

アルミニウム粉末の摩擦押出しによる
薄板の成形法の開発*中村 保^{*1}, 平岩 正 至^{*1}
今泉 晴 樹^{*2}, 富沢 康 治^{*3}Friction-Assisted Extrusion of Aluminium Thin Strips
from Pure Aluminium PowderTamotsu NAKAMURA, Masashi HIRAIWA,
Haruki IMAIZUMI and Yasuji TOMIZAWA

The friction-assisted extrusion of thin strips developed by the authors was applied to a powder-forming from pure aluminium powder. The thin strips of 0.05-2 mm in thickness could be cold-formed directly from the aluminium powder with a considerably low punch pressure ratio $p/2k=0.9-1.2$ (p : punch pressure, k : yield shear stress), which agreed with the theoretical value estimated by an upper bound method. The thin strips formed from the aluminium powder have superior mechanical properties to the strips formed from aluminium blocks, such as Vickers hardness $HV=60-90$, ultimate tensile strength $S_T=220-320$ MPa, total elongation $e_T=4-5\%$ and so on.

Key Words: Plastic Forming, Tribology, Friction-Assisted Extrusion, Thin Metal Strip, Aluminium Powder, Powder Forming, Mechanical Properties

1. 結 論

金属等の粉末成形において、成形体の密度を高め、製品強度や寸法精度の向上を図るため、圧密・焼結後の熱間塑性加工（焼結鍛造等）、あるいは静水圧成形（CIP, HIP）が行われる。また、粉末素材を金属容器に詰め、直接熱間塑性加工を行うことも試みられている⁽¹⁾。これらの方法はいずれも熱間状態での成形であるが、冷間状態でも粉末素材に高圧力下で、極めて大きな塑性変形を与え、粉末粒自身の大きな塑性変形あるいは粉末粒同士の相対移動や相対すべりを生じさせることにより、粉末成形体の密度や粉末粒同士の接合力を顕著に高めることが可能になると考えられる⁽²⁾。さらに、このような粉末成形体を焼結することにより、粉末粒間の拡散接合をいっそう助長することができると考えられる。また、複合粉末素材から、直接冷間で塑性成形することにより、各種複合材料の製造の可能性が期待される。

本研究では、著者らが開発した薄板の摩擦押出し成

形法⁽³⁾を利用して、粉末素材から各種複合材料の製造法の可能性を探るため、一種のモデル粉末素材として、工業用純アルミニウム粉末素材から薄板を冷間で直接成形する方法について検討した。その結果、厚さ約 50 μm までの薄板の成形が実現でき、その強度特性等は、溶製材の摩擦押出しによる薄板と同等以上になることが明らかになったので、ここに報告する。

2. 成 形 原 理

図 1 は摩擦押出しにより粉末素材から薄板を直接成形する方法の原理を示す。粉末素材 1 をコンテナ 5 中に充てんし、パンチ 4 により加圧・圧密する。所定のパンチ面圧を負荷した状態で、アンビル 2 を横押しラムにより水平に駆動すると、アンビル工具面の摩擦力により素材はダイス 3 の間げきから流出し、薄板 1 a が形成される。パンチによる圧密だけでは十分な高密度化と高強度化は達成されないが、摩擦押出しでは、アンビル面近傍における高面圧下での厳しいせん断変形により、粉末粒自身の大きな塑性変形と粉末粒同士の相対移動が生じ、その結果粉末成形体の高密度化と粉末粒同士の強固な圧接接合が生じ、高強度特性が得られるものと期待される。

* 平成 2 年 5 月 11 日 塑性加工春期講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 4 月 13 日。

*¹ 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北 3-5-1)。

*² 静岡大学工学部。

*³ マルヤス工業(株) (〒444 岡崎市橋目町 1)。

3. 実験方法

粉末素材からの薄板の摩擦押出し成形装置は、ブロック素材からの成形の場合と全く同じで、多軸動油圧プレスにセットされている⁽³⁾。表1に実験条件を示す。コンテナは超硬合金(V4)製の組型で、横断面寸法は $10 \times 10 \text{ mm}^2$ である。ダイス出口寸法は幅10mmで、間げき $h=0.05 \sim 2 \text{ mm}$ までとし、押出し比を $R=5 \sim 200$ の間で6段階に変更した。アンビルは超硬合金(V4)製で、供試面の表面粗さは $R_{\text{max}}=0.2 \mu\text{m}$ 、 $R_a=0.047 \mu\text{m}$ である。アンビルの横押し速度は約 0.1 mm/s 、最大移動行程は40mmとした。パンチ荷重 P_p 、アンビル荷重 P_A およびコンテナクランプ荷重 P_H を押し行程中連続測定した。なお、コンテナのクランプ荷重 P_H はアンビルに直接加わらないように、ダイホルダで受ける構造となっている。

供試素材粉末としては表2に示す工業用純アルミニウムのアトマイズ粉末At-100(平均粒径 $100 \sim 200 \mu\text{m}$)を用いた。このアルミニウム粉末の真密度は $\rho_0=2.699 \text{ g/cm}^3$ である。粉末充てん量は、真密度体積で $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ になるように重量測定した。圧密時に

表1 実験条件

(a) 工具

	Material	Mechanical properties	Surface roughness
Die	Cemented carbide V4	Hardness HRA: about 85	$R_{\text{max}}=0.2 \mu\text{m}$
Anvil	Cemented carbide V4	Hardness HRA: about 85	$R_{\text{max}}=0.2 \mu\text{m}$ $R_a=0.047 \mu\text{m}$

(b) 成形条件

Cross section of container: $10 \times 10 \text{ mm}^2$
Extruded thickness: 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1, 0.05 mm
Extrusion ratio: 5, 10, 20, 40, 100, 200
Anvil velocity: about 0.1 mm/s
Anvil stroke: about 40 mm
Lubricant of container: Zinc stearate
Lubrication condition of anvil surface: Dry

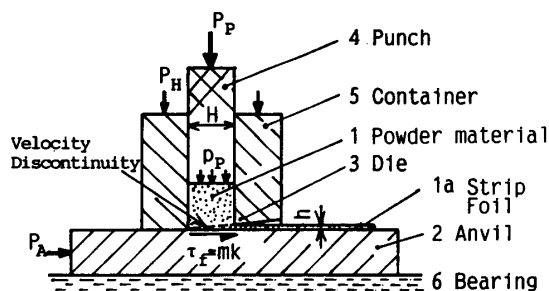


図1 粉末素材からの薄板の摩擦押出し成形法の原理

は、ダイス出口に簡単なふたをして成形した。

本実験では市販で入手可能なアルミニウムアトマイズ粉末のできるだけ小さな平均粒径のものを用いたが、これより大きな平均粒径の粉末素材でも同様に成形可能と考えられる。一方、数 μm 程度のアルミニウム粉末の製造はかなり困難なようであるが、微粉末素材からの成形については、別の機会に検討を試みたい。

アンビル工具面の固着摩擦状態を実現しやすくするため、この面は無潤滑としたが、コンテナ内面およびパンチ面はステアリン酸亜鉛粉末で潤滑した。アンビル摺動面は二硫化モリブデン乾燥皮膜潤滑としたが、比較のためマシン油潤滑の場合についても検討した。

成製品の密度測定は含油前後の空気中および水中重量から求めた。引張試験は、各厚さの製品(幅10mm、長さ40mm)から標点距離約8mm、平行部幅約8mmの小引張試験片を切り出して行った。硬さは、マイクロビッカース硬さ試験(荷重25g)により測定した。

4. 成形条件に関する検討

図2は、コンテナ中でパンチ面圧を変更して圧密した素材の相対密度 ρ/ρ_0 の変化を示す圧密曲線である。

表2 工業用純アルミニウム粉末の成分と粒度分布

Element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Ti+V	Other
Content%	99.75	0.09	0.16	tr.	tr.	tr.	tr.
Mesh	+100	100~200	200~350	-350			
wt%	0.1	84.4	12.6	2.9			

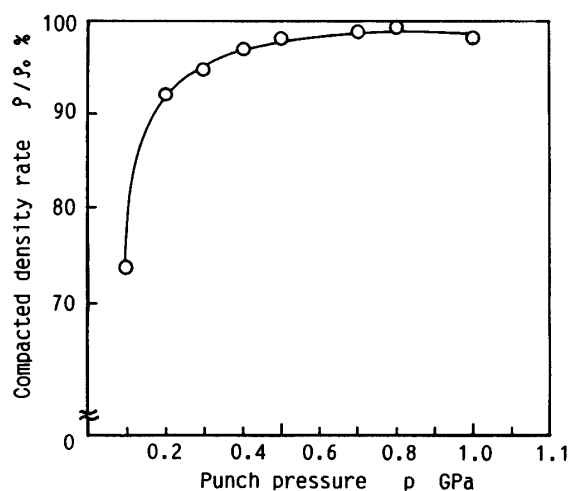


図2 アルミニウム粉末の圧密成形における相対密度とパンチ面圧の関係

コンテナ内面はステアリン酸亜鉛で潤滑した。パンチ面圧が約 0.4 GPa までに相対密度は顕著に上昇し、それ以上ではほぼ一定の値 97~98% を示す。

図 3 はパンチ面圧 p を変更して摩擦押出し成形を行った場合の相対製品長さ L_P/L_A の変化の一例 (押し比 $R=40$) を示す。パンチ面圧が、 $p=0.2\sim 0.5$ GPa の範囲では $L_P/L_A=1$ であるが、それ以上の面圧では L_P/L_A は 1 以上になり、摩擦押出しに通常の押し変形が重畳して生ずることがわかる。表面クラック等がない適正な製品は図中の黒塗りの記号で示すような面圧範囲 $p=0.3\sim 0.4$ GPa で成形可能となった。

図 4 は粉末摩擦押出し成形が可能となる上限と下限の相対面圧 $p/2k$ を押し比 R に対して示したものである。ここで、素材のせん断降伏応力 k の値としては、後出の図 8 または図 9 における硬さ HV または

引張強さ S_T の値から $k=160$ MPa を仮定した。実線は摩擦押出し成形の上界法による理論曲線である。丸印で示すように、粉末素材の摩擦押出し成形でも下限の相対面圧は固着摩擦の条件 $m_A=1$ の理論曲線とほぼ一致している。この結果は別報⁽³⁾ の溶製材からの摩擦押出しの場合と同じで、粉末素材からの摩擦押出しでも変形特性は溶製材と同様に取扱うことが可能であると考えられる。

図 5 は押し比 $R=40$ の場合のアンビル荷重 P_A に及ぼすパンチ面圧 p と摺動面潤滑の影響を示したものである。アンビル摺動面を二硫化モリブデン潤滑とした場合のほうがアンビル荷重の増加率が低くなり、摩擦抵抗が低く有利になることがわかる。パンチ面圧 $p=0$ に外挿したアンビル荷重 P_A は、摺動面の摩擦抵抗が零になったときのアンビル荷重すなわちアンビル工具面と粉末素材界面の摩擦抵抗を表す。

この $p=0$ のときのアンビル荷重 P_A から摩擦せん断応力 τ_f を求め、押し比 R に対して示すと、図 6 のようになる。押し比 R の増加に伴い τ_f は 82 から 105 MPa 程度まで増加する。これらの値は、後出の図 8 あるいは図 9 の硬さあるいは引張強さから見積もられるせん断降伏応力 $k=160$ MPa より低い値となっている。

5. 製品強度特性

図 7 の丸印はアルミニウム粉末素材の摩擦押出し成形後の相対密度 ρ/ρ_0 と押し比 R の関係を示したものである。また、図中の四角印は図 2 の圧密曲線において各押し比のパンチ面圧に対応する相対密度を求めて示したものである。押し比 $R=5\sim 20$ では、摩

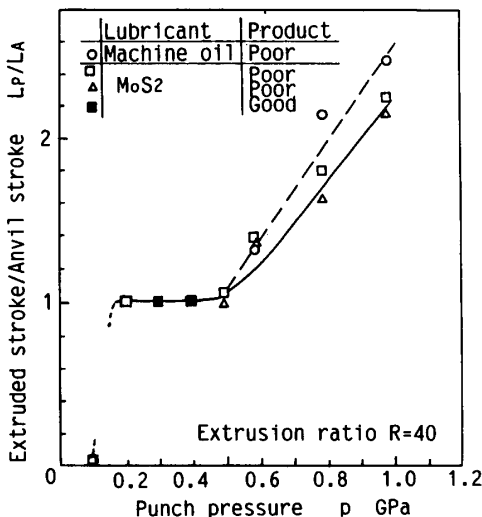


図 3 粉末摩擦押出し成形における相対製品長さとのパンチ面圧の関係

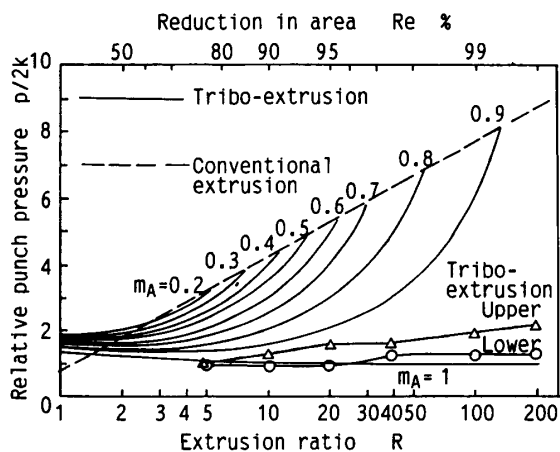


図 4 粉末摩擦押出し成形における相対パンチ面圧と押し比の関係

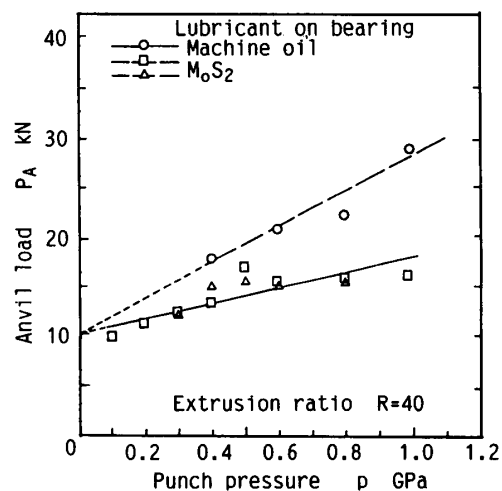


図 5 アンビル荷重に及ぼすパンチ面圧と摺動面潤滑の影響

擦押し成形によりさらに密度増加が生じているが、 $R=40$ 以上では、ほとんど変化がないことがわかる。

粉末摩擦押し成形品のビッカース硬さ HV の分布を測定した結果、先端付近約 5 mm 以内ではやや低い硬さ値を示したが、それ以外はほぼ一定値を示した。そこで、その平均値 HV を押し比 R に対して示すと、図 8 のようになる。丸印で示す冷間成形のままの場合、 R の増加に伴い HV 60 から 90 程度まで顕著に増加している。図中に一点鎖線で示す溶製材からの製品の硬さ⁽³⁾ に比較して、全体的に HV は約 10 程度高くなっている。三角印は粉末摩擦押し成形後、 $400^{\circ}\text{C}\cdot 2\text{h}$ の熱処理を施した場合の硬さ HV を示す。熱処理により硬さ HV は約 35 から 53 程度まで低下しているが、溶製材の工業用純アルミニウムの完全焼なまし材の硬さ $HV=20\sim 25$ に比べてまだかなり高い値となっている。

図 9 に粉末押し成形品の引張強さ S_T と押し比 R の関係を示す。押し比 $R=5$ の場合には、コンテナ内に充てんできる粉末素材の量が不足し、製品長さ

が 15 mm 程度しか得られなかったため、引張試験を行っていない。黒塗りの記号で示すように、粉末素材から冷間成形したままの成形品でも、引張強さは $S_T=220\sim 320\text{ MPa}$ となり、一点鎖線で示す溶製材から冷間成形したままの場合⁽³⁾ より、 $20\sim 50\text{ MPa}$ 程度も高い値を示している。白抜きの記号は、 $400^{\circ}\text{C}\cdot 2\text{h}$ の熱処理を施した場合であり、 $R=20$ 以上で $S_T=120\sim 130\text{ MPa}$ 程度の値をとる。溶製材を完全に焼なましした状態では、通常 $S_T=100\text{ MPa}$ の値をとると考えられるため、粉末成形品のほうが焼なまし状態でも、 20 MPa 程度高い S_T の値をとることがわかる。押し比が小さいと、引張強さが減少する傾向にあるが、これは塑性変形量が少なくなり、加工硬化が少なくなるためと、粉末粒同士の接合が不十分になるためと考えられる。

図 10 に全伸び e_T と押し比 R の関係を示す。黒塗りの記号で示すように、粉末素材から冷間成形したままの場合でも $e_T=4\sim 5\%$ となり、一点鎖線で示す溶

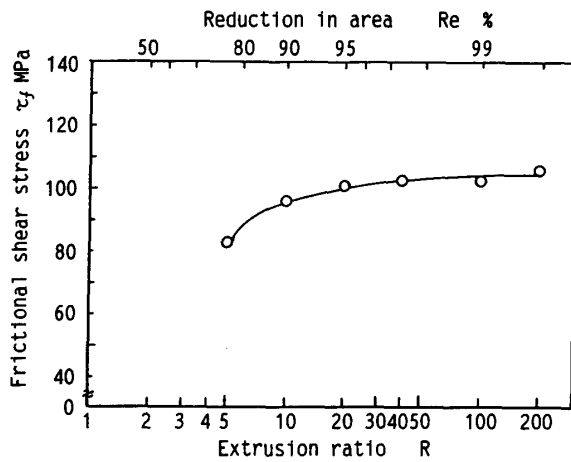


図 6 アンビル面と粉末素材界面の摩擦せん断応力と押し比の関係

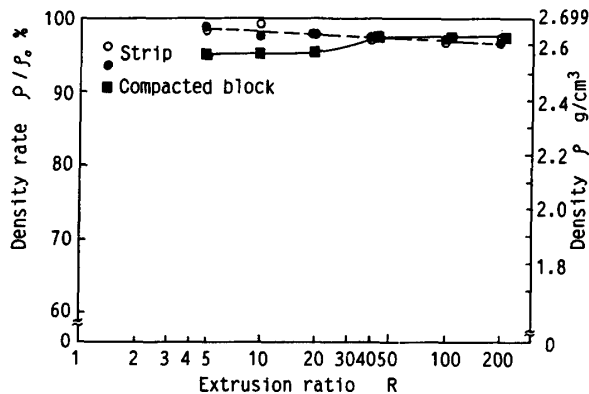


図 7 粉末摩擦押し成形品の密度と押し比の関係

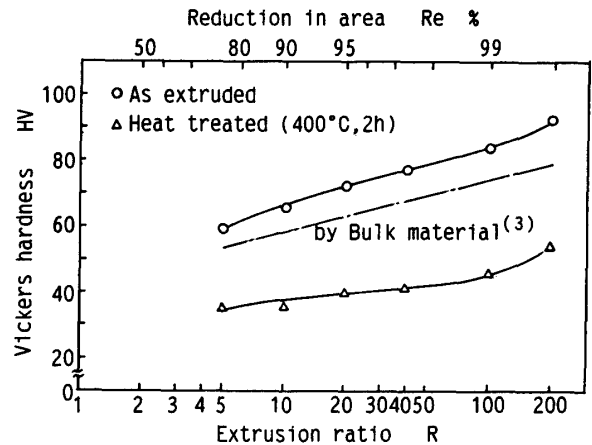


図 8 粉末摩擦押し成形品の硬さと押し比の関係

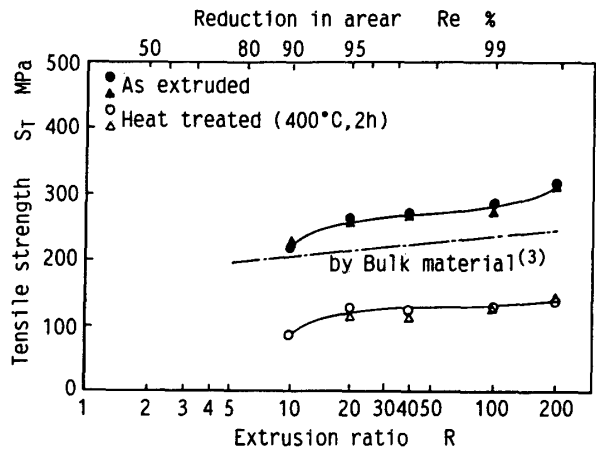


図 9 粉末摩擦押し成形品の引張強さと押し比の関係

製材の場合⁽³⁾に比較して、 $R=20$ 以上ではかえって大きな値となっている。白抜きの記号で示すように、 $400^{\circ}\text{C}\cdot 2\text{h}$ の熱処理を施した場合には、 $e_r=5\sim 10\%$ 程度まで延性が増加することがわかる。

以上のように、硬さ、引張強さおよび全伸び等の強度特性は、粉末からの成形品のほうが溶製材からの成形品より優れていることがわかった。これは、粉末表面の酸化膜の破碎埋込みによる分散強化のためとも考えられるが、その機構については、今後さらに調査を進めたい。

6. 寸法および表面品質

図 11 に製品外観写真の例を示す。(a)押し出し比 $R=20$ (板厚 0.5 mm) の場合には、組型併せ目へのバリが生じているが、押し出し先端部を除いてかなり平坦な製品形状が得られている。(b)押し出し比 $R=200$ (板厚 0.08 mm) の場合には、押し出し先端部に割れが生じ、ダイス側へカールした状態となっている。先端部の割れは押し出し初期の非定常変形によるものと考えられる。ダイス側へのカールはダイス出口付近でのモーメントの作用と、アンビルからの離型時の変形によるものと考えられる。

図 12 に粉末摩擦押し出し成形品の先端からの位置 x に対する厚さ h の分布の一例を示す。一点鎖線は各押し出し比 R に対するダイス出口の設定間げきを示す。 $R=200$ の場合にダイス出口寸法より $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 程度大きな厚さ h となっているが、それ以外の押し出し比では設定間げきより $10\ \mu\text{m}$ 程度大きな厚さのばらつき範囲に納まっている。この厚さ分布とそのばらつきの程度は別報⁽³⁾の溶製材からの摩擦押し出し成形品とほぼ同等である。

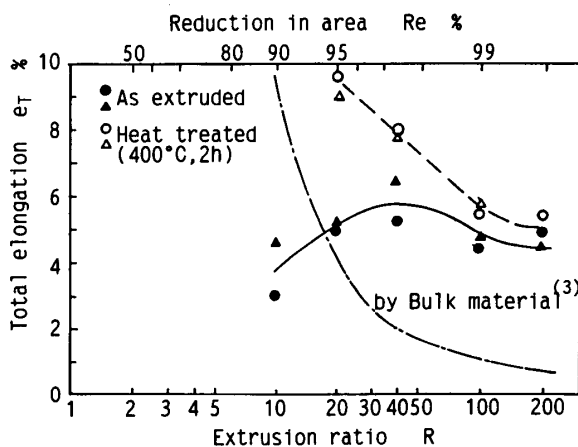
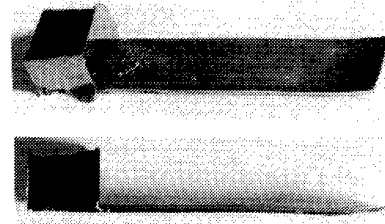
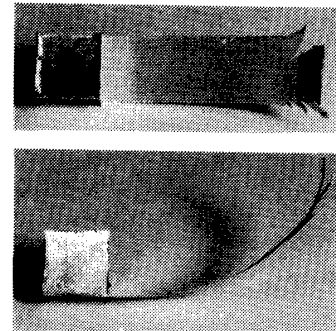


図 10 粉末摩擦押し出し成形品の全伸びと押し出し比の関係

図 13 に粉末摩擦押し出し成形品のアンビル側表面の中心線平均粗さ R_a の分布を示す。押し出し比 $R=10$ の場合を除くと、 $R_a=0.1\sim 0.25\ \mu\text{m}$ 程度の範囲に納まっている。アンビル工具面の表面粗さ $R_a=0.047\ \mu\text{m}$ に比べてやや大きいのが、溶製材からの成形品の場合⁽³⁾とほぼ同等である。一方、ダイス側の表面性状は、ダイス出口角による擦過傷が生じやすいため、アンビル面側に比べて表面粗さはやや大きく、 $R_a=1\sim 3\ \mu\text{m}$ となっ



(a) 押し出し比 $R=20$, 製品板厚 $h=0.5\text{ mm}$



(b) 押し出し比 $R=200$, 製品板厚 $h=0.08\text{ mm}$

図 11 製品外観写真の例

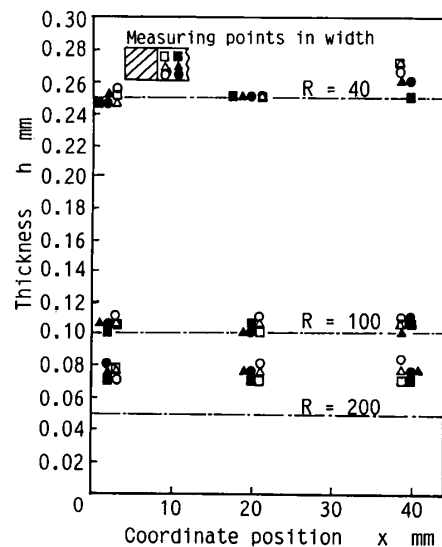


図 12 粉末摩擦押し出し成形品の先端からの位置に対する厚さの分布

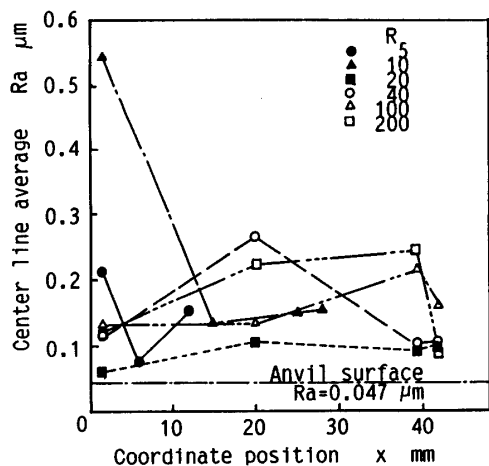


図 13 粉末摩擦押出し成形品の先端からの位置に対する中心線平均粗さの分布

た。また、本実験では、 $400^{\circ}\text{C}\cdot 2\text{h}$ の熱処理を施した場合、圧密成形時に封入された空気が膨張し火膨れ状の表面となったため、今後は圧密前の脱気処理等の対策が必要になると考えられる。

7. 結 論

工業用純アルミニウム粉末を素材とした摩擦押出し成形により、厚さ $h=0.05\sim 2\text{mm}$ (押出し比 $R=5\sim 200$)の薄板製品を冷間で直接成形することが可能になった。それらの粉末成形品の強度特性を溶製材からの成形品と比較した結果、次のような結論が得られた。

(1) 粉末素材の摩擦押出し成形が可能となる下限の相対パンチ面圧 $p/2k$ は $0.9\sim 1.2$ 程度となり、溶製材からの摩擦押出し成形の場合⁽³⁾と同様に、上界法による理論値とほぼ一致することが明らかになった。

(2) 粉末摩擦押出し成形品の強度特性は、冷間成形のままでも、ビッカース硬さ $HV=60\sim 90$ 程度、引張強さ $S_T=220\sim 320\text{MPa}$ 程度、および全伸び $e_T=4\sim 5\%$ 程度となり、溶製材からの成形品と同等以上の優れた特性を示すことがわかった。

(3) 粉末摩擦押出し成形品の寸法精度と表面粗さは溶製材からの成形品とほぼ同程度になることがわかった。

以上の結果は、純アルミニウム粉末を一種のモデル粉末として用いた結果であるが、本成形法をさらに発展させることにより、各種混合粉末素材から各種複合材料薄板の製造の可能性が期待される。

本研究の遂行にあたり、科学研究費補助金・一般研究(B)および天田金属加工機械技術振興財団・研究開発助成の援助をいただいた。また、日本鋼管(株)・田島秀紀氏には粉末成形技術等でお世話になった。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば、中川、西山記念講座テキスト 鉄鋼の粉末冶金技術の進歩、(1982)、149、日本鉄鋼協会。
- (2) 松本・工藤・宇田、昭和63年春塑加講論、(1988-5)、159。
- (3) 中村・平岩・富沢、機論、59-557、C(1993)、193。