

着地トレーニングが着地からのジャンプにおける跳躍高 およびキネティクス・キネマティクスに与える影響

Effects of landing training on jump height, kinetics and kinematics in landing to jump task

飯田 祥明（東京大学大学院総合文化研究科）

稲葉 優希（東京大学大学院総合文化研究科）

金久 博昭（鹿屋体育大学）

1 緒言

着地からのジャンプという動作において、より高い跳躍高を達成するためには、跳躍動作のみならず跳躍に移行するまでの着地の技術も重要な要素になると考えられる。例えば、伊藤 (1995) は、つま先から着地するドロップジャンプと踵から着地するドロップジャンプとを比較し、前者の方が跳躍時の床反力の平均値が大きくなると指摘している。また、Hoffrén et al. (2007) は、ドロップジャンプにおける着地時の足関節スティフネスと離地速度との間に、Horita et al. (2002) は重心最下点における膝関節トルクと跳躍高との間に、それぞれ正の相関関係があると報告している。これらの先行知見は、着地からのジャンプにおける跳躍高に、着地の技術が影響していることを示唆するものである。

また、着地動作をトレーニング課題として、その効果を検証した例も散見される (McNair et al., 2000; Prapavessis et al., 2003; Oñate et al., 2005)。それらは傷害予防の観点から、着地トレーニングの衝撃の大きさに対する効果を検討したものであり、McNair et al. (2000) によると、関節のキネマティクスに関する指示および音声による床反力の大きさのフィードバックを与えられた被験者は、指示を受けなかった被験者と比較して、着地時の床反力の低下に有意に高い効果を示すと報告されている。また、Prapavessis et al. (2003) は、McNair et al. (2000) と同様の着地トレーニングを8～10歳の子供に課し、フィードバックを受けた被験者において、より衝撃緩衝技術の向上が認められると述べている。さらにOñate et al. (2005) は、ビデオを用いた着地技術のフィードバックにより、着地時の床反力のピーク値が減少すると報告している。これらの研究結果は、動作に関するフィードバックを付加した着地トレーニングによって、衝撃緩衝のための着地技術が向上するこ

とを示すものである。

これまで着地からのジャンプの1つとして数多く研究されてきたドロップジャンプは、着地を伴う最大努力の跳躍が短い接地時間（約200～400ms）で行われるという特徴を有し、その着地時に発生する大きな床反力（衝撃）によって高い跳躍パフォーマンスの達成が可能になるとされている (Horita et al., 2002; Hoffren et al., 2007)。しかしながら球技などの競技においては、周りの状況に合わせ、接地時間を長くすることを要求される場面が多く存在する。したがって、接地時間が長いタイプの着地からのジャンプを効果的に遂行できる能力も、様々なスポーツにおいて外部環境に適応的な跳躍を達成するために必要不可欠なものであるといえる。さらに、筆者らの研究結果 (飯田ら, 2009) によると、従来のドロップジャンプより接地時間が長い（約650ms）着地からのジャンプの跳躍高が、着地直後における衝撃の大きさと負の相関関係を持ち、衝撃の緩衝が着地からのジャンプのパフォーマンスに関係する要素の1つである可能性が示唆された。このような結果は、従来の接地時間の短いドロップジャンプとは異なり、着地トレーニングを実施することで、衝撃を緩衝する能力を高めると同時に、着地後の跳躍高を向上できる可能性があることを示すものと考えられる。

このような結果と先行研究 (McNair et al., 2000; Prapavessis et al., 2003; Oñate et al., 2005) の知見を考え合わせると、着地のためのトレーニングによる着地時の衝撃を緩衝する能力の向上は、接地時間が長い着地からジャンプにおける跳躍高の改善につながると考えられる。

そこで本研究では、着地のためのトレーニングを実施し、上記の仮説を検証すると同時に、着地から離地までの局面におけるキネティクスおよびキネマティクスの変化について明らかにすることを目的とした。

II 方法

(i) 被験者

健康成人男性16名が実験に参加した。被験者は、週1日程度の頻度で、競技としてではなく、レクリエーションとしてスポーツ活動を継続していた。しかし、ジャンプを主体とするトレーニングの実施経験を持つ被験者は含まれていなかった。被験者を着地トレーニング群10名(年齢: 25.3 ± 2.5 歳, 身長: 174.6 ± 5.7 cm, 体重: 67.9 ± 9.9 kg, 平均値 $\pm$ 標準偏差)およびコントロール群6名(年齢: 25.0 ± 2.1 歳, 身長: 175.0 ± 8.0 cm, 体重: 73.1 ± 11.1 kg)の2つのグループに分けた。トレーニング前の年齢, 身長および体重に, 被験者群間で有意な差は認められなかった。実験の実施に先立ち, 被験者には本研究の目的, 実施内容, 測定に伴う危険性について説明し, 被験者から書面にて実験参加の同意を得た。本研究は東京大学大学院総合文化研究科・教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たうえで実施した。

(ii) 実験の概要

トレーニング群は, 着地のみによるトレーニングを週3日の頻度で, 2週間実施した。Prapavessis et al. (2003)によると, 1週間(4セッション)の着地トレーニングによって, 着地時の衝撃は有意に減少することが報告されている。そこで本研究では, 衝撃の低下が期待でき, かつ下肢筋力に大きな変化が起きないと推察される2週間(6セット)という期間を設定した。また, 着地動作やドロップジャンプトレーニングに関する多くの先行研究においては, 落下高として30~40cmの高さが採用されており, その高さは安全性が高いと報告されている(図子ほか, 1993)。そこで本研究では, 着地動作の落下高を35cmと設定した。

トレーニング群およびコントロール群ともに, トレーニング開始前(Pre測定)およびトレーニング期間終了後(Post測定)の2回にわたり, 床反力計の端からの距離20cmに設置した高さ35cmの台上からの着地(landing: LAND), 着地からのジャンプ(landing to jump: L-J), ならびにスクワットジャンプ(squat jump: SJ)の3種類の試行を実施した。なお, トレーニング群のPost測定は, トレーニング実施最終日から1~3日後に実施した。LANDおよびL-J試行において, 被験者には, 裸足で手を腰に当て左足支持の状態から落下し, 視線は常に前方のマークに置くように指示した。また, LAND実施の条件は「できる限り衝撃を緩衝する」, L-Jについては「着地後, できる限り高く跳ぶ」こととした。SJにおいては, 被験者には裸足で手を腰に当て, 各被験者が最適とした屈曲姿勢から, 反動を用いずに「できる限り高く跳ぶ」よう指示した。LAND, L-JおよびSJは各10試行行い, 実施順はランダ

ムとした。

(iii) トレーニングプログラム

着地トレーニングで用いた動作はLAND試行と同一であり, 高さ35cmからの両足着地とした。1日あたり1セット10試行を3セット(計30試行)実施し, 試行間に30秒, セット間に2分間の休息を設けた。また, 「できる限り衝撃を緩衝する」ことをトレーニング実施の条件とし, 被験者には, 試行毎に床反力垂直成分(F_z)のピーク値をフィードバックし, その値をできる限り小さくするよう指示した。着地トレーニングの効果を検討した先行研究では, 下肢関節の角度, 床反力の大きさを表す音声(Prapavessis et al., 2003; McNair et al., 2000)およびビデオの映像(Oñate et al., 2005)といった情報を被験者にフィードバックし, また動作に関するアドバイスを与えている。しかし, これらの方法では, 着地動作に対する検者の主観が混入し, また, 被験者のフィードバックに対する理解にも個人差が生じると考えられる。したがって, 本実験では, トレーニング実施中の床反力の計測結果に基づき, 試行毎に F_z のピーク値のみを被験者にフィードバックし, 動作に関するアドバイスは行わなかった。

(iv) キネマティック・床反力データの取得

PreおよびPost測定における課題動作の遂行中, 3次元動作解析システム(Motion Analysis Corp., USA)を用いてキネマティックデータを, 床反力計(Kistler, Switzerland)によって床反力データを取得した。各データのサンプリング周波数は, キネマティックデータ200Hz, 床反力データ1000Hzに設定した。3次元動作解析システムによる計測では, 頭頂部, 前頭部, 後頭部, 右肩甲骨下, 左右肩峰, 左右肘頭, 左右手茎状突起, 左右大転子, 左右膝関節中心, 左右足関節中心, 左右踵骨後部, 左右第三中足骨遠位端の各箇所計20個の反射マークを貼付した。なお課題動作中の関節角度は, 図1に示すように定義した。

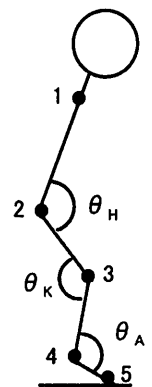


図1 関節角度定義
1: 右肩峰
2: 右大転子
3: 右膝関節中心
4: 右足関節中心
5: 右第三中足骨遠位端
 θ_H : 股関節角度
 θ_K : 膝関節角度
 θ_A : 足関節角度

(v) データ分析

本研究ではLANDおよびL-Jのデータの分析に際し, 先行研究(Kulas et al., 2006)にならい, 接地から100ms後まで(ABSORPTION局面), 接地100ms後から重心が最下点に達するまで(BRAKING局面), さらにL-Jについ

ては、重心が上昇し始めて離地するまで (PROPULSION局面) の3局面に分けた (図2)。さらに、より安定したデータの取得のため、LANDについてはABSORPTION局面におけるFzのピーク値を、L-JおよびSJについては跳躍高をそれぞれ基準とし、最上位および最下位の2試行を除き、計6試行分のデータについて解析した。また各測定変数の代表値は、選別した6試行の測定変数を加算平均することによって算出した。

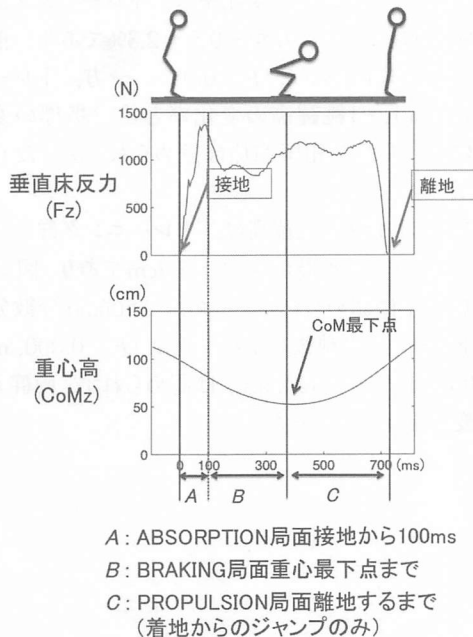


図2 着地および着地からのジャンプにおける分析局面

3次元動作解析システムによって得た身体各部位の座標データに対し、4次の位相遅れなしバターワースローパスフィルタ (遮断周波数8Hz) を用いて、マーカーの揺れによるノイズを軽減した後 (Hara et al., 2008; Winter, 2004) に、身体重心位置 (CoM) および股関節、膝関節、足関節の各角度を算出した (Winter, 2004)。また、L-JおよびSJについては、跳躍時のCoM最高点から立位時のCoMの高さを減じることによって各試行の跳躍高を算出し (Baca, 1999)、選別した6試行の平均値を各被験者の跳躍高とした。床反力データからは、ABSORPTION局面におけるFzピーク値 (N) を各被験者の体重 (N) で除すことで、接地直後の衝撃の大きさを表す衝撃指標を算出した (Decker et al., 2003; 飯田ほか, 2009; Zhang et al., 2000)。さらに、L-Jのキネマティックおよび床反力データに対し逆ダイナミクス法を適用することで、足関節、膝関節および股関節の関節トルクを算出し、関節トルクに関節角速度を乗じることで関節パワーを算出した (阿江と藤井, 2002)。関節トルクおよびパワーは局面毎に平均し、さらに関節パワーに関しては局面毎に積分することで仕事

量を算出した (阿江と藤井, 2002)。

(vi) 統計処理

測定値の基本統計量は群別の平均値±標準偏差により表し、Pre測定値およびトレーニングに伴う変化率の両群間の比較には、対応のないt検定を用いた。また、着地トレーニングの有無による測定値の変化の有意性については、被験者群 (トレーニング群、コントロール群) およびトレーニング前後 (Pre測定、Post測定) を要因とする反復測定二元配置分散分析を実施した。被験者群×トレーニング前後の交互作用が認められた場合、各群においてトレーニング前後で対応のあるt検定を行った。いずれの検定においても有意水準は5%とした。

III 結果

典型的な被験者における各時系列データのトレーニング前後の変化を図3に示す。各群における平均値の結果は以下の通りである。

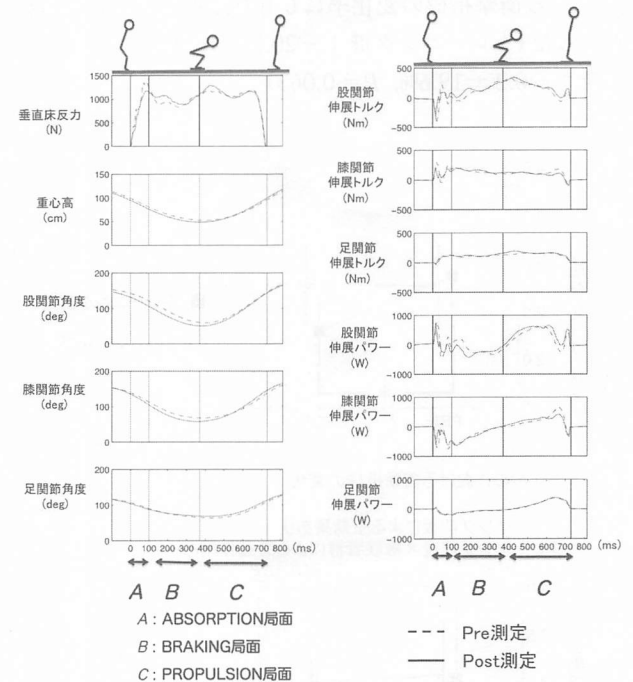


図3 トレーニング前後の各時系列データ (典型例)

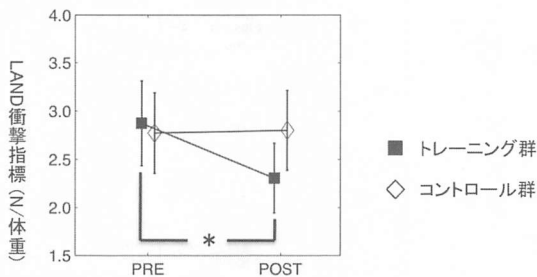
(i) 体重における変化

Post測定における被験者の体重は、トレーニング群が $68.0 \pm 9.8\text{kg}$ 、コントロール群が $73.2 \pm 11.0\text{kg}$ であり、二元配置分散分析の結果、体重に有意な主効果 (トレーニング前後) および交互作用 (被験者群×トレーニング前後) は検出されなかった (主効果: $F = 0.080$, $P = 0.782$, 交互作用: $F = 0.002$, $P = 0.964$)。

(ii) 着地時衝撃における変化

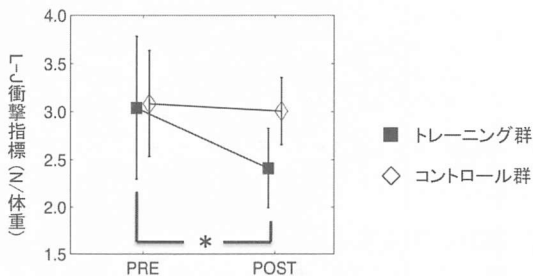
Pre測定におけるLANDの衝撃指標は、トレーニング群 2.88 ± 0.44 、コントロール群 2.77 ± 0.42 であり (図 4a), 群間に有意な差は認められなかった. 二元配置分散分析の結果, 交互作用 (被験者群 $\times$ トレーニング前後) が認められた ($F = 7.378$, $P = 0.017$). トレーニング群のPost測定における衝撃指標は, Pre測定におけるものより有意に小さく ($P < 0.05$), コントロール群の衝撃指標に有意な変化は認められなかった. LANDにおける衝撃指標の変化率は, トレーニング群が $-19.8 \pm 15.1\%$, コントロール群が $1.5 \pm 9.8\%$ であり, 有意な群間差が認められた ($P < 0.05$).

Pre測定におけるL-Jの衝撃指標は, トレーニング群が 3.04 ± 0.74 , コントロール群が 3.08 ± 0.55 であり (図 4b), 群間に有意な差は認められなかった. Post測定の結果, L-Jの衝撃指標は, トレーニング群において減少する傾向が認められた. しかし, 二元配置分散分析の結果, トレーニング前後による主効果 ($F = 3.628$, $P = 0.078$) および交互作用 ($F = 2.211$, $P = 0.159$) は検出されず, L-Jにおける衝撃指標の変化率にも有意な群間差は認められなかった (トレーニング群: $-20.7 \pm 16.0\%$, コントロール群: $-0.2 \pm 19.6\%$, $P = 0.063$).



a: LANDにおける衝撃指標の変化

トレーニング前後による主効果あり
トレーニング前後 $\times$ 被験者群による交互作用あり



b: L-Jにおける衝撃指標の変化

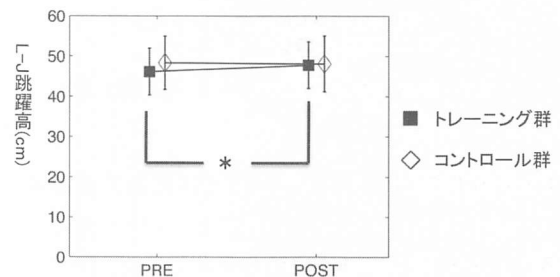
トレーニング前後による主効果なし
トレーニング前後 $\times$ 被験者群による交互作用なし

図4 着地トレーニングによる衝撃指標の変化
(*:トレーニング群, Pre測定 vs. Post測定, $P < 0.05$)

(iii) 跳躍高における変化

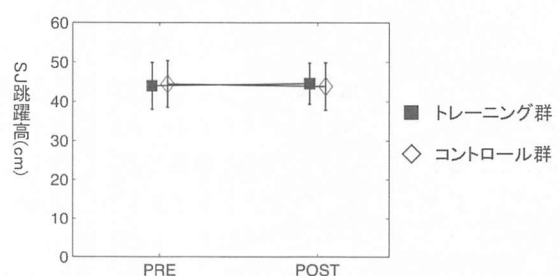
Pre測定におけるL-Jの跳躍高は, トレーニング群が $46.1 \pm 5.8\text{cm}$, コントロール群が $48.3 \pm 6.6\text{cm}$ であり (図 5a), 群間に有意な差は認められなかった. 二元配置分散分析の結果, 有意な交互作用が認められた ($F = 5.873$, $P < 0.05$). 跳躍高は, トレーニング群の場合に, Pre測定よりPost測定において有意に高く, コントロール群ではPre測定とPost測定との間に有意な差は認められなかった. L-Jにおける跳躍高の変化率は, トレーニング群が $3.6 \pm 3.8\%$, コントロール群が $-0.5 \pm 2.3\%$ であり, 前者が後者より有意に高かった ($P < 0.05$). 一方, トレーニング群におけるL-J跳躍高の変化率と衝撃指標の変化率との間には, 有意な相関関係は認められなかった ($r = 0.358$, n.s.).

Pre測定におけるSJの跳躍高は, トレーニング群が $44.0 \pm 5.9\text{cm}$, コントロール群が $44.4 \pm 5.9\text{cm}$ であり (図 5b), 群間に有意な差は認められなかった. 二元配置分散分析の結果, トレーニング前後による主効果 ($F = 0.000$, n.s.) および交互作用 ($F = 2.524$, n.s.) は認められず, 両群ともに有意な変化を示さなかった.



a: L-Jにおける跳躍高の変化

トレーニング前後による主効果なし
トレーニング前後 $\times$ 被験者群による交互作用あり



b: SJにおける跳躍高の変化

トレーニング前後による主効果なし
トレーニング前後 $\times$ 被験者群による交互作用なし

図5 着地トレーニングによる跳躍高の変化
(*:トレーニング群, Pre測定 vs. Post測定, $P < 0.05$)

(iv) 所要時間および関節角度における変化

トレーニング前後におけるL-Jの所要時間および関節角度に関するデータを表1に示す。各局面所要時間および接地時間に関する全項目において、Pre測定における測定値に有意な群間差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、すべての項目について交互作用(被験者群×トレーニング前後)は検出されず、両群の全項目についてトレーニング前後で有意な変化は認められなかった。

L-Jの関節角度に関する全項目において、Pre測定における測定値に有意な群間差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、接地時の足関節角度($F=5.089$, $P<0.05$)および最小股関節角度($F=7.916$, $P<0.05$)に有意な交互作用が認められた。接地時の足関節角度は、トレーニング群の場合、Post測定においてPre測定より有意に大きく($P<0.05$)、コントロール群ではトレーニング前後で有意な差は認められなかった。最小股関節角度は、トレーニング群ではPost測定においてPre測定より有意に小さく($P<0.05$)、コントロール群では有意な変化を示さなかった。

表1 着地からのジャンプにおける各局面所要時間および接地時・最小関節角度(平均値±標準偏差)

	トレーニング群		コントロール群	
	Pre測定	Post測定	Pre測定	Post測定
< 所要時間(ms) >				
BRACING局面	353.8±78.9	346.3±51.1	373.5±65.1	348.5±50.2
PROPULSION局面	322.5±59.7	316.7±39.9	331.3±45.2	313.5±40.4
接地時間	776.3±136.9	763.0±86.0	804.7±109.4	761.9±87.6
< 接地時関節角度(deg) >				
股関節	140.9±5.1	132.6±8.7 *	138.1±7.8	135.9±8.6
膝関節	142.5±4.2	138.3±4.1 *	144.4±5.5	141.7±6.2
足関節†	105.1±4.2	108.5±4.0 *	108.4±6.0	108.6±7.4
< 最小関節角度(deg) >				
股関節†	68.2±16.5	60.2±12.7 *	61.6±13.6	62.9±13.6
膝関節	78.3±9.8	69.0±10.1 *	75.3±9.6	73.4±10.2
足関節	64.2±5.3	66.0±3.6	63.7±4.6	63.4±3.7

* : Pre vs. Post, $P<0.05$ † : 交互作用あり(被験者群 × トレーニング前後), $P<0.05$

(v) 関節トルクおよび関節パワーにおける変化

Pre測定およびPost測定におけるL-Jの関節トルク、パワーおよび仕事量に関するデータを表2～4に示す。

Pre測定におけるPROPULSION局面の股関節伸展トルク平均値は、コントロール群がトレーニング群より有意に高い値であった(表2)。二元配置分散分析の結果、PROPULSION局面の股関節および膝関節におけるトルクに、有意な交互作用が認められた(股関節： $F=10.339$, 膝関節： $F=6.393$ $P<0.05$)。PROPULSION局面における股関節伸展トルクは、トレーニング群ではPost測定において有意にPre測定より大きく($P<0.05$)、コントロール群には有意な差は認められなかった。

Pre測定におけるPROPULSION局面の股関節パワー

表2 着地からのジャンプにおける各局面関節トルク平均値(平均値±標準偏差)

< トルク平均値(Nm/体重) >	トレーニング群		コントロール群	
	Pre測定	Post測定	Pre測定	Post測定
ABSORPTION局面				
股関節	-0.15±0.07	-0.09±0.06 *	-0.07±0.19	-0.12±0.06
膝関節	0.29±0.05	0.27±0.06	0.22±0.09	0.26±0.05
足関節	0.13±0.02	0.13±0.02	0.14±0.06	0.14±0.03
BRAKING局面				
股関節	0.21±0.07	0.27±0.09 *	0.27±0.11	0.28±0.08
膝関節	0.26±0.07	0.27±0.06	0.22±0.05	0.24±0.05 *
足関節	0.19±0.03	0.21±0.04 *	0.21±0.09	0.22±0.06
PROPULSION局面				
股関節†	0.20±0.05 #	0.27±0.04 *	0.27±0.04	0.27±0.04
膝関節†	0.21±0.06	0.20±0.05	0.17±0.04	0.19±0.03
足関節	0.23±0.03	0.24±0.02	0.25±0.06	0.26±0.04

* : Pre vs. Post, $P<0.05$; # : トレーニング群 vs. コントロール群† : 交互作用あり(被験者群 × トレーニング前後), $P<0.05$

表3 着地からのジャンプにおける各局面関節パワー平均値(平均値±標準偏差)

< パワー平均値(W/体重) >	トレーニング群		コントロール群	
	Pre測定	Post測定	Pre測定	Post測定
ABSORPTION局面				
股関節†	0.66±0.34	-0.39±0.32 *	0.28±0.80	0.52±0.37
膝関節	-1.44±0.34	-1.34±0.29	-1.07±0.48	-1.31±0.32
足関節	-0.46±0.09	-0.44±0.08	-0.50±0.23	-0.45±0.11
BRAKING局面				
股関節	-0.47±0.22	-0.67±0.22 *	-0.68±0.34	-0.70±0.32
膝関節	-0.70±0.20	-0.76±0.20	-0.59±0.18	-0.69±0.15 *
足関節	-0.28±0.07	-0.32±0.06 *	-0.35±0.19	-0.36±0.12
PROPULSION局面				
股関節†	0.61±0.21 #	0.90±0.19 *	0.92±0.19	0.92±0.25
膝関節†	0.72±0.23	0.69±0.19	0.57±0.16	0.66±0.11
足関節	0.54±0.09	0.52±0.06	0.62±0.20	0.66±0.18 #

* : Pre vs. Post, $P<0.05$; # : トレーニング群 vs. コントロール群† : 交互作用あり(被験者群 × トレーニング前後), $P<0.05$

表4 着地からのジャンプにおける各局面関節仕事量(平均値±標準偏差)

< 仕事(J/体重) >	トレーニング群		コントロール群	
	Pre測定	Post測定	Pre測定	Post測定
ABSORPTION局面				
股関節	0.36±0.19	0.21±0.17	0.15±0.42	0.27±0.19
膝関節	-0.76±0.19	-0.70±0.15	-0.56±0.25	-0.69±0.17
足関節	-0.24±0.04	-0.23±0.04	-0.26±0.12	-0.24 ±0.06
BRAKING局面				
股関節	-0.58±0.21 #	-0.80±0.27 *	-0.85±0.27	-0.84±0.33
膝関節	-0.82±0.22	-0.92±0.30	-0.78±0.22	-0.83±0.11
足関節	-0.34±0.06	-0.38±0.06	-0.43±0.15	-0.42±0.09
PROPULSION局面				
股関節†	0.99±0.48 #	1.46±0.36 *	1.52±0.21	1.45±0.30
膝関節	1.12±0.30	1.11±0.29	0.95±0.26	1.08±0.20
足関節	0.88±0.10	0.84±0.11	1.00±0.20	1.03±0.17 #

* : Pre vs. Post, $P<0.05$; # : トレーニング群 vs. コントロール群† : 交互作用あり(被験者群 × トレーニング前後), $P<0.05$

平均値は、コントロール群がトレーニング群より有意に高い値であった(表3)。その他のPre測定の値に、有意な群間差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、ABSORPTION局面の股関節パワー($F=4.757$, $P<0.05$)ならびにPROPULSION局面の股関節および膝関節におけるパワーに、有意な交互作用が認められた(股関節： $F=12.830$, 膝関節： $F=4.766$ $P<0.05$)。ABSORPTION局面における股関節パワーは、トレーニ

ング群ではPost測定において有意にPre測定より小さく ($P < 0.05$)、コントロール群には有意な差は認められなかった。PROPULSION局面における股関節パワーは、トレーニング群ではPost測定において有意にPre測定より大きく ($P < 0.05$)、コントロール群には有意な差は認められなかった。

Pre測定におけるBRAKINGおよびPROPULSION局面の股関節仕事量は、コントロール群がトレーニング群より有意に高い値であった(表4)。その他のPre測定の値に、有意な群間差は認められなかった。二元配置分散分析の結果、PROPULSION局面の股関節における仕事量(正のパワー積分値)に、有意な交互作用が認められた($F = 14.191$, $P < 0.05$)。PROPULSION局面における股関節角仕事量は、トレーニング群ではPost測定において有意にPre測定より大きく ($P < 0.05$)、コントロール群には有意な差は認められなかった。

IV 考察

本研究のPre測定におけるL-Jの接地時間はトレーニング群 776.3 ± 109.4 ms、コントロール群 804.7 ± 136.9 msであり、両群ともにトレーニング前後で有意な変化は認められなかった(表1)。Bounce drop jump (BDJ) と counter-movement drop jump (CDJ) の比較をなした Bobbert et al. (1987a) によると、それぞれの接地時間はBDJが約300ms、CDJが約450msであると報告されている。このような先行知見に比較して、本研究のL-JはCDJよりも接地時間が長い動作であったといえる。また、Pre測定におけるL-Jの衝撃指標は、トレーニング群が 3.04 ± 0.74 、コントロール群が 3.08 ± 0.55 であり、トレーニング群についてはPost測定において 2.41 ± 0.42 と有意に低下した。Bobbert et al. (1987b) は本研究と同程度の落下高(40cm)からのドロップジャンプにおけるFzのピーク値が体重の4.5倍程度であることを報告している。したがって、本研究で採用したL-Jは上記のようなドロップジャンプと比較して衝撃が小さく、下肢における傷害の危険性の低い安全な動作であり、さらに着地トレーニング後にはその安全性が増したものと推測される。

2週間という短期のトレーニングであったが、トレーニング群はLAND着地時の衝撃指標に有意な減少を示した(図4a)。この結果は、着地のみをトレーニング動作とした先行研究(Prapavessis et al., 2003; McNair et al., 2000; Oñate et al., 2005)の結果と一致する。また、トレーニング群のL-Jの衝撃指標には、有意ではないまでも、Post測定において減少する傾向がみられ(図4b)、着地トレーニングによる衝撃緩衝能力の改善が、着地からのジャンプにおける衝撃緩衝能力の向上に対しても影響を与えてい

る可能性が示唆される。

トレーニング群において接地時の足関節角度が有意に増加した(表1)。この結果は、トレーニング群の被験者が、着地トレーニング後に足関節をより底屈位で接地するようになったことを意味する。Kovács et al. (1999) によると、つま先からの着地に比較して踵からの着地では、Fzのピーク値が大きくなると報告されている。すなわち、トレーニング群における接地時の足関節角度の有意な増加は、踵からの接地を避け、着地時の衝撃の緩衝に貢献したと考えられる。また、着地トレーニングによって最小股関節角度が有意に減少した(表1)。この結果は、トレーニング群のL-Jが股関節をより大きく屈曲させる動作に変容したことを示す。先行研究において、股関節屈曲角度の増加は、着地時の床反力のピーク値を減少させると報告されている(Devita & Skelly, 1992; Blackburn & Pauda, 2008, 2009)。したがって、これら足関節および股関節角度における一連の変化は、トレーニング群の被験者が、衝撃緩衝に適した着地姿勢を学習したことの表れであると推察される。

着地トレーニングによって、L-Jの跳躍高は有意に向上した(図5a)。これまで、ドロップジャンプによるトレーニングによって、同動作時の跳躍高が増大することを認める研究は多い(Schmidtbleicher et al., 1988; Wilson et al., 1993, 1996; Holcomb et al., 1996; Gehri et al., 1998; Matavulji et al., 2001; Tricoli et al., 2005; Lehance et al., 2005)。しかし、着地のみによるトレーニングによって、着地からのジャンプの跳躍高が向上することを報告した例はない。本研究の結果は、着地のみによるトレーニングであっても、L-Jのパフォーマンスの向上が期待できることを示唆するものである。

着地トレーニングによってL-Jの跳躍高が増加した場合、その要因として、当初、衝撃緩衝能力の向上が想定された。しかし、L-Jの衝撃指標の変化率と跳躍高の変化率との間には有意な相関関係は認められず、衝撃緩衝能力の向上自体が跳躍高の増加に直接貢献したとはいえない。一方、着地トレーニングによって、下肢の伸展・底屈筋群の筋力が増大し、着地を伴わない跳躍自体のパフォーマンスが向上したことも考えられる。しかしながら、着地を伴わない跳躍であるSJの跳躍高に有意な変化は認められず(図5b)、その可能性も否定される。

Vanrenterghem et al. (2008) によると、スクワットジャンプにおいて、動作開始時の体幹部前傾角度の増加は、股関節伸展パワーの増大につながると報告されている。先に述べたように、トレーニング群では最小股関節角度が有意に減少した(表1)。この結果は、トレーニング群のL-Jが、PROPULSION局面に先行して股関節を大きく屈曲する動作に変化したことを意味する。さらに、ト

レーニング群では、PROPULSION局面における股関節のトルク・パワーの平均値および仕事量が増加した(表2～4)。これらの結果は、スクワットジャンプを実施する際、体幹の傾き増加は股関節による伸展パワーの増大につながるとする Vanrenterghem et al. (2008) の報告と一致する。また、Vanrenterghem et al. (2008) は、股関節、膝関節および足関節の正のパワーピーク値のなかで、股関節のみがスクワットジャンプの跳躍高と有意な正の相関関係を持つことを報告し、跳躍パフォーマンスにおける股関節伸展によるパワー発揮の重要性を示唆している。これらの先行知見と本研究の結果を考え合わせると、着地トレーニングによって、重心最下点時の股関節屈曲角度が増加し、PROPULSION局面における股関節伸展のパワー発揮が増大することで、L-Jの跳躍高が改善した可能性が示唆される。

一方、本研究においては筋活動および筋力に関する測定を実施しなかった。プライオメトリックトレーニングがドロップジャンプ中の筋活動に与える影響について着目した研究によると、接地時の腓腹筋の活動量の増加 (Schmidtbleicher et al., 1988) および接地前の股関節内転筋の活動水準向上 (Chimera et al., 2004) が報告されている。本研究のトレーニング群においても、それらの先行研究において報告されているものと同様な変化が、股関節周りの筋群あるいは下肢筋群に生じ、それが跳躍高の改善に貢献した可能性もある。また、本研究では、下肢筋力に大きな変化が起きないと推察される2週間(6セット)という期間を設定した。しかし、跳躍動作に関与する筋群は、着地トレーニング中、伸張性収縮を繰り返すことになる。それゆえ、着地トレーニングが跳躍動作の主働筋群に伸張性筋力の増大をもたらすことで、着地時の股関節および膝関節の屈曲角度を大きなものとし、その結果、跳躍パフォーマンスが改善された可能性も考えられる。着地トレーニングに伴う跳躍高増大の要因に関しては、今後、キネティクスおよびキネマティクス以外に、跳躍動作の主働筋群の筋力の測定も加え、改めて検討する必要がある。

V 結論

本研究では、着地のみのトレーニングによる着地時の衝撃を緩衝する能力の向上は、着地から跳躍に移行した際のパフォーマンスの改善につながるという推測に基づき、トレーニングの実施に伴う衝撃緩衝能力、跳躍高、ならびに着地から離地までの局面におけるキネティクスおよびキネマティクスの変化について検討した。その主な結果は、以下の通りであった。

1. 着地トレーニングによって、LANDおよびL-Jにおける衝撃指標は減少した。その要因として接地時の足関節角度の増加および最小股関節角度の減少が考えられた。
2. 着地トレーニング後、L-Jの跳躍高は増加し、SJの跳躍高に有意な変化は認められなかった。
3. L-Jの跳躍高の変化率と衝撃指標のそれとの間に有意な相関関係は認められなかった。
4. 着地トレーニングによって、L-Jにおける股関節最小角度は減少し、PROPULSION局面における股関節のトルク・パワーおよび仕事量が増大した。

以上のように、着地のみのトレーニングによって着地からのジャンプの跳躍高は改善した。しかし、その要因として、着地時の衝撃緩衝能力の向上が関連する、という当初の仮説は棄却され、PROPULSION局面における股関節の力発揮の増大が示唆された。

引用文献

- 阿江 通良・藤井 範久 (2002) スポーツバイオメカニクス 20講。朝倉書店, 115-117.
- 飯田 祥明・稲葉 優希・深代 千之・金久 博昭 (2009) 着地動作および着地からのジャンプにおける下肢・体幹の筋活動のコーディネーション。東京体育学研究, 1: 5-12.
- 伊藤 道郎 (1995) ドロップジャンプにおける着地技術の影響。天理大学学報, 179: 93-105.
- 図子 浩二・高松 薫・古藤 高良 (1993) 各種スポーツ選手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.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., and van Ingen Schenau, G. J. (1987a): Drop jumping. I. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. Med. Sci. Sports Exerc., (19): 332-338.
- Bobbert, M. F., Huijing, P. A., and van Ingen Schenau, G. J. (1987b): Drop jumping. I. The influence of dropping height on the biomechanics of jumping. Med. Sci. Sports Exerc., (19): 339-346.
- Baca, A. (1999): A comparison of methods for analyzing drop jump performance. Med. Sci. Sports Exerc., 31 (3): 437-442.
- Blackburn, J. T. and Padua, D. A. (2008): Influence of trunk flexion on hip and knee joint kinematics during a controlled drop landing. Clin. Biomech., (Bristol, Avon) 23: 313-319.
- Blackburn, J. T. and Padua, D. A. (2009): Sagittal-plane trunk position, landing forces, and quadriceps electromyographic activity. J. Athl. Train., 44: 174-179.
- Chimera, N. J., Swanik, K. A., Swanik, C. B., and Straub, S. J. (2004): Effects of Plyometric Training on Muscle-Activation

- Strategies and Performance in Female Athletes. *J. Athl. Train.*, Mar; 39 (1): 24-31.
- Decker, M. J., Torry, M. R., Wyland, D. J., Sterett, W. I., and Richard Steadman, J. (2003): Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*, 18 (7): 662-669.
- Devita, P. and Skelly, W. A. (1992): Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24: 108-115
- Gehri, D. J., Ricard, M. D., Kleinerl, D.M., and Kirkendall, D. T. (1998): A Comparison of Plyometric Training Techniques for Improving Vertical Jump Ability and Energy Production. *J. Strength Cond. Res.*, 12 (2): 85-89.
- Hara, M., Shibayama, A., Arakawa, H., and Fukushima, S. (2008): Effect of arm swing direction on forward and backward jump performance. *J. Biomech.*, 41 (13): 2806-2815.
- Hoffrén, M., Ishikawa, M., and Komi, P. V. (2007): Age-related neuromuscular function during drop jumps. *J. Appl. Physiol.*, 103 (4): 1276-1283.
- Holcomb, W. R., Lander, J. E., Rutland, R. M., and Wilson, G. D. (1996): The Effectiveness of a Modified Plyometric Program on Power and the Vertical Jump. *J. Strength Cond. Res.*, 10 (2): 89-92
- Horita, T., Komi, P. V., Nicol, C., and Kyröläinen, H. (2002): Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: implications to performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 88 (1): 76-84.
- Kovács, I., Tihanyi, J., Devita, P., Rácz, L., Barrier, J., and Hortobágyi, T. (1999): Foot placement modifies kinematics and kinetics during drop jumping. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31 (5): 708-716.
- Kulas, A. S., Schmitz, R. J., Schultz, S. J., Watson, M. A., and Perrin, D. H. (2006): Energy absorption as a predictor of leg impedance in highly trained females. *J. Appl. Biomech.*, 22 (3): 177-185.
- Lehance, C., Croisier, J.-L., and Bury, T. (2005): Optojump system efficiency in the assessment of lower limbs explosive strength. *Sci. Sports*, (20): 131-135.
- Matavulji, D., Kukolj, M., Ugarkovic, D., Tihanyi, J., and Jaric, S. (2001): Effects of plyometric training on jumping performance in junior basketball players. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, (41): 159-164.
- McNair, P. J., Prapavessis, H., and Callender, K. (2000): Decreasing landing forces: effect of instruction. *Br. J. Sports Med.*, 34 (4): 293-296.
- Oñate, J. A., Guskiewicz, K. M., Marshall, S. W., Giuliani, C., Yu, B., and Garrett, W. E. (2005): Instruction of jump-landing technique using videotape feedback: altering lower extremity motion patterns. *Am. J. Sports Med.*, 33 (6): 831-842.
- Prapavessis, H., McNair, P. J., Anderson, K., and Hohepa, M. (2003): Decreasing landing forces in children: the effect of instructions. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 33 (4): 204-207.
- Schmidtbleicher, D., Gollhofer, A., and Frick, U. (1988): Effects of a stretch-shortening typed training on the performance capability and innervation characteristics of leg extensor muscles. In: *Biomechanics XI-A*. Free University Press, 185-189.
- Tricoli, V., Lamas, L., Carnevale, R., and Ugrinowitsch, C. (2005): Short-term effects on lower-body functional power development: weightlifting vs. vertical jump training programs. *J. Strength Cond. Res.*, 19 (2): 433-437.
- Vanrenterghem, J., Lees, A., and Clercq, D. D. (2008): Effect of forward trunk inclination on joint power output in vertical jumping. *J. Strength Cond. Res.*, 22 (3): 708-714.
- Wilson, G. J., Murphy, A. J., and Giorgi, A. (1996): Weight and plyometric training: effects on eccentric and concentric force production. *Can. J. Appl. Physiol.*, 21 (4): 301-315.
- Wilson G. J., Newton, R. U., Murphy, A. J., and Humphries, B. J. (1993): The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 25 (11): 1279-1286.
- Winter, D. A. (2004): *Biomechanics and motor control of human movement*, third ed. Wiley, New York.: 180-202.
- Zhang, S. N., Bates, B. T., and Dufek, J. S. (2000): Contributions of lower extremity joints to energy dissipation during landings. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32 (4): 812-819.

連絡責任者

住所：〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1

東京大学大学院総合文化研究科

広域科学専攻生命環境科学系

身体運動科学グループ

氏名：飯田祥明

E-mail : youshi73@yahoo.co.jp