

多結晶金属材料の塑性変形に伴う接合面の微視的変形挙動

岡山大学 大学院自然科学研究科

助手 清水一郎

(平成6年度奨励研究助成 AF-94039)

1. 研究の背景

多結晶金属材料を塑性加工によって成形する際に、工具等と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ることが知られている^(1, 2)。この自由表面あれば、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、結晶粒の変形挙動の観察や、表面形状の三次元的測定によって詳細に調べられてきた^(3~8)。

一方、多結晶金属同士が互いに接触する接合面においても、塑性変形に伴って微視的な不均一変形が生じ、表面あれが発生することが報告されている^{(1), (9~11)}。この接合面のあれは、塑性加工を受ける材料の摩擦・潤滑に影響するとともに、複合材料の界面特性等とも関連し、工業的にも重要な研究課題であると考えられる。しかしながら、これまでに接合面あれについて、特にその要因と考えられる多結晶金属の微視的不均質性との関係について検討した研究は見当たらない。また、これまでに得られている実験データは材料の種類も限られており、未だ不十分である。

そこで本研究では、接合面における微視的不均一変形の成長および変化の挙動を、主として表面あれ測定によって実験的に解明することを試みた。すなわち、単軸圧縮変形下における同種金属同士および異種金属同士の接合面における表面あれ（微視的不均一変形）の発生・成長および変化の挙動の解明、および自由表面あれと接合面あれの類似点および相違点に関して検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片および圧縮試験 基準となる供試材は、工業用純銅 (99.98wt%) を用いた。まず、銅試験片を $20 \times 20 \times 30$ mm の直方体に切削加工後、マイクロカッターを用いて等しく二分割した。自由表面および互いに接触する面を、手研磨およびバフ仕上げによって初期粗さ $0.06 \mu\text{mRa}$ 程度の鏡面に仕上げた後、 600°C 1 時間保持の条件で真空焼鈍を行って試験に供した。なお、変形前における平均結晶粒径は比較法で測定した結果、約 $75 \mu\text{m}$ であった。

異種材料同士の接合面の組み合わせとしては、純銅と鉛、および純銅と純アルミニウムを用いた。接合面は、分割した銅試験片の一方に穴を開け、そこに異種材料を挿入することによって作製した。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、鏡面

に研磨した。一方、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の合わせて加工し、研磨した後 310°C 1 時間保持の真空焼きなましを行い、銅試験片の穴に埋め込んだ。アルミニウムの平均結晶粒径は約 $120 \mu\text{m}$ であった。異種材料の接合面を測定するための圧縮試験片形状と寸法を図 1 および表 1 に示す。また、その機械的性質を表 2 に示す。なお、鉛の埋込み寸法は、表面粗さの測定領域が確保できる表面積があり、かつ接合面の粗さに対する周囲の母材の影響が小さくなる深さを実験的に選択した。一方、アルミニウムについては、鉛埋込み試験片とほぼ同様に变形するように、すなわち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。こうして得られた二種類の埋込み試験片については、同じ負荷ひずみにおける変形形態が類似となることを実験的に確認している。

圧縮試験は圧縮試験機に耐圧板を取り付け、摩擦の

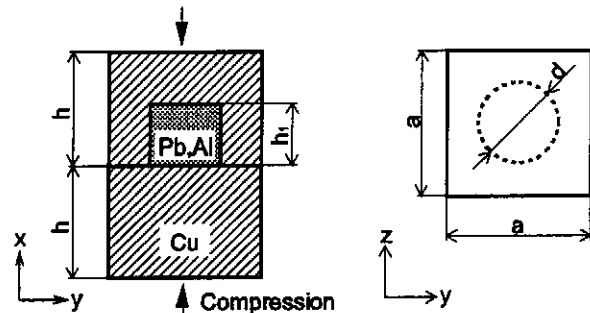


Fig. 1 Compressive specimen.

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
h1	10	15

Table 2 Mechanical properties of materials.

Material	Tensile strength (MPa)	Vickers hardness (Hv)
Cu	246.0	86.9
Al	88.6	22.2
Pb	16.5	6.6

影響を軽減するために、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で行った。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、接合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 表面粗さの測定 表面粗さの測定は、触針式表面粗さ計を用いて、測定長さ8mm、カットオフ値0.8mmの条件で行った。接合面における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、接合面内の相互に垂直なy方向およびz方向とした。各負荷ひずみ段階における表面粗さの測定値は、各々の方向に10回測定した平均値をとった。なお、異種材料接合面においては純銅側を主として測定したが、鉛またはアルミニウム側の接合面粗さも比較のため一部測定した。

3. 実験結果および考察

3・1 負荷ひずみによる接合面の粗さの変化

3・1・1 同種金属（銅と銅）の接合面 銅同士を重ね合わせて圧縮した際の、接合面および自由表面における負荷ひずみ ϵ に伴う中心線平均粗さRa (Average roughness) の変化を図2に示す。接合面および自由表面ともに、表面粗さは負荷ひずみにほぼ比例して増加することがわかる。このとき、測定方向による差はほとんど見られず、接触している上下の面の各測定結果はほぼ一致している。また、接合面の粗さの増加割合は自由表面の2/5程度になっている。最小自乗法で得られた中心線平均粗さRaと負荷ひずみ ϵ の関係は、

$$\text{接合面: } Ra = 5.9 \epsilon \quad [\mu\text{m}] \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{自由表面: } Ra = 15.0 \epsilon \quad [\mu\text{m}] \dots \dots \dots (2)$$

となる。

試験片の巨視的変形と表面粗さの関係について、小坂田ら⁽¹⁾は、表面粗さの大きさは負荷ひずみの他に塑

性変形に伴う表面積の変化によっても影響されると述べている。そこで、粗さ測定面のひずみの選び方を変えて図2の結果を整理し直してみる。

まず、接合面および自由表面の中心線平均粗さを、測定面内の最大ひずみ $|\epsilon|_{\max}$ で整理した結果を図3に示す。図3において、表面粗さの変化は接合面、自由表面によらず類似の傾向を示すことがわかる。また、測定面の粗さを、その面内の相当塑性ひずみとの関係で整理した結果を図4に示す。ここで面内の相当塑性ひずみとしては、通常の相当塑性ひずみの定義式から、測定面に垂直なひずみ成分を零とおいて除いた次式を用いている。

$$\text{接合面: } \bar{\epsilon} = 2(\epsilon_y^2 - \epsilon_y \epsilon_z + \epsilon_z^2)^{1/2} / 3 \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{自由表面: } \bar{\epsilon} = 2(\epsilon_x^2 - \epsilon_x \epsilon_y + \epsilon_y^2)^{1/2} / 3 \dots \dots \dots (4)$$

図4においても、接合面と自由表面の粗さの変化は類似の傾向を示していることがわかる。これらの結果は、接合面における粗さの増加割合が、測定面における巨視的な寸法変化に影響されることを示していると考えられるが、現在のところ、その物理的意味は明確ではなく、今後さらに実験データを追加して検討する必要

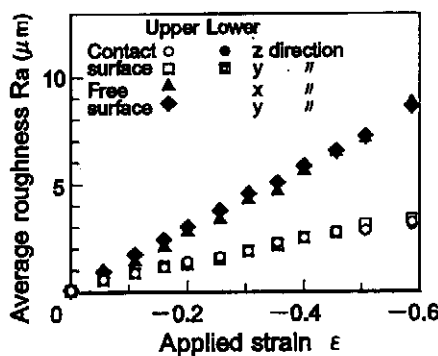


Fig. 2 Change in average roughness Ra with applied strain. (Measured on surface of copper contacting with copper.)

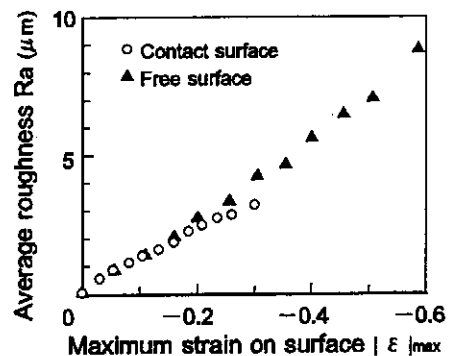


Fig. 3 Change in average roughness Ra with absolute value of maximum strain on each surface (Cu-Cu).

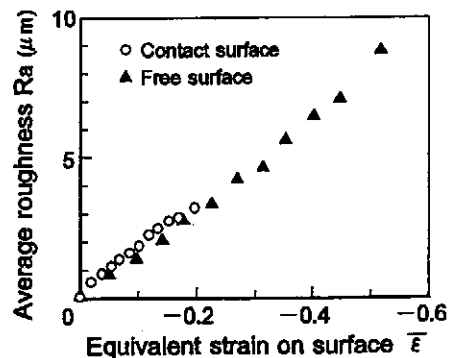


Fig. 4 Change in average roughness Ra with equivalent strain on each surface (Cu-Cu).

があると考えられる。

3・1・2 銅と鉛の接合面 銅と鉛の接合面における、負荷ひずみ ϵ に伴う中心線平均粗さ R_a の変化を図5に示す。銅と鉛の接合面においても、銅同士の場合(図2)と同様に表面粗さは負荷ひずみにほぼ比例して増加している。また、測定方向による差は認められなかった。最小自乗法で得られた中心線平均粗さ R_a と負荷ひずみ ϵ の関係は、

$$\text{接合面} : R_a = 11.0 \epsilon \quad [\mu\text{m}] \cdots \cdots (5)$$

となり、同じ負荷ひずみに対する表面粗さは、自由表面よりは小さく、銅同士の接合面に対しては約2倍となった。なお、鉛側の接合面についても一部測定したが、表面粗さは銅側の接合面とほぼ同じ値であり、接合面に間隙を生じることなく不均一変形が進行することが確認された。

3・1・3 銅とアルミニウムの接合面 銅とアルミニウムの接合面および自由表面における、負荷ひずみ ϵ に伴う中心線平均粗さ R_a の変化を図6に示す。銅とアルミニウムの接合面においても、銅同士(図3)や銅と鉛(図5)の接合面の場合と同様に、表面粗さは負荷ひずみにほぼ比例して増加している。これらの

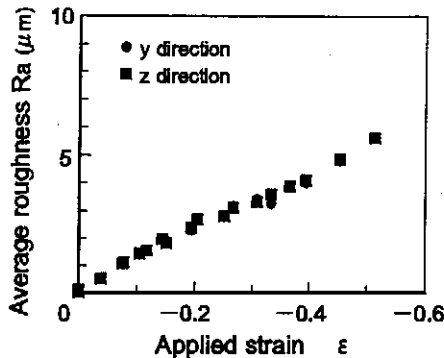


Fig. 5 Change in average roughness R_a with applied strain. (Measured on surface of copper contacting with lead.)

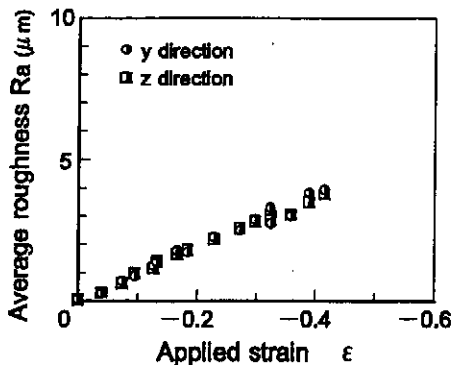


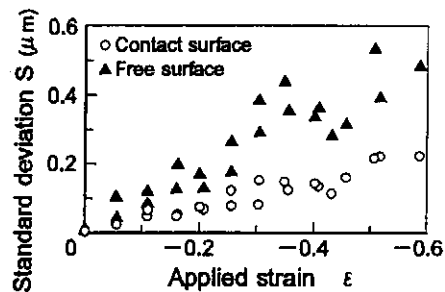
Fig. 6 Change in average roughness R_a with applied strain. (Measured on surface of copper contacting with aluminum.)

結果から、接合面における不均一変形の形状的性質は、接触する金属の片方(この場合は銅と予想される)に大きく依存することが推測される。なお、最小自乗法で得られた中心線平均粗さ R_a と負荷ひずみ ϵ の関係は、

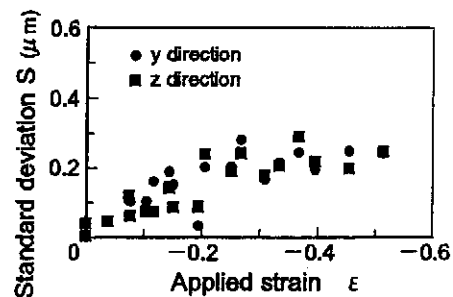
$$\text{接合面} : R_a = 9.3 \epsilon \quad [\mu\text{m}] \cdots \cdots (6)$$

であり、銅同士の接合面より大きく、銅と鉛の接合面よりは小さくなった。

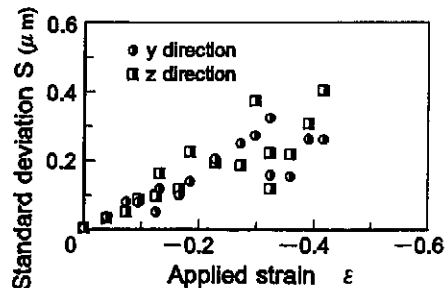
3・2 接合面粗さの測定結果のばらつき 接合面の粗さ測定結果のばらつき、すなわち表面粗さの不均一性について検討するために、標準偏差 S (Standard deviation) を求めた。標準偏差は、 n 個の測定結果 R_i に対して、その平均値を \bar{R} とすると、



(a) Copper contacting with copper.



(b) Copper contacting with lead.



(c) Copper contacting with aluminum.

Fig. 7 Standard deviation S of contact surface roughness R_a versus applied strain.

$$S = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{(n-1)} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。

銅同士、銅と鉛、銅とアルミニウムの接合面で測定した中心線平均粗さ Ra に対する、標準偏差と負荷ひずみの関係を図 7 (a)~(c) に示す。これらの結果から、いずれの組み合わせの接合面においても、表面粗さの標準偏差は負荷ひずみに伴って増加することがわかる。このことは、負荷ひずみの増加とともに、接合面においても材料不均質のために微視的な塑性変形の不均一性が增大することを示している。

3.3 各測定面における粗さの比較 ここでは、得られた 3 種類の接合面および自由表面における表面粗さの測定結果を比較検討する。図 8 は、各測定面における中心線平均粗さの圧縮ひずみによる平均的な変化を示している。各面の表面粗さは、共に負荷ひずみに比例して増加するが、このとき銅の自由表面の粗さの増加割合が最も大きく、銅同士の接合面の 2 倍以上となっている。銅と鉛の接合面の粗さの増加割合は、銅の自由表面と比べてやや小さく、また、銅とアルミニウムの接合面の粗さは、銅の自由表面、銅と鉛の接合面よりさらに小さいが、銅同士の接合面よりは大きいことがわかる。

3.4 接合面粗さに及ぼす材料の変形抵抗の影響

これまでに示した実験結果より、各接合面の粗さ R は負荷ひずみ ε にほぼ比例して増加することから、

$$R = C \cdot \epsilon \dots\dots\dots (8)$$

という関係⁽⁴⁾によって表されるが、その増加率 C は接触する相手側の材料によって異なる。そこで、この点を定量的に明らかにするため、各接合面の粗さ増加率と、各材料のピッカース硬さ Hv (表 2) の関係について検討する。まず、銅と接触している材料の相対的なピッカース硬さ RHv を、

$$RHv = (Hv1 - Hv2) / Hv1 \dots\dots\dots (9)$$

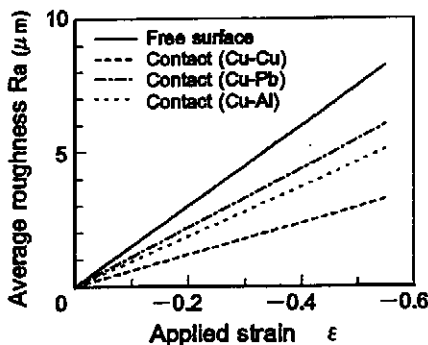


Fig. 8 Relation between average roughness Ra of various surfaces and applied strain.

と定義する。ここで Hv1, Hv2 は、それぞれ銅および銅と接触する材料のピッカース硬さである。この相対ピッカース硬さと各接合面の中心線平均粗さの増加率

$Ca = Ra / \epsilon$ の関係を図 9 に示す。図 9 より、接合面粗さの増加率 Ca は、接触する材料の相対ピッカース硬さとほぼ直線関係にあり、相対ピッカース硬さの増加に伴って大きくなるのがわかる。すなわち、異種材料が互いに接触しながら変形する場合、接触する相手側の材料の変形抵抗が大きくなるほど接合面の粗さは減少することを示している。

3.5 各接合面の粗さ曲線 銅同士、銅と鉛、銅とアルミニウムの接合面、および銅の自由表面における粗さ曲線の例を図 10 (a)~(d) に示す ($\epsilon = -0.20$)。これらの粗さ曲線は、測定長さ 8 mm から 1 mm 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く、銅と鉛、銅とアルミニウム、銅同士の接合面の順で小さくなっていく。この傾向は、大きな凹凸に重畳されている微小な凹凸についても同様であり、接触する材料の変形抵抗によって、接合面における変形が拘束され、凹凸が減少することを示していると考えられる。

4. 結 言

多結晶純銅の試験片を等しく二分割し、銅同士の接合面、および片方に鉛またはアルミニウムを埋め込んだ異種金属の接合面を持つ直方体形状試験片を作製した。これらの試験片に対して単軸圧縮試験を行い、接合面の表面あれを調べることににより、接合面における微視的不均一変形の成長および変化の挙動を詳細に調べた。得られた主な結果を要約すると次の通りである。

- (1) 銅同士の接合面の粗さは、自由表面と同様に負荷ひずみにほぼ比例して増加する。ただし、接合面の粗さの増加割合は自由表面より小さく、中心線平均粗さで 2/5 程度であった。
- (2) 異種金属の接合面の粗さも、自由表面および同種金属の接合面と同様に、負荷ひずみにほぼ比例して増

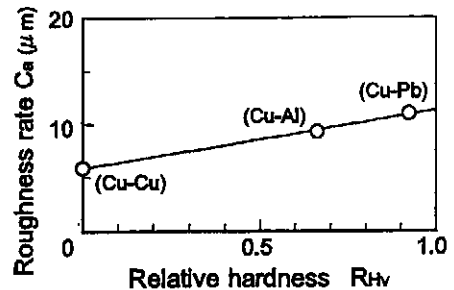


Fig. 9 Relation between increasing rate of average roughness $Ca = Ra / \epsilon$ and relative Vickers hardness RHv of contacting metals.

加する。銅と鉛、銅とアルミニウムの接合面の粗さの増加率は、銅と銅の接合面の粗さの増加率よりも大きい、銅の自由表面の粗さの増加率よりは低くなる。

(3) 接合面の粗さは、接触する二つの材料の相対的な硬さによって変化する。銅同士、銅と鉛、銅とアルミ

ニウムの接合面については、銅と接触する相手側の材料の相対ピッカース硬さの増加にほぼ比例して、接合面粗さの増加率が低下する。

(4) 異種金属材料相互の接合面の粗さの断面曲線においては、粗さ波形の大きな起伏と、それに重畳されている小さな凹凸が、材料相互の拘束のために少なくなり、結果的に表面粗さが減少する。これは、接触する二つの面が相互に変形を拘束するためであると考えられる。

謝 辞

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、謝意を表します。

参考文献

- (1) 小坂田宏造・大矢根守哉, 日本機械学会論文集, 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, 日本機械学会論文集, 51-468 A (1984), 2036-2041.
- (4) 阿部武治・長岐 滋・赤瀬哲也, 日本機械学会論文集, 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, 日本機械学会論文集, 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, 日本機械学会論文集, 59-567 A (1993), 2618-2625.
- (8) 清水一郎・阿部武治, 日本機械学会論文集, 60-578 A (1994), 2369-2376.
- (9) 阿部武治 編, 強度解析学II, (1984), 119, オーム社.
- (10) 渋谷陽二・北川 浩・中村恭之, 材料, 41-466 (1992), 1108.
- (11) Gotoh, M., Yamashita, M. and Torii, N., JSME Int. J., Ser. A, 36-2 (1993), 182-189.

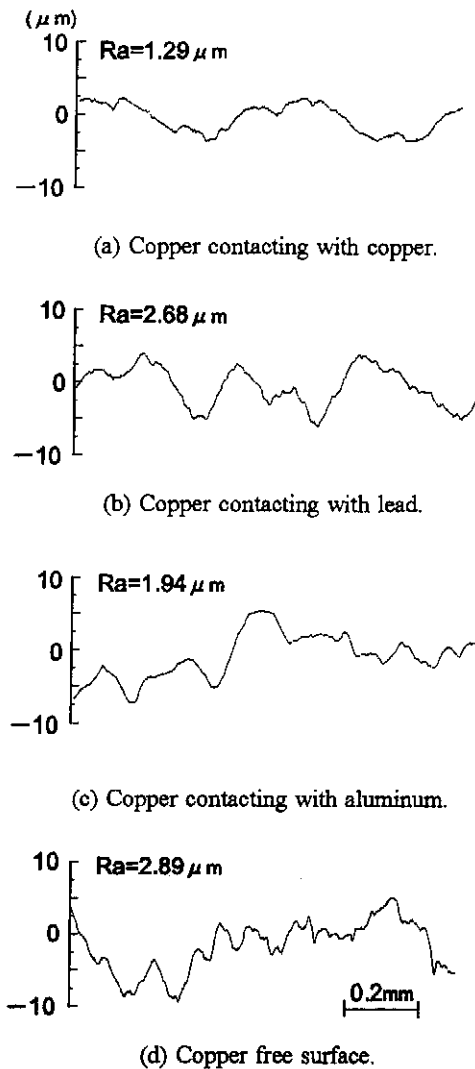


Fig. 10 Examples of surface roughness curve for various surfaces ($\epsilon = -0.20$).