

電子顕微鏡弱ビーム干渉縞法による $\Sigma = 3$ 非整合双晶境界の解析(III)

Structure analysis of $\Sigma=3$ incoherent twin boundary by weak-beam method (III)

田 中 孝 治*・森 実*・石 田 洋 一*
Koji TANAKA, Minoru MORI and Yoichi ISHIDA

1. はじめに

前二報^{1,2)}において、弱ビーム干渉縞法を用いて SUS316 オーステナイトステンレス鋼の $\Sigma = 3$ 非整合双晶境界の並進成分を解析した代表的な例を紹介した。前報²⁾で示したように $\Sigma = 3$ 非整合双晶境界はかなりの頻度で $\{211\}$ 面以外の面を持つ^{3),4),5)}。今回は、これまでの解析例に基づき非整合双晶面の分布と各双晶面を代表する並進成分についてその全体的傾向を示し、全体としての構造と局所的な構造から考察する。

2. 観察結果のまとめ

双晶方位を $[0\bar{1}1]$ 軸回り 70.5° で定義し、整合双晶面を $(111)_M \parallel (\bar{1}\bar{1}1)_T$ とすると良く知られた $\{211\}$ 非整合双晶面は $(\bar{2}11)_M \parallel (\bar{2}\bar{1}\bar{1})_T$ となる。これに基づいて指数づけして実験結果を整理すると表 1 に示すようになる。この表から非整合双晶面は $(\bar{2}11)$, $(\bar{3}11)$, $(\bar{3}22)$ 等の $(\bar{2}11)$ 面またはそれに近い面 (A グループ) と $(0\bar{1}1)$ 面 (B グループ) の二つのグループに分けられることがすぐわかる。並進成分について考えてみると A グループにおいては $a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$ の並進が多く、それ以外は $a/4 [0\bar{1}1]$ と $a/12 [411]$ があつた。B グループにおいては $a/6 [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ の並進が多く、それ以外では $a/4 [1\bar{1}0]$ が一つあつた。並進成分はほとんどの場合共通な面の方向であるが、 $a/12 [411]$ は相手の粒の指数で読み変えると $a/4 [011]$ になり、共通な面の方向ではない。

3. 非整合双晶境界面の分布

表 1 において解析結果をすべて示し、非整合双晶面が $(\bar{2}11)$ 面またはそれに近い面 (A グループ) と $(0\bar{1}1)$ 面 (B グループ) の二つのグループに分けられることを示した。A グループの面方位をステレオ投影図にプロットすると図 1 のようになる。●は並進成分が $a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$ の場合、○はそれ以外の並進成分を持つ場合、△は粒界転位が重畳

*東京大学生産技術研究所 第 4 部

表 1 解析結果のまとめ

n : 面方位, R : 並進成分, X : 解析できなかったもの

No	n	R
1	$(\bar{2}11)$	$a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$
2	$(\bar{2}11)$	$a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$
3	$(\bar{3}11)$	$a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$
4	$(\bar{3}11)$	$a/4 [0\bar{1}1]$
5	$(\bar{3}22)$	$a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$
6	$(\bar{5}22)$	$a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$
7	$(\bar{3}21)$	X
8	$(\bar{6}12)$	X
9	$(\bar{6}21)$	$a/6 [111]$
10	$(\bar{5}12)$	$a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$
11	$(\bar{4}12)$	$a/12 [411]$ $a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$
12	$(\bar{3}12)$	$a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$ $a/12 [411]$
13	$(\bar{4}03)$	X
14	$(0\bar{1}1)$	$a/6 [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$
15	$(0\bar{1}1)$	$a/6 [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$
16	$(0\bar{1}1)$	$a/6 [111]$
17	$(0\bar{1}1)$	$a/4 [1\bar{1}0]$

している場合である。この図を見ると粒界転位が無いときはほとんどの場合 $(0\bar{2}2)$ の晶帯大円に近いこと、粒界転位がある場合は転位の左右で面が異なり粒界面が曲面的な形状を持つが、それでも $(0\bar{2}2)$ の晶帯大円からそれほど離れていないことがわかる。このことから非整合双晶境界面は $(\bar{2}11)$ 面からずれるときでも、面方位が $(0\bar{1}1)$ に垂直な面をとろうとする傾向があると思われる。粒界面エネルギーは $\Sigma = 3 \{111\} \parallel \{111\}$ や $\{112\} \parallel \{112\}$ ⁶⁾ 以外にも $\{011\} \parallel \{011\}$ ⁷⁾ にエネルギーカスプが見つかっている⁸⁾が、写真 1 に示すような $(\bar{3}11)$ 面を持つ場合がかなりの頻度であることから、 $(\bar{2}11)$ 面から 10° ぐらいはずれた近傍 ($(\bar{3}11)$, $(\bar{3}22)$, $(\bar{5}22)$ 面等) にもエネルギーカスプ

研究速報

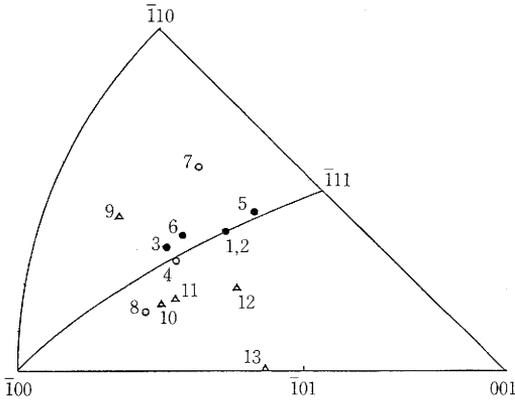


図1 (211)面またはそれに近い面(Bグループ)のステレオ投影図。●: a/12[211]の並進成分を持つ場合, ○: それ以外の並進成分を持つ場合, △: 粒界転位を持つ場合, 番号は表1と同じ

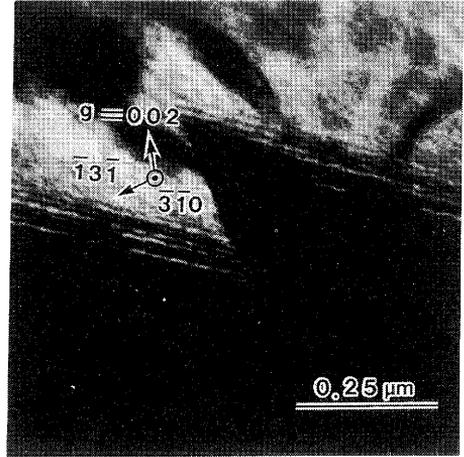


写真1 Σ=3双晶の暗視野像。非整合双晶面が(131)面であることがわかる

を持つと推測される。また、これらのカスプからずれた面を持つときに格子の不整合を補うために粒界転位が導入されると考えることができる。

4. 並進成分Rについての考察

4-1 全体として見た場合

今回観察された並進成分Rの共通な低指数のgに対するg・Rの値をまとめると表2のようになる。a/12[211]の並進成分は(111)原子面と回転軸方向の(011)原子面を連続に保ち、a/6[111]の並進成分は(111)原子面を半原子面ずらす、他の(011), (110), (101)原子面は連続に保つ。また、a/4[011]並進成分は(011)原子面を一原子面すつかりずらす、(111)原子面は連続に保つ。a/4[110], a/12[411]の並進成分についても同様のことが言える。以上のことより共通の低指数面を保存するような向きに並進移動したほうがエネルギー的に安定であると考えられる。a/4[011], a/4[110]の並進成分のように一原子面ずらすものは本質的に原子面を保存する並進と等価であるが、前報²⁾で述べたようにこれらの並進はa/12[211]やa/6[111]に比べて距離が大きいためによくは存在しないものと思われる。さらに、電子論的に考えてみても面心立方格子金属にとって最も重要な(111)原子面を保存するという事は非常に大切なことである。このことから(211)面またはそれに近い面においてa/12[211]に並進成分が最も多く観察されたのは当然であると言える。(011)面に関しては周りの原子からの束縛が強いためにa/12[211]の並進を起こすことができず、束縛の少ないa/6[111]の方向に並進移動したものである。

表2 低指数な共通のgとg・Rの関係

R \ g	111	022	220	202
1/12[211]	0	0	+1/2	-1/2
1/6[111]	+1/2	0	0	0
1/4[011]	0	1	+1/2	+1/2
1/4[110]	0	+1/2	1	-1/2
1/12[411]	+1/2	0	+1/2	-1/2

4-2 局所的に見た場合

図2は[011]方向から投影した(211)Σ=3非整合双晶境界の対称要素を示したものである。紙面上向きが[011]_cで、粒界面は(211)_Mである。(a)は対応格子プロットで、○はマトリックス(M)、●はツイイン(T)で○は対応格子点(C)を示す。この構造は紙面に平行な面と粒界面に鏡面対称を持ち、矢印の方向に2回対称軸を持っており、層空間群(layer space group)はP2'mm'である('はカラー反転を示す)。第2報²⁾で述べたようにこの構造ではA, Bの位置にある原子がa/√6=0.408aしか離れておらず、これが面心立方格子の最近接原子間距離の0.707aの58%の距離であるために反発力を生じて並進移動するものと思われる。(b), (c), (d)はそれぞれa/6[111], a/6[111], a/12[211]だけ●を並進移動したものである。このままの状態では粒界において○と●が近づきすぎて共存できないので両者の中間の位置に一つの原子だけをおいたものが(e), (f), (g)である。(g)の○は共有点を示す。(e), (f)は紙面に平行な鏡面対称は保存されるが、面内の並進を起こしたために粒界に

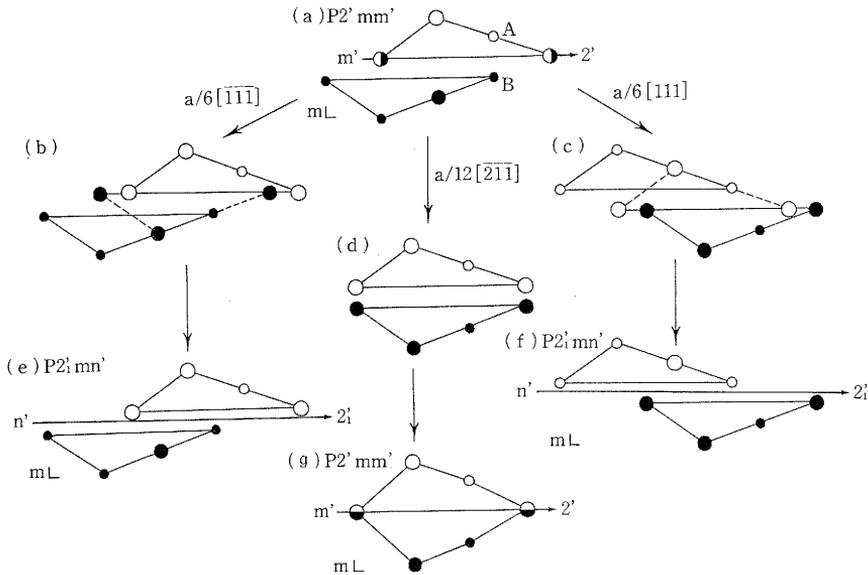


図 2 $[0\bar{1}1]$ 方向から投影した $(\bar{2}11)\Sigma=3$ 非整合双晶境界の対称要素
○: マトリックス ●: ツウィン ⊙: 対応格子点 ⊖: 共有点

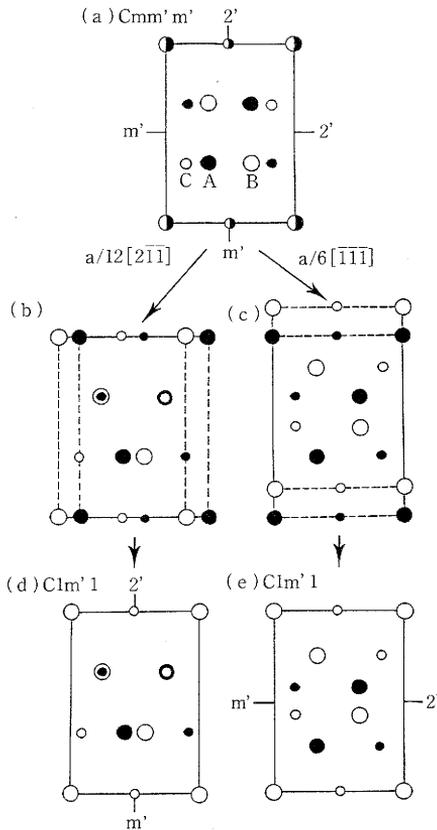


図 3 $[0\bar{1}1]$ 方向から投影した $(0\bar{1}1)\Sigma=3$ 非整合双晶境界の対称要素
○: マトリックス ●: ツウィン ⊙: 対応格子点

平行な鏡面对称は失われ、矢印の方向の 2 回らせん軸と対角映進面を持つ。この構造の層空間群は $P2'mn'$ と表される。(g) は粒界に垂直な並進を起こしたもので粒界面での鏡面对称が保存される。したがって、層空間群は対応格子(a)と同じ $P2'mm'$ である。つまり、 $\pm a/6 [111]$ の並進は構造を変え対称性を崩してしまうが、 $a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$ の並進は対称性を崩さない。

A グループにおいて、 $\pm a/6 [111]$ の並進がみられず、 $a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$ の並進が多かったことから並進移動は元の対称性を保存するように行われる⁹⁾と解釈できる。

図 3 は $[0\bar{1}1]$ 方向から投影した $(0\bar{1}1)\Sigma=3$ 非整合双晶境界の対称要素を示したものである。○は上に粒(M)、●は下の粒(T)で⊙は対応格子点(C)を示している。(a)は対応格子プロットである(第 2 報²⁾、図 3 参照)。これは紙面に平行と垂直に 2 つの鏡映面を持ち、矢印方向に 2 回対称軸を持っており、層空間群は $Cmm'm'$ である。これも第 2 報²⁾で述べたように A と B、A と C の距離が $a/\sqrt{6}=0.408a$ と小さいために、これら 2 点の組に反発力を生じ界面エネルギーを下げるために並進移動を起こすと考えられる。(b)、(c)はそれぞれ●を $a/6 [111]$ 、 $a/12 [2\bar{1}\bar{1}]$ 並進させたものである。このままの状態では○と●が近すぎて共存できないので、近すぎる●を取り除き中間の位置に○を置くと(d)、(e)のようになる。(d)、(e)ともに面内の並進であるために紙面に平行な鏡面对称は失われるが、紙面に垂直な鏡面と二回対称軸を持つ。これらはともに層空間群は $C1m'1$ である。

研究速報

しかし、(d)では●や○のような高さの異なる格子点を持ってしまい不安定である。したがって、(0 $\bar{1}$ 1)面では(e)のような $a/6$ [111]の並進移動が多いものと思われる。

5. ま と め

SUS316オーステナイトステンレス鋼の非整合双晶境界を電子顕微鏡干渉縞法により解析した結果、非整合面の面方位と並進成分が求められ以下のことがわかった。

- 1) 粒界面は(0 $\bar{1}$ 1)面と(2 $\bar{1}$ 1)面またはそれに近い面の二つのグループに分けられる。
- 2) (2 $\bar{1}$ 1)面に近い面は(0 $\bar{1}$ 1)面に垂直な面を取ろうとする傾向がある。
- 3) (2 $\bar{1}$ 1)面またはそれに近い面は $a/12$ [2 $\bar{1}$ 1]の並進成分を持つことが多い。
- 4) (0 $\bar{1}$ 1)面は $\pm a/6$ [111]の並進成分を持つことが多い。
- 5) [0 $\bar{1}$ 1]方向やその他の方向の並進成分は少ない。

- 6) 低指数面を保存するような方向に並進移動する。
- 7) 元の対称性を保存するような向きに並進移動を起こす。
(1989年4月25日受理)

参 考 文 献

- 1) 田中, 森, 石田: 生産研究, 41巻4号, (1989, 4)
- 2) 田中, 森, 石田: 生産研究, 41巻7号, (1989, 7)
- 3) R.C. Pond and V. Vitek: Proc. R. Soc. B, 357(1977), 453
- 4) R.C. Pond: Proc. R. Soc. A, 357(1977), 471
- 5) D. Vaughan: Phil. Mag. 22(1970)1003
- 6) G.C. Hasson and C. Goux: Scripta Met. 5(1971)889
- 7) A. Otsuki and M. Mizuno: Proc. Sympos. on Grain Boundary Structure and Related Phenomena Trans. Japan Inst. Metals, Suppl. 27(1986)789
- 8) A.P. Sutton and R.W. Balluffi: Acta Met. 35(1987) 2177
- 9) R.C. Pond and W. Bollmann: Phil. Trans. Roy. Soc. A292(1979)449

