

# 微小重力下におけるティラピアの遊泳と摂餌行動に関する研究

東京海洋大学 竹内俊郎、遠藤雅人

## Study on swimming and feeding behavior of tilapia under microgravity

Toshio Takeuchi and Masato Endo

Tokyo University of Marine Science and Technology, Konan, Minato, Tokyo 108-8477

E-Mail: asteroid@kaiyodai.ac.jp

**Abstract:** Relationship between swimming behavior and feeding behavior of juvenile tilapia *Oreochromis niloticus* fed on water flea *Moina macrocopa* were investigated under microgravity. The fish controlled their posture with dorsal light response and voluntarily fed the water flea under visible light, while the fish could not feed when it showed abnormal swimming in the conditions irradiated near infrared light. In the infrared light, two types of abnormal swimming i.e., looping and rolling were observed and strain difference was confirmed in the pattern of abnormal swimming.

**Key words:** Feeding Behavior, Microgravity, Tilapia, Water Flea

我々はこれまでに人工的な食物連鎖を利用した魚類の継代飼育による食料生産技術確立するため、微細藻類(スピルリナ、クロレラ、ユーグレナおよびセネデスマス)、動物プランクトン(タマミジンコ)、魚類(ティラピア)からなる閉鎖生態系循環式養殖システム(Closed Ecological Recirculating Aquaculture System, CERAS)の開発を目指し、研究を進めてきた。また、我々は本システムを将来の宇宙環境下における食料生産、特に動物性タンパク質生産に適用可能と考えている<sup>1-3)</sup>。

宇宙環境下における養殖システムの確立には上記の物質循環系の確立とそれぞれの水棲生物における地上とは異なる重力環境下での行動観察が必要であった。そのため、我々は微小重力下におけるティラピアの視感度と姿勢保持の関係を調査するため、航空機を用いた研究も同時に進めてきた。一般に魚類は重力のない環境に曝されると平衡感覚を失い、ローリングやルーピングなどの異常遊泳行動を示すことが知られている<sup>4)</sup>。我々はティラピアの微小重力耐性形質について調べるため、過去2回の航空機実験において密閉式魚類行動観察装置に魚を収容し、その行動を観察した<sup>5-9)</sup>。その結果、750nm以下の光を照射することにより、ほとんどの個体が背光反射を示して自らの姿勢を正常に保持できること、この姿勢保持において、視覚依存性から平衡感覚依存性へ移行する重力値は約0.1Gであり、0.2G条件下においては大半の個体が重力に依存すること、ティラピアの中には780nmの近赤外光をも認識できる個体が存在し、この形質は遺伝することなどを明らかにした<sup>5-8)</sup>。現在、これらの個体の形質固定を行っている。

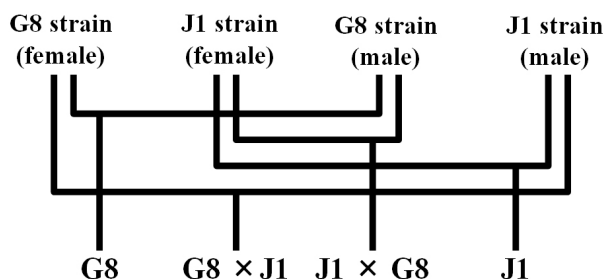
本研究ではこれらの知見を基に、微小重力下におけるティラピアの遊泳行動における系統差と動物プランクトン-魚類間の被食・捕食の行動様式を調査することを目的とし、微小重力実験に用いたティ

ラピアの子孫を供試し、タマミジンコを餌として与える航空機実験を行った。同時に自動給餌装置の技術開発のための基礎的データ収集を図ることも目的とした。

## 材料および方法

### 供試生物

餌料生物として枝角目ミジンコ科に属するタマミジンコ *Moina macrocopa* を用いた。増殖した個体群より、512μmのメッシュスクリーンで選別した親虫を供試した。魚類はナイルティラピア *Oreochromis niloticus* を用いた。Fig. 1に今回の実験で用いた個体の家系を示す。本研究室において過去に行われた航空機実験(1997年および1999年)で微小重力下における遊泳行動の系統差が示唆された微小重力耐性系統(G8系統)および光感知能力が劣る系統(J1系統)群から親魚を選抜し、人工授精により得られた稚魚(体長: 33.2±0.52mm)を用いた。供試個体はG8系統、J1系統および系統間の交配個体を1水槽につき6個体、計12個体を用いた。なお、個体名は系統名の後に番号を付記することで表した。



**Fig. 1** The pedigree diagram of *O. niloticus* tested for investigation of strain difference in postural control and swimming behavior under microgravity.

## 実験装置

実験にはアクリル製小型密閉式水槽(幅80×奥行80×高さ80mm, 容積約500ml)を2個設置した密閉式魚類観察装置(東洋エンジニアリング(株))を使用した。1水槽につき供試魚6個体を収容した。マグネットポンプを用いて水槽-中空糸膜間で飼育水を循環させた。また、エアーポンプにより中空糸膜中でガス交換を行い、溶存酸素を維持した。照明は可視光として白色LED、発光波長 $880\pm 40\text{nm}$  LED(以下、880nm 近赤外光と記す)、発光波長 $950\pm 45\text{nm}$  LED(以下、950nm 近赤外光と記す)をそれぞれ39、63および54個配置した基盤を用い、水槽下部から照射した。各照射光の放射熱量は、可視光 $0.53\text{W/m}^2$ 、880nm 近赤外光 $8.19\text{W/m}^2$ および950nm 近赤外光 $8.31\text{W/m}^2$ であった。

ティラピアの行動撮影は水槽正面から行い、可視光条件下ではカラーCCDカメラ、近赤外光条件下ではモノクロCCDカメラを使用した。

## タマミジンコ自動供給装置の開発

微小重力下におけるティラピアの摂餌行動を調査するため、微小重力突入後にタマミジンコを水槽内へ自動供給するシステムを開発した。供給装置の概要をFig. 2に示す。本システムは、タマミジンコ収容バッグからローラーポンプによりタマミジンコを水槽内へ供給する仕組みである。微小重力突入後に航空機から送信されるG信号を検知後、0.5秒後に、5秒間の設定で給餌ポンプを作動させた。この設定により、タマミジンコがG信号感知から平均2.80秒後に5秒間連続で水槽内へ供給された。タマミジンコは航空機実験1フライトにつき400個体を飼育水とともにバッグに収容した。以上の装置開発により、摂餌実験1回、1水槽につき平均14個体のタマミジンコを供給できた。

## 航空機実験

実験装置を航空機(ガルフストリームII, ダイアモンドエアサービス(株)運行)の実験ラックに固定し、航空機実験を行った。

機上での映像記録には航空機内に搭載されたデジタルビデオデッキを用い、オンスクリーン表示装

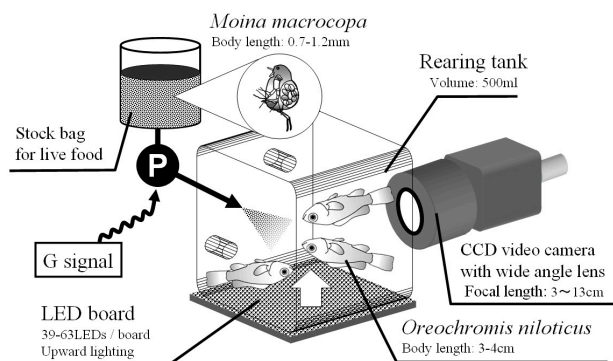


Fig. 2 Scheme of an automatic feeding and observation system for *O. niloticus* under microgravity.

置により画面上に重力値、時刻、G信号開始からの時間を同時記録した。光照射は、可視光(白色光)、880nm 近赤外光および950nm 近赤外光の3条件とした。また、各フライトにおいてタマミジンコを供給する放物線飛行は6~8回とし、それ以外の放物線飛行では無供給とした。また、対照実験として地上で同条件の摂餌実験を行った。

## 映像解析方法および評価方法

解析は映像再生ソフトを用いて行い、航空機実験および地上対照実験における供試魚の遊泳行動および摂餌行動を時間で評価した。解析映像数は可視光下においては3実験、880nm および950nm 近赤外光においてはともに2実験とした。行動パターンの分類は、正常遊泳として光源に対して背側を向ける背光反射(DLR: Dorsal Light Response)および水槽壁面に腹側を密着させる向壁反射(VSR: Ventral Substrate Response)との2つに分類した。また、異常遊泳は頭部を下方へ向ける頭部下降(以下、Head down と記す)、体軸を中心に体側方向へ傾くティルティング(Tilting)、体軸を中心として左右へ回転するローリング(Rolling)、腹部を中心として前方向へ回転するルーピング(Looping)に分類し、それぞれの行動を示した時間の微小重力暴露時間に占める割合を算出した。

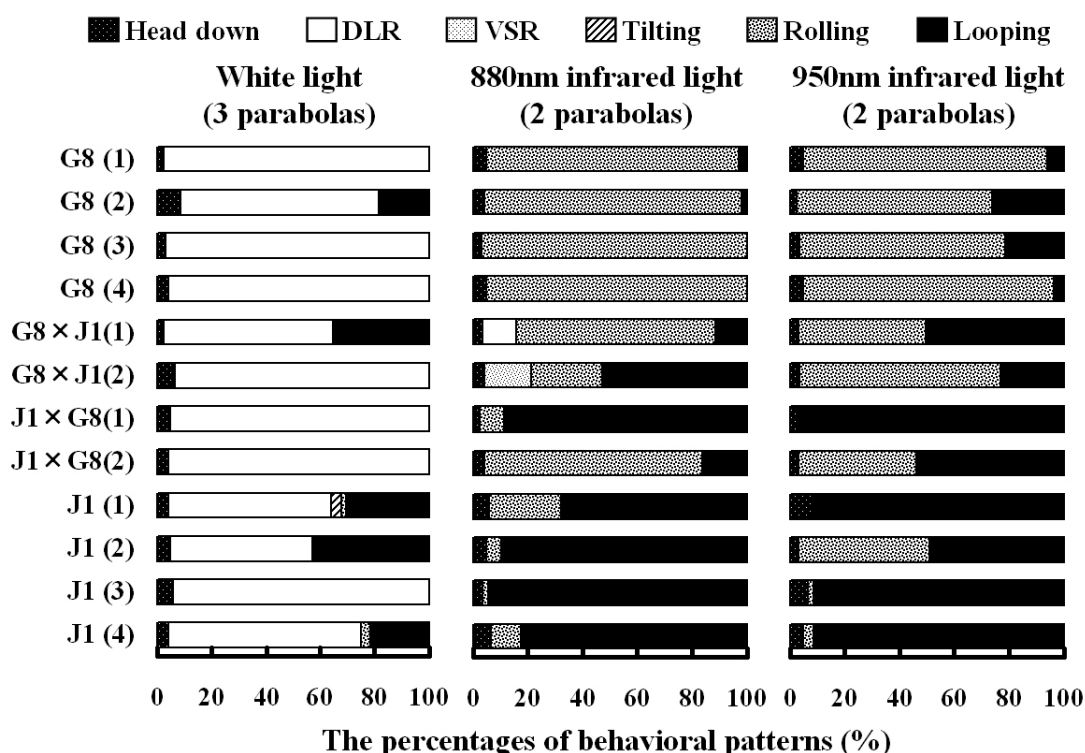
続いて、行動パターンを評価した映像と同様の実験映像において摂餌の有無を確認し、摂餌が観察された場合には摂餌時の遊泳行動を確認した。

## 結果および考察

### 微小重力下における遊泳行動と系統差

白色光および2種類の近赤外光照射条件下における個体別遊泳行動パターンをFig. 3に示す。12個体全てが背光反射による正常遊泳を示した。その正常遊泳率は個体間でばらつきが見られたが、系統別の平均値では $J1 < G8 \times J1 < G8 < J1 \times G8$ の順であった。系統間で正常遊泳率に有意差は認められなかったが、親魚の微小重力耐性形質を概ね反映する結果となった。また、白色光下で観察された異常遊泳行動はほぼLoopingであった。

880nm 近赤外光下における行動パターンについて、 $G8 \times J1(2)$ はVSRにより、 $G8 \times J1(1)$ はDLRにより、僅かではあったが、正常遊泳を行った。880nm 近赤外光下で正常遊泳個体が観察されたことは、我々が行った過去の航空機実験の結果と一致するものである<sup>5,9)</sup>。また、その他の個体はHead downを示した後に異常遊泳を示した。系統別で行動パターンを比較すると、Rolling率とLooping率でG8およびJ1系統間で有意差が見られた(Tukeyの多重比較検定,  $p < 0.05$ )。その値はRolling率で $94.5 \pm 2.1\%$ および $10.9 \pm 11.0\%$ 、Looping率で $1.2 \pm 1.4\%$ および $83.7 \pm 11.8\%$ であり、両系統の交配個体における平均はこれらの値の間に位置していた。



**Fig. 3** The percentages of behavioral patterns in total time of individual *O. niloticus* with exposed microgravity under three kinds of light conditions. The individuals were named for strain and number in parentheses. DLR: dorsal light response; VSR: Ventral substrate response.

950nm 近赤外光下における行動パターンについては、全ての個体が Head down を示した後に異常遊泳を示し、正常遊泳は観察されなかった。このことから、ティラピアの光感知、すなわち背光反射および向壁反射による姿勢保持は 950nm LED を使用した際は不可能であることが分かった。系統別による比較を行なった結果、880nm 近赤外光下と同様に Rolling 率と Looping 率で G8 および J1 系統間で有意差が見られた (Tukey's test,  $p < 0.05$ )。値は Rolling 率で  $81.8 \pm 9.9\%$  および  $13.4 \pm 23.3\%$ 、Looping 率で  $14.2 \pm 10.8\%$  および  $80.8 \pm 21.2\%$  であり、両系統の交

配個体における平均も同様にこれらの値の間に位置していた。

このことから、今回使用したティラピア 2 系統の間における微小重力下の遊泳行動、特に光感知が困難な場合の異常遊泳行動のパターンに差があることが分かった。

#### 微小重力および地上における摂餌個体数の比較

Table 1 に微小重力下および地上における個体別のタマミジンコ摂餌数および摂餌割合を示す。白色光照射時においては地上と同様に微小重力下でも供試した全ての個体で摂餌が観察された。また、こ

**Table 1** The number of feed intake and percentages of feed intake by each fish in feeding experiments under microgravity and above grand

Condition			Tank A								Tank B							
Gravity	Illumination	Feed intake	G8 (1)	G8 (2)	G8 x J1 (1)	J1 x G8 (1)	J1 (1)	J1 (2)	Total feeding	Food supply	G8 (3)	G8 (4)	G8 x J1 (2)	J1 x G8 (2)	J1 (3)	J1 (4)	Total feeding	Food supply
$\mu$ G	Visible light	Number (ind.)	3	3	8	14	5	7	40	52	3	1	6	5	4	3	22	22
		Percentage (%)	5.5	5.8	14.7	26.8	10.4	13.3	76.5	100.0	14.3	5.6	27.0	18.5	20.6	14.0	100.0	100.0
	Infrared light (880nm)	Number (ind.)	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	29
		Percentage (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	Infrared light (950nm)	Number (ind.)	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	24
		Percentage (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1G (ground)	Visible light	Number (ind.)	4	2	5	16	5	8	40	40	2	10	15	4	3	4	38	38
		Percentage (%)	11.4	4.8	11.0	43.0	12.3	17.6	100.0	100.0	5.6	25.4	40.1	10.3	7.9	10.7	100.0	100.0
	Infrared light (880nm)	Number (ind.)	2	0	0	0	0	0	36	36	1	0	2	0	1	0	30	30.0
		Percentage (%)	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	100.0	3.6	0.0	7.1	0.0	3.1	0.0	13.8	100.0
	Infrared light (950nm)	Number (ind.)	0	0	0	0	0	0	33	33	0	1	1	0	0	0	24	24
		Percentage (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	3.6	5.0	0.0	0.0	0.0	8.6	100.0

の微小重力下における摂餌時の行動パターンは、全て背向反射による定位行動であった。このことから、微小重力下では可視光下において背光反射による定位の上に摂餌が成り立つことが明らかとなった。これは姿勢保持と摂餌行動が密接に関係しており、姿勢保持が不可能な場合は摂餌も不可能であることを示すものである。このことから、微小重力下において魚に給餌を行うためには姿勢保持が可能となる光照射条件の設定が必要不可欠であることが明らかとなった。なお、摂餌行動に関しては系統間の差は認められなかった。

一方、微小重力下近赤外光照射時では、880nm 近赤外光下で短時間ではあるが正常遊泳を行った G8×J1(2)および G8×J1(1)個体を含め、全ての個体で摂餌が観察されなかった。しかし、地上における近赤外光照射条件では 880nm 近赤外光下で 4 個体、950nm 近赤外光下で 2 個体が摂餌した。そのタマミジンコ摂餌個体数を可視光下の摂餌個体数と比較すると非常に少なく、十分な摂餌が行われなかったと推察される。先に述べた通り、950nmLED 光はティラピアに対して完全な暗視野であると考えられる。摂餌個体数はわずかであったが、このような光感知が困難な状況で摂餌行動が観察されたことは、可視光下での索餌とは異なり、別の感覚器によりタマミジンコの認知と摂餌が行われたと考えられた。

#### 微小重力下および地上における摂餌行動の比較

微小重力下では可視光下において摂餌行動が観察されたことから、微小重力下と地上における摂餌行動の比較を行うため、摂餌割合、捕食時間(視認して餌に突進し、捕食するまでに要した時間)、初回摂餌時間(タマミジンコが水槽に供給されてから最初に摂餌するまでに要した時間)、および摂餌間隔(1 実験中に 2 回以上の摂餌が行われた際の摂餌の間隔)を計測した。これら 4 項目において両条件間で有意差は認められなかった( $t$ -検定,  $p>0.05$ )。このことから、微小重力下においてティラピアは地上と同様の摂餌行動が可能であることが明らかとなった。

#### 結語

本研究からティラピアの遊泳行動、特に暗視条件下の異常遊泳行動に系統差があること、微小重力下におけるティラピアの摂餌行動は可視光下における背光反射による正常遊泳の上に成り立つことが新たに示された。また、装置面ではタマミジンコ自動供給装置が微小重力下で正常に動作することも確認できた。

これは我々の目指す宇宙環境下における閉鎖生態系における魚類生産の可能性を 1 歩前進させる結果であり、微小重力下における魚類の摂餌に関しての新知見も含んでいる。今後はさらにこれまでの知見と本研究結果を合わせて微小重力下における

水圏閉鎖生態系実験の提案や地上における水圏物質循環システムの構築を進める予定である。

#### 謝 辞

本研究は平成 17 年度選定「第 8 回宇宙環境利用に関する公募地上研究-微小重力下における魚類の姿勢保持と摂餌行動に関する研究」の一環として行ったものである。装置製作に関してはエコーモデルエンジニアリング(有)の皆様にご尽力いただいた。また、航空機実験の実施に際し、ダイヤモンドエアサービス(株)の皆様には多大なるご支援、ご協力を賜った。ここに謝意を表する。

#### 引用文献

- 1) 竹内俊郎, 遠藤雅人, 2004: 閉鎖循環式養殖システムの最近の進歩, *Eco-Engineering*, **16**(1), 15-20.
- 2) 遠藤雅人, 竹内俊郎, 2004: 異なる光および重力環境下におけるティラピアの行動観察からみた宇宙養殖の可能性. 第 48 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 48, p. 76.
- 3) 遠藤雅人, 2006: めだかの学校第 10 回〜若手研究者の横顔〜宇宙で養殖を行うためには, *月刊養殖*, **43**(1), 84-85.
- 4) von Baumgarten, R. J., Baldrighi, G. and Shillinger, G. L. Jr., 1972: Vestibular behavior of fish during diminished G-force and weightlessness. *Aerospace Med.*, **43**, 626-632.
- 5) 竹内俊郎, 吉崎悟朗, 倉澤 聡, 遠藤雅人, 廣田哲也, 鈴木克徳, 木部勢至朗, 上田 匡, 田仲広明, 1998: 航空機を用いた微小重力環境下における水棲生物の重力感知・応答実験, *パラボリックフライト ―航空機微小重力実験結果報告―*, **8**(3), 21-28.
- 6) 竹内俊郎, 遠藤雅人, 小林龍太郎, 有賀恭子, 吉崎悟朗, 坂本隆幸, 神吉良二, 2000: 閉鎖生態系循環式養殖システム(CERAS)の開発に関する研究 VII. 小重力(low G)が及ぼすティラピア遊泳行動への影響, *CELSS 学会誌*, **13**(1), 27-32.
- 7) 竹内俊郎, 遠藤雅人, 小林龍太郎, 有賀恭子, 吉崎悟朗, 坂本隆幸, 神吉良二, 2000: 閉鎖生態系循環式養殖システム(CERAS)の開発に関する研究 VIII. 微小重力下におけるティラピア遊泳行動の系統差. *CELSS 学会平成 12 年度学術講演会講演集*, pp. 27-30.
- 8) 小林龍太郎, 遠藤雅人, 吉崎悟朗, 竹内俊郎, 2002: 回転ドラム追従実験によるティラピアの近赤外光感知能力の測定およびその系統差. *日本水産学会誌*, **68**(5), 646-651.
- 9) 遠藤雅人, 小林龍太郎, 有賀恭子, 吉崎悟朗, 竹内俊郎, 2002: 微小重力および近赤外光照射下におけるティラピアの姿勢保持. *日本水産学会誌*, **68**(6), 887-892.