

鉄鋼材料におけるマルテンサイト・ ベイナイト変態の結晶学

宮本 吾郎*

1. はじめに

凝固や凝集反応と異なり，結晶固体中での相変態挙動は母相と生成相の結晶学的な制限を強く受ける．鉄鋼材料においては，高温で安定なオーステナイト(γ : fcc)を冷却する過程で生成するフェライト(α : bcc)を主構成相とする種々の相変態組織を作り込み，多様な特性を持つ材料を得ている．従って，fcc \rightarrow bcc変態における結晶学は鉄鋼材料の組織形成過程を理解する上で欠かせない情報となる．しかし実用鋼の多くは母相 γ が室温で安定に存在しないことから，その相変態における結晶学の理解は進んでいない．ここ10年ほどの間に走査型電子顕微鏡(SEM)に電子線後方散乱回折(EBSD)検出器を備えた装置が広く普及して，広範囲の結晶方位を比較的手軽に測定することが可能となり，様々な材料の相変態組織の解析へ適用されている⁽¹⁾．本稿では，結晶学的な影響を強く受ける鉄鋼材料のマルテンサイトおよびベイナイト変態を対象を絞り，著者がこれまでSEM/EBSD測定を利用して行ってきた研究事例を紹介する．

2. 鉄鋼材料におけるラスマルテンサイトおよびベイナイト組織

γ を急冷すると無拡散せん断型変態であるマルテンサイト変態が起こり，低炭素低合金鋼ではラス形状のマルテンサイトが生成する．一方，鋼をフェライト・パーライト変態温度域とマルテンサイト変態温度の中間温度域で変態させると，ベイナイト組織が生成する．ベイナイト組織は，ラス状のベ

イニティックフェライトと炭化物が混在した組織である．その生成機構については，拡散型変態とする考え方⁽²⁾と，せん断型変態とする考え方⁽³⁾があり，長く論争が続いていたが未だ決着はついていない．しかし，ベイナイト/ γ 間の方位関係や晶癖面，ベイナイト/ γ 界面構造といった結晶学的な特徴はラスマルテンサイトのものと同様であることが明らかにされている⁽⁴⁾． γ とマルテンサイトおよびベイナイト間の格子対応は，ベイン対応($[100]_{\gamma} // [110]_{\text{M}}$, $[010]_{\gamma} // [\bar{1}10]_{\text{M}}$, $[001]_{\gamma} // [001]_{\text{M}}$)によると考えられている．ベイン対応に剛体回転が加わり，マルテンサイトやベイナイトは母相 γ に対して最終的に最密面が平行かつ最密方向が平行であるKurdjumov-Sachs (K-S)の関係($(111)_{\gamma} // (011)_{\text{M}}$, $[\bar{1}01]_{\gamma} // [\bar{1}\bar{1}1]_{\text{M}}$)や，K-S関係から最密方向関係が 5.3° ずれたNishiyama-Wasserman (N-W)関係($(111)_{\gamma} // (011)_{\text{M}}$, $[\bar{1}\bar{1}0]_{\gamma} // [100]_{\text{M}}$)に近い方位関係を持つようになる．これらの方位関係の相関を図1(a)に示す．K-S関係およびN-W関係はBain対応からのずれが比較的小さなため，これらの方位関係を持って生成する結晶粒方位は3種類のBain対応を中心として分布することになる．K-S関係には全部で24通りの等価なバリエーションが存在するため，ひとつの γ 粒から生成したマルテンサイト・ベイナイト組織中には，種々のバリエーション境界が形成されることになる．これらの境界の性格およびその密度がマルテンサイトやベイナイトの強度や靱性といった機械的特性を支配する因子の一つとなる．個々のラスは通常幅 $1\ \mu\text{m}$ 以下の微結晶であるが，マルテンサイト・ベイナイト変態では24種類のバリエーションがランダムに生成するのではなく，隣接するバリエーション間には特定の相関が存在するため，バリエーション境界の性格やその密度はバリエーション

* 東北大学助教；金属材料研究所(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

Crystallography of Martensitic and Bainitic Transformation in Steels; Goro Miyamoto (Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai)

Keywords: steel, martensitic transformation, bainitic transformation, orientation relationship, scanning electron microscopy/electron backscattering diffraction (SEM/EBSD)

2010年3月1日受理

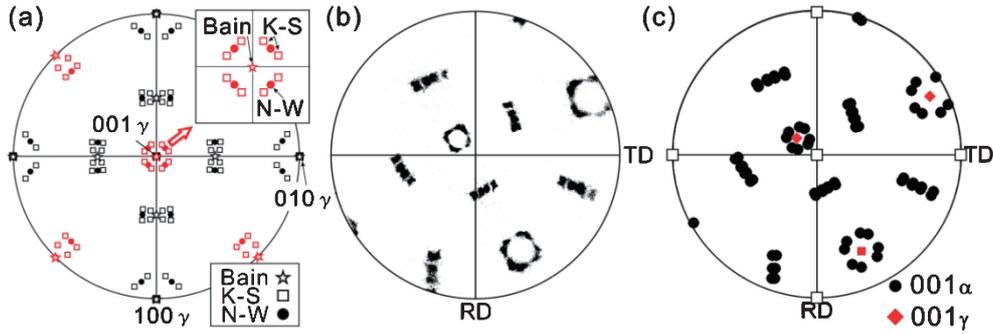


図1 (a) γ に対して種々の方位関係を持って生成するフェライトの<001>をプロットした 001_γ 標準ステレオ投影図, (b) ひとつの γ 粒から生成したラスマルテンサイト組織の<001> $_\alpha$ 極点図, (c) (b)のフィッティング結果. (a)ではひとつのバイン対応とそこから派生した K-S 関係および N-W 関係のバリエーションを赤で示している.

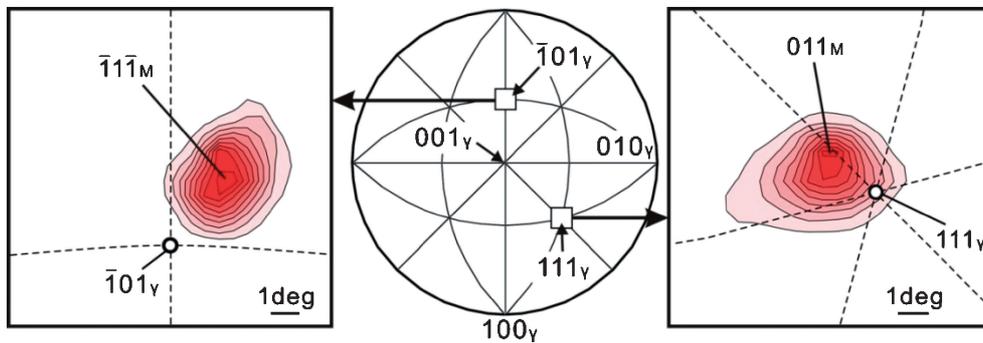


図2 ラスマルテンサイト/ γ 間の方位関係 (Fe-0.15C-1.5Mn-0.2Si 合金).

の隣接傾向やマルテンサイト・ベイナイト/ γ 間の方位関係に強く影響される。

3. ラスマルテンサイト・ベイナイト/オーステナイト間の方位関係

相変態の結晶学における最も基本的な情報は両相の結晶構造及び方位関係である。マルテンサイトの結晶構造は侵入型元素を添加すると bcc 構造から bct 構造へと変化することが知られているが、その正方晶性は低炭素鋼では小さく SEM/EBSD 測定では通常検出できないため、ここではそれらを区別せず話を進める。

マルテンサイト/ γ 間の方位関係については、多量の γ が室温でも残留する高合金鋼において生成するレンズマルテンサイトや薄板状マルテンサイトに関して古くから X 線を用いた精密な測定が行われている⁽⁵⁾。一方で、実用上重要な低炭素低合金鋼でのラスマルテンサイトおよびベイナイト/ γ 間の方位関係については、ラス間に残留したフィルム状 γ を利用した報告例がわずかにあるのみである⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これに対して、著者らは最近 SEM/EBSD 測定を利用して、マルテンサイト/ γ 、ベイナイト/ γ 間の方位関係を求める手法を開発している⁽⁸⁾。一つの γ 粒から生成したマルテンサイトおよびベイナイトは図 1 (b) の <001> $_\alpha$ 極点図に示すような変態集合組織を有する。この集合組織は、母相 γ 方位と結晶方位関係

に関する情報を含むため、数値計算を用いたフィッティングにより、それぞれを 1 度以内の精度で決定することができる (図 1 (c))。この方法は残留 γ の方位を測定する必要がないため、 γ が残留しない低炭素低合金鋼でのマルテンサイトやベイナイト/ γ 間の方位関係の解析が可能である。手法の詳細は原論文を参照されたい⁽⁸⁾。

低炭素マルテンサイト/ γ 間の方位関係を解析した一例を図 2 に示す。図 2 は 001_γ 標準ステレオ投影図上に $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]_M$ および $[011]_M$ 方位をプロットしたものであり、等高線は測定データの分布を示している。これを見ると、マルテンサイトおよび γ の最密方向 ($[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]_M$, $[\bar{1}01]_\gamma$) および最密面 ($(011)_M$, $(111)_\gamma$) は共に平行関係になく、数度の方位差を持つことが明らかである。更に、マルテンサイト/ γ 間の方位関係は一定ではなく、数度のばらつきを持って分布していることが分かる。このような高精度の方位関係測定を種々のマルテンサイトおよびベイナイト組織について行った結果、いずれの組織においても最密方向および最密面は平行関係になく、さらに最密面間の方位差は変態温度によって変化することが初めて明らかになった⁽⁸⁾。

後述するように、ラスマルテンサイト生成に伴う変態歪を緩和するため周囲 γ は塑性変形する⁽⁹⁾。変態温度が高くなるほど γ の強度が低下してより塑性緩和が起こりやすくなることを考えると、変態温度が高くなるほどマルテンサイト・ベイナイト周囲の γ の方位回転量が大きくなるため、方位関係

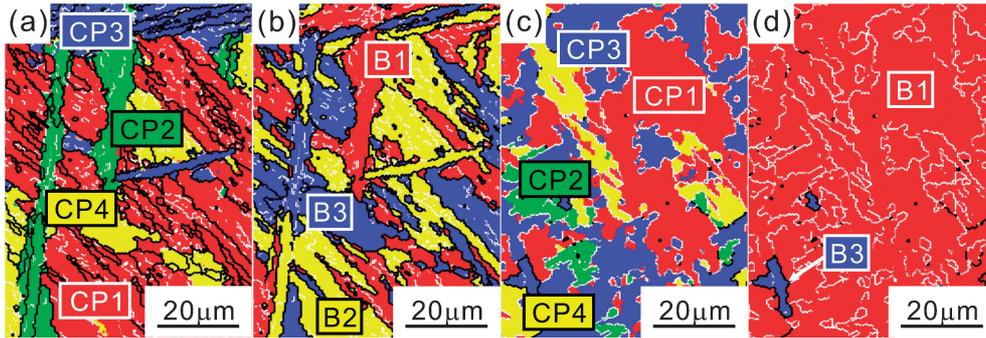


図3 ラスマルテンサイト組織の(a) CP マップ, (b) ベインマップ, バイナイト組織(823 K 変態材)の(c) CP マップ, (d) ベインマップ(Fe-0.15C-1.5Mn-0.2Si 合金). 図中黒線, 白線はそれぞれ大角粒界($\Delta\theta > 15^\circ$)および小角粒界($5^\circ < \Delta\theta < 15^\circ$)を表す.

に変態温度依存性が現れるものと考えられる.

4. マルテンサイト・ベイナイト組織におけるバリエーションの隣接傾向

光学顕微鏡や SEM 観察に基づくマルテンサイト組織の分類により, 旧 γ 粒はほぼ平行な晶癖面を共有するラスの集団であるパッケージに分割され, 更にパッケージはほぼ同じ結晶方位を有するラスの集団であるブロックに分割されることが知られている⁽¹⁰⁾. 一般的にベイナイト組織も同様の下部組織から構成される. 通常パッケージ境界やブロック境界は大角粒界であるため強度や靱性といった機械的特性に強く影響すると考えられ, その微細化が追求されてきた. これに対して最近 SEM/EBSD 測定による方位解析で, 異なる下部組織を有するベイナイト組織が観察されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾.

図3(a)に低炭素マルテンサイト組織の α 方位マップにおいて, マルテンサイト/ γ 間の最密面平行(Close-packed Plane parallel)関係を共有する領域ごとに色分けした CP マップを示す. また, 図中の黒線, 白線はそれぞれ大角および小角粒界を表している. これを見ると各 CP 領域の中に大角粒界が多数存在することから, マルテンサイト組織では最密面平行関係を共有する複数のバリエーションが集団で生成していることが分かる. ラスマルテンサイトの晶癖面は平行関係にある最密面($(011)_M // \sim (111)_\gamma$)に近いことから, 各 CP 領域はパッケージと対応している. 図3(b)に同一視野においてベイン対応を共有する領域ごとに色分けしたベインマップを示す. これを見ると, 各ベイン領域は大角粒界をほとんど含まないことから分かるように, 結晶方位の近いラスによって構成されており, ブロックに相当する. 一方, 823 K 保持で生成した低炭素ベイナイト組織を見ると CP 領域内には大角粒界は含まれず(図3(c)), 同一ベイングループに属するバリエーションが集団で生成している(図3(d)). より低温の 723 K で生成したベイナイト組織では, マルテンサイト組織と同様に CP グループに属するバリエーションが隣接して生成することから, 同じベイングループに属するバリエーションが集団で生成する傾向は, 高温で変態させたベイナイト組織の特徴であろうと考えられる. 823 K 変態材のように同一ベイングループ

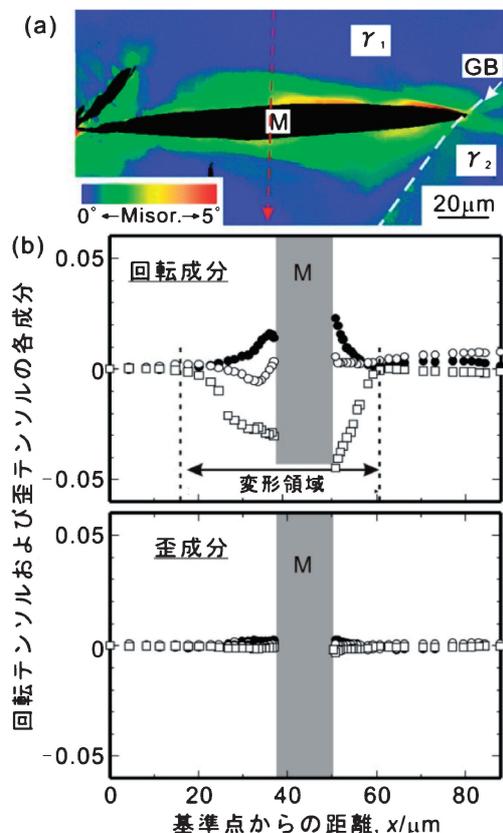


図4 Fe-33Ni 合金において生成したレンズマルテンサイト周囲 γ の変形, (a) γ 中の方位差マップ, (b) γ 中の回転および歪テンソル成分のプロファイル.

に属するバリエーションが集団で生成すると, ベイン領域が CP 領域よりも大きくなるため, 従来のパッケージやブロックという概念が成り立たない. そこで, 筆者らは従来のパッケージやブロックという分類の代わりに, 先に述べたように結晶方位測定を基にしたバリエーションの集団として分類される CP グループおよびベイングループという新たな定義を提唱している. この定義を用いることで, 様々な条件下で生成したマルテンサイトおよびベイナイト組織の特徴を統一的に記述できるのではないかと考えている.

マルテンサイトおよび比較的変態温度の低いベイナイト組織において最密面平行関係を共有するバリエントが隣接して生成する理由としては、マルテンサイト・ベイナイト生成に伴い導入される周囲母相 γ の弾性エネルギーをなるべく低下させるようなバリエントが集団で生成する自己緩和機構が働くためであると考えられている。一方、変態温度が高い場合には、母相の塑性変形が容易であり変態歪を塑性緩和することができるため、自己緩和機構に有利なバリエントが隣接して生成する必要性が薄れる。一方で、同一ベイングループに属するバリエント間の方位差は小さく、大部分の組み合わせが小角粒界となるのに対して、異なるベイングループに属するバリエント間の方位差はいずれも 45° 以上と非常に大きい。従って、変態温度が高くベイナイト変態の駆動力が小さい場合には、ベイナイト変態によって形成される粒界のエネルギーを低下させるため、方位差の小さな組み合わせとなるように同一ベイングループに属するバリエントが隣接して生成するものと考えられる。塑性緩和によってある特定の種類の格子欠陥が γ 中に導入されて、その後生成するバリエントが制限される可能性も指摘されている⁽¹³⁾。

5. マルテンサイト周囲 γ 中での変態歪の緩和状態

上述したようにマルテンサイト・ベイナイト/ γ 間の方位関係においても、バリエントの隣接傾向においても、マルテンサイトおよびベイナイト変態に伴う周囲母相 γ の変形挙動が組織形成を支配する非常に重要な因子となる。これまでにマルテンサイト変態に伴う周囲母相の変形については、原子間力顕微鏡による表面起伏測定⁽¹⁴⁾や、TEMを用いたマルテンサイト周囲 γ 中の転位組織の観察⁽¹⁵⁾により調べられてきたが、ここでもSEM/EBSD測定は強力な解析手法となる⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾。図4(a)にFe-33Ni合金において生成したレンズマルテンサイト周囲 γ 中の方位差マップを示す。この図ではマルテンサイトを黒で、マルテンサイトから離れた基準点からの γ 中の方位差を色のグラデーションによって表している。この図に示すように、レンズマルテンサイト周囲 γ 中には大きな方位変化があり、レンズマルテンサイト生成に伴う変態歪を緩和するために γ が塑性変形して方位回転が生じている。この塑性緩和領域はレンズマルテンサイトの両側にマルテンサイトに対して対称に分布しており、マルテンサイト現象論から予測される形状変化方向に沿って発達していることが明らかになっている⁽⁹⁾。

上記のような結晶方位に基づく塑性変形の議論に対して、変形前後のEBSD像の微小変化を画像処理により検出し、局所領域の弾塑性歪を測定できる手法が最近Wilkinsonら⁽¹⁶⁾によって開発されている。この手法では、基準点と測定点から撮影したEBSD像から同一箇所を切り出し(図5(a), (b))、画像解析による相関像(図5(c))を計算する。相関像中の最輝点の座標が2つの画像のずれ量とずれ方向(ずれベクトル)を表すため、最輝点の座標を精密に測定することで2つの画像のずれベクトルを得ることができる。この

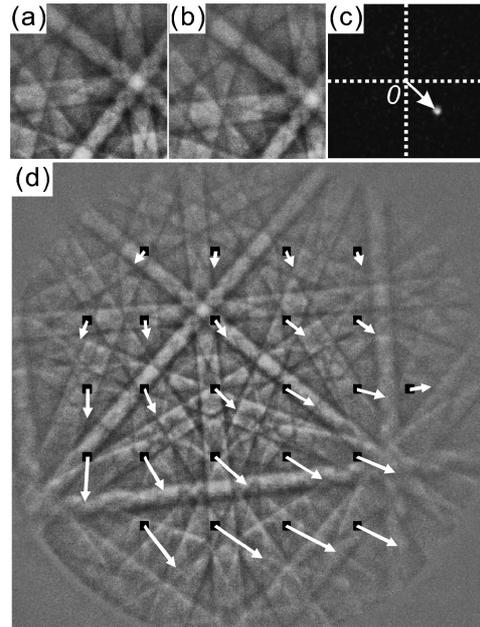


図5 EBSD像の微小ずれ検出手順, (a) 基準領域から得られたEBSD像の一部拡大図, (b) 測定領域から得られたEBSD像の一部拡大図, (c) (a)と(b)から計算した位相限定相関像, (d) EBSD像全体での微小ずれ(変化量は20倍にして表してある)。

ずれベクトルをEBSD像の複数の場所で求めることで、図5(d)に示すようにEBSD像が全体としてどのように変化するかを知ることができる。EBSD像の変化は結晶の変形と直接関係することから、EBSD像の微小変化量より基準点に対する測定点の結晶の変形を変位勾配テンソルとして得ることができる。

本研究では、Wilkinsonら⁽¹⁶⁾の手法を参考にして、彼らの用いている相互相関法ではなく、より感度の高い位相限定相関法⁽¹⁷⁾を用いて独自のプログラムを作成した。また、同一 γ 粒内でマルテンサイトから十分離れた点の変形は小さいと考えて基準点とし、マルテンサイト周囲 γ の変形を測定した。図4(a)に示したレンズマルテンサイトに対して垂直な線に沿って測定した変位勾配テンソルの回転および歪成分プロファイルを図4(b)に示す⁽⁹⁾。ここで、歪成分は弾性変形に由来し、回転成分は弾性・塑性変形両方に由来するが、一般的に塑性変形による歪量は弾性変形による歪量よりも桁違いに大きなことから、塑性変形した材料では回転成分が歪成分よりも大きくなると予想される。図4(b)に示すようにレンズマルテンサイト周囲では歪成分よりも回転成分の変化が著しく大きなことから、レンズマルテンサイト生成に伴う変態歪の多くは γ の塑性変形によって緩和されていることが分かる。変形領域はレンズマルテンサイトの両側に存在するが、マルテンサイト厚さの数倍程度の狭い領域に集中している。更に、回転テンソルの3つの成分の比率は回転軸の方位に対応していることから、得られた回転成分より γ 中の方位回転の回転軸方位を議論することもでき、マルテンサイト

