Al-Si 系合金の衝撃強さにおよぼす銅の影響*

—Al-Si 系合金鋳物の衝撃強さに関する検討 (第3報)—

小松 登**・中村 元志**・山本 善章**

Effects of Cu on impact strength of Al-Si alloys

—Observations of impact strength of Al-Si alloys (3rd Report)—

UDC 669.715'782-14:620.178.7

KOMATSU Noboru**, NAKAMURA Motoyuki** and

YAMAMOTO Yoshiaki**

Effects of Cu on the impact strength and structures of Al-Si alloys were examined by means of Charpy impact test and metallographical method. The following three types of specimens were used:

- As cast.
- Solution heat treated at 500°C for 240 min. for the above specimens.
- Artificially age hardened at 200°C for 300 min. after the above solution heat treatment.

(1) The impact strength of as cast alloys tended to be decreased with the increase in Si content and Cu addition. When Si content was low (approximately below 4%), the strength was markedly decreased with the addition of Cu. However, the strength was gradually decreased with increasing Si content and no effects of Cu were seen on the strength at about 15% of Si content.

(2) By the addition of a small amount of Cu to the hypo-eutectic alloy of nearly eutectic composition with no primary Si crystals, a marked decrease of the impact strength was seen on the specimens solution heat treated at 500°C. The above decrease resulted from the formation of primary Si crystals due to the addition of Cu. The configuration of these primary Si crystals was the cause of stress concentration as reported in the previous paper,¹⁾ and it was kept unchanged by holding at 500°C.

(3) The impact strength of the alloys, which had been artificially age hardened at 200°C after solution heat treatment at 500°C, tended to be decreased with the increase in Si content and Cu addition. Especially, the effect of Cu addition was greater than that of Si content.

(Received Feb. 10, 1970)

1. ま え が き

Al-Si 二元合金の衝撃強さは晶出した針状共晶けい素や角板状初晶けい素の量により著しく変化し、晶出けい素の形状を変えれば亜共晶成分範囲ではけい素量を増加しても衝撃強さは、あまり変わらないことそしてAl-Si-Fe合金のように性質のことなつた2種類の晶出物すなわち、けい素および鉄化合物の存在する場合には、その何れをも形状変化させる処理を行なわないと衝撃強さの向上は期待できないことを、第1報¹⁾、第2報²⁾で報告した。本研究は、Al-Si 合金中に、晶出物形状が熱処理により変化する銅を実用鑄造合金範囲で添加させた場合の晶出物形状と衝撃強さの変化を検討した。

2. 試料および実験方法

Table 1 に示した成分の母合金を用い **Table 2** に示

した組成の Al-Si-Cu および Al-Cu 合金を溶製した。試料の作成方法および実験方法は前報¹⁾と同じである。すなわちそれら各合金を800°Cに加熱し0.15mmHg 真空

Table 1 Chemical compositions of alloys used as raw materials (wt%)

Element Raw materials	Si	Fe	Cu	Ti	Mg	Mn
Al	0.06	0.15	0.01	—	—	—
Al-13 Si	12.9	0.20	0.01	—	—	—
Al-30 Si	28.2	0.30	Tr	—	—	—
Al-12 Si	12.2	0.13	Tr	—	—	—
Al-Cu (1)	0.07	0.11	4.2	0.2	0.1	—
Al-Cu (2)	0.03	0.11	4.63	0.01	0.01	Tr

* 軽金属学会第36回大会 (44年5月) にて発表

** 株式会社豊田中央研究所 (名古屋市)
Toyota Central Research and Development Lab., Inc. (Nagoya)

中ではほぼ1時間脱ガスを行ない液相線+90℃まで冷却後300℃に予熱した肉厚20mmの金型に鑄造し10□×180の試片を作製した。これを55×10□に切断し、中央に2φの穴をあけてノッチ効果を施し、鑄放し後および下記に示す熱処理後、室温で5kg-m、30kg-mのシャルピー衝撃試験機で衝撃試験およびカタサ測定、組織観察を行なった。

T4 処理：500℃で30分～4時間加熱保持後水焼入れ処理

T6 処理：500℃で4時間加熱後水焼入れ直ちに200℃で30分～5時間加熱後空冷の焼入れ、焼戻し処理
なお銅を含む試料は衝撃試験、カタサ測定は鑄放し材では鑄造後1時間以内、T4材では水焼入れ後10分以内に行なうように留意した。

3. 実験結果および考察

Al-4, 8, 13, 15 % Si 合金に銅を0～3.8%添加したときの鑄放し材および500℃で4時間加熱保持後水焼入れした試料の衝撃値変化をFig. 1に示した。

Table 2 Chemical compositions of Al-Si-Cu alloy by fluorescent X-ray analysis (wt%)

Element Alloys	Si	Cu					
Al- 4%Si-Cu	3.1	<0.1	0.7	1.2	2.2	4.1	
Al- 8%Si-Cu	8.6	<0.1	0.7	1.3	1.8	3.8	
Al-13%Si-Cu	12.9	<0.1	0.2	1.3	2.7	2.9	4.5
Al-15%Si-Cu	15.0	<0.1	0.7	1.2	2.0	3.8	
Al-Cu	—	—	—	—	2.3	3.4	4.5
Al- 4%Cu-Si	Cu	4.3	3.8	4.4	4.0	—	—
	Si	0.5	0.6	1.8	2.8	—	—

鑄放し材ではAl-4, 8%Si合金へ銅を添加すると衝撃値を著しく低下させるが、けい素含有量の増加と共に、その程度は小さくなり Al-15%Si合金では銅を3.8%程度まで添加しても、しなくても衝撃値は変化しなくなる。

これはPhoto. 1 (a) に示すようにAl-3%Si合金へ銅を添加すると銅添加量の増加と共にCuAl₂相が増加し、3.8%銅では針状共晶けい素とCuAl₂相がほぼ同量程度認められるようになり、この何れもが衝撃値の低下に影響を与えるためと考えられ、Al-15%Si合金の場合はPhoto. 1 (b) に示すように応力集中の大きい初晶け

Fig. 1 Change in impact value of Al-Si-Cu alloys with Si content

(a)

(b)

Photo. 1 Microstructures of Al-Si alloys containing Cu, as cast, etched.

(a) Al-3.1%Si-3.8%Cu ×400

(b) Al-15%Si-4.2%Cu ×50

い素と針状共晶けい素の量が圧倒的に多くなり、これらによる衝撃値の低下が著しく CuAl_2 相による衝撃値低下の効果が認められにくくなるためと考えられる。T4 処理を行なうと銅を添加しても、しなくても鋳放し材より著しい衝撃値の増加が認められる。銅を含まないときは既報¹⁾のごとく、けい素 5~12% の範囲で衝撃値の低下があまり見られずけい素 4~5% および 12~13% 以上の範囲で著しい衝撃値の低下がある。このけい素 12~13% 以上の範囲の衝撃値の低下は加熱処理によってあまり変化しない初晶けい素量に依存する。

銅を添加するとその添加量の増加と共に加熱処理による衝撃値の増加の割合は減少したが、その増加の割合はけい素含有量に関係し一様でないようである。これを詳細に検討するため、Fig. 2 および Fig. 3 に Al-8.6%Si 合金、Al-13%Si 合金に銅を 0~4.5% 添加したときの T4 処理による衝撃値変化を示した。Fig. 2 から Al-8.6%Si-Cu 合金の場合 500°C 加熱保持時間と共に衝撃値は一様に増加し、銅を含まない T4 処理材の衝撃値は $5.6\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 、銅を 0.7% 添加したそれは $4.9\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ で銅 0.7% の添加で約 $0.7\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ の低下があった。一方 Fig. 3 に示す Al-13%Si-Cu 合金の場合 500°C 加熱保持時間による衝撃値の増加は一様でなく銅添加量の増加と共に低下する。銅を含まない T4 処理材の衝撃値は $3.5\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 、銅を 0.5% 添加したそれは $1.8\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ で銅 0.5% の添加で約 $1.7\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ の低下を示した。かように Al-Si 合金への銅の添加はけい素含有量により衝撃値におよぼす影響が異なる。この状態をさらに明らかにするため Al-

Si 合金の T4 処理材の衝撃値を用い、

$$\frac{\text{Al-Si 合金の衝撃値} - \text{Al-Si-Cu 合金の衝撃値}}{\text{Al-Si 合金の衝撃値}} \times 100$$

を算出し銅添加量の増加による衝撃値の減少率を求めた。

その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から減少率は銅添加量の増加と共に大きくなるが Al-13%Si-Cu 合金を除き銅含有量が等しいときは同じ位の減少率を示し銅 3.8% でほぼ 20~30% の値を示した。しかし Al-13%Si-Cu

Fig. 3 Change in impact value of Al-13%Si-Cu alloys with holding time at 500°C

Fig. 2 Change in impact value and hardness of Al-8.6%Si-Cu alloys with holding time at 500°C

Fig. 4 Decrease in impact value with Si content in Al-Si alloys with addition of Cu. The specimens were solution treated at 500°C for 240 min.

合金の減少率は銅添加量 0.7% で50%, 銅 3.8% で80% とかなり大きく他のけい素含有量の合金に比べて銅の添加は著しく耐衝撃性を悪くするようである。これら合金の組織を光学顕微鏡で観察すると **Photo. 2** のようである。**Photo. 2 (a)**, **(c)** は T4 処理後の Al-8.6%Si-Cu 合金, **Photo. 2 (b)**, **(d)** は Al-13%Si-Cu 合金の組織である。Al-8.6%Si-Cu 合金の場合, 組織中には球状の共晶けい素と α -アルミニウム相と銅の添加による CuAl_2 相が存在するが Al-13%Si-Cu 合金の場合, 前者の他に加熱処理により形状が変化し難い初晶けい素が存在し, その量は銅を含まない **Photo. 2 (b)** に比べて **Photo. 2 (d)** に示すように銅を 0.5% 含むことにより増加した。

Fig. 5 Liquidus curves for the Al-Cu-Si system⁸⁾

これは **Fig. 5** に示す Al-Cu-Si 系合金の状態図⁸⁾ から共晶組成に近い Al-Si 合金への銅の添加は, Al-Si 合金

Fig. 6 Change in impact value and hardness of Al-8.6% Si-Cu alloys with holding time at 200°C

(a)

(b)

(c)

(d)

Photo. 2 Microstructures of Al-Si-Cu alloys etched. The specimens were solution treated at 500°C for 240 min.

- (a) Al-8.6%Si, $\times 400$ (b) Al-13%Si, $\times 50$
 (c) Al-8.6%Si-0.5%Cu, $\times 400$
 (d) Al-13%Si-0.5%Cu, $\times 50$

の共晶点を低けい素側へ移行させる⁴⁾⁵⁾ ために共晶組成附近の合金に銅を添加するとけい素量が同じであっても初晶けい素量が多くなり、その初晶けい素により **Fig. 1** の Al-Si 合金の過共晶側に見るごとく衝撃値を低下させたものと考えられる。このことから Al-Si-Cu 合金の T4 処理材の衝撃値は、けい素 5 ~ 11% 以外の範囲ではけい素含有量に大きく依存し、けい素 5 ~ 11% の範囲では銅添加量に依存し減少するといえるように思われる。

Fig. 6 に Al-8.6%Si-Cu 合金の T6 処理における 200 °C 焼戻し加熱保持時間による衝撃値とカタサの変化を示した。銅添加量の増加と共に T6 材のカタサは増加し、これにともなつて衝撃値は低下した。特に銅添加量 3.8 % の T6 材の衝撃値は 1.9kg-m/cm² と著しく低下した。

Fig. 7 Change in impact value and hardness of Al-Cu alloys with Cu content
(a) as cast (b) Solution treated at 500°C for 240 min. (c) Age hardened at 200°C for 300 min, after solution treatment

つぎにアルミニウムに銅を添加さらに Al-4%Cu 合金にけい素を添加させて衝撃値と組織の関係を検討した。

Fig. 7 にアルミニウムに銅を添加したときの各処理状態における衝撃値とカタサの変化を示した。**Fig. 7** から各処理材ともに銅添加量と共にカタサは直線的に増加している。これに対し鑄放し材の衝撃値は、顕微鏡組織から銅添加量の増加と共に多く観察される CuAl₂ 相に応じ、ほぼ直線的に低下するが、T4 材のそれは α-アルミニウム地への CuAl₂ 相の固溶により鑄放し材よりも増加⁶⁾ し銅含有量の増加に対してカタサは増加しているにもかかわらず衝撃値の低下はゆるやかで、銅含有量 3.4% と 4.5% とではほとんど変らなかった。T6 材の衝撃値は、銅添加量の増加と共に直線的に著しく低下し、カタサの増加と良く対応する所から時効素の出現による性質変化と考え

Fig. 8 Change in impact value and hardness of Al-4% Cu-Si alloys with Si content

Photo. 3 Load-time curves for test pieces of Al-4% Cu-Si alloys as cast. Vertical and horizontal axes represent load and time, respectively.

(a) Al-4%Cu, 4.16 kgm/cm² (b) Al-4%Cu-1%Si, 1.96 kgm/cm²

られる。**Fig. 8** に Al-4%Cu 合金にけい素を添加させたときの各処理状態における衝撃値とカタサの変化を示した。Al-4%Cu 合金にけい素を添加させるとカタサは各処理材ともに、けい素添加量の増加と共に上昇、そして衝撃値は減少したが、特に鑄放し材、T6 材の衝撃値はけい素約 1% の添加で著しい低下を示した。このけい素のわずかの添加で著しい衝撃値の低下を検討するため、Al-4%Cu 合金にけい素を 0 ~ 2% まで添加した鑄放し材を用い衝撃破断時の荷重-時間線図の測定による方法⁷⁾⁸⁾ およびそれら各合金の衝撃値の約半分の荷重を与え、クラックの状態の観察による方法と併用した。その結果を **Photo. 3** および **Photo. 4** に示した。

Photo. 3 の荷重-時間線図は横軸が時間で 1 目盛 0.5 m-sec たて軸が荷重で 1 目盛 0.02 V で約 200 kg に相当する。

Photo. 3 からけい素が添加されると最大荷重^{5,6)} は増加するが、クラック形成エネルギー、クラック伝播エネルギーは低下する。特に最大荷重以後、破断までの時間が小さく線図の勾配が急なことから Al-4%Cu-1%Si 合金はクラックが形成されると、そのクラックはかなり早く伝播し破断してしまうことがうかがわれる。

Photo. 4 (a), (b) は、Al-4%Cu 合金でのクラック、**Photo. 4 (c) (d)** は Al-4%Cu-1%Si 合金のクラックである。Al-4%Cu 合金のクラックは **Photo. 4 (a)** に示すように太く、その先端は CuAl₂ 相と思われる晶出物で止つていたが **Photo. 4 (b)** に示すようにクラックをともなう晶出物のマトリックスは変形を呈していた。一方、けい素を含んだ試料は **Photo. 4 (c)** に示すようにクラックは細く長く伸び、その先端は **Photo. 4 (d)** に示すようにけい素と思われる晶出物に沿って存在しマトリ

Fig. 9 Impact value for Al-Si-Cu alloys as cast, solution treated at 500°C for 240 min. and age hardened at 200°C for 300 min. after solution treatment. Numbers in each line represent the impact value of each alloys.

Photo. 4 Structure of Al-4% Cu-Si alloys as cast after impact test.

- (a) Al-4%Cu, ×100 optical micro-structure
- (b) Al-4%Cu, ×100 optical micro-structure
- (c) Al-4%Cu-1%Si, ×100 optical micro-structure
- (d) Al-4%Cu-1%Si, ×1500 surface replica electron micro-structure

ツクスの変形はなく、しかもクラック先端からかなり離れた晶出物にも小さいクラックが存在し **Photo. 3 (b)** に示されるごとくクラックが伝播しやすくなっているように思われる。

けい素 0 ~ 15%, 銅 0 ~ 4 % の成分内で今までにえられた Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu 合金の衝撃値を用い各処理別に Al-Si-Cu 系合金鑄物の等衝撃値図の作成を行なった。その結果を **Fig. 9** に示した。実線は鑄放し材、一点鎖線は T4 材、破線は T6 材で線上の数字は衝撃値を示している。

鑄放し材で衝撃値の等しい点を結んだ線はアルミニウム軸にほぼ平行である。したがって衝撃値はけい素および銅含有量の両方に関連して変化しているように思われるが、銅含有量 2 % 以内の場合は特にけい素含有量に、銅含有量 2 ~ 4 % の場合はけい素、銅含有量の両方に、そして銅含有量 4 % 以上の場合再びけい素含有量に依存し、その傾向は特にけい素含有量 2 % 以内で著しい。これは **Photo. 3** および **Photo. 4** に示したごとく衝撃破断に針状共晶けい素および CuAl_2 相が共に影響を与えているものと考えられる。

T4 材の衝撃値の等しい点を結んだ線はけい素軸にほぼ平行でけい素含有量に依存するが、けい素約 5 ~ 11 % の範囲でアルミニウム軸および銅軸に平行な部分があり、したがって銅含有量とともに大きく変化する範囲がある。これは **Photo. 2** に示すごとく銅添加による Al-Si 合金の初晶けい素の晶出に起因する衝撃値変化によるものと考えられる。

T6 材の衝撃値の等しい点を結んだ線はけい素含有量 1 % 以内でけい素軸に、それ以外では銅軸そしてじやつかんアルミニウム軸に平行であった。したがって T6 材の衝撃値はけい素含有量よりも銅含有量に依存して変化する。

このことから Al-Si-Cu 系合金の衝撃値におよぼす各処理材でのけい素、銅の依存性はつぎのごとくいえる。

i) 鑄放し材の衝撃値はけい素、銅含有量の両方に依存し晶出けい素および CuAl_2 相が共に影響を与えていることがわかる。特に銅に比べて応力集中の大きいけい素晶出物による依存性が大きい。ii) T4 材の衝撃値はおおよそけい素含有量に依存するがけい素含有量 5 ~ 11 % の範囲で銅含有量に大きく依存する範囲がある。iii) T6 材の

衝撃値は銅ならびにけい素含有量の両方に依存するが、その依存性はけい素に比べて銅による所が大である。

4. ま と め

Al-Si 合金に銅を添加し鑄放し後、T4, T6 処理とことなる処理を施し衝撃試験、カタサ測定、組織観察を行ない Al-Si 合金の衝撃強さにおよぼす銅添加の影響を検討した。

その結果 Al-Si 合金への銅の添加は (i) CuAl_2 相の晶出、(ii) 銅固溶による α -アルミニウム地の脆化、(iii) Al-Si 共晶成分付近での二元共晶線の低けい素側への移行による初晶けい素の晶出らにより衝撃強さを低下させる。すなわち

(i) 鑄放し材の衝撃値はけい素含有量、銅含有量に依存するがけい素含有量の少ない時 (約 4 % 以下) に銅添加の影響が大きく、けい素含有量の増加と共に減少し、約 15 % けい素では銅を添加してもしなくても衝撃値は変化しなくなる。

(ii) 亜共晶組成で初晶けい素が存在しない範囲でも銅が入ると初晶けい素が晶出し T4 材の場合 Al-Si 二元合金に比べて衝撃値は低下する。したがって T4 材の衝撃値は銅添加により初晶けい素晶出量が多くなるようなけい素範囲では銅添加量に依存して著しく低下する。

(iii) T6 材の衝撃値は銅量、けい素量に、特に銅添加量に依存して著しく低下する。

参 考 文 献

- 1) 小松, 中村, 山本: 軽金属 **19** (1969) 9, 398
- 2) 小松, 中村, 山本: 軽金属 **19** (1969) 10, 445
- 3) Colin J. Smithells; Metal Reference Book 1 488 (1962) London
- 4) Hancmann, Schrader; Ternäre Legierungen Das Aluminiums 92 Atlas Metallographicus **III**, 2
- 5) Eberhart Schürmann; Giesserei 56 (1969) 77
- 6) I. D. Olliff, V. Kondic; AFS Cast Metal Research **J 5** (1969) 1-25
- 7) 田中, 梅川, 布村: 日本金属学会誌 **27** (1963) 11, 535
- 8) 田中, 布村: 日本金属学会誌 **27** (1963) 9, 439