

摩擦押出しによる銅-アルミニウム複合薄板の成形*

中村 保*¹, 田中 繁一*¹, 平岩 正至*¹
今泉 晴樹*², 富沢 康治*³Friction-Assisted Extrusion of Thin Strips Made of
Copper and Aluminium Composite MaterialTamotsu NAKAMURA, Shigekazu TANAKA, Masashi HIRAIWA,
Haruki IMAIZUMI and Yasuji TOMIZAWA

The friction-assisted extrusion of thin strips, developed by the authors, was applied to the production of copper and aluminium composite thin strips. The composite thin strips which are claddings with 2 and 3 layers of copper and aluminium and 0.25~1 mm in thickness could be extruded successfully from block metals with the extrusion ratio of 10~40 and punch pressure ranging from about 0.6 to 1.1 GPa. Composite thin strips which are made of complex phases of copper and aluminium and are 0.05~1 mm in thickness could be extruded directly from the powder mixture of Cu and Al with the extrusion ratio of 5~200 and the punch pressure of 0.3~1.2 GPa. The thin strips as extruded from the metal powders showed Vickers hardness HV increasing with the mixture ratio of copper powder and the extrusion ratio within a range from 50 to 240. The tensile strength S_T of the thin strips as extruded from composite metal powders was 290 MPa at maximum and was increased to 340 MPa by heat treatment for 1 hour at 400°C.

Key Words: Plastic Forming, Tribology, Powder Metallurgy, Friction-Assisted Extrusion, Composite Material, Cladding Metal, Powder Formig, Mechanical Properties

1. 緒 言

既報において、工具面摩擦力を積極的に活用した薄板の摩擦押出し成形法を提案し、アルミニウム粉末素材から、厚さ 2 mm~50 μ m 程度の一様厚さの金属薄板を直接冷間成形することが可能になり、その成形品の強度特性は、溶製ブロック素材からの摩擦押出しによる薄板成形品と同等以上になることを報告した⁽¹⁾⁽²⁾。これは、摩擦押出し成形において、粉末素材が高圧縮応力下で極めて大きな塑性変形を与えられ、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滑りが生じ、粉末成形体の密度や接合力が顕著に高められたためと考えられた。さらに、このような粉末成形体を焼結することにより、粉末間の拡散接合を一層助長することができると思われる。

本報では、このような摩擦押出しの特徴を生かして、アルミニウムと銅ブロック素材から冷間で直接クラッド薄板を成形する方法、およびアルミニウムと銅の混合粉末素材から複合相金属薄板を直接成形する方法に

ついて検討を試みる。

2. 成形原理と実験方法

2.1 クラッド薄板の成形法 図1に示すように、コンテナ内に挿入した異種金属ブロックの重ね合せ素材を、パンチによりアンピルの上面に所定の面圧で押付け、アンピルを水平に駆動すると、アンピル上面の摩擦力によって、極めて大きなせん断変形を受け、異種材料が同時にダイスの開口部から流出する。その際、異種材料の界面で大きな表面積拡大を生じるため、冷間でも圧接接合が生じ、クラッド材の成形が可能になると考えられる。

成形装置および実験条件は既報⁽¹⁾⁽²⁾とほぼ同様であり、コンテナ断面積は 10×10 mm² である。押出し比

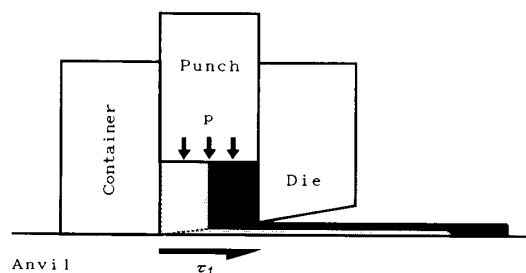


図1 異種金属ブロック素材からのクラッド薄板の摩擦押出し成形の原理

* 原稿受付 平成6年7月29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 (〒432 浜松市城北3-5-1)。*³ マルヤス工業(株) (〒444 岡崎市橋目町北山1)。

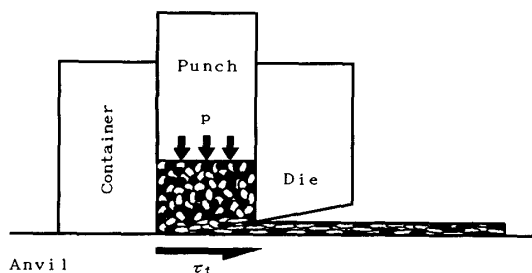


図2 異種金属混合粉末素材からの複合金属薄板の摩擦押出し成形の原理

は $R=100$ 以上の成形が困難であったため、 $R=5, 10, 20, 40$ の4種類とした。アンビル面は表面粗さ $R_{max}=0.2\ \mu\text{m}$ で無潤滑状態とし、横押し速度は約 $0.1\ \text{mm/s}$ 、移動距離は約 $40\ \text{mm}$ とした。素材は工業用純アルミニウム Al 板 F 材および工業用純銅 Cu 板 O 材である。2層または3層成形の素材厚さ比は、Al(5 mm)/Cu(5 mm)、Al(2 mm)/Cu(8 mm)、Al(2.5 mm)/Cu(5 mm)/Al(2.5 mm) の組合せとした。素材界面は切削仕上げの無潤滑状態とした。

2.2 複合相金属薄板の成形法 図2に示すように、異種金属の混合粉末をコンテナ内に充てんし、パンチにより加圧・圧密したのち、摩擦押出しにより薄板に成形する。パンチによる圧密だけでは十分な高密度化と粉末粒同士の接合はほとんど生じないが、摩擦押出しではアンビル面近傍において高面圧下で厳しいせん断変形が生じるため、粉末粒の塑性変形による大きな表面積拡大と異種金属粒同士の相対滑り等により、粉末成形体の高密度化と粉末粒同士の圧接接合が生じると考えられる。さらに、粉末成形体の焼結により、粉末粒間の拡散接合や合金化が促進されると考えられる。

粉末素材としては、工業用純アルミニウムのアトマイズ粉末 Al_p (-100メッシュ、粒径約 $150\ \mu\text{m}$ 以下)、および工業用純銅の電解粉末 Cu_p (-325メッシュ、粒径約 $43\ \mu\text{m}$ 以下) を用いた。 Al_p 粉末に対する Cu_p 粉末の混合重量割合は、0, 10, 20, 50, 80, 90, 100 wt% に変更した。充てん量は、真密度を仮定した圧密成形体の横断面積が $10 \times 10\ \text{mm}^2$ 、高さ約 $5\ \text{mm}$ になるように調整した。圧密面圧は、 $0.3 \sim 1.0\ \text{GPa}$ の範囲で銅粉末混合割合とともに増加させた。押し出し比は $R=5 \sim 200$ の範囲で変更した。その他の成形条件は2.1節と同様である。摩擦押出し成形によって作製した帯板の引張試験には、標点距離 $8\ \text{mm}$ 、平行部幅 $5\ \text{mm}$ の試験片を用いた。

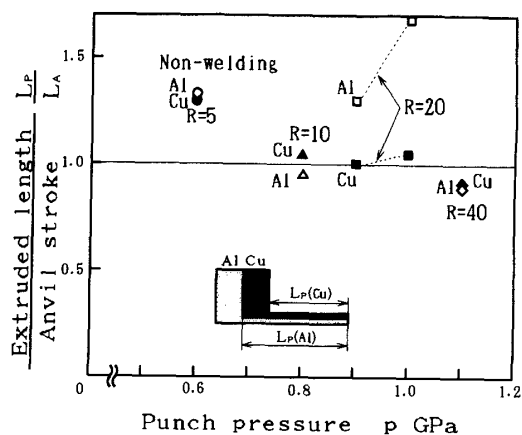


図3 Al(5)/Cu(5)の2層クラッド薄板成形における相対製品長さとパンチ面圧の関係

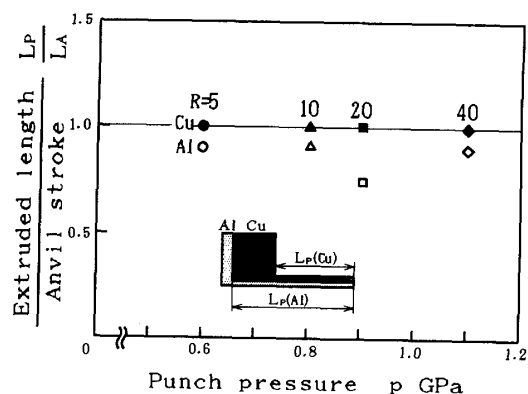


図4 Al(2)/Cu(8)の2層クラッド薄板成形における相対製品長さとパンチ面圧の関係

3. クラッド薄板の成形

3.1 Al(5)/Cu(5)の2層成形 図3は、図中に示すように、厚さ $5\ \text{mm}$ の Al と厚さ $5\ \text{mm}$ の Cu を重ね合わせた素材から摩擦押出した場合のパンチ面圧 p と相対製品長さ L_p/L_A (製品長さ/アンビル移動距離) の関係を示したものである。押し出し比 $R=5 \sim 40$ の範囲で、相対製品長さは必ずしも $L_p/L_A=1$ とならないが、パンチ面圧 $p=0.4 \sim 1.1\ \text{GPa}$ の範囲で一応成形が可能となっている。ただし、 $R=5$ の成形品は接合が生じなかった。 $R=10 \sim 40$ の接合強度の実測は困難であったが、はく離時に母材内で破断する程度の接合が生じていることを確認した。

押し出し比 $R=20$ の成形品の厚さ分布の一例を後述の図7(a)に示す。押し出し位置 x は、先端を零として示してある。Alの厚さが押し出し距離とともにやや薄くなる傾向にある。これは、図3においてAlの相対製品長さが1以上になることから、初期行程において摩擦押出し変形に先行してAlだけが押し出されたためと考えられる。 $R=10, 40$ の場合は、 $R=20$ の場合より一

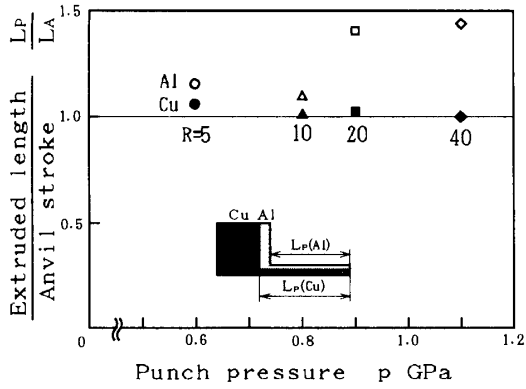


図 5 Cu(8)/Al(2)の2層クラッド薄板成形における相対製品長さとのパンチ面圧の関係

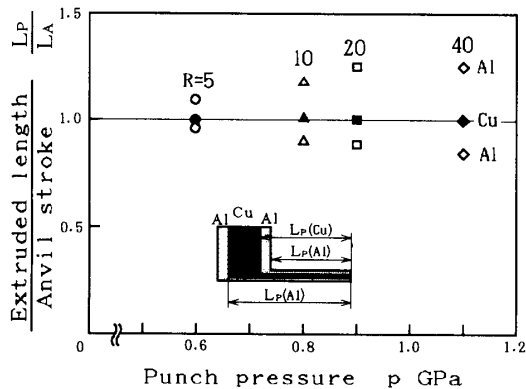


図 6 Al(2.5)/Cu(5)/Al(2.5)の3層クラッド薄板成形における相対製品長さとのパンチ面圧の関係

様な厚さ分布が得られることを確認している。

なお、図3と左右反対の素材組合せでは、軟質のアルミニウムのみが押し出され、二層成形は実現できないことが確認されている⁽³⁾。

3.2 Al(2)/Cu(8)の2層成形 図4は、図中に示すように、厚さ2mmのAlと厚さ8mmのCuを重ね合わせた素材から摩擦押ししたときのパンチ面圧 p と相対製品長さ L_p/L_A の関係を示す。図3とほぼ同程度のパンチ面圧 p で成形が可能になっている。いずれの押し比 R でもCuは $L_p/L_A=1$ となるのに対して、Alは0.9以下であり、後出の図7(b)の厚さ分布からも、先端付近ではAl層がほとんど形成されていないことがわかる。これは図4中の素材組合せの幾何形状から類推されるように、押し初期にはCuのみが先行して流出するためである。

3.3 Cu(8)/Al(2)の2層成形 図5は、図4と逆の素材配置の場合であるが、パンチ面圧 p はほぼ同程度で成形が可能となっている。Cuは、いずれの R でも $L_p/L_A=1$ となるが、初期行程で摩擦押し変形に先行してAlだけが押し出されたため、 L_p/L_A は1より大きくなっている。先端付近を除いて、後出の図7

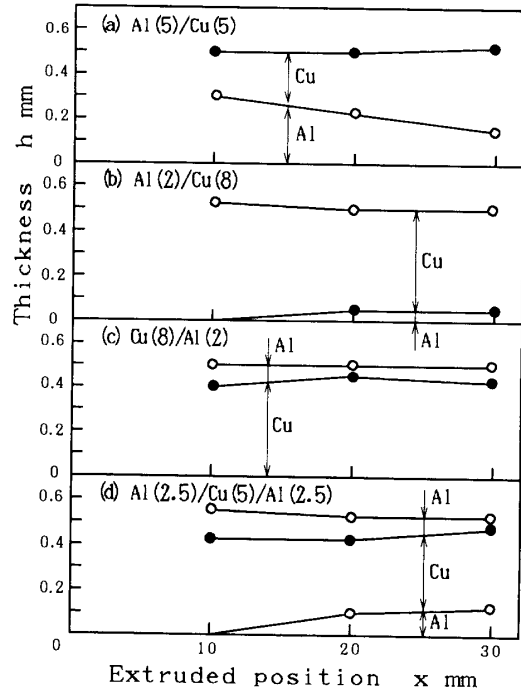


図 7 クラッド薄板成形品の厚さ分布の一例 (押し比 $R=20$)

(c)に示すように厚さ分布はほぼ一様である。

3.4 Al(2.5)/Cu(5)/Al(2.5)の3層成形 図6は、3層クラッド成形の場合であるが、成形面圧 p は図3~5とほぼ同程度で成形が可能となっている。この場合、Cuは $L_p/L_A=1$ となるのに対して、ダイ出口側のAlは流出しやすく、反対側のAlは流出が遅れることがわかる。後出の図7(d)の厚さ分布から、下層Alの先端付近がやや薄くなっているが、その他はほぼ一様な分布となっている。

4. 複合粉末金属薄板の成形

4.1 摩擦押しでの成形面圧 図8は、各種混合割合の混合粉末素材から摩擦押しにより直接薄板を成形する場合の、パンチ面圧 p と押し比 R の関係を示したものである。Al_p 100%からAl_p 50wt%-Cu_p 50wt%までは $R=200$ まで成形可能となったが、それ以上のCu_p wt%では $R=40$ までが本実験における成形可能な範囲であった。

いずれの混合粉末でも、パンチ面圧 p は押し比 R の増加に伴い多少増加する傾向を示すが、Cu_p wt%の増加に伴う p の増加の方が顕著である。これは、図10に示されるように、成形された帯板の硬さHVがCu_p 混合量の増加に伴って顕著に増加することから、混合粉末成形体の平均変形抵抗がCu_p wt%の増大に伴って顕著に増加するためと考えられる。

そこで、図8のパンチ面圧 p を平均変形抵抗2kで

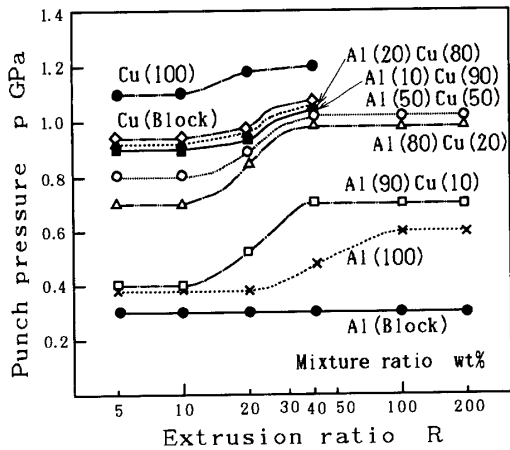


図 8 Al_p-Cu_p 混合粉末素材からの薄板摩擦押出しにおけるパンチ面圧に及ぼす押出し比と混合率の影響

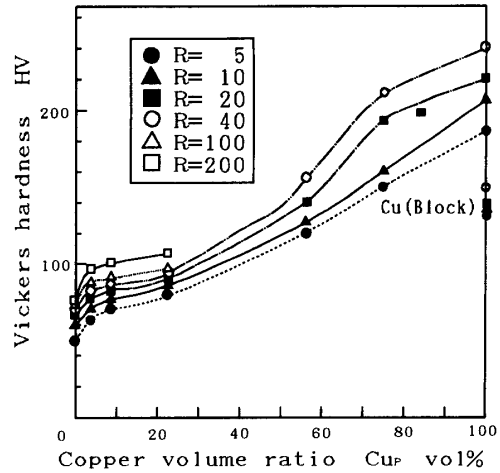


図 10 Al_p-Cu_p 混合粉末素材からの薄板摩擦押出し成形品のビッカース硬さと銅体積混合率の関係

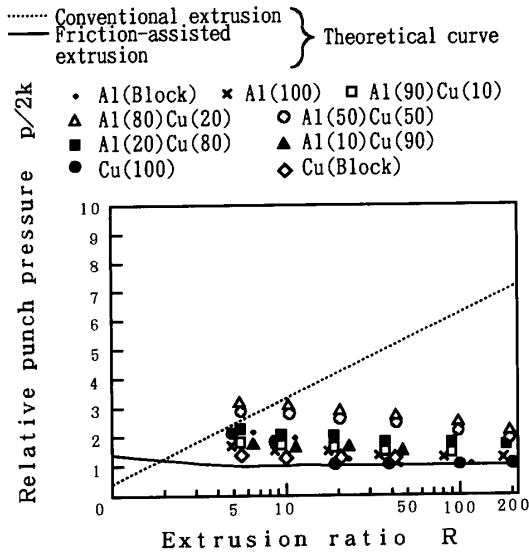


図 9 Al_p-Cu_p 混合粉末素材からの薄板摩擦押出しにおけるパンチ面圧比に及ぼす押出し比と混合率の影響

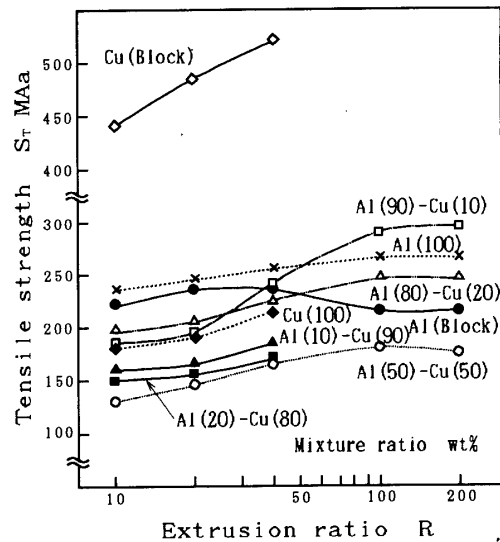


図 11 Al_p-Cu_p 混合粉末素材からの薄板摩擦押出し成形品の引張り強さに及ぼす押出し比と混合率の影響

標準化した相対パンチ面圧 $p/2k$ で整理し直すと、図 9 のようになる。ただし、平均変形抵抗 $2k$ としては、硬さ HV との換算関係から $2k = 2HV / (2.7\sqrt{3})$ を用いた。Al ブロック、Al_p 100%、Cu ブロック、Cu_p 100% などの単相材では、上界法による理論曲線⁽¹⁾ にほぼ一致し、 $p/2k = 1 \sim 2$ 程度の低い相対面圧となっている。これに対して、混合粉末素材では、やや高い相対面圧 $p/2k$ を示し、特に、Al_p 50 wt%-Cu_p 50 wt% および Al_p 80 wt%-Cu_p 20 wt% では $p/2k = 2 \sim 3$ 程度まで増加している。

4.2 成形された帯板の強度特性 図 10 は薄板成形品のマイクロビッカース硬さ HV を銅の体積混合率 Cu_p vol% に対して示したものである。いずれの混合率でも押出し比 R とともに HV が増加し、加工硬化特性が現れている。また Cu_p vol% とともに HV は

顕著に増加し、Cu_p 100% 粉末では、HV = 180 ~ 240 となり、Cu ブロックの HV = 130 ~ 150 に比較してもかなり高い値となっている。このような硬さの特性は、Al_p 100% 粉末の場合にも認められたもので⁽²⁾、粉末表面の酸化膜が粉末成形体中に分散し、強化するためと考えられる。

図 11 は薄板成形品の引張強さ S_T を押出し比 R に対して示したものである。 R に伴い S_T は増加する傾向にあるが、硬さの場合と異なり、Cu_p wt% が増加しても、 S_T は必ずしも増加していない。特に、Cu_p 100% 粉末の場合には、Cu ブロックの $S_T = 450 \sim 500$ MPa に比較して、かなり低い値 $S_T = 180 \sim 210$ MPa 程度しか得られていない。硬さと異なり、引張り強さは粉末同士の接合強度によって左右されるため、粉末表面の

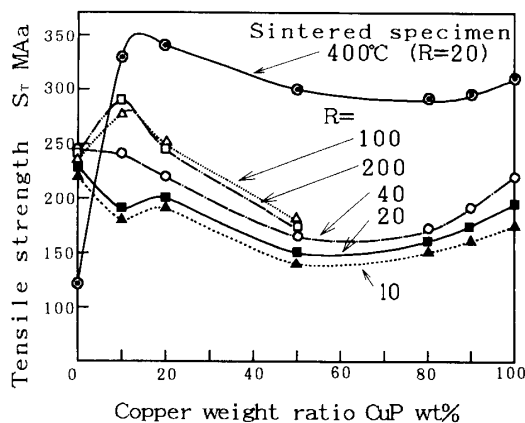


図 12 Al_p - Cu_p 混合粉末素材からの薄板摩擦押出し成形品の引張り強さと銅重量混合率の関係

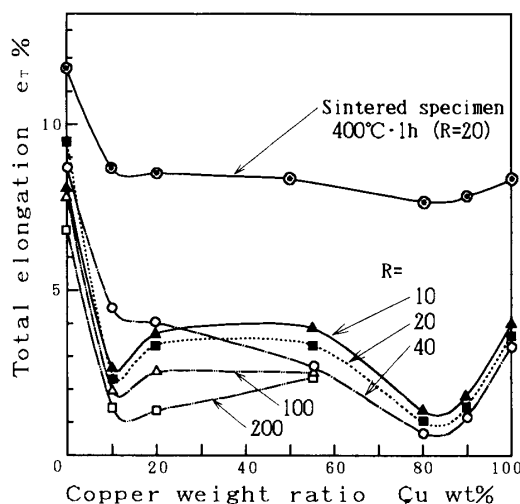


図 13 Al_p - Cu_p 混合粉末素材からの薄板摩擦押出し成形品の全伸びと銅重量混合率の関係

酸化膜は分散強化の役割より、かえって接合を阻害する要因になっていると考えられる。

図 12 は引張り強さ S_T と Cu_p wt% の関係を示す。 Cu_p 10 wt% の場合、 $R=40$ 以下では Al_p 100% よりかえってやや低い S_T を示すが、 $R=100, 200$ では、極大値 $S_T \approx 280 \sim 290$ MPa を示している。 Cu_p 50 wt% の混合率ではいずれの押し比 R でも極小値を示す。このように、 Cu_p 10 wt% 程度では、銅粉末がアルミニウム基地中に分散し強化特性を示すのに対して、 Cu_p 50 wt% では銅粉末とアルミニウム粉末の接合が十分生じていないものと考えられる。

図 12 には $R=20$ の試験片を $400^\circ\text{C} \cdot 1\text{h}$ 熱処理した場合の引張り強さ S_T を二重丸の記号で示す。熱処理により Al_p 100% の S_T は 125 MPa まで低下するのに対して、 Cu_p の混合粉末ではいずれも S_T が顕著に増加している。特に、 Cu_p 10~20 wt% 程度で極大値 S_T

≈ 340 MPa 程度の高い値が得られている。

図 13 は全伸び e_T と Cu_p wt% の関係を示す。 Al_p 100 wt% の場合にやや高い $e_T = 7 \sim 9\%$ を示す以外は、延性はかなり低い。しかし、 $400^\circ\text{C} \cdot 1\text{h}$ の熱処理により、 $e_T = 8 \sim 12\%$ 程度まで延性が改善されることがわかる。

熱処理による強度と延性の増加は、 Cu と Al の粉末同士の反応による強固な相の形成によると考えられるが、この点については今後さらに検討を進めたい。

5. 結 言

薄板の摩擦押出し成形法を用いて、アルミニウム Al と銅 Cu のブロック素材からクラッド薄板を冷間で直接成形することを試み、さらにアルミニウム粉末 Al_p と銅粉末 Cu_p の混合粉末素材から冷間で直接複合金属薄板を成形することを試みた結果、次のような結論が得られた。

(1) Al と Cu ブロックの各種厚さ比の組合せ素材を用いて、2層および3層のクラッド成形を試みた結果、押し比 $R=10 \sim 40$ 、面圧 $p=0.6 \sim 1.1$ GPa の範囲でほぼ所望の厚さ比のクラッド板の成形が可能になった。

(2) Al_p と Cu_p 混合粉末素材からの成形では、 Cu_p 50 wt% までは $R=5 \sim 200$ 、それ以上では $R=5 \sim 40$ までの薄板の成形が可能になった。パンチ面圧 p は Cu_p wt% の増大に伴い、 $p=0.3$ から 1.2 GPa 程度まで顕著に増大したが、相対パンチ面圧 $p/2k$ は単相粉末では 1~2 程度、混合粉末では 2~3 程度となった。

(3) 混合粉末から成形した薄板の硬さは、 Al_p 100% の $HV=50 \sim 80$ 程度から Cu_p 100% の $HV=180 \sim 240$ 程度まで、 Cu_p vol% の増大に伴いほぼ直線的に顕著に増大した。

(4) 引張り強さ S_T は $R=100 \sim 200$ 、 Cu 10 wt% の場合に極大値 $S_T \approx 290$ MPa を示し、さらに $400^\circ\text{C} \cdot 1\text{h}$ の熱処理により $S_T \approx 340$ MPa 程度まで高まることが確認された。

本研究の遂行に当たり、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、卒研生白畑智博君、田村修一君に協力いただいた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 中村・平岩・富沢, 機論, 59-557, C (1993), 193.
- (2) 中村・平岩・今泉, 機論, 59-557, C (1993), 199.
- (3) Nakamura, T., ほか 2 名, Proc. 1st Japan Int. SAMPE, (1989), 729.
- (4) 中村・戸沢, 塑性と加工, 16-175 (1975), 668.