

報道機関 各位

熊本大学

世界初！鉄隕石中に含まれる微小な結晶相 「テーナイト」の強さと延性の計測に成功

（ポイント）

- 鉄隕石（※1）を構成している微小な結晶相（※2）ごとの強さと延性を、独自に開発したマイクロ引張試験（※3）技術を用いて計測することに成功しました。
- 窒素を多量に含む「テーナイト（※4）」と呼ばれる相が強さと延性を兼ね備えていることを発見しました。
- 鉄隕石の起源や歴史の解明だけでなく、高張力鋼の設計戦略の考案に役立てられることが期待されます。

（概要説明）

熊本大学大学院先端科学研究部の峯洋二教授、高島和希教授の研究グループは、独自に開発したマイクロ引張試験技術を用いて、鉄隕石を構成している髪の毛の太さよりも小さいサイズの結晶相ごとの力学特性（引っ張ったときの強さと延性）を精密に計測することに世界で初めて成功しました。その結果、窒素を多量に含む「テーナイト」と呼ばれる相が強さと延性を兼ね備えていることを発見しました。鉄隕石は、その起源と歴史を理解するために調べられてきましたが、これまでの材料試験技術では、含まれるき裂の存在のために鉄隕石の物質そのものの強さと延性を正確に計測できていませんでした。この成果は、鉄隕石の起源や歴史の解明だけでなく、「先進高張力鋼」の設計戦略の考案に役立てられることが期待されます。人類が初めて手にした金属と言われる鉄隕石が現代のものづくりにもヒントを与え続けているのかもしれません。

本研究の成果は、2021年2月26日（金）午前10時（グリニッジ標準時）に、ネイチャー・リサーチ社刊行のオンライン科学誌「Scientific Reports」に掲載されました。

本研究は、日本鋼構造協会鋼構造の未来探索委員会の支援を受けて実施したものです。

(説明)

[背景]

金属は様々な温度や圧力条件下で結晶構造（結晶相）が変化します。鉄隕石は、鉄、ニッケルからなる合金で、鉄隕石を構成する主な相には、体心立方晶構造の「カマサイト」、面心立方晶構造の「テーナイト」、斜方晶構造の「コーヘナイト」などがあります。鉄隕石に特有な微視組織（顕微鏡で観察できる微小な組織）は、隕石母体がゆっくり冷却される間に「テーナイト」から「カマサイト」が生成および成長することによって形成されます。その冷却速度は、温度が1℃下がる間に、数百年から数千年かかると推定され、人工的に作られる鋼と比べて大きなひらきがあります。一方で、鉄隕石と人工的に作られる鋼は、結晶相が変化するときの変態メカニズムの結晶学的特徴が類似しています。しかし、鉄隕石の力学特性（強さと延性）に関する研究は少なく、これまでの報告によると、引張強さが約100 MPa未満であるとされていましたが、この値は人工的に作られた鉄-ニッケル合金に比べてかなり低い値です。これは、鉄隕石に含まれるき裂や空洞が、構成相のもつ本来の強さや延性の計測を阻害しているためです。

金属の微小結晶相の力学特性を計測する際には、微小な柱（マイクロピラー）を作製し、圧縮する試験方法がしばしば用いられています。しかし、この方法では、力学特性のうち塑性変形の開始（降伏点）、加工硬化および破断伸びを正確に計測することができません。これまでに本研究グループでは、試験片サイズを微視組織スケール、つまり数十マイクロメートルにまで減少させて、引張試験を実施し、鋼やチタン合金、マグネシウム合金の微小構成相の力学特性を評価することに成功しています。今回は、このマイクロ引張試験技術を、鉄隕石を構成する微小結晶相における力学特性の計測に適用しました。

[研究の内容]

試料に用いたのは、鉄隕石の「キャニオンディアブロ鉄隕石」です。図1aは、電子線後方散乱回折法（※5）により得られたキャニオンディアブロ鉄隕石に含まれる「テーナイト」相の結晶方位の分布とマイクロ引張試験片の採取位置を示しています。図1aに示すように、試験部が1つの結晶に含まれるように、集束イオンビーム加工装置を使用して、試験部サイズが $11 \times 20 \times 50 \mu\text{m}^3$ のマイクロ引張試験片（図1b）を作製しました。また、鉄隕石の主たる相である「カマサイト」についても単結晶試験片を同様に作製しました。図1cは、ほぼ同一結晶方位をもつ単結晶「テーナイト」および「カマサイト」試験片のマイクロ引張試験によって得られた応力-ひずみ応答を示しています。「カマサイト」の場合、塑性変形が始まる降伏強さと破壊までの伸びはそれぞれ350 MPaと19%と測定されました。これらの値は、「カマサイト」が粗大に発達したギベオン鉄隕石の従来サイズの試験片における引張試験結果とよい一致を示しており、マイクロ引張試験の妥当性が確認されました。一方、「テーナイト」の降伏強さと破壊までの伸びは、それぞれ935 MPaと65%と測定され、きわめて良好な強さと延性のバランスを示すことが判明しました。通常、地球上で作られるニッケルを含む鋼材には、窒素を多量に含ませることができないのですが、この「テーナイト」には多量の窒素（1.35質量%）が含ま

れており、高い強さと延性の発現メカニズムに寄与していると考えられます。

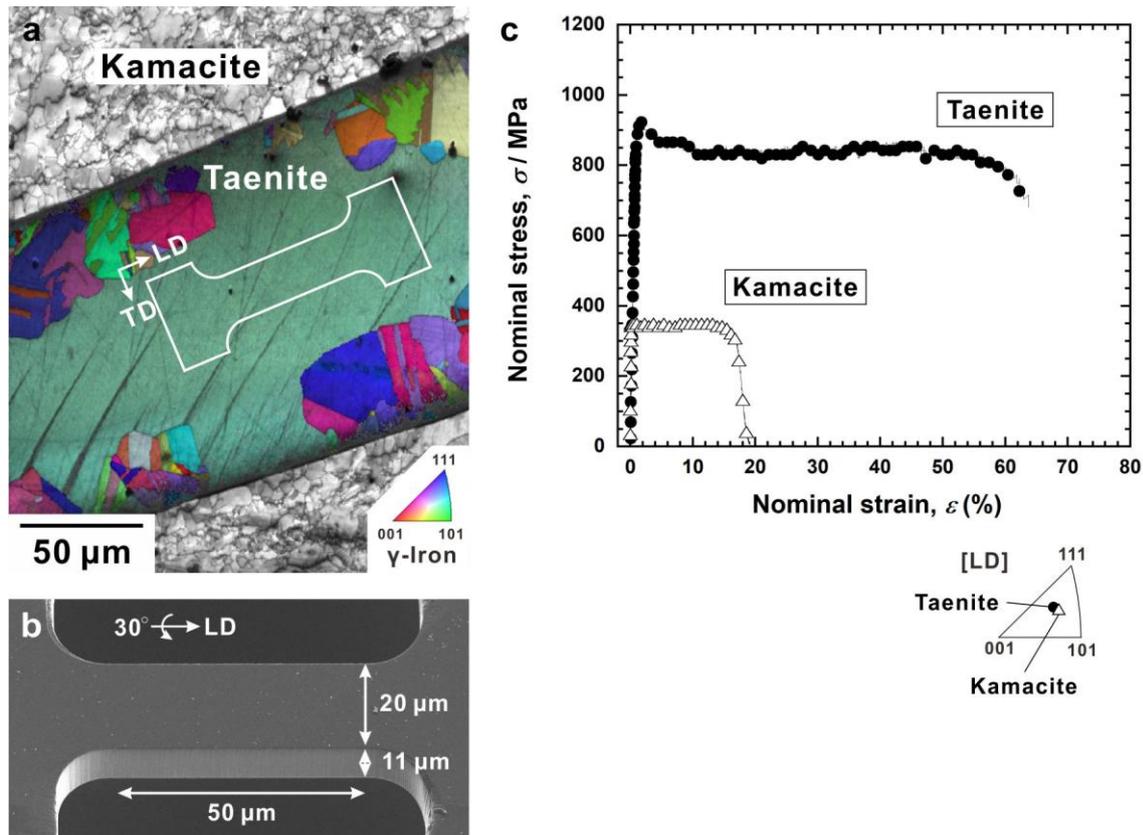


図 1 (a)電子線後方散乱回折法で得られた鉄隕石の結晶相「テーナイト」の結晶方位マップ。LDは引っ張る方向と平行方向、TDは垂直を示す。

(b)マイクロ引張試験片の形状

(c)「テーナイト」と「カマサイト」の応力（縦軸）とひずみ（横軸）の関係

[成果と展開]

以上のように、キャニオンディアブロ鉄隕石を構成する結晶相ごとに、マイクロ引張試験技術を用いて強さと延性を計測することに成功しました。また、微小な構成相「テーナイト」は、ニッケルに富むオーステナイト相であっても、高レベルの窒素が含まれており、優れた力学特性（降伏強さと破断伸び）を示すことが明らかになりました。

現代の先進高張力鋼の開発では、厳しい環境条件下での使用において、鋼材中に吸収された水素によって鋼材の強度が低下する「水素脆化」のリスクを許容できるオーステナイト高張力鋼の開発が大きな課題となっています。本研究での発見が、高度な高張力鋼の開発に役立ち、鋼中の窒素とニッケルの含有量の関係を理解するための研究の動機付けになることを期待しています。

[用語解説]

- ※1 鉄隕石：主に 5 から 60 質量%までのさまざまなニッケル含有量をもつ鉄-ニッケル合金。ニッケル含有量に基づいて異なる組織学的特徴を示すいくつかのタイプに分類されます。また、発見された場所によって呼称されます。
- ※2 相：物理的な状態や化学的組成が一様な形態のもの。例えば、気相、液相、固相などがあります。固相は、結晶構造や化学的組成に基づいてさらに α 相、 γ 相などに区別されます。
- ※3 マイクロ引張試験：MEMS (メムス) と呼ばれる、非常に微小な世界で活躍する電子機械デバイスを構成する材料の力学特性計測のために開発された試験方法。従来のサイズでの引張試験に用いられる試験片の千分の一程度のスケールで計測することが可能です。
- ※4 テーナイト：鉄隕石を構成する鉄-ニッケル合金で、ニッケル含有量が約 30 から 60 質量%の面心立方晶の結晶構造をもつ金属相。人工的に作られるオーステナイトに相当します。
- ※5 電子線後方散乱回折法：電子顕微鏡に付帯する検出器を用いて、電子線照射により材料表面領域の結晶面からの回折電子を捉えて、結晶構造を反映したパターンを取得し、結晶方位の情報を得る手法。

(論文情報)

論文名：Excellent mechanical properties of taenite in meteoric iron

著者：Shohei Ueki, Yoji Mine, Kazuki Takashima

掲載誌：Scientific Reports

doi：10.1038/s41598-021-83792-y

URL：www.nature.com/articles/s41598-021-83792-y

【お問い合わせ先】

熊本大学大学院先端科学研究部

担当：峯 洋二

電話：096-342-3713

e-mail：mine@msre.kumamoto-u.ac.jp