

金属基傾斜機能材料押し出し加工における 塑性変形挙動の解析

都城工業高等専門学校 機械工学科

助教授 山中 昇

(平成6年度研究開発助成 AF-94029)

1. 研究の背景と目的

金属間化合物は機械的、電気的に優れた特性が期待されている新素材であるが、一般的に硬くて脆いため取り扱いが不便という欠点がある。この欠点は、靱性のあるマトリックス中に金属間化合物を分散させ、in-situ複合材料化する事で克服されるものと考えられる⁽¹⁾。

ところで、熱応力緩和という観点から提唱された傾斜機能材料 (FGM) は、材質等の諸機能が材料の一面から他方の面へと連続的かつ傾斜的に変化する特性を持つ材料であり⁽²⁾、この特性は金属間化合物を上述のように分散させる際の有効な手段として考えられる。

現在、著者らは元素間あるいは晶出物と溶湯との密度の差を利用して熔融状態の合金に遠心力を負荷する遠心力法

により、厚肉円筒のFGMを作製している⁽³⁻⁶⁾。この厚肉円筒FGMを構造材料として使用するためには、なんらかの金属加工技術を施すことが必要となり、ニアネットシェイプが可能なことなどから、塑性加工が有効な加工手段と考える。しかし、金属間化合物自体には塑性変形能がなく、更に均質材料のこれまでの知見をそのままFGMに適用することは困難である。また難加工材で健全な成型品を得るための加工法、条件については、一部に押し出し加工時のダイス材質などに関する検討例⁽⁷⁾があるのみで詳細はほとんど明らかにされていない。

以上の見地から、本研究では変形過程の観察が容易な平面ひずみ状態で室温および熱間における押し出し加工実験を行い、金属基傾斜機能材料における塑性加工の可能性を検討することとした。

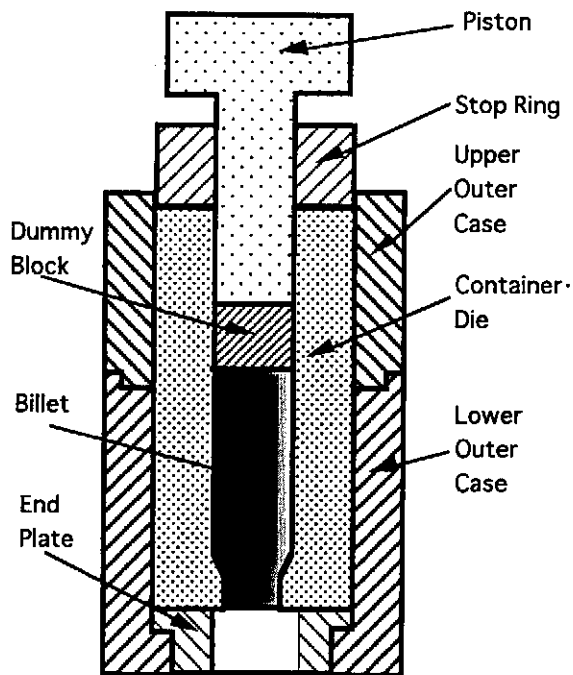


図1 平面ひずみ押し出し工具

2. 実験方法

2.1 供試材料および実験条件

試験に供した傾斜機能材料は市販のAl-20mass%Ni合金を遠心铸造して作製した厚肉円筒Al-Al₃Ni FGMであり⁽⁵⁾、この厚肉円筒から円筒の軸方向が押し出し方向と同方向になるように切り出して押し出しビレットとした。ビレット形状は幅10mm、厚さ4.8mmの板状で、先端がダイス形状と一致する

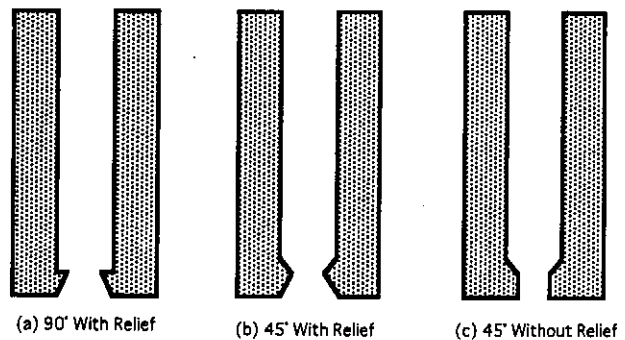


図2 ダイス形状 (a) 90° 逃げ有りダイス (b) 45° 逃げ有りダイス、(c) 45° 逃げ無しダイス

ように加工した。このビレットを2枚合わせて用い、片方のビレットの合わせ面には、実験後塑性流れの観察が出来るように、 v 字溝の1mm正方形格子模様をけがいた。また、比較のため純アルミニウム(A1050)を同様な形状に加工し、押し出し実験した。押し出し実験は、押し出し比2.16、押し出し速度3.7mm/min一定にて、室温(R.T)、473K(0.5 T_m)、693K(0.75 T_m)および873K(0.95 T_m)の4つの加工温度について行った。ここで、 T_m は純アルミニウムの融点(933K)である。

2. 2 実験装置および方法

平面ひずみ状態の押し出しを行うため、押し出し方向と直角な1つの方向では厚さが変化しない分割可能な構造の装置を製作し、図1に示す。また、図2(a)はダイス半角90°の逃げ有りダイス、(b)はダイス半角45°の逃げ有りダイスおよび(c)はベアリング部に10mmのランドを設けたダイス半角45°の逃げ無しダイスであり、本研究ではそれぞれのダイスを90°逃げ有りダイス、45°逃げ有りダイスおよび45°逃げ無しダイスと記す。通常用いられるダイスには図2(a)、(b)の様にダイス出口にダイスと押し出されたビレットが接触しないように逃げを設けたり、短いランドを設けている。ま

た、ダイスとビレットの固着を防止するため潤滑剤として二硫化モリブデンとコロイダルグラファイト(固形炭素潤滑剤)を用いた。格子けがき面を合わせ面にして、2枚のビレットを合わせてダイスに挿入し、80ton油圧プレスにて押し出した。押し出しの際、荷重およびラムの変位をコンピュータに記録し、これらの値から押し出し荷重および押し出し速度を求めた。

3. 実験結果および考察

3. 1 FGM供試材料の様相

押し出し実験で用いたAl-Al₃Ni FGM厚肉円筒の光学顕微鏡写真を図3に示す。Xは円筒外周からの距離を円筒厚さで規格化した値である。X=0.08がAl-Al₃Ni FGM厚肉円筒の円筒外周を、X=1.0が円筒内周を表す。多角形をした白い部分がAl₃Niであり、灰色の部分がアルミニウムである。Al₃Niは円筒の外周部に多く分布していることが分かる。図3の写真から点算法によりAl-Al₃Ni FGM厚肉円筒のAl₃Ni体積分率の分布を求め、図4に示す。Al₃Niの体積分率は円筒外周部で45%、内周部で16%となる傾斜分布となった。

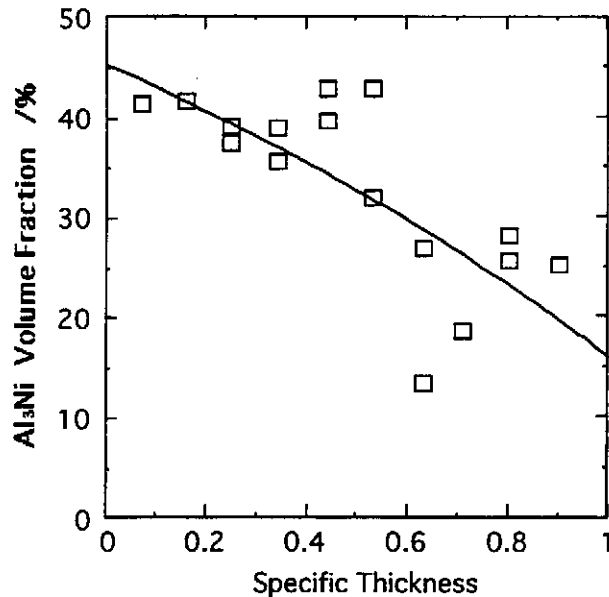


図4 Al-Al₃Ni FGM厚肉円筒の体積分率

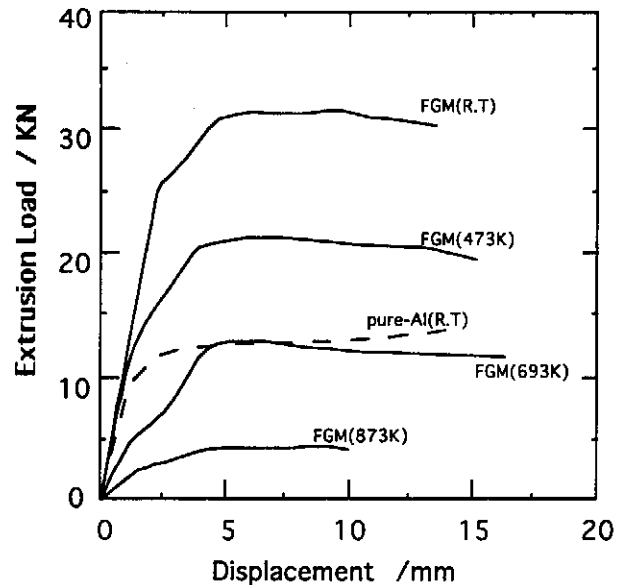


図5 各温度における押し出し荷重-変位曲線

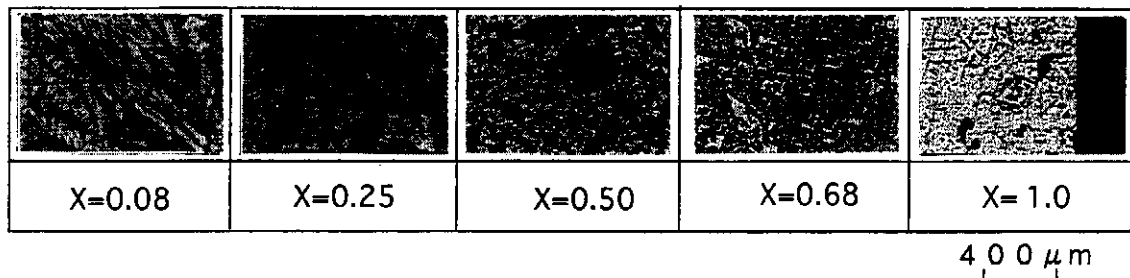


図3 厚肉円筒FGMの光学顕微鏡組織写真

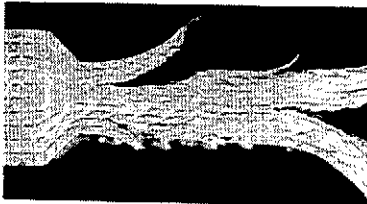
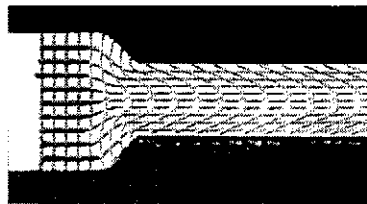

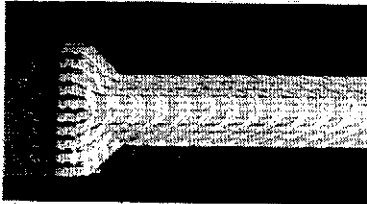
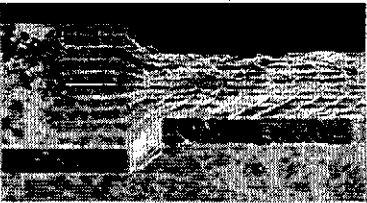
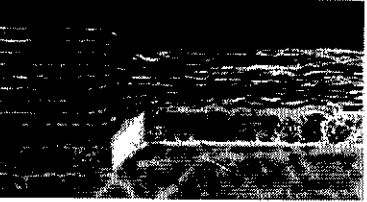

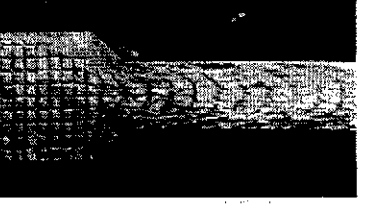

	FGM	Pure-Al
With Relief	 <p>473K</p>	 <p>R.T</p>
Without Relief	 <p>R.T</p>	 <p>R.T</p>
	 <p>473K</p>	
	 <p>693K</p>	
	 <p>793K</p>	
	 <p>893K</p>	
		<p>10mm</p> 

図6 押しビレットの外形写真

3. 2 押し荷重-変位曲線

室温での純アルミニウムと各種加工温度でのFGMとの押し荷重とピストンストローク（変位）の関係を図5に示す。室温のFGMと純アルミニウムの荷重と変位の関係を比較すると、FGMでは変位が5mmで、純アルミニウムでは2.5mmで押し荷重が一定になった。このことから定常押しになるまでの変位はFGMの場合が純アルミニウムの場合の約2倍の変位を要することが分かる。またFGMの定常押し荷重が純アルミニウムの約2.5倍になり、アルミニウム中に金属間化合物を分散させることによる強化の効果が認められた。FGMの定常押し荷重は加工温度の上昇と共に低下した。このことはFGMも他の金属と同様に加工温度が高くなると塑性流れの抵抗が小さくなるので、押し性は良好になると考えられる。押し荷重が小さくなった原因は、Al₃Niが軟化しにくい材料であることからマトリックスのアルミニウムの軟化によるものと考えられる。

3. 3 押し後のビレットの様相

図6に押し加工を行ったビレットの外形写真を示す。図には示さないが、室温における90°逃げ有りダイスによる押しではデッドメタルとビレット側面に割れが生じた⁽⁸⁾。図6の様に室温および473Kにおける45°逃げ有りダイスによる押しでは、FGM、純アルミニウム共にデッドメタルが発生していない。また、純アルミニウム押し製品については外見上の欠陥は無かったが、FGMでは、割れが生じているのが確認できた。45°逃げ無しダイスによる押しでは図6のようにFGMの表面に割れは生じていない。また純アルミニウムについては、逃げ無しのダイスによる室温から高温での押しビレットに外形的な変化はみられなかったため、図6には室温における製品のみ写真を示す。45°逃げ無しダイスによる室温でのFGMの押し製品には、セントラルバースト⁽⁹⁾が発生した。図のようにセントラルバーストが格子溝上に発生していることから、この格子溝を起点として発生したものと考えられる。図より473Kでは外見上セントラルバーストは無く、ビレット表面の細かい割れは温度上昇と共に減少した。またビレット分割面は凸凹している。

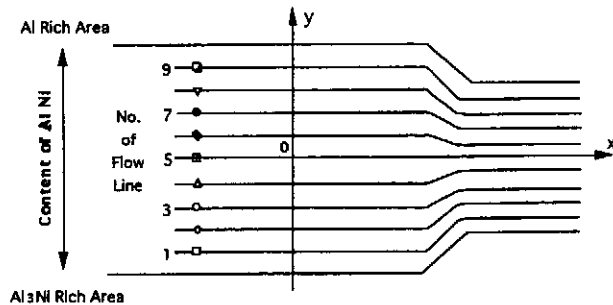


図7 解析に用いた流線番号

これは押し荷重が不安定になっており、純アルミニウムにおいてはこのような現象が無いことから、FGM特有の現象であると考えられる。さらに、押し後のFGMの組織を工学顕微鏡観察した。873Kにおける押しビレットが他の温度より空隙が少なく、良好な押しであった⁽¹⁰⁾。したがって、本押し条件では873Kが適温であることがわかった。しかし最適温度かどうかは本実験条件では確認できなかった。

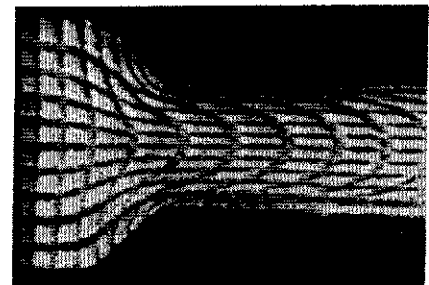
4. 解析

4. 1 格子線解析法^(11~13)

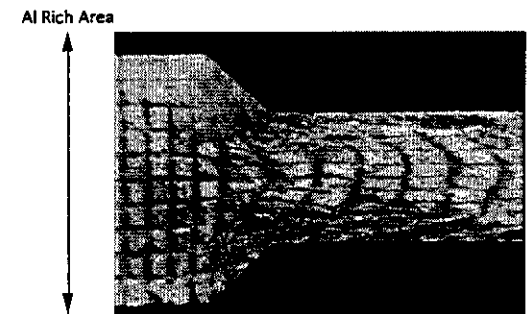
格子線解析法は、物体の表面または対称軸を含む断面上に、あらかじめ描いておいた格子線あるいはその他の規則的に配置された点や小円等の変形状況（流れ場）から、釣合方程式と塑性方程式、および相当応力と相当ひずみの関係式を用いて、変形領域内のひずみ、および応力を解析するものである。解析では、塑性加工実験を行い、変形前後（定常変形の解析）、あるいは増分変形前後（非定常変形の解析）の格子点の座標を読み取ることによって、変位あるいは変位増分が求められる。本研究ではひずみ等を求める際に、求める点とその前後の点から平均的に求める方法を適用し、平均的な値を利用して各値を求めることとした。

4. 2 解析手順

押し加工に用いたビレットにけがいた格子模様を使っ



(a) Pure-Al at 793K



(b) FGM at 873K

図8 押し後のビレット格子模様

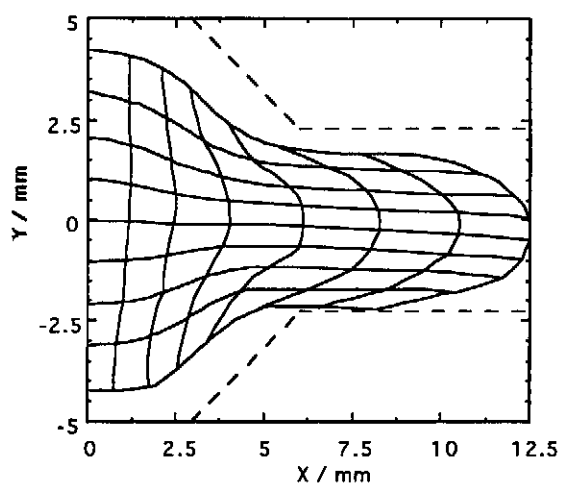
て解析する際の流線番号を図7に示す。FGMについてAl₃Niの体積分率は流線番号1の部分が多く、9の部分が少ない組成傾斜となっている。したがって流線番号1の方が9より硬い。

5. 解析結果および考察

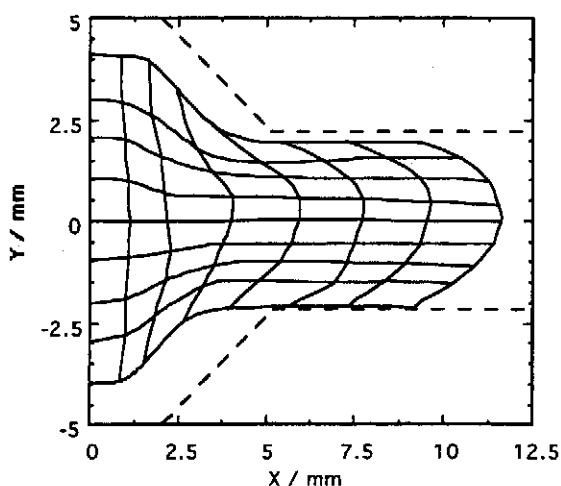
5.1 格子模様および流線模様

873Kで空隙の少ない良好な押し結果が得られたことから、FGMについては873Kについて解析を行った。また、FGMの結果との比較のために同温度での純アルミニウムの押しを行ったが、ピレットが軟化し、正しい格子模様を得られなかったため、純アルミニウムについては793Kのピレットについての変形解析を格子線解析法に基づいたプログラムを作成し、解析した。

用いたFGMの格子模様と純アルミニウムの格子模様の写真を



(a) Pure-Al at 793K



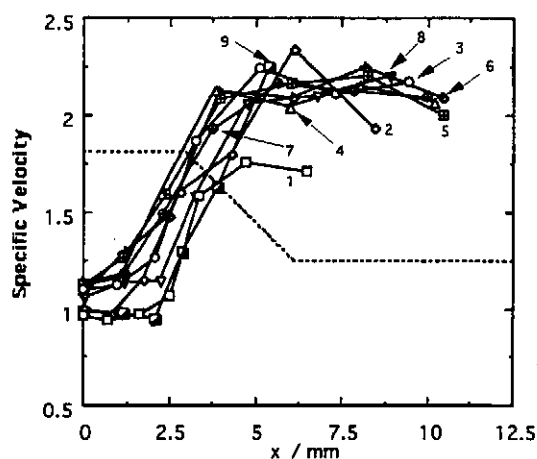
(b) FGM at 873K

図9 純アルミニウムおよびFGMの流線模様

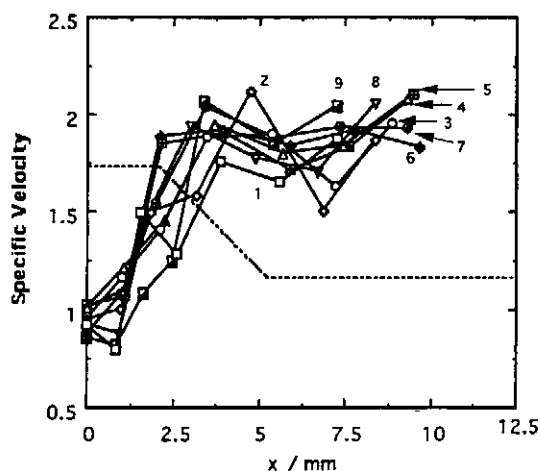
を図8に示す。図8の格子模様の拡大写真からデジタイザで格子の交点を入力して得られた純アルミニウムおよびFGMの流線模様を図9に示す。図9中の破線はダイス形状を示す。図9に示した格子模様と図9の流線模様を比較すると、写真の格子模様と流線とが一致しており、格子点が正しく入力されていることが分かる。図9より純アルミニウムの流線は押し出し方向軸対称の形状で、ダイス角周辺でなだらかな曲線となっている。FGMの流線は軸対称の形状とはならない。また、変形開始点の位置を見るとFGMの方が純アルミニウムよりダイス入口に近く、変形が遅く始まっており、変形域が狭くなる。

5.2 無次元化速度および相当ひずみ

ラム速度（押し出し速度）で無次元化した流線の各位置での速度を図10に示す。無次元化速度は純アルミニウム、FGM共に未変形部で1となり、ラム速度と等しく、ダイス入口の前より徐々に上昇し、ダイス出口では一定になっている。流線別にみても、純アルミニウム、FGMのどちらの流線

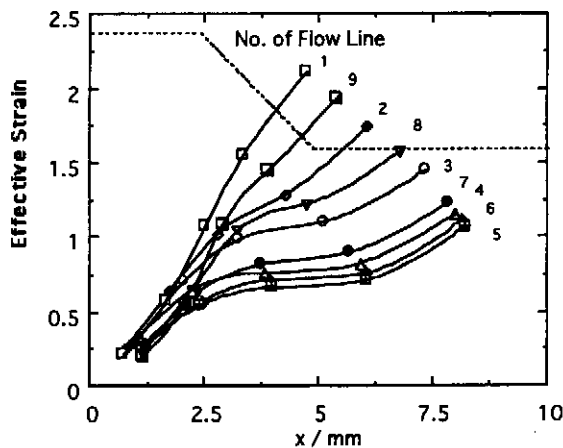


(a) Pure-Al at 793K

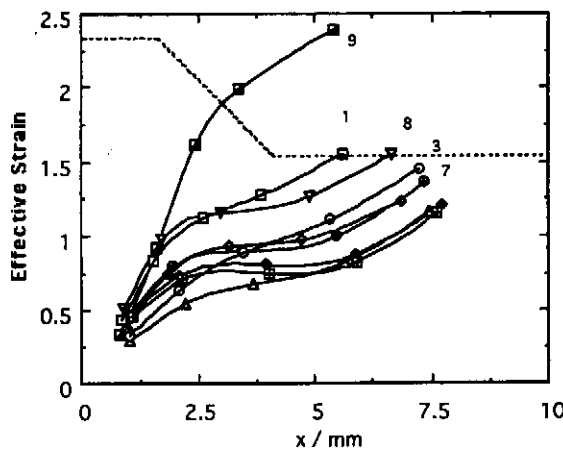


(b) FGM at 873K

図10 ラム速度で無次元化した流線各位置での速度



(a) Pure-Al at 793K



(b) FGM at 873K

図11 流線各位置における相当ひずみの結果

も、変化は外側では大きく、内側ほど小さくなるのがわかる。これはダイスに逃げがないため、ピレットとランドの摩擦のため、押し出しが不安定になり、外側の無次元化速度の変化が内側のそれに比べ大きくなったものと考えられる。また、純アルミニウムの変化に比べFGMのそれが大きいのは、FGMの非均質性による影響と考えられる。

図11に流線の各位置における相当ひずみの結果を示す。ダイス出口における相当ひずみの大小関係は純アルミニウムについて流線番号5→6→4→7→3→8→2→9→1の順で大きくなり、ピレットの中心より外側へと相当ひずみが規則的に増大している。一方、FGMの場合は大小関係は複雑であり、これは組成傾斜による影響と考えられるが、本実験では組成傾斜の影響を定性的、定量的に把握できなかった。

6. 結論

Al-Al₃NiFGMの押し出し加工実験をダイス形状および加工

温度を変えて行い、実験結果の組織観察および格子線解析法による変形過程の解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 45°逃げ無しダイスよりピレット側面の割れのない押し出し製品を作成することができた。
- 2) FGMの押し出し荷重と純アルミニウムの押し出し荷重を比較するとFGMの押し出し荷重が大きく、Al₃Niの分散の効果が認められ、また室温に比べ高温での押し出し荷重が小さくなり、押し出し加工が容易になった。
- 3) 無次元化速度・相当ひずみ速度・相当ひずみの純アルミニウムとFGMの結果を比較すると、FGMの方が変化が大きく、組成傾斜の影響が認められた。

以上のことから、押し出し温度、ダイス形状等を考慮することによって、FGMの押し出し加工が可能であることが分かった。ただし、最適押し出し温度、最適ダイス形状等については明らかに出来なかったため、今後検討したい。

謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によって行われたことを付記し、財団および関係各位に深く感謝の意を表します。また実験装置や試験片作成にご尽力いただいた本校実習工場の技官の方々に感謝いたします。卒業研究として本研究に一生懸命取り組んでくれた6名の卒業生各氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) 山口,馬越:金属間化合物, 日刊工業新聞社, (1984), 143.
- (2) 新野,平井,渡辺:日本複合材料学会誌, 13(1987), 257.
- (3) 渡辺,中西,武田,山中:日本機械学会論文集A編, 58(556), 2472.
- (4) 山中,渡辺,福井,布村:軽金属, 44(1994), 330.
- (5) 福井,山中,渡辺,清宮:軽金属, 44(1994), 622.
- (6) 福井,山中,渡辺,中西:熱処理, 35(1995), 11.
- (7) 渡辺,齊藤,岡庭:軽金属, 40(1990), 278.
- (8) 片岡,桑畑,佐藤:平成6年度都城高専卒業論文, (1995), 14.
- (9) 松下:最新塑性加工要覧, (1986), 172, 日本塑性加工学会.
- (10) マット・サリム,大重,小玉:日本機械学会九州学生会第27回卒業研究発表講演会論文集, 137.
- (11) 堤:軽金属, 13-133(1972), 149-157.
- (12) shabaik. A.H, Kobayashi. S: Trans. ASME. Series B, 89(1967), 339.
- (13) Shabaik. A.H, Thomen. E.G: Advance in Machine Tool Design and Research, 1(1968), 239.