

両生類の行動に対する強磁場制御による微小および過重力環境の影響

藤原 好恒 (広大院・理), 柏木 啓子 (広大院・理), 中川 真依 (広大・理),
 新海 正 (東京都老人総合研究所), 柳澤 誠 (広大院・理), 古野 伸明 (広大院・理),
 花田 秀樹 (広大院・理), 鈴木 賢一 (愛媛大学 沿岸環境科学研究センター),
 勝 賢二郎 (熊本大学発生医学研究所), 山下 雅道 (宇宙航空研究開発機構),
 山本 卓 (広大院・理), 谷本 能文 (大阪大谷大学薬学部), 柏木 昭彦 (広大院・理)

Effects of Magnetically Controlled Microgravity and Hypergravity Environment on Amphibian Behavior

Yoshihisa Fujiwara^{*1}, Keiko Kashiwagi², Mai Nakagawa³, Tadashi Shinkai⁴, Makoto Yanagisawa²,
 Nobuaki Furuno², Hideki Hanada², Kenichi Suzuki⁵, Kenjiro Katu⁶, Masamichi Yamashita⁷,
 Takashi Yamamoto¹, Yoshifumi Tanimoto⁸, Akihiko Kashiwagi¹

^{*1}Graduate School of Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526

²Institute for Amphibian Biology, Graduate School of Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526

³Faculty of Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526

⁴Tokyo Metropolitan Institute of Gerontology, Tokyo 173-0015

⁵Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama, Ehime 790-8577

⁶Institute of Molecular Embryology and Genetics, Kumamoto, Kumamoto 860-0811

⁷ISAS/JAXA, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210

⁸Faculty of Pharmacy, Osaka Ohtani University, Tondabayashi, Osaka 584-8540

E-Mail: fuji0710@sci.hiroshima-u.ac.jp

Abstract: Effects of magnetically controlled gravitational environments of microgravity and hypergravity on the behavior in water of *Xenopus tropicalis* and *Xenopus laevis* in several developmental stages was studied with a strong superconducting magnet on the ground. The microgravity and hypergravity were created by operating a strong diamagnetic force in the opposite and same directions toward the gravitational force, respectively. At the magnetic center where there was no gravitational control and only effects of a magnetic field should be expected, the interesting effect of looping was observed for the first time in the tadpole stages of both *Xenopus tropicalis* and *Xenopus laevis*. Therefore, the looping effect observed here was interpreted as a magnetic field effect not a gravitational effect which was seen in a case of a medaka fish exposed to the microgravity environment by a parabolic flying. The magnetic field effect on the otolith, probably the magnetic orientation of it, may upset the sense of equilibrium as well as the effect of microgravity on medaka. This speculation is supported by the observation that such a seasick condition remains for some time even after taking out them from the magnet. Although the looping effect on the tadpoles was also observed in both magnetically controlled microgravity and hypergravity, the gravitational effect on the looping was unclear at present. However, the gravitational effect on buoyancy was observed in the tadpole of *Xenopus tropicalis*. Neither magnetic nor gravitational effect was observed on the neurula and tail bud stages of *Xenopus laevis* and primary developmental stages of the *Xenopus tropicalis* tadpole.

Key words; Amphibian, *Xenopus tropicalis*, *Xenopus laevis*, Neurula, Tail bud, Tadpole, Strong magnetic field, Magnetically controlled gravity, Microgravity, Hypergravity, Looping phenomenon, Otolith, Magnetic orientation

1. はじめに

宇宙環境の魅力はその微小重力環境にあると考え多くの研究がなされてきている中で、比較対象として地上の強磁場・重力制御環境の研究がある。文字通り、この環境は微小重力だけではなく重力制御の仕組み上、強磁場をも併せもつ複合環境場である。したがって、強磁場による影響と重力制御による影響の区別は重要となる。反対に、この複合の環境場であるからこそ、強磁場と重力制御の両方による協調効果も期待される興味深い環境場といえる。¹⁾

両生類であるカエルは、過去あった地球の磁極変化^{2,3)}にも耐えて生き延びてきた種であり、磁場の影響を研究するのに適した生物種である。我々のグループはアフリカツメガエルを使って、強磁場が発生異常をもたらすことを示してきた。^{4,5)} また、変態する種、進化の過程において水中から地上への移動過程にある種などの観点からみても、強磁場・重力制御環境の研究対象として非常に魅力的な種と言える。今回は、この強磁場・重力制御環境が両生類であるツメガエルの種々の発生段階に与える影響を明らかにし、宇宙の微小重力環境が生体に及ぼす影響の理解に役立てることを目的とする。

2. 実験方法

縦型超伝導磁石 (JASTEC, LH15T40) がもつ鉛直方向の強磁場と高勾配磁場を使ってつくる地上の微小重力環境は、強磁場内に置かれた生体に生じる反磁性磁気力を重力と同じ大きさで重力方向と反対方向に作用させることで得ることができる。したがって、この微小重力環境は宇宙のそれとは異なり、強磁場を併せもつ複合環境場となる。本研究の微小重力環境の磁束密度と見かけの重力は、それぞれ 10.7 T, ~0 G である。一方、過重力環境は、反磁性磁気力を重力方向と同方向に働くようにすることで得られ、そこでは 12 T, 1.8 G である。これらの他に、通常の重力の大きさをもつが、磁石の中心にあって最も磁場強度が強い磁場中心 (15 T, 1 G) と磁石の外である磁場外 (0 T, 1 G) の環境を併せて、4つの強磁場・重力制御環境が生体に与える影響を調べた。

生体サンプルには、両生類であるニシツメガエル (*Xenopus tropicalis*) のオタマジャクシの発生過程である粘性物質を出しそれで体を支持し餌はとらない時期、粘性物質が消失し餌を取り始める時期、

通常のおタマジャクシの形態となる時期と、アフリカツメガエル (*Xenopus laevis*) の発生過程である神経胚、尾芽胚、通常のおタマジャクシの形態となる時期のものを、生きたまま通常の飼育環境に近い環境下において実験に用いた。

各強磁場・重力制御環境に置かれたサンプルの様子は、CCD カメラを用いて水平方向からその場観察し、録画して解析に用いた。

3. 結果

各サンプルの各強磁場・重力制御環境における観察結果を表1にまとめた。

磁場外では、写真のように水面からぶら下がっている姿勢が多いニシツメガエルのオタマジャクシ (時期) にも、容器底面に横たわっている姿勢が多いオタマジャクシ (時期) にも、浮力への影響以外は強磁場・重力制御環境による影響は見られなかった。また、もともと動きが見られないアフリカツメガエルの神経胚と静止している状態が多い尾芽胚にも、同様に各環境による顕著な影響は見られなかった。

しかしながら、強磁場のみが存在し重力は通常の重力である磁場中心にセットされたニシツメガエルのオタマジャクシ (時期) では、ルーピング (ぐるぐると回転する運動) やねじれ運動の異常行動が観察された。更に非常に興味深いことに、ニシツメガエルのこのルーピングは生体を磁場の外に取り出した後もしばらくの間観察された。また、取り出された生体はかなり活動性が低下していて、通常行う尾部による泳動も力弱く、容器底に静止している状態が多くなった。また、体サイズの大きいアフリカツメガエルのオタマジャクシでも、同様にルーピングが観察された。麻酔下にあるオタマジャクシにはルーピング等の異常行動は見られなかった。

ただし、これら異常行動に対する微小重力と過重力それぞれの影響は、現段階においては不明瞭であった。どちらの環境下でも一様にルーピングやねじれ泳動の異常行動が観察された。これら以外には重力制御特有と思われる異常行動は観察されなかった。

一方、浮力に対する重力制御の影響が観察された。ニシツメガエルのオタマジャクシ (時期) では、総じて微小重力環境では沈み、過重力環境では浮く傾向が見てとれた。

4. 考察

4.1. 強磁場の影響

ニシツメガエルのオタマジャクシで観察されたルーピングやねじれ泳動は、磁場中心という重力は通常の重力のまま強磁場のみが存在する環境で観察されたことから、これらの異常行動は強磁場そのものが引き起こしていると考えられる。よって、これまでにパラボリック飛行の微小重力によって観察されたメダカのルーピングとはその作用機序が異なる。しかしながら、今回オタマジャクシで観察されたルーピングは、オタマジャクシの初期の段階 (時期と) では観測されなかったという発生段階依存性があったこと、また、磁場の外に取り出した後でもしばらくは継続されること、そしてそのときの生体は活動性が落ちてあたかも船酔いのような状態にな

る様子から、発生の段階で形成される平衡を司る器官がダメージを受けていることが予想される。今後、磁場に暴露した生体の薄片切片を作製し、耳石を始めとする平衡器官の形態学的観察を要するが、おそらく平衡器官内の耳石が強磁場によって磁気配向し、それが平衡感覚の情報伝達の不具合を引き起こしたものである。耳石の主成分の一つにヒドロキシアパタイトがあるが、その単結晶はある程度の大きさになると強磁場の中で向きが揃う磁気配向が起こることが知られている。⁶⁾ パラボリック飛行下のメダカは重力制御が原因であったのに対し、今回のオタマジャクシは強磁場によって平衡器官に不具合が生じた結果、ルーピングが起こったと考えられる。原因は異なるが、作用点は同じである。

4.2. 重力制御の影響

本研究における強磁場による微小重力と過重力がオタマジャクシに及ぼす影響は、残念ながら現段階では不明瞭である。上述のように、強磁場そのものがオタマジャクシにルーピングを誘発するため、重力制御による平衡器官への影響はその陰に隠れて見えにくくなっていると考えられる。本実験での微小重力及び過重力環境の磁場強度は、それぞれ 10.7 T, 12 T であり、それらは共にルーピングを引き起こした磁場中心の強磁場 15 T に近い値であるため、それらだけで充分ルーピングを誘発しているであろうと考えられるからである。

4.3. 重力制御の浮力への影響

ニシツメガエルのオタマジャクシ(時期)では、重力制御が浮力に及ぼす効果が観察された。総じて、微小重力では沈み、過重力環境では浮く傾向が見てとれた。強磁場・重力制御環境下におかれた水中のオタマジャクシにかかる力は、重力と反磁性磁気力である。これらの合力を、周囲の水にも同じようにかかる重力と反磁性磁気力の合力と比較した場合、オタマジャクシにかかる下向きの合力が大きければオタマジャクシは沈み、反対に水にかかる下向きの合力が大きければ浮くことになる。強磁場・重力制御環境下では、これら4つの力のバランスでオタマジャクシの浮力が決まる。磁場の外では、適度に調節された浮力であるが、強磁場内では反磁性磁気力のためにバランスが崩れる。それらのバランスは、オタマジャクシと水それぞれの反磁性磁化率と密度、そして環境の磁場強度と磁場勾配の大きさによって決まる。解析の結果、オタマジャクシの反磁性磁化率は、その絶対値が水のそれより小さいと求められた。

5. まとめ

地上で作る強磁場・重力制御環境が、ニシツメガ

エルとアフリカツメガエルの種々の発生段階に及ぼす影響をその場観察した。その結果、強磁場そのものがルーピングとねじれ泳動の異常行動を誘発することを、オタマジャクシを使って初めて明らかにした。これまでに、ルーピングそのものはメダカを使ったパラボリック飛行での微小重力環境で観察されている。おそらく本研究での強磁場の影響が及ぶターゲットも同じく平衡器官もしくは耳石そのものであるが、作用機序はパラボリック飛行の微小重力の場合と異なり、平衡器官もしくは耳石そのものの磁気配向が原因と考察された。

強磁場を使った重力制御テクニックのメリットの一つは、地上で安全に安価にそして半永久的に時間の制約に捕らわれずに微小重力環境を再現できる点にあるが、今回の研究では、地上の強磁場・重力制御環境が強磁場と重力制御の複合の環境場であることを明確に示したと言える。そして、宇宙では微小重力環境だけではなく、中性子星のように今回用いた強磁場よりはるかに強力な磁場環境も存在することから、宇宙環境利用に関する研究は、重力制御と強磁場の両面による研究が望まれる。

6. 謝辞

この研究の一部は、平成23年度大阪大谷大学薬学部共同研究費の援助によって行われました。

7. 参考文献

- 1) Y. Fujiwara, N. Shibata, Y. Matsumoto, and Y. Tanimoto, Effect of Hypergravity Created by Strong Magnetic Force on Orientation of Porphyrin Nanorods, *J. Magn. Magn. Mater.*, **310**, 2859-2861 (2007).
- 2) Uffen, R.J., *Nature*, **198**, 143-144 (1963).
- 3) Raup, D.M., *Nature*, **314**, 341-343 (1985).
- 4) Kawakami, S. et al., *Jap. J. Appl. Phys.*, **45**, 6055-6056 (2006).
- 5) 柏木昭彦, 他, 両生類の生活環に対する強磁場の影響—初期発生の形態学のおよび分子生物学的解析, *宇宙利用シンポジウム (第26回)*, L42 (2010).
- 6) J. Akiyama, M. Hashimoto, H. Takadama, F. Nagata, Y. Yokogawa, K. Sassa, K. Iwai, and S. Asai, *Mater. Trans.*, **46**, 2514 (2005).

表1 各強磁場・重力制御環境がツメガエルに及ぼす影響

両生類	ステージ	磁場外のスナップショット	強磁場・重力制御環境		
			微小重力 (10.7 T, ~0 G)	磁場中心 (15 T, 1 G)	過重力 (12 T, 1.8 G)
ニシ ツメガエル	オタマ ジャクシ (時期)		浮力への僅かな影響が見られた		
	オタマ ジャクシ (時期)		顕著な影響は見られない		
	オタマ ジャクシ (時期)		<ul style="list-style-type: none"> ・激しいルーピングとねじれ泳動が見られた ・磁場外に出しても暫くはルーピングが残存した ・磁場外に出したとき活動性が低下していた ・浮力への影響（微小重力では沈み，過重力では浮く）が見られた 		
アフリカ ツメガエル	神経胚		顕著な影響は見られない		
	尾芽胚		顕著な影響は見られない		
	オタマ ジャクシ		ルーピングとねじれ泳動が見られた（体サイズに依存している傾向が見られる）		