三次元アトムプローブによる金属材料の サブナノメーター分析

宝 野 和 博*

1. はじめに

アトムプローブ電解イオン顕微鏡 (Atom Probe Field Ion Microscope, APFIM) は電解イオン顕微鏡 (FIM) に飛行時間型質量分析器を取付けたもので、金属表面の個々の原子を観察することができると同時に、これらの原子の質量を測定することによりその原子種を決定できるという究極的な局所分析装置である⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。分析の空間分解能は面内方向に ~ 0.5 nm 以下、試料の深さ方向に1原始面 (~ 0.2 nm) である。また検出効率に質量依存性がなく、軽元素でも定量的に分析できるという利点がある。このようにアトムプローブは現在実用化されている局所分析装置のなかでは最も高い空間分解能と定量性を有しているが、プローブホールと呼ばれる分析用のアパーチャーでおおわれた極めて微小な領域からだけ原子を検出しているために、データーとしてはこのような領域の深さ方向への一次元的な濃度プロファイルしか得られない。プローブホールで選択される領域は試料の全表面積の0.1%にも満たない。つまりアトムプローブ分析では試料表面からイオン化される原子の99.9%以上を無駄にしていることになる。

1988年にオックスフォード大学のグループにより開発された位置敏感型アトムプローブ (position sensitive atom probe, PoSAP)⁽⁵⁾⁽⁶⁾ は、アトムプローブの検出器に位置敏感型検出器 (position sensitive detector) を取り入れたもので、分析に際してアパーチャーを用いずに検出器に到達した原子の飛行時間と位置を同時に測定することができる装置であ

る。この装置を用いれば試料表面に存在する合金中の全構成元素を原子レベルの空間分解能で2次元マップとして表示することができるばかりでなく、電界蒸発現象を用いて試料表面を一原子層ずつ蒸発させることにより、2次元マップを深さ方向に拡張していくことができる。このデーターをコンピュータで蓄積し再構成することにより、合金中の原子の分布を3次的に再構成することができる⁽⁷⁾。この手法は、従来のアトムプローブの分析領域がプローブホールのカバーする極めて微細な領域に限られるという欠点を克服しただけでなく、個々の原子の位置をサブナノメーターの分解能で決定することのできるユニークな分析手法である。

位置敏感型アトムプローブでは、位置検出器の特性から同時に2個以上のイオンが検出器に到達した場合にはこれらのイオンの位置測定が不可能になるという欠点があるが、これを改善するためにフランスのルーアン大学のグループは位置検出器として100個の陽極を用いた多重検出システムを採用し、これを断層アトムプローブ (Tomographic Atom Probe, TAP) と名付けた⁽⁸⁾。いずれにしてもイオンの飛行時間測定と位置検出を同時に行うという点においては、PoSAPと原理的には同じであり、さらにこれらのデータを再構築することにより原子位置に関する3次的な情報が得られるということで、これらのアトムプローブは総称して3次元アトムプローブ (Three Dimensional Atom Probe, 3DAP) と呼ばれている。

すでに3次元アトムプローブの原理と応用に関する解説記事は筆者らにより本誌に掲載されているが⁽⁹⁾、本稿では「先端実験技術シリーズ」の一貫として、3次元アトムプロ

* 金属材料技術研究所計算材料研究部主任研究官 (〒305 つくば市千現1-2-1)

Subnanometer Scale Microstructural Characterization by a Three Dimensional Atom Probe; Kazuhiro Hono (National Research Institute for Metals, Sengen, Tsukuba)

Keywords: three dimensional atom probe, field ion microscope, position sensitive atom probe, atom probe, atom probe field ion microscope, field ion microscope, tomographic atom probe

1995年12月28日受理

2. 位置敏感型アトムプローブ

$$x=2Q_1/(Q_1+Q_2+Q_3) \quad (1)$$

$$y=2Q_2/(Q_1+Q_2+Q_3) \quad (2)$$

Diagram illustrating the FIM (Field Ion Microscopy) system setup. The system includes an FIM material (FIM 試料) emitting ions (イオン) which pass through an MCP (Microchannel Plate) and a wedge-and-strip structure (wedge-and-strip 陽極). The ions are then detected by three channels (Q₁, Q₂, Q₃). The system includes a trigger signal (トリガー信号) and a time signal (時間信号) which are processed by a DAC, ADC, and a CAMAC bus controller. The CAMAC bus controller is connected to a 32-bit personal computer (32 bit パーソナルコンピューター). The system also includes a delay and gate (Delay & Gate) unit and a position signal (位置信号).

Key components and signals shown:

- FIM 試料 (FIM material)
- イオン (Ions)
- MCP (Microchannel Plate)
- wedge-and-strip 陽極 (Wedge-and-strip anode)
- Q₁, Q₂, Q₃ (Detection channels)
- 位置信号 (Position signal)
- 時間信号 (Time signal)
- トリガー信号 (Trigger signal)
- V_{dc}, V_p (Voltage sources)
- パルスサー (Pulsar)
- Start, Stop (Timing signals)
- Delay & Gate (Timing unit)
- 8ch TDC (8-channel Time-to-Digital Converter)
- Charge ADC (Charge-to-Digital Converter)
- CAMAC バスコントローラー (CAMAC Bus Controller)
- 32 bit パーソナルコンピューター (32-bit Personal Computer)

Formulas for position signals:

$$X = Q_1 / (Q_1 + Q_2 + Q_3)$$

$$Y = Q_2 / (Q_1 + Q_2 + Q_3)$$

PoSAP により測定される FIM 像はデジタル FIM 像と呼ばれている。デジタル FIM 像を得るためには通常の FIM で清浄表面を得た後、鏡体内の結像ガスを 1×10^{-6} Pa 程度に減圧し、3 チャンネルの電荷敏感型アナログ-デジタル変換器(ADC)を用いて 3 つの陽極上の電荷を同時に測定する。このとき飛行時間測定は行わず、電荷の測定は連続的に入射するイオンの時間信号をトリガーとして、一定の遅延時間(~ 100 ns)の後、一定のゲート幅(~ 50 ns)で電荷量を測定する。このように測定された電荷量を式(1), (2)で位置座標に変換することにより、デジタル FIM 像を記録することができる。図 2 はタングステンデジタル FIM 像と実際の FIM 像を比較したものであるが⁽¹⁶⁾、デジタル FIM 像で得られる像と実際の FIM 像がかなりの精度で一致していることから、wedge-and-strip タイプの PSD は原子レベルの分解能を得るのに十分な分解能を有していることが分かる。しかし後に述べるように、電界蒸発現象を用いるアトムプローブ分析では原子の位置が蒸発収差により若干ずれるために、原子の位置を厳密に再現することはできない。デジタル FIM 像の観察は PSD や MCP の動作条件を最適化するために不可欠である。またデジタル FIM 像を使えば、PSD で実際に覆われている領域からだけの FIM 像を映し出すことができるので、粒界偏析などを分析したい場合、実際の結晶粒界の位置を FIM 像として映し出し、それと全く同じ領域からの元素マッピングをとることができる。また電界イオン現象や電界放射現象の観測自体を対象とする研究では、PSD を利用することにより、蛍光板に比較するとはるかに定量的な観測が可能になると考えられる。

$$m/n = 2e(V_{dc} + \alpha V_n)(t/l)^2 \quad (3)$$

268

図2 タングステンの(a)デジタルFIM像と(b)He ガスによる通常のFIM 像。(文献(16))

変換することができる。特に低指数面を PoSAP で観測すると、原子の蒸発に伴って原子面が小さくなっていく様子が観測され、このような観測により単一面から蒸発する原子の個数が決定でき、かなり正確な深さ方向へのスケージングが可能となる⁽¹⁷⁾。

3. 断層アトムプローブ

PoSAP では wedge-and-strip 型陽極の特性から、単一のパルスで複数個のイオンが検出器に到達すると、位置検出が不可能になる。つまり単一パルスで1個以上の原子が蒸発しないような条件で分析を行わなければならない。従来の APFIM でも、単一パルスで質量の同じ複数個のイオンが同時到着した場合、これらを1個のイオンとして数えてしまうという欠点がある。したがって、この問題は PoSAP に限らず、アトムプローブ分析法に共通した問題であるといえる。しかし APFIM では小さなアパーチャーで囲まれた領域からしか原子を検出しないために、単一パルスに対して1個以下の原子しか検出しないという条件設定はそれほど困難ではない。一方でアパーチャーを使わない3次元アトムプローブで、同一の分析条件を設定するためには原子の蒸発速度を極めて遅くしなければならない。実際の蒸発速度は 0.02 pulse/ion 程度の蒸発速度であり、これは 100 Hz のパルサーを用いた場合、2 atom/s であり、3次元の原子分布を概観するために最小必要と考えられる原子数100000個を収集するために、実に13時間(46.8 ks)以上要することになる。つまり PoSAP はシリアルタイプの3次元アトムプローブといえる。

このような欠点を克服するために、ルーアン大学のグループは PSD として、1 cm×1 cm の正方形の陽極96個を取り付けた多重陽極 PSD を提案し、これをアトムプローブに装着した断層アトムプローブ(Tomographic Atom Probe, TAP)を開発した⁽⁸⁾。つまりパラレルタイプの3次元アトムプローブである。図3に TAP の模式図を示す。3段重ねの MCP の背面に96個の正方形の陽極が並べられている。時間信号は MCP の最終段からとりだし、これらは8チャンネルのタイマーの時間信号となる。この装置で採用されている電荷敏感型の ADC は1個当たり96チャンネルを有しており、すべての陽極のチャージを測定する。この 96 ch の電荷測定をタイマーの 8 ch 分すべてについて行うというわけである。換言すれば、8 ch すべてに質量の異なるイオンが入ったとしても、このアトムプローブではすべてのイオンの位置測定が可能となる。さらに同時到着したイオンでも図4に示されるように電荷雲がオーバーラップしない位置に到達した場合は完全に位置決定が可能である。したがって、原子の蒸発速度を 0.1 ion/pulse 程度にしてもかなりの収率で原子を収集することができ、100 Hz のパルサーを使用するとすれば、データー収集に要する時間は PoSAP に比較すると10分の1程度に短縮される。つまり PoSAP で1日(86.4 ks)かけていたような測定が、わずか2~3時間(10 ks)程度で行えることになる。

このようなメリットがある反面で、1サイクル当たりの全データー数は、96 ch の 8 ch 分、つまり 768 ch におよび、データー処理が極めて複雑になるという欠点もある。前述の PoSAP では、チャージ測定がわずか 3 ch であったことを考えれば、TAP が桁はずれに複雑な装置であることが分かる。

図3 断層アトムプローブ(TAP)の模式図。(文献(8))

図4 光学式位置敏感型アトムプローブ(Optical PoSAP)の模式図。(文献(19))

また通常の APFIM や PoSAP では、市販の CAMAC モジュールを組合せることにより計測系を構成することができるために、装置の作製が比較的容易である。これに対して、TAP では FASTBUS のモジュールを使用せざるを得ないために、計測系が複雑で高価になる。

4. 光学式位置敏感型アトムプローブ

位置情報は位置敏感型検出器を使わなくても、蛍光板に映し出された輝点を CCD カメラを使用すれば記録できる。この手法を用いるとこれまで映像型アトムプローブとして用いられてきた検出器をそのまま使用できるというメリットがある。このような位置敏感型アトムプローブは光学式アトム

プローブ (Optical Atom Probe, OAP) と呼ばれており、Miller により提案された⁽¹⁸⁾。しかし OAP ではやはり単一パルスで複数個の原子がイオン化した場合に、原子の位置と飛行時間を相関づけることができず、シリアルモードでしか使用できない。

OAP でパラレルプロセスを可能とするために、Cerezo らは図4に示されるように、位置検出を CCD カメラで、飛行時間測定を多重陽極で独立に行い、個々のイオンの位置検出と飛行時間測定を可能とする、光学式位置敏感型アトムプローブ (Optical PoSAP) の開発に取り組んでいる⁽¹⁹⁾。この方式のメリットは OAP でパラレルモードが可能となるだけではなく、位置検出を CCD カメラで行うために、TAP のように 96 ch のチャージ ADC を必要としない。このメリットは大きく、コストを大幅に下げられる上に、FASTBUS モジュールを使用する必要がないので、装置の構成も著しく単純化できる。また検出器は通常のチャンネルプレートと蛍光板の組合せでできるために、市販の MCP アセンブリを購入して、外部装置として OPoSAP の光学検出器を取り付けるだけで、装置が完成される。ただし、この装置はまだ試作段階であり、現時点では十分な性能評価はされていない。

5. エネルギー補償型 3 次元アトムプローブ

位置敏感型アトムプローブは直線型の飛行時間測定でイオンの質量電荷比を測定するために、パルス印加による電界蒸発の際に生ずるイオンのエネルギー欠損の補償を行えないと

いう欠点がある．このようなイオンのエネルギー欠損はパルスエネルギーが100%イオンに伝達されないために生ずるもので，これを補償しない限り飛行時間測定を正確に行っても高い質量分解能は得られない．このため通常の飛行時間型アトムプローブでは Poschenrieder が設計した静電レンズ⁽²⁰⁾ またはリフレクトロンと呼ばれる静電反射板⁽²¹⁾を用いてエネルギー補償を行っている．図5には一例として，(a)エネルギー補償を行ったリフレクトロンアトムプローブによる

図5 (a) エネルギー補償型アトムプローブによる Cr-Fe 合金のマススペクトラムと (b) 20 cm の飛行距離をもつ PoSAP による同じ合金から得られたマススペクトラム．(文献(22))

Cr-Fe 合金のマススペクトラムと (b) 飛行距離 20 cm の PoSAP で得られえた Cr-Fe 合金のマススペクトラムを示す⁽²²⁾．リフレクトロンモードではイオンのエネルギー補償がなされているので，その質量分解能は原子のすべての同位体を分解することができるほど高い．一方 PoSAP モードでは飛行距離が短いことと，エネルギー補償がなされていないことの2つの理由から質量分解能はかなり悪く，同位体は分解されていない．

このようなエネルギー補償器は限られた開口角でしか有効に動作しないと考えられており，しかもエネルギー補償後に位置情報を十分に保存できないと考えられていたので，最近まで3次元アトムプローブにエネルギー補償器を付ける試みは成されなかった．したがって，位置敏感型アトムプローブで質量分解能が低いという欠点を補うためには，同一チャンバー内にエネルギー補償型の飛行時間型アトムプローブを併設するのが適当と考えられ，エネルギー補償型の飛行時間型アトムプローブ (ToFAP) と位置敏感型アトムプローブ (PoSAP) の2つの分析モードを任意に選べるような複合型3次元アトムプローブが作製されてきた⁽²²⁾．最近 Sijbrandij ら⁽²³⁾は，図6に示されるような大広角のリフレクトロンを用いても FIM の位置情報が保存されることを示した．さらに従来では，原子をイオン化するために試料に正のパルスを加えていたが，正しく終端された負のパルスを対向陰極に加えることにより，さらに質量分解能をたかめることができることも発表されている⁽²⁴⁾．したがって，近い将来にはエネルギー補償を行った3次元アトムプローブが作製されるようになると考えられ，現状の質量分解能の制約は解消されると期待される．また最近では MCP の全面にさらに負のバイアスを加えると従来60%程度であった MCP の検出効率が85%程度にまで高められることも報告されている⁽²⁵⁾．これらの最新の研究成果を取り組んだ，エネルギー補償型のバラ

図6 リフレクトロンによりエネルギー補償を行った3次元アトムプローブの模式図．

レルタイプの3次元アトムプローブが開発されれば、質量分解能、データー収集速度、検出効率ともに格段に優れた「スーパーアトムプローブ」と呼ぶにふさわしい装置の作製

も可能である。

3次元アトムプローブのデーターは飛行時間型アトムプローブのデーターに原子の位置情報という付加的な情報をつけ

図7 Co-12Cr-2Ta 合金薄膜の(a) デジタル FIM 像, (c) Co, Cr, Ta の元素マップ, (d) Cr の2次元濃度マップ. (文献(26))

図8 500 K でスパッター製膜された Co-12Cr-2Ta 合金薄膜中の結晶粒界をふくむ領域の3次元濃度マップ. 結晶粒界に添って Cr 濃度が高い Cr リッチ相が形成されている. (文献(26))

加えたものである。したがって、質量分解能の高い3次元アトムプローブが開発されれば、従来型の飛行時間型アトムプローブは過去の遺物に化してしまう可能性がある。実際、現在すでに3次元アトムプローブしか稼働させていないアトムプローブグループさえある。しかし、3次元アトムプローブで収集される原子の数は膨大になり、わずか20 nm程度の深さの分析を行うためにも100000個以上の原子が収集される。このデータから必要な情報だけを引き出すためには、優れたデータ解析ソフトウェアが必要であり、しかも今後1000000個オーダーの原子を扱うようになると、高速なワークステーションも必要になってくる。このような環境は近い将来満たされていくことになると考えられるが、今後5年程度は必要な領域からだけ原子を効率的に収集する従来型のアトムプローブと、情報量が豊富であるが、膨大なデータ量を占有する3次元アトムプローブが共存していくものと考えられる。

6. 3次元アトムプローブによる材料の解析例

3次元アトムプローブ(3DAP)の応用例として、まず、図7にCo-Cr-Ta合金薄膜の結晶粒界の解析例を示す⁽²⁶⁾。図7(a)にはPSDを用いて観測されたデジタルFIM像が示されている。この像から試料の中心に結晶粒界が存在していることが明瞭に観察される。図7(a)と同一の領域から検出された元素マッピングが図7(b)に示されている。この図で個々の点は原子に相当し、水色の点がCo原子、赤の点がCr原子、青の点がTa原子の位置である。この元素マッピングから局所的な領域の濃度を計算し、Crの濃度マッピングに書き換えたのが図7(c)である。Cr濃度が結晶粒界に添って高くなっていることが分かる。このような2次元的なデータを重ね合わせて、3次元的な濃度マッピングを表示したのが図8である⁽²⁶⁾。Cr濃度は粒界に添って、25 at.%程度に達しており、結晶粒はCr濃度の高い粒界相に覆われている。Cr濃度の高い部分で、当然Co濃度は低くなっている。Ta濃度はほぼ均一であり、Co-Cr-Ta薄膜ではTaは均一に固溶している反面、Crは粒界に添って濃度が高くなり、Crリッチな常磁性相を形成していることが示されている。

3DAPは深さ方向には原子レベルの分解能を有している。したがって特定の方向に規則的な原子面の積層のある規則合金を分析すると、規則構造に相当する原子濃度の変化を捉えることができる。Ni基超合金の母相はfcc相であり、この母相にL1₂構造を持ったγ'相(Ni₃Al)が析出している。L1₂構造をもつ規則相を[001]方向に原子面の分解能で分析できれば、100%のNiを含む(002)面と50%Ni, 50%Alを含む(002)面が交互に現れてくるはずである。図9はRouen大学のグループがTAPにより得たNi基超合金中のAl原子の3次元元素マッピングである⁽²⁷⁾。母相中ではAl原子は均一

図9 Ni基超合金のTAPによるAlの元素マップ。Al濃度の高いγ'相を曲面で囲んで示している。このγ'相内部では、[001]方向に一原子層ごとにAl原子の濃度の高い面が現れている。これはL1₂構造を持つNi₃Alの原子位置を反映したものである。(D. Blavetteらによる。文献⁽²⁷⁾)

に固溶しているのに、曲面で囲まれたγ相中ではAl原子は1枚ごとの(002)面で観察される。これはL1₂構造に対応した原子面の積層を表しており、析出した規則相からだけ規則的な原子の配列が検出されていることから、3DAPが原子面の分解能で原子の位置を再現することができることが示されている。ただし3DAPでは分析の深さ方向にしか原子面が分解されていないことに注意されたい。これは、原子が電界蒸発する直前に表面上でエネルギーの低い位置に緩和することによって起こる現象のためで、面内方向の分解能はこのような蒸発収差により失われてしまう。したがって3次元アトムプローブで規則合金を解析しても、1方向にしか規則配列に相当する原子配列は観察されない。ただし蒸発収差で失われる原子位置の情報は高々0.1 nm程度と考えられ、3DAPが他の局所分析手法に比較して、最も高い空間分解能を有している事実には変わりはない。

このように、3次元アトムプローブでは規則化に関する情報と局所的な原子濃度変化に関する情報を同時にとらえることができるので、規則化を伴う合金の相変態過程を観察すれば、これまでに電子顕微鏡やX線回折では得られなかったような情報が得られると期待される。規則化を伴う相分離過程では、規則変態が相分離に先立って生ずるのか、あるいはその逆であるのかという議論が長年にわたって繰り広げられているが、3次元アトムプローブを用いると、このような問

題に直接アプローチできる可能性がある⁽²⁸⁾。

7. 結 言

位置敏感型アトムプローブによる最初のデーターが Oxford グループにより発表されて以来、7 年以上が経過した。この間、3 次元アトムプローブは合金の相変態に関する問題を中心として多くの金属材料の超微細領域分析に応用されてきた。これらの応用例を本稿で紹介することは紙数の制約から不可能であるので、代表的なものに関し文献(26)-(36)を紹介するとどめる。また3次元アトムプローブは Oxford 方式の PoSAP と Rouen 方式の TAP がそれぞれのグループにより商品化されており、アトムプローブの専門家だけでなく3次元アトムプローブを用いて材料研究を行うための環境は整いつつある。今後より多くの研究者により、この究極的な材料解析手法が用いられ、これまで未解決であった材料の微細組織に関する諸問題が解決されていくことを期待している。

本稿の執筆にあたって、東北大学金属材料研究所の桜井利夫教授、岡野 竜氏、西巻純輝氏との共同研究の成果を利用させていただいた。さらに TAP のデーターを使用させていただいた Rouen 大学の D. Blavette 教授に感謝します。

文 献

- (1) R. Wangner: *Field-Ion Microscopy (Crystals-growth, properties, and applications)*, Vol. 6, Springer-Verlag, Berlin, (1982).
- (2) M. K. Miller and G. D. W. Smith: *Atom-Probe Microanalysis: Principles and Applications to Materials Problems*, MRS, Pittsburgh, (1989).
- (3) T. T. Tsong: *Atom-probe field ion microscopy-Field ion emission and surfaces and interfaces at atomic resolution*, Cambridge University Press, (1990).
- (4) M. K. Miller, A. Cerezo, G. D. W. Smith and M. G. Hetherington: *Atom Probe Field Ion Microscopy*, Oxford University Press, (1996), in press.
- (5) A. Cerezo, T. J. Godfrey and G. D. W. Smith: *Rev. Sci. Instrum.*, **59**(1988), 862.
- (6) A. Cerezo, T. J. Godfrey, C. R. M. Grovenor, M. G. Hetherington, R. M. Hoyle, J. P. Jakubovics, J. A. Liddle, G. D. W. Smith and G. M. Worrall: *J. Microscopy*, **154**(1989), 215.
- (7) A. Cerezo, M. G. Hetherington, J. M. Hyde, M. K. Miller, G. D. W. Smith and J. S. Underkoffler: *Surf. Sci.* **266**(1992), 471.
- (8) D. Blavette, B. Deconihout, A. Bostel, J. M. Sarrau, M. Bouet and A. Menand: *Rev. Sci. Instrum.*, **64**(1993), 2911.
- (9) 宝野和博, 岡野 竜, 桜井利夫: まてりあ, **34**(1995), 578.
- (10) 山本雅彦, 稔野宗次: 日本金属学会会報, **17**(1978), 900.
- (11) 宝野和博, 桜井利夫: 軽金属, **42**, (1992), 236.
- (12) 宝野和博, 桜井利夫: 日本金属学会会報, **31**(1992), 900.
- (13) 宝野和博, 桜井利夫: 日本応用磁気学会誌, **18**(1994), 15.
- (14) 植森龍治, 佐賀 誠, 森川博文: 日本金属学会会報, **30**(1991), 498.
- (15) C. Martin, P. Jelinsky, M. Lampton and R. F. Malina: *Rev. Sci. Instrum.*, **52**(1981), 1067.
- (16) 岡野 竜: 東北大学大学院理学研究科物理学専攻修士論文, (1995).
- (17) J. M. Hyde, A. Cerezo, R. P. Setna, P. J. Warren, G. D. W. Smith: *Appl. Surf. Sci.*, **76/77**(1994), 382.
- (18) M. K. Miller: *Surf. Sci.*, **266**(1992), 494.
- (19) A. Cerezo, T. J. Godfrey, J. M. Hyde, S. J. Sijbrandij and G. D. W. Smith: *Appl. Surf. Sci.*, **76/77**(1994), 374.
- (20) W. P. Poschenrieder: *Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, **9**(1972), 357.
- (21) W. Drachsel, L. von Alvensleben and A. J. Melmed: *J. Phys.*, **50**(1989), C8-541.
- (22) K. Hono, R. Okano, T. Saeda and T. Sakurai: *Appl. Surf. Sci.*, **87/88**(1995), 453.
- (23) S. J. Sijbrandij, A. Cerezo, T. J. Godfrey and G. D. W. Smith: *Appl. Surf. Sci.*, (1996), in press.
- (24) S. J. Sijbrandij, A. Cerezo and G. D. W. Smith: *Appl. Surf. Sci.*, **87/88**(1995), 414.
- (25) B. Deconihout, P. Gerard, M. Bouet and A. Bostel: *Appl. Surf. Sci.* (1996), in press.
- (26) J. Nishimaki, K. Hono, N. Hasegawa and T. Sakurai: *Appl. Phys. Lett.* in press.
- (27) B. Deconihout, A. Bostel, P. Bas, S. Chambrelaud, L. Letellier, F. Danoix and B. Blavette: *Appl. Surf. Sci.*, **76/77**(1994), 145.
- (28) C. Schmuck, F. Danoix, P. Caron, A. Hauet and D. Blavette: *Appl. Surf. Sci.*, (1996), in press.
- (29) L. Letellier, A. Bostel and D. Blavette: *Scripta Metall. Mater.*, **30**(1994), 1503.
- (30) P. Pareige, P. Auger, P. Bas and D. Blavette: *Scripta Metall. Mater.*, **33**(1995), 1033.
- (31) A. Bigot, F. Danoix, P. Auger, D. Blavette and A. Menand: *Appl. Surf. Sci.*, (1996), in press.
- (32) T. Al-Kassab, M.-P. Macht, V. Naundorf, H. Wollenberge, S. Chambrelaud, F. Danoix and D. Blavette: *Appl. Surf. Sci.*, (1996), in press.
- (33) M. K. Miller, J. M. Hyde, M. G. Hetherington, A. Cerezo, G. D. W. Smith and C. M. Elliott: *Acta metall. mater.* **43**(1995), 3385.
- (34) R. P. Setna, J. M. Hyde, A. Cerezo, G. D. W. Smith and M. F. Chisholm: *Appl. Surf. Sci.*, **67** (1993), 368 and **76/77**(1994), 203.
- (35) K. Hono, K. Yeh, Y. Maeda and T. Sakurai: *Appl. Phys. Lett.*, **66**(1995), 1686.
- (36) R. Okano, K. Hono, K. Takanashi, H. Fujimori and T. Sakurai: *J. Appl. Phys.*, **77**(1995), 5843.

略 号

APFIM : atom probe field ion microscope, アトムプローブ
電界イオン顕微鏡。
OAP : optical atom probe, 光学アトムプローブ。
FIM : field ion microscope, 電界イオン顕微鏡。
MCP : microchannel plate, マイクロチャネルプレート。
PoSAP : position sensitive atom probe, 位置敏感型アトム
プローブ。
PSD : position sensitive detector, 位置敏感型検出器。
TAP : tomographic atom probe, 断層アトムプローブ。
ToFAP : time-of-flight atom probe, 飛行時間型アトムプロ
ーブ。
3DAP : three dimensional atom probe, 三次元アトムプロー
ーブ。