

歩行運動と筋蛋白の確率過程

緒方, 道彦
九州大学健康科学センター

<https://doi.org/10.15017/3517>

出版情報 : 健康科学. 26, pp.61-70, 2004-03-25. Institute of Health Science, Kyushu University
バージョン :
権利関係 :

— 寄 稿 —

歩行運動と筋蛋白の確率過程

緒 方 道 彦^{1)*}

Human's walking and probability process of contractile proteins

Appendix

Stochastic relations between cellular and molecular events in muscle mechanics

Michihiko OGATA^{1)*}

Abstract

The tool which increases a human's own function is desirable. So we have to know more in detail about a human's own function. As one of the example human's walking and muscles are considered. The muscle works bearing load. It is the most basic function in life. At first human's walking is discussed from the comparative physiological view point. Then the stochastic process of contractile protein is mentioned in the appendix. The motility of molecules is a key factor in life.

Key words: Walking, muscle mechanics; Poisson process.

(Journal of Health Science, Kyushu University, 26: 61-65, 2004)

康寧と疾憂

創立25周年を超え、改めて康寧の科学の原点について考えたいものである。

広いホテルのロビーにタイルが敷きつめられていた。「よし、このタイルの一行だけを辿って、フロントまで行く。両側は断崖絶壁ということや」、80歳を超えた西堀先生（第一次南極越冬隊長、登山家）は慎重に狭いルートを進み、ルーム・キーを受取りニッコリされた。目標達成の満足感。積極的な健康づくりには、常に手作りの目標に向かって、自分を甘やかさぬ努力が欠かせない。

高血圧や糖尿病などの生活習慣病に対して、欠陥（リスクファクター）を減らし予防する健康法があるが、教育的で禁欲的なものが多く、あまりニッコリしたくなるものではない。

1978年、健康科学センター（IHS）の創設に際し、健康概念の二面性が議論された。身体的に「疾」、心理的に「憂」の状態はマイナス面であり、身体的に「康」、心理的に「寧」の状態がプラス面である。前者に関わるのは医学（疾憂の科学）であり、その使命は、アラ（欠陥、疾憂）をなくすことにある。心身の不調のすべてを本人が自覚し、克服出来るものではない。ここに“アラを探し、アラをなくす”科学の意義がある。検査値がすべて正常ならば確かに健康、だが健康といえるのか？

車椅子のため歩けぬ、だから泳ぐと決め、年齢相当のキロ数を毎年こなしながら、銀行の頭取・会長として立派に社会的責任を果たした友人がいる。健康でなくとも、健康人ではないのか。

個人的な健康とは「障害の有無でなく、自分の心身を充分に使いこなしている状態」であろう。

1) 九州大学健康科学センター Institute of Health Science, Kyushu University

*連絡先: 九州大学健康科学センター 〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1 Tel/fax: 092-583-7685

Correspondence to: Institute of Health Science, Kyushu University 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan
Tel/fax: +81-92-583-7685

WHO 憲章のなかの Well being は, Not merrily the absence of disease or infirmity である. この健康概念は康寧に相当する. 国際社会の実状から WHO の活動が疾憂対策に終始しているのはやむを得ないが, Well being, 康寧, の科学的根拠を探りたいものである.

注; この論考は, (1) 「歩くヒト」を主題とした本文と (2) 分子レベルの筋収縮に関する Appendix よりなる.

はじめに

1978年の健康科学センター (IHS) 創設から25年になる. 健康科学の研究は, まずヒトの本態についての視点を確立し, その上で人々が自らの可能性を十分に発揮できる方策を提示できるものでありたい.

現代生活の常識は, 進化学的な常識ではない.

その例として, ヒトの二足直立歩行に関する考察を述べることにしたい.

1. Read Nature, Not Books

IHSのクレストのDNAラセンにはRead Natureと刻んである. 健康づくりの科学には, 生物進化の視点, 遺伝子の解読, が重要と考えたからである.

生体分子モーターは, ミオシンとアクチンの相互作用であることが実証された. この普遍的なミクロの機能単位は生物進化の場でひろく活用されている.

2. ミクロ系の揺らぎとマクロ系の張力

運動・スポーツを支える筋張力の基礎は分子系である. 細胞から抽出されたタンパク酵素の溶液内反応は, 個別のミクロ系における独立事象であるが, 細胞内のマクロ系の張力も, ミクロ系の独立な反応の加成性によると考えられるようである.

骨格筋の収縮単位は殆ど均一, 収縮方向も単軸性なので, 一次元ブラウン運動の定常独立増分過程の理論を適用し, 静止張力 (resting tension) と単収縮 (single twitch) の時間的解析を試みた.

その詳しい議論は Appendix に譲るが, 要約すると;

1) Thick filament 上の myosin head は, 筋弛緩時 (Ca free) でも actin と接触し ATP の加水分解を繰り返してミクロな張力を発生するが, 揺らぎの方向性はランダムである. ATP が豊富で, Z-disc 方向と M-line 方向の揺らぎの確率 (P_z, P_M) が共に 0.5 のとき, $P = P_z + P_M = 1$ となり筋長は土ゼロに止まる. マクロ系の秩序は最高となっている. ミクロ系が活発に揺らぎ続けることで, マクロ系の静止

状態が保たれている. 細胞形態 (秩序) の維持は active process であり, 骨格筋が骨と協同して個体の姿勢を保持する静止張力が抗重力機能の基礎になっている.

2) 静止筋でも, 外力で引き伸ばされると, 確率 (P_z, P_M) の差による内部応力が生じ, マクロ系の静止張力に歪みが現れ, 筋は弛緩長に回復しようとする. ゴム様のエントロピー弾性である. Appendix の Fig.2B に静止筋の長さとの関係を示している.

3) 骨格筋がインパルス刺激を受けると, 神経支配の密度と, 発達した小胞体により, 筋節内の Ca 濃度が一斉に上昇する. 全ミクロ系の揺らぎに時間的一様性 (Uniform configuration) が現れ, Poisson 過程の条件が成立する. Poisson 過程の総和はまた Poisson 過程なので, マクロ系の単収縮の波形は Poisson の式で近似されることになる. 発生張力の大きさは, 動員可能なミクロ系の量の総和になる (加成性).

筋細胞は内部エネルギー (分子の熱振動) で形態を維持する. その上で外部負荷 (stretch) が大きくなければ, エネルギーの余裕により筋収縮の仕事をする.

3. The innate capacity of man is to be a perfect hunter and gatherer

新たな生物種が安定したライフ・スタイルを確立するまでに, 10^4 回以上の世代交代が必要とされている. 生物進化とは, 世代ごとに遺伝子が僅かずつ変わり, ゲノムの増補・改定が集積される過程である.

ホモ・サピエンスの場合は数十万年以上にわたる狩猟・採集生活に適應する中で, 生理・心理機能が備わった筈である. 農耕・牧畜の始まりは1万年前に過ぎないが, 現代のライフ・スタイルには, 狩猟・採集生活の面影はない. 個体は変わらずに, 道具 (psycho-social tools) だけが発達している.

「道具とは個体機能の外化である」という定義がある. 工具は手の働き, クルマは足の働き, 料理は咀嚼・消化機能の働き, 光学機器は眼の働き, コンピューターは脳の働きなど, それぞれの機能を助け, 増幅するの

が“外化”である。

遺伝子は環境条件に応じて働き、表現型を作り出す。一卵性双生児でも、ライフ・スタイルにより運動能力に差ができる。道具による機能の外化は、ヒト個体の本来の能力の向上と退化のいずれにも働くのである。

4. Hunter and gatherer としてのヒト

微生物から鯨までの各種の生物における代謝速度 [Kcal/hr] と体重 [gm] の関係を総括した図がある。

How animals work, (Knut Schmidt-Nielsen, 1972, 動物の作動と性能, 柳田 訳, HAW) の図 49 (Hemmingsen, 1960) のデータによると、体重 [g] とエネルギー関係は、

単細胞生物： $1.12 \cdot 10^{-7} \cdot \text{体重}^{0.74}$ [KJ/s],

変温生物： $8.72 \cdot 10^{-7} \cdot \text{体重}^{0.74}$ [KJ/s],

恒温生物： $320 \cdot 10^{-7} \cdot \text{体重}^{0.74}$ [KJ/s],

となる。恒温性を保つには同じ体重の変温動物の36倍のエネルギー・コストが掛かる。体温調節機能の分、体のサイズも大きくなっている。

環境温度に縛られず自由に生活するには、優れた探索能力と俊敏な体力が必要になる。大型化は進化の利点であり、初期の小さな哺乳類の大型化も起ったが、Schmidt-Nielsen はいまひとつ走行の為のエネルギー (体重 1 g 当り) が大型になるほど少なくて済むという利点もあると指摘している。

HAW の図32では、動物の移動運動のデータを、酸素消費量 (1 km/gm 体重) と個体サイズ (体重, g) の関係を、 $\text{Log} [\text{酸素量}] = A - B \cdot \text{Log} [\text{体重, g}]$ の式により纏めている。単位体重当りの移動コストの係数 B は；

魚類0.256, 昆虫類と鳥類0.292, 陸棲哺乳類0.402

地上移動が有利なのは、水中では重力が1/6G であり、空中は抵抗が少ないことに関係している。

この比較は移動経費の正味 (運動性経費) についてであるが、同じ図32に測定期間中の総消費エネルギー (非運動性経費 + 運動性経費) のデータもある。その回帰は二次曲線になっている。

前述したように、静止状態でも筋はエネルギーを消費している。非運動時の個体内の代謝も活発な筈である。総経費に占める運動の正味経費の割合が、個体サイズの違いでどう変わるのかをみたのが、Fig.1 である。Fig.1 の横軸は常用対数目盛りで個体サイズ [体重 g] を示し、縦軸は運動性経費の回帰式を総経費の回帰式で割った曲線である。体重 8 kg の哺乳類は総

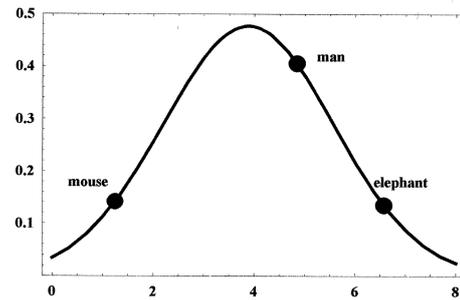


Fig. 1 The rate of the move cost to the total cost. A mouse needs homoeothermic cost and an elephant needs anti-gravity cost. A man is quite efficient.

経費の48%が運動経費に回せるが、体重10ton では8%, 体重10g で11%しか使えない。黒丸印は図の左からハツカネズミ (体重17g), ヒト (体重70kg), ゴウ (体重3.75ton) の位置である。ヒトは約40%が使える。

ヒトのエンジン出力はゴウやネズミの3倍 (g 体重当り) スポーツ・カーなみである。

Hunter は俊敏な殺し屋、その条件に合うのが中型哺乳類である。完全骨格の発見で体重 6 ton のティラノザウルスは鈍重な腐肉の掃除屋と判明した。恐竜の殺し屋たちも中型だったのである。

動物は立ち上がって移動する。運動の正味経費の内容につき、HAW の図30は、マウス21g からイヌ18kg までの代謝速度と走行速度のグラフである。代謝速度 (cal/hr/g 体重) は走行速度とともに直線的に増大し、代謝速度 = $A + B \cdot \text{走行速度}$ の式が使える。

A は速度ゼロのときの所要経費であり、B が走行性能に関連している。また係数 A, B は種特異的である。

大型になる程減少する傾向は A, B ともに示すが、前述の-0.40の値はこの場合、係数 B であり、速度ゼロに対応する係数 A は-0.20である。A は陸棲動物が重力環境下で立って静止しているときの経費を表す様である。図30に基づく A, B と個体サイズの関係は；

$$A = 1.374 - 0.207 \cdot \text{Log} [\text{体重 g}]$$

$$B = 2.241 - 0.390 \cdot \text{Log} [\text{体重 g}]$$

A は姿勢 (形態) の維持経費、B は正味の推進経費の係数とみなして、B/A の値と個体サイズの関係を示すのが Fig.2 である。

横軸は常用対数目盛りで個体サイズ [体重 g] を示し、縦軸は推進経費の姿勢維持経費に対する倍率である。黒丸印は左からハツカネズミ、ヒト、ゴウの位置であり、ヒトで距離 1 km の歩行に必要なエネルギーは直立と歩行にほぼ半分ずつである。

小型の哺乳類は、重力には縛られないが、体温の維

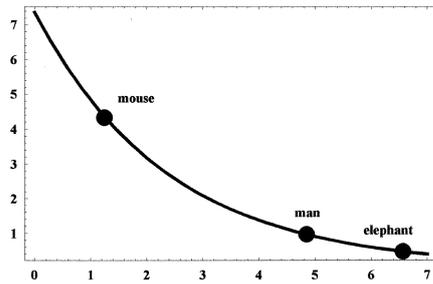


Fig. 2 The ratio of the move cost to anti-gravity cost.. When the body size of animal becomes large, the move cost per unit weight decreases.

持と移動経費のために食料確保に追われている。大型になると、草食で食料は確保できるが、重力の制約が大きくなるので、太い骨や足などの抗重力構造の維持が優先し、敏捷性は犠牲になる。

5. ヒトの歩く速さ

IHSのクレストに、太陽に向かって歩くヒトの姿がある。古代のエジプト・ギリシャ・ペルシャなどで使われた距離の単位、stadion、は、朝の太陽がはじめてから地平線を離れるまでの2分間にヒトが歩いた距離である。その平均は約92m/分になる。1977年最初のネパール調査で、歩く日常生活の人々の歩速は90±12m/分であった。九大の学生2000例のスタスタ歩きでは約90m/分である。これは急ぎ足ではない。ネパール人や古代人（日本の江戸時代人も）は、この速さで毎日旅を続けるのが常識だったのである。

この歩行能力がヒトのゲノムに記録されている筈だが、その実現は個人のライフ・スタイルのあり方で異なる。食塩の過剰摂取の問題は、ヤノマモ族の調査に端を発している。確かに現代人の疾患（高血圧リスク）の予防に役立った。しかしヤノマモ族が狩猟・採集生活であることは注目されなかった。関連する動物実験でも、運動不足のネズミたち（現代人には最適のモデル）が貢献した。IHSの川崎グループによる研究は、食塩が多くても段々畑で働くネパール村民には加齢に伴う血圧上昇が起らないことを実証した。

外化による退化、歩く能力の低下は連鎖的に他の諸機能も衰えさせる。だからこそ、歩く健康づくりは、本来の総合的な能力の回復に役立つのである。

6. 歩行運動中のエネルギー配分と重力

歩くより走れと云われた時代があった。走ると脚力

は増し、スポーツのトレーニングにはなる。然し、健康づくりは、自分に備わったゲノムの可能性を十分に発揮することなので、ヒト本来の歩く能力のレベルに達すること（毎日十里歩いて旅ができる）が先決である。現代人には歩行は軽い運動ではない。水中や空中の移動運動に比べると、陸上移動における体重の増大は移動経費の節約に役立っている。但し減ったのは推進エネルギーだけである。

ここで歩行運動の力学モデルにつき、エネルギー配分を考えてみることにしたい。

物理的には速度はベクトルである。モデルの体重は重心の一点に集中し、[体重]*[重力加速度]*[高さ]が姿勢維持のエネルギーに相当することになる。角度 θ で踏み出す脚筋の力積（Mechanical Impulse）に基づく歩速ベクトルは、垂直成分と水平成分に分解できる。 $\theta=90$ 度で個体は直立・静止、推進エネルギーはゼロだが、抗重力の垂直成分のエネルギー消費は持続的である。（Fig.2のときの係数A 参照）

Fig.3は質点の放物線と角度 θ の関係を示している。ヒト個体の重心の高さは一定なので、踏み出す力が大きいと角度 θ が減少し、歩幅が広くなり、速度が増す。ヒトは二足歩行であり、左右の脚の動きに $\pi/2$ の位相差があるので、重心の上下動は小さい（Fig.4）。

踏み出し角度で速度が決まり、そのベクトルは二成分にわけられる。速度の二乗がエネルギーに比例するので、垂直成分と水平（推進）成分のエネルギー配分を推定できる。Fig.5は横軸に角度 θ [Radian]、縦軸にエネルギーの大きさを、0～1の相対値で表している。

このモデルでは、分速90mのとき θ は1.14程度なので推進に20%、残りのエネルギーは倒れぬ（抗重力）ために費やされている。

陸上の移動運動では、抗重力性と筋力の関連が大きい。Fig.1で示したように、中型動物は筋力が有利に使え敏捷である。肉食恐竜たちは大型ではなかった。

歩く健康づくりは、歩く距離や速さだけに意味があるわけではない。

高齢者には、日に10分程度のsteppingが有効という報告がある。立つだけでも抗重力性は増す。歳相応の方法があつてよい。

7. まとめ

医科学の役割は、こまめにアラを探し修復の方法を考えることである。運動不足のネズミたちも有効なモ

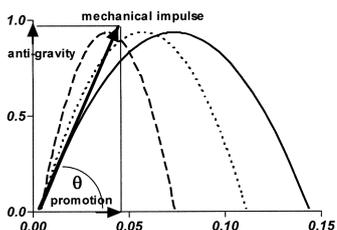


Fig. 3 Two ingredients of the walk speed vector. The model of single step shows the relation between anti-gravity cost and horizontal move cost.

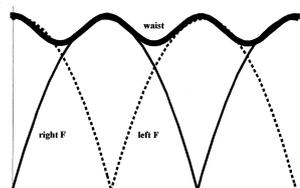


Fig. 4 Waist movement when walking on two foot. The phase difference of a leg is suppressing the shake of the waist.

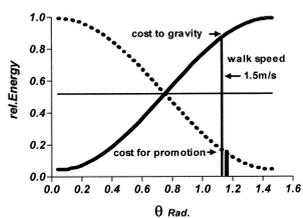


Fig. 5 The angle and the energy distribution. If it steps forward at the angle of 1.27 rad., speed will be 90m/min. About 80% of energy is consumed by the perpendicular ingredient at this case.

デルになる。動物実験が役立つのは、彼らの遺伝子が進化学的に近縁だからである。

農業・牧畜は人為的に生育環境を操作する。野生の動植物が選別され養殖 (cultured) 型になる。現代人のライフ・スタイルもやはり人為的な面が多い。換言すれば、現代人の殆どは養殖人間なのである。

康寧の科学での動物実験は難しい。自立して暮らす元気な野生動物は非協力的である。手がかりは動物行動学しかない。ともあれ、康寧の科学では、道具による外化の功罪を確かめ、自然人間の活力をさらに増進する基礎を探りたいものである。

参考；本文中で紹介した How animals work, (Knut Schmidt-Nielsen, 1972) の柳田訳「動物の作動と性能」絶版のため、以下にその原図を転載する。

106 からだのサイズとスケーリングの諸問題

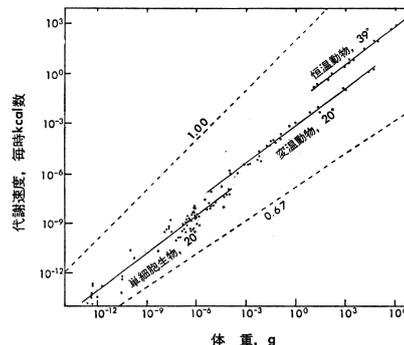


図 29 各種の生物における代謝速度対体重の関係。両軸上の各区画標は 1000 倍の差差を表示したもの。(Hemmingen, 1960 年, からのデータ)

58 運動作業, エネルギー, そして蒸発

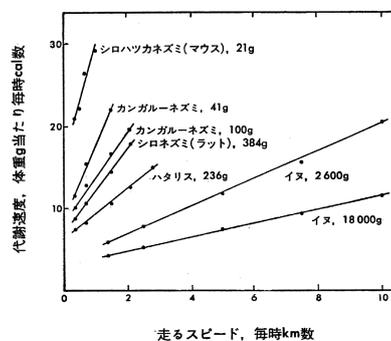


図 30 走行中の動物の酸素消費は走るスピードとともに直線的に増加する。そのおかげで走ることに要するエネルギー経費を計算することができるが、この経費は本文中で説明するように種ごとで恒常で、体のサイズが増すにつれて減少する。(Taylor, Schmidt-Nielsen および Raab, 1970 年, からとる)

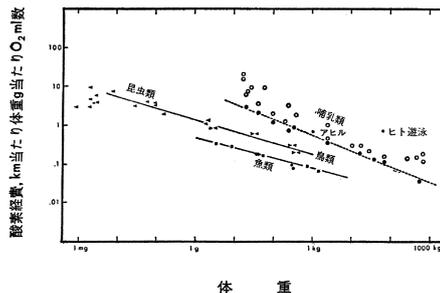


図 32 動物の移動運動の所要経費。動物の体重 1g 当たりを距離 1km だけ輸送するに要する酸素量で表わす。特記した場合を除き、これらデータは運動中の総代謝支出額についてのもの。丸印—歩行中ならびに走行中。黒丸は移動運動の正味経費を表わし(図 31 と同一データ)、回帰直線は最小自乗法により算出。白丸は運動中の動物の総酸素消費量を表わし、したがって休息時(もしくはゼロ・スピード時) O₂ 消費量をこめる。これらの点はそのため正味経費を表わす回帰直線の上にくる。(Tucker, 1970 年, と同一出典に基づき計算。諸他の出典からの測定点も付け加えた。) 矢尻印—飛行中の動物。矢尻二つは鳥類、同じく一つは昆虫類。回帰直線は目測で引いた。四角印—遊泳中の動物(魚類。他にアヒルとヒトの場合は特記してある)。回帰直線(目測で引いた)に沿う五つの点はサケの場合のもの (Brett, 1965 年)。菱形印二点はシロマスとカワヒメマスとでのもの (Matyukhin および Stolbow, 1970 年)。二重菱形印はビンフィッシュ(タイ科の魚類 *Lagodon rhomboides*) でのもの (Wohlschlag ほか, 1968 年)。「アヒル」と記した四角印は Prange および Schmidt-Nielsen (1970 年) からとる。