

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02484

研究課題名（和文）放射光・FEMを活用した第三世代超高張力鋼の損傷挙動の解明と逆問題解析への発展

研究課題名（英文）Damage mechanism analysis of third generation ultra-high strength steels using combining method of synchrotron X-ray and finite element simulation, and its extension to inverse problem analysis

研究代表者

松野 崇 (Matsuno, Takashi)

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：30781687

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではTRIP鋼と呼ばれる自動車用の高強度鋼材を対象に、その変形と破壊の機構の解明を行った。変形が一旦集中してしまった際に破壊しやすくなることがTRIP鋼の弱点である。新たに開発した数値解析と計測を組み合わせた引張試験方法、および大型加速器Spring-8にて実施した変形中の内部の力と金属組織の非破壊分析により、その原因が変形の集中を受けて内部の硬い微視組織が不安定に発達し、内部に強い引張力を誘起することであることが分かった。さらに微視金属組織の3次元形状を観察し、観察像に基づいたシミュレーションを実施した。その結果、金属組織内の硬質組織周囲に力の集中箇所が存在することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は今まで不明であったTRIP鋼の変形特性を明らかにできたとの学術的意義、そして新たな自動車用超高強度鋼材とその加工方法の開発シーズを与えるという社会的意義を有する。TRIP鋼は変形集中を抑制するはずであると長らく信じられており、これに対してはっきりとした答えを導けた意義は大きい。シミュレーションを活用することで、材料の開発と材料に合わせた加工方法の双方を一貫して最適化可能なシステムの足掛かりも構築することができた。実現すれば、自動車の安全性向上に加え、部材の薄肉化による軽量化や加工時間の革新的な短縮を図ることができる。カーボンニュートラル社会への土台作りとして貢献できるものと考えている。

研究成果の概要（英文）： This research project elucidated deformation and damage mechanism of high-strength TRIP steels used for automobile crash component parts. It has been a task for TRIP steel applications that deformation localization sites subjected to easy fracture. A newly developed tensile testing method combining numerical analysis and measurement, as well as nondestructive analysis of internal forces and metallographic microstructure during tensile deformation conducted at Spring-8, revealed that the cause is the unstable development of the internal hard microstructure under deformation localization, which induces strong internal tensile forces. Furthermore, three-dimensional microstructural observation was conducted to obtain numerical model based on the actual microstructure. After that, finite element simulations were performed based on this model. This simulation found that tensile forces were localized around the hard phase among the metallographic microstructure.

研究分野：金属材料の変形と破壊

キーワード：TRIP鋼 微視的解析 放射光 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

自動車用鋼板には高い延性と強度が要求される。これは部材を成形するにあたってのプレス加工を材料の破断なく容易に行え、かつ、自動車の衝突の際に部材の高い強度により乗員を安全に保護するためである。

このような高強度・高延性な自動車用鋼板の一つの候補として、TRIP 鋼と呼ばれる高強度鋼材が挙げられる。TRIP 鋼は高強度でありながら、引張試験においては破断するまでに非常によく伸びるという特徴がある。これは、TRIP 効果と呼ばれる鋼材内部の微視的な構造変化が一箇所に変形が集中することを防ぎ、引張試験片全体にわたって満遍なく変形を伝播させることによる。

一方で、TRIP 鋼は一度変形が集中してしまうと破壊が起こりやすいという弱点がある。さらなる自動車部材の高強度化を達成するには、このような弱点を克服した新たな TRIP 鋼を開発しなければならない。そのためには、TRIP 鋼において変形が集中してしまった際に何故に破壊しやすいのかを解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、変形集中箇所において TRIP 鋼の破壊が促進されるメカニズムを明らかにすることを目的とした。変形集中箇所においては応力 3 軸度という力学指標が大きくなり、一般には応力 3 軸度が高いほど小さな変形量で破壊が起こってしまう。さらには、TRIP 鋼は他の鋼材と異なり、同じ変形量であってもその変形に必要な力の値が応力 3 軸度に依存して異なるという特性がある。

そこで、本研究では応力 3 軸度が高い状態において特定の変形に必要な力（変形抵抗）がどのように変化するのか、そして、その変化した力が微視的なオーステナイトからマルテンサイトへ変化する機構にどのように影響を与え、破壊に至らしめるのか、力学的な視点から明らかにした。

3. 研究の方法

(1) 切り欠き部の変形抵抗の測定

上述の応力 3 軸度が高い状態を切り欠きにより再現することを考え、切り欠き部の変形量と力を測定することで応力 3 軸度が TRIP 鋼の変形抵抗に与える影響を明らかにした。このために引張試験中に試験片の形状変化の履歴を測定しておき、この履歴を参照とした数値シミュレーションを介して変形抵抗を導出する手法を新たに開発している（図 1）。



図 1 開発した小型引張試験システム。切り欠き部の変形抵抗測定を実現。

(2) X 線による鋼材内力の可視化

さらに兵庫県佐用町の SPring-8 にて、X 線を使って鋼材内部の変形抵抗の直接測定を行った。金属結晶に力が加わっている場合、X 線が透過した際の回折角度が変化する。引張試験中のその変化量を計測しておき、TRIP 鋼中のオーステナイトやマルテンサイト、それ以外の素地を形成するフェライトに加わった力を明らかにした。また、X 線の信号からはオーステナイトの割合の変化も分かるため、信号を分析することでその変化率を求めた。

(3) オーステナイト組織の 3 次元形状測定とシミュレーションモデルの作成

(1) と (2) で測定された変形抵抗の応力 3 軸度による変化のメカニズムを解明するべく、引張変形中の金属組織の状態を解析した。(2) の結晶に加わった力を平均値として参照する数値シミュレーションの実施により金属組織中の力の分配を可視化し、いかにしてオーステナイトに力が分配されるのかを考察した。オーステナイト形状により結果は左右されるので、実際の金属組織形状を東北大学の 3 次元電子顕微鏡により観察し、観察像を直接シミュレーションモデルと

して用いた(図2)。オーステナイトの形状は単純な楕円や多角形で模擬する場合が多い。しかしながら、実際には図2に示すような複雑なネットワーク状の歪な形状を有している。実際の形状を用いることでより現実に近い結果を得ることが本研究の特徴となる。

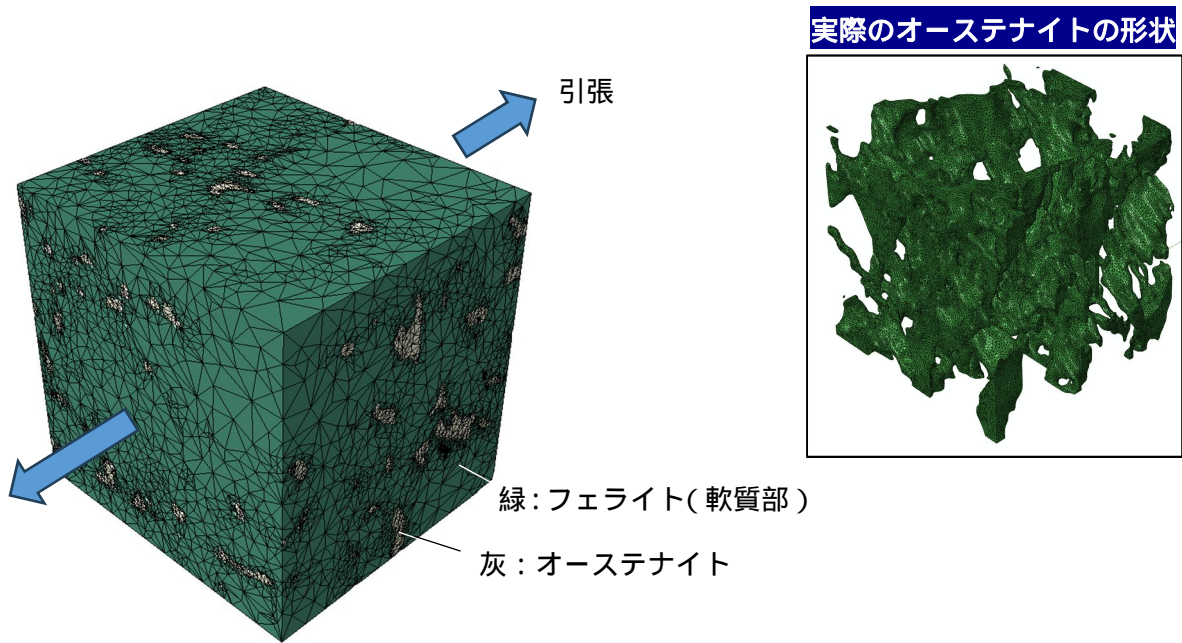


図2 力学シミュレーションに用いたTRIP鋼の微視組織モデル

4. 研究成果

(1) オーステナイトからマルテンサイトへの変化で応力3軸度が不安定に高くなる。

切り欠き引張試験片の変形抵抗を調べた結果、応力3軸度が高いことでオーステナイトがマルテンサイトへ変化しやすくなり、さらに変化したマルテンサイトによりさらに応力3軸度が増す現象が明らかとなった。

図3は応力3軸度を切り欠きにより増した場合とそうでない場合との変形抵抗の比較である。変形抵抗は変形とともに増すことが知られており、その挙動に2つのケースで違いが見られる。点線の丸で囲んである部分に着目すると、3軸度が高い場合に変形抵抗が増す結果となった。この挙動は変形の初期(変形量が少ない領域)に限られ、変形が大きくなると変形抵抗はほぼ同一のものになる。

引張シミュレーションの結果、このような最初だけ変形抵抗が増すという効果は、応力3軸度をさらに高くすることが判明した。研究背景に述べた、「なぜ変形集中部においてTRIP鋼は破壊しやすいのか?」という疑問に対し、変形集中(切り欠き)により最初だけ変形抵抗が増すためであるとの答えが得られたものとなる。

それでは、何がこのような最初だけ変形抵抗を増すという効果を及ぼすのか?これはX線を使った解析によりオーステナイトがマルテンサイトに変化しやすくなったことが原因であることが分かった。図4はX線により測定された変形中のオーステナイトの割合である。変形とともに硬いマルテンサイトに変化をするので、その割合は減っていく。切り欠きのない、応力3軸度が低い条件を基準とすれば、切り欠きにより応力3軸度が増した条件では変形初期に一気にオーステナイトが減少していることが確認できる。硬いマルテンサイトがより多く含まれる分だけ変形抵抗は増し、その変化が終了してしまったために変形の後期では同じような抵抗になったことが分かる。

X線によるオーステナイトに加わる力の測定結果(図4)から、切り欠き試験片のケースでオーステナイトに加わる力(静水応力)が増していることが分かる。静水応力が高いほど応力3軸度も高い。従来から知られるように、切り欠きのような変形集中部は応力3軸度が高く、その高

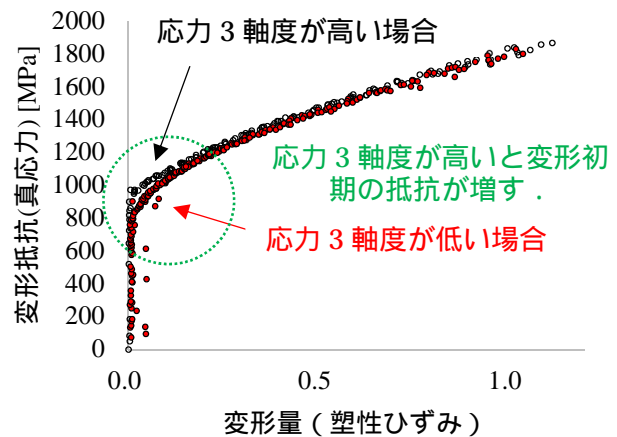


図3 応力3軸度が高い場合と低い場合の変形抵抗の比較

い応力 3 軸度によりオーステナイトからマルテンサイトへの変化が促進される。本研究では、この促進効果が相互作用を起こし、さらに TRIP 鋼内部の応力 3 軸度を増すという不安定現象が明らかとなった。このような不安定現象こそが TRIP 鋼における変形集中部の早期破断の要因である。

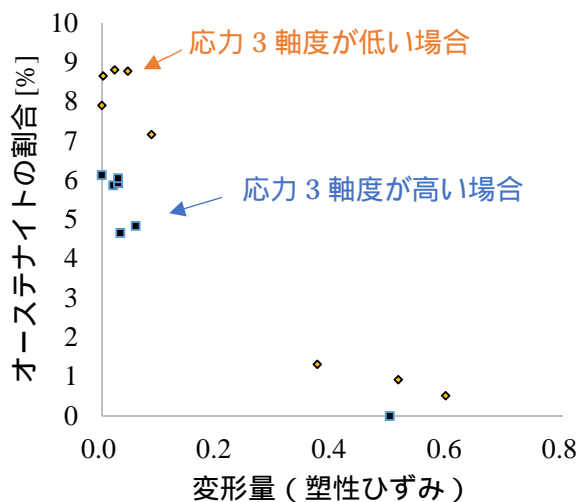


図 3 引張変形中のオーステナイトの割合の推移。低いほど硬いマルテンサイトへ変化している。

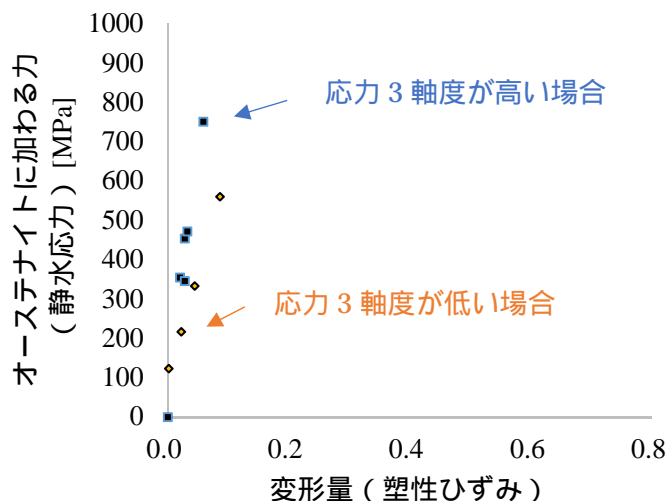


図 4 引張変形中のオーステナイトに加わる力 (静水応力)。

(2) オーステナイトは周囲のフェライトから引張を受けることで静水応力が増す。

図 5 に図 3 の引張シミュレーション結果の一例を示す。付加された力 (静水応力) が高い部分とそうでない部分が存在する結果となった。力の高い箇所はオーステナイトの周囲である。このような力の集中傾向は素地であるフェライトの強度を仮想的に上げるほどに顕著となった。図 5 の結果は最も図 4 の実測値に近いものとして解析できたケースであるが、フェライトの強度を 900 MPa ほどに設定している。対象とした TRIP 鋼のフェライトはベイネティックフェライトと呼ばれる強化されたフェライトであるため、概ね妥当な結果となっている。

シミュレーション結果を分析すると、変形して伸びに直交方向に縮もうとするオーステナイトを周囲のフェライトが拘束し、直交方向に引き延ばすことで静水応力が増すことが明らかとなった。

このシミュレーションでは完全に測定された変形抵抗と X 線による内部力の測定値を再現することはできなかった。そのため、今後さらに改善が必要がある。研究を進め、内部に破壊が起こる力と変形の閾値、およびこれを増加させる材料設計シーズを見出していきたい。

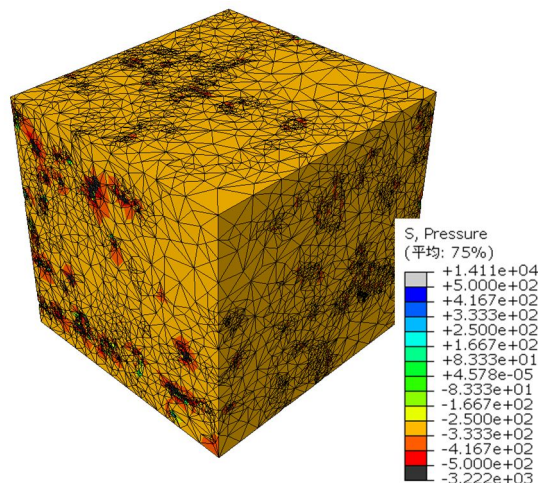


図 5 オーステナイトに加わる力 (静水応力) の解析結果。赤い部分ほど引張の静水応力が高い。

(3) その他の成果

本研究は様々な試行錯誤を行なった。TRIP 鋼の変形と損傷の解析を行うとの目的の基、電子顕微鏡中での曲げ試験、変形後の金属組織の 3 次元観察、ナノサイズでの硬さ測定とその周囲の金属組織の 3 次元観察、ディープフェイクを介した逆変形問題の解析等、本報告書にまとめきれなかった数多くの結果が得られている。

研究助成としての本テーマは終了したが、今後も継続的にこれらの結果を成果としてまとめ上げ、社会に還元していく所存である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsuno Takashi, Hojo Tomohiko, Watanabe Ikumu, Shiro Ayumi, Shobu Takahisa, Kajiwara Kentaro	4. 巻 1
2. 論文標題 Tensile deformation behavior of TRIP-aided bainitic ferrite steel in the post-necking strain region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials: Methods	6. 最初と最後の頁 56 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/27660400.2021.1922207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Yuto, Matsuno Takashi, Hama Takayuki, Matsuda Tomoko, Okitsu Yoshitaka, Hayashi Seiji, Takada Kenji, Naito Tadashi	4. 巻 109
2. 論文標題 1180 MPa級マルテンサイト母相Dual Phase鋼における微視的延性破壊機構の解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 536 ~ 546
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2022-100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松野崇
2. 発表標題 超高張力鋼塑性変形部の応力測定と数値シミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 “結晶性材料のマルチスケール解析フォーラム” シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田大樹, 松野崇, 北条智彦, 柴山由樹, 松田知子, 渡邊育夢
2. 発表標題 放射光回折を用いたTBF・TM鋼中の相応力分配の測定
3. 学会等名 日本塑性加工学会第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松野崇, 北條智彦, 渡邊育夢
2. 発表標題 応力3軸度を考慮した簡易加工硬化則によりTRIP鋼の大変形域加工硬化挙動の解析
3. 学会等名 日本塑性加工学会第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松野崇, 藤田大樹, 北條智彦, 柴山由樹, 松田知子, 渡邊育夢
2. 発表標題 TRIP鋼の切り欠き材引張試験における相応力分配と損傷
3. 学会等名 日本機械学会M&M材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松野崇
2. 発表標題 自動車用次世代高強度鋼製部材に向けた応力測定と数値シミュレーションの複合的解析
3. 学会等名 理化学研究所, 理研セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田大樹, 松野崇, 北條智彦, 柴山由樹, 松田知子, 渡邊育夢
2. 発表標題 TRIP-aided マルテンサイト鋼の引張大变形域における微細残留オーステナイト相の挙動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会春季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田大樹 , 松野崇 , 松田知子 , 北條智彦 , 渡邊育夢
2. 発表標題 TRIP鋼切り欠き材の変形抵抗の同定と放射光応力測定による検証
3. 学会等名 日本材料学会・第56回 X線材料強度に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松田 知子 (Tomoko Matsuda) (00587644)	地方独立行政法人鳥取県産業技術センター・無機材料グループ・主任研究員 (85104)	
研究分担者	北條 智彦 (Tomohiko Hojo) (50442463)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	
研究分担者	渡邊 育夢 (Ikumu Watanabe) (20535992)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主幹研究員 (82108)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------