

アルミニウムおよびアルミニウム合金の 押出しに関する研究(第3報)

Al-Mg-Si合金押出し材の機械的性質

小林 義 一*

Studies on the Extrusion of Aluminum and Aluminum Alloys (3rd report)

Mechanical properties of extruded Al-Mg-Si alloys

Yoshikazu Kobayashi

1. 緒 言

筆者はアルミニウムおよびアルミニウム合金の押出しに関する研究を行っており、第1報⁽¹⁾において、リーレ型万能試験機を利用出来るような押出し装置を設計製作し、99.8%アルミニウムについて、加工度、押出し温度、ダイス角、ピレット長さなどの押出し条件が押出し性におよぼす影響を調べ、またこれらの押出し条件が押出し材の外観、寸法、金属流れ、かたさなどにおよぼす影響についての基礎的資料を多く得た。今回はこの実験をさらに発展させ、現在建築用型材とくにアルミサッシなどに著しい伸びを示しているAl-Mg-Si合金について押出しを行ない、その押出し材の機械的性質や焼もどしをしたときの機械的性質の変化などを調べた。

Al-Mg-Si合金は、図1に示すように、 Mg_2Si なる化合物があたかも純成分のごとき挙動をして、Al固溶体における Mg_2Si の溶解度が高温から低温に向って減少する準二元系状態図を示す。このため、この合金は適当な熱処理により機械的性質を向上させることができる。また非常に韌性に富み、耐食性もあり、さらに押出しその他の加工性がよいという長所をもっている。ところがこの合金は、 Mg_2Si を形成するに必要なMgとSiの割合は重量比で1.73:1であるが、この割合よりもSiが過剰な場合にはさして影響されないが、Mgが過剰になると、図2に示すように、Alに対する Mg_2Si の溶解度がかなり減少し、⁽²⁾このため熱処理効果が薄れたり、押出し性が悪くなる⁽³⁾から、MgとSiの添加量には十分注意する必要がある。しかし押出し用Al-Mg-Si合金は、JIS規格によるとMg 0.45~0.9%、Si 0.20~0.6%となっており、MgとSiの配合のされ方によっては、たとえJIS規格範囲内であっても、 Mg_2Si に対してMgが過剰な場合もSiが過剰な場合もありうるわけである。そこで本実験では、JIS規格を参考にしてMgとSiを種々組み合わせ、 Mg_2Si に対してMgが過剰な場合とSiが過剰な場合の合金を作成し、これらの合金の押出しを行ない、押出し材の機械的性質や焼もどしをしたときの機械的性質などを調べることを目的とした。

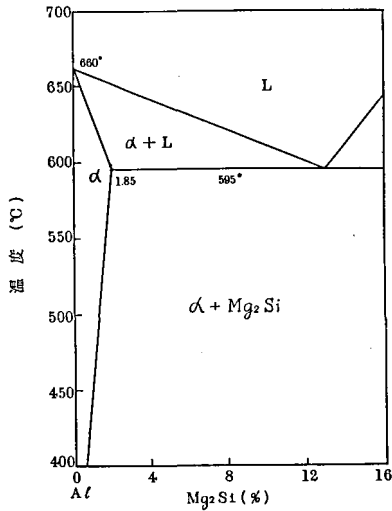


図1 アルミニウム—ケイ化マグネシウム
準二元系状態図

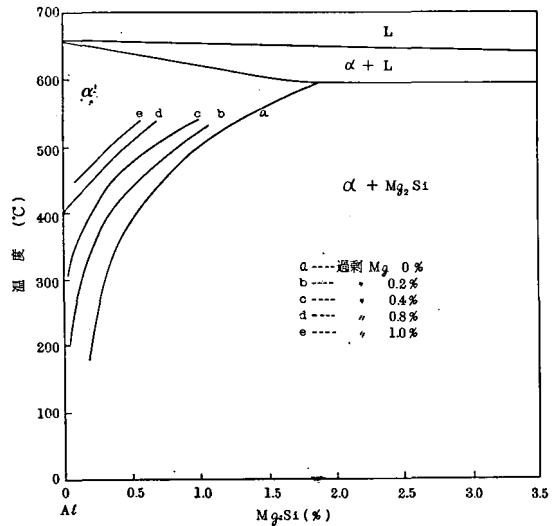


図2 Mg₂Siの溶解度におよぼす
Mg過剰量の影響

2. 試料と実験方法

Al—Mg—Si 合金において、Mg と Si が Mg₂Si を形成する割合より Mg が過剰な場合と Si が過剰な場合の押出し材の機械的性質を調べるために、合金組成として Si 0.2, 0.4 および 0.6%, また Mg 0.2, 0.5 および 0.8% と変えて組み合わせた 9 種類を作成した。表 1 はこれらの合金の配合割合と化学分析値 および各合金が Mg₂Si に対して Mg がどの程度過剰であるか、Si がどの程度過剰であることを示したものである。

表 1 試料の配合値と化学分析値 (%)

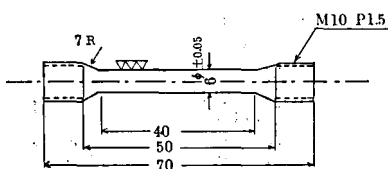
番号	配合値		化学分析値						
	Si	Mg	Si	Mg	Mg ₂ Si	過剰Si	過剰Mg	Fe	Al
1	0.2	0.2	0.20	0.21	0.33	0.08		0.12	残り
2	0.2	0.5	0.20	0.50	0.55		0.15	0.11	〃
3	0.2	0.8	0.19	0.74	0.52		0.41	0.10	〃
4	0.4	0.2	0.39	0.25	0.39	0.25		0.11	〃
5	0.4	0.5	0.38	0.53	0.84	0.07		0.11	〃
6	0.4	0.8	0.39	0.71	1.06		0.04	0.11	〃
7	0.6	0.2	0.57	0.26	0.41	0.42		0.12	〃
8	0.6	0.5	0.56	0.50	0.79	0.27		0.11	〃
9	0.6	0.8	0.54	0.77	1.22	0.09		0.11	〃

地金は99.7%Al (Fe 0.12%, Si 0.10%含有) を使用し, Mg の添加には99.9%Mgを, また Si の添加には Al-24.9% Si (Fe 0.3%含有) 母合金を用いた。

溶解には鉄製ガス溶解炉を使用し, 内面をアルミナとケイ酸ソーダにて十分ライニングしてから, 一回の溶解量を 18kg とし, 溶湯の温度を 760°C まで上げ, 鑄込温度 720°C で, ほぼ 120°C の金型に鑄込んだ。また金型は直径 45mm 長さ 160mm のものを使用した。金型鑄造後 560°C, 8hr の均質化処理を行なったのち, 直径 40mm 長さ 80mm のビレットを切削加工して作成した。これらのビレットを第1報⁽¹⁾ で使用したと同じ押出し装置を使用して押出した。ビレットの加熱は, ビレットをコンテナに装入後, 試験機に取り付け, 管状電気炉でコンテナをつつんで通電し, ビレットをコンテナとともに加熱し所定の温度に達してから 30min 保持して押出した。なお加圧は万能試験機のバルブを調節し油圧により行ない, 荷重とストロークの関係は試験機の自記記録装置により記録した。

押出し条件としては, 加工度を92%と一定にし, 押出し温度は実際現場操業に近い温度で, 平衡状態図からみて固溶体範囲と考えられる 520°C とそれよりも低く Mg_2Si が析出していると考えられる 440°C および両者の間で変態点付近と考えられる 480°C の3種類とした。なお押出し速度はビレットの移動速度で20~30mm/min, 押出されてでてくる押出し材の速度で 250~380mm/min とし, 潤滑剤としては黒鉛を使用した。

押出し材の引張試験は, 押出し材から図3に示すような試験片を切削加工し, インストロン型引張試験機を使用し, 引張速度 2mm/min で行なった。また, かたさはマイクロピッカース硬度計を使用し, 荷重 500g で測定した。



引張試験片
図3

3. 実験結果とその考察

3-1 押出し材の機械的性質

3-1-1 押出し材のかたさ

図4および図5は押出し温度 520°, 480° および 440°C で押出し後空冷した押出し材を2ヶ月間常温時効したのちのかたさが, Mg と Si の量によってどのように変化しているかを示したものであり, 図4は Mg を一定にして Si を変えた場合, 図5は Si を一定にして Mg を変えた場合である。そしてこれらの関係を3元的に図示したのが図6であり, この図のほぼ中央に Mg_2Si と記してある直線は, Mg と Si がこの直線上にある場合にちょうど Mg_2Si を形成する割合になっていることを示し, この直線より手前側は Mg_2Si より Si が過剰な場合, また向う側は Mg が過剰の場合を示す。これらによると押出し材のかたさにおよぼす Mg と Si の影響は, 押出し温度の高低によって著しい相違が認められる。まず, 押出し温度 520°C の場合には, Mg が一定のときは Si が多くなるにつれてほぼ直線にかたさは高くなり, 一方 Si が一定のときは Mg が多くなるにつれてほぼ直線にかたさは高くなっている。そして Mg と Si が最も多い Mg 0.8%, Si 0.6% で最高のかたさ Hv65 を示している。このように押出し温度 520°C の場合には, Mg と Si が多くなるにつれてかたさは高くなるが, これは次のように考えられる。押出し温度が 520°C の場合には, 図2によると,

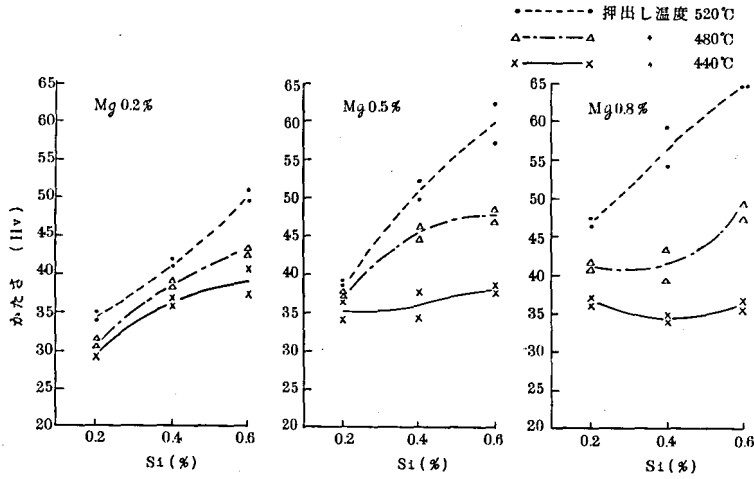


図4 押し出し材のかたさにおよぼすMg, Siの影響 (Mg一定)

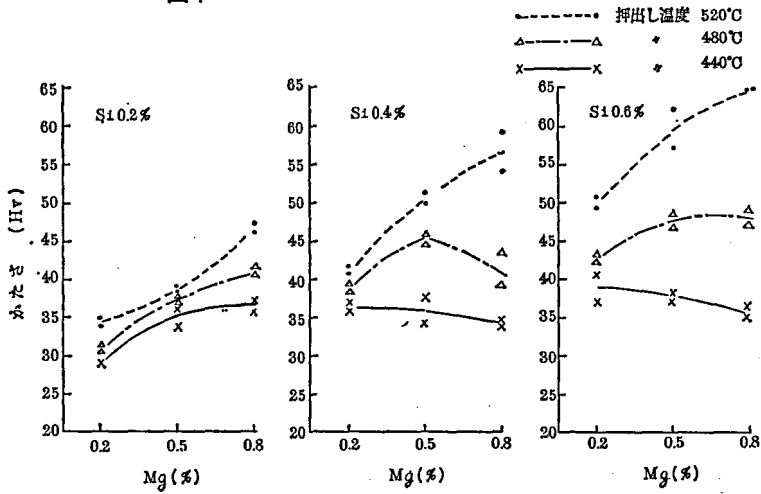


図5 押し出し材のかたさにおよぼすSi, Mgの影響 (Si一定)

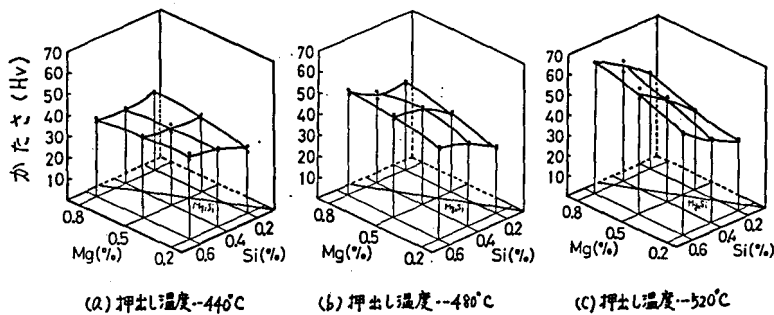


図6 押し出し材のかたさにおよぼすMg, Siの影響

Mg と Si がちょうど Mg_2Si を形成する割合に配合されているときに Mg_2Si は 1.1% まで固溶される。一方 Mg_2Si に対して過剰Mgが最も多いSi 0.2%, Mg 0.8%の試料においては、

Mg₂Si が0.52%形成され、過剰 Mg は0.41%存在する。図2によると、過剰 Mg が0.4%のときは温度 520°C で Mg₂Si は0.8%固溶されるはずであるから、この場合は固溶体範囲で加工したことになる。表1および図2より考えると、他の配合割合のときも、520°C では固溶体範囲となっており、本実験ではすべての試料について押出し温度 520°C の場合には固溶体範囲で加工したと考えてよい。固溶体範囲で加工した場合には、Mg₂Si ができるだけ多い方が、押出し後一層過飽和の状態になって、かたさは高くなるわけである。表1より明らかなように、Si が一定の場合には Mg が多くなるほど Mg₂Si 量は多くなり、また Mg が一定の場合には Si が多くなるほど Mg₂Si 量は多くなっており、そのために押出し材のかたさは高くなったものと考えられる。

押出し温度 480°C の場合には、Mg が一定のときには、Mg 0.2% のときのみ Si が多くなるにつれてかたさは高くなるが、Mg がそれよりも多い場合には Si が多くなるにつれてかたさは必ずしも高くなってはいない。また Si が一定の場合には、Si が最少の0.2%のときのみ Mg が多くなるにつれてかたさがほぼ直線的に高くなるが、Si 0.6% のときには Mg が0.5%から0.8%に増加してもかたさはほとんど変わらないし、Si 0.4%のときには Mg が0.5%から0.8%となるにつれてかたさは少し低下している。このことは 480°C における Mg₂Si の Al への固溶度が原因と思われる。すなわち Mg 0.2%および Si 0.2%の場合には、表1により、Mg₂Si は最高で0.55%存在するが、図2により明らかなように、この量は 480°C ではすべて固溶される。そこで Si あるいは Mg が多くなるほどかたさは高くなっていく。Si 0.6%、Mg 0.5%では Mg₂Si は0.79%、また Si 0.6%、Mg 0.8%では Mg₂Si が1.22%形成されるが、図2によると、温度 480°C の場合には Mg₂Si はほぼ0.9%までしか固溶されない（過剰 Mg 0%のとき）ので、Si 0.6%、Mg 0.8%のときには0.9%だけが固溶され、残りの0.32%は固溶されないことになる。このため Mg₂Si の Al への固溶量は Si 0.6%、Mg 0.5%の場合と Si 0.6%、Mg 0.8%の場合ではほぼ0.1%の違いしかないことになる。このことにより、かたさも Si 0.6%のときは Mg が0.5%から0.8%に増加してもほとんど高くないものと思われる。次に Si 0.4%、Mg 0.8%ときは Mg₂Si は1.06%形成されるが、もし過剰 Mg がないものとするとき0.9%だけ固溶され、残りは固溶されないままとなるはずである。しかるにこの場合は、過剰 Mg が存在し、そのため Mg₂Si の Al への固溶度が低下してしまうので、Mg₂Si の固溶量は0.9%よりもさらに低くなることになる。一方 Si 0.4%、Mg 0.5%のときには Mg₂Si は0.84%存在し、この場合は Si が過剰のため全部固溶されるものと考えられる。このように Si 0.4%、Mg 0.5%のときには形成される Mg₂Si はすべて固溶されるが、Si 0.4%、Mg 0.8%のときには形成される Mg₂Si のうち固溶されずに残ってしまう量が大部分存在し、このことが Si 0.4%で Mg が0.5%から0.8%に増加するときのかたさの低下する原因となったものと思われる。

押出し温度 440°C の場合には、Mg が少ないときには Si が増加するにつれて、また Si が少ないときには Mg が増加するにつれて、かたさはわずかに高くなるが、その値は押出し温度 520°C や 480°C の場合よりもずっと低く Hv35~40 どころである。Mg が多いときには Si が増加してもかたさの変化はほとんど認められず、また Si が多いときには Mg が増加してもかたさの増加はほとんど認められず Hv35~40 の値を示している。これは 440°C では Mg₂Si がほとんど固溶されないからであると思われる。

これらのことは、押出し材を焼もどし処理した場合にも言えて、175°Cで5hrの焼もどし

処理をしたときのかたさの変化を図7に示すが、押出し温度 480°C の場合には、押出しのまゝの場合と同じように Si 0.4% および 0.6% のときには Mg が 0.5% から 0.8% に多くなるにつれてかたさは低くなっている。一方押出し温度 520°C の場合には Mg および Si が多くなるにつれてかたさは高くなり、押出し温度 440°C の場合には Mg および Si の多少によるかたさの変化はほとんど認められない。

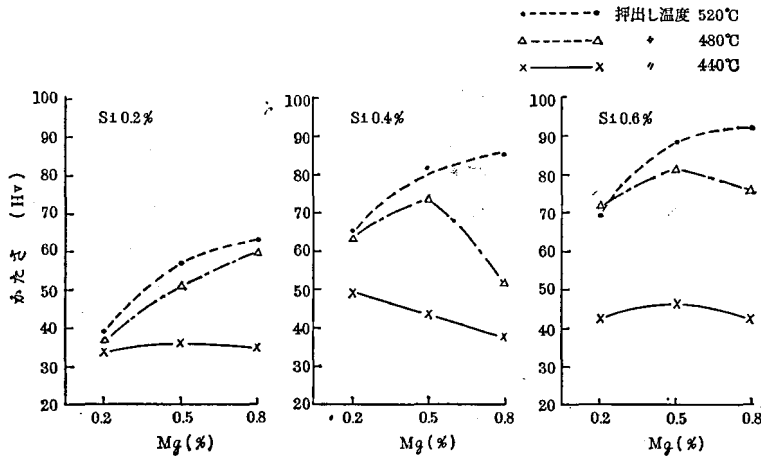


図7 押出し材を175°Cで5hr焼もどし(T5処理)したときのかたさにおよぼすSi, Mgの影響

以上のことにより、押出し温度 520°C の場合には、本実験に使用した Mg と Si の範囲では、Mg および Si がどのような割合でも、形成される Mg_2Si はほとんど固溶され、かたさは Mg および Si が多いほど高くなる。押出し温度 480°C の場合には、形成される Mg_2Si がすべて固溶される範囲であれば、Mg および Si が多いほどかたさは高くなり、固溶される Mg_2Si 以上に Mg_2Si が存在する場合には、固溶される量の多少によりかたさの大小はさまり、また過剰 Mg が存在すると、固溶される Mg_2Si 量が低下するので、かたさも低下する傾向を示す。押出し温度 440°C の場合には、 Mg_2Si はほとんど固溶されず、Mg と Si が増加してもかたさはほとんど変化しないことがわかった。

3-1-2 押出し材の引張性質

図8および図9は押出し材の引張強さ、0.2%耐力および伸びにおよぼす Mg と Si の影響であり、図8は Mg を一定にして Si を変えた場合、また図9は Si を一定にして Mg を変えた場合である。これらによると、押出し温度 440°C の場合には引張強さ、0.2%耐力および伸びともに Mg と Si の量によりほとんど変化が認められない。押出し温度 520°C の場合には Si が多くなるにつれ、また Mg が多くなるにつれて引張強さおよび0.2%耐力は大きな値を示す傾向にある。しかし伸びはあまりはっきりした変化は認められない。そして、これら Mg と Si による引張強さと0.2%耐力の変化は、図4および図5に示したかたさの変化とほとんど同じ傾向を示している。

以上、押出し材のかたさおよび引張試験の結果から、良好な機械的性質を得るための押出し温度としては、440°C では低すぎ、480°C では押出し材の機械的性質が不安定となり、520°C くらいが適当であるということがわかった。また Mg と Si の割合としては、Mg および Si が多くなるにつれて機械的性質は向上した。

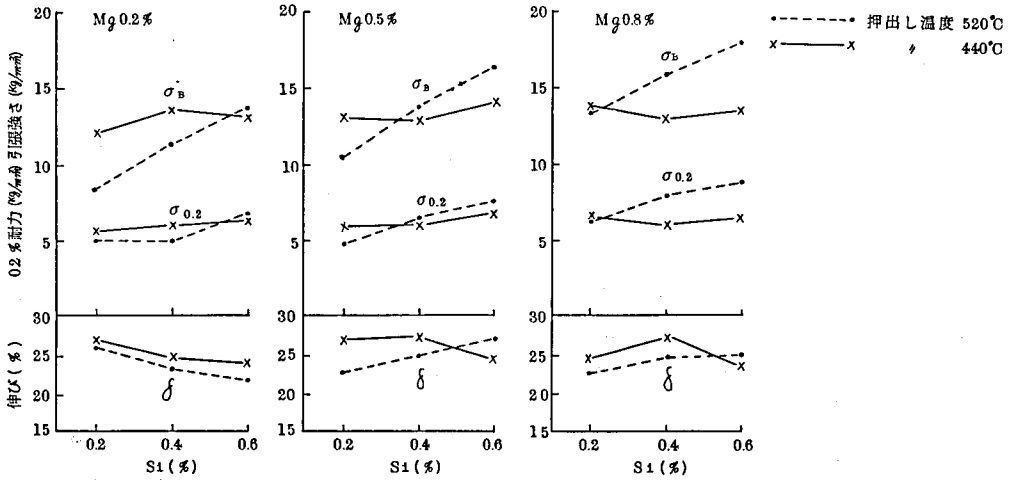


図8 押出し材の機械的性質におよぼすMg, Siの影響 (Mg一定)

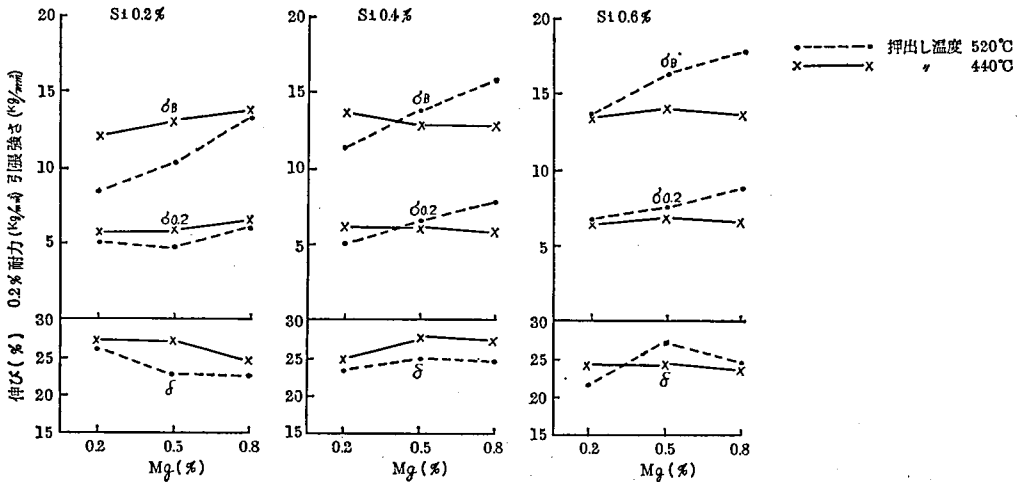


図9 押出し材の機械的性質におよぼすSi, Mgの影響 (Si一定)

3-2 押出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 合金押出し材は、含有される Mg と Si 量および押出し温度が適当であれば、押出しのままでも図4および図8に示されたようにすぐれた機械的性質を示す。しかし、この合金は押出し後適当に焼もどしすることによって機械的性質を著しく向上させることができる。本実験においてもこの点を調べるために、各押出し温度で押出した押出し材を焼もどし処理 (T5 処理) し、そのときのかたさの変化を調べ、また引張試験も行なった。図10および図11は押出し材を 175°C で 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 16hr 焼もどしして、そのときのかたさを半対数目盛に表わしたものであり、図10は Mg を一定にして Si を変えた場合、また図11は Si を一定にして Mg を変えた場合である。これらによると、押出し温度 520°C の場合には、焼もどし時間が 3~5 hr でかたさはほぼ一定の値に達しているが、Mg および Si が少ないほどかたさの上昇のしかたはゆっくりであり、Mg および Si が多くなるにつれてかたさの上昇のしかたは大きくなる傾向にある。また Mg 0.2%, Si 0.2% と少ない場合には、焼もどしによるかたさの上昇はほとんど認められないが、Mg および Si が多くなるに

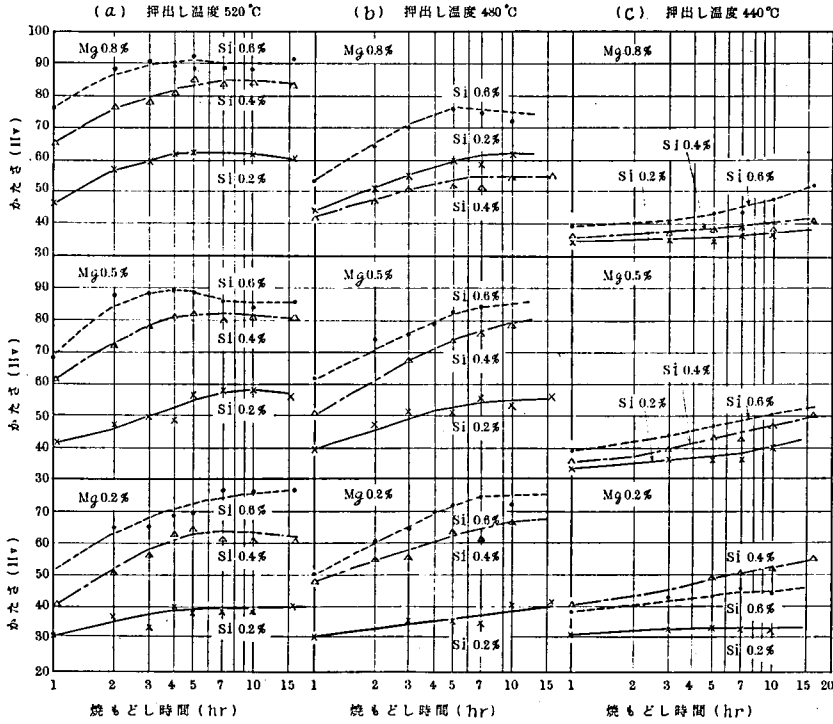


図10

押出し材を焼もどし処理 (T5処理) したときのかたさの変化 (Mg一定) (焼もどし温度---175°C)

つれて、焼もどしによるかたさの上昇もいっそう著しくなり、Mg 0.8%, Si 0.6%では175°Cで5hrの焼もどしにより Hv92にも達している。また図10のMgが一定の場合にはSiが0.2, 0.4, 0.6%と増加するにつれて、かたさも大きく増加しているが、図11によると、Siが0.4%と0.6%の場合にはMgが0.5%から0.8%に増加してもかたさの上昇はあまり認められない。このことからMgとSiでは、Siの多い方が焼もどしによるかたさの上昇が多く認められることがわかる。

押出し温度が440°Cの場合には、図10によりわかるように、焼もどしによるかたさの上昇はほんのわずかしが認められ

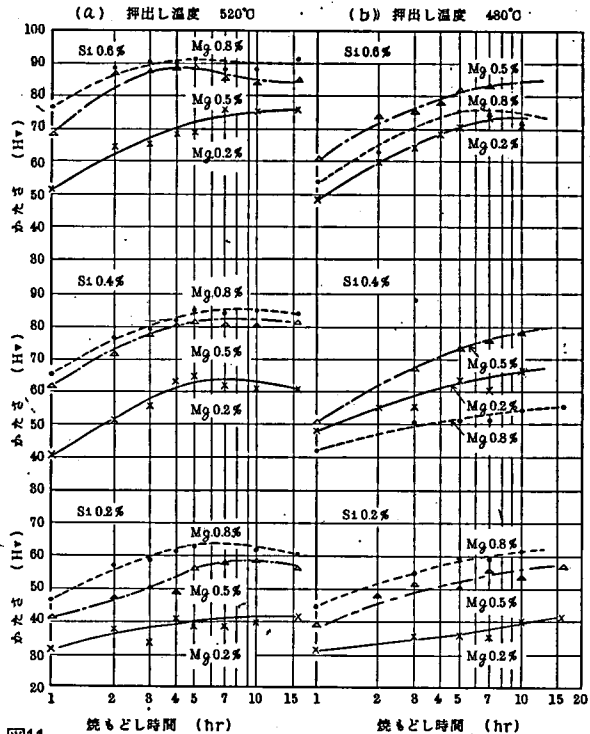


図11

押出し材を焼もどし処理 (T5処理) したときのかたさの変化 (Si一定) (焼もどし温度---175°C)

ず、この結果からも押出し温度 440°C では不適當であると言えることができる。

押出し温度 480°C の場合には、焼もどしによるかたさの上昇は認められるものの、520°C 押出し材に比較すれば、全般的にかたさは低くなっており、とくに Mg が多くなるにつれて 520°C 押出し材とのかたさのひらきが大きくなるという特徴が認められる。これは、押出し材のかたさのところで説明したように、Mg が過剰になるにつれて Mg₂Si の Al への固溶度が低下することに原因があるものと思われる。

以上のことにより、Mg と Si の配合としては Mg₂Si を形成する割合より Si をわずかに過剰にしておくことにより、焼もどしによるかたさのより大きな上昇が期待できることがわかる。

図12は 520°C 押出し材および 440°C 押出し材を 175°C、3hr の焼もどし処理 (T5 処理) を行なつてのち引張試験を行なつた結果である。これによると、440°C 押出し材は Mg と Si がどのような割合になつていても機械的性質の変化はほとんど認められないが、520°C 押出し材では、Mg および Si が多くなるにつれて引張強さ、0.2%耐力の著しい向上と伸びのわずかな低下が認められる。

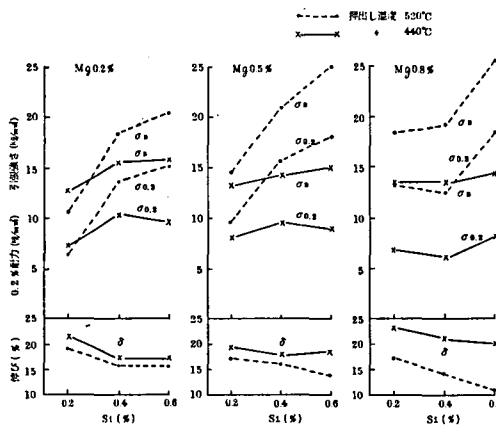


図12 焼もどし処理 (T5処理) をした押出し材の機械的性質 (焼もどし.....175°C, 3hr)

3-3 押出し材を焼入れ焼もどし処理 (T6 処理) したときの機械的性質

図13は520°, 480°および440°Cで押出した押出し材を 520°Cで 1hr 加熱後 20±2°C の水中に焼入れし、たどちに 175°C で 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 16 および 24hr 焼もどしをし、そのときのかたさの変化を半対数目盛に示したものである。押出し材の T5 処理の場合には、押出し温度の高低が T5 処理材の機械的性質に大きな影響をおよぼしたのであるが、T6 処理の場合には図13で明らかなように、押出し温度の高低は T6 処理材の機械的性質にほとんど影響をおよぼさず、440°C 押出し材の場合でも化学成分が適当であればかたさの大きな向上が認められる。そのかわり、T6 処理の場合には Mg と Si の配合割合が押出し材の機械的性質に大きな影響をおよぼす。化学成分の機械的性質におよぼす影響をみると、Mg 0.2% の場合には Si 0.2~0.6% の範囲で T6 処理によるかたさの向上は認められない。同様に Si 0.2% の場合には Mg 0.2~0.8% の範囲で T6 処理によるかたさの向上は認められない。また Mg 0.5% で Si 0.4% の場合にはかたさはあまり向上せず、T6 処理によってかたさの向

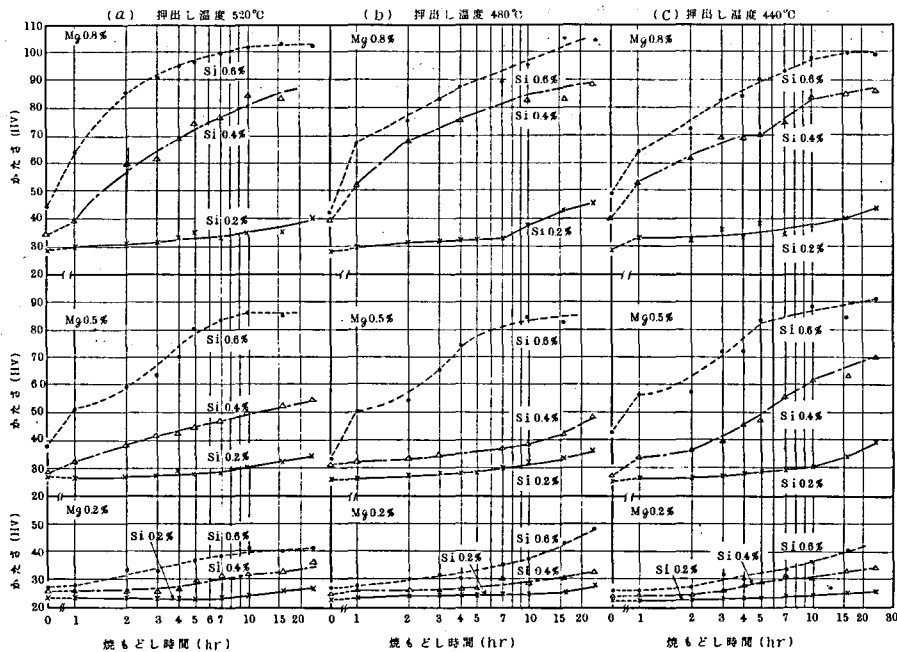


図13 押出し材を焼入れ焼もどし処理(T6処理)したときのかたさの変化
(溶体化処理 520°C・1hr)
(焼もどし温度 175°C)

上するのは Mg 0.5% で Si 0.6% および Mg 0.8% で Si 0.4~0.6% の範囲である。そして T6 処理によりもっともかたさの向上するのは Mg 0.8% で Si 0.6% の場合であり、この点は T5 処理の場合と同様である。表 2 は T6 処理により はっきりかたさの向上が認められる Mg と Si の組み合わせを示し、表中の○印がかたさの向上が認められる組み合わせを、×印がかたさの向上が認められない組み合わせを、そして△印が両者のほぼ中間のかたさの向上が認められる組み合わせを示す。また T6 処理によりかたさが一定の値に近づくまでの焼もどし時間は、T5 処理の場合よりもいくぶん遅れて、10hr 以後になり、そのときのかたさは Hv105 にも達し、T5 処理の最高のかたさ Hv92 に比較して大分かたかたくなっていることがわかる。

表2 T6 処理によりかたさの向上が認められる Mg, Si の組み合わせ

Mg	Si		
	0.2%	0.4%	0.6%
0.2%	×	×	×
0.5%	×	△	○
0.8%	×	○	○

また T5 処理の場合には、押出し温度が高い場合には、Mg が 0.2% と低い場合でも Si が 0.2, 0.4, 0.6% と増加するにつれてかたさの上昇が認められ、逆に Si が 0.2% と低い場合でも Mg が 0.2, 0.5, 0.8% と増加するにつれてかたさの上昇が認められるが、T6 処理の場合には、Mg が 0.2% の場合には Si が増加してもかたさはほとんど高くならず、一方 Si が 0.2% の場合には Mg が増加してもかたさはほとんど高くなっていない。このことから、固溶体範囲での押出し加工が加工後の機械的性質の向上に効果的であるということがわかる。

4. 結 論

Al—Mg—Si 合金において、Mg と Si の配合割合を種々変えて押出しを行ない、押出し材の機械的性質および押出し材を熱処理したときの機械的性質を調べた結果つぎのことがわかった。

- (1) 押出し材の機械的性質は押出し温度および Mg と Si の含有量によって大きな変化が認められる。良好な機械的性質を得るためには、押出し温度をほぼ 520°C にして、固溶体範囲で押出すことが大切であり、この場合には Mg 0.2~0.8%、Si 0.2~0.6% の範囲では、Mg および Si が多いほどかたさ、引張強さ、0.2% 耐力ともに良くなる。

溶解度曲線付近の温度（本実験では 480°C）で加工する場合には、形成された Mg_2Si のうち Al に固溶される Mg_2Si 量が多いほど機械的性質は良くなる。また、 Mg_2Si に対して Mg が過剰に存在すると、 Mg_2Si の固溶度が低下し、固溶される Mg_2Si 量が少なくなるために機械的性質も悪くなる。

440°C で押出した場合には、Mg および Si の量によって押出し材の機械的性質はほとんど変化せず、また値も一様に低くなる。

- (2) 押出し材を焼もどし処理（T5 処理）したときの機械的性質は、押出し温度の高低により大きな影響をうけ、押出し温度 520°C の場合には T5 処理により機械的性質を著しく向上させることができる。押出し温度 440°C の場合には T5 処理による効果はほとんどなく、480°C の場合には両者の中間を示す。
- (3) 押出し材の焼もどし（T5 処理）の条件としては 175°C で 3~5 hr がよい。また本実験に使用された Mg と Si の範囲では、Mg および Si が多いほど焼もどしによる機械的性質の向上は著しいが、Mg と Si の配合としては Mg_2Si を形成する割合より Si をわずかに過剰にしておくといよい。
- (4) 押出し材を焼入れ焼もどし処理（T6 処理）したときの機械的性質は、押出し温度の高低に影響されず、Mg と Si の配合割合により大きな影響をうける。そして T6 処理により機械的性質が向上する Mg と Si の割合は Mg 0.5~0.8%、Si 0.4~0.6% の範囲であり、Mg および Si が多いほど向上は著しい。
- (5) T6 処理の条件としては、T5 処理の場合より焼もどし時間を少し長くする必要があり、520°C で 1hr 溶体化処理後 20°C の水中に焼入れした場合には、175°C で 10hr の焼もどしが必要である。

終りに本研究に際して研究資金の一部として昭和 43 年度文部省科学研究費によったことを付記する。

参 考 文 献

- (1) 小林：長野高専紀要，1967，No. 2，p. 15.
- (2) F. Keller, C. M. Craighead: Trans. AIME, Inst. Metals, Div., 122, 1936, p. 315~323.
- (3) 高橋, 小林, 小島：軽金属, 1969. Vol. 19, p. 189.