

飛躍的に高強度化したセラミックス複合材料の開発とメカニズム解明に成功：次世代切削工具として応用！

名古屋大学大学院工学研究科物質科学専攻の松永 克志 教授、西 智広 大学院生の研究グループは、日本特殊陶業株式会社との共同研究で、従来から飛躍的に強度が向上したセラミックス複合材料の開発と、その電子・原子レベルからのメカニズムの解明に成功しました。

セラミックスは、耐熱性、硬度、化学的安定性に優れた特性を持っていますが、もろいという大きな欠点があります。この欠点を克服するために、セラミックスと異種材料を組み合わせて複合化し、強度、靱性を向上させたのがセラミックス複合材料です。セラミックス複合材料は、その特性を活かし、航空宇宙やエネルギーといった国を支える基幹産業の様々な分野で応用されています。切削工具分野では、主に耐熱合金^(注1)加工に用いられ、昨今の航空宇宙産業の発展に大きく貢献しています。同分野において、今後の更なる発展を支えていくために、長い寿命を有し、より高速な耐熱超硬合金加工に耐えうる高強度セラミックス複合材料の開発が望まれています。本研究では、複合セラミックス材料中の異種材料界面に、ドーパント元素^(注2)を偏析させることで、材料強度の飛躍的な改善をもたらし、従来のセラミックス複合材料と比較して2倍以上の高い強度に到達することを明らかにしました。こうした知見は、コーティング材料や積層、薄膜等の異種材料の接合界面を有する全ての材料分野に応用できると期待されます。

この研究成果は、2020年12月3日付（日本時間19時）ネイチャー・パブリッシング・グループの学術誌「サイエンティフィック・リポーツ(Scientific Reports)」オンライン版に掲載されました。

なお、本研究は、文部科学省・科学研究費補助金・新学術領域研究「機能コアの材料科学」（2019-2023年度、領域代表 松永克志）の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- 異種材料界面のミクロな構造制御が材料強度の飛躍的な改善に繋がる
- 従来のセラミックス複合材料の2倍以上の超高強度複合セラミックス材料
- 本材料を切削工具として応用した製品では、耐熱合金の切削加工において、従来の切削工具に対し、2倍の高効率加工を実現
- 複合セラミックス材料の開発の他、コーティング材料や積層材料への展開にも期待

【研究背景・内容・意義】

セラミックスは、耐熱性、硬度、化学的安定性に優れた特性を持っていますが、もろいという大きな欠点があります。この欠点を克服するために、セラミックスと異種材料を組み合わせて複合化し、強度、靱性を向上させたのがセラミックス複合材料です。切削工具分野においてセラミックス複合材料は、ジェットエンジンやガスタービン部材として利用される耐熱超合金の切削加工に用いられており、航空宇宙産業の発展に欠かせない役割を担っています。従来、針状の炭化ケイ素(SiC) ウィスカとアルミナ(Al_2O_3)を複合したセラミックス複合材料が、一般的な耐熱合金加工用切削工具として使用されています。しかし、SiC ウィスカは、高価であり、針状の粒子であるため健康に対するリスクがあることから慎重な取り扱いが必要です。また、SiC ウィスカ- Al_2O_3 をはじめとする従来のセラミックス複合材料の機械的強度は、1 GPa(ギガパスカル)程度の強度に留まっていました。今後の更なる発展が予測される航空宇宙産業では、低コストかつ健康に対するリスクがなく、長い寿命を有し、より高速な耐熱超硬合金加工に耐えうる高強度セラミックス複合材料の開発が望まれています。

本研究は、 Al_2O_3 と超硬質材料の炭化タングステン(WC)からなるセラミックス複合材料に、微量のジルコニア(ZrO_2)を添加することで材料の強度を飛躍的に改善できることを明らかにし、2 GPa以上の大きな曲げ強度を達成することができました(図1)。この高強度化の起源について、走査型透過電子顕微鏡法(STEM)^(注3)およびエネルギー分散X線分光法(EDS)^(注4)、第一原理計算を用いて詳細に調べました。その結果、 Al_2O_3 とWCの異種材料界面に、原子一層分の領域でジルコニウム(Zr)の偏析層を形成していることがわかりました(図2)。また、添加したZrの一部が Al_2O_3 とWCの異種材料界面にどのように偏析し、どのようにして材料強度の向上に寄与するのかを突き止め、高強度セラミックス複合材料の開発に資する知見を獲得することができました(図3)。このような知見は、セラミックス複合材料の開発だけでなく、コーティング材料や積層、薄膜等のヘテロ界面を有する材料システムの改良にも応用できると期待されます。この材料を応用した製品は、次世代加工を実現する最新切削工具「BIDEMICS」^(注5)として販売しており、耐熱合金の切削加工において、従来の切削工具に対し、2倍の高効率加工を可能としました(図4)。

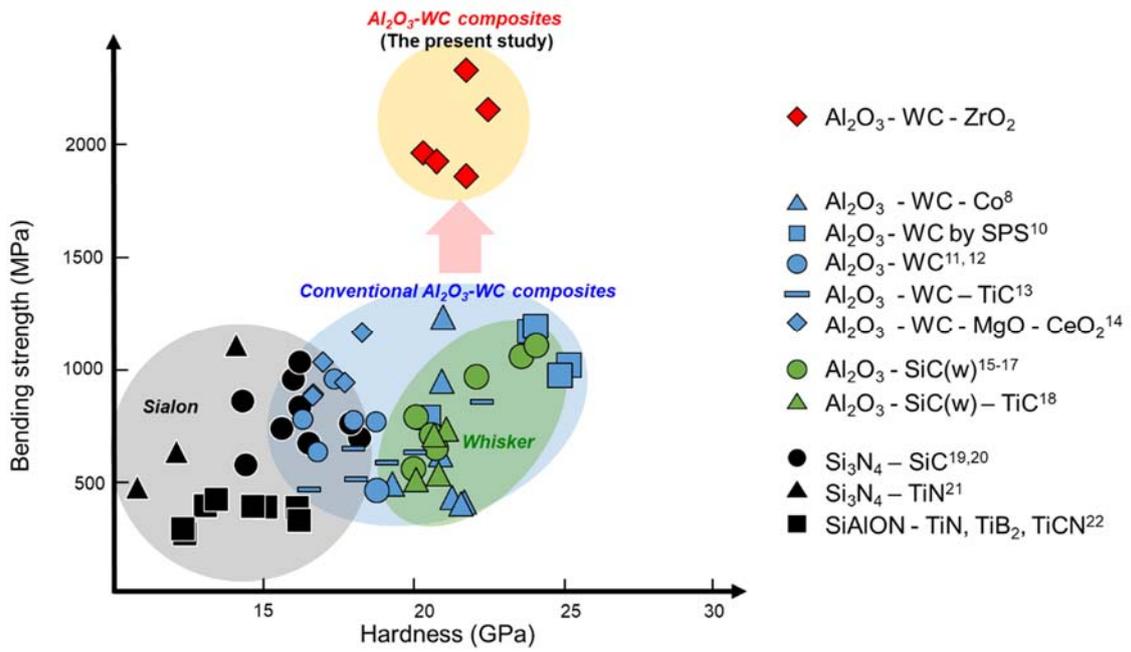


図1 従来のセラミックス複合材料との機械的特性比較

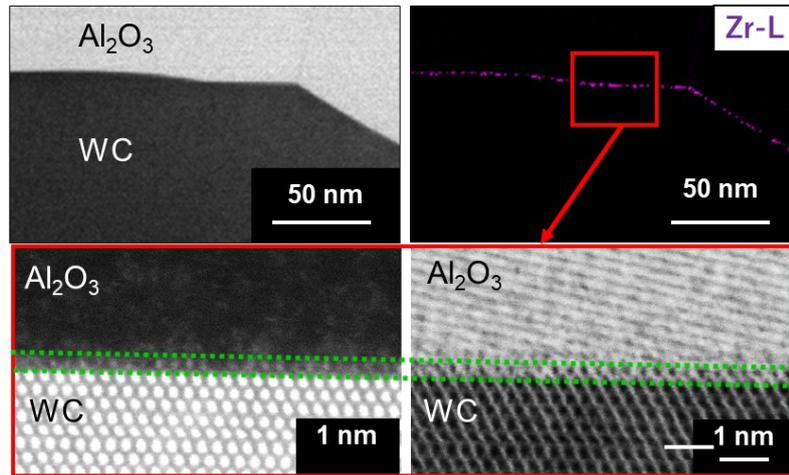


図2 Al₂O₃とWCの異種材料界面の分析結果

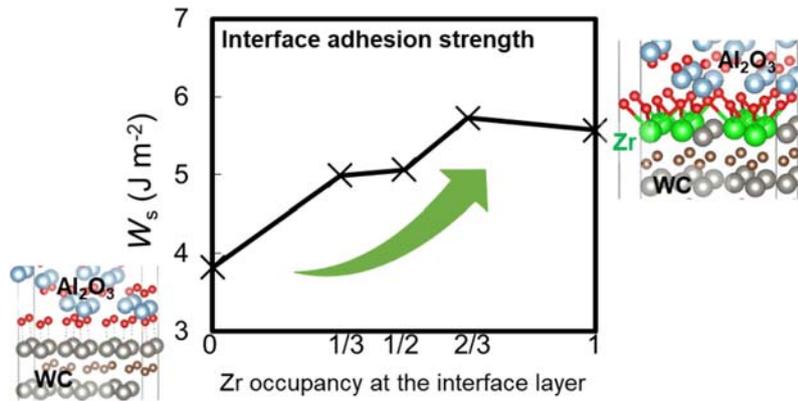


図3 第一原理計算により求めた界面の破壊強度

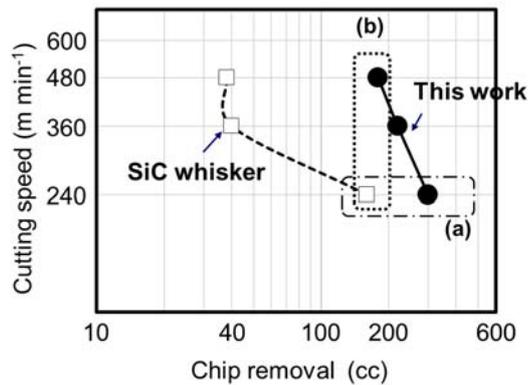


図4 切削工具性能比較

【用語説明】

(注1) 耐熱合金：航空機エンジン部品には、高い耐熱性を有する「Ni 基耐熱合金」が使用されている。優れた高温強度や耐熱性を有する一方で、金属材料の中でも難切削材料として、高能率加工が課題となっていた。

(注2) ドーパント元素：母材を構成する主成分元素の他に微量に添加された元素。材料開発において、ドーパントは機能発現に重要な役割を果たしている。元素ドーピングによる機能の発現メカニズムを理解するには、物質中でドーパントがどのように配列し、周囲の原子構造にどのように影響を与えているかを知ることが重要となる。

(注3) 走査型透過電子顕微鏡法：集束レンズによって細く絞った電子線プローブを試料上で走査し、各々の点での透過電子を検出することで像を得ることができる。近年では電子線プローブを1 Å (オングストローム：10-10m) 以下にまで絞り込むことができ、材料中の原子の直接観察も可能になっている。

(注4) エネルギー分散 X 線分光法：試料表面に電子線を照射し、放出されるエックス線を検出して、元素組成を分析する手法。

(注5) BIDEIGS：針状の炭化ケイ素ウイスカではなく、硬度、熱特性に優れる炭化タングステン、強度、靱性に優れ、異種材料界面を強化するドーパントとして作用するジルコニアで、化学的安定性に優れるアルミナを強化した微細複合組織で構成されている切削工具材料。航空機部品加工用切削工具として製品販売。

【論文情報】

雑誌名：Scientific Reports

論文タイトル：Advanced superhard composite materials with extremely improved mechanical strength by interfacial segregation of dilute dopants

著者：Tomohiro Nishi (名古屋大学大学院生), Katsuyuki Matsunaga (名古屋大学教授), Takeshi Mitsuoka, Yasuyuki Okimura, Yusuke Katsu

DOI：10.1038/s41598-020-78064-0