

博士論文

アスリートにおける足趾筋力と
運動パフォーマンスとの関係

(The study of relationship between toe muscular
strengths and athletic performance in athletes)

2020 年 3月

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科
スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程

湯浅 康弘

立命館大学審査博士論文

アスリートにおける足趾筋力と
運動パフォーマンスとの関係

(The study of relationship between toe muscular
strengths and athletic performance in athletes)

2020 年 3月

March 2020

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科
スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程
Doctoral Program in Sport and Health Science
Graduate School of Sport and Health Science
Ritsumeikan University

湯浅 康弘

YUASA Yasuhiro

研究指導教員：伊坂 忠夫教授
Supervisor: Professor ISAKA Tadao

目次

用語の定義

序	1
第1章 緒言	3
1-1. 足部の解剖学的特徴	3
1-1-1. 足部の骨格構造と関節機能	3
1-1-2. MPJ の機能	8
1-1-3. 足部の筋の構造と機能	9
1-2. 運動パフォーマンス	14
1-2-1. 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係	14
1-2-2. 足趾筋力と跳躍パフォーマンスとの関係	16
1-2-3. 足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係	17
1-3. 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係に関する先行研究の問題点	18
1-3-1. 足趾筋力の測定法	18
1-3-2. 測定対象者	20
1-3-3. 運動パフォーマンスの評価項目	20

1-4. 本研究の目的と概略	22
1-4-1. 目的	22
1-4-2. 本研究の構成	22
第2章 足関節およびMPJの角度が足趾押力に及ぼす影響（研究課題Ⅰ）	26
2-1. はじめに	26
2-2. 方法	27
2-3. 結果	36
2-4. 考察	40
2-5. 小括	43
第3章 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係	44
3-1. 跳躍パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅱ）	44
3-1-1. はじめに	44
3-1-2. 方法	45
3-1-3. 結果	58
3-1-4. 考察	61
3-1-5. 小括	64

3-2. スプリント走パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅲ）	66
3-2-1. はじめに	66
3-2-2. 方法	67
3-2-3. 結果	71
3-2-4. 考察	74
3-2-5. 小括	76
3-3. 方向転換走パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅳ）	77
3-3-1. はじめに	77
3-3-2. 方法	78
3-3-3. 結果	82
3-3-4. 考察	86
3-3-5. 小括	87
第4章 総括論議	88
第5章 結論	100

参考文献 ····· 102

謝辭 ····· 110

用語の定義

アスリート

特定の競技スポーツや身体運動に習熟している者であり，特定のスポーツ種目の実践を通して勝敗あるいは順位が争われる競技会に定期的に参加している者を指す．本研究においては，レスリング，アメリカンフットボール，バレーボール，トライアスロン，日本拳法，ライフセービングの各競技の競技者をアスリートとして採用した．

一般人

特定の競技スポーツへの参加がなく，日常的に運動を実践する習慣を持たない成人を指す．

足趾筋力 (Toe muscular strength)

前足部に位置する中足趾節関節 (Metatarsophalangeal Joint : MPJ) など下肢の最も遠位関節において，足部外在筋群 (長母趾屈筋，長趾屈筋) と足部内在筋群 (短母趾屈筋，短趾屈筋，虫様筋) の収縮によって発揮される筋力を指す．本研究においては，足趾屈力と足趾押力の両方を包含する総称とする．

足趾屈力 (Toe flexor strength)

MPJ が底屈位で足趾が屈曲しながら地面を掴むように発揮する力であり，足部外在筋群（長母趾屈筋，長趾屈筋）と足部内在筋群（短母趾屈筋，短趾屈筋，虫様筋）の収縮により発揮される筋力を指す．

足趾押力 (Toe pushing force)

MPJ が底背屈位および背屈位で足趾が伸展している状態で地面を押すように発揮する力であり，足部外在筋群（長母趾屈筋，長趾屈筋）と足部内在筋群（短母趾屈筋，短趾屈筋，虫様筋）の収縮により発揮される筋力を指す．

等尺性最大発揮筋力 (Maximum voluntary isometric contraction : MVIC)

筋が筋長を変えない等尺性の条件下において収縮し，最大努力で発揮した筋力を指す．

裸足アスリート

競技スポーツの練習や試合において，裸足で競技を行う競技者を指す．本研究では，日本拳法とライフセービングの競技者を裸足アスリートとして採用した．

非裸足アスリート

競技スポーツの練習や試合において、主にシューズを着用（非裸足）して競技を行う競技者を指す。本研究では、レスリング、アメリカンフットボール、バレーボール、トライアスロンの競技者を非裸足アスリートとして採用した。

運動パフォーマンス

身体活動である、走る、跳ぶ、投げる、泳ぐ、素早く切り返すなどの運動のできばえ（パフォーマンス）を指す。本研究では、運動パフォーマンスとしてプレス型およびリバウンド型跳躍、スプリント走、方向転換走のパフォーマンスに関する測定を実施した。

プレス型跳躍パフォーマンス

下肢関節の屈曲－伸展範囲が大きく、踏切時間が長い（0.2秒以上）跳躍動作を指す。本研究では、プレス型跳躍として反動を用いない垂直跳びと反動を用いた立ち幅跳びを採用し、それらのパフォーマンスを測定した。

リバウンド型跳躍パフォーマンス

下肢関節の屈曲－伸展範囲が狭く，極めて短い踏切動作（0.2 秒以内）を意識して行う連続的な跳躍動作を指す．本研究では，リバウンド型跳躍としてホッピングとリバウンドジャンプ動作を採用し，それらのパフォーマンスを測定した．

スプリント走パフォーマンス

方向変化のない直線的な距離を最高速度で移動する動作全般を指す．本研究では，スプリント走として，10 yard および 40 yard スプリント走を採用した．

方向転換走パフォーマンス

走動作中に進行方向の転換を伴う動作全般を指す．本研究では，方向転換走パフォーマンスとして，プロアジリティテスト，3 コーンテストを採用し，そのパフォーマンスを測定した．

略語の一覧

DIP Distal interphalangeal joint (遠位趾節間関節)

ICC Intraclass correlation coefficient (級内相関係数)

IP Interphalangeal joint (趾節間関節)

MPJ Metatarsophalangeal joint (中足趾節関節)

MVIC Maximum voluntary isometric contraction (等尺性最大発揮筋力)

PIP Proximal interphalangeal joint (近位趾節間関節)

TMS Toe muscular strength (足趾筋力)

序

人類が直立二足歩行の能力を獲得することに伴い手足の機能分化が起こり，足部にはアーチが形成され身体を安定して支持する機能が備わった（近藤，1993）．直立二足歩行を常とする人類にとって，足部は動作刺激による負荷を最初に受ける身体部位であり，足底や足趾の筋力は様々な身体活動のパフォーマンスに対し重要な役割を果たすと考えられる．

筋力と運動パフォーマンスとの関係は，スポーツ健康科学の主要な研究テーマの1つであり，これまでも非常に多くの研究が実施されてきた．しかしながら，筋力と運動パフォーマンスとの関係に関する先行研究は，前者の測定として足関節や膝関節，股関節に着目したものが大半であり（図子ら，1995；Horita et al.，1996；Young et al.，2002；Newman et al.，2004；Markovic.，2007；Schache et al.，2011；Kariyama et al.，2016），それらに比較して足趾筋力を対象とした例は極めて少ない．また，これまでに足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係について検討した研究は，高齢者や一般人を対象としたものに限られ，アスリートを対象にした例はない．さらに，これまで足趾筋力の測定は，中足趾節関節（Metatarsophalangeal Joint：MP関節，MPJ）が底屈位で行われてきた．しかし，方向転換動作の接地時や跳躍の離地時におけるMPJの状態は背屈位である（Riley et al.，2013）．そのような実際の運動場面における足趾の

状態を考慮に入れると、MPJ が底屈位よりも背屈位での足趾筋力の方が運動パフォーマンスとの関係性は強いと予想される。

そこで本博士論文では、アスリートを対象に MPJ が底屈位および背屈位で足趾筋力をそれぞれ測定し、それらと跳躍、スプリント走および方向転換走のパフォーマンスとの関係性を明らかにすることを目的とする。

第 1 章 緒言

1-1. 足部の解剖学的特徴

1-1-1. 足部の骨格構造と関節機能

足部は 26 個の骨と 19 の大きな筋，多数の小筋群，100 以上の靭帯で構成されており，それらの組織が形成する複雑な構造によって様々な機能を果たすことができる（中村ら，2014）．足部の主な役割は，体重支持と身体推進であることから，足部の力学的機能の改善は，これらの動作を担う上で重要であると考えられる．

足部の骨格構造（図 1.1）は，足趾の骨である趾骨（基節骨，中節骨，末節骨）と中足骨で構成される前足部，および楔状骨（内側，中間，外側）と舟状骨で構成される中足部，距骨と踵骨で構成される後足部に分けられる（中村ら，2014）．また足趾には，趾の趾節骨間を結ぶ趾節間関節（Interphalangeal joint ; IP 関節）があり，最も遠位に位置し，中節骨と末節骨を繋ぐ遠位趾節間関節（Distal interphalangeal joint : DIP 関節），遠位より手前に位置し基節骨と中節骨を繋ぐ近位趾節間関節（Proximal interphalangeal joint : PIP 関節），および足趾の付け根に位置し中足骨と趾節骨間の関節である中足趾節関節（Metatarsophalangeal Joint : MP 関節，MPJ）など複数の関節が存在しており，足関節と MPJ は，それぞれが独立して働くことが知られている（Stefanyshyn et al., 1998）．母趾の MPJ は約 45°の底屈（屈曲）と 70°の背屈（伸

展), 他 4 本の足趾の MPJ は, 約 40°の底屈 (屈曲) と 40°の背屈 (伸展) が可能であり, 5 趾すべての MPJ で僅かであるが内転と外転することができる. また, 4 趾の PIP 関節では, 0°背屈位 (伸展位) から 35°の底屈 (屈曲) が可能であり, DIP 関節では 60°の底屈 (屈曲) と 30°の背屈 (伸展) が可能である. これらの関節の可動域については, 個人差や関節間における違いが認められる (中村ら, 2014) .

足部の 26 個の骨は, すべて靭帯で連結されており, 足部にアーチ状の構造を作り, それを保つことで身体の荷重を支持し, 起立, 歩行, 走行, 跳躍など様々な動作における地面への効率の良い力伝達や接地時の衝撃吸収などの基盤となっている (橋本, 2004). 足部アーチは, 踵骨, 距骨, 舟状骨, 楔状骨 (3 個), 中足骨 (3 個) から構成される内側縦アーチおよび踵骨, 立方骨, 第 4 および 5 中足骨で構成される外側縦アーチ, ならびに楔状骨, 中足骨, 立方骨から構成される横アーチの 3 つからなる

(図 1.2). また, 足部アーチには Truss mechanism (トラス機構) と Windlass mechanism (ウィンドラス機構) と呼ばれる特徴的な作用がある (図 1.3 A, B). Truss mechanism は, 足部アーチを足根骨と靭帯によりそれらが結合した関節の 2 つの上辺および足底腱膜で作られる底辺の三角構造からなり, 荷重位において伸縮性のある足底腱膜を伸張させることで体重を支持し, 衝撃を吸収分散する (Erdemir et al., 2004). Windlass mechanism は, MPJ を背屈させることによって, 足底腱膜を中足骨頭の周りに巻きつけることによって作用し (Kappel-Bargas et al., 1998), 巻き上げられ

た足底腱膜が緊張することによって踵骨が前方に引き寄せられ、足部の剛性を高める作用がある (Hicks., 1954). この2つの作用により、歩行や疾走時における踵離地から足趾離地での蹴り出しの力を効率よく接地面に伝達することができる (橋本, 2004).

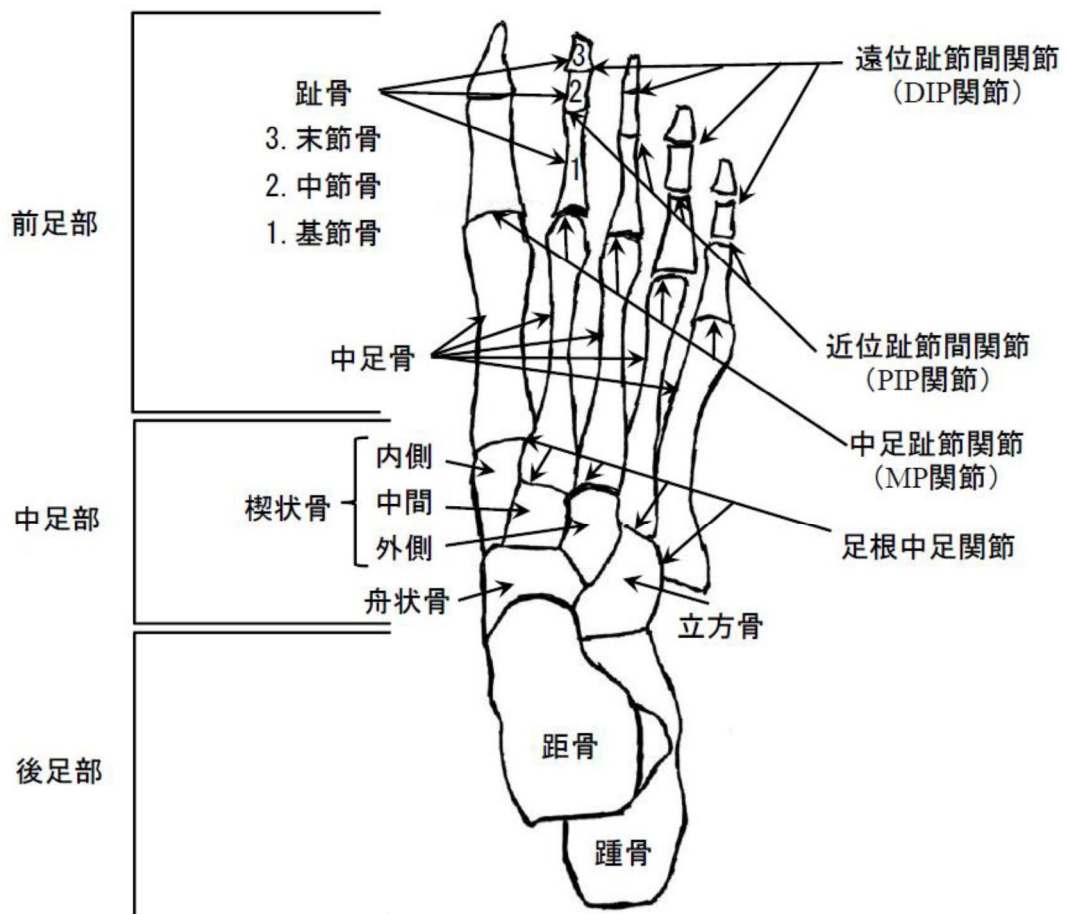


図 1.1 右足の骨格



図 1.2 右足部アーチの構造

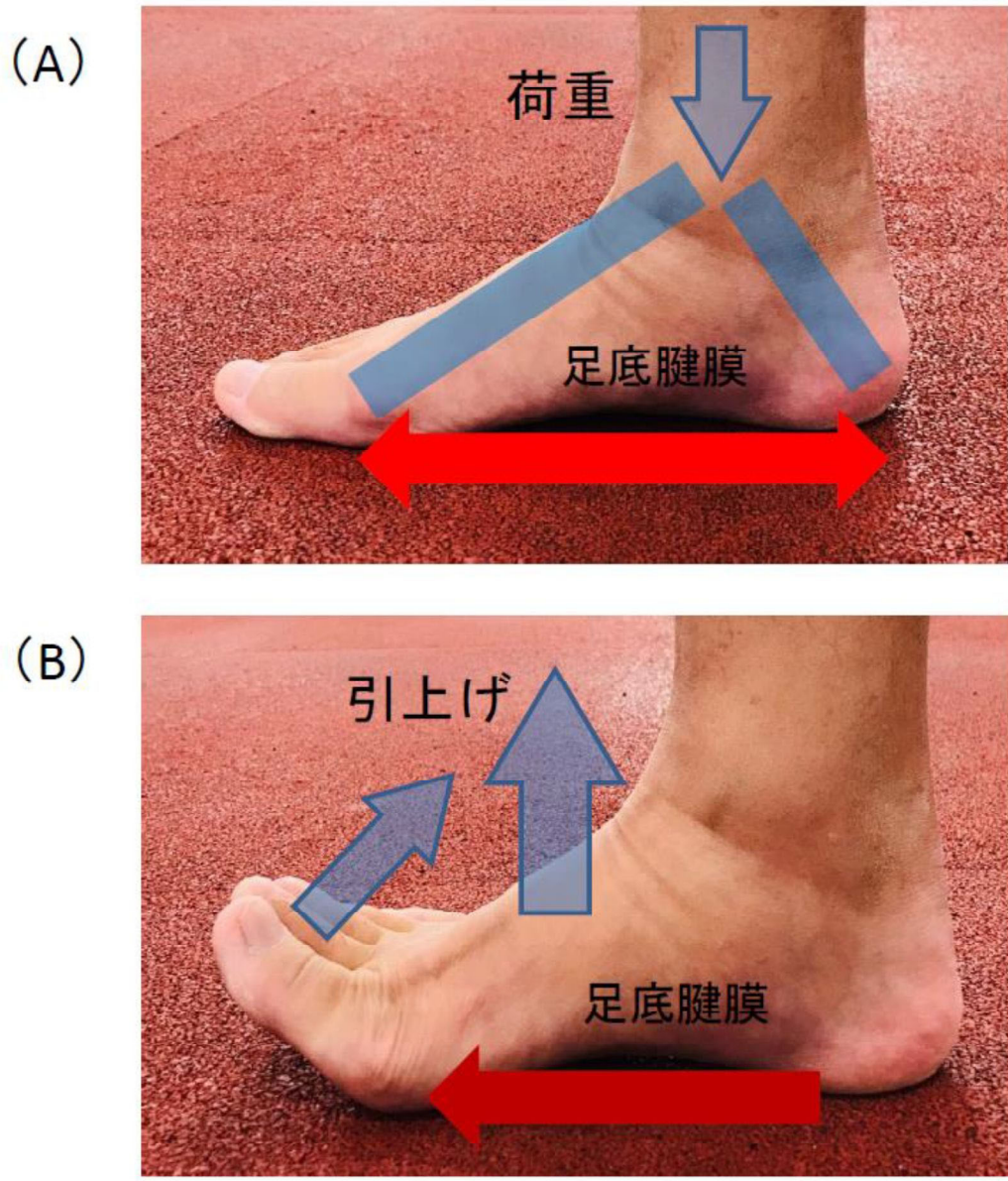


図 1.3 トラス機構 (A) およびウィンドラス機構 (B).

1-1-2. MPJの機能

臨床研究分野では、足部を後足部（踵骨および距骨）、前足部（5つの中足骨）、足趾（基節骨）の3つのセグメントにモデル化したもの（Carson et al., 2001）や、脚、踵骨、中足部（舟状骨および立方骨）、外側前足部（第4および第5中足骨）、内側前足部（第1中足骨）、母趾の6つのセグメントにモデル化したものを用いて研究が行われている（Salford foot model ; Nester et al., 2014）。それに対し、運動パフォーマンスとの関連については、足部をMPJで分離した2つのセグメントモデルとした研究が実施されており、エネルギーの観点から考えると、MPJはランニングやスプリントの接地時にはエネルギーを吸収する役割はあるが、離地時には股関節や膝関節、足関節などの下肢関節と比較してエネルギーをほとんど生成しないことが報告されている（Stefanyshyn et al., 1997 ; Stefanyshyn et al., 2004 ; Krell et al., 2006）。足趾筋力（Toe muscular strength）の強さを決定する外在筋の筋長一力の関係は、MPJと足関節の角度に依存することが示唆されており（Goldmann et al., 2012 ; Goldmann et al., 2013）、足関節が底背屈および背屈位、MPJが背屈位にあるときに足趾筋力が最大になる（Goldmann et al., 2012）。しかし、これまでのところ足趾筋力はMPJ底屈位で測定されてきた（Morita et al., 2015 ; Otsuka et al., 2015 ; 山田ら, 2015 ; 大森ら, 2011 ; 鹿内ら, 2017 ; Uritani et al., 2017）。スプリント走（Smith et al., 2014）や跳躍の離地時、方向転換の接地時にMPJは底屈位ではなく背屈位になることが観察されて

いる (Riley et al., 2013) . したがって、実際のスポーツ場面における MPJ の状態を考慮すると、運動パフォーマンスと足趾筋力との関連性を検証するためには、後者の値として MPJ 背屈位でのものを得る必要があるといえる.

1-1-3. 足部の筋の構造と機能

足関節および足部や足趾の動きに関与する筋は、筋腹が下腿にある外在筋と筋腹が足部にある内在筋に分類される (中村ら, 2014). 外在筋の起始は大腿骨, 脛骨および腓骨にあり, 骨間膜と筋膜によって 4 つの区画 (コンパートメント) に分けられる

(図 1.4). 前方部コンパートメントは前脛骨筋, 長趾伸筋, 長母趾伸筋および第 3 腓骨筋を含み, 足関節を背屈, 足趾を伸展, 足部を内反および外反させる. 外側部コンパートメントには長腓骨筋と短腓骨筋が含まれ, 足関節の底屈および外反を行う. 後方は深部および浅部コンパートメントに分けられる. 後方深部コンパートメントには, 膝窩筋, 後脛骨筋, 長母趾屈筋および長趾屈筋があり, 足関節の底屈や足趾の屈曲, 足部の内反を行う. また, 後方浅部コンパートメントには腓腹筋, ヒラメ筋および足底筋があり, 足関節の底屈を担う.

内在筋の起始と停止は足部の骨にあり, 4 層から構成される足底部内に観察できる

(図 1.5). 第 1 層には母趾外転筋, 小趾外転筋, 短趾屈筋および短小趾屈筋がある.

母趾外転筋は母趾の外転を行い, 短母趾屈筋を補助することで MPJ における母趾の屈

曲を行う。小趾外転筋は第5趾の基節骨を外転させ、短趾屈筋と短小趾屈筋は第2から第5趾の中節骨に関わる関節の屈曲を行う。第2層には足底方形筋と4つの虫様筋がある。足底方形筋は第2から第5趾のDIP関節の屈筋であり、虫様筋はMPJにおける屈筋である。第3層には短母趾屈筋および母趾内転筋がある。短母趾屈筋は母趾のMPJにおける屈曲を行い、母趾内転筋は内在筋の中で唯一、母趾を内転させることができる。最も深層である第4層には、4つの背側骨間筋と3つの底側骨間筋がある。背側骨間筋は第2から第4趾の屈曲とMPJの外転を行い、底側骨間筋は第3趾から第5趾の屈曲および各足趾のMPJにおける内転を行う（中村ら、2014）。

足部外在筋群と内在筋群の足趾屈筋群で発揮される足趾筋力は、MPJの関節角度により力を発揮する方向の違いによって足趾屈力（Toe flexor strength）と足趾押し力（Toe pushing force）に分類される。足趾屈力は、MPJが底屈位で足趾が屈曲しながら地面を掴むように発揮する筋力であり、足趾押し力は、MPJが底背屈位および背屈位で足趾が伸展している状態で地面を押しように発揮する筋力を指す（Yuasa et al., 2018）。

長母趾屈筋の長さは、足関節が1°回転するごとに0.5mm、MPJが1°回転するごとに0.22mm 変わるといわれている（Refshauge et al., 1995）。そのような関節角度の変化に伴う筋長変化を反映する形で、足趾筋力は、主働筋である長母趾屈筋や長趾屈筋など筋腹が下腿にある外在筋群の筋長一力の関係に基づき、足関節とMPJの関節角度に依存することが示唆されている（Goldmann et al., 2012）。また、外在筋は足関節と

MPJ を跨ぐ二関節筋であることから、足関節角度の変化は外在筋群の最大筋力の発揮水準に影響する (Kurihara et al., 2014) . 足部の内在筋および外在筋の筋横断面積は、足趾筋力の等尺性最大発揮筋力 (Maximum voluntary isometric contraction, MVIC) の決定因子の 1 つとなることが報告されている (Kurihara et al., 2014) .

一方、足趾屈力は立位や歩行時における姿勢制御において重要な役割を果たし (Endo et al., 2002 ; Menz et al., 2005) , 足趾屈力の低下は高齢者の転倒リスクとなり (Mickle et al. , 2009) , 動的姿勢制御に影響を及ぼす (加辺ら, 2002) . また、足趾の障害が関節可動域の低下を引き起こし、アスリートの身体能力の低下に結びつく可能性も示唆されている (Garth et al., 1989) . その一方で、MPJ 底屈の主働筋である長母趾屈筋や長趾屈筋など足趾底屈筋のトレーニングは、跳躍パフォーマンスやスプリント走パフォーマンスを改善することが報告されている (Goldmann et al., 2013 ; Hashimoto et al., 2014) .

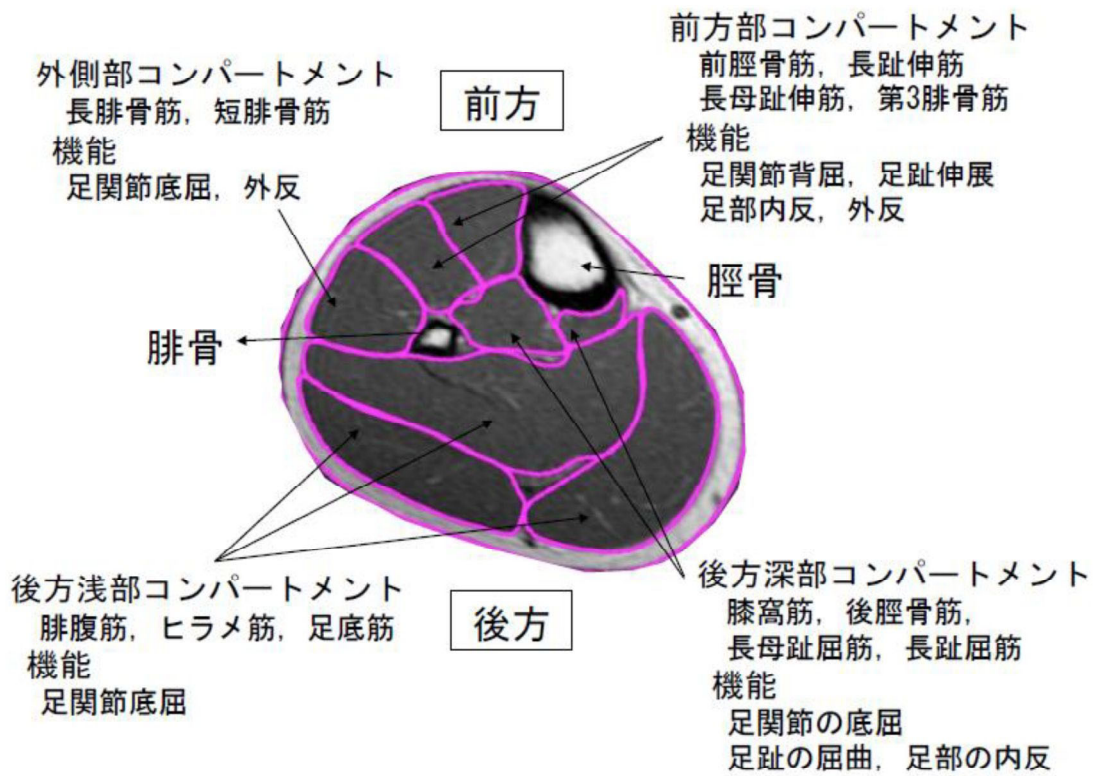


図 1.4 外在筋のコンパートメントを示す右脚下腿近位 30%位置の断面図

(MRI 画像)

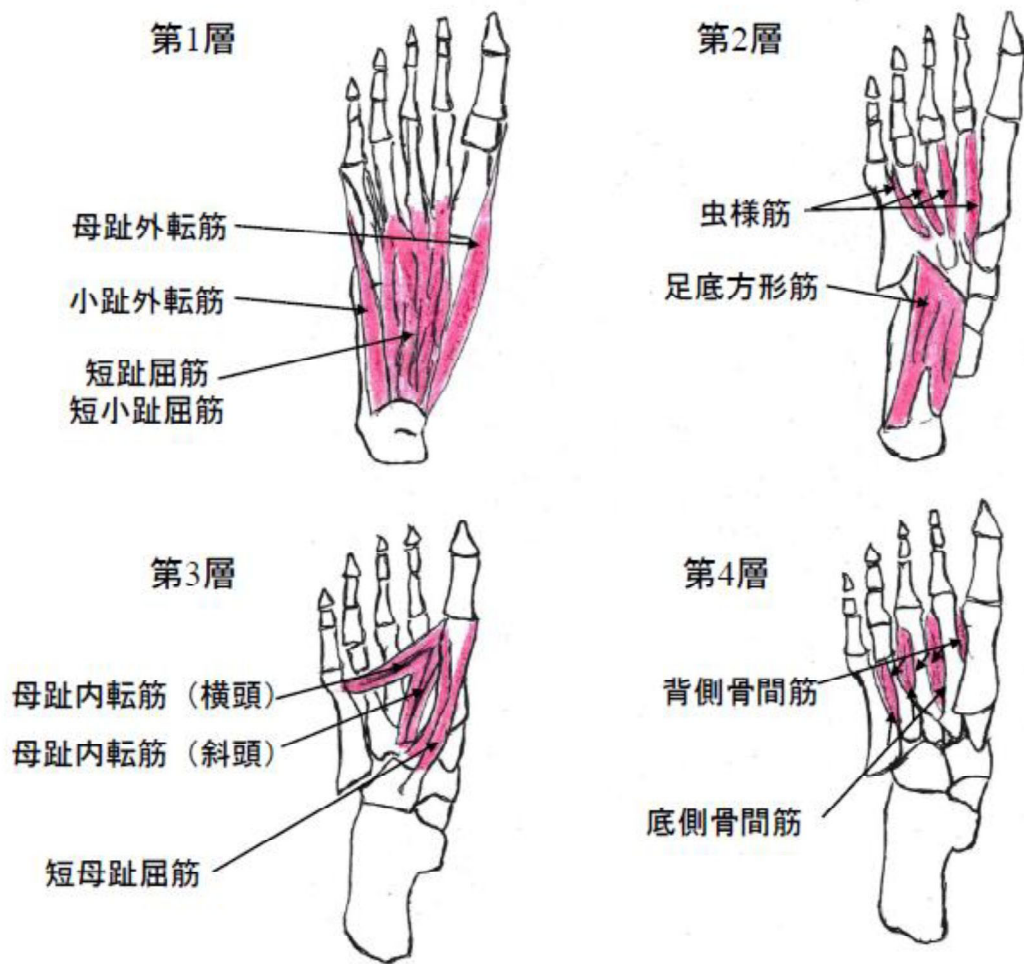


図 1.5 右足底側より見た足部内在筋の4つの層

1-2. 運動パフォーマンス

1-2-1. 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係

筋力と運動パフォーマンスとの関係については、これまでも数多くの研究が実施されてきている。それらの先行研究においては、主に大筋群が関与する股関節または膝関節のいずれか、或いはそれら複数の関節が関与する筋力が測定されてきた

(Johnson et al., 2001 ; Markovic., 2007 ; Newman et al., 2004 ; Young et al., 2002 ; Robertson et al., 1987) 。一方、足部は剛性のある単一のセグメントとしてモデル化され (Bezodis et al., 2008 ; 越野ら, 2012 ; 鳥海ら, 2002 ; Farley., 1998) , MPJ など下肢の最も遠位の関節で発揮される筋力と運動パフォーマンスとの関係については、ほとんど着目されてはこなかった。しかしながら、MPJ で発揮されるモーメントは足関節モーメントよりも小さいとはいえ (Roy et al., 2006) , 足部は走, 跳躍, 方向転換などの動作遂行に伴う負荷を最初に受ける身体部位である。したがって、MPJ で発揮される筋力は運動パフォーマンスと関連すると考えられ、その実態を明らかにすることを目的に、2015 年以降、足趾筋力とジャンプや 30–50 m スプリント走のパフォーマンスとの関係について検討した研究が散見されるようになる (表 1.1) 。ここでは、それら先行研究の知見を要約し、本論文の研究課題を明らかにする。

表 1.1 先行研究のレビュー：足趾筋力と運動パフォーマンスの関係

Author (year)	n	Participants	TMS	Performance	
			Plantar flexed	Speed	Jump
Morita et al. (2015)	301 M:146 W:155	8.6 ± 0.5yr	○	50m sprint (Overall : r=-0.17~-0.35 : P<0.05)	Broad jump (Overall : r=0.26-0.42 : p<0.01) Rebound jump (Overall : r=0.24-0.25 : p<0.01)
Otsuka et al. (2015)	161 M:85 W:76	14.1 ± 0.3yr	○	50m sprint (r=-0.40 : p<0.01)	Broad jump (r=0.37 : p<0.01)
Yamada et al. (2015)	M : 101	20.3 ± 0.5 yr	○	50m sprint (Bare foot, r=0.28 : p<0.01) (Shoes, r=0.30 : p<0.01)	
Shikanai et al. (2017)	86 M:43 W:43	Elementary school 4th -6th grade	○	50m sprint (r=-0.26~-0.33 : p<0.05)	
Uritani et al. (2017)	338 M:178 W:160	4.7 ± 0.6 yr	○	25m sprint (M, β =-0.14 : p<0.01, R ² =0.49) (W, β =-0.10 : p<0.01, R ² =0.45)	Broad jump (M, β =2.74 : p<0.01 : R ² =0.45) (W, β =3.26 : p<0.01 : R ² =0.38)
Ikeda et al. (2015)	153 M:71 W:82	4.4 ± 0.5 yr	○		Side jump (r=0.42 : p<0.01) Broad jump (r=0.36 : p<0.01)
Yun et al. (2016)	18	23.3 ± 2.5 yr	○		Counter movement jump (r=0.77 : p<0.001)

M : 男性, W : 女性, TMS (Toe muscular strength) : 足趾筋力,

Plantar flexed : 底屈位, β : 標準化偏回帰係数

1-2-2. 足趾筋力と跳躍パフォーマンスとの関係

ジャンプ動作は、短い踏切時間でどれだけ高く跳躍できるかというリバウンド型ジャンプと、どれだけ高く跳躍できるかというプレス型ジャンプに分類される。前者は跳躍高を踏み切り時間で除した値が、後者では跳躍高がそれぞれパフォーマンスの指標として求められている（金高ら，1998）。ドロップジャンプや連続リバウンドジャンプなどに代表されるリバウンド型の跳躍動作における運動遂行時間（踏切時間）は0.2秒程度であり、立ち幅跳びや垂直跳びなどのプレス型の踏切時間である0.5～1.0秒程度と比較して、足が地面へ着地してから離地するまでの時間が短い（遠藤ら，2007；金高ら，1998）。下肢の最も遠位に位置する前足部はMPJを有し、ジャンプ動作において足が離地する際に地面と接触している身体唯一の部分であり、足関節とMPJはそれぞれが独立に働くことが示唆されている（Stefanyshyn et al., 1998）。また、反復横跳びの回数や立ち幅跳びの距離は足趾筋力と有意な相関関係にあり（Otsuka et al., 2015）、MPJ底屈の主働筋である足趾底屈筋のトレーニングは、立ち幅跳びや垂直跳びのパフォーマンスを改善することが報告されている（Goldmann et al., 2013；Hashimoto et al., 2014）。さらに、一般人や中学生を対象にした研究では、足趾筋力とプレス型の跳躍パフォーマンス（立ち幅跳びや垂直跳び）との関係が明らかにされている（Goldmann et al., 2013；Hashimoto et al., 2014；Otsuka et al., 2015）。MPJで発揮されるモーメントは足関節モーメントよりも小さい（Bezodis et al., 2014；

Roy et al., 2006). しかし、連続リバウンドジャンプでは踵が着地することなく跳躍するため、その動作遂行にあたっては、前足部に位置する MPJ 周りで発揮される足趾筋力の貢献を無視できないと考えられる。しかしながら、アスリートを対象とした研究はなく、特に足趾筋力と連続的な切り返しを伴うリバウンド型の跳躍パフォーマンスとの関係性については、一般人あるいはアスリートのいずれにおいても検討されていない。

1-2-3. 足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係

スプリント走の立脚期において、足部内在筋は体重を継続的に支えており (Mann et al., 1979)、足趾筋力はスプリント走タイムと有意な相関関係を示すことが報告されている (Morita et al., 2015 ; Otsuka et al., 2015 ; 山田ら, 2015 ; 大森ら, 2011 ; 鹿内ら, 2017 ; Uritani et al., 2017)。また、足部内在筋のトレーニングは、50mスプリント走のタイムを有意に改善する (Hashimoto et al., 2014)。さらに、経験豊富なランナーを対象とした研究において MPJ の受動的なトルクは、ランニングエコノミーと負の相関関係にあることが報告されており、足趾底屈筋群の筋力の強さが立脚期の安定性、敏捷性を備えたより効果的で速い前進運動の実現に貢献していることが示唆されている (Man et al., 2016)。一方、ランニングパフォーマンスにおいて、より硬いソールを使用したシューズを着用した場合、MPJ はエネルギーを接地時に吸収する役割はある

が、離地時においてはほとんど生成しないことが報告されている (Stefanyshyn et al., 2000) . しかし、これらの先行研究の研究対象の多くは、一般人や成長期の子供であり、アスリートの足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係についての報告はない。また、スプリント走時に前足部が接地すると、MPJ は底屈位ではなく、背屈位になることから、スプリント走パフォーマンスに対する足趾筋力の寄与を検証するためには、MPJ が背屈位での足趾筋力を測定する必要がある。

しかしながら、Man et al. 以外の先行研究では足趾筋力を MPJ が底屈位で測定しており、また、Man et al. の研究においてもコンピューター制御のモーターによる MPJ 受動トルクの計測であり、MPJ が背屈位にある足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係については明らかになっていない。

1-3. 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係に関する先行研究の問題点

1-3-1. 足趾筋力の測定法

実際の運動時に前足部が接地面に触れると、MPJ は底屈位ではなく背屈位になる (Riley et al., 2013) . 足趾筋力の強さを決定する外在筋の筋長一力の関係は、MPJ と足関節の角度に依存することが示唆されており (Goldmann et al., 2012) , MPJ 背屈位にあるときに足趾筋力は最大になる。また、陸上選手を対象とした先行研究におい

て、裸足と非裸足条件におけるスプリント走では、接地から離地までにおける MPJ の関節モーメントおよび関節角度がそれぞれ異なり、関節モーメントと MPJ の背屈角度がそれぞれピークとなる時点では、裸足条件が $55.6 \pm 11.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ (平均値 \pm SD) , $51.5 \pm 3.5^\circ$ 背屈位、非裸足条件が $63.9 \pm 14.9 \text{ N} \cdot \text{m}$, $42.3 \pm 5.7^\circ$ 背屈位であると報告されている (Smith et al., 2014). したがって、競技条件が裸足条件から非裸足条件まで異なる競技者を対象にする場合、足趾筋力測定における関節角度を考慮する必要があると考えられる.

しかし、先行研究では足趾筋力は MPJ 底屈位である足趾屈力で測定されており、足趾筋力の最大能力を評価するのであれば、関節モーメントがピークとなる MPJ 背屈位における足趾押力で測定する必要がある。また様々な身体活動において、接地時における MPJ は底屈位ではなく背屈位になる。本博士論文の 3 章の結果より、足趾屈力と足趾押力との間に有意な差は認められず、また、中程度の相関関係が認められる ($r=0.55$, $P<0.05$) が、これらの測定方法における問題点を踏まえると足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係について検証するためには、MPJ 背屈位での足趾押力を測定する必要があると考えられる.

1-3-2. 測定対象者

先行研究において、足趾筋力とプレス型の跳躍パフォーマンス（立ち幅跳びや垂直跳び）（Goldmann et al., 2013 ; Hashimoto et al., 2014 ; Otsuka et al., 2015）, および足趾屈力と 50mのスプリント走タイム（Morita et al., 2015 ; Otsuka et al., 2015 ; 山田ら, 2015 ; 大森ら, 2011 ; 鹿内ら, 2017 ; Uritani et al., 2017）との間に有意な相関関係が認められている。しかし、先行研究の研究対象は一般人や成長期の子供であり、アスリートを対象にした研究はない。アスリートは実際のスポーツ動作において、様々な方向や様式で運動すること、また、短時間で素早く切り返す能力や俊敏なステップワークなどが競技中に要求されることから、これまで解明されていなかったアスリートの足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係について明らかにする必要がある。

1-3-3. 運動パフォーマンスの評価項目

これまでのところ跳躍パフォーマンスと足趾筋力との関係については、主に単発的なプレス型跳躍動作でのパフォーマンスの評価値に基づき検討されてきた。しかしながら、連続的な繰り返しリバウンド型の跳躍パフォーマンスと足趾筋力との関係については、一般人も含め検証した例はこれまでのところない。

また、フィールドスポーツ競技においては、競技中、動作の方向転換が頻繁に観察される。例えばサッカーでは、1試合あたり700回を超える方向転換が必要とされる

様々な状況が報告されており (Bloomfield et al., 2007) , バasketボールの試合においては, 2 秒に 1 回の頻度で切り替え動作が行われている (McInnes et al., 1995) . これらの知見は, フィールドスポーツ競技の場合に, 動作方向をすばやく転換する能力が速く走る能力や高く跳躍する能力と同じくらい重要であることを示唆するもの他にない.

方向転換走パフォーマンスに関する先行研究は, スクワットやスクワットジャンプ, レッグエクステンション, ドロップジャンプなどを用いて, 主に股関節, 膝関節および足関節といった下肢関節の筋力やパワーとの関係について検討されてきた

(Sassi et al., 2009 ; Markovic., 2007 ; Young et al., 2002) . しかし, それらの先行研究では, MPJ など下肢の最も遠位の関節回りの筋力については無視されてきた. MPJ の底屈モーメントは方向転換走の立脚後期に観察される (Riley et al., 2013) ことから, MPJ のモーメントは, 方向転換走の際に下肢の伸筋のより大きな力を接地面に伝達するのに重要な役割を果たす可能性がある.

1-4. 本研究の目的と概略

1-4-1. 目的

本研究は、アスリートにおける足趾筋力（足趾屈力および足趾押し力）と跳躍、スプリント走、方向転換走の各パフォーマンスとの関係について明らかにすることを目的とした。まず、裸足アスリートと非裸足アスリートを対象に足関節およびMPJの角度が足趾押し力に及ぼす影響を明らかにし（研究課題Ⅰ）、研究課題Ⅰの結果を基にした足趾筋力測定方法を用いて、アスリートにおける足趾筋力と跳躍（研究課題Ⅱ）、スプリント走（研究課題Ⅲ）および方向転換走（研究課題Ⅳ）の各パフォーマンスとの関係について検証した。

1-4-2. 本研究の構成

本研究は、緒言（第1章）、足関節およびMPJの角度が足趾押し力に及ぼす影響（第2章）、足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係（第3章）、総括論議（第4章）、結論（第5章）から構成される。

第1章：緒言

足部の解剖学的特徴および足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係について、先行研究における問題点を議論し、本博士論文の研究目的を設定した。

第2章：足関節およびMPJの角度が足趾押力に及ぼす影響（研究課題Ⅰ）

裸足アスリートと非裸足アスリートを対象に足関節およびMPJの角度が足趾押力に及ぼす影響を明らかにし、足趾押力の測定における足関節およびMPJの設定角度を決定することを目的とした。

第3章：足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係

3-1. 跳躍パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅱ）

アスリートの足趾筋力と跳躍パフォーマンスとの関係について明らかにすることを目的とし、MPJが底屈位の足趾屈力と背屈位の足趾押力を測定し、足趾筋力と跳躍パフォーマンスとの関係について検討した。

副論文：湯浅康弘，栗原俊之，積山和明，小澤翔，有賀誠司，小山孟志，伊坂忠夫：

アスリートにおける方向および様式の異なる跳躍能力と足趾筋力の関係

—足趾筋力発揮時の中足趾節関節角度に着目して—。（2019）．体力科学，

68(1)，83-90.

3-2. スプリント走パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅲ）

アスリートの足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係について明らかにすることを目的とし、MPJ が底屈位の足趾屈力と背屈位の足趾押力を測定し、直線スプリント走パフォーマンスとの関係について検討した。

3-3. 方向転換走パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅳ）

アスリートの足趾筋力と方向転換走パフォーマンスとの関係について明らかにすることを目的とし、MPJ が底屈位の足趾屈力と背屈位の足趾押力を測定し、方向転換走パフォーマンスとの関係について検討した。

副論文 : Yuasa Y, Kurihara T, Isaka T. Relationship between toe muscular strength and the ability to change direction in athletes. (2018). *Journal of Human Kinetics* 64, 47–55.

第 4 章：総括論議

以上の結果に基づいて、1) 足趾押力測定時の関節角度と力の関係、2) 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係および 3) 跳躍パフォーマンスに対する足趾押力および下肢関節トルクの貢献について総括的に考察した。

第 5 章：結論

本博士論文から得られた知見より，アスリートにおける足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係について結論した．

第2章 足関節およびMPJの角度が足趾押力に及ぼす影響（研究課題I）

2-1. はじめに

足趾屈筋群は、長母趾屈筋や長趾屈筋など筋腹が下腿にある外在筋と短趾屈筋や短母趾屈筋、足底方形筋、虫様筋など筋腹が足部にある内在筋によって構成される。これらの筋群で発揮される足趾屈力（Toe flexor strength）の大きさは、長母趾屈筋や長趾屈筋などの外在筋群の筋長-力関係を反映するため、足関節とMPJの角度の影響を受ける（Goldmann et al., 2012）。跳躍の離地時、方向転換の接地時にMPJは背屈位になることが観察されている（Riley et al., 2013）。しかし、従来 of 先行研究における足趾屈力の測定は、椅坐位で足関節底背屈位0°、MPJ底屈位とし足趾を牽引させる形で実施されてきた（Endo et al., 2002 ; Hashimoto et al., 2014 ; Otsuka et al., 2015）。

一方、MPJ背屈位での押力の測定は試みられておらず、それに対する足関節およびMPJの角度の影響は不明である。その点を明らかにすることは、足趾押力を測定する際の関節角度条件を決定するうえで重要である。

また、足趾屈力に関する先行研究では、一般人を対象に測定が実施されてきた。Lieberman et al., (2010) の報告によると、習慣的に裸足で走るランナーと靴を履いて走るランナーでは、ランニングの接地パターンにおいてキネマティクスとキネティクスが異なるといわれている。さらに、靴を着用した非裸足条件ではスプリント速度を

大幅に増加（平均 0.3m/s）させるが、MPJ の可動域が制限され（平均 17.9%減少）、ピーク背屈角速度が減少（平均 25.5%）する（Smith et al., 2014）。したがって、練習や試合において裸足が条件となるアスリートとそれ以外のアスリートでは、足趾押力発揮時における関節角度－力関係が異なることが予想される。

そこで本研究では、裸足アスリートと非裸足アスリートを対象に足関節および MPJ の角度が足趾押力に及ぼす影響を明らかにし、足趾押力の測定における足関節および MPJ の設定角度を決定することを目的とした。

2-2. 方法

2-2-1. 対象

対象は男子大学生アスリート 15 名であり、裸足競技群として日本拳法選手 8 名（年齢 20.5 ± 0.8 歳，身長 173.3 ± 6.6 cm，体質量 71.8 ± 10.1 kg，平均値 \pm 標準偏差），非裸足競技群としてレスリング選手 7 名（年齢 19.6 ± 1.3 歳，身長 170.1 ± 6.9 cm，体質量 77.6 ± 15.2 kg，平均値 \pm 標準偏差）とした。両競技種目の対象はいずれも競技歴が 4 年以上であり，全国大会および関西学生選手権入賞レベルのアスリートであった。

本実験を実施するにあたり，立命館大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の「人を対象とする研究倫理」の承認を受けた（BKC－人医－2015－002）。研究の実施

に先立ち、各対象者には文書および口頭で実験の目的、方法、本実験における危険や不利益およびその応急処置を含めた対応策、補償等の安全性に対する内容等について説明した後、全対象者より書面による実験参加の同意を得た。本研究では先行研究（甲斐ら、2007）を参考に、利き足についてはボールを蹴る足（機能脚）と定義した。なお、対象者全員が利き足は右足であった。

2-2-2. 研究プロトコール

すべての対象者に対して、身長、体質量、足長、母趾長、足関節可動域、足趾押力測定を実施した。

2-2-3. 測定項目

2-2-3-1. 身体測定

身長および体質量は、Tシャツ、ハーフパンツの着衣および裸足にて、身長計付き体重計（TANITA社製、WB-510）を用いて測定した。身長は0.1cm単位、体質量は0.1kg単位で測定した。

2-2-3-2. 足部形態（足長，母趾長）

足長および母趾長を足部形態として裸足で測定した。足長は，立位姿勢において定規を用いて，踵後端から最も長い足趾先端までの距離を測定した。母趾長については，母趾先端からMPJまでの距離を測定した。

2-2-3-3. 足関節可動域

足関節可動域は，先行研究（Nilsson et al., 2009）を参考に床の垂線に対する下腿の傾斜角度と定義した（図2.1）。対象は前足荷重位で足を前後に開き，ゴニオメーター（酒井医療社製，TTM-KO）を用いて後足足関節最大背屈位での下腿傾斜角度を裸足にて測定した。測定は，後足の踵が床面から離れていないこと，ならびに足部の回旋が生じないよう第2趾と踵部中央とを結ぶ線が真直ぐ前を向いていることを視認した後に実施した。

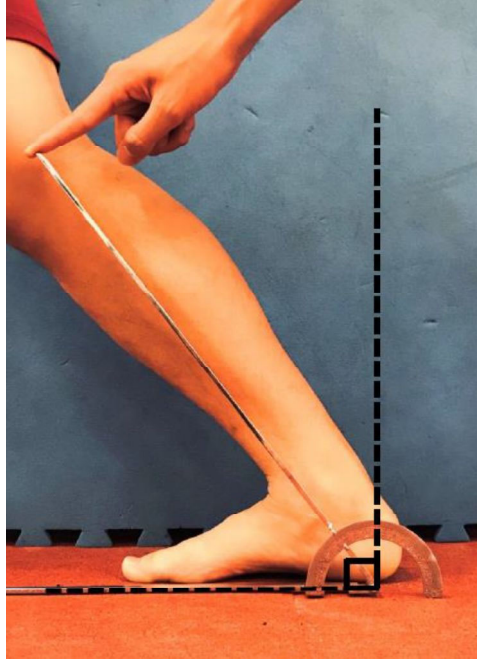


図2.1 足関節可動域の測定

ゴニオメーター（酒井医療社製，TIMKO）を用いて足関節可動域を測定した。前足荷重位で足を前後に開いた対象の脛骨に沿ってゴニオメーターをあて、後足足関節最大背屈位での下腿傾斜角度を測定した。

2-2-3-4. 足趾押力

足趾押力は、特注の足趾押力測定器（T.K.K.1268，竹井機器工業社製，日本）を用いて裸足にて測定した（図 2.2，図 2.3）。測定肢位は椅坐位（股関節および膝関節は 90°屈曲位）であり，測定時に対象者は胸の前で両腕を組んだ状態で，筋力発揮を実施した。足趾押力測定時の足関節ならびに MPJ の角度設定は足関節角度 3 通り（背屈位 20°，底背屈位 0°，底屈位 10°），MPJ 角度 3 通り（底背屈位 0°，背屈位 30°，背屈位 45°）とし，それらの合計 9 通りの組み合わせ（足関節背屈位 20°－MPJ 底背屈位 0°，足関節背屈位 20°－MPJ 背屈位 30°，足関節背屈位 20°－MPJ 背屈位 45°，足関節底背屈位 0°－MPJ 底背屈位 0°，足関節底背屈位 0°－MPJ 背屈位 30°，足関節底背屈位 0°－MPJ 背屈位 45°，足関節底屈位 10°－MPJ 底背屈位 0°，足関節底屈位 10°－MPJ 背屈位 30°，足関節底屈位 10°－MPJ 背屈位 45°）において測定を実施した（図 2.4）。測定の実施に際しては，測定用プレートの角度を調整後に固定し，3 回の練習を行わせ十分に休息させた後，最大努力の足趾押力を 3 秒間，左右の各足で 2 回ずつ発揮させた。測定用プレート面に対して垂直方向にかかった力を等尺性最大発揮筋力（Maximum voluntary isometric contraction : MVIC, kg）として記録した。左右の測定順は，エクセルのランダム関数を用いて対象者ごとにランダム化した。なお，各関節角度条件における筋力については，測定値を体質量で除した値を個人の代表値とした。

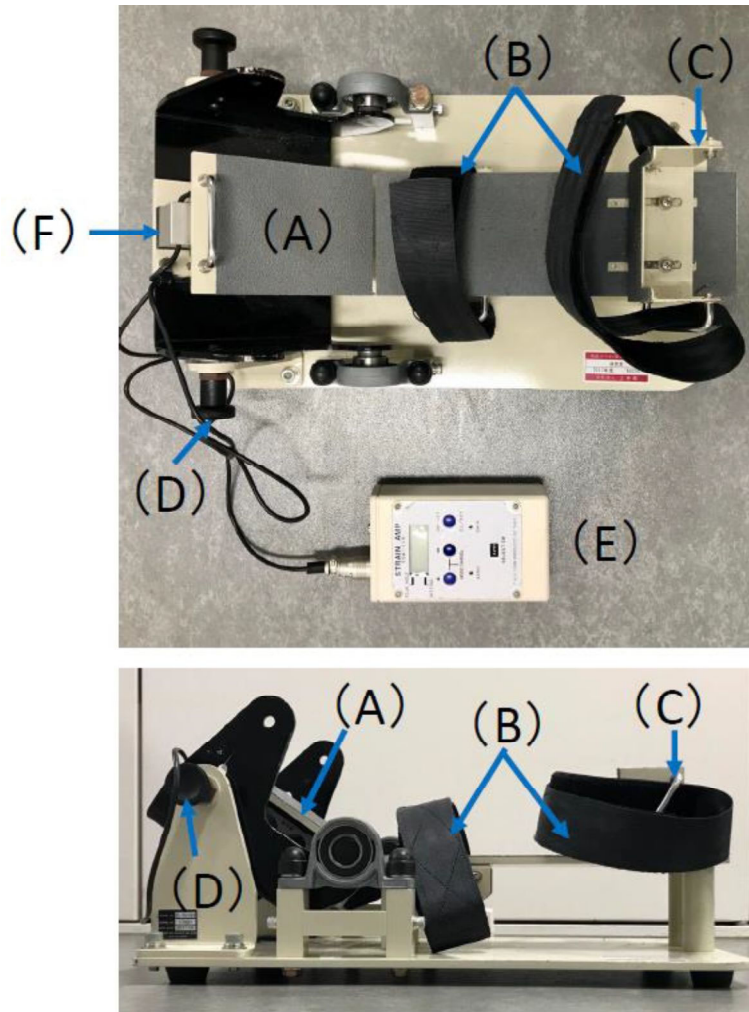


図 2.2 足趾押力測定器（竹井機器工業社製，T K K 1268）

(A) 測定用プレート（ 0° ～ 60° まで設定可能） (B) 足部固定用ストラップ

(C) 踵固定用プレート (D) 測定用プレート角度設定調節ピン

(E) ストレインアンプ（測定範囲： $0\sim 100\text{kgf}$ ，精度： $\pm 0.5\%FS$ 以下）

(F) ロードセル（定格出力 $1.0197\text{mV/V}\pm 15\%-0\%$ ，総合誤差 0.015% of R O）

寸法（W 265×（D）450×（H）225mm 重量 15.0kg

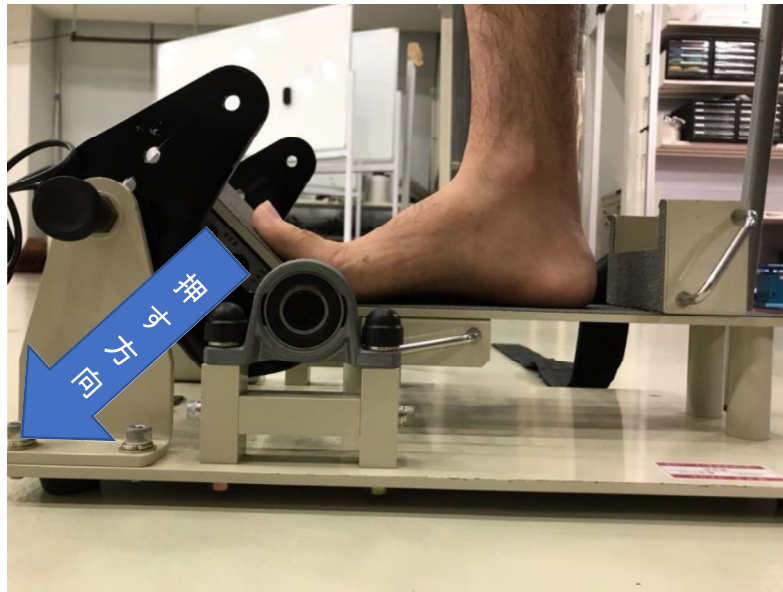
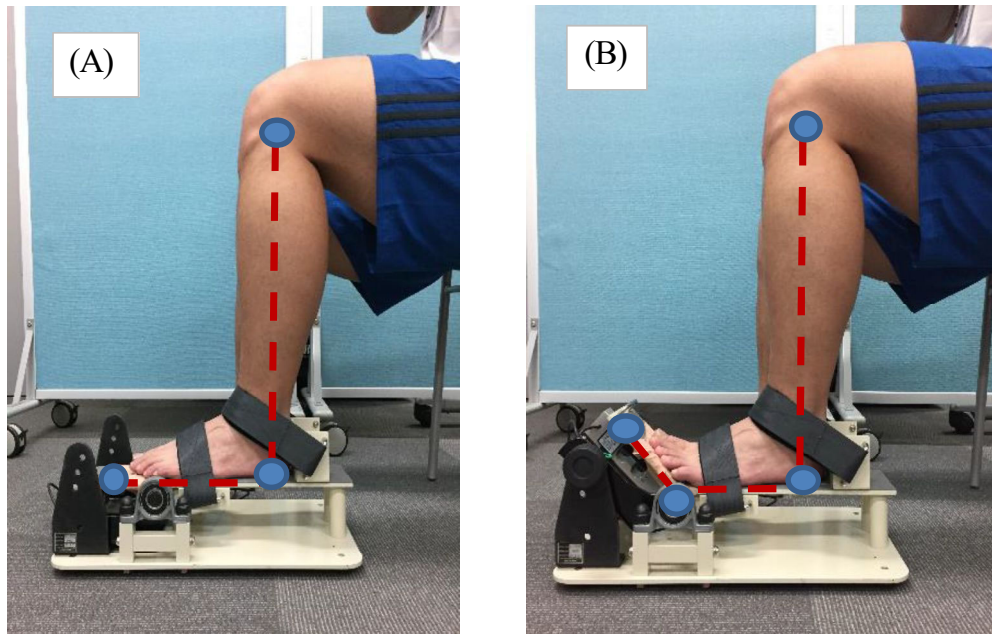


図 2.3 足趾押し測定における足部の位置



(A) 足関節底背屈 0° -MPJ 底背屈 0° (B) 足関節底背屈 0° -MPJ 背屈 45°

図 2.4 足趾押力測定における角度設定の例

特注の足趾押力測定器 (T. K K 1268, 竹井機器工業社製, 日本) を用いて足趾押力を測定した。足関節角度ならびに MPJ の角度の組合せについては, 足関節を 3 パターン (背屈位 20° , 底背屈位 0° , 底屈位 10°), MPJ を 3 パターン (底背屈位 0° , 背屈位 30° , 45°) の合計 9 通りの組み合わせにより足趾押力を測定した。

2-2-3-5. 統計解析

全ての測定値は、平均値±標準偏差により示した。足趾押力の試行間における検者内信頼性については、級内相関係数（intraclass correlation coefficient, ICC）（1, 2）で評価した。身体特性および足趾押力についてはKolmogorov-Smirnov検定にて正規性の検定を行なった後、左右の足趾押力について対応のある t 検定を行った。また、左右の差を評価するために効果量を算出した。t 検定の結果、関節角度の組合せに関係なく、足趾押力には左右差が認められなかった。対象者全員が利き足は右足であったことから、右足の測定値を個人の代表値として採用し、3元配置分散分析（群間×足関節角度3パターン×MPJ関節角度3パターン）を用いて解析を行なった。それらに交互作用、主効果が認められた場合、post-hocテストとしてBonferroni法を用いて多重比較検定を行なった。なお、統計解析にはSPSS software Ver.20（International Business Machines CoUSA）を用いて、いずれの場合においても統計解析の有意水準は危険率5%とした。

2-3. 結果

表 2.1 に身体測定，足部形態および足関節可動域の測定結果を示した．いずれの測定項目においても，有意な群間差および左右差は認められなかった．

表 2.2 には足趾押力の結果について示した．足趾押力における ICC は 0.57 から 0.97 の範囲であった．また，足趾押力の測定結果において，いずれの条件においても左右差は認められなかった．したがって，結果において左右の試行順に伴う偏りはなかったと判断し，足趾押力の群間差および関節角度間差については，右足の足趾押力を用いて検討した．

図 2.5 は，足関節および MPJ の異なる関節角度の組み合わせ条件における足趾押力を裸足競技群と非裸足競技群で比較したものである．足趾押力における平均値は，裸足競技群において足関節背屈位 20° -MPJ 背屈位 30° (2.88 ± 1.05 N/kg)，非裸足競技群では足関節背屈位 20° -MPJ 底背屈位 0° (3.28 ± 0.67 N/kg) において最大となった．3 元配置分散分析の結果，群間，足関節角度，MPJ 角度に有意な交互作用は認められず，足関節角度および MPJ 角度の両要因に有意な主効果が認められたことから，足関節角度および MPJ 角度それぞれを要因とする一元配置分散分析を行い，有意な主効果が認められた場合に post-hoc テストとして Bonferroni 法を用いて多重比較検定を行なった．

分析の結果，両要因に有意な主効果が認められた．多重比較検定の結果，足関節では背屈 20°条件 (2.76 ± 0.87 N/kg) および底背屈 0°条件 (2.55 ± 0.76 N/kg) が底屈 10° (2.20 ± 0.53 N/kg) よりも有意に高い値を示した．また，MPJ は底背屈 0°条件 (2.66 ± 0.78 N/kg) および背屈 30°条件 (2.56 ± 0.81 N/kg) が背屈 45°条件 (2.29 ± 0.67 N/kg) よりも有意に高い値を示した．

表 2.1 身長，体質量，足長，母趾長および足関節可動域における裸足競技群と非裸足競技群の比較

項目	裸足競技群 (n=8)	右 vs 左	非裸足競技群 (n=7)	右 vs 左	裸足競技群 vs 非裸足競技群
身長 (cm)	173.3 ± 6.6		170.1 ± 6.9		n.s.
体質量 (kg)	71.8 ± 10.1		77.6 ± 15.2		n.s.
足長 (cm)	右 25.6 ± 0.8	n.s.	25.4 ± 1.4	n.s.	n.s.
	左 25.8 ± 0.8		25.2 ± 1.4		n.s.
母趾長 (cm)	右 6.8 ± 0.6	n.s.	6.6 ± 0.3	n.s.	n.s.
	左 6.7 ± 0.6		6.7 ± 0.2		n.s.
足関節可動域 (°)	右 51.6 ± 5.7	n.s.	55.4 ± 5.7	n.s.	n.s.
	左 53.4 ± 6.6		55.9 ± 5.0		n.s.

平均値 \pm 標準偏差.

n. s.: Not significant.

表 2.2 足趾押力における裸足競技群と非裸足競技群の比較

足関節角度	MPJ角度	裸足競技群	P	ICC (1, 2)	非裸足競技群	P	ICC (1, 2)	d		
底屈 10°	0°	右	2.19 ± 0.42	n.s	0.68	2.41 ± 0.52	n.s	0.69	0.47	
		左	2.26 ± 0.78		0.87	2.55 ± 0.70		0.88	0.39	
	30°	右	2.09 ± 0.67	n.s	0.89	2.28 ± 0.52	n.s	0.76	0.31	
		左	1.93 ± 0.52		0.83	2.16 ± 0.46		0.86	0.47	
		右	2.13 ± 0.62	n.s	0.97	2.14 ± 0.51	n.s	0.72	0.02	
		左	1.93 ± 0.52		0.85	2.06 ± 0.55		0.58	0.24	
底背屈 0°	0°	右	2.67 ± 0.82	n.s	0.90	2.59 ± 0.76	n.s	0.93	0.10	
		左	2.18 ± 0.78		0.95	2.76 ± 0.74		0.78	0.76	
	30°	右	2.59 ± 0.93	n.s	0.83	2.61 ± 0.63	n.s	0.93	0.02	
		左	2.31 ± 0.72		0.82	2.54 ± 0.69		0.96	0.33	
		右	2.43 ± 0.81	n.s	0.94	2.41 ± 0.78	n.s	0.88	0.03	
		左	2.15 ± 0.76		0.93	2.40 ± 0.73		0.90	0.33	
	背屈 20°	0°	右	2.87 ± 1.04	n.s	0.87	3.28 ± 0.67	n.s	0.91	0.46
			左	2.57 ± 0.56		0.84	3.07 ± 0.98		0.89	0.64
		30°	右	2.88 ± 1.05	n.s	0.91	2.93 ± 0.78	n.s	0.91	0.05
			左	2.41 ± 0.83		0.82	2.87 ± 0.83		0.96	0.55
			右	2.32 ± 0.71	n.s	0.83	2.29 ± 0.73	n.s	0.95	0.04
			左	2.37 ± 0.83		0.95	2.78 ± 0.81		0.57	0.50

平均値 ± 標準偏差. d: effect size. n. s. : Not significant.

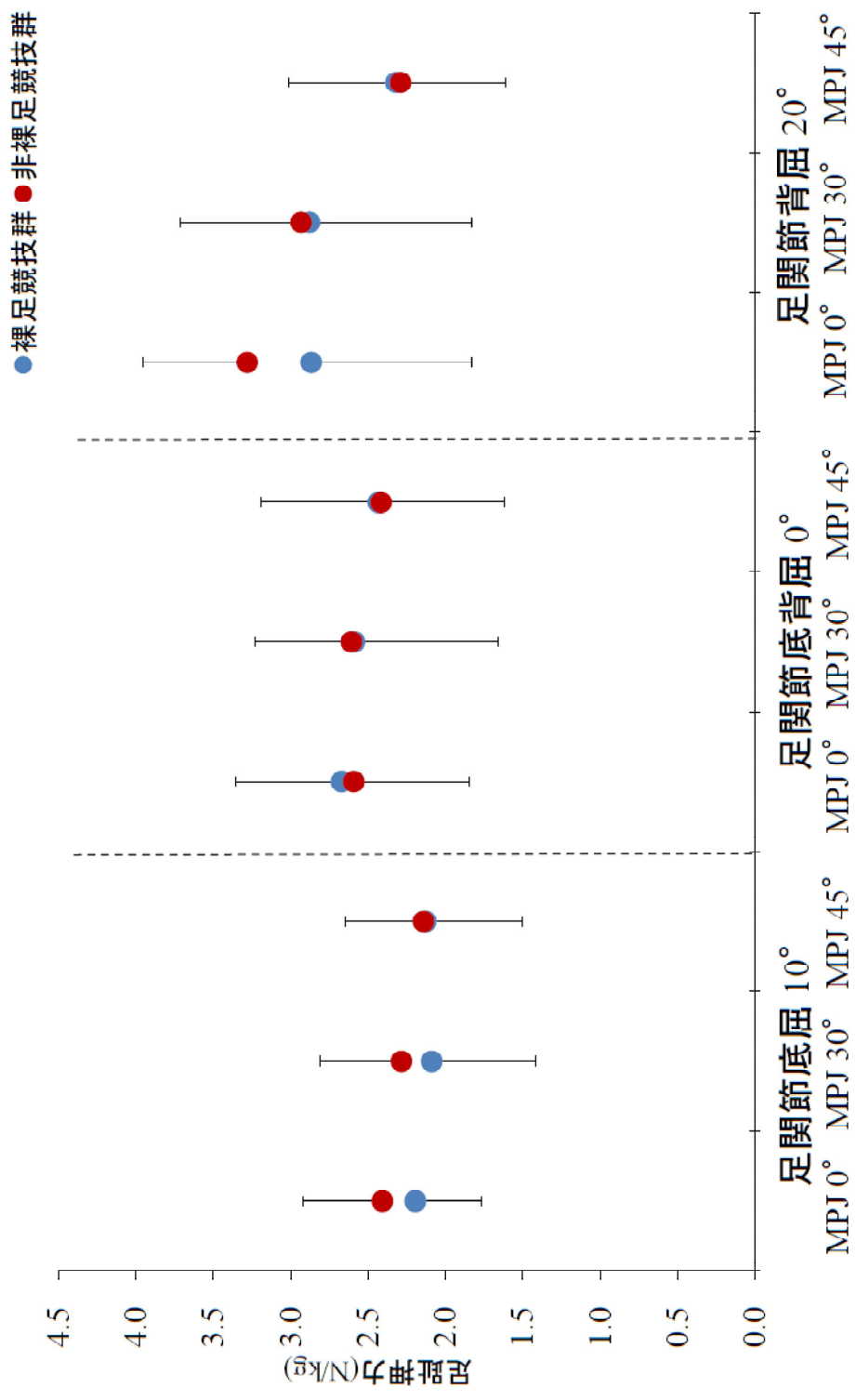


図 2.5 足関節およびMPJの異なる関節角度組み合わせ条件における足趾押力の裸足競技群と非裸足競技群の比較

2-4. 考察

本研究の結果、いずれの関節角度条件においても、足趾押力に競技種目による有意な主効果はなく、また競技種目と関節角度との交互作用も確認されなかった。このような結果は、競技活動中の靴着用の有無は、足趾押力の発揮水準および関節角度―足趾押力関係に影響を与えないことを示唆する。一方、足趾押力には足関節およびMPJの両関節角度の有意な主効果が認められ、その発揮水準は両関節角度の影響を受けることが明らかとなった。

靴を着用した非裸足条件でのスプリント走ではMPJの可動域が制限され、背屈角度の極大値が減少することが報告されている (Smith et al., 2014)。したがって、習慣的に裸足条件で競技を実施する者と非裸足条件を常とするアスリートでは、足趾押力発揮時における関節角度―力関係が異なることが予想された。しかし、本研究結果はそれを支持するものではなかった。歩行時において、硬い構造の靴底よりも柔らかい構造の靴底の方がMPJの背屈を引き起こしやすく、硬い構造の靴底は足趾の筋出力に影響を与えることが示唆されている (Bojsen-Møller et al., 1979)。本研究の非裸足アスリートとして採用したレスリング選手は、練習時および試合時において、素材が柔らかく、つま先が曲がり易い形状のレスリングシューズを着用している。そのようなシューズの着用は、競技活動中に裸足と同様な関節可動域での足趾の動きを可能にすると考えられ、その結果として、関節角度と足趾押力との関係に有意な群間差がもたら

されなかったと推察される。

本研究において、足趾押力は、足関節では背屈 20°条件が底屈 10°条件および底背屈 0°条件に比較して有意に高く、また MPJ では底背屈 0°条件および背屈 30°条件が背屈 45°条件より有意に高い値となった。足趾筋力に対する足関節の影響は先行研究においても認められており、足趾押力および足趾屈力は足関節底屈位よりも足関節底背屈 0°や 10°背屈位において高値となることが報告されている (Goldmann et al., 2012 ; 相馬ら, 2013) 。足関節の影響に関する本研究の結果は、それら先行研究の結果と一致する。一方で、本研究の結果は、仮に MPJ での力発揮に着目し、それにおける競技種目差やパフォーマンスとの関係を検討しようとするのであれば、測定時の足関節および MPJ の関節角度の設定に対象者間あるいは競技種目間で統一性を持たせることが必要であることを示唆するものといえる。

多人数を対象にした調査研究において足趾押力の測定を試みる場合に、測定時間の都合上、本研究のように多数の関節角度の組み合わせによるデータ採取は困難であり、特定の関節角度での測定を余儀なくされる。そのような場合、測定時の関節角度の組み合わせを決定する条件として、足趾押力が最大となり、かつ測定値の再現性が高いということがあげられる。本研究の結果において、足趾押力が最大となった関節角度の組み合わせは、裸足競技群が足関節背屈位 20°—MPJ 背屈位 30°、非裸足競技群が足関節背屈位 20° —MPJ 底背屈位 0°であった。しかし、足関節可動域が狭い測定対

象者にとって、足関節背屈位 20°での固定は非常に困難を伴った。一方、足関節背屈位 20°を含まない角度組み合わせ条件において、足趾押力が最大となった関節角度の組み合わせと有意差がなく、近似する力発揮が可能な角度条件は足関節底背屈位 0°条件であった。また、足関節底背屈位 0°条件で MPJ の角度を変化させた場合、最も ICC が高い角度は MPJ 背屈位 45°条件 (ICC : 0.94) であった。さらに、MPJ はスプリント走の離地直前に裸足条件において $51.5 \pm 3.5^\circ$ 背屈位、非裸足条件において $42.3 \pm 5.7^\circ$ 背屈位であることや (Smith et al., 2014)、方向転換走の離地時に右足 $38.1 \pm 10.1^\circ$ 背屈位、左足 $31.6 \pm 10.2^\circ$ 背屈位であると報告されている (Riley et al., 2013)。これらの点と本研究の結果を考え合わせると、仮に単一の関節角度組み合わせにより足趾押力の測定を実施することを想定した場合に、足関節底背屈位 0°—MPJ 背屈位 45°条件が足趾押力の測定時の関節角度設定になると考えられる。

本研究では、足趾押力測定時の母趾 MPJ の角度をゴニオメーターにて測定し、測定用プレートの設定角度との整合性を確認した。しかし、レントゲン撮影等による関節角度の確認は実施していない。また、測定機器の構造上、足趾が短い対象者は、第 5 趾が測定用プレート上に届かない場合もあった。本研究における足趾押力の測定は、それらを限界点として持つ。

2-5. 小括

研究課題 I では、足趾押力発揮時における関節角度－力関係が異なることが予想される裸足アスリートと非裸足アスリートを対象に、足関節および MPJ の異なる角度の組み合わせにおいて足趾押力を測定し、本博士論文の研究課題で用いる足趾押力測定時の関節角度を決定することを目的とした。

本研究の主な結果は以下の通りであった。

- 1) 足趾押力には、いずれの関節角度組合せ条件においても両群間に有意差は認められず、競技種目と関節角度条件との間に有意な交互作用は存在しなかった。
- 2) 足趾押力は、足関節および MPJ の両関節角度の影響を受け、足関節では背屈 20°条件が底屈 10°条件および底背屈 0°条件に比較して有意に高く、また MPJ では底背屈 0°条件および背屈 30°条件が背屈 45°条件より有意に高い値となった。
- 3) 測定の再現性は、足関節底背屈位 0°条件では MPJ 背屈位 45°条件 (ICC : 0.94) で最も高くなった。

以上の結果と実際の運動時の MPJ の角度に関する先行知見を考慮に入れ、足関節角度底背屈位 0°および MPJ 角度 45°の組み合わせを、本論文における足趾押力の測定時の関節角度設定条件として決定した。

第3章 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係

3-1. 跳躍パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅱ）

3-1-1. はじめに

下肢の最も遠位に位置する前足部は MPJ を有し、MPJ 周辺で出力される足趾筋力と跳躍パフォーマンスとの関係については、これまでのところ単発的なプレス型の跳躍動作を対象に検討されてきた（Goldmann et al., 2013 ; Hashimoto et al., 2014 ; Otsuka et al., 2015）. 一方、連続的な繰り返しリバウンド型のジャンプパフォーマンスと足趾筋力との関係については、一般人も含め検証した例はない. また、踏切動作中の MPJ は背屈位であることから（Riley et al., 2013）, MPJ が背屈位での足趾押力は底屈位での足趾屈力よりも跳躍パフォーマンスに強く関連すると予想される.

本研究では、アスリートおよび一般人を対象にした測定結果に基づき、1) 跳躍方向の異なるプレス型および連続的な繰り返しリバウンド型の跳躍パフォーマンスと足趾筋力との関係、および2) プレス型および連続的な繰り返しリバウンド型の跳躍パフォーマンスと足趾筋力との関係に、足趾筋力測定時の MPJ 角度が及ぼす影響について明らかにすることを目的とした.

3-1-2. 方法

3-1-2-1. 対象

対象は、男子大学生 32 名（年齢 20.5 ± 1.4 歳）であり、アスリート群 24 名（バレーボール部所属選手 10 名，ライフセービング部所属選手 7 名，トライアスロン部所属選手 7 名，年齢 20.1 ± 1.1 歳，身長 175.6 ± 10.1 cm，体質量 68.1 ± 9.4 kg，平均値 \pm 標準偏差），対照群 8 名（年齢 21.6 ± 1.6 歳，身長 172.8 ± 5.4 cm，体質量 79.2 ± 8.1 kg，平均値 \pm 標準偏差）とした。アスリート群のすべての対象者は競技歴が 2 年以上であり，全国大会上位入賞レベルのアスリートであった。アスリート群の競技種目は，競技中に高い跳躍パフォーマンスが要求される球技種目系アスリート（バレーボール），裸足で瞬発的なパフォーマンスが要求される複合種目系アスリート（ライフセービング），跳躍パフォーマンスが主要な競技要素とならない持久系種目系アスリート（トライアスロン）であった。いずれのアスリート群も足趾に特化したトレーニングは行っていなかった。対照群は，定期的な運動を行っていないものとした。本実験を実施するにあたり，立命館大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の「人を対象とする研究倫理」の承認を受けており（BKC-人医-2017-013），各対象者に対して文書および口頭で実験の目的，方法，本実験における危険や不利益およびその応急処置を含めた対応策，補償等の安全性に対する内容等について説明した後，すべての

対象者より書面によって実験参加の同意を得たうえで実施した。本研究では先行研究（甲斐ら，2007）を参考に、利き足についてはボールを蹴る足（機能脚）と定義した。なお、対象者全員が利き足は右足であった。

3-1-2-2. 研究プロトコール

すべての対象者に対して、身体測定、足趾筋力測定（足趾屈力、足趾押し力）、跳躍パフォーマンス指標の測定（連続リバウンドジャンプ、ホッピング、垂直跳び、立ち幅跳び）を実施した。跳躍パフォーマンス指標に関する全ての測定は、足趾筋力測定と同日に実施した。足趾筋力は足趾屈力と足趾押し力を測定した。得られた結果より、跳躍方向の異なるプレス型およびリバウンド型の跳躍パフォーマンスと足趾筋力との関係、およびそれらの関係に足趾筋力測定時の MPJ 角度が及ぼす影響について検討した。

3-1-2-3. 測定項目

3-1-2-3-1. 身体測定

身体測定については、2-1. 足関節および MPJ の角度が足趾押し力に及ぼす影響における身体測定の方法 2-2-3-1. と同一の手順により実施した。

3-1-2-3-2. 足趾筋力（足趾屈力、足趾押力）

足趾筋力の評価には、足趾屈力および足趾押力の測定を裸足で実施した。足趾屈力は、足趾屈力測定器（T.K.K.3361、竹井機器工業社製、日本）を用いて（図 3.1, 図 3.2）、足趾底屈位で測定した（Morita et al., 2015, Otsuka et al., 2015）。測定肢位は椅坐位（股関節および膝関節は 90°屈曲位）であり、測定時に対象者は胸の前で両腕を組んだ状態で、筋力発揮を実施した。MPJ がグリップバーの位置に合うように測定器の踵固定用プレートを調節し、3 回の練習を行わせ十分に休息させた後、DIP, PIP および MPJ を屈曲させ、足趾でグリップバーを把持させた状態により最大努力で 3 秒間、左右の各足で 2 回ずつ牽引させた。グリップバーの水平方向に掛かった力の最大値を測定値とした（図 3.3A）。足趾押力は、研究課題 I で使用した特注の足趾押力測定器（T.K.K.1268、竹井機器工業社製、日本）を用い測定した（Yuasa et al., 2018）。測定肢位は、足趾屈力と同様の椅坐位姿勢とした。測定用プレートの角度を 45°に調整した後固定し、3 回の練習を行わせ十分に休息させた後、足趾で測定用プレートを最大努力で 3 秒間、左右の各足で 2 回ずつ押させた。測定用プレート面に対して垂直方向にかかった力を等尺性最大発揮筋力（MVIC, kg）として記録した（図 3.3B）。足趾屈力および足趾押力は、左右足の測定順についてエクセルのランダム関数を用いて対象者ごとにランダム化した。なお、相対的評価を行うために測定値を体質量で除した値を算出して用いた。

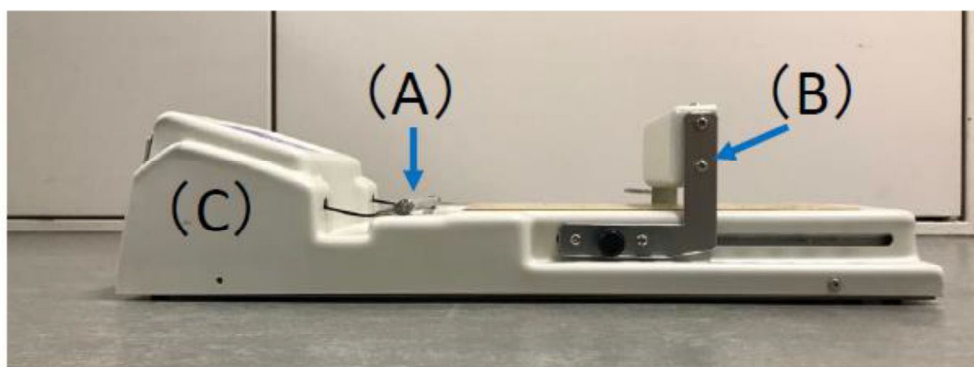
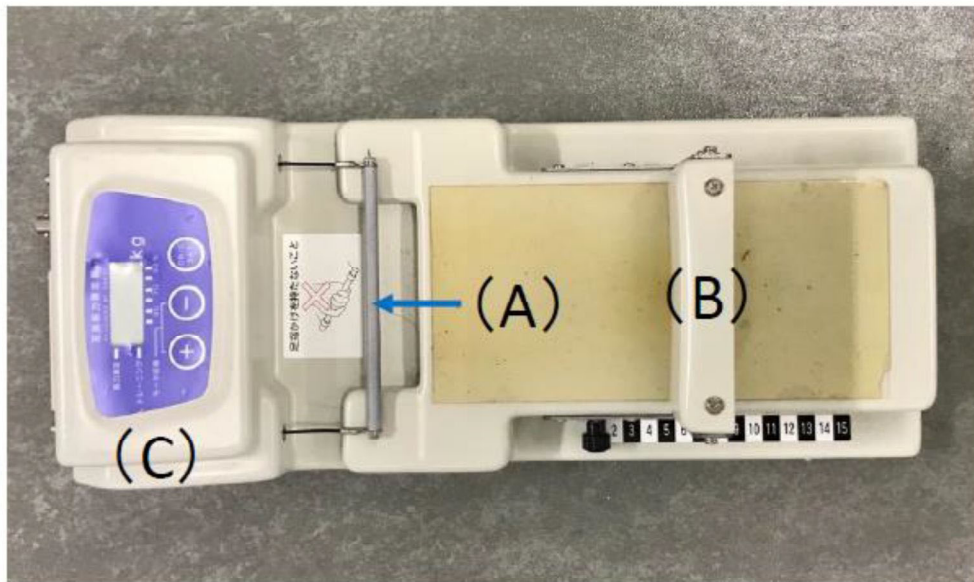


図 3.1 足趾屈力測定器 (T. K K 3361, 竹井機器工業社製, 日本)

(A) グリップバー (B) 踵固定用プレート

(C) ひずみゲージ式ロードセル (測定範囲 : 0.5~80kgf, 精度 : $\pm 0.2\%$ FS 以下)

寸法 (W 200× (D) 480× (H) 110mm 重量 4.0kg

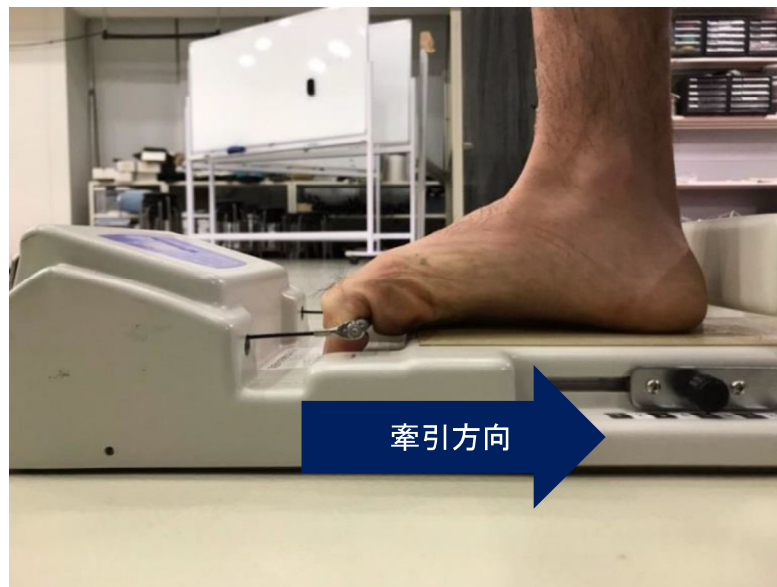


図 3.2 足趾屈力測定における足部の位置

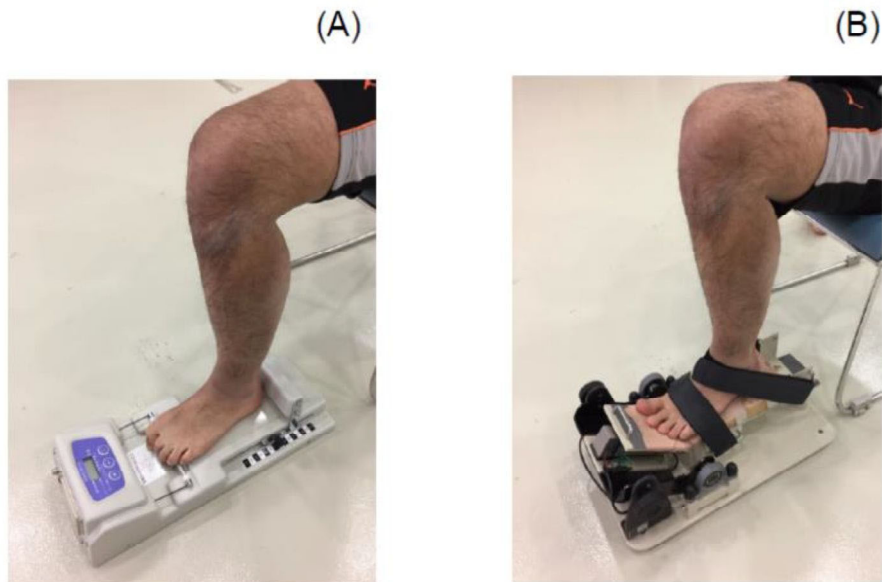


図 3.3 足趾筋力測定

足趾屈力 (A).

測定には足趾屈力測定器 (T. K K 3361, 竹井機器工業社製, 日本) を用いて足趾屈力を測定した. 対象者は, 足関節を底背屈中間位 0° とした状態で足趾をグリップバーに置き, MPJ が底屈位となる足趾屈力を測定した.

足趾伸力 (B).

測定には研究課題 I で使用した足趾伸力測定器 (T. K K 1268, 竹井機器工業社製, 日本) を用いて足趾伸力を測定した. 対象者は, 足関節を底背屈中間位 0° とした状態で, MPJ 背屈位 45° に設定した足趾伸力の測定を行った.

3-1-2-3-3. 跳躍パフォーマンス指標

4種の跳躍動作による跳躍パフォーマンスの測定は、いずれも裸足で行った。各テストを実施するにあたり、全ての対象者は全身への5分間の静的ストレッチおよび5分間の動的ストレッチを行った。

3-1-2-3-3-1. 連続リバウンドジャンプ（リバウンド型・垂直）

連続リバウンドジャンプは、マットスイッチ計測システム（マルチジャンプテスト，ディケイエイチ社製，日本）を用いて測定した。跳躍試技については，先行研究（遠藤ら，2007）を参考に，任意の自由なリズムの条件にて両足接地の立位姿勢から連続10回の跳躍を実施した（図3.4）。実施の際には，可能な限り短い接地時間で高く跳び上がるように指示した。また，腕の振り込み動作の影響を除外するために，跳躍の際には両手を腰に当てて実施した。滞空時間（air time: ta）と接地時間（contact time: tc），重力加速度（gravitational acceleration: $g=9.8\text{m/s}^2$ ）から跳躍高（h） $= 1/8 \cdot g \cdot \text{ta}^2$ を算出し，次に跳躍高を接地時間で除すことによって，筋の伸張-短縮サイクル（Stretch-Shortening Cycle: SSC）の評価法として用いられているリバウンドジャンプ指数（RJ-index = h / tc）を算出した（遠藤ら，2007）。連続10回のリバウンドジャンプを1試技のみ行い，10回の跳躍のRJ-Indexのうち最大値を測定値として採用した。

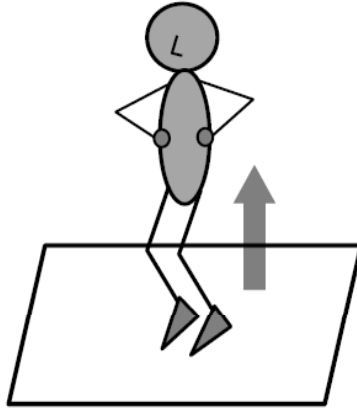


図3.4 連続リバウンドジャンプ

マットスイッチ計測システム上で、対象者は任意の自由なリズムの条件にて両足接地の立位姿勢から連続10回の跳躍を行った。

3-1-2-3-3-2. ホッピング（リバウンド型・水平）

ホッピングは、床面上に 30 cm幅（内幅 20 cm）になるように5 cm 幅のラインテープを用いて2本の平行なラインを施し、それを用いて測定した。跳躍試技については、先行研究（Gustavsson et al., 2006）を参考に、対象者は「用意，スタート」の合図でライン間を超えるように、両足で前後方向に連続10回のホッピングを行い、ストップウォッチを用いてその所要タイムを測定した（図3.5）。実施において腕の振り込み動作は制限せずに、一度でもラインを踏み越えなかった場合には、30秒後に再度測定を行った。1つの測定が終了したら、1分以上の休息後、次の測定を行った。測定は2回行い、最も良かったタイムを測定値として採用した。

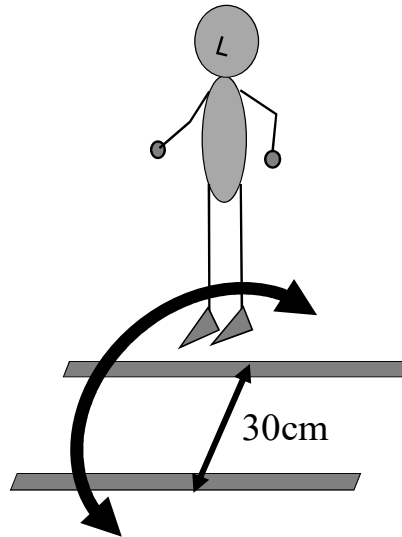


図 3.5 ホッピング

床面上に 30 cm幅（内幅 20 cm）になるように 5 cm幅のラインテープを用いて 2本の平行なラインを施した。対象者はライン間を超えるように、両足で前後方向に連続 10 回のホッピングを行った。

3-1-2-3-3-3. 垂直跳び（プレス型・垂直）

垂直跳びは、マットスイッチ計測システム（マルチジャンプテスト，ディケイエイチ社製，日本）を用いて測定した．跳躍試技については，先行研究（図子ら，1995）を参考に，反動動作を用いずに全力で跳躍する垂直跳びを実施した．本研究においては，腕振り動作の影響を除外するため両手を腰に当て，ゴニオメーター（TTM-KO，酒井医療株式会社製，日本）を用いて膝を 90° 屈曲させた状態を確認してから跳躍させた（図 3.6）．試行は 2 回とし，各試技における滞空時間から跳躍高を算出し，最大値を測定値として採用した．

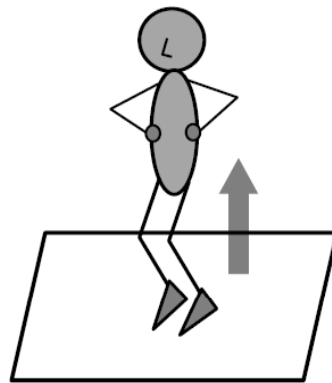


図 3.6 垂直跳び

マットスイッチ計測システム上で対象者は両手を腰に当て，膝を 90° 屈曲させた状態を確認してから跳躍を実施した．

3-1-2-3-3-4. 立ち幅跳び（プレス型・水平）

立ち幅跳びは、床の上に貼付したスタートラインより測定を行った。跳躍試技については、先行研究（Goldmann et al., 2013）を参考に、両足が地面に接地した状態から全力で前方に跳躍した。本研究においては、両足接地の立位姿勢でスタートラインより腕の振り込み動作は制限せず、助走は用いずに裸足で跳躍させた（図 3.7）。スタートラインより最も近い着地点（踵）までの距離を測定した。試行は 2 回測定し、最大値を測定値として採用した。

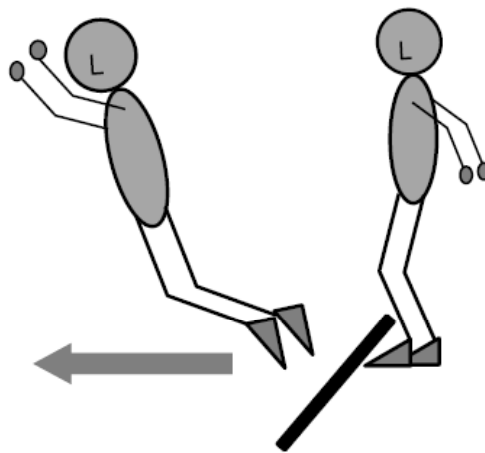


図 3.7 立ち幅跳び

対象者は両足接地の立位姿勢でスタートラインより、腕の振り込み動作は制限せず、助走は用いずに跳躍を実施した。

3-1-2-3-4. 統計解析

全ての測定値は、平均値±標準偏差で示した。足趾筋力と跳躍パフォーマンスの検者内信頼性については、級内相関係数 ICC (1, 2) で評価し、十分な再現性が確認されたのちに、各測定項目における対象者群間の比較には対応のない t 検定を行った。また、群間の差を評価するために効果量を算出した。その結果、足趾筋力の左右差は認められなかった。足趾筋力と跳躍パフォーマンスとの相関関係については、足趾筋力測定の左右各 2 試技のうちの最大値と、各跳躍テストの最高および最速の測定値を採用した。すべてのテスト変数（足趾屈力、足趾押し力、連続リバウンドジャンプ、ホッピング、垂直跳び、立ち幅跳び）の関連性の検討には、ピアソンの積率相関係数を求めた。なお、有意差検定および相関係数の算出については、バレーボール選手、ライフセービング選手、トライアスロン選手をまとめてアスリート群として算出した。統計解析には SPSS software Ver.20 (International Business Machines Co., USA) を用いて、いずれの場合においても統計解析の有意水準は危険率 5%とした。

3-1-3. 結果

表3.1に対象者群別における身体特性，各条件における足趾筋力，各跳躍パフォーマンス指標の結果を示した。

足趾筋力および跳躍パフォーマンス指標の級内相関係数ICC（1，2）は，それぞれ0.87–0.97および0.62–0.94の範囲であり，それらの再現性は対照群の立ち幅跳び

（ICC=0.62）を除き全体的に良好（Jackson et al., 1980）と判断できるものであった。

足趾筋力は，足趾屈力および足趾押力の各条件において群間に有意な差は認められなかった。跳躍パフォーマンスでは，ホッピングにおいて有意な群間差が認められたが（ $P<0.05$ ），他の項目については群間に有意差は認められなかった。

表3.2に対象者群別における足趾筋力と各種の跳躍パフォーマンス指標との相関係数を示した。アスリート群においては，足趾押力とホッピングおよび連続リバウンドジャンプとの間にそれぞれ有意な相関関係が認められた（ $P<0.05$ ）（図3.8および図3.9）。

一方，足趾屈力は，いずれの跳躍パフォーマンス指標項目とも有意な相関関係を示さなかった。対照群については，いずれの足趾筋力と跳躍パフォーマンス指標項目との間に有意な相関関係は認められなかった。

表 3.1 対象者群別の身体測定, 足趾筋力, 跳躍パフォーマンス指標の結果

	アスリート群 (n=24)		対照群(n=8)		対象者群間 <i>p</i>	<i>d</i>
	平均値 ± 標準偏差		平均値 ± 標準偏差			
身長 (cm)	175.6 ± 10.1		172.8 ± 5.4		n.s.	
体質量 (kg)	68.1 ± 9.4		79.2 ± 8.1		n.s.	
足趾屈力 (N/kg)	右	1.89 ± 0.45	1.54 ± 0.35	n.s.	0.82	
	左	1.90 ± 0.49	1.65 ± 0.57	n.s.	0.49	
足趾押力 (N/kg)	右	3.05 ± 0.85	2.63 ± 0.74	n.s.	0.51	
	左	2.91 ± 0.95	2.49 ± 0.74	n.s.	0.46	
リバウンドジャンプ (m/s)	1.75 ± 0.50		1.71 ± 0.48		n.s.	0.08
ホッピング (sec)	2.92 ± 0.59		2.44 ± 0.27		*	0.90
垂直跳び(cm)	33.3 ± 5.7		34.5 ± 6.3		n.s.	0.21
立ち幅跳び (cm)	236.3 ± 27.3		228.8 ± 17.5		n.s.	0.30

* : $P < 0.05$. *d*: effect size. n.s. : Not significant.

表 3.2 足趾筋力と跳躍パフォーマンス指標の関係

跳躍方向および様式		水平方向跳躍		垂直方向跳躍	
		リバウンド型	プレス型	リバウンド型	プレス型
		ホッピング	立ち幅跳び	連続リバウンドジャンプ	垂直跳び
足趾屈力	アスリート群	$r = -0.23$	$r = -0.07$	$r = 0.20$	$r = 0.37$
	対照群	$r = 0.09$	$r = -0.01$	$r = 0.28$	$r = -0.10$
足趾押力	アスリート群	$r = -0.55^*$	$r = 0.25$	$r = 0.40^*$	$r = 0.24$
	対照群	$r = 0.08$	$r = 0.53$	$r = -0.15$	$r = 0.53$

* : $P < 0.05$.

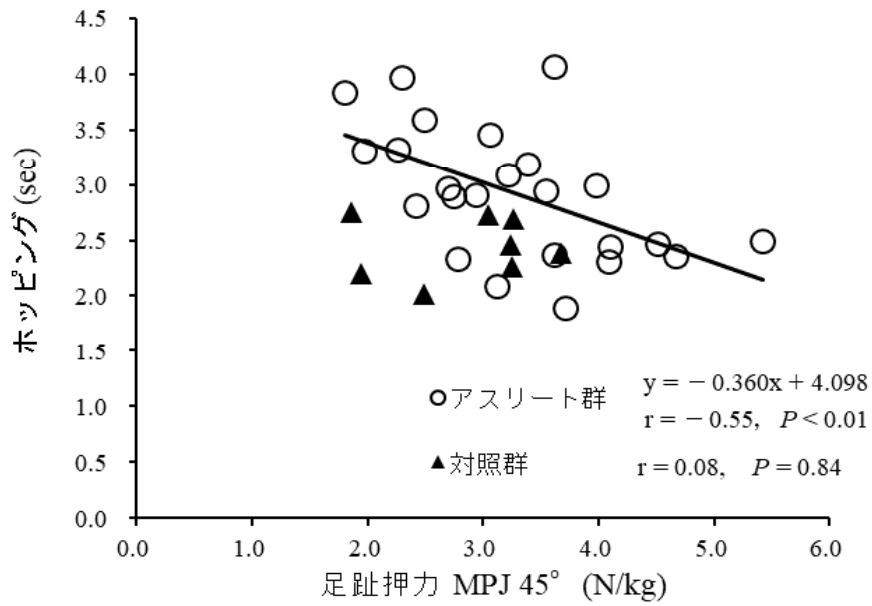


図 3.8 MPJ 45° の足趾押し力とホッピングの関係

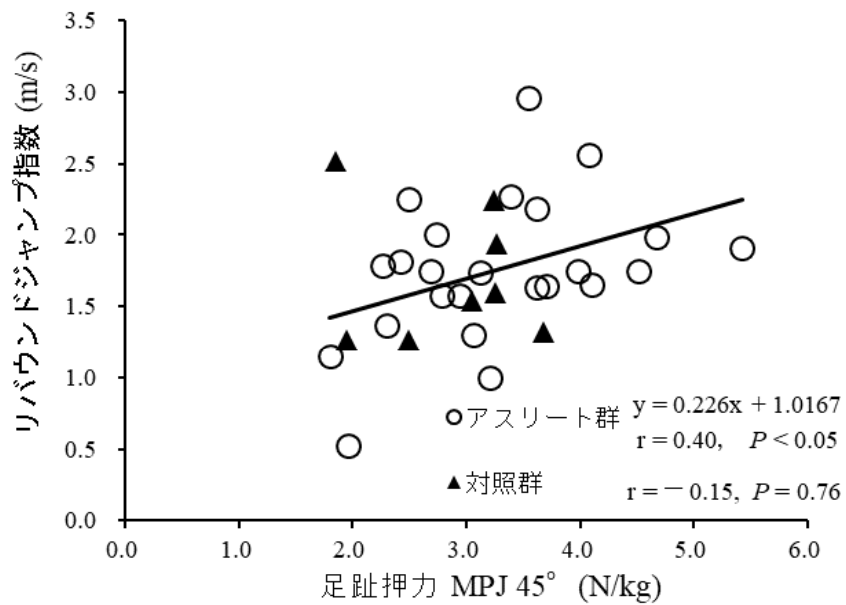


図 3.9 MPJ 45° の足趾押し力と連続リバウンドジャンプの関係

3-1-4. 考察

本研究では、まず跳躍方向の異なるプレス型およびリバウンド型の跳躍動作でのパフォーマンスと足趾筋力との関係について検討した（研究目的1）。その結果、アスリート群において、足趾押力と連続リバウンドジャンプおよびホッピングの各パフォーマンスとの間に有意な相関関係が認められた。

跳躍動作は、リバウンドジャンプに代表される運動遂行時間（踏切時間）の短い（0.2秒以内）跳躍動作と立ち幅跳びや垂直跳びなどのプレス型に代表される踏切時間の長い（0.2秒以上）跳躍動作に分類される（遠藤ら，2007；金高ら，1998）。それらのいずれの跳躍動作においても、高いパフォーマンスを発揮するためには短時間に大きな地面反力を獲得することが重要となることから（荻山ら，2016），下肢3関節が同時に動員される脚伸展力と跳躍動作の成績に関係があることが報告されている（図子ら，1995）。それに対し、本研究の結果は、足趾押力もリバウンド型の跳躍パフォーマンスに影響を及ぼしうることを示唆するものといえる。

足趾押力発揮時のように、MPJが背屈することにより、足底腱膜が中足骨頭の周りに巻きつけられる Windlass mechanism と呼ばれる作用が起こる。（Kappel-Bargas et al., 1998）。この作用は、巻き上げられた足底腱膜が緊張することにより、足部の剛性が高められ（Hicks., 1954）、荷重位における足部の Truss mechanism により足底腱膜の張力が増強されることで、前足部における大きな力発揮を接地面に伝達するといわれ

ている (Erdemir et al., 2004). 跳躍動作において, MPJ は接地および離地時に背屈位である (Riley et al., 2013) ことから, MPJ が受動的に背屈することで足部外在筋が伸張して足部の剛性を高めていると考えられる. また, 連続リバウンドジャンプにおいて下肢の剛性は, 足関節の剛性に大きく依存することが示唆されている (Farley et al., 1999). 足関節の剛性は, 下腿三頭筋の伸張反射のような短時間における筋活動の変化によって制御されており (Hobara et al., 2007), 着地時の関節角度の変化によっても影響を受ける (Farley et al., 1998). これらのことから, 接地および離地時ににおいて足部や足関節は剛性を高めることにより, 足趾押力の発揮を最大限促進し, エネルギーロスを最小限にすることで (Stefanyshyn et al., 1998), リバウンド型の跳躍パフォーマンスの遂行能力を高めていることが考えられ, そのことが結果的に足趾押力とリバウンド型跳躍パフォーマンスとの有意な相関関係を生む要因の一つとなっていると推察される.

プレス型の跳躍パフォーマンスにおいては, 両群ともに垂直跳びおよび立ち幅跳びの成績といずれの足趾筋力との間に有意な相関は認められなかった. プレス型跳躍の垂直跳びにおいて, 下肢全体の仕事量に対する各関節の仕事量の割合は, 股関節40.0%, 足関節35.8%, 膝関節24.2%であると報告されている (Robertson et al., 1987). したがって, プレス型跳躍においては股関節, 膝関節, 足関節を同時に動員する脚伸展動作での力発揮が跳躍パフォーマンスに影響した可能性が高く, 関節角度

条件に係わらず足趾筋力の貢献度が低かったと考えられ、結果的にプレス型の跳躍パフォーマンスと足趾筋力との間に相関関係が認められなかったと推察される。一方、14～15歳の若年者を対象とした先行研究の結果によると、立ち幅跳びの跳躍距離と足趾屈力との間に有意な相関関係が示されているが（Otsuka et al., 2015）、平均的な運動能力の若年者（中学生）を対象とした先行研究に対して、本研究のアスリート群の選手は短時間に前足部のみで接地するような動作を競技の中で繰り返すことによって、MPJが底屈位で筋力発揮する足趾屈力よりも背屈位で筋力発揮する足趾押しの方が影響を与えたと考えられ、また、プレス型跳躍よりもリバウンド型跳躍のパフォーマンス遂行能力に影響を与えたと示唆される。

本研究では、第2の目的として、異なるMPJ角度で足趾筋力を測定し、足趾筋力と跳躍パフォーマンスとの関係における足趾筋力測定時のMPJ角度が及ぼす影響を検証した。その結果、MPJが背屈位にある足趾押しのみリバウンド型の跳躍と相関関係を認めた。今回、相関関係が認められたのはアスリート群の足趾押しと連続リバウンドジャンプおよびホッピングであったことから、アスリートにおける連続的な跳躍パフォーマンスにはMPJ背屈位での足趾押しが影響することが考えられる。リバウンド型の跳躍では、前足部の接地のみで跳躍することも観察されることから、足趾押し発揮時のMPJの角度が相関関係のあった連続リバウンドジャンプおよびホッピングにおける接地動作時のそれと類似していた可能性が示唆される。

また、足趾屈力の測定に際し、グリップバーの位置に対して MPJ および足部の位置を調整して固定したため、測定機器の構造上、足趾の長さが短い対象者は第 5 趾のみがグリップバーに掛からない場合があった。本研究における足趾屈力の測定は、それらを限界点として持つ。

3-1-5. 小括

本研究は、アスリートおよび一般人を対象にした測定結果に基づき、1) 跳躍方向の異なるプレス型および連続的な繰り返しリバウンド型の跳躍パフォーマンスと足趾筋力との関係、および 2) 足趾筋力とプレス型および連続的な繰り返しリバウンド型の跳躍パフォーマンスとの関係に、足趾筋力測定時の MPJ 角度が及ぼす影響について明らかにするために、相関分析を用いて検討を行った。本研究の結果より次のことが明らかとなった。

- 1) リバウンド型の跳躍パフォーマンスである、連続リバウンドジャンプおよびホッピングと足趾押力との間にアスリート群においてのみ、それぞれ有意な相関関係が認められた。
- 2) プレス型の跳躍パフォーマンスである垂直跳びや立ち幅跳びと足趾筋力との間には、いずれの群においても相関関係が認められなかった。

3) 足趾筋力と各跳躍パフォーマンス指標との関係は、MPJ が背屈位にある足趾押力と連続リバウンドジャンプおよびホッピングとの間において相関関係が認められた。

一方で、MPJ が底屈位となる足趾屈力については相関関係が認められなかった。

以上のことから、連続リバウンドジャンプおよびホッピングのようなリバウンド型の跳躍パフォーマンスと MPJ が背屈位で筋力を発揮する足趾押力が関係していることが明らかとなった。

3-2. スプリント走パフォーマンスとの関係（研究課題Ⅲ）

3-2-1. はじめに

スプリント走は、競技スポーツの様々な局面でみられ、その能力はアスリートとして要求される基本的な身体能力の一つである。Mann et al., (1979) は、スプリント走の立脚期において、足部内在筋が体重を継続的に支えていると報告しており、50mのスプリントタイムおよび疾走速度と足趾屈力の中に有意な相関関係が認められている (Morita et al., 2014 ; Otsuka et al., 2015)。また、足部内在筋のトレーニングは、50mスプリントのタイムを有意に改善する (Hashimoto et al., 2014)。しかし、これらの先行研究は一般人や成長期の若年者を対象者として採用しており、アスリートの足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係については明らかではない。また、先行研究における足趾筋力は、MPJ 底屈位で測定されてきた。Smith et al., (2014) によると、スプリント離地直前の MPJ は底屈位ではなく、裸足条件において $51.5 \pm 3.5^\circ$ 背屈位、非裸足条件において $42.3 \pm 5.7^\circ$ 背屈位である。したがって、MPJ 背屈位での足趾押力は、MPJ 底屈位での足趾屈力よりもスプリント走パフォーマンスにより強く関連すると予想される。

本研究ではアスリートを対象に、1) 足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係、および2) 足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係を明らかにし、MPJ

の角度条件および筋力発揮様式の異なる足趾筋力が及ぼす影響について検討することを目的とした。

3-2-2. 方法

3-2-2-1. 対象

対象は、男子大学生アスリート 17 名（アメリカンフットボール競技，ポジション：ワイドレシーバーおよびランニングバック，年齢 19.9 ± 0.9 歳，身長 173.0 ± 7.0 cm，体質量 79.7 ± 8.0 kg，競技歴 7.3 ± 1.7 年，平均値 \pm 標準偏差）とした。本実験を実施するにあたり，立命館大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の「人を対象とする研究倫理」の承認を受けており（BKC-人医-2015-002），各対象者に対して文書および口頭で実験の目的，方法，本実験における危険や不利益およびその応急処置を含めた対応策，補償等の安全性に対する内容等について説明した後，すべての対象者より書面によって実験参加の同意を得た上で実施した。本研究では先行研究（甲斐ら，2007）を参考に，利き足についてはボールを蹴る足（機能脚）と定義した。なお，対象者全員が利き足は右足であった。

3-2-2-2. 研究プロトコール

すべての対象者に対して、身体測定、足趾筋力（足趾屈力、足趾押力）、スプリント走パフォーマンス（10 yard スプリント走、40 yard スプリント走）を実施した。スプリント走パフォーマンスの全ての測定については、足趾筋力測定とは異なる日にフットボール競技場で行われた。得られた結果より、足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの関係性について検討した。

3-2-2-3. 測定項目

3-2-2-3-1. 身体測定

身体測定については、2-1. 足関節およびMPJの角度が足趾押力に及ぼす影響における身体測定の方法 2-2-3-1. と同一の手順により実施した。

3-2-2-3-2. 足趾筋力（足趾屈力、足趾押力）

足趾筋力測定は、本論文 3-1. および 3-1-2-3-2. と同一の方法により実施した。

3-2-2-3-3. スプリント走パフォーマンス

スプリント走パフォーマンスの評価として、40 yard (約 36.58m) の直線スプリント走を実施した。実施に際し、対象者は競技用スパイクを履いた (McGee et al., 2003 ; Robbins., 2010)。また、その際、10 yard (約 9.14m) 通過時のタイムを計測した。タイムの測定には、無線式光電管タイム測定装置 (Brower Timing System, USA) を使用した。各対象者は、スタートラインに対して片手を地面に着き、手と同側の足を1歩後方に引いた3ポイントスタンスを1秒間保持した姿勢からスタートした。10 yard スプリントタイム測定ラインを通過後、最後にフィニッシュラインを通過した (図 3.10)。各テストを実施するにあたり、全ての対象者は全身への5分間の静的ストレッチおよび5分間の動的ストレッチをおこなった。その後、5分間のスプリント練習を行わせ十分に休息させた後、2回試行した。測定値は0.01秒の単位で記録し、2回の試行のうち最も良いタイムを測定値とした。

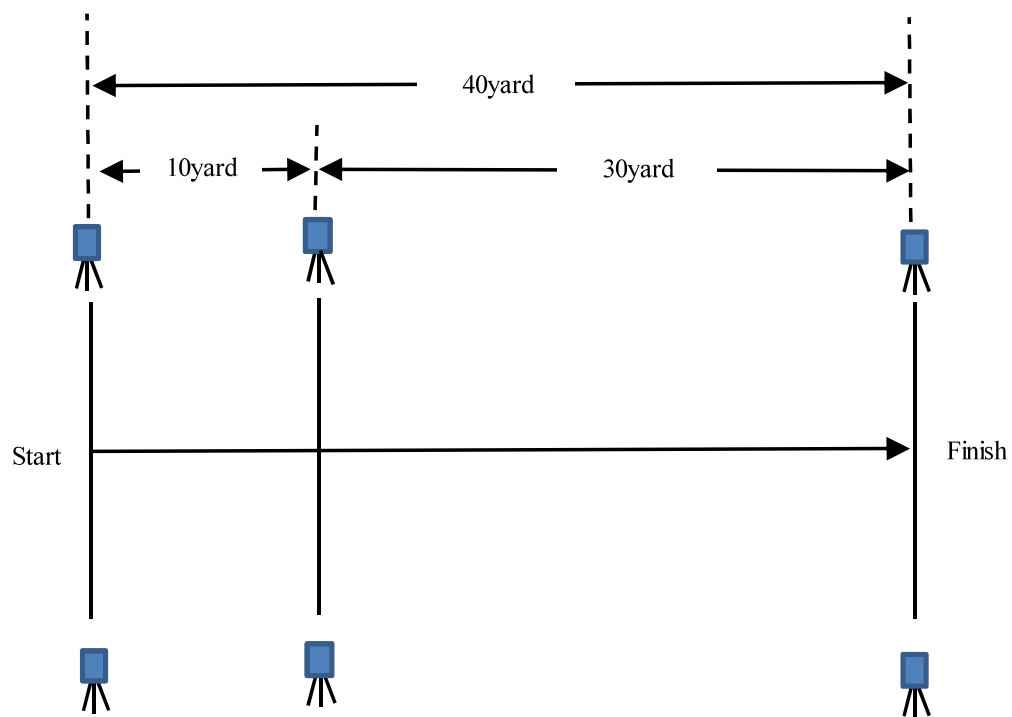


図 3.10 40yard スプリント走における無線式光電管タイム測定装置の設置位置

スタート地点, 10 yard 地点, 40 yard 地点 (ゴール) に設置した無線式光電管

タイム測定装置 (Brower Timing System USA) を用いて測定を行なった。

3-2-2-3-4. 統計解析

全ての測定値は、平均値±標準偏差で示した。足趾筋力の検者内信頼性については、級内相関係数 ICC (1, 3) で評価し、良好な再現性が確認されたのちに、足趾筋力の左右の比較および足趾屈力と足趾押力の比較については、対応のある t 検定を行った。また、左右の差を評価するために効果量を算出した。その結果、足趾筋力の左右差は認められなかった。足趾筋力とスプリント走パフォーマンスとの相関関係については、足趾筋力測定 of 左右各 3 試技のうちの最大値と各スプリント走の最速の測定値を採用した。すべてのテスト変数（足趾屈力、足趾押力、10 yard スプリント走タイムおよび 40 yard スプリント走タイム）の関連性の検討には、ピアソンの積率相関係数を求めた。

なお、統計解析には SPSS software Ver.20 (International Business Machines Co., USA) を用いて、いずれの場合においても統計解析の有意水準は危険率 5%とした。

3-2-3. 結果

表 3.3 に各測定の結果について示した。足趾屈力と足趾押力の左右の ICC (1, 3) は 0.73–0.81 の範囲であった。足趾屈力および足趾押力において左右の有意差は認められなかった。また、足趾屈力と足趾押力との間には有意な差は認められなかった (右 : $P=0.44$; 左 : $P=0.67$)。10yard スプリント走, および 40yard スプリント走の

ICC (1. 2) は 0.61–0.77 の範囲であった。それらの再現性は 10yard スプリント走

(ICC=0.61) を除き、良好 (Jackson et al., 1980) と判断できるものであった。

足趾屈力および足趾押力と 10yard スプリント走タイムおよび 40yard スプリント走タイムの相関関係を図 3.11 に示した。10yard スプリント走タイムは、足趾屈力および足趾押力と有意な相関関係を示さなかった。同様に、40yard スプリント走タイムと足趾屈力および足趾押力との間にも有意な相関関係は認められなかった。

表 3.3 身体測定, 足趾筋力測定, スプリント走パフォーマンス測定の結果

		平均値 ± 標準偏差	ICC	<i>P</i>	<i>d</i>
身長 (cm)		173.0 ± 7.0			
体質量 (kg)		79.7 ± 8.0			
足趾屈力 (N/kg)	左	2.18 ± 0.44	0.73	n. s.	0.28
	右	2.28 ± 0.37	0.75		
足趾押力 (N/kg)	左	2.24 ± 0.57	0.81	n. s.	0.22
	右	2.35 ± 0.44	0.76		
10 yard スプリント走 (sec)		1.71 ± 0.06	0.61		
40 yard スプリント走 (sec)		5.01 ± 0.14	0.77		

n. s. : Not significant. *d*: effect size.

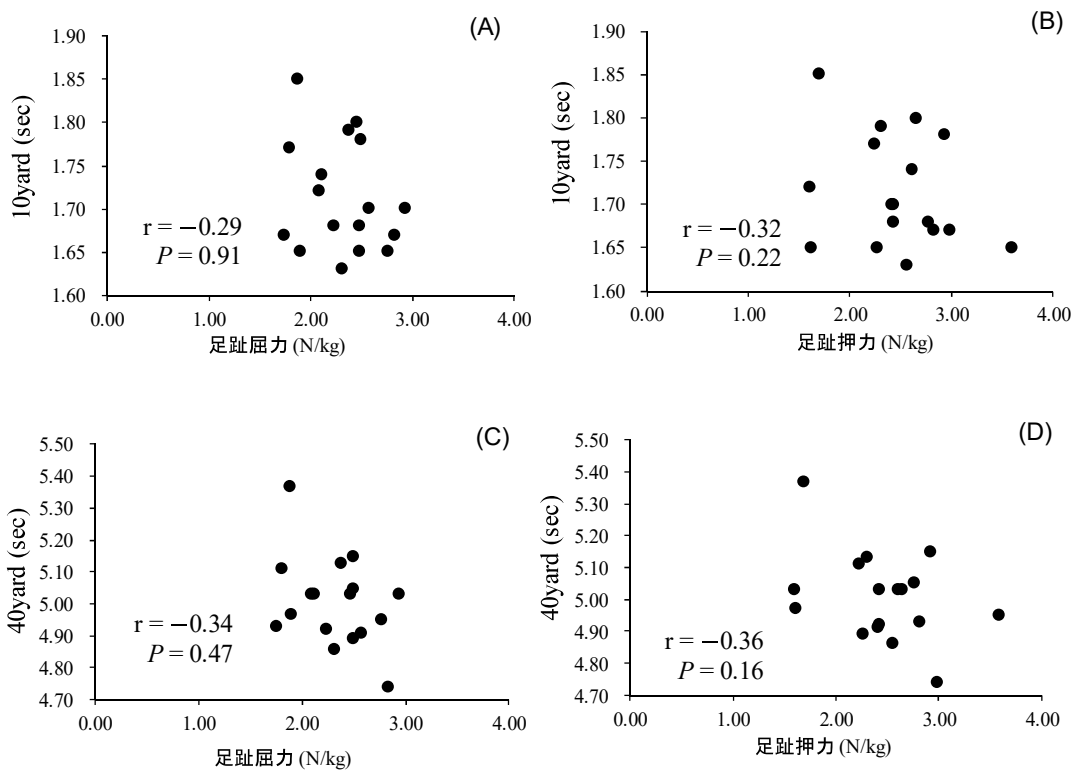


図 3.11 足趾筋力とスプリントタイムの関係

足趾屈力 (A) および足趾押し力 (B) と 10yard スプリントタイムとの関係.

足趾屈力 (C) および足趾押し力 (D) と 40yard スプリントタイムとの関係.

3-2-4. 考察

本研究では、MPJの角度が異なる足趾筋力とアスリートのスプリント走パフォーマンスとの関係について検討した。その結果、MPJが底屈位となる足趾屈力およびMPJが背屈位となる足趾押し力ともに、スプリント走パフォーマンスとの間に有意な相関関係を示さなかった。このような結果は、足趾筋力がMPJの角度条件および筋力発揮様式にかかわらず、アスリートのスプリント走パフォーマンスに影響を及ぼさないことを示唆すると同時に、足趾押し力が足趾屈力よりもスプリント走パフォーマンスにより強く関係するであろうという本研究の仮説を否定する。

先行研究において、足趾屈力と50mの疾走速度（山田ら，2015；Otsuka et al., 2015）およびスプリントタイム（Morita et al., 2014）の間には有意な相関関係が認められているが、本研究結果においては足趾屈力および足趾押し力ともにスプリント走パフォーマンスとの間に相関関係は認められなかった。その理由として、次の2点が考えられる。まず、対象者の違いである。先行研究では、一般人や成長期の若年者を対象としているのに対して、本研究の対象は、日頃からスプリント走のトレーニングに取り組むアメリカンフットボールの選手であった。陸上競技短距離選手を対象とした先行研究によると、スプリント走の疾走速度と股関節屈曲および伸展、膝関節屈曲、足関節底屈の各下肢関節トルクとの間で有意な相関関係が報告されており（渡邊ら，2009），本研究の対象者はスプリント走のトレーニングを繰り返すことで、足趾

屈力よりもそれらの下肢関節トルクの影響を受けたと推察される。また、先行研究の足趾屈力は対象者間の性別によって差異が認められており (Morita et al., 2014) , 男女混合の対象者における相関関係であるのに対して、本研究の対象者は男性で統一されていた。足趾屈力の変動係数 CV (%) においても先行研究 (Morita et al., 2014) の対象者が 28.2% であるのに対して、本研究の対象者は 15.6% と低かったことから、足趾筋力の発揮能力の点において等質の集団であったと考えられる。

また、筋力発揮の点において、スプリント走パフォーマンスを向上させるためには、股関節や膝関節周辺の筋力が重要である (Laurent et al., 2014 ; McBride et al., 2009 ; Cronin et al., 2005 ; Wisløff et al., 2004) 。さらに、スプリント走の疾走速度と股関節および膝関節の等速性最大筋力との間には正の相関関係が認められている (渡邊ら, 2003) 。本研究の対象者は日頃から筋力トレーニングを実施しているアメリカンフットボール選手であり、股関節や膝関節周辺の優れた筋力発揮能力を獲得している。一方、足部を MPJ で分離した 2 つのセグメントモデルとした先行研究では、ランニングやスプリント走の離地時において、MPJ は最小限のエネルギーしか発揮しないことが示唆されている (Krell et al., 2006 ; Stefanyshyn et al., 2004) 。実際に陸上競技 100m 種目の男女オリンピック代表選手のスプリント走タイムと MPJ の最大伸展角速度との間には有意な相関関係は認められていない (Krell et al., 2006) 。

これらの知見および本研究の結果を考え合わせると、アスリートのスプリント走パ

パフォーマンスに対しては、日頃の筋力トレーニングなどで発揮される股関節や膝関節周辺の筋力の影響が大きいと推察され、MPJの関節角度および力発揮様式に係わらず足趾筋力はスプリント走パフォーマンスに影響を及ぼさないといえる。

3-2-5. 小括

本研究は、MPJの角度が異なる足趾筋力とアスリートのスプリント走パフォーマンスとの関係について明らかにするために、相関分析を用いて検討を行った。本研究の結果より次のことが明らかとなった。

- 1) 10 yard スプリント走および 40 yard スプリント走は、足趾が底屈位となる足趾屈力および足趾が背屈位となる足趾押力ともに有意な相関関係は認められなかった。

以上のことから、足趾筋力はMPJ角度条件および力発揮様式にかかわらず、アスリートのスプリント走パフォーマンスに影響を及ぼさないことが明らかとなった。

3-3. 方向転換走パフォーマンスとの関係（研究課題IV）

3-3-1. はじめに

走動作中に進行方向の転換を伴う動作は、様々なスポーツにおいて頻繁にみられ、そのパフォーマンスはアスリートの運動能力として要求される重要な要素の一つである。プロアジリティやTテスト、カットラン、スラロームランなど、走動作と方向転換動作の複合動作である方向転換走パフォーマンスと筋力に関する先行研究では、主に股関節、膝関節あるいは足関節において発揮される筋力を対象に検討されており（Sassi et al., 2009 ; Markovic., 2007 ; Young et al., 2002）, 下肢の最も遠位に位置する MPJ において発揮される筋力については着目されてこなかった。Riley et al., (2013) によると、方向転換走の離地時に MPJ は右足 $38.1 \pm 10.1^\circ$ 背屈位、左足 $31.6 \pm 10.2^\circ$ 背屈位であると報告されている。したがって、MPJ で発揮される筋力が方向転換走パフォーマンスと関係性を持つ可能性があると同時に、その関係性は、MPJ 背屈位での足趾押力が MPJ 底屈位での足趾屈力よりも強いと考えられる。

そこで本研究の目的は、1) 足趾筋力と方向転換走パフォーマンスとの関係、および 2) 足趾筋力と方向転換走パフォーマンスとの関係に、MPJ の角度条件および筋力発揮様式の違いが及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

3-3-2. 方法

3-3-2-1. 対象

対象は、研究課題Ⅲの対象者であった男子大学生アスリート 17 名（アメリカンフットボール競技，ポジション：ワイドレシーバーおよびランニングバック，年齢 19.9 ± 0.9 歳，身長 173.0 ± 7.0 cm，体質量 79.7 ± 8.0 kg，競技歴 7.3 ± 1.7 年，平均値 \pm 標準偏差）とした。本実験を実施するにあたり，立命館大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の「人を対象とする研究倫理」の承認を受けており（BKC一人医-2015-002），各対象者に対して文書および口頭で実験の目的，方法，本実験における危険や不利益およびその応急処置を含めた対応策，補償等の安全性に対する内容等について説明した後，すべての対象者より書面によって実験参加の同意を得た上で実施した。本研究では先行研究（甲斐ら，2007）を参考に，利き足についてはボールを蹴る足（機能脚）と定義した。なお，対象者全員が利き足は右足であった。

3-3-2-2. 研究プロトコール

すべての対象者に対して，身体測定，方向転換走パフォーマンス（プロアジリティテスト，3 コーンテスト）を実施した。足趾筋力（足趾屈力，足趾押し力）については，対象者が同じであったため，研究課題Ⅲのデータを使用した。方向転換走パフォ

パフォーマンスの全ての測定については、足趾筋力測定とは異なる日にフットボール競技場で行われた。得られた結果より、足趾筋力と方向転換走パフォーマンスとの間の関係性について検討した。

3-3-2-3. 測定項目

3-3-2-3-1. 身体測定

身体測定については、2-1. 足関節およびMPJの角度が足趾押力に及ぼす影響における身体測定の方法2-2-3-1. と同一の手順により実施した。

3-3-2-3-2. 足趾筋力（足趾屈力，足趾押力）

足趾筋力測定は、本論文3-1. および3-1-2-3-2. と同一の方法により実施した。

3-3-2-3-3. 方向転換走パフォーマンス

方向転換走パフォーマンスの評価は、フロアジリティテストおよび3コーンテストをいずれも競技用スパイクを履いて実施した（McGee et al., 2003 ; Robbins., 2010）。測定はストップウォッチ（SVAS005, SEIKO 社製, 日本）を用いて手動で行った。フロアジリティテストは、スタートラインに対して左右各5 yard 間隔にラインを引いた

コースを用いた（図 3.12 A）。対象者は、スタートラインが身体を中心になるように跨いで中央に位置し、スタートライン上に片手を着いた 3 ポイントスタンスを 1 秒間保持した姿勢からスタートした。すぐに右に走り、右手で 5 yard ラインに触れた後、素早く左に方向を変えてスタートラインを通過後、左手で 5 yard ラインに触れ、最後にフィニッシュラインを通過した。同様に左方向へのスタートも実施した。各テストを実施するにあたり、全ての対象者は全身への 5 分間の静的ストレッチおよび 5 分間の動的ストレッチをおこなった。その後、5 分間の練習を行わせ十分に休息させた後、左右各 2 回、計 4 試行した。測定値は 0.01 秒の単位で記録し、2 回の試行のうち最も良いタイムを測定値とした。

3 コーンテストは、3 つの円錐状のコーンを 5 yard 間隔で設定した L 字型のコースを用いた（図 3.12 B）。対象者は、スタートラインに対して片手を地面に着き、手と同側の足を 1 歩後方に引いた 3 ポイントスタンスを 1 秒間保持した姿勢からスタートした。5 yard 前方のライン間をスプリントしながら 1 往復した。その際、ターンはすべてラインに触れた。次にコーン 2 を 90°ターンした後、コーン 3 に向かってスプリントし、180°ターンをした。再びコーン 2 を 90°ターンしてフィニッシュラインを通過した。各対象者は 5 分間の練習を行わせ十分に休息させた後、左右各 2 回、合計 4 回試行した。測定値は 0.01 秒の単位で記録し、左右各 2 回の試行のうちそれぞれ最も良いタイムを測定値とした。

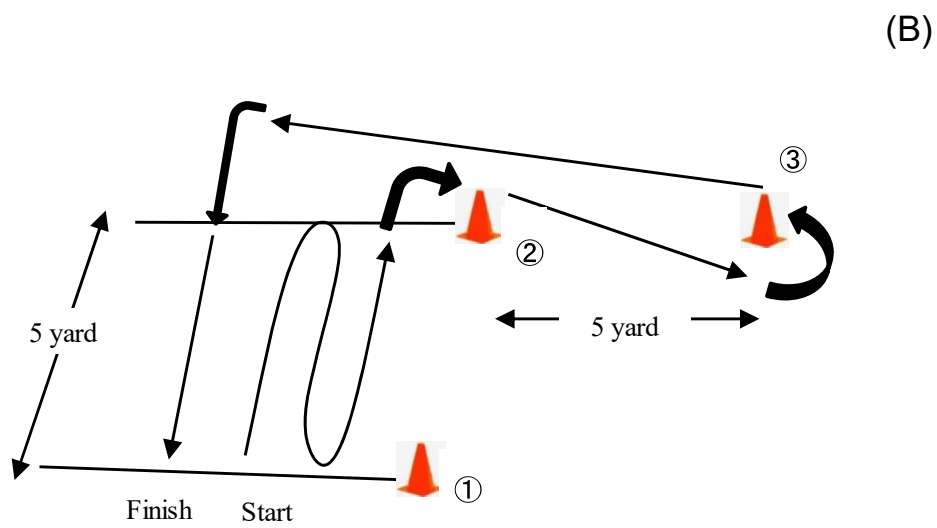
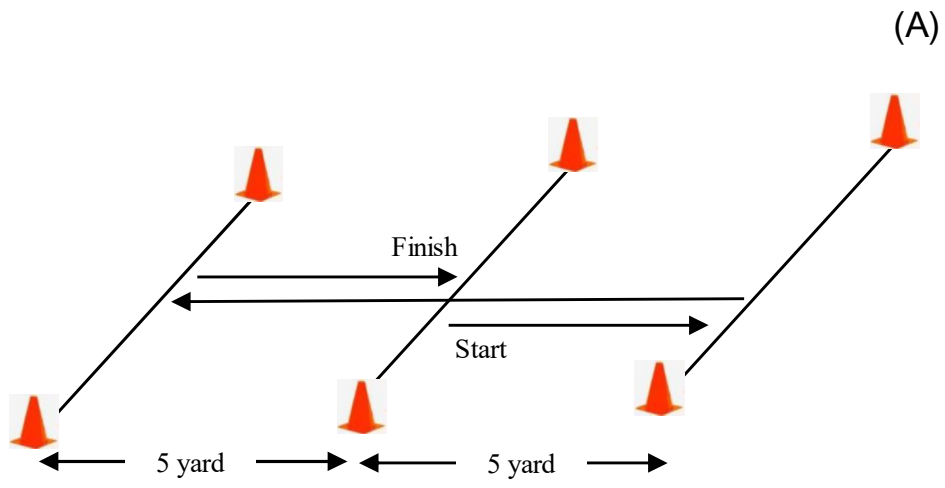


図 3.12. 方向転換走パフォーマンステスト

プロアジリティテスト(A) および 3 コーンテスト (B).

3-3-2-3-4. 統計解析

全ての測定値は、平均値±標準偏差で示した。足趾筋力の検者内信頼性については、級内相関係数 ICC (1, 3) で評価し、良好な再現性が確認されたのちに、足趾筋力の左右の比較および足趾屈力と足趾押力の比較については対応のある t 検定を行った。また、左右の差を評価するために効果量を算出した。その結果、足趾筋力の左右差は認められなかった。足趾筋力と方向転換走パフォーマンスとの相関関係については、足趾筋力測定 of 左右各 3 試技のうち of 最大値とプロアジリティテストおよび 3 コーンテスト of 最速 of 測定値を採用した。すべてのテスト変数 (足趾屈力, 足趾押力, プロアジリティテストおよび 3 コーンテスト) の関連性の検討には、ピアソンの積率相関係数を求めた。

なお、統計解析には SPSS software Ver.20 (International Business Machines Co., USA) を用いて、いずれの場合においても統計解析 of 有意水準は危険率 5% とした。

3-3-3. 結果

表 3.4 に足趾筋力および各テストの結果について示した。足趾屈力と足趾押力の左右 of ICC (1, 3) は 0.73–0.81 であった。また、プロアジリティテストおよび 3 コーンテスト of ICC (1, 2) は 0.76–0.81 であった。それらの再現性は、全体的に良好 (Jackson et al., 1980) と判断できるものであった。

足趾屈力および足趾押力に有意な左右差は認められなかった。また、足趾屈力と足趾押力との間にも有意な差は認められなかった（右： $P=0.44$ ；左： $P=0.67$ ）。

図 3.13 は、足趾屈力および足趾押力とプロアジリティテストおよび 3 コーンテストの各関係を示したものである。足趾押力はプロアジリティテスト（図 3.13 B）および 3 コーンテスト（図 3.13 D）の結果と負の相関関係を示した（プロアジリティテスト： $r=-0.50$, $P<0.05$ ；3 コーンテスト： $r=-0.50$, $P<0.05$ ）。一方、足趾屈力とプロアジリティテスト（図 3.13 A）および 3 コーンテスト（図 3.13 C）との間に有意な相関関係は認められなかった（プロアジリティテスト： $r=-0.40$, $P=0.11$ ；3 コーンテスト： $r=-0.41$, $P=0.10$ ）。

表 3.4 身体測定, 足趾筋力測定, 方向転換走パフォーマンステストの結果

		平均値 ± 標準偏差	ICC	<i>P</i>	<i>d</i>
身長 (cm)		173.0 ± 7.0			
体質量 (kg)		79.7 ± 8.0			
足趾屈力 (N/kg)	左	2.18 ± 0.44	0.73	n. s.	0.28
	右	2.28 ± 0.37	0.75		
足趾推力 (N/kg)	左	2.24 ± 0.57	0.81	n. s.	0.22
	右	2.35 ± 0.44	0.76		
プロアジリティテスト(sec)	左	4.43 ± 0.13	0.76	n. s.	0.23
	右	4.41 ± 0.12			
3コーンテスト (sec)	左	7.22 ± 0.28	0.81	n. s.	0.20
	右	7.27 ± 0.21			

n. s. : Not significant. *d*: effect size.

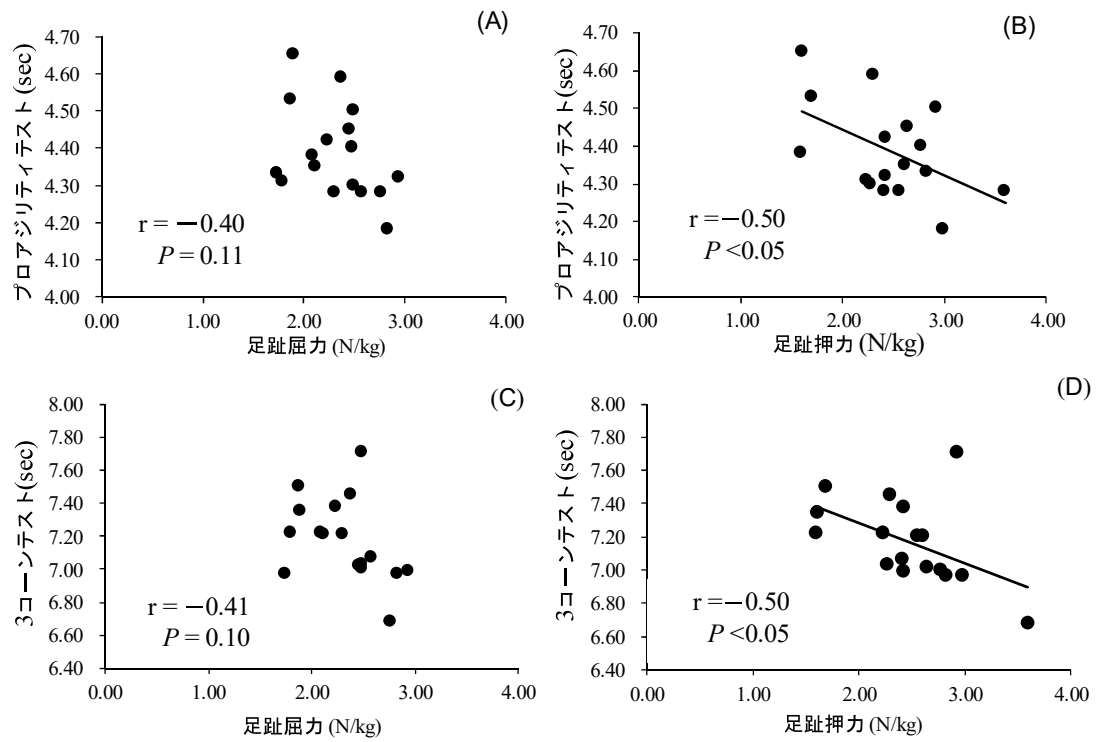


図 3.13 足趾筋力と方向転換走パフォーマンステストの関係.

プロアジリティテストのパフォーマンスと足趾屈力 (A) および足趾押力

(B) との関係.

3コーンテストのパフォーマンスと足趾屈力 (C) および足趾押力 (D) との

関係.

3-3-4. 考察

本研究の結果、方向転換走パフォーマンスは MPJ が背屈位となる足趾押力と有意な負の相関関係を示したが、MPJ が底屈位となる足趾屈力との間には有意な相関関係が認められなかった。結果は本研究の仮説を支持するものであった。

足趾押力と方向転換走パフォーマンスとの相関関係を説明する背景の一つには、方向転換動作の離地時における MPJ の状態 (Riley et al., 2013) と筋力測定時のそれとの類似性があると考えられる。また同時にそれは、足趾屈力が方向転換走パフォーマンスと有意な相関関係を示さなかったことを説明する要因にもなるといえる。

さらに、本研究で実施した運動課題の構成要素も足趾筋力とパフォーマンスとの関係に関する結果を説明する要因になると考えられる。すなわち本研究で採用したプロアジリティテストおよび3コーンテストは、スプリント中の加速と減速、方向転換動作が含まれており、走動作を含む方向転換能力を評価している (McGee et al., 2003 ; Robbins., 2010) 。研究課題Ⅲの結果では、足趾筋力と 10yard および 40yard スプリントテストのタイムとの間には有意な相関関係は認められなかった。スプリントテストは、総距離でプロアジリティテスト (20yard) および3コーンテスト (30yard) のそれらと類似しているが、方向転換動作を含まない。プロアジリティテストには 180°のターンが2回、3コーンテストには2回の 90°ターンと 180°ターンおよび1回の 360°ターンが含まれる。スプリント走動作における離地時 (Smith et al., 2014) および方向転

換動作の離地時 (Riley et al., 2013) において MPJ は背屈位であるのに対して、本研究では方向転換動作のみ足趾押力と相関関係が認められた。研究課題Ⅲで考察したようにスプリント走に影響を及ぼすのは、股関節や膝関節周辺で発揮される筋力であることが示唆される。これに対して、方向転換走パフォーマンスには身体の加速および減速動作が頻繁に含まれる方向転換動作が含まれている。これらのことから、スプリント走に比較して、方向転換動作のパフォーマンスに対する MPJ において発揮される筋力の貢献度は、スプリント走のそれに比較して高いと考えられ、そのことが足趾押力と方向転換走パフォーマンスとの有意な相関関係を生む要因の一つとなっていると推察される。

3-3-5. 小括

本研究は、MPJ の角度が異なる足趾筋力とアスリートの方向転換走パフォーマンスとの関係について明らかにするために、相関分析を用いて検討を行った。本研究の結果より次のことが明らかとなった。

1) 足趾押力は、プロアジリティテストおよび3コーンテストの結果と負の相関関係が

認められたが、足趾屈力においては有意な相関関係は認められなかった。

以上のことから、アスリートの方向転換走パフォーマンスは MPJ が背屈位の足趾押力が関係していることが明らかとなった。

第4章 総括論議

本博士論文は、アスリートにおける足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係について明らかにすることを目的とした。その目的を達成するために、まず足関節およびMPJの関節角度と足趾筋力との関係について確認した後、跳躍、スプリント走、方向転換走の各パフォーマンスと足趾筋力との関係を検証した。その主な結果は以下の通りであった。

- 1) 裸足競技群と非裸足競技群のアスリートの間において靴着用の有無は、足趾押力の発揮水準および関節角度-力関係に影響を与えず、足趾押力の発揮水準は足関節およびMPJの両関節角度の影響を受けることが明らかとなった（研究課題Ⅰ）。
- 2) 足趾屈力は、跳躍、スプリント走、方向転換走の各運動パフォーマンスと有意な相関関係が認められなかった（研究課題Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ）。それに対し、足趾押力は、リバウンド型跳躍パフォーマンスおよび方向転換走パフォーマンスと有意な相関関係を示した（研究課題Ⅱ，Ⅳ）。

以上の結果に基づき、本章ではアスリートにおける1) 足趾押力測定時の関節角度と力の関係、2) 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係、および3) 跳躍パフォーマンスに対する足趾押力および下肢関節トルクの貢献の3点について総括的に考察する。

4-1. 足趾押力測定時の関節角度と力の関係

足関節および MPJ の関節角度－力関係において、裸足アスリートと非裸足アスリートでは有意な差は認められなかったものの、足趾押力は足関節および MPJ の両関節角度の影響を受け、足関節底背屈位および背屈位に比較して足関節底屈位で低い値となった。この結果は Goldmann et al., (2012) の報告と一致する。Goldmanne et al., (2012) は、Refshauge et al., (1995) のモデルを用いて、外在筋の筋長－力関係について推定している。そこで、本研究においても、研究課題 I の裸足群と非裸足群の両群のデータに Goldmanne et al., (2012) と同じモデルを適用し、足関節（表 4.1）および MPJ（表 4.2）それぞれの関節角度を変化させた場合の外在筋の筋長－力関係として図示してみた（足関節：図 4.1, 図 4.2. MPJ：図 4.3, 図 4.4）。図 4.1 は、MPJ の関節角度を保持した条件において、足関節角度を変化させた場合に伴う長母趾屈筋長と足趾押力との関係、図 4.2 は、それらの関係に内在筋長の変化を含めて模式化して図示したものである。MPJ の角度を保持した条件で足関節角度を変化させた場合、内在筋の筋長は一定であるが、MPJ0°条件および MPJ30°条件において足関節底屈 10°条件と背屈 20°条件を比較すると、外在筋である長母趾屈筋が伸張することに伴い、足趾押力が増加していることから、上行脚であると考えられる。ただし、MPJ 背屈位 45°条件における足関節背屈位 20°条件では、長母趾屈筋が伸張することに伴い、足趾押力が低下していることから、外在筋の筋長－力関係においては下行脚であると考えられる。

また、図 4.3 は足関節角度を保持した条件において、MPJ の関節角度を変化させた場合に伴う長母趾屈筋長と足趾押力との関係、図 4.4 は、それらの関係に内在筋長の変化を含めて模式的に図示したものである。足関節角度を保持した条件において、MPJ の関節角度を変化させた場合、MPJ 背屈位 45°条件では外在筋である長母趾屈筋が伸張すると予想されたが、それに伴い足趾押力が低下した。また、MPJ 背屈位 30°条件から底背屈 0°条件では至適長付近となることが示された。MPJ が背屈位になるに伴い、長母趾屈筋が伸張することから、図 4.1、図 4.2 の結果によると外在筋の出力が強くなることが予想されたが、実際には足趾押力は低下した。MPJ 周辺で発揮されるモーメントは、足関節と MPJ を跨ぐ二関節筋である外在筋と筋の起始停止が足部に存在する内在筋の複合的な作用によって発揮される (Goldmann et al., 2012) もであり、短趾屈筋は最大随意モーメントの約 40%を生み出したとしているが、あくまで仮定に基づく予測値であり、内在筋の筋長-力関係における実測値については不明である。本研究においても、内在筋長の変化については算出できないため推測になるが、外在筋は足関節角度の影響しか受けず、上行脚と考えられる領域で伸張に伴い筋力が低下していることを踏まえると、内在筋は下行脚にあると考えられ、短母趾屈筋や短趾屈筋、虫様筋など内在筋の筋長変化についても、足趾押力の発揮水準に影響を与える可能性を無視することはできないくらい大きいといえる。また、足関節底屈位での足趾押力発揮は、拮抗筋として作用する足趾伸筋群 (長母趾伸筋や長趾伸筋など) が

伸張し、それに伴って生じる抵抗や距腿関節に遊びが生じることの影響で足関節が不安定になる（相馬ら., 2013）。足趾押力の発揮には、主働筋である外在筋に影響を及ぼす足関節の安定性が求められることから（相馬ら., 2013）、足関節底屈位において足趾押力が低値を示した要因の一つとも考えられる。

表 4.1 足関節の角度変化に伴う長母趾屈筋長の変化と足趾押力の関係

MPJ角度(°)	MPJ底背屈位0°			MPJ背屈位30°			MPJ背屈位45°		
足関節角度(°)	底屈位10°	底背屈位0°	背屈位20°	底屈位10°	底背屈位0°	背屈位20°	底屈位10°	底背屈位0°	背屈位20°
長母趾屈筋長(mm)	-5.0	0.0	10.0	1.6	6.6	16.6	4.9	9.9	19.9
足趾押力平均(N/kg)	2.29	2.63	3.06	2.18	2.60	2.90	2.13	2.42	2.30
S.D	0.46	0.77	0.88	0.59	0.78	0.90	0.55	0.77	0.69

表 4.2 MPJ の角度変化に伴う長母趾屈筋長の変化と足趾押力の関係

足関節角度(°)	底屈位10°			底背屈位0°			背屈位20°		
MPJ角度(°)	0°	30°	45°	0°	30°	45°	0°	30°	45°
長母趾屈筋長(mm)	-5.0	1.6	4.9	0.0	6.6	9.9	10.0	16.6	19.9
足趾押力平均(N/kg)	2.29	2.18	2.13	2.63	2.60	2.42	3.06	2.90	2.30
S.D	0.46	0.59	0.55	0.77	0.78	0.77	0.88	0.90	0.69

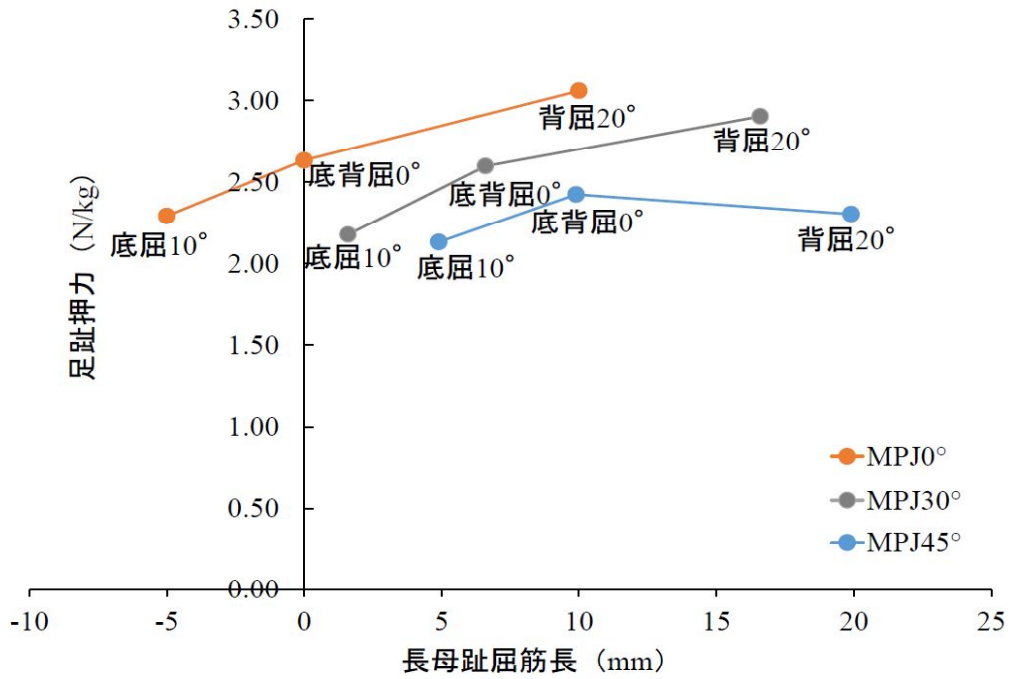


図 4.1 足関節角度変化に伴う長母趾屈筋長と足趾押力との関係

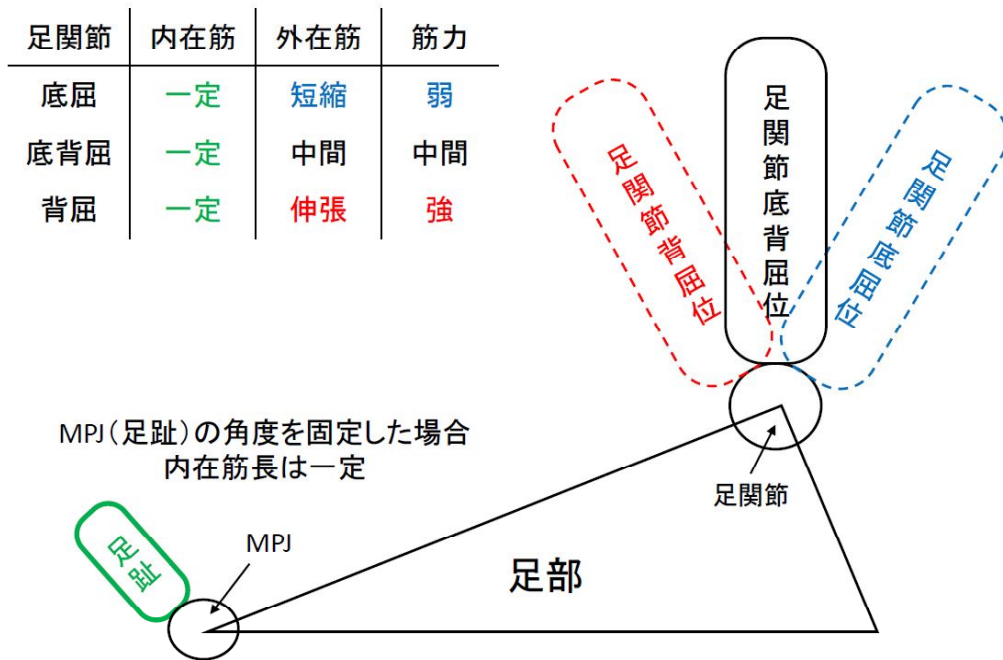


図 4.2 足関節角度変化に伴う外在筋および内在筋の筋長と足趾押力との関係

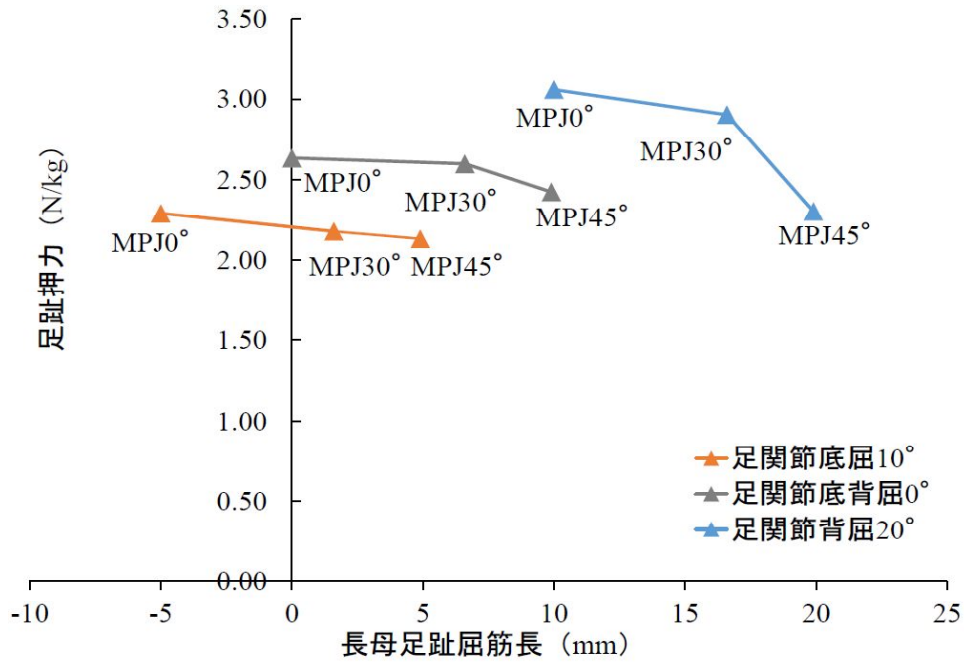


図 4.3 MPJ 角度の変化に伴う長母趾屈筋長と足趾押力との関係

MPJ	内在筋	外在筋	筋力
底背屈0°	短縮	短縮	強
背屈30°	中間	中間	中間
背屈45°	伸張	伸張	弱

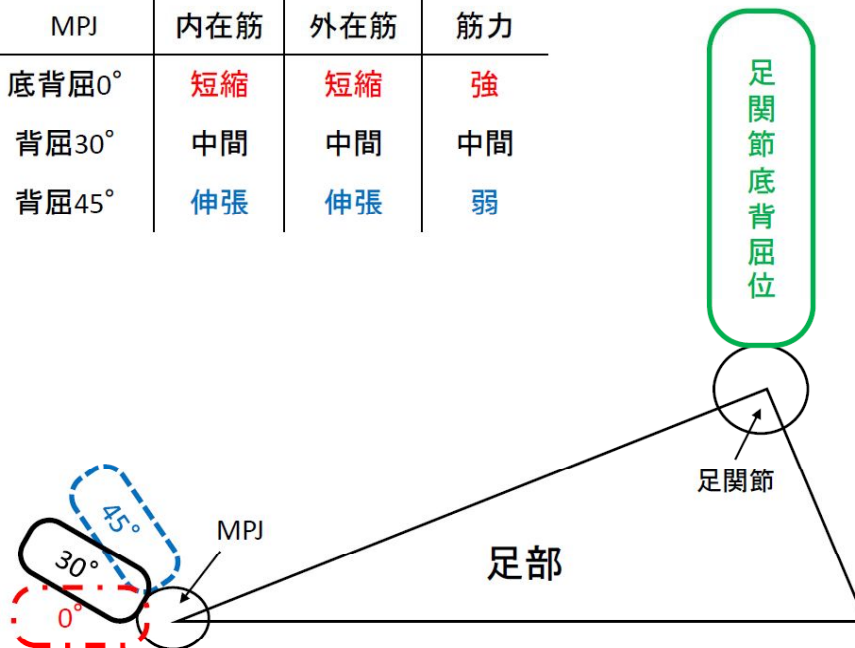


図 4.4 MPJ 角度変化に伴う外在筋および内在筋の筋長と足趾押力との関係

4-2. 足趾筋力と運動パフォーマンスとの関係

第3章では、足趾筋力発揮時においてMPJが底屈位の足趾屈力と背屈位の足趾押力を測定し、それらと跳躍、スプリント走、方向転換走の各運動パフォーマンスとの関係を検討した。その結果、足趾押力とリバウンド型の跳躍パフォーマンスおよび方向転換走パフォーマンスとの間には有意な相関関係が認められた。跳躍動作や方向転換動作においては、MPJは接地および離地時に背屈位となる(Riley et al., 2013)。その場合に、MPJが受動的に背屈することで足底腱膜が伸張して足部や足関節の剛性は高められていると考えられる(Hicks., 1954)。これにより、接地および離地時において足部や足関節の剛性を高め、足趾押力の発揮が最大限に促進されることによって、リバウンド型の跳躍パフォーマンスや方向転換走パフォーマンスの遂行能力を高め、そのことが結果的に足趾押力とリバウンド型跳躍パフォーマンスおよび方向転換走パフォーマンスとの間に有意な相関関係を生む要因の一つになっていると考えられる。

一方、足趾屈力はMPJが底屈位で発揮された筋力である。一般人を対象とした先行研究において、足趾屈力と運動パフォーマンスの相関関係が認められているが

(Goldmann et al., 2013 ; Hashimoto et al., 2014 ; Otsuka et al., 2015) , 本研究において足趾屈力は、すべての運動パフォーマンスと相関関係は認められなかった。実際の運動時には前足部が接地面に触れるとMPJは底屈位ではなく背屈位になる(Riley et al., 2013)。そのような運動時のMPJの動態を考慮すれば、足趾屈力は足趾筋力と運

動パフォーマンスとの関係性を評価するうえで適切な測度とはいえず、そのことが足趾屈力と運動パフォーマンスとの間に有意な相関関係が認められなかったことを説明する要因の一つであると考えられる。

4.3. 跳躍パフォーマンスに対する足趾押力および下肢関節トルクの貢献

第3章の研究課題において、足趾押力のみアスリートの運動パフォーマンスと相関関係が認められたが、MPJ 以外に股関節、膝関節、足関節の各関節回りの出力の影響を受けている可能性が考えられる。実際に、垂直跳びにおける下肢全体の仕事量に対する各関節の仕事量の割合は、股関節 40.0%、足関節 35.8%、膝関節 24.2%であると報告されている (Robertson et al., 1987)。また、連続ホッピングではパフォーマンス遂行時における下肢関節剛性の主な決定要因が跳躍時の周波数によって異なり、長周期 (1.2-1.5Hz) では膝関節が、短周期 (2.2-3.0Hz) では足関節が決定因子であると報告されている (Hobara et al., 2011)。そこで、有意な相関関係が認められた跳躍パフォーマンスと足趾押力との関係性について、股関節、膝関節および足関節の各関節トルクの測定値を加えた形で、その関係性を改めて検証した。対象は、男子大学生 10 名 (年齢 19.8 ± 1.1 歳、身長 171.2 ± 7.1 cm、体質量 70.8 ± 9.0 kg) であり、足趾押力、股関節伸展、膝関節伸展および足関節底屈トルク、跳躍パフォーマンス (ホッピング、1.5Hz, 2.2H, 3.0Hz 周期の連続リバウンドジャンプ、垂直跳び、立ち幅跳び) を測定

した (BKC一人医-2017-013)。足趾押力は第3章と同一の方法により測定した。股関節、膝関節、足関節の各トルクの測定は、筋力評価システム BIODEX System 4 (米国 Biodex Medical Systems 社製) を用いて 30, 180, および 300 deg / sec の3種の設定速度での等速性トルクを測定した。関節トルクの測定は右足のみとし、各関節における試技順は、エクセルのランダム関数を用いて対象者ごとにランダム化して実施した。

各部位5回程度反復練習させた後、30秒休憩後に試技を1回、全力で連続的に5回反復させ、動作中に発揮された最大トルクを最大等速性関節トルクとした。各種の跳躍パフォーマンスの評価として、研究課題IIで用いたホッピング、垂直跳び、立ち幅跳びおよび1.5Hz, 2.2Hz, 3.0Hz周期の連続リバウンドジャンプの4種目、合計6種類の跳躍動作をいずれも裸足で行った。連続リバウンドジャンプについては、メトロノームを用いて1.5Hz (90回 / min), 2.2Hz (132回 / min), 3.0Hz (180回 / min) のリズム条件にて両足接地の立位姿勢から連続10回の跳躍を行い、跳躍のRJ-Indexのうち最大値を測定値として採用した。連続リバウンドジャンプにおいて、メトロノームの音に追随することが可能な動作の周波数範囲は1.5Hzから3.0Hzであり、(Hobara et al., 2011)、先行研究において接地時間の短いホッピング動作における検証には2.2Hzが採用されている (Hobara et al., 2007, 2011)。それに倣った、跳躍パフォーマンスの全ての測定は、足趾押力測定と同日に行われた。各跳躍パフォーマンスに対する足趾筋力および下肢関節トルクの関係を検討するために、跳躍パフォーマンスを従属変

数，足趾押力および下肢関節トルクを独立変数とする重回帰分析（ステップワイズ法）を実施した．統計解析には SPSS software Ver.20（International Business Machines Co., USA）を用いて，いずれの場合においても統計解析の有意水準は危険率 5%とした．

その結果，ホッピング，1.5Hz および 2.2Hz の連続リバウンドジャンプに関する項目の標準回帰係数に有意性が認められた（表 4.3）．また，重回帰分析によって作成される重回帰式は，表 4.4 の通りであった．重回帰分析の結果，足趾押力が因子として抽出されたのは，2.2Hz（短周期）の連続リバウンドジャンプのみであった．これは，接地時に MPJ が受動的に背屈することにより，Windlass mechanism がより強く作用することで足部や足関節の剛性が高められ，足趾押力の発揮が最大限促進され，跳躍時における接地および離地時のエネルギーロスを最小限にすることで（Stefanyshyn et al., 1998），リバウンド型の跳躍パフォーマンスの遂行能力を高めていると推察される．

以上の結果から，運動遂行時間（踏切時間）の極めて短い（0.2 秒以内）跳躍動作については，足趾押力が影響を及ぼすと考えられる．これらの知見と本研究結果を総括的に考察すると，足趾押力の役割は方向転換時に動作方向を変えることや接地時間の短い跳躍などの運動刺激に対して，身体末端部の筋出力を微調整しながら運動パフォーマンスの遂行を制御するものであると考えられる．

表 4.3 跳躍パフォーマンスに関する重回帰分析の結果

従属変数：ホッピング ($R^2=0.703$)			
独立変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	
	B	β	P
定数	5.017		0.000
足関節底屈300 deg/sec	-4.859	-0.838	0.002

従属変数：連続リバウンドジャンプ1.5Hz ($R^2=0.770$)			
独立変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	
	B	β	P
定数	0.809		0.005
膝関節伸展30 deg/sec	-0.222	-0.713	0.006
足関節底屈300 deg/sec	0.937	0.489	0.031

従属変数：連続リバウンドジャンプ2.2Hz ($R^2=0.449$)			
独立変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	
	B	β	P
定数	-0.360		0.270
足趾押力	0.234	0.670	0.034

R^2 = 自由度調整済決定係数

表 4.4 重回帰式

従属変数	R ²	重回帰式
ホッピング	0.703	$y = 5.017 - 4.859 \times \text{足関節底屈}300 \text{ deg /sec}$
RJ 1.5Hz	0.770	$y = 0.809 - 0.222 \times \text{膝関節伸展}30 \text{ deg /sec} + 0.937 \times \text{足関節底屈}300 \text{ deg /sec}$
RJ 2.2Hz	0.449	$y = -0.36 + 0.234 \times \text{足趾押力}$

RJ : 連続リバウンドジャンプ

第5章 結論

本博士論文は、アスリートにおける足趾筋力と跳躍、スプリント走、方向転換走の各運動パフォーマンスとの関係について明らかにすることを目的とし、以下の知見を得た。

- 1) 裸足競技群と非裸足競技群のアスリートの間において靴着用の有無は、足趾押力および関節角度-力関係に影響を与えず、足趾押力は足関節およびMPJの両関節角度の影響を受ける。
- 2) 足趾押力は、接地時間の極めて短い連続リバウンド型の跳躍パフォーマンスおよびターンや切り返し動作を含む方向転換走パフォーマンスと関係するが、スプリント走および垂直跳びや立ち幅跳びなどのプレス型跳躍パフォーマンスとは関係しない。また、跳躍パフォーマンス（ホッピング、1.5Hz、2.2Hz、3.0Hz周期の連続リバウンドジャンプ、垂直跳び、立ち幅跳び）に対し、足趾押力および下肢関節トルク（股関節伸展、膝関節伸展、足関節底屈；30, 180, 300 deg/sec）を独立変数とする重回帰分析（ステップワイズ法）を実施したところ、パフォーマンスに対する貢献因子として足趾押力が選択された運動課題は、2.2Hz周期の連続リバウンドジャンプのみであった。

以上の知見より、アスリートにおいて足趾押力は、方向転換走や接地時間が極めて

短い跳躍運動のパフォーマンスに影響すると結論した。

【参考文献】

1. Bezodis, I. N., Kerwin, D. G., Salo, A. I. T. Lower-limb mechanics during the support phase of maximum-velocity sprint running. (2008). *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(4), 707-715.
2. Bloomfield, J., Polman, R., O' Donoghue, P. Physical demands of different positions in FA premier league soccer. (2007). *Journal of Sport Science Medicine*, 6(1), 63-70.
3. Bojsen-Møller, F & Lamoreux, F. Significance of free dorsiflexion of the toes in walking. (1979). *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 50(4), 471-479.
4. Carson, M. C., Harrington, M. E., Thompson, N., O'Connor, J. J., Theologis, T.N. Kinematic analysis of a multi-segment foot model for research and clinical applications: a repeatability analysis. (2001). *Journal of Biomechanics*, 34(10), 1299-1307.
5. Cronin, J. B., Hansen, K. T. Strength and power predictors of sports speed. (2005). *Journal of Strength Conditioning Research*, 19(2), 349-357.
6. Endo, M., Ashton-Miller, J. A., Alexander, N. B. Effects of age and gender on toe flexor muscle strength. (2002). *Journal of Gerontology Medical Sciences*, 57(6), 392-397.
7. Erdemir, A., Hamel, A. J., Fauth, A. R., Piazza, S. J., Sharkey, N. A. Dynamic loading of the plantar aponeurosis in walking. (2004). *Journal of Bone and Joint Surgery*, 86(3), 546-552.
8. Farley, C. T., Houdijk, H. H., Van, S. C., Louie, M. Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses. (1998). *Journal of Applied Physiology*, 85(3), 1044-1055.
9. Farley, C. T., Morgenroth, D. C. Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. (1999). *Journal of Biomechanics*, 32(3), 267-273.
10. Garth, W. P. Jr., Miller, S. T. Evaluation of claw toe deformity, weakness of the foot intrinsic, and posteromedial shin pain. (1989). *The American Journal of Sports Medicine*, 17(6), 821-827.

11. Goldmann J. P, Brüggemann G. P. The potential of human toe flexor muscles to produce force. (2012). *Journal of Anatomy*, 221(2), 187-194.
12. Goldmann, J. P., Sanno, M., Willwacher, S., Heinrich, K., Brüggemann, G. P. Effects of increased toe flexor muscle strength to foot and ankle function in walking, running and jumping. (2011). *Footwear Science*, 3(1), 59-60.
13. Goldmann, J. P., Sanno, M., Willwacher, S., Heinrich, K., Brüggemann, G. P. The potential of toe flexor muscles to enhance Performance. (2013). *Journal of Sports Sciences*, 31(4), 424-433.
14. Gustavsson, A., Neeter, C., Thomee, P., Silbernagel K. G, Augustsson J, Thomee, R., Karlsson J. A test battery for evaluating hop performance in patients with an ACL injury and patients who have undergone ACL reconstruction. (2006). *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 14(8), 778-788.
15. Hashimoto, T., Sakuraba, K. Strength training for the intrinsic flexor muscles of the foot: effects on muscle strength, the foot arch, and dynamic parameters before and after the training. (2014). *Journal of Physical Therapy Science*, 26(3), 373-376.
16. Hicks, J. H. The mechanics of the foot. II. The plantar aponeurosis and the arch. (1954). *Journal of Anatomy*, 88(1), 25-30.
17. Hobara, H., Inoue, K., Omuro, K., Muraoka, T., Kanosue, K. Determinant of leg stiffness during hopping is frequency-dependent. (2011). *European Journal of Applied Physiology*, 111(9), 2195-2201.
18. Hobara, H., Kanosue, K., Suzuki, S. Changes in muscle activity with increase in leg stiffness during hopping. (2007). *Neuroscience Letters*, 418(1), 55-59.
19. Horita, T., Komi, P. V., Nicol, C., Kyröläinen H. Stretch shortening cycle fatigue: interactions among joint stiffness, reflex, and muscle mechanical performance in the drop jump. (1996). *European Journal of Applied Physiology*, 73(5), 393-403.
20. Jackson, A., Jackson, AS., Bell, J. A Comparison of alpha and the intraclass reliability coefficients. (1980). *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(3), 568-571.

21. Johnson, M. D., Buckley, J. G. Muscle power patterns in the mid-acceleration phase of sprinting. (2001). *Journal of Sports Sciences*, 19(4), 263-72.
22. Kappel-Bargas, A., Woolf, R. D, Cornwall, M. W, McPoil, T. G. The windlass mechanism during normal walking and passive first metatarsalphalangeal joint extension. (1998). *Clinical Biomechanics*, 13(3), 190-194.
23. Kariyama, Y., Zushi K. Relationships between lower-limb joint kinetic parameters of sprint running and rebound jump during the support phases. (2016). *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 5(2), 187-193.
24. Krell, J. B., Stefanyshyn, D. J. The relationship between extension of the metatarsophalangeal joint and sprint time for 100m olympic athletes. (2006). *Journal of Sports Sciences*, 24(2), 175-180.
25. Kurihara, T., Yamauchi, J., Otsuka, M., Tottori, N., Hashimoto, T., Isaka, T. Maximum toe flexor muscle strength and quantitative analysis of human plantar intrinsic and extrinsic muscles by a magnetic resonance imaging technique. (2014). *Journal of Foot and Ankle Research*, 7:26.
26. Laurent, B. S., Alvaro, R., Tai, T. T., Eduardo, S. V., Haff, G. G. Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: A systematic review with meta-analysis. (2014). *Sports Medicine*, 44(12), 1693-1702.
27. Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., Daoud, A. I., D'Andrea, S., Davis, I. S., Mang'Eni, R. O., Pitsiladis, Y. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. (2010). *Nature*, 463, 531-536.
28. Low, K., Noblin, J. D., Browne, J. E., Barnhouse, C. D., Scott, A. R. Jones fractures in the elite football player. (2004). *Journal of Surgical Orthopaedic Advances*, 13(3), 156-160.
29. Man, H. S., Lam. W. K., Lee, J., Capio, C. M., Leung, A, K, L. Is passive metatarsophalangeal joint stiffness related to leg stiffness, vertical stiffness and running economy during sub-maximal running? (2016). *Gait & Posture* 49, 303-308.
30. Mann, R. A., Hagy, J. L. The function of the toes in walking, running, jogging and running. (1979). *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 142, 24-29.

31. Markovic, G. Poor relationship between strength and power qualities and agility performance. (2007). *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 47(3), 276-283.
32. McBride, J. M., Blow, D., Kirby, T. J., Haines, T. L., Dayne, A. M., Triplett, N. T. Relationship between maximal squat strength and five, ten, and forty yard sprint times. (2009). *Journal of Strength Conditioning Research*, 23(6), 1633-1636.
33. Mcgee, K. J., Burkett, L. N. The national football league combine: A reliable predictor of draft status? (2003). *Journal of Strength Conditioning Research*, 17(1), 6-11.
34. McInnes, S. E., Carlson, J. S., Jones, C. J., McKenna, M. J. The physiological load imposed on basketball players during competition. (1995). *Journal of Sports Sciences*, 13(5), 387-397.
35. Menz, H. B., Morris, M. E., Lord, S. R. Foot and ankle characteristics associated with impaired balance and functional ability in older people. (2005), *Journal of Gerontology Medical Sciences*, 60(12), 1546-52.
36. Mickle, K. J., Munro, B. J., Lord, S., Menz, H. B., Steele, J. R. Are toe weakness and deformity associated with falls in older people. (2009). XXIIInd Congress of the International Society of Biomechanics.
37. Morita, N., Yamauchi, J., Kurihara, T., Fukuoka, R., Otsuka, M., Okuda, T., Ishizawa, N., Nakajima, T., Nakamichi, R., Matsuno S., Kamiie, S., Shide, N., Kambayashi, I., Shinkaiya, H. Toe flexor strength and foot arch height in children. (2015), *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 47(2), 350-356.
38. Nester, C. J., Jarvis, H. L., Jones, R. K., Bowden, P. D., Liu, A. Movement of the human foot in 100 pain free individuals aged 18–45: implications for understanding normal foot function. (2012). *Journal of Foot and Ankle Research*, 7(1), 51.
39. Newman, M. A., Tarpinning, K. M., Marino, F. E. Relationships between isokinetic knee strength, single-sprint performance, and repeated-sprint ability in football players. (2004). *Journal of Strength Conditioning Research*, 18(4), 867-872.

40. Nilsson, G. M., Jonsson, K., Ekdahl, C. S., Eneroth, M. Effects of a training program after surgically treated ankle fracture: a prospective randomised controlled trial. (2009). *BMC Musculoskeletal Disorders*, 10(1), 118.
41. Otsuka, M., Yamauchi, J., Kurihara, T., Morita, N., Isaka, T. Toe flexor strength and lower-limb physical performance in adolescent. (2015). *Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche*, 174(7-8), 307-313.
42. Refshauge, K. M., Chan, R., Janet, L. T., McCloskey, D. I. Detection of movements imposed on human hip, knee, ankle and toe joints. (1995). *Journal of Physiology*, 488(1), 231-241.
43. Riley, P. O., Kent, R. W., Dierks, T. A., Lievers, W. B., Frimenko, R. E., Crandall, J. R. Foot kinematics and loading of professional athletes in American football-specific tasks. (2013). *Gait & Posture*, 38(4), 563-569.
44. Robbins, D. W. The National Football League (NFL) combine: Does normalized data better predict performance in the NFL draft? (2010). *Journal of Strength Conditioning Research*, 24(11), 2888-2899.
45. Robertson, D. G. E., Fleming, R. D. Kinetics of standing broad and vertical jumping. (1987). *Canadian Journal of Sports Sciences*, 12(1), 19-23.
46. Roy, J. P., Stefanyshyn, D. J. Shoe midsole longitudinal bending stiffness and running economy, joint energy, and EMG. (2006). *Medicine & Science in Sports & Exercise* 38(3), 562–569.
47. Sassi, R.H., Dardouri, W., Yahmed, M.H., Gmada, N., Mahfoudhi, M.E., and Gharbi, Z. (2009). Relative and absolute reliability of a modified agility T-test and its relationship with vertical jump and straight sprint. *Journal of Strength Conditioning Research*, 23(6), 1644-1651.
48. Schache, A. G., Blanch, P. D., Dorn, T. W., Brown, N. A., Rosemond, D., Pandy, M. G. Effect of running speed on lower limb joint kinetics. (2011). *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(7), 1260-1271.

49. Smith, G., Lake, M., Lees, A. Metatarsophalangeal joint function during sprinting: A comparison of barefoot and sprint spike shod foot conditions. (2014). *Journal of Applied Biomechanics*, 30(2), 206-212.
50. Stefanyshyn, D. J., Fusco, C. Increased shoe bending stiffness increases sprint performance. (2004). *Sports Biomechanics*, 3(1), 55-66.
51. Stefanyshyn, D. J. Nigg, B. M. Mechanical energy contribution of the metatarsophalangeal joint to running and sprinting. (1997). *Journal of Biomechanics*, 30(11-12), 1081-1085.
52. Stefanyshyn, D. J. Nigg, B. M. Contribution of the lower extremity joints to mechanical energy in the running vertical jumps and running long jumps. (1998). *Journal of Sports Sciences*, 16(2), 177-186.
53. Stefanyshyn, D. J., Nigg, B. M. Influence of midsole bending stiffness on joint energy and jump height performance. (2000). *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 32(2), 471-476.
54. Uritani, D., Fukumoto, T., Matsumoto, D., Shima, M. Association between toe grip strength and physical performance among japanese preschool children. (2017). *Clinical Research on Foot&Ankle*, 5(3), 243.
55. Wisløff, U., Castagna, C., Helgerud, J., Jones, R., Hoff, J. Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. (2004). *British Journal of Sports Medicine*, 38(3), 285-288.
56. Young, W. B., James, R., Montgomery, I. Is muscle power related to running speed with change of direction? (2002). *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 42(3), 282-288.
57. Yuasa Y, Kurihara T, Isaka T. Relationship between toe muscular strength and the ability to change direction in athletes. (2018). *Journal of Human Kinetics*, 64, 47-55.
58. 遠藤俊典, 田内健二, 木越清信, 尾縣貢. リバウンドジャンプと垂直跳の遂行能力の発達に関する横断的研究. (2007). *体育学研究*, 52(2), 149-159.

59. 大森重宜, 杉林孝法, 島田一志, 太田めぐみ. 足把持力がスプリント力に及ぼす影響. (2011). 金沢星稜大学人間科学研究 5(1), 31-34.
60. 甲斐義浩, 村田伸, 田中真一. 利き足と非利き足における足把持力および大腿四頭筋筋力の比較. (2007). 理学療法科学, 22(3), 365-368.
61. 金高宏文, 佐伯直也, 関子浩二, 西菌秀嗣, 會田勝, 平田文夫. 小学生から中学生までのリバウンドジャンプ力の横断的発達. (1998). スポーツトレーニング科学, 2, 37-42.
62. 加辺憲人, 黒澤和生, 西田裕介, 岸田あゆみ, 小林聖美, 田中淑子, 牧迫飛雄馬, 増田幸泰, 渡辺観世子. 足趾が動的姿勢制御に果たす役割に関する研究. (2002). 理学療法科学, 17(3), 199-204.
63. 荻山靖, 関子浩二. 下肢Stiffness特性がバウンディングの踏切動作に及ぼす影響. (2016). 体育学研究, 61(2), 435-448.
64. 越野裕太, 山中正紀, 瀬戸川美香, 武田直樹. 足関節背屈可動域と方向転換動作時の足関節背屈・内反, 足部方向角度との関係性. (2012). 体力科学, 61(5), 487-493.
65. 近藤四郎. ひ弱になる日本人の足. (1993). 草思社, 東京, pp94.
66. 鹿内和也, 尾田敦, 石川大瑛, 川口陽亮, 吉田深咲, 横山寛子, 前田健太郎, 浦本史也, 伊藤亮太, 藤林直樹. 小学生の50m走のタイムとアーチ高率, 足趾把持力の関連. (2017). 東北理学療法科学, 29, 64-68.
67. 関子浩二, 高松薫: バリスティックな伸張-短縮サイクル運動の遂行能力を決定する要因 -筋力および瞬発力に着目して-. (1995). 体力科学, 44, 147-154.
68. 相馬正之, 村田伸, 甲斐義浩, 中江秀幸, 佐藤洋介. 足関節の角度変化による足趾把持力の比較. (2013). ヘルスプロモーション理学療法研究, 3(1), 21-23.
69. 鳥海清司, 大島徹, 熊本水頼. 関節トルクから見たヒトの跳躍方向の調節. (2002). バイオメカニズム, 16, 243-252.

70. 中村千秋, 竹内真希. 身体運動の機能解剖 改訂版. (2014). 医道の日本社, 東京, pp169-195.
71. 橋本建史. 足アーチ構造の機能. (2004). 慶應医学, 81(1), 17-21.
72. 村田 伸. 足趾把持力に関する研究. (2018). 学術研究出版, 兵庫県, pp4.
73. 山田健二, 須藤明治. 足把持力と疾走速度の関係. (2015). 理学療法科学, 30(4), 519-521.
74. 渡邊信晃, 榎本靖士, 大山卞圭悟, 宮下憲, 尾懸貢, 勝田茂. スプリント走時の疾走動作および関節トルクと等速性最大筋力との関係. (2003). 体育学研究, 48(4), 405-419.

謝辞

本博士学位論文の執筆にあたり、多くの方々よりご指導、ご支援賜りましたことをここに深謝致します。

研究指導担当教員として、博士課程後期課程5年間にわたり明晰かつ丁寧な研究指導ならびに親身なご助言、ご校閲を賜りました、立命館大学スポーツ健康科学部 伊坂忠夫教授に心から誠意を表わすとともに、厚く御礼申し上げます。

立命館大学総合科学技術研究機構 栗原俊之准教授には、本研究の遂行にあたり、絶え間なくご指導を戴きました。栗原先生には、研究に関することのみならず、物事を捉える視点や考え方について、懇切丁寧にご教示戴きました。心より感謝の意を表し、ここに御礼申し上げます。誠に有難うございました。

立命館大学スポーツ健康科学部 金久博昭教授には、多大なるご指導、ご助言を賜り心より感謝致します。本博士論文を執筆するにあたり、明晰かつ的確なご助言を頂いたことによって本博士論文を洗練することが出来ました。深く感謝申し上げます。

また、ご多忙にもかかわらず副査を引き受けて頂きました、中京大学スポーツ科学部 桜井伸二教授、立命館大学スポーツ健康科学部 塩澤成弘教授、同学部 長野明紀教授には、非常に丁寧かつ貴重なご指導、ご助言を賜りましたことをここに感謝申し上げます。

研究活動および研究ゼミナールにおいてご指導、ご助言ならびにご支援を頂きまし

た、立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科伊坂研究室の皆様ならびに立命館大学
スポーツ健康科学部助教および講師の先生方には心より感謝しております。

東海大学における実験を遂行するにあたり、様々な面でご協力賜り、お世話になり
ました東海大学体育学部 積山和明教授、小澤翔助教、同大学健康学部 有賀誠司教
授、東海大学スポーツ医科学研究所 小山孟志講師および同大学体育学研究科の皆様
には、謹んで心より感謝申し上げます。

最後になりますが、仕事と大学院における学生生活を様々な面で支えてくれた、
妻、2人の息子たち、母、立命館大学アメリカンフットボール部コーチングスタッフの
皆様をはじめとする、関わって下さいました全ての方々に心より感謝の意を表しまし
て謝辞とさせて戴きます。

多くの方々にご支援戴いて博士論文が執筆出来たことを忘れず、研究成果を指導現
場へ還元できるように精進する所存です。今後ともご指導、ご鞭撻の程、宜しくお願
い申し上げます。

2020年3月 湯淺 康弘

