Al-Mg-Si 系合金の研究 (第5報)

機械的性質および電気伝導度におよぼす微量マンガン、クロム、
ニッケル、亜鉛、スズ、アンチモン、鉛およびコバルト添加の影
響について

寺井 士郎* 馬場 義雄**

Study on the aluminium-magnesium-silicon alloy (5th Report)

(UDC 669.715'721'782-12)

Effect of the small addition of manganese, chromium, nickel, zinc, tin, antimony, lead and cobalt
on the mechanical properties and electrical conductivity of Al-Mg-Si ternary alloy

TERAI Shiro* BABA Yoshio**

This is to report on the study of the effect of the small addition of manganese, chromium, nickel, zinc, tin, antimony, lead and cobalt on the mechanical properties and electrical conductivity of Al- (Mg+Si $\approx$ 1.1%) ternary alloy with different Mg/Si weight ratio.

The findings are as follows:

(1) The addition of manganese and chromium gives the largest effect on the decrease of electrical conductivity of the extruded products of Al-Mg-Si alloy, especially chromium, of all the elements. It seems due to the difficulty of precipitating chromium from the ingot in supersaturated solid solution.

(2) In a practical view point, the properties of extruded product of Al-Mg-Si alloy added with less than 0.03% manganese or chromium barely can meet the requirement of 2EC-T6 or 6101-T6 standard, where the electrical conductivity of 55% IACS and ultimate tensile strength of 20.3 kg/mm².

(3) Zinc besides manganese and chromium fairly increases the strength of as-extruded products of Al-Mg-Si alloy. It can not be explained by the extrusion texture "press-effect" because the structure of extruded products containing zinc shows enough recrystallization in the state of as-extruded. Therefore the closer investigation on the effect of zinc on the precipitation of Mg₂Si ("hardenability") may be required.

(4) The mechanical properties and electrical conductivity of extruded products of Al-Mg-Si alloy are not particularly influenced by the addition of nickel, tin, antimony, lead and cobalt in the present experiment.

(Received Mar. 25, 1963)

1. 緒 言

前報に引続いて、本報では Al-Mg-Si 系合金を導電材料として使用する場合の機械的性質ならびに電気伝導度におよぼす微量添加元素の影響として、マンガン、クロム、ニッケル、亜鉛、スズ、アンチモン、鉛およびコバルトをそれぞれ単独で最大 0.6% 添加した場合の影響を調べた。マンガンおよびクロムは、この系合金の電気伝導度を低下する元素であるが、工業的にはどの程度の範囲まで許容し得るかが問題である。すなわち導電材料としてこの系合金を使用する場合引張強さで 20.3 kg/mm²

と電気伝導度 55% IACS を同時に保証しうる材料として ALCOA 社 2 EC (1962 年版ハンドブックによる) Reynolds 社 6101 (1961 年版ハンドブックによる) ALCAN 社 D50S (ALCAN ALLOY DATA SHEET 1962 年版による) を参照しても、ALCOA 社ではマンガンおよびクロムのそれぞれを 0.01% 以下に押え、Reynolds 社は、それぞれを 0.03% 以下に押え、ALCAN 社では、他の不純物の項でそれぞれ 0.03% 以下に押えている。DIN EAlMgSi によれば Cr+Mn+Ti+V の合計を 0.03% 以下に押えており、かなり厳重な許容制限であるといわねばならない。筆者らはこの点に注目して、いわゆる 55EC

* 住友軽金属工業㈱研究部主任研究員工博 Sumitomo Light Metal Industries, Ltd., Tech., Dept., Dr., Eng.

** 住友軽金属工業㈱研究部 Sumitomo Light Metal Industries, Ltd., Tech., Dept.

Table 1 Chemical composition of test specimens

	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Fe	Zn	Ti
A 1	0.85	0.37	<0.01	<0.01	0.01	0.11	0.01	<0.01
2	0.69	0.48	<0.01	<0.01	0.01	0.11	0.01	<0.01
3	0.63	0.51	<0.01	<0.01	0.01	0.11	0.01	<0.01
	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Fe	Zn	Ti
B 1	0.85	0.36	0.03	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01
2	0.85	0.36	0.11	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01
3	0.86	0.35	0.31	—	—	—	—	—
4	0.83	0.35	0.52	—	—	—	—	—
5	0.70	0.41	0.03	—	—	—	—	—
6	0.70	0.40	0.12	—	—	—	—	—
7	0.72	0.41	0.34	—	—	—	—	—
8	0.69	0.43	0.53	—	—	—	—	—
9	0.64	0.49	0.03	—	—	—	—	—
10	0.63	0.49	0.12	—	—	—	—	—
11	0.64	0.51	0.31	—	—	—	—	—
12	0.64	0.45	0.53	—	—	—	—	—
	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Fe	Zn	Ti
C 1	0.83	0.32	0.00	0.03	0.01	0.09	0.02	0.01
2	0.85	0.33	0.00	0.09	0.01	0.09	0.02	0.01
3	0.83	0.32	—	0.28	—	—	—	—
4	0.79	0.29	—	0.45	—	—	—	—
5	0.72	0.42	—	0.03	—	—	—	—
6	0.71	0.41	—	0.08	—	—	—	—
7	0.72	0.40	—	0.28	—	—	—	—
8	0.69	0.42	—	0.52	—	—	—	—
9	0.61	0.47	—	0.03	—	—	—	—
10	0.61	0.46	—	0.07	—	—	—	—
11	0.60	0.45	—	0.28	—	—	—	—
12	0.63	0.47	—	0.46	—	—	—	—
	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	Mn	Cr	Zn
D 1	0.81	0.34	0.01	0.10	0.12	0.00	0.00	0.01
2	0.84	0.32	—	—	0.31	—	—	—
3	0.83	0.32	—	—	0.54	—	—	—
4	0.74	0.41	—	—	0.12	—	—	—
5	0.76	0.40	—	—	0.34	—	—	—
6	0.75	0.42	—	—	0.56	—	—	—
7	0.61	0.47	—	—	0.12	—	—	—
8	0.62	0.47	—	—	0.36	—	—	—
9	0.61	0.50	—	—	0.57	—	—	—
	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Ti
E 1	0.85	0.33	0.10	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00
2	0.84	0.34	—	—	—	0.36	—	—
3	0.87	0.32	—	—	—	0.56	—	—
4	0.72	0.40	—	—	—	0.04	—	—
5	0.74	0.42	—	—	—	0.37	—	—

	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Ti
6	0.72	0.42	—	—	—	0.59	—	—
7	0.63	0.47	—	—	—	0.05	—	—
8	0.63	0.50	—	—	—	0.33	—	—
9	0.62	0.47	—	—	—	0.52	—	—
	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Sn	Zn
F 1	0.85	0.31	0.10	0.10	0.00	0.01	0.13	0.00
2	0.85	0.29	—	—	—	—	0.30	—
3	0.85	0.30	—	—	—	—	0.47	—
4	0.77	0.38	—	—	—	—	0.11	—
5	0.74	0.39	—	—	—	—	0.28	—
6	0.76	0.37	—	—	—	—	0.47	—
7	0.64	0.46	—	—	—	—	0.11	—
8	0.64	0.41	—	—	—	—	0.27	—
9	0.62	0.46	—	—	—	—	0.53	—
	Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Cr	Mn	Sb
G 1	0.85	0.34	0.10	Tr	Tr	Tr	Tr	0.04
2	0.82	0.31	—	—	—	—	—	0.10
3	0.81	0.32	—	—	—	—	—	0.18
4	0.72	0.39	—	—	—	—	—	0.10
5	0.70	0.43	—	—	—	—	—	0.17
6	0.73	0.38	—	—	—	—	—	0.28
7	0.64	0.51	—	—	—	—	—	0.10
8	0.62	0.49	—	—	—	—	—	0.15
9	0.62	0.51	—	—	—	—	—	0.13
	Mg	Si	Pb	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn
H 1	0.82	0.31	0.14	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.79	0.27	0.34	—	—	—	—	—
3	0.78	0.30	0.52	—	—	—	—	—
4	0.69	0.40	0.08	—	—	—	—	—
5	0.69	0.46	0.36	—	—	—	—	—
6	0.68	0.43	0.54	—	—	—	—	—
7	0.62	0.50	0.12	—	—	—	—	—
8	0.66	0.48	0.34	—	—	—	—	—
9	0.60	0.49	0.48	—	—	—	—	—
	Mg	Si	Co	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn
I 1	0.80	0.33	0.10	0.09	0.0	0.00	0.0	0.00
2	0.83	0.31	0.27	—	—	—	—	—
3	0.82	0.36	0.49	0.14	Tr	Tr	Tr	0.01
4	0.74	0.43	0.08	—	—	—	—	—
5	0.71	0.43	0.29	—	—	—	—	—
6	0.70	0.42	0.51	0.15	Tr	Tr	Tr	0.01
7	0.62	0.48	0.11	—	—	—	—	—
8	0.59	0.51	0.36	—	—	—	—	—
9	0.62	0.51	0.49	0.16	Tr	Tr	Tr	0.01

Table 2 Melting and casting condition of the test ingots.

Melting temperature (°C)	Chlorination temperature (°C)	Casting temperature (°C)	Dimension of mold (mm)	Temperature of mold (°C)
760	730	720	68φ×170 l	100

Table 3 Extruding condition of the test specimens

Temperature of billet (°C)	Temperature of container (°C)	Temperature of die (°C)	Dimension of die hole (mm)	Extruding speed (m/min)
480	350	350	10φ×3 holes	10

Fig. 1(a) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. As extruded condition.

の規格を満足させるためには、この系合金のマンガンおよびクロムをどの程度に押えたらよいかを調査することとし、その他の元素については、電気伝導度をあまり低下することがないと予想されるので、むしろ機械的性質にどのような効果、あるいは影響を与えるものであるかを期待して本実験を行なった。

2. 実験材料

実験材料として、アルミニウム地金には、99.7%純度のものを使用し、マンガンの添加には、Al-4% Mn 合金を、クロムの添加には Al-5% Cr 合金を、ニッケル

の添加には、Al-15% Ni を、コバルトの添加には、Al-5% Co 合金を使用し、その他の元素はすべて単独で添加した。

3. 実験方法および装置

2項にのべた実験材料を使用して、Table 1 に化学成分を示した試料を Table 2 に示す条件に溶製し、Table 3に示す条件で押出し加工を行なった。このようにして得た材料をすでに報告した方法によつて実験を行なった。Table 1 に示した化学成分で明らかごとく、本報の実験では、第4報と同じく、含有するマグネシウムとケイ

Fig. 1(b) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. As extruded condition.

素量との合計を1.1%にして、マグネシウムとケイ素が $Mg_0.8Si$ 量比によつて理論的に算定されるよりマグネシウム量の多い過剰マグネシウム域のもの ($Mg0.8\%$ $Si0.3\%$) 理論的に算定されるマグネシウムとケイ素の量比に等しいもの ($Mg0.7\%$ $Si0.42\%$) および理論的に算定されるマグネシウムとケイ素の量比よりケイ素量の多い過剰ケイ素量のもの ($Mg0.6\%$ $Si0.5\%$) の3合金に上述の元素を添加した。

4. 実験結果

4.1 押出しのままの性質におよぼす添加元素の影響

Fig. 1(a)に押出しのままの引張強さにおよぼす添加元素の影響について調査した結果を示した。この結果によるとマンガンは Al-Mg-Si 系合金の Mg/Si の比に関係なく引張強さを増加させ、本報告に調査した添加元素のなかでは、その効果は最も著しい。クロムは、マンガンほどではないが、各領域の合金についてマンガンと同様の傾向を示し引張強さを増加させている。ニッケルは、押出しのままの引張強さの増加には、マンガン、クロムが示したような強度増加はないが、低下させることもなかった。亜鉛およびスズは、過剰ケイ素域の合金に添加

した場合に引張強さを増加させる傾向が認められた。アンチモンは、この系合金の押出しのままの引張強さにはほとんど影響を認めない。鉛は若干ではあるが過剰ケイ素域の合金に添加した場合に引張強さを向上させることが認められた。

Fig. 1(b)に押出しのままの電気伝導度におよぼす添加元素の影響について調査した結果を示した。この結果によると、マンガンは Al-Mg-Si 系合金の Mg/Si の比に関係なく、電気伝導度を低下させる。クロムは、マンガンよりさらに著しく電気伝導度を低下させる傾向が強く、本実験に示した添加範囲では0.5%でもまだ低下の程度を飽和させることは困難のように思われる。ニッケルおよび亜鉛はいずれも Al-Mg-Si 系合金の電気伝導度に対しては同じような傾向を示しており、最初の0.1%程度の添加が特に電気伝導度低下の傾向が強いようである。スズおよび鉛は、過剰マグネシウム域の合金または balanced 合金についてはほとんど影響を与えないが、過剰ケイ素域の試料では若干電気伝導度を低下させる傾向が認められた。アンチモンおよびコバルトは Mg/Si の量比にかかわらず電気伝導度の低下を示した。

4.2 熱処理後の性質におよぼす添加元素の影響

Fig. 2(a) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Annealed condition.

Fig. 2(b) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Annealed condition.

Fig. 3(a) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Precipitated at 230°C for 2 hrs after extrusion.

Fig. 3(b) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Precipitated at 230°C for 2 hrs after extrusion.

Fig. 4(a) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Aged at room temperature for 2 weeks after solution heat treatment at 520°C.

Fig. 4(b) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Aged at room temperature for 2 weeks after solution heat treatment at 520°C.

Fig. 5(a) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Precipitated at 175°C for 8 hrs immediately after solution heat treatment at 520°C.

Fig. 5(b) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Solution heat treated at 520°C, and then precipitated at 175°C for 8 hrs after aging at room temperature for 2 weeks.

Fig. 5(c) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloy with different Mg/Si ratio. Solution heat treated at 520°C, and then precipitated at 175°C for 20 hrs after aging at room temperature for 2 weeks.

Fig. 5(d) Effect of additional elements on the tensile properties of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio. Precipitated at 230°C for 2 hrs immediately after solution heat treatment at 520°C.

Fig. 6(a) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio.

Precipitated at 175°C for 8 hrs immediately after solution heat treatment at 520°C.

Fig. 6(b) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio.

Solution heat treated at 520°C, and then precipitated at 175°C for 8 hrs after aging at room temperature for 2 weeks.

Fig. 6(c) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratio.
Solution heat treated at 520°C, and then precipitated at 175°C for 20 hrs after aging at room temperature for 2 weeks.

Fig. 6(d) Effect of additional elements on the electrical conductivity of Al-Mg-Si alloy with different Mg/Si ratio.
Precipitated at 230°C for 2 hrs immediately after solution heat treatment at 520°C.

Fig. 7 Relation between tensile strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys containing 0.3% additional element.

Solution heat treated at 520°C, and then precipitated at 230°C for 2 hrs after aging at room temperature for 2 weeks.

4.2.1 押出し後焼鈍した場合の性質

Fig.2(a)に押出し後焼鈍した材料(400°Cで2時間加熱後26°C/hrの冷却速度で室温まで徐冷)の引張強さに対する添加元素の効果を示した。焼鈍後においてもマンガンを追加した材料は今回調査した添加元素のなかでは最も焼鈍しされ難い傾向を示している。クロムはマンガンほどではないが、balanced Mg₂Si域の合金または過剰ケイ素域の合金に添加した場合焼鈍しされがたい傾向を示した。ニッケルおよび亜鉛を追加した材料は押出し後焼鈍した場合にはそれぞれの元素を追加していない材料と比較してほとんど差は認められない。さらにスズ、鉛、アンチモンおよびコバルトもAl-Mg-Si系合金の焼鈍後の引張強さにはほとんど影響は認められなかった。

Fig.2(b)は同様の結果を電気伝導度についてまとめた図であるが、クロムが添加された試料は焼鈍後も電気伝導度の回復がほとんど認められなかったが、マンガンを添加した試料は、回復の傾向を示している。クロム、マンガン以外の添加元素も若干電気伝導度を低下させる傾向が認められた。

4.2.2 押出し後の析出処理による性質の変化

つぎに、押出し材を析出処理のみ行なった場合の性質についてのべる。**Fig.3(a)**はAl-Mg-Si系合金を押出し後230°Cで2時間析出処理を行なった場合の引張強さにおよぼす添加元素の影響を示す図である。マンガン0.5%程度添加した材料ではAl-Mg-Si系に比較して強さは数kg/mm²強いが押出しのままの引張強さの析出処理による向上にはあまり効果を認めない。特に0.1%までのマンガン含有試料は、析出処理にもとづく硬化量は少ない。クロムおよびニッケルも析出処理による引張強さ

の向上にはたいした効果は認められなかった。亜鉛を過剰ケイ素域の合金に添加した場合にやや引張強さの向上に効果のあることが認められた。スズ、鉛、アンチモンおよびコバルトは析出処理にもとづく引張強さの向上にはほとんど効果を認めない。

Fig.3(b)は同様の実験を電気伝導度について行なった結果で、クロムおよびマンガン、特にクロムは析出処理によつても電気伝導度の回復はきわめて微少である。Mg/Si量比との関係については過剰マグネシウム域に添加された場合に電気伝導度低下の傾向が強く現われている。クロムおよびマンガン以外の添加元素では本系合金の押出し材を析出処理した場合の電気伝導度におよぼす影響は、ほとんど認められない。

4.2.3 溶体化処理後に室温時効を行なった場合の性質

つぎに、溶体化処理後の室温時効による性質の変化についてのべる。**Fig.4(a)**はAl-Mg-Si系合金押出し材を520°Cで1時間溶体化処理を行なった後、室温で2週間時効させた場合の引張強さにおよぼす添加元素の影響について示したものである。図によると、マンガンおよびニッケルは本系合金の過剰ケイ素領域に添加した場合引張強さにやや向上の効果を示している。クロム、アンチモン、コバルト、鉛も引張強さを向上させているが、その程度は前者に比較して少ない。なお、スズの添加は引張強さを低下させることが認められた。**Fig.4(b)**は同様の実験を電気伝導度についてまとめた結果である。図によるとクロムはこの系合金の焼入れ室温時効材の電気伝導度を最も著しく低下させ、マンガンがこれにつぎその他の元素の添加による電気伝導度の低下は前者の添加による低下に比べるとわずかであることが認められた。

4.2.4 溶体化処理後の焼もどしによる性質の変化

溶体化処理後直ちに、あるいは2週間の室温時効を行なった後175℃で8時間および20時間、230℃で2時間焼もどしを実施した場合の引張強さにおよぼす添加元素の影響を Fig.5 (a)~(d)に示した。Fig. 5(a)は520℃で1時間溶体化処理を行なった後、直ちに175℃で8時間焼もどしを行なった場合の引張強さと添加元素の影響を示す図である。図によるとマンガン、ニッケル、クロムおよびコバルトが引張強さを向上させ、亜鉛、鉛は影響がなくアンチモンおよびスズは引張強さを減少させる傾向を示している。耐力はクロムあるいはマンガンなどを約0.5%程度添加した場合に若干の向上を認められる程度であった。Fig. 5(b)はFig.5(a)に示したのと同様の溶体化処理を実施した後に2週間室温で時効させた後析出処理を行なった場合の結果であるが、ニッケルを添加した材料、特に過剰ケイ素域に添加した材料が引張強さの増加を示している。クロムおよびマンガンの引張強さの向上に効果がある。その他の元素については特に引張強さを著しく向上させる傾向は認められなかった。Fig. 5(c)は520℃で1時間溶体化処理を実施した後、2週間の室温時効を行ない、さらに175℃で20時間焼もどし処理を実施した場合の結果で175℃で8時間時効させた場合より一般に引張強さは向上しているが、クロムおよびマンガンを0.5%程度添加した材料は引張強さの低下を示し、この系合金の時効過程において過時効現象を起しやすい傾向を示している。他の添加元素は、Mg/Si量比、添加量の相異によつて必ずしも同一の傾向を示さないがニッケルの添加が引張強さの増加に最も効果があるように見受けられ、ニッケル以外の元素は特に大きな影響を与えないことが認められた。Fig. 5(d)はFig.5(c)に示したのと同様の溶体化処理を実施したあと直ちに230℃で2時間時効処理を行なった場合の結果であるが、この程度の温度ですべての試料は過時効を受け一般に引張強さは低下する。添加元素の中で特に引張強さの増加に効果のある元素を選べば、ニッケル、スズその他の元素は特に大きな影響を与えるものでないことが認められた。以上に述べたのと同様の実験を電気伝導度について調査した結果を Fig. 6(a)~(d)に示した。

Fig. 6(a)は溶体化処理後に175℃で8時間時効させた場合の結果でクロムおよびマンガンは電気伝導を著しく低下させているが、その他の元素は電気伝導度に大きな影響を与えていない。Fig.6(b)は同様のことを溶体化処理後2週間室温時効させてから実施した結果であるが、クロムを除いては電気伝導度に大きな影響を与えることは認められなかった。Fig. 6(c)は、溶体化処理後直ちに175℃で20時間後焼もどした場合の結果で、スズを添加した試料に若干電気伝導度の向上が認められた以外は特

に電気伝導度を向上させるような元素は認められなかった。クロムおよびマンガンはこの場合でも電気伝導度の低下が著しい。Fig. 6(d)は、同様の溶体化処理を実施した後直ちに230℃で2時間焼もどしを行なった場合の結果であるが、クロムおよびマンガンを添加した試料以外の試料はいずれも電気伝導度に大きな影響を与えるようなことはなかった。クロムおよびマンガンは、本系合金の電気伝導度の低下をきたすが、特にクロムはマンガンの場合の約3倍に近い減少を示すことが明らかとなった。

以上実験の結果を前報に報告した銅、鉄、カドミウムおよびジルコニウムと共に示したのが Fig. 7である。この表は各添加元素を一定としてそれぞれAl-Mg-Si合金(Mg + Si=1.1%)の過剰マグネシウム域、balanced Mg₂Si域ならびに過剰ケイ素域に添加し、押出し後520℃で30分間の溶体化処理を実施し、2週間室温時効後250℃で2時間焼もどしを行なった場合の結果を横軸に引張強さ、縦軸に電気伝導度を取り整理して見たものである。この表でわかるように、電気伝導度を添加元素によつてさらに改善させることは非常に困難であることが明らかである。しかし電気伝導度もあまり低下させずに(現行2ECの規格の電気伝導度を保持する程度)強度の増加をはかることは可能であることがわかった。

5. 結果に対する検討

押出しのままの強さを増加させる元素として、マンガン、クロム、亜鉛およびコバルトがある。マンガンおよびクロムが押出し後の強さを増加させる原因として、押出し材の再結晶温度を上昇させ、押出し特性を助長していることが考えられるので、押出しのままの顕微鏡組織を検討して見た。

Photo.1(a)~(c)はAl-(Mg+Si≒1.1%)合金のMg/Si量比の異なる領域にマンガンを添加した場合の結果であり、Photo.2(a)~(c)は同じくクロムについて行なった実験結果である。両者とも未再結晶組織である。マンガンは全面的に析出したような形であり、クロムでは非常に繊維状組織が存在している。押出しのままの比較的低いニッケルを含有した試料の顕微鏡組織をPhoto.3(a)~(c)に示した。Photo. 3によつて明らかごとく、ニッケルを含有した試料は再結晶組織である。またPhoto.4(a)~(c)に示したごとく亜鉛を添加した試料はニッケルを含有した試料と同様に再結晶組織であるにもかかわらず、押出しのままの強度がすぐれているのは、Al-Mg-Si系合金の焼きの入りやすさに関係しているように思われる。亜鉛はマグネシウムとMgZn₂なる金属間化合物をつくりこれ自体がアルミニウムに対する固溶度変化にもとづいて硬化要素となり得るのであるが、本実験においては、

Photo. 1 Micro-structures of extruded Al-Mg-Si alloys containing 0.3% Mn.

Photo. 2 Micro-structures of the extruded Al-Mg-Si alloy containing 0.3% Cr. ($\times 100$)

Photo. 3 Micro-structures of the extruded Al-Mg-Si alloys containing 0.3% Ni.

過剰マグネシウム側で過剰のマグネシウムと MgZn_2 なる化合物をつくつても、この MgZn_2 の量はきわめてわずかであつて固溶体に入つてしまうためあまり問題とならない。また亜鉛添加による強度の増加が過剰マグネシウム側よりも過剰ケイ素側において顕著であることを考えると、亜鉛添加による硬化原因については Al-Mg-Si 系合金の焼入れ性の面からも考える必要があるように思

As-extruded
(Mg 0.8, Si 0.3)

Precipitated at 230°C
or 2 hrs after extrusion

(Mg 0.7, Si 0.42)

(Mg 0.6, Si 0.5)

Photo. 4 Micro-structures of the extruded Al-Mg-Si alloys containing 0.3% Zn. ($\times 100$)

われる。これについては別途検討の予定である。

マンガンおよびクロムは共に Al-Mg-Si 系合金の電気伝導度を著しく低下せしめるが、押し出しま、焼鈍し材および押し出し後焼もどし材にクロムを含む場合特にこの傾向が顕著である。この原因については、クロムを添加した鑄塊は予備加熱（480°C $\times$ 24hrs）によつてもクロムが析出しがたく（この傾向は別の目的で行つた著者達の研究結果で明白）強制固溶体のままで押し出される傾向が強く、電気伝導度の低下が大きくなつたのではないかと思われる。

これに関連して 2 EC あるいは 6101 合金におけるマンガンおよびクロムの含有量に対する制限については、**Fig. 6(d)** に示したごとくマンガンおよびクロムをそれぞれ 0.03% 含有した合金について、520°C で溶体化処理後 230°C で 2 時間焼もどし処理した場合、過剰マグネシウム域では電気伝導度 55% 以下となり、balanced Mg_2Si あるいは過剰ケイ素域でもクロム添加材は電気伝導度 55% を下まわるぎりぎりの値であつた。マンガンおよびクロムの極微量（0.03% 以下）の影響あるいは両元素の共存効果については更に検討したい。

6. 結 言

本報告では、マグネシウムとケイ素の量比を過剰マグネシウム域、balanced Mg_2Si 域および過剰ケイ素域の 3 域にわけた Al-(Mg+Si $\approx$ 1.1%) 合金に対する微量添加元素の影響として、マンガン、クロム、ニッケル、亜鉛、スズ、アンチモン、鉛およびコバルトの添加が本系合金の引張強さおよび電気伝導度におよぼす影響を調査した。その結果。

(1) マンガンおよびクロムの添加は本実験に試験した元素中では最も Al-Mg-Si 系合金の電気伝導度を低下せしめるが、特にクロムを添加した場合にこの傾向が著しかつた。クロムが過飽和固溶鑄塊から析出しがたいことも原因しているように思われる。

(2) 実用的観点からみれば、2 EC あるいは 6101 合金の T6 規格、すなわち、電気伝導度 55% IACS、引張強さ 20.3kg/mm² 以上を満足せしめるためにはマンガンおよびクロムの上限 0.03% はそれぞれ単独添加の場合でも境界線であつた。

(3) マンガンおよびクロム以外では亜鉛が Al-Mg-Si 系合金押し出し材の押し出しのままの強度をかなり増加していた。この原因については亜鉛を添加したものは押し出しのままでも再結晶を完了しているので、押し出し特性では説明できない。焼入れ性の面からも考える必要があるように思われる。

(4) ニッケル、スズ、アンチモン、鉛およびコバルトの添加は今回の実験の範囲では Al-Mg-Si 系合金の諸性能に特に顕著な影響を与えなかつた。