

微小角入射 X 線回折で界面の構造をみる

表 和 彦

分析化学の基礎となる物質の分離過程では、均一相とは異なり、界面を横切った選択的物質移動や界面（表面）における吸着など、界面領域の化学的特異性が効果的に働いています。そこで、本年の入門講座では、物質の表面、界面、界面を含む境界相領域の構造や性質、そこで生じている反応を研究する種々方法について、最近の進歩を含めて、方法別に、専門の研究者の方々に解説をお願いしました。

「ぶんせき」編集委員会

1 はじめに

『界面』といったとき何がイメージされるだろう？まず頭に浮かぶ固体表面は固体と気体や真空との界面といえる。同じ固体表面でも、液体中では固液界面として電気化学的な反応にとって重要である。また両親媒性分子が、気液界面としての液体表面に、単分子膜を形成したときにできる構造や界面における相互作用は非常に興味深い。さらに近年の電子材料では、多くの機能性積層膜が使われている。これらは、固体内部に界面を持つ例である。このように我々が分析対象とすべき多くの界面が存在する。X線は、高い物質透過力を持っており、内部に埋もれた界面も含め、これらのほとんどが測定の対象になり得る。また、非破壊測定法であり、その場観察にも有効である。本稿では、微小角入射法の基本的な原理と測定法に関して説明したのち、いくつかの測定例を紹介しながら、X線の回折や散乱によって何がみえるかについて解説する。

2 測定原理と方法

波長 λ の X 線に対する屈折率 n は、物質中の電子密度を ρ_e (cm^{-3})、古典電子半径 $r_e = 2.818 \times 10^{-13}$ cm、

X 線の線吸収係数を μ (cm^{-1}) として、以下の式で書ける。

$$n = 1 - \delta + i\beta, \quad \delta = \frac{r_e}{2\pi} \lambda^2 \rho_e, \quad \beta = \frac{\lambda}{4\pi} \mu \dots (1)$$

ここで、 β は屈折率の虚数部で X 線の物質による吸収を表している。式(1)に具体的に数値を入れて計算してみると、たとえばシリコンに対して、CuK α 線 ($\lambda = 1.54 \times 10^{-8}$ cm) では、 $\delta = 7.57 \times 10^{-6}$ 、 $\beta = 1.75 \times 10^{-7}$ となる。X 線においては、屈折率が 1 に非常に近いことがわかる。このとき、全反射臨界角度は $\theta_c = \sqrt{2\delta}$ で計算され、今の場合 0.223° という小さな値となる。これより低い視射角で入射した X 線は、内部へ伝播せず、表面で全反射される。『微小角入射』というキーワードは、このように、X 線を全反射臨界角に相当するおよそ 0.5° 以下の視射角で表面に入射することを意味している。そのとき、表面や界面において相互作用が増大し、X 線の反射・屈折が顕著に現れ、界面に対して敏感な測定が可能になる。これらの点に関しては、本誌解説¹⁾でも述べられているので、ぜひそちらも参照されたい。

さて、X 線回折でみえるのは、原子の配置、つまり Å オーダーの原子構造である。波長 λ の X 線は、周期 d を持つ結晶格子によって、ブラッグの式

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_B} \dots (2)$$

で与えられる角度 θ_B に鋭いピークをもって回折される。このピーク角度や強度、方向を調べることによって、基本単位である結晶格子の構造を知ることができる。

微小角入射 X 線回折（以下 GIXD と略す）法は、X 線を全反射臨界角近傍で入射することを特徴としている。そのため、通常の X 線回折の場合と測定方法がやや異なったものとなる。その特徴について図 1 を使っ

Analytical Methods for Surfaces, Interfaces and Boundary Regions—
Observation of Interface Structure by Grazing Incidence X-Ray
Diffraction.

て説明する。先に述べたように、X線を臨界角に近い非常に小さな視射角 α_i で入射するため、まず入射角度を制御するための平行性の高いX線が必要になる。表面に照射されたX線は α_i に応じて、反射する成分と屈折して内部へ伝播する成分とに分かれる。ただし、 α_i が全反射臨界角 θ_c 以下の場合、屈折X線は表面数nmに局限され内部へ伝播できない¹⁾。これをエバネッセント波と呼んでいる。GIXDでは、このように θ_c 近傍の視射角でX線を入射し、検出器を図1で示す面内方向にスキャンすることにより測定を行う。この方法により、nmオーダーの極表面における原子レベルの構造が観測される。さらにこのとき回折に寄与するのは、図1に示した表面に垂直な格子面である。従来のX線回折が、主に表面に平行な格子面からの回折を測定していることと対照的である。

ところで、図1において視射角 α_i で入射したX線が表面近傍で回折を起こしたとしても、回折X線は物質内に入って行ってしまい、表面から外に出てこないのでは思われるかもしれない。この点を理解するキーワードは、『屈折』と『薄い格子面からの回折』である。図2

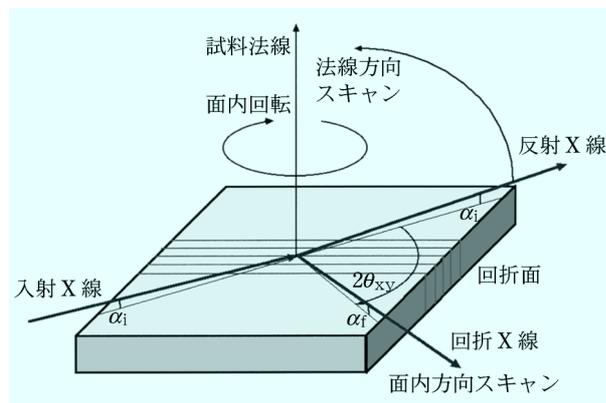


図1 微小角入射X線回折の幾何学的配置

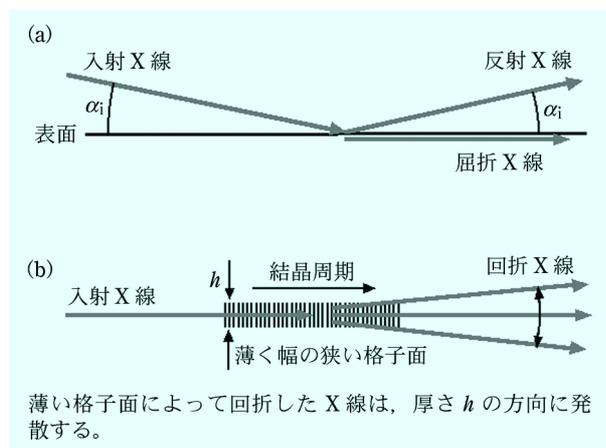


図2 微小角入射におけるX線の反射・屈折(a)および回折(b)

(a)に示すように、臨界角以下で入射したX線は物質内では屈折によって表面と平行に進行する。逆にいうと、表面に平行な回折X線は、表面での屈折によって臨界角に相当する角度を持って出射される。さらに重要な点は、『薄い』ということである。図2(b)に示す厚さ h の薄く幅の狭い格子面によって回折されたX線は、その厚さ方向に、半価幅にして $\Delta k/k \sim \pm 3/(h \times k)$ 程度の発散角を持って出射される。ただし、 $k = 2\pi/\lambda$ はX線の波数である。これは、波長程度の幅の狭いスリットを通過した波が、そこから発散して広がっていくと同様な現象である。たとえば、波長 1.54 \AA のX線が厚さ 5 nm の膜で回折された場合 $\pm 0.8^\circ$ 程度、 2 nm であれば $\pm 2.1^\circ$ の発散角を持つことになる。したがって、通常GIXDによる回折X線の出射角 α_f の分布を測定すると、図3に示すように、臨界角 θ_c をピークに、膜厚に応じた広い分布をもつ²⁾。この広がりをBragg rod³⁾と呼んでいる。この点は、薄い膜でなくとも、入射角が小さくX線が極表面しか浸入しない場合も同様で、回折線は出射角方向に広がりを持って出てくる。以上が、表面に垂直な格子面の回折が、有限な出射角度 α_f において観測可能な理由である。さらに同様の理由で、格子面が厳密に表面に直交せず、小さな傾きを持っている場合にも、回折X線を観測することができる。なお、定量的な回折強度計算に関しては、文献¹⁾⁴⁾を参照されたい。

ところで、散乱ベクトル Q の面内成分 Q_{xy} と法線成分 Q_z は、 θ_{xy} を散乱角の面内投影成分として、それぞれ

$$Q_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \alpha_i + \sin \alpha_f)$$

$$Q_{xy} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\cos^2 \alpha_i + \cos^2 \alpha_f - 2 \cos \alpha_i \cos \alpha_f \cos 2\theta_{xy}}$$

$$\cong \frac{4\pi \sin(2\theta_{xy}/2)}{\lambda} \dots \dots \dots (3)$$

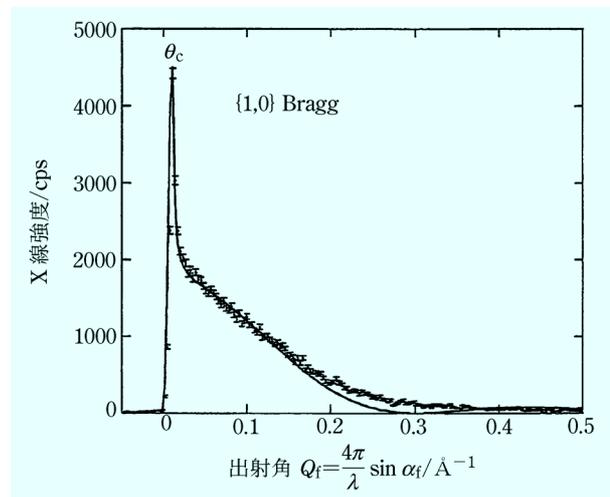


図3 回折X線強度の出射角度依存性²⁾

と書け、最後の等号は α_i および α_f がともに小さな角度の場合に成立する。ただし、ここで示した Q_z は測定系からみたもので、薄膜内でみたときには屈折によって、

$$q_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha_i} + \sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha_f}) \quad \dots (4)$$

となる。 $n=1$ のとき、 Q_z と q_z が一致することは容易に確かめられる。また、 α_i および α_f が臨界角度以下のときは $q_z \cong 0$ であることもわかる。これは、先に述べた『屈折』によって、薄膜内では表面に平行な散乱ベクトルを持つ $q_z=0$ の回折が、測定系からみると $Q_z > 0$ において観測されることを表している。このように、 α_i および α_f が臨界角に近い場合、物質の内部では実質的に面内の散乱ベクトル Q_{xy} (これは屈折によっても不変である) のみが寄与していると考えてよい。したがって、このような配置を特にインプレノ回折¹⁾と呼んでいる。

X線全反射現象を利用した測定法には、他に図2(a)で示した反射X線に注目し、その視射角依存性を測定するX線反射率法がある。この方法では、積層 (q_z) 方向の構造をみることができる。また評価できる膜厚も、1 nm 以下から 1 μm 程度までの広い範囲に及ぶ。また、GIXD と類似の装置で測定可能なため、この両者を併用して界面構造を評価することも多い。

3 測定装置

GIXD で測定したい対象は、多くの場合、界面数 nm の範囲である。しかし、X線は物質との相互作用が弱く、通常の実験室装置では十分な回折強度を得ることができないことが多い。したがって、GIXD による研究は、平行性が高く、しかも強度の強い放射光 X 線源の利用によって 1980 年代以降、急速に発達普及してきた⁵⁾。GIXD 測定は、図1で示したような配置で行われる。したがって、X線の視射角度を変えるための試料回転軸と、それに直交する試料法線を中心にした検出器や試料を回転させる軸を持つことが必要である。

検出器側では、回折角度 2θ に対する分解能を持たせるうえで、有効幅の広い平行スリットがよく使われる。これは、X線が微小な角度で入射し、試料上での照射領域 (foot print) が広がってしまうため、そこからの回折 X 線を効率良く測定する目的である。また、X線の取り出し角度方向に分解能を持つ位置敏感型検出器を用いることにより、先に述べた Bragg rod 上の回折強度を一度に測定する構成の装置もよく使われる。図4には、平行スリットの代わりにアナライザー結晶を配置して、 2θ に対する分解能を向上させた構成例を示す⁶⁾。最近では、日本でも放射光施設において、GIXD 測定ができる表面回折ビームラインが稼働しており、一般ユーザーでも利用が可能になってきた。

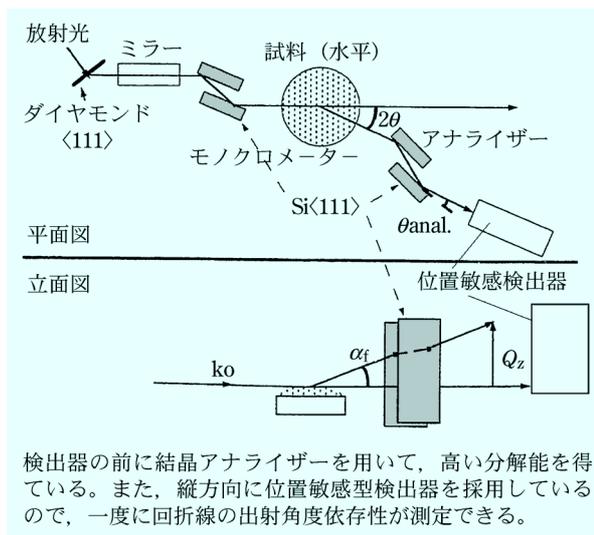


図4 微小角入射 X 線回折における光学系の例⁶⁾

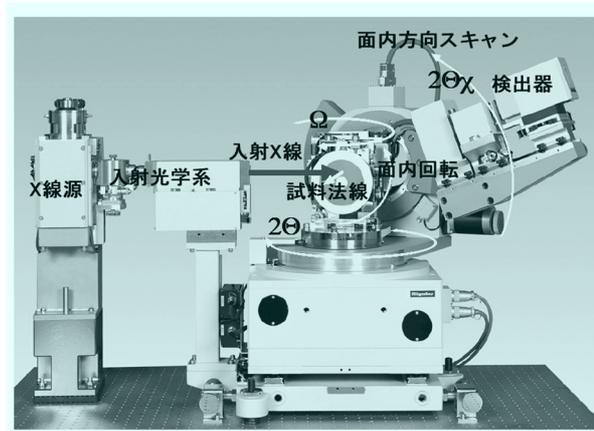


図5 微小角入射 X 線回折が可能な実験室の測定装置

また、実験室光源を用いた装置でも、最近の X 線光学素子⁷⁾の進歩により、実用的な強度で GIXD を測定できるようになってきた。そのような装置⁸⁾の例を図5に示す。多層膜ミラーと平行スリットを組み合わせた入射光学系によって、入射方向、面内回折方向に平行化された X 線を試料に微小な視射角度で照射する。そのとき、視射角度 α_i は、試料ステージが載っている Ω 軸によって調整する。取り出し角度に関しては、検出器が出射角度方向に横移動して調整する。また、GIXD 測定のための面内方向スキャンは $2\theta_x$ 軸を使って行う。回折角度に対する分解能は、検出器の前に配置した平行スリットによって得る構成になっている。

次節以降では、様々の界面構造を評価した実例を挙げることににより、「GIXD で何がみえるのか」について説明していく。

4 薄膜成長中の結晶表面

結晶表面には、表面エネルギーにより、内部の結晶構

造と異なった原子の配置が現れることがある。GIXDによりこのような表面を測定すると、基板結晶とは異なる非整数次の指数を持つ回折ピークが現れる。このような表面原子からの回折を利用して、結晶成長中における原子レベルの成長界面構造を理解することは、理論的にも、また結晶性のよい薄膜を成長させるためにも非常に重要である。特にMOCVD成長炉中では内部にガスが存在し、MBE等で用いられている電子線による測定が困難である。そのため、原子レベルの構造解析には、ガス雰囲気中でも測定が可能なX線による方法が唯一と

いってよい。川村らはGIXDにより、Pリッチな雰囲気におけるInP(001)表面においてP原子が(2×1)構造を形成し、それに伴うIn原子の変位が生じることを、多数の非整数次の回折強度を詳しく測定することにより明らかにしている⁹⁾。そのうちの一つである(5/2 5/2 0)回折の結晶成長中におけるプロファイル変化を図6に示す¹⁰⁾。測定はSPring-8 BL24XUにおいて、波長1.24 Åを用いて行われた。視射角 α_i は0.42°、受光側には0.2°の平行スリットを用いている。

図6(a)はPリッチな状態 (tertiarybutylphosphine = TBPのみ) で、成長は止まっているときのものである。このとき、P原子の(2×1)構造に起因する(5/2 5/2 0)回折は、シャープで最大の強度を持っている。そこにInを含んだガス(trimethylindium = TMI)を流すと成長が始まり、それに伴って回折ピークがブロードになる。この原因は、ステップ成長におけるス

テップ間の距離が成長に伴って減少し、P原子(2×1)構造のドメインサイズが減少したことによると考えられる。図6(b), (c)および(d)におけるそれぞれの大きさは、225 nm, 115 nm および 144 nm である。最後にドメインサイズが増加しているのは、P原子の供給を増やしたことによるものである。ただし、ドメインサイズLの計算には、回折ピークの半価幅を $\Delta\omega$ 、X線の波長を λ 、Bragg角を θ_B としたとき、Sherrerの式¹¹⁾、

$$L = 0.94\lambda / (\Delta\omega \cos \theta_B) \dots\dots\dots (5)$$

を用いている。

さらにInの供給を停止し結晶成長を止めると、図6(e)のように再び元のピーク形状に戻ることが確認された。ただし、Inの供給を止めてから、ピーク形状が元に戻る時定数は76 sであった。これは、In原子が基板に取り込まれるまでに長い時間を要することを示している。

このほかにも、GaAs¹²⁾やGaN¹³⁾など多くの結晶成長のその場観察が行われており、GIXDにより結晶成長界面における原子レベルのダイナミックな変化をとらえることが可能となった。

5 固体薄膜中の界面

例えば、最近の高密度ハードディスクの読み出しヘッドに使われている巨大磁気抵抗効果を利用したスピナル膜では、数nmの薄膜を10層程度積層する。そのような薄膜の各膜厚や界面層の様子、それに各層の結晶性がデバイスの特性に直接作用する。これらの膜の評価にもX線反射率¹⁴⁾やGIXD¹⁵⁾は、今や欠かすことができないものとなっている。特に、X線の視射角 α_i を制御することによりX線の浸入深さを変えることができるため¹⁾、固体内部にある薄膜界面における結晶構造を非破壊で測定することができる。

図7にAl/Cuの積層膜に対し、 α_i を変化させて測定した結果を示す。測定は、図5で示した実験室X線源(CuK α 線 $\lambda = 1.54$ Å)を用いて行った。Alに対する全反射臨界角は0.236°である。したがって、0.2°入射の場合の浸入深さは10 nm以下である。このときには、最表層のAlのみしか回折を起こすことができない。実際、図7にみられるように、Alの回折ピークのみが観測されている。一方、 α_i を0.5°まで大きくすると、浸入深さは数百nmとなり、下層のCuによる回折ピークも現れてくる。図7で興味深いのは、Cuとは異なった別のピークが観測された点である。これは、AlとCuの混合相と同定され、成膜過程で界面において反応が起こったため形成されたものと考えられる。

このように、GIXDの視射角制御による深さ方向の解析によって、多層膜界面の構造も非破壊で測定することができる。

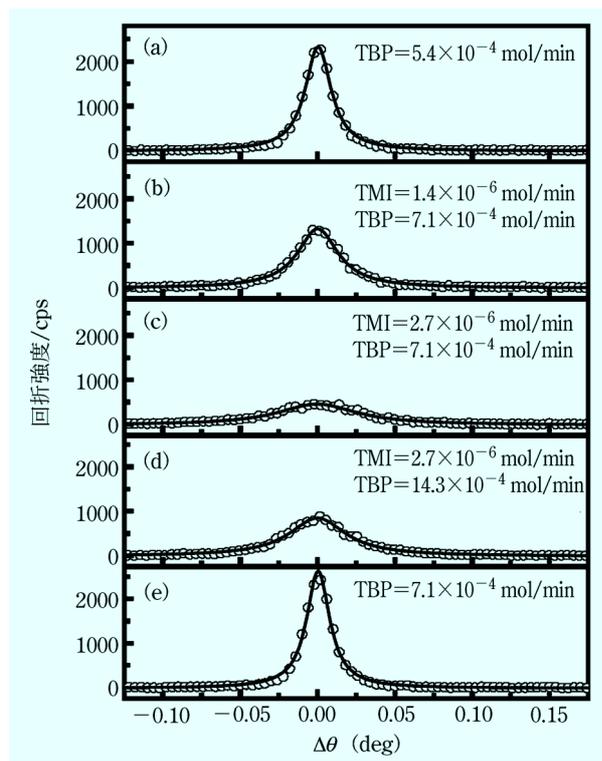


図6 結晶成長中での表面回折パターンの変化¹⁰⁾

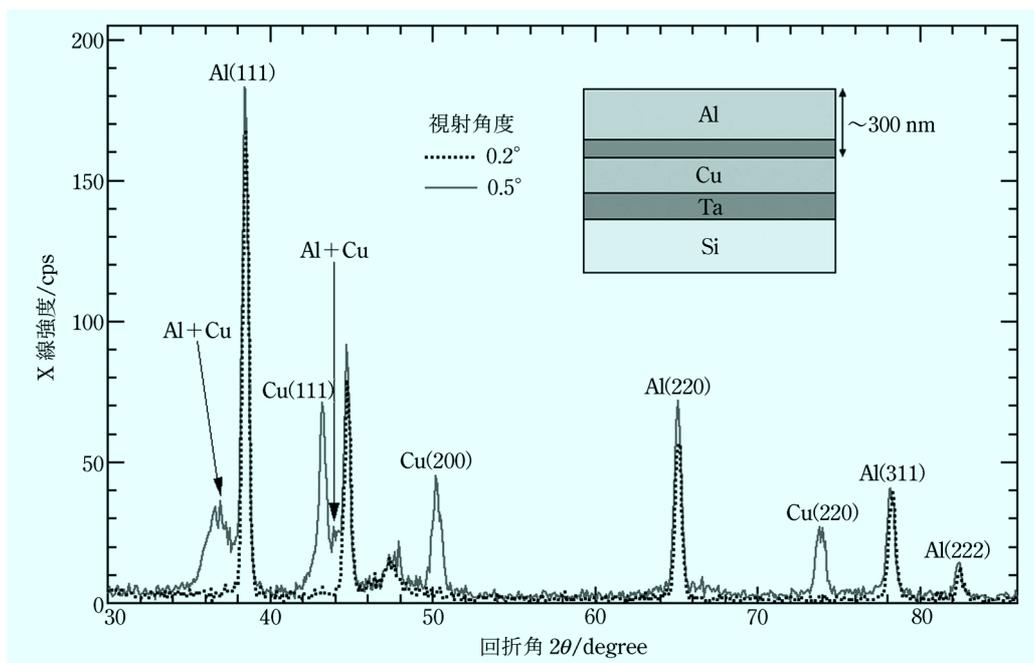


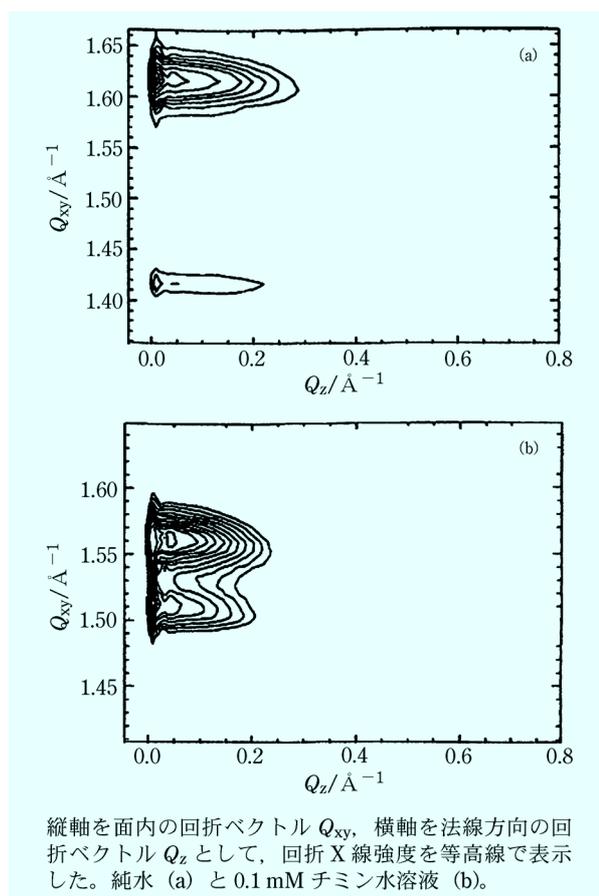
図7 X線入射視射角度による回折パターンの変化

6 液体表面の単分子膜

気液界面においては、両親媒性分子を用いることにより、効果的に単分子膜を形成することができる。たとえば、これを基板に固定することにより、さまざまな性質を持つ分子デバイスや表面修飾が検討されている。また近年では、気液界面を利用して、分子識別の機構を解明する研究も行われている¹⁶⁾。単分子膜は、二次元的な結晶であり、面内方向にだけ周期性を持つため、GIXDによってのみ、その分子配置を直接測定することができる。

生体における分子識別の例として、Vollhardtらは純水およびチミン水溶液の表面に両親媒性メラミン誘導体 ($2C_{11}H_{23}$ -melamine) の単分子膜を形成し、構造や相の変化を調べた¹⁷⁾。その結果、チミンが存在すると、結晶成長に大きな差が現れ、それに伴って圧力面積曲線も大きく変化することが観測された。一方、原子レベルの配置に関しては、図8に示したGIXDの結果から、どちらも歪んだ六方晶であるが、チミン溶液の方が、分子の傾き角や六方晶からの歪みが小さいことが明らかになった。

ここで、少し図8の見方を説明しておく。図の縦軸は Q_{xy} で、二つのピークは、二次元結晶の反射 (10), (01) および ($\bar{1}1$) に相当する。歪みのない六方晶の場合これらのピークは一致する。これが二つに分離しているのは、分子が傾いたことによって六方晶が歪んだためである。また横軸 Q_z 方向の広がり、2節で述べたように結晶分子の厚さ h や結晶中の分子の傾きを反映している。図8からわかるように、純水上の単分子膜の方



縦軸を面内の回折ベクトル Q_{xy} 、横軸を法線方向の回折ベクトル Q_z として、回折X線強度を等高線で表示した。純水 (a) と 0.1 mM チミン水溶液 (b)。

図8 水面上メラミン単分子膜の回折パターン¹⁷⁾

が二つのピークの分裂が大きく、さらにZ方向にも広がりが大きい。これは、分子の傾き角がチミン水溶液の場合より大きいことを示している。以上の測定結果と理

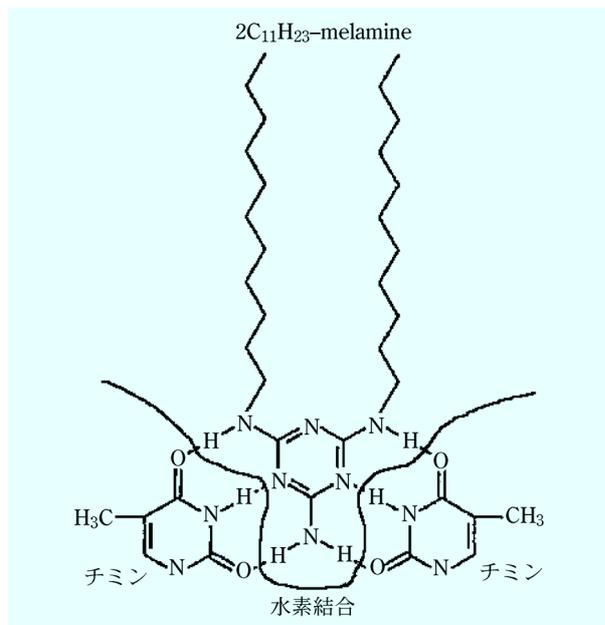


図9 気液界面で形成される分子間の結合¹⁷⁾

論計算により、気液界面において、一つのメラミンと二つのチミン分子が図9に示すような水素結合を形成することがわかった。

このように、気液界面を反応の場として、生体内の分子識別に対する基礎的な理解を深めることができる。気液界面を利用した分子反応制御は今後もますます盛んになると考えられる。GIXDは、そこでの分子配列を直接測定することのできる唯一の方法といつてよい。ほかに、水面上において分子が二次元的ミセルを作り、それがさらに格子定数 33.5 nm の六方晶を形成することを確認した例¹⁸⁾や液-液界面に形成した単分子膜の測定例¹⁹⁾など、界面に形成された膜分子の GIXD による構造解析はさらに新しい広がりを見せている。

またここで詳しく述べる余裕はないが、このような単分子膜を形成した液体表面を X 線反射率法で測定することにより、液面に垂直な方向の密度構造を解析することができる²⁰⁾。また、両方を組み合わせた研究も行われている²¹⁾。

7 液体中の固体表面

X 線は高い物質透過力を持つため、水溶液中でポテンシャルの加わった電極表面における原子構造の変化も測定可能である。そのために Tamura ら²²⁾が製作した測定セルの例を図10に示す。このセルは、電極表面に電解質の液滴を形成するもので、得られる液滴の直径は約 7 mm である。照射する X 線には、エネルギーの高い 32 keV ($\lambda = 0.386 \text{ \AA}$) を用いることにより、液滴による吸収を 20% 程度まで低く抑えることができる。また電極には、電解研磨した単結晶の Au(111) を用い、その表面に Bi_2O_3 を HClO_4 に溶解させることによって

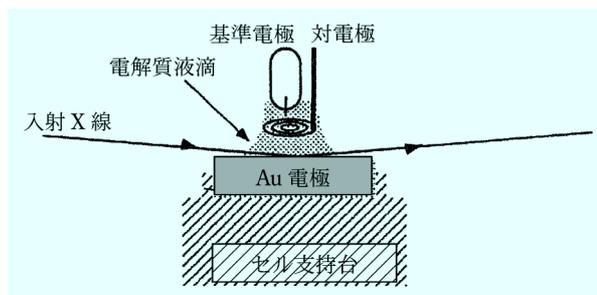
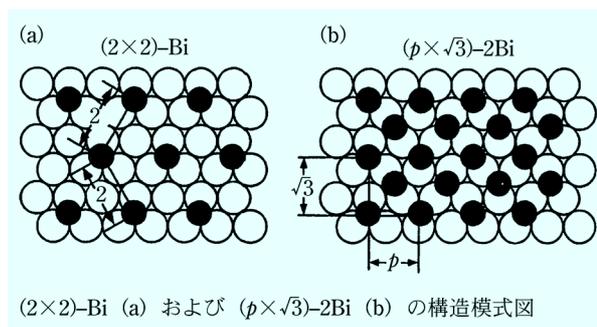


図10 電解質中の電極表面を測定するためのセル²²⁾



(2×2)-Bi (a) および $(p \times \sqrt{3})$ -2Bi (b) の構造模式図

図11 Au(111)表面上に形成される Bi 原子の超構造²³⁾

得た電解質を液滴として形成する。

Bi 電解質中においては、Au 電極のポテンシャルに応じ、図11に示すような2種類の Bi 単原子層構造が形成され、それぞれの構造に対応して GIXD による非整数次の回折点が現れる²³⁾。これらの回折強度をモニターしながら Au 電極のポテンシャルを変化させた結果を図12に示す。ポテンシャルを 0.1 V から増加させていくと、図12(c)で示した $(p \times \sqrt{3})$ 構造に対応する回折強度が 0.2 V 付近で減少し、0.23 V 付近から図12(b)で示した (2×2) 構造に対応する回折強度が増加する。さらにポテンシャルを上げ、0.28 V 以上になるとその回折強度も消失する。このとき、Bi 原子は Au 表面から離れることが別の回折強度から確かめられている。またポテンシャルを下げる方向でも、多少のヒステリシスはあるものの、まず (2×2) 構造が現れ、続いて、 $(p \times \sqrt{3})$ 構造に転移することが確かめられた。

さらに、ポテンシャルの掃引速度を上げた測定を行うと、Bi 原子の吸着と (2×2) 構造の形成はミリ秒のオーダーで終了するのに対し、そこから $(p \times \sqrt{3})$ 構造への転移には数秒要することが明らかになった。このことは、図12(a)に示した電流密度の結果とも整合する。つまり、2.8 V 付近の速い転移では、高くシャープなピークが現れ、2.3 V 付近のゆっくりした転移では、ブロードなピークになっている。このように GIXD を用いた詳細な研究により、電解質中の電極表面における原子レベルのダイナミックな構造変化を直接測定することが可能になった。

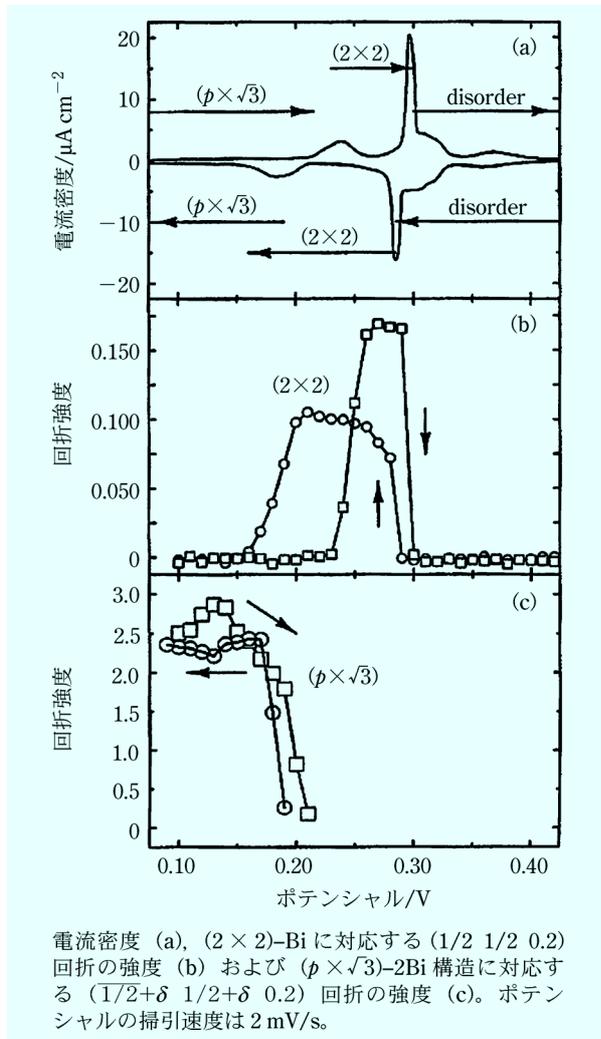


図 12 電極ポテンシャルを変化させたときの電流密度と X 線回折強度²²⁾

8 おわりに

これまで述べてきたように、微小角入射 X 線回折により、表面や界面での原子レベルの構造を非破壊で測定できる。また、X 線は、高い透過力を持つため、固体表面や気液界面だけでなく、固体内部や液体中の固体表面までも測定可能である。

ほかにも多くの応用例があるが、それらに関しては、たとえば本誌進歩総説²⁴⁾も参照されたい。実際の測定についても、SPring-8 を始めとする放射光施設において、微小角入射 X 線回折が可能なビームラインがいくつか稼働し、一般ユーザーが使えるようになってきている。また、強度や分解能では劣るが、実験室で測定可能な市販の装置も存在する。ここで取りあげた例の一つだけでも読者の興味を引くことができ、表面や界面の構造評価が必要になったときに、「X 線を使ってみよう」と思い出してもらえれば幸いである。

- 1) 表 和彦, 稲葉克彦: ぶんせき, **2002**, 623.
- 2) M. S. Kent, H. Yim, D. Y. Sasaki, S. Sajita, J. Majewski, T. Gog: *Langmuir*, **20**, 2819 (2004).
- 3) J. Als-Nielsen, D. Jacquemain, K. Kjaer, F. Leveiller, M. Lahav, L. Leiserowitz: *Phys. Rep.*, **246**, 251 (1994).
- 5) 桜井健次, L. Ortega: ぶんせき, 1998, 164.
- 6) C. Zakri, A. Renault, J-P. Rieu, M. Vallade, B. Berge, J-F. Legrand, G. Vingault, G. Grubel: *Phys. Rev.*, **55**, 14163 (1997).
- 7) 表 和彦, 藤縄 剛: X 線分析の進歩, **30**, 165 (1999).
- 8) 表 和彦, 松野信也: X 線分析の進歩, **30**, 205 (1999).
- 9) 川村朋見, 渡辺義夫, 内海裕一, 藤川誠司, 松井純爾, 籠島 靖, 津坂佳幸: 放射光, **14**, 128 (2001).
- 10) S. Fujikawa, T. Kawamura, S. Bhunia, Y. Watanabe, K. Tokushima, Y. Tsusaka, Y. Kagosima, J. Matsui: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, L144 (2005).
- 11) 例えば, B. E. Warren: "X-Ray Diffraction", Dover (New York), 1990, p. 253 参照.
- 12) F. J. Lamelas, P. H. Fuoss, P. Imperatrion, D. W. Kisker, G. B. Stephenson, S. Brennan: *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2610 (1992).
- 13) G. B. Stephenson, J. A. Eastman, C. Thompson, O. Auciello, L. J. Thompson: *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3326 (1999).
- 14) 宇佐美勝久, 小林憲雄, 平野辰巳, 田島康成, 今川尊雄: X 線分析の進歩, **32**, 63 (2001).
- 15) 角田匡清, 今北健一, 高橋 研: 日本応用磁気学会誌, **29**, 722 (2005).
- 16) T. Kunitake, *Thin Solid Films*, **284/285**, 9 (1996).
- 17) D. Vollhardt, F. Liu, R. Rudert, W. He: *J. Phys. Chem.*, **B109**, 10849 (2005).
- 18) P. Fontaine, M. Goldmann, P. Muller, M. C. Faure, O. Konovalov, M. P. Krafft: *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 512 (2005).
- 19) Z. Zhang, D. M. Mitrovic, S. M. Williams, Z. Huang, M. L. Schlossman: *J. Chem. Phys.*, **110**, 7421 (1999).
- 20) E. Mouri, K. Matsumoto, H. Matsuoka: *J. Polymer Sci.*, **B41**, 1921 (2003).
- 21) D. Vaknin, M. S. Kelley, B. M. Ocko: *J. Chem. Phys.*, **115**, 7697 (2001).
- 22) K. Tamura, J. X. Wang, R. R. Adzic, B. M. Ocko: *J. Phys. Chem.*, **108**, 1992 (2004).
- 23) C. Chen, K. D. Kepler, A. A. Gewirth, B. M. Ocko, J. Wang: *J. Phys. Chem.*, **97**, 7290 (1993).
- 24) 表 和彦: ぶんせき, **2004**, 33.



表 和彦 (Kazuhiko OMOTE)

㈱リガク X 線研究所 (〒196-8666 東京都昭島市松原町 3-4-12)。大阪大学大学院理研科修了。工学博士。<現在の研究テーマ> X 線光学, X 線による薄膜構造の評価。<趣味> 自転車レース参加, マラソン, 登山, スキー。