

## 微小重力下における魚の前庭順応機構の研究 (GOLDFISH)

代表研究者： 高林 彰<sup>\*1</sup>

共同研究者： 小原 健<sup>\*1</sup>、大村輝江<sup>\*1</sup>、渡邊 悟<sup>\*2</sup>、森 滋夫<sup>\*2</sup>、  
田中正文<sup>\*2</sup>、桜木惣吉<sup>\*3</sup>、R. von Baumgarten<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> 藤田保健衛生大学、<sup>\*2</sup> 名古屋大学 環境医学研究所、<sup>\*3</sup> 愛知教育大学、

<sup>\*4</sup> マインツ大学、ドイツ

In a space experiment, the adaptation of goldfish behavior during flight and readaptation after landing were investigated. Six goldfish (1 normal, 1 with otoliths removed on both sides, 4 with otoliths removed on one side) were flown in a fish package (F/P) of Aquatic Animal Experiment Unit (AAEU). The dorsal light responses (DLRs) of fish with otoliths removed were recorded after operation until launch and after landing. The behavior of the fish in microgravity were recorded with a video camera on mission elapsed time (MET) Day-00, 02, 05, 08, 12.

On MET Day-00, the two fish with otoliths removed on one side showed flexion of the body toward the operated side. These fish also showed rolling behavior toward the operated side. However, the body flexion disappeared on MET Day-05 or MET Day-08. No rolling behaviors were observed after that time, which might indicate adaptation in microgravity. The normal fish and the fish with otolith removed on both sides showed backward looping responses during the 13 days mission. Although the frequency of looping episodes decreased after MET Day-08, five fish still showed looping response at MET Day-12, that was the last day of video recording on orbit. In microgravity, visual system of fish did not seem to provide sufficient cues to prevent them from looping and rolling.

After landing, no looping and no rolling behavior were observed. However, the tilt angle of the DLR increased in the fish with otolith removed 5 month before launch but not in normal and those with otoliths removed 2 weeks before launch. These results suggest that the behavioral dysfunction and the adaptational process in space are dependent on vestibular inputs.

### 実験の目的、意義

宇宙における微小重力環境は、生体の各種機能に影響を与える。感覚入力の変化、特に重力加速度のセンサーとして重要な耳石器への入力の消失が種々の機能的変調を引き起こすと考えられている。一方、これらの機能的変調は時間の経過とともに、地上での基準あるいは宇宙での基準へ順応することが知られている。同様な順応過程は、長期宇宙滞在から地上1G環境への帰還時にもみられる。

重力感覚の変容は、姿勢調節にも種々の影響を与える。運動・姿勢の制御は、視覚系、前庭系、体性感覚系などの感覚受容器からの信号を中枢神経系内で統合処理し、筋張力の連続的調節の結果と考えられているが、宇宙の微小重力環境下では、前庭器、特に耳石からの入力消失が最も大きな影響を与えると考えられている。これらの、感覚入力の役割の重要度の変化は、微小重力環境暴露の初期にみられる宇宙順応症候群 (Space Adaptation Syn-

drome; SAS)の機序を考える上でも重要である。

魚の行動においても、微小重力暴露の初期段階でみられた異常な回転行動が、微小重力滞在時間の経過とともに減少することが報告されている<sup>1)</sup>。魚の背光反応行動は、視覚-前庭感覚相互作用の研究対象として実験が行われてきた<sup>2~10)</sup>。魚は一般に光に背を向け、重力の方向に腹を向ける性質を有している。この姿勢は主に、光の方向と強さを両眼の網膜からの視覚入力として、および加速度の方向と強さを両側前庭器、特に耳石器からの入力としたバランスによって制御されると考えられている。

1994年7月に行われたIML-2(第二次国際微小重力実験室)では、前庭を摘出した金魚の遊泳運動、背光反応を指標として微小重力への順応および地上帰還後の再順応を調べた。これによって、地上における前庭機能の違いが、宇宙の微小重力での行動と、その順応にいかなる効果を与えるかを検討した。

## 実験の方法と試料

### 実験方法

宇宙飛行実験に用いた金魚は体長7~8 cm、体重7.5~11 gのフナオの紅白和金であった。飛行実験には、正常金魚1匹、両側前庭摘出金魚を1匹、片側前庭摘出金魚4匹を用いた。両側前庭摘出および片側前庭器摘出群の内2匹の手術はスペースシャトルの打ち上げ約5ヶ月前に行われた。残りの2匹の片側前庭摘出手術は2週間前に行われた。前庭器摘出手術は、1万分の1から4万分の1のMS222による軽い麻酔下で、金魚を灌流しながら固定して行った。前庭器摘出手術は、頭骨にあけた小孔から卵形囊耳石および半器官の一部を摘出し、その後小孔を骨蠟にて封じた。

5ヶ月前の前庭摘出手術は約60匹に対して行い、約4ヶ月にわたって背光反応を記録し、解析結果を参考に両側前庭摘出金魚10匹、片側前庭摘出金魚20匹を選抜し、正常金魚90匹を加え、計120匹をNASAケネディ宇宙センターへ空輸した。輸送した正常金魚のうち20匹に対して、片側前庭摘出手術を打ち上げ2週間前に行った。以上の金魚のなかから飛行群6匹、バックアップ群6匹および地上対照群6匹を選抜し、打ち上げ36時間前にフィッシュパッケージに入れた。飛行前実験記録を行った後、NASAへ引き渡しスペースシャトルのラボ内にある、水棲動物実験装置(AAEU)へ積み込まれた。

飛行中は毎日のシフトの最初にフィッシュパッケージのカバーを開け、そのシフトの終了時に閉じることによって昼夜リズムを形成することとした。カバーの開閉時に、金魚の状態が音声によって報告された。飛行実験はミッション経過時間(MET)の0、2、5、8、12日目の計5回行われた。1回の実験は30分のビデオ記録からなり、最初の10分間は上方からの一定光照射中の行動記録で残りの20分間は、上方とこれと90度横方向からの光照射がそれぞれ20秒ごとに切り換わる条件下での行動記録であった。スペースシャトル帰還後約6時間で試料を受取り、ただちに飛行後実験をおこなった。飛行前後の実験は飛行中と同様である。その後、フィッシュパッケージから金魚を取り出し、個体毎に背光反応を計測した。背光反応の計測は、帰還後1週間にわたって毎日行った。

クルーによって毎日の金魚の状態を報告してもらうため、教育訓練においては、予想される魚の健康状態、あるいは行動の異常を例示し理解してもらった。また、手術の方法を示し、各個体の行動における差、およびその特徴を理解し適切な表現を行えるようにした。実際の個体識別は金魚の紅白の模様によって行った。最終的に飛行金魚として選抜された

個体の模様を描き、クルーに持参してもらった。

## 地上予備実験

暗黒中あるいは両眼摘出をおこなった金魚では、前庭器が正常であれば重力方向に腹を向けた安定な姿勢を示す。したがって、視覚入力に遮断された場合は耳石器からの入力を主にした制御によって姿勢の安定が保たれると考えられる。片眼のみを摘出した金魚では、上方からの光照射に対して、正常眼の方にわずかに傾斜する傾向を示すが、ほぼ直立姿勢を示す。一方、この片眼盲目金魚の背光反応は、正常眼の方に大きく傾斜する。このことは、視覚入力の左右差が大きいにもかかわらず、直立姿勢を維持する傾向が大きくなると考えられ、地上の1G環境下では前庭入力の重みが大きいものと推定される。

一方、前庭器摘出直後の金魚は、非常に不安定な姿勢を示すが、2時間以上経過した後では安定な姿勢を示した。特に、一側破壊の金魚では、術側への傾斜が大きく、不安定となった。約4ヶ月経過すると、術側への最大傾斜角度は減少し、健側へのそれはほとんど変化せず、結果的には左右両方への傾斜角度はほぼ等しくなった。この特性は時間の経過とともに、正常魚のそれに近付くが、等しくはならなかった。

両側前庭摘出金魚では、背光反応に左右の差はないが、最大傾斜角度および速度は一側破壊魚の術側への傾斜角度および速度より大きかった。また、両側前庭破壊でも時間とともにこれらの特性は正常魚のそれに近づいた。この結果は、一側でも前庭器が正常であれば、背光反応の傾斜角度は抑制されるが、地上の1G環境下で順応することに関して、前庭器以外の重力検出器官が関与していることを示唆している。

地上1G環境下で3ヶ月以上順応した金魚の背光反応を、放物線飛行によって得られる低重力環境において計測した。低重力下では、正常魚、一側前庭破壊魚ともに最大傾斜角度が90度となる。これらの魚の傾斜速度も1G環境下に比べて増大傾向を示した。一方、両側前庭破壊魚においても、最大傾斜角度は順応後に比べて大きく、また、傾斜速度では、順応後あるいは摘出手術直後に比べても大きい傾向を示した。両側前庭破壊魚においては耳石器からの重力加速度変化の入力はないと考えられるから、低重力における背光反応特性の変化には他の感覚入力の影響があると思われた。両側前庭摘出魚では、摘出手術後の時間経過の比較的短い順応以前の時期においても、低重力下で行動の変化が観察されており、重力の変化に起因する他の感覚入力の変化が考えられる。

また、両側前庭器摘出後、3ヶ月以上経過した金魚を盲目にしてその行動を観察した。両眼摘出直後には、姿勢が不安定になるが数時間後には直立姿勢を維持できるようになった。このことは、両側前庭器摘出によって、視覚入力の姿勢制御に対する重みが増加しており、この視覚入力の消失によって姿勢が不安定になったと推測される。しかし、それにもかかわらず一応の直立姿勢が維持できることを示しており、視覚、前庭系以外の感覚入力に関与するものと考えられる。このような両眼盲目で両側前庭器摘出金魚の微小重力下での行動を観察した。背光反応はもちろん観察されないが、微小重力にともなって直立姿勢がくずれることが観察された。このことは、1G環境下では、視覚、前庭入力以外の重力検出感覚系が働いて姿勢の安定を維持していたが、微小重力下ではこの感覚入力も消失したため姿勢が不安定になったと解釈できる。

水圧、浮力は重力加速度の低下に応じて変化し、これらの影響を受ける感覚入力としては、側線器、浮袋からのものが考えられ、側線が背光反応にどのように関与するかについて検討した。両側前庭器摘出後3ヶ月以上経過した金魚の頭部側線をキシロカインによって麻酔した後の背光反応は、最大傾斜角度がほぼ90度となり、前庭器摘出直後の値とほ

ほぼ等しくなった。しかし、傾斜速度はほとんど変化を示さなかった。正常魚および片側前庭器摘出後3ヶ月以上経過した金魚に対する側線器麻酔の背光反応の最大傾斜角度に与える効果を調べると、正常魚、および片側前庭器摘出金魚では側線器の麻酔効果はみられないが両側前庭器摘出金魚では最大傾斜角度が増大した。このことは、背光反応における側線器からの入力の重みが前庭器が片側でも機能している場合には小さいが、両側ともに機能しない時には重力に関連した入力センサーとしてその重みが増大したものと理解された。しかし、傾斜速度は変化しないことから、関与のしかたは前庭器のそれとは異なることが推定された。これらの感覚入力の重みの変化は、地上の1G環境へ帰還した時の再順応過程においても重要な役割をはたすと予想された。

## 飛行実験の結果

### 飛行中の行動

片側前庭器摘出してから5ヶ月経過した金魚の一匹と、術後2週間の金魚の一匹が術側へ湾曲する姿勢を示し、その方向へローリング行動をした(図1)。この姿勢は、術後6ヶ月の金魚(L-64)ではMET Day 05まで観察されたがDay 08には見られず、術後2週間の金魚(L-90)ではMET Day 05では観察されなかった。湾曲の程度は、術後の経過時間が長い方が大きかった。

飛行中は、地上対照群あるいは飛行前の記録に比べて、全般に活発な遊泳行動、姿勢の方向性の乱れが観察された。MET Day 00に正常金魚、両側前庭器摘出金魚および片側前庭

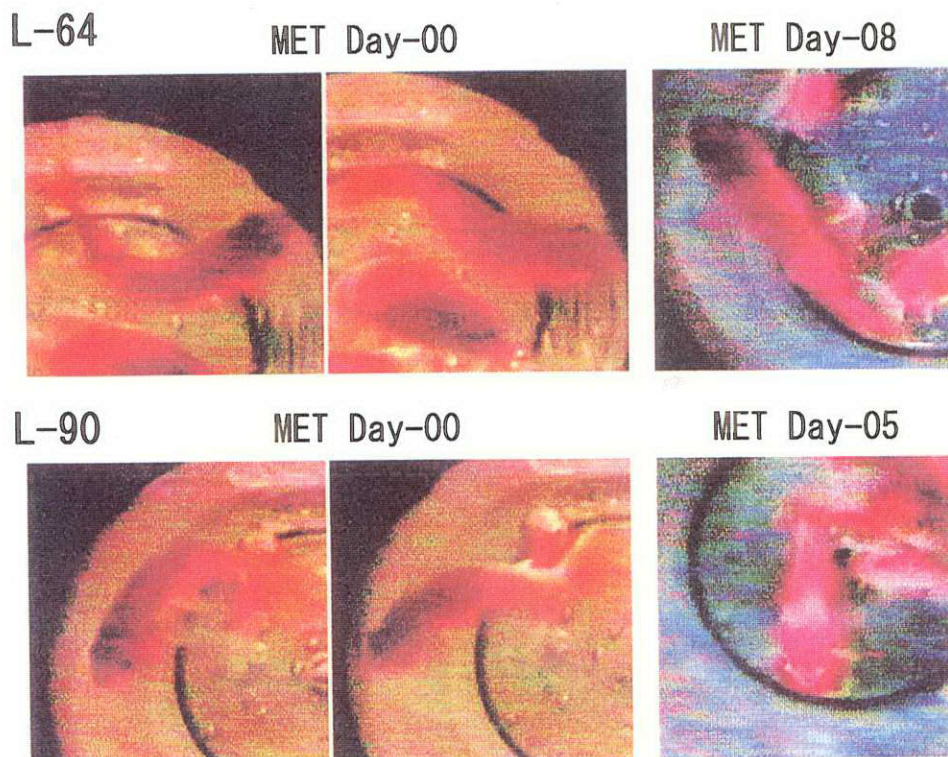


図1 飛行中に観察された体の湾曲とその回復

器摘出金魚の一匹にルーピング行動がみられた(図3)。このルーピングは、従来報告されていた腹を内側にした回転ではなく<sup>11)</sup>、背を内側にした回転であった。また、このルーピングは記録期間中に連続したものではなく、数回以上の回転が断続的に行われることが観察された。飛行期間中にルーピングを示した金魚は、6匹中の5匹であり、前庭器摘出の有無あるいは術後の経過時間に無関係であった。ルーピングの回数を20秒間隔ごとに計測した結果を図2に示す。

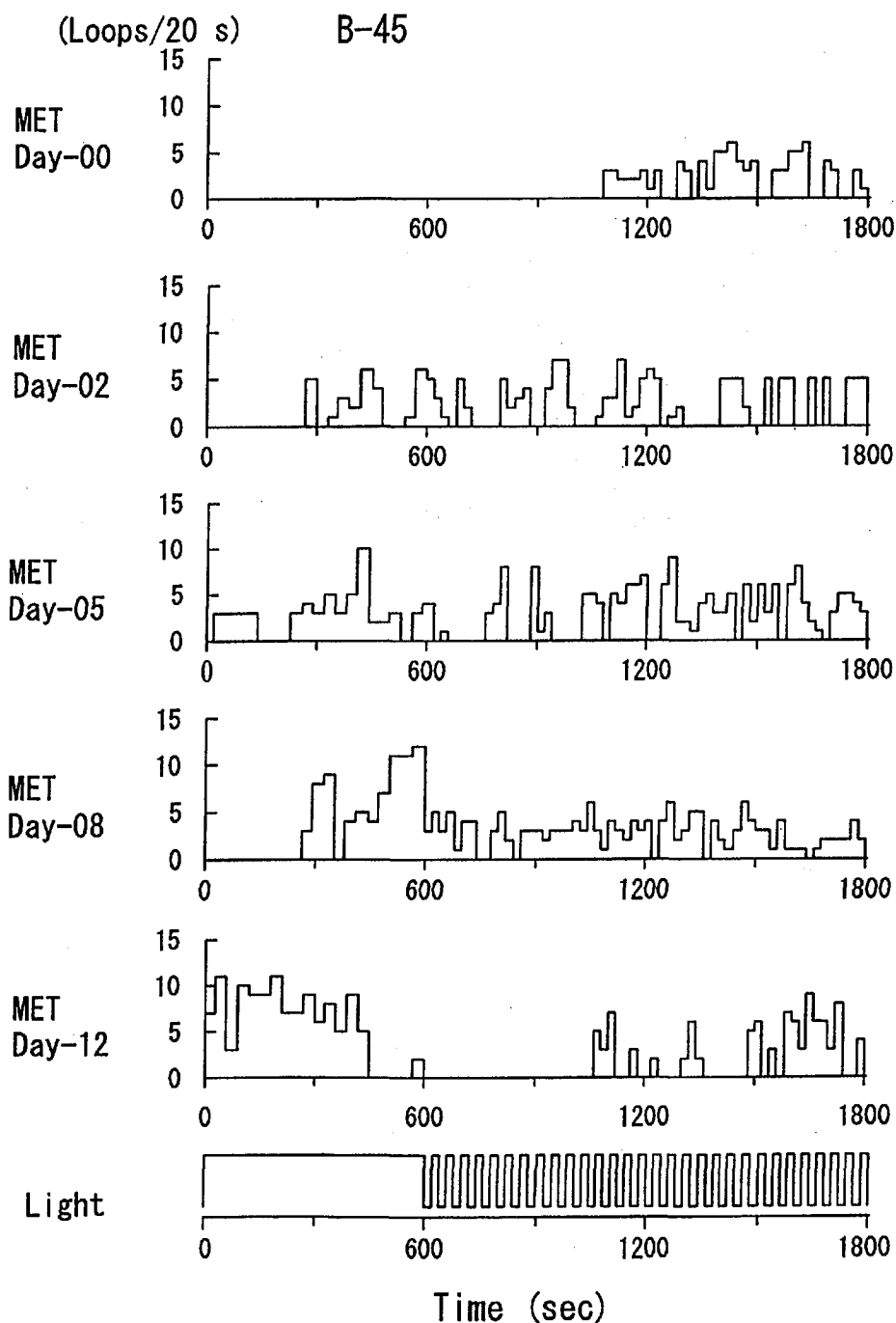


図2 飛行中に観察されたルーピング行動の時間的变化

飛行中に観察された異常行動の一つにローリングがあった(図4)。ローリングが観察されたのは、すべて片側の前庭器を摘出した金魚で、4匹中3匹に観察されたが、回転方向は、すべて術側であった。この内の2匹は、飛行の初期において、体の湾曲が観察された金魚であり、この期間中はほぼ連続的なローリングが観察された(図5)。

### B-45

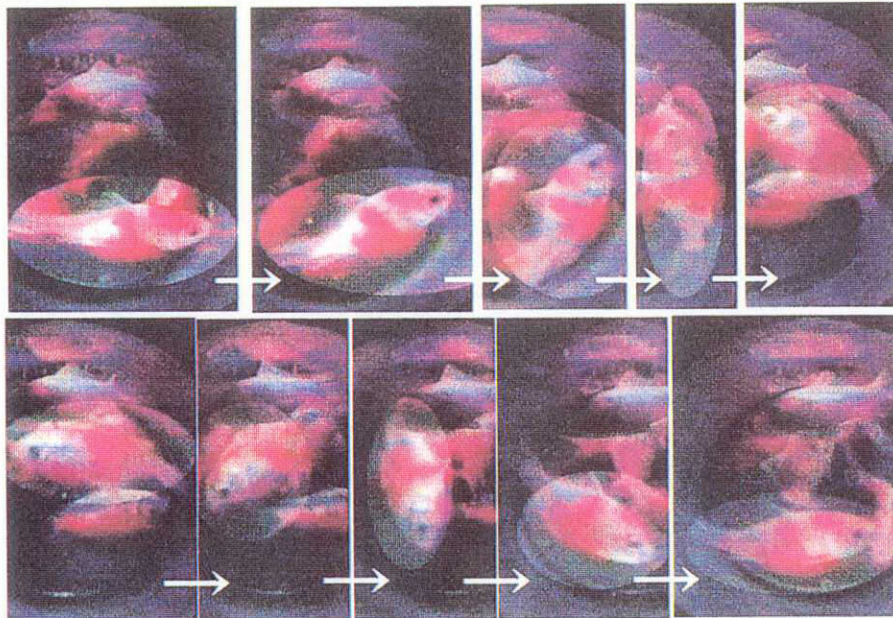


図3 飛行中に観察されたルーピング行動

### L-64

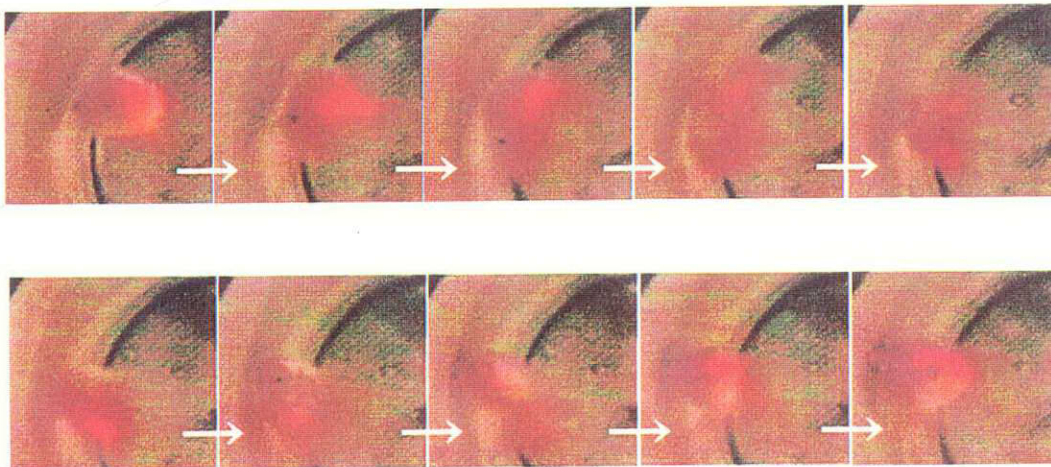


図4 飛行中に観察されたローリング行動

飛行実験の、行動記録時間は30分であるが、最初の10分間は光照射が一定の方向からおこなわれており、その後の20分間は20秒間隔で光照射の方向を切り換えることによって背光反応を調べた。これらの光照射条件下で、ルーピング行動やローリング行動が行われているということは、光の方向に背を向けた姿勢を維持していないことであり、背光反応をしていないことを意味する。ルーピングもローリングもしない期間中で、2秒以上にわたって背を光方向にむけている時間を調べた結果の一例を図6に示す。他の金魚においても同様な結果であり、飛行中は全く背光反応を示さなかった。

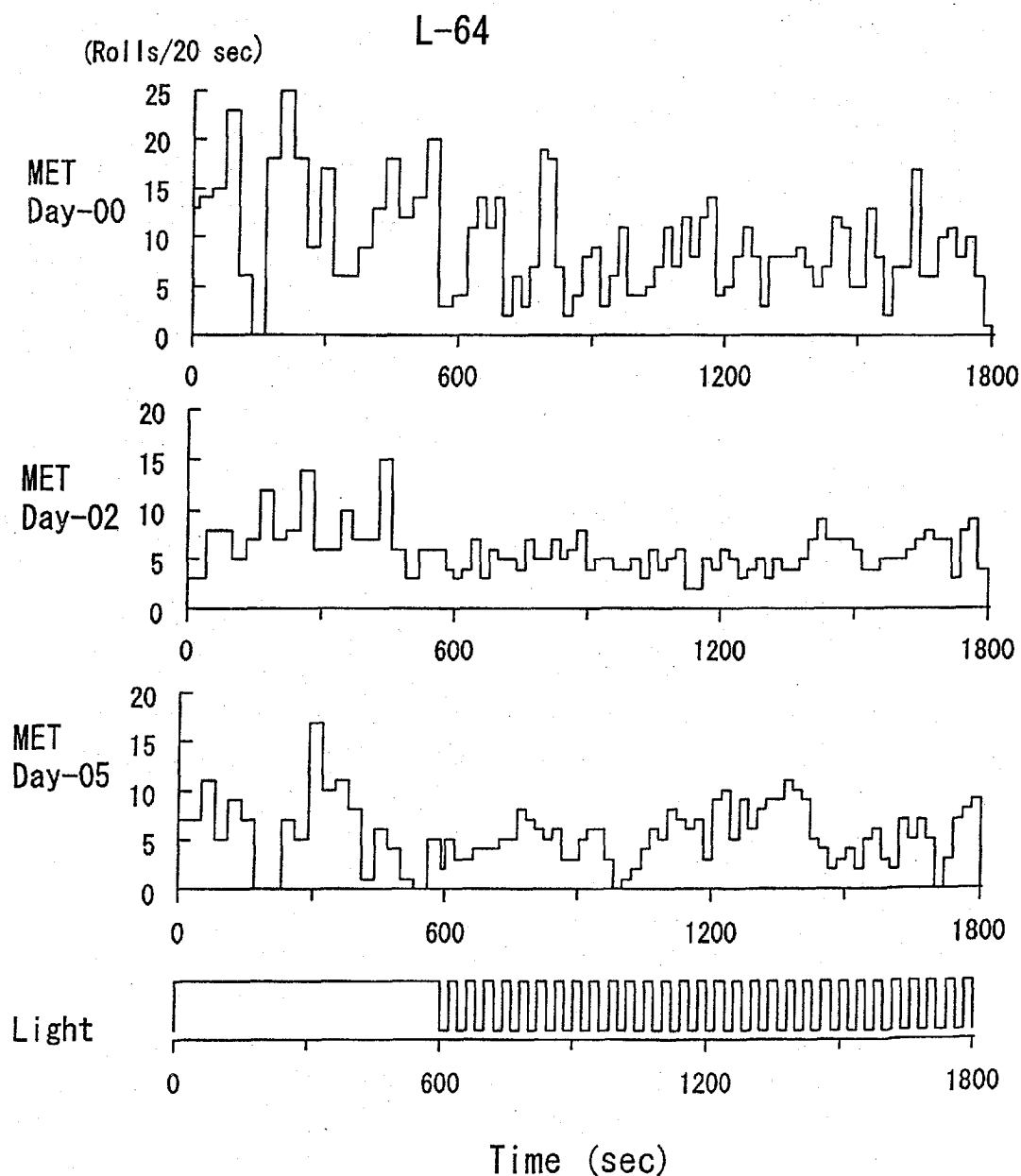


図5 飛行中に観察されたローリング行動の時間的変化。  
20秒間における回転数を示す。

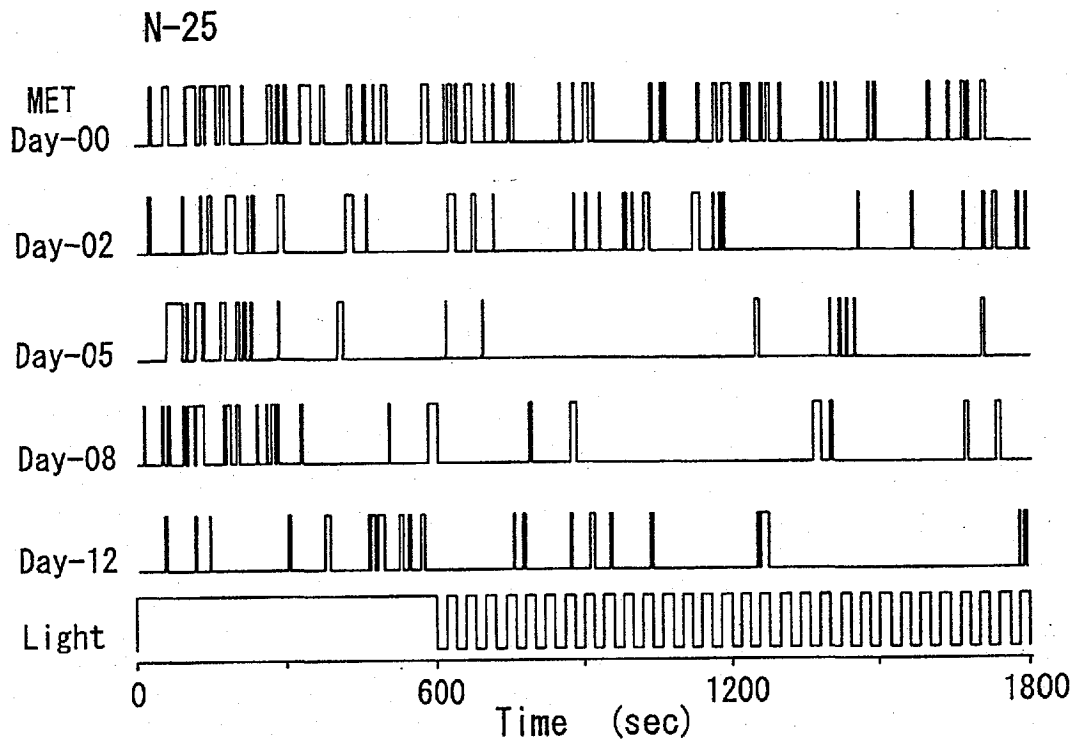


図 6 飛行中に背を光に向けた時間

#### 飛行前後の背光反応

スペースシャトル帰還後約 6 時間で試料を受取り、ただちに飛行後実験をおこなった。飛行前後の実験は飛行中と同様に AAEU 内で行った。その後、フィッシュパッケージから金魚を取り出し、個体毎に背光反応を計測した。背光反応の計測は、帰還日に 2 回(着陸後 8 時間と 16 時間後)およびそれ以後、24 時間間隔で 6 回の計測を行った。飛行前の背光反応の記録および解析は、手術直後の 1 週間以内に約 3 回、以後 3 週間間隔で打ち上げ直前まで行われた。飛行に用いられた被検体の、背光反応の最大傾斜角度の変化は、予備実験で得られた結果と一致したものであった。つまり、手術直後においては、術側への傾斜角度が 30 - 40 度に増大し、健常側への傾斜は、ほとんど変化しないかあるいは、少し増大する傾向を示す。この術側への傾斜角度の増大は、48 時間後には減少が認められ、以後数ヶ月にわたって徐々に減少する傾向を示す。結果的に、術後に観察された背光反応の左右差が消失するように順応する。

打ち上げ直前の背光反応の傾斜角度は、2 週間前に手術を行った金魚の方が多少大きい傾向が残っているものの、自由遊泳行動に差はみられなかった。飛行前後の背光反応の、傾斜角度の変化の例を図 7 に示す。前庭摘出手術を、打ち上げ 5 ヶ月前に行った金魚では、飛行後に、傾斜角度の増大が認められた。打ち上げの 2 週間前に、片側の前庭器を摘出した金魚も、背光反応の傾斜角度は同様な経過をたどるが、飛行後の傾斜角度に大きな変化は認められなかった(図 7 : R-85)。



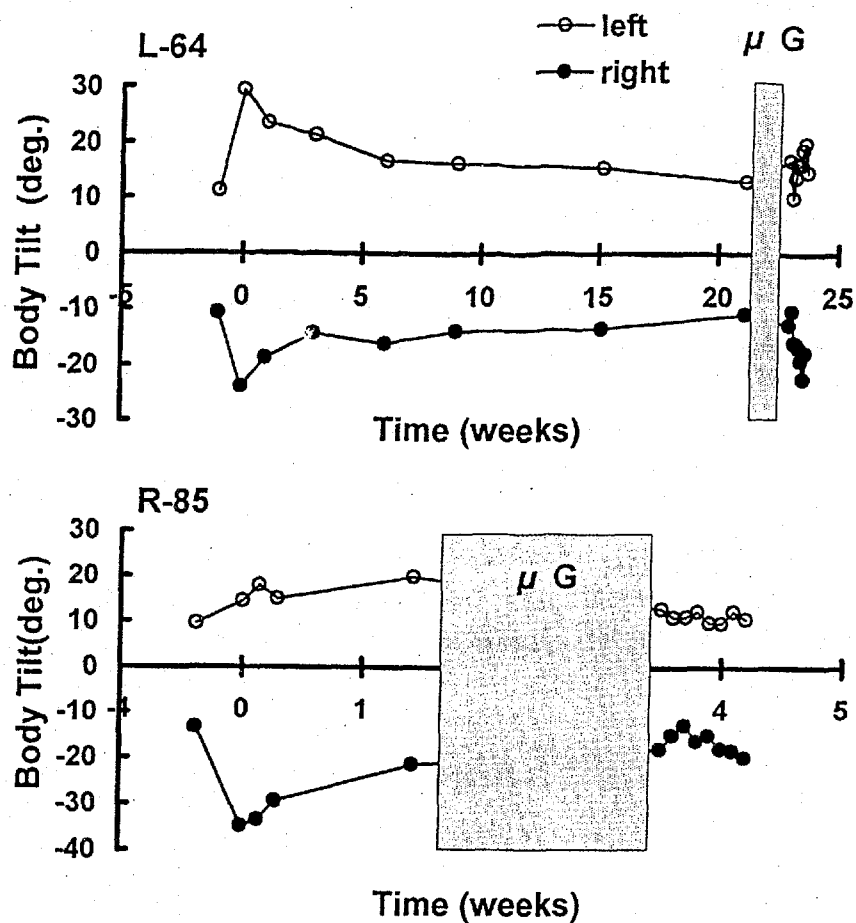


図7 前庭摘出後の背光反応の変化。  
 $\mu G$  は宇宙飛行の期間を示す。

## 解析と考察

### 飛行中の順応

片側前庭摘出して5ヶ月経過した金魚の一匹と、術後2週間の金魚の一匹が術側へ湾曲する姿勢を示し、その方向へローリング行動をした。術側へ曲る、非対称性筋緊張は手術直後に観察される姿勢であるが、1時間以内には代償がおこり正常な姿勢をとるようになる。飛行中におけるこのような非対称性の筋緊張は、微小重力によって代償が無くなった結果再度現れたものと考えられる。この姿勢は、術後5ヶ月の金魚ではMET Day 05まで観察されたがDay 08には見られず、術後2週間の金魚ではMET Day 05では観察されなかった。また、術後2週間の金魚はそれ以後ルーピング行動を示したが、術後5ヶ月の金魚はルーピング行動を示さなかった。これらは、微小重力環境における順応と考えられた。

飛行機による放物線飛行で得られる微小重力下では、明中ではルーピングは観察されず

暗中で、腹を内側にしたゆっくりしたルーピングが観察されたのみであった。また、放物線飛行中には、頭を腹の方向に向けるダイビング反応はしばしば観察されており、腹を内側にしたルーピングもこの反応の延長であると考えられていた<sup>10, 11)</sup>。今回の結果で放物線飛行と異なる行動を示した原因が、水槽の違い、微小重力の時間(放物線飛行で得られる微小重力期間は約20秒)の違い、あるいは微小重力の前に過重力期間(約2.5 G)が存在することによるのかは今後の検討を要する。

また、両側前庭摘出金魚も背を内側にしたルーピングを示した。この金魚は約5ヶ月前に手術を受けており、地上での背光反応の傾斜角度は減少を示していた。この金魚も微小重力の影響を受けたことは、前庭器以外の重力感知器官によるのか、あるいは卵形囊以外の耳石器官が関与している可能性を示唆している。

飛行期間中に行われた、5回の行動記録について、各30分に対するルーピングあるいはローリングを示した時間の割合を図8に示す。ルーピングは宇宙飛行の初期には比較的少なく、約1週間経過後に最大となり、その後再度減少傾向を示した。しかし、飛行期間中に完全に消失することはなく、ルーピング行動でみる限り、宇宙での順応には2週間以上かかることが示唆された。一方、ローリングは飛行の初期のみに観察され、1週間以内に消失し、以後は観察されず、完全に順応したことを示すと考えられた。

6匹のいずれの金魚も光の照射方向の切り換えに対して、明確な背光反応を示さなかった。これは、光によってルーピングが止らなかつたことによると考えられるが、逆に、視覚の手がかりが姿勢の安定化の役割を果たさなかつたことを示すと考えられた。水槽内の光反射や光源の強さの検討も必要であるが、微小重力による前庭系の混乱、あるいは、視覚-前庭系の相互作用における混乱が大きかつたことが示唆される。

#### 帰還後の再順応

帰還後はルーピングやローリングは観察されず、自由遊泳行動の地上への再順応は非常に速かつた。しかし、地上へ帰還後、1週間にわたって計測された背光反応では、前庭摘出の有無と地上での順応の期間の異なることに対応した差異が認められた。飛行後の背光反応の変化を、飛行直前と比較した結果を図9に示す。正常金魚においては、宇宙飛行の前後で、背光反応の傾斜角度に全く変化がみられなかつた。前庭器が正常であれば、地上への再順応は速いと考えられた。一方、前庭摘出手術を受けた金魚は、片側摘出および両側摘出を含めて、術後十分に地上の環境に順応した後、微小重力を体験した魚と、まだ十分に順応しないで微小重力を体験した魚に分けられる。帰還初日(R+0)では、背光反応の傾斜角度は、飛行直前と同じか、あるいは多少の減少傾向があつた。飛行前の術後の経過が長い例では、帰還後、徐々に傾斜角度が増大する傾向が認められた。帰還後の計測は1週間であつたが、それ以後は再度減少する傾向があつた。一方、術後、2週間で微小重力を体験した例では、帰還後の背光反応の傾斜角度は増大傾向を示さなかつた。これらの結果から、前庭順応の期間が長いほど、微小重力の影響を受けやすいことが示唆された。

#### 行動以外の解析

行動の解析以外に、微小重力では、筋の萎縮が報告されていることから、筋の組織学的解析が大平充宣助教授(鹿屋体育大学)によって行われた。また、血中カルシウム濃度の調節ホルモンを分泌する器官である、鰓後体の組織学的検索が高木 勇教授(藤田保健衛生大学)によって、各種臓器におけるストレス蛋白質の分析が、大西武雄教授(奈良県立医大)

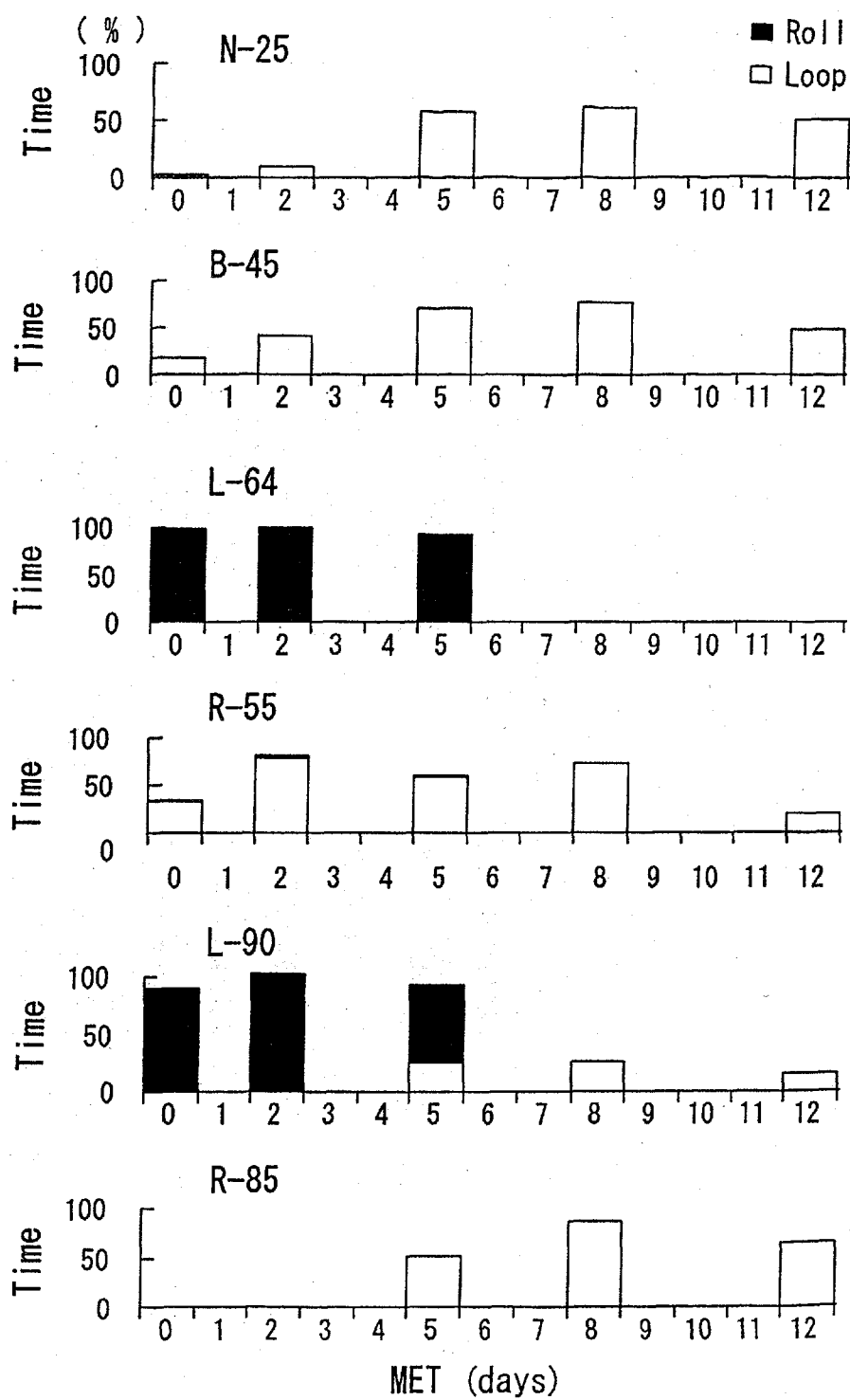


図 8 飛行中にルーピングあるいはローリング行動をした時間の割合

によって行われた。水棲動物である、金魚では本来の環境が準無重量であり、明確な抗重力筋が存在しないこともあって、微小重力の影響は検出されなかった。また、鰓後体の組織学的差異も認められなかった。一方、筋、皮膚、脾臓におけるストレス蛋白(HSP72)は、地上の対照群に比べて有意な増大が認められた。これらのストレスが、微小重力の直接の効果なのかあるいは、宇宙放射線あるいは、打ち上げや帰還時のGの変化によるものなのかは不明であるが、行動では検出できなかったストレスがあったことが確認された。

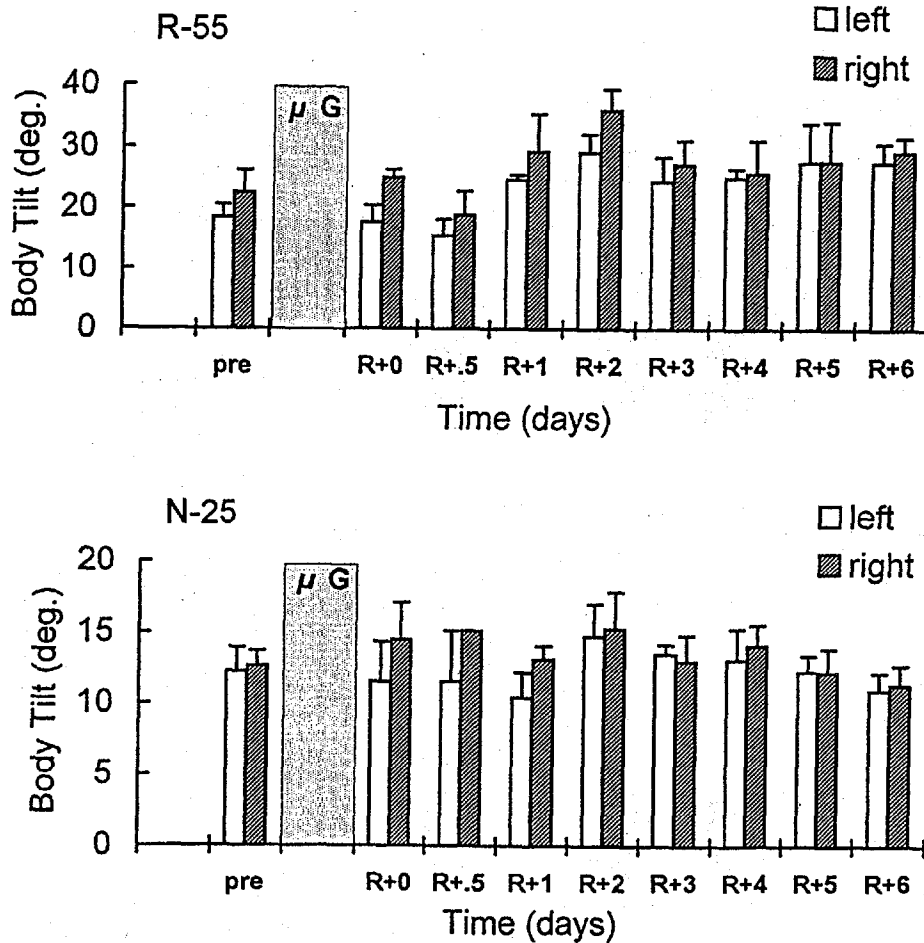


図9 地上帰還後の背光反応の変化

## 結論

微小重力下では、前庭器への入力消失による、遊泳行動や姿勢の変調が観察された。その程度は正常金魚、両側前庭摘出金魚、片側前庭摘出金魚の間で差異があった。片側前庭摘出金魚に現れた非対称性筋緊張が、最も明確な順応を示した。また、前庭感覚入力の左右差による、ローリング行動も飛行期間中に順応を示した。一方、前庭感覚の前後の感覚異常によると考えられるルーピング行動は、微小重力に暴露された直後より時間的遅れをもって最も激しくなり、その後減少するが2週間の飛行期間中では、完全な順応を示さなかった。

帰還後の、自由遊泳における再順応は速かったが、背光反応の傾斜角度を指標とした再順応過程は、前庭器官の有無と前庭摘出手術後の地上での順応期間の長さに依存していた。前庭摘出後の地上での順応期間が長い方が、地上へ帰還後の再順応に1週間以上の時間を要することが示唆された。

#### 参考文献

- 1) von Baumgarten, R.J., Simmonds, R. C., Boyd, J. F. and Garriott, O. K. Effects of prolonged weightlessness on the swimming pattern of fish aboard Skylab 3. *Aviat. Space Environ. Med.* **46**, 902-906 (1975).
- 2) 御手洗玄洋, 森 滋夫, 高木貞治, 高林 彰, 榊原 学, 臼井支朗. 無重力環境下の運動制御とその順応に関する研究 I. 姿勢変化と視葉活動からみた鯉の背光反射特性について. *環研年報.* **31**, 1-8 (1980).
- 3) 御手洗玄洋, 高木貞治, 森 滋夫, 高林 彰. 無重力環境下の運動制御とその順応に関する研究 VI. 鯉の背光反射と中枢活動の観察. *環研年報.* **32**, 14-17 (1981).
- 4) 御手洗玄洋, 森 滋夫, 高木貞治, 高林 彰. 無重力環境下の運動制御とその順応に関する研究 VIII. 鯉の背光反射行動と小脳活動. *環研年報.* **33**, 16 (1982).
- 5) 御手洗玄洋, 高林 彰, 森 滋夫, 高木貞治. 無重力環境下の運動制御とその順応に関する研究 XIII. 鯉の背光反射と眼球運動. *環研年報.* **34**, 1-6 (1983).
- 6) 高木貞治, 高林 彰, 森 滋夫, 渡辺 悟, 佐竹裕孝, 植木俊介, 伊藤貴代子, 山崎孝, 関本洋一, 御手洗玄洋. 無重力環境下の運動制御とその順応に関する研究 XXIV. 回転水槽中における鯉の姿勢変化. *環研年報.* **36**, 12-17 (1985).
- 7) 渡辺 悟, 高木貞治, 高林 彰, 森 滋夫, 御手洗玄洋. 無重力環境下の運動制御とその順応に関する研究 XXVI. 脳各部の破壊による背光反射の中枢経路の検索. *環研年報.* **37**, 1-3 (1986).
- 8) 森 滋夫, 渡辺 悟, 高林 彰, 榊原 学, 古賀一男, 高木貞治, 臼井支朗. 無重力環境下の運動制御とその順応に関する研究 XXVI. 放物線飛行実験における鯉の背光反射と小脳活動の解析. *環研年報.* **38**, 13-19 (1987).
- 9) Takabayashi, A., Watanabe, S., von Baumgarten, R., Wetzig, J. and Ohta, H. Postural control of fish during parabolic aircraft flight. In *Biological Sciences in Space*, ed. by S. Watanabe, G. Mitarai and S. Mori, Myu Research, Tokyo (1987). 163-172.
- 10) 高林 彰, 小原 健, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉. 金魚の姿勢制御に与える微小重力の効果. 第9回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1992). 119-122.
- 11) von Baumgarten, Baldrighi, G. and Shllinger, G. L. Jr. Vestibular behavior of fish during diminished G-force and weightlessness. *Aerospace Med.* 626-632 (1972).

#### 外部発表

- 1) Takabayashi, A., Watanabe, S., Mori, S., Tanaka, M., Sakuragi, S. and Takagi, S. Posture control of goldfish in microgravity. *Proceedings of the seventeenth international symposium of space technology and science* (1990). 2015-2020.

- 2) Takabayashi, A., Watanabe, S. and Takagi, S. Posture control of fish related to gravity input. *Proceedings of the eighteenth international symposium of space technology and science* (1992). 2059-2063.
- 3) 高林 彰, 小原 健, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉, von Baumgarten, R. 微小重力下における魚の前庭順応機構. 第7回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1990). 261-265.
- 4) 高林 彰, 小原 健, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉, von Baumgarten, R. 微小重力での感覚入力の変化と金魚の姿勢制御. 第8回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1991). 96-100.
- 5) 高林 彰, 小原 健, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉. 金魚の姿勢制御に与える微小重力の効果. 第9回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1992). 119-122.
- 6) 高林 彰, 小原 健, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉. 宇宙と地上における魚の前庭順応. 第10回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1993). 102-106.
- 7) 高林 彰, 小原 健, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉, von Baumgarten, R. IML-2における金魚の行動観察実験. 第11回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1994). 8-11.
- 8) 高林 彰, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉. 宇宙の微小重力環境下における金魚の行動. 第72回日本生理学会大会, 名古屋(1995).
- 9) 高林 彰, 小原 健, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉, von Baumgarten, R. 微小重力下における魚の前庭順応機構 - IML-2における金魚の行動観察実験 -. 環境医学研究所年報. 46, 16-18 (1995).
- 10) 高林 彰, 小原 健, 大村輝江, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉, 長岡俊治. 宇宙の微小重力における魚の行動順応. 第12回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1995). 6-9.
- 11) 高林 彰, 小原 健, 大村輝江, 渡邊 悟, 森 滋夫, 田中正文, 桜木惣吉, 長岡俊治. IML-2(第二次国際微小重力実験室)における魚の前庭順応実験. 日本マイクログラフィティ応用学会誌. 12, 157-162 (1995).