

400m走における下肢神経筋機能の疲労動態

Fatigue of lower neuromuscular function in 400m running

天野雅斗 島 典広

Masato AMANO Norihiro SHIMA

東海学園大学 人間健康学部 人間健康学科

Department of Human Wellness, School of Human Wellness, Tokai Gakuen University

キーワード：400m 走, 筋電図, 筋疲労

Key words : 400m Running, electromyography, fatigue

要約

400m 走中の筋疲労に関しては、エネルギー供給機構や代謝産物の蓄積、バイオメカニクス特性などから論じられることが多いが、中枢神経系の関与も考えられることが知られている。そこで本研究は、400m 走中に中枢性の疲労がどの程度影響するのかを解明する第一歩として、ワイヤレス表面電極筋電図法を用いて実験を行った。実験は大学陸上競技部に所属し、400m 走種目を専門としている男子学生 6 名を被験者とした。その結果、400m 走後半の疲労困憊時の大腿二頭筋や大臀筋、腓腹筋の筋活動は最大筋活動率の 60-80%までしか増加しなかった。この結果から、400m 走中の疲労は大腿二頭筋や大臀筋、腓腹筋の筋活動の増加を抑制した可能性を示唆した。

Abstract

Fatigue during 400m running is often discussed the accumulation of metabolites and energy supply mechanism and biomechanical properties. It is not clear how neuromuscular activity changes during 400m running. The purpose of this study was to examine neuromuscular activity during 400m running by using of wireless surface electromyography (EMG). Running speed and EMG of biceps femoris (BF), gluteus maximus (GM), and lateral gastrocnemius (LG) muscles during 70m and 400m running were measured in 6 sprinters of track and field. EMG amplitude of BF, GM, and LG during 400m running increased only 60-80% of maximum EMG during 70m sprint running. These results suggest that neuromuscular fatigue during 400m running inhibits neuromuscular activity of BF, GM, and LG.

緒言

陸上競技大会における400m走種目は、必要なエネルギーの約60%弱が無気的エネルギーに依存しているとされ、乳酸の蓄積も著しく最も過酷な種目であると考えられている（尾縣1998）。400m走は80m付近を通過する時点で最大疾走速度を迎えその後ゴールに向かって疾走速度は徐々に低下し続けていくことが明らかになっている（尾縣1998）。この疾走速度の低下が緩やかな者ほど400m走の記録が良いとされており、疾走速度低下の原因に関しては生理学的見地から多くの研究が行われている（Hirvonen 1992, Rusko 1993, Nummela 1994）。しかし、実際の400m走中の疾走速度低下に神経筋機能の疲労がどのように影響しているかを検討した研究は少ない。随意的な運動時には中枢神経系で統合された指令が α 運動ニューロンを興奮させ、その興奮が筋に到達して筋収縮が起こる。この α 運動ニューロンの興奮状態や活動状態が筋へ反映されたものが筋電図（Electromyogram; EMG）であり、筋電図の変化から神経筋機能の疲労状態を捉えることが出来るとされている。そこで本研究では下肢の筋活動に焦点を絞り、400m走前半から後半にかけての神経筋疲労動態を表面電極筋電図法を用いて明らかにすることとした。

方法

1. 被験者

被験者は大学陸上競技部に所属し、400m走種目を専門としている男子学生6名であった（平均±標準誤差）。6名全員の身体的特徴及び400m走最高記録を表1に示した。

実験に先立ち、口頭および文書にて本実験の主旨、内容、方法、および実験施行にまつわる危険性の説明を充分に行い、自発的同意を得た上で実験を行った。尚、本研究の実施にあたっては東海学園大学研究の倫理委員会の承認を得た。

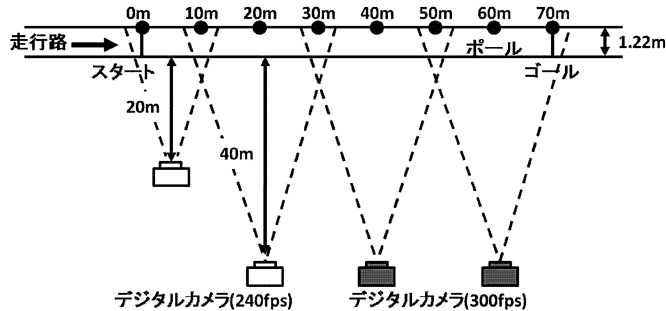
表1 被験者の身体的特徴及び400m走最高記録

被験者	身長 (cm)	体重 (kg)	400m 走最高記録 (秒)
A	184	76	47.30
B	175	69	49.06
C	172	64	49.82
D	166	58	50.76
E	175	62	51.36
F	173	62	49.14
平均±標準誤差	174±2.4	65±2.6	49.57±0.6

2. 70m 走および 400m 走中の疾走速度の測定

70m 走と 400m 走は、同日に行った。十分なウォーミングアップの後に 70m 走を実施した。その後、回復時間（10 分～20 分）を置き 400m 走を実施した。70m 走は最大疾走速度や 400m 走との筋電図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、直線レーンを用いスタンディングスタートで行った（図 1 A）。10m 毎の所要タイムを測定するために、カメラとレーン上の 10m 間隔のポイントを結んだ線上にポールを立てた。撮影は被験者の右側方に高速度カメラ（EX-FH25 および EX-F1, CASIO 社）を 4 台置き、毎秒 240 コマ（EX-FH25, CASIO 社）または毎秒 300 コマ（EX-F1, CASIO 社）で撮影した。20m 毎の所要タイムからそれぞれの区間平均走速度を算出し、区間所要タイムの最も短い区間の平均走速度を最大疾走速度とした。400m 走は図 1 B で示したように、400m トラックの 4 レーンを用い実際の 400m 走レースを想定して 1 人ずつクラウチングスタートからピストルの合図で行った。ペース配分に関する指示は行わず、全力で行うよう指示した。20m 毎の所要タイムを測定するために、カメラとレーン上の 20m 間隔のポイント（内側のラインから 20cm のポイント）を結んだ線上にポールを立てた。撮影はグラウンド中央に高速度カメラ（EX-FH25, CASIO 社）を置き、毎秒 240 コマでパニング撮影を行った。

A:70m走測定セットアップ



B:400m走測定セットアップ

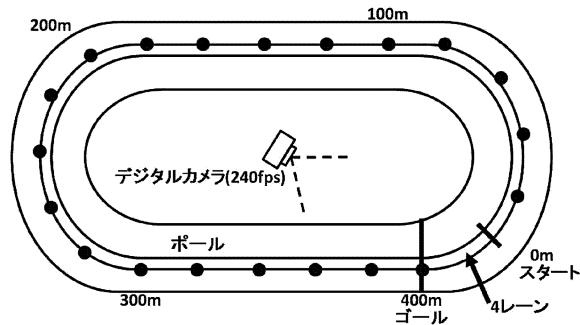


図 1 実験セットアップ

3. 下肢筋の筋電図の測定

70m 走と 400m 走の筋電図 (Electromyogram: 以下 EMG) の記録にはワイヤレス多チャンネルテレメータシステム (WEB-7000, 日本光電) を用い, 右脚の大腿二頭筋 (Biceps femoris: BF), 大臀筋 (Gluteus maximus: GM), 腓腹筋外側頭 (Lateral Gastrocnemius: LG) の 3 筋から記録した. 測定部位は筋腹中央部として, EMG 送信機 (ZB-150H, 日本光電) を専用の EMG 粘着テープで装着し, さらに送信機全体をキネシオテープで固定した. EMG の導出に際して, 測定部位を除毛しアルコール綿で拭き取った. また, 着地の瞬間を同定するために三軸加速度計 (ZB-156H, 日本光電) を右脚脛骨下部に装着した. EMG と加速度計から導出した電波信号は, 腰に装着したベルト式送信機バイオリピータ (ZB-700H, 日本光電) を介して 5~1000Hz の帯域で増幅し, グラウンド中央に設置した受信機 (ZR-700H, 日本光電) へ伝送しサンプリング周波数 1kHz でコンピュータに取り込んだ. 記録後, 分析ソフト (LabChart6) によってデジタルフィルター処理 (上限 500Hz, 下限 20Hz) を行った. 加速度より同定した接地タイミングの前後 260msec (接地前 160msec 接地後 100msec) の EMG 信号の平均振幅値 (Root Mean Square; RMS) を得た.

4. 400m 走中の心拍数の測定

400m 走中の心拍数を, 心拍計 (S610i, POLAR) を用いて 5 秒ごとに記録し, 最高心拍数を求めた.

5. 血中乳酸濃度の測定

採血は 70m 走直前と, 400m 走 3 分後に行った. 血中乳酸濃度は指先部よりランセットを用いて穿刺し, キャピラリーにて全血 20 μ を採取した. 採取した血液サンプルはただちにサンプル容器に投入し数回攪拌した後 4-10°C に冷やされたクーラーボックスに保存した. 血中乳酸濃度は乳酸測定装置 (BIOSEN Cline, EKF DIAGNOSTIC 社製) の固定化酵素法を用いて分析した.

6. 統計処理

全てのデータは平均値±標準誤差として示した. 400m 走各区間で得られた EMG の平均振幅値 (RMS) は, 70m 走時に得られた最大値を基に正規化し (%RMS), 400m 走時の筋活動の割合 (筋活動率とする) を評価した. 統計処理には, 繰り返しのある一元配置分散分析を用いた. この検定で有意であった際に可能な全ての組み合わせについて Fisher's LSD を用いて比較した. 全ての検定において有意水準は危険率 5%未満とした.

結果

本研究の400m走記録は 51.53 ± 0.60 秒であった。70m走での最高疾走速度は40-60m区間で現れ、その時の最高疾走速度は 10.28 ± 0.13 m/secであった。また、400m走での最高疾走速度も70m走と同様に、40-60m区間で現れた。その時の最高疾走速度は 8.88 ± 0.13 m/secであり、これは70m走最高速度を100%とした時の86.3%であった。400m走の40-60m区間で現れた最高疾走速度と比較して、0-10m、80-100m、160-400mまでの各区間の疾走速度は有意に低い値を示した($p < 0.05$) (図2)。400m走最後の区間(380-400m)での疾走速度は 6.78 ± 0.12 m/secであり、これは70m走最高速度を100%とした時の65.9%であった。

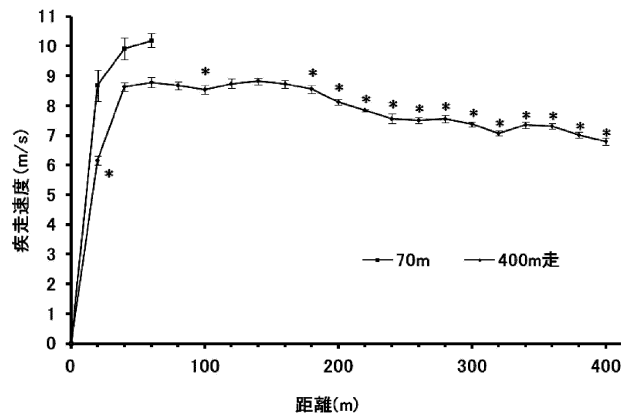


図2 70m走および400m走疾走速度の変化

*400m走40-60m区間の疾走速度(最大疾走速度)と比較して有意に低い値 ($p < 0.05$)

本研究ではEMGにアーチファクトが多く、BFとGMは5名、LGは2名のみ記録することが出来た。図3、4にスタートからゴールまでのEMG活動と三軸加速度計の記録例を示す。BFは

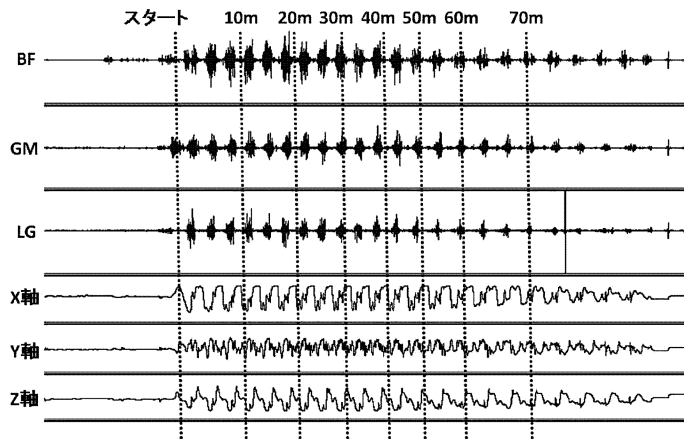


図3 70m走時の筋電図及び加速度計

BF：大腿二頭筋，GM：大臀筋，LG：腓腹筋外側頭，X・Y・Z軸：三軸加速度計—
X軸：脛骨垂直軸，Y軸：脛骨横断軸，Z軸：脛骨前後軸。

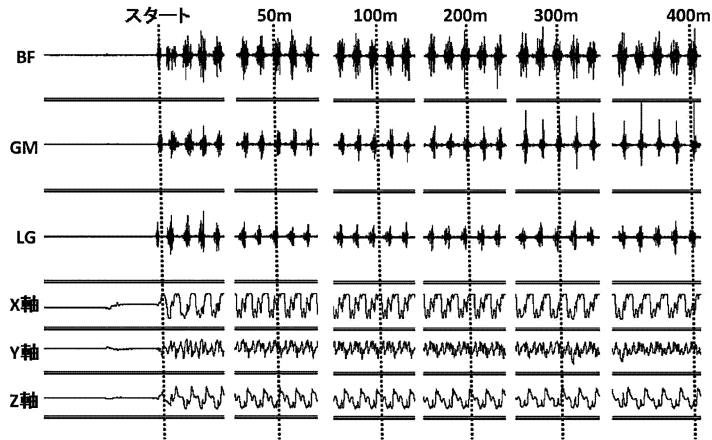


図4 400m 走時の筋電図及び加速度計

BF：大腿二頭筋，GM：大臀筋，LG：腓腹筋外側頭，X・Y・Z軸：三軸加速度計—
X軸：脛骨垂直軸，Y軸：脛骨横断軸，Z軸：脛骨前後軸。

10m 地点の筋活動率と比べて 300m 地点の筋活動率は有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。GM は 10m 地点の筋活動率と比べて、100m、200m、400m の筋活動率は有意に低い値を示し、50m 地点の筋活動率と比べて、100m、400m の筋活動率は有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。また、LG は スタートからゴールにかけて徐々に筋活動率が増加し続ける傾向が見られた (図5)。

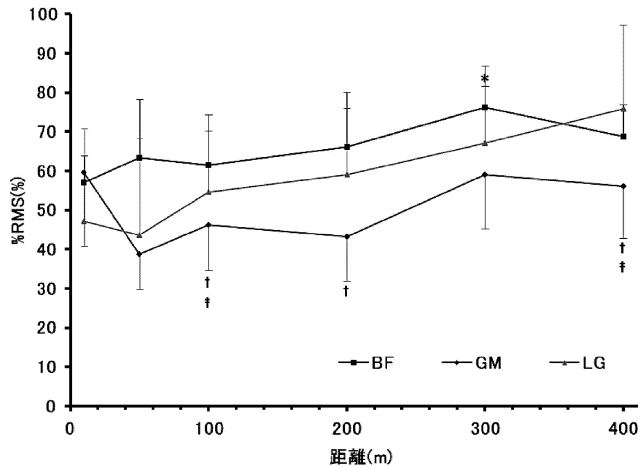


図5 400m 走時の筋活動率 (70m 走時の最大 RMS を 100%として)

- * BF 10m 地点の RMS と比較して有意に高い値 ($p < 0.05$)
- † GM 10m 地点の RMS と比較して有意に低い値 ($p < 0.05$)
- ‡ GM 50m 地点の RMS と比較して有意に高い値 ($p < 0.05$)

400m 走時の最高心拍数は 197 ± 10 bpm であり、70m 走前、400m 走後の血中乳酸濃度はそれぞれ、 3.92 ± 1.40 mmol、 20.47 ± 0.81 mmol であった。

考察

本研究の400m走記録は、 51.53 ± 0.60 秒であり、400m走最高記録 49.57 ± 0.59 秒に対して、達成率は96.1%であった。これは、400m走選手を対象に全力疾走を行わせた Hirvonen et al. (1992) の研究における達成率93.8%、Rusko et al. (1993) の94.8%、Nummela et al. (1994) の93.8%と比較しても高い値であった。このことから、本研究では実際の400m走レースに近いペースで測定試技が行えたものと推測できる。また、Hirvonen et al. (1992) は、400m走における速度低下の原因は、筋中のクレアチンリン酸が枯渇し、乳酸の蓄積が最大になることであると指摘している。乳酸の蓄積は400m走中の速度低下の原因の一つであると考え、本研究では400m走後の血中乳酸濃度を測定した。その結果、400m走後の血中乳酸濃度は 20.47 ± 0.81 mmolまで上昇していた。また、400m走時の最高心拍数も 197 ± 10 bpmまで上昇していたことから、本研究の測定試技は最大努力で行われ、どの被験者も400m走後、疲労困憊に達していたことが推察できる。また、400m走の疾走速度については70m最大疾走速度の86.3%までしか速度の上昇が見られなかったことから、400m走選手が400m走を走る場合は、最大疾走速度の8割程度が最大であることが予想される。

本研究では70m走と400m走のスタートからゴールまでの右脚部筋電図を記録したが、五味ら (2007) が報告したような後半にかけて腓腹筋の筋活動率が低下するという変化は見られず、各筋とも後半にかけ同様に筋活動率が增加する傾向が見られた。大臀筋は10m付近で強い筋活動が見られたが、その後筋活動が最大値の40%まで低下することから400m走を疾走する上では最初の加速期以外あまり重要な役割を担っていない可能性が示された。それに比べ、大腿二頭筋はスタートからゴールまで一貫して強い筋活動を示し、最大で約80%まで筋活動が増加することから大臀筋よりも疾走速度の維持・向上に貢献していることが示された。

最後に、70m走時の最大EMGを100%として、400m走時のEMG活動を比較したが、各筋とも400m走で100%を超えるような筋活動は見られず、最大でも80%程度であった。疲労した筋の出力を維持するためには中枢神経系からの指令で α 運動ニューロンを興奮させ、さらには運動単位の動員を増加させることが必要となり、そうなれば筋活動率は100%を超えてくるものと推測したが実際にはそうならなかった。これには五味ら (2007) の報告のような中枢性からの抑制(α 運動ニューロンからの信号自体の低下)、または乳酸の増加に伴う筋pHの低下がグリコーゲン分解に参与するグリコーゲン分解酵素やホスホフルクトキナーゼ(PFK)活性を低下させた(Chasiotis et al 1983)ことや、筋小胞体からのカルシウムイオンの放出や取り込みを阻害した(Nakamaru & Schwartz 1972)ことにより、筋活動率の増加が抑えられた可能性を示唆する。

総論

本研究は400m走中の速度低下と脚部筋電図の変化を測定した。160-180m通過後の後半に疾走速度低下が顕著に起こったが、それと同時にBFやGM、LGの筋活動率も増加する傾向が見られた。これは中枢神経系制御による運動単位を増加させたためと考えられるが、それとは逆に筋活動率が100%に到達しなかった原因は中枢からの指令が筋活動抑制の働きも担っていたためではないかという可能性が示唆された。

文献

- Chasiotis D, Hultman E, Sahlin K, 1983. Acidotic depression of cyclic AMP accumulation and phosphorylase b to a transformation in skeletal muscle of man. *J Physiol* 335: 197-204.
- Hirvonen J, Nummela A, Rusko H, Rehunen S, Harkonen M, 1992. Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can J Spt Sci* 17: 141-144.
- Nakamaru Y, Schwartz A, 1972. The influence of hydrogen ion concentration on calcium binding and release by skeletal muscle sarcoplasmic reticulum. *J Gen Physiol* 59: 22-32.
- Nummela A, Rusko H, Mero A, 1994. EMG activities and ground reaction forces during fatigued and nonfatigued sprinting. *Med Sci Sports Exerc* 26: 605-609.
- Rusko H, Nummela A, Mero A, 1993. A new method for the evaluation of anaerobic running in athletes. *Eur J Appl Physiol* 66: 97-101.
- 尾縣貢, 福島洋樹, 大山圭悟, 安井年文, 鍋倉賢治, 宮下憲, 関岡康雄, 永井純, 1998. 下肢の筋持久性と400m走中の疾走速度逡減との関係. *体育学研究* 42(5): 370-379.
- 尾縣貢, 安井年文, 大山圭悟, 山崎一彦, 荻部俊二, 高本恵美, 伊藤穰, 森田正利, 関岡康雄, 2000. 一流400mランナーにおける体力的特性とレースパターンとの関係. *体育学研究* 45(3): 422-432.
- 尾縣貢, 福島洋樹, 大山圭吾, 安井年文, 関岡康雄, 1998. 筋疲労時の疾走能力と体力的要因との関係. *体力科学* 47: 535-542.
- 五味宏生, 土江寛裕, 木村孝三, 小林海, 保原浩明, 村岡哲郎, 磯繁雄, 川上泰雄, 福永哲夫, 彼末一之, 2007. 短距離トップランナーの400m走中脚筋電図の記録. *スポーツ科学研究* 4: 10-17.
- 内山靖, 小林武, 間瀬教史, 2001. 計測法入門 測り方・測る意味. 協同医書出版社.