

技術論文

鋼のオーステナイト組織の再構築法の高精度化に向けた検討

Development of a Reconstruction Method for Prior Austenite Microstructure Using EBSD Data of Ferrite Microstructure

畑 顕 吾*
Kengo HATA脇 田 昌 幸
Masayuki WAKITA藤 原 知 哉
Kazuki FUJIWARA河 野 佳 織
Kaori KAWANO

抄 録

鋼のマルテンサイトまたは、ベイナイトの組織のEBSD解析データを用いて、変態前のオーステナイトを再構築する解析手法を開発した。本手法では、隣接する複数のフェライト結晶粒の間で、K-S関係に基づく24通りのバリエーションについて、結晶学的な解析を行い、実際の変態バリエーションとして最も確率の高い方位を特定することで、共通のオーステナイト方位を持つ領域を探索し、変態前のオーステナイト組織を再構築する。この方法により、広範囲な金属組織において、オーステナイト組織を再構築することができ、オーステナイトの平均結晶粒径だけでなく、結晶方位や集合組織を高精度に求めることが可能である。

Abstract

A method for reconstructing a prior austenite microstructure from a ferrite microstructure using EBSD data has been developed. Orientations of prior austenite can be obtained through a series of calculation to find a group of neighboring ferrite grains that have the common prior austenite orientation. The calculation is based on the orientation changes due to ferrite to austenite transformation with the KS (Kurdjumov-Sachs) orientation relationship, which try to choose the actual KS orientation relationship from among the 24 possible relationships. This new method has enabled us to reconstruct the prior austenite microstructure in a large area, which provide us with not only the average grain size but also the orientation and the texture of prior austenite at high temperature without in-situ measurements.

1. 緒 言

鋼のオーステナイト(γ)からフェライト(α)への相変態は、鉄鋼製品の金属組織を制御し、適切な機械特性を得るうえで重要な現象である。多くの鉄鋼製品の金属組織はフェライトで構成されるが、その組織形成は、相変態前のオーステナイト組織の状態に大きく影響されるので、鉄鋼製品の組織制御を考えるうえで相変態前のオーステナイトの金属組織の情報は重要である。特に、近年は鉄鋼製品への高強度化へのニーズが高まり、ベイナイトやマルテンサイトといった硬質な組織が多用されるようになって、これらの組織におけるパケットやブロックを決めるオーステナイト組織の状態制御の重要性が増してきている。

近年、簡便にオーステナイト組織の情報を得る手法として、マルテンサイト組織、あるいは、ベイナイト組織の結

晶方位データを解析することによって、相変態前のオーステナイトの金属組織を再構築する技術が研究されており、実用的なオーステナイトの再構築プログラムも開発されている¹⁻⁵⁾。それらの手法では、鋼のオーステナイトとフェライトの間にKurdjumov-Sachs(K-S)の関係⁶⁾、あるいは、Nishiyama-Wasserman(N-W)の関係⁷⁾が成り立つことに基づき、フェライト相のバリエーションを解析することにより、相変態前のオーステナイトの方位を求めることを可能としている。

新日鐵住金(株)においても、従来の報告を参考に、マルテンサイトやベイナイトマルチバリエーション組織のEBSD(Electron Backscatter Diffraction)測定データを用いた結晶学的な解析により、多結晶オーステナイト組織を自動解析可能なプログラムを開発した。本報では、その再構築法の解析方法の詳細、および、独自に施した計算アルゴリズム

* 先端技術研究所 基盤メタラジー研究部 主任研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒660-0891

について説明するとともに、その手法によるオーステナイト再構築の精度、ならびに、利用例を紹介する。

2. 本 論

新日鐵住金で開発したオーステナイト再構築法について、その解析方法の詳細を以下の3項目に分けて、説明する。

2.1 フェライトバリエーションの結晶方位からのオーステナイト方位の推定方法

相変態における生成相の結晶方位から、母相の結晶方位を解析するための基本的な計算手法に、Humbert らによって提案された方法が挙げられる。Humbert らは、Ti 合金における $\beta \rightarrow \alpha$ 変態において、両相の間に Burgers の結晶方位関係が成り立つことに基づいて、フェライト相のバリエーションの結晶方位を解析することによって、母相 β の方位を求める計算方法を提案した^{4,5)}。Humbert らの方法は、後に報告された様々な母相方位の再構築法においても、同様に用いられている。

銅のオーステナイトとフェライトの間においても、K-S 関係などの方位関係が成り立つことが知られている。開発したオーステナイトの再構築法では、Humbert らが提案した方法に則り、母相オーステナイトとフェライト相のバリエーションの間の関係を、次のような回転行列により表現した。

$$R_j g^a = V_k R_i g^r \quad (1)$$

ここで、 g^a および g^r は、それぞれフェライトおよびオーステナイトの結晶方位をあらわす回転行列である。 V_k ($k=1, 2, \dots, 24$) はオーステナイトからフェライトへの結晶座標系の変換行列で、K-S 関係の場合はオーステナイト結晶座標系で $\langle 112 \rangle$ 軸周りに 90 度回転させる回転行列として表すことができる⁸⁾。実際には、 V_k は正確な K-S 関係ではなく K-S 関係と N-W 関係の中間の方位関係を用いる。 R_i と R_j ($i, j=1, 2, \dots, 24$) は立方対称性の回転行列群である。

(1) の関係から、オーステナイトの結晶方位は、

$$g^r = (V_k R_i)^{-1} R_j g^a \quad (2)$$

と表すことができる。K-S 関係には、結晶学的に等価な方位の兄弟晶 (バリエーション) が 24 通り存在するため、 V_k は 24 通りの選択肢がある。したがって、オーステナイトの結晶方位も 24 通りの異なる方位を取り得るので、この関係式だけでは方位を 1 つに決めることができない。

どのバリエーションで変態したかがわかれば、母相と生成相の間の方位関係 V_k を 1 つに絞ることができ、(2) 式のフェライトの方位からオーステナイトの方位を求めることができる。 V_k を特定するためには、同じオーステナイト粒から生成した少なくとも 3 種類のフェライトバリエーションについて上述の関係を考慮する必要があると報告されている⁴⁾。3 つのフェライトバリエーションの結晶方位から求めたオーステナイトの結晶方位を比較し、一致する方位として母相

オーステナイトの結晶方位を特定できる。具体的な計算は、異なるフェライトバリエーションの結晶方位 g^{a1} と g^{a2} を用いて、式(3)、(4)によって求まるオーステナイト同士の方位差 θ を評価し、それが一定の許容角度に収まるような i と k を求める。

$$M^{r1-r2} = g^{r1-1} g^{r2} = ((V_k R_i)^{-1} g^{a1})^{-1} (V_i R_j)^{-1} g^{a2} \quad (3)$$

$$\theta = \cos^{-1} ((M_{11} + M_{22} + M_{33} - 1)/2) \quad (4)$$

この結果、式(2)からオーステナイト方位 g^r が求まる。この方法によって、フェライト相バリエーションの結晶方位から、オーステナイトの結晶方位を解析することが可能である。 α_1 と α_2 が共通のオーステナイトを母相に持てば、 θ の値は理想的には 0 度であるが、実際には、設定した結晶方位関係が実際の方位関係と誤差を持つことや、測定技術上の結晶方位の誤差 (EBSD による方位測定の誤差) など種々の誤差の影響によって、有限の値を取る。そのため、上述のように一定の許容角度を設定する必要がある。

2.2 複数のフェライト結晶粒における共通オーステナイト粒の解析

Humbert の解析方法を拡張することによって、複数のフェライト結晶粒について、共通の母相オーステナイトを持つかどうかを解析することができる。すなわち、上述の 3 つのフェライト粒の周囲に隣接する他の 4 つ目のフェライト結晶粒についても同様に Humbert の解析方法を適用し、誤差 θ の大きさを評価すれば、共通のオーステナイトから生成したフェライトを判定することができる。さらに、この要領に従って隣接するフェライト粒を次々に解析していくことによって、共通オーステナイトを持つフェライト粒のグループが拡張していき、共通オーステナイトを持つ領域を求めることができる。

しかし、多数の異なる方位のオーステナイト粒から生成したフェライト組織をこの方法で解析する場合は、個々のフェライト粒について、共通のオーステナイトに含まれるかどうかを正しく判定することが必要となる。このとき、オーステナイトを正しく判定できるかどうかは、共通オーステナイト方位とみなすための許容角度をどのような値に設定するか大きく依存する。許容角度を過度に大きな値に設定すると、別のオーステナイトから変態したフェライト結晶粒で、本来は結晶方位関係を満たさないものであっても、誤って共通のオーステナイト方位として解析されてしまう可能性が大きくなる。

このことを、実際のデータを用いた解析例で説明する。解析のための鋼材は、0.2%C-2%Mn 鋼を用い、熱間圧延と冷間圧延を施した後、900℃で 100s 保持した後、水焼き入れた鋼を用いた。板厚の 3/4 位置の圧延方向断面において EBSD の測定を行い、マルテンサイト組織の EBSD データを用いた。その組織のイメージオリエンティマップと、結晶方位マップをそれぞれ図 1 (a) (b) に示す。EBSD マップ

の表示は、(株)TSL ソリューションズ、OIM analysis (ver. 7.1) を用いた。図1 (a)中の色は、付記した IPF マップ上の色に対応する方位を表す。

例として、図中に矢印で示した位置の結晶粒 A を起点として選び、この結晶粒を出発点に、隣接するフェライト結晶粒との間で、上述の方法により共通オーステナイト方位を解析した。許容角度を2～15度の種々の角度に設定し、その範囲内にオーステナイト同士の方位差 θ が収まる限り、解析を続けた。その結果を図2に示す。

許容角度を2度設定した場合(図2(a))、起点の結晶粒と周囲の結晶粒との間で、共通のオーステナイト方位は見つからないという結果を得た。そのため、図中には何も表示されていない。上述のように、オーステナイト結晶方位の間の方位差 θ は有限な値を持つため、許容角度を小さくしすぎると共通オーステナイトを見出すことができない。一方、許容角度を3度以上とした場合に、共通のオーステナイト方位を持つ結晶粒が見出された。しかし、共通オーステナイト方位を持つフェライト粒のグループを求めることができるものの、その領域は許容角度を大きくするに伴っ

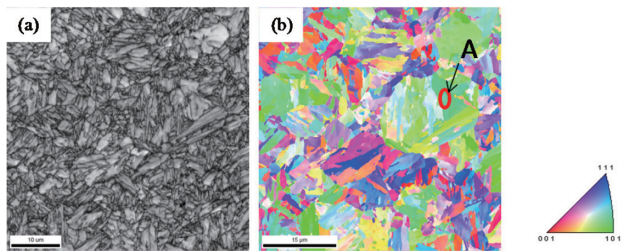


図1 EBSD 測定による供試材のイメージオリティマップと結晶方位 (IPF) マップ
Image quality mapping of the microstructure (a) and corresponding orientation mapping (b) of the specimen

て、著しく拡大した(図2(b)～(f))。このように、許容角度の違いによって共通オーステナイトの解析結果が大きく変化することは、解析結果が許容角度に対して極めて容易に影響されることを意味している。

そのように、解析結果が許容角度によって影響されやすい原因は、フェライトのバリエーションを解析する際に、実際は異なるオーステナイトから生成したフェライト粒であっても、偶然に共通オーステナイト方位が見出される可能性が高いことに起因する。偶然に共通オーステナイト方位が見出される可能性の高さを、許容角度に対して見積もった結果を図3に示す。この見積もりは、コンピュータを用いて、フェライトのランダムな結晶方位のペアを5万通り人工的に作成し、これらの結晶学的に全く関連性のないフェライト方位の間に、偶然に共通オーステナイト方位が見つかる確率を見積もったものである。2つのフェライト

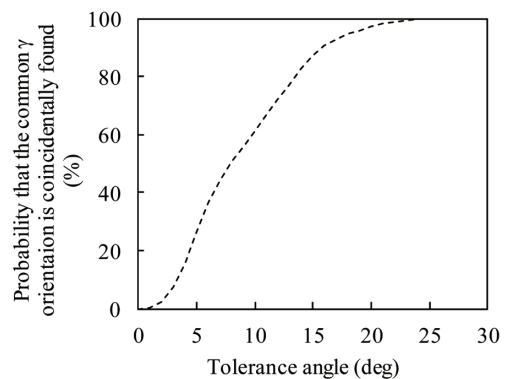


図3 2つのフェライト結晶粒に偶然に共通オーステナイトと方位が見出される確率

Probability that a common γ orientation is coincidentally found between two α grains for different cases of tolerance angles

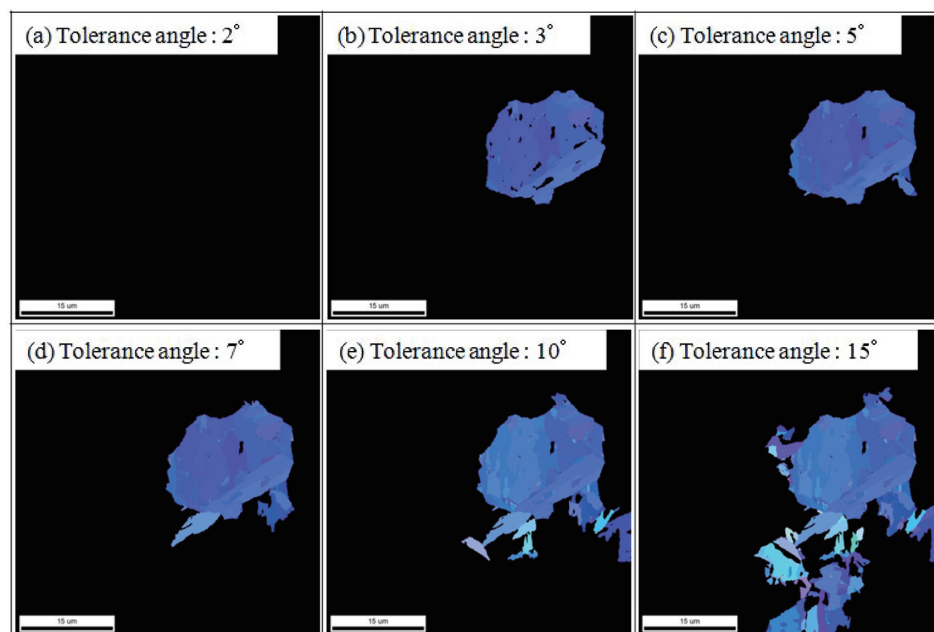


図2 共通オーステナイトを持つフェライト粒のグループ (EBSD の結晶方位マップで表示)

Group of α grains with common prior γ orientation for different tolerance angles (indicated as orientation mapping)

結晶方位の間で、偶然に共通オーステナイトが見出される確率は、許容角度が3度の場合に7%、5度の場合に26%、10度の場合に61%にもなる。このような性質から、K-S関係に基づくバリエーション解析においては、高い確率で誤った解析結果が得られやすい。

2.3 多結晶フェライト組織におけるオーステナイト組織の再構築

許容角度によって解析結果が極端に変化する問題を解決するために、従来報告されているオーステナイト再構築法においても様々な方法が取られている。たとえば、上述の共通オーステナイト方位の許容角度を適切な値に設定したり、あるいは、段階的に許容角度を増加させながら解析したりすることが、有効な手段である。

新日鐵住金において開発した方法では、さらにオーステナイト再構築の精度を向上させるために、上述の、許容角度によって解析結果が極端に変化する問題を回避する方法を考案した。すなわち、上述のように誤った解析結果を導きうる原因は、偶然に誤った共通オーステナイト方位が見出されてしまうことであるが、すべてのフェライト粒がこのような誤判定の影響を受けるわけではなく、組織内の一部のフェライト粒は、一定の許容誤差に対して、周囲のフェライト粒との間で共通のオーステナイト方位を1つに決定できるものが存在する。このような、信頼性の高い方位を特定した上で、それを起点として周囲のフェライト粒についても共通オーステナイト方位を解析すれば組織全体を高精度に解析することが可能である。具体的な計算方法としては、上述のHumbertらの方法による共通オーステナイトの方法において、起点となった結晶粒を金属組織内のすべてのフェライト粒を対象にして、解析を行うことで共通オーステナイトの候補となり得るすべての結晶方位の可能性を考慮することができる。その解析結果を統計的に評価することで、式(1)の V_k の候補が1つしか見出せないフェライト粒を求め、これを共通のオーステナイト方位が1つに決定できるフェライト粒として特定することができる。

バリエーション番号が1つに特定された場合のオーステナイトの方位は、特に信頼性が高いと考えられる。このような条件を満たすフェライト結晶粒が、通常の組織内にどの程度の割合で存在しているかを調べた例として、図1のデータにおいて、候補となるバリエーション番号が1つに特定されたフェライト結晶粒を抽出し、オーステナイト方位に変換し表示したものを図4に示す。この解析における許容誤差は5度に設定した。方位が現れている箇所が、バリエーション番号が1つに特定されたフェライト結晶粒であり、黒色の領域は候補のバリエーション番号が複数見つかったフェライト結晶粒の領域である。この結果においても、組織の大部分において、オーステナイトの方位を特定することができる。

残りのフェライト粒は、複数の候補となるバリエーション番

号を持つが、そのフェライト粒に隣接する、上述のオーステナイト方位が1つに決定した結晶粒との方位差を調べ、方位差が最も小さい方位に決定する。これは結果的に周囲の粒と最も方位差の小さいオーステナイト粒に組み込まれることになる。

以上の方法によって、組織全体でオーステナイト組織を再構築することができる。図1のデータで、オーステナイト組織を再構築した結果を図5に示す。マルテンサイトの非常に複雑な結晶組織から、明確な等軸粒の形状を持ったオーステナイト粒が再構築されていることが確認できる。なお、再構築組織内に黒で示された結晶粒が散見されるが、これらの粒は、周囲のいずれの結晶粒とも共通オーステナイトを見出せなかった結晶粒を示す。

2.4 オーステナイト再構築法の精度の検証

本解析法による再構築オーステナイトの妥当性を評価するため、オーステナイト粒界、および、オーステナイトの結晶方位が正しく再構築できているかを、下の二例で実験的に検証した。

2.4.1 オーステナイト粒界の再構築精度の検証

オーステナイト粒界の検証実験のため、図1のEBSD測



図4 オーステナイト方位が1つだけ見出されたフェライト粒のみを用いて再構築したオーステナイト組織解析
Reconstructed γ microstructure using the α grains in Fig. 1 which has just one candidate γ orientation

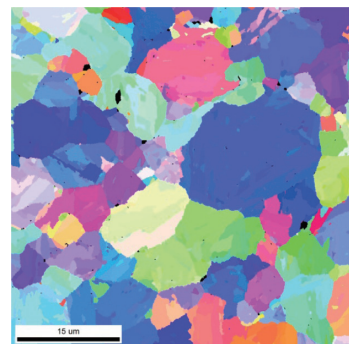


図5 フェライト組織(図1)から再構築したオーステナイト組織の結晶方位マップ
Orientation mapping of γ microstructure reconstructed from the α microstructure shown in Fig. 1

定の領域の周囲にピッカース圧痕を作製し、マーキングしたのち、その領域をピクリン酸によって腐食し、現出させたオーステナイト粒界を走査電子顕微鏡 (SEM) 観察した。この観察結果と再構築法によるオーステナイト組織の結晶粒界を比較することで検証することとした。その結果を図 6 (a) (b) に示す。図 6 (a) 上では、オーステナイト粒界と判断された箇所を赤線で示している。図 6 (b) に、再構築法によるオーステナイト組織の結晶方位マップ上に、 15° 以上の方位差を持つ粒界を黒線で表示したものを示す。

図 6 (a) と (b) を比較すると、大部分の粒界が一致していることが確認でき、オーステナイト粒の形状や粒径はよく再現できていることが確認できる。細部では、粒界が正しく解析されていない箇所も見られ、完全に旧オーステナイト組織を再構築するには至っていないものの、オーステナイト組織の状態を把握するには十分な情報が得られている。

2.4.2 オーステナイト結晶方位の精度の検証

再構築したオーステナイト粒の結晶方位が正しく解析されているかを検証するための検証実験として、S55C 鋼を

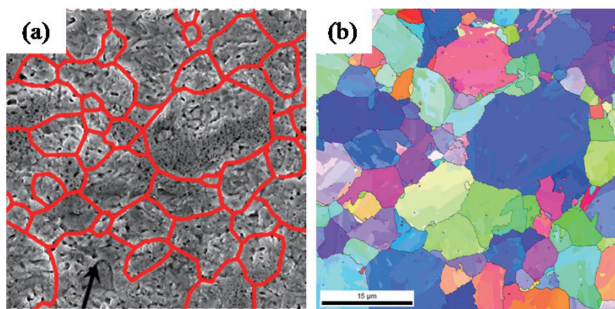


図6 オーステナイトの粒界の妥当性の検証結果
(a)ピクリン酸腐食組織による γ 粒界, (b)逆解析旧 γ の方位マップ+ 15° 粒界 (黒線)
Appropriateness of the grain boundaries of reconstructed austenite
(a) Austenite grain boundaries emerged by picric acid, (b) Grain boundaries in the reconstructed austenite (indicated by black line)

オーステナイト域温度から焼き入れた鋼材を作製し、その表面を EBSD で解析した。本鋼は焼き入れ組織内に、残留オーステナイトが含まれる鋼である。残留オーステナイトの方位は、焼き入れる前のオーステナイト粒の結晶方位と同じ方位を維持していると考えられることから、その方位と、再構築したオーステナイトの方位を比較することで、結晶方位の精度を検証することとした。

焼き入れ組織中のマルテンサイトの結晶方位マップを図 7 (a) に、焼き入れ組織中の残留オーステナイトの結晶方位マップを図 7 (b) に示す。さらに、図 7 (a) のフェライトの結晶方位データを用いてオーステナイトを再構築した結果を図 7 (c) に示す。それぞれの結晶方位マップは、結晶粒が識別しやすいように 15° 粒界を黒線で示した。図 7 (b) のそれぞれのオーステナイトの方位を、図 7 (c) の再構築オーステナイトの方位と比べると、残留オーステナイトの方位と、それに隣接する再構築オーステナイトの方位はよく一致していることが確認できる。この結果から、再構築オーステナイトの方位は、正確に得られていることを確認した。

2.5 本解析法の利用例

本解析法は、解析に用いる最小のデータ単位を BCC 結晶粒の平均方位としているため、計算量が少なく、高速で解析できる。広範囲の金属組織を短時間で解析できることから、多数のオーステナイト結晶粒の再構築データを用いて、オーステナイトの結晶粒径や集合組織を精度よく求めることに適している。

そのような解析結果の一例として、鋼を高温のオーステナイト域で保持したときの、保持時間の経過に伴う、オーステナイトの結晶粒径と集合組織の変化を調査した結果について紹介する。

サンプル鋼材の組成は 0.2%C-2%Mn 鋼であり、熱間圧延と冷間圧延を施した後、 870°C で 0 ~ 95s の種々の時間保持する熱処理を施した後、水焼き入れた。EBSD の測定を、板厚の $3/4$ 位置の圧延方向断面において、 $500\mu\text{m}$ 長 $\times 100\mu\text{m}$ 厚範囲を $0.1\mu\text{m}$ の測定間隔で行った。得られ

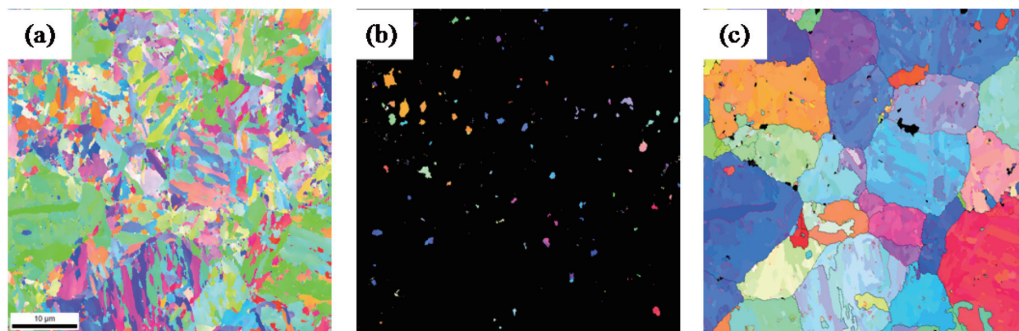


図7 旧 γ の方位の妥当性検証結果
(a)元のマルテンサイト組織の方位マップ, (b)残留 γ の方位マップ, (c)逆解析旧 γ の方位マップ+ 15° 粒界 (黒線)
Appropriateness of the crystal orientation of reconstructed austenite
(a) Orientation mapping of the initial (martensite) microstructure, (b) Orientation mapping of the retained austenite grains in the initial microstructure, (c) Reconstructed austenite microstructure

た結晶データを用いて、開発した旧オーステナイト組織の再構築プログラムによりオーステナイト組織を解析し、オーステナイトの平均結晶粒径と集合組織を解析した。結晶粒径は、方位差 15° 以上で囲まれる結晶粒として規定した。集合組織は、圧延方向断面において測定したオーステナイトの結晶を ND (Normal Direction) 方向からの観察になるようにデータ変換した後、球調和展開級数法により解析し、方位分布関数 (ODF) として表示した。

代表的な結果として、 870°C で 30 秒保持した後、焼き入れた組織の、結晶方位マップと、オーステナイト再構築解析後の結晶方位マップを、それぞれ図 8 (a) と (b) に示す。同図には、それぞれフェライトとオーステナイトの平均結晶粒径も付記した。このような再構築オーステナイトのデータを用いて、熱処理の保持時間に対するオーステナイトの平均結晶粒径と集合組織 (ODF の $\phi_2 = 45^\circ$ 断面) の変化を求めた。その結果を、それぞれ図 9 と図 10 に示す。図 9 から、熱処理保持時間の経過に伴い、平均結晶粒径は $7.9\mu\text{m}$ から $9.3\mu\text{m}$ に粗大化していることが確認できる。一方、図 10 の集合組織は Brass 方位 ($(110)[\bar{1}\bar{1}2]$) と Copper 方位 ($(112)[\bar{1}\bar{1}1]$) が発達した典型的なオーステナイトの集合組織であるが、いずれの熱処理保持時間においても強度に特に変化の傾向は認めなかった。このように、本手法によって熱処理中のオーステナイトの組織変化を精度よく調査するこ

とが可能である。

3. 結 言

鋼のマルテンサイトまたは、ベイナイトの組織の EBSD 解析データを用いて、変態前のオーステナイトを再構築する解析手法を開発した。本手法では、オーステナイト粒を再構築するうえで、共通結晶方位の許容誤差の課題を解決し、高精度にオーステナイト方位を判定できる解析プログラムとして開発された。解析結果を検証した結果、本再構築法によって、オーステナイト組織を精度よく再現することが可能であることが示された。また、この手法は、広範囲な金属組織において、オーステナイト組織を短時間で再構築できることから、オーステナイトの平均結晶粒径や集合組織を高精度に求めることに適している。

謝 辞

本再構築法を開発する上で、茨城県庁 (元日鉄住金テクノロジー(株)) の富田俊郎博士には、プログラム技術の確立の面で、多大なご助力をいただくとともに、本稿を執筆する上で貴重な議論をいただきました。ここに感謝の意を表します。

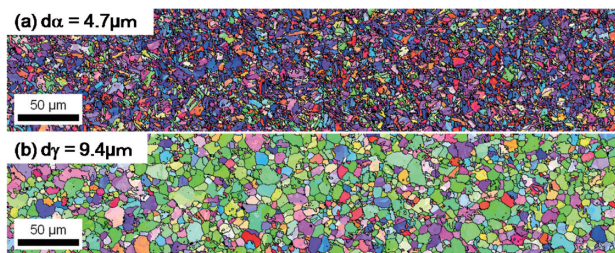


図 8 EBSD 解析による結晶方位マップ
(a) $870^\circ\text{C} \times 30$ 秒保持後に水焼き入れた組織 (マルテンサイト), (b) 再構築オーステナイト組織

Orientation mapping by EBSD analysis
(a) Microstructure of martensite after $870^\circ\text{C} \times 30\text{s}$ annealing and water quenching, (b) Reconstructed austenite microstructure

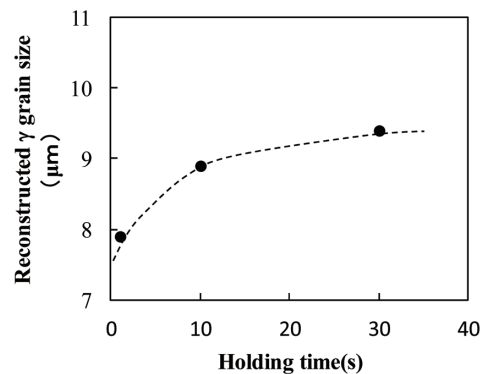


図 9 870°C での保持時間に対する再構築オーステナイトの粒径の変化

Changes of grain size of reconstructed austenite microstructure to holding time at 870°C

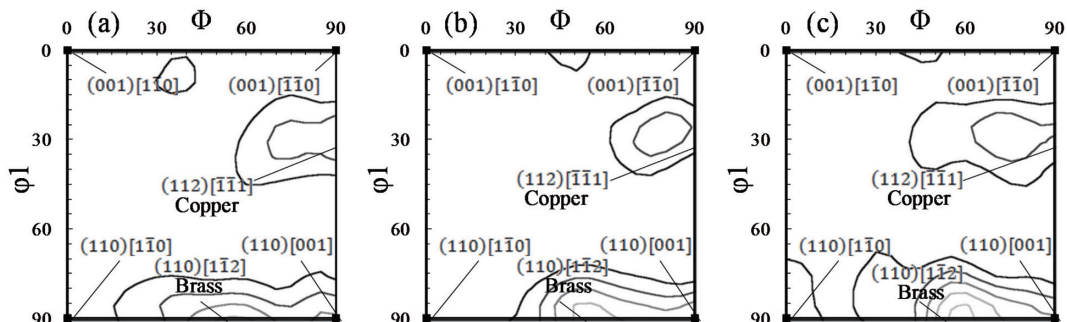


図 10 870°C での保持時間に対する再構築 γ 組織における集合組織 (それぞれ ODF の $\phi_2 = 45^\circ$ 断面) (a) $870^\circ\text{C} \times 1$ 秒保持, (b) $870^\circ\text{C} \times 10$ 秒保持, (c) $870^\circ\text{C} \times 30$ 秒保持

Changes of the texture of reconstructed austenite microstructure to holding time ($\phi_2 = 45^\circ$ section in ODF)
(a) After $870^\circ\text{C} \times 1\text{s}$ hold, (b) After $870^\circ\text{C} \times 10\text{s}$ hold and (c) After $87^\circ\text{C} \times 30\text{s}$ hold

参考文献

- 1) Cayron, C., Artaud, B., Briottet, L.: Materials Characterization. 57, 386 (2006)
- 2) Miyamoto, G., Iwata, N., Takayama, N., Furuhashi, T.: ISIJ International. 51, 1174 (2011)
- 3) Morimoto, T., Yoshida, F., Chikushi, I., Kitahara, H., Tsuji, N.: Tetsu-to-Hagane. 93, 591 (2007)
- 4) Humbert, M., Moustahfid, H., Wagner, F., Philippe, M. J.: Scr. Metall. Mater. 30, 377 (1994)
- 5) Humbert, M., Gey, N.: J. Appl. Crystallogr. 35, 401 (2002)
- 6) Krudjumov, G., Sachs, G.: Z. Physik. 64, 225 (1930)
- 7) Nishiyama, Z.: Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. 23, 638 (1934)
- 8) Tomida, T., Imai, N., Miyata, K., Fukushima, S., Yoshida, M., Wakita, M., Etou, M., Sasaki, T., Haraguchi, Y., Okada, Y.: ISIJ Int. 48, 1148 (2008)



畑 顕吾 Kengo HATA
先端技術研究所 基盤メタラジー研究部
主任研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



脇田昌幸 Masayuki WAKITA
先端技術研究所 基盤メタラジー研究部
主幹研究員



藤原知哉 Kazuki FUJIWARA
先端技術研究所 基盤メタラジー研究部
上席主幹研究員 博士(工学)



河野佳織 Kaori KAWANO
先端技術研究所
基盤メタラジー研究部長 博士(工学)