宇宙空間における動物の行動と発生

人類が宇宙空間に本格的に長期滞在する時代がやって来た。1998年の11月、アメリカ、ロシア、ヨーロッパ、カナダとともに我が国も参加して、国際宇宙ステーションの組立てが開始された。月と火星への進出も計画されており、民間の企業が提案する宇宙旅行も現実味を帯びてきた。はたして、宇宙環境でも人類は生涯を通して生きていけるのであろうか？ 宇宙環境の特徴は、良好な視界、高真空、微小重力、宇宙放射線である。その中でも、微小重力や宇宙放射線がどのように生命活動に影響を与えるかが注目されている。地球上で生まれた生物が宇宙空間に飛び出すことは、様々な問題をひき起こすかも知れない。本稿では、宇宙空間における動物の行動と発生についての実験成果の一端を紹介したい。

宇宙滞在による宇宙飛行士の身体的変化

ガガーリンによる人類史上初の宇宙飛行以来、多くの人々が宇宙飛行を体験してきた。宇宙飛行士の身体検査から、宇宙環境（特に、微小重力と宇宙放射線）は人体に致命的な影響を及ぼさないことがわかっている。しかし、

死には至らないまでも、様々な体の変化が起こっている。たとえば、微小重力下では体重を支える必要がないので、骨量の減少や筋力の低下が起こる。血圧を高くする必要がないので、心機能の脆弱化が起こり、体液のシフトによってむくんだ顔や細い足へと体型が変化する。

一方、超新星の爆発や太陽の核融合から生じる宇宙放射線は、宇宙ステーションの厚い金属を貫き、宇宙飛行士の体に達する。宇宙放射線が眼球や視神経を貫くと、アイフラッシュと呼ばれる白い火花が目の中に飛び散る。他の組織や臓器に宇宙放射線が飛び込んだときの影響も懸念される。線エネルギー付与の高い重粒子線を含む宇宙放射線は、X線などに比べて生物影響が大きい。宇宙で長期間滞在したほうがより多くのDNA損傷を起こすことを、スペースシャトルやミールに搭載したヒト細胞で筆者らは見いだしている⁽¹⁾。また、長期間滞在したミールの宇宙飛行士のリンパ球に、染色体異常が多発していることも報告されている。宇宙で長期間生活するためには、宇宙放射線の障害を減らすための工夫が求められる⁽²⁾。

宇宙空間は生物にとってストレスなのか？

生物は放射線だけでなく微小重力や生理ストレスといった複合環境に曝されたとき、どのように応答し、どこまで適応できるのか不明な点が多い。筆者らは、地上実験で様々な環境ストレスによって、ストレスタンパク質(HSP 72)だけでなく、癌抑制遺伝子産物p53も誘導されることを明らかにしてきた⁽³⁻⁶⁾。また、宇宙飛行したラットの皮膚や筋肉でp53が誘導される

図1 ■ 宇宙飛行したラットの筋肉におけるp53の蓄積誘導

p53のウエスタンブロットの解析結果。レーン1～4は地上対照のラット筋肉のサンプル、レーン5～8は宇宙飛行したサンプル。

こと(図1)⁽⁷⁾，さらに金魚の皮膚，筋肉，脾臓でHSP72が誘導されることを明らかにしてきた⁽⁸⁾。生物にとって宇宙環境はストレスなのであろう。生物はどこまで宇宙環境に適応できるのかを今後明らかにする必要があると考えている。

宇宙空間で動物の行動は地球上と異なるのか？

「宙返り 何度もできる無重力 着地できない このもどかしさ」これは向井宇宙飛行士が実体験を詠んだものである。我々の地上生活からは想像できない空間であることを表現してい

る。地球上の生物は重力を感知して実にうまく地上生活に適応してきた。原生動物のゾウリムシも細胞膜に内在するタンパク質が重力センサーとして働くことが知られている。植物の根は下へ，茎は上へと伸びるためにも，重力は成長の大きな因子である。動物は耳石などの平衡器官や筋肉，関節，内臓などの感覚や視覚といった複数の情報源から，自分の体勢を総合的に判断して行動を起こしている。地上でみられる行動がどの程度遺伝的にしくまれ，学習により獲得されるのかといった点は，きわめて興味深い。

微小重力下で動物は，恐怖あるいは不快時と同じ行動をすることが知られ

ている。カエルはそっくり返り，ヘビは自分にかみつく。また，通常サカナはぐると回転してしまい，微小重力が姿勢制御に大きな影響を及ぼしていることがわかっている。水中の上層や中層にすむサカナやオタマジャクシは底に沈もうとするし，底のほうにすむものは上に浮かび上がろうとする。また，地上生活のラット，カメ，トノサマガエルは空中に浮きやすく，ひっくり返ったときと同じように寝返りをうつ。一方，樹上生活のモモンガ，アマガエルはしがみつくな，滑空時と同じように着地姿勢をとる。このように微小重力環境の動物の行動は，その生活パターンと深く関わっていることが

図2 ■サカサナマス(下)とコリドラス(上)が地表(1G)で泳いでいる様子(A)および地表と微小重力(μG)における光源の位置とサカナの姿勢(B)

わかってきた。

一般のサカナは背中を上に向けて泳ぐ習性を備えている。この習性は光の入射方向に背部を向けようとする反射運動（背光反射）によって生じ、この反射運動はサカナの姿勢制御において重要な役割を果たしている。サカナの姿勢制御に重力感覚も重要な役割を果たしており、光の入射角度を大きくしても体が傾かないように姿勢制御されている。ところが、サカサナマズはその名のごとく地表でも逆さまになって泳ぎ、重力をまったく無視しているかのように行動する。

筆者らはサカサナマズの姿勢制御について、近縁種のコリドラスを対照として研究した(図2)⁹⁾。その結果、①サカサナマズは重力、光の照射方向、光の明るさの変化にかかわらず、遊泳行動に変化はみられなかった。②コリドラスは一般的な姿勢制御をとった。地表では光の照射方向にかかわらず腹部を下に向けた。微小重力下では光源方向に背部を向けた。③サカサナマズ、コリドラスとも一方の耳石摘出一カ月後の個体は、未処理の内耳による姿勢制御の代償作用により、微小重力下で正常個体と同様な行動を示した。これらの実験から、サカサナマズは重力変化に影響されないことがわかった。動物の姿勢制御の研究にとってきわめて興味深いサカナである。今後、片側の耳石を取り除いた状態での姿勢制御の

代償作用の因子に重力が必要なのかどうかを宇宙実験で確かめたい。地球で生まれ育ってきた生物を宇宙環境へ移すことによって、従来当然とされていた生活様式のしくみがあらためて明らかにされるものと考えている。

宇宙で動物は子孫繁栄できるか？

受精から卵の発生・成長を経て、全身を構成するそれぞれの細胞へと分化する過程に、宇宙環境はどのような影響をもたらすのであろうか。最終的に

はヒトの赤ちゃんが生まれ育つかどうか大きな注目点であろう。

ニワトリの受精直後の卵を宇宙にもっていったところ孵化しなかった。カラの内側のしょう膜と尿嚢表面に血管がはれなかったのも、ガス交換できずにヒヨコになれなかったと考えられている。カエルの端黄卵は地上で受精すると動物極（黒いほう）が上になる。宇宙では動物極がいろいろな方向を向くが、正常にオタマジャクシが生まれた。

宇宙空間での子づくりも大きなテーマの一つである。東大の井尻らがメダ

図3 ■ 宇宙空間で孢子からアメーバへと発芽した後、増殖し形態形成をした細胞性粘菌の子実体

カでの子づくりから赤ちゃんの誕生までを確認している。宇宙メダカ誕生の成功の鍵は、視力が優れ微小重力下でも普通に泳ぐメダカを選択したことであった。

筆者らは動物にも植物にも属している細胞性粘菌（タマホコリカビ）を用いて、分化・形態形成の研究を行なった⁽¹⁰⁾。細胞性粘菌の胞子は発芽するとアメーバ細胞となり、大腸菌を餌として増殖する。増殖したアメーバ細胞は化学物質 cAMP に対する正の走化性があり、お互いに集合して多細胞体となる。その後、移動体やソンプレロの形態を経て、胞子、胞子嚢、柄、仮根などに分化して子実体となる。筆者らは、この細胞性粘菌の野生株 NC 4 と放射線感受性株 γ s 13 とを小さな培養器にセットし、スペースシャトルコロンビア号とアトランティス号に搭載した。従来の宇宙実験は受精卵や種子を用いており、今回のように離れたアメーバ細胞を cAMP という化学物質で集合させることをねらったのは初めてであった。

その結果、宇宙環境で両株とも、胞

子から発芽してアメーバ細胞となり増殖した。また、アメーバ細胞は集合体を形成し、胞子、胞子嚢、柄、仮根の細胞へと分化した。地上の対照とほぼ同数の正常な子実体が形成されることを明らかにした(図 3)。

国際宇宙ステーションの建設により、宇宙環境を長期間利用する機会が飛躍的に増加する。ステーションの曝露部実験設備で、オゾン層のない原始の地球に降り注いでいたと考えられる太陽紫外線が得られる。生命誕生や進化の研究の面からもステーションは大いに期待される。今後、宇宙での人類の長期滞在に向けて、危機管理、高真空環境からの隔離のための気密性、空気組成の維持、対流がない環境での温度制御、閉鎖空間での異文化のクルーとの交流、生活面での衛生、食料補給など多くの課題を解決する必要がある。安全で住みよいステーション建設が多くの科学研究の成功をもたらすと期待している。

1) 高橋昭久, 大西 健, 大西武雄: 放射線生物研究, 34, 86 (1999)。

- 2) T. Ohnishi & S. Nagaoka : *Biol. Sci. Space*, 12, 5 (1998)。
- 3) T. Ohnishi, X. Wang, K. Ohnishi & A. Takahashi : *Oncogene*, 16, 1507 (1998)。
- 4) T. Ohtsubo, X. Wang, A. Takahashi, K. Ohnishi, H. Saito, C.W. Song & T. Ohnishi : *Cancer Res.*, 57, 3910 (1997)。
- 5) X. Wang & T. Ohnishi : *J. Radiat. Res.*, 38, 179 (1997)。
- 6) T. Ohnishi, X. Wang, K. Ohnishi, H. Matsumoto & A. Takahashi : *J. Biol. Chem.*, 271, 14510 (1996)。
- 7) T. Ohnishi, N. Inoue, H. Matsumoto, T. Omatsu, Y. Ohira & S. Nagaoka : *J. Appl. Physiol.*, 81, 183 (1996)。
- 8) T. Ohnishi, K. Tsuji, T. Ohmura, H. Matsumoto, X. Wang, A. Takahashi, S. Nagaoka & A. Takabayashi : *Adv. Space Res.*, 21, 1077 (1998)。
- 9) K. Ohnishi, T. Yamamoto, A. Takahashi, T. Ueda, H. Tanaka & T. Ohnishi : *Parabolic Flight*, 8, 15 (1998)。
- 10) T. Ohnishi, A. Takahashi, K. Okachi, K. Ohnishi, H. Matsumoto, S. Takahashi, H. Yamanaka, T. Nakano & S. Nagaoka : *Biol. Sci. Space*, 11, 29 (1997)。

(高橋昭久, 大西 健, 大西武雄, 奈良県立医科大学生物学教室)