

Fe-3wt%Si固溶体双結晶における 〈110〉小傾角粒界の移動形態

上原 雅人*・歳田 寿充*²・中島 英治*³

Migration of Low Angle 〈110〉Tilt Boundary in Fe-3wt%Si Bicrystals

Masato UEHARA, Hisamitsu TOSHIDA and Hideharu NAKASHIMA

Synopsis : The kinetics of grain boundary migration for low angle 〈110〉 tilt boundary with misorientation angle of 6° was experimentally studied at various temperatures between 1200 and 1625K using Fe-3wt%Si solid solution bicrystals by capillarity technique. The migration velocity of the low angle tilt boundary was much smaller than that of the $\Sigma 9$ coincidence boundary. The driving force and mobility of the moving grain boundary were calculated from the migration velocity, the curvature and the grain boundary energy.

According to the calculation, the small migration velocity of the low angle tilt boundary is considered to be due to the small mobility and the small driving force (the grain boundary energy).

But the migration mechanism of the low angle tilt boundary was as same as that of the $\Sigma 9$ coincidence boundary. At the low temperatures, the migration was controlled by the diffusion of Si that interacted with the grain boundary. On the other hand, at the high temperatures, it was controlled by the grain boundary diffusion.

Key words : grain boundary migration ; low angle tilt boundary ; capillarity technique ; Fe-3wt%Si alloy ; oriented electrical steel sheet.

1. 緒言

近年、結晶異方性を生かすために再結晶集合組織の組織制御が盛んに行われている。再結晶集合組織の形成は再結晶核の生成と生長によるが、二次再結晶においては粒生長、つまり粒界移動が重要な過程となる。

粒界移動の研究は、特に純金属について古くから盛んに行われており¹⁾、粒界の易動度は、粒界構造や温度、駆動力(粒界の曲率や粒界エネルギーなど)、不純物に強く影響を受けることが明らかになっている。一般に粒界の易動度は粒界拡散速度の粒界性格依存性に起因していると考えられている。したがって、対応粒界より一般粒界の易動度の方が大きいと考えられる。しかし、原勢と清水²⁾は、方向性珪素鋼板について二次再結晶後の組織観察を行い、再結晶集合組織には $\Sigma 9$ や $\Sigma 5$ などの対応粒界が多く存在していたことを報告している。このことから、彼らは一般粒界より対応粒界の方が速く移動すると指摘している。異種元素を多く含んだ固溶体合金における粒界移動は、異種元素と粒界の相互作用を考慮する必要がある。そこで、我々はFe-3wt%Si固溶体合金の方位制御した $\Sigma 9$ 対応粒界とランダム粒界を含む双結晶を用いて粒界移動について検討してき

た^{3,4)}。

その結果、高温・高駆動力ではランダム粒界の易動度の方が $\Sigma 9$ 対応粒界より大きく、低温・低駆動力では逆に $\Sigma 9$ 対応粒界の易動度の方が大きくなることを見出した。さらに、高温・高駆動力での粒界移動は粒界拡散に律速され、低温・低駆動力では固溶原子であるSiの拡散に律速されることが明らかになった。つまり、粒界と固溶原子の相互作用のために、粒界が移動するときの条件によっては易動度の序列は変わってしまうのである³⁾。

このように、Fe-3wt%Si固溶体合金の粒界移動では、粒界と固溶原子であるSi原子の相互作用が重要な因子として挙げられる。小傾角粒界は粒界の芯構造における体積変化が大傾角粒界に比べて非常に小さく、Si原子との相互作用が小さいと考えられる。このような小傾角粒界の移動機構を検討することは固溶体合金の粒界移動現象を解明する上で極めて重要である。

また、小傾角粒界の移動速度は非常に小さいことが知られている。特にGoss集合組織形成の際、 $\Sigma 9$ 対応粒界など移動速度の大きい粒界を持つ結晶粒は優先的に生長するが、小傾角粒界など移動速度の小さい粒界は粒生長を抑制する。この移動速度の小さい粒界の移動速度を測定し、 $\Sigma 9$ 対応粒

平成9年8月26日受付 平成9年10月29日受理 (Received on Aug. 26, 1997; Accepted on Oct. 29, 1997)

* 九州大学大学院生 (Graduate Student, Kyushu University, 6-1 Kasugakoen Kasuga 816)

* 2 九州大学大学院生 (現: トヨタ自動車(株)) (Graduate Student, Kyushu University, now Toyota Motor Corporation)

* 3 九州大学大学院総合理工学研究科 (Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University)

界など移動速度の大きい粒界と比較検討することは、再結晶集合組織の形成機構を解明することに関しても重要であると考えられる。

そこで本研究では、<110>小傾角粒界(方位差は約6°)を含む双結晶を作製して、移動速度を1198~1623Kの範囲で測定した。さらに、移動速度や易動度、移動機構などについて既に報告したΣ9対応粒界と比較検討した。

2. 実験方法

2.1 原理

粒界移動処理は、capillarity法⁵⁾に基づいて行った。粒界の移動速度 v は易動度 M と駆動力 P の積、

$$v = MP \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。粒界の張力を駆動力とする場合、駆動力 P は粒界エネルギー $\gamma_{g.b.}$ と粒界の曲率 κ の積、

$$P = \gamma_{g.b.} \kappa \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。capillarity法では、粒界と試料側面が角度 α で交わるように試料を加工する。このとき移動する粒界の試料側面における曲率 κ と移動距離 a の関係は、

$$\kappa = \frac{f(\alpha)}{a} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。この $f(\alpha)$ は形状因子であり、式(3)が成り立つことは理論的にも実験的にも確認している³⁾。Fig. 1に $f(\alpha)$ と α の関係を示した。図の黒丸は、実際に様々な α で粒界を移動させた後の曲率と移動距離から求めた $f(\alpha)$ の値で、白丸は数値計算により求めた値である。図より、 $f(\alpha)$ は α の増加とともに単調減少することがわかる。

式(3)より、移動距離 a が大きくなれば曲率 κ は小さくなる。つまり、このcapillarity法は、粒界が移動するほど駆動力 P は低下するという特徴を本質的にもつことになる。

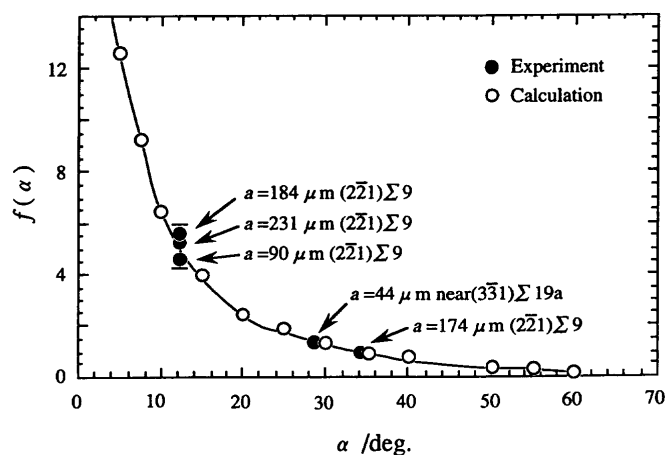


Fig. 1. Relationship between $f(\alpha)$ and α ³⁾.

式(1)~(3)より、試料側面での粒界の移動速度 v は、

$$v = \frac{da}{dt} = M\gamma_{g.b.} \frac{f(\alpha)}{a} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。式(4)を時間 t で積分すると、

$$a^2 = 2 M\gamma_{g.b.} f(\alpha) t \quad \dots\dots\dots (5)$$

となり、移動距離の二乗 a^2 は時間 t に比例することになる。したがって、各時間 t における試料側面における移動距離 a を測定すれば、粒界の易動度 M と粒界エネルギー $\gamma_{g.b.}$ の積を求めることができる。

2.2 試料

高純度Fe-3.25wt%Si合金を用いて、高周波浮遊帯域溶融回転法⁶⁾により、[110]方向を回転軸とした小傾角粒界(方位差は約6°)を有する双結晶を作製した。

この双結晶から低速ダイヤモンドカッターを用いて、板面が(110)面、厚さが400~600 μ mの板状試料を切り出した。さらに、粒界が試料側面に鋭角になるように端面を切断した。このとき生じた切断傷が粒界移動を拘束する可能性があるため、試料側面を#800~#2000のSiC耐水ペーパーで研磨した後、HF:H₂O₂=1:10(体積比)の研磨液を用いて化学研磨した。

次に試料の両側表面を#240~#2000のSiC耐水ペーパーで研磨した後、0.3 μ mのAl₂O₃粒子で鏡面仕上げ研磨した。また、これらの加工により導入されたひずみを除去するために、約8.0 \times 10⁻⁴Paの真空中において1073Kで21.6ksの焼鈍を行った。その後、背面反射ラウエ観察し、加工ひずみに起因する回折スポットのストリークが生じないことを確認した。なお、この焼鈍の際、粒界が移動しないことも確認している。

2.3 分割焼鈍法

先の試料を目的温度に加熱し粒界を移動させた後HF:HNO₃:H₂O=1:8:10(体積比)の腐食液を用いて腐食し、光学顕微鏡観察により移動距離を測定した。観察後、再び機械研磨を施し鏡面仕上げした。そして、先と同様な加工ひずみ除去のための焼鈍を施した後、再び目的温度に加熱して粒界を移動させた。この操作を5~6回繰り返し、1198~1623Kの温度における移動距離と時間の関係を求めた。

なお、移動の際の加熱は赤外線イメージ炉で行った。試料を炉内の熱電対にスポット溶接し、約2.0 \times 10⁻³Paの真空中で加熱した。その際、酸化防止のためにZr薄膜と共に加熱した。

3. 実験結果および考察

3.1 粒界移動の形態

Fig. 2 (a)及び(b)は、 $\alpha=30^\circ$ と $\alpha=12^\circ$ の小傾角粒界に、

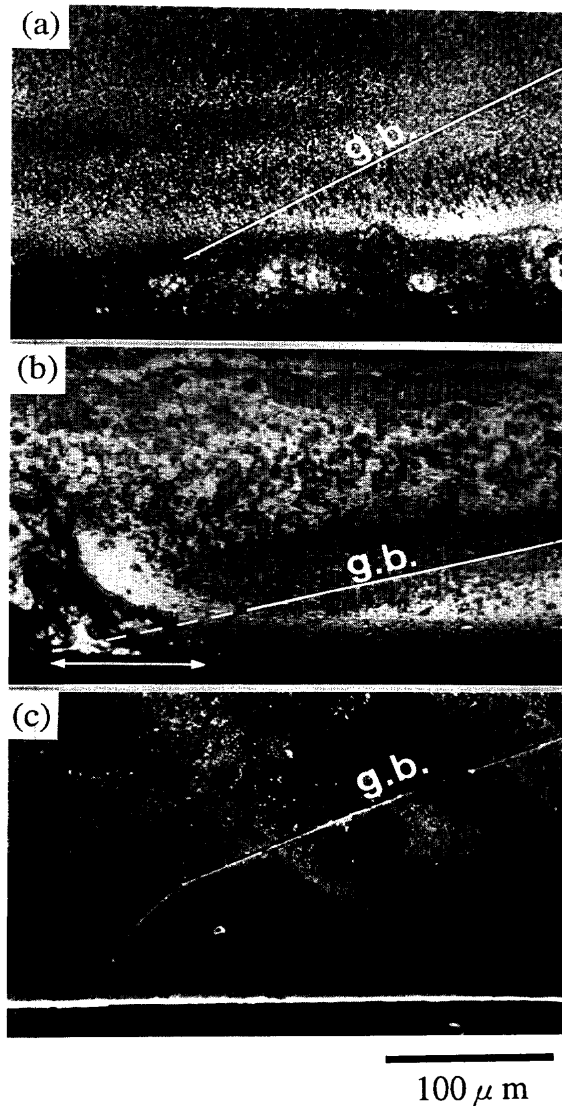


Fig. 2. Photomicrographs of Fe-3wt%Si bicrystals with low angle tilt boundary of (a) $\alpha=30^\circ$ and (b) $\alpha=10^\circ$ annealed at 1223K for 4.5ks, and SEM image of that with $\Sigma 9$ coincidence boundary³⁾ of (c) $\alpha=23^\circ$ annealed at 1223K for 2.7ks.

温度1223Kで約4.5ksの粒界移動加熱処理を施した後の光学顕微鏡写真である。また、(c)は $\alpha=23^\circ$ の $\Sigma 9$ 対応粒界に同じ温度1223Kで約2.7ksの粒界移動加熱処理を施した後のSEM像³⁾である。(a)において、 $\alpha=30^\circ$ の小傾角粒界では粒界移動はほとんど確認できない。しかし、(b)の $\alpha=12^\circ$ の小傾角粒界では約100 μm 程度粒界移動していることが確認される。これは、(a)に比べて $f(\alpha)$ が大きいため、つまり、駆動力が大きいためである。(c)において $\Sigma 9$ 対応粒界は $\alpha=23^\circ$ でも十分粒界移動は確認されるから、小傾角粒界は $\Sigma 9$ 対応粒界に比べて非常に動きにくいことがわかる。

また、Fig. 3は、温度1223Kにおける粒界移動の移動距離の二乗を $f(\alpha)$ で規格化した $a^2/f(\alpha)$ と時間 t の関係を示すものであり、(a)は小傾角粒界、(b)は $\Sigma 9$ 対応粒界の結果である。測定点を直線で近似すると、前章の式(5)よりこの勾配は $2M\gamma_{g.b.}$ となる。(b)の $\Sigma 9$ 対応粒界の $\alpha=9^\circ$ では勾

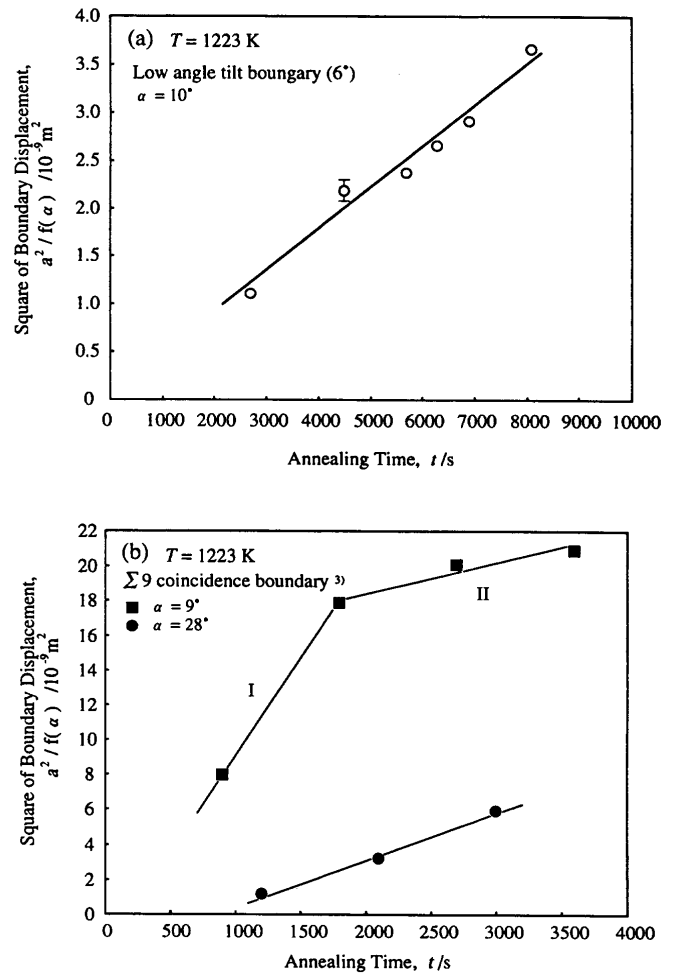


Fig. 3. Relationship between the annealing time, t , and the square of displacement, a^2 , at 1223K for (a) low angle tilt boundary and (b) $\Sigma 9$ coincidence boundary³⁾.

配の変化が見られる。この変化は既報³⁾で述べているように、capillarity法で本質的に生じてしまう駆動力の低下に伴う、移動速度の低下のための粒界移動の律速機構の変化、つまり易動度 M の変化に対応している。前述のように、capillarity法は粒界の移動が進めば駆動力は低下してしまう。したがって、駆動力の大きい移動初期では移動速度が速いため、固溶原子であるSi原子の拡散が粒界の移動に追従できない。しかし、粒界移動が進めば駆動力は低下するために、移動速度も低下する。すると、Si原子の拡散が粒界の移動に追従できるようになり、粒界はSi原子と相互作用し合うようになる。こうなると、粒界移動はSi原子の拡散に律速されるようになり、移動速度は急激に小さくなる。以下、この移動初期の領域を第I段階とし、その後を第II段階とする。これに対して、小傾角粒界では勾配の変化は見られず、粒界移動の律速機構の変化は確認されない。また、小傾角粒界の方が $\Sigma 9$ 対応粒界よりも勾配が非常に小さく、 $2M\gamma_{g.b.}$ が小さいことがわかる。この値が大きいく程、粒界の移動速度が大きくなるから、小傾角粒界の方が移動速度が小さいことがわかる。したがって、小傾角粒界で勾配の変化は見られな

かったのは、測定範囲より小さい移動距離(曲率半径)ですべてに律速機構の変化が起きているのではないかと推測される。

次に、実際の粒生長現象に対応するように、同一の曲率で移動速度を比較した。Fig. 4は、1223Kにおける移動速度 v と曲率 κ の関係を示したものである。ここで、曲率 κ は粒界移動加熱処理を施した後の粒界の形状を円近似して求めた。図より、Fig. 3と同様に、小傾角粒界では勾配の変化は見られないのに対して、 $\Sigma 9$ 対応粒界では曲率が約 $2.0 \times 10^4 \text{m}^{-1}$ (曲率半径が $50 \mu\text{m}$)で勾配の変化と移動速度の急激な変化が見られる。この変化はFig. 3と同様に駆動力の変化に伴う粒界移動の律速機構の変化を意味する。曲率が約 $2.0 \times 10^4 \text{m}^{-1}$ よりも大きい領域はFig. 3の第I段階に対応し、曲率の小さい領域は第II段階に対応する。また、 $\Sigma 9$ 対応粒界の移動速度に比べて小傾角粒界の移動速度が非常に小さいことは図より良くわかるが、曲率が約 $2.0 \times 10^4 \text{m}^{-1}$ 以下では小傾角粒界の移動速度は $\Sigma 9$ 対応粒界の1/5から1/4程度であり、曲率が約 $2.0 \times 10^4 \text{m}^{-1}$ 以上では小傾角粒界の移動速度は $\Sigma 9$ 対応粒界の1/15程度と非常に小さいものであった。

次に、本質的な粒界の移動速度の違いを理解するために、同一の駆動力で粒界移動速度を比較した。Fig. 5は1223Kにおける移動速度 v と駆動力 P の関係を示すものである。ここで、駆動力 P は報告されている純鉄の粒界エネルギーの報告値^{7,8)}

$$\gamma_{g.b.} = 1.335 - 7 \times 10^{-5} T \text{ (J/m}^2\text{)} ; \Sigma 9 \text{ 対応粒界}$$

$$\gamma_{g.b.} = 0.628 - 7 \times 10^{-5} T \text{ (J/m}^2\text{)} ; \text{小傾角粒界}$$

とFig. 4の曲率 κ の積から得た。Fig. 4と同様に小傾角粒界では勾配の変化は見られないのに対して、 $\Sigma 9$ 対応粒界では、駆動力が約25kPaで移動速度の急激な変化と勾配の

変化が見られる。また、駆動力が約25kPa以下(第II段階)では小傾角粒界の移動速度は $\Sigma 9$ 対応粒界の1/3から1/2程度、駆動力が約25kPa以上(第I段階)では1/7程度であった。この移動速度の差はFig. 4に比べて小さい。Fig. 5は、同一の駆動力で移動速度を比較したものであるが、これはFig. 4を駆動力として働く粒界エネルギーで規格化したことになる。つまり、小傾角粒界の移動速度が小さいことの原因には、本質的な移動速度、つまり、易動度そのものが小さいことに加え、粒界移動の駆動力として働く粒界エネルギーが小さいことも挙げられる。

ところで、Fig. 4やFig. 5からわかるように、 $\Sigma 9$ 対応粒界が第I段階である場合、小傾角粒界と $\Sigma 9$ 対応粒界の移動速度の差は著しく大きくなった。つまり、 $\Sigma 9$ 対応粒界の遷移段階である曲率が $2.0 \times 10^4 \text{m}^{-1}$ から今回の測定範囲である $8.0 \times 10^4 \text{m}^{-1}$ の間(駆動力が25kPaから50kPa)では小傾角粒界と $\Sigma 9$ 対応粒界の移動速度の差は非常に大きくなっている。これは、特筆すべき現象で、このような曲率(駆動力)範囲では、特定の粒界の優先成長が促進されることになる。

3.2 易動度の温度依存性

次に、粒界移動の律速機構を検討するために様々な温度で移動速度を測定し、易動度を求めた。得られた易動度 M をアレニウスプロットでFig. 6に示す。なお、比較のため $\Sigma 9$ 対応粒界については、第II段階に対する結果のみを示した³⁾。全ての温度で小傾角粒界の易動度は $\Sigma 9$ 対応粒界に比べて小さいものであった。また、小傾角粒界の易動度の温度依存性は、 $\Sigma 9$ 対応粒界と同様に中間温度域を挟んで、勾配の異なる2つの領域に分けることができた。

まず、1198Kから1248Kの低温域での小傾角粒界の易動度は、 $\Sigma 9$ 対応粒界の1/3から1/2程度であった。さらに、図の勾配から活性化エネルギーを求めると、小傾角粒界では

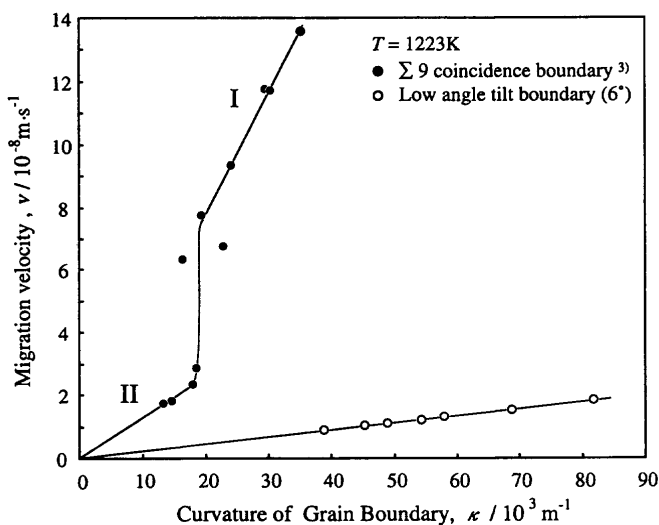


Fig. 4. Relationship between the curvature, κ , and the migration velocity, v , at 1223K. Solid circles show the calculated values of $\Sigma 9$ coincidence boundary³⁾ and open circles indicate those of low angle tilt boundary.

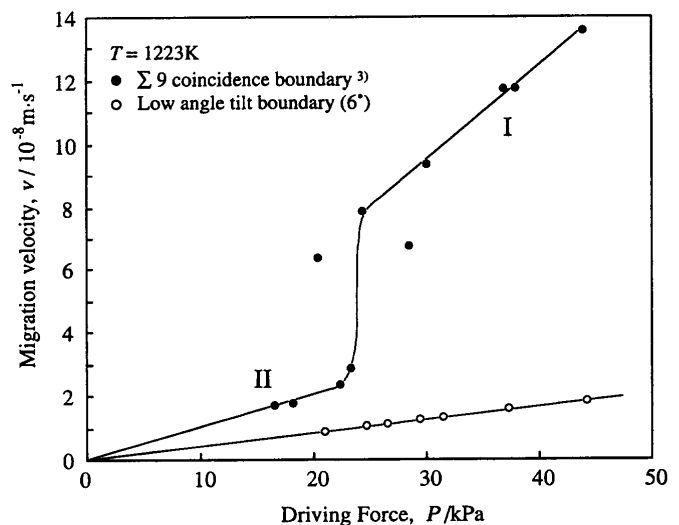


Fig. 5. Relationship between the driving force, P , and the migration velocity, v , at 1223K. Solid circles show the calculated values of $\Sigma 9$ coincidence boundary³⁾ and open circles indicate those of low angle tilt boundary.

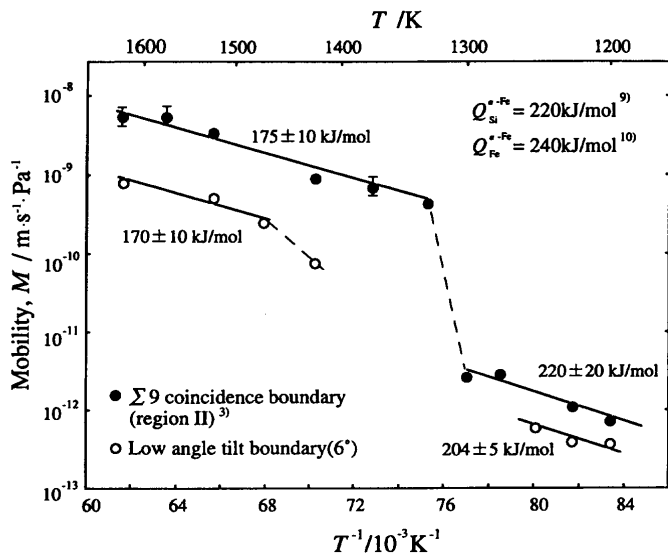


Fig. 6. Arrhenius plot of the mobility, M .
Solid circles show the calculated values of $\Sigma 9$ coincidence boundary³⁾ and open circles indicate those of low angle tilt boundary.

204 ± 5 kJ/molとなり、 $\Sigma 9$ 対応粒界の220 ± 20 kJ/molとほぼ同じ値をとった。これらの値は α -Fe中のSiの固有拡散の活性化エネルギー(219.8 ± 4.2 kJ/mol⁹⁾)にほぼ一致する。小傾角粒界は粒界の芯構造における体積変化が小さいため、Si原子との相互作用が小さいと考えられていた。しかし、この結果から、低温域では小傾角粒界の粒界移動も、 $\Sigma 9$ 対応粒界と同様にSi原子の拡散によって律速されていると言える。

また、1473Kから1623Kの高温域では、小傾角粒界の易動度は $\Sigma 9$ 対応粒界の約1/8から1/7程度と非常に小さいものであった。さらに、図の勾配から得られた活性化エネルギーは、小傾角粒界では170 ± 10 kJ/molであり、 $\Sigma 9$ 対応粒界の175 ± 10 kJ/molとほぼ同じ値であった。これらは α -Fe中のSiの固有拡散の活性化エネルギー(219.8 ± 4.2 kJ/mol⁹⁾)や α -Feの自己格子拡散の活性化エネルギー(240.9 kJ/mol¹⁰⁾)よりも小さい。しかし、報告されている α -Feの粒界拡散の活性化エネルギー(約139.6 ~ 173.5 kJ/mol¹¹⁾)に近い値である。したがって、この温度域における粒界移動は粒界拡散によって律速されていると考えられる。

ところで、高温域での粒界移動は、Si原子の影響をあまり受けないからintrinsicな粒界移動に近いと考えられる。しかし、一般に方位差が約15°以下の小傾角粒界の粒界移動は自己格子拡散に律速されると考えられており¹²⁾、今回の結果とは一致しない。この原因については現在のところ明らかでないが、これまでの小傾角粒界の粒界移動に関する研究の多くは、fcc金属を用いたものであり、今回のようなbcc金属の例は著者の知る限り皆無である。bccの結晶構造はfccより空隙率は大きい。したがって、今回のような方位差が約6°の小傾角粒界でもbcc金属ならば十分粒界拡散のような高速拡散が生じる可能性がある。しかし、これは推測

の域を脱し得ず、bcc金属の小傾角粒界の微細構造についての詳細な研究が必要と考えられる。

以上、粒界移動の律速機構の検討から、小傾角粒界も $\Sigma 9$ 対応粒界と同様に、低温域では粒界と相互作用するSi原子の拡散に律速され、Si原子の拡散が粒界の移動速度に追従できなくなるような高温域では粒界拡散に律速されることがわかった。ところで、両温度域の間の中間温度域は、低温域の律速機構から高温域の律速機構への遷移段階と考えられる。しかし、 $\Sigma 9$ 対応粒界と小傾角粒界とでは、遷移の様子が異なっている。つまり、 $\Sigma 9$ 対応粒界は約1300Kで低温域から高温域に狭い温度範囲で遷移しているのに対して、小傾角粒界はなだらかに遷移し約1473Kで高温域の律速機構になっている。律速機構の遷移は、Si原子の拡散が粒界の移動速度に追従できなくなると生じる。高温域の易動度を見る限り、intrinsicな小傾角粒界の移動速度は $\Sigma 9$ 対応粒界に比べて非常に小さい。したがって、 $\Sigma 9$ 対応粒界に比べて小傾角粒界は高温でなだらかに遷移すると考えられる。

この律速機構の遷移の相違は、温度一定で駆動力が変化する場合でも見られる。前述のFig. 4は1223Kで粒界を移動させた結果であるが、 $\Sigma 9$ 対応粒界は曲率が約 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ で遷移が生じている。しかし、小傾角粒界は今回の測定では移動機構の遷移は見られない。Fig. 6から、1223Kでの小傾角粒界の粒界移動は今回測定した条件ではSi原子の拡散に律速されていることは明らかである。ゆえに、小傾角粒界は測定範囲より大きな曲率(約 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 以上)で遷移していると考えられる。つまり、曲率が $2.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ の間では $\Sigma 9$ 対応粒界は粒界拡散に律速されるのに対して、小傾角粒界はSi原子の拡散に律速される。したがって、前述したこの範囲での移動速度の差の著しい増大は、粒界の種類による遷移段階の相違によってもたらされたものである。この粒界移動の律速機構の遷移、つまり、移動速度の急激な変化はFe-3wt%Si固溶体合金などのような、多量に含まれている溶質原子と粒界が相互作用し粒界移動に大きな影響を与えるような固溶体合金特有のものであると考えられる。したがって、純金属に比べて、ある程度異種元素が固溶している固溶体合金の方が、特定の結晶粒の優先成長が起きやすく、特徴的な集合組織を形成しやすいと考えられる。

4. 結論

Fe-3wt%Si固溶体合金の小傾角粒界を用いて、粒界移動速度を測定して以下の結果を得た。

(1) 小傾角粒界の移動速度は $\Sigma 9$ 対応粒界に比べて非常に小さく、曲率が $2.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 以下で $\Sigma 9$ 対応粒界の約1/4 ~ 1/5程度であった。また、曲率が $2.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ では $\Sigma 9$ 対応粒界の約1/15程度であった。

(2) 曲率が $2.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ (駆動力が25 ~ 50 kPa)

で小傾角粒界と $\Sigma 9$ 対応粒界の移動速度の差が著しく大きくなったが、これは固溶体合金に特有である粒界移動機構の遷移段階が $\Sigma 9$ 対応粒界と小傾角粒界で異なるためと考えられる。

(3)小傾角粒界の移動速度が小さいのは、易動度そのものが小さいことの他に、駆動力として働く粒界エネルギーが小さいことも挙げられる。

(4)1198K~1248Kにおける小傾角粒界の粒界移動の活性化エネルギーは約204kJ/molとなり、 α -Fe中のSiの固有拡散の活性化エネルギーにはほぼ一致する。故に、大傾角粒界に比べてSi原子との相互作用が小さいと考えられる小傾角粒界の粒界移動も、この温度域では大傾角粒界と同様にSi原子の拡散によって律速されていると考えられる。

(5)1473K~1623Kにおける小傾角粒界の粒界移動の活性化エネルギーは約170kJ/molとなる。これは α -Feの粒界拡散の活性化エネルギーと一致する。故に、この温度域での小傾角粒界の粒界移動は粒界拡散に律速されていると考えられる。

終わりに、本研究を遂行するに当たり、Fe-3wt%Si合金の化学分析をしていただいた、新日本製鐵株式会社西田世

紀氏に心から感謝申し上げる。なお、本研究は平成6年度文部省科学研究助成一般(B)によって行ったものである。ここに特記して感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 例えば, K.T.Aust and J.W.Rutter: Trans. AIME, **215** (1959), 820.
- 2) 原勢二郎, 清水 亮: 日本金属学会誌, **54** (1990), 1.
- 3) 中島英治, 上田利行, 連川貞弘, 市川活之, 吉永日出男: 鉄と鋼, **82** (1996), 238.
- 4) 市川活之, 上田利行, 連川貞弘, 吉富康成, 松尾征夫, 川崎宏一, 中島英治, 吉永日出男: 鉄と鋼, **82** (1996), 471.
- 5) R.C.Sun and C.L.Bauer: Acta Metall., **18** (1970), 635.
- 6) H.Kurishita, A.Oishi, H.Kubo and H.Yoshinaga: J.Jpn.Inst. Met., **47** (1983), 546.
- 7) D.Wolf: Philos.Mag., **62** (1990), 447.
- 8) E.D.Hondors: Technique of Metals Research, ed. by R.Bunshah, Vol.6 (A), Chapter 8A, John Wiley&Sons, New York (1970).
- 9) H.Oikawa: Technology Reports, **47** (1982), 215.
- 10) H.Oikawa: Technology Reports, **47** (1982), 67.
- 11) S.V.Zemskii, V.I.Grigorkin and L.N.Moskaleva: Chern. Metall., **13** (1970), 86.
- 12) 例えば, R.Viswanathan and C.L. Bauer: Acta Metall., **21** (1973), 1099.