鑄造用 Al-Cu 系合金の機械的性質に 及ぼす添加元素の影響*

佃 誠**・鈴木 敏夫**・福井 泉**
原田 雅行**・小池 進**

Effects of alloying elements on mechanical properties of Al-Cu casting alloy*

UDC: 669. 715' 3-14: 539. 4

Makoto TSUKUDA** Toshio SUZUKI** Izumi FUKUI**
Masayuki HARADA** and Susumu KOIKE**

Al-3.5%Cu-0.07%Ti(B) alloy to which Mg, Zn, Mn, Cr and Si were added was studied. Ultimate and yield strength of the Al-Cu-0.07%Ti(B) alloy rapidly increase with increase in Cu 2 to 5%. The elongation and Charpy impact value rapidly decrease with Cu up to 3.5%. The Al-3.5%Cu-0.07%Ti(B) alloy containing 0.3%Mn, 0.2%Cr and 0.2%Si has mechanical properties considerably increased. Ultimate and yield strengths of the Al-3.5%Cu-0.3%Mn-0.2%Cr-0.2%Si-0.07%Ti(B) alloy exponentially increase with Mg up to 1.5%, but the elongation and Charpy impact value decrease. Zn in the alloy gradually intensifies the strength. The alloy containing 3.5%Cu, 1%Mg, %Zn, 0.3%Mn, 0.2%Cr, 0.2%Si and 0.07%Ti(B) is recommended which have tensile strength 42 kg/mm² and elongation 18% (permanent mold cast and T 6).

(Received February 28, 1980)

1. 緒 言

鑄造用 Al-Cu 系合金は AC1A, 295.0, AU 5 GT など高力鑄物用として良く知られている。しかし最近高級鑄物用材料は強さと共に伸び・シャルピー衝撃値の高いことが要求されるようになってきた。従来の合金は強さを主体にした観点から研究開発され、靱性が要求される場合には強さを犠牲にする熱処理によつて伸びを求めているのが実情である。これら在来合金の多くは Cu 量が約 4 ~ 5 % で、Mg, Ti, Zn, Ag などを強化元素として添加し、強さは 40 ~ 48 kg/mm² と高いが、伸びは 4 ~ 10% にしすぎない¹⁻³⁾。

本研究は強さと共に靱性の向上のために、Al-Cu 2 元合金で、Cu 量を伸びの低下が少ない範囲の 3.5% に抑え、Mn, Si, Cr を 0.5% 以下添加した合金に対して、Mg, Zn の添加量と熱処理条件の機械的性質に及ぼす影響について試験し、高力高靱性合金の開発を目的とした。

2. 実験方法

99.99% Al 地金, 99.9% Cu プスパー, 99.9% Mg 地金, 99.99% Zn 地金と Al-5% Cr, Al-10%Mn, Al-5% Ti-0.2%B 中間合金にて、化学成分分析値が Table 1 に示す試料を溶製した。溶解は電気抵抗加熱炉で #150 黒鉛のつぼを用い、フラックスで除滓精錬後、 3×10^{-4} torr で真空脱ガスした。溶解温度は 760℃ 以下で、保持温度を $740 \pm 10^\circ\text{C}$ とした。

試験片は鑄造条件を一定にするため、金型表面温度 $150 \pm 10^\circ\text{C}$ の JIS 金型に、各合金とも液相線 + 75°C の温度で鑄込んだ。引張試験は JIS 金型鑄造試験片の 1/4 分割片から標点間距離 25 mm, 直径 6.25 mm のスモールサイズ試験片で、衝撃試験は JIS 3号試験片で実施した。機械的性質は鑄放しのままと、T 6 処理の状態を求めた。熱処理条件は 505℃ × 15 hr の溶体化処理、または 505℃ で 8 hr 後 512℃ で 8 hr さらに 527℃ で 8 hr 溶体化処理し、15℃ の水焼入れ後 160, 170, 180℃ で各 20 hr 焼もどし処理を行なった。

* 軽金属学会第 56 回春期大会 (54-5) で講演発表した。

** ㈱神戸製鋼所 (名古屋市)。Kobe Steel Ltd (Nagoya)。

Table 1 Chemical composition (wt%)

		Cu	Mg	Si	Fe	Ti	B	Cr	Mn	Zn
Al-x% Cu	1	2.05	0.05	0.06	0.01	0.060	0.003	—	—	—
	2	3.36	0.07	0.06	0.03	0.068	0.002	—	—	—
	3	4.44	0.07	0.07	0.03	0.070	0.002	—	—	—
	4	5.19	0.07	0.06	0.02	0.065	0.006	—	—	—
	5	7.04	0.06	0.03	0.10	0.057	0.004	—	—	—
	6	12.45	0.06	0.04	0.10	0.056	0.004	—	—	—
Al-3.5% Cu-0~1% Zn-x% Mg	1	3.52	0.08	0.19	0.06	0.086	0.003	0.17	0.28	0.02
	2	3.35	0.07	0.17	0.03	0.087	0.004	0.17	0.28	1.01
	3	3.66	0.40	0.20	0.05	0.078	0.003	0.17	0.28	0.02
	4	3.53	0.40	0.18	0.03	0.084	0.004	0.16	0.28	1.01
	5	3.58	0.67	0.18	0.04	0.074	0.002	0.18	0.28	0.02
	6	3.53	0.75	0.18	0.04	0.081	0.003	0.17	0.28	0.94
	7	3.48	1.18	0.19	0.04	0.074	0.003	0.19	0.28	0.02
	8	3.77	1.27	0.20	0.05	0.084	0.004	0.17	0.34	0.96
	9	3.45	1.34	0.18	0.06	0.078	0.003	0.17	0.29	0.02
	10	3.78	1.27	0.20	0.05	0.084	0.004	0.17	0.34	0.96
	11	3.55	1.75	0.17	0.08	0.069	0.003	0.17	0.28	0.02
	12	3.46	1.55	0.19	0.05	0.086	0.004	0.19	0.31	0.94
Al-3.5% Cu-1% Mg-x% Zn	1	3.48	1.18	0.19	0.04	0.074	0.003	0.19	0.28	0.02
	2	3.77	1.27	0.20	0.05	0.084	0.004	0.17	0.34	0.96
	3	3.83	1.00	0.21	0.05	0.078	0.004	0.18	0.32	1.47
	4	3.84	1.13	0.21	0.04	0.081	0.004	0.19	0.31	2.41
	5	3.96	1.12	0.19	0.04	0.063	0.003	0.19	0.30	2.95

3. 実験結果および考察

3.1 Al-Cu2 元合金の機械的性質に及ぼす Cu 量の影響

Cu 量を 2~12% の間を 6 水準とし, Al-5% Ti-0.2% B 中間合金を Ti として 0.07% 添加し, 組織を均一な微細等軸晶組織とした。鑄込温度は 2% Cu の液相線温度 $656+75^{\circ}\text{C}$ の 731°C から 12.45% Cu の $619+75^{\circ}\text{C}$ の 694°C までとした。冷却速度が組織ならびに機械的性質に大きく影響するので⁴⁾, 各成分とも溶湯冷却速度を 9~10 $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$, 凝固区間冷却速度を約 $4.0^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ に一定にして試料を作成した。

Fig. 1 に同一冷却速度における Cu 量の機械的性質に及ぼす影響を示す。図中の破線は鑄放し材, 実線は 505°C で 15 hr 溶体化処理後 15°C の水焼入れし, 160°C で 20 hr 焼もどした T 6 処理材の値である。

鑄放し材では硬さ, 引張強さ, 耐力ともに Cu 量の増加につれてほぼ直線的に増大する。これに対し伸び・衝撃値は Cu 量の増加とともに低下する。とくに Cu 2~5% 間での低下が著しいがその後は緩かになる。衝撃値

は伸びよりも低下が著しい。

T 6 材では硬さは Cu 量とともに除々に増加する。これに対し引張強さは 5% Cu 量までは急激に増大しその後は緩かに低下する。耐力は 5% Cu 量までは急激に増加し, その後も緩かに増加する。伸び・衝撃値は鑄放し材とほぼ同様の傾向を示すが, 伸びは Cu 量にかかわらず T 6 材は鑄放し材よりも値が低い。

Cu 量と機械的性質の関係についての Dix ら⁵⁾ の砂型試験片での結果は鑄放し状態の耐力, 伸び, T 6 状態の引張強さは同様の傾向であるが, 鑄放し材の引張強さは 3~4% Cu で最高値を示し, 以後 Cu 量の増加とともに値が減少するとしている。この差異は本実験では Ti (B) により微細等軸晶組織であることと凝固時の冷却速度が速いことから, デンドライト, 晶出物が細かい。第 2 相が結晶粒界に晶出する Cu 量においてもそれが比較的微細なため強さの低下を示さないためと考えられる。

Photo 1 に各 Cu 量のマイクロ組織を示す。F 材では 2% Cu でも粒内, 粒界にわずかなではあるが CuAl_2 晶出物が見られる。Cu 量が多くなるほど粒界の CuAl_2 晶出物の幅が増大する。それとともに粒内のデンドライト間隙

Fig. 1 Effect of Cu content on mechanical properties of Al-x%Cu-0.07%Ti (B) alloys; F and T6 T6: 505°C × 15h-160°C × 20h

における晶出物も多くなる。T 6 処理すると 2% Cu では粒内、粒界に見られた晶出物は消失し、細い結晶粒界のみが見られる。

Fig. 1 および Photo 1 の結果より、T 6 処理材の機械的性質は Cu 量の少ない 2% では粒内、粒界の晶出物が固溶、消失し高い靱性が得られるが強さが低い。これに対して Cu 量が多くなり晶出物が增大するにつれ靱性は低下し、強さは固溶量の増加により向上する。また最大固溶濃度以上では晶出物が多くなりすぎるため靱性の低下は著しく、引張強さは緩やかに低下する。以上の結果より、最高強さを示すのは多くの実用合金に使用されている 4~6% Cu であるが、靱性の向上には凝固時の晶出物をより固溶し得る低 Cu 組成側がよい。また 2 元平衡状態図によれば溶体化温度に近い 500°C での Cu 固溶量は約 4% である。そこで Cu の固溶状態より靱性を重視して Cu 量を 3.5% とし、次に Al-3.5% Cu 合金への添加元素の効果を試験した。

Photo 1 Microstructures of Al-x%Cu-0.07%Ti (B) alloy; as cast and T6 (×400) T6: 505°C × 15h-160°C × 20h

3.2 Al-3.5%Cu 合金の機械的性質に及ぼす Mn, Cr, Si 添加の影響

靱性の高い高力合金を得るため基本組織を Al-3.5% Cu とし、靱性を阻害しないで引張強さ、耐力を強化する添加元素を検討した。微量添加元素中 Mn は本実験と類似の Al-4% Cu-0.5% Mg 合金の強さ、伸びに対する影響の結果より⁶⁾、両者ともに向上する成分範囲である 0.5% 以下の、ここでは Mn 量を 0.3% とした。同様に Al-4.5% Cu-0.3% Mg 系合金の機械的性質に対する添加元素とその添加量に関する試験結果⁷⁾より、強さの向上を目的に Si、靱性の向上を目的に Cr を各々 0.2% 添加することとした。

Table 2 に Al-3.36% Cu-0.06% Ti (B) 合金と Al-3.52% Cu-0.28% Mn-0.19% Si-0.17% Cr-0.06% Ti (B) 合金の鑄放し材、T 6 材の機械的性質を示す。Mn, Si, Cr を添加した方が引張強さ、伸びとも向上している。光学顕微鏡観察では晶出物および化合物の大きさ、形状、分布に差異が認められなかった。

Table 2 Mechanical properties of Al-3.5%Cu-0.06%Ti(B) alloy containing Mn, Si and Cr. F and T6

		σ_B (kg/mm ²)	σ_Y (kg/mm ²)	δ (%)	I_c (kg·m/cm ²)
Al-3.36% Cu-0.06%Ti(B)	F	16.5	7.2	30.5	5.2
	T6	24.5	13.0	18.5	4.65
Al-3.52% Cu-0.28% Mn-0.19% Si-0.17% Cr-0.06% Ti(B)	F	19.2	7.2	38.1	3.08
	T6	28.5	13.2	25.0	4.95

T6 : 505°C×15hr—15°CWQ—160°C×20hr

Fig. 2 Effect of Mg content on mechanical properties of Al-3.5%Cu-0.3%Mn-0.2%Cr-0.2%Si-0.07%Ti(B)-0 & 1% Zn alloys; as cast**3.3 Al-3.5%Cu 系合金の機械的性質に及ぼす Mg 量の影響**

Al-3.5% Cu-0.3%Mn-0.2% Cr-0.2% Si-0.07% Ti(B) 合金に Zn 量を 0 と 1% とし、これに対し Mg 量を 0, 0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6% の 6 水準にて金型試験片を溶製し、機械的性質を調べた。分析値は Table 1 に示す。T6 処理は JIS AC1A 合金の 505°C×15hr と、晶出物を十分に固溶させることを目的として 505°C×8hr-512°C×8hr-527°C×8hr の 2 種類の溶体化処理を行なった。焼入れ後 160, 170, 180°C で各 20 hr 焼もどした。

Fig. 2 に Al-3.5% Cu-0.3%Mn-0.2% Cr-0.2% Si-0.07% Ti(B) 合金の鑄放し材の機械的性質に及ぼす

Mg 1 %

Zn 0 %

Mg 1 %

Zn 1 %

Photo 2 Microstructures of Al-3.5%Cu-1%Mg-0.3%Mn-0.2%Cr-0.2%Si-0.07%Ti(B)-x%Zn alloy; as cast (×400)

Mg, Zn 量の影響を示す。Zn 0% の場合は Mg 量が 0.5% までに強さの上昇が著しく、引張強さは約 10kg/mm²、耐力で約 5 kg/mm² 向上する。しかし Mg 0.5% 以上では強さの向上割合が小さくなり、逆に低下する。一方伸び、衝撃値は Mg 量の増加とともに低下する。1% の Zn が共存しても Mg 量の増加に伴う引張強さ、耐力の向上、伸び、衝撃値の低下の傾向は同様である。しかし値は引張強さで 0.5kg/mm²、伸びで約 5% と Zn が 1% 共存した方が高い。**Photo 2** に Al-3.5% Cu-0.3% Mn-0.2% Cr-0.2% Si-0.07% Ti(B) 合金に 1% の Mg を加え、さらに Zn を 0 と 1% 添加したものとのミクロ組織を比較した。Zn を添加しない場合、Mg 0% では Photo 1 と同様に CuAl₂ 晶出物が存在し、Mg 添加量が増すと粒界近傍に Al-Cu-Mg 系晶出物と考えられる毛状の晶出物が観察される。Mg 量が多くなるにつれて α 相中への固溶、さらに粒界近傍への晶出物が増すことにより強さの向上、靱性の低下が生ずる。しかし Zn 1% では Mg 量が増しても粒界近傍での晶出物が少ししかなく、このために Zn 0% よりも伸び、衝撃値が高い。

Fig. 3 に Al-3.5% Cu-0.3%Mn-0.2% Cr-0.2% Si-0.07% Ti(B) 合金の T6 処理材の機械的性質に及ぼす Mg, Zn 添加量と T6 処理条件の影響を示す。T6 処理しても Zn, Mg 量の機械的性質への影響の傾向は鑄放し材とはほぼ同様である。しかし焼もどし条件が同じなら溶体化処理が十分な場合には伸び、衝撃値が低下しないで引張強さ、耐力が向上する。また焼もどし温度の影響は引張強さには小さいが、耐力は焼もどし温度が高いほど向上し、伸び、衝撃値は逆に温度が高いほど低下する。

Fig. 3 Effect of Mg content on mechanical properties of Al-3.5%Cu-0.3%Mn-0.2%Cr-0.2%Si-0.07%Ti (B)-0 & 1% Zn alloys; T6.

このような熱処理による機械的性質の向上は、Zn 0%では CuAl_2 , $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_2$ の析出、また Zn 1%では Al-Mg-Zn 系の 3 元化合物や MgZn_2 の析出に起因しているものと考えられる。

3.4 Al-3.5%Cu-1%Mg 系合金の機械的性質に及ぼす Zn 量の影響

Fig. 4 Effect of Zn content on mechanical properties of Al-3.5%Cu-1%Mg-0.3%Mn-0.2%Cr-0.2%Si-0.07%Ti (B) alloys; as cast

Fig. 5 Effect of Zn content on mechanical properties of Al-3.5%Cu-1%Mg-0.3%Mn-0.2%Cr-0.2%Si-0.07%Ti (B) alloys; T6

3.3項で Zn を含有すると機械的性質の向上が認められた。そこで Al-3.5% Cu 系合金で Mg を 1% とし Zn 量を 0 ~ 3.0% まで変えたときの機械的性質に対する Zn の影響を求めた。供試材の成分分析値は Table 1 に示す。

Fig. 4 に Al-3.5% Cu-1%Mg-0.3%Mn-0.2% Cr-0.2% Si-0.07% Ti (B) 合金鑄放材の機械的性質に及

Zn 1.5%

Zn 3.0%

Photo 3 Microstructures of Al-3.5%Cu-1%Mg-0.3%Mn-0.2%Cr-0.2%Si-0.07%Ti(B)×%Zn alloy; T6 (×400) T6: 505°C ×8h-515°C ×8h-527°C × 8h-160°C × 20h

ばす Zn 量の影響を示す。機械的性質は Zn 量とともに向上するが、なかでも引張強さの向上が著しい。ミクロ組織は Photo 2 に示したのと差は認められなかった。

Fig. 5 に T 6 処理材の結果を示す。引張強さは Zn 量 0 ~ 3 % の間でいずれの熱処理条件でも 42 ~ 45 kg/mm² と僅かな効果しか認められない。これに対し耐力は Zn 量が多くなるほど、また焼もどし温度が高くなるほど向上し、焼もどし温度 160°C では Zn 1.5 ~ 3 % で約 30 kg/mm², 170°C では Zn 2.5 ~ 3 % で 35 kg/mm², 180°C では Zn 1.5 ~ 2.5 % で 40 kg/mm² と各々最高値を示す。伸びへの Zn 量の影響は焼もどし温度により異なり、160°C 焼もどしでは Zn 量が増えても 17 ~ 18 % とほぼ一定の伸び値であり、170°C では Zn 1 % までは伸び値 16 % なのに Zn 3 % で 12 % に低下する。また 180°C では Zn 量によらず低く、約 10 % である。

このように焼もどし温度 160°C では Zn 量の機械的性質への影響は小さい。しかし焼もどし温度を高くすると、Zn 量が多くなるにつれて耐力が向上し、伸びは低下するか、低い値のままとなる。本合金系の析出において、Zn 量と共に検討すると、160°C では CuAl₂ と Al-Cu-Mg 系の析出物による硬化が主であり、Al Mg Zn あるいは MgZn₂ の影響は小さい。170°C では Zn 1 % 以上で Al Mg Zn, MgZn₂ の影響が出はじめ耐力が向上、伸びが低下する。また 180°C になると 1 % の Zn ですでに Al Mg Zn, MgZn₂ 析出物の影響が認められる。

Photo 3 に上記条件におけるミクロ組織を示す。鑄放し材では粒界、粒内ともに CuAl₂, Al Cu Mg 化合物が

見られたのが、T 6 処理すると晶出物は α 相中に固溶されてほそい結晶粒界のみとなる。このことが T 6 することにより著しく強度が向上ししかも靱性を高く保っているものと考えられる。

上記のごとく、Al-3.5% Cu-1.0% Mg-1.0% Zn-0.3% Mn-0.2% Cr-0.2% Si-0.07% Ti(B) 合金を T 6 処理することにより、引張強さ 45 kg/mm², 耐力 30 kg/mm² と高く、伸び 16%, 衝撃値 2.0 kg·m/cm² と靱性に富んだ高力合金が得られた。

4. 結 論

高力にして靱性の高い鑄造用アルミニウム合金を得ることを目的として、Al-Cu 2 元系合金の Cu 量の機械的性質に及ぼす影響を調べ、さらに適正 Cu 量において Mg, Zn 量と微量元素として Mn, Cr, Si を加え、Ti(B) により結晶粒を微細化することにより下記の結果を得た。

1) Al-Cu 2 元合金の 2 ~ 12% Cu の範囲で、0.07% Ti(B) で結晶粒を微細化すると、T 6 処理により Cu 4.5 ~ 5 % で引張強さは最高値を示すが、伸び、衝撃値は低下する。これに対して Cu 3.5 % では強さは若干低いが、伸び 30%, 衝撃値 5 kg·m/cm² と靱性が優れている。

2) Al-3.5% Cu-0.07% Ti(B) 合金に靱性を損うことなく強さの向上が可能な添加元素として、Mn 0.3%, Cr 0.2%, Si 0.2% を加え、さらに Mg 1 % を添加すると、T 6 処理で引張強さ 40 kg/mm², 耐力 30 kg/mm², 伸び 15%, 衝撃値 1.5 kg·m/cm² 以上となる。

3) 上記の合金にさらに Zn を加え、T 6 処理をするに引張強さ、耐力は向上する。とくに耐力は Zn 量とともに焼もどし温度の影響が大きい。Zn 1 ~ 1.5 % を添加し 160°C 焼もどしで引張強さ 42 kg/mm², 耐力 30 kg/mm², 伸び 18 % を得た。

4) また同じ Al-3.5% Cu-1 % Mg-(1.5 ~ 2.5) % Zn 系合金では 180°C 焼もどしで伸び値は若干低下するが、耐力が著しく向上し、引張強さ 45 kg/mm², 耐力 40 kg/mm², 伸び 10 % が得られた。

参 考 文 献

- 1) A. Judiler: *Modern Casting*, Vol. **55**, Jan. (1969), P. 57
- 2) E. E. Stonebrook, R. H. Ewing: *Modern Casting*, Vol. **54**, July, (1968), P. 90
- 3) 磯部, 井藤: アルミニウム, No. 505, p. 16.
- 4) 佃, 鈴木, 福井, 原田: 軽金属, **29**, No. 10 (1979) 5. 437.
- 5) E. H. Dix, Trad. J. J. Bowman: *Metals Handbook*, American Society for Metals, (1948), P. 804
- 6) V. Horn: *Aluminum*, Vol. 1 properties, metallurgy and phase diagrams, American Society for Metals (1967), P. 194
- 7) 佃, 鈴木, 原田: 公開特許, 昭 54-10214.