多結晶純銅の平面ひずみ圧縮塑性変形に伴う接触面のあれ*

邵 玉 柱^{*1}, 阿 部 武 治^{*2}, 清 水 一 郎^{*3}
川 口 順 也^{*4}, 納 所 孝 至^{*5}

Roughening of Contact Surface During Plane Strain Compressive Plastic Deformation of Polycrystalline Copper

Yu-zhu TAI, Takeji ABE, Ichiro SHIMIZU,
Junya KAWAGUCHI and Takayoshi NOSHO

Changes in surface roughness and three-dimensional microscopic shapes of contact surface of polycrystalline copper during plane strain compressive plastic deformation are studied. The roughening of contact surface is measured with a stylus instrument. The microscopic change in surface shape is also observed with a scanning electron microscope. The roughness of contact surface measured in the free direction is larger than that measured in the constrained direction for the specimen having transverse contact surface. Meanwhile, the roughness of contact surface measured in the loading direction of the specimen having longitudinal contact surface is a little larger than that measured in the free direction. From the observation by a scanning electron microscope, it is seen that the mountains and the valleys which appear on the free surface are sharp, while those on the contact surface are relatively rounded.

Key Words: Plasticity, Surface Roughening, Contact Surface, Plane Strain Compression, Polycrystalline Copper

1. 緒 言

多結晶金属材料を塑性変形させると、型や工具に接触していない自由表面には表面あれが発生する。この自由表面あれは、材料の微視的な不均一性と密接に関係していることが指摘されており、表面あれ形状の三次元的測定や電子顕微鏡による結晶粒の変形挙動の観察が行われている^{(1)~(4)}。

一方、多結晶金属相互の接触面においても、塑性変形に伴って不均一変形が進行し、表面あれが成長する⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このような接触面の微視的な形状変化は、多結晶金属内部における変形挙動の解明に有用であると考えられるほか、複合材料の界面特性、金属の接合などとも関連する重要な研究課題であると考えられる。

多結晶金属の接触面あれについて、先に著者らは、

工業用純銅の単軸圧縮に伴う自由表面および内部接触面の表面粗さを測定し、比較検討した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。その結果、接触面においても負荷ひずみにほぼ比例して表面粗さが増加するが、その程度は自由表面の約半分と小さいこと、また電子顕微鏡観察から、接触面あれの形状は、材料相互の拘束のために自由表面あれとは定性的に異なることなどを指摘した。しかしながら一般の塑性加工においては、材料が型や工具によって拘束されながら変形することから、平面ひずみに近い状態で変形が進行する場合も多い⁽⁷⁾。このような平面ひずみ条件下での接触面の変形挙動に関連した従来の研究例としては、人工的に作ったのこ刃状の突起の変形挙動の観察⁽⁸⁾ などがあるが、接触面の微視的な表面形状変化について調べた例は見当たらない。

そこで本研究では、直方体純銅を荷重垂直方向または荷重方向に二分割した後、再び重ね合わせた試験片について、平面ひずみ圧縮条件下における自由表面と接触面の表面粗さの二次元的な変化を調べる。また、接触面あれ形状を三次元的に測定することにより、平面ひずみ条件下における多結晶金属の内部接触面の微視的変形挙動、および接触面に対する荷重方向の影響の解明を試みる。

* 原稿受付 1997 年 5 月 21 日。

^{*1} 岡山大学大学院自然科学研究科 (☎ 700-8530 岡山市津島中 3 1 1)。

^{*2} 正員、岡山大学工学部。

^{*3} 正員、岡山大学大学院自然科学研究科。

^{*4} 大阪ガスセキュリティサービス(株) (☎ 532-0024 大阪市淀川区十三本町 3 6 35)。

^{*5} 正員、東岡山高周波工業(株) (☎ 703-8228 岡山市乙多見 463)。

2. 実験方法

2.1 試験片および平面ひずみ圧縮試験 供試材は工業用多結晶純銅(99.98 wt.% Cu)である。試験片は、まず素材断面 25×25 mm の角棒から直方体に切削加工後、マイクロカッタを用いて二分割した。次に自由表面および接触面を、研磨紙とバフ仕上げによって、初期の中心線平均粗さ⁽⁹⁾が $0.06 \mu\text{m} R_a$ 程度の鏡面にした後、 600°C 、1時間保持の真空焼なましを行って残留応力を除去した。なお、試験片は荷重方向に対して平行に分割したものと、荷重垂直方向に分割したものの2種類を作製した。平面ひずみ圧縮試験片の形状と概略の寸法を図1に示す(ただし、 z 方向の寸法は正確に20 mmに仕上げている)。接触面および自由表面における変形前の平均結晶粒径は、ともに約 $75 \mu\text{m}$ であり、結晶粒形状はほぼ等方性であった。

平面ひずみ圧縮試験は、圧縮試験機(東京衡機製 980 kN 形)に、図2に示すようなジグを取付けて行った。なお、ジグと試験片の間には、摩擦を低減するためにテフロンシートを挟んでいる。試験片は、対数ひずみで約 -0.05 の圧縮ひずみを加えるごとに試験機から取り外して、自由表面あれと接触面あれを測定し、最終的にひずみが約 -0.60 まで変形させた。

2.2 表面あれの測定および電子顕微鏡観察 表面粗さの測定には、触針式表面粗さ計(東京精密製サーフコム 304 B)を用いた。自由表面と接触面の二次元的な表面粗さは、カットオフ値 0.8 mm 、測定長さ 8 mm の条件⁽⁹⁾で、測定面内の直交する二方向について測定した。すなわち、図1に示すように、圧縮方向を x 方向、ジグによって変形が拘束されている方向を z 方向とすると、自由表面の場合は x および z 方向、荷重方向に垂直な接触面の場合は y および z 方向、荷重方向に平行な接触面の場合は x および y 方向にお

Fig. 1 Compressive specimen

の10回測定し、最大値と最小値を除いた8回の測定結果から平均値を求めた。

一方、接触面における三次元的な表面あれ形状については、接触面内にけがき線で区別した $3 \times 3 \text{ mm}^2$ の領域を、カットオフなしで $10 \mu\text{m}$ 間隔に約300回測定し、著者らが開発した三次元表面あれ形状測定システム⁽⁴⁾によって定量的に測定した。また、走査形電子顕微鏡(SEM, 日立製 S-450 形)を用いて各ひずみ段階での自由表面および接触面を観察し、それらの微視的表面形状の変化に関しても定性的に検討を加えた。

3. 実験結果および考察

3.1 負荷ひずみに伴う表面粗さの変化 純銅試験片を平面ひずみ条件下で圧縮し、自由表面および接触面の二次元的な表面粗さを測定した。自由表面、荷重方向に垂直な接触面、荷重方向に平行な接触面のおののについて、中心線平均粗さ(Centerline average roughness) R_a および最大高さ(Maximum height) R_{max} と負荷ひずみ ϵ の関係を図3~5に示す。比較のため、同じ純銅試験片の単軸圧縮の場合の、自由表面および荷重方向に垂直な接触面の表面粗さの測定結果⁽⁵⁾も図中に示している。

これらの測定結果から、自由表面と2種類の接触面の二次元的な表面粗さは、ともにひずみにほぼ比例して増加するが、材料相互の拘束を受ける接触面粗さの増加割合は、拘束されない自由表面よりも小さいことがわかる。すなわち、荷重方向に垂直および平行な接触面の粗さは、それぞれ自由表面の約 $2/5$ および約 $2/7$ となっている。

自由表面に関しては、単軸圧縮の際には測定方向によって表面粗さに差が認められなかったが⁽⁵⁾、平面ひずみ圧縮においては、荷重方向(x 方向)に測定した粗さのほうが拘束方向(z 方向)の粗さより20%程度大

Fig. 2 Instrument for plane strain compression

きくなる傾向がある⁽⁷⁾。一方、荷重方向に垂直な接触面においては、自由変形方向(y 方向)に測定した粗さのほうが拘束方向(z 方向)よりも大きく、荷重方向に平行な接触面においては、荷重方向(x 方向)に測定したほうが自由変形方向(y 方向)よりも大きい。これら

の測定方向による表面粗さの差は、後述する表面あれ形状の性質に起因していると考えられる。各面における粗さの増加割合は、負荷ひずみ $\varepsilon = -0.40$ の近辺で減少しているが、これは局所変形が生じたためと考えられる。また、図5に示すように、荷重方向に平行な

Fig. 3 Change in centerline average roughness and maximum height with applied strain ε on free surface

Fig. 4 Change in centerline average roughness and maximum height with applied strain ε on contact surface normal to loading direction

Fig. 5 Change in centerline average roughness and maximum height with applied strain ε on contact surface parallel to loading direction

接触面においても、荷重方向(x 方向)に単軸圧縮の場合(破線)と同程度の表面粗さが生じていることは、 z 方向の巨視的なひずみ ε_z が零であるにもかかわらず、微視的不均一変形を表している微視的ひずみ $\Delta\varepsilon_z$ は単軸圧縮の場合とほぼ同程度であることを示しており、興味深い。

次に、自由表面および接触面の表面粗さのバラツキについて検討するため、先の報告⁽⁶⁾と同様に、中心線平均粗さ R_a の標準偏差 S (Standard deviation)と変動係数 V (Coefficient of variation)を求めた(ここに、 $V=S/\bar{R}_a$ 、 $\bar{R}_a$ は平均値)。図6はおおのの面に対する R_a の標準偏差および変動係数と荷重ひずみの関係を示している。いずれの面においても、中心線平均粗さの標準偏差は荷重ひずみに対してほぼ比例的に増加するが、他方、変動係数はほぼ一定値をとる。これらの傾向は、荷重ひずみが増加するとともに、材料の表面だけでなく、その内部においても、材料不均質に起因する微視的変形のバラツキが増大することを示していると考えられる。

3.2 接触面粗さの変化に対する平面ひずみ圧縮の変形形態の影響 3.1節で述べたように、平面ひずみ圧縮条件下における各測定面の表面粗さは、荷重ひ

ずみ $\varepsilon=-0.40$ の付近で表面粗さの増加割合が減少する。そこで、平面ひずみ圧縮における試験片の変形形態を調べるために、試験片とジグが接する側面に1mm間隔でけがき線を描き、各荷重ひずみ段階におけるけがき線の変形を観察した。その結果の一例を図7に示す。平面ひずみ圧縮条件下においては、荷重ひずみが約 -0.40 から試験片とジグの接する面にせん断変形の集中する領域が現れ、試験片の変形形態(微視的なひずみ分布)が変化することがわかる。このせん断変形の集中領域は、図8(b)に模式的に示すような方向に発生している。すなわち、荷重ひずみが約 -0.40 以降においては、このような領域に変形が集中し、それ以外の各測定領域における変形量が荷重ひずみに対して小さくなったために、平均的な粗さの増加割合も低下したものと考えられる。

3.3 荷重ひずみに伴う接触面の微視的形狀変化

平面ひずみ条件下における接触面の三次元的な表面あれ形状の変化の様子を図9, 10に示す。すなわち、図9, 10は、それぞれ荷重方向に垂直な接触面および荷重方向に平行な接触面の等高線図と三次元表示の例を示している。なお、等高線図には表面あれの高さを8等分して示している。また、図9(a)、図10(a)に

Fig. 6 Standard deviation S and coefficient of variation V of centerline average roughness R_a versus applied strain ε for various surface

示す左右の図は、それぞれ互いに接触する二つの面の測定結果である。これらの左右の図を比較すると、互いに接触している二つの面の微視的な凹凸は、反転した形状となっており、負荷ひずみに伴って互いの位置関係を維持しながら成長していることがわかる。

図9に示す接触面あれの凹凸は負荷ひずみの増加に伴って成長している。荷重方向に垂直な接触面においては、塑性変形の比較的初期において、接触面あれの山や谷が拘束方向(z 方向)に連なるように形成され、負荷ひずみが増加しても、その形状はほぼ維持されながら高低差が増加している。一方、図10に示す荷重

方向に平行な接触面では、接触面あれの山や谷は自由変形方向(y 方向)に連なるように形成される。これらの傾向が、図4, 5において示した測定方向による表面粗さの差の原因となっていると考えられる。一方、平面ひずみ圧縮の際の自由表面では、拘束方向(z 方向)に長い山や谷が観察されている⁽⁷⁾。これらの結果に基づいて、平面ひずみ圧縮変形に伴う微視的な不均一変形による山脈の形成方向を模式的に示すと、図8(a)のようになる。

図11に、自由表面、荷重方向に垂直な接触面および荷重方向に平行な接触面の電子顕微鏡観察結果の一例($\epsilon = -0.30$)を示す。これらの結果を比較すると、自由表面では、すべり帯の発達による表面の凹凸が明りように認められるのに対して、接触面では、すべり帯も現れているがその量は自由表面より少なく、それらの凹凸も先端が押し潰されて滑らかになっていることがわかる。この傾向は、接触面の方にかかわらずほぼ同様である。

以上のような実験結果から、多結晶金属の平面ひずみ圧縮に対する変形モードを推定すると次のようになると考えられる。すなわち、巨視的には、 z 方向の変形が拘束されるため、図8(b)に示すように x - y 平面内の変形は、AC, BD方向のせん断変形が生じやすくなり、結果として自由表面や荷重方向に垂直な接触面では z 方向に山脈が形成され[図9(b)]、 y 方向に測定した表面粗さが z 方向より大きくなるものと考えられる(図4)。これに対して x - z 平面内の変形は、図8(c)に示すように、 z 方向の拘束のため $\epsilon_z = 0$ であり、EG, あるいはFH方向のせん断変形は巨視的には起こらない。しかし、微視的にはこのような変形も生じていると考えられ、図5に示すように、微視的ひずみ $\Delta\epsilon_z \neq 0$ となるものと考えられる。したがって、荷重方向の接触面では主として y 方向に山脈が形成

Fig. 7 Deformation pattern of constrained surface for plane strain compression

Fig. 8 Schematic diagram of macroscopic and microscopic deformation mode under plane strain compression

され [図 10(b)], 図 5 に示すように x 方向の粗さが y 方向より大きくなったものと考えられる。しかしながら, この場合には, 変形は y 方向にも生じるため, 変形はよりランダムとなる。また, 端面, 側面で摩擦がないものと仮定した場合には, 塑性力学におけるレービー・ミーゼスの式から予測されるように,

$\sigma_z = \sigma_x/2$ となることから, 測定方向による表面粗さの差異も, 荷重方向に垂直な接触面 (図 4) と比較して荷重方向に平行な接触面 (図 5) のほうが小さくなったものと考えられる。

なお今後, 本研究の延長として, 圧延などの具体的な塑性加工過程における内部接触面の粗さの変化につ

Fig. 9 Three-dimensional shape of roughened surface for plane strain compression (contact surface normal to loading direction)

いても調べる予定である。

4. 結 言

多結晶純銅の直方体形状試験片を用い、荷重方向に垂直または平行に二分割し、分割面を再び重ね合わせて平面ひずみ圧縮試験を行った。各試験片の自由表面と2種類の接触面について、二次元表面粗さおよび三次元表面あれ形状の変化を調べるとともに、走査形電

子顕微鏡による観察を行い、表面における微視的不均一変形について検討した。得られた主な結果を要約すると次のとおりである。

(1) 平面ひずみ圧縮における自由表面、荷重方向に垂直な接触面および荷重方向に平行な接触面の粗さは、ともに負荷ひずみにほぼ比例して増加するが、接触面の粗さは自由表面より小さく、自由表面の約2/5~2/7倍となる。

(a) Contour map for left and right contact surface

(b) Shape of roughened surface for right contact surface

Fig. 10 Three-dimensional shape of roughened surface of plane strain compression (contact surface parallel to loading direction)

Fig. 11 Examples of SEM micrographs of free surface and contact surface ($\epsilon = -0.30$)

(2) 自由表面における表面粗さは、拘束方向に測定した粗さよりも、荷重方向に測定した表面粗さのほうが約20%大きくなる。一方、荷重方向に垂直な接触面においては自由変形方向に測定した粗さが大きく、荷重方向に平行な接触面においては荷重方向に測定した粗さが大きくなる。

(3) 接触面の粗さの増加は、圧縮負荷ひずみ $-0.30 \sim -0.40$ 程度で低下する傾向が認められた。これは、平面ひずみ圧縮変形において、せん断変形の集中域が生じるためであると考えられる。また、荷重方向に垂直な接触面の粗さは、荷重方向に平行な接触面より約30%大きくなった。一方、荷重方向に平行な接触面では、巨視的には面に垂直な方向のひずみを生じていないにもかかわらず、微視的には不均一変形を生じていることが示された。

(4) 接触面の表面あれ形状は、負荷ひずみの増加に伴って最初に生じた凹凸の位置関係をほぼ維持しながら成長する。荷重方向に垂直な接触面の微視的な山と谷は、拘束方向に長く伸びているのに対して、荷重方向に平行な接触面の山と谷は、自由変形方向に長くのびる。これらの材料内部における微視的流れ方向の

異方性を考えることによって、平面ひずみ圧縮条件下の接触面のあれの変化の傾向を、統一的に説明することができる。

(5) 走査電子顕微鏡観察により、接触面においても自由表面と同様に凹凸の起伏および結晶粒内のすべり変形が認められたが、それらは変形が相互に拘束されるために自由表面よりも緩やかな形状をしていることが認められた。

文 献

- (1) 小坂田宏造・大矢根守哉, 機論, **36**-286(1970), 1017-1022.
- (2) Thomas, T. R. 編, *Rough Surfaces*, (1982), Longman.
- (3) 阿部武治・清水一郎・西山大洋, 機論, **57**-542, A (1991), 2587-2594.
- (4) 清水一郎・阿部武治, 機論, **60**-578, A (1994), 2369-2376.
- (5) 阿部武治・邵玉柱・松崎稔・清水一郎, 機論, **61**-587, A (1995), 1562-1567.
- (6) 邵玉柱・阿部武治・清水一郎・納所孝至, 機論, **62**-604, A (1996), 2270-2276.
- (7) 納所孝至・清水一郎・阿部武治・若山正宏・堤健二郎, 材料, **46**-8(1997), 887-892.
- (8) Gotoh, M., Yamashita, M. and Torii, N., *JSME Int. J.*, Ser. A, **36**-2 (1993), 182-189.
- (9) 日本工業規格 B 0601-1982.