

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14608

研究課題名（和文）複合組織材におけるマクロ・ミクロ変形機構の解明

研究課題名（英文）Characterization of macro- and micro-deformation behavior in the materials with heterogeneous deformation

研究代表者

朴 明駿（Park, Myeong-heom）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：90803479

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、デジタル画像相関法を用いて複相材料の不均一変形を定量評価することで複相組織における高強度・高延性の発現原因を調査し、そのデジタル画像相関法の更なる応用による局所応力分布の直感的可視化を試みた。フェライト+マルテンサイトからなる二相鋼(Dual-phase鋼)においては硬質マルテンサイトの変形寄与が加工硬化能の向上に大きく影響していることを明らかにしており、変形中マルテンサイト変態を起こすTRIP(Transformation-induced plasticity)鋼においてはマルテンサイトの順次変態が局所応力の乱れと大きく関係していることが本研究より明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、デジタル画像相関法を用い負荷中・除荷後の弾性ひずみを測定することで直感的でかつ簡便に応力を可視化できる画期的手法を提案している。この成果は材料科学分野のみならず全科学分野において波及力は大きいと考えられる。一方、本提案は簡便な応力可視化手法でありながら、除荷時の残留応力を無視していることなど課題点も大いに残っている。こうした課題点に対して本手法は他の残留応力法を組み合わせることで改善すべく更なる工夫をしていく予定である。

研究成果の概要（英文）：The present study quantitatively characterized local deformation behavior using the digital image correlation (DIC) technique with ferrite + martensite dual-phase (DP) steels, and the investigation of local stress distribution was attempted by measuring elastic strain through the applied DIC technique. It was found that the greater contribution of martensite to plastic deformation led to a significant increase in its strain-hardening ability. Additionally, the present result also suggests that a subsequent transformation of martensite in the transformation-induced plasticity (TRIP) steels is closely related to the dynamic change in the local stress of martensite.

研究分野：材料工学

キーワード：不均一変形 局所変形 ひずみ解析 デジタル画像相関法 局所応力 弾性ひずみ 複相組織

1. 研究開始当初の背景

従来の構造用金属材料は、破壊の起点となりやすい不純物や第2相などをできるだけ排除し組織内を均一にするのが一般的であった。しかしながら、変形中にマルテンサイトが生成する変形誘起マルテンサイト鋼 (Transformation Induced Plasticity; TRIP) は、変形中に硬質なマルテンサイトが導入された結果、優れた強度-延性バランスを示すことが知られている。また、軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相からなる二相鋼(Dual-phase)DP 鋼は典型的な不均一複合組織の一つとして位置づけられており高い強度と優れた延性・成形性を有していることから多くの分野で使用されている。このことは、従来避けるべき組織の不均一性の導入によってむしろ機械的性質が大幅に向上を示している。しかしながら、組織の複相化が高強度・高延性とどう関係しているかについては十分に理解されていない。それを明らかにするには組織レベルでの局所ひずみ分布および局所応力分布を正確に計測する必要があると考えられる。そこで本研究では、複相組織における局所ひずみ・応力分布を調べる手法を考案しその妥当性を検討することを目的とした。

2. 研究の目的

機械的性質の異なる相が混在する複合組織材に対してマイクロ組織レベルでの不均一変形挙動(応力場・ひずみ場)を定量的に評価することにより、複合組織材が有する優れた力学特性の根本原因を解明することを目的とする。下記の2つの目的に分けて本研究を遂行した。

(1) : 典型的な不均一組織材である DP 鋼を用い、不均一変形の素過程を理解した上で、高強度・高延性・変形初期段階の高加工硬化率の原因を解明する。なお、これまで明らかにならなかったクラックの発生場所(フェライト/マルテンサイト界面か、マルテンサイト内部か)・進展過程を組織レベルでの局所応力・局所ひずみ集中と関連して議論を見直す。

(2) : 変形中順次にマルテンサイト変態を起こす TRIP 鋼における TRIP 効果の本質を明らかにする。まず、マルテンサイト変態起こすための臨界応力テンソル・ひずみテンソル・弾性ひずみエネルギーを実験で求めその妥当性を検討する。次に、変形初期・中期・破断直前に分けて変態臨界応力/ひずみを調べることで、変形とともに増大するマルテンサイト変態抑制の原因を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) : 複相組織における局所ひずみの定量評価

局所ひずみの測定は画像相関法より行い、不均一変形挙動を定量的に評価した。高解像度ひずみ分布マップ作成を達成するために試料表面に平均粒度 $0.04\mu\text{m}$ のコロイダルシリカをランダムに付着させ高精度ひずみ解析を行った。(図1)

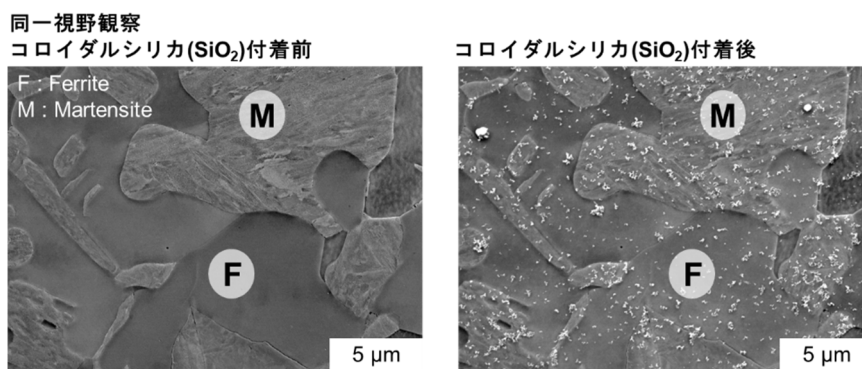


図1 高解像度-画像相関法のためのコロイダルシリカパターン付けの例

(2) : 局所応力の可視化

変形中・除荷後の組織変化を画像相関法より測定することで弾性ひずみ分布を取得し、フックの法則より弾性係数をかけることで応力分布マップを作図する。現段階での計算は等方体を仮定して行っており、表面の応力状態を測定するため平面応力状態と見なして計算を行った。

4. 研究成果

(1) フェライト+マルテンサイトからなる DP 鋼における局所ひずみおよび局所応力マップ

画像相関法より得られたフェライト+マルテンサイトからなる DP 鋼における局所ひずみおよび局所応力マップの測定結果を図2に示す。公称ひずみが2.7%の変形初期のひずみ・応力のマップとなっており、図中のFとMはそれぞれ軟質フェライトと硬質マルテンサイトを示している。

軟質フェライトに大きなひずみ集中が生じており、硬質マルテンサイトは変形にほとんど寄与していないことが見受けられた。また、局所応力分布マップから、フェライトとマルテンサイトの界面に大きな応力が集中している傾向が見受けられ、その応力集中は、フェライトとマルテンサイトの変形勾配が顕著に生じる場所で生じやすいことが分かった。

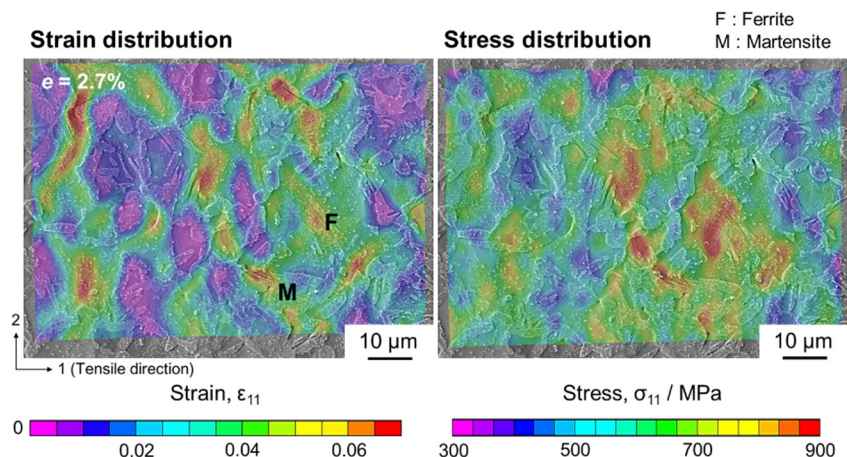


図2 フェライト+マルテンサイトからなる低炭素鋼 DP 鋼における局所ひずみ分布マップ(左)および局所応力分布マップ(右)

(2) TRIP 鋼における局所応力の評価

Fe-24Ni-0.3C TRIP 鋼における局所応力の評価例を図3に示す。図中の(a)と(b)は公称ひずみがそれぞれ 21.2%、23.2%の際の局所応力を示しており、応力分布マップに重ね合わせた赤と青はそれぞれの変形の際に観察されたマルテンサイトに対応している。21.2%の公称ひずみの変形においてはマルテンサイト(赤)周辺に顕著な応力の変化が見られなかったものの、23.3%の公称ひずみで新たなマルテンサイト(青)が導入され、局所応力の大きな乱れが見受けられた。興味深いことに、マルテンサイトで挟まれたオーステナイト粒ではバンド状の圧縮応力場が観察され、マルテンサイトの順次変態は局所応力の随時変化と大きく関係していることが示唆された。

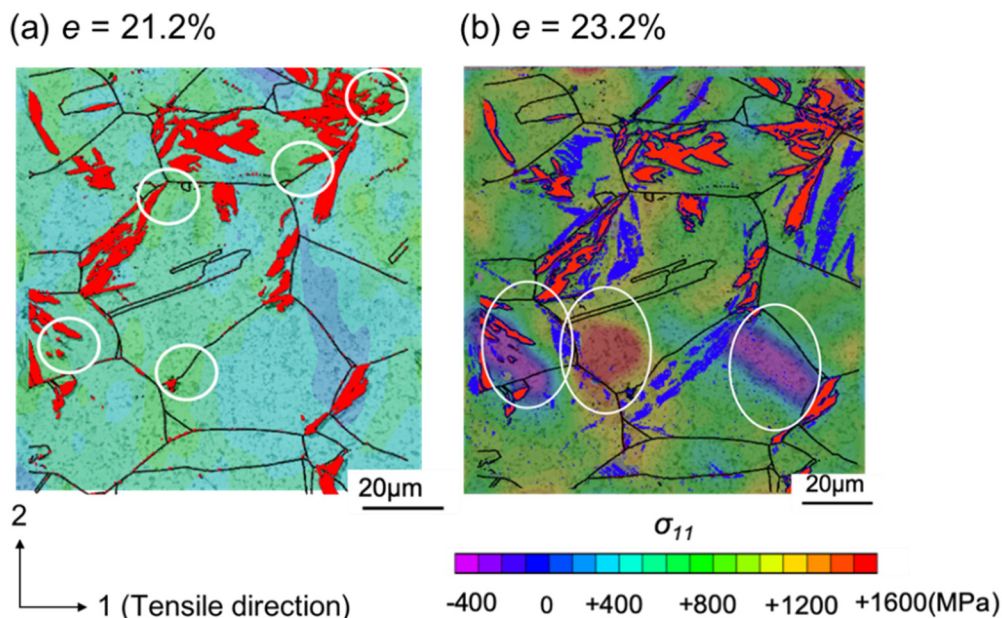


図3 Fe-24Ni-0.3C TRIP 鋼における局所応力の変化。応力マップ上の赤と青はそれぞれ 21.2%、23.3%の公称ひずみの際に変態したマルテンサイトに対応する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Wenqi Mao, Si Gao, Yu Bai, Myeong-heom Park, Akinobu Shibata, Nobuhiro Tsuji	4. 巻 17
2. 論文標題 Effective grain size refinement of an Fe-24Ni-0.3C metastable austenitic steel by a modified two-step cold rolling and annealing process utilizing the deformation-induced martensitic transformation and its reverse transformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research and Technology	6. 最初と最後の頁 2690-2700
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmrt.2022.02.031	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 該当する
1. 著者名 Myeong-heom Park, Yuichi Tagusari, Nobuhiro Tsuji	4. 巻 1247
2. 論文標題 Characterization of local deformation and fracture behavior in ferrite + martensite dual-phase steels having different grain sizes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 12041
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/1249/1/012041	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 該当する
1. 著者名 Seon-keun Oh, Myeong-heom Park, Young-kook Lee	4. 巻 24
2. 論文標題 Mechanisms of types B and C serrations in the tensile flow curve of C-bearing high Mn steel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research and Technology	6. 最初と最後の頁 3826-3838
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmrt.2023.04.040	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 該当する
1. 著者名 Avala Lavakumar, Myeong-heom Park, Sukyoung Hwang, Hiroki Adachi, Masugu Sato, Ranjit Kumar Ray, Mitsuhiro Murayama, Nobuhiro Tsuji	4. 巻 874
2. 論文標題 Role of surrounding phases on deformation-induced martensitic transformation of retained austenite in multi-phase TRIP steel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering A	6. 最初と最後の頁 145089
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.msea.2023.145089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yu Bai, Hiroki Kitamura, Si Gao, Yanzhong Tian, Nokeun Park, Myeonb-heom Park, Hiroki Adachi, Akinobu Shibata, Masugu Sato, Mitsuhiro Murayama, Nobuhiro Tsuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Unique transition of yielding mechanism and unexpected activation of deformation twinning in ultrafine grained Fe-31Mn-3Al-3Si alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 15870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-94800-6	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 該当する

1. 著者名 Sukyoung Hwang, Myeong-heom Park, Yu Bai, Akinobu Shibata, Wenqi Mao, Hiroki Adach, Masugu Sato, Nobuhiro Tsuji	4. 巻 205
2. 論文標題 Mesoscopic nature of serration behavior in high-Mn austenitic steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2020.116543	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 該当する

1. 著者名 Akinobu Shibata, Takashi Yonemura, Yuji Momotani, Myeong-heom Park, Shisaku Takagi, Yazid Madi, Jacques Besson, Nobuhiro Tsuji	4. 巻 210
2. 論文標題 Effects of local stress, strain, and hydrogen content on hydrogen-related fracture behavior in low-carbon martensitic steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116828	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Park Myeong-heom, Shibata Akinobu, Tsuji Nobuhiro	4. 巻 7
2. 論文標題 Challenging Ultra Grain Refinement of Ferrite in Low-C Steel Only by Heat Treatment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Materials	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmats.2020.604792	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 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 朴 明駿, 田鎖 悠, 辻 伸泰
2. 発表標題 粒径の異なるフェライト+マルテンサイト二相鋼における変形・破壊挙動の解明
3. 学会等名 第184回 日本鉄鋼協会 秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Myeong-heom Park, Yuto Fujimura, Nobuhiro Tsuji
2. 発表標題 Local deformation behavior of ferrite + martensite dual phase steels with different martensite hardness
3. 学会等名 7th International Conference on Advanced Steels (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Myeong-heom Park, Yuichi Tagusari, Nobuhiro Tsuji
2. 発表標題 Characterization of Local deformation and fracture behaviors in ferrite + martensite dual phase steels having different grain sizes
3. 学会等名 42nd Risoe International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Myeong-heom Park
2. 発表標題 Characterization of local deformation and fracture behaviors in dual- phase steels with different ferrite grain sizes
3. 学会等名 KIM-JIM Joint symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朴明駿、藤村雄斗、柴田暁伸、辻伸泰
2. 発表標題 強度比の異なるフェライト+マルテンサイト二相鋼の局所変形挙動
3. 学会等名 第181回 日本鉄鋼協会 春季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朴明駿
2. 発表標題 画像相関法を用いたミクロ変形不均一性の評価と力学特性との関係
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2021年度第7回「不均一変形組織と力学特性」研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朴明駿、袴田滋天、辻伸泰
2. 発表標題 TRIP鋼のセレーションに余もナウ巨視的・微視的不均一変形挙動の画像相関法による解析
3. 学会等名 第169回 日本金属学会 秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朴明駿
2. 発表標題 強度比の異なるフェライト+マルテンサイト二相鋼の局所変形挙動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 応力およびひずみ量分布表示方法、装置およびプログラム	発明者 朴明駿	権利者 JST
産業財産権の種類、番号 特許、7253284	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 STRESS AND STRAIN AMOUNT DISTRIBUTION DISPLAY METHOD, DEVICE, AND PROGRAM	発明者 朴明駿	権利者 JST
産業財産権の種類、番号 特許、10- 2578830	取得年 2023年	国内・外国の別 外国

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------