

白色 X 線マイクロビームと波長分散型 X 線回折により測定した
SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼における引張変形中の
局所内部応力と変形誘起マルテンサイト変態の関係
**Relationship between Deformation-Induced Martensitic Transformation
and Local Internal Stress Field in SUS304 Austenitic Stainless Steel during
Tensile Deformation Evaluated by Energy-Dispersive X-Ray Diffraction
Microscopy with White X-Ray Micro Beam**

柴田 暁伸^a, 陳 美伝^a, 寺田 大将^a, 足立 大樹^b, 辻 伸泰^a
Akinobu Shibata^a, Meichuan Chen^a, Daisuke Terada^a, Hiroki Adachi^b, Nobuhiro Tsuji^a

^a 京都大学, ^b 兵庫県立大学
^a Kyoto University, ^b University of Hyogo

オーステナイト系ステンレス鋼における引張変形中の局所内部応力場を、白色 X 線マイクロビームと波長分散型 X 線回折を用いて解析し、変形誘起マルテンサイト変態とオーステナイトの局所内部応力場の関係を調べた。その結果、引張変形中のオーステナイトの内部応力場は不均一であり、変形誘起マルテンサイトの生成によって、周囲のオーステナイトの局所内部応力場が大きく変化することがわかった。

キーワード： 変形誘起マルテンサイト変態、オーステナイト系ステンレス鋼、
白色 X 線マイクロビーム、局所内部応力場、EXDM

背景と研究目的：

鉄鋼材料のような構造用金属材料は、高強度だけでなく、加工性・成形性といった延性にも優れていることが重要である。高強度と高延性を両立する手法の一つとして、変形誘起マルテンサイト変態によって生じる TRIP (Transformation Induced Plasticity: 変態誘起塑性) 効果の利用が挙げられる。TRIP 効果を利用した鉄鋼材料、いわゆる TRIP 鋼は高強度・高延性を実現した材料であり、さらに衝撃吸収性などの靱性にも優れている。TRIP 鋼はその優れた機械的特性のため、自動車用鋼板などですでに幅広く実用化されている。

近年、二酸化炭素排出量削減の観点から、燃費向上を目的とした自動車などの輸送機器の車体重量軽量化が求められており、高強度・高延性を有する TRIP 鋼もその機械的特性の更なる向上が重要な課題となっている。

変形誘起マルテンサイト変態では種々の方位を有するマルテンサイトがランダムに生成するわけではなく、ある特定の方位を有するマルテンサイトが優先的に生成する。この変形誘起マルテンサイト変態におけるマルテンサイト方位選択則を理論的に解明することができれば、生成するマルテンサイトの方位を制御することが可能となり、TRIP 効果を向上させる新たな組織制御法の開発に繋がると考えられる。マルテンサイト方位選択則に関しては、Patel and Cohen モデル[1]や Bogers and Burgers モデル[2]などが提案されている。しかし、我々は多結晶 SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼の引張変形中の変形誘起マルテンサイト変態を、一軸引張応力状態のもとに解析した結果、従来のモデルでは観察された変形誘起マルテンサイトの方位を説明できないことを明らかにした[3]。これは引張変形中における多結晶オーステナイトの局所領域での内部応力状態が均一ではないことに起因していると考えられる。近年、Kajiwara らは SPring-8 BL28B2 にて白色 X 線マイクロビームと波長分散型 X 線回折を用いた局所内部応力測定技術 (Energy-dispersive X-ray Diffraction Microscopy: EXDM) を開発してきている[4]。そこで、本研究では、Kajiwara らが開発した技術である EXDM を用いて、変形誘起マルテンサイト変態が生じる前の母相オーステナイト中の局所内部応力場を正確に測定し、変形誘起マルテンサイト変態と母相オーステナイト中の内部応力場の関係を明らかにすることを目的として実験を行った。

実験：

試料は SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼を用いた。放電加工により引張試験片を切り出し、1100 °C、8hr の焼鈍処理を施した後、水冷した。熱処理後、10% HClO₄ + 90% CH₃COOH 溶液を用いた電解研磨により表面加工層を除去し、走査型電子顕微鏡により得られる電子線後方散乱回折 (EBSD) パターンを解析することにより、試験片の結晶方位マップを作成した。作成した引張試験片の形状は平行部長さ：3 mm、平行部幅：1 mm、厚さ：0.3 mm である。

ビームライン BL28B2 において、白色 X 線マイクロビーム (ビーム径：10 μm × 10 μm) を引張試験片に照射しながら試料ステージを走査することによって、各照射位置での透過ラウエパターンをフラットパネル検出器にて測定し、隣接する測定位置での透過ラウエパターンの変化から試験片の結晶粒界マップを構築した。測定範囲は 1 mm × 2 mm 程度であり、測定ステップは 10 μm である。

結晶粒界マップおよび EBSD 方位マップから局所内部応力場を測定する領域を選定し、回折 X 線の回折角とエネルギースペクトルを半導体検出器により測定することにより、測定領域中の種々の回折面の格子面間隔を求めた。そして、試験片に種々の引張ひずみを付加し、同一領域に関して上記の解析を繰返すことにより、引張ひずみの増加に伴う格子面間隔の変化を測定し、格子面間隔の変化と弾性定数から局所内部応力場を算出した。

結果および考察：

図 1(a)、(b) に引張変形前の EBSD 方位マップおよび透過ラウエパターン解析によって得られた結晶方位マップを示す。EBSD 方位マップと結晶方位マップは良い一致を示していることがわかる。図 2(a)、(b) は 0.8 % および 4.2 % の引張ひずみを与えた後の透過ラウエパターン解析によって得られた結晶粒界マップであり (図 2(a)、(b) の領域は図 1 の黒点線で示した領域に対応している)、引張方向は図の水平方向である。また、図 2(a)、(b) の結晶粒界マップ上には、内部応力場を測定した領域およびその局所領域の内部応力場を主応力の方向とその大きさの形で同時に表してある (赤線：引張応力、青線：圧縮応力)。図 2(a) から、巨視的には水平方向の一軸引張応力を印加しているが、局所的な内部応力場は不均一であることがわかる。また、ひずみ量が 0.8 % から 4.2 % に増加することによって、図 2(a)、(b) の 'A'、'B'、'C' と記した領域の局所内部応力場が大きく変化している。特に 'B'、'C' の領域では、引張方向に平行な応力が引張応力から圧縮応力へと変化している。図 2(c) は 4.2 % の引張ひずみを与えた後の EBSD により得られた相分布マップであり、

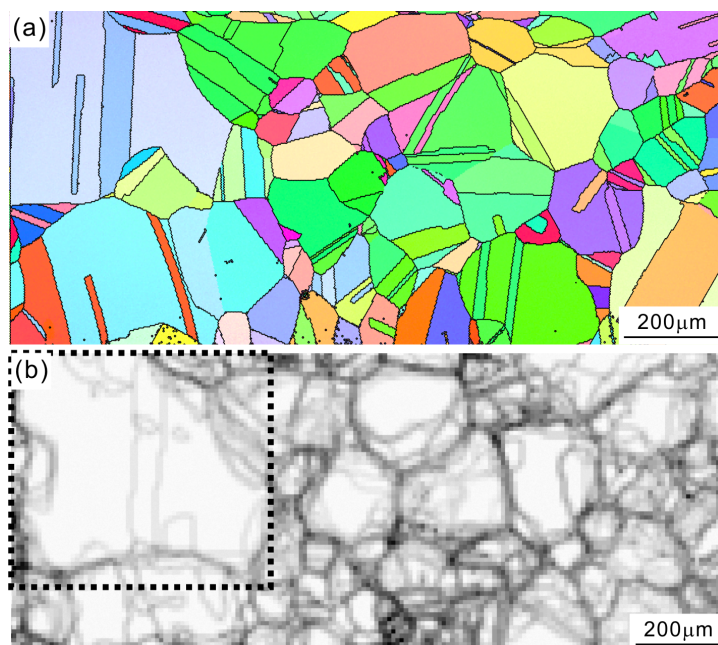


図 1. (a) Orientation map obtained by EBSD analysis and (b) grain boundary image obtained by Laue pattern analysis in SUS304 austenitic steel.

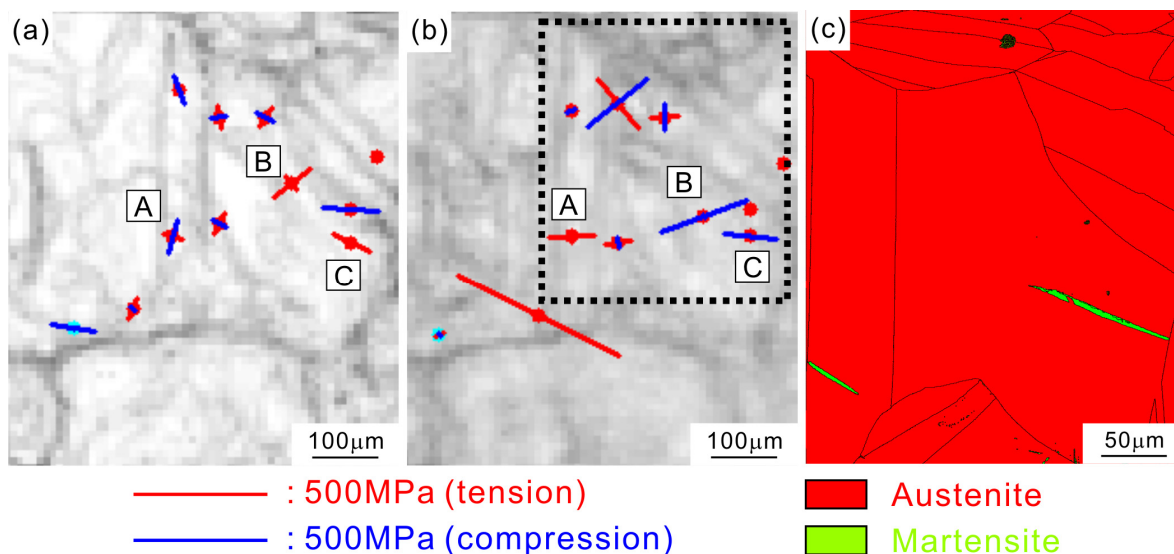


図 2. (a), (b) Local internal stress field expressed as principal stress. The direction and magnitude of the principal stress are described as length and color (red: tensile stress, blue: compressive stress).
(c) Phase map obtained by EBSD analysis (red: austenite, green: martensite).

赤色の領域はオーステナイト、緑色の領域はマルテンサイトを表している(測定領域は図 2(b)の黒点線で示した領域である)。図 2(c)から、図 2(a), (b)の‘A’、‘B’、‘C’と記した領域近傍に変形誘起マルテンサイトが生成していることがわかる。そのため、変形誘起マルテンサイトが生じたことによって、変形誘起マルテンサイトの周囲のオーステナイトの局所内部応力場が大きく変化したと考えられる。

今後の課題：

図 2(c)に示した変形誘起マルテンサイトの晶癖面や結晶学的特徴を EBSD 解析によって求め、今回の実験で得られた図 2(a)の変形誘起マルテンサイト変態が生じる前のオーステナイトの局所内部応力場との関係を調べることによって、変形誘起マルテンサイト変態におけるマルテンサイト方位選択則を明らかにしていく。

参考文献：

- [1] J.R. Patel and M. Cohen, *Acta. Metall.* **1**, 531 (1953).
- [2] A.J. Bogers and W.G. Burgers, *Acta. Metall.* **12**, 255 (1964).
- [3] M. Chen et al, *Mater. Trans.* **54**, 308 (2013).
- [4] K. Kajiwara et al, *ISIJ Int*, **53**, 165 (2013).