

《 総 説 》

二関節筋と運動制御*1

熊本 水 頼*2

Motor Control Properties induced by Bi-articular Muscles*1

Minayori KUMAMOTO*2

Abstract : Recently the unique functional characteristics of bi-articular muscles have been revealed by means of EMG kinesiological analysis and control engineering analysis. A two-joint limb link mechanism provided with one antagonistic pair of bi-articular muscles passing over two adjacent joints as well as two antagonistic pairs of mono-articular muscles at both end joints could control output forces exerted at the end point of the link mechanism in an arbitral direction with only a single input command signal informing the desired direction. The output force distribution of the limb link mechanism with three pairs of six muscles showed a hexagonal shape, whereas the link mechanism without the paired bi-articular muscles and only with the two pairs of mono-articular muscles showed a tetragonal shape. Configurational characteristics of the hexagonal output force distribution indicated that an individual functionally different effective muscular strength can be evaluated from the output force values of four designated points on the output force distribution line. Such a limb link mechanism could also dissolve contact tasks in order to maintain postural stability. Clinical applications utilizing the unique control properties of bi-articular muscles may shed light on future rehabilitation medicine therapies. (**Jpn J Rehabil Med** 2012 ; 49 : 631-639)

Key words : 二関節筋 (bi-articular muscle), 拮抗筋 (antagonistic muscle), 出力制御 (output force control), 剛性制御 (stiffness control), 軌道制御 (trajectory control)

はじめに

私どもの肘や膝にモーターは付いてはいない。二の腕を触れば力こぶ、これは二関節筋である。極めて当たり前のことを敢えてここで採り上げねばならぬのは、いま現在、リハビリテーションや整形外科の教科書や参考書で二関節筋を計算に取り込んで動作を解析している例がほとんどないのが現状だからである。関係学会誌の術後評価の動作解析に関する論文を見ても然り。動作解析はほ

とんどがモーションキャプチャーベースで筋駆動の概念、二関節筋の存在を計算に取り込んだものは皆無とってよい。しかし二関節筋のことを知らなくても何ら深刻な問題は起こっていない。医者や理学療法士が二関節筋の特性を知らなくてもどのような運動処方を与えても、もちろん患者は詳しいことは知らなくても、患者自身本来持っている二関節筋を駆使してどんな運動処方もやり遂げてしまう。この地球上の四足動物が3億5千万年前から連綿として受け継いでいる二関節筋の、類い希な運動制御機能は、使い手の動物は、もち

2012年3月28日受稿

*1 本稿は第48回日本リハビリテーション医学会学術集会教育講演(2011年11月3日, 千葉)をまとめたものである。

*2 京都大学名誉教授/〒520-0027 滋賀県大津市錦織2-9-16

Emeritus Professor of Kyoto University

E-mail: RXG05012@nifty.com

ろんヒトも含めて、理屈など知らなくても関係なく、素晴らしいパフォーマンスを披露してくれている。この限りでは問題はなかったのだが、二関節筋の特性が明らかになった上で改めて従来の参考書類や論文を見直してみると二関節筋の特性を反映させた論説はほとんどないことに気付かれるはずである。特に、理学療法士作業療法士国家試験出題基準が作成され、重要事項として生体力学の基礎、「身体とてこ」の解説をみると、関節トルク力学体系が如何に深く浸透しているか思い知らされると共に、避けて通れぬ二関節筋の理論体系の理解の普及を急ぐ必要性を痛感する。さらに工学技術の進歩は関節モーター駆動の Powersuits を患者に装着しようとしている。制御機能特性の違う装具が人体にどのような影響を与えるのか詳しく検証されているのであろうか。二関節筋の存在意義について最近の知見を紹介し、課題点を整理しておきたい。

実効筋概念導入

我々の上肢、下肢の筋配列はいうまでもなく複雑である。しかし一般的解剖書に依っても明らかだが、上肢下肢共に制御機能特性に関わる拮抗二関節筋、すなわち上肢では上腕二頭筋と上腕三頭筋長頭、下肢では大腿直筋とハムストリングス（大腿二頭筋長頭、半腱様筋、半膜様筋）、これらの筋の起始、付着は第1リンク（上腕あるいは大腿）と第2リンク（前腕あるいは下腿）が作る2次元平面内に局在している。かつ第1関節（肩関節或いは股関節）は球関節だが第2関節（肘関節或いは膝関節）は運動中1軸と考えられるので、四肢が3次元空間を自由に屈伸運動をする最中拮抗二関節筋の筋走行は第1リンクと第2リンクが作る2次元平面内を外れることはほとんどないことが確かめられた¹⁾。したがって拮抗二関節筋と共にリンク機構の制御機能に参画できる拮抗一関節筋群は第1リンク、第2リンクが作る2次元平面内にある筋、または筋束に限られることになる。これを一関節筋か二関節筋か、一関節筋であれば第1関節（肩関節或いは股関節）の屈筋（f1）

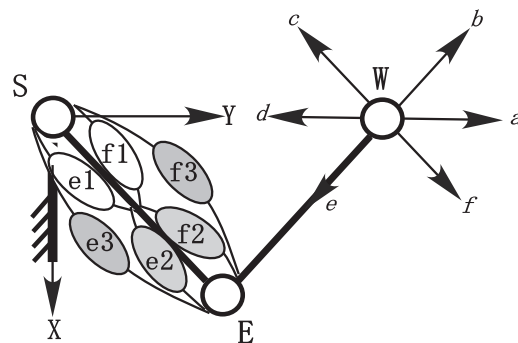


図1 実効筋概念導入による上肢基本モデル

S：肩関節，E：肘関節，W：手関節，f1；e1：肩関節拮抗一関節筋，f2；e2：肘関節拮抗一関節筋，f3；e3：拮抗二関節筋でf3は上腕二頭筋，e3は上腕三頭筋長頭，実在筋と同じ。a～f：系先端Wにおける出力方向，a-d：肩関節（S）と手関節（W）を結ぶ方向，b-e：前腕に沿った方向，c-f：上腕に平行な方向

か伸筋（e1）か、第2関節（肘関節或いは膝関節）の屈筋（f2）か伸筋（e2）かで機能別実効筋と定義し、符号化して解析を進めることとした（図1）。二関節筋については上腕二頭筋およびハムストリングスをf3，上腕三頭筋長頭および大腿直筋をe3とした。上肢の肢位によって（f3：e3）および（f2：e2）は実効筋を構成する実在筋の内容は変わらないが，f1は上肢が矢状面にあるときは三角筋の前部筋束だが，水平面に移ると大胸筋鎖骨部などが加わり，e1は矢状面では三角筋後部筋束に加えて大円筋等多くの伸展筋群が参画するが，水平面では三角筋後部筋束のみが主となり他の筋群の影響は少なくなる¹⁾。

四肢先端制御機能特性について

1. 剛性制御（姿勢制御）

上肢，下肢共に拮抗二関節筋は強大であり，決して無視できる存在ではない。したがって関節駆動力学体系に基づく従来の生体力学で考えられていた個々の関節の独立した関節剛性に代わって，拮抗二関節筋の存在は，四肢2関節リンク機構の系全体の剛性，あるいは系先端剛性を考えるべきことを示唆するものである。

工学的解析の結果は拮抗二関節筋を含む3対の

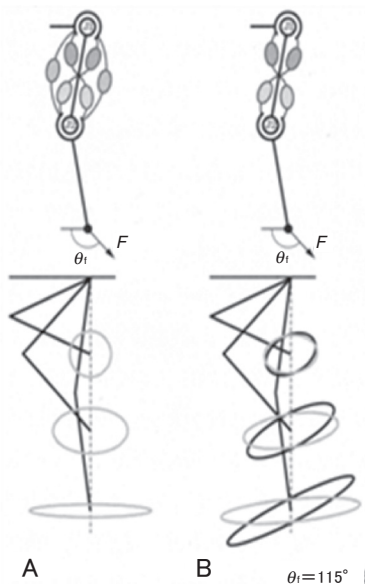


図2 拮抗二関節筋の有無が系先端剛性に及ぼす影響
剛性楕円は重なり合うので剛性の逆数であるコンプライアンスで表してある。図では剛性の楕円に直交する楕円となるので、楕円の径の短いほど剛性が高いことを表している。

A: 拮抗二関節筋が装備されていると外部擾乱 ($F: \theta_t = 115^\circ$) に対して剛性の楕円に変化はない。姿勢が安定して保持されていることを示す。B: 拮抗二関節筋がなくて、拮抗一関節筋のみの場合、外部擾乱は剛性の楕円の形状を変える。姿勢不安定となる。

拮抗筋の存在が系先端剛性の楕円を自由に制御できることを示すもので、機構的に外部擾乱に対して、四肢先端からの感覚情報のフィードバックなしでも安定した姿勢制御を可能としていることを示している(図2)²⁾。これは脊髄反射による姿勢制御以前に、拮抗二関節筋を備えた機構そのものがバランス機能に貢献していることを示す。これは神経による情報伝達・演算処理時間の致命的遅延を補うものと考えられる。

これを脊髄反射、さらに上位中枢による制御が如何に関わってくるのか見極めること、これが今後臨床応用を考える上で重要となろう。

2. 軌道制御(力と変位の関係)

工学的には Contact task と呼ばれるもので、本来拮抗二関節筋を持っているヒトや動物は Contact task は解消されていて全く問題にならない。

しかしここで敢えて言及するのは、関節毎にモーターが配置されているだけのパワースーツのような介助機器が市場に出回っているからである。2関節同時駆動の概念のないロボット工学の領域では最も深刻な問題の1つである。

理論的ならびに実験的解析の結果、リンク機構系先端に外力が加えられたとき、拮抗二関節筋が装備された機構では負荷の方向と変位の方向は一致して問題ないが、拮抗二関節筋のない機構では一致せず、ずれてしまうことが示された。系先端の位置の情報を常に追ってフィードバック制御が欠かせないことになる²⁾。図7Cに示すように、関節にモーターを装備しただけのパワースーツのようなものを装着したとき、着床の床反力の方向に変位は一致せず、滑る力が働くことになる。また出力分布も違えば患者が違和感を訴えるのは当然であろう。しかし六角形の出力分布の特異性に基づくヒトの卓越した適応能力が少々欠陥理論にも対応してしまうことは後述する。

四肢先端出力特性について

1. 筋電図動作学的解析

図1に示す機能別実効筋が四肢リンク機構先端に発揮する出力にそれぞれどのように貢献しているのか、筋電図動作学的解析を試みた。上肢と下肢の実効筋配置は鏡像的に対象であるが、拮抗一関節筋からの筋放電の導出に容易な上肢を対象に実験を進めた。先ず上肢を水平位ならびに矢状面に保ち、手根関節部に力検知器を装着し、等尺的最大努力で全方位、 360° の方向に力を発揮させた。この間、機能別実効筋を代表する筋、すなわち肩関節と肘関節にまたがる1対の拮抗二関節筋(上腕二頭筋: Blo と上腕三頭筋長頭: Tlo のペア)ならびに両端の関節の拮抗一関節筋群(肩関節では三角筋前部: Da と同後部: Ds のペアおよび大胸筋鎖骨部: Pc と大円筋: Tm のペア、肘関節では上腕三頭筋外側頭: Tla と上腕筋: Br のペア)から表面電極誘導法によって筋電図を記録した。8名の被験者について、それぞれ上肢を伸展させた姿勢、屈曲させた姿勢とその中間の3種の姿勢

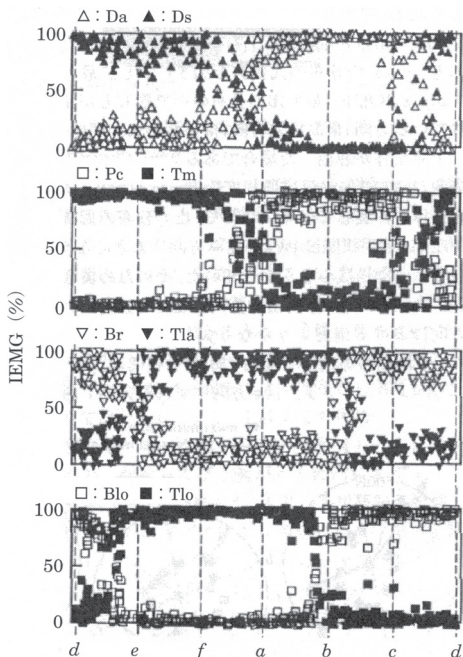


図3 百分率表示積分筋電図

縦軸：百分率表示筋活動レベル，Da：三角筋前部，Ds：三角筋後部，Pc：大胸筋鎖骨部，Tm：大円筋，Br：上腕筋，Tla：上腕三頭筋外側頭，Blo：上腕二頭筋長頭，Tlo：上腕三頭筋長頭．横軸：a～f：図1に示す系先端出力方向を表す．

について試技を行わせた。

全ての筋電図を比較検討した結果、ほとんど同様な放電様相を呈していた。そこで筋放電の積分値を求め百分率表示をして全ての記録を重複描記したものが図3である。この図から、各拮抗筋ペアはそれぞれ特定の出力方向領域で放電活動を交代し、拮抗二関節筋、肘関節拮抗一関節筋、肩関節拮抗一関節筋と放電活動を交代する領域が順次変わり、2巡して全方位をカバーしていることが判る。1対の拮抗二関節筋と2対の拮抗一関節筋群が見事に協調した活動様相を呈していた³⁾。

2. 機械的リンクモデルによる理論的解析

機能別実効筋概念を導入して構築した拮抗二関節筋装備基本筋骨格リンクモデル(図1)の系先端Wにおいて最大出力を発揮させるための各筋の出力レベルを理論的に計算してグラフにプロットしたものが図4である。明らかに図3の筋電図パターンに似ており、それぞれの拮抗筋は特定の

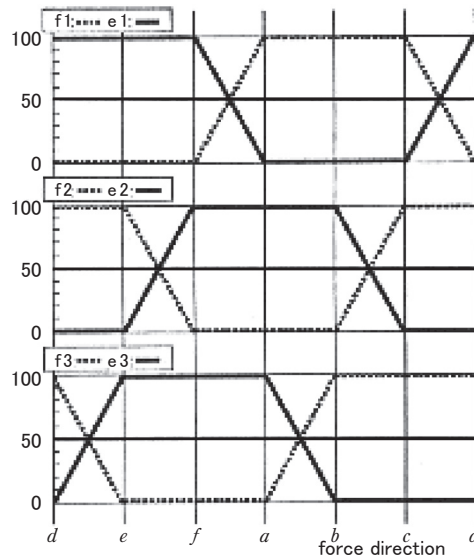


図4 基本モデルの系先端に最大出力を発揮させるための各筋出力レベルの理論的計算結果

縦軸：実効筋活動レベル．横軸：系先端出力方向，図1に同じ

角度領域で活動レベルを交代しながら出力方向制御に貢献し、3対で全方位をカバーしていると考えられる³⁾。

3. ロボット工学的解析

さらにロボット工学的に確認実験を行うために、空気圧制御ゴム人工筋を使い、拮抗二関節筋を含む3対の拮抗筋を装備したロボットアームを製作し、各筋を図4に示す出力レベルパターンで駆動した時のロボット系先端に発揮される力をプロットした出力分布が図5である。すなわち3対の拮抗筋の存在が360°の方向へわたって出力方向を制御し、かつ出力分布が六角形を示すことを実証している。

系先端出力分布が何故六角形となるのか、理論的にも詳述してあるが⁴⁾、視覚的に示したのが図6である。

ここで注意すべきは、従来の関節トルクに基づいた力学教科書は、例えば図6左の筋f2が収縮するときには、関節Eの周りにトルクを発生させるので、系先端Wでは前腕軸に直角に力を発揮すると述べてある。関節Sを完全に固定した機械

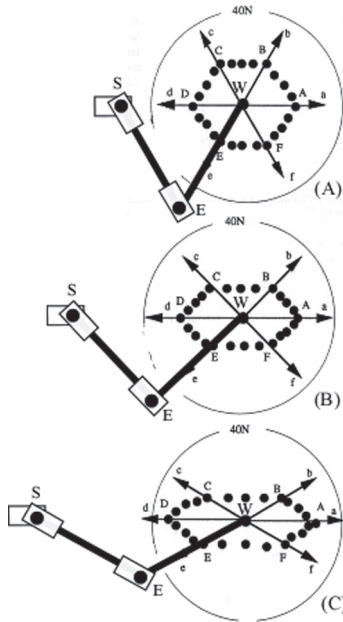


図5 アームロボット系先端出力分布
肘関節角度を上(60°), 中(90°), 下(120°)と次第に伸長したとき系先端出力分布の形状が横長に変化する様子を示す。

的リンク機構ではいざ知らず, 人体では肩関節Sを完全固定することはできない。肩関節S, 肘関節Eが共にフリーなリンク機構では肘関節周りの1関節筋f2およびe2は手根関節Wと肩関節Sを結ぶ方向に出力する。肩関節周りの1関節筋f1およびe1は前腕に沿った方向に, 拮抗二関節筋

f3およびe3は上腕に平行な方向に出力する(図6左)。したがって任意の出力方向に対して, 影響する各筋の出力和を幾何学的に求めると図6右に示すように六角形の出力分布図が得られる。

拮抗二関節筋の存在を無視し関節トルクで計算した場合には系先端出力分布は四角形となり生体本来の出力特性を現すことはできない。理論的実験的に実証確認した結果が論文⁴⁾である。図7に示す歩行着床時の動作解析に当たっても, 床反力は脚本来の六角形の出力分布特性(A)によって補償されているはずで, 関節トルク(B)では生体本来の特性は解析できない。

出力特性を再現する神経回路網

図2に示す筋活動様相は, 脊髄におけるα運動ニューロンの活動様相そのものである。そこで図2において各拮抗筋ペアの活動レベルが特定の出力方向領域で一方が漸増的に変化するとき他の拮抗筋は漸減的に変化することに着目し, かつ活動レベルの交代は少なくとも4個の筋束を仮定すれば理解しやすいことから図8に示す脊髄レベル神経回路網を提案した。図の上部に示すスイッチボードは, このような装置が脊髄にあるというのではなく, 出力方向を示す上位中枢からの指令を具象化したものである。この回路は出力方向aとbの間で活動レベルを交代しているので, 拮抗二

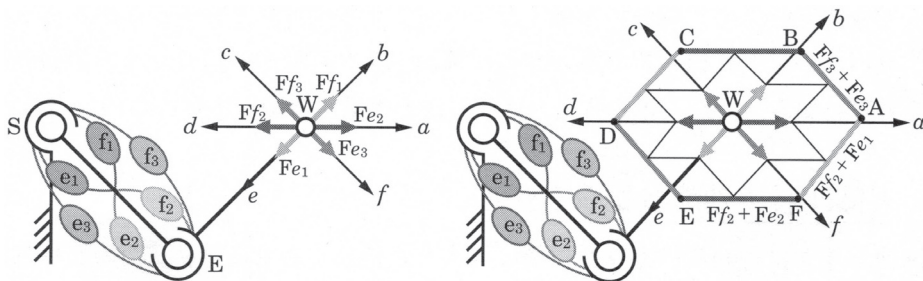


図6 各実効筋の系先端出力方向(左)と六角形出力分布(右)

(左) 各実効筋($f_i; e_i; i=1, 2, 3$)が肩関節(S), 肘関節(E)が自由な条件下で系先端(W)に発揮できる出力値($Ff_i; Fe_i; i=1, 2, 3$)を示す。それぞれa~fの方向に沿っていることを示す。(右) 3対6筋の実効筋の系先端における出力分布図は各実効筋の系先端出力の幾何学的合成で得られ, ABCDEFの六角形となる。この六角形の各辺の長さが各拮抗筋の出力和になることを示している。

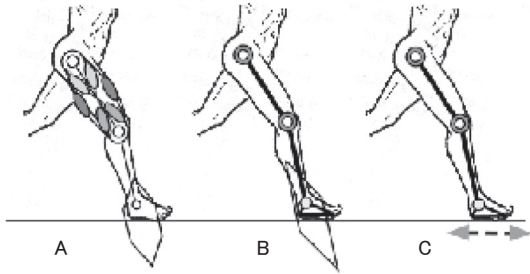


図7 下肢着床時の問題点について

A: ヒトの大腿部拮抗筋群による足関節部における出力特性は六角形の出力分布を示す. B: 関節にしかモーターを着けてない装具の出力特性は四角形の出力分布を示す. C: 関節にしかモーターを着けていない装具では Contact task は解消されていないので横に滑りやすい.

関節筋に対する回路を示している. このスイッチボードの部分をも 60 度ずつ位相をずらせて 3 個を 1 つに纏めると, 出力方向を指示する単一の入力信号で 3 対 6 筋の拮抗筋群の活動レベルの制御が可能となる³⁾. 我々は拮抗二関節筋と両端の関節の 2 対の拮抗一関節筋を装備し, かつ, これを単一の入力信号で任意の方向へ出力できる神経回路網を備えたリンク機構を協調制御モデル (Coordination Control Model) と呼ぶこととしている.

神経情報は電気情報に他ならない. したがって神経回路網は電気回路で簡単に再現可能で, 我々の協力企業の 1 つは BiCCOM (Bi-articular actuator provided Coordination Control Model) OKI-ARM を製作し, 単一入力信号による任意の方向への出力や系先端出力分布が六角形を示すこと, 系先端剛性が楕円を示すことなどを実証している⁵⁾. ここで強調しておきたいのは人体四肢リンク機構では第 1 関節 (肩関節或いは股関節) と第 2 関節 (肘関節或いは膝関節) は独立に制御されているのではないという事実である.

関節トルクに代わる筋力評価法

1. 実効筋力計測評価法 (FEMS Program)

人体四肢の出力特性として拮抗二関節筋を含む実効筋の出力を計測, 評価することが求められる. それを計測評価できるシステムは図 6 右に示

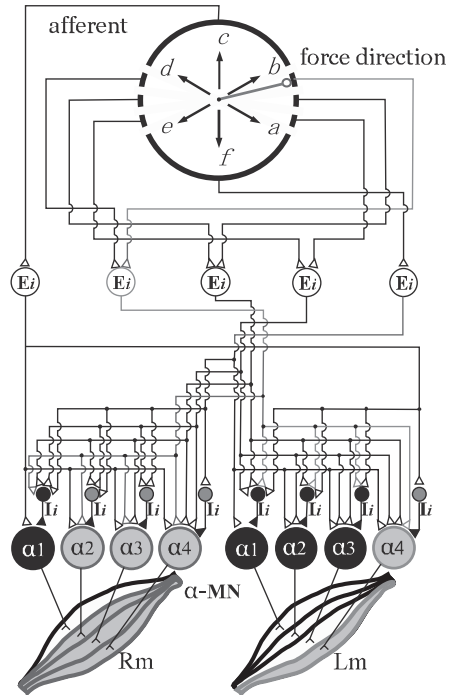


図8 拮抗筋の活動レベル交代を再現する脊髓レベル神経回路網

上部スイッチボード: 出力方向を指す上位中枢からの指令を具象化したもの. 出力方向 a~f は図 1 に同じ. E_i : 促進性介在ニューロン, I_i : 抑制性介在ニューロン, αMN : α 運動ニューロン, R_m ; L_m : 1 対の拮抗筋を示し, それぞれ $\alpha 1 \sim 4$, 4 個の筋束から構成されると仮定.

されている出力分布の形状特性に可能性を見出すことができる. すなわちこの六角形の出力分布の幾何学的合力計算の過程から次のことが明らかとなった. 先ず, 辺 AB と辺 DE は上腕に平行で, その長さは拮抗二関節筋の出力和 ($Ff3 + Fe3$) に等しい. 次に辺 BC と辺 EF は肩関節 (S) と系先端 (W) を結ぶ方向に平行で, その長さは肘関節拮抗一関節筋の出力和 ($Ff2 + Fe2$) に等しく, さらに辺 CD と辺 FA は前腕に平行で, その長さは肩関節拮抗一関節筋の出力和 ($Ff1 + Fe1$) に等しい. したがってこれらの性質を利用して, 被験者の負担を軽減するためできるだけ少ない計測点で評価する方法として提案されたものが図 9 に示す 4 点計測法である. 詳細は参考文献⁶⁾ を参照していただくとして, 現在, 協力企業の協力を得て試作器の改良が進められ, データ収集が進め

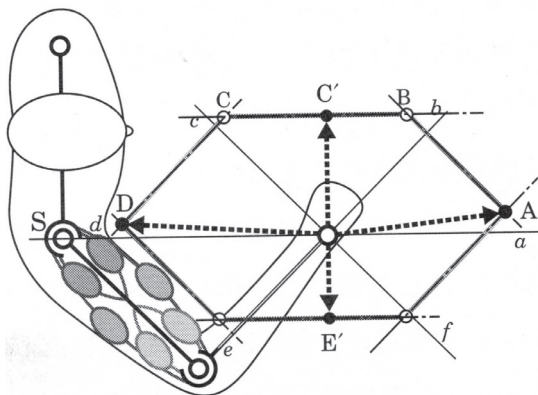


図9 実効筋力評価4点計測法

られているところである。

2. 融通無碍の出力特性

図10はある六角形の出力分布を構成する ($f_i + e_i : i=1, 2, 3$) の組み合わせは無限に存在することを示している。3対6個の実効筋の1つを決めてやらなければ解は求まらないが、反面、ある1つの筋が疲弊しても他の筋の出力の調整で全体の出力特性には影響は出ないこと、すなわち融通無碍の高い適応能力を示している。出力特性の違う装着型パワースーツのような装具を押しつけられても違和感はしばらくのことで、順応できる根拠をも示す。しかし一時的に順応した後、人体にどのような影響が出るか、未だ聞いていない。

二関節筋獲得の進化的背景

現世の陸上2足・4足動物は、哺乳類を始め鳥類、爬虫類から両生類に至るまで、殆ど全て拮抗二関節筋を備えている。したがって二関節筋は進化史上原始魚類が四肢を得て水中から陸上に上がることに成功し、原始両生類へと進化した時点で獲得したと考えるのが自然であろう。そこで制御の基本と予想される拮抗筋制御の淵源を探るため、約5億7千万年前カンブリア紀の初めに現れて、今なお世界中の温帯、亜熱帯の砂質海底に生息している頭索動物のナメクジウオが線維性脊索の両側に配置された筋でS字状波動運動で遊泳していることに着目した。その筋は現世高等動物の

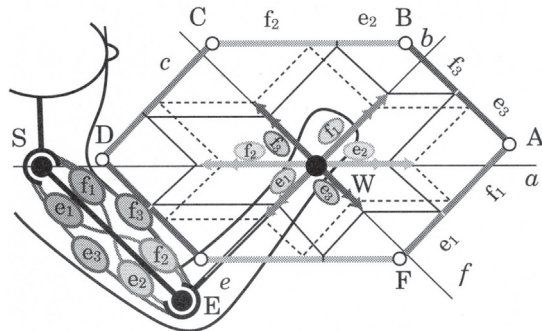


図10 融通無碍の出力特性

横紋筋とほとんど変わらない構造を示し、神経索には神経回路網を構成するに足る介在ニューロンを持っている。そこでベルト駆動による7対の拮抗筋配置を持つナメクジウオ工学モデルを作り、図8と等価な拮抗筋制御回路を時系列モードで制御することでS字状波動運動を生成し水中遊泳に成功した。さらにデボン紀に現れ、その一族が生き続けている肉鱗類のシーラカンスの胸鰭の解剖所見は、内層の回内・回外筋が拮抗二関節筋配置にありかつその筋束の一部が分離して両端の関節に2対の拮抗一関節筋配置をなしていることが確かめられた。これは前述した協調制御モデルの筋配置の基本原型を示していた。これは肉鱗類の仲間の上陸成功を運動制御の面から裏付けると考えている。さらに3個の拮抗筋制御回路を位相差組合せモードに組むとき、単一の入力信号で四肢リンク機構は任意の方向へ運動可能で、上陸初期の原始両生類の貧弱な中枢機能でも制御が可能であったと考えられる。拮抗筋制御システムを時系列モード(時間軸)から位相差組合せモード(空間軸)に変換するのは機械的、数学的には簡単にできることが実証された⁷⁾。しかし生物は恐らく7千万から1億の年月、文字通り命がけで獲得したものであろう。一端獲得した後はその卓越した制御機能特性の故に決して手放すことなく今日陸上動物全てがその恩恵に浴しているのである。

二関節筋力学体系の臨床応用例について

1. 加齢変化

下肢の出力の加齢変化を機能別実効筋の出力配分として計測された結果から、膝伸展筋群のうち二関節筋は衰えていなくて、一関節筋群のみが出力低下していることが示された¹⁾。その運動処方としては、1) スロースクワットを選択した場合、重心が大腿部中間を通るようにやや前傾姿勢を取らせる。理由は膝伸展ならびに股関節伸展一関節筋群に負荷をかけるためである。2) 自転車エルゴが効果的と考えられる。

2. 歩行解析 (動作解析)

動作解析も従来のモーションキャプチャーベースの解析に代わって機能別実効筋の出力配分からの解析が可能となった。歩行の例では、正常成人被験者の着踵時脚出力は当該被験者の脚最大出力のほぼ23～30%であると計測された⁸⁾。歩行は基本中の基本動作であり、心肺機能の維持、増強に適切な運動ではあろう。しかしながら脚筋出力の維持を試みる観点からは歩行の負荷は小さすぎる、特に高齢者にとって脚筋出力を維持することは重要であり、運動処方には前述したスロースクワットや自転車エルゴなどの処方調整が必要となろう。

3. 運動処方

運動処方を考えるのに二関節筋は避けられない命題でありながら、提示できる処方は残念ながら未だ多くはない。運動処方は拮抗二関節筋の存在を避けて通れる命題ではない。我々の研究会ではHP上に情報を公開しながら広く有志者の参画を求め、情報の蓄積を図りたいと考えている。

課 題

1. 知らぬが仏

二関節筋が関わる特異な出力特性、制御機能特性が解明されてきたのがごく最近ではあるが、“はじめに”で述べたように施術者も患者も二関節筋のことを知らなくても、どのような運動処方

にも患者自身は本来持っている二関節筋の卓越した機能を駆使して運動してしまう。施術者と患者の間だけで推移していれば何ら問題は起こらない。ところがこのような経過が論文化されると、論文著者、査読者その学術書の編集委員の全てが、二関節筋のことを知らない現実を暴露していることになる。悲喜劇としかいいようのない事態となる。Nature誌でさえ被験者は肩関節トルク肘関節トルクを独立に発揮できるような錯覚を持って論文化してしまっているのが現実である⁸⁾。

2. 身体とてこ

“はじめに”で触れた国家試験出題基準の問題点は従来の力学の解説に由来する。例えば肘関節屈曲の一関節筋が収縮すると、肘関節周りに回転トルクを発生させて前腕の軸に直交する方向に力を発生させると記されている。肩関節が固定され、上腕が動かないような条件下では確かにこのようになる。しかし普通身体運動は肩関節、上腕は自由に動ける状態で仕事をする。この場合、肘関節の一関節筋だけが出力できる方向は図6左に示すように手首と肩関節を結ぶ方向となるはずである。さらに肘関節一関節筋で手に持ったカップを口元に運べると、てこの原理として解説している。手にカップを持って口元に運ぶ動作をしながら、三角筋の前後筋束を触診してみれば直ぐ判ることだが、実効筋群が全て協調して活動して初めて動作が成立する。筋電図などを駆使するまでもなく触診で十分に確かめ得ることなのである。このような間違いが国家試験出題基準に資料として掲載されていると見過ごす訳にはいかない。

3. 大腿直筋の機能説明

ほとんどの解剖書は大腿直筋の機能について、膝関節を伸展させ、股関節は屈曲させると記載している。大腿直筋単独の機能としては間違いではない。しかし膝関節、股関節共に伸展しながら歩行の着地動作をするとき、あるいはジャンプをするとき大腿直筋はどのような役割を果たしているのか。解剖書の記載では説明できない。以前、筆者は理学療法士から「患者の膝関節トルク、股関節トルクは充分にあると思われるのに立位姿勢を取らせることができない。二関節筋が邪魔をして

いるのではないか」という質問を受けたことがある。立位姿勢や歩行の着床時、床反力の方向はおおよそ図6右のa方向とb方向に挟まれた角度領域に落ち着く。拮抗二関節筋が出力方向制御を行っている領域なのである。大腿直筋に関する現代の解剖書の記載はおおよそ2000年前、既にC Galen (131～201 AD)によって述べられた働きと同じなのである。しかも彼は同時に筋の機能は身体全体の中でどのような貢献をしているか考えなければならぬと警告している。協調活動を予見している先人の慧眼には唯々畏敬の念を抱くばかりである。

協調活動は四肢実効筋群の間だけに止まらないはずである。四肢と体幹、また体幹内の筋群の間にも協調した活動パターンを考える必要がある。個々の筋が独立して支配制御されているとは、その制御量からしても考えにくい。

4. マン・マシーン・インターフェイス

我々が最も危惧するのはこの領域である。ヒトの出力特性・制御機能特性と異なるパワー装具などを装着されたときに人体にどのような障害が起こるのか。詳しく調査、検証されたとは寡聞にして聞いていない。安心できる機能を備えた装具の研究開発を慎重に進める必要がある。

5. 科学基礎

二関節筋は諸々の科学領域、すなわち生理学、解剖学、バイオメカニクス、生体工学、等々おおよそ身体運動に関わる全ての学問領域の基礎の計算座標に関わるので科学基礎 (Fundamental Principle of Sciences) と定義づけることとした。いわばAxiomatic principleなのである。従来、全て関節トルク力学体系で論じられてきた領域で、影響するところ広範にわたり、paradigm shiftを余儀なくされるだけに深刻である。

何故このような事態を招いたのか。これは筆者自身にも重い責任があり、深い反省と共に記しておく。身体運動を力学的に解析する試みは前大戦後、欧米にて先ずKinesiologyとして始まり、動

的解析の重要性から程なくBiomechanicsと概念的に展開しながらわが国に導入されてきた。1950年代後半と想起されるが、機械的リンク機構の力学体系、すなわち関節トルク力学体系そのものであった。トルク計算に慣れていた我々は疑いもなく受け入れた経緯がある。二関節筋の特異性に気付いたのは近年のことで、罪滅ぼしも兼ねて、啓発活動を展開したいと思っている。

気鋭の有志の研究参画を切に願っている。研究活動は一般社団法人電気学会 生体機構に学ぶ運動制御協同研究委員会、啓発活動はNPO 生体機構制御研究会⁹⁾が担当することにしている。

文 献

- 1) 熊本水頼 編著：二関節筋. 医学書院, 東京, 2008
- 2) Kumamoto M, Oshima T, Yamamoto T: Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles—Mechanical engineering model analyses. *Hum Mov Sci* 1994; 13: 611-634
- 3) 藤川智彦, 大島 徹, 熊本水頼, 横井信安: 拮抗筋群による協調制御機能. 日本機械学会論文集 (C編) 1997; 63: 769-776
- 4) Oshima T, Fujikawa T, Kameyama O, Kumamoto M: Robotic analyses of output force distribution developed by human limbs. *Proceedings of the 2000 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Osaka, Japan, 2000*; 229-234
- 5) 熊本水頼 編著：ヒューマノイド工学. 東京電機大学出版局, 東京, 2006
- 6) 大島 徹, 藤川智彦, 熊本水頼: 一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による脚の機能別実効筋力評価—出力分布からの機能別実効筋力の推定—. *精密工学会誌* 2001; 67: 1824-1828
- 7) Tsuji T: Investigation of a lancelet robot with a triarticular muscle mechanism. *in Abstracts, International Symposium on Application of Biomechanical Control Systems to Precision Engineering—Engineering Review of Biological Evolution of Motion Control—* (ed by Kumamoto M) 2010; 64-67
- 8) Pruszynski A, Kurtzer I, Nashed J, Omrani M, Brouwer B, Scott S: Primary motor cortex underlies multi-joint integration for fast feedback control. *Nature* 2011; 478: 387-390
- 9) NPO生体機構制御研究会ホームページ: Available from URL: <http://air-dawn.net/>