-Mn-Mg系合金ではさらに中強度・成形性を重視した3005合金 (Al-1.25%Mn-0.4%Mg) が1953年に,

図6 Al-4%Cu合金の析出相の電顕組織¹⁵⁾ (a) GP (1)ゾーン (150°C-30 min), (b) GP (2)ゾーン (150°C-3.5 h), (c) GP (2)ゾーン+ θ' 相 (150°C-250 h), (d) θ' 相 (200°C-2 h)

3105合金 (Al-0.55%Mn-0.4%Mg) が1960年に相次いで開発された。成形加工性のよい合金で、3003合金は一般器物、フィン、化粧板、複写機ドラム等に用いられる。また3004合金はキャンボディ材のほか、電球口金、屋根板、カラーアルミ等にも用いられる。3005、3105合金は建材、カラーアルミ、キャップ材に用いられている。

4.4 Al-Si系合金 (4000系合金)

Al-Si系合金の主要添加元素はSiで、熔融温度が低下し展伸性が損なわれない、最大12%まで含有する合金が開発されている。まず、鍛造用合金としては4032合金 (Al-12%Si-0.9%Cu-1.1%Mg-0.9%Ni) があげられ、Cu、Mg、Niの添加で、耐摩耗性、低膨張係数のほか、耐熱性を向上させている。4032合金はピストン、シリンダヘッド等に用いられている。Si量をさらに低下させた4043合金 (Al-5%Si) は熔融状態で湯流れがよいので、溶接ワイヤーや接合用ろう材 (通常は3003合金をしん材とするクラッド材が多い) 等に用いられる。また4043系合金では析出Siおよび共晶Siのいずれもが陽極酸化皮膜中に残存し、灰色系の色を自然発色し、建築用パネル材に用いられている¹⁹⁾。

4.5 Al-Mg系合金 (5000系合金)

Al-Mg系合金は高い強度、良好な成形性、耐食性および溶接性を併せ持つことを目的に1930年代に開発された合金である。強度はMgの固溶体強化と加工硬化の組合わせて調整される。Mgは強化元素としてはMnよりも効果的で、おおよそ0.8%Mgが1.25%Mnと同等の強

化が得られるとされる²⁰⁾。図7²¹⁾に示すように、Mg量が増すにつれ、たとえば1%Mg合金 (O材) では引張強さ100 MPa、耐力40 MPaであるが、5%Mg合金では引張強さ250 MPa、耐力100 MPaと強度が増加する。実用合金としては製造性や耐食性の観点からMg含有量6%までの合金が用いられている。またAl-Mg合金ではMgが転位を固着し、強度の結晶粒依存性が観察される²²⁾。このことは、成形時にMgが固着から離脱する際に、図8のようなストレッチストレーンマークが発生し、外観を損ねる²³⁾。固着は熱処理の温度でコットレル雰囲気が形成されるかどうかできまり、図9のように、高温では固着がなくなり、強度の結晶粒依存性がなくなる²⁴⁾。3%Mgまでの合金では室温および高温で構造的に安定であるが、高加工を受けた高Mg含有合金では応力腐食等のおそれがあるので、一般には約200°C以上の軟化処理材 (H2n材) や、焼なまし材 (O材) の形で用いられる。

1920年代は一部のAl-4%Mg合金材は製造はされたが、商業生産には到っていないかった。1930年代になり、強度や加工性等を改善するためにCrやMnを添加した5052合金 (Al-2.5%Mg-0.25%Cr)、5154合金 (Al-3.5%Mg-0.25%Cr)、5056合金 (Al-5.0%Mg-0.15%Mn-0.15%Cr) が相次いで開発された。その後、低強度の汎用合金として5005合金 (Al-0.8%Mg) が1935年に開発された。そして溶湯処理、圧延方法の開発等により、Mgをより多く含有し、強度が高く、溶接可能な5083合金 (Al-4.5%Mg-0.7%Mn-0.15%Cr) および5086合金

5

図7 Al-Mg合金焼なまし材の機械的性質に及ぼすMg量の影響²¹⁾

(Al-4.0%Mg-0.45%Mn-0.15%Cr) が1954年に開発された。また、晶出物を低減し成形性を向上した5082合金 (Al-4.5%Mg) が1963年に、その強度をMnの添加で向上した5182合金 (Al-4.5%Mg-0.35%Mn) が開発された。これらの基本合金を受け、多くの派生合金が開発され、約70種もの合金がAAに登録されている。また、我が国でも3003合金と同等の強度をもつ5N01合金 (Al-0.4%Mg) や、リベット用の5N02合金 (Al-0.35%Mg-0.65%Mn) が開発されている。

Al-Mg系合金はMg量、Mn、Cr等の遷移元素の調整により適当な強度を持ち、かつ耐食性、成形加工性、溶接性が優れるので幅広い用途に用いられている。低Mg合金の5N01合金は光輝処理後の陽極酸化処理で高い光輝度が得られるので、台所用品やカメラ、装飾部品、鋁

図8 Al-3.11%Mg合金 (400°C-2h焼なまし材) の0.5%引張後のstretcher strain markings²³⁾ (下の曲線はA-A'線上での両面の凹凸状況を示す)

板に用いられ、5005合金は加工性、耐食性が優れるので建築用内外装、車両、船舶の内装に用いられている。中強度のAl-Mg合金の5052合金は一般板金、船舶、車両、建築、コーヒー缶等の負圧缶エンド、ハニカムコアに用いられ、5052の不純物を規制して過酸化水素の分解を抑制した5652、5254合金は過酸化水素容器に、5454合金は自動車ホイールに用いられている。Mg含有量が4%の合金は高い強度を有する。中でも5083合金は実用非熱処理合金中で最も高い強度を持つ耐食材料で、溶接性、耐

図9 Al-Mg合金の降伏強度の結晶粒依存性に及ぼす焼入れ温度の影響²⁴⁾

海水性、低温特性に優れるので、船舶、車両、低温用タンク、圧力容器に用いられている。5082, 5182合金は成形加工性、耐食性がよいので、缶エンドに用いられ、耐食性と切削仕上がり性、陽極酸化処理性のよい5056合金はカメラ鏡胴、通信機器部品、ファスナーに用いられ、5086合金は耐海水性が優れた溶接構造に適した合金で従来から船舶、圧力容器に用いられてきたが、最近では晶出物を低減し、磁気ディスク基盤に用いられている。

なお、最近の自動車のアルミ化の動向の中で、Al-4～5%Mg系合金が自動車のパネル用に盛んに開発され、今後の新しい用途として期待されている²⁵⁾。

4.6 Al-Mg-Si系合金 (6000系合金)

Al-Mg-Si系合金は少量のMg, Siを主要元素として含み、熱処理によりMg₂Siを析出させる熱処理型アルミニウム合金である。場合により図10のように、Mg₂Siのバランス組成よりもSiを過剰に添加し、強度を向上させている²⁶⁾。また、MnやCr等の遷移元素を添加し、強度向上と結晶粒制御を図っている。さらに、Cuが添加され、より一層の強度向上が図られている。本合金は中強度の強度と優れた耐食性をもつために、構造用アルミニウム合金として用いられている。

Al-Mg-Si系合金の開発はWilmのジュラルミンの発見に触発されて開始されたもので、米国で1921年に6051合金(Al-0.5%Mg-1%Si)が開発された。この合金は3003合金と同等の強度を有し、1100系と同等の成形性を有していた。その後、強度の改善が図られた6151合金(Al-0.6%Mg-0.9%Si-0.25%Cr)が1928年に開発されJISにも登録されている。

その後、1935年に代表的なAl-Mg-Si系合金である6061合金(Al-1.0%Mg-0.6%Si-0.25%Cu-0.25%Cr)が開発され、中強度の汎用構造用合金として使用が拡大した。しかしながら、6061合金は押出性が悪く、押出し直後に焼入れ処理を行うプレス焼入れ性²⁷⁾が劣るので、1941年になり6063合金(Al-0.7%Mg-0.4%Si)が開発され、押出用合金として幅広く用いられるようになった。本合金は低温、低圧力で押出しができ、押出し直後の強制空冷で焼入れできるという特徴を有す。Bi, Pbを添加し、切削性を向上した6262合金(Al-1.0%Mg-0.6%Si-0.25%Cu-0.1%Cr-0.6%Bi-0.6%Pb)が1960年に開発されている。

わが国では押出性、プレス焼入れ性を改善するために6063合金系よりも過剰Si側の組成にした6N01合金(Al-0.6%Mg-0.65%Si)が開発され、車両用の大型中空形材等に使用されている²⁸⁾。JISにはこのほか、高強度かつ高導電率を有する6101合金(Al-0.6%Mg-0.5

図10 Al-Mg-Si合金における引張強さとMg, Si量の関係²⁶⁾

Si)がある。このほか約60種もの合金がAAに登録されている。

以下にAl-Mg-Si系合金の用途を示す。まず6061合金は耐食性が良好で、T6処理により高い耐力(280 N/mm²)が得られるが、溶接断手強度が低くなるためボルト、リベット構造用に主用され、船舶、車両、陸上構造物等に用いられている。6N01合金は中強度の押出用合金で、耐食性、溶接性も良好で、車両、陸上構造物、船舶に用いられ、6063合金は押出性に優れ、複雑な断面形状の形材が得られ、耐食性、表面処理性も良好なので、建築、ガードレール、車両、家具、家電製品、装飾品に用いられる。6151合金は鍛造加工性に優れ、耐食性、表面処理性もよく、機械、自動車部品に使用される。6101合金は導電率が55% IACS以上で、ブスバー、電線に使用される。6262合金は2011合金に比し、耐食性、表面処理性が優れ、6061合金と同等の強度を有するので、カメラ鏡胴、気化器部品、ブレーキ部品、ガス器具部品に用いられる。

最近の自動車のアルミニウム化の中で、Al-Mg-Si系合金はリューダースマークを生じない、高い塗装焼付け硬化性を有する等の利点から、米国では6009(Al-0.6%Mg-0.8%Si-0.35%Cu-0.5%Mn)、6010(Al-0.8%Mg-1.0%Si-0.35%Cu-0.5%Mn)が1967年に開発されている。我が国でも本系合金の開発が盛んになっている²⁹⁾。

5

4.7 Al-Zn-Mg 合金 (7000系合金)

Al-Zn-Mg 合金はCuを含有する高强度合金系と含有しない中強度合金系の2系統がある。いずれも、熱処理によりMgZn₂を析出させる熱処理型アルミニウム合金である。Al-Zn-Mg-Cu系合金は1920年代のドイツでのAl-Zn-Mg系合金の発見を契機に、欠点である応力腐食割れの克服を目的に日本、米国、欧州で現象の解明と実用合金の開発が盛んに行われた。7075合金 (Al-5.6% Zn-2.5%Mg-1.6%Cu-0.2%Cr) は我が国で1938年に開発された超々ジュラルミン (ESD) に端を発する合金で、零式戦闘機に用いられて以来、今日まで2024合金とともに航空機用アルミニウム合金の主流を占めている。この合金のCrは組織を非再結晶あるいは微細再結晶組織とし、応力腐食割れ性の改善を図ったものである。7075合金のT6材は引張強さ570 N/mm²と実用アルミニウム合金中、最大の強度を誇る。厚肉材や鍛造材の応力腐食割れ対策には、強度を犠牲にしてT76, T73等の過時効処理が用いられている。また、耐食性の向上のため、7072合金 (Al-1%Zn) 合金とのクラッド材としても用いられている。7075合金は航空機のほかスキーストックに用いられ、溶接性が劣るため、組立てはリベット、ボルト等の機械的接合法により行われる。

Al-Zn-Mg合金はCuを添加せず、Zn, Mgを低く抑え、溶接性を向上させたもので、溶体化処理温度が低く、焼入れ感受性が鈍感で、常温時効硬化性が優れる等の特徴を持つ。我が国で開発された7N01合金 (Al-4.5%Zn-1.5%Mg-0.45%Mn) は常温時効硬化性があり、溶接部の強度が常温放置により母材に近いところまで回復するという特徴を有し、車両や陸上構造物に使用される³⁰⁾。7003合金 (Al-5.7%Zn-0.75%Mg-0.15%Zr) は強度は7N01合金に若干劣るが、押出性がよく、薄肉の大型形材が得られ、車両やオートバイ用に使われる。

最近の動向としては、高靱性合金としては7075合金を高純度化した7475や7050 (Al-6.2%Zn-2.3%Mg-2.3%Cu-0.12%Zr) 合金の実用化¹⁷⁾や、T6処理後に200℃位の高温で復元時効を行い、再度T6処理を行い、図11のように耐SCC性を向上し、強度の犠牲を少なくした復元時効処理 (RRA処理)³¹⁾がT77処理として実用化している。

4.8 Al-Li系合金

Liは比重が0.53と非常に軽く、Al-Li合金は1%のLiの添加により、比重が3%低下し、弾性率が6%上昇し、熱処理により準安定相の δ' -Al₃Liの析出により強化される高比強度・高弾性率という画期的特徴を有す

図11 復元時効処理 (Alcoa 826 Process) を施した7050合金、35 mm厚板材のST方向の耐応力腐食割れ性 (負荷応力310 MPa, 3.5%NaCl交互浸漬試験 (ASTM G44-75), n=5) と耐力との関係 (図中に従来の調質材T651, T7651, T7451材の結果を示す)³¹⁾

る熱処理型アルミニウム合金である。

Liの効果は1920年代にドイツで見出されていたが、実用合金としては1957年に米国で2020合金 (Al-1.1%Li-4.5%Cu-0.5%Mn-0.2%Cd) が開発され海軍機に採用されたが、破壊靱性の問題が顕在化し開発は中断した。その後、オイルショック、複合材等の進出により、航空機用アルミニウム合金のより一層の軽量化のため、1980年代になり開発が再び活発になった。鑄造の安全対策と高純度化とAl₃Zrを分散粒子に用いることによる破壊靱性の向上等に開発努力がなされ、1984年にAlcoa社により2090合金 (Al-2.2%Li-2.7%Cu-0.12%Zr) が、1985年にPechiney社により2091合金 (Al-2.0%Li-2.1%Cu-1.5%Mg-0.10%Zr) が、AlcanとPechiney社により8090合金 (Al-2.4%Li-1.3%Cu-0.9%Mg-0.10%Zr)、同年Alcan社により8091合金 (Al-2.6%Li-1.5%Cu-0.8%Mg-0.10%Zr) が相次いでAAに登録された。これらの合金は現行の2024, 7075合金に相当する強度を有する^{32), 33)}。

わが国でも、アルミニウム7社の共同出資による「アリウム」が1989年に設立され、材料開発とDC連続鑄造技術の確立をめざして、活発な研究開発がなされている。

5. おわりに

展伸用アルミニウム合金について、筆者が基本的必要事項と考える点について述べたが、「化学成分 (合金系) - プロセス - 組織 - 特性」の関係を理解することの重要性を再度、提起したい。幸い、組織観察法 (キャラクター

ゼーション技術)の進歩は目覚ましい。そこで、日常の研究開発や体験で得られた観察結果を時々基本事項に照らし合わせて、ふりかえることを繰返せば、新たな材料の創造にもつながると考える。一方では、材料の強度も1934年の転位論が出て、今年で60年を数えるが、電子論等による新しい合金設計の試みもなされようとしている³⁴⁾。これからの人々はこれら、新しい手法にも果敢にチャレンジして頂きたい。

本稿では、基本事項が中心となり、新素材、リサイクル等取り上げられなかったことが多々ある点をお詫びしたい。また、たくさんの文献を参考にさせて頂いた先輩諸氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 40周年記念事業実行委員会記念出版部会(神尾彰彦編): アルミニウムの組織と性質, 軽金属学会, (1991).
- 2) 軽金属協会標準化総合委員会: アルミニウムハンドブック(第5版), (1994).
- 3) 「アルミニウムの基礎と工業技術」編集委員会(村上陽太郎編): アルミニウムの基礎と工業技術, 軽金属協会, (1985).
- 4) L. F. Mondolfo: Aluminum Alloys, Structure and Properties, Butterworths, (1979).
- 5) I. J. Polmear: Light Alloys-Metallurgy of the Light Metals, Edward Arnold, (1981).
- 6) D. Altenpohl: Aluminum Viewed from within, Aluminum-Verlag, (1982).
- 7) J. E. Hatch ed.: Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM, (1984).
- 8) 小林藤次郎: アルミニウムのおはなし, 日本規格協会, (1985).
- 9) A. K. Vasudevan and R. D. Doherty: Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications, Academic Press inc., (1989).
- 10) 神尾彰彦: アルミニウム新時代, 工業調査会, (1993).
- 11) 大堀紘一, 竹内 庸: 参考文献3), p. 79.
- 12) 小菅張弓: 参考文献1), p. 178, 180.
- 13) 参考文献1), p. 145.
- 14) J. M. Silcock, T. J. Heal and H. K. Hardy: J. Inst. Metals, 82 (1953-54), 239.
- 15) 里 達雄: 参考文献1), p. 195.
- 16) J. T. Staley: 参考文献9), p. 6.
- 17) 今村次男: 軽金属, 41 (1991), 623.
- 18) 川島敏彦: 軽金属, 40 (1990), 856.
- 19) 高橋正弘: ある, 1971-9, 8.
- 20) J. W. Bay: Metals Handbook (10th), Vol. 2, (1989), 29.
- 21) R. E. Sanders, Jr., S. F. Baumann and H. C. Stumpf: 参考文献9), p. 66.
- 22) 江藤武比古, 佐々木靖紀, 宮木美光: 軽金属学会第60回春期大会講演概要, (1981), 13.
- 23) 柳川政洋, 大家正二郎: 軽金属, 41 (1991), 815.
- 24) W. H. Hooper: J. Inst. Metals, 81 (1952-53).
- 25) 日野光雄: アルトピア, 12 (1989), 9.
- 26) J. langerweger: Proc. Aluminum Technology '86, Paper, No. 46.
- 27) C. V. Lynch: Light Metal Age, 27 (1969), 22.
- 28) 参考文献3), p. 324.
- 29) J. W. Evancho and J. G. Kaufman: Aluminium, 53 (1977), 609.
- 30) 水野政夫ほか: 軽金属溶接学会誌, 36 (1967), 854.
- 31) W. H. Hunt, Jr. and J. T. Staley: Light Weight Alloys for Aerospace Applications: TMS, (1989), 111.
- 32) 小島 陽: 参考文献1), p. 9.
- 33) 古川 稔, 美浦康宏, 根本 実: 日本金属学会誌, 50 (1986), 961.
- 34) 森永正彦, 斉藤淳一, 森下政夫: 軽金属, 42 (1992), 614.