塑性変形に伴う自由表面あれの抑制*

高倉 章雄^{*1}, 山口 克彦^{*1}, 北川 雅彦^{*2}Suppression of Free Surface Roughening
of Metal with Plastic Deformation

Norio TAKAKURA, Katsuhiko YAMAGUCHI and Masahiko KITAGAWA

Surface roughening of metals with plastic deformation is governed not only by the strain but also by the crystal grain size of the materials. Therefore surface roughening may be expected to decrease when a material with smaller crystal grains at the surface layer is produced. In the present investigation, a thin layer with small crystal grain size is coated on the surface of an aluminium alloy and the effects of the crystal grain size, as well as the thickness of the surface layer, on surface roughening are evaluated in an upsetting test. It is shown that surface roughening is dominated only by the crystal grain size on the surface layer and so surface roughening can be suppressed by coating the surface of the material with a thin layer of small crystal grains.

Key Words: Surface Roughness, Plastic Forming, Forging, Finite-Element Method, Sintered Materials, Crystal Grain, Clad Material

1. 緒 言

金属材料に塑性変形を与えると、工具に接していない材料の自由表面は変形の進行に伴って粗くなる。このような材料の粗面化現象は、製品の美観をそこねるばかりではなく、後工程としてのメッキや塗装などの表面処理を行う場合にも問題となる。また、特に薄板成形の場合には、板表面のあれは板厚に厚い部分と薄い部分といった板厚の不均一さを生じさせるため、成形限界を低下させる原因にもなる。

このような塑性変形の進行に伴う自由表面のあれに関しては、これまで数多くの実験的および解析的研究がなされてきた^{(1)~(6)}。それらによると、多結晶金属材料の自由表面あれは、ひずみおよび素材の結晶粒の大きさに比例して増大することが示されている。また、この表面あれは、材料表面に存在する数個の結晶粒の回転やすべりなどの不均一な変形が表面に現れたものであると考えられている。

このことは、逆に考えれば、結晶粒が大きく表面あれの発達が著しい材料であっても、表面層の結晶粒の

みを小さくすれば、表面あれの発達を抑制しうることを示唆している⁽⁹⁾。塑性変形に伴う表面あれの発達を抑制することができれば、製品の高精度・高品質化や表面改質、さらには薄板成形におけるプレス成形限界の向上にも役立つものと考えられるが、表面層の結晶粒の変形挙動に注目し、表面あれの抑制効果を検討した研究は見当たらない。

そこで本研究では、材料の表面層に小さい結晶粒を有する二層材料について、有限要素法によるシミュレーションを行い、表面あれの発達に対する表面層と内部層の結晶粒の影響を調べた。また、粉粒径が異なるアルミニウム粉末を使用して内部層と表面層の結晶粒径が異なる二層材料を作製し、表面あれの発達状況を実験的に調べるとともに、表面あれの抑制効果について検討した。

2. 2層材料の表面あれの剛塑性
有限要素シミュレーション

ここでは、2層材料の表面あれの発達に対する表面層および内部層の結晶粒の影響を把握するために、まず、表面あれのシミュレーションを行った。シミュレーションでは、アルミニウム材を対象にし、計算の1段階において変形中の加工硬化を考慮した剛塑性有限

* 原稿受付 平成4年10月26日。

^{*1} 正員、京都工芸繊維大学工学部 (〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。^{*2} 京都工芸繊維大学大学院 [現：積水化学工業(株)]。

要素法⁽⁶⁾を使用した。

2・1 材料モデル 表面あれの発達をシミュレートするために、図1に示すような簡単な不均質材料モデル⁽⁴⁾⁽⁶⁾を使用した(結晶粒を2種類の異なる変形抵抗を持つ正方形で近似したもの)。これは、内部層に一边 d_1 の結晶粒が、また表面層に一边 d_2 の結晶粒が規則正しく交互に配列している平面モデルである。結晶粒の変形抵抗としては、アルミニウム粗大結晶粒板(単結晶板)の1軸引張試験から得られた相当応力 σ —相当ひずみ ε 曲線($\sigma = F\varepsilon^n$)が最大と最小になるものを使用した⁽⁶⁾。

計算は、図1に示す ABCD の範囲についてのみ行った。図2に、要素分割を示す。表面層の結晶粒は4要素に、また内部層の結晶粒は、要素の大きさが表面層の要素と同じ大きさになるように要素分割した。計算における境界条件は、図2において

AD 上の Z 軸方向速度： $v = \text{一定}$

BC 上の Z 軸方向速度： $v = 0$

AB 上の X 軸方向速度： $u = 0$

である。なお、1段階の変形で生じる圧縮ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_z$ は 0.01 とした。

2・2 面あれの発達状況 図3は、表面層がない

図1 不均質材料モデル

図2 要素分割

場合とある場合($d_1=150\mu\text{m}$, $d_2=50\mu\text{m}$, 表面層の結晶粒の個数 $N=4$ 個)について、要素の変形状態を示したものである。図に示すように、変形の進行に伴って自由表面の凹凸がはげしくなるが、表面層に小さい結晶粒の層がある場合には、ない場合に比べて表面の凹凸の発達が小さくなっていることがわかる。この表面凹凸の差を最大高さ R_{max} として表示すると、変形の進行に伴う R_{max} の発達は、図4のようになる。これらの図より、表面粗さ R_{max} は、変形の進行に伴って単調に増大すること、および表面層に存在する小さい結晶粒の個数が多くなるほど表面粗さ R_{max} の発達が小さくなり、表面粗さとひずみの関係は、ほぼ一つの曲線になることがわかる。

2・3 表面層結晶粒の影響 図5は、内部の結晶粒径($d_1=200\mu\text{m}$)を一定とし、表面層の結晶粒径 d_2 を変化させた場合の表面粗さ R_{max} (ひずみ $\varepsilon_z=0.4$ の時点)と表面層厚さ t の関係を示したものである。図より、表面粗さ R_{max} は表面層厚さ t の増加に伴って減少し、表面層の結晶粒径と同じ粒径($d=d_2$)を持つ単一材の場合と同じ値に収束することがわかる。また表面粗さ R_{max} が収束する時点の表面層厚さ t_{cr} は、ほ

図3 変形に伴う要素の変形状態

図4 変形に伴う表面粗さ R_{max} の発達状況

ば一定(約 0.2 mm)となっており表面層の結晶粒径に影響されないことがわかる。

このことから、材料表面に存在する数個の結晶粒の粒径を小さくすれば、表面粗さ $R_{\max}$ は表面層の結晶粒のみに支配されることになり、表面あれの発達を小さくすることができると考えられる。

2.4 内部層結晶粒の影響 図 6 に、表面層の結晶粒径 ($d_2=50 \mu\text{m}$) を一定とし内部層の結晶粒径 d_1 を変化させた場合の表面粗さ $R_{\max}$ と表面層の結晶粒の個数 N の関係を示す。また図 7 に、図 6 の表面粗さ $R_{\max}$ が収束する時点の臨界表面層の厚さ t_{cr} (結晶粒の個数 N_{cr}) と内部層の結晶粒径 d_1 の関係を示す。図より、臨界表面層厚さ t_{cr} は、内部層の結晶粒径 d_1 が大きなものほど大きくなることがわかる。したがって、表面粗さを抑制するためには、内部層の結晶粒径 d_1 が大きいもの、すなわち表面あれの発達が著しい材料ほど表面層厚さ t_{cr} を大きくする必要がある。

2.5 内部層と表面層の境界面の凹凸の変化 図 3 に示したように、内部層と表面層の境界面の凹凸は、

表面粗さと同様に変形の進行に伴ってはげしくなる。この境界面の凹凸の差を境界面粗さ R_B と呼ぶことにする。図 8 に、内部層の結晶粒径を一定 ($d_1=200 \mu\text{m}$) とし、表面層の結晶粒径 d_2 を変化させた場合の境界面粗さ R_B ($\epsilon_z=0.4$) と表面層厚さ t の関係を示す。図に示すように、境界面粗さ R_B は、表面層厚さ t の増加に伴っていったん極大値を示したのち減少し、表面層厚さ t が 0.2 mm 以上になるとほぼ一定値に収束する。このことから、表面層に小さい結晶粒を積層することは、自由表面のみならず境界面の凹凸の発達をも低下させることがわかる。

3. 粉末焼結体を用いた 2 層材料の作製

以上のような簡単な不均質材料モデルを用いたシミュレーションの結果から、材料表面層の結晶粒を小さくすれば、表面あれの発達は表面層の結晶粒のみに支配されて小さくなることがわかった。そこで、内部層と表面層の結晶粒径が異なる 2 層材料を作製し、実験

図 5 表面粗さ $R_{\max}$ に対する表面層厚さ t の影響

図 7 臨界表面層厚さ t_{cr} と内部層結晶粒径 d_1 の関係

図 6 表面粗さ $R_{\max}$ に対する内部層結晶粒径 d_1 の影響

図 8 境界面粗さ R_B と表面層厚さ t の関係

を行った。

3・1 供試粉末および試験片の作製 溶製材を使用して、内部層と表面層の結晶粒径が異なる2層材料を作製することは容易ではない。本研究では、金属粉末焼結体の結晶粒径が粉粒径に依存すること⁽¹⁰⁾に着目し、粉粒径が異なるアルミニウム粉末を使用して内部層と表面層の結晶粒径が異なる焼結体を作製し、これを試験片として用いた。

本実験で使用したアルミニウム粉末の粉粒径を表1に示す。粉粒径は、使用したふるい目の平均値である。また、粉末の走査電子顕微鏡写真の一例を図9に示す。

まず、図10に示す圧粉体成形工具内に内部層の粉末を充てんし、これを荷重 $P=1\text{ kN}$ で軽く圧縮した。その後、上ポンチを取はずし、その上に粉粒径の小さい粉末を充てんした。そして、相対密度(圧粉体の密度をアルミニウムの真密度で除した値)が約0.93になるように圧縮し、一辺20 mmの立方体の圧粉体を作製した。このようにして得られた圧粉体を真空焼結(640°C , 90分)したものを2層材料試験片とした。

得られた試験片の断面の顕微鏡写真の一例を図11に示す。図に示すように、表面層と内部層で結晶粒径が異なった2層材料が得られていることがわかる。

図12に、焼結体の結晶粒径 d と使用した粉末の粉粒径 D の関係を示す。なお、結晶粒径は、圧粉体作製の加圧方向に平行な断面の顕微鏡写真より正方形近似して求めたものである。図に示すように、粉粒径が大きいものほど、焼結体の結晶粒径が大きくなっていることがわかる。また、これらの焼結体の F 値, n 値は $F=160\text{ MPa}$, $n=0.26\sim 0.28$ であった。

表1 実験に使用したアルミニウム粉末の組合せ

	Particle size D μm					
Inner layer	138			98		
Surface layer	38	49	69	38	49	38

図9 粉末の走査電子顕微鏡写真

3・2 実験方法 上記の方法で作製した試験片を表面層が自由表面となるようにして単純圧縮を行い、この表面層の粗さ R_{max} の発達を測定した。表面粗さの測定には、触針式粗さ測定機を使用し、試験片側面の中央部を軸方向に3箇所測定し、その平均値を測定値とした。なお、測定面の初期粗さは、エメリペーパー(#1000)を使用して $R_{\text{max}} \approx 3\text{ }\mu\text{m}$ 程度に仕上げた。

圧縮実験では、試験片のたるみ変形を防ぐためにテフロンシート(厚さ0.05 mm)とワセリンを用いた繰返し潤滑(一回の圧縮ひずみ $\varepsilon_z=0.05$)を行った。

4. 2層材料の表面あれ

4・1 表面あれの発達 まず、単一材について表面

図10 圧粉体成形工具

図11 試験片断面の顕微鏡写真

図12 焼結体の粉粒径 D と結晶粒径 d の関係

粗さ $R_{\max}$ の発達状況を調べた。図 13 に、表面粗さ $R_{\max}$ と圧縮ひずみ ε_z の関係を示す。図中の実線は、表面粗さ $R_{\max}$ の実験点を最小二乗法で近似したものである。焼結体の表面粗さの発達には、密度変化も影響⁽¹⁰⁾ するが、本実験で使用した試験片の初期相対密度は約 0.93 と大きく、また変形に伴う密度変化も小

図 13 変形に伴う表面粗さ $R_{\max}$ の発達状況 (単一材)

さいため、ここでは密度変化の影響は無視した。図に示すように、表面粗さ $R_{\max}$ の発達は、小さい粉粒径で作製した焼結体ほど小さくなる。

内部層に粉粒径 $D_1=98\ \mu\text{m}$ の粉末、表面層に $D_2=49\ \mu\text{m}$ の粉末を使用して作製した 2 層材料 (表面層厚さ $t=0.1, 1\ \text{mm}$) の圧縮変形に伴う粗さ曲線の変化を図 14 に示す。図に示すように、表面粗さ $R_{\max}$ は、変形が大きくなるほどはげしくなるが、表面に粉粒径が小さい層をもつ 2 層材料では、表面層の厚さ t が大きいものほど表面粗さ $R_{\max}$ が小さくなっていることがわかる。

図 15 に、内部層に粉粒径 $D_1=138\ \mu\text{m}$ 、表面層に $D_2<38\ \mu\text{m}$ のアルミニウム粉末を用いて作製した 2 層材料の表面粗さ $R_{\max}$ の発達状況を示す。なお、図中の○●印は、それぞれ内部層および表面層に使用した粉末の単一材の結果である。図に示すように、いずれの材料もひずみに対して表面粗さの増加は直線的であることがわかる。そして、表面層の粉粒径が小さい 2 層材料の場合には、表面層厚さ t が大きいものほど粗さの発達が小さくなり、表面層に使用した粉末の単一材の

図 14 変形に伴う表面粗さ曲線の変化 ($D_1=98\ \mu\text{m}$, $D_2=49\ \mu\text{m}$)

図 15 変形に伴う表面粗さ $R_{\max}$ の発達状況 (2 層材)

図 16 粗さ増加割合 α に対する表面層粉粒径 D_2 の影響

図 17 粗さ増加割合 α に対する内部層粉粒径 D_1 の影響 図 18 表面層厚さ t_{cr} と内部層粉粒径 D_1 の影響

結果に近づくことがわかる。

4.2 表面層粉粒径の影響 図 16 に、表面層の粉粒径を変化させた場合の粗さ増加割合 α (図 15 の直線の傾き) と表面層厚さ t の関係を示す。いずれの場合においても、粗さは増加割合 α は、表面層厚さ t の増加に伴って小さくなり、表面層に用いた粉末の単一材の結果と同じ値に収束する。また、粗さ増加割合 α が収束する臨界表面層厚さ t_{cr} は、表面層の粉粒径にはかわらずほぼ一定 ($t_{cr} \approx 0.7$ mm) となり、この傾向はシミュレーションの結果 (図 5) と定性的に一致している。

4.3 内部層粉粒径の影響 図 17, 18 に、内部層の粉粒径を変化させた場合の粗さ増加割合 α と表面層厚さ t の関係、および粗さ増加割合 α が収束する時点の臨界表面層厚さ t_{cr} と内部層の粉粒径 D_1 の関係を示す。図より、シミュレーションの結果と同様に、内部層の粉粒径が大きい (粗さ増加割合 α が大きい) 場合ほど、表面層厚さ t_{cr} を厚くする必要があることがわかる。

本実験で使用した焼結体の場合、粉粒径 D と結晶粒径 d の間には、 $d \approx 0.7D$ の関係があった。図 17 より $t_{cr} \approx 5D_1$ であるから、結局、表面層の厚さを内部層の結晶粒径の約 7 倍以上にすれば、表面あれは表面層の結晶粒のみに支配され表面あれを抑制できるものと考えられる。

5. 結 言

材料の内部層と表面層で結晶粒径が異なる 2 層材料について、変形の進行に伴う自由表面粗さの発達状況

を、簡単な不均質材料モデルを用いた剛塑性有限要素法とアルミニウム粉末焼結体を用いた実験の両面から検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 材料表面の結晶粒を内部の結晶粒よりも小さくすれば、表面あれの発達を抑制することができる。
- (2) 表面あれを抑制するために必要な表面層の厚さ t_{cr} は、本実験の場合、内部層の結晶粒径 d の約 7 倍以上であった。この表面層厚さ t_{cr} は、表面層の結晶粒径に依存しない。

終りに、剛塑性有限要素法に関し有益なご討論を頂いた大阪大学森謙一郎助教授、実験に協力された卒研生荻谷元彦 [現・アイシン精機(株)] 坂本賢一 [現・住友精密工業(株)] の両君、ならびに実験装置の製作にご協力頂いた本学機械工場片岡啓、大角和重、川崎晃技官の諸氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 小坂田・大矢根, 機論, **36**-286(1970), 1017.
- (2) Thomson P. F. & Shafer B. U., *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, **22**-4(1982), 261.
- (3) Dautzenberg J. H. & Kals J. A. G. *Advanced Technology Plasticity*, **1**(1984), 186.
- (4) 阿部・ほか 2 名, 機論, **50**-454, C(1984), 1236.
- (5) 河合・ほか 2 名, 機論, **51**-468, C(1985), 2100.
- (6) 高倉・ほか 2 名, 機論, **51**-469, C(1985), 2364.
- (7) 中村・ほか 2 名, 機論, **52**-476, C(1986), 1448.
- (8) 小豆島・宮川, 塑性と加工, **27**-310(1986), 1261.
- (9) 高倉・山口, 平 3 塑性加工春季講演会講演論文集, (1991-5), 569.
- (10) 高倉・ほか 2 名, 機論, **56**-521, C(1990), 228.