

# 適応と進化におけるマクロ現象論

## ——表現型変化の低次元拘束と揺らぎ— 応答関係



金子 邦彦

東京大学大学院総合文化研究科/理学系研究科,  
生物普遍性研究機構  
kaneko@complex.c.u-tokyo.ac.jp



古澤 力

理化学研究所生命機能科学研究センター/  
東京大学理学系研究科, 生物普遍性研究機構  
chikara.furusawa@riken.jp

シュレーディンガーは、70年ほど前に著書『生命とは何か』で、情報を担う分子としてのDNAの性質を予言しました。これは分子生物学の興隆への大きな一石となり、以降、生物内の個々の分子の性質は調べあげられてきました。しかし、それら分子の集まった「生きている状態とは何か」の答えには至っていません。物理学は安定した平衡状態に限定することで、マクロシステムをとらえる「熱力学」をつくることにかつて成功しました。もちろん、生命は平衡状態にはありません。しかし生命システム、具体的には細胞は、膨大な成分を有し、その組成を維持して複製でき、外界に適応し進化するという共通特性を持っています。では、こうしたシステムの普遍的性質を記述する状態論を構築できないでしょうか。そこで、熱力学にならって、まずは定常的に成長する細胞状態を対象を限り、さらに進化によって発展してきた状態は摂動に対する安定性を有していることに着目します。これをふまえて、適応と進化に関して、以下のような普遍法則が見出されてきました。

(1) 様々な外界の環境変化に対し、細胞内

の全成分(数千成分)の変化は互いに比例して、その比例係数は細胞成長速度というマクロ変数で表される。

(2) このような短期的適応変化と、長期的進化の間に対しても、全成分(表現型)変化の間に共通比例変化則が成り立つ。

(3) こうした外部変化に対する応答と、ノイズによる揺らぎの間には統計力学での揺動応答関係と類似した比例関係が成り立つ。

(4) 各成分の揺らぎに関しても、ノイズによる短時間スケールでの分散と遺伝子変異による長時間スケールでの分散の間に全成分にわたる比例関係が成り立つ。

(5) 進化的安定性により細胞の高次元なミクロ状態が低次元なマクロ状態へと次元圧縮されることがこれらの法則の背後にあると考えられる。

以上のことは、大腸菌進化実験とトランスクリプトーム解析などによる高次元の表現型解析、細胞モデルの計算機シミュレーション、現象論的理論で確認され、普遍的な法則となることが期待されます。また、この結果から遺伝的変異はランダムに起きても表現型の進化には決定論的な方向性があることも示唆されます。

### —Keywords—

#### 表現型：

ある生物の状態を表す量であり、その形態、生理的性質、遺伝子発現量などを含む。例えば大腸菌は約4,000種類の遺伝子を持ち、それぞれの発現量を表現型として捉えることができるなど、一般には高次元の量となる。ゲノム配列に依存するが、環境条件や細胞内化学反応の揺らぎによっても変動し、ゲノム配列によって一意に決まるわけではない。

#### トランスクリプトーム解析：

ゲノム上に存在する全ての遺伝子に対応するmRNAの発現量(細胞当たりの分子数)を同時に定量する解析手法のこと。マイクロアレイを用いた手法や、超並列シーケンサを用いたRNA-Seqと呼ばれる手法が存在する。

#### 次元圧縮：

高次元のデータを、それが持つ情報をできるだけ保存するように、低次元のデータに変換すること。例えば、細胞内の全成分量を独立な変数として捉えると、それは高次元の状態として表現されるが、その変化が互いに相関をしていれば、低次元の状態に変換することができる。主成分分析やニューラルネットワークなど、様々な次元圧縮の手法が利用されている。