

足関節バランストレーニング時 の下腿筋活動量の検討～器具別の比較と 足関節不安定性を有する脚の特性～

Electromyographic Activity of the Lower Leg during Ankle Joint
Balance Exercises～Characteristics of Ankle Instability
using different types of Equipment～

松葉 開*1, 功刀 峻*1, 吉田成仁*2
増成暁彦*1,3, 福田 崇*1, 宮川俊平*1

キー・ワード：balance exercises, EMG activity of the lower leg, ankle sprain
バランストレーニング, 下腿筋活動量, 足関節捻挫

【要旨】 本研究では足関節バランストレーニング時の下腿筋活動量を明らかにすることを目的とした。対象は足関節不安定性（AI）を有さない健常脚（Con 群）と AI を有する脚（AI 群）とした。安定面、バランスパッド、バランスディスク、ディジョックボード、BOSU の各器具上で片脚立位をとらせ、表面筋電図計にて筋活動電位を計測した。被験筋は長腓骨筋、短腓骨筋、前脛骨筋とした。各筋の筋活動量を器具別に比較すると、全体として BOSU の筋活動量が他の器具と比べ高く、安定面では低かった。また群や筋の違いにより筋活動量が高まる器具が異なっていた。この結果は足関節捻挫予防トレーニングやリハビリテーションを実施する上で有用な一指標となると考えられた。

はじめに

足関節捻挫は最も多い外傷の一つであり^{1,2)}、足関節捻挫受傷後の不十分な治療やリハビリテーションは高い再発率や³⁾ 足関節不安定性（Ankle Instability：以下、AI）の残存に繋がると報告されている⁴⁾。そのため、足関節捻挫受傷後のリハビリテーションや再発予防トレーニングを充実させることが重要視されている。

足関節捻挫の再発予防、または AI の予防としては、バランストレーニングに代表される固有感覚訓練が効果的であることが示されている⁵⁾。実際に、バランストレーニングは足関節捻挫の再発率を減少させ⁶⁾、AI に影響を与える要因として挙げ

られている筋機能⁷⁾、姿勢制御機能⁸⁾、関節位置覚⁹⁾も改善させている。筋機能に着目し固有感覚訓練の効果を見ていくと、バランストレーニングによって腓骨筋反応時間が短縮することが多く報告されているにも関わらず⁷⁾、バランストレーニングが筋活動量に及ぼす影響を検討した研究は少ない。足関節周囲筋の活性化は足関節の動的安定性に大きく関与することが示されており¹⁰⁾、そのなかでも長腓骨筋と短腓骨筋は足関節外側の安定機構であり、足関節捻挫の 65～85% を占めると言われる内反捻挫を防ぐ重要な筋であることが報告されている¹¹⁾。したがって、バランストレーニング時の足関節周囲筋の筋活動量を検討することは、足関節安定性の獲得、そして足関節捻挫予防に繋がる有用な一指標となると考えられる。

現在スポーツの現場においては、足関節捻挫受傷後のリハビリテーションや足関節捻挫予防トレーニングとして、様々な器具を用いたバランス

*1 筑波大学

*2 帝京平成大学

*3 茨城県立医療大学

表 1 身体特性および Karlsson score の得点

| 項目/群 | Con 群 (N=10) | AI 群 (N=8) |
|--------------------|--------------|------------|
| 身長 (cm) | 164.4±4.7 | 158.6±6.1 |
| 体重 (kg) | 57.7±7.0 | 60.0±4.1 |
| BMI | 21.3±2.0 | 21.2±1.5 |
| 年齢 (歳) | 20.5±0.5 | 21.0±2.0 |
| Karlsson score (点) | 99.7±0.9 | 77.0±12.1 |

Values are means±SD

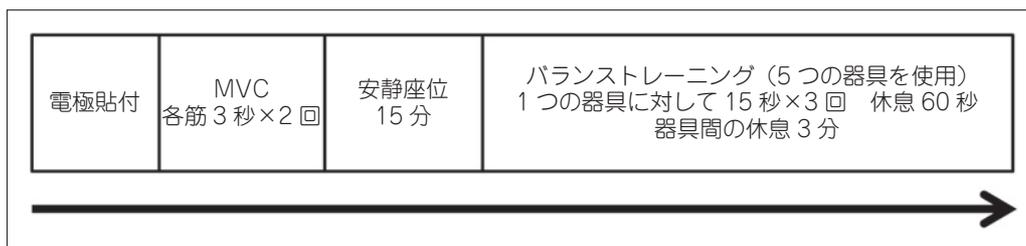


図 1 実験プロトコル

トレーニングが行われている。しかし、それらの器具使用時における下腿筋活動量を比較検討した研究は少ない。また、バランストレーニングなどの固有感覚訓練においては、器具別の負荷や難易度を示す明確な指標が明らかになっていないため、実施時は選手やトレーナーの主観で器具を選択している。各器具における筋活動量が明らかになれば、トレーニングを実施する選手の状態に合わせ、各筋にかかる負荷を基準とした器具選択が可能になると考えられる。

対象および方法

1. 対象

成人女子サッカー選手の内、AIを有さない者10名10脚（以下、Con群）と、AIを有する者8名8脚（以下、AI群）を対象とした。AIの評価にはKarlsson scoreを用いた¹²⁾。この評価法は「痛み」、「腫脹」、「主観的不安定感」、「硬さ」、「階段昇降」、「ランニング」、「日常生活」、「装具の使用」の8つの項目について、対象者の主観によって該当する状態を選ぶものである。100点満点中81点以上の脚をAI「陰性」、80点以下の脚をAI「陽性」としている。本研究では、Karlsson scoreの結果が「陰性」であった脚をCon群、「陽性」であった脚をAI群とした。なお、左右ともに「陰性」であった場合は得点の高い方の脚を、「陽性」であった場合は得点の低い方の脚を、得点が同じであった場合

は最大努力下でボールを蹴る脚を被験側とした。

また、6ヶ月以内に足関節捻挫の既往がある者、過去に下肢の手術歴・骨折の既往がある者、下肢に傷害があり現在練習に参加できていない者、神経疾患・前庭疾患がある者、日頃から捻挫予防のための筋力トレーニングやバランストレーニングを行っている者は対象から除外した。対象者の身体特性ならびにKarlsson scoreの結果を表1に示す。

2. 実験プロトコル

はじめに、各筋に対して徒手抵抗下で最大等尺性随意収縮（Maximum Voluntary Contraction：以下、MVC）を3秒間2回行わせた。MVC測定終了後、15分の安静座位をとらせた。その後、5つの器具を用いたバランストレーニングを各器具15秒間、60秒の休息をはさみ3回行わせた。なお、器具間の休息は3分とし、バランストレーニングで用いる器具の順番はランダム化した。実験プロトコルを図1に示す。

3. バランストレーニング

バランストレーニングには、安定面としてアンブレ内蔵型フォースプレート（以下、安定面）、バランスパッド（インターリハ株式会社）、バランスディスク（Kramer JAPAN）、ディジヨックボード（酒井医療社）、BOSU® Balance Trainer（DW Fitness, LLC, 2002：以下、BOSU）の5つの器具を用いた（図2）。空気圧による形態の変化が生

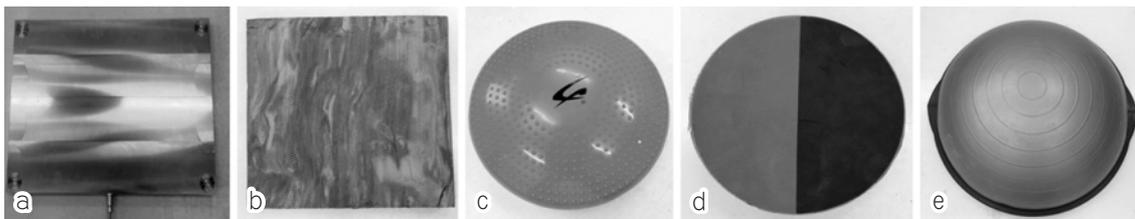


図2 バランストレーニングに用いた器具
 a. 安定面 (アンプ内蔵型フォースプレート)
 b. バランスパッド (インターリハ株式会社)
 c. バランスディスク (Kramer JAPAN)
 d. デジジョックボード (酒井医療社)
 丸 (直径 300mm×30mm) ボス船底大 (直径 160mm×60mm)
 e. BOSU Balance Trainer (DW Fitness, LLC, 2002)



図3 表面筋電図計



図4 表面電極

じると予測されるバランスディスクとBOSUは、空気圧または高さの規定を設けた。バランスディスクは10kgの重りを乗せた時の空気圧が30hpaになるようにし、BOSUは、BOSU® BALANCE TRAINER COMPLETE WORKOUT SYSTEMマニュアルに基づき、床からの高さが25cmになるように設定した。

測定肢位はTroppら¹³⁾の方法に準じた片脚起立とし、上肢を前胸部で組ませ、遊脚の膝を屈曲した姿勢をとらせた。支持脚は骨性の支持の影響を回避し、大きな筋活動を得るため膝関節軽度屈曲位とした。また、対象者の目の高さで3m前方の壁に取り付けられた視標を注視するように指示した。さらに、支持脚の足の位置が、各器具の中央線に踵骨の中央と第2中足骨が重なり、且つ、各器具の前縁から第2趾までの距離と後縁から踵骨までの距離が等しくなるように指示した。

4. 下腿筋活動量の測定

片脚立位のバランストレーニング時の筋活動電位を、表面筋電図計 (Biometrics 社) を用いて測

定した (図3)。電極には表面電極とアンプが一体化されたEMGアンプ (Biometrics社; 電極間中心距離2cm)を用いた (図4)。EMGアンプは、筋電図マニュアル基礎・臨床応用を参考に¹⁴⁾、各筋線維方向に平行になるよう理学療法士の資格保有者が触診の後に貼付した。15秒間のバランストレーニングで得られた筋活動電位から各筋の実効値 (以下、RMS) を算出した。その値をMVC時のRMSで除して筋活動量 (%MVC) を算出した。各器具3回の平均値を分析に用いた。

5. 被験筋

被験筋は長腓骨筋、短腓骨筋、前脛骨筋の3筋とした。

6. 統計処理

3つの被験筋と5つの器具を用いたバランストレーニング時の筋活動量の比較を行うため、二元配置分散分析を行った。交互作用が見られた項目に関しては、単純主効果検定の実施後、事後検定として調整 Bonferroni 法による多重比較検定を行った。有意水準はすべて5%とした。

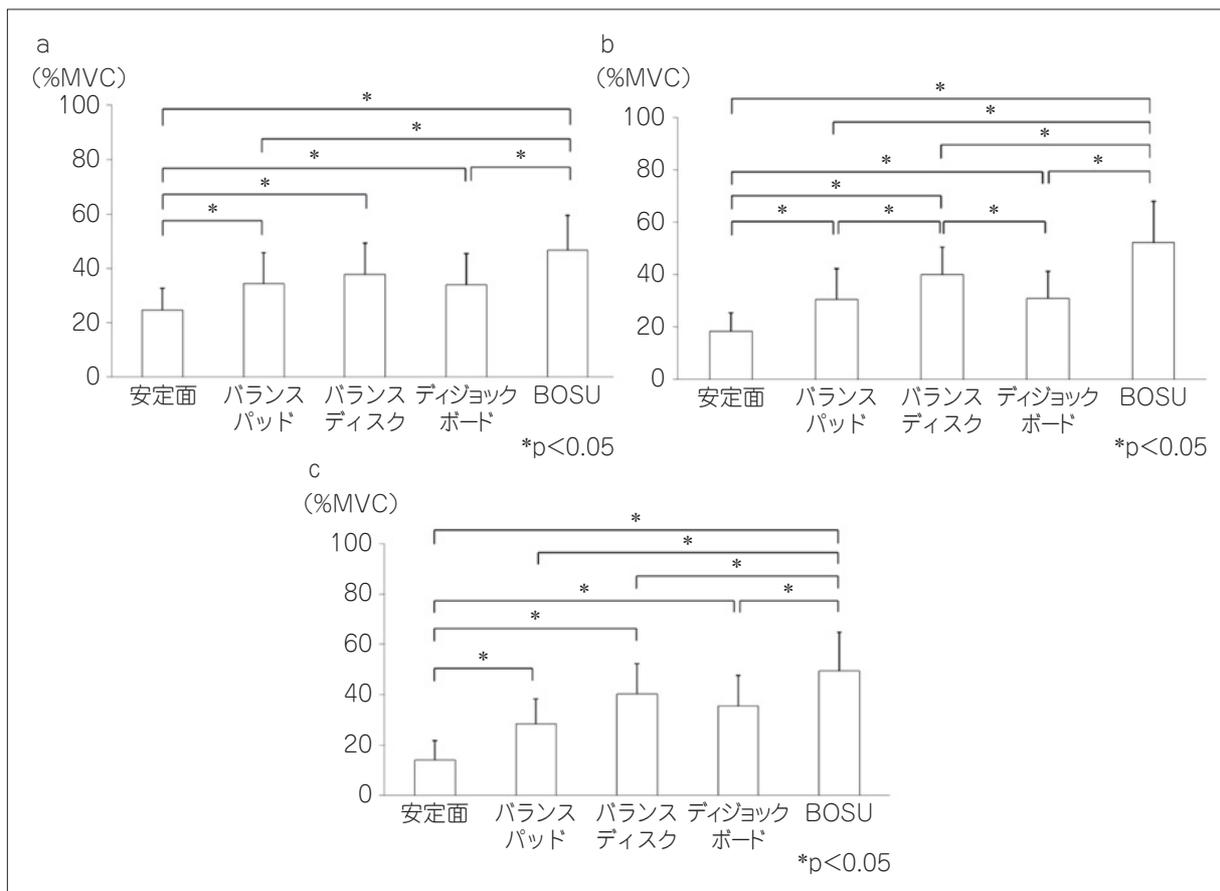


図5 Con群における器具間の筋活動量の比較 (n=10)

- a. 長腓骨筋の筋活動量
- b. 短腓骨筋の筋活動量
- c. 前脛骨筋の筋活動量

結果

1. Con群における器具間の筋活動量の比較

1) 長腓骨筋の筋活動量 (%MVC)

長腓骨筋の筋活動量は、安定面 24.69 ± 8.04 , バランスパッド 34.25 ± 11.51 , バランスディスク 37.86 ± 11.44 , デイジョックボード 33.89 ± 11.43 , BOSU 46.66 ± 12.79 であった。筋活動量を器具間で比較すると、BOSUは安定面、バランスパッド、デイジョックボードと比較し筋活動量が有意に高値を示した。また、バランスパッド、バランスディスク、デイジョックボードは安定面と比較し有意に高値を示した(図5a)。

2) 短腓骨筋の筋活動量 (%MVC)

短腓骨筋の筋活動量は、安定面 18.25 ± 7.21 , バランスパッド 30.49 ± 11.72 , バランスディスク 40.00 ± 10.44 , デイジョックボード 30.80 ± 10.38 , BOSU 52.26 ± 15.65 であった。筋活動量を器具間

で比較すると、BOSUは全ての器具と比較し筋活動量が有意に高値を示した。また、バランスディスクは安定面、バランスパッド、デイジョックボードと比較し有意に高値を示した。さらに、バランスパッド、デイジョックボードは安定面と比較し有意に高値を示した(図5b)。

3) 前脛骨筋の筋活動量 (%MVC)

前脛骨筋の筋活動量は、安定面 13.89 ± 7.72 , バランスパッド 28.34 ± 9.92 , バランスディスク 40.23 ± 11.96 , デイジョックボード 35.36 ± 12.34 , BOSU 49.41 ± 15.36 であった。これらの筋活動量を器具間で比較すると、BOSUは全ての器具と比較し筋活動量が有意に高値を示した。また、バランスパッド、バランスディスク、デイジョックボードは安定面と比較し有意に高値を示した(図5c)。

2. AI群における器具間の筋活動量の比較

1) 長腓骨筋の筋活動量 (%MVC)

長腓骨筋の筋活動量は、安定面 32.29 ± 13.29 ,

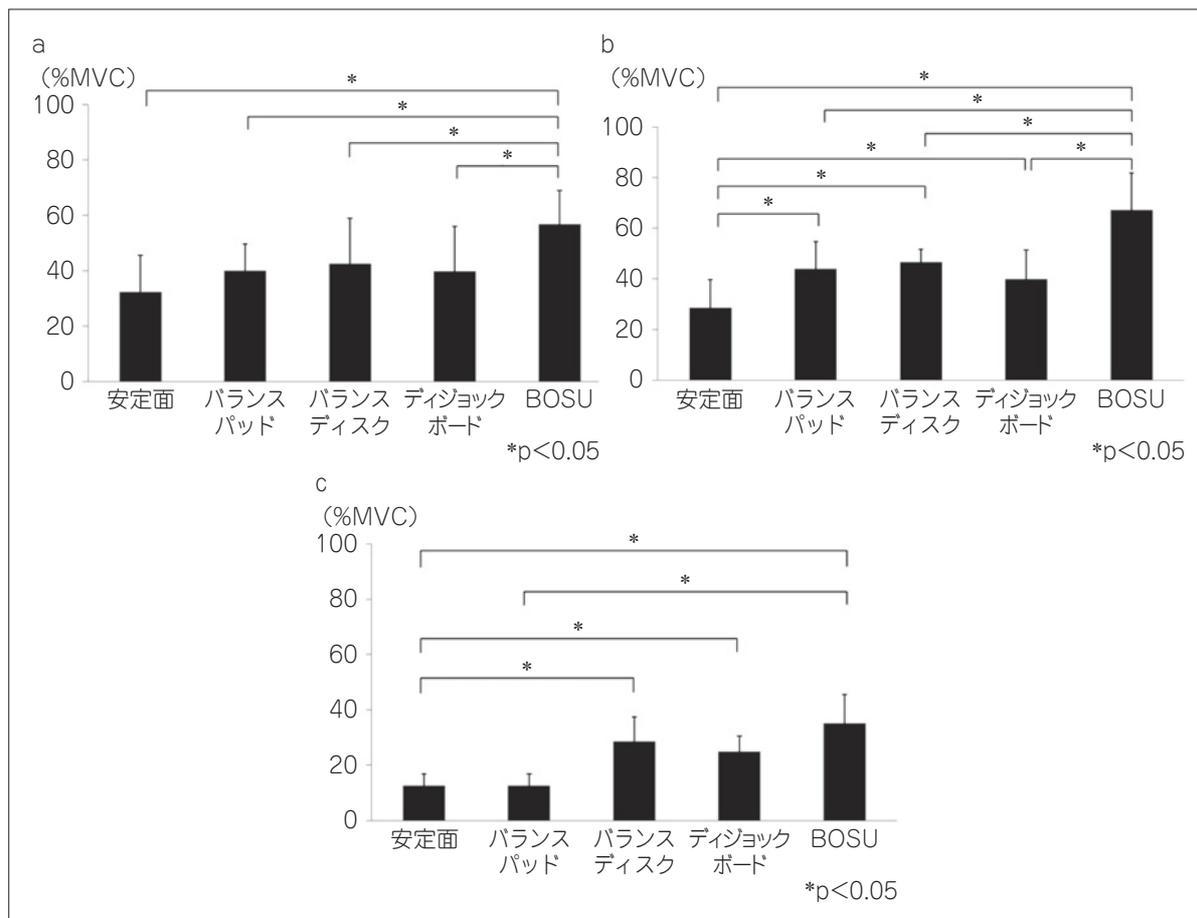


図6 AI群における器具間の筋活動量の比較 (n=8)

- a. 長腓骨筋の筋活動量
- b. 短腓骨筋の筋活動量
- c. 前脛骨筋の筋活動量

バランスパッド 40.04 ± 9.56 , バランスディスク 42.59 ± 16.13 , デイジョックボード 39.91 ± 16.13 , BOSU 56.85 ± 12.10 であった。筋活動量を器具間で比較すると、BOSUは全ての器具と比較し筋活動量が有意に高値を示した(図6a)。

2) 短腓骨筋の筋活動量 (%MVC)

短腓骨筋の筋活動量は、安定面 28.60 ± 11.08 , バランスパッド 43.98 ± 10.68 , バランスディスク 46.59 ± 5.97 , デイジョックボード 39.85 ± 11.51 , BOSU 67.23 ± 14.52 であった。筋活動量を器具間で比較すると、BOSUは全ての器具と比較し筋活動量が有意に高値を示した。また、バランスパッド、バランスディスク、デイジョックボードは安定面と比較し有意に高値を示した(図6b)。

3) 前脛骨筋の筋活動量 (%MVC)

前脛骨筋の筋活動量は、安定面 12.62 ± 4.15 , バランスパッド 20.38 ± 4.38 , バランスディスク 28.61 ± 8.86 , デイジョックボード 24.91 ± 6.67 ,

BOSU 35.14 ± 10.42 であった。これらの筋活動量を器具間で比較すると、BOSUは安定面、バランスパッドと比較し筋活動量が有意に高値を示した。また、バランスディスク、デイジョックボードは安定面と比較し有意に高値を示した(図6c)。

■ 考 察

Con群とAI群ともに、BOSU使用時の長腓骨筋、短腓骨筋、前脛骨筋の筋活動量が他の器具と比べ高くなることが示された。慢性足関節不安定性を有さない健常脚を対象に、安定面、トランポリン、Balance Platformを使用し15秒間の片脚立位時の下腿筋活動量を比較検討した先行研究において、Balance Platformは安定面に比べ長腓骨筋と前脛骨筋の筋活動量が有意に高く、トランポリンは安定面に比べ前脛骨筋の筋活動量が有意に高かったことが報告されている¹⁵⁾。また、同じく健常脚を対象とした先行研究において、デイジョック

ボードに類似した円盤状のFREEMANボードと、左右方向への運動のみを行うシーソー板状のLATERALボード使用時の長腓骨筋と前脛骨筋の筋活動量が、安定面に比べて有意に高かったことが報告されている¹⁶⁾。以上のように、不安定面では足関節周囲筋の筋活動量が高くなることが考えられる。したがって、本研究において長腓骨筋や短腓骨筋、前脛骨筋の筋活動量が高い値を示したBOSUは、他の器具より不安定な状態を作り出し、筋活動量を増大させる器具であると考えられる。

また、長腓骨筋の筋活動量に着目すると、AI群では安定面との差が認められたのはBOSUのみであり、BOSUが安定面、バランスパッド、ディジョックボードと比較し筋活動量が有意に高値を示し、バランスパッド、バランスディスク、ディジョックボードも安定面と比較し有意に高値を示したCon群とは異なっていた。AIを有する脚では安定面における片脚立位時の長腓骨筋の筋収縮力が、健常の脚に比べ有意に増大することが報告されており¹⁷⁾、その理由として、AIを有する脚では靭帯性の支持機構が低下し、筋性の支持機構への要求が高まることが挙げられている¹⁷⁾。また、AIを有する脚では片脚立位時の足圧中心点が外側に偏位することが報告されている¹⁸⁾。これに対して、長腓骨筋の収縮は足圧中心点を内側へ移動させることが報告されている¹⁹⁾。これらのことから、AI群においては、安定面での片脚立位時に外側に偏位した足圧中心点を内側に移動させるために、長腓骨筋をより多く収縮させたと考えられる。筋性の支持機構への要求の高まり、そして足圧中心点の外側偏位の結果として安定面での長腓骨筋の筋活動量が高まり、BOSU以外の器具との間に差がみられなかったと考えられる。

さらに、AI群の前脛骨筋の筋活動量に着目すると、安定面と不安定面（バランスパッド）間に差がなく、不安定面同士（BOSU、バランスディスク、ディジョックボード）でも差が認められないといった、Con群とは異なる結果を示した。この理由としては、AI群では足関節の底屈・回内の作用を持つ腓骨筋群の活動割合が多いことから、腓骨筋群とは相反する足関節の背屈・回外の作用を持つ前脛骨筋の収縮機会がCon群に比べて相対的に少なくなり、器具の違いによる筋活動量の差が認められなかったことが考えられる。

長腓骨筋と短腓骨筋は、足関節内反捻挫が起こりにくいとされる足関節中間位、もしくは回内位に足関節を保つ重要な筋であり、筋が収縮する際にはそれらの腱が足関節の後足部を外側から締め付け足関節外側安定機構となるため、好発する足関節内反捻挫を防ぐ重要な筋であること¹¹⁾や、足関節周囲筋の活性化は足関節の動的安定性に大きく関与すること¹⁰⁾が報告されている。また、腓骨筋群の筋断面積の増大は足関節の安定性に寄与することも報告されている²⁰⁾。さらに、片脚立位の姿勢制御において前脛骨筋が足関節を安定させる重要な筋であることが報告されていることから¹⁵⁾、腓骨筋群だけではなく、前脛骨筋の筋活動量も足関節の安定性を獲得する上で有用な役割を果たしていると考えられる。以上のことから、足関節捻挫予防トレーニングとしてバランストレーニングを用いる場合には、長腓骨筋、短腓骨筋、前脛骨筋の筋活動量を一つの指標に、高い筋活動量を示すBOSUを選択しトレーニングを行うことで、より効率的に足関節の動的安定性を獲得できると考えられる。また、足関節捻挫後のリハビリテーションとしてバランストレーニングを用いる場合は、筋活動量が高くなる不安定な器具を初期段階から使用するのはなく、足関節捻挫後の外反筋力の低下²¹⁾や過負荷による筋疲労²²⁾を原因とした再受傷のリスクに配慮しながら、筋活動量の低いものから段階的にトレーニングを行うことで、より安全で効率的に足関節の動的安定性を獲得できると考えられる。段階的に筋活動量の高い不安定な器具を使用し、その動揺性に適応させていくことが足関節捻挫の傷害予防や再発予防に繋がると示唆される。

本研究では、各器具でのバランストレーニングが実際に足関節安定性の獲得や、足関節捻挫予防に繋がるかというところまで検討していない。したがって、今後は各器具でのバランストレーニングが、片脚立位時の筋活動動態の変位、関節位置覚や重心動揺、筋力や筋反応時間といった筋機能、足関節捻挫予防などに与える影響を検討していく必要がある。特に、AI群では固有感覚障害により、関節位置覚やバランス能力の低下が考えられるので、これらの項目を検討していくことは重要である。また、足圧中心点の測定や動作解析も同時に行い、バランストレーニング時の足圧中心点と筋活動量の関係性や、筋活動様式も含めた筋活動特

性を検討していく必要がある。

結 論

本研究で明らかとなったバランストレーニング時の下腿筋活動量は、健常脚とAIを有する脚それぞれに対して、足関節捻挫予防トレーニングや足関節捻挫後のリハビリテーションを実施する上で有用な一指標となると考えられる。また、AIの有無や、筋によって筋活動量が高まる器具が異なること、各筋が足関節の安定性に与える影響などを考慮し、対象とする選手の状態に合った器具選択を行うことで、より安全で効率的に足関節の安定性を獲得できる可能性がある。

文 献

- 1) Garrick, J.G.: The frequency of injury, mechanism of injury, and epidemiology of ankle sprains. *Am. J. Sports Med.* 5: 241-242, 1977.
- 2) Hootman, J.M. et al.: Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives. *J. Athl. Train.* 42: 311-319, 2007.
- 3) Yeung, M.S. et al.: An epidemiological survey on ankle sprain. *Br. J. Sports Med.* 28: 112-116, 1994.
- 4) Freeman, M.A. et al.: THE ETIOLOGY AND PREVENTION OF FUNCTIONAL INSTABILITY OF THE FOOT. *J Bone Jt. Surg Br* 47-B: 678-685, 1965.
- 5) Wester, J.U. et al.: Wobble board training after partial sprains of the lateral ligaments of the ankle: a prospective randomized study. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 23: 332-336, 1996.
- 6) Mohammadi, F.: Comparison of 3 preventive methods to reduce the recurrence of ankle inversion sprains in male soccer players. *Am. J. Sports Med.* 35: 922-926, 2007.
- 7) Osborne, M.D. et al.: The Effect of Ankle Disk Training on Muscle Reaction Time in Subjects with a History of Ankle Sprain. *Am. J. Sport. Med.* 29: 627-632, 2001.
- 8) Gauffin, H. et al.: Effect of ankle disk training on postural control in patients with functional instability of the ankle joint. *Int. J. Sports Med.* 9: 141-144, 1988.
- 9) Eils, E., Rosenbaum, D.: A multi-station proprioceptive exercise program in patients with ankle instability. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33: 1991-1998, 2001.
- 10) Riemann, B.L. et al.: The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability. *J. Athl. Train.* 37: 71-79, 2002.
- 11) 吉野浩一ほか：関節病態運動学 14 足関節の病態運動学と理学療法. 理学療法 (東京) 24: 1475-1481, 2007.
- 12) Karlsson, J., Peterson, L.: Evaluation of ankle joint function: the use of a scoring scale. *Foot* 1: 15-19, 1991.
- 13) Tropp, H. et al.: Stabilometry in functional instability of the ankle and its value in predicting injury. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16: 64-66, 1984.
- 14) 下野俊哉：表面筋電図マニュアル 基礎・臨床応用. 酒井医療, 156-158, 2010.
- 15) Braun Ferreira, L.A. et al.: Analysis of electromyographic activity of ankle muscles on stable and unstable surfaces with eyes open and closed. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 15: 496-501, 2011.
- 16) Cimadoro, G. et al.: Effects of different unstable supports on EMG activity and balance. *Neurosci. Lett.* 548: 228-232, 2013.
- 17) 八木優英ほか：足関節の機能的不安定性が片脚立位の筋活動に与える影響. 理学療法科学 27: 213-216, 2012.
- 18) 小林直行ほか：大学サッカー選手における足関節内反捻挫後の経時的な足底圧中心変位. 日本フットボール学会 5th Congre, 47, 2008.
- 19) 江 依法ほか：片脚立位時の姿勢維持における足関節の制御機構. 教育医学 49: 277-284, 2004.
- 20) 小林直行ほか：不安定症に対する不安定板訓練が下腿筋断面積に及ぼす影響. 体力科学 55: 870, 2006.
- 21) Willems, T. et al.: Proprioception and Muscle Strength in Subjects With a History of Ankle Sprains and Chronic Instability. *J. Athl. Train.* 37: 487-493, 2002.
- 22) Gefen, A.: Biomechanical analysis of fatigue-related foot injury mechanisms in athletes and recruits during intensive marching. *Med. Biol. Eng. Comput.* 40: 302-310, 2002.

(受付：2014年10月8日，受理：2015年4月16日)

Electromyographic Activity of the Lower Leg during Ankle Joint Balance Exercises～Characteristics of Ankle Instability using different types of Equipment～

Matsuba, K. ^{*1}, Kunugi, S. ^{*1}, Yoshida, N. ^{*2}
Masunari, A. ^{*1,3}, Fukuda, T. ^{*1}, Miyakawa, S. ^{*1}

^{*1} University of Tsukuba

^{*2} Teikyo Heisei University

^{*3} Ibaraki Prefectural University of Health Sciences

Key words: balance exercises, EMG activity of the lower leg, ankle sprain

[Abstract] The purpose of this study was to determine the pattern and magnitude of electromyographic (EMG) activity of the lower leg during ankle joint balance exercises. A total of five different types of balancing tools (stable surface, balance pad, balance disc, DYJOC[®] board and BOSU[®]) were developed for two distinct groups, one with AI (AI group) and the other without AI (Con group). Integrated EMG activity was recorded for the peroneus longus, peroneus brevis and tibialis anterior during single-leg balance. Comparison of EMG activity based on different instruments showed that the EMG activity of BOSU[®] was higher than that with other tools in both groups, but lower for a stable surface. EMG activity also increased with a certain instrument depending on the muscle and group. The results of this study indicate that the EMG activity of the lower leg using different types of balancing equipment will greatly contribute to the prevention and treatment of ankle sprains both in AI and Con groups.