

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560086

研究課題名(和文)TRIP鋼における高速変形挙動の時間的階層性とエネルギー吸収能向上機構の解明

研究課題名(英文)A clarification on mechanism of improvement in energy absorption capacity and time hierarchy of impact deformation behavior in TRIP steel

研究代表者

岩本 剛 (Iwamoto, Takeshi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40274112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：Kelvinダブルブリッジを応用した回路を開発し、試験片の抵抗変化を測定した。その上で、測定結果の精度向上を試み、完成した回路の妥当性を示した。温度場に関しては、直径80 μ mの極細熱電対を用いて測定を行った。また、衝撃負荷下における破壊靱性値を評価し、そのマルチ時間スケール性を実験的に明らかにすることを試みた。実施した試験の有限要素シミュレーションを行い、実験事実と併せて時間的階層性によるTRIP鋼の衝撃エネルギー吸収特性向上のメカニズム解明を試みた。

研究成果の概要(英文)：A circuit based on the Kelvin double bridge was developed. Then, a change in resistance of the specimen made of TRIP steel was measured. In addition, a precision of the measured value was attempted to be improved and a validity of the developed circuit was confirmed. Temperature was measured by using extremely-thin thermocouple with 80 micron in diameter. On the other hand, fracture toughness under impact loading was evaluated and its multi-scale property in time domain was attempted to be clarified experimentally. The finite element simulation under similar condition of the experiments conducted was performed. Finally, the mechanism of improvement in impact energy absorption of TRIP steel was attempted to be clarified from the viewpoint of multi-scale in time.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：TRIP鋼 相変態 衝撃エネルギー 時間的階層性

1. 研究開始当初の背景

対象とする巨視的現象が高速になると、時間スケールが小さくなり、それに付随する物理現象との時間的階層性と相互作用によって、巨視的に現れる現象が大きく変化する可能性が秘めている。すなわち、高速負荷下では時間的階層性の存在が極めて重要となりうる。従って、時間的階層性の存在が考えられる場合、その時間的階層性を明らかにした上で、マルチスケールモデリングを行うことは非常に重要である。材料力学の分野ではこれまで、分子動力学法の解析結果をさらに上の時間スケール上で表現するためのマルチスケールモデリングの研究が、国内外とも数多く行われている。香港理工大の Sun 教授は最近、形状記憶合金を対象として様々な条件のもとで実験を行ない、応力 ひずみ曲線に現れるヒステリシスのひずみ速度依存性や熱伝導率および熱伝達率依存性を対象に、空間だけでなく時間の階層性の存在を検討し始めている。この研究は、現在まであまり注目されていなかった時間の階層性の研究に端緒をつけた重要なものである。

研究代表者の主たる研究対象である TRIP 鋼は、塑性ひずみを加えることによって発生するひずみ誘起マルテンサイト(α')変態(以下 SIMT)を伴って優れた機械的性質を持つ。TRIP 鋼が有する特性の一つに、衝撃エネルギー吸収(以下 IEA)特性がある。TRIP 鋼は、高速負荷中に発生する SIMT がそれ自身でエネルギーの消費を伴って発生するため、より多くの α' 相が生成することによって IEA 特性に優れると考えられている。これは、論理的には受け入れやすいが推察の域を出ない。一般に、 α' 変態は温度に強く依存する現象で、塑性変形に伴う不可逆仕事によって多くの熱が発生する場合、 α' 変態の発生確率は低くなる。つまり、TRIP 鋼は、高速負荷下において、SIMT を伴って優れた IEA 特性をもつが、塑性変形に伴って発生する熱の影響により、変態する α' 量は非常に小さいという、相反する現象が現れることになる。この矛盾を解決するため、TRIP 鋼の高速負荷下における相変態熱・力学的挙動を解明することは非常に重要であると言えるが、未だ本質的に理解されてないのが現状である。本質的にこのメカニズムを理解するために、TRIP 鋼において支配的な相変態熱・力学場の時間スケールを考える。それぞれに場において特徴的な量の時間変化を計測し、それぞれの線図の初期の傾きにより表せば、 α' 相や熱の生成速度は、変形の時間スケールに大きく依存するものと考えられるが、これらの大小関係等は、実験事実として高速負荷中の両者の測定が困難なことから明らかではない。従って、TRIP 鋼の IEA 特性が向上するメカニズムを解明するためには、実験的に高速変形挙動のみならず、相変態挙動及び温度上昇を正確にリアルタイムで測定し、この装置を応用して高速負荷下における IEA 特性を評価する必

要がある。以上より、本研究の代表者は TRIP 鋼の高速負荷下における α' 量と温度上昇を測定するために、分割式ホプキンソン棒法衝撃圧縮/引張試験装置を試作し、それを用いて TRIP 鋼の衝撃試験を行っている。同時に、 α' 量と直線性があると言われている体積抵抗率を直流電位差法や Wheatstone ブリッジを用いて測定する方法の開発と、極薄熱電対を用いた高速度温度測定を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究では、Sun 教授によって端緒をつけられた材料の力学特性の時間スケール依存性の考え方を TRIP 鋼に応用し、相変態熱・力学の概念に基づいて、それぞれの場を持つ時間スケールと階層性を実験と解析を併用することによって検討することにある。この結果を、IEA 特性の時間スケール依存性に適用し、IEA 特性に及ぼす SIMT の影響を明らかにする。さらに、本現象のマルチ時間スケールモデリングについての礎を得る。以上を通じて、TRIP 鋼の時間的階層性を明らかにし、IEA 特性が向上するメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

1) 相変態熱・力学場の高速、高精度同時計測法の開発

金属のような非常に低い抵抗を測定するための Kelvin ダブルブリッジに、ひずみゲージでの測定法で用いられているアクティブダミー法を応用した回路を開発し、測定結果の精度向上を目指す。開発した回路の妥当性を示すために、まず未変形の試験片の体積抵抗率を、市販の低抵抗計およびこれまでに作成した直流電位差法による回路と併せて測定する。さらに、作成した回路の動的応答特性を検討するため、単位ステップ信号を入力し、出力を検出し、ホプキンソン棒法衝撃試験において生じる応力波の速度程度の信号が検出できることを示す。また、あらゆる変形時の試験片から体積抵抗率測定と X 線回折法を用いて、体積抵抗率と α' 相体積分率との関係を得る。

温度場の測定に関しては、極薄熱電対を用いると、試験片への端子の固着性に優れるが、応答性に劣るため、直径 80 μm の極細熱電対を用いた測定に切り替える。これまで、抵抗率測定には試験片に流す必要があるため、別に温度測定を実施してきたが、改良を加え、体積抵抗率測定と同時に進めるようにする。

2) 単軸負荷下における相変態熱・力学現象の時間的階層性の検討

上で開発した装置を用い、現有的実験装置により、様々な負荷速度において、単軸負荷を作用させた場合の相変態熱・力学連成現象の時間的階層性を実験的に明らかにする。この際、変形させる時間スケールを入力とすれば、その時に発生する熱や相変態の時間スケールを出力として測定することが可能と

なる。これらを整理，検討することにより変形に要する時間スケールと熱および相変態における時間スケールの階層性が明らかになる。

3) TRIP 鋼の衝撃エネルギー吸収特性の時間的階層性の検討とメカニズムの解明

TRIP 鋼の衝撃エネルギー吸収特性を評価するため，衝撃負荷下における破壊靱性値を評価し，そのマルチ時間スケール性を明らかにする。さらに，TRIP 鋼の IEA 特性を評価するために，分割式ホプキンソン棒法に基づいた衝撃 3 点曲げ試験装置を新たに試作し，衝撃負荷下における IEA 特性を調査し，現有の材料試験機と併せて IEA の時間スケール依存性を検討する。また，TRIP 鋼が延性材料であることから，以下の対象となる破壊力学パラメータは J 積分である。試作した試験装置を用いて，後述する数値シミュレーションを援用して動的な J 積分値を測定する。

4) 数値シミュレーションによる実験事実の再現とメカニズムの解明

既に提案しているモデルを用いて，1 項の有限要素シミュレーションを行ない，実験事実と併せて時間的階層性による TRIP 鋼の IEA 特性向上のメカニズムを解明する。以前，衝撃平面ひずみ引張りにおける変形挙動や静的モード I 負荷下における停留き裂と直進き裂進展挙動に及ぼす α 相の影響を検討した結果である。このノウハウを適用すれば，衝撃負荷における停留き裂と直進き裂進展挙動が及ぼす α 相の影響を検討可能である。

4. 研究成果

金属のような非常に低い抵抗を測定するための Kelvin ダブルブリッジを応用した回路を開発し，測定結果の精度向上を試みた。開発した回路の妥当性を示すために，まず未変形の試験片の体積抵抗率を，市販の低抵抗計およびこれまでに作成した直流電位差法による回路と併せて測定した。さらに，作成した回路の動的応答特性を検討するため，ホプキンソン棒法衝撃試験において生じる応力波の速度程度の信号が検出できることを確認した。温度場の測定に関しては，極薄熱電対を用いると，試験片への端子の固着性に優れるが，応答性に劣るため，直径 80 μm の極細熱電対を用いた測定に切り替えて測定を行った。

上記結果を踏まえて，TRIP 鋼の衝撃エネルギー吸収特性を評価するため，衝撃負荷下における破壊靱性値を評価し，そのマルチ時間スケール性を実験的に明らかにすることを試みた。さらに，TRIP 鋼の IEA 特性を評価するために，分割式ホプキンソン棒法に基づいた衝撃 3 点曲げ試験装置を過去の文献に従って，新たに試作し，衝撃負荷下における IEA 特性を調査し，保有の材料試験機と併せて IEA の時間スケール依存性を検討した。また，TRIP 鋼が延性材料であることから，以下の対象となる破壊力学パラメータは J 積分であ

る。試作した試験装置を用いて，過去の文献等を援用して動的な J 積分の測定を試みた。

既に提案しているモデルを用い，先に実施した試験の有限要素シミュレーションを行い，実験事実と併せて時間的階層性による TRIP 鋼の IEA 特性向上のメカニズム解明を試みた。以前，衝撃平面ひずみ引張りにおける変形挙動や静的モード I 負荷下における停留き裂と直進き裂進展挙動に及ぼすマルテンサイト相の影響を検討した結果のノウハウを適用し，衝撃負荷における停留き裂が及ぼすマルテンサイト相の影響を検討可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

1) Daiki Inoshita and Takeshi Iwamoto, A study on rate sensitivity of impedance in TRIP steel during deformation at various strain rate under two kinds of deformation mode, Applied Mechanics and Materials, (2014), 掲載決定印刷中, 査読有

2) Hang Thi Pham, Leishi Shi and Takeshi Iwamoto, An evaluation of energy absorption under three-point bending deformation at higher deflection rate for TRIP steel, Key Engineering Materials, (2014), 掲載決定印刷中, 査読有

3) Yutaro Moriyama, Daiki Inoshita and Takeshi Iwamoto, An evaluation on strain dependency and strain rate sensitivity of martensitic transformation generated in TRIP steel by measurement of magnetic permeability, Key Engineering Materials, (2014), 掲載決定印刷中, 査読有

4) Takeshi Iwamoto, Shiro Yamanaka and Alexis Rusinek, Deformation mode dependency on strain rate sensitivity of volume resistivity in TRIP steel, Key Engineering Materials, Vol. 535-536, (2013), pp. 473-476, 査読有

5) Daiki Inoshita, Shiro Yamanaka and Takeshi Iwamoto, An experimental evaluation on change in impedance of TRIP steel subjected to plastic deformation at various strain rates, Key Engineering Materials, Vol. 535-536, (2013), pp. 445-448, 査読有

6) 岩本 剛, 橋本慎也, 川端敏之, 石 磊石, オーステナイト系ステンレス鋼におけるエネルギー吸収特性の速度依存性の J 積分による実験的評価, 鉄と鋼, 99 巻, (2013), pp. 322-328, 査読有

[学会発表](計 15 件)

1) 森山優太郎, 井下大輝, 岩本剛, 透磁率評価による TRIP 鋼に生成するマルテンサイ

ト変態のひずみおよびひずみ速度依存性評価, 日本機械学会中国四国学生会第 44 回学生員卒業研究発表講演会, 2014 年 3 月 6 日, 鳥取大学

2) 井下大輝, 岩本剛, 磁性評価によるマルテンサイト変態量の定量化および TRIP 鋼におけるひずみ速度依存性評価への応用, 第 57 回材料工学研究連合講演会, 2013 年 11 月 25 ~ 26 日, 京都テルサ

3) Leishi Shi, Takeshi Iwamoto and Hiroyuki Mizunuma, A study on rate sensitivity of bending deformation in TRIP steel by experimental and computational approaches, The 8th international symposium of impact engineering, 2013 年 9 月 2 ~ 6 日, 大阪大学会館

4) Daiki Inoshita and Takeshi Iwamoto, A study on rate sensitivity of impedance in TRIP steel during deformation at various strain rate under two kinds of deformation mode, The 8th international symposium of impact engineering, 2013 年 9 月 2 ~ 6 日, 大阪大学会館

5) 上口敬幸, 石磊石, 岩本剛, 3 点曲げ試験による TRIP 鋼の J 積分値のひずみ速度依存性評価, 日本機械学会中国四国学生会第 43 回学生員卒業研究発表講演会, 2013 年 3 月 7 日, 高知工科大学

6) 水沼宏幸, 石磊石, 岩本剛, 種々の変形速度における TRIP 鋼の曲げ変形挙動の有限要素シミュレーション, 日本機械学会中国四国学生会第 43 回学生員卒業研究発表講演会, 2013 年 3 月 7 日, 高知工科大学

7) Takeshi Iwamoto, Shin-ya Hashimoto and Leishi Shi, A study on rate sensitivity of elasto-plastic fracture toughness of TRIP steel evaluated by a small punch test, DYMAT 2012, 2012 年 9 月 3 ~ 7 日, Konzerthaus, Freiburg, Germany

8) 井下大輝, 山中志郎, 岩本剛, ひずみ速度に依存した TRIP 鋼のインピーダンス変化の実験的評価, 日本材料学会第 61 期学術講演会・総会, 2012 年 5 月 26 ~ 27 日, 岡山大学工学部

9) Leishi Shi, Shin-ya Hashimoto, Takeshi Iwamoto, A Study on Rate Sensitivity of Bending Deformation in TRIP Steel, 日本材料学会第 61 期学術講演会・総会, 2012 年 5 月 26 ~ 27 日, 岡山大学工学部

10) 川端敏之, 橋本慎也, 岩本剛, 沢俊行, TRIP 鋼における弾塑性破壊靱性値のひずみ速度依存性の実験的評価, 日本機械学会中国四国学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 2012 年 3 月 7 日, 広島大学

11) 井下大輝, 山中志郎, 岩本剛, 沢俊行, 塑性変形を受ける TRIP 鋼のインピーダンス変化の実験的評価, 日本機械学会中国四国学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 2012 年 3 月 7 日, 広島大学

12) 橋本慎也, 岩本剛, 沢俊行, 衝撃スモ

ールパンチ試験方法の確立及び TRIP 鋼のひずみ速度依存性の評価, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会, 2011 年 11 月 9 日, 岡山大学

13) 山中志郎, 岩本剛, 沢俊行, 塑性変形を受ける TRIP 鋼の体積抵抗率変化の実験的評価, 日本機械学会第 24 回計算力学講演会, 2011 年 11 月 9 日, 岡山大学

14) Shin-ya Hashimoto, Takeshi Iwamoto and Toshiyuki Sawa, A Study on Fracture Toughness and Its Rate Sensitivity of TRIP Steel Using Small Punch Test Method, International conference on advanced technology in experimental mechanics 2011 (ATEM2011), 2011 年 9 月 21 日, Kobe convention center

15) Shiro Yamanaka, Takeshi Iwamoto and Toshiyuki Sawa, An Experimental Evaluation on Change in Electrical Resistivity and Temperature of TRIP Steel during Plastic Deformation, International conference on advanced technology in experimental mechanics 2011 (ATEM2011), 2011 年 9 月 21 日, Kobe convention center

〔その他〕

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/iwamotot/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩本 剛 (Takeshi Iwamoto)

広島大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 4 0 2 7 4 1 1 2

(2) 研究分担者

()

研究者番号: