

January Special

マラソン研究

東京2020対策から
リカバリーはじめマラソンの科学を探る



設楽悠太、大迫傑、服部勇馬の3選手の活躍ぶりが目立つ男子マラソン界。世界に目を転じて2時間1分台まで記録は伸び、2時間を切るのも時間の問題と言われている。折しも、東京オリンピック・パラリンピックまでもう2年もない。世界中が暑熱下早朝で行われるマラソン対策を進めている現在、その東京2020対策から、疲労（損傷）する筋肉の特定、その回復過程を研究するグループからの報告、また「体力」や長距離走能力を見る指標開発で知られる先生にも取材し、マラソンの科学を掘り下げた。

- 1 東京2020のマラソンの科学的対応について 杉田正明 P.2
- 2 マラソン前後の筋肉の硬さ変化とリカバリーの方策 稲見崇孝 P.8
- 3 フルマラソン前後で足部の形状はどう変化し、どう回復するか 深野真子 P.14
- 4 マラソンで生じる筋ダメージの評価 東原綾子 P.18
—— 骨格筋画像研究の視点から
- 5 酸素摂取効率勾配（OUES：Oxygen uptake efficiency slope）という指標について 馬場礼三 P.29
—— 生理学的基礎と臨床への応用

東京 2020 のマラソンの科学的対応について

杉田正明

日本体育大学教授
日本陸上競技連盟科学委員長

日本陸上競技連盟の科学委員長でもある杉田先生に、世界と日本のマラソンの科学の最先端を聞いた。トップアスリートのみならず、愛好家レベルでも参考になるところが多い内容である。東京 2020 は科学の戦いでもある。

——東京オリンピックを目標としたときに、よく言われている暑熱の問題とか、早朝スタートという時間のコントロールとか、高所トレーニングとか、いろいろな要素があると思います。暑熱対策は世界中で進んでいるようですが、今の日本の位置はどの辺にあるのか、日本として最も力を入れているのはここであるとか、これからはここが欠けているのでやらなければいけないとか、マラソンの科

学に対する研究の概要についてお話を伺いた
いと思います。先生は今、どういう立場でマ
ラソンに関わっていらっしゃるのですか？

杉田：今は日本陸上競技連盟の科学委員長
という立場です。総勢 35 名の科学委員が
いて、それぞれに種目の担当を決めていま
す。私は、長距離とマラソンの科学の責任
者をやっています。競歩担当者は別にいる
のですが、暑さ対策とかコンディショニン
グという面を担当しています。

暑さ対策

杉田：リオデジャネイロオリンピックの 2
年前の 2014 年に、リオも東京も暑いとい
うことで、当時、男子マラソン部長の宗猛さ
んと女子マラソン部長の天満屋の武富豊さ
んの 2 人から暑さ対策をやっていこうと声
をかけていただき、北海道の合宿等で暑さ
対策をやるようになりました。しかし、オ



杉田正明（すぎた・まさあき）先生

リンピック前で公開できないデータもあり
ますのでご了解ください。

最初に行ったのは、練習前後の体重、体
温、汗の成分を調べることでした。その理
由は、暑さ対策のポイントは、深部体温を
上げないこと、体内の水分が失われないこ
と、汗によるミネラル・電解質（ナトリウ
ム、カリウム等）の損失を補うこと、この
3 つにしまわれるからです。

体温は耳で測れば、とりあえず深部体温
を知ることができます。体内の脱水の程度
も練習前後に体重を測ればわかります。途
中で給水した場合は、給水のボトルをその
都度測って、それも合わせてどれくらい減
ったかがわかります。でも汗の成分は、全
然調べられていませんでした。

——ナトリウムやカリウムなどの損失を補う
ことと言われてはいるが、誰もそれはちゃん
と知らなかったということですか？

杉田：そうです。アスリートを対象とした
データはなかったですね。

——調べるのもそんなに簡単ではないですか
らね、体温や体重に比べると。

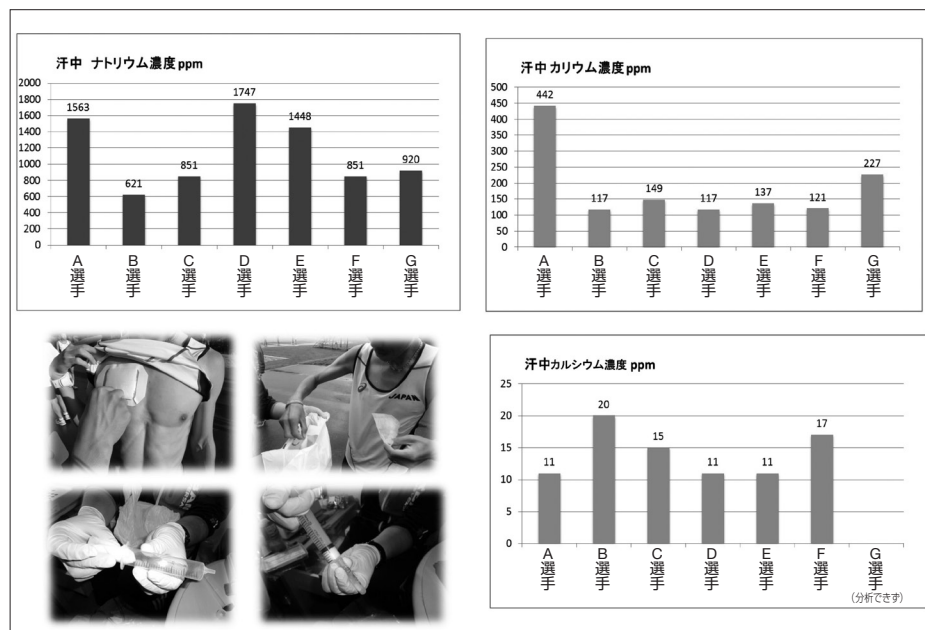


図 1 マラソンナショナルチーム土別合宿 40km 走（2014.9.9,11 時 START）での汗中の成分分析結果
(P.25 にカラー図掲載)

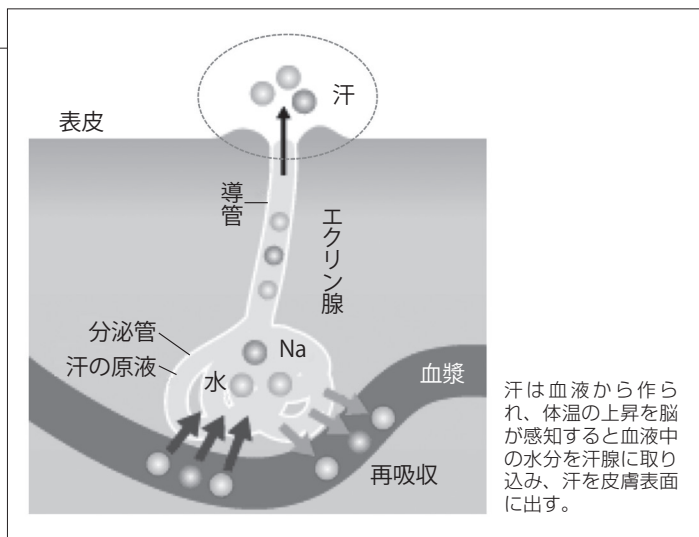


图 2

杉田：そうなんです。図1は2014年に初めて、マラソンのナショナルチームの合宿で行ったものです。先行研究で、全身の汗のナトリウムの濃度は、胸と太ももの汗の濃度がかなり高く相関するというものです。ですので、これは胸部の汗を収集しました。——胸にガーゼを貼った。ガーゼも結構、厚い。

杉田：そうですね、気密性が保たれるようにシールが貼ってあります。

——7.5cm 四方。

杉田：はい。それを注射器で抽出して調べてみました。するとずいぶん個人差があるということがわかりました。さらにナトリウムだけでなくいろいろなものが体内から排出されていることがわかりました。そこで、この汗で失われる成分が多いとどうなるのかについても、選手の聞き取りから調べました。そして、ある成分がたくさん排出される人は要注意だということもわかってきました。普段の練習とか体調をいい状態に維持するために、選手ごとに、たとえば栄養をどうするかとか、飲むものをどうするかとか、いろいろな戦略が考えられるのではないかと思います。

——体外に出ていくわけですから、当然、そういう栄養素が失われているということ。

杉田：図2に示すように、本来、エクリン腺から導管を通して汗が出ますが、教科書的には、排出される栄養素は身体にとってなくてはならないものなので、ここで1回出ようとするのに、さらにナトリウムはじ



图 3

め図にあるようなものを再吸収してもう1回身体に入れて、抜いたものが出ていくようになっています。

——大事なものは、出ようとするけどもう1回吸収する。よくできた仕組み。

杉田：結局、それが追いつかなくなるくらい激しく発汗すると、再吸収せずにそのまま出るということで、教科書的には、発汗量の多い人の汗は、こういったものが再吸収されにくいので、排出される成分の濃度が高いと書いてあるのですが、そんなことはないのです。

—— 経験的には逆かなという感じはしますね。汗をいっぱいかくとサラサラしてきて、ほとんど水分だなという感じになる。

杉田：そうですね。でも教科書的にはそう書いてある。確かに、暑熱に慣れていない状態のときは、そういう感じです。でも身体が慣れてくると、汗はサラサラになる。それでも個人差があります。アスリートを対象にこうしたことに取り組んだのは、わが国ではこれが初めてではないでしょうか。多くを述べることはできないのですが、深部体温を特殊な装置を用いて測定をしたことがあります。初めて測ることができました。

リオデジャネイロオリンピックのときに50km競歩で、荒井選手とカナダの選手が3位と4位をめぐってクレーム合戦のような形になりました。そのときに4位になったカナダのダンフィー選手がカナダのテレビのニュースにネットで出ているのですが、

彼らも深部体温を測っていました。これは飲み込んだピルにデータが保存され、あとで読み取るという方式です。

フランス製で、ボディキャップ (Body-cap) と呼ばれているものがあります (図3)。これは競歩の話ではあるのですが、たぶん競歩以外でも用いられていると思います。今、カナダの取り組んでいる暑さ対策のなかで、汗については、ナトリウム、グルコース、タンパク質を測定する着用可能なパッチを使用して計測しているそうです。我々の取り組みのほうが先行していると思っていましたが、同じようなことを最新のテクノロジーを使って諸外国もさまざまな取り組みを行ってきていることが推測されます。

——これは汗の成分と深部体温との関係を見ようとしている？

杉田：どちらかという中暑熱環境下で試合をしたりしたときに、体温がどれくらい上がるのかということと汗中にどんなものが入り込むのかということをそれぞれ見ていきたいと思います。

——暑熱対策としてさまざまやっていますね。

杉田：そうですね。競歩は皆で集まって合宿することが多いのでサポートがやりやすいのですが、マラソンはそれぞれに分かれてチーム単位で合宿することが多いので、我々もすべてうまく対応できないのですが……。

図4は40℃の暑熱環境下で、3つの条件

対象者: 持久系7名. 28 ± 3 yr, 77.9 ± 6.4 kg,

40°C (17%)

△ Pre-Cooling; $35.9 \pm 0.2^\circ\text{C}$
○ Control ; $37.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$
■ Pre-Heating; $38.2 \pm 0.1^\circ\text{C}$

自転車漕ぎ時間
60% of $\text{VO}_{2\text{max}}$

Gonzalez et al., Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. JAP, Vol. 86 (3): 1032-1039, 1999.

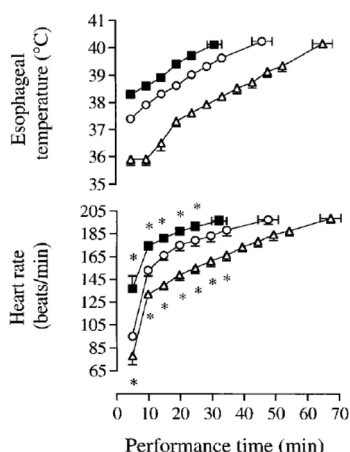


図 4



図 5 北京世界陸上 (2015.8) でのアップ会場での様子

で7人が自転車をオールアウトまで漕ぐという実験データです。3条件の1つは、運動する直前に身体を冷やす、たとえば水風呂に入るとかで深部体温を35°Cにする。コントロールは何もしない。もう1つは、直前に簡単に言うウォーミングアップをする、つまり身体を温めます。そのうち一番長く漕げたのが、pre-cooling。暑熱環境のなかでは、直前に身体を冷やすことの重要性を示唆しています。その次がコントロールで、一番短かったのがpre-heatingです。でも、オールアウトになるときというのは3条件いずれも深部体温が約40°Cで同じ水準です。ということは暑熱環境下での運動能力を考えるなら、運動開始時の深部体温と40°Cまでのこの幅がポテンシャルを表すと言えそうです。

——すると、アップだけやってレースに出るのが一番よくないということですね。

杉田: そうです。

——アップはしないほうがいい?

杉田: ウォーミングアップしてもいいのですが、暑熱環境では運動前には体温を下げるということが重要であるということと、運動中も当然身体の熱を下げるようにする。ということで、世界では図5のようなことを行っています。これは北京での世界陸上のウォーミングアップエリアの様子です。

——アイスベストですね。日本で売っている

のですか?

杉田: 売っています。普通に買えます。こういうのを着て、やっているのです。メタ解析の論文によって暑熱環境下で運動前と運動中に身体を冷やすことによってパフォーマンスが上がるということが結論づけられています。したがって、試合の直前、試合の最中にどういことをやるかは、いろいろなやり方が浸透してきています。たとえばアイス

スラリーという氷を砕いたものを飲むという方法があります。体重1kg当たり7.5g、60kgの人だと450gを6回に分けて飲むのですが、結構な量を飲まなければなりません。それを飲んで暑熱環境下で運動をしたときの直腸温は冷水を飲むよりも低く推移し、運動継続時間は飲むよりも2割くらい長く見られたことが報告されています (図6)。外から冷やすやり方と、水風呂に入ったり、アイスジャケットを着たり、中から冷やしたりといろいろあります。

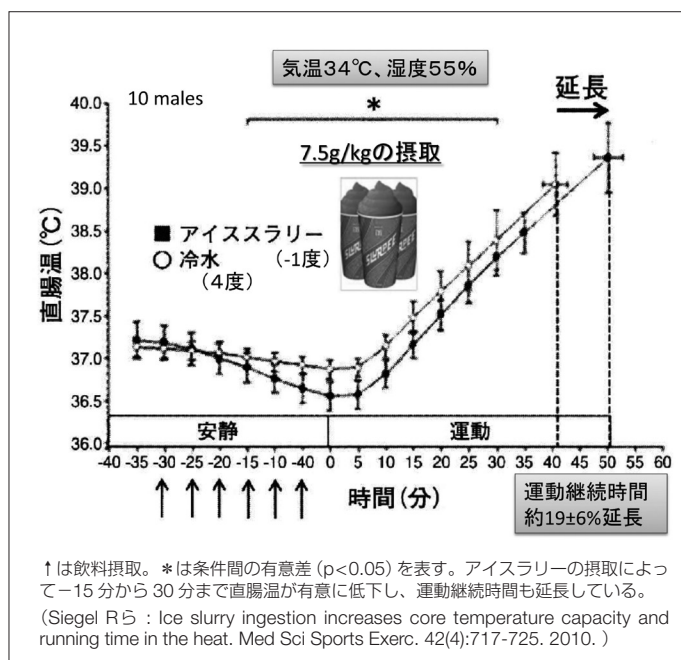


図 6 ランニング中の直腸温の経時的変化 (Siegel ら (2010) を改変)

——併用したほうがいい?

杉田: いいですね。

——それを胃に入れて、お腹は冷えないのですか?

杉田: 重要なポイントです。人によっては下痢を生じることがあります。冷たいものを急激に摂るので、身体が逆の反応をする場合があります。私が聞いた話では、たとえば胃がものすごく熱くなって困ったという選手もいるそうです。ですからこれは相当、入念に試す必要があると思います。

2

マラソン研究——東京 2020 対策からリカバリーはじめマラソンの科学を探る

マラソン前後の筋肉の硬さ変化とリカバリーの方策

稲見崇孝

慶應義塾大学体育研究所

2 時間少しで 42.195km を駆け抜けるハードな競技、マラソンを走る前後で大腿部や下腿の筋肉はどのように変化するか。またその変化は、筋肉内部の遠位と中間、近位ではどう違うか。回復にはどの程度の時間が必要か。そうした実践的問題について研究を進める稲見先生に新しい知見を紹介していただいた。

大腿部と下腿部でどの筋肉が硬くなるか

——今研究されていることのはじまりは？

稲見：まず、どこを最も回復（リカバリー）したらいのかこれがこれまで明確ではなかったというところから入りました。

——どこというのは筋肉の話ですね。

稲見：そうです。主として筋肉をターゲットとしてきたのですが、これまでのマラソン、さらにはウルトラマラソンなど、長距離系のものは生理学的指標がメインアウトカムとなることが多く、たとえば血液を採って分析するという方法が行われてきました。局所ではなく、全身の指標としては、疲労度、つまりどれくらい疲れているかを見ようとされてきたのですが、マラソン後どこに部位特異的な損傷があるのかとなるとやはり筋力や柔軟性（関節可動域）、筋痛などで見るしかない現状がありました。とくに柔軟性に関して、たとえば足首を背屈したときに、ふくらはぎの筋肉がどれくらい硬くなっているかが指標の 1 つになってきたのですが、ふくらはぎでも腓腹筋なのかヒラメ筋なのか、特定ができなかった現状があります。一方で最近、硬さの変化を定量化する際にエラストグラフィを使うこ



稲見崇孝（いなみ・たかゆき）先生

とで、筋肉を特定して観察できるようになってきました。

図 1 はとくに下肢筋肉がどれだけ硬くなったかを示したものです。縦軸は上にいけばいくほど柔らかくて、下にいけばいくほど

硬くなることを示しています。

山梨県の河口湖をスタート地点に行われているフルマラソンの大会、富士山マラソンで、過去、何件かやって得た知見です¹⁾。マラソンを走る前と、走った直後に測定しています。直後（POST）というのは、ゴールして 1、2 分で測定がはじまるほど、ゴール付近にブースを構えさせてもらっています。それから 1 日後、3 日後、8 日後と追跡して測定しています。これまで取っている指標としては、最大筋力や関節可動域など、これまでに報告されてきた指標もありますが、この研究では筋肉の硬さに着目し、どの筋肉が硬く

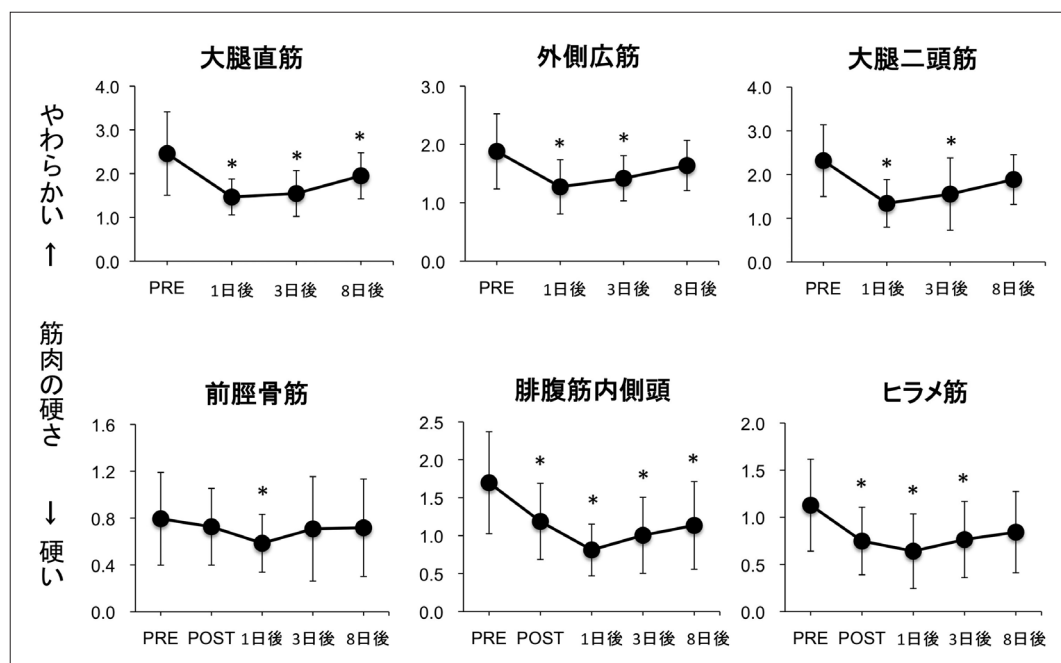


図 1 下肢筋群の硬さ変化

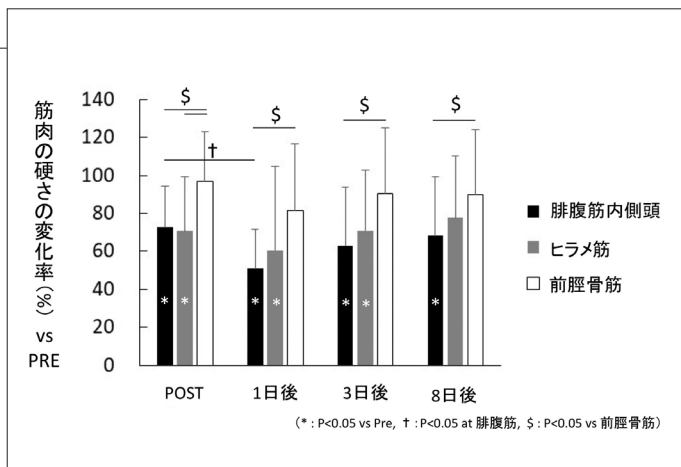


図2 下腿部の硬さの変化率
8日経ってもなお腓腹筋は回復していない

なっているのかを見て筋損傷の1つの指標にしていこうという取り組みです。

図1を見ると、下肢筋群でもとくに下段の下腿(前脛骨筋、腓腹筋内側頭、ヒラメ筋)は直後(POST)も見えていますが、実際に硬くなるのはその日ではなくて1日後がピークを示しています。上段の大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋のデータには直後はないのですが、これを見ると1日後がピークというのはどの筋肉も同じでした。ただ全部の筋肉で様に同様の変化が起こることではなく、その程度はかなり違っているという印象です。ふくらはぎが硬くなった、損傷したといっても、それは筋肉によって異なりそうということがわかってきました。

——これは複数の選手?

稲見: そうです。人数は21人です。

——21人の平均値?

稲見: そうです。

——みなそれぞれ経験のあるマラソンランナーですか?

稲見: そうです。このマラソン大会で3位に入る、国際大会に出ていくようなレベルの人たちも入っています。ただ一般の、趣味にしているようなレベルの人もあるので、対象としたアスリートのレベルには幅があります。多くは大学の陸上同好会の学生です。陸上同好会のトップランナーは競走部よりも成績がいい学生もいて、そういう学生たちにお願ひして、実験の全日程に参加してもらいました。男女で比較しても結果は変わりませんでした。

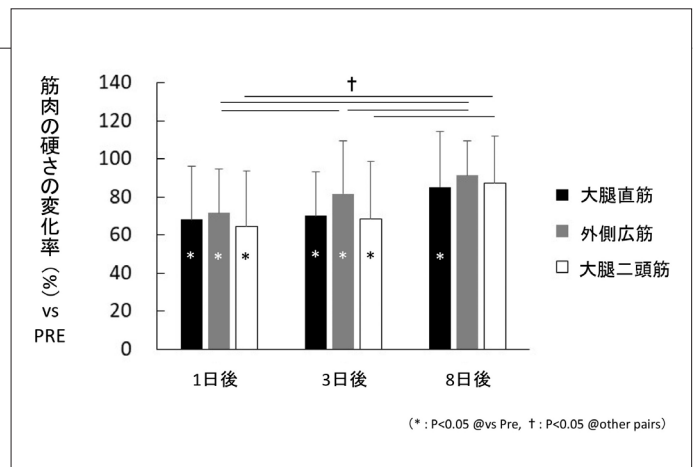


図3 大腿部の硬さの変化率
8日経ってもなお大腿直筋の硬さは回復していない

回復の時間的目安

——要するに、この6筋については、次の日に最も硬くなって徐々に回復していく。

稲見: とあるWebのデータによると、マラソンに出場する市民ランナーはどんどん増えていて、なかには練習をしっかりとしない人も多いので、大会が終わった次の日は、仕事の能率が3割くらい低下するようです²⁾。そういう日常生活に支障をきたすような運動は、本当によいのだろうかということもあります。やはりリカバリーは早いほうがいいので、それを前提として研究をはじめました。先にも述べたように、当初はどこ筋の筋肉がリカバリーを必要としているか、どういう時系列で変化するかわかっていませんでした。1日後が概ねどの筋肉もピークなのですが、それは少しずつ違いそうだという点が面白そうな結果でした。

変化の程度がどれくらい違うかというのを示したのが、図2の下腿と図3の大腿部です。図1の硬さを変化率、PRE(マラソン前)を基準にして示したものです。たとえば図2はPREを基準にPOSTから8日目まで4回測定した結果を示しています。下腿のなかでは腓腹筋が一番硬くなりました(グラフのバーが低いほど硬いことを示す)。大腿部の場合は大腿直筋とハムストリングス(大腿二頭筋)に比較的大きな硬さの変化が起こっているかなという感じがします。測定肢位の問題もあるかもしれませんが、前脛骨筋などはPOSTのときもあまり変わりありませんでした。

リカバリーという視点でみると、筋肉によっては8日経ってもなお回復していない、元の水準に戻っていないというのが気がかりです。回復している筋肉も当然ありますし、1日後にピークを迎え、そのときの損傷の程度は同じなのですが、回復には差がある筋肉もありました。マラソン大会が終わった後には、活動量計をつけていただいて、日常の活動量やトレーニングをはじめていないかなどを調査しています。特別なことをせず、一般的な生活を送るとこういう状況になるということです。1日後に硬くなって、3日、8日と回復傾向にはあるのですが、8日経っても元の基準には統計的に戻っていない筋肉もある。

——図2の腓腹筋は戻っていない。

稲見: そうですね。グラフ縦軸が下にいけばいくほど硬くなっているということになりますので100%に戻っていないということは回復はしていないことを示します。PREに比べてPOSTは有意差がついていて、1日後、3日後、8日後とまだ有意差が残っています。8日後のグラフを見ると、ヒラメ筋と前脛骨筋はもう有意差がなくなっているの、ほぼほぼ最初に戻りはじめていると言えると思います。したがって、下腿であれば腓腹筋の回復が遅いということになります。同じように図3の大腿部の筋肉を見ると、8日後までにまだ有意差が残っているのは、大腿直筋。PREに比べて、マラソン前に比べて硬いということになるので、同じ大腿部でも筋肉によってもだい

3

マラソン研究——東京 2020 対策からリハビリはじめるマラソンの科学を探る

フルマラソン前後で足部の形状はどう変化し、どう回復するか

深野真子

芝浦工業大学工学部

42.195km という長い距離を走ると足部の形状はどう変化するか。それはどのようにしてもとに戻るのか。形状の変化はシューズとの関係で靴ずれの発生にも影響する。何がどう変化するか、直後はもとより 8 日後まで追いかけて変化を見た研究内容を紹介していただく。

マラソン前後での足部の形状変化を見る

—— バイオメカニクスと障害の関係などを研究されている？

深野：そうですね。私は足部をずっと見てきたのですが、足部はまだ障害にたどり着く前の段階で、あまり研究がされていないということもあり、まずは基本的な歩きとか、健常者のデータからとっていかないといいところなんです。まだまだ障害までたどり着いていないという感じです。

—— 今回は、「足部の三次元的な形状変化とフィッティングを考える」という研究内容を紹介していただく。

深野：はい、これは今年、日本靴医学会で発表した内容で、今年 2018 年の European Journal of Sports Science にも掲載されました。フルマラソンでの足部の形状変化を見たものです。

—— 足部の形状変化。

深野：もう少し具体的に言うと、サブタイトルに記したように「フルマラソン走破前後での足部の形状変化とその回復について」という内容になります。

—— 形状の回復。

深野：走るとアーチなどがつぶれるのですが、その後、どう回復していくのか。そもそも戻るのかどうかをこの研究では調べています。足部の三次元的な形状（形態）情報は、足と適合性の高いシューズを設計するうえで重要になりますし、靴ずれは長距離ランナーにとって頻度の高い問題のひとつで、マラソンレース中あるいはレース後にメディカルテントを訪れたランナーのうち、0.2～39%は靴ずれ（水ぶくれ、マメ）が原因という報告もあります（Mailler-Savage et al., 2006）。また靴ずれは、骨格筋の外傷・障害として比較的軽視されますが、靴ずれがあるランナーは膝関節のオーバーユース障害を起こす可能性が高いとされています（Van Tiggelen et al., 2009）。—— 観点としては、ゆくゆくは障害予防につなげたい？

深野：そうですね。こういった足の形状が



深野真子（ふかの・まこ）先生

変わるというようなことを活かした靴の設計にも、データを使ってもらえないかと考えています。この研究を始めた頃は、フル

方法

- 目的：フルマラソン走破前後での足部の形状変化とその回復を明らかにする
- 被験者：健康な大学陸上サークル所属選手11名（男性6名、女性5名）
- 年齢：20.1 ± 1.0 歳、身長：165.2 ± 7.8 cm、
体重：54.6 ± 6.4 kg、BMI：20.0 ± 1.8 kg/m²
- 足型の計測
計測機器：3D foot scanner (Dream GP)
- 両足立位・裸足で測定
- 計測プロトコル：pre、走破直後、1日後、3日後、8日後



Fukano et al. European Journal of Sport Science, 2018

図 1

(P.25 にカラー図掲載)



図 2

(P.25 にカラー図掲載)

る、3D foot scanner という測定装置を現地に持っていったりしています(図2)。裸足になって立ってもらって測定すると、片脚で1分も立たないで3次元的なデータが出てくるので、それを取り出してアーチの高さを測ったり、横幅を測ったり、足のプロネーションがどうなっているかなどを測っています(図3)。study design はシンプルで、これらの変数が、プレ(マラソンを走る前)、(マラソン走破)直後、1、3、8日後にどういふふうに変化するかというのを調べているとい

うのがこの研究です。

——この富士山マラソンに参加する人というのは、レベルの高い人？

深野：レベルが高い方からファンランナーまでいろいろいらっしゃいます。今回の対象は大学の陸上サークルに所属している方で、富士山マラソンを走るという方に「実験に協力していただけませんか？」と依頼し了解を得た人で、実験のためにあえて走っていただいたわけではありません。

——大学というのは複数の大学？

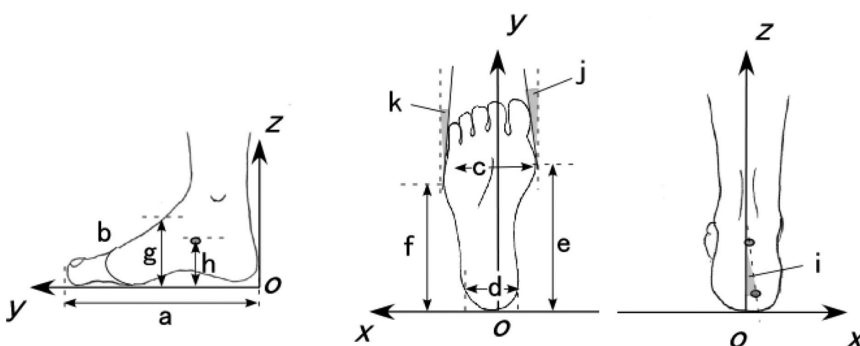
深野：はい。研究はチームを組んでやっていますが、それぞれにいる大学の学生をリクルートしてという感じです。実際のマラソン直後の計測は図2に示したようにブースを設置し、ゴールしたらすぐに測定しました。

マラソン直後は足部の体積が減る

深野：被験者は図1にも示しましたが、健康な大学陸上サークル所属選手11名(男性6名、女性5名)です。日頃から走っている方です。図4は結果です。マラソン走破後、足部はむくむかなと思ったのですが、

測定項目:

足長(a)、足囲(b)、足幅(c)、踵幅(d)、内踏まず長(e)、外踏まず長(f)、足背高(g)、舟状骨高(h)、アーチ高率(舟状骨高/足長×100)、後足部角度(i)、足部体積



Fukano et al. European Journal of Sport Science, 2018

図 3

マラソンを走った後には「アーチが落ちる」などと、まことしやかに言われていたのですが、本当に落ちるのかどうかということ、アーチが落ちた後、それが回復するのかどうかを調べたいということで、稲見崇孝先生と一緒に研究をはじめました。実際

には富士山マラソンと一緒に、データをとってきました。この研究の場合は、フルマラソンを走る前と走った直後、それと1日後、3日後、8日後という時間軸で3次元的な足部形状を記録しています(図1参照)。今は簡単に3次元形状で計測でき

4

マラソン研究——東京 2020 対策からリハビリ—はじめマラソンの科学を語る

マラソンで生じる筋ダメージの評価 ——骨格筋画像研究の視点から

東原綾子

早稲田大学スポーツ科学学術院

マラソンで筋がどれくらいダメージを受けているかについて、骨格筋の変化を画像で検証していく研究に携わっておられるのが東原先生。画像とは、超音波画像と磁気共鳴画像(MRI)である。まだ新しい研究分野だが何をどうみて何かわかってきているかを語っていただく。障害予防に直結した話であり、さらなる今後の成果が楽しみな研究である。

骨格筋の画像研究

——先生は、筋ダメージの骨格筋画像研究をされている。

東原：はい。マラソンによって筋がダメージを受けますが、そのダメージの程度を評価する研究がこれまでも多く行われていますが、それは身体全体で評価するというものでした。たとえば、下肢筋力測定や筋損傷の有無を判断する指標となる血中のクレアチンキナーゼ活性値を測る、あとは主観的な筋痛を評価することで、筋がどれほどダメージを受けているのかをマラソンレース前後で評価するといったアプローチで研究報告が多くなされてきました。近年、画像評価技術の発達に伴って多く行われている画像研究によって、筋個別のダメージの程度であったり、同じ筋のなかでも場所の違いによって損傷度を比較することが可能になりました。しかし、マラソンに対するそういう研究の報告はいまだなく、今回はマラソンの筋ダメージを評価するにあたっての骨格筋画像研究の可能性と、今、稲見崇孝先生はじめ私たちの研究グループで取り組んでいる研究内容に関して紹介させて

いただければと思います。

——画像というのは？

東原：主に超音波画像と、磁気共鳴画像(Magnetic Resonance Imaging：MRI)です。

——超音波がすごいぶん進歩してきていますね。

東原：そうですね。筋の形状を捉えるだけでなく、筋の硬さを評価できる技術が飛躍的に伸びています。

——エラストグラフィですね。

東原：そうです。マラソンレース後に下肢の筋は全体的にダメージを受けるのですが、回復に要する時間が筋によって違うことが明らかになっています。

——そういうことに関する画像的データは出てきていない。

東原：マラソン前後の筋に対する評価は、あまりされていないのが現状です。

——先生はこの2種類の画像や他の手法を使って、マラソンにおける筋ダメージをどう評価するか研究されている。

東原：はい。そこで現時点での研究動向と、それを踏まえて画像研究を取り入れていくとどういったことがわかるのかについて述べさせていただきます。

ランニング障害について

東原：近年の健康志向の高まりにより、マラソン愛好家の数は年齢を問わず増えてきています。しかし、長距離ランニングを続けることによって、身体に対するダメージは大きく残ります。接地を繰り返す行ことで、とくに下肢の筋肉、骨、軟骨、腱、靱帯、あるいは神経などの運動器へ負荷が加わります。またランニング動作によって筋が伸張—短縮サイクルを繰り返すことで



東原綾子（ひがしはら・あやこ）先生

筋に微細な損傷が生じてきます。筋損傷は走りの経済性、つまりいかに低燃費で走るかというところの代謝的能力の低下や最高走速度の低下に大きく影響します。また、ランニングパフォーマンスが下がるだけではなく、運動器のダメージや疲労が残存していくことでさまざまな障害が引き起こされます(図1)。

ランニングで多い障害は、一般的に「ランナー膝(腸脛靱帯炎)」「シンスプリント」「疲労骨折(脛骨・中足骨)」「アキレス腱症(炎)」「測定筋膜症(炎)」が挙げられ、これらの下肢にみられる慢性的な障害：ランニング障害につながっていくということになります。ランニング愛好家が増えているのと同時にこういった怪我の数というのも増えているのが現状で、ランニング障害の予防のためにはコンディショニングを適切に行うということが必要になってきます。そのコンディショニング戦略を立てるためには、長時間のランニング、とくにフルマラソンを走ることによってレース後に運動器がどのような状態になるのかを明らかに



図 1

しなければならないということになります。そこで、マラソン後の筋ダメージ評価における研究の現状と、とくに筋損傷に焦点を当てた骨格筋の画像研究の可能性についてお話しさせていただきたいと思います。

マラソンにおける筋損傷評価研究の現状

東原：まずマラソンにおける筋損傷評価に関する研究の現状ですが、おもに3つのアプローチによる調査結果が報告されています（図2）。1つ目は、マラソン前後で最大筋力を測る手法です。マラソン後はとくに下肢の筋力が低下するのですが、そこを評価するというものです。

——最大随意収縮時のトルクとありますが、これは何の機械で測っているのですか？

東原：ポータブル徒手筋力計による計測が多いですが、バイオデックスのような筋力測定装置で測っている研究もあります。

マラソンレース前後で筋力を測った研究報告1-5を調べてみると、レクリエーショ

ナルレベルあるいはエリートレベルのランナーに対してマラソン前後1日から7日後までの範囲で膝関節伸筋力や足関節底屈筋力が計測されています。膝伸筋力に関しては、ランナーのレベルに関わらず1週間以内に回復すると報告されています。足関節底屈筋力に関する報告を見てみると、エリートランナーではレクリエーションレベルのランナーに比べて、筋力低下が著しいようです。その原因としては、同じマラソンを走るのにも、エリートランナーのほうが走速度が速く、それに伴いステップ長も長くなるので絶対的な強度が高くなり足関節底屈筋群への負荷が大きくなると考えられます。また、接地のパターンがレクリエーションレベルだと踵接地が多いのですが、エリートレベルになっていくほど中足部で着地する選手の割合が増えると言われていて、そうなると中足部での着地のほうが足関節の底屈筋に大きく負荷がかかるので、その分ダメージも大きく筋力低下につながるのではないかと推測できます。

もう一点、先行研究からわかることは、長時間のランニング後の筋力低下の程度は筋の収縮様式の違いによっても異なるということです。関節運動を伴わず筋の長さを変えずに行う筋力発揮（等尺性収縮）に対

マラソンによる筋損傷の評価

①最大随意収縮時のトルク

- マラソンレース後に低下し、その後1週間以内に回復
- エリートランナーは足関節底屈筋力低下が大きい
- 筋収縮様式により回復に要する時間が異なる

②血中のクレアチンキナーゼ活性値（Creatine kinase :CK）

- レース2日後まで上昇、1週間以内に回復

③筋痛

- レース後1週間以内に回復

図 2

して、筋が短縮しながら行う筋力発揮（短縮性収縮）では、フルマラソン後1週間経っても筋力低下が残ったままであると報告されています⁶⁾。また、等尺性収縮や短縮性収縮時に比べて、筋が伸張しながら筋力発揮する伸張性収縮のほうがランニング後に著しく筋力が低下するという報告⁷⁾もあるので、筋収縮様式によってもダメージの残り方が異なることがこれまでの研究から見るができます。

——言われてみると、そうだろうなという感じですね。

東原：伸張性収縮では筋肉に対する負荷が高いので、不思議な感じはしませんね。

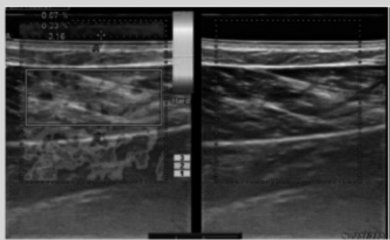
まとめると、マラソンレース後に、ランナーのパフォーマンスレベルに関係なく筋力は1週間以内に回復するということと、エリートランナーに関してはとくに足関節の底屈筋力の低下が大きいということ、筋の収縮様式によって筋力の回復に要する時間が異なるということがわかっています。

——性差については？ 一般的に女性のほうがマラソン回数が多いように思えるので。

東原：先行研究では性差を検討しているものはありません。ただ、私はスポーツ活動中に起こる「肉離れ」に関する研究を行っているのですが、男性スポーツ選手に比べて女性選手では「肉離れ」の受傷率は非常に少ないのです。それは男性に対して女性は身体レベルでも筋レベルでも柔軟性が高いことなどさまざまな推測がなされているのですが、伸張性収縮による負荷を同程度

超音波画像診断

- 筋の形態的特徴 (Bモード)
 - ・筋や皮下脂肪の厚み
 - ・筋束長・羽状角 (筋線維の走行方向)
 - ・運動中のダイナミックな筋線維の収縮動態の観察
- 筋の硬さ (エラストグラフィ)



磁気共鳴画像

Magnetic Resonance Imaging: MRI

- 骨格筋の形態・機能を評価
 - ・筋量や脂肪量の計測
 - ・身体の深部にある筋を含め、さまざまな筋の量を筋ごとに評価
 - ・運動中の筋の活動や反応の相対量

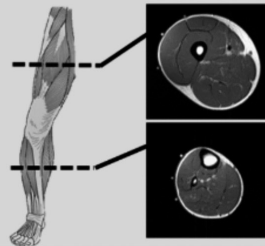


図3 骨格筋画像研究

(P.25 にカラー図掲載)

与えたときも、筋のミクロなレベルで伸張負荷に対する耐性に性差があるのかもしれませんが。これからきっと明らかになってくる範囲だと思います。

——なるほど。ありがとうございます。

東原：2つ目は、血中のクレアチンキナーゼ活性値を測る方法です。クレアチンキナーゼは本来、骨格筋や心筋に多く存在し、筋収縮時のエネルギーの産生に関与する酵素ですが、筋細胞が破壊されることによって血中に出てきて、その濃度を測ることでどれくらい筋が損傷しているかを測る指標になります。ただ、血中クレアチンキナーゼ値は強い筋収縮を伴う運動により著しい上昇を示しますが、マラソンのような長時間にわたる運動（有酸素運動）では細胞膜の透過性亢進によっても血中に出てくるので、マラソンの場合だと、この2つの異なるメカニズムで血中のクレアチンキナーゼ活性値が上がると考えられています。したがって、マラソン後に血中クレアチンキナーゼ活性が高いからといって、一概にそれが筋の損傷度を直接的に反映しているわけではないので、マラソンによる筋損傷の程度を反映する指標としては限界が指摘され

てはありますが、筋損傷の有無を判断する指標として多くの研究で用いられています。多くの研究が、血中クレアチンキナーゼ活性値はマラソンレース後2日後にピークとなり、その後1週間以内に回復するということを示しています^{1-4,8-10)}。

最後は、ランナーの主観的な筋痛を評価することでダメージを相対的に評価するというものです。マラソン後の筋痛に関して調査した先行研究を調べてみると、研究によって多少違いはありますが、主観的な痛みは1週間以内に回復することが報告されています^{3,4,6,9,10)}。現時点で報告されているマラソンによる筋損傷の評価に関しては、以上の3つの指標による報告がなされています。

筋損傷の評価と骨格筋画像研究

東原：冒頭でお話したように、下肢筋に対する慢性障害を予防していくにあたっては、どの筋がどれだけダメージを受けているのかを知ることが重要になってくると思います。そこで有用なのが骨格筋画像研究（図3）です。おもに超音波画像とMRIを用いた研究が主流になりますが、超音波画

像診断では筋の厚みや筋線維の走行方向（羽状角）や長さ（筋束長）というような形態的特徴を非侵襲的に捉えることができます。また、いくつか手技手法はありますが、超音波エラストグラフィではプローブの圧迫によって生じる組織のひずみを画像化することで筋の硬さを評価します。一方MRIに関しては、超音波画像診断では見ることができない深部にある筋も含めてさまざまな筋の筋量や脂肪量の計測や運動中の筋の活動や反応の相対量の評価を行うことができます。

超音波画像からわかること

東原：ヒトの筋の形状にはいくつかの種類がありますが、羽状筋は筋全体の力発揮の方向に対して筋線維がある角度をもって走行しています。超音波画像によって計測できる羽状角や筋束長は、骨格筋の機能を左右する重要な因子となります。運動後の疲労状態にある筋の形状は変化し、羽状角が大きく、筋束長は短くなることが示されています¹¹⁾。この運動後の筋形状の変化は、腱や腱膜が一定の応力のもとで時間に伴い変形が増加する現象（クリープ現象）によ

特集 1

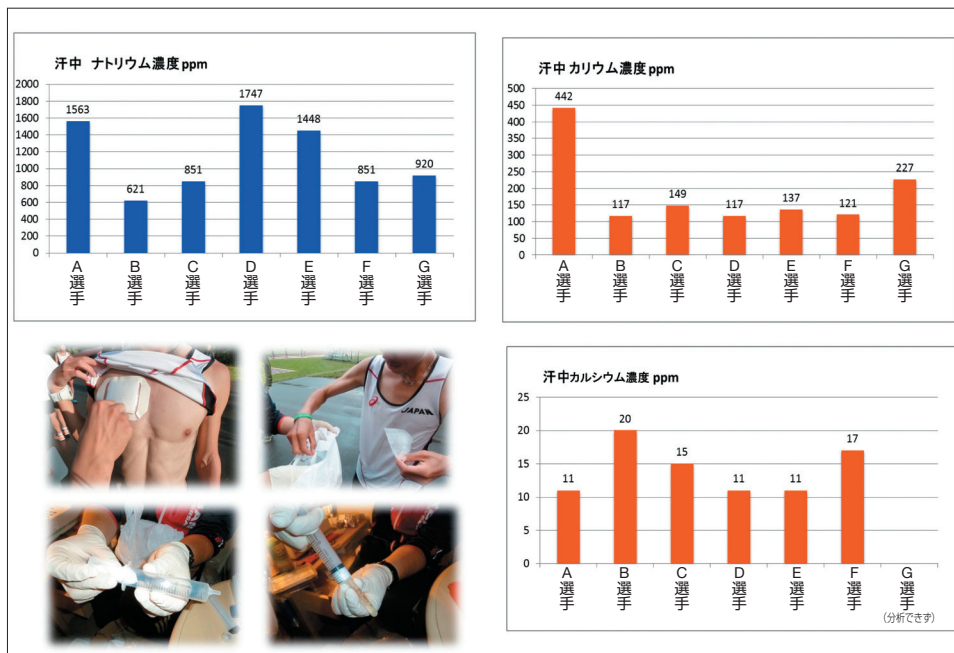


図 1 マラソンナショナルチーム士別合宿 40km 走 (2014.9.9,11 時 START) での汗中の成分分析結果

特集 3

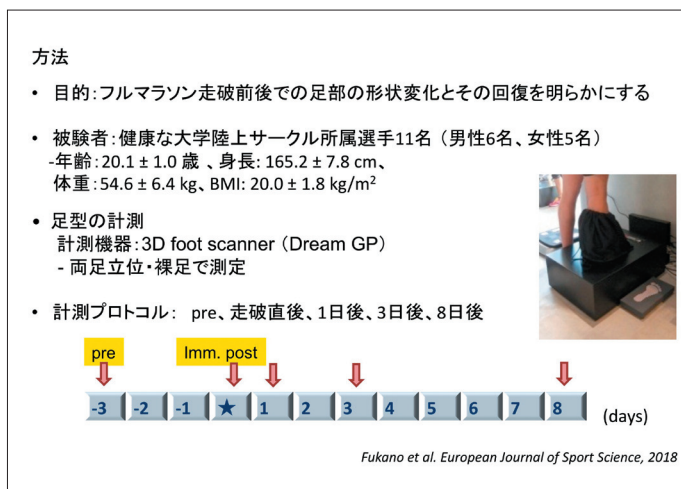


図 1



図 2

特集 4

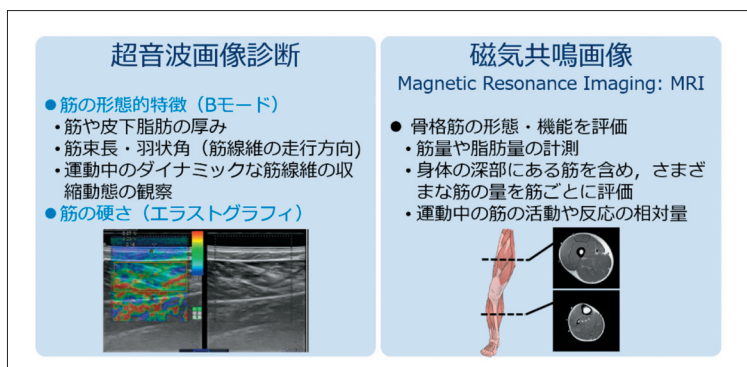


図 3 骨格筋画像研究

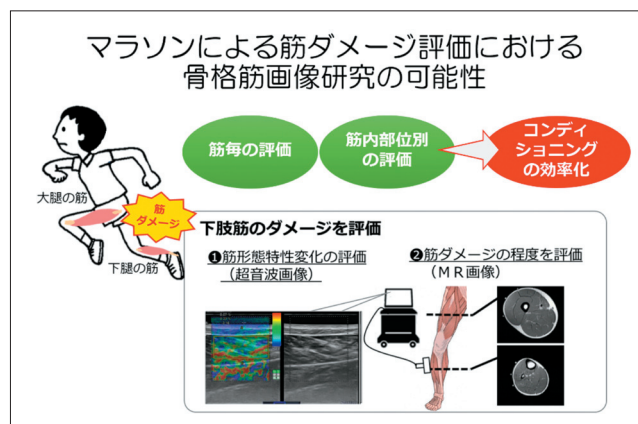


図 5

5

酸素摂取効率勾配 (OUES : Oxygen uptake efficiency slope) という指標について —— 生理学的基礎と臨床への応用

馬場礼三

中部大学生命健康科学部スポーツ保健医療学科
教授、小児科医

OUES という指標を開発した馬場先生。これを求めるには最大負荷を必要としないため、心疾患患者などにも用いることができ、さらにはトップアスリートにも活用できる。馬場先生らは実際に東海大学のランナーを対象に研究されたことがある。少し難解な部分があるが、できるだけわかりやすく解説していた。

——今年9月のベルリンマラソンではケニアのエリウド・キプショゲ選手が2時間1分39秒という世界新記録を樹立。いずれは2時間を切るのだろうと思われますが、そういうスピードで走っているマラソン選手の生体内で何が起きているのか。これからのマラソンはどのようにっていくのか。大迫傑選手もシカゴ・マラソンで2時間5分50秒で日本記録を出しました。設楽悠太選手、服部勇馬選手の活躍もあり、日本記録と世界記録にはまだ若干差はあるものの、日本選手にも期待できるようになってきました。2時間1分台の記録が続出しているわけではない。

馬場：しかし、2時間を切るのは時間の問題だと思います。今や10000mを26分台で普通に走る世界です。30分をちょっと切るペースで走れば2時間を切れるわけですから。

——先生ご自身も長距離をやっていたらっしゃった？

馬場：私は中距離が専門で、全日本大学駅伝を2回走りました。

——名古屋大学のときですね。今でも走っている？

馬場：はい。走っています。

——先生は長距離選手の研究をされているというのはどういう経緯ですか？

馬場：現在の大学では対象がないのでやっていますが、以前東海大学にいたときに駅伝選手たちの運動耐容能を測っていました。マラソン選手の呼吸循環応答を研究しました。現在はマラソン選手ではなく、おもに糖尿病の患者さんの呼吸、運動時の換気応答を研究しています。今行っているのは腕のエルゴメータです。全身の運動対応能がどのくらい測定できるか。たとえば足のちゃんと使えない患者さんで体力がきちんと評価できる方法はないかということで、腕のエルゴメータで全身の心肺運動対応能がどれくらい評価できるかということを行っています。

世界中で用いられている OUES という指標

馬場：アスリートの話ではないのですが、私の研究でもっとも広く認められているのは、酸素摂取効率勾配 (OUES : Oxygen uptake efficiency slope) で、教科書やヨーロッパの心臓病学会のガイドラインなど、世界中で使用されているされている指標です。

—— どういう指標でしょうか。

馬場：世界で現在標準的に使用されている指標で、詳細はわれわれが東海大学紀要で発表した解説記事に記してありますので、それを参照していただきたいのですが (編集部注：以下はカコミ欄を参照しつつお目通しいただきたい)、横軸に漸増運動負荷中



馬場礼三 (ばば・れいぞう) 先生

の分時換気量 ($\dot{V}E$)、つまり1分間に何リットル、ハーハーしたか。換気、つまり入れ替えの空気の量です。横軸にハーハーした分時換気量 ($\dot{V}E$ l/min、カコミ欄図1a)、縦軸に酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$ (ml/min)) をとります。両者の関係は対数関数で表せます。これは $\dot{V}O_2$ は生体のエンジンの出力です。そのことをあまりわかっておられない方がおられますが、 $\dot{V}O_2$ は生体のエンジンの出力で、なぜわれわれは酸素摂取量を測るかという、自分たちのもっているエンジンの出力、何馬力のエンジンを積んでいるかを直接測ることはできないけれども、酸素摂取量を計ることによって、たとえば1分子のブドウ糖が分解していくとピルビン酸になっていってアセチル CoA になってクレブス回路でミトコンドリアの中に入って、最終産物は36個のATP (36ATP)。その間に6個 (6ATP) の酸素を消費する。ATP はすぐに分解できるから測ることもできない。ただATP とリン酸に分解したときには爆発的なエネルギーができます。

■ OUES : Oxygen uptake efficiency slope とは

以下は、馬場ら、Oxygen uptake efficiency slope (OUES) : その生理学的基礎と臨床応用, Tokai J. Sports Med. Sci. No.11, 9-14, 1999 より編集部で抜粋要約したもの。参考文献リストは割愛。

OUES とは

図 1a は、ある被検者での漸増運動負荷中の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$ [ml/min]) と分時換気量 ($\dot{V}E$ [l/min]) の関数を示したものの。このグラフからわかるように、 $\dot{V}O_2$ の $\dot{V}E$ に対する増加率は負荷強度が増すにつれて次第に鈍り、最後には頭打ちになる。これらの関係は対数関数を用いるとよく表すことができ、図 1a を X 軸についての片対数表示すると両者の関係は直線で表される。それが図 1b で、その傾きは生理学的に重要な意味をもつ。すなわち、大きい傾きは一定の換気量の増加に対して大きい酸素摂取量の増加が得られることを意味する。我々は、この傾きを酸素摂取効率勾配 (Oxygen uptake efficiency slope [OUES]) と名付け、これが運動耐容能の指標として使用可能であることを示した。1996 年に登場して以来、この指標に関していくつかの基礎的な研究や臨床応用が報告されてきている。

OUES の生理学

前述のとおり、漸増運動負荷中の $\dot{V}E$ と $\dot{V}O_2$ の関係は対数関係で回帰することができ、対象 (年齢、基礎疾患の有無や種類)、負荷プロトコルの種類にかかわらずその回帰係数はいずれの報告でも平均で 0.96 の高値が得られている。 $\dot{V}E$ と $\dot{V}O_2$ の関係は、

$$d\dot{V}O_2 / d\dot{V}E = a \times \ln 10 / \dot{V}E$$

と表される (その前の式は割愛)。この式は、

$\dot{V}O_2$ の $\dot{V}E$ に対する増加率が係数 a (すなわち OUES) であり、ある相対運動強度 ($\dot{V}E$) における $\dot{V}O_2$ の増加率を示す係数である、言い換えれば、OUES は体がどれくらい有効に酸素を摂取できるかを表す指標であると言える。

OUES の決定因子

(冒頭の計算式は割愛)

OUES は、(i) 代謝性アシドーシスへの進展の時期と程度、すなわち作業筋への血

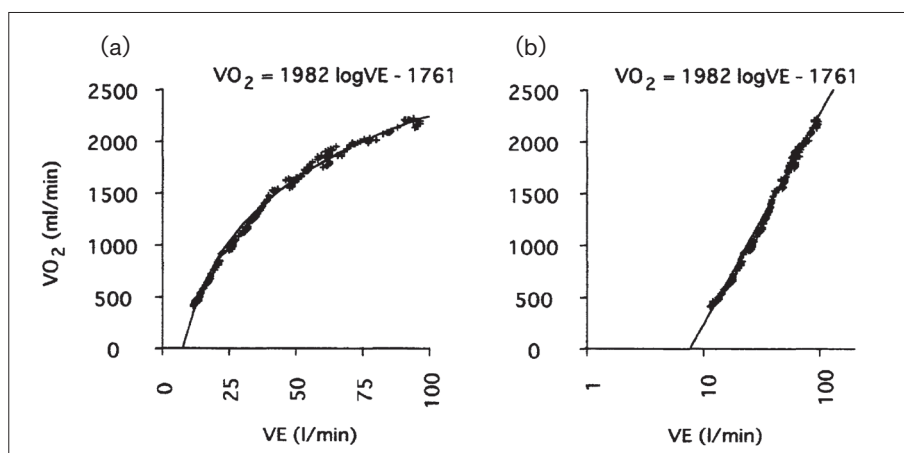


図 1 ある被検者における漸増運動負荷中の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と換気量 ($\dot{V}E$) の関係。両者は対数関係でよく表すことができる (a)。これを x 軸についての片対数表示で表すと、直線関係となる (b)。この直線の傾きは換気の有効性を表す指標であり、これを OUES と呼ぶ。

何ジュールのエネルギーを生み出したかは測れないけれども、その間に取り込んだ酸素の摂取量を測れば、つまり何ジュールのエネルギーを生み出したかを測ることと正比例の関係だから等価になります。縦軸はエンジンの出力。横軸はハーハーした量。これが対数関数で近似できるので横軸を横軸対数にするとカコミ欄の図 1b のようになります。この傾きに注目すると傾き a が立っていれば立っているほど、ハーハーせずにエンジンの出力を上げられる。効率のいいエンジンを積んでいる。この傾きを求めればエンジンの出力を測れる。効率が測れる。もっと言うならば、最大酸素摂取量を測らなくても、途中で終わってもこの傾きは求められるから、全力で目一杯走らせなくてもエンジンの効率は測れる。これは傾き a を OUES としたのですが、OUES

は最大酸素摂取量との間に相関係数は 0.95 くらいです。ほとんど直線関係になります。この傾きを求めることが、最大酸素摂取量を求めるのと同じということなのです。しかも途中で運動が終わっても目一杯走らなくても、エンジンの効率、つまりエンジンの出力を求めることができる。——すると当然、マラソン選手などは傾き a が立ってくるということですね。

馬場：そうです。

疾患を有する人への OUES の有用性

——病気の人は傾き a の角度が小さくなる。

馬場：最大酸素摂取量はだいたい体重 1 kg あたり 12ml/min くらいを下回ってくると「この患者さんはもう危険な状態」と世界中

の心臓の専門家たちは知っています。心不全患者の予後、この人が助かるかどうかを知る方法は実は最大酸素摂取量しかないのです。つまり、この人を心臓移植の待機リストに載せないといけないのかがわかる。それには最大酸素摂取量しかないのです。今は BNP (脳性ナトリウム利尿ペプチド: Brain Natriuretic Peptide) という指標が出てきて、多少は役に立つというようになってきていますが。

——平たく言えば生命力の指標は最大酸素摂取量になると。

馬場：12ml/min を下回ったら心臓移植の待機リストに載せないといけないのだけれども、この心不全患者に目一杯走らせるわけにはいかない。危険ですから。ですから世界中のみんなが目一杯走らせなくても心不全患者さんの体力を評価できる方法があ