Fe-Si 合金の繰り返し変形に伴う転位組織の形成機構

首藤 洋志^{1,2,*} 小野寺 暁理^{2,*} 荒井 重 勇³ 宮澤 知 孝² 藤居 俊 之²

¹新日鐵住金株式会社技術開発本部

²東京工業大学物質理工学院

³名古屋大学未来材料・システム研究所

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 82, No. 5 (2018), pp. 176–181

© 2018 The Japan Institute of Metals and Materials

Formation Mechanism of Dislocation Structures during Cyclic Deformation in an Fe-Si Alloy

Hiroshi Shuto^{1,2,*}, Akari Onodera^{2,*}, Shigeo Arai³, Tomotaka Miyazawa² and Toshiyuki Fujii²

¹R & D Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Oita 870–0992

²School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152–8552

³Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, Nagoya 464–8603

The dislocation structures in polycrystalline Fe–1 mass% Si after cyclic deformation were observed using high voltage electron microscopy in order to investigate the formation mechanism of the dislocation structures. Vein, wall, and cell structures were found in a deformed specimen. Detailed orientation and structure of the walls were analyzed. Burgers vectors of dislocations in the walls were $a/2[111]$ and $a/2[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$. A set of walls was arranged parallel to the (110) plane and it was found to be a part of labyrinth structure consisting of the (110) and (001) walls. It is suggested that the formation mechanism of the labyrinth structure in bcc metal is reasonably understood by extending the mechanisms in fcc metals. [doi:10.2320/jinstmet.JBW201711]

(Received January 15, 2018; Accepted February 23, 2018; Published March 30, 2018)

Keywords: fatigue, cyclic deformation, dislocation structure, wall structure, labyrinth structure, iron, steel, silicon, high voltage electron microscopy

1. 緒 言

著者らはこれまで、疲労特性と疲労試験によって形成される転位組織に相関があることを示してきた^{1,2)}。Yokoi らは、疲労特性の良好な Cu 添加鋼において、低サイクル疲労試験後の転位組織が Cell 組織ではなく Vein 組織であることを報告した¹⁾。Shuto らは IF 鋼中の固溶元素を変化させ、Cell 組織を形成しやすい Fe–Ni よりも Cell 組織を形成しにくい Fe–Si、Fe–Al、Fe–Cu の方が疲労特性は優れていると報告した²⁾。これらの知見から、鋼の疲労による転位組織形成を制御し、Cell 組織の形成を抑制できれば、鋼板の疲労特性は向上することが期待できる。

疲労に伴う転位組織を制御するには、その形成過程を明らかにすることが重要である。fcc 金属においては、すべり系が $\{111\}\langle 110 \rangle$ に特定されるため、活動すべり系と形成される転位組織との関係が議論しやすく、これまでの研究によって、Vein 組織、Wall 組織、Labyrinth 組織、Cell 組織などの形成過程がまとめられている^{3–7)}。一方で、鉄に代表される bcc 金属ではその理解は不十分で、例えば Labyrinth 組織を構成する転位 Wall の方位の解釈は一致していない^{8–13)}。

Mori らは Fe–3 mass% Si 合金単結晶に対して単一すべり方位で疲労試験を行い、(110)に対して約45°傾いた2つの転

位 Wall が形成されることを報告した⁸⁾。Mori らはこれを“Extended Cell”と呼んだが、その転位 Wall の結晶学的な方位は同定しておらず、形成過程についても不明としている。Fielding らは Fe–25 mass% Cr 合金多結晶に対して疲労試験を行い、応力軸が $[10\bar{1}]$ となる結晶粒に着目し、2種類の転位 Wall からなる Labyrinth 組織が形成されると報告した⁹⁾。2種類の転位 Wall のうち一方は (101) Wall であると報告したが、他方については記載が無く、形成過程は議論していない。Turenne らは bcc 金属の繰り返し変形によって形成される Labyrinth 組織における転位 Wall の方位を幾何学的に予測することを試みている¹⁰⁾。具体的には、活動するすべり系を2つ選択し、それぞれのすべり系において刃状転位の双極子ループを考え、2種類の転位ループの幾何学的配列を議論した。その結果、一つのすべり系の組み合わせに対し、3通りの転位 Wall の形成方位(転位 Wall が平行となる面)を予測し、そのうち、構造が安定な二つが選択され、Labyrinth 組織を構成する転位 Wall になるとしている。そして、これまでの実験結果^{8,9)}との比較を行い、予測とよい一致を示すと述べた。しかし、議論の過程では、強引な推論も見受けられ、実験結果を全て説明しているとはいえない。Roven らは低炭素鋼で、塑性ひずみ振幅一定の疲労試験を行い、塑性ひずみ振幅 3.6×10^{-3} および 4.1×10^{-3} で Labyrinth 組織ができると報告したが、転位 Wall の形成方位には言及していない^{11,12)}。Petrenec らはフェライト系ステンレス鋼で疲労試験を行い、2つのすべり系が同時に活動しやすい結晶粒で Labyrinth 組織を観察して

* 東京工業大学大学院生 (Graduate Student, Tokyo Institute of Technology)

いる¹³⁾。fcc 金属のとき⁷⁾と同様、Labyrinth 組織を構成する 2 種類の転位 Wall のうち一方は、活動する 2 種類の転位のバーガースベクトルの二等分面になると述べているが、もう一方の転位 Wall の方位には言及していない。

このように、bcc 金属中に Labyrinth 組織が形成されることはしばしば報告されてきたが、その形成方位と形成過程の議論は十分とはいえない。そこで、本研究では bcc 構造を持つ Fe-1 mass% Si 合金多結晶の繰り返し変形によって形成される転位組織を超高圧電子顕微鏡により詳細に観察し、転位組織の形成過程を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 供試材

Wall 組織や Labyrinth 組織の形成が報告されている Fe-1 mass% Si 合金を準備した¹⁴⁾。化学成分を Table 1 に示す。圧延および熱処理は Fig. 1 に示す手順によって実施した。粗圧延、仕上圧延により板厚 5 mm とした後、700℃、60 min の熱処理を 2 回行い、疲労特性に影響を及ぼす固溶 C、固溶 N を TiC、TiN として析出させた。得られた供試材の組織写真を Fig. 2 に示す。供試材はフェライト組織であり、平均結晶粒径は 33 μm であった。供試材に対し、圧延方向に垂直な方向を引張方向として、引張試験を行った結果を Fig. 3 に示す。0.2% 耐力は 174 MPa、引張強さは 382 MPa であった。また、応力-ひずみ曲線は不連続降伏を示したことから、固溶 C や

固溶 N の転位運動への影響は無視できる。

2.2 疲労試験条件

仕上圧延後の板厚 5 mm の供試材に対し、表裏を 0.5 mm ずつ機械研磨して板厚 4 mm とした。さらに電解研磨を行い、表層の加工層を除去した後、圧延方向に垂直な方向を長手方向として、Fig. 4 に示す疲労試験片を作製した。得られた試験片に対し、電気式油圧制御疲労試験装置 (MTS 社製 318.1) を用いて、室温大気圧下で全ひずみ振幅一定の引張-圧縮疲労試験を行った。疲労試験条件は、ゲージ長さ 8 mm、全ひずみ振幅 5×10^{-3} 、ひずみ速度 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、応力比 $R = -1$ とした。ひずみは試験片の平行部に取り付けた伸び計で測定した。

2.3 転位組織観察手法

疲労試験後の試験片の平行部から、転位組織観察用の薄膜を採取した。まず平行部から薄膜の板厚方向が試験片の幅方向と一致するように幅 5 mm、長さ 10 mm、厚さ 1 mm の試料を切り出し、厚さ 100 μm まで機械研磨を行った。その後、直径 3 mm に打ち抜き、電解研磨によりさらに板厚を薄くした。電解研磨には過塩素酸とメタノールの容積比が 1:9 の電解液を用い、液温を -50℃、電圧を 16~20 V とした。

作製した薄膜に対し、超高圧電子顕微鏡 (JEM-1000K RS) を用いて、加速電圧 1000 kV で転位組織の観察を行った。本装置は加速電圧が高い上に走査透過電子顕微鏡 (STEM) 機能を有するため、広い視野において、等厚干渉縞やバンドコンターの無い転位組織を観察することが可能である。試料ホルダーには二軸傾斜ホルダーを用い、傾斜により回折ベクトル g を変化させることで転位のバーガースベクトルを同定した。

Table 1 Chemical composition of sample.

(mass%)									
Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	N	
bal.	0.0024	0.96	<0.003	0.01	<0.003	0.027	0.035	0.0021

Fig. 1 Hot-rolling and annealing process.

Fig. 2 Microstructure of sample.

Fig. 3 Stress-strain curve and mechanical properties of sample.

Fig. 4 Shape and size of fatigue test specimen.

観察は主に STEM モードの明視野条件で行った。

3. 結 果

3.1 疲労試験

Fig. 5 に繰り返し回数と応力振幅の関係を示す。全ひずみ振幅一定条件の元で、供試材は 10 cycle までに急激に繰り返し硬化し、10 cycle 以降もその程度は小さくなるものの繰り返し硬化を示した。Fig. 6 に繰り返し回数と塑性ひずみ振幅の関係を示す。1 cycle から 10 cycle までの間に塑性ひずみ振幅は 3.8×10^{-3} から 3.3×10^{-3} まで低下し、その後 1000 cycle までほぼ一定の値を示した。さらに、2000 cycle 以降に塑性ひずみ振幅は低下し、破断に至った。

これまでにフェライト合金で Labyrinth 組織が観察されている塑性ひずみ振幅は $2.0 \times 10^{-3} \sim 4.1 \times 10^{-3}$ であり^{8,9,11,12)}、本研究において塑性ひずみ振幅が安定した領域の値に近い。今回、塑性ひずみ振幅は 10 cycle から 1000 cycle にかけてほぼ一定値を示しており、1000 cycle の時点でその塑性ひずみ振幅に対応した転位組織が発達していると解釈して、疲労試験を中断し、薄膜を切り出して転位組織の観察を行った。

3.2 転位組織観察

1000 cycle 繰り返し変形後の転位組織を Fig. 7 に示す。供

Fig. 5 Cyclic hardening curve for Fe-1 mass% Si in constant total plastic strain amplitude cycling.

Fig. 6 Plastic strain amplitude of Fe-1 mass% Si in constant total plastic strain amplitude cycling.

試材の転位組織は同一結晶粒内でも均一ではなく、領域ごとに Vein 組織、Wall 組織、Cell 組織と異なる組織が形成されていた。本研究では Turenne らが提唱した仮説を検証するため、Wall 組織に着目して詳細に観察を行った。

Fig. 8 に、Wall 組織が形成された同一視野を、[001] 方向から 3 種の異なる回折条件で観察した STEM 明視野像、およびこの視野に対応するステレオ投影図を示す。本合金における転位のバーガスベクトル $\mathbf{b}$ は $\langle 111 \rangle$ 方向に平行であるため、Fig. 8(a) の回折条件では $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} \neq 0$ となり、観察視野内に存在する全ての転位が観察可能である。Fig. 8(a) より、Wall 組織は転位が周期的に集積した転位 Wall と転位密度が小さい Channel で構成されており、転位 Wall 間の距離は $0.7 \mu\text{m}$ 程度であった。これは Ushioda らが Fe-1 mass% Si 合金において応力振幅 381 MPa の疲労試験で報告した値とほぼ一致する¹⁴⁾。また、転位 Wall は Fig. 8(a) の右上から左下に向かって平行に配列しており、これは Fig. 8(d) のステレオ投影図より、 (110) , (111) , $(\bar{1}\bar{1}1)$ のトレースと一致した。Fig. 8(b) では $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}11]$ または $\mathbf{b} = a/2[1\bar{1}1]$ のときに $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ を満たすため、該当する転位のコントラストが消滅する。Fig. 8(a) と (b) を比較すると、コントラストが消滅した転位は確認できないため、この Wall 組織内に $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}11]$ または $\mathbf{b} = a/2[1\bar{1}1]$ を持つ転位は含まれていないことが分かった。Fig. 8(c) では $\mathbf{b} = a/2[111]$ または $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}\bar{1}1]$ のときに $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ を満たし、該当する転位のコントラストが消滅する。Fig. 8(a) と (c) を比較すると、転位 Wall 中の転位と Channel 内の転位の両方のコントラストが弱くなっていた。このことから、今回観察された転位 Wall は $\mathbf{b} = a/2[111]$ もしくは $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}\bar{1}1]$ の転位のうちの片方もしくは両方によって形成されていることが分かった。

4. 考 察

転位 Wall の形成方位を明らかにするため、まず転位 Wall を構成する転位のバーガスベクトルが何種類あるかを考える。単一すべりの活動によって形成される Ladder 組織に見られる転位 Wall は、主すべり系の刃状転位双極子で構成され

Fig. 7 Representative dislocation structures after 1000 cycles of constant strain amplitude cycling.

Fig. 8 STEM images of wall structures in a grain oriented to [001] observed with various g conditions. (a) $g = \bar{2}00$. All of dislocations are visible. (b) $g = 110$. All of dislocations are visible. (c) $g = 1\bar{1}0$. Contrast of dislocations are decreased. (d) Stereo projection.

Fig. 9 Details of the wall structures. Walls are nearly edge-on.

ている⁷⁾。よって、単一のバーガースベクトルの転位で構成される転位 Wall の法線の方法は、そのバーガースベクトルの方向と一致する。このことは Turenne らの幾何学的な推測からも求められる¹⁰⁾。この考えに従えば、転位 Wall を構成する転位のバーガースベクトルが $\mathbf{b} = a/2[111]$ のみであると仮定した場合、転位 Wall は [111] に垂直な (111) Wall となる。実際に Fig. 8(a) から、転位 Wall の方位は (111) トレースと一致している。しかし、Fig. 8(d) のステレオ投影図から分かるように、観察した転位 Wall が (111) Wall ならば、観察面に対し edge-on の条件にはならず、35° 傾斜して観察されることになる。EELS による測定から薄膜の厚さは約 500 nm であったことから、転位 Wall が 35° 傾斜している場合には、少なくとも 300 nm 程度の厚さを持つ転位 Wall として観察されるはずである。Fig. 9 に Wall 組織の拡大写真を示すが、転位 Wall の厚さは薄い部分で 100 nm 程度であり、35° 傾斜した転位 Wall と

は考えにくい。よって、ここで観察した転位 Wall は $\mathbf{b} = a/2[111]$ の転位のみで構成される (111) Wall とはいえない。転位 Wall 中の転位のバーガースベクトルが $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}\bar{1}1]$ のみと仮定した場合にも同様の考察から、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ Wall と解釈すると矛盾が生じる。以上の考察から、転位 Wall 中には、 $\mathbf{b} = a/2[111]$ および $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}\bar{1}1]$ の 2 種類の転位が存在すると解釈の方が合理的である。

次に、転位 Wall の形成方位を考察する。Turenne らによれば、活動する 2 種類のすべり系において、刃状転位の双極子ループを考え、その 2 種類の双極子ループの幾何学的配列から転位 Wall の形成方位が 3 通りに決まる¹⁰⁾。さらに、それぞれの転位 Wall と、2 種類のすべり系のバーガースベクトルのなす角度 (Sweeping Angle) を計算し、Sweeping Angle が 90° に近いほど双極子ループが転位 Wall に積層しやすく、安定な構造になるとした¹⁰⁾。この解釈に基づき、転位 Wall を構成する転位のバーガースベクトルが $\mathbf{b} = a/2[111]$ および $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}\bar{1}1]$ の 2 種類である場合の転位 Wall の形成方位と Sweeping Angle を求め、Table 2 にまとめた。すべり面は {110} を仮定した。例えば、活動するすべり系が $(\bar{1}01)[111]$ と $(101)[\bar{1}\bar{1}1]$ の場合には、転位 Wall が平行になる面として (001), $(\bar{1}20)$, (120) の 3 種類が予測される。このとき、それぞれの Sweeping Angle が 35°, 15°, 51° となり、Sweeping Angle が大きい (001) Wall と (120) Wall が選択されると解釈できる。なお、Turenne らは、活動するすべり面が共有されている場合に形成される (001) Wall の Sweeping Angle を 0° としているが、

Table 2 Wall orientations in Labyrinth structure predicted from Ref. 10). α , β and γ correspond to sweeping angles of Wall A, Wall B and Wall C respectively.

Angles between slip planes /deg	Primary slip system	Secondary slip system	Wall orientation			Sweeping angles /deg					
			A	B	C	α_1	α_2	β_1	β_2	γ_1	γ_2
90	($\bar{1}01$)[$\bar{1}11$]	($\bar{1}01$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(001)($\bar{1}20$)(120)			35	35	15	15	51	51
90	($0\bar{1}1$)[$\bar{1}11$]	(011)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(001)($\bar{2}10$)(120)			35	35	15	15	51	51
0	($\bar{1}10$)[$\bar{1}11$]	($\bar{1}10$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(110)(001)($\bar{1}10$)			55	55	35	35	0	0
60	($\bar{1}01$)[$\bar{1}11$]	(011)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(110)($3\bar{3}2$)($\bar{1}13$)			55	55	14	14	31	31
60	($\bar{1}01$)[$\bar{1}11$]	($\bar{1}10$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(031)($2\bar{1}3$)($5\bar{1}3$)			47	21	38	18	17	61
60	($0\bar{1}1$)[$\bar{1}11$]	($\bar{1}10$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	($\bar{1}23$)(301)($\bar{1}53$)			38	18	47	21	17	61
60	($\bar{1}10$)[$\bar{1}11$]	(101)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(213)($0\bar{3}1$)(513)			18	38	21	47	61	17
60	($0\bar{1}1$)[$\bar{1}11$]	(101)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(110)(332)($\bar{1}13$)			55	55	14	14	31	31
60	($\bar{1}10$)[$\bar{1}11$]	(011)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	($1\bar{2}3$)(301)(153)			18	38	21	47	61	17
60	($\bar{1}10$)[$\bar{1}11$]	(011)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]	(301)($1\bar{2}3$)(153)			21	47	18	38	61	17

これは正しくは 35° であり, Table 2 で修正している. Table 2 に示した形成が予測される転位 Wall のうち, 今回観察された転位 Wall の面方位に近く, かつ観察面に対して edge-on に近いものは, (110) Wall と (120) Wall のみであった. 2 種類のトレースを, Wall 組織の観察像と合わせて Fig. 10 に示す. Fig. 10 より, 転位 Wall は一部 (120) トレースと一致する部分はあるが, 全体として (110) トレースとよく合うことが分かる. Table 2 より (110) Wall が形成されうるすべり系の組み合わせは ($\bar{1}10$)[$\bar{1}11$] と ($\bar{1}10$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$], ($\bar{1}01$)[$\bar{1}11$] と (011)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$], ($0\bar{1}1$)[$\bar{1}11$] と (101)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$] の 3 通りである. すべり系が ($\bar{1}10$)[$\bar{1}11$] と ($\bar{1}10$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$] の場合, 形成されうる転位 Wall は (110) Wall と (001) Wall であるが, (001) Wall は観察面と平行となり, 薄膜を切り出した部分が隣り合う (001) Wall の間の Channel 部分に相当すると考えれば, (001) Wall は観察されず, (110) Wall のみが観察されたと説明できる. 一方で, すべり系が ($\bar{1}01$)[$\bar{1}11$] と ($\bar{1}10$)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$] の場合, 形成されうる転位 Wall は (110) Wall と (113) Wall である. (113) Wall は観察面と約 25° の角度をなすため, もし存在すれば, 観察視野内に少なくとも $1\mu\text{m}$ 程度の厚さを持つ転位 Wall として観察されるはずである. しかし, Fig. 10 にはそれに該当する組織が見られないため, (113) Wall は形成されていないといえる. また, すべり系が ($0\bar{1}1$)[$\bar{1}11$] と (101)[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$] の場合, 形成されうる転位 Wall は (110) Wall と (332) Wall である. (332) は観察面と約 65° の角度をなすため, 視野内に転位 Wall として観察されるはずである. さらに, Fig. 10 から分かるように, (332) Wall のトレースは観察視野の左上から右下に向かって平行に配列する. このような特徴に該当する転位 Wall は観察されなかったため, (332) Wall は形成されていないといえる. 以上の検討から, 今回観察された転位組織は (110) Wall と (001) Wall で構成される Labyrinth 組織を [001] 方向から観察したものと推測される. 過去にこのような方位の Labyrinth の報告例はないものの, Turenne らの説から予測できる転位 Wall の形成方位である. ただし, Turenne らの仮説を当てはめるには, 主すべり面と 2 次すべり面が同一である必要があるが, 本研究ではすべり面の同定を行っていないため, この部分においては更なる検討の必要がある. なお, $\{110\}$ に加えて $\{112\}$ もすべり面の候補として検討したところ, 同様の考察から (110) Wall が形成される余地があることから, すべり面の特定は今後の必須の課題といえる.

本研究で観察された (110) Wall と (001) Wall による Labyrinth 組織は, fcc 金属における Li らの解釈を用いても説明が可能

Fig. 10 Traces of slip planes. (110) trace is parallel to dislocation walls.

である⁷⁾. fcc 金属では (100) Wall と (001) Wall の組み合わせで Labyrinth 組織が形成されることが知られている. Li らはこれを, 主すべり系と臨界すべり系の 2 つの転位のバーガースベクトルを合成し, その合成ベクトルに対して垂直な面に沿って転位 Wall が形成されたと解釈した⁷⁾. この面は, 2 つのバーガースベクトルの二等分面となり, Petrenec らは bcc 金属でもこの位置に転位 Wall が形成されることを指摘した¹³⁾. 本研究において, 転位 Wall を構成するバーガースベクトルは $\mathbf{b} = a/2[111]$ および $\mathbf{b} = a/2[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ であった. 供試材は引張圧縮変形を受けているため, 正負のバーガースベクトルをともに考慮すれば, それらの合成ベクトルは

$$a/2[111] + a/2[\bar{1}\bar{1}\bar{1}] = a[001]$$

$$a/2[111] + a/2[11\bar{1}] = a[110]$$

の 2 通りとなる. この合成ベクトルに垂直な転位 Wall は (001) Wall および (110) Wall となり, 本研究で観察した Labyrinth 組織と一致する.

fcc 金属においては, 主すべり系と臨界すべり系のバーガースベクトルは直交するため, 主すべり系と臨界すべり系が同時に活動する条件では, Turenne らの解釈から予測される転位 Wall の形成方位と, Li らの解釈から予測される転位 Wall の形成方位は一致する. しかし bcc 金属においては, 2 つの活動すべり系の転位のバーガースベクトルが直交しないため, これらの予測は一致しない. ただし, bcc 金属においても主すべり面と二次すべり面が同一になる場合, すなわち二次すべり面が共面すべりの場合に限り, 両者の予測は一致する.

本研究においては、転位のバーガースベクトルの同定に留まり、すべり面の同定には至っていない。今後、活動すべり系を制御した試験を行い、Labyrinth 組織中の転位 Wall の形成過程を明らかにしていく。また、転位組織の三次元構造をトモグラフィや Electron Channeling Contrast 法を用いて観察し、Labyrinth 組織中の転位 Wall の形成過程を明らかにすることを予定している。

5. 結 言

Fe-1 mass% Si 合金に対して低サイクル疲労試験を行い、転位組織を超高圧電子顕微鏡で観察し、以下のことを明らかにした。

- ・転位組織は Cell 組織, Wall 組織, Vein 組織の混合組織であった。
- ・転位 Wall は 2 種類のバーガースベクトルの転位で構成されていた。
- ・Wall 組織は、(110)Wall と (001)Wall から成る Labyrinth 組織である。
- ・Labyrinth 組織を構成する転位 Wall の面方位は、fcc 金属の Labyrinth 組織の形成機構を bcc 金属に拡張すれば、説明が可能である。

本研究は文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォーム課題として、名古屋大学微細構造解析プラットフォームの支援を頂きました。

文 献

- 1) T. Yokoi and M. Takahashi: J. Mater. Sci. **36**(2001) 5757-5765.
- 2) H. Shuto and T. Yokoi: CAMP-ISIJ **28**(2015) 261.
- 3) P. J. Woods: Philos. Mag. **28**(1973) 155-191.
- 4) J. I. Dickson, J. Boutin and G. L'espérance: Acta Metall. **34**(1986) 1505-1514.
- 5) C. Laird, Z. Wang, B. T. Ma and H. F. Chai: Mater. Sci. Eng. A **113**(1989) 245-257.
- 6) H. Mughrabi: Metall. Mater. Trans. A **40**(2009) 1257-1279.
- 7) P. Li, S. X. Li, Z. G. Wang and Z. F. Zhang: Prog. Mater. Sci. **56**(2011) 328-377.
- 8) H. Mori, M. Tokuwame and T. Miyazaki: Philos. Mag. A **40**(1979) 409-433.
- 9) S. E. Fielding and W. M. Stobbs: J. Microscopy **130**(1983) 279-288.
- 10) S. Turenne, G. L'espérance and J. I. Dickson: Acta Metall. **36**(1988) 459-468.
- 11) H. J. Roven and E. Nes: Scr. Metall. **21**(1987) 1727-1732.
- 12) H. J. Roven and E. Nes: Acta Metall. Mater. **39**(1991) 1719-1733.
- 13) M. Petrenec, J. Polák, K. Obrtlík and J. Man: Acta Mater. **54**(2006) 3429-3443.
- 14) K. Ushioda, M. Goto, Y. Komatsu, A. Hoshino and S. Takebayashi: Tetsu-to-Hagané **94**(2008) 321-330.