

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

カウンタームーブメントジャンプ中に発生する
Braking rate of force development の意義の整理と
Braking 局面の力-速度関係

Organizing the significance of the braking rate of force development during the counter movement jump, and the force-velocity relationship during the braking phase

2024年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

西海 大地

NISHIUMI, Daichi

研究指導教員： 広瀬 統一 教授

目次

第 1 章 序論	1
第 1 節 序	1
第 2 節 関連論文の考証	4
第 3 節 本論文の目的と構成	11
第 2 章 カウンタームーブメントジャンプパフォーマンスとジャンプ中の 下降局面の変数との関連：システムティックレビュー	13
第 1 節 緒言	13
第 2 節 方法	14
第 3 節 結果	18
第 4 節 考察	22
第 5 節 結論	24
第 3 章 Braking rate of force development 及び償却時の力はジャンプ高向上に 寄与するのか？-横断的観測から-	25
第 1 節 緒言	25
第 2 節 方法	27
第 3 節 結果	31
第 4 節 考察	33
第 5 節 結論	36

第 4 章 -相殺効果- Braking rate of force development 及び償却時の力の 向上はジャンプ高向上に寄与しない	37
第 1 節 緒言	37
第 2 節 方法	38
第 3 節 結果	42
第 4 節 考察	47
第 5 節 結論	45
第 5 章 Braking 局面における Force-velocity profile -Eccentric 筋力と の関連及び 2 点法の妥当性検証-.....	51
第 1 節 緒言	51
第 2 節 方法	53
第 3 節 結果	58
第 4 節 考察	66
第 5 節 結論	70
第 6 章 総合論議	71
第 7 章 結論	81
参考文献.....	82

本博士論文の研究成果は以下の内容であった。

【第2章】

・レビュー論文

Nishiumi D, Nishioka T, Saito H, Kurokawa T, Hirose N. Associations of eccentric force variables during jumping and eccentric lower-limb strength with vertical jump performance: A systematic review. *PLOS ONE*. 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0289631

・学会発表

西海大地, 西岡卓哉, 齋藤裕美, 黒川貴徳, 広瀬統一, カウンタームーブメントジャンプにおける下降局面の地面反力とジャンプパフォーマンスの関係: 系統的レビュー. 第35回 日本トレーニング科学学会大会. 2022年12月3日. 口頭発表

【第3章】

・原著論文

Nishiumi D, Hirose N. Do braking and amortization forces in countermovement jumps contribute to jump height? *Sports Biomechanics*. 2023. DOI: 10.1080/14763141.2023.2232340

・学会発表

西海大地, 広瀬統一, カウンタームーブメントジャンプにおける下降局面の地面反力と上昇局面後半の地面反力及びジャンプ高との関係. NSCA ジャパン S&C カンファレンス 2022. 2023年2月4日. 口頭発表.

【第 5 章】

・ 原著論文

Nishiumi D, Yamaguchi S, Kurokawa T, Wakamiya K, Hirose N. Force-velocity profiling during the braking phase of countermovement jump: Relationship to eccentric strength and validity of the two-point method. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2023. In press.

・ 学会発表

Nishiumi D, Nishioka T, Yamaguchi S, Kurokawa T, Wakamiya K, Hirose N. Relationship between lower limb mechanical capability obtained from force velocity relationship during the braking Phase of countermovement jumps and jump force time characteristics. 27th Annual Congress of the European College of Sport Science. 30 Aug - 2 Sep 2022. e-poster.

第1章 序論

第1節 序

多くの競技スポーツにおいて、物体や自身の身体を短時間で加速させ、大きな速度を獲得することは、非常に重要である。例えば、投球時や蹴球時におけるボールの速度(91)(76)、ジャンプの離地の速度(93)、スプリント時の疾走速度(70)、方向転換時の速度(20)などが挙げられる。これらの競技スポーツにおけるパフォーマンスでは、物体や身体に質量が存在するため、大きな運動量 [kg・m/s] (質量[kg]×速度[m/s]) が求められることとなる。そこで運動量を獲得するために重要な概念となるのが力積[Ns]である。ニュートンの運動方程式より、

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

が得られる。この時 \mathbf{F} は力[N]、 m は質量[kg]、 \mathbf{v} は速度[m/s]、 t は時間[s]を表す。ここで時刻 t_1 から t_2 の間に物体に力が加わり、その間に物体の速度が \mathbf{v}_1 から \mathbf{v}_2 に変化したとすると、

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} m\mathbf{v} dt = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F} dt$$

となり、左辺は $m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1$ に変換され、

$$m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1 = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F} dt \quad \text{①}$$

が得られる。 $m\mathbf{v}$ は運動量を表し、 $\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F} dt$ は力積を示す。したがって運動量の変化は力積で説明され、力積の向上が大きな運動量を獲得するための条件となる。さらに、スポーツ動作中に瞬時に質量が変化することは考えにくいので、質量は一定と過程すると、力積によって物体の速度の変化も決定づけられる。

ここで、冒頭で例に挙げたような競技スポーツの場面において、大きな運動量を獲得するにあたり、考慮しなければならない問題が「時間的制約」である。力積は①の式より、時間を長くすることで大きな力積を獲得することが可能であるが、例に挙げた投球や蹴球、スプリント、ジャンプ、方向転換などの動作では、動作時間が有限であるため、短時間で大きな力積を獲得しなければならない。そこで短時間で大きな力積を獲得するためには、①の式より、単位時間当たりの力を大きくすることが重要であることが分かる。図 1-1 に示したようなジャンプ時の場合、特に動作開始から最大地面反力までの力の変化率を増加させることが重要である(29)。この力の変化率は、Rate of force development (RFD)として知られており、任意の区間における力の変化量を時間の変化量で除した値である(63)。この RFD が増加すると、短時間で大きな力が発生していることを意味するため、時間的制約がある競技スポーツ動作中において重要な役割を担う(67) (94) (61) (28)。そのため RFD を向上させるために、レジスタンストレーニング(6)やジャンプ及びプライオメトリックトレ

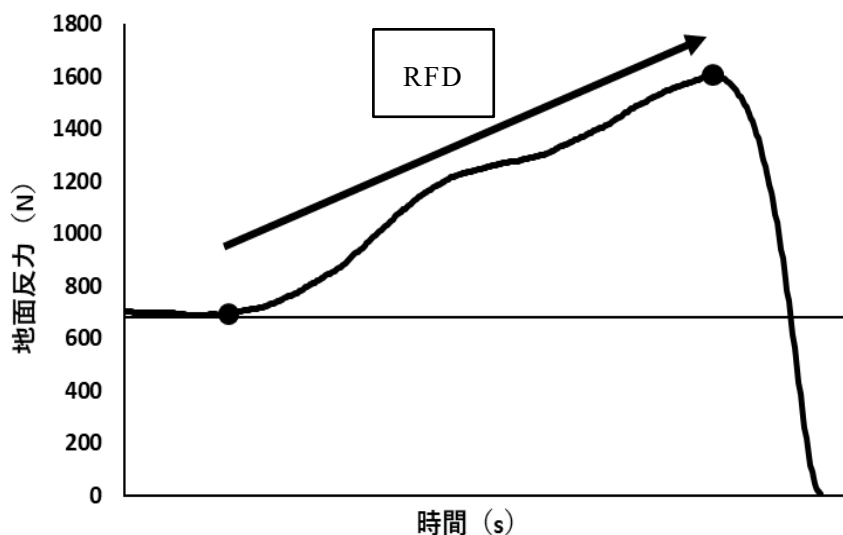


図 1-1：スクワットジャンプにおける Rate of force development (RFD)

ーニング(77) (12)、ウェイトリフティングスタイルトレーニング(47)等が行われている。

RFDには図1-1に示した Concentric 収縮時の RFD (C-RFD) (29) (67)に加えて、等尺性収縮時の RFD (I-RFD) (10) (28)と Eccentric 収縮時の RFD (E-RFD: しばしば CMJにおける反動動作中の最小地面反力から身体重心速度が 0m/s に到達した時点の地面反力の変化率を指す) (9) (17)の3つに大別される。また E-RFD と類似の概念にカウンタームーブメントジャンプ (Counter movement jump: CMJ) の下降局面中に発生する Braking 局面の RFD (B-RFD: しばしば CMJにおける反動動作中の身体重心速度が負の最大速度から身体重心速度が 0m/s に到達した区間の地面反力の変化率を指す) (54) (55)も存在する。C-RFD と I-RFD は、短時間で爆発的な大きな力を発生させる能力と解釈されるが(63)、E-RFD と B-RFD は与えられた速度を短時間で減速させるための大きな力を発生させる能力(37) (36)と解釈される。近年のメタアナリシスによって、高強度の加速頻度よりも高強度の減速頻度の方が多い球技スポーツ(ラグビーやサッカー、陸上ホッケー、アメリカンフットボールなど)が報告され(35)、減速能力の重要性が提唱されている。その減速能力の指標の1つとされているのが CMJ 中の B-RFD であり(37) (64)、自体重の CMJ で測定できるためスポーツ現場において有用である。さらには CMJ パフォーマンスに寄与する要因の1つとしても注目を浴びてきている(55) (16)。しかしながら、第2節で詳述するが、B-RFD を含んだ下降局面の変数は反動戦略によって変化する可能性や(75)、B-RFD と CMJ 高の関連は先行研究間での差異(69)も存在したりするため、B-RFD の意義が不明確な部分があると言わざるを得ない。B-RFD の意義を整理し、明確にすることができれば、次の議論である B-RFD を向上しなければならない理由も明確となる。そこで本論文では、まず反動戦略

を統一したうえでの B-RFD と CMJ 高の関連を明確にして B-RFD の意義を整理し、さらに Braking 局面の力の向上法の検討を行うことを試みた。

第 2 節 関連研究の考証

第 1 項 CMJ 中の Braking rate of force development

CMJ の局面は、近年の Harry et al. (2020) の研究によって、フォースプレートから得られる地面反力-時間曲線をもとに詳細に定義された (表 1-1, 図 1-2) (40)。

本研究の B-RFD は、表 1-1 にて定義された Braking 局面の開始時から終了時の地面反力の変化量を Braking 局面の時間で除した変化率とした。Braking 局面の力積は、重心下降速度が減少しているため、減速のための力積と解釈でき、Unloading 局面から Yielding 局面までに得られた下方向の運動量と一致する。そのため Braking 局面の力積は、Yielding 局面までに得られた運動量に依存する。よって、Braking 局面の力を増加させると時間は短縮し、Braking 局面の力の変化率と定義される B-RFD の向上となって表される。

表 1-1: カウンタームーブメントジャンプの局面分け (Harry et al. 2020)

CMJの局面	定義
Unloading	安静時の地面反力から2.5%減少した時点から最小地面反力の時点まで
Yielding	最小地面反力の時点から最小重心下降速度の時点まで
Braking	最小重心下降速度の時点から速度が0m/sとなった時点まで
Concentric	速度が0m/sとなった時点から地面反力が20Nを下回った時点まで

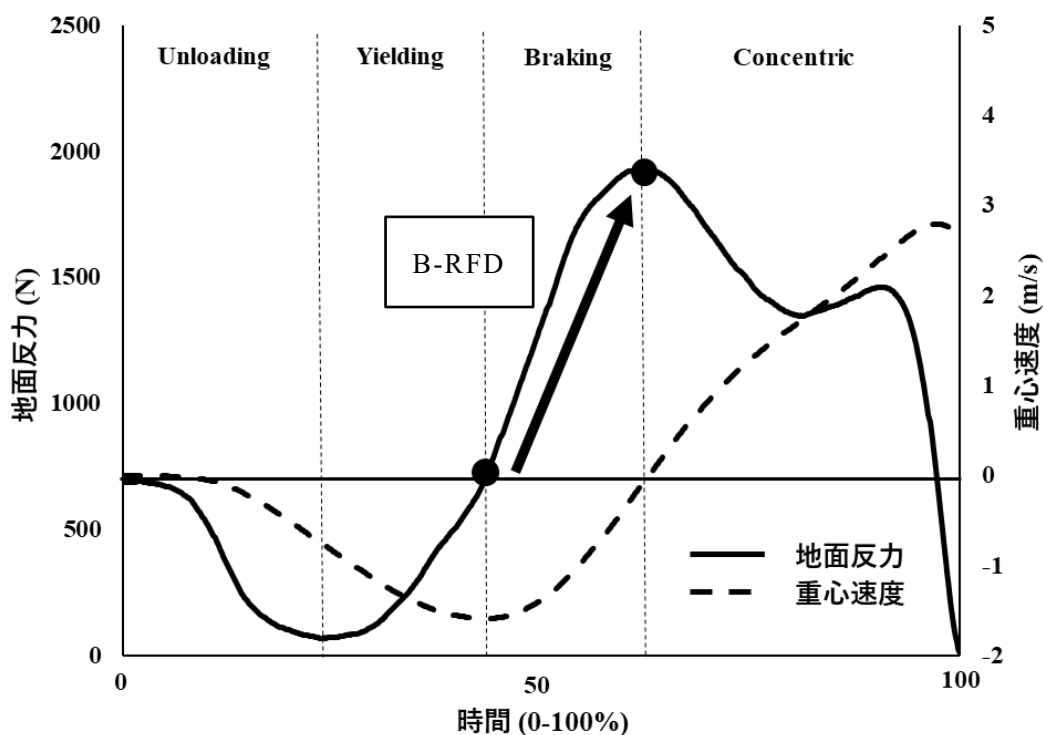


図 1-2：カウンタームーブメントジャンプの局面と

Braking rate of force development (B-RFD) (Harry et al. 2020)

第2項 B-RFD と減速能力の関係

短時間で大きな運動量を獲得するだけでなく、短時間で大きな運動量を減少させる減速能力も競技スポーツにおいては重要である(35) (37) (64)。近年のメタアナリシスによってラグビーや陸上ホッケー、サッカーのプレー中の高強度の減速頻度は高強度の加速頻度よりも多いことが明らかとなっている(35)。また、方向転換速度に対しても減速能力は貢献し(20)、さらには傷害予防にも寄与するなど(64)、減速能力の重要性が認知されてきている。減速能力は、与えられた速度及び運動量を可能な限り短時間で減少させる能力と定義づけられるが(37)、運動量が大きいくほど、それを相殺するための同等な大きな減速の力積が必要となる。

競技スポーツ中においては、時間的制約があり、序論でも述べたように短時間で大きな力積を獲得するには RFD の概念と同様に単位時間当たりの大きな速度の減少が重要となる。Harper らは、短時間で減速のための大きな力積を獲得する能力を「水平減速能力 (Horizontal deceleration ability)」と表現し、加速-減速テスト (図 1-3) にて「減速度[m/s²]」として数値化した(38)。図 1-4 は減速度を示し、スプリント中の最大速度から速度が 0 m/s に至るまでの速度の変化量とそれに要した時間の変化量を除した値 (変化率) としている。この減速度が高い群と低い群の CMJ 中の B-RFD 比較したところ、中程度の効果量が報告された(36)。しかしながら、この方法にはいくつかの問題点がある。1 つ目としては、空気抵抗、気圧、気温の影響を受けるためそれらの環境をそろえた室内で行わなければならないこと、2 つ目は測定の安全性を考慮すると 35m 以上の直線が必要であること、3 つ目はサーフェス及びシューズができるだけ普段の環境と近い環境 (例えば芝生とスパイクなど) で行わなければならないことなどが挙げられる(38)。室内環境が整った 35m 以上の直線かつ普段と同様なサーフェスが確保できる環境はスポーツ現場レベルでは限られた施設でしかできないため課題が残る。その点では自重の CMJ から得られる B-RFD はスポーツ現場でも比較的導入しやすく、臨床的意義は高いと考えられる。また、方向転換の減速能力の指標の 1 つでもある Change of direction deficit (方向転換走の時間から相応の距離の直線走の時間を減じて求める)と B-RFD と同様の概念である E-RFD との負の相関関係も報告されている(96)。これらのことより、水平減速能力の構成要素に B-RFD が含まれ、B-RFD がアスリートの水平減速能力の 1 つの指標とも考えられている(37)。

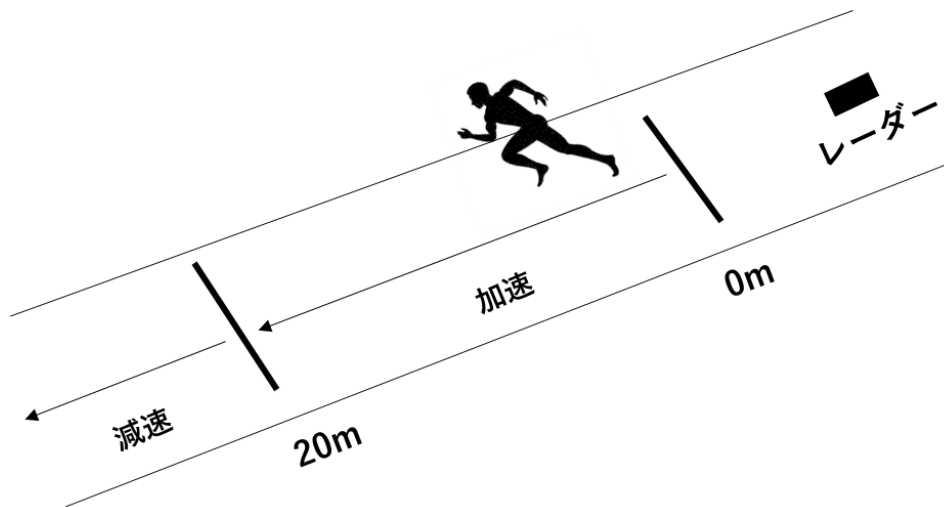


図 1-3：加速-減速テスト（Harper et al. 2020）

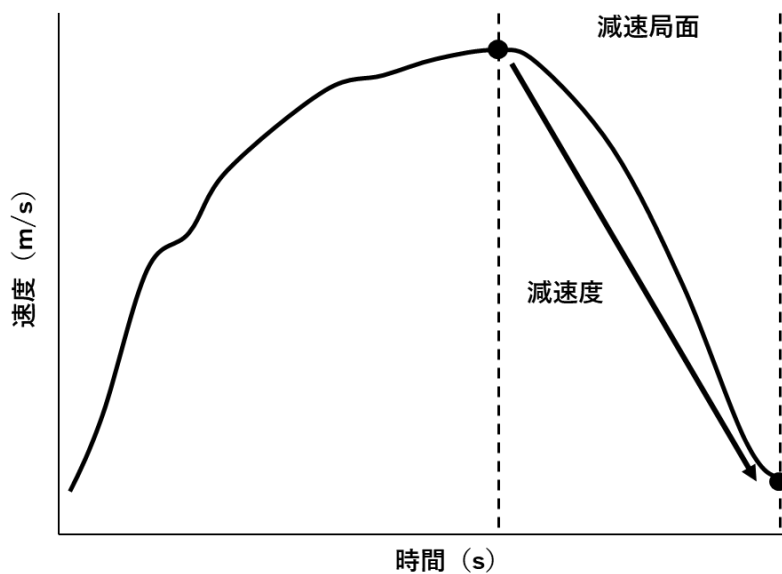


図 1-4：加速-減速テスト時における減速度（Harper et al. 2020）

第 3 項 B-RFD と CMJ パフォーマンスの関係

代表的な CMJ パフォーマンスとして、CMJ 高と修正反応筋力指数（Reactive strength index modified: RSI_{mod}）が挙げられる(24)。ニュートンの法則により、CMJ 高は Concentric 局面の正味の力積によって決定される。

RSImod は、CMJ 高をジャンプ時間（Unloading 局面開始から離地までの時間）で除して算出される(24) (54)。CMJ 高は、スプリント時間(59)や方向転換時間(44)と関連しており、RSImod は爆発的パフォーマンスの指標の 1 つで(84) (24) (54) (52)、ラグビー(68)においては上位リーグ選手と下位リーグ選手との間に有意差と大きな効果量 ($d = 1.11$) が報告されているため、それぞれ重要な指標とされている。

CMJ 中の B-RFD とジャンプ高及び RSImod との関連を調査した研究はいくつか存在する。Laffaye ら（2013）は B-RFD とジャンプ高の有意な相関関係を報告し(55)、Cormie ら（2010）は短期間のトレーニング介入にて、CMJ の地面反力-時間曲線の変化を調査して、ジャンプ高の向上は Braking 局面の力の向上による影響の可能性が高いとしている(16)。RSImod に関しては、Krzyszowski et al.（2022）が高い RSImod 群と低い RSImod 群の B-RFD を比較し、有意な差と大きな効果量 ($d = 1.41$) を報告しており、RSImod を従属変数として重回帰分析をしたところ B-RFD が説明変数の 1 つであったと報告している(54)。この B-RFD が向上することによるジャンプ高向上の理論的背景は、B-RFD が高まると CMJ の Concentric 局面初期のフォースが増加し、Concentric 局面全体の力積が向上することに繋がって、ジャンプ高に寄与すると考えられている(16)。一方 RSImod に関しては、ジャンプ高向上に加え、Concentric 局面の重心上昇速度増加による時間短縮と Braking 局面の時間の短縮がジャンプ時間短縮に繋がるためと考えられている(54)。

一方で近年、B-RFD と CMJ 高が関連しないとする報告もされてきている(69)。Merino-Muñoz et al.は、B-RFD とジャンプ高の関連はなかったとしており(69)、さらに、Araya-Ibacache ら（2022）の研究では、ダイナミックストレッチにて B-RFD は向上したが、ジャンプ高は変化なかったとしている(3)。これらの結果は、前段落で述べた結果と矛盾しており、B-RFD と CMJ 高の関連

については、科学的な合意が得られていない。そのため、この問題を解決する研究が求められる。

第4項 Braking RFDの向上法

上述したようにCMJ高との関連はいまだ不明であるが、水平減速能力及びRSImodの向上に繋がる可能性があるため、B-RFDを向上させることは有益と考えられる。CMJ中の下降局面の変数は異なる反動の速度及び深度で変化するため(74)(75)、異なる反動戦略(異なる反動の速度と深度)によってB-RFDは急性的に変化し得る。反動動作の速度においては、より速く抜重することで、地面反力が大きく低下してUnloadingからYielding局面の下方方向の運動量が増加するため、Braking局面の力積や力も増加せざるを得ない可能性がある。深度においては、2つの要因が考えられ、1つは、より浅い深度においては、下降局面の時間が短くなることに伴ってBraking局面の時間も短くなるため、B-RFDは向上すること、もう1つは、より深い深度はより長いUnloading及びYielding局面に繋がり、速度と同様の要因でB-RFDも増加する可能性がある。しかしながら、B-RFDに対する異なる抜重の速度や深度の影響は検証されていない。さらに、同一の反動戦略下においてBraking局面の地面反力の向上に焦点を当てた研究も見当たらない。

第1項でも述べたように、競技スポーツ動作の特性でもある時間的制約下での大きな力積の獲得には、単位時間当たりの力が重要である。また競技スポーツ動作は、関節運動がダイナミックに行われることがほとんどで、関節運動が生じないアイソメトリック収縮であることはあまり見られない。そのため、短時間での大きな力積獲得時には、筋が力を発揮する状況(すなわち関節角度や角速度)は瞬間瞬間で異なり、筋の長さ-張力関係(43)や力-速度関係(13)が筋力発揮に影響を及ぼし得る。近年、多関節運動の力-速度関係に着目して筋の

発揮する力積やパワーの向上のための介入が試みられている。多関節運動であるジャンプ中の力-速度関係は直線関係になることが分かっており（図 1-5）(78) (7)、高速度及び低速度下においてもより大きな力を発揮できるようになることで、時々刻々と速度が変化する状況下でもより大きな筋力発揮が可能となり、ジャンプにおいては上昇局面の力積の向上に繋がる(78) (49)。このことは、CMJにおける Braking 局面にも同様のことが当てはまる可能性がある。図 1-2 から分かるように、Braking 局面においても速度が 0 に向けて変化しており、Braking 局面の時間は 250ms 未満(68)であることから、高速度及び低速度の状況が起こると考えられる。そのため、Braking 局面においても力-速度関係に着目して向上法の検討をすることは有意義であると考えられる。しかしながら、Braking 局面における力-速度関係は知られていない。

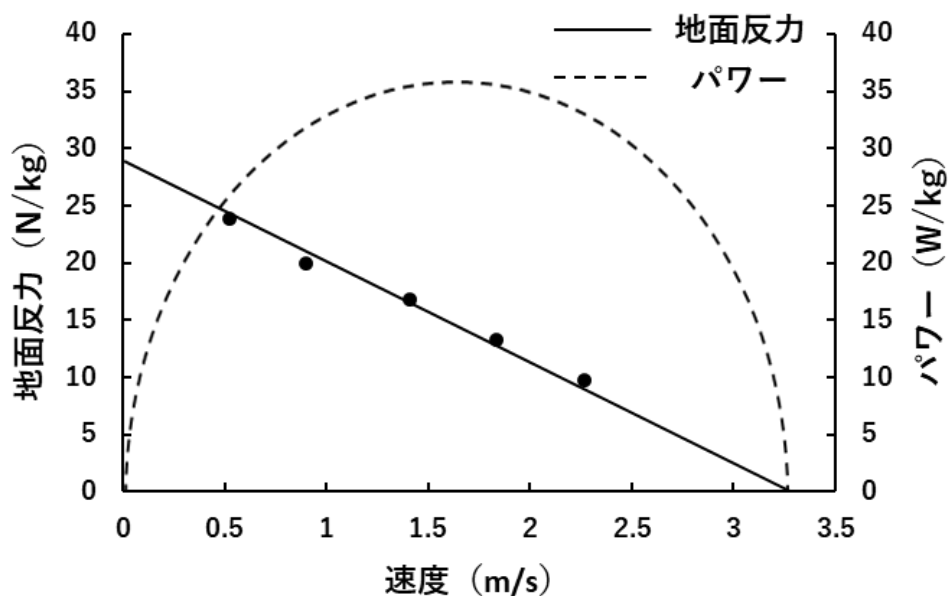


図 1-5：ジャンプ時における力-速度関係

第3節 本論文の目的と構成

Braking RFD の現状をまとめると、CMJ 中に発生する Braking RFD は、Braking 局面中の力を向上させることで増加し、水平速能力及び RSImod と関連があるが、CMJ 高との関連は矛盾した結果が報告されている。また、Braking RFD は反動戦略を変えることで急性的に変化し得るが、直接検証されてはおらず、同一の反動戦略下での Braking 局面の力の向上に着目した研究も見当たらない。CMJ 高との関連を明らかにすることで B-RFD の意義が整理され、向上させるべき理由が明確となる。加えて Braking 局面の力を向上させるには、速度の変化があるため、力-速度関係から考えることは重要であると考えられるが、Braking 局面の力-速度関係は知られていない。よって、本論文の目的は、規定された反動戦略下において a) CMJ 中に発生する B-RFD と CMJ 高の関連を明らかにすること、b) 同一の反動戦略下での Braking 局面の力-速度関係の特徴を調査することの2点とした。

B-RFD と CMJ 高の関連の有無の矛盾の要因を探るため、まずはできるだけ抜け漏れがなく包括的に B-RFD と CMJ 高の関連を調査した研究を集めるために第2章で系統的レビューを行った。次に第2章で先行研究間の差異の考えられる要因を第3章及び4章の研究にて検証を行った。そして第5章の研究にて Braking 局面の力-速度関係の特徴を調査し、最後の第6章の総合論議、第7章の結論で本論文を構成した。

第2章から第5章までの研究の概要は下記の通りである。

「第2章 カウンタームーブメントジャンプ中の下降局面の変数とジャンプ高との関連：システマティックレビュー」

CMJ 中の反動動作中の変数と CMJ 高との関連を調査した研究を PRISMA 声明に則って、系統的レビューを行った。併せて下降局面の変数と CMJ 高との関連が矛盾する考えられる要因の検討を行った。

「第 3 章 **Braking rate of force development** 及び償却時の力はジャンプ高向上に寄与するのか？-横断的観測から」

第 2 章で考えられた要因である「B-RFD 及び償却時の地面反力の増大による Concentric 局面前期の地面反力の向上は、力-速度関係の影響により Concentric 局面後期の地面反力の減少に関連している可能性」について相関分析によって検討した。

「第 4 章 -相殺効果- **Braking rate of force development** 及び償却時の地面反力の向上はジャンプ高の向上に寄与しない」

第 3 章にて、B-RFD 及び償却時の地面反力と Concentric 局面後期の地面反力は有意な負の相関関係が認められ、仮説の通りの結果となったため、急性的に B-RFD 及び償却時の地面反力を変化させた際のジャンプ高への影響を調査した。また Concentric 局面中の前半と後半の地面反力の変化率の間で相関分析を行い、前半の力の上昇分と後半の力の減少分の相殺効果を調査した。

「第 5 章 **Braking** 局面における力-速度プロフィール -Eccentric 筋力との関連及び 2 点法の妥当性検証-」

Braking 局面における力-速度関係の特徴を調査した。またそれが他のパフォーマンス指標とどのような関係にあるのか、さらにはトレーニング指導現場で比較的測定負荷が少ないとされる 2 点法の妥当性の検証を行った。

第2章 カウンタームーブメントジャンプ中の下降局面の変数とジャンプ高との関連：系統的レビュー

第1節 緒言

CMJ高は、直線スプリント(59)や方向転換能力(COD)(44)のような運動能力だけでなく、バレーボール(80)、サッカー(42)、バスケットボール(81)などの競技における競技レベルとも関連しており、CMJ高の向上は、競技スポーツにおいて従来からの関心事となっている。

ジャンプ高はニュートンの運動第二法則に従った Concentric 局面の正味の力積によって規定される。この観点から、CMJ高の向上には Concentric 局面の力積の増大が必要である。この力積は、Concentric 局面初期で大きな力を発揮し、後期まで大きな力をできるだけ維持することによって向上させることが可能である(29)。そのため、Concentric 局面初期の地面反力および最大地面反力を増加させるために負荷を用いたジャンプやスクワットトレーニングが行われている(16)。

また、Concentric 局面初期の地面反力を向上させる 1つの方法として Concentric 局面直前に反動動作を使用することが挙げられる(8)。この反動動作により、Braking 局面において大きな力を発生させることができ、これにより、Concentric 局面全体の力積が向上し、それによって CMJ高も向上する可能性がある(16)。しかしながら、Braking 局面の力の指標である B-RFD と CMJ高は関連しないとする報告も存在し(69)、先行研究間で差異がある。

したがって、本研究の目的は、CMJ中の下降局面中に発生する RFD 及び地面反力の変数と CMJ高との関連を系統的レビューにて整理し、先行研究間の見解の差異の要因を検討することとした。

第 2 節 方法

検索方法と情報源

本系統的レビューは、2020 年の系統的レビューおよびメタアナリシスに関する報告項目 (PRISMA) ガイドラインに則った(73)。本研究はヒトを被験者対象としていないため、倫理審査委員会の承認は必要なかった。文献検索は、2022 年 9 月 30 日に 1 人の検者によって行われ、PubMed、Web of Science、および Scopus の電子データベースを使用した。検索語は表 2-1 に示した。

表 2-1: 文献検索に用いた検索語

検索語
("eccentric strength" or "eccentric force" or "eccentric power" or "eccentric velocity" or "eccentric impulse" or "eccentric moment" or "eccentric torque" or "eccentric time" or "eccentric duration" or "braking strength" or "braking force" or "braking power" or "braking velocity" or "braking impulse" or "braking moment" or "braking torque" or "braking time" or "braking duration" or "negative strength" or "negative force" or "negative power" or "negative velocity" or "negative impulse" or "negative moment" or "negative torque" or "negative time" or "negative duration" or "downward strength" or "downward force" or "downward power" or "downward velocity" or "downward impulse" or "downward moment" or "downward torque" or "downward time" or "downward duration" or "descending strength" or "descending force" or "descending power" or "descending velocity" or "descending impulse" or "descending moment" or "descending torque" or "descending time" or "descending duration" or "deceleration strength" or "deceleration force" or "deceleration power" or "deceleration velocity" or "deceleration impulse" or "deceleration moment" or "deceleration torque" or "deceleration time" or "deceleration duration") and ("jump")

適格基準

本研究のための PECO (Population, Exposure, Comparator, and Outcome) は、Population : 16~40 歳のアスリート、Exposure : CMJ 下降局面の RFD、Comparator : CMJ 高、Outcome : 相関係数 (r) または効果量 (Cohen's d) とした。包含基準は、1) 英語で記述されていること、2) 横断的研究デザインであること、3) 健康な 16~40 歳のアスリートであること、4) 力および/または

時間および/または RFD および/または力積の測定をしていること、5) CMJ 高の測定をしていることとした。除外基準は、1) 相関分析または群間比較が行われていないもの、2) 群間比較研究において、CMJ 高を基準にしたグループ分けが行われていないものとした。

研究論文の選択

データベースから得られた文献の題名と抄録は、3人の検者によって独立して評価された。その後、選ばれた文献の全文は3人の検者によって独立して評価された。3人の間で意見が異なった場合は、会議にて3人の合意によって解決された。

質的評価（バイアスのリスク評価）

研究論文の質的評価は、修正された Downs and Black のチェックリスト(22)の形式を用いて、2人の検者によって独立して実施された。このチェックリストは、横断的研究に合わせて調整されたものであり(48)(18)、本レビューでも同様に使用された。チェックリストには13の項目[1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 16, 18, 20, 25]があり、最大得点は14点であった。チェックリストの中で唯一、最大得点が2点となる項目は[5]であった(2="はい"、1="部分的に"、0="いいえ")。質的評価の得点が10点以上は高い、5~9点は中程度の品質、4点以下は低いを示す。独立した質的評価の後、最終的な得点を決定するために合意を得るための会議が行われた。

データ収集とデータ項目

表 2-2 では、含まれた研究の主な結果をまとめた。表 2-2 の項目は以下のよう
に定義された：[1] 文献、[2] グループ、[3] 被験者数、[4] 年齢、[5] 競技

の種類、[6] ジャンプの種類、[7] 下降局面の変数、[8] 測定項目、[9] 算出方法、[10] 反動戦略、[11] 腕振り戦略、[12] 統計解析の結果。

CMJ の各局面の用語定義

本研究に含まれた先行研究では、CMJ の各局面に関して類似の定義が使用されていたが、各局面に使用された用語は異なっていた。したがって、本研究では以下のように統一された用語が使用された(40)。Unloading 局面：反動動作の開始から最小の地面反力までの区間、Yielding 局面：最小の地面反力から最大の負の重心速度までの区間、Braking 局面：最大の負の重心速度から重心速度が 0 m/s に達した区間、Eccentric 局面：Yielding 局面の開始から Braking 局面の終了までの区間、Concentric 局面：Eccentric 局面終了から離地までの区間、償却時の地面反力：Concentric 局面開始時の地面反力。

CMJ 高の算出方法

CMJ 高の算出方法は研究によって異なり、力積-運動量法と滞空時間法が使用されていた。力積-運動量法と滞空時間法の計算方法はそれぞれ以下の通りである(92)。

$$h = Vto^2/2g \quad (\text{力積-運動量法})$$

$$h = gt^2/8 \quad (\text{滞空時間法})$$

ここで、 h は CMJ 高、 Vto は離地時の重心速度、 g は重力加速度、 t は滞空時間を示す。

効果量の解釈

報告された Cohen's d および Pearson's r の効果量は、それぞれ以下のように解釈した。小： > 0.2 、中： > 0.5 、大： > 0.8 (14)；微小： < 0.1 、小： > 0.1 、中程度： > 0.3 、高： > 0.5 、非常に高い： > 0.7 、ほぼ完全： > 0.9 (46)。

第3節 結果

研究の選択

最初の文献検索にて合計 805 件の研究が選択された。そのうち 801 件はデータベース検索によるもので（それぞれ PubMed から 308 件、Web of Science から 218 件、Scopus から 275 件）、4 件は手動検索によるものであった。重複した文献 165 件を除外し、結果として 640 件の研究が残った。次に文献の題名と抄録の評価によって 85 件の結果が得られた。最終的に全文の評価によって 6 件の研究が得られ、これらが本研究で詳細にレビューされた（図 2-1）。

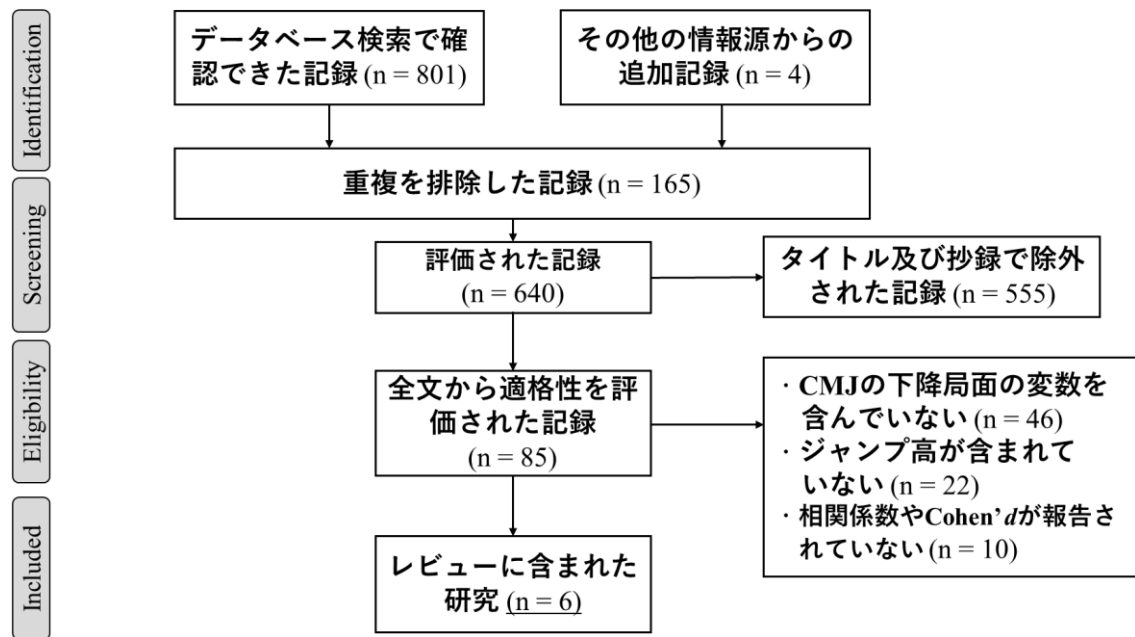


図 2-1: 文献選択過程の PRISMA フローチャート

包含された文献の特徴

このレビューには、下降局面の RFD 及び地面反力、時間、速度と CMJ 高との関係を調査した 6 件の横断研究が含まれた(表 2-2)。被験者の特徴に関しては、5 件の研究がチームスポーツのアスリートを対象にしていた(55) (26) (4)

(69) (66)。2 件の研究には陸上競技選手(30) (66)、2 件の研究にはレクリエーションレベルの参加者(30) (55)、が含まれた。チームスポーツは、サッカー、ラグビー、バスケットボール、フットボール、バレーボール、野球、ホッケーが含まれていた。下降局面の変数は、全ての研究で CMJ 中に計測された。統計解析については、4 件の文献は関連性をピアソンの積率相関分析で報告し (55) (4) (69) (30)、残りの 2 件の研究は異なるグループ間の比較を通じて検証して、効果量を報告していた (26) (66)。CMJ 高は、4 件の文献で力積-運動量法を用いて計算され(55) (26) (4) (66)、1 件の文献で滞空時間法が使用されていた(69)。また、残り 1 件の文献では算出方法について記述がなかった(30)。CMJ の反動戦略は、5 件の文献で制限されておらず(55) (26) (4) (69) (66)、残りの 1 つの文献では記述がなかった(30)。腕のスイング戦略は、制限なく腕振りを用いた文献が 1 件 (55)、腕振りを用いなかった文献が 5 件(30) (26) (4) (69) (66) であった。

質的評価 (バイアスのリスク評価)

レビューされた先行研究における修正された Downs and Black チェックリストのスコアは、9 から 11 点までの範囲であった。質的評価で 5 つの研究は高いと見なされ(55) (4) (30) (69) (66)、1 つは中程度あった (26)。表 2-3 に、各項目のスコアを示した。

表 2-2: 本研究に含まれた文献の主な結果

文献	グループ	被験者数	年齢 (平均 ± 標準偏差)	競技の種類	ジャンプの種類	下降局面の変数	測定項目	算出方法	反動戦略	腕振り戦略	統計解析の結果
Gonzalez-Badillo and Marques [28]	N/A	48	22.5 (N/A)	トレーニング経験者、陸上	loaded CMJ (17kg)	Unloading ~ yieldingの地面反力	ジャンプ高	N/A	N/A	バーベルを握る	$r = 0.67 \sim 0.584$ $p < 0.05$
						Unloading ~ yielding 局面の時間					$r = -0.335$ $p < 0.05$
											$r = -0.297$ $p < 0.05$
Lafaye et al. [19]	N/A	273	28 (N/A)	トレーニング経験者、バスケットボール、フットボール、バレーボール、野球	CMJ	B-RFD	ジャンプ高	力積-運動量法	制限なし	制限なし	$r = 0.52$ $p < 0.01$
						B-RFD/体重					$r = 0.40$ $p < 0.01$
						エキセントリック局面の時間					$r = -0.21$ $p < 0.01$
Flori'a et al. [20]	高ジャンプグループ	17	17.8 ± 1.2	ラグビー	CMJ	Braking局面の地面反力					$d \geq 0.7$ $p < 0.049$
						後期のB-RFD	ジャンプ高	力積-運動量法	制限なし	腰に当てる	$d \geq 0.7$ $p < 0.046$
						下降局面の速度					$d \geq -0.7$ $p < 0.049$
Banker et al. [21]	N/A	26	19.65 ± 1.23	サッカー	CMJ	Unloading局面の地面反力	ジャンプ高	力積-運動量法	制限なし	腰に当てる	$r = -0.101$ $p > 0.05$
						Unloading局面のRFD					$r = 0.018$ $p > 0.05$
						E-RFD					$r = 0.097$ $p > 0.05$
Merino-Muñoz et al. [23]	N/A	21	24.4 ± 4.0	サッカー	CMJ	償却局面の地面反力	ジャンプ高	落空時間法	制限なし	腰に当てる	$r = 0.319$ $p = 0.158$
						B-RFD					
						Unloading ~ yielding局面の時間					$d = 0.13$ $p > 0.05$
McHugh et al. [24]	高ジャンプグループ	19	21 ± 3	陸上ホッケー、ラグロス、サッカー、バスケットボール、陸上、フットボール、ラグビー、スキー	CMJ	最小地面反力					$d = 0.64$ $p > 0.05$
						償却局面の地面反力	ジャンプ高	力積-運動量法	制限なし	腰に当てる	$d = 1.20$ $p < 0.05$
						B-RFD					$d = 1.15$ $p < 0.05$
McHugh et al. [24]	低ジャンプグループ	17	21 ± 3	陸上ホッケー、ラグロス、サッカー、バスケットボール、陸上、フットボール、ラグビー、スキー	CMJ	Braking局面の時間					$d = 0.99$ $p < 0.05$
						エキセントリック局面の力					$d = 1.19$ $p < 0.05$

表 2-3: 質的評価の結果

文献	1	2	3	5	6	7	10	11	12	16	18	20	25	点数	品質
Gonza'lez-Badillo and Marques	1	1	1	2	1	1	0	0	0	1	1	1	0	10	高い
Laffaye et al.	1	1	1	2	1	1	0	1	0	1	1	1	0	11	高い
Flori'a et al.	1	1	1	2	1	0	0	1	0	1	1	0	0	9	中程度
Merino-Muñoz et al.	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	10	高い
Barker et al.	1	1	1	2	1	1	0	0	0	1	1	1	0	10	高い
McHugh et al.	1	1	1	2	1	1	1	1	0	1	1	0	0	11	高い

CMJ 高との関連

B-RFD は 3 件の文献で(55) (66) (26)、Braking 局面の地面反力は 2 件の文献で (26) (30)で、CMJ 高と関連すると報告された。一方、それぞれ 1 件ずつの文献で B-RFD (69)及び E-RFD (4)と CMJ 高の間に有意でない相関関係が報告されていた。また、Braking 局面の力積(30)と時間 (66)、Eccentric 局面の時間 (55)と地面反力(66)、償却時の地面反力 (66)はそれぞれ 1 件ずつの文献で CMJ 高との関連が報告されたが、1 件の文献(4)で償却時の地面反力と CMJ 高との有意な関連は確認されなかった。

第4節 考察

本研究は、CMJのB-RFD及び下降局面中の変数とCMJ高との関連性を調査した研究を選定し、要約した。著者が知る限りでは、本研究がこのテーマに関する初めての系統的レビューである。CMJのB-RFDやBraking局面の地面反力は、一部の研究ではCMJ高と関連していたが、B-RFD及びE-RFDとの関連性が見られなかったとの報告も存在しており、研究間での差異が見られた。

CMJ高とB-RFDおよびBraking局面の地面反力が関連する要因として、Concentric局面の初期の地面反力の増加が挙げられる。Concentric局面の直前（すなわちBraking局面から償却時）に大きな力が発生すると、Concentric局面初期の地面反力が増加し、それがConcentric局面全体の力積の向上に繋がってCMJ高が向上すると考えられる(16)。一方で、CMJ高とB-RFDやE-RFD、償却時の地面反力との関連性が見られない要因としては、Concentric局面後期の重心上昇速度の増加が力の発揮を妨げる可能性が考えられる。反動の使用はConcentric局面の初期の力を増加させるが、同時に重心上昇速度も増加させる。この速度の増加がConcentric局面後期にも影響を及ぼして重心上昇速度増加に繋がり、筋の力-速度関係(13)のために力の発揮が妨げられる可能性がある。しかし、これは研究で直接証明されているわけではなく、推論の域を出ない。

他の考えられる要因として、先行研究では反動戦略（反動動作の速度と深度）が制限されていなかったことが挙げられる。CMJの力-時間曲線の単峰と双峰の形における地面反力の変数を比較した研究では、単峰群は双峰群と比較して有意に浅い反動の深度とより高いB-RFD及びBraking局面の地面反力を示したが、両群間のCMJ高には有意な差がなかった(66)。これは、反動の深度が下降局面の変数に影響を与え、これらの変数とCMJ高との関連性は反動戦略を統一しない限り正確に調査されない可能性を示唆している。本レビュー

に含まれた文献では、反動戦略を統一していないか記述がなかった。今後の研究で CMJ の B-RFD をはじめとする下降局面の変数と CMJ 高の関連性を調査するには、統一された反動戦略を使用する必要があるだろう。

また、腕振り戦略も CMJ 中の地面反力に影響を与える(34)。本レビューに含まれた文献は、腕振りを使用した状態での CMJ と使用しない状態での CMJ が混在していた。しかし、腕振りを使用するかどうかに関わらず、それぞれの研究で、B-RFD と CMJ 高との関連を見出していた(55) (26) (66)。これは、腕振り戦略の有無が B-RFD と CMJ 高との関連に関与していなかった可能性を示唆している。B-RFD と CMJ の関連を調査する際には、反動の速度や深度は統一しなければならないが、腕振り戦略は統一してもしなくても影響はないと考えられる。

Braking 局面の力の変数に加えて、CMJ 高と関連する他の変数には、Unloading から Braking 局面の力積、時間、負の速度も含まれていた。Braking 局面の力積は、Unloading 局面と Yeilding 局面で獲得された運動量で決定される。そのため、Unloading 局面と Yeilding 局面で獲得された下向きの力と速度の増加は、Braking 局面の力積を増加させる。同時に、Unloading 局面から Braking 局面までの時間は短くなる。これは前述のように、Concentric 局面初期の地面反力が増加することがあり、CMJ 高と関連を示した要因である可能性がある。

本研究の限界は、CMJ の下降局面の変数と CMJ 高との間に直接の因果関係を示すはできないこと、および研究間で測定される CMJ の方法（反動戦略と腕振り戦略）が異なり、統合的なメタ分析が行うことができなかった点である。

第 5 節 結論

B-RFD と CMJ 高との関連は先行研究間で差異があり、科学的な合意は得られていない。B-RFD を増加させることで Concentric 局面初期の力が向上する可能性があるが、必ずしも CMJ 高に寄与するわけではない可能性もある。今後の研究として、CMJ の反動の速度と深度が下降局面の変数に影響を及ぼしてしまうため、反動戦略を統一した上で B-RFD をはじめとする下降局面の変数と CMJ 高との関連を調査すること、加えて筋の力-速度関係が関連しないことの説明となり得るか検討が行われるべきだと考えられる。

第3章 Braking rate of force development 及び償却時の力はジャンプ高向上に寄与するのか？-横断的観測から-

This is an 'Original Manuscript' of an article published by Taylor & Francis Group in *Sports Biomechanics* on 2023, available online: DOI:

10.1080/14763141.2023.2232340

第1節 緒言

第2章までで触れてきているように、大きな B-RFD は Concentric 局面初期の力を向上させる(16)。これは B-RFD が向上すると Concentric 局面開始時の償却時の力の増加に繋がるためである。しかし、必ずしもこのメカニズムが CMJ 高へ寄与するとは限らない可能性があり、第2章の系統的レビューより、B-RFD と CMJ 高の関連を示す文献と示さない文献が混在している。Concentric 局面初期の地面反力増加は、重心速度の増加を意味し、その結果 Concentric 局面後半でも重心速度が増加して、より速い筋収縮速度が必要とされ、筋力-速度関係(13)が力の発揮に負の影響を及ぼす可能性がある。したがって、より大きな B-RFD が常にジャンプ高に寄与するわけではないと考えられるが、この仮説を検証した研究は知られていない。

また、多関節運動と単関節運動における力-速度関係は異なり、多関節運動は直線関係を示す(78)。CMJ は多関節運動であるため、多関節運動の力-速度関係で調査されるべきである。しかし著者の知る限り CMJ 中の地面反力と多関節運動の力-速度関係との関連は調査されていない。大きな B-RFD と償却時の地面反力が Concentric 局面後半の力の発揮に与える影響を調査するためには、CMJ 中の地面反力と多関節運動の力-速度関係との関連が明らかにされる必要がある。

したがって、本研究の目的は、1) B-RFD 及び償却時の地面反力と Concentric 局面後半の地面反力及びジャンプ高との関連、2) 多関節運動の力-速度関係と CMJ 中の地面反力との関連を調査することとした。CMJ の Concentric 局面後半の力は多関節運動の力-速度関係の高速領域の能力と関連しており、さらに大きな B-RFD と償却時の地面反力は、Concentric 局面後半の力と負の相関関係を有すると仮説を立てた。

第 2 節 方法

実験参加者

参加者は 27 人の健康な男性（年齢： 20 ± 1 歳、体重： 76.2 ± 8.3 kg、身長： 173.5 ± 4.7 cm；平均 \pm 標準偏差）で、少なくとも 1 年間のレジスタンストレーニング経験を有していた。すべての参加者は、自身の体重（BM）の 120% を使用して安全に CMJ を行うことができ、筋骨格系の疾患を有していなかった。参加者の数は、事前に G*Power 3.1（Heinrich-Heine-Universität Dusseldorf, North-Rhine Westphalia, Germany）を使用して事前検定によって決定された。事前検定に使用された統計学的検定力、統計学的有意水準、効果量はそれぞれ 0.8、0.05、0.52、とした。統計学的検定力と統計学的有意水準は Cohen のガイドライン(14)に基づいて決定され、効果量は先行研究(55)に基づいて決定された。本研究は早稲田大学倫理審査委員会によって承認され、ヘルシンキ宣言に従って実施された。すべての参加者にはリスクについて口頭および書面で説明し、同意書に署名することで同意を得た。

実験手順

本研究は 2 日にわたって実施された。参加者は、1 日目に自体重の CMJ と負荷を用いた CMJ の練習試技を行い、2 日目に測定を行った。2 日目の前日には下肢のウェイトトレーニングを控えさせた。1 日目には、ステーションナリーバイクと動的ストレッチを含む 10 分間の所定のウォーミングアップを行った。動的ストレッチは、両側の大腿四頭筋、ハムストリングス、大殿筋のストレッチを 5 回ずつ、ランジ動作を左右 5 回ずつ、胸郭の回旋運動を左右 10 回ずつ行うものとした。その後、自体重（0%）CMJ と 32 kg、60%、80%、100%、120% BM（体重: Body mass）の負荷を使用した CMJ の練習を行った。各条件で少なくとも 2 回の練習試技を、2 日目の測定と同様のスミスマ

シンを用いて行った。それによって参加者は規定された反動動作の深度（膝関節屈曲 90 度）と速度（最大随意速度）に慣れることができた。2 日目には、身長と体重の測定を行った後、1 日目と同様のウォーミングアップを行い、その後 0% CMJ と 5 つの負荷を用いた CMJ の測定を行った。すべての条件の CMJ は 2 回ずつフォースプレート上で測定した。1 日目と 2 日目は、疲労の影響を排除するために 3 日から 1 週間を空けた(85)。この期間中の下肢のウェイトトレーニングは禁止とした。

CMJ の測定方法

0% CMJ は、肩に 0.5 kg のカーボンバーを担いで行った。負荷を用いた CMJ（32 kg、60%、80%、100%、120% BM）は、1 日目の練習セッションと同様のスミスマシン（KEISER Inc., USA）を使用して測定された。最も軽い負荷の CMJ は、使用したスミスマシンで最小の重量である 32 kg を使用して行った。ウェイトシャフトはハイバーの位置（僧帽筋の上）に担ぎ、足幅は肩幅、足部はわずかに外転させた位置に置いた。反動の深度と速度は下降局面の地面反力の変数に影響を与えるため(74) (75)、反動戦略を規定し、深度は膝関節 90 度の深度に、速度は各実験参加者の最大随意速度と規定した。反動動作の深度の目安として光電管（VoltOnoSprint, S-CADE Inc., Japan）を、膝関節が屈曲 90 度に達したときに音が鳴るよう参加者の臀部の下に配置した。反動動作の速度の規定として、各実験参加者の各 CMJ の試行の前に、「できるだけ速くしゃがんで、できるだけ速くジャンプしてください」と指示をした。CMJ の測定前のウォーミングアップとして、0% CMJ を 3 回ずつ 2 セット、各負荷の CMJ を 1 回ずつ行った。最初に 0% CMJ を測定し、その後に負荷を用いた CMJ をランダムな順序で測定した。試行間には少なくとも 2 分間の休憩時間を設け

た。膝関節 90°の深度に反動動作が達しなかった試行は除外され、2分間の休憩後に再度測定した。

データ解析

CMJの地面反力は、フォースプレート（9287CA、KISTELR Inc., Japan）にて1000 Hzで測定した。得られた波形はローパスフィルタ（50 Hz）を使用して処理した(41)。CMJ試行の前に、実験参加者にフォースプレート上で1秒間静止させ、システム重量[N]（体重+外部負荷）とそれを重力加速度（ 9.81m/s^2 ）で除すことでシステム質量[kg]を取得した。台形法を用いてシステム重心の加速度と速度を算出した(58)。すなわち得られた地面反力からシステム重量を差し引くことで正味の地面反力を算出して、それをシステム質量で除して加速度算出した。得られた加速度を時間で積分してシステム重心の速度を求めた。CMJの局面分けは、第2章で定義した通りとした。

B-RFDは、次の式を使用して計算した：

$$\text{B-RFD} = (\text{Braking } F_{\text{end}} - \text{Braking } F_{\text{start}}) / t_{\text{Braking}}$$

ここで $\text{Braking } F_{\text{end}}$ は Braking 局面の終了時の地面反力、 $\text{Braking } F_{\text{start}}$ は Braking 局面の開始時の地面反力、 t_{Braking} は Braking 局面の持続時間を指す。償却時の地面反力（ AmF ）は、償却時に発揮された力を指す。B-RFD及び AmF は 0%CMJ から算出した。CMJ高は、第2章で示した力積-運動量法を用いて算出した。

多関節運動の力-速度関係は、Samozino et al. (2012) によって提案されたジャンプ中の力-速度プロフィールを用いた(78)。Concentric 局面の理論上の最大地面反力（すなわち、地面反力軸の切片[F_0]）および理論上の最大速度（すな

わち、速度軸の切片[V0])は、体重、各CMJ条件の外部負荷、CMJ高、プッシュオフ距離をSamozinoのExcelシートに挿入して計算した。Concentric局面前半の平均地面反力(EMF)および後半の平均地面反力(LMF)は、Concentric局面の時間で半分に2分割し、それぞれ前半と後半の各局面の平均値を参加者の体重で除して計算した。個々のConcentric局面の力発揮能力を正規化するため、EMFに対するLMFの比率として、LMFをEMFで除した値(L/E)を求めた。

統計解析

すべての結果は平均 ± 標準偏差(SD)で示された。統計解析は、Statistical Package for the Social Sciences (SPSS 28, IBM Corp., USA)を使用して実施した。データの信頼性を検定するために変動係数(CV)を算出し、CVが<10%の場合、許容される信頼性とみなされた(15)。すべてのデータの正規性を確認するためにShapiro-Wilk検定を使用して分析した。変数間の関連を分析するために、正規分布および非正規分布のデータは、それぞれPearsonの積率相関係数(r)およびSpearmanの順位相関係数(ρ)を使用した。相関係数は次のように解釈した：微小(< 0.1)、小(> 0.1)、中程度(> 0.3)、高(> 0.5)、非常に高(> 0.7)、ほぼ完璧(> 0.9) (46)。統計学的有意水準は $p < 0.05$ とした。

第3節 結果

表 3-1 および表 3-2 には、それぞれ CV と相関分析の結果を示した。すべての結果の CV は 10%未満となり、信頼性が認められた。B-RFD と L/E の間、および AmF と L/E の間には有意な高いもしくは非常に高い負の相関関係が認められた。F0/BM と EMF、LMF の間には有意な正の高い相関関係が認められた。また、V0 と LMF の間にも有意な正の高い相関関係が認められた。一方で、B-RFD と CMJ 高との間、また AmF と CMJ 高との間には有意な相関関係は認められなかった。

表 3-1: 結果の値と変動係数

	値	CV (%)
B-RFD (N/s/kg)	93.7 ± 24.0	4.4 ± 4.2
AmF (N/kg)	25.1 ± 2.5	1.9 ± 1.6
L/E (N/kg)	0.78 ± 0.06	3.0 ± 4.6
EMF (N/kg)	21.4 ± 1.7	3.1 ± 4.9
LMF (N/kg)	16.6 ± 1.4	2.1 ± 2.2
V0 (m/s)	2.91 ± 0.32	5.0 ± 3.5
F0/BM (N/kg)	31.9 ± 3.2	2.1 ± 1.6
CMJ height (m)	0.36 ± 0.06	2.9 ± 2.5

B-RFD;Braking 局面の力の立ち上がり率, AmF; 償却時の地面反力, L/E; Concentric 局面後半の平均地面反力を前半の平均地面反力で除した値, EMF; Concentric 局面前半の平均地面反力, LMF; Concentric 局面後半の地面反力, V0; 理論上の最大速度, F0/BM; 体重で正規化した理論上の最大地面反力, CMJ height; カウンタームーブメントジャンプ高, * $p < 0.05$.

表 3-2: 各変数間の相関係数

	B-RFD	AmF	L/E	EMF	LMF	V0	F0/BM	CMJ height
B-RFD (N/s/kg)	1.00	0.84*	-0.53*	0.75*	0.18	0.12	0.44	0.36
AmF (N/kg)		1.00	-0.72*	0.75*	0.02	0.10	0.35	0.24
L/E (N/kg)			1.00	-0.45*	0.53*	0.30	0.07	0.38
EMF (N/kg)				1.00	0.51*	0.34	0.66*	0.51*
LMF (N/kg)					1.00	0.61*	0.69*	0.83*
V0 (m/s)						1.00	0.02	0.71*
F0/BM (N/kg)							1.00	0.59*
CMJ height (m)								1.00

B-RFD;Braking 局面の力の立ち上がり率, AmF; 償却時の地面反力, L/E; Concentric 局面後半の平均地面反力を前半の平均地面反力で除した値, EMF; Concentric 局面前半の平均地面反力, LMF; Concentric 局面後半の地面反力, V0; 理論上の最大速度, F0/BM; 体重で正規化した理論上の最大地面反力, CMJ height; カウンタームーブメントジャンプ高, * $p < 0.05$.

第4節 考察

本研究では、反動戦略を規定したうえで、B-RFD及びAmFとCMJ高およびConcentric局面後半の地面反力との関連を調査した。さらに、多関節運動の力-速度関係とCMJ中の地面反力の関連についても調査した。B-RFDおよびAmFとL/Eとの間に有意な負の相関関係が認められたが、CMJ高との有意な相関関係は認められなかった。これは、Braking局面からConcentric局面前半までの大きな地面反力はConcentric局面後半の地面反力に負の影響を及ぼす可能性があり、仮説を支持する結果となった。さらに、F0はEMFとLMFの両方と関連があったが、V0はLMFとのみ有意な相関が認められた。この結果は、Concentric局面後半の力はV0と関連しており、これもおおむね仮説を支持するものであった。

本研究では、B-RFDおよびAmFとCMJ高との間に有意な相関関係は認められなかった（相関係数はそれぞれ $r = 0.36, 0.24$ ）。これはMerino-Muñoz et al. (2020)によって報告された以前の結果と一致しており、B-RFDとCMJ高との間に有意でない正の相関関係（ $r = 0.319$ ）が報告されている(69)。理論的には、Braking局面の時間が一定の場合、この局面中の力の増加はB-RFDの増加に繋がり、その後AmFの増加を引き起こす。つまり、Concentric局面初期の力の増加に繋がる。Cormie et al. (2010)は介入研究を行い、CMJ高の増加はBraking局面の地面反力が向上したことによるConcentric局面初期の地面反力の増加が全体の力積の増加に寄与した可能性を報告している(16)。しかしながら、この研究のトレーニング介入には、Concentric局面の力を向上させる要素も含まれており、そのトレーニング効果としてConcentric局面後半の地面反力が低下せずに済んだ結果とも解釈が可能である。そのため、増加したBraking局面の力だけによる効果と断定することは難しいと考えられる。

B-RFD および AmF と CMJ 高との関連が有意ではない理論的な理由は、やはり筋の力-速度関係の影響を受けているためと考えられる。先行研究では、CMJ の Concentric 局面の前半から後半にかけて外側広筋の筋束長が短くなることが示されている(23) (72)。また本研究では B-RFD 及び AmF と L/E の間に高いもしくは非常に高い負の相関関係が確認され、さらに V0 は LMF と高い相関関係を有していた。Concentric 局面の後半は、体の重心速度が大きいいため、V0 と関連していると考えられる。CMJ における腕振り効果のメカニズムを調査した先行研究によれば、腕振りによる Concentric 局面後半での下肢の関節角速度の減少が筋力を発生させやすくし、跳躍高の増加に寄与する可能性が示唆されており、CMJ 中においては力-速度関係の影響を受ける可能性があると考えられている(25) (32) (33)。これは、反対に Concentric 局面後半における重心速度の増加（すなわち、関節角速度の増加）は、力の発揮に負の影響を及ぼす可能性があることを意味する。これらのことを踏まえると、Concentric 局面前半の地面反力が増加すると力-速度関係によって後期の地面反力が低下する現象が十分に生じ得ると考えられる。また本研究では、CMJ 高は EMF よりも LMF と強く関連していた。したがって、Concentric 局面後半の地面反力の方が CMJ 高を説明し、後半の地面反力の減少は CMJ 高に大きな影響を及ぼす可能性がある。これらの結果は B-RFD および AmF の増加が必ずしも CMJ 高に肯定的な影響を及ぼすわけではないことを示している。同時に Concentric 局面前半の地面反力の増加は後期の地面反力の減少によって相殺され、その結果 Concentric 局面全体の力積に影響がなかった可能性が考えられる。しかし、本研究は横断研究であるため、相殺効果は、実際に Concentric 局面前半の力を増加させた際に後期の力にどのような影響があるかを調査しない限り推論の域を出ない。

一般的に CMJ は反動動作を用いない同じ深度から始まるスクワットジャンプよりも高い跳躍高が得られる(8)。反動によってジャンプ高を向上させることができるメカニズムとして、筋のたるみ (muscle slack) が少ない状態で Concentric 局面を開始できることである(87)。muscle slack がある場合、Concentric 局面中の筋の収縮距離と速度が増加し、筋力の発揮が難しくなると考えられる。反動動作によって Braking 局面の力が発生し、その結果筋が事前に収縮され、腱が伸長された状態で Concentric 局面が始まると、筋肉の収縮距離と速度が最小限に抑えられ、筋力がより発揮しやすくなる。この知見も踏まえると、muscle slack が十分に除去される範囲での反動動作及び Braking 局面の力は CMJ 高に有益であるが、それ以上の Braking 局面の地面反力は CMJ に必ずしも寄与するわけではないと推察される。

第 5 節 結論

反動戦略を規定した CMJ におけるより大きな B-RFD と AmF は、Concentric 局面前半の地面反力を増加させるが、Concentric 局面後半の地面反力を潜在的に減少させる可能性が示唆された。したがって、B-RFD と AmF が必ずしも CMJ 高に関連及び寄与するわけではないと考えられる。多関節運動の力-速度関係は、Concentric 局面後半の筋収縮速度が増加するにつれて力を発揮することが難しくなることの結果を説明する要因と考えられる。

第4章 -相殺効果- Braking rate of force development 及び償却時の地面反力向上はジャンプ高向上に寄与しない

第1節 緒言

第2章にて、反動戦略の未規定が、B-RFDをはじめとする下降局面の地面反力とCMJ高の関連の先行研究間での不一致を生じさせている可能性が挙げられた。反動動作の速度と深度は、下降局面中の地面反力や時間などの変数に影響を与え(74)(75)、速度が速いほど、深度が浅いもしくは深いほどB-RFDは向上すると考えられるため、反動戦略を規定しなければそれらの関連性を正確に調査することは難しい。Pérez-Castillaら(2021)は、反動動作の速度と深度を変えて、CMJの下降局面中の変数の変化を報告した(74)。しかし、B-RFDの測定やCMJ高との関連については調査していなかった。第3章の研究による反動動作を規定した状態でのB-RFDとCMJ高との有意な関連はなく、Concentric局面後半の平均地面反力と負の高い関連が確認された。これらの背景から、いくつかの異なる規定された反動戦略を用いてB-RFDを急性的に変化させることが可能であるが、その変化はCMJ高の変化との有意な関連はないと考えられる。

そこで本研究では、異なる反動戦略の条件を用いてB-RFDを急性的に変化させた際のB-RFDの変化とCMJ高の変化に与える影響を調査することを目的とした。さらに、異なる反動戦略条件下でのConcentric局面の前半と後半の力積を比較し、前半の力積の向上が及ぼす後半の力積への影響を調査した。仮説は、B-RFDの変化はCMJ高に影響を与えず、その説明因子としてConcentric局面前半の力積の向上は後半の力積の減少によって相殺されるというものであった。

第2節 方法

実験参加者

実験参加者は健康な成人男女 19 名（男性：人数 11 名；年齢 24 ± 2 歳；体重 69.8 ± 6.0 kg；身長 172.5 ± 4.2 cm；女性：人数 8 名；年齢 23 ± 3 歳；体重 61.6 ± 8.6 kg；身長 160.3 ± 5.1 cm；[平均 \pm 標準偏差]）であった。実験参加者は全員少なくとも 1 年以上のトレーニング経験を有しており、筋骨格の傷害の現病歴はなかった。実験参加者の数は、事前に G*Power 3.1 (Heinrich-Heine-Universität Dusseldorf, North-Rhine Westphalia, Germany) を使用して事前検定によって 18 名と算出された。統計学的有意水準、統計学的検定力、効果量（偏 η^2 ）はそれぞれ 0.05、0.8、および 0.25 と設定した。統計学的有意水準および統計学的検定力は、Cohen のガイドラインに従った。効果量は、第 3 章の研究に基づいて決定した。本研究は早稲田大学の倫理委員会によって承認され、ヘルシンキ宣言の原則に従って実施した。実験参加者から文書での同意を取得する前に、調査の潜在的な利益とリスクに関する包括的な説明を口頭および文書で行った。

実験手順

本研究は 2 日間に渡って行われ、ウォーミングアップは両日とも自由な静的ストレッチングと指示された動的ストレッチングの組み合わせとした。1 日目には、CMJ の練習を行った。6 種類の CMJ（60-preferred, 60-fast, 90-preferred, 90-fast, 120-preferred, and 120-fast）を、3 種類の深度条件（膝関節角度が 60 度、90 度、120 度）と 2 種類の速度条件（自由な速度と可能な限り速い速度）を組み合わせ実施した。2 日目には、6 種類の CMJ をそれぞれ 2 回ずつフォースプレート上で測定した。1 日目と 2 日目の間の時間は、48 時間～1 週間に設定した。

CMJ の測定

CMJ は、自体重で行われ、動作中に手は腰に位置させた。反動動作の深度を決定するために、膝関節がそれぞれ 60 度、90 度、120 度に屈曲したときに音を発する光電管を臀部の下に設置した。膝関節角度は、大腿骨の大転子、大腿骨の外側上顆、下腿の外果を結ぶ角度とし、手動の東大式ゴニオメータで測定した。反動動作の速度条件は「fast」（可能な限り速く）と「preferred」（自己選択速度）とした。1 日目には、各実験参加者の 3 種類の反動動作の深度に対する光電管の高さを記録した。その後、実験参加者が 6 種類の CMJ に慣れるのに十分な各種類 3 回以上の練習試技を行った。2 日目には、6 種類の CMJ をランダムな順序で測定した。各 CMJ の測定は 2 回ずつ行われ、測定の信頼性を評価するために分析された。各試技の直前に fast 条件においては「できるだけ速くしゃがんで、できるだけ高くジャンプしてください」と指示し、preferred 条件においては、「自由な速度でしゃがんで、できるだけ高くジャンプしてください」と指示を行った。各条件で反動動作の深度が浅すぎるか、深すぎる場合は失敗と見なされ、測定が繰り返された。各試行間には少なくとも 30 秒間の休息時間を設けた。

データ解析

CMJ の測定は、フォースプレート（Hawkin Dynamics Inc., USA）を使用して行った。得られた力-時間曲線から、CMJ 高、B-RFD、Amf、下降速度、反動動作の深度、および Concentric 局面の前半と後半の力積を算出した。各 CMJ 測定の前にフォースプレート上で実験参加者に 1 秒間静止させて安静時地面反力 [N] を取得し、その値を重力加速度 (9.81m/s^2) で除すことで実験参加者の質量 [kg] を求めた。体の質量中心の速度は、台形積分法(58)を用いて算出した。正味の地面反力を計算するために、地面反力から安静時地面反力を差し引き、そ

の結果得られる値を体重で除して加速度を求めた。質量中心の速度と変位は、それぞれ得られた加速度と質量中心の速度を時間で積分することで算出した。CMJの局面分けは、第2章での定義に準拠した。CMJ中のB-RFDは、Braking局面の開始点と終了点での地面反力の変化量をBraking局面の時間で除すことで算出した。AmfはConcentric局面開始時の地面反力とした。下降速度は、反動動作中の最大の負の速度とした。CMJ高は、第2章で示した力積-運動量を用いて算出した。

Concentric局面前半の正味の力積(EI)は、Concentric局面の持続時間を100%とした際、そのうち0%から50%の間の力積として定義した。Concentric局面後半の正味の力積(LI)は、Concentric局面全体の力積(TI)からEIを差し引くことで得られた。異なる反動戦略の条件間でEIとLIを比較するために、それらをTIで除して正規化し(それぞれEI/TIとLI/TI)、比率を算出した。preferred条件とfast条件の間のCMJ高、B-RFD、Amf、EI、LI、EI/TI、LI/TIの変化率を算出した。その後、変化率間で相関分析を実施した。

統計解析

結果は平均 ± 標準偏差(SD)で示した。統計解析はSPSS(28, IBM Corp., USA)を使用して行った。信頼性を評価するために、各2試行間の変動係数(CV)を算出した。許容可能な信頼性は、CVが10%未満の場合と定義した(15)。統計学的有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

得られたデータの正規性は、Shapiro-Wilk検定にて評価した。下降局面の負の最大速度について、preferred条件とfast条件の間で対応のあるT検定(60度-preferred vs. 60度-fast、90度-preferred vs. 90度-fast、120度-preferred vs. 120度-fast)を実施した。反動動作の深度について、60度、90度、120度の条件間で比較するために対応のある一元配置分散分析および事後のBonferroni検

定を実施した。6種類のCMJの結果を比較するために、対応のある二元配置分散分析を行った。効果量は偏 η^2 を使用した（小 > 0.01 ；中 > 0.06 ；大 > 0.138 ）。

変数の変化率間の関連を分析するために、正規性が確認されたデータはPearsonの積率相関係数（ r ）を、正規性が確認されなかったデータに関してはSpearmanの順位相関係数（ ρ ）を使用した。解釈は以下の通りとした：微小（ < 0.1 ）、小（ > 0.1 ）、中程度（ > 0.3 ）、高（ > 0.5 ）、非常に高（ > 0.7 ）、ほぼ完璧（ > 0.9 ）(46)。

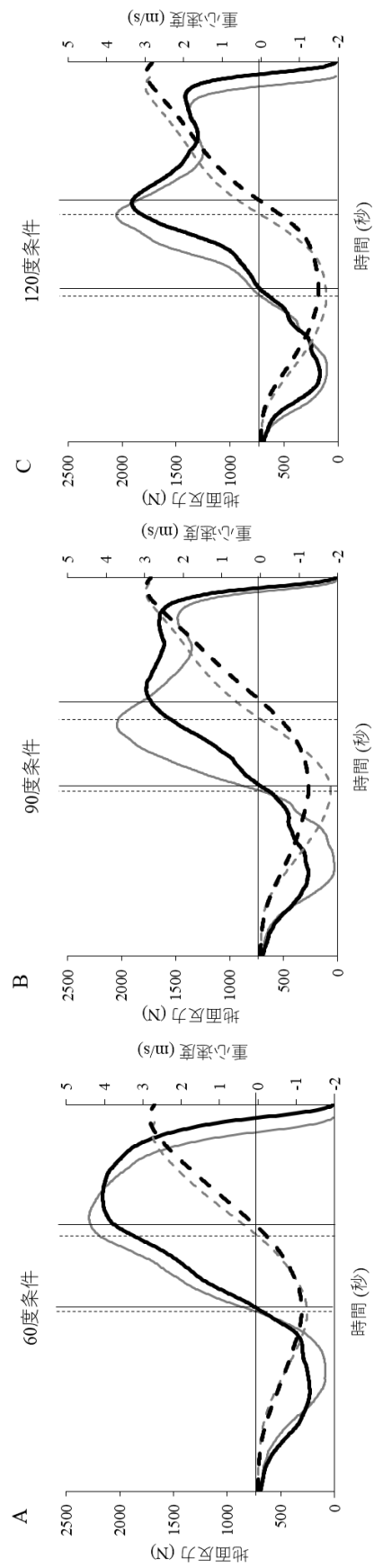
第 3 節 結果

2 試行間の変数の CV はすべて 10% 未満であったことから、信頼性が示された (表 4-1)。さらに、preferred 条件と fast 条件間の反動動作の深度についての信頼性は 60、90、120 度条件それぞれ $CV = 7.2 \pm 5.3\%$, $4.0 \pm 3.0\%$, $2.5 \pm 2.0\%$ であり、速度条件間で深度の有意な差異はなかった。preferred 条件と fast 条件の下降局面の負の最大速度についての対応のある T 検定では、fast 条件で有意に高い負の速度が得られた ($p < 0.05$)。反動動作の深度について 60 度、90 度、120 度の条件を比較する対応のある一元配置分析では、有意な主効果が見られた ($p < 0.05$)。事後のボンフェローニ検定により、反動動作の深度は、60 度条件よりも 90 度および 120 度条件で有意に大きく、また 90 度条件よりも 120 度条件で有意に大きかったことが示された ($p < 0.05$)。各条件の地面反力-時間曲線の典型例を図 4-1 に示した。CMJ 高、B-RFD、Amf、EI、および LI の結果は、表 2 に示した。B-RFD と Amf において、速度及び深度の主効果が見られ、B-RFD は交互作用も見られた。CMJ 高は有意な深度の主効果が認められたが、速度の主効果は確認されなかった。EI と LI の両方は速度の主効果があり、LI はまた深度の主効果も示された。変数間の変化率の相関係数は、表 3 から表 5 に示した。3 種類のすべての深度条件における preferred 条件と fast 条件の間で、CMJ 高の変化率と B-RFD 及び Amf の変化率との間には有意な相関関係は確認されなかった。しかし、3 種類のすべての深度条件における preferred 条件と fast 条件の間で、B-RFD と Amf の変化率は EI/TI の変化率と高いまたは非常に高い正の相関関係を示し、LI/TI の変化率と高いまたは非常に高い負の相関関係を示した。さらに、EI/TI の変化率と LI/TI の変化率の間にはほぼ完璧な負の相関関係が確認された。

表 4-1：結果の変動係数

CV (%)	60-preferred	60-fast	90-preferred	90-fast	120-preferred	120-fast
CMJ高	2.0 ± 1.7	2.0 ± 2.7	2.3 ± 1.9	2.6 ± 2.1	2.1 ± 1.4	1.8 ± 1.8
B-RFD	3.8 ± 2.9	5.9 ± 4.7	6.9 ± 5.1	4.3 ± 4.3	7.1 ± 6.2	4.9 ± 5.0
Amf	2.0 ± 1.4	2.1 ± 1.5	2.8 ± 1.7	1.7 ± 1.3	2.0 ± 1.4	1.9 ± 1.6
下降の最大速度	6.2 ± 4.7	2.6 ± 1.8	5.6 ± 4.7	3.4 ± 2.6	4.7 ± 2.6	3.4 ± 2.7
反動動作の深さ	3.7 ± 3.4	4.6 ± 3.1	2.8 ± 2.5	3.8 ± 3.2	2.5 ± 1.8	2.6 ± 2.4
EI	1.4 ± 1.4	1.4 ± 1.2	1.8 ± 1.4	2.3 ± 1.5	1.8 ± 1.4	1.3 ± 1.0
LI	2.9 ± 3.1	3.7 ± 2.5	3.3 ± 2.9	4.1 ± 4.5	2.8 ± 2.4	2.6 ± 2.3

CV: 変動係数, CMJ: カウンタームーブメントジャンプ, B-RFD: Braking 局面の力の立ち上がり率, Amf: 償却時の地面反力, EI: Concentric 局面前半の力積, LI: Concentric 局面後半の力積



黒い実線と灰色の実線は、それぞれ「Preferred条件」と「Fast条件」における地面反力を示す。黒い点線と灰色の点線は、それぞれ「Preferred条件」と「Fast条件」における重心速度を示す。縦の実線と縦の点線の間の区間は、「Preferred条件」と「Fast条件」のBraking局面を示す。

図 4-1: 各条件の地面反力-時間曲線の典型例

表 4-2: 結果の値と分析結果

	速度	深度			速度効果		深度効果		交互作用	
		60°	90°	120°	偏 η^2	p 値	偏 η^2	p 値	偏 η^2	p 値
CMJ高 (m)	Preferred	0.32 ± 0.05	0.35 ± 0.06	0.36 ± 0.06	0.01	0.32	0.64	< 0.01	< 0.01	0.78
	Fast	0.31 ± 0.04	0.35 ± 0.06	0.36 ± 0.06						
B-RFD (N/s)	Preferred	7534.0 ± 1956.6	5644.8 ± 1515.6	5127.9 ± 1944.6	0.26	< 0.01	0.67	< 0.01	0.20	< 0.01
	Fast	16266.0 ± 2101.1	6867.5 ± 1372.5	6613.6 ± 1847.3						
Amf (N)	Preferred	1657.4 ± 252.5	1589.3 ± 245.4	1615.9 ± 280.8	0.39	< 0.01	0.22	< 0.01	0.04	0.19
	Fast	1826.6 ± 247.6	1680.0 ± 222.1	1756.4 ± 286.5						
EI (Ns)	Preferred	107.5 ± 17.7	106.6 ± 18.8	106.8 ± 19.4	0.23	< 0.01	0.04	0.16	0.03	0.22
	Fast	110.4 ± 17.4	108.6 ± 19.0	111.6 ± 19.7						
LI (Ns)	Preferred	58.3 ± 10.7	66.4 ± 10.9	67.1 ± 11.8	0.22	< 0.01	0.55	< 0.01	0.013	0.56
	Fast	52.8 ± 9.4	63.0 ± 11.9	63.1 ± 11.4						

CMJ: カウンタームーブメントジャンプ, B-RFD: Braking 局面の力の立ち上がり率, Amf: 償却時の地面反力, EI: Concentric 局面前半の力積, LI: Concentric 局面後半の力積

表 4-3: 60 度条件における Preferred 条件と Fast 条件間の
変化率同士の相関マトリクス

% Δ	CMJ高	B-RFD	Amf	EI	LI	EI/TI	LI/TI
CMJ高	1	0.29	0.44	0.50*	0.44	-0.06	0.16
B-RFD		1	0.90*	0.71*	-0.49*	0.70*	-0.66*
Amf			1	0.87*	-0.54*	0.81*	-0.74*
EI				1	-0.47*	0.79*	-0.71*
LI					1	-0.90*	0.95*
EI/TI						1	-0.96*
LI/TI							1

% Δ : 変化率, CMJ: カウンタームーブメントジャンプ, B-RFD: Braking 局面の力の立ち上がり率, Amf: 償却時の地面反力, EI: Concentric 局面前半の力積, LI: Concentric 局面後半の力積, EI/TI: EI を Concentric 局面の総力積で除した値, LI/TI: LI を Concentric 局面の総力積で除した値, *: p < 0.05, グレーの網掛けは Spearman の順位相関係数を指す

表 4-4: 90 度条件における Preferred 条件と Fast 条件間の
変化率同士の相関マトリクス

%Δ	CMJ高	B-RFD	Amf	EI	LI	EI/TI	LI/TI
CMJ高	1	-0.02	-0.09	0.51*	0.33	-0.003	-0.02
B-RFD		1	0.97*	0.681*	-0.49*	0.67*	-0.70*
Amf			1	0.67*	-0.51*	0.67*	-0.70*
EI				1	-0.53*	0.81*	-0.82*
LI					1	-0.92*	0.92*
EI/TI						1	-0.99*
LI/TI							1

%Δ: 変化率, CMJ: カウンタームーブメントジャンプ, B-RFD: Braking 局面の力の立ち上がり率, Amf: 償却時の地面反力, EI: Concentric 局面前半の力積, LI: Concentric 局面後半の力積, EI/TI: EI を Concentric 局面の総力積で除した値, LI/TI: LI を Concentric 局面の総力積で除した値, *: p < 0.05, グレーの網掛けは Spearman の順位相関係数を指す

表 4-5: 120 度条件における Preferred 条件と Fast 条件間の
変化率同士の相関マトリクス

%Δ	CMJ高	B-RFD	Amf	EI	LI	EI/TI	LI/TI
CMJ高	1	0.31	0.29	0.34	0.56*	-0.24	0.30
B-RFD		1	0.93*	0.74*	-0.37	0.65*	-0.59*
Amf			1	0.78*	-0.37	0.67*	-0.55*
EI				1	-0.43	0.78*	-0.69*
LI					1	-0.88*	0.94*
EI/TI						1	-0.96*
LI/TI							1

%Δ: 変化率, CMJ: カウンタームーブメントジャンプ, B-RFD: Braking 局面の力の立ち上がり率, Amf: 償却時の地面反力, EI: Concentric 局面前半の力積, LI: Concentric 局面後半の力積, EI/TI: EI を Concentric 局面の総力積で除した値, LI/TI: LI を Concentric 局面の総力積で除した値, *: p < 0.05, グレーの網掛けは Spearman の順位相関係数を指す

第4節 考察

本研究の目的は、反動戦略を変更した際の B-RFD の変化とその変化が及ぼす CMJ 高への影響を調査することであった。対応のある二元配置分散分析の結果、B-RFD 及び Amf には有意な速度と深度の主効果が見られたが、CMJ 高には速度の主効果が確認されなかった。さらに、変化率の相関分析では、B-RFD 及び Amf と CMJ 高との間に有意な相関関係は確認されなかった。これらの結果は、反動戦略を変更することで B-RFD は急性的に変化するが、その変化は CMJ 高の増加に貢献しなかったことを示唆し、したがって当初の仮説を支持するものであった。

本研究では、B-RFD は CMJ の反動動作の速度と深度を変化させることで変動することが明らかとなった。先行研究では、反動動作の速度と深度を変化させて CMJ の地面反力の変数が調査された(74) (75)が、筆者の知る限りでは、本研究が B-RFD の変動を直接的に調査し、それが CMJ 高に与える影響を調べた最初の研究である。また本研究の結果は、B-RFD の向上が必ずしも CMJ 高の増加に寄与しない可能性があることを示唆しており、Merino-Muñoz らの B-RFD と CMJ 高の間に有意な相関関係がないことの結果と一致している(69)。本論文の第3章の研究においては、B-RFD と Concentric 局面後半の平均地面反力との間に高い負の相関関係が示されており、さらには Krzyszkowski ら(2022)の動作指示が地面反力に与える影響について調査した研究にて、Braking 局面の地面反力の向上があつたにもかかわらず、CMJ 高には有意な変化がなかったことを報告している(53)。これらの結果は、本研究の結果の妥当性を支持するものである。

二元分散分析の結果に基づくと反動動作の速度を増加させることは B-RFD と Amf を有意に向上させたが、CMJ 高には有意な変化がなかった。さらに、反動動作の深さが増すにつれて B-RFD は減少し、CMJ 高は増加する傾向が観察された。これらは、B-RFD と Amf の増加はジャンプ高に寄与しないことを示しており、筋の力-速度関係の影響に起因すると考えられる。本研究では、preferred 条件と fast 条件の間の B-RFD および Amf の変化率は、すべての深度条件において、EI の変化率と高いもしくは非常に高い相関関係を示した。これは、Braking 局面から償却時の地面反力の増加が Concentric 局面前半の力積の向上に寄与すること示唆している。第 3 章の研究からも考えられる通り、Concentric 局面前半の力積の向上は、後半における重心の上昇速度の向上をもたらし、筋収縮速度のさらなる増加が求められ、この潜在的な影響は、筋の力-速度関係より筋力発揮に悪影響を及ぼす可能性がある。実際、本研究ではすべての深度条件において、EI/TI の変化率と LI/TI の変化率の間には $r < -0.96$ のほぼ完璧な負の相関係数が示された。これは、EI の向上は LI の減少をもたらすことを示している。CMJ の Concentric 局面では、外側広筋は Concentric をしており (72) (23)、第 3 章の研究の結果も踏まえると、これらの所見は、CMJ の力-時間曲線が筋の力-速度関係に影響を受けることが十分に考えられる。B-RFD 及び Amf の向上による Concentric 局面前半の力積向上は、Concentric 局面後半における力積の減少によって相殺され、Concentric 局面全体の力積に変化はなく、結果として CMJ 高に変化がないことに繋がる。

さらに、本研究は反動動作の深度を変えることの影響も調査した。反動動作の深度を変えることは、下降局面の変数に影響を与える可能性があり、異なる深度にて検証することで、さまざまな深度で同様の結果が得られるかどうかを検証した。しかし、反動動作の深度に関わらず、B-RFD、Amf、CMJ 高、EI/TI、LI/TI の関係は一貫していた。したがって、B-RFD と Amf の向上が

CMJ 高の向上に寄与しない要因は、どの反動動作の深度でも一貫していると推察される。また、60 度条件において大きな B-RFD が確認された。これは、反動動作の深度が浅い分、時間が短く、同時に B-RFD の分母である Braking 時間も非常に短いためと考えられる。一方で CMJ 高においては、深度の主効果が確認された。反動動作の深度が増すにつれて、Concentric 時に地面を押し距離も増加し、それによってより長い時間地面に力を加えることが可能となって、力積を獲得しやすくなり、CMJ 高に寄与すると考えられる(79)。しかしながら、B-RFD は CMJ 高の特徴と反対の特徴を示し、深度が浅くなるにつれて B-RFD は大きな値を示している。このことから CMJ 高に B-RFD が寄与しているとは言い難い。

スポーツ現場への応用として、素早い反動動作によって B-RFD と Amf を向上させることが、必ずしも CMJ 高の増加に寄与するわけではないということが挙げられる。しかしながら、第 3 章でも述べたように、通常反動動作を行わないスクワットジャンプに比べて、CMJ は一般的により高い跳躍高をもたらすことが知られている(8)。これは、筋のたわみ (muscle slack) の影響を受けると考えられ(87)、筋のたわみがほとんどなくなる範囲で反動動作を用いて Braking 局面の力を発生させることは重要であると考えられる。したがって、CMJ 高を向上させることを目指す際には、自由な反動動作を許容することが適切と考えられる。

本研究の限界としては、反動動作の速度は 2 つ、深度は 3 つの条件しかなかったことが挙げられる。したがって他の速度や深度でも同様の結果が得られるかどうかは不明であるため、B-RFD は反動戦略の速度と深度に影響を受けることは明らかとなったが、速度が速いほど、もしくは深度が浅いほど B-RFD は向上するとは言い切れない。今回の結果を一般化するためには、シミュレー

ション研究等でさまざまな条件下での実験を通じたさらなる調査が必要であろう。

第5節 結論

本研究の結果は、B-RFDの向上はCMJ高の向上に必ずしも寄与しないことを示している。その要因として、B-RFDの向上はAmfとConcentric局面前半の力積の向上に繋がる一方、筋の力-速度関係によるConcentric局面後半の力積の減少によって相殺されることである。その結果、Concentric局面全体の力積には変化がなく、CMJ高に顕著な寄与がないと考えられる。また、B-RFDは反動動作の速度と深度に影響を受けるため、測定する際には、反動戦略を規定すべきだと考えられる。

第 5 章 Braking 局面における力-速度関係 – Eccentric 筋力との関連及び 2 点法の妥当性検証 –

This is a non-final version of an article published in final form in [Nishiumi D, Yamaguchi S, Kurokawa T, Wakamiya K, Hirose N. Force-velocity profiling during the braking phase of countermovement jump: Relationship to eccentric strength and validity of the two-point method. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2023. In press].

第 1 節 緒言

多関節運動における個人の力-速度関係を表す力-速度プロフィール (FVP) の向上は、離地速度及び Concentric 局面の正味の力積を向上させるために重要である(78)。FVP は、ジャンプ動作の Concentric 局面における力-速度関係から計算される指標であり、準線形の関係を示している(78)。力積を向上させるには、競技スポーツ動作等の時間的制約下においては瞬間瞬間の大きな力が求められる。ジャンプ動作では、身体重心が上昇していくにつれて関節の角速度も変化するため(62)、時々刻々と筋力を発揮する際の速度が変化する。加えて、第 3 章の研究から自体重 CMJ の力-時間曲線と力-速度関係は関連が考えられる。したがって、時間的制約下で且つ筋力を発揮する速度が異なる運動課題の力積を向上させる際には、FVP を考慮する必要がある(78) (71)。FVP を向上させる効果的な方法の 1 つは、FVP から得られる理論上の最大出力 (F_0)、理論上の最大速度 (V_0)、および最大パワー (P_{max}) を増加させることである(49)。さらに、準線形の関係性を持つため、FVP は 2 点法を用いて測定することができ(2) (27)、その後のトレーニングに適用することが可能である。(49)。

一方で、CMJのBraking局面においても時間的制約があり、筋力を発揮する速度が異なる。そのため、Braking局面の力を向上させるには、Concentric局面と同様に、FVPを考慮する必要があると考えられる。Braking局面の力はB-RFDの向上に繋がり、RSI_{mod}(54)や水平減速能力(36)(37)に寄与する可能性がある。しかし、Braking局面のFVP(bFVP)は著者の知る限りいまだ調査されていない。したがって、本研究の目的は、CMJのbFVPの特徴を調査し、Eccentric筋力等のその他のパフォーマンス指標との関係を調査することとした。さらに、CMJのbFVPがConcentric局面と同様に直線的な関係を持つ場合、Concentric局面のFVP(cFVP)と共に、二つの異なる負荷のみで測定する二点法(27)を用いられる可能性があるため、bFVPの二点法の妥当性を調査した。

仮説は、bFVPの傾きは急であり(F_0 が大きい)、y軸切片の値が大きいほど(F_0 が大きいほど)、パフォーマンスが高く、他のパフォーマンス指標との関連も大きいと考えられる。CMJのBraking局面においては、平均速度は平均地面反力が増加するにつれて0m/sに近づく。したがってx軸切片(V_0)は0m/sに近いことが望ましいと考えられる。同時に、Braking局面では、cFVPにみられる最適な傾きは存在せず、 P_{max} は意味を持たないと考えられる(5)。

第 2 節 方法

実験参加者

実験参加者は、定期的にトレーニングを行っており、少なくとも 1 年間のレジスタンストレーニングの経験がある健康な男性 16 人（年齢： 22 ± 2 歳、体重： 75.8 ± 7.8 kg、身長： 173.8 ± 5.4 cm；平均 \pm 標準偏差）とした。また、実験参加者は適切かつ安全に体重の 120% の負荷を使用して CMJ を行うことができ、筋骨格系の疼痛がなかった。参加者人数は G*Power 3.1 で事前検定を行って推定し、15 人が得られた。事前検定の計算に使用された統計学的有意水準、統計学的検定力、効果量は、それぞれ 0.05、0.8、および 0.35 であった。統計学的有意水準と統計学的検定力は Cohen のガイドライン(14)に則った。効果量は予備実験で予測された値を用いた。本研究は早稲田大学の倫理審査委員会によって承認され、ヘルシンキ宣言に従って実施された。実験参加者は、大学が承認した文書に書かれた同意書に同意する前に、調査の利益とリスクについて口頭および書面で説明された。

実験手順

テストは以下のように 2 日に渡って実施された。両日の最初に、ウォーミングアップとして自由な静的ストレッチングと 5 分間の有酸素運動及び 5 分間の指定したダイナミックストレッチングを行った。1 日目はその後、バックスクワットにおける Eccentric 局面の 1 回最大反復挙上重量（ECC-1RM）の測定を行った。その後、自体重および負荷を用いた CMJ の練習を行った。測定に用いるものと同様のスミスマシンで、6 種類の条件（0% BM、32 kg、60%、80%、100%、120% BM）をそれぞれ少なくとも 2 回の練習試行を行った。これにより、実験参加者は規定された反動戦略に慣れることができた。2 日目には、実験参加者の身長と体重を測定し、1 日目と同様のウォーミングアップを

行った後、各 CMJ 条件を 2 回ずつ、フォースプレートを使用して測定した。

1 日目と 2 日目の間には、78 時間から 1 週間の間隔を設けた。

種目測定方法

ECC-1RM (ICC = 0.98) は、先行研究に従って(82)、3 秒間で膝関節が 90 度に達するまで降下できる最大の重量と定義した。参加者は、スミスマシン (KEISER 社, USA) を使用して、膝関節が 90 度に達するまでメトロノームに合わせて降下した。臀部の下に光電管 (VoltOnoSprint、S-CADE Inc., Japan) を設置し、所定の深度に到達すると、音が発せられるようにした。ウェイトシャフトを担ぐ位置はハイバーの位置とし、足幅は肩幅で足部をわずかに外転させた。ECC-1RM のウォーミングアップは、申告された通常のバックスクワットの 1RM までスミスマシン上で任意の重量を使用して、2~3 セット行った。ウォーミングアップ時もバックスクワットの下局面はメトロノームに合わせて 3 秒間の降下を行った。ECC-1RM は、3~5 回の試行の範囲内で決定された。3 秒間で降下できなかった試行は失敗と見なし、その場合は重量を 5 kg 減少させ、試行を繰り返した。

自体重で行われる CMJ (0% BM) は、重さ 0.5 kg のカーボンバーを使用して測定した。32 kg、60%、80%、100%、120% BM の 5 種類の負荷を用いた CMJ は、スミスマシンを使用して測定した。本研究の CMJ の負荷は、スミスマシンのシャフトの最小重量である 32 kg から開始した。また、32 kg は実験参加者の体重の約 42% であった。ウェイトシャフトは ECC-1RM と同様にハイバーの位置とし、足幅は肩幅とした。反動動作の深度は膝関節屈曲 90 度の深度とした。光電管は、ECC-1RM 測定時と同様に臀部の下に膝関節 90 度の位置で音が発せられるように設置し、実験参加者が反動動作時に所定の位置に達したことを知らせた。反動動作の速度は、各実験参加者の最大随意速度とし、各

CMJ の試行前には「できるだけ速くしゃがんで、できるだけ速くジャンプしてください」という指示を行った。異なる反動戦略は下降局面の変数に影響を与えるため規定した(75)。CMJ のウォーミングアップは、0%BM の CMJ を 3 回 2 セット、5 種類の負荷を用いた CMJ は各 1 回ずつ行った。測定はまず 0%BM の CMJ を行い、その後、負荷を用いた CMJ はランダム of 順序に行なった。CMJ の各条件は、それぞれ 2 回ずつ測定した。試行間には少なくとも 2 分以上の休憩時間が設けられた。反動動作の深度が膝関節 90 度に達しなかった試行は失敗として除外し、2 分間の休憩後に再度測定した。

データ解析

各 CMJ は、フォースプレート (9287CA、KISTLER Japan Inc., Japan) 上で 1000 Hz にて測定された。得られた地面反力の波形は 50 Hz のローパスフィルタで処理した(39)。実験参加者にシャフトを担ぎながらフォースプレート上で 1 秒間静止させてシステム重量[N]を取得し、その値を重力加速度 (9.81m/s^2) で除すことでシステム質量[kg]を算出した。システム重心の速度は台形積分法に従って計算した(58)。地面反力からシステム重量を差し引いて正味の地面反力を得て、その値をシステム質量で除して加速度を得た。システム重心の速度は、得られた加速度を時間で積分して算出した。CMJ の局面分けは、第 2 章の定義に準拠した。Braking 局面と Concentric 局面の力と速度は、それぞれの局面中の平均地面反力 (それぞれ B-MF と MF) 及び平均速度 (それぞれ B-MV と MV) とし、2 回の試行の値の平均値を使用して散布図を作成した。Braking 局面および Concentric 局面中の理論上の最大出力 (それぞれ B-F0 と F0) と理論上の最大速度 (それぞれ B-V0 と V0)、FVP の傾き (それぞれ B-Sfv と Sfv) を決定するために回帰式を算出した。

B-RFD は Braking 局面の開始と終了時の力の変化量を Braking 局面

の持続時間で除すことによって算出し、0%BMのCMJから得た。Braking局面の最大地面反力(B-PF)も、0%BMのCMJから得た。CMJ高は、第2章で示した力積-運動量法を用いて算出した。RSImodは、CMJ高をジャンプ時間(反動動作の開始から離地までの時間)で除して算出した。

2点法の妥当性を調査するために、0%BMのCMJと各負荷(0%-32kg、0-60%、0-80%、0-100%、0-120%)間で1次回帰式を算出し、B-F0、B-V0、およびB-Sfvを得た。これらの変数が各6条件で算出された値(6点法)との一致度を調査した。

統計解析

結果の値は平均 ± 標準偏差で示した。統計解析は、SPSS (28, IBM Corp., USA) を使用して行った。各CMJのB-MF、MF、B-MV、MVに対して信頼性テストとして級内相関係数(ICC、[3, 1])および変動係数(CV)を算出した。ICC > 0.80 (56)およびCV < 10% (15)で許容可能な信頼性とした。統計学的有意水準は、 $p < 0.05$ とした。B-MFとB-MVの関係を調査するために、一次、二次および三次の回帰式が計算され、得られた散布図から決定係数(r^2)を求めた。しかしながら、 r^2 および残差は回帰式選択基準として適切ではないため、自由度が40未満の場合に適用される修正赤池情報量基準(AICc)を最適な適合回帰式を識別するために使用した(51)。最適な適合回帰モデルは、AICcが最も低い値の回帰式とした(51)。一次、二次、三次の回帰式から導かれるAICcの平均値と標準偏差を実験参加者ごとに算出し、データの正規性を確認するためにShapiro-Wilk検定を実施した。その後、対応のある一元配置分散分析とBonferroni事後検定を行った。効果量は、偏 η^2 (小:>0.01、中:>0.06、大:>0.138)を使用した。群間の比較には、Hedgesの g (小:>0.2、中:>0.5、大:>0.8)を使用した(14)。

bFVP と他のパフォーマンス指標との関連を調査するために、相関分析を実施した。Shapiro-Wilk 検定によって正規性が確認されたデータとされなかったデータに対して、それぞれ Pearson の積率相関係数 (r) と Spearman の順位相関係数 (ρ) を使用した。相関係数の解釈は以下の通りとした：微小 < 0.1 、小 > 0.1 、中 > 0.3 、高 > 0.5 、非常に高 > 0.7 、ほぼ完璧 > 0.9 (46)。

6点法と2点法の間の一貫度を定量化するため、Bland-Altman95%一致限界(95% LoA)分析(誤差 \pm (1.96 x SDdiff))を用いた(60)。これは、値が小さいほど一貫度が高いことを示す(27)。固定誤差は、6点法と2点法の値の差について、一標本のT検定を用いて、95%信頼区間が0を含む場合に存在しないと定義した。比例誤差は、6点法と2点法の値の差と平均値の間で線形回帰分析を行い、有意な傾きを得られない場合に存在しないと定義した。分散不均一性は、Whiteの検定で有意な結果を得られない場合に、存在しないと定義した。許容可能な誤差は、以下の条件がすべて満たされる場合と定義した：[1] 固定誤差がないこと、[2] 比例誤差がないこと、[3] 分散不均一性がないこと、[4] 相対誤差((2点法の値-6点法の値)/6点法)が $\pm 20\%$ 未満の合計数が全体の75%以上であること(60)、[5] 2点法の一貫限界が6点法の1回目と2回目の測定の一貫限界と比較して低いこと。

第3節 結果

ECC-1RMの値は 142.1 ± 15.8 kg で、体重比の値は 1.9 ± 0.2 kg/BM であった。各6条件（0%、32 kg、60%、80%、100%、120% BM）の B-MF、B-MV、ICC、CV は表 5-1 に示した。すべての条件で $ICC > 0.80$ および $CV < 10\%$ であり、許容される信頼性であった。一次、二次、および三次回帰式それぞれの AICc の値と r^2 は、表 5-2 に示した。1 次回帰式の AICc が他の回帰式よりも有意に低かった ($p = 0.002$; 偏 $\eta^2 = 0.62$)。

表 5-1: Braking 局面の平均地面反力と速度の値、級内相関係数、変動係数

% BM	B-MF (N)	ICC (95% CI)	CV (%)	B-MV (m/s)	ICC (95%CI)	CV (%)
0%	1468.5 ± 140.6	0.95 (0.86, 0.99)	1.9 ± 2.0	-1.03 ± 0.04	0.82 (0.49, 0.95)	2.5 ± 1.4
32kg	1669.1 ± 163.3	0.93 (0.78, 0.98)	1.9 ± 1.6	-0.90 ± 0.04	0.82 (0.48, 0.95)	2.6 ± 1.3
60%	1785.8 ± 190.2	0.86 (0.61, 0.95)	2.9 ± 2.4	-0.85 ± 0.05	0.81 (0.45, 0.94)	2.9 ± 2.1
80%	1882.5 ± 195.5	0.99 (0.97, 0.99)	1.1 ± 0.8	-0.79 ± 0.07	0.81 (0.45, 0.94)	2.7 ± 2.3
100%	2000.3 ± 220.0	0.92 (0.76, 0.97)	2.4 ± 2.2	-0.72 ± 0.07	0.84 (0.54, 0.95)	4.4 ± 4.1
120%	2107.0 ± 224.4	0.96 (0.86, 0.99)	1.6 ± 1.2	-0.66 ± 0.07	0.87 (0.65, 0.96)	3.5 ± 3.3

BM: 体重, B-MF: Braking 局面の平均地面反力, ICC: 級内相関係数, 95% CI: 95% 信頼区間, CV: 変動係数

表 5-2: 一次、二次、三次式における修正赤池情報基準

	一次	二次	三次	p 値	偏 η^2	一次 - 二次	Hedges's g 一次 - 三次	二次 - 三次
AICc	$60.3 \pm 9.2^* \dagger$	$63.1 \pm 8.8 \ddagger$	71.2 ± 12.3	< 0.05	0.62	0.3	0.97	0.74
r^2	0.96 ± 0.03	0.98 ± 0.02	0.98 ± 0.02					

*: 一次回帰式と二次回帰式との間での有意差 ($p = 0.002$), †: 一次回帰式と三次回帰式との間での有意差 ($p < 0.001$), ‡: 二次回帰式と三次回帰式との間での有意差 ($p < 0.001$), AICc: 修正赤池情報基準

CMJ の bFVP と cFVP の典型例を図 5-1 に示した。一次回帰式から得られた B-Sfv、B-F0、B-V0、Sfv、F0、V0 の値を表 5-3 に示した。B-Sfv、B-F0、B-V0 の ICC と CV は、それぞれ 0.90 (0.73–0.97) および $8.4 \pm 6.3\%$ 、0.96 (0.88–0.99) および $3.7 \pm 2.5\%$ 、0.89 (0.72–0.96) および $4.2 \pm 3.2\%$ であった。

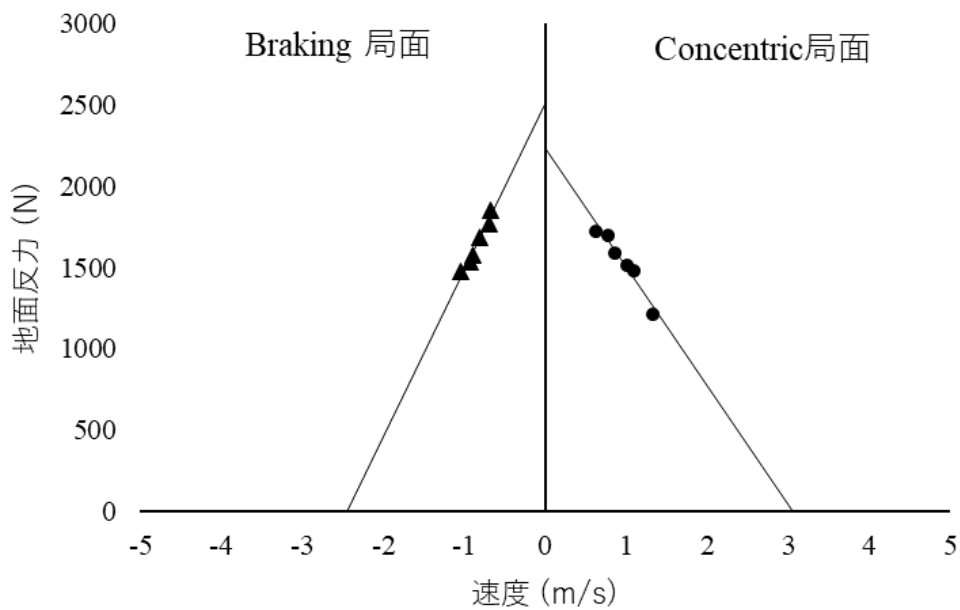


図 5-1: Braking 局面と Concentric 局面の力-速度プロファイルの典型例

表 5-3: Braking 局面と Concentric 局面の力-速度プロファイルの値

局面	Sfv (N.s/m)	Sfv/BM (N.s/m/kg)	F0 (N)	F0 /BM (N/kg)	V0 (m/s)
Braking	1819.2 ± 709.7	23.8 ± 8.7	3322.6 ± 819.7	43.7 ± 9.5	-1.94 ± 0.34
Concentric	-840.0 ± 141.5	-11.1 ± 1.7	2393.2 ± 325.0	31.5 ± 3.4	2.87 ± 0.26

Sfv: 力-速度プロファイルの傾き, F0: 理論上の最大出力, V0: 理論上の最大速度, BM: 体重

表 5-4 に bFVP の変数と他のパフォーマンス指標 (ECC-1RM、B-RFD、B-PF、CMJ 高、RSImod、Pmax、F0/BM) との相関係数を示した。ECC-1RM と B-Sfv、B-Sfv/BM、B-F0、B-F0/BM との間に有意な相関関係が認められた (それぞれ $r = 0.56$ 、 0.59 、 0.57 、 0.65 , $p < 0.05$)。さらに、B-PF と B-F0/BM ($r = 0.56$, $p < 0.05$)、CMJ 高と B-F0/BM ($r = 0.52$, $p < 0.05$) の間にも有意な相関関係が認められた。しかし、B-RFD および RSImod は、いずれの bFVP の変数とも有意な相関関係は認められなかった。

表 5-4: bFVP の変数とその他のパフォーマンス指標との相関分析

		力-速度プロフィール の変数	95%CI	p 値
ECC-1RM (kg/BW)	B-Sfv (N.s/m)	$r = 0.56$ (0.08, 0.82)	0.03*	
	B-Sfv/BW (N.s/m/kg)	$r = 0.59$ (0.13, 0.84)	0.02*	
	B-F0 (N)	$r = 0.57$ (0.10, 0.83)	0.02*	
	B-F0/BW (N/kg)	$r = 0.65$ (0.23, 0.87)	0.01*	
B-RFD (N/s)	B-Sfv (N.s/m)	$\rho = 0.20$ (-0.34, 0.64)	0.46	
	B-Sfv/BW (N.s/m/kg)	$\rho = 0.25$ (-0.29, 0.67)	0.35	
	B-F0 (N)	$\rho = 0.25$ (-0.30, 0.67)	0.36	
	B-F0/BW (N/kg)	$\rho = 0.34$ (-0.20, 0.72)	0.20	
B-PF (N/kg)	B-Sfv (N.s/m)	$r = 0.44$ (-0.68, 0.77)	0.09	
	B-Sfv/BW (N.s/m/kg)	$r = 0.47$ (-0.04, 0.78)	0.07	
	B-F0 (N)	$r = 0.48$ (-0.15, 0.79)	0.06	
	B-F0/BW (N/kg)	$r = 0.56$ (0.09, 0.83)	0.02*	
CMJ高 (m)	B-Sfv (N.s/m)	$r = 0.42$ (-0.10, 0.76)	0.11	
	B-Sfv/BW (N.s/m/kg)	$r = 0.48$ (-0.18, 0.79)	0.06	
	B-F0 (N)	$r = 0.41$ (-0.11, 0.75)	0.12	
	B-F0/BW (N/kg)	$r = 0.52$ (0.04, 0.81)	0.04*	
RSI _{mod} (m/s)	B-Sfv (N.s/m)	$r = 0.38$ (-0.14, 0.74)	0.15	
	B-Sfv/BW (N.s/m/kg)	$r = 0.36$ (-0.16, 0.73)	0.17	
	B-F0 (N)	$r = 0.38$ (-0.14, 0.74)	0.14	
	B-F0/BW (N/kg)	$r = 0.37$ (-0.16, 0.73)	0.16	
Pmax (W)	B-Sfv (N.s/m)	$r = 0.53$ (0.44, 0.81)	0.04*	
	B-Sfv/BW (N.s/m/kg)	$r = 0.59$ (0.13, 0.84)	0.02*	
	B-F0 (N)	$r = 0.52$ (0.03, 0.81)	0.04	
	B-F0/BW (N/kg)	$r = 0.62$ (0.19, 0.86)	0.01*	
F0/BW (N/kg)	B-Sfv (N.s/m)	$r = 0.52$ (0.28, 0.81)	0.04*	
	B-Sfv/BW (N.s/m/kg)	$r = 0.57$ (0.11, 0.83)	0.02*	
	B-F0 (N)	$r = 0.50$ (0.00, 0.80)	0.05	
	B-F0/BW (N/kg)	$r = 0.60$ (0.15, 0.85)	0.01*	

95% CI: 95%信頼区間, ECC-1RM: Eccentric 局面の 1 回最大反復重量, B-RFD: Braking 局面の力の立ち上がり率, B-PF: Braking 局面の最大地面反力, RSI_{mod}: 修正反応筋力指数, Pmax: 最大パワー, F0: 理論上の最大出力, B-Sfv: Braking 局面の力-速度プロフィールの傾き, B-F0: Braking 局面の F0, BW: 体重, * : $p < 0.05$,

表 5-5 に、2 点法（0-32 kg、0-60%、0-80%、0-100%、0-120%）と 6 点法によって得られた値の間の Bland-Altman 分析の 95% 一致限界を示した。B-V0 の 0-32 kg 条件を除いて、一標本の T 検定の 95% 信頼区間は 0 を含んでおり、固定誤差は存在しなかった。6 点法と 2 点法の差と平均値の間の回帰分析は、0-120% のすべての条件で有意な傾きを特定せず、比例誤差は存在しなかった。すべての 0-120% 条件（それぞれ B-Sfv、B-F0、B-V0、 $p = 0.054$ 、 0.52 、 0.15 ）において、White の検定による統計学的有意性は認められず、分散不均一性は存在しなかった（図 5-2）。B-Sfv の 0-32 kg 条件を除くすべての条件において、相対誤差は $\pm 20\%$ 未満の割合が 75% を超えていた。また、0-120% 条件において、6 点法の 1 回目と 2 回目の測定的一致限界と比較して低い一致限界が認められた（図 5-2）。

表 5-5: 2 点法の妥当性の検証結果

二点法	Blant-Altman分析の 95% 一致限界 (± 1.96 標準偏差)	一標本のT検定 における95%CI		回帰式の傾き <i>p</i> 値	相対誤差が 20%未満の 割合	
		下限	上限			
B-Sfv	0 -32kg	-801.2 (-8902.4, 7300.0)	-743.9	1545.0	< 0.01	53%
	0 - 60%	-60.1 (-1407.9, 1287.8)	-168.5	228.6	0.02	79%
	0 - 80%	-86.0 (-854.2, 682.1)	-61.4	147.4	0.09	100%
	0 - 100%	-38.3 (-639.7, 563.1)	-65.8	104.1	0.03	100%
	0 - 120%	-8.4 (-208.6, 191.8)	-23.0	31.4	0.87	100%
B-F0	0 -32kg	-795.8 (-8744.1, 7152.6)	-725.0	1520.8	< 0.01	81%
	0 - 60%	-58.5 (-1318.3, 1201.3)	-156.3	214.8	0.02	100%
	0 - 80%	-79.7 (-767.4, 607.9)	-53.6	133.3	0.14	100%
	0 - 100%	-44.1 (-535.8, 447.6)	-44.8	88.9	0.03	100%
	0 - 120%	-11.0 (-157.7, 135.8)	-15.3	26.2	0.44	100%
B-V0	0 -32kg	0.47 (-1.13, 2.07)	-0.46	-0.01	< 0.01	80%
	0 - 60%	0.18 (-0.62, 0.98)	-0.21	0.03	< 0.01	93%
	0 - 80%	0.02 (-0.36, 0.40)	-0.06	0.04	0.02	100%
	0 - 100%	0.04 (-0.22, 0.30)	-0.06	0.02	< 0.01	100%
	0 - 120%	0.00 (-0.10, 0.10)	-0.01	0.01	0.23	100%

95% CI: 95%信頼区間, B-Sfv: Braking 局面の力-速度プロフィールの傾き, B-F0: Braking 局面における理論上の最大出力, B-V0: Braking 局面における理論上の最大速度

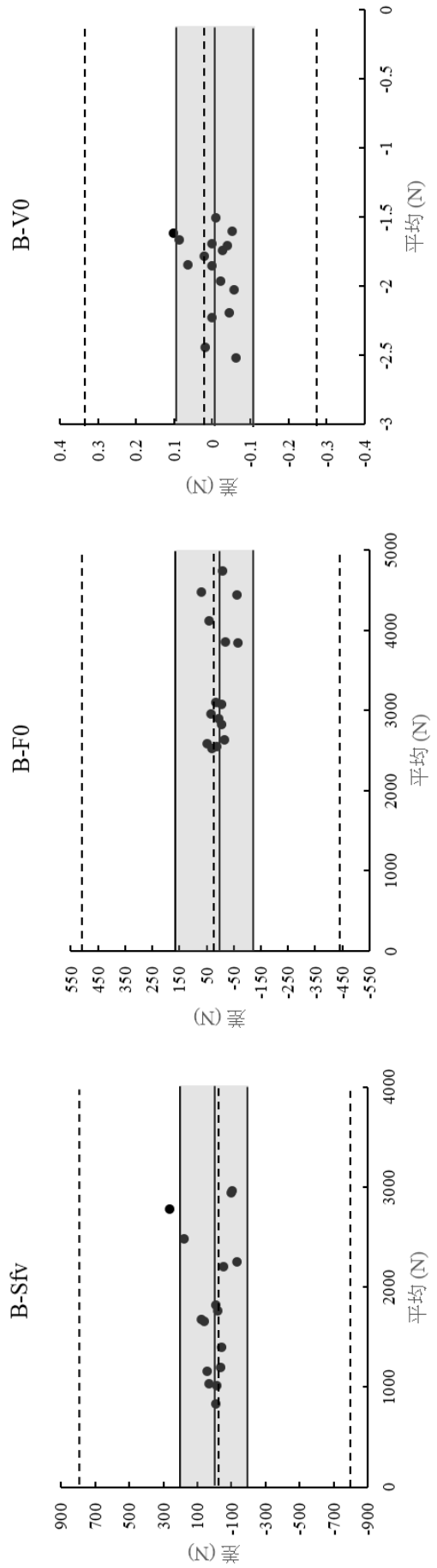


図 5-2: 0-120%条件における B-Sfv, B-F0, B-V0 の Brand-Altman プロット
 実線と灰色の領域は 0-120%の条件における一致限界を示す。点線は 6 点法の 1 回目と 2 回目の測定から得られた一致限界を示す。

図 5-2: 0-120%条件における B-Sfv, B-F0, B-V0 の Brand-Altman プロット

第4節 考察

本研究は、CMJのBraking局面の力-速度関係の特徴を調査し、他のパフォーマンス指標との関係を調査した。また二点法を用いることが可能か否かを調査した。結果は、CMJのBraking局面の力-速度関係はcFVPと同様に直線的な関係を持ち、個人のbFVPであるB-SfvおよびB-F0の値がECC-1RMとB-PFと有意に相関していることが示された。さらに、bFVPは2点法を用いて、6点法と比較して簡易的に測定可能であることが明らかとなった。

本研究において1次回帰式が最も適合する推定モデルであった ($p < 0.05$)。したがって、CMJのBraking局面の力-速度関係は、少なくとも0-120% BMの範囲で、CMJのcFVP(50)と同様に線形の関係を示すと考えられる。典型的な例(図2)に示されているように、個人のbFVPを定量化することは可能で、cFVPとは異なる正の傾きを有する。また、bFVPを定量化することは、トレーニング指導者が個人の減速能力を把握し、トレーニング前後で減速能力の変遷が確認できるためトレーニング指導に効果的に活用するのに役立つ可能性がある。さらにbFVPの定量化は、本研究で示された線形の関係性のため、より少ない負荷条件(2~5つの異なる負荷)の下でも測定可能かもしれない。

しかし、本研究の結果は、単関節運動のEccentric収縮時の力-速度関係(13)や、最近Barkerらによって報告されたEccentric局面の力-速度プロフィール(2022)(5)の特性と大きく異なる結果となった。単関節運動のEccentric収縮時は、力と速度は通常同時に増加する傾向があるが、本研究のBraking局面の力-速度関係は反対に力が増加するにつれて速度は低下する傾向を示した。傾向が異なる可能性の一つとして、CMJのBraking局面中は筋収縮がEccentric収縮であるとは限らないことが挙げられる。先行研究にて、外側広筋の筋束長は、60%1RMの負荷を用いたCMJのBraking局面中においても大きな変化がない可能性が示唆されているため(23)、外側広筋の収縮様式は、Eccentric収縮

ではなく準等尺性 (Quasi-isometric) 収縮(83)である可能性がある。筋収縮様式の違いが、本研究の結果と先行研究の結果との違いの一因である可能性がある。一方、他の考えられる可能性として、Braking局面は与えられた運動量を相殺する必要がある、反動動作の深度が規定されている場合、外部負荷が増加すると抜重の速度を減少させて与えられる運動量を個人の最大減速能力を超越しないよう調整する可能性が挙げられる。そのような場合、負荷が増加すると力は増加するが、速度は減少する。しかしながら、推論の域を出ないため、今後の調査が必要である。

Braking局面の力-速度関係は直線であるため、個人値であるbFVPのSfvやB-F0、B-V0を得ることが可能であった。先に述べたように、CMJのBraking局面の速度はBraking局面の地面反力が増加するにつれて0m/sに近づく。したがって、B-V0は0m/sに近いほど望ましいと考えられる。同時に、Barkerらの指摘と同様にF0とV0を掛け合わせて算出されるPmaxは、Braking局面では意味をなさないと考えられる(88)。そのため、傾きが大きければ大きいほど、B-F0が大きく、パフォーマンスに関連する可能性がある。表4の結果は、この仮説を支持している。B-Sfv、B-Sfv/BM、B-F0、B-F0/BM、およびECC-1RMの間に見られる有意な相関関係は、bFVPから得られるSfvやF0が多関節運動のEccentric筋力に関連していることを示唆している。B-SfvとB-F0はcFVPのF0とも高い関連があるため力発揮能力として解釈することは妥当であり、ECC-1RMとの有意な相関関係も合理的な結果であるといえる。自体重のCMJのBraking局面の地面反力及びB-RFDなどは、水平減速能力やRSImodと関連していて注目を浴びているが、個人のBraking局面の最大出力を推定する方法は不明であった。本研究で得られたB-SfvやB-F0の値は、Braking局面中の個人の理論上の最大出力の指標である可能性がある。今後の研究では、これらの変数と水平減速能力との関係を調査していくことが望まれ

る。また、本研究の結果は B-F0/BM と B-PF および CMJ 高との間に有意な相関関係が認められたが、B-RFD や RSI_{mod} とは有意な相関関係が確認されなかった。本研究のすべての実験参加者において、Braking 局面の終了時に B-PF が観察された。これはシステム重心の速度がほぼ 0m/s に近づいており、低速での力を発揮する能力であったとも解釈できるため、低速度時の理論上の最大出力と考えられる B-F0/BM と B-PF は関連すると考えられる。一方、B-RFD や RSI_{mod} はそれぞれ Braking 局面及びジャンプ動作の時間で除される。したがって、bFVP が時間の短縮に寄与しなかった可能性があるが、理論上 B-PF の力の増加は同時に Braking 局面の時間を減少させるはずなので、この関係性は今後さらに詳細に調査される必要がある。加えて本研究では bFVP と cFVP の変数間に有意な相関関係が確認された。CMJ の cFVP は最大筋力も反映されており、bFVP も同様に最大筋力が重要であると考えられるため、このような相関関係の結果となった可能性がある。bFVP と CMJ 高との相関関係の要因は、伸張性最大筋力と CMJ 高は正の相関関係があることが知られているため (11) (31)、このような結果となったと考えられる。

本研究では、二点法の妥当性も確認された。従来の研究で一般的に使用されてきた 6 点法は時間を要し、被測定者の大きな疲労を引き起こす(27)。したがって、自体重と負荷をかけた CMJ の 2 種類のみで測定することで、測定時間と疲労が大幅に削減される。本研究の結果では、CMJ の負荷が増加するにつれて、Bland-Altman 分析の 95% 一致限界も低下していた。これは、cFVP で使用される二点法の特性と類似している(27)。本研究では、0-120%BM 条件のみが許容可能な誤差の条件の範囲に含まれた。つまり、固定誤差、比例誤差、分散不均一性がなく、相対誤差が $\pm 20\%$ 未満の割合が 75%以上で、一致限界の上限と下限が 6 点法の 1 回目と 2 回目の測定間の一致限界よりも低かった。また、先行研究で報告された cFVP の 0-75 kg 条件の一致限界と比較して、0-

120%BM 条件の一致限界はほぼ同等であった。これらの結果は、二点法も bFVP において妥当であることを示している。一方で、cFVP は最低でも体重の 75% の負荷を用いた場合に妥当であるとされており、bFVP よりも扱う重量が少ない(27)。しかしながら、その先行研究で主張された妥当性は主に相関分析によって評価されており、固定誤差や比例誤差、分散不均一性が評価されていなく、見落とされている可能性があり、疑問が残る。cFVP の 2 点法は、2 点間の負荷の差をできるだけ大きくすることがのぞましい(27)。そのため、本研究で用いた 0-120%BM 条件にて CMJ の FVP を測定することで、bFVP だけでなく同時に cFVP も、測定時間と疲労を軽減しながら測定することが可能である。さらに、方向転換能力(82)やジャンプ高(11)と関連する多関節運動の Eccentric 最大筋力は、しばしば超最大負荷（130-170%の収縮 1RM）を用いて測定される(45) (82)が、これは身体に大きな負荷が伴う。この点においても本研究での 0-120%条件の負荷は、実験参加者の ECC-1RM に対して約 64%であったため B-F0/BM は、最大下の負荷を使用した多関節運動の Eccentric 最大筋力の指標としても用いることができる可能性がある。

本研究の限界として、0~120%BM の負荷に関する関係性しか調査できなかったことが挙げられる。120%BM を超える負荷や 0%BM 未満の負荷を含めた bFVP の特徴がどのようになるかは明確ではない。しかし、cFVP も、完全に直線的な関係性が証明されていないため同様である。今後未知の負荷の範囲を明確にするための研究が求められる。また、本研究で示された Braking 局面の力-速度関係は、使用する負荷が増加すると実施者自身で下降する速度を減速させて与えられる運動量を調節する心理的制限が生じる可能性がある。よって、心理的制限も含めた個人の力-速度プロフィールである可能性があるため、今後は心理的制限も最小限にするための修正策も求められるかもしれない。

第 5 節 結論

CMJ の bFVP は少なくとも 0-120%BM の負荷条件内で直線的な関係を持つ。bFVP から得られる B-Sfv と B-F0 は、Braking 局面中の最大出力の指標である可能性があり、Braking 局面の地面反力の向上に寄与する可能性がある。さらに、cFVP と同様に、bFVP は二点法（0-120%BM の負荷）を用いて測定でき、測定時間と疲労を軽減できる。トレーニング指導者は被測定者の減速能力を定量化し、トレーニング介入の効果を観察できると考えられる。

第 6 章 総合論議

本論文での第 1 章と第 2 章では B-RFD の意義について考証し、CMJ 高との関連における先行研究間での差異の要因について検討した。第 3 章と第 4 章では、第 2 章までに挙げられた B-RFD と CMJ 高との関連の差異の要因の仮説を検証した。第 5 章で、Braking 局面の力の向上を念頭に、Braking 局面の力-速度関係の特徴を調査した。本章では、第 1 章から第 5 章までで得られた知見を総合的に考察し、論議を行う。第 1 節では B-RFD の現状の意義を整理し、第 2 節で B-RFD を測定する際の注意点を示したうえで、第 3 節にて B-RFD を実際に向上させるためのエクササイズやトレーニング手法を考察する。第 4 節では、B-RFD と密接な関係にあると考えられる反動動作中の筋-腱相互作用との関連について論じ、最後の第 5 節にて考えられる今後の展望を論議した。

第 1 節 Braking rate of force development の意義の整理

本論文の第 3 章及び第 4 章の研究の結果から、B-RFD の向上効果は、Concentric 局面後半の力積の減少によって相殺され、ジャンプ高に寄与しないことが明らかとなった。先行研究においても、ダイナミックストレッチングや動作指示にて急性的に B-RFD および Braking 局面の力が変化したにも関わらず、ジャンプ高は変化しなかったとの報告がある。これらは、第 3 章及び第 4 章の結果と類似し、妥当性を支持するものである。これらの先行研究の知見も併せて B-RFD の意義を整理すると、「B-RFD は CMJ 高には寄与しないが、RSI_{mod} には寄与し、水平減速能力とも関連がある」とすることができる（表 6-1）。尚、本稿では「寄与」と「関連」の意味をそれぞれ「ある物事の変化に影響を与えること」及び「ある物事と他の物事との間に関わりがあること」とした。本論文で B-RFD が関連および寄与するパフォーマンス指標を整理できたことで、B-RFD のパフォーマンスへの現時点での意義が整理された。これ

は、あるパフォーマンスを向上させるにあたり、B-RFDの向上を目的としたトレーニングを取り入れるか否かの判断の一助となり得る。RSI_{mod}や水平減速能力の向上を目的とする際には、B-RFD向上のためのトレーニングやエクササイズを取り入れることは有益であると考えられるが、CMJ高のさらなる向上においては、B-RFD向上を念頭に置く意義は低いと考えられる。

表 6-1: B-RFD が関与するパフォーマンス指標

パフォーマンス指標	寄与・関連	参考文献
CMJ高	寄与しない	第3及び第4章
RSI _{mod}	寄与する	(54)
水平減速能力	関連する	(36), (37), (64)

CMJ 高: カウンタームーブメントジャンプ高, RSI_{mod}: 修正反応筋力指数

また、表 6-1 に挙げたパフォーマンス指標以外にも副次的に寄与する可能性のあるものとして、方向転換能力やスポーツ傷害予防が挙げられる(19) (20) (64)。180度の方向転換スピードは、走速度との関連に加えて、方向転換直前の急激な減速も寄与するとされる(20) (19)。また高い水平減速能力は、スポーツ動作中に適切な減速ができるため、スポーツ外傷の受傷起点や身体の軟部組織への慢性的な負荷を避けられる可能性があるため、スポーツ傷害予防に寄与することが示唆されている(64)。よって B-RFD の向上は間接的に方向転換能力やスポーツ傷害予防に貢献する可能性がある。しかしながら、B-RFD と水平減速能力は関連するとされるが、B-RFD の経時的な変化が与える水平減速能力への影響は直接的に調査されていないため、今後はそのようなデザインの研究が求められるであろう。

第2節 Braking rate of force development の測定時の注意点

B-RFD の測定時には、第1章のシステマティックレビューにより、多くの先行研究で反動戦略を規定していないことが分かり、それが B-RFD と CMJ 高との関連の有無を生じさせた可能性がある。そして第4章の研究から、反動の速度と深度で B-RFD は急性的に異なることが明らかとなった。そのため、経時的な B-RFD の変化を測定していくには、反動戦略を規定して測定することが望ましいと考えられる。しかしながら、速度の規定は対象者が規定した速度で完璧に反動動作を行うことは不可能であるため、現状では「なるべく速くしゃがんで」という指示で規定すべきと考えられる。近年の先行研究においても RSI_{mod} を測定する際には、反動戦略を規定すべきことが示唆されており、速度の規定の仕方も同様である(75)。一方、反動の深度の規定は、事前に任意の膝関節角度を設定して、対象者に実際に反動を行う関節角度で静止してもらい、その時点で音が発せられるよう臀部の下に光電管を設置して規定することが望ましいと考えられる(図6-1)。いくつかの先行研究では、臀部の下にゴムバンドを設置しているが(74)(75)、ゴムと臀部が接触した際のゴムの張力が地面反力に影響を与えかねないため、光電管を設置することが望ましいだろう。しかしながら、反動動作の規定は、あくまで目安を設けるに過ぎないため、反動動作の速度と深度の個人内での信頼性、トレーニング介入の慢性効果といった経時的な変化を調査する際には事前の日間信頼性を確認したうえでの測定が必要となるだろう。加えて、反動戦略は、動作指示による影響も報告されているため(53)、測定時には事前に規定された反動戦略や動作指示のもとでの CMJ の練習試行による十分な動作習得が必要である。



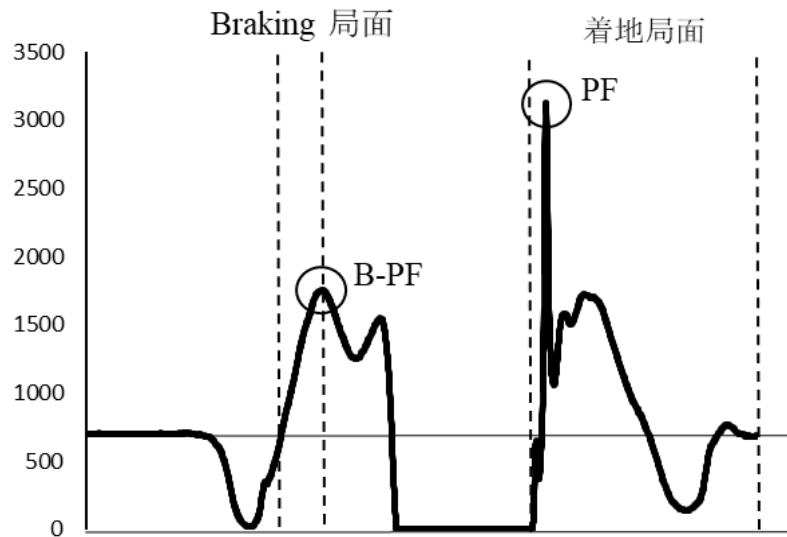
図 6-1: 光電管を用いた反動動作の深度の規定

第3節 Braking rate of force development の向上法の検討

第5章の研究より、CMJのBraking局面における力-速度関係の特徴が明らかとなった。この力-速度関係から考えられるBraking局面の力の向上方法として、低速度下の力と高速度下の力、それぞれに対して向上を目的としたエクササイズを行うことが効果的と考えられる。これは、Concentric局面の力-速度関係から考えたトレーニング戦略でも同様に、低速度下では高負荷低速度の、高速度下では低負荷高速度のエクササイズにてトレーニングが行われており、両速度域において筋力の向上が確認されている(49)。Braking局面の力においては、低速度のトレーニング方法として、Eccentric過負荷(Eccentric overload: EOL)トレーニングやEccentric強調(AEL)トレーニングがある(86)。EOLは、レッグプレス等のエクササイズで100%1RMを超える重量で伸

長性収縮局面を行うトレーニング方法であり(86)、一方 AEL は、Eccentric 局面の負荷を Concentric 局面に対して増加させるトレーニング方法である(89)。これらのトレーニングは、Eccentric 筋力の向上に効果的とされており(89)、同時に低速度下での筋力向上にも有益であると考えられる。Braking 局面の筋収縮様式は明確にされているわけではなく、Eccentric 収縮でない可能性もある。しかしながら、Braking 局面の特性として、筋が受動的に引き伸ばされる負荷に対して抵抗する状況であることに相違ないと思われる。つまりこの特性は Eccentric 収縮の特性と同様であるため、Eccentric 収縮のエクササイズは、Braking 局面の力の向上にも寄与することは十分にあり得る。一方、高速度下でのトレーニングとしては、自体重での抜重や台上からの着地、ジャンプ後の着地などのエクササイズが考えられる。これらのエクササイズは、EOL 及び AEL と比較して関節角速度が速いため(57) (65)、高速度下での筋力を発揮するエクササイズとなる。本論文の実験参加者において全員がジャンプ後の着地は、ジャンプの反動動作にみられる Braking 局面の最大地面反力よりも大きな地面反力が発生した(図 6-2)。そのため、着地の伴うエクササイズは Braking 局面の力の向上に非常に効果的であろう。しかしながら、着地時の力-時間曲線から見て取れるように、着地初期に大きな地面反力が発生しており、後半になるにつれて地面反力は低下している。これは反動動作における Braking 局面とは反対の様相を示しており、大きな Braking 局面の地面反力が発生する関節角度が異なる可能性が考えられる。この可能性と類似する先行研究が実際に存在し、CMJ 後の着地と CMJ で得られた重心上昇高と同様の高さの台からの着地で得られる最大地面反力とその時の下肢の関節角度は異なるとされる(1)。台からの着地の方が最大地面反力は大きく、その時点での関節角度は有意に低値を示した(1)。関節角度が異なる状況下でのトレーニングが Braking 局面の力

の向上にどのような影響を与えるかは不明であるため、今後はそのような課題を調査する研究も期待される。



B-RF: Braking 局面の最大地面反力, PF: 最大地面反力

図 6-2: Braking 局面と着地局面の最大地面反力 (典型例)

また、第 5 章の研究にて 6 種類の負荷を用いて CMJ を行ったように、様々な負荷を用いた CMJ のトレーニングを行うことでも Braking 局面の力の向上に寄与すると考えられる。どの負荷でも、より短時間で減速させることができれば、Braking 局面の力-速度関係は B-F0 が向上して B-V0 は減少し、傾きが大きくなると考えられる。加えて高速 Eccentric トレーニングも近年行われてきており、素早く抜重するのみのバックスクワット (Fast eccentric squat: FESQ) は、B-RFD と類似の概念である E-RFD を向上させる方法として注目されている(9)。バックスクワットの約 70%1RM の負荷で FESQ を行った際の E-RFD は他の負荷 (30, 40, 50, 60, 80, 90%1RM) と比較して最も高い値であったため(9)、スポーツ現場においても 70%1RM を FESQ の負荷設定の 1 つの目安となるだろう。

図 6-1 に Braking 局面に焦点を当てたトレーニング介入によって生じる bFVP 及び cFVP の向上の予想図を示した(図 6-3)。先にも述べたように、bFVP においては、B-F0 が大きく、B-V0 が小さいことが望ましいため、Braking 局面のトレーニングによって B-F0 は向上するが、B-V0 は減少する可能性が高い。また、B-F0 は低速度下での筋力指標の 1 つでもあると考えられるため、cFVP にも影響を及ぼすと思われる。その場合は、F0 が向上し、V0 は多少変化が見られるが、F0 よりは向上度は低いと考えられる。

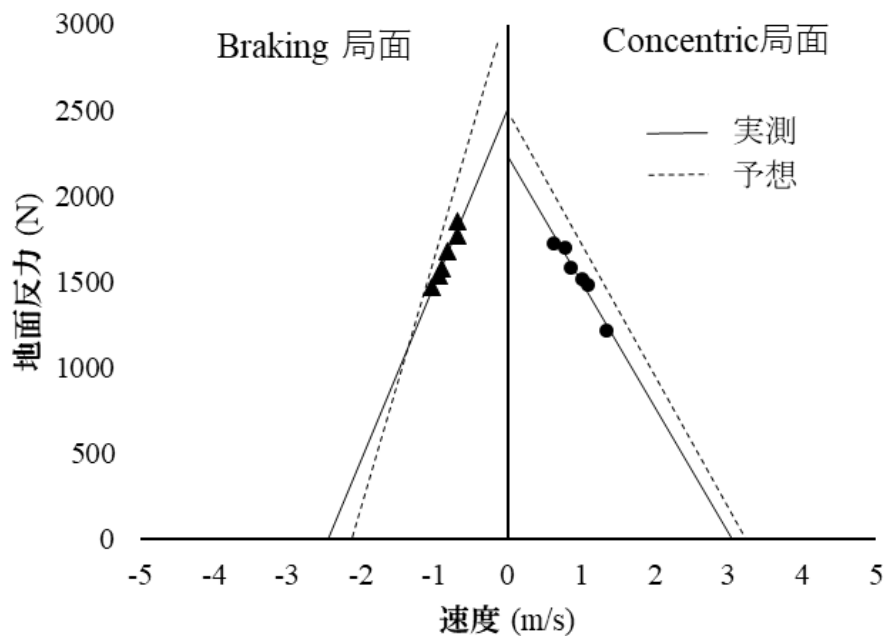


図 6-3: Braking 局面に焦点を当てたトレーニング後の力-速度関係の推移の予想図

第 4 節 Braking rate of force development と筋-腱相互作用との関係

本研究において、B-RFD はジャンプ高に寄与しないことが明らかとなったが、B-RFD が完全に存在しなくてもジャンプ高を最大化させることは可能であるとは言い難い。一般的に反動動作を用いないスクワットジャンプと比較して、CMJ のジャンプ高は高いことが知られている(8)。このジャンプ高の違いを説明する要因として B-RFD と密接に関係するメカニズムが 2 点あると考えられている(87)。1 つ目は反動動作を用いることで腱の弾性エネルギーを利用すること、2 つ目は muscle slack が除去されることである(87)。反動動作を用いることでジャンプの Concentric 局面直前に筋収縮が生じることで B-RFD が発生し、膝関節や足関節の腱が引き伸ばされる。これによって腱の弾性エネルギーが貯蔵される。大きな B-RFD は短時間で大きな力を発揮していることを意味するため、腱も短時間で強く引き伸ばされ、弾性エネルギーも増加すると考えられる。しかしながら、この貯蔵された腱の弾性エネルギーが利用されるにはどのような反動戦略下においても可能であるわけではない(87, 95)。より速く、より浅い反動動作を用いた CMJ (Kopper et al. 2014 の研究では、膝関節屈曲 40 度の深度で速く反動動作を行う CMJ) においては、貯蔵された腱の弾性エネルギーは Concentric 局面初期の地面反力向上にわずかながらではあるが利用される(95)。一方、反動動作の速度が最大下および/またはより反動動作の深度が深い CMJ においては、貯蔵された弾性エネルギーがほとんど失われるか、熱エネルギーに変換されてしまう(87, 95)。本研究の第 3 章の実験にて、最大速度かつ膝関節 60 度の浅い深度を用いた CMJ を行ったが、弾性エネルギーの利用による効果はわずかであっただろう。

2 つ目の muscle slack は、反動動作を用いることで Concentric 局面直前に筋収縮が生じることで除去される(87)。muscle slack は筋のたるみと訳され、これが存在すると、反動を用いないスクワットジャンプの動作開始時に筋の運動

単位の動員が少なく、Concentric 局面初期の地面反力が CMJ と比較して小さく、結果的に全体の力積が低値となる(87)。B-RFD が存在すると、この muscle slack は除去されて Concentric 局面開始時により多くの運動単位が動員されるため、muscle slack が存在する反動を用いないスクワットジャンプと比較して、CMJ のジャンプ高は大きくなると考えられる。しかしながら、より大きな B-RFD はより大きな筋の張力を要求するため、Concentric 局面開始時の運動単位をより多く動員させることが可能と考えられるが、本研究で明らかとなったように Concentric 局面初期の地面反力の向上が必ずしもジャンプ高には寄与しないため、ジャンプ高最大化には muscle slack を除去する最低限の B-RFD で十分だと推察される。今後はこの最低限の B-RFD はどの程度であるかを検討する余地があるだろう。

第 5 節 今後の展望

本研究にて、B-RFD のパフォーマンスへの意義が整理された。そのため、今後は、反動戦略を規定したうえでの B-RFD 向上を目的としたトレーニング手法の研究が求められるだろう。しかしながら、第 5 章の結果より、Braking 局面の力-速度関係は、Eccentric 収縮における力-速度関係と特徴が大きく異なり、これは Braking 局面中の筋収縮様式が Eccentric 収縮ではない可能性がある。Eccentric 筋力を向上させるには Eccentric トレーニングが効果的であることから推察できるように(21) (89)、Braking 局面の力や B-RFD の向上手法を考案する際には、Braking 局面の筋収縮様式に合わせたエクササイズ選択をすることが最も効果的である可能性があるため、今後 Braking 局面の筋収縮様式を明らかにしていくことは重要である。バックスクワットの 60%1RM 負荷を用いた CMJ 中の外側広筋の筋束長を測定した研究では、Braking 局面の筋収縮様式は準等尺性収縮の可能性を示しているが(72) (23)、Braking 局面に焦点を当

て統計解析や調査を行っていないため、今後は詳細に調査する研究が望まれる。

また、前述した FESQ は、エクササイズ中に最大速度の意識を実施者にもたせて降下させる。このような最大速度の意識や努力度は、Concentric 局面においても重要性が知られており、速度計測デバイスによる即時フィードバックが実施者の最大随意速度を誘発しやすいことが分かっている(90)。そのため、FESQ 等のエクササイズにおいても Eccentric 局面の速度の即時フィードバックも効果的であると考えられ、そのようなデザインの介入研究も意義があると云えるだろう。

第 7 章 結論

CMJ 中に発生する B-RFD は RSI_{mod} に寄与し、水平減速能力と関連するが、CMJ 高には寄与しないと考えられる。CMJ 高に寄与しない要因として、B-RFD が向上することによる Concentric 局面前半の力積の向上は後期の力積の減少によって相殺されることが示唆された。また、B-RFD は反動戦略（速度と深度）によって急性的に変化するため、測定時には反動戦略を規定して測定すべきである。

CMJ 中の Braking 局面の力の向上は、筋の力-速度関係で考えることが望ましいと考えられるため、Braking 局面の力-速度関係を調査したところ、少なくとも 0~120%BM の範囲で直線関係を示した。その力-速度関係から得られた傾き (B-Sfv) と力軸の切片 (B-F0) は、Braking 局面の最大出力の指標である可能性があり、Eccentric 局面の 1 回最大反復重量及び Braking 局面の最大地面反力との関連が見られ、さらに 2 点法（自体重と 120%BM の重量）を用いて測定することが可能である。

参考文献

1. Afifi M and Hinrichs RN. A mechanics comparison between landing from a countermovement jump and landing from stepping off a box. *Journal of Applied Biomechanics* 28: 1-9, 2012.
2. Aidar FJ, Brito CJ, de Matos DG, de Oliveira LAS, de Souza RF, de Almeida-Neto PF, de Araujo Tinoco Cabral BG, Neiva HP, Neto FR, Reis VM, Marinho DA, Marques MC, Clemente FM, and Nobari H. Force-velocity relationship in Paralympic powerlifting: two or multiple-point methods to determine a maximum repetition. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation* 14: 159, 2022.
3. Araya-Ibacache M, Aedo-Munoz E, Carreno-Ortiz P, Moya-Jofre C, Prat-Luri A, and Cerda-Kohler H. Dynamic Stretching Increases the Eccentric Rate of Force Development, but not Jump Height in Female Volleyball Players. *Journal of Human Kinetics* 84: 158-165, 2022.
4. Barker L, Harry J, and Mercer J. Relationships between countermovement jump ground reaction forces and jump height, reactive strength index, and jump time. *Journal of Strength & Conditioning Research* 32: 248–254, 2018.
5. Barker L, Siedlik J, Magrini M, Sarai Uesato, Harvey Wang, Sjovold A, Ewing G, and Harry JR. Eccentric force velocity profiling: motor control strategy considerations and relationships to strength and jump performance. *J Strength Cond Res*, 2022. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2022.
6. Blazeovich AJ, Wilson CJ, Alcaraz PE, and Rubio-Arias JA. Effects of Resistance Training Movement Pattern and Velocity on Isometric Muscular Rate of Force Development: A Systematic Review with Meta-analysis and Meta-regression. *Sports Medicine* 50: 943-963, 2020.

7. Bobbert MF. Why is the force-velocity relationship in leg press tasks quasi-linear rather than hyperbolic? *Journal of Applied Physiology* 112: 1975-1983, 2012.
8. Bobbert MF, G. GK, C. LM, and J. VSA. Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine & Science in Sports & Exercise* 28: 1402-1412, 1996.
9. Bogdanis GC, Tsoukos A, Brown LE, Selima E, Veligekas P, Spengos K, and Terzis G. Muscle Fiber and Performance Changes after Fast Eccentric Complex Training. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 50: 729-738, 2018.
10. Brady CJ, Harrison AJ, and Comyns TM. A review of the reliability of biomechanical variables produced during the isometric mid-thigh pull and isometric squat and the reporting of normative data. *Sports Biomechanics* 19: 1-25, 2020.
11. Bridgeman L, McGuigan M, Gill N, and Dulson D. Relationships between concentric and eccentric strength and countermovement jump performance in resistance trained men. *Journal of Strength & Conditioning Research* 32: 255–260, 2018.
12. Burgess KE, Connick MJ, P G-S, and Pearson SJ. Plyometric vs. isometric training influences on tendon properties and muscle output. *Journal of Strength and Conditioning Research* 21: 986-989, 2007.
13. Burkholder TJ, Fingado B, Baron S, and Lieber RL. Relationship Between Muscle Fiber Types and Sizes and Muscle Architectural Properties in the Mouse Hindlimb. *Journal of Morphology* 221: 177-190, 1994.
14. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* Second Edition. Chapter 8, pp 286–288 Hillsdale, NJ: Lawrance Erlbaum Associates, 1988.

15. Cormack SJ, Newton RU, McGuigan MR, and Doyle TLA. Reliability of Measures Obtained During Single and Repeated Countermovement Jumps, *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2008, 3, 131-144.
International Journal of Sports Physiology and Performance, 3: 131-144, 2008.
16. Cormie P, McGuigan MR, and Newton RU. Changes in the eccentric phase contribute to improved stretch-shorten cycle performance after training. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 42: 1731-1744, 2010.
17. Costa JA, Spyrou K, Sancho A, Reis JF, and Brito J. Reliability of Maximal Strength and Peak Rate of Force Development in a Portable Nordic Hamstrings Exercise Device. *Sensors (Basel)* 23, 2023.
18. De Bleecker C, Vermeulen S, De Blaiser C, Willems T, De Ridder R, and Roosen P. Relationship Between Jump-Landing Kinematics and Lower Extremity Overuse Injuries in Physically Active Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine* 50: 1515-1532, 2020.
19. Dos'Santos T, McBurnie A, Thomas C, Comfort P, and Jones P. Biomechanical determinants of the modified and traditional 505 change of direction speed test. *Journal of Strength and Conditioning Research* 34: 1285-1296, 2020.
20. Dos'Santos T, Thomas C, Jones P, and Comfort P. Mechanical determinants of faster change of direction speed performance in male athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research* 31: 696-705, 2017.
21. Douglas J, Pearson S, Ross A, and McGuigan M. Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review. *Sports Medicine* 47: 917-941, 2017.
22. Downs SH and Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *Journal of Epidemiology and*

1998.

23. Earp JE, Newton RU, Cormie P, and Blazevich AJ. Faster Movement Speed Results in Greater Tendon Strain during the Loaded Squat Exercise. *Frontiers in Physiology* 7: 366, 2016.
24. Ebben W and Petushek E. Using the reactive strength index modified to evaluate plyometric performance. *Journal of Strength and Conditioning Research* 24: 1983-1987, 2010.
25. Feltner ME, Frascetti DJ, and Crisp RJ. Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps. *Journal of Sports Sciences* 17: 449-466, 1999.
26. Flori'a P, Go'mez-Landero L, Sua' rez-Arrones L, and Harrison A. Kinetic and kinematic analysis for assessing the differences in countermovement jump performance in rugby players. *Journal of Strength & Conditioning Research* 30: 2533–2539, 2016.
27. Garcia-Ramos A, Perez-Castilla A, and Jaric S. Optimisation of applied loads when using the two-point method for assessing the force-velocity relationship during vertical jumps. *Sports Biomechanics* 20: 274-289, 2021.
28. Giles G, Lutton G, and Martin J. Scoping Review of the Isometric Mid-Thigh Pull Performance Relationship to Dynamic Sport Performance Assessments. *Jornal of Functional Morphology and Kinesiology* 7, 2022.
29. Gonzalez-Badillo JJ, Jimenez-Reyes P, and Ramirez-Lechuga J. Determinant Factors of the Squat Jump in Sprinting and Jumping Athletes. *Journal of Human Kinetics* 58: 15-22, 2017.
30. González-Badillo JJ and Marques MC. Relationship between kinematic factors

- and countermovement jump height in trained track and field athletes. *Journal of Strength & Conditioning Research* 24: 3443-3447, 2009.
31. González-Moro IM, Alcañiz RN, Ruiz MJP, Albaladej JLL, and López VF. Isokinetic strength and vertical jump test in acrobatic skydivers. *Archivos de Medicina del Deporte* 35: 317-324, 2018.
 32. Hara M, Shibayama A, Takeshita D, and Fukashiro S. The effect of arm swing on lower extremities in vertical jumping. *Journal of Biomechanics* 39: 2503-2511, 2006.
 33. Hara M, Shibayama A, Takeshita D, Hay DC, and Fukashiro S. A comparison of the mechanical effect of arm swing and countermovement on the lower extremities in vertical jumping. *Human Movement Science* 27: 636-648, 2008.
 34. Harman EA, Rosenstein MT, Frykman PN, and Rosenstein RM. The effects of arms and countermovement on vertical jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22: 825-833, 1990.
 35. Harper DJ, Carling C, and Kiely J. High-Intensity Acceleration and Deceleration Demands in Elite Team Sports Competitive Match Play: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Sports Medicine* 49: 1923-1947, 2019.
 36. Harper DJ, Cohen DD, Carling C, and Kiely J. Can Countermovement Jump Neuromuscular Performance Qualities Differentiate Maximal Horizontal Deceleration Ability in Team Sport Athletes? *Sports (Basel)* 8, 2020.
 37. Harper DJ, McBurnie AJ, Santos TD, Eriksrud O, Evans M, Cohen DD, Rhodes D, Carling C, and Kiely J. Biomechanical and Neuromuscular Performance Requirements of Horizontal Deceleration: A Review with Implications for Random Intermittent Multi-Directional Sports. *Sports Medicine* 52: 2321-2354,

- 2022.
38. Harper DJ, Morin JB, Carling C, and Kiely J. Measuring maximal horizontal deceleration ability using radar technology: reliability and sensitivity of kinematic and kinetic variables. *Sports Biomechanics*: 1-17, 2020.
 39. Harry J, Blinch J, Barker L, Krzyszkowski J, and Chowning L. Low-pass filter effects on metrics of countermovement vertical jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research* 36: 1459-1467, 2022.
 40. Harry JR, Barker LA, and Paquette MR. A Joint Power Approach to Define Countermovement Jump Phases Using Force Platforms. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 52: 993-1000, 2020.
 41. Harry JR, Blinch J, Barker LA, Krzyszkowski J, and Chowning L. Low-pass filter effects on metrics of countermovement vertical jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research* 36: 1459–1467, 2022.
 42. Haugen TA, Tønnessen E, and Seiler S. Speed and Countermovement-Jump Characteristics of Elite Female Soccer Players, 1995–2010. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 7: 340-349, 2012.
 43. Herlihy J and Murphy R. Length-Tension Relationship of Smooth Muscle of the Hog Carotid Artery. *Circulation Research* 33: 275-283, 1973.
 44. Hernandez-Davo JL, Loturco I, Pereira LA, Cesari R, Pratdesaba J, Madruga-Parera M, Sanz-Rivas D, and Fernandez-Fernandez J. Relationship between Sprint, Change of Direction, Jump, and Hexagon Test Performance in Young Tennis Players. *Journal of Sports Science and Medicine* 20: 197-203, 2021.
 45. Hollander DB, Kraemer RR, Kilpatrick MW, Ramadan ZG, Reeves GV, Francois M, Hebert EP, and Tryniecki. JL. Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise.

- Journal of Strength and Conditioning Research* 21: 34-40, 2007.
46. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, and Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 41: 3-13, 2009.
 47. James L, Suchomel T, Comfort P, Haff G, and Connick M. Rate of force development adaptations after weightlifting-style training: the influence of power clean ability. *Journal of Strength and Conditioning Research* 36: 1560-1567, 2022.
 48. Jarvis P, Turner A, Read P, and Bishop C. Reactive Strength Index and its Associations with Measures of Physical and Sports Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine* 52: 301-330, 2022.
 49. Jiménez-Reyes P, Samozino P, Brughelli M, and Morin JB. Effectiveness of an Individualized Training Based on Force-Velocity Profiling during Jumping. *Frontiers in Physiology* 7: 677, 2016.
 50. Jiménez-Reyes P, Samozino P, Cuadrado-Peñafiel V, Conceição F, González-Badillo JJ, and Morin JB. Effect of countermovement on power-force-velocity profile. *European Journal of Applied Physiology* 114: 2281-2288, 2014.
 51. Johnson JB and Omland KS. Model selection in ecology and evolution. *Trends Ecol Evol* 19: 101-108, 2004.
 52. Kipp K, Kiely MT, and Geiser CF. Reactive strength index modified is a valid measure of explosiveness in collegiate female volleyball players. *Journal of Strength & Conditioning Research* 30: 1341–1347, 2016.
 53. Krzyszkowski J, Chowning L, and Harry J. Phase-Specific Verbal Cue Effects on Countermovement Jump Performance. *Journal of Strength & Conditioning Research* 2021.

54. Krzyszkowski J, Chowning L, and Harry J. Phase-specific predictors of countermovement jump performance that distinguish good from poor jumpers. *Journal of Strength & Conditioning Research* 36: 1257-1263, 2022.
55. Laffaye G, Wagner PP, and Tombleson TIL. Countermovement jump height: Gender and sport-specific differences in the force-time variables. *Journal of Strength and Conditioning Research* 28: 1096-1105, 2013.
56. Landis JR and Koch GG. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33: 159-174, 1977.
57. Lephart SM, Ferris CM, Riemann BL, Myers JB, and Fu FH. Gender differences in strength and lower extremity kinematics during landing. *Clinical orthopaedics and related research* 401: 162-169, 2002.
58. Linthorne NP. Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *American Journal of Physics* 69: 1198-1204, 2001.
59. Loturco I, D'angelo RA, Fernandes V, Gil S, Kobal R, Abad CCC, Kitamura K, and Nakamura FY. Relationship between sprint ability and loaded/unloaded jump tests in elite sprinters. *Journal of Strength & Conditioning Research* 29: 758–764, 2015.
60. Ludbrook J. Confidence in Altman–Bland plots: A critical review of the method of differences. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology* 37: 143-149, 2010.
61. Lum D, Haff GG, and Barbosa TM. The Relationship between Isometric Force-Time Characteristics and Dynamic Performance: A Systematic Review. *Sports (Basel)* 8, 2020.
62. Mackala K, Stodo' lka J, Siemienski A, and Coh M. Biomechanical analysis of squat jump and countermovement jump from varying starting positions. *Journal*

- of Strength and Conditioning Research* 27: 2650-2661, 2013.
63. Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, Folland J, Tillin N, and Duchateau J. Rate of force development: physiological and methodological considerations. *European Journal of Applied Physiology* 116: 1091-1116, 2016.
 64. McBurnie AJ, Harper DJ, Jones PA, and Dos'Santos T. Deceleration Training in Team Sports: Another Potential 'Vaccine' for Sports-Related Injury? *Sports Medicine* 52: 1-12, 2022.
 65. McCann RS, Terada M, Kosik KB, and Gribble PA. Landing Kinematics and Isometric Hip Strength of Individuals With Chronic Ankle Instability. *Foot Ankle Int* 40: 969-977, 2019.
 66. McHugh MP, Hickok M, Cohen JA, Virgile A, and Connolly DAJ. Is there a biomechanically efficient vertical ground reaction force profile for countermovement jumps? *Translational Sports Medicine* 4: 138-146, 2020.
 67. McLellan C, Lovell D, and Gass G. The role of rate of force development on vertical jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research* 25: 379-385, 2011.
 68. McMahon J, Jones P, and Comfort P. Comparison of countermovement jump-derived reactive strength index modified and underpinning force-time variables between super league and championship rugby league players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2019.
 69. Merino-Muñoz P, Pérez-Contreras J, Aedo-Muñoz E, and Garrido B. Relationship between jump height and rate of braking force development in professional soccer players. *Journal of Physical Education and Sport* 20, 2020.
 70. Mero A, Komi PV, and Gregor R. Biomechanics of sprint running. A review. *Sports medicine* 13: 376-392, 1992.

71. Morin JB and Samozino P. Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 11: 267-272, 2016.
72. Nikolaidou ME, Marzilger R, Bohm S, Mersmann F, and Arampatzis A. Operating length and velocity of human M. vastus lateralis fascicles during vertical jumping. *Royal Society Open Science* 4: 170185, 2017.
73. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hrobjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, and Moher D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372: 71, 2021.
74. Perez-Castilla A, Rojas FJ, Gomez-Martinez F, and Garcia-Ramos A. Vertical jump performance is affected by the velocity and depth of the countermovement. *Sports Biomechanics* 20: 1015-1030, 2021.
75. Perez-Castilla A, Weakley J, Garcia-Pinillos F, Rojas FJ, and Garcia-Ramos A. Influence of countermovement depth on the countermovement jump-derived reactive strength index modified. *European Journal of Sport Science* 21: 1606-1616, 2021.
76. Rada A, Kuvacic G, De Giorgio A, Sellami M, Ardigo LP, Bragazzi NL, and Padulo J. The ball kicking speed: A new, efficient performance indicator in youth soccer. *PLOS ONE* 14: e0217101, 2019.
77. Ramirez-Campillo R, Andrade DC, Garcia-Pinillos F, Negra Y, Boullosa D, and Moran J. Effects of jump training on physical fitness and athletic performance in endurance runners: A meta-analysis. *Journal of Sports Sciences* 39: 2030-

- 2050, 2021.
78. Samozino P, Rejc E, Di Prampero PE, Belli A, and Morin JB. Optimal force-velocity profile in ballistic movements--altius: citius or fortius? *Medicine & Science in Sports & Exercise* 44: 313-322, 2012.
 79. Sánchez-Sixto A, Harrison AJ, and Floría P. Larger Countermovement Increases the Jump Height of Countermovement Jump. *Sports (Basel)* 6, 2018.
 80. Sattler T, Hadzic V, Dervisevic E, and Markovic G. Vertical jump performance of professional male and female volleyball players: effects of playing position and competition level. *Journal of Strength & Conditioning Research* 29: 1486–1493, 2015.
 81. Spiteri T, Binetti M, Scanlan AT, Dalbo VJ, Dolci F, and Specos C. Physical determinants of Division 1 Collegiate basketball, Women’s National Basketball League, and Women’s National Basketball Association athletes: with reference to lower-body sidedness. *Journal of Strength & Conditioning Research* 33: 159–166, 2019.
 82. Spiteri T, Nimphius S, Hart NH, Specos C, Sheppard JM, and Newton RU. Contribution of strength characteristics to change of direction and agility performance in female basketball athletes. *Journal of Strength & Conditioning Research* 28: 2415–2423, 2014.
 83. Spurway NC. Hiking physiology and the “quasi-isometric” concept. *Journal of Sports Sciences* 25: 1081-1093, 2007.
 84. Suchomel T, Bailey C, Sole C, Grazer J, and Beckham G. Using reactive strength index-modified as an explosive performance measurement tool in Division I athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research* 29: 899-904, 2015.

85. Thomas K, Brownstein CG, Dent J, Parker P, Goodall S, and Howatson G. Neuromuscular Fatigue and Recovery after Heavy Resistance, Jump, and Sprint Training. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 50: 2526-2535, 2018.
86. Toien T, Pedersen Haglo H, Unhjem R, Hoff J, and Wang E. Maximal strength training: the impact of eccentric overload. *J Neurophysiol* 120: 2868-2876, 2018.
87. Van-Hooren B and Zolotarjova J. The difference between countermovement and squat jump performances: a review of underlying mechanisms with practical applications. *Journal of Strength & Conditioning Research* 31: 2011–2020, 2017.
88. Vandewalle H, Peres G, Heller J, Panel J, and Monod H. Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. *European Journal of Applied Physiology* 56: 650-656, 1987.
89. Wagle JP, Taber CB, Cunanan AJ, Bingham GE, Carroll KM, DeWeese BH, Sato K, and Stone MH. Accentuated Eccentric Loading for Training and Performance: A Review. *Sports Medicine* 47: 2473-2495, 2017.
90. Weakley J, Cowley N, Schoenfeld BJ, Read DB, Timmins RG, Garcia-Ramos A, and McGuckian TB. The Effect of Feedback on Resistance Training Performance and Adaptations: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine* 53: 1789-1803, 2023.
91. Whiteside D, Martini D, Zernicke R, and Goulet G. Ball speed and release consistency predict pitching success in Major League Baseball. *Journal of Strength and Conditioning Research* 30: 1787-1795, 2016.
92. Xu J, Turner A, Comfort P, Harry JR, McMahon JJ, Chavda S, and Bishop C. A Systematic Review of the Different Calculation Methods for Measuring Jump

- Height During the Countermovement and Drop Jump Tests. *Sports Medicine* 53: 1055-1072, 2023.
93. Yang K, Tang WT, Liu SH, and Pandy MG. Muscle Contributions to Take-Off Velocity in the Long Jump. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 55: 1434-1444, 2023.
94. Zaras N, Stasinaki AN, Spiliopoulou P, Arnaoutis G, Hadjicharalambous M, and Terzis G. Rate of Force Development, Muscle Architecture, and Performance in Elite Weightlifters. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 16: 216-223, 2021.
95. Kopper B, Csende Z, Trzaskoma L, Tihanyi J. Stretch-shortening cycle characteristics during vertical jumps carried out with small and large range of motion. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 24: 233-239, 2014.
96. 黒崎ひかる, 勝毛志輝, 坪田依真, 平田浩祐, 平山邦明. 加速及び減速パフォーマンスはそれぞれ短縮性および Eccentric の rate of force development と相関する. *NSCA ジャパン S&C カンファレンス 2022 ポスター発表*: 167, 2023.

謝辞

本博士論文の主査は広瀬統一先生でした。広瀬先生には、私が学部2年生の時に広瀬ゼミに所属してから約8年間、大変にお世話になりました。広瀬先生はいつも私の思い描く理想を応援してくださり、さらに良くなるようにと多大なるご助言をしてくださいました。広瀬先生なくして、私の学部時代から現在に至るまでの人間性の構築や研究成果は得られませんでした。誠に有り難うございました。これからは、社会に貢献する仕事をしていくことが広瀬先生への最大の恩返しと思い、精進していきたいと思えます。

本博士論文の副査は、岡田純一先生、平山邦明先生、秋山圭先生でした。ご多忙のところ、私の研究のご助言を賜りました。岡田先生と平山先生には、私の学部時代に所属していた部活動においてもご指導いただき、恩師の先生でもございます。部活動に所属していた際のご指導も私にとっては非常に大きいもので、本論文を作成するにあたって、活かされておりました。秋山先生には、私が修士課程に所属しているときより、ゼミでのご指導を頂いておりました。不安であった私をいつも励ましていただきました。誠に有り難うございました。

最後に、広瀬研究室の皆様、本博士論文に関わってくださった方々に御礼申し上げます。皆様のご協力がなければ本論文を完成させることは到底叶いませんでした。誠に有り難うございました。