

## 巧みに動きを制御すること

日本福祉大学スポーツ科学部助教 山本 真史

**秋山** 皆さん、こんにちは。今日は、山本真史先生をお招きして、スポーツ心理というか、体を動かすということが、私たちの空間の把握の仕方、もしくはそれに基づく運動ということとといったどうつながっていくかということをお話していただけるということです。実は、そういう分野を当校の心理学部の中で研究している者がいないので、そういう意味では最新の話を聞けると思い、大変楽しみにしています。

ちょうど先生の書いたものが、心理学ワールドを見て、すごく面白いと興味を持っています。今日、ぜひこれからの講演を楽しみにしています。皆さん、どうぞよろしくお願いします。

**中村** 早速、講演に移ります。山本先生、よろしくお願いします。

**山本** 皆さん、こんにちは。愛知県にある日本福祉大学から来た山本です。今日は、このような機会をいただきまして、中村珍晴先生はじめご関係の先生方、あらためて感謝申し上げます。

実は、私は神戸学院大学とはつながりがあります。私の父が栄養学部で奉職していました。もう定年退職をしていますが、山本順一郎というのが私の父です。今日も先ほどここまで送ってもらいました。小さい頃によく来ていたし、学園祭などによく遊びに来ていました。今日、来たときに、いろいろと大変懐かしく思っていました。

### 地上で体操する、宇宙で体操する

今日のテーマとして、私は運動の制御の研究をしているので、その内容について話します。今から二つの映像を流します。一つは左側（地上で体操する）の映像で、もう一つが右側（宇宙で体操する）の映像です。皆さんは、特に若い3人は、ラジオ体操はご存じですか。まだされているということでもいいですか。小さい頃、夏休みに朝早く行って、ラジオから流れる音に合わせて体操し、スタンプをためるということをやっていたかもしれません。今もあるということ話をします。

今からラジオ体操の映像を流します。一つが地上でラジオ体操をした場合、もう一つが宇宙で体操をした場合、この二つの映像を流します。まず、左側の地上でラジオ体操をする場合の映像です。

(映像開始)

**多胡** 多胡肇です。良い姿勢をお取りください。ラジオ体操第1。腕を前から上に、伸び伸びと背伸びの運動から。はい、1, 2, 3, 4, 5, 6, 腕と足の運動。

**山本** これは、皆さん、見慣れている映像です。

**多胡** 腕を横に振りながら、立っている方は、元氣よく足を曲げて伸ばしましょう。

**山本** この2人の女性は、非常に円滑に、皆さんがご承知のと通りの体操をしています。

**多胡** 1, 2, 3, 4, 5, 6, 腕を回します。

(映像終了)

**山本** これは地上で行った場合ですが、では、宇宙で同じようなものを行った場合はどうなるかです。この人は宇宙飛行士の若田光一さんです。

(映像開始)

—— ラジオ体操第1。腕を前から上に上げて、大きく背伸びの運動。はい、1, 2, 3, 4, 5, 6, 手足の運動。

**山本** いかがですか。回転してしまいます。

—— 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8。

**山本** 足の動きもうまくいっていません。

—— 1, 2, 3, 4, 5, 6, 腕を回します。

(映像終了)

**山本** 屈伸ができないのは当たり前です。要は、地面からの反力をもらっていないから難しいのです。これを見ると、違いが明らかに分かります。この地上でやった場合と宇宙でやった場合、果たして何が違うかというと、何が違いますか。どういう条件が違うのでしょうか。地球にあって宇宙にないものです。

—— 重力。

**山本** そうです。重力ですね。要は、左側は地上です。地上で体操する場合は重力があります。ところが、宇宙で行う場合は、これは重力がありません。無

重力に暴露された中で体操をしています。

当たり前ですが、よくよく考えると、地上で運動するということは、私たちが重力に適応した結果を示しています。重力は私たちの体を下に引っ張ります。その力に私たちが適応しているが故に、地上では左側のような滑らかな体操を行うことができますが、宇宙に行くと体を下に引っ張る重力の存在がないので、体操が途端に非常に難しくなります。

逆に言うと、無重力の環境に暴露されていて、その中で適応していくと、無重力の中でのラジオ体操というものが新しく作られていく。地上でできないようなラジオ体操が宇宙でできるということもあり得ます。

### どのような情報を利用していた？

今、ラジオ体操を地上あるいは宇宙でやっていましたが、地上でラジオ体操をしていた人たちは、いったいどういう重力の情報を使っていたのかという話をします。ラジオ体操をするときに、重力に関わるどういう情報を使っていたかという話です。

### 視 覚

まずは視覚です。視覚の話は、心理学の授業の中でいろいろ習っていると思います。これはラジオ体操をしている画像です。この絵の中から、重力に関わる情報を何か見つけることができますか。

重力は、簡単に言うと、真っすぐな方向です。それをどう判断するかというと、水平面、この線です。重力は水平面に対して直交するので、水平面が分かると、重力の方向を認識する、検知することが可能になります。

また、この人たちは、恐らく、スタジオのほうを見えています。スタジオは部屋なので柱があります。その柱を見ていると、縦に線が入っています。それは、まさに重力軸と一致する方向です。つまり、床のレーン、あるいは縦に走っている柱の方向を目で見て重力方向を検出することができます。

私たちの体は面白いです。例えば、暗室で、体が傾いた状態で垂直方向を視覚的に示してもらって心理実験が古くからあります。サブジェクティブ・ヴィジュアル・ヴァーティカル課題です。そのときに、傾かせた角度によって、行き過ぎたり、あるいは垂直軸に届かなかったりしますが、物理的な垂直軸にぴったり合わせるのは非常に難しいと言われています。

どうやって合わせられるかということ、やはり周辺の視覚情報があれば簡単に合わせることができます。つまり、周辺の視覚情報を基にして重力方向を検出するのは、私たちが非常にやりやすい重力方向の検出の仕方と言えます。

### 前 庭

視覚情報以外に、重力に関わるどういう情報を利用しているかというので、次は、前庭の情報です。前庭はこういう器官です。この真ん中の所に耳石器があります。輪が三つのこれは「三半規管」と呼ばれるものです。これらを総称して「前庭」と言います。これはカタツムリのような形をしていて、「蝸牛（かぎゅう）」と言います。これは聴覚に関わります。

前庭の中の中央、付け根のような所が「耳石」と呼ばれるものです。耳石を取り上げてみたのがこの絵です。細かい解剖学的なものを示しています。耳石とは何かというと、炭酸カルシウムの石です。その石がゼラチンのような膜の上に載っている形状をしています。このゼラチンの中に、「有毛細胞」と呼ばれる細胞が埋まっている状況です。耳石は、直線の加速度を検出することができます。例えば、私たちが真っすぐ動くときも加速します。そういう直線の加速度、あるいは、下に引っ張っている重力の加速度を検出することができます。

例えば、前に動いたとすると、耳石は慣性によってその場にとどまろうとする性質があります。けれども、ゼラチンは逆に引っ張られるかたちになって、有毛細胞が動きます。

要は、慣性によって耳石は残ろうとします。その下のゼラチンが動いてしまって有毛細胞が引っ張られると、活動電位が発生して、前庭神経核から脳の中核に情報が流れていくという働きをしています。

重力加速度を検出する場合は、安静にしていれば常に入り続けるかたちになるので、頭の向きなどを変えると、重力加速度の検出の仕方が若干変わってきます。もう少し分かりやすくするために、映像を用意してあります。見てください。イメージしやすいです。音はありません。

これは耳です。耳の奥に「内耳」と呼ばれる所があります。内耳に前庭器官があります。これは蝸牛です。これは音に関わるものです。ここが耳石と呼ばれるものです。この耳石をピックアップしたものが、さっき絵で示したものです。これはゼラチンになっていて、これは耳石です。これが動くと、耳石は慣性によって残ろうとする性質があって、ゼラチンが動いてそのゼラチンの中にある有毛細胞が引っ張られて動き、引っ張られると活動電位が出てきます。

耳石器は、そういうかたちで重力加速度を検出することが解剖学的に分かっています。重力加速度を検出する前庭によって、無意識的ですが重力方向を検出することができます。

## 体性感覚

今、視覚と前庭の話をしましたが、ほかに重力にかかわるどういう情報があるかという、体性感覚と呼ばれる筋肉の感覚、足の裏にかかる圧の感覚が挙げられます。

これは筋肉の絵です。脊髄があります。実は、筋肉にはセンサーがあります。これは、筋肉が伸びると反応する伸張センサーです。これは筋紡錘と呼ばれるものです。重力が下に引っ張る、重力の力によって私たちの体が動くと、それによって筋肉が伸びます。そうすると、伸びているということを感じ取る筋紡錘のセンサーが中枢に情報を伝えます。

足裏の感覚です。椅子に座っていると、お尻の所に圧の感覚があると思います。ずっと座っていると感覚がだんだん馴化していくので、慣れてきて感覚を感じなくなりますが、基本的にお尻に圧を感じます。立ったときは足の裏に圧を感じます。どちらか片方に体を傾けると、その足にかかっている圧をより感じやすくなります。そういう圧の情報も、私たちが重力を感じ、検出する一つの情報です。感覚モダリティーの一つだと言えます。このように、筋の伸張具合、あるいは触覚、触圧覚も、重力を検出する一つの情報です。重要な感覚モダリティーです。

まとめます。私たちは重力に関わるどういう情報を利用しているかという、床面や柱などの視覚の情報、重力加速度を検知する前庭の情報、筋の伸び具合、触圧覚などの体性感覚の情報を利用して重力の方向を検出しています。

## 感覚情報から運動計画・制御へ

私たちは、視覚、前庭、体性感覚の情報を脳で統合し、重力の空間認知をして、運動に移していきます。運動を計画して、運動を制御していきます。ラジオ体操も、もちろん、こういった感覚情報を脳で統合して、体操という運動を行っています。

## 運動の仕組み

今日は運動制御の話がメインになるので、運動についてもう少し詳しく見てきます。運動の仕組みについてよく間違えられるのは、筋肉はどう骨についているかという話をしたときに、なかなか答えられません。どういうことかという、骨があって、「筋肉ってどうやってついてますか」と聞くと、学生は、「1本の骨の両端に筋肉がついてます」という回答をよくしますが、それだと、極端な話、骨が折れてしまいます。

そうではなくて、骨が2本あって、関節をまたぐかたちで筋肉はついています。そして、筋肉が収縮

をすると、こういう回転運動が起こります。これが運動の仕組みです。この図はその様子を表しています。筋肉は、伸びる場合、伸びながら収縮する場合ももちろんありますが、基本的には短くなる性質があります。筋肉は、骨と骨の間の関節をまたぐかたちでついています。この筋肉が短くなると、腱を介して骨を引っ張ることで回転運動が起きます。これは基本的な話です。これは非常に単純な例です。

## 複雑な身体の構造

皆さんの体は、こんな単純な話だけではなかなか難しいです。それは、皆さんの体は大変複雑だからです。ちなみに、全身の骨の数、筋肉の数は大体どれぐらいか知っていますか。骨の数は大体どれぐらいだと思いませんか。

―― 500 個。

山本 500 個。

―― 1000 個。

山本 1000 個。どうですか。

―― 200 個です。

山本 200 個。

―― 800 個。

山本 800 個。正解は 200 個です。こういう聞き方をすると大体多く答えますが、大体 200 個です。筋肉の数は大体 400 個です。これだけの筋肉があるということです。これだけの筋肉を制御するのはとても大変なことです。

## 運動の仕組み

もう少し脳の話をして。この図は、「皮質脊髄路」と呼ばれる大脳皮質から脊髄を経由して筋肉に運動指令が行くという経路を示しています。大脳皮質の皮質と脊髄の経路という意味で、「皮質脊髄路」と言います。

この一番上の脳の図は、脳の一次運動野の断面を示しています。前額面上で脳をスライスして示したものがこの様子です。この一次運動野は大体この辺りにあって、ここから運動の命令が筋肉に伝わっていきます。途中、延髄・脊髄接合部、錐体という所で交差します。左と右が入れ替わって、そのまま脊髄に下りてきて、別のニューロン、運動神経・運動ニューロンにスイッチをして筋肉に命令が届く流れになっています。一次運動野と呼ばれる所から、こういうかたちで命令が流れると、命令は筋肉に届きます。そして筋肉が収縮をします。皆さんはこうやって運動しています。

この大脳皮質の一次運動野も少し取り上げます。一次運動野は、どこの筋肉を制御するか、支配するかがおよそ決まっています。例えば、この絵は大脳皮質の一次運動野のこの辺りを抜き出したものです。

内側を見ると、ここが下肢で、体幹があって、手があって、顔があるという構造をしています。これをもう少し立体にしたのがこの人形です。「ホムンクルス」と呼ばれるものです。運動野、感覚野両方にあります。

これはどこに特徴があるかという、やはり手が大きい、顔が大きいところです。大きいということは、それらの部位をそれだけ繊細に制御することが可能だということです。

これは、運動の巧みさと、皮質脊髄路の数、ファイバーの数の関係性を示したレビューの論文です。齧歯類（げっしるい）、サル、ヒト、それぞれの器用さを指数で出してみると、齧歯類に比べてサルのほうが器用で、サルよりもさらにヒトが器用です。これは、プリシジョングリップ、つまむ動きの様子を表していますが、ヒトは特に器用です。

どうして器用かというのを見てみると、脊髄の点の大きさを見ると、ヒトほど大きくなっているのが分かります。これは、皮質から脊髄に向かう 1 経路あたりの線維数を表しています。それがその下に数字が書かれていますが、ヒトが一番多くなっています。右に行くほど多くなっています。この数が多いほど神経の数が多いということは、それだけ制御しやすいことになるので、細かな制御が可能になるということを、この図は示しています。

プリントに戻ります。「運動の仕組み」は、先ほど示した図です。先ほどは脳の話をしていましたが、次はもう少し末梢の話をしていきます。これは末梢の様子を示しています。脊髄があって筋肉があります。筋肉は線維からなっています。一本一本の線維が集まってできたものが筋肉です。この筋肉の線維のことを「筋線維」と言います。

脊髄から、運動神経、「運動ニューロン」と呼ばれるものが、この筋肉の線維のほうに向かっていきます。運動ニューロン 1 本あたりがいろいろな筋線維にくっついていきます。1 本の運動ニューロンと、それがくっついていく線維を足して運動単位と呼びます。この運動単位の数が多いほど、細かな制御ができることが分かっています。それだけ組み合わせが自由になるので、運動単位が少ないほど細かな運動制御ができます。

## 筋シナジー

全身の筋肉の数は 400 個ぐらいあります。さらにそれらの筋肉の中は、ものすごい数の筋線維があります。こう考えると、一個一個の筋肉、一本一本の筋線維に一個一個運動指令の情報を送っていたら、情報が爆発してしまいます。とても処理しきれない情報量になってしまいます。

そこで、今、いろいろな研究者が研究を進めている概念として、「筋シナジー」と呼ばれるものがあります。古くは、(ニコライ・アレクサンドロヴィチ・)

ベルンシュタインというロシアの科学者が言っていますが、最近、いろいろと非常に盛んに研究されています。

筋シナジーは、「共変動する複数の筋の組み合わせ」と定義されます。例を使ってもう少し説明します。私たちは、歩いたり、腕を曲げ伸ばししたりするという運動は、いろいろな関節が絡んできます。つまり、多関節運動になります。歩くときは、腰、膝、足首の関節が使われます。その多関節運動は、各関節運動に分解することができます。つまり、腰の関節の運動と、膝の関節の運動と、足の関節の運動を組み合わせると多関節運動になっています。

それぞれの関節運動をつくる筋肉もまたいっぱいあります。その一個一個に情報を送るのは大変です。脳としてそんなことはなかなかできないので、同じような働きをする筋肉にまとめて命令を出します。それが「シナジー」と呼ばれるものです。

例えば、脳から指令が送られます。例ではシナジーを四つ挙げていますが、脳からシナジーに命令が来ると、シナジーはそのシナジーを作っている筋肉に一齐に命令を出します。例えば、筋肉一個一個に命令を出そうとすると九つの運動指令が必要ですが、こうすると四つで済みます。つまり、情報量としては少なくなります。筋肉に命令を送らないといけません、その量は減らすことができます。こういう筋シナジーというものが、皆さんの体にあると言われていて、その研究が盛んに行われています。筋シナジーの話はここまでです。

これは、筋肉の解剖学的な様子を表しています。筋肉は基本的に短くなります。筋肉が短くなると、腱を介してくっついていく骨を引っ張ります。そうすることで回転運動が起きます。

## エネルギー

これは物理的な話というか、バイオメカニカルな話ですが、もう少し生理学的な話をします。筋肉を収縮させるためにはエネルギーが必要です。エネルギーはどう作られるかという、ATP（アデノシン三リン酸）が、ADP（アデノシン二リン酸）とリン酸に分解されるときにエネルギーが出ます。私たちは、このときに出てくるエネルギーを使って筋肉を収縮させています。

この分解された ATP は、何度も何度も再合成されてもう一度作られますが、作るたびに、グルコース、糖、時に脂肪を使ったりして、エネルギー源が必要になります。そうしたエネルギーないしはエネルギー源がなくなってしまうたら、当たり前ですが、筋肉が収縮できなくなるので運動できなくなります。

そう考えると、これは今日のこの発表内容の最も重要なところですが、筋力以外の動力源をできるだけ使おうとします。筋肉は、使うためにはエネルギー

が必要です。でも、エネルギーは有限です。その有限なエネルギーをできるだけ使わずに目的を達成したほうが、当たり前ですが、長い時間運動することができます。なので、できるだけ筋力以外の動力源を活用できないか。実際、ヒトはそういうことをしています。その筋力以外の動力源として私が着目しているのが重力です。ここで、ようやく最初のラジオ体操の話につながります。

## 筋力以外の動力源 重力 (mg)

重力は「mg」で定義されます。「m」は質量、「g」は重力加速度で、9.8メートル毎秒毎秒です。重力はこの掛け合わせで表現されます。でも、地球にいる限りは、この重力から免れることは、基本的にはできません。水の中に入ると、浮力が働いたりして陸地にいるときとは重力のかかり方が違ったりしますが、地上にいる限りは、基本的に重力の法則を受けます。

この重力が具体的にどういう作用をもたらすかというと、重力トルクを作ります。今、ここに上腕と前腕と手を示しています。肘を曲げたときに、重力は前腕を下に引っ張ります。「トルク」は回転力で、重力によって引き起こされる回転力ということで、「重力トルク」と言います。

重力トルクは、作用点に働く重力と、回転の軸から作用点までの長さのモーメントアームを掛け合わせたものです。ちなみに、前腕がこのようにあるとき、前腕にかかる重力トルクは幾らでしょうか。ゼロです。なぜかという、モーメントアームがゼロだからです。

こうすると、回転軸が肘の所に来ます。力と回転軸が一致している、作用点と回転軸が一致しています。そうするとトルクは働きません。この垂直に立っている所から水平に近付けば近付くほど、重力トルクの値は大きくなってきます。これは簡単な物理の力学の話です。こういう重力トルクとして私たちの体に作用しています。

## 乳幼児期と重力への適応

私たちは、いつから重力に暴露されているかというと、小さい頃からです。おなかの中にいるときは浮力が働きますが、おなかから出てくると、途端に重力にさらされることになります。私たちは、おなかから出てきた時点で重力にさらされますが、その重力にだんだん適応してきます。

これは、月齢0カ月から16カ月までの乳幼児の動きのパターンの変遷を示したものです。最初はうつぶせになっていて、頭を上げられる状態です。そこからまた成長して、次はうつぶせで胸を上げられて、腕で支持することができるようになります。そして、

寝返りをすることができて、支えなしで座ることができて、はいはいすることができて、支え立ちをすることができて、自分でつかまって立つことができて、伝い歩きができて、一人で立てるようになって、一人で歩けるようになるという発達をしてきます。

これは、逆に言うと、重力に適応してきたということが言えます。要は、重力がどう体に働くのかを理解し、認識しながらこういう動きがだんだんできます。私の子どもは、今、1歳9カ月ですが、大体こういう変遷で成長してきたような気がします。重力のかかり方は、もちろん、認識には上っていないので無意識だと思いますが、体に対する重力のかかり方を、小さい頃から覚えてきます。

私たちは重力に適応していますが、重力が大きく関わってくるのを認識するような状況はどういう状況かというと、例えば、野球のキャッチングの状況です。この左側は野球の外野手がボールをキャッチする様子を示しています。上から落ちてくるものをキャッチする機会があったと思いますが、大体、キャッチングすることができていると思います。それは、ボールが9.8メートル毎秒毎秒で加速的に落ちてくることを脳が認識しているからに相違ありません。

初速度が幾らにせよ、ボールがこう落ちてくると、あとどれぐらいのタイミングでここの位置に来るかを脳の中で予測して、適切なタイミングで筋肉を収縮させてボールを挟んでキャッチすることができます。それは、脳の中に内部モデルがあるという話がよくされます。重力がどう体に作用して、どうボールを落とすかという内部モデルが脳の中に存在すると言われています。

## 無重力に暴露されると？

こちらは、宇宙のスペースシャトルの中の様子を示しています。宇宙飛行士が、ここの筒から落ちてくるボールをキャッチするという課題をするときの様子を示しています。宇宙に行くと、9.8メートル毎秒毎秒の重力はありません。つまり、この9.8メートル毎秒毎秒より遅く、初速度に依存するかたちで落ちてきます。ボールが出てきたその速度で落ちてくるので、加速がなかなかされないような状況です。こういう状況でボールをキャッチするときはどうなるかという話をします。

こちらは、上腕二頭筋の筋の活動の様子を示したものです。黒色の線(地上)を見ると、「0」の所に「衝突」と書いてありますが、ここがキャッチングの適切なタイミングです。黒色のときは地上でキャッチングするときですが、100ミリ秒前ぐらいで筋活動のピークを迎えて下がっていく波形をしています。

0G、つまり無重力の環境に行くと、地球と同じように落ちてきません。遅く落ちてきます。そうする

と、筋肉の活動のピークが早くに表れてしまいます。そして、なかなか落ちません。要は、地球と同じように早く落ちてくると思っていますが落ちてこないで、筋肉の活動だけ早く出てしまいます。手を早く伸ばして待っている状況になってしまいます。

こちらは、「ボールの初速度 (m/s)」, ここから落ちてくる時の速度を表しています。「0.7」, 「1.7」, 「2.7」と、三つの段階で、右に行くほどボールが速く、左は遅く落ちてくるという状況を示しています。これを見ると、縦軸は「0G-1G タイミング差 (s)」で、地上でやったときとのタイミングの差を表しています。

これを見ると、「0.7」の初速度で遅く落ちてくる、つまり、地球でキャッチングするときよりも遅く落ちてくる場合は、地球でキャッチするときよりも遅くなります。でも、落ちてくる速度が速くなればなるほど、地球でやっているときと変わらなくなってきます。当たり前ですが、早く落ちてくるからキャッチングしやすいです。遅く落ちてくるとキャッチしにくいことを表しています。

こちらは、前腕を回転させる様子を表しています。黒色は地上で行ったときの回転の波形を示しています。「0」の所が適切なボールキャッチのタイミングです。黒色をたどっていくと、ちょうど「0」に来るタイミングに合わせるように波形が上がってきます。適切に回転させてキャッチをしています。

無重力に行くと、やはり適切なタイミングよりも前に、早くに回転させてしまいます。なかなか落ちてきません。自分が知っているボールの落ち方よりも遅いですが、体が先に動いてしまいます。そういう状況が生まれてしまいます。

ただ、これをよく見ると、色の違いがあります。赤色（飛行3日目）と緑色（飛行9日目）と青色（飛行15日目）は、このスペースシャトルの中でどれだけ過ごしたかを表しています。スペースシャトルの中で同じような課題をすればするほど、回転の量は減ってくるのが分かります。無駄に回転させなくなってくる様子を示しています。飛行15日目ぐらいになると、3日目に比べるとあまり回転させない、つまり、このデータは、無重力に徐々に適応していつていることを示しています。

## 重力下での運動制御（ポインティング運動）

私は、運動のほうに注目しています。重力が運動の制御とどう関わってくるかという研究を進めています。重力と運動の制御の話をするときによく使われるのはポインティングの課題です。上にあるターゲットと下にあるターゲットに向かって指、腕を上げたり下げたりする、非常に単純なポインティングの課題を使います。

実験心理学でも、リーチングやポインティングの

実験がよくあります。ジャンヌローのプリシェイピングの話とか、いろいろありますが、それに近い、ターゲットに向かって指をさす運動をします。このターゲットに向かって腕を動かすときの運動の様子を調べるときに、どういうシステムを使うかという話を簡単にします。

## 重力下での運動制御（ポインティング運動） 動作測定システム

動きの様子、動きをどう測定するかというと、「動作測定システム（モーション・キャプチャー・システム）」と呼ばれる装置を使用します。これは一つの例のカメラです。昔は、その後ろで録画しているような普通のカメラを使っていたのですが、今は赤外線カメラをよく使います。赤外線カメラは、中央にレンズがあって、その周りに赤外線を発光するLEDがついています。赤外線を発光するLEDから赤外光が発光されます。赤外線を反射するマーカーにその赤外光が当たると、それが跳ね返ってレンズの中に納まります。アニメーションをかけますので見てください。

レンズの周りのLEDがあります。そこから赤外線が発光されます。それが反射マーカーに当たると、反射マーカーからレンズのほうに向かってその情報が返ってくるシステムです。今は赤色で示しましたが、実際は、波長上、目に見えない光なので見えません。カメラを空間のいろいろな所につけて、この反射マーカーがどこにあるかを座標上で算出するシステムが、モーション・キャプチャー・システムと呼ばれるシステムです。

この例でいくと、例えば、この赤色の三つの軸の交わっている所が原点、この原点に対してこの反射マーカーがどこにあるのかを、座標値の「x」, 「y」, 「z」で表すシステムです。

## 重力下での運動制御（ポインティング運動） キネマティクス分析

運動の分析には、大きく分けると二つの方法があります。一つが「キネマティクス分析」と呼ばれる方法です。このキネマティクス分析は、運動の状態を表す、状態を評価する分析です。

こういったパラメーターが出てくるかというと、腕の動く速度、加速度、角速度、角加速度といったもので、「角」というのは、回転を表します。また、こういった運動の状態が、どうやって引き起こされているのか、その運動の状態の原因を分析する分析が、「キネマティクス分析」です。こういったパラメーターを算出するかというと、力、トルクなどを出して、力やトルクが、速度、加速度といったキネマティクスを生み出しているかという分析をします。運動

の分析を大きく分けると、キネマティクス分析とキネティクス分析に分けられます。

### 重力下での運動制御（ポインティング運動） 上下方向で速度曲線の非対称性

キネマティクス分析やキネティクス分析を使って、重力と運動制御の関係を調べるときに使われるポインティング運動を分析するとどうなるかという話に入ります。

こちらは、上下方向にポインティングする場合と左右方向にポインティングする場合の課題の様子を示しています。下に波形が載っていますが、この波形は、指先ないし上肢が動く速度の曲線を表しています。左側の波形の実線は、手を上に上げたときの速度の波形です。破線は、手を下に下したときの速度の曲線を示しています。これを見ると、ピークがずれているのが分かります。上下方向に腕を動かすときは、波形のピークがずれることが分かっています。

上に動かす、ないし下に動かすときは、腕が水平にあるときに重力トルクが一番かかりますが、重力トルクは上に行くほど小さくなって、真上に行くとゼロになります。逆に、真横から下に行くとき小さくなって、真下に行くと重力トルクはゼロになります。つまり、腕を上ないし下に動かすときは、重力トルクが変化する運動と言えます。

逆に、左右に腕を動かす場合は、波形が重なります。左に腕を動かそうが、右に動かそうが、波形が重なります。左右に動かす場合は、重力のかかり方は不変です。こういう場合は、波形が重なり、いわゆるベルシェイプの波形になります。しかし、上下に動かすと、波形がずれることが分かっている、上下方向間で速度曲線が非対称になることが確認されています。これは、いろいろな研究で確認されています。リーチングの研究だと、水平面でやることが多いのですが、水平面の場合は、確かにベルシェイプになります。しかし、ヴァーティカルにすると、波形がずれて変わってくるのが分かっています。

こちらは、上下方向の速度曲線の様子を表しています。「①」と書かれている所、「②」と書かれている所がありますが、実線にせよ破線にせよ、速度曲線の運動開始からピークまでが「①」です。ピークから運動終了までが「②」です。速度曲線の運動開始からピークまでの「①」は、腕が加速されているフェーズを表します。逆に、ピークから運動終了までは、腕が減速されているフェーズを表します。当たり前ですが、腕を動かすと、最後は止まらなければいけないので、どこから減速をします。左の図は、最初は加速をして、だんだんピークを迎えて、徐々に減速をする様子を示しています。

実線が上方向の運動を示し、破線が下方向の運動

を示していますが、上方向への運動は、相対的に「②」の時間が長くなります。重力は、私たちの体を下に引っ張ります。つまり、上に上げて、いずれは減速して止まらなければいけないわけですが、その減速するフェーズを長くしているということは、重力が引っ張ってくれるフェーズをできるだけ長くすることです。つまり、重力による減速の作用を生かし得る減速の「②」を長くする戦略を採っている」と解釈されています。

逆に、下方向への運動は、「①」が長くなります。これは、重力が腕を下に引っ張ってくれる加速のフェーズを長くする戦略を採っていると言われています。つまり、筋肉はエネルギーを使うので、できるだけ筋肉を使わないように運動の目的を達成するために、重力の作用を生かしていると言われています。

### 重力下での運動制御（ポインティング運動） キネティクス分析

次に、運動の状態がどうつくられるかというキネティクス分析を紹介します。キネティクスの分析は、トルクを出すということですが、トルクには幾つか種類があります。筋肉が収縮することで生まれる回転力の筋トルクや、重力の力によって生み出される重力トルクなどがあります。別のトルクもありますが、ここでは筋トルクと重力トルクを取り上げます。

下の図が、その様子を表しています。左側の赤色が腕を上方向に上げたとき、右側の青色が下方向に腕を下したときの様子を示しています。波形が崩れていますが、一番上の点線が筋トルクで、真ん中の実線が筋トルクと重力トルクを足した正味のトルク、下の破線が重力トルクです。右側の下方向の青色も一緒です。例えば筋トルクを見ると、波形のパターンが、上の場合と下の場合と似ていますが、上下反転した形になっています。重力トルクも、徐々に小さくなっていく様子を表しています。

次に、筋力が生み出すトルク、重量が生み出すトルクは、キネマティクス運動をどのように作ってくるかシミュレーションをして出しました。順動力学計算、因果です。原因になるトルクがあって、結果のキネマティクスがどう生み出されるかという分析をしました。そのデータが、下の図に示されています（図）。

一番上が点線、真ん中は実線と灰色の点線、下が破線で、右側も一緒です。加速度のデータを示していますが、運動の開始から交わる所までが加速のフェーズです。交わった所から運動終了までが減速のフェーズになります。真ん中にある実線は、筋トルクと重力トルクのそれぞれが生み出すものを足したものです。灰色の点線がありますが、これはキネマティクス（角加速度）をそのまま出した実測のデー

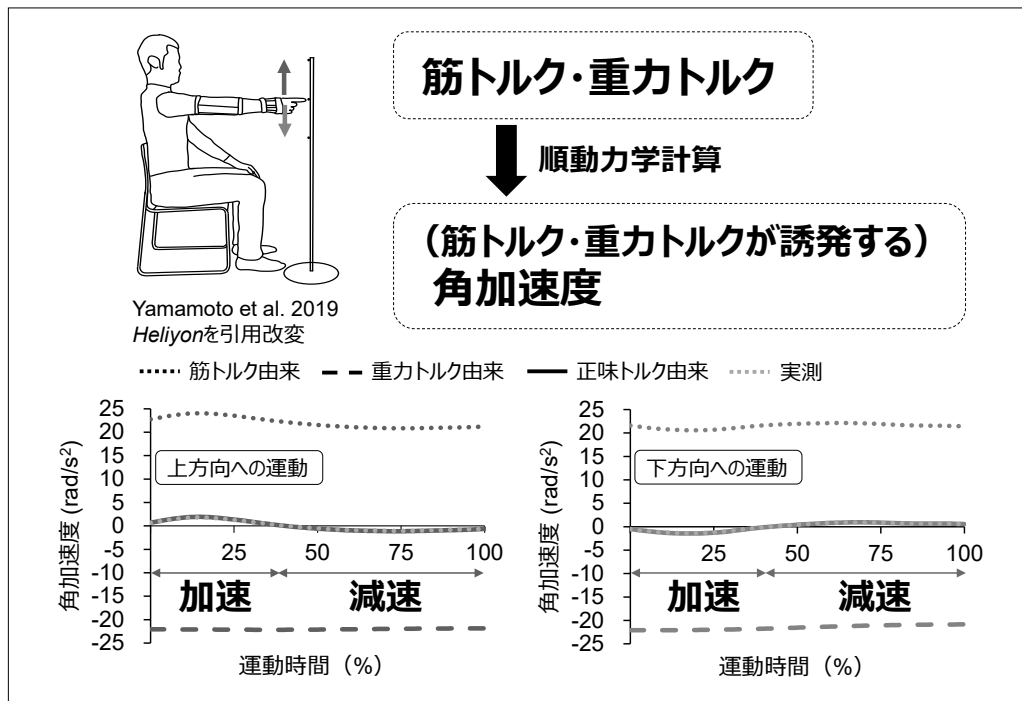


図 重力下での運動制御 (ポインティング運動)

タです。これを見ると、非常にきれいにフィットされているのが分かります。これで計算式が合っていることを確認します。

ここで、真ん中の波形に着目すると、真ん中の波形がプラスのときは、筋トルクが生み出すもののほうが、重力トルクが生み出すものより大きいことを意味します。逆に、真ん中がマイナスになっているときは、筋トルクより重力トルクのほうがキネマティクスを作っていることを表します。

右側の図は、左側の図を縦に並べて拡大したものです。上方向を運動があって、運動開始から波形がゼロとクロスする所まで加速のフェーズですが、ここがプラスになっています。これは、筋トルクのほうが重力トルクよりも大きく利いていることを表しています。要は、重力は下に引っ張るわけですから、その重力にあらがわないと上に上がらないことを意味します。つまり、重力に対抗するために筋トルクを優位にしていることが分かります。

逆に、減速フェーズはマイナスになっているので、筋トルクよりも重力トルクが利いているということになります。いずれ止まらなければいけないので、止まるフェーズのときに重力の引っ張ってくれる力を使っていることを表しています。

下方向の場合は、加速局面がマイナスになっているので、加速局面は重力トルクが優位になっています。つまり、重力が勝手に下に引っ張ってくれる力をうまく使っていることを表す重力トルクの優位化ということです。最後は、止まらなければいけないので、ブレーキをかけます。それは、重力にあらがわないと止まれないので、減速のために筋トルクを優位化していることが分かります。

今、ポインティングをモーションキャプチャーで捉えた様子を示していますが、ほかに筋電を使った筋活動の様子を調べる研究もあります。手を上に上げるか、手を下に下げるかという課題ですが、手を上げるか手を下に下げる運動をしているときの筋肉の活動を捉えました。どういった筋肉を捉えたかという、肩の筋肉の三角筋の前部、三角筋の後部、上腕二頭筋、上腕三頭筋といった筋肉の活動を捉えました。

左側の長方形で示した所の筋活動を見ると、非常に小さくなっている様子が分かると思います。これは、筋肉の活動が非常に小さいことを示しています。筋肉が活動していないということは、上肢が自由落下して、重力を使っているフェーズと考えられています。例えば上方向に腕を動かす場合、ピークから運動終了まで減速の局面に筋の不活動、重力利用のフェーズが見られます。

先ほどから繰り返し言っていますが、私たちは腕を上げて、最後は止まらなければいけません。止まらないといけない減速するときに、筋の不活動を起こして重力をうまく使っています。下方向に動かすときは、運動の開始からピークまでの腕が加速するフェーズで筋肉の活動をうまく落として、重力に手を下に引っ張ってもらっているということが分かります。

### 重力下での運動制御 (ポインティング運動) 運動制御のルール：コストの最小化 (計算論的神経科学)

最近よく見られる研究に、計算論的神経科学があ



ります。計算論的神経科学は、数理モデルや数理シミュレーションを使って運動制御のルールを抽出するアプローチです。あるコストがあって、そのコストを最小化するように運動を制御しているのではないかということが、腕を上には上げる、ないし下へ下げるような運動でも考えられています。どういうコストを小さくしようかという話ですが、筋トルク（力）から躍度（加速度を微分した運動のばらつき）を足したものをコストとして、このコストを最小化するようにシミュレーションしたのが右側の図です。

旧来の躍度最小モデルは、ばらつきをできるだけ抑えます。水平面上のポインティングだと、波形を再現できますが、上下方向の運動だと、躍度最小モデルでは再現できません。躍度最小モデルを使うと、上方向ないし下方向の波形が重なってしまいます。先ほどから言っているように、上方向の波形と下方向の波形は、ずれることが分かっていますが、重なってしまうので、躍度最小モデルではうまくいきません。提案モデルのトルクと躍度を足したものでコストを最小化してシミュレーションすると、うまく再現できます。こういう提案モデルを使った研究があります。

## 無重力への暴露と運動適応

実際にポインティング運動を紹介してきましたが、無重力に行ったときにどうなるかという研究があります。宇宙に行って実験するのは大変ですから、飛行機に乗って実験をします。パラボリック飛行という飛行ですが、水平に飛んでいるときは地球と同じ1Gの重力の負荷がかかりますが、上に上がって加速

をすると、加重力で重力が大きくなります。宇宙に飛び立とうとすると、とんでもない圧力がかかっているような映画のシーンを見たことがあると思いますが、それと同じようなシーンです。そこからエンジンを切って自由に慣性で飛行機を飛ばす瞬間に0Gになります。この間にポインティングさせると、無重力環境に近い環境で実験ができます。その様子を示したものが左側の動画です。

フランスのグループが行った実験です。今、浮いている人がいますが、これは0Gの状態です。無重力のときにポインティングをしました。そのときの波形の速度曲線を示したものが右側の図です。1Gでやったときは、上方向の曲線と下方向の曲線で、赤色と青色がずれているのが分かります。無重力に暴露されると、重力がかかってくるだろうという無意識的な予測のもとで行いますから、最初に残ります。しかし、だんだん波形が重なってきます。これは、無重力に適応しているという様子を示しています。

## 重力下での別の運動では？（到達把握運動）

ほかの運動ではどうだろうかというのを示します。ポインティング運動は、ターゲットを指さすだけですから、もう少し難しいつかむ要素を加えた到達把握運動で分析をしました。手を伸ばして物をつかむという運動は、二つの成分に分けられます。一つは、到達運動成分です。これは、手を物体のほうに伸ばす運動成分です。もう一つは、把握運動成分で、手を物体の形に合わせて手を形作る成分です。この二つの成分に分けて、上下の到達把握運動をキネマティクス分析で分析しました。

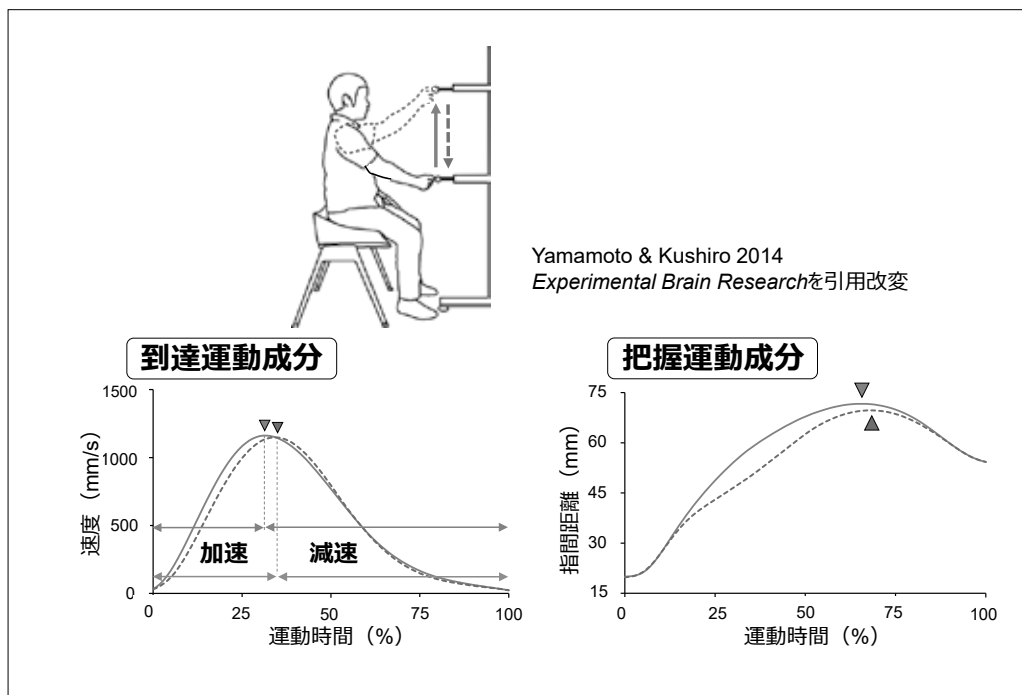


図 重力下での運動制御（到達把握運動）

到達運動成分は、手首のマーカーを使います。手首のマーカーを使って、速度曲線を分析して、加速、減速の時間を出します。把握運動成分は、手を形作るので、親指と人差し指の間の距離を出すことによって分析をすることができます。

結果を示すと、左側が到達運動成分、右側が把握運動成分です（図 2）。左側の到達運動成分を見ると、ポインティング運動と同じようにピークがずれています。上方向の赤色のほうが、ピークから終了までの減速フェーズが長くなっているのが分かります。つまり、重力による減速作用を生かし得る減速局面です。重力が引っ張って減速させる局面が、手を伸ばしてつかむ運動でも確認されました。下方向は、運動開始からピークまで加速のフェーズが長くなっていることが分かります。

手を形作る把握運動成分の手の親指と人差し指の幅を見ると、赤色のほうが大きく開いています。つまり、赤色は、つかみに行くので、指にトルクがかかります。このトルクをうまく使っているのではないかと考えます。逆に、下に行く場合は、閉じるトルクがかかるので、指間距離としては小さくなって、重力による作用をそれぞれ生かしていると考えます。

### 重力下での別の運動では？（打鍵運動）

別の研究者の研究で、非常に面白い研究があります。これは、より実践に近くなっていますが、ピアノを弾く打鍵運動を分析しました。こちらは、ピアノを打鍵する運動がどのくらい続くかを調べた研究です。熟練者と初心者で比較すると、熟練者は、30 分たってもピアノを弾き続けることができますが、初心者は、10 分から 15 分でリタイアしてしまいます。

初心者は、筋肉をたくさん使っているので続きません。筋肉はエネルギーが必要なので、エネルギーを使う筋肉を使うと続きません。熟練者は、筋肉以外の力を使っているので、長い時間引き続けることができます。ピアノコンサートに行くと、ピアニストは 1 時間、2 時間とピアノを弾きますが、いちいち筋肉を使っていたら弾き続けることはできないし、音が乱れてきます。しかし、音が乱れないというのは、筋肉以外の要素を使っているからだと考えられます。

右側の図は、腕を下ろして打鍵するときの回転の力が横軸です。上側は、上腕二頭筋の活動をどれだけ少なくしているかで、下側は、上腕三頭筋をどれだけ使っているかという要素を示しています。色の違いは、音の大きさの違いで、青色がピアノで、赤色がフォルテです。右側の初心者のデータを見ると、音を大きくするために上腕三頭筋の活動量を上げています。つまり、二の腕の筋肉を収縮させることで腕を振り下ろして、筋肉をたくさん使っています。

ピアニストは、上腕三頭筋は変わらず、上腕二頭筋の活動を減少させています。つまり、上腕二頭筋

の力を抜くと勝手に腕が落ちるので、ピアニストは、上腕二頭筋の力を抜いて大きな音を出しています。上腕二頭筋の活動を抜いているということは、重力を使っているということです。ピアニストは、重力をうまく使っていて、初心者は、筋肉の活動を使ってピアノを弾いているということです。このように、人は、いかにうまく重力を使って運動しているかということが分かります。

### 重力を生かすということ 利 点

私は、重力を生かすことこそ、巧みに運動を制御することだと考えています。重力を生かす利点は何かかというと、一つは、「生理学的コスト（ATP 等）の抑制」です。重力をうまく使うことで、省エネで運動ができます。もう一つは、「筋出力に付随するノイズの抑制」です。筋肉を収縮させるとノイズが生まれることが分かっています。皆さんが手に力を入れると、震えます。これがノイズです。小さな力では手の震えは起こりませんが、力を入れれば入れるほど、手は震えます。このように筋肉を収縮させるとノイズが発生しますが、重力に頼って筋肉に頼らなければ、ノイズを減らすことができます。

こちらは、筋出力によってノイズが生まれる実験のデータを示しています。力の平均値、力を入れる量を増やすほど、力のばらつきが大きくなります。ポインティングのように、ターゲットをしっかりと指でさすという正確な運動をしようとすればするほど、筋肉を使わないほうがいいです。筋肉を使うとずれやすくなります。そういう意味で、重力を使うメリットは、こういったところにもあります。

### 巧みに動きを制御するという事

最後になりますが、私は、巧みに動きを制御するという事は、「重力など筋力以外の要素を生かしつつ、効率的に運動の目的を達成するということ」に秘訣（ひけつ）があると考えています。これで、今日の話とさせていただきます。ご清聴、ありがとうございました。

### 質疑応答

**中村** 少し時間があるので、質疑応答の時間にします。何か気になることがあれば、ぜひ質問をお願いします。石崎淳一先生、お願いします。

**石崎** 石崎です。どうもありがとうございます。私のような素人には、全く衝撃的な発表だったのですが、一つは、先生は運動学が専門ということですが、重力の影響、人間の運動に関しての重力が前提となって私たちの運動が行われているという

領域の研究が、いつ頃から行われていて、それ自体が一つの領域を形成しているのか、あるいは、今日、先生が紹介してくれたような主に運動制御の専門家の中で、例えば宇宙に行ったりすることが可能になるので、そういう実験が行われているのか、研究領域のことを教えてください。もう一つは、末梢の精密なデータで、詳細な説明だったと思いますが、制御に関して、中枢のほうではどうなのかということをお願いいたします。

**山本** ありがとうございます。まず、一点目の質問ですが、運動制御の研究が重力に着目されて行われてきたのが、1990年代ぐらいです。それまでも重力に関する研究は行われていましたが、1990年より前に、耳鼻咽喉に関わる研究をしている先生たちがいろいろ研究を行っていました。

「重力に関わる運動制御の研究は、1990年代から行われている」と話しましたが、研究対象として扱っている人は、多くはありません。なぜかという、当たり前にあるからだと思います。重力というのは、当たり前にあって、重力に着目する意義というのは、あまり見いだされてこなかったからだと考えています。

ただ、それより以前には、耳鼻科の先生たちを中心とする知覚の研究です。先ほど、体が傾いたら垂直をどう示すかという話をしましたが、それも古くからあります。研究領域としては、運動の話は1990年代以降、それより前に知覚の研究が耳鼻科の先生たちを中心に行われてきました。

もう一点は、中枢の話ですと、あまり知見がありませんが、2016年にニューロサイエンスの論文で、非常に簡単に手首だけ上下に動かす、左右に動かすというのを比較してみたら、どういったところが方向特異的だったかという、島（とう・インシュラ）という脳の部位の活動がみられました。島というのは、前庭を刺激すると、脳の皮質から前庭の刺激によって活動を採ることができます。その一部だと言われています。このインシュラが、重力に関わる情報処理をしているのではないかとされていますが、あまりないです。最近になって、ようやく出てきたという状況です。

**石崎** ありがとうございます。

**中村** 長谷川千洋先生、お願いします。

**長谷川** とても興味深い発表、ありがとうございます。二点聞きたいのですが、一点目は、今の中村の話にも関わりますが、運動しようとする意図、補足運動野みたいな所が、どんなふうに重力と関わるのか、何かしようとする力が入ったりするので、重力との関係はどうなのか、意図との問題に関して。

もう一点は、一点目の質問に近いのですが、身近にピアニストがいるので、音楽家たちは、脱力ということをやっている、変に力が入

ると駄目なので、スポーツ選手とか、楽器を弾く人とか、声楽もそうですが、力を抜くことを非常に気にします。逆に、意図的に重力を上手に使う方法とか、心理学の中でも、認知症で体を使ってというのがあってと思いますが、そういうスキルのようなものを知っていたら教えてもらえれば、個人的に助かります。

**山本** 非常に難しい質問です。まず一点目の意思の話ですが、明確な回答はできません。結局、意思に基づいて運動をしていると考えた場合、意思の処理は意識的にできるものではないと思います。そこで、例えば補足運動野のような領域が関与しているかどうかというのは、覚えてないです。

もう一点のほうに移ると、どううまく使っていくかということですが、「脱力をする」と、とても難しいスキルだと言われています。今、手元にはありませんが、収縮をするカリラックスをするか、どちらがパフォーマンスを高くするか調べた研究があります。コントラクション、収縮のほうが簡単です。

例えば、「ある一定の力を出しなさい」というときに、そのターゲットからずれやすいのは、リラックスです。コントラクションだと、割りとスムーズに合わせられますが、脱力で一定の力に合わせっていくのは、なかなか難しいと言われています。そういう意味では、学習をするしかないと思います。要は、力を抜くという練習を繰り返すことで、動きのパターンというか、動きを滑らかにしていくというのが…、ありきたりな回答ですけど、それしかないと思います。

**長谷川** ありがとうございます。

**中村** 長谷和久先生。

**長谷** 長谷です。興味深い話をありがとうございます。的外れな質問かもしれませんが、キネマティクス分析で、「重力トルクに変化がある上下運動が、ずれる」という話がありましたが、「無重力に暴露される」と、「パラボリック飛行」のところで、比較的早くに無重力状態に適応すると思われました。つまりフィードバックプロセスのようなものがあって、「ここは1Gではないから、それに合わせて常識的な運動をもたそう」みたいな部分の研究がされているのですか。

**山本** ありがとうございます。基本的には、パラボリック飛行を使って無重力に暴露されたときの適応過程を追うという研究ぐらいしかないと思います。

**長谷** なるほど。

**山本** というのは、無重力の環境をつくり出すシステムが、なかなかないと思います。よく、「力場をかける」という水平方向の運動はありますが、あれを縦にやってみるかどうかですけど、今のところそういう研究はありません。

長谷 分かりました。

山本 この過程で、内部モデルが修正されているという話になっています。

長谷 ありがとうございます。

清水 よろしいですか、清水寛之です。非常に興味深い話をありがとうございました。私はたくさん質問があるのですが、さきほどの長谷先生のご質問は、割りと古くて、私が学生のときに習った感覚緊張場理論 (sensory-tonic field theory) の知覚要因に関するものです。そうすると、無重力状態に早く適応するのは、おそらく実験事態では目をつぶってなくて、視覚情報が多いからだという気がします。

それと同じように、先ほど言われていた中で、緊張ではなくて、実は弛緩にすごく意味があって、統合的に、例えば障がい児などにはアテトーゼがありますが、どの筋肉も収縮すると動かないです。だから、弛緩する部分と緊張する部分がうまく統合されているから、スムーズな動きになるのだと思います。

それとともに、今までは、おそらく、重力と圧を区別しにくかったのだと思います。圧は身体との接触がありますから。私の知り合いもシミュレーターを用いた研究をやっていますが、シミュレーターを使うと、音や傾きしかコントロールできなくて、G をかけないと駄目です。重力のことを取り扱えるようになったが、比較的最近だと思っています。

そういう意味では、私の考えでは、最初、無重力に早く適応するというのも、実は椅子に固定しているからあなるのであって、椅子から解放されていたら、そんなに早くいかないはずです。要するに、椅子に固定されている分だけ、重力によらない部分があるので、立ち上がりの早いものが出ます。だから、椅子から解放して、本当に身体全体が無重力にさらされると、適応するような気がします。

もう一つは、長谷川先生も言われましたが、重力は大事ですけど、おそらく慣性 (inertia) が大事だと思います。また、必ずしも上下方向ではなくて、左右方向でもスピードが出たり、あの辺り、モーションタイムがパーセントで出ていたのによくわからないのですが、ゆっくりやるのと速くやるのとでは、絶対的に加速度が違うので、そこが非常に大事だと思います。いろいろ思いつくまで失礼しました。

山本 ありがとうございます。今の慣性の話は、まさに重要なところで、今、実験をしているところです。

清水 それはいいですね。

山本 速度を変えたときの運動パターンを見ようとしています。あと、知覚誘因という話がありまし

たが、確かにそうなる可能性があります。私たちは、知覚に対して、どの感覚モダリティーにウェイトを置くかという重みづけをやっているわけです。重みづけが、例えば圧の情報をなくして、視覚に頼ろうとする状況が生まれたとすると、速度を見たままで頼りにする、見たままのボールの動きを頼りにしようとする可能性もあり得ると思います。そういう意味では、今回の結果と違う結果になってもおかしくないと思います。

清水 そういう意味では、空間の異方性と、知覚的な異方性の問題と言われた上下・左右の利き方が違うというのは、符合しているのかずれているのかわかりませんが、関係しているのかもしれないと思います。

山本 ありがとうございます。

中村 難波愛先生。

難波 私は、大した質問ではありませんが、無重力の話がすごく面白くて、初期と終期の間隔は、どのぐらいなのかと思いました。例えば無重力が何時間も続くわけではないと思うので、そんな短時間の間に人間の体は無重力の状況に適応するのかなのか非常に興味があります。

山本 正確な時間は覚えていませんが、G の初期と終期の間、数十試行でした。結局、どういうふうパラボリック飛行をするかという、繰り返して何回も 0G の状況をつくって運動をさせます。大体数十試行でした。そういう意味では、早い適応が見られていると考えるべきだと思います。ずっと宇宙にいれば筋肉の特性は変わってきますが、そんな短時間では筋肉の特性は変わらないので、脳の中で重力がないということをアップデートしていると考えます。

中村 秋山学先生。

秋山 秋山です。ありがとうございました。実は、私の前任校の上司が、パソコンのキーボードの設計というか、疲れないキーボードとか、仕事の座り方のようなことを研究していて、私が被験者になっていました。そのときのことを思い出しながら、例えば疲れないとか、疲れにくい作業の在り方のような方法もあり得るのでしょうか。

例えば立ち作業で物を持ったりすることは、割りと人間工学とか労働条件の規則の中で、モーメントの話が出ていましたが、こう持つのと、こう持つので、どれぐらいの負荷に対して、どれぐらいの時間なら作業量がいいのかという話はあるのですが、意外に、持ち方とか、そういうことと脱力との話での方向、どういう疲れ方の問題に発展するのかなと感じました。

そこで、例えば私たちがキーボードを使ってパソコンで作業をするとき、机の高さが数センチ違うだけで疲労度が相当違います。それは、実際に私も被験者でやっています。ひょっとしたら、そ

ういうことも脱力の仕方、こうやったらやりにくいけれど、こうやったらやりやすいとか、こういうこともあり得るのでしょうね。

**山本** まさしくそうだと思います。各セグメント、各身体部位が、重力方向に対して水平になっていればなっているほど、トルクがかかりやすくなり、トルクが大きくなるので、極端な話をすると、真っすぐ真上でこうやると、重力トルクはかかりません。回転軸と力の作用点の距離がなくなりますから、極端な話、これでやると、一番楽です。結局、下したときに、各セグメントが重力に対してどれだけの角度を持っているのかというのを分析すると、疲れにくい姿勢を出すことはできると思いま

す。あり得る話だと思いました。

**清水** のけぞって作業する場合とかですね。

**秋山** ありがとうございます。

**中村** 学生の皆さんは、大丈夫ですか。それでは、時間となりましたので、今日話していただいた運動制御と運動学習というのは、スポーツ心理学の中でも結構ホットなテーマで、その中でも非常に基礎的な部分を話していただきました。今日の話が、皆さんの知的好奇心を刺激してくれればうれしく思います。最後にもう一度、山本先生に大きな拍手をお願いします。

(拍手)