

古賀一男氏講演
「微小重力環境へのヒトの順応とその限界
——宇宙飛行士の行動を分析して地球と重力を
より正しく理解したい」(2)

報告 岩 城 覚 久

はじめに

本稿は、2017年1月21日(土)に同志社女子大学(今出川キャンパス純正館S104教室)で開催された科学研究費補助金基盤研究(C)「グローバル・アート・インダストリーにおけるアートの可能性」(研究代表者:神戸大学[現近畿大学]・前川修、研究分担者:立命館大学[現九州大学]・増田展大、近畿大学・岩城覚久、研究課題/領域番号:26370095)主催第4回公開研究会「微小重力環境における生の技法=アート、その現在と未来——宇宙工学/スペースアート」の招聘ゲスト、古賀一男先生(京都ノートルダム女子大学[現同大学名誉教授])の講演「微小重力環境へのヒトの順応とその限界——宇宙飛行士の行動を分析して地球と重力をより正しく理解したい」の後半部分の内容を一部編集して収録したものである¹。講演前半部分は『文学・芸術・文化』第33巻、第2号(岩城2022)に収録している。

講演前半部分は「なぜ宇宙に行きたいのか?」という問いかけから始まり、微小重力環境へのヒトの順応とその限界(体液のシフト、ムーンフェイス、カルシウムの排出など)について、また微小重力環境の地上でのシミュレーション(パラボリックフライト、6度ヘッドダウンなど)について解説される。この後半部分では、重力を直接的・間接的に検出する器官と身体・環境との関係が解説され、古賀先生自身が携わった宇宙実験やそれに向けたオリジナルの実験装置の制作が紹介される。地上訓練用、宇宙での本番用に数々の実験装置が制作されたが、実験後そうし

¹ 講演の採録を認めていただき、掲載内容を確認して手を加えてくださった古賀一男先生にこの場を借りてお礼を申し上げます。また本稿の作成過程で支援をいただいた松谷容作さん(追手門学院大学)、講演および質疑の採録を認めていただいた科研メンバーと参加者の皆さんに感謝します。

た装置がしっかり保管されることがなかったため、古賀先生が一部を救出し、町工場などで再現されたと聞いている。全周型の巨大実験装置などは名古屋大学博物館に保存されているという²。報告者が取り組む感性学の観点からも、きわめて興味深い装置である。

また本稿には、講演後におこなった質疑応答の一部も古賀先生の回答を中心に編集し、採録した。当日聴衆として参加した美学・芸術学、感性学、アートやデザインなどの研究者や実践者からもコメントや感想が数多く出たが、紙幅の都合上、質問は短く書き換えている。とはいえ、一連のやり取りは、アートやデザイン、あるいは、いわゆる文系の領域で学ぶ読者にとっては、自らの領域と宇宙生命科学との接点を示唆するものになるかもしれない。

なお、古賀先生に講演の終盤にお話しいただき、関連する映像も見せていただいた二つのエピソード（「フライト中にジャン・デーヴィス宇宙飛行士の身体軸と客観的身体軸がズレ、ビデオカメラが90度傾いて設置されたというエピソード」；「毛利宇宙飛行士が地上帰還直後の歩行時に左に傾いているように感じたというエピソード」）については、『知覚の正体』他でも紹介され、詳しく分析されているので、やはり紙幅の都合上、ここでは割愛させていただいた。ぜひ著作をご覧になっていただきたい（古賀 2003；古賀 2011；古賀 2015）。

2023年現在、NASAが提案する月面探査プログラム「アルテミス計画」との関係で月面での生活をめぐるシンポジウムなどが盛んにおこなわれ、有人飛行の研究の主な関心は地球周回軌道上での滞在から月や火星での滞在やその間の移動にシフトしている印象を受ける。本稿に記録された研究は軌道上での長期滞在を可能にした国際宇宙ステーション（ISS）の建設が開始される1998年よりもさらに前、1992年に日本が国としてはじめて主体的にアメリカのスペースシャトル内でおこなった一連の研究のなかのひとつである。それ以降、とりわけ日本ではヒトをターゲットにした宇宙生命科学の研究はそれほどおこなわれず、古賀先生の研究分野の直接的な後継者も不在であると聞く。その点でも、宇宙生命学者自身が非専門家にも理解しやすいように噛み砕いて解説する本講演の内容が前後半を通じて文字テキスト

² 2016年9月30日にノートルダム女子大学の古賀先生の研究室でおこなったインタビューの記録より（聞き手：岩城）。

として残されることには意義がある。研究会の経緯や本講演の位置づけについては、講演前半部分の冒頭にも記しているので（岩城 2022）、併せてご覧になっていたきたい。

（岩城覚久）

〈講演〉「微小重力環境へのヒトの順応とその限界——宇宙飛行士の行動を分析して地球と重力をより正しく理解したい」（2）

京都ノートルダム女子大学心理学部名誉教授

古賀一男

[講演前半目次]

退役したスペースシャトルはどこに？
なぜ宇宙に行きたいのか？
パラボリックフライト（弾道飛行）
微小重力環境における身体の変化
体液のシフト／ムーンフェイス
カルシウムの排出
ヘッド・ウォーター・イマージョン
ドライ・ヘッド・ウォーター・イマージョン
細胞や植物の実験・パピルスと重力
微小重力空間にヒトの身体は順応できるのか
重力と感覚
重力と系統発生および個体発生

[講演後半]

重力を直接知覚する器官（一次情報）

重力そのものを感知するセンサーは耳の奥にある前庭器官の中の耳石器官（卵形嚢と球形嚢）であるが、これは姿勢の制御等に直接関与する運動系を制御しているために、まとまった知覚として認識されることはほとんどない。

(講演資料より抜粋)

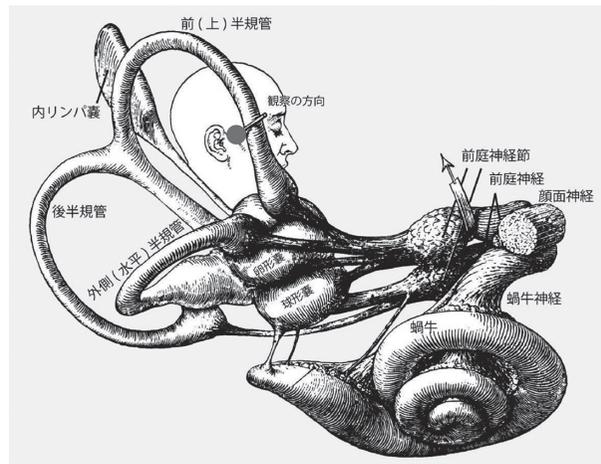


図1 重力を知覚する器官

HARDY M., ANAT. REC., 59, 403-478, 1934 (古賀一男氏講演資料より)³

古賀：先ほどから言っている耳石器官は三半規管の根元にあります。卵形嚢と球形嚢というところにあるセンサーが重力を感じます。耳の少し前のところにあります。三半規管は体の回転ですね。3軸の周りの回転を感じます。それに対して、耳石器官は水平方向と、それから上下方向も感じます。鳥の場合は、三次元的な行動をやりますので、もう一つ壺嚢といわれているものがあります。鳥の場合は水平、上下、どちら向きに直進したかという3軸、人間の場合は2軸を知るセンサーがあるということになります。

重力を間接的に知覚する器官 (二次情報)

重力を間接的に知覚する器官 (二次情報)

- ・筋感覚 (抗重力筋：ANTI-GRAVITY MUSCLE)
- ・体性感覚 (SOMATOSENSORY ORGAN) 皮膚感覚、関節・腱

³ 以下、煩雑になるので省略するが、本稿に掲載した図はすべて古賀先生の許可を得て講演資料から転載したものである。また注はすべて報告者による。

- ・ 視覚
- ・ 聴覚

重力要因により変化を生じるが知覚されない生理的変化（三次情報）

- ・ 体液シフトと血流量の減少（心・循環系変化、順応）
- ・ カルシウムの体外流出（骨・メタボリズム均衡の準可塑的变化）
- ・ 不使用による筋萎縮（抗重力筋のアトロフィー）
- ・ 免疫力の低下（恒常的な環境要因の無変化による負方向への変化）
- ・ 発生障害（重力に適応した発生初期の諸問題）（講演資料より抜粋）

ただし、重力をこの耳石器官だけで知るかというところではありません。「筋感覚」、「体性感覚」、「視覚」、「聴覚」といったものも二次情報を提供しています。

「筋感覚」（抗重力筋：anti-gravity muscle）については、伸ばしたり縮めたりするときに使う筋肉の中にマッスル・スピンドル（muscle spindle）、筋紡錘というものがあります。紡錘形をしています。この機械的なセンサーがコイルのばねのように伸び縮みすることによって、筋が伸びたか縮んだか知ることができます。たとえば、指も曲がる時には指の内側の筋肉が縮んで外側の筋肉が伸びているわけですが、重力の方向について下に向けるとやりにくくて、上に向けるとやりやすいとかがあるかというところ、これは自覚できるほどの感覚的な変化はありません。指にどれくらい抗重力性があるかというところ、負荷される作業量の程度によっていろいろと難しいところはあります。最近はやっているボルダリングという壁を登るスポーツがありますが、確か5秒か10秒以内に次の手で移してやるか、あるいは足で支えてやらないと脱力して落ちてしまいます。指の筋肉は重力に対してそんなに強いものではないといえます。しかし指だけに体重がかかっていると考えるとそんなものだと思います。普通のフリーの状態では、頭を支えている後ろの筋肉より指の筋肉の方が重力に対する仕事をあまりしていません。声帯であるとか、唇の口輪筋であるとかも同じで、その辺の筋肉では、寝たらしゃべりやすいとか立ったらしゃべりやすいとか、そういうことはほとんどありません。

それから、私の研究で使っている目の動き（眼球運動）です。一方の目には6本

の外眼筋が付いていて眼球を動かしています。これも重力の方向との関係で動きやすいか動きにくいかということはそれほど顕著な自覚はありません。まったくないわけではありませんが。体の中で重力の影響を受けやすいパーツとそうでないものがあるということになります。そういう中で一番、その両方が同調しているのが実は頭と目の動きということになります。目は6本の筋肉で眼球を動かしますが、頭部については、頭の後ろに僧帽筋、トラペジウス (trapezius) という大きな筋肉があって約5、6キロある頭を後ろから引っ張って支えています。ちなみに、カトリックの偉いお坊さんが頭にかぶっている帽子を僧帽といますが、その形をしているので僧帽筋といいます。緊張が緩んでくるとコックリコックリと頭が下がって来ます。下がってくると耳石の方では、頭が傾いた、僧房筋が伸びた、これではいけないということで頭部を引っ張り上げる。これが船をこぐという状態です。

前庭動眼反射

普通、日常生活のアラートな状態（覚醒状態）ですと、頭が動いたときに目は頭部の運動方向に反対側に反射的に動くということが知られています。これは前庭動眼反射 (vestibulo ocular reflex) といわれ、頭部の運動方向とは逆方向に目が動きます。そのときに頭は、やはり後ろから引っ張られているだけですから、「うん」とかぶりを振る行動一つにしても、下げるほうは重力のままだとカクンとなるので、引っ張りながら下げる、持ち上げるときは力いっぱい持ち上げるという相異なる筋の使い方をしていきます。「うん」とかぶりを振るだけでも、存外、複雑な運動になっています。その複雑な運動の中で頭を素早く動かすと、目は頭部の運動とは反対側に動くということになります。そうであれば目の反射機構と頭の筋肉の使い方とは、重力のある環境と重力がない環境や小さい環境、あるいは過重力、重力が非常に大きな環境とでは一体どういうふう違うだろうかと。つまり、重力をパラメータとして検討していくときには、目と頭の運動を同時に記録して検討していくのが非常に面白いのではないかというのが、私が宇宙実験をやったときの第一の動機だったわけです。

『少林寺三十六房』(1978) という面白い映画があります。その映画では、少林寺の高僧がもうそろそろ卒業という若い僧に最後の試験をします。「ろうそくの火を

見て火の方向に合わせて目だけを動かさない」、しかし、「頭を動かさなきゃならんぞ」と高僧は言います。「もし頭を動かしたらほっぺたのところにある大きな線香でやけどするぞ、おまえ、よく気を付けろよ」と高僧は言って試験を開始します。もちろん、若いお坊さんも随分訓練が行き届いていて、頭は動かさずに眼だけを動かして左右に動く火を追うのは大丈夫ということになっていますが、高僧は意地が悪く、どんどんろうそくの振れる速度を増してしていきます。若いお坊さんは、ついについていけなくなって目を動かすのを止めてしまいます。そうすると車は急に止まらないということと同じように、頭が動いてやけどをしてしまいます。つまり、こういう連続運動みたいなものはいつも意識してやっているわけではなくて、そして、目の動きと頭の動きは連動しているということもあって、急にペースを変えると、どれほど鍛えられた僧でもやけどをしてしまうわけです。この映画の一場面はいかに目と頭とが連動しているかということの非常にいい例ではないかと思えます。

地上実験で必要だった実験装置 1——全周体位斜線装置 220° フルカバレッジ球形スクリーン

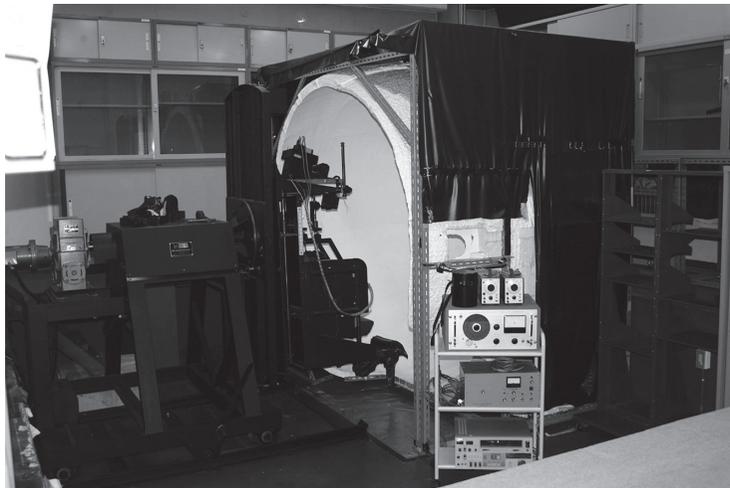


図2 地上実験で必要だった実験装置 1：全周体位傾斜装置と 220° フルカバレッジ球形スクリーン

そういうふうな実験を宇宙でやる計画でしたが、問題はいろいろありました。宇

宙でやる実験を統制実験として地上でするのは本当に時間がかかります。毛利さんのときは1982年ぐらいに公募があって、実際にやったのは1992年の時点で10年間もかかっていました。私も宇宙実験やるから10年間論文書かないっていったら首になるので、何か自分の研究をしながら、準備もしなくてはならないということになります。つまり、二足のわらじでやらないといけないということになります。宇宙でやる実験は宇宙飛行士が行ってやってくれるわけで、そのやり方さえこちらはスーパーバイズすればいいわけですが、地上の実験は地上でデータを取って、コントロールデータを取らなければいけません。図2は宇宙でやった実験の地上でのコントロール実験をする装置です。この大きなドームを作り、視野の遮蔽をして、いろんな部屋の中の動作とかが見えないようにして、かつ、一定の視覚刺激を出せるようにしておいて、そして、そこで宇宙飛行士をひっくり返したり、横にしたりと、そういうことをしなければいけないのです。

そうした装置を自分で制作するわけですが、図2の大きなスクリーンは視野の直径が大体差し渡しで240度あります。カバーする角度は220度ぐらいです(図3)。大体こういうスクリーンは180度というのが殆どですが、180度だと首を動かしたときに外の実験室が見えてしまいます。従って、もうちょっと後ろのほうまでカバーしなければいけない。これをどうやって作るかということが重要です。そんな時に街を歩いていたたり、車を運転したりしていると、どうしてもマンションの上にある給水塔が目についてしょうがありません。あれ、ちょっと小さいけれど、どこで売っているのだろうかということばかり考えていました。基本的に大部分のものはちょっと小さ過ぎる。そうした給水塔は70センチぐらいから1メートルぐらいまでが多いものですから、自分で作らなきゃいけないということになりました。

以下はどうやって作るかという説明です。四角い発泡スチロールをたくさん買ってきました。対角線で切って、三角柱を作り、中身をえぐって行って捨てて、スイカの皮のようなものだけを残して、この皮を貼り付けていけばいいんじゃないかということを考えて、実際に実行に移したということですね(図3)。

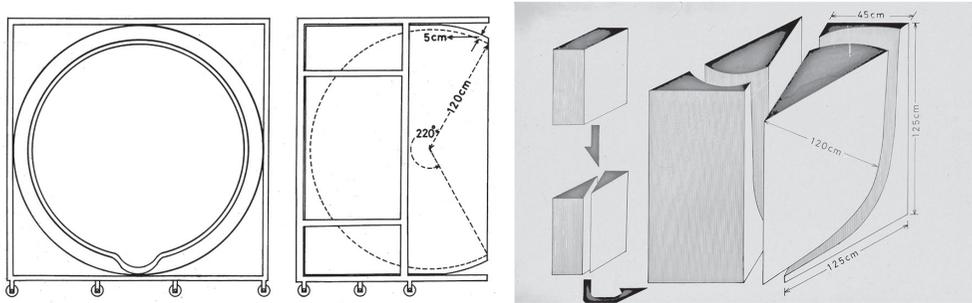


図3 球形スクリーンの制作：設計図

畳一畳分の発泡スチロールを厚さ45センチで計算して切ってもらい、対角線をニクロム線で切っていきます。大きなニクロム線を熱して、高電圧をかけていくのですが、真っ赤になるまでやると材料であるスチロールが溶けてしまうので、水も用意しておいて、300～4000℃ぐらいまで切断用のブレードを熱するようにします。そして、図4にありますように内側をえぐって取ったセクターを作って寄せ集めました。寄せ集めるとドーム状のものができます。先端のところはうまくいかないので四角く切って残った素材でふせます。更に紙で内張りをします。毎日ローラー刷毛で塗装をします。朝、研究室に行ったら1回塗る、帰る前に1回塗るといったふうに1カ月ぐらい、どんどん塗っていくと非常に滑らかになって、理想に近いスクリーンができました。ただ、毎日どっかにペンキが付いて帰るものですから、家の人間には評価がよろしくないというふうなことはありました。それから、枠を付けて。

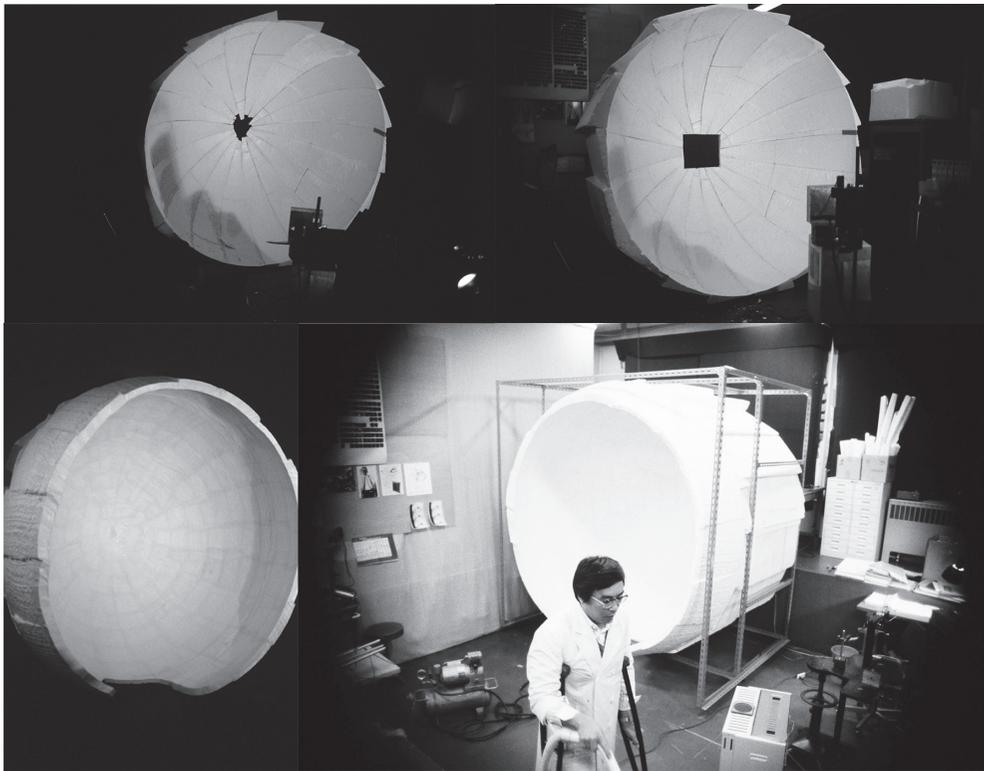


図4 球形スクリーンの制作：制作プロセス（古賀一男氏講演資料より）

最後に、実験に使用する装置を各所にセットします。幾つかの装置は自分で作るわけにはいかないので、設計して、鉄工所に作ってもらいました。この装置の一番の眼目は、スクリーンのちょうど中心に回転軸を置いて、両目の間（両眼瞳孔中心）で被験者を回すことです。普通こういう体を回す装置の場合、おへそ辺りで回すとバランスが取れて回しやすいのですが、この装置では両眼瞳孔中心で身体的位置を変えて回すことが重要でした。つまり、耳石だとか三半規管に余計な負荷がかからないようなところをピボットにして回すということが非常に重要なわけで、この装置ではそれを実現することも重要でした。そのスクリーンに魚眼レンズつきのプロジェクターを、これも特別に作って取り付けました。いろんな視覚刺激を投影することができます。さらにそのそばに高輝度レーザー光を使って、ガルバノメーターを直角に2組使用し、これを独立に振ることによって、スクリーン上の任意の場所にレーザー光を投影することができました。ガルバノメーターを高い周波数で

動作させるとパターンを形成することもできました。

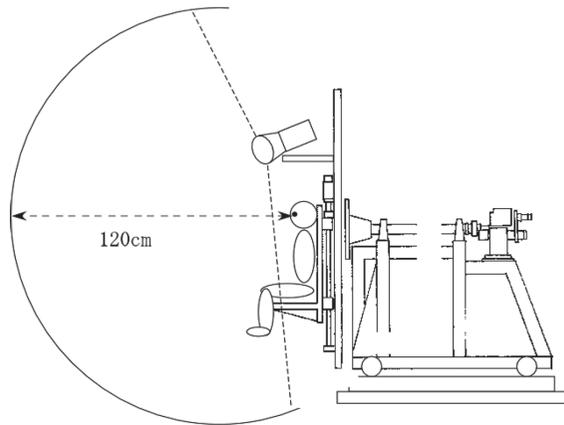


図5 全周位傾斜装置と220°フルカバレッジ球形スクリーン

1985年に宇宙飛行士が毛利衛さん、向井千秋さん、土井隆雄さんの3人に決まりました。その後、かなり頻繁に研究所に来研してもらい、頭の動きと目の動きのデータを取りました。3人のうちで、例えば、土井さんが逆さまになっているときには、毛利さんと向井さんがその光景を見ていて、向井さんが被験者として振り回されているときには土井さんと毛利さんが見ているということになります。地上でやるときは非常に大仰な、安全を担保した装置が必要になります。安全は担保されているけれど、やはり逆さまになって15分ぐらい置いておかれるとかなりひどい。逆さづりになるんで、頭に血が上がるどころではなく苦行だったと思われれます。宇宙飛行士の人は我慢強いことがよくわかりました。「大丈夫です」としか言わないので助かりましたが、学生さんだと2、3分で音を上げてしまうという種類の実験でした。今は倫理委員会を通らないのかもしれませんが。

それから、図6はもう少し軽便な機能を実現する専用のものです。体を縦、あるいは横にスイングする椅子です。アメリカのスペースシャトルでの1981年のミッションで、MITのヤングという先生が実験をしたときに作った装置をビデオで見せてくれたので、そのビデオを見ながら設計図を書いて作りました。後で外側からエクスターナルのドライブを、装置に付けたのですが、ドライブ装置を付けると重たくなるので、パラボリックフライトのときには手で動かしてスイングをさせて使

ってきた装置です。地上でやるとこういうふうに、上下方向と、それから左右方向とに振ることができる。両方一緒に振ることもできます。さらに欲が出てくると、そいつをローリングの方向にも振る装置を作りたくなりました。そこに載せてやれば3軸でスイングがかかる実験ができるという、そういう装置ですね(図7)。こういったものを作って、実験を続けてきました。

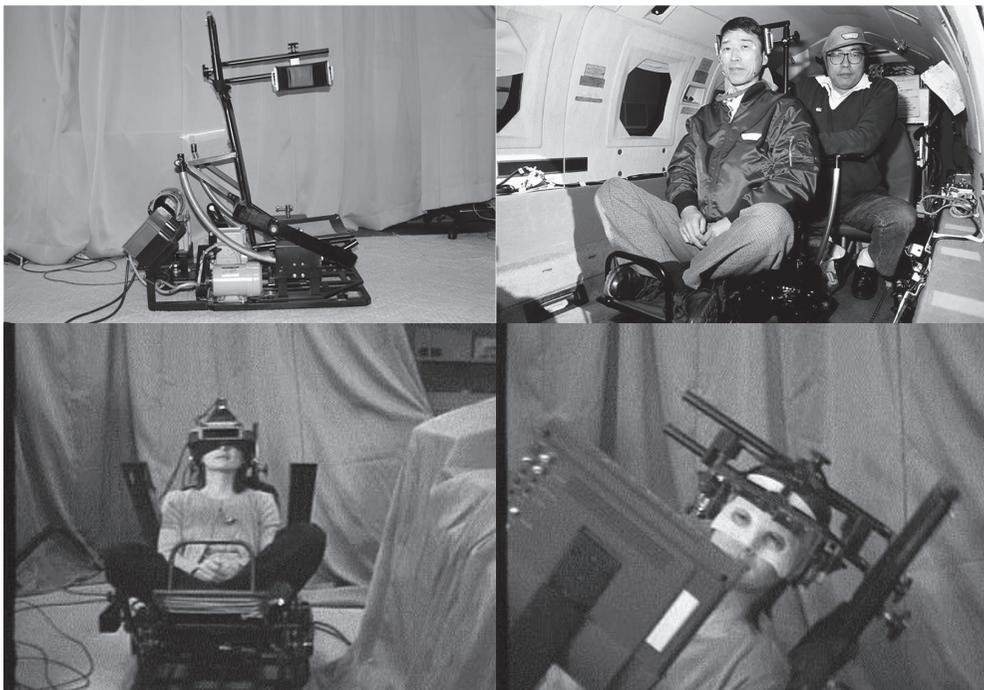


図6 地上実験で必要だった実験装置2:多軸(2軸)スイング椅子



図7 地上実験で必要だった装置3：多軸（3軸）スイング椅子

FAPT（第1次材料実験；First Material Processing Test）

このプロジェクト全体には「FMPT（First Material Processing Test）」、「第1次材料実験」というマテリアル系の名前が付いていました。今は文化庁などと一緒に文部科学省という名前になっていますが、当時の科学技術庁がアメリカのNASAとの政府間の交渉で、スペースシャトルのごく初期に、日本にも何か研究センターのプロジェクトを出してくれたら、1機分の半分の宇宙実験室に自分たちで作ったものを載せてもいいよと言われました。それを国内で公募してみたらどうですかという、そういうサジェスションがあって公募したのですが、集まったのは材料系ばかりでした。

例えば、重力の少ないところでタンパク質の合成をやると、純度の高い結晶タンパクがたくさん作れる、あるいは、ガラスを熔融して、非常に純度の高い光ファイバーを作る場合、重力がある所でやると比重によってガラスの透明度が上澄みと下で違ってきますが、宇宙でやれば非常に均一なグラスファイバーができるとか、そういう類いのものづくりに直結するというふうな提案が多くて、集まった30、40近くのものを選定して、NASAのところへ持っていったら、これでは駄目だとクレームが付きまして。あなたたちには研究をやってもらいたいのに、こんなものばかり集めてきて、またものを作ってアメリカに売ろうとしている、駄目って言っ

てすごく怒られてですね。

じゃあ、どうしたらいいかってことになって、科学技術庁の人が頭を寄せて考えた結果、やってもあんまり役に立たんものを公募しよう、それはライフサイエンスだということになりました。つまり、当時は科学技術庁のものづくりの観点から見ると、ライフサイエンスなんて役にも立たないという、そういう認識が強かった。それが常識でした。そして公募して、30か40、もうちょっとあったと思うんですが、中で選ばれたのが10幾つ、12ぐらいが選定されて、材料実験が22とライフサイエンスが12、合計で34ぐらいが日本の実験ということに決まりました⁴。

88年に打ち上げというマイルストーンができていましたが、チャレンジャーの事故が1986年1月28日にありまして、その後のプロジェクトは1991年まで延びてしまい、さらに最後にもう一年明確な理由が示されないままにプロジェクトの実施が延期になってしまいました。

FAPT 関連資料

図8はFAPTのデカールです。ミッションは91年に予定していました。ミッションは1988年、さらに90年になって1年延びてしまい、92年ということになって、デカールは作り直されました。その延びた間、何度もアメリカに行くことになりました。当時の宇宙開発事業団の人はトレーラーハウスで仕事をしていました。壁を見ると古い「ふわっと91」のデカールが貼ってありました。「First Material Processing Test」、第1次材料実験と書いてありますが、日本名のニックネームは「ふわっと」。空中に浮くというふわっとという意味と、What、何が起きているんだろうということの掛け言葉ですと新聞か何かで読んだ覚えがあります。

⁴ 以下に実験のリストが掲載されている。「FMPT 第1次材料実験 ふわっと'92 毛利宇宙飛行士搭乗」<https://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/spexp04c.html> (2023年5月15日最終アクセス)



図8 First Material Processing Test デカール

このような状況で実験と会議をどんどん続けていたわけです。図9は1年延びたときのタイムスケジュールですが、こういったものがどんどん紙で床に散乱するわけです。捨てられていくのを私は拾ってきました。

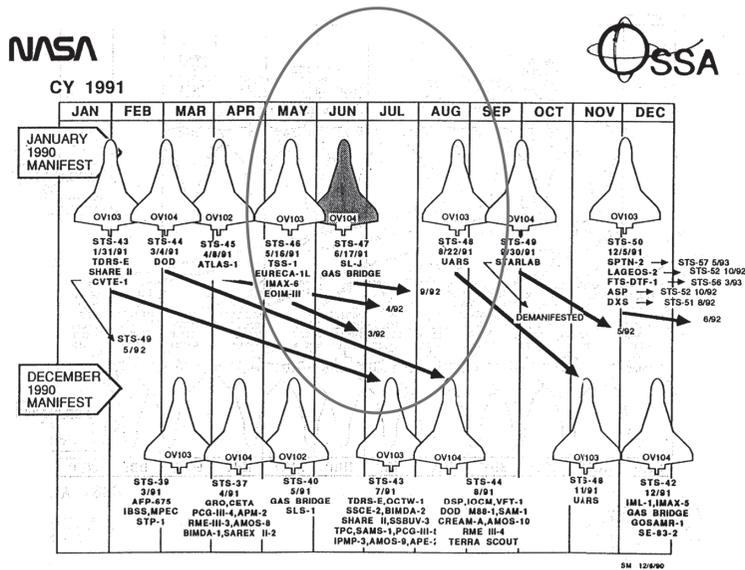


図9 変更されたフライトスケジュール

FATP の準備

どこで実際に実験をするかですが、打ち上げはケネディ・スペース・センターで

す。飛行の管理、管制はジョンソン・スペース・センターです。実験の管理は、ハンツビルという陸軍の基地のマーシャル・スペース・フライト・センターでやります。実は第2次世界大戦時にドイツ軍のV2を作ったフォン・ブラウン氏を連れてきて、ロケットの研究をさせた場所が、ハンツビルです。それから、エイムス・リサーチ・センター。これらがライフサイエンス系の実験をする所です。マテリアル系の人はこれに加えて、ジェット推進研究所という所も使います。そういったものがあるって、あっちへ行ったりこっちへ行ったりして、1カ月で2週間はアメリカ、2週間は名古屋とかいう生活が続いていて、結構くたびれる仕事でした。

図10はマーシャル・スペース・フライト・センターです。この中にあるモックアップで、宇宙飛行士は舞台稽古をします。シナリオや手順を書いたものを見ながら、それでこのスイッチを入れるんだなといったことを毎日練習します。歌舞伎の俳優さんと同じですね。



図10 マーシャル・スペース・フライト・センター

ケネディ・スペース・センターの打ち上げ射場には宇宙実験専用の格納庫があって、そこでシャトルを組み立てます。39番打ち上げ台のA、Bと二つで多くの宇宙関係のロケットが打ち上げられます。フロリダの対岸は打ち上げ場の観覧席になっていて、海水浴をしながら打ち上げを見ることができます。

宇宙空間での実験

そして、図11は実験をしている最中です。地上では鉄の塊のような装置だった

のがスペースシャトルの実験室の中では、こんな簡単な装置で体を固定しておいて、そして実験をするということができるよう。宇宙で行う実験と地上のそれは装置も何もかも異なる仕組みになっています。簡単といえば簡単です。毛利さんやこのアメリカ人の乗り組み員が、事前の訓練通りにやってくれるかどうか実験の成否を分けるといえます。とはいえ、彼らと交信をできるかということ、研究者は交信はできない規則になっています。交信できるのは地上にいるバックアップの宇宙飛行士だけです。このときは土井さんと向井さんがバックアップでした。もし出発の直前になって毛利さんがおなかを壊したりすると、向井さんか土井さんのどちらかが乗船することになります。宇宙での実験中はその2人が毛利さんと交信して、そのときに私が何かしてほしいということがあったら、会議にかけて、通れば、彼らが船上の宇宙飛行士に伝えてくれるという、そういうやり方でした。

ライフサイエンスー4

宇宙空間における視覚安定性の研究

テーマ提案者: 荻坂良二(名古屋大学環境医学研究所)

主任研究者: 古賀一男(")

共同研究者: 木田光郎(")

辻敬一郎(名古屋大学・文学部・心理学研究室)

後藤卓夫(")



京都ノートルダム女子大学

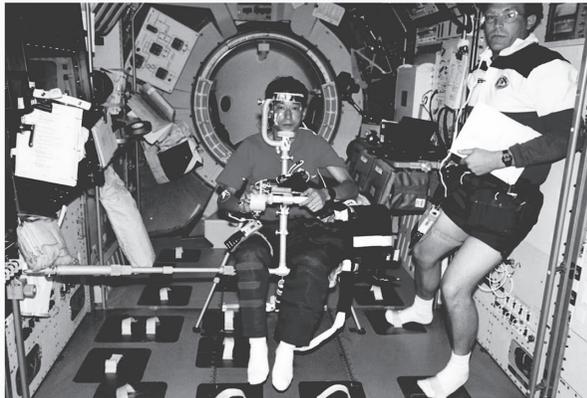


図 11 宇宙空間における視覚安定性の研究

地上実験・飛行中の実験・地上帰還後の実験

図12は実験のスケジュールで、もともとは91年に予定されており、89年に1回目のコントロールデータ、地上の重力のデータを取りましたが、宇宙での実験が92年になってしまったので、最新の比較データが必要になりました。それで、もう1回取る機会があり、都合2回、地上のコントロールデータを取りました。そして実際の打ち上げのときは、初日、3日目、6日目と3回データを取ります。そして地上に帰って来たその直後のイミディエイト・ポスト・フライト・データというのも必要でしたが、それは実験計画に含まれてないので駄目と拒否されて、1カ月後の、12月に地上用のデータを取るようになりました。全体としては5ブロックの同じデータがあって、これを比較検討するプランになっています。

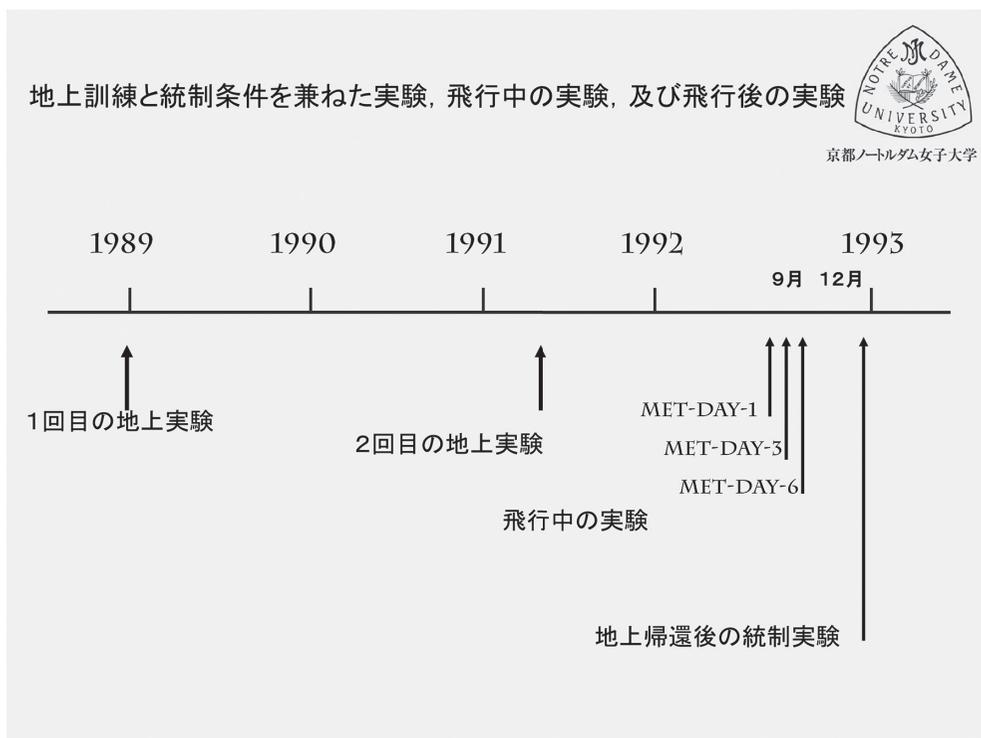


図12 実験スケジュール

次の図13は1989年と90年に地上で取った1回目と2回目のデータ、92年の宇宙での1日目、3日目、6日目のデータ、地上に帰還後の12月のデータです。部分

的に記録が不足しています。実験の1日目は毛利さんも私も慣れてなかったので、時間が不足してしまったのがその理由です。時間は非常に厳密で、もう5分やらせて欲しいといってもそれはまったく無理でした。仮に5分を余分にとると計画されていた時間に5分食い込んでしまって後の実験ができなくなります。自分の時間をサクリファイスする（犠牲にする）というのは可能ですが別枠で時間が必要な計画変更は不可能です。このあたりは自分の実験室で自分が実験をすることとの大きな違いです。

飛行中の実験の2日目は4回実験をやっています。3日目も4回の試行が予定されていました。1回分の実験時間が空いていますが、これは意図的に空けたままにしてもらいました。この実験データを見ると、地上で1回目、2年後にもう一回、それから帰ってきてから1回。これは全部、眼球運動なんですけれど、マグニチュード、増幅率がちょっと違うので、なんか違うように見えますが、上で取ったものと基本的にはあんまり変化がないということが読み取れます。

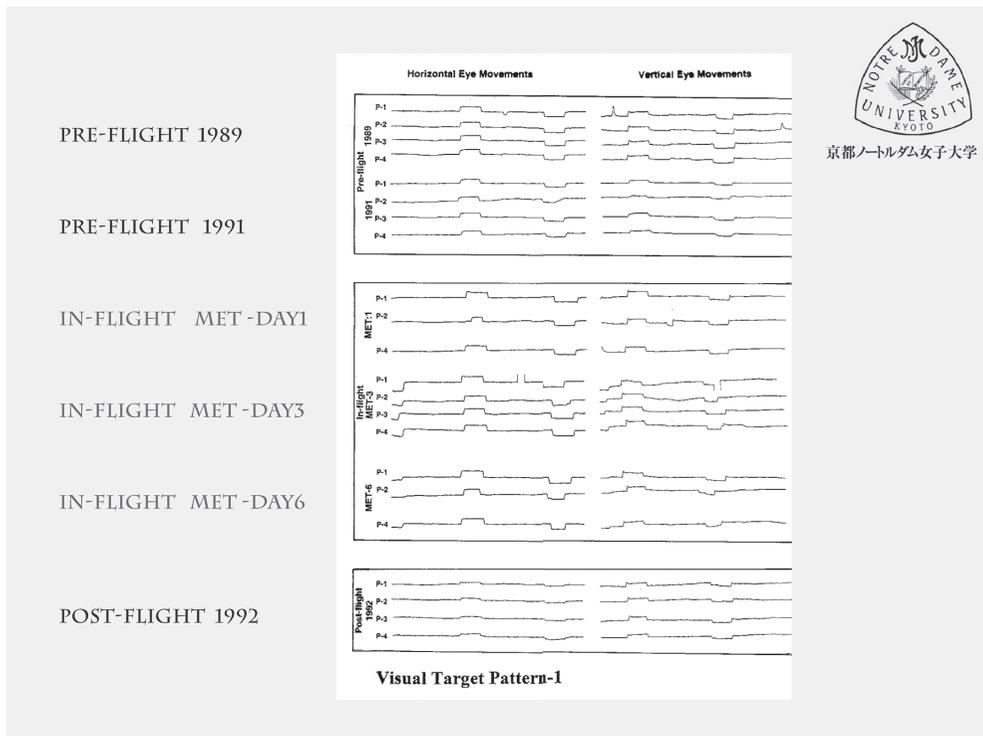


図 13 実験データ

実験の再挑戦

飛行中の実験の1日目(1回目)に変化がなくて、3日目(2回目)にも変化がなかったことを私は理解しました。このときミッション全体のスーパーバイズをしていた先生が「あなたの気持ちはそれで済むのか」と助言してくれました。「分かりました。ちょっと考えます」と返事をして少し考えました。宇宙用での実験装置の中に体を固定して実験を行っていました。プランニングの段階の計画ではそうでしたが実験計画では頭と目の協応運動を見なかったもので、本当は頭部を動かした時の記録がほしいと追加の変更を申請しました。いまさら頭部を動かす条件を追加することは難しい中、なんとかそれを少しだけ変更してもらおうかなと思い、テンポラル・オペレーション・チェンジ・リクエスト(臨時実験変更届)を出しました。3日目と6日目の間にテンポラル・オペレーション・チェンジ・リクエストに提案を出して、NASAのほうのワークスケジュールと照らし合わせて幸いにしてOKが出たので、実験条件の1回分を中止して、装置から頭を外しフリーにして実験を継続しました。実験変更の理由はどう言ったかという、あんまり地上の側のデータで大きな出力がないので、電極がちゃんとくっついているかどうかチェックしたい、それで頭を動かしてもらえないか、ということを行いました。それがうまく通りました。

それで、地上からは次のような交信をしました。1秒で一方方向に、2秒で1往復首を数回、振ってください。そのときのデータもちゃんと取ってください。ただし、目はいつも正面を向いたままにしておいてください。目を正面に向けたまま頭を動かすと、頭に対する目の位置が動きますので、首の動きを目の動きで類推することができます。そういう実験を追加しました。向井さんと毛利さんが交信をして、私は見ているしかない、そういう状態でした。

実際、データを取ってみると図14のように取得できました。宇宙という微小重力環境下でも筋電図が僅かですが記録できました。結局、これを見ると、目は地上と同じように動いているけど、首は重力がないので、振るのにそんなに筋肉を使わなくてもいい。つまり動かしているのは映像で分かるので、たしかに動かしているのですが筋力は使わなくていい。でも、目の反射機能はそのまま残っている、そういう地上の重力環境下ではあまり見かけない運動時のコンビネーションのデータが

取れたということです。これは将来的にはちょっと面白いデータかなというように思いました。図14にあるように、データの中の地上で取得した条件では大きな筋電図が記録できます。首も、目も両方は協応して動いているように見える結果のようなデータですが地上で行ったパラボリック飛行でおこなった実験ではそういうデータはありませんでした。

頭を動かすのと、目を動かすのと、重力に呼応して働く筋肉と、あまりそうではない筋肉との間のつながり。これが重力のない環境に行ってしまうとうまく釣り合いが取れるまでに一定の時間がかかるはず。これは長期の実験をやってみなければ分からないことが実際の微小重力環境で示されました。実際の微小重力環境といってもこの当時としてはせいぜい1週間から10日、3週間が最大ということで長期の実験はできませんでした。その後の日本の宇宙実験は人間を被験者とした実験をあんまりやらないので、宇宙におけるヒトの実験はできないということになっているのが現状です。

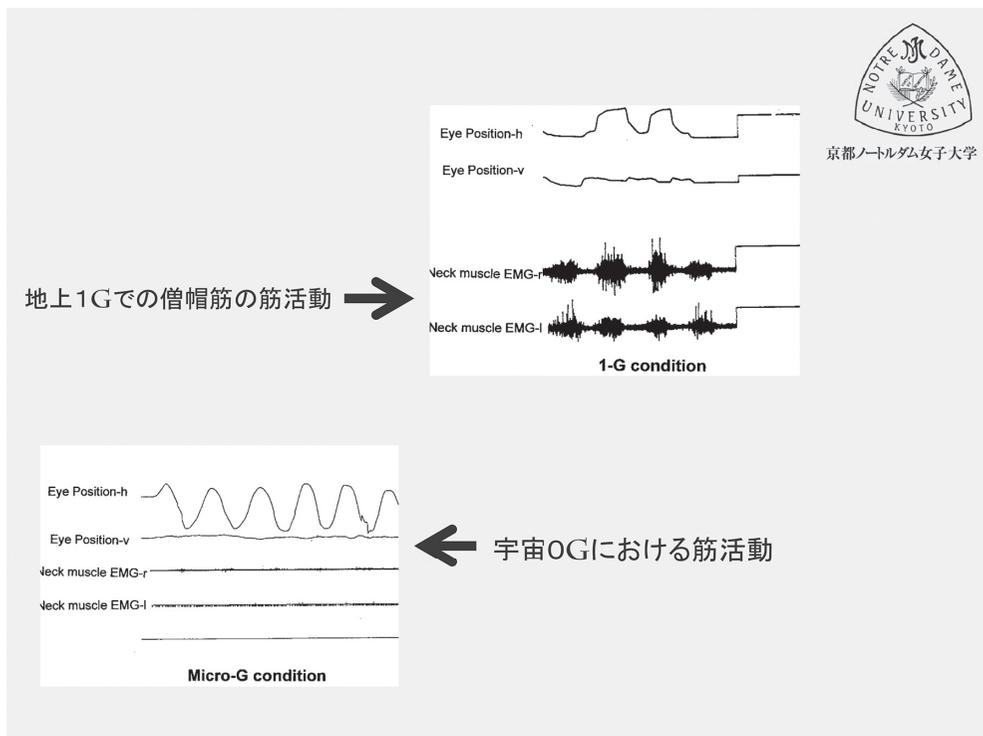


図14 地上と宇宙での実験データ比較

まとめ

結論 1

重力に関する種々の環境変数が変化するとき、環境に対して順応するダイナミズムと可塑性（もはや元には戻れない側面）を示す二つの特性があると認識することが重力を正しく評価することになるにちがいない。

結論 2

生物のメカニズムと機能のすべてを決定する重力の影響は、生理的諸機能だけでなく高度な認識機能までも規定することを考えておくことが重要。それは地球の重力が私達生物の身体と精神を作り上げてきたという歴史を認めることに他ならないのだから。
(講演資料より抜粋)

最後にそれでも宇宙に行くのだろうかという疑問を問いかけるのですが、答えは簡単です。地球に戻ってこないならばいいと思います⁵。行ったままでよいならそれはそれで一つの考え方です。最近の『オデッセイ』(2015)という映画では宇宙飛行士のメンバーの1人が火星に取り残されますが、もしそのまま居るなら問題ないわけです。でも、みんな宇宙に行きたいというふうについて、そう叫んでいた宇宙飛行士がやっぱり帰ってくるとなると、そんなに行きたかったのだったら帰ってくるなどと泣き言を言うな！、なんて乱暴なことも言いたくなります。それは冗談です。つまり、いかにわれわれが重力の下で培われた環境で、仕事をしたり、生活をしているかという現状について、この環境がなくなったときにどういう問題があるか、さまざまな問題が起こってくるだろう、そういったものについては、いろんなことを解決していく持続する努力がなければいけない、そういうことがいえるかなと思います。以上です。

⁵ 微小重力環境下で生じる弊害のうち地上に戻らないのであればそれほど問題でない案件も多いとされる。ただし、地球に帰還したり、他の惑星に着陸したりするなら、筋肉や骨量の低下などは大きな問題になる。他の惑星への最初の着陸時には地球帰還時のようなサポートも受けられない。

Q & A

Q：今回参加させていただいている聴衆の大部分は美学や芸術学の出身者ですが、大抵の場合、上下、水平垂直というフレームが定まったなかでものを考えていて、自己中心座標軸、外的環境中心座標軸、重力加速度の軸がずれたときにどのような身体感覚が生じて、それがどこまで高度な認識機能に関わっているかといったことを考えてきた人はわれわれの分野ではあまりいないのではないかと思います。カントの言う生命感覚のようなものも捉え直すことができるのではないかと考えて、面白く感じました。

映像も研究している立場からうかがいたいのですが、例えば、微小重力空間が舞台になっている『ゼロ・グラビティ』（2013）のような映画では3軸の回転が画面上で行われていて、われわれは座ってそうした映像を見ているだけですが、こちらの重力も狂ってくるような感覚に襲われます。これは何なのかと考えてしまうのですが、もし何か関連することがありましたら。

古賀：重力にかなり近い気がします。私は本職では目の動きという特別な運動機能と知覚の関係について仕事をしているのですが、首をローリングの方向（頭と足を軸とした回転方向）に傾けると、目は起き上がり小法師のように頭部の回転とは逆方向に回転するわけです。目には六本の筋肉がついているので、そんなに大きく回転しません。最大で12度ぐらいまでは回りますが、首をちょっとかしげたりすると、5度や6度は回転します。反対側に起き上がり小法師のように戻りますが、首がどんな傾きをしても、網膜像は正立しているとき、直立しているときと同じような位置を保とうとする。そういう動きを眼球はすることになります。身体の小さな位置の小さな変異を眼球の反対回旋で保障しようという機能です。

眼球が戻る動きは、首の動きに対しても起こるし、目の前で例えば何か回転しても起こります。物を回してやると、目はそれに沿って回って戻る、回って戻るということを繰り返します。横方向に流れるように動く映像、あるいは、縦方向や時として斜め方向に動く映像を見ると、目はその方向に動きますが、これと同じことが回転方向にも起こります。目は水平方向、垂直方向に、直線運動しているような印象を与えますけれど、ソケットの中に入っている眼球は運動の範囲に限界はありま

すが、回転して身体の偏倚によって否応なく生じる網膜上の位置変位を修正するわけです。垂直にも水平にも、それから回転方向にも。3軸共にです。そうするとこの3軸目の、体が重力の方向を大きく逸脱してそのまま放っておくと倒れるかもしれないという姿勢にきたときには、耳石のほうも常ならざる情報を中枢に送出するだろうし、目のほうもそれを持ち直そうとする方向に位置を変え、体の筋肉の緊張も、やはりある特定の筋肉が緊張しないと倒れてしまう。このへんのところの修正機能が常ならざる感覚みたいなものを生む原因になっているのではないだろうかと思うことも可能な気がします。

質問者：すごくよく分かりました。耳石と筋肉とあとは眼球の周りの筋肉。

古賀：目だけは正しい位置にきているけど、他のものは正しくない、常ならざるところにきているという。

質問者：感覚かどうかという議論がありましたけれど、感覚未満の状態のものが個々にありながら、しかもそれらが相互につながって微修正、微調整をしていて、実は普通に生きているときにもそれが常に働いているということになるわけですよね。

古賀：そうですね。たとえば徳俵に足のかかったお相撲さんが、押し相撲に持ち込まれたときは、首だけは立っていることがほとんどですね。立ち直り反射っていいですけど、そうすところえることができます。頭さえ立てておけば押し戻すことができますが。あれが傾いてしまったら、もう負けですね。そういうことがスポーツの世界では往々にしてあるのではないだろうかと思います。

Q：視覚、体性感覚、耳からの重力情報などはやはり脳で統合されるのでしょうか。

古賀：私はそう思います。それもかなり高次なところで。

Q：宇宙では強い光が生じるというお話がありました。地上では体験しないですけども、何かわれわれの記憶の中にインプットされているといったことでしょうか。臨死体験では光を見るといった話もありますが、そういったものなのでしょうか。『2001年宇宙の旅』（1968）の最後でも光が飛んでいるようなシーンが延々と続きますが。

古賀：手術の最中に光を感じたりするというのは、ちょっと私にはわからないですけども、宇宙の方は、強いというよりは、ピカッと光るということです。ひどい場合は真っ白に一瞬なるということも報告では出ているようです。記憶のように高次の神経活動ではなくて、具体的に宇宙放射線で細胞が破壊されたときに、ロドプシンだとかそういったものが、一瞬、破壊されてぱっと破れて出てしまう。それで光を感じてしまう。そういうことかと思います。私自身はあんまりそういう宇宙放射線でピカって光ったっていう経験はもちろんなのですが。

Q：XYZ軸の全ての制御を、結構、首でおこなっていて、首は人間のある意味、軸になっているということをそこまで考えたことなかったので、今日は、首っていうものを再認識した気がします。

古賀：私のやっている実験だと、ヘッド・マウント・ディスプレイになるべく簡単な刺激を出します。そして刺激が一定速で動いたり、回転したり、横にシーンが流れたり、あるいは、単純にランダムドットが流れたりします。身体と離れた位置にある向こうのスクリーンを見るのではなくて、ヘッド・マウント・ディスプレイで見るところが肝なんですけれども。例えば右から左にだらだら流れる絵が出てきたときに、その流れの方向に首を動かしてやると、目は首と反対方向に動くから、絵は早く動きます。それに対して、絵の流れの方向と逆向きに首を動かすと、目は首と反対、つまり、絵の流れの方向に行きますから、刺激が止まってしまいます。左右に首を動かすたびに、止まったり、早くなったり、止まったり、早くなったりということ、交代で、動かすたびにいろんな動きが出てきてしまう。これはもう明らかにナチュラルでないですよ。

じゃあ、日常生活でもそうしたことがいっぱい起こってもおかしくないのになぜそのように認識しないのか。例えば人がどんどん交差点を渡っている所で、彼女がどこにいるんだろうとかいって探すときに、どうして実験のときのような変化はないのか。それは現実の生活場面は非常にリッチで、動かないものもあれば動くものもあるというので、バランスができていて、そういうことが知覚されても認識されないのだと思います。ただ、非常にコントロールされた、それしか見えないところで先の実験のようなことが起こると、一体、どれが正しい動きなのか分からなくなってしまうことがあります。そのときは明らかに首の動きに呼応した目の反射運動と、目の前で動いているものとの方向が、ベクトルがどういう関係になっているかによって、動きの見え方が大いに変ってくる。そういうことがあることは明らかですがそれを検討しようとする研究者はほとんどいないようです。

Q：ご著書の『知覚の正体』では次のようにおっしゃっています。「重力に慣れ親しんだ生物が果たして微小重力環境で恒久的に順応し生存してゆく可能性はあるのだろうか。他にも数々の問題があるのだが、私は「ノー」としか言い様がない。しかし地上の重力が生物に与えている意味と影響を考える時、微小重力環境ほど有効な実験条件を与えてくれる場所は他にはあり得ない」。

古賀：環境への順応については、私が若い頃に大阪市立大学だとか、いくつかの大学の先生たちと一緒に、反転視の研究、実験をやっていました。昔からよくある逆さ眼鏡の実験です。あれはもともとはどこから始まったかという、目の中にある角膜と水晶体を通して正面にあるものはこういうふうに（たとえばペットボトルのキャップ側が上に）見えているけれど、網膜上では180度逆さまに見えるのはどうしてかというのが、研究の始まりです。それを左右を逆さまにしたり、上下を回転させたり、上下を裏返したりとか、いろんなことをやって、実験をした歴史があります。非常に長期の実験になります。最低で2週間、寝食をともにして、集団で1人の被験者を面倒見なければできない大変な実験です。2週間やると自転車ですぐいと移動ができるようになります。非常に不思議です。それほど可塑性があることは驚くべき実験です。2週間経って、フルアダプテーションと呼ばれる状態にな

った後に、今度は装置を取り外すと速やかに元に戻る。そんなに上達していたのに、せいぜい2時間で元の世界に戻ってしまう。そうすると、さきほどフルアダプトとっていた行動の変化は、行動ができていただけであって、アダプトしているのではないのではないかというようなことが議論されました。

左右反転眼鏡条件だったと記憶していますが、被験者がコーヒーを飲む時に使うカップが普段は液体を注ぐ部分が凹んで見えますが、左右が入れ替わっていると、その部分が膨らんで見えるんです。注意深い被験者からはカップの中のコーヒーが盛り上がりが見えるという報告がありました。これは眼鏡をとった後も3日も4日も続くんですね。アダプトした後、フルアダプテーションまでやって報告を記録するとどうもおかしいという議論がありました。やっぱりかなり中枢の奥のほうに変異が起こったに違いない。しかしそれは1カ月もすると消失します。ということから考えると、異なる環境である微小重力にはかなりの程度、適応できていると考えてもいいという気がします。

もう少し付け加えると、実は環境にアダプトするということは、臨界期という発達の段階でもあっても同じことが起こっていると考えられます。例えば角膜が濁っている全盲の人が、角膜移植で角膜を取り換える。ほぼ正常の視覚があるにもかかわらず、手術をやる時期を逃してしまうと、例えば、18や20歳でそういう手術を受けるとテレビが見えるようになっても目の前に画像が張り付いたように画像が動いているように見えて、「相撲の番組なんか見たくない」、「テレビなんか見たくない、あんなもの、見ているだけで気分が悪い」という不快感を告げるようになります。でも、5歳とか3歳とかの頃にその手術をやっておれば、そういうことにはならなかった。そういう報告もあります。発達のプロセスの中に視覚の基本的な節目の臨界期と高速で運動する対象を記録するハードウェアを用いて記録するという問題があったと思われます。新しいハードウェアを導入しても「知覚発達の臨界期」を逃すと正しい問題点を指摘するという問題が控えています。

そのように考えると、環境にどれだけ適応して、正しい知覚を持てるかということとは非常に難しい問題です。どれだけ長くその中にいるか、いつ何が変化させられるかとか、いつ修正させられるかとか、そういう様々な要因が入ってきて、なかなか一筋縄ではいかないという気がします。そうすると私のような年寄りにとって宇

宙などは行きたくない。しかし若い人は行きたいというのは理解できます。

質問者：発達的に考えるというのがすごく面白かったのと、宇宙に行くということを見ると、普通は微小重力環境にどれだけわれわれがアダプトできるかという方向でしか考えないですけど、逆にわれわれ地球上の生命というのは、重力にアダプトできたものたちの生き残りだというふうな着想をいただくと（岩城 2022: 73）、ちょっと頭を反転させることができ、それは面白いなと思いました。今のお話との関係だと、微小重力空間に出ていくというときも、まだ実際にはできないでしょうけれど、外国語の修得と同じで、小学校1年生ぐらいの子どもを宇宙に連れていくと、割と今までと違うアダプテーションがあるんじゃないかという気がしてきました。「IGと微小重力を比較するだけでなく、Gのバラエティについても考えるべきである」といったことを事前にお話しをうかがった際に先生はおっしゃっていて、この点もまた考えていくことができればと思います。今日はありがとうございました。

古賀：いえ、どうも。ありがとうございました。

引用文献

Hardy M. 1934. "Observations on the innervation of the macura sacculi in man". *Anatomical Records*, 59, 403-78.

岩城覚久. 2022. 「古賀一男氏講演「微小重力環境へのヒトの順応とその限界—宇宙飛行士の行動を分析して地球と重力をより正しく理解したい」」『文学・芸術・文化』第33巻第2号：55-77. https://kindai.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=22465&item_no=1&page_id=13&block_id=21 最終アクセス日 2023年5月26日

古賀一男. 2003. 「重力基準の問題」 牧野達郎編『知覚の可塑性と行動適応』ブレーン出版.

古賀一男. 2011. 『知覚の正体——どこまでが知覚でどこからが創造か』河出書房新社.

古賀一男. 2014. 「有人宇宙実験 FMPT と有人ライフ・サイエンスの役割と重要性」『宇宙航

空環境医学』Vol.51, No.1: 1-12.

<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/16247> 最終アクセス日 2023年5月
26日

古賀一男. 2015.「宇宙空間における知覚と行動の変容と適応」宇宙の人間学研究会編『なぜ、
人は宇宙をめざすのか』誠文堂新光社