

大きさと重力の生物学 -宇宙実験計画の指針-

お茶大・人間文化 馬場昭次、東大・総合文化 跡見順子、石井直方、さくら研究所 中村輝子、
お茶大・理 最上善広、仲矢史雄、JAXA 山下雅道

Biology of Size and Gravity -Guideline for Planning Space Experiments-

Shoji A. Baba, Yoriko Atomi, Naokata Ishii, Teruko Nakamura, Yoshihiro Mogami, Fumio Nakaya, Masamichi Yamashita
E-Mail: yamashita@surc.isas.jaxa.jp

Abstract: Scope of space and gravitational biology is discussed from a viewpoint of biology of size. Physical size of cells and individual body is a fundamental property of biology, which closely relates to matter, energy and information of living systems. Recent topics of allometry are summarized here. Analysis of biological quantities of many species and individuals with regression to power equations is a powerful tool to identify responsible mechanism underlying. Research objectives of space and gravitational biology could be elucidated and stated with such a systematic way. Action of gravity on biological systems and response of living organisms are understood with the central concept of biology, i.e. evolution and adaptation. If sensing gravitational vector to orient body or equipping anti-gravitational component is cost effective and paid off for improving the fitness of organisms, then they invest their limited resources for it. Economy of biological systems trade works in this way, which is called "symmorphosis." Selection of research subjects and test species should be made by choosing phenomena that indicate "good to pay for gravity". Molecular biology provides useful tools, once appropriate subjects are set for space science.

Key words; Allometry, Size, Gravity

大きさと重力の生物学はなにを目的としているか

細胞や生物体の大きさは生物の基本的な性質の一つであり、生物体の質量・体積・表面積といったいくつかの物理量に対して密に関係する。生物体には体の重量をささえたり、あるいは運動時に発生する力に対抗する要素をそなえることが要求される。重力は、自然対流を誘起するなどして輸送現象にも支配をおよぼしていることから、生物体の体積や表面積は物質や熱、そしてそれにとまう情報の生物体内外の輸送などに深くかかわる要素である。

大きさの生物学は、重力が生物と生命現象をさまざまに支配する過程とその機構を、細胞から個体・生態系にいたる階層を対象にして論ずる（山下・馬場、2004）。ここでは特に個体の階層におけるアロメトリーについて、いろいろに提唱される仮説や基本的な考え方を整理する。それぞれの階層において、より下層の階層の要素とそのはたらきにはかならずしも還元はできない重力の関与する現象とその作用機構を示す。動物と植物の進化と適応の戦略について論じこれらを総合することにより、具体的な実験そのものを導き出すものでは必ずしもないが、重力生物学・宇宙での生物学の取り組むべき課題を提示しよう。

生物の大きさやアロメトリーをめぐる最近の話題

生物や生命現象に関する諸量が生物の体長や体質量を変数とするべき乗式でよくあらわすことができるときにこれをアロメトリーとよぶ。回帰式は必ずしもべき乗式である必然性はない。変数の値の部分区間でべき乗の関係がなりたつが全域をみるとはずれることもあるし分散が大きい場合もある。これはいくつかの要素や機構が領域それぞれに関与していることのあらわれであつたりする。アロメトリーがよく適用できるにせよはずれるにせよ、データをアロメトリーの回帰式で整理してみることは現象に関与する機構を推定するうえで有効な手法である。アロメトリーの代表的な適用例である代謝速度と体長・体重の関係にしても、代謝速度が体長の $2/3$ 乗に比例するのがあるいは $3/4$ 乗に比例するのかわれと判定できるかというレベルをふくめて、いまだ盛んな議論がつづいている。 $2/3$ 乗に比例すると見る場合には、体表面積と体質量の関係に支配された現象として説明されるのが一般的である。 $3/4$ 乗の依存性を説明する機構は様々に提案され検討されてきた。いまだ定説は確立されておらず、なお新しい仮説が提出されている。

そのひとつは Suarez & Darveau (2005) が提唱した説で、さまざまな依存性を示すパーツの総和と

して個体をとらえるものである。器官により代謝速度の質量依存性のべき数が-0.08（腎）から-0.27（肝）と異なり、それぞれの器官の質量の体質量への依存性ととの積の和が個体としての代謝速度の体質量への総括的な依存性、べき数をあたえるという説明である。

Nakaya ら（2003）は群体をつくるホヤの一種の代謝速度について生物の階層性にかかわる興味ある発見を報告している。その種の生活環には群体を構成する新しい世代の個虫が独立している期間と個体同士が連絡して共有する排水路や循環系がつけられ群体としての生活をおくる期間の2つがある。群体は面状におおきくなるので、表面積と体積の比の大きさ依存性にもとづくアロメトリーの説明は適用できない系である。実験で得られた結果は、個体が独立しているときの代謝速度は総質量の1次に比例し、個体間が連絡して群体を構成するときは統計的に0.75とは異なる回数に比例する。群体は多細胞化により生物が大型化した様々な機能を高度化させる進化の過程で重要なエポックである。すなわち、ひとつひとつの細胞から群体という上位の階層が創発された。群体化という原初的な段階ですでに群体の大きさを細胞がいずれかのしくみにより感知するかあるいは制限されて代謝速度を群体の大きさにより変える、あるいは変わるということがなされている。

生物の大きさを制御する遺伝子といった点でもあらたな発見がなされている。生物の大きさを規定する要素としてその下限と上限を決める物理と化学がある。生物体の大きさがあたえられたとして、多様である生物体の各部や器官がどれほどにそれぞれ最適化されて設計され適応しているかを論じ、生物体設計の経済学としてSymmorphosisという概念が提唱されている。それぞれの器官の機能は、その生物個体にとり限られた資源のもとでの需要と供給の関係においておよそ過不足なくつくられている。代謝のアロメトリーはそのような生物の経済学のひとつとしてみることもできる。環境の変化に対して耐性があったり適切な安全率がえらばれていることなどをふくめたこの生物の経済学が進化でいうところの適応度に関係するならば、大きさや重力の生物学は生物学の基本的な概念である進化とふかむすびつく。

それでは、生物個体の大きさは細胞や細胞内の分子などによってどのようにはかられ、また個体の大きさをどのように決めているのだろうか。Edgar（1999）は大きさに対する遺伝子や分子の支配について、細胞や器官さらに個体の階層でのそれぞれの物理的な大きさの分子生物学的な制御のしくみ、信号経路とその分子的な実体があきらかにされてきているを紹介している。このように、大きさと重力

の生物学は現象の記載にとどまらない本質・実体的な理解が可能になっている。

重力生物学の課題とその対象の選択

重力生物学は重力の支配する生物現象を対象とする。重力は質量に対して作用する力である。生命の基本単位である細胞の質量や細胞器官と細胞質との密度差は小さくて、重力の作用は細胞の階層ではみられないだろうと推定されていた。これに対して、単細胞の原生動物の重力走性の生理学的な機構がしめされ、宇宙実験から遊泳する原生動物の増殖速度に重力依存性がみいだされた。またリンパ球の免疫活性が重力によって顕著な影響をうけることなどがわかり、細胞への重力の直接的な作用のあることが示されたのは宇宙における生物学の重要な発見であった。

一方で、大きさが桁違いに大きい両生類の卵細胞は受精すると重力の作用で定位回転するといった顕著な重力の関与がみられるにもかかわらず、発生の進行にしたがって微小重力曝露での初期の卵割面の偏異や胞胚期にみられるいくつかの特徴はその後消失する。重力の影響は巨視的な現象、たとえば肺をふくらませるのに水面に泳ぎあがり空気を飲み込むといった行動が微小重力環境では阻害されるといったことから派生するいくつかの器官形成や発生の障害において示される。

重力は生命圏に横断で上下のある世界をつくる。重力は動物の行動世界の座標軸をきめ、そして重力ベクトルの方向を感受することで行動世界のなかでのからだの配向をしるということで動物にとり重要な物理的な環境要素である。

重力は植物が光をもとめ自身の重量をささえるためのかたちと機械的な強度をうみだす指標や刺激となる。樹木についてみると、樹冠部は太陽の光エネルギーにより光合成を行なう葉とそれを支える小枝からなる。季節により、花や果実をつけて生殖を行なう樹冠の広がりや高さは、進化でいうところの適応度につよく関係する。さらに主幹や太い枝、そして主根と側根から構成される根などの樹木の各部分は重力方向を感知してそれぞれのかたちをつくり、それぞれの部分より上部の重量を支え、水分やイオンをとり込んで輸送する。したがって、主幹の高さ及び主根の発達が進化のバロメーターになる。これら2つの機能の植物体各部での分担は、動物の器官におけるほどには、あまり明確ではない。しかし、それぞれの部分での機能の発達とそれらと重力とのかかわりは植物の進化における重要な要素といえよう。

水中から陸上への棲息圏の拡大が自重をささえてからだのかたちを維持するのに余分のコストを必要としても、総体としてのバランスシートにしたがつ

て重力に対抗するしゅみを発達させた。そして重力の情報を感受し、より環境に適応した行動あるいはかたちをえらび適応度をあげたり、あるいは重力に対抗するしゅみをつくるのに生物体は投資する。

生物体の設計の経済学が進化の過程でえらばれ発達しているのであれば、(いいかえれば、資源のむだな配置が進化の適応度をさげるのであれば) 重力を感受して行動やかたちを調節することで適応度があがるか、あるいは重力に対抗してからだの形を維持したり運動することが生命活動により有利な条件をあたえる限りにおいて生物は重力にからむしゅみをそのからだのなかくみこむ。細胞においてもしかり。細胞において重力の感受がその生物個体の適応度をあげるのであれば、細胞ほどの小さな質量で熱雑音にうもれそうな重力の情報であつてもたくみな仕組みを発達させて重力ベクトルを弁別しその方向や大きさを感じ受する。

ある細胞が重力の顕著な支配をうけあるいは微小な重力信号を感じ受するからとつて、すべての細胞が重力に支配され重力を感じ受するということはない。細胞に機械的な刺激を感じ受するしゅみがあるとしてもそれは重力をその細胞が直接的に感受する能力をもつとは限らない。細胞群の形状やあるいは器官や個体の階層への重力の作用を介した二次的な結果としての現象である可能性についてよく検討する必要がある。巨視的なレベルでの重力の支配はその質量のおおきなことからさまざまなかたちでみることができると。

重力生物学はその対象とする現象や生物種をえら

ぶには、重力の影響について進化や適応という生物学の基本概念に関連するかどうかをえらぶ際の指標のひとつとするのがよい。系統的にえらんだ一群の生物を比較して重力の関与についての仮説を検証するのに、重力が作用する質量を変数とするアロメトリーから整理してみるのは有効な手法である。モデル生物種の選択には遺伝子の解明などをふくめて実験生物種として確立されていることを基準とするのは必要な条件であるが、それで十分ということはない。重力生物学は重力が関与する生命現象の解明を目的とするのであり、それを網羅的な検索により発見するのは研究の展開のごく限られた段階でしかない。ポストゲノム時代の生物学が進むべき方向の議論ともあわせて、重力生物学の計画と宇宙において実施する研究課題を科学の内在的な論理にしたがい策定するのがよい。

参照文献

- B.A. Edgar; From small flies come big discoveries about size control, *Nature Cell Biol.*, **1**, E191 (1999)
- F. Nakaya, et al; Switching of metabolic-rate scaling between allometry and isometry in colonial ascidians, *Proc. R. Soc. Lond. B*, **270**, 1105-1113 (2003)
- R.K. Suarez, C.A. Darveau; Multi-level regulation and metabolic scaling, *J. Exp. Biol*, **208**, 1627-1634 (2005)
- 山下雅道、馬場昭次 ; 大きさと重力の生物学、*Biol. Sci. Space*, **18**, 13-27 (2004).