

筋肉の硬さ測定に関する研究

土居 陽治郎・小林 一 敏

An evaluation of the stiffness of human muscle

Youjirou DOI Kazutoshi KOBAYASHI

Sometimes muscles are stiffened after a hard training or a race. It is difficult to recognize how much the muscles are stiffened for lack of method to measure muscle stiffness. Therefore, two types of instrument were made for measuring muscle stiffness:

1. Muscle Stiffness Testing Device... An instrument which measures muscle stiffness through the outer skin with a static loading.

2. Muscle Dynamic Testing Device... An instrument which measures muscle dynamic response through the outer skin with an impulsive dynamic loading.

Muscle Stiffness Testing was utilized for analyzing three problems as follows:

- 1) How much does an exercise stiffen human muscle?
- 2) Does the skinfold have an influence on the changes of muscle stiffness?
- 3) Does the muscle stiffness have anything to do with the muscle fatigue?

Muscle Dynamic Testing was utilized for solving a nonlinear viscoelastic model by least square method.

Results:

- a) Muscle Stiffness Testing was effective for measuring the changes of muscle condition.
- b) When the muscle stiffness of the same person was measured, the skinfold did not have an influence on the changes of muscle stiffness.
- c) In order to investigate whether the muscle was in fatigue or not, it was an effective method to measure the changes of the muscle stiffness.
- d) Muscle Dynamic Testing might be a useful method to reveal the mechanical character of the various muscle conditions.

Key words: muscle stiffness, muscle fatigue, dynamic loading, viscoelastic model.

1. はじめに

合宿などの激しいトレーニングをした後や全力を発揮した試合の後、あるいは不慣れな運動・労働などの後などに、いわゆる筋肉痛とか筋肉の疲労感を知覚することはよくある。こういう時は、触れると筋肉が硬く張った状態になっていることが多い。また、筋肉が収縮状態にあるときは硬く、弛緩状態にあるときは軟らかいと容易に認識する

ことができる。しかし、この筋肉の硬さを客観的にとらえた報告は少なく、特に筋肉の硬さを物理的な尺度から検討したものはほとんどない。

一方、戦後のわが国において疲労の研究が盛んに行われていた時期があり、筋肉の疲労についても筋力の低下からだけでなく硬さの変化などからも論じられていた²⁾。それらは筋肉の硬さそのものの物理的尺度を検討してないため、筋肉の硬さ

と筋肉疲労とを関係づけるまでには至っていない。しかし、近年のレオロジーの発展により生体組織の物性を力学的に論じることが可能になってきた。

そこで本研究では、筋肉の硬さそのものの物性を力学的な立場から検討し、筋肉の硬さの変化と筋肉の疲労との関係を明らかにしようとしたものである。

本研究のように筋肉の疲労について論じることが意義深いと考えられる。最近の健康ブームで自らランニングなどの運動を実施したり、医者やスポーツ指導者が積極的に運動を奨励しているが、筋肉疲労の点まで配慮が及んでいないとは考えられない。このことは、選手クラスのコーチング場面でも同様であり、トレーニングの計画や実施と障害の予防という点からみても、真剣に取り組まねばならないテーマであると思われる。また、人工芝や全天候型運動場では非常に疲れ易いとの報告が多く、人工の材料で加工されたパイレング・サーフェイスの人体への影響とその評価についても筋肉の疲労という立場から検討できるものであろう。

2. 硬さの定義

硬い軟らかいを経験することは容易であるが、これらを定量的に表すことは難しい。それは、一口に硬いと言っても、引っ張ったときにどれだけの強さに耐えうるとか、引っかきに対する抵抗、摩擦に対する抵抗など広い範囲の内容を含んでおり、それらの性質すべてを表す測定方法はない¹⁴⁾¹⁷⁾、とされているからである。したがって、硬さの定義はいまだ存在しておらず、現在では、“ある物体の硬さとは、それが他の物体によって変形を与えられようとするときに呈する抵抗の大小を示す尺度である”という定義が最も妥当であると考えられている¹⁹⁾。

この考えを具体化した測定法としては、多種多様な方式が考案されているが、生体を対象とした硬さ試験機で適当なものは現在のところ存在していない。つまりは、筋肉を含め、生体の硬さ・軟らかさの定義づけがなされていないことを意味している。

3. 筋の硬さの測定法の原理と測定装置

生体を対象とした硬さの定義は確立されてい

いが、我が国でも生体の中で硬い軟らかいを容易に識別できる筋を対象として硬さ試験機が考案・試作されている⁹⁾¹⁰⁾¹⁵⁾。それらの共通点は、皮膚の表面から押しつけた力をもとに筋などの硬さを測定するものである。中には、小林ら⁹⁾や加藤ら¹⁰⁾の測定装置のように、強制振動を加えてその応答特性から硬さを測定するものもあるが、原理はやはり押力の応答である。

そこで、本実験でも押力と変位の関係から硬さを評価し得るゴム硬度計（島津製作所）を用い、それを筋の硬さに適用できるように改良した皮膚圧入計を試作した。

3.1 ゴム硬度計(JIS K6301—1975)について

図1にその構成を示すが、この装置は押針がゴムなどの物体に押しつけられると、押針が付着しているスピンドルが加圧用のバネに抗して変位し、その変位を物体の硬さとして表示するもの⁹⁾である。このゴム硬度計の特徴は硬度計を下向き、上向き、横向きにしても測定値のばらつきを生じないという意味で、人体の筋の硬さ測定には適していると考えられる。

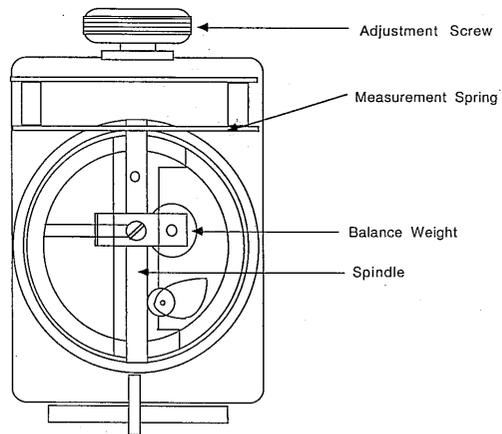


Fig. 1 Rubber Hardness Testing device (produced by Shimadzu Corporation).

3.2 皮膚圧入計

ゴム硬度計それ自身でも筋の硬さは測定可能であるが、押針の先端が尖っており、わずかの圧入でも痛く感じ、実用的でない。それにまた、ゴム

硬度計の対象はゴム・糸巻などであり、それらは物質として軟らかいものではあるが、生体組織と比べればかなり硬いものである。したがって、そのまま筋の硬さに適用したのでは、感度が低すぎるという欠点を有する。そこで押針の皮膚に当たる面積が大きいほど、ゴム硬度計の加圧バネに大きな弾性力を与えることができることから押針の先に適当な摩擦のない円柱棒を付着し、測定感度をあげることを可能にした。円柱にはデルリン材を用い、その直径は8.3mmとした。そして、この円柱（以後、押棒という）を支持し、ゴム硬度計の加圧面と同様な加圧面を持つ、支持台をゴム硬度計の加圧面に接着した。皮膚圧入計の概要を図2に示す。皮膚圧入計の目盛りとばね定数の関係を図3に示す。なお、ばね定数に関しては、押棒が押している面積当りの圧力と圧入の距離との関係から算出した。

測定方法は皮膚圧入計を手を持って、測定筋の表面の皮膚面に対して垂直に保ち、支持台加工面を皮膚に軽く接触させるよう押し込んで、接触した時点の目盛りを読むものであり、この方法は、ゴム硬度計でゴム硬度を測定する場合と同じである。

3.3 筋の衝撃応答性測定装置

皮膚圧入計は生体のいわば弾性的な性質のみを取り上げて測定するものであるが、生体組織は弾性的特性と粘性的性質を合わせもった粘弾性的性質を有している。この粘弾性的性質を表す力学的モデルの代表に、Maxwell Model (直列粘弾性) と Voigt Model (並列粘弾性) の2つが考えられている¹¹⁾。皮膚面などの生体軟組織は、一定の荷重に対しては瞬時に弾性変形を生じるのではなく、徐々に変形速度が緩み、やがて停止して平衡点に到達するタイプの粘弾性的特性を呈する。この意味からいうと、生体軟組織は Voigt 型と解釈される¹³⁾。

Voigt 型の物性を示すものに、高分子材料がある。この材料の粘弾性特性の測定には強制振動を加えて、その周波数応答から動的弾性係数・動的粘性係数を求める方法が一般的であるが、生体組織材料の粘弾性特性を衝撃試験法を用いて非線形大変形を考慮した報告もある¹⁰⁾。

本研究では後者の衝撃試験法を用いることとし、そのために衝撃試験装置（以後、筋衝撃試験

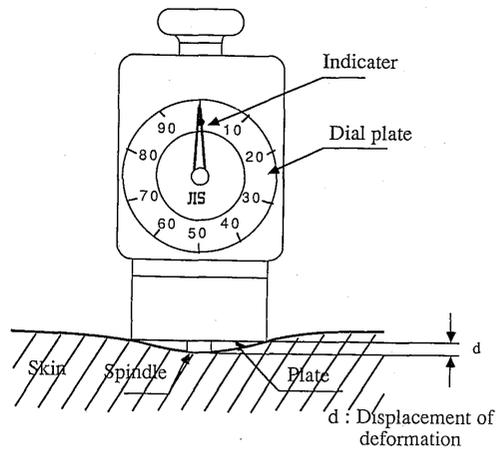


Fig. 2 An instrument for muscle stiffness (Muscle Stiffness Testing).

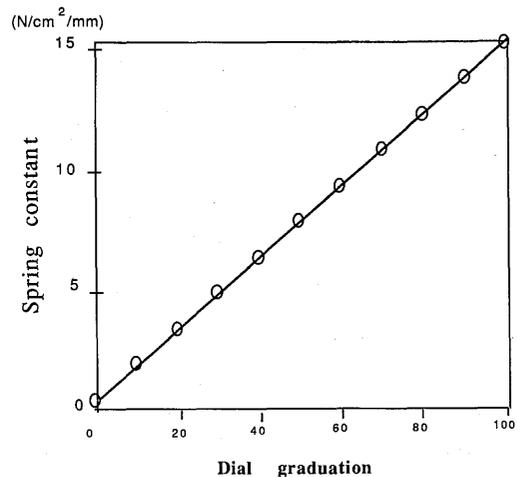


Fig. 3 Static response of the instrument for testing muscle stiffness (Muscle Stiffness Testing).

装置という) を試作して筋の衝撃応答特性を調べた。

筋衝撃試験装置の概略を図4に示す。この装置は落下重錘1を伴った衝撃ハンマーヘッド3が衝撃伝達部5に衝突する。すると、5と一体となった先端の皮膚衝撃部8が皮膚面を押しつけ、皮膚にくぼみを形成する。この時の衝撃荷重、つまり皮膚面を押す力 f を荷重センサ7で、また衝撃加速度 ($\frac{d^2x}{dt^2}$) を加速度センサ6で検出するものである。落下重錘1やその落下高を変えることで、衝撃荷重を変化させることができる。

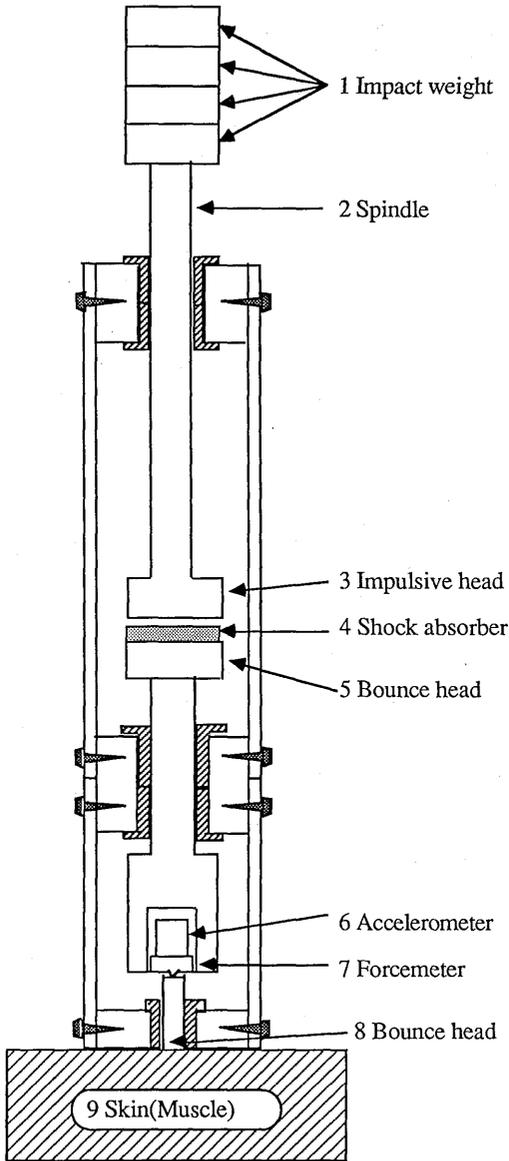


Fig. 4 Muscle Dynamic Testing device.

加速度 $(\frac{d^2x}{dt^2})$ から速度 $(\frac{dx}{dt})$ および変位 x を算出することは原理的には可能であるが、加速度計の信号をもとにした解析には問題点が多い⁹⁾。こ

の筋衝撃試験装置では高精度で応答特性のよい加速度計を選択し、2階積分をして正確に変位を算出することが可能となった。

3. 4 筋の衝撃応答特性モデル

生体軟組織は Voigt Model のような特性を呈するが、荷重 f と変形 x には

$$f = kx + c \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (1)$$

k : 弾性係数 c : 粘性係数

があるとされていて、Voigt の方程式とよばれている。ところが、こういう線形のモデルでは生体軟組織の衝撃応答を完全に記述できない¹⁰⁾。そこで、Voigt Model の特性を有するが、バネやダッシュポットが非線形の性質を持った力学モデルで記述されると仮定した。

$$f = kx^a + c \left(\frac{dx}{dt} \right)^b \quad (2)$$

筋衝撃試験装置はその構造上、荷重 f を接触面積で除した圧力 P として測定されるため、(2)式の両辺を接触面積で除した。

$$P = Kx^a + C \left(\frac{dx}{dt} \right)^b \quad (3)$$

(3)式の、 a 、 K 、 b 、 C の値は、筋衝撃試験装置から、圧力 P 、変形速度 $(\frac{dx}{dt})$ 、および変位 x を計測し、最小二乗法によりそれらの数値を推定する方法を選んだ。

4. 実験方法

実験は4種類行った

- a. 筋肉の硬さと皮脂厚との関係を調べる。
- b. 筋肉の疲労を推定する。
- c. 筋肉の疲労と筋力の低下の関係を調べる。
- d. 筋肉の硬さの変化を物質特性から調べる。

(実験 a) 筋肉の硬さと皮脂厚との関係

皮膚圧入計や筋衝撃試験装置による筋肉の硬さの測定には、皮膚表面から測定するため、皮下脂肪による影響が生じてくるのは明白である。そこで、運動前後での筋肉の硬さの変化と皮脂厚の変化を調べた。

- 被験者—筑波大学水泳部員6名
- 運動負荷—公認競技会における200m自由形レース
- 測定方法—表1に示した筋群について、レース前後の筋肉の硬さを皮膚圧入計により測定

Table 1 Muscles measured by Muscle Stiffness Testing.

5000m running	200m freestyle swimming
trapezius	triceps brachii
pectoralis	deltoideus
latissimus dorsi	latissimus dorsi
triceps drachii	triceps drachii
rectus abdominis	biceps brachii
biceps femoris	brachioradialis
gastrocnemius	rectus femoris
tibialis anterior	gastrocnemius
	tibialis anterior

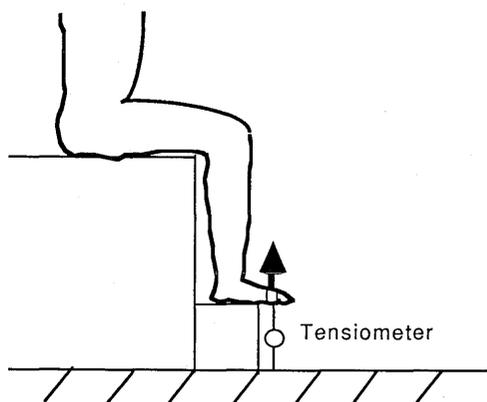


Fig. 5 Method of the force of the dorsal flexion of the foot. A load cell was used for measuring the force.

し、またその測定箇所¹⁾の皮脂厚を超音波皮脂厚計(積水化学工業 SH-302FT)にて測定した。
(実験b) 筋肉疲労の推定
運動後の筋肉疲労を筋肉の硬さの変化から推定しようとしたもの。

1. 測定

- 被験者—筑波大学陸上部員長距離ブロックの男子学生16名
- 運動負荷—5000m タイムレース
- 測定方法—ウォームアップ前
ウォームアップ後(レース直前)
レース直後
クーリングダウン(30分)後

の4回、表1に示す筋群について皮膚圧入計により筋肉の硬さを測定した。

(実験c) 筋肉疲労と筋力低下の関係

走運動では着地衝撃によって前脛骨筋に大きな力が働くことから¹²⁾、前脛骨筋の筋肉疲労が顕著であると予想され、前脛骨筋の疲労と筋力との関係を見ようとしたもの。

- 被験者—筑波大学陸上部員長距離ブロック男子学生2名
- 運動負荷—1名には5000m タイムレース、他の1名には5000mのジョギング
- 測定方法—ウォームアップ前、レース直前、レース直後、およびクーリングダウン後の前脛骨筋の硬さを皮膚圧入計で測定すると同時に、図5に示すような足部背屈力を測定した。

(実験d) 筋肉の硬さと物質特性

筋肉が運動によって硬くなるということは、物理的にどのような性質が変化するものかを検討する。

- 被験者—成人男子1名
- 運動負荷—5000m タイムレース
- 測定方法—レース前、レース後の前脛骨筋の硬さを皮膚圧入計で測定し、同時に、筋衝撃試験装置で前脛骨筋の衝撃応答を測定した。

筋肉の硬さは、測定箇所が異なればその硬度も異なっている。例えば、前脛骨筋のように筋が皮膚表面近くに存在するような箇所の硬度は硬く、腓腹筋のように皮下脂肪におおわれていて「軟らかい」感じを受ける箇所の硬度は低い。そのうえ個体差もある。したがって、皮膚圧入計の指示する目盛りの大きさのみで筋肉疲労を推定することは難しい。そこで、すべての測定箇所の運動前(ここではウォームアップ前)の硬さを1とし、増減率を算出した。この増減率は筋肉の硬さの変化の度合を示したものである。この方法により、個体差および測定箇所のちがいの影響を除去できるものと考えられる。

結果と考察

5.1 筋肉の硬さに及ぼす皮脂厚の影響

筋肉の硬さを皮膚表面上から測定する限り、この皮下脂肪の影響は無視できない。いくら筋肉が硬くなっていても、皮下脂肪によってその変化が表れなければ測定不可能である。ところが、皮下脂肪は運動の前後及び運動(筋収縮)中に軟らかくなったり、あるいは皮下脂肪の厚さが増大することは考えられず、皮膚圧入計で

Table 2 Changes between the skinfold thickness and stiffness on the trapezius muscle in 200m freestyle swimming.

Sub.	Skinfold thickness(mm)		Stiffness value(degree)	
	Before race	After race	Before race	After race
A	7.3	7.5	12.0	15.0
B	5.5	5.5	8.5	11.5
C	6.7	6.7	10.0	12.0
D	8.5	8.4	10.0	13.0
E	6.6	6.7	11.0	13.5
F	6.2	6.2	9.5	13.5

(Stiffness value 1 degree=0.21N/cm²/mm)

測定された硬さの変化は筋肉自身の硬さの変化と考えられる。

表2は、200m自由形レース前後における僧帽筋の皮脂厚及び皮膚圧入計の変化を示したものである。各被験者の皮脂厚自身には変化がみられず、ばね定数で表される筋肉の硬さが増加している。このことは、筋肉そのものが硬くなったことを示していると考えて差し支えない。従って、皮膚圧入計を用いることによって同一部位の筋肉の硬さの変化を測定することが可能と考えられる。ただし、今回の測定に用いた被験者は身体脂肪量が15%以下の男子で、いわゆ

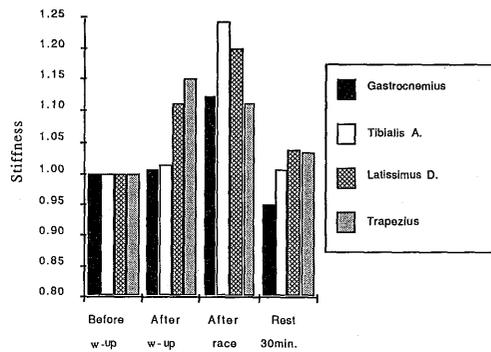


Fig. 6 Changes in the muscle stiffness ratios.

Table 3 Stiffness values on the tibialis anterior muscle in 5000m running race.

Sub.	Stiffness value(degree)			
	Before w-up	After w-up	After race	After rest
A	19	22	35	19
B	20	18	20	16
C	17	16	21	18
D	11	14	18	17
E	18	19	20	18
F	20	21	41	22
G	18	14	18	15
H	20	18	25	21
I	17	20	18	21
J	15	18	23	18
K	21	17	19	16
L	18	18	20	15
M	12	12	14	13
N	16	15	17	14
O	20	22	18	18
P	16	16	18	14

(Stiffness value 1 degree=0.21N/cm²/mm)

るスポーツマン体型の持ち主である。皮膚圧入計をあらゆる人のあらゆる部位で測定するにはまだ解決しなければならないことがあり、万能とはいえない。例えば、女性の乳房を測定した場合、目盛りの針はほとんど振れず、硬さそのものの比較をするまでにはいたらないのが現状である。

5.2 筋肉疲労と筋肉の硬さ

5000m 走の前後で、皮膚圧入計による筋肉の硬さを測定したところ、測定した筋群全部の硬さの度合が増加した(図6)。とりわけ前脛骨筋における硬さの度合の増大が著しい。表3は、全被験者の前脛骨筋における皮膚圧入計で測定された硬さの変化を示したものであるが、中には2倍近くも増加した者も見られた。この測定結果は「長距離走では下腿の全面的筋がよく張る」という選手たちの実感をよく表している。また、広背筋については、姿勢保持のための筋収縮だけでなく、体幹の捻りにも大きく関与しているため¹⁸⁾、結果的に筋肉の疲労につながったのではないかと推察される。

5000m 直後には硬かった筋も、約30分のクーリングダウンを施すことによって、ほぼ元の硬さまでに回復していた。

前脛骨筋が5000m 走において、その硬さが大きく増加したが、そのように硬化したことが筋肉疲労につながっているかどうかを足部背屈力という筋肉測定によって検討した。その結果、レース直後では、筋肉が硬くなった反面、筋力は低下するという結果を得た。ところが、ジョギング程度では、筋肉も硬くならず、筋力の低下も見られなかった。また、レース後30分のクーリングダウンを施すと、筋肉の硬さも筋力もほぼレース前の状態に戻った(図7, 8)。

これらのことから、前脛骨筋が硬くなるということは、筋肉疲労を起こして機能が低下していることを表していると推察される。筋肉疲労の指標のひとつとして、筋肉の硬さの変化を測定する意義があると示唆された。

特に前脛骨筋の疲労と長距離走は密接な関係がある。「土のグラウンドよりも全天候型トラックで走った方が下腿の疲れが激しい」という訴えを具体的なデータとして提供した例はなく、この分野においても、この皮膚圧入計による筋肉

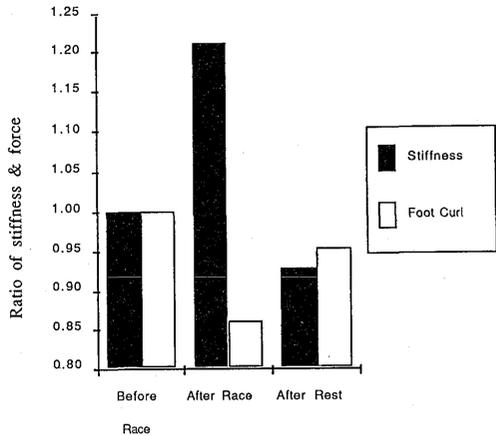


Fig. 7 Changes in the ratio of the tibialis anterior stiffness and the force of the dorsal flexion of the foot (5000m race).

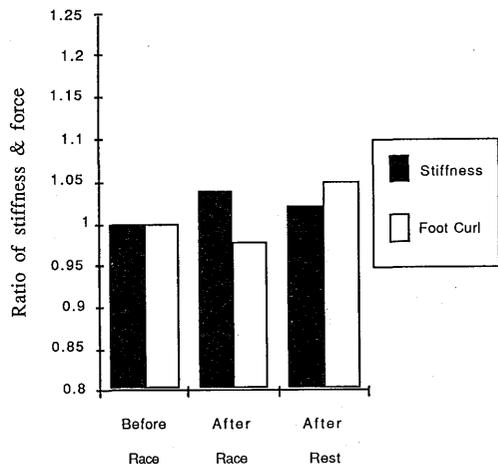


Fig. 8 Changes in the ratio of the tibialis anterior stiffness and the force of the dorsal flexion of the foot (jogging).

疲労の推定法は有益な情報を与えるものと期待される。

5.3 筋の衝撃応答特性

図9は実験dでのレース後の前脛骨筋の衝撃圧力および最小二乗法を用いて求めた推定衝撃圧力の関係を示したものである。最小二乗法により求めた推定圧力の適合度は、標準誤差(不

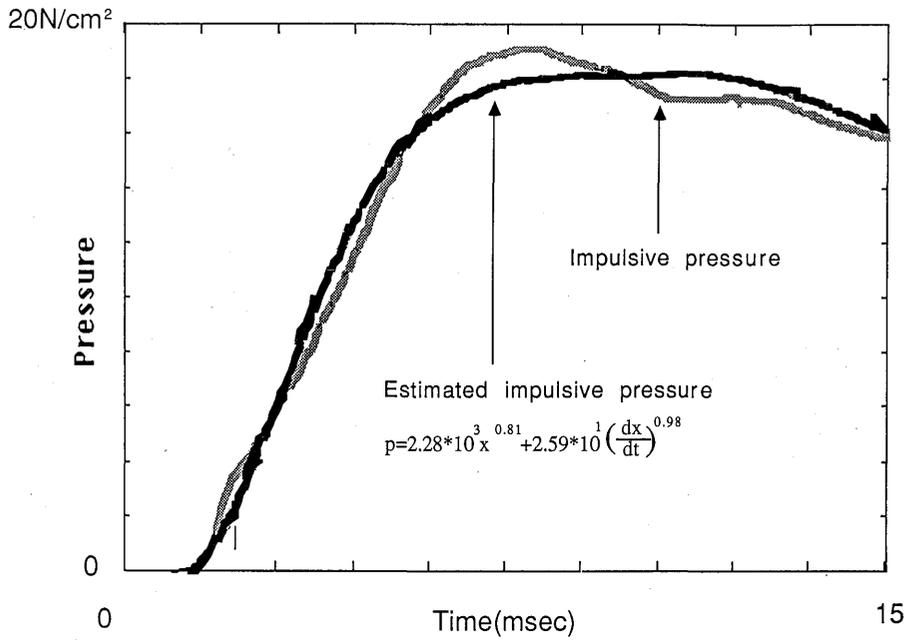


Fig. 9 Impulsive pressure and estimated impulsive pressure on the tibialis anterior muscle after 5000m-running (Standard Error= 0.36N/cm²).

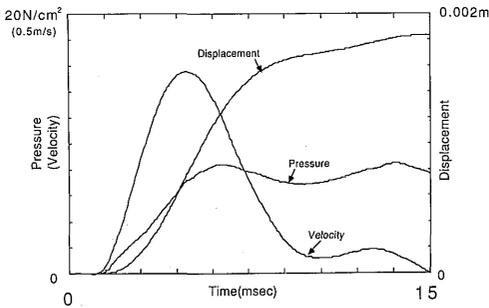


Fig. 10 Dynamic response on the tibialis anterior muscle before 5000m-running.

偏分散値の平方根) $Se=0.36 [N/cm^2]$ と小さく、(3)式が衝撃応答をよく表していると考えられる。

実験 d におけるレース前後での前脛骨筋の衝撃応答特性を図10, 11に示した。これらの図は、衝撃圧力 $P [N/cm^2]$ 、変形速度 $(\frac{dx}{dt}) [m/s]$ 、および変位 $x [m]$ について時間経過を追って描いたものである。最小二乗法により求めた推定圧力 P' と測定された圧力 P との適合度は、レース

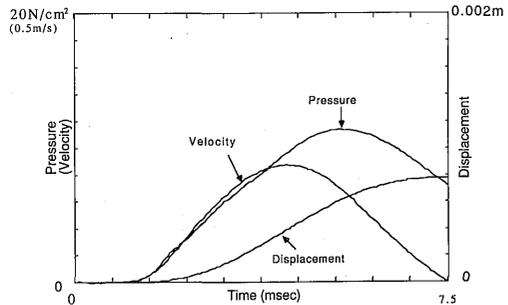


Fig. 11 Dynamic response on the tibialis anterior muscle after 5000m-running.

Table 4 Modulus of viscoelasticity and muscle stiffness value.

	Before race	After race
K	9.89×10^3	2.28×10^3
C	8.48×10^0	2.59×10^1
a	1.14×10^0	8.10×10^{-1}
b	8.60×10^{-1}	9.80×10^{-1}
stiffness value	21 degree	33 degree

前後いずれも $Se=0.32 [N/cm^2]$ であった。皮膚圧入計で測定された筋肉の硬さは、レース前が 21° 、レース後が 33° であった (表 4)。

レース前後での衝撃応答特性をみてみると、レース後では粘性の割合が高い。この傾向は、筋を緊張させた状態でも同様であり、この状態でも皮膚圧入計は弛緩状態よりも高い値を示す。これらのことから硬くなった筋の特徴は、衝撃応答における粘性の割合が増加していると推察される。

この衝撃応答における粘性の割合が高いということは、筋肉中の水分量(血液量)、たとえば筋の血流量の変化と関係があると考えられる。血流量の増加は運動中のみならず、運動直後にも一過性的に現れることが知られている。運動後の血流量から安静時の血流量の差を過剰血流量というが、Black¹⁾は歩行・ランニング時における下腿の過剰血流量を測定し、ある速度以上になると速度に比例して過剰血流量が増加すると報告している。

血流量の増加は血管の拡張との関係が深く、運動時および運動後は CO_2 などの血管拡張物質が増加するために、血流量の増加は著しい⁸⁾。筋の衝撃応答特性においてレース後の粘性の割合が高くなった理由の 1 つに、このような血流量の増加が関与していると思われる。

けれども、筋の衝撃応答の結果だけから、運動後の筋の血流量や筋充血を論ずるのは早計であろう。しかし、筋肉の硬さの変化の物理的特性を明らかにする試みは、その変化のメカニズムを生理学的に解明する上で意義深いと思われる。

6. まとめ

筋収縮時あるいは激運動後などに、筋肉が硬くなっていることを感じるのは容易である。そこで、どれくらい硬くなっているか、その硬さの特性を定量的に求めるために次の二種類の装置を試作した。

①皮膚圧入計——皮膚表面上から筋肉の硬さを静的荷重をかけて調べる装置。

②筋衝撃試験装置——皮膚表面上から衝撃荷重を加え、筋肉の動的応答特性を調べる装置。

そして、運動前後での筋肉の硬さの変化、筋肉の硬さの変化に対する皮脂厚の影響、および

筋肉の硬さと筋肉の疲労との関係を皮膚圧入計を用いて検討した。また、筋への衝撃応答特性を Voigt Model にもとづく非線形粘弾性力学モデルを仮定し、最小二乗法によりモデルを解析した。

その結果、次のような結果を得た。

(1)筋肉の硬さの変化を調べるために皮膚圧入計を用いたことは有効であった。

(2)筋肉の硬さの変化は皮下脂肪に影響を受けなかった。しかし、個体内での異なった筋の測定および個体間の測定には、皮脂厚の影響を考慮しなければならず、装置を含めた今後の課題である。

(3)5000m 全力走では、前脛骨筋と広背筋の硬さの割合の増加が顕著であり、筋肉が硬くなる現象を把握することは筋肉疲労の指標の 1 つとして考えられた。

(4)筋への衝撃応答特性から、疲労した筋の物質特性を粘弾性モデルによって解明できる可能性があることが示唆された。

引用・参考文献

- 1) Black, J.E. :Blood flow requirements of the human calf muscle after walking and running., Clin. Sci., 18, pp. 89-102, 1959.
- 2) 猪飼道夫, 石井満:筋の硬さと筋力, 体力科学, 1-5, p. 168, 1951.
- 3) 俵島津製作所:硬度計, 実用新案公報, 昭和61-36913.
- 4) 加藤正道, 村上新治, 松本伍良, 随意収縮時におけるヒト前脛骨筋の硬さ変化について, 医用電子と生体工学, 17-4, pp. 258-263, 1979.
- 5) 小林一敏:衝撃加速度からの変位の算出, Journal of Japanese Sports Sciences, 6-3, pp. 185-190, 1987.
- 6) 小林健二, 室岡一:生体組織の硬度測定装置, 特許公報, 昭和61-55378.
- 7) 紺野義男:筋硬度に関する研究(第一報), 体力科学, 1-5, pp. 180-185, 1951.
- 8) 真島英信:「生理学」, pp. 410-411, 文光堂, 1978.
- 9) 宮埜寿夫, 佐渡山亜兵:筋硬度計, 特許公報, 昭和56-50575.
- 10) 瑞穂医科工業:筋緊張度測定器, 公開実用新案公報, 昭和61-46192.
- 11) 中川鶴太郎:レオロジー(第2版), pp. 157-190, 岩波全書, 1978.

- 12) Nigg, B.M. :Biomechanics of running shoes, pp. 128-137, Human Kinetics Publishers, Inc., 1986.
- 13) 佐藤正明：生体組織の力学特性, 医用電子と生体工学, 24-4, pp. 213-219, 1986.
- 14) 須藤一：材料試験法, p. 95, 内田老鶴圃新社, 1976.
- 15) 高木洋, 笠原哲, 沖野雅美, 平林列, 富田豊, 堀内敏夫：肩凝りと筋肉の弾性率, 医用電子と生体工学, 22-1, pp. 46-52, 1984.
- 16) 高谷治, 赤塚孝雄：複合材料としての生体の力学的特性, 日本機械学会誌, Vol. 71, pp. 855-859, 1968.
- 17) 寺沢正男：硬さのおはなし, pp. 29-51, 日本規格協会, 1981.
- 18) 山田憲政, 関岡康雄, 小林一敏：走運動中の体幹部のひねり動作の解析, 日本体育学会第38回大会号, p. 658, 1987.
- 19) 吉沢武男：硬さ試験法とその応用, pp. 1-6, 裳華房, 1967.