

金属成形加工実験シミュレーション用モデル材料の開発とその検証(第2報)

桑原田聡*, 牟禮雄二*, 松田豪彦*, 中西賢二**

Development and Verification of Model Material for Forming Simulation of Metals and Alloys II

Satoru KUWAHARADA, Yuji MURE, Takehiko MATSUDA and Kenji NAKANISHI

金属成形加工の実験シミュレーションで、金属材料固有の変形特性（フローカーブ）を1/数百～1/数千の低応力で再現できるモデル材料を開発した。モデル材料はWAXと微粉末との混合物であり、微粉末量を調整することで、フローカーブを制御することが可能である。また、一連の実験・解析によって、モデル材料のフローカーブを正確に予測できる変形抵抗式を定めた。また、加工硬化特性を示すアルミニウムと加工軟化特性を示すマグネシウム合金の平面ひずみ据込み加工実験を実材料とそのモデル材料を用いて実施した結果、外形状や材料の塑性流れと内部ひずみ分布が実用上満足できる精度で一致することを確認した。

Keyword : 鍛造加工, 実験シミュレーション, モデル材料, 金属材料, フローカーブ

1. 緒 言

成形加工シミュレーションは、金属成形加工の加工条件を検討する技術として広く活用されており、主に実験シミュレーションと計算機シミュレーションに大別できる。この中で、実験シミュレーションでは、成形体の形状変化や材料の流動等を実験した結果をベースとすることから、加工材と型・工具間の接触条件や加工材の変形特性が不明な加工過程において、特に有効な手法といえる。同手法では、油粘土あるいはワックス（WAX）を実金属の代用材（モデル材料）に用いることで、冷間および熱間の鍛造、圧延、押し出し加工などの各種成形加工実験シミュレーションを常温、低荷重下で簡便に実施することが可能である^{1)～6)}。ただし、このモデル材料には、実金属と同様な変形特性をもつことが要求される。

金属材料の変形特性を定量的に表すフローカーブ（単軸圧縮での真応力-真ひずみ曲線）は、温度やひずみ速度の影響を受けて変化することが知られている⁷⁾。また、温度とひずみ速度の両方を一定の変形条件下で測定したフローカーブは、常温～温間加工温度域で加工硬化型形状を示し、熱間加工温度域では、定常変形型あるいは加工軟化型形状を示す。

筆者らはこれまでに、金属材料に類似したフローカーブを示す成形加工実験シミュレーション用モデル材料を開発し、熱間加工温度域で加工軟化型形状を示すマグネシウム合金とモデル材料の類似性について検証している⁸⁾。

そこで本研究では、開発したモデル材料の利便性を高めるために、フローカーブを予測する変形抵抗式を提案した。

次に、成形品の外形変化と内部変形状態（塑性流れ）の計測が容易な平面ひずみ据込み加工を適用例に選び、開発したモデル材料を用いて金属材料の成形加工実験シミュレーションを実施する際の適用手順を明らかにした。実験に用いた金属材料は、室温付近で加工硬化型のフローカーブを示す純アルミニウム（A1050）と熱間加工温度域で加工軟化型のフローカーブを示すマグネシウム合金（AZ31B）である。

2. モデル材料の変形抵抗式

2.1 モデル材の作製とフローカーブ測定

実験に用いたモデル材料は、前報⁸⁾と同様にWAXと微粉末を混合・混練したWAX粘土である。WAX成分は、マイクロワックス、鈷油、ロジンを用いた混合物（質量比でマイクロワックス：鈷油：ロジン＝5：1：1）、微粉末には、カオリン、炭酸カルシウム（質量比でカオリン：炭酸カルシウム＝2：5）を用いて、表1に示す配合のモデル材料を作製した。

モデル材料の作製から単軸圧縮試験によるフローカーブ測定までのフローチャートを図1に示す。モデル材料の作製では、WAX成分を150℃に加熱した油浴中で完全に溶解し、界面活性剤（第一工業製薬（株）製ノイゲンET-129）と微粉末を加えて攪拌した。冷却後、WAXと微粉末の混合物を2軸混練機で約1時間混練し、均一化を図った。また、混練後のモデル材料を再度、加熱溶解して金属製円筒型へ流し込み、冷却固化してφ40×40mmの円柱試料を作製した。モデル材料のフローカーブは、円柱試料の単軸圧縮試験から求めた。試験条件は、加圧速度：1 mm/s、変形温度：25℃、潤滑剤：ワセリンで、初期高さの50%になるまで圧縮した。

* 生産技術部

** 鹿児島大学

表1 モデル材料の配合

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
WAX ^{*1} (mass%)	100	85	70	50	45	40	35	30	20
Powder ^{*2} (mass%)	0	15	30	50	55	60	65	70	80

^{*1}: Micro WAX : Oil : Resin = 5 : 1 : 1

^{*2}: Kaolin : Lime = 2 : 5

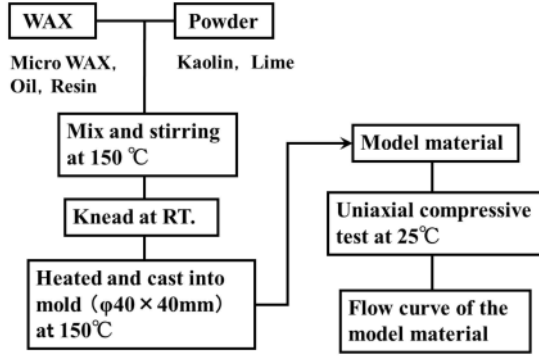


図1 モデル材料の作製と単軸圧縮試験によるフローカーブ測定フローチャート

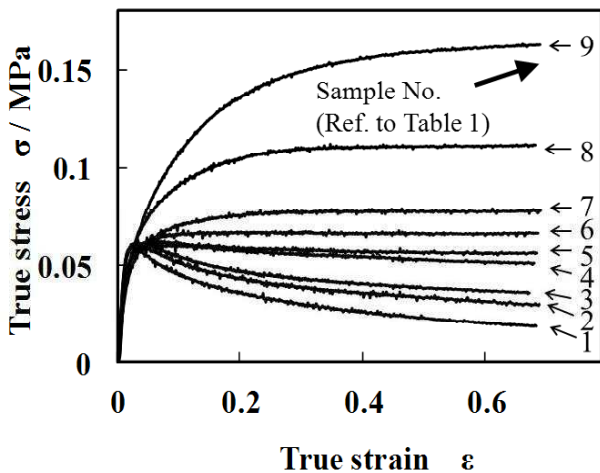


図2 モデル材料のフローカーブ

図2に表1の各試料の単軸圧縮試験結果から得られたフローカーブを示す。この結果から、各配合のモデル材料が金属材料でみられる以下の3パターンのフローカーブを示すことがわかった。

- 1) 微粉末量0～55mass% (表1のNo. 1～5) までは、ひずみ0.05付近の応力値が最大となり、それ以降のひずみの増加に伴って応力が低下する加工軟化型
- 2) 微粉末量60mass% (表1のNo. 6) では、ひずみ0.05以降の応力値が、ほぼ一定となる定常変形型
- 3) 微粉末量がさらに増加する (表1のNo. 7～9) と、ひずみの増加に伴って応力が高くなる加工硬化型

なお、図2のフローカーブを用いて、金属材料の変形特性を表す指数 (加工硬化指数: n 値) を算出した。これは金属材料の経験則式としてよく知られた(1)式で表した場合の実験因子 C と n のことであり、ひずみが0.05以上の

表2 図2のフローカーブから算出した C 値と n 値

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Powder (mass%)	0	15	30	50	55	60	65	70	80
C value	0.02	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.12	0.19
n value	-0.43	-0.27	-0.21	-0.08	-0.03	0.01	0.07	0.13	0.25

範囲における値を表2に示す。

以上の結果から、WAXへの微粉末量を増減することで上記1)～3)のフローカーブ (n 値) を調整できることがわかった。

$$\sigma = C\varepsilon^n \tag{1}$$

2.2 変形抵抗式

これまで金属材料の塑性変形抵抗式に関する研究の成果が多く報告されている^{9)~12)}。今回、モデル材料についての変形抵抗式は、任意のひずみ ε における変形抵抗 σ に及ぼす影響を考慮するために加工硬化率 (フローカーブの微小領域における傾き: $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_\varepsilon$) で表すこととして、図2の実験データに基づいて作成した。

すなわち、ある量の微粉末を添加したモデル材料の加工硬化率 $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_\varepsilon$ は、表1のNo. 1 (基準加工硬化率) $(\partial\sigma_0/\partial\varepsilon)_\varepsilon$ に微粉末を添加することによって表れる加工硬化率の増分 $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_R$ を加えた結果とすると(2)式となる。

$$\left[\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} \right]_\varepsilon = \left[\frac{\partial\sigma_0}{\partial\varepsilon} \right]_\varepsilon + \left[\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} \right]_R \tag{2}$$

表1のNo. 1 (微粉末量: $Pw=0$ mass%) および各微粉末量のモデル材料 (図2の $Pw=30\sim80$ mass%) のフローカーブ実測値を用いて、いくつかのひずみ ε における加工硬化率の増分 (すなわち(2)式の $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_R$ 項) を求めた。各微粉末量のモデル材料ごとに表示した加工硬化率の増分 $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_R$ とひずみ ε の関係を図3(A)に示す。また上記の $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_R$ と ε の関係を片対数グラフで表示した結果を図3(B)に示す。図3(B)で、 $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_R$ 値を求める際のフローカーブ実測値の読み取り誤差と差分計算の誤差が小さい $\varepsilon > 0.1$ のひずみ領域において、微粉末量ごとのプロット点で示す $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_R$ と ε の関係は線形関数(3)式あるいは同式を書き換えた(4)式で近似できる。ここで、式中の q と S_0 (あるいは K) は、実験因子である。 q は、線形関数(4)式の傾きのことであり、微粉末量に関係なく、 $q=6.0$ となった。一方 S_0 (あるいは K) は、微粉末量に関連して変化する材料因子であることが分かった。なお、 $(\partial\sigma/\partial\varepsilon)_R$ 値が極めて小さい粉末量 (図3(B)の $Pw: 30\sim55$ mass%) の場合、微小数値を片対数表示していることにより、(3)式による近似直線

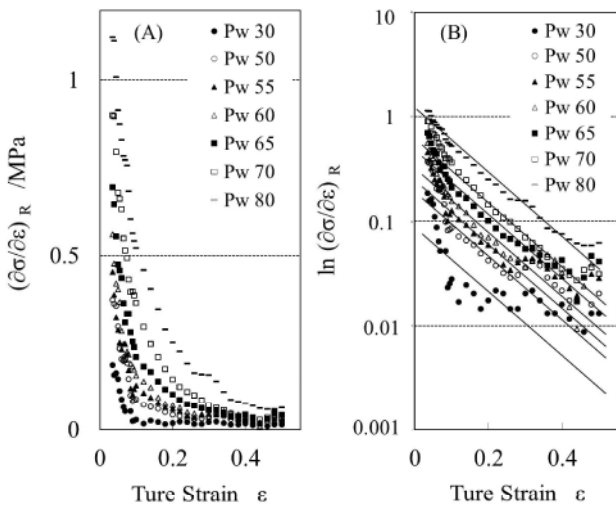


図3 モデル材料のフローカーブにおける加工硬化率とひずみの関係 (A : 線形軸, B : 片対数軸)

とプロット点の差異が大きく見えるが、後述する検証計算により(3)式による近似で良いことを確認した。このときの実験因子Kと微粉末量(Pw)の関係を図4に示す。

$$\ln\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}\right)_R = -q \cdot \varepsilon + S_0 \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}\right)_R = K \exp(-q \cdot \varepsilon), \quad K = \exp(S_0) \quad (4)$$

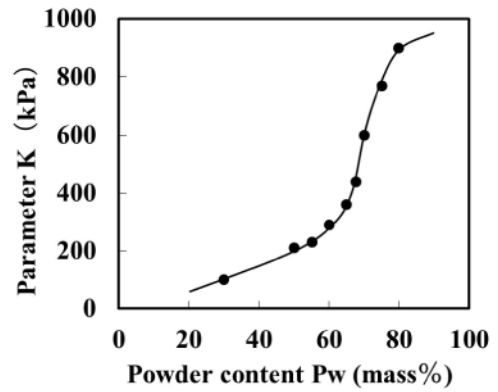


図4 実験因子Kと微粉末量(Pw)との関係

以上の実験・解析手順により、モデル材料の変形抵抗式は、(5)式で表すことができた。

$$\left[\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}\right]_{\varepsilon} = \left[\frac{\partial\sigma_0}{\partial\varepsilon}\right]_{\varepsilon} + K \exp(-q \cdot \varepsilon) \quad (5)$$

また、図4のKと粉末量(Pw)の関係をKとPwに関する区分二次方程式で表した式ならびに $q=6.0$ と(5)式を連立させて、Runge-Kutta法で数値積分する計算プログラムを作成して、微粉末量をいくつか変えたモデル材料のフローカーブを推算した。図5に実測結果と計算結果の比較を示す。図5から加工硬化率を用いた変形抵抗式によるフローカーブ推算結果は、実測値とほぼ一致した。これによ

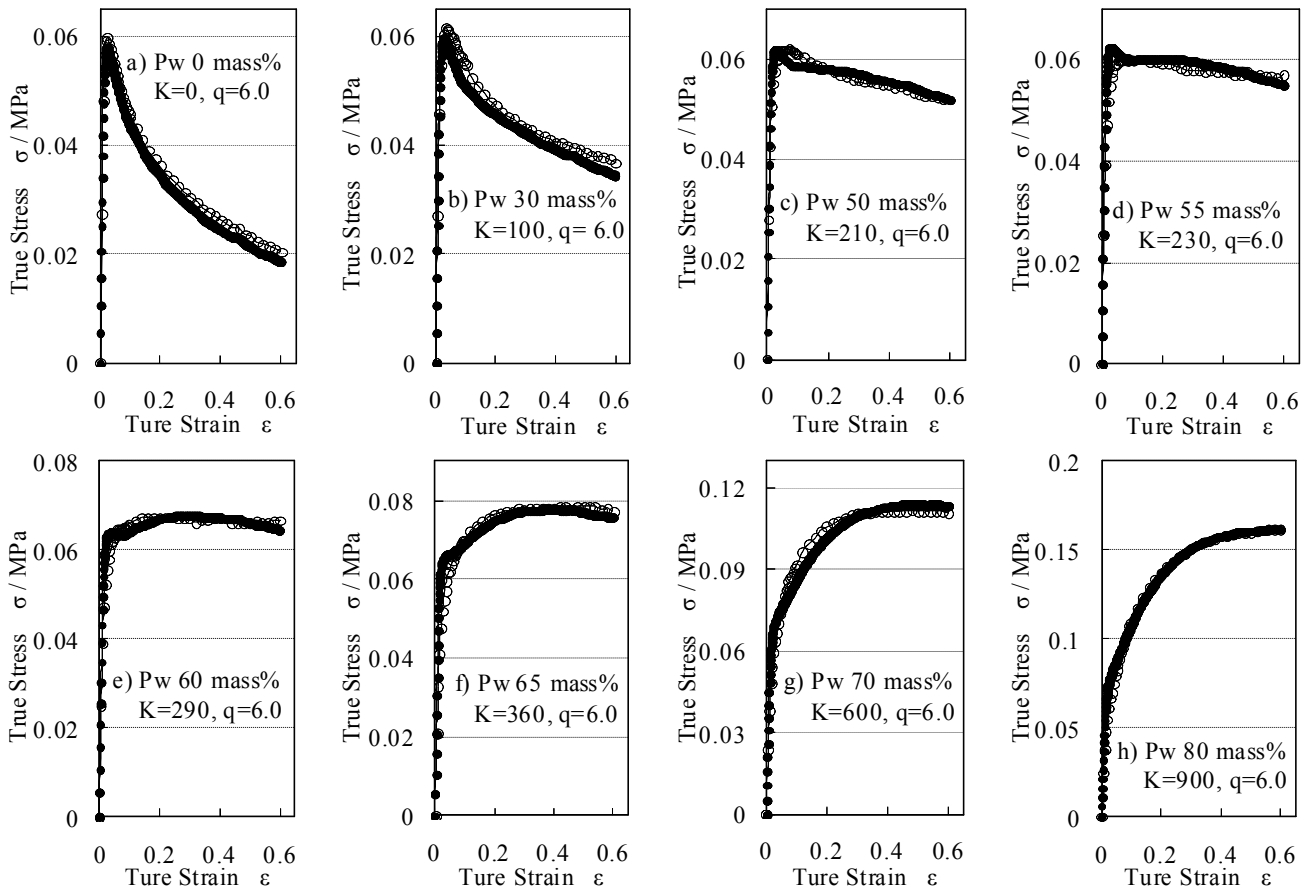


図5 モデル材料のフローカーブ実測値(○)と変形抵抗式から計算で求めたフローカーブ(●)の比較

り、任意の配合のモデル材料のフローカーブを求めることができる。

3. 成形加工シミュレーション

3. 1 供試金属材料

成形加工シミュレーションの対象材料として、室温付近で加工硬化型フローカーブを示す純アルミニウム (A1050) と熱間加工温度域で加工軟化型のフローカーブとなるマグネシウム合金 (AZ31B) を選定した。A1050とAZ31Bの化学組成をそれぞれ表3と表4に示す。また、両材料ともに実験に使用する前に焼鈍した。このときの焼鈍温度と硬度の結果を表5に示す。

上記の金属材料の変形特性について、Φ16×24mmの円柱形状試験片を用いた単軸圧縮試験を行い、フローカーブを求めた。各材料のフローカーブ測定結果を図6に示す。このときの試験条件として、A1050は、加圧速度：0.5mm/s、

表3 アルミニウム (A1050) の化学組成

mass%								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V	Al
0.07	0.35	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	bal.

表4 マグネシウム合金 (AZ31B) の化学組成

mass%							
Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
3.50	1.40	1.00	0.10	0.05	0.01	0.01	bal.

表5 各金属材料の焼鈍温度と硬度 (Hv)

	Annealed temp. / °C	Vickers hardness / HV
A1050	350	25
AZ31B	345	65

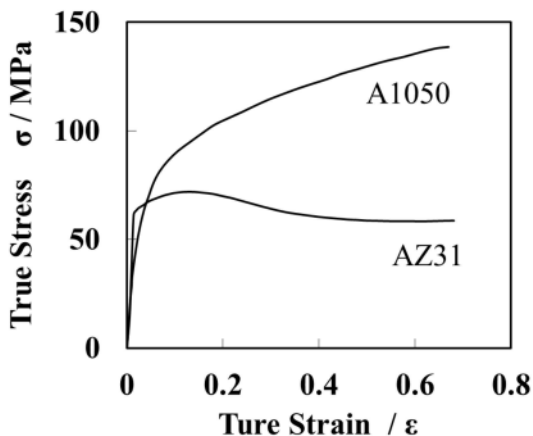


図6 金属材料のフローカーブ

変形温度：室温、潤滑剤：鉱油であり、AZ31Bの試験条件は、加圧速度：0.5mm/s、変形温度：300℃、潤滑剤：二硫化モリブデン系潤滑剤である。

3. 2 モデル材料の作製

金属材料と類似のフローカーブを示すモデル材料の配合および作製は、以下の手順で行った。

- (1) (5)式と実験因子 (K：図4から求めた値、q=6.0) から任意の微粉末量におけるモデル材料のフローカーブを算出する。
- (2) (1)で求めたフローカーブについて、ひずみが0.05以上のときの応力とひずみ値を用いて(1)式のnを定める。
- (3) 以上の解析で得られたn値とモデル材料の微粉末量の関係 (図7) を求める。
- (4) 実測した金属材料のフローカーブ (図6) から(1)式のn値を求めることで、モデル材料の作製に必要な微粉末量を図7から確定する。

図6のフローカーブから(1)式中のCとnを求めると、A1050でC=155 MPa、n=0.24、AZ31Bでは、C=54 MPa、n=-0.14となった。次に、各n値に対応する微粉末量は、図7からA1050で80mass%、AZ31Bでは40mass%と定めることができた。また、この結果を基にモデル材料を作製し、単軸圧縮試験からフローカーブを実測して、これまでと同様の計算解析からCとnを求めた。

以上の実験・解析結果から得た、実金属およびモデル材料のC、n値を表6に示す。表6から、モデル材料の成形加工実験は、実金属を用いた加工と比較して、1/1000程度の低応力で行えることがわかる。また、マグネシウム合金は、約300℃で加工するのに対し、モデル材料は、室温で模擬実験が可能である。

次に金属材料およびモデル材料の各フローカーブを比較するために表6のC値を用いて、相対応力 (σ / C) を計算し、ひずみとの関係についてプロットした。図8にモデル材料と金属材料のフローカーブの相互比較結果を示す。図8では、金属材料およびモデル材料のフローカーブが、

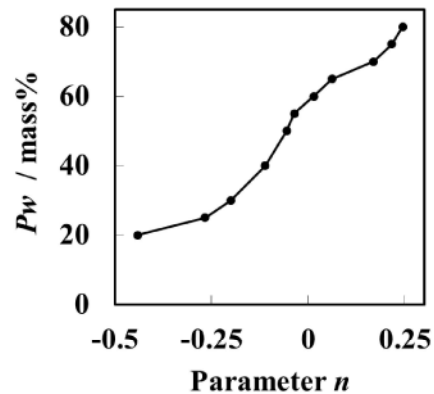
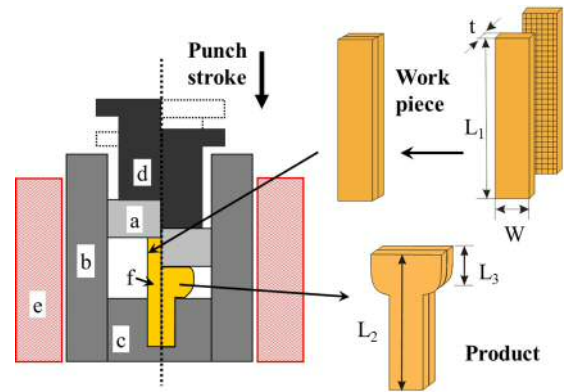


図7 モデル材料のn値と微粉末量の関係

表6 実金属とモデル材料のC値とn値

Workpiece	C value	n value
A1050	155MPa	0.24
AZ31B	54MPa	-0.14
Model material (Pw:80mass%)	195kPa	0.25
Model material (Pw:40mass%)	43kPa	-0.11



a: upper die b: container c: lower die
d: punch e: heater f: workpiece

図9 実験装置概略図

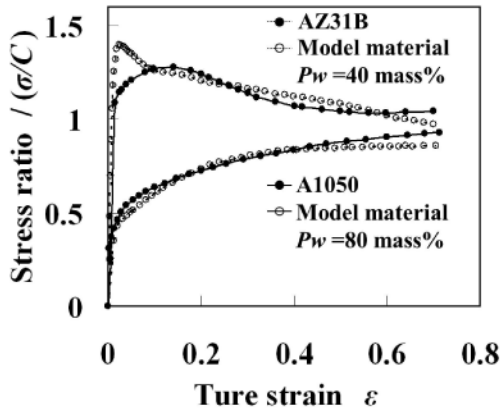


図8 モデル材料と金属材料のフローカーブの相互比較

それぞれ相互に類似することを確認した。これにより、特定の金属材料に相応するモデル材料を作製する際に必要な微粉末量を容易に求めることができる。

3.3 平面ひずみ据込み加工実験シミュレーション

3.3.1 実験装置および実験方法

平面ひずみ据込み加工実験装置の概略図を図9に示す。同装置は、パンチd、上型a、下型c、外型b、ヒーターeで構成される。試料fは、 $t = 6\text{ mm}$ 、 $L_1 = 60\text{ mm}$ 、 $W = 13\text{ mm}$ である。実金属では試料の片面に2mm間隔の格子線をけがき加工した。モデル材料では、試料の片面に2mm間隔の格子線をスタンプ印刷した。図9に示すように、2枚の試料を合わせて1個の実験材料とした。ここで、合わせ面の一方は格子線模様のある面であり、塑性流れ(格子模様)の観測面となる。

平面ひずみ据込み加工実験の実験条件を表7に示す。こ

表7 平面ひずみ据え込み加工実験条件

Workpiece	Upsetting temp./°C	Lubricant	Upsetting speed/mm·s ⁻¹
A1050	25	Mineral oil	0.5
AZ31B	300	MoS ₂	0.5
Model material	25	Vaseline	0.5

の条件は、フローカーブを求める際の単軸圧縮試験と同様である。また、外形状や格子模様の変化を段階的に観察するために逐次加工実験を行った。パンチの移動量(パンチストローク)を計測し、0~5mm、0~7mmおよび0~9mmのストロークで成形加工した。加工後の成形品寸法は、型のたわみ等の影響で $L_2 = 48\text{ mm}$ 、 $L_3 = 13\text{ mm}$ となった。

3.3.2 実験結果と考察

逐次変形実験で得た、純アルミニウム(A1050)とマグネシウム合金(AZ31B)の平面ひずみ据込み加工後の成形品写真を図10に示す。なお、図中のパンチストロークは実測値である。図10における(A)はA1050の結果を示し、(B)はAZ31Bの結果を示す。実金属とそのモデル材料は、相互に類似した輪郭形状ならびに材料内部の格子模様となっていることが確認できる。また、アルミニウムの常温加工とマグネシウム合金の300℃における加工を比較すると、パンチストローク量が5mmまでは、実材料およびモデル材料とも成形品の輪郭形状ならびに内部の変形状態に大きな差はみられない。しかしパンチストローク量が7mm以上では、加工硬化型変形特性を示すアルミニウムおよびそのモデル材料と加工軟化型のマグネシウム合金とそのモデル材料の変形状態に明確な差異が認められた。

パンチストローク9mmにおける外面の輪郭形状および内部の格子線模様の比較を図11に示す。ただし、図10の実金属材料の格子線模様が明瞭でないため、線を明確にするためにトレースを加えた。同図では、成形品の輪郭形状ならびに加工材内部の塑性流れに関する格子線模様が金属材料の変形特性によって変わることが確認できる。

さらに、格子線解析法を適用して、逐次変形実験で得られた塑性流れ観測面上の格子線模様の時間変化から変形過程における各格子線交点の移動速度を算定し、変形領域内部の相当ひずみ速度分布および相当ひずみ分布を算定し

た。図12にストローク量9mmまでの加工材内部の相当ひずみ分布を示す。図12では、モデル材料で得た成形加工過程における相当ひずみ分布が、実金属で得る相当ひずみ分布と同様の傾向を示している。また、加工硬化型変形特性を持つA1050と加工軟化型変形特性を持つAZ31Bの変形領域内

部の変形状態が明確に異なっていることも確認できる。すなわち、A1050とそのモデル材料の場合、加工材の加工硬化特性により、下型との接触部付近以外では変形領域内部のひずみ分布に大きなひずみ値領域は現れない。一方、AZ31Bとそのモデル材料では、加工材の加工軟化特性により、変

	(A) Aluminum (A1050)				(B) Magnesium Alloy (AZ31B)			
Punch stroke /mm	0	5.3	7.6	8.7	0	4.9	7.0	9.2
Working time /s	0	10.6	15.2	17.4	0	9.8	14.0	18.4
Actual material								
Punch stroke /mm	0	5.2	7.1	8.5	0	5.3	6.8	9.3
Working time /s	0	10.4	14.2	17.0	0	10.6	13.6	18.6
Model material								

図10 平面ひずみ据込み加工実験の逐次加工による成形品写真 (A : アルミニウム合金 (A1050), B : A用のモデル材料, C : マグネシウム合金 (AZ31B), D : C用のモデル材料)

	Aluminum (A1050)	Magnesium Alloy (AZ31B)
Actual material	(A)	(C)
Model material	(B)	(D)

図11 加工後の成形品外形状と格子模様

(A : 純アルミニウム (A1050), B : Aのモデル材料, C : マグネシウム合金 (AZ31B), D : Cのモデル材料)

	Aluminum (A1050)	Magnesium Alloy (AZ31B)	Scale
Actual material	(A)	(C)	
Model material	(B)	(D)	

図12 加工後の成形品外形状と相当ひずみ分布

(A : 純アルミニウム (A1050), B : Aのモデル材料, C : マグネシウム合金 (AZ31B), D : Cのモデル材料)

形領域内部の中心付近および同付近から加工材外側と下型との接触部を結ぶ線に大きなひずみ値領域が現れる分布模様となることがわかった。

以上の結果から、金属材料の n 値とほぼ同じ値となるモデル材料を用いた成形加工実験シミュレーションを行うことによって、実金属の成形品形状、塑性流れおよび内部ひずみ分布を実用上満足できる精度で予測できた。

4. 結 言

金属材料の冷間から熱間加工までの実験シミュレーションを常温および低加工荷重で簡便に実施できるモデル材料の適用に関連する実験・解析を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1) モデル材料の微粉末量を調整することで、フローカーブを制御することができるモデル材料を作製し、このフローカーブを正確に予測できる変形抵抗式を提示した。この式を利用することで、任意の配合におけるモデル材料のフローカーブを求めることができる。
- (2) モデル材料に関する微粉末量とフローカーブを n 乗加工硬化則式で近似させた n 値の関係を明らかにした。これにより、特定の金属材料に相応するモデル材料を製作する際に必要な微粉末量を容易に求めることができる。
- (3) 冷間加工で加工硬化型フローカーブを呈するA1050と温間加工で加工軟化型フローカーブを呈するAZ31Bの平面ひずみ据込み成形加工実験シミュレーションを各金属材料に適合させたモデル材料を用いて実施した。モデル材料を用いた成形加工実験は、室温で実施できると同時に実金属を用いた成形加工実験の1/1000程度の低応力レベルで行うことができた。
- (4) 上記平面ひずみ据込み加工実験から成形過程の塑性流れを可視化して、ひずみ解析を行った結果、実金属の成形品形状、塑性流れおよび内部ひずみ分布を実用上満足できる精度で予測できることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 栗野泰吉, 団野敦: 塑性と加工, **13**, 141, 768-775 (1972)
- 2) Wanheim T., Maegaard V. & Danckert J.: Adv Technol Plast, **2**, 984-996 (1984)
- 3) 中西賢二, 牟禮雄二: 塑性と加工, **36**, 418, 1300-1305 (1995)
- 4) Arentoft M., Gronostajski Z., Niechajowicz A. & Wanheim T.: J. Mater. Process. Technol., **106**, 2-7 (2000)
- 5) 木場博文, 中西賢二, 上谷俊平: 塑性と加工, **42**, 488, 954-958 (2001)
- 6) 鈴木康介, 星野倫彦, 内田幸彦: 塑性と加工, **50**, 576, 49-53 (2009)
- 7) Bariani F. P. & Negro D. T.: Annals of CIRP, **48-1**, 183-186 (1999)
- 8) 桑原田聡, 牟禮雄二, 松田豪彦, 中西賢二: 鹿児島県工業技術センター研究報告, **23**, 39-44 (2009)
- 9) Nakanishi K., Kamitani S. & Fukui Y.: Research Reports of the Faculty of Engineering, Kagoshima University, **36**, 19-32 (1994)
- 10) 中西賢二: 塑性と加工, **30**, 337, 262-269 (1989)
- 11) 宮川英明, 中島英治, 吉永日出男: 九州大(工)研究報告, **13**, 4, 325-331 (1992)
- 12) 日本塑性加工学会編: 塑性加工便覧, コロナ社 (2006), p31-34