

Al-Mg-Si 合金の押出し加工性, 機械的性質 および集合組織におよぼす Fe 添加の影響*

小林 義 一**

1. 緒 言

筆者は Al-Mg-Si 系合金の押出しに関する研究を行っており, すでに Mg と Si の量を種々変えた Al-Mg-Si 合金の押出し加工性や押出し材の機械的性質および押出し集合組織などを調べて報告^{(1)~(6)}してきたが, これらの実験において, 押出し温度や加工度などの押出し条件が同じであっても合金の作成にあたって使用するアルミニウム地金の純度によって押出し加工性や押出し材の機械的性質が異なる事が明らかになった. これはアルミニウム地金中に不純物として含有する Fe の影響によるものと考えられるので, 今回はこの点を確認するために, 高純度アルミニウム地金を使用して作成した Al-Mg-Si 合金に Fe の量を種々変えて添加した合金を作成して熱間押出し加工を行ない, その押出し加工性, 押出し材の機械的性質および押出し集合組織が Fe の添加によってどのように影響されるかを実験した.

2. 試料の作成と実験方法

Al-Mg-Si 合金の作成には99.994%高純度アルミニウム (Fe 0.002%, Si 0.002%, Cu 0.002%含有) および99.9% Mg を用い, Si の添加には Al-24.9% Si (Fe 0.3%, Cu 0.00%含有) 母合金を用いた. これらを内面をアルミナで内張りした黒鉛るつぽにより溶解し, Al-0.6%Mg-0.4%Si 合金を作成した. つぎに Fe の添加は, 得られた Al-Mg-Si 合金を再度溶解し, これに鉄線および Al-50%Fe 母合金を加えて Fe の含有量が 0%から0.2%おきに1.0%までの6種類を作成した. そのときの溶湯温度はほぼ780°C, 鑄込温度はほぼ720°Cとし, ほぼ120°Cに加熱した直径 45mm長さ 160mmの金型に鑄込んだ. その後560°C, 8hr の均質化処理を行なったのち直径 40mm長さ 80mmのピレットを切削加工して作成した. このようにして得られた試料の化学分析値を表1に示す.

押出し条件としては, 押出し温度を440, 480および520°Cの3種類に変え, 押出し速度は0.5m/minとし, ダイス穴の形状は円形で加工度は92%とした. また潤滑剤には黒鉛を使用した.

押出し材の機械的性質の調査は, 押出し材から直径 6mm 標点距離 40mmの試験片を切削加工し, インストロン型引張試験機により引張速度 2mm/minで引張試験を行なった. またかたさ測定はマイクロビッカース硬度計 (荷重500g) を使用した.

つぎに押出し集合組織は, 押出し材中央部の組織が安定しているところからその縦断面にそって厚さほぼ 1mm の板を切り出し, エメリーペーパーで仕上げ, さらに 1%カセイソーダ

* 昭和49年10月 日本機械学会北陸信越支部長野地方講演会において発表

** 機械工学科助教授

原稿受付 昭和50年9月30日

表1 試料の配合値と化学分析値(%)

No.	配 合 値			化 学 分 析 値			
	Si	Mg	Fe	Si	Mg	Fe	Al
F 0	0.4	0.6	0	0.41(0.39)	0.58(0.64)	0.005(0.002)	残 り
F 2	0.4	0.6	0.2	0.42(0.40)	0.51(0.57)	0.20 (0.10)	〃
F 4	0.4	0.6	0.4	0.42(0.40)	0.40(0.44)	0.40 (0.19)	〃
F 6	0.4	0.6	0.6	0.42(0.40)	0.51(0.57)	0.60 (0.29)	〃
F 8	0.4	0.6	0.8	0.41(0.40)	0.43(0.48)	0.80 (0.39)	〃
F10	0.4	0.6	1.0	0.42(0.41)	0.30(0.33)	1.05 (0.51)	〃

(注) 括弧内は原子パーセントを示す。

水溶液でほぼ 0.15mm になるまで薄くしてから X 線ディフレクトメータにより集合組織の極点図を作成し、また X 線写真を撮影した。使用した X 線は Cu 対陰極に Ni フィルタをつけ、電圧 30KV、電流 8mA とした。

3. 実験結果とその考察

3-1 押し出し加工性

図1は Al-Mg-Si 合金の押し出し加工性におよぼす Fe の影響を調べるために、Fe 含有量が異なった合金を 440, 480 および 520°C で熱間押し出し加工を行ない、そのときの押し出し圧力が Fe の量によってどのように変化するかを示したものである。これによると Fe の含有量が増加するにつれて押し出し圧力は上昇し押し出し加工性は低下する。この傾向は押し出し温度が低いほど大きい。試料の分析結果によると Fe の量が増えるにつれて Si の量はほぼ一定であるが、Mg の量は少しずつ低下している。しかし Fe の量を一定にして Mg と Si の量を変えた合金の押し出し加工性を調べた筆者の実験⁽¹⁾によると、Mg は押し出し圧力を増大させるが、Si はほとんどそれを増大させない。このことを考慮すると、本実験による押し出し圧力の上昇は Fe によるものであることがわかる。この原因を調べるために鋳塊の顕微鏡組織を調べた。その結果を写真1に示す。これによるといずれの合金も結晶粒界にそって析出物が認められ、Fe の量が多くなるにつれてこの析出物の量も多くなることがわかる。またこの析出物を X 線マイクロアナライザで調べたところ Al-Fe-Si 化合物であることがわかった。

以上により Fe の量が増加するにつれて押し出し圧力が高くなり押し出し加工性が悪くなる原因は Al-Fe-Si 化合物が材料の変形抵抗を増大させるためであると思われる。

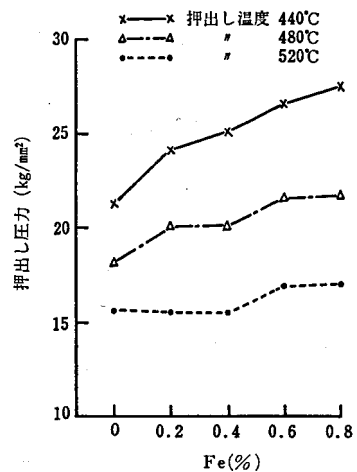


図1 押し出し圧力におよぼす Fe の影響

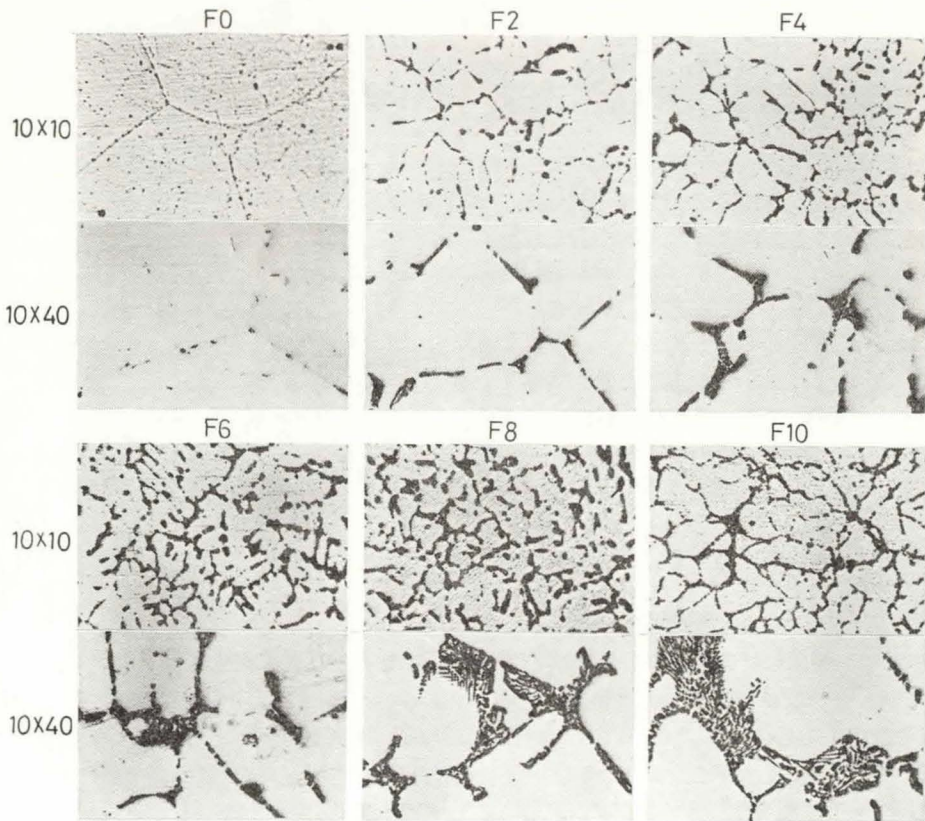


写真1 鋳塊の顕微鏡組織（均質化処理…560°C，8 hr加熱後空冷）

3-2 押出し材の機械的性質

3-2-1 押出しのまま（F材）の機械的性質

押出し材の機械的性質におよぼすFeの影響を調べるために，Feの量が異なった6種類の合金を440，480および520°Cで押出して得られた押出し材の縦断面のかたさ測定および押出し材の引張試験を行なった．これらの結果を図2および図3に示す．これらによると，押出し材の機械的性質は押出し温度の高低とFe含有量によって大きく影響を受け，押出し温度が440°Cの場合にはFeの量が多くなるにつれてかたさがわずかに増大するが，これはFe量の増加につれて地が強化されるためであると思われる．引張強さおよび0.2%耐力は，この温度ではFeの量によってほとんど影響されずに一定で，その値も一様に低くなっている．押出し温度が高くなると，Feの量が増加するにつれてかたさは低下する傾向を示すが，0.2%耐力はほとんど影響されない．また引張強さはわずかに低下する傾向を示すが，Fe量が増加するにつれてMgの量が減少していることの影響を考えると，Feの引張強さにおよぼす影響は大きくない．伸びは押出し温度が高くなるにつれて小さくなるが，Feの量による影響は小さい．

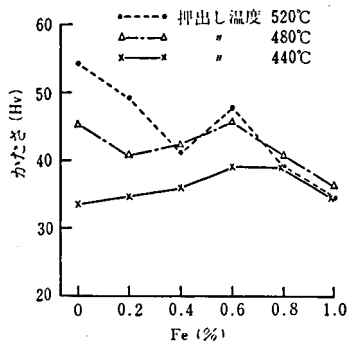


図2 押し材のかたさにおよぼすFeの影響

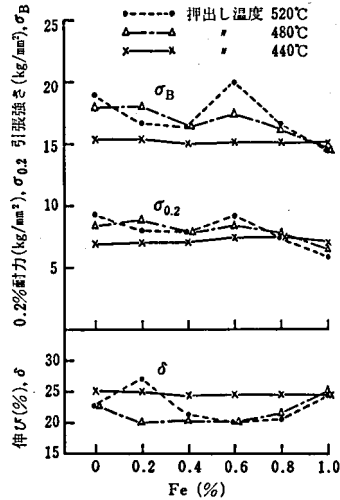


図3 押し材の機械的性質におよぼすFeの影響

3-2-2 押し材を焼もどし処理 (T5処理) したときの機械的性質

Al-Mg-Si 合金は押しそのまま使用するよりもむしろ押し後焼もどし処理 (T5処理) をして使用する場合が多いので、今回も押し材を焼もどし処理をして、焼もどし特性におよぼすFeの影響を調べた。図4は520°C押し材を175°Cで焼もどしをして時間の経過につれてかたさの変化する様子を調べたものであり、図5は同じ試料を210°Cで焼もどした場合である。これらによると、かたさは焼もどし時間とともに上昇していき、175°C焼もどしの場合にはほぼ7hrで最高かたさに達し、それ以後は過時効となりかたさは低下する。また210°C焼もどしの場合には1~1.5hrの焼もどしで最高かたさに達するが、最高かたさは175°C焼もどしの場合に比較して低い値となっている。このような焼もどしによるかたさの上昇は合金に含まれるFeの量が少ないほど顕著に現われており、Feの量が多くなるにつれ

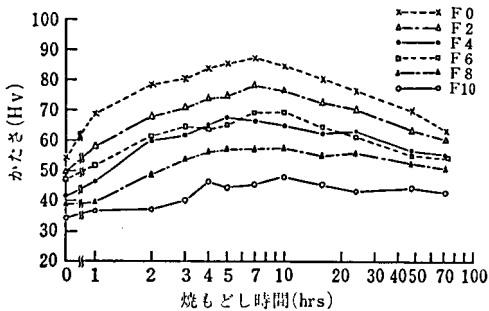


図4 押し材を焼もどし処理 (T5処理) したときのかたさの変化 (押し温度……520°C) (焼もどし温度……175°C)

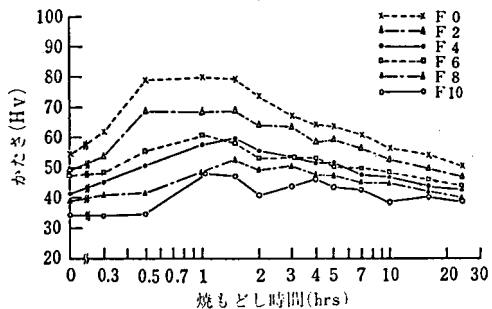


図5 押し材を焼もどし処理 (T5処理) したときのかたさの変化 (押し温度……520°C) (焼もどし温度……210°C)

て焼もどし効果は少なくなる。そして F10 合金の場合にはほとんど時効硬化を示さない。図6はこの焼もどし特性におよぼすFeの影響をまとめたものである。すなわち 520°C 押出し材を焼もどしたときに最高かたさが得られた 175°C×7hr および 210°C×1.5hr の焼もどし条件のときのかたさが Fe の量によってどのように変化するかを示している。これによると、Fe の量が増えるにつれてかたさが低下することは明白である。すなわち Fe は Al-Mg-Si 合金の焼もどし特性を著しく悪化させることがわかる。この原因を調べるために、押出し材を X線マイクロアナライザで調べ、その結果を写真2および写真3に示す。これら

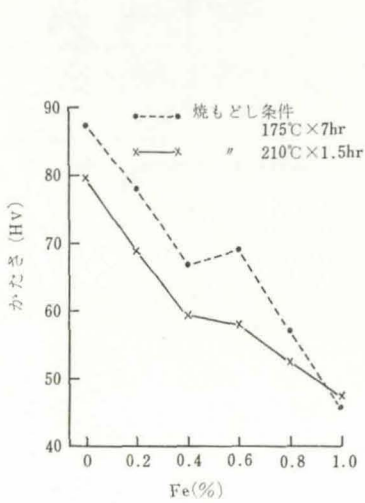


図6 押出し材を焼もどし処理 (T5 処理) したときのかたさにおよぼすFeの影響 (押出し温度…520°C)

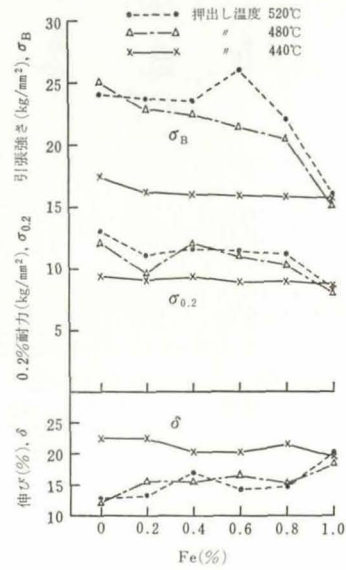


図7 押出し材を焼もどし処理 (T5 処理) したときの機械的性質におよぼすFeの影響 (焼もどし…175°C×7hr)

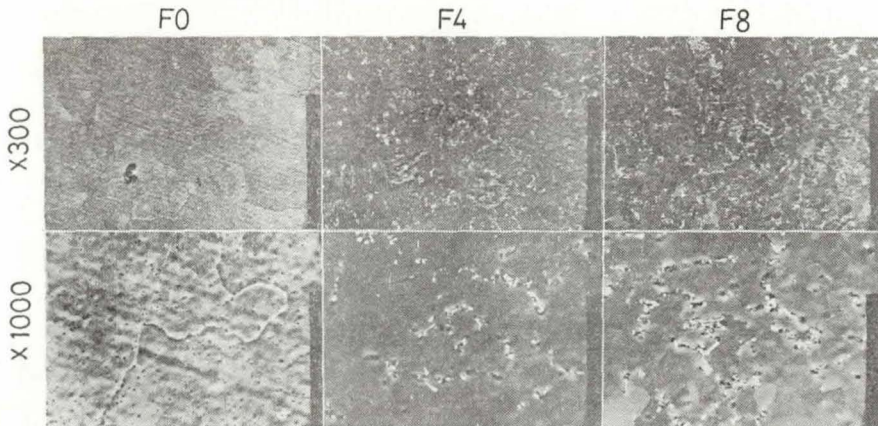


写真2 Al-Mg-Si 合金押出し材の顕微鏡像 (試料…480°C 押出し材)

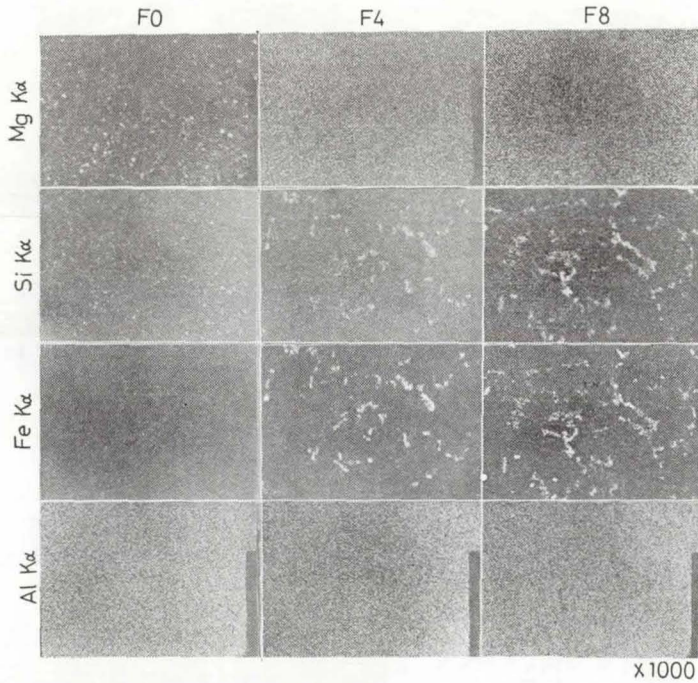


写真3 Al-Mg-Si 合金押し出し材のX線マイクロアナライザによる
特性X線像 (試料…480°C押し出し材)

によると Fe の量が少ない試料 F0 は X 線マイクロアナライザによる特性 X 線像は Mg と Si がほぼ 2 : 1 の割合で対応しており、 Mg_2Si の存在が確認できる。F4 および F8 の顕微鏡像 (写真 2) では析出物が認められ、この析出物は写真 3 の特性 X 線像によると Fe, Si および Al が対応しており Al-Fe-Si 化合物であることが確認される。

以上により、Al-Mg-Si 合金において Fe の量が増加するにつれて焼もどし特性が低下するのは、Fe のために Al-Fe-Si 化合物ができ、そのためこの合金の硬化要素である Mg_2Si 化合物の量が減少するからであると結論される。

図 7 は押し出し材を 175°C × 7 hr の焼もどし処理 (T5 処理) をしてから引張試験を行なった結果である。引張強さおよび 0.2% 耐力ともに押し出し温度が高い場合には Fe の量が増えるにつれて低下し、かたさの場合と同じような傾向を示す。伸びは押し出し温度が高い場合は Fe の量が増えるにつれて大きくなる。しかし 440°C 押し出しの場合には引張強さ、0.2% 耐力ともに Fe の量によってほとんど影響されずにその値も一様に低いが、これは加工温度が低いために硬化要素の Mg_2Si が Al に固溶することができず、そのためにこの合金を焼もどしても Mg_2Si の析出にともなう強度の増加が期待できないからであろう。

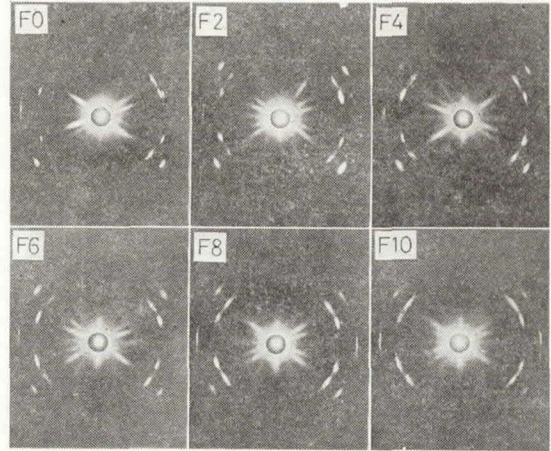
3-3 押し出し集合組織

押し出し集合組織が押し出し温度および Fe 含有量の違いによってどのように変化するかを調べるために、押し出し材中央部の組織が安定しているところから切り出した縦断面について X 線写真を撮影し、また X 線ディフレクトメータによる $\{111\}$ および $\{200\}$ 極点図を作成し

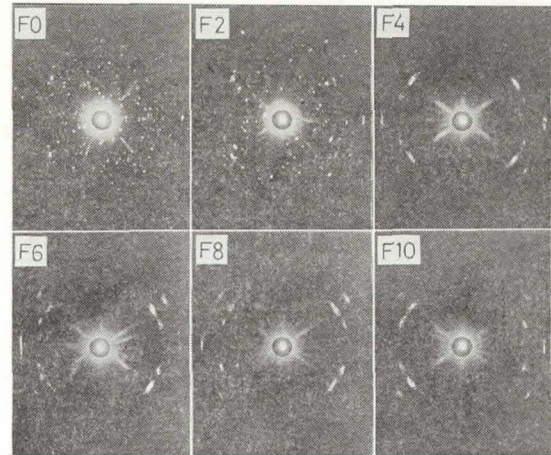
た。1例として写真4に440および520°C押し出し材のX線写真を, また図8に440°C押し出し材のF0, F4およびF8の{111}および{200}極点図を示す。また図9には試料F8を520°Cで押し出したときの{111}および{200}極点図を示す。これらの{111}極点図における中央の4本の集積帯のうち外側の2本は<100>繊維組織の存在を示し, 内側の2本および上下両極の集積点は<111>繊維組織の存在を示す。{200}極点図においては中央の集積帯と上下両極の集積点が<100>繊維組織の存在を示し, 中間部の2本の集積帯が<111>繊維組織の存在を示す。これらのX線写真および極点図によると, 押し出し温度が480°C以下の場合には<111>および<100>方向が押し出し方向に一致しているが, 押し出し温度が520°CになるとFeの少ない試料は集合組織を示さなくなる。また440°C押し出し材の極点図における集積強度をみると, Feの量が0, 0.4, 0.8%と増えるにつれて, {200}極点図における両極の強度は10, 7.3, 3と低下し, <111>集積帯の強度もFeの量が増えるにつれて9.5, 2.9, 2.8とわずかに低下の傾向を示している。{111}極点図においても上下両極の<111>集積点の強度

はFeの量の増加につれて39, 29, 24とわずかに低下の傾向を示し, 中央の集積帯もほぼ同様の傾向を示す。520°C押し出し材の極点図においては<100>集積帯の著しい発達認められる。たとえば試料F8について中央の集積帯における<100>の占める割合をみると{111}極点図では440°C押し出し材のとき31.0%のものが520°C押し出し材では42.4%に上昇し, 一方{200}極点図においても440°C押し出しのとき20.0%であるものが520°C押し出し材では51.1%に上昇している。また集積帯の中のとくに集積度の高いところは切り出した試料面に平行に揃っている結晶面を示すが, これらの面は<111>集積帯では(178)面が大部分でわずかに(112)面や(213)面が認められる。また<100>集積帯では(001), (011), (012)面などの面が試料面に平行に揃っていることがわかる。

以上のようにAl-Mg-Si合金押し出し材は<111>と<100>方向が押し出し方向に向いてお

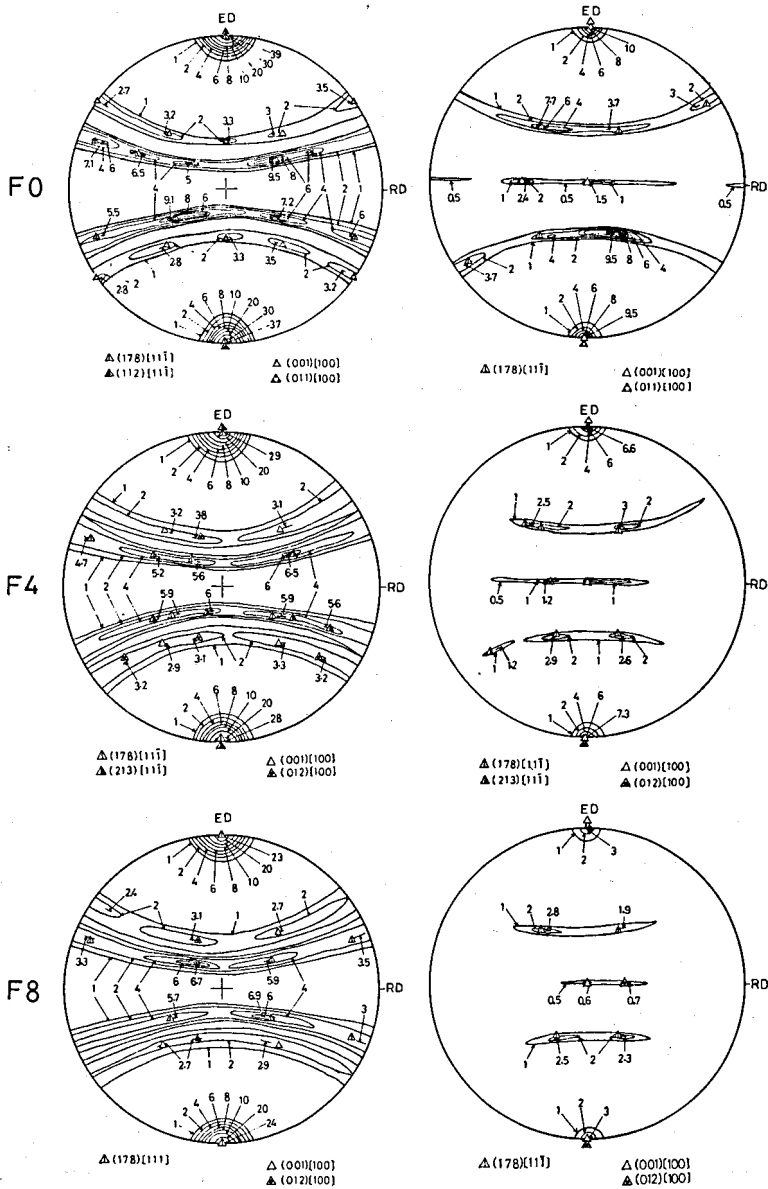


(a) 押し出し温度……440°C



(b) 押し出し温度……520°C

写真4 Al-Mg-Si合金押し出し材のX線写真



(a) {111} 極点図 (b) {200} 極点図
 図8 440°C押し出し材の {111} および {200} 極点図

り、その強度は Fe 量や押し出し温度によって変化が認められるが、このような強度の変化は押し出し材横断面の X線回折強度を調べることによっても知ることができると思われるので、各条件で押し出した押し出し材の横断面の X線回折と同じ試料を粉末状にしたもの（ヤスリで粉末状にしてから歪、内部応力などの除去のために 400°C×1 hr の焼なましをしたもの）の X線回折を行なった。1 例として図10に試料 F0 の粉末状試料および 440°C 押し出し材の横断面の X線回折図形を示すが、押し出し材は粉末状試料に比較して (111), (200) および (222)

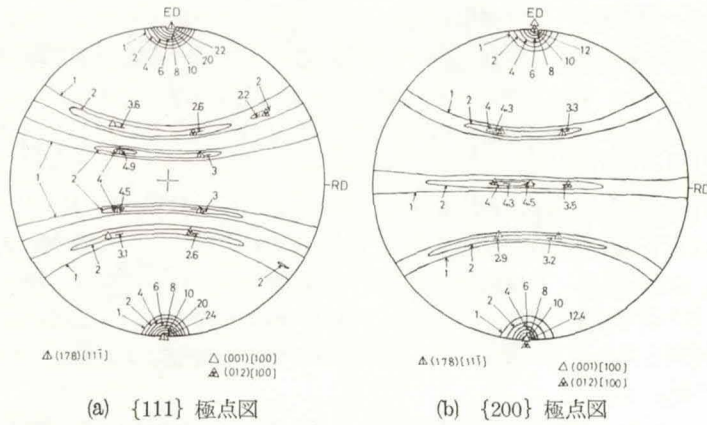


図9 520°C押し出し材の {111} および {200} 極点図 (試料…F 8)

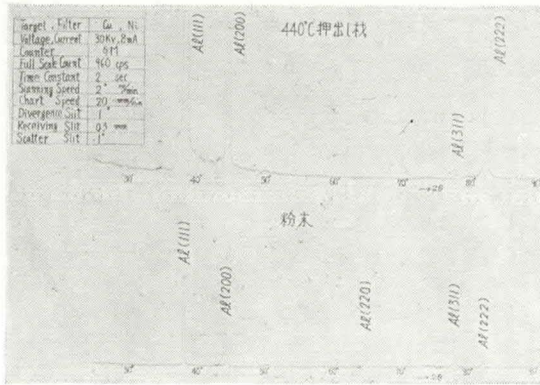


図10 押し出し材横断面のX線回折図形と粉末状試料のX線回折図形 (試料…F0)

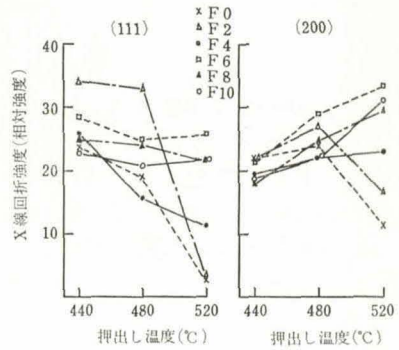


図11 押し出し材横断面のX線回折強度と押し出し温度との関係

面からの回折強度が著しく強くなっていることがわかる。図11はこれらX線回折の結果をまとめたものであり、縦軸には粉末状試料のX線回折強度を基準にして示した押し出し材のX線回折強度を示し、横軸には押し出し温度を示してある。これによると押し出し温度が高くなるにつれて(200)面からの回折強度は強くなり、(111)面からの回折強度は逆に弱くなる傾向を示すが、Feの量による影響は小さい。またFeの量が少ない合金は押し出し温度が高くなると(200)および(111)面からの回折強度が著しく弱くなる。これは $\langle 111 \rangle$ と $\langle 100 \rangle$ が押し出し方向に一致していないことを示し、X線写真の結果とよい対応を示す。

4. 結 論

高純度アルミニウムを使用して作成した Al-Mg-Si 合金にFeの量を0.005~1.05%の範囲で添加した合金を440, 480および520°Cで押し出し、その押し出し加工性、押し出し材の機械的性質および集合組織を調べたところつぎのことがわかった。

(1) Feの量が増えると押し出し圧力が高くなり押し出し加工性は悪くなる。これは Al-Fe-Si 化合物が材料の変形抵抗を大きくさせるためであると考えられる。

(2) 押出し材の機械的性質は押出し温度と Fe の量により影響を受け、押出し温度が高い場合は Fe の量が増加するにつれてかたさは低くなる。引張強さと 0.2%耐力は押出し温度が高くなるほど大きくなり、伸びは逆に小さくなる傾向を示すが、Fe の量によっては大きな影響は受けない。また Fe の量が増加すると押出し材を焼もどしたときの特性が著しく低下する。

(3) 押出し材の集合組織は、押出し温度が低い場合には $\langle 111 \rangle$ と $\langle 100 \rangle$ が押出し方向に揃うと同時に半径方向にも特定の面が揃う。極点図上におけるこれらの強度は Fe の量が増えるにつれてわずかに低下の傾向を示す。押出し温度が高くなるにつれて押出し材横断面の(200)面からのX線回析強度は強くなり、(111)面からのX線回析強度は弱くなる傾向を示す。また押出し温度が高い場合には、Fe の量が少ない合金はそれの多い合金にくらべて集合組織の消滅がはやい。

終りに本実験を行なうにあたり東京工業大学高橋恒夫教授には種々御援助を賜りましたことを付記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 高橋恒夫, 小林義一, 小島陽: 軽金属, VoL.19 (1969), P.189.
- (2) 小林義一: 長野工業高等専門学校紀要, 第3号 (1969), P.45.
- (3) 小林義一: 長野工業高等専門学校紀要, 第4号 (1971), P.17.
- (4) 高橋恒夫, 小林義一, 時沢貢: 軽金属, VoL.23 (1973), P.248.
- (5) 小林義一: 長野工業高等専門学校紀要, 第5号 (1973), P.29.