異種金属接触面の圧縮塑性変形に伴うあれ*

邵 玉 柱^{*1}, 阿 部 武 治^{*2}
清 水 一 郎^{*2}, 納 所 孝 至^{*3}

Roughening of Contact Surface between Different Polycrystalline Metals during Compressive Plastic Deformation

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

The internal contact surface of polycrystalline metals, as well as their free surface, is roughened during compressive plastic deformation. The effect of the combination of metals on the roughening of the contact surface, however, has hardly been studied. Roughening of the internal contact surface is important not only for the study of friction or bonding during plastic working, but also for the basic study of deformation of polycrystalline metals. In the present study, a rectangular block specimen and another block specimen comprised of different metals are prepared and pressed together. The roughening of the internal contact surface is measured using a stylus instrument. The combinations of copper, aluminium and lead are studied. The microscopic change of surface shape is also observed using a scanning electron microscope. It is found that the roughness of the contact surface of copper is dependent on the hardness of the contacting metals.

Key Words: Plasticity, Polycrystalline Metals, Roughness, Contact Surface, Compression

1. 緒 言

多結晶金属材料が塑性変形する場合、工具などに接していない自由表面は変形の進行に伴って微細な凹凸を生じ、粗くなることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。これらの表面あれは、すべり変形による個々の結晶粒の不均一な変形挙動と密接に関係していることが指摘されており、電子顕微鏡による結晶粒の変形挙動の観察や、表面形状の三次元的観察が行われている^{(3)~(8)}。

一方、多結晶金属相互の接触面の粗さ、すなわち材料内部の仮想的な平面の粗さについても、塑性変形とともに増加することが報告されている⁽¹⁾⁽⁹⁾。すなわち先に著者らは、工業用純銅を用いて単純圧縮試験を行い、自由表面および内部の接触面について、粗さの変化や自由表面あれと接触面のあれとの関係について調べた。また、同種金属の接触面のあれは自由表面のあれに比べてかなり小さいことを示した。

これらの実験は同種の材料の接触面についてであったが、異種材料の接触面についても調べる必要がある

と考えられる。すなわち、異種材料の接触面のあれは、塑性加工を受ける材料の摩擦、潤滑などとも密接に関連してい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と考えられ、工業的にも重要な研究課題である。またこの問題は、多結晶金属材料の塑性変形挙動を明らかにする上でも重要な情報になると考えられる⁽¹⁰⁾。

このような問題に関連した従来の研究例としては、異種材料の積層複合材料の界面のあれ⁽¹¹⁾や、人工的に作ったのこ刃状の突起の変形挙動の観察⁽¹²⁾などがある。しかしながら、圧縮塑性変形を受ける異種材料の接触面のあれについての研究はほとんど見当たらない。また、接触面のあれは金属材料の組合せによっても変化すると考えられるが、この点についても明確ではない。

そこで本報では、多結晶銅の直方体形状の圧縮試験片を上下二分割し、分割した銅試験片の片方に鉛あるいはアルミニウムを接触材料として埋め込み、これらの試験片を重ね合わせて単軸圧縮実験を行うとともに、触針式粗さ測定機を用いて接触面の粗さを測定する。また、その接触面の変化を走査電子顕微鏡によって観察し、自由表面や銅と銅の接触面の粗さ曲線とも比較しながら考察することにする。

* 原稿受付 1996 年 4 月 19 日。

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

^{*2} 正員、岡山大学工学部。

^{*3} 正員、岡山県立大学情報工学部 (〒719-11 総社市窪木 111)。

2. 実験方法

2.1 試験片および圧縮試験 基準となる供試材としては、工業用多結晶純銅を用いた。まず銅試験片を断面 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、その試験片を上下等分に二分割した。分割した面の片方には、接触材を埋め込むための穴をあけた。接触している二つの面上の初期中心線平均粗さを $R_a = 0.06 \mu\text{m}$ 程度の鏡面に仕上げた後、 600°C 、1 h の真空焼なましを行った。なお、銅の平均結晶粒径は約 $75 \mu\text{m}$ であった。鉛は市販の純鉛板材を溶かして、銅試験片の穴に注入した後、接触面を鏡面に研磨した。純アルミニウムは丸棒から切り出して、銅試験片の穴の寸法に合わせて加工し、接触する面を研磨した後に 310°C 、1 h の真空焼なましを行い、銅試験片の穴に埋め込んだ。なお、アルミニウムの平均結晶粒径は約 $120 \mu\text{m}$ であった。2種類の異種材料からなる圧縮試験片の形状と寸法を図1および表1に示す。その成分と機械的性質を表2に示す。なお、表2に示しているビッカース硬さは、各試験片の熱処理後、圧縮変形前に測定した値である。また、鉛とア

ルミニウムの埋込み寸法は、まず鉛について、表面粗さの測定領域が確保できる表面積があり、かつ接触面の粗さに対する母材の影響が小さくなる深さを実験的に選んだ。アルミニウムについては、この鉛埋込み試験片とほぼ同様に变形するように、接触面内における強度が等しくなること、および埋込み試験片全体の強度が等しくなるように埋込み寸法を決定した。このようにして得られた鉛埋込み試験片とアルミニウム埋込み試験片については、同じひずみを受けた際の変形形態が類似となることを実験的に確認した。

圧縮試験は圧縮試験機(東京衡機製 980 kN 形)を用い、ジグとして耐圧板を取付けた。摩擦の影響を少なくするため、耐圧板と圧縮試験片の端面の間にテフロンシートを挟んだ。試験片は対数ひずみで荷重方向に約 -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、接触面の表面粗さを測定した。圧縮試験は最終的に対数ひずみで約 -0.6 まで行った。

2.2 粗さの測定と微視的形状の観察 表面粗さの測定は触針式表面粗さ測定機(東京精密製サーフコム 304 B)を用いて、スキッドレス方式により、表3に示す条件で行った。接触面の表面粗さの測定方向は、図1に示すように荷重方向を x 方向としたとき、接触面内の相互に垂直な y 方向および z 方向をとった。各負荷ひずみ ε に対する粗さの測定値は、それぞれの方向に10回測定した平均値をとった。接触面の表面粗さの測定は、純銅側の粗さをおもに測定するが、純銅と接触する異種材料側の接触面粗さも、比較のため一部測定した。また、走査電子顕微鏡(SEM, 日立製 S-450)を用いて、各ひずみ段階で接触面の微視的 표면形状の変化を観察した。

Fig. 1 Compressive specimen

Table 1 Dimension of specimens [mm]

Dimension	Specimen	
	Cu-Pb	Cu-Al
h	24.4 ~ 25.4	
a	24 ~ 25	
d	12 ϕ	18 ϕ
h ₁	10	15

Table 2 Mechanical properties

Metal	Compositions (%)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	Grain size (μm)
Cu	99.98	246.0	48.0	86.9	75
Al	99.98	88.6	28.3	22.2	120
Pb	99.98	16.5	30.0	6.6	—

3. 実験結果および考察

3・1 負荷ひずみによる接触面の粗さの変化

3・1・1 銅と鉛を接触させた場合 まず、銅と鉛を接触させた試験片を圧縮変形させて、接触面の粗さを測定した。図2は、銅と鉛の接触面の中心線平均粗さ(Average roughness) R_a および最大高さ(Maximum height) R_{max} と x 軸方向の負荷ひずみ ϵ の関係を示している。この測定結果からわかるように、接触面粗さの測定方向による差はほとんど見られず、中心線平均粗さ R_a と最大高さ R_{max} はともに、負荷ひずみ ϵ に比例して増加する。ここで、接触面の最大高さ R_{max} は中心線平均粗さ R_a の約7倍となっている。また、鉛側の接触面の粗さも一部測定したが、粗さは銅側接触面の粗さとほとんど同じ値であった。なお、

Table 3 Conditions of measurement of surface roughness

Tracing speed	0.3mm/s
Traversing length	8.0mm
Cut-off value	0.8mm

(a) Average roughness R_a

(b) Maximum height R_{max}

Fig. 2 Relation between contact surface roughness and applied strain ϵ for copper contacting with lead

図2から最小二乗法によって接触面の粗さ R_a , R_{max} と負荷ひずみ ϵ の関係を求めると、それぞれ次式で表される。

$$\text{中心線平均粗さ: } R_a = 10.98|\epsilon| \text{ } [\mu\text{m}] \quad \cdots (1)$$

$$\text{最大高さ: } R_{max} = 78.5|\epsilon| \text{ } [\mu\text{m}] \quad \cdots (2)$$

3・1・2 銅とアルミニウムを接触させた場合 次に、銅とアルミニウムを接触させた試験片を圧縮変形させて、接触面の粗さを測定した。図3は、接触面の中心線平均粗さおよび最大高さ と負荷ひずみ ϵ の関係を示している。この場合にも、接触面粗さの測定方向による差はほとんど見られず、中心線平均粗さ R_a と最大高さ R_{max} はともに、負荷ひずみ ϵ に比例して増加する。接触面の最大高さ R_{max} は、先と同じく中心線平均粗さ R_a の約7倍となっている。また、アルミニウム側の接触面の粗さ(図3, ●, ■印)も、銅側接触面の粗さ(○, □印)とほとんど同じ値であった。なおこの場合、接触面の粗さ R_a , R_{max} と負荷ひずみ ϵ の関係は、それぞれ次式で表される。

$$\text{中心線平均粗さ: } R_a = 9.29|\epsilon| \text{ } [\mu\text{m}] \quad \cdots (3)$$

$$\text{最大高さ: } R_{max} = 66.1|\epsilon| \text{ } [\mu\text{m}] \quad \cdots (4)$$

(a) Average roughness R_a

(b) Maximum height R_{max}

Fig. 3 Relation between contact surface roughness and applied strain ϵ for copper contacting with aluminium

3・2 接触面粗さの測定結果のばらつき 接触面の粗さ測定結果のばらつきについて検討するため、標準偏差 S と変動係数 V を計算した。すなわち、 n 個の測定データの平均値を $\bar{R}$ 、各測定データを R_i とすると、標準偏差 S (Standard deviation) は

$$S = \left\{ \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 / (n-1) \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。

一方、変動係数 (Coefficient of variation) V は、式 (5) の標準偏差 S を平均値 $\bar{R}$ で割った値として次式で与えられる⁽¹³⁾。

$$V = S / \bar{R} \dots\dots\dots (6)$$

図4, 5には銅と鉛、銅とアルミニウムの接触面の中心線平均粗さ R_a に対する、標準偏差 S および変動係数 V と負荷ひずみ ϵ の関係のそれぞれを示している。これらからわかるように、銅と鉛、銅とアルミニウムの接触面の粗さの測定結果は、ともに同じ傾向を示している。また、図5のアルミニウム側(●, ■印)も銅側(○, □印)とほぼ同じ変化を示している。すなわち、中心線平均粗さ R_a の標準偏差 S は負荷ひずみ

ϵ の増加とともにほぼ比例的に増加するが、他方変動係数 V はほぼ一定値をとる⁽⁹⁾。これらの結果は、負荷ひずみが増加するとともに、試料の内部においても、材料不均質のために不均一な塑性変形が生じることを示していると考えられる。なお、銅と鉛、銅とアルミニウムの接触面の最大高さ R_{max} の標準偏差 S および変動係数 V と負荷ひずみ ϵ の関係についても、中心線平均粗さ R_a の変化(図4, 5)と同様な傾向が得られた。

3・3 各測定面における粗さの比較 ここでは、各測定面の粗さの実験結果を比較、検討する。図6は直方体圧縮試験片の銅の自由表面、銅と銅の接触面⁽⁹⁾、銅と鉛の接触面および銅とアルミニウムの接触面の粗さ(R_a , R_{max})の、圧縮負荷ひずみによる平均的な変化を示している。この結果から、各測定面の中心線平均粗さ R_a と最大高さ R_{max} はともに、負荷ひずみ ϵ に比例して増加するが、銅の自由表面の粗さの増加する割合が最も大きく、銅と銅の接触面の2倍以上となっている。銅と鉛の接触面の粗さの増加の割合は、銅の自由表面のそれと比べてやや低くなる。また、銅とア

(a) Standard deviation S

(b) Coefficient of variation V

Fig. 4 Standard deviation S and Coefficient of variation V of contact surface roughness R_a versus applied strain ϵ for copper contacting with lead

(a) Standard deviation S

(b) Coefficient of variation V

Fig. 5 Standard deviation S and Coefficient of variation V of contact surface roughness R_a versus applied strain ϵ for copper contacting with aluminium

ルミニウムの接触面の粗さの増加の割合は、銅の自由表面、銅と鉛の接触面の増加の割合よりさらに低いが、銅と銅の接触面の増加の割合よりも大きい。

3・4 各接触面の粗さに及ぼす材料の変形抵抗の影響
図6からわかるように、各接触面の粗さは負荷ひずみにほぼ比例していることから、

$$R = C \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (7)$$

という関係⁽¹⁾⁽⁶⁾によって表されるが、粗さの増加の程度は接触する相手側の材料の変形抵抗によって異なる。この点を定量的に明らかにするため、各接触面の粗さの増加率 $C = R/\varepsilon$ と、各接触材料のビッカース硬さ H_V (表2) との関係について検討する。

図7には、各接触面の中心線平均粗さおよび最大高さの増加率 $C_a = R_a/\varepsilon$, $C_{max} = R_{max}/\varepsilon$ と、銅と接触している材料の相対ビッカース硬さ R_{HV} との関係を示している。ここで、互いに接触する材料の相対ビッカース硬さを

$$R_{HV} = (H_{V1} - H_{V2})/H_{V1} \dots\dots\dots (8)$$

によって定義する。 H_{V1} , H_{V2} は、それぞれ銅および銅と接触する材料のビッカース硬さである。図7か

ら、接触面粗さの増加率 C_a , C_{max} はともに、接触する相手側材料のビッカース硬さとほぼ直線関係にあり、相対ビッカース硬さ R_{HV} の増加に伴って大きくなることがわかる。言いかえると、異種材料を接触させる場合、接触材料の変形抵抗の増加によって、接触面の粗さは減少することを示している。これらの結果は、接触する相手側の材料の変形抵抗によって、不均一な変形の拘束される程度が異なり、したがって粗さが異なることを示していると考えられる。

3・5 各接触面の粗さ曲線および微視的形狀の観察
負荷ひずみ $\varepsilon = -0.20$ における、銅の自由表面、同種材料の銅と銅の接触面、および異種材料の銅と鉛、銅とアルミニウムの接触面の粗さ曲線の測定例を図8に示す。この粗さ曲線は測定長さ8mmから1mmを取り出して、拡大して示している。これらを比較すると、粗さ曲線を形成している大きな凹凸は、銅の自由表面における起伏が最も大きい、鉛との接触面、アルミニウムとの接触面、銅との接触面の順で小さくなっていく。また、大きな凹凸に重畳されている微小な凹凸についても、同じ順で小さくなっていく。

次に、走査形電子顕微鏡を用いて、銅の自由表面、また同種および異種金属との接触面における微視的表面形状を観察した例($\varepsilon = -0.25$)を図9に示す。これらを比較すると、自由表面にはすべり帯の発達による

(a) Average roughness R_a

(b) Maximum height R_{max}

Fig. 6 Relation between roughness of various surfaces and applied strain ε

(a) $C_a = R_a/\varepsilon$

(b) $C_{max} = R_{max}/\varepsilon$

Fig. 7 Relation between increasing rates $C_a = R_a/\varepsilon$, $C_{max} = R_{max}/\varepsilon$ of surface roughness and relative Vickers hardness R_{HV} of contacting metals

数 μm 程度の凹凸が明瞭に観察されるのに対して、接触面では、それらの凹凸は存在するものの、先端が押し潰されたようになっており、全体的に滑らかな形状になっている様子が認められる。さらに、自由表面において明りょうに観察される結晶粒界が、接触面にお

いてはほとんど識別できない。これらの結果を図8で述べた粗さ曲線の相違と考え合わせると、自由表面では拘束がないため、表面に垂直な方向へ変形が自由に発達するのに対して、接触面では変形が互に拘束されるため、特に同種材料の銅と銅の接触面では凹凸の進

Fig. 8 Examples of surface roughness curve for various surfaces ($\epsilon = -0.20$, traversing length 1.0 mm)

Fig. 9 Examples of SEM micrographs of free surface and contact surfaces ($\epsilon = -0.25$)

行が緩やかになっているものと推論される。

4. 結 言

多結晶純銅の試験片を二分割して、片方に別の多結晶金属を埋め込んだ直方体形状試験片を用い、分割面を再び重ね合わせて単軸圧縮試験を行い、異種材料が接触する接触面について、触針式表面粗さ測定機を用いて表面粗さを測定するとともに、走査電子顕微鏡による表面の微視的観察を行った。得られたおもな結果を要約すると次のとおりである。

(1) 異種多結晶金属の接触面の粗さは、単一材料の自由表面および同種材料の接触面の粗さの変化と同様に、測定方向によらず、与えた負荷ひずみに比例して増加し、また接触面の両側の粗さはほとんど同じ値になる。銅と鉛、銅とアルミニウムの接触面の粗さの増加率は、銅と銅の接触面の粗さの増加よりも大きい。銅の自由表面の粗さの増加率よりは低くなっている。

(2) 接触面の粗さは、接触する二つの材料の相対的な硬さによって変化する。銅と銅、銅と鉛、銅とアルミニウムの接触面については、銅と接触する相手側の材料のビッカース硬さの増加にほぼ比例して、接触面粗さの増加率が低下する。

(3) 異種金属材料相互の接触面の粗さの断面曲線は、粗さ波形の大きな起伏に重なっている小さな凹凸が、材料相互の拘束のため少なくなる傾向がある。走

査電子顕微鏡による接触面の変化の観察によっても、凹凸の起伏および結晶粒内のすべり帯による変形が見られるが、接触する二つの面が相互に変形を拘束するため、自由表面の微視的形狀よりも緩やかな凹凸となり、粗さが減少する傾向が認められる。

終わりに、本研究に(財)天田金属加工機械技術振興財団(奨励研究, AF-94039)から援助を受けたことを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) 小坂田宏造・大矢根守哉, 機論, **36** 286(1970), 1017-1022.
- (2) 大矢根守哉, 塑性と加工, **18** 193(1977), 144-150.
- (3) 阿部武治・長岐滋・前田裕次・岡部豊, 機論, **51** 468, A(1984), 2036-2041.
- (4) 阿部武治・長岐滋・赤瀬哲也, 機論, **50** 454, A(1984), 1236-1244.
- (5) 阿部武治・野村晃, 材料, **39** 444(1990), 1248-1253.
- (6) 阿部武治・清水一郎・西山大洋, 機論, **57** 542, A(1991), 2587-2594.
- (7) 清水一郎・納所孝至・阿部武治・山本一三・寺井寛明, 機論, **59** 567, A(1993), 2618-2625.
- (8) 清水一郎・阿部武治, 機論, **60** 578, A(1994), 2369-2376.
- (9) 阿部武治・納所孝至・邵玉柱・松崎稔・清水一郎, 機論, **61** 587, A(1995), 110-115.
- (10) 阿部武治編, 強度解析学II, (1984), 119, オーム社.
- (11) 渋谷陽二・北川浩・中村恭之, 材料, **41** 466(1992), 1108-1113.
- (12) Gotoh, M., Yamashita, M. and Torii, N., *JSM E Int. J.*, Ser. A, **36** 2(1993), 182-189.
- (13) 田畑吉雄, やさしい統計学, (1988年), 15, 50-61, 現代数学社.