

走動作による疲労が筋活動様式に及ぼす影響

原 著

Effects of fatigue due to running on muscle activity

松永直人*¹, 阿久澤弘*¹, 今井 厚*², 金岡恒治*²

キー・ワード：fatigue, intervention, pre-activation
疲労, 介入, pre-activation

〔要旨〕 健常男性 8 名を対象に走動作時の体幹・下肢 15 筋の筋活動量を疲労介入前後で比較した。介入は 70% 強度での 10 分間のランニングとした。筋活動は最大等尺性収縮 (MVC) で正規化した。立脚期の筋活動量は中殿筋が 47.9%MVC から 38.8%MVC に、外側広筋は 101.8%MVC から 94.1%MVC となったが介入前後で差はなかった。一方着地前の筋活動量が中殿筋は 19.0%MVC から 9.8%MVC に、外側広筋は 37.1%MVC から 22.7%MVC に有意に低下した。着地前の股・膝関節周囲筋の活動は関節を安定させ着地後の身体を支持する機能を持つが、疲労により十分な関節安定性を得られなくなる可能性が示唆された。

緒言

腸脛靭帯炎や Medial tibial stress syndrome に代表されるランニング障害の多くはオーバーユースによって発生する慢性障害で、その発症には一週間当たりの走行距離が関係している^{1,2)}。ランニングの着地時に下肢には体重の 4.5 倍の地面反力がかかり、特に足関節の関節間力は体重の 9-13 倍になる^{3,4)}。したがって、走行距離が延びるほど着地時の衝撃を繰り返し受け、筋や靭帯に過剰な負荷がかかることで障害を誘発させると考えられる。ドロップジャンプやランディングの研究から、着地時にかかる地面反力に抗して関節を安定させ身体を支えるため、股関節や膝関節周囲筋は着地前から予め活動することが明らかとなっている⁵⁻¹¹⁾。この活動は pre-activation と呼ばれ、身体の支持機能や円滑な動作のために重要な役割を担っている。Arampatzis ら⁸⁾ や Brazier ら¹²⁾ の報告によればドロップジャンプの着地時の膝伸展筋群の pre-activation の活動量と関節の安定性は正

の相関があり、活動量の不足や活動タイミングの遅延は、荷重時に関節の安定性を確保できず十分な身体支持機能を得られないため、障害のリスクとなるとされている。

ランニング障害として頻度の高い腸脛靭帯炎は中殿筋の機能不全がリスクファクターの一つであると報告されている¹³⁻¹⁵⁾。ランニング中の立脚期に中殿筋は大腿筋膜張筋と共に股関節の内転を抑制し骨盤を安定させる役割を担っているが、中殿筋の機能が低下するとその代償として大腿筋膜張筋の活動性が高まり、その結果として腸脛靭帯炎を誘発することが報告されている¹⁵⁾。腸脛靭帯炎の発症はランニングの走行距離と関連があることから^{1,2)}、ランニングの継続によって生じた疲労が中殿筋の機能低下を誘発している可能性があるが、ランニングによって疲労した状況でのランニング中の筋活動を調査した研究はみられない。そこで本研究は、ランニング中の筋活動を調査し、着地前に pre-activation が発生しているかを確認すること、またランニングによる疲労介入が筋活動様式に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

*1 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科

*2 早稲田大学スポーツ科学学術院

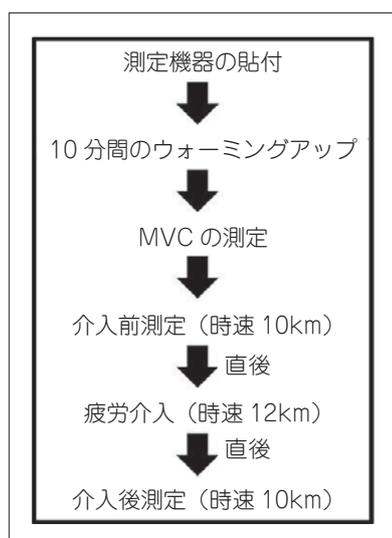


図1 実験の流れ

方法

対象は若年健常男性 8 名 (年齢 22.4 ± 2.9 歳, 身長 174.1 ± 6.5 cm, 体重 65.3 ± 6.3 kg) で, 週に 2-3 回の運動習慣がある者とした. 運動強度はレクリエーションレベルで, 対象の実施している競技は陸上, 水泳, バドミントンであった. なお, 実験時に下肢に整形外科的疾患がある者やランニングができない者は除外した. 本研究は本学「ヒトを対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を得て実施した. また対象者には研究に関する説明を十分に行い, 文書による同意を得た後に実験を実施した.

実験は被験者に筋電計を貼付した後, 10 分間のウォーミングアップ及び準備体操を行ったうえで, トレッドミル (R-16S, 株式会社アルペン) を用いて毎時 10km の速度でのランニング中の筋活動を計測した (図 1). まず毎時 10km の速度でのランニング時の体幹下肢の筋活動を測定した後, 疲労介入を行い, 再度毎時 10km の速度でのランニング時の筋活動を測定した. 疲労介入は 70% 運動強度での 10 分間走とし, 心拍計 (FT2, ポラール・エレクトロ・ジャパン株式会社) を用いて, カルボーネン法 ($0.7 \times (220 - \text{対象の年齢} - \text{安静時心拍数}) + \text{安静時心拍数}$) によって算出される心拍数でのランニングを行った. また, 疲労介入による対象者の主観的な疲労度を評価するために, 安静時を 6, 疲労困憊時を 20 とする主観的運動強度 (Borg scale) を疲労介入前後で調査した.

筋活動量測定

ランニング中の筋活動はワイヤレス筋電計 (BioLog DL-5000, 有限会社エスアンドエムイー) を用いて, 1000Hz で測定した. 皮膚研磨剤 (スキンピュア, 日本光電) とアルコールを用いて皮膚抵抗を $2k\Omega$ まで減少させた後, 表面電極 (BlueSensor N-00-S, 株式会社メッツ) を貼付した. 対象は全て利き足は右であったため, 被験筋は右側の腹直筋 (RA), 外腹斜筋 (EO), 内腹斜筋/腹横筋 (IO/TrA), 脊柱起立筋 (ES), 大腿直筋 (RF), 外側広筋 (VL), 内側広筋 (VM), 大殿筋 (Gmax), 中殿筋 (Gmed), 大腿二頭筋長頭 (BFl), 大腿二頭筋短頭 (BFs), 大腿筋膜張筋 (TFL), 内転筋 (ADD), 前脛骨筋 (TA), 腓腹筋 (GAS) の 15 筋とした. 実験試技を行う前に徒手筋力検査を用いて, 5 秒間の最大等尺性収縮 (maximum voluntary contraction: MVC) 時の筋活動を測定した.

挙動解析

ランニング動作の期分けを行うため, 19mm のマーカー (QPM190, QUALYSIS, Sweden) をトレッドミルのベルト横前方 2 点, 後方 2 点, シューズの爪先及び踵部に貼付し, 足部の接地離地動作を 6 台の三次元光学式動作解析装置 (OQUS, QUALYSIS, Sweden) を用いて, 200Hz で測定した.

筋電図解析

Montgomery ら¹⁶⁾ の報告を基に, ランニング動作 1 周期を右足の接地から右足の離地までの立脚期, 右足の離地から左足の接地までの遊脚前期, 左足の接地から離地までの遊脚中期, 左足の離地から再度右足が接地するまでの遊脚後期の 4 期に期分けした (図 2). その後, BIMUTAS-Video (キッセイコムテック株式会社) を用いて筋電波形を 20-500Hz のバンドパスフィルタにかけ, MVC 時の筋電位を用いて正規化し, 各期の筋活動量を %MVC の形で算出した.

統計処理には SPSS (IBM, SPSS Statistics 21.0) を用いて, 着地前に筋が pre-activation しているか確認するため, 疲労介入前の遊脚前期, 遊脚中期, 遊脚後期の筋活動量を一元配置分散分析 (ANOVA) を用いて比較し, 事後検定は Bonferroni 法を用いた. また, 疲労介入前後の心拍数, 各期の筋活動量は対応のある t 検定を用いて比較した. 疲労介入前後の Borg scale については

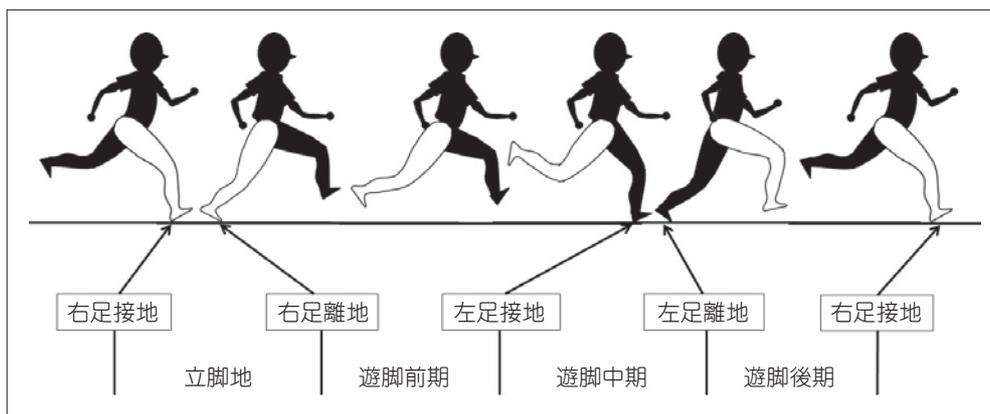


図2 ランニング1周期の期分け方法

表1 疲労介入前後の心拍数, Borg scale と疲労介入による走行距離

	疲労介入前	疲労介入後	p
心拍数 (拍/分)	62.1 ± 6.5	161.1 ± 9.0	<0.001
Borg scale	11.0 ± 0.5	13.5 ± 1.2	<0.001
介入の走行距離 (km)	2.1 ± 0.2		

Mann-Whitney の U 検定を用いて比較した。なお、有意水準は全て 5% 未満とした。

結果

カルボーネン法を用いた疲労介入の平均走行速度は時速 12.1 ± 0.6km で、走行距離は平均 2.1 ± 0.2 km であった。平均心拍数と Borg scale の平均値は、疲労介入前に比較して疲労介入後において有意に上昇した (表 1)。

疲労介入前の遊脚前期、遊脚中期、遊脚後期の筋活動量を比較したところ、腹直筋、外腹斜筋、脊柱起立筋は遊脚中期に遊脚前期及び遊脚後期より高い筋活動量を示したが、3期の活動量に有意な差はなかった (図 3)。下肢筋は遊脚後期に遊脚前期及び遊脚中期より高い活動を示し、その中で外側広筋は遊脚後期 (37.1 ± 15.6%MVC, p<0.001) で遊脚前期 (9.4 ± 10.6%MVC, p=0.018)、遊脚中期 (15.0 ± 12.9%MVC, p=0.008) より有意に活動量が大きかった。大殿筋と中殿筋は遊脚後期の筋活動量が遊脚前期及び遊脚中期より大きく、一元配置分散分析では各期の活動量に差を認めしたが (大殿筋: p=0.048, 中殿筋: p=0.017)、事後検定では各期の筋活動量に有意な差は認めなかった (図 3)。

疲労介入前後の各期の筋活動量を比較したとこ

ろ、立脚期と遊脚前期では全ての筋で疲労介入前後の筋活動量に差を認めなかった (図 4 立脚期, 図 4 遊脚前期) が、遊脚中期では、疲労介入後の大腿直筋の筋活動量が介入前より有意に小さかった (介入前: 8.5 ± 5.9%MVC, 介入後: 6.1 ± 3.6%MVC, p=0.040, 図 4 遊脚中期)。疲労介入後の遊脚後期では中殿筋 (介入前: 19.0 ± 8.5%MVC, 介入後: 9.8 ± 4.8%MVC, p=0.027)、外側広筋 (介入前: 37.1 ± 15.6%MVC, 介入後: 22.7 ± 16.2%MVC, p=0.045)、前脛骨筋 (介入前: 45.5 ± 19.1%MVC, 介入後: 29.3 ± 12.2%MVC, p=0.006) の活動量が有意に減少した。内腹斜筋/腹横筋は全ての期で介入後の筋活動量が介入前より大きかったが、介入前後で活動量に有意な差を認めなかった (図 4 遊脚後期)。

考察

本研究ではランニング中の体幹下肢の筋活動を測定し、疲労介入前の遊脚期 3 期の筋活動量の比較、及び疲労介入前後の各期の筋活動量を比較した。

遊脚期 3 期の比較

まず遊脚期 3 期の筋活動量の比較から、下肢筋群の遊脚後期の筋活動量は遊脚前期及び遊脚中期より大きく、その中で遊脚後期の外側広筋の活動

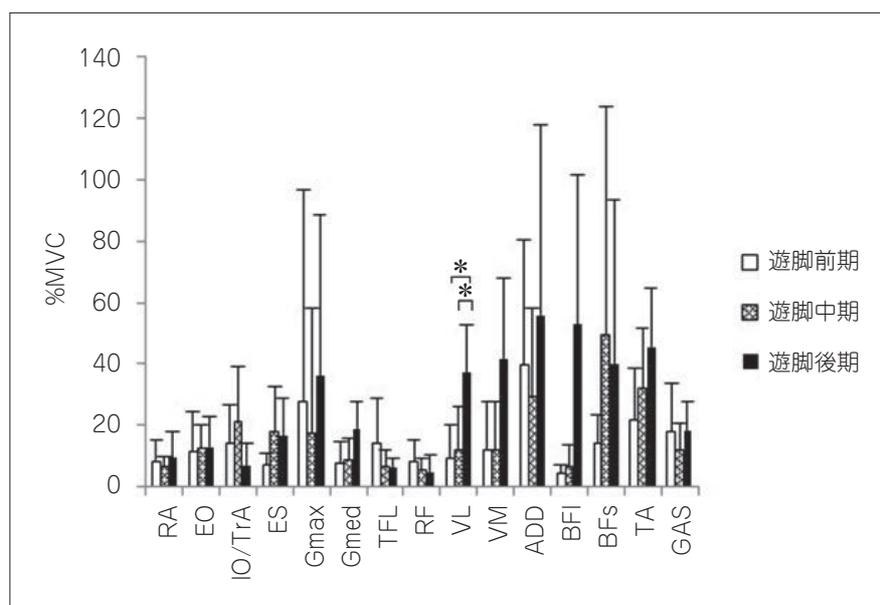


図3 疲労介入前の遊脚期の筋活動量の比較

量は他の2期より有意に大きかった。遊脚後期は荷重負荷を受け立脚期に入る直前であり、外側広筋は膝関節の安定性を高め身体の支持機能を得るために事前に活動したと考えられる。中殿筋と大殿筋においても外側広筋と同様に、荷重負荷を受ける前の遊脚後期に活動を認め、股関節を安定させるために活動していることが示唆された。これらの結果はドロップジャンプを対象とした先行研究の結果と一致するものであった⁵⁻¹¹⁾。また、筋電図生波形での報告ではあるが、Montgomeryら¹⁶⁾も着地直前にこれらの筋電位が上昇することを報告している。

体幹筋の活動は、疲労介入前後で有意な差を認めなかったものの遊脚中期の活動が遊脚前期や遊脚後期より大きかった。遊脚中期は左足で支持している期間である。Saundersらはランニング中の体幹筋の活動により着地時の地面反力を吸収し、体幹を固めることによって重心の前方移動の効率化と共に、腰椎骨盤帯の姿勢を制御すると報告しており¹⁷⁾、本研究でも左足支持期間である遊脚中期にSaundersらと同様の役割を果たしていたと考えられる。

疲労介入前後の比較

遊脚期の筋活動量の比較から、遊脚後期の外側広筋、中殿筋及び大殿筋は荷重負荷を受ける前に活動を開始しており、関節を安定させるためのpre-activationであることが推察された。しかし、

疲労介入後の遊脚後期では外側広筋と中殿筋の活動量は介入前と比べ有意に小さくなった。関節の安定性はpre-activationの活動量と正の相関があるとされているため¹²⁾、介入後の膝及び股関節は安定性が十分に確保できていない可能性がある。

腸脛靭帯炎は立脚期における中殿筋の機能低下と大腿筋膜張筋の代償的活動によって誘発されることが報告されている¹⁵⁾。本研究では介入によって着地前である遊脚後期中殿筋の活動量は低下したものの、立脚期における中殿筋の活動は低下しておらず、また大腿筋膜張筋の活動も代償的な上昇を認めなかった。腸脛靭帯炎は走行距離とも関連があるが^{1,2)}、本研究では介入による走行距離が約2kmと短かったことで腸脛靭帯炎の発症要因とされる筋活動の変化が生じなかったと考えられる。走行距離が延長することで、遊脚後期だけでなく立脚期における筋活動量の変化が生じる可能性があることから、今後調査する必要がある。

全ての期で疲労介入後の内腹斜筋/腹横筋の活動量が、有意ではないものの介入前より大きかった。また、介入後の中殿筋の活動量が介入前と比べ低下していた。中殿筋は立脚期に股関節の内転を抑制し股関節を安定させる働きがあるが¹⁵⁾、筋活動量が疲労介入によって低下したことから、内腹斜筋/腹横筋は中殿筋の代償として股関節の安定性に寄与したため介入後の活動量が上昇した可能性がある。

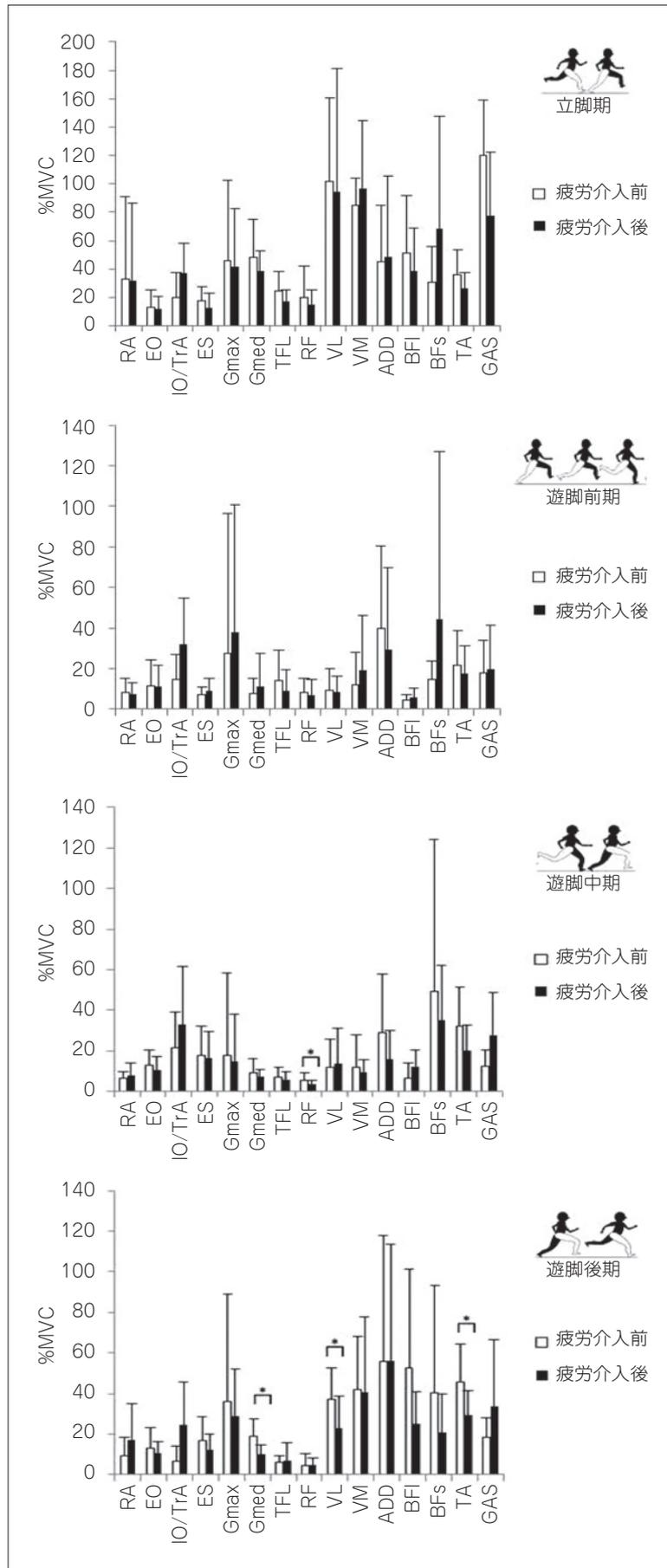


図4 疲労介入前後の各期の筋活動量の比較

本研究では疲労介入によって多くの筋で遊脚後期の活動量に変化が生じた。疲労によって筋の活動タイミングが遅延することが報告されており¹⁸⁾、本研究では疲労によって荷重によって最も筋活動が必要となる立脚期の直前である遊脚後期の pre-activation の発生タイミングが遅延した結果、筋活動量が低下したと考えられる。

本研究では筋活動量の標準偏差が大きかったが、これは被験者の競技歴が異なることから走り方に個体差が生じたと考えられる。また、本研究では10分以上のランニングでは発汗によって表面電極の固定が維持できないため、70%強度のランニングを10分間行わせた。実際のスポーツ現場ではより強度が高く長時間の運動を行うことや、今回の介入によって被験者に十分な疲労介入が負荷されたか否かが明らかではないことから、今後より詳細な疲労条件での筋活動様式の解析が求められる。また、本研究では実験時のシューズやインソールを統一しておらず、下肢アライメントの測定も行っていない。これらの要素はランニング時のフォームおよび筋活動に影響を及ぼす可能性があり、標準偏差が大きくなった可能性がある。

結 論

本研究は疲労介入前後のランニング中の体幹下肢筋活動を調査した結果、介入前では膝・股関節を安定させ身体の支持機能を得るために、着地による荷重負荷を受ける前から外側広筋と中殿筋が活動していたが、介入後に外側広筋と中殿筋の活動量が低下したことから、着地時の膝・股関節の安定性が低下する可能性が示唆された。

文 献

- 1) Walter, SD et al.: The Ontario cohort study of running-related injuries. *Arch Intern Med* 149: 2561-2564, 1989.
- 2) Macera, CA et al.: Predicting lower-extremity injuries among habitual runners. *Arch Intern Med* 149: 2565-2568, 1989.
- 3) 阿江通良ほか：スプリント走の地面反力。陸上競技研究 7: 2-10, 1991.
- 4) Burdet, RG: Force predicted at the ankle during running. *Med Sci Sports Exerc* 14: 308-316, 1982.
- 5) Hoffren, M et al.: Age-related neuromuscular function during drop jumps. *J Appl Physiol* 103: 1276-1283, 2007.
- 6) Horita, T et al.: Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: implications to performance. *Eur J Appl Physiol* 88: 76-84, 2002.
- 7) Iida, Y et al.: Activity modulations of trunk and lower limb muscles during impact-absorbing landing. *J Electromyogr Kinesiol* 21: 602-609, 2011.
- 8) Brazier, J et al.: Lower extremity stiffness: Effects on performance and injury and implications for training. *Strength Cond J* 36: 103-112, 2004.
- 9) Jones, GM, Watt, DG: Observation on the control of stepping and hopping movements in man. *J Physiol* 219: 709-727, 1971.
- 10) Neptune, RR et al.: Muscle coordination and function during cutting movements. *Med Sci Sports Exerc* 31: 294-302, 1999.
- 11) Santello, M: Review of motor control mechanisms underlying impact absorption from falls. *Gait Posture* 21: 85-94, 2005.
- 12) Arampatzis, A et al.: Influence of leg stiffness and its effects on myodynamic jumping performance. *J Electromyogr Kinesiol* 11(5): 355-364, 2001.
- 13) Fredericson, M et al.: Hip abductor weakness in distance runners with iliotibial band syndrome. *Clin J Sport Med* 10: 169-175, 2000.
- 14) Baker, RL et al.: Iliotibial band syndrome: soft tissue and biomechanical factors in evaluation and treatment. *PMR* 3: 550-561, 2011.
- 15) Louw, M, Deary, C: The biomechanical variables involved in the aetiology of iliotibial band syndrome in distance runners—A systematic review of the literature. *Phys Ther Sport* 15: 64-75, 2014.
- 16) Montgomery, WH et al.: Electromyographic analysis of hip and knee musculature during running. *Am J Sports Med* 22: 272-278, 1994.
- 17) Steven, SW et al.: Postural and respiratory activation of the trunk muscles changes with mode and speed of locomotion. *Gait Posture* 20(3): 280-290, 2004.
- 18) Nyland, JA et al.: Fatigue after eccentric quadriceps femoris work produces earlier gastrocnemius and delayed quadriceps femoris activation during crossover cutting among normal athletic women.

Effects of fatigue due to running on muscle activity

Matsunaga, N.^{*1}, Akuzawa, H.^{*1}, Imai, A.^{*2}, Kaneoka, K.^{*2}

^{*1} Graduate School of Sport Sciences, Waseda University

^{*2} Faculty of Sport Sciences, Waseda University

Key words: fatigue, intervention, pre-activation

[Abstract] The activity of 15 muscles of the trunk and lower limb were assessed during running in eight healthy men before and after fatigue intervention. Fatigue intervention consisted of 10 minutes of running at an intensity of 70% of maximal oxygen consumption, which was determined using the Karvonen formula. Muscle activity was normalized using maximal voluntary isometric contraction (MVC). Although the activity of the gluteus medius and vastus lateralis muscles during the stance phase decreased after intervention, these changes were not significant. Before landing, the activity of the vastus lateralis muscle (before: $37.1 \pm 15.6\%$ MVC; after: $22.7 \pm 16.2\%$ MVC; $p=0.045$) and the gluteus medius muscle (before: $19.0 \pm 8.5\%$ MVC; after: $9.8 \pm 4.8\%$ MVC; $p=0.027$) significantly decreased after intervention. The activity of muscles around the hip and knee prior to landing has the function of stabilizing the respective joints and supporting the body. Our data indicated that the activity levels of these muscles decreased after intervention, and it is suggested that this change due to fatigue prevents the hip and knee joints from being stabilized sufficiently prior to landing.