

宇宙環境下における閉鎖居住施設における 食料生産用養殖技術の開発

(東京海洋大学) 遠藤 雅人

人間が将来、月や火星などの地球以外の衛星や惑星に基地を作り、その中で人間に必要な物質を循環供給しながら生活する閉鎖居住施設は、人類の宇宙進出における次の大きな一歩となる。宇宙での居住構想が研究され始めて60年近くになり、これまで地上および軌道上におけるさまざまな研究が行われてきた。特に居住施設の研究においては人間の生命を維持するためのガス交換も含めた物質循環の研究が行われ、その中で大きなウエイトを占めている事項が食料生産の研究である。最近では国際宇宙ステーションにおいて葉物野菜の水耕栽培を行って試食することも行われている。これまで宇宙居住を想定した食料生産は、人間が排出した二酸化炭素を酸素に変換することが同時に可能である植物栽培が主に研究されてきた。しかし、食の多様性を考えた場合には動物性タンパク質の供給も必要となると考えられる。そこで我々はこの宇宙居住施設における動物性タンパク質の供給を、魚類養殖で行うことを目指して研究を行ってきた。

本研究は、海洋の生態系を模擬して物質のリサイクルを行う物質循環型魚類養殖の研究と、地上と異なる重力下で魚類養殖に利用する生物がどのような条件下で正常に飼育・培養できるかを調査する研究とに大きく分けることができる。今回はこれまでの研究成果について紹介する。

物質循環型魚類養殖

宇宙環境下における居住施設では現在宇宙ステーションで行われている物質の再利用をさらに高度化した技術により人間の生命を維持する必要がある。これはいわば地球で行われている物質循環を、科学技術を駆使して行うものである。居住施設の建設場所が地球から遠いほどその技術の安定性と物質循環率を高い水準で維持する必要がある。特に食料生産システムについては生物学・農学的要素が強い。そこで我々はこの物質循環の概念を魚類養殖に適用した物質循環型養殖の開発を行ってきた。概念図を図1に示す。食用魚であるティラピア *Oreochromis niloticus* の排せつ物を肥料としてクロレラ *Chlorella vulgaris* を培養し、このクロレラを餌としてタマミジンコ *Moina macrocopa* を生産し、ティラピア稚

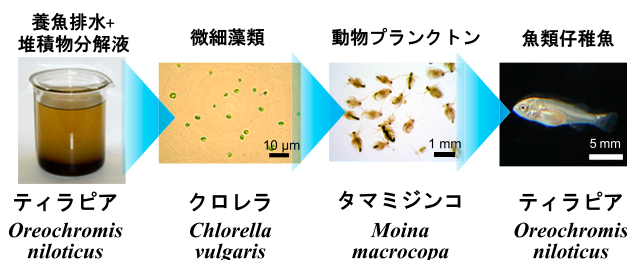


図1. ティラピアの排せつ物を利用してティラピアの餌を作る

魚の餌に利用しようとするものである。

この研究ではまず、宇宙での魚類飼育を想定し、重力がない状態でも酸素供給が可能な人工肺を取り付けた密閉式魚類飼育装置（総水量：約60 L）を開発した。この飼育装置を用いてティラピアを換水せずに半年間飼育した¹⁾。ティラピアは約10 gの稚魚が470 g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濾過の過程で硝酸イオンとして蓄積されるが、400 mgN/Lの硝酸が蓄積しても成長に影響がないことも合わせて確認した。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²⁾。

我々が独自に進めている研究の他に、アクアポニックスの適用も大いに期待できる。アクアポニックスとは循環式養殖の排水を植物の肥料として用い、食用野菜や果物の水耕栽培を行う物質循環型の食料生産システムである。これは宇宙居住施設の食料生産の基本構成である植物栽培と水産養殖を直結することが可能な方式であり、養殖魚の餌の生産は困難であるが、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。

また、気体の循環に関しては微細藻類-ティラピア間でガス交換を行う実験装置を開発し、酸素および二酸化炭素の挙動について把握した。この装置を用いてクロレラ-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もない、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が可能であることが示された³⁾。

これらの研究で得られたデータからティラピアの物質循環型養殖における物質フローの試算が可能となった⁴⁾。

異なる微小重力下における水棲生物の行動

宇宙居住施設での魚類養殖を考えた場合、宇宙船内などの重力が限りなく小さい微小重力下における魚類飼育が必要となる。これまでのキンギョやメダカを用いた研究では重力のない環境に曝された場合、体軸に対して横方向に回転するローリングや腹側を中心にして前方に回転するルーピングなどの異常遊泳行動が観察されていた。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した。ビデオカメラを搭載した密閉式魚類行動観察装置にティラピア稚魚を収容し、この装置を航空機の搭載し、放物線飛行させることによって微小重力下の行動観察実験を行った。図2に装置の写真を示す。1回の放物線飛行によって約20秒間の微小重力が得られ、これを繰り返して観察を行った。その結果、可視光LED（発光波長：585 nm、放射照度：0.073 W/m²）を照射することで光に背を向けて姿勢を維持する背光反射によりほとんどの個体が正常に遊泳できること、ティラピアの中には近赤外光LED（発光波長：880 nm、放射照度：1.5 W/m²）をも認識できる個体が存在し⁵⁾、この形質は遺伝することを明らかにした⁶⁾。さらに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た。行動観察装置に餌となるタマミジンコの供給装置を取り付け、微小重力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システムを開発し、行動観察を試

みた。その結果、白色光照射時（放射照度：0.53 W/m²）には地上と同様に微小重力下でも供試したすべ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、すべて背向反射による定位行動であった。一方、近赤外光LED（発光波長：950 nm、放射照度：8.3 W/m²）を照射した同様の実験ではティラピアは異常遊泳行動を示し、タマミジンコを捕食できなかった。このことから、光環境、姿勢保持および摂餌行動が密接に関係しており、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と結論付けられた⁷⁾。

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角度で飛行することで低重力（～0.2 G）環境を得ることも可能である。そこで異なる重力環境下（μG、0.05 G、0.1 G および0.2 G）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⁸⁾。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0.1 Gであり、0.2 G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3/8 G）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。

これまで特殊環境を想定してさまざまな研究を行ってきたが、前提になる想定が地上とは異なる環境条件であるため、通常的环境では観察できない興味深い結果を得ることができた。また、物質循環の研究では物質利用やさまざまな飼育・培養条件の制約を克服することが利用物質やエネルギーの削減につながり、地上の環境に配慮した養殖技術の研究開発にも貢献すると考えている。

文 献

- 1) 遠藤雅人ら：CELSS学会誌，**12**, 17 (1999).
- 2) Endo, M. *et al.*: Program & Abstracts of 5th World Fisheries Congress, p. 163 (2008).
- 3) 遠藤雅人ら：生態工学会発足記念大会論文集，p. 72 (2001).
- 4) Endo, M. and Takeuchi, T.: Closed Habitation Experiments and Material Circulation Technology, p. 458, Institute for Environmental Science (2005).
- 5) 遠藤雅人ら：日本水産学会誌，**68**, 887 (2002).
- 6) 遠藤雅人ら：生態工学会年次大会発表論文集，p. 91 (2009).
- 7) 遠藤雅人ら：生態工学会年次大会発表要旨集，p. 37 (2007).
- 8) 竹内俊郎ら：CELSS学会誌，**13**, 27 (2000).

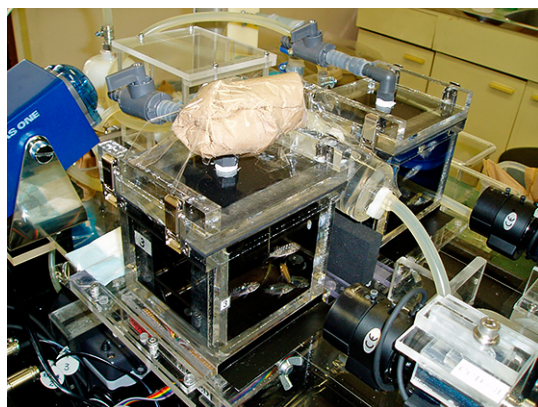


図2. ティラピアの行動観察装置