

魚の背光反射行動と小脳活動に対する無重力効果*

御手洗玄洋**・森 滋夫***・高林 彰***
高木 貞治***・臼井 支朗†・西村 純
長友 信人・並木 道義

(1984年5月10日受理)

Hypogravic Effects on Behavior and Brain Activity of Carp in a Balloon Microgravity Experiment

By

Genyo MITARAI, Shigeo MORI, Akira TAKABAYASHI,
Sadaharu TAKAGI, Shiro USUI, Jun NISHIMURA,
Makoto NAGATOMO and Michiyoshi NAMIKI

Abstract: Behavior and cerebellar electrical activity of a carp (25 cm in size) were observed during free-fall hypogravity using a balloon microgravity system which was recently developed by Nishimura and his group. The carp's behavior was taken in 8 mm films during the free fall and the cerebellar activity was telemetered during the whole flight. A fish chamber was so designed as to keep the animal healthy for more than 10 hours and to induce the dorsal light tilt reaction (DLTR) of the carp in the midst of free-fall. Two days before the launch, the chamber was set into the rocket-shaped air-tight capsule. The chamber function was supported by another device throughout the stay on the ground.

The balloon microgravity system worked perfectly with minimal spinning and pitching and 20-seconds hypogravity of 10

* 本研究は、一部、文部省科学研究費総合(B) (No. 57480115, 代表 御手洗) の補助による。

** 中京大学体育学部

*** 名古屋大学環境医学研究所

† 豊橋技術科学大学

$-3 \cdot 10^{-2}G$ was obtained from the onset of free-fall to the parachute opening. The film recovered showed that the carp, standing upright along the gravity force, tilted her body axis to receive the light on her back (DLTR) during the free fall, indicating that the posture would be completely controlled by light under a hypogravic state. A computer analysis made for the cerebellar activity revealed that the power spectrum had increased remarkably during the free fall, at the frequency ranges of around 10 Hz and 25-30 Hz.

1. はじめに

「宇宙酔」は、1G 環境下で獲得された姿勢・運動制御のプログラムを無重力環境下に適合するように書き替える過程で一過性に生ずる感覚統御系の混乱に帰因する、という仮説がある。宇宙では耳石からの入力が見失くなり、筋や関節などからの固有感覚情報も歪められるため、正常な視覚入力との間に錯誤が生じてしまうとする考えである。

スペースラブ3で、ポリエチレンの薄膜で作った袋に“幼魚”を封じ込め、その行動が観察された[1]。魚は、最初、異常な回転運動を示したが、3日目以後は次第に正常な泳ぎとなった。この様子は、宇宙飛行士が“宇宙酔”をおこしたときの回転性錯覚の愁訴と類似性があり、また、回復の過程も似ているところから、宇宙酔研究の一つのモデルとして注目された。

魚は光の方向と重力の方向によって、その姿勢を決めることは古くから知られていたが[2][3]、耳石の働かなくなる宇宙では、実際、光のみに依存した行動をとるという[1]。もし冒頭の仮説が正しければ、当然、このとき感覚統御中枢に混乱が生じているはずである。そこで我々は、これを実験的に確かめるべく、スペースシャトルに鯉を搭載し、その光依存性行動（背光反射）と姿勢・運動の統御中枢である小脳の電気活動の変化、および、これらの順応過程を追跡する計画をたて、具体化に向け努力をつづけている[4][5]。この計画の実現には、鯉が無重力下で実際に光のみに依存した背光反射行動を示し、小脳活動が何らかの変化を示すことが前提であるが、地上ではこれらを確認する手段のないままこれまで過ぎてきた。しかし、最近、並木、西村ら[6]により大型気球を利用した無重力実験システムが開発され、懸案の実験が可能となり、1983年9月6日、世界で初めて魚が気球で空を飛んだ。以下にこの実験の概要と結果を報告する。

2. 実験装置構成の概要

(1) 無重力実験システム

大型気球にバラスト用ゴンドラと実験装置を組み込んだロケット形状の気密カプセルを吊り下げ、高度30 kmからカプセルを自由落下させて約 $10^{-3}G$ の低重力を20秒間得ることができる[6]。今回用いたシステムの詳細は別に報告された[7]。カプセルの外観と構造および機器の配置を図1に示す。この総重量は約270 kgであった。

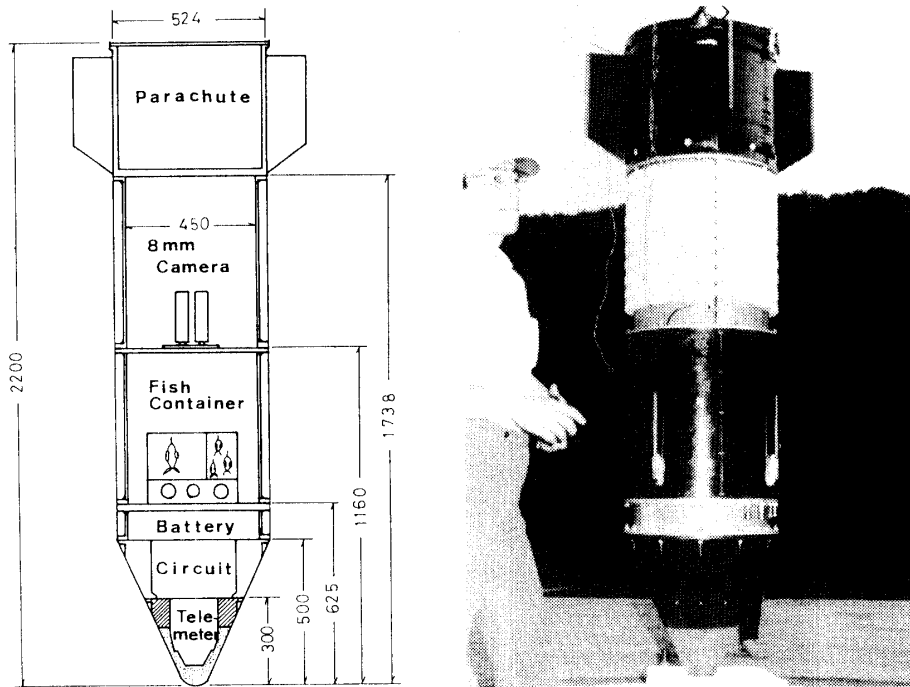


図1 無重力実験システムのカプセル外観（右）とその構造（左）

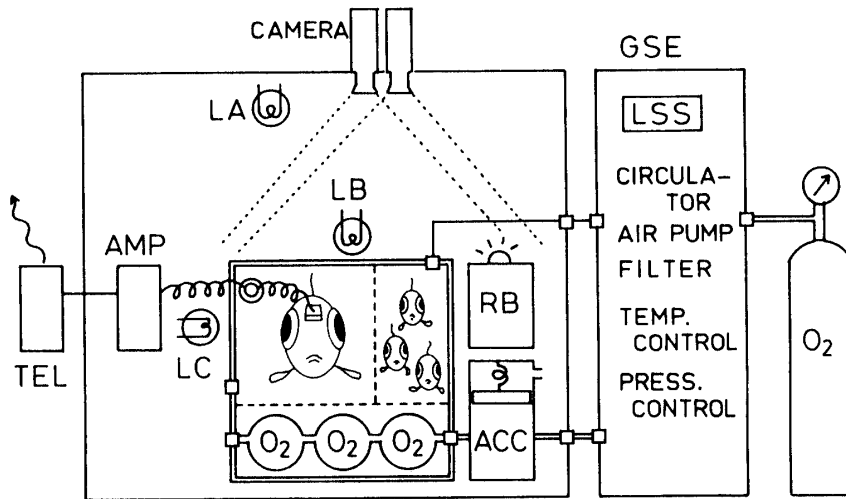


図2 魚用実験装置構成の概略図

(2) 魚用実験装置の概要

装置は、魚の生命維持、行動記録、脳波記録に関する機能部から構成され、これらの装置の関連を模式的に図2に示す。

体長約25 cmの鯉一匹、体長約10 cmの金魚3匹および酸素バッグを収容する魚容器は、厚さ10 mmの透明ポリカーボネートを素材とし、内寸200 (H)×200 (W)×300 (D)

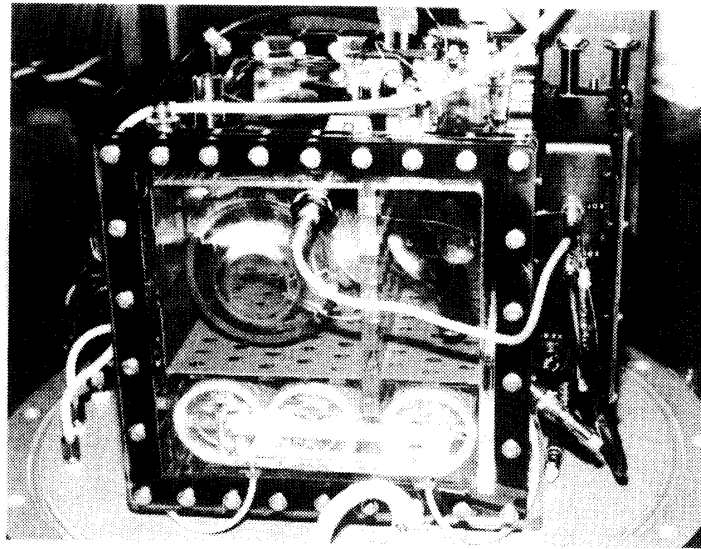


写真1 魚容器の外観

mmの直方体で、鯉、金魚は別々に収まるようにした(写真1)。魚容器の重量は水を満たした場合約15 kgであった。

鯉は小脳活動記録用銀ボール電極と小型防水前置増幅器を頭部に装着し、その出力は有線で外部に導出、魚容器側壁に取りつけた主増幅器を介してテレメータ装置へ連結される。背光反射行動を誘発するための照明装置(6 V、豆球)は魚容器側面(ランプC)および鯉、金魚室の境界部(ランプB)に設置し、これとは別に8ミリカメラ横に一個とりつけ(ランプA)、魚の姿勢安定用および行動観察用とした(カプセル壁面に設けた窓から直視可能)。ランプB、Cの照度は鯉の眼前で約600ルクスであり、リレー(RB)を介して交互に20秒間ずつ照明方向が切り替わる。リレーボックスの上面には赤色LEDを置き、10秒に1回の光サインがフィルムに映しこまれる(図4参照)。

酸素バッグは、魚容器を構成する前後の蓋に取りつけた6個の支持板に厚さ約100ミクロンのシリコン膜を巻き、外部から酸素を供給できるようになっている。酸素バッグには放球直前に酸素を満たすこととし、それまでは外部から支援装置(GSE)で魚容器の水を循環して被験体の生命維持を図る。シリコン膜の表面積は約0.113 m²で、これに100%酸素を満たした場合、10時間は魚を密閉できるはずである[8]。酸素が消費されるとバッグ内圧が陰圧になり効率が低下するので、これを補償するため、軟質ゴムで作ったアキュムレータ(ACC)を魚容器外壁に取りつけてバッグ内圧を一定にするようにした。しかし、放球前にカプセル内圧を1.2気圧にあげるのに、この圧がアキュムレータを介して酸素バッグにも加わるため、これに対する対策が支援装置の一部として付加された。

支援装置は、水循環機構、バブリング用エアポンプ、水フィルター、温度制御機構、圧調節機構を備えており、かつ放球前には、魚容器内の溶存酸素濃度を高め、酸素バッグに酸素を供給できるものであった[8]。

3. 実験方法

(1) 被験体

放球の約10日前に電極と前置増幅器を頭部に取りつけた鯉3匹, 約2週間前に眼球摘出(3匹), 耳石摘出(3匹)した金魚と正常のもの4匹を軽く麻酔して名古屋から三陸大気球観測所へ運搬し, 数日の養生をとる。放球の2日前, 脳波の記録状態, 泳ぎの状態から最終候補の鯉一匹, 金魚各一匹を選抜。

(2) 放球前準備

無重力実験システムのカプセル機能テスト(圧力漏れチェック, 命令, 受信系電波テスト)に1日を要するため, 放球の2日前に被験体を魚容器に収納してカプセルに組み込み, 支援装置により外部から生命維持, 脳波モニターを開始, 放球直前に, 支援装置を介し, 魚容器内溶存酸素濃度を2~3倍に上昇させ, 酸素バッグへ酸素を満たした。

(3) 無重力実験

気球からのカプセル投下90秒前に指令電波によりタイマーを起動し, 図3に示すシーケンスに従って装置を作動させた。8ミリカメラの撮影時間は約3分であり, 自由落下の20秒がこの真中にくるようにプログラムされた。フィルムは, カプセル回収後, 被験体とともに観測所でもとり出した。被験体は, 電極位置の同定のため, 麻酔後断頭しホルマリン固定した。脳波は, 放球前から海面着水までテレメータによりモニターおよび記録された。

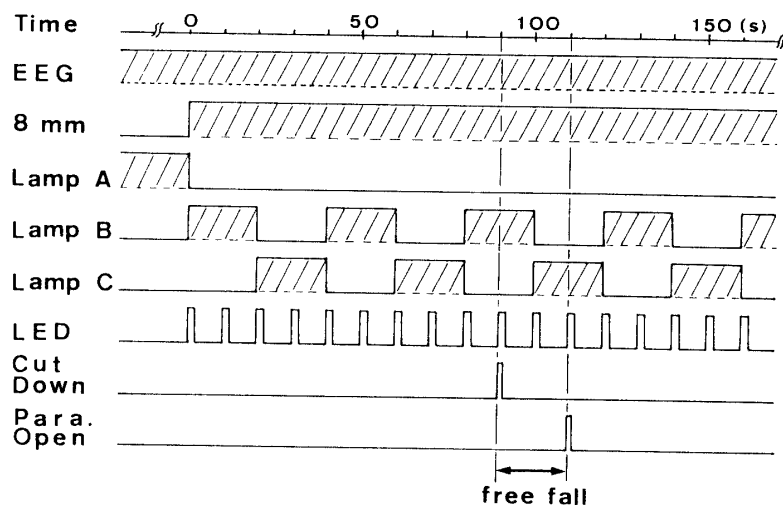


図3 無重力実験のタイムシーケンス

4. 実験結果および考察

(1) 金魚の死亡と鯉脳波の異常

今回の実験において, 自由落下前および途中の背光反射行動を, 正常, 盲目, 耳石摘出の金魚と比較することになり, 無重力下の魚の視覚依存性を一目瞭然に見せることを意図し

たが、金魚は3匹とも放球時に死亡してしまったため実現できなかった。死亡の原因は、金魚が水循環の排出口にくり返し引きよせられて次第に衰弱したことによると考えられる。これは、支援装置に設けられた魚容器内圧モニターに残された間歇的な圧異常の記録から推測でき、明時にはそれが認められないことから、暗中、魚が視覚の手がかりを失くしたことが主要な原因と思われる。シャトル用装置開発にあたり考慮すべき問題である。

放球前夜には鯉小脳活動に異常波が混入するようになった。これも、容器内圧の突然の変化が鯉の激しい動きを誘発し、小脳組織に損傷を与えたことによるとと思われる。異常脳波は次第におさまる傾向にあったため、実験は遂行された。

(2) 無重力実験システムの作動

放球は朝7時23分、約2時間で32 kmのレベルフライトに入り、10時40分にカプセル投下。約25分後に着水、ただちに回収された。カプセルは観測所に持ち帰り、鯉に異状のないことが確かめられた。

高度約31 kmからの自由落下中のカプセルの加速度は、10秒後 $3.5 \times 10^{-3}G$ 、20秒後のパラシュート開傘直前では $1.7 \times 10^{-2}G$ であった。この20秒間にカプセルは、鯉の長軸方向に $\pm 5^\circ$ 程度、1.5回のピッチングがあったが、これは魚にとっては無視できるものであった。水温は、放球時 $25^\circ C$ 、投下時 $23.3^\circ C$ で、その変化幅は小さく、西村研究室で行われたシミュレーション実験による予測値に近いものであった。

(3) 鯉の行動変化

2台の8ミリカメラはともに正常に行動し、撮影された鯉の行動から無重力下の行動の特徴が観察できた。自由落下直前では1 G下とかわらぬ正常姿勢を示しており、側方照射によっても、その傾斜はフィルム上に判定は困難な程度であった。自由落下開始と同時に、鯉は一瞬頭を激しく振る驚愕反応を示し、その後ゆっくりランプBを背に向ける姿勢に移行した。ランプBは金魚と鯉の部屋の境界部に位置したため、鯉にとっては斜め照射となり、10秒後のランプCによる側方照射は鯉にとって腹側方向からの照射となった。このことが鯉の背光反射行動を困難にし、当初期待した通りの行動記録とはならない結果となった。しかし、ランプBに背を向ける行動は明らかに重力依存性の消失による姿勢変化であり、無重力下では光のみに依存した行動を示すことは確認できた。ただし、1 G下で耳石摘出鯉が示す速い光依存性行動[1]に比べ、その変化速度が比較的ゆっくりしていることが注目された。耳石摘出が必ずしも無重力シミュレーションとはなっていないことを示唆しており、この点からも、シャトル実験の有効性が期待できる。

20秒後のパラシュート開傘により、鯉はただちに姿勢を戻し、腹側照射による不安定な動きも消失した。

(4) 鯉の小脳活動変化

鯉の脳波は放球から着水までの全経過に亘りテレメータ(22 KHz)で観測所へ送られ、データレコーダに記録された。脳波は終始安定せず、大きなスパイク状の波が随所に見られ解析を困難にしたが、比較的安定な箇所を選び、スペクトル解析を適用した。すなわち、脳波の短時間定常性を仮定し、2秒長の脳波時系列を1秒ずつずらして切り出し、Burg法によるパワースペクトルを比較した。実際の脳波記録を図4に、解析の1例を図5に示す。

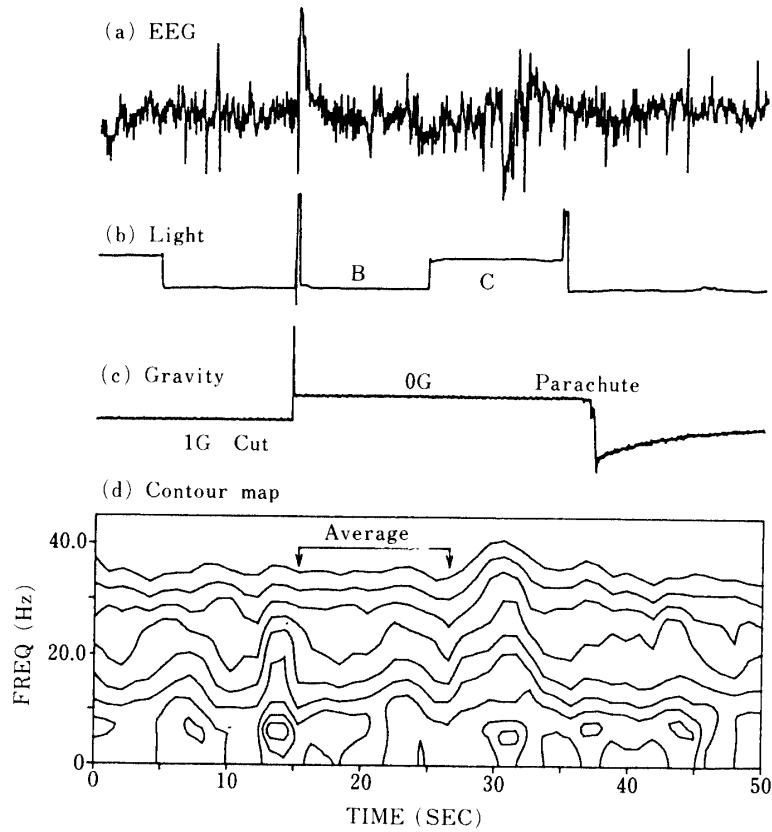


図4 自由落下時の鯉脳波(a)およびその等パワースペクトル線図(d). (b)光照射方向切り替わり信号 (ランプB, C). (c)加速度計信号.

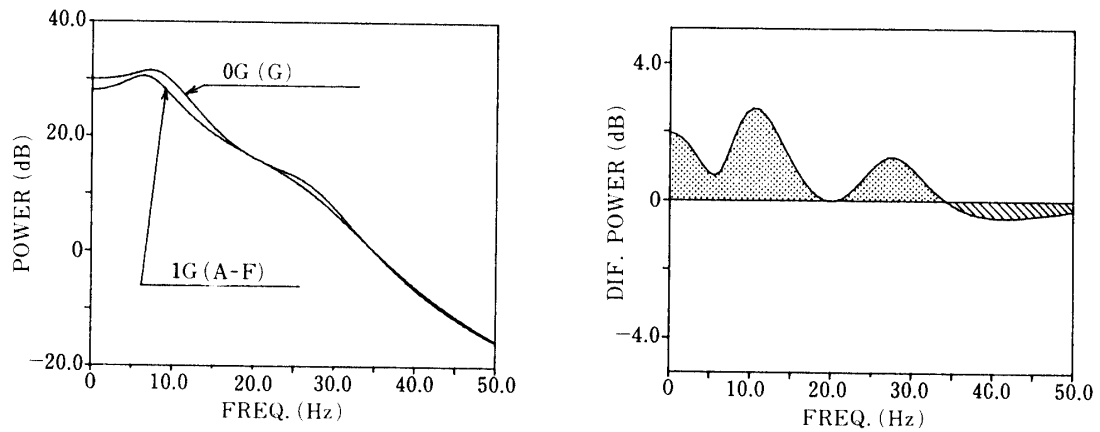


図5 自由落下時 (0G) と直前 (1G) の平均パワースペクトル (左図) およびその差分 (右図).

付加的解析の詳細および電極位置に関する記述は別に報告された[10][11].

図4(a)の脳波は、3-30 Hzのフィルターを通して再生されたものであり、最初の大きな上向きスパイクはカプセル切り離しカッター作動時のアーチファクト、次の下向きのスパイクは鯉の動きによるものである。図4(d)はこれを300 Hzでサンプリングし、5 dBごとの等パワースペクトル線図で示したものであり、脳波上に生じている個々のエポックを容易に読みとれるようにしている。

図5は自由落下時とその直前の平均パワースペクトル(A)およびその差分(B)を示しており、自由落下時では、10 Hz前後および25-30 Hzに特徴的なパワーの増大のあることがわかる。この変化がどの程度無重力に特有であるのか、その判定は今回の1例だけでは困難であり、さらに例数を重ねる必要はあるが、少なくとも何らかの無重力の影響がこの変化に含まれていることは間違いない。

5. まとめ

スペースシャトルによる「魚を用いた宇宙酔研究」の予備実験の一環として、大気球から自由落下させて得られる20秒間の無重力下の鯉の背光反射行動と小脳活動の変化を観察した。金魚の死亡により、無重力下の視覚依存性行動に関する詳細な検討はできなかったが、鯉では、予測通り、自由落下時に光のみに依存した姿動行動をとり、このとき小脳活動に明らかな変化を認め、シャトル実験の有効性を確かめることができた。

参 考 文 献

- [1] von Baumgarten, R.J., R.C. Simmonds, J.F. Boyd, and O.K. Garriott: *Aviat. Space Environ. Med.*, **46**, 902, 1975
- [2] von Holst, E.: *Pubbl. Stat. Zool. Napoli*, **15**, 143, 1935
- [3] von Holst, E.: *Z. vergl. Physiol.*, **32**, 60, 1950
- [4] 御手洗玄洋: 文部省科学研究費一般(A)研究成果報告書, 1982
- [5] 御手洗玄洋: 文部省科学研究費一般(B)研究成果報告書, 1984
- [6] 並木道義, 太田茂雄, 秋山弘光, 山上隆正, 粕 豊, 西村 純: 宇宙科学研究所報告(特集第4号), p 27, 1982
- [7] 並木道義, 太田茂雄, 秋山弘光, 山上隆正, 粕 豊, 西村 純, 広沢春任: 大気球シンポジウム, 1984 (印刷中)
- [8] 御手洗玄洋, 森 滋夫, 高林 彰, 高木貞治, 臼井支朗: 名大環研年報, **35**, 3, 1984
- [9] 御手洗玄洋, 高林 彰, 森 滋夫, 高木貞治: 名大環研年報, **34**, 1, 1983
- [10] 御手洗玄洋, 臼井支朗, 山田 勇, 森 滋夫, 高林 彰, 高木貞治: 名大環研年報, **35**, 19, 1984
- [11] 御手洗玄洋, 高林 彰, 森 滋夫, 高木貞治, 臼井支朗, 西村 純, 並木道義: 名大環研年報, **35**, 12, 1984