

第18章 アルミニウム合金

18.1 アルミニウム合金の歴史

アルミニウム (**aluminium**) およびアルミニウム合金は国内総需要は鉄鋼に次いで、金属素材の重要な地位を占めている。鉄や銅が古代から使われてきたのに対して、アルミニウムの歴史は新しい。アルミニウムは地殻構成元素量を産出したクラーク数では、酸素、珪素に次いで多い元素で、鉄の 1.6 倍も存在しており、持続採掘年数も銅の 20～30 年に比べて約 200 年と長い。最近まで利用されなかった理由は安定な酸化物として存在するために精錬が難しかったことにある。1807 年英国のデイヴィ (**H.Davy**) が明ばんの成分を分析して正体不明の金属元素を発見してアルミアム (**Alumium**) と名付けた^(注 1)。後にアルミニウム (**Aluminium**) と名付けられた^(注 2)。1825 年デンマークの化学者エルステッド (**H.C.Oersted**) が酸化アルミニウムから粉末状の金属アルミニウムの製造に成功した。1827 年にはドイツのベーラー (**F.Wöhler**) も粉末アルミニウムの製造に成功し、1845 年に粒状のアルミニウムの製造に成功して、密度などの物性値が明らかとなった。1854 年にはフランスのドヴィル (**S.C.Deville**) と独国のブンゼン (**R.W.Bunsen**) が相前後して塩化アルミニウムをナトリウムで還元し、金属アルミニウムの分離に成功し、工業化の道を開いた。同じ頃、ドイツのローゼ (**H.Rose**) と英国のパーシー (**Percy**) もほとんど同時に氷晶石を利用し、ナトリウム還元法を提案した。1856 年、フランスのドヴィル (**H.E.S.Deville**) はナポレオン 3 世の命を受けて世界最初のアルミニウム工場を建設、1861 年にはペシネ (**Pechiney**) が生産を開始したが、当時で年産 1.8 トン、1888 年でやっと約 4.5 トンであった。

1866 年にフランスの科学者シーメンス (**W.V.Siemens**) が直流発電機を発明、1870 年にベルギーのグラム (**Z.T.Gramme**) がこの直流発電機の工業生産化に成功したことにより、安い電力の供給が可能になった。1886 年 2 月、アメリカの大学院生ホール (**C.M.Hall**) は熔融氷晶石 (Na_3AlF_6) 中に酸化アルミニウムを投入して電気分解することによって金属アルミニウムの製造に成功し、1889 年米国で特許を取得した^(注 3)。同じ年、フランスのエール (**Paul.L.He'routl**) がホールと同じ方法を独自に発明して 1889 年 5 月にフランス、ベルギー、英国およびスイスで特許で取得した。ホールとエールが発明した電解精錬法は現在の精錬法と基本原理では同じであり、「ホール・エール法」と呼ばれている^(注 4)。その後の 1888 年にはオーストリアのバイヤー (**K.J.Bayer**) がボーキサイトからアルミナを抽出する湿式アルカリ法 (バイヤー法) を発明した。

^(注 1) アルミアムの語源は明ばんを表す **Alum** であり、その後、ラテン語の光を持つものという意味のアルーミネと合体させてアルミニウムとなる。

^(注 2) 米国ではアルミナム (**Aluminum**) と名付けられた。

^(注 3) 1888 年ホールは **Pittsburgh Reduction Co.** を設立し、アルミニウムの精錬を開始した。これが現在のアルコア (**Aluminum Company of America**) の前身である。

^(注 4) ホールとエールは同じ年に電解精錬法を発明したが、彼らには共通点が多い。同じ年に生まれ、同じ年に発明し、1888 年に生産工場を興し、2 人とも 1914 年に 51 才で没した。

18.2 アルミニウムの製造法

現在のボーキサイトからアルミニウムを製造する手法はバイヤー法とホール・エール法である。原料のボーキサイトはアルミナ (Al_2O_3) のほか、シリカ (SiO_2)、酸化チタン (TiO_2) などが含まれている。まず、ボーキサイトは乾燥、粉碎され、水酸化ナトリウム (NaOH) と混合されると、アルミナが溶融してアルミン酸ナトリウム (NaAlO_2) になり、不純物が沈殿し分離される。このアルミン酸ナトリウムは攪拌しながら冷却すると水酸化アルミニウム (Al(OH)_2) が結晶化する。それを加熱するとアルミナができる。(これをバイヤー法と言う。)

次に、溶融アルミナを電気分解してアルミニウムができる。アルミナの融点は高いので融点を下げるために氷晶石 (Na_3AlF_6) やフッ化アルミニウム (AlF_3) が添加される。1000 °C 以上に加熱し溶融状態のアルミナの中に電極を挿入し電気分解させると、陽極に CO_2 が、陰極にアルミニウムが析出する。アルミニウム 1 トンを作るにはアルミナ 2 トン(その原料のボーキサイトは 4 トン) 必要となる。その他に水酸化ナトリウム、氷晶石などが必要な上、アルミニウム 1 トンを作るのに 15,000 kWh もの電力を必要とする(注 5)

18.3 アルミニウム合金の特性

18.3.1 物理的性質

第18.1表: アルミニウムの物理的性質

性質	高純度 Al(99.996%)	普通純度 Al(99.6%)
密度 g/cm^3	2.6989	2.71
融点 °C	660.2	約 655
比熱 J/gK	0.905(0 °C)	0.877(0 °C)
溶融潜熱 J/g	402.4	395.6
熱伝導率 W/mK	-	236(0 °C)
熱膨張率 20 ~ 100 °C	24.58×10^{-6}	23.5×10^{-6}
導電率 %	64.94	59(焼きなまし)
固有抵抗 Ωm 20 °C	2.6548×10^{-8}	2.75×10^{-8}
結晶構造 fcc Å 20 °C	a=0.40413nm	a=0.404nm

密度

密度は 2.69 と小さい。比重は 5 以下を軽金属と呼び、軽金属には 15 の元素がある。軽金属の中では極めて小さいわけではないが、実用材料である鉄の 7.86、銅の 8.93、チタンの 4.50 に比べると、軽量化などに有効である。

ヤング率, 弾性限

アルミニウム合金のヤング率は 70 ~ 72GPa であり、鉄鋼材料のその約 1/3 で、たわみによる変異が問題となる構造部分に使用するには十分注意を要する。

(注 5) 身近な例で示すと、350ml のビール缶に使われるアルミニウムを作るためには 100W 電球を丸 2 日間つけっぱなしにするにほぼ等しい電力を必要とする。

なお、アルミニウム単結晶のヤング率は結晶方位依存性があり、 $\langle 111 \rangle$ 方向は **75GPa**、 $\langle 110 \rangle$ 方向は **71GPa**、 $\langle 100 \rangle$ 方向では **62GPa** となる。

弾性限 σ_e は耐力 $\sigma_{0.2}$ の **75%**程度と見なされる。

第18.2表: アルミニウム合金の弾性率

ヤング率 E(GPa)	剛性率 G(GPa)	比弾性率	
		E/ ρ	G/ ρ
70	27	26	10

注: 比重 ρ は **2.7** として計算, 単位は **GPa**

熱伝導率

アルミニウムは銀、銅、金に次いで熱伝導率が高い。この熱伝導率の良さを利用して、オートバイの放熱装置、室内クーラーや瞬間湯沸かしパイプや熱交換機には以前は銅合金が利用されていたが、大量生産が可能になったためにこれら装置には不可欠な材料となった。

電気伝導率

アルミニウムは銀、銅、金に次いで電気伝導率が高い。銅の比電気抵抗を **100** とするとアルミニウムは **61 ~ 85** である^(注 6)。一般に、電線は銅が用いられているが、発電所から変電所を経て電気を送る場合には距離が長いので、軽量で十分な強度、可撓(かとう)性(たわみに対する強度)が要求される。アルミニウムの比重は銅の比重の約 $1/3$ であるので軽量化が可能であるが、強度が低い。そこで、亜鉛めっきした鋼線、および鋼撚線を芯にして、その上に中層、外層のアルミニウム線を同心円にロール状に巻いて送電線にする鋼心アルミ撚り線 (ACSR) がある^(注 7)。

非磁性

鉄やコバルト、ニッケルは強磁性体で磁石に付くが、アルミニウムは磁石に付かず、磁気を帯びないので、非磁性を要する機器や場所で使われる。例えば船のコンパスは船の航路を決める重要な機器であるので、アルミニウムが用いられており、さらに操舵室の床や屋根にもアルミニウムを用いられることもある。

低温特性

アルミニウム合金の靱性は温度の低下とともに上昇するために、低温度で靱性値自体を問題にすることはない。上記の熱伝導特性、電気伝導特性から低温機器の熱交換器、超電導体の安定化材などでも使われている。

その他

衝撃によって火花を散らさない。

(注 6) アルミニウムにつづく亜鉛や鉄がそれぞれ **28**, **18** であることをみるとアルミニウムは電気の良導体とすることになる。

(注 7) 電線を通る電気は電線の断面を均等に流れるのではなく外周部に **8** 割以上の電気が流れるので、鋼心アルミ撚り線のように導電率の低い鋼撚り線を中心線としても電力ロスが小さい。

極低温でも脆化しない。
反射率が大きい。

18.3.2 化学的性質

アルミニウム合金の腐食形態

全面腐食 (general corrosion)

アルミニウムは両性金属であるために、強酸および強アルカリ中で全面的に腐食される。とくに塩酸溶液や苛性アルカリ溶液中で腐食速度は大きく、酸化性の酸である硝酸溶液中では小さい。

孔食 (pitting corrosion) 中性溶液 (pH4 ~ 9) における主要な腐食は孔食である。アルミニウムの孔食発生の大きな要因は塩素イオンであり、数 ppm の塩素イオンの存在で孔食を発生することがある。他の陰イオンや重金属イオンを塩素イオンの効果を促進させる。クロム酸イオンは逆に孔食を抑制する。

すき間腐食 (crevice corrosion)

アルミニウム合金はすき間腐食を生じやすい。すきま部には水が入りやすいこと、腐食性物質が濃縮されやすいことなどが原因となる。

ガルバニック腐食 (galvanic corrosion)

多くの金属はアルミニウムより貴電位であることから、他の金属と接触した状態で水溶液に浸漬されると電池作用により腐食が促進される。種々の金属を効果で分類すると、

促進せず：亜鉛 (むしろ抑制効果あり)、カドミウムなど

促進度小：鉄鋼 (塩素イオンが少ない場合)、ステンレス鋼、クロム

：マグネシウム、チタン、鉛など

促進度中：ニッケル、スズ、炭素など 促進度大：鉄鋼 (塩素イオンが多い場合)、銅、水銀

となる。

エロージョン (erosion)

高流速の液体に接触するアルミニウムは表面酸化被膜が機械的破壊され深いピットを生ずることがある。一般に、3m/sec 以上になるとエロージョンが生じやすいとされているが、液中に懸濁性固形物や気泡があると腐食がさらに助長される。

粒界腐食 (intergranular corrosion)

不適切な熱処理を行うと結晶粒界へ析出物が連続的に存在する場合に、結晶粒界部分が選択的に腐食される。Al-Cu 系、Al-Mg 系 (Mg4%以上)、Al-Mg-Si 系、Al-Zn-Mg(-Cu) 系で生じやすい。

応力腐食割れ (stress corrosion cracking)

Al-Mg 系 (Mg35%以上)、Al-Cu 系、Al-Zn-Mg(-Cu) 系などの合金では、海水や塩分を含む湿った大気などによって粒界型応力腐食割れを発生しやすい。

各種アルミニウム合金の耐食性

純アルミニウム

99.00%以上の高純度アルミニウムはアルミニウム合金の中で耐食性が最良で、純度が低下するにつれて耐食性が低下する。とくに、AlFeSi の 3 元系化合物が析出すると水中で深いピットを生じ易くなる。

Al-Cu 系合金 (熱処理型)

Cuは耐孔食性を低下させる元素であるために、この系の合金は耐食性が劣る。粒界腐食を生じやすいので、腐食性の低い大気中以外での使用の場合には防食対策を行うことが望ましい。

Al-Mn 系合金 (非熱処理型)

全般的には良好な耐食性を有する。純金属に比べて、深いピットを生じにくい特徴がある。

Al-Mg 系合金 (非熱処理型)

Mgは耐孔食性を向上させ、また酸化皮膜をの成長を促進させるために、この系はアルミニウム合金の中で最良と言える。とくに塩分を多く含む環境での耐食性が優れている。ただし、酸性環境での腐食速度は純アルミニウムよりも若干多い。**Mg**を5%以上含む合金は応力腐食割れを生じやすい。

Al-Mg-Si 系 (熱処理型)

耐食性はAl-Mg系、Al-Mn系に次いで良好であり、熱処理型では最良である。しかし、 Al_2Si が量論比以上のSiを含む合金や、Cuを含む合金は耐食性がやや劣る。

Al-Zn-Mg(-Cu) 系合金 (熱処理型)

Znは耐食性を劣化させる合金元素であり、この系の合金は耐食性が劣る。とくにCuを含む合金はAl-Cu系と同様に防食対策が必要となる。Cuを含まない合金の耐食性はこれよりも良く、Cuを含むAl-Mg-Si系合金と同程度と同等である。ただし、溶接部の熱影響部の耐食性が劣化する。

各種環境における腐食挙動と防食技術

大気中での腐食と防食

大気暴露されたアルミニウムには浅いピットが全面的に生ずる。厚さの減少は僅かで陸上の大気環境では年間 $1\mu\text{m}$ の腐食速度を超えることはほとんどない。腐食性が強いのは海洋上の大気であり、海岸工業地、海浜、内陸工業地、田園の順となる。板厚が厚ければ腐食の影響は小さいが、通常陽極酸化により $15\sim 25\mu\text{m}$ 程度の被膜を付け、十分な封孔処理を行うことが望ましい。

海水中での腐食と防食

海水中で問題となる腐食が孔食とすき間腐食である。耐海水性の高い材料がAl-Mg系とAl-Mn系の合金である。孔食防止対策として塗装と陰極防食である。塗装の場合には塗膜の密着性が悪いとすき間腐食を生じやすい。すき間腐食は海水中でとくに生じやすい。

水による腐食と防食

真水中での腐食はほとんどが孔食である。合金系としてはAl-Mg系とAl-Mn系がよいが、材料間での差は海水中ほど大きくない。

防食法としては陽極酸化、化成処理、塗装、陽極防食などがある。循環系では腐食抑制剤の添加が効果的である。

18.3.3 機械的性質

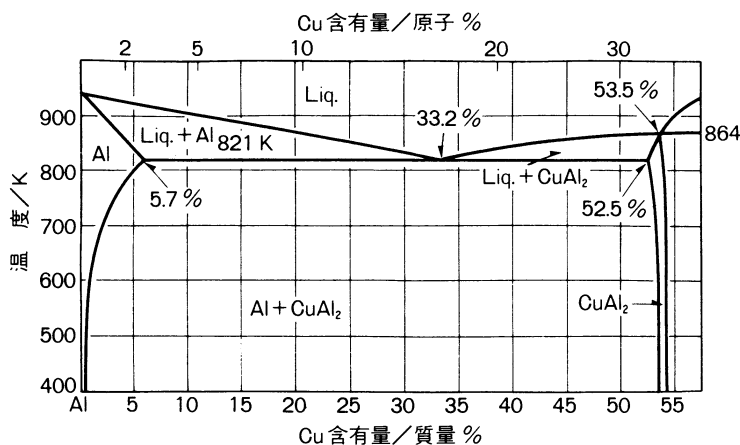
アルミニウムのヤング率は鋼の約 $1/3$ であり、剛性の低い材料である。引張強さは焼なまし状態で $40\sim 80\text{MPa}$ 、冷間加工状態でも 150MPa 程度であり、純鉄の引張強さが約 200MPa であるのに比べると低い。アルミニウムの大きな利点は密度が 2.7 と小さく、比強度(強さ/密度)が大きいことである。

アルミニウム合金の強度を向上させるには、加工による加工硬化と、時効硬化による析出硬化が良く用いられる。アルミニウム合金の析出硬化はAl-Cu合金において初めて見出された現象である。図18.1はAl-Cu系の平衡状態図である。Al-4%Cu合金を793Kに加熱するとCuが α 相に固溶した単相組織となる。これを急速冷却すると、この状態が室温まで保持された過飽和固溶体が形成される。これを室温あるいは低温度で保持すると時間とともに硬さが上昇する時効現象が現れる。図18.2は時効硬化の高yか過程を示

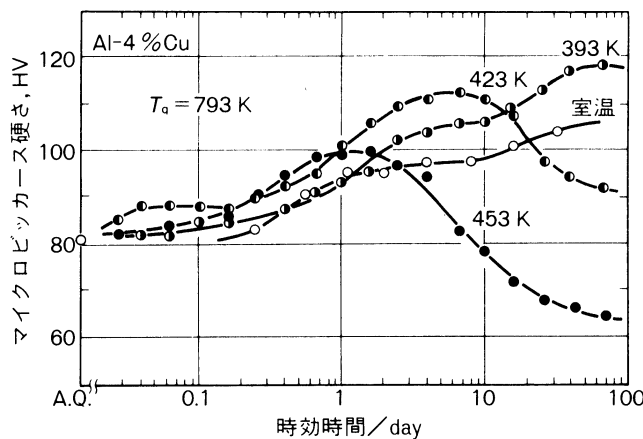
したものである。硬さは固溶化状態に比べて約50%の上昇を示す。実用合金ではCuやMg, Siを添加してさらに強度レベルを上昇させている。

この現象は析出強化としてアルミニウム合金の場合には時効過程においてCuの板状集合体GPゾーンが形成されるためである。析出過程は過飽和固溶体 → G.P. ゾーン → 中間相 → 安定相へと変化する。図18.3はその過程を示したもので、時効とともに母相と整合性があるG.P.(1)から半整合であるG.P.(2),そして中間相θ'相へと変化する。半整合のG.P.(2)からθ'相の微細析出で最高硬さが得られる。さらに加熱してθ'相が安定相であるθ相(Al₂Cu)へ変化すると析出相の粗大化によって硬さは低下する。時効温度が低い方が最高硬さは高くなるが、最高硬さに到達する時間は長くなる。時効温度が高いと、G.P.ゾーンの生成時間が短く、すぐにθ'相が析出する。

極低温での強度は大きく、-253Kでのアルミニウムの破断真応力は約1.57GPaにも達する。



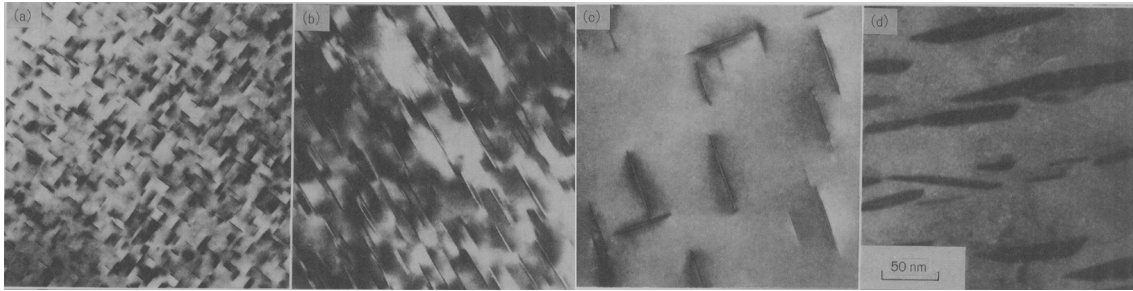
第18.1図: Al-Cu系平衡状態図



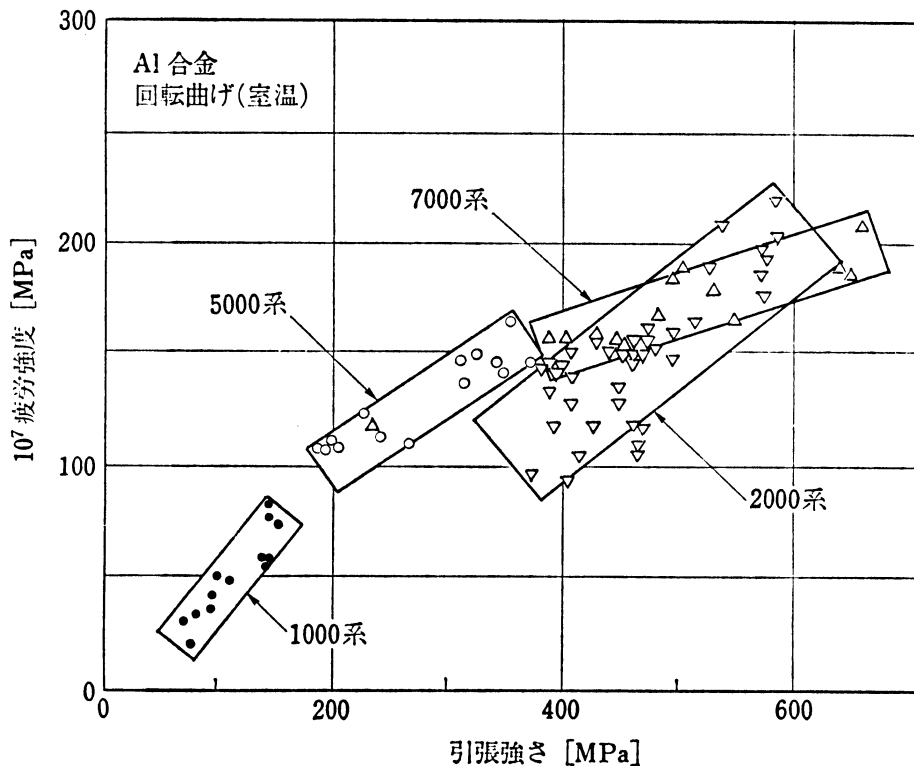
第18.2図: Al-4%Cu合金の時効硬化曲線

疲労

アルミニウム合金の疲れ強さと引張強さの関係を図18.4に示す。アルミニウム合金はS-N曲線に明確な疲労限度を示さないために、繰返し数10⁷回に対する時間強度で表している。2000系や700系などの熱処理系では疲労強度と引張強さの比は約1/3程度で、溶接して使われる5000系, 1000系ではその比が1/2となっている。



第18.3図: Al-4%Cu 合金の時効硬化現象。a:GP(1)ゾーン, b:GP(2)ゾーン, c: θ' 相, d: θ 相 (Al_2Cu)



第18.4図: Al 合金の疲れ強度と引張強さの関係

18.3.4 アルミニウム合金の加工性

被削性

アルミニウム合金の旋削加工についての特性を挙げると次のようになる。

- (1) 比重が鉄鋼や銅合金に比べて約 $1/3$ で旋削などでは高速回転における慣性力が小さい。
- (2) 耐力が小さいので、加工に際して取付け、取外しによる歪状態の変化を生じやすく、加工精度が狂う原因となる。
- (3) 硬さが低いので切り屑その他によって仕上げ面にきずを生じやすく、仕上げ面の美観を損なうことが多い。
- (4) せん断強さも低く切削に際に刃先によって塑性流動を生じやすい。
- (5) 鉄鋼に比べて構成刃先の生成脱落が生じやすく、切削機構が複雑になり、良好な仕上げ面が得られにくく

い。

(6) 熱膨張率が大きいので、加工熱による温度上昇が加工精度に大きく左右される。

18.4 アルミニウム合金の表面処理

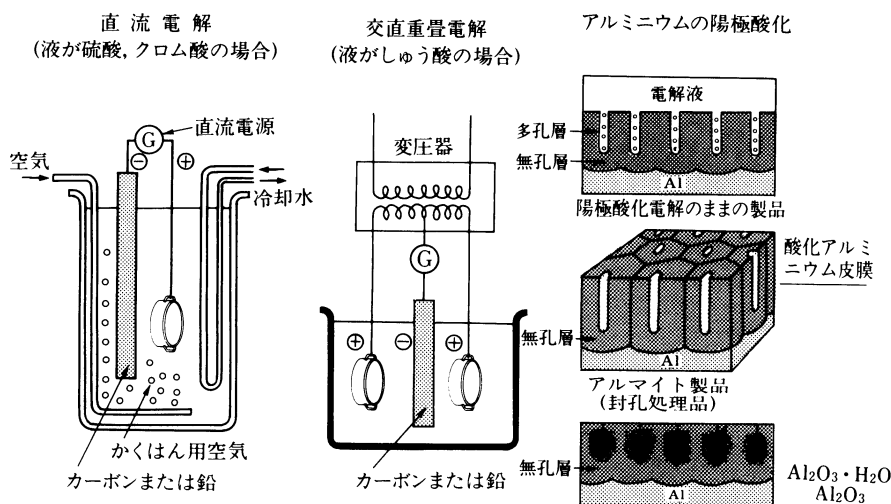
アルミニウム合金の表面には 3 ~ 10nm の薄い酸化アルミニウムの皮膜が生成され、10 ~ 30 日で約 0.1 μm に成長する。この酸化皮膜を人工的に厚く安定に生成させる方法に陽極酸化処理 (アルマイト処理) の後に陽極酸化処理は、図 18.5 に示すように、アルミニウム表面を機械的あるいは化学的に研磨した後、硫酸、クロム酸あるいはシュウ酸の電解液を入れた電解槽に製品を入れ、アルミニウム製品を陽極として弱い直流、交流または直交流の電流を流すと、電気分解で生じた酸素がアルミニウムの表面に吸着して、緻密な酸化アルミニウム (アルミナ) 皮膜が生成される。この酸化皮膜の表面には直径 0.01 ~ 0.05 μm の小さな孔が μm^2 あたり 60 ~ 800 個あいている。この孔に水分が浸入すると腐食の原因となることから、圧力容器に入れて水蒸気を吹き込んで加圧するか、あるいは沸騰水中に入れて、表面に水酸化アルミニウムを生成させて、孔をふさぐ封孔処理をおこなう。陽極酸化皮膜は耐食性、耐摩耗性に優れている。

また、電解液の種類、温度、電流密度、時間、アルミニウム合金成分を調整して発色、着色させることができる。このような着色皮膜は色の劣化が少なく建築の壁 (カーテンウォール)、窓枠 (サッシ)、パネルなどに使われている。

18.5 アルミニウム合金の種類と組成

アルミニウム合金の呼称は各国の規格によって異なっており、国際的に登録された合金で約 400 種類があり、マイナーチェンジされた合金を加えると実際に製造されている種類は数 1000 種類になると考えられる。アルミニウム合金材料は展伸用合金と鋳物用合金に分類され、アルミニウム地金に種々の合金元素が添加されており、添加する元素の種類によって表 18.3 のように分類される。

これらのアルミニウム合金材料は大きく展伸用合金と鋳物用合金に分類される。



第18.5図: 陽極酸化皮膜処理 (軽金属協会:アルミニウムハンドブック第4版 (1990))

第18.3表: アルミニウム合金の種類

アルミニウム合金	展伸用合金	非熱処理合金	純アルミニウム (1000 系)
			Al-Mn 系合金 (3000 系)
			Al-Si 系合金 (4000 系)
			Al-Mg 系合金 (5000 系)
		熱処理合金	Al-Cu-Mg 系合金 (2000 系)
			Al-Mg-Si 系合金 (6000 系)
	鋳物用合金	非熱処理合金	Al-Zn-Mg,Cu 系合金 (7000 系)
			その他 (8000 系)
			Al-Si 系合金 (AC3A)
		熱処理合金	Al-Mg 系合金 (AC7A)
			Al-Si 系合金 (AC1A)
			Al-Cu-Si 系合金 (AC2A)
			Al-Si-Cu 系合金 (AC4B)
			Al-Si-Mg 系合金 (AC4A,4C,4CH)
			Al-Si-Cu-Mg 系合金 (AC4D)
Al-Cu-Ni-Mg 系合金 (AC5A)			
Al-Si-Cu-Mg-(Ni) 系合金 (AC8A,8B,8C,9A,9B)			

18.5.1 展伸用アルミニウム合金

展伸用合金は国際的な統一規格として、米国アルミニウム協会の方式に従った表記法が ISO によって標準規格とされ、8 種類の系統に分類されている。

また、固溶化処理、時効処理により所定の強度を得る熱処理型と、製造のまま、あるいは圧延、押出し、引抜きなどの冷間加工によって所定の強度を得る非熱処理型に分けられる。ただし、熱処理型合金であっても、さらに高い強度を得るためには冷間加工を施すこともあり、また、非熱処理合金であっても焼鈍し、安定化処理などの熱処理を施すこともある (図 18.6)。

JIS ではアルミニウム合金は以下のように表示する (JIS H 4000)。

1 位 2 位 3 位 4 位 5 位 形状 調質
 A 1 1 0 0 P - H14
 A 6 0 6 3 S - T5

1 位の記号 A はアルミニウムを表し、2 位は基本合金系を表す。それ以降の 3 位は制定順位で、0 が基本合金、1～9 がその改良系を表し、N は日本独自の合金を表す。4、5 位は A.A. の管理する国際登録番号で、純 Al(1000 系) の場合は純度の小数点以下 2 桁を表し、その他は旧アルコア記号に基づいている。5 位の数字の後ろには製品形状を表す 1～3 個の英字が付されるが、これは材料の形状および製造条件を示す記号あるいは寸法許容度を示す等級記号である。さらにハイフンの後ろには材料の加工硬化状態あるいは熱処理状態などの調質を示す記号が付される (表 18.4 および表 18.5 参照)。

表 18.6 は展伸用アルミニウム合金の特性と主な用途を示したものである。

18.5.2 1000 系材料 (純アルミニウム)

1000 系材料の系統は、純アルミニウムの系統に属するもので、主としてアルミニウム中に不可避免的に存在する主要不純物である Fe、Si の量によって細分化される^(注 8)。不純物が少なくするにつれて耐食性が向上し陽極酸化被膜処理後の光沢が改善される。

1100 は陽極酸化被膜処理 (アルマイト処理) 後、光沢を出すために銅が添加されている。1060、1070 は

^(注 8) 工業的には純度 99% 以上のものをアルミニウムと総称するが 4 桁数字のうち、下 2 桁の XX の数字は純度 99.XX% 以上であることを表し、2 桁目の数字はアルミニウムに他の微量添加元素が存在するか他の微量添加元素を許容するかなどを任意の数字を与えて区別している。

第18.4表: 展伸材の形状記号

記号	意味	JIS	記号	意味	JIS
P	板, 条, 円板	H4000	FD	型打鍛造品	H4140
PC	合せ板	H4000	FH	自由鍛造品	H4140
BE	押出棒	H4040	H	箔	H4180
BD	引抜棒	H4040			H4170
W	引抜線	H4040	PB	圧延板導体	H4180
TE	押出管	H4080	SB	押出板導体	H4180
TD	引抜管	H4080	TB	管導体	H4180
TW	溶接管	H4090	BY	溶接線	Z3232
TWA	アーク溶接管	H4090	BW	溶接ワイヤー	Z3232
S	押出型材	H4100			

第18.5表: 展伸用アルミニウム合金の熱処理記号

O	焼きなましによりさらに柔らかい状態にしたもの
HXY	H は加工硬化したもので, (X=1 ~ 9) Y(Y=1 ~ 9) はその細分記号を表す
H1	加工硬化だけのもの
H2	加工硬化後適度に軟化熱処理したもの
H3	加工硬化後安定化処理したもの (マグネシウムを腐食くむ合金にだけ適用する)
HX1	1/8 硬質材
HX4	1/2 硬質材
HX8	硬質材
HX9	特硬質材
T	熱処理により F-O-H 以外の安定な質別にしたもの, T1(高温加工から冷却後, 自然時効させたもの) から T10(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) まであり, それぞれ硬さで区別される

送配電用材料, 放熱板として多く用いられている

この系の材料は耐食性, 加工性, 溶接性, 熱・電気伝導率に優れているが, 強度は低いいため構造材料には適していない。したがって, 家庭日用品, 電気器具, 食品タンク, 装飾品などに使用されている。

18.5.3 2000 系材料 (Al-Cu-Mg)

2000 系材料^(注 9)にはジュラルミン (Duralumin), 超ジュラルミンの名で知られる 2017, 2024 の他, 2014 の高力合金が知られており, 強度は鋼に匹敵するものもある。しかし, 比較的多くの銅を含むために耐食性が劣り, 環境によっては注意を要する。2014 は高強度鍛造材として広い用途に用いられている。プレス成形は高強度のために困難であるので液圧などを用いる特殊成形法が用いられる。2024 は超塑性材料として

(注 9) 2000 系材料の下 2 桁の表示は 1000 系材料のような特別な意味はなく, 申請者が任意に選んだ番号を付しているもので, 成分を知るには成分表と対応させる必要がある。2 桁目数字は 1000 系材料と同様に下 2 桁の合金の変種, 派生を表すことが多い。

第18.6表: 展伸用アルミニウム合金の特性と主な用途

合金系 (JIS 合金種数)	特性の概要	用途
1000 シリーズ 純アルミニウム (9 種)	99%以上の純度のもの。成形性、表面処理性、耐食性、強度は低い。	日用品、導電材、はく地、印刷板、熱交換部品
2000 シリーズ Al-Cu 系 (11 種)	銅が多いので耐食性は悪いが、強度は高い。	軸、航空機、ピストン、耐熱用部品
3000 シリーズ Al-Mn 系 (6 種)	強度が純アルミより高く、成形性、溶接性、耐食性に優れている。	フィン、船舶用材、アルミ缶のボディ、建材
4000 シリーズ Al-Si 系 (6 種)	耐熱性、耐摩耗性、熱膨張係数が小さい。	ピストン、シリンダーヘッド、建築パネル
5000 シリーズ Al-Mg 系 (13 種)	3000 シリーズと同程度の強度。加工性溶接性、耐食性、陽極酸化後の仕上がりが良好。	建築用内装材、アルミ缶エンド材、船舶、車両、カメラ鏡胴、磁気ディスク
6000 シリーズ Al-Mg-Si 系 (6 種)	熱処理型耐食性合金。耐力が高い。押し出し加工性が良好。	建材、ガードレール、車両、家電製品
7000 シリーズ Al-Zn-Mg, Cu 系 (5 種)	アルミ合金中最高の強度。溶接構造用。	航空機、フィン、スキーストック、オートバイのリム

も用いられ、一部自動車のボディーにも使われている^(注 10)。2036, 2037-T4 は欧米では自動車のボディー材料として用いられているが、日本では 2000 系材料はあまり用いられていない。2011 は低融点合金 Sn, Pb, Bi が添加され快削合金として精密機械部品に用いられる。耐熱合金 2218, 2618, 遅効性リベット用材として 2117 がある。これらの合金は高い強度を有するが耐食性は劣るため防食処理を施したり、表面に純アルミニウムを圧延被覆したクラッド材として用いられる。この系の材料は溶融溶接性に劣り、通常リベットやボルト接合が行われるが、多量の Cu を含む 2219 は溶融溶接性が良好で、耐熱性も優れた材料である。

18.5.4 3000 系材料 (Al-Mn)

3000 系材料は Mn, さらには Mg を添加して、耐食性および加工性を低下させることなく、幾分強度を上昇させた材料で、代表的材料に 3003, 3004 があり、缶胴、器物、容器、電球口金、フィンなどに使用されている。3003 は建材、器物、容器などに用いられ、これに Mg を 1% 添 3004 はアルミ缶胴材としての需要が多く^(注 11)、フルハード (H19) を用いても極限まで薄肉化が可能であり、作業安定性からも優れた材料である。

18.5.5 4000 系材料 (Al-Si)

4000 系材料は Si を添加した材料で、Si を比較的多く添加された 4032 は耐熱・耐摩耗性に優れ、熱膨張係数が比較的小さいので、各種ピストン材、しゅう動部品として使用されている。プレス成形性は劣っているために板材成型用としては用いられない。また、Si 量によって融点が低下することを利用してブレージングろう材、ブレージングシート、溶接ワイヤとして熱交換機などの組立に使用される。さらに、Si 添

(注 10) 英国の Super Form 社では種々の超塑性アルミニウム合金を「SUPRAL」の名で売り出している。

(注 11) DI 缶用材料としての生産量は年 20 万トンを超えている。

加量によって陽極酸化処理後の色調が白灰から黒灰色に変化するので自然発色合金としてビルの外装壁としても用いられている。

18.5.6 5000 系材料 (Al-Mg)

5000 系材料は Mg の固溶強化型材料で、1000 系材料に次いで生産量が多い。Mg 量の増加に伴って強度が増加するが、さらに強度、加工性を改善するために Cr, Mn が添加される。Mg 添加量が多いほど成形性は改善されるが、セレーションと呼ばれるひずみ模様が発生しやすい。また、Mg 添加量が増えると圧延性が劣りパス回数も増えてコストも増加する。5005 あは加工性、耐食性に優れ建築、車両、船舶の内外装材に、5N01 は陽極酸化被膜処理後も優れた光沢を維持するので光輝合金として化粧板、カメラ部品、銘板に、中強度の 5052 は汎用性の高い材料で板金加工材、缶エンド材、車両、船舶に用いられる。不純物を制御した 5652 は過酸化水素に対して耐食性が優れ過酸化水素用タンク材に用いられる。5083 は非熱処理合金の中で最も高い強度を持ち、耐食性、溶接性、低温特性、耐海水性に優れ、構造部材として多く使用されているが、冷間加工のままでは応力腐食割れを起こすことがあるので、通常焼鈍材で使用される。強度は 1100 の 2 倍以上あり、引張強さ 300MPa、伸び 30%を保証するという意味で 30-30 材と呼ばれる。最近では 35-35 材が普通になってきた。外板としてフード、フェンダー、ルーフなどに使用されている。また、磁気ディスク基板に 5086 の不純物を制御した改良合金、飲料缶エンド材の 5182 などがある。この系の合金は冷間加工のままでは経時変化によりわずかながら強度が低下し、伸びが増加する変化を示すので、120℃程度の温度で加熱する安定化処理 (H3Y) が施される。最近では、成形性を改良した自動車ボディ用 Al-Mg 系合金が新たに開発されている。

18.5.7 6000 系材料 (Al-Mg-Si)

この系の合金は押出用合金として用いられ、 Mg_2Si の析出により硬化させる熱処理型合金である。強度、耐食性ともに良好で、代表的構造用材料として利用されている。ただし、溶接のままでは継手効率が低く、ビス、リベット、ボルト接合による構造組立が行われることが多い。6061-T6 は耐力が 245MPa 以上で、SS400 鋼に相当し、バランスの取れたアルミニウム構造用合金であり、多くの自動車構造材料に使われている。6063 は押出し性が良好で押出しつつ空冷で焼きが入る特徴があり、住宅用サッシ、鉄道車両、オートバイ、ガードレール、高欄、コンテナなどに使われている。^(注 12) 6N01 は強度の低下を抑えながら、プレス成形性を改善したもので大型車両用でに使用されている。6262 は低融点金属を添加したもので切削性に優れ、カメラ、ガス機器、ブレーキ部品などに使用されている。6101 は 55%以上の導電率を有し、ブスバー、電線などに使用されている。

18.5.8 7000 系材料 (Al-Zn-Mg, Cu)

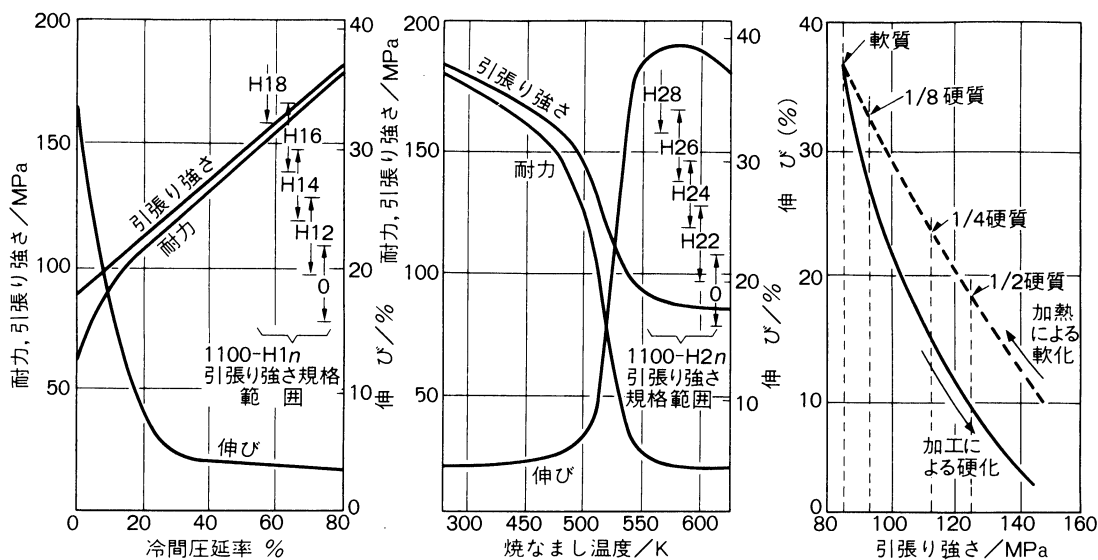
アルミニウム合金の中で最も強度が高い Al-Zn-Mg-Cu 合金があり、超々ジュラルミンと言われる 7075 は航空機材料として使われている。この合金は耐食性、耐応力腐食割れ性に劣る欠点があるが、強度を多少犠牲にしてこれらの欠点を改善する熱処理も開発されている。7075 の不純物量を規制して靱性を改善した 7175、7475、焼入れ性を改善した鍛造用合金 7050、7079 などがこの系に属する。Cu を含まない Al-Zn-Mg 合金は焼入れ性が良好で常温時効で硬化する特徴があり、その代表が 7N01 で車両や陸上構造物に使用されている。溶接も可能で、溶接後の熱影響部も自然時効によって母材の強度に回復するので、優れた溶接

^(注 12) 建材としての展伸材の利用は年間 100 万トンに達しているが、そのほとんどが 6063 である。

効率が得られる。ただし、熱処理が適切でないと応力腐食割れを生ずることがある。7003 は 7N01 より強度が低いが、押し出し加工性がよく、大型薄肉形状の製造が容易で、車両やオートバイリムなどに用いられている。

18.5.9 8000 系材料その他

箔圧延性の良好な 8079, 高剛性, 高力合金として航空機材の一部に使われている。また, Li を添加すると密度が低下し, ヤング率が大きくなるため航空機材として開発が進められている Al-Li 合金 8090, 8091 などがある。さらに, 急冷凝固粉末合金が開発され, 国際登録されている。



第18.6図: アルミニウムの冷間加工による加工硬化と焼なましによる軟化挙動

18.5.10 鋳造用アルミニウム合金

表 18.7 および表 18.8 にアルミニウム合金鋳物の種類, 特徴および主な用途を示す。

Al-Cu 系材料 (AC-1, AC-2, AC-5)

Al-Cu 合金は時効処理により機械的性質を向上させることができる。この系の材料は鋳造性, 機械的性質, 切削性などが良いが, 熱間加工性は悪い。AC-1 A は 4 ~ 5%Cu で約 1%の Si, Fe および 0.2%以下の Ti などを含む。鋳造のままで引張強さが 157MPa(16kgf/mm²) 以上, 伸び 5%以上で時効処理を施すと 274MPa(28kgf/mm²) 以上, 伸び 3%以上で砂型, 金型用として架線用部品などに用いられる。Al-Cu の Cu の一部を Zn で置き換えて, 耐力を増大させたものをドイツ合金という。Al-Cu 合金の鋳造性を Si で, Al-Si 合金の切削性を Cu によって向上させた Al-Cu-Si 系材料にラウタル(lautal)がある。AC-2 A がこの合金にあたり, 鋳造性, 気密性, 溶接性が良くダイカスト用にも用いられる。Al-Cu-Ni-Mg 系の材料に Y 合金(JIS では AC-5A に相当)があり, 高温強度, 伝熱性がよく熱膨張係数が小さいことから内燃機関のピストン, ピストンヘッドなどに用いられる。

第18.7表: アルミニウム合金鋳物の種類, 特徴および主な用途(その1)(田中良平編: 材料選択ハンドブック)

種類	記号	合金系 (相当合金名)	鋳物の種類	参考	
				合金の特徴	用途例
アルミニウム合金鋳物 鋳物 1 種 A	AC 1 A	Al-Cu 系	金型, 砂型, シュル型	機械的性質が優れ, 被削性も良いが, 鋳 造性が良い	架線用部品, 自動車 自動車部品, 航空機 用油圧部品, 電装品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 2 種 A	AC2A	Al-Cu-Si 系 (ラウタル)	金型, 砂型, シュル型	鋳造性が良く, 引張 強さは良いが, 伸び が少ない。一般用 として優れている。	マニホールド, デフ ポンプボディ, シリ ンダヘッド, 自動車 用足回り部品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 2 種 B	AC2B	Al-Cu-Si 系	金型, 砂型, シュル型	鋳造性が良く, 一般 用として広く使わ れている	バルブボディ, クラン クケース, クラッチ ハウジング
アルミニウム合金鋳物 鋳物 3 種 A	AC3A	Al-Si 系 (シルミン)	金型, 砂型, シュル型	流動性が優れ, 耐食 性も良いが, 耐力が 低い	ケース類, カバー類, ハ ウジング類の薄肉, 複 雑な形状のもの, カー テンウォール
アルミニウム合金鋳物 鋳物 4 種 A	AC4A	Al-Si-Mg 系 (シルミン γ)	金型, 砂型, シュル型	鋳造性が良く, 靱性 が優れ, 強度を要す る大型鋳物に用いら れる	ブレーキドラム, ミッ ションケース, クラン クケース, ギアボック ス, 船用車両用エン ジン部品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 4 種 B	AC4B	Al-Si-Cu 系 (含銅シルミン)	金型, 砂型, シュル型	鋳造性が良く, 引張 強さは良いが, 伸び が少ない。一般用 として優れている。	クランクケース, シリ ンダヘッド, マニホー ルド, 航空機用電装品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 4 種 C	AC4C	Al-Si-Mg 系	金型, 砂型, シュル型	鋳造性に優れ, 耐圧 性, 耐食性も良い	油圧部品, ミッション ケース, フライホイ ルハイジング, 航空機 ファイティング類, カー テンウォール, 小型船用 エンジン, 航空機部品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 4 種 CH	AC4CH	Al-Si-Mg 系	金型, 砂型, シュル型	鋳造性が良く, 機械 的性質も良く, 高級 鋳物に用いられる	自動車用車輪, 架線金 具, 航空機用エンジン 部品と油圧部品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 4 種 D	AC4D	Al-Si-Cu -Mg 系	金型, 砂型, シュル型	鋳造性が良く, 機械 的性質も良い。耐圧 性を要するものに用 いられる	水冷シリンダヘッド, クランクケース, シリ ンダクロック, シリン ダブロック, 燃料ポン プ, 航空機用油圧部品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 5 種 A	AC5A	Al-Cu-Ni -Mg 系 (Y 合金)	金型, 砂型, シュル型	高温で引張強さが良 い。鋳造性は良く ない。	空冷シリンダヘッド, ディーゼル機関用ピスト ン, 航空機用エンジン用 部品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 7 種 A	AC7A	Al-Mg 系	金型, 砂型, シュル型	耐食性が優れ, 機械 的性質がよく, 陽極 酸化性が良い, 鋳造 性が良くない	架線金具, 舶用部品, と って, 彫刻素材, 事務 機器, いす, 航空機用電 装品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 7 種 B	AC7B	Al-Mg 系 (ヒドロナリ ウム)	金型, 砂型, シュル型	耐食性が優れ, 機械 的性質がよく, 鋳造 性が良くない, 経年 変化により伸びがと くに減少する	光学機器フレーム, ケー ス, 航空機部品, 航空機 用機体部品
アルミニウム合金鋳物 鋳物 8 種 A	AC8A	Al-Si-Cu -Ni-Mg 系 (ローエック ス)	金型	耐熱性に優れ, 耐摩 耗性がよく, 熱膨張 係数が小さい, 引張 強さも高い	自動車, ディーゼル機関 用ピストン, 舶用ピスト ン, プーリー, 軸受

第18.8表: アルミニウム合金鋳物の種類, 特徴および主な用途 (その2)(田中良平編: 材料選択ハンドブック)

種類	記号	合金系 (相当合金名)	鋳物の種類	参考	
				合金の特徴	用途例
アルミニウム合金鋳物 鋳物 8 種 B	AC8B	Al-Si-Cu -Mg 系	金型	同上	自動車ピストン, プーリー, 軸受
アルミニウム合金鋳物 鋳物 8 種 C	AC8C	Al-Si-Cu -Mg 系	金型	同上	自動車ピストン, プーリー, 軸受
アルミニウム合金鋳物 鋳物 9 種 A	AC9A	Al-Si-Cu -Ni-Mg 系	金型	耐熱性が優れ, 熱膨張係数が小さい, 耐摩耗性は良いが, 鋳造性や被削性は良くない	ピストン (空冷 2 サイクル用)
アルミニウム合金鋳物 鋳物 9 種 B	AC9B	Al-Si-Cu -Ni-Mg 系	金型	耐熱性が優れ, 熱膨張係数が小さい, 耐摩耗性は良いが, 鋳造性や被削性は良くない	ピストン (ディーゼル機関用), 空冷シリンダ

Al-Si 系材料 (AC-3, AC-4, AC-8)

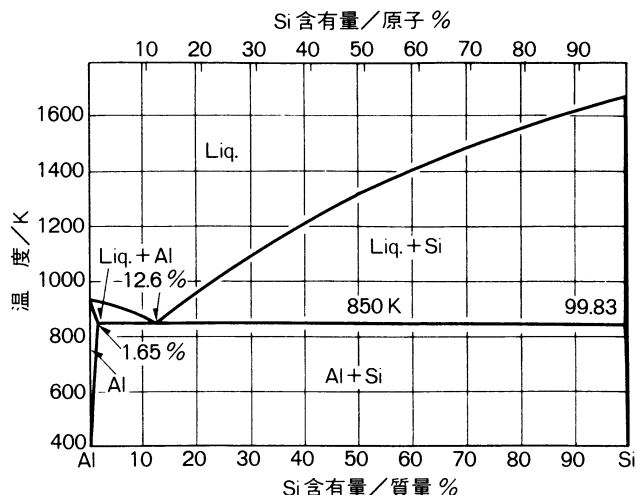
Al と Si は共晶系の状態図を形成し, α 相中への Si の溶解度は小さいので熱処理効果はない。共晶付近 (10 ~ 13%) の合金をシルミン(silumin)(AC-3C) という。Al-Si の共晶点は 11.7% であるが, 一般的には少量の Na や NaF を加えて冷却した場合, 共晶温度が低下し, 共晶組成は 13.5% 付近まで変化し, 共晶組織は微細化して機械的性質は改善される (改良処理(modification))。シルミンは湯流れが良く, 縮み代も小さく, 鋳肌もきれいであることから, ケースやカバー類などの薄肉鋳物や複雑な形状の鋳物に用いられている。しかし, 耐力, 高温強度, 疲れ強さ, 加工性が他のアルミニウム合金に劣るためにこれらの性質を改善したシルミンが開発されている。Si の一部を Mg に置き換えて時効硬化性 (析出強化) を持たせた γ シルミン AC-4A (8 ~ 10%-0.3 ~ 0.6%Mg), AC-4C (6.5 ~ 7.5%-0.25 ~ 0.45%Mg), Cu 添加により固溶強化と時効硬化性を持たせた含銅シルミン AC-4B (7 ~ 10%Si-2 ~ 4%Cu) などが開発されている。これらの合金は固溶化 (500 °C)-時効処理 (160 °C) で約 245MPa の強度が得られ, 鋳造性, 溶接性, 耐振性などが良好なことから内燃機関の部品に使われている。また, ローエックス(low-ex)(Al-Si-Ni-Mg-Cu) は, 熱膨張係数が小さく, 時効硬化性, 耐摩耗性が良いために自動車用および船舶用ピストン, 滑車などの金型鋳物に用いられている。

Al-Mg 系材料 (AC-7)

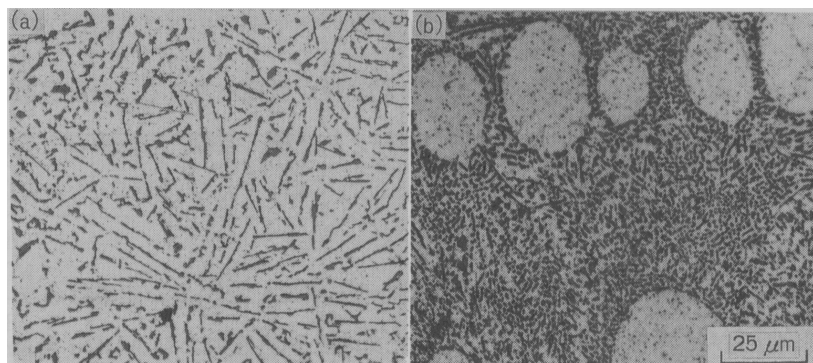
耐食性が良好で, 切削性に優れているが, 溶解時に表面に酸化皮膜が生成するために鋳造性が悪く, 耐圧鋳物としては不適當である。非熱処理型の AC-7A (3.5 ~ 5.5%Mg-0.2%Si-0.3%Fe-0.6%Mn-0.2%Ti) と熱処理型の AC-7B (9.5 ~ 11.0%Mg-0.2%Si-0.3%Fe-0.10%Mn-0.2%Ti) があり, ヒドロナリウム (Hydranalium) と呼ばれ, 耐海水性がアルミニウム合金の中で最大で, 船舶用あるいは科学工業用部品などに用いられている。

ダイカスト用材料 (ACD1, 3, 5, 6, 10, 12)

ダイカスト用合金としては湯流れ性, 融点, 強度などが重要な因子である。合金元素として, Si は湯流れの改善, 熱間割れの防止, Fe, Cu はダイスとの粘着と題すの腐食の防止, Cu は基質の強化に寄与する。一般的にはシルミン, ヒドロナリウム, ラウタルなどが多く用いられる。



第18.7図: Al-Si 系平衡状態図



第18.8図: Al-12.5%Si 合金の改良処理。a:改良前, b:Na による改良処理。

18.6 アルミニウム合金の加工性

18.6.1 アルミニウム合金の塑性加工性

一般にアルミニウム合金の成形性は鋼に比べて劣る。これは強度を向上させるために延性を犠牲にしている点が多い。ヤング率が鋼の約 $1/3$ 、 r 値が 1 以下であるために、深絞り性、曲げ性、伸びフランジ性に問題がある。 n 値は鋼板より大きいため、張出し性は大きくは劣っていない。したがって、成形性が劣っている分は成形技術で補う必要がある。強度と延性のバランスが取れているのは 5000 系合金で、幅広い用途に使用されている。

18.6.2 アルミニウム合金の溶接性

アルミニウム合金はほとんどの溶接方法で溶接可能であるが、一般には TIG 溶接または MIG 溶接が用いられる。

鋼に比べると以下の理由により溶接性は劣る。

- (1) 表面に高融点の酸化皮膜が生成しやすい。
- (2) 熱伝導率が大きいため局所的加熱が難しい。

(3) 熱膨張係数が大きいので溶接変形，溶接割れを生じやすい。

(4) 水素を吸収して気泡を生じやすい。

(1) を改善するために，溶接前には酸化皮膜の除去^(注 13)を行って溶接を行う。(2) は一般に熱影響部が大きくなり，非熱処理合金ではボンド部とその近傍に，熱処理合金では熱影響を受けない母材に隣接した部分に軟化領域が生じ，強度が低下する。(3) の溶接割れの防止には母材や溶接金属の化学組成の調整や **Ti**, **Zr**, **B** などの微量添加が有効である。(4) の水素源を遮断するために空気の巻込みの防止，溶接材料の汚れ，水分などの除去，予熱の利用，高湿度雰囲気での溶接を避けるなどの対策が有効である。

18.6.3 アルミニウム合金の被削性

純アルミニウムの焼なまし材は軟らく粘いために，チップが長く連なり構成刃先を生成しやすい^(注 14)ので，良好な仕上面が得られにくいので，適切な工具形状と加工条件を選定する必要がある。

冷間加工した材料は被削性が向上し，高力アルミニウム合金の熱処理材では被削性がさらに向上する^(注 15)。アルミニウム合金を切削するには高速度鋼が最も適している。切削油は油-水エマルジョン，水溶性ワックスが一般的である。

18.7 アルミニウム合金のリサイクル

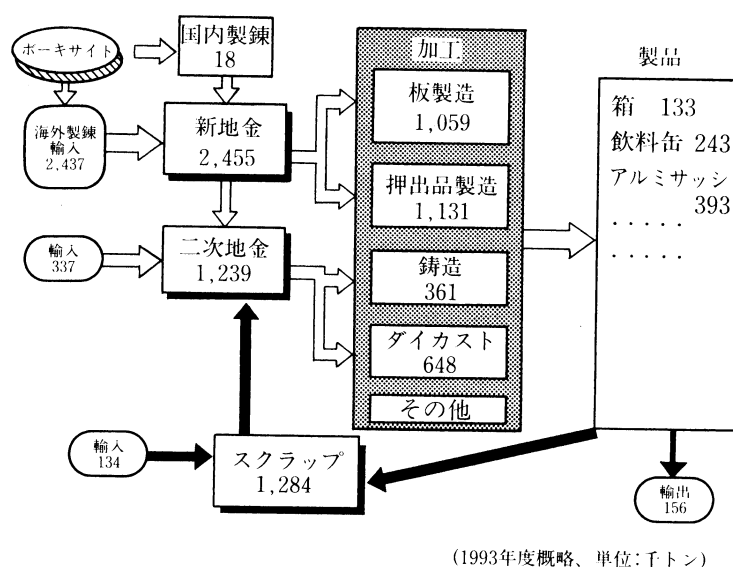
アルミニウムは資源的には恵まれており、持続採掘年数が銅が 20～30 年に比べて約 200 年と見積もられており資源的には枯渇する心配はない。しかし、アルミニウムは「電気の缶詰」とも言われているようにエネルギー的には問題がある。鉍石のボーキサイトからアルミナを抽出して電解精錬によって金属アルミニウムを得るには **50.9kcal/g** の多量のエネルギーを必要とする。それに対して、リサイクルによって再資源化すれば、鉍石から新地金を得るときのエネルギーに比べて約 **3%** 以下ですみ、かつ精錬時の **CO₂** ガスの排出も低減できることからエネルギー問題、環境問題からもリサイクルが望まれている。

(参照鉄鋼材料のリサイクル p.227, 銅合金のリサイクル p.363, プラスチックのリサイクル p.430)

(注 13) **Ar** ガスを用いる **TIG** 溶接や **MIG** 溶接ではクリーニング作用 (**W** 電極を正極，母材を負極にして溶接すると酸化皮膜が除去される作用)

(注 14) アルミニウム合金の構成刃先は **mm** 単位になることもあり仕上面への影響が大きい。構成刃先を生成させないためには，工具のすくい角を大きくする，切削速度と送りを大きくするなどの対策が良い。

(注 15) 同じ強度の軟鋼に比べると切削抵抗は約 **1/3** と小さく，またチップは細かく切れ，仕上げ面も良好である。



第18.9図: アルミニウムのマテリアルフロー (エコマテリアル研究会編「エコマテリアル事典, サイエンスフォーラム (1996)

ジュラルミンの名前

“ジュラルミン”の名称は学術用語ではなく、商品名である。従って、名前の由来ははっきりしていないが、2つの説がある。第1の説は、ラテン語で「硬い」を意味する **Duras** と英語のアルミニウム (**Aluminum**) を合成した造語である。第2の説は発明者アルフレッド・ヴィルムがジューレンという町に工場を開設したことからジューレンで作られたアルミニウムの意味でジュラルミンという言葉ができたという説である。

1906年、ドイツの技術者アルフレッド・ヴィルムは軟かいアルミニウムを、鋼の焼入れと同じように、焼入れして硬くする方法を見出すために、いろいろな合金を作っては焼入れを繰り返していた。しかし、いくら焼入れしても硬くなるものは見出せず、かえって軟らかくなるものもあった。いろいろな失敗をし、ふと三日前に焼入れした合金の硬さを測定したところ、みごとに硬くなっているのを発見した（この現象を「時効硬化」と呼ぶ）。ジュラルミンが1909年特許申請、1912年にドイツ特許が認められた。

1903年、ライト兄弟が飛行機の飛行に成功したが、当時の飛行機の馬力は小さく、機体材料には木製、布張りが常識とされ、金属で機体を作るなど考えられなかった。1910年になって、英国の **Vickers Sons and Maxim, Inc** 製の飛行船“**Mayfly**”に初めてジュラルミンが用いられたが、格納庫から引き出す時に真っ二つに折れ、信頼性に疑問がもたれる結果となった。しかし、当時のドイツ軍は、1852年に発明され実用段階にあった飛行船の機体へのジュラルミンの使用を考えた。ジュラルミンの使用によって、飛行船の機体は大型化し、全長が100メートルを超えるものも現れた。1929年、世界一周の途中で日本に立ち寄った「ツェペリン伯号」は全長235.5メートル、旅客25名であった。第1次世界大戦では飛行船は大いに活躍したが、1916年に初めて撃墜された。当時、機体の中のガスには水素が利用されていたために、金属に小さな弾丸が当たっても火花が発生するので、多くの飛行船が撃墜された。1917年、航空機メーカーあるユンカーズ社は戦闘攻撃機 J-1 の外板に採用され、航空機はジュラルミンの時代となった。これをきっかけにジュラルミンは日本でも研究されるようになった。研究のきっかけは1916年、最初の撃墜の際、英国の日本大使館に駐在していた海軍武官が大破したツェペリン飛行船の構造材の一部を入手し、これが住友伸銅所（後の住友軽金属）に送られ、成分分析された。1935年従来のジュラルミンよりも強度の高い超ジュラルミンが完成した。さらに、翌1936年、さらに強度を高めた超々ジュラルミンが住友伸銅所で開発された。翌1937年、海軍の試作機「12試艦戦」の構造材に採用され、「零式戦闘機」として量産に移された。

— アルマイトは何語? —

アルミニウムは錆びない、と言われますが、金以外の金属は大気中で酸素と結びついて酸化物を形成する。これが「さび」であるので、たいていの金属は錆びることになる。アルミニウムの場合にはこの酸化物は非常に硬く、また緻密で安定であるために腐食の進行を妨げる。そこで、この酸化物皮膜を厚くすることにより、さらに機能を向上させることができる、と考え、日本で早くから研究が行われている。

1923年(大正12年)、理化学研究所の鯨井恒太郎、植木栄らを中心とする研究グループは酸や塩基塩を電解液として電気分解するとアルミニウムの表面に酸化皮膜が生成され、電解条件を変えることにより皮膜厚さを変えることができる方法を発明し、日本特許として公開した。すなわち、瀬藤象二がシュウ酸を電解液として皮膜を生成する方法を発明、続いて、宮田聡が加圧水蒸気中で封孔処理を行う方法を発明した。海外では同じ1923年に英国のベンゲーフ(Bengough)とスチュアート(Stuart)がクロム酸を電解液として乳白色の酸化皮膜を発明した。このようにアルミニウムに陽極酸化処理によって酸化皮膜を生成させる方法は日本と英国から始まった。

1931年(昭和6年)、理化学研究所は発明したシュウ酸浴による陽極酸化処理をアルマイト(Almite)と名付けて商標登録を行った。現在、陽極酸化処理は硫酸浴による方法が主流になっているが、アルマイトと言う名が広く使われ、一般的な言葉となってしまったため、この方法に対してもアルマイトと言う呼び名が一般に使われている。

アルマイトは日本での名称であって、1927年米国では硫酸浴による電解法を発明してアルミライト(Alumilite)と名付け、ドイツではエロキザール(Eloxal)と名付けている。国際的な用語としてはアノダイジング(AnodizingまたはAnodising)が用いられている。

第19章 銅合金

19.1 銅合金の歴史

銅 (copper) および銅合金は金属材料としては古くから利用されてきた。これは鑄造しやすいことによるが、近年では電気、電子工業の発達に伴い、さらに重要な材料となっている。青銅は紀元前 5000 年頃から、祭器、剣、像、鐘などに用いられ、12 世紀頃からは大砲の鑄造に利用された。黄銅は青銅に次いで利用され、古代ローマ人は貨幣に使用したとされている。人工的な黄銅の製造は金属亜鉛の製造が可能となったからのことで、1520 年以降とされる。

19.2 銅合金の製造法

銅の一般的な鉱石は硫化物の黄銅鉱であるが、日本では黄銅鉱と共存した含銅硫化鉄鉱 ($\text{Cu}_2\text{SFe}_2\text{S}_3$) の形で産出する。鉱石は以下のプロセスで電気銅となる。

鉱石 → 粉砕 → 選鉱 → 焙焼 → 製錬 → 精錬 → 粗銅 → 電解 → 電気銅

粉砕、選鉱は低品位の鉱石から富銅化するために浮遊選鉱法により行う。焙焼は選鉱粉を融点以下に加熱して、As, Sb などの蒸発しやすい不純物を除去し、含有 S 量の 1/4 以下にする。製錬は高炉法と反射炉法があるが、日本では高炉法が多い。精錬に造滓剤を加えて還元して、かわ (matte) とからみ (slag) に分ける。 Fe_2O_3 は FeO となってからみとなって分離除去される。製錬はかわを酸化する形で行う。炉は転炉を用い、空気を炉に吹き込むんで、粗銅 (blister copper) が生成される。これを電解製錬で高純度化して 99.99% 純度以上の電気銅 (electrolytic copper) ができる。

19.3 銅合金の特性

19.3.1 物理的性質

銅の主な物理的性質を表 19.1 に示す。これらの性質は銅の純度に依存する。Cu の結晶構造は面心立方格子、格子定数 3.6080\AA で、金属組織は典型的多角形組織 (双晶を含むことが多い) となる。

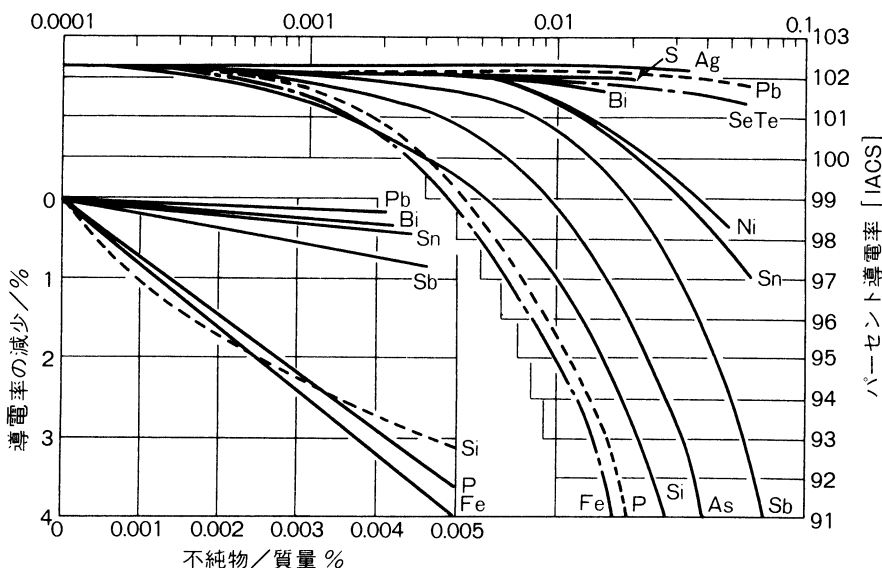
Cu は Ag について電気伝導率^(注 1)が高く、電気材料として重要な性質である。電気伝導率は銅の品位、温度、加工度に大きく影響される。図 24.5 は導電率および不純物の影響を示したもので、純銅に微量の不純物元素が混入することにより導電率は影響されることが分かる。Te, Ag, Cd などはあまり導電率を下げない。Ag は少量でも再結晶温度を上昇させ、また Cd は強さを高めるので、電線などに添加される。

図 19.2 に導電性と引張強さの関係を示す。

(注 1) 電気抵抗率 ($\Omega \text{ cm}$, 体積抵抗率) の逆数を電気伝導率というが、一般には導電率として、国際標準軟銅の電気伝導率を 100% として計算したものをを用いる。国際標準軟銅の電気抵抗率は $1.7241 \mu \Omega \text{ cm}$ と決められている。IACS (国際軟銅標準):1913 年当時の良質市販銅の平均値をとり、これを 100% として、これと比較して百分率で表したものである。

第19.1表: 銅の物理的性質 (日本金属学会編: 非鉄材料, 日本金属学会より)

性質		数値	性質		数値
原子量		63.546	蒸気圧 (Pa)T(K)		$\log P = -17.650/T + 15.51 - 1.273 \log T$
モル原子量 ($10^{-6} \text{m}^3/\text{mol}$)		7.07	熱膨張係数 10^6K^{-1}		線 293K 体 1356 ~ 1478K
モル容 (10^{-30}m^3)		11.74			
結晶構造		面心立方格子	比熱 ($\text{k J/kg} \cdot \text{K}$)		293K T(K)
格子定数 (10^{-1}nm)					
密度 (10^6g/m^3)	計算値	8.990	固体		$0.0990 + 0.0236 \times 10^{-3} T$
	実測値	293K	液体 mp ~ 1600K		
		mp 固体	8.32	0.118	
	mp 液体	7.93	電気抵抗係数 ($10^{-8} \Omega \cdot \text{m/K}$) 293K		0.0068
融点 (K)		1356	縦弾性係数 (GPa)		110.24
沸点 (K)		2861	横弾性係数 (GPa)		44.82
融点潜熱 (J/g)		204.2	ポアソン比		0.348
蒸発潜熱 (J/g)		4832.5	導電率 (99.95%)		101%IACS
熱伝導率 (W/mK) 0°C		403			



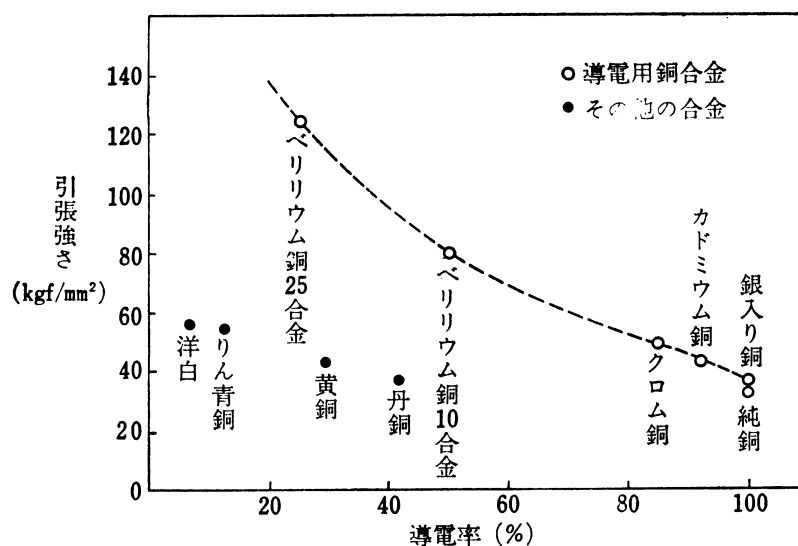
第19.1図: 不純物の導電性に及ぼす影響

19.3.2 化学的性質

耐食性

銅は鉄鋼に比べて耐食性が良く、乾燥した大気中ではほとんど変化がない。湿った空気中でもほとんど変化しないが、二酸化炭素が存在すると緑色の緑青(ろくしょう) $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ が生ずる(注²⁾)。一般に水には二酸化炭素が含まれるので銅を水に浸せば酸化や緑青に変色する。加熱されると 130°C 程度で表面酸化する。

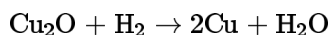
(注²⁾ 20 ~ 30年前まで緑青は毒であると考えられていた。これは明治時代花見団子で食中毒が起き、それを煮た銅鍋に疑いがかけられたため、実際は銅中に含まれていた砒素が原因だった。ただし、現在の銅には砒素は含まれていない。



第19.2図: 導電性と引張強さの関係

水素脆性 (hydrogen embrittlement)

酸素を含む銅は石炭ガスや水性ガスのような水素を含む還元性ガスの中で加熱すると、水素は銅中に拡散して、次のような反応を起こす。



ここで発生した H_2O は固体表面まで拡散できず、細かい気泡となり、脆くなる。この現象を水素脆性という。還元性ガス中で加熱するような用途で使われる脱酸素銅や無酸素銅については JIS で水素脆性試験が規定されている。

19.3.3 機械的性質

高純度の銅は極めて軟らかく、焼なまし材では HV40、引張強さは 210MPa、耐力 45MPa 程度である。純銅を用いて構造物をつくるには塑性加工は容易であるが、剛性、硬さ、強度などの点で問題がある。

銅は面心立方格子であることから、冷間加工による加工物は焼なまし材の 2 倍にもなる。

また、Cu 合金の疲れ強さは引張強さが 400MPa までの範囲では引張強さの 0.3 ~ 0.5 の間の範囲にあるが、それ以上では 200MPa で飽和値を示す。

19.4 銅合金の種類と組成

19.4.1 純銅 (pure copper)

銅地金は JIS では 4 種類の純度に分類されている。主な不純物としては As, Sb, Bi, Pb, S, Fe など指定されているが、その他に H や O も不純物として注意する必要がある。電解製錬で得られた電気銅はそのままでは使用できず、再溶解して使用する。再溶解の方法によって含有する酸素量は異なり、その酸素量によって、タフピッチ銅 (tough pitch copper)、脱酸素銅 (deoxidized copper)、無酸素銅 (oxygen free high conductivity copper) に大別される。

タフピッチ銅

電気銅を反射炉で溶解し、鑄造直前に生木でポーリング (poling)^(注3)を行い、生木中の有機物で還元して酸素量を調整する。これをタフピッチ銅という。酸素が0.02～0.04%になるまで還元し鑄造する。酸素を低減することにより不純物の害を減らし、水素の吸収を防ぐことによって健全な鑄塊を作ることができる。電線用としては連続鑄造法がとられるようになった。

銅中へのOの溶解度は極めて小さく、1273Kで0.008%以下とされており、タフピッチ銅中に含まれるOはCu₂Oの形で存在する。鑄造組織ではCu₂Oが基地の粒界に細かく点在したものとなる。このようにタフピッチ銅は少量のCu₂Oを含んでいるが、他の不純物元素は固溶量が減って導電率は高い。しかし、高温で水素が銅中に含まれるとCu₂Oが還元されてH₂Oを生じて、いわゆる水素脆化を生ずる。

脱酸銅

還元性ガスの中で加熱されるような場所には脱酸銅が用いられる。Cuを溶解した後にPやSiのような酸素との親和力の大きな元素を添加して酸素を除去する。Pで脱酸した場合には、材料中にPが残留するので、タフピッチ銅に比べて導電性が低い。Pで脱酸したリン脱酸銅は、主に給水管など、還元性ガスを使つてろう接や溶接をするような用途に用いられる。また、銅溶接の溶接棒にも使われる。

無酸素銅

無酸素銅は高純度の電気銅を使用して1.33～0.133Paの真空中かCOなどの還元性雰囲気中で溶解鑄造する。これを無酸素銅と呼ばれ、残留O量は0.001%以下で水素脆性は見られない。タフピッチ銅よりも展延性、耐疲れ性にも優れ、可とう性を要求される電線の導体やヘッダー加工に適している。

最近、電子材料として高純度銅が注目され、最電解銅およびさらに精錬した高純度銅も製造されるようになった。

19.4.2 黄銅 (brass)

黄銅は銅Cuと亜鉛Znを主成分とした合金で、真鍮とも呼ばれる。Cu-Zn系平衡状態図を図24.5に示す。Zn38%まではα固溶体を形成している。α相は面心立方格子で軟らかく、加工性が良好な相である。

Zn38%を超えるとβ相が現れる^(注4)。β相は体心立方格子で、高温ではCuとZnの不規則格子をなし、低温では規則格子のβ'相になる。引張強さはα相より大きい、硬くて脆い。室温では加工しにくい、高温では軟らかくなり、加工しやすくなる。

物理的性質

CuにZnが添加されると比重は徐々に小さくなる。導電率はZn39%までは低くなり、それ以上ではわずかに上昇し、Zn50%で最大となる。

(注3) Cuの溶湯に生木を突っ込み、溶湯を脱酸すること。わが国では生木として松丸太を用いる。

(注4) 実際には平衡状態にはならず、35%Znでも鑄造状態ではα相中にβ相が混在することがある。

機械的性質

CuにZnが添加されると引張強さは上昇し、 β 相が現れると急激に上昇しZn45%で最大となる。それ以上になると γ 相が現れて脆くなって引張強さは低下する。それに対して、伸びはZn量とともに上昇するが、Zn30%で最大となり、 γ 相が現れると極めて小さくなる。このように、Zn45%以上になり γ 相が現れると機械的性質は劣化して実用的には使用できない。

化学的性質

CuにZnが添加されると、Zn15%までは純銅とほとんど変わらないが、それ以上になるとZn量とともに耐食性は劣化する。とくに比較的高い温度で海水に接触すると脱亜鉛腐食 (dezincification) を生ずる。これは、黄銅中のZnが優先的に海水中に溶け出し、後に酸化物に富んだ海綿状のCuが残る現象である。また、黄銅には赤錆 (red stain) が表面にできることがある。

冷間加工した黄銅の管や棒は使用中または貯蔵中に突然割れることがある。これを黄銅の時期割れ (season cracking) (注5) または置割れという。これは1方向に偏した加工を行ったり、使用中に応力がかかっていたりして、その部分がアンモニアやアンモニウム塩に触れると結晶粒間が局部腐食を受けて割れを生ずるのである。時期割れを防ぐには内部応力を取り除くため、7:3黄銅で200～230℃、6:4黄銅で180～220℃で20～30min焼なましを行う。

黄銅の種類

(1) 丹銅 (red brass)

Znを10～20%含む合金でC2100、C2200、C2300、C2400の4種類がある。色が黄銅よりも赤みを帯びているので、建築用や装飾用に用いられる。深絞りも優れている。

(2) 黄銅 (brass)

表19.2に示すように、Zn30%の7:3黄銅とZn40%の6:4黄銅、その中間のZn35%とZn37%の合金が実用化されている。図19.3に状態図を示すように、7:3黄銅は α 相(面心立方格子)、6:4黄銅は($\alpha + \beta$ (体心立方格子))相となっている。この金属組織の違いによって、図19.4に示すように、機械的性質が大きく変化する。

α 相は延性があり、Zn30%で伸びは最大となる。また、引張強さは β 相を含むZn42%で最大となる。また、図19.5に加工した7:3黄銅の焼なましに伴う機械的性質の変化を示す。低温焼なまし硬化を示し、523～623Kで再結晶して軟化する。

6:4黄銅は($\alpha + \beta$)組織で、 β 相は727～741Kで $\beta \rightleftharpoons \beta'$ の規則-不規則変態を生じ、 β' 相は常温で硬いので、加工は高温で行われる。

機械的性質が良く安価であるのでCu合金の中では使用量が多い。用途として、建築、日用品、機械部品、自動車のラジエータ、電気器具など広範囲にわたる。

(3) 特殊黄銅

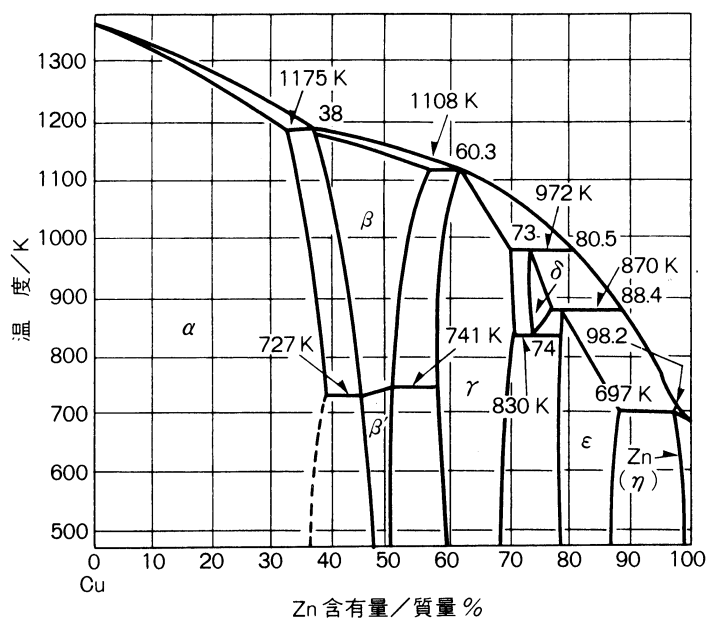
黄銅にPb、Mn、Al、Fe、Sn、Ni、Siなどを添加して機械的性質や耐食性を改善したものが特殊黄銅である。

快削黄銅 (free cutting brass) : 黄銅にPbを添加すると切削性が改善される。これを快削黄銅という。表19.3にその化学成分を示す。Pbは黄銅中にはほとんど固溶せずに結晶粒界に析出するので脆くなるので、切削性が向上する。7:3黄銅では熱間加工のときに割れを生じて加工できないが、6:4黄銅では5%ぐ

(注5) 19世紀末、英国軍がインドにおいて黄銅製薬きょうがモンスーンの時に割れるので、時期割れと名づけたと言われている。(材料と環境 48,[2],67(1999))

第19.2表: 黄銅板の種類と化学成分 (JIS H 3100)

種類	化学成分 (%)				用途例
	Cu	不純物		Zn	
		Pb	Fe		
C2600 (7:3 黄銅)	68.5 ~ 71.5	≤ 0.07	≤ 0.15	残	自動車用ラジエータなどの一般深絞り用, 時計部品, 薬きょうなどの特殊絞り用又は 圧縮加工用
C2680 (65:35 黄銅)	64.0 ~ 68.0	≤ 0.07	≤ 0.05	残	自動車用ラジエータ・ランプケースなどの 一般絞り用
C2720 (63:37 黄銅)	62.0 ~ 64.0	≤ 0.07	≤ 0.07	残	時計部品, 金属雑貨などの型押し, 板物お よび一般ろう付け用
C2801 (6:4 黄銅)	59.0 ~ 62.0	≤ 0.10	≤ 0.07	残	配線器具部品, ネームプレート, 計器板, 一般板金加工用



第19.3図: Cu-Zn系平衡状態図

らいまで余り影響はない。一般には1.5～3.0%のPb添加が普通であり、これ以上添加しても切削性は向上せず、反対に機械的性質が劣化する。

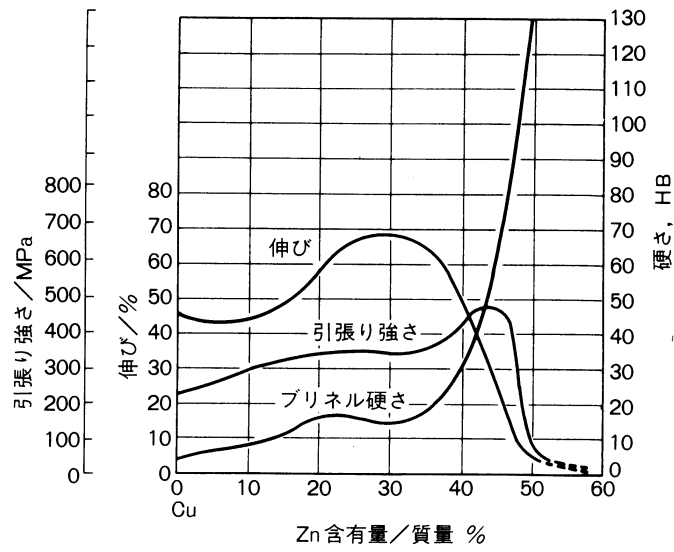
第19.3表: 快削黄銅棒の化学成分 (JIS H 3250)

種類	化学成分 (%)			用途例
	Cu	Pb	Fe	
C3601	59.0 ~ 63.0	1.8 ~ 3.7	≤ 0.3	被削性に優れる。C3601, C3602は 展伸性も良い。ボルト, ナット, 小ねじ, スピンドル, 歯車, バル ブ, カメラ部品など。
C3602	59.0 ~ 63.0	1.8 ~ 3.7	≤ 0.5	
C3603	57.0 ~ 61.0	1.8 ~ 3.7	≤ 0.35	
C3604	57.0 ~ 61.0	1.8 ~ 3.7	≤ 0.7	

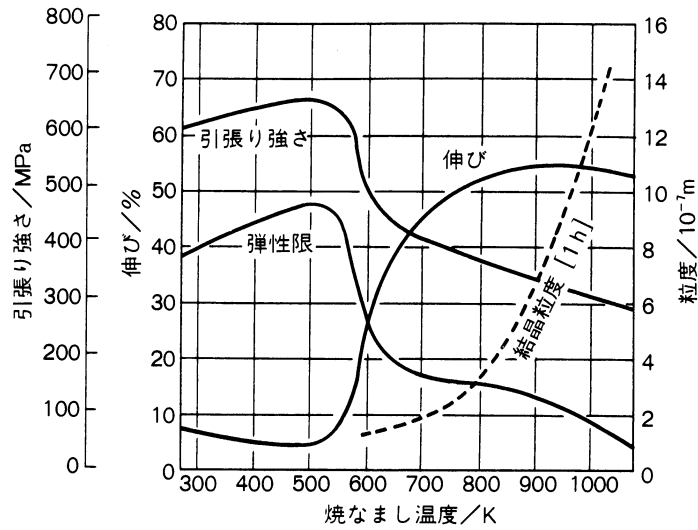
高力黄銅: 黄銅にAl, Fe, Sn, Mnなどを添加して、引張強さや硬さを向上させたものを高力黄銅(こりきおうどう)という。

(4) ずず黄銅 (naval)

6:4黄銅は脱亜鉛腐食を生じやすいので、これを防ぐためにSnを1%程度添加したものをネーバル黄銅



第19.4図: Cu-Zn 系合金の機械的性質



第19.5図: 50%加工した 7/3 黄銅の焼なましによる機械的性質の変化

という。

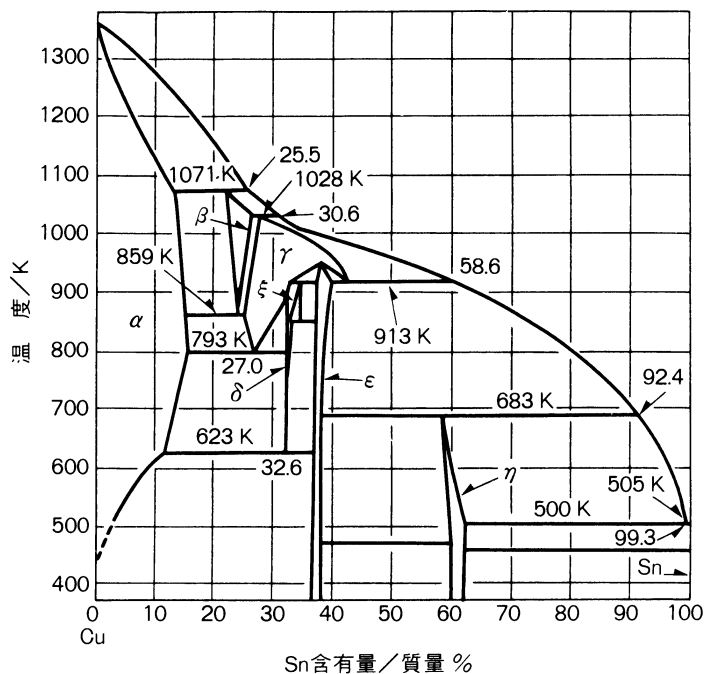
(5) アルミニウム黄銅 (albrac)

黄銅に Al と脱亜鉛腐食防止のために As とを添加したものをアルミニウム黄銅という。海水、淡水に対する耐食性に優れ、比較的高温で使用できるので腹水器などの熱交換器の管材に用いられる。

19.4.3 青銅 (bronze)

金属組織

青銅とは、一般に Cu-Sn 合金およびこれに他の元素を添加したものをいう^(注6)。図 19.6 に Cu-Sn 系平衡状態図を示す。Cu 中には Sn を約 16% 固溶できる。Cu-Sn 系状態図には $\alpha, \alpha', \gamma, \delta, \epsilon$ 相の固溶体および化合物があるが、 α 相以外は延性に乏しく、工業的には α 相から ($\alpha + \delta$) 相間である。



第19.6図: Cu-Sn 系平衡状態図

機械的性質

Cu-Sn 合金の機械的性質は状態図からも明らかなように 300 ~ 500 °C に相変態があるので、熱処理温度、冷却速度によって変化する。

青銅の種類

Cu に 3 ~ 7% Sn を含む α 単相の青銅は展延性があり冷間加工も可能であり耐食性も良好であるが Sn が高価であるため、純粋な Cu-Sn 二元合金が工業的には使われていない。一般には、これに Zn, Pb, P などを添加して利用される。

(1) Zn を含む青銅

Zn を添加した青銅では Zn 10% 以下のものが機械用青銅として利用されている。とくに、88% Cu-10% Sn-2% Sn をアドミラルティガンメタル (admiralty gun metal) と呼ばれ^(注7)、JIS 青銅铸件 3 種がこれにあたる。铸造性、機械的性質、耐食性とくに耐海水性に優れている。高価な Sn の代わりに 1.5 ~ 4% Si を添加したものにシルジン青銅があり、砲金に匹敵する耐海水性がある。

^(注6) 昔から、黄銅以外の銅合金を青銅と呼ばれていたため、Cu に Sn を含まない合金も青銅という名前が残っているため、Cu-Sn 合金は錫青銅と呼んだほうが誤解がない。

^(注7) 日本では砲金と呼ばれ、大砲などに用いられていた。

(2)Pb を含む青銅

青銅に Pb5 ~ 30%を加えたものを軸受用青銅または鉛青銅といい、一般機械の軸受部分に用いられる。Pb10%以上を含むものを高鉛青銅といい、大荷重の軸受に適している。

青銅に Pb を添加すると Pb は固溶せずに結晶粒界に集まる。硬い金属組織中に軟らかい Pb が存在することにより軸受材料として有効に働く。

Cu に Pb を 30 ~ 40%加えた軸受用合金をケルメット (kelmet) と呼ばれ、航空機、自動車などの高速度、高荷重軸受に用いられる。

(3) リン青銅

Cu-8%Sn 合金に 0.03 ~ 0.35%P を添加したものをリン青銅といい、ばね材料に用いられる。また、耐磨耗性を利用して歯車、カム、軸受などにも利用される。P は Cu 中に固溶して固溶強化するが、多くなると Cu₃P が析出して脆くなる。

第19.4表: 黄銅鋳物 (JIS H 5120)

種類	記号	化学成分 (%)						引張試験		用途例
		Cu	Zn	Pb	Sn	Al	Fe	引張強さ	伸び (%)	
黄銅鋳物 1種	CAC201 (YBsC1)	83.0 ~ 88.0	残	≤ 0.5	Sn+Al+Fe: ≤ 1.0			≥ 150(MPa)	≥ 25	ろう付け容易。 排気部品など
黄銅鋳物 2種	CAC202 (YBsC2)	65.0 ~ 70.0	残	0.5 ~ 3.0	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 0.8	≥ 200(MPa)	≥ 20	電気部品、一 般機械部品など
黄銅鋳物 3種	CAC203 (YBsC3)	58.0 ~ 64.0	残	0.5 ~ 3.0	≤ 1.0	≤ 0.5	≤ 0.8	≥ 250(MPa)	≥ 20	電機用、建築用、 機械部品など

(4) アルミニウム青銅 (aluminium bronze)

青銅と名があるが、Cu-Al系合金で Al が 9.4%までは α 相である。美しい黄金色で、加工性に富んでいる。模造金 (imitation gold) とし利用されている^(注 8)。実用合金では第 3 元素として Ni, Mn, Fe などを少量添加しており、ハイアルブロンズ (highal bronze), ダイナモブロンズ (dynamo bronze), アームスブロンズ (arms bronze) などがある。

また、Cu-Al-Mn 系のホイスラー合金 (heusler alloy) がある。

19.4.4 析出強化型銅合金

Cu-Be 系合金

ベリリウム銅またはベリリウム青銅と呼ばれる。代表的な時効硬化性合金で、時効処理により引張強さが最大で 1373MPa にも達し、導電率も優れているため、高級なばね材料、精密な機械部品に使用される。また、打撃時に火花を出さないので精油所や鉱山などにおける安全工具としても利用されている。実用の Cu-Be 合金は少量の Co を含有する。Co は固溶化熱処理における高温加熱時での結晶粒粗大化を防止し、時効処理における過時効を防ぐ。

Cu-Ti 系合金

時効硬化性が大きく、ばね性、耐磨耗性、耐熱性では Cu-Be 合金に優るくらいである。引張強さは最大で 1324MPa にも達するが、導電率は高くない。

(注 8) 現在の 5 円硬貨はアルミニウム青銅が使われている。

Cu-Cr 系合金

Cr の溶解度が極めて小さく、析出硬化状態で 80%IACS 以上の導電率を示す。軟化温度は 773K 以上にもなり、高温での耐摩耗性も大きいので溶接用の電極材料に用いられる。Cu に Zr を添加した 0.2%以下添加した Cu-Zr 合金も時効硬化性が大きく、優れた耐熱性と導電率を有している。

Cu-Ni-Si 合金

この系の合金はコルソン合金 (colson alloy) または C 合金と呼ばれ、時効硬化性を示す。電気伝導性も銅合金としては高いので、強力導電材料に使われている。

19.4.5 その他の銅合金

Cu - Ni 合金

Cu と Ni は全率固溶体を形成し、強靱化、耐食性の向上などが見られる。

キュプロニッケル (cupro nickel)

Ni10 ~ 20%を含有し、耐食性の優れた合金である。脱亜鉛腐食も時期割れもないので、コンデンサーチューブなどに使われている。

コンスタンタン (constantan)

Cu に 45%Ni を添加した合金で、電気抵抗が大きく、その温度依存性が小さいことから、精密抵抗線材料、抵抗線ひずみ計、熱電対などに使われている。

Cu-Ni-Zn 合金

Cu に 10 ~ 25%Ni の合金に Zn を添加した合金を洋銀 (german silver) または洋白 (nickel silver) と呼ばれ、模造銀などとして利用されてきた。機械的性質、耐熱性、耐食性が優れていることから、ばね材料、抵抗体、電気コンタクト部品、バイメタルなどとして用いられている。また、装飾品、食器などに古くから用いられている。

19.5 銅合金の加工性

19.5.1 銅合金の塑性加工性

純銅は冷間、熱間ともに加工性が良い。黄銅は Zn15%以下は熱間、15 ~ 37%の α 黄銅は高温で脆いため冷間で加工する。37 ~ 40%Zn での ($\alpha + \beta$) は冷間、熱間いずれも加工できる。リン青銅、洋白は冷間加工が適する。

19.5.2 銅合金の溶接性

TIG 溶接や MIG 溶接あるいはガス溶接が多用され、厚板ではサブマージアーク溶接やエレクトロスラッグ溶接も実用されている。Cu 合金は熱伝導率が大きいため溶接部から熱が逃げやすいので、溶接の際には十分な予熱が必要である。鋼に比べると、熱影響部が大きく、強さや延性が劣化しやすい。熱膨張係数が大きいと溶接後の収縮も大きく、溶接割れ、高温割れを生じやすい。このような割れは適切な溶接棒の

選択, ピーニングによる溶接部組織の微細化, 小入熱の採用によって防止可能である。溶接部には気泡が発生しやすいので注意を要する。Mn, Si, Ti などの脱酸元素を含む溶接棒の使用が有効である。

19.5.3 銅合金の被削性

純銅や脱酸銅の焼なまし材はアルミニウムと同様に軟らかく, かつ粘いので切削加工はしにくい。このような軟質材は切削加工せずに塑性加工で成形するほうが良い。黄銅 (Cu-30 ~ 40%Zn 合金) は被削性が良好で, Pb を 1 ~ 3% 添加した快削黄銅もある。ネーバル黄銅やアドミラルティ黄銅など耐海水性を改良した特殊黄銅も被削性に優れている。

青銅 (Cu-Sn 合金), マンガン青銅, アルミニウム青銅などは快削黄銅の約 1/2 の被削性になるが, 快削青銅も製造されている。

19.6 銅合金のリサイクル

銅合金

(参照アルミニウム合金のリサイクル p.349) (参照鉄鋼材料リサイクル p.227)

19.7 銅合金の最近の動向

鉛フリー銅合金

水道水などに使われる器具, 例えば給水栓金具, 配管継ぎ手, バルブ, 水道メータなどには耐食性に優れていることから青銅鋳物や黄銅鋳物が用いられている。これらの合金には優れた鋳造性, 熱間加工性に加え, 優れた被削性が要求されることから, 2%から 7%の鉛が添加されている。

鉛は一度体内に摂取されると外に排出することが非常に困難な物質であり, 人体に蓄積されていくと神経障害や消火器系の異常を起こすことはよく知られている。最近の研究では低濃度であっても鉛を長時間摂取すると, 幼児期の発達障害を引き起こし, 内分泌かく乱作用があると報告されている。厚生省は 1992 年水道水基準において鉛の基準値を従来の 0.1mg/L 以下から 0.05mg/L 以下に強化し, さらに 0.01mg/L 以下にすべきであると指導している。

このような鉛を含まない黄銅棒や銅合金鋳物の開発が要求され, 地球環境レベルか環境保全の点から延期部品や機械部品に用いられる銅合金鋳物についても鉛フリーが強く望まれている。

第20章 チタン合金

20.1 チタンの歴史

チタン (titanium) が初めて発見されたのは 1791 年英国のグレガー (Willian Gregor) とされている。1795 年ドイツのクラブロート (M.H.Klaproth) がギリシャ神話のタイタン (Titanen; 巨人) にちなんでチタン (Titan) と名づけた。

金属チタンの抽出は 20 世紀になって、米国のハンター (M.A.Hunter) やオランダのファナーケル (A.E.von Arkel) やデボア (J.H.DeBoer) によって研究されたが、工業的な生産を可能にしたのは米国のクロール (W.J.Kroll) である。1940 年特許を取得し、1948 年トン規模の生産に成功した。チタンの生産は航空機産業の発展とも関連して大いに進歩した。1953 年にケスラー (H.D.Kessler) とハンソン (Hanson) によって、Ti-6Al-4V 合金が発明され、1960 年代チタン合金は航空機のジェットエンジンに大量に使われるようになった。

日本では 1940 年代からチタンの研究が行われていたが、日本での生産は 1952 年クロール法によるスポンジチタンの生産で、1954 年には展伸材の生産が行われた

20.2 チタンの製造法

チタンの鉱石はイルメナイト (illumenite, FeTiO_3) とルチル (Rutile, TiO_2) である^(注 1)。酸化物鉱石を中間原料である四塩化チタン (TiCl_4) を用い、金属マグネシウムや金属ナトリウムによって還元して作られる。四塩化チタン (TiCl_4) と金属マグネシウムを反応させてスポンジチタンを作る方法をクロール法 (Kroll 法) という。得られたスポンジチタンを消耗電極式アーク炉で溶解し、その後に圧延、鍛造、鋳造を繰り返して、製品とする。図 20.1 はその工程を示したものである。

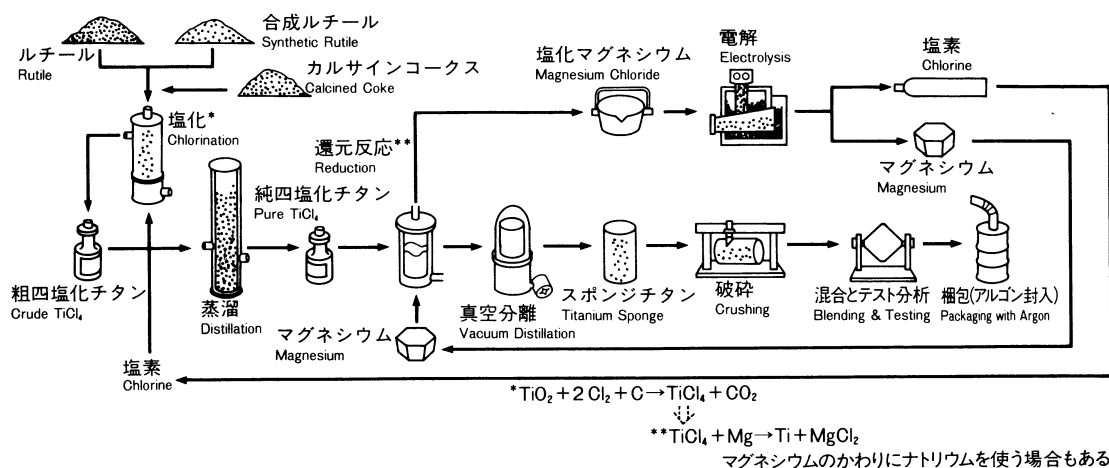
20.3 基本的特性

20.3.1 物理的性質

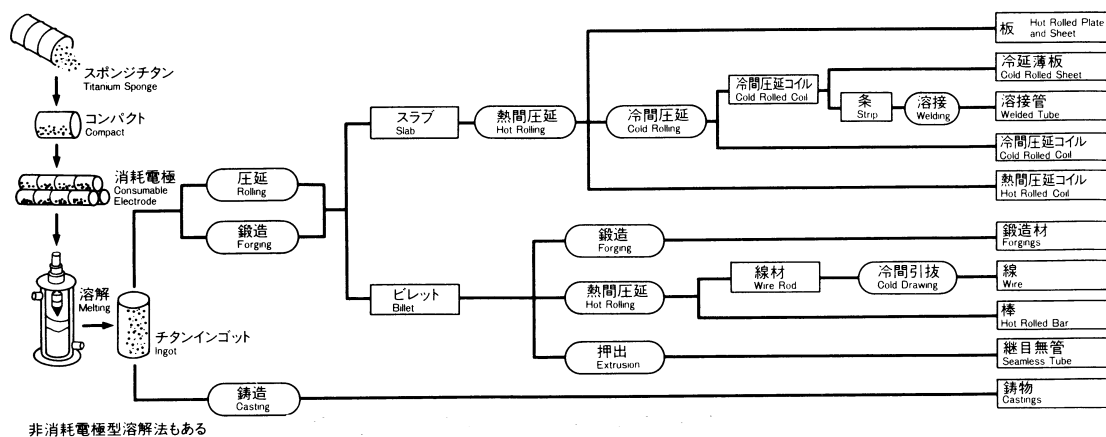
Ti は比重が 4.51 と小さく^(注 2)、融点 (1668 °C) が高く、熱伝導率および電気伝導率が低い。885 °C で同素変態を生じ、低温の稠密六方格子 (α 相) から 885 °C で体心立方格子 (β 相) に変わる。ヤング率は 10.43×10^4 で鉄の約半分であり、同じ応力で鉄より 2 倍たわむことを示している。電気伝導率や熱伝導率は低い。また、磁化率は $+1.6 \times 10^{-6}$ で、常磁性体である。

^(注 1) 鉱床はオーストラリア、ノルウェイ、南アフリカ、カナダ、ブラジル、インドなどに分布している。

^(注 2) 比重 5 以下の金属を軽金属という。一般的な軽金属には、その他にアルミニウム、マグネシウムなどがある。



スポンジチタンの代表的な製造工程



第20.1図: 各種 Ti 展伸材の代表的な製造工程 (チタン協会「チタンの世界」より)

20.3.2 化学的性質

チタンは硝酸などのような酸化性の酸に対して大変強い。これは強い不動態皮膜の形成に起因する。塩素イオンに対してもステンレス鋼以上に不動態皮膜が破壊されにくく、孔食、すき間腐食、応力腐食割れが生じにくい。高温・高濃度の塩酸や硫酸に腐食されるが、少量の酸化剤を添加して不動態化することにより腐食速度は低下する。また、微量の水分があれば塩素ガスに耐える。亜硫酸ガス硫化水素、ほとんどの有機酸に対して優れた耐食性を示す。しかし、アルカリに対しては万能ではなく、高温、高濃度の苛性ソーダ (NaOH) や苛性カリ (KOH) には腐食される。水素を吸収し、水素化物を形成し、水素脆性を生ずることがある。

600℃を越える空气中に高温に長時間さらされるとなると酸化が急激に増加する。タービンブレードのような空气中で長時間加熱される場合には 550℃が限界温度となる。また、流動海中ではエロージョンを起こしにくい。

第20.1表: Tiの物理的性質(他の金属との比較)

	純 Ti	Al	Fe	Cu
融点(°C)	1668	660	1530	1083
結晶構造	hcp(≤885 °C)	fcc	bcc(≤910 °C)	fcc
密度(g/cm ³)	4.51	2.70	7.86	8.93
原子番号	22	13	26	29
原子量	47.90	26.97	55.85	63.57
ヤング率(MPa)	10.43 × 10 ⁴	6.91 × 10 ⁴	19.22 × 10 ⁴	11.67 × 10 ⁴
ポアソン比	0.34	0.33	0.31	0.34
電気比抵抗(μΩ-cm, 20 °C)	47 ~ 55	2.7	9.7	1.7
電気伝導率(Cuに比べて,%)	3.1	64.0	18.0	100
熱伝導率(cal/cm ² /s/°C/cm)	0.041	0.487	0.145	0.923
線膨張率(/°C, 20 °C)	8.4 × 10 ⁻⁶	23.0 × 10 ⁻⁶	12.0 × 10 ⁻⁶	16.8 × 10 ⁻⁶
比熱(cal/g/°C)	0.12	0.21	0.11	0.09
磁化率*	+1.25 × 10 ⁶	+0.65 × 10 ⁶	強磁性体	-0.086 × 10 ⁶

* Fe以外は常磁性体

20.3.3 機械的性質

Tiは882°Cに変態点があり、低温側では稠密六方格子(α相)、高温側では体心立方格子(β相)である。一般に稠密六方格子は塑性変形が困難であるために構造用展伸材としての利用は少ない。Tiの場合には、図20.2に示すように、すべり変形が少ないが、それを補う双晶変形が見られるために、実用上塑性加工性には問題がない。しかし、結晶学的に利用できるすべり系は制限されるので、板材においては異方性を示す(注3)。このような塑性変形は不純物、組織、温度に影響を受け、加工硬化、変形能、集合組織の形成にも変化を生ずる。Tiの硬さに不純物の影響はO₂が大きく、O₂含有量が増すと靱性の劣化を招く。O₂の他に、不純物としてはFeおよびH₂などがある。Tiの製造取扱工程ではO₂を低減するために溶解や高温での鍛造・圧延および溶接などでは真空中またはArなどの不活性ガス雰囲気中で作業が行われるので、空气中からのN₂やH₂の侵入は極めて少ない。

CPチタンの機械的性質は、C₀をO₂含有量(ppm)、C_FをFe含有量とすると、

$$\text{引張強さ (MPa)} = 0.115C_0 + 0.052C_F + 27.744$$

$$0.2\% \text{耐力 (MPa)} = 0.114C_0 + 0.047C_F + 18.850$$

$$\text{伸び (\%)} = -0.0160C_0 - 0.033C_F + 46.253$$

$$\text{絞り (\%)} = -0.0185C_0 - 0.0075C_F + 84.074$$

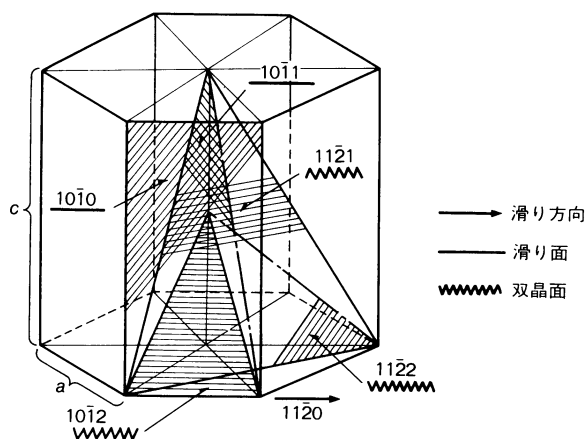
$$\text{硬さ (HB)} = 0.0381C_0 + 0.0171C_F + 89.746$$

で表される。

第20.2表: チタンと長所と短所

性質	長所	短所
密度が4.51 g/cm ³ (鉄の約60%)	比強度が大きい (高強度が出せる)	
ヤング率が小さい 高いr値を示す	ばね性が良い 深絞り性に優れる	たわみやすい
一様伸びが小さい (n値が小さい)		張出し加工性が劣る
熱容量が小さい	急冷ができる	冷めやすい
酸素との反応性が大きい 物がつきにくい	耐食性、耐水素吸収性に優れる 付着した雪や海藻などを除きやすい	熱間スケールが生成しやすい 接着性が劣る
水素を吸収しやすい (水素固溶度が小さい)	水素貯蔵材に適している	水素脆化を生じやすい

(注3) チタン板においては圧延方向の縦材よりも横材の方が引張強さ、耐力とも1~2%程度大きい。

第20.2図: α Ti のすべり系と双晶系

第20.3表: 代表的チタンおよびチタン合金の性質

組成	熱処理	引張性質		
		引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)
純チタン				
JIS 1 種	A	270 ~ 410	≥ 165	≥ 27
JIS 2 種	A	340 ~ 510	≥ 215	≥ 23
JIS 3 種	A	480 ~ 620	≥ 345	≥ 18
α 合金				
Ti-5Al-2.5Sn	A	862	804	16
α リッチ $\alpha + \beta$ 合金				
Ti-8Al-1Mo-1V	A	1000	951	15
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	A	980	892	15
$\alpha + \beta$ 合金				
Ti-3Al-2.5V	A	686	588	20
Ti-6Al-4V	A	980	921	14
	STA	1170	1100	10
Ti-6Al-6V-2Sn	A	1060	990	14
	STA	1270	1170	10
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	STA	1270	1180	10
Ti-10V-2Fe-3Al	STA	1270	1200	10
β 合金				
Ti-13V-11Cr-3Al	STA	1220	1170	8
Ti-3Al-6Cr-4Mo-4Zr	STA	1440	1370	7
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	STA	1380	1310	11
Ti-15Mo-5Zr-3Al	STA	1470	1450	13
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	STA	1230	1110	10

A:焼きなまし, STA:固溶化時効

20.4 チタンおよびチタン合金の種類と化学組成

表 20.3 に代表的 Ti 合金の化学組成と性質を, 表 20.4 にそれら合金の用途を示す。

20.4.1 CP チタン (工業用純チタン)

工業用に使用されている金属材料の中で構造材料として純金属が利用されている例は少ないが, 純チタン (CP チタン: commercial pure titanium) は引張強さが 240 ~ 620MPa, 伸びが 20 ~ 30%と鉄鋼材料並みの強度と靱性を持っているために純金属のまま構造材料として使用される。

CP チタンの JIS 規格では Fe と O の含有量により 3 種類に区分されているが, 不純物の多いものほど強度が高い。逆に侵入型不純物元素が増すと極低温の靱性は低下するので, とくに低温での靱性を保証する

第20.4表: チタン展伸材の用途

産業分野	使用分野	具体的使用部位
航空・宇宙	ジェットエンジン部品	コンプレッサー/ファン用ブレード/ディスク/ケーシング, ベーン, スタブシャフト
	機体部品 ロケット, 人工衛星, ミサイル等部品	ランチデイングギアービーム, フラップ, スポイラ, エンジンナセル, バンクヘッド, スーパー燃料交換タンク (ロケットチャンバー, ロケットブースター), ウィング
化学・石油化学, その他一般産業	尿素, 酢酸, アセトン, アセトアルデヒド, メラミン, 硝酸, IPA, PO, アジピン酸, テレフタル酸, アクリロニトリル, カクロラクタム, アクリル酸エステル, 無水マレイン酸, グルタミン酸, 高度さらし粉, 製紙, パルプ, ソーダ・塩素, 表面処理関係, 非鉄金属, 製鉄, 公害 (廃ガス, 廃液, 集塵)	熱交換器, 反応槽, 反応塔, 圧力釜, 蒸留塔, 凝縮器, 遠心分離機, ミキサ, 送風機, バルブ, ポンプ, 配管, 計測機器, ディフューザ, スクリーン, 電極基材, 電解槽, めっき用治具類, 電極, 銅箔用ドラム, 電解精錬用電極, EGL めっき電極, し尿処理装置
電力・造水	原子力発電, 火力発電, 地熱発電, 海水淡水化プラント	タービンコンデンサ用復水管/管板, タービンブレード, 伝熱管
海洋・エネルギー	石油・ガス掘削	ライザパイプ, 検層機器
	石油精製, LNG 関連 深海艇/救難艇, 海洋温度差発電 水産物養殖	熱交換器 耐圧殻/インバータ容器/構造材, 熱交換器 漁網, 熱交換器
核燃料	廃棄物処理/再処理/濃縮	熱回収蒸発缶, 遠心分離機磁石カバー
建築・土木	屋根, ビルの外装, 港湾設備, 橋梁, 海底トンネル	屋根, 外壁, 飾り金具, 金具類, 飾り柱, エクステリア, モニュメント, 標識, 表札, 手摺, 配管, 防食被覆, 鉄筋陰極防食用電極, 工具類
輸送機器	自動車部品 (四輪車, 二輪車)	コンロッド, パイプ, リチーナ, バイブスプリング, サスペンションスプリング, ボルト/ナット, ホイール, タンク・ローリ, マフラー
	舶用部品, 鉄道 (リニアモーターカー他)	熱交換器, ジェットフォイルの水中翼, シュノーケル, パンタグラフ, クライオスタット, 超伝導モータ
民生品	通信・光学機器	カメラ, ボディ, 露光装置, 現像装置, 電池, 海中継器
	音響機器 医療, 健康, 厚生	スピーカ, 振動板 人工関節, 歯科材料, 手術機器, ペースメーカー, 車椅子, ステッキ, アルカリイオン電池
	自動車部品 装飾品, 装身具 スポーツ・レジャー用品, その他	フレーム, リム, スポーク, ペダル 時計, 腕時計, 眼鏡フレーム, アクセサリー (ピアス, ネックレス, ネクタイピン, カフスボタン), はさみ, ひげ剃り, ライター ゴルフクラブシャフト/ヘッド, テニスラケット, 登山用具 (ハーケン, ピッケル, カラビナ, バーナ, コップ, アイゼン), スキーの板/ストック, ポブルレー, スパイク, 馬蹄, 剣道の面具, 釣り具, ヨット部品, ボンベ, ダイバーナイフ, 魔法瓶, 中華鍋, フライパン, お玉杓子, 家具, 筆記具, 印鑑, 玩具, ドラム (楽器)

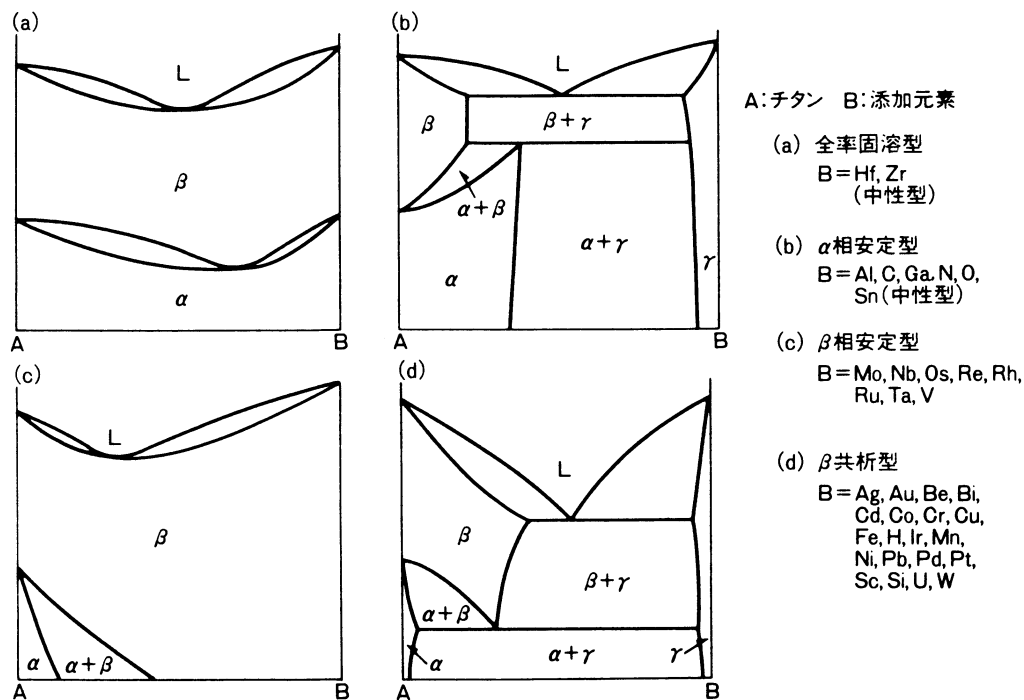
ためには JIS とは別に高純度の ELI 級チタン (extra low interstitial) を用いるほうが良い。

CP チタンは化学的に安定で, 400 ~ 500 °C の高温まで酸化せず, 室温付近ではフッ酸以外の酸や塩類にも侵されず, 極めて良好な耐食性を示しているため, 化学装置や海水を使用する熱交換器などの構造材料として利用されている。

20.4.2 チタン合金

チタンの特徴である比重が小さい、強度が高い、耐食性が良好という特性の中で、CPチタンは、それら1つの特性を利用しているものが多いが、チタン合金になると、強度に対しても比重で割った比強度が重要な特性値となる。

Ti合金の2元系状態図は図20.3に示すように、(1) 溶融点の挙動、(2) $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 変態温度の挙動、から4つに分類される。(a) は α - β 全率固溶体型で、中間相を作らない。(b) は α 相安定型で、変態点を上昇させて α が安定である。(c) は β 相安定型で、変態点が降下して β 領域が常温まで拡大した。(d) は β 共析型で、 β 相が安定化しており、温度が低くなると共析変態を生ずる。このような添加元素の挙動を基にして、 α Ti合金、 $(\alpha + \beta)$ Ti合金、 β Ti合金に分けられる。



第20.3図: Ti合金状態図の分類

 α Ti合金

実用 α 合金はTi-Alをベースに開発されている。図20.3(b)に示すように、Alを添加するにしたがって α 相領域は拡大し、強度も上昇する。しかし、Al7%以上になると $Ti_3Al(\alpha_2)$ 相が現れ、靱性が劣化する。これを避けるために第3元素を添加して Ti_3Al を析出させずに Al を多量に固溶させるように材料開発されている。その代表がTi-5Al-2.5Sn合金である。この合金は高温強度、高温クリープ特性に優れ、さらにELI材は低温靱性も優れている。

α Ti合金に対して、 β 相安定化元素を添加して $(\alpha + \beta)$ 合金の高強度と単純 α 合金の優れた高温特性とを兼ね備えた β 相を僅かに含む“準 α Ti合金 (Near α Alloy)”が開発されている。その代表がTi-8Al-1Mo-1V, Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.2Si, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Moである。

α Ti合金は稠密六方格子のためにすべり系は制限されるが、双晶変形が補う。しかし、 α 相安定化元素、

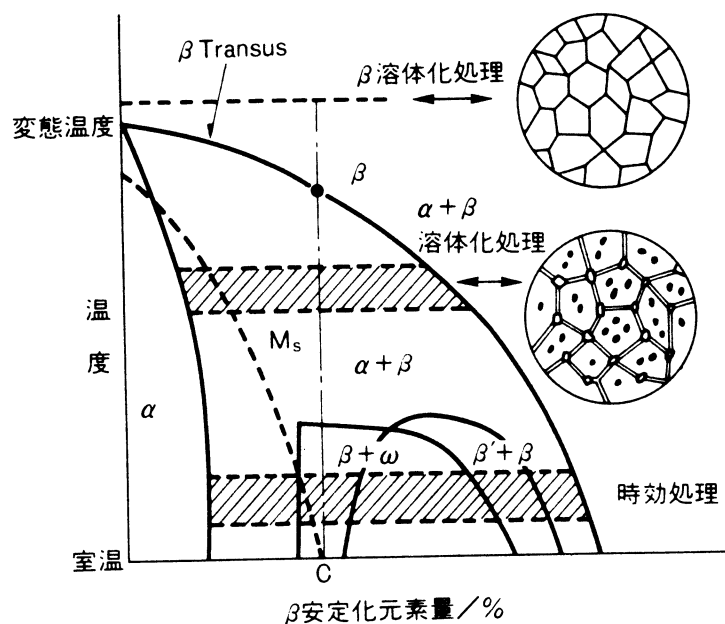
とくに **Al** は双晶変形を妨げる効果がある。そのために、塑性変形させると結晶方位が異方的に優先方位をとり、いわゆる集合組織 (**texture**) を示すようになる。六方格子の底面が圧延面に平行になるような集合組織は材料学的に好ましい効果を生ずる (注 4)。

($\alpha + \beta$)Ti 合金

α 安定化元素と β 安定化元素の両方を加えて、高温における β 相を急冷しても室温で残留させて ($\alpha + \beta$) の 2 相としたもので、実用 Ti 合金ではこの型が多い。

($\alpha + \beta$)Ti 合金の組織は加工や熱処理によって変動し、機械的性質に大きく影響する。図 20.4 に状態図と熱処理の概略を示す。一般的には β トランザス直上の β 相領域で鍛造して鑄造組織を壊し、次いで ($\alpha + \beta$) 領域で均一な組織とするために熱間加工が行われる。さらに ($\alpha + \beta$) 領域で固溶化熱処理を行い、急冷後に 673 ~ 873K で数時間時効処理を施すと、 β 相から α 相が微細析出して強化される (注 5)。

Ti-6Al-4V 合金は熱処理性、加工性、溶接性など全体のバランスがとれ、最も広く使われている (注 6)。厚肉材では熱処理性を改善した T-6Al-6V-2Sn 合金が用いられる。V や Mo を減少させて、Al や Sn を増大させると弾性係数が大きくなり、耐クリープ性が改善される。Ti-8Al-1V-1Mo 合金は Ti-6Al-4V 合金よりも弾性係数が 10% 大きく、クリープ強度も大きい。しかし、Al 量が多いと α_2 相 (Ti_3Al) が析出して脆くなる。これを避けるためには 2 重焼鈍という特殊な熱処理を行う必要がある (注 7)。



第20.4図: $\alpha + \beta$ 合金と熱処理の概略

(注 4) 集合組織によって強度が上昇する作用を“texture hardening”という。

(注 5) このときに時効時間や時効温度が不適切であると、中間遷移相として ω 相が生じて脆くなることもある。また、 β 相が多すぎると β 脆性と呼ばれる脆性が生ずる。

(注 6) Ti 合金の使用量は米国が最も多いが、その中で Ti-6Al-4V 合金が Ti 合金の 50% 以上を占めている。

(注 7) 安定な ($\alpha + \beta$) 相を得るための安定化焼鈍後に、再び同じ温度で加熱し、空冷などの比較的速い速度で冷却するものである。これを行うと、強度はやや低下するが、破壊靱性や耐クリープ性は向上する。

β Ti 合金

Ti に Mo や Fe の β 相安定化元素をある量以上に添加すると β 領域から急冷することによって β 相が室温でも残留するようになる。β 安定化元素には全率固溶型の Mo, V, Nb, Ta などと、共析型の Fe, Cr, Mn, Co, Ni などがあるが、共析型元素のほうが有効である。

耐食性を要求する用途に対しては、純チタンが用いられるのが一般であるが、Ti-Mo 系 β 合金は耐食性合金の 1 つである。純 Ti は硝酸のような酸化性の酸に対する耐食性は良好であるが、硫酸や塩酸のような還元性の酸に対しては耐食性が十分ではない。このような環境においても Ti-0.2Pd 合金が優れた特性を示し、Ti-15Mo-5Zr や Ti-15 Mo-0.2Pd β 合金はさらに耐食性が良好である。

20.5 チタン合金の加工性

20.5.1 チタン合金の塑性加工性

室温での伸びが小さいので成形限界が低く、降伏比 (引張強さ/耐力) が大きくて、適正な成形加工応力を選定しにくい。また、(耐力/ヤング率) の値が大きくて、成形加工後にスプリングバックにより加工精度を出しにくい。深絞り性では r 値、ユニカルカップ値、限界絞り比も大きい。張出し性では n 値は小さく、エリクセン値はチタン 2 種は他の材料よりも小さいが、チタン 1 種材 (酸素含有量が小さい) はキルド鋼やステンレス鋼並となる。

エリクセン値の改善には結晶粒を大きくすることが有効であるが、大きすぎると成形後肌荒れを生ずるようになる。また、張出し性不足の改善には、設計的には、型の角 R を修正したり、引張り範囲を小さくするように素材形状を変える。プレス工程を分割して加工度を落とす。冷間加工時の表面の摩擦係数が大きく、潤滑剤 (黒鉛、2 硫化モリブデンなど) の選択、管理を適正に行う必要がある。高温での延性の増加、クリープによる塑性流動を利用して成形性、精度の向上をはかる。現在は常温予備成形 → ホットサイジングが主流であるが、ホットサイジングはクリープを利用しているために時間がかかるのが欠点であり、超塑性を含めて種々の加工法が研究されている。

20.5.2 チタン合金の溶接性

TIG 溶接や MIG 溶接が多用されているが電子ビーム溶接や抵抗溶接も行われている。溶接する場合には、溶接部の気泡や脆化が問題となる。気泡は溶接部に吸収された水素、大きな冷却速度、シールドガス中の不純物、母材や溶接材料の汚れなどである。溶接部の脆化は大気中の酸素、窒素、水素などが溶接部に侵入拡散し靱性を劣化させる。電子ビーム溶接は雰囲気真空であるため不純物の問題も少なく、熱影響部を小さくできることが利点であるが、溶接部の硬化に問題が残っている。

20.5.3 チタン合金の被削性

チタンは他の材料に比べると難加工材とされている。しかし、適切な加工条件と対策を行うことにより加工することができる。チタンの加工硬化度はオーステナイト系ステンレス鋼よりも小さく、ほぼ 0.2% C 炭素鋼と同程度であるので、切削のせん断応力は比較的小さく、構成刃先は作りにくい利点はあるが、以下のような欠点があるので、注意する必要がある。

(1) 熱伝導率が小さく、比熱も小さいので、工具との摩擦熱が拡散しにくく、刃先に集中する。加工のときは水溶性切削油を十分に使用することが望ましい。

- (2) 構成刃先を作らないことからせん断角が大きくなり、薄いチップが刃先の限られた部分とだけ接触するので面圧が大きくなる。加工のときは工具形状と切削条件を適切に選択する必要がある。
- (3) チタンのヤング率は鉄鋼の約 $1/2$ で、旋盤加工などではたわみやすい。
- (4) チタンは鉄系金属とは低融点の共晶反応を約 $1,000^{\circ}\text{C}$ で起こすので、工具との焼付きによる工具破損やかじりによる不良を生じやすい。
- (5) 熱膨張係数が鉄より大きいことや熱伝導率と比熱が小さいため、鉄鋼の切削作業よりも加工中の温度上昇が大きく、加工寸法精度の誤差を誘発したり、真直度を損ないやすい。

切削工具は高速度鋼では Co 量の多いものが使われるが、むしろ WC-Co 系の超硬工具が推奨される。切削条件は切削速度を小さく、送りを大きくすることが原則であるが、高速切削は温度上昇を生じやすいので、チタンでは $10 \sim 100\text{m/min}$ (鋼の約 $1/5$) が推奨される。これに対して、送りを大きくしても温度上昇への影響は小さいので機械の剛性と馬力に見合って $0.2 \sim 0.5\text{mm/rev}$ と大きくするのが良い。

切削油は水溶性のものを多量に使うことが望ましい。

チタンの研磨仕上げ加工は、残留応力や表面の微細クラックにより疲れ強さを低下させるので、行わないほうが良い。

チタンのカメラへの利用

日本における1994年の年間生産台数は2,700万台で、1眼レフカメラは300万台（その8割は輸出）である。カメラへのTi合金の利用はシャッター幕への利用である。シャッター幕は、昔はフロント・シャッター、コンパクトカメラではレンズ・シャッター、1眼レフ・カメラではフォーカルプレレン・シャッターへと変化している。そのフォーカルプレレン・シャッターとカメラの歴史を探ると、

昔はゴム引幕、動作方向は横方向の巻き取り方式

1957年 (株)ニコンSP チタン製のシャッター

1959年 ニコンFシリーズ チタン製のシャッター

1960年 ニコンFで 1/2000秒を実現

1978年4月29日 故植村直巳氏、北極点単独踏破にニコンF2を持参

1982年 ニコンFM2で 1/4000秒を実現

となる。チタン箔材の材質はJIS 2種で、厚さ0.025mmで、軽量化のために箔はエッチング処理で肉抜きを行い、表面は窒化処理で高強度化を施している。

また、カメラ外装材は、昔は上下プレートとも黄銅材で、表面にNiCrあるいはBCrめっきにより表面硬化させていたが、

1986年 オリンパス光学工業(株) OM-4Ti(プロ用) 上下プレートをチタン材に

その後、(株)ニコン FM-2T、FM-3T

(株)京セラ RTS-3、S3などが発売される。

1990年 (株)京セラ CONTAX-T2 を発売

上下カバー、フロントカバー、バックカバーもチタン化

と変化している。

第21章 マグネシウム合金

21.1 マグネシウム合金の歴史

マグネシウム (magnesium) は、1808年 H.Davy により発見された銀白色の非鉄金属で、アルミニウムやチタンと同様に比較的新しい金属である。地殻存在度は第8番目^(注1)で地殻の約2.5%を占め、海水中にもマグネシウムとして0.13%が溶解している。

マグネシウムの需要部門の第1位はアルミ合金への添加用であり、第2位は粉末・防食マグネシウムなどの分野、第3位がマグネシウムダイカストの分野である。最近ではマグネシウム合金をダイカストで鋳造成形してノートパソコンやAV機器などの電気・電子機器、自動車部品などに採用され著しい増加を示している^(注2)。

21.2 マグネシウム合金の製造

原子番号12の周期律表の第II A族に属するアルカリ土類金属で、アルミニウムに比べて活性な金属である。このために一般のアルミニウムと違い、大気中で溶解することができない。

マグネシウムの製造は、これまでにマグネサイト、カーナライト、ドロマイトなどの鉱石や海水、鹹水(かんすい：濃厚塩水)などから得られた塩化マグネシウム、酸化マグネシウムを原料としていろいろな製造法が開発された。現在行われている製造法は電解法^(注3)と熱還元法^(注4)に大別される^(注5)。

融点は650℃でアルミニウム(660℃)とほぼ同じである。同じ容積で比較した場合、アルミニウムに比べて密度が小さいために、低い熱量で溶解させることができる。

21.3 マグネシウムの特性

^(注1) 酸素、けい素、アルミニウム、水素、鉄、カルシウム、ナトリウムに次いで多い。

^(注2) 第1位のアルミ合金への添加用は年間2.2万トンで国内需要の約70%以上を占める。第3位のマグネシウムダイカストの分野は近年急速に増加し約9%を占めるようになり、今後さらに増加すると予想される。

^(注3) 電解法は、用いられる原料の塩化マグネシウムの質や製造法によって次のように分けられる。

イーゲー法；ドイツのイーゲー (I.G.) 社が1924年に開発した電解法で、海水から作った $Mg(OH)_2$ を焼成して MgO とし、炭素および塩化マグネシウムと混合して小塊に固めたものを、さらに塩化炉中で塩素と反応させて無水塩化マグネシウムを作り、それを電解槽で電解し、マグネシウムと塩素を同時に生産回収する方法で、塩素ガスは無水塩化マグネシウム製造用にリサイクルされる。

ダウ法；米国のダウ・ケミカル (Dow Chemical) 社の方法で、海水に石灰乳を加え水酸化マグネシウムを沈殿させ、次に塩化水素を加えて塩化マグネシウムとしてから、脱水処理した含水塩化マグネシウムを原料として電解し、マグネシウムと塩化水素を生産する。

新電解法；原料の海水や鹹水(かんすい)を浄化と濃縮により良質の塩化マグネシウムを作り、脱水して電解する。

^(注4) 酸化マグネシウムに還元剤を混ぜて減圧下で高温に加熱すると、還元されたマグネシウム蒸気が冷却部で凝縮する。還元剤としては炭素、珪素またはこれらの担体を用いられる。原料はドロマイトや海水から生産される酸化マグネシウムが使われる。ピジョン法はカナダのピジョン (Pidgeon) 教授が考案した方法で、ドロマイトを焼いた焼成ドロマイト ($MgO \cdot CaO$) とフェロシリコンを混合したペレットをレトルトに挿入して、真空中で高温(1200℃)に加熱して反応させ、できたマグネシウム蒸気が凝縮し、塊状のマグネシウムができる。また、マグネテルム法はフランスのペシネー・ユージュスグループが開発し、ソフレム社が工業化した方法で、ドロマイト、珪素鉄、アルミナの混合原料を用い、反応温度を下げて連続操作を可能にした。純度はピジョン法よりもわずかに劣る。

^(注5) 現在、日本ではマグネシウムの精錬は行われていない

21.3.1 物理的性質

マグネシウムの主な物理的性質および機械的性質をアルミニウム、鉄と対比させて表 21.1 に示す。

第21.1表: マグネシウムの物理的性質

項目	マグネシウム	アルミニウム	鉄
密度	1.74	2.70	7.87
融点	650	660	1539
沸点	1110	2060	2740
融解潜熱	372	397	272
比熱	1.03	0.90	0.46
結晶構造	最密六方格子	面心立方格子	体心立方格子
ヤング率	44.1	68.6	196.0
線膨張係数	27.0	24.0	12.3
熱伝導率	1.59	2.22	0.75
標準電極電位	-2.37	-1.66	-0.44

マグネシウムの密度は 1.78 と Al の約 2/3, 鉄鋼の約 1/4, 亜鉛の約 1/3 弱であり, 実用の軽金属の中で最も軽く, このため高い比強度, 比耐力を示す。

一方, マグネシウムは稠密六方格子であるために室温での加工性が悪く。純マグネシウムの室温での加工度は 10 ~ 20% である。しかし, 300 °C 以上になると底面すべり面以外のすべりによって延性が急速に改善され, 熱間加工や押し出し加工も可能となる。

21.3.2 化学的性質

Al に比較して強度は高いが, 耐食性が劣ることが大きな欠点である。

高純度マグネシウムの耐食性はアルミニウム合金や鉄鋼材料よりも優れている。マグネシウムは銀白色の金属であるが, 空気中に放置していると, 徐々に酸化されて塩基性炭酸マグネシウムと合金元素の酸化物とからなる皮膜を生成する。この皮膜はアルカリ性で, 乾燥状態では薄くて半透明であるが, 湿った状態にあるときは厚く成長し黒色を示す。この皮膜はアルミニウムの酸化皮膜ほどではないが, いろいろな環境での腐食から保護する働きがある。

マグネシウムの中に Fe, Ni, Cu などの不純物が混入したり, 機械加工により重金属類の微粉末が表面に残存していたり, 異種金属と電氣的に接触していたりすると激しく腐食する。また, 同じ材料であっても熱処理により金属組織が変化すると耐食性は大きく変化する。純マグネシウムに対する Ni の許容限界量は 0.005%, Fe は 0.016%, Cu は 0.1% とされている。

防食法としては重クロム酸ナトリウムと硝酸の混合水溶液に浸漬して表面に耐食性酸化皮膜を作らせ, その上に適当な塗料を用いることが望ましい。

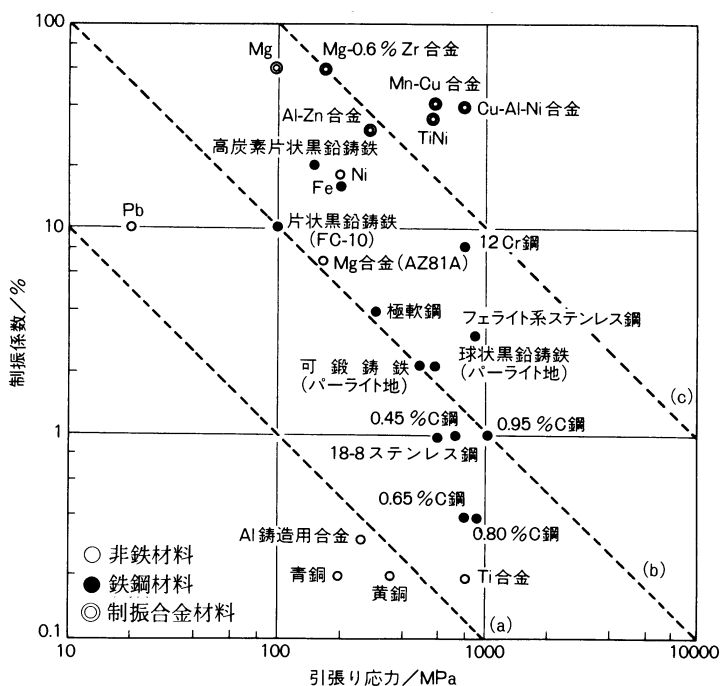
21.3.3 機械的性質

Mg 合金の疲れ強さは引張強さの 1/4 ~ 1/2 がばらつき範囲とされている。

また, 図 21.1 に示すように外部からの振動を吸収する制振性がよいために, チェーンソーや釘打ち機などの携帯品で持ち運ぶ機器のハウジングに, また, 自動車のエンジンカバーなどに用いられている。さらに, 物体が衝突したときの耐くぼみ特性がアルミニウムや軟鋼に比べてよい。寸法の安定性非常に良く, くぼみ抵抗性, 切削性も良好である。

表 21.2 に Mg 合金の主要添加元素とその役割を示す。

最近では、再溶解が比較的容易であることから、リサイクル性の良い新しい金属として注目されている。



第21.1図: 金属材料の制振係数と強度の関係

第21.2表: マグネシウム合金の主要添加元素とその役割

元素名	記号	役割
アルミニウム	A	機械的性質の改善
マンガン	M	耐食性の改善
銀	Q	耐熱性の改善
亜鉛	Z	耐食性, 強度の改善
けい素	S	クリープ強度の改善
トリウム	H	Zrとの共存下で結晶粒を微細化し機械的性質を改善
ジルコニウム	K	結晶粒を微細化
希土類	E	機械的性質の改善
イットリウム	W	Zrとの共存下で結晶粒を微細化し機械的性質を改善
銅	C	機械的性質の改善

21.4 マグネシウム合金の種類と組成

21.4.1 鋳造用マグネシウム合金

比強度が高く切削性が良いので、製品の軽量化に有効である。鋳造加工には砂型や金型のいずれも行われている。また、融点が低く、凝固潜熱が少なく、Alのように鋳型、湯道などの鋼材を損耗しないので、ダイカストにも適している。

(1)Mg-Al系 Mg-Al-Zn系 (MC1 ~ 3), Mg-Al-Mn系 (MC5) は6 ~ 8%Alに0.3%Mnを加えたもので、軽く、鋳造性は良いが耐食性は劣る。

(2)Mg-Zn系 強さ、伸びはシルミンに劣らず、加工性も良いが、海水に弱い。自動車のピストン、クラン

クケースなどに用いられている。さらに **Zr** を加えて組織の微細化，強さの向上をはかったものに **Mg-Zn-Zr** 系 (MC6,7 系) がある。希土類元素 **Th** の添加によってクリープ強度を向上させたものに **Mg-Zn-RE-Zr** 系 (MC8 系) がある。

(3)**Mg-RE** あるいは **Mg-Th** 近年開発された耐熱 **Mg** 合金で，希土類元素 (rare earths; 記号 **RE**) の **Ce** や **Th** を加えて耐熱性を増したもので，**Mg-Ce-Zr**, **Mg-RE-Zr**, **Mg-Th-Zr**, **Mg-Th-Ce-Zr**, **Mg-Th-Mn**, **Mg-RE-Mn** などがある。

表 21.3 に鋳物用マグネシウム合金の化学組成を，表 21.4 に鋳物用マグネシウム合金の特性，適応性および用途を示す。また，表 21.5 にダイカスト用マグネシウム合金の化学組成を，表 21.6 に物理的性質を，表 21.7 に機械的性質を，また表 21.8 に特性を示す。

第21.3表: 鋳物用マグネシウム合金の化学成分

種類		化学成分 (%)							
ASTM	JIS	Al	Zn	Mn	RE	Zr	Si	Cu	Ni
AZ63 系	MC1	5.3 ~ 6.7	2.5 ~ 3.5	0.15 ~ 0.35	-	-	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.10
AZ91 系	MC2A	8.1 ~ 9.3	0.4 ~ 1.0	0.13 ~ 0.35	-	-	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.01
	MC2B	8.1 ~ 9.3	0.4 ~ 1.0	0.17 ~ 0.35	Fe: ≤ 0.005		≤ 0.20	≤ 0.15	≤ 0.0010
AZ92 系	MC3	8.3 ~ 9.7	1.6 ~ 2.4	0.10 ~ 0.35	-	-	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.10
AM100 系	MC5	9.3 ~ 10.7	≤ 0.30	0.10 ~ 0.35	-	-	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.01
ZK51 系	MC6	-	3.6 ~ 5.5	-	-	0.50 ~ 1.0	-	≤ 0.10	≤ 0.01
ZK61 系	MC7	-	5.5 ~ 6.5	-	-	0.6 ~ 1.0	-	≤ 0.10	≤ 0.01
EZ33 系	MC8	-	2.0 ~ 3.1	-	2.5 ~ 4.0	0.50 ~ 1.0	-	≤ 0.10	≤ 0.01
QE22 系	MC9	-	-	Ag: 2.0 ~ 3.0	1.8 ~ 2.5	0.40 ~ 1.0	-	≤ 0.10	≤ 0.01
ZE41 系	MC10	-	3.5 ~ 5.0	-	0.75 ~ 1.75	0.40 ~ 1.0	-	≤ 0.10	≤ 0.01

21.4.2 展伸用マグネシウム合金

結晶構造から，冷間での塑性加工は困難であるが，熱間加工 (300 ~ 400 °C) は容易で圧延，押出し，鍛造ができる。

展伸用マグネシウム合金は **Mg-Al-Zn** 系 (AZ 系) および **Mg-Zn-Zr** 系 (ZK 系) が主で，適当な加工の工程管理で機械的性質を保証できる。展伸用マグネシウム合金の引張強さは 230 ~ 310MPa，耐力はその約 60%程度で，伸びは 5%以上である。

表 21.9 に展伸用 **Mg** 合金の化学成分を，表 21.10 に機械的性質を示す。

21.5 マグネシウム合金の加工性

第21.4表: 鋳造用マグネシウム合金の特性, 適応性および用途 (田中良平編: 材料利用ハンドブック, 日刊工業新聞社より)

JIS 記号	鋳物の区分	相当合金名	特性	用途例
MC1	砂型 金型	AZ63A	強度と靱性はあるが, 鋳造はやや劣る。比較的単純形状の鋳物に適する。耐食性は良好である。	一般鋳物 3輪用ハブホイール, テレビカメラ用部品, 双眼鏡体, 織機用部品など
MC2	砂型 金型	AZ91A	靱性がある鋳造性がよく, 耐圧鋳物に適する。鋳造性はMC3よりよい。耐食性はMC1より劣る。	一般用鋳物 クラッチペダル, クランクケース, トランスミッション, ギアボックスなどの自動車用部品, OA 機器用部品, レーダー用部品, 工具用ジグなど
MC3	砂型 金型	AZ92A	強度はあるが, 靱性に劣る。鋳造性は良く, 耐圧鋳物に適する。	一般用鋳物 エンジン用部品, 印刷用サドルなど。
MC5	金型	AM100A	強度および靱性があり, 耐圧鋳物に適する。	一般用鋳物 エンジン用部品
MC6	砂型	ZK51A	強度と靱性が要求される場合に用いられる。T5 処理で靱性が良い。	高力鋳物 レーザー用車輪, 酸素ポンプブラケットなど
MC7	砂型	ZK61A	強度と靱性が要求される場合に用いられる。T5 および T6 処理により靱性は増す。	高力鋳物 インレットハウジングなど
MC8	砂型	EZ33A	鋳造性, 溶接性, 耐圧性がある。常温の強度は低いが, 高温での強度の低下は少なく, クリーブ強さは大きい。	耐熱用鋳物 エンジン用部品, ギアケース, コンプレッサケースなど

第21.5表: ダイカスト用マグネシウム合金の規格組成

合金系		Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe
AZ-91 系	ASTM							
	JIS							
AM-60 系	MD1A	8.3 ~ 9.7	0.35 ~ 1.0	≧ 0.15	≦ 0.50	≦ 0.10	≦ 0.03	—
	MD1B	8.3 ~ 9.7	0.35 ~ 1.0	≧ 0.15	≦ 0.50	≦ 0.35	≦ 0.03	—
AS-41 系	MD1D	8.3 ~ 9.7	0.35 ~ 1.0	≧ 0.15	≦ 0.10	≦ 0.30	≦ 0.002	≦ 0.005
	MD2A	5.5 ~ 6.5	≦ 0.22	≧ 0.13	≦ 0.50	≦ 0.35	≦ 0.03	—
AM50A 系	MD2B	5.5 ~ 6.5	≦ 0.22	≧ 0.25	≦ 0.10	≦ 0.010	≦ 0.010	≦ 0.005
	MD3A	3.5 ~ 5.0	≦ 0.12	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 1.50	≦ 0.06	≦ 0.03	—
AS21 系	MD3B	3.5 ~ 5.0	≦ 0.12	0.35 ~ 0.70	0.50 ~ 1.50	≦ 0.02	≦ 0.002	≦ 0.0035
		4.4 ~ 5.4	≦ 0.22	0.26 ~ 0.60	≦ 0.10	≦ 0.10	≦ 0.002	≦ 0.004
		1.9 ~ 2.5	0.15 ~ 0.25	≧ 0.20	0.7 ~ 1.2	≦ 0.008	≦ 0.001	≦ 0.004

第21.6表: ダイカスト用マグネシウム合金の物理的性質

合金名	密度 (Mg/m ³)	液相線温度 (K)	固相線温度 (K)	溶融潜熱 (kJkg ⁻¹)	比熱 (kJ(kg・K) ⁻¹)	線膨張係数 (10 ⁻⁶)	熱伝導率 (W(Km) ⁻¹)	導電率 (MSm ⁻¹)
AZ91D	1.81	871	693-708	370	1.02	26.0	51	6.6
AM60B	1.80	888	693-708	370	1.02	26.0	61	-
AM50A	1.77	893	693-708	370	1.02	26.0	65	9.1
AM20	1.75	911	693-708	370	1.02	26.0	94	13.1
AS41B	1.77	890	(693-708)	370	1.02	26.1	68	-
AS21	1.76	905	(693-708)	370	1.02	26.1	84	10.8
AE42	1.79	898	(863)	370	1.02	26.1	84	11.7

第21.7表: ダイカスト用マグネシウム合金の室温における機械的性質

合金名	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	破断伸び (%)	縦弾性係数 (GPa)	せん断弾性係数 (GPa)	ブリネル硬さ HB	衝撃吸収エネルギー ノッチなし (J)
AZ91D	240	160	3	45	17	70	6
AM60B	225	130	8	45	-	65	17
AM50A	210	125	10	45	-	60	18
AM20	190	90	12	45	-	45	18
AS41B	215	140	6	45	-	60	4
AS21	175	110	9	45	-	55	5
AE42	230	145	10	45	-	60	5

第21.8表: ダイカスト用マグネシウム合金の特徴

合金系		合金の特徴	用途例
AZ-91系	JIS MD1A	铸造性、機械的性質が良く多く使用される 耐食性がAより劣る、他は同じ 耐食性がAより良い、他は同じ、高純度合金	チェンソー等可搬工具、VTR、音響、 光学機器部品、スポーツ用品、自動 車部品、OA機器部品、他
	JIS MD1B		
	JIS MD1D		
AM-60系	JIS MD2A	铸造性はAZ-91系より劣るが、伸びと靱性が良い Bは高純度合金で耐食性はAより良い	自動車部品(2輪4輪車のホイール)、 スポーツ用品、他
	JIS MD2B		
AS-41系	JIS MD3A	铸造性は劣るが、高温強度が良い	自動車エンジン部品
AM-20A,50A		伸び性、耐衝撃性を改善した合金	自動車部品(座席フレーム)

21.5.1 マグネシウム合金の塑性加工性

マグネシウムは稠密六方格子であるために一般的に塑性加工は難しい^(注6)が、それぞれの加工法に適した化学組成の材料を用いて、適切な加工条件の下で加工すれば良好な加工を行うことも可能となってきた。

押し出し加工：中空体を含めてマグネシウムの塑性加工には押し出し加工が最も適している。ダイスの製造が可能であればいろいろな形状の加工が可能で、品質も良く、機械的性質の揃った材料が得られる。

圧延：マグネシウムは冷間加工性が悪く、板材は一般に性質は劣るが、厚板は寸法安定性が良く、定盤

第21.9表: 展伸用マグネシウム合金の化学成分

合金系		化学成分 (wt%)									用途
JIS	ASTM	Al	Zn	Zr	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Ca	
1種	AZ31	8.3 ~ 9.7	0.5 ~ 1.5	-	≥ 0.15	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.010	≤ 0.04	P,T,B,S
2種	AZ61A	5.5 ~ 7.2	0.5 ~ 1.5	-	0.15 ~ 0.40	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.010	-	T,B,S
3種	AZ80A	7.5 ~ 9.2	0.2 ~ 1.0	-	0.10 ~ 0.40	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.010	-	B,S
4種	-	-	0.8 ~ 1.5	0.4 ~ 0.8	-	-	≤ 0.03	≤ 0.05	-	-	P,T,B,S
5種	-	-	2.5 ~ 4.0	0.4 ~ 0.8	-	-	≤ 0.03	≤ 0.05	-	-	P,B,S
6種	ZK60A	-	4.8 ~ 6.2	0.45 ~ 0.8	-	-	≤ 0.03	≤ 0.05	-	-	B,S
7種	-	1.5 ~ 2.4	0.5 ~ 1.5	-	≥ 0.05	≤ 0.10	≤ 0.03	≤ 0.05	≤ 0.010	-	P

注：P:板材, T:継目なし管, B:棒材, S:型材

(注6) 体心立方格子や面心立方格子に比べ、すべり系が底面すべりが起こりやすく、柱面すべりや錐面すべりが起こりにくいのである。

第21.10表: 展伸用マグネシウム合金の機械的性質

合金 質別記号*	機械的性質			加工形態**
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	
1種-H112	≥ 230	≥ 140	≥ 6	T,B,S
1種-O	≥ 220	≥ 105	≥ 11	P
1種-H14	≥ 260	≥ 200	≥ 4	P
2種-H112	≥ 260	≥ 150	≥ 6	T,B,S
3種-H112	≥ 280	≥ 190	≥ 5	B,S
4種-H112	≥ 250	≥ 170	≥ 8	P,T,B,S
5種-H112	≥ 270	≥ 190	≥ 8	P,B,S
6種-H112	≥ 300	≥ 210	≥ 5	B,S
6種-T5	≥ 310	≥ 230	≥ 5	B,S
7種-O	≥ 190	≥ 90	≥ 13	P

*H112; 製造されたままの状態での機械的性質の保証されたもの

O; 焼なまししたもの, H14; 所定の機械的性質を得るために加工硬化したもの, T5; 高温加工から冷却後, 人工時効処理したもの

**P:板材, T:継目なし管, B:棒材, S:型材

や工作用板材などとしての性能は良い。薄板はへこみ抵抗が大きいのでその点では有用であるが、加工費が高くつくのが欠点である。

鍛造: マグネシウム合金は容易に鍛造ができ、鍛造品の性能も良い。

二次加工: 深絞りや曲げ加工などは適温に加熱しながら行えば、かなりの加工も可能である。

21.5.2 マグネシウム合金の溶接性

一般に MIG 溶接や TIG 溶接によって容易に溶接可能であるが、化学成分によっては溶接の難しい材料もある。スポット溶接も適切な溶接条件を選択すれば可能である。その他、電子ビーム溶接やレーザー溶接、摩擦圧接、爆発溶接なども可能である。

21.5.3 マグネシウム合金の被削性

マグネシウム合金の切削抵抗は、炭素鋼の約 1/6、アルミニウム合金や黄銅の約 1/2 程度で小さい。結晶構造は稠密六方格子ですべり系が少なく、塑性変形しにくい。また、工具とは高温になっても反応しにくいので構成刃先を作りやすく、被削性は良好で工具寿命は長い。

しかし、マグネシウムは活性であり、乾燥した粉末やチップは高温になると発火しやすいので、安全のために旋削では多量の鉱物油冷却剤を使用するとともに切削速度を小さく、チップ厚さを大きくすることが望ましい。

さらに、比熱が他の材料に比べて小さいため局部加熱を生じやすく、熱膨張が鉄の約 2 倍と大きいいため切削時の温度上昇のために仕上寸法精度の誤差を生じやすいので注意を要する。

— マグネシウム成型品 —

1997年9月末に、三菱電機は厚さが18mmと世界一薄いノート型パソコン「Pedion」を発売した。A4判サイズのノート型は厚さが40～60mmが一般的で、最も薄型でも厚さは28mmだった。重さも1.4kgと大幅に軽くなっている。

薄型・軽量化を徹底追求するために、リチウムイオン・ポリマー二次電池を円いてパック厚さ6.5mmにし、HDD（ハードディスク駆動装置）も厚さ8.5mmの薄型を採用するなど、新技術を意欲的に投入した。その中で、マグネシウム合金製筐（きょう）体（外装部品）の採用が注目されている。ノート型では軽くする目的でマグネシウム合金製筐体が採用された先例はいくつかあった。従来はダイカスト法による製法では厚さが1～2mmが限界だがだったが、今回はマグネシウム合金の射出成型品を液晶ディスプレイ側の上ケースに用い、厚さ1mmを実現した。「チクリモールディング」とも呼ばれるマグネシウム合金の射出成型法は、流動性が高い半熔融状態のマグネシウム合金スラリーを金型内に充填（てん）し成型する。プラスチックの射出成型機と同様に、チップ形状の合金原料をシリンダー内で熔融させ、すぐ成型する。一方ダイカスト法は活性なマグネシウム合金熔融液をためておいて鑄造するため、空気中の酸素ガスと反応しないようにフラックスを合金熔融液の表面に散布するなど、厳密な生産管理が必要になる。マグネシウムの射出成型法は、米国バテル研究所とダウ・ケミカルが共同開発した。

元々軽くて薄肉成型できるマグネシウム合金の射出成型品は、軽量・小型化争いが激しい携帯情報機器で採用が相次いでいる。800gのミニノート型パソコンとして注目を集めている東芝の「Libretto」の第3弾として、97年1月に発売された「同50」は前モデルと同じ大きさを保ちながら性能向上を図った。筐体を極力薄くして内部空間を拡大する目的で、マグネシウム合金の射出成型品が適用された。平均厚さ0.7mmと前モデルの約半分に薄肉化した。11月に、NECが発売したミニノート型「mobioNX」にも採用されている。携帯型MD（ミニディスク）プレーヤーでもソニーの「MDウォークマンMZ-E50」と松下電器産業の「SJ-MJ7」、富士写真フィルムのデジタルスチルカメラの「フジックスDS-300」などの筐体などに採用されている。

小型軽量化を徹底追求している携帯型情報機器は、今後も差異化が激しく求められる。マグネシウム合金射出成型品は活腫の場が拡大基調に入った。

第21.11表: マグネシウム合金を採用した代表的なノート型パソコン

時期	メーカー	製品	採用部位	肉厚 (mm)
97年1月	東芝	A5判 Libretto50	ベース, LCDカバー, 放熱板	0.7
97年5月	松下電器産業	A4判 CF-35	LCDカバー	1.0
97年9月	三菱電機	A4判 Pedion	ベース, LCDカバー	1.0
97年11月	日本電気	A5判 mobioNX	ベース, LCDカバー	1.0
97年11月	東芝	B5判 Porteg300	ベース	0.7, 0.8
97年11月	ソニー	B5判 VAIC PCG-505	ベース, キーボード, LCDカバー	1.0, 0.6
98年6月	シャープ	B5判 PC-PJ t	ベース, LCDカバー	—
98年6月	日本電気	B5判 LaVieNX	ベース, LCDカバー	—
98年6月	松下電器産業	B5判 CF-S21J5	LCDカバー	—
98年7月	東芝	B5判 ダイナブック	ベース, LCDカバー	—

第22章 その他の金属, 合金

22.1 ニッケル合金

22.1.1 ニッケルの特性

Ni は比重が 8.902, 融点が 1,453 °C, 沸点が 2,730 °C, 電気抵抗率 $6.84 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$, 結晶構造が面心立方格子で加工に富む。353 °C で磁気変態点があり, V, Cr, Si, Al, Ti, Mo, Mn, Zn, Sn, Cu などの合金元素はこの磁気変態を下げ, Co, Fe は上げる。

Ni の物理的性質を表 22.1 に示す。

第22.1表: Ni の物理的性質

密度 g/cm^3	8.85(25 °C)	熱伝導率 W/mK	94(0 °C)
融点 °C	1453	熱膨張係数	$13.3 \times 10^{-6}(0 \text{ °C})$
比熱 J/gK	0.444(0 °C)	結晶構造	fcc, a=0.35238nm

Ni は非常に耐食性が良く, 空気中では安定しており, 置き割れなどは生じない。水や海水に対しても極めて安定である。無機酸には, 酸化性の強い HNO_3 に対してやや劣るが, H_2SO_4 や HCl などに対して安定である。有機酸に対しては常温, 常圧の条件では安定であるが, 高温ではやや劣る。また, アルカリに対しては NaOH に破非常に安定であり, NH_4OH には 1% 以下ならば全く安定である。また, 塩類に対しても, 酸化性の強い塩類以外はかなり安定である。

22.1.2 ニッケル合金

Ni-Cu 合金

Ni と Cu はいずれも面心立方格子で格子定数も近いので全率固溶体を形成し, 実用合金としては幅広い組成のものが使われている。

(1) 15 ~ 20%Ni 合金: ニッケル青銅にあたる。

(2) 45 ~ 55%Ni 合金: 固有抵抗値が約 $50 \mu\Omega \text{ cm}$ で, その温度係数も小さいので電気抵抗材料に適し, 熱起電力が大きいので, 低温用熱電対として使われ, コンスタantan (*constantan*) という。

(3) 60 ~ 75%Ni 合金: 約 67%Ni, 30%Cu で Fe, Mn などを含む合金はモネルメタル (*Monel metal*) という(注 1)。冷間加工性に富み, 耐食, 耐熱性が大きく, 非鉄金属の中では強靱な材料の 1 つで, 摩擦抵抗も大きい。復水器管, タービン羽根, ポンプ部品, 化学機械, 鋳山機械, 熱機関材料として使われる。K モネル (66%Ni-29%Cu-3%Al で析出硬化性がある), S モネル (63%Ni-30%Cu-4%Si, 鋳物), H モネル (63%Ni-30%Cu-3%Si, 鋳物), 快削用の R モネルがある。

(注 1) A. Monel がカナダの鉱石から直接製錬した天然合金で, この名が付いた。

Ni-Al 合金

耐食材料 4.5%Al, 94%Ni の時効性合金は熱処理によって 1225 ~ 1470MPa の引張強度が得られる。94%Ni, 2%Al, 1%Si, 0.5%Fe, 2.5%Mn の材料は熱電対のアルメル (alumel) である。

Ni-Fe 合金

Ni-Fe-Mo 系合金をハステロイ (Hastelloy)^(注2) と呼ばれ、Ni-Fe-Mo 系に Cr を加えた合金はインコネル (inconel) と呼ばれている。図 22.2 は Ni 基合金における添加元素の役割を示したもので、種々の合金が開発されている。ハステロイには、

ハステロイ A → B → B-2

ハステロイ C → C-276 → C-22

ハステロイ D

ハステロイ E → F → G → G-2 → G-3 → G-30 → H → H9M

ハステロイ N

ハステロイ X → XR

と開発されている。Aは、Ni-Mo-Fe 合金で、1920年に開発された耐塩酸材です。Bは、Aの改良で、low Fe です。耐塩酸材としては良いが、Crがないので、耐酸化性には弱い。Cは、Ni-Cr-Mo 合金で、1960年に開発されましたハステロイ シリーズの主力である。塩酸、硫酸、硝酸などの各種の酸に対して耐食性が良い。Dは、鋳物専用の Ni-Si 合金です。高 Si 鋳鉄の代替を目指しました材料である^(注3) Gは、Ni-Cr-Mo-Fe-Cu 合金で、1960年に開発されました。コストダウンのために、わざと Fe を添加し、耐食性も C より低い、それを補完するために Cu を添加してある材料で、スーパーステンレス鋼に近いハステロイである。Nは、BとCの間にある合金です。Xは、耐熱用のハステロイである。それに加えて、B-2、C-276、G-3などは鋭敏化防止のために低炭素化したものです^(注4)。

第22.2表: Ni 基合金における添加元素の役割

	Co	Fe	Cr	Mo,W,V	Nb,Ta,Ti	Al	Si	C,B,Zr
固溶強化	○	○	○	○	○	○	○	
金属間化合物形成					○	○	○	
結晶粒界強化								○
炭化物形成			○	○	○			○
耐酸化保護皮膜			○			○	○	

Ni-Cr 合金

Ni-Cr 合金はニクロム (nichrome) と呼ばれ、耐熱性、耐食性に優れ、電気抵抗が大きいことから、電熱線に用いられる。電熱線は JIS C2520 に規定され、Ni55%以上、Cr10 ~ 26%である。Ni に Cr を添加すると耐熱性が向上し、Mo, W, Co が添加されると耐熱性、耐食性が向上する。

89%Ni, 9.8%Cr, 1%Fe, 0.2%Mn は熱電対のクロメル (chromel) である。

(注2) ハステロイ合金の開発者は、米国の Haynes (ヘインズ, ステンレス鋼も開発しており、ステライト:Stellite 合金の開発者でもある) である。ハステロイは Hastelloy は商標で、Haynes Star Light Alloy(腐食せず, 星の輝きを維持する合金) から命名した言われている。米国の Haynes という名前の会社が製造し、日本ではライセンス契約した三菱マテリアルが製造しています。

(注3) コスト的に合わず、使用が少ない。

(注4) 現在、A, B, D, E, F, G, N は製造されていない。

22.2 亜鉛合金

22.2.1 製造法

Zn の鉱石は主として閃亜鉛鉱 (**zinc blende;ZnS**) で、これを酸化焙焼して ZnO とし、炭素で還元蒸留して Zn を得る。融点、沸点が低いので蒸留法で約 98.5%の地金ができ、電気分解法によって約 99.95 ~ 99.999%の純亜鉛が作られる。

22.2.2 物理的性質

亜鉛は稠密六方格子であるが冷間加工も可能である。表 22.3 に亜鉛の物理的性質を示す。

第22.3表: 亜鉛の特性

密度 g/cm ³	7.133(20 °C)	熱伝導率 W/mK	117(20 °C)
融点 °C	420	熱膨張係数	39.7 × 10 ⁻⁶ (20 °C)
比熱 J/gK	382.8	結晶構造	hcp,a=0.26649nm,c=0.49470nm

22.2.3 亜鉛合金

Zn 合金は、(1) 鋳造性が良い、(2) 鋳込み温度が低い、(3) 鉄製の溶融容器を侵食させない、などの特徴からダイカスト用として用いられ、鋳製品も Al 合金よりも強く、大気中での耐食性が良好である特徴がある。Zn に約 4%Al を含む合金をザマーク合金 (**Zamak**) という。この合金に Cu を添加すると強度が向上するが、時効による寸法精度が大きくなる。

Zn 板としては一般用、乾電池用、印刷用などに分類され、JIS H4321 に規格化されている。

ザマーク合金に潤滑性向上のために Sn、さらに硬さの上昇のために Cu、Sb、Pb などを添加したものは軸受に使われる。

22.3 鉛合金

22.3.1 製造法

Pb の鉱石は主として方鉛鉱 (**galena;PbS**) で、これを酸化焙焼して PbO とし、これを焼結、還元して鋳塊を得る。

22.3.2 鉛の特性

Pb は実用金属中で最も重く、融点が低く、強度が低く、展延性に富む。耐食性に優れ、放射線の遮蔽力も多い。再結晶温度が室温以下であるために、加工しても硬化しない。

表 22.4 に Pb の物理的性質を示す。

第22.4表: 鉛の物理的性質

密度 g/cm ³	11.34(20℃)	結晶構造	fcc,a=0.4938nm
融点 ℃	327.4	引張強さ MPa	12 ~ 17
比熱 J/gK	0.126	伸び %	40 ~ 50
熱伝導率 W/mK	36(20℃)	硬さ HB	4 ~ 6
熱膨張係数	29.3 × 10 ⁻⁶ (20℃)	ヤング率 MPa	16.1 × 10 ³

22.3.3 鉛合金

Pbの強度を向上させるためにはCa, Sb, Asなどが添加される。0.15%Caの合金, 1%Sbの合金は時効により硬化し, 伸びの低下も小さい。4~10%Sbの合金は硬鉛(hard lead)と呼び, Sbの少ないものは板材, 管材に, Sbの多いものは鋳物用として化学工業, 蓄電池極板に用いられる。放射線の遮蔽用にはPb-Sb系が用いられる。

Pbは人体に有害であり, これらの取り扱いには十分に注意する必要がある。また, 食器や玩具には10%以上のPbを含む材料は使用が禁止されている(注5)。

22.4 錫合金

22.4.1 製造法

Snは錫石(cassiterite;SnO₂)を製錬し, 電気製錬によって純度を向上させる。

22.4.2 錫の特性

Snは低融点金属で, 13.2℃に同素変態がある。この変態点より上をβ-Sn(白錫), 下をα-Sn(灰錫)という(注6)。白錫の一部が, β→α変態が生じて, 灰色粉末に崩壊することがあり, これを錫ペスト(tin pest)という。また, 錫または錫を多く含む2相合金は, 塑性変形させると結晶構造が正方格子であり, 双晶変形による不均一変形のために音を発する。これを錫鳴り(tin cry)または錫なきという。

純Snは引張強さが17~34MPa, 伸び35~40%, HB6~10で展延性に富み, 再結晶温度が常温以下(0~25℃)であるために常温で箔まで加工できる。Snは空气中で耐食性が良く, 光沢が失われにくい。強無機酸には侵食されやすいが, アルカリや有機酸には強い。

また, 人体には無害であるので缶詰類に使用される。

表22.5にSnの物理的性質を示す。

第22.5表: Snの物理的性質

密度 g/cm ³	α-Sn 5.76(20℃) β-Sn 7.28(20℃)	熱伝導率 W/mK	68(20℃)
融点 ℃	231.9	熱膨張係数	23 × 10 ⁻⁶ (0~100℃)
比熱 J/gK	0.224(0℃)	結晶構造	α-Sn: 立方格子 a=0.64912nm β-Sn: 正方格子 a=0.58314nm, c=0.31815nm

22.4.3 錫合金

(注5) 最近では快削材料中に添加されるPbも削減, あるいは使用が制限されつつある。

(注6) 過冷却が大きく, 通常身の回りで見られるものは高温側のβ-Sn(白錫)である。

軸受合金

軸受合金は荷重に耐える強さと硬さを持ち、衝撃・振動に耐えるための十分な靱性を持ち、摩擦係数が小さく、摩耗に耐え、伝熱性が良く、耐食性が良く、鑄造しやすく安価であることが要求される。金属組織は軟らかい基地に硬い結晶が散在しているものが適している。

Sn 基の軸受合金^(注 7)は約 4%Cu, 2 ~ 15%Sb の合金で耐圧強さが大きく、耐食性、耐摩耗性に優れている。これをバビットメタル (babbit metal)^(注 8)という。

活字合金

活字合金 (type metal) には低融点で鑄造性が良く、収縮率が小さく、相当の硬さがあり、耐摩耗性、耐食性などが要求される。このために Pb-Sb-Sn 系合金がある。

ろう付用合金

ろう付またはろう接 (soldering) とは融点が母材の融点よりも低い材料を溶融添加して、母材を溶かさずに接合させる方法で、ろう付し易い材料は相手金属と固溶体を作ることが望ましい。ろう付は融点が低い方が作業しやすく、Pb-Sn 系があり、これを軟ろう (soft solder) という。このような低融点金属では強度が不十分な場合には Ag, Au, または黄銅を主体とする合金が使われ、これを硬ろう (hard solder) という。

軟ろうは Sn と Pb が主成分ではんだ Sn が 95 ~ 20%が規定されている。Sn-Pb 系状態図では 61.9%Sn が共晶点で共晶温度が 183 °Cである。

硬ろうには、黄銅ろう (Cu-Zn 合金)、銀ろう (Ag-Cu-Zn 合金) などがある。Al 合金用はんだには Sn を主体に Zn, Al を添加したもの、Zn を主体に Sn, Al, Cd を添加したものがある。

可溶合金

200 °C以下で溶融する合金を可溶合金といい、Bi, Pb, Sn, Cd, Inなどを合金化して共晶温度を下げたものをいう。

用途としては高圧ガス容器の安全弁、電気ヒューズ、精密鑄造用ろう型ダイス、歯科用金型などがある。

^(注 7) Sn, Pb, Zn, Sb, Cd など軟かく融手の低い材料を一般にホワイトメタル (white metal) というが、狭義には Sn-Sb 系, Pb-Sn-Sb 系をいう。

^(注 8) 1839 年に英国人 Isaac babbit が発明したので、この名がある。

