

November Special

# 二関節筋

その意味とはたらき



2つの関節をまたぐ二関節筋。それを知らない人はいないだろう。しかし、では二関節筋はいったいなぜ存在するのか、なにをやっているのかとなると、詳細に答えられる人は少ない。長く二関節筋について研究されてきた熊本先生に取材。二関節筋に興味をもったきっかけから、その後の研究について、現在わかっていること、わかり始めていることなどを詳しく聞いた。長いインタビューを先生が編集された『二関節筋』（医学書院）という本とともに紹介する。

- 1 はじめに P.6  
——二関節筋への注目
- 2 二関節筋の研究 熊本水頼（以下同） P.7
- 3 進化からみた二関節筋 P.10
- 4 二関節筋研究の成果 P.14

# 1

二関節筋

## はじめに ——二関節筋への注目

「二関節筋」という言葉は、101号で丹羽先生らによる特集メディカルストレッチングで登場している。その二関節筋を長く研究されてきたのが熊本水頼先生。バイオメカニクスと整形外科の違いがあるが、熊本先生は最近『二関節筋』という本を編集された。はじめに、なぜ二関節筋の特集を組むか、どのような特集かを記しておきたい。

本誌101号で「メディカルストレッチング」を特集に組み、丹羽滋郎先生のグループの成果を紹介した。そこで、「二・多関節筋」への注目がひとつのキーになっていた。

その丹羽先生から『二関節筋』という本が出版されたことを聞いた（今年5月刊、医学書院）。熊本水頼先生が編集されているとのこと。熊本先生とはある研究会でお会いし、鋭く熱を帯びた意見が印象的であった。

「二関節筋」についていつか特集を組もうと思っていたので、その本を購入、読み始めたが、丹羽先生が「面白いけれど、むずかしいという人が多い」とおっしゃっていたのを思い出した。

本誌101号で記したように、丹羽先生は、1986年に当時名古屋大学医学部解剖学教授の長松英一先生による『関節運動ヨリミタル筋学』（1936年、金原書店）に目を通したが、そこに、中高齢者の関節の可動域の減少は、関節の変化より関節を構成している二・多関節筋の伸展性にあるという記述に注目した。つまり、「加齢により関節の動きが悪くなるのは、筋の拘縮が大きな因子」とされていた。そこから丹羽先生は、全身の関節筋について調べていったという。したがって、丹羽先生らの著書『メデ

ィカルストレッチング——筋学からみた関節疾患の運動療法』（金原出版）にも二・多関節筋について詳しく記されている。丹羽先生と熊本先生は交流があり、二関節筋に関する研究に携わっておられる方とのつながりも広がっているようだ。

「むずかしいと言う人が多い」と言われる『二関節筋』を読み始めた。たしかに面白い。しかしむずかしいというか素養がなければわからないところも多い。約200ページの本、あまりに専門的すぎるところは読み飛ばし、あとは熊本先生にお会いしてお話を聞こうと決めた。

東京の学士会館でお目にかかり、長い時間、ノートパソコンに入った資料とともに解説していただいた。「むずかしいと言われるけれど、話を聞いたらそんなにむずかしくはないだろう」と笑っておられた。

この特集は、その長い時間の話と『二関節筋』の本を中心に紹介する。

なお、『二関節筋』は、監修・奈良勲、編集協力・内山靖、畠直輝で、「運動制御とリハビリテーション」という副題がついている。奈良先生は、神戸学院大学教授・総合リハビリテーション学部医療リハビリテーション学科理学療法学、内山先生は名古屋大学教授・医学部保健学科理学療法学、畠先生は国立障害者（旧名「身障者」）リハビリテーションセンター研究所障害工学研究部で、みなさん理学療法に関わる専門家である。

全体は、序章を含め6章からなり、別掲欄のようにになっているが、ご覧のとおり、工学と理学療法学が融合したような本である。この特集の詳細については、ぜひ本書にあたっていたきたい。

### ■『二関節筋』の主な内容

#### 序章 二関節筋力学体系—リハビリテーション領域への導入

- 1 二関節筋は邪魔な存在か（熊本水頼）
- 2 理学療法からみた運動・関節制御（福井勉）
- 3 リハビリテーション領域と工学との融合（内山靖）

#### 第1章 総論（熊本水頼）

- 1 二関節筋研究の歴史
- 2 実効筋概念導入に基づく四肢筋力骨格系リンクモデル構築
- 3 人体四肢出力特性と制御機能特性
- 4 考察

#### 第2章 進化史が語る必然性（熊本水頼）

- 1 二関節筋の誕生と運動制御の進化
- 2 進化史が示唆する人体筋配列の特徴

#### 第3章 計測・評価の実際

- 1 実効筋力の解析・評価法（大島徹）
- 2 実効筋力計測結果（阿部友和・熊本水頼）

#### 第4章 動作解析法

- 1 実効筋表示（FEMS）による動作解析（相澤高治・石井慎一郎・熊本水頼）



2008年5月刊  
B5判208頁  
医学書院  
4,410円

- 2 筋電図動作学的解析（熊本水頼）
  - 3 実効筋駆動ヒューマンシミュレーション（畠直輝）
- #### 第5章 臨床応用
- 1 理学療法実践（福井勉、大島徹、畠直輝）
  - 2 トレーニング応用（大島徹）
  - 3 バイオフィードバック法（熊本水頼）
  - 4 ヒューマンフレンドリーデザイン（熊本水頼）

# 2

二関節筋

## 二関節筋の研究

### 熊本水頼

京都大学名誉教授

以下は、学士会館で熊本先生に長い時間、二関節筋の研究について語っていただいた内容をもとに再構成したものである。

#### 「関節は動くか？」

スポーツでは動作を外側から見ています。ほとんどがモーションキャプチャーで撮影し、スティックピクチャーあるいは場合によってはスケルトンで表しています。たとえば「臨床バイオメカニクス学会」がありますが、以前は「整形外科バイオメカニクス学会」と呼ばれていたもので、毎年報告がなされています。術後の評価として、歩行や立ち上がり動作などを映像解析しています。では、その映像を何で表すか。それはどんな方法でもよいのですが、その際床反力がいくつというように計算をします。その床反力はどの関節から生じたものか、そういう解析がなされます。

しかし、では関節が動くのでしょうか。関節自体が動くのではなく、筋肉が動かしている。ところが、こうした臨床的な解析でもスポーツの運動解析でも、スティックピクチャーで表し、そこまではよいとしても、そこから計算するときには二関節筋の関与について触れられていることはまずありません。というのは、二関節筋が何をやっているのかわかなかったからです。

「関節は動くか？」と聞いたら、「動いていますよ」と答える人がほとんどです。「じゃあ関節にモーターでもついているのか?」。そこで初めて振り返る。たしかに、関節を動かしているのは筋肉で、筋肉を動かして

いるのは神経です。関節自体は動きません。

#### “motor control”と“motion control”

神経生理学会でも生理学会でも“motor control”という部門があり、国際的にもこれは「運動制御」を意味します。私が京都大学を定年退官して、次の職場の富山県立大学に移ったとき、工学部だったので、私の研究室を“Laboratory of human motor control”と表示したら、工学部の先生から、「電動機制御をやるのか」と言われた。工学の世界では、“motor control”は「電動機制御」になる。では彼らは「運動制御」をどう呼ぶかというところ、”motion control”と言っています。慶應義塾大学の大西公平先生が20年くらい主宰されている国際学会がありますが、そこでも“motion control”と言われています。

生理学者と工学の専門家とではこのように言葉自体が違っているのですが、生理学者に「運動制御はどうやっているのか」と聞くと、「神経が行っている」と答えます。しかし、神経が動くわけではない。言葉として、神経筋単位、motor unitというのは知っている。神経と筋はユニットでないと機能しないことはみな知っています。ところが、日常患者やスポーツ選手をみたときには、ばらばらになります。そこにギャップが出てくる。

筋肉は動力源と思っている人が多く、「制御」となると、うまく話がつながらない。そういうことが今でも続いています。

#### 二関節筋研究のきっかけとなったカヌー競技

私は、京都大学時代から長く二関節筋を



くまもと・みなより  
京都大学名誉教授。株式会社計算力学センター顧問。1949年九州大学農学部卒。1960年京都大学講師、医学博士、教授を経て、1990年退官。同年富山県立大学工学部教授。2002年株式会社計算力学研究センター顧問。2004年(社)精密工学会生体機構制御・応用技術専門委員会委員長

研究のターゲットにしてきました。なぜ、二関節筋に興味を持ったかと言うと、東京オリンピックのときから、カヌー競技のトレーニングドクターをしてきたのですが、まずカヌーのパドルを引く動作で筋電図をとった。当時はテレメーターがなく、京大の中庭に大きな組み立て式プールを置いて、そこにカヤックを浮かべ、先端と後ろを切ってチェーンでとめて、テストパドルを選手に思い切り引いてもらった。日本でトップクラスの選手です。テストパドルが折れるくらい力を入れて引いてもらったから、上腕二頭筋から放電がみられない。見た目には、肘屈曲位で力が入っているにもかかわらず、筋放電がない。京大に入ったばかりの学生では上腕二頭筋からは筋放電が出ていた。最初は機械が断線でもしたのかと思うと、引き上げるときにはちゃんと筋放電がみられる。「おかしいな」と思っ

# 3

二関節筋

## 進化からみた二関節筋

出力分布 (P.14、図11参照) は一見複雑だが、表現としてわかりやすいものである。上肢の場合、きれいな六角形になっている。先ほどの話の続きから、進化からみた二関節筋についての話へと進む。インタビュー形式でまとめていく。

### 一関節筋、二関節筋、三関節筋

——出力分布表示については、カヌーでのアプローチ同様、上肢が先だった。

そう。上肢のほうがやりやすい。下肢は、ヒトが直立歩行になってから5000万年たっています。はじめ、小さな霊長類は地上に君臨していた食肉類や有蹄類に追われて樹上に追いやられ、長い間の樹上生活の間、垂直方向の負荷に対応してきた。その後地上に降りてきた。もともとは上肢も下肢もまったく同じだったけれど、下肢のほうは垂直方向の負荷が大きくなったので、上肢の出力分布はきれいな六角形になるけれど、下肢は垂直方向に伸びています。

——上肢と下肢とでは、下肢には荷重がかかっているという違いがあるが…。

たしかにそうですが、それが根本的な制御の違いをもたらすほどではない。ただし、筋の出力配分はたしかに変わってきている。だから垂直方向の負荷が常にかかっている。それを代償できるような筋配列になっていると言えます。

——一関節筋は重力対応、二関節筋は制御、したがって寝たきりになるとまず一関節筋が衰えると書かれています。

それは当初、福井勉先生(文京学院大学教授、『二関節筋』執筆者)らから聞いたのですが、進化史的に見て、まず間違いない。

——だから、水中にいる魚類には二関節筋はない。

そう。では、魚類は単関節筋かとなりますが、そうではない。多関節筋、おそらく機能的三関節筋。そうでないとS字状に動かして泳ぐことができない。マグロやカツオのように、パンパンと泳ぐ種類もありますが、あれが主流ではないと思います。やはりマスのように泳ぐのが主流というか、大昔からのあり方だと思います。『二関節筋』の本にも書きましたが、ナメクジウオは、脳もないし鰭(ひれ)もない。

——魚類では機能的三関節筋が存在していたが、両性類になると二関節筋が登場し、三関節筋は消滅した。それは重力下では三関節筋ではうまく動けないから？

動けない。鰭はもともと三関節筋がひとつの機能的単位となっていたと考えられます。これについては今、三宅力先生がゲノムで調べておられます。機能的単位が鰭という形になり、その鰭が折りたたまれて四肢になる。しかし、筋肉素材はナメクジウオのときからすでに横紋筋構造で、今に至るまでほとんど変わっていない。

ナメクジウオ(図3)は、5cmくらいの長さで、「く」の字型の模様は筋節です。筋線維は水平に走行しています。図4は筋節の電子顕微鏡写真ですが、サルコメアは約2ミクロンでわれわれヒトと変わりません。アクチン、ミオシン、A帯、I帯も変わらない。横行小管はできていない。これは5億7000万年前から存在している生物です。当時から筋としては今もほとんど変わらない。

——筋そのものはそこからあまり進化していない？

ここまで進化して、ここから安定している。ほとんど完成している。ここから横行小管ができ、それらがそろってくる。それが現世の横紋筋です。ところが平滑筋はこのナメクジウオと同じです。

ナメクジウオのS字状波動遊泳運動を撮影したものが図5ですが、すると収縮している部分が3カ所できる。4カ所はできない。それが伝播していくときには2カ所という瞬間もありますが、ということは収縮する機能的単位が少なくとも3つないとS字にならない。4つでは多すぎる。それをさらにみていくと、途中で鏡像的に同じ局面が出てきます。ということは、前後の配列が同じということです。左右も同じ。そういうモデルを考えると、機能的単位が3つあり、それが伝播していく。S字を伝搬させるために、少しずつずらして配列してみる。ずれて配列しているから、順番に収縮すると、それが伝わっていく。しかもそれが左右、前後が対称になっている。となると、図6のような配列になるわけです。7対、8対でも同じ、9対だと多すぎる。機能的単位としては三関節筋ということになります。もちろん、関節構造はないのだけれど、仮想関節を考えると、そうなります。こういう解析をしていきました。

### 拮抗筋

次に拮抗筋ですが、拮抗筋どうしは、片方が収縮すると、他方は弛緩する。1つの細胞であれば、オン/オフでよいけれど、筋ではたくさんの筋線維が含まれていて、それが、片方の活動度が徐々に強くなるにしたがって、拮抗するほうはだんだん弱くなる。拮抗筋なので、活動度をたすと同じ。

# 4

## 二関節筋研究の成果

二関節筋の研究成果はいかなるものか、今後の発展も含め、どうことがわかってきたのかを語っていただく。専門的なことも多いが、できるだけ噛み砕いて説明していただいた。

### 「関節トルク」という思考からの脱皮

さて、二関節筋は剛性制御、軌道制御さらに出力制御に関わる。では、われわれは実際にそれをどういう場面で使っているか。二関節筋が出力制御に関わるということは関節トルクではものは言えないということになります。今画像分析では関節トルクの計算が中心になっています。経済産業省主導のプロジェクトでも人間の出力特性のデータベースをつくって、関節ごとに伸展・屈曲でとっています。そのプロジェクトは今も継続していますが、そのデータベースでは人体の出力特性を現すことはできません。そのことは実験的根拠に基づいて証明し、論文化しています。文献8がそれです。二関節筋の存在を無視したこのようなプロジェクトの推進にどのような意味があるのか、説明責任が問われる問題だと思っています。肘を屈曲するだけで仕事をしているわけではない。下肢もそうです。支えているのは足の出力です。そのとき、関節トルクをみても意味をなさない。

——歩く、立つというのは関節トルクだけの問題ではない。

そうです。しかし、そうではないとなったとき、どうするのか。『二関節筋』の本にも書かれているとおり、二関節筋の出力を評価しなければいけない。これはそうむずかしいことではありません。

実際には二関節筋はあるのだけれど、これを無視して、関節トルクを計算していくと、図11の上のように四角形にしかならない。しかし、先ほど述べたように、実際には図11下に示したとおり六角形です。四角形で考えると、最大出力の方向も違ってくる。ところが、この関節トルクの話を進めても、そう大きな齟齬をきたしてはいないということもあります。

そういう意味ではオリンピックなど世界レベルの選手を語る、指導するというとき、問題が生じます。結果が悪ければ、選手が悪いということになります。そこに至るまでには、研究側の問題もあります。

本来、「筋出力」は完全に制御できない。逆に制御できたらスポーツ競技は成り立たない。周径囲を測ると、太いほうが出力は大きい。アームの長さを測れば、あとは計

算で出てくる。

——でも、それはロボットの世界。

人間は、任意の出力制御ができないから、オリンピック競技が成り立つ。しかし、そうは言いながらも、ある程度出力制御はできる。だから、スポーツ選手という職業が成り立つ。プロ選手が成り立ち、プロはアマとはたしかに違うということが出てくる。ところが、プロでもアマでも、ひとりの個人が完璧に出力を任意にコントロールできるかという、できない。

——その出力と違って力を出しているわけではない。

それもあつし、このくらいの出力をと思ってもできない。それには集中力もある。だから、握力計で測っても、「強い」「弱い」の差は出るけれども、では「強い」はいつも同じ出力かという決してそうではな

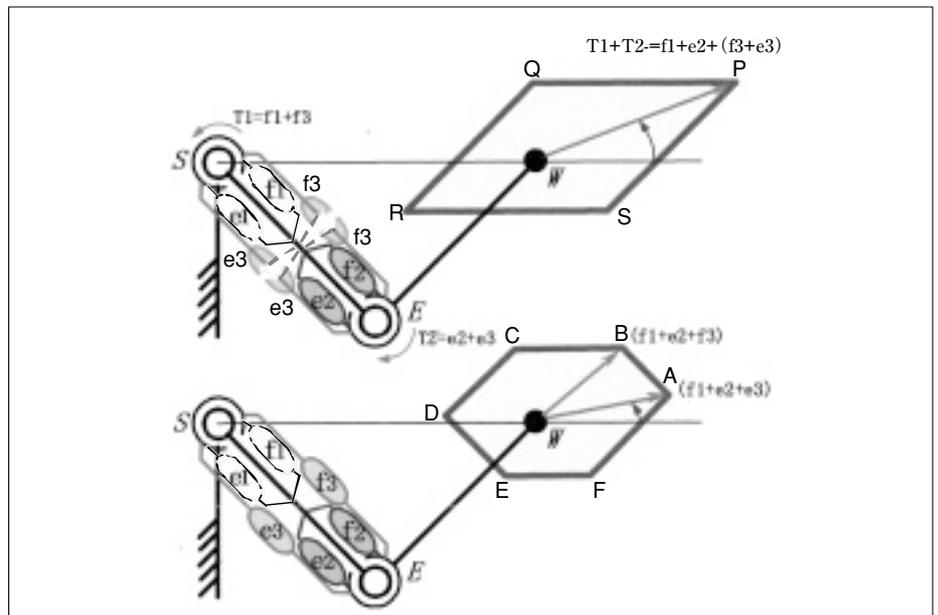


図11 二関節筋を無視して関節トルクとして計算した系先端出力分布（上）と二関節筋を取り込んで計算したもの（下）  
最大出力の方向、その大きさも異なる。