

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」(1)

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」の内容を一部編集して収録したものである。紙幅の都合上、今回は主に講演内容の前半部分を収録している¹。

宇宙生命科学者であり、実験心理学が専門である古賀一男先生は、1992年9月にスペースシャトル・エンデバー号で実施された日本では初の本格的な有人宇宙実験に主任研究者(92年当時の所属は名古屋大学・環境医学研究所・宇宙医学実験センター)として従事した経歴を持ち、特に日本では専門家が少ないとされる微小重力環境下でのヒトの生を対象とした実証的な研究の第一人者である。

研究会当日は、報告者がまず「スペースアートとエスティックス」というタイトルで導入をおこない、次いで古賀先生に講演いただいた²。

単に宇宙に行って帰るだけでなく、長期滞在が当たり前のようにおこなわれるようになってきたなかで、技術的に構築された宇宙の生存圏では、生命の身体、知覚や認識や思考になにが生じるのか、今後、感性学・美学・芸術学の立

場から何を考えるべきなのか、といったことがわれわれの関心事です。(中略) 昨今では ISS [国際宇宙ステーション] の人文・社会的利用に向けたプログラムのなかでアートの実践や研究もおこなわれ、わたし自身も諸々関心をもって調べてまいりましたが、古賀先生が「この領域(人文系)の研究者には宇宙実験の経験が少なく、微小重力やその他の物理的な特性についての基本的な要素技術蓄積が不足するであろうということは 30 年前の FMPT の状況と酷似している」[古賀 2014] と論文で指摘されている通りの部分があると思います。つきましては、『なぜ、人は宇宙をめざすのか』[古賀 2015] や『知覚の正体』[古賀 2011] などでも書かれている「微小重力空間とヒト」をめぐる話題を、映像資料などを拝見させていただきながらレクチャーをしていただけないでしょうか。ISS 以前から実験にかかわってこられた先生の知見はもちろんのこと、先生が開発された実験装置や『なぜ、人は宇宙をめざすのか』の最後に書かれている「視覚障害」の問題、先生がたどってこられた研究史などにも大きな関心を持っています(岩城 2017 年の古賀先生への依頼内容の一部を要約)

われわれのこうしたリクエストに答えていただき、2017 年に実施された本講演を今日採録する意義のいくつか簡単に触れるなら、まず、当時とそれほど状況が変わらない(特に日本語で読める)情報の不足がある。次に、宇宙をめぐる最近の動向がある。1961 年のガガーリンの宇宙飛行以降、サリュートプログラム(ロシア 1971-86)、スカイラブ(合衆国 1973-74)、ミール(ロシア 1986-2000)などの宇宙ステーションのオペレーションを経て、2011 年に国際宇宙ステーション(ISS)が完成し、中国独自の宇宙ステーション計画も開始され(2011-)、宇宙は行くところから滞在するところになる。この状況にさらに大きなイメージの変化をもたらした出来事は、昨年 2020 年 5 月に民間企業スペース X が開発したクルードラゴンが ISS にドッキングする民間初の有人宇宙飛行に成功したことである。アメリカではもともと宇宙開発への民間企業の参入は進められていたが、ISS への有人宇宙飛行の成功は象徴的な出来事になった。それ以降、ヴァージン・ギャラクティックやブルーオリジンも試験飛行を成功させ、2017 年の講演当時よりも、宇宙旅行が

急激に身近なものになってきたという印象がある（一時的な印象に終わるかもしれないが）。そんななかで、一般にはあまり知られていない微小重力空間でのリアルな生の条件を示すこの講演の意義はますます大きなものとなるであろう。また宇宙がやや身近になってきた状況は、これまではそれが遠いものに見えていたいわゆる人文系の学生にももしかすると将来宇宙とかかわる仕事などに就く可能性があるのではないかという気持ちを多少なりとも生じさせる。たとえば、わたしが現在所属する近畿大学文芸学部文化デザイン学科（2016年開設）という学科の学生にとっては、そうしたリアリティのなかで微小重力空間・閉鎖空間内でヒトが生活することを想像し、そこでの感性のあり方や新しい生活のデザインをできるだけ具体的に考えてみることは、地上の生活を相対化するうえでも、新たな発想を生み出すきっかけとしても、意義があることのように思われる³。そこからさらに、人工重力を含む、多重力の世界に思考を展開することもできるであろう。元宇宙飛行士の向井千秋氏が言うように「1Gがわれわれにとって最適な重力レベルかどうかというのは、実はわからない」（立花 2007, 137）ということもあるのかもしれない。宇宙飛行士の映像だけからでは読み取ることが困難な微小重力環境での生の具体的な条件やその地上でのシミュレーションについて門外漢にも理解しやすいかたちで解説される本講演は、宇宙には行かない、有人飛行は必要ないという立場を洗練させる場合も含めて、思考訓練にリアリティを与える、優れた教材にもなるのではないだろうか⁴。

以下に採録した講演の前半部分では微小重力環境へのヒトの適用とその限界、さらには、微小重力環境の地上でのシミュレーションについて解説される。未収録の後半部分では、重力を検出する耳石の働きの詳細や古賀先生自身がかかわった宇宙での実験についての詳細が論じられる⁵。これについては、別稿に譲りたい。

（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」⁶

京都ノートルダム女子大学心理学部名誉教授

古賀一男

古賀：今日は呼んでいただきましてありがとうございます。岩城先生から「微小重力環境へのヒトの順応とその限界」というタイトルをいただきまして、こちらで「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」というサブタイトルを付けました。

退役したスペースシャトルはどこに？

ちょっと古くなりますけれど、2012年に新聞に出ていた記事で、「シャトル、街にあらわる」というものがあります（『朝日新聞』2012年10月14日付）。2012年にシャトルのミッションが終わりまして、金食い虫だったものですから、全部で6機ぐらい造ったんですけど、そのうち2機は事故で失われてしまいました。1機はエンジンが付いてない最初の空気抵抗なんかを調べるためのダミーのワーク、エ



図1 「退役したスペースシャトルの現在地」 講演者作成

エンタープライズという名前のシャトルだったんですが、それを含めて4機は残っています。「シャトル、街にあらわる」というのは何かといいますと、ロサンゼルスにある科学博物館にそのうちの1機を移送している最中のこととして、陸送をしています。ケネディから持ってくる時には専用の輸送機がありまして、ピギーバック輸送 (piggy back) と言って、その背中に乗せておんぶするような感じで持ってきます。街中へ来るとトレーラーに載せて、運んでいる最中ということですね。

どのシャトルがどこにあるかという、カリフォルニアにあるのは毛利さん（毛利衛元宇宙飛行士）の実験で使ったエンデバー号です。それからニューヨークにあるのは、エンタープライズ号というエンジンの付いてないものです。図1にあるのは、ちょうど輸送機から足を外してグライダーのように飛ばしているところですね。それからアトランティス号はケネディスペースセンターにあります。科学を志す子どもたちのスペースキャンプなんかをやっているところですが、そこに置いてあります。それからディスカバリー号は、ワシントンDCのほうにあります。これは例によりまして、博物館です。動態保存をしてあります。動態保存というか動かないだけどもエンジンを保存してあるという状態です。

なぜ宇宙に行きたいのか？

僕はもともと宇宙実験をやっていたわけではないんですけども、[1970年代末頃から⁷] 否応なく関係を持たざるを得なくなってしまったときに、やっぱりなんかおかしいんじゃないかなと思うことがあって。それはどういうことか少し述べます。主に宇宙飛行士が子どもたちに、「みんな、科学を勉強して宇宙に行こうね」と、「宇宙はいいよ」ということをしきりに言うものですから、打ち上げの場面を見たりいろんなことをしたりして、世界中の子どもたちが皆宇宙に行ってみたいという気持ちを強く持つようになっていく。疑いもなくそうした気持ちを持っていると言うようになっていく。一度でいいから重力を逃れて、空中を自由に飛び回ってみたい。こういうことを言う子どもが多いんですけど、問題はこの自由に飛び回ってみたいということで、本当に自由に飛び回れると思っているんだろうかということです。赤ちゃんをぽんっと水の中に放り込みますと、羊水の中で泳いでいたものですからすぐに泳いで、目も開けて泳ぐようですけども、1歳、2歳になっ

たときに、水の中に放り込まれて泳げるかっていうと自由に泳げずじたばたするだけです。そのまま成長して大人でも泳げない人がいっぱいいることを考えると、重力がなくなったところでそんなに自由に体を操ることができるとは思えません。しかし、そういうことを宇宙飛行士をはじめとして、ほとんどの者が言う。そして、宇宙飛行士はよくテレビに出てくるものですから、憧れの的になっている。いわば、アイドルを崇拝するような形になっているということが現実にあるということなんですね。

私が「いや、空中を飛び回ってみたいんだったら、宇宙じゃなくても地上でもできますよ」って言うと、宇宙飛行士が今度は脇のほうから、そんなのは駄目で、ちょっとしたことで何かやっても偽物だからどうしても宇宙空間に僕は行ってみたい、と言うんですね。宇宙飛行士にもやはりある種の功名心もあるし、ある種の選良意識というものもあって、必ず宇宙に行ってみたいと考えている。できれば一番乗りをしてみたいという気持ちも強くある。これはちょうど、新大陸を求めて船出して行った冒険家と同じような意識をやはり宇宙飛行士が持っていると考えべきであって、それを隠したまま子どもに「宇宙に行こうぜ」と言って、あんまりけしかけないでほしいというのが僕の偽らざる気持ちなんですね。なんで宇宙に行きたいんですかという疑問だとか、宇宙に行っても体や心、精神、そういったものは本当に大丈夫ですかという、実は大丈夫じゃないことがたくさんあるのに、そういったことをちゃんと言わないで「宇宙に行こうぜ、みんな。いいぜ」ということを言うので。こういう疑問を呈すると、よく教育を受けてない子ども、つまり、宇宙のことについて知らない子どもたちは「どういう意味ですか、それは。宇宙に行っちゃいけないんですか」というふうなことを聞き返してくるのではないだろうかと思うわけですね。

パラボリックフライト（弾道飛行）

では、宇宙でなくても地上でも大丈夫といういくつかの例を見ていただきたいと思います。一番、無重力に近い状態で、つまり、宇宙をふらふらと飛んでみたいというのができるのは、もう弾道飛行、パラボリックフライト（parabolic flight）に尽きるということになります。日本でよく実験に使われるのは三菱重工の名古屋の小



図2 同型機 A Mitsubishi MU-300 Diamond, N417KT (c/no. A083SA) , at Nashville International Airport, YSSYguy at English Wikipedia, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:N417KTatBNA.JPG>, Accessed November 22, 2021

牧空港にある、ダイヤモンドエアサービスというところが持っている社有機で、MU-300 という 10 人乗り、12 人乗りのビジネスジェットを弾道飛行用に改良したものです (図2) 8。スピードがどれだけ出るかによって、どれだけ長くマイクロ重力 (microgravity, 微小重力) が出現するか変わるんですけど、この飛行機でも、最大でせいぜい 15 秒です。パイロットの技量にもよりますが、15 秒ぐらいはそれが実現できるということになります。

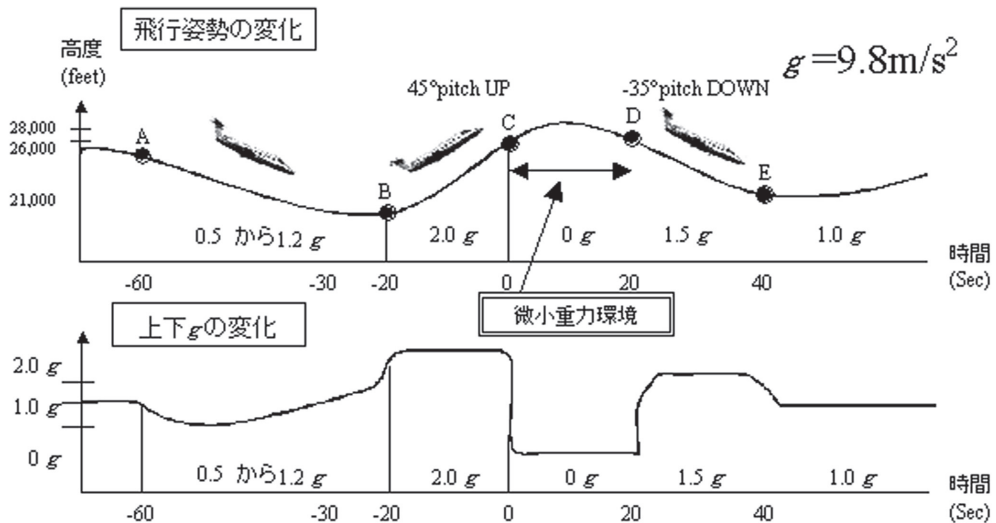


図3 重力変化グラフ
<https://www.jsforum.or.jp/technic/su/www4/public/koubo/microgravity/contents/c07/>
 最終アクセス日 2021 年 11 月 21 日

実際には、海上でやるんですけど、4000～5000メートルのところから海のほうに向かって40度から45度の角度で突っ込んで行って、重力を利用してスピードを稼いでおいて、突然、機種を反転させて45度の方向に上に上げて、高度を回復した辺りでエンジンをほとんど切ってしまう、絞ってしまう。あとは、そのまま放物線を描くオペレーションをパイロットがうまくやれば、12～13秒、下りまで含めて0Gの状態、マイクログラヴィティの状態が実現できるというわけですね。

ただ、これ、マイクロGは実現できますが、突っ込んでいくときに0.7Gぐらいになって、さらに機首を上げたときに2Gぐらい過重Gがかかってしまって、そして0Gになって、また再び過重Gがかかるというので、Gのプロファイルを見てみると0Gの前後に2Gから1.5Gぐらいがかかってしまいます(cf.図3)。0Gのときに体はふわりと空間に浮いてしまいますけれども、その前の過重Gの影響、ヒステリシス(履歴)を内包したままの実験になる。そして実験は非常に短い時間です。使用料が高いですから相乗りでやるんですが、人に限らず動物の実験、それか

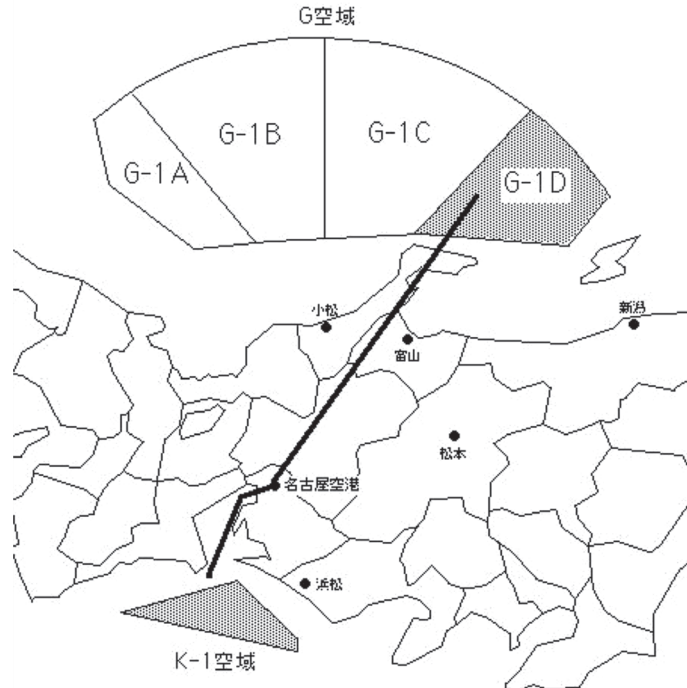


図4 「パラボリックフライトの空域」航空機実験システムガイド(改訂C版)平成11年刊 第2章セクション1, ダイヤモンドエアーサービス社内資料(講演者所蔵)

らマテリアル系の実験、細胞の実験なんかをやって、そのどれも、どの資料、あるいはどの生物も、そういったヒステリシスの影響を受けているということなので、その辺を勘案してデータを見なければいけないということになります。

日本の場合は、遠州灘の自衛隊の訓練区域と、それから能登半島の北寄りのところにあるもうちょっと広い空域を使って、大体、午前、午後を自衛隊の飛行機にここで訓練しないようにしてもらって、遠州灘側や能登半島側で6回ぐらい、折り返して6回ぐらい、往復で12～13回のマイクログラビティをやるということになります(図4)。飛行機はいろんなところがチューニングしてあります。スピードも出るようになっていきますし、マイクロGになったときにポンプに空気が入って燃料が送られなくなると、今度は本当にエンジンがストップしてしまうので、マイクロGになっても燃料がいつも吸い込み口のどこに来るようにとか、そういうようなことがやってあるんだそうです。

実際のパラボリックフライトではまずエンジンがかかっていて、エンジンを切ってしまうと、徐々に水平飛行に移ってきて、マイクロGになります。そして、今度は海のほうに向かって落ちていくということになり、そして、また回復するというふうなことをやるわけですね。マイクロGになるわずか14～15秒で実験をやるんですが、突っ込んでいって、水平飛行に移って、今度、海面のほうへ進んでというふうになります。

今、映っているのは研究所の僕の隣の部屋の友人だったんですけど、眼球運



図5 「講演中の古賀一男氏(左)パラボリック・フライト中の眼球および頭部の運動にかんする実験の様子(右)」講演記録映像より2017年1月21日

動をとるように操縦をしています(図5)。マイクロGになってふわりとって、そばで僕が介助をして、逆さまにしてやって。そして頭を動かしてもらって、眼球運動と、頭部の運動とを記録するというふうなことをやるわけですが、重力がくる前にすぐ姿勢を戻してあげないと、頭から落ちてしまうということですからかなり危ないです。本人も心得てはいるんですけど、時々ぐしゃってってしまうことがあって。

それから、いろいろとエピソードはあってですね。子どもが言うようにやりたいてみんな言うんだけど、パラボリックフライトはそんなに気持ちのいいものではなくて、体の中で内臓が全部、重力がないときに浮いてしまう。おなかの中で浮いてしまうので、特に胃の中に少し香りの強いものが入っていると、喉まで上がってきてそのまま吐いてしまうということが、非常に頻繁に起こりますね。昼ご飯にカレーを食べた人は、必ず中で嘔吐をしてしまうというのがあるって、カレーだけは食べないようにと何度も言うんですけど、三菱の社員食堂に行って、みんなカレーを食べてくるんですね。一度吐いてしまうと実験にならないものですから、機内も汚れてしまうので本当に困るんですけども、全然言うことを聞かない学生さんがいっぱいいるということがあります。

微小重力環境における身体の変化

次に体の中でどういうことがマイクロGになったときに起こるかということです。まず、心血管系、血液系の変化(changes in blood system)があります。それから、ヘッドワード・フリユイド・シフト(headward fluid shift)、頭のほうに血が上るという状態にもなります。それから、体の体重がなくなるということ(decreased weight bearing)。こうしたことが起こります。体重がなくなる、少なくなるということは、宙に浮いて気持ちがいいって言うけれど、実は下半身の筋肉に対して負荷がかからないということになります。何か病気になって入院をして1週間ほどベッドに寝ると退院するとき足がふらふらするとか力が入らないといったことが起こりますが、それが宇宙に行くとき起こってしまう。宇宙飛行士を運ぶスペースシャトルには、機関士とパイロットが1名ずつついていくわけですけど、彼らは宇宙飛行士のような仕事は何もしないんですね。着陸するときちゃんとパ

ラシュートを出すことと、リアの車輪のブレーキを確実に足で踏むこと、これだけしか仕事がないんです。そのために宇宙に行って、宇宙飛行士がせっせと仕事をしている間は、毎日、数時間エルゴメーターをこぐ。そして、足の筋肉の衰えを防止するという作業を毎日やっているという状態です。これをやらないとブレーキが踏めない、とっさのときに踏めないというようなことが起こってくる。

頭のほうに血が上ることについては、後で詳しく見ますが、地上の実験では6度ヘッドダウン（6 degrees head-down bed rest, HDBR）だとか、それからヘッドアウト・ウォーター・イマージョン（head-out water immersion, HOWI）というものがあります。ヘッドアウト・ウォーター・イマージョンでは頭と首から上だけを水の上に出して、ちょうど歯磨きのチューブを水圧でもって絞り上げるようにして血液を頭のほうに持ってくると、マイクログラビティと同じ状態になる。あるいは、6度のヘッドダウンでやると、自然に血液が頭のほうに上って行って、そして顔がかなりパンパンに腫れてしまう状態までくるということなんですね。今日はエイムズリサーチセンター（Ames Research Center）というアメリカのカリフォルニア、サンフランシスコの南側にある生物系の研究所のほうでやっている実験のビデオを持ってきました。1週間くらい寝たままの状態で行った実験の記録です。

体液のシフト（fluid shift）／ムーンフェイス（moon face）

まず、血液系というか、心肺機能ですね。血液を含めてそういったものが変化するフリユイド・シフト（fluid shift）があります（図6）。1Gの場合は、重力に引っ張られて心臓よりも下のほうに血液がたくさん分布している状態ですが、重力のないところに行くと引っ張る力がないので頭のほうに血液が行ってしまいます。重力のある環境では、足で立って直立して踏ん張っているものですから、筋肉が非常に強く血管を圧迫して、血液が下半身に下がりきらないようにするというのを日常的にはやっているわけです。そして皆さん、ご存知なわけですが、7、8時間以上のフライトのエコノミークラス症候群というのがあります。フライト中に狭い座席で何もしないで椅子に座ったままですから足に力が入ってない。そうすると下肢に血液が下がり、下がると中で押し上げて戻らない。戻らないと血餅ができて、血栓症になる。そして、現地に着いてイミグレーションのほうへ歩いていく

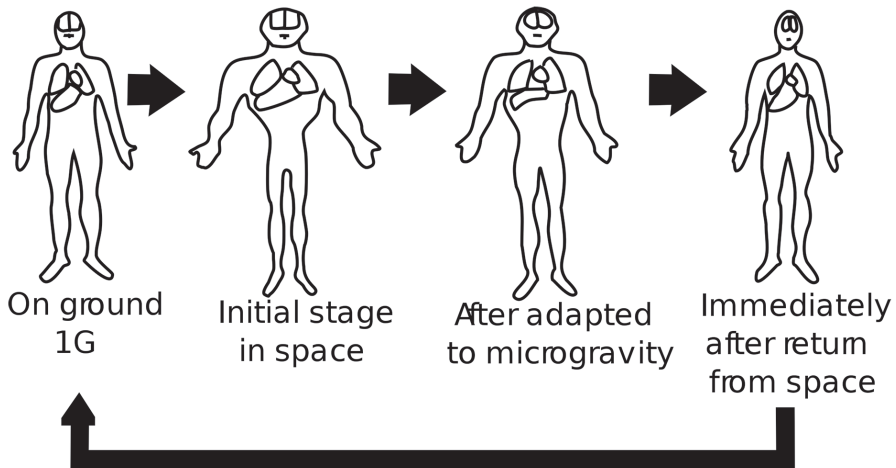


図6 「微小重力下での体液分布の変化。左から、地上1G下、宇宙空間での初期段階、微小重力への順応後、宇宙から帰還した直後」 Image displaying fluid distribution in microgravity, originally produced by NASA, redrawn by CFCF, January 24, 2014, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Space_body_fluid.svg, Accessed November 22, 2021

と、途端にそのときに足の力でもって、血栓を心臓のほうへ送り出してしまう。心臓からさらに頭のほうへ送り出してしまうと、そこでほぼ生死にかかわる血栓症を起こしてしまうということがあるわけです。それを防ぐように今は、2時間に一度ぐらいですか、足の運動というテレビのような画面が流れることが義務付けられているんですけど、あれをやらないとそういうことになりやすい。地震で、集団生活が嫌だといって自動車で生活をしたいというふうなことをやって、自動車のシートで寝ると、やはり同じようなことが起こるともいわれています。

で、この0Gのところでは血液が頭のほうにいつてしまうとどうかというと、実際には打ち上げからスペースシャトルにしる、ロシアのロケットにしる、20分から30分で宇宙飛行士は0Gに近いところに行って、あとはずっと0Gなんですけれども、そうすると、急に引っ張る力がなくなって、頭のほうへ血が上って顔がかなりパンパンに腫れ上がる。パフィー・フェイス (puffy face) とかムーン・フェイス (moon face) というふうには呼ばれるんですが、これをテレビで地上のほうへ送って家族が見ると、うちの子はどうしたのかしら、スイカのような顔をしているわと、両親や身内の肉親が心配するということがありました。最近では、それは大丈夫ですよという宣伝や教育が行き届いているので、すぐ話がしたいというんで、家族とつながりません。昔は大変心配するので、宇宙に行って二日、三日は映像を下

へ流さない、宇宙飛行士の顔は映さないというふうなことがあったようですけれど、今は大丈夫、みんなよく知っているからということにはなっているようです。このようにして1Gから無重力、0Gへいって、約1カ月から1カ月半で身体の順応（adaptation）が起こって、そして地上に帰って来ます。

カルシウムの排出

それで、こここのところの順応過程にもなかなか難しいものがあるって、頭のほうへ血が上ると、静脈の血液がたくさん頭のほうへいくので、血管が膨れ上がる。膨れ上がると、血管壁にある伸展受容器という機械的なセンサーがびゅーっと広がって、頭に血がたくさん来たよと、こんなに来ちゃ駄目だからと、中枢のほうへコマンドを送る。すると中枢が、心臓のほうに心房性ナトリウムホルモンを分泌するようにコマンドを出します。コマンドが出ると、この心房性ナトリウムホルモンは、体内の体液を体外へ排出することを促す機能を果たします。体液を体外に排出するといっても、どこか血管切って血を出すわけにはいかないので、これは排尿によって水分を出して、体内の水分を調節するということになります。そのときに非常に具合が悪いのは排尿とともに尿の中にカルシウムが混ざって排出されるということです。骨の破骨細胞、つまり古くなった骨を食っていく細胞と、それから新しい骨をつくっていく骨芽細胞とのバランスを崩してしまう。つまり重力がなくなると骨はいらないというふうに身体の自律機能が働いて、どんどんカルシウムを体外に排出することも同時に起こってしまう。尿の中にカルシウムが溶けたままどんどん排出されて、そして大体1カ月、2カ月いると、10パーセントぐらいの骨密度が下がるということも起こってしまいます。現在、宇宙飛行士は、そういうことで帰ってきたときに障害が起らないように、カルシウム剤を滞在中はたくさん飲む。そういった対症療法があるということになります。それから、1日や2日、もう1週間ぐらいいると、体液が約1リットル半、2リットルぐらいは減ってしまいます。尿で排出してしまって平衡を保つようにするんで、着陸のときには一気に2リットルぐらいのスポーツ飲料に似たようなものを飲んで下りてこないとやはり体調が悪くて、今度は立てない、力が入らない、それから場合によっては失神するということが起こります。着陸のときも苦しい、それから、滞在時も苦しい。これでもまだ君は宇

宙に行くかい？と言いたくなるというふうな感じではあるわけですね。

ヘッドアウト・ウォーター・イマージョン (head-out water immersion, HOWI)

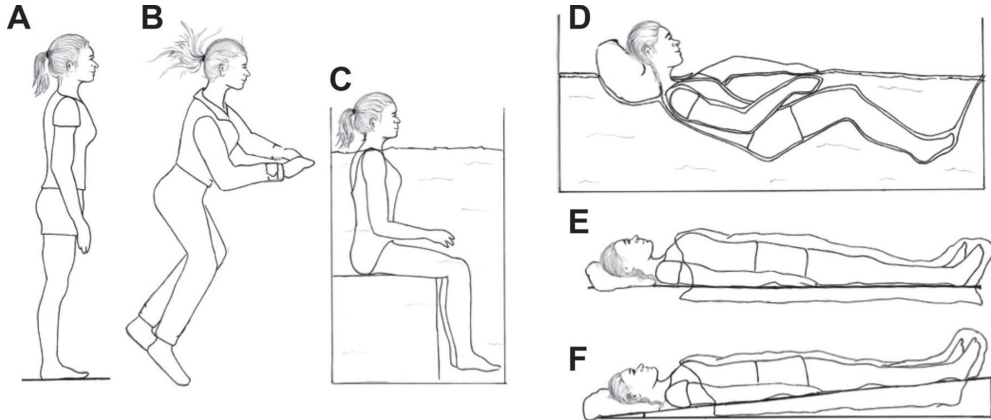


図7 「(A)：1G下での直立姿勢。(B)：微小重力下。(C)、(D)、(E)、(F)：微小重力下でのヒトの状態を地上でシミュレーションする際に使用される方法。(C)：ウォーター・イマージョン、(D)：ドライ・イマージョン、(E)：水平位ベッドレスト、(F)：ヘッドダウティルト。直立姿勢(A)や水平位ベッドレスト(E)は地上での活動時や睡眠時の一般的な姿勢であり、地上の重力と相関的であると仮定される2つの基本姿勢である。両者はヒトに対する重力の影響を研究する際に用いられる基準姿勢であり、シミュレーションないし実際の微小重力の影響との比較のための基準となる」

This figure depicts upright standing posture in 1 G (A), weightlessness in microgravity (B), and the most commonly used ground-based methods for simulating human existence in microgravity: water immersion (C), dry immersion (D), horizontal bed rest (E), and head-down tilt (F). Upright posture (A) and horizontal bed rest (E) are the two basic postures we assume relative to gravity during normal Earth-bound wakeful activity and sleep, respectively. Sitting (not shown) is a more stable and quiescent upright posture than standing, and may, therefore, be preferred in some cases. Upright and horizontal supine posture is the reference postures most commonly used to investigate acute effects of gravity on humans and to serve as a baseline control and recovery conditions for comparison to simulated and actual microgravity, Watenpaugh DE. "Analogues of microgravity: head-down tilt and water immersion." *J Appl Physiol* (1985). 2016 Apr 15;120 (8):905.

地上で行うヘッドアウト・ウォーター・イマージョン (head-out water immersion, HOWI) という方法では、首だけを出して水圧で調節する、絞り上げるというわけなんです (図7C, 8)。ちょうど名古屋大学の環境医学研究所にいるときにNHKが取材に来て実験をやることができました。この実験では水圧で体がどれくらい細くなるかということで、伸び縮みするゴムチューブの中に水銀を入れてあって、それを体の要所要所に巻いて、どれくらいの水圧で体のどの部分が細くなったかということが分かるようにしています。別のタンクでサーマル・ニュートラル (thermal

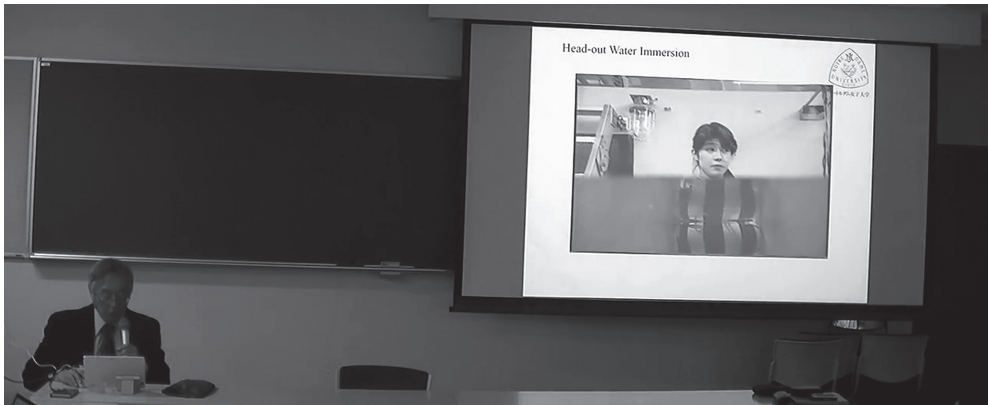


図8 「名古屋大学環境医学研究所でのヘッドアウト・ウォーター・イマージョンの実験の様子」
講演記録映像より 2017年1月21日

neutral)、中性温水を6トン程作っておいて急速に送り込むという実験をやるわけです。下のほうから一気に水が入ってきて、そして水圧を感じていくという、そういう類の実験ですね。で、体温差を測り、体のサイズを測り、そして足の膝の裏あたりから直接交感神経の働きを記録するというのもやります。このときはテレビの取材だったので、神経を記録するということは、やりませんでした。

ドライ・ヘッドアウト・ウォーター・イマージョン (dry immersion)

それから、ドライ・ヘッドアウト・ウォーター・イマージョン (dry immersion) というものがあります (図7D, 図9)。水の表面に非常にすべすべしたビロードのような防水布を置いて、その中にちょうど大根が生えているような状態で、1週間とか10日間とか入って、頭のほうに血液を送ったままの状態で行うことができる装置です。この実験を紹介するフランス人が作ったドキュメントでは、ロシアがアメリカとの政治的な競争のなかで一番乗りをしたいということで、どうしたら強い宇宙飛行士を育成できるか、あるいは事故があったときにどうしたら痛みを耐えられるか、麻薬がどれくらいの量まで使えるかといった実験を宇宙に行かずに地上で行っている最中のところ取材していました。ご覧になると大変、憂鬱になるドキュメントではあります。



図9 「ドライ・イマージョンのベッド」 Dry immersion beds at Medes in Toulouse, France, Image Credit: CNES-Rémi Benoit, 2019, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/02/Dry_immersion_beds_at_Medes, Accessed November 22, 2021

6度ヘッドダウン (6 degrees head-down tilt bed rest, HDBR)



図10 「6度ヘッドダウンティルト。ベッドレスト研究中被験者がコンピューターを使用している」 -6° head down tilt. Using a computer during the bedrest study in Toulouse (October 2001). Image Credit: ESA https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2001/11/-6_head_down_tilt#.YZoybrX4Kuw.link, Accessed November 22, 2021

それから6度のヘッドダウンですね (図7F; 10; 11)。

NHKの番組で、ちょっと古いんですけども、エイムズリサーチセンターの6度ヘッドダウンの実験をやっているところがあります。まずベッドの角度を付けます。そして、角度を付けたところで固定します。そして、そこにかかなりの高額の報酬で雇われた人が被験者としてやってくるわけですね。日本でも学生さんにアルバイトで「これは歩がいいぞ。1週間寝たままで30万円も40万円もくれるぞ」と言



図 11 「90 日間のベッドレスト研究。被験者はシャワーを浴びたり、食事をしたたり、他の参加者たちと交流したりといったすべてをベッド上でこなす」 During the 90-day bed rest study, participants do everything in bed, from showering to eating to socializing with other participants. Image Credit: NASA, <https://www.nasa.gov/audience/foreducators/lying-around.html>, Accessed November 21, 2021

って宣伝すると、すぐ来るんですけど、大体2日ぐらいでもう我慢できないといって、辞めてしまうことが多いですね。番組では大人の人を被験者にしていましたが、3人ぐらい同時にやっていました。そして1週間ぐらいだったと思いますけれど、もちろん排便、排尿、それから食事、そういったものも全て頭を下げたままでやります。やはりシャワーを浴びたいということもあるので、そばに置いてあるシャワー室のほうへ移動するんですけど、斜めになったままで、寝ながらシャワー室へ移動します。体にシャワーをかけてもらって、頭は自分で洗います。

それで、1週間これで過ごして、終わると失神してしまうこともあります。1週間で元の生活へぼんと戻ると、少なくなった血液が足のほうへ、とんと下がってしまうので、フェインティングを起こしてしまうということが番組では出てまいります。実験終了後に体を起こしてベッドに腰掛けるとかなりぼうぜん自失という感じで、ちょっといけないという感じですね。特に足をぶらんとしているのがよろしくないんでしょうね。どんどん血液が下がってくるものですから。倒れてしまうこともあります⁹。

細胞や植物の実験・パピルスと重力

もし、ヒトを使わない実験だとどういうことになるかということ、細胞であったり植物であったりを使う実験では、グラビティ・アベレージド・クライノスタット・ローテーション (gravity averaged clinostat rotation) というものがあります。満

遍なく平均的に重力をかけることによって、無重力とよく似たことになるという仮説をもとに実験をします。装置に細胞が入っているんですが、それをぐりぐりと重力に対して、360度方向、回してやる。で、それでは無重力になった影響が出ているのか、回転の影響があるかはっきりしないのではないかとということで、同時に同じ資料を水平に回してやって、両条件の差を見るという実験もよく行われております。細胞レベルの実験だとこういうことが行われるということです。

これは、ちょっと僕の勝手な想像なんですけれども。エジプトの紙を作るパピルスなんですけれども、パピルスの増え方っていうのは非常に面白くて。日本でヤブレガサなんていう名前がついているらしいんですけど、花瓶に挿しておくとそのまま後は枯れてしまいます。ですが、葉っぱの方を下むきに逆さまにして水に漬けておくと、本来は根が出る方向、つまり茎の方向へ芽が出てきて、葉が出る方向、普通ならばそちら側が芽に出るところの方向に根が出てきます。上下逆さまにしてやると、根は出てくるんだけど、本来の成長点が逆転してそういうものが出てきます。こういうことを知ってか知らずか、そうやってパピルスを増やしていくというのは民間ではおこなわれているわけですね。ナイル川の上流のほうに自生しているんですが、なよなよとした、あんまり強い植物ではないなんですけれども、動物が通ったり、人が通ったり、船が通ったりして茎がぼきんと折れて、水の中にじゃぼんと漬かると生育範囲を伸ばしていく。そういうことをこの植物が獲得したのかもしれない。こういうのが、重力のないところへ持っていかなくても何か重力に関する研究ができる一つの例ではないかなというふうな気がするんですね。

微小重力空間にヒトの身体は順応できるか

で、もう一度、人間に戻りますと、図12の横軸に、1カ月、2カ月、3カ月と取ってありまして、それぞれいろんなパラメータがどういうふうに変化していくかということなんです。まず前庭系ですね。前庭系というのは重力を直接感知する感覚器官です。知覚のレベルでは、知覚のようには何も感じない。感じなくはないんですけれども、無重力に行くと非常に速やかに問題を発症して、そして速やかに元に戻る。0Gの状態にアダプトするというのが前庭器官です。先ほど触れた体外に排出する水、電解質系は10日ぐらいで、それから心肺機能は約1カ月弱ぐらいで

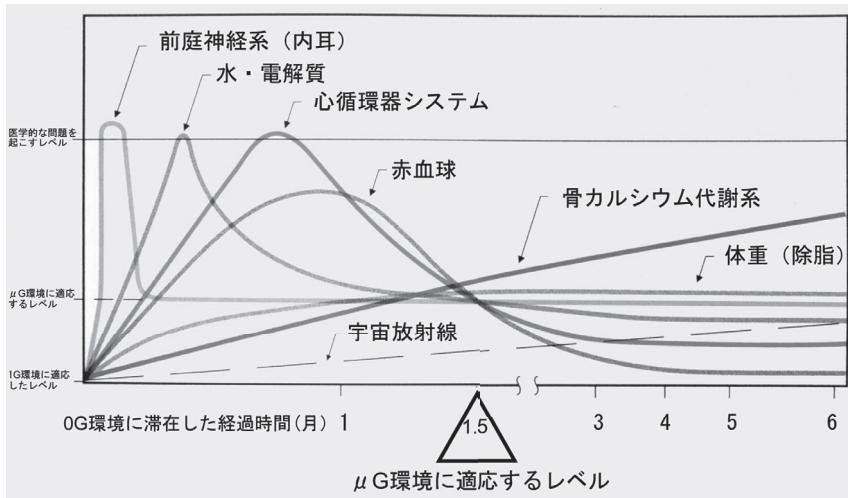


図12 「宇宙空間という微小重力環境に暴露された時の各種身体機能の変化と順応」以下にもとづき講演者が作成 Nicogossian, A. E., and James F. P. Jr. *Space physiology and medicine*. Washington, Scientific and Technical Information Branch, National Aeronautics and Space Administration; U.S. G.P.O. (NASA SP, 447) RC1150.N52, 1982

アダプトします。赤血球なんかは、もうちょっと長くかかります。そして、大体0Gに落ち着くのが1カ月半ぐらいです。1カ月半ぐらいが順応時間であるというのは、1カ月半ぐらいで微小重力環境で発症した身体の変化が以前の状態に戻ることが多くのパラメータの測定結果から分かっているということです。

ただし治まらないものが二つありまして、一つは常に体外に排出されるカルシウムの排出は止まらない。従って、長くいればいるほど、カルシウムは排出され、骨粗しょう症になってしまいます。それから、宇宙放射線には非常に強いものがある、これは自覚できるぐらい強いもので、網膜を宇宙放射線が貫くと、かなり強い光を感じます。そのときに、視細胞が破壊されるということも分かっています。これも累積されていくので、どうやって隔壁で防ぐかというふうなことは、大いに問題になっている。これは宇宙飛行士に限ったことではなくて、たとえばパイロットの場合も宇宙放射線の被曝を累積的にある一定上、何ミリシーベルトかは超えないようにということで、年間の搭乗回数が決まっています。この二つを除いて他のものは一応治まってくるというふう考えたらいいかと思います、結構、長い時間がかかるということになります。

ところで、このカルシウムが尿の中で排出されるというのは、実は地上でも大き

な問題です。特に女性が、排卵が終わって更年期を過ぎると、女性ホルモンが分泌されなくなる。そうすると、この骨粗しょう症になりやすいといいますが、男性よりも骨密度が悪くなる。たとえば、70歳ぐらいになって少し骨が弱くなっているときに、転んで骨を折ってしまう。骨を折ってしまってベッドに寝付いてしまうと、さらに輪をかけたようにカルシウムが体の外に出ていってしまって、もうその後は、なかなか日常生活に戻れないということもあるわけですね。若くても毎晩何時間か睡眠を取る。睡眠を取るときは、6度のヘッドダウンではないけれども、枕はしているからちょっと頭は上がっているけれども、直立しているときよりも血液の体内分布はマイクログラビティに近い状態になっています。そうすると、朝起きるとトイレに行く。ほとんどの人は、夕べぐっすり寝たから一度もトイレに起きてない、だから朝、トイレに行くんだと思っているけれど、実はそうではなくて6度ヘッドダウンと同じように、頭のほうに血液が注入して体液分布が変わってしまったので、朝、起きがけに排尿の意欲が非常に切迫してくるというふうなことが言えるわけですね。このことは存外、みんなあまり自覚していません。そうすると、少しずつではあるけれども、朝の一番最初のおしっこの中にはカルシウムが非常に濃く出ているということがあります。ただ、その日は起きて働けばですね、歩けば、また1日の中で元に戻ってきます。そういう往復をしながら日々を送っているんであまり気にならないんですが、1日のうちの睡眠を取る6時間、8時間というのは宇宙に行っているというふうに言えなくもないということになります。

重力と感覚

そういうことで、この重力がいかに生体にとって大きな影響を与えているかということなんですけれども、実際に重力の検出にかかわるのは、先ほど岩城先生が言われたように感覚か、知覚かと考えると、感覚器官、感覚受容器ではあるんだけど、一般的に意識にのぼってきて、何かを重力で感じるという表現はあまりないんですね¹⁰。昔ですと、出来の悪いエレベーターでびゅんと上がっていきますと、押さえつけられるような荷重を感じましたし、どすんと下がって下のほうへくると、ふわっと浮き上がるという感覚があったんですけども、今はそのところの速度の調整が非常にうまくいって、そういうことをほとんど感じないエレベーター

にはなっています。

でも、歩いているときに階段で足をすいっと滑らせたときにはドキッとするほど、ここの耳石器官が急にこの重力のマイナスを感じてしまうというふうなことは、何か危険を察知する、そういうシグナルのようなものを耳の奥のほうで感じるということはあるのではないかなと。あるいは、そういうものをもって、重力の代わりに何か足を滑らしてしまったと、そういう感覚で理解しているのではないかなという気がするわけです。あるいは、冬になると最近は軽い防寒着が多いですけど、昔は非常に重たいオーバーコートを着ていて。家に帰ってきてオーバーを脱ぐと、ほっとするというのはやはり、この肩のところに非常に重たいオーバーの重さが何キロかはかかっている。あるいは、山を登るときに背中にバックパックを背負っていると、重力がかかっているんじゃないって重たい、圧力がかかっているというふうに思っていますし、下ろすとほっとするというのは、重さが取れたってことで、負荷が取れたというふうに思っているけれど、やはりこれも重力の感覚ではないかと。それは耳ではなくって皮膚の表面にある、いわゆる体性感覚といわれている圧感覚というふうなものが、重力を感じているということはあるんじゃないかなという気はするわけですね。こういったものに負けてしまうと、恐らく生物というのは生きていけない。

重力と系統発生および個体発生

そうすると今、地球上で生きている、生存している系統発生を繰り返している生物というのは動物も植物も、いずれも重力を克服したものしか残ってないというふうに考えるのがほぼ正当であろうと。そうすると、生きているわれわれは、重力があることがごくごく普通の環境であるという、そういう中で生活をしているという理解は、非常に僕は重要なことではないかという気がします。しかし、体の中はパーツパーツによって重力を感じやすいものと感じにくいものがあります。それから、発達の段階を考えていくと、赤ちゃんは生まれてすぐに立ち上がれませんし、首も据わっていません。これは、重力なすがままの状態です。で、徐々に寝返りができてハイハイができて、すがり立ちができ、よちよち歩きができるようになる。そして二足歩行ができて走ることができるようになって、そして大人になって普通

・重力に抵抗する生体のメカニズム

メカニズムと機能		破綻
心臓のポンプアップ機能	→	心循環機能不全
直立による下肢の筋緊張	→	下肢への過度な血液貯留
骨格の形成	→	骨粗相症
抗重力筋の維持機構	→	運動機能不全

・重力を利用した発生のメカニズム

メカニズムと機能		破綻
発生初期の卵割	→	極の絶対的位置の不定
発生途上の神経系の発生	→	神経ネットワークの発育不良
重力感覚器官の形成と発達	→	形成不良 (?)

図 13 「重力を克服した生物のみが生存を継続できかつ系統発生を繰り返して今日に至っている」
講演者作成

の歩行ができるようになる。そして、徐々に年を取って行って、今度はつえがないと歩けないようになる。そのうちつえでも危なくなってしまう。赤ちゃんと同じような状態になってくると考えると、重力のファンクション、関数として人間は成長をしていく、そして老化していくというふうな理解も非常に重要ではないかなと僕は気がするわけですね。

そういうふうなことを、今、言ったことをちょっと箇条書きにしてあります (図 13)。心筋、心臓のポンプアップ機能だとか、下肢の緊張であるとか、骨の形成であるとか。それからあともう一つは、宇宙実験でよくやるんですけど、受精卵が卵割をしていくときに、ある時期、臨界期に重力がないとうまく卵割ができないということもあって、発生を繰り返す、系統発生を繰り返すことが非常に困難であるということも問題です。土星か木星に行くのに、そうなるのは孫の時代まで三代重ねれば人間だって行けるんじゃないかというふうに考える人は、いないわけでもありませんが、少なくとも重力のないところで子どもや孫に伝えていくことは、並大抵なことではないだろうと。

ただ一つ、『2001年宇宙の旅』(スタンリー・キューブリック監督 1968年)のディスカバリー号の中で使われているような人工重力という手がある。人工重力をつくってやれば、それで耐えていくことができるということはあると思うんです

ね¹¹。でも、それって実は、無重力に行きたいなっていう子どもには、人工重力の中に行くんだよ、それでもまだ行く？と言ったほうがいいんじゃないか。地球のほうがいいんじゃないかと言わざるを得ないというところはあるようですね。あまり皮肉を言うと、「もう、おまえ、重力のことはしゃべらなくていい」って言われるものですから、こういうところでちょこちょこと言っているだけなんですけれども。

(続く)

引用文献

- 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』 プレーン出版.
- 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 2021 年 11 月 30 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.
- 古賀一男. 2021a. “West met east at west,” 『Vision』 Vol. 33, No. 1: 12-20.
https://doi.org/10.24636/vision.33.1_12 最終アクセス日 2022 年 1 月 9 日
- 古賀一男. 2021b. “West met east at west,” 『Vision』 Vol. 33, No. 2: 83-93.
https://doi.org/10.24636/vision.33.2_83 最終アクセス日 2022 年 1 月 9 日
- 岩城覚久. 2017. クリス・サルター講演「感覚人類学・テクノロジー・メディアアート」 『混沌』 (14) 近畿大学総合文化研究学科: 142-115.
- Iwaki, Akihisa. 2017. “Bodily Experience and Life in A Microgravity Environment: Thinking with Space Art,” *Proceedings of ICA 2016 “Aesthetics and Mass Culture,”* 556-561.
- Iwaki, Akihisa. 2019. Toward an Aesthetics of Inter-space: From Microgravity Environment to Multi-gravity Environment, *Art Style: Art & Culture International Magazine*, Volume4: 89-109.
- 前川修他編. 2020. 『アウトースペース／インナースペース／インタースペース・アートの美

学 2017-2019 年度科学研究費報告書』 [https://www.dropbox.com/s/h4j3y2lc2x8v3f7/](https://www.dropbox.com/s/h4j3y2lc2x8v3f7/ReportofInterSpaceAesthetics.pdf?dl=0)

ReportofInterSpaceAesthetics.pdf?dl=0 最終アクセス日 2021 年 11 月 30 日

立花隆. 2007. 『宇宙を語る I——宇宙飛行士との対話』中央公論新社.

¹ 2014 年度から 2016 年度にかけて、主に美学 = 感性学、視覚文化学、映像メディア論などを専門領域とするメンバーで構成されたこの研究プロジェクトでは、「メディアアート」「ニューロアート」「バイオアート」「スペースアート」といった一連のアートに焦点を合わせ、そうした諸実践にかかわるゲストとの討論を通じて、「コンピュータテクノロジー」「脳工学」「生物工学」「宇宙工学」といったテクノロジーが生み出す技術的環境のなかで、わたしたちの身体や感性が被る変容（と不変容）を具体的に考え、かつそれを歴史的に相対化することを意図した一連の公開研究会を開催してきた。全 4 回にわたる公開研究会のプログラムの概要およびメディア・アーティストであるクリス・サルター氏を招聘して開催した第 3 回公開研究会の講演内容は以下にまとめた。岩城 2017。

² その後 2017 年度から 2019 年度にかけては、古賀先生にも参加いただき、科学研究費補助金基盤研究 (B)「アウトースペース／インナースペース／インタースペース・アートの美学」(研究代表者：前川修、研究課題／領域番号：17H02286)で共同研究をおこなう機会にも恵まれ (cf. 前川他編 2020)、報告者自身もいくつかの宇宙、感性、アートにかかわる論考を発表する機会があった (Iwaki 2017; 2019)。

³ 手探りのなかではあるが、実際にそのような授業も試みている。

⁴ 有人宇宙飛行に関する基礎研究をおこなう意義については以下を参照のこと。古賀 2014。

⁵ 最近執筆された古賀先生自身による報告として、以下も参照のこと。古賀 2021a; 古賀 2021b。

⁶ 以下、講演内容に加えた注記および脚注はすべて岩城による。また、講演当時のまともではいかないまでも非専門家にも理解しやすいものになるように、特に断りのない場合は、報告者が図を事後的に挿入している。講演の採録を認めていただき、講演内容ならびに挿入された図を確認いただき、さらにいくつかの図を提供いただいた古賀一男先生にはこの場を借りてお礼を申し上げます。

⁷ 以下を参照のこと。古賀 2014。

- ⁸ ダイヤモンドエアサービス（株）の航空実験の概要については以下に記載がある <https://www.jsforum.or.jp/technic/su/www4/public/koubo/microgravity/contents/c07/> 最終アクセス日 2021 年 11 月 21 日
- ⁹ 比較的最近のものとして、たとえば 2019 年に行われた 60 日間の 6 度ヘッドダウン実験の報告と写真が参考になる。人工重力をかけるグループとの比較研究も行われている。“One Small Step … Without Ever Leaving Bed,” NASA, <https://www.nasa.gov/feature/one-small-step-without-ever-leaving-bed>, Accessed November 21, 2021
- ¹⁰ 「重力センサーとしての感覚器官」に関するより詳細な解説として以下を参照のこと。古賀 2013.
- ¹¹ 人工重力（多重力）がわれわれの感性や文化にどのような影響を与えるかということも興味深い問題である。Cf. Iwaki 2019.