焼結アルミニウム合金(SAP)の製造法に関する研究

増田 良道* 田中英八郎**

菊田 貞雄** 徳能 裕巳** 藤倉 正国***

Yoshimichi Masuda, Eihachiro Tanaka, Sadao Kikuta, Hiromi Tokuno and Masakuni Fujikura : On the Production Techniques of Sintered Aluminium Alloy.

Each process of production techniques of sintered aluminium alloy was studied experimentally by using atomized aluminium powder as starting material. The optimum condition was determined for each process in regarding with the properties of produced alloys.

The results obtained are as following:

(1) The optimum pressure for powder compaction at room temperature was 5 ton/cm² in taking account of densification and crack formation in compact. At this pressure the powders containing 10~15 wt% oxide were compacted to a density of 2.2~2.5 g/cm³, with a compacting factor of 3.0~3.5.

(2) In extrusion of the hot pressed compact much sounder material of uniform density was produced than in that of the cold compacted powder using the lower extrusion ratio, although the extrusion pressure increased about 10%.

(3) In order to prevent the occurrence of defects in the extruded products it is preferable to use of conical die designed to be minimized the shear component in material flow.

(4) For leveling down of the extrusion pressure the using of appropriate lubricant and the higher extrusion speed is advantageous.

As the hot pressed compact containing 11.6 wt% oxide was extruded at 500°C by using a 15:1 ratio and a lubricant of colloidal graphite in extrusion speed of 47 mm/sec, the extrusion pressure became lower than 40 kg/mm².

(Received August 30, 1963)

I. 緒 言

アルミニウムとアルミナの分散型合金である SAP については、すでに数多くの研究が行なわれている^{(1)~(3)†}。とくに常温および高温におけるその機械的性質については多くの実験が行なわれ^{(4)~(14)}、いわゆる分散強化機構については理論的検討も行なわれた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。その結果、SAP の機械的性質と分散相の分布状態については、一定の関係が存

在することが明らかにされ、またその機械的性質の一部についてはある程度理論的説明も可能になっている。しかし、SAP の製造工程はきわめて複雑で、製粉、成形および押出し加工の各段階において、分散相の分布状態を制約する要素が多数存在する。したがってこのような製造工程を経て作られた SAP の機械的性質は、各段階における製造条件によつて当然なんらかの影響をうけると考えられる。

しかし SAP に関する従来の研究はいずれもその特性自体を対象としたものが多く、製造工程を主体とした研究や、またそれと性質との関連性を対象とした研究はほとんど発表されていない。われわれはこの観点から、SAP について粉末の調製からその諸特性の研究にいたるまで一貫した研究を行ない、主としてその製造条件と性質との間の関係を明らかにする目的でこの研究を行なった。なお、本報ではまずこの研究の第一段階としての製造工程について、各段階における製造条件や加工法の検討を行なった結果を報告し、これと関連する諸性質の研究結果については別報で報告する。

- * 東北大学工学部金属工学科 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, Tōhoku University, Sendai)
- ** 東北大学金属材料研究所 (The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tōhoku University, Sendai)
- *** 日本楽器製造株式会社 (当時) (Nippon Musical Instrument Mfg. Co. Ltd., Hamamatsu)
- (1) J.G.Solomir: Z. Metallk., **52** (1961), 1645.
- (2) E.M.Modl-Onitsch: Aluminium, **37** (1961), 724.
- (3) E. A. Bloch and H. Hug: W. Leszynski eds., Powder Metallurgy, (1961), Interscience Publ. N. Y., 371.
- † (1), (2), (3) は SAP に関する最近の輯録文献
- (4) A. von Zeerleder: Z. Metallk., **41** (1950), 228.
- (5) E. Boenisch and W. Wiederholt: Z. Metallk., **42** (1951), 344.
- (6) R. Irrmann: Metallurgia, **46** (1952), 125.
- (7) E. Gregory and N. J. Grant: Trans. AIME, **200** (1954), 247.
- (8) F. V. Lenel, A. B. Backensto and M. V. Rose: Trans. AIME, **209** (1957), 124.
- (9) F. V. Lenel: R. F. Hehemann, G. M. Ault, eds., High Temperature Materials, Wiley, N. Y., (1959), 321.
- (10) G. S. Ansell: Trans. AIME, **215** (1959), 294.

- (11) G. S. Ansell and J. Weertman: Trans. AIME, **215** (1959), 838.
- (12) F. V. Lenel and G. S. Ansell: W. Leszynski eds., Powder Metallurgy, Interscience Publ. N. Y., (1961), 267.
- (13) E. J. Westerman and F. V. Lenel: Trans. AIME, **218** (1960), 1010.
- (14) C. L. Meyers and O. D. Sherby: J. Inst. Metals, **90** (1961~2), 380.

II. 実験方法

1. 粉末の調製

原料粉末は市販のアトマイズ Al 粉⁽¹⁵⁾を使用した。その純度および主な性質は Table 1 に示したとおりで、酸素は Al_2O_3 として約 0.5 wt% であった。従来の SIAG 法に準拠し⁽⁶⁾、これにステアリン酸を 0.5 wt% 添加し、シャワー型ボールミル⁽¹⁶⁾を使用して、酸素を 8 vol% 含む酸素と窒素の混合気流中で粉碎し、酸化物含有量を調整した。

Table 1 Atomized aluminium powder used for raw materials of SAP.

Mesh or particle size	Tap density (g/cc)	Chemical analysis, wt%			
		Fe	Si	Cu	O_2 (as Al_2O_3)
-200 mesh <74 microns	1.0	0.8	0.3	0.3	0.52

原料粉末の粒形は Photo. 1 (a) に示したように液滴形であるが (Photo. 1), 粉碎の進行に伴って (b) のように鱗片形となり、さらに粉碎が進むと微細化すると同時に一方では徐々に凝集がおこり、(c) に示したような粒状の粉末になる。このような粒形の変化に伴って粉末の性質は当然著しく変化する。Fig. 1 はその一例を示した図で、粉碎時間に対して粉末中の酸化物量、および粉末のタップ密度と被覆面積が変化する (Fig. 1)。粉末粒子が鱗片状になると

Fig.1 Change in properties of aluminium powder during a milling process.

表面張力で水面に浮くようになるので、単位質量の粉末が水面を被覆する面積を測定し、被覆面積を求めた⁽¹⁷⁾。すなわちこの場合被覆面積は粉碎過程を知るために一つの目安となる。この図からわかるように、粉末中の酸化物は粉碎時間とともに増加するが、被覆面積と密度は粒子の凝集が始まると急激に変化する。すなわち被覆面積は極大値を経

て急激に減少し、密度は逆に極小値を経て増加するが、その時期はやや遅れる。この実験例では、凝集は粉碎開始か

(a) as atomized

(b) milled

(c) milled and granulated

Photo.1 Various sort of aluminium powder, ($\times 250$)

(15) 長谷川, 今村: 金属学会会報, 1 (1962), 263.

(16) F. Skaupy: Metallkeramik, Verlag Chemie, Weinheim, Bergstr., (1950), 224.

(17) J.D. Edwards and R.D. Mason: Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., 6 (1934), 159.

ら約 30 時間後におこっているが、その時期は粉碎条件とくに粉碎機の構造や機能、さらに雰囲気、凝集防止剤の添加量によって変化する。たとえば、ステアリン酸の添加量や雰囲気中の酸素量が前記の値よりも少ない条件で粉碎すると、粉碎が十分に進行しないうちに凝集がおこり、酸化物量の多い粉末を調製することが不可能であった。しかしこれらの条件を一定に保つてもなお所要の性質を備えた粉末を作るに要する粉碎時間を一定にすることはできなかった。したがってこの場合、粉碎時間は粉末の性質を調整するための決定的な目安とすることはできなかったが、われわれの行なった実験条件のもとでは 10~15 wt% 程度の酸化物を含有し、適度な密度および、成形性をもつ粉末を作るには約 40~50 時間を要した。

実験に供した粉末はいずれも粉碎処理後、真空中 (10^{-3} mmHg) で 400°C に 1.5 時間加熱し、添加したステアリン酸を十分に蒸発除去したのち酸化物量を塩素法で分析した。また脱脂後の粒化処理によって粉末のタップ密度は Fig. 1 に×印で示したように、処理前の値約 0.25 から 0.6 g/cc 位まで飛躍的に増加し、吸着物質の離脱と同時に粒子の凝集が促進することを認めた。

トの素材を作るために用いたものと同じである。図に示したように圧粉体の高さ H の変化、すなわちラムの行程に対

Table 3 Methods and conditions of extrusion experiment.

Series	Diameter of green compact used for billet (mm)	Sheathing for hot compact and billet	Extrusion		
			Diameter of container (mm)	Method	Press
A	19	W rapped with Al foil	20	direct	Vertical type 40 t
B	30	〃	32	indirect	〃
C	62	Packed in Al-can of 3 mm chick	75	〃	Horizontal type 300 t

2. 常温圧粉成形

圧縮成形の第一条件として適当な成形圧力を決定するため、Table 2 に示した酸化物の含有量の異なる 4 種の粉末について常温における圧縮成形試験を行なった。すなわち、粉末 No. 1, 2, 3, 4 を選び、それらの粉末約 1 g を直径 10 mm の円筒形金型 (スプリング浮型方式) で圧縮成形し、それぞれの成形圧力に対して得られた圧粉体の密度を測定

Table 2 Properties of aluminium powder used for compaction test in room temperature.

Powder No.	Al_2O_3 content (wt%)	Tap density (g/cm^3)	Compacting factor at ($5 \text{ t}/\text{cm}^2$)
1	3.1	0.71	3.6
2	7.6	0.77	3.2
3	10.7	1.07	2.2
4	15.8	0.66	3.4
5	16.4	0.81	3.0

した。なおまた圧縮成形の過程を詳細に調べる目的で圧縮時における圧力の変化を測定する実験を行なった。ただしこの実験には粉末 No. 5 を用い、Fig. 2 に示したような片押し方式の円筒金型を使用した。この金型は押し出し用ピレッ

する圧縮圧力の変化を測定した。また、常温圧粉の実験にはすべて潤滑剤としてパラフィンの四塩化炭素溶液を工具面に塗布し、粉末と工具との摩擦および粘着を防いだ。

なお押し出し実験用の試料としては Table 3 に示したような直径の異なる 3 種の圧粉体を調製した。これらはいずれも $5 \text{ t}/\text{cm}^2$ の圧力のもとに 10~30 sec 保持し圧縮成形したが、これらの条件は前記の圧縮成形試験の結果から決定した (III. 2. 参照)。

3. 高温圧縮成形

常温で圧縮成形した圧粉体をそのまま高温押し出しにすることは不可能ではないが、予め高温で圧縮成形すれば押出材の密度や分散度は一層高くなることが期待される。したがって、両者を比較検討するために高温圧縮体の押し出し試験も行なった。なおこのための試料は Table 3 に示した 3 種の大きさの異なる圧粉体を用いて製作した。その場合圧粉体はいずれもその両端面をブラッシングしたのち数個重ね合せ、A, B の場合はアルミニウム箔で包み、C の場合は肉厚 3 mm のアルミニウム円筒に詰め 500°C , $5 \text{ t}/\text{cm}^2$ で圧縮加工を行なった。この条件はできるだけ密度の高い

ものを得る目的で、耐熱鋼金型の耐熱限度を考えに入れて選んだ。なお、この場合の潤滑剤はコロイド黒鉛懸濁油(oildag)を用いた。またこの処理によつて圧縮体の常温圧粉体の密度の約1.2~1.3倍となり、ほぼ押出し材の値に近くなった。

4. 高温押出し

高温押出しの実験に供した圧粉体、および高温圧縮体はいずれも前記の方法および条件によつて製作したものであるが、高温圧縮成形体は表面の被覆材を切削除去したのち、ふたたびアルミニウム被覆を行なつた。

押出し装置はFig.3にAの場合を示し、またBの場合はAと同形式のものを、ダミイ・ブロックとダイスを逆に入れ換えて用いた。なお、Cの場合はFig.4に示した横型

Fig.3 Schematic diagram of die assembly for direct extrusion.

Fig.4 Schematic diagram of die assembly for indirect extrusion.

の押出し装置を用いた。また使用した押出し機はTable 3に示したようにそれぞれ40 tの整型および300 tの横型水圧機を用い、圧力の測定は前者の場合支柱に貼りつけた抵抗線歪計を、また後者では水圧計を用いた。

押出し条件のうち温度は500°~550°Cの間に限定したが、この条件は別の押出し材について高温圧縮試験を行なった結果から決定した。なおこの実験については別報で報告する。その他押出し素材、押出し方法、潤滑剤の種類、速度、ダイスの形状、材質などを変え、押出圧の変化を測定した。

III. 実験結果とその考察

1. 常温圧粉体の密度と成形圧力の関係

酸化物含有量の異なる4種の粉末について、成形圧力と圧粉体の密度の関係を図示するとFig.5のようになる。一

Fig.5 Relation between compacting pressure and density of green compact of various aluminium powder with different oxide content.

般的傾向は普通の純金属粉末の場合と比べてとくに変つた点は認められない。また当然のことながら、酸化物含有量の多い粉末ほど圧縮性が悪く、圧粉体の密度は粉末の酸化物含有量と圧粉圧力によつてきまり、圧粉以前の粉末の見かけ密度とは直接関係がない。この場合粉末の真密度を正確に測定することができないので圧粉体の密度比ないし充実度を求めることはできないが、押出し材の密度に対する百分率を求めてみると、10 t/cm²で成形した圧粉体の密度は90~95%程度となる。Fig.5からわかるように8 t/cm²以上の圧力で圧粉しても密度の増加はたいして期待できず、また圧力が高くなると潤滑剤を用いても型の壁面に対する粉末の粘着が著しく、圧粉体を型から押出すとき層状に破壊する。したがつて余り高圧力で成形することは実際上好ましくない。一方圧力が2 t/cm²以下の場合には粒化度の低い鱗片状粒子を多く含む粉末は成形が困難である。以上の実験結果および実際の見地からみて、常温における圧縮成形の圧力は5 t/cm²が適当と考えられる。したがつて圧粉体の密度は2.2~2.5 g/cc程度となる。

2. 常温圧粉過程と粉末量との関係

Fig.6は同一ロットの粉末(Table 2, No.5)について粉

末量を変えて圧粉した場合における圧縮過程と圧力の関係を示した図である。すなわち、横軸に圧縮時におけるラム

Fig. 6 Changes in pressure with increasing of ram stroke during compacting various amount of aluminium powder containing 16.4 wt% Al_2O_3 in room temperature.

ないしパンチの行程をとり、縦軸に圧力の上昇を示した。いずれの場合も圧力は圧縮過程の初期においては低く、ほぼ一定であり終期に至つて急激に増加する。この曲線の形は潤滑剤の有無によつては変化しないが、粉末量が異なると圧粉体の高さが当然違つて来るので、図中に示したように変化する。しかしこの実験に用いた圧粉装置 (Fig. 2) の場合、粉末量を 100~300 g の範囲にとり、最終圧力を 5 t/cm² とすれば、円柱圧粉体の高さは 15~40 mm 程度となり、この範囲では粉末量と圧粉体の高さの関係は Fig. 7 に

Fig. 7 Relation between height of cylindrical compact and amount of powder used.

示したようにほぼ直線となり、得られる圧粉体の密度はほぼ一定 (2.45 g/cc) になることがわかった。したがつてこ

の場合粉末の圧縮比は約 3:1 になる。

また、この実験では圧縮速度を 1 cm/min に選んだが、この程度の低速で圧縮成形を行なえば、最終圧力 5 t/cm² に到達後、1 分間保持しても圧粉体の高さは変化せず、保持時間に対してはほとんど無関係となる。

3. 圧粉体の高温圧縮過程

Fig. 8 は酸化物含有量の異なる数種の圧粉体について高温圧縮 (500°C, 5 t/cm²) 実験を行なつた結果を示した図である (Fig. 8)。すなわち、横軸に圧縮体の長さないし高さの減少をとり、縦軸に圧縮過程における圧力の変化をとり、各試料の圧縮過程を示した。この実験に供した圧粉体試料はいずれも同一条件で調製 (Table 3 C) したものであるが、この図からわかるようにそれらの圧縮過程は必ずしも同一ではない。(a) は比較的正常的な圧縮過程の場合で、圧力は圧縮過程の進行に伴つて 2 段階に増加する。すなわち、この場合円柱形の圧粉体試料の直径は圧縮成形の金型の内径に比べてやや小さく、最小約 1 mm のあそびがある。したがつて第 1 段の圧力上昇は圧粉体が降伏するまでの過程をあらわし、第 2 段の圧力上昇は圧縮体が型の中にほとんど完全に詰まつてから後の過程をあらわすものと考えられ、この場合は普通の金属円柱を圧縮成形した場合の過程と同じである。一方 (b) に示した例は異常な圧縮過程で、とくに酸化物含有量が多く塑性に乏しい圧粉体や、また試料と型の間のあそびが大きい場合におこりがちである。すなわち、(a) に示した例はいずれも酸化物量が 10 wt% 前後の圧粉体を用いた場合で、この程度の酸化物量の場合はほぼ正常な圧縮過程を呈するが、酸化物量が 15 wt% 前後になると (b) に示したように異常過程を示す。また酸化物量が、(a) とほぼ同じとき、すなわち 9.6 wt% の試料では径が型の径に比べて著しく小さいために異常圧縮過程をおこした例である。このような異常を呈する原因は圧粉体が圧縮過程において一時的に破壊することにあると考えられるが、圧縮過程が異常を呈しても、圧縮の条件が一定ならばほぼ一定の密度の圧縮体が得られる。この場合得られる圧縮体密度の絶対値はもちろん酸化物含有量や圧縮条件に左右されるが、500°C, 5 t/cm² で圧縮した場合、圧粉体から圧縮体への実質的な体積減少率は約 15% で、密度も体積減少に相当するだけ増加し、押出し材の密度の値に近いものとなつた。

4. 正押出し過程における押出し圧力と潤滑剤および押出し速度の関係

SAP の高温押出しに適した潤滑剤および押出し速度を決定するため、できるだけ他の条件を一定に保つて正押出しの実験を行ない、押出し圧力におよぼす潤滑剤や押出し速度の影響を調べた。すなわち、Table 4 は酸化物含有量 11.6 wt% の A 型試料 (Table 3 参照) について、flat die (bearing length 2 mm, 押出し比 15:1) を用い、正押出しを行なつた結果をまとめたものである。なおこの場合、

押し温度は500°Cを目標とし、できるだけ一定に保つように努めたが、予熱の温度調整が難かしく、その結果は表

下するためと考えられる。しかしこの点はなお検討を要するので、ここでただちに結論することは避けたい。しかし

Fig.8 Changes in pressure with increase in reduction percentage of compact height during hot pressing of various green compacts containing different Al_2O_3 amount.

Table 4 Experimental conditions for direct extrusion of A series shown in Table 3.

	Lubricant	Temp. (°C)	Speed (mm/sec)	Press (kg/mm ²)	Miscellaneous
1-0	no Lubrication	503	25	58.5	Oxide Content 11.6 wt%
1-1	Graphite Grease	496	21	55.1	Cold Press Compact
1-2	"	490	46	43.0	18 mm ϕ × 38 mmh
2-1	Moly kote	508	23	57.1	Direct Ext.
2-2	"	533	34	43.4	Ext. Ratio 15
2-3	"	510	47	47.3	Flat Die
3-1	Aqua-dag	506	21	42.1	Bearing Length 2 mm
3-2	"	500	39	40.1	
4-1	Oil-dag	495	35	48.4	
4-2	"	506	47	34.4	

に記載したようにやや不同となつた。したがって、以下実験結果の検討に際しては、できるだけ相互の温度差の小さいものを選んで比較した。さて、この表からわかるように無潤滑の場合(1-0)、押し速度21~25 mm/secで押し圧は58.5 kg/mm²となり、かなり高いが、黒鉛グリースのような普通の潤滑剤を試料に塗布すると押し圧は数%低下し、55.1, 57.1 kg/mm²(1-1, 2-1)程度になる。また、さらにコロイド黒鉛懸濁水のような特殊潤滑剤を用いた場合(3-1)、押し圧は約30%も低下し42.1 kg/mm²となつた。

一方、同じ潤滑剤を使用し、押し速度を変化させた場合、すなわち1-1と1-2, 2-1と2-3, 3-1と3-2, 4-1と4-2をそれぞれ比較してみると、明らかに押し速度の大きい方が押し圧が低いことがわかる。この傾向は普通の金属の押出しの場合とは全く逆で、SAPの特徴の一つと考えられる。また、その原因は押し速度が大きくなると押し中に温度上昇がおり、そのためSAPの変形抵抗が低

い。以上の結果からSAPの高温における押し圧は本来かなり高いにもかかわらず、潤滑剤や押し速度の適当な選定によって相当低い値、たとえば40 kg/mm²以下(4-2)に下げることが明らかにされた。

5. 逆押し過程における圧力の変化

逆押し過程におけるラム行程と圧力の変化との関係は普通の金属の場合とほとんど同様で、とくに指摘すべき特徴はない。すなわち、押し開始後圧力はほとんど一定で変化なく、その圧力は同一条件で正押しを行なつた場合に比較して低い。

6. 常温圧粉体の押し加工

常温で成形した圧粉体を高温圧縮せず、そのまま高温押しした場合と、高温圧縮成形を行なつたのち押しした場合と両者を比較するため、酸化物量の同じ試料について、できるだけ押し条件を同じにして比較実験を行なつた。

その結果は Table 5 に示したように正、逆いずれの押出しの場合にも、素材に圧粉体を用いた場合は高温圧縮体で材質はそれぞれ SKD 4 (ダイス鋼) と超硬合金 (WC-Co) 認められない。また 3, 4 および 5, 6 はいずれも flat die

Table 5 Relation between extrusion pressure and content of oxide in billets (prepared by two different method).

	Oxide content (wt%)	C or H	Direct or Indirect	Ext. Ratio (mmφ)	Ext. Temp. (g)	Speed (mm/sec)	Press (kg/mm ²)	Die
1	9.6	C	Indirect	10 (10)	509	24	30.0	Flat die bearing 2 mm
2	"	C	"	10 (10)	511	8	35.0	"
3	"	C	"	10 (10)	509	5	40.5	"
4	"	H	"	10 (10)	510	14	34.0	"
5	"	H	"	10 (10)	500	7	38.0	"
6	7.6	C	Direct	15 (5)	513	30	45.5	"
7	"	H	"	15 (5)	505	28	50.0	"

C: Cold pressed billet; H: Hot pressed billet (500°C, 5 t/cm²)

用いた場合に比べて押出し圧は約 10% 低い (6, 7, 2, 5 参照)。これはおそらく粉末粒子間の結合状態の差に原因すると思われる。しかし、この点についてはなお今後の研究にまたなければならぬ。

一方、圧粉体と高温圧縮体の密度差は 12% であったが、これらを押出したものの密度にはほとんど差がなかった。したがって、圧粉体に存在した空隙は押出し加工中にほとんど絞り出されてしまうものと考えられる。また、そのためか押出し材の末端近くに空気の出出し口と思われるフレを生じ、その近傍はきわめて多孔質となる。

さらに圧粉体を素材とした押出し材においては、その末端部に細かい亀裂が多数発生するが、これはコンテナ中の dead metal に相当する部分と推定される。

以上の結果から、圧粉体をそのまま素材として押出せば押出し圧は低くてすむが、その押出し材は高温圧縮体を素材としたものに比べて末端部に種々の欠陥があらわれやすく、また、密度も不均一になるおそれがあることがわかった。

7. 押出し圧におよぼすダイスの形状および材質の影響

A および B 型の試料 (Table 3 参照) について、形状および材質の異なる種々のダイスを用い逆押出しの実験を行ない、その結果を Table 6 にまとめた。

であるが、押出し圧は超硬ダイスの方がやや高い程度で、いずれにしても大差のない結果を得た。

一方、ダイス面の角度を変えた場合は 7, 8 に示した。すなわち、7 は半角 60° の凹面をもつダイスを使用した場合で、8 は逆に半角 60° の凸面をもつダイスを用いた場合の結果であるが、凹面ダイスによる押出し圧は凸面ダイスを用いた場合より約 10% 高い。このようにダイスの形状や材質は SAP の押出し圧にはたいした影響をおよぼさないことが明らかにされた。しかしつぎにのべるようにダイスの形状は押出し材に発生する亀裂とは密接な関係がある。

8. 押出しダイスの形状と押出し材に発生する亀裂の関係

SAP はその酸化物含有量が増加するにもなつて硬くなり、また脆くなることはすでによく知られているとおりで、それに準じて押出し圧も増加するが、とくに酸化物含有量が 15 wt% をこえると、押出し材全面にわたつて著しい亀裂が発生することが、おうおうにして認められた。

Photo. 2 は酸化物含有量 15.8 wt% の素材を押出し比 10:1, 500°C で押出した直径 24 mm の SAP の写真である。(a) は flat die を使用した場合で、押出し材の全長にわたつて著しい亀裂を生じた。しかしダイス半角 45° の凹面ダイスを用いると (b) に示したように亀裂の数は著しく減少する。また、さらに半角の大きい 30° の凹面ダイスを

Table 6 Die profile and material relationship on extrusion pressure in various extrusion experiments.

	Oxide content (wt%)	Direct or indirect	Die profile	Ext. ratio	Ext. temp. (°C)	Ext. speed (mm/sec)	Ext. press (kg/mm ²)
1	5.2	Indirect	Flat-3	5	512	13	20.3
2	"	"	Flat-0.5	5	505	13	20.0
3	"	"	Flat-2	10	505	11	34.5
4	"	"	W.C.-1	10	507	9	37.0
5	Al Billet	"	Flat-1	5	400	10	13.0
6	"	"	W.C.-1	5	395	11	13.6
7	8.3	"	M-30-2	10	505	5	44.0
8	"	"	Φ-30-2	10	508	4	40.0
9	10.0	"	Flat-2	10	507	3	40.7

Die material: {W-carbide (W-10% Co)}; Flat-3: Flat die bearing 3 mm; M-30-2: Φ30° bearing 2 mm

表中 1, 2 はともに flat die で bearing length はそれぞれ 3 および 0.5 mm であるが、押出し圧にはほとんど差が

用いると (c) のように亀裂発生は全く認められなくなつた。この結果は押出し中の附加的せん断変形量とよく対応する

と考えられる。すなわち、SAP のように高温で脆くなる合金の押出しには附加的せん断変形量の最も少ないダイス形

Photo.2 Surface of extruded S.A.P. bar with 15.8 wt% oxide. ($\times 1/5$)
(a) die angle 180° (flat die)
(b) die angle 90°
(c) die angle 60°

状を選ぶことが望ましい。

なお、SAP の場合の押出し圧は Table 5, 6 に示したように、押出し比の増加とともに上昇するが、その点は他の金属の場合と同様である。

IV. 総 括

SAP の製造条件について研究を行ない、つぎの結果をえた。

(1) 圧粉体の密度は粉末の酸化物含有量と圧粉圧力によって定まり、粉末の見かけ密度と直接関係がない。

(2) 酸化物含有量 10~15 wt% の Al 粉を成形する圧力としては約 5 t/cm^2 が適し、この場合圧縮係数は約 3.0~3.5 で、密度が 2.2~2.5 g/cc 程度の圧粉体がえられる。

(3) 前記の圧粉体を 500°C 、 5 t/cm^2 で高温圧縮した場合、体積は約 15% 減少する。この場合正常な圧縮過程は普通の金属円柱の圧縮過程と同じである。

(4) 前記高温圧縮体の押出し圧は潤滑剤の種類、押出し速度により著しい影響をうけるが、それらを適当に選定すれば、酸化物含有量 11.6 wt% の場合でも 500°C 、押出し比 15:1 の場合、押出し圧を 40 kg/mm^2 以下に下げることができる。

(5) ダイスの材質やベアリング長さは押出し圧に対して大した影響をおよぼさない。

(6) 圧粉体を高温圧縮せず、そのまま押出せば押出し圧は高温圧縮体を押出す場合に比べ約 10% 低くなり、押出し材の密度はほぼ同じになるが、欠陥が発生しやすく密度も不均一になりがちである。

(7) ダイスの形状は押出し圧には著しい影響をおよぼさないが、欠陥の発生に密接な関係があり、その観点から附加的せん断変形量を最も少なくするような形状のダイスが適当である。

この研究は日本楽器製造株式会社の協力によって行なわれた。とくに試料の化学分析はすべて同社技術研究所で行なつた。なお、この研究の遂行にあたり、種々御指導、御援助をいただいた東北大学金属材料研究所大日方一司教授、ならびに日本楽器製造株式会社技術研究所金属研究室長 Dr-Ing. 執印智司氏に深く感謝の意を表します。