

ベイナイト鋼の変形に及ぼすベイナイト・ラスとオーステナイトとの結晶方位関係の効果

仲井 清真*・恵 智裕*²・小林 千悟*・濱田 昌彦*³・小溝 裕一*⁴

Effects of Crystal Orientation Relationship between Bainite-lath and Austenite on Deformation Behaviors in a Bainitic Steel

Kiyomichi NAKAI, Tomohiro MEGUMI, Sengo KOBAYASHI, Masahiko HAMADA and Yuichi KOMIZO

Synopsis : Size of bainite lath is sub-micron, corresponding to that of ultra-fine grained steel. Bainite has Kurdjumov-Sachs (K-S) crystal orientation relationship with austenite, in spite of the ultra-fine grained steel having no crystal orientation relationship. Parallelism of slip systems between variants was examined using stereographic analysis. The stereographic analysis clarified that the fraction of parallelism of slip systems in variants of bainite is greater than that of grains in ultra-fine grained steel without crystal orientation relationship. It could be suggested that 24 variants of bainite laths formed at random (intragranular bainite) are preferable to develop mechanical properties, for example, elongation and/or toughness.

Key words : bainite; variant; crystal orientation relationship; tensile property; stereographic analysis; shear strain; relaxation; fine-grained steel.

1. 緒言

ベイナイト鋼は、ベイナイト・ラス (bcc構造; α) から成るが、ラスとは細長い板状の形状を指す。このベイナイト・ラスは、板面が $\{110\}_\alpha$ 面であり、ラスの長手方向は、 $\langle 111 \rangle_\alpha$ 方向である。ベイナイト・ラスの板面は、母相であるオーステナイト (fcc構造) 中の $\{111\}_\gamma$ 面と平行に析出する。つまり、両相の界面 (以後、晶癖面と呼ぶ) は、 $\{110\}_\alpha // \{111\}_\gamma$ である。ところで、ベイナイト鋼には、光学顕微鏡組織において、ベイナイト・ラスの長手方向が一方方向に揃っている領域が存在する。つまり、同一の晶癖面を有するベイナイト・ラスが接して存在している領域がある。これをブロックと呼ぶ。但し、一つの晶癖面上には、6種類のバリエーションが存在する。したがって、光学顕微鏡組織上で一方方向に伸びたベイナイト・ラスは、試料表面と6種類の異なる結晶面で交わる可能性がある。さらに、この6種類のバリエーション間には互いに双晶関係にあるベイナイト・ラスが存在し、3組の双晶関係から成る。但し、双晶はブロックが生成されるときのみ顕著に隣接して存在し、1ブロック内に1種類の双晶がほぼ均一に存在することが多い。各バリエーションが無秩序に生成されている場合には、このような現象はあまり見られない。以上より、ブロックごとに試料表面には、異なる結晶面が出ているので、エッチングの度合いが異なり、光学顕微鏡組織において、ブ

ロック毎にコントラストが異なって見える。また、同一の晶癖面から成るブロック2個以上の集合体をパケットと呼ぶ。つまり、ベイナイト・ラスの伸びている方向が異なる領域同士の境界がパケット粒界となる。

ベイナイト・ラスは、平均サイズが $1\mu\text{m}$ 以下と細かく、超微細粒材料中の結晶粒径に匹敵する。しかし、超微細粒材料中の結晶粒は、結晶学的にはほぼ無秩序に配列しているが、ベイナイト・ラスは、母相であるオーステナイトと Kurdjumov-Sachs (K-S) の方位関係、 $\{011\}_\alpha // \{111\}_\gamma$, $\langle 11\bar{1} \rangle_\alpha // \langle 10\bar{1} \rangle_\gamma$ および $\langle 21\bar{1} \rangle_\alpha // \langle \bar{1}2\bar{1} \rangle_\gamma$ を有する。したがって、特に変形初期では Schmid 因子に依存して変形が進行するので、この K-S の方位関係の有無が変形過程に影響を及ぼすことが考えられる。つまり、一つのベイナイト・ラスが剪断変形すると、隣接するベイナイト・ラスによってその剪断歪が緩和される可能性がある。隣接するベイナイト・ラス中のすべり系との平行性が良好である (以後、互いに平行性の良好なすべり系を平行すべり系と称す) と、剪断歪が隣接するベイナイト・ラスの変形によって緩和されやすい。しかし、100%の緩和は望めず、最初に変形したベイナイト・ラス中に残留する剪断歪は、隣接するベイナイト・ラス中の平行すべり系以外のすべり系の活動によって緩和されると考えられる。これによっても緩和されない場合には、材料破断の要因の一つになるものと考えられる。

よって、本研究では超微細粒材料を想定して無秩序に結

平成17年6月29日受付 平成17年9月1日受理 (Received on June 29, 2005; Accepted on Sep. 1, 2005)

* 愛媛大学工学部 (Faculty of Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho Matsuyama 790-8577)

* 2 住友化学株式会社基礎化学品研究所 (Basic Chemical, Sumitomo Chemical Co., Ltd.)

* 3 住友金属工業株式会社総合技術研究所 (Corporate R & D Lab., Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 4 大阪大学接合科学研究所 (Joining and Welding Res. Inst., Osaka University)

晶粒が配向している場合と、粒内ベイナイト・ラスの場合（オーステナイト母相との間にK-S方位関係が存在し、かつ、24種類のバリエントがほぼ無秩序に存在する）とを考え、隣接する結晶粒間あるいはベイナイト・ラス間のすべり系の平行性を定量的に解析し、その変形過程に及ぼす効果について検討したので報告する。粒内ベイナイト・ラスの場合に24種のバリエントがほぼ均等に生成し、ベイナイト鋼の強靱性および高強度化に結び付く可能性が高い^{2,7)}。また、ベイナイト・ラスによるブロックの変形過程に及ぼす効果についても検討した。

2. 実験方法

2.1 ベイナイト・ラス間の変形伝播の観察

試料の化学組成をTable 1に示す。この試料からFig. 1に示す形状で厚さ1mmの引張試験片を作製した。これを1673K×300sの焼鈍にてオーステナイト化後、723Kで種々の時間、等温保持を行った。これらの等温保持試料の硬度を計測した結果、14.4ks等温保持にて著しい組織変化はなく硬度の減少が生じたので、ベイナイト・ラスの回復が期待され、引張試験による変形にて増殖した転位を判別しやすいのではないかと考えた。よって、Fig. 2に示すように723K×14.4ksの等温保持試料を引張試験に供した。引張試験は、歪速度 5×10^{-4} /sで行った。引張試験後の下部組織は、透過電子顕微鏡で観察した。透過電子顕微鏡用薄膜の作製にあたっては、エタノール、グリセリンおよび過塩素酸を体積比で、各々、70、20および10%混合し、電解研磨液として用いた。電解研磨は、50V、50mAおよび278Kの条件下で双ジェット研磨法にて行なった。但し、試料形状は、 $3\text{mm}^{\phi} \times 100\mu\text{m}$ である。

3. 解析結果

3.1 すべり系の平行性

Fig. 3に2個のバリエントを図示している。但し、同一の晶癖面を有する場合を図示している。異種の晶癖面の場合には、ベイナイト・ラスの界面が平行でないだけであり、他は同一である。


Fig. 3に示すようにベイナイト・ラス1で変形が生じ始めるとすると、図に示すように剪断歪が発生する。このときベイナイト・ラス1内のすべり系Aが活動したとする。そうするとこのすべり系Aに対して平行に近いすべり系Bが活動しやすいと考えられ、かつ、ベイナイト・ラス1内の剪断歪も隣接するベイナイト・ラス2の変形によって緩和されやすいと考えられる。Fig. 4に見られるようにラス界面の一部（で囲まれた領域）では隣接した部分で高密度の転位が見られ、かつ、剪断歪によってその界面部分が他の界面部分から折れ曲がって見える。つまり、ベ

Table 1. Chemical composition (wt%).

C	Si	Mn	P	Sol.Al	Ti	S	O	N
0.19	<0.01	1.44	0.002	0.001	0.018	<0.001	0.007	0.003

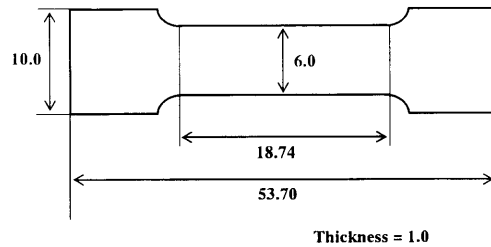


Fig. 1. Tensile test specimen. The unit of both length and thickness is mm.

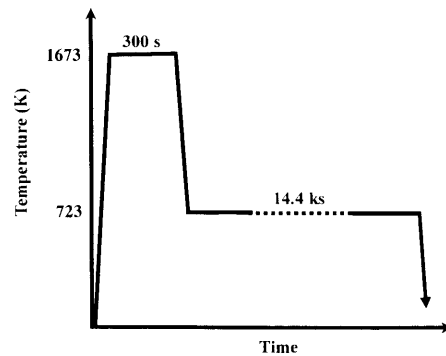


Fig. 2. Heat treatment.

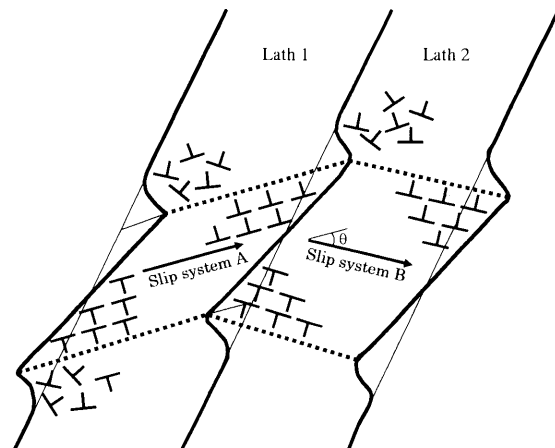


Fig. 3. Schematic illustration of deformed bainite laths. Almost of shear strain might be relaxed with deformation of neighboring bainite lath, which is induced by slip system with large Schmid factor. Remained strain is relaxed by activation of slip systems with small Schmid factors. Fine solid lines indicate initial shape of bainite laths and thick lines indicate deformed shape. The symbol \perp is dislocation. The region between dotted lines is sheared by activation of slip system with large Schmid factor.

ナイト・ラス1で生じた剪断歪、 ϵ_1 、の大部分がベイナイト・ラス2の変形、 $\epsilon_2 = \epsilon_1 \cos \theta$ (θ はすべり系AとBとの成す角度)、によって緩和され、ベイナイト・ラス界面で

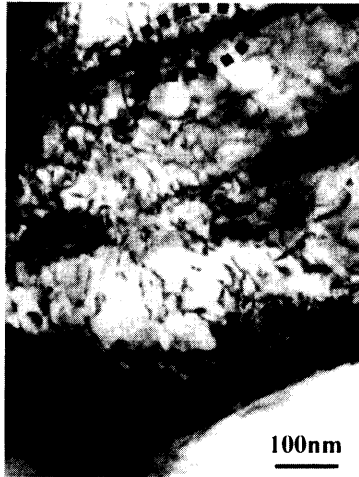


Fig. 4. The interface between bainite laths deformed with shear stress, enclosed with dotted line. Relatively high density of dislocations at the interface exist.

の過度（高密度）の転位の集積が避けられ材料の伸びを助長することになると考えられる。Fig. 3は理解を促すためにすべり方向AとBとが同一平面上にある場合を想定している。ベイナイト・ラス間のすべり系、すべり面およびすべり方向、の平行性が良い程、 θ の値は減少し、ベイナイト・ラス2による歪緩和量、 $\epsilon_1 \cos \theta$ 、は増大することになる。ベイナイト・ラス1と2におけるすべり面同士の平行性についても同様の傾向にあり、平行性が良い程、ベイナイト・ラス1中で生じた剪断歪がベイナイト・ラス2中のすべり面の剪断歪を効率良く誘起する傾向になるのは明白である。

したがって、両ラス間のすべり方向およびすべり面の平行性が、ベイナイト・ラスの場合と超微細粒材料の場合とで如何に異なるのかを検討し、材料の伸び（靱性とも関連在り）に及ぼす効果について検討した。まず、ベイナイト・ラス間のすべり系の平行性について検討した。この検討に当っては、ステレオ投影図を利用した。ベイナイト・ラスには24種類のバリエントが存在するが、まず、オーステナイトの $(111)_\gamma$ 標準投影図を準備した。この $(111)_\gamma$ 標準投影図を基準に採り、K-S方位関係を有するベイナイト・ラス (bcc構造) のステレオ投影図を作成した。ところで、ベイナイト・ラスは、オーステナイト中の4枚の $\{111\}_\gamma$ 面を晶癖面とし、各晶癖面につき6種類のバリエントが存在する。したがって、ベイナイト・ラス間のすべり系の平行性を検討するに当っては、Fig. 5に示すトンプソン四面体を参考とした。例えばFig. 5中のトンプソン四面体のB1面上に6種類のベイナイト・ラス・バリエントが存在し、これに対応して6枚のステレオ投影図を必要とする (Fig. 6)。このB1面を晶癖面とするバリエント間については、すべり面およびすべり方向の平行性を上記の6枚のステレオ投影図を利用して解析した。ベイナイト・ラスのすべり面としては、1つのバリエントについて6種の

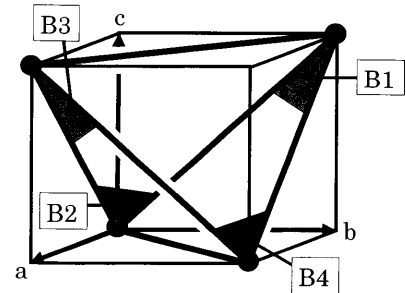


Fig. 5. Thompson tetrahedron in a fcc lattice with crystallographic axes, a, b and c.

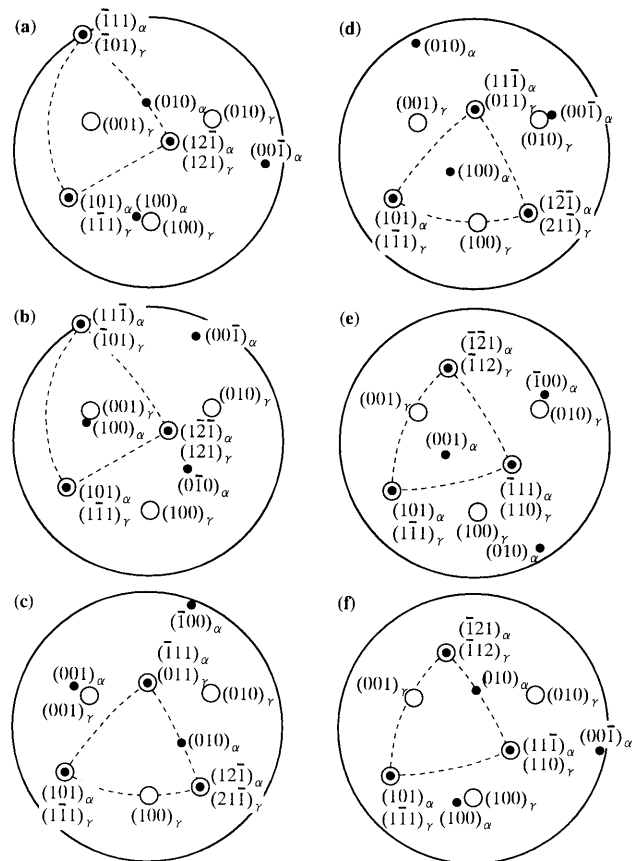


Fig. 6. Stereographic projections for crystallographic directions in 6 variants with habit plane of $(111)_\gamma$.

$\{110\}_\alpha$ および12種の $\{112\}_\alpha$ を採り上げた。つまり、Fig. 6中の6枚のステレオ投影図を重ねて $\{110\}_\alpha$ および $\{112\}_\alpha$ 間の角度を計測した。但し、 20° 以下の角度を成すすべり面同士を「平行すべり系」として採り上げた。理由は、 20° という角度が小傾角粒界を挟んだ結晶粒同士が成す最大角にほぼ匹敵するからである。面間角度の計測にあたっては、約4,900組を対象とせねばならないが、これらの結果を図にまとめたものがFig. 7である。全すべり面の内の5.43%が 20° 以下である。次に、すべり面同士が 20° 以下のすべり系の内、すべり方向、 $\langle 111 \rangle_\alpha$ 、同士が 20° 以下のものの存在割合を解析した。 $\{110\}_\alpha$ については、1つの面につき2方向のすべり方向、 $\{112\}_\alpha$ については、1つの面につき1

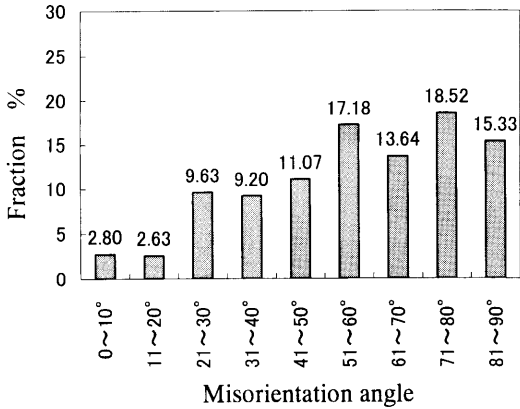


Fig. 7. Distribution of misorientation angle between directions normal to slip planes in B1-variants with Kurdjumov-Sachs orientation relationship.

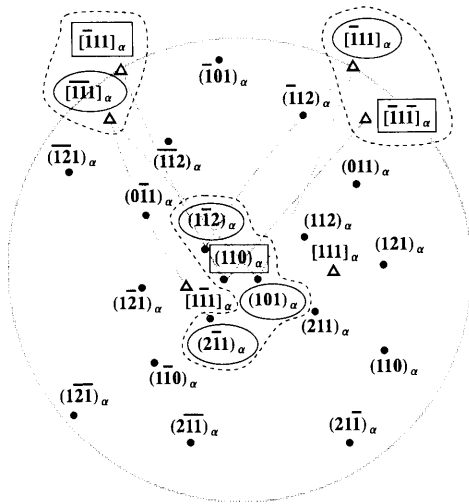


Fig. 8. Slip systems enclosed with \bigcirc are in a variant. Slip systems enclosed with \square are in another variant. In this case, both slip planes and slip directions are parallel with each other within 20° , which are enclosed with dotted line.

方向のすべり方向が存在する。その解析の様子の一例として Fig. 8 を示す。例えば、 \bigcirc で囲んだ 2 方向、 $[\bar{1}11]_\alpha$ と $[\bar{1}\bar{1}1]_\alpha$ の間の角度をウルフネット上の大円に沿って計測している。この結果を Fig. 9 に示す。この結果からすべり方向の平行性が良いものの割合は 27.93% となり、すべり面およびすべり方向の両方の平行性が良いものの割合は、 $0.0543 \times 0.2793 \times 100 = 1.52\%$ となった。

以上は、B1 面 (Fig. 5) 上に存在する 6 種類のバリエーションに関する解析結果であったが、次に異なる晶癖面間のバリエーションについて考える。B1 面上に存在するバリエーションと B2 面、B3 面および B4 面上のバリエーションとは互いに結晶学上、同一の配向を取ることになるので、B1 面上のバリエーションと B2 面上のバリエーション間ですべり系の平行性を検討すれば良いことになる。この B1 面上のバリエーションと B2 面上のバリエーション間での平行性が良いすべり系の存在割合を (3/4) 倍し、B1 面上のみのバリエーション間の平行性が

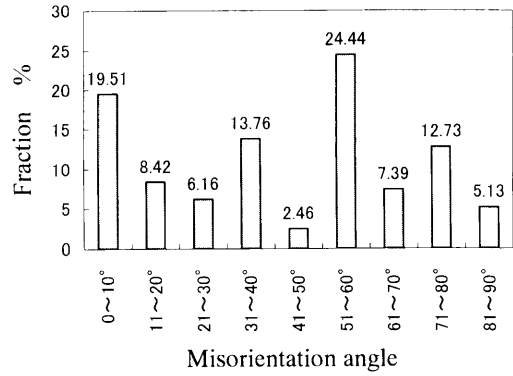


Fig. 9. Distribution of misorientation angle between slip directions in B1-variants with Kurdjumov-Sachs orientation relationship.

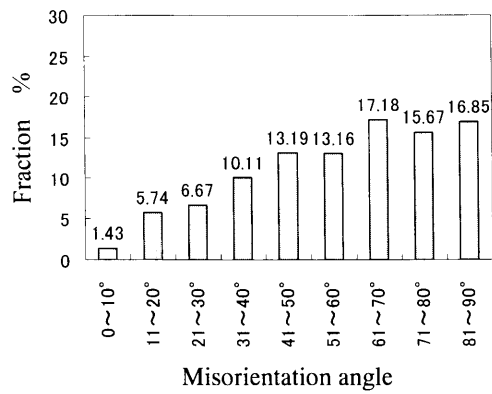


Fig. 10. Distribution of misorientation angle between directions normal to slip planes in B1- and B2-variants of bainite lath with Kurdjumov-Sachs orientation relationship.

良いすべり系の存在割合を (1/4) 倍して加えたものが系全体に対して存在する平行性が良いすべり系の存在割合ということになる。

そこで、まず、B1 面上のバリエーションと B2 面上のバリエーションの間でのすべり面の平行性について解析した。面間角度の計測にあたっては、約 12,000 組を対象とせねばならないが、これらの結果を図にまとめたものが Fig. 10 である。すべり面同士の平行性の良いものは、7.17% である。この内、すべり方向に関する平行性の良いものは、36.59% であった (Fig. 11 参照)。したがって、すべり面およびすべり方向の両方の平行性の良いものは、 $0.0717 \times 0.3659 \times 100 = 2.62\%$ となる。よって、試料全体では $1.52\% \times (1/4) + 2.62\% \times (3/4) = 2.35\%$ の割合でベイナイト・ラス間のすべり面およびすべり方向の両方の平行性が同時に良いことになる。

一方、結晶粒間に全く結晶方位関係が存在しない多結晶材料について、前述のすべり面およびすべり方向が同時に 20° 以内の平行性を保つ割合を算出した。結晶粒を半径 r の球体とすると、1 つのすべり面の垂直方向に対して、開き角 20° の円錐で切り取られる半径 r の球体の表面積の球体全表面積に対する割合 S を求める。

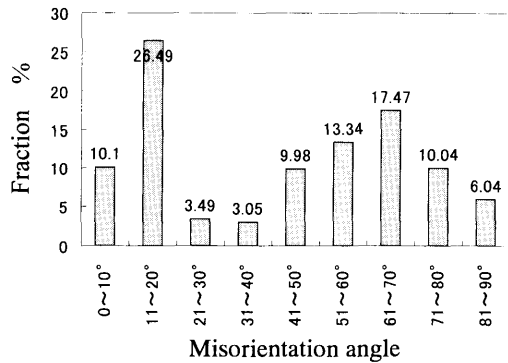


Fig. 11. Distribution of misorientation angle between slip directions in B1- and B2-variants of bainite lath with Kurdjumov-Sachs orientation relationship.

$$S = 2\pi r^2 \int_0^{\pi/18} \sin \theta d\theta / 4\pi r^2 = 0.0152$$

すべり面 $\{110\}_\alpha$ および $\{112\}_\alpha$ の全枚数は 36 枚であるから、1 個の結晶粒表面につき最大で $0.0152 \times 36 = 0.547$ の割合ですべり面の垂直方向に対して、開き角 20° の円錐で切り取られる球体の表面積が存在する。したがって、 $(0.547)^2/2 = 0.150$ の割合ですべり面の平行性が与えられる。次に、すべり方向同士の平行性について考える。すべり方向 $\langle 111 \rangle_\alpha$ は、1 枚の $\{110\}_\alpha$ については 4 方向（1 つの方向について逆方向も考慮する）、 $\{112\}_\alpha$ については 2 方向であるから、 $(0.0152 \times 6)^2/2 = 4.16 \times 10^{-3}$ の割合ですべり方向の平行性が良いことになる。したがって、すべり面とすべり方向が同時に良い平行性を有する割合は、 $0.150 \times 4.16 \times 10^{-3} = 6.24 \times 10^{-4}$ となる。つまり、0.06% となる。

つまり、ベイナイトが K-S の結晶方位関係を有する場合（平行性が良い割合：2.35%）は、結晶方位関係が存在しない多結晶材料の場合（平行性が良い割合：0.06%）に比べて、約 39 倍も平行性が高いことが伺える。したがって、1 個のベイナイト・ラス中の剪断歪が隣接するベイナイト・ラスの変形によって緩和される確立は、多結晶材料におけるそれよりも高いことを示唆しており、転位の局所的もしくは集中的な蓄積を抑制する可能性が高い。このことは、材料の割れを誘発しにくいことに繋がる。

ところで、本研究に用いた試料においては、ブロック (block) が形成されている領域もあり、Fig. 12 に見られるように双晶関係にあるバリエントから成っている。そこで、双晶関係にあるバリエント間におけるすべり面およびすべり方向の平行性を調べたところ、平行性が良い割合は、1.00% であった。一方、双晶関係がなく、同一晶癖面上に存在する 6 種類のバリエント間では、すべり面およびすべり方向の平行性は 1.52% であることから、ブロックを形成せず、各種のバリエントが形成されるほうが材料の割れを誘発しにくいと考えられる。

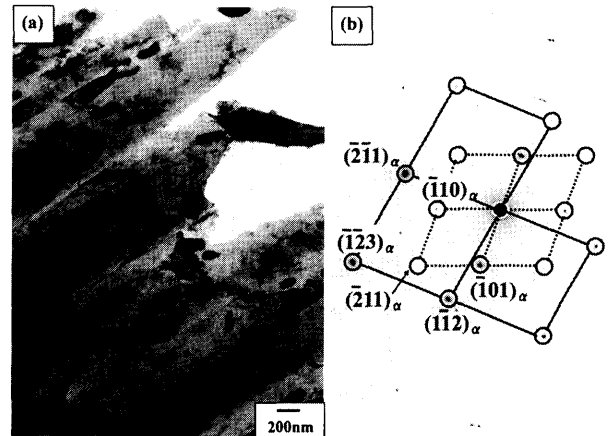


Fig. 12. (a) Bright-field transmission electron micrograph taken from a block of bainite laths and (b) diffraction pattern taken from (a). The diffraction pattern indicates that the block consists of 2 laths having $\{112\}$ twinned relation with each other.

4. まとめ

(1) ベイナイト・ラスは非常に微細であるので、1 つのベイナイト・ラス内での極端な多重すべりは、困難であると考えられる。理由は、高密度の転位間での弾性的相互作用は非常に大きく、多重すべりの導入前に他のベイナイト・ラスでの変形が生ずると考えるのが妥当である。したがって、主すべり系が変形を支配する大きな要因であると考えられる。

(2) 1 つのバリエントの変形による転位の増殖集団が隣接するバリエントの変形を誘起するという下部組織の観察結果から、一般に、1 つのバリエントの剪断歪の緩和が隣接するバリエントの変形によって生ずるのではないかと考えられた。そこで、隣接バリエント間のすべり系の平行性（すべり面およびすべり方向同士が 20° 以内）をステレオ解析法にて調べた結果、同一晶癖面のバリエント間では 1.52%、異種晶癖面バリエント間では 2.62% であった。試料全体では 2.35% である。一方、結晶粒間に全く結晶方位関係が存在しない多結晶材料におけるそれは、0.06% であることからベイナイト・ラスにおける結晶方位関係、Kurdjumov-Sachs の関係： $\{011\}_\alpha // \{111\}_\gamma$ 、 $\langle 11\bar{1} \rangle_\alpha // \langle 10\bar{1} \rangle_\gamma$ および $\langle 21\bar{1} \rangle_\alpha // \langle \bar{1}2\bar{1} \rangle_\gamma$ がベイナイト鋼の機械的性質の改善に大いに役立つことが期待される。

(3) 光学顕微鏡組織において、ベイナイト・ラスの長手方向が一方に揃っている領域が存在することがある。つまり、同一の晶癖面を有するベイナイト・ラスが接して存在している領域、つまり、ブロックが生成されていることが多い。但し、一つの晶癖面上には、6 種類のバリエントが存在する。さらに、この 6 種類のバリエント間には互いに双晶関係にあるベイナイト・ラスも存在する。

但し、本研究では、隣接するベイナイト・ラスは双晶関係にあるものが多かった（同一ブロック内にて）が、すべ

り系の平行性は良くなく、割れの発生が生じやすいことが示唆できた。いわゆる破面単位になりやすいことが伺えた。したがって、ブロックやブロックの集合体であるパケットが細かいほうが各種のバリエーション同士が隣接する可能性が高くなるので、韌性向上が期待できる。

終わりに本研究の遂行にあたり、(社)日本鉄鋼協会から第12回鉄鋼研究振興助成による御援助を賜ったことを明記し、ここに深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) K.Nakai, T.Megumi, S.Kobayashi, M.Hamada and Y.Komizo: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 42.
- 2) R.L.Klueh, D.J.Alexander and E.A.Kenik: *J. Nucl. Mater.*, **277** (1995), 11.
- 3) R.L.Klueh and D.J.Alexander: *J. Nucl. Mater.*, **265** (1999), 262.
- 4) M.J.Balart, C.L.Davis and M.Strangwood: *Mater. Sci. Eng. A*, **A328** (2002), 48.
- 5) K.Laha, K.S.Chandravathi, K.B.S.Rao, S.L.Mannan and D.H.Sastry: *Int. J. Pressure Vessels Piping*, **77** (2000), 761.
- 6) D.Q.Bai, S.Yue, T.M.Maccagno and J.J.Jonas: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 371.
- 7) N.Shikanai, H.Kagawa and M.Kurihara: *ISIJ Int.*, **32** (1992), 335.