研究ノート

重心と安定性
－玩具を用いた幼児教育へのひとつのアプローチ－

○新谷　明雲*1　石川　正一*2　国広　勝代*2

キーワード：重心、質量中心、安定性、不安定性、運動、力のモーメント、偶力、加重平均、モービル、やじろべぇ、起き上がり子法師、支持基底面、天秤棒、竿秤、支点、作用点、往復運動

第１章　はじめに

哺乳類の多くは餌を求めて移動したり、駆けたり、飛んだり、といった一連の動作をいともたやすく行うことができる。4 本足なのでこれらの動作が可能なことはごく自然に理解できる。2 本足のヒトがこれらの動作を可能にするメカニズムとは一体何だろうか。赤ちゃんがよちよち歩きを始めるのはオギャーと産声を上げてから 10 か月を過ぎるころからなのである。この 10 か月あまりは 2 足歩行への準備期間なのだろうか。他の哺乳類は生まれ落ちて間もなく 4 本足で動くことができるが、その後 4 足歩行から 2 足歩行に移行することは無さそうである。熊が 2 本足で立つのは敵を威嚇したりエサを取る際の行為であり、移動のためではない。

またヒトは歳を重ねるにつれ転倒事故がふえ寝たきりの原因となる。同じく、幼児もよく転ぶ（が転んでもすぐ起き上がり寝たきりになるということはあまり耳にしない。）。両者は同じ原因からだろうか。

柔道や相撲は相手を抑え込んだり投げ倒したり場外に押し出したりする競技である。重心をその支持基底面（以下で「基底面」という）から逸脱することによって不安定性をつくりだす競技とみなせないか。

本稿はこれらの素朴な疑問への解明に向け鍵となる「重心」の概念と物体の「安定性」について考察することを目的とする。私たちの身の回りには重心の性質を巧みに利用した道具や玩具が数多く見受けられる。それらを使って遊んだり、作ってみたりし、その原理について学習することで重心の役割と物体の安定性についての理解を深めることができる。

以下に本稿の構成を示す。次章（第２章）では「重心」を物質のありよう（離散的か連続的か）によって定義する。また物体を回転させる「力のモーメント」の概念を導入する。これらの準備を経て、物体の回転と併進運動に対する安定性の要件を提示し、具体例に基づき議論する。第３章では、代表的な具体例として（Ⅰ）シーソー、（Ⅱ）モービル、（Ⅲ）やじろべぇ、（Ⅳ）起き上がり小法師、の４つを取り上げる。（Ⅱ）のモービルは空間アートとしていろんなところでお目にかかる。モービルは風などの揺れに対したなびくことはあってもひっくり返ったりしない。まるでカーテンが揺れるかのように安定であるのはなぜだろうか、考えてみたい。（Ⅲ）ではやじろべぇの動き（運動）を安定（往復運動）にするしくみについて考える。またやじろべぇは全方位の揺れに対して安定であることを知る。（Ⅳ）のおき上がり子法師では、頭部に力を加え傾けた後に手を放すと平衡点に戻ろうとして振動を繰り返す。この往復運動の原理について考えてみる。最後の章（第４章）は課題と今後の展望にあてられる。

第２章　重心の定義

１　重心の定義

重心の定義を（１）質点系（離散系）の場合、と（２）連続分布の場合、の２つに分けて議論する。

*1　至誠館大学　非常勤講師
*2　至誠館大学　ライフデザイン学部

（1）質点系（離散系）の場合

質量が存在するが、大きさが無視できる場合を質点と言う。例として、太陽の周りの地球の運動を考える場合には地球を点として捉えることで十分である。一方で、地球の潮汐（海水の干満）を扱う場合には、地球をもはや質点と考えてはこの現象を扱うことが出来ない。如何なる事象を扱うかによって、ある時は質点とみなしたり、ある時は剛体（構成物体の相互の位置関係が不変とする近似）とみなしたり、あるときは弾性体（地震の際プレートの動きや津波を扱うとき）としてモデル化するのである。

２質点系の場合

一直線状に質量 m_1、m_2 をもつ２つの質点があるとき、場所を表すために実数直線を考える。これを x 軸と呼ぶことにする。いま、基準となる点（原点という）を数直線の０にとる。この基準点から見て質点 1、2 の位置（これを x 座標という）を x_1, x_2 としよう。基準点より左にあれば x は負の値を、右にあれば正の値を持つ。いま、2 つの質点は図 1 のように $0 < x_1 < x_2$ となるように配置する。

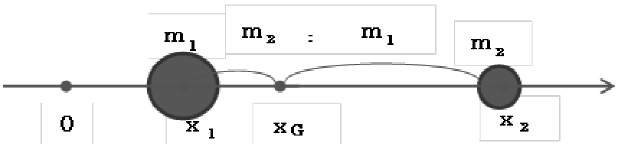


図１　２質点の重心

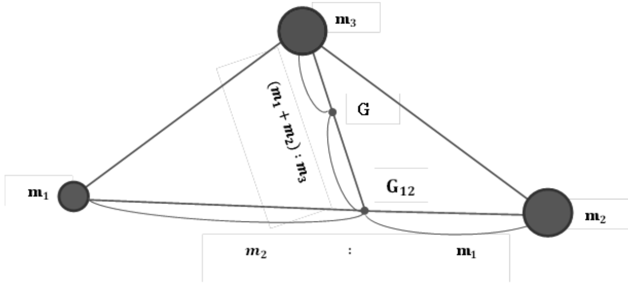
重心 G は二つの質点の線分の長さ $\ell = x_2 - x_1$ を $m_2 : m_1$ に内分する点である。これは質量の多い方に重心があるだろうという直観からこの内分がふさわしいことがうなずける。すなわち

$$x_G = x_1 + \ell\,\frac{m_2}{(m_1 + m_2)} = {(m_1x_1 + m_2x_2)}/{(m_1 + m_2)}$$

となる。この式は重心が２質点の質量についての加重平均であることを示唆する。

３質点系の場合

３質点の場合に移ろう。この時、３質点が共に一直線状に分布するのは特別な場合で、第３の質点（質量 m_3）が２質点を結ぶ直線の外にあると考えるのがより一般的である。その為には x 軸に加えそれと直交する y 軸を導入せざるをえない。したがって、３質点に位置座標をそれぞれ (x_1, y_1)，(x_2, y_2)，(x_3, y_3) と配するのが妥当である。



（G12 に（m1＋m2）の質量ががある。）

図２　３質点系の重心

質点１と２の重心 x_{G12}、y_{G12} はそれぞれ、

$$x_{G12} = {(m_1x_1 + m_2x_2)}/{(m_1 + m_2)},$$

$$y_{G12} = {(m_1y_1 + m_2y_2)}/{(m_1 + m_2)},$$

で与えられる。３質点の重心 G は G_{12} と質点３の位置を結んだ線分を $m_3 : (m_1 + m_2)$ の比で内分すればよい。すなわち、

$$x_G = {(m_3x_{G12} + (m_1 + m_2)x_3)}/{\{(m_1 + m_2) + m_3\}} = {(m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3)}/{(m_1 + m_2 + m_3)},$$

y_G も同様にして

$$y_G = {(m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3)}/{(m_1 + m_2 + m_3)},$$

として求まる。この式から分かることは、３質点の重心 G はまたもや、３質点の位置座標の加重平均に他ならない。ここで加重(重み)とは、

$$m_i/(m_1 + m_2 + m_3), \quad (i = 1,2,3)$$

をいう。

４質点系の場合

４質点系の場合には、３質点がなす空間は面から立体となるので x 軸、y 軸に直交する第３軸、すなわ

ち z 軸が必要となる。重心Ｇは

$$x_G = \frac{m_1x_1+m_2x_2+m_3x_3+m_4x_4}{m_1+m_2+m_3+m_4},$$

$$y_G = \frac{m_1y_1+m_2y_2+m_3y_3+m_4y_4}{m_1+m_2+m_3+m_4},$$

$$z_G = \frac{m_1z_1+m_2z_2+m_3z_3+m_4z_4}{m_1+m_2+m_3+m_4}$$

となる。

N 質点系の場合

帰納法により３次元空間に N 個の質点が座標値 (x_i, y_i, z_i) $(i=1,\cdots,N)$ が分布するときその重心座標 (x_G, y_G, z_G) は

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i x_i}{M}, \quad y_G = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i y_i}{M}, \quad z_G = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i z_i}{M}, \qquad (1)$$

として求まる[1)]。となる。ここで、M はＮ個の質点系の全質量で、

$$M = \sum_{i=1}^{N} m_i, \qquad (2)$$

であたえられる。基準点である原点はどこにとっても構わない。式（1）より重心点はＮ個の質点系の代表する点ととらえることができ、全質量が代表点に集中しているとみなす。この重心の定義は、相対質量 m_i/M を重みとする座標値の平均（加重平均）に他ならない[2)]。平均は統計学では座標値の次数が１なので１次のモーメントと呼ばれる。分散は２次のモーメントである。ちなみに力学では質量分布に関する座標の１次のモーメントが重心座標で、２次のモーメントが慣性能率Ｉ（回転運動の慣性を表す量）を表す。

（2）連続分布の場合

質点系とは異なり、通常の物体は大きさがあり質量密度が空間に連続的に分布している。この場合には密度関数 ρ を導入することで重心座標を求めることが出来る。紙工作では一様分布を扱うことになり、前項の質点系の場合も特別な場合として与えることが出来る。式（1）と（2）に代わるものとして

$$x_G = \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{x\,\rho(x,y,z)}{M} dv, \ y_G = \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{y\,\rho(x,y,z)}{M} dv, \ z_G = \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{z\,\rho(x,y,z)}{M} dv, \qquad (3)$$

$$M = \iiint_{-\infty}^{\infty} \rho(x,y,z) dv, \ dv = dx\,dy\,dz, \qquad (4)$$

で与えることが出来る。この特別な場合として、一様分布の場合とＮ質点系を扱う。

一様分布の場合

直方体領域 $a \le x \le a', b \le y \le b', c \le z \le c',$ に物質が一様に分布するとき、物質密度関数、ρ は階段関数 $\theta(x-a)$ を用いて、

$$\rho(x,y,z) = M\theta(x-a)\theta(a'-x)\theta(y-b)\theta(b'-y)\theta(z-c)\theta(c'-z), \qquad (5)$$

$$\theta(x-a) = \begin{cases} 1, & x \ge a \\ 0, & x \le a \end{cases}, \qquad (6)$$

で与えられる。

N 質点系の場合： ρ は Dirac の δ-関数をもちいて、

$$\rho(x,y,z) = \sum_{i=1}^{N} m_i\, \delta(x-a_i)\delta(y-b_i)\,\delta(z-c_i), \qquad (7)$$

であたえられ、式（1）が再現される。

２　力のモーメント

力のモーメントは、物体の回転を論ずるための物理量である。力のモーメントは位置ベクトルと力の外積（ベクトル積）で、次のように

$$\mathbf{N} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = (yF_z - zF_y, zF_x - xF_z, xF_y - yF_x) \qquad (8)$$

で定義されるベクトル量である。その向きは、位置ベクトルから力のベクトルの方向にねじるとき右ねじが進む方向となる。

具体例：シーソーのつり合い

簡単の為に正面に向かって前進するときを右回りのモーメントと後退する時を左回りのモーメントを呼ぶことにする。裏面からすれば左右逆になるので便宜的な言い回しである。外積は大学の課程で習うので中学校や高校ではこのようにとることが決められている。

図３では右回りのモーメントは $\ell_2 m_2 g$ で、左回りのモーメントは $\ell_1 m_1 g$ となる。ここで、g は重力加速度を表す。支点 f（fulcrum の f）の周りの力のモ

ーメントＮ（ベクトルの大きさ）はこれらの総和で、右回りに対して＋符号を、左回りには－符号をつけ、

$$\mathbf{N} = \ell_2 m_2 g - \ell_1 m_1 g = (\ell_2 m_2 - \ell_1 m_1) g \qquad (9)$$

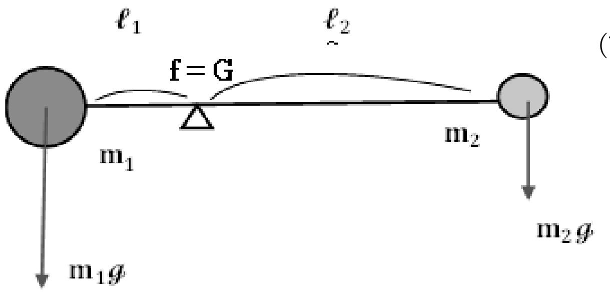
となる。ここで点Ｏが重心Ｇであれば、

$$\ell_1 : \ell_2 = m_2 : m_1 \qquad (10)$$

である。式（１０）を（９）に代入して、

$$N = 0 \ , \qquad (11)$$

をうる。重心と支点が一致するばあい、力のモーメントはゼロとなる。第３章のシーソーはどの角度でも静止することが出来る。また、いったん回転すれば等角速度回転を行う。



（ア）

図３　シーソーのつり合い

<u>重心の周りのモーメント</u>

式（１）は、

$$0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \ (x_i - x_G)}{\sum_{i=1}^{N} m_i} \ ,$$

$$0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i (y_i - y_G)}{\sum_{i=1}^{N} m_i} \ , \qquad 0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i (z_i - z_G)}{\sum_{i=1}^{N} m_i} \qquad (13)$$

と書ける。重力加速度 g を上式の両辺に乗ずれば、私たちの住む地球上では一様重力場なので力のモーメントの総和がゼロであることになる。力のモーメントとは重心から力の方向に下ろした垂線の距離と力の積である。したがって、重心の周りの力のモーメントの和がゼロであることを式（１３）は主張する。

<u>３　物体の平衡状態とは</u>

大きさのあるマクロな物体の平衡状態は次の要件

（１）　系にはたらく外力の総和がゼロ、

（２）　系にはたらく外力のモーメントの総和がゼロ、

のいずれもが満たされるとき実現する。要件（１）は、物体の重心が加速度運動（速度が変化）しないことを保証し、要件（２）は物体が加速度回転（角速度が変化）しないことを保証するものである。即ち運動状態に変化が起こらないことを保証する要件と言える。

以下でいくつかの例について上記の要件が満たされているかを調べてみる。

（ア）地上における単振り子：上の条件はどれも満たさない。しかし、往復運動（振動）し、周期的に同じ状態が繰り返されている。周期Ｔより大きな時間スケールで見れば「動的な平衡状態」と言える。

（イ）地球の自転：宇宙ステーションの中でのこまの自転は、要件（１）および（２）が共に満足されている。同様に地球の自転に関して、太陽や月の引力は無関係である。地球はエネルギーを消費せずとも自らの重心のまわりに永久に回り続けるはずである。ただし大気や潮流との摩擦損を無視できるものとする限りにおいて。

（ウ）地球の公転：地球の公転は、太陽からの重力によって引き起こされる加速度運動である。よって要件（１）が満たされないので、平衡状態と言えないのではないか？答えは「否」である。この誤解は地球だけの公転運動に注目することからくる。太陽と結ばれた２体系を考えなければならない。この二つの天体はお互いの共通重心の周りを公転している。太陽も公転しているのである。２天体の共通重心は太陽質量があまりにも地球に比し大きいため、太陽自身の重心の位置から地球寄りにほんの少しずれた点にある。この重心の周りの運動に関し、要件（１）と（２）は共に満たされている。太陽と地球の間に働く万有引力は要件（１）を成り立たせないといぶかるかもしれない。この力は「内力」であって外力ではない。この２天体に働く「外力」の総和が問題なのである。木星や他の惑星からの外力がどれほど大きいかが問題なのである。要件（２）についてもお互いの引力が同一線上にある

ためモーメントはゼロである。

（エ）釣合のとれたシーソー：お父さんがシーソーの中心寄りに座り、小さな子供が後ろの方に座ることで要件（2）は満たされる。では要件（1）はどうか？重心の位置が回転運動の中心（支点）なので回転軸を支える部分から抗力が働きそれが二人の重力の和とつりあっている。したがって、２つの要件を満たしている。軸受けの地面からの高さがシーソーの半径より大きければ、常に釣り合いを保ったまま等角速度回転を続けることになる。父親の体重が子供の2倍とすれば回転軸からの距離（回転半径）は子供の方が2倍長いので、父親の 2 倍の速さ（速さ＝半径×角速度）で空を切ることになる。このことは地球と太陽の共通重心を運動する場合も同じである。なぜ地球の公転の速さ（秒速約３０ｋｍ）が大きいのかが理解できるはずである。

次章ではおもちゃや道具（天秤棒や竿秤、モービルアート）の平衡状態を見てみる。常に、２つの要件（1）と（2）が満たされているわけではない。むしろ（1）は成り立つが、（2）は常に成り立たず、静的平衡点の周りを往復運動する。単振り子と似た安定な動的平衡といえる。

第３章　重心を利用したおもちゃ

この章では、重心を利用したおもちゃ（Ｉ）シーソー、(Ⅱ) モービルアート、(Ⅲ) やじろべぇ、(Ⅳ) 起き上がり子法師、のそれぞれについて運動の安定性について見てみよう。

（Ｉ）シーソー

遊園地や公園のシーソーを思い浮かべてみよう。シーソーは支点と重心が一致する例である（図４ - a)。支点を原点にとれば力の和および力のモーメントの和がゼロであれば、シーソーはあらゆる角度で静止する（図 4-b)。一人の人が一瞬でも体を後ろにずらしたり、身に着けているものを投げたりすれば、重心の位置が支点からずれ（8）により力のモーメント式が生じ、モーメントの総和がゼロになる状態（最終的に重心が支点の真下に来た状態）で落ち着く。この状況はシーソーが鉛直になっている極めて危険な状態と言える。現実には相手の足が地面に着き、回転をいったん食い止め、次に地面を蹴る動作よって逆向きのモーメントをつくりだし、その結果逆方向に回転し始める。シーソーの往復運動はお互いが順次に足で地面を蹴る動作（反力）によって引き起こされる人為的な運動といえる。シーソーの釣り合いは運動という視点から見れば不安定である。むしろこの不安定性が生み出すモーメントを利用した憩いの遊具と言える。このように、シーソーの釣り合いは物理学では「不安定平衡」とか「不安定な釣り合い」とかいう。

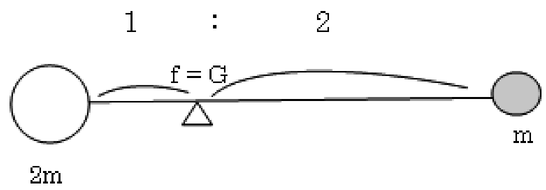


図４－a　重心Ｇと支点ｆが一致

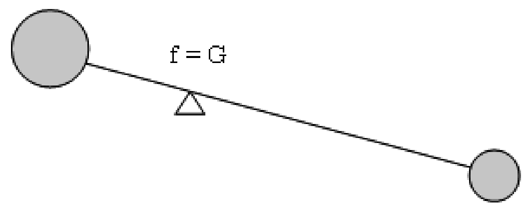


図４－b　任意の傾きで静止する。質量または距離の比が変わるとＧはｆからズレ倒立する

（Ⅱ）モービルアート

今では見られなくなった魚屋さんの竿秤や金魚売りの天秤棒はシーソーとは異なり運動の安定性がみられる。これが不安定では、魚が皿からつるりと落ちて目方売りはできないし、水の入った桶に金魚を入れて運ぶことできなくなる。ではこの安定性はどこから来るのであろうか。

竿秤を例にとる。図５のように竿に太さｄを持た

せ、握りひもは竿の上端につながっている。この点が支点である。重心の位置は竿の重心と両端の吊下がった物体の重心を結ぶ鉛直線の間にある。ここでは議論の煩雑さを避けるため竿の質量を小さいとみなし無視することとした。このことは議論の本質にかかわらない。釣りあった水平の状態（図 5-a）では重心は支点の真下にある。傾けると重心の位置が支点の真下から $a(=\frac{d}{2}\sin\theta)$ だけずれ（図 5-b）、張力と重力が偶力となりモーメントが生まれ、傾きとは逆方向に戻そうとし水平となる。これが竿秤の復元のメカニズムである。もし、竿に太さがなければ、傾いても重心は常に支点の真下にあるため水平に戻るメカニズムはないので、魚屋さんにとっては見辛く取扱いが厄介である。

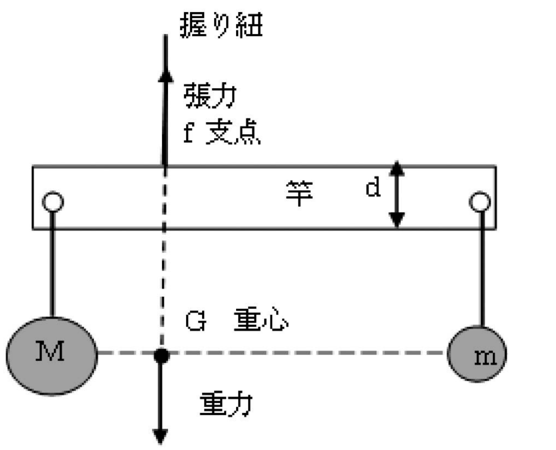


図５－a　水平であると偶力のモーメント N はゼロ

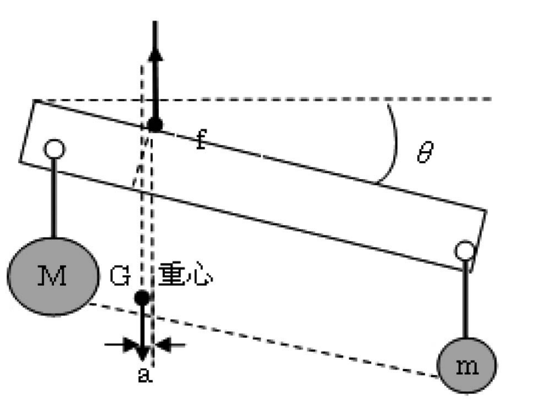


図５－b　θ 傾けると偶力のモーメントは N=(M+m)ｇa、これが復元の源

天秤棒の場合には、竿秤とは逆に支点の位置は棒の下端になる。金魚屋さんは左右の重さが異なっても巧みに棒と肩の接触点の位置を変えることで支点を重心の真上に移動しモーメントの和をゼロに調整している。揺れに対する復元のメカニズムは竿秤と同じである。

この竿秤の原理を利用してモービルアートを作る。船の横揺れを激しくしたような動き　―　角振幅が大きい動き　―　にしたい場合には、細目の横棒を選べばよい。一方、ゆったりとした動きのものにしたい場合には、太めの（ないしは厚みはなくても縦幅のある定規の様な）ものを選べばよい。後者の場合には、小さな傾きでも元に戻す大きなモーメントを生むからである。

（Ⅲ）やじろべぇ

やじろべぇの重心 G の位置は支点 f より下方にある（図 6-a）。支点での上向きの抗力と下向きの重力が偶力をなし、復元のモーメントが生まれ左右に傾いてもモービルや天秤棒の場合と同じく安定な往復運動が可能となる（図６-b）。しかし、支点を重心より下方にするとほんのわずかな傾きでも傾きが増幅する方向に偶力のモーメントが生ずるため往復運動は起こらず転倒する。

さて前後に対しては、どうであろうか。これも重心が支点の下方にあることから、前に倒すと後ろに戻そうとするモーメントが発生し前後の安定な往復運動を可能とする、左右前後だけでなくあらゆる方向の揺れに対し安定となる。

やじろべぇの全方位の安定性を利用すれば、支点を貫通する穴をあけひもを通せばサーカスの綱渡り芸人を再現することができる。その際、穴の口径をひもの太さよりおおきくとり、特に入口出口を広めに削り取れば動きの自由度が増し危なっかしい動きの綱渡り芸を楽しむことができる。

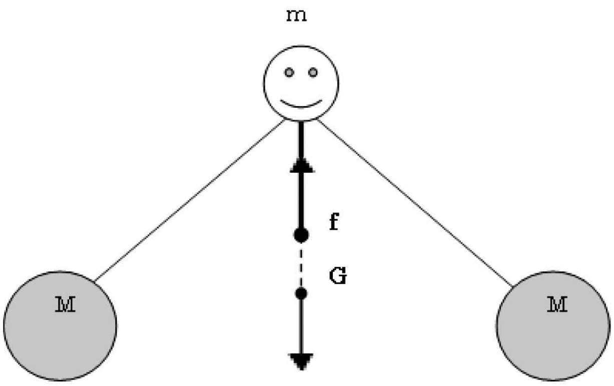


図６－a　重心Ｇは支点ｆの真下にあるので偶力の
モーメントＮはゼロ

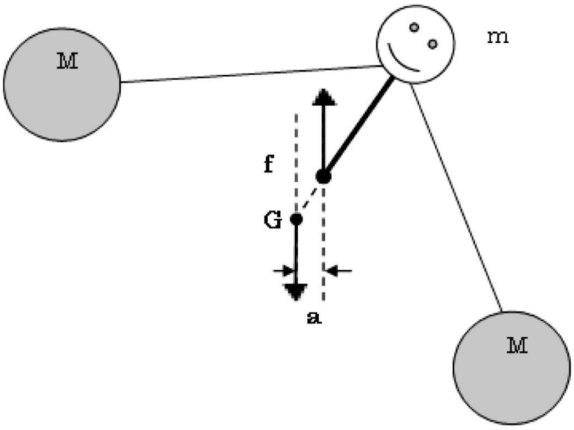


図６－ｂ　角度θ傾いた時、大きさＮ＝(2M+m) ga
の反時計まわりの偶力のモーメントが生ずる。

⑷ 起き上がり子法師

球体の起き上がり子法師の場合を考えよう。接触点に垂直上向きの抗力と重心点から下方に重力が働きお互いが偶力をなす。図 7-a は釣合の状態にあり、この時には偶力の作用線は一致するため力のモーメントはゼロとなる。図 7-b のように傾くと 2 力の作用線がずれるため偶力のモーメントが生ずる。図 7-c では作用線の距離が最大となりモーメントは最大となる。この力のモーメントが傾いた方向と逆の方向に戻す働きをし、往復運動が可能となる。復元力が働くための条件は、球の中心を除く球体内部に重心があることであるである。一輪車に乗ってペダルをこぐ場合には重心は車輪の外にありこの条件が成り立たない。

図７－a　錘を底につけたため重心は球の中心
より下になり偶力のモーメントはゼロ

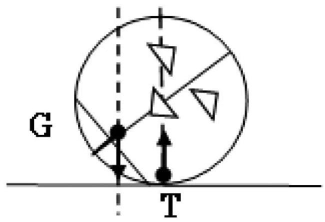


図７－b　45°傾いた場合、抗力と重力は偶力をなし
そのモーメントが釣合の位置に戻す

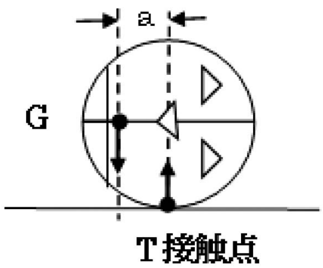


図７-c　90°傾いた時重心線と作用線の間隔 a が最大
となり偶力のモーメントＮも最大となる

第４章　おわりに～課題と展望

前章では玩具や天秤棒や竿秤、モービルアートについて往復運動の安定性について議論した。実際には、これらの往復運動は振幅の幅が徐々に狭くなり静止する。空気抵抗や支点での摩擦によって力学的エネルギーの損失が起こるからである。用途に応じ速やかに静止する（過減衰）か、ゆっくり静止する（減衰振動）ように設計されなければならない。慣性能率と抵抗力の作るモーメントですべてが決まる。竿秤では過減衰が望ましいし、やじろべぇは慣性能率を大きくしゆっくり長く揺れていてほしい。これらの詳細については今後の作品制作の過程での課題としたい。

また、本稿では果たせなかったことであるが、学生による作品については稿を改め紹介したい。

次の課題は人間の運動についてである。重心点は、目に見えないものであるが、われわれはこれを意識せずに生活している。人間が２本足で立っていられるのは、人間の重心が臍の近くにありその地面に下ろした点が左右に開いた２本の足裏がつくる長方形（「基底面」という）の中にあれば安定なのである[3), 4)]。１本足で立つバレリーナのアラベスクは数本の足先がつくる狭い基底面（成人で10〜20㎠）に重心の落下点を納めなければ姿勢を維持できないのである。逆に柔道の自然体は両足を左右前後に開くことにより基底面を大きくし相手の前後左右の揺さぶりに備えるのである。相撲のすり足では腰を落とし交互に足を前に出す。押す腕と足の動きを逆にして重心の位置を体の前方低い位置（体の外の位置）に保つようにしている。基底面が最も最小になる左右に両足がそろった瞬間に投げを打たれると転倒するのである。その点４つ足動物の基底面は大きくその安定性は際立っている。走行についても4つ足は2つ足よりも早く走ることが可能である。弱肉強食の世界では走行スピードが生死にかかわる。直立では目立ちやすく外敵に狙われる確率が増す。進化の過程で生き残った結果が４つ足動物なのだろうか。

歩行や走行は前進直線運動が基本である。この運動は重心の位置を基底面から外すことにより可能である。すなわちあえて不安定を創りだしそれを回復しようと手足を移動させそれが新たな不安定を創り出す、この一連の行為の反復により前進運動が実現する。作用点と支点が一致することで前進力をうまれる。地面と足の間の摩擦のない世界では摩擦力の反作用（反力）がないため前進力は存在せず前に進めない。

往復運動する物体に共通することは傾く方向と逆の方向に押し戻すモーメントが存在することである。前進運動では重心の落下点が基底面からはみ出ることが必要となる。

歩行・走行・一輪車やサーカスの綱わたりなどの運動の安定性についてより深い議論を今後おこないたい。

幼児の転倒は重心の位置が高いこと（胸の近く）が転倒するモーメントを大きくし躓く要因ではと推量される。一方老人の転倒は、骨そしょう症などにより前屈みになり、重心の位置が体の前方にずれ、ちょっとした動作により重心の落下点が基底面からはみ出す。加えて二の足が出ないため転倒すると思われる。幼児と老人に共通することはいずれも転倒に対し踏ん張る筋量が十分ではないことと思われる。これらはいずれも推量の域を脱していないので、今後の検証が必要である。

[参考文献]

1) 原康夫；物理学, 学術図書出版, 1991

2) J.C,ミラー；統計学の基礎, 培風館, 1992

3) 石井喜八・西山哲成；スポーツ動作学入門, 市村出版, 2002

4)中村隆一・齋藤宏・長崎浩；基礎運動学（第６版　補訂）、医歯薬出版、2014.