

小角散乱法による蛋白質の磁場応答性と磁覚の研究展開

新井栄揮

量子科学技術研究開発機構 量子生命科学研究所

多くの蛋白質は反磁性体であり、その反磁性は主にペプチド結合平面・芳香族アミノ酸の配置などの秩序構造的に由来する[1]。しかし、一般的には蛋白質の磁化率は非常に小さいため、外部磁場によって蛋白質の立体構造や分子挙動が影響を受けることは殆どない（例：ウシ血清アルブミンの磁化率は -0.826×10^{-6} CGS 単位）。従って、蛋白質を磁場に応答させるには、多数の蛋白質分子の空間的配置の秩序化（結晶化・線維化など）に伴う磁化率や磁気異方性の増大、及び、強力な磁場印加が必要となる。例えばフィブリンやコラーゲンなどは、 10^7 個程度の蛋白質分子が線維状・秩序的に連なった異方的形状の巨大複合体を形成することで、1~十数テスラ(T)の強磁場印加によって配向する磁場応答性が現れる[2]。

一方、これまでに我々は、PF BL-10C と試料磁場印加装置[3]を組み合わせた X 線小角散乱(SAXS)測定により、カワラバト(*Columba livia*)の網膜細胞に存在する鉄硫黄クラスター輸送蛋白質 ISCA1 (cIISCA1, 14kDa) が、従来の蛋白質研究の例よりも低磁場に応答する新規現象を発見した[4,5]。SAXS 測定により得られた主な知見は次の通りである。① cIISCA1 は構造多型性を有し、鉄硫黄クラスター結合時は球型、鉄硫黄クラスター解離時には棒型の分子外形をとる。②自然な磁場環境下 ($40 \sim 60 \mu\text{T}$) では、 7 mg/mL cIISCA1 溶液中の約 10% の cIISCA1 分子が秩序構造化（柱状多量体化）しており、数十~数百 mT の静磁場を印加すると多量体の平均長・会合性が増大する。③EDTA などのキレート剤を添加して鉄を除去した cIISCA1 は磁場応答しなくなる。本研究により、鉄などの高磁化率の物質が蛋白質に結合する場合、蛋白質高次構造・分子挙動の記述子の一つとして磁性が大きく寄与する例があることが示された。cIISCA1 がどの程度の低磁場まで応答しうるかは現在調査中である。

カワラバトは磁場の情報を感知して知覚化する能力「磁覚」を有する。1970 年代以降の様々な研究により、鳥類を始めとする多くの動物種が磁覚を有することや、渡り・帰巢・採餌・繁殖等の行動に磁覚が利用されていることが明らかにされた。しかし、その機構は完全には解明されておらず、諸説が入り乱れた状況にある[6]。ISCA1 が磁覚に寄与する可能性についても例外ではなく、多くの議論が交わされている。本発表では、蛋白質等生体分子の磁性研究における小角散乱法の有用性を紹介するとともに、これまでに報告されている磁覚研究なども俯瞰し、cIISCA1 が寄与すると仮定した場合のカワラバトの磁覚の機構や、今後必要となる小角散乱解析技術等について考察する。

[1] Worcester D.L., *Proc Natl Acad Sci USA*. 1978, 75, 5475

[2] Kotani H., *et al. J Appl Phys*. 2000, 87, 6191

[3] Hirai M., *et al., J Appl Cryst*. 2003, 36, 520

[4] Arai S., *et al., Protein Sci*. 2022 31, e4313

[5] Arai S., *et al. PF Highlights 2022, 2023, 22*

[6] 新井栄揮 他, 量子生命科学ハンドブック, NTS, 第 2 編第 1 章第 1 節, in press.