研究報告

鑄造用 Al-Si-Cu-Mg 系合金の機械的性質および
顕微鏡組織に及ぼす Fe, Mn, Zn, Ti の影響

小宮山 芳朗*・内田 邦彦*・郡市 政広*

Effects of Fe, Mn, Zn and Ti on mechanical properties and
micro-structures of Al-Si-Cu-Mg casting alloy

UDC 669.715'782'721-14 : 539.4 : 669.12+669.74+669.5+669.295

KOMIYAMA Yoshiro*, UCHIDA Kunihiko* and GUNSHI Masahiro*

Al-Si-Cu-Mg casting alloys which are commonly used contain several other elements, some of which are beneficial and others not. The effects of iron, manganese, zinc and titanium on mechanical properties and micro-structures of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy were investigated and the experimental results were analyzed statistically. The following results were obtained.

- (1) Zinc content up to 2 percent and titanium content up to 0.2 percent have little effects on tensile properties and hardness of permanent mold castings of this alloy.
- (2) With increasing iron content, hardness increases but tensile strength and elongation decrease.
- (3) Tensile strength markedly decreases when iron content exceeds 0.5 percent.
- (4) Manganese addition reduces the harmful effect of iron since the needle type structure of K compound and FeAl₃ compound is replaced by aluminum-manganese-iron compound.
- (5) A small addition of manganese is usually considered to be desirable. Whereas in larger quantities, it has a harmful effect.
- (6) A manganese addition of about 0.5 percent results in improved properties of this alloy.

(Received January 19, 1976)

1. 緒 言

一般部品鑄造用合金として Al-Si-Cu-Mg 系合金が多く使用され、これらに関する研究も多い^{1),2),3)}。

本系合金では Cu 含有量が1.0%から4.0%の間で使用されているが、Cu 量は高い方が強度的に優れた値を示す⁴⁾。

Mg は熱処理効果が大きく、わずかの添加によつても熱処理を施すことにより強度向上が大きい。

またこの系の合金では Si は比較的高 Si 側の方が流動性が良い⁵⁾。しかし共晶点を越すと初晶 Si を多く晶出する恐れがある。

したがつて著者らは Al-Si-Cu-Mg 系合金の基本成分としてケイ素9.2%、銅4%、マグネシウム0.5%、残り

アルミニウムとし、アルミニウム合金鑄物に不純物元素として一般に含有する Fe, Mn, Zn, Tiの機械的性質および顕微鏡組織に及ぼす影響について調査したので報告する。

2. 実験方法

本実験は実験計画法の直交表 L₁₆ に組付け、交互作用の一部省略法⁶⁾を用いて行なつた。

添加元素成分は Fe 量および Mn 量については0~1.5%まで4水準とし、Zn 量は0~2.0%まで4水準とした。Ti量は0, 0.2%の水準とした。

なお Fe 分は添加量0であつても工業用純度のアルミニウム地金を用いたため **Table 2** 内分析表に示した程度の Fe 含有量がある。

* トヨタ自動車工業株式会社 (豊田市)。Toyota Motor Co. Ltd. (Toyota).

Table 2 Chemical composition of specimens.

No.	Additional elements (%)				Result of analysis (wt%)							
	Fe	Mn	Zn	Ti	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Fe	Zn	Al
1	0.15,	0,	0,	0	9.19	3.99	0.49	0.01	0.01	0.18	t	Bal.
2	0.15,	0.5,	0.3,	0.2	9.17	3.97	0.49	0.51	0.22	0.18	0.31	"
3	0.15,	1.0,	1.0,	0.2	9.08	3.89	0.48	0.98	0.21	0.12	1.00	"
4	0.15,	1.5,	2.0,	0	9.09	3.93	0.51	1.50	0.02	0.18	2.11	"
5	0.15,	0,	2.0,	0.2	9.13	3.97	0.50	0.01	0.22	0.50	2.03	"
6	0.5,	0.5,	1.0,	0	9.13	3.95	0.50	0.50	0.01	0.53	1.04	"
7	0.5,	1.0,	0.3,	0	9.25	3.94	0.51	1.06	0.01	0.58	0.32	"
8	0.5,	1.5,	0,	0.2	9.17	3.94	0.48	1.47	0.20	0.54	t	"
9	1.0,	0,	1.0,	0.2	9.23	3.93	0.50	0.01	0.02	0.98	1.02	"
10	1.0,	0.5,	2.0,	0	9.24	3.97	0.53	0.50	0.01	1.02	2.03	"
11	1.0,	1.0,	0,	0	9.30	4.00	0.48	1.13	0.01	1.16	t	"
12	1.0,	1.5,	0.3,	0.2	9.19	3.92	0.50	1.57	0.20	0.99	0.32	"
13	1.5,	0,	0.3,	0	9.17	3.95	0.51	0.01	0.01	1.46	0.31	"
14	1.5,	0.5,	0,	0.2	9.27	3.93	0.50	0.50	0.21	1.34	t	"
15	1.5,	1.0,	2.0,	0.2	9.20	3.92	0.51	1.00	0.20	1.53	2.09	"
16	1.5,	1.5,	1.0,	0	9.11	3.90	0.52	1.59	0.01	1.43	1.02	"

Fe×Mn の交互作用についても調査した。水準および割付け列は **Table 1** に示したとおりである。

試験片の鑄造は、黒鉛るつぽを用い50キログラム抵抗式電気炉にて、溶解温度 750℃で溶解を行ない、フラックス処理は NaCl(2)+NaF(1) のフラックスを 0.3%添加した。

Table 1 Factor and level applied to experiment.

Factors	Labels	Rows
Fe	0.15%, 0.5%, 1.0%, 1.5%	1, 2, 3
Mn	0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%	4, 8, 12
Zn	0%, 0.3%, 1.0%, 2.0%	7, 10, 13
Ti	0%, 0.2%	15
Fe×Mn		5, 6, 9, 10
e		11, 14

脱ガスは塩素ガスを15分間吹込んで脱ガスした。

鑄造温度は 730℃で、鑄型は JIS 舟底金型を用いた。

引張り試験はこの鑄造材から JIS 4 号試片を採取して行なった。カタサ試片は引張り試験後のチャック部から採った。

伸びの標点間距離は50 mmで測定した。

熱処理材の機械的性質を論ずる場合、熱処理条件が問題になるが、Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg 合金の比較的高い強度の得られる熱処理条件として予備試験の結果⁷⁾から T₈ 処理は185℃×5 hr 空冷、T₆ 処理は 510℃×4 hr 水冷後 185℃×3 hr の時効処理とした。

3. 試験結果

3.1 分散分析結果

Table 3 に分散分析の検定結果を示す。Table 中の**

Table 3 The result of analysis of variance.

Property H.T.	Tensile Strength			Elongation			Hardness		
	F	T ₅	T ₆	F	T ₅	T ₆	F	T ₅	T ₆
Fe	**53%	**53%	**47%		* 23%		**48%	* 41%	
Mn	**10%	* 11%	* 15%				* 11%		**40%
Zn									* 25%
Ti							** 8%	* 9%	
Fe×Mn	**23%	**21%	**24%				**27%		

** : Level of significance = 99%

* : Level of significance = 95%

% : Proportion of sam of squares

は危険率1%で有意差有りとなつたもので、*は危険率5%で有意であることを示す。寄与率についても表中に付記した。伸びについて有意差有りとなつたのは少なかったが、これは測定誤差が大きく分散が大きくなつたため、また逆にカタサについて有意であつたものが多く、寄与率も高かつたが、これは誤差分散が小さかつたためである。以下に確率95%以上で有意差有りとなつたものについて記す。

3.2 引張り強さ

3.2.1 鑄放し(F)材

鑄放し材の引張り強さは本試験の範囲内ではZnやTi量に影響されず、Fe量とMn量だけに影響される。

Fig. 1 にFe分の効果を示した。Fe分は少ない方が強度は強く0.5%以上になると急激に引張り強さを低下させる。

Mnの効果は**Fig. 2**に示した。Mn含有量を増すにしたがつて引張り強さを増し、1%で最高となりそれ以上、添加すると強度を下げる。しかしFeとMn量は単独での影響だけで論ずるのは不適当で両者には相互作用で論ずる必要がある。

Feを0.5~1.5%まで添加した場合はMn量が1%で引張り強さが最高であつたが、Fe分の少ない場合は1%以上Mnを添加すると強度を下げる。**Fig. 3**にFe量とMn量の引張り強さに及ぼす影響を示した。Fe分が0.5%以下では0~1.0%Mn含有量で27 kg/mm²以上の引張り強さが得られる。

最も強度が高いのはFe含有量が少なく、Mn含有量が0.5%含まれる場合である。

Fig. 1 Effects of Fe addition on tensile strength of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy.

Fig. 2 Effects of Mn addition on tensile strength of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy.

Fig. 3 Effects of Fe and Mn contents on tensile strength of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy, as cast.

Fe量を1%以上含有し、Mnを合金しないと強度は急減する。特に1.5% Feを含有し、Mnを添加しない場合引張り強さは14 kg/mm²ほどである。またMnを1.5%含有するとFe量と関係なくほとんど同じ強さになる。Fe含有量とMn量の引張り強さに及ぼす相互作用については熱処理を行なつた場合と同じ傾向であり、さらにその傾向が顕著になるため、熱処理材のところで詳述する。

3.2.2 熱処理(T₅, T₆)材

Fig. 1, 2に示すように熱処理材もFe分は少ない方が引張り強さは高い。Mn量は0.5%以上入っている方が好ましい。Znは2%まで、Tiは0.2%まで含有しても大きな影響はない。Fe, Mnについては、それぞれ単独での効果もあるが、それより相互作用の効果が大きい

Fig. 4 Effects of Fe and Mn contents on tensile strength of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy, T5 treated.

で、両元素の含有量を対比して述べた方がより好ましいと考えられるため、その観点から述べる。

Fig. 4 に T_5 材について示したが、Fe 分が多く、1.5% 含有する場合、Mn を添加することによる改善効果は大きい。Fe 量を 1.5% 含有して Mn 添加が 0 の場合は 14 kg/mm² の引張り強さであるが、これに 0.5% Mn を添加すると約 7 kg/mm² 増し、21 kg/mm² の引張り強さになる。さらに Mn 添加量を増すと 1.5% まで強度は上がる。

Fe が 1% 含有する場合も Mn を添加すると、1.5% Fe を含有した場合より効果は少ないが、1.5% Fe を含有している場合と同様な傾向で改善される。

Fe 量が 0.5% 以下の場合は 0.5% の Mn の添加が好ましい。それ以下 Mn を添加すると逆に強度を下げる。

Mn を含有しない場合は、Fe 量は少ない方が強い。特に 1% 以上含有すると強度を急激に下げる。

T_6 処理材では Fe および Mn 含有量による相互作用は T_5 処理材よりさらに大きい。**Fig. 5** に示したように Fe 量を 1.5% 含有し、Mn を添加しないものは引張り強さ 15 kg/mm² ほどであるが、これに Mn を添加すると極めて大きな改善効果があり、Mn 0.5% 添加で 16 kg/mm² 以上の強度増となり、引張り強さ 32 kg/mm² となる。さらに Mn 量を増すと、Fe 分を 1% 添加した場合も、Fe 分 1.5% 含有する場合よりも効果は小さいが、Mn 1.5% 添加まで強度を増す傾向にある。

Fe 分が 0.5% 以下の場合は 0.5% Mn 添加で最高強度となり、それ以上の Mn の添加では逆に強度を下げる、Fe 含有量 0.15% で Mn を 0.5% 添加し、 T_6 処理を施したものは約 47 kg/mm² の引張り強さが得られる。

Mn 量を 1.5% 含有するものはいずれの場合も Fe 分に関係なく引張り強さに大きな差はない。Mn 量が 0 の

Fig. 5 Effects of Fe and Mn contents on tensile strength of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy, T6 treated.

場合は Fe 分の違いによる引張り強さの違いは大きく、 T_6 処理の場合は Fe 含有量 0.15% であると 46 kg/mm² くらいの引張り強さであるが、Fe 分が 0.5%, 1.0%, 1.5% と増すにしたがつて 43 kg/mm², 30 kg/mm², 15 kg/mm² と上がる。特に Fe 分が 0.5% 以上になると強度低下は大きい。

F, T_5 , T_6 材共同様な傾向を示すが、熱処理を施すことにより、Fe, Mn, の相互作用が大きくなる。

総じて、Fe 含有量が 1% 以上の場合は Mn 量は 1.5% まで増すにしたがつて引張り強さを増し、Fe 含有量が 0.5% 以下では Mn 含有量が 0.5% が最も好ましく、それ以上では逆に強度を下げる。

いずれの場合も Mn 含有量に関係なく、Fe 分は少ない方が引張り強さは高い。

3.3 伸び

分散分析の検定結果では金型鑄造の T_5 材にのみ確率 95% で有差であつたが、その他は有意差なしであつた。

Fig. 6 Effects of Fe content on elongation of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy.

Fig. 7 Effects of Mn content on elongation of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy.

これはこの系の合金の伸びが小さく測定誤差が大きいため分散が大きくなり検定では有意差なしであったが、実際には **Fig. 6** に示すように Fe 分は伸びを小さくし、特に 0.5% 以上であると急激に下げる。また Mn も 0.5% まで伸びを下げないが、それ以上添加するとわずかながら伸びを下げる (**Fig. 7**) Ti, Zn は伸びに影響を及ぼさない。

3.4 カタサ

鋳放し材のカタサは Fe と Mn の寄与率が 85% であることからほとんど Fe 量と Mn 量で決まるといえる。Ti も危険率 1% で有意であったが、寄与率は 7.9% で影響度は小さい。当然 Ti を含有する方が、カタサは高い。

F 材、熱処理材とも検定結果での有意性は高く出ているが、これはカタサ測定のパラツキが小さいためで、実際には **Fig. 8, 9** に示すように Fe 量, Mn 量ともにカタサを増すがその増加は極めてわずかである。

Fig. 8 Effects of Fe content on hardness of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy.

Fig. 9 Effects of Mn content on hardness of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy.

3.5 顕微鏡組織

Photo 1 (a)~(p) はいずれも前記引張り試片のチャック部からとった顕微鏡組織で、 T_6 処理材で、0.5% の HF 溶液で腐食させたものである。これらの組織写真に示すように、Al-9.2 Si-4 Cu-0.5 Mg 合金 Zn を 2% まで添加しても Zn は大部分マトリックス中に固溶してしまい、亜鉛化合物は見られない。また亜鉛を添加することによっても大きな組織の変化は見られない。Ti も冷却速度の遅い砂型に鋳造した場合は結晶微細化の効果があるが、JIS 舟底金型のように冷却速度の速い場合には組織に、それほど大きな微細化効果は示さない。

Photo 1 (a) が Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg 合金の組織写真であるがこれに 0.2% の Ti と 0.5% の Mn および 0.3% の Zn を添加したのが **Photo 1 (b)** である。これらを比べても顕微鏡組織はほとんど変わらない。0.3% の Zn はマトリックス中に固溶しており、Ti の微細化効果もあまり影響していない。(ただし Ti は後述するように Mn が多く入っている場合の Mn 化合物の形状に影響を及ぼすようである。) Mn も 0.5% くらいでは小さな Mn 化合物が見られるが、**Photo 1 (a), (b)** は大差ない組織をしている。組織に大きな影響を及ぼすのは機械的性質と同様 Fe と Mn である。**Photo 1 (c)** は Fe 含有量が少なくて Mn を 1% 添加した組織で Mn の針状化合物(黒色)が晶出している。0.5% Mn を添加した場合 (**Photo 1 (b)**) は極めて強度を高くするが、**Photo 1 (c)** に示すように Mn 化合物が多く晶出するようになると、強度を低下させる。

Photo 1 (c) には共晶 Si, CuSi_2 , Mg_2Si , および Mn 化合物が見られる。

Ti は前述したように冷却速度の速い、舟底金型に鋳造した場合、結晶微細化の効果は小さいが、Mn 化合物の形状に影響を及ぼすようである。すなわち Ti が含まれ

(a) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg

(b) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-0.3Zn-0.5Mn-0.2Ti

(c) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-0.5Fe-2Zn-0.2Ti

(d) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-0.5Fe-1Zn-0.5Mn

(e) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Fe-1Zn-0.2Ti

(f) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Fe-2Zn-0.5Mn

(g) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1.5Fe-0.3Zn

(h) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1.5Fe-0.5Mn-0.2Ti

Photo 1 Effects of additional elements on the micro structures of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg

(c) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Zn-1Mn-0.2Ti

(d) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-2Zn-1.5Mn

(g) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-0.5Fe-0.3Zn-1Mn

(h) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-0.5Fe-1.5Mn-0.2Ti

(k) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Fe-1.5Mn

(l) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Fe-0.3Zn-1.5Mn-0.2Ti

(o) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1.5Fe-2Zn-1Mn-0.2Ti

(p) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1.5Fe-1Zn-1Mn

alloy, T_6 treated, etched 3 sec. in 0.5% HF.

ている場合は Mn 化合物は、鉄含有量および Mn 添加量によつて、針状、棒状、あるいはつらら状組織を示すが、Tiが入っていない場合は塊状あるいは、かえで葉状組織を示す。これらが両方混じつたような明確な区別がない場合も、各元素の含有比率によりあり、特に鉄分含有量が Mn 含有量に比し多い場合に針状になりがちであるが、概してそのような傾向を示す。Photo 1 (c), (h), (l), は Mn を含有しており、Tiが含まれている場合で Photo 1 (d), (f), (g), (k) は Ti を含まない場合の組織である。

Photo 2 は Zn を添加しないで Fe, Mn, Ti 添加量を変えて組織の変化を確認のため調べたものである。

Photo 2 (a) は Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1.5 Mn 合金の T₆ 材で、Photo 2 (b)はこれに0.2% Ti を添加したもので、鑄造条件は同じである。これらの写真に示すように Ti を含有していないと Mn 化合物は塊状であるが、Ti が入るとやや長細くなっている。また Photo 2 (c)は Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Mn 合金の組織写真でこれに Ti を 0.2%添加したのが、Photo 2 (d)である。Photo 2 (e), (f) で Mn 含有量に比し Fe 含有量が多くなると Ti 添加に関

(a) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1.5Mn

(b) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1.5Mn-0.2Ti

(c) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Mn

(d) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Mn-0.2Ti

(e) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Fe-1Mn

(f) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg-1Fe-1Mn-0.2Ti

Photo 2 Effects of additional elements on the micro-structures of Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg alloy, T₆ treated, etched 3 sec. in 0.5% HF.

係なく Mn 化合物は針状になる。

Photo 1 (i) に見られる針状組織は鉄化合物である。Fe 分を 1% 含有したもので、これに Mn を加えると針状化合物は Al-Mn-Fe 化合物を造り、なくなる傾向にある。鉄分が高くなると共晶組織が粗くなるが、これに Mn を添加すると共晶が細くなっている。

Photo 1 (i)(j) は 1% Fe 含有したもので、Photo 1 (m) (n) は 1.5% Fe を含有したものである。これに Mn を 1% 以上添加したものは、Photo 1 (k), (l), (o), (p) に示すように共晶組織が細くなっている。Fe 分が多い場合は特に Mn の改良効果が大きい。

Fe 分を 1.5% 含有する試料 No. 13 のものは Photo 1 (m) に示すように粗大な針状の鉄化合物が出ており、引張り強さも T_6 処理を施して 14.9 kg/mm^2 と極めて低いが Mn を 0.5% 添加すると引張り強さは 31.7 kg/mm^2 となり大きく強度向上する。組織も粗大な針状組織が微細になっている (Photo 1 (n))。これに Mn を 1% 添加すると鉄の針状化合物は塊状の Al-Mn-Fe 化合物となり、引張り強さも T_6 処理材で 37 kg/mm^2 と、Fe 分を 1.5% 含有して Mn 無添加の場合の約 2 倍の強度増大となっている。Mn は鉄分を 1% 以上含有している場合は 1% 以上添加することが強度的にも良く、また Fe 分が 0.5% 以下の時は 0.5% 前後が好ましいことが、組織にも現われている。

4. ま と め

(1) Al-9.2Si-4Cu-0.5Mg 合金中の Fe 分が多くなるにしたがってカタサを高くするが、引張り強さや伸びを小さくするため 0.5% 以下が好ましい。Fe 分が 0.5% 以上になると急激に強度を低下させる。

(2) Mn 量も増加するにしたがってカタサを増す傾向にあるが、引張り強さについては、Fe 含有量により最適な Mn 量が変わってくる。Fe 含有量が 0.5% より少ない場合は 0.5% 程度の Mn の添加が好ましいが、Fe 分が多くなればさらに添加量を増した方が良い。いずれにしても 0.5% 程度の Mn の添加は好ましい影響を与える。

(3) Zn は検定結果では 2% までほとんど影響を与えない。しかし Zn 量が多くなると (1.5% 以上) 引張り強さを低下させ、ばらつかせる傾向⁵⁾がある。

(4) Ti はカタサおよび引張り強さを高くする傾向にあるが金型鑄造の場合、効果は極めて小さい。

(5) 顕微鏡組織では、Fe 量が 0.5% 以上になると針状の K 化合物または FeAl_3 の鉄化合物が晶出して、そのため Fe 分が 0.5% 以上になると急激に引張り強さ、伸びを小さくする。この場合 Mn を添加すると Fe は Mn と化合物を造り、針状の鉄化合物が消失して機械的性質の改良がなされる。

参 考 文 献

- 1) 高橋, 嵯峨, 小島: 軽金属, **17** (1967), 368.
- 2) 西, 篠田, 尹: 鑄物, **47** (1974), 253.
- 3) W. A. Bailey: Modern Casting, January, (1965), 790.
- 4) R. C. Lemon, C. R. Howle: Modern Casting, September, (1963), 465.
- 5) Y. Komiyama: The paper which is presented at the institute of metal's Autumn 1972 Meeting, to be held in Zurich, Switzerland from September, 25 ~ 29.
- 6) 田口: 実験計画法(上), (下), 丸善出版.
- 7) 小宮山, 内田: トヨタ技術レポート, MMA ~ 154 (1970), 9.