

集光型中性子超小角散乱装置の開発とセルロース生産バクテリアのその場観察への挑戦

Development of focusing ultra-small-angle neutron scattering apparatus and a challenge to in-situ observations of acetobacter xylinum

橋本 竹治 強相関超分子研究グループ

Takeji Hashimoto Research Group for Strongly Correlated Supramolecules



- ・ソフトマターが内蔵する階層構造のその場観察を可能にする集光型中性子超小角散乱装置を開発しました。
- ・その応用例として、セルロース生産菌（酢酸菌）の0.1 nm-10 μmにわたる階層構造の横断的観察に挑戦し、本方法を用いた新しい研究展開が可能であることを示しました。
- ・ We have developed a focusing ultra-small-angle neutron scattering spectrometer which enables to conduct in-situ observations of hierarchical structures in soft matters and biological systems.
- ・ We have demonstrated some perspectives of the method for elucidation of the hierarchical structures of acetobacter xylinum over a wide length scale from 0.1 nm to 10 μm.

概要

細胞等生体系をも含む広義のソフトマターが内蔵する0.1 nmから10 μmにわたる階層構造を、横断的にその場観察を可能にする集光型中性子超小角散乱装置の開発、その応用例として酢酸菌の階層構造のその場観察結果を報告します。

本研究は強相関超分子研究グループ（小泉智、岩瀬裕希、元川竜平、田中宏和、山口大輔）日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門中性子光学研究グループ（鈴木淳市、奥高之、笹尾一、清水裕彦（現KEK））及び九州大学バイオアーキテクチャーセンター（近藤哲男、富田陽子）との共同研究として行われました。

本成果の一部は、日本中性子科学会誌「波紋」17, 19-28 (2007) 及び国際結晶学会誌 J. Appl. Cryst. 40,

1. 研究の背景

s474-s479 (2007) に掲載されました。

分子間に働く相互作用の変化が、分子間距離より遥かに大きな距離にわたり分子相互の並びや向きに影響を及ぼしたり、分子集合体の形成や消滅をもたらしたりする場合があります。このような状況下にあ

る系を、我々は強相関超分子系と呼んでいます。例えば高分子ブロック共重合体における分子集合構造がその好例として挙げられます [1, 2] ソフトマター（用語1参照）の性質や機能、生体の生命活動の理解のためには、個々の分子の特性のみならずこの強相関超分子系における分子集合体の特性を知ることが重要です。分子集合体の特性とは、外部からの様々な刺激に対する応答と運動についての特性です。その中味は分子集合体が形成する過程、消滅する過程、形や大きさを変える過程、並進・回転・振動運動をする過程の特徴です（図1）。多くの場合分子集

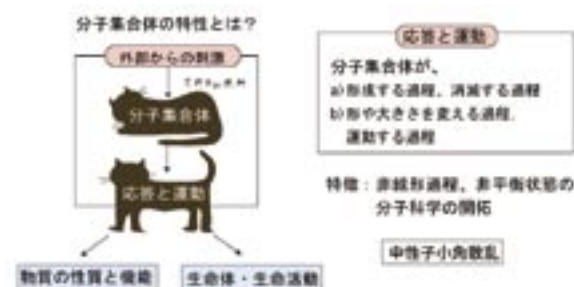


図1 分子集合体の力学（ソフトマター物質科学と生命科学の橋渡し）の基礎原理

Fig.1 Principles of mechanics of molecular self-assembly which bridges between soft-matter physical science and life science.

合体は階層構造(用語2参照)を有し、それを構成する各階層の構造要素は互いに相関し協同運動するものと考えられます。我々はこの相関・協同運動を生体系における情報伝達の基礎、ソフトマター物質科学と生命科学との橋渡し(物質・生命科学)の鍵と考えました。また、この解明こそが分子集合体の力学の

2. 研究の経緯

開拓に連なると考えています。

従来、階層構造に着目した研究例は少数です。その数少ない研究は階層構造の中の一つの構造要素に着目した研究に限られる場合が多く、小さな構造要素から大きな構造要素に至るまで階層構造全体についての統一的な研究(階層横断的研究)や、異なる階層構造要素間に働く相互作用の研究は皆無に等しい状態でした。その原因は、階層横断的研究をするための方法が未発達であるためと考えられます。我々はこの階層横断的研究の有効な研究手法として集光型中性子超小角散乱装置の開発を目指しました。

我々のグループでは、(1)ソフトマター物質科学に重点をおいた研究と、(2)ソフトマター物質科学と生命科学との橋渡しを念頭に置いた研究とを並行して推進しています。(2)の研究については、階層構造を持った組織体の一つである細胞や、細胞を構成する生体高分子の分子集合体の「分子細胞生物学」に立脚した研究を実施しています。(1)の研究については、生体の三要素、組織(階層構造)・遺伝情報・生化学反応[3]の中の一要素である生化学反応に着目して、「高分子合成反応と反応に誘起された高分子の自己組織化」の研究に重点をおいた研究をしています。上記集光型中性子超小角散乱装置は、(1)(2)のいずれの研究にも適用できるものです。(2)の研究については今回酢酸菌という生きた細胞の中性子散乱実験を実施し、中性子散乱が分子細胞生物学に寄与することが出来る

3. 研究の内容

か否かの糸口を見つけたいと思いました。

1. 集光型中性子超小角散乱装置の開発

我々は生物の最小の単位である細胞のサイズ(1~10 μm)を意識して、JRR-3原子炉に既存のピンホール型小角散乱装置(SANS-J)の整備改良に着手しました。2003年から3カ年を要して、集光型超小角散乱装

置SANS-Jへの改造を完了しました。この装置単独で散乱ベクトル q (用語3参照)の大きさ q で20~0.003 nm⁻¹を、実空間スケールで0.3 nm~2 μmの4桁をカバーすることに成功しました。この観測スケールの広さは単色化した中性子散乱ビームを用いる装置としては、世界レベルでも画期的に秀でたものであり、国際会議での招待講演の栄に浴しました[4,5]

本装置では、中性子ビーム(I)を試料に照射し、試料で散乱された中性子散乱波の検出器面(D)上の位置分布から試料の構造を調べます。分解能を上げるため、中性子ビームを集光させるための集光レンズ(F)(用語4参照)と、ビーム近傍(C)に散乱される散乱波の位置と強度を精度良く決めるための2次元フォトマルチプライヤー(P)を設けています(図2a,c)

中性子集光レンズとしては、6極型永久磁石磁気レンズ[6]と両面凹面物質レンズ(図2a, F及び図2b参照)の2種類を搭載し、各々を必要に応じて入射ビーム側に設置したT-型コリメータ(T-Shape Collimator)内で遠隔操作により、出し入れできるように工夫し

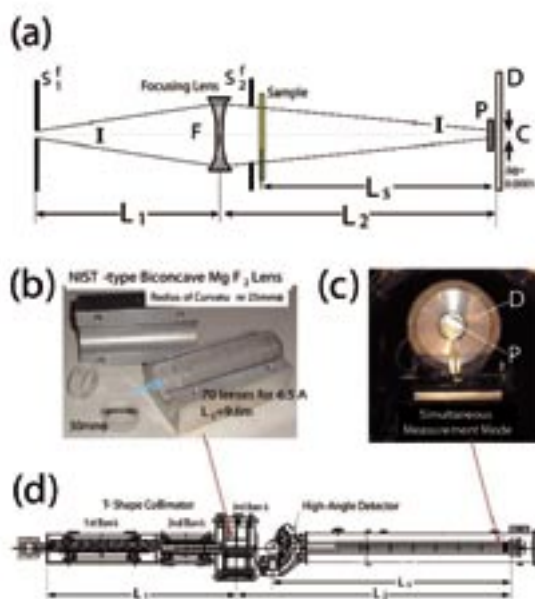


図2 (a)集光型超小角散乱装置光学系の模式図、(b) NIST-タイプ両面凹面物質(MgF₂)レンズ、(c)(入射ビーム進行方向に沿って見た)2次元検出器Dと中心ビーム近傍で出し入れ可能な高分解能2次元検出器P、(d)集光型超小角散乱装置

Fig.2 (a) Schematic illustration of the focusing optics of ultra-small angle neutron scattering (USANS) apparatus, (b) NIST-type biconcave MgF₂ lens, (c) Area detector D and high-resolution area detector P; P can be set in and out from the area covered by two dimensional detector D. The detectors D and P are viewed along the propagation direction of the incident beam, (d) Focusing ultra-small angle neutron scattering spectrometer SANS-J-II equipped with MgF₂ lens and magnetic lens.

ました(図2d参照)。更にこれと連動して、2次元フォトマルチプライヤー(P)を遠隔操作で出し入れできるように工夫しました。

これら遠隔操作の工夫により、(1)物質レンズFとPをビームラインに導入した超小角散乱測定(100nm ~ 2 μm の構造決定)、(2)磁気レンズとPを導入した超小角散乱測定(100nm ~ 2 μm の構造決定)のみならず、(3)物質レンズ、磁気レンズ及びPをビームラインから取り外した従来の小角散乱(SANS-Jの性能を持った)測定(3nm ~ 100nmの構造決定)を、一つの装置で使い分けることが可能となりました。さらに三つの光学系の持つ各々の長所を最大限に引き出し、それらを選択して協調的に利用することが可能となりました。これらは高価な中性子ビームを極限的に効率よく利用することにより、学術文化の発展に還元させたいという強い願望に端を発するものでした。

本装置より、より高い波数分解能が必要な時には既設の2結晶Bonse-Hart型超小角散乱装置(用語5参照)(PNO)を用いることにより約0.3 ~ 30 μm の構造、より低い波数分解能が必要な時にはSANS-Jに既設した高角度検出器(High-Angle Detector 図2d)により、約0.4 ~ 3nmの構造のキャラクタリゼーションが可能となりました。

2. 生きた細胞のその場観察

ここではセルロース生産バクテリア(酢酸菌)の階層横断的構造解析への応用について紹介します[7]。この応用は世界でも初めての試みです。酢酸菌は断面直径約1 μm 、長軸長さ約5 ~ 10 μm の円筒状の原核生物であり(図3a)、グルコースを原料としてセルロースを合成するという興味深い機能を持ちます[8]。酢

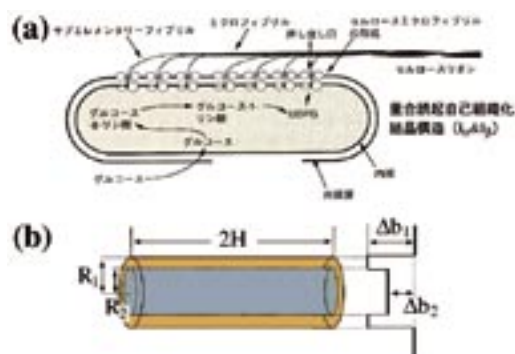


図3 (a) 酢酸菌の模式図と(b) 酢酸菌の単純化した二重円筒モデル及びその重水溶媒に対する相対散乱長密度分布、 b_1 (膜) b_2 (細胞質)

Fig.3 (a) Schematic illustration of acetobacter xylinum with the terminal complex of enzymes which create cellulose filaments and ribbons and (b) a simplified coaxial cylinder model for acetobacter xylinum having a relative scattering length density profile with respect to deuterated water as a solvent across the cylinder: b_1 for the membrane and b_2 for cytoplasm.

酸菌は菌体表面に直線上に配列するセルロース合成酵素複合体(ターミナルコンプレックス=押し出し口)でセルロースを合成しかつセルロース繊維(サブエレメンタリーフィブリル)を噴出します。セルロースは水に不溶であるため、隣り合う押し出し口から噴出したセルロース分子は即時に会合し、やがて結晶化し、セルロースリボンを形成します。この菌体の代謝生成物としてのセルロースリボンの形成は、ソフトマター物質科学の視点に立てば、「ターミナルコンプレックスという特異な反応場での高分子合成反応(酵素重合反応)と反応に誘起された反応生成物(セルロース分子)の自己組織化」という非平衡状態の分子科学の問題と解釈できます(図1)。まさに[研究の経緯]の項で述べた(1)の研究テーマの一つに他なりません。本研究について、このノートではこれ以上論じませんが、目下積極的に研究を展開しているところです。

ここでは生きた酢酸菌そのものの階層構造についての研究を紹介します。生きたままの菌の構造解析に成功すれば、菌が何らかの外的刺激を受けた時に、菌体の各階層構造要素の応答をその場で観察することが可能となり、細胞の刺激・応答の神秘に迫ることが可能となります。この可能性の実現は、分子細胞生物学に大きな波及効果をもたらすものと期待できます。さて、生きた酢酸菌の実験を実施するために以下の手順で試料を調整しました。グルコースを主成分とした Schramm-Hesrin (SH) 培地を軽水、重水の溶媒で作成しました。この時得られた酢酸菌を各々軽水酢酸菌、重水置換酢酸菌(用語6参照)と命名しました。この培地に培菌し、30 日のインキュベータ中で約10日間をかけてゆっくりとした振盪をしながら酢酸菌の培養を行いました。SH 培地にはセルラーゼ(セルロース分解酵素)を加え、培養中に生成されるセルロースを分解して取り除きました。このようにして得た培養液を濾過したのち遠心分離にかけペースト状の酢酸菌を得ました。これに重水を加えて試料溶液を調整した直後に、速やかに中性子超小角散乱実験を実施しました。

このようにして調整した酢酸菌(濃度0.25%)の中性子散乱強度分布を図4に示しました。またこの散乱強度分布から予想される酢酸菌の階層構造を模式的に図5に示しました。この強度分布は4桁の波数 q と9桁の強度にわたり、同一の試料の[小さな構造(数nm)を反映した]大きな波数 q のFourierモード($q=1\text{ nm}^{-1}$)から[大きな構造(数10 μm)を反映した]小さな波数 q のFourierモード($q=10^{-4}\text{ nm}^{-1}$)の強度スペクトルを示すものです。この広範なスペクトルの観測のために2台の散乱装置(PNOとSANS-J)及び

三つの光学系を駆使しました。即ちPNOが持つ2結晶型光学系並びにSANS-J- が持つ二つの光学系 [物質レンズを用いた集光型(超小角散乱)光学系とピンホール型(小角散乱)光学系]です。集光型光学系は、ピンホール型光学系と2結晶型光学系のつなぎ目に位置する貴重なものです。また2結晶型光学系は中性子散乱の最高波数分解能を実現し、光学顕微鏡などの実空間観測法とのつなぎとして重要です。

図4の赤データ点で示した散乱強度分布(赤曲線)は軽水酢酸菌の重水中での散乱を示し、青データ(青曲線)は重水置換酢酸菌の重水中での散乱を示します。二つの散乱強度曲線は2結晶型と集光型光学系がカバーする小さな波数領域で一致し、ピンホール光学系がカバーする大きな波数領域で相違します。このことは以下に示すように、菌体の構造を解析する上で大きなヒントを与えてくれます。この実験結

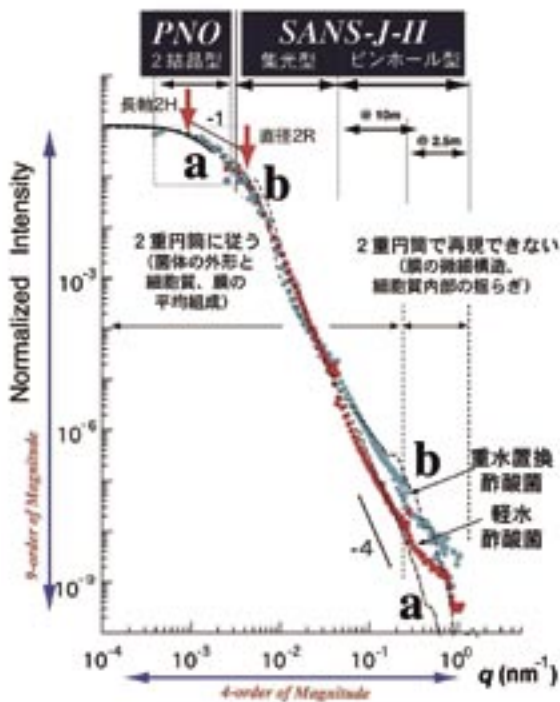


図4 軽水酢酸菌及び重水置換酢酸菌を重水中に分散させた試料からの散乱曲線(各々赤丸曲線、青丸曲線)。破線a及びbは各々赤丸及び青丸実験散乱曲線の二重円筒モデルによる最適フィッティング曲線。破線a,bは、実験曲線と比較するため、理論散乱曲線を各光学系のロッキングカーブにより“スミアー”したものです。ピンホール型光学系による散乱測定では、試料-検出器間距離を10mと2.5mとした二つの光学系を用いました。

Fig.4 Neutron scattering curves from the deuterated water solution of the acetobacter xylum cultivated in protonated and deuterated water, both of which were measured in deuterated water (concentration: 0.25wt%) and represented by red and blue circles, respectively. The broken lines a and b represent the best-fitted theoretical curves from the acetobacter xylum cultivated in protonated and deuterated water, respectively. In order to compare the experimental curves with the theoretical curves, the theoretical curves were smeared by using the rocking curve for each optical system used in this work.

果の意味を理解するために、次のような解析を行ってみました。図3aのイラストの膜と細胞質に着目し、複雑な菌体を単純な2重円筒で置き換えてみました(図3b)。すなわち膜と細胞質の内部に存在する局所構造を一様に塗りつぶし(平均化し)、溶媒である重水に対するそれらの相対平均散乱長が各々 b_1 , b_2 であるとします。膜がグラム陰性の細胞壁構造を持つことを基に、その平均散乱長 b_1 は計算から求めました。また電子顕微鏡像を参考にして長軸の長さ $2H = 10 \mu\text{m}$ 、また断面半径 $R_1 = 1 \mu\text{m}$ 、細胞壁厚み $R = R_1 - R_2 = 10 \text{nm}$ としました。 b_2 を計算から求めることは容易でないため、フィッティングパラメータとして、図4の実験結果と二重円筒モデルに基づいた理論散乱曲線との最適化を行いました。

上のモデルに従い赤曲線に最適化した理論散乱曲線が図4の波線aで、青曲線に最適化した理論散乱曲線が波線bです。 $q < 4 \times 10^2 \text{nm}^{-1}$ の小波数領域では、赤・青二つの実験曲線及びa,b二つの波線がほぼ一致します。このことから、この領域の散乱は、主として菌体の外形 (R_1 と $2H$) に依存することが分かりました

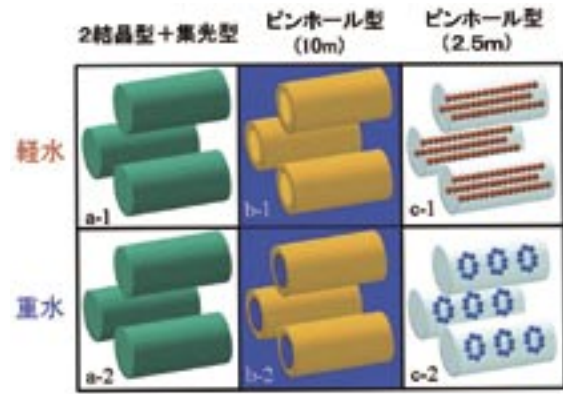


図5 2結晶型光学系及び集光型光学系を用いた超小角散乱装置、試料-検出器間距離を10m及び2.5mとしたピンホール型小角散乱装置により得られた酢酸菌の階層構造の模式図。2結晶型・集光型超小角散乱装置は菌体の外形 R_1 , $2H$ (a-1, a-2)に、10mピンホール型小角散乱装置は菌体の界面及び膜厚 $R_1 - R_2$ (b-1, b-2)に、2.5mピンホール型小角散乱装置は細胞質及び膜の内部構造(c-1, c-2)に関する情報を与えます。上段(a-1, b-1, c-1)は軽水酢酸菌、下段(a-2, b-2, c-2)は重水酢酸菌に対する模式図を示します。(c-1),(c-2)は細胞質内部の媒体を軽水及び重水とした時の中性子散乱が見る細胞質の内部構造(中性子散乱におけるコントラスト変調の効果)を模式的に示します。

Fig.5 Schematic illustration of the hierarchical structure of acetobacter xylum dispersed in deuterated water as observed by the Bonse-Hart type USANS apparatus plus the focusing type USANS apparatus (a-1, a-2) and by the pinhole type small-angle neutron scattering (SANS) apparatus having the detector-sample distance of 10 m (b-1, b-2) and 2.5 m (c-1, c-2). The parts (a-1), (b-1), and (c-1) illustrate the structures cultivated in water, while the parts (a-2), (b-2), and (c-2) illustrate those cultivated in deuterated water. The part (c-1) and (c-2) schematically highlight a difference of fine structures within cytoplasm which may be captured by the 2.5 m SANS apparatus, due to the contrast difference in the matrix of cytoplasm.

(図5 a-1, a2参照) 特に $q < 10^3 \text{ nm}^{-1}$ の領域では、散乱はGuinierの法則[9]に従い、この法則を用いることにより菌体の外形の回転半径 $R_g [= (R_1^2/2) + (H^2/3)]^{1/2}$ を求めることができます。また二つの赤矢印の間の q 領域では、散乱強度分布は q^{-1} に従うことが分かりました。この q^{-1} 乗則[9]から、この空間スケールでは、菌体は細い針状構造体に見えることを意味します。散乱曲線の q^{-1} からの小 q 側での背違の定量的解析からシリンダーの長さ $2H$ 、大 q 側での背違の定量的解析から半径 R_1 を求めることができます。

散乱解析から得られた結果 $2H$ 、 R_1 は、電子顕微鏡観察から得られた結果と一致し、電子顕微鏡観察結果の妥当性が分かりました。また2結晶型・集光型超小角散乱法の実用性・有効性が分かりました。 $4 \times 10^2 < q < 2 \times 10^4 \text{ nm}^{-1}$ の大波数域(10 mピンホール光学系のカバーする領域)では、赤・青の曲線、破線a, bに差が生じますが、この小空間スケールでは菌体の重水置換効果による b_2 の変化に敏感であることが分かります。軽水酢酸菌では b_2 が b_1 に近づくため、細胞質と細胞膜の区別が付きにくくなる結果(図5, b-1参照)赤の曲線はPorod則[9]に従った q^{-4} 乗則を示し菌体の界面構造に関する情報を与えることが分かりました。一方重水置換酢酸菌では b_2 が小さくなるので、細胞は中空円筒の構造(膜構造)を反映することになります(図5 b-2参照)。更に $q > 2 \times 10^4 \text{ nm}^{-1}$ のより大波数領域(2.5mピンホール光学系のカバーする領域)では、赤曲線、青曲線共に各々破線a, bからの背違を顕著に示すので、細胞質及び細胞膜はもはや均質構造モデルで近似できないことが分かります。つまりこれらの背違を積極的に解析することにより各々の局所構造、即ちより小さい階層構造要素、についての情報をも抽出することが可能なこと

4. 成果の意義と波及効果

が分かりました(図5 c-1, c-2参照)。

従来の装置と比較した時の、今回開発した集光系超小角散乱装置の利点を以下に要約します。

- 1)空間分解能を10倍向上しました。すなわち10倍大きな構造まで測定できると共に、10倍鋭い散乱極大の観察を可能にしました。後者は散乱極大のピーク幅をより精度良く解析できることを意味し物性論的には極めて重要なことです。
- 2)従来の小角散乱領域($10^2 < q < 10^4 \text{ nm}^{-1}$)の散乱強度を4倍から13倍に増加させました。このことは、将来の研究目標である外部刺激に対する階層構造の応答挙動の時間分解測定をより容易に

するものです。

- 3)異方的な超小角散乱パターン(強度分布)の検出を可能にし、様々な外場の下での超小角散乱の観測を可能にしました。一つの応用例として酢酸菌という細胞を生きたままの状態を観測しました。その結果、その階層構造を数nmから数10 μm にわたり階層横断的にその場観察できることが分かりました。これらの成果は、中性子超小角散乱・小角散乱が、階層構造のその場観察に関して新しくかつ有効な研究手法を提供すること、そしてソフトマター物質科学分野、分子細胞生物学分野に対し

5. 今後の予定

て大きな波及効果をもたらすことを示唆します。

- (1) 光、熱、pH、ズリ流動等外部から与えられる刺激に対する階層構造の応答挙動のその場・時間分解測定と階層間協同運動の研究の展開
- (2) 様々な系に対して、幅広い空間スケールにわたる中性子散乱曲線の精密・定量解析の実施
- (3) 重水素置換コントラストマッチ法による各階層構造からの散乱を分離抽出(部分散乱関数の抽出)
- (4) 偏極中性子と核スピ化学を応用した動的核スピ偏極によるコントラスト変調法の応用に関する基礎研究
- (5) 多くの生体系・ソフトマター系への本方法の展開
- (6) IR、Raman、UV、NMR等のマイクロ・プローブ、光学顕微鏡等のマクロ・プローブとメソ・プローブとしての本方法の併用・同時測定等により、中性子ビーム研究の新世界を開拓、分子集合体力学の開拓を目指したいと思ひます。

参考文献

- [1] T. Hashimoto, Bull. Chem. Soc. Jpn. 78, 1 (2005).
- [2] 橋本竹治, 基礎科学ノート 24, 33 (2006).
- [3] 美宅成樹, 日本物理学会誌 50, 255 (1995).
- [4] S. Koizumi, Invited talk at the 8th International Conference on Neutron Scattering, ICNS2005, Nov.27-Dec.2, 2005, Sydney, Australia; S. Koizumi et al. Physica B, 385, 1000 (2006).
- [5] S. Koizumi, Invited talk at the 13th International Conference on Small-angle Scattering, July 9-13, 2006, Kyoto, Japan; Koizumi et al. J. Appl. Cryst. 40, s408 (2007).
- [6] T. Oku et al. J. Appl. Cryst. 40, s408 (2007).
- [7] 小泉 智ら, 「波紋」17, 19 (2007).
- [8] 磯貝 明, セルロースの科学, 朝倉書店 (2005).
- [9] A. Guinier, G. Fournet, SMALL-ANGLE SCATTERING OF X-RAYS, N.Y., J. Wiley & Sons, Inc. (1955).
- [10] U. Bonse and M. Hart, Appl. Phys. Lett. 7, 238 (1965).
- [11] D. Schwahn et al. Nuclear Instrum. Methods A239, 229 (1985).

1. ソフトマター

従来の物性物理学の主対象は、イオン結晶、金属結晶やアモルファス固体です。これらは分子間、原子間相互作用により維持された硬い物質群(ハードマター)であり、これらの物理的性質はミクロな原子の配列や電子状態に基づき記述されてきました。これらの物質群と対極にあるのが軟らかい物質群(ソフトマター、「複雑液体」とも呼ばれます)です。具体的には、高分子、液晶、ゲル、界面活性剤(ミセル、石鹸膜)、生体膜、コロイド分散液、過冷却液体、多成分液体等がソフトマターに属します。これらの物質においては原子スケールよりも十分大きいメソスケール(1 nm ~ 100 nm)の中間構造(超分子構造)が存在しますし、中間構造自体、更により高次の組織体(階層構造)をも形成する場合があります。高分子やコロイド粒子では分子や粒子が巨大で、それら自身が既にメソスケールの構造体であります。その上にそれらが自己会合してより大きな組織体を形成することもあります。また他の低分子ソフトマターもそれ自身、自己会合し中間構造やそれらの組織体を形成します。中間構造体中の分子・原子は互いに長距離相関を持つので、強相関超分子系を形成します。ソフトマター物質科学に於いては、ミクロな原子・分子の配列や電子状態のみならず、これら中間構造、組織体の構造解析とそれらの物性に及ぼす影響の解明が重要となります[1, 2]。

2. 階層構造

ある要素が複数集まることで一つの集合体を形成し、その集合体が複数集まることで更に大きな一つの大集合体を形成します。このような構造を階層構造といいます。階層構造は、数nmの小さな構造要素(集合体)から数 μm 以上にわたる大きな構造要素まで、様々な大きさの構造要素から構成されています。即ち階層構造は異なった大きさの構造要素(階層構造要素)の集合体と考えられます。

3. 散乱ベクトル q と散乱強度分布 $I(q)$

散乱ベクトル q は、 $q = (2/\lambda)(s - s_0)$ (s, s_0 は各々散乱ビーム、入射ビームの進行方向を示す単位ベクトル)で定義され、波数の次元を持ち、momentum transfer vectorとも呼ばれます。散乱体の構造はFourier展開することができます。この時、波数ベクトル q のFourierモードの強度が散乱強度 $I(q)$ に相当します。即ちFourierモードの波数 q が、散乱ベクトルの大きさ q に対応し、 q Fourierモードの強度が散乱強度 $I(q)$ に対応します。従って散乱強度分布を求めることは、構造体のFourierモードのスペクトル強度 $I(q)$ を求めることと等価です。散乱ベクトル q の大きさ q は、 $q = (4/\lambda) \sin(\theta/2)$ 、 λ は各々中性子ビームの波長と散乱角)で与えられます。この q と波数 q のFourierモードの特性長(波長) r とは $r = 2/\lambda q$ で与えられる関係(いわゆる、逆関係)を持ちます。従って大きな構造は小波数 q のスペクトル(散乱)強度に、小さな構造は大波数 q の強度に影響を与えます。図4の超小角散乱の最小波数 $q = 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$ は、 $r = 2/\lambda q = 2 \times 10^4 \text{ nm} = 60 \mu\text{m}$ に相当し、その散乱角 $\theta = (2/\lambda) \times 10^{-5} \approx 10^{-5}$ ラジアン(但し $\lambda = 0.2 \text{ nm}$ 、弧度にすれば1度の1700分の1)の正に超小角に相当し、その散乱強度の測定には驚くべき高い角度分解能が必要です。

4. 中性子集光レンズ、物質レンズと磁気レンズ

物質レンズは、物質界面での中性子の屈折により中性子ビームを集光するので、物質による散乱及び吸収により入射エネルギーの一部を失います。他方、磁気レンズでは磁場勾配が中性子に及ぼす力により中性子を集光するので、物質の介在による入射エネルギー損失はありません。然し、偏極した入射中性子ビーム(偏極度が99%以上)の使用が必要ですので、半分の入射中性子を失うこととなります。偏極中性子ビームを使用するのは、逆向きのスピンを持った中性子は、レンズ中で発散し超小角散乱測定の妨げとなるからです。以上の損得を考慮すると、通常の超小角散乱測定には、取り扱いが簡単な物質レンズが有効です。他方、プロトンの動的核スピン偏極を利用したコントラスト変調法という特別な用途には、偏極中性子を用いること及び磁気レンズを用いることが必要となります。

5. 2結晶Bonse-Hart型超小角散乱装置

BonseとHart[10]は、X線に対して2個の溝型にカットしたゲルマニウム単結晶を、一つはモノクロメータとして入射ビームの単色・平行ビーム化に、他の一つは散乱波のアナライザーとして角度で散乱された散乱波の選別に使用することにより、超小角散乱測定を可能にしました。中性子ビームに対するBonse-Hart光学系の応用はSchwahnらにより成されました[11]。

6. 軽水酢酸菌と重水置換酢酸菌

重水 Schramm-Hesrin (SH) 培地で培養された菌体は内部まで重水に置換されています(重水置換酢酸菌)。一方、軽水 SH 培地より得られた菌体の内部は軽水で構成され、重水を溶媒に用いた中性子散乱の測定中(全測定時間は約24時間)はこの状態が保持されるものとみなせます。従って軽水酢酸菌が溶媒である重水中に分散する時、酢酸菌の細胞質の中性子に対する散乱長密度は、溶媒のそれより低く、図3bの b_2 は b_1 に近づくので、酢酸菌全体(円筒全体)が重水中に際立って見えることとなります。他方、重水置換酢酸菌が重水中に分散するとき、細胞質の散乱長密度は溶媒のそれに近づくので、 b_2 が零に近くなり、細胞膜(中空円筒)が重水中に際立って見えることとなります。従って重水置換による中性子散乱は酢酸菌の内部構造を色別して見分けることを可能にします。また量子エネルギーの低い冷中性子を照射しても、酢酸菌はダメージを受けない「生きた状態」を維持するはずで