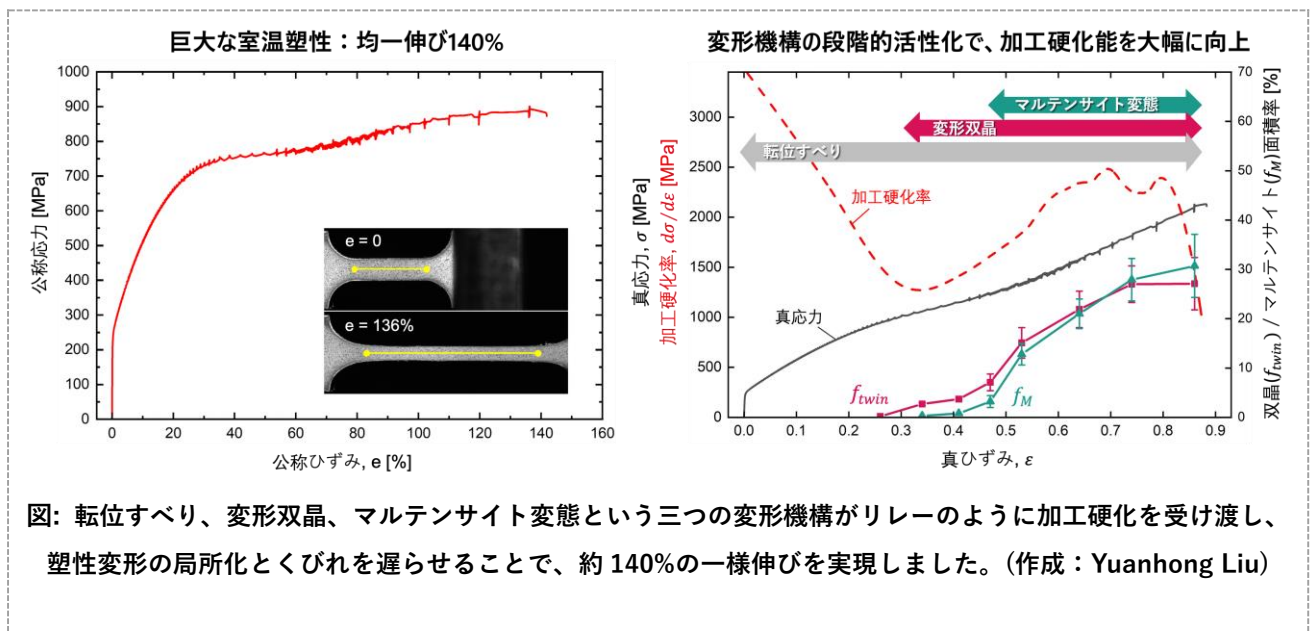


室温で 140% も伸びる超延性鋼

— 三つの変形機構を順に活用 —

概要

京都大学大学院工学研究科 劉遠宏特定研究員、高 斯 同准教授、辻 伸泰 同教授らの研究グループは、約 140% の一様伸び (注 1) と約 900 MPa の引張強さを両立するオーステナイト鋼を開発しました。一般的な金属材料の一様伸びは約 20~40% で、先進的な鉄鋼材料でも約 70% に達する程度です。通常の金属材料は転位すべりが主な変形機構であるのに対して、本材料では、転位すべり、変形双晶 (注 2)、変形誘起マルテンサイト変態 (注 3) という三つの塑性変形機構が、変形の進行に伴って順番に働きます。これらがリレーのように加工硬化 (注 4) を受け渡すことで、塑性変形の局所化を抑え、くびれと破断を大幅に遅らせることが分かりました。さらに、炭素添加によって変形双晶とマルテンサイト変態が働くタイミングを制御し、この連続的な発動を実現しました。本成果は、金属材料が持つ延性の潜在力を示すとともに、自動車、建築、航空機などに用いられる高強度・高延性構造材料の新たな設計指針を与えるものです。本研究成果は、2026 年 9 月 1 日に国際学術誌「Materials Today」に掲載されました。



1. 背景

金属材料の延性を示す重要な指標の一つが「一様伸び」です。これは、引張変形中に試験片全体が均一に伸び続けられる限界を表し、変形が一部に集中して「くびれ」が発生するまでの伸びです。変形が均一に続くかどうかは、材料が変形とともに強くなる「加工硬化」の速さ (加工硬化率) と、塑性変形を続けるために必要な応力 (流動応力) のバランスで大きく決まります。加工硬化率が十分高ければ均一変形は続きますが、不足するとくびれが早期に発生し、通常その後まもなく破断に至ります。

通常の金属における加工硬化は主に転位の蓄積と相互作用によって生じますが、加工硬化能力は変形

とともに徐々に低下していきます。一部の先進的な鉄鋼材料においては、変形双晶やマルテンサイト変態が加工硬化能力を上げることで大きな延性を実現します。しかしながら、多くの場合は変形双晶とマルテンサイト変態の一つが発現されます。本研究では、複数の塑性変形機構を発現させるだけでなく、それらを順番に発動させること、つまり前の機構の加工硬化効果が弱くなる際に次の新たな変形機構が加工硬化を担うことができないかと考えました。このような「受け渡し」ができれば、より広い変形範囲で加工硬化を維持し、一様伸びを大幅に伸ばせると考えました。

2. 研究手法・成果

本研究の合金設計の中心的な考え方は、炭素を用いて異なる変形機構が働き始めるタイミングを制御することです。炭素量を 0.6 質量%まで高めることで、変形前の結晶構造であるオーステナイトを安定化し、マルテンサイト変態を遅らせました。これにより、まず変形双晶が働くことのできる中間の変形領域をつくり、その後、より大きな変形でマルテンサイト変態が活性化するように設計しました。この狙いが実現しているかを、引張試験、電子顕微鏡・電子線後方散乱回折（EBSD）による組織観察、放射光その場 X 線回折（注 5）、分子動力学計算および第一原理計算によって検証しました。

その結果、低ひずみ域では転位すべりが主に働き、中間ひずみ域では変形双晶が活性化し、さらに大きなひずみ域では変形誘起マルテンサイト変態が顕著になることを確認しました。三つの機構が順番に働くことで、異なる変形段階で追加の加工硬化が供給され、高い加工硬化率が非常に広いひずみ範囲にわたって維持されました。その結果、この鋼は約 900 MPa の引張強さを保ちながら、一様伸び約 140% という大きな延性を示しました。

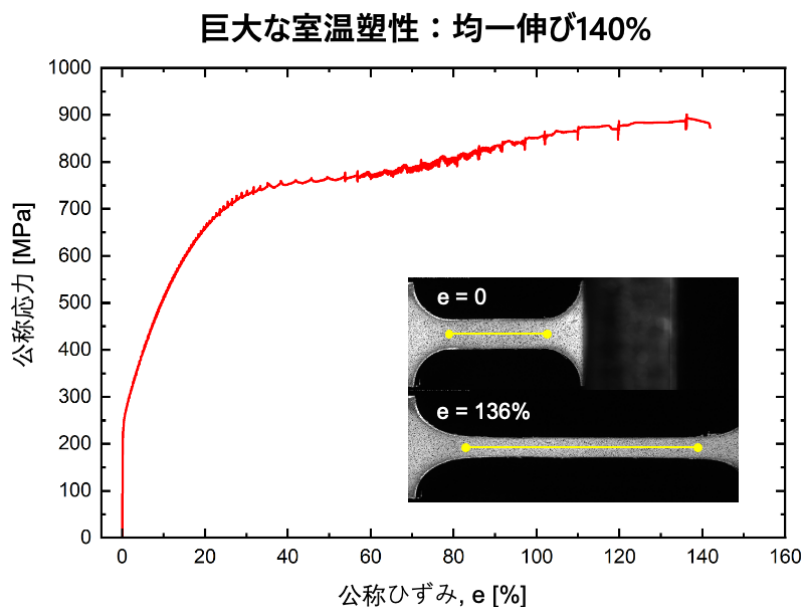


図 1：Fe-24Ni-0.6C (wt. %)鋼の応力（単位面積あたりの力）-ひずみ（変形の割合）曲線

転位すべり、変形双晶、マルテンサイト変態の段階的活性化で、加工硬化能を大幅に向上

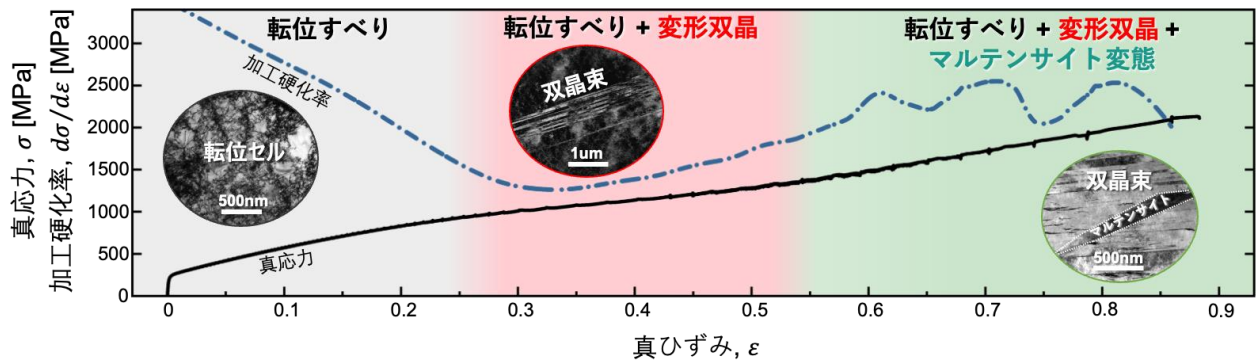


図 2：転位すべり、変形双晶、変形誘起マルテンサイト変態のリレー挙動と、それに伴う加工硬化率・真応力-真ひずみ曲線

さらに興味深いことに、後から生成するマルテンサイトの多くは、先に形成された変形双晶の内部で生成していました。すなわち、前の変形機構によって形成された組織が、次の変形機構が働くための有利な条件をつくっており、変形機構の間に自然な「受け渡し」が生じていることが明らかになりました。

先行変形双晶内におけるマルテンサイト変態

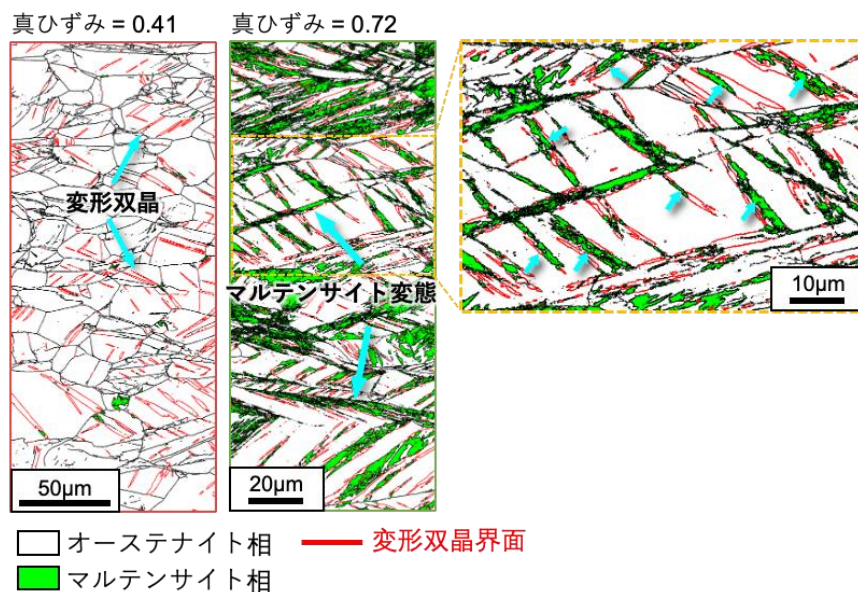


図 3：変形双晶が先行して形成され、その内部で引き続きマルテンサイト変態が生じる

3. 波及効果、今後の予定

金属材料は一般に延性を持つ材料と考えられていますが、先進的な金属材料でも一様伸びは通常 60～70%程度です。この値は脆いセラミックスよりはるかに大きい一方、高い伸びを示す高分子材料には及びません。本研究で開発した鋼は約 140%の一様伸びに達し、一部の高延性高分子材料に近い変形能

を示しました。この結果は、金属材料の延性には、従来考えられていた以上に大きな潜在力があることを示唆しています。

より広い観点では、本研究は、構造用金属における長年の課題である「強度と延性のトレードオフ」を克服するための新しい考え方を提示するものです。また、自動車、建築物、航空機などの荷重を支える構造部材に向けて、高強度と高延性を両立する先進金属材料を設計する上での指針になると期待されます。

今後は、変形双晶やマルテンサイト変態が始まるタイミングや進行速度に影響する結晶粒径、変形温度、ひずみ速度などを系統的に調べ、組成・組織・使用条件を組み合わせることで各機構の「受け渡し」を最適化するとともに、この連続発動の考え方を他の合金系にも展開できるかを検証します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構（JST）CREST（JPMJCR1994）、日本学術振興会（JSPS）国際共同研究加速基金（国際先導研究）（JP23K20037）、JSPS 科研費（JP25K08343、JP22K14509）、および中国国家留学基金管理委员会（CSC）の支援を受けて実施されました。

研究には、京都大学、金沢大学、大阪大学、Massachusetts Institute of Technology (MIT)、九州大学、Virginia Tech、物質・材料研究機構（NIMS）、Northeastern University（中国）の研究者が参加しました。放射光実験は SPring-8 で実施しました。

<用語解説>

注 1 一様伸び：引張試験で試験片全体がほぼ均一に伸びることができる最大の伸び。局所的なくびれが始まるまでの延性を表します。

注 2 変形双晶：塑性変形によって結晶の一部が鏡映関係を持つ双晶構造になる現象です。新しい界面が形成されることで、追加の加工硬化をもたらします。

注 3 変形誘起マルテンサイト変態：塑性変形中にオーステナイトからより硬いマルテンサイトへ結晶構造が変化する現象です。変態によって加工硬化を高めることができます。

注 4 加工硬化：塑性変形が進むにつれて材料が変形しにくくなり、流動応力が上昇する現象です。加工硬化が十分に続くと、くびれの発生を遅らせることができます。

注 5 その場 X 線回折：試料を変形させながら X 線回折を測定し、相の量や各相が負担する応力などを連続的に調べる方法です。

<研究者のコメント>

最も興味深かったのは、異なる変形機構が単に順番に現れるだけでなく、前の機構がつくった組織が次の機構の発動を助けていたことです。特に、中間の変形段階で形成された変形双晶が、その後のマルテンサイト変態に有利な場所となりました。この自然な「受け渡し」によって加工硬化を長く維持できたことは、金属材料の延性の限界をさらに広げる新しい材料設計につながると考えています。（高 斯 准 教授）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Super ductile steel via sequentially activating multiple strengthening mechanisms
(複数の強化機構を連続的に発動させることによる超延性鋼)

著 者：Yuanhong Liu, Si Gao, Myeong-heom Park, Shuhei Yoshida, Reza Gholizadeh, Zhenghao Chen, Keisuke Ikeda, Jin-Yu Zhang, Saeid Alipour, Jesada Punyafu, Wenqi Mao, Mitsuhiro Murayama, Kyosuke Kishida, Akinobu Shibata, Tomotsugu Shimokawa, Shigenobu Ogata, Ju Li, Nobuhiro Tsuji

掲載誌：Materials Today 100 (2026) 103497

DOI：10.1016/j.mattod.2026.103497