

May Special

筋腱複合体

ここまでわかった筋腱のふるまい



3月29日、昭和大学保健医療学部で「スポーツ選手のためのリハビリテーション研究会」の講習会が開催され、そこで福永先生が、「足部・足関節のバイオメカニクス～筋・腱複合体のダイナミクスに着目して～」という演題で講演された。その内容をもとに、再編集し、掲載するのが今月の特集である。なお、実際には、多数のスライド、また動画を使用されたが、ここでは多くを割愛している。

- 1 パフォーマンス発揮と筋腱複合体 福永哲夫 P.6
- 2 筋腱複合体とは P.7
——そのふるまいとはたらき
- 3 パフォーマンス向上のために P.13

1

筋腱複合体

パフォーマンス発揮と筋腱複合体

福永哲夫

鹿屋体育大学学長

まず序として、スポーツ科学の立場の説明、そしてスポーツの「主観」と科学の「客観」という視点について語っていただく。

スポーツ現場を見ていますと、驚くべき素晴らしいパフォーマンスが繰り広げられています。細い腕から投げ出される時速150kmを超えるボール速度、ゴムまりのように弾む体操床運動で跳躍等など。このようなスーパーパフォーマンスは単に筋肉の発揮パワーだけでは説明が付きません。トップパフォーマンスを生み出すには筋と腱の相互作用が関係していることが容易に想像されます。筋と腱の問題は1995年くらいから本格的に研究し始め、腱の弾性特性を定量する試みの実験をやってきました。

本題に入る前に、スポーツ科学が扱う領

域(図1)について私の考えを述べたいと思います。

はじめに

—スポーツの「主観」と科学の「客観」

最初に申し上げますが、スポーツという言葉は、ダンス、体操、エクササイズ、など、あらゆる身体運動を含む言葉として定義し、スポーツに関する科学的アプローチをスポーツ科学と定義します。このスポーツ科学が対象とするスポーツは、競技スポーツ、健康スポーツ、さらに、教養スポーツ、の3つに分かれると考えています。どのスポーツにおいても、実施に際しては、指導したりコーチングするという場面があります。そのための理論的な根拠(コーチング科学)が必要であります。さらには、身体運動のメカニズムを明らかにするために生理学、解剖学、バイオメカニクス、心理学等等、さまざまな研究領域が応用されています。そういう全体を「スポーツ科学」といって私たちは取り扱っておりま

す。

私は体育大学にいますが、体育大学ではこういったものをカリキュラムとして学生に教えたり、研究したりしているわけです。それらを見ていますと、こうした一連のシステムとして考えた場合に、身体運動の科学的原理や指導・コーチング理論は、運動生理学やバイオメカニクスなどを利用して数字や客観的な資料にもとづいて物事を考えます。一方、スポーツの現場というのは非常に主観的なものです。野球の投手にとって速いボールを投げるのが要求されますが、野球競技ではよい投手とは打者が速く感じるボールを投げればよいわけで、実際は時速150kmとか160kmではなくても、140kmくらいのスピードでもバッターにとっては160km以上に感じればそれは非常に打ちづらい“よい投手”ということになります。この主観的なところを客観的につなげていくというのは、教えたり、コーチングしたりするところで非常におもしろいところであると思います。スポーツ

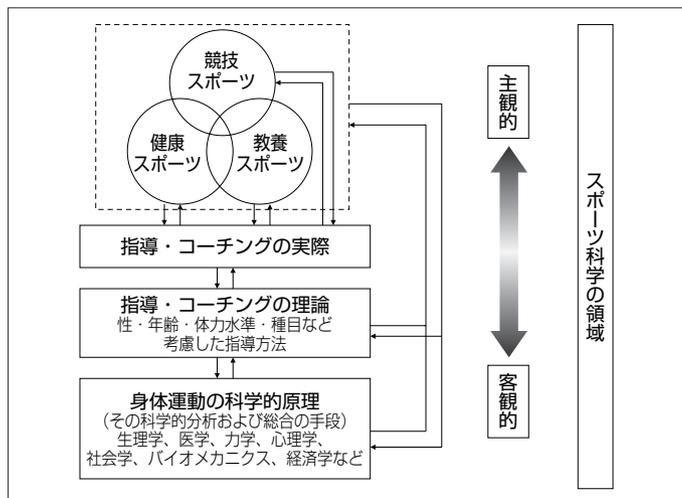


図1 スポーツ科学の領域 (福永原図)

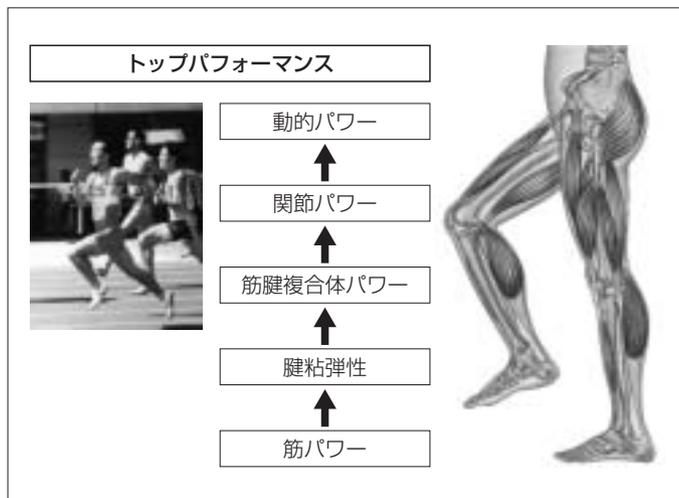


図2 筋と腱の相互作用 (福永原図)

は主観的で、サイエンスは客観的ですが、スポーツ科学はこの主観と客観をいかにリンクさせるかということで、これが私たちにとっては非常に大事なところ。客観と主観との関係に筋と腱の相互作用が関係してきます。

そこで、本題に入りたいと思います。

筋肉が力を発揮すると、内側腓腹筋が末梢でアキレス腱になり、踵骨を上へ引き上げる力になるわけです。結局、その一連のエネルギーの流れをみると、腱の粘弾性特性が影響してきます。つまり、腱が針金のような硬い組織の状態だと、出した力そのまま踵にかかるということになりますが、



スーパーパフォーマンスには筋のみならず腱との相互作用が関係している

腱がスプリングのように伸びたり、縮んだりすると、動きは大きく変わってきます。つまり筋と腱の複合体として力やパワーが関節のパワーとして生じてきます (図2)。

今日の話は、運動中に筋と腱の間でどのようなことが起きているのかということ、実験データをお見せしながらご説明したいと思います。

2

筋腱複合体

筋腱複合体とは ——そのふるまいとはたらき

筋腱複合体はどうなっているか、それはどのようなふるまいをするか。それによって何が起きているか。貴重な画像とともに解説していただく。

超音波で筋腱複合体を見る

超音波断層法を用いて下腿後面の断層像を撮影してみます (図3、P.8参照)。筋と腱を総称して筋腱複合体 (Muscle Tendon Complex, MTC) といいます。超音波画像で斜めに走行している白いエコーが筋束からのもので、筋束 (Fascicle) には、筋線維がたくさん集まってパックされています。超音波装置で見ると、腱と筋束とがわかります。筋線維が発揮した力がこの腱に力を及ぼして、腱は中枢の方向に引っ張る。それが集まってアキレス腱の力になって、それが踵骨を上へ持ち上げるということになります。

等尺性収縮は

アイソメトリックか？

足関節を固定して足背屈動作をした状態での筋線維長を超音波で計ります。この場合、足関節が固定されていますから、関節の角度は変化しません。つまり関節を固定して筋力を発揮しますと、これは、従来でいうアイソメトリックコントラクションということになります。普通、こういったアイソメトリックコントラクション、等尺性筋力発揮という状態では、「筋線維は長さが一定である」と定義されています。そうだとすると、筋線維の長さは画像で変化しないはず。実際に力を入れてみるとどうなるかということが起きるかということ、図4 (P.8参照) のように、明らかに長さが短くなっている様子がわかると思います。

そして、力を強く入れていけばいくほど、筋線維がより短縮していく様子が見えま

す。つまり、関節を固定していても筋力が発揮されれば筋線維は短縮しているわけです。このような状態での筋線維の短縮はインターナルショートニングといわれています。動物実験では概念的に説明されてきましたが、人の生体での報告はこの論文 (図4、P.8参照) が初めてです。なぜこのようなことが起こるのでしょうか。それは、筋線維に直列に配列している腱組織が弾性体であるからだと考えられます。つまり、筋の発揮張力によって腱組織が伸長されますと、その分だけ筋線維が短縮することになります (図5、P.8参照)。

腱の弾性特性を測る

この腱の伸長量は腱の弾性特性 (やわらかさ具合) によって変わります。この腱弾性特性は超音波法により定量が可能です。たとえば、膝関節を固定して膝伸展筋力を

よい歩行やジャンプ動作はできないということです。

先ほどの体操床運動における膝を伸ばして連続ジャンプするという動きは、フロアにスプリングが入っているということもありますが、それに加えて、からだのなかで腱によるバネ特性が効いているということです。たとえば言うなら、筋に腱というバネがついているから、あのようなパワフル

な動作ができるということであろうと思います。

同じようなことですが、私どもの院生でオリンピックの短距離選手がいます。10秒09というのが彼のベストですが、ただしこのときは追い風2m以上あったので公式には認められていません。彼は身長約170cmの小柄な選手ですが、それでもピッチは世界一です。筋に腱というバネにつ

いているので、このような速いピッチ、スピードで疾走できるということです。つまり、非常に高いパフォーマンスができるには筋と腱の相互作用が必要だと言いたいわけですね。

つまり、筋がエンジンとして力を出し、腱がバネとしてスピードを生み、力とスピードで高いパフォーマンスを出しているということになります。

3

筋腱複合体

パフォーマンス向上のために

ここまでわかった筋腱複合体だが、では、どうすれば、パフォーマンス向上につながるができるか。さまざまな視点から、さらに解説していただく。

パワーアップ

もう少し細かく調べていくと、なぜパワーアップできるのかという疑問が出てきます。腱が伸長し、筋の長さは一定だと、なぜ高いパワーが出るのか。腱そのものは、力とかパワーを発揮する器官ではないわけです。バネはモーターとは違い、それだけでは何もできない。引っ張ってくれるから伸びるだけなのです。そのメカニズムを解明すべく、図15 (P.14) のような装置を作りました。

錘を引っかけて、膝を動かないようにして、つま先だけ蹴る。つま先のみでのジャンプ動作になります。からだ全体は固定しました。そのときの状態を測ったもので、この研究は2002年のJournal of Physiologyに載せました。反動なしで行うのをNo CM (no counter movement)、反動ありで行うのをCM (counter movement) と

しました。図16は、横軸が筋線維の長さ、縦軸が筋力です。

反動なし (No CM) の場合、最初、ふくらはぎの筋線維の長さは約70mmです。そこから力が上がっていき、筋線維が短縮していきます。つまり、短縮性収縮です。一方で、反動あり (CM) の場合は、最初は筋線維の長さは約52mmです。そこから65mmくらいに伸長し、その後長さは一定で、力だけ上にあがっていく。長さが一定ですから、これはアイソメトリックです。そこから短縮性収縮に向かっています。伸長されるときはほとんど力を出しません。アイソメトリックのときに力を出している。No CMでは、力は3500Nくらい、それに比べて、CMはスピードを持って短縮しながら、長さが一定になり、アイソメトリック局面で4500Nくらいの力になります。それだけ余計に力が出せる。余計に力が出せるということは、それだけ余計に跳べるということです。先ほど述べたように私でも反動をつけた垂直とびでは10%ほど大きくなるのですが、なぜ10%ほど大きくなるのかという理由はこれで

す。筋線維がアイソメトリックな状態で力を発揮できる。短縮性の収縮のときよりもそれだけ余計にエネルギーを出せるのです。このプラス分が反動の効果として10~20%として生まれてくる。これが反動で高く跳べるメカニズムです。

これをパワーでみたのが図17です。反動をつけると、切り替えしのところでそれだけ余計にパワーがかかる。このパワーは筋線維がアイソメトリックに力を発揮している結果であります。

性差

こういう筋と腱の特性の程度は人によってかなり異なります。すると、まず男女で違うかという疑問が生じます。そこで男女差をみました。男女の筋線維の長さ、それから腱の長さを調べてみました (図18)。長さはあまり変わりません。そこで横軸をストレイン (伸び率)、縦軸をストレスとし、ストレイン、つまり最初の状態から何%伸びたか、ストレスはどのくらい力を加えたか、腱の断面積あたりで発揮した力を縦軸にします (図19)。