

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760575

研究課題名(和文) ナノインデンテーションとマルチスケール解析を用いた複相金属材料の変形機構解明

研究課題名(英文) Multi-scale analysis of deformation mechanism in multi-phase structure materials combined with nanoindentation method

研究代表者

林 泰輔 (HAYASHI, Taisuke)

島根大学・総合科学研究支援センター・教務職員

研究者番号：50580495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：高強度構造用材料は複相かつさまざまなスケールの構造からなる複雑な組織を有し、さらなる性能最適化のため組織と変形挙動の関連を明らかにする必要がある。知見が不足している異相境界部を含めてその変形挙動を解析するため、電子顕微鏡による組織観察をマルチスケールに行うとともにインデンテーションによる局所変形を導入して組織と変形挙動の関連を調査した。その結果、高強度を担う組織および境界組織の定量的解析手法を提案することが出来た。また、変形中に起きる組織変化を半定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Complex microstructures of high-strength structure materials such as dual phase steels have been investigated by multi-scale analysis to clarify the relationship between the microstructures and deformation behaviors for further development and optimization of such materials. We have examined the complex microstructures by extensive use of electron microscopy, and then deformation behaviors and deformed microstructures have been investigated by indentation combined with observations for the non-deformed and deformed microstructures. We have proposed an analysis method to quantitatively characterize martensite/ferrite structures, and have semi-quantitatively evaluated the microstructure change triggered by indentations.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造・機能材料

キーワード：ラスマルテンサイト 複相鋼 塑性変形

1. 研究開始当初の背景

エネルギー消費節減と二酸化炭素排出抑制のため、自動車などの移動体筐体の材料として高比強度の構造材料が必要とされている。繊維強化プラスチックなどの性能向上が目覚ましいとはいえ、地上を走る移動体筐体においては価格、強度、耐疲労破壊、加工性などを考慮すると依然として金属材料が有力な候補である。近年注目されている合金系は優れた力学特性を発現させるために複相かつ様々なスケールの構造からなる複雑な組織を有する。複相合金の中でもコスト面や加工性で有利な複相鋼の場合、強度を受け持つマルテンサイトやベイナイトなどの高強度組織と、延性を担うフェライトなどの高延性組織の複合組織を加工熱処理により作り込む方法が一般的であり、最終的に得られる組織は複雑かつ多様性に富むため解析は容易でない。さらに、異相境界近傍における塑性変形挙動が巨視的な塑性変形や破壊挙動に大きな影響を及ぼすことが指摘されているが、境界部組織を含む詳細な解析結果はほとんど報告されていない。こうした解析の困難さと組織の複雑さを背景に、力学特性の予測に用いられる計算機実験による解析も変形伝達の素過程を考慮しない連続体としての取扱いにとどまっていた。近年、計算機の演算能力の向上や計算手法の改良により、組織や結晶方位といった微視的な要素を取り入れた力学特性予測が可能となりつつあるが、実験的データやデータを得るための手法確立が十分ではなく、早急に組織解析法と実験データの蓄積が必要とされている。そして、複相構造用材料の飛躍的な性能向上を達成するためには、単純に巨視的塑性変形挙動に応じて相比率や相分布形態を調整するだけでは不十分であり、転位のような変形の素過程から巨視的塑性変形挙動まで、異相境界近傍も含めて各スケールにおける変形挙動を理解する必要がある。

2. 研究の目的

複雑な複相合金組織をマルチスケールかつ異相境界部における変形挙動を含めて解析するため、電子顕微鏡による組織観察とインデンテーション試験による局所変形の導入を組合せることで定量的な組織解析と変形挙動解析を行い、巨視的変形挙動を微視的組織と関連付けながら解明し、材料組織最適化への新たな基礎を気づくことを目的とした。また、組織の解析と定量化のために新たな解析法を含めて手法として確立することも併せて目的とした。

3. 研究の方法

研究初期段階ではまず高強度組織としてよく用いられるラスマルテンサイトに着目し、ラスマルテンサイト単相鋼を用いて組織解析を行った上で、インデンテーションによる局所変形前後における組織解析も行った。

これらの結果を応用することでより複雑な複相組織解析を行うための基礎を築いた。マルテンサイト単相鋼としては3.1Mn 極低炭素鋼を1200 にて10分間保持後水焼入れしたものを用い、変形特性の解析には引張試験、ビッカース試験機による局所変形導入、およびナノインデンテーション試験を用いた。次にフェライト/マルテンサイト二相鋼を用いて境界部組織を含めた組織解析法を検討するとともに、マルテンサイト単相鋼と同様の変形試験を用いて変形挙動の解析を行った。いずれの場合も、組織解析に際しては走査型電子顕微鏡 (SEM) および電子線後方散乱回折 (EBSD) と透過型電子顕微鏡 (TEM) をスケールに合わせて用い、顕微鏡を用いて得られたデータの解析には市販の解析ソフトのほかに独自に作成した解析プログラムを用いた。インデンテーションによる塑性歪の定量に際しては非線形有限要素法を用いたシミュレーション結果を併用した。

4. 研究成果

図1にマルテンサイト鋼においてみられる特徴的な階層型組織の模式図を示す。高温においてオーステナイト単相の状態から急冷することで生成されるラスマルテンサイトは、大きな組織単位から順に旧オーステナイト粒、マルテンサイト変態における晶癖面がほぼ同一となるパケット、ほぼ同じ結晶方位を有し板に近い形状と言われているブロック、そしてブロック内の微細な板状結晶であるラスに分類できる。これらの組織単位の内、ブロックは通常が多結晶組織における結晶粒に近い働きをされると考えられており、またラスなどに見られる晶癖面はすべり系の活動を制限すると考えられている。このため、各組織単位について慎重に検討する必要がある。

極低炭素鋼ラスマルテンサイトを用いて組織観察を行うと、図2に示すような細長い結晶粒がおよそ1-3度程度の比較的低角の粒界で区切られたラスマルテンサイトのブロック内組織が観察される。極低炭素鋼におい

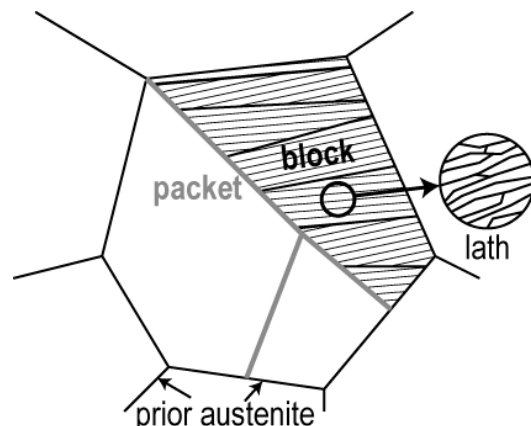


図1.ラスマルテンサイトの階層型組織の模式図。図中では簡潔にするため1つのパケットのみ内部構造を描いている。

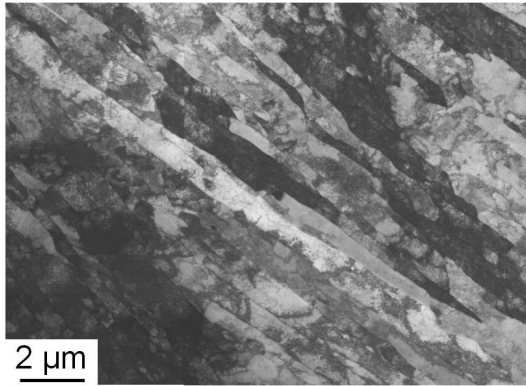


図2 極低炭素鋼ラスマルテンサイトのブロック内における TEM 明視野像。

ては圧延などで塑性歪を導入すると歪の量に応じて一旦ラス境界の一部が消失し、その後はフェライト圧延組織などで見られるラメラ状組織へ変化していくことが報告されている。ラス境界がすべり系の活動を直接制限している可能性があることから、インデンターを用いて局所変形を導入し、ラス境界に注目して変形前後の組織変化を解析した。

図3に変形導入前後における組織変化をラス境界にほぼ垂直な方向の方位差をプロットすることにより示す。図3(b)-(c)から、変形前はラス内部に微細な方位差がみられていた領域において変形後は方位差がほぼ見られなくなっている。一方で、方位差がむしろ大きくなっている領域もあり、歪の量や方向によって複雑に変化していることが示唆される。そこで歪を定量するために有限要素法を用いた変形のシミュレーションを行い、さらにマイクロサンプリングによる TEM 観察を組合せてラス境界の変化を微視的視点から解明することを試みた。その結果、転位壁として考えることが出来るラス境界上には

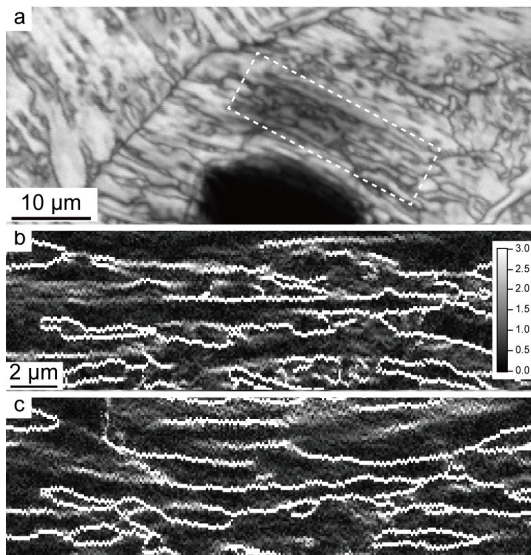


図3 . (a) EBSD image quality マップ，(b)-(c) (a)の破線で示す領域付近における変形前後のラス界面変化を一方向方位差マップで示したもの。方位差は(b)-(c)における紙面上下方向に対して計算した。

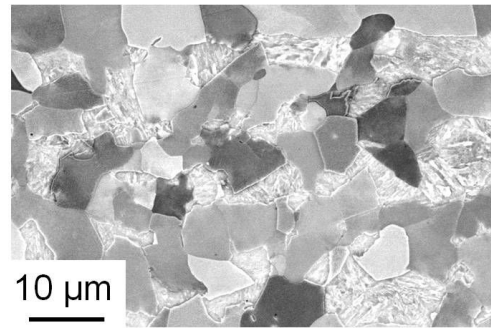


図4 . フェライト/マルテンサイト複相鋼の反射電子像。細かなコントラストがある部分がマルテンサイト。

変形後も転位が高密度に存在することが確認された。今後は歪量や方向と転位の関係についてより詳細な検討を行うことを計画している。

単相マルテンサイト鋼を用いて組織観察およびインデンテーションを用いた変形組織観察の方法について検討を行った後、目的である複相鋼を用いて組織観察と解析、そして変形機構解明に向けた変形試験と組織観察を行った。図4に本研究で用いたフェライト/マルテンサイト複相鋼の一例を示す。この複相鋼は Fe-0.100C-0.49Si-1.99Mn (mass%)の組成を有し、その組織は 10 μm 程度の微細なマルテンサイト領域と、残りのおよそ 7 割を占めるフェライト領域からなる。この複相組織はオーステナイト単相の状態で熱延されたのち、徐冷中にフェライトが成長し、続く水焼入れで残りの領域がマルテンサイトへ変態することで形成される。従って、隣接するフェライトとマルテンサイト領域は同一の旧オーステナイト粒から生成することが多い。マルテンサイトは Kurdjumov-Sachs (KS) のようなオーステナイトとの方位関係を必ず有し、フェライトも高い頻度でオーステナイトと KS の関係もしくはそれに近い方位関係を有するため、隣接するフェライトとマルテンサイトの間にも方位関係が成り立っている場合が多い。また、KS などの方位関係を有するときはすべり系の粒界における回転が少なく済むため塑性歪の抵抗が少なくなると考えられる。フェライトとマルテンサイトの間にはどのような方位関係があるかを調べるため、まず旧オーステナイトの方位をマルテンサイト領域に現れている各バリエーションの方位から推定し、その結果を基に KS に近い方位関係に従っている隣接フェライト粒の割合を調べた。オーステナイト推定の過程は EBSD データを基にコンピュータ上で自動的に処理を行うプログラムを作成して行った。

図5に示すように KS の関係に近い方位関係を仮定することで旧オーステナイト方位の推定が可能であり、推定したオーステナイトの方位から、マルテンサイトの領域を正確にバリエーションごとに整理することが出来る。パケットで整理すると、定義上 4 種類あるパ

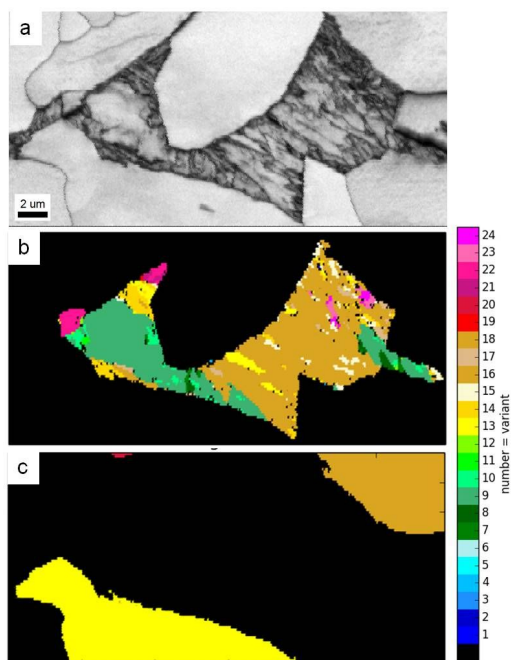


図5．複相鋼における，(a) EBSD image quality マップ，(b) 領域抽出と旧オーステナイト方位の推定を行い，KS 方位関係のバリエーションごとに色分けしたマップ，(c) 隣接するフェライトの中で KS の関係を持つ粒を色分けしたマップ．

ケットの内1種のポケットがその領域（同一の旧オーステナイトから生成した領域）の大部分を占める例が半数近く観察された．従って，マルテンサイト領域は平均的に見ると晶癖面の方向，つまりすべり系が制限を受ける方向が偏っている場合が多い．また，付近のフェライトが KS の関係に従う割合を調べると，全フェライト粒のおよそ4分の1が KS の関係に近い方位を有することが明らかになった．このことから，フェライトとマルテンサイトの变形伝達を考える際にはフェライト/マルテンサイト間の方位関係やマルテンサイト領域の組織サイズ（ポケットやブロック）を考慮しないと十分な議論が出来ないと考えられる．

複相鋼においてもインデント前後の組織観察を行い，变形伝達がどのように行われるのかを調査した．マルテンサイト領域にインデントを行うと，ある程度の歪量までは周りのフェライトへ歪を伝達し，マルテンサイト領域自体は相対的な塑性变形量が小さいが，歪量が増えるに従い明瞭に塑性变形する．そして，マルテンサイト領域に隣接するフェライトにおける局所歪を EBSD データから見積もることにより，マルテンサイト領域の变形が晶癖面に制限されることを間接的に確認できた．さらに，EBSD の方位差マップを用いた定性的な確認をしたのち，TEM によるセル組織観察と EBSD データから計算できるセル間の方位差を組合せることにより变形前後の転位組織を定量的に評価することを検討している．

本研究では，マルテンサイトなどの複雑な

組織を含む複相組織の解析を行い，その手法やデータを基に異相境界部における变形伝達挙動を微視的観点から明らかにするための基礎を築いた．その上で異相境界部の变形伝達挙動を解析し，フェライトとマルテンサイトのような降伏応力が大きく異なる状況における半定量的な解析が行えることを示した．またその際に用いた解析手法は，一般に応用できるように改良を加えることにより，より実践的な手法として発展させる．今後は定量的な解析を簡便に行えるように解析法を整理するとともに，実際の材料設計に使えるようなパラメータの抽出を行い，構造物の性能向上へと繋げていくことを計画している．

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 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

林泰輔，森戸茂一，大庭卓也，”複相鋼におけるマルテンサイト組織およびフェライト/マルテンサイト界面組織”，第167回日本鉄鋼協会春季講演大会，2014年3月21日，東京工業大学（目黒区）．

林泰輔，森戸茂一，大庭卓也，”複相鋼におけるマルテンサイト組織と局所变形挙動”，第166回日本鉄鋼協会秋季講演大会，2013年9月17日，金沢大学（金沢市）．

林泰輔，森戸茂一，大庭卓也，”インデントを用いたラスマルテンサイト境界部における变形挙動の解析”，第165回日本鉄鋼協会春季講演大会，2013年3月29日，東京電機大学（足立区）．

林泰輔，宮良陽一，森戸茂一，大庭卓也，”極低炭素鋼ラスマルテンサイトの引張变形による微細組織変化”，第164回日本鉄鋼協会秋季講演大会，2012年9月17日，愛媛大学（松山市）．

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

該当なし

6．研究組織

(1)研究代表者

林 泰輔 (HAYASHI Taisuke)

島根大学・総合科学研究支援センター・教務職員

研究者番号：50580495