

マイクロピラー圧縮試験法を用いた アルミニウム合金の局所変形抵抗の評価

名古屋大学 大学院工学研究科 物質プロセス工学専攻
准教授 高田 尚記
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016004)

キーワード：単結晶，アルミニウム，マイクロピラー，集束イオンビーム，すべり変形

1. 研究の目的と背景

マイクロピラー圧縮試験^{1,2)}は、集束イオンビーム (Focused Ion Beam: FIB) 加工により観察試料の特定箇所から大きさ数 μm ～数 100 nm の圧縮試験片 (マイクロピラー) を作製し、平板型圧子を装着したナノインデントを用いた圧縮試験により、微小領域の機械的性質を調べる手法である。近年の FIB 加工技術の発達は短時間のマイクロピラーの作製を実現し、ナノインデントに用いられる微小荷重検出の技術³⁾はこれらの圧縮試験を可能にした。そのため、本実験手法は結晶性材料の強度及び変形の基礎研究⁴⁾に用いられ、転位枯渇硬化^{4,5)}の実証など転位論及び結晶塑性の学問分野の発展に貢献した。また、マイクロピラー圧縮試験は、これまで脆性的と信じられていた金属間化合物^{6,7)}の塑性変形の可能性を示した。

マイクロピラー圧縮試験の有用性は走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察用試料の中の微細かつ特定の領域から作製した試験片の応力-ひずみ曲線を比較的簡便に取得できることにある。例えば、鉄鋼材料において DP 鋼 (フェライト及びマルテンサイトといった異なる組織構成要素から成る) に代表される高強度二相鋼板は広く知られているが、本手法は複相組織内部の構成相そのものの機械的性質を実験的に調査可能である⁸⁾。また、単結晶だけでなく単一粒界を含んだ双結晶マイクロピラーの作製⁹⁻¹¹⁾は多結晶中の強度・変形に及ぼす結晶粒界の影響を実験的に調査可能である。しかし、マイクロピラー圧縮試験のアルミニウムやアルミニウム合金への適用例⁹⁻¹⁴⁾は、他の fcc 金属^{1, 15-17)}と比べて少ない。これは、従来研究の多くは転位論の基礎研究を対象とし、高融点の金属 (Ni, Au, Cu 等) を用いたためである。本手法を実用合金へ適用するには、マイクロピラー圧縮試験で測定される強度と通常のパルク材 (大きさ数 mm 以上の試験片) の強度の違いを明確にする必要がある。その強度の試験片寸法依存性 (サイズ依存性) の理解には、異なる試験片寸法を持つ単結晶アルミニウムマイクロピラーの強度と変形に関する基礎研究が不可欠である。また、FIB を用いたマイクロピラーの作製は試験片上方向 (観察方向) からイオン加工されるため、試験片が若干台形型の形状になるのは不可避であり¹⁾、完全な円柱型試験片を作製するのは極めて困難である。しかし、円柱型マイクロピラーの強度・変形に及ぼす試験片形状の影響を検討した例はなく、本手法を用いた強度測定の

確立には、どの程度まで試験片の台形型が許容できるか検証する必要がある。

本研究では、マイクロピラー圧縮試験を用いたアルミニウム合金の局所的な変形抵抗評価法の確立に向けた基礎研究として、高純度アルミニウム多結晶から作製した $\alpha\text{-Al}$ (fcc) 単結晶マイクロピラーの圧縮試験を行い、測定強度に及ぼす試験片寸法及び試験片形状の影響を調査した。

2. 実験方法

2・1 試料作製

高純度アルミニウム (純度 99.99%) をアルミナ製タンマン管に入れ、高周波誘導炉を用いてアルゴン雰囲気下 (0.02 MPa) で炉内温度を 800°C まで昇温させた後、400°C になるまで炉冷、その後空冷させてインゴットを溶製した。作製したインゴットに冷間圧延 (54%) を施し板状にした後、焼鈍 (300°C, 1 h) を施した。その試料の平均結晶粒径は 623 μm である。作製した試料に SiC エメリー紙 (#800, #1200, #2400) による粗研磨を施した後、コロイダルシリカにより鏡面仕上げを施した。さらに、10% 過塩素酸-エタノール混合溶液を用いて電解研磨 (35 V, 20 s) を施した。この供試材表面に微小硬度計 (FM-700e, 株式会社テック製) を用いてビッカース圧痕を導入し正方形 1 mm \times 1 mm の領域を複数用意した。なお、本研究で用いた純アルミニウムのビッカース硬さは 14 HV であった。このビッカース圧痕で囲まれた領域 1 mm \times 1 mm で電子線後方散乱回折 (EBSD) 法による結晶方位解析を行った。解析には電界放射型走査電子顕微鏡 (JSM-7001FA, 株式会社日本電子製) を用い、加速電圧 20 kV、測定幅 5 μm および 0.1 μm の条件で測定を行った。

2・2 マイクロピラー圧縮試験

マイクロピラー圧縮試験片の作製には集束イオンビーム加工装置 (JEM-9320FIB, 株式会社日本電子製) を用いた。加速電圧 30 kV、エミッション電流 2.0 μA にて、加工初期の粗削り工程ではプローブ電流 5000 pA および 1000 pA、仕上げ工程では 500 pA および 300 pA とした。Dose 量を 3~18 nC/ (μm^2) で変化させて試験片高さおよび加工時間を調整した。作製したマイクロピラーの観察にはプローブ電流 50 pA を使用した。供試材は多結晶体であるが、全て単一

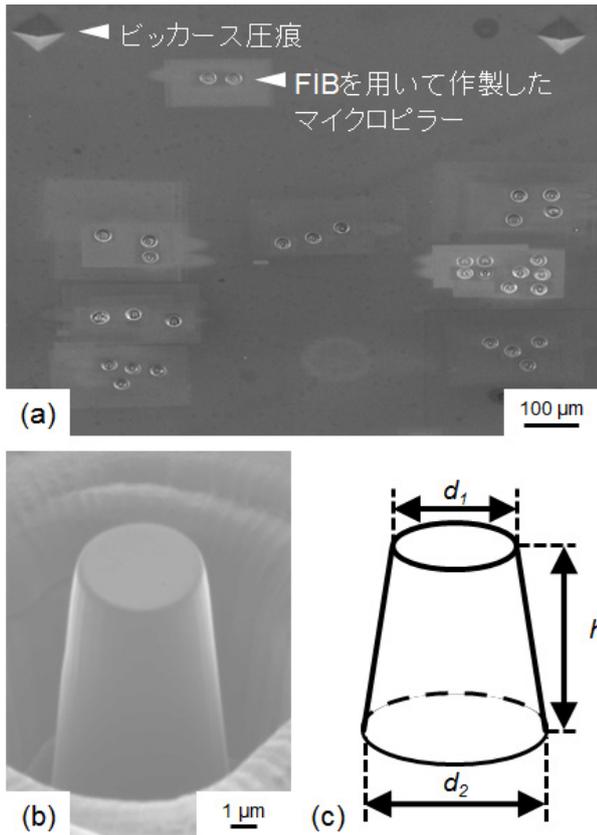


図1 (a)供試材表面に複数作製した単結晶マイクロピラーのSEM像, (b)代表的な単結晶マイクロピラー, (c)マイクロピラーの直径と高さ測定の様式図

の結晶粒内から作製することで内部に粒界を含まない単結晶マイクロピラーとなる。図1に(a)供試材表面に複数作製した単結晶マイクロピラーのSEM像, (b)代表的な単結晶マイクロピラーのSIM (Scanning Ion Microscope) 像¹⁸⁾, (c)マイクロピラーの直径と高さ測定の様式図を示す。図1(a)で隅に観察される四角錐型の圧痕はビッカース硬度計により導入されたビッカース圧痕であり、マイクロピラー作製時の目印となる。本研究で作製した円柱状マイクロピラー (図1(b)) の直径 d は、試験片上部直径 d_1 と下部直径 d_2 の平均値とした (Fig. 1(c))。 h は試験片高さである。これらの値は、マイクロピラーのSIM像 (図1(b)) を用いて測定した。

圧縮試験には直径 $20\ \mu\text{m}$ の平面圧子が装着された荷重制御型ダイナミック超微小硬度計 (DUH-211S, 株式会社島津製作所製) を用いた。荷重負荷速度は $5.0 \times 10^{-3}\ \text{mN/s}$ と設定した。なお、試験片の初期ひずみ速度は約 $5.0 \times 10^{-4}\ \text{/s}$ である。すべての圧縮試験は室温にて実施した。得られた荷重-変位曲線から、試験片直径 d および高さ h を用いて応力-ひずみ曲線を作成した。変形後のマイクロピラーの観察には電界放射型走査電子顕微鏡 (JSM-7001FA, 株式会社日本電子製) を用い、SEM像から活動すべり面およびすべり方向の同定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 試料作製

図2に、マイクロピラーを作製した領域 $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ の (a)SEM像, (b)結晶方位分布図, (c, d) 方位差分布測定箇所 (a)の結晶方位分布図および測定結果を示す。図2(b, c)では、圧縮軸方向 (観察方向) の結晶方位を標準ステレオ三角形に基づくカラーキーで表示した。本研究では単一すべり系が活動すると予想される標準ステレオ三角形内部の方位を圧縮軸方向として選定し、 $\langle 3\ 13\ 21 \rangle$ の方位を持つ結晶粒内部にてマイクロピラーを作製した。この結晶粒内部では方位変化は認められない (図2(b))。また、微小領域のEBSD解析は、結晶粒内部の方位差が 1° 以下 (図2(c, d)) であることを示した。これらの結果は、結晶粒内部の転位密度は非常に小さいことを示す。

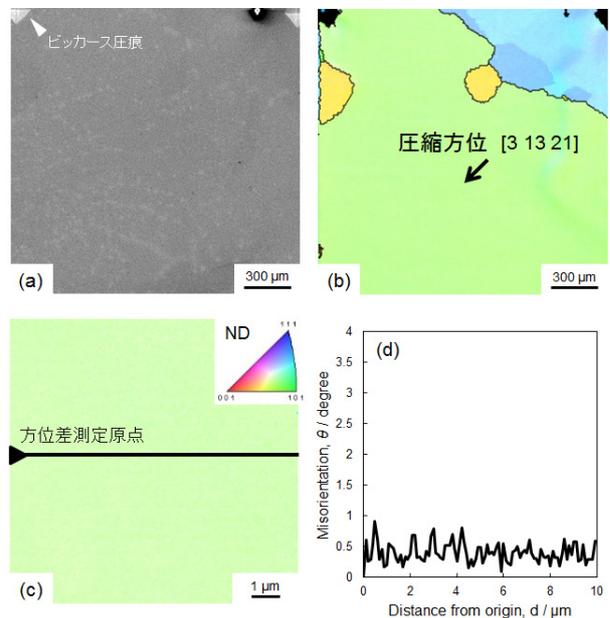


図2 純Al多結晶試料におけるマイクロピラーを作製した領域 $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ の (a)SEM像, (b)結晶方位分布図, (c, d) 方位差分布測定箇所の結晶方位分布図および測定結果

3.2 試験片直径の異なるマイクロピラーの圧縮変形

図3に圧縮方向 $\langle 3\ 13\ 21 \rangle$ の圧縮試験から得られた $\alpha\text{-Al}$ (fcc構造) 単結晶マイクロピラーの公称応力-公称ひずみ曲線を試験片直径 d ごとに示す。黒塗りの逆三角形で示した応力は各マイクロピラーがすべり変形を開始したと考えられる応力 (σ_i) である。試験片直径 d が比較的小さい場合 ($d = 1.2\ \mu\text{m}$)、試験片は応力約 $160\ \text{MPa}$ で降伏し、その後急激なひずみ増加 (ストレインバースト) が数回確認された。これは、ナノインデンテーション試験におけるポップインの現象¹⁹⁾に対応すると考えられる。一方、試験片直径 d が比較的大きい場合 ($d = 10.2\ \mu\text{m}$)、試験片は応力約 $30\ \text{MPa}$ で降伏し、典型的なミリメートルサイズの単結晶試験片における低ひずみ域の挙動に類似した連続的な降伏が確認された。試験片直径 d ごとの σ_i を比較する

と、およそ $d = 1 \sim 10 \mu\text{m}$ では試験片直径 d が小さい程強度が大きくなる強度のサイズ依存性を確認できる。特に、およそ $d = 1 \sim 2 \mu\text{m}$ の間で応力上昇がより顕著に認められた。

図 4 に圧縮試験後の単結晶マイクロピラー ((a) $d = 1.2 \mu\text{m}$, (b) $d = 3.3 \mu\text{m}$, (c) $d = 10.2 \mu\text{m}$) の SEM 像を示す。いずれの試験片直径 d でも塑性変形時に生じたと考えられ

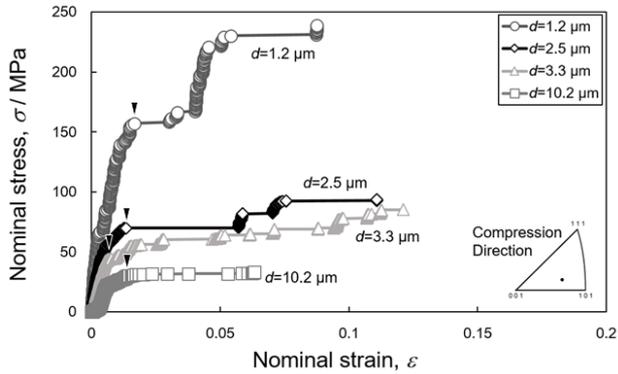


図 3 異なる試験片直径 d を持つ単結晶マイクロピラーの公称応力-公称ひずみ曲線

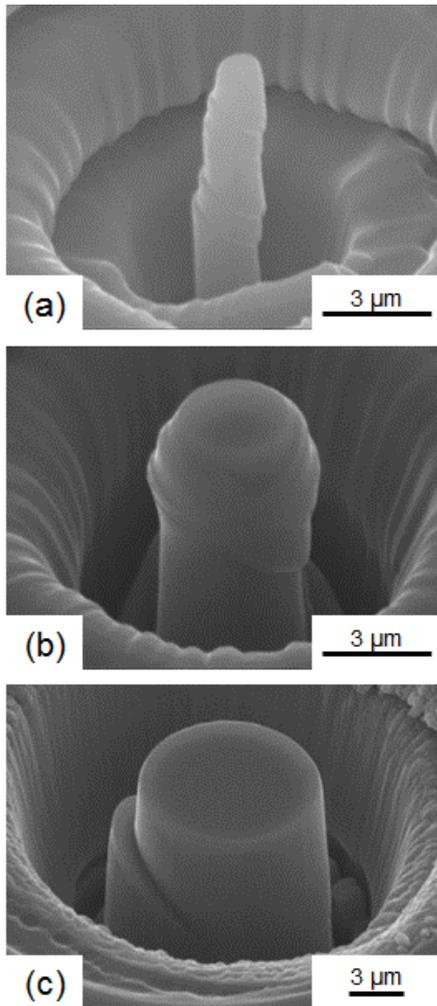


図 4 圧縮試験後の単結晶マイクロピラー : (a) $d = 1.2 \mu\text{m}$, (b) $d = 3.3 \mu\text{m}$, (c) $d = 10.2 \mu\text{m}$

るすべり跡が観察された。これは、活動したすべり系のすべり面に対応する。これらの観察結果から、一部で2次すべりが認められるが、すべての試験片の変形は主に一次すべりで担われていることがわかった。またすべり跡の数は、試験片直径の増加に伴い少なくなる傾向が認められた。それぞれの応力-ひずみ曲線と比較すると、すべり跡の数はストレインバーストの回数に対応していると考えられる。なお、すべての圧縮試験後の試験片の観察の結果、座屈による変形は起きていないことを確認した。これは、本研究で作製したマイクロピラーのアスペクト比 ($h/d = 2 \sim 9$) が圧縮によるすべり変形を評価するために適切であったことを示す。

図 5 に圧縮軸方向 $\langle 3 \ 13 \ 21 \rangle$ の単結晶マイクロピラーの圧縮試験後の (a, b) SEM 像, (c, d) 圧縮方向を中心とした $\{111\}$ および $\{011\}$ 正極点図を示す。図 5 (a) では試料を 45° 傾斜させ、すべり跡が明瞭に観察できるマイクロピラー側面に回転させて撮影した。この SEM 像より、すべり面法線方向と圧縮軸方向がなす角度は 46° である。 $\{111\}$ 正極点図 (図 5 (c)) より、圧縮軸方向 $[13 \ -3 \ 21]$ と成す角度が SEM 像から求めた角度 46° に最も近い (111) 面がすべり面であると考えられる。また、図 5 (b) ではマイクロピラーのすべり方向が観察できる真上から撮影した。 $\{011\}$ 正極点図 (図 5 (d)) より、すべり方向は $[0 \ -11]$ 方向であると考えられる。ここで、(111) 面と $[0 \ -11]$ 方向は互いに垂直な指数であり、すべり面とすべり方向の関係を満足するものである。以上の解析より同定された活動すべり系 $(111)[0 \ -11]$ のシュミット因子は 0.49 であった。これは、本研究における圧縮方向の単結晶の変形においてシュミット因子最大のす

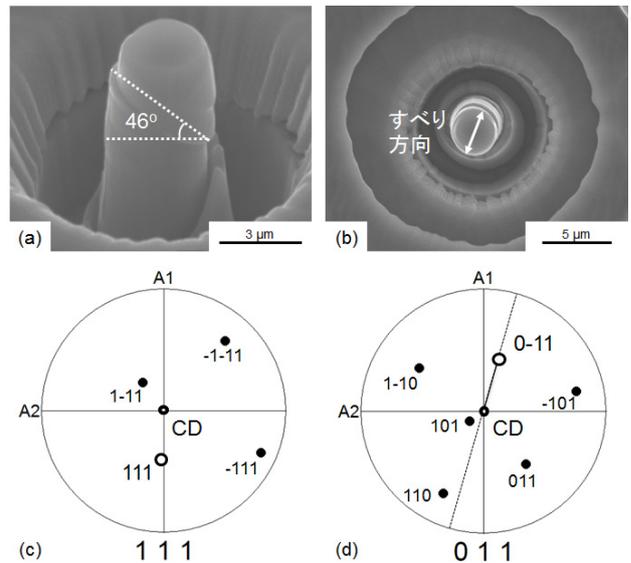


図 5 圧縮軸方向 $\langle 3 \ 13 \ 21 \rangle$ の単結晶マイクロピラーの圧縮試験後の (a, b) SEM 像, (c, d) 圧縮方向を中心とした $\{111\}$ および $\{011\}$ 正極点図

べり系で優先的にすべりが生じたことを示す。以上の結果は、すべての試験片で確認された。

図 6 に本研究で作製した単結晶マイクロピラーの σ_i およびひずみ 5% 時の応力 $\sigma_{5\%}$ を同定したシュミット因子 (図 5) を用いて計算した (a) 臨界分解せん断応力 τ_i (CRSS) および (b) ひずみ 5% 時のせん断応力 $\tau_{5\%}$ と試験片直径 d の関係を示す。比較として、純度 5N (99.999%)¹²⁾ および純度 3N (99.9%)¹³⁾ の単結晶マイクロピラーの強度も併せて示す。なお、 σ_i の理論的な最大値である理想せん断強度^{20,21)} と最小値であるバルク試験片 (大きき数ミリメートルの試験片) の CRSS²¹⁾ を図 6(a) に示す。図中に示す破線は近似直線であり、 τ_i および $\tau_{5\%}$ の両方で試験片直径 d の増加に伴う強度の低下が観察され、強度のサイズ依存性が他の fcc 金属^{1, 15-17)} 同様、純アルミニウムでも認められた。また、本研究の純度 4N アルミニウムの強度のサイズ依存性の傾向に純度 5N および 3N の結果が良く一致した。したがって、純度 3N から 5N の範囲においてアルミニウムの強度のサイズ依存性に及ぼす純度の影響はほとんどない。

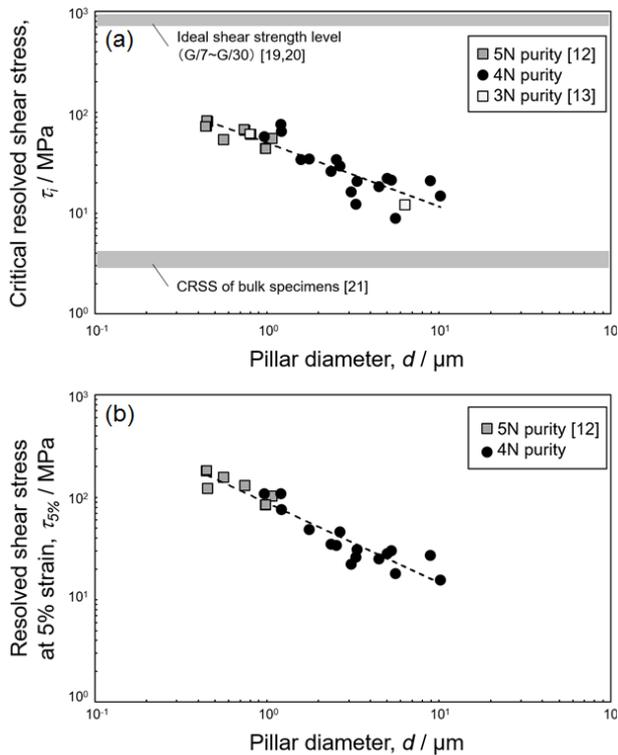


図 6 (a) 臨界分解せん断応力 τ_i (CRSS) および (b) ひずみ 5% 時のせん断応力 $\tau_{5\%}$ と試験片直径 d の関係

3・3 試験片形状の異なるマイクロピラーの圧縮変形

本研究では単結晶マイクロピラーの強度と変形に及ぼす試験片形状の影響を明らかにするため、同一の試験片直径 d (約 $3.3 \mu\text{m}$) を持つが、異なる上部試験片直径 d_1 と下部試験片直径 d_2 を持つ単結晶マイクロピラーを作製し、それらの圧縮試験を行った。図 7 に異なる d_1/d_2 を持つマイ

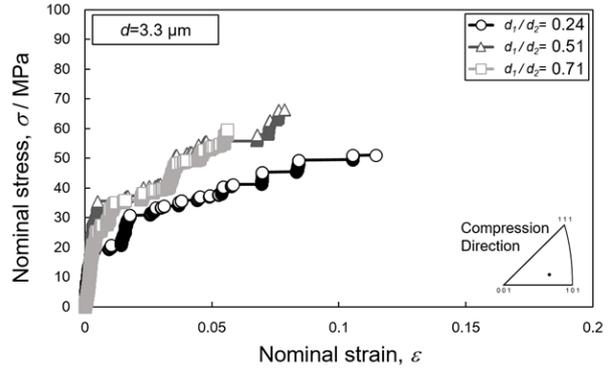


図 7 異なる d_1/d_2 を持つ単結晶マイクロピラーの公称応力-公称ひずみ曲線

クロピラーの圧縮試験から得られた公称応力-公称ひずみ曲線を示す。 d_1/d_2 は 0 以上 1 以下の値となり、円柱状マイクロピラーの上部から下部の傾斜が小さい程 d_1/d_2 は 1 に近い値を示す。 $d_1/d_2 = 0.51$ および 0.71 では応力約 35 MPa で降伏し、同程度の強度が認められた。一方、 $d_1/d_2 = 0.24$ では応力約 20 MPa で降伏が認められ、同じ試験片直径 d であっても比較的小さい強度として測定される。これら圧縮試験後の単結晶マイクロピラー ((a) $d_1/d_2 = 0.24$, (b) $d_1/d_2 = 0.43$) の SEM 像を図 8 に示す。 $d_1/d_2 = 0.24$ および 0.43 の場合、マイクロピラーの比較的上部で不均一な変形が生じており、図 4 で認められたような単一すべり系の活動を示すすべり跡は観察されなかった。 d_1/d_2 がおよそ 0.5 以上の試験片表面では、図 4 で示される形状のすべり跡が観察された。したがって、 d_1/d_2 が 0.5 以下の単結晶マイクロピラーで測定される強度は試験片上部の局所的な不均一変形に起因し、試験片の単一すべり系の活動に対応しない。

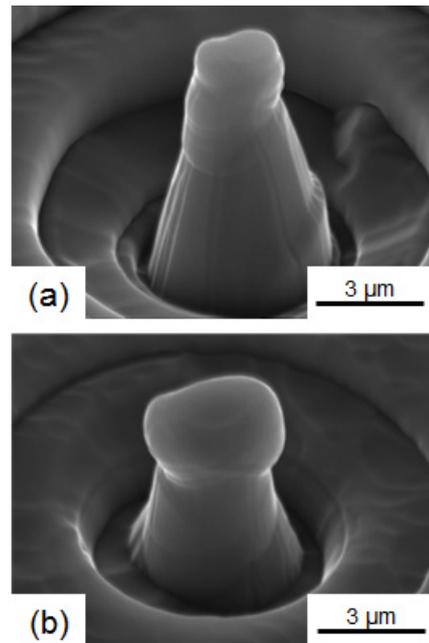


図 8 圧縮試験後の単結晶マイクロピラーの SEM 像 : (a) $d_1/d_2 = 0.24$, (b) $d_1/d_2 = 0.43$

図9に $d = 3.2 \sim 3.3 \mu\text{m}$ の単結晶マイクロピラーのひずみ5%時の応力 $\sigma_{5\%}$ と d_1/d_2 の関係を示す。 $d_1/d_2 = 0.5$ 以上の場合、測定される応力はほぼ一定である。一方で $d_1/d_2 = 0.5$ 以下の場合、 d_1/d_2 の値が小さい程測定される応力は小さくなる傾向にある。これは、実際には d_1 と d_2 の平均値として算出される試験片直径 d よりも小さな直径の断面積で変形が生じるためと推察される。以上の結果より、試験片直径約 $3 \mu\text{m}$ の高純度アルミニウムの単結晶マイクロピラーの強度評価には、少なくとも $d_1/d_2 = 0.5$ 以上の試験片形状に作製する必要があると結論される。なお、同一形状の単結晶試験片中の応力分布状態は試験片寸法に依らず同じである（試験片土台の効果²²⁾を無視する）ことを考慮すると、本研究における試験片形状の適正值（ $d_1/d_2 = 0.5$ ）は試験片サイズに依らず適応可能と推察される。

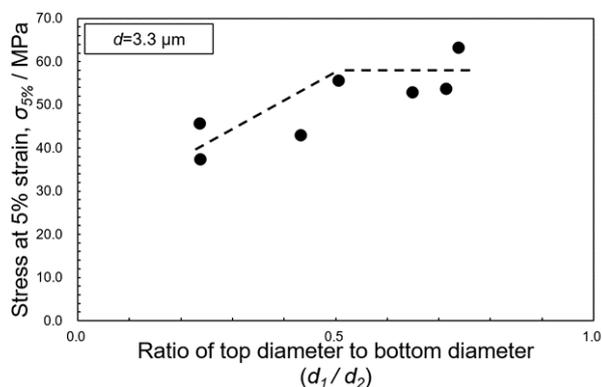


図9 $d = 3.2 \sim 3.3 \mu\text{m}$ の単結晶マイクロピラーのひずみ5%時の応力 $\sigma_{5\%}$ と d_1/d_2 の関係

3・4 強度の試験片寸法依存性

本研究では純99.99%アルミニウム多結晶体から作製した $1 \mu\text{m}$ 以下から10数 μm まで異なる平均直径を持つ単結晶マイクロピラーの強度を測定し、試験片直径の増加に伴う強度の低下に対応する明瞭な強度のサイズ依存性を実験的に明らかにした（図6）。これまで、マイクロピラー圧縮試験にて測定されるCRSS (τ_i) と試験片直径 d は次式の関係が成り立つことが報告されている^{1,17)}。

$$(\tau_i/G) = A(d/b)^m \quad (1)$$

ここで、 G は剛性率、 b はバーガースペクトルの大きさ、 A と m は定数である。特に、Dou と Derby¹⁷⁾はfcc金属（主にNi, Cu, Auであるが、一部Alも含む）の単結晶マイクロピラーの強度を総括し、 $A = 0.71$ 、 $m = -0.66$ で整理できる可能性を示した。

そこで本研究の実験結果を用いて、純アルミニウム単結晶マイクロピラーにおけるCRSSの試験片直径依存性を整理した。図10にCRSS τ_i を剛性率 G で規格化した値 (τ_i/G) と試験片直径 d をバーガースペクトルで規格化した値 (d/b) の関係を示す。Dou と Derby¹⁷⁾による結果も実線で併せて示す。図中の破線は純度の異なる単結晶アルミニウムの先行研究^{12, 13)}と本研究の試験結果から得られた

近似直線である。本研究で得られた純アルミニウムのCRSSの試験片直径依存性を示す直線は $A = 0.33$ 、 $m = -0.63$ を示す。したがって、単結晶純アルミニウムの強度における試験片直径依存係数である m は従来の報告と一致するが、係数 A は異なる値を示した。この結果は、最近報告された種々のfcc金属の強度のサイズ依存性の傾向¹⁴⁾と良く一致する。これまでの実験および計算を用いた数 10 nm ~ 数 mm の微小金属の塑性変形解析^{24,27)}は、単結晶微小試験片の強度は転位運動に要する応力ではなく、転位増殖に要する応力が決定することを明らかにしている。したがって、強度の試験片直径依存係数である m がfcc金属の種類に依らず同じである事実は、微小fcc結晶中における転位の増殖過程は物質に依らず同じであることを示唆する。一方、係数 A は同じfcc金属においても物質によって異なると考えられる。Wu ら¹⁴⁾は係数 A と積層欠陥エネルギーの関係を考察し、積層欠陥エネルギーの低下に伴い A が増加することを指摘した。低積層欠陥エネルギーは微小結晶内における増殖過程の転位の拡張を促進し、増殖中の転位の線張力（結晶表面と転位の相互作用）や増殖後の転位運動の抵抗（ジョグの生成等）を増大させる可能性がある。したがって、積層欠陥エネルギー低下に伴う A の増大は定性的に理解できると考えられる。しかし、強度のサイズ依存性を決定する支配因子は現状不明である。今後、マイクロピラー圧縮試験で測定される強度の試験片直径依存性を本質的に理解するためには、変形後の単結晶マイクロピラー内部に導入された転位の観察^{28,29)}だけでなく、意図的に初期転位や転位源を導入した試験片を用いて強度と変形のサイズ依存性も系統的に調べる必要がある。

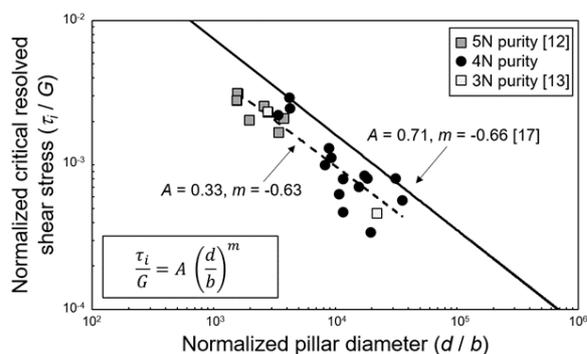


図10 CRSS τ_i を剛性率 G で規格化した値 (τ_i/G) と試験片直径 d をバーガースペクトルで規格化した値 (d/b) の関係

4. 結言

本研究は、アルミニウム多結晶体から作製した単結晶マイクロピラーで測定される強度のサイズ依存性を調査した結果、以下の結論を得た。

1. ステレオ三角形内部の圧縮方位を持つ（単一すべり系が活動する）単結晶マイクロピラーは、試験片直径約

1~10 μm の範囲において強度のサイズ依存性を示す。本研究で測定された強度は、先行研究である純度 99.999 % および 99.9 % の結果^{12,13)}と良く対応する。

2. 円柱状の単結晶マイクロピラー（直径約 3 μm ）を用いた強度評価には、少なく試験片上部直径と下部直径の比 (d_1/d_2) が 0.5 以上の試験片形状に作製する必要がある。

3. 純アルミニウム単結晶マイクロピラーの圧縮試験で測定される臨界分解せん断応力 τ_c と試験片直径 d の関係 ($0.5 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$) は、剛性率 G およびバーガースベクトル b を用いて以下の式で整理できる。

$$(\tau_c/G) = 0.33(d/b)^{-0.63}$$

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団一般研究開発助成の支援を受けたものである。ここに特記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) J.R. Greer and J.T.M. De Hosson: Prog. Mater. Sci. 56 (2011), 654-724.
- 2) M. D. Uchic, D. M. Dimiduk, J. N. Florando, W. D. Nix: Science 305 (2004), 986-989.
- 3) W. C. Oliver and G. M. Pharr: J. Mater. Res., 7(1992), 1564-1589.
- 4) J.R. Greer and W.D. Nix: Phy. Rev. B 73(2006), 245410.
- 5) C. Chisholm, H. Bei, M.B. Lowry, J. Oh, S.A. Syed Asif, O.L. Warren, Z.W. Shan, E.P. George, A.M. Minor: Acta Mater. 60(2012), 2258-2264.
- 6) N. Takata, H. Ghassemi-Armaki, Y. Terada, M. Takeyama, and K.S. Kumar: Scripta Mater. 68 (2013), 615-618.
- 7) N. L. Okamoto, D. Kashioka, M. Inomoto, H. Inui, H. Takebayashi and Shu Yamaguchi: Scripta Mater. 69 (2013), 307-310.
- 8) H. G. Armaki, R. Maaß, S.P. Bhat, S. Sriram, J.R. Greer and K.S. Kumar: Acta Mater. 61 (2013), 3640-3652.
- 9) Z. H. Aitken, D. Jang, C.R. Weinberger and J. R. Greer: Small 10 (2014), 100-108.
- 10) Y. Kim, S. Lee, J.B. Jeon, Y.-J. Kim, B.-J. Lee, S.-H. Oh, S.-M. Han: Scripta Mater. 107 (2015), 5-9.
- 11) B.-L. Zheng, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, H. Hosoda, T. Sato and M. Sone: J. Japan Inst. Met. Mater. 80 (2016), 66-70.
- 12) A. Kunz, S. Pathak and J.R. Greer: Acta Mater. 59 (2011), 4416-4424.
- 13) K.S. Ng and A.H.W. Ngan: Acta Mater., 56 (2008), 1712-1720.
- 14) J.H. Wu, W.Y. Tsai, J.C. Huang, C.H. Hsieh, G.-R. Huang: Mater. Sci. Eng. A 662 (2016), 296-302.
- 15) D.M. Dimiduk, M.D. Uchic and T.A. Parthasarathy: Acta Mater. 53 (2005) 4065-4077.
- 16) J. R. Greer, W. C. Oliver and W. D. Nix: Acta Mater. 53 (2005) 1821-1830.
- 17) R. Dou and B. Derby: Scripta Mater. 61(2009), 524-527.
- 18) G. W. Padua and Q. Wang: Nanotechnology Research Methods for Food and Bioproducts, Wiley Online Library, (2012).
- 19) A. Barnoush, M. T. Welsch and Horst Vehoff: Scripta Mater. 63(2010), 465-468.
- 20) 鈴木秀次：転位論入門，アグネ（1967）。
- 21) S. Ogata, J. Li, S. Yip: Science 298(2002), 807-811.
- 22) I. N. Sneddon, Int. J. Eng. Sci. 3 (1965) 47-57.
- 23) W. F. Hosford Jr., R.L. Fleischer and W.A. Backofen: Acta Metall. 8(1960), 187-198.
- 24) T. A. Parthasarathy, S. I. Rao, D. M. Dimiduk, M. D. Uchic and D. R. Trinkle: Scripta Mater. 56 (2007) 313-316.
- 25) S.I. Rao, D.M. Dimiduk, T.A. Parthasarathy, M.D. Uchic, M. Tang and C. Woodward: Acta Mater. 56 (2008) 3245-3259.
- 26) W. D. Nix and S.-W. Lee: Phil. Mag. 91(2011), 1084-1096.
- 27) C. R. Weinberger and G.J. Tucker: Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 20 (2012) 075001.
- 28) D.M. Norfleet, D.M. Dimiduk, S.J. Polasik, M.D. Uchic and M.J. Mills: Acta Mater. 56 (2008) 2988-3001.
- 29) C.P. Frick, B.G. Clark, S. Orso, A.S. Schneider and E. Arzt: Mater. Sci. Eng. A 489 (2008), 319-329.