

## メダカの宇宙における交尾・産卵行動 (MEDAKA)

代表研究者： 井尻憲一\*<sup>1</sup>

共同研究者： 江口星雄\*<sup>2</sup>、水野利恵\*<sup>1</sup>、藤井鉄男\*<sup>1</sup>、田口泰子\*<sup>3</sup>、  
山下雅道\*<sup>4</sup>、黒谷明美\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> 東京大学 アイソトープ総合センター、\*<sup>2</sup> 東京大学、\*<sup>3</sup> 放射線医学総合研究所、  
\*<sup>4</sup> 宇宙科学研究所

In the second International Microgravity Laboratory (IML-2/ STS-65) mission carried out in 1994, four of a small Japanese killifish (Medaka, *Oryzias latipes*) made a space travel of 15 days. These four Medaka fish performed their successful mating behavior in space for the first time among vertebrate animals. Moreover, the eggs they laid developed normally till hatching fry (baby fish) in space. Usually, fish swim in loop patterns when they are exposed to microgravity. In prior experiments using parabolic flights of airplane, we have found a special strain of this fish species that does not exhibit looping behavior at all. The success of the present space experiment owes much to the use of this strain.

Two scenes of mating behavior were down-linked in real-time from space, and more mating scenes have been recorded in the video-tapes brought back. In this fish species, shedding of eggs and fertilization of eggs take place at the same time during their mating behavior. Fish mated and laid eggs everyday during the first week, and near the end of the mission most of the eggs had a well-developed body with two pigmented eyes. At the end of 12th day, a baby fish was detected and the crew successfully took a picture of a baby fish. In total, 43 eggs were laid (detected), out of which 8 baby fish were born (hatched out of eggs) in space, as truly 'space-originated' babies. 30 baby fish hatched within 3 days after landing. This is the normal hatching rate, comparing with the ground-based data.

Four adult fish re-started mating and laying eggs on the 7th day after landing and continued to do so everyday afterward. So far, we could not detect any effects of 15-day space travel on their offspring. The 'space-originated' babies are, so to speak, Adam and Eve came from space. Such alien fish have already grown up in our lab and started creating their colony on the Earth.

### 実験の目的、意義

#### IML-2 メダカ実験の目的

この宇宙実験ではメダカを用いて、将来、宇宙で可能な魚類養殖の方式を検討するための基礎的なデータを出すことを目的とした。ただし、IML-2は2週間の飛行のため、具体的には、1)宇宙でメダカが産卵行動を行うことができるかを調べた(産卵行動)。とともに、2)産卵された卵が宇宙で正常に発生できるかどうか、すなわち、受精からふ化までが正常に進行するかを調べ(胚発生)、3)また、地上へ帰還後も産卵させ、2週間の飛行が子孫へ及ぼす影響についても調べた(子孫への影響)。



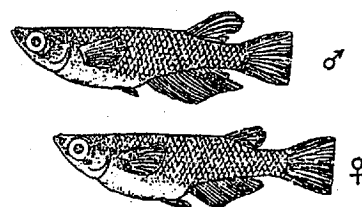
図1について簡単に説明しておく。微小重力下で、①交尾・産卵行動がとれるか？が最初のチェック項目である。もし、これが不可能つまりNoならば、代わりに宇宙で養殖した雌雄成魚からの卵と精子を用いて、人工授精を行う必要がある。微小重力下で、②正常に受精するか？また受精した卵はその後③胚の発生は正常か？が次に確認すべき項目となる。これらが難しい場合には、地上で受精させた受精卵あるいは発生胚を宇宙へ運ぶことが必要となる。現在、これらを凍結して保存する技術は盛んに研究され、解凍時の正常発生率も上がってきており、この方法は期待できる。もちろん、地上から稚魚を水中で飼育しながら輸送することも可能な手段ではある。これらの場合すなわち凍結した受精卵や胚、あるいは稚魚を宇宙へ輸送する場合には、宇宙での何世代にもわたる飼育(つまり継代飼育)はできず、つねに地上から運ぶ受精卵、胚、稚魚に依存する、つまり、供給者(地球)に全面的に依存する養殖の形となる。

④成魚まで正常に育つか？がNoの場合は、微小重力下での魚類の養殖は断念せざるを得ないし、實際上、行う価値はない。その場合には、むしろ月面基地(低重力)などでの飼育あるいは継代飼育の可能性を、これらのチェック項目に従って検討するのがよい。また、地上そして微小重力下でともに可能な項目については、月面基地でも可能と考えてよい。⑤生殖細胞形成は正常か？さらに⑥二世魚は交尾・産卵をするか？がYesと確認できれば、あとは継代飼育の実験、CELSS (Controlled Ecological Life Support Systems)への組み込み実験といった大規模な実験を行っていく。最終的には、肉質向上といったことも重要となる。

確認すべき項目のうちで、④成魚まで正常に育つか？以降の項目については、どうしても長期間の実験となるので、宇宙ステーション等での実験となる。この意味で、今回のIML-2計画で行う実験項目は①～③である。しかし、この①～③の項目を確かめることで、将来の宇宙での魚類養殖の採るべき形態がほぼ明らかになる。このように、今回実施した実験テーマの内容は宇宙ステーションでの長期・継代飼育実験を行う前に結論を出しておくべき重要な課題であった。今回の実験では宇宙で産卵した卵の発生を調べ、さらに地上へ降りてからも成魚の子孫への影響を調べたので、⑤の項目についても部分的ではあるが情報を得ることができた。

## 実験の方法と試料

			メダカ	
分類	学名	<i>Oryzias latipes</i>		
成魚	体重	約0.7g	体長	約3cm
	雌雄の見分け方	図のように背びれと尻びれの形が違う 背びれ：雄の背びれは大きく、切れ込みがある 雌の背びれは小さい 尻びれ：雄は尻びれも大きく、平行四辺形 雌の尻びれは尾の方に行くにつれ、小さくなる		
	産卵のための条件	明暗サイクル	14時間の明期/10時間の暗期	
		水温	23～28℃	
	メダカの産卵の特徴	明暗サイクル、水温といった条件が整っている場合には、一度産卵を始めると、数カ月にもわたり毎日産卵を続ける 明暗サイクルで明期になってから(つまり照明が点灯してから)2時間以内に産卵が行われる		
	卵の発生	卵の大きさ	直径1mm	
		産卵数	雌1匹が産卵する卵は1日約5～25個	
		ふ化	受精(産卵)後約10日(24℃)で、卵膜から稚魚が出てくる(ふ化)	



メダカの雄と雌

## メダカの産卵行動

産卵行動が宇宙(微小重力)でとれるかどうかがこの実験の目的の1つである。一般に魚は微小重力下ではぐるぐると回転運動を行うことが知られている。ジェット機を放物線を描くように飛行(放物線飛行)させることで約20秒間の微小重力が作り出せる。代表研究者らはこの方法で多くのメダカをテストし、微小重力下でまったく回転せず普通に泳ぐ微小重力に強いメダカの系統を探し出した。しかもこの性質は、親から子へ、そして孫へと遺伝する。そこで、この系統のメダカ(ccT系統、いわゆる東大メダカ)を用い、宇宙での行動を詳しく調べるとともに、産卵行動および産卵された卵が発生していくようすを観察した。

このように微小重力でふつうに泳げる系統を用いるものの、宇宙で産卵させるためには地上で(日本で、そして引き続き NASA ケネディ宇宙センター(KSC)で)、状態の良いメダカを用意して宇宙実験用のメダカ用タンクに搭載する必要があった。今回の宇宙でのメダカ産卵実験の成功はほとんど、良いメダカの選抜にかかっていた。メダカ選抜については後述する。

## 交尾という用語について

地上での観察でも、雄が産卵行動らしき振舞いをするのだが、雌がそれに答えない場合も時折ある。このような場合(たとえば、雌だけが宇宙酔いになった場合)も、ビデオ記録により、そのことがわかるはずである。実験テーマの正式名が交尾・産卵行動となっているのは、たんに雄と雌の抱接だけでなく、雄から雌への求愛行動も含めた、広い意味での産卵行動を見るからである。なお、魚の場合、交尾という語よりは、「抱接」という方が正しい。しかし、宇宙実験の成果は広く一般にもマスコミ等で公開されることを考慮し、抱接という耳慣れぬ用語に代えて、交尾を使用した。つまり、mating behavior という語の日本語訳として何が適切かを考えた末、雄が雌を抱きながらの産卵ということを明確にする意味で、「交尾・産卵」という語を用いた。実際、我々研究者の間でもメダカの一連の産卵行動の中で、交尾という語が使われている。

## 20秒 vs. 2週間

微小重力に強いメダカの系統を見い出したと言っても、これまで行った航空機実験(ダイヤモンドエアサービス社、MU-300)のデータは、当然ながら、すべて20秒の微小重力状態の話である。微小重力状態になったのほんの初期の反応を見ているにすぎない。今回のIML-2ミッションの2週間では初期反応、定常に達した状態、順応を示す状態などが時間とともに出現し、20秒とは全く別の反応も考えられた。これを調べるのも目的の1つであった。

## 胚発生を観察

メダカの卵はそれを囲む膜(卵膜)が透明なだけでなく、ふ化するまではからだの表面はほぼ透明で、たとえば内臓ができていくようすも外から詳しく観察できる。微小重力下で脊椎動物の受精卵が正常に発生し、ふ化(誕生)するかについては、まだはっきりとした結論が出ていない。これは地球上で重力が発生の過程にどのように作用しているかを知るう

えでも重要な研究テーマである。

メダカの卵は産卵後 10 日間でふ化する(24℃の場合)。今回の宇宙滞在期間は約 2 週間と長いので、その後半には卵膜からふ化した稚魚の行動も観察できた。

## 2 世代飼育装置

簡単ではあるが、親メダカと卵・稚魚とを分離して飼育する機構を考案した。交尾・産卵後しばらく卵は雌の腹からぶら下がっているが、やがて雌の体から離れていく。元来、親メダカは自分自身が産んだ卵でさえ食べてしまう。卵の回収は水流を利用して行うことにした。卵は通過するが、親メダカは通れない金網をつけ、水の排出口には目の荒いナイロンフィルターを置き、卵や稚魚が排出口に引き込まれないようにした。このフィルターの網目は立体的なため、ふ化した稚魚が入り込み、心地よく滞在できる構造になっている。水の流れとこのように機構により、稚魚もこの隔離機構(金網によって隔てられている部分)に留まっていることを期待し、簡単な 2 世代飼育を計画した。

### 前もって搭載するメダカ胚の宇宙実験

もし、親メダカが宇宙で交尾・産卵しなければ、胚発生の観察は不可能となる。このような場合も想定し、胚発生に関して以下の 1)、 2) の実験も実施した。

#### 1) 前もって搭載するメダカ胚の発生および稚魚の行動

このために、2つの金網ボックスが用意された。これらの中に前もって地上で受精し発生の進んだ胚を入れておき、その発生の様子、およびその後ふ化した稚魚の行動をビデオで記録した。一方の金網ボックスには HO5 系統の卵が、もう一方には ccT 系統の卵が入れられた。KSC の実験室で産卵した卵を採集し、発生段階の進んだ胚(黒い眼がすでに出来ている段階、stage 26/27 付近)を用意した。打上げ後、MET Day 02、Day 04、Day 07、Day 09、Day 11 に、この金網上の全ての胚の拡大像がビデオに記録された。と同時に、その映像が地上に送信された(ダウンリンク)。

水温 24℃では産卵後(受精後)ふつう 10 日前後でふ化(hatch)するため、MET Day 04、Day 07 のビデオ観察時には、ふ化した稚魚が多数出現していた。金網ボックスに搭載したのは ccT と HO5 系統の卵である。ccT という系統は微小重力に強いことが、航空機による微小重力実験(パラボリックフライト、20 秒間の微小重力)で判明している。つまり、ccT 系統の成魚は微小重力でもふつうに泳げる。ふ化したばかりの稚魚に微小重力で姿勢を制御できるという、この能力があるのかどうかを、これらのビデオ観察から判定した。逆に、HO5 系統の成魚は微小重力でぐるぐると回転する。微小重力で発生した稚魚は回転するのか、しないのか。これもビデオ観察を行った。姿勢制御に関する神経系の発達の様子を知る上で、重要な観察データである。

#### 2) ccT 系統と他の系統の胚の発生能の比較

さらに別の場所(金魚水槽奥の金網容器)にも ccT 系統と他の系統(数系統)の胚を入れ、これも宇宙でふ化させた(ただし、これらについては、ビデオ観察は行わなかった)。地上へ帰還後にふ化率を調べ、微小重力での発生・ふ化に系統によって違いがあるかを調べた。つまり、発生能力という点から、宇宙に適した系統があるかどうかを調べるためである。

## 宇宙飛行後の解析

地上に回収した稚魚については行動を観察するとともに、成長させ、産卵させることによって、その子孫への影響を調べた。宇宙旅行をした4匹の成魚についても、地上で産卵を継続させた。この場合、産卵された卵が発生するかどうかを調べることで、微小重力下において成魚のからだの中で生殖細胞(卵子や精子)が正常に形成されたか、またその形成過程のどの時期が微小重力の影響を受けやすいかが判定できる。

宇宙で撮影したビデオテープは7時間余にわたっていた。この詳細な解析を行った。

## 成魚メダカの系統

メダカ用タンク(カセット式水槽)に搭載した成魚4匹(雄2匹、雌2匹)は、ヒメダカ・タイプ(だいたい色のメダカ)である。系統はccT系統(いわゆる東大メダカ)と称される系統である。航空機による微小重力実験から、微小重力に強い(ふつうに泳げる)メダカの系統はこのccT系統とHNI-II系統の2系統だけであった(他の系統のメダカは微小重力ではぐるぐると回転してしまった)。

宇宙で用いるメダカ用タンク内での飼育実験(地上実験)を繰り返したが、HNI-II系統はかなり神経質であり、水槽の狭さと水槽内の流れがストレスとなるらしく、地上でさえ産卵を中止することが時折おこった。このような理由で、微小重力に強く、しかもストレスに比較的強いccT系統の成魚を搭載することに決定した。

## メダカの宇宙食

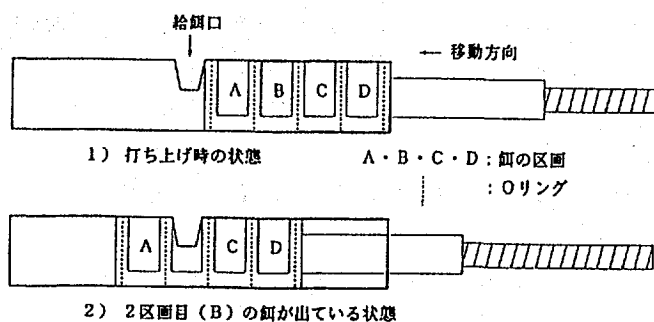


図2 給餌機構

今回メダカについては産卵の継続を目的としているため、餌を与える必要がある。今回のメダカ用タンクの給餌機構に入れる餌には適度の膨潤性が必要であった。これに嗜好性などの要因を考えて、特別に餌を製作した。当然ながら、地上でもこの餌で飼育を続けたメダカを宇宙へ上げた。なお、本番でのメダカ用宇宙食は工場で小分けしてアルミ袋に真空パックされたもので、KSCでは

滅菌操作はせず、クリーンベンチ内で開封後すぐに図2に示すような給餌機構に充填した。

給餌機構において、餌の収納部は4区画あり、シリンダーの中でOリングによって、飼育水から完全に隔離された状態となっている。ネジを回転させるとAの区画が給餌口(開口部)に進み、餌が水を吸い膨潤して給餌口から盛り上がり食べ易くなる。また給餌口からも、メダカが頭を入れてシリンダー内の餌をある程度は食べることができる。3日後には、ネジを再び回転させ、B区画を給餌口に進める。これにより、A区画はシリンダー内に格納される。このようにして、餌が飼育水と接するのはその時与えている区画の餌のみで、他の区画の餌や食べ残しはシリンダー内に封じ込められており、餌による水質の悪化を最小限に抑える機構となっている。



## メダカの選抜(東大にて)



図3 追従装置による視覚検査。ある速度で回転する白黒の縞模様にて、メダカが追従できるかを検査する(外部発表9を参照)。

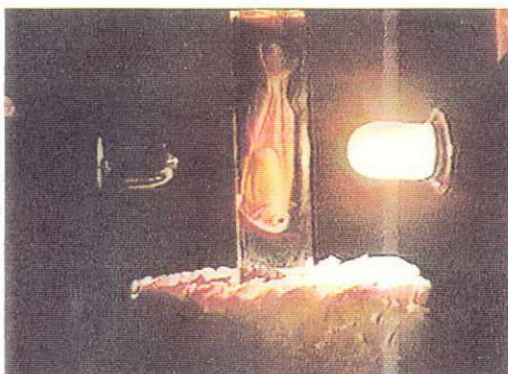


図4 背光反射能力の検査(方式I)。左右のランプは交互に点灯。能力は反応時間で測定(外部発表9を参照)。

1994年の春には、前年より育てた ccT 系統(いわゆる東大メダカ)の1年魚約2000匹が東京大学アイソトープ総合センターの屋上で飼育されていた。その後、大きさや形状から選んで、約1500匹を飼育室に入れた。白黒縞模様追従テスト(図3)で約6割が合格。背光反射能力チェックとしては2方式を考えた。当初、日本で2方式とも行うつもりであった。しかし1つの方式(方式II)は時間がかかるので、KSCで行うこととし、日本での背光反射検査としては方式I(図4)のみを実施した。さらに、産卵のチェックにより実際にミニ容器+水流に入れた組は114組、最終的に6月1日の時点で82組が残った。

輸送するメダカの選抜としては、まず大きさ、形状をもとに選び、つぎに白黒の縞模様を回転してそれに対する追従を調べて、速い速度でも追従するものを選んだ。合格したメダカについて、徐々に照明のつく時間をずらし、KSCの現地時間に合わせていった(日本出発の2週間前にはほぼ昼夜逆転の状態とした、飼育室の照明時刻20:00～10:00、暗期10:00～20:00)。雌雄の産卵、受精能力を確認した後、雌2匹、雄2匹(計4匹)を1組として、ミニ容器(容量250ml、宇宙で用いるメダカ用タンクとほぼ同じ容量)に入れ、水中ポンプで水流をつけ、飼育を続けた。ミニ容

器へ入れるのは5月10日から開始、産卵能力が確認できた雌雄4匹がで次第、順次ミニ容器に移していった。ミニ容器に入れた組は、全部で114組となった。容器の狭さや水流で衰弱し、死亡したものなどは取り除き、最終的に6月1日の時点で82組が残った。

## メダカの輸送

このうち、50組(計200匹)を第一陣(荷物便)で6月2日に輸送した。同時に受精卵を搭載する実験用に、ccT系統以外の成魚100匹も輸送した。荷物便の輸送は近鉄エクスプレス(KWE)が行い、輸送経路は成田ーロサンジェルスーオーランド、オーランドから陸路でKSCへ。メダカの状態は良好、死亡なしとの報告を受けた。そこで、6月6日のハンドキャリア(手持ち)は当初予定通りの100匹(25組)とした。

6月6日に100匹をハンドキャリアで研究代表者がKSCへ運んだ。これまでのリハーサルでは米国内での通関および経路の関係でノースウェスト社を使用したため、本番でも同社を利用した。搭乗時のセキュリティでX線での手荷物検査を行わないよう、その旨を記した依頼状を持って行った。NW002便に乗り、2人で成田ーロスーミネアポリスーオー

ランド(以上すべて NW)を使用しオーランド空港まで運び、迎いの車で KSC へ輸送した。

### メダカの選抜(KSCにて)

シャトル搭載候補の 75 組(計 300 匹)については、KSC でミニ容器+水流で飼育を続け、最終的に残った組で、産卵を継続している組から宇宙へ打上げる 1 組を選んだ。なお、KSC へ着いてからは、現地のミネラルウォーター(キシミー(地名)水、FMPT (First Material Processing Test) でコイの飼育に使った)を飼育水として使用した。KSC ではすべてのメダカについて、回転する白黒縞模様への追従テストを再度行うとともに、背光反射能力も検査した。背光反射の検査は方式 II を採用した(図 5)。



図 5 背光反射能力の検査(方式 II)。片側(左)のみから照明し、メダカの傾きで能力を判定する(外部発表 9 を参照)。

### 飛行実験の結果

地上で産卵を続けている雌雄 2 ペア(計 4 匹)のメダカを水棲生物飼育装置に入れ、スペースラブで飼育した。クルーは 3 日ごとに給餌機構を動かし、新しい餌を補給する。産卵を継続させるために 14 時間の明期と 10 時間の暗期の明暗サイクルを繰り返し、水温は 24 °C に設定した。産卵を続けているメダカは毎朝 1 回、明期開始後 2 時間以内に産卵行動をとる。クルーはその朝に産卵が行われたことを雌の腹部に付着している受精卵の存在、あるいは卵隔離機構内にその日産卵した卵があることで確認し、翌日の明期開始後にタンクにビデオカメラをセットして、メダカの様子を 2 時間にわたって撮影した(MET Day 02, Day 04, Day 07)。これにより、産卵行動が確実に記録できた。産卵された卵は水流によってタンクの片隅にある卵隔離用の区画に運ばれるようにしてあるので、親メダカに食べられることはない。さらに、卵の発生していく状況を日々を追って観察し、これもビデオにおさめた。

### 経過報告

以下は簡単な経過報告である。

- 1) KSC では最終的に 4 匹のメダカ(雄 2 匹、雌 2 匹)を選抜し、雄にコスモと元気、雌に夢と未来(みき)と名付けた。これらの名前は予め日本宇宙少年団の子供たちにより決められたものである。
- 2) 4 匹のメダカは打上げ 30 時間前にシャトルに搭載された。
- 3) シャトルは定刻(日本時間 7 月 9 日午前 1 時 43 分)に打上がり、約 24 時間後には産卵



した卵3個がタンク内にあると向井 PS (Payload Specialist) の報告があった。

- 4) 翌日には卵が10個に増えていることが彼女から報告された。メダカは交尾と産卵を同時に行うので、卵の増加からメダカが宇宙で交尾を行っていることは確信できた。なお、ここでの交尾とは一連の産卵行動の中で、雄メダカが雌を背びれと尻びれを使って抱き、ひれの刺激によって雌の腹から卵を出させると同時に、精子をかけ受精させることを言う(「交尾という用語について」参照)。
- 5) メダカは毎朝、産卵行動をとるので、翌日はビデオカメラをセットしてもらい、光がついてからの行動を録画するとともに、リアルタイムで画像を送ってもらった。交尾シーンが地上へ届き、感激したことを覚えている(図6)。

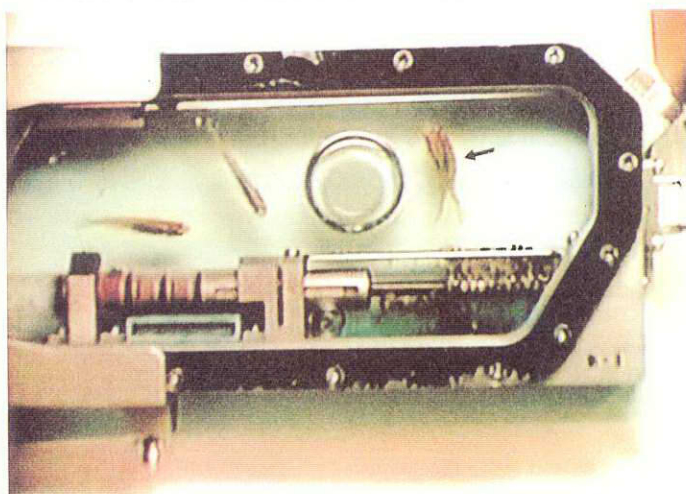


図6 宇宙でのメダカの交尾行動(矢印)

6) 向井 PS から初日に産んだ卵にすでに眼ができていたとの報告を受け、発生が宇宙でも正常に進んでいることを確信した。

7) 前回のビデオ撮影では産卵直後の卵の様子がはっきりとわからなかったので、再びビデオカメラで交尾シーンとともに、産卵直後に雌の腹についている卵をアップで撮影してもらった。

8) メダカの卵は順調に発生を続けており(図7)、そろそろ赤ちゃんメダカの誕生が期待された。ただし水を共有するイモリのために水温を下げたため、宇宙滞在中にふ化が実現できるか、かなりの不安があった。

- 9) 12日目の終り、向井 PS がメダカのベビーを見つけた。母親と一緒に泳ぐ赤ちゃんメダカの映像は、ミッションの報告として全米に流された(図8)。

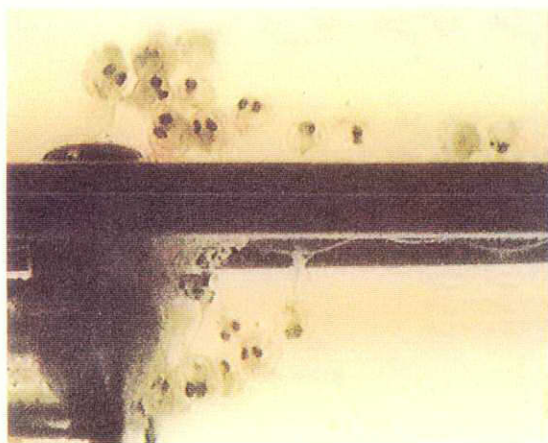


図7 宇宙で産卵した卵は正常に発生を続けた。胚のほとんどが黒く大きな眼をもち、ふ化直前の状態である。

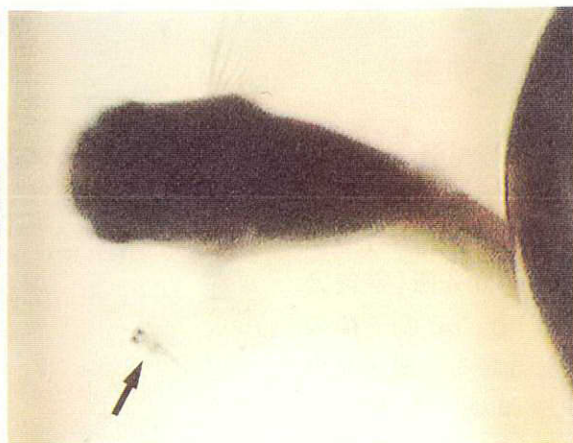


図8 母メダカと泳ぐ宇宙誕生メダカ(矢印)

- 10) シャトルは1日滞在期間を延長し無事着陸。着陸を見届けた後、メダカのタンクが出てくるのを待つ。タンクの底に沈んだまま動かない4匹のメダカを見て、関係者はみんなまっ青になる。ひれが正常に動いていることを確認し、やっと、重力の重さでメダカが下に沈んでいることが理解できた。一匹が、さらにまた一匹が泳ぐ努力をするのを見た時、初めて全員に笑顔が戻った。
- 11) 驚きは続いた。宇宙で誕生した赤ちゃんメダカはなんと8匹にもなっていた。シャトルの帰還が延期されたことが、さらなる成功をもたらしたことになる。
- 12) 宇宙から帰ってきた親メダカ4匹は、実は浮き袋の使い方を忘れてしまっていた。重力のない宇宙では浮き袋を使う必要が無かったのである。このため地上ではタンクの底に沈んだまま、上へあがろうとするがすぐに底へ落ちるといふ、滑稽な動きが続いた。これに反し、赤ちゃんメダカは地上でも正常に泳いでいた。
- 13) 地上に戻って4日目には親メダカはほぼ正常に泳げるようになり、1週間後つまり7月30日に東大に持って帰ったとたん、米国時間の朝に両方のペアが産卵を開始し、以後も毎日産卵を続けた。
- 14) 宇宙を飛行したメダカ4匹(これらは世間で宇宙メダカと称されている)は、コスモと未来をペアに、また元氣と夢をペアにして飼育し、約40日にわたって産卵数、受精率、ふ化率を調べた。2週間の宇宙飛行(微小重力、宇宙放射線)の影響は認められていない(「子孫への影響」参照)。
- 15) このようにしてふ化した稚魚はその後成長させ、2000匹を超えた。これら宇宙メダカ2世はその里親募集を行い、現在までに全国304カ所(小学校など)に配布した。配布先からは3世、さらに4世の誕生が報告されている。
- 16) 当然ながら東大でも、宇宙メダカ3世そして4世も誕生している。とともに、宇宙で誕生した赤ちゃんメダカ(「宇宙誕生メダカ」または「宇宙起源メダカ」と称す)も産卵を始め、その子も育っている。

## 解析と考察

### 子孫への影響

図9は宇宙へ行った親メダカ4匹(宇宙メダカ)と、その子孫の近況である。親メダカの産卵は1994年7月30日(シャトル打ち上げから22日)から再び開始された。雌雄1匹

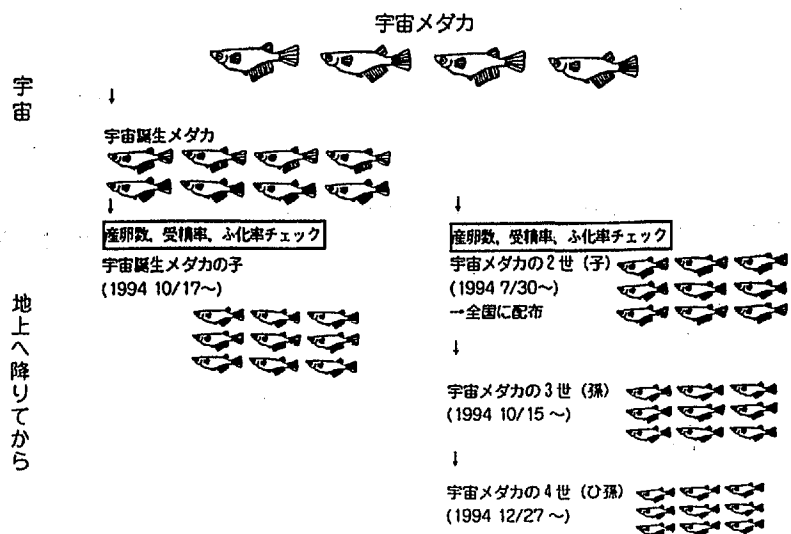


図9 宇宙メダカとその子孫

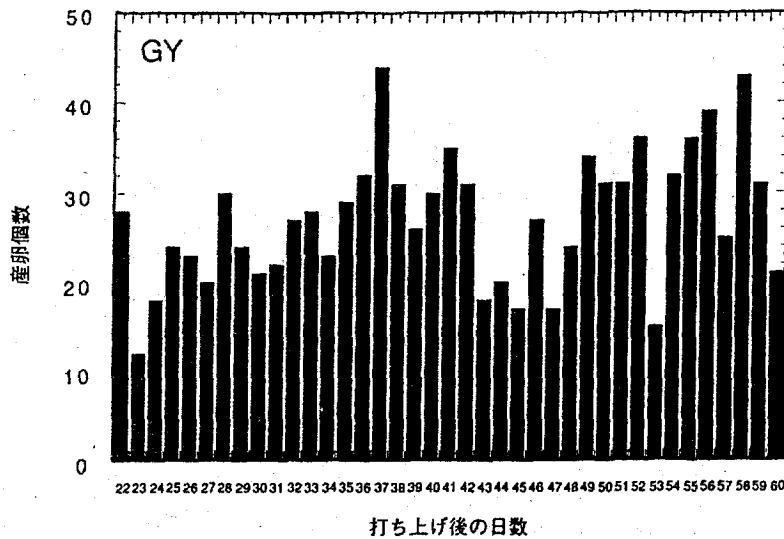


図 10 帰還してからの宇宙メダカ 1 ペア (GY) による産卵数。横軸はシャトル打ち上げからの日数で表示。

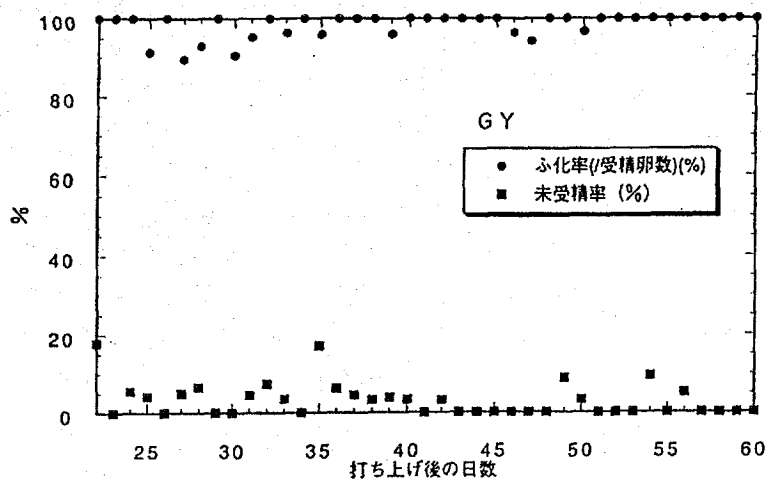


図 11 帰還してからの宇宙メダカ 1 ペア (GY) による卵のふ化率、未受精率。横軸はシャトル打ち上げからの日数で表示。

産卵データである。宇宙で受精からふ化までが進行した個体であるが、全く影響は認められない。宇宙誕生メダカについては、産卵データの記録を今しばらく続ける。

#### 産卵行動に関する実験結果

前述したように、メダカは宇宙へ行った最初の日から交尾・産卵を行った。メダカにとって微小重力はあまり影響がなかったようにみえる。しかしながら、ビデオ映像の詳細な解析からメダカたちもかなりのストレス状態にあったこと、また微小重力の交尾にも、てこずっていた事実が判明している。詳細については報告書「宇宙メダカ実験のすべて」(請求方法は外部発表 9 に記載)を参照。

ずつをペアとして飼育し、産卵を継続させ、産卵数、受精率、ふ化率を調べた。図 10 は雄である元気 (G) と雌である夢 (Y) による毎日の産卵数のデータ (GY と表示) である。このペアについて、その卵のふ化率、未受精率を図 11 に示す。ふ化率、未受精率とも、研究室で正常に飼育しているメダカによる産卵データと比べ、数値的にも違いは認められない。もう一つのペア、雄がコスモ (C)、雌が未来 (M) の場合についても同様のデータが得られている (外部発表 9 を参照)。産卵数、受精、そしてふ化でみる限り、15 日間の宇宙飛行は親メダカの生殖細胞へはこれといった影響を及ぼしていない。

図 9 に示したように、宇宙で誕生した赤ちゃんメダカ (宇宙誕生メダカ) も雌雄 2 匹が大きく育ち、産卵を開始している。図 12 はその

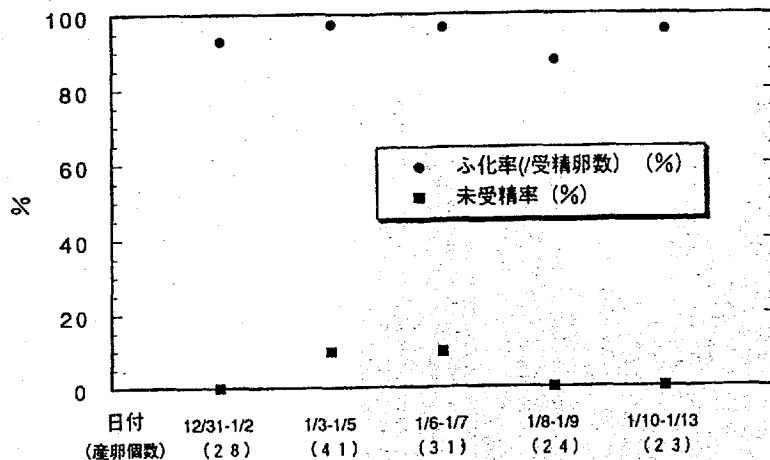


図 12 宇宙誕生メダカ 1 ペアの産卵データ。数日にわたって産卵した卵を、1 つにまとめてデータを出してある。日付は産卵日を示し、1994 年 12 月 31 日から 1995 年 1 月 13 日まで。

## 宇宙で産卵した卵の発生

宇宙では合計 43 個の卵が産卵され、8 匹が宇宙で赤ちゃんメダカになった。ふ化までの時間が足りず、30 個は地球に帰ってふ化した。残りの 5 個は未受精卵あるいは初期の発生段階で死亡した(地上での実験室でも同程度の死亡は起こる)。このことについて説明しておく。シャトルが帰還して 6 時間後に試料(成魚、稚魚)を取り出した。この時、ふ化していた稚魚は 11 匹確認された。その

うち 3 匹は形状、挙動から、ふ化して間もない(つまり、着陸後にふ化した)可能性もあった。確実に宇宙飛行中にふ化した稚魚を扱うという目的から、これら 3 匹を除く 8 匹を「宇宙誕生メダカ」と称し、その行動を観察、顕微鏡標本用に固定、あるいは成長させて子孫への影響を研究することとした。27 個の胚は正常に発生しており、stage 32 ないし stage 33 の発生段階にあった。これらの胚は着陸後 2 日目(7 月 25 日)で 26 個が、残り 1 個が 3 日目(7 月 26 日)にふ化した。卵と判断できるものがあと 5 個あり、これは初期の発生段階(おそらく stage 16 以前、体軸形成以前)で死亡したか、あるいはもともと受精しなかった卵(未受精卵)である。しかし、産卵後日数が経っており、そのどちらであるかの区別は不可能であった。このように、少なくとも 43 個の卵が宇宙で産卵されたことがわかった。卵隔離用の区画内に移動する前に成魚メダカが食べることもあったと考えられ、実際の産卵数はこの数よりも多い可能性はある。

## 前もって搭載したメダカ胚の実験

### 1) 前もって搭載したメダカ胚の発生および稚魚の行動

地上で発生を開始させたメダカ胚を金網ボックスに入れ、打ち上げの 30 時間前にシャトルに搭載した。1 つの金網ボックスには ccT 系統の胚を、他方の金網ボックスには HOS 系統の胚を入れておいた。多くの胚は MET Day 04 にはふ化しており、宇宙飛行士からの報告では、どちらの稚魚も回転していないとのことであった。ビデオ画像の解析からも、ccT 系統の稚魚も HOS 系統の稚魚も宇宙で回転していないことが確認できた。

成魚では ccT 系統は微小重力(20 秒、航空機実験)で回転しない系統であり、HOS は回転する系統である。今回の稚魚の行動観察から言えることは、親が遺伝的に微小重力で回転するかしないかに関わらず、その子供はどちらの系統も微小重力で回転せず、ふつうに泳ぐということである。つまり、微小重力での姿勢制御に関する感覚混乱は稚魚では生じないというのが結論である。地球上(重力のある場所)で長く育ったものが経験により身につけた感覚が存在してこそ、微小重力で感覚混乱が起こるのであろう。宇宙酔いのメカニズムを考察する上でも興味深い結果である。

## 2) ccT 系統と他の系統の胚発生能の比較

ccT 系統と他の系統の卵を入れ、これらを宇宙でふ化させた。この実験の目的は微小重力での発生・ふ化に系統によって違いがあるか、つまり発生能力という点から宇宙に適した系統があるかを調べるためであった。

結果は ccT 系統のふ化率の方が、他の系統の胚よりも成績が良かった。たとえば ccT 系統は搭載した 175 系統の胚のうち 130 個がふ化した(ふ化率 74%)が、他の系統は(他の 3 つの系統の胚の合計として)、98 個を搭載し、54 個がふ化した(ふ化率 55%)。地上の実験でも、一般に ccT 系統の胚は薬剤や放射線といったストレスに比較的強いことが知られている。微小重力というストレスに対してもこの傾向が認められたことになる。ccT 系統は成魚でも胚でも、宇宙ステーションでの実験に適したメダカの系統と言える。

## 結論

今回のメダカ宇宙実験では魚が微小重力でも交尾・産卵が行え、発生も正常に(少なくともふ化までは)微小重力で進行することが示された。雌雄による交尾・産卵は脊椎動物では初めてである。実験は微小重力(0g)での魚の交尾・産卵・ふ化を証明したが、地上(1g)でも当然可能なわけで、この結果が意味するところは、少なくとも 0g から 1.0g の範囲の重力下では、魚の交尾・産卵・ふ化が可能ということである。たとえば月面基地(約 1/6g)でも魚の飼育は実現でき、人工的に重力を作って生活するスペースコロニー計画ではその中心(0g)からのあらゆる場所で魚が飼えるということになる。帰還後の産卵データからも、生殖細胞に及ぼす微小重力の影響は認められていない。

図 1 に示した「魚類養殖に向けての確認項目」で、少なくとも①、②、③がすべて Yes と結論が出た。その結果、図 1 の右側に示した他の代替法を考える必要がなくなった。宇宙で産卵した卵の発生や、地上へ降りてからの子孫への影響の有無を調べた研究から、⑤の問いに対しても、成魚になってからの生殖細胞形成のみについてであり、部分的ではあるが、微小重力で Yes という答えが得られた。

## 宇宙ステーション実験へ

今回のメダカ実験は宇宙ステーションでの、さらなる実験を目指したものであった。宇宙でメダカが産卵行動をとれること、卵が正常な稚魚になることがわかったが、この成果によって、長期の実験が可能な宇宙ステーションで、メダカを何世代も飼育(継代飼育)する可能性が開けたのである。メダカは実験室内では、卵から 3 カ月で、次の世代を産卵できるまでに成長する脊椎動物である。人が 20 歳で子供を作るとしても、その約 80 倍の速さで世代交代を繰り返す計算になる。人類が宇宙へ進出し、そこで子孫を増やしていく時、どのような変化が生じていくのかが、メダカを用いれば 80 倍早く予知できる。このように、マウスやラットの交尾が実現できるまでは、脊椎動物であり継代飼育の可能性を示したメダカは、非常に有力な宇宙実験用の動物となろう。もちろん、メダカの継代飼育の一番の目的は、宇宙での魚類養殖のための基礎研究である。

実は、私自身がとくに興味を持っていることは、無重力への生物の適応である。地球に生命が誕生して 35 億年と言われるが、この間、生命は無重力という環境を一度も経験したことがない。無重力という新しい環境に置かれたメダカが、世代を繰り返していく時、どのように適応し変化していくのだろうか。DNA の遺伝情報の、どの遺伝子を使って適応



していくのだろう。今回のメダカ宇宙実験において、人工授精ではなく、雌雄による自然な形で産卵が行えるかをあえて調べたのは、このような研究目標のためである。無重力に適応した個体のみが盛んな生殖活動をし、子孫を増やしていくはずである。それが遺伝する変化であれば、何十世代も繰り返した後の宇宙メダカ集団は、地球のメダカと違っていてもいい。このような進化の一断面が検証できたら、どんなに興味深いことだろう。これがメダカ宇宙実験に抱く、生物学研究者としての私の夢である。

#### 参考文献

- 1) 井尻憲一．無重力に強いメダカと弱いメダカ．日本マイクログラビティ応用学会誌．10, 158-166 (1993)．
- 2) 井尻憲一．微小重力下におけるメダカの行動．宇宙航空環境医学．31, 20-23 (1994)．
- 3) 特別インタビュー「宇宙で誕生するメダカ」, 井尻憲一・東京大学アイソトープ総合センター助教授に聞く．ニュートン．1994年5月号, 86-91．

#### 外部発表

- 1) Ijiri, K. Life sciences experiments on IML-2(2): Mating behavior of the fish Medaka and development of their eggs in space. *Proceedings of "IN SPACE '94"* (1994). 31-36.
- 2) Ijiri, K., Mizuno, R., Taguchi, Y. and Eguchi, H. IML-2 space medaka experiment. *Proceedings of the Eleventh Space Utilization Symposium* (1994). 12.
- 3) Ijiri, K. A preliminary report on IML-2 medaka experiment: Mating behavior of the fish medaka and development of their eggs in space. *Biol. Sci. in Space*. 8, 231-233 (1994).
- 4) Ijiri, K. Fish mating experiment in space -- What it aimed at and how it was prepared. *Biol. Sci. in Space*. 9, 3-16 (1995).
- 5) Ijiri, K. Medaka fish had the honor to perform the first successful vertebrate mating in space. *Fish Biol. J. MEDAKA*. 7, in press (1995).
- 6) 井尻憲一．IML-2宇宙メダカ実験の成果と宇宙ステーションへの展開．第11回宇宙ステーション講演会／第8回有人宇宙飛行技術シンポジウム講演集(1995)．S. 7-8．
- 7) 井尻憲一．未知への挑戦——宇宙実験の意義と課題(宇宙メダカ実験と宇宙放射線を中心として)．第6回計測連合シンポジウム、先端計測'95資料集(1995)．49-60．
- 8) 井尻憲一．宇宙メダカ実験．日本マイクログラビティ応用学会誌．12, 144-149 (1995)．
- 9) 井尻憲一．「宇宙メダカ実験のすべて」(57頁)．RICUT発行(1995)．

なお、対応する英語版として 'The First Vertebrate Mating in Space - A Fish Story' (57 pages) があります。他に、「宇宙メダカの子もたち——飼育報告集」(230頁)は、全国に配布した宇宙メダカ2世の飼育・観察記録です。宇宙メダカ2世の里親の方々からの報告書を、そのまま写真製本してあります。これらの報告書を希望される方は、希望する本と配達先住所を明記し、封書で井尻憲一まで請求してください。ただし、実費として1冊当たり1,000円分を頂きます(定額小為替または現金書留でお送りください。郵送費は当方で負担)。報告書請求先：〒113 東京都文京区弥生 2-11-16、東京大学 アイソトープ総合センター、井尻 憲一(宛)。