

CONTENTS

P1 総合科学研究機構 中性子科学センター長退任挨拶 P2 CROSS 中性子科学センター新センター長就任挨拶 P3 CROSS 産業利用推進センター新センター長
P4 重水素化技術の紹介 紫外線に負けないアミノ酸をつくる P7 「見える」、「見えた」を再考する - 絵画表現論との対比 - P18 2025 年度量子ビームサイエンスフ
ェスタ開催報告 P18 【開催報告】有機・高分子材料研究会／放射光・中性子連携利用研究会 合同シンポジウム P19 施設からのお知らせ P20 今後の行事予定

総合科学研究機構 中性子科学センター長 退任挨拶

総合科学研究機構
柴山 充弘

2020年6月から2期6年勤めたCROSS中性子科学センター長を退任しました。全てのことを自ら判断し行動しなければならなかった個人経営的な大学での研究室運営とは随分異なり、役割分担・分業体制が確立したCROSSでのセンター運営に最初は戸惑いも感じましたが、無事、務めを果たすことができました。CROSSを離れ、サラリーマン人生も終えるにあたり、この紙面を借りて関係諸氏、コミュニティの皆様へ、一言、ご挨拶させていただきます。

「四季」のバックナンバー Vol. 48 (2020年・秋)に私の着任の挨拶の記事があるのを再発見しました。そこには、本多光太郎先生の名言「産業は学問の道場なり」を引用し、施設と産業界とのインターフェースたらんと抱負を書いていたのを思い出します。一方、ほぼ同時期に、「ニューノーマル時代の中性子利用」という巻頭言を中性子科学会機関誌「波紋」に寄稿していました(2020年11月号、vol.30, No.4)。思い起こせば、着任当時は、2019年11月末に発生した新型コロナウイルス感染症(COVID-19)が世界中に蔓延し、いつ収束するか全く予断を許さない状況が続いていました。その時の状況を以下のように述べています。「J-PARC MLFでは2020年4月20日より約一ヶ月運転停止と職員の自宅待機やテレワークを余儀なくされた。運転再開後、実験装置は稼働してもそれぞれの大学や研究機関の方針でユーザーがMLFに来ることができない状況が続く、代行実験などで課題を遂行したビームラインも多くあった。」それはすなわち、中性子利用推進機関であるCROSSの存在意義をも問われるということの意味していました。幸いにして、コロナは数年で終息し、JRR-3の再稼働と相まって、中性子利用は再び活況を呈しています。

「四季」の読者の多くは何らかの形で中性子に関わっておられることでしょう。そして、おそらく「中性子は難しく、まして産業利用は大変だ」といった感想をおもちかとおもいます。私自身、大学在職中、中性子散乱について講義やセミナーで紹介することは多々ありましたが、中性子を理解してもらうことの難しさを常に感じていました。それでも、産業界の方々とは共同研究などを通じて「学問の道場」を実践することができました。CROSSに異動後は、立場的に学生やユーザーからさらに遠ざかったこともあり、このもどかしさをより強く思うようになりました。その解決策として思いついたのが本の執筆でした。最初はブルーバックスのような啓蒙書を、と考えましたが、結局、教科書を書くのがベストだという考えに至りました。そして、いくつかの出版社に企画書を提示し交渉してできたのが「中性子散乱入門」(講談社、2025年5月上梓)です。おかげさまで、この本は、63の大学図書館、27の公立図書館に収蔵されるほどになりました。さらに、今年2月には英語版「Introduction to Soft Matter Neutron Scattering」(Springer Nature)からハードカバーおよび電子版として出版されました。私の中性子散乱研究者人生の中で得た知識や経験が教科書というインターフェースを介して多くの人たちと共有し、後進に伝えることができたと思無量です。

「波紋」巻頭言での続く文章では次のような提言をしていました。「中性子関連施設としては抜本的な対応が必要となる。測定の自動化やリモート化、データへのリモートアクセス、リモート解析などのインフラの整備が急務である。」と。この提言は、昨今、国を挙げて推進している研究DXそのものであり、今、MLFがAI for Scienceとともに全力で取り組んでいるプロジェクトです。今後の進展を見守りたいと思います。Olds Be Ambitiousを座右の銘とする者より。

総合科学研究機構 中性子科学センター 川北 至信

2026年6月より、一般財団法人総合科学研究機構(CROSS)の中性子科学センター長を拝命いたしました、川北至信と申します。着任にあたり、一言ご挨拶申し上げます。

当センターは、特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律(いわゆる共用法)によって指定される特定中性子線施設 J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)の利用促進業務を行っております。登録施設利用促進機関として文部科学大臣から5年ごとに認可を受けており、2026年4月より第4期が開始されました。この第4期では、「中性子をもっと身近に。研究と産業に新たな推進力を。」をテーマに、4つのスローガンを掲げました。

1. 1 MW 大強度中性子ビームを活用した画期的な成果の創出と組織間連携による中性子利用の裾野拡大
2. AI、DXを活用した利用システムと実験・解析環境の充実
3. 産学官連携の推進による新たな産業的価値の創出
4. 中性子科学を先導する人材の育成

私自身は、3月まで原子力機構のMLF副ディビジョン長として、施設側からCROSSと協働してきました。CROSSのこれまでの歩みは、MLFの中性子源の出力上昇の歩みのごとく、一步一步着実なステップを踏み、活動を広げてきました。共用ビームライン7本の利用支援と成果創出、成果の発信はもとより、MLFと原子力機構の研究炉JRR-3に共通した中性子・ミュオンポータルサイトJ-JOINによる利用サービスの展

開、中性子産業利用推進センターの設置と2本の茨城県中性子ビームラインの運営への参画、産学官連携の取り組み(高機能性高分子コンソーシアム、量子ビーム分析アライアンス、この4月から始まったCROSS Neutron Plaza)、とその成長を見てきました。

次の5年間では、組織間の連携がより重要なキーワードになると思っています。MLFの出力も設計目標であった1 MWに到達し、今後の利用促進は、AIやDXを最大限活用した著しい効率化を進めていく中で、ユーザーの利用率を向上させ裾野拡大につなげていく必要があります。まだ中性子を利用していないが、中性子利用がその人の研究展開に多大な効果を与える研究をしている人、将来の研究を考える上で、設備の充実した大型研究施設の利用が気になっている方、そういうポテンシャルユーザーにアプローチをしていく手段を早急に開発していきたいと思っています。解決したい課題を抱えている人が、それを解決するのに最適な手段を容易に見つけすぐに着手し結果にたどり着ける、その成果創出までの期間の大幅な短縮は、日本全体の科学技術の発展、産業の発展に必要不可欠です。こうした未来を描くためにも、組織間連携や施設間連携、マルチビーム連携は重要です。利用促進機関としてCROSSはそのハブとして機能していくべきと考えています。

中性子産業利用推進協議会の会員企業の皆様とは、産業界の新たな推進力となれるような、中性子利用の在り方を見出していきたいと思っています。必要なときにすぐに安心して利用できるような中性子利用環境の実現は、施設連携があれば決して夢とは思っていません。皆様のご助言をいただきながら、具体的なアクションも起こしていきます。ご理解とご協力をお願いいたします。

総合科学研究機構
中性子産業利用推進センター
舟越 賢一

2026年4月より、一般財団法人総合科学研究機構(CROSS)中性子産業利用推進センター長を拝命いたしました舟越賢一です。当センターは、大強度陽子加速器施設J-PARCの物質・生命科学実験施設(MLF)において、茨城県が整備した二本の中性子ビームライン(茨城県ビームライン)の管理・運用を担っております。自治体が主体となって中性子の産業利用を体系的に推進する本事業は、全国的にも先駆的な取り組みであり、その運営を担う責任の重さを改めて感じ、身の引き締まる思いです。

茨城県中性子ビームライン事業は、「中性子の産業利用による革新的技術の創出」、「中性子関連産業の育成を通じた地域産業への波及」、「研究者・技術者の集積による研究拠点形成」という三つの目的のもとに推進されてきました。これまで築かれてきた成果と志をしっかりと継承するとともに、産業界の発展に資する活動をさらに強化していききたいと思います。

当センターが運用する「生命物質構造解析装置(iBIX:BL03)」および「材料構造解析装置(iMATERIA:BL20)」は、産業利用に資する高度な計測基盤として重要な役割を担っています。iBIXは、TOF単結晶中性子回折装置として、タンパク質などの生体高分子や合成高分子の構造を原子レベルで可視化できる世界最高性能の装置です。特に、中性子ならではの「水素原子やプロトンが見える」という特長は、創薬や次世代材料開発において、機能発現の鍵を握るミクロなメカニズムの解明に資する重要な情報をもたらします。また、iMATERIAは、高分解能粉末回折から小角散乱までをカバーする高汎用装置であり、リチウムイオン電池材料のオペランド測定や、金属材料の相変態・応力応答のその場観察など、実デバイス条件に近い評価を可能とし、製品開発に直結する知見を提供しています。これら二本のビームラインの特長を最大限に活かし、産業利用の高度化と産業競争力の強化に貢献することが、当センターの重要な使命であると認識しております。

現在、産業界はカーボンニュートラルおよびデジタルトランスフォーメーション(DX)という大きな転換期に直面しています。このような環境下において、中性子を実効性の高い「実学のツール」として位置づけ続けるため、私は以下の三点を重点的に推進してまいります。第一に、中性子DXによるハイスループットな実験・解析環境の整備です。産業界のスピード感に応え、革新的な研究開発を支えるため、最新のDX技術を導入し、実験から解析までのリードタイム短縮を推進してまいります。具体的には、試料自動交換機構の活用や測定の自動化・迅速化、さらには特殊環境下での実験技術の高度化を進め、企業が研究開発サイクルの中で中性子をより身近かつ実践的に活用できる環境の整備を進めてまいります。第二に、「製品に近い視点」での社会実装支援です。中性子の高い透過能を活かし、複雑な内部構造を有する実製品を使用環境に近い条件で非破壊観察する技術は、材料設計や製品開発に新たな知見をもたらすものです。単なるデータ提供にとどまらず、得られた構造情報を機能向上や性能評価へ結びつけられるよう、解析手法の高度化を進めてまいります。第三に、利用者ニーズに寄り添った支援体制の充実です。当センターでは、産業利用コーディネーターによる相談対応、初めての利用者向けのトライアルユース制度、試料送付によるメールインサービスなどを提供しています。今後は利用プロセスのDX化による利便性向上を進めるとともに、事前相談から結果解釈、課題解決までを一体的に支援できる体制をさらに強化してまいります。

中性子計測は、非破壊で物質内部の深い領域まで捉えることができる特長を持っており、その産業的価値は今後ますます高まっていくものと考えております。一方で、「測定できる」ことにとどまらず、「課題解決に使える」技術として社会に定着させていくことが重要です。そのためには、産業界のニーズに寄り添いながら、研究成果を実際のものづくりや製品開発へと結びつけていく取り組みが不可欠です。茨城県東海村という世界有数の研究基盤が集積する地において、当センターが産業界と研究機関をつなぎ、新たなイノベーションを創出する中核的な存在となれるよう、今後も挑戦を続けてまいります。皆様のより一層のご理解とご支援を賜りますようお願い申し上げます。

重水素化技術の紹介 紫外線に負けないアミノ酸をつくる

日本原子力研究開発機構
柴崎 千枝

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) J-PARC センターでは、物質・生命科学実験施設 (MLF) の共用ビームラインで使用する重水素化試料を供給するための施設として、重水素化ラボラトリー (D-Lab) を整備しています。材料合成に用いられる有機ポリマーやイオン液体などの機能性材料だけでなく、タンパク質や DNA など生命科学と関わりの深い物質も重水素化することが可能です。

中性子散乱実験において、物質の重水素化は非常に重要です。重水素化により、軽水素からの大きな非干渉性散乱を抑えることで、高精度な中性子散乱実験が可能となります。中性子結晶構造解析では、軽水素に比べ重水素の方が核散乱長密度が大きいために、分子中の水素原子の位置をより正確に観測できるようになります。さらに中性子小角散乱法では、部分的に重水素化した試料を用いることで、複合体中の特定の分子や領域だけを選択的に観測することも可能になります。

アミノ酸は生体を構成する基本分子であり、酵素やホルモンなど生命機能に不可欠なタンパク質の構成要素です。また、健康食品、医薬品、生分解性材料など幅広い分野で利用されている有用な有機分子でもあります。重水素化により、タンパク質中のアミノ酸残基やその水素原子の位置、ダイナミクスを詳細に明らかにすることで、酵素反応機構や医薬品との相互作用の解明が期待されています。さらに近年では、医薬品分子中の水素原子を重水素原子に置き換えた「重水素化医薬品 (Deuterated drugs)」も注目されています。重水素は水素よりも結合エネルギーが高く、炭素-重水素 (C-D) 結合は炭素-水素 (C-H) 結合より切断されにくいという特徴を利用し、薬物の代謝反応及び体内での分解速度を低下させることができます。これにより、薬効の持続時間が延長されるだけでなく、投与量や投与回数の低減が可能となり、副作用の少ない医薬品として開発が進められています。

アミノ酸の重水素化手法

アミノ酸の重水素化にはいくつかの方法が知られています。重水素体の前駆体から順に合成していく化学的合成法その他、重水中で微生物や植物を培養してタン

パク質を生産させ、それを分解してアミノ酸を得る生物的手法があります。また、市販の軽水素体 (非重水素化) アミノ酸を酵素反応によって重水素化する半生物的手法も知られています。

しかし、これらの手法では、得られる収量が限られることや、重水素化する位置を制御することが難しいという課題があります。そこで本研究では、既存の化学的合成法を改良し、さまざまなアミノ酸に適用でき、側鎖を含めたすべての水素原子を高収率で重水素化できる簡便な方法を開発しました。

簡易型重水素化反応装置

重水素化反応には、岐阜薬科大学の佐治木氏らによって報告された手法を基にした水素-重水素交換反応を採用しました [1]。この方法では、アミノ酸、白金/炭素 (Pt/C) 触媒、2-プロパノール (2-PrOH)、重水 (D_2O) を混合し、高温高压条件下で反応を行います (Fig. 1)。従来の重水素化合成では水素ガス (H_2) を直接用いる方法が一般的ですが、本手法では 2-PrOH と Pt/C 触媒との反応によって系内で水素ガスが生成し、その場で水素-重水素交換反応が進行する点が特徴です。さらに、本研究では簡易的な重水素化反応装置 (Fig. 2) を構築し、一般的な実験室設備で反応を実施できる条件を検討しました [2]。

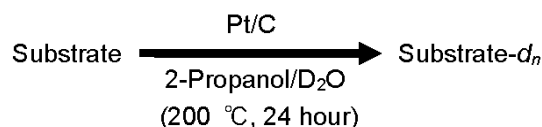


Figure 1. アミノ酸重水素化の反応スキーム
初期条件として 200 °C、24 時間で反応を行い、その後反応率向上を目的として反応温度および反応時間、添加剤の最適化を行った。

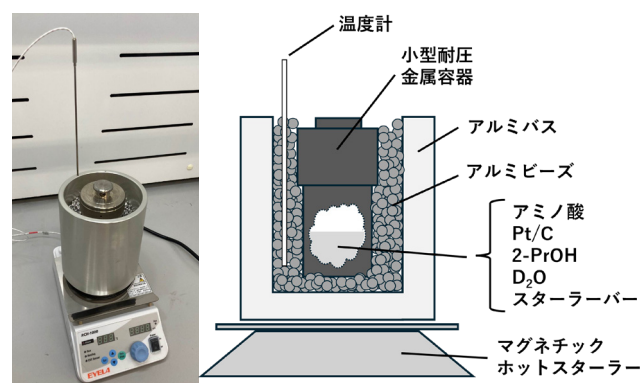


Figure 2. 簡易型重水素化反応装置

これにより、実験用高温高压反応装置 Parr リアクターや高压ガス（水素ガス）などの特別な設備を用いることなく、比較的容易に重水素化反応を行うことが可能になりました。

この装置を用いて、タンパク質を構成する 20 種類の基本アミノ酸それぞれについて重水素化反応を実施しました。水に対して難溶性のアミノ酸については、溶解性を向上させるために酸やアルカリなどの添加剤を加えました。また、反応温度は 80 ~ 230℃ の範囲で検討し、反応時間についても最適化を行いました。その結果、20 種類のアミノ酸のうち約 7 種類について、側鎖を含めた高い (50% 以上) 重水素化率を達成することができました (Fig. 3)。重水素化率は核磁気共鳴分光法 (NMR) および質量分析 (MS) により評価しました [3]。

光学異性体の分離

ほとんどのアミノ酸はその構造的特徴から、光学異性体 (L 体、D 体) が存在します。市販されているアミノ酸の多くは L 体ですが、自然界にはごくわずかに D 体も存在しています。L 体と D 体は、化学的性質はほぼ同じであるものの、旋光性が逆であり、生体内の酵素反応などでは異なる挙動を示すことが知られています。本重水素化反応では、主鎖の水素原子の重水素化によりアミノ酸のラセミ化が生じます (L 体と D 体が両方生じる)。つまり、本手法によって得られた重水素化アミノ酸を生化学研究などに利用する場合には、光学異性体の分離が重要になります。

そこで、カラムの固定相中に導入されたキラル認識能を有する化合物と鏡像異性体 (L 体 / D 体 アミノ

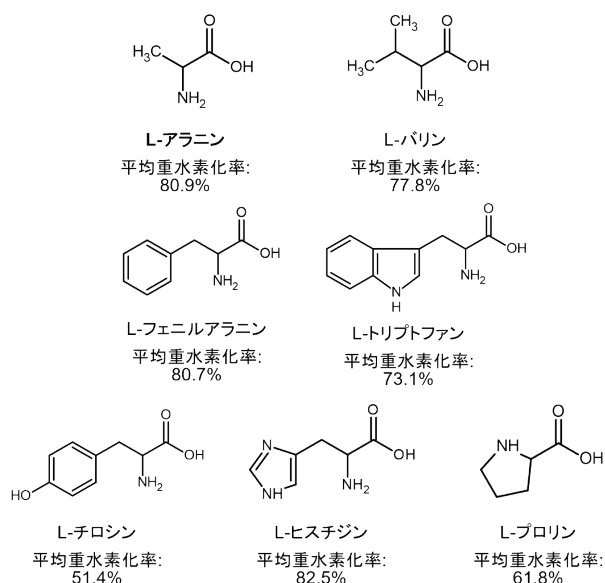


Figure 3. 高効率の重水素化に成功した、市販では高価なアミノ酸

酸) との相互作用の違いにより溶出時間に差が生じることを利用したキラルカラム (DAICEL CHIRALPAK ZWIX(+)) を用いたクロマトグラフィーによる分離を試みました (Fig. 4)。クロマトグラムでは二つのピークが観測され、それぞれ L 体重水素化アミノ酸 (溶出時間: 約 36 分) および D 体重水素化アミノ酸 (溶出時間: 約 30 分) に対応することが確認されました。この結果から、本反応によって生成した重水素化アミノ酸はラセミ体として存在しており、キラルカラムによってそれぞれの光学異性体を分離取得できることが明らかになりました。

トリプトファンの重水素化

高い重水素化率が得られたアミノ酸の一つとして、インドール環を側鎖にもつトリプトファンがあります (Fig. 3)。このアミノ酸は、神経伝達物質であるセロトニンや睡眠に関与するホルモンであるメラトニンの前駆体として、睡眠や気分の調節に関わる重要な役割を持っています。また、健康食品としても広く知られているアミノ酸です。しかし、光、酸素および湿気の影響により分解を受けやすいため、遮光・密閉・乾燥条件下で保存する必要があるとされています。

重水素化による同位体効果を検証するため、重水素化トリプトファンについて酸 (熱) による分解試験および紫外線照射による分解試験を行いました。その結果、酸による分解速度には非重水素化体との差は見られませんが、紫外線照射による分解速度は重水素化体で低下しました (Fig. 5)。以上の実験から、重水素化トリプトファンは非重水素化体と比べ、酸や熱

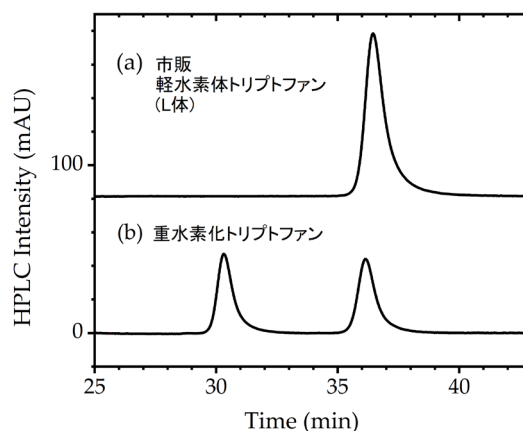


Figure 4. キラルカラムクロマトグラフィーによるエナンチオマー分離

(a) 市販の軽水素体トリプトファン (L 体)

(b) 重水素化したトリプトファン

(検出は励起波長 250 nm、蛍光波長 350 nm)

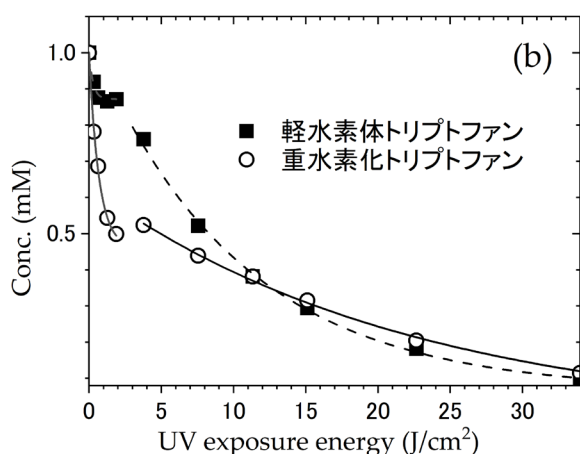
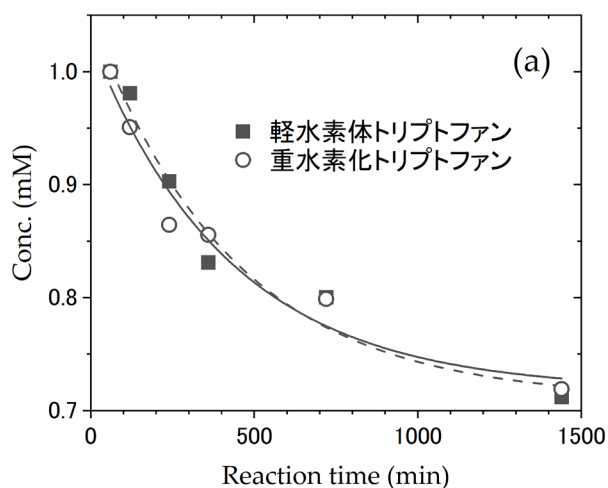


Figure 5. 重水素化したトリプトファンの安定性試験
(a) 酸(熱)分解試験：6 M HCl 中、80 °C で処理した。
(検出は、励起波長 290 nm、蛍光波長 339 nm)
(b) 紫外線分解試験：100 mM KCl 水溶液中で 254
nm (62.94 mJ min⁻¹ cm⁻²) の紫外線を照射した。
(検出は、励起波長 290 nm、蛍光波長 295–450 nm)

に対する安定性はほぼ変わりませんが、紫外線に対してはより高い安定性を示すことが明らかになりました。

重水素化トリプトファンの X 線結晶構造

本研究で合成した重水素化トリプトファンを結晶化し、単結晶 X 線構造解析により結晶構造を決定しました (Fig. 6)。空間群は P2₁/c であり、ラセミ体として結晶化していました。結晶構造中で、トリプトファン分子は双性イオン型 (zwitterionic form) をとり、水素結合によって R 体 (D 体) と S 体 (L 体) による二量体構造を形成していました。さらに、この二量体は、N-H...O 水素結合により b 軸および c 軸方向に結合していました。重水素化トリプトファン結晶は、非重水素化トリプトファン結晶と同形構造であり、結合距離や結合角、水素結合距離に有意な差は認められませんでした。

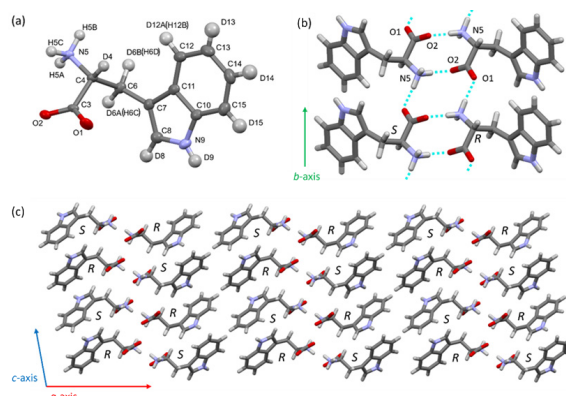


Figure 6. 重水素化したトリプトファンの X 線結晶構造
(a) 重水素化トリプトファンの構造
(b) (S)-トリプトファン分子 (L 体) と (R)-トリプトファン分子 (D 体) の間に形成される水素結合の様子
(c) トリプトファン分子の結晶中でのパッキングの様子

おわりに

本研究では、さまざまなアミノ酸に適用可能で簡便な化学的重水素化手法を開発しました。本成果は、中性子散乱を用いた生体分子の構造・機能解析の発展に貢献することが期待されます。例えば、重水素化アミノ酸を利用してタンパク質中の特定のアミノ酸残基を選択的に重水素化することや、重水素化アミノ酸を連結して得た重水素化ペプチドを用いることで、ペプチドを基質とする酵素反応の進行過程や反応機構をより詳細に解明できると考えています。加えて、部分的重水素化によって分子中の特定領域 (例えばリンカー部位) のみを選択的に標識することで、柔軟な分子構造のダイナミクス解析や、複合体中の特定領域の選択的観測にも展開できる可能性があります。

また、重水素化アミノ酸は新たな機能性材料としての可能性も有しています。例えば、D 体かつ重水素化されたアミノ酸を用いてペプチドを合成することで、化学的性質を大きく変えることなく、カビ等の微生物由来のペプチド分解酵素に対する耐性や、紫外線に対する安定性を向上させた新規材料の開発につながることを期待されます。

このように、本研究で開発した重水素化アミノ酸は、中性子散乱を用いた生命科学研究だけでなく、新規機能性材料の開発など、生命科学から材料科学まで幅広い分野への展開が期待できると思われます。

本研究は令和 5 年度原子力機構理事長ファンド旧萌芽研究開発制度の助成の下で実施しました。研究の遂行にあたり、CROSS の阿久津和宏氏、杉山晴紀氏 (現東京理科大学) に技術的支援、QST 安達基泰氏、 Lund 大学 Zoë Fisher 氏に実験に関する助言をいただきました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

- [1] Y. Sawama et al., Chem Pharm Bull, 66(1), 21 (2018).
[2] K. Akutsu-Suyama et al., CROSS Reports,

2024.001 (2024).

- [3] C. Shibazaki et al., Bioengineering, 12, 981 (2025).

「見える」、「見えた」を再考する - 絵画表現論との対比 -

茨城大学
小泉 智

はじめに

例えば、高分子学会（プラスチック材料の開発者の集まり）において、小角散乱、回折の実験は理解が難しいとのコメントを度々お聞きします。一方で電子顕微鏡はそうでもない。このためか散乱実験のイロハを解説する定型の入門書の発刊が、今なお後を絶たないわけですが、なぜかしっくりしないと感じる材料の専門家は多いのではないのでしょうか？本稿では「見ること」、そして「納得」することを改めて考えてみたいと思います。しっくりしないのは人間が日常で培った実空間認知の悟性と、散乱・回折の逆空間の理屈に不整合があるからではないかと思うわけです。みなさんも同じように感じておられるであろうことを掘り下げてみましょう。

見るための人間の悟性

認知哲学 (Philosophy of Cognitive Science) とは、人間(最近では AI)が「世界をどのように認識し、考え、意識を生み出しているのか」という仕組みを脳科学や数理物理学の最新知見と融合させながら探求する哲学分野です。デカルトとカントはその祖であると言える

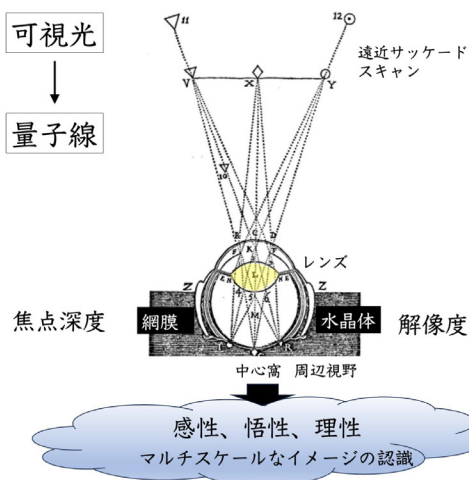


図1 デカルトの眼球スケッチと屈折光学、カントの認知哲学は現在の最先端量子線計測にも共通な興味深い視点である。

でしょう。17～18世紀のヨーロッパで近世哲学は「見える(視覚)」や「認識」についてどのように論じたか？ここから見てみたいと思います。

デカルト (1596–1650)

デカルトは「xyz座標 (デカルト座標)」を導入し、視覚の仕組みを「光学」、「幾何学」として論じました。著書「方法序説」[1]の一節、屈折光学の中で、眼球は暗箱と同じ物理装置である物体の表面から放たれた光が、レンズ (水晶体) で屈折し、網膜に「コントラスト (明暗の反転像)」を結ぶ物理プロセスを記述しています(図1)。ちょっと言い換えますと、外界の「位置 (xyz座標)」を、光を通じて、網膜 (XY面) へと幾何学的に写像 (投影) するということだと思います。しかしデカルトは、網膜に映った2次元の投影像を、そのままでは人間は「3次元構造」として認識できないとも指摘しました (眼球の絵を描くと風景の左右が反転してしまう)。見ているのは眼だけではなく、脳の理性 (心) が関与するという指摘です (我思う、ゆえに我あり)。

カント (1724–1804)

デカルトの100年ほどのち、カントは人間の脳の認識システムをさらに発展させました。哲学界の「コペルニクスの転換」、彼の名著『純粋理性批判』[2]では感性と悟性の対等関係を度々論じています。難解な詳細はさておき、カントは次のような面白いことを言っています。「自然界を網羅した全データはそのままではいわば「カオス」で、人間には届かない」「外界にある物体の真の姿 (物自体) を人間はそのままでは絶対に認識できない」

感性とは人間がそのカオスを「見える」にするために人間の頭の中に組み込まれている認識のフィルターです。一方で、悟性とは認識のための「閾値による分離」と「記憶との相関」と言い得ます [3]。そして理性が妥当性を判断します。

焦点深度 (Depth of Focus)

デカルトの指摘によれば人間の眼がはっきりと輪郭

を捉えるためには、網膜に焦点を合わせる必要があります。焦点が合う奥行きを幅を焦点深度 DOF といひ次式で定義されます。

$$DOF = \frac{\lambda}{2 \cdot \alpha^2} \quad (1)$$

λ は波長、 α は光線の「開き角」(対物レンズの開口数 $NA \sim \sin \alpha$) です。この数式が示す通り、焦点深度を深くする (DOF の値を大きくする) ためには、「波長を長く」また「開き角を小さく」する必要があります。光学顕微鏡 (光学レンズ) の焦点深度は浅い。可視光の顕微鏡や通常のカメラは、手前にピントを合わせると奥がボケる。一方で電子線は、つまり SEM (走査電子顕微鏡) ではビームの平行性が高いので焦点深度がたいへん深い。

人間の眼 (水晶体)

デカルトの指摘の通り人間の眼は光学レンズです。すなわち、その焦点深度は浅い。それではどうやって人間は遠くの富士山と、近くの波に同時に鮮明に認識することができるのでしょうか？人間の空間認識はカメラのような光学機器より複雑で、つまり「超高速な動的フォーカス」、「サックード (躍度運動)」と脳の「メモリー合成」を組み合わせたハイブリッドシステムです。さらに網膜の構造自体も中心窩と周辺視野というマルチスケール観察に適した構造になっています。中心窩は網膜の中央にある極めて狭いエリアのことです。ここには視細胞が超高密度で詰まっており、粒子の輪郭や文字のエッジ (高周波成分) を圧倒的な解像度で識別します。他方、周辺視野は中心から外れた領域であり解像度が劇的に落ちます。ここでは細かな輪郭は見え「大まかな明暗のグラデーション (低周波成分)」や「もや (揺らぎ・動き)」だけを敏感にキャッチします。脳は、眼を細かく動かすことで風景全体にスキャンし、この中心の「超高解像度な画像」を周辺の「大まかなデータ」と統合することで広い視野全体が見えているような錯覚 (美しい世界の残像) を認識しています。

奥行きを認識する悟性と絵画表現

ここからは絵画の表現技法を振り返ってみたいと思います。テーマは「奥行きの位置次元 (Z) へのこだわり」、ポイントは「遠近法」と「オクルージョン (重なり合い)」です。はじめの図 2 は 1413 年のブルネレスキの作品です。キャンバスの中央に水平線を引き、その線上に 1 点の消失点を設定します。周辺にあるすべての風景は、この 1 点に収束するように描かれ

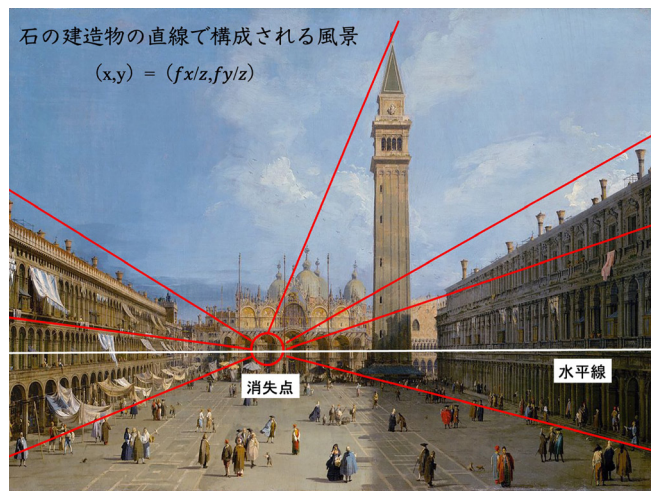


図2 18世紀 ジョヴァンニ・アントニオ・カナル(イタリア)による線遠近法(西洋絵画の真髄)。観察者の目線は動かない。

ていることがわかります。このような技を「線遠近法」といい、西洋絵画のバックボーンです。

では私たち東洋は？中国には「三遠の法」という遠近法が在りました。図3をみてください。山水画を描いた縦長の掛け軸、その中央の水平線を設定します。それは「平遠」と呼ばれ「水平に見渡す広がり」の表現です。この上下に「高遠」、「深遠」を置きます。これらは「見上げる高さの山の表現」と「見下ろす・奥を覗き込む谷の表現」の構図です。このように画家が眼を多視点的に上下に動かし、XY平面の上下を使って自然の壮大さ (奥行き) を捉えています。

遠近法の東西の違いはどうして生まれたのでしょうか？それは、おそらく西洋では石の建造物に囲まれて、直線で構成される風景が溢れているのに対して、東洋では不規則な曲線からなる独特の風景が日常に在る。こんなことに由来しているのではないかと思います。さて中国の遠近法は日本にも伝来しました。例えば狩

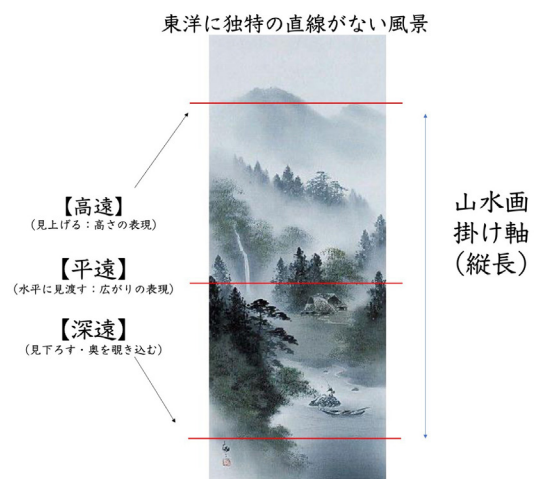


図3 中国の遠近法 「三遠の法」 観察者の目線は上中下と移動する。

野永徳の「洛中洛外図」では、京都の市中を俯瞰的に眺め、屏風の下に手前の風景を、上に遠くの風景を描いています。このような手法を「積立遠近法」と呼びます（紙面の都合で図表の掲載は省略します）。

葛飾北斎（画狂老人記）

カントと同年代の1800年代、日本人は遠くの富士山をどのように見ていたのでしょうか？画狂老人記「北斎」を例に振り返りましょう。北斎は富士山遠影を西洋の遠近法と日本独自の感性を融合させて描きました。「富嶽三十六景」の中の「神奈川沖浪裏」を図4左に示します。北斎はオランダから長崎に伝来した線遠近法を学び、それまでの浮世絵にはなかった圧倒的な空間の広がりや立体感を表現しました（浮世絵から浮絵へと進化）。

北斎の脳は手前の小波にピントが合った瞬間の鮮明な「手前の画像」と、奥の富士山にピントが合った瞬間の鮮明な「奥の画像」を、記憶の中でリアルタイムにパッチワークのように合成します。その結果として北斎の浪裏の図のような遠近のマルチスケールな風景を認識することができたのです。

浪裏の図のマルチスケールは他にも在ります。特筆すべきは手前の波の先端を螺旋で自己相似的に描いています。フラクタル（自己相似性）の描写です。どのスケールで拡大しても同じ構造が現れる性質をフラクタルといい、マンデルブローが1975年に創り出した言葉です。フラクタルとはラテン語の「fractus（壊された、不連続な、破片）」に由来します。北斎はマンデルブローより100年も前にフラクタルの面白さを先取りした。また時間軸もマルチスケールです。数万年に及び鎮座する悠久の富士に対して、一瞬の波し

ぶきとの対比。どうですか！鴨長明の方丈記にある泡沫の儚さ、日本人の感性がここでは大波の躍動として描れています。

一方で「富嶽三十六景」の中の「赤富士」（図4右）では、奥行きを1次元を塗りつぶしています。壮大な富士と上空の雲が同一のキャンバスの面上に2次元的に描かれています。しかし「遠くのは霞む」という感性のもと、富士の裾野に色彩のグラディエーションで微かに遠近を表現しています（空気遠近法）。版画の色重ねでグラディエーションを描く。パルス中性子線の小角散乱と同じ手法であると思いませんか（図12で再考する）。

まとめてみますと従来の奥行きの一次元の表現で、西洋の線遠近法は $(z \rightarrow 1/y)$ 変換、東洋の積立遠近法は $(z \rightarrow y)$ 変換です。そこに z を押しつぶす浮世絵ジャポニズムが参入。西洋の線遠近法は、画家と対象は一步も動かない「静止」を前提にする描き方、東洋の積立遠近法は画家の視点が上下に移動する描き方です。[4]

「粒子が見えた」とは？

私たちが「粒子が見えた」と認識するのはどんな状況でしょうか？次のステップが関係すると思います。

- (1) 粒子の輪郭の抽出：目に入った光の情報から、脳の視覚野の中心窩が「色の変わり目（境界線）」を切り出します。これにより周囲の空間から独立した「粒子」の形が定義できます。「粒子の輪郭」は「密度場の一次微分」と言えます。
- (2) 輝度コントラストの確認：粒子とその背景の間に明るさ（輝度）や色の違いを認識する。差（コントラスト）が激しいほど、粒子は鮮明に見え



図4 富嶽三十六景(天保2年(1831年)頃から刊行)における北斎の挑戦。神奈川沖浪裏(左)は3つの視点のマルチスケール(遠近, 自己相似性, 時間)を盛り込み躍動を表現した。赤富士(右)では奥行きの1次元を塗りつぶして静寂を表現した。空の雲は富士と同一面上に配置され動かない。一枚の和紙に異なる色を載せた版木を十数回押し当てて色を重ねた(この作業はTOF型小角散乱と同じ, 図12を参照)。
図版は"HOKUSAI" Matthi Forrer (Prestel社)

たと感じます。

- (3) さらに粒子の内部に明暗の高周波成分の感知できれば「質感」の知覚につながります。先に述べたように 網膜の中心（黄斑部の中心にある中心窩）は、細かく急激に変化する視覚の高周波成分を捉えるのが得意です。

SEM の 2 次電子像

では走査電子顕微鏡（SEM）の 2 次電子像（SEI）はどうか？ 視覚と同様に「粒子の輪郭」すなわち「密度場の一次微分」、そして「奥行き」の 1 次元表現（Z 軸）がどのように現れるかをみてみます。図 5 はシリカ微粒子の 2 次電子像です。SEM の SEI 像は形状コントラストとも言われ、立体感（奥行き）を持つ最大の理由は、「エッジ効果」にあります。細く絞った電子線を試料表面に照射すると、比較的浅い数 nm 程度の表面から「二次電子」と呼ばれる極めてエネルギーの低い電子が飛び出します。平坦な場所では二次電子は内部に吸収されやすいですが、サンプルの「輪郭（エッジ）」や「傾斜」がある場所では、傾斜に垂直な方向の外に飛び出しやすくなり、検出器に届く量（輝度）が急激に増大します。これをエッジ効果と言います。傾斜は表面の凹凸（形状場）の空間的な一次微分で在り、SEI は傾斜を像の「明暗（輝度コントラスト）」として翻訳しています。さらに SEM の二次電子検出器は、通常、試料室の「斜め上（片側）」に配置されています。そのため「太陽光と影」と同じく明るい、暗い側面ができて奥行きが強調されます。検出器の反対側の面は二次電子が遮られるため「暗い影（オクルージョン）」になります。人は一次微分が定義するエッジ（輪郭）と全体の影を、悟性で処理することで微粒子を 3 次元の形として認識します。

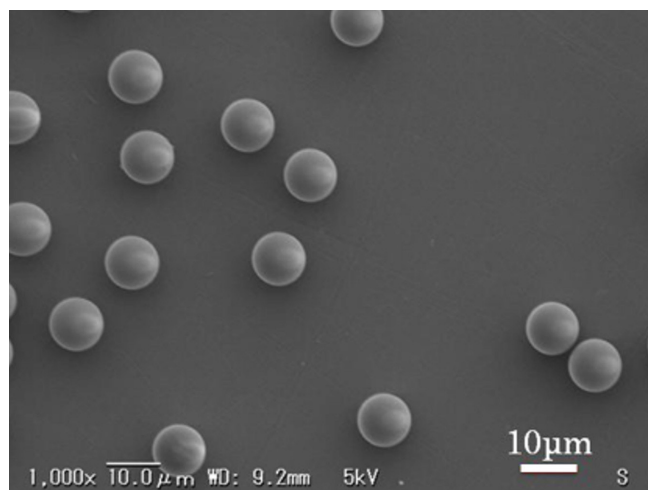


図5 走査型電子顕微鏡によるシリカ微粒子の2次電子像(文献5より転載)。

なぜ、散乱・回折の解釈はむずかしいのか？

ここまで長々と人間の悟性、実空間で培われた空間認識について述べてきました。人間は生まれながらに日々の生活の中で、実空間の奥行きを 1 次元を捉える悟性を鍛えられています。そして脳は焦点深度の限界を補うパッチワーク合成機能が発達するように進化しました。一方で、これから振り返るように散乱・回折実験は、逆空間への悟性の転換を求める手法です。光の種類を問わずに、次のような物理的背景があります。

- (1) 量子線と物質の弱い相互作用を前提として「第一ボルン近似」が成立します（1 回散乱の近似）。その結果、散乱実験は、実空間の構造（微粒子やその配置）をフーリエ変換するという数学的な表記そのものです。微粒子は「散乱波」の重ね合わせの散乱振幅 (F) で記述されます。
- (2) 量子力学の要請に従い、観測量の強度は共役な散乱振幅の積ですから位相情報は消失するので実空間へ戻れないという悟性のジレンマに陥ります。
- (3) 解決策として、モデル解析で構造パラメータを決定して実空間に戻れることを試みます。しかし小角散乱のスペクトルは捉え所がなくモデル化が困難な場合もあります。また解析結果に対して人の悟性に適った納得を得にくい。悟性を補助する新しい試みとして、主成分解析法（トヨタ自動車 WAVEBASE）が散乱業界にも登場しました。[6]

中性子小角散乱

材料のミクロ構造を観察したい私たちは、感性、悟性の一部を電子顕微鏡や小角散乱装置に委ねます。こ

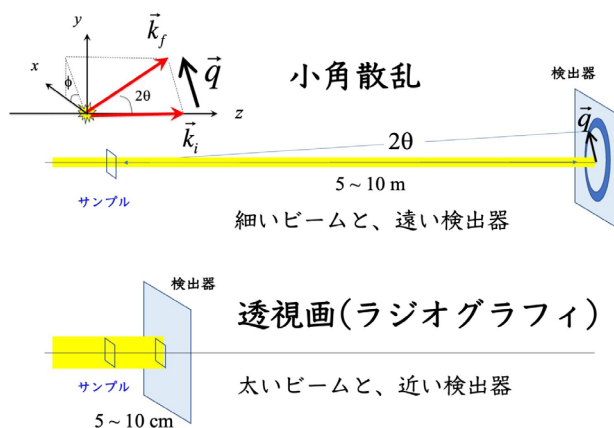


図6 検出器の距離を変えると、実空間と逆空間を行き来することができる。

実空間

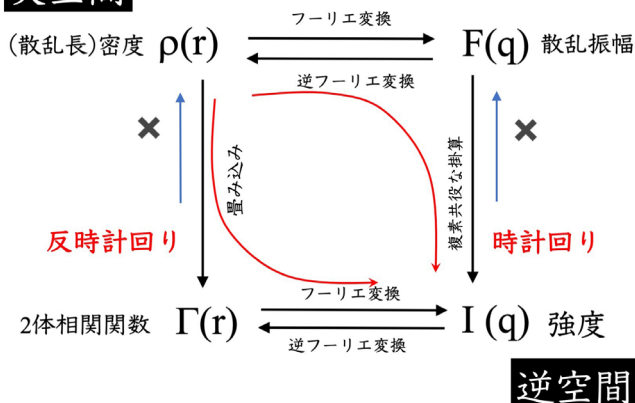


図7 構造と散乱強度を繋ぐスクエア(逆空間を観測するための摂理)。散乱の観測には本稿に述べた規則のほか、不確定性原理の制約がある。

んな立場を専門家の皆さんと雑誌「金属」に書きました [7]。最先端のこれらの観測機器は、カントのいう自然界に溢れる全データにフィルターを掛ける知覚装置です。小角散乱と透視画法（ラジオグラフィ）の光学系は次のとおりです（図6）。どちらも透過光の観測です。詳細は文献 8-11 をご覧ください。

先に述べた通り小角散乱の観測量は光の強度、つまり散乱振幅の二乗です。「共役な掛け算」、すなわち存在確率は実数であれという要請、それはまたコヒーレントな領域でブラッグの回折条件を満たした干渉とも言えます。この状況を散乱スクエアとして描いてみました（図7）。

散乱振幅を経由するダイアグラムの時計回りのパスは数式で書くと、散乱振幅 $F(q)$ は、実空間の散乱長密度 $\rho(r)$ のフーリエ変換で定義されます。

$$F(q) = \int \rho(r) e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r} \quad (2)$$

散乱強度 $I(q)$ は、共役な散乱振幅の掛け算です。

$$I(q) = |F(q)|^2 \quad (3)$$

ところで視覚による界面の検出は密度場の一次微分に着目することでした。小角散乱も同様に原子配置関数 $\rho(r)$ の微分量が散乱振幅を与えることを確認します。まずフーリエ変換の性質（微分のフーリエ変換）を利用します。

$$\mathcal{F}[\nabla \rho(r)] = i\mathbf{q} \int \rho(r) e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r} = i\mathbf{q} F(q) \quad (4)$$

位置 r に関する微分（勾配ベクトル $\nabla \rho(r)$ ）のフーリエ変換は元の変換に $i\mathbf{q}$ を掛けたものになります。この両辺の絶対値の2乗をとると

$$|\mathcal{F}[\nabla \rho(r)]|^2 = q^2 |F(q)|^2 = q^2 I(q) \quad (5)$$

つまり散乱強度 $I(q)$ は

$$I(q) = \frac{1}{q^2} \left| \int \nabla \rho(r) e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r} \right|^2 \quad (6)$$

のようにも書き表せます。この式が意味することは私たちの眼と同じように小角散乱も

(1) 密度の空間的な変化率（ $\nabla \rho$ ）を切り出して見ているということです。そして

(2) 密度の高低差が大きいときはっきりと見えます。この高低差をコントラストと呼びます。例えば微粒子と外の溶媒の間の散乱超密度の差 $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2$ を散乱コントラストと定義します。

次に散乱の勾配の積分からコントラスト（密度差 $\Delta \rho$ ）を抽出してみましょう。1次元のケース（ x 方向の界面）が簡単であるので、ある相 1（密度 ρ_1 ）から相 2（密度 ρ_2 ）へ変化する 1 次元界面を考えます。このとき界面をまたぐ領域 $[x_1, x_2]$ で勾配を積分すると、数学的にコントラスト（散乱長密度差）そのものになります。

$$\int_{x_1}^{x_2} \nabla \rho(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{d\rho}{dx} dx = \rho(x_2) - \rho(x_1) = \Delta \rho \quad (7)$$

勾配（ $\nabla \rho$ ）の積分がコントラスト（ $\Delta \rho$ ）を与えることが確認できました。この関係を前述の散乱強度の式 (6) に組み込みます。つまり界面が理想的にシャープな場合、勾配 $\nabla \rho$ は界面位置だけでスパイク状（デルタ関数）に値を持ちます。勾配はデルタ関数 $\delta(r)$ を用いて $\nabla \rho \approx \Delta \rho \cdot \delta(r)$ （界面の位置）と書けるため、

$$I(q) \approx \frac{(\Delta \rho)^2}{q^2} \times |\text{界面の形状因子}|^2 \quad (8)$$

となり強度がコントラストの2乗に比例することが導かれます。これをさらに高角側（ q が大きい領域）で積分するとポロド則が導かれます。

$$I(q) \approx 2\pi (\Delta \rho)^2 \frac{S}{V} q^{-4} \quad (9)$$

ここで s は全界面積、 V は照射体積、両者の比を比界面積といいます。比界面積の定量評価は小角散乱が最も得意とするところです。もし界面がボケてなだらか（勾配が小さい）であれば、この q^{-4} よりも速い減衰（ガウス関数が掛け算された減衰）になります。

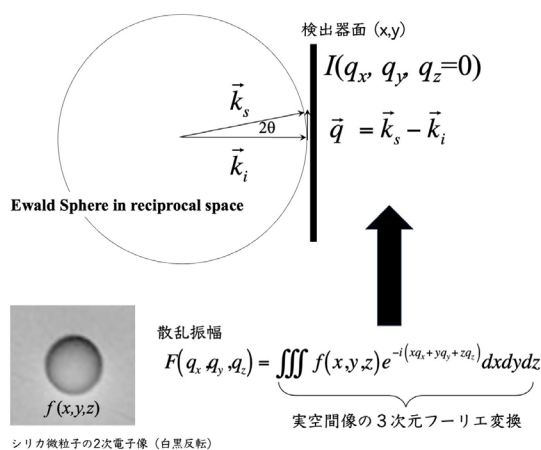


図8 小角散乱は1次元圧縮の観察(投影切断定理)。北斎の浮世絵版画もまた1次元圧縮である。

散乱実験による粒子の見方(エwald球、逆格子という悟性)

中性子が散乱する過程には2つの保存則「エネルギー保存則」と「運動量保存則」が関与します。この保存則を幾何学的に統合したものがエwald球(Ewald sphere)です(図8)。小角散乱では多くの場合エネルギーが変化しない弾性散乱を仮定している。このとき波長λは変わらない、つまり波数ベクトルの大きさ $|k_i|=|k_s|=2\pi/\lambda$ は等しい。この「大きさが一定」という条件が、逆空間において原点を通る「半径kのエwald球」を規定します。先の散乱ベクトル $q=k_s-k_i$ は、系に与えられた(あるいは奪われた)運動量を表します。

結晶や構造の周期性(逆格子ベクトルG)と運動量変化が一致したとき($q=G$)、強い散乱が起きます。つまりブラッグの回折条件は、逆格子点Gがエwald球面に乗ったという幾何学的表現に書き換えられました。小角散乱で観測する材料の構造は周期性が高いとは言えません。このとき逆格子点Gは、ぼやけて原点 $q=0$ から富士の裾野のようになだらかに広がる形になります。先のポロド則は q^{-4} で原点の周りに広がっています。

小角散乱は何を見ているの?(再び実空間2次元電子像へ)

前節の散乱・回折実験の説明はどうでしょうか? 私たちの日常の悟性の外にある「散乱・回折の理屈」で、一気に煙に巻かれた感じがあります。ここで小角散乱は何を見ているのかを小角観察の特殊事情から整理してみましょう。エwald球が散乱の観測条件であるとわかりました。そこで小角散乱、つまり散乱角 2θ を

小さくします。この極限では $q_z=0$ をとることに他なりません。三次元の散乱因子 $F_{3D}(q_x, q_y, q_z)$ を

$$F_{3D}(q_x, q_y, q_z) = \iiint f_{3D}(x, y, z) e^{-i(q_x x + q_y y + q_z z)} dx dy dz \quad (11)$$

で再定義します。ここでは実空間の構造(密度分布)を関数fで表しました。小角散乱の条件 $q_z=0$ を代入すると、

$$\begin{aligned} F_{3D}(q_x, q_y, 0) &= \iiint f_{3D}(x, y, z) e^{-i(q_x x + q_y y + 0 \cdot z)} dx dy dz \\ &= \iint \left[\int f_{3D}(x, y, z) dz \right] e^{-i(q_x x + q_y y)} dx dy \end{aligned} \quad (12)$$

括弧内の積分を $f_{2D}(x, y)$ と定義します。

$$f_{2D}(x, y) = \int f_{3D}(x, y, z) dz \quad (13)$$

$f_{2D}(x, y)$ は、三次元的な構造 $f_{3D}(x, y, z)$ をz方向に積分(投影)したものです(これをラドン変換と呼びます)。投影積分の結果、奥行きz方向の広がり(画像の輝度(色)の濃淡で表現されたこと)になります。

式(12)に戻ります。この式の意味するところは「実空間でのラドン変換(実空間の投影)は、フーリエ空間(逆空間)でのXY断面の切り出しに完全に等しい」という数学的関係です。3次元の現実を「2次元の影(透過光)」にラドン変換しただけ(生データの状態)では、重なり(オクルージョン)が生じます。手前にある「波」の情報と、奥にある「富士」の情報が実空間の同じ光軸上で重なると1枚の投影写真(XY面)を見ただけでは浪裏の富士を分離・解像することができません。

しかしそれを式(12)に従ってフーリエ空間(逆空間)に持っていくと、驚くべきことに、その軸の波数が「0」へと完全に引き算(固定)され、中心を通るフラットな2次元の「切断面(断面)」へと転写されます。これが投影切断面定理(Projection-Slice Theorem)です。試しに美術学校のある学生の鉛筆デッサン($f_{2D}(x, y)$)を2次元フーリエ変換して見ましょう。

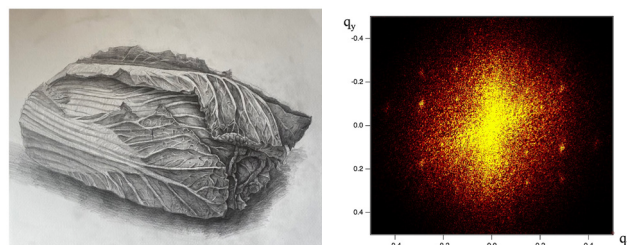


図9 白菜のデッサン(左)に2次元フーリエ変換を施して逆空間で見る(右)。逆空間で白菜を認識するのは至難の技であるが、しかしデッサンを定量している(複数のスポットは葉の繊維質を評価)。デッサンの奥行き(1次元は鉛筆(カーボンの付着量)の濃淡で表現した)。

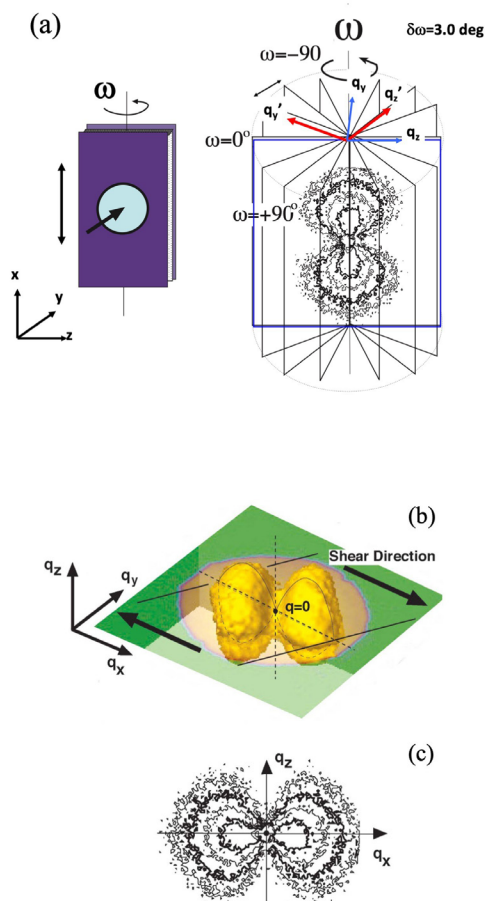


図10 動的に非対称なブレンド系でずり変形を加えた際に現れる流動誘起相分離を中性子小角散乱装置SANS-J-IIにて立体観測した。結果は「小貫明モデル(京大理物)」とぴたりと一致し驚いた [12]。

$$F_{2D}(q_x, q_y) = \iint f_{2D}(x, y) e^{-i(q_x x + q_y y)} dx dy \quad (14)$$

図9の右は $F_{2D}(q_x, q_y)^2$ 、つまり散乱強度です。散乱・回折実験は白炭を逆空間でこのように眺めています。図5に示したシリカ微粒子のSEI画像を2次元フーリエ変換してみました [5]。その結果、小角X線散乱の計測結果とよく一致しました。「SEI画像の2D-FFT」と「SAXSパターン」を比較して一致をみたのは、「実空間での輝度のz方向の重ね合わせ(投影積分)が、逆空間での「 $q_z=0$ という薄い断面(Slice)」を抽出することと等価とみなせるからです(投影切断面定理の確認)。トヨタ自動車の解析プラットフォーム(WAVEBASE) [6]においても顕微鏡画像の数値化にこの考え方を利用しています。

立体小角散乱という「多視点観測」

小角散乱は散乱角が非常に小さいため、原点付近のエワルド球の表面は、ほぼ「平面」と見なせます。検

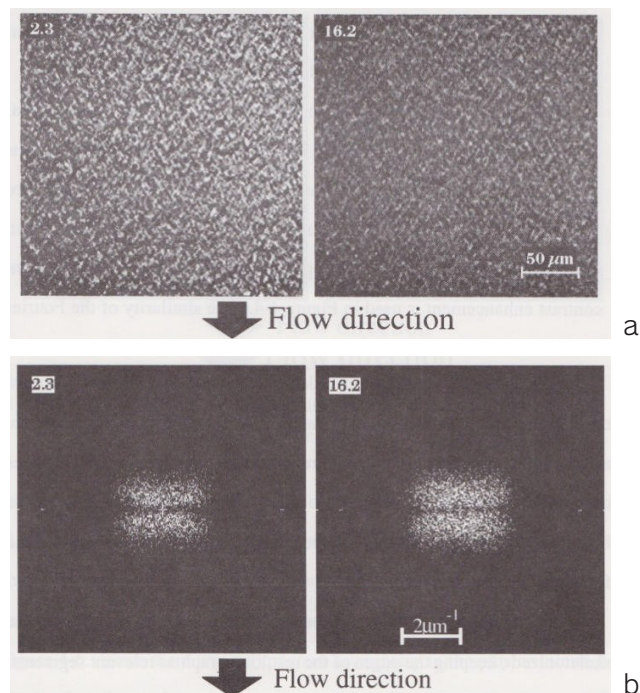


図11 濃度揺らぎのカメラ画像(a)を逆空間像(b)に変換してみると異方性が見えた！畳み込み演算の威力, 小角散乱は「揺らぎの科学」で活躍する。

出器の断面は $q_z \approx 0$ 面であり、検出器は三次元的な散乱体 $I(\mathbf{q})$ のうち、この平面上に乗っている「薄いスライス」だけを切り取って表示します。フィルムであってもサンプルを光軸(z軸)に対して傾ける操作(y軸を回転軸として回転する操作)を細かに丁寧に実施します。異なる角度で得られた $q_z=0$ (実験室座標系)の逆空間の断面(Slice)を次々と撮り溜めPC上で連結させ立体小角散乱を観測しました(図10、[12])。動的に非対称なブレンド系でずり変形を加えた際に現れる流動誘起相分離は図10のような三次元的に異方性にある濃度揺らぎです。アブノーマル・バタフライの正体は $s(q_x, q_y, q_z)$ を $q_z=0$ 面(サンプル座標系)でスライスした際の「断面図」に他なりません。

「揺らぎ」は見えるか？

赤富士の裾野に掛かったモヤはどうやって認識しますか？流体の分野ではシュリーレン法という面白い技術があります(例えば室蘭工大 畠中和明先生)。人間の目には見えないエアコンの気流など「透明なものの揺らぎ」を、その後ろにおいた「紋様の輪郭の歪み」として可視化することができます。

図11は流動下の高分子溶液(PS/DOP(ポリスチレン/ジオクチルフタレート)準濃厚溶液)の濃度揺らぎを捉えた光学顕微鏡像です(文献13)。濃度揺らぎの濃淡がカメラで撮影されています。これは動的非対称性を持つ混合物で生じる「流動誘起相分離」です

が、果たしてどのような特徴があるのでしょうか？定量的に議論するために写真の2次元フーリエ変換を施してみます。流動方向にウイングが広がる異方的な小角散乱が現れました。一見、乱雑に見える高分子溶液のモヤは流動方向に対して異方的です（図10と同じアブノーマルバタフライ）。この例でわかるように「揺らぎ」の評価は逆空間観察（小角散乱）の得意とするところです。特に流動下の濃度揺らぎは、非平衡定常状態としてのその場にだけで現れる高次構造です。中性子小角散乱を用いれば、観測を高分子鎖のサイズまで掘り下げることができ、鎖の変形と揺らぎの関係が議論できる。産業の現場と照らし合わせれば、熔融紡糸、射出成形といった高分子加工に関わるテーマとして興味深いでしょう。

では、なぜ逆空間観察（小角散乱）は揺らぎの異方性を捉えたのでしょうか？散乱スクエア（図7）の反時計回りを見てください。散乱強度の逆フーリエ変換は2体相関関数 $\Gamma(r)$ です。結晶学ではパターンソン関数といいます。2体相関関数は原子配置関数の畳み込みです。

$$\Gamma(\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r}) * \rho(-\mathbf{r}) = \int \rho(\mathbf{r}') \rho(\mathbf{r}' + \mathbf{r}) d\mathbf{r}' \quad (15)$$

これはもとの揺らぎの像と「距離 r だけずらした像」の積、つまり重なるの程度を全方位、全空間にわたり足し合わせたものです。この積分値は「距離 r 離れた2点間にどれだけ密度の揺らぎがあるか」という相関の強さを示しています。 $r=0$ （ずれゼロ）のときは同一の像が重なるため重なり積分は最大値をとります。 r が小さい近距離では、まだ大部分が重なっています。 r が大きい遠距離では重なりがなくなれば、積分値は最低値になります。相関関数の減衰の仕方から「重なりが消える距離」つまり「相関長」が評価できるわけです。まとめれば「畳み込み」という演算は「お隣さんとの関係」を明示するものであり、実空間の絶対座標から原子間の相対座標へ変換と言ってもいいかもしれません。散乱実験は波動の二乗を観測するという理由で図7の反時計回りのパスが必ず存在する、つまり「畳み込み」を経由するわけです。異方性と相関長といった揺らぎの観測は小角散乱が最も活躍する場面です。ですから、小角散乱の2次元検出機は原点 $q=0$ の周りに対称かつ途切れなく配置するべきです。これから装置建設する際のアドバイスです。

TOF 型小角散乱は「より完璧な2次元コンパイラ」

小角散乱は投影切断面定理のもとで構造情報を2

次元 x - y 面に押しつぶす演算装置でした。J-PARC のパルス中性子で実施する飛行時間型中性子小角散乱（TOF 型小角散乱）はさらに完璧な「2次元コンパイラ」です。（一方、TOF 型粉末回折装置は x - y 方向を押しつぶす装置です）。そして J-PARC 加速器では波長スキャンで2次元画面を波数 q をずらしながら積み重ねます。北斎の版画のごときです。波数 q は $q = (4\pi/\lambda) \sin \theta$ と定義されます。

原子炉型小角散乱はモノクロメータで波長 λ を固定して散乱角 θ （つまり検出器位置）を変えながら波数 q を振ります。一方で TOF 型小角散乱は散乱角 θ を小さく固定して、先の投影切断面定理を保ちながら波数 q を振る。もちろん波長が変わればエワルト球の半径（曲率）が変わります。

西洋の油絵は絵の具をオイルに溶かしてキャンバスの上に立体的に積み重ねながら光の反射をふんだんに使いながら描きます。一方で木版画は乾いた感触の岩絵の具の色を和紙の上に重ねていきます。特に木版画では「馬連による圧着」という物理プロセスによってキャンバスの上の Z 軸（厚み）の情報を完全にゼロに押しつぶします。彫師が版木の隅に正確に彫り込んだ「見当」と呼ばれるマーク）を手掛かりに摺師は和紙の端を色の異なる版木にピタッと合わせ十数回も異なる色の版を重ねていきます。これらの結果、網膜へのテカリ（正反射）を消去し、2次元の XY 平面上の輪郭（高周波エッジ）と色彩の積み重ねの前後関係だけで風景を描いています。

北斎が手掛けた木版画という画法は TOF 型小角散乱と似ているように思えます。つまり版画は、「TOF 型小角散乱の逆変換システム」ではないでしょうか。TOF 型小角散乱は「3次元の構造」から「波長スキャ

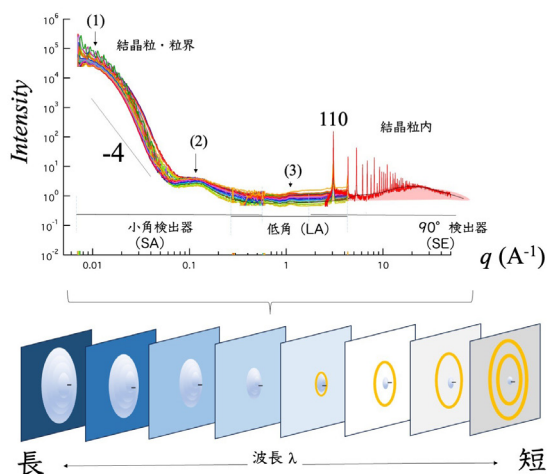


図12 パルス中性子線による散乱実験（鉄鋼材料）は北斎の版画と同様に多色刷りの重ね合わせである。[9]

ンでZ軸を潰した2次元の配置データを重ねる」プロセスです。図12にこのイメージを図示してみました。波長スキャンで波数違いの逆空間像を積み上げます。版画は「実空間の2次元の配置データ(版画)」を人間の脳に入力することで、脳の中で「波長スキャン(色彩の分離)」と「エッジ抽出(一次微分)」を逆再生させ、失われたZ軸(奥行き)を悟性の力で認識させるプロセスと見なすことができるように思います。

ジャポニズムという認知哲学

19世紀後半(1860年代以降)、葛飾北斎をはじめとする浮世絵や日本の美術工芸品がヨーロッパに流れ込み、西洋絵画の根底にあった遠近法による空間認知を根底から揺さぶり、爆発的な視覚革命を引き起こしました。これをジャポニズム(Japonisme)と呼びます。

19世紀後半、この西洋の遠近法を機械的に実行する写真カメラが登場したことで、西洋の画家たちは「XYZ空間をただ正確に模写することに何の意味があるのか」という想いにぶつかりました。西洋が400年間盲信してきた「線遠近法」に対する迷い(中性子科学でも、仮に中性子顕微鏡が登場したら散乱・回折の流派に激震が走るでしょう)。

この最中にヨーロッパへ流れ込んだのが、北斎らの浮世絵でした。セザンヌ、ゴッホ、モネ、ドガ、ローレックらは、浮世絵が持つ「3次元の厚みや陰影を徹底的に引き算したフラット(平面)なXY面の配置の美学」を見て衝撃を受けた。ジャポニズムが提示したのは「奥行きの1次元」の新しい捉え方です。ジャポニズムによって西洋の線遠近法の呪縛が破られた結果、20世紀に登場したのがパブロ・ピカソの「キュビズム(多視点の幾何学、立体主義)」です。ピカソはキュビズムは、マルチアングルによる多視点観察による「3次元空間(XYZ)の解体」、そして「2次元平面(XY面)への同時描写」と言えます。

新しい試み、全方位走査

人間がオブジェクト(リンゴや人物)を観察するとき、正面から見ただけでなく、横に回り込み、上から覗き込み、後ろ姿を記憶します。立体小角散乱はこれを逆空間で実施しました。ピカソは、この「正面から見た目」「横から見た鼻」「後ろから見た輪郭」という、異なる方角の2次元データを1枚のXY平面の上に同時に重ね書きしました。これは3次元空間を2次元に投影するとき「手前のものが奥のものを隠す(オクルージョン)」という物理的制約への挑戦と言えます。



図13 ピカソは感性と悟性の力で人物を透視した。ピカソが中性子線の透視画を見ていたら、キュビズムを超える表現が生まれていたかも知れない。

す。キュビズムは透視という目線で、重なりを破壊しようとした。物体の「表」と「裏」をバラバラの破片(フラグメント)に分解しキャンバスの上に並列に配置(分離・解像)したわけです。

中性子科学における透視画法

図13中央にコンクリートの中性子ラジオグラフィーを示しました。内部は表から裏にかけて透けて見えます。その左横にピカソの作品が2つあります(上は正面からの写実的人物像、下は多視点観察をもとにいろいろな方角の視野を重ね描きしたキュビズムの人物像)。中性子ラジオグラフィー(中央)は奥行き、裏表の全てを重ね描いてオクルージョンの制約を超えて可視化しています。可視光でコンクリートの表面を捉える(上下)のは、写実的な人物像(図13左上)と同じです。全方位の画像をCT画像化すれば立体像が得られます(右上)。これらは全て、iMATERIA装置の中性子カメラによる撮影です。

オクルージョンの解体の先に「見える、見えた」

オクルージョン(occlusion)とは手前にある物体が後ろにある物体を隠し、視界を「遮蔽(しゃへい)」する現象のことです。写実性とはオクルージョンを忠実に描くことです。はじめに中性子小角散乱でたびたび話題になるオクルージョンについて述べます。タイヤのゴムを例にしてみれば、非干渉性散乱、フィラーの散乱のオクルージョンを消し去れば、架橋構造が見える、さらに動的不均一性が見える。このためにスピンの自由度の活用できることを波紋記事[11]に書き

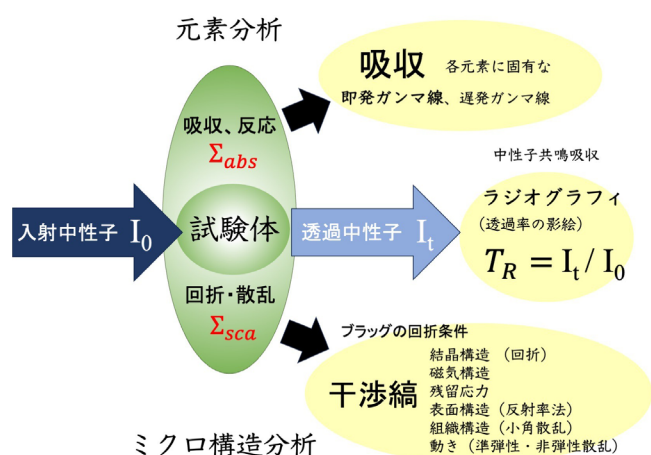


図 14 白色パルス中性子線と物質の多様な相互作用。一粒の中性子は多彩な色(2次放射線)を発する魔法の絵の具だ。

ました。しかし重水素化コントラストマッチは万能に在らず、コントラストマッチで微粒子は消えない！コントラストマッチのために導入した H 体と D 体の混合物は新しい濃度揺らぎを生み出して、しかし微粒子の位置から排除されます。この状況は濃度揺らぎの散乱 ($I_{\text{揺らぎ}}$) と微粒子の散乱 ($I_{\text{微粒子}}$) の畳み込み ($I_{\text{揺らぎ}} * I_{\text{微粒子}}$) として観測されます。この散乱はマッチングポイントで生き残り微粒子は消えません(詳細は別に述べます)。

話を一般に戻します。オクルージョンは光の透過性、物質感度(断面積)の問題です。光の種類、中性子と可視光では状況が大きく異なるでしょう。しかし物質内を進むときの両者の振る舞いは、実部と虚部からなる「複素屈折率 n 」という共通な指標で記述されます。複素屈折率の実部 δ は図 14 の散乱・屈折(波の位相変化)を、虚部 β は図 14 の吸収を記述します。

$$n = 1 - \frac{\lambda^2}{2\pi} Nb \quad (16)$$

式(16)の b は散乱長で複素数で与えられます。その結果、複素屈折率は $n = 1 - \delta - i\beta$ の形になります。

図 14 は中性子線と物質の多様な相互作用を示しました。図 14 の矢印は確率流密度の保存則、連続の式に従います。入射と透過の中性子束の比率、すなわち透過率は線吸収過程のランベルトベールの式に従います。吸収係数は中性子の場合断面積で表します。

共鳴吸収は、中性子のエネルギーが原子核の「励起エネルギー」とぴったり一致したときに起きます。複合核形成、共鳴、即発ガンマ線に発生と続きます。共鳴近傍での吸収断面積 σ_{abs} は有名なブライット・ウィグナー(Breit-Wigner)の公式で与えられます。

中性子捕獲に伴って放出されるガンマ線には、発生するタイミングと物理的メカニズムの違いによって「即発」と「遅発」の2種類があります。中性子が原子核に吸い込まれた「複合核」になった直後(約 10^{-14} 秒以内)に余分なエネルギー(結合エネルギー)をすぐに捨てるために放出されるのが即発ガンマ線(Prompt Gamma-ray)です。エネルギーが非常に高い(最大 10 MeV 程度)元素ごとに固有の鋭いスペクトルを持つため、即発ガンマ線分析(PGA)として、ホウ素や水素などの非破壊分析に利用されます。一方で、吸い込まれた後に励起した原子核自体が緩和して起きるのが遅発ガンマ線(Delayed Gamma-ray)です。エネルギーは即発よりは低め(一般に数 "MeV" 以下)で数ミリ秒～数年後(親核種の半減期に依存)放出されるので放射化分析(NAA)として利用されます。

パルス中性子線ビームラインにおける三者一体マルチモーダル観測装置 [8,10,11]

茨城大学は茨城県委託事業 先端研究として、散乱・回折装置 iMATERIA (BL20) に中性子カメラを設置しました(測定結果は図 13)。J-PARC では白色のパルス中性子線がサンプルを透過するので、構成元素の共鳴吸収条件を満たすと即発ガンマ線が発生します。これを検出するゲルマニウム検出器の設置することを先端研究として進めてきました。また、このような散乱回折、イメージング、元素分析を同時にまかなえる三者一体の観測装置を背景にした「産業利用エントランス構想」を提案しました(R7 年度 7 月 中性子産業利用報告会、秋葉原)。白色のパルス中性子線がサンプルを通過する限り即発ガンマ線が必ず発生します。ですから装置の下流に第 2 照射ポートを設けてもいい(中性子有効利用の経済学)。第 2 照射ポートを実現するには茨城大学が設計、制作した「穴あき 2 次元検出機」[14]が必須です。

中性子線で見えるためには？

カントのいう感性と悟性の結果、また眼と脳の機能の結果、私たちは常々 3 次元の実空間認識しているわけですが。小角散乱による見方も、この人の日常の感覚にかなわなければ納得が得られないということでしょうか。ですから私たちもアウトプットは実空間のイラストを目指します。「見える」ためにはビームラインが必要です。中性子線の場合は市販の装置がありません。また線源を保有する機会は国内の拠点に限られます。しかるに観測装置を開発、建設、運転維持する科学者は、中性子科学の代表的な立場にあると言ってい

いでしょう。その貴重なポジションを得たものがどのような活動を行うのか、日本の中性子科学の発展（中性子ジャポニズム）は、この1点に託されていると考えます。また「中性子だけが見ることが出来るもの」を厳選することに注力することも必須でしょう。そのためには他の顕微法との対比、実空間と逆空間の相互交流が重要です。このような観点から日本顕微鏡学会にて研究部会を立ち上げました（パルス中性子線による顕微法開発）。協議会の既存研究会との共催で研究会や講演会活動を行っていきたいと考えます。

終わりに

北斎は絵描き入門書「略画早指南」で「あらゆる自然の形は円と直線に還元できる」と説いています。フーリエ級数展開、ポロド則などのパワーローやフラクタルリミットは基本図形の情報です。手塚治虫は北斎の継承者とも言われますが、中性子科学も北斎に共感するところでもあります。本稿の一部は2026年5月27日に「メニコン×東北大学 みる未来のための共創研究所」（東北大学片平キャンパス）で講演させていただいた内容です。伊藤恵利先生には貴重な機会をいただきましたことをここに感謝申し上げます。締切に追われて五月雨に思いつきで執筆しました故、勘違い、理解不足の点が多々あるかと思ひます。ご指摘の修正、訂正は現在準備中の専門書にて行うこととご了解ください。

文献

- 1) 「方法序説」デカルト著（谷川多佳子訳）（岩波文庫）
- 2) シリーズ世界の思想「カント 純粹理性批判」御子柴善之著（角川選書）
- 3) 現代では先端計測器がコヒーレント領域（時空間）での「焦点」からのシグナルが感性の補助している。本稿ではそれは中性子小角散乱である。また新しい試みとして主成分分析（PCA）は悟性を補う。PCAは分光データを特徴づける本質的な次元（PC1, PC2）だけを引き算・抽出するケモメトリクスの主流ツールです。
- 4) このような西洋と東洋の「物の見方」に対するせめぎ合い（交流試合）は、後に1900年初頭に再び繰り返されることとなります。ブラッグ父子の結晶学（回折条件）に対して、寺田寅彦の研究（綿、麻などの回折パターン）。この結晶学ジャポニズムの始まりは国内の小角散乱の文化を産み出した。

- 5) Koizumi, S.; Ueda, S.; Nishikawa, Y.; Terao, T. and Kubo, N. New attempt to combine scanning electron microscopy and small-angle scattering in reciprocal space. *J. Appl. Cryst.* **2019**, 52, 783–790.
- 6) 材料分析データ解析クラウドサービス“WAVEBASE” 矢野正雄, 山口剛生、青木亮、井出一人, 池田英恵, 外山泰弘, 村井祐介, 小野寛太, 庄司哲也, トヨタテクニカルレビュー、2023/9 Vol.69 No.1, pp48.
- 7) 「特集 量子ビーム技術連携による材料組織解析を目指して」 金属 Vol.96 No.5 (2026).
- 8) 「中性子産業利用の現状と提案 - 飛行時間型小角散乱とその周辺から -」 小泉 智 日本中性子科学会「波紋」Vol.33, No.3, pp.98-106 (2023); “Practical Neutron Detection Modalities for Industrial Use Available at a Time-of-Flight Small-Angle Scattering Instrument.” *Satoshi Koizumi and Kazuki Mita, *J. Appl. Cryst.* (2025) 58, DOI: 10.1107/S1600576725004479
- 9) 「鉄構・プラスチック加工のための中性子非破壊検査I - 茨城県内の企業の話題から -」 小泉 智 他, 日本中性子科学会「波紋」Vol. 33, No.3, pp. 89-96 (2024)
- 10) 「産業利用のための第3期ビーム運営における中性子多様・多点計測、そして自動解析」 小泉 智 他, 日本中性子科学会「波紋」(2025).
- 11) 「中性子小角散乱は素晴らしい産業用分析ツール - スピンの自由度でさらに深く掘り下げよう! -」 小泉 智 日本中性子科学会「波紋」(2026)
- 12) Koizumi, S. and Suzuki, J. (2006) *J. Appl. Cryst.*, 39, 878–888
- 13) Kume T., Hattori T., Hashimoto T.: *Macromolecules*, **30**, 427 (1997)（久米卓司(花王) 博士論文）.
- 14) Yohei Noda, Hideki Izunome, Tomoki Maeda, Takumi Inada, Satoru Ueda and Satoshi Koizumi” , *Quantum Beam Sci.* 2020, 4, 32; doi:10.3390/qubs4040032

2025 年度量子ビームサイエンスフェスタ開催報告

量子ビームサイエンスフェスタ
実行委員長 梅垣 いづみ
副実行委員長 大東 琢治

2026年3月11、12、13日にKEK物質構造科学研究所、J-PARCセンター、総合科学研究機構(CROSS)、PFユーザーアソシエーション(PF-UA)、J-PARC MLF利用者懇談会が主催する量子ビームサイエンスフェスタ(QBSF)を開催しました。今回も前年を踏襲し対面開催を尊重し、607名(うち学生は116名)の方に参加登録頂きました。毎年、開催地をつくばと水戸を交互に変え、今回は水戸にある水戸市民会館での2回目の開催となりました。開催期間中やその後日にはサテライト研究会が開催され、液体・非晶質研究会と第2回MLFロードマップ ワークショップが開催されました。

水戸開催でのQBSFは、初日にPFシンポジウムが行われ、最終日にMLFシンポジウム、中日はQBSFという構成になっています。ユーザー及び施設による271件のポスター発表が行われ、そのうち63名の学生の学生奨励賞への応募がありました。6名の学生に学生奨励賞が授与され、授賞式は150名を超える参加者の懇親会の中で行われました。3会場で平行での口頭発表では、「無機材料」「有機材料」「磁性・強相関」「生命科学」「イメージング」「基礎物理」の6つのセッションで3件ずつ講演をいただきました。最終日のMLFシンポジウムは、例年になくMLFでのサイエンスや成果に注目したプログラムでした。昼食休憩後、午後のセッ

ションの前に行われたMLF利用者懇談会の総会と要望・アンケート報告では、MLF利用者懇談会が施設とユーザーの間の架け橋となる活動のおかげで、施設への理解が深まり、要望が実現されていることがよくわかりました。

会期の翌日はサテライト会議として第2回MLFロードマップワークショップが開催され、こちらも多くの方にご参加いただきました。ターゲットステーション2(TS2)での研究展望に加え、TS1の高度化、施設設備への要望など分野で分かれてグループ討議しました。

今回11回目を迎えたQBSFは、施設スタッフとユーザーの情報交換の場であるだけではなく、異なるブローブや分野の研究者間の交流を通じて新たな研究の発展に繋げる場として開催されてきました。今回も皆様の新たなきっかけとなっておりましたら幸いです。お忙しい中ご参加いただいた皆様、並びに開催にあたりご協力賜りました関係各位に、心より感謝いたします。

QBSF2025の会の様子は物質構造科学研究所のホームページ(*1)やKEKトピックス(*2)もぜひご覧ください。

*1)<https://www2.kek.jp/imss/news/2026/topics/0311-13qbsf2025/>

*2)<https://www.kek.jp/ja/topics/202604031700>

【開催報告】有機・高分子材料研究会／放射光・中性子連携利用研究会 合同シンポジウム

2026年5月18日、新橋ビジネスフォーラムおよびオンラインのハイブリッド形式にて、合同シンポジウム「中性子・放射光と計算科学の融合が拓く次世代材料解析」が開催されました。産学官から91名もの参加がありました。皆様に心より御礼申し上げます。

本シンポジウムでは、量子ビーム利用と計算科学の融合をテーマにプログラムを展開しました。中でも岡

田真人氏(東京大学)による特別講演「AI for Science/データ駆動科学が拓く次世代材料解析」は非常に注目度が高く、続く6件の講演でもベイズ推定やアルゴリズム開発に関する最新の知見が共有されました。

総合討論では活発な議論が交わされ、データ駆動型研究への期待と熱意の高さを実感する大変有意義な機会となりました。

施設からのお知らせ

◆ J-PARC MLF

2026B期の一般利用課題について、3月17日～4月7日に「優先」、4月17日～5月8日に「短期、1年」、4月17日～6月12日に「産業利用促進」の公募を実施しました。

各公募の総申請数は372件(中性子326件、ミュオン46件)、このうち企業からの申請は26件でした。課題審査の結果は9月頃通知されます。

一般利用課題申請書の書き方講座をMLFホームページで公開しました。

MLF課題申請の概要、審査基準、および採択に近づく申請書作成の留意点を解説する動画(約30分)を公開しています。ぜひご参照ください。

<https://mlfinfo.jp/ja/user/proposals/tips.html>

◆ JRR-3

6月8日より2026年度の施設供用運転を開始いたしました。2026年度は12月まで6サイクルの運転を実施する予定です。

2026年度の施設供用運転終了後は、高経年化した設備の更新工事等を予定しており、2027年度の施設

供用運転開始は12月を予定しております。なお、2027年度の詳細な運転スケジュールは2027年1月末頃に決定する予定です。利用者の皆様にはご不便をおかけいたしますが、ご理解の程よろしくお願い申し上げます。

運転状況はじめ関連情報等は、JRR-3 ユーザーズオフィスのホームページをご参照下さい。

<https://jrr3uo.jaea.go.jp/index.htm>

◆ 茨城県ビームライン

産業利用課題を常時公募しております。

希望する実験時期の公募スケジュールをご確認いただき(希望する実験時期により締め切りが異なります)、募集要項をお読みの上、ご応募ください。

直近は令和8年度第4回募集(11、12月に実験実施予定)で締切は令和8年9月15日(火)12:00です。

詳細は茨城県ビームラインのウェブサイト
https://www.pref.ibaraki.jp/sangyo/kagaku/tyusei/procedure_industrial_use.html

をご覧ください。

今後の行事予定

日時	会議名	場所	その他
7月6日～9日	MLZ Conference 2026: Neutrons for Future Health	Munich (Germany)	https://indico.frm2.tum.de/event/601/page/517-venue
7月16日	令和8年度中性子産業利用推進協議会総会	秋葉原コンベンションホール(東京)	
7月16日～17日	令和8年度中性子産業利用報告会	秋葉原コンベンションホール(東京)	
7月12日～16日	2026 American Conference on Neutron Scattering (ACNS2026)	Detroit (USA)	https://ceramics.org/event/american-conference-on-neutron-scattering-2026-acns-2026/
7月20日～23日	SXNS18	Chicago (USA)	
9月21日～25日	Photons and Neutrons Realistic Artificial Intelligence Datasets (PaNRAID)	CNRS CAES Village (France)	https://formation.pepr-iadem.fr/formation-panraid
8月11日～18日	IUCr2026	Calgary (Canada)	https://www.iucr2026.org/
8月19日～20日	中性子イメージング研究会	航空会館ビジネスフォーラム(20日はハイブリッド)	
8月31日～9月4日	XVI Polarized Neutrons for Condensed Matter Investigations Conference (PNCMI 2026)	Zaragoza (Spain)	https://pncmi2026.csic.es/
9月18日	第3回MLFロードマップワークショップ	早稲田大学西早稲田キャンパス	
10月6日～9日	Polysolvat-16	Tutzing (Germany)	
10月8日～10日	German Conference on Research with Synchrotron Radiation, Neutrons, Ions and Accelerators at Large-Scale Facilities (SNIB2026)	Hamburg (Germany)	https://indico.desy.de/event/51551/overview
10月12日～16日	10th International Topical Meeting on Neutron Radiography (ITMNR-10)	Annecy (France)	https://workshops.ill.fr/event/555/overview
10月13日～15日	3rd INTERNATIONAL MEETING ON CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR HiCANS (High Current Accelerator-driven Neutron Sources) (IMoH 2026)	Leioa (Spain)	https://www.imoh.eu/
11月16日～18日	SKADI Early Science Workshop	ESS (Lund, Sweden)	https://indico.ess.eu/event/3938/
2027年6月27日～7月1日	European Conference on Neutron Scattering (ECNS2027)	Grenoble (France)	

◆リンクのご案内

中性子・ミュオン利用ポータルサイト J-JOIN : <https://j-join.cross.or.jp/>
J-PARC : <https://j-parc.jp/c/index.html>
J-PARAC MLF (Meet @ MLF) : <https://mlfinfo.jp/ja/>
J-PARAC MLF (Meet @ MLF)パンフレット : <https://mlfinfo.jp/ja/reports/published.html>
J-PARC センター ユーザーズ オフィス : <https://is.j-parc.jp/uo/ja/index.html>
茨城県中性子ビームライン : <https://www.pref.ibaraki.jp/sangyo/kagaku/tyusei/bl-top.html>
J-PARC MLF 成果検索 : <https://mlfinfo.jp/ja/publications.html>

JRR-3 : <https://jrr3.jaea.go.jp/>
JRR-3 Twitter : https://twitter.com/JAEA_JRR3
JRR-3 ユーザーズ オフィス : <https://jrr3uo.jaea.go.jp/>
(一財)総合科学研究機構(CROSS) 中性子科学センター : <https://neutron.cross.or.jp/ja/>
J-PARC MLF 利用者懇談会 : <https://is.j-parc.jp/MLFuser/>
いばらき量子線利活用協議会 : <https://www.ibaraki-quantum.com/>

日本中性子科学会 : <https://www.jsns.net/>
日本中性子科学会「国内の中性子実験施設」 : <https://www.jsns.net/facilities/>
日本中間子科学会 : <http://jmeson.org/>

季報「四季」編集委員会

委員長 三田 一樹(CROSS)

委員 佐野 亜沙美(J-PARC)、山崎 大(J-PARC)、水沢 多鶴子(CROSS)、
小島 優子(三菱ケミカル)、村田 尚義(富士電機)

事務局 小室 又洋、渡邊 克朗、綿引 美知枝(中性子産業利用推進協議会)

※「四季」のバックナンバーは下記のサイトでご覧いただくことができます : <https://j-neutron.com/siki.html>

中性子産業利用推進協議会(IUSNA) 季報「四季」【26年・夏】Vol.71

発行日 2026年7月25日

発行元 中性子産業利用推進協議会

〒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 D201

TEL:029-352-3934 FAX:029-352-3935 E-mail:info@j-neutron.com

<https://j-neutron.com/> (2022年2月1日よりURLを変更しました)

本誌掲載物の著作権は著者が保有します。本誌の複写、転載等に際しては著者の許可が必要です。