

IIII 特集：生態工学 IIIII
(解説)

閉鎖系における魚類の生産と微小重力の影響

遠藤 雅人・竹内 俊郎

Effect of Production on Fish under the Closed Systems and Microgravity

Masato ENDO and Toshio TAKEUCHI

Abstract

Artificial fish production is one of the important food supply system in the world. On the other hand, aquaculture has been a pollutant source of natural water environment in no small part. This explanation introduces closed recirculating fish culture system which is expected to develop the aquaculture technology and improve economy further. The system has a lot of advantages including environmental conservation and food safety compared with other aquaculture systems. Furthermore closed ecological recirculating aquaculture system using artificial food chains is explained for the futural situation of aquaculture in space as the derivative technology with our accumulated knowledge on the management of the artificial food chain, rearing systems and postural control mechanism of aquatic animals under various gravity environments. Finally, the direction of future perspective for aquaculture function, technology and economics is discussed from the aspect of eco-engineering.

Keyword(s): closed system, fish, aquaculture, microgravity, production

1. はじめに

21 世紀に入りすでに 12 年が経過した。ミレニアム当時、今世紀を展望した際、次のトリレンマが大きく立ちはだかるといわれた。1) 先進国と発展途上国間の経済格差、2) 人口爆発、3) 地球環境問題、これらの問題は、ますます現実を帯び、あるいは着々と進行し、水圏の研究に携わる我々、特に増養殖を中心とした水産業に立脚した研究にかかわる者がこれらの解決と今後の方向性を示すことは極めて重要である。

現実に目を向けると、エビをはじめとする発展途上国からの水産物の大量輸入、それに伴うマングローブ伐採による沿岸環境の荒廃、食料、特にタンパク源の海洋（河川・湖沼を含む）からの供給量の増加、集約的養殖による自家汚染の蔓延など、我々が解決しなければならない課題は多い。1992 年リオデジャネイロの国際会議で確認された“Sustainable Development”から 20 年、昨年 6 月に“国連持続可能な開発会議（リオ+20）”が開催され、「我々の求める未来」についての成果文書が合意された。同文書中、「グリーン経済は持続可能な開発を達成する上で重要なツールであり、それを追求する国による共通の

取組として認識すること」、が必要とされ、特に農林水産分野では、「各国の多様な農業を考慮した持続的な農業生産の増大と生産性の向上」が謳われている。このような中、我々としては、水圏における資源の循環再生型・持続的発展型飼育などの取り組みが今後さらに重要になるものと考えている。

そこで、本解説では、世界的に生産量が伸びている養殖漁業を今後さらに発展させる目的で、完全閉鎖系養殖システムについて紹介するとともに、将来宇宙での養殖を想定した場合、水棲動物の微小重力環境下における姿勢制御などについてのこれまでの知見を述べ、今後の方向性について論じる。

2. 完全閉鎖系養殖システム

2.1 閉鎖循環式養殖システム¹⁾

2.1.1 概念

閉鎖循環式養殖は、物質排出を抑えて飼育水を循環濾過して再利用するため、海水採取が直接不可能な内陸でも海水魚の養殖が可能であるという利点を持っており、

国立大学法人 東京海洋大学 大学院 海洋科学技術研究科 海洋科学系 〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7
Division of Marine Science, Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477 Japan
(E-mail: asteroid@kaiyodai.ac.jp, take@kaiyodai.ac.jp)

水族館の水処理技術を応用した養殖システムである。これまで行われていた天然水域での水産養殖を陸地に拡大する画期的な養殖方式である。飼育の面では様々な魚介類において実績を上げており、国内においては比較的高額で取引されるヒラメ、マダイ、トラフグ、クエ、クルマエビ類、アワビ類の飼育例がある。特に海から遠く離れた山岳地域においても海産魚の養殖が試みられ、「森のヒラメ」や「山のトラフグ」生産などの実績がある。

また、この飼育水の循環利用が画期的な隔離性を生み出し、自然環境と独立した養魚環境の創出を可能にしている。そのため、台風、赤潮などの自然環境からの影響を受けにくく、水質汚濁物質の負荷等の自然環境への悪影響を防止することができる。さらに水温管理、感染症の防止、廃棄物回収等が容易で養殖環境を自由に制御することも他の養殖法にない利点である。

2.1.2 水質浄化

水産生物、特に魚類飼育における重要な技術の一つとして飼育水管理が挙げられる。特に、閉鎖循環式養殖システムにおいては魚から排泄された物質はシステム内に蓄積されることから、その処理過程が極めて重要である。

一般的な海水魚の閉鎖循環式養殖の模式図を Fig. 1 に示す。水処理は固形物の除去、懸濁物の除去、溶存態有害物質の無毒化・除去、殺菌の過程から構成される。固形物の除去に関しては重力による沈殿の他、最近では回転ドラムスクリーンを用いた洗浄式フィルターやサイクロン技術を導入した固液分離装置の開発も進められている^{2,3)}。懸濁物の除去に関しては主に海水魚飼育で用いられている泡沫分離装置がある。これは飼育水中に空気や酸素の微細気泡(数百 μm)を発生させ、気液界面に懸濁物質が付着する原理を利用したもので懸濁物が付着した気泡が浮上し、水面で崩壊することで懸濁物が濃縮・回収される⁴⁾。

溶存態有害物質の無毒化・除去に関しては排泄されたアンモニアを硝酸イオンに酸化する硝化、硝酸イオンを窒素ガスとしてシステム内から除去する脱窒がある。こ

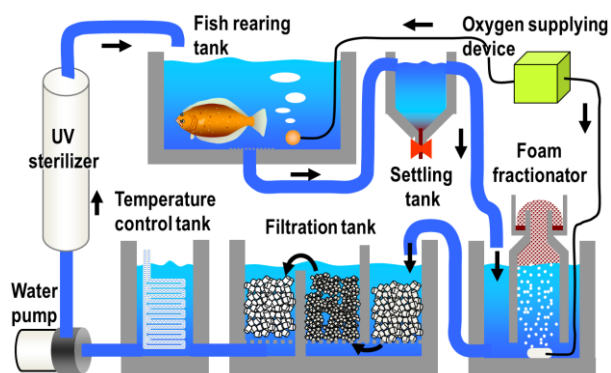


Fig. 1 Basic construction of a closed recirculating aquaculture system

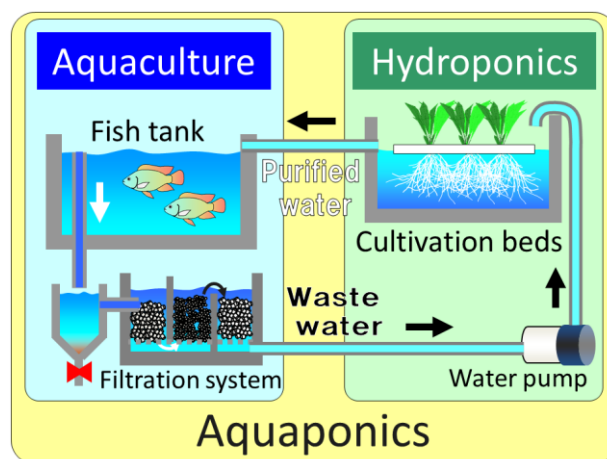


Fig. 2 Conceptual scheme of aquaponics system

れらの過程は微生物の作用を利用することから生物濾過と呼ばれる。これらの生物は固着性であるため、生物濾過槽内に多孔質の濾材を充填し、微生物を増殖させて用いる。硝化にはアンモニア酸化細菌および亜硝酸酸化細菌が用いられ、好気的環境下で反応が進行する。一方、脱窒は嫌気的環境下でグルコース、メタノール⁵⁾および硫黄などをエネルギー源として種々の脱窒細菌を用いて行われる⁶⁾。殺菌に関しては水処理の最終段階で行われる。飼育水に直接紫外線を照射して殺菌する紫外線殺菌や微量のオゾン溶解して殺菌を行うオゾン殺菌の他、海水では電気分解により、塩素を発生させる電解殺菌が可能である⁷⁾。

閉鎖循環式養殖における完全閉鎖を成立させるためには排泄される物質を総合的に除去する必要がある。現在、物質の総合的な除去は植物の物質同化作用のみである。これに関しては古くから研究が進められている「アクアポニックス」と呼ばれている複合型食料生産システムがある。概略図を Fig. 2 に示す。アクアポニックスとはアクアカルチャー(養殖)とハイドロポニックス(水耕栽培)とを組み合わせてできた造語であり、実際には養魚の飼育水を水耕栽培用の培地として利用し、魚類から排泄される物質を肥料として栽培する植物に吸収させて、水質浄化を行う。代表的な知見としてティラピアの養殖とトマト、レタスの水耕栽培との組み合わせ⁸⁾やアメリカナマズとトマトの組み合わせがあり、その他、幾つかの養殖魚種と水耕栽培種を用いて既に実用化されている。

また、海水魚飼育においては海藻の利用や微細藻類の利用も試みられている。これは閉鎖生態系概念を取り入れたものである。微細藻類の利用に関しては閉鎖生態系の項で詳しく論じる。

2.1.3 環境制御

水産養殖では、その生産性を向上させるため、利用する生物の特性を十分に理解し、その生物の潜在的な能力を

最大限に引き出す飼育法が望まれる。閉鎖循環式養殖システムでは、光や飼育水の塩分といった様々な環境因子を制御することが可能であるため、成長促進、飼料転換効率の向上や再生産の制御などを行うことが可能である。我々はこれまでに淡水魚のティラピアを用いて光の周期を短縮して給餌を行い、飼育水の塩分を魚の浸透圧に近いものにするると成長が促進されること⁹⁾や光周期を短くすることで産卵を抑える効果¹⁰⁾を実証している。さらに、自動給餌、自動水質モニタリング、自動調光および自動監視を取り入れた総合的な養殖施設の自動化に関する研究に取り組んでおり、これによって環境制御を行い、夜間に無人で給餌や水質調整を行い、成長を促進させる技術の構築を進めている¹¹⁾。

2.1.4 食品安全

閉鎖循環式養殖システムを持つ完全な飼育環境の制御と隔離性を活用すれば、生産量、生産性および生産物の質の向上を図ることができる。閉鎖循環式養殖施設内で繁殖技術により世代を越えて水産物の飼育を行った場合、ニーズに合わせた品種の作出が可能となり、世代を遡って血統書のような家系の履歴、適正な飼育環境、摂餌した餌・飼料の種類や量をデータとして精密に記録することが可能となる。いわば、究極の HACCP およびトレーサビリティを実現できると考えられる。また、食の安全が完全に約束された水産物の生産が可能になる。具体的にはフグ毒に代表される魚貝毒やダイオキシン、重金属等の有害物質の侵入・蓄積は防止でき、海面で生産された養殖魚や天然水産物よりも安全な食品が提供できる可能性もある。特に魚貝毒や重金属の侵入防止と同様にシステム内に病原体を持ちこまなければ、感染症の発生も防止でき、投薬する必要もない。これにより SPF 豚のような特定の病原体を持たない水産物の生産も可能となり、これまでに SPF エビの生産技術が確立している。

2.1.5 廃エネルギーの利用

閉鎖循環式養殖における生産コストの大半は電気代と施設費用である。“海面いけす”での養殖あるいは天然海水を利用する“掛け流し式”陸上養殖と比較すると電気代が上乗せされるため、コスト高となり、採算が取りにくい。実際に生産コストの 1/3~1/2 はエネルギー代で占められ、特に調温コストに関してはその大半を占める。

そこで廃エネルギーを利用した閉鎖循環式養殖システムの研究を進めている。近年、エネルギー創出の観点から様々なバイオマスや工場排熱を利用する発電方式が検討されている。その中でも 50°C 以下の低温排熱の利用は非常に難しいとされている。そこで我々はその排熱を養殖に利用することを提案している。現在、北海道の牧場から出る廃棄物をガス化して発電を行い、その発電の際に出る排熱をトラフグ養殖に利用するプロジェクトを進

めている。このバイオマスを用いた発電と閉鎖循環式養殖の組み合わせは排熱の有効利用を目的としており、東北地方などの比較的気温の低い地域に適している。その他、安定的な電力が得られる水力発電や温泉排水の熱利用など、さまざまな廃エネルギーの探索が必要であり、経済性を高める上で非常に有効であると考えられる。一方、飼育水の冷却に関しても地下水や冷熱利用、高温排熱のエネルギーを利用した冷却装置についても検討を進めている。

2.2 閉鎖生態系循環式養殖システム

2.2.1 概念

将来、宇宙環境下において人類が自給自足を行って生活する場合、人間を中心とした人工的な環境を創出する閉鎖生態系生命維持システム (CELSS) が必要である。

CELSS のサブシステムには太陽光発電や電池・電源供給装置を含むエネルギー生産・供給サブシステム、汚水を処理する水浄化システム、空気を調整・管理するガス再生システム、廃棄物を肥料等に交換する廃棄物処理システム、供給された物質から食料を作り出す食料生産サブシステムなどがあり、これらの中で物質循環を制御して環境を維持する。これらのサブシステムの中で食料生産サブシステムは、植物栽培を基本とした食料の供給、栄養塩と二酸化炭素の吸収および酸素の再生を同時に行う生物を主体とした装置群である。さらに食の多様性と恒久的な食料生産を考えた場合には動物性タンパク質の供給が不可欠であり、食用となる動物の飼育が必要となる。

一方、魚類は宇宙開発の初期から宇宙空間における動物実験に用いられている。メダカを用いた飼育実験では微小重力下における産卵および受精卵の孵化が達成されており、重力のない場所でも魚類が世代交代できることが示された¹²⁾。このように魚類は微小重力下で飼育が可能であるとともに繁殖できることが示されているばかり

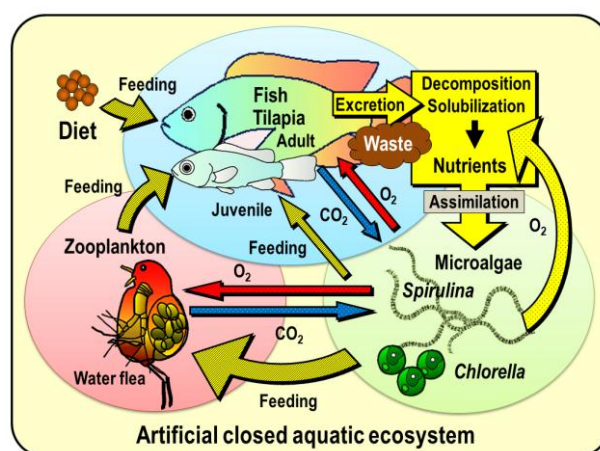


Fig. 3 Material recycle in the closed recirculating aquaculture system, CERAS

でなく、他の食用動物の飼育と比較して飼育に要する空間も少なく、臭いも発生しない。従って宇宙閉鎖環境下における魚類飼育は陸上動物の飼育と比較し、非常に簡単であると言える。

そこで我々はこの動物性タンパク質の供給源として魚類養殖の適用を目指して研究を進めてきた。CELSSの食料生産サブシステムにおいては物質変換の効率化が求められ、特に動物性タンパク質の生産においては閉鎖生態系内の人間の営みと同様にサブシステム内で物質循環の効率化を図る必要がある。我々はこれらの観点から、人工生態系の概念を取り入れた閉鎖生態系循環式養殖システム（Closed ecological recirculating aquaculture system, CERAS）の構築を目的とした研究を進めている。Fig. 3にCERASの物質循環について示す。CERASは魚類養殖システムに微細藻類を用いた栄養塩吸収および酸素再生システムを取り入れ、副産物として得られた微細藻類のバイオマスを養殖魚に直接給餌したり、動物プランクトンに捕食させ、魚類稚魚の餌料として用いることで人工閉鎖生態系を作り出し、物質循環を行おうとするものである。これまでにティラピア *Oreochromis niloticus* を養殖魚の候補として宇宙における養殖の可能性について検証を行ってきており、それらの研究を中心に、宇宙におけるCELSS内で生活するための食料生産サブシステムとしての魚類養殖について以下にまとめる。

2.2.2 食料生産サブシステム内での物質循環系の構築

CERASの物質循環では地上における物質循環型の養殖システム概念に付け加えて気体の物質循環と重力への対応が必要である。我々はまず、宇宙での魚類飼育を想定し、人工肺を装備した密閉式魚類飼育装置（総水量：約60L）を開発した。概要をFig. 4に示す。この飼育装置を用いてティラピアの半年間にわたる無換水飼育に成功し、約10gの稚魚が470gまで成長した。また、その際にティラピアから排泄されるアンモニアは飼育水の循環

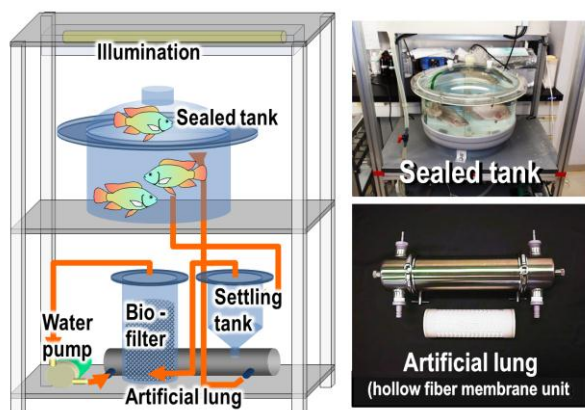


Fig. 4 Sealed fish rearing tank with artificial lung

濾過の過程で硝酸イオンとして蓄積されるが400mgN/Lの硝酸が蓄積しても成長に影響がないことも分かった¹³⁾。次にティラピア養殖の飼育排水と堆積物を栄養塩としてクロレラ *Chlorella vulgaris* を生産し、そのクロレラを餌としてタマミジンコを生産することに成功している。さらにタマミジンコの飼育排水を用いてクロレラを連続的に消費・増殖させる栄養塩循環型のタマミジンコ飼育装置を試作した。装置写真をFig. 5に示す。この装置を用いてミジンコの増殖実験を行った結果、クロレラを単にタマミジンコに給餌するのみの飼育法と比較して2倍以上の効率でティラピアから排泄された物質を吸収させることが可能であった。これらの結果から、ティラピアの排泄物からクロレラを介して餌となるタマミジンコの生産が可能であることを明らかにした¹⁴⁾。また、多段階の食物連鎖を介する養殖システムの他に微細藻類-魚類の物質循環による養殖システムの研究を行い、生のスピルリナ *Spirulina platensis* のみをティラピアに給餌して3世代にわたる継代飼育が可能であることも確認した¹⁵⁾。現在、スピルリナーティラピア間の物質循環系の構築を目指した研究も進めている。スピルリナを主な原料とする配合飼料を用いたティラピア飼育の検討と、ティラピア飼育時の飼育排水や堆積物を用いたスピルリナ培養という2つの課題に取り組んでおり、これらの技術が確立されれば、本システム内においてティラピアとスピルリナの2種生物間のみで栄養塩循環を行うことができるようになる。

我々が独自に進めている研究の他に、前述のアクアポニックスの適用も大いに期待できる（Fig. 2）。アクアポニックスはCELSSの食料生産サブシステムの基本構成である植物栽培と水産養殖を結びつけることができる方式であり、養殖魚の餌を直接生産することは難しいが、排水処理の面から考えると植物の栄養塩吸収作用で飼育水の再生ができる点で非常に効果的である。



Fig. 5 Nutrient feedback rearing system for water flea. The system is constructed a algal cultivation flask (left side) and a water flea rearing bottle (right side)



Fig. 6 Experimental unit for gas exchange between microalgae and fish

また、気体の循環に関してはティラピア-微細藻類間でガス交換を行う飼育実験装置を開発し、酸素および二酸化炭素の挙動について把握した。装置の写真を **Fig. 6** に示す。この装置を用いてクロレラーティラピア間のガス交換実験を 2 週間行った結果、クロレラの増殖にとともに、装置全体の酸素および二酸化炭素の濃度が徐々に安定し、ティラピアへの十分な酸素供給が行われ、ティラピアの生命維持および水質維持に成功している¹⁶⁾。

2.3.3 宇宙食としてのティラピア

ティラピアはアフリカ原産の淡水魚で現在では熱帯・亜熱帯地方で盛んに養殖が進められている有用水産魚種である。養殖魚種の中でも水質汚濁や低酸素にも非常に強く飼育も容易である。また、世界各国で食されていることから人種を問わず食品として利用することが可能である。

宇宙環境下における魚類養殖への本種の適用は我々がやっている養殖システムの検討と生物特性の把握のほか、宇宙食としての利用についても研究が行われている。宇宙食としてのティラピアの有効性を検討するため、成魚の筋肉および幼魚全体の栄養組成分析が行われ、成魚の筋肉を摂取することで良質のタンパク質および脂質が得られることや、幼魚に関しては寒天で皮膜を作った後に高温高圧処理を施すことで全体を食べることができること、この調理加工法による主要成分の損失も無いこと、さらに、重力環境下で不足しがちなカルシウムやリンなどのミネラル類も同時に摂取できることが報告されている¹⁷⁾。一方、ティラピアを主原料とした魚醤油について検討が進められており、ティラピアを用いた調味料の開発も試みられている¹⁸⁾。このように、宇宙での養殖を想定する際には生産から消費までの過程と物質循環やエネ

ルギー利用までを総合的に検討していく必要がある。特に環境においては重力の変化が適用される生物やそれを生産する装置群に大きく影響を及ぼすと考えられる。

3. 水棲動物に及ぼす微小重力の影響

3.1 動物プランクトン (オオミジンコ)

宇宙における閉鎖環境下で人工の食物連鎖を制御しながら魚類養殖を行う場合、さまざまな重力環境で餌生物が正常に生育できるかが重要となる。特に動物プランクトンにおいてはこれまで小さな密閉式の水槽を用いた宇宙実験において微小重力下で生存可能であることが分かっている¹⁹⁾。さまざまな重力・光環境下における動物プランクトンの行動観察に関してはオオミジンコ *Daphnia magna* を用いて遊泳を観察し、重力や光への反応について調査している²⁰⁾。この実験ではオオミジンコは 24 ± 3 日齢、体長 $3.48 \pm 0.21 \text{mm}$ の個体を用いて、アクリル製小型密閉式水槽に飼育水とともに収容して CCD カメラで行動を観察した。オオミジンコを収容した観察装置を航空機に搭載し、照明には白色 LED (2.5W/m^2) および 950nm の近赤外光 LED (6.7W/m^2) を、重力は μG , 0.1G , 0.2G , 1G および 1.8G を設定し、光と重力をそれぞれ組み合わせた条件で行動観察を行った。 μG , 0.1G および 0.2G 環境は航空機の放物線飛行および放物線飛行よりも緩やかな曲線の飛行により、約 20 秒間得られ、 1.8G 環境は放物線飛行突入前の航空機の上昇時に約 15 秒間得ることができる。また、 1G での観察は地上で行った。

撮影した画像を **Fig. 7** に示すとともにオオミジンコの遊泳行動および姿勢保持について **Fig. 8** にまとめた。依存性は水槽内での遊泳方向と姿勢、回転行動の有無により判定を行った。姿勢保持における光と重力の依存度を解析したところ、オオミジンコは光を感知できる場合、 1G

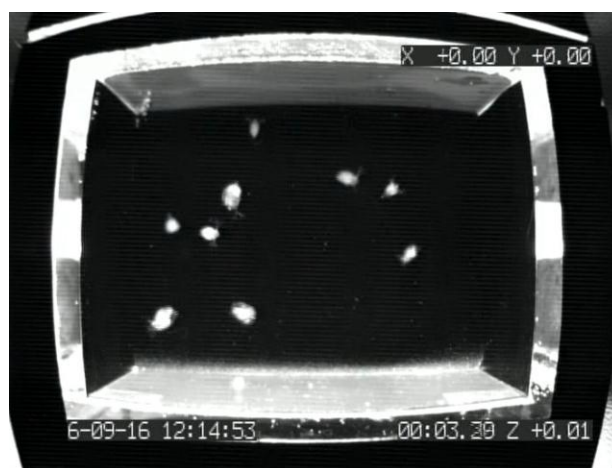


Fig. 7 Abnormal swimming behavior (forward rotation) of *Daphnia magna* under microgravity and infra-red irradiated condition

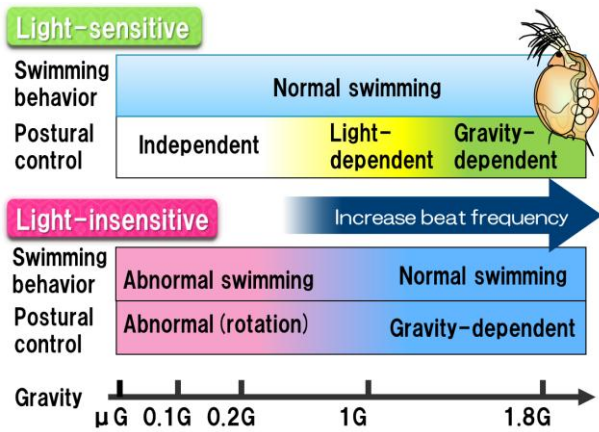


Fig. 8 Relationship between swimming behavior and postural control of *Daphnia magna* under various gravity environments

では光に依存して姿勢を制御するが、重力が増加するに伴い、重力刺激が強くなるため、姿勢制御因子は光から重力に移行していくことが判明した。また、1G 以下では重力が減少するに伴い、光の照射方向に関わらず姿勢制御を行ったため、依存性の傾向が消失するものと考えられる。光感知が不可能な場合、重力が感知可能な環境では重力に依存して姿勢を制御し、重力感知が不可能な場合、異常遊泳を行うことが明らかとなった。なお、重力に依存して姿勢制御が可能な重力値は 0.2G と 1G との間にあることも分かった。

オオミジンコが遊泳のために第二触角で環境水を掻くビートの速度と重力の関係を解析した結果、可視光下において 1.8G では、1G と比較し、ビート頻度が増加する傾向が見られた。これは重力の増加に伴い、オオミジンコは重力の影響で沈降速度が増し、垂直位置を保持するため、ビート頻度が増加すると考えられる。一方、重力が減少するに伴い、ビート頻度も減少し、 μG の下部からの照射では 1.0G と比較し、有意に遅くなった。また、1G 以下の重力においては水槽上部から照射では下部からの光照射と比較し、ビート頻度が増加する傾向にあり。特に μG では有意に速くなった。これは μG 、0.1G および 0.2G 環境を創出する際、前後に過重力が付加されるため、計測開始時にほとんどの個体が水槽下層に定位し、上から光を照射すると、可視光に対して正の走光性を示し、水槽下層から上層に遊泳していくため、ビート数が増加するのではないかと考えられる。特に μG では正の走光性反応が顕著になることが観察されている。また、近赤外光下では重力に関わらず、ビート頻度に大きく影響しないことも分かった。

3.2 魚類（ティラピア）

宇宙環境下での養殖を考えた場合、宇宙ステーションや輸送船内等の微小重力下における魚類飼育が必要とな

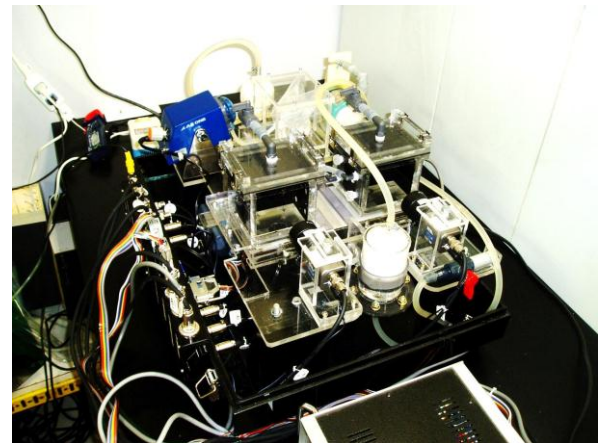


Fig. 9 Observation equipment for the swimming and feeding behavior of tilapia

る。これまでのキンギョ²¹⁾やメダカ²²⁾を用いた研究では重力のない環境に曝された場合、ローリングやルーピングなどの異常遊泳行動が観察されている。そこで微小重力下における稚魚の光感知能力と姿勢保持の関係を調査するため、航空機の放物線飛行による稚魚の行動観察実験を行った。装置写真を Fig. 9 に示す。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。その結果、発光波長 585nm の可視光 LED (0.073W/m^2) を照射することにより、ほとんどの個体が光に背を向けて姿勢を維持する背光反射を示して正常に遊泳できること、ティラピアの中には発光波長 880nm の近赤外光 LED (1.5W/m^2) をも認識できる個体が存在し²³⁾、この形質が遺伝することなどを明らかにした²⁴⁾。これにより、微小重力下においてティラピアが光照射により正常な遊泳が可能であり、この能力には同じ種でも系統で差のあることがわかった。

さらに最近の実験で、遊泳行動よりも高次の行動である摂餌行動について観察を行っている。行動観察装置に餌となるタマミジンコ *Moina macrocopa* 供給装置を取り付け、微小重力状態移行後にティラピアの観察槽へタマミジンコが供給されるように調整して行動観察を試みた。実験装置の概念図を Fig. 10 に、画像を Fig. 11 に示す。その結果、白色光照射時 (0.53W/m^2) に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、微小重力下でも白色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。一方、950nm の近赤外光 LED (8.3W/m^2) を照射した同様の実験でティラピアは異常遊泳行動（回転）を示し、タマミジンコを捕食できなかった。このことから、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も分かった。従って、微小

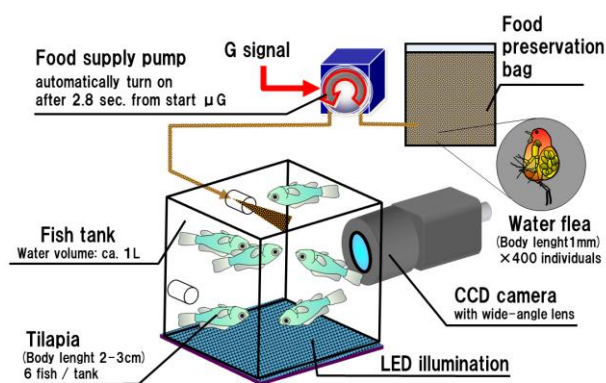


Fig. 10 Scheme of a feeding experiment under microgravity

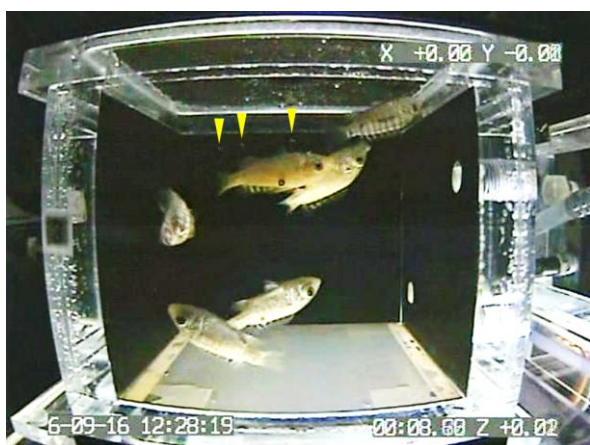


Fig. 11 Swimming and feeding behavior of tilapia under microgravity. Yellow arrow heads indicate water fleas. The fish preyed the food and tuned over by the upward irradiation of light

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と結論付けられる²⁵⁾。

航空機を用いた放物線飛行により、微小重力環境を得ることができたが、さらに放物線よりも緩やかな傾斜で飛行することで低重力（ $\sim 0.2G$ ）環境を得ることもできる。これらの環境創出技術を利用して異なる重力環境下（ μG 、 $0.05G$ 、 $0.1G$ および $0.2G$ ）および光照射（底から上向き）におけるティラピアの行動観察を行った²⁶⁾。重力値に関わらず、光に反応して背光反射を示した個体を光依存、水槽下部からの光に背光反射を行わず、水槽上部に背を向けて正常遊泳する個体を重力依存として分類した。その結果、ティラピアの姿勢保持において光依存から重力依存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がわかった。このことから、月および火星の重力（およそ $1/6$ および $3/8G$ ）下でティラピアは光照射に関わらず、姿勢

保持が可能であることが分かった。

3.3 宇宙での養殖技術と課題

前述のとおり、養殖対象種ティラピアおよび人工的な水圏閉鎖生態系の構築の際に用いる動物プランクトンや微細藻類の、重力をはじめとする環境適応能力試験や物質循環技術の確立に関する研究がこれまで行われてきたが、今後は CELSS における人間の食料需要および廃棄物処理量等を考慮した実用システムにおける規模の試算および運用法の検討が必要である。

食糧生産としての魚類養殖を考えた場合、人間の摂取量を決定し、システム規模を試算していく必要がある。成人（日本人）が 1 日に必要なタンパク質は $60\sim 70g^{17)}$ であり、その $1/2$ を動物性タンパク質摂取量とし、ティラピアを摂取することで所要量を全て満たすこととすると、一日に $35g$ の動物性タンパク質が必要となる。これを前述したようにティラピア幼魚全魚体を摂取することで賄う場合、一日の消費量は $212g$ 湿重量/人となる。これを 84 日間のティラピア幼魚（魚体重 $11.7g$ から $94.8g$ まで）の実際の飼育結果¹³⁾を参考に、最大飼育密度を水量 $1t$ 当たり総魚体重 $30kg$ 、飼育期間中に飼育尾数を変更せずに飼育を行うと仮定して計算すると、ティラピアの循環式飼育システムのみで水量 $677L$ の装置が必要となる。また、成魚の筋肉（刺身）のみを摂取する場合は 189 日間の飼育結果（魚体重 $11.7g$ から $473.0g$ まで）¹³⁾ および可食部割合を全体の 31.3% 、タンパク質含量を $19.8g/100g^{17)}$ とすると、飼育密度等の飼育条件を幼魚飼育と同条件として仮定した場合、 $3,648L$ の装置が必要となる。本試算は飼育期間全体で飼育尾数を変化させずに飼育した場合、すなわち、収穫時の密度を基準とした数値であり、飼育初期は個体が小さく、非常に低い密度となるため、飼育装置を縮小するもしくは同じ水量で飼育尾数を増やすこともできる。このように、飼育魚を段階的に移動して密度管理を行えば、試算した値よりも少ない水量で同量のティラピアを生産することが可能となる。今回の試算は食用魚の飼育における装置の規模を算定したものであるが、CELSS における食料生産サブシステムを構築する場合には、その一部である閉鎖生態系循環式養殖システムにおいても動物プランクトンや微細藻類の生産を考慮する必要がある、数十倍のエネルギーと飼育・培養装置が必要となる。

宇宙環境下における魚類養殖では適用される水生生物の重力および光応答感知の特性を把握した上で飼育装置の仕様を決定することが重要である。そこでこれまでの研究結果を基にして重力とティラピアの飼育条件について Fig. 12 にまとめる。ティラピアの飼育に関しては微小重力に近い重力環境下では飼育装置に密閉式の飼育槽や濾過槽を用い、人工肺を接続して光を一定方向から照射する方法が望ましい。さらに光に対して良く反応する個体群を選抜することで安定した飼育が実現できる。また、

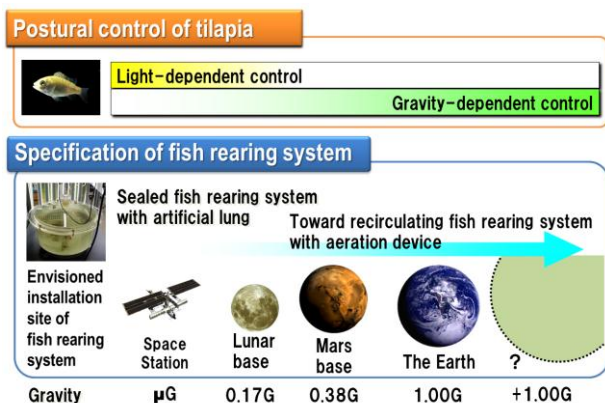


Fig. 12 Relationship between tilapia rearing and gravity environments

0.2G 以上では通常の循環濾過式水槽を用いてティラピアの生産が可能であると考えられる。魚類生産の観点からはティラピアが微小重力下で摂餌可能であることが明らかになったが、今後は長期の微小重力下における成長および再生産（親魚の成熟，卵・精子の受精，受精卵の発生）が可能であるかを研究する必要がある。

食料生産サブシステムでは食料の生産は基より、物質循環を考慮し、栄養塩を効率よく利用しなければならない。動物性タンパク質生産の基盤として魚類養殖を行う際にも同様にこの物質循環系の最適化が重要な課題になる。宇宙環境下における食品としてティラピアを用いる際も幼魚の全魚体を摂取するか、成魚の筋肉のみを摂取するかでその生産システムの規模も大きく変化してくる。また、生産システム自体の運用に関してもその他のサブシステムとの相互関係や食料貯蔵の有無、貯蔵方法によって物質循環効率やエネルギー消費量が大きく変わってくると思われる。今後は人間を含めた閉鎖居住施設等の先駆的な知見も考慮し、食料生産システムとしての魚類養殖の実現性について更なる検討を進める必要がある。

4. あとがき

本解説では地上における閉鎖循環式養殖、宇宙における食料生産に適用可能な閉鎖生態系循環式養殖システムと宇宙での魚類養殖を想定したティラピアおよびオオミジンコの遊泳行動に対する地上とは異なる重力の影響についての研究結果を紹介し、宇宙養殖の可能性についても論じた。

世界の水産においては生産高の40%以上を養殖漁業が占めており、漁獲漁業が頭打ちとなっている中、増大し続ける需要を下支えしている。近年中には養殖と漁獲生産量の逆転が予想され、いよいよ獲る漁業から作る漁業への大きな転換が図られる。一方で養殖漁業は天然水域の汚濁を招いていることも事実であり、持続的な養殖を実現するためには汚濁物質の処理が第一の課題となる。

生態工学的な観点からはその汚濁物質を物質循環によって除去する技術の開発が急務であり、天然水域に汚濁物質を排出せずに処理・再利用する技術が望まれている。これに関しては宇宙も視野に入れた人工的な生態系を取り入れた養殖の研究が非常に有効であると考えられる。また、生物の特性を飼育環境との関連性から研究することにより、その生物の環境適応能の把握や生産性の向上につなげることも可能である。これにより、物質およびエネルギー効率のより良い養殖システムの構築につなげることができる。地上における閉鎖循環式養殖に宇宙を想定した研究の成果を利用することも十分に有り得ることである。養殖の陸上への進出は閉鎖循環式養殖の適用とともに進められ、限られたエネルギー、水資源の有効利用や水産における増産をもたらすと同時に天然水産資源の保全にも寄与すると考えられる。また、これら食料生産の進化は養殖の概念を機能面、技術面および経済面から変えていくことになるであろう。その際の基盤技術として本解説に記した技術が利用されていくことを期待する。

参考文献

- 1) M. Endo: Aquaculture Magazine, **47** (2010) 66 (in Japanese).
- 2) T. Itoh, F. Inoue and M. Osakabe: Marine engineering, **45** (2010) 114 (in Japanese).
- 3) T. Itoh, F. Inoue and M. Osakabe: Marine engineering, **46** (2011) 105 (in Japanese).
- 4) Y. Kaneko, M. Endo, T. Takeuchi, T. Furuta and K. Kikuchi: Eco-Engineering, **23** (2011) 57 (in Japanese).
- 5) H. Yoshino, D. E. Gruenberg, I. Watanabe, K. Miyajima and O. Sato: Suisanzoshoku, **47** (1999) 445 (in Japanese).
- 6) H. Furumai, H. Obayashi and K. Fujita: J. Jpn. Soc. Water Environ., **19** (1996) 715 (in Japanese).
- 7) M. Yoshimizu and H. Kasai: Industrial Water, **523** (2002) 13 (in Japanese).
- 8) D. E. Seawright, R. R. Stickney and R. B. Walker: Aquaculture, **160** (1998) 215.
- 9) M. Takahashi, M. Endo, S. Yoshizaki, T. Takeuchi and K. Omori: Proc. SEE Conf., Utsunomiya, JPN, Jun. 2004, p. 39 (in Japanese).
- 10) A. K. Biswas T. Morita, G. Yoshizaki, M. Maita and T. Takeuchi: Aquaculture, **243** (2005) 229.
- 11) D. Morishita, M. Endo, S. Yoshizawa and T. Takeuchi: Proc. SEE Conf., Towada, JPN, Jun. 2012, p. 16 (in Japanese).
- 12) K. Ijiri: Biol. Sci. Space, **8** (1994) 231..
- 13) M. Endo, T. Takeuchi, G. Yoshizaki, M. Toyobe, R. Kanki, K. Omori (Suzuki), M. Oguchi and S. Kibe: CELSS J., **12**(2) (1999) 17 (in Japanese).
- 14) M. Endo, Y. Mori and T. Takeuchi: Prog. & Absts. 5th World Fisheries Congress. Yokohama, JPN, Oct. 2008, p. 163.
- 15) J. Lu and T. Takeuchi: Aquaculture, **234** (2004) 625.
- 16) M. Endo, G. Yoshizaki and T. Takeuchi, Prog. & Absts. Internat. Symp. Closed Habitation Expts. & Material Circulation Tech. Rokkasho, JPN, Sep. 2001, p. 72.
- 17) H. Suzuki: CELSS J., **11**(1) (1998) 15.
- 18) H. Tachi, Y. Sugino, H. Miyazaki, M. Endo, and T. Takeuchi: Proc. SEE Conf., Gifu, JPN, Jun. 2007, p. 33 (in Japanese).
- 19) K. Ijiri, R. Mizuno, T. Narita, T. Ohmura, Y.

- Ishikawa, M. Yamashita, G. Anderson, J. Poynter and T. MacCallum: *Biol. Sci. Space* **12** (1998) 377.
- 20) M. Endo, N. Kakimoto, S. Kanemaru, M. Saitoh, K. Omori and T. Takeuchi: *Proc. SEE Conf., Tokyo, JPN, Jun. 2011*, p. 49 (in Japanese).
- 21) R. J. von Baumgarten, G. Baldrighi and G. L. Shillinger Jr.: *Aerospace Med.*, **43** (1972) 626.
- 22) K. Ijiri: *Adv Space Res.*, **25** (2000) 1997.
- 23) M. Endo, R. Kobayashi, K. Ariga, G. Yoshizaki and T. Takeuchi: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **68** (2002) 887 (in Japanese).
- 24) R. Kobayashi, M. Endo, G. Yoshizaki and T. Takeuchi: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **68** (2002) 646 (in Japanese).
- 25) T. Takeuchi and M. Endo: *Space Utiliz. Res.*, **24** (2008) 251 (in Japanese).
- 26) T. Takeuchi, M. Endo, R. Kobayashi, K. Ariga, G. Yoshizaki, T. Sakamoto and R. Kanki: *CELSS J.*, **13** (1998) 27 (in Japanese).

(2013年2月28日受理, 2013年4月12日採録)