

## 魚類の長期宇宙滞在に向けた閉鎖生態系実験装置の検討

新堀真希<sup>1</sup>, Jane Poynter<sup>2</sup>, Stephen G. Nelson<sup>3</sup>

<sup>1</sup>お茶の水女子大学・人間文化研究科, <sup>2</sup>Paragon Space Development Corporation, <sup>3</sup>University of Arizona

## Closed Life Support Ecosystem for Long-duration Space Experiment with Fish

Maki Niihori<sup>1</sup>, Jane Poynter<sup>2</sup>, Stephen G. Nelson<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University, 2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610

<sup>2</sup> Paragon Space Development Corporation, Tucson, AZ, U.S.A.

<sup>3</sup> Environmental Research Laboratory, Department of Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona, Tucson, AZ, U.S.A.

E-mail: g0470511@edu.cc.ocha.ac.jp

Abstract: Microgravity environment in space has been recently utilized as the field to investigate the gravitational biology. In 2003, the experiment was operated aboard the space shuttle Columbia, STS-107 for the study on the development and swimming behavior of Medaka fry under microgravity in space (Niihori et al., 2004). In this experiment a closed ecological system was developed in order to maintain the eggs and hatched fry under microgravity. The system was prepared based on the ABS, Autonomous Biological System (Poynter et al., 2001; Ishikawa et al., 1996, 1998a, b) and maintained the ecological system during flight mission (16 days). This was the first success of a closed ecological system used for the life support of the vertebrate in space. This system provided mechanically quiet environment and was very useful to study the behavior of animals under microgravity. However, the details of ecosystem were not investigated because it was used as a part of experimental equipment. We study the Ecosystem in order to expand the utilization and develop the system for long-lasting space experiment as a biological-device with small fish, *Heterandria formosa* instead of Medaka. The newly developed closed system for *H. formosa* can maintain the life of an adult fish at least 30 days. We would like to propose that this system as a closed life support system for long-lasting space experiment with fish and as a biological transporter for space exploration.

### 1. はじめに

2003年1月、スペースシャトル・コロンビア号で行われた16日間のSTS-107ミッションにおいて、メダカ卵の発生と孵化後の稚魚の遊泳行動を観察する実験を行った。この実験には、Autonomous Biological Systemを元に開発されたEcosystemを生命維持装置として用いた。これは、閉鎖生態系実験装置を、水生脊椎動物の生命維持に用いた初めての実験であった。この実験において、Ecosystemは、生命維持装置として有用であることはもちろん、機械的な刺激から隔離された状態を作り出すことにより、微小重力の生物挙動に対する影響を観察するのに非常に適した実験装置であることが明らかになった。Ecosystemは容量約1000 mlという非常に小さな密閉容器の中に、水生無脊椎動物、有機物、植物を含むシステムで、生物種間でエネルギー授受をおこない、生態系を構築させる装置である。このような省スペース、省エネルギーの実験装置はこれらの制約の多い宇宙実験には非常に適したシステムであると考えられる。

さらに、今までは無脊椎動物のみのシステムであったが、脊椎動物にまで応用できる可能性を示したことは、Ecosystem利用の更なる応用の可能性を十分示唆しうる結果であった。しかしながら、この実験ではメダカ卵の発生と稚魚の遊泳行動の観察に焦点が当てられていたため、Ecosystemの詳細な解析は行われなかった。そこで今回は、宇宙での世代交代や生物の長期輸送システムとしてのEcosystemの汎用性拡大の可能性を探るべく、魚類の長期宇宙滞に向けた閉鎖性体系実験装置の検討を行った。

### 2. 材料と方法

Ecosystemの捕食者として*Heterandria formosa*のオスを用いた。この魚は成魚のメスで最大体長約4 cm、オスで約2 cmと小型の魚であり、容積が約1000 mlの装置の中で飼育するのに適した材料であると考えた。また、卵胎生の魚であり、その世代交代の様式は、宇宙空間での継代飼育を目標とした実験に適するのではないかと期待している。

閉鎖生態系を構築する物として、容積が 960 ml のガラス製の四角柱の容器を用いた。今回の実験では、実験期間を 30 日とし、人口淡水、有機泥、水草 (*Ceratophyllum demersum*)、タニシ (*Physa sp.*)、ゾウリムシ、ワムシ、Ostracod、Copepod、魚 (*H. formosa* のオス 1 匹) を主な構成要員として Ecosystem のエネルギーの流れをデザインした。この実験では、魚が捕食者となり、ゾウリムシ、ワムシなどの微生物や Ostracod、Copepod が被食者となると仮定し、エコシステム内で捕食 - 被食の場となる空間デザインを行った。さらに、その空間デザインや餌となる生物が Ecosystem に有効であるかどうかの検討も行った (Table 1)。Table 1-M, F, P, N は実験手順、内容物ともに STS-107 での Ecosystem に類似させたシステムでの実験 (1st simulation; 作成を含めた実験時間 42 日間、うち閉鎖実験期間 30 日)、Table 1-HH, HL, LH, LL の各実験は 1st simulation の結果を受け、改良を行った実験 (2nd simulation; 作成を含めた実験時間 58 日間、うち閉鎖実験期間 30 日) である。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 魚の生存率

Ecosystem の完成度の指標として、30 日間の魚の生存率を求めた (Table 1)。その結果、STS-107 の

実験で使用した System と全く同じ Ecosystem (Table 1-M) は、成魚の飼育には適さないということがわかった。STS-107 の実験では、メダカを卵の状態に封入したことで、1) 孵化するまでにかかる日数で、Ecosystem 内の生物の増殖がさらに進んだ、2) 孵化した後の稚魚は最初の餌としてゾウリムシやワムシのような微生物を摂取し、その後ミジンコのような大きな生物を摂取するため、餌に階層構造ができ、餌の選択肢が多かった、3) 実験期間が 16 日間と短期間でそのうち約 10 日間は卵の状態であったため、Ecosystem が餌を供給すべき日数は約 1 週間であった等の理由によってミッション期間中の成功が導かれたと考えられる。しかし、今回の実験では、魚は成魚であり、Ecosystem 内に封入した直後から捕食が始まる。ミジンコはその Protein 含有量の多さから、餌としての有用性が指摘されるが、一方でその遊泳行動やサイズによって魚に捕食されやすいという点がある。実験中後の解析から、ミジンコは Ecosystem に魚が入れられた直後に捕食されつくしてしまい、魚は餌が不足したことによって生存できなかったのではないかと推測できる。また、Copepod も同様に、魚封入直後に捕食されつくしていることがわかった (Table 1-N, F, P)。そこで、Ostracod を魚の餌として焦点を当て、さらに、Ostracod の生育を促すよう

Table 1. Contents of closed ecological system

Experimental group / Content	1st simulation				2nd simulation			
	N	M	P	F	HH	HL	LH	LL
Fish	○	○	○	○	○	○	○	○
Water Plant	○	○	○	—	○	○	○	○
Filamentous Algae	—	—	—	○	—	—	—	—
Refugeum (typeA)	○	○	○	○	—	—	—	—
Refugeum (typeB)	—	—	—	—	○	○	○	○
High Surface Area	—	—	—	—	○	—	○	—
Snail	○	○	○	○	○	○	○	○
Infusoria	○	○	○	○	○	○	○	○
Daphnia	—	○	—	—	—	—	—	—
Ostracoda	○	—	○	○	○	○	○	○
Copepoda	○	—	○	○	—	—	—	—
Nitrogen Conc. [ppm]	1.0	0.1	0.1	0.1	1.0	1.0	0.1	0.1
Survival Rate	3/4	1/4	3/4	3/4	5/6	6/6	6/6	5/6

な条件を作り、内容生物の増殖のための期間を十分に設けることによって、魚の生存率を上昇させることができた (Table 1- HH, HL, LH, LL)。

### 3.2. 生物の多様性

Ecosystem は当初、最大 7 種類の生物から作成されたが、実験後の解析により、センチウ、貧毛類、扁形動物、ケイソウなどの生物が混入していることが確認された。これらは、分解者としてのバクテリアの生息域の中心となる有機泥や、植物の表面に付着していたものが持ち込まれたものと考えられる。しかしながら、これらの生物は、魚の生存にとって悪影響を与えるものとは考えにくく、魚の餌としての役割が期待されるものである。また、タニシや Ostracod はサイズの小さなものが多数見られた。これらは、Ecosystem 内での増殖、世代交代が行われたことを示唆する。酸素供給源の植物は、1st simulation、2nd simulation とともに著しい成長が見られた。

### 3.3. 魚の行動観察

この実験装置は長期間閉鎖生態系の中での生物の動きを観察することができる。外界からの影響が少なく、微小重力の効果を検出しやすい Ecosystem は重力生物学の分野に大きく貢献できるものとする。その功績として、STS-107 の実験では宇宙空間での発生の時間経過や、孵化した稚魚の様子を時系列に沿って観察することができた。新たに作出した Ecosystem においても、外部からビデオカメラによる撮影を行い、画像解析ソフト Bohboh (Shiba et al., 2002) を用いることで、速度や方向を含む遊泳行動の解析が可能であった。

## 4. まとめ

閉鎖空間での長期観察とその行動の解析が可能であることは、微小重力環境を応用した生物の生態を観察する研究に寄与するところが大きいと考える。微小重力の効果そのまま生物の行動に現れることで、生物と重力のかかわり、すなわち、行動発現における重力の役割について理解を深めることができるであろう。さらに長期間の飼育が可能になれば、他の惑星への生物の輸送装置として有効であると考えている。

## 5. References

- 1) Ishikawa Y, Kobayashi K, Seki K, Mizutani H, Kawasaki Y, Koike J, Ijiri K, Yamashita M, Sugiura K, Poynter J, MacCallum T, Anderson G (1998a) Analysis of water in autonomous biological systems (ABS) samples. *Biol Sci Space* 12: 366-372
- 2) Ishikawa Y, Kobayashi K, Seki K, Mizutani H, Kawasaki Y, Koike J, Ijiri K, Yamashita M, Sugiura K,

- Poynter J, MacCallum T, Anderson G (1998b) Concluding remarks of autonomous biological systems (ABS) experiments. *Biol Sci Space* 12: 394-399
- 3) Ishikawa Y, Anderson G, Poynter J, MacCullum T, Frye R, Kawasaki Y, Koike J, Kobayashi K, Mizutani H, Sugiura K, Ijiri K, Ishikawa Y, Saito T, Shiraishi A (1996) Mini ecosystem in space- preliminary experiment on board STS-77. *Biol Sci Space* 10: 105-111
- 4) Niihori M, Mogami Y, Naruse K and Baba SA (2004) Development and Swimming Behavior of Medaka Fry in Spaceflight aboard the Space Shuttle Columbia (STS-107). *Zool Sci* 21: 923-931
- 5) Poynter J, MacCallum T, Anderson G, Rupert M, Woodard S, Goulart C, Campbell K (2001) The Development and Testing of Visualization and Passively controlled Life Support Systems for Experimental Organisms During Spaceflight. *SAE proceedings*, 2001-01-2288
- 6) Shiba K, Mogami Y, Baba SA (2002) Ciliary movement of sea-urchin Embryos. *Nat Sci Rep Ochanomizu Univ* 53: 49-54