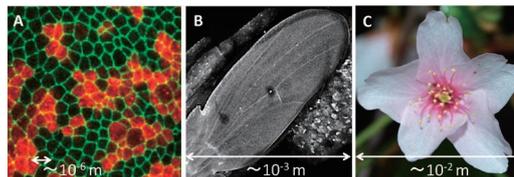


## 生命の物理：相互干渉する多スケール系の共通性と多様性

生命は生体分子から細胞内小器官, 細胞, 多細胞組織 (図 A), 器官 (図 B), 個体にいたる, 階層的かつ動的な構造をもつ。階層間の空間スケールの違いは10倍程度だが, 生体分子と個体 (ヒト) では $10^9$ 倍にもなる。各階層の時間スケールも近接する。すなわち細胞の複製過程および器官や個体の発生過程は, 逐次的というよりむしろ同時に進行しながら各階層を再生産する。生命とはこういった再帰的な階層性を維持し, さらに進化できる系である。

生物の各階層において運動方程式のような第一原理は未知だが, 物理学には異なる現象に共通する数理を見出す方法論があり, 理論と実験が連携した研究が近年進んでいる。細胞スケールでは, 生化学反応を非線形微分方程式などで定式化し, 濃度に比例したタンパク質の蛍光から, 細胞内のタンパク質濃度の時空間変化を検証できる (図 A の赤)。加えて, 細胞の変形を連続体力学で定式化し, 細胞膜の形 (図 A の緑) などから変位や応力を検証できる。これら生化学反応や力学を介した細胞間相互作用が働くことで, 多細胞組織から器官が発生する。その相互作用に応じた多細胞組織の挙動は, 非平衡統計物理などによりモデル化され, 各細胞と組織の階層で同時に計測できる (図 A, B)。器官



A. 動物の上皮細胞。緑は細胞膜に局在するタンパク質。B. 器官 (昆虫のはね) となる多細胞組織。2次元シート状に約 $10^4$ 個の上皮細胞が配置。白の輝点はAの緑と同タンパク質。C. 器官 (花弁) の数と配置。

の集合体としての「個体」が発生する過程には, ヒトの指やサクラの花弁の数はなぜ5か (図 C) という身近な不思議がある。複数の器官の間の相互作用を電気力学の類推などからモデル化することで, 器官の数と配置を制御する各器官の生化学反応や力学的性質が予測されている。

これらの研究は, スケールが近接する階層が相互に非線形に干渉し合うことを示しつつある。複数の階層が干渉して, 微小スケールのふるまいが巨大スケールに影響することは, 地震や乱流や相転移にも共通する。加えて生命は進化する。進化によるDNAや上述の各階層の変化の特徴も, 理論と実験の両面から研究が進んでいる。今世紀の課題は, 相互干渉的な階層構造の生物種を超えた普遍性と, 進化を経た多様性の物理学だ。

藤本仰一 (阪大院理), 会誌編集委員会