

リバウンド型連続ジャンプの動作および力発揮特性

—リバウンド型一回ドロップジャンプと比較して—

林 直人*・福島 洋樹・堀田 朋基

The characteristics of takeoff movement and joint kinetics
during the repeated drop jumps

—comparison with the single drop jump—

Naoto HAYASHI・Hiroki FUKUSHIMA・Tomoki HORITA

E-mail: thorita@edu.u-toyama.ac.jp

Abstract

The purpose of the present study was to investigate the characteristics of repeated drop jumps (RJ) comparing with single drop jump (DJ) in plyometrics. Thirteen male track and field athletes performed DJ and RJ with maximal effort. Jumping motions in the sagittal plane were videotaped by a high speed camera (300Hz). And ground reaction force was recorded with a force platform (1000Hz). At the same time, surface electrodes were placed over the six lower extremity muscles (1000Hz). Kinematics and kinetics were calculated. RJ performances were increased with times. Jump index of 7th RJ was higher than that of DJ ($p < .05$) because of greater ankle joint power. By the way, Jump index of 1st RJ was lower than that of DJ ($p < .01$). 1st RJ became a condition that hip and knee joint were flexed. Therefore it has been suggested that RJ is more effective training tool for increasing jump performance comparing with DJ.

keywords : repeated drop jumps, single drop jump, joint torque, EMG

I. 緒言

筋収縮には、等尺性収縮、等張性収縮、等速性収縮の3様式があり、さらに等張性収縮および等速性収縮は、それぞれ伸張性および短縮性の2つのタイプに分類されている。これらのタイプの筋収縮は、単独で生じることはほとんどなく、実際の人の運動における筋活動は、いくつかの筋収縮が複合している。特に、筋が短縮する前に伸張する複合的な筋の収縮様式を、伸張-短縮サイクル (Stretch-Shortening Cycle ; SSC) 運動と呼んでいる (Norman and Komi, 1979)。伸張と短縮を複合した時の筋活動は、短縮性だけの筋活動と比較して、短縮局面において大きな力およびパワー発揮が可能になる。SSC運動によって爆発的なパワー発揮ができる理由として、予備緊張によって筋を活性化させ、短縮局面の開始時点における力の立ち上がりが

早くできること (Bobbert et al., 1996)、直列弾性要素に貯蔵した弾性エネルギーを短縮局面において効果的に再利用できること (Bosco et al., 1981)、活動筋を伸張させることによって伸張反射を誘発し、筋 stiffness を高めること (Melivill Jones and Watt, 1971) などが挙げられる。

ランニングおよびジャンプのような運動において、下肢における筋の収縮様式に着目してみると、腓腹筋-アキレス腱複合体は、着地とともに伸張され、主運動局面の開始とともに短縮される典型的なSSC運動を行っている。特に、下肢は大きな弾性組織であるアキレス腱を有していることから、着地衝撃を吸収し、動きのパフォーマンスを高めるのに重要な役割を果たしている。走幅跳や走高跳、あるいは球技スポーツにおける各種の跳躍やフットワークは、極めて短時間に爆発的に力を発揮することが要求されるバリスティックな運動である。このバリスティックな運動は、遂行時間が比較的長い運動やゆっくりと力を調節しながら発揮する運動とは、神

*富山大学大学院教育学研究科(平成26年度修了)

経制御機構や力発揮に関する調節機序が異なることが認められている(米田, 1989). また, これらの運動は, 上述した典型的な SSC 運動でもある. したがって, 下肢における SSC 運動の遂行能力を適切に保持増進させていくことは, 各種スポーツ競技において優れたパフォーマンスを発揮するのに欠かせないことである(図子ら, 1993).

SSC 運動の伸張負荷様式を利用する筋力・パワーのトレーニング法として, プライオメトリックスが挙げられる. 特に, 下肢のプライオメトリックスに関する研究や SSC 運動の遂行能力を高めるためのトレーニングの一つとして, 両脚踏切で垂直方向へ跳躍するリバウンド型ジャンプが多く用いられている. リバウンド型ジャンプは, ある高さの台から跳び下り即座に跳び上がるリバウンド型一回ドロップジャンプ(single drop jump; 以下 DJ とする)とリバウンド型連続ジャンプ(repeated drop jumps; 以下 RJ とする)に分けられる. DJ は, 必要とされる筋の収縮様式, 筋力発揮時間, 各筋群の活性化状態などが, 陸上競技の跳躍種目における踏切の特性に類似していることから, トレーニング手段としてのみではなく, テスト運動としてもよく用いられている(Bobbert, 1990).

RJ は, トレーニング現場や研究で用いられている(岩竹ら, 2008). しかしながら, RJ に関する研究では, その運動中の筋の活動の相違やメカニズムは検討されているが(山崎ら, 1980), DJ との相違は検討されていない. また, 多くの研究の実験試技として用いられてはいるが, RJ 中の一回の跳躍のみを分析対象としているため, 連続跳躍中の変化については言及されていない. そのため, 両ジャンプはトレーニングに用いられてはいるが, 指導者やトレーニング実施者の経験的な判断から同様のジャンプであると判断されていることが一般的である. しかし RJ では連続で跳躍するために, 身体各部の使い方や筋力発揮に関する微調整が要求されると推察できる. そのため, 各関節の動きや関節トルクおよび関節パワー, 筋の活動様式などの力発揮特性には DJ と相違があると予想される. したがって, 両ジャンプの力発揮の相違を明らかにすることができれば, これらを下肢のプライオメトリックスとして用いる際の留意点が明確にできるとともに, 効果的な利用法を考案することにつながると推察される. そこで本研究では, バイオメカニクスの観点から

RJ 中における変化を見出し, DJ との比較から RJ の特性を検討することを目的とした.

II. 方法

1. 被験者

被験者は, 大学陸上競技部に所属する男子13名(年齢 20.1 ± 1.0 歳, 身長 174.4 ± 3.9 cm, 体重 65.4 ± 5.1 kg)とした. なお, 実験を開始するにあたりすべての被験者には, 研究の趣旨, 内容ならびに実験に伴う安全性についてあらかじめ説明し, 参加の同意を得た.

2. 実験試技

被験者は, 各自で十分にウォーミングアップをした後, 以下に示す試技を行なった.

- ①台高30cmのボックスから飛び降り, 1回の跳躍をする DJ
- ②台高30cmのボックスから飛び降り, 10回連続して跳躍する RJ

いずれの試技も, 腕の振込み動作の影響を排除するために, 手を腰に当てた姿勢で, できるだけ短い接地時間でできるだけ高く跳び, 全力で行うように指示をした.

3. 実験手順

1) 撮影方法

動作の撮影は, 被験者の右側方 5m 地点にハイスピードカメラ(Casio 社製 High Speed Exilim EX-F1)を設置し, 撮影速度300コマ/秒, シャッター速度 $1/1000$ 秒に設定し行なった. 被験者の頭頂, 右肩峰点, 右肘, 右手首(尺骨端中心), 右大転子, 右膝, 右外踝, 右踵および右足先の計9点に反射マーカーを貼付けした.

2) 筋電図(EMG)測定

本実験での筋電図の測定部位は, 被験者の左脚を対象とし, 被験筋は大殿筋(GM), 大腿直筋(RF), 大腿二頭筋(RF), 前脛骨筋(TA), 腓腹筋(GA), ヒラメ筋(SO)の6筋であった. 筋電図は, 表面皿電極を用いて双極導出により導出した. 電極は筋腹部に電極間が20mmになるように貼った. 導出された筋電図は, 被験者の腰に装着されたデータロガー(S&ME 社製 Biolog DL-2000)から, サンプリング周波数1000Hzでパーソナルコンピュータに記録

した。

3) 地面反力測定

各試技はフォースプレート (KISTLER 社製 Type 9281) 上で行わせた。試技中の地面反力は、1000 Hz で測定し、フォースプレートからの出力信号を、アンプ (KISTLER 社製 Type9865) を介して A/D 変換し、パーソナルコンピュータに記録した。なお、映像と筋電図および地面反力データを同期させるために、同期装置を映像に映し込み、同時に同期信号をデータロガーと A/D 変換機へ取り込んだ。

4. 分析

本研究では、対象とする動作が左右対称であると仮定した。身体右側方を分析対象とし、接地局面を各跳躍の接地瞬間から離地直前までとし、接地局面を身体重心の最下点を基準に、エキセントリック局面 (以下 Ecc 局面) およびコンセントリック局面 (以下 Con 局面) に分けた。各被験者が Ecc 局面に要した時間を50%、Con 局面に要した時間を50%としてそれぞれのデータを規格化した。また、筋電図測定では、接地瞬間の100ms 前までを接地準備局面 (以下 Pre 局面) として分析を行った。(Fig. 1) さらに、地面反力、関節トルクおよび関節パワーについては体重で規格化した。

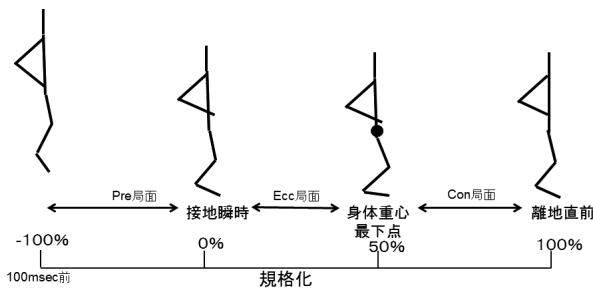


Fig. 1 分析局面定義

1) 動作分析

動作分析は、動作解析ソフト (ディケイエイチ社製 Frame-DIASIV) を用いて、頭頂、右肩峰点、右肘、右手首 (尺骨端中心)、右大転子、右膝、右外踝、右踵および右足先の計 9 点を、毎秒300コマ相当でデジタル化する事で実施した。デジタル化した座標値は、2次元 DLT 法に基づいて実座標値に換算し、デジタルローパスフィルターを用い 6Hz で平滑化した。そこから、接地局面における身体各分節および関節の角度および角速度を算出した。本研究における、分節および関節角度の定義は Fig. 2

に示した。

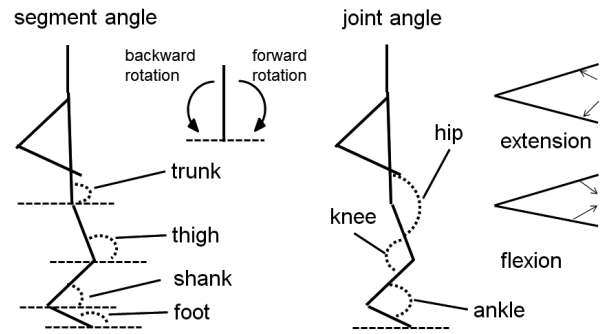


Fig. 2 分節および関節角度定義

2) 筋電図分析

データ解析ソフト (S&ME 社製 m-Scope) を用いて、各筋の筋電図を全波整流した後に、各局面において 1ms ごとに時間積分することで積分筋電図 (iEMG) を算出した。また、iEMG を各局面に要した時間で除することによって平均筋放電量 (mEMG) を算出した。

3) 地面反力分析

フォースプレートから得られた地面反力データから、各局面において 1ms ごとに時間積分することで鉛直力積を求めた。また、鉛直方向の地面反力の波形から接地時間と滞空時間を求めた。さらに、跳躍高とジャンプ指数を算出した。ジャンプ指数は、関子ら (1993) がバリストックな跳躍運動の遂行能力を評価する指標として考案したものである。本研究における DJ と RJ は、跳躍高と接地時間の両者を求めることができるため、このジャンプ指数を用いて評価をした。

$$\text{跳躍高} = 1/8 \cdot 9.8 \cdot \text{滞空時間}^2$$

$$\text{ジャンプ指数} = \text{跳躍高} / \text{接地時間}$$

4) 関節トルクおよび関節パワーの算出

関節トルクおよび関節パワーを算出するために、下肢を股、膝および足関節の 3 関節で分割した 2 次元リンクセグメントモデルと仮定した。

動作分析および地面反力データをもとにして、各関節のトルクを算出した。各部分の質量、質量中心位置および慣性モーメントの算出には阿江 (1998) の身体部分慣性係数を用いた。フリーボディダイアグラムにもとづき、各部分の近位端に作用するトルクを運動方程式により求めた。算出したトルクは反時計回りを正とした。また関節パワーは、関節トルクと関節角速度の積によって求めた。接地局面における伸展トルクの平均値、正および負のパワーの平

均値を算出した。さらに、求めたパワーを時間積分することで各関節の仕事量を求め、下肢三関節の仕事量の総和である総仕事量から各関節の仕事量の割合を示す貢献度を算出した。地面反力データにおける圧力中心は Winter (1990) の方法により算出した。

5. 統計処理

統計処理については、全てのデータを平均値±標準偏差で示した。各跳躍のジャンプ指数、接地時間および跳躍高の差異については試技回数を要因とする一元配置分散分析を用いた。これにより、有意差が認められた跳躍間の各分析項目の平均値の比較には対応のある t 検定を用いた。各関節の角度、角速度、トルク、パワーおよび分節の角度、角速度、地面反力の規格化したデータに関しては、規格化時間 5% ごとに平均値の比較を行った。なお、有意性は危険率 5% 未満で判定した。

6. 実験日時・場所

本実験は、2011年 3 月 18・22・25 日に富山大学人間発達科学部 3 棟 311 講義室で行った。

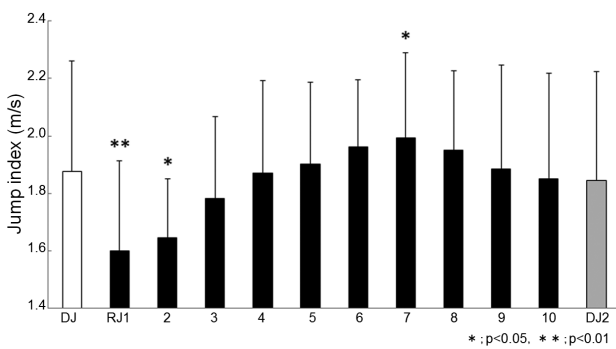


Fig. 3 RJ と DJ のジャンプ指数

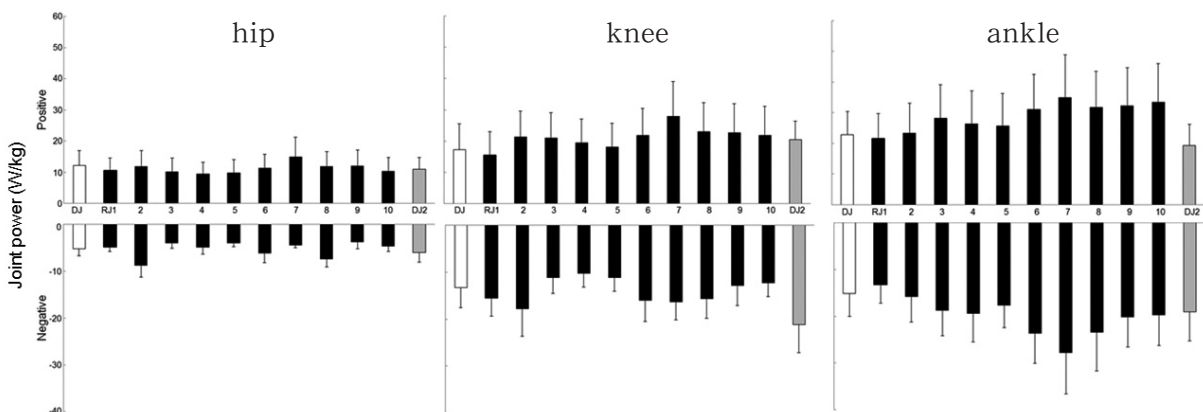


Fig. 4 RJ と DJ の各関節パワー

Ⅲ. 結果 と 考察

1. リバウンドジャンプ中の変化

RJ のジャンプ指数は、1 回目から 7 回目まで値が高まり、その後 10 回目までわずかに低下した。DJ と比較すると、4 回目以降は高い値を示した (Fig. 3)。各関節のパワーもほぼ同様の変化を示していた (Fig. 4)。

ドロップジャンプトレーニングによって、神経系が改善されて最大筋力と素早く力を発揮する能力の両方が向上すること (Hakkinen et al., 1985)、着地瞬間の過度な伸張負荷に対する抑制機構が低下し、逆に促進機能が增大すること (Schmidtbleicher and Gollhofer, 1987) が示されている。さらに、筋の伸張によって収縮要素が生化学的な変化を受け、大きな仕事をするのが可能となる。つまり、収縮要素自体の張力が高まる現象が知られており、それは「筋の増強効果 (Potentiation)」と呼ばれている (Komi, 1984)。これらのことから、RJ のような連続跳躍中において、神経系の改善や筋の適切な働きが促進されること、短縮中の仕事を大きくする増強効果が生じることが可能性として考えられる。RJ 中にこれらに近い現象が生じたために、回数を重ねる毎に各関節パワーが高まり、ジャンプ指数が上昇していったと推察される。

また、RJ 後に行った DJ の結果は、初めに行った DJ とほぼ同等のジャンプ指数であった。仮に、RJ 後の DJ のジャンプ指数が RJ 前の DJ および RJ 中のジャンプ指数よりも高くなっていったならば、RJ のような連続跳躍が後のジャンプ指数の向上に影響を及ぼす可能性が推察される。しかしながら、本研究の結果では DJ のジャンプ指数に大きな差は見られなかった。つまり、DJ の一回の跳躍に対し

て、RJは連続で跳躍することによって、即時的にジャンプ指数を高めることができる運動である可能性が推察される。なお、これらのことについては、今後多様な実験や計測に基づいた研究を推進する必要があるだろう。

以上のことから、RJは跳躍回数と共にパワーが高まり、DJと比較して、より高いパフォーマンスを発揮できるということが特性であると考えられる。

2. RJ7回目とDJの比較

本研究ではRJが跳躍回数と共にジャンプ指数を高める可能性が示唆された (Fig. 3)。そこで、DJとRJにおいて高いジャンプ指数を発揮した跳躍の比較を行い、RJのより詳細な検討をしていく。

DJと比較して、有意に高いジャンプ指数を示したのは、RJの7回目 (以下RJ7とする)であった。その要因として、足関節における正および負のパワー、各関節のトルクが有意に大きな値であることが影響していると考えられる。この背景には、跳躍動作の相違が関係していると推察される。

股および膝関節角度の変容はDJと比較して小さかった。リバウンド型ジャンプにおいて踏切時間を短縮するためには、質量や慣性モーメントの大きな身体部位を動かさず、短時間に大きなパワーを発揮できる構造的および機能的特性をもつ足関節の動きが重要であることが示されている (図子ら, 1998)。

本研究におけるRJ7の動作は、この報告とよく一致したものであったと考えられる。

注目すべきは、DJとRJ7の下腿部と足部の動きである。Ecc局面において、DJは下腿部が大きく前傾し、RJ7は足部が大きく後傾をしている (Fig. 5)。伸張反射や弾性エネルギーの貯蔵と再利用などのSSC運動によってパワー発揮が増大する効果の大小は、筋の伸張速度の大きさに影響を受けることが報告されている (Bobbert et al., 1996)。足部の急速な後傾をすることによりアキレス腱におけるSSC運動の効果を有効活用できることが考えられ、このことがRJ7における正および負のパワーを発揮することにつながり、DJと比べて高いジャンプ指数を発揮したと推察される。

これらのことから、DJと比較してRJ7においてジャンプ指数が高くなった要因として、連続で跳躍する中で適切な動作を行い、効率的な跳躍になったことが考えられる。

3. RJ1回目とDJの比較

DJと比較して、ジャンプ指数が有意に低い値を示した跳躍が、RJの1回目 (以下RJ1とする)と2回目 (以下RJ2とする)であった (Fig. 3)。特に、RJ1においては、接地時間が有意に長く、跳躍高が有意に低い値を示した。ここでは、RJ1とDJの比較を行う。

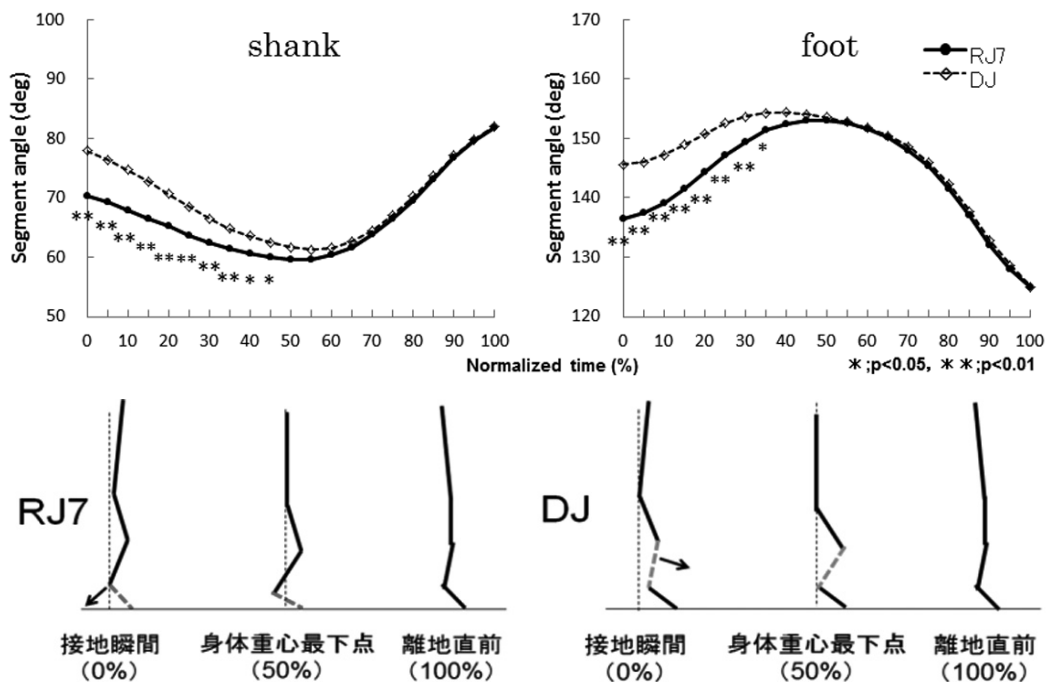


Fig. 5 RJ7とDJの分節角度変化

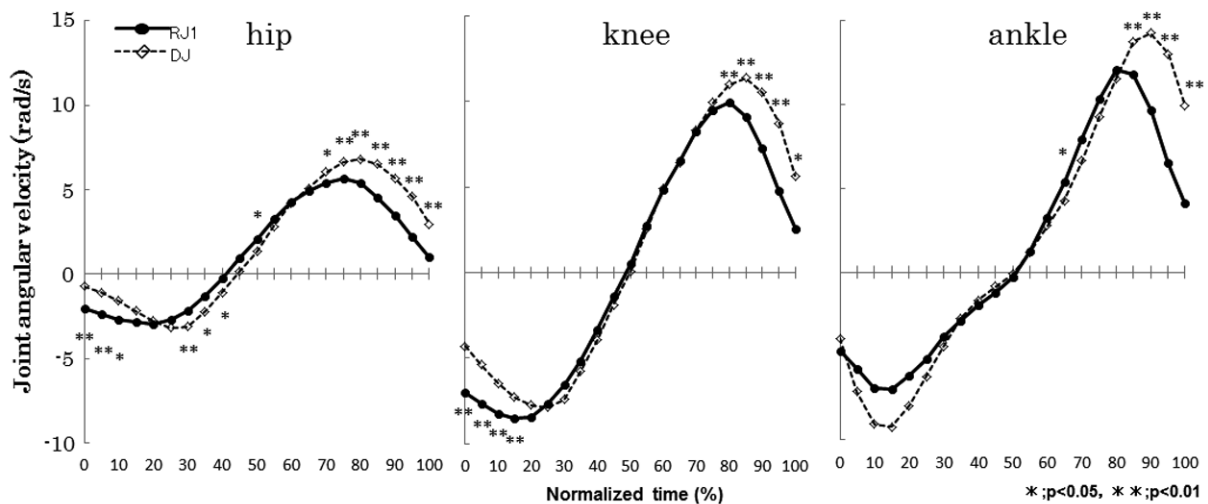


Fig. 6 RJ1 と DJ の関節角速度変化

規格化した分析項目の変化を見ると、関節角速度に大きな差が見られた (Fig. 6)。三関節とも DJ と比べて、規格化時間85%から100%における伸展角速度が有意に低い値を示した。パワーはトルクと角速度の内積によって算出されることから、パワーの値が低かったのは角速度の値が低いことが影響していると考えられる。また、股および膝関節の規格化時間0%から15%の屈曲角速度が有意に低い値を示した。鉛直地面反力では、DJ と比べて規格化時間45%から80%の値が有意に低かった。

これらのことから、RJ は接地瞬間から股および膝関節が屈曲し、着地の衝撃を吸収するような跳躍あるいはつぶれるような跳躍になったと考えられる。Ecc 局面の鉛直地面反力に有意な差が見られなかったのは、RJ1 と DJ は30cmの台から跳び下りるため、その衝撃が同等のものであったためと考えられる。RJ1 では股および膝関節を屈曲させることにより衝撃を吸収したために、Con 局面における鉛直地面反力が DJ に比べて低い値を示したことにつながったと推察される。同時に、接地瞬間の衝撃と共に引き伸ばされた筋と腱が、エネルギーを貯蔵し再利用をする効率的な跳躍機序を十分に遂行できなかった可能性が考えられる。そして、離地直前の伸展速度の低下は、「踏み切りきらない」状態になったのではいかと推察される。このため、関節のトルクが同等であっても、爆発的なパワーを発揮することができないために接地時間が長くなり、高い跳躍高を獲得できない結果につながったと考えられる。

DJ と RJ1 は、30cmの台の上から自分のタイミングで跳び下りる運動であり、本研究の実験試技に

おいて最も類似した運動であることから、各分析項目において大きな差が見られないと推察された。しかしながら結果は上述の通りであり、跳躍の回数や連続跳躍運動であるということが被験者の心理的背景に存在していた可能性があり得る。この点については、今後さらなる研究が必要とされる。

IV. 結論

RJ は跳躍回数と共にジャンプ指数が高まり、DJ と比較して、より高いパワーを発揮できる運動であることが示唆された。

V. 要約

本研究では、バイオメカニクスの観点から RJ 中における変化および DJ と比較した RJ の特性を検討することを目的とした。陸上競技選手13名を対象に DJ と RJ を行わせた。主な結果は以下のとおりである。

- ①RJのジャンプ指数は、回数と共に高い値を示した。連続して跳躍をすることで、次第に高いパワーを発揮していたと考えられる。
- ②RJの7回目がDJと比較して、高いジャンプ指数を示した。股および膝関節の動きを最小にし、足部の大きな後傾により、効率的なジャンプ動作を行うことで、大きな力学的パワーを発揮できたことが影響したと考えられる。

③RJの1回目がDJと比較して、低いジャンプ指数を示した。股および膝関節の動きが大きく、アキレス腱を含む筋-腱複合体の利用を効率的に行えなかったために、大きな力学的パワーを発揮できなかったことが影響したと考えられる。

本研究の結果から、RJは跳躍回数と共にジャンプ指数が高まり、DJと比較して、より高いパワーを発揮できる運動であることが示唆された。

〈謝辞〉

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご協力していただいた諸先生方、被験者および実験補助にご協力いただいた方々に心から感謝いたします。

VI. 参考文献

- 阿江通良 (1996): 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *J.J.Sports Sci.*, 15(3), 155-162.
- Bobbert, M.F., Gerritsen, K.G.M., Litjens, M.C.A. and van Soest, A.J. (1996): Why is counter movement jump height greater than squat jump height?. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28, 1402-1412.
- Bobbert, F.M. (1990): Drop jumping as training method for jumping ability. *Sports Medicine*. 9, 7-22.
- Bosco, C., Komi, P.V. and Ito, A. (1981): Prestretch potentiation of human skeletal muscle during ballistic movement. *Acta Physiol. Scand.*, 111, 135-140.
- Hakkinen, K., Komi, P.V., and Alen, M. (1985): Effect of explosive type strength training on isometric force- and relaxation -time, electromyographic and muscle fiber characteristics of leg extensor muscle. *Acta Physiol. Scand.*, 125, 587-600.
- 岩竹 淳・北田耕司・川原繁樹・関子浩二 (2008): ジャンプトレーニングが思春期後期にある男子生徒の疾走能力に与える影響. *体育学研究*, 53, 353-362.
- Komi, P.V. (1984): Physiological and biomechanical correlates of muscle function: Effect of muscle structure and stretch - shortening cycle on force and speed. *Exerc. Sports Sci. Rev.*, 1, 81-117.
- Melivill Jones, G. and Watt, D.G.D. (1971): Observations on the control of stepping and hopping movements in man. *J. Physiol.* 219: 709-727.
- Norman, R.W. and Komi, P.V. (1979): Electro-mechanical delay in skeletal muscle under normal movement conditions. *Acta Physiol. Scand.*, 106, 241-248.
- Schmidtbleicher, D. and Gollhofer, A. (1987): Effects of stretch-shortening typed training on the performance capability and innovation characteristics of leg extensor muscles. *Bio-mechanics*, XI-A, 185-189.
- Winter, D.A. (1990): *Biomechanics and Motor control of Human Movement*, 2nd ed. Wiley Interscience, New York, 36-41.
- 山崎良比古・鬼頭伸和・三井淳蔵・穂丸武臣 (1980): 律動的ジャンプ動作における伸張反射. *体育学研究*, 25, 113-118.
- 米田継武 (1989): すばやい力発揮の制御. *J.J. Sports Sci.*, 10, 657-662.
- 関子浩二・西園秀嗣・平田文夫 (1998): 筋収縮の違いからみた下肢三関節のトルク発揮特性. *体力科学*, 47, 513-600.
- 関子浩二・高松 薫・古藤高良 (1993): 各種スポーツ競技者における下肢の筋力およびパワー発揮に関する特性. *体育学研究*, 38, 265-278.

(2015年10月15日受付)

(2015年12月9日受理)