マグネシウム合金粉末の押出しに関する研究*

諸住正太郎**・石河三郎***・幸田成康****

On the extrusion of magnesium alloy powder*

(UDC 669. 71' 721' 782-12 : 539. 4. 412)

MOROZUMI Shotaro**・ISHIKAWA Saburo***・KODA Shigeyasu****

This is to report on the experiment of extrusion of Mg-1%Al and Mg-0.6%Zr in powder. These alloys were used separately and also in mixture of 50-50. Through the experiment the followings were measured: curves of extrusion pressure versus temperature; appearance of extrusions; tensile strength of the materials extruded at different speeds and temperatures; tensile strength of annealed materials; macro and micro-structure of the material before and after extruded. These values were compared with those of the same materials extruded from cast billets and the findings are as follows: To obtain good powder extrusions, relatively high temperature (450° - 500°C), high reduction rate and high pressure are required. Softening of powder extrusions by annealing is less than that of extrusions from billets, because the dispersed oxide inhibits the grain growth. The extrusions of mixed powder of the two alloys (Mg-1%Al and Mg-0.6%Zr) keep higher strength after annealing. Extrusion process is also discussed here from the view point of metallography.

(Received Dec. 27, 1962)

1. ま え が き

筆者らの一部¹⁾が前に報告したように、マグネシウムおよびその合金を粉末押出し法によつて加工成形すると同組成の鑄造ビレットを用いて作つた押出し材よりも再結晶粒が細かく強さも高くなる。このマグネシウム粉末押出し法については、すでに米国において一部の合金に実用化されているが、その押出しに関する基礎実験の結果の発表^{2),3)}は少ない。とくにわが国においては全くないという現況である。

筆者らは、Mg-1% Al 合金および Mg-0.6% Zr 合金のアトマイズ法によつて作つたマグネシウム合金粉末(ベレット)を得たので、それを使つてこの粉末押出し法の基礎的な実験を行なつた。本報においてはその結果について述べる。なお比較のため Mg-1%Al 合金の鑄造ビレットによる押出しも併せて行なつた。

2. 試料および実験方法

2.1 試 料

用いた Mg-1% Al および Mg-0.6% Zr 合金粉末は、

米国 D 社で作られたもので、融解した合金をジェット噴射し飛散させて作つた真円度の高いものである。その断面および組織を **Photo. 1 (a)~(c)** にあげた。入手したこれら粉末は 60 メツシュ (0.25mm) のところにピークをもつものであるが、あらい方の粉末は他の目的に用い本実験では粉末状態を強調する意味もあつて、80 (0.177 mm)~150 メツシュ (0.105mm) のところに約 60% のピークをもつ粉末を用いた。その粒度分布の一例を **Table 1** に示す。

また、比較に用いた鑄造ビレットは Mg-1% Al 合金を 35mmφ の金型に鑄込んだものから、30mmφ×45mm の寸法に切削加工したものである。これらの試料の分析値は **Table 1** に示したとおりである。

2.2 押出し装置

用いた押出し装置を **Fig. 1** に示す。コンテナの内径は 30mm で、この装置に 50 t アムスラー型油圧万能試験機で圧力を加えた。加熱は装置の外側に取付けた抵抗型電気炉によつて行なつた。

2.3 押出し条件

ダイス孔は円形で直径が 6 および 8.5mm の 2 種を用

* 本会第23回秋期大会 (37-11-15) に発表

** 東北大学金属材料研究所助教授工博

*** 岩手大学工学部金属工学科教授

**** 東北大学金属材料研究所教授工博

Assist. Prof., The Research Institute for Iron, Steel and Other Metal, Tohoku University, Dr. Eng.

Prof., Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, Iwate University

Prof., The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University, Dr. Eng.

Table 1 Chemical composition and size distribution of powders of samples.

Billet	Mark	Chemical composition (%)		Size distribution of powders	
		Al	Zr		
Mg- 1 % Al Powder	AP	1. 11	—	Larger than 60 mesh	nil
				60 - 80 mesh	17. 8%
				80 - 150 mesh	63. 2%
				Smaller than 150 mesh	19. 0%
Mg- 1 % Al Cast	AC	0. 97	—	—	
Mg-0. 6% Zr Powder	ZP	—	0. 62	Larger than 60 mesh	nil
				60 - 80 mesh	12%
				80 - 150 mesh	64%
				Smaller than 150 mesh	24%

×150 (×4.5/7)

a. Section of Mg-0.6% Zr alloy powder, as polished

×600 (×4.5/7)

b. Microstructure of annealed Mg-0.6% Zr alloy powder for 2 hrs at 400°C, etched with acetic glycol etchant

×600 (×4.5/7)

c. Microstructure of annealed Mg-1% Al alloy powder for 2 hrs at 400°C, etched with acetic glycol etchant

Photo. 1 Section and microstructures of powder used.

いた。これらの直径をもつ押出し材はコンテナの内径に対して押出し比がそれぞれ 25 : 1 および 13 : 1 となり加工度としては前者が96%で後者は91%となる。

粉末試料の押出しは次のようにして行なつた。すなわち、ダイスを目くら板としてコンテナを 350℃ に加熱し、そのなかに粉末を入れて30分保持してから約10 t の加圧によつて圧縮した。次いでダイスの所定の位置の温度 (Fig. 1 参照) が所要の温度に達してから約 30 分間保持して、各速度で押出しを行なつた。試験機の自記記録装置によつて荷重—行程線図を得た。鑄造ビレットの押出しは、コンテナの中で試料を加熱し、粉末のときと同様に所要温度に達してから30分保持して行なつた。

押出し速度は押出されてでてくる試料の速度が 3.8~70cm/min であつて、その加減は試験機のバルブで油の送り速度を調節することによつて行なつたが、正確に速度を制御することは難しかつた。それで、実際に材料がダイスよりでてから押出しを終了するまでの時間と押出

し材の長さを測定して速度を知つた。

温度は前述のように、正確には試料の温度とはいいがたいが、できるだけ試料に近いコンテナの内部の温度を測定しているのでその差は大きくはない。押出し中の温度変化も若干あつたが、各比較する温度差にくらべると、さほど大きいものではなく、その影響は少ないと考えた。

なお、いずれの場合も潤滑剤は使用しなかつた。

2.4 実験項目

2.4.1 押出し圧力など

自記させた圧力—行程線図から押出し圧力を知り、変形抵抗、摩擦係数などを算出した。

2.4.2 外観検査

各条件下で押出した材料の表面状況を検査して割れなどの発生の有無を調べた。

2.4.3 組織検査

押出し素材および押出し途中の素材、および押出し材

Fig. 1 Extrusion apparatus.

の断面を研磨し、マクロおよびミクロ組織の検査を行なった。このときの腐食液は10% HNO_3 である。

2.4.4 引張試験

押出し材の頭部より2cmのところから、13cm おきに切断した試片を標点距離を5cmとして引張試験片を作った。これらの試験片はそれぞれの目的にしたがつて、押し出しのまま、または熱処理して引張った。使った試験機は5tのアムスラー型油圧試験機である。

2.4.5 硬さ試験

押出し材の性質の均一性を調べるため、必要に応じてロツクウェル、Eスケールで硬さを測定した。

3. 実験結果

3.1 押し出し実験

3.1.1 押し出し圧力

本実験における押し出しは、いわゆる前方押し出しであるが、粉末ビレットの押し出しにおける圧力一行程線図の傾向は鑄造ビレットのそれやアルミニウムの場合などと同じで、その図解的例を Fig. 2 に示す。

この線図における $P_{\max}$ (線図の最初の極大の荷重) と $P_{\min}$ (押し出し末期の極小荷重) とを求め、押し出し速度が粉末押し出し材では19.7~23.3cm/minのものについて、鑄造ビレットでは全試料(20~70cm/min)について、Siebel⁴⁾の式、

Fig. 2 Schematic drawing of extrusion pressure versus travel of ram diagram

Fig. 3 Values of K_e and μ versus extrusion temperature.

$$P_{\min} = F_0 K_e \ln F_0 / F_1$$

を用いて、変形抵抗 K_e を算出し、さらに

$$\mu = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\pi D L K_e}$$

より、摩擦係数 μ を求めた。ここに F_0 , F_1 はそれぞれコンテナおよび押し出し材の断面積であり、 D , L はそれぞれコンテナの内径およびビレットの最初の長さである。これらの結果を Fig. 3 にあげる。

これをみると、鑄造ビレットにくらべて粉末では変形抵抗および摩擦係数が大きく、Mg-1% Al より Mg-0.6% Zr 合金の方が押し出しに多くのエネルギーを必要とすることがわかる。

3.1.2 材料の流れ

通常押し出し時における材料の流れは、ビレットの縦断面にえがいた格子縞によって研究されているが、この粉末ビレットでは、最初の粒の表面にできている酸化膜に着目すると、もつと微視的なところでの材料の流れがよく観察される。それで Mg-0.6% Zr 合金の粉末を用い

(a)

 $\times 2 (\times 5.5/8)$

(b)

 $\times 400 (\times 4.5/7)$ **Photo. 2** Macro- and micro-structure of compact of Mg-0.6% Zr alloy powder

(a)

(b)

(c)

(d)

(c)

(f)

(g)

(h) $\times 400 (\times 3.5/6)$

I

 $\times 2 (\times 6.5/8)$

II

Photo. 3 Macro- and micro-structures of the Mg-0.6% Zr alloy compact at an early stage of extrusion.

て、6 mm ϕ の棒を押出したときの 各段階における材料の流れを調べた結果を次に述べる。

粉末をコンテナ内で加圧して、取出し、そのたて断面を研摩したものを **Photo. 2 (a)** に示す。350 $^{\circ}$ C で10 t ぐらいで加圧したものでは、下部（ダイス側で **Photo. 2 (a)** では左側）がよくつまっていない。そのため写真では、研摩などの操作で割れが入っているのがみられる。その中央部の顕微鏡写真を **Photo. 2 (b)** に示した。これを見ると、粒界に空洞がみられる。しかし、結晶粒は変

形加工をうけているのがわかる。これを押出していくと **Photo. 3 (I)**, **Photo. 4 (I)** となり、それらの内部組織は **Photo. 3 (a)~(h)**, **Photo. 4 (a)~(d)** というようになっている。

これらの写真をみると、各粒は変形され押出し方向に長く伸びている。そして粒内においては最初に存在するセルはさらに細かいセルに分けられ、ダイスからでたときは非常に細かい粒からできている。もちろんこの場合加工度が小さいと、押出された材料、とくに先端での変

Photo. 4 Macro- and micro-structures of the Mg-0.6% Zr alloy compact at a final stage of extrusion

Photo. 5 Transverse micro-structures of the 8.5mmφ Mg-1% Al alloy powder extrusions

形度が少なく、各粒が接着していないところもあるし、粒が長く伸びていないものもある。Mg-1% Al 合金粉末のときも同様な変形を行なうが、Mg-0.6% Zr 合金粉末の押し材にくらべると、押し材の粒度はいく分あいようである。Mg-1% Al 鋳造ピレットでも同様な変形機構が考えられるが、この場合では、結晶粒は相当大きく再結晶していて、かつ粒のそろつたものとなっている。

コンテナ内部の材料の変形は各部で異り、ピレット中心線上（ラムの中心線の延長上）での主な変形は、上述のように、ダイスに相当近づいたところで行なわれるが、側面部の材料はそれよりも強く変形され、できた押し材は中心線付近より表層部での加工度が高くなる。

その一例を Mg-1% Al 合金粉末を 8.5mmφ に押し出したときの試料について **Photo. 5** に示す。

しかしながら、ダイス側のコンテナの隅においては材料の流れの外側にあたるため、流れは起らず、たとえば、**Photo. 3** 中の図 (a) (II) の i のところは同図の h のところと同様の組織を示している。

3.2 押し材の性質

2.2.1 表面状況

粉末押し材の外観をみると、押し温度が低すぎたり、押し速度が不適当であると、いわゆるまつかさ状の割れが表面にみられる。一方、温度が高いと、押し方向に引っかききずのようにむしられた状況を示す。しかし、適当な押し条件では、きれいな表面が得られる。

この様子は鑄造ビレットの場合と若干おもむきが違う。鑄造ビレットでは高温になると、表面に押出し方向に対して直角にあらひ凸凹がみられ、それがさらに激しくなると、いわゆる熱脆性によるまつかさ状の割れに発達する。これらの表面状況の例を **Photo. 6 (I)** および **(II)** に示す。

このような表面欠陥(著しくなると内部にも達するが)の発生は押出し温度と速度に関係すると考えられるが、本実験におけるこれら欠陥の発生と押出し条件(温度および速度)の関係を 6 mm ϕ 押出し材について示すと **Fig. 4** のとおりである。

これをみると、粉末押出しは鑄造ビレットより高温で押出すとよいことがわかる。

次に、ふくれの現象についてふれる。比較的温度の高い押出しおよび焼なましにおいて、一部試料表面にふくれがみられた。これは粉末押出し材にみられる重要な結果の1つである。その原因としては最初の粒間に存在していた空気の残存したものか、水分などの揮発分が考えられる。これらについてはさらに実験を重ねて検討する必要がある。

3.2.2 押出し材の組織

押出し材の組織は、本実験の範囲内では、押出し温度や速度よりも、押出し比によつて大きく変化する。すなわち、押出し加工度が小さいと、押出し材の中心部と外側部では材料の流れる度合が違ふ。また先端は著しく加工度の小さいものとなつてくる。**Photo. 7** に 8.5 mm ϕ の押出し材のマクロおよびミクロ写真をのせた。これらを

Photo. 6 Appearance of powder- and cast-extrusions

Ia and IIa: Extruded at a moderate temperature
Ib and IIb: Extruded at a relatively high temperature
Ic : Extruded at a relatively low temperature

みると、押出し材の先端の中心部はほとんど加工されていないため、各粉末粒子の結合がわるく、粒がぼろぼろ落ちることさえある。この 8.5 mm ϕ の場合、先端から 45 cm 後のところでさへ比較的あらひ中心部をもつている。

このような中心部と外側部の流れの差異は、たとえ加工度が大きくなつても、まつたくなすることはできないもので、これはひとり粉末押出し材に限つたことではないが、後に述べるように、粉末押出し材においてはそれによる性質の差異が非常に大きいから、ある程度以上の加工を与えなければならない。6 mm ϕ の押出し材のものは 8.5 mm ϕ のものよりも先端における強さの劣化が少ないことは後にあげるとおりである。

粉末押出し材のミクロ組織を押出し方向とそれに直角の方向における断面についてみると (**Photo. 5** および **7** 参照) 当然考えられることであるが、各粉末粒子の表面酸化物は押出し方向に長く伸びてつながっている。直角方向においては、もとの粉末粒界にそつて網状になつてゐる。加工度の低いときはこの粒界の中が単一の結晶で占められていることもあるが、多くの場合前述のセル形成によつて細かい結晶粒に分かれてゐる。これに対して鑄造ビレットでは、等方的な新しい結晶粒の生成がみられ、それらの結晶粒をつらぬいて、押出し方向に流れ模様が腐食によつて現出される。これらの組織の焼なましによる変化については他の機会に発表したい。

3.2.2 押出し材の機械的性質

(1) 押出し方向における偏差

6 mm ϕ の押出し材について、押出し方向に 13 cm おきに切断した試片の引張強さを各合金について示すと、**Fig. 5** に示すとおりである。これをみると、同一合金でも押出し条件が異なるため強さに差がみられるが、粉末押出し材は鑄造ビレット押出し材よりも偏差が大きく、一

Fig. 4 Surface condition of 6mm ϕ - specimens extruded at various speeds and temperatures.

Photo. 7 Macro- and micro-structures at the front end of the 8.5mmφ Mg-1% Al alloy powder extrusions.

般に先端と後端が低くなる傾向にある。しかし、その偏差は押出し条件の変化による差よりも小さく、先、後端の一部を削除すれば実質的には差がないとみてもよいと考えられる。8.5mm φ の押出し材では同図に点線で併記したように、加二度が小さいと、先端部の強さは著しく低下する*。このことは前掲の **Photo. 7** からわかるが、この試片の各部の硬さの測定結果 (**Photo. 7** 中に併記) から判断すると、先端から約 10cm のところからはほぼ満足すべき均質性 (完全に均質という意味ではない) をもっているものと思う。

(2) 押出し条件による引張強さの偏差

6 mm φ の各試料の先端部から 3 本目のものについてそれらの引張強さを押出し速度に対して図示すると **Fig. 6** のとおりである。これを見ると、二、三の例外を除くと、粉末押出し材は押出し速度が速くなるにしたがつてわずかではあるが強さが増す。この実験では 1 つの点は 1 本の試験片の結果であるが、**Fig. 5** の同一押出し材の各部の性質変化から考えると、押出し温度の違いによる強さの差をも含めて、これらの **Fig. 6** での変化は押出し条件の違いによるものと考えられる。しかし、それらの条件がどのように作用しているかということについては、本実験の結果のみでは明確な解析はできない。

* この先端部試片の引張強さは、試片各部で異なり、この図での先端部強さは、その試片中でも最も弱い端部のチャック部での破断強さである。

(3) 焼なましによる押出し材の引張強さの変化

各条件での押出しによつて得られた試料中から、引張強さの差の小さいグループを選び、それらを 300~500℃ の各温度で 24 時間焼なましして引張試験を行なった結果を **Fig. 7** に示す。各点は 2~3 本の試験片の平均である。

これを見ると、鑄造ビレットから作られたものは 400℃ 以上の焼なましで強さが大きく低下するが、粉末押出し材のその低下は少ない。

同図には Mg-1% Al と Mg-0.6% Zr の粉末をほぼ等量に混ぜて押出しを行なった試料についての結果を点線で示した。これはいずれのものよりも強さの低下が少な

Fig. 5 Tensile strength of extrusions at each portion.

Fig. 6 Tensile strength of 6mmφ specimens extruded at various speeds and temperatures.

Fig. 7 Tensile strength of 6mmφ extrusions annealed for 24hrs. at various temperatures.

い。この試料は焼なまししたものでも Mg-0.6% Zr の地での結晶粒が非常に細かく、Mg-0.6% Zr 合金粉末単独押出し材の同処理のものより細かい結晶粒を示す。

このように、粉末押出し材は鑄造ビレット押出し材にくらべると焼なまし処理後における結晶粒も細かいため相当の強さを維持している。このことは粉末押出し材の大きな特色の1つである。

4. 考 察

本実験で用いた試料粉末は、Busk²⁾らの用いたのと同様な球状粉末であるが、入手したものをふるい分けし、細かいものを用いたので、本実験で得られた結果は、Busk²⁾らの結果よりむしろスクラツチ法によつて作つた 100~200 メツシュが約 90% の粉末で行なつた Cole³⁾の実験結果と比較検討するのがよいと考えられる。

一般に押出し圧力は、Cole の結果にも示されているように、押出し速度が大きくなるにつれて高くなる。本実験での速度範囲でもそのような傾向がみられる。それで粉末押出しにおける K_e の算出には約 20cm/min の押出し速度のものについて行なつたのであるが、こうして得られた粉末押出しの K_e の値は、もつとも速い速度 (20~70 cm/min) で押出しを行なつた鑄造ビレットのそれよりも高く、同じ K_e の値に対応する温度に約 50°C の

差がみられる。このことから粉末押出し材の高温における強さは、鑄造ビレット押出し材のそれより高いことが予期される。事実高温における強さや耐クリープ値は粉末押出し材の方がよい。⁵⁾

摩擦係数については、本実験では潤滑剤を用いながつたこと、およびラムとコンテナの間に相当の隙間があり、押出し後そこに合金が残存していることから、合金自体が潤滑作用をしているわけで、摩擦係数の値も合金強さに関連するようにも思われるが、明確ではない。とくに 400~450°C では K_e の値は著しく変化しているのに μ の変化はほとんどない。

粉末押出し材で、押出し温度の低いときにまつかさ状の割れが表面に発生することは Cole の研究でも認められ、彼は 450°C 以上での押出してなめらかな表面を得ている。本実験でも 450°C ではまだ十分にいいものが得られない場合もあるので、表面状況からみると 450~500°C の範囲で、しかもある程度速度 (10cm/min) 以上で押出しを行なうとよいと考えられる。これは鑄造ビレット押出しでは考えられない温度で、そのような温度で鑄造ビレットの押出しを行なうと、熱間脆性のため表面に同様な割れを発生する。Mg-1% Al 合金鑄造ビレットの 450°C での押出しでは、さらに温度をあげるとこのような割れへ移行すると思われるあらい表面がみられた。このように同一組成の合金でも、粉末と塊状ビレットでは押出し温度に大きな差がある。これは、Cole の指摘しているように、粉末押出しでは粉末表面の酸化膜を破つて粉末同士を結合させるに十分な温度が必要であるためであろう。

ふくれの発生は粉末押出し法において注意しなければならない重要な事項の1つであろう。同様な取扱いを行なつたにもかかわらず、あるものにはふくれの発生がみられたが、これは揮発物質の付着か、空気強制混入のためと思われる。

押出し材の不均質性は、押出し比をある程度大きくすることによつて避けられるだろう。本実験では 8.5mmφ 押出し材(押出し比 13:1)では均質性はよくないが、6mmφ (25:1)ではほぼ満足すべきものと考えられる。表面層と中心部との性質の差異は普通の押出し材でも、ある程度避けられないものであり⁶⁾、押出し法の本質的な問題である。

押出し条件による機械的性質の偏差についての結果は前述のように明らかな解析を行なえなかつたが、条件を正しく制御することによつて、機械的性質のよいものが得られることがわかつた。この機械的性質、とくに引張強さの差はおそらく押出し材の表面状況によつても影響されるだろう。表面を仕上げて使用するというを前提とすることは変則的であり、やはり押出ししたままの

表面を持つて使用されるということを対象に考えると、表面状況のよいものを作ることが重要なことであるから、この点を考慮してさらに実験の積重ねが行なわれなければならない。

次に押出し材を焼なまししたときの性質の変化についての本実験の結果をみると、粉末押出し材は 350°C あたりからの強さの低下が鑄造ビレットによるものよりも少ない。これは中間工業的規模で行なつた比較的大きい粒径をもつ粉末での押出し材における同様な試験の引張試験や硬さの測定結果⁷⁾と異なる。その実験では 300°C 以上の焼なましで強さが著しく低下している。それで本実験の結果と合わせて考えると、次のようになると思う。すなわち、粉末押出し材は押出しのままでは非常に細かい結晶粒を示し、一部加工組織を残存しているが、鑄造ビレットのそれは相当再結晶をした組織をもっている。それらを加熱していくと、鑄造ビレット押出し材は残留歪の除去と結晶粒粗大化が進み軟化するが、粉末押出し材では残留歪の除去後の結晶粒粗大化が分散している（押出し方向）酸化物のため阻止されて細かい結晶粒を維持する。残留歪が除去されると小さな圧こんでの硬さ測定では、硬さの値の低下が著しくなるだろう。しかし、結晶粒の粗大化が阻止されると、引張強さの著しい低下はみられないものと考えられる。

本実験においては粉末粒度の大きさの影響といったものについては研究の対象としなかつた。また酸化物の量という点では全く無知のものであつて、その量を制御することもしてない。しかし、明らかに以上の実験における粉末押出し材の特長は酸化物の効果とみてよい。その点から考えても、前述の中間工業的な規模での実験よりも本実験の結果の方が粉末の特長をよく表わしていると思う。中間工業的規模での試料が非常に耐クリープ値のよいことから、本実験でのさらに細かい粉末を使つて作つた試料は、もつとよい性能を示すものと期待される。

そういう点に加えて、Busk らのいう干渉 (interference) 硬化現象の利用も興味あるものである。この方法は通常の融解法による合金化ができない元素を粉末として、ともに押出しを行ない、その元素またはその後の熱処理で生成した分散化合物相によつて合金の強化を計るものである。本実験での $\text{Mg-1\% Al}$ と $\text{Mg-0.6\% Zr}$ 合金の混合は最初それを意図してアルミニウムとジルコニウムによる化合物形成を行なわせて材料の強化をねらつた。結果は各合金より強いものが得られ、焼なまし軟化の度合の少ない合金が得られた。しかし、その原因としては干渉硬化によるか、他の特殊な変形機構による $\text{Mg-0.6\% Zr}$ 合金地の再結晶温度上昇などによるか明らかではない。現在これについて他の方面から研究を行なつているので、将来あらためて発表したい。

5. む す び

本実験では、 $80\sim 150$ メツシュに約 60% のピークをもつ粒度分布の $\text{Mg-1\% Al}$ および $\text{Mg-0.6\% Zr}$ 合金粉末の押出しを行なつた。コンテナの内径は 30mm であり、押出し材の直径は 6 mm と 8.5 mm である。また押出し温度は $400\sim 550^{\circ}\text{C}$ 、速度は $3.8\sim 48.5\text{cm/min}$ である。その結果を要約すると次のとおりである。

(1) 変形抵抗や摩擦係数は同一組成合金の鑄造ビレットの押出しにおけるよりも大きく、温度の低下により増大する。

(2) 押出しの進行に伴なつて、最初の粉末中のセルの細分化というような様相によつて変形し、粒の外形は長く伸び、粒表面にあつた酸化物は押出し方向に長くつらなつていく。

(3) 押出し加工度が小さいと、押出し材先端の粉末の結合が悪く、また中心部と表層部の加工度が著しく異なる。

(4) 粉末押出しにおける温度は、鑄造ビレットのそれよりもはるかに高い温度が必要である。これは粉末表面の酸化膜を破つて粉末同士を結合させるに十分な温度ということになる。温度が低いとまつかさ状割れの発生が著しい。

(5) 押出し速度は、適当な温度で比較的速いものがよかつた。

(6) 押出し材各部の機械的性質の偏差は、押出し加工度が小さいと大きく、一般に鑄造ビレットのそれより大きい。

(7) 焼なましによる強さの低下は、鑄造ビレット押出し材より少ない。これは分散している酸化物による結晶成長阻止作用のため、結晶粒が比較的大きくならないからであると考えられる。

(8) $\text{Mg-1\% Al}$ および $\text{Mg-0.6\% Zr}$ 合金粉末を等量混ぜ合わせて作つた同時押出し材は、各合金粉末単体より作つた押出し材より、焼なましによる強さの低下が少ない。これについてはさらに研究を行なつていく。

(9) その他顕微鏡写真によつて押出し中および押出し材の材料の流れを示した。

本実験における合金粉末の入手には Dow Metal Products Co. の Dr. J. W. Fredrickson の好意によつた。また実験遂行には東北大学金属材料研究所菊地勉夫君の援助を得た。ここに厚く感謝の意を表します。なお本実験の一部は文部省科学研究費によることを併せて付記します。

参 考 文 献

- 1) 幸田, 諸住: 軽金属 **11** (No. 47) (1961) 125.
- 2) R. S. Busk, T. E. Leontis: Trans. AIME, **188** (1950) 297.
- 3) H. G. Cole: J. Inst. Metals: **86** (1957-58) 29
- 4) E. Siebel: Die Formgebung im Bildsamen Zustande (1932).
- 5) 幸田, 諸住: 未発表
- 6) 幸田, 諸住, 加藤: 軽金属 **12** (No. 15) (1962) 18.
- 7) 幸田, 諸住: 未発表.