

平成29年6月16日

分野：工学系 キーワード：超高温耐熱材料、シリサイド、高温強度、航空宇宙材料

1400 度でも使用可能な超高温耐熱材料を開発

— 航空宇宙産業応用、発電所 CO₂ 削減につながる新技術 —

【記者発表：6月19日（月）15時～@阪大吹田キャンパス】

【研究成果のポイント】

- ◆ 1400℃という超高温まで高強度を維持する、これまでにない新材料を創成
- ◆ これまで、特定方向で強度、靱性が大きく低下することが課題だったが、Cr(クロム)とIr(イリジウム)という元素を微量添加することで、多方向への高強度化を可能とした
- ◆ 火力発電所、ジェットエンジン等で使用されるタービンブレード用材料として適応することで大幅に熱効率を上昇、環境へのCO₂排出量の大幅削減に期待

❖ 概要

大阪大学大学院工学研究科の萩原幸司准教授、中野貴由教授らの研究グループは、1400℃以上の超高温での使用に耐えるタービンブレード用材料として開発中の、遷移金属とシリコンを組み合わせた遷移金属シリサイド^{*1}である NbSi₂(ニオブダイシリサイド)/MoSi₂(モリブデンダイシリサイド)を組み合わせた複相シリサイド合金について、実用化における大きな問題点であった室温靱性(靱性:割れにくさの尺度)、ならびに高温強度(クリープ強度^{*2})の同時向上を、Cr(クロム)とIr(イリジウム)という元素の微量添加により世界で初めて実現しました。

これまで複相シリサイド合金は、C40-NbSi₂、C11_b-MoSi₂ 相^{*3}が板状にそれぞれ交互に並んだラメラ組織^{*4}を有しており、優れた力学特性を示すものの、両相の界面がずれる方向などの特定の方向に力が負荷された際に、強度、靱性が低い値を示すことが、実用化に向けた大きな問題となっていました。

今回、萩原幸司准教授、中野貴由教授らの研究グループは、この複相シリサイド合金にCrとIrの2つの元素をそれぞれ0.5at.%^{*5}という微量を同時添加することにより、ラメラ組織に加え、右図1に示すような特徴的な「格子ラメラ組織(図1)^{*6}」を発達させることに世界で初めて成功しました。この材料の力学特性を評価したところ、従来の複相シリサイド合金で見られた優れた力学特性を保持しつつ、かつ特定方向への強度・靱性低下を同時に抑制可能であることを初めて見出しました。

本材料は、1400℃という超高温まで高強度を維持する、これまでにない新材料であり、飛行機ジェットエンジンのタービンブレード等にて現在使用されている耐熱合金であるNi(ニッケル)基超合金(耐温度～1100℃)と置き換えることにより、大幅な熱効率の上昇を通じ、環境へのCO₂排出量の大幅削減を実現することが期待されます。

本研究成果は、英国科学誌「Scientific Reports」に、6月21日(水)18時(日本時間)に公開されます。

本研究成果について、6月19日(月)15時から大阪大学大学院工学研究科(吹田キャンパス)にて記者発表を行います。是非ともご取材くださいますよう、よろしくお願いいたします。

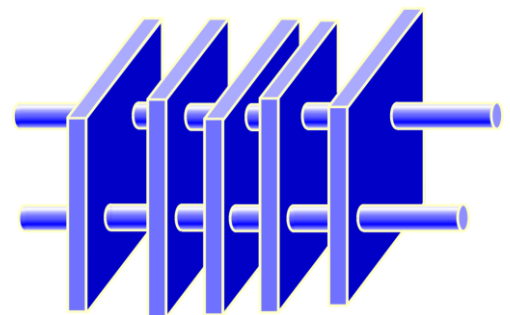
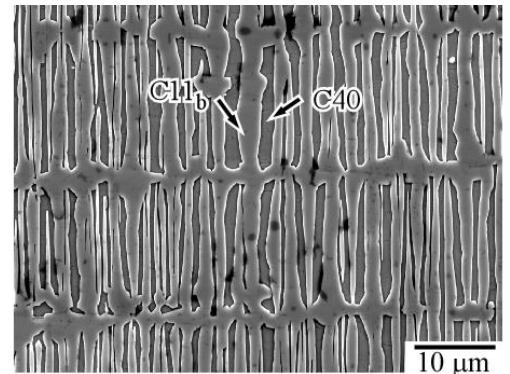


図1 NbSi₂/MoSi₂ 複相シリサイド合金に、Cr、Irを微量添加することで発達する特徴的な「格子ラメラ組織」(上図)と模式図(下図)



Press Release

❖ 研究の背景

近年、エネルギー問題や地球温暖化抑制に向けた CO₂ 排出量低減のために、発電所等にて 1400℃ 以上での高温使用に耐え得る超高温構造材料の開発が早急に求められています。というのも、国内で排出する CO₂ の約 30% が火力発電所に由来することを考慮すれば、発電用タービンエンジンなど燃焼システムの熱効率を 1% 向上させるだけでも、温室効果ガスの排出削減に対して非常に大きな効果が得られます。この実現のため、萩原准教授、中野教授らの研究グループは、軽量、高融点を有する遷移金属シリサイドである NbSi₂ と MoSi₂ を組み合わせた「複相シリサイド合金」を 2000 年初頭に開発し、その研究開発を進めています。従来の複相シリサイド合金は、NbSi₂ と MoSi₂ 両相が板状の形状を有し、それらが交互に積み重なった「ラメラ組織」を有しています。このラメラ組織に由来し、結晶方位の制御により、特定方向に延性(加工が可能な特性)を保持しつつ、かつ高い高温強度を示すという優れた特性を示すことから、次世代超高温構造材料の候補材として注目されています。

しかしながらこの「ラメラ組織」は、確かに各板状結晶粒と平行方向に荷重が負荷された際には高強度を示すものの、例えば各板状結晶粒が 45 度傾いた方向から荷重が負荷された際には、その界面に平行に変形が生じることにより、高温での強度(クリープ強度)が大きく低下します。またさらに、ひとたび界面に平行に割れ(crack)が生じた際には、即座に破壊に至るといった実用化に向けた大きな問題点がありました。

❖ 研究の成果

萩原准教授らの研究グループは今回、Cr(クロム)と Ir(イリジウム)元素の同時添加を提案しました。これまでの研究で、Cr を添加することにより、両相の界面に Cr が偏析する(界面に Cr 原子が集まる)ことでラメラ組織の安定化、高温強度上昇を実現し、また一方で Ir を添加することによりラメラ組織を細かくすることで、室温韌性(韌性:割れにくさの尺度)の上昇を実現しました。しかし、両特性の同時向上はこれまで不可能でした。本研究においてこの Ir と Cr を同時に添加し、高温でのラメラ組織発達化熱処理を施したところ、両者の相互作用として、先の図 1 に示すような特徴的な「格子ラメラ組織」が形成されることを世界で初めて見出しました。本組織を発達させることにより、多方位で優れた力学特性を示す材料の創製に世界で初めて成功しました。

❖ 本研究成果が社会に与える影響 (本研究成果の意義)

火力発電所のタービンブレード使用温度の向上は、熱効率を上昇させることで排出 CO₂ 量削減を実現するための非常に有効な方策です。今回の新材料開発により大幅な熱効率の上昇が実現されることは、低炭素社会の実現に向けた重要な一歩となります。

❖ 特記事項

本研究成果は、2017 年 6 月 21 日(水)18 時(日本時間)に英国科学誌「Scientific Reports」(オンライン, nature publishing)に掲載されます。

タイトル: "Outstanding compressive creep strength in Cr/Ir-codoped (Mo_{0.85}Nb_{0.15})Si₂ crystals with the unique cross-lamellar microstructure"

著者名: Koji Hagihara, Takaaki Ikenishi, Haruka Araki, Takayoshi Nakano

なお、本研究は、科学技術振興機構(JST)プロジェクト「先端的低炭素化技術開発(ALCA)」におけるプロジェクト「界面機能化に基づく MoSi₂ 基 Brittle/Brittle 複相単結晶超耐熱材料の開発」、ならびに、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) SIP プロジェクト「革新的設計生産技術」の支援のもとで実施されました。

【研究者のコメント】

本材料の開発は、我々がこれからも継続的に地球に優しく豊かな生活を営む上で必要不可欠な、CO₂ 排出量削減という、環境対策として最も重要な部分に貢献できるものと期待しています。

また、私個人の夢を語りますと、本材料開発が、我々が子供のころから持っていた「宇宙旅行の実現」に少しでもつながれば、と夢見ています。本材料の使用により、通常の飛行機のように、何度も宇宙を行ったり来たり出来るロケット(宇宙往還機)ができれば、海外旅行と同じ感覚で宇宙旅行できる時代がいつか来ると期待しており、それが私が元気に生きている間に実現すればいいな、と思っています。

❖ 用語説明

※1 遷移金属シリサイド

元素周期表の第3族から11族に位置する遷移金属と Si(ケイ素)との化合物の総称。例えば MoSi₂ は高温ヒーター材料(カンタルスーパー)として現在も広く用いられている。一部の遷移金属シリサイドは Si の存在により、高温にさらされた際に SiO₂ 保護被膜を形成するため高温耐酸化性に優れ、また軽量、高融点を有することから、高温構造材料としての適応が強く期待されている。

※2 クリープ強度

通常の状態では、金属材料に降伏応力(塑性変形が開始する応力)以下の応力を負荷しても、材料は変形しない。しかし高温下においては、物体に一定の応力を加え続けると、時間とともに物体がじわじわと変形していく。これをクリープ変形と呼び、高温構造材料としての使用を考える際には単純な高温強度に加え、このクリープ変形に対する抵抗(クリープ強度)の向上が重要である。

※3 C40-NbSi₂、C11_b-MoSi₂ 相

C40、C11_bとはそれぞれ NbSi₂(ニオブダイシリサイド)、MoSi₂(モリブデンダイシリサイド)が示す原子配列(結晶構造)を示す科学用語(右図 2)。一見すると両者は互いに全く異なる結晶構造を持っているように見える。しかし、図中色を付けた原子面をみると、その面上だけでは互いに原子配列が似ていることがわかる。この結晶構造の類似性に着目し特定の処理を施すことで、「ラメラ組織」をもった複相シリサイド合金を開発した。

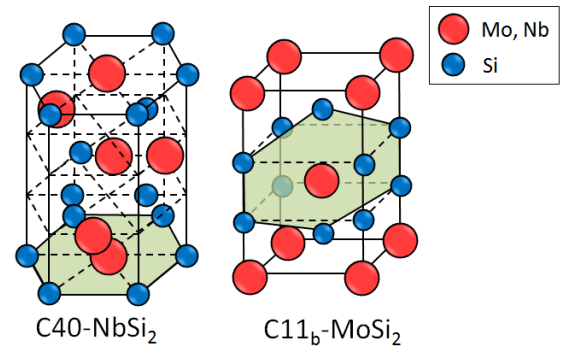


図2 NbSi₂、MoSi₂ が示す C40、C11_b 構造

※4 ラメラ組織

NbSi₂と MoSi₂ 相が板状に互い違いに自発的に配列した構造(図 3)。2000 年初頭に中野教授らの研究グループにより、(Mo_{0.85}Nb_{0.15})Si₂ 合金(at.%^{※5})にて、その制御法を確立した。上述の化学組成を有する合金中では図3に示すように二相の界面は模式的に示したほど理想的に平滑でないが、これに Cr を微量添加することで、両相がよりきれいに配列した完全な平滑ラメラ組織をとり、この結果ラメラ界面と平行に荷重を負荷した際に、より優れた高温力学特性を示すことをこれまでに見出した。

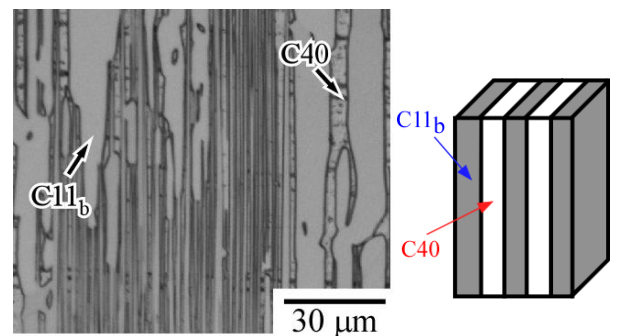


図 3 従来の(Mo_{0.85}Nb_{0.15})Si₂ 二相合金にて見られるラメラ組織

※5 at.%

アトミックパーセント、原子%。今回実施した Cr、Ir の 0.5at.% 添加とは、従来の(Mo_{0.85}Nb_{0.15})Si₂ 合金中の原子 1000 個のうちの 5 個ずつを各元素で入れ替えたことを示す。



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

国立大学法人 大阪大学

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-1

TEL: 06-6877-5111 (代)

www.osaka-u.ac.jp

Press Release

※6 格子ラメラ組織

上述の $(\text{Mo}_{0.85}\text{Nb}_{0.15})\text{Si}_2$ 合金に 0.5at.% ずつの Cr、Ir を同時添加した合金に対し、高温でのラメラ組織発達化熱処理を施したところ、本文図1に示すような、特異な「格子ラメラ組織」を発達させることに世界で初めて成功した。走査型・透過型電子顕微鏡を用い様々な方向から観察を行うことにより、格子ラメラ組織中では、ラメラ界面に対し直交方向に、横串のように棒状の $\text{C}11_b$ 相が自発的に配列する特異な組織構造が発達していることが確認された。