Cognitive Studies, **16**(4), 508-522. (Dec. 2009)

●研究論文●

自己運動と模範運動の運動観察が外力利用運動の技術修得に与える効果

小池 貴行 [1), 2)]・犬飼 祥雅 [1)]・山田 憲政 [1)]

The purpose of this study was to investigate whether the action observation changes the learner's leg stiffness, representing mechanical state of global leg spring, during drop jump (DJ) and whether the process to observe the learner's and model's movement is effective method. We used the drop jump as trial movement, since its performance is influenced by the change in leg stiffness. 21 subjects we employed were divided into 3 groups (GPs) according to the observation type-GP1: observation of both the model's and their own DJ; GP2: observation of only the model's DJ; GP3: no observation with rest. The subjects performed DJ pre and post observation. Leg stiffness was estimated using the leg length (240 fps) and vertical ground reaction force (Fz) (2000 Hz) during stance phase and compared between pre- and post-tests in each group. In GP1, kinetic (the leg stiffness and maximum value of Fz) and kinematic (i.e., contact duration and change in leg compression) parameters in posttest were significantly higher and lesser than that in pretest, respectively. The results indicate that the leg stiffness is increased by the action observation and thus the observation procedure is effective to enhance the DJ skill that utilizes the external force. Further, the results suggest that observing learner's own and model's movements is to enhance the effect of action observation.

Keywords: action observation（観察運動学習）, self- and model's movement（自己運動と他者運動）, improvement of motor skill（運動技能の向上）, drop jumping（ドロップジャンプ）, leg stiffness modulation（脚スティフネス調節）

1. 緒　言

我々人間は，身体外部に存在する道具の使用や壁や地面へ力を加えるなど，外部環境への物理的な働きかけや環境との相互作用により運動を行う．道具を用いる運動の例をあげると，家事全般，筆記などの社会的活動から楽器演奏や絵画，彫刻制作など，音楽，芸術の文化的活動，そして歩行や走行等の基本運動や投球動作などの身体運動があげられる．そのような運動を適切に行うためには，個々が運動状況に応じ，適切な技能を習得することが求められる．人間はどのようにそれら技能習得を行うのか？ 運動学習理論はその習得過程を説明しようとしている．運動学習について Schemit (1991) は,「巧みな課題遂行の能力を比較的永続する変化に導くような実践あるいは経験に関する一連の過程」と説明した．これは実践や練習を通じて獲得される運動行動の変化であり，運動状況に応じた感覚運動系の協応が向上し，運動技能が獲得される過程（中村ら, 2003）でもある．つまり運動中に身体内の感覚受容器や固有受容器が感知した情報が，中枢神経系へフィードバックされ，それを基に新たな運動プログラムの構築や既存のプログラムを修正することで必要な技能を獲得できるのである．

一方で近年，個々の運動に必要な技能の取得について，学習者の模範動作映像の観察が技能改善に

Effect of Observation of Learner's and Model's Movements on Acquisition of the Learner's Motor Skill to Utilize External Force, by Takayuki Koike[1) 2)], Yoshimasa Inukai[1)], and Norimasa Yamada[1)] ([1)] Laboratory of Human Movement Science, Graduate School of Education, Hokkaido University, [2)] Satellite Venture Business Laboratory, Muroran Institute Technology).

与える影響について検討した研究が多数ある．これは運動学習における他者が行う運動の観察が学習者の運動技能改善に与える効果への期待の現れであろう．その期待の理由は，サルの F5 やヒトのブローカー野（44, 45 野）付近に存在する，模範が行う運動の観察時と観察者自らが同じ運動を行った時に活動するミラーニューロンが発見されたためである (Rizzolatti et al., 1996a, b; Gallese et al., 1996; Decety et al., 1997; Buccino et al., 2004). このニューロンは特に，観察した運動の意図が理解できる場合（Rizzolatti et al., 2001）や，模倣することを目的に運動を観察すると，その動作を行う身体部位に対応する運動野と感覚野のニューロンがより強く活動することが知られている (Iacoboni et al., 1999; Buccino et al., 2004). このようなミラーニューロンの運動の観察時と実行時に共通する活動の報告を基に，運動学習の研究者らはミラーニューロンの活動により観察運動学習が達成されること，そして個々の運動で必要な技能の習得や未熟な技能を改善させることを考えている．

その観察運動学習の実証研究では，例えば，キーボードのタッピング順序の習得 (Heyes & Foster, 2002; Kelly et al., 2003; Osman et al., 2005) や指定された時間にスイッチを押す運動のタイミングの習得 (Badets et al., 2006) などがある．指の他にも，上肢による投球動作 (Breslin et al., 2005) や下肢によるサッカーのキック動作における複数の関節の協調 (Horn et al., 2005)，さらに投球動作時の四肢間の動作の協調 (Breslin et al., 2006) など，肢部の複数の関節を同時に可動させる複雑な運動の場合でも観察運動学習により運動技能が改善され，模範の動きに近づいている．また，運動学習で重要な情報である運動後に得られる結果の知識 (KR) を実施者へ還元せず，運動観察のみを行わせた場合でも，実施者の運動技能の改善が認められている (Horn et al., 2005). これら結果は，それぞれの運動に必要な技術が運動観察中に同時に行われる模倣によって，自己の運動技能として学習されることを示している．一方であらゆる身体運動の実行中には常に身体へ作用する外力が実行中の動作に影響する．この外力には重力の他に，例えばボールの重量や大きさ，キーボードや地面の硬さなど運動中の対象物の形態や重量，形質等に依存する力が挙げられる．したがって，我々はこのような身体外部環境で生ずる外力に対応しつつ，目的とする運動を遂行しなければならない．しかしながら，実際に観察運動学習と外力に関連する運動技能の習得を検討した研究は Mattar & Gribble (2005) の研究のみである．彼らは，学習者の上肢のリーチング（腕伸ばし）運動中に上肢に取り付けたマニピュラランダム（外力発生装置）から発生した外力により乱される運動軌跡が，模範の運動技能の上達過程を観察することで直線に近い軌跡へ修正されることを報告した．

この研究では，外力が運動技能を乱す要因であるとみなしているが，その一方で，外力は運動パフォーマンスを向上させる要因でもある．走運動 (Farley & Gonzalez, 1996; Seyfarth et al., 2002) や跳躍運動 (Seyfarth et al., 1999) などでは，高い移動速度の維持や跳躍距離を得るために着地直後に身体に作用する着地衝撃を推力として利用する必要があるため，この外力を利用する運動技能の習得も重要である．しかし，観察運動学習を通じたこの運動技能の習得や改善については検証されていない．

そのような技能を習得するためには，脚部を地面反力に対応可能な状態にさせる必要がある．つまり，身体に作用する外力の大きさに対抗可能な力発揮を脚筋群が行うことで外力作用に伴う身体姿勢の動揺を減少させ，運動遂行を可能にさせるのである．この筋張力によって変化する下肢の力学的状態に関する多くの指標の中で最も簡易的な指標が，脚部を一本のバネに例えそのバネの硬さを示す脚スティフネスである (Blickhan, 1989; McMahon & Cheng, 1990). この脚スティフネスは着地後に身体に作用した外力の大きさ変化と下肢関節の屈伸運動に伴う脚部バネの長さ変化の線形関係によって表される．さらにこのバネ長は着地後の身体重心と足部の接地部分間の距離で表され，着地後のバネ伸縮が外力である地面反力の大きさに影響することが知られている．接地局面における関節の屈曲角度の減少は下肢筋群の筋活動の増加により起こるので下肢筋群の活動は脚長の変化に影響し，結果的にスティフネスに影響する．スティフネスの変化は運動パフォーマンスにも影響しており，例えば，走速度 (Farley & Gonzalez, 1996; Heise & Martin, 1998; Dalleau et al., 1998; Arampatiz et al., 1999; Kuitunen et al., 2002; Seyfarth et al., 2002) やその場連続ジャンプの 1 秒間あたりの跳躍回数のペース (Farley et al., 1991; Farley et al.,

1998; Farley & Morgenroth, 1999)，さらには台から飛び降り，即座に飛び上がる運動であるドロップジャンプの力学的な脚伸展パワーや離地速度などのパフォーマンス (Gollhofer & Kyrolatinen, 1991; Arampatzis et al., 2001; Horita et al., 2002) に影響することが知られている．

ドロップジャンプは特に着地—跳躍の動作を短い接地時間で行うことが求められるため，下肢関節の着地直後の屈曲可動を小さくさせ，跳躍動作時の関節の伸展可動範囲を大きくし，高い跳躍高を達成させなければならない．つまり，脚長の伸縮変化を最小限にさせながら，下肢筋群は大きな力を発揮する必要がある (Bobbert et al., 1987)．このことは脚スティフネスを高めなければ，高いパフォーマンスが得られないことを示唆する．この運動学的･動力学的特徴は接地局面の関節可動に伴う筋の長さ変化を最小限に抑えるので，ドロップジャンプはプライオメトリックトレーニング（短時間の着地—跳躍への動作で生ずる主動筋の外力による伸張性収縮から短縮性収縮へ切り替わりが筋の粘弾性特性と神経—筋系のフィードバック回路やフィードフォーワード回路により行われるので，必要最小限の筋伸張でその特性を最大限に活かせるようにするトレーニング）の 1 種目としても捉えられている．一方で多くのドロップジャンプのスティフネス調節を検討した研究があり，最近では験者からの口頭による跳躍高や接地時間の定性的指示に応じてスティフネスが変化する報告がある（Arampatzis et al., 2001）．また，スティフネスの変化は中枢神経系によりコントロールされ (Gollhofer & Kyrolatinen, 1991; Horita et al., 2002)，特にその制御は筋の着地前の予備活動や関節周りの拮抗筋群の共同収縮の影響をうけるという報告 (Nielsen et al., 1994; Arampatzis et al., 2001; Horita et al., 2002) がある．この報告はスティフネスが自己調節可能な運動技能であることを示唆する．前述の通り，スティフネスの変化は下肢関節の屈曲可動域に応じた下肢長の変化や身体重心の変位に反映されるので，視覚で確認できる動きの変化は結果的にスティフネスの変化に反映されると考えられる．したがって，運動観察を通じてドロップジャンプ時のスティフネス調節が学習できる可能性がある．本研究では，運動観察を通じてドロップジャンプの運動技能の上達がなされるかを検証することを目的とし，その技能上達の評価を脚スティフネスから行った．

さらに各々のスポーツに必要な技能を習得する際，多くの学習者はその技能の未経験者や未熟な初心者である．彼らへの指導では，そのスポーツに取り組む時間の多い模範者が動きの手本を示すことが多い．学習者はその模範が示す運動を観察し，技能の習得を試みる．しかし，彼らが観察する技能は熟練した技能であるため，既述の Mattar & Gribble のような模範者の技能上達過程の観察は困難である．また，自らの技能を観察する機会も少ない．一方で，ビデオを用いることで撮影された学習者の未熟な技能と模範者の熟練した技能の両方を連続して観察することも可能であるので，その観察を通じて両者の動作の差異が確認できると考えられる．これをドロップジャンプに当てはめると，既述のように下肢関節の動きはスティフネス値に影響するので，学習者は模範と未上達な自らの動きの差異より両者のスティフネスの差異も認識できると考えられる．本研究では，模範のドロップジャンプのビデオ映像を観察する条件と，モデルと被験者自身のドロップジャンプ映像を観察する条件を設けた．

それら 2 種類の観察運動学習の違いが運動技能の改善に与える影響を検証するために，本研究では，被験者らに運動観察前後にドロップジャンプ試技を実施させた．その後，観察前後のドロップジャンプの比較をもとに，脚スティフネスや接地時間が変化するか，さらに脚伸展パワーをもとにドロップジャンプのパフォーマンスが改善されるかを検討した．

2. 方　法

2.1 被験者とモデル

2.1.1 被験者

被験者は，ドロップジャンプのトレーニング経験がない健康な男子大学生 24 名（平均年齢 21.5± 2.1 才，平均身長 174.1 ± 5.4cm，平均体重 69.7 ± 9.6kg）であった．被験者には，事前に実験の趣旨，方法および実験に伴う危険性などの説明を十分に行い，実験参加の同意を得た．また，本研究は北海道大学大学院教育学研究科倫理委員会の承認を得た．

2.1.2 モデル

被験者とは別に，予備実験の段階でドロップジャンプパフォーマンスが高かった男子大学生 1 名（年齢 20 才，身長 169cm，体重 63.8kg）を模範運動

のモデルとして用いた．モデルにも被験者同様に実験参加の同意を得た．モデルは一週間のドロップジャンプ練習を行い，その後デジタルカメラ (DR-DVL700, Victor) で観察映像の撮影を行った．

2.1.3　被験者のグループ分け

被験者は以下に示す三つの運動観察条件のグループへ無作為に 8 名ずつ分けられた；グループ 1：モデルと被験者自身のドロップジャンプを観察；グループ 2：モデルのドロップジャンプだけを観察；グループ 3：コントロール群としてドロップジャンプを観察せず安静に待機．これらのグループ間には身長，体重に有意差はなかった．

2.2　実験手順

実験の概略図を図 1A に示す．実験試技は高さ 35cm の台からドロップジャンプを行った．この台高は，一般的にドロップジャンプの研究に用いられる高さであり，その場からのジャンプと比較して大きな跳躍力が発揮できる最適な高さである (Bobbert et al., 1987a, b).

次にドロップジャンプの試技内容と運動観察を含めた実験手順を紹介する．まず，ドロップジャンプが台の上から跳び上がることなく着地面へ落下し，着地後すぐに鉛直方向にジャンプする運動であるので，被験者へは「手を腰にあてた状態でドロップジャンプ運動を行い，両足で同時に着地し，着地後できるだけ速く，かつできるだけ高く跳ぶこと」を口頭で指示した．被験者らはドロップジャンプに慣れてもらうために 3 回の練習を実施後，運動観察前の試技を 2 分間隔で 3 回行った (Pretest)．その後，彼らは観察学習用の映像としてドロップジャンプを 1 回行い，それをデジタルカメラで撮影した．5 分間の休息を挟んで運動観察を行った．被験者には，モデルはドロップジャンプパフォーマンスが高いことを伝え，参考にするよう指示した．映像の内容は，グループ 1 では被験者自身のドロップジャンプ 1 回，モデルのドロップジャンプ 2 回，さらに被験者のドロップジャンプ 1 回，モデルのドロップジャンプ 2 回が一続きとなった映像を 1 セットとして，2 分間隔で 8 セット観察した．それぞれの映像でグループ 2 ではモデルのドロップジャンプ 4 回が一続きとなった映像を 1 セットとして，2 分間隔で 8 セット観察した．グループ 3 は運動観察を行わないため 20 分間安静に待機した．運動観察にはフェイスマウントディスプレイ（Glasstron, SONY）を用いて，被験者の目の前で映像を映した．なお，これら観察回数とセット数の設定は，動きの特徴の読み取りを集中して観察できる回数であることが予備実験において確認されたことに基づいている．運動観察後，5 分間の休息を挟んで 3 回の練習を行ってから，運動観察後の試技を 2 分間隔で 3 回行った (Posttest).

2.3　データ収集と解析方法

実験は地面反力の測定とビデオ撮影を行った（図 1A 参照）．地面反力はフォースプラットフォーム (OR6-5-1, AMTI) を用いてサンプリング周波数 2000Hz で測定した．被験者の右体側の肩峰，大転子，脛骨外側上顆，足関節外顆，第五中足骨頭に反射マーカーを取り付け，被験者の右矢状面を約 5m 離れた位置から高速ビデオカメラ (FASTCAM-Rabbit-mini2, Photron Inc., Tokyo) を用いて 240fps で撮影した．撮影された画像は，動作解析ソフト (Frame-DIAS, DKH Co. Ltd., Tokyo) を用いて各マーカーのデジタイズを行い，二次元の座標データに変換した．それら座標データの実座標系への変換は DLT 法を用いた．それら変換した座標データは 15Hz を遮断周波数とするバターワース型ローパスフィルタを用いて平滑化した．座標データから身体の各セグメントの重心座標を求めた後に全身の重心座標を求めた (Winter, 1990).

スティフネスの算出では，脚部を一本の線形バネと例え，図 1 に表示した接地局面前半に生ずる脚短縮に伴う重心変位（図 1B）と地面反力（図 1C）から得られる直線回帰式の係数を最小 2 乗法で求め，その係数をスティフネスとした（図 2）(Stefnyshyn & Nigg, 1998; Arampatzis et al., 2001)．ドロップジャンプでは着地後できるだけ速く高く跳ぶことが求められ，それにはより短時間でより大きな仕事をすることが必要なので，仕事率であるパワーが重要なパフォーマンス指標となる．本研究では接地局面の脚伸展パワーを算出し，その最大値をドロップジャンプのパフォーマンス指標として用いた．Arampatzis et al. (2001) は脚スティフネスに応じて最大脚伸展パワーが変化すると報告している．このことから，以下の式 (1) に示す，鉛直方向の地面反力 (Fz) と重心鉛直方向の移動速度 (V) の積算を

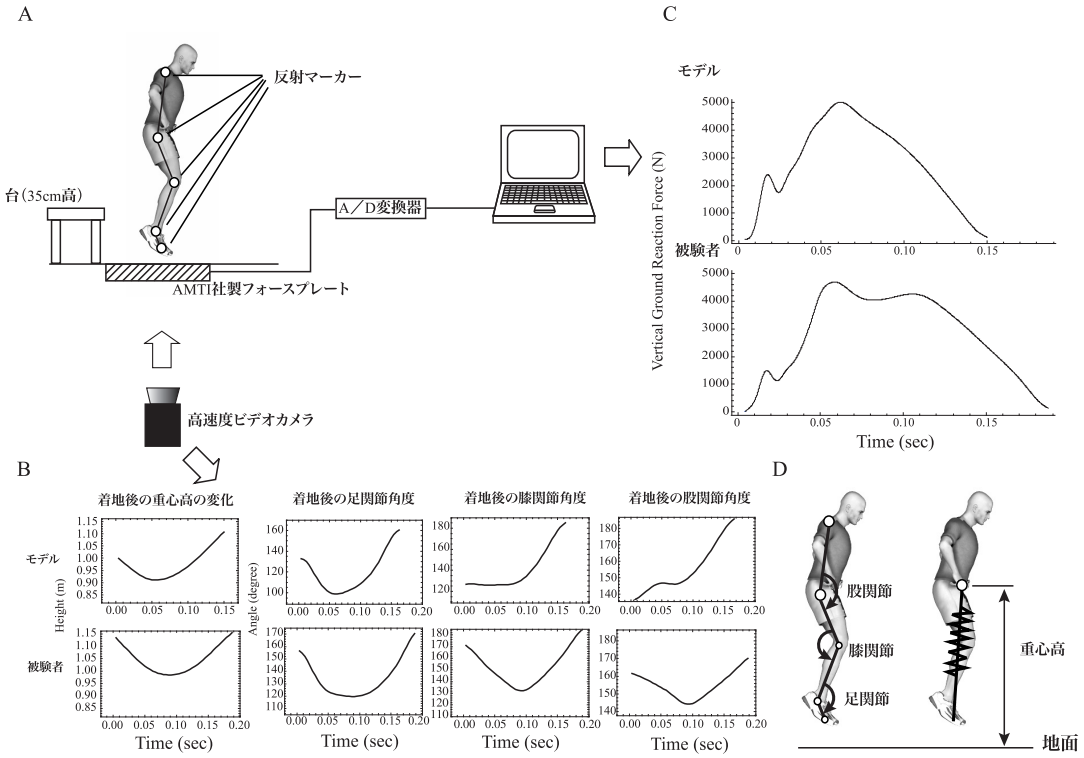

図 1 (A) 実験構成図，(B) モデルとある被験者の着地後の重心変位，足関節，膝関節，股関節角度，(C) モデルとある被験者の鉛直方向の地面反力，(D) 関節角度の定義（左）と重心高および脚スティフネス（右）

用い，脚伸展パワーを得た．

$$P(t_1) = Fz(t_1) \cdot V(t_1) \qquad (1)$$

ここで $P(t_1)$ は脚伸展パワーであり，t は時間である．また $V(t_1)$ は，以下の式 (2) に示す，実際の運動学データから得られた重心変位と鉛直方向の地面反力データの加算から得た (Arampatzis et al., 2001).

$$V(t_1) = V_0 + \int_{t_0}^{t_1} \frac{F(t) - mg}{m} dt \qquad (2)$$

ここで V_0 は着地時の鉛直方向の重心速度，m は被験者の体重，g は重力加速度 (9.81m/s^2) である．スティフネス値，最大パワー値，Fz の最大値は被験者の体重で除した体重当たりの値を求めた．さらに，図 1B と C に示した重心変位と下肢関節（足関節，膝関節，股関節）角度および Fz をもとに，鉛直方向の重心の離地速度，接地時間，接地局面の脚長の短縮量（つまり重心の着地時と最低位時の変位差），鉛直方向の地面反力の最大値，下肢関節の着地時と重心最低変位時の角度，および両者の角度差である角度変位を算出した．DLT 法による座標変換から運動学，および動力学データ算出までの処理は Mathematica 7 (Wolfram research) を用いた．これら解析より得られた各数値については以下に記す統計処理を行った．それらの値は全て平均値 ± 標準偏差で表示した．

2.4 統計解析

統計処理では，各グループの Pretest と Posttest における解析データの平均値を求め，それら平均値の有意差検定は対応のある t 検定を行った．統計的有意性の基準は危険率 5%未満とした．この検定で有意性が認められた群の値（図 3）に関し，Pretest 値と Posttest 値との差が他の群より顕著に見られるものがあったため，その 3 グループの Pretest 値の差について，まず 1 元配置分散分析を用い検証し

表 1 モデルと被験者群のドロップジャンプ中の運動学および動力学変数の平均値と標準偏差．モデルの各変数は 6 試技から得られた値であり，被験者の各変数は観察前 3 試技から得られた値である．

	unit	Model	Subjects
Leg Stiffness	N/m/kg	627.30 ± 90.30	166.86 ± 155.63
Fz Max	N/kg	78.24 ± 3.70	41.71 ± 11.85
Maximum Leg Power	W/kg	84.42 ± 2.30	47.21 ± 10.72
Maximum Leg Compression	m	0.12 ± 0.01	0.27 ± 0.09
Contact Duration	sec	0.15 ± 0.01	0.35 ± 0.11
Vertical velocity of CG at toe-off	m/s	2.91 ± 0.04	2.54 ± 0.31
Ankle angle at touch-down	degree	132.10 ± 1.38	138.70 ± 13.01
Ankle displacement	degree	33.90 ± 0.81	54.35 ± 23.27
Knee angle at touch-down	degree	127.65 ± 2.69	147.94 ± 11.04
Knee displacement	degree	−0.60 ± 2.61	44.69 ± 16.76
Hip angle at touch-down	degree	139.94 ± 2.49	145.28 ± 10.40
Hip displacement	degree	12.58 ± 2.05	27.62 ± 24.60

CG: 身体重心 (Center of Gravity of body)，Fz: 鉛直方向の地面反力，
N: ニュートン，W: ワット（仕事率）

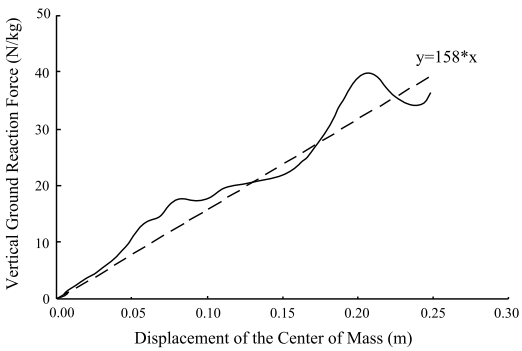

図 2 立脚期前半における重心変位すなわち脚短縮長に対する地面反力とその回帰直線の一例．この回帰直線の傾きから脚スティフネスが算出される．この図のスティフネスは 158N/m/kg であった．

た．その結果，Pretest 値に群間差が無かった場合でも，Pretest 値と Posttest 値の差が t 検定の有意性検出に関わる可能性がある．つまり，有意性検出の差がグループ間の Pretest と Posttest の差による可能性である．そこでグループを共変数として，各グループの Pretest 値を独立変数，各グループの Posttest 値を従属変数とし，グループ間の分散を比較する共分散分析を用いた．この分析では，各被験者の Pretest と Posttest の平均値を変数として用い，Posttest 値へのグループと初期値の影響を検証した．以上の t 検定と分散分析，および共分散分析では StatView 5.0 (SAS Inc) を用いた．有意水準は $p < 0.05$ とした．

3. 結 果

3.1 被験者とモデル

表 1 はモデルと解析対象となった被験者の Pretest 時の脚スティフネス，Fz の最大値，脚伸展パワーの最大値，脚長の短縮量，接地時間，離地速度，下肢関節の着地時角度と最大角度変位の平均値と標準偏差である．本研究では観察映像を撮影するデジタルカメラと解析映像を撮影する高速カメラの併用ができなかった．したがって，表 1 のモデルと被験者の値は，それぞれ観察映像を撮影する直前に行ったドロップジャンプの 5 回分と 3 回分の平均値である．また，モデルのドロップジャンプが模範運動として十分な役割を果たすためには，モデルと被験者の Pretest のスティフネスが十分に異なっている（つまり，被験者の値が低い）必要があると考えた．そこで，モデルのスティフネスをもとに事前に Pretest 被験者のスティフネスに基準を設け，その基準から外れた全ての被験者を解析の対象から除くことにした．この基準は次のように定めた．まず，モデルの観察映像撮影前に行ったドロップジャンプのスティフネスが 627.30 ± 90.30 N/m/kg であったことから，被験者のスティフネスが上記のモデルの変動範囲，つまり平均±標準偏差より十分離れている必要があると判断した．次にその離れ値である

表 2 運動観察に伴う Pretest の各変数に対する Posttest の変化率

		All trials		
	unit	Group 1	Group 2	Group 3
Leg Stiffness	%	68.31	26.68	30.87
Fz Max	%	20.44	15.20	9.02
Maximum Leg Power	%	6.39	−3.12	4.25
Maximum Leg Compression	%	−27.70	−20.88	−7.16
Contact Time	%	−27.90	−14.04	−10.49
Vertical velocity of CG at toe-off	%	1.22	−0.15	−0.14
Ankle angle at touch-down	%	3.57	2.61	0.16
Ankle displacement	%	15.16	21.14	4.45
Knee angle at touch-down	%	4.34	7.90	1.26
Knee displacement	%	52.35	48.99	16.82
Hip angle at touch-down	%	0.81	7.19	1.51
Hip displacement	%	111.99	79.31	33.77

が，標準偏差の範囲内ならばモデルのスティフネスと変わらないため，統計学的にもその範囲から十分離れると言える標準偏差の 2 倍以下とした．つまり 446 N/m/kg 以下という基準を定めた．その結果，この基準から外れた被験者 1 名（グループ 1）を解析の対象から除いた．代表試技でも同様にその被験者が解析対象から外れた．また，左右両足による同時着地が行われなかった被験者 1 名（グループ 2）を解析の対象から除いた．その結果，解析対象の被験者数はグループ 1 とグループ 2 が 7 名ずつ，グループ 3 が 8 名の計 22 名となった．表 1 に示したように各パラメータでモデルと解析対象となった被験者の間には大きな差があり，モデルは模範運動としての役割を十分果たしたと考えられる．

3.2 Pretest と Posttest の比較

図 3A–F には，スティフネス，Fz Max，脚伸展パワー，脚短縮量，接地時間，離地速度の Pretest と Posttest の平均値と標準偏差，そしてそれら値の観察前後の t 検定の結果をグループ単位で示した．グループ 1 では図 3A のスティフネスが有意に増加し (Pretest: 123.87 ± 78.42 N/m/kg; Posttest: 208.48 ± 99.21 N/m/kg; $p < 0.05$)，図 3B の最大地面反力も有意に増加した (Pretest: 42.87 ± 11.36 N/kg; Posttest: 51.78 ± 18.39 N/kg; $p < 0.05$)．そして図 3D の脚短縮量は有意に減少した (Pretest: 0.30 ± 0.11 m; Posttest: 0.22 ± 0.06 m; $p < 0.05$)．走行時のスティフネスと着地衝撃の関係を検証した Nigg & Liu (1999) はスティフネスの増加が着地衝撃の増加と上半身の鉛直方向の変位の減少をもたらすことを報告した．本研究の結果はこの報告と一致している．また，図 3E に示す接地時間も有意に減少した (Pretest: 0.39 ± 0.1 sec; Posttest: 0.28 ± 0.06 sec; $p < 0.05$)．グループ 2 では，脚短縮量のみで有意に減少した (Pretest: 0.25 ± 0.09 m; Posttest: 0.20 ± 0.06 m; $p < 0.05$)．図 3F の離地速度と図 3C の最大パワーでは全グループに有意な変化は認められなかった．またこれら Pretest に対する Posttest の変化を比率で表したものが表 2 である．グループ 1 では他のグループより変化が大きいことを示した．特に，脚スティフネスの変化率は 68.31%であり，これら変化率は他のグループと比べて大きかった．

これら有意差が認められた変数の Pretest 値の分散分析は，対象となった変数全てにおいて有意差が無かったことを示した（スティフネス: $F_{2,19} = 0.85$, $p = 0.44$; Fz Max: $F_{2,19} = 0.03$, $p = 0.97$; 脚短縮量: $F_{2,19} = 0.59$, $p = 0.56$; 接地時間: $F_{2,19} = 1.05$, $p = 0.56$）．また，図 3 と表 2 からグループ 1 のスティフネスの変化が他グループより大きかった（変化率: 64.31%）ことから，スティフネスの共分散解析を行った．図 4 は，スティフネスの Pretest 値と Posttest 値との回帰分析をグループ毎に示したものであり，表 3 はそれら値の分散分析および共分散分析の結果である．図 4 ではグループ 3 の回帰直線がグループ 1 と 2 に対し交差した．この結果は共変量に対し，Pretest 値とグループの交互作用が影響する可能性があることを

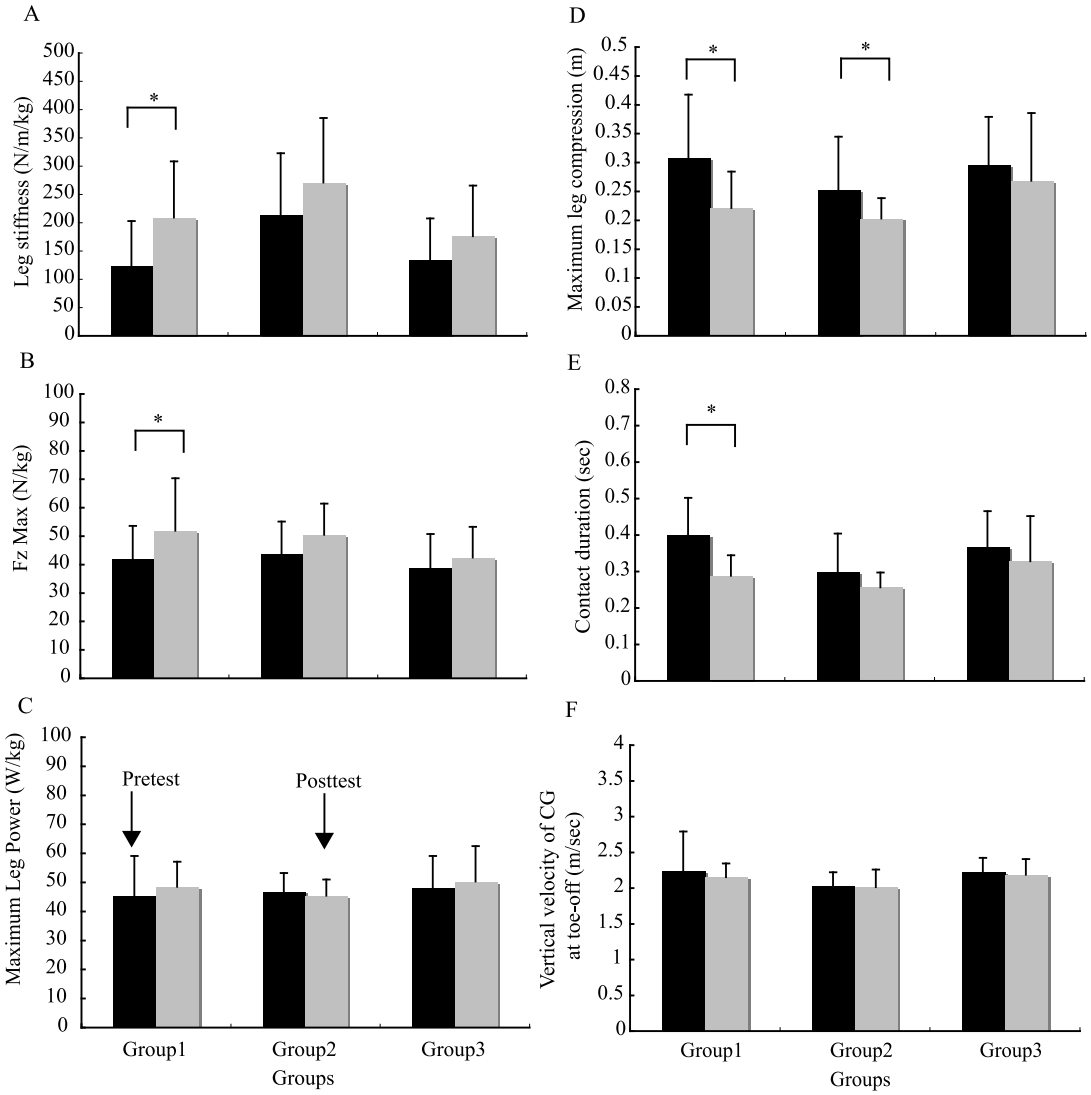

図 3　全被験者の全試技 (A–F) の Pretest（黒）と Posttest（灰色）のデータの結果．A は脚スティフネス，B は鉛直方向の地面反力の最大値，C は脚伸展パワーの最大値，D は脚短縮幅の最大値，E は接地時間，F は離地速度である．アスタリスク (∗) は統計的有意差 ($p < 0.05$) があることを示す．

示した．しかし，表 3 に示した分散分析では交互作用が認められず，共分散分析ではグループ差が脚スティフネスの共変量に影響しないことを示した．したがって，無作為に分けた三つのグループは，本研究で用いたパラメータという観点において統計的な偏りはなかったと言える．

図 5 にモデルのある一試技のスティックピクチャーと地面反力波形を，図 6 にグループ 1 の一例として被験者 1 名の Pretest と Posttest のスティックピクチャーと地面反力波形を示す．スティックピクチャーの間隔は約 0.02 秒である．このモデルと Pretest 被験者の両者のスティクピクチャーを比較すると，モデルは被験者に比べて着地中の股関節や膝関節の屈曲角度が小さく，しゃがみ込みが浅いことが分かる．つまり，両者の動きが視覚的に明らかな差として現れている．また，被験者の Pretest（図 6A）と Posttest（図 6B）の比較をすると，Posttest では股関節や膝関節の屈曲が減少していることが視覚的

表 3 脚スティフネスの分散分析（上）と共分散分析の結果

Source	DF	Sums of squares	Mean Squares	F	p
Leg K in Pretest	1	75775.91	75775.91	12.24	< 0.005
Group	2	16916.37	8458.19	1.37	0.28
Leg K x Group	2	11838.61	5919.30	0.96	0.40
Error	17	105219.70	6189.39		
Leg K in Pretest	1	91101.76	91101.76	14.79	< 0.005
Group	2	7713.12	3856.56	0.63	0.55
Error	19	117058.31	6160.96		

DF は自由度，F は分散比，p は確率，Leg K は脚スティフネスである．

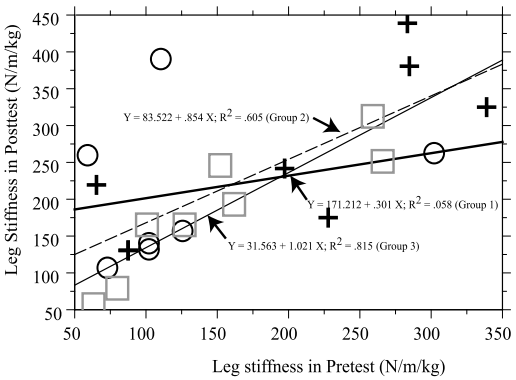

図 4 各 3 グループの脚スティフネスの Pretest と Posttest の分布および回帰直線．白い円はグループ 1，十字はグループ 2，灰色の四角はグループ 3 である．

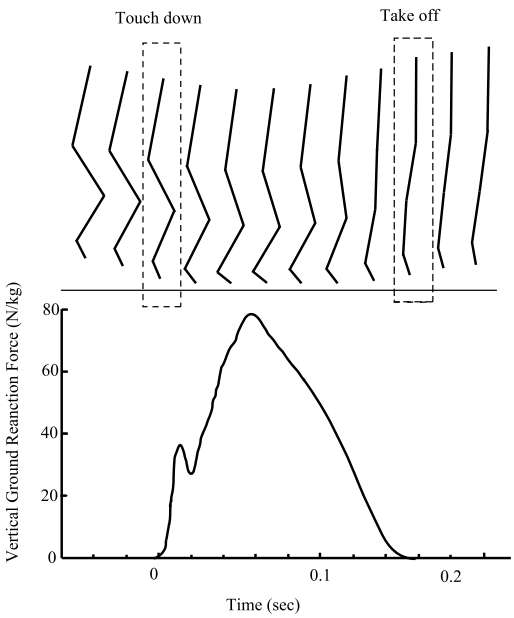

図 5 モデルのスティックピクチャーと地面反力波形．スティックピクチャーは約 0.02 秒間隔のモデルの動きを表し，スティックピクチャーと地面反力波形は同一の時間軸である．

にも確認でき，その変化によってこの被験者はモデルのジャンプに近づいていることが分かる．この被験者の地面反力波形を見ると，Posttest の波形は最大地面反力が増加し，その後の伸展局面の地面反力も大きくなっている．このようにグループ 1 では，映像観察後に動きや地面反力に変化が現れ，スティフネスが変化したことが分かる．

その図 6 で確認された運動観察に伴う動作の定性的な変化をもとに，運動観察前後の関節角度変化を比較した．図 7 は各関節の着地時（白色）と重心最低位時（灰色）の角度である．この 2 角度の差分は角度変位である．図 7A の足関節ではグループ 1 と 2 で角度変位が観察前後で有意に減少した．図 7B の膝関節では，グループ 1 で最低変位時と角度変位が運動観察後に有意に減少し，グループ 2 で観察後の着地時角度と角度変位が有意に減少した．図 7C の股関節では，グループ 1 で角度変位が有意に減少し，重心最低位時の角度が有意に増加し，グループ 2 では着地時角度と角度変位が有意に減少した．

4. 考 察

4.1 ドロップジャンプのスティフネス変化

本研究では，図 3 と表 2 で示したようにモデルと被験者自身の運動を観察したグループ 1 のみでドロップジャンプのスティフネスに Pretest と Posttest の間に統計的有意差と大幅な変化が認められた．以下ではグループ 1 の全試技と代表試技で現れた変化をもとに，観察運動学習によるドロップジャンプの

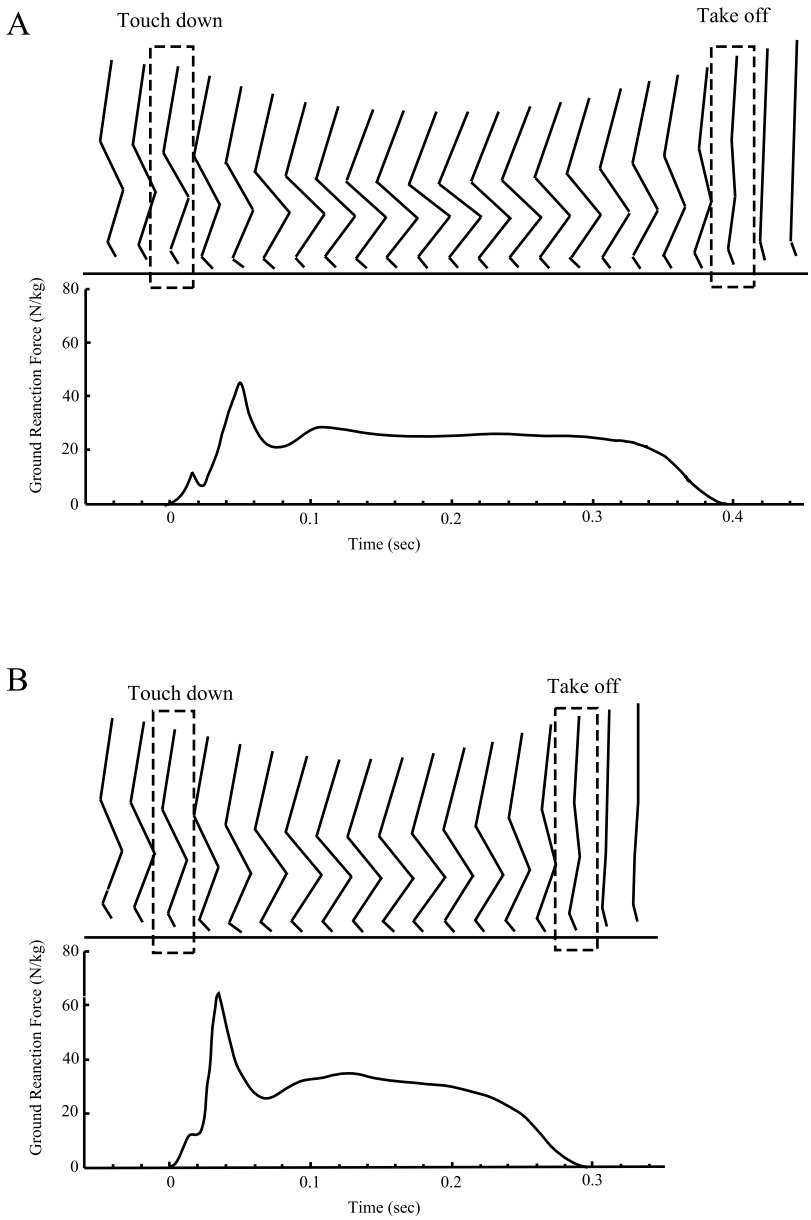

図 6　グループ 1 の被験者 1 名の Pretest と Posttest のスティックピクチャーと地面反力波形．スティックピクチャーの間隔は 0.02 秒の被験者の動きを表し，スティックピクチャーと地面反力は同じ時間軸である．A: Pretest, B : Posttest

運動技能の変化について検討する．

グループ 1 では，スティフネスが運動観察後に統計的に有意な増加と大幅な増加を示し（図 3A），これにあわせて脚短縮量（図 3D）と接地時間（図 3E）が有意に変化した．Arampatzis et al. (2001) は，スティフネスと離地速度や接地時間の関係についても報告しており，離地速度はスティフネスがある程度増加しても大きく変化しないがスティフネスが増加しすぎると減少するとし，また接地時間はスティフネスの増加に伴って減少するとしている．グループ 1 では運動観察後に接地時間は減少した（図 3E）が離地速度は変化しておらず（図 3F），スティ

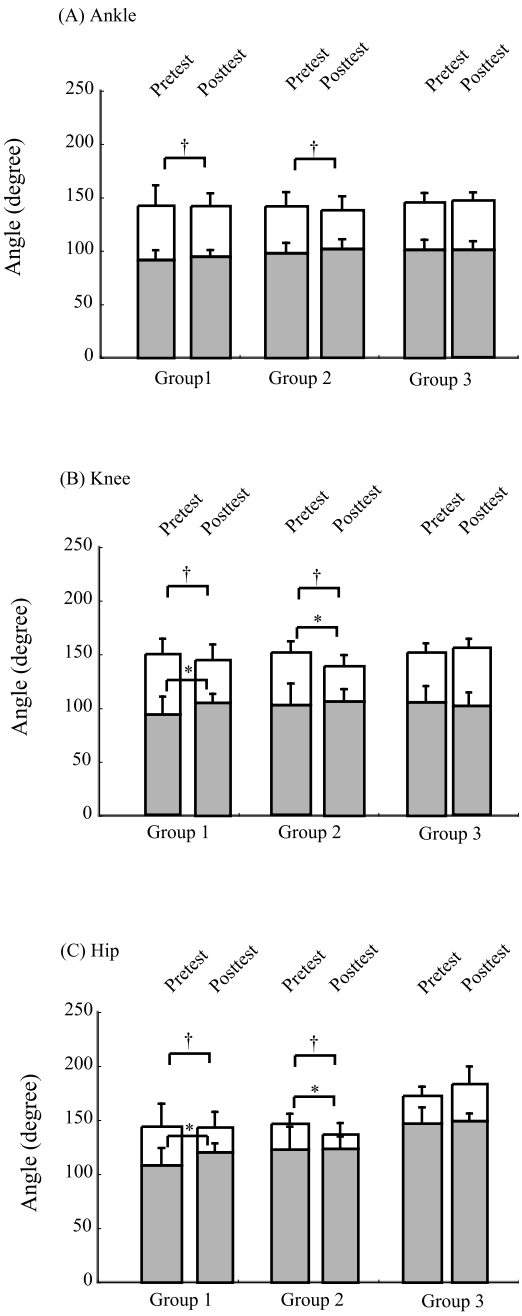

図 7 着地時角度（白色）と最低重心変位時（灰色）の関節角度．アスタリスク (∗) は観察前後で有意差が見られることを示す．ダガー (†) は着地時と最低重心変位時の差分から得られる角度変位に観察前後で有意差があることを示す．

フネスは離地速度を落とさない範囲で増加したことが分かる．この接地時間が減少しても離地速度が減少しなかったという結果は，離地速度が跳躍高に関係することから，グループ 1 では着地後できるだけ速く高く跳ぶという目標に沿ったスティフネス調節が行われたと考えられる．これらのことは，運動観察を通してドロップジャンプのパフォーマンスを向上させようと，スティフネス調節が学習されたことを示唆する．

スティフネス調節とパフォーマンス向上については，Arampatzis et al. (2001) がスティフネスの適度の増加はパフォーマンスの指標となる脚伸展パワーを増加させるが，スティフネスがさらに増加すると逆にパワーは減少すると報告している．この見解に対し，グループ 1 の脚伸展パワーの最大値は有意に増加しなかった（図 3C）．グループ 1 は自己とモデルの動きの差異を知覚し，モデルに動きを近づけようと運動ストラテジーを変化させたのだが，最大パワーはモデルの値よりも低かった．このことは，モデルと同様のパフォーマンスを発揮するにはさらにスティフネスを増加させる必要があることを示唆するだけでなく，パフォーマンスの向上にはさらなる運動学習が必要であることが推察される．そのような結果であっても，1 回の観察運動学習によってスティフネスが有意に増加したことを考えると，今後の観察運動学習の方法次第で脚伸展パワーの増加，すなわちパフォーマンスが向上する可能性がある．

スティフネス調節は，外力を受けた筋が伸張性収縮を行うことで弾性エネルギーを蓄え，その弾性エネルギーをその後の短縮性収縮に利用するという効率的に運動を行うための運動技能と考えられる．本研究では，このスティフネス調節が運動観察を通じて学習されることが示された．過去の観察運動学習に関する研究では，例えば，タッピングの順序 (Heyes & Foster, 2002; Kelly et al., 2003; Osman et al., 2005)，タイミング (Badets et al., 2006)，関節の協調性（Breslin et al., 2005）の学習など動作の定性的側面や運動学的側面のみが検証されており，外力への対応を学習する研究はほとんど行われていなかった．外力への対応に関する観察運動学習としては，外乱を受けて行われるリーチング運動の軌道が運動観察によって直線軌道に近づくという，外力に抵抗して腕を動かす運動について検討された

のみである (Mattar & Gribble, 2005). したがって，本研究は初めて，外力の利用に関する運動技能であるスティフネス調節が運動観察を通じて学習されることを示したといえる.

ドロップジャンプの受動的局面におけるスティフネスの変化には，特に着地前の筋の予備活動が関与する (Arampatzis et al., 2001; Horita et al., 2002). したがってグループ 1 では，着地前の筋への運動指令が変化し，予備活動が増加したことでスティフネスが増加したと考えられる. しかし，このスティフネスを増加させるために必要である筋の予備活動自体は観察することができない. そのため，着地後に現れた動きの観察をもとに着地前の予備活動を増加させるための運動指令が学習されたと考えられる. このように着地後に現れた動きをもとに着地前の運動指令の修正を行うためには，着地衝撃が身体に及ぼす影響を考慮しなくてはならない. つまり，本研究の運動観察によってスティフネス調節が学習されたという結果は，身体と着地衝撃という外力の影響を含めた学習が運動観察によって行われたことを示唆する.

4.2 模範と自己の動作映像の観察による運動学習

本研究では，モデルと被験者自身のドロップジャンプを観察したグループ 1 で明確な学習効果が現れたが，モデルのドロップジャンプだけを観察したグループ 2 では統計的な有意差が脚短縮量で見られただけであった. また，変化率を比較するとグループ 2 が小さかったことから明確な学習効果は現れなかった. このことから，モデルだけでなく自分自身の運動を観察することが観察運動学習の有効な方法となる可能性が示唆された. これは，観察運動学習において自身とモデルの動きの差が重要な情報となることを示すものであり，本研究によって初めて報告された結果である.

これまでの観察運動学習の研究では，モデルの運動を観察するだけでも学習効果が現れることを報告しているが，本研究ではモデルの観察だけでは大きな学習効果は現れなかった. この理由として，これらの先行研究は外力を受けずに行われる運動の学習であったのに対し，本研究は外力を受けて行われるドロップジャンプの学習であったことが挙げられるだろう. すなわち，ドロップジャンプは着地衝撃という外力と身体の筋群が発揮する内力により動きが決定されるため，外力の影響を含めた学習を行う必要があり，学習内容がより複雑であったと考えられる. そのため，モデルの観察だけでは学習を達成するための十分な情報が得られなかったと考えられる. 外力を受けて行われる運動の観察学習を行った研究である，外乱を受けて行われるリーチング運動の研究 (Mattar & Gribble, 2005) では，模範的な運動と未上達な運動を観察し，その動きの差異を役立てることで運動学習が達成された. 本研究でも動きの差異に着目し，モデルと被験者自身の動きの差異が観察運動学習に有効に作用すると考え実験を行った. その結果，その予想通りモデルと被験者自身の運動観察を行ったグループ 1 で大幅な運動学習効果が得られた.

図 5 と図 6A のスティックピクチャーで示したように，モデルは着地後の下肢の屈曲量が少なく屈曲から伸展への移行が素早く行われているのに対して，Pretest 時の被験者は着地後の下肢の屈曲が大きく屈曲から伸展への移行に時間を要した. グループ 1 では，モデルと被験者自身のドロップジャンプを観察することで，この屈曲量や屈曲から伸展への移行速度といった動きの差異が正確に知覚されたと考えられる. そして，この動きの差異の知覚がスティフネスを変化させるための運動指令の修正に有効に作用したと考えられる. しかし，モデルだけの観察を行ったグループ 2 では，被験者自らの動きの知覚は着地衝撃や着地局面の関節可動などの体性感覚情報に依存する他無く，主観的に動作の内容をイメージするしかなく，実際の動作の内容が明確にできなかったと考えられる. このため自らとモデルの動きの差異を正確に知覚できず，スティフネスを変化させるための運動指令の修正が行われなかったと考えられる.

その運動指令の修正が成されたかは，図 7 に示した着地時角度と角度変位からも確認できる. その図ではグループ 1 と 2 で着地後の角度変位が有意に減少することを示した. しかし，角度変位減少には着地時角度および重心最低位時角度の減少が関わるため，それら値の変化を考慮する必要がある. 事実，グループ 1 では重心最低時角度の有意な増加によって変位が減少したが，一方のグループ 2 では着地時角度の減少が角度変位を減少させた. Arampatzis et al. (2001) は，脚スティフネスと共に増加した着

地前の関節伸展筋の予備緊張が着地後の関節トルク／角度変位から得られる関節スティフネスを増加させ，角度変位を減少させることを報告している．その伸展筋の予備活動増加は関節の伸展トルクを増加させるので (Nielsen et al., 1994)，着地時の関節角度を一定位または伸展位にさせる．グループ 1 の被験者は，自己と模範の動きの差異を知覚したので，下肢長や関節屈曲量を最小限にさせた．この屈曲量の抑制には着地後の筋伸張を抑制する必要があるので，彼らは関節伸展筋の予備活動の増加によって関節の屈曲可動を抑制させ，スティフネスを増加させたと考えられる．一方のグループ 2 では，脚スティフネス増加に関わるような角度変位の減少を行わせる運動指令への修正ができなかったと考えられる．

また，本研究においてモデルのドロップジャンプだけを観察しても明確な学習効果が得られなかったのは，今回用いた被験者にはドロップジャンプのトレーニング経験がなく，本研究で初めてドロップジャンプを行ったことも理由の一つになっている可能性がある．なぜなら，対象となる運動の経験によって観察運動学習の効果が変化する可能性があるからである．運動経験によってその運動を観察した時の脳の活動に違いが現れ，自分にとって経験のある，慣れた運動を観察した方が脳はより強い活動を示すことが報告されている (Calvo-Merino et al., 2005; Haslinger et al., 2005)．このことから，全く経験のない運動を観察するよりもある程度経験を積んでから観察した方がより正確に運動を知覚でき，より多くの情報を得ることができるようになる可能性が考えられる．本研究でも，被験者が事前にドロップジャンプの練習をある程度行うことで，モデルのドロップジャンプを観察するだけでもスティフネス調節が学習されたかもしれない．しかしながら，この運動経験と観察運動学習の関係については本研究の結果からは明確なことは分からないため，さらなる研究が必要である．

謝　辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究 C19500491 の補助を受けた．

文　献

Arampatzis, A., Schade, F., Walsh, M., & Bruggemann, G. P. (2001). Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, **11**, 355–364.

Asmussen, E., & Bonde-Petersen, F. (1974). Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta physiologica Scandinavica*, **91**, 385–392.

Badets, A., Blandin, Y., & Shea, C. H. (2006). *Intention in motor learning through observation Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **59**, 377–386.

Bobbert, M. F., Hujing, P. A., & van Ingen Schenau, G. J. (1987a). Drop jumping. I. The influence of jumping techinque on the biomechanics of jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **19**, 332–338.

Bobbert, M. F., Hujing, P. A., & van Ingen Schenau, G. J. (1987b). Drop jumping. II. The influence of jumping techinque on the biomechanics of jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **19**, 339–346.

Breslin, G., Hodges, N. J., Williams, A. M. Curran, W., & Kremer, J. (2005). Modelling relative motion to facilitate intra-limb coordination. *Human Movment Science*, **24**, 446–463.

Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G. R., Zilles, K., Freund, H. J., & Rizzolatti, G. (2004). *Neuron*, **42**, 323–334.

Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grezes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: an FMRI study with expert dancers. *Cerebral cortex*, **15**, 1243–1249.

Dalleau, G., Belli, A., Bourdin, M., & Lacour, J. R. (1998). The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, **77**, 257–263.

Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., Grassi, F., & Fazio, F. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, **120**, 1763–1777.

Farley, C. T., Blickhan, R., Saito, J., & Taylor, C. R. (1991). Hopping frequency in humans: a test of how springs set stride frequency in bouncing gaits. *Journal of Applied Physiology*, **71**, 2127–2132.

Farley, C. T., & Morgenroth, D. C. (1999). Leg

stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of Biomechanics*, **32**, 267–273.

Gallse, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, **119**, 593–609.

Gallese, V., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, **8**, 369–403.

Gollhofer, A., & Kyrolainen, H. (1991). Neuromuscular control of the human leg extensor muscles in jump exercises under various stretch-load conditions. *International Journal of Sports Medicine*, **12**, 34–40.

Haslinger, B., Erhard, P., Altenmuller, E., Schroeder, U., Boecker, H., & Ceballos-Baumann, A. O. (2005). Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists. *Journal of cognitive neuroscience*, **17**, 282–293.

Heise, G. D., & Martin, P. E. (1998). "Leg spring" characteristics and the aerobic demand of running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **30**, 750–754.

Heyes, C. M., & Foster, C. L. (2002). Motor learning by observation: evidence from a serial reaction time task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, **55**, 593–607.

Horita, T., Komi, P. V., Nicol, C., & Kyrolainen, H. (2002). Interaction between prelanding activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: implications to performance. *European Journal of Applied Physiology*, **88**, 76–84.

Hortobagyi, T., & DeVita, P. (2000). Muscle pre- and coactivity during downward stepping are associated with leg stiffness in aging. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, **10**, 117–126.

Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, **286**, 2526–2528.

Kelly, S. W., Burton, A. M., Riedel, B., & Lynch, E. (2003). Sequence learning by action and observation: evidence for separate mechanisms. *British Journal of Psychology*, **94**, 355–372.

Kuitunen, S., Komi, P. V., & Kyrolainen, H. (2002). Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, **34**, 166–173.

Mattar, A. A., & Gribble, P. L. (2005). Motor learning by observing. *Neuron*, **46**, 153–160.

中村 隆一・齋藤 宏・長崎 浩 (2003). 基礎運動学 (第 6 版). 東京：医歯薬出版.

Nielsen, J., Sinkjaer, T., Toft, E., & Kagamihara, Y. (1994). Segmental reflexes and ankle joint stiffness during co-contraction of antagonistic ankle muscles in man. *Experimental Brain Research*, **102**, 350–358.

Nigg, B. M., & Liu, W. (1999). The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running. *Journal of Biomechanics*, **32**, 849–856.

Osman, M., Bird, G., & Heyes, C. (2005). Action observation supports effector-dependent learning of finger movement sequences. *Experimental Brain Research*, **165**, 19–27.

Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallse, V., & Fogassi, L. (1996a). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, **3**, 131–141.

Rissolatti, G., Fadiga, L., Matelli, M., Bettinardi, V., Paulesu, E., Perani, D., & Fazio, F. (1996b). Localization of grasp representaions in human by PET: 1. Obsevation versus excution. *Experimantal Brain Research*, **111**, 246–256.

Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews. Neuroscience*, **2**, 661–670.

Schmidt, R. A. (1991). *Motor learning and performance: from principles to practice*. Champaign: Human Kinetics Books.

Seyfarth, A., Geyer, H., Gunther, M., & Blickhan, R. (2002). A movement criterion for running. *Journal of Biomechanics*, **35**, 649–655.

Stefanyshyn, D. J., & Nigg, B. M. (1998). Dynamic angular stiffness of the ankle joint during running and sprinting. *Journal of Applied Biomechanics*, **14**, 292–299.

Walsh, M., Arampatzis, A., Schade, F., & Bruggemann, G. P. (2004). The effect of drop jump starting height and contact time on power, work performed, and moment of

force. *Journal of strength and conditioning research*, **18**, 561–566.

Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. (2nd edition). New York: John Wiley.

(Received 1 Dec. 2008)
(Accepted 1 Aug. 2009)

小池　貴行

1975 年生．2007 年北海道大学大学院教育学研究科博士課程修了．現在，室蘭工業大学サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー博士研究員．博士（教育学）．2007/4–2009/3 北海道大学大学院教育学研究院専門研究員．身体運動時の外力への対応が可能な運動技術形成に関わる神経系-筋系の相互作用と身体の力学的状態の変化を研究対象の 1 つとしている．最近は意思決定に関わる神経ネットワークが運動の制御や学習に果たす役割にも興味を持つ．

koike@mmm.muroran-it.ac.jp

犬飼 祥雅

2005 年北海道大学工学部卒業，2007 年北海道大学大学院教育学研究科修士課程修了．北大工学部卒業後，ボート競技の経験を生かし，運動科学の研究分野へ進む．修士課程では観察運動学習に着手し，山田研究室で本研究の基盤を築いた．修了後の現在は研究職から離れている．

山田　憲政 (正会員)

1960 年生．1985 年筑波大学大学院体育研究科修了．現在．北海道大学大学院教育学研究院人間発達科学分野准教授．博士（教育学）．1992 年ウォータルー大学客員助教授．1998 − 1999 年アムステルダム自由大学人間運動科学部客員研究員．本研究は観察と想像が一種の運動である事を実証する一連の研究の一つとなると思っています．

yamada@edu.hokudai.ac.jp