

# パーライト組織の結晶学的特徴と弾性歪

中田伸生\*

## 1. はじめに

鉄鋼材料では、高温で安定に存在するオーステナイト (fcc) を冷却することでフェライト (bcc) を主構成相とする複数の変態生成物が得られ、これらは第2相となるセメンタイトの分散状態や変態様式の違いによって、フェライト、パーライト、ベイナイト、マルテンサイト組織と分類される。そして、合金設計や加工熱処理によって各組織を巧みにコントロールする組織制御技術が鉄鋼材料の多彩な特性を引き出すための根幹技術となっていることから、各組織の特徴を理解するために非常に多くの研究がこれまでになされてきた。このうち、フェライト組織は鉄鋼の基本組織であることから、古くから多くの研究がなされており、ベイナイト、マルテンサイト組織についても高強度鋼の基地組織となるため近年盛んに研究がなされている。これに比べて、パーライト組織そのものに関する研究は相対的に少なく、よくわかっていない点が多い。パーライト組織は、『天然の微細複層組織』と呼ぶべき不思議な組織形態を持つだけでなく、強伸線加工を施すことで量産鋼種の中で最も高い強度特性を示すなど学術的にも工業的にも大変興味深い組織である。そのため、走査型電子顕微鏡 (SEM) に電子線後方散乱回折 (EBSD) 検出器を備えた結晶方位回折装置など新たな組織解析技術を利用して、今一度、パーライト組織を調査しようとする気運が高まりつつある<sup>(1)(2)</sup>。本稿では、SEM/EBSD測定を中心に著者が行ってきた研究成果を通して、新たにわかってきたパーライト組織の魅力を紹介する。

## 2. パーライト組織に対する疑問

図1はパーライト組織の模式図を示す。パーライトはオーステナイトから生じる共析反応によってフェライトとセメン

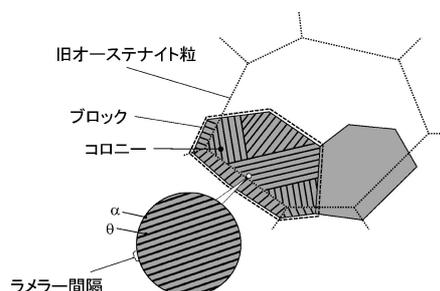


図1 パーライト組織の模式図。

タイトが層状に配列したラメラ組織である。そして、その内部には階層的な下部組織を形成しており、フェライトの結晶方位が同じ領域をブロック (変態途中のノジュールに対応)、その中でラメラの配向が同じ領域をコロニーと定義する<sup>(3)</sup>。つまり、フェライト組織の各粒内にセメンタイト板がいくつかの配向を持ちながら分散した組織がパーライトであるといえる。しかしながら、実際のパーライト組織はそれほど単純でないことが最近わかってきた。図2は、電子線後方散乱方 (EBSD) 法により作図した (a) フェライト組織 (IF鋼)、(b) パーライト組織 (共析鋼)、(c) ラスマルテンサイト組織 (極低炭素鋼) のフェライトに関する結晶方位マップであり、図中の黒線と赤線はそれぞれ大角粒界 ( $15^\circ \sim$ ) と小角粒界 ( $5 \sim 15^\circ$ ) を表している。いずれもフェライトを主構成相とする組織であるが、変態様式の違いによってその組織の特徴は大きく異なっており、(a) フェライト組織と (b) パーライト組織が同様であるとは到底思えない。(a) フェライト組織は、滑らかな大角粒界に囲まれた等軸結晶粒で構成されており、各粒内の結晶方位は一樣であることがわかる。これは、拡散変態によって形成した変態生成物の一般的な特徴であり、変態界面での原子の再配列によって均質な結晶が形成したことを物語っている。対照的に、(c) ラスマルテンサイ

\* 九州大学助教；大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)  
 Crystallographic Characteristics and Elastic Strain in Pearlite Structure; Nobuo Nakata (Graduate School of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)  
 Keywords: steel, pearlite, phase transformation, elastic strain, scanning electron microscopy/backscattering diffraction (SEM/EBSD)  
 2010年1月6日受理

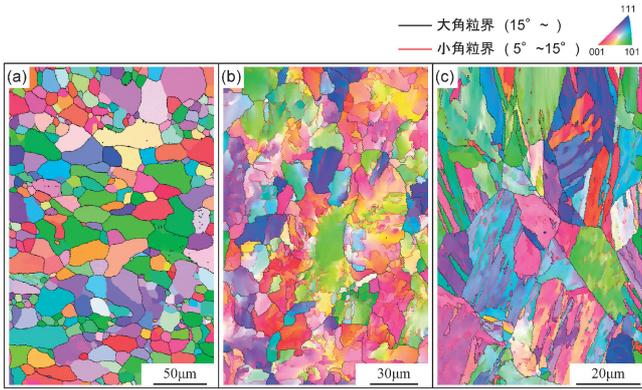


図2 (a)フェライト組織, (b)パーライト組織, (c)ラスマルテンサイト組織のbcc相に関する結晶方位マップ.

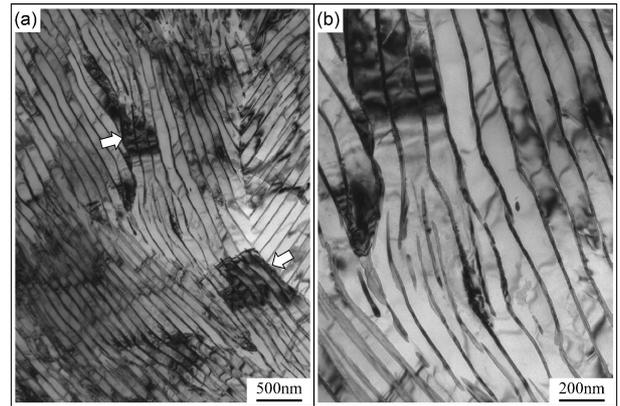


図5 パーライトのTEM組織.

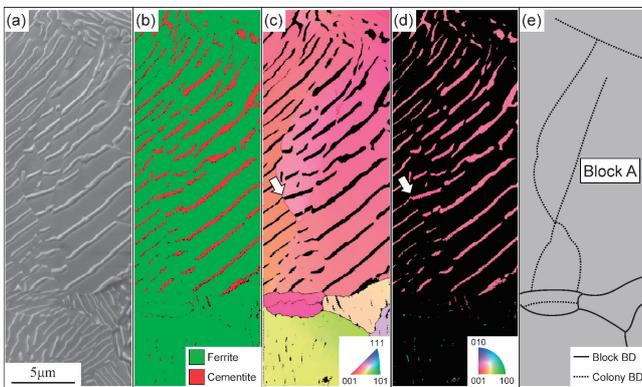


図3 パーライト組織におけるフェライトとセメンタイト. (a) SEM イメージ, (b) 相マップ, (c) フェライトの結晶方位マップ, (d) セメンタイトの結晶方位マップ, (e) ブロック・コロニー境界マップ

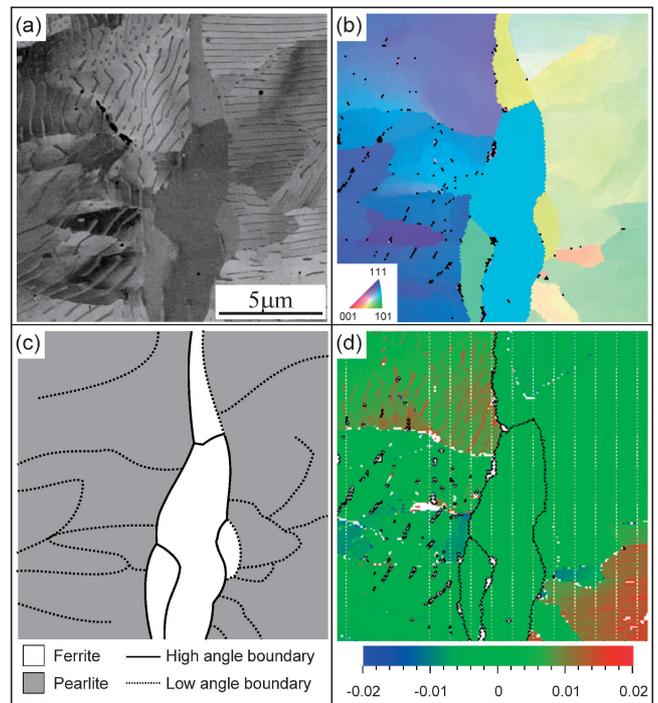


図6 亜共析パーライトにおける弾性歪分布. (a) SEM イメージ, (b) フェライト結晶方位マップ, (c) 相マップ, (d)  $E_{31}$  の弾性歪マップ

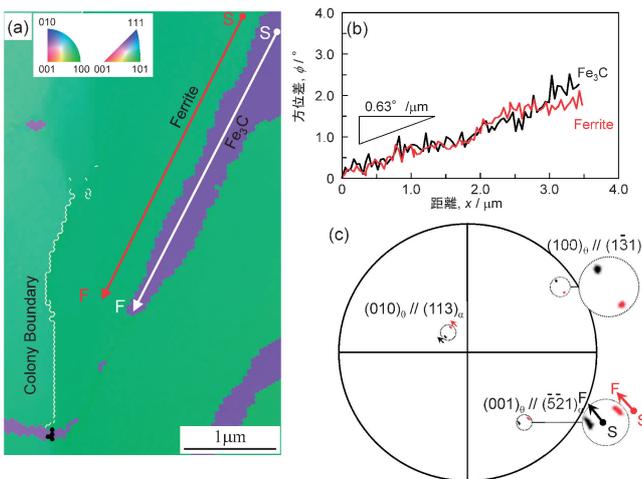


図4 パーライト組織におけるフェライトとセメンタイトの結晶方位回転. (a) 結晶方位マップおよび方位変化を示す, (b) プロファイル, (c) 極点図

ト組織は、直線的な大角粒界を呈しており、その内部には小角粒界に対応した不連続な方位変化が多数観察される。これは、ラスマルテンサイト組織が旧オーステナイト粒界を引き継ぎながら、パケット、ブロック、サブブロックという幾何学的な微細下部組織を形成したためであり<sup>(4)</sup>、ラスマルテンサイト組織が剪断型無拡散変態によって生成したことを明示している。これに対して、(b)パーライト組織では、湾曲した大角粒界に囲まれた複数のブロックが観察されることから、フェライト組織と同様に拡散変態によってパーライト組織が形成したと理解できる。しかしながら、そのブロック内部の結晶方位は連続的に目まぐるしく変化しており、場合によってはラスマルテンサイト組織の様に小角粒界も多数導入

していることが確認できる。このことは、『フェライトの結晶方位が一定の領域をブロック』とする既存の組織定義に明らかな誤りがあったことを指摘するものであり、パーライト組織に対する認識がいかに不足しているかを示す結果といえよう。このような背景から、パーライト組織に対する疑問と興味が一段と強くなり、以降の研究を行うに至った。

### 3. パーライト組織の結晶学的特徴<sup>(5)</sup>

図3は全面パーライト組織となる工業用過共析鋼(Fe-0.9%C-0.9%Mn)の(a) SEM組織ならびに同視野の(b)相マップ、(c)フェライト、(d)セメンタイトの結晶方位マップ、さらに、これらの結果をもとにトレースした(e)ブロック、コロニー境界を示す。パーライト組織中のセメンタイトは非常に微細なうえ、結晶の対称性が悪いことから、EBSD図形からその結晶方位を同定することは大変困難であるが、本観察領域においては比較的広範囲でフェライトとセメンタイトの結晶方位を同時に認識できている。(e)で指示するブロックAに注目すると、ブロックA内部にはセメンタイト配向の変わり目であるコロニー境界がいくつか観察されるにもかかわらず、セメンタイトはほぼ同一の方位を有していることがわかる。これは、ブロック(パーライト/ジュール)内のフェライトとセメンタイトはともに単一結晶方位であると報告したM. Hillert<sup>(6)</sup>の結果と同様のものであり、セメンタイトの新たな核生成ではなく、枝分かれによってコロニーの形成を説明するブランチング機構を強く支持する結果である。ただし、後述するように一つのコロニー内でさえもフェライトとセメンタイトの結晶方位は完全に一定ではなく、さらに、矢印で示すようなコロニー境界においては数°の方位差を持った不連続な方位変化が観察された。このような結果は多くのコロニー境界で確認されたことから、セメンタイトのブランチングには小角粒界の導入を伴うと思われる。

次に、コロニー内でのパーライト組織の特徴を図4にて説明する。結晶方位マップ(a)に示す白・赤色の直線に沿って、フェライト・セメンタイト両相の方位変化を距離に対するプロファイル(b)と極点図(c)で示す。結晶方位マップ(a)では単一結晶方位であるように見えるそれぞれの相も、プロファイル(b)では連続して結晶方位が変化しており、その勾配はともに $0.63^\circ/\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。そして、極点図(c)より、フェライトとセメンタイトは、Pitch-Petch関係 $((001)_\theta // (52\bar{1})_\alpha, [100]_\theta 2.6^\circ \text{ from } [13\bar{1}]_\alpha, [010]_\theta 2.6^\circ \text{ from } [113]_\alpha)$ <sup>(7)(8)</sup>に近い方位関係を有したまま、同じ方向へ結晶回転している様子も認められる。これらの結果は、フェライトとセメンタイトがコロニー内部で特定の結晶方位関係を満足しながら同調して結晶回転していることを意味している。では、パーライト中の結晶回転はどのようにして生み出されているのであろうか？ 仮に、図4(b)で実測された方位変化の勾配 $d\phi/dx$  ( $0.63^\circ/\mu\text{m}$ )がGN (Geometrically Necessary) 転位によってもたらされるとすると、その転位密度 $\rho_{GN}$ は以下の式で算出することが出来る<sup>(9)</sup>。

$$\rho_{GN} = (d\phi/dx)/b$$

ここで、 $b$ をフェライトのバーガース・ベクトル( $=0.248 \text{ nm}$ )とすると、フェライト中のGN転位密度は $4.4 \times 10^{13}/\text{m}^2$ と見積もられ、相当量の転位がパーライト組織に分散していることが予想される。しかしながら、図5に示すTEM観察結果のように実際のパーライト組織中にはほとんど転位を観察することは出来ず、大きな矛盾が生じてしまう。その一方で、パーライト組織中には矢印で示すように弾性歪に起因すると考えられる回折コントラストが明瞭に存在しており、それらはラメラの配向に従って分布しているように見える。つまり、パーライト組織に特有な結晶方位回転は塑性歪(転位)ではなく、弾性歪によってもたらされていると理解できる。

### 4. パーライト組織に内在する弾性歪<sup>(10)</sup>

上述したようにパーライト組織を理解する上で弾性歪は重要な因子であり、その分布状態や量を把握する必要がある。近年、Wilkinson等<sup>(11)</sup>によってEBSD図形の微小変化を画像処理によって検出し、局所領域での弾塑性歪を測定する手法(EBSD/Wilkinson法)が開発され、組織解析の新たなツールとして注目されている<sup>(12)</sup>。そこで、EBSD/Wilkinson法を利用してパーライト組織に内在する弾性歪の測定を試みた。図6は初析フェライトを含んだパーライト組織となる工業用垂共析鋼(S55C)の(a) SEM組織、(b)フェライト方位マップ、(c)粒界を加えた相マップ、そして、(d) EBSD/Wilkinson法により測定した $E_{31}$ (紙面に対して上下方向のせん断)に関する弾性歪マップを示す。各図の中心部には旧オーステナイト粒界から析出したと思われるいくつかの初析フェライト粒があり、その両側にパーライト組織が形成している。弾性歪マップ(d)に注目すると、初析フェライト粒内はほぼ無歪状態であるのに対して、パーライト組織では弾性歪が明瞭に存在している。そして、この弾性歪量はコロニー境界を挟んで不連続に変化しており、コロニーを組織単位としながら弾性歪が異方的に分布していることが示唆される。さらに詳細な解析の結果、一つのコロニー内であっても弾性歪量は徐々に変化しており、上述した結晶方位回転と弾性歪が対応する様子が確認された。これらの結果から、パーライト組織と弾性歪には以下のような関係があるものと推察される。パーライト変態で形成するフェライトとセメンタイトの間には格子ミスフィットが発生し、これを緩和するためにフェライト/セメンタイト界面にミスフィット転位や構造レッジが導入されていることをG. J. Shifletらは報告している<sup>(13)(14)</sup>。ここで、これらの緩和機構によって格子ミスフィットが十分に緩和されない場合、微細なラメラ構造によって互いに変形を拘束されたフェライトとセメンタイト両相では特定方位への結晶格子の湾曲、すなわち結晶回転が起きるのであろう。その結果として生じる非等方弾性歪はラメラの成長とともに増大・蓄積されるため、これを軽減するためにラメラは配向を変えると考えられる。言い換えれば、セメ

