

X線回折法による $\text{Si}(111) (\sqrt{3} \times \sqrt{3}) \text{R } 30^\circ - \text{Ag}$ 構造の解析

高 橋 敏 男・中 谷 信一郎

東京大学物性研究所 106 東京都港区六本木 7-22-1

(1991 年 11 月 13 日受理)

Surface Structure Analysis of $\text{Si}(111) (\sqrt{3} \times \sqrt{3}) \text{R } 30^\circ - \text{Ag}$ by X-Ray Diffraction

Toshio TAKAHASHI and Shinichiro NAKATANI

Institute for Solid State Physics, University of Tokyo
Roppongi Minatoku Tokyo 106

(Received November 13, 1991)

X線回折法により結晶表面構造を基板結晶に対して3次元的に決定する方法の例として、 $\text{Si}(111) (\sqrt{3} \times \sqrt{3}) \text{R } 30^\circ - \text{Ag}$ 構造の解析結果を紹介する。逆格子ロッドに沿ったX線回折強度(ロッド・プロファイル)を解析する方法では、すべての原子の座標および温度因子を決定可能である。さらに、X線トポグラフィによる表面構造の観察例を示す。

1. はじめに

最近、X線回折法は、表面・界面の研究に重要な役割を果たすようになっており、原子配列、ラフネス、相転移現象、結晶成長機構など多方面の研究にすでに利用されている¹⁾。ここでは、おもに、そのうちの原子配列の決定に関することについてふれる。

X線回折法による表面・界面の構造研究は、最初、図 1(a) に示すような微小角入射の実験配置を用いて行われ²⁾、この配置により表面・界面の2次元投影構造が容易に決定できるようになった。その後、3次元的な構造を決定するために(b)、(c)に示すような実験配置も採用されるようになった³⁻⁵⁾。

本稿では、 $\text{Si}(111) (\sqrt{3} \times \sqrt{3}) \text{R } 30^\circ - \text{Ag}$ 構造を例にとり、図 1(c)のような実験配置を用いて逆格子ロッドに沿って回折強度を測定することにより、表面構造を3次元的にしかも基板結晶を基準に決定できることを説明する^{6,7)}。最後に、X線トポグラフィを表面・界面構造評価に応用できる可能性を示した例⁷⁾を紹介する。

2. $\text{Si}(111) (\sqrt{3} \times \sqrt{3}) \text{R } 30^\circ - \text{Ag}$ 構造の概要

$\text{Si}(111) (\sqrt{3} \times \sqrt{3}) \text{R } 30^\circ - \text{Ag}$ (以下、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} - \text{Ag}$ と呼ぶ) 表面は、さまざまな方法により研究されているにもかかわらず、長年にわたりその構造についての論争が続いた表面である⁸⁻¹⁰⁾。

この表面構造についての大きな論点の1つは、Ag の飽和被覆率が2/3か1かという点である。それに対応して、図 2⁹⁾ (a) に示すハニカムモデルと(b)に示すトライマーモデルの2つのモデルが提唱されていた。

そんな折り、図 3 に示すような STM (Scanning Tunneling Microscope) 像が IBM の2つのグループで独立に観測された²⁰⁻²²⁾。しかし、STM では原子の種類を特定するのは困難なので、上記2つのモデルを決定するには区別できなかった。実際、1つのグループ^{20,21)}はSTMで観測された像はAg原子に対応しており図2(a)のハニカムモデルが正しいとし、他のグループ²²⁾はSTM像はSi原子を見ており、Ag原子はその下に埋もれていて図2(b)のトライマー構造をとると主張し

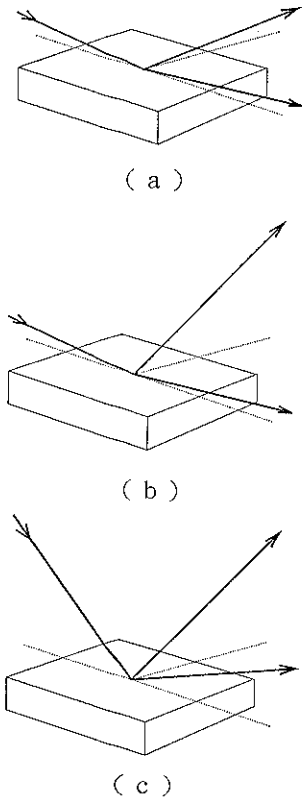


図 1 X線回折法に用いられる実験配置
(a)は、全反射の臨界角付近の微小角でX線を入射し、回折X線も表面すれすれの方で観測するため散乱ベクトルがほぼ表面内に含まれる in plane の実験配置
(b), (c)は、散乱ベクトルが表面内に含まれない out of plane の実験配置
(b)は、微小角入射の配置で、回折X線は大きな取り出し角度で観測する

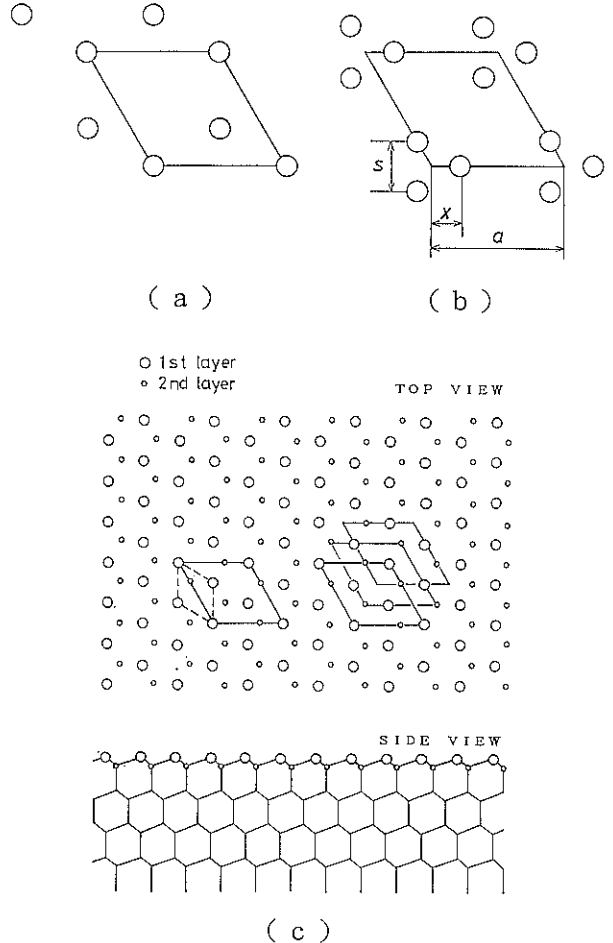


図 2 Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造の Ag の原子配列モデルと単位格子のとり方
(a)は、被覆率 3 分の 2 のハニカムモデル
(b)は、被覆率 1 のトライマーモデル
(c)は、Si(111) 表面における 1×1 構造の単位格子 (破線) と $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造の単位格子 (実線) の関係
 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造の単位格子の原点のとり方には、3 通りの自由度がある

た。

われわれは、X線回折法によりどちらの解釈も誤りであり、図 4²³⁾に示すようなトライマー構造を修正したモデルを提唱し、STM で得られた像は、1つの原子に対応しておらず3つの Ag 原子が作る三角形のクラスター (ハッチした部分) に対応しているということを主張してきた^{5,6)}。その後、われわれの構造モデルは、X線回折法²⁴⁾、X線定在波法²⁵⁾、電子回折法^{26,27)}、低速イオン散乱法²⁸⁻³⁰⁾、第1原理に基づく理論計算などでも支

持されるようになった^{31,32)}。

この構造については、すでに他誌³³⁾に報じており重複する部分も多いが、以下にその後の進展も含めて述べることにする。

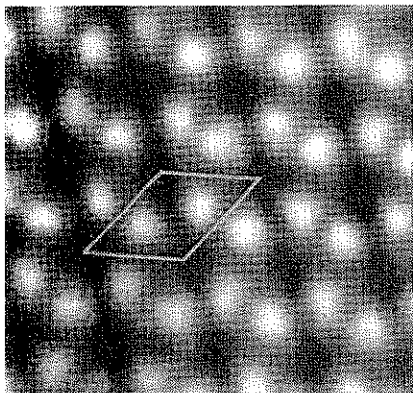


図3 Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の STM 像²²⁾

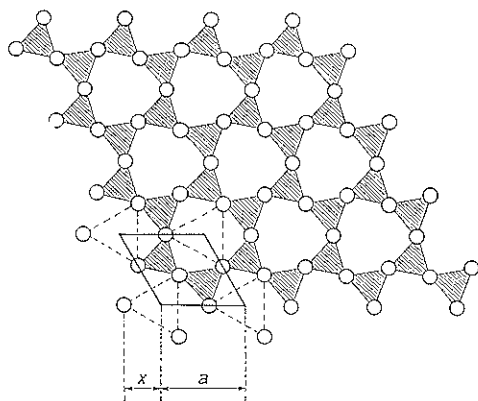


図4 Ag の原子配列

白丸が Ag 原子、破線の大きな三角形が図 2(b) のトライマーに相当する(向きが変わっている)。3つの Ag 原子でつくる小さな三角形(斜線)の中心を図3の STM 像は見ていと解釈される。

3. X線回折法による解析

われわれは、図 1(c)のような実験配置を用いて、逆格子ロッドに沿ってさまざまな指数の回折斑点強度の測定を行った。図 5³⁴⁾ は、その配置をエワルト球を用いて逆格子空間で表わしたものである。われわれは、LEED (低速電子回折) において、I-E (Intensity-Energy) 曲線を測定するのと同じように、入射X線のエネルギーを変化させ逆格子ロッドに沿った回折強度の変化、すなわち、ロッド・プロファイルを測定する方法を採用した。

実験は、高エネルギー研のシンクロトロン放射を用いて行われた。Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面構造の分数次および整数次の反射について、それぞれ 10 個程度のロッド・プロファイルを測定したが、ここでは、例とし

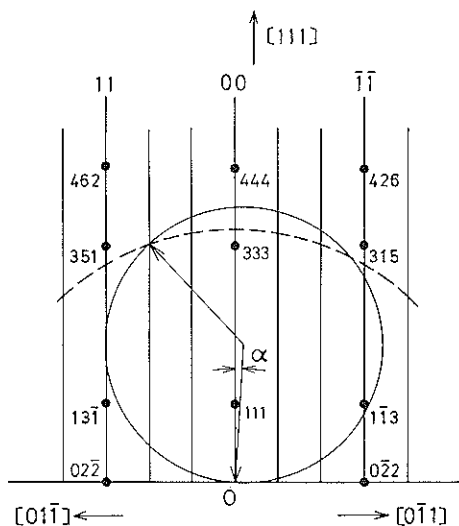


図5 逆格子空間における回折条件

波長(エワルト球の半径)を変化させ、入射角を適当に変えることにより逆格子ロッドに沿った回折強度を測定できる。

て、 $(2/3 \ 2/3)$ ロッド、および $(0 \ 0)$ ロッドについて得られた結果のみを図 6²³⁾、図 7⁶⁾ に示す。

$\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造のような超構造の場合には、回折斑点は、分数次の超格子反射と整数次の基本格子反射とに分類できる。超格子反射のロッド・プロファイルを測定すれば、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造を形成している表面の Ag 原子やバルクの位置から変位している Si 原子の位置を3次的に決定できる。

一方、整数次の基本格子反射についてロッド・プロファイルを測定すれば、そのような3次的な原子配列を基板結晶を基準に決定できる。なお、この整数次の逆格子ロッドに沿っての散乱は、最近、CTR (Crystal Truncation Rod) 散乱と呼ばれている⁴⁾。

このように、X線回折法は、原理的には、表面構造を基板結晶に関係づけて完全に決定できる。STM、低速イオン散乱、光電子回折などでは表面構造を表面原子を基準に求めるのと対照的である。

3.1 解析手順

この構造を決定するためにわれわれの行った解析法を解説する。解析は便宜上以下の手順で行われた。

(1) 原子によるX線の散乱振幅は、ほぼ原子番号に比例するので、Ag 原子からの散乱振幅が Si に比べて圧倒的に大きい。したがって、第ゼロ近似では、Si 基板結晶はX線に対して透明であり、Ag の原子層だけが存在するものとみなし、回折強度分布から Ag 原子の

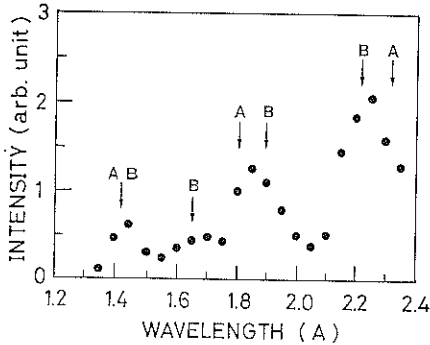


図 6 (2/3 2/3) ロッドに沿っての回折強度
A, B で示される 2 つの振動成分がある。

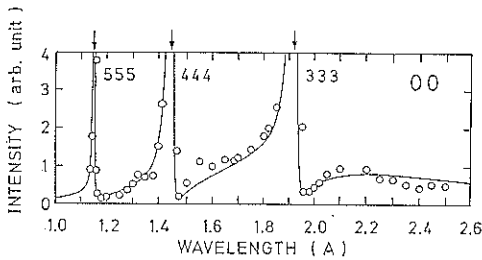


図 7 (0 0) ロッドに沿っての回折強度
矢印は、ブラッグ反射の起きる波長を表す。

配列を最初に求める。

(2) 同様な理由により、最初は Si 原子の変位を無視して、Ag 原子の吸着位置を再構成していない理想的な Si 結晶に対して 3 次元的に決定する。

(3) 表面 Si 原子の再構成、吸着 Si 原子などの可能性を検討し、構造の概要を決定する。

(4) 基板 Si 結晶の表面付近の原子変位もとりいれ、

最小自乗法によりすべての原子座標および温度因子を同時に決定する。

一般には、最初から (3), (4) の解析を可能性のあるすべての構造について行う必要があるが、非常に多くの計算を必要とするので、ここでは上記のような手順を採用した。というのは、一般に、表面構造を求める場合には、最初、ある構造モデルを仮定し、そのモデルについての計算結果を実験結果と比較し、良い一致が得られるまでさまざまなモデルについて検討するという方法が用いられるので、このようにすることにより検討すべきモデルの数を激減させることができるからである。

3.2 Ag の原子配列

まず最初に、Ag の原子配列だけを求める。図 8^{6,35)} (a), (b) は、それぞれ Ag の 1 原子層が図 2(a), (b) のような配列をしている場合に得られる回折パターンの強度分布の計算結果である。

ハニカムモデルでは、2 種類の強度しか存在せず、分数次、整数次の反射強度はそれぞれすべて等しい。これに対し、トライマーモデルでは、Ag の三角形の大きさにより強度分布は変わるが、いずれにしてもさまざまな強度が存在する。ここでは図 4 に対応して三角形の大きさを表すパラメーター x/a が $4/9$ の場合について示してある。ここで、 a は単位格子の大きさを 6.65 Å である。

このように、ハニカムモデルとトライマーモデルではまったく異なる強度分布を示す。この差は、通常の結晶構造解析において、たとえば、bcc と fcc では、単位格子内の原子数、原子配列が異なるため、まったく異なる強度分布をもつと同じである。

図 8(c) は、X 線回折法により測定された回折強度分

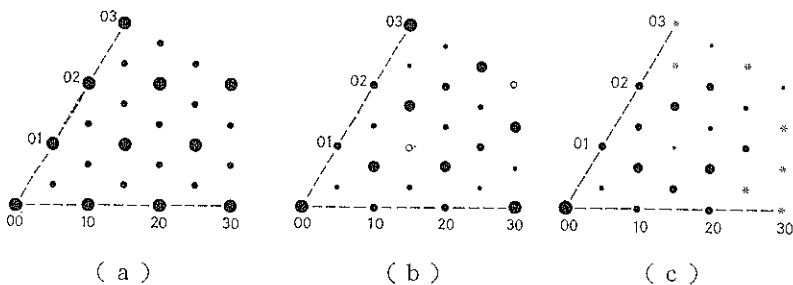


図 8 Ag 1 原子層からの X 線回折強度分布。面積が強度に比例する。(a) は、図 2(a) のハニカムモデル、(b) は図 2(b) のトライマーモデルに対する計算値。(b) では、図 4 に対応して、 $x/a=4/9$ に対して計算された。白丸は、強度がゼロになる反射。(c) は、実験結果。分数次の反射の場合はロッドに沿っての回折強度の平均値、整数次の反射の場合には、逆格子点付近を除外した回折強度の平均値を採用した。*印は、測定されなかった反射。

布である。さまざまな強度が存在することからハニカムモデルは完全に否定できる。トライマーモデルにおいて、三角形の大きさを変えて最小自乗法により最もよく一致する x/a の値を求めると 0.44 ± 0.01 であった。図 8(b) に示した計算結果 ($x/a = 4/9 \approx 0.444$) と回折強度の大小関係がかなりよく一致していることがわかる。

3.3 Ag 原子の理想 Si 結晶に対する吸着位置

Ag 自身の原子配列は求められたので、つぎに整数次のロッド・プロファイルの解析から理想的な Si 結晶に対する Ag の吸着位置を決定する。 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造の場合には、Si 基板の 1×1 構造の座標原点に対して $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造の単位格子の原点とり方は、図 2(c) のように 3 通り考えられる。トライマーを 180 度回転したものは、元の構造とは異なるので、合計 6 通りの吸着位置について検討する必要がある。それぞれの吸着モデルについて、理想的な Si 表面第 1 層からの高さ z をパラメータとして、最小自乗法による解析を行った。その結果、図 9^(a)、(b) の 2 つだけが可能性があり、他の 4 つの吸着位置については、まったく可能性がないことがわかった。それぞれ Ag 原子の Si 第 1 層からの高さ z は、約 2.9 ± 0.1 Å であった。

図 10^(a) は、Ag の吸着の高さを 0.2 Å きざみで変えて (0 0) ロッドについての回折強度を計算した結果である。Si 基板結晶全体で回折された波と Ag の原子層で回折された波との干渉効果^{5,9)} により、一般に、逆格子点の前後でロッド・プロファイルは非対称になり、その非対称性から吸着原子位置を高精度に決定できる。

計算から、吸着の高さの誤差は 0.1 Å 以下であることは容易に判断できよう。比較のために、Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi 構造の場合に得られた実験結果を図 10(b) に示す。この場合の吸着の高さ z は、約 2.7 Å であった。

図 9(a)、(b) の 2 つの吸着位置を比較すれば、(a) のほうが一致の程度は良いが (b) の吸着位置を完全に否定するのは困難なので、最近、透過型の実験配置による測定を行った。0 $\bar{1}$ ロッドについて得られた結果を図 11^(a) に示す。黒丸が測定結果で、破線、点線はそれぞれ図 9(a)、(b) の吸着位置について計算された結果である。逆格子点 $1\bar{1}1$ 前後の非対称性から図 9(a) の吸着位置のみが許され、図 9(b) の吸着位置は完全に否定できることがわかる。

3.4 再構成 Si 原子の決定

表面構造の解析を困難にしている 1 つの理由は、表面構造は、表面に垂直方向には周期性がない点である。具体的には、図 9(a) のようなモデルにおいて、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造の対称性をもつ位置ならば、原理的には、Si 原子を何個つけ加えていってもかまわない。たとえば、図 2(a)、(b) に示したような Si 原子層は、そのような条件を満たすので何層でも追加可能である。

このような観点から、Si 原子を 6 個まで追加してできる可能性のあるすべてのモデルについて最小自乗法により検討を加えた。その結果、図 2(b) のようなトライマー状の原子配置をとる Si 原子層 (黒丸) を図 12 に示す位置に追加した構造が最も実験結果とよく一致することがわかった。そうすることにより、図 11 の実線で示

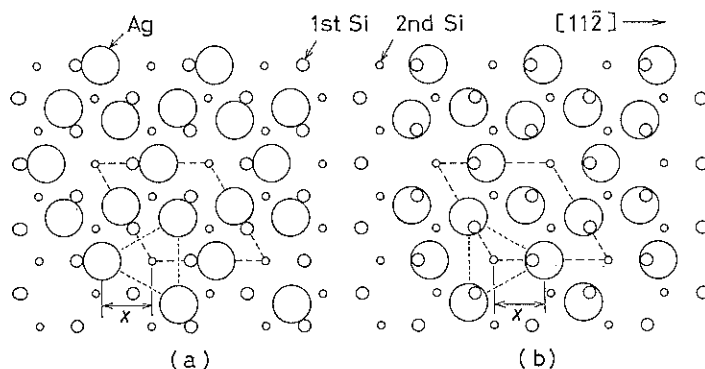


図 9 Ag 原子の再構成していない Si(111) 面に対する吸着位置。Ag は第 1 層 Si 原子の上、約 2.9 Å の高さにある。(a) のほうが (b) より好ましいが、反射型の実験配置では (b) の吸着位置は否定できない。透過型の配置を用いた実験結果 (図 11) から (b) の吸着位置は否定でき、(a) の吸着位置だけが許されることが結論づけられる。

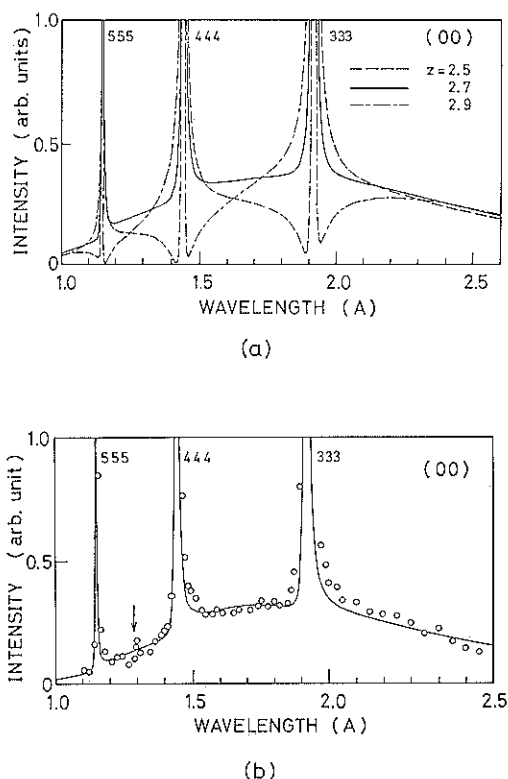


図 10 (a)は、(0 0)ロッド・プロファイルの計算結果。吸着の高さを 2.5, 2.7, 2.9 Å と変化させた。Ag の場合には、約 2.9 Å であることが明瞭にわかる。(b)に、比較のために Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi 構造の場合の実験結果を示す。

したように、計算結果と実験結果の一致の程度は格段によくなる。

この構造は、結局、Si 2重層のうちの1層が消失して1層だけが残った missing top layer model と呼ばれるものになる。図 12²³⁾ に示すように、残った Si 原子（黒丸）は、3つの結合電子をもつので、そのうちの2つの電子で Si のトライマーを形成し、残った1つの電子で Ag と結合していると考えると辻つまが合う。

3.5 すべての原子座標および温度因子の決定

以上の解析では、トライマー状の Si 原子を除き、基板 Si 原子はバルクと同じ位置を占めると仮定した。実際には、表面付近の Si 原子は変位していることが予想される。

このことは、定性的に図6の分数次のロッド・プロファイルが振動していることからいえる。X線回折法では、1回散乱のみを考えればよいので、回折強度の振動的な振舞いは、回折に寄与しているいくつかの原子面で回折された波の干渉効果として説明可能である。

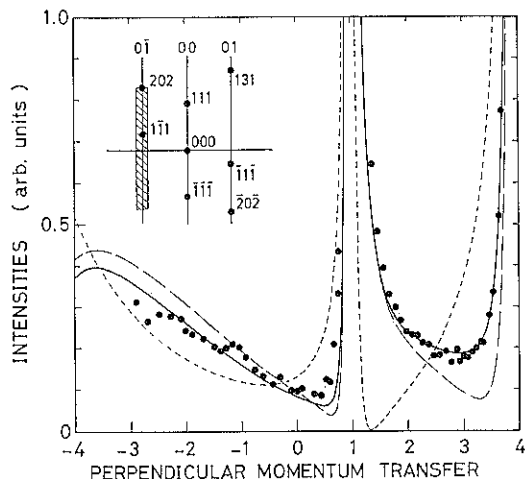


図 11 透過型実験配置により測定された回折強度 (黒丸)。挿入図は、測定範囲を表わす。中央のピークが 111 ブラッグ反射に相当する。破線および点線は、それぞれ図 9 の (a), (b) のモデルに対する計算結果。実線は、図 12 に示すモデルに対する計算結果。

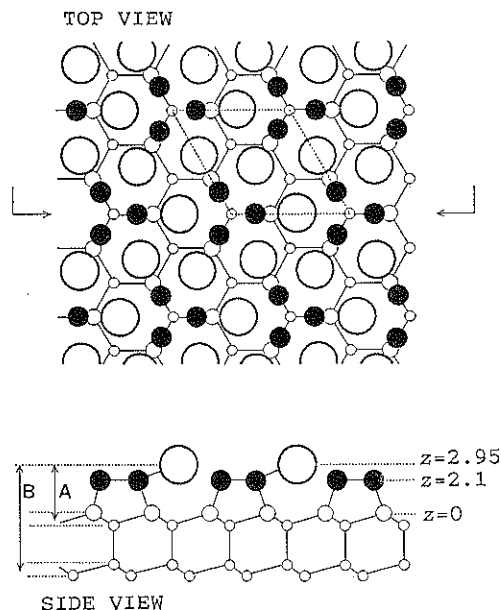


図 12 Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造の最終結果。
トライマー Si (黒丸) は、面内でバルクの位置から約 0.9 Å 変位している。その下の 2 つの Si 2 重層 (白丸) もかなり変位している。

今の場合、Ag の原子層からの散乱振幅がきわめて大きいので、その Ag の原子層と変位した Si の原子層で散乱された波の間の干渉効果が顕著に現れる。図 6 に見られるように、振動は少なくとも 2 つの周期をもつ。

振動の周期は、干渉する原子面間の距離に逆比例するので、図6に示した矢印A, Bは、それぞれ、図12に示したように、Ag原子層と変位したSi原子層との干渉効果に対応している。なお、Siトライマー層(黒丸)は、Ag原子層との距離が近すぎるために、いま観測している領域では、振動の周期が長すぎて振動的な振舞いは観測されない。

2つのSi2重層も含めて図12に示したすべての原子の位置、温度因子を最小自乗法により求めることを試みた。以前に、変位させるSi原子の温度因子をすべて等しくしとっていたときには、Si2重層内のいくつかの原子は、非現実的な構造の位置に収束していた。最近、すべてのSi原子の温度因子を独立に変えられるように最小自乗法を改良した結果、すべての原子間距離が現実的な値をとるような位置に収束するようになった³⁷⁾。

そこで問題になるのは、図3に示したSTM像の解釈である。この像は、図12においてAgの作る小さな三角形クラスターの中心(最も小さい白丸)の真上にSi原子をハニカム状におけば、Si原子そのものをとらえていると解釈可能である。ところがそのようなモデルを最小自乗法により解析すると、ハニカム状のSi原子は、表面から数百Å離れた位置で収束する。このことは、そのようなSi原子は存在しないほうがよいことを示している。

最近、第1原理に基づく論理計算によりSTM像の理論的解釈も試みられ^{31,32)}、図3のSTM像はある電子状態をみており原子の位置を必ずしも反映していないことが示された。このように長年続いた論争もほとんどの表面解析法で同じ結論が得られるようになってきた。

4. 表面X線トポグラフィ

図10(a)からわかるように、もしAg原子の吸着位置が異なればX線の反射率も異なるので、構造に乱れがあればそれは反射率の差としてコントラストがつくことになる。

従来のX線回折トポグラフィは逆格子点付近で観測を行っているため主にバルクの情報を含んでいる。図10(a)は、積極的に逆格子点からずらしてオフブラッグ条件でトポグラフを撮影すれば、表面の情報を抽出できることを示している。

現状では、いくつかの制約から、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造が形成されているところと形成されていないところを反射率から区別できる程度の分解能であるが、以上のような観点からSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造のトポグラフを撮影した(図13⁷⁾)。

写真は、図に示したような配置で440逆格子点から角

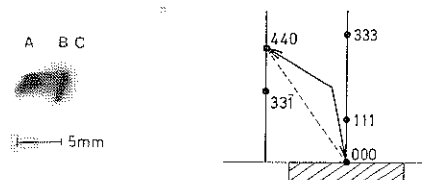


図13 X線トポグラフ。440逆格子点からわずかにオフブラッグ条件で撮影された。Aのスポットが $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造に対応する。そのスポットの下部分が欠けているのは、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造が形成されていない部分に対応する。

度にして 0.5° 程度オフブラッグ条件で撮影された。Aが表面からの情報をもつスポットであり、Bはバルクを反映したスポットで、入射ビームの縦方向の大きさの目安を与える。

Aのスポットは、Bのスポットに比べて下の部分が欠けていることがわかる。Aの強く反射しているところは、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造が形成されているところに対応し、下の欠けているところは、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag構造が形成されていないところに対応している。この結果は、LEEDによる観測とも一致していた。

5. おわりに

X線回折法の特徴の1つは、散乱過程を1回散乱で扱える点である。このため、得られたデータの解析はきわめて容易である。また、本稿で示したように、原理的には、すべての原子座標および温度因子を精度よく決定可能である。しかし、複雑な構造の場合には、検討すべき構造が膨大な数にのぼるので、他の相補的な情報を与える表面構造評価法と組合せれば、より迅速に結論を得ることができるであろう。

なお、本稿ではふれなかったが、図2(a)に示したin planeの実験配置では、パターンソートなどによりモデルに依存しないで2次元投影構造を求めることが可能であり、この方法も併用すべきであることは論を待たない。

本稿で紹介した表面X線回折トポグラフィは、反射強度が許せば、さらにオフブラッグ条件を用いたり、分数次の反射についてトポグラフの撮影することにより表面の効果をさらにきわめさせることも可能である。

文 献

- 1) 総合報告として、R. Feidenhans'l: Surf. Sci. Rep. 10, 105 (1989).
- 2) P. Eisenberger and W.C. Marra: Phys. Rev. Lett. 46, 1081 (1981).

- 3) S.R. Andrews and R.A. Cowley: J. Phys. C **18**, 6427 (1985).
- 4) I.K. Robinson: Phys. Rev. **B33**, 3038 (1986).
- 5) T. Takahashi, S. Nakatani, T. Ishikawa and S. Kikuta: Surf. Sci. **191**, L 825 (1987).
- 6) T. Takahashi, S. Nakatani, N. Okamoto, T. Ishikawa and S. Kikuta: Jpn. J. Appl. Phys. **27**, L 753 (1988).
- 7) T. Takahashi, S. Nakatani, N. Okamoto, T. Ishikawa and S. Kikuta: Surf. Sci. **242**, 54 (1991).
- 8) K. Spiegel: Surf. Sci. **7**, 125 (1967).
- 9) Y. Gotoh and S. Ino: Jpn. J. Appl. Phys. **17**, 2097 (1978).
- 10) F. Wehking, H. Beckermann and R. Niedermayer: Surf. Sci. **71**, 364 (1978).
- 11) M. Saitoh, F. Shoji, K. Oura and T. Hanawa: Jpn. J. Appl. Phys. **19**, L 421 (1980).
- 12) Y. Gotoh, A. Chauvet, M. Manneville and R. Kern: Jpn. J. Appl. Phys. **20**, L 853 (1981).
- 13) Y. Terada, T. Yoshizuka, K. Oura and T. Hanawa: Surf. Sci. **114**, 65 (1982).
- 14) J. Stohr, R. Jaeger, G. Rossi, T. Kendelewics and I. Lindau: Surf. Sci. **134**, 813 (1983).
- 15) Y. Horio and A. Ichimiya: Surf. Sci. **133**, 393 (1983).
- 16) Y. Horio and A. Ichimiya: Surf. Sci. **164**, 589 (1985).
- 17) S. Kono, K. Higashiyama and T. Sagawa: Surf. Sci. **165**, 21 (1986).
- 18) M. Aono, R. Souda, C. Oshima and Y. Ishizawa: Surf. Sci. **168**, 713 (1986).
- 19) S. Hasegawa, H. Daimon and S. Ino: Surf. Sci. **138**, 138 (1987).
- 20) R.J. Wilson and S. Chiang: Phys. Rev. Lett. **58**, 369 (1987).
- 21) R.J. Wilson and S. Chiang: Phys. Rev. Lett. **59**, 2329 (1987).
- 22) E.J. van Loenen, J.E. Demuth, R.M. Tromp and R.J. Hamers: Phys. Rev. Lett. **58**, 373 (1987).
- 23) T. Takahashi: Proc. 2nd Inter. Conf. Surface and X-Ray Scattering held at Bad Honnef in Germany on June (1991).
- 24) E. Vlieg, A.W. Denier van der Gon, J.F. van der Veen, J.E. MacDonald and C. Norris: Surf. Sci. **209**, 100 (1989).
- 25) E. Vlieg, E. Fontes and J.R. Patel: Phys. Rev. Lett. **43**, 7185 (1991).
- 26) A. Ichimiya, S. Kohmoto, T. Fujii and Y. Horio: Appl. Surf. Sci. **41/42**, 82 (1989).
- 27) T. Yoshida, S. Takahashi, Y. Tanishiro and K. Takayanagi: in preparation
- 28) K. Sumitomo, K. Tanaka, Y. Izawa, I. Katayama, F. Shoji, K. Oura and T. Hanawa: Appl. Surf. Sci. **41/42**, 112 (1989).
- 29) M. Katayama, T. Chasse, M. Kato and M. Aono: Abstr. 2nd Inter. Conf. Formation of Semiconductor Interfaces (1988) 105.
- 30) M. Katayama, R.S. Williams, M. Kato, E. Nomura and M. Aono: Phys. Rev. Lett. **66**, 2762 (1991).
- 31) Y.G. Ding, C.T. Chan and K.M. Ho: Phys. Rev. Lett. **67**, 1454 (1991).
- 32) 渡邊聰, 塚田捷, 青野正和: 日本物理学会第 46 回年会講演予稿集, 第 2 分冊 (1991) 457.
- 33) 高橋敏男, 中谷信一郎, 岡本直子, 石川哲也, 菊田惺志: 放射光, **2**(3), 55 (1989).
- 34) T. Takahashi, K. Izumi, T. Ishikawa and S. Kikuta: Surf. Sci. **183**, L 302 (1987).
- 35) T. Takahashi, S. Nakatani, N. Okamoto, T. Ishikawa and S. Kikuta: Rev. Sci. Instrum. **60**, 2365 (1989).
- 36) 高橋敏男: サイエンス **18**(10), 54 (1988).
- 37) T. Takahashi and S. Nakatani: in preparation.