

中性子回折実験：中性子回折実験のすすめ

星 川 晃 範

1 はじめに

古代ギリシャ哲学でも議論されていた、物質を分けていった際、どこまで小さくなるのか？ 当時でもそれ以上は分けられない不可分の最小単位が存在すると考えられていたそうだが、観測できなかつたため、確証に至らなかつた。それが現代では当たり前のように物質は原子から構成されていると理解されている。さらに原子は原子核と電子で成り立ち、原子核は陽子と中性子から構成される。陽子と中性子はクォークと呼ばれる小さな素粒子三つから構成されるところまでわかってきた。このように分割できないと思われていた原子は、素粒子レベルで分割できるようになってきている。このような理解を進めるにあたり、量子ビームが非常に活躍しており、それは加速器の開発とともに劇的な進歩を遂げてきたと言っても過言ではない。簡単にその歴史について振り返ると、意外と最近までこのような理解に至っていないことに気づかされる。

X線は1895年にレントゲンにより発見されており、当時金属電極間に高電圧を印加することにより放電する現象（陰極線）が知られており、これをさらに物質に当てることにより非常に透過性の高いもの（X線）が生じていることを発見した。のちの1897年にトムソンにより電子が発見され、その後、陰極線と電子が一致していることがわかった。陽子に関してはラザフォードが1919年に窒素の原子核の崩壊により発見している。中性子に関してはチャドウィックが1932年に陽子と同じ質量を持つ粒子であることを明らかとし、「中性子」と命名した。したがって、中性子の発見から考えると、まだ100年経っておらず、原子に関する理解も非常に最近までわかっていなかったわけである¹⁾。現状の様々な量子ビームを考えると非常に短時間で技術開発が行われてきた。したがって、このような量子ビームは馴染みが少ないというのもある意味当然のことと言える。

量子ビームは基本的には加速器を用いて荷電粒子を加速することにより連続的に取り出すことに成功している。こうした中、最も汎用的なものとして身近なものとなってきたのはX線であろう。だれでも健康診断等でレントゲン写真は測定したことがあるに違いない。X線は電磁波と呼ばれる光であり、可視光も含めてエネルギーと波長をかけると一定の値 $[E(\text{eV}) \cdot \lambda(\text{nm}) = hc \approx$

$1240, h$: プランク定数, c : 光速] となっている。一方で、電子線や中性子は粒子線である。電子は質量が軽いので、相対論的な効果があり、 $\lambda = \lambda_c(1 - \beta)^{-1/2}$ [λ_c : コンプトン波長 2.426 pm ($= h/m_e c$, m_e : 電子の静止質量), $\beta = v/c$] と表される。中性子は物質波 [ド・ブロイ波, $\lambda = h/mv$, m : 質量, v : 速度] で記述される。中性子の運動エネルギーと波長および、飛行速度と波長の関係は下記となる。

$$E(\text{meV}) = 0.818/\lambda^2(\text{nm}) \dots\dots\dots(1-1)$$

$$\lambda(\text{nm}) = 395.6/v(\text{m/s}) \dots\dots\dots(1-2)$$

電磁波としての光は時に粒子的に振る舞う性質もあり、その場合は光子と呼ばれている。粒子性と波動性が同時に存在する。こうしたなか、電子よりも1840倍ほどの質量を持ち、電荷を持たない中性子は、そのビームの取り出し方は難しい技術といえる。光速に近づくにつれ、相対論的な効果により、粒子の質量が大きくなり、高エネルギー加速器が必要となる。中性子は原理的に加速器では加速できないため、工夫して取り出す必要がある。

1・1 中性子線源

中性子を量子ビームとして取り出すには、核分裂を利用した原子炉もしくは加速器による核破砕を用いる。原子炉の燃料としてはウランの同位体の一つである²³⁵Uが用いられており、中性子を取り込まれることで核反応を起こし、核分裂する。この際、核分裂と同時に高速中性子が放出され、この中性子をさらに別の原子核が取り込むことにより、連続的に核分裂反応を起こしている。このように連続的に核分裂反応が起こる状態を臨界と呼ぶ。核分裂により生じる高速中性子は、原子核との反応する確率（吸収される確率）が低いので、実際には水で冷やすことにより、エネルギーの低い熱中性子を生成することにより、反応する確率を高くし、核分裂反応が定常的に安定した臨界状態を実現している。このような臨界状態では、定常的に中性子が発生し、炉心から中性子ビーム用のポートからビームとして取り出される。一方、加速器では陽子ビームを光速近くまで加速し、重金属のターゲットに陽子ビームを当てることにより核破砕を起こし中性子が放出される。発生した中性子はエネルギーが高く、波長も短いことからあまり物質と反応しにくいので、モデレータと呼ばれる減速材（主に液体水素）

を使って中性子のエネルギーを下げ、原子レベルの 0.1 nm 程度の波長を生成することができる。このように、中性子線源としては原子炉と加速器の 2 種類ある。日本国内での大型施設としては、茨城県東海村に集中しており、日本原子力研究開発機構の JRR-3²⁾ と呼ばれる研究炉と J-PARC の物質生命科学実験施設 (MLF)³⁾ で中性子を利用できる。

1.2 散乱長

量子線を当てた際の散乱を考える際に、その散乱のされやすさを示す値を散乱能または散乱振幅と呼ばれ、その大きさの二乗が散乱強度に比例する。通常の波の振幅の二乗も強度に相当していることから同様に考えられる。X 線では電子で散乱されることから、電子数に比例して散乱されやすい。つまり X 線の散乱振幅は電子数つまり原子番号に相当する。中性子では散乱長 (b) という値が用いられ、原子およびその同位体によって値が異なる⁴⁾⁵⁾。さらに散乱長は正負両方の値を持ち、ちょうど相殺するように原子を混ぜることによりその材料の散乱長を 0 にすることも可能である。散乱強度は確率的な要素であり、単位立体角および角度により、その散乱される確率が変化するものとして考え、このような量を散乱断面積と呼ぶ。この散乱断面積が大きいほどその散乱される確率が高いことになる。中性子の散乱断面積 (σ) は全立体角 4π と散乱振幅の 2 乗の積として表される。

$$\sigma = 4\pi b^2 \dots\dots\dots(1-3)$$

原子に吸収される確率も吸収断面積 σ_a として表され、全断面積 σ_T は散乱断面積と吸収断面積の和となる。

$$\sigma_T = \sigma + \sigma_a \dots\dots\dots(1-4)$$

散乱現象を考える際に、実際に観測されるピークやスポットなどは波数空間で考える。波数空間では、周期性を簡単に表現することができ、実空間では無限にくり返すような構造を、一つの周期として表現できる利点であるとともに、観測データは波数空間で測定されており、構造の周期性を見ることができる。

1.3 干渉性散乱と非干渉性散乱

散乱される際に波として強め合ったり、弱めあったりするような干渉効果があり、中性子に関しては干渉性散乱と非干渉性散乱がある。非干渉性散乱は波として干渉しないため、入射中性子数にそのまま依存して観測される。散乱の確率を表す散乱断面積 σ は干渉性散乱断面積 σ_c と非干渉性散乱断面積 σ_{inc} の和である。

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_{inc} \dots\dots\dots(1-5)$$

この際、散乱長に関してもそれぞれ干渉性散乱長と非干

渉性散乱長として定義される。

$$\sigma_c = 4\pi b_c^2 \dots\dots\dots(1-6)$$

$$\sigma_{inc} = 4\pi b_{inc}^2 \dots\dots\dots(1-7)$$

原子およびその同位体の違いにより、干渉性散乱と非干渉性散乱の起こりやすさは異なる。非干渉性散乱は基本的にバックグラウンドをあげることになるが、それを利用して入射中性子の波長依存性を測定することができる。

1.4 弾性散乱と非弾性散乱

散乱を考える際、散乱の前後でエネルギーまたは波長が変化しない散乱を弾性散乱、変化するものを非弾性散乱と呼ぶ。弾性散乱と非弾性散乱は原子の種類で起こるのではなく、材料 (試料) に内在する原子同士の結合の特性等に由来する。例えば格子振動 (フォノン) の分散関係や、磁性を担う電子スピンの集団励起モード (マグノン) 由来の分散関係などは、中性子の非弾性散乱により実測することが可能である。ここでの分散関係は、スペクトル解析をしているようなもので、ある周波数における励起モードはどのくらいあるのかを計測できる。大半の散乱は弾性散乱として起こり、非弾性散乱はそれに比べると少ない現象である。同じ原子でも、その周りを構成する原子により結合力等が変わってしまうため、原子種で決まらない。弾性散乱と非弾性散乱に関しては、原子の種類等による散乱断面積や散乱長という値が決まらない。ここで 1.3 の干渉性散乱と非干渉性散乱とは独立事象である。したがって、弾性散乱と非弾性散乱に関して、それぞれ干渉性散乱と非干渉性散乱が存在する。

1.5 中性子の特徴と X 線との違い

原子で散乱されることを考えた際、中性子と X 線では根本的に散乱される部位が異なる。原子は原子核とその外殻としての電子があると考えた際に、X 線は外側の電子で散乱されるのに対して、中性子は主に原子核で散乱される。したがって、電子の外殻と比べると原子核の方が小さい。磁性を担うのは電子スピンであり、磁性のように電子スピンの相互作用しているような中では、原子核の他この電子スピンに対して、中性子の持つスピンの相互作用により散乱される。ここで、原子核での散乱能と電子での散乱能では、散乱される対象の大きさの違いから、散乱能の振る舞いが大きく異なる。原子の大きさが外側の電子雲の大きさとすると 0.1 nm (10^{-10} m) 程度の大きさに相当する、原子核は 1 fm (10^{-15} m) 程度の大きさであり、実空間では非常に大きさが異なることがわかる。散乱能として波数空間 ($q=2\pi/r$) で考えると実空間の逆数に比例するため、 r がゼロに近づくにつれ q は発散する。つまり、原子核で散乱される場合、非常に r が小さいことから、対応する q が大きくなる。その結果、散乱能 b は大きな q でなければ減衰しな

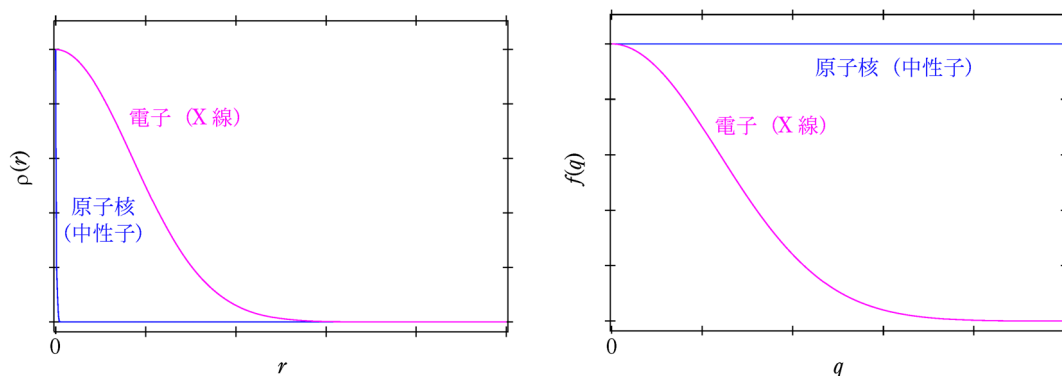


図1 実空間の密度分布 $\rho(r)$ と波数空間における散乱因子 $f(q)$
 ここで $\rho(r)$ と $f(q)$ はフーリエ変換 (逆変換) の関係にある。

いことになり、測定に必要な q に対しては一定となる。電子で散乱される場合は r が原子の大きさと同等であることから、測定に必要な q において、 q の増加とともに散乱能が減衰する。例として実空間の密度分布と散乱能を決める散乱因子を図1に示す。X線等でよく用いられる角度分散では、散乱角 2θ (入射方向と散乱方向の角度の差分) による強度分布を計測した場合、およそ $2\theta=90^\circ$ 以上でピーク強度が得られなくなる。中性子では原子核による散乱では $2\theta=90^\circ$ 以上の高角まで散乱能が保たれるのに対して、電子による散乱 (磁気散乱) は散乱能がX線同様に減衰する。

2 原子炉型中性子

2.1 角度分散

単波長を試料に入射して、散乱角 2θ に対する回折強度分布を計測する手法を角度分散と呼ぶ。実験室系X線でも主に用いられており、X線では特性X線を用いて単波長化することができるが、中性子で単波長を生成するには、結晶モノクロメータと呼ばれる物が主に使われている。結晶を用いてもっとも強い強度が得られる回折ピークをビームとして取り出している。また、速度分別機と呼ばれる回転体を使って行う場合もある。この場合、その回転数と中性子の速度が一致状態だけ通り抜けることができるようにしている。入射中性子のビーム方向を揃えるため、試料よりも上流側ではソーラースリットと呼ばれる中性子の吸収剤を塗布したスリットを使って入射中性子の向きを揃える (方向がずれたものは吸収させてしまう)。また、試料はゴニオメータと呼ばれる軸を回転できるステージを用いており、3軸分光器は三つの回転軸があるものを指す (図2)。ベースの回転軸は ω 軸と呼ばれることが多い。検出器に関しては ω 軸を円の中心とした円弧状にセットされる。この際、図3のように検出器を等間隔に並べておくと検出器間の測定を連続的にすることで全検出器にわたって、連続的な角度を測定できる。したがって、検出器の数を多く並べることにより単位時間あたりの検出効率が上がる。それぞ

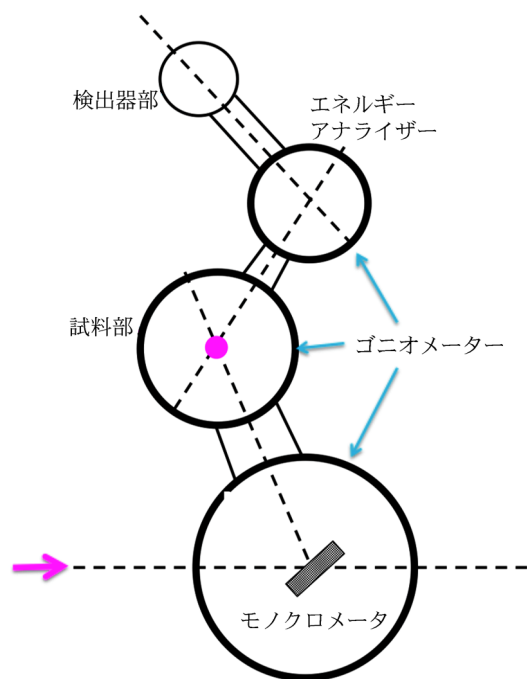


図2 3軸スペクトロメータ略図

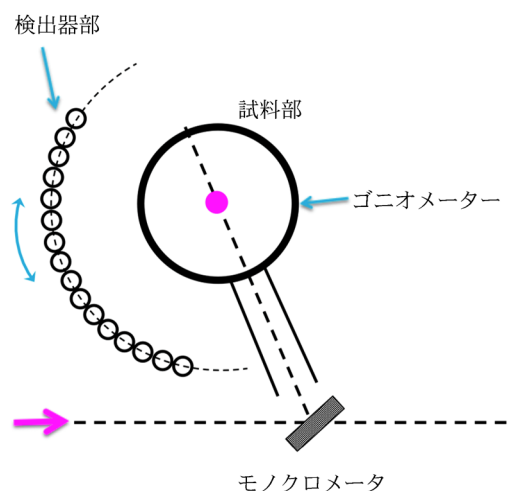


図3 粉末回折計略図

れの検出器ごとに若干の検出効率の違いがあるため、それぞれの検出効率をバナジウムなどで計測し、そのバックグラウンドが合うように補正を行う。分解能は格子面間隔 d に対してその半値幅 Δd の比 $\Delta d/d$ とする。角度分散型では下記のように表される。

$$(\Delta d/d)^2 = (\Delta\lambda/\lambda)^2 + (\cot\theta \cdot \Delta\theta)^2 \dots\dots\dots(2-1)$$

$\cot\theta (=1/\tan\theta)$ は $\theta=90^\circ$ で 0 であることから、分解能は $2\theta=180^\circ$ で最も高く、低角側は分解能が低くなる。測定データとしてはピークの幅が高角側で広がるように見えるが、分解能としては高い。つまり、散乱角により分解能は変化する。

3 飛行時間型中性子

線源から検出器まで、ある決められた距離に対して、中性子の飛行時間 (TOF: Time-of-flight) を測定する手法である。この際、飛行時間から中性子の速度を求めることができ、速度から中性子の波長またはエネルギーを見積もることができる。つまり様々な波長 (エネルギー) が混ざった白色中性子を飛行時間の違いから波長 (エネルギー) を分離し、それぞれの波長での強度を計測している。波長はエネルギーにも対応しており、線源から飛んでくる中性子のエネルギーに対する強度変化を計測していることから、エネルギー分散型の計測と言える。

中性子のスタート時刻は陽子加速器で生成された陽子ビームがターゲットに当たる時刻を $t=0 (T_0)$ として計測を行う。図 4 に示すように線源から試料までの距離を $L1$ 、試料から検出器までの距離を $L2$ として飛行距離を固定した状態で検出器での飛行時間の変化から強度を計測する。飛行時間が短ければ速い中性子 (高エネルギー)

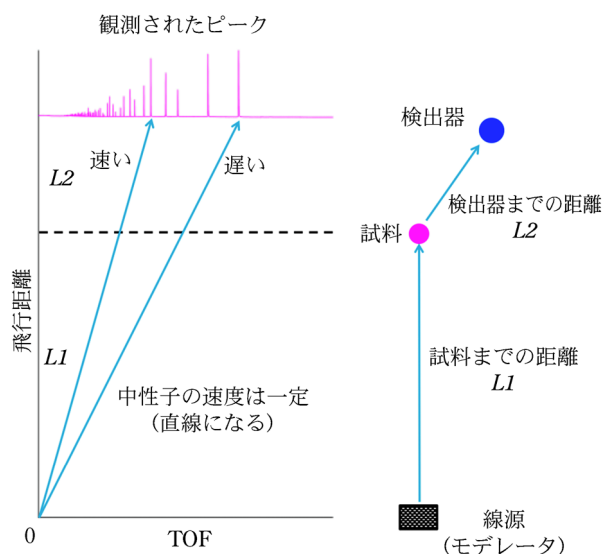


図 4 飛行時間法の原理。飛行距離を固定して飛行時間の変化 (速度の違い=エネルギーの違い) から強度分布を得る。

であり、飛行時間が長いと遅い中性子 (低エネルギー) となり、この飛行時間の変化によりピークが観測される (図 4)。加速器の周期が計測時間の律速となる。ただしチョッパーと呼ばれる中性子の吸収剤を部分的に塗布した回転体を用いることにより、2 倍の周期や 5 倍の周期まで長く計測する場合もある。周期を長くすることにより、飛行時間は長くなるが、強度はその分、減少する。例えば加速器が 25 Hz で運転している場合、1 周期は 40 msec となり、飛行時間を 2 倍の 80 msec まで計測できるようにセットすると、単位時間で得られる散乱強度は半分になり、同じ統計精度のカウントをためようとすると、倍の時間が必要となる。

入射中性子の強度は、波長によって異なっている。液体水素の充填されたモデレータにて中性子が透過することにより、中性子が冷やされ、熱平衡成分として低エネルギーにシフトする。高エネルギーの成分は $1/\lambda$ 、すなわち $1/TOF$ な成分であり、これらが重なったような分布として入射中性子強度が得られる (図 5)。中性子の波長 (エネルギー) により、検出器で検出される効率が異なり、エネルギーが低いものほど、簡単に吸収されることもあり検出効率が高くなる。したがってビームモニターで実測された入射中性子も波長により強度が変わっていることを意味する。

強度補正をするには、図 6 で示すように観測された強度に対して入射中性子強度で規格化する必要がある。この際の入射中性子強度をどう見積もるか、検出効率をどう考えるかというのが、強度補正の際には重要となってくる。入射中性子強度は回折実験では非干渉性散乱の多いバナジウムを使うことが多く、非干渉性散乱によるバックグラウンドが入射中性子強度を反映している。実際にはバナジウムの多重散乱 (一度散乱されたものがさらに散乱されてしまう) も無視できないため、計算により見積もる場合もある。ビームラインによって入射中性子強度の見積もりは異なり、測定時刻から加速器の陽子ビームで用いた陽子数の合計をもとに補正するこ

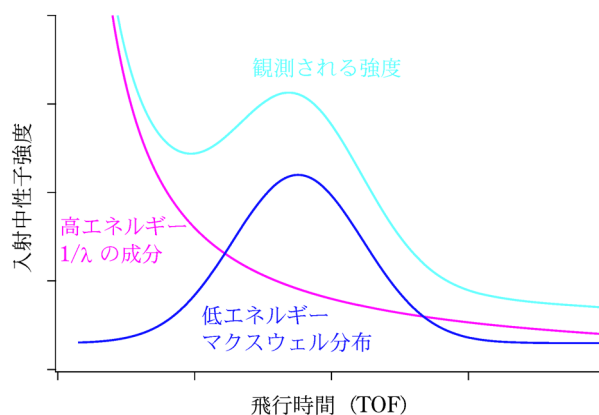


図 5 入射中性子強度の波長依存性 $I(\lambda)$ ここで飛行時間 \propto 波長の関係がある。

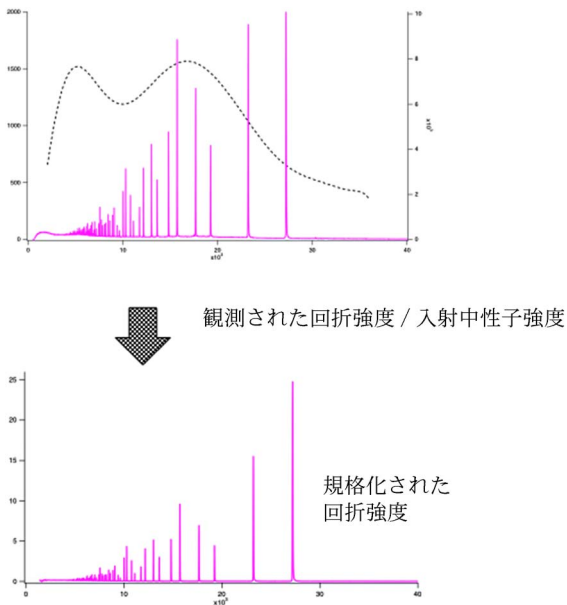


図 6 回折パターンの強度補正

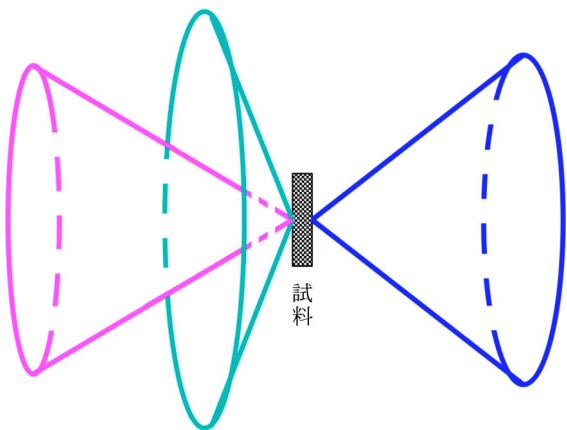


図 7 デバイーシェラーリング

ともある。粉末試料では回折ピークは試料を円錐の頂点としてデバイーシェラーリングと呼ばれる円状のピークの強度分布を示す(図7)。短波長では各格子面間隔に沿った回折ピークが角度ごとに観測されており、波長が変わることにより散乱角も変化する。TOFが短時間であればそれだけ短波長となり、散乱角も小さく、長波長になるに伴い、散乱角が大きくなる。つまり短波長から長波長へ波長が連続的に変化するので、その分散角も低角から高角へピークが時間とともに移動する。したがって、検出器の位置が違くと違ったタイミングで同じ指数のピークが観測されることになる。この状態で足し合わせてもピーク位置が合わないため、ある基準の検出器のポイントを決めて、そのピーク位置にあるように時間をずらしてデータを整理する。この方法を時間焦点法(time focusing)と呼ぶ。こうすることで散乱角の異なる検出器を一つにまとめることができる。ただし、この際、波長を混ぜ合わせることになるため、波長依存があ

る場合には注意が必要である。いずれにせよかなり広い立体角に対する回折データを一つにまとめることができるため、観測された強度が高くなる。得られた観測された強度を入射中性子強度で規格化することで、最終的な試料に関する回折パターンを得ることができる。各ビームラインで、強度補正に関する計算は異なる部分もあるが、大まかには同じことをしている。

中性子をド・ブローイ波($\lambda=h/mv$, h :プランク定数, m :質量, v :速度)とし、飛行距離 L 、飛行時間 t とするとブラッグの法則は次式で表される。

$$2d \sin \theta = \lambda = (h/mL)t \dots\dots\dots(3-1)$$

分解能は次式で表される。

$$(\Delta d/d)^2 = (\Delta t/t)^2 + (\Delta L/L)^2 + (\cot \theta \cdot \Delta \theta)^2 \dots\dots\dots(3-2)$$

飛行時間型回折装置では、検出器が並んでいるかたまりをバンクと呼ぶ。この際、背面散乱($2\theta=180^\circ$)では $\cot \theta=0$ となるので、 $\Delta d/d$ が一番小さくなり、最も高分解能になる。また散乱角は固定された状態で波長が変化するので、高分解能を維持したまま d 領域の回折パターンの測定ができる。つまり飛行時間型で得られる回折パターンはそれぞれのバンクでは異なるものの、得られたバンクの測定データは分解能が一定となる。つまりピークの半値幅は指数によってほぼ変化しないデータが得られる。

4 解析方法

粉末回折パターンは試料を評価する際に広く使われており、多くの方は結晶構造解析をせず、そのピーク位置からその結晶性等を評価される場合が多い。ここで、ピーク位置とそれぞれのピークの強度比は得られる情報が異なっている。ピーク位置は結晶の対称性によるもので、単位胞のサイズや空間群によって変化する。ピークの強度比は単位胞内の原子配列等の変化により変化する。ピークがシャープであるのはその面間隔のずれが少ないことを意味しており、単位胞の分布が少ない。反対にピークがブロードな場合、観測された面間隔の分布が広がっており、単位胞自体に分布がある。結晶を細かく粉砕していくとおおよそナノサイズくらいまで細かな粉末は必ず、単位胞と粉体の試料サイズが近づくため、単位胞の周期構造が長周期に渡り存在できなくなるためである。ナノサイズまで小さくならなくとも結晶子と呼ばれる粉体中の単結晶としての大きさが異なる相が混ざると、ピーク幅から何相の不純物があるのか想像できる場合がある。温度によっても回折パターンは変化する。温度の上昇とともに原子の振動は大きくなり、ピークがブロードになりやすい。結晶構造解析では、原子変位パラメータもしくは温度因子と呼ばれる。もちろん温度に関

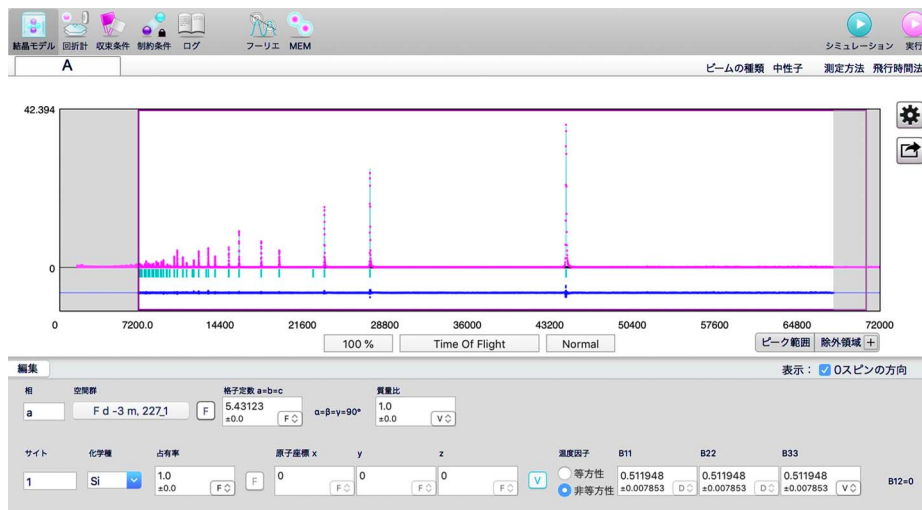


図 8 Z-Rietveld の解析例

係なく、空間的な原子の分布がある場合も同様のパラメータで考えられる。粉末試料は基本的には結晶の方位がランダムに混ざった状態として考えるが、微結晶が針状であったり、平板状であったり偏った形を持つ粉末試料では、結晶の方位が揃ってしまう場合がある。これを結晶の配向と呼ぶ。結晶の配向はいくつかの方位が混ざってしまう場合もあり、このような結晶方位の配向によりある特定の面間隔のピークが強くなったり、弱くなったりする。ピークの強度比が通常と変化する場合として、結晶性が高い場合、格子面で複数回にわたり回折してしまい、結果として1回のみでの回折と比べて強度が低くなる消衰効果と呼ばれる現象が起こる場合がある。回折ピークは簡単には下記で表される。

$$I_{hkl} \propto I_0(\lambda) \varepsilon(\lambda) A_{hkl}(\lambda) E_{hkl}(\lambda) P_{hkl}(\lambda) m |F_{hkl}|^2 \dots \dots \dots (4-1)$$

ここで λ : 波長, I_0 : 入射中性子強度, ε : 検出器効率, A_{hkl} : 吸収係数, E_{hkl} : 消衰係数, P_{hkl} : 配向係数, m : 多重度, F_{hkl} : 構造因子である。また、原子座標や占有率、温度因子等から F_{hkl} は計算できる。測定された回折パターンに対して、構造モデルを仮定してシミュレーションを行い、原子座標等の構造パラメータに対して最小二乗法を用いて最適値を求めることを Rietveld 法と呼ぶ⁶⁾。全パターンフィッティングを行うことにより、構造モデルの最適化を行うことができ、粉末回折パターンから精密結晶構造解析が可能である。

さまざまなソフト (Z-Rietveld⁷⁾, GSAS⁸⁾, Fullprof⁹⁾, MAUD¹⁰⁾, etc.) があり、これらを利用することにより Rietveld 解析が可能である。回折データ、および装置パラメータを取り込み、初期構造モデルとして結晶構造が報告されている場合には、その結晶構造ファイルを取り込む。この際、結晶構造のファイルとして CIF (Crystallographic Information File) 形式が一般的に用いられ

ており、ほぼどのソフトでもこの形式で対応が可能である。この形式は単位胞の大きさや空間対称性を表す空間群、原子座標、占有率、温度因子(原子変位パラメータ)等の情報が決められた形式で入力されている。解析としては、構造モデル中の温度因子等を精密化していき、解析の信頼度を表す R 因子の値から、解析結果を判断する。図 8 に Z-Rietveld での簡単な解析例を示す。これまで報告されている結晶構造に関しては、有償の結晶構造データベース (ICSD, CSD, CRYSTMET 等¹¹⁾) や、あるいはインターネット上でフリーのデータベース (ただしデータ数は少ない) で検索が可能である。完全な未知構造に関する構造解析はかなり大変であり、ピーク位置から結晶の対称性を調べるところからはじめ、ピークの指数付けを行う必要がある。ピークサーチと呼ばれる各種ソフトや無償の Conograph⁷⁾ 等を用いることで空間対称性や単位胞のサイズを決める必要がある。ピークの指数付けができれば、化学構造としての結合を考慮して原子座標を入力していく。将来的には AI 等を用いてこの辺りも自動化ができるようになっていくと思われる。

粉末回折実験は新規材料開発をした際に合成された試料評価として非常に有効であるとともに、多相を持つような複合材料等に対しても対応していくことになるであろう。今後、さらに計算科学との融合がなされ、誰もが簡単に結晶構造解析ができるようになることと期待される。

文 献

- 1) J. D. Rogers : *Physics Procedia* **43**, 1 (2013).
- 2) 日本原子力研究開発機構 原子力化学研究所 JRR-3, <https://jrr3.jaea.go.jp> (2021年7月19日, 最終確認).
- 3) J-PARC MLF Next to Meet@MLF, <https://mlfinfo.jp/ja/> (2021年7月19日, 最終確認).
- 4) "International Tables for Crystallography Vol. C", Edited by E. Prince, chap 4.4 (The International Union Crystallography).

- 5) Neutron scattering lengths and cross sections, NIST Center for Neutron Research, <https://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/> (2021年7月19日, 最終確認).
- 6) "The Rietveld Method", Edited by R. A. Young (Oxford Science Publications).
- 7) Z-Code, 高エネルギー加速器研究機構, <https://z-code.kek.jp/zrg/> (2021年7月19日, 最終確認).
- 8) B. H. Toby, R. B. Von Dreele : *J. Appl. Cryst.*, **46**, 544 (2013) ; GSAS-II, <https://subversion.xray.aps.anl.gov/trac/pyGSAS> (2021年7月19日, 最終確認).
- 9) J. Rodriguez-Carvajal : *Physica B*, **192**, 55 (1993) ; FullProf, <https://www.ill.eu/sites/fullprof/index.html> (2021年7月19日, 最終確認).
- 10) MAUD, Materials Analysis Using Diffraction, Luca

Lutterotti, University of Trento, <http://maud.radiographema.eu> (2021年7月19日, 最終確認).

- 11) JAICI, 化学情報協会, 結晶構造データベース, <https://www.jaici.or.jp/wcas/top.htm> (2021年7月19日, 最終確認).



星川晃範 (AKINORI HOSHIKAWA)

茨城大学 (〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方162-1 いばらき量子ビーム研究センター。博士(理学)。《現在の研究テーマ》水素結合に着目した材料科学。《趣味》犬, 楽器。

原稿募集

話題欄の原稿を募集しています

内容：読者に分析化学・分析技術及びその関連分野の話題を提供するもので、分析に関係ある技術、化合物、装置、公的な基準や標準に関すること、又それらに関連する提案、時評的な記事などを分かりやすく述べたもの。

但し、他誌に未発表のものに限ります。

執筆上の注意：1) 広い読者層を対象とするので、用語、略語などは分かりやすく記述すること。2) 啓蒙的であること。3) 図表は適宜用いてもよい。4) 図表を含めて4000字以内（原則として

図・表は1枚500字に換算）とする。

なお、執筆者自身の研究紹介の場とすることのないよう御留意ください。

◇採用の可否は編集委員会にご一任ください。原稿の送付および問い合わせは下記へお願いします。

〒141-0031 東京都品川区西五反田1-26-2

五反田サンハイツ304号

(公社)日本分析化学会「ぶんせき」編集委員会

[E-mail : bunseki@jsac.or.jp]