

短距離トップランナーの400m走中脚筋電図の記録

Measurement of leg electromyogram during 400m running of top sprinters

五味宏生^{1),3)}, 土江寛裕^{2),3)}, 木村孝三^{1),3)}, 小林海²⁾, 保原浩明²⁾,
村岡哲郎⁴⁾, 磯繁雄^{1),3)}, 川上泰雄¹⁾, 福永哲夫¹⁾, 彼末一之^{1),3),4)}

¹⁾ 早稲田大学スポーツ科学学術院

²⁾ 早稲田大学人間科学学術院

³⁾ 早稲田大学競走部

⁴⁾ 早稲田大学先端科学・健康医療融合研究機構

キーワード: 陸上競技, 400m走, 筋電図, 疲労

抄 録

400m走の疲労については主として筋や呼吸・循環系の特性から論じられることが多いが、中枢神経系も関係することが知られている。そこで本研究では、スタートからゴールまで脚部各筋の筋電図を簡便に記録し、後半局面での速度遞減に神経性の疲労がどの程度関与するかを解析する第一歩とした。被験者は専門種目が400mと100mの二名の一流陸上競技選手で測定部位は右脚7箇所とした(1.ヒラメ筋、2.腓腹筋、3.前脛骨筋、4.大腿二頭筋、5.外側広筋、6.大腿直筋、7.大臀筋)。また踵部に小型の加速度計を装着して脚の動きを記録した。データは被験者の腰に固定した小型のデータロガーに1kHzのサンプル周波数で収録した。筋電図は全波整流し、1サイクルごとに積分した。十分な準備運動の後、通常のレースと同様に400mを全力で走るように指示し、スタートからゴールまでビデオ撮影を行った。1サイクルごとの積分筋電図値は100m付近までは高い値を示しその後は安定していた。しかし、短距離選手の腓腹筋EMGはゴールまで徐々に減少する傾向にあった。一方ヒラメ筋のEMGは中間付近から逆に徐々に増加した。400m選手にはとくに筋活動の低下は見られなかった。短距離選手で速筋線維の多い腓腹筋で電気活動が低下することは、中枢神経からの指令が低下している可能性(中枢性の疲労)を示唆する。

スポーツ科学研究, 4, 9-16, 2007 年, 受付日: 2006 年 11 月 17 日, 受理日: 2007 年 5 月 23 日

連絡先: 五味宏生, 〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15, Tel & Fax 04-2947-6751

kouki53@ruri.waseda.jp

I. 緒言

運動時間とエネルギー供給機構の割合の關係の解析によれば、30秒程度で疲労困憊に至る運動では約65%、60秒程度の運動では約50%が無酸素過

程によりエネルギー供給がなされる (Melbo and Tabata, 1993)。400m走はトップレベルの選手では45秒前後であることから、必要とされるエネルギーの半分以上は無酸素過程のエネルギーに依存していると

推測される(八田,2001)。つまり酸素負債量が大きく、乳酸などの代謝産物の蓄積も著しい非常に苛酷な種目である。そこでそのパフォーマンスを考える上で、レース後半で生じる疲労が大変重要な要因となる。400m走の疲労については主として筋の特性や血中乳酸濃度など生理学的見地から多くの知見が得られており (Karlsson et al,1974: Nummela,1992) 、主なエネルギー供給源がレース後半でクレアチンリン酸系から解糖系へ移行することで生じる乳酸の蓄積が速度減の原因であると考えられていた (Tesch,1978)。最近では乳酸の産出だけでなく、それに伴うクレアチンリン酸濃度の低下と筋収縮に重要な役割を果たすカルシウムの働きを阻害するリン酸の濃度の上昇や細胞内でのナトリウム濃度の変化など、さまざまな要因が400m走時の疲労に関係していると考えられている(八田,2004)。

これらのさまざまな要因の中で疲労には中枢神経系も関係することが知られている(Latash,1998)。神経系の疲労を解析するには筋電図の記録が不可欠である。本研究では小型のアンプとデータロガーを用いて400m走のスタートからゴールまで走動作に重要な役割を果たすと思われる脚部各筋の筋電図の変化を解析した。特に無酸素課程が重要な短距離種目のうち、最長の400mと最短の100mの二名の一流選手の筋電図を測定することにより、400m走の後半局面での速度減に神経性の疲労がどの程度関与するかを解析する第一歩とした。

II. 方法

1. 下肢筋の筋電図の測定

筋電図 (Electromyogram:以下EMG) の記録は右脚のヒラメ筋 (Soleus :SL)、腓腹筋 (Gastrocnemius:GC)、前脛骨筋 (Tibialis anterior:TA)、大腿二頭筋 (Biceps femoris:BF)、外側広筋 (Vastus lateralis:VL)、大腿直筋 (Rectus femoris:RF)、大臀筋 (Gluteus maximus:GM) の7筋から行った。測定部位は筋腹中央部とし、ヒラメ筋 (SL)、腓腹筋 (GC) についてはともに外側頭 (LS, LG) とした。19×36mmの電

極 (日本光電製: ディスポ電極 F-150S) を電極間距離 20mm で各筋に装着した。EMG測定用の作動増幅アンプ (図1, フルサワラボアプライアンス製: 利得1000倍) は13mm×25mm×7mmと小型で、これを電極の近傍にサージカルテープで固定した。装着後、電極をより厳密に固定するため、アンダーラップ (Mueller製) で脚部全体を覆った (図2)。また、着地の瞬間を同定するため加速度計を踵部後面に装着した。EMGと加速度計からの出力は携帯型のデータロガー (10.4cm×6cm×2.7cm, 125g, フルサワラボアプライアンス製 FLA-128) に記録した (図1)。このデータロガーは1KHzのサンプリング周波数で8チャンネルのデータを最大300秒間連続記録することが可能である。またデータロガーはコンピュータに有線で接続して記録される筋電図をモニターできるので、電極の装着異常などの問題をあらかじめチェックすることができる (実際の実験時にはその接続ははずす)。測定後EMG信号は50Hz以下の低域をカットし、さらに加速度より求めた走動作の1サイクル毎に整流積分値 (iEMG) を求めた。

2. 被験者と実験プロトコール

被験者は陸上競技を専門に行っている2名の男性である。一人は100mが専門のオリンピック選手 (以下A選手)、もう一人は400mが専門の全日本クラスの選手 (以下B選手) である。競技記録は表1の通りである。なお、被験者には実験についてあらかじめ説明し、文章にて同意を得た上で実験を行なった。

実験は早稲田大学所沢キャンパスの陸上競技場 (二種公認) で行った。被験者には通常の試合時と同様なウォームアップを十分に行なわせ、電極装着確認後、まずスタンディングスタートから100mの全力走を実施した。これは400mとのスピードの相対値を算出するのに必要なデータを採取するために行った。十分な休息後、試合のレースを想定して1人ずつクラウチングスタートからピストルの合図で400m走を行った。ペース設定などはせず『全力で』との教示のみを与えた。



図1. 筋電図測定用データロガー



図2. 筋電図測定部位

表1 被験者のベストタイムと計測タイム

被験者	専門種目	専門種目ベスト	400mベスト	測定タイム
A	100m	10"21	52"8	51"78
B	400m	46"89	46"89	48"98

3. 走動作の測定

グラウンド中央部に1台デジタルビデオカメラ(Panasonic NV-S9)を設置した。400m走では50mの区間毎の所要タイムを測定するために、カメラと被験者が走るレーン上の50m間隔のポイントを結んだ線の上にコーン(高さ80cm, 底部の直径40cm)を立て400mをパニング撮影した。同様に100m走時は10mの区間毎の所要タイムを測定するために10m毎にコーンを立て撮影した。そして以下の方法でそれぞれの実験での平均走速度、ピッチ、ストライドを算出した。

60fpsで撮影したビデオ画像をPCに取り込み動作解析ソフト(Frame Dias,DKH製)にて毎秒60コマずつ解析した。400m走ではピストルの煙からスタート時を特定した。また、ある区間の始めのコーンを被験者のトルソーが通過した時間をビデオカウンターから読み取り T_1 、同じトルソーがコーンを通過した後に最初に着地した時間を t_1 、同じ50m(100m走では10m)区間内で t_1 の着地側と同側足の最後の着地時間を t_2 、さらに区間の終わり(次の区間の始め)のコーンをトルソーが通過した時刻を T_2 として、以下の計算を行っ

た。

$$\text{疾走速度 (Running Speed:RS)} = L / (T_2 - T_1) \text{ (m/s)}$$

(Lは400m走では50m、100m走では10m)

$$\text{ピッチ (Stride Frequency:SF)} = \text{Step数} / (t_2 - t_1) \text{ (step/sec)}$$

$$\text{ストライド (Stride Length:SL)} = \text{RS} / \text{SF} \text{ (m)}$$

III. 結果

本研究で用いた方法で400m全区間のEMGを安定して記録することができた。100m走タイムはA選手10秒98,B選手11秒15であった。最高疾走速度出現区間は両選手とも40~50mであり、その時の速度はA選手10.53m/s、B選手10.17m/s。

図3は400m走の速度、ピッチ、ストライドの変化を表す。図3Aは絶対速度、3Bは100m走で得られた最大速度に対する相対値である。絶対速度で見ると400m走時、50m毎の走速度は2名とも50-100m区間が最も高い値であった(図3A)。両選手ともその後、速度の低下が見られるが、その低下の様相は両者で対照的である。先ず100mを専門のA選手(図3A)は50-100m区間の平均速度は9.8m/sと高い値を示す。

しかし、そのスピードは徐々に低下し、最後には6.3m/s(最高区間速度の64%)まで落ちてしまっている。一方、400mが専門のB選手(図3A)は最高速度は9.0m/sとA選手よりも低い値であるが速度低下は7.8m/s(87%)までにとどまっておき、A選手と比べるとスピードがよく維持されている。相対速度で見るとピークの値には両者で大きな違いはない(A選手92.8%、B選手89.7%)。A選手は後半に大きく速度が低下する。このときピッチ、ストライドともに低下するが、ストライドが最高値の86%の低下に留まっているのに対して、ピッチは71%まで低下している。特に前半(200mまで)ではストライドの低下は小さく、速度低下の要因はピッチの低下が主である。一方後半にはピッチの低下とともにストライドも低下している。B選手はピッチ、ストライドともA選手に比べると低下の割合は小さい。

図4と図6にスタートからゴールまでのEMG活動と加速度計の連続記録を示す。7つの筋すべてで安定したEMGが得られている。そして踵に装着した加速度計の記録は大きなピークを規則的に示しており、着地時点を容易に検出することができる。

図4はA選手のスタートからゴールまでの筋電図である。特に速度ピーク付近とゴール間近での各筋の放電を図4より時間スケールを拡大して示したのが図5A.Bである。ゴール間近に見られるGCとRFの筋放電量の低下が一見して分かる。

図8はランニングの1サイクル毎に筋電図を整流積分したものを50mの区間毎に平均した値である。GCとRFでは筋活動が徐々に低下している。これに対してSLでは筋活動が200m付近までは低下しているが、後半再び強くなっている。その他の筋についてはスタートからゴールまで活動にそれほど大きな変化はみられない。

一方図6はB選手のスタートからゴールまでの筋電

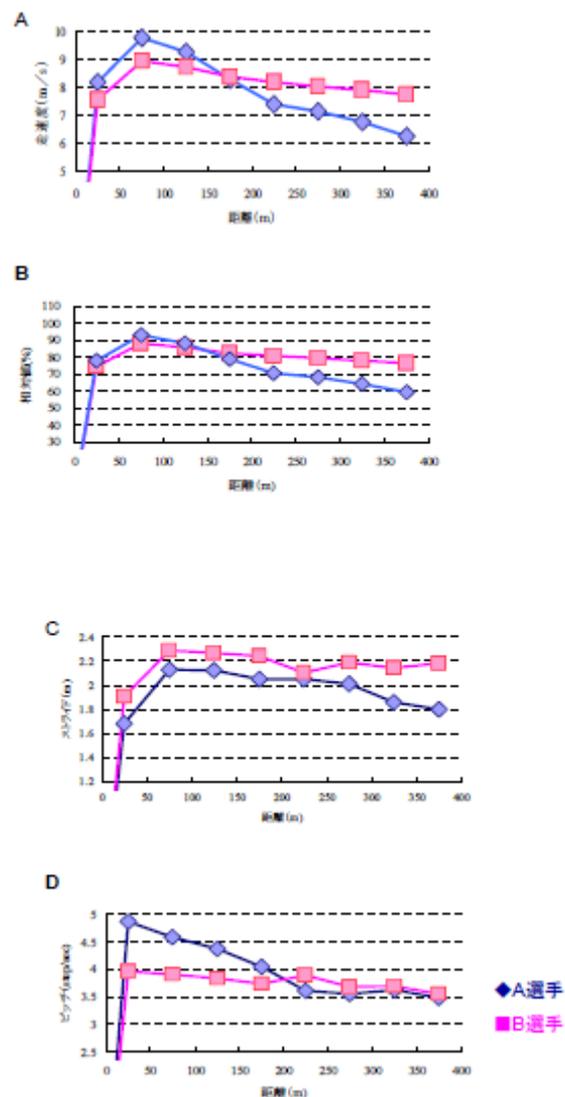


図3 .A: 走速度, B: %最大疾走速度 (100m 走時の最大疾走速度と比較), C: ストライド, D: ピッチの変化

図である。この選手には各筋ともスタートからゴールまで活動の大きな変化は見られない。図7に時間スケールを拡大したものを示す。定量的な解析もこの傾向を示している(図7)。A選手で低下の見られたGC、RFでも活動は最後まで維持されるか、むしろわずかではあるが上昇傾向にある。SLにもほとんど活動の変化は見られない。

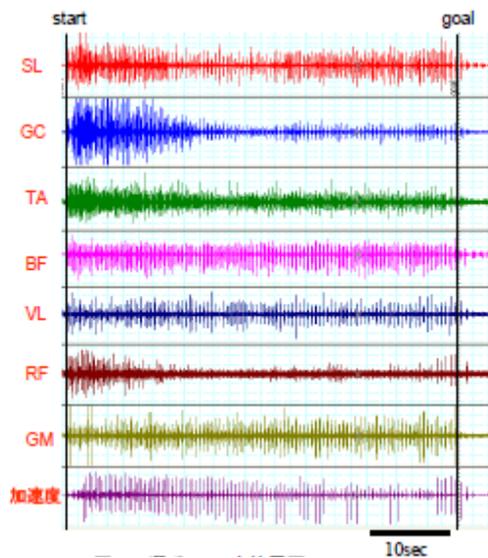


図4. A選手400m走筋電図

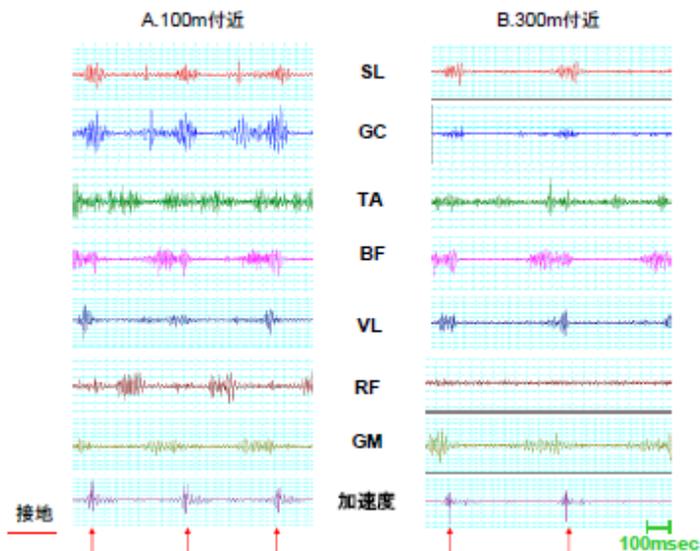


図5. A選手筋電図

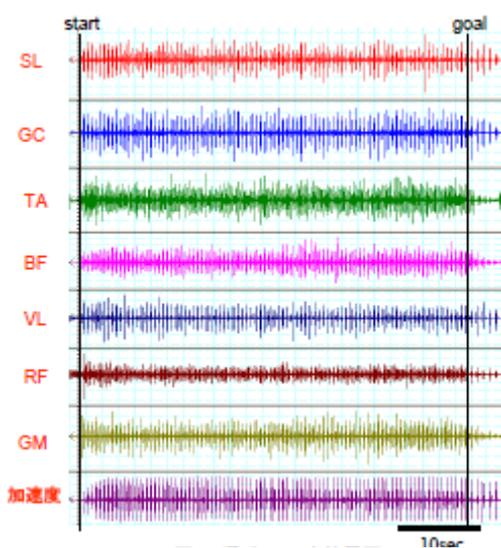


図6. B選手400m走筋電図

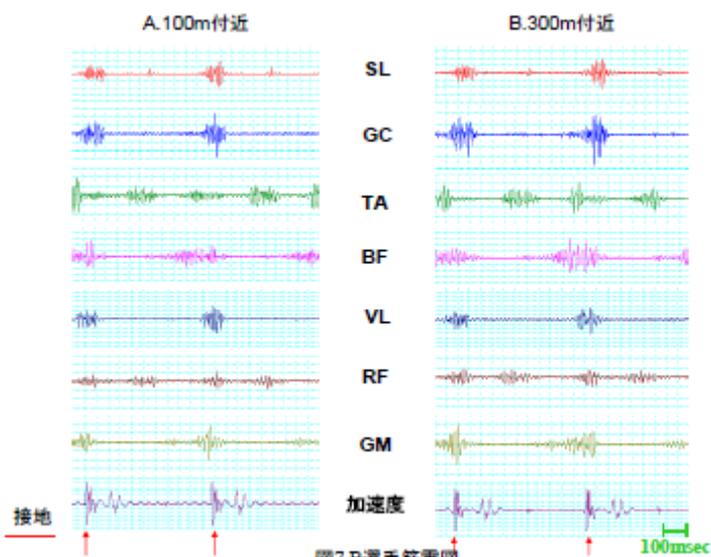


図6. B選手筋電図

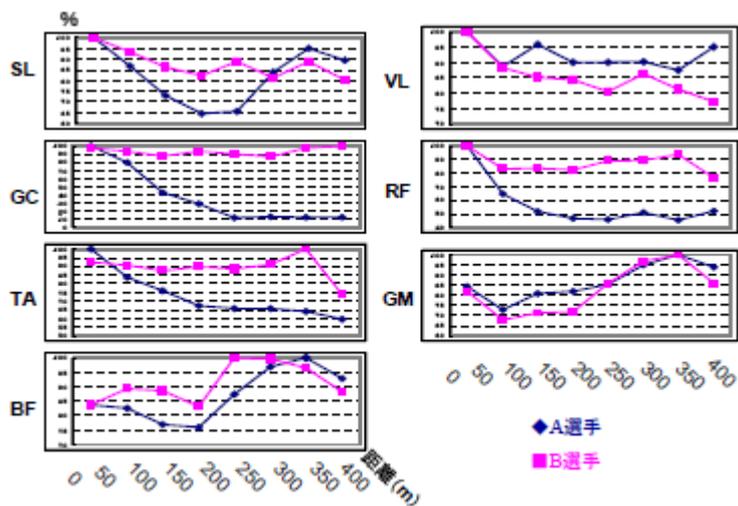


図8.50m毎の平均筋放電

IV. 考察

本研究では400m走のスタートからゴールまでの脚部筋電図を記録することができた。小型のアンプを電極近くに配置することでノイズの少ない記録が実現できた。

本研究の被験者は2名のみだが、いずれも一流の短距離選手であり、得られたデータは非常に興味深いものである。以下にこれについて若干の考察を行う。速度曲線は両者で対照的である。A選手は100m以降大きな速度低下が見られるが、B選手はゴールまで高い速度を維持している。しかし相対速度で見るとピーク速度に大きな違いはなく、A選手が特にオーバーペースであった（最初の速度が速すぎた）とはいえない。

下腿三頭筋のGC、SLの活動に、両被験者で異なる活動パターンがみられた。100m走を専門とするA選手は前半ではGCの放電量が多いが、後半には急激な低下を示している。一方、SLの活動は後半にむしろ増加した。対照的に400m走を専門とするB選手はスタートからゴールまでGC、SLともに活動変化がほとんど見られなかった。

A選手は後半に大きく速度が低下する。このときピッチ、ストライドともに低下するが、ストライドが最高値の86%の低下に留まっているのに対して、ピッチは71%まで低下している。特に前半（200mまで）ではストライドの低下は小さく、速度低下の要因はピッチの低下が主である。一方後半にはピッチの低下とともにストライドも低下している。このようなパフォーマンス低下の原因の一つには筋電図上に観察されたGCの活動低下があると考えられる。GCは膝関節の屈曲と足関節の底屈を行う二関節筋である。そこで、GCの活動が低下すればストライドを規定する足の蹴り（足関節の底屈）の速度、及び高いピッチの維持に重要な遊脚後期の下腿の振り出し（膝関節屈曲位からの伸展）の速度がともに低下するであろう。このGCの活動低下を補うように後半でSLの筋放電の増加が見

られる。しかしSLは足関節の底屈のみに関係する単関節筋であるので、ストライドの維持には役立つが、ピッチの低下は防ぐことはできない。これがストライドに比べてピッチの低下割合が大きかった原因と考えられる。

A選手に見られた腓腹筋でのEMG活動の低下は何に起因するのであろうか。EMG活動の低下には2つの可能性が考えられる。つまり、(1) α -運動神経からの信号自体が低下しているか、(2) 神経-筋接合部から筋線維上での活動電位発生機構の変化により活動電位そのものが小さくなるかである（篠原, 2002）。Kawakami et al.(2000)は下腿三頭筋で1秒間の等尺性最大収縮を繰り返し100回行わせて、腓腹筋とヒラメ筋での疲労の影響の違いを検討している。それによれば、脛骨神経の超最大値刺激時の筋電図の大きさは100回収縮後でも最大値の80%まで低下するにとどまっており、さらにこの傾向には腓腹筋とヒラメ筋で違いは見られなかった。走動作との筋収縮様式の違いからKawasaki et alの結果は本実験とは直接には比べられないものの、100回の収縮とは400mのランニングにはほぼ相当する（ストライドが2mとして200歩、つまり片脚では100歩）。本実験でのA選手の腓腹筋筋電図が20%以下にも低下し、一方ヒラメ筋ではほとんど変化が見られなかった。この結果はEMGの低下が上の(1)、つまり α -運動神経からの信号自体の低下による可能性を強く示唆している。もしそうだとするとこのことは特定の筋の疲労が何らかの方法で検出され、それによってその筋への出力が抑制されるという機構の存在を示唆している。これが脊髄に存在するのがあるいは上位中枢が関係するのかは不明である。しかし、「力が発揮できない筋には命令を送らない」という機能的には大変意味のある機構である。

一方、400m走行中に疾走動作が変化し、その結果腓腹筋とヒラメ筋の使い方が変化した（例え

ば、腓腹筋の利用が低下している)可能性も考えられる。つまり、「力が発揮できない筋には命令を送らない」のではなく「命令を送る必要がないから送らない」のかもしれない。しかし、例えば腓腹筋がまだ力を出すことができ、それを使えばより速い速度が得られるときに(現にA選手も前半ではそれが実現されている)、あえて速度が遅くなるように疾走動作を変えるとは考え難い。やはり腓腹筋などの活動の低下は筋の収縮力低下と関係したものであろう。これまで「中枢性疲労」は全身一様に起こるものについて主として解析されている。ここで問題になっているのはそれとは異なり、中枢神経系が個々の筋の活動を疲労の程度に応じて調節するという可能性である。そのメカニズムについて今後の解析がおおいに期待される。

これまでの研究では400m走選手の後半部分での速度逡減はストライドの減少が強く影響していると指摘(尾縣、1998)されている。また、400m走後半の動作変容として、膝の上がり低くなり、振り出しも小さくなること、接地(支持期)の支持脚のスウィング速度が低下するといった報告(市川ら、1995)もある。このように400m走後半にはいろいろな変化が起こると考えられるが、その様相は個人々々で異なるであろう。このような点を明らかにしてトレーニングにつなげる意味でも、筋電図の記録を行い、それを運動学的な解析と組み合わせることが必要であると考えられる。また今回の実験では筋電図の解析方法として個人内での増減の検討のみであり筋放電量を選手間で比較することはできない。そこで、今後は各選手の筋放電量の比較を可能とするために各筋の最大随意収縮時あるいは短い距離の全力走などの筋活動を基準に正規化して、選手間での比較することが必要である。

V. まとめ

400m走のスタートからゴールまでのランニング

中の脚部筋電図を手軽に計測するシステムを用いて2名の一流選手(一人は100m, もう一人は400mが専門)の脚部各筋の筋電図活動を速度、ピッチ、ストライドとともに測定した。全区間の筋電図を安定して記録することができた。両選手とも200m通過後の後半に速度逡減がみられた。専門種目別にみると100m選手では速度逡減率が高く、400mを専門とする選手は比較的速度逡減が少なかった。これに対応して100mの選手で腓腹筋の筋電図活動の顕著な低下が見られた。本実験の結果は、400m走後半における速度逡減は、エネルギー供給機構などの要因だけからではなく、中枢神経系の疲労という面からも解析する必要があることを示唆する。

参考文献

- Costill,D.L.,J.Daniels,W.Evans,W.J.Fink,G.Krahenbuhl and tenn B.Saltin(1976)Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and femail track athletes.J.Appl.Physiol.40.149-154
- Gollnick,P.D.,R.B.Armstrong,B.Saltin,C.W.Saubert ,W.L.Sembrow-ich and R.E.Shephard.(1973)Effect of training on enzyme activ-ity and muscle fiber composition of human skeletal muscle.J.A-ppl.Physiol.34.107-111
- 八田秀雄 (2001) 乳酸を活かしたスポーツトレーニング、初版、講談社、東京、pp.101-106
- 八田秀雄、吉田祐子、加藤麻衣 (2004) クエン酸で乳酸を対処して疲労回復という誤り、体育の科学、56,142-146
- 市川博啓、伊藤章、斉藤昌久、佐川和則、伊藤道朗、加藤謙一、阿江通良、小林寛道 (1995) アジア大会400m決勝のランナー動作解析、日本体育学会第46回大会号、3781
- Karlsson,J,Hulten,B.andSjodin,B. (1974)

- Substrate activation and product- inhibition of LDH activity in human skeletal muscle. *Acta Physiol.Scand.*92.21-26
- Kawakami Y, Amemiya K, Kanehisa H, Ikegawa S, Fukunaga T. (2000) Fatigue responses of human triceps surae muscles during repetitive maximal isometric contractions. *J Appl Physiol* 88: 1969-1975
- Melbo J, Tabata I (1993) Anerobic enegy release in working muscle during 30s to 3min of exhausting bicycling. *J Appl Physiol* 75:1654-1660
- 沼澤秀雄、杉浦雄策 (1994) 200m,400mレースの時間分析、世界一流競技者の技術、初版、ベースボールマガジン社、東京、pp.50-56
- Nummela,A., Vuorimaa,T. and Rusko,H. (1992) Changes in force production,blood lactate and EMG activity in the 400m sprint.*J.Sports Sci.*10:217-228
- 尾縣貢、福島洋樹、大山圭悟、安井年文、鍋倉賢治、宮下憲、永井純(1998) 下肢の筋持久性と400m走中の疾走速度遞減との関係、*体育学研究*、42、370-379
- 篠原稔(2002)筋疲労。「筋の科学事典」(福永哲夫編), 朝倉書店, pp.152-159
- Tesch,P.A (1978) Muscle fatigue in man and lactate concentration.*Bi-omechanics iv -A*,in Asmussen,E.and Jorgensen,K.(Eds.),U-niver-sity Pa-rk Press:Baltimore.68-72