粒界内部摩擦ピーク，その歴史と現状

岩 崎 邦 彦*

1. はじめに

我々が日常使っている金属材料のほとんどすべては多結晶体であるが，結晶粒そのものよりも粒界の方が重要な役割を果たすことがある．高温における機械的特性は粒界の影響を大きく受けることが知られており，例えば，粒界脆性，超塑性は粒界がそれぞれ害，益となった有名な例である．最近話題のニューセラミックスでは粒界がその機械的特性のみならず電気的特性等も左右し，粒界制御が材料開発のキーポイントであるとさえ言われている．

このような見地から，粒界研究は最近盛んに行われており⁽¹⁾⁽²⁾，いわゆる結晶学的にきれいな粒界に対しては電子顕微鏡観察，コンピュータシミュレーション等により原子的スケールでかなりのことがわかってきている．しかし，実際の粒界はそれ程きれいなものばかりではなく，その動的挙動となると原子配列は時間と共に変化し，事情は非常に複雑である．

内部摩擦による粒界研究は約 40 年の歴史をもつが，粒界の原子的構造の解明と言う点では電子顕微鏡等に比べいささか無力である．しかし，粒界の動的挙動を比較的簡単に捉えると言う点では有力な手段の 1 つであると考えられるので，ここにその歴史的背景と問題点を私見を交えて紹介する．金属の種類により内部摩擦の挙動は十分異なり，混乱を招く恐れがあるため，今回は最もよく研究されている純アルミニウムを中心に話を進め，微量不純物の影響にも少し言及する．Al に関する測定が多いのは (1) 再結晶温度が低いいため粒径の制御がしやすい，(2) 弾性的異方性が小さいためその影響をあまり気

にしないのでよい，(3) 焼鈍双晶ができにくいいため粒界と双晶境界との混同の心配が少ない，等の理由による．

2. 歴 史 的 背 景

粒界が粘性すべりをするのではないかと言うアイデアは 1941 年に Zener⁽³⁾ によって導入されている．彼の 2 次元モデルによれば，図 1 (a) のような相接する 2 つの結晶粒 1, 2 が外力により互いにすべる場合，三重点 (triple joint) と呼ばれる他の粒界との交点にすべりに対する抵抗力が発生するため，粒界にそっての結晶粒 1, 2 の相対的すべり量は図 1 (b) のようになる⁽⁴⁾．十分低い応力レベルではこの抵抗力は歪に比例するものと考えられ，外力を除けばすべりは元に戻るが，粒界すべりは応力に対して時間的に遅れを伴うので，この系は結局図 1 (c) のようなバネとダッシュポットの組み合わせで置き替え

図 1 Zener の粒界粘性すべりモデル⁽³⁾⁽⁴⁾。

* 科学技術庁特殊法人理化学研究所金属物理研究室研究員，現在：日新製鋼株式会社新材料研究所主任研究員

Historical Review on the Grain Boundary Internal Friction Peak; Kunihiko Iwasaki (The Institute of Physical and Chemical Research, Wako. Present address: New Materials Research Lab., Nisshin Steel Co., Ltd., Ichikawa)

Keywords: internal friction, elastic modulus, grain boundary, bamboo boundary, aluminum, aluminum alloy

1986 年 12 月 9 日受理

ることができ、内部摩擦の分野ではよく知られている標準線型弾性体(standard linear solid)に帰結する。このモデルでは、試料サイズに比べて十分小さな結晶粒に対しては緩和強度(relaxation strength)は粒径に依存せず、約 0.6 という大きな値をとるが、粒界に不純物等の障害物があると、この値はもっと小さくなる。一方、緩和時間(relaxation time)は粒径に比例する。

粒界の粘性すべりは実際にクリープや応力緩和の測定で早くから認められていたが、これを内部摩擦で最初に捉えたのが Kê⁽⁵⁾⁽⁶⁾ による 1947 年の有名な実験である。なお、この論文は現在広く使われているねじり振子型内部摩擦測定装置を開発、紹介したことでよく知られている。彼は図 2 に示すように 99.99% の Al 多結晶において約 280°C に大きな内部摩擦ピークを見出し、単結晶(実は純度が多結晶のものより低い 99.2% の竹状晶(bamboo crystal)であり、これが後に問題になるのであるが)では見られないということと、ピークの諸特性も上記の Zener モデルとかなり良く一致することから、ピークが粒界の粘性すべりに依るものであると結論した。この場合、内部摩擦は粒界に沿ってのすべり量とすべりに対する抵抗力との積に比例し、低温では前者が小さく、高温では逆に後者が小さくなるので、中間の温度で内部摩擦は最大となり、温度の関数としてピークが生ずるのである。

Kê の結果は非常に単純明解であったが、細かい点においては後にいろいろ問題点が出た。例えば、緩和時間は粒径には比例せず、ほぼ自乗に比例する⁽⁷⁾、粒界すべりに依るのではなく粒界の移動に依るのではないか⁽⁸⁾、ピーク幅の問題⁽⁹⁾、多結晶と単結晶との試料純度の差の問題⁽⁴⁾、等である。

以上のような批判にもかかわらず、問題のピークが粒界に関連しているという点においては長い間疑問を持つ者はいなかった。しかし、Roberts 等⁽¹⁰⁾がニッケルに対する測定結果からではあるが、格子転位の関与を示唆した

のに呼応して Bonetti 等⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁵⁾と Woirgard 等⁽¹⁶⁾⁻⁽²¹⁾は 1970 年の半ばより粒界ピークの存在そのものを疑問視し始めた。つまり、粒界ピークと呼ばれていたものは粒界に依るものではなく、格子転位に依るものであると考えたのである。彼等の指摘は粒界ピークの根源にかかわるものであり、内部摩擦研究としては古い問題であった粒界ピークが再び論議的になったのである。彼等はその論拠として、(1)単結晶でも加工すれば同じようなピークは生じ、多結晶のそれの方が大きいのは転位密度が高いためである⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁹⁾、(2)格子転位特有の大きな歪振幅依存性がある⁽²²⁾、(3)加工等の影響が大きい⁽¹⁷⁾、(4)積層欠陥エネルギーとの関連性がある⁽²³⁾(これは後に偶然のものであることが示されているが⁽²⁴⁾)、(5)活性化エネルギーが粒界のものよりバルクのものに近い⁽⁵⁾、等を挙げている。

これに対して Kê⁽²⁵⁾は(1)大傾角粒界中の転位と単結晶のすべり帯中の転位は構造が似ているため同じようなピークが出る可能性があるが、それらは同一のものではない。(2)加工は粒内転位の導入ばかりではなく粒界にも大きな影響を与え、粒界ピークの変え、それを別のピークと見誤っている、(3)単結晶と称しているものでも加工により多結晶化している疑いがある、等の根拠により反論した。

最近、Bonetti 等⁽²⁶⁾は 300°C 付近のピークは格子転位が粒界で消滅することによる間接的な粒界すべりによると言うモデルを出し、純粋な粒界すべりではないが粒界の関与を認めた。彼等は 500°C 付近のピークが純粋な粒界すべりに依るものであると言っているが、それは今問題にしているものとはピーク温度が 200°C も離れており、全く別のものであるのでここでは議論しない。Woirgard 等も最近はこの件に関しては直接的にはあまりふれておらずトーンダウンしている。しかし、彼等はまた粒界ピークの存在を完全には認めたわけではなく、ちなみに彼等の論文では粒界ピークと言う言葉は使用せず、 $1/2 T_m$ (融点)付近のピークと呼んでいる。

以上のような経過を経てこの論争は一部にはまだ反対があるものの Kê 側に軍配が上がりほぼ解決したものと見なしてよいであろう。しかし、転位の集合体と考えられる粒界、すべり帯、セルウォール、ポリゴニゼーション境界等はすべて内部摩擦にひっかかる可能性を持っており、内部摩擦の測定からのみではそれ等の識別は非常に困難である。しかも、粒界転位と格子転位は相互作用を及ぼし合い互いに独立ではなく、単結晶と多結晶では純度が同じでも試料の作製過程の差により粒界の有無以外にも内部構造に大きな差がある。次節に示すように、岩崎⁽²⁷⁾はいわゆる粒界ピークには粒界転位と格子転位の両者からの寄与があることを実際に示している。結局、両者間の論争はそれぞれ別々のピークを問題にしていた

図 2 Kê による粒界ピークの最初の観察⁽⁵⁾。

可能性が非常に強い。つまり、どちらのピークも存在し、それ等が偶然に同じ温度領域に生じたため混乱を引き起こしたのではないかと考えられる。

3. 最近の研究から

岩崎⁽²⁷⁾はねじり振子による純 Al 線に対する測定を行い、振動周期の温度微分が内部摩擦より鋭いピークを与える⁽²⁸⁾ことを利用し、いわゆる粒界ピークは内部摩擦ピークとしては 1 つのピークに見えても、実は、少なくとも 2 つの成分、高温成分 (HTC) と低温成分 (LTC)，より成ることを示した。600°C で 3.6–7.2 ks 焼鈍すると内部摩擦ピークの幅は最大となり両成分がほぼ等しくなる (表 1)。ここで、活性化エネルギーは振動周期の微分を利用した簡便法⁽²⁸⁾により求めたものである。600°C で更に長時間焼鈍すると HTC が優勢となりピークは高温へ移り (図 3)，加工すると逆に LTC が優勢となりピークは低温へ移り低くなる (図 4)。図 3 および 4 で t , t' , Q^{-1} はそれぞれ規格化した振動周期、その温度微分、内部摩擦を示し、 t' が少なくとも 2 つのピークに分離していることがわかる。ピークの高さの粒径依存性は図 5 に示すように、焼鈍状態 (HTC 優勢) では良い相関を示すが、加工状態 (LTC 優勢) では相関があるとは言えない。また、表面観察よりこの場合の変形はほとんど粒内で起こっていることがわかった。以上のことから HTC が粒界転位に LTC が格子転位に関連しているのではないかと推測された。ただし、ここで言う格子転位は何らかのかたちで粒界と関連をもっているもので、純粋な格子転位とは異なる。後者はもっと低温 (200°C 以下) にピークを与えることが知られている^{(20) (29) (30)}。

線状材料では結晶粒度の制御が困難 (比較的低温で安定な竹状晶となってしまうそれ以上進展しない) なことから岩崎は歪焼鈍法により粒度制御が簡単な板状試料用の逆吊りたわみ振子を開発し⁽³¹⁾、単、双多結晶に対して測定を行った⁽³⁰⁾。単結晶では加工後焼鈍して新粒界を形成した場合以外いわゆる粒界ピークは存在しないことを確認し、また、引張りおよび圧縮軸 (たわみ振子の軸) と粒界のなす角 θ が 0, 45, 90 度の 3 種の双結晶板

表 1 試料状態によるピーク特性の変化。

試料状態	活性化エネルギー (eV†)	振動数因子 (Hz)	幅比	1 Hz 換算ピーク温度 (°C)
600°C で 3.6~7.2 ks 焼鈍	1.6	10^{15}	2.2	260
600°C で 360 ks 以上焼鈍	1.6	10^{13}	1.9	298
引張加工	1.5	10^{14}	2.0	254

† 1 eV = 1.6×10^{-19} J.

を用いて測定し、ピークが 45 度の試料にのみ顕著に現れることを見出した (図 6)。挿入図に試料形状を示すが、斜線部は試料をつかむための部分である。試料は下端を

図 3 焼鈍による粒界ピークの高温への移動⁽²⁷⁾。

図 4 加工による粒界ピークの低温への移動⁽²⁷⁾. 図 6 双結晶を用いた測定⁽³⁰⁾. 図 5 粒界ピーク高さの結晶粒度依存性⁽²⁷⁾. 図 7 粒界とたわみ振子の軸とのなす角とせん断応力(歪)との関係⁽³⁰⁾.

固定され、上端が紙面の方向にたわみ振動する⁽³¹⁾。なお、この 3 種の試料は同一の双結晶から切り出したものであり、粒界は試料面(紙面)に垂直に入っている。図 7 に示すように、粒界に働くせん断応力の成分の違いを考えると、ピークが粒界に関連していることは明白で、しかも粒界すべりによるものであると考えられる。更に中

間の 15, 30, 60, 75 度の試料に対しても測定したところ、図 8 に示すように大体この曲線にのることがわかった⁽³²⁾。これはピークの高さに正の歪振幅依存性(図 9)があることにより説明できる⁽³³⁾。もし歪振幅依存性がなければ、0 および 90 度以外のところではフラットになるものと予想される。

一方、Kê 等⁽³⁴⁾⁻⁽⁴³⁾は純 Al 線に対する一連の測定を行ない、種々の方法で作製した同一純度の単結晶、多結晶

図8 ピーク高さの粒界とたわみ振子の軸とのなす角度依存性⁽³²⁾。

図9 ピーク高さの歪振幅依存性⁽³³⁾。

の比較により粒界ピークの存在を再確認し、更に、粒界ピーク(280°Cピーク)の外に3つの新しいピーク、170°Cピーク、260°Cピーク、365°Cピークを見出した。電子顕微鏡観察の結果とも照らし合わせ、170°Cピークは加工により導入された粒内転位に、260°Cピークは竹状晶粒界(bamboo boundary)近傍のポリゴニゼーション境界に、365°Cピークは粒内に分散した転位(dispersive dislocation)の上昇運動にそれぞれ関連しているものと解釈している。260°Cピークは350°C以上で焼鈍することにより粒径が試料径を上回る(竹状晶化する)と突然280°Cピークにとってかわって現れ、焼鈍により低温側に移動するという特異な挙動を示す(図10)。彼等はこのピークを Macrocrystalline peak, 280°Cの通常の粒界ピークを Conventional grain boundary peak (Kê peak)と呼び区別している。

しかし、岩崎の測定結果⁽²⁷⁾では高純度のAlの場合、粒界ピーク温度付近で試料は測定中に竹状晶化してしまいKê等の言うような粒径の成長による280°Cピークから260°Cピークへの急激な変化は観測されず、焼鈍による低温への移動、高さの減少も起こらない。荻野等⁽⁴⁴⁾も竹状晶化によるピーク温度の大きな変化は観測しておらず、ピーク高さはむしろ少し増加している。

Kê等と岩崎との論争点は竹状晶粒界と竹状晶化していない細い粒界が同じ内部摩擦ピークを与えるかどうかと言う点である。Kê等によれば、竹状晶化している岩崎

図10 Conventional grain boundary peakからMacrocrystalline peakへの突然の移行⁽³⁶⁾。焼鈍温度 1: 195°C, 2: 255°C, 3: 290°C, 4: 324°C, 5: 390°C, 6: 450°C, 7: 500°C

の試料には280°Cピークは存在しないはずで、170°Cピークは岩崎のLTCに、260°Cピークは岩崎のHTCおよびWoigard等のP₁に、280°CピークはBonetti等のK₁に、365°CピークはWoigard等のP₂にそれぞれ対応している。

これに対し岩崎は170°Cピークに対応するのは岩崎が加工した試料に見出したP₁₅₀⁽³⁰⁾で、LTCとHTCはKê等の測定では分離されておらず(振動周期の温度微分)のみ分離されて見える⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。彼等の焼鈍試料では大部分HTCのはずであり、また、次のような理由から260°Cピークと280°CピークとHTCは同一のもので、これ等がいわゆる粒界ピークであると考えている。(1) 260°CピークおよびHTCはその粒径依存性⁽²⁷⁾⁽³⁹⁾から竹状晶粒界に関連していることは明らかで、竹状晶粒界近傍に形成され易いと彼等の言うポリゴニゼーション境界に帰結する⁽³⁴⁾⁻⁽³⁹⁾必然性はない。(2) 竹状晶粒界はれっきとした粒界であり、つまり260°CピークおよびHTCは粒界と関係している。(3) Alは表面が丈夫な酸化物(Al₂O₃)で覆われており、それが図1(a)に示したような三重点と同様に粒界すべりに対して抵抗力を与えるため、三重点の存在が必ずしも粒界ピーク出現のための必要条件⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾ではない。従って、竹状晶粒界が微細な通常の粒界かに依らず同一のメカニズムでこれ等すべてのピークは生ずるものと考えられる。Cu₃Auのように表面に丈夫な酸化物が形成されない場合は、竹状晶化により粒界ピークが消滅するだけで、それにかわる新しいピークは生じないという観測結果⁽⁴⁵⁾もこのことを支持して

いる。(4)260°C ピーク, 280°C ピーク, HTC はほぼ同じ活性化エネルギーをもつ。(5)焼鈍による低温への移動は通常は考えにくく, 岩崎によればこのような現象は加工した時のみ現れている⁽²⁷⁾ので, $K\hat{e}$ 等の測定では何らかの理由(例えば, ねじり振子のカウンターウェイトによるクリープ変形)で試料が測定中に加工された可能性がある。この外, 試料純度の差(同じ 5 N と称しても不純物濃度が国によりかなり違う), 測定雰囲気の違い(彼等は空气中, 岩崎は真空中で測定), 試料作製法の差等も不一致の原因と考えられ, 現在, 両者間では共同研究が行われており⁽⁴⁶⁾いずれこの問題も決着がつくと思われる。

4. 微量不純物元素の影響

不純物元素の粒界ピークに及ぼす影響は古くから調べられているが⁽⁴⁾, ここでは岩崎⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾による Al-0.011 原子%Sn, Al-0.068 原子%Cu および Al-0.032 原子%Ag に対する最近の結果を簡単に紹介する。これらの合金に対して粒界上に析出している不純物元素の濃度を Seah 等⁽⁴⁹⁾により導入された粒界富化因子(粒界上の不純物元素濃度と粒内のそれとの比)を用いて推定すると概略表 2 のようになる⁽⁴⁷⁾。粒界の厚さを 1 原子距離と仮定しているため, Al-Sn に対する 140% という値は約 1 原子層半にわたって粒界が Sn 原子で飽和されていることを意味する。Al-Cu および Al-Ag においては不純物による飽和は起きていない。不純物元素濃度が低い場合は, 粒界すべりは純 Al の場合と同様に粒界転位により起こると考えられるが, 粒界転位の移動は不純物元素により抑制され, その結果粒界ピークは高温側にずれる⁽⁴⁷⁾。しかし, 粒界が Al-Sn のように不純物元素により飽和されていると事情はかなり変わってくる。この場合の粒界は焼結助剤を用いて粉末焼結した物質のものにむしろ似ていて, 各結晶粒は全く別組成の粒界層により分離されている。従って, 粒界転位は考えにくく, 粒界すべりは飽和した不純物原子層が潤滑層のように働くことにより起こるのではないかと想像される。詳細は省略するが, この差がピーク特性の歪振幅依存性の差となって現れているものと思われる⁽⁴⁸⁾。

表 2 粒界上の不純物濃度推定値(絶対値はあまり信用おけない)。

試料	粒界富化因子	粒界上の不純物濃度(原子%)
Al-0.011 Sn	1.3×10^4	140
Al-0.068 Cu	1.5×10^2	10
Al-0.032 Ag	1.8×10	0.6

5. 粒界ピークの理論

先ず, 粒界ピークを生じているのは粒界のすべりか,

移動かの点であるが, 殆どどの研究者はすべり説を支持しており, 移動のモデルを考えたのは Leak 等⁽⁸⁾⁽²²⁾⁽⁵⁰⁾のみである。後者の根拠は自己拡散の活性化エネルギーがバルクのものより粒界のものに近い, 振動数因子が原子のジャンプのものに近い, という 2 点である。移動説の 1 つの鼓膜振動モデル⁽⁵⁰⁾では外力によりどうして粒界が移動するのかという点で, 弾性定数の異方性や都合の良い応力集中を考えなければならず, 無理がある。転位モデル⁽⁸⁾⁽²²⁾ではこの点での問題はないが, 彼等も最近はすべり説を採っている⁽⁵¹⁾。

粒界ピークが粒界すべりによって生じているということはほぼ確かであるが, $K\hat{e}$ の最初の発見以来 40 年近くたっているにもかかわらず, 定量的にはおろか, 定性的にも満足すべき理論は残念ながら出ていない。これは, 複雑な応力と歪の関係, 粒界上の階段(ledge)の存在による局所的な移動の混入, 格子転位との相互作用, すべりによる周囲の変形, 等々現象が非常に複雑なためであろう。古くは, Zener⁽³⁾のように粘性という概念にこれらすべてをひっくるめてしまう手法, 不規則帯(disordered zone)としてまとめて捉える方法⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾, 等があるが, 最近のものは転位モデルである。いくつかの例を挙げると, 刃状転位での原子空孔の生成とその 2 本の刃状転位間の移動を考えたもの⁽⁵⁴⁾, くぎづけ点間の粒界転位の可逆的移動によるもの⁽¹⁶⁾⁽⁵⁵⁾, 歪振幅とともに励起される粒界転位の数が増加することにより歪振幅依存性を説明したもの⁽²²⁾, 粒界端における応力集中を考慮した転位モデル⁽⁵¹⁾, 連続に分布した粒界転位を考えたもの⁽⁵⁶⁾, 等があるが, 詳細は原論文を参照していただきたい。

6. おわりに

粒界ピークの存在とそれが粒界すべりによることはほぼ確かであろう。しかし, 詳しく調べれば調べるほど似たようなピークは多数存在し, すべてが解明されるにはまだ時間が必要である。最近, 粒界の構造がかなりはっきり分かってきているにもかかわらず, 粒界ピークの研究は残念ながら 40 年前と比べあまり進歩したとは言えない。より良く制御されたきれいな粒界を持つ双結晶等に対する系統的な測定が強く望まれる。ただし, 双結晶の場合, ピークがあまり大きく出ないため詳しい解析がやりにくいと言う欠点がある。内部摩擦測定と並行して同一試料を用いた他の測定を行い比較検討することが望ましい。

最後にこの拙文を書く機会を与えていただいた京都大学の小岩教授に謝意を表します。

文 献

- (1) 日本金属学会会報, 「粒界, 相界面」特集, 22(1983), 79.
- (2) *Proc. 4th JIM Int. Symp. on Grain Boundary Structure and Related Phenomena*, Supplement to Trans. JIM, Vol. 27(1986).
- (3) C.Zener: Phys. Rev., 60(1941), 906.
- (4) A.S.Nowick and B.S.Berry: *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Academic Press, New York, (1972), 449.
- (5) T.S.Kê: Phys. Rev., 71(1947), 553.
- (6) T.S.Kê: Phys. Rev., 72(1947), 41.
- (7) C.D.Starr, E.C.Vicars, A.Goldger and J.E.Dorn: Trans. ASM, 45(1953), 275.
- (8) T.M.Williams and G.M.Leak: Acta Metall., 15(1967), 1111.
- (9) D.T.Peters, J.C.Bisseliches and J.W.Spretnak: Trans. Metall. Soc. AIME, 230(1964), 530.
- (10) J.T.A.Roberts and P.Barrand: J. Inst. Metals, 96(1968), 172.
- (11) E.Bonetti, E.Evangelista, P.Gondi and R.Tognato: Nuovo Cimento, 33B(1976), 408.
- (12) E.Bonetti, E.Evangelista, P.Gondi and R.Tognato: Phys. Status Solidi(a), 39(1977), 661.
- (13) E.Bonetti, E.Evangelista and P.Gondi: *Proc. 6th Int. Conf. Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids*, Ed. by R.R.Hasiguti and N.Mikoshiba, Univ. Tokyo Press, Tokyo, (1977), 301. 以下 ICIFUAS-6 と略す.
- (14) E.Bonetti, E.Evangelista and P.Gondi: Phys. Status Solidi(a), 63(1981), 645.
- (15) E.Bonetti, L.Castellani, E.Evangelista and P.Gondi: J. de Phys., C5(1981), 433.
- (16) J.Woigard, J.P.Amirault and J. de Fouquet: *Proc. 5th Int. Conf. Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids*, Ed. by D.Lenz and K.Lücke, Springer-Verlag, Berlin, (1973), 392. 以下 ICIFUAS-5 と略す.
- (17) J.Woigard, M.Gerland and A.Rivière: ICIFUAS-6, 293.
- (18) J.Woigard, A.Rivière and J. de Fouquet: J. de Phys., C5(1981), 407.
- (19) R. J. Gaboriaud, J. Woigard, M. Gerland and A. Rivière: Philos. Mag., 43(1981), 363.
- (20) A.Rivière, J.P.Amirault and J.Woigard: J. de Phys., C5(1981), 439.
- (21) A.Rivière and J.Woigard: Scripta Metall., 17(1983), 269.
- (22) C.C.Smith and G.M.Leak: ICIFUAS-5, 383.
- (23) J.N.Cordeau and J.W.Spretnak: Trans. Metall. Soc. AIME, 236(1966), 1685.
- (24) G.Roberts and G.M.Leak: ICIFUAS-5, 370.
- (25) T.S.Kê: J. de Phys., C5(1981), 421.
- (26) E.Bonetti, A.Cavallini, E.Evangelista and P.Gondi: J. de Phys., C9(1983), 759.
- (27) K.Iwasaki: Phys. Status Solidi(a), 79(1983), 115.
- (28) K.Iwasaki: J. Phys. Soc. Japan, 49(1980), 271.
- (29) C.Esnouf and G.Fantozzi: J. de Phys., C5(1981), 445.
- (30) K.Iwasaki: Phys. Status Solidi(a), 81(1984), 485.
- (31) K.Iwasaki: J. Phys., E16(1983), 421.
- (32) K.Iwasaki: Phys. Status Solidi(a), 90(1985), K35.
- (33) K.Iwasaki: Phys. Status Solidi(a), 94(1986), 601.
- (34) T.S.Kê, P.Cui and C.M.Su: Phys. Status Solidi(a), 84(1984), 157.
- (35) T.S.Kê, L.D.Zhang, P.Cui, Q.Huang and B.S.Zhang: Phys. Status Solidi(a), 84(1984), 465.
- (36) T.S.Kê, P.Cui, S.C.Yan and Q.Huang: Phys. Status Solidi(a), 86(1984), 593.
- (37) T.S.Kê: *Proc. Int. Conf. Dislocations in Solids*, Ed. by H.Suzuki, et al., Univ. Tokyo Press, Tokyo, (1985), 591.
- (38) L.D.Zhang and T.S.Kê: 同上, 279.
- (39) T.S.Kê: J. de Phys., C10(1985), 351.
- (40) J.Shi, L.D.Zhang and T.S.Kê: J. de Phys., C10(1985), 355.
- (41) C.M.Su and T.S.Kê: J. de Phys., C10(1985), 359.
- (42) C.M.Su and T.S.Kê: Phys. Status Solidi(a), 94(1986), 191.
- (43) T.S.Kê: (2)と同じ, 679.
- (44) Y.Ogino and Y.Amano: Trans. JIM, 20(1979), 81.
- (45) K.Iwasaki: J. Phys. Soc. Japan, 55(1986), 546.
- (46) 岩崎邦彦: 日本金属学会会報, 25(1986), 781.
- (47) K.Iwasaki: Phys. Status Solidi(a), 86(1984), 637.
- (48) K.Iwasaki: Phys. Status Solidi(a)印刷中.
- (49) M.P.Seah and E.D.Hondros: Scripta Metall., 7(1973), 735.
- (50) G.W.Miles and G.M.Leak: Proc. Phys. Soc., 78(1961), 1529.
- (51) G.Roberts and G.M.Leak: ICIFUAS-6, 117.
- (52) N.F.Mott: Proc. Phys. Soc., 60(1948), 391.
- (53) T.S.Kê: J. Appl. Phys., 20(1949), 274.
- (54) A.S.Nowick: *Metal Interfaces*, American Soc. Metals, New York, (1952), 248.
- (55) J.T.A.Roberts and P.Barrand: Trans. Metall. Soc. AIME, 242(1968), 2299.
- (56) Z.Q.Sun and T.S.Kê: J. de Phys., C 5(1981), 451.