

足趾屈曲方法の違いが 足部内在筋と外在筋の活動に与える影響 —超音波エラストグラフィを用いた評価—

Evaluation of the Activities of the Intrinsic and Extrinsic Foot Muscles during Toe Flexion with or without Interphalangeal Joint Flexion using Ultrasound Shear Wave Elastography

廣田健斗*1, 渡邊耕太*2, 根岸奎輔*1, 宮本浩樹*1
谷口達也*1,3, 寺本篤史*4, 山下敏彦*4

キー・ワード : Intrinsic foot muscle, toe flexor strength, medial longitudinal arch
足部内在筋, 足趾屈曲力, 内側縦アーチ

【要旨】 【はじめに】 足部内在筋は足アーチの保持やスポーツに重要である。足部内在筋に特化したトレーニング方法や足関節肢位の検討がなされてきたが、足趾屈曲方法の違いによって足部内在筋への効果が変わるかは明らかでない。

【目的】 足趾屈曲方法の違いが足部内在筋と外在筋の活動に与える影響を明らかにすること。

【方法】 対象は健康成人7名。肢位は長座位で足関節中間位。足趾屈曲方法は、趾節間関節中間位として中足趾節関節を屈曲する条件（IP 伸展条件）と趾節間関節および中足趾節関節を屈曲する条件（IP 屈曲条件）の2条件とし、母趾と外側趾で分けて評価を行った。屈曲時に足趾には500gの負荷をかけた。被験筋は母趾外転筋、短母趾屈筋、短趾屈筋、足底方形筋、長母趾屈筋、長趾屈筋とした。筋収縮時の筋活動と相関することが報告されている筋弾性率を、剪断波エラストグラフィ装置を用いて足趾屈曲中に計測した。条件間の比較を統計学的に行った（ $p < 0.05$ ）。

【結果】 母趾外転筋（ $P=0.018$ ）、短母趾屈筋（ $P=0.018$ ）、短趾屈筋（ $P=0.026$ ）でIP屈曲条件よりもIP伸展条件の方が有意に筋弾性率が大きかった。

【考察】 2条件間で統計学的有意差を認めた筋は、その付着部からいずれもMTP関節を優位に屈曲する筋である。本研究結果から、より有効な足部内在筋トレーニングのためには足趾屈曲方法が非常に重要であると考えられた。

はじめに

足趾屈曲には、外在筋である長母趾屈筋と長趾屈筋のほか、母趾外転筋や短母趾屈筋、短趾屈筋、足底方形筋に代表される足部内在筋など多くの筋が関わる。これら足部内在筋は足アーチの保持¹⁾や

歩行時の足部安定化²⁾、バランス機能³⁾、スポーツパフォーマンス⁴⁾に重要であることが知られている。

足趾屈曲筋のトレーニングはタオルギャザーが一般的に行われてきたが、近年 short foot exercise と呼ばれる足部内在筋に特化したトレーニングも考案されてきている⁵⁾。また、Hashimotoらは足部内在筋のトレーニングとして足関節底屈位での足趾屈曲運動を提唱しており、足関節最大底屈位では外在筋は弛緩するが、内在筋は足関節肢位によって筋長が影響されないため、内在筋の活動が

*1 札幌医科大学大学院保健医療学研究所

*2 札幌医科大学保健医療学部理学療法第二講座

*3 札幌徳洲会病院リハビリテーション科

*4 札幌医科大学医学部整形外科講座

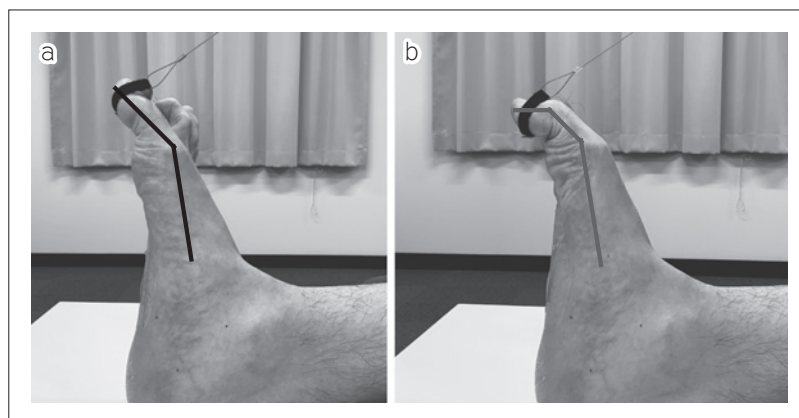


図1 足趾屈曲条件

(a) IP 伸展条件 (b) IP 屈曲条件

IP 伸展条件では趾節間 (interphalangea ; IP) 関節中間位での中足趾節 (metatarsophalangeal ; MTP) 関節の屈曲を行った。IP 屈曲条件では IP 関節および MTP 関節の屈曲を行った。

高まると考察している⁶⁾。

足部外在筋と内在筋の解剖学的な違いとして、起始のみでなく停止にも違いがある。足部外在筋は趾末節骨に付着するが、足部内在筋の多くは趾基節骨もしくは中節骨に付着を有する⁷⁾。そのため、外在筋は遠位趾節間 (Distal interphalangeal, 以下 DIP) 関節の屈曲作用を有する一方で、内在筋は DIP 関節の屈曲作用を有さない。したがって、足趾屈曲方法により足部内在筋に特化したトレーニングが行える可能性がある。しかしながら、足趾屈曲方法の違いによって足部内在筋の活動が変わるかは明らかにされていない。

そこで本研究の目的は、超音波エラストグラフィ装置を用いて足趾屈曲方法の違いが足部内在筋と外在筋の活動に与える影響を評価することとした。

対象および方法

対象

対象は健常成人7名 (平均年齢 21.7 ± 1.3 歳, 平均身長 170.7 ± 5.6cm, 平均体重 65.6 ± 9.3kg) とした。測定側は利き足とし、ボールを蹴る足を利き足とした。過去に測定側下肢の機能障害や変形が残存するような整形外科的既往を有する者は除外した。なお、対象者には研究に関する説明を十分に行い、書面による同意を得た後に実験を実施した。

方法

足趾屈曲課題

肢位は長座位にて膝関節と足関節は中間位とし、股関節は被験者が楽に姿勢を保持できる屈曲角度とした。負荷をかける足趾の末節部にカフを巻き、カフは金属ワイヤーと滑車を用いて重錘と連結した。母趾と外側趾で分けて評価を行い、母趾に対しては 500g の重錘を負荷し、外側趾では第 2~5 趾に合計で 500g の重錘を負荷した。開始肢位は中足趾節 (Metatarsophalangeal, 以下 MTP) 関節中間位とし、足趾屈曲により重錘を持ち上げる。足趾屈曲方法は①MTP 関節のみを屈曲する方法 (IP 伸展条件) と②MTP 関節と趾節間 (Interphalangeal, 以下 IP) 関節の屈曲を行う方法 (IP 屈曲条件) の 2 種類とした (図 1)。足趾屈曲によって重錘が持ち上がった時点での足趾屈曲角度を保持した (図 2)。なお、事前に pilot 実験を行い、①および②の屈曲方法が可能な負荷量を規定した。

筋弾性率の計測

筋弾性率の計測には剪断波エラストグラフィ装置 (Aixplorer, SuperSonic Imagine) およびリニアプローブ (2-10MHz) を使用した。母趾の評価時には母趾外転筋、短母趾屈筋、長母趾屈筋を被験筋とし、外側趾の評価時には短趾屈筋、足底方形筋、長趾屈筋を被験筋とした。プローブ位置は、超音波画像診断装置にて足趾屈曲筋の筋厚を計測している先行研究に従った^{8,9)}。足趾屈曲課題保持中に剪断波エラストグラフィモードの画像を各条件で

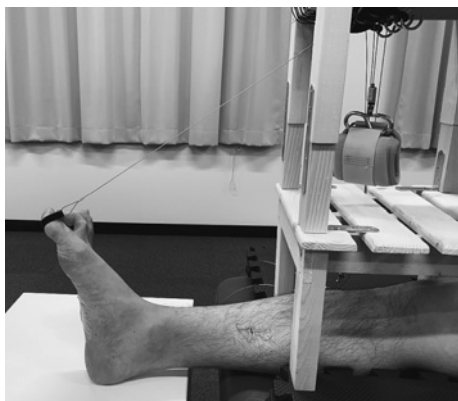


図2 足趾屈曲課題
足趾屈曲により500gの重錘を持ち上げ、持ち上がった時点での足趾屈曲角度を保持した。

2回撮像した。得られた画像の関心領域内に円領域を3箇所設定し、それぞれの円領域における平均ヤング率を計測した。筋内腱が存在する場合、筋内腱に円領域が入らないよう筋線維内に設定した。母趾外転筋、短母趾屈筋、短趾屈筋には直径4mm、足底方形筋については直径3mmの円領域を設定し、長趾屈筋と長母趾屈筋には直径5mmの円領域を設定した。3箇所の平均値を各画像のヤング率とした(図3)。本装置は、生体軟組織が等方性である仮定のもとヤング率を算出しているが、骨格筋は圧迫の方向で弾性が変わる性質を持つ異方性体であるため、本研究では得られたヤング率を3で除して得られる剪断弾性率を算出した。各条件で得られた2回の弾性率の平均値を解析に用いた。

統計学的解析

各筋において、足趾屈曲条件間での弾性率を比較するため、対応のあるt検定、Wilcoxonの符号つき順位和検定を行った。有意水準は5%とした。

結 果

母趾の評価時には、母趾外転筋と短母趾屈筋においてIP屈曲条件よりもIP伸展条件の方が有意に弾性率が高かった(図4)。外側趾の評価時には、短趾屈筋においてIP屈曲条件よりもIP伸展条件の方が有意に弾性率が高かった(図5)。長母趾屈筋、足底方形筋、長趾屈筋は条件間で有意差を認めなかった。

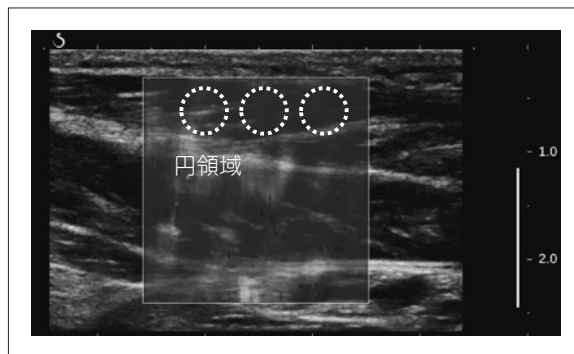


図3 ヤング率の計測
母趾外転筋を撮像した画像である。四角で囲った関心領域のヤング率をカラーマッピング表示している。関心領域内に円領域を3箇所設定し、それぞれの円内部の平均ヤング率をキロパスカル単位で計測した。3箇所の平均値を各画像のヤング率とした。

考 察

収縮時の筋弾性は筋活動と相関することが腓腹筋や肩周囲筋を対象とした研究で報告されている^{10,11}。足趾屈曲筋においても、足部内在筋の一つである足底方形筋の内側頭と外側頭を対象に、エラストグラフィが筋の活動評価として用いられている¹²。本研究においても、エラストグラフィによって得られた筋弾性率の値を筋活動の指標として計測を行った。

本研究において2条件間で有意差を認めた筋はいずれも趾基節骨もしくは趾中節骨に停止を有する筋である。母趾外転筋および短母趾屈筋は種子骨を經由して母趾基節骨底に停止し、短趾屈筋は第2~5趾の中節骨底側面に停止する⁷。そのため、これらの筋は母趾のIP関節および外側趾のDIP関節屈曲には作用せず、MTP関節を有意に屈曲する筋であると考えられる。したがって、母趾外転筋、短母趾屈筋、短趾屈筋は、IP伸展条件のようなMTP関節屈曲運動によって効率的にトレーニングされる可能性がある。

一方、有意差を認めなかった長母趾屈筋および長趾屈筋は趾末節骨に停止し、足底方形筋は長趾屈筋腱と長母趾屈筋腱に停止する⁷。そのため、これらの筋はMTP関節の屈曲に加え、母趾IP関節の屈曲、第2~5趾DIP関節の屈曲にも作用する。本研究におけるIP屈曲条件では、母趾IP関節と第2~5趾DIP関節の屈曲を含めた運動を行った。そのため、これらの筋ではIP屈曲条件におい

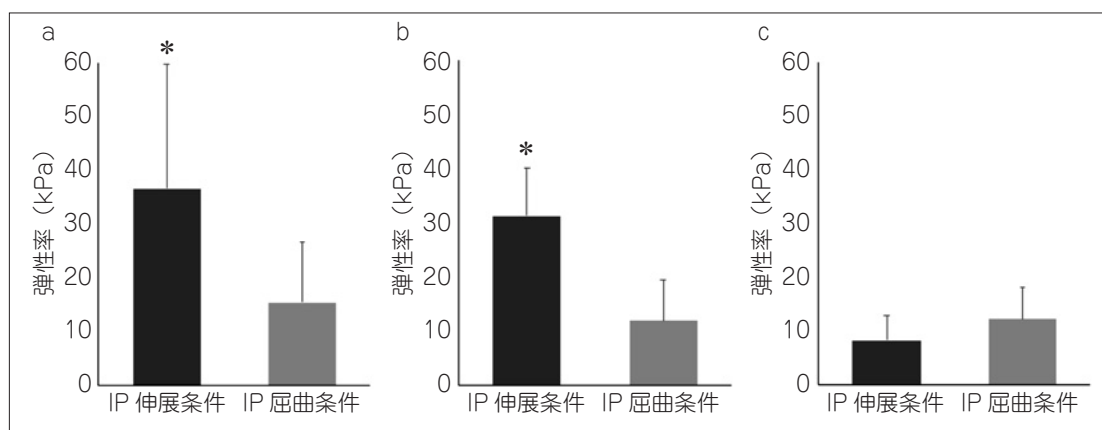


図4 母趾評価時の弾性率
 (a) 母趾外転筋, (b) 短母趾屈筋, (c) 長母趾屈筋
 母趾外転筋, 短母趾屈筋で IP 伸展条件の方が IP 屈曲条件よりも有意に高い弾性率を示した. * $p < 0.05$ vs IP 屈曲条件

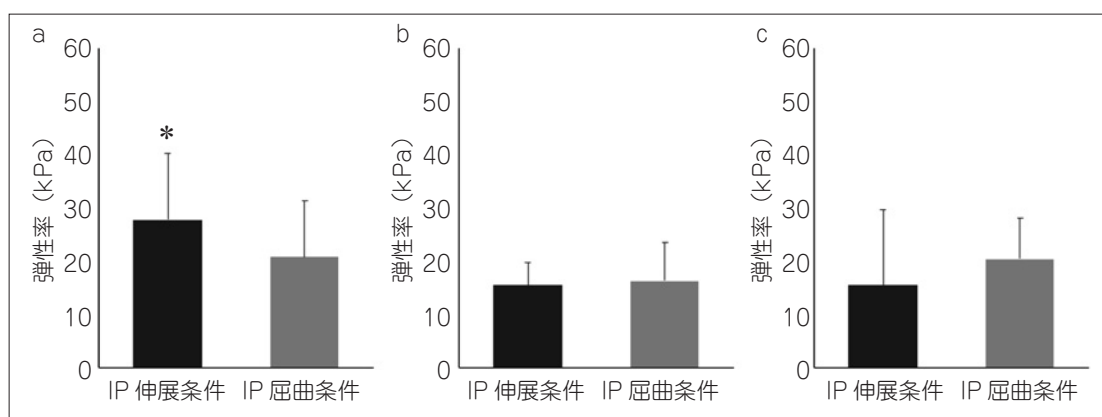


図5 外側趾評価時の弾性率
 (a) 短趾屈筋, (b) 足底方形筋, (c) 長趾屈筋
 短趾屈筋で IP 伸展条件の方が IP 屈曲条件よりも有意に高い弾性率を示した. * $p < 0.05$ vs IP 屈曲条件

て有意に弾性率が高くなることを予測していたが、2条件間で有意差はみられなかった。その要因として、足趾にかかる負荷量が小さかったことが考えられる。長母趾屈筋、長趾屈筋の筋横断面積は足部内在筋に比べ大きい¹³⁾ため、発揮筋力も大きいことが推察される。筋横断面積から足趾屈曲筋の最大筋力を推定した研究では、長母趾屈筋は131~209N、長趾屈筋は133~212Nの筋力を有するとされている¹³⁾。本研究ではIP伸展条件を実施するために、母趾のIP関節および外側趾のDIP関節が屈曲しないよう足趾屈曲運動が行える負荷量をpilot実験から規定した。しかしながら、長母趾屈筋と長趾屈筋が有する筋力に比較すると本研究での負荷量は小さかったために、IP屈曲条件においても長母趾屈筋および長趾屈筋の弾性率が上

昇しなかったと考えられる。

代表的な足部内在筋のトレーニングとして、short foot exerciseが報告されている^{5,14)}。Short foot exerciseは足趾を屈曲せず、第一中足骨頭を踵の方に近づける運動である。その際、前足部と踵は床から離さないようにし、内側縦アーチの引き上げを意識する¹⁴⁾。Short foot exerciseはタオルギャザー運動に比べ母趾外転筋の筋活動が有意に高く⁵⁾、そのトレーニング後には舟状骨高降下量の減少やバランス機能が向上したことが示されている^{15~17)}。他にも、Toes spread out exerciseは軽度外反母趾の対象においてshort foot exerciseよりも母趾外転筋の活動が有意に高く、軽度外反母趾の対象ではtoes spread out exerciseの有用性が示唆されている¹⁸⁾。Hashimotoらは足関節最大底

屈位での足趾屈曲運動時には足関節中間位よりも短母趾屈筋, 短趾屈筋の筋活動が高いことを示し, 足部内在筋のトレーニングには足関節最大底屈位での足趾屈曲運動を推奨している⁶⁾.

しかしながら, これまで足趾の屈曲方法に着目して足部内在筋の活動が変わるかは検討されて来なかった. 本研究の結果から, より有効な足部内在筋トレーニングのためには足趾屈曲方法が非常に重要であると考えられた. 特に, 母趾外転筋, 短母趾屈筋, 短趾屈筋のトレーニングには IP 関節伸展位での足趾屈曲運動が有効であると考えられる. 足部内在筋は足部アーチの保持や足部の安定化に関わることから, スポーツパフォーマンス向上とともに足部疾患の予防や治療においても足部内在筋のトレーニングが重要である. 今後は本知見を基に効果的な足部内在筋トレーニング方法や足趾屈曲筋の中でも特定の筋をターゲットとするトレーニング方法を考案する予定である.

結 語

7名の健常者を対象として, 剪断波エラストグラフィ装置を用いて足趾屈曲方法が足部内在筋と外在筋の活動に与える影響を検討した. 母趾外転筋, 短母趾屈筋, 短趾屈筋は IP 伸展条件において IP 屈曲条件よりも高い筋弾性率を示した. IP 伸展条件において高い弾性率を示した筋は, その付着部からいずれも MTP 関節を優位に屈曲する筋である. 足部内在筋トレーニングには足趾屈曲方法も重要であると考えられた.

謝 辞

本研究は平成 30 年度日本スポーツ治療医学研究会の研究助成を受けて実施されました. ここに感謝の気持ちと御礼を申し上げます.

利益相反

本論文に関連し, 開示すべき利益相反はなし.

文 献

1) Kelly LA, Cresswell AG, Racinais S, et al. Intrinsic foot muscles have the capacity to control deformation of the longitudinal arch. *J R Soc Interface*. 2014; 11: 20131188.

2) Mann R, Inman VT. Phasic activity of intrinsic muscles of the foot. *J Bone Joint Surg Am*. 1964; 46: 469-481.

3) Kelly LA, Kuitunen S, Racinais S, et al. Recruitment of the plantar intrinsic foot muscles with increasing postural demand. *Clin Biomech*. 2012; 27: 46-51.

4) Morita N, Yamauchi J, Kurihara T, et al. Toe flexor strength and foot arch height in children. *Med Sci Sports Exerc*. 2015; 47: 350-356.

5) Jung DY, Kim MH, Koh EK, et al. A comparison in the muscle activity of the abductor hallucis and the medial longitudinal arch angle during toe curl and short foot exercises. *Phys Ther Sport*. 2011; 12: 30-35.

6) Hashimoto T, Sakuraba K. Assessment of effective ankle joint positioning in strength training for intrinsic foot flexor muscles: a comparison of intrinsic foot flexor muscle activity in a position intermediate to plantar and dorsiflexion with that in maximum plantar flexion using needle electromyography. *J Phys Ther Sci*. 2014; 26: 451-454.

7) 坂井建雄. プロメテウス解剖学アトラス 解剖学総論/運動器系, 第 2 版. 東京: 医学書院; 2007.

8) Mickle KJ, Nester CJ, Crofts G, et al. Reliability of ultrasound to measure morphology of the toe flexor muscles. *J Foot Ankle Res*. 2013; 6: 12.

9) Crofts G, Angin S, Mickle KJ, et al. Reliability of ultrasound for measurement of selected foot structures. *Gait Posture*. 2014; 39: 35-39.

10) Inami T, Tsujimura T, Shimizu T, et al. Relationship between isometric contraction intensity and muscle hardness assessed by ultrasound strain elastography. *Eur J Appl Physiol*. 2017; 117: 843-852.

11) Kim K, Hwang HJ, Kim SG, et al. Can shoulder muscle activity be evaluated with ultrasound shear wave elastography? *Clin Orthop Relat Res*. 2018; 476: 1276-1283.

12) Nakanowatari T, Koseki T, Sato T, et al. Evaluation of the activities of the medial and lateral heads of quadratus plantae in flexion movements of the lateral four toes using ultrasound real-time tissue elastography. *Foot*. 2018; 36: 25-29.

13) Green SM, Briggs PJ. Flexion strength of the toes in the normal foot. An evaluation using magnetic resonance imaging. *Foot*. 2013; 23: 115-119.

14) Gooding TM, Feger MA, Hart JM, et al. Intrinsic

- foot muscle activation during specific exercises: a T2 time magnetic resonance imaging study. *J Athl Train.* 2016; 51: 644-650.
- 15) Lynn SK, Padilla RA, Tsang KK. Differences in static- and dynamic-balance task performance after 4 weeks of intrinsic-foot-muscle training: the short-foot exercise versus the towel-curl exercise. *J Sport Rehabil.* 2012; 21: 327-333.
- 16) Jung DY, Koh EK, Kwon OY. Effect of foot orthoses and short-foot exercise on the cross-sectional area of the abductor hallucis muscle in subjects with pes planus: a randomized controlled trial. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2011; 24: 225-231.
- 17) Mulligan EP, Cook PG. Effect of plantar intrinsic muscle training on medial longitudinal arch morphology and dynamic function. *Man Ther.* 2013; 18: 425-430.
- 18) Kim MH, Kwon OY, Kim SH, et al. Comparison of muscle activities of abductor hallucis and adductor hallucis between the short foot and toe-spread-out exercises in subjects with mild hallux valgus. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2013; 26: 163-168.

(受付：2020年3月27日，受理：2020年11月27日)

Evaluation of the Activities of the Intrinsic and Extrinsic Foot Muscles during Toe Flexion with or without Interphalangeal Joint Flexion using Ultrasound Shear Wave Elastography

Hirota, K.^{*1}, Watanabe, K.^{*2}, Negishi, K.^{*1}, Miyamoto, H.^{*1}
Taniguchi, T.^{*1,3}, Teramoto, A.^{*4}, Yamashita, T.^{*4}

^{*1} Graduate School of Health Science, Sapporo Medical University

^{*2} Department of Physical Therapy, Sapporo Medical University School of Health Science

^{*3} Department of Rehabilitation, Sapporo Tokushukai Hospital

^{*4} Department of Orthopaedic Surgery, Sapporo Medical University School of Medicine

Key words: Intrinsic foot muscle, toe flexor strength, medial longitudinal arch

[Abstract] Introduction: The intrinsic foot muscles are important to maintain the arch of the foot and in sports activities. Using ultrasound shear wave elastography, we investigated the effect of different toe flexion methods on the activity of intrinsic and extrinsic foot muscles.

Methods: The study included 7 healthy adults who performed toe flexion with interphalangeal (IP) joint flexion (with-IP-flexion condition) and without IP joint flexion (without-IP-flexion condition). The applied load during toe flexion was 500 g. Muscle stiffness was measured in the abductor hallucis, flexor hallucis brevis, flexor digitorum brevis, quadratus plantae, flexor hallucis longus, and flexor digitorum longus muscles using ultrasound shear wave elastography. Muscle stiffness was statistically compared between the with- and without-IP-flexion conditions ($p < 0.05$).

Results: The stiffness of the abductor hallucis ($p=0.018$), flexor hallucis brevis ($p=0.018$), and flexor digitorum brevis muscles ($p=0.026$) was significantly greater during the without-IP-flexion than the with-IP-flexion condition.

Discussion: Muscles that showed a significant difference in stiffness between the aforementioned study conditions were considered to anatomically flex the metatarsophalangeal joint. These results suggest that the toe flexion method is important for more effective training involving the intrinsic foot muscles.