

さまざまな傾斜の路面を走るときの筋活動

中 京 大 学 桜 井 伸 二

(共同研究者) 中京大学大学院 安 栽 漢

Muscular Activity of the Lower Limb while Running on Various Slopes

by

Shinji Sakurai

School of Health and Sport Sciences,

Chukyo University

Jaehan Ahn

Graduate School of Health and Sport Sciences,

Chukyo University

ABSTRACT

The purpose of this study was to compare muscle activities of the lower limb during treadmill running under five different conditions (Level, Left, Right, Down and Up). All slopes were of 14% grade and tilted toward the left (Left), the right (Right), downward (Down), and upward (Up) directions of the runner. Nine subjects participated in this study. Electromyographic activities of the following seven muscles, gluteus maximus, biceps femoris, rectus femoris, vastus lateralis, tibialis anterior, medial gastrocnemius, and soleus, were measured using bipolar surface electrodes. Results showed that Left and Right slopes had only little effect on the muscular activities. However, for all of the muscles measured, the activities of the lower-positioned leg were greater than those of the higher-positioned leg. During the Up trial, almost every muscle showed greater activity than the other trials. The Down slope tended to give the anterior muscles greater, and the posterior muscles less work, compared to Level running.

要 旨

本研究の目的は、平地、上り坂、下り坂、左下がり、右下がりといった傾斜した路面における走動作中の下肢筋活動の特徴を知ることである。男性被験者9名が上記の5つの傾斜の条件で不整地歩行シミュレータの上でランニングを行った。ランニングに用いられた各路面の斜度は8度、走スピード2.8m/sであった。それぞれの条件でランニング中の大殿筋、大腿二頭筋、大腿直筋、外側広筋、前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋の筋活動を、表面筋電図法により求め検討した。その結果、上り坂においてはほぼ全ての筋で活動レベルが高かった。下り坂においては身体前面の筋活動が大きく、身体後面の筋活動は小さかった。片流れ路のランニングにおいて筋の活動パターンは平地走に比べ特に大きな差異は認められなかったが、路面の低い側の脚の筋活動が路面の高い側の脚の筋活動に比べ全ての筋でわずかず大きかった。

緒 言

走行動作（ランニング）は歩行動作とともに人間の最も基本的な動作のひとつであり、移動手段である。歩行動作、走行動作ともに、古くから多くの研究が行われてきた。その多くは平坦な路面を歩く、あるいは走る動作に関するものであった。

人間が日常生活で歩いたり走ったりする路面には平らなところばかりでなく、斜面、階段、起伏など、さまざまな不整がある。環境や路面状況にあわせた歩き方や走り方が選ばれ、動作がそれぞれ異なったものになるものと考えられる。

マルガリア⁶⁾はトレッドミルを用いて斜度とスピードを変え、上り坂、平地、下り坂で歩行やランニング運動を行わせた。その際の消費エネルギー量を求めることにより各運動における身体の機械的効率を考察した。

上り坂や下り坂歩行の動作の特徴については以

下のようにいくつかの研究がなされてきた。阿久津¹⁾は上り坂と下り坂歩行時の特徴として、坂が急なほど歩幅が小さくなり、上る際には体幹が前方に、また下る際には後方に傾くという姿勢の変化を認めた。Kawamuraら⁵⁾は健康な男性17名に上りと下り坂歩行を行わせたとき、急な斜度では両斜面で歩行速度の減少が認められたことを報告した。Wall and Charteris¹¹⁾はトレッドミル上の上りと下りでの歩行でわずかな歩行速度の減少が認められたこと、下り坂では衝撃力を吸収するためにより深い膝の屈曲が認められることを報告した。Wallら¹⁰⁾は20%下り坂歩行中に平地に比べストライド長と歩調（step frequency）が減少したこと、立脚期後半における膝関節屈曲の増大、遊脚期後半から立脚期初期における股関節屈曲の減少を報告した。

ランニングについても多くの研究が行われてきた。筋電図法を用いた研究では例えば以下のようなものがある。Matsuiら⁷⁾はトレッドミル走行中において、滞空期では脚が前方に振り出されるスウィング相の後半で膝関節は伸展し、前脛骨筋や大腿直筋の顕著な活動が認められること、また接地期には大殿筋、大腿直筋、腓腹筋の活動が大きいことを報告した。Itoら³⁾は下肢の6ヶ所の筋から導出した筋放電量の4人の平均値は、222m/分から558m/分の範囲の速度では接地期で一定であったが、滞空期では速度の上昇にともなって増加することを報告した。Komi⁴⁾は、接地期の筋活動のうち、伸張性収縮が生じる接地期前半では、短縮性収縮が主となる接地期後半と比較してすべての筋の筋活動量が大きい、走速度が180m/分から540m/分の範囲では、接地期前半と後半の筋活動の差は高速になるほど小さくなることを報告した。

以上のような研究のほとんどは平地におけるランニングを対象としている。平地以外のランニング動作や筋活動に関する研究報告は、歩行の場合

に比べさらに数が少ない。Swanson and Caldwell⁹⁾は、斜度30%の上り坂走（走速度4.5m/s）で、同速度の平地走および同ピッチの平地走に比べて、支持期における多くの下肢筋群のEMG振幅や回復期の股関節の屈曲および伸展の平均パワーが大きかったと報告している。Yokozawa et al¹²⁾は、支持期における下肢関節トルクのパターンおよび大きさは上り坂走と平地走との間に顕著な違いがなかったこと、上り坂走の方が下肢関節の屈曲角速度は小さく伸展角速度は大きかったことを報告している。また横澤ら¹³⁾は平地走と上り坂走における筋電図を調べ、遊脚期の前半で斜度が大きくなるほど大腿筋膜長筋の筋放電が大きく、遊脚期の後半は大殿筋の筋放電が大きく、斜度が大きくなるほど支持期では大殿筋、大腿筋膜長筋、大腿直筋、外側広筋、ヒラメ筋の筋放電が大きかったことを報告した。

以上のように、歩行や走行中の筋電図の研究はそのほとんどが平地における動作についてのものであった。上り斜面を対象とした研究は認められるものの研究の数が少なく、下り坂になるとさらに数が少ない。左右方向への傾斜のある片流れ路における動作に関する研究報告は非常に数が少なく、その動作の特徴や筋活動様式はほとんど明らかにされていない。

安ら²⁾は平地と左右斜面における歩行動作を比較検討し、片流れ路では接地期は長く、離地期は短かったこと、右足関節は右下がり路面で最も屈曲傾向にあり、また膝や腰の角度は逆側への片流れ路で大きいこと、左右方向への下肢各部の移動幅は、平地歩行と比べ片流れ路では斜面方向に関わらず小さいことを報告した。歩行ばかりではなく、ランニングについても、ロードレースやクロスカンントリーで経験するように実際には常に平坦な路面を走るとは限らず、多様な路面を走る機会がある。平坦な路面での研究成果が多様な状況における走動作の本質を果たして反映しているか

という疑問が残る。

本研究の目的は、上り坂、下り坂、左下がり、右下がりといった斜度のある路面における走動作中の下肢筋活動の特徴を知ることである。

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者は大学体育学部および大学院体育学研究科に所属する健康な男子学生9名（年齢21.8±2.1歳，身長172.6±6.6cm，体重65.4±8.9kg）で、全員トレッドミルでの走行に十分慣れた者であった。中京大学大学院体育学研究科倫理委員会規定の「人を対象とする研究に関する倫理指針」に基づき、被験者に事前に実験の目的・内容について説明を行い、本研究の主旨および内容の理解を確認した上で参加することの承諾を得た。

1.2 実験方法

1) 不整地歩行シミュレータ

本研究に用いた不整地歩行シミュレータ（酒井医療製EXO-43BT & U-0063）はトレッドミルを改良することにより、上り坂、下り坂、左右方向へ傾斜した路面、およびその組み合わせで、路面のあらゆる傾斜を再現することができる装置である。設定できる斜面の傾斜範囲は前後方向±10度、左右方向±10度であり、最大速度は10km/hである。

2) 実験条件

走速度はすべての走条件において10km/h（2.8m/s）であり、平地、左下がり、右下がり、上り、下りという計5種の条件について実験を行った。それぞれLevel, Left, Right, Up, Downとよぶことにする。なお傾斜路面の場合、斜度は全て8度（14%）に設定した。被験者には、本人が希望するだけのウォーミングアップの後、それぞれの条件で約2分間ずつランニングを行わせた。実験に用いた走条件の順序はランダムとし5条件を

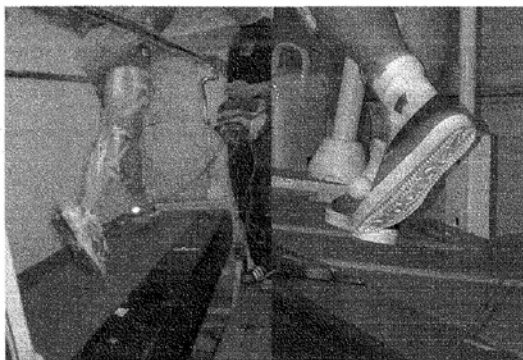


図1 Experimental setup of Up (left photo) and Right (right photo) trials on a running simulator for uneven terrain

連続して実施した。ピッチは特に規定せず、被験者には最も快適な状態で走るように指示した。測定の様子を図1に示した。

3) 筋電図

各条件において1～1.5分間走った後、筋電図を30秒間記録した。本研究では、右下肢の大殿筋 (m. gluteus maximus), 大腿二頭筋 (m. biceps femoris), 大腿直筋 (m. rectus femoris), 外側広筋 (m. vastus lateralis), 前脛骨筋 (m. tibialis anterior), 腓腹筋 (m. gastrocnemius), ヒラメ筋 (m. soleus) から表面筋電図を導出した。各筋における筋電図の導出には使い捨ての表面電極 (直径10mm, 塩化銀電極, 日本光電, 電極間距離: 25 mm) を用い, 差動プリアンプ (TEAC社製, AR-C2EMG1, 周波数特性: 10～1200Hz) を通して, PCカードデータレコーダ (TEAC社製, DR-C2) により記録した (サンプリング周波数1000Hz, 16ビット)。

4) データ処理

データの解析には各試行で連続した10周期のデータを採用した。右脚の踵が接地して再び右脚の踵が接地するまでをランニングの一周期とした。右脚の踵の接地時確認には靴の踵につけた50 Gの加速度計からの波形の顕著な立ち上がりを用いた。記録された筋電のデータから安静時の平均値をさし引いた後に全波整流を行った。101点移動平均法を用いて平滑化を行った。これは4.4Hzのローパスフィルター (大道⁸⁾) を用いて包絡線

(linear envelope) を求めることに相当する。今後この曲線を筋電レベルとする。右足踵の接地時をトリガーとして10周期分を加算平均した。Level試行10周期分の筋電レベルの最大値を平均して100%とした時の、各試行における筋電レベルの変化を相対値で表した。またLevel試行における各被験者の1周期内の平均筋電レベルを100%として、各試行の平均筋電レベルを相対値で求めた。

2. 結果と考察

同時に行ったビデオ撮影により、つま先の離地時 (支持期から遊脚期への移行時期) を確認したところ、被験者や斜度条件によって若干の差が認められるものの、各支持期は走行周期の約40%を占めていた。

図2には被験者AのLeft試行における筋電図および加速度計の信号の生データを示した。

図3には同じく被験者AのLeft試行における10周期分の筋活動レベルの変化を、右踵接地を基準 (0ms) として重ね合わせて示した。一部の例外を除き、各被験者内、および各斜度条件内でよい再現性が認められた。

各被験者についてLevel試行の筋電レベルの最大値の10試行の平均値を100%とした時の、各条件の1周期筋電レベルの変化を相対値で表した。図4には被験者Aについて5条件の結果を筋ごとに1枚のグラフにして示した。相対的な筋電レベルには差が認められるものの、筋放電のパターンには5条件間で類似性が認められた。まず、筋活動時期について見てみると、大殿筋は同側肢の支持期前半と遊脚期後半に主に活動し、大腿二頭筋はやはり同側肢の支持期と遊脚期後半の活動が顕著であった。大腿直筋は支持期前半と遊脚期の前半、また外側広筋は支持期の前半と遊脚期の後半に主に活動していた。前脛骨筋には支持期の後半から踵の着地時まで徐々に活動レベルが大きくなるように比較的持続的な活動が認められ、腓腹筋

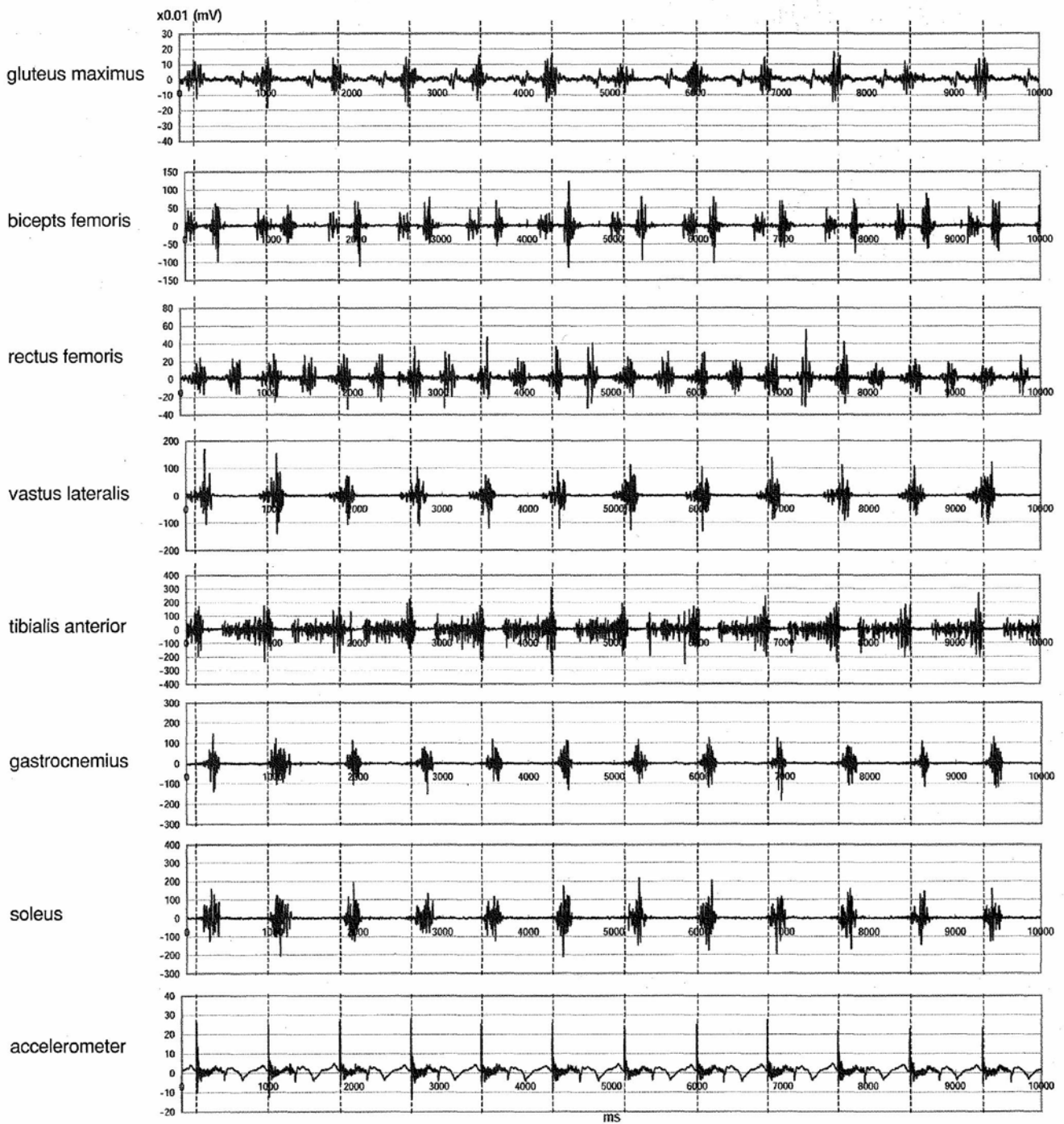


図2 Raw EMG data from the Left trial (subject A)

とヒラメ筋は主に支持期に活動していた。このような筋活動のパターンは多くの被験者間で共通したものであったが、大腿直筋では遊脚期前半の顕著な活動が認められず外側広筋と非常に似たパターンを示す者がいるなど、若干の個人差が認められた。

筋活動の大きさからみると大殿筋の活動レベル

はUp試行で他の斜度条件の試行に比べ明らかに大きく、他の4条件での様相は似ていた。他の被験者の場合も含め、他の6筋に見られる活動レベルの試行条件（斜度）による違いは大殿筋の場合に比べ小さかった。被験者Aに関しては以下のような傾向が認められた。大腿二頭筋の筋電レベルは、支持期ではDown試行が最も小さく、また遊

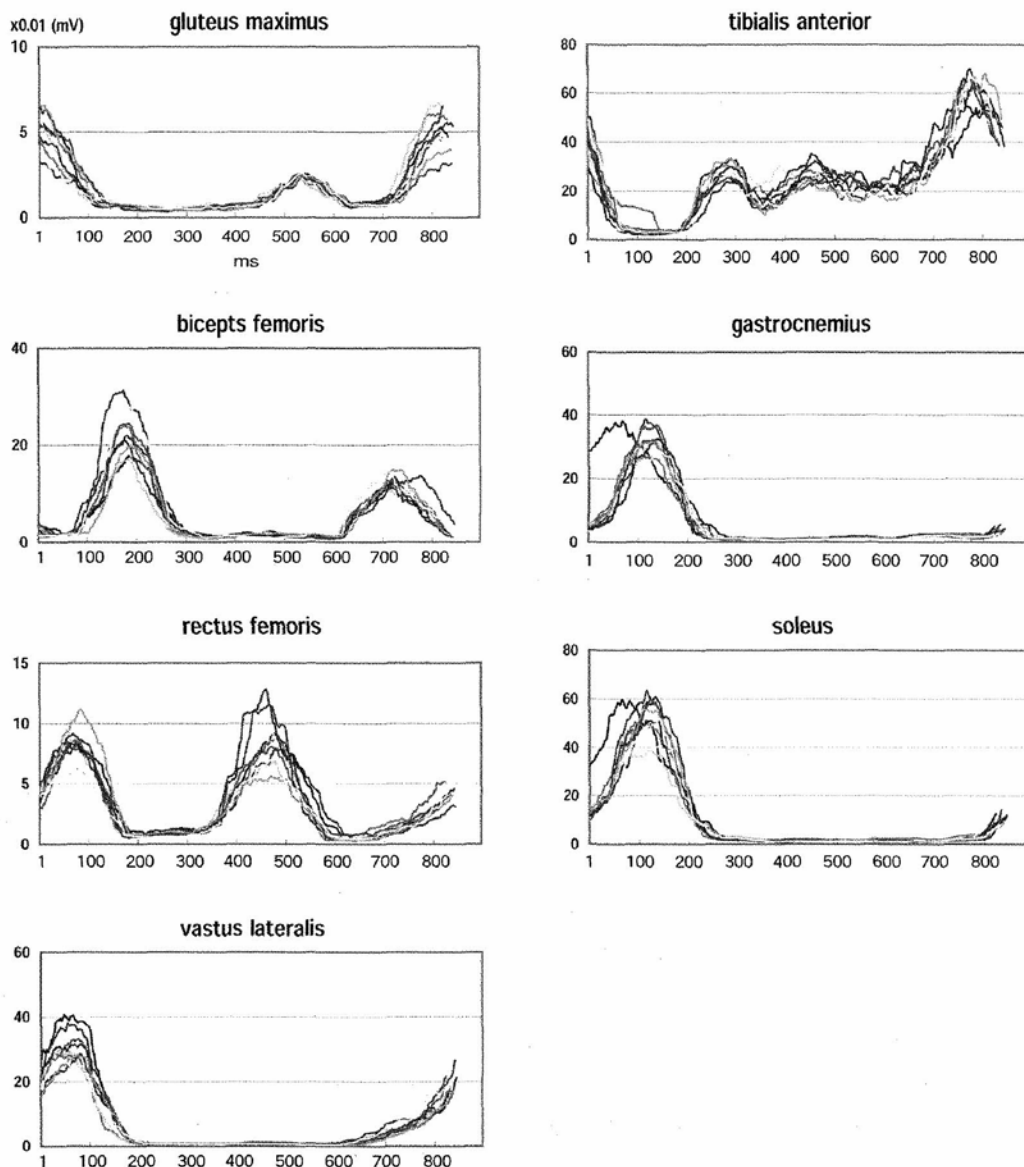


図3 EMG activity of 10 strides in “Left” trial (subject A)
Individual strides were determined and synchronized at heel contact of the right foot

脚期の後半ではUp試行で最も大きかった。大腿直筋は、支持期前半ではUpおよびDownが最も大きく、遊脚期の前半ではUpとLeftが最も大きかった。外側広筋は支持期前半でUpが最も大きかった。前脛骨筋は支持期の後半から遊脚期後半までUp試行で最も大きかった。支持期における腓腹筋とヒラメ筋の活動はUpで最も大きく、Downで最も小さかった。この相対的な筋電レベルの大きさにも被験者間で類似性が認められるものの、若干の個人差は存在した。

表1は、Level試行のピーク値を100%としたときの、各斜度条件における相対的筋電レベルの

ピーク値について、全被験者の平均値と標準偏差を示したものである。Upは他の4条件に比べ、前脛骨筋をのぞくすべての筋肉においてピーク値が大きかった。Downは、Levelと比べ、大腿直筋と前脛骨筋で大きく、大殿筋、腓腹筋とヒラメ筋において小さかった。LeftはLevelに比べ、大腿直筋がやや大きく、前脛骨筋と腓腹筋はやや小さかった。RightはLevelに比べ、大腿直筋が大きく、他の筋は似ていた。LeftとRightを比較すると全体的にRightの方がわずかずつ大きい傾向が認められた。

次に、Level試行の平均筋電レベルを100%と

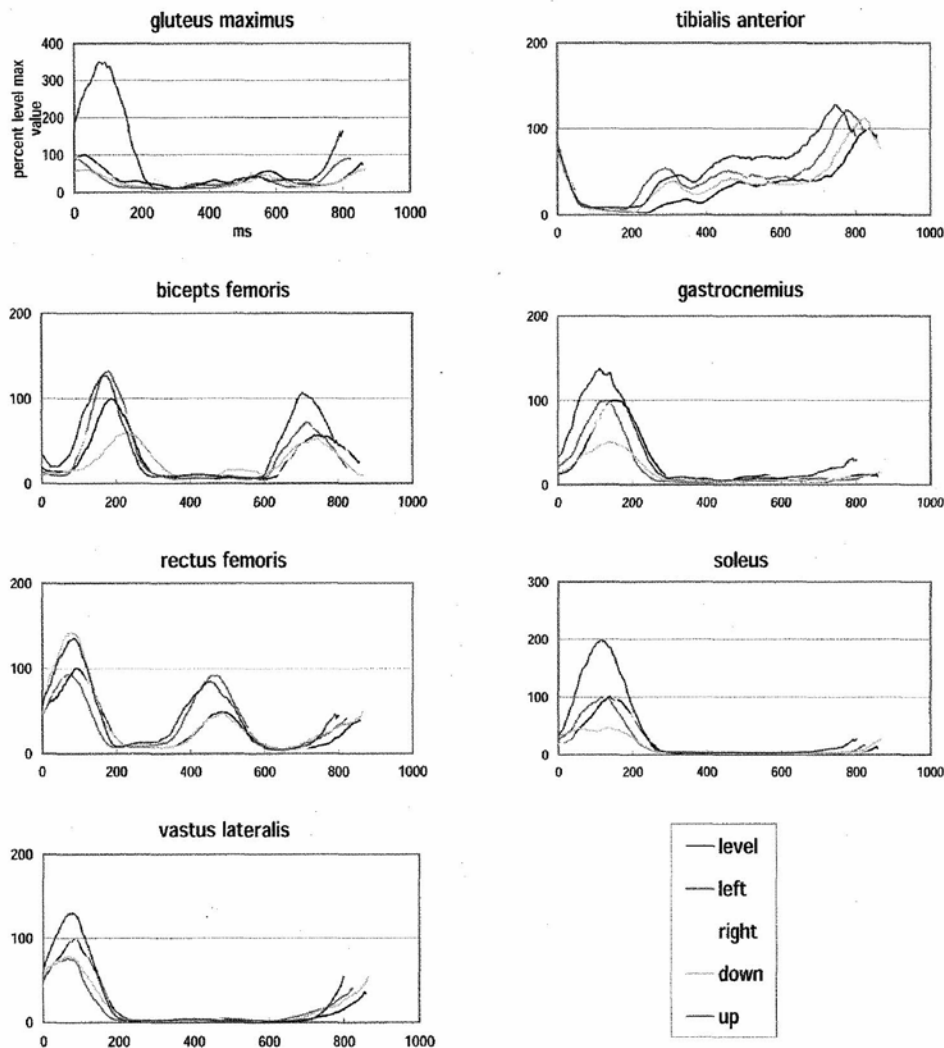


図4 Average EMG activity of 10 strides, synchronized at heel contact of the right foot (subject A)

表1 Peak values under each condition, relative to level running

muscle	Level	Left	Right	Down	Up
gluteus maximus (n=8)	100	103.9 (28.3)	100.7 (10.7)	78.9 (19.1)	287.6 (72.0)
biceps femoris	100	100.4 (15.2)	101.3 (19.0)	101.3 (28.8)	157.5 (48.6)
rectus femoris (n=7)	100	108.5 (14.5)	115.6 (13.2)	134.7 (23.0)	182.4 (37.5)
vastus lateralis (n=8)	100	97.8 (16.6)	100.6 (10.0)	100.1 (19.9)	175.3 (37.1)
tibialis anterior	100	92.1 (21.5)	99.7 (25.0)	132.3 (46.3)	107.7 (24.9)
gastrocnemius	100	91.0 (10.3)	99.0 (11.5)	49.9 (8.3)	134.9 (14.1)
soleus	100	96.0 (8.1)	98.0 (13.7)	48.1 (11.3)	188.0 (50.0)

Values are mean and (SD) n=9, unless mentioned

したときの、各斜度条件における平均筋電レベルについて全被験者の平均値と標準偏差を求め表2に示した。5条件の中でUpはすべての筋肉にお

いて平均筋活動レベルが最大であった。Downは、Levelと比べ、大腿直筋、外側広筋と前脛骨筋という身体前面の筋で大きく、大殿筋、大腿二頭筋、

表2 Average values under each condition, relative to level running

muscle	Level	Left	Right	Down	Up
gluteus maximus (n=8)	100	101.7 (21.4)	108.3 (22.4)	78.2 (20.3)	214.0 (64.8)
biceps femoris	100	98.8 (16.1)	102.5 (14.7)	79.0 (20.3)	168.0 (38.7)
rectus femoris (n=7)	100	111.2 (15.2)	115.2 (15.6)	121.9 (17.8)	165.2 (25.3)
vastus lateralis (n=8)	100	104.1 (20.6)	108.8 (18.5)	107.3 (16.8)	165.3 (30.6)
tibialis anterior	100	96.4 (23.1)	101.3 (16.5)	118.4 (35.4)	124.4 (21.1)
gastrocnemius	100	94.2 (8.8)	103.9 (12.5)	61.5 (8.2)	143.4 (12.6)
soleus	100	96.0 (6.6)	101.0 (13.1)	62.8 (13.5)	183.8 (35.4)

Values are mean and (SD) n=9, unless mentioned

腓腹筋, ヒラメ筋という身体後面の筋では小さかった。RightはLevelに比べ, すべての筋において1%から15%程度大きかった。LeftはLevelと比べ, 大腿直筋と外側広筋がやや大きく, 前脛骨筋, 腓腹筋とヒラメ筋がやや小さかった。LeftとRightを比較すると4%から10%程度とわずかずつではあるが, 全ての筋でRightが大きかった。

内省によると, Levelと比べ, LeftやRightという片流れ路ではランニング動作に違和感をもつ被験者が多かった。しかしながら記録した筋放電のデータからは, Levelに比べUpやDown試行で認められたほどの筋放電パターンや筋活動レベルの大きな差は, LeftやRightの各斜度条件で認められなかった。違和感を持つ理由としては, 上り坂や下り坂に比べ片流れ路のランニングの経験が少なかったこと, またわずかではあるが左右側の筋活動レベルの差が認められたことなどが考えられる。一方, エネルギー消費量は筋活動量を一面で反映するものであるから, 片流れ路におけるランニングは上り坂や下り坂の場合ほどには平地に比べエネルギー消費量は大きく違わないものと推測される。

今回は大殿筋, 大腿二頭筋, 大腿直筋, 外側広筋, 前脛骨筋, 腓腹筋, ヒラメ筋という7筋について筋電図を記録し9名の被験者の平均的な変化

について考察した。今後は, さまざまな路面のランニングにおいて, 下肢の内・外転や足関節の内・外反に直接関係する筋の活動を記録する, 個人の下肢アラインメントとの関係を検討する, ビデオ画像解析を併用することにより動作との対応を図ることなどが必要だと考えられる。

まとめ

平地, 右下がり, 左下がり, 上り, 下りという5つの斜度条件でランニングを行った際の大殿筋, 大腿二頭筋, 大腿直筋, 外側広筋, 前脛骨筋, 腓腹筋, ヒラメ筋の筋活動を, 表面筋電図法により求め検討した。その結果, 本研究で用いられた斜度8度, 走スピード2.8m/sという条件下においては, 片流れ路のランニングで筋の活動パターンに平地走に比べ大きな差異は認められなかった。上り坂においてほとんど全ての筋で活動レベルが高かった。下り坂では身体前面の筋活動が大きく, 身体後面の筋活動が小さかった。片流れ路面では, 低い側の脚の筋活動が高い側の脚に比べわずかずつ大きかった。

謝辞

本研究の実施にあたり, 松本 実, 池澤知秋 (以上中京大学大学院), 音羽奈保美 (名古屋大学

医学部) の各氏の多大な協力を得た。深く感謝する。

文 献

- 1) 阿久津邦男；歩行の科学，不味堂，東京，p.49 (1975)
- 2) 安菽漢，桜井伸二，和田敬世；平地と左右斜面歩行中の下肢関節運動の解析，中京大学体育研究所紀要，18，79-87 (2004)
- 3) Ito, A., T. Fuchimoto and M. Kaneko ; Quantitative analysis of EMG during various speeds of running, In ; *Biomechanics IX*. D.A.Winter, et al. (ed) , Champaign, Human Kinetics Publishers, 301-306 (1985)
- 4) Komi, P. V. ; Biomechanical features of running with special emphasis on load Characteristics and mechanical efficiency. In ; *Biomechanical Aspects of Sports Shoes and Playing Surfaces*, B. Nigg and B. Kerr (ed.) , Calgary ; University of Calgary, 123-134 (1983)
- 5) Kawamura K., Tokuhiko A., Takechi H. ; Gait analysis on slope walking ; a study on step length, stride width, time factors and deviation in the center of pressure. *Acta Med Okayama* 45: 179-184 (1991)
- 6) マルガリア, M.:身体運動のエネルギー (金子公宥訳), ベースボールマガジン社 (1978)
- 7) Matsui, H., M. Miyashita and M. Miura ; Transducer for measurement of pressure distribution in the foot. *Research Bulletin (Dept. of General Education, Nagoya Univ.)* 14 (10), 69-75 (1970)
- 8) 大道ら；スポーツ力学，高文堂出版社 (1989)
- 9) Swanson S.C., Caldwell G.E. ; An Integrated biomechanical analysis of high speed incline and level treadmill running. *Med. Science Sports Exercise*, 32 (6) 1146-1155 (2000)
- 10) Wall J.C., Nottrodt J.W., Charteris J. ; The effects of uphill and downhill walking on pelvic oscillations in the transverse plane. *Ergonomics*, 24: 807-816 (1981)
- 11) Wall J.C., Charteris J. ; The kinematics of uphill and downhill walking. In ; *Proceedings of the North American Congress on Biomechanics*. Quebec, Montreal ; NACOB Organizing Committee. : 299-300 (1986)
- 12) Yokozawa et al. ; Muscular load of the lower extremity muscles during uphill running. *Book of abstracts, XVIIIth Congress of the International Society of Biomechanics*, Zurich, Switzerland, p.325 (2001)
- 13) 横澤俊治，藤井範久，阿江通良；長距離走者の上り坂走行時における下肢筋放電パターンの特徴. 日本体育学会第53回大会：p.308 (2002)