

硬さ試験によるアルミニウム合金の塑性異方性の検討

青山学院大学 大学院

尾崎毅 (Tsuyoshi OZAKI)

長谷川龍之介 (Ryunosuke HASEGAWA)

青山学院大学 理工学部

蓮沼将太 (Shota HASUNUMA)

小川武史 (Takeshi OGAWA)

1. 緒言

水素社会実現のために、燃料電池電気自動車の普及およびインフラの整備が進められており、その重要な構成部品の1つが高圧水素容器である。タイプ3の高圧水素容器では、口金およびライナーにアルミニウム合金が使用されており、塑性加工が施されている。したがって、これらの部材には塑性異方性のあることが考えられる。しかし、口金およびライナーの実部品から引張試験片を切り出して異方性を検証することは困難である。そこで、著者らが提案している硬さ試験による力学特性の推定方法¹⁾²⁾が塑性異方性の評価に使用できないかを検討した。

硬さ試験における圧痕まわりの変形挙動は複雑である。圧子の直下では試料表面に垂直な圧縮変形が生じ、試料表面と平行な方向に押出されて、表面の盛り上がり（パイルアップ）が形成される³⁾。著者らは、面心立方金属のNi単結晶および六方晶のTi単結晶について、圧痕まわりの塑性変形挙動を電子線後方散乱解析（EBSD）法によって検討を行い、結晶構造および結晶方位の影響を検討した⁴⁾⁵⁾。その結果、Ti単結晶の場合には結晶方位に依存したパイルアップ挙動が顕著に観察された。一方、Ni単結晶の場合、パイルアップは小さく、(001)面への押込みでは試料表面に平行な塑性変形が認められたが、(111)面への押込みでは表面の圧痕下部にのみ塑性変形が認められた。同様な手法による検討は、組織を粗大化させたNi多結晶についても行っており、(001)面以外の面への押込みでは、(111)面と同様な変形挙動を呈している。Niと同じ面心立方金属のAlでも同様な挙動を呈することが考えられる。また、アルミニウム合金においても、試料表面と垂直な方向への塑性変形が顕著となり、その方向の塑性変形特性を反映した硬さの値が得られると考えられる。

そこで本研究では、高圧水素容器に使用されている6061合金に加えて、焼なまし処理を施した5083合金について、圧延方向（L）、板幅方向（T）および板厚方向（S）と垂直な面に硬さ試験を行い、異方性の検討を行った。また、LおよびT方向の引張試験を行い、硬さ試験から推定される真応力と真ひずみの関係を比較した。さらに、塑性異方性を仮定した有限要素法（FEM）モデルによって硬さ試験のシミュレーションを行い、妥当性の検討を行った。

2. 供試材

供試材は、展伸材に溶体化処理（540℃2時間保持後、水冷）および時効（T6：室温24時間保持後、175℃10時間保持）処理を施した6061合金、および展伸材に焼なまし（O：375℃1時間保持後、炉冷）処理を施した5083合金である。素材の寸法は、6061が300×200×14 mm、5083が200×200×10 mmである。図1と図2にEBSD法を用いた微視組織の観察結果を示す。いずれの材料もL方向に引き延

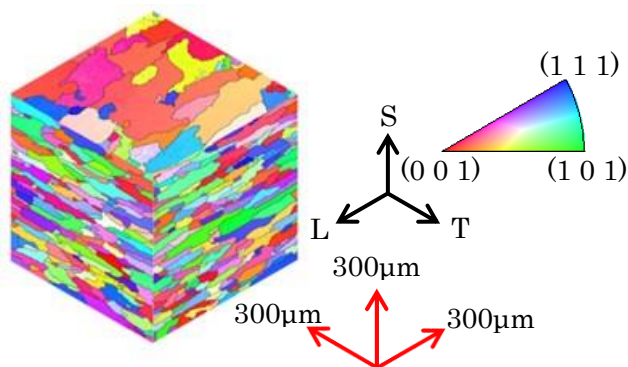


図 1 6061 の微視組織

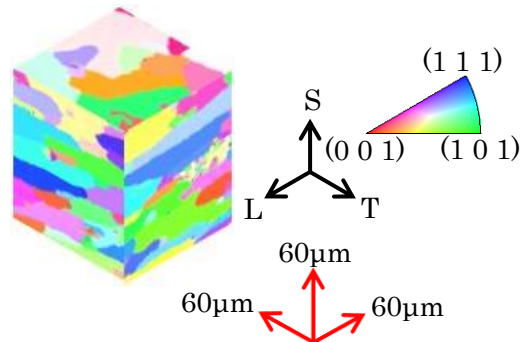


図 2 5083 の微視組織

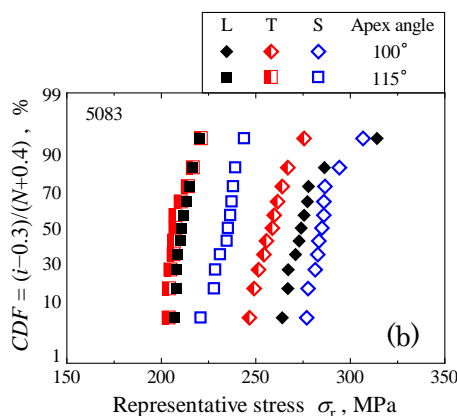
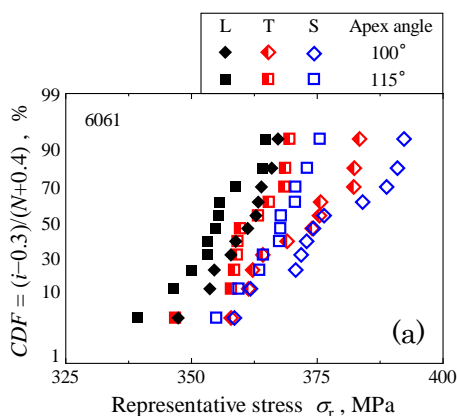


図 3 押し込み方向の異なる 2 圧子法の代表応力. (a) 6061, (b) 5083

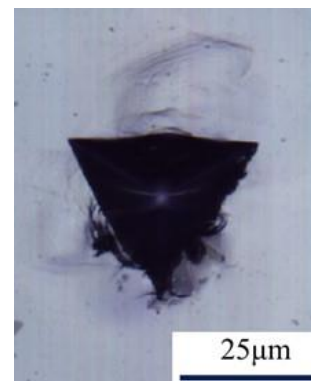


図 4 介在物の影響を受けた圧痕様相(5083, L 方向, $\phi=100^\circ$)

ばされた結晶粒が観察される。

3. 硬さ試験

供試材から小片を切り出し、L、T および S 方向と垂直な面の硬さ試験を行うために樹脂埋めを行った。試験片の表面は、加工層が十分除去されるまでエメリー紙で研磨し、ダイヤモンドサスペンションおよびコロイダルシリカ研磨処理を施して平滑に仕上げた。硬さ試験は、稜間角 $\phi=100^\circ$ および 115° のダイヤモンド三角錐圧子により、室温（空調 20°C ）において行った。負荷および除荷速度は 3.5 および 7.0 mN/s 、 $\phi=100^\circ$ および 115° の試験荷重は 600 および 1200 mN である。各方向および圧子について、それぞれ 11 回の試験を行った。 $\phi=100^\circ$ および 115° の圧子による硬さ試験は 0.2 mm 間隔で並べて行い、それぞれの圧子による硬さ試験位置も 0.2 mm 間隔となるようにした。

硬さ試験終了後、三角形の圧痕の頂点間の距離 l をレーザー顕微鏡で測定し、前述した力学特性の推定方法 ¹²⁾ に基づいて代表応力 σ_r を求めた。 $\phi=100^\circ$ および 115° の圧子によって求めた σ_r は、それぞれの代表ひずみ $\epsilon_r=3.7$ および 8.5% における σ_t を表している。 σ_r を正規確率紙に示した結果を図 3 に示す。累積分布関数 CDF にはメディアンランク法を用いた。図中の L、T および S は押し込み方向を示している。なお、5083 の L 方向、 $\phi=100^\circ$ における最大の σ_r の結果は、他のデータの傾向から大きく逸脱している。この場合、図 4 に示すように圧痕まわりに割れが観察され、介在物の上に圧子が押込まれたと考えられる。この結果を除けば、それぞれの条件で測定された σ_r は、ほぼ直線上に分布しており、正規分布に従っている。いずれの材料の場合にも、 $\phi=100^\circ$ の σ_r はばらつきが大きく、押し込み方向による差異が顕著である。また、いずれの条件でも押し込み方向の結晶粒界の間隔が最も小さい S 方向の σ_r

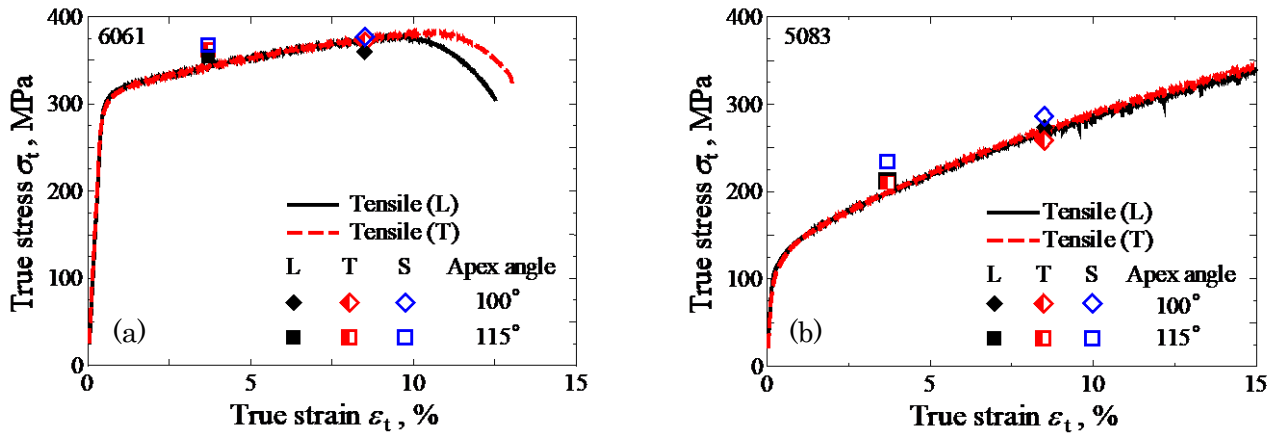


図5 引張試験における真応力 σ_t –真ひずみ ε_t 関係と代表ひずみ ε_r の中央値. (a) 6061, (b) 5083

が最も大きい. $\phi=115^\circ$ の σ_r は 6061 および 5083 とともに L 方向と T 方向の差は小さいが, $\phi=100^\circ$ の σ_r は 6061 では T 方向, 5083 では L 方向のほうが高くなっている.

4. 引張試験

引張試験片は JIS Z2241 の 14B 号引張試験片であり, 6061 の場合, 平行部長さ 78 mm, 幅 10 mm, 厚さ 5 mm である. 5083 の場合, それぞれ 52 mm, 8 mm および 6 mm である. 引張方向を L および T 方向とした. ストロークヘッドの変位速度は, 6061 が 1.0 mm/min, 5083 が 0.6 mm/min である. 試験片に貼付したひずみゲージとストロークヘッド変位の測定結果を用いて試験機のコンプライアンスを求め, ストロークヘッド変位を換算して真ひずみ ε_t を算出した. 得られた真応力 σ_t と ε_t の関係を図 5 に示す. いずれの材料の場合にも, L 方向と T 方向の塑性異方性はほとんど認められない. 図 5 には図 3 の中央値として得られた σ_r と ε_r の関係を併記した. ばらつきを考慮すれば, 硬さ試験で予測した応力ひずみ関係は引張試験結果とほぼ一致している.

以上のように, 供試材の L 方向と T 方向では塑性異方性が小さく, 硬さ試験の有効性を判断できない. 今後は, S 方向を含めた塑性異方性を圧縮試験によって検討する.

5. FEM 解析

硬さ試験による塑性異方性評価の有効性を調べるために, FEM 解析を行った. 解析には MSC ソフトウェア Marc 2014 を用いた. 解析モデルを図 6 に示す. 中央部の三角錐圧子を z 方向に移動させ, 円柱形の試料に押し込んだ. 押し込み深さが 1 μm になったら除荷した. 圧子は剛体としてモデル化した. なお, x および y 方向の押し込みはモデルの軸を回転させた. 試料の σ_t と ε_t の関係を図 7 に示す. 塑性域では $\sigma_t = K\varepsilon_t^n$ となっており, 異方性解析の x および y 方向では $K=3007.2 \text{ MPa}$, $n=0.3062$, z 方向では, $K=3219.2 \text{ MPa}$, $n=0.3109$ である. 降伏条件には Hill のモデルを用いた. また, z 方向の σ_t が他の方向と比べて約 5%大きくなるようにした. 塑性不安定条件に基づく引張強さ $\sigma_B = K(n/e)^n$ の比は約 6.5%である. ここで, e はネイピア数である.

押し込み力 F と押し込み深さ h の関係を図 8 に示す. z 方向の押し込みで

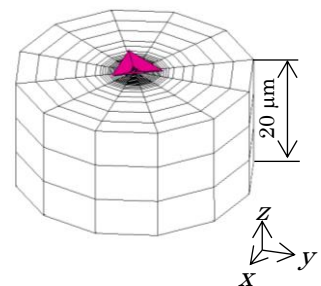


図6 FEM 解析モデル

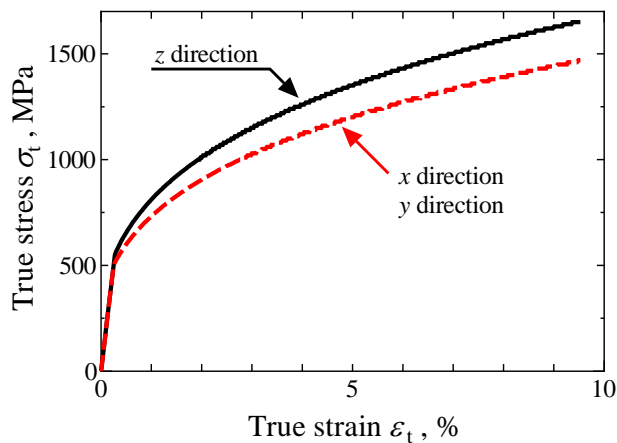


図7 解析に用いた真応力-真ひずみ関係

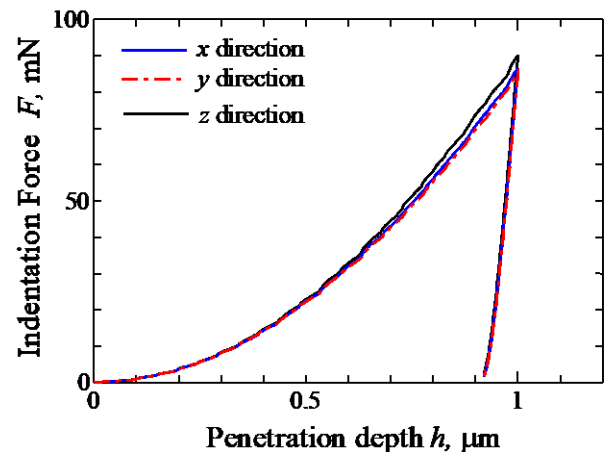


図8 押込み深さと押込み荷重の関係

は、 x および y 方向の押込みに比べて F の最大値が4%程度大きくなった。この差異は硬さ試験の結果と同様である。この結果から、 σ_B の差異よりは小さい比率となるが、硬さ試験により塑性異方性を判定できると考えられる。

6. 結言

本研究では、アルミニウム合金の硬さ試験と引張試験を行い、塑性異方性の検討を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) EBSD 観察から結晶粒が圧延方向に引き延ばされており、組織の異方性が認められる。
- (2) 硬さ試験からS方向の強度がLおよびT方向よりも高いことが示唆された。
- (3) L方向とT方向の引張試験では塑性異方性が小さく、硬さ試験の有効性を判断できないが、FEM解析の結果から、硬さ試験により塑性異方性を検出できる可能性が示唆された。

参考文献

- (1) 中島弘毅, 齋藤裕樹, 蓮沼将太, 小川武史; “硬さ試験による炭素鋼の局所力学特性の推定と配管溶接部への適用”, 圧力技術, 54巻, 1号, pp.16-24 (2016).
- (2) 中島弘毅, 蓮沼将太, 小川武史, 山谷真和, 櫻井一弥; “鋼板溶接部の引張変形挙動の測定と局所力学特性に基づく強度評価”, 圧力技術, 55巻, 6号, pp.303-312 (2017).
- (3) 中村 雅勇; “押込みかたさの物理的意味”, 日本金属学会会報, 17巻, 5号, pp. 444-445(1978).
- (4) Shota HASUNUMA, Hirohisa MIYAZAKI, Kensuke SHIMADA, Takeshi OGAWA; “Investigation of the indentation size effect based on measurement of the geometrically necessary dislocation density by electron backscatter diffraction”, Mechanical Engineering Journal, Vol. 5, Issue 2, Pages 17-00638 (2018).
- (5) Shota HASUNUMA, Hirohisa MIYAZAKI and Takeshi OGAWA; “Investigation of the mechanism of the indentation size effect for titanium”, Mechanical Engineering Journal, Vol. 6, Issue 2, Pages 18-00545 (2019).