

# 鉄合金マルテンサイト

## ～組織形成機構と力学特性発現機構～

柴田 暁 伸\*

### 1. はじめに

鉄合金マルテンサイト組織は高強度の源となる組織であり、日本刀に代表されるような刃物、自動車などの輸送機器、更には高層ビルなどの巨大建造物に用いられる等、我々の社会に最も寄与している金属組織であると言っても過言ではない。鉄合金マルテンサイトは古くから使用されてきているがゆえに、過去から現在に至るまで膨大な研究の蓄積がある。しかし残念ながらその組織形成機構や力学特性発現機構の理解は未だ十分であるとは言えない。今後、マルテンサイト組織を利用した新たな材料開発を行う上で、マルテンサイトの組織形成機構や力学特性発現機構を把握しておくことは不可欠である。本稿では著者が行ってきた鉄合金マルテンサイトの組織形成機構および力学特性発現機構に関する研究を紹介する。

### 2. 鉄合金マルテンサイト

鉄合金マルテンサイトのうち、結晶構造がbcc構造もしくはbct構造である $\alpha'$ マルテンサイトは合金の組成や生成温度によって形態が大きく変化し、図1に示すようにラスマルテンサイト、バタフライマルテンサイト、レンズマルテンサイト、薄板状マルテンサイトと様々な形態が存在する。このように様々な形態が存在するのは鉄合金マルテンサイトのみで報告されている特徴である。これらのマルテンサイトは形態が異なるだけでなく、内部微視組織や結晶学的特徴もそれぞれ異なっている<sup>(1)</sup>。図1に示す4つのマルテンサイトのうち、ラスマルテンサイトは高強度鋼に現れる組織であ

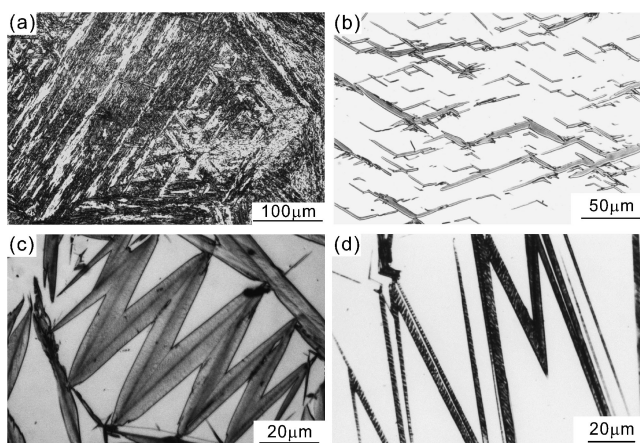


図1 鉄合金マルテンサイトの4つの形態を表した光学顕微鏡写真，(a)ラスマルテンサイト，(b)バタフライマルテンサイト，(c)レンズマルテンサイト，(d)薄板状マルテンサイト。

り、多くの実用鋼に用いられている組織である。一方、薄板状マルテンサイトはマルテンサイト/オーステナイト界面が可逆的に移動できるため、形状記憶効果や超弾性効果が発現する。このように鉄合金マルテンサイトは多様な力学特性を示し、その力学特性はマルテンサイトの形態と密接に関連している。

著者は図1に示した4つの形態のマルテンサイトのうち、レンズマルテンサイト(図1(c))を用いてマルテンサイト組織の形成機構を内部微視組織や異相界面構造の観点から調べ、ラスマルテンサイト(図1(a))を用いてマルテンサイトの力学特性発現機構を粒界強度の観点から調べた。

\* 京都大学助教；工学研究科材料工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)  
Martensite in Iron-based Alloy ~the Formation Mechanism of Microstructure and the Origin of Mechanical Property~; Akinobu Shibata (Department of Materials Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto)  
Keywords: steel, martensitic transformation, microstructure, interphase boundary, micromechanical characterization, mechanical property  
2011年2月28日受理

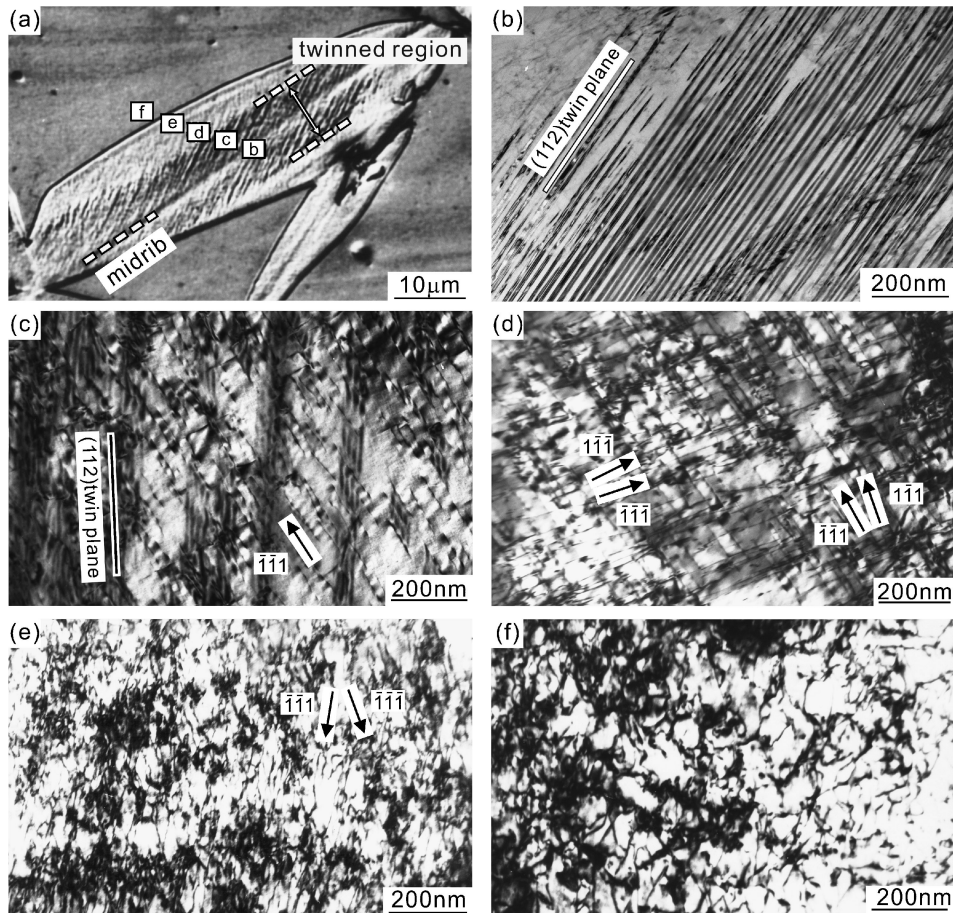


図2 レンズマルテンサイトの(a) 光学顕微鏡写真, (b)–(f) 内部微視組織を表した TEM 像<sup>(3)</sup> ((b) ミドリブ, (c) 双晶領域, (d) 非双晶領域 (双晶領域近傍), (e) 非双晶領域 (界面近傍), (f) 周囲のオーステナイト)。

### 3. 鉄合金マルテンサイトの内部微視組織

通常、マルテンサイトは格子不変変形に由来した転位や双晶などの格子欠陥、つまり内部微視組織を有している。この内部微視組織は図1に示した4つのマルテンサイトでそれぞれ異なり、特に図1(c)に示したレンズマルテンサイトの内部微視組織は他のマルテンサイトに比べて非常に複雑である。この複雑な内部微視組織の成因を解明するために、レンズマルテンサイトの内部微視組織を詳細に観察した。

図2(a)はFe-33Ni合金におけるレンズマルテンサイトの光学顕微鏡写真であり、界面が滑らかに湾曲している。レンズマルテンサイトはプレート中央部のミドリブ(強く腐食された線状の組織)、その周囲の双晶領域(周囲に比べてコントラストが暗い組織)、界面付近の非双晶領域の異なる3つの領域から構成されていることがわかる。

図2(b)–(f)はFe-33Ni合金におけるレンズマルテンサイトの成長に伴う内部微視組織変化を示したTEM像である。図2(a)の光学顕微鏡写真にそれぞれの観察領域を模式的に示しており、図2(b)–(f)はそれぞれミドリブ、双晶領域、非双晶領域(双晶領域近傍および界面近傍)、界面付近のオーステナイトの内部微視組織である。図2(b), (c)より、ミド

リブは高密度の双晶で構成されており、双晶領域にはミドリブから部分的に成長した双晶と1種類のらせん転位が存在していることがわかる。また非双晶領域は転位のみで構成されているが、図2(d)と(e)に示すように、マルテンサイトプレートの内側では複数種類のらせん転位のみが観察されるのに対し、界面近傍では湾曲し、複雑に絡み合った転位が観察され、非双晶領域内でも場所によって転位組織が異なっている。

このように成長に伴って内部微視組織が双晶から転位へと変化するのは、マルテンサイト変態に伴う潜熱によってマルテンサイトプレート内部の局所温度が上昇したために、格子不変変形の様式が成長途中に双晶変形からすべり変形に変化したことに起因していると著者は考えている<sup>(2)</sup>。また図2(e)に示したように界面近傍にのみ湾曲し絡み合った転位組織が観察されるが、これは界面近傍のオーステナイト中に導入された転位(図2(f))がマルテンサイト内に受け継がれたためであると考えられる。レンズマルテンサイトプレートの場所ごとの転位密度を測定した結果<sup>(3)</sup>、界面近傍の非双晶領域(図2(e))の転位密度は双晶領域近傍の非双晶領域の転位密度(図2(d))と周囲のオーステナイト(図2(f))の転位密度の和とほぼ等しい値になっていたことも、オーステナイト中の転位が界面近傍でマルテンサイトに受け継がれているとい

う事実を裏付けている。

図2で示したようにレンズマルテンサイトの内部微視組織は成長に伴って大きく変化し、一つのマルテンサイト内部で均一ではない。そのためオーステナイトとの結晶方位関係などの結晶学的特徴も一つのマルテンサイト内部で均一ではないと考えられる。そこでレンズマルテンサイト内部の精密な結晶方位解析のために電子線後方散乱回折(EBSD)を適用し、一つのマルテンサイトプレート内部の局所結晶方位を調べた。その結果、ミドリブ近傍の領域はオーステナイトとGreninger-Troiano(G-T)関係を満たしているが、界面に向かうにつれて結晶方位関係がKurdjumov-Sachs(K-S)関係に変化するということが明らかとなった<sup>(4)</sup>。これまで結晶方位関係に関して多くの研究があるが、一つのマルテンサイト内部で結晶方位関係が変化するという知見は著者らが初めて得たものである。

#### 4. 鉄合金マルテンサイトの異相界面構造

異相界面構造は界面の移動度やひずみの緩和機構と密接に関連しており、変態生成物の変態機構を解明する上で非常に重要な情報を含んでいる。マルテンサイトとオーステナイト間の界面には母相からマルテンサイトへの格子変形(結晶構造の変化)を担う転位(変態転位)と格子変形によって生じる長範囲のひずみを緩和する転位(緩和転位)の2種類が存在する。そこで著者は格子不変変形の様式を正確に同定するために、オーステナイト/マルテンサイト異相界面構造、特に界面上に存在する緩和転位を詳細に観察した。以下で示すバーガースベクトル(すべり方向)やせん断面の方位はすべてマルテンサイトとオーステナイトの結晶方位関係が $[\bar{1}01]_A//[\bar{1}\bar{1}1]_M$ ,  $(111)_A//(\bar{0}11)_M$ であるバリエントを基準にして指数付けしたものである。

図3(a)はFe-33Ni合金におけるレンズマルテンサイトの界面構造をweak beam法により観察したTEM像である。界面上に規則正しく配列した転位が存在していることがわかる。また図3(b)は異相界面の原子構造を観察した高分解能電子顕微鏡(HREM)像である。これらの観察結果から、マルテンサイトの異相界面上にはバーガースベクトルが $a/2[\bar{1}\bar{1}1]_M(=a/2[\bar{1}01]_A)$ と $a/2[1\bar{1}1]_M(=a/2[0\bar{1}1]_A)$ である2種類の界面転位が存在していることが明らかとなった(以後、これらの界面転位を $b_1$ および $b_2$ と呼ぶ)。転位線方向から推定される $b_1$ と $b_2$ のせん断面はそれぞれ $(112)_M(=(101)_A)$ ,  $(\bar{1}12)_M(=(011)_A)$ でありせん断量はそれぞれ0.25, 0.12と見積もられる。ここで特筆すべきことは $b_1$ の界面転位のバーガースベクトルおよびせん断面はミドリブにおいて観察された変態双晶の双晶方向および双晶面と一致していることである。そのため、レンズマルテンサイトの生成初期段階であるミドリブ(図2(b))では、格子不変変形は双晶変形のみであり、せん断方向は $b_1$ に平行であるが、成長していく過程で $b_2$ のすべり変形が新たな格子不変変形として導入されるということが明らかとなった。この $b_2$ のすべり

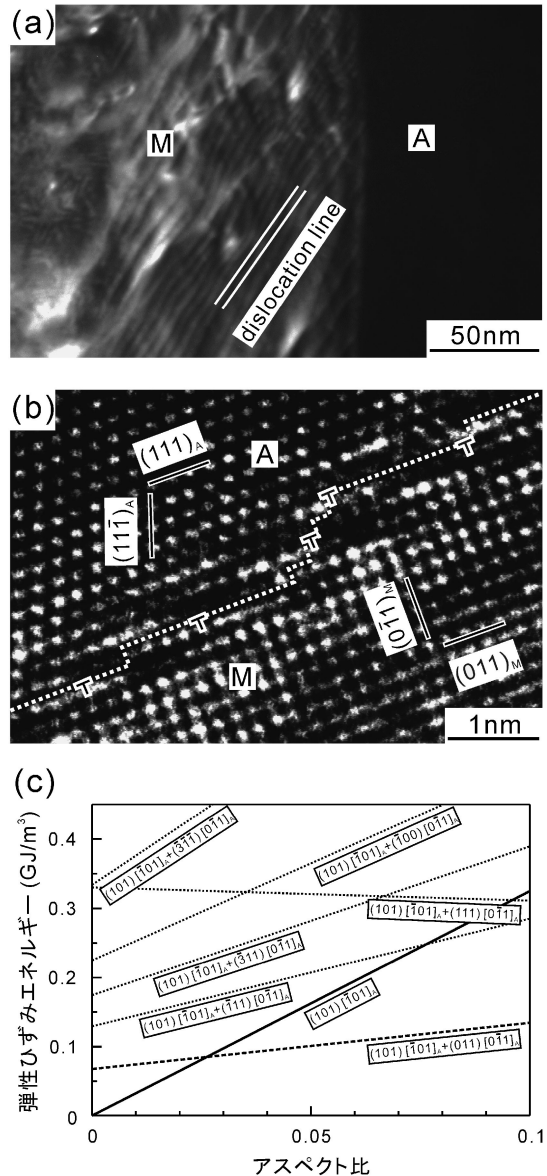


図3 (a), (b) レンズマルテンサイトの異相界面構造を表したTEM像およびHREM像<sup>(11)</sup>, (c) 種々の格子不変変形が働いた場合のマルテンサイトプレートの弾性ひずみエネルギーとアスペクト比の関係<sup>(11)</sup>。

り変形が成長途中に新たな格子不変変形として導入される要因を明らかにするために、マルテンサイト変態の現象論<sup>(5)-(8)</sup>とマイクロメカニクス<sup>(9)(10)</sup>を組み合わせた解析を行った。図3(c)はその結果であり、マルテンサイトのアスペクト比と弾性ひずみエネルギーの関係を表したものである。太実線は格子不変変形が $b_1$ のみの場合、太点線は $b_1$ と $b_2$ の2つのすべり変形が格子不変変形として働いている場合、他の点線は $b_1$ に加えて $b_2$ 以外のすべり系が格子不変変形として働いた場合の弾性ひずみエネルギーを表している。生成初期段階のミドリブの領域では $b_1$ による格子不変変形(双晶変形)のみが働いている方が弾性ひずみエネルギーが小さい。しかしアスペクト比が0.02以上になると $b_2$ のすべり

変形が導入されることによってマルテンサイト変態に伴う弾性ひずみエネルギーが大きく減少する。つまりレンズマルテンサイトは成長途中に弾性ひずみエネルギーを減少させるために  $b_2$  のすべり変形が新たな格子不変変形として導入されると言える。詳細な解析は原論文<sup>(11)</sup>を参照されたい。

また詳細は省略するが、格子不変変形が  $b_1$  と  $b_2$  の2種類のすべり変形が働く場合、マルテンサイト変態の現象論<sup>(5)-(8)</sup>から求められるオーステナイトとの結晶方位関係は K-S 関係に近い。つまりレンズマルテンサイトの成長に伴う内部微視組織や結晶学的特徴の変化は成長に伴う格子不変変形の様式の変化によってうまく説明することができる。

ここで図1に示した4つのマルテンサイトのうち薄板状マルテンサイトとラスマルテンサイトに注目する。薄板状マルテンサイトは内部微視組織に高密度の双晶を含んでおり<sup>(12)</sup>、オーステナイトとの結晶方位関係は G-T 関係であると報告されている<sup>(13)(14)</sup>。一方、ラスマルテンサイトは内部微視組織は転位であり<sup>(15)(16)</sup>、オーステナイトとの結晶方位関係は K-S 関係に近い<sup>(17)-(20)</sup>。そのため、レンズマルテンサイトにおいて観察された双晶から転位への内部微視組織の変化および G-T 関係から K-S 関係へのオーステナイトとの結晶方位関係の変化は薄板状マルテンサイトからラスマルテンサイトへの形態遷移に対応していると言える。つまり、鉄合金マルテンサイトの形態遷移は格子不変変形の様式の変化に起因していると結論付けることができる。

## 5. 鉄合金マルテンサイトの粒界強度評価

図1に示した4つの形態のマルテンサイトのうち、ラスマルテンサイト組織はほとんどの高強度鋼に現れる組織であるため、実用上非常に重要な組織である。これまでラスマルテンサイト全体の強度に対して最も寄与率が高い強化因子は炭素による固溶強化および析出強化であると考えられてきた<sup>(21)</sup>。しかし近年のナノインデンテーションを用いた一連の研究<sup>(22)-(25)</sup>により、ラスマルテンサイトの全体の強度に対する粒界強化の寄与率は過去の研究で見積もられていた値よりも非常に大きいということが明らかとなってきている。母相オーステナイト粒はラスマルテンサイト変態によって種々の異なるスケールの微視組織に分割され、ラスマルテンサイト組織は内部にラス境界、サブブロック境界、ブロック境界、パケット境界、旧オーステナイト粒界といった結晶学的に異なる粒界が多数存在する。これらのどの境界がラスマルテンサイトの全体の強度に対する有効結晶境界であるかは不明である。そこで著者はマイクロサイズ試験片を用いた微小領域力学特性評価によりラスマルテンサイトの粒界強度を正確に評価した。

図4(a), (b)は Fe-23Ni 合金におけるラスマルテンサイトの粒界マップであり、この粒界マップに示す領域からサブブロック境界のみを含む片持梁型マイクロサイズ試験片および一つのブロック境界のみを含む片持梁型マイクロサイズ試験片を集束イオンビーム(FIB)加工によりそれぞれ作製した。

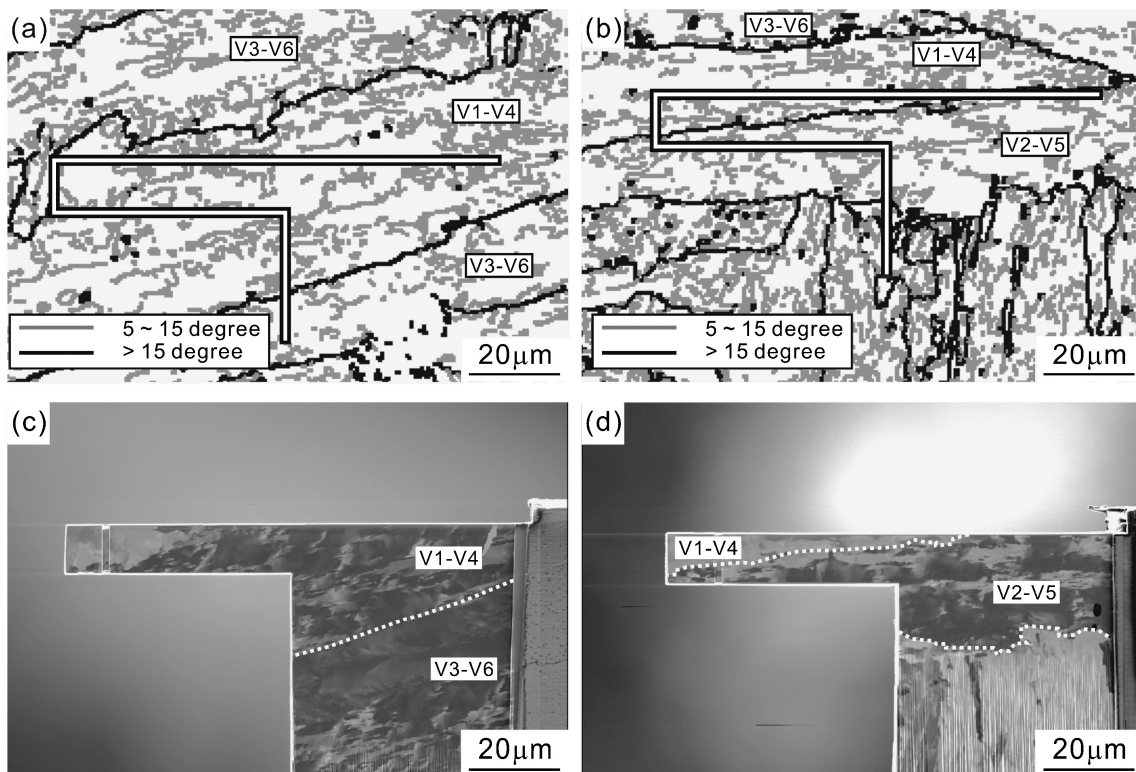


図4 (a), (b)ラスマルテンサイトの粒界マップ<sup>(26)</sup>, (c), (d)作製した片持梁型マイクロサイズ試験片のSIM像<sup>(26)</sup>。

