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1報）
純アルミニウムの押出しについて

小　林　義　一*

Studies on the Extrusion of Aluminum and Aluminum Alloy (lst report)
On the Extrusion of Pure Aluminum

Yoshikazu Kobayashi

1. 緒　　言

アルミニウム合金の押出し加工技術の進歩はめざましく，型材もますます複雑なものができるようになっている。一方，押出し加工に関する基礎的研究もこれまでに数多くなされており，古くには Sachs[(1)~(2)] や Siebel[(3)] の有名な研究があり，その後もいろいろ研究されている[(4)]。わが国においても森永ほか[(5)]，幸田ほか[(6)]，麻田ほか[(7)]などがアルミニウムおよびその合金について，いろいろな押出し条件のもとで実験を行ない，その押出圧力を調べ，また得られた押出し棒の組織・硬さ・引張り性質などがどのように変化するかをいろいろな角度から調べている。また最近では63 s アルミニウム合金について工業的規模で押出し実験を行ない，最高押出し圧力を与える実験式をくわしく導いた工業上貴重な実験や[(8)]，押出し過程の変化を理論的に解析した研究[(9)]なども見られる。

このようにアルミニウムおよびその合金の押出しに関してはいろいろ研究されているが，筆者は万能試験機を利用して押出すことが出来るような押出し装置を設計製作し，アルミニウムおよびその合金の押出しに関する基礎的資料を実際に得る目的で実験をすすめているが，今回は純アルミニウムについての結果を報告する。

2. 押出し装置

押出し装置はリーレ型50ton 万能試験機を利用できるように設計した。図1はその組立図である。ダイスは取換え可能であり，コンテナにはできるだけ内側に熱電対挿入用の穴をあけ，ビレットは押板を介してラムにより加圧するようにした。使用した材料はダイス，コンテナ，押板およびラムは合金工具鋼D 6種，他は炭素鋼である。

また図2はダイスの詳細図を示す。図は加工度80%，ダイス角75° のものを示しているが，加工度およびダイス角をいろいろ変えて押出すために図中の α 寸法（ダイス穴）は，11·3ϕ，15·0ϕ，17·9ϕおよび20·4ϕの4種類，また α 寸法（ダイス角）は 90，75，60 および 45° の4種類のものをそれぞれ作成した。

写真1は押出し装置を万能試験機に取り付けた様子を示し，(1)は製作した押出し装置，(2)は加熱

* 機械工学科

用電気炉，(3)は熱電対，(4)は高温計そして(5)は試験機本体である。なお押出し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自記させた。

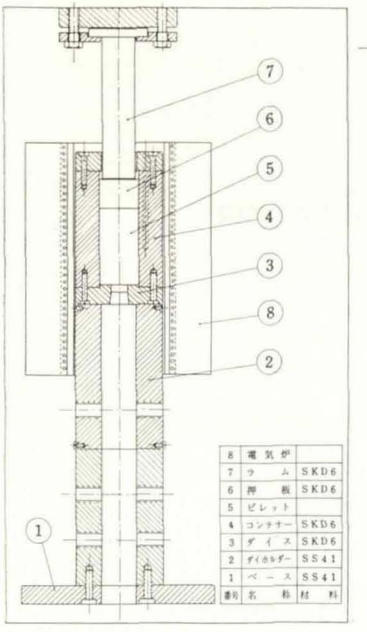


図　1　押出し装置組立図

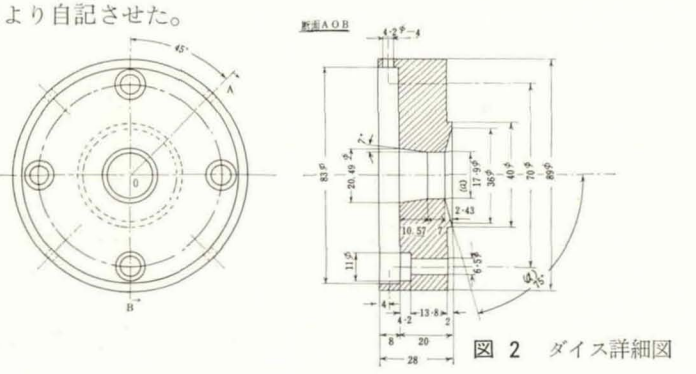


図　2　ダイス詳細図

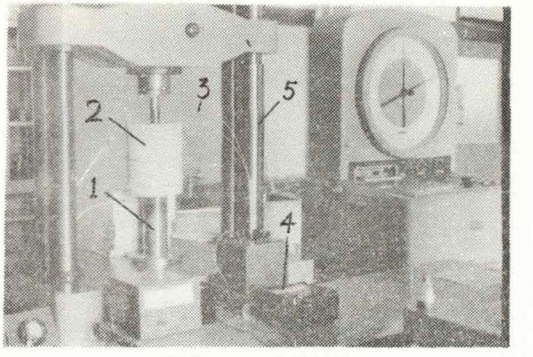


写真　1　実験装置

3. 試料の作成と実験方法

試料は99.8%アルミニウムを使用し，その化学組成を表1に示す。この試料を 45φ×160mm の金型に鋳込温度 690～700°C で鋳込んだ。金型への鋳造条件を同じにするために，金型は毎回水中で冷却し，恒温槽で 120～130°C にしてから鋳込んだ。その後 490°C，10hr の均質化処理を行なった。この鋳塊は写真2に示されるような柱状晶を示しているので，この影響を除くために金型の底の方（写真の右の方）20mm と上部（写真の左の方）60mおよび表面から 2.5mm をそれぞれ切りすてて中央部から直径 40mm，長さ 80mm のビレットを切削加工した。

表　1　試料の化学組成

Al(%)	Fe(%)	Cu(%)	Si(%)
99.80	0.14	0.001	0.05

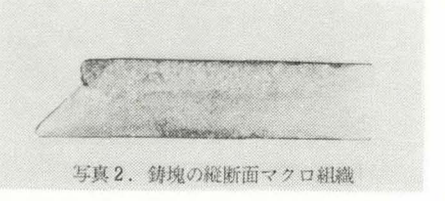


写真2．鋳塊の縦断面マクロ組織

押出しはビレットをコンテナに挿入後，ダイス，押板とともに同時に加熱し，所要の温度に達してから行なった。押出し温度は 350，450 および 520°C の3種類，加工度は74，80，86および92%の4種類，ダイス角は 90，75，60 および 45° の4種類そしてビレット長さを 80，60 および 40mm の3種類に変えて押出した。これらの押出し条件を一括して表2に，また使用したダ

イスの外観を写真3に示す。また押出し速度は 80～100mm/min と一定とし，押出し後はすべて空冷した。なお潤滑剤は黒鉛を使用した。

以上のようにして押出した押出し棒について外観，寸法，顕微鏡，硬さなどを調べまたX線ディフレクトメータによって集合組織の極点図作成およびX線写真の撮影を行なった。

表 2 押出し条件

加工度 (%)	74	80	86	92
ダイス角 (°)	90	75	60	45
押出し温度 (°C)	350	450	520	
ビレット大きさ (mm)	40φ×80	40φ×60	40φ×40	

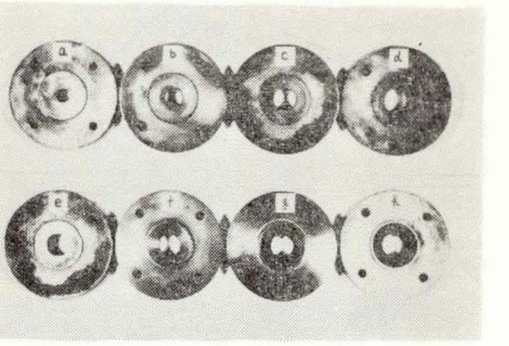


写真 3 ダイスの外観

a …加工度 92%
b … 〃 86%
c … 〃 80%
d … 〃 74%
ダイス角90°
e …ダイス角90°
f … 〃 75°
g … 〃 60°
h … 〃 45°
加工度80%

4. 実験結果とその考察

4—1 押出し圧力

押出し何重とストロークの関係は試験機の自記記録装置によりすべての押出し棒について記録したのであるが，その一例として，加工度80%，ダイス角90°，ビレット長さ60mmで各温度に押出したものを図3に示す。これによるとラムの移動につれてビレットが加圧されダイスから出始めるまで荷重は急激に上昇し最高荷重に達する。そしてビレットがダイスから出始めると荷重は減少し始め，それ以後，ラムの移動につれて残部ビレットの減少および押出し加工中の再結晶によって荷重はしだいに低下する。そしてコンテナー内に押出されるべきビレットがなくなった点で荷重は最低を示し，それ以後は押板がダイス面を直接加圧するので荷重は急激に上昇する。この図からわかるように実際の押出し作業において，ある材料を押出すことができるかどうかを知るには初めの立上がりに見られる最高荷重を知ればよい。そこでこれを押出し荷重とし，押出し荷重をビレットの横断面積で除して押出し圧力とし，押出し圧力が加工度，押出し温度，ビレット長さおよびダイス角によってどのように変化するかを調べた。図4～図7はこれらの結果を示す。これらの図から押出し圧力は加工度と押出し温度によって大いに影響され，加工度が大きくなるほど，また押出し温度が低くなるほど押出し圧力は飛躍的に増加する。そして両者の関係は片対数図表上で直線関係を示す。また，ビレット長さが長くなるにつれて押出し圧力は比例的に増加する。しかし，ダイス角を適当に選ぶと押出し圧力をある程度低下させることが可能であり，ダイス角 60°付近で押出し圧力が最低

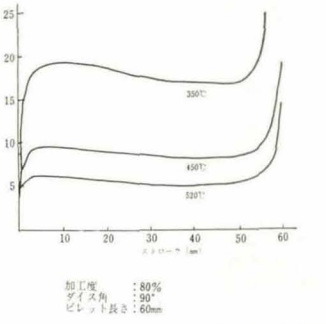


図 3 押出し荷重とストロークの関係

を示すことがわかる。

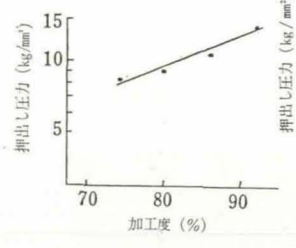


図4．押出し圧力と加工度との関係
押出し温度：450℃
ダイス角　：90°
ビレット長さ：80mm

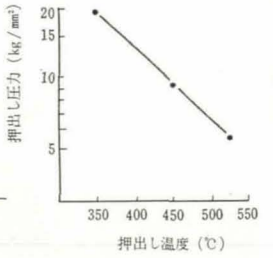


図5．押出し圧力と押出し温度との関係
ビレット長さ：80mm
ダイス角　：90°
加工度　　：80%

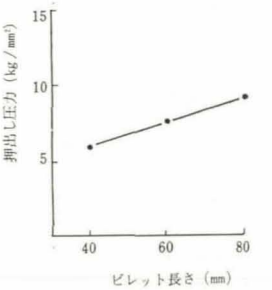


図6．押出し圧力とビレット長さとの関係
押出し温度：450℃
ダイス角　：90°
加工度　　：80%

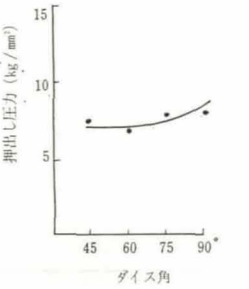


図7．押出し圧力とダイス角との関係
押出し温度　：450℃
ビレット長さ：80mm
加工度　　：80%

4—2　押出し棒の外観

得られた押出し棒の外観の一例を写真4に示す。これは押出し温度を450°C と一定にしダイス角90°，ビレット長さ80mm のものについていろいろな加工度で押出したものである。これによると押出し棒の外観はいずれの押出し条件で押出したものも，少々，縦方向にきずが見られる程度であまり大きな表面欠陥は見られない。

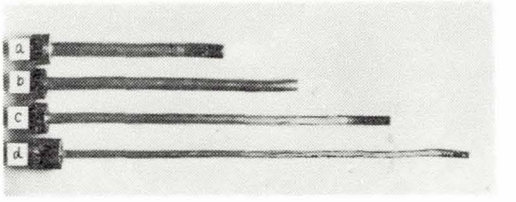


写真　4　押出し棒の外観

加工度 { a …74%
　　b …80%
　　c …86%
　　d …92%

4—3　押出し棒の位置による外径寸法の変化

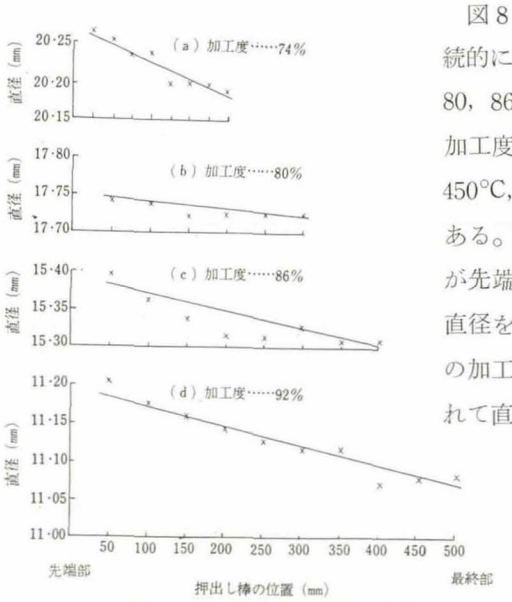
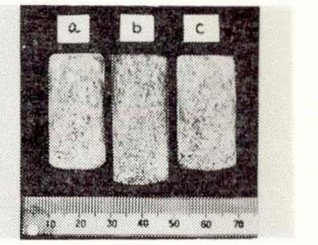


図　8　押出し棒の直径の変化
（押出し温度　：450°C
　ダイス角　　：90°
　ビレット長さ：80mm）

図8は押出し棒の直径を先端から最終部まで連続的に測定した結果である。加工度は上から74，80，86および92%である。その他の押出し条件は各加工度についてすべて同じであり，押出し温度450°C，ダイス角90°そしてビレット長さは80mmである。また図の横軸が押出し棒の位置を示し，左側が先端部，右側が最終部を示す。縦軸は押出し棒の直径を示している。これによると押出し棒はいずれの加工度においても，先端部から最終部になるにつれて直径が減少する傾向を示している。

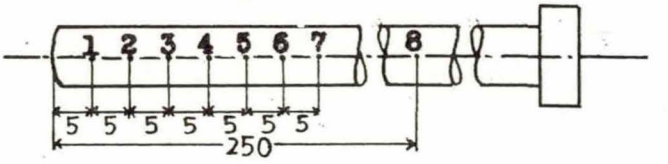
4—4 金属流れ

押出し棒には先端部から最終部になるにつれ，また中心部から外周部になるにつれて金属流れに変化があることは知られている。本実験においてもこの点を確かめるため，いろいろな押出し条件について肉眼および顕微鏡によって金属流れの様子を調べた。これらの結果を写真5～写真8に示す。写真5は押出し棒先端部の金属流れの様子を示したものであり，加工度80%，ダイズ角90°，ビレット長さ80mmで，押出し温度は左から350，450および520℃のものである。また全体の大きさは写真中のスケールにより知ることができる。これによると押出し棒は最先端では鋳造したときの組織のまゝであり，金属流れは生じていないが，なかに入るにつれて外側から中心に巻き込むように金属流れが生じているのがわかる。この様子をさらにくわしく調べるために顕微鏡によって観察した。写真6はその一例であり，加工度80%，押出し温度350℃，ダイス角90°のものである。写真は押出し棒の中心にそって，最先端から5mmおきに撮影した。なお写真中の番号は押出し棒の図に示した位置の番号と対応し，8番には先端部の組織と比較する意味で中央部の組織を示した。これらの写真から金属流れの変化の様子が非常に良くわかる。



(加工度80%，ダイス角90°，ビレット長さ80mm)
押出し温度 { a……350℃ / b……450℃ / c……520℃ }

写 真5 押出棒先端部のマクロ組織



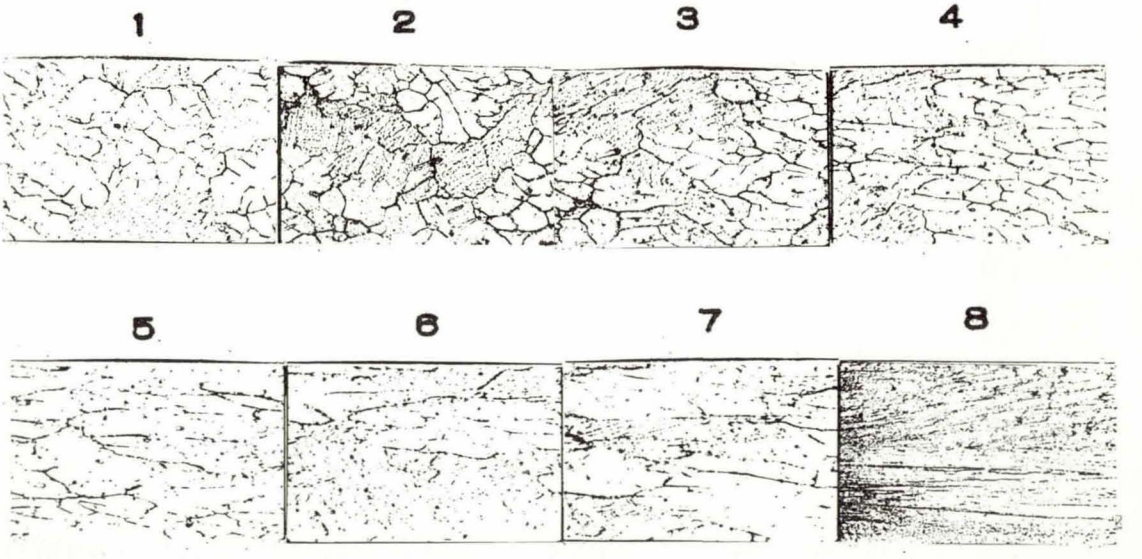


写真 6 押出し棒の顕微鏡写真（倍率…42）
(加 工 度……80%
押出し温度……350℃
ダ イ ス 角……90℃)

写真7はビレットがダイスを出るときの金属の流れの様子を示したものである。押出し温度は450°C，ダイス角は90°で加工度は左から74，80，86および92%である。このようにビレットがダイスを出るさいは，ダイスのかどの部分で非常に強く変形され，ダイスを出たところでは外周部が中心部に比べて，流れが急になっている様子が良くわかる。とくにダイス角92%のものは素材がダイス穴に向ってきれいな円弧状に，いちぢるしく強く変形され，ビレットの中心部はそれほど強く変形されておらず，素材が小さなダイス穴を出るさいの塑性変形機構を解明する場合の有力な手がかりを与えている。またいずれの加工度においてもビレットがダイス面に接する隅の部分に流れの生じていない部分すなわちデッドゾーンがはっきり見られる。

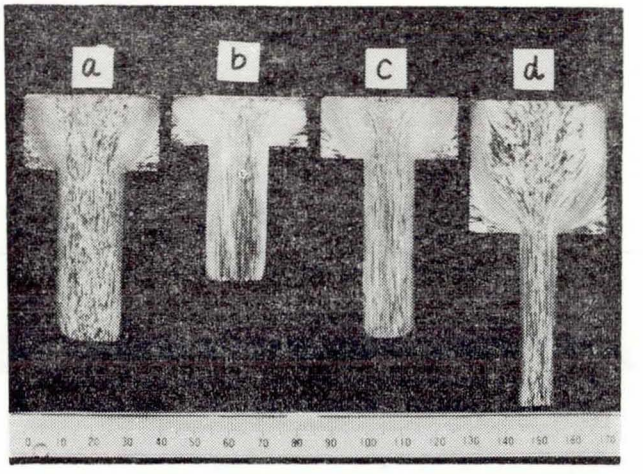


写真　7　残部ビレットのマクロ組織
加工度 { a……74%, b……80%, c……86%, d……92% }
押出し温度……450°C
ダイス角……90°C

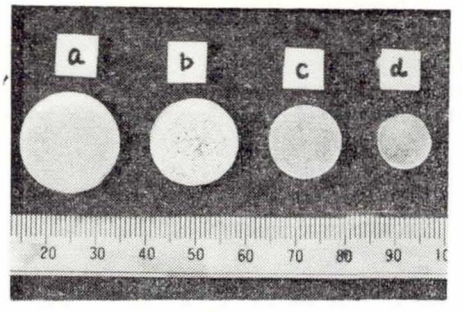


写真　8　押出し棒横断面のマクロ組織
加工度 { a…74%, b…80%, c…86%, d…92% }　押出し温度…450°C　ダイス角…90°

写真8は押出し棒中央部の横断面のマクロ組織である。押出し温度は450°C，ダイス角は90°であり，加工度は左から74，80，86および92%である。これによると加工度が低いときには，外周部が環状に強く変形され，中心部はそれほど変形されていないが，加工度が高くなるにつれて外周部と中心部の差はしだいになくなり，加工度92%のときは全面一様に強く変形されているのがわかる。

4—5　硬　さ

押出し棒の金属流れを調べた結果，先端部から中央部になるにつれて，また中心部から外周部になるにつれて流れに変化のあることがわかった。流れの急なところはそれだけ強く加工されているわけであるからその部分の硬さは高くなっていることは考えられる。そこで，いろいろな押出し条件で押出した押出し棒の縦断面および横断面の硬さを測定してみた。図9は縦断面の硬さの一例である。押出し条件は加工度80%，押出し温度450°C，ダイス角90°でビレット長さは上から

40, 60および80mmである。また実線は押出し棒の中心部，破線は外側そして一点鎖線は両者の中間の硬さをそれぞれ示す。なお硬さはマイクロビッカース硬度計を使用し，荷重100gで測定した。これによると先端部および最終部はいくぶん硬さが低いが，中央部では，ビレット長さ60mmのものが最終部になるにつれてわずかに硬さの低下する傾向が見られるほかは全般的に見てそれほど大きな変化は見られない。

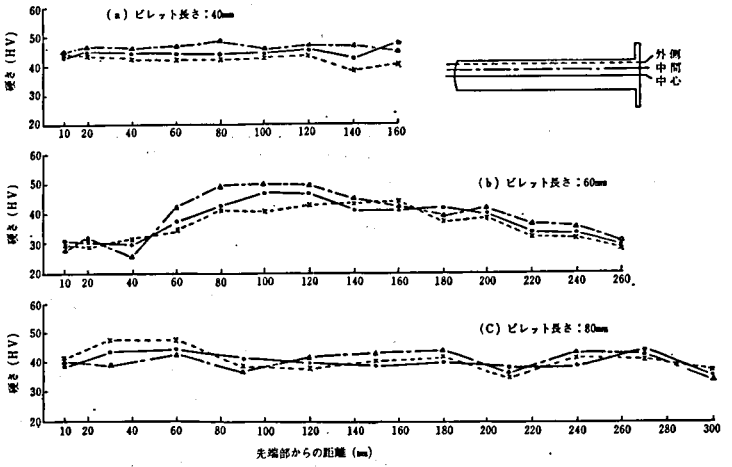


図 9 押出し棒縦断面の硬さ
(加工度：80%，押出し温度：450°C，ダイス角：90°)

図10は横断面の硬さ分布の一例であり，加工度80%，押出し温度 450°C，ダイス角 90° で押出したものである。なお図中の実線は最先端から10mmの横断面を，また破線は最先端から130mmの横断面の分布を示す。これによると最先端から 130mm のところでは外周部が中心部に比較して硬さは高い傾向を示すが，これは外周部が中心部より強く変形されているためであると考えられ，写真8の横断面のマクロ組織の結果と良い対応をしている。しかし最先端から10mm のところでは，マクロ組織の結果からも明らかなように，あまり加工されていないので硬さは一様に低い値を示している。

図11は残部ビレット縦断面の硬さ分布である。押出し条件は加工度80%，押出し温度450°C ダイス角90°，ビレット長さ80mmである。これによると残部ビレットの隅の部分の硬さが低く，写真7で見られたデッドゾーンと非常に良い対応を示しているのがわかる。

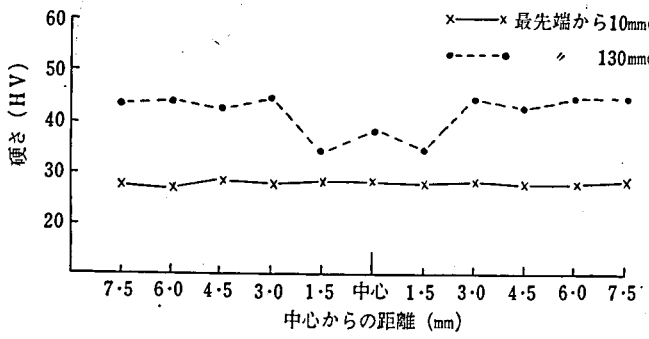


図 10 押出し棒横断面の硬さ
(加工度80%・押出し温度450°C・ダイス角90°)

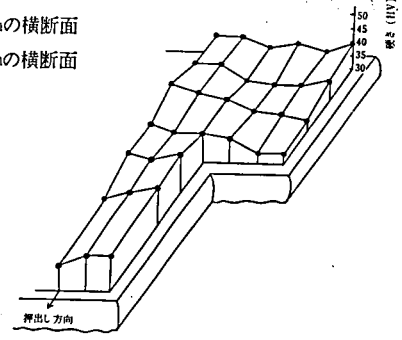


図 11 残部ビレット縦断面の硬さ
(加工度…80%・押出し温度450°C・ダイス角…90°)

4—6 押出し棒の集合組織

押出し棒の集合組織を研究する場合，従来はX線写真を撮影しその斑点の位置および黒化の程

度により集合組織をいろいろ論じていたのであるが，筆者はX線ディフレクトメータによって極点図をかくという方法により，アルミニウム押出し棒の集合組織をよりくわしく知ることができた。

図12および図13は押出し棒の<111>面の極点図である。図12は押出し温度の影響で，押出し温度は左側が350°C，右側が520°Cである。図13はダイス角の影響で，ダイス角は左側が90°，右側が45°である。また極点図は反射法（Shultz法）により作成し，投影面は棒の縦割り断面に

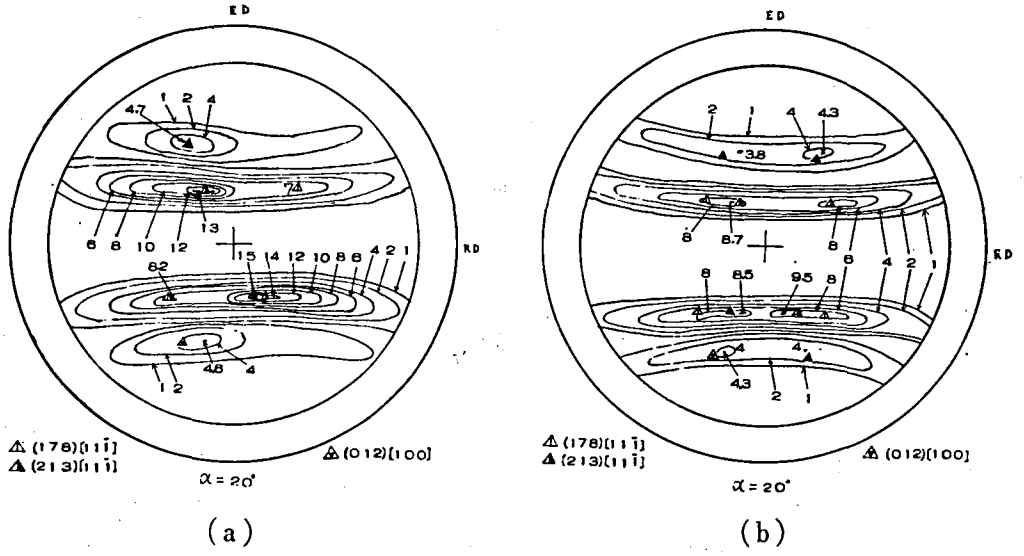


図 12 アルミニウム押出し棒の{111}極点図 —押出し温度の影響—（加工度80%，ダイス角90°）
押出し温度 { a …350°C / b …520°C }

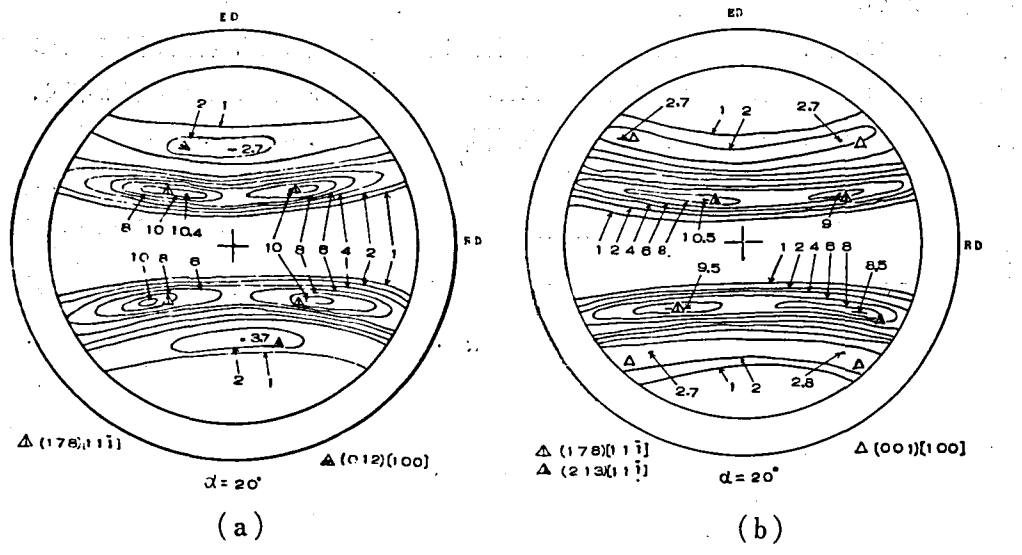


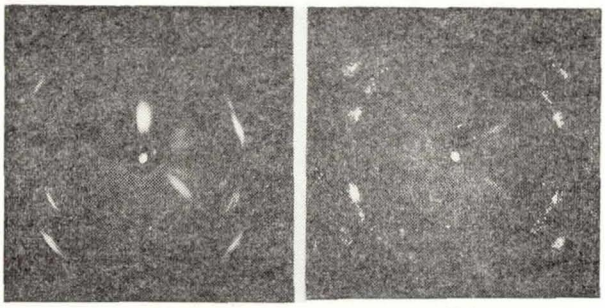
図 13 アルミニウム押出し棒の{111}極点図 —ダイス角の影響—（加工度80%，押出し温度450°C）
ダイス角 { a …90° / b …45° }

なっている。したがって，押出し方向と棒材の半径方向がこの面内にある。これらの極点図にお

いて外側の集積帯は<100>集合組織をまた内側の集積帯は<111>集合組織を示す。このようにアルミニウム押出し棒は<111>と<100>の2重集合組織を示すが，その強度は<111>の方が<100>に比べてはるかに大きい。また押出し温度によっても大いに影響され，350°C で押出したものの<111>の最高強度は15であるのに対し，520°C で押出したものは9.5となっている（図12参照)。しかし押出し温度が同じであれば，ダイス角の大小によって強度はほとんど変わらない（図13参照)。そして<111>および<100>を示す集積帯の内部で強度のとくに高くなっているのは (178)〔11$\bar{1}$〕, (213)〔11$\bar{1}$〕, (012)〔100〕および (001)〔100〕である。

また<111>や<100>のできる原因や割合については，これまでにいろいろ論ぜられている。たとえばHibbard[10]は99.994%アルミニウムを加工度98%で冷間引抜きを行ない，大部分<111>であるが，少々の<100>を観察し，<100>は室温での再結晶によるものであると結論を下し，Dayal[11]は99.5%アルミニウムについて実験し，<100>は高い加工度では消失する中間的成分であると結論づけている。また C. J. Mc Hargue[12]らは99.99%の純アルミニウムについて押出し実験を行ない，<100>成分のうちわずかな部分は鋳造時に生じた<100>集合組織がそのまゝ保たれているが，大部分は押出し加工中の再結晶によるものであると結論づけ，また<111>は変形集合組織であると結論づけている。筆者もこの件についてはくわしく実験し，すでに発表した[13]。

写真9は押出し温度 350°C と 520°C で押出した押出し棒のX線写真である。試料は押出し棒の中央部の中心から厚さほゞ2mmを切り出し，エメリーペーパおよびバフで平滑に仕上げてから電解研摩により厚さほゞ0.1mmまで薄くしたものをもちいた。使用したX線は Cu 対陰極で，Ni フイルターをし，電圧 30kv 電流 10mA の条件で，試料は静止し透過法で撮影した。なおX線照射時間は2hrである。これらのX線写真は図12の極点図と対応するものである。この



(a)　(b)

写真 9 アルミニウム押出し棒のX線写真
（加工度80%，ダイス角90°）
押出し温度 { a …350°C / b …520°C }

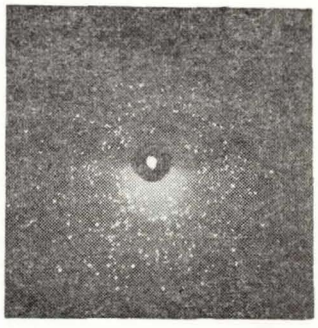


写真 10 350°C押出し棒を450°C 1 hr 焼鈍したX線写真

写真において，内側のリングは111反射を，外側のリングは200反射を示す。また111反射を示すリングの斑点の位置を調べることにより，この試料は<111>と<100>の2重集合組織をもっていることがわかる。また押出し温度520°C のものは斑点が小さな点に分かれ，両結晶しているのがわかる。

写真10は 350°C で押出した押出し棒の中央部から切り出した試料（写真9の左側の試料と同一のもの）を 450°C で1 hr 焼鈍したときのX線写真である。焼鈍により完全に再結晶してしま

っており，写真9のようなリングはもはや存在しなくなっている。

5. 結　　論

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%アルミニウムを，加工度，押出し温度，ダイス角，ビレット長さなどの押出し条件をいろいろ変えて押出し実験を行ない，得られた押出し棒の外観，寸法，顕微鏡，硬さなどの検査およびX線ディフレクトメータによる極点図作成やX線写真の撮影を行ない次の結論を得た。

（1） 純アルミニウムを押出すときの押出し圧力は加工度，押出し温度，ビレット長さ，ダイス角などの押出し条件によって大いに変化する。とくに加工度が大きくなるにつれ，また押出し温度が低くなるにつれて押出し圧力は飛躍的に大きくなり，両者はそれぞれ片対数図表上で直線関係を示す。またビレット長さが大きくなると押出し圧力は直線的に大きくなり，ダイス角が60°付近のときに押出し圧力は最も少ない。

（2） 押出し棒の外観は，いずれの押出し条件のものでも，それほど大きな表面欠陥は見られない。

（3） 押出し棒の外径寸法は，いずれの押出し条件で押出しても先端部から最終部になるにつれて減少する。

（4） 押出し棒の先端部から最終部になるにつれ，また中心部から外周部になるにつれて金属流れに変化がある。外周部は中心部に比較して流れは急であるが，加工度が高くなるにつれて両者の違いはしだいになくなり，全体の流れが一様にはやくなる。また残部ビレットのダイスに接する隅の部分には流れの生じないデッドゾーンが見られる。

（5） 押出し棒の先端部から最終部になるにつれて硬さの変化はあまり見られないが，中心部から外周部になるにつれて硬さは高くなる傾向を示す。またデッドゾーンの部分の硬さは一様に低く，金属流れの観察結果と良い対応を示す。

（6） アルミニウム押出し棒は<111>と<100>の2重集合組織を示すが，<111>の占める割合は<100>にくらべてはるかに多い。また，その強度は押出し温度が低いほど高く，押出し温度が同じであれば，ダイス角が変わってもそれほど変化はない。そして強度の高い部分は，(178)〔11$\bar{1}$〕，(213)〔11$\bar{1}$〕，(012)〔100〕および(001)〔100〕である。

この研究は筆者が内地研究員として東京工業大学に留学中に行なったものを一部分まとめたものである。

また研究を行なうにあたっては東京工業大学高橋恒夫教授の御指導を受けたことを付記して深謝の意を表します。

参 考 文 献

(1) G. Sachs : Spanlose Formung der Metalle, 1930.
(2) G. Sachs : J. of Inst. Metals, 1939, vol. 64, p. 261.
(3) E. Siebel : Die Formgebung im Bildsamen Zustande, 1932.

(4) C. E. Peason : J. Inst. Metals, 1931, vol. 45, p.345.
C. E. Peason : J. Inst. Metals, 1939, vol. 64, p.299.
(5) 森永, 細井, 湯川：軽金属, 1955, No.15, P.31.
森永, 細井, 南, 森田：軽金属, 1955, No.15, P.39.
森永, 細井, 寺本, 松島：軽金属, 1955, No.15, P.44.
森永, 細井：軽金属, 1955, No.15, P.50.
細井, 沢登, 湯川：軽金属, 1957, No.24, P.65.
細井, 湯川, 沢登：軽金属, 1958, No.28, P.33.
森永, 細井, 沢登：軽金属, 1958, No.29, P.9.
細井：軽金属, 1958, No.33, P.11.
細井：軽金属, 1958, No.33, P.24.
細井, 沢登：軽金属, 1958, No.33, P.29.
細井, 沢登：軽金属, 1958, No.33, P.33.
細井：軽金属, 1958, No.33, P.33.
(6) 幸田, 諸住, 加藤：軽金属, 1962, Vol.12, No.51, P.18.
(7) 麻田, 田中, 小池, 森本：日本金属学会誌, 1957, Vol.21, P.176.
麻田, 小池, 森本, 田中：日本金属学会誌, 1957, Vol.21, P.180.
麻田, 小池, 森本：日本金属学会誌, 1957, Vol.21, P.210.
麻田, 小池：日本金属学会誌, 1957, Vol.21, P.309.
(8) 竹内, 小林, 菊地：軽金属, 1965, Vol.15, No.74, P.340.
(9) R. M. Treco : Transactions of the A. S. M, 1962, vol. 55, p.697.
(10) W. R. Hibbard : Journal, Institute of Metals, 1950, vol. 77, p.581.
(11) P. Dayal : Trans., Indian Institute of Metals, 1956, vol. 10, p.201.
(12) C. J. McHargue, L. K. Jetter, J. C. Ogle : Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1959, vol. 215, p.831.
(13) 高橋, 小林：軽金属学会第32回春期大会, 1967.