

繊毛は、真核生物が誕生した初期に獲得された、細胞運動を司る細胞小器官である。「鞭毛」と「繊毛」は、長さや細胞あたりの本数に違いがあるが、基本的に同じ細胞小器官である。これらの「微小の毛」を通して生物を眺めると、生物の共通性と多様性が浮かび上がるとともに、生命における構造と機能を結びつける縦の糸に加え、進化を含め、ミクロからマクロレベルのさまざまな事象を結びつける横の糸が見えてくる。繊毛は、ミクロの水環境における運動を司るとともに、外界からのシグナルを受容し、細胞の行動を制御する。多細胞生物では、上皮細胞の周りに水流を起こし、発生や形態形成を司るコントロールセンターとして働く。さらに、単細胞生物の行動や、動物の体液の循環、濾過摂食など、細胞・組織・個体周りのミクロの水流制御は、食物網も含めた水圏生態系の基盤になっていると言っても過言ではない。

私はこれまで、海産動物を主な研究対象としつつ、原生物や植物も含め、多様な生物に存在する繊毛の構造と運動調節について研究してきた。これまで行ってきた主な研究テーマは、運動の分子モーター「ダイニン」の構造変化、cAMP/カルシウムとタンパク質リン酸化による精子鞭毛の運動制御機構、新規光受容タンパク質による繊毛の光応答制御、体内受精における異型精子の行動と生殖戦略、繊毛の構造・波形調節の進化と多様化などである。今回は、これらの研究の中から2つのテーマについてお話ししたい。

一つ目は、ダイニンに結合し、カルシウムイオン依存的なモーター調節に関わる神経カルシウムセンサー「カラクシン」の話である。カルシウムイオンは、繊毛波の対称性を変化させ、細胞の遊泳方向をコントロールする因子として昔から注目されてきた。その制御機構に関して、外腕ダイニンのカルシウムセンサーはカルモジュリンであると、長い間、信じられてきた。我々はこれに疑問を抱き、ダイニンに結合するカルシウムセンサーの特定と精製を試み、カラクシンを発見、命名した。さらに、繊毛の運動方向を決める上で重要な波の非対称性制御にカラクシンが必須であること、その結果、ホヤの精子走化性に重要な役割を果たしていること、ウニ胚では繊毛を打つ方向と協調性を制御していること、マウスではカラクシンの欠損により、内臓逆位や水頭症といった繊毛病になることを明らかにした。また、カラクシンが植物や繊毛虫などを含むバイコンタの系統には存在せず、動物を含むオピストコンタ特異的に獲得されたタンパク質であることを見出した。カラクシンによるダイニンや繊毛波対称性のカルシウム制御は、オピストコンタとバイコンタで「鏡像」関係であり、真核生物の祖先で二分されて進化してきたという説を提唱した。

次に、繊毛構造の多様化についてお話しする。9+2構造を保持しつつも、いくつかの生物では、進化に伴った繊毛構造の多様化が見られる。その中で、多繊毛化は繊毛虫や異型精子、動物の上皮細胞に見られ、ミクロの水環境における推進力や運動方向転換の効率化に役立ってきたと考えられる。有櫛動物クシクラゲは、多繊毛を束化し、肉眼でも見えるほど巨大化させた櫛板を有する。繊毛を個体の遊泳に用いる最大の生物である。我々は、クシクラゲの一種カブトクラゲを用いて、巨大な櫛板内部で数万本にも及ぶ繊毛同士を結びつけている構造（隔小板）を構成する新規のタンパク質を複数同定した。これらのタンパク質が欠損すると、櫛板運動の平面性や非対称な繊毛打、半同調的な連動打がなくなり、クシクラゲは遊泳できなくなる。さらに、櫛板が二段構造をとっており、平面性、非対称性、半同調性といった運動機能が領域ごとに分担されていることを明らかにした。これは、ミクロ水環境（低レイノルズ数）の運動から脱却して、繊毛をマクロ水環境（高レイノルズ数）に用いる方法を選んだ、クシクラゲの分子戦略の一つであると考えられる。