

## 生体分子系における情報処理とその熱力学

### Information processing and thermodynamics in biomolecular systems

飯野 亮太（自然科学研究機構 分子科学研究所）

分子モーターを代表例とする分子機械は生命の活動を支える。生体分子モーターは熱ゆらぎが支配する環境下で ATP（アデノシン三リン酸）の化学エネルギーを利用して自律的な一方向運動を行い、高速回転、高速移動、長距離移動、高効率エネルギー変換といった高い性能を発揮する。1990 年代半ばに勃興した光学顕微鏡 1 分子観察・操作技術の発展とともに、生体分子モーターの作動原理の理解を目指した研究が盛んに行われている。

生体分子モーターの作動原理として欧米では当初、マクロな機械と類似した、「硬い」分子の構造変化（パワーストローク）が動きを駆動するという考えが主流であった。これに対し、大澤文夫や柳田敏雄は分子の「柔らかさ」と熱ゆらぎの重要性を提唱した。現在では、熱ゆらぎ（ブラウン運動）の重要性は広く受け入れられている。生体分子モーターは熱ゆらぎに抗って動くのではなく、ランダムなブラウン運動を「整流」することで一方向運動を行い、構造変化は整流を強化すると考えられている。

では、ブラウン運動の整流は如何にして行われるのか？ここで重要となるのが、本セッションのテーマである情報処理とその熱力学（情報熱力学）である。情報熱力学では情報とエネルギーが結びつけられる。生体分子モーターがブラウン運動を整流する過程（前後左右の選択）は情報処理であり、その情報処理にエネルギーが使われるという考えである。柳田は筋肉を構成するミオシンについて「ミオシンは運動ではなく情報処理をしている」と主張している（生物物理, 61, 195-197, 2021）。

本セッションの講演者である沙川貴大氏は情報熱力学、鳥谷部祥一氏は生体分子モーター研究の第一人者である。お二人は共同でマクスウェルのデーモンを実証し、情報からエネルギーを取り出せることを初めて示した（Nat Phys, 6, 988-992, 2010）。また、最適輸送理論に基づき、有限時間で散逸を最小化する物質輸送を実現した（Nat Commun, 16, 10424, 2025）。生体分子モーターが高い性能を発揮するうえで情報を如何に利用しているのか、お二人の最新の知見に基づく意見を種として活発な議論を展開したい。