

補助事業番号 2018M-103

補助事業名 平成30年度 Ti₂AlC基耐熱性軽量合金における異方的力学挙動の解明補助事業

補助事業者名 東北大学大学院工学研究科 知能デバイス材料学専攻 関戸信彰

1 研究の概要

次世代の耐熱性軽量材料として期待されているTi₂AlCに着目し、それが抱える問題点の一つである室温脆性の解決を目指した。結晶塑性の異方性を比較的容易に観測出来るナノインデンテーション法を用いて、弾性定数、変形の開始挙動、塑性変形の異方性を調査した。さらに、収束イオンビーム装置を用いてナノインデンテーションで生じた圧痕周囲を抽出し、透過型電子顕微鏡観察を駆使して、変形メカニズムを解明した。

2 研究の目的と背景

地球温暖化は、化石燃料が大量に消費されて、大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度が上昇することで引き起こされると考えられている。日本は世界屈指のCO₂排出国であるため、その削減が強く求められている。日本におけるCO₂排出を分野的に見ると、発電分野が最も多く、全体の40%を超える。近年、太陽光発電などの自然エネルギーを利用した発電が、CO₂を排出しないクリーンな発電であるとして期待されているが、その発電量は総電力の数%であり、さらに発電量が天候に左右されるエネルギーは、メイン電源になり得ない。

2011年の震災以降、原子力発電所の稼働率は極めて低い状態にあり、かわりに火力発電への依存度が高まっている。すなわち、日本は以前よりもCO₂を排出しやすい体質になっている。よって、地球温暖化ガスの排出量を削減し、持続可能な社会を構築するためには、石炭や天然ガスをエネルギー源とする火力発電システムを高効率化することが不可欠である。

ガスタービンを高効率化するためには、ガス燃焼温度の高温化と、回転翼の軽量化が必要である。現在、ガスタービンの大部分のブレードにはNi基超合金が使われている。それら回転翼の一部を、軽量の素材に代替することができれば、ガスタービンの効率向上が期待できる。ところで、Ti₂AlCは、優れた熱伝導性、導電性、耐熱衝撃性といった金属的な性質と、軽量性、高剛性、良好な耐酸化性といったセラミックス的な性質を併せ持つため、次世代の軽量耐熱材料として期待されている。Ti₂AlCがNi基超合金を凌ぐ耐熱性を具備することは困難であると予想されるが、比重がNi基超合金の半分程度であるため、中・高温域に晒される回転翼の一部を代替するだけでも大きな効果が期待できる。問題点は、Ti₂AlCが”脆い”こと、すなわち荷重が負荷されると割れが発生しやすいことである。この脆さを克服するためには、Ti₂AlCにおける塑性変形メカニズムを解明する必要がある。

そこで本事業は、微視組織の局所領域における力学挙動を調べる手法であるナノインデンテーション法を用いて、Ti₂AlCにおける塑性変形挙動、特に異方性に着目してを調査を行い、Ti₂AlCの実用化に資する基礎的知見を獲得することを目的とした。

3 研究内容

(URL: <http://www.material.tohoku.ac.jp/~uhtm/sekido/funds.html>)

金属材料(例えば鉄など)は、力を加え、ある一定量以上曲げると、元の形に戻らなくなる。これを「塑性変形」と呼ぶ。金属は結晶性固体、すなわち原子が規則正しく並んだ固体であるので、金属の塑性変形は、原子の規則正しい並びを維持したまま、ある特定の原子面でズレが生じる現象である。すなわち、変形しやすい(柔らかい)金属は、原子面でズレが生じやすい金属である。他方、変形しにくい結晶性材料とは、原子面でのズレが生じにくい材料であって、それに力が加わると、原子面でのズレが生じず、原子の結合が分断される。それが「割れ」に相当する。金属製の皿を床に落とすと傷が付いたり凹んだりするが、陶器(セラミクス)の皿を落とすと割れてしまうのは、金属が塑性変形しやすく、セラミクスが塑性変形しにくいという両者の特性の違いに起因する。他方、金属材料は、温度が高くなると、より小さい力で塑性変形しやすくなる。刀鍛冶が熱く熱せられた鉄を叩いて刀の形にする加工するのは、高温で鉄が柔らかくなる性質を利用したものである。すなわち、高温で使用する金属素材には、室温である程度の塑性変形が可能であり(壊れにくい)、かつ温度が上がっても柔らかくなりにくいという、いわば相反する性質が求められている。

近年、 Ti_2AlC は、優れた熱伝導性、導電性、耐熱衝撃性といった金属的な性質と、軽量性、高剛性、良好な耐酸化性といったセラミクス的な性質を併せ持つ、次世代の軽量耐熱材料として期待されている。しかしながら、 Ti_2AlC は、他のセラミクス材料よりは塑性変形能はあるものの、実用的に必要とされるレベルに達していない。本研究では、 Ti_2AlC の室温における変形挙動を詳細に調査し、変形能向上のための基礎的知見を拡充することを目的とした。

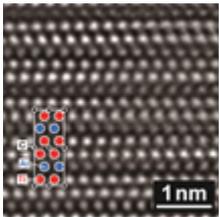
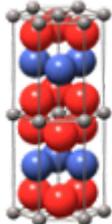
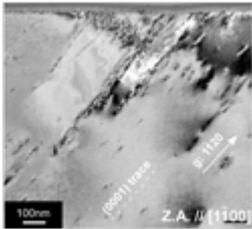
ところで、 Ti_2AlC は、 Ti_2C レイヤーとAlレイヤーが交互に積層した層状構造を有しており、室温での塑性変形は、積層面上における転位すべりが活動する(すなわち「原子面でのズレ」が生じる素過程)ことで生じ、それ以外のすべり系は活動しにくい(それ以外の原子面ではズレが生じにくい)ことが知られている。これが、 Ti_2AlC が他のセラミクスよりは塑性変形能が高いものの、十分ではない理由である。しかし、積層面上における転位すべりが抑制された場合、どのようなメカニズムで塑性変形するかについては理解されていない。そこで本研究は、新たな材料評価手法として近年注目されているナノインデンテーション法を用いて、塑性変形の異方性を調査した。

Ti_2AlC における弾性定数の異方性をナノインデンテーション法により評価した結果、第一原理計算により得られた傾向と一致なかった。これは、ナノインデンテーションの圧入時に、圧子に沿った物質移動が生ずる、いわゆる「パイルアップ」の形成挙動が圧入方向により変化することが理由の一つであると予想された。すなわち、 Ti_2AlC のような、塑性変形挙動に異方性の強い材料については、弾性定数の評価に注意が必要であることが示唆された。

塑性変形開始挙動に対応するpop-in現象は、圧子直下に印加される最大せん断応力が理想強度程度の高応力に達した際に発生することを見いだした。また、その臨界荷重は単軸圧縮を想定した底面すべりに対するシュミット因子で整理できることが明らかになった。これは、 Ti_2AlC の

変形は主として底面すべりであることを示唆する結果である。同様の結果が、透過型電子顕微鏡観察で得られた。

また、底面すべりが抑制される方位から荷重を負荷するすると、非底面転位のすべりやキンク帯形成が確認された。キンク境界は圧入方向に平行な底面転位の配列によって構成されており、キンク帯近傍に層間剝離が発生していることから、キンク帯形成においては層間剝離が重要な役割を果たしていることが示唆された。

 <p>Ti₂AlCの原子配列を観察した高分解能電子顕微鏡像</p>	 <p>Ti₂AlCの結晶構造の模式図</p>
 <p>Ti₂AlCの変形挙動。特定の原子面のみで変形が進行することを捉えた電子顕微鏡像</p>	 <p>合金粉末粉碎・混合装置（本事業で購入）</p>

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本事業では、発電用ガスタービンの回転翼に使用することを想定しているが、航空機や宇宙往來機などへの展開もあり得る。新たな高温材料は、高性能な次世代型エネルギー変換システムの創成につながり、航空・宇宙産業や発電分野で大きなブレークスルーを生み出す。学術的には、本事業で得られた知見を、Mg合金など異方性の高い化合物で観察される変形メカニズム解明に資することができる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本事業では、Ti₂AlCといった近年注目される新素材に対して、新たな力学特性評価手法として期待されているナノインデンテーション法を適用することで、今までに無い新規の知見を得ることができた。すなわち、ナノインデンテーションの圧子直下では割れが抑制されることで塑性変形が誘起され、キンク変形など新奇な変形機構の観測に成功した。本事業で用いた手法は他の素材に対しても適用可能であり、脆い結晶性材料の変形能評価に有用であることが示された。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

無し（投稿論文準備中）

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

無し

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

無し

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：東北大学大学院工学研究科 知能デバイス材料学専攻
(トウホクダイガクダイガクインコウガクケンキュウカ チノウデバイスザ
イリョウガクセンコウ)

住 所：〒980-8579

仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-02

担 当 者：准教授 関戸 信彰（セキド ノブアキ）

E - m a i l：sekido@material.tohoku.ac.jp

U R L： <http://www.material.tohoku.ac.jp/~uhtm/sekido/funds.html>