

## 6. 展伸用アルミニウム合金 -2 元系合金-

本講義では、鉄鋼材料以外の金属材料の合金組成、状態図、熱処理による組織制御、物理的性質及び適用例を学習する。今回はアルミニウム合金について述べる。一般に、アルミニウム合金は展伸材と鋳造材に分類される。先ず、展伸材について述べる。

### 6.1 製造工程

展伸用アルミニウム合金の特性を説明する前に、アルミニウム合金の製造工程について述べる(図 6.1)。アルミニウムの製造は、まず原料であるボーキサイト(酸化アルミニウム  $Al_2O_3$  を 50%以上含む)と苛性ソーダ(水酸化ナトリウム  $NaOH$ )で溶解して、二酸化ナトリウムアルミニウム( $NaAlO_2$ )の生成とともにアルミナ( $Al_2O_3$ )が抽出される。その後、アルミナを熔融氷晶石( $Na_3AlF_6$ )の中で炭素電極を用いて電気分解する(Hall-Héroult process)ことにより、金属アルミニウムが製造される。このときの化学反応式を次式に示す。



国内では静岡の蒲原(日本軽金属㈱)で行われていたのみであったが、2014年に終了した。そのため、国内アルミニウム地金はすべて輸入されたものを使用している。

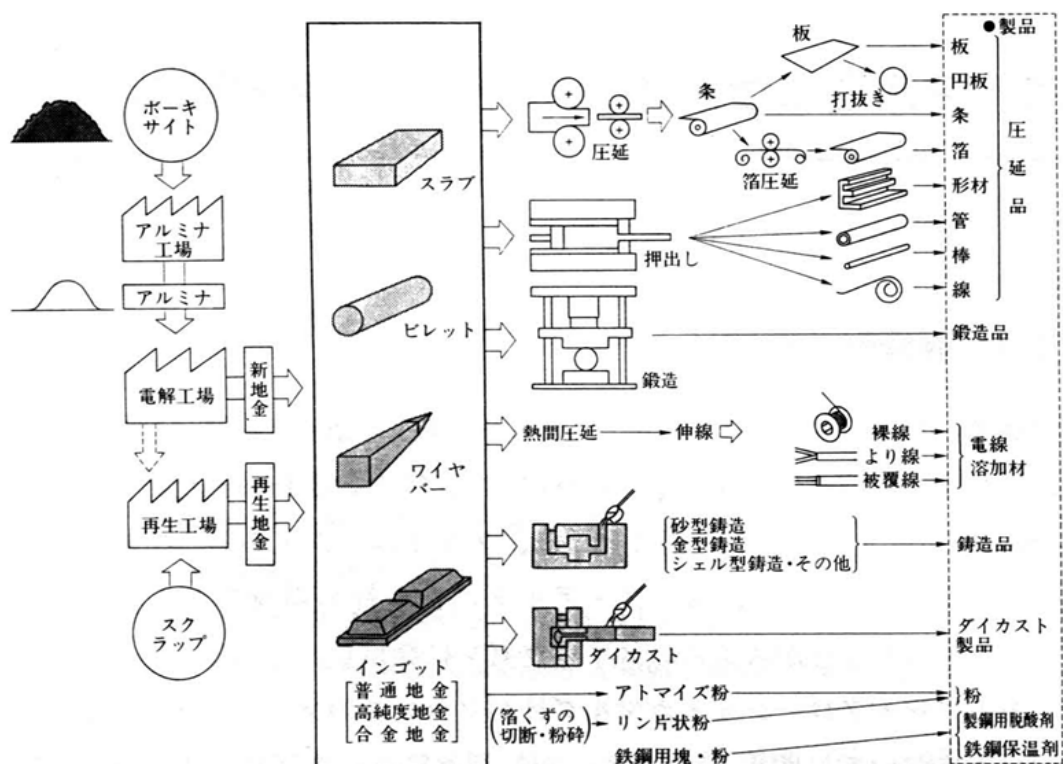


図 6.1 アルミニウム合金の製造工程 [1]

国内では静岡の蒲原（日本軽金属㈱）で行われていたのみであったが、2014年に終了した。そのため、国内アルミニウム地金はすべて輸入されたものを使用している。

このような地金を用いて、溶解炉で成分調整が行われ、展伸用合金としての鋳塊が製造される。アルミニウム展伸材、圧延、押し出しもしくは鍛造といった方法で製造される。これら鋳塊は熱間加工前に熱処理が施され、この熱処理を、均質化熱処理（homogenizing）、ソーキング（soaking）あるいは予備加熱（pre-heating）と呼ぶ。この熱処理は通常合金の融点に近い温度で数時間行われる。その後、鋳塊は熱間圧延、熱間押し出しもしくは熱間鍛造される。

## 6.2 展伸用アルミニウム合金の分類

展伸用合金は、図 6.2 に示すように非熱処理型合金と熱処理型合金の 2 種類に大別される。これは合金の強化機構に由来し、非熱処理型合金は主に合金元素の固溶強化、熱処理型合金は主に熱処理による析出強化によって強化される。また、主要合金元素によって 1000 系から 7000 系まで分類される（表 6.1）。

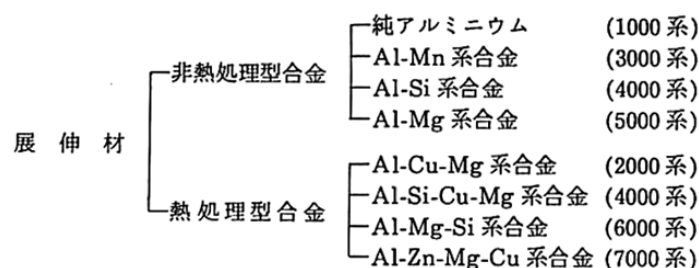


図 6.2 展伸用アルミニウム合金の組成による分類 [2]

表 6.1 代表的な展伸用アルミニウム合金の化学組成 (wt.%) [2]

	合金番号	組成(質量%)
1000系 アルミニウム	1080	Al>99.80
	1060	Al>99.60
	1050	Al>99.50
	1100	Al>99.00, Cu 0.1
	1200	Al>99.00, Cu<0.5
2000系 Al-Cu-Mg合金	2014	Cu 4.4, Mg 0.5, Mn 0.8, Si 0.8
	2017	Cu 4.0, Mg 0.6, Mn 0.7, Si 0.5
	2024	Cu 4.4, Mg 1.5, Mn 0.6
3000系 Al-Mn合金	3003	Mn 1.2, Cu 0.1
	3004	Mn 1.2, Mg 1.0
4000系 Al-Si合金	4032	Si 12.0, Cu 0.9, Mg 1.0, Ni 0.9
	4043	Si 5.0
5000系 Al-Mg合金	5005	Mg 0.8
	5052	Mg 2.5, Cr 0.25
	5083	Mg 4.5, Mn 0.7, Cr 0.1
	5086	Mg 4.0, Mn 0.5, Cr 0.1
6000系 Al-Mg-Si合金	6061	Mg 1.0, Si 0.6, Cu 0.25, Cr 0.25
	6063	Mg 0.7, Si 0.4
7000系 Al-Zn-Mg-Cu合金	7075	Zn 5.6, Mg 2.5, Cu 1.6, Cr 0.25
	7N01	Zn 4.5, Mg 1.5, Mn 0.5

また、展伸用アルミニウム合金において施した加工処理もしくは熱処理を示す質別記号が用いられる。(表 6.2) H は非熱処理型, T は熱処理型で用いられる. このような記号はアルミニウム合金の産業界では一般に用いられており, 製品の品質を識別するのに用いられる. 本講義においてこのような記号をすべて暗記する必要はないが, その意味 (特に熱処理) を理解して頂きたい. 表 6.3 に, 熱処理を意味する T の詳細な質別記号とその意味を示す. すべての熱処理において溶体化処理 (solution treatment) といった高温に保持後, 冷却もしくは比較的低温で時効 (aging) 処理している. これは, 溶体化処理によって  $\alpha$ -Al 母相における析出の過飽和度を高め, その後の冷却もしくは時効を用いて母相内の析出物を制御していることを意味する (第 4 回, 第 5 回講義資料を参考).

表 6.2 展伸用アルミニウム合金の質別の基本記号 [1]

記号	定 義	意 味
F	製造のままのもの.	特に調質に指定なく製造された状態を示し, 押出しのままで調質を受けない材料がこれにあたる. また, 展伸材では機械的性質を規定しない.
H	加工硬化したもの.	追加熱処理の有無にかかわらず, 加工硬化によって強さを増したのもの.
H112	展伸材においては積極的な加工硬化を加えずに, 製造されたままの状態で機械的性質の保証されたもの.	
T	熱処理によって F, O, H 以外の安定な質別にしたもの.	追加加工硬化の有無にかかわらず, 熱処理によって安定な質別にしたもの.
O	焼なまししたもの.	展伸材については, 最も軟らかい状態を得るように焼なまししたもの. 鋳物については, 伸びの増加または寸法安定化のために焼なまししたもの.
W	溶体化処理したもの.	溶体化処理後常温で自然時効する合金だけに適用する不安定な質別.

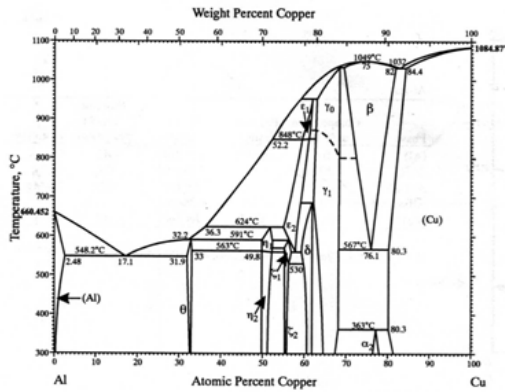
表 6.3 展伸用アルミニウム合金の T を頭文字とした質別の記号とその意味 [1]

記号	意 味
T1	高温加工から冷却後自然時効させたもの
T2	高温加工から冷却後冷間加工を行い自然時効させたもの
T3	溶体化処理後焼入れし, 冷間加工を行いさらに自然時効させたもの
T4	溶体化処理後焼入れし, 自然時効させたもの
T5	高温加工から冷却後人工時効硬化処理したもの
T6	溶体化処理後焼入れし, 人工時効硬化処理したもの
T7	溶体化処理後焼入れし, 過時効処理したもの
T8	溶体化処理後焼入れし冷間加工を行い, さらに人工時効硬化処理したもの
T9	溶体化処理後焼入れし人工時効硬化処理を行い, さらに冷間加工したもの
T10	高温加工から冷却後冷間加工を行い, さらに人工時効硬化処理したもの

### 6.3 展伸用アルミニウム合金の状態図

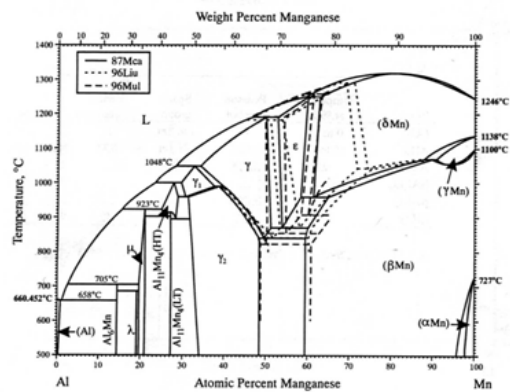
図 6.3 に、アルミニウム合金主添加元素である Cu, Mn, Mg 及び Zn の 2 元系状態図を示す。熱処理型合金である Al-Cu は微量の Cu 添加によって  $Al_2Cu$ - $\theta$  相が析出することがわかる (析出の詳細は後述する)。

(a) Al-Cu binary (2xxx)



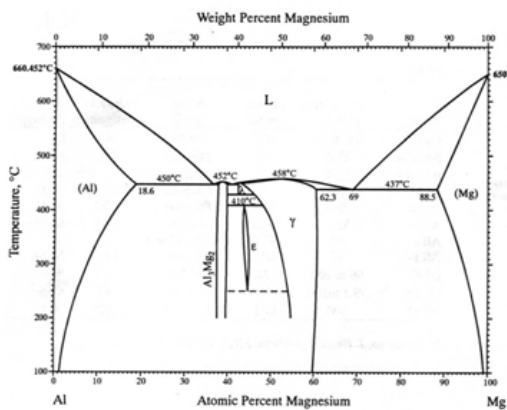
Phase	Composition, at.% Cu	Pearson symbol	Space group	Strukturbericht designation	Prototype
(Al)	0 to 2.48	cF4	$Fm\bar{3}m$	A1	Cu
$\theta$	31.9 to 33.0	tI12	$I4/mcm$	C16	$Al_2Cu$
$\eta_1$	49.8 to 52.4	<i>oP16 or oC16</i>	$Pban$ or $Cmnm$	...	...
$\eta_2$	49.8 to 52.3	<i>mC20</i>	$CmI2$	...	...
$\zeta_1$	55.2 to 56.8	<i>hP42</i>	$P6/mmm$	...	...
$\zeta_2$	55.2 to 56.3	<i>m**</i>	...	...	...
$\epsilon_1$	59.4 to 62.1	<i>c**</i>	...	...	...
$\epsilon_2$	55.0 to 61.1	<i>hP4</i>	$P6_3/mmc$	$B8_1$	NiAs
$\delta$	59.3 to 61.9	<i>hR*</i>	$R\bar{3}m$	...	...
$\gamma_0$	63 to 68.5	<i>cI52</i>	$I\bar{4}3m$	$D8_2$	$Cu_5Zn$
$\gamma_1$	62.5 to 68.5	<i>cP52</i>	$P\bar{4}3m$	$D8_3$	$Al_4Cu_3$
$\beta$	69.5 to 72	<i>cI2</i>	$Im\bar{3}m$	A2	W
$\alpha_2$	76.5 to 88	...	...	...	...
(Cu)	80.3 to 100	cF4	$Fm\bar{3}m$	A1	Cu

(b) Al-Mn binary (3xxx)



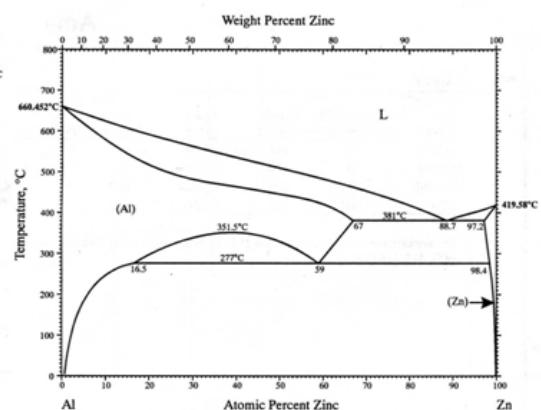
Phase	Composition, at.% Mn	Pearson symbol	Space group	Strukturbericht designation	Prototype
(Al)	0 to 0.62	cF4	$Fm\bar{3}m$	A1	Cu
$Al_6Mn$	14.2	<i>oC28</i>	$Cmcm$	$D2_b$	$Al_6Mn$
$\lambda$	?	<i>oP60</i>	$Pnmm$	...	...
$\mu(Al_4Mn)$	19 to 20.8	<i>hP574</i>	$P6_3/mmc$	...	...
$Al_{11}Mn_4(HT)$	25 to 28.7	<i>oP160</i>	$Pnma$	...	...
$Al_{11}Mn_4(LT)$	27	<i>aP30</i>	$P\bar{1}$	...	...
$\gamma_1$	30 to 38.2	...	...	...	...
$\gamma_2(Al_8Mn_5)$	31.4 to 49	<i>hR26</i>	$R\bar{3}m$	$D8_{10}$	$Al_8Cr_5$
$\gamma$	34.5 to 51.3	<i>cI2</i>	$Im\bar{3}m$	A2	W
$\epsilon$	53.2 to 60	<i>hP2</i>	$P6_3/mmc$	A3	Mg
$\delta(Mn)$	61.5 to 100	<i>cI2</i>	$Im\bar{3}m$	A2	W
$\gamma(Mn)$	90.9 to 100	<i>cF4</i>	$Fm\bar{3}m$	A1	Cu
$\beta(Mn)$	59.5 to 100	<i>cP20</i>	$P4_32$	A13	$\beta Mn$
$\alpha(Mn)$	98 to 100	<i>cI58</i>	$I\bar{4}3m$	A12	$\alpha Mn$

(c) Al-Mg binary (5xxx)



Phase	Composition, at.% Mg	Pearson symbol	Space group	Strukturbericht designation	Prototype
(Al)	0 to 18.6	cF4	$Fm\bar{3}m$	A1	Cu
$Al_3Mg_2$	37.5 to 40	<i>cF1832</i>	$Fd\bar{3}m$	...	...
$\lambda$	42.5	...	...	...	...
$\epsilon$	43.5 to 44.8	<i>hR53</i>	$R\bar{3}$	...	...
$\gamma$	43.2 to 62.3	<i>cI58</i>	$I\bar{4}3m$	A12	$\alpha Mn$
(Mg)	88.5 to 100	<i>hP2</i>	$P6_3/mmc$	A3	Mg

(d) Al-Zn binary (7xxx)



Phase	Composition, at.% Zn	Pearson symbol	Space group	Strukturbericht designation	Prototype
(Al)	0 to 67	cF4	$Fm\bar{3}m$	A1	Cu
(Zn)	97.2 to 100	<i>hP2</i>	$P6_3/mmc$	A3	Mg

図 6.3 アルミニウム合金主添加元素である Cu, Mn, Mg 及び Zn の 2 元系状態図[3]

2000系に属するAl-Cu (Al-Cu-Mg) 合金はAl<sub>2</sub>Cu (Al<sub>2</sub>CuMgも含む) の析出物 (実際はそれらのG.P.ゾーン) によって強化される. これらの合金はジュラルミンと呼ばれ, 2017ジュラルミンや2024超ジュラルミンは鋼に匹敵する (400 MPa以上) の高い引張強度を有する.

表 6.4 代表的な展伸用アルミニウム合金の機械的性質 [2]

材 質	引 張 り 性 質				ブリネル 硬 さ 10/500	せん断 強 度 (MPa)	疲 れ 強 さ 5×10 <sup>8</sup> 回 (MPa)	縦弾性 係 数 (GPa)
	引張り 強 さ (MPa)	0.2% 耐 力 (MPa)	伸 び(%)					
			板 1.6mm厚	棒 φ12.7mm				
1060-O	69	29	43	—	19	49	20	69
1060-H12	83	74	16	—	23	54	29	69
1060-H14	98	88	12	—	26	64	34	69
1060-H18	132	123	6	—	35	74	44	69
1100-O	88	34	35	45	23	64	34	69
1100-H12	108	103	12	25	28	69	39	69
1100-H14	123	114	9	20	32	74	49	69
1100-H18	167	152	5	15	44	88	64	69
2017-O	181	69	—	22	45	123	88	73
2017-T4	427	275	—	22	105	260	123	73
2024-O	186	74	20	22	47	123	88	74
2024-T3	481	343	18	—	120	284	137	74
2024-T4	422	324	20	19	120	284	137	74
3003-O	108	39	30	40	28	74	49	69
3003-H12	132	123	10	20	35	83	54	69
3003-H14	152	147	8	16	40	98	64	69
3003-H18	201	186	4	10	55	108	69	69
3004-O	181	69	20	25	45	108	98	69
3004-H32	216	172	10	17	52	117	103	69
3004-H34	240	201	9	12	63	123	103	69
3004-H38	284	250	5	6	77	147	108	69
4032-T6	378	319	—	9	120	260	108	78
5005-O	123	39	25	—	28	74	—	69
5005-H12	137	132	10	—	—	98	—	69
5005-H14	157	152	6	—	—	98	—	69
5005-H18	201	191	4	—	—	108	—	69
5052-O	191	88	25	30	47	123	108	71
5052-H32	226	191	12	18	60	137	117	71
5052-H34	260	216	10	14	68	147	123	71
5052-H38	289	255	7	8	77	167	137	71
5083-O	289	147	—	22	—	172	—	71
5083-H32	319	226	—	16	—	—	157	71

一方, 3000系に分類されるAl-Mn合金においてα-Al(fcc)中にMnがほとんど固溶しない (図 6.4). そのため, 本合金は溶体化処理後の熱処理による時効硬化性をほとんど示さない. これは溶体化処理を用いて過飽和なMn元素を含むα-Al固溶体をつくるのが困難である (図 6.4 参照) だけでなく, Al-Cu合金で認められるような微細な中間相の析出物を形成しないためである. このため2000系合金ほど強

度は高くないが、1000系合金（純アルミニウム合金）より高い強度（ $\text{Al}_6\text{Mn}$ 析出物による強化）と優れた耐食性（ $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ 析出物の生成により母相内のFe元素を減少させる）を有するのが3000系合金の利点である。

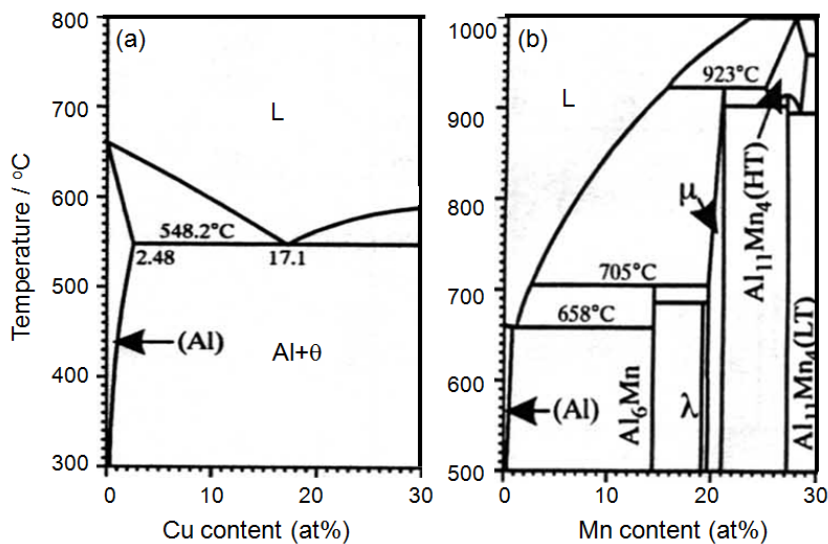


図 6.4 (a) Al-Cu 及び(b) Al-Mn 2 元系状態図における $\alpha$ -Al 単相領域 [3]

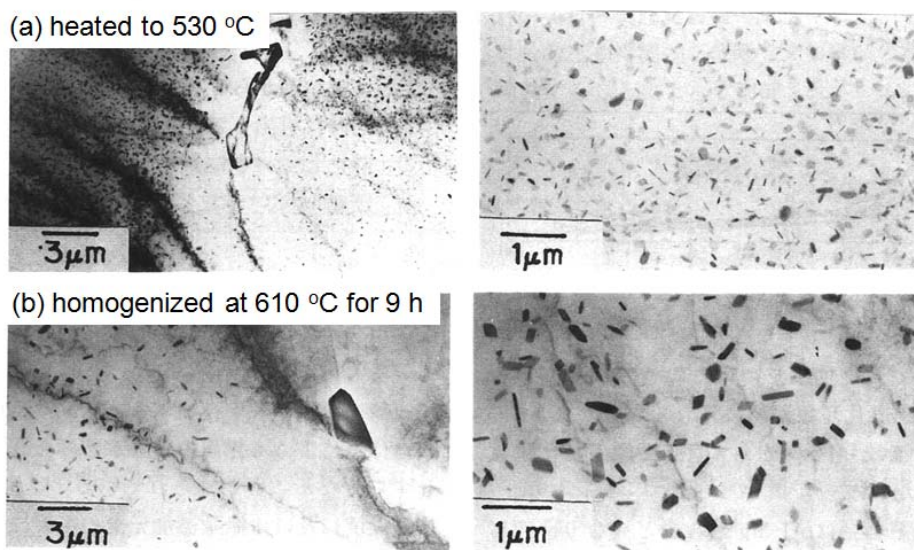


図 6.5 異なる条件で均質化処理を施した Al-Mn 合金(3004)の析出物の電子顕微鏡像[4]

### 参考図書

- [1] アルミニウム合金の強度，小林俊郎，内田老鶴圃 (2001).
- [2] 非鉄材料－講座・現代の金属学 材料編 5－，日本金属学会 (1987).
- [3] Phase diagrams for Binary Alloys, Hiroaki Okamoto, ASM International (2000).
- [4] アルミニウムの組織と性質，軽金属学会 (1991).