

アルミ廃材の鋳物への適応性に関する研究

機械属室 国 吉 和 男

1. まえがき

アルミニウムはボーキサイトから製錬すると4,190 ℓ (灯油) のエネルギーが必要で、再生だと製錬エネルギーの4.2% (174 ℓ) のエネルギーでリサイクルができると言われる。従って石油ショック以来の省エネブームの中では、アルミ製品のリサイクルがさかんに強調され、昭和56年には62.4万t/年のアルミくずが二次合金原料として使用された。又再生されたアルミニウム二次地金及び合金は、ベースメタル、ダイカスト、鋳物、圧延用として高い比率で再利用されている。¹⁾

県内で排出するアルミ廃材はこのような需要を背景に、鉄くずとともに回収、分離され、本土二次合金工場に出荷されている。アルミ廃材の主なものは、エンジンブロックとサッシ類で、量的には6~7社 300~400t/月と推定される。エンジンブロックからのアルミ分離は、重油炉等で、ブロックごと加熱し、溶解温度差を利用して分離し、200kg程度のインゴットに鋳込んで出荷される。又サッシやアルミ缶類はほとんど、プレス等により一定のブロックにまとめて、出荷される。雑多に発生する廃材は、このように回収業社内で、目視に頼る仕分け分離が行なわれるが、溶解分離によるアルミインゴットはFeやZnの混入が、又缶類のプレスブロックは鉄類の混入が避け難いと思われる。

そこで、アルミ廃材の中でも、比較的仕分が容易で、材料的にも安定し、直接購入が可能な建築用サッシ廃材を主原料に鋳物への適応性を検討した。Si、Mgの添加量と、鋳型の種類、注湯温度、鋳込み温度、鋳込み重量、溶湯処理など6因子と、ひけ量、湯流れ性、引張り強度、硬さ、結晶粒径等との関係を、 $L_{16}(2^{15})$ の直交配列表に割り付けて実験を行い検討を加えた。

2. 実験方法

2-1 実験計画

因子は6因子2水準とし、その内容を(表-1)に示す。直交配列表は、(図-1)の線点図を用いて、(表-2)のように、 $L_{16}(2^{15})$ に要因割り付けを行った。これにより試験片の溶解及び鋳込み条件は(表-3)のとおりとなる。

表-1 6因子2水準の内容

因子	水準		備考
	1	2	
A: Si量	5.0%	0.0%	金属 Si
B: 鋳型	生型	有機鋳型	AVライト有機鋳型
C: Mg量	1.0%	0.0%	金属 Mg
D: 溶湯処理	有	無	粒子微細化剤
E: 鋳込み重量	790g	680g	リブ厚さの大、小
F: 鋳込み温度	800℃	700℃	PR熱電対

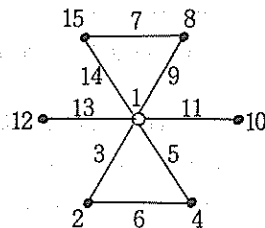


図-1 線点図

表-2 要因割り付け

列番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
因子	A	B	A×B	C	A×C	B×C	誤差	D	A×D	E	A×E	F	誤差	誤差	誤差

2-2 溶解装置及び試験片用鋳型

溶解装置は富士電波製MG-30型で、黒鉛ルツボを用いて溶解した。試験片用鋳型は大洋鋳機F-1型造型機用マッチプレート(400×250)に(写真-1)(図-2)のように、ひけ試験片用と湯流れ試験片用を同時に鋳込めるよう配置した。

表-3 実験条件

列番 要因 No.	1	2	4	8	10	12
	Si%	鋳型 種類	Mg%	溶湯 処理	鋳込 重量	鋳込温 度 ℃
1	5.0	生	1.0	有	A	800
2	5.0	生	1.0	-	B	700
3	5.0	生	-	有	A	700
4	5.0	生	-	-	B	800
5	5.0	有	1.0	有	B	800
6	5.0	有	1.0	-	A	700
7	5.0	有	-	有	B	700
8	5.0	有	-	-	A	800
9	-	生	1.0	有	A	800
10	-	生	1.0	-	B	700
11	-	生	-	有	A	700
12	-	生	-	-	B	800
13	-	有	1.0	有	B	800
14	-	有	1.0	-	A	700
15	-	有	-	有	B	700
16	-	有	-	-	A	800

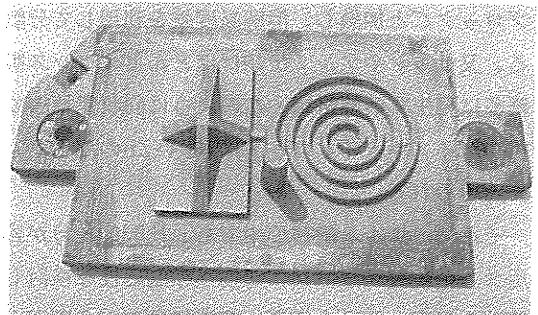


写真-1 F1型造型機用マチプレート(400×250)

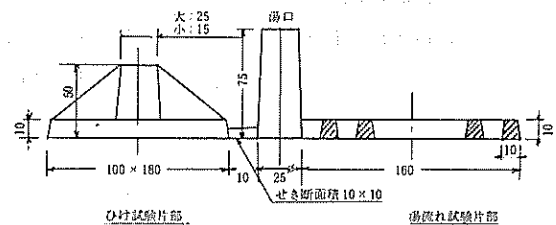


図-2 試験片用鋳型寸法

注) 鋳込重量 A = 790g, B = 680g

2-2 原材料及び添加材

溶解するアルミはサッシ腐材を5kg/チャージとし、同時に2鋳型を鋳込む。添加用Siは金属Si(JIS G 2912の1号、Si、98%)、Mgは95%金属Mgを使用した。

2-3 測定方法

・温度: 出湯温度はPt熱電対で800~850℃とし、トリベ中で静置して、設定温度になったところで鋳型に注湯した。

○ひけ：ひけ試験片の重量をメトラー社、PL-1200型天秤を用いて0.01gの精度で測定し、次に市販の保修用パテでひけ部分を埋め、重量増加分からひけ量を算出した。

○引張り強度：

引張り強度を測定するための試料の採取は(図-3)に示したひけ試験片(平面図)の一部から、2個採取し、旋盤加工により丸棒試験片(径7.0~10.0%)に加工した。引張強度は島津製作所製オートグラフ(DSS-10T型)を用いて求めた。

○硬さ試験

(図-3)の一部から試料を採取し、ブルネル硬さ試験機により(10/500)のスケールで、2個所を測定し、その平均値を求めた。

○結晶粒径

(図-3)の一部から試料を採取し、NIKON、VMS-FT-3型金属顕微鏡を用い、100倍の写真を撮影し、その写真中の結晶粒5個の長径、短径を%単位で測定し平均値を求めた。

○元素分析

(図-3)の一部から試料を採取し、島津製作所製発光分光分析装置(GVM-100型)を用いて、定量分析を行った。

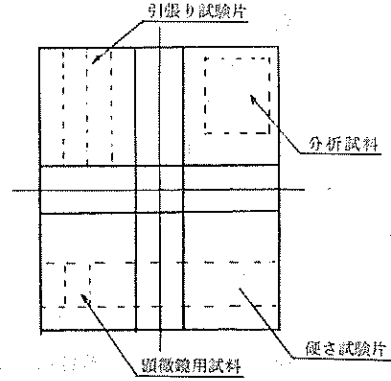


図-3 ひけ試験片からの試料採取位置

3. 試験結果

各試験片の特性値を測定してまとめたのが(表-4)である。これらの測定値をそれぞれ分散分析して、測定項目別に考察を加え、さらに組織試験も行った。

表-4 測定結果一覧表

項目 No	ひけ量 (g)	湯流れ性 (%)	引張り強さ (kg/mm ²)	硬さ H _B (10/500)	結晶粒径 (%)
1	1.88	130.50	9.28	40.90	18.00
2	0.69	78.10	9.74	38.30	16.00
3	0.00	82.00	10.93	41.70	25.10
4	1.61	123.20	12.48	39.70	14.80
5	0.31	84.30	9.40	43.10	27.00
6	0.65	28.20	9.39	40.20	14.10
7	1.23	40.80	11.48	49.20	19.80
8	1.61	89.10	12.30	47.70	18.90
9	3.01	128.60	14.05	37.90	15.00
10	1.88	60.00	12.16	40.00	19.40
11	7.57	50.50	9.43	23.30	13.40
12	2.97	118.60	9.65	25.40	17.20
13	1.79	103.30	12.49	37.70	14.00
14	2.32	30.00	12.21	36.20	11.20
15	5.26	38.40	9.24	21.60	14.50
16	4.56	100.20	9.80	25.30	27.20

3-1 ひげ要因

試験片のひげ欠陥の発生例を(写真-2)に示した。リブのクロス部分を中心に、下型面と、コーナー部分にひげが発生している。このひけた部分にパテを充てんし、充てんされたパテ重量でひげを定量化した。その値を分散分析したのが(表-5)である。

Si量が危険率1%で高度に有意で、Mg量と、Si量×Mg量の交互作用が5%の危険率で有意となり、鋳型はひげにあまり影響ないことがわかる。寄与率では、Si量が最も高く、Mg量、Mg量×Si量の交互作用の順であった。又、交互作用の母平均を推定すると(図-4)に示すとおりである。すなわち、最もひげの発生しやすいのは、SiとMgをとも添加しない場合で、ひげの少ないのは、SiとMgを両方とも添加した場合と言える。

表-5 ひげ量分散分析

要因	S	φ	V	F ₀	F'₀
A	28.57	1	28.57	25.16	26.28***
B	0.22	1	0.22	0.19	8.66*
C	9.42	1	9.42	8.31	
D	1.42	1	1.42	1.25	
E	2.15	1	2.15	1.89	
F	0.22	1	0.22	0.19	
A×C	6.81	1	6.81	6.00	
A×D	3.10	1	3.10	2.73	2.85
誤差	7.94	7	1.14	$V_e' = \frac{11.96}{11} = 1.09$	
	59.85	15			

***危険率1%で有意、*危険率5%で有意

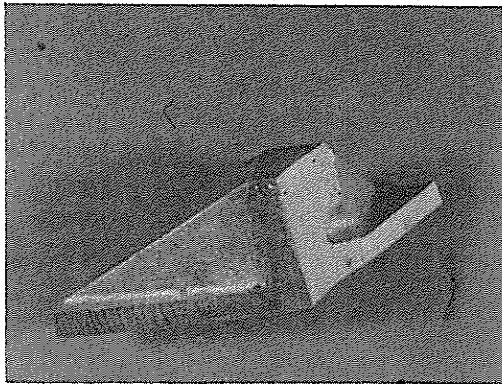


写真-2 ひげ欠陥発生例

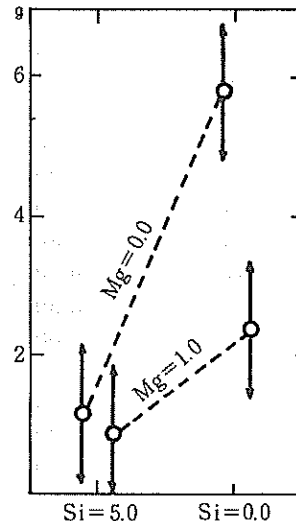


図-4 ひげの推定

3-2. 湯流れの要因

湯流れ試験片の結果を(写真-3)に示す。これらのうず巻全長を分散分析したのが(表-6)である。鋳型の種類と注湯温度が1%の危険率で高度に有意で、Si量×鋳型の交互作用が5%の危険率で有意であった。

さらに因子の母平均を推定したのが(図-5)で、鋳型では生型の方が湯流れが良く、鋳込温度は高温の800℃注湯が湯流れが良いことがわかる。又、Si量×鋳型の交互作用の母平均を推定すると、生型でしかもSiを添加した時が湯流れが良く、有機鋳型でSiを添加した時が最も湯流れが悪いとと言える。

表-6 湯流れ性分散分析

要因	S	φ	V	F ₀	F'₀
A	44.22	1	44.22	0.73	75.19***
B	4,134.49	1	4,134.49	68.58	
C	0.0	1	0.0	0	
D	60.06	1	60.06	0.99	
E	3.61	1	3.61	0.06	
F	13,794.50	1	13,794.50	228.80	250.68***
A × B	457.96	1	457.96	7.60	8.32*
A × C	129.96	1	129.96	2.15	
誤差	422.01	7	60.28	$V'_E = \frac{659.86}{12} = 54.99$	
	19,046.90	15			

***危険率1%で有意、*危険率5%で有意

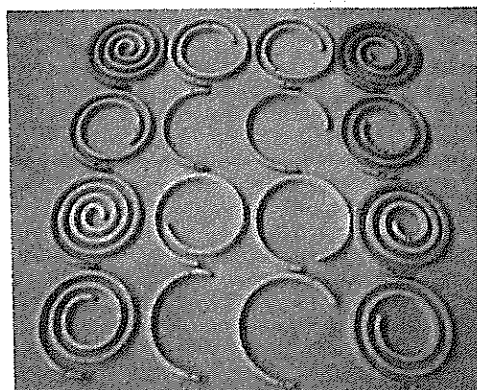


写真-3 湯流れ試験結果

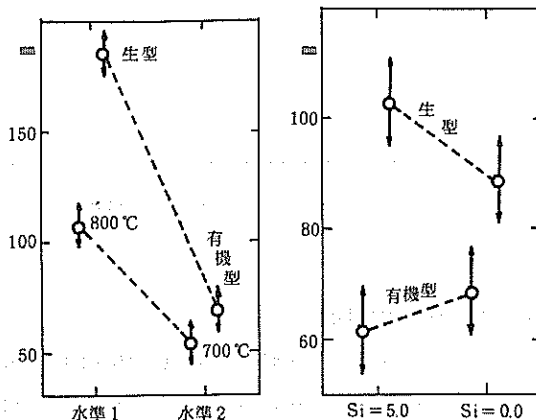


図-5 湯流れ推定

3-3 引張り強さの要因

引張り強さを分散分析したのが(表-7)である。Si量×Mg量の交互作用が1%の危険率で有意で、鋳込温度は5%の危険率で有意となっている。

交互作用の母平均を推定すると（図-6）のようになる。Siを添加せず、Mgを添加した場合が最も引張り強度が高く、危険率5%で平均値14.6~10.9kg/mm²となる。又、Siを添加し、Mgを添加しない場合が最も強度を低下させ、危険率5%で平均値11.3~7.6kg/mm²となる。

ここで、引張り強度に影響すると考えられるSi量や鋳型、溶湯処理等に有意性が見られないのは、ガス欠陥であるピンホールが多発しており、これが強度にバラツキを与えて、誤差項を大きくしたためと考えられる。

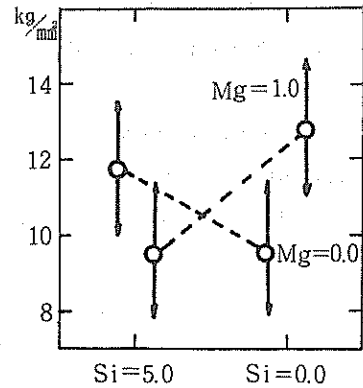


図-6 引張り強度推定

表-7 引張り強さ分散分析

要因	S	φ	V	F ₀	F'₀
A	1.02	1	1.02	3.06	3.46
B	0.12	1	0.12	0.36	
C	0.73	1	0.73	2.19	
D	0.13	1	0.13	0.39	
E	0.04	1	0.04	0.12	
F	1.48	1	1.48	4.45	
A×B	0.18	1	0.18	0.54	104.43※※
A×C	30.72	1	30.72	92.29	
誤差	2.33	7	0.33	$V'_E = \frac{3.53}{12} = 0.29$	
	36.73	15			

※※ 危険率1%で有意、※危険率5%で有意

3-4 硬さの要因

（表-8）はブルネル硬さ試験値（H_B（10/500））を分散分析したものである。Si量、Mg量、Si量×Mg量の交互作用、Si量×鋳型種類の交互作用がいずれも1%の危険率で有意である。寄与率はSi量が50.9%と最も高く、次にSi量×Mg量の交互作用、Si量×鋳型、Mg量の順であった。

又、交互作用の母平均を推定すると（図-7, 8）に示すようになる。いずれもSiを添加した場合に硬さは向上することがわかる。（図-7）でみると、Si添加で有機鋳型の場合が最も硬さは高く、危険率5%で平均値47~43H_Bとなる。（図-8）でみると、Siを添加して、Mgを添加しない場合が最も硬さを高め、危険率5%で平均値が47~42H_Bとなる。

表-8 硬さ(HB)分散分析

要因	S	∅	V	F ₀	F'₀
A	545.22	1	545.22	153.94	147.32 ***
B	11.90	1	11.90	3.36	27.56 ***
C	102.01	1	102.01	28.80	
D	0.42	1	0.42	0.11	
E	0.20	1	0.20	0.06	
F	3.24	1	3.24	0.91	
A × B	40.32	1	40.32	11.38	
A × C	324.00	1	324.00	91.48	87.54 ***
A × D	14.82	1	14.82	4.18	4.00
誤差	21.25	6	3.54	$V'_E = \frac{37.01}{10} = 3.70$	
	1,063.40	15			

*** 危険率1%で有意、*危険率5%で有意

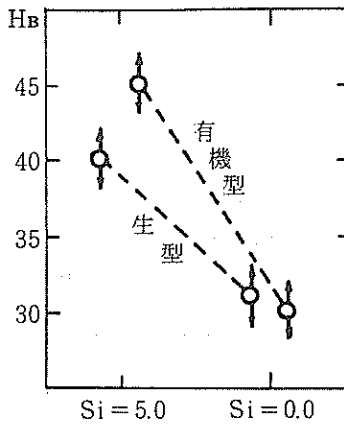


図-7 硬さの推定

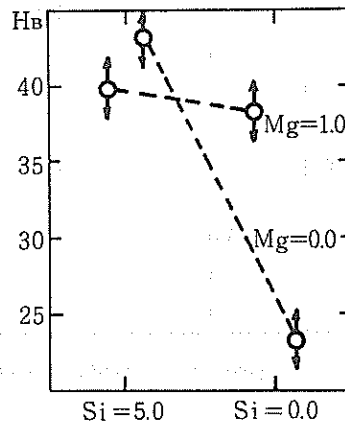


図-8 硬さの推定

3-5 結晶粒径の要因

(表-9)はマイクロ写真中の5個の粒子の平均直径を分散分析したもので、Si量×溶湯処理の交互作用だけが5%の危険率で有意となった。

3-6 要因の寄与率

各特性値に対し要因の影響度を寄与率でまとめたのが(表-10)である。

ひとと、結晶粒径は誤差が大きいが、他の特性値は誤差が小さく、主要因子をとらえている。湯流れは鋳込み温度、引張り強さは、Si量×Mg量の交互作用、硬さはSi量が最も大きく影響していることがわかる。溶湯処理と、鋳込重量はいずれの特性値にも影響を与えてないが、これは水準値の設定が不相当であったかも知れない。

表-9 結晶粒形分散分析

要因	S	ϕ	V	F_o	F'_o
A	29.70	1	29.70	1.50	7.29**
B	3.80	1	3.80	0.19	
C	16.40	1	16.40	0.83	
D	4.00	1	4.00	0.20	
E	0.0	1	0.0	0	
F	21.62	1	21.62	1.09	
A × D	122.10	1	122.10	6.15	
誤差	158.80	8	19.85	$V_e = \frac{234.34}{14} = 16.74$	
	356.44	15			

***危険率1%で有意、*危険率5%で有意

表-10 各要因の影響(寄与率)

要因	ひけ量	湯流れ性	引張り強さ	硬さ H_B	結晶粒径
A: Si量	46.3 ***	21.4 ***	2.0	50.9 ***	66.4
B: 鑄型					
C: Mg量	14.3 ***			9.2 ***	
D: 溶湯処理					
E: 鑄込重量					
F: 鑄込温度		72.1 ***	3.2 *		
A × B		2.1 *		3.4 ***	
A × C	10.0 ***		82.8 ***	30.1 ***	
A × D	3.8			1.0	
誤差	27.3	4.3	12.0	5.2	

***危険率1%で有意、*危険率5%で有意

3-7 組織試験

(写真4~7)にSiとMgを中心にグループ分けして、マイクロ組織写真と、化学成分、鑄込み条件、鑄込重量等を併記してまとめた。

溶湯は原材料としてサッシ材を使用しているため、もともとFeを0.3%程度含有しているうえに溶解時にトリベ等からのFeの混入がある。従って、Si、Mgを添加しない場合でも(写真-7)のような鑄造組織となる。これは α (Al)相の白地の粒界付近に $FeAl_3$ を晶出していると考えられる。又、Si、Mgを添加していくと、(写真6~4)のように、粒界の黒色部が増加していくのがわかる。これはSi、Mg、Feを中心にした不純物が、 α (Al)相の粒界に晶出している部分で、その主な組織は、板状Siの相、や球状の Mg_2Si 相、骸骨状の $K_5(Al_{15}Fe_6Si_5)$ 相、骸骨状の $K_5(Al_{15}Fe_6Si_5)$ 相、棒状の $K_6(Al_4FeSi)$ 相など、確認することができる。

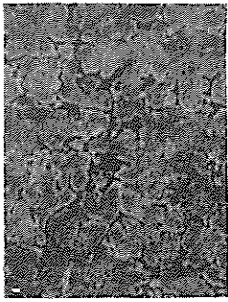
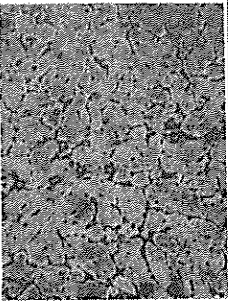
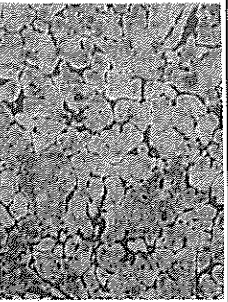
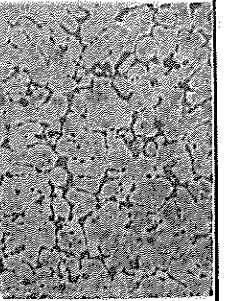
ミクロ組織				
	試料 No	1	2	5
Si 量	4.41 %	4.72 %	4.97 %	4.98 %
Mg 量	3.22 %	3.59 %	3.70 %	4.27 %
鑄 型	生 型	生 型	有機鑄型	有機鑄型
鑄込温度	800 °C	700 °C	800 °C	700 °C
鑄込重量	790 g	680 g	680 g	790 g
引張強さ	9.3	9.7	9.4	9.4
組 織	α (Al) Si, Mg ₂ Si	α (Al) Si, Mg ₂ Si	α (Al) Si, Mg ₂ Si	α (Al) Si, Mg ₂ Si

写真 - 4 Si + Mg 添加組織

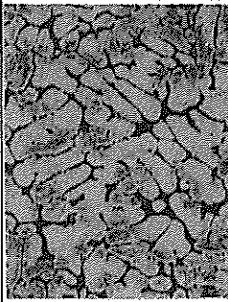
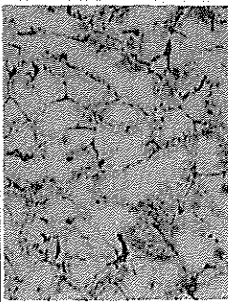
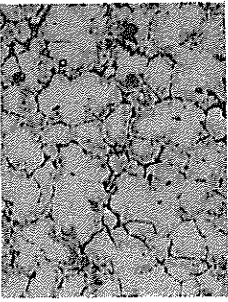
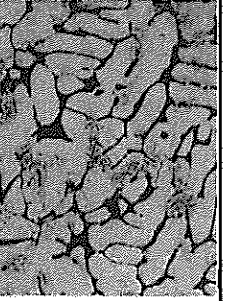
ミクロ組織				
	試料 No	3	4	7
Si 量	3.53 %	4.19 %	3.51 %	4.37 %
Mg 量	0.31 %	0.30 %	0.29 %	0.36 %
鑄 型	生 型	生 型	有機鑄型	有機鑄型
鑄込温度	700 °C	800 °C	700 °C	800 °C
鑄込重量	790 g	680 g	680 g	790 g
引張強さ	10.9	12.5	11.5	12.3
組 織	α (Al) Si, Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆	α (Al) Si, Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆	α (Al) Si, Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆	α (Al) Si, Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆

写真 - 5 Si 添加組織

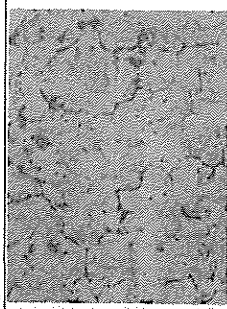
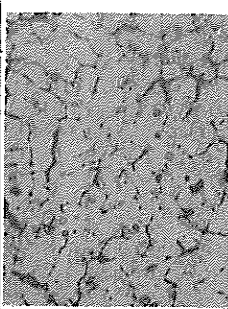
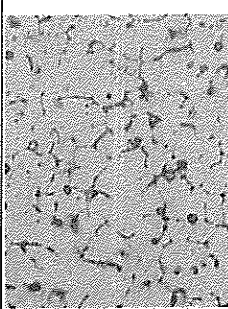
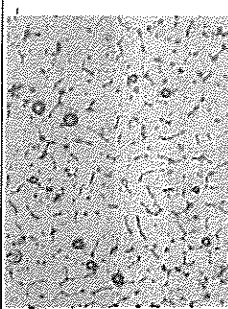
ミクロ組織				
試料 No	9	10	13	14
Si 量	0.19 %	0.29 %	0.25 %	0.23 %
Mg 量	2.72 %	2.92 %	2.90 %	3.41 %
鑄 型	生 型	生 型	有機鑄型	有機鑄型
鑄込温度	800 °C	700 °C	800 °C	700 °C
鑄込重量	790 g	680 g	680 g	790 g
引張強さ	14.1	12.2	12.5	12.2
組 織	α (Al) Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆	α (Al) Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆	α (Al) Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆	α (Al) Mg ₂ Si, K ₅ , K ₆

写真-6 Mg 添加組織

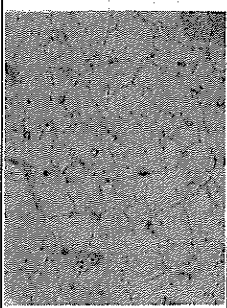
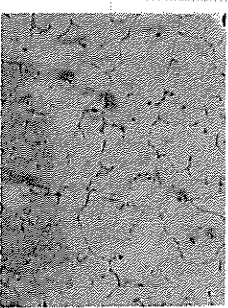
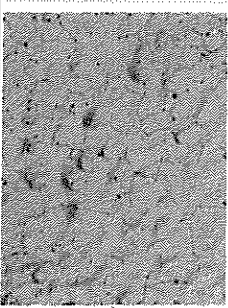
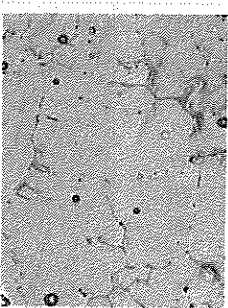
ミクロ組織				
試料 No	11	12	15	16
Si 量	0.02 %	0.14 %	- %	0.16 %
Mg 量	0.15 %	0.26 %	0.15 %	0.27 %
鑄 型	生 型	生 型	有機鑄型	有機鑄型
鑄込温度	700 °C	800 °C	700 °C	800 °C
鑄込重量	790 g	680 g	680 g	790 g
引張強さ	9.4	9.7	9.2	9.8
組 織	α (Al) FeAl ₃	α (Al) FeAl ₃	α (Al) FeAl ₃	α (Al) FeAl ₃

写真-7 Si, Mg 無添加組織

4. 結 言

サッシ廃材を鋳物に適応するため、サッシを主原料に、 $L_{16}(2^{15})$ 直交配列表を用いて、溶解実験を行った。6因子と5特性値の関係と、組織試験の検討を行った結果次のことが明らかとなった。

- 1) ひけに対し、Si量が最も大きく影響し、次にMg量が影響を与えている。SiとMgを添加しない場合が最もひけの発生が大きい。
- 2) 湯流れに対しては、鋳型と鋳込温度が大きく影響する。有機鋳型より生型の方が湯流れは良く、鋳込温度は高い方が良い。Si量×鋳型の交互作用では、Siを添加して生型に注湯した時が最も湯流れが良かった。
- 3) 引張り強度には、Si量×Mg量の交互作用が大きく影響する。最も強度が高いのは、Siを添加せず、Mgだけ添加した時である。
- 4) 硬さに対しては、Si量、Mg量、Si量×Mg量の交互作用、Si量×鋳型の交互作用がいずれも大きく影響し、Siを添加すると硬さは増す傾向にある。
- 5) 結晶粒径の定量化は十分でなかったが、Si量×溶湯処理の交互作用の影響が確認できた。
- 6) 寄与率でみると、Si量とMg量、あるいはその交互作用が各特性値に大きく影響しているのがわかる。
- 7) サッシ廃材を溶解した場合のマイクロ組織が明らかとなった。すなわち、無添加の状態では $\alpha(\text{Al})$ 相と粒界に FeAl_3 を晶出している。

Si、Mgを添加すると、 $\alpha(\text{Al})$ の粒界付近に、Si、 Mg_2Si 、 $\text{K}_5(\text{Al}_{15}\text{Fe}_6\text{Si}_5)$ 、 $\text{K}_6(\text{Al}_4\text{FeSi})$ 等を晶出し粒界が明瞭となる。

最後に本研究を進めるにあたり、御指導、御助言をいただいた名古屋工業技術試験所 太田英明主任研究官と琉球大学 糸村昌祐助教授に対し深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 津村、「アルミニウム二次合金について」総合鋳物、82, 12.
- 2) 和泉、諸住、寺沢、「金属組織写真集、非鉄材料編」、丸善、1972.
- 3) 石川、「実験計画法(上)、(下)」(株)東京化学同人、1971.
- 4) 石島、「溶解、鋳込条件の相違による省エネルギーと不良対策」、1982、技術開発研究補助事業成果普及講習会用テキスト

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。