ダブルレッグホップのトレーニングにともなう 下肢関節のモーメントとパワーの変化

池田 祐介 淵本 隆文

Changes in joint moment and joint power of the lower limbs due to double-leg hop training

Yusuke Ikeda and Takafumi Fuchimoto

Abstract

This study examined the changes in joint moment and joint power of the lower limbs during double-leg hop (DLH) training. Six untrained male subjects were given DLH training 3 days per week for 8 weeks. The height of the hurdle was fixed at 90% of the maximum. The subjects were measured for three types of vertical jump, rebound jump and isokinetic strength before and after training. Ground reaction force and 24 body positions were recorded simultaneously and analysis of these data led to classification into two phases (a negative phase and a positive phase). The contact time in DLH was reduced after training ($p < 0.01$). The height of the body's center of gravity did not change during take-on and take-off, but changed significantly during the minimal phase ($p < 0.01$). Body stiffness was significantly increased in both the negative phase ($p < 0.01$) and positive phase ($p < 0.01$). The peak joint moment and joint power at the ankle increased significantly, but those of the hip and knee did not change during the contact phase. The peak joint power at the hip appeared in the early contact phase after training, and the stiffness of the ankle increased significantly ($p < 0.05$). However, these changes in joint moment and joint power were not transferred to vertical jump performance, rebound jump height or isokinetic strength. Only the contact time of the rebound jump was shortened. In conclusion, it was clarified that DLH training induced an increase in the peak joint moment and stiffness of the ankle joint. Moreover the peak muscle power of the hip appeared in the early contact phase.

Key words : stiffness, stretch-shortening cycle, jumping

(Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 50: 1-11, January, 2005)

キーワード：プライオメトリックス、スティフネス、伸張—短縮サイクル、ジャンプ

I 緒 言

スポーツ活動においては、伸張性収縮が短縮性収縮に先行する筋活動、いわゆる筋の伸張—短縮サイクル (stretch-shortening cycle : SSC) (Komi, 1984) を伴う筋活動が多く発現する。このような筋活動で発揮される力や速度を増大するトレーニングの一つにプライオメトリックス (plyometrics) がある。プライオメトリックスの目的は、SSC運動において腱または筋に貯蔵される弾性エネルギー (Cavagna et al., 1968 : Asmussen and Bonde-Petersen, 1974) の量とその利用能力を改善することによって、瞬時に大きな力を発揮する能力を身に付けさせることである。

先行研究において、跳躍選手、短距離選手、フットワークに優れる球技種目の選手はリバウンドドロップジャンプにおける [跳躍高／接地時間] の指数が大きい (図子, 1996) こと、また 60m の全力走における加速局面および速度維持局面のスプリント能力は [接地期も含めた位置エネルギーの増加量／接地時間] (Bosco et al., 1983) と有意な相関関係にあること (岩竹, 2002) が報告されており、これら 2 つの指数は短い接地時間の中で大きな力を発揮する能力を表している。また、高さや短い接地時間を要求したドロップジャンプのトレーニングが [ドロップジャンプの跳躍高／接地時間] の指数を増加させた (Young et al., 1999) という報告は、プライオメトリックスが短い接地時間の中で大きな力を発揮する能力を高めるのに有効であることを示している。Bobbert et al. (1987) は 20cm, 40cm, 60cm におけるドロップジャンプの関節モーメント、関節パワーの値を比較し、60cm からのドロップジャンプでは足関節のモーメント、パワーのピーク値が 20cm, 40cm の時よりも小さくなると報告した。Schmidtbleicher et al. (1988) は、トレーニング前に見られた接地中の筋放電の低下は 4 週間のトレーニングによってみられなくなり、神経—筋へ

の抑制はトレーニングによって改善されると報告した。ハードルを用いたダブルレッグホップ (以下 DLH とする) の研究では、Viitasalo et al. (1993) がバレーボールの選手を用いてトレーニングを行っている時の疲労の影響を調べた研究を行っているが、DLH のトレーニングによって下肢三関節の関節モーメント、関節パワーがどのように変化し、接地時間にどのような影響を与えているのかについて調べた研究は見当たらない。下肢のプライオメトリックスでは、股関節、膝関節、足関節に作用する筋群が主なトレーニング対象となるが、トレーニング効果の詳細を知るには、各関節に作用する関節モーメント、関節パワーがどのように改善されるかを個別に調べる必要がある。

そこで本研究では、パワー、調整力または、技術のトレーニングの一つとして現場で一般的に行われている DLH を用いて、接地時間の短縮を目標とするトレーニングを行わせ、DLH を行っている時の下肢の関節モーメントと関節パワーがどのように改善されるかを明らかにしようとした。また、接地時間の短縮を目標とするトレーニングが筋力やジャンプ能力の改善にどの程度貢献するかも合わせて検討した。

II 研究方法

1. 被験者

被験者は日常的にトレーニングを行っていない男子学生で、トレーニング群 6 名 (年齢は 18.0 ± 0.0 歳, 身長は 171.0 ± 7.5 cm, 体重は 63.1 ± 6.8 kg), コントロール群 7 名 (18.3 ± 0.5 歳, 168.0 ± 4.2 cm, 63.1 ± 3.7 kg) の合計 13 名とした。被験者には本研究の目的と実験内容について十分な説明を行い、実験参加に対する同意を得た。

2. 実験手順とトレーニング内容

トレーニング試技は、90cm の間隔で並べられた 6 台のハードルを、素早い反動を用いて両脚踏切で連続的に跳び越えていくダブルレッグホップ (DLH) とした。ハードルは被験者の安全を考え

て、2本のプラスチック製の支柱にゴムを張ったものとした。実験は①DLHの練習、②第1回測定（以下Preという）、③DLHのトレーニング、④第2回測定（以下Postという）の順で行った。コントロール群は①、②、④のみ行った。②と③は3—4日、③と④は3—5日の間隔をあけた。

DLHの練習ではDLHの動作になれることを目的とし、1日1時間の練習を1日の間隔をおいて3日間行わせた。練習の最終日に6台のハードルを連続で越えることのできるハードルの最大高を測定した。

DLHのトレーニングは週3日の頻度で8週間行わせた。1日のトレーニング内容は、6台のハードルを連続して跳び越え、2分の休息を入れて10セット行うこととした。ハードルの高さは、トレーニング期間中、トレーニング前の練習で測定した最大高の90%（以下90%ハードル高という）に固定し、トレーニング目標は接地時間を短縮させることとした。90%ハードル高は、トレーニング群が72—90cm、コントロール群が68—90cmの範囲であった。

3. 測定の項目と方法

PreとPostで行った測定は、①90%ハードル高を用いて「できるだけ接地時間を短く」という指示で行わせたDLHの接地時間、②腕の振込み動作と反動動作を用いた垂直跳（CMJ1）の跳躍高、③手を腰につけ、反動動作だけを用いた垂直跳（CMJ2）の跳躍高、④手を腰につけ、大腿部を水平にした姿勢から反動なしで行う垂直跳（SJ）の跳躍高、⑤手を腰につけた姿勢で、「なるべく接地時間を短く、かつ高い跳躍ができるように」という指示のもと、膝の屈曲をできるだけ抑えて足関節を中心とした10回連続のその場跳躍（RJ）の接地時間と跳躍高、⑥股関節伸展、膝関節伸展、足関節底屈の等速性筋力である。

DLHの試技については、PreとPostの測定およびトレーニング2週目から8週目までの各週の2日目に、被験者の跳躍フォームを右側方よりデジタルビデオカメラ（SONY DCR-VX1000）を用いて60fpsで撮影するとともに、鉛直（Fy）お

よび水平前後方向（Fx）の地面反力をフォースプレート（縦60cm×幅40cm、キスラー社製）を用いて検出し、A/D変換器（MP100、モンテシステム社製）を介してコンピュータに1000Hzで入力した。ビデオ撮影は4台目と5台目のハードルを跳び越える範囲で行い、フォースプレートは4台目と5台目のハードルの間に埋設した。PreとPostで実施した跳躍項目については、DLHと同様の方法で鉛直方向の地面反力を測定した。RJを除く測定はすべて2回行い、良い方の値をデータとして採用した。RJは10回連続の跳躍の内、最初の2回と最後の2回を除いた6回の試技について平均値を求めた。等速性筋力は右脚と左脚の両方において、KIN-COM III（米国Chattecx社製）を用いて $30\text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$ と $180\text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$ の2種類の角速度で測定した。筋力発揮の関節可動範囲は、解剖学的原位を0degとすると、股関節50deg屈曲位から10deg屈曲位、膝関節50degから10deg、足関節10deg背屈位から15deg底屈位とした。

4. 分析方法

1) DLHの分析

DLHの動作分析は、ビデオ映像をもとに、Frame-DIAS Ver2.85（ディケイエイチ社製）を用いて、身体24ヵ所を每秒60コマでデジタイズし、コントロールポイントを用いて実長換算した2次元座標を求めた。その後身体座標を4次のButterworth digital filterを用いて7Hzで平滑した。遮断周波数はWinter（1990, pp.41-43）の方法を用いて決定した。平滑したデータをもとに、股関節、膝関節、足関節の角度変位、角速度、角加速度、身体全体の重心座標と身体各部分の重心座標を算出した。また、地面反力のデータを基に圧力中心座標を算出した（Kistler Instrumente AG, 1988）。ビデオ映像から求めたデータと地面反力および圧力中心座標を、リンクセグメントモデルに関する剛体運動方程式（Winter, 1990, pp.65-83）に入力して、股、膝、足関節の筋モーメントおよび筋パワーを算出した。これらの計算は右下肢の動作データを用いて行ったが、左右

の下肢が同じ動きをしていると仮定して、算出結果を両下肢の合計値とみなした。これらの算出に必要な身体部分の質量、重心位置、慣性モーメントは阿江ほか（1996）の値を用いた。ビデオ映像と地面反力の同期は、接地前5コマの右つま先の鉛直座標を時間軸に対してプロットし、その回帰直線が高さゼロ（フロア一面の高さ）と交わる時点をフォースプレートの鉛直反力の立ち上がり時

と合わせることによって行った。接地時間と滞空時間は地面反力から求めた。

身体重心高が最小になる時点がFyのピークが出現する時点と一致（1/60s以内の差）していたので、DLH動作について、接地時からFyのピークが出現するまでをNegative局面、Fyのピークが出現してから離地までをPositive局面と定義した。

本研究では全身のバネの硬さを表す指標として McMahon et al. (1990) の方法と同様に、全身の stiffness ($\text{Nkg}^{-1} \text{m}^{-1}$) を、Negative局面はFyのピーク値 (Nkg^{-1}) をNegative局面の重心下降距離 (m) で除し、Positive局面はFyのピーク値をPositive局面の重心上昇距離で除すことによって算出した。また、足関節のバネの硬さを表す足関節の stiffness ($\text{Nmkg}^{-1} \text{deg}^{-1}$) は、足関節モーメントのピーク値 (Nmkg^{-1}) を接地中に足関節が背屈した角変位 (deg) で除すことによって算出した。

2) PreとPostで行った跳躍測定

跳躍項目における接地時間と滞空時間は地面反力から求めた。跳躍高 (H) は滞空時間 (ta) を用いて $[9.8 \times ta^2/8]$ で算出した。RJについては、

Figure 1 The change of the training group's (n=6) contact time in double leg hop from pre-test to post-test. Vertical bar is expressed the standard deviation.

Table 1 The results (mean $\pm$ standard deviation) of pre-test and post-test.

Items	Training group		Control group	
	Pre	Post	Pre	Post
DLH contact time (ms)	249 $\pm$ 41	166 $\pm$ 14***	203 $\pm$ 28	210 $\pm$ 20
CMJ 1 height (m)	0.45 $\pm$ 0.03	0.48 $\pm$ 0.04	0.46 $\pm$ 0.07	0.46 $\pm$ 0.06
CMJ 2 height (m)	0.39 $\pm$ 0.02	0.41 $\pm$ 0.03	0.40 $\pm$ 0.06	0.41 $\pm$ 0.06
SJ height (m)	0.35 $\pm$ 0.06	0.36 $\pm$ 0.05	0.38 $\pm$ 0.04	0.37 $\pm$ 0.06
RJ contact time (ms)	190 $\pm$ 30	170 $\pm$ 30*	172 $\pm$ 10	170 $\pm$ 11
RJ height (m)	0.24 $\pm$ 0.08	0.22 $\pm$ 0.04	0.23 $\pm$ 0.06	0.23 $\pm$ 0.06
RJ index	0.43 $\pm$ 0.30	0.37 $\pm$ 0.17	0.38 $\pm$ 0.20	0.41 $\pm$ 0.20
Isokinetic Strength of joint extension (Nm).				
Hip	30deg/s	118 $\pm$ 23	116 $\pm$ 16	111 $\pm$ 56
	180deg/s	100 $\pm$ 13	92 $\pm$ 26	92 $\pm$ 15
Knee	30deg/s	123 $\pm$ 32	125 $\pm$ 29	120 $\pm$ 29
	180deg/s	89 $\pm$ 15	92 $\pm$ 19	85 $\pm$ 25
Ankle	30deg/s	142 $\pm$ 21	129 $\pm$ 21	126 $\pm$ 24
	180deg/s	78 $\pm$ 13	75 $\pm$ 8	71 $\pm$ 13

Significant level of difference between Pre and Post *p < 0.05, ***p < 0.001

踏切中の平均パワーを表す指数としてRJindex (Rebound Jump Index; m/s) (図子ほか, 1993) を「跳躍高/接地時間」で算出した。

5 統計処理

PreとPostのデータ比較には対応のあるt検定を用いた。トレーニング経過に伴うデータの変化については、反復測定による一元配置の分散分析を用い、その後の多重比較はDunnettの方法で行った。統計処理はすべてSPSS Ver10を用いて行った。すべての有意性は危険率5%未満で判別した。

III 結 果

1. DLHの接地時間

DLHの接地時間はトレーニング群において、トレーニング経過に伴って減少し (Figure 1), 平均値でみるとPreの249msからPostの166msへ短縮した (Table 1)。このトレーニング経過に伴う減少は分散分析の結果有意 ($F=13.3$, $p<0.001$) であった。多重比較の結果, 2週目—Postの接地時間はすべてPreより有意 ($p<0.01$ — 0.001) に小さく, 6週目—Postの接地時間は2週目より有意 ($p<0.05$ — 0.001) に小さかった。局面別にみるとNegative局面の接地時間がPreの106msからPostの71msへ有意 ($p<0.05$) に短縮し, Positive局面においても143msから95msへ有意 ($p<0.01$) に短縮した。コントロール群の接地時間はPreとPostで有意差は見られなかった (Table 1)。

2. 垂直跳, RJ, 等速性筋力

トレーニング群におけるCMJ1, CMJ2, SJ, RJの跳躍高, RJindexは, トレーニング前後で有意な変化を示さなかったが, RJの接地時間はPreの190msからPostの170msに有意に短縮した (Table 1)。コントロール群の跳躍項目においては有意な変化を示さなかった。等速性筋力においては, トレーニング群とコントロール群の両群において, すべての測定項目で有意な変化がみら

れなかった。

3. DLHにおける動作と力学量の変化

DLHの動作学的, 力学的分析はトレーニング群についてのみ行った。

1) 動 作

DLHの重心高は, 接地時, 離地時においてPreとPost間に有意差は認められなかった (Table 2)。またハードルを越える際の最大重心高と離地後の重心上昇距離はいずれもPreとPost間で有意差が見られなかったが, Postで平均7cmの減少が見られた。しかし, 接地中の重心

Table 2 The change of the movements and the stiffness in double leg hop from pre-test to post-test in training group. Data are expressed as mean $\pm$ standard deviation

	Pre	Post
Height of CG (m)		
take on	1.04 $\pm$ 0.06	1.04 $\pm$ 0.05
minimum	0.84 $\pm$ 0.07	0.94 $\pm$ 0.05**
take off	1.12 $\pm$ 0.07	1.12 $\pm$ 0.05
maximum	1.50 $\pm$ 0.10	1.43 $\pm$ 0.04
Vertical displacement of CG (m)		
Negative phase	0.20 $\pm$ 0.03	0.10 $\pm$ 0.02**
Positive phase	0.28 $\pm$ 0.04	0.18 $\pm$ 0.01***
rise in air	0.38 $\pm$ 0.12	0.31 $\pm$ 0.06
Hip angle (deg)		
take on	144 $\pm$ 6	143 $\pm$ 6
minimum of CG	143 $\pm$ 8	155 $\pm$ 2*
take off	178 $\pm$ 7	172 $\pm$ 4
Knee angle (deg)		
take on	143 $\pm$ 7	137 $\pm$ 7
minimum of CG	118 $\pm$ 6	133 $\pm$ 5**
take off	160 $\pm$ 8	153 $\pm$ 6
Ankle angle (deg)		
take on	106 $\pm$ 7	100 $\pm$ 7
minimum of CG	55 $\pm$ 8	66 $\pm$ 5*
take off	109 $\pm$ 9	109 $\pm$ 8
Whole body stiffness (Nkg ⁻¹ m ⁻¹)		
negative phase	272 $\pm$ 98	693 $\pm$ 162**
positive phase	196 $\pm$ 63	393 $\pm$ 65**
Ankle stiffness (Nmkg ⁻¹ deg ⁻¹)	0.118 $\pm$ 0.035	0.235 $\pm$ 0.078*

Significant level of difference between Pre and Post :

* $p<0.05$ ** $p<0.01$ *** $p<0.001$.

CG, body center of gravity.

Figure 2 The change of the training group's (n=6) joint moment at hip, knee and ankle in double leg hop during contact phase from pre-test to post-test. Ext means joint extension. Vertical bar is expressed as standard deviation.

Figure 3 The change of the peak joint moment at ankle in double leg hop from pre-test to post-test. Vertical bar is expressed as standard deviation.

の最下点はPostがPreより0.10m有意に高くなった。Negative局面の重心下降距離およびPositive局面の重心上昇距離はともにPostがPreより0.10m有意に短くなった。下肢3関節の角度は接地時と離地時においてトレーニング前後で変化が見られなかったが、重心最下点時においてPost

がPreより股関節で12deg、膝関節角で15deg、足関節で11degの有意な角度増（より伸展位）が見られた。

2) Fyのピーク値と全身のstiffness

トレーニング群における身体質量当たりのFyのピーク値は、Preの $52.6 \pm 12.4 \text{ Nkg}^{-1}$ からPostの $68.7 \pm 6.0 \text{ Nkg}^{-1}$ へと有意 ($p < 0.05$) に増加した。全身のstiffnessはNegative局面においてPreの $272 \pm 98 \text{ Nkg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ からPostの $693 \pm 162 \text{ Nkg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ へと有意 ($p < 0.01$) に増加し、Positive局面においてPreの $196 \pm 63 \text{ Nkg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ からPostの $393 \pm 65 \text{ Nkg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ へと有意 ($p < 0.01$) に増加した (Table 2)。

3) 下肢における関節モーメント、関節パワー

Figure 2は接地期における関節モーメントのトレーニングに伴う変化を示したもので、時間軸を接地時間で標準化したデータの6名の加算平均である。股関節と足関節における関節モーメントはいずれもPostにおいてPreより伸展方向への立ち上がりが早くなった。膝関節における伸展モーメントは2週目で増加したがその後増加はみられず、接地時間の最も短かった8週目には最小値を示した。Figure 3にトレーニングに伴う足関節モーメントのピーク値の変化を示した。足関節の伸展モーメントのピーク値におけるトレーニング経過に伴う増加は、分散分析の結果有意 ($F=3.59$, $p < 0.01$) であり、Preの $5.2 \pm 0.98 \text{ Nmkg}^{-1}$ からPostの $7.4 \pm 1.72 \text{ Nmkg}^{-1}$ へと有意 ($p < 0.05$) に増加した。股関節における伸展モーメントのピーク値はトレーニング前後で有意な変化を示さなかった。足関節のstiffnessはNegative局面においてPreの $0.118 \pm 0.035 \text{ Nmkg}^{-1} \text{ deg}^{-1}$ からPostの $0.235 \pm 0.078 \text{ Nmkg}^{-1} \text{ deg}^{-1}$ へと有意 ($p < 0.05$) に増加した。

Figure 4は関節パワーの変化を示したものである。関節パワーは足関節で最も大きな値を示した。足関節パワーは接地前半に負、後半に正を示し、膝関節パワーは4週目まで同様のパターンを示したが、8週目とPostでは負のパワーが明らかに減少した。股関節パワーにおいては4週目以降負のピーク値が増加し、接地の前半に正のピーク値が

Figure 4 The change of the training group's (n=6) joint power at hip, knee and ankle in double leg hop during contact phase from pre-test to post-test. Vertical bar is expressed as standard deviation.

Figure 5 The change of the peak joint power at ankle in double leg hop from Pre-test to Post-test. Vertical bar is expressed as standard deviation.

出現するようになった。足関節における負パワーのピーク値はトレーニング経過に伴って有意に変化し ($F=2.63$, $p<0.05$) (Figure 5), Preの -35.3Wkg^{-1} から Postの -64.6Wkg^{-1} へ有意 ($p<0.05$) な増加が認められた。正パワーのピーク値もトレーニング経過に伴って有意に変化し ($F=3.51$, $p<0.01$) (Figure 5), Preの $30.9 \pm$

11.5Wkg^{-1} から8週目の $54.1 \pm 17.8\text{Wkg}^{-1}$ へ有意 ($p<0.05$) な増加が認められた。膝関節の負のピーク値はPreの $-22.9 \pm 8.0\text{Wkg}^{-1}$ から Postの $-7.0 \pm 5.3\text{Wkg}^{-1}$ へ有意 ($p<0.05$) な減少が認められたが、正のパワーのピーク値はトレーニング前後で有意差は認められなかった。股関節においては正、負のピーク値ともにトレーニング前後で有意差は認められなかった。

IV 考 察

本研究では、ハードルの高さを一定にし、接地時間の短縮を目標としたDLHを週3日の頻度で8週間行うことによって、トレーニング群の接地時間が平均33%短縮した。Negative局面、Positive局面ともに接地時間が短縮し、 F_y のピーク値は増大した。跳躍高はPostにおいて7cm減少したが有意ではなかった。身体全体のstiffnessはNegative局面とPositive局面の両方で増加しており、stiffnessの増大が接地中の重心下降距離および上昇距離を減少させ、全体の接地時間を短縮させたと考えられる。すなわち、トレーニングによって短時間で衝撃を受け止め、短い時間でより大きな筋力を発揮できるようになった。これらの結果は下肢の運動においてより“硬いばね”のように振舞うことでより大きな力を発揮することができるという報告(田内ほか, 2002; 堀田ほか, 1997)と一致している。また本研究で得られたPostのNegative局面におけるstiffnessの値 ($693\text{Nkg}^{-1}\text{m}^{-1}$) は、田内ほか (2002) の30cmのリバウンドジャンプで得られたstiffnessの値 ($609.47\text{Nkg}^{-1}\text{m}^{-1}$) [伸張局面におけるMean forceを身体重心の鉛直方向の変位で除した値]と比較するとかなり小さい値であるが、これはDLHとリバウンドジャンプの跳び方の違いや本研究よりもNegative局面の接地時間が60 msと短いこと、そして田内らの研究では被験者として大学の陸上競技選手を用いたことが原因であると考えられる。

PreにおけるDLHの重心の落下距離(ハードル上の重心高から接地時の重心高を引いた値)が

約45cmであったことから、本研究の結果と Bobbert et al. (1987) の40cmのドロップジャンプにおける結果を比較するとPreの足関節モーメントの値 (5.23 Nmkg^{-1}) は40cmのドロップジャンプの値 (5.27 Nmkg^{-1}) とほぼ等しかった。また Negative局面におけるパワーの値 (35.25 Wkg^{-1}) は40cmのドロップジャンプの値 (44.1 Wkg^{-1}) よりもやや小さく、Positive局面における値 (30.94 Wkg^{-1}) は40cmのドロップジャンプの値 (29.0 Wkg^{-1}) とほぼ等しかった。足関節のモーメントはPostで立ち上がりが早くなり、そのピーク値は有意に増加した。足関節まわりの関節モーメントのピーク値は接地時間と有意な負の相関を示した ($r=0.793$, $p<0.05$)。また、Negative局面とPositive局面における足関節の最大角速度を調べたところ、トレーニング前後で有意差は見られなかった。足関節パワーのピーク値は、負局面、正局面ともにトレーニング後有意に増加し、足関節のstiffnessはNegative局面、Positive局面においてPostで有意に増加した。これらの結果は、疾走速度の高い選手は足関節を固定させキック力を短い時間内に地面に伝えられるようにしていたという報告 (伊藤ほか, 1998) と似ている。すなわち、短い時間に大きなパワーを発揮するためには足関節の硬度を高めることによって関節モーメントを増加させることが重要であり、足関節のそのような変化が本研究において接地時間を短縮させるのに有効に働いたと考えられる。これらのことを考慮すると足関節モーメントが接地時間短縮の要因の1つであると考えられる。

膝関節においては、2週目で伸展モーメントが増加したが、トレーニングによって減少する傾向がみられた。トレーニングによる足関節の伸展モーメントの増加は膝関節を伸展させる方向に働くために膝関節を跳躍のための適切な角度に保つために膝の伸展モーメントが減少したと考えられる。膝関節におけるパワーは4週目までは足関節と同様に接地前半に負、後半に正を示していたがトレーニングによって負のピーク値は有意 ($p<0.05$) な減少が認められ、2週目からPostで接地時間と有意な正の相関を示した ($r=0.903$, $p<$

0.01) これらの事実は走運動の接地期において、膝関節の伸展モーメントと負のパワーが足関節と股関節に比べてかなり小さいという報告 (伊藤ほか, 1997) と一致する。以上のことからDLHにおいて膝関節まわりの筋は、積極的にトルクやパワーを発揮する一方で、跳躍動作が正常に実施できるように股関節と足関節の間で調整を行っているのではないかと考えられる。

股関節の伸展モーメントのピーク値は有意な変化を示さなかったが、トレーニング前半で接地前半に出現していた正のパワーのピークが、トレーニング後半では接地直後に現れるようになった。これは接地直後の大きな衝撃力を受け止めることができるように全身のstiffnessを高めるのに貢献したと考えられる。

本研究ではDLHトレーニングによって垂直跳びの跳躍高は増加しなかった。先行研究においては、プライオメトリックスが垂直跳びの跳躍高を増加させるという報告 (Blattner, 1979) と、増加させないという報告 (Young et al., 1999) がある。前者のトレーニングは86cmの高さからのデプスジャンプであり、後者のトレーニングは跳躍高が最も大きくなる高さからのデプスジャンプとDJindexが最も大きくなる高さからのデプスジャンプであった。本研究においては落下距離が31—38cmの連続ジャンプであり、トレーニング条件が異なるので直接比較することはできない。Fukashiro and Komi (1987) は、カウンタームーブメントジャンプ (CMJ) とスクワットジャンプ (SJ) においては股関節、膝関節、足関節の順に関節モーメントと仕事量が大きく、ホッピング (最大下の努力で膝を曲げて行う連続跳躍) においては足関節、膝関節の順に関節モーメントと仕事量が大きく、股関節のモーメントと仕事量はほとんどゼロであったと報告している。本研究で行ったDLHにおける下肢関節のモーメントは足関節が最も大きく、膝関節がやや小さく、股関節が最も小さかった。関節パワーは、足関節、膝関節、股関節の順に大きかった。これらのことから考えると、DLHの筋活動は足関節のモーメントと仕事量が最も大きい点はホッピングに類似し

ているといえるが、股関節と膝関節の機能はCMJ, SJ, ホッピングのいずれとも異なると考えられる。膝関節の機能は、上述のように、むしろ走運動の接地期に類似していた。したがって、本研究で垂直跳びの跳躍高に増加が見られなかった原因の一つは、DLHにおける下肢関節の関節モーメント、関節パワーの発揮パターンがCMJおよびSJと異なっていたことが考えられる。また、トレーニングレベルに応じてハードル高を漸増させず、ハードル高を固定して、接地時間だけを短縮するトレーニングを行ったために、垂直跳びのキック時間と上昇速度に対応するような筋力の増加が得られなかったことも関係しているのではないかと考えられる。

下肢3関節における等速性の伸展筋力は本研究のDLHトレーニングによって変化しなかった。Young (1999) はドロップジャンプのトレーニングを行い、19kgのバーを肩に乗せてスクワットジャンプを行わせた時の地面反力のピーク値は変化しなかったと報告している。研究例が少ないのではっきりしたことはいえないが、本研究のDLHトレーニングでは大きなモーメントを発揮している時間が100ms程度と非常に短かったことが、最大筋力を増加させるに至らなかった原因と考えられる。下肢の筋力が変化しなかったという結果は、DLHにおける関節モーメントとstiffnessの改善が筋力を増加させるほどの組織的な変化によって生じたのではなく、主としてSchmidtbleicher et al. (1988) の報告にみられるような神経—筋の抑制の改善などによるものではないかと考えられる。

トレーニング前後の測定においてRJにおける接地時間だけが有意に短縮し、垂直跳びの跳躍高がいずれも変化しなかったことを考慮すると、プライオメトリックスのトレーニング効果は、そのトレーニングの動作様式の影響を強く受けると考えられる。したがって、DLHに限らず、プライオメトリックスを筋強化のトレーニングとして取り入れるには、パフォーマンスの向上を期待している運動の関節モーメント、関節パワーの発揮パターンが類似したプライオメトリックスを用いる

ことが重要であると考えられる。

V ま と め

本研究では、接地時間の短縮を目標とするプライオメトリックスのトレーニングが下肢の筋活動をどのように変化させるかを明らかにするために、日常的にトレーニングを行っていない男子6名を対象に、最大高の90%の高さに固定した6台のハードルを連続して跳び越えるダブルレッグホップ (DLH) のトレーニングを週3日の頻度で8週間行わせた。その結果、DLHの接地時間はトレーニング前 (Pre) の $249 \pm 41\text{ms}$ からトレーニング後 (Post) の $166 \pm 14\text{ms}$ へ有意に短縮した。トレーニング前後での測定において、リバウンドジャンプ (RJ) の接地時間は短縮したが、垂直跳、RJの跳躍高、RJのRDJindex、股関節、膝関節、足関節における等速性の伸展筋力はいずれも変化しなかった。DLHにおけるトレーニングの変化は以下の通りであった。

1. 接地時間はNegative局面とPositive局面のいずれにおいてもPostで有意に短縮した。
2. 鉛直方向の地面反力のピーク値は、Postで有意に増加した。
3. 接地時、離地前の重心高および重心最大高はトレーニングによって変化しなかったが、重心最下点における重心高が有意に高くなった。したがって、Negative局面とPositive局面における重心移動距離はいずれも有意に短くなった。
4. 身体全体のstiffnessは、Negative局面とPositive局面のいずれにおいてもPostで有意に増加した。
5. トレーニングによって股関節の伸展モーメントのピーク値は変化しなかったが、足関節の底屈モーメントのピーク値は有意に増加した。また、股関節、足関節において関節モーメントの立ち上がりが早くなった。
6. 股関節における正のピーク値はトレーニングによって変化しなかった。膝関節における負のピーク値はトレーニングによって有意に減少した。足関節における関節パワーのピーク値は、

Negative局面においてトレーニングによって有意に増加した。

以上の結果から、接地時間の短縮を目標とするDLHのトレーニングは足関節底屈の関節モーメントを増大させ、股関節における関節パワーのピークの出現を早くさせるとともに足関節のstiffnessを増加させることが明らかとなり、それらは主として神経系の改善によるものではないかと考えられた。

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特性. *Jpn. J. Sports Sci.*, 15 : 155-162.
- Asmussen, E. and Bonde-Petersen F. (1974) Storage of Elastic energy in skeletal muscle in man. *Acta Physiol. Scand.*, 91: 385-392.
- Blattner, S.E. and Nobel, L. (1979) Relative Effects of isokinetic and plyometric training on vertical jumping performance. *Res. Quart.*, 50: 583-588.
- Bobbert, M.F., Huijing, P.A., and van Ingen schenau, G.J. (1987) Drop jumping.II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19: 339-346.
- Bosco, C., Luhtanen, P., and Komi, P.V. (1983) A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 50: 273-282.
- Cavagna, G.A., Dusman, B., and Margaria, R. (1968) Positive work done by a previously stretched muscle. *J. Appl. Physiol.*, 24: 21-32.
- Fukashiro, S. and Komi, P.V. (1987) Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int. J. Sports Med.*, 8 (Suppl 1) : 15-21.
- 堀田朋基, Komi, P.V., Nicol, C., and Kyrolainen, H. (1997) ドロップジャンプにおける膝伸展筋群の粘弾性および動作のプリプログラミングとパフォーマンスとの関係. 第13回日本バイオメカニクス学会大会編集委員会編 身体運動のバイオメカニクス. 第13回日本バイオメカニクス学会大会編集委員会: 筑波, pp. 250-254.
- 伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道朗・小林寛道 (1998) 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係. *体育学研究*, 43 : 260-273.
- 伊藤 章・斉藤昌久・淵本隆文 (1997) スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー, および筋放電パターンの変化. *体育学研究*, 42 : 71-83.
- 岩竹 淳・鈴木朋美・中村夏実・小田宏行・永澤健・岩壁達男 (2002) 陸上競技選手のリバウンドジャンプにおける発揮パワーとスプリントパフォーマンスとの関係. *体育学研究*, 47 : 253-261.
- Kistler Instrumente AG (1988) Operating-and service-instructions. Kistler Instrumente AG, 13.
- Komi, P.V. (1984) Physiological and Biomechanical correlates of muscle function: Effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exerc. Sports Sci. Rev.*, 12: 81-117.
- McMahon, T.A. and Cheng, G.C. (1990) The mechanics of running: how does stiffness couple with speed. *J. Biomech.* 23 (suppl.1) : 65-78.
- Schmidtbleicher, D., Gollhofer, D., and Flick, U. (1988) Effect of a stretch-shortening typed training of the performance capability and innervation characteristics of leg extensor muscles. In: Groot, G., Hollander, A.P., Huijing, P.A., and van Ingen Schenau, G.J. (Eds.) *Biomechanics XI-A*. Free University Press: Amsterdam, pp. 185-189.
- 田内健二・尹聖鎮・高松 薫 (2002) 同一個人の上肢と下肢のSSC運動における力発揮特性の相違. *体育学研究*, 47 : 533-546.
- Viitasalo, J., Hämaläinen, K., Mononen, H., Salo, A., and Lahtinen, J. (1993) Biomechanical effects of fatigue during continuous hurdle jumping. *J. Sports Sci.*, 11: 503-509.
- Winter, D.A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement* (2nd Ed.). John Wiley & Sons, Inc.: Toronto.
- Young, W.B., Wilson, G.J., and Byrne, C. (1999) A comparison of drop jump training Method: Effects on leg extensor strength qualities and jumping performance. *Int. J. Sports Med.*, 20: 295-303.
- 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.

関子浩二・高松 薫（1996）“ばね”を高めるための
トレーニング理論. トレーニング科学, 8：7-16.

（平成15年11月4日受付）
（平成16年9月4日受理）