

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686098

研究課題名(和文) 粒内核生成による鉄鋼材料のせん断型変態組織の微細化

研究課題名(英文) Microstructure refinement of steels by intragranular nucleation in displacive transformation

研究代表者

宮本 吾郎 (Miyamoto, Goro)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：60451621

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,500,000円、(間接経費) 6,450,000円

研究成果の概要(和文)：せん断型変態組織の微細化を目的として、拡散型変態で確立されている粒内核生成を適用した。その結果、拡散型変態で効果の大きな粒内介在物・析出物からの核生成は、せん断型変態では起こりにくいのに対して、変態前に加工を加えることで特定のバリエーションが生成するバリエーション選択が起こるとともに、組織が微細化することが明らかとなった。  
また、母相/生成相間の結晶方位関係精密測定法に基づく母相方位再構築法を確立することで、せん断型変態組織形成の理解に重要となるオーステナイト母相組織を解析することができることを明確にした。

研究成果の概要(英文)：In order to refine microstructure of displacive transformation, intragranular nucleation, which has been used in the diffusional transformation, has been applied. It was found that, unlike to diffusional transformation, effects of inclusion or precipitates within matrix grains are small while deformation prior to transformation accelerates intragranular nucleation of martensite or bainite, leading to refinement of microstructure.  
Furthermore, novel characterization method has been developed on a basis of precise measurement of orientation relationship between product and matrix phases and reconstruction method of austenite matrix.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：せん断型変態 組織微細化 マルテンサイト バイナイト

### 1. 研究開始当初の背景

せん断型変態により形成されるラスマルテンサイトおよびベイナイト組織は、最近の鉄鋼材料に対するさらなる高強度化の要求を背景にますます重要性を増している。高強度と高延性を両立するためには、有効結晶粒界を多く材料中に導入することが不可欠であり、フェライト組織を対象として $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒を得る試みが進められている。一方、鉄鋼材料のせん断型変態組織は、一般的に厚さ $1\mu\text{m}$ 以下の微結晶(ラス)から構成されるが、母相/生成相間の強い結晶学的拘束のため生成可能な複数の特定結晶方位(バリエーション)の中でも同じバリエーションに属するラスが母相粒界から集団で生成してしまう。このバリエーション領域の境界が有効結晶粒界として働くため、異なる結晶方位を有するラスを多く核生成させるとともに個々のラスの成長を抑制してバリエーション領域を微細化することがせん断型変態組織の高強度化・高延靱性化に直結する。本研究では、せん断型変態組織の超微細化法として、母相粒内の不均一組織からの粒内核生成に注目する。拡散型変態においては、粒内の第二相や熱間加工によって導入された変形組織からの粒内変態誘起がオキサイドメタラジヤや制御圧延といった加工熱処理法の中で広く利用されているが、マルテンサイトやベイナイトといったせん断型変態組織の微細化は母相粒の微細化に頼ることがほとんどで、粒内核生成による微細化追求は大きな可能性を残している。また、せん断型変態は母相の強い結晶学的拘束を受けるため粒内の不均一組織でバリエーション領域の成長が阻害され成長抑制の点でも微細化に寄与することが期待される。

### 2. 研究の目的

せん断型変態により形成されるバリエーション領域のサイズやその種類を制御するため、母相粒内に図1に示すような第二相や変形組織を導入して粒内核生成に及ぼす影響を

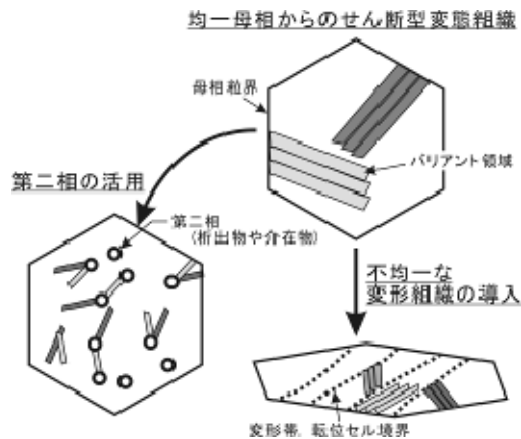


図1 母相粒内への不均一組織(第二相調, 加工変形組織)導入による組織超微細化

調査し、母相中の不均一組織導入によるバリエーションサイズおよび優先生成バリエーション制御法を確立する。

### 3. 研究の方法

モデル合金として熱処理の容易なFe-高Ni合金および実用鋼に近いFe-0.15C-1.5Mn合金をベースとした低炭素低合金鋼を用いた。これらの合金を均質化した後、所定のサイズに切り出した。変態前加工の影響を調べるため、 $\gamma$ 化後、種々の歪量の軸圧縮加工を施し、冷却しマルテンサイト変態もしくは、ベイナイト変態させた。一方、析出物がせん断型変態組織に及ぼす影響を調査するために、合金炭化物が生成する温度域で種々の時間保持を行い、その後冷却することでベイナイトおよびマルテンサイトを生成させた。

これらの熱処理材の組織を、光顕、SEM/EBSD法を用いて解析し、組織サイズ、バリエーション選択傾向を調査した。

### 4. 研究成果

#### (1) オーステナイト再構築法の確立

せん断型相変態組織に大きな影響を及ぼす母相オーステナイト組織を明らかにするために、母相/生成相間の方位関係を精密に調査し、局所的な母相方位を再構築するプログラムを構築した。さらに、アルゴリズムの見直し、マルチCPUコア計算への対応によって、当初の計算速度から200倍程度高速化することができた。図2に再構築計算の一例を示す。図2(a)は変態前に30%軸圧縮変形を加えたオーステナイトから生成したマルテンサイトの $\alpha$ 方位マップ、図2(b)は(a)から再構築

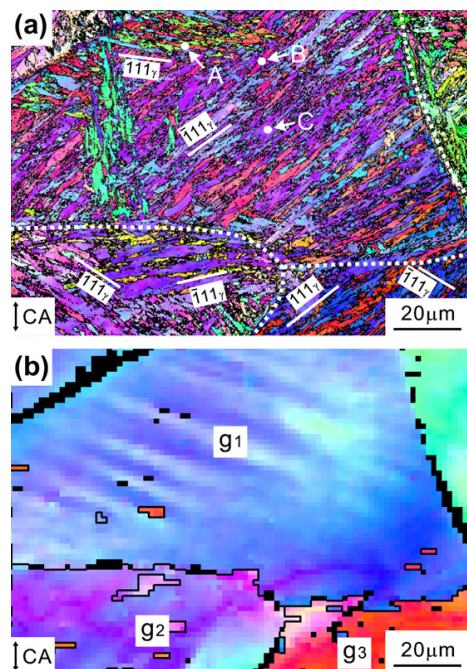


図2 (a)30%オースフォームドマルテンサイトの方位マップ、(b)(a)から再構築したオーステナイトの方位マップ

した $\gamma$ 方位マップである。本手法を用いることで、 $\gamma$ 粒界の位置のみならず、圧縮変形に伴い導入された $\gamma$ 粒内の加工組織が可視化できていることが分かる。また、本手法では $\gamma$ 方位そのものを再構築するため、集合組織についても評価できることが確認された。

### (2) 粒内析出物がせん断型変態組織に及ぼす影響

粒内析出物として、 $\gamma$ 中に微細析出するNb炭化物を選択し、Fe-0.1C-1.5Mn-0.1Nb合金を用いて実験を行った。図3にNb炭化物が析出する1273Kでの保持の有無によるマルテンサイトおよびベイナイト組織の変化を示す。1273Kで18ks保持することで、Nb炭化物が生成することは、SEM観察により確認した。マルテンサイト組織サイズは、保持無材で3.5 $\mu$ m、保持有材で3.6 $\mu$ mであり、ベイナイト組織については、保持無材で10.7 $\mu$ m、保持有材で9.4 $\mu$ mであり、炭化物を導入することで大きな組織微細化効果は見られなかった。また、硬度やバリエーション組織についても、析出保持によって目立った改善は見られず、析出保持時間および保持温度を種々変化させたが、傾向は変わらないことが分かった。

### (3) 変態前加工がせん断型変態組織に及ぼす影響

変態前加工の影響を調べるために、Fe-3Ni-0.15C-1.5Mn-0.5Mo合金を用いた。 $\gamma$ 化後、700°Cで種々の歪量の一軸圧縮加工を施し、その組織変化を調査した。図4に変態前加工がマルテンサイトおよびベイナイト組織に及ぼす影響を示す。いずれの組織においても変態前加工により組織は微細化され、さらに、圧縮軸に対して40-60°の角度を持つバリエーションが多く生成していることが分かる。図5は組織サイズに及ぼす変態前加工の影響

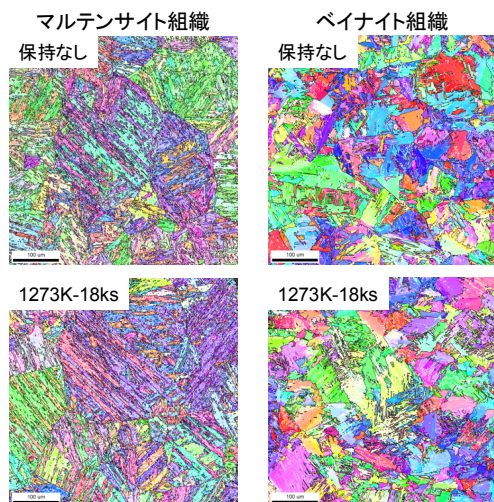


図3 マルテンサイトおよびベイナイト組織(500°C, 600s)に及ぼす炭化物析出の影響. Fe-0.15C-1.5Mn-0.1Nb合金.

の影響であるが、加工量が増加するに伴いいずれの組織も単調に微細化されるが、マルテンサイト組織の方が微細化効果大きい。

(1)で確立した再構築法を用いて、生成するバリエーション量を定量化した結果、変態前加工を施すことで、母相の活動すべり面に平行な晶癖面を持つバリエーションが優先的に生成することが明らかとなった。また、それらのバリエーションの中でも一部のものが優先的に生成しやすい。さらに、母相組織を室温でも観察することのできるFe-32Ni合金を同条件で一軸圧縮変形させて組織を観察したところ、母相の活動すべり面に沿って転位境界(マイクロバンド)が発達していた。これらの結果より、図6に示す様に、マイクロバンドに平行な晶癖面を有するバリエーションの優先核生成、および優先成長によってこれらのバリエーションが多く生成したものと考えられる。従って、これらの結果は、変態前加工によって導入された転位組織がマルテンサイトやベイナイトの粒内核生成を促進させ、組織を微細化させるとともに、特定のバリエーションの優先生成を引き起こすことを示している。

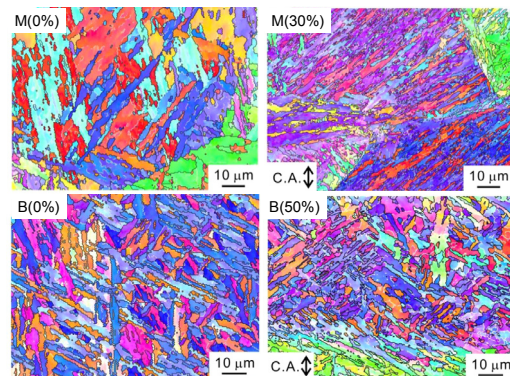


図4 マルテンサイト(M)およびベイナイト(B)の $\alpha$ 方位マップ, 無加工材(M(0%), B(0%)), 加工材(M(30%), B(50%))

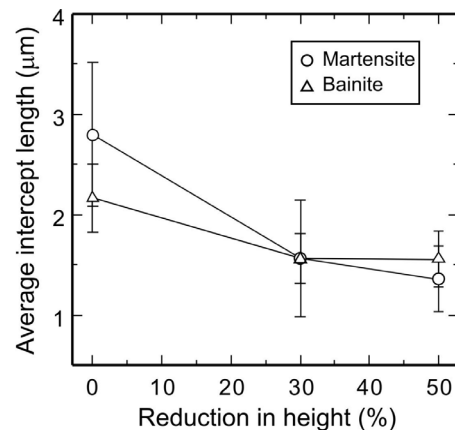


図5 マルテンサイトおよびベイナイト組織のサイズに及ぼす変態前加工の影響



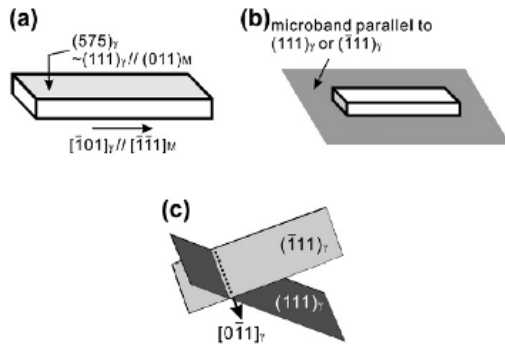


図6 (a)ラスの模式図, (b)マイクロバンド上へのラスの核生成, (c)成長におけるバリエント選択則

#### まとめ

本研究では、せん断型変態組織の微細化をめざし、各種不均一組織を母相粒内に導入することで、粒内核生成を促進させるとともに、母相方位再構築法の構築に取り組んだ。その結果、第二相については大きな効果のないことが分かったが、変態前加工によって導入された転位組織はせん断型変態組織の粒内核生成に有効であることが見出された。

#### 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 5 件)

1. T. Chiba, G. Miyamoto, T. Furuhashi, Comparison of Variant Selection between Lenticular and Lath Martensite Transformed from Deformed Austenite, *ISIJ Int.*, (査読有), 53(2013), pp. 915-919, DOI: 0.2355/isijinternational.53.915
2. G. Miyamoto, N. Iwata, N. Takayama, T. Furuhashi, Variant selection of lath martensite and bainite transformation in low carbon steel by ausforming, *J. Alloy and Compounds*, (査読有), 577(2013), pp. S528-S532, DOI:10.1016/j.jallcom.2011.12.111
3. Chiba T, G. Miyamoto, T. Furuhashi, Variant selection in ausformed lenticular martensite, *Scripta Mater.*, (査読有), 67(2012), pp. 324-327, DOI:10.1016/j.scriptamat.2012.05.007
4. N. Takayama, G. Miyamoto and T. Furuhashi, Effects of transformation temperature on variant pairing of bainitic ferrite in low carbon steel, *Acta Mater.*, (査読有), 60(2012), pp.

2387-2396,

doi:10.1016/j.actamat.2011.12.018

5. G. Miyamoto, N. Iwata, N. Takayama, T. Furuhashi, Quantitative analysis of variant selection in ausformed lath martensite, *Acta Mater.*, (査読有), 60(2012), pp. 1139-1148, doi:10.1016/j.actamat.2011.11.018

##### [学会発表] (計 15 件)

1. 宮本吾郎, 古原忠, EBSD法を用いた鉄系マルテンサイトの結晶学解析, 日本金属学会2014年春期(第154回)講演大会, 2014/3/22, 東工大.
2. 知場三周, 宮本吾郎, 古原忠, オースフォームドレンズマルテンサイトのバリエント選択に及ぼす母相粒界の影響, 日本金属学会2014年春期(第154回)講演大会, 2014/3/22, 東工大.
3. T. Chiba, G. Miyamoto, T. Furuhashi, Variant selection of ausformed martensite in Fe-Ni-C alloys, 日本鉄鋼協会第165回春季講演大会, 2013/3/27, 東京電機大.
4. 知場三周, 宮本吾郎, 古原忠, オースフォームドレンズマルテンサイトのバリエント選択, 日本鉄鋼協会第164回秋季講演大会, 2012.9.15, 愛媛.
5. G. Miyamoto, A. Stormvinter, T. Furuhashi, A. Borgenstam, EBSD法を用いたFe-Cマルテンサイトの方角関係とバリエント隣接傾向の解析, 日本鉄鋼協会第163回春季講演大会, 2012.3.30, 横国.
6. 高山直樹, 宮本吾郎, 古原忠, 低炭素鋼のベイナイトおよびラスマルテンサイト組織におけるバリエント選択, 日本鉄鋼協会第163回春季講演大会, 2012.3.30, 横国.
7. N. Takayama, G. Miyamoto and T. Furuhashi, Variant selection of bainite and lath martensite in low carbon steel, 日本鉄鋼協会第161回秋季講演大会, 2011.09.21, 大阪大学.
8. G. Miyamoto, N. Iwata, N. Takayama, T. Furuhashi, オースフォームドラスマルテンサイトにおけるバリエント選択の定量解析, 日本鉄鋼協会第161回秋季講演大会, 2011.09.22, 大阪大学

##### [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]  
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 吾郎 (Miyamoto Goro)  
東北大学・金属材料研究所・准教授  
研究者番号：60451621