

## 高延性を示す新規鉄基合金の変形機構の解明

### Characterization of Deformation Mechanism of Novel Iron-based Alloys Exhibiting High Ductility

藤枝 俊<sup>a</sup>, 吉村 俊基<sup>a</sup>, 篠田 弘造<sup>a</sup>, 鈴木 茂<sup>a</sup>  
Shun Fujieda, Toshiki Yoshimura, Kozo Shinoda, Shigeru Suzuki

<sup>a</sup>東北大学 多元物質科学研究所  
<sup>a</sup>Tohoku University, IMRAM

Mn 量の多い Fe-Mn 系合金のなかには、高い延性を示す合金がある。それらの特徴的な変形過程を明らかにするために、変形量を変えた試料の二次元的な X 線回折パターンを測定した。変形に伴う回折強度の変化に関する結果から、多結晶材中において引張り方向に対し双晶のせん断変形を起こしやすい方位をもつ結晶粒から双晶変形が起こることが示唆された。

キーワード： 双晶変形、面心立方結晶、延性

#### 背景と研究目的：

高濃度のマンガンを含む Fe-Mn 系合金は、高い延性や形状記憶効果を示すために、新しい特性をもつ合金として注目されている[1]。この系の合金は希少元素を含まず、安価な原料から作製できるため、新機能をもつ構造材料として産業分野での利用が期待されている。これらの高延性や形状記憶効果の特性発現には、室温付近の変形に伴う双晶形成やマルテンサイト変態が密接に関係している。このため、変形機構と合金内部の構造や組織との関係の解明が重要となっているが、多結晶合金の組織を電子顕微鏡等で観察しても複雑な変形組織が観察されるだけで、外部の変形と変形組織の間関係を検討するには限界がある[2]。このため、本実験では Fe-Mn-C 系合金の変形に伴う構造情報を引き出すために、様々な変形を加えた多結晶合金に対して放射光による X 線回折実験を行った。

著者等は、これまで Fe-Mn-Si 系の形状記憶合金に対して精密な二次元 X 線回折パターンの測定から、変形によりマルテンサイト相の出現することを明らかにしてきた。また、マルテンサイト変態を起こした試料を加熱するとルテンサイト相が部分的に消滅することなども示してきた。今回の実験では、高強度で高延性の Fe-Mn-C 系合金について、変形に伴う合金の方位変化の解析を行い、マルテンサイト変態が生じないかどうかなどについても検討した。

#### 実験：

試料は Fe-Mn-0.6% C 合金であり、再結晶させた後に、0~60%の引張り変形を加えた試料を作製した。それらの X 線回折パターン(デバイリング)を、透過配置でイメージングプレート(IP)により記録した(図 1 に実験セットアップを示す)。IP から回折パターンを読み取った後に、Fit2D により回折強度を評価した。

リング内の回折強度の相対的变化から、引張り変形に伴う結晶配向変化を含めた組織変化を評価した。これまで、多結晶におけるマルテンサイト変態が起こる応力方向に対する方位等が調べてきたが、今回は引張り方向に対するせん断変形の応力が最大となる面が重要であることが示されてきた。このため、今回の実験においても、変形過程を評価する際には、引張り方向に対するこれらの優先方向の効果を考慮した。

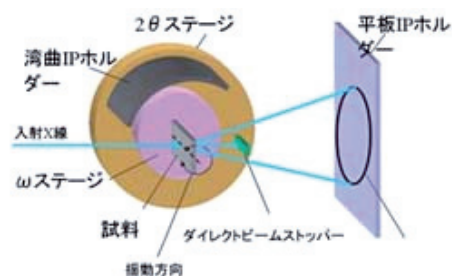


図 1. 二次元回折のための配置

## 結果および考察：

図2は高い延性を示す再結晶したままのオーステナイト(fcc)系 Fe-Mn-C 系合金の回折リングを三次元的に表示している。今回の回折実験では、放射光のエネルギーを 30keV にして測定した。図2では回折リングの 1/4 を示しており、縦軸は回折強度である。回折リングの強度は、部分的に強くなっているが、リングの円周方向で平均するとほぼ均一になっている。これは、歪みの少ない再結晶粒がほぼランダムに分布していることを示唆している。

この合金を引張試験すると、60%以上の伸びを示した。図3はこの合金を60%まで引張り変形した試料からの回折リングを示している。この試料においては、変形したにもかかわらず $\alpha'$ 相(bcc)や $\epsilon$ 相(hcp)のマルテンサイト相による回折パターンが観察されなかった。このことは、母相(fcc)の構造が変化せずに塑性変形したことを示している。すなわち、転位や双晶変形によって、変形が進んだことを示唆している。また、図3ではリングの円周方向で回折強度はつながつており、これは結晶性の良い各結晶粒が塑性変形により歪んだことによる。

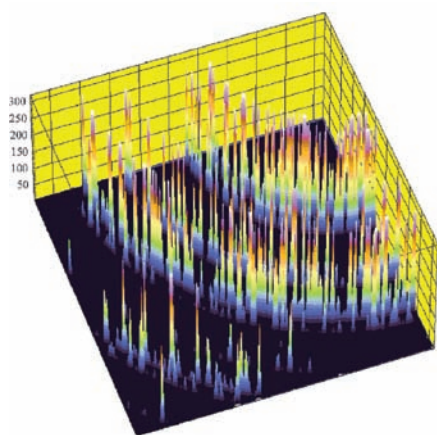


図 2. Fe-Mn-C 合金の再結晶材からの二次元 X 線回折パターンの 3D 表示。回折リングを 1/4 の表記。

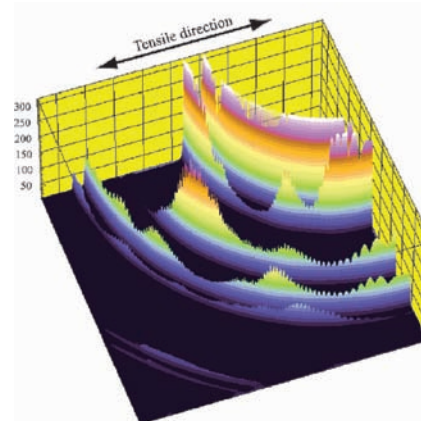


図 3. Fe-Mn-C 合金の 60%引張り材からの二次元 X 線回折パターンの 3D 表示。回折リングを 1/4 の表記。

回折リングの円周方向における回折強度の変化から、多結晶内で引張り方向に対しどの方位の結晶粒が変形しているかを見積もることができる[2]。図3は、母相 fcc と双晶の原子配列を示している。この関係をもとに、双晶や転位のすべりによる変形を考慮しステレオ投影により変形過程を解析した。図4は、ステレオ投影上で、母相のせん断面(111)とせん断方位 $\langle -211 \rangle$ のときの結晶方位(双晶の母相)を示した。図3の結果などから、引張り変形により、引張り方向が $\langle 011 \rangle$ 近傍の方位(水色付近)をもつ結晶粒の割合が減少し、それらの結晶粒で優先的に変形が起こったことが示唆された。また、変形量の増大に伴い、水色付近の方位が双晶変形による方位からずれたため、転位すべりの $\langle -110 \rangle$ のせん断変形の成分が増えることも示唆された。

図5は母相 fcc に対する双晶関係の方位をステレオ投影したものであり、双晶のせん断面(111)とせん断方位 $\langle 2-1-1 \rangle$ を、図4の母相方位に対応させて示した。今回の X 線回折結果から、引張り変形に伴い、引張り方向に対し $\langle 100 \rangle$ 近傍の方位をもつ結晶粒の割合が増えていることが示された。すなわち、変形に伴い双晶が生成していることが示唆された。しかし、すべての変形が双晶によるものでなく、変形に伴い転位すべりも同時に起こっていると考えられる。

このように、Fe-Mn-C 系合金の変形には、双晶変形や転位によるすべり変形が深く関係していると考えられるが、それを確認するために、EBSD (電子後方散乱回折) による微細組織の方位解析も行った。その結果、多結晶材の中で双晶変形のせん断変形が起こりやすい方位をもつ結晶粒で、板状の双晶が形成していることが確認できた。以上の情報は、高延性などの力学特性の発現機構を考察する上で重要であり、これらの情報を基、合金成分や変形様式をさらに制御することにより、高機能合金の開発が進展することが期待される。

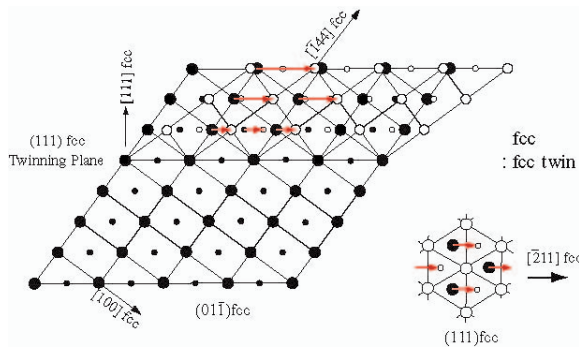


図 3.(左) 母相 fcc からの変形双晶 fcc の生成を示す原子配列。

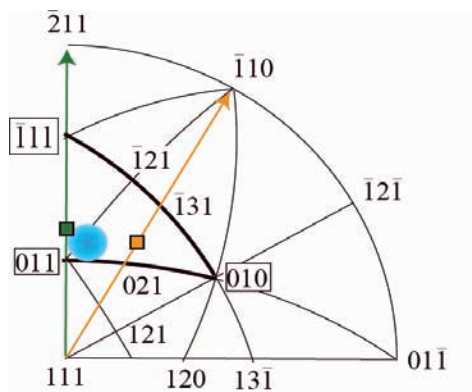


図 4. 再結晶した Fe-Mn-C 合金を 10%引張り変形した時に、母相 fcc の回折強度の低下から見積もった、引張りによるせん断変形で引張り応力に対し変形した結晶粒の方位 (水色)。母相 fcc のステレオ投影上にプロット。緑色のマークと黄色のマークは、それぞれ双晶変形と転位すべりによる最大せん断応力方向。

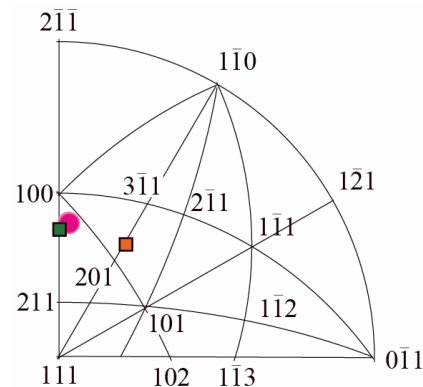


図 5. 再結晶した Fe-Mn-C 合金を引張り変形した時の母相 fcc の回折強度の低下から見積もった、引張りによるせん断変形で引張り応力に対し変形した結晶粒の方位 (赤色)。変形で形成した双晶 fcc のステレオ投影上にプロット。

### 今後の課題：

今回の実験で、引張り変形に伴う全体的な結晶方位の変化により、変形双晶が形成していることを示唆する結果が得られた。実際に、引張り試験した同じ試料の EBSD による微視的な方位解析により、多結晶材の中で、変形双晶が引張り方向に対して双晶せん断変形が発生しやすい方位をもつ結晶粒で形成していることが確認された。引張り方向に対し双晶せん断変形が発生しやすい方位は  $\langle 144 \rangle$  近傍の方位であり、これは多結晶においてもほぼ Schmid の法則が働いていることを示唆している興味深い結果であるといえる。今後は、これらの巨視的な方位解析法や微視的な観察法を組み合わせることにより、外的な力による全体的な変形挙動が明らかにされることが期待できる。

### 参考文献：

- [1] O.Grassel, L.Krüger, G.Frommeyer, L.W.Meyer: Inter. J. Plast, 16 (2000), 1391.
- [2] S.Senoo, K.Shinoda, M.Sato, T.Maruyama, S.Suzuki: Mater. Trans., 49(2008), 1229.