着地動作における緩衝的運動調節について

永 田 晟* 室 増 男** 日 丸 哲 也***

MOTOR CONTROL OF LANDING MOTION ON KINETIC ANALYSES ABOUT ABSORBABILITY

AKIRA NAGATA, MASUO MURO AND TETSUYA HIMARU

The impulsive force-external loads relationships are reported experimentally on eight adult males by the method providing different actions: soft and hard motion or attached spring on the platform, four jumping down heights of the stand: 15, 33, 67 and 125cm and four additional loads to the body weight: 1, 2, 4 and 8kg. The forces are dealt with as the momentum on the landing motion and apparatus used are multi-component forces plate and 16mm camera. The impulsive force is measured using the planimeter about recorded waves of multicomponent forces exerted in the landing motion over the time of 0.8sec. The results obtained are as follows;

- 1) The impulsive forces are increased on the relation of the logarithmic function proportionally with the height of stand and with the weight of load.
- 2) According to analyses of the landing motion, these angles of the ankle, the knee and the hip are flexed greater in proportion to higher of the stand but no changes of these angles of body segments are showed with weighter of additional loads.
- 3) Taking these results and reference into consideration, absorbable landing motion has been assumed to involve decrement oscillation in internal body segments and to maintain potential using for the next motion.

(J. Physical Fitness Japan 1979, 28: 81~87)

I. 緒 言

生体の緩衝的運動調節を外部に発現された運動現象の中で捉え、その運動特徴とその発現メカニズムの主要因子について考察する時に生体運動の調節的機能の資料が得られるだろう。緩衝的な運動の測定と評価は、「外力に対して生体が反応した反働力を運動量としてとらえ、その大小でもって評価する」といえる。運動量の変化分は力積に等しく、その時の運動状態を示すとすれば、緩衝能の運動的評価は、その運動時の力積を測定して、その大小で評価されよう。従来こうした生体の緩衝能についての研究はほとんどなく¹⁴⁾、生体内の緩衝的モデルとして記述されてきた。そのため、生体諸器官の直列的弾性要素のつながりとして解

釈され、その機能が説明されてきた報告が多い。緩衝能が最もよくあらわれると考えられる運動場面は高所からの「とびおり着地動作」と考えられる⁹⁾。緩衝能測定上の妥当性として、各種着地動作を測定することによって、独立したパフォーマンスを示しているの、測定上着地動作の信頼性や再現性も高いと考えられる。

本研究の目的は、着地動作時に現われる緩衝能を外部負荷の種類と質量によって、どの程度変化するか、その程度と物体と生体との機能差を見出すことにある。さらに物体の力学的な法則とは異なる生体の緩衝的調節機能を見出す資料を集めることである。普遍すれば、この解析によって、生体の運動機能発現法則と運動制御メカニズム解析の基礎が得られるだろう。そして外部からの負荷

* 東京都立大学

Tokyo Metropolitan University

** 東京薬科大学

Tokyo College of Pharmacy

*** 文部省

Ministry of Education

的な外乱をいかに巧みに制御するのか, その運動現象を着地動作の中で見い出そうとした。

II. 方 法

1) 着地動作の規定

被検者は可能な限り柔らかく, 音を出さないように, とびおり着地することを規定した。指定された箇所(足形で示す)に着地し, 静止するように指示した。とびおり台前方 30cm に着地台が置かれ, その台は金属(ステンレス)製のもので, 堅固なものである。床面の弾性は殆ど無視できる。(図 1 参照)

2) 着地動作時の運動量の測定

フォース・プレート(キスラー製)を使用し, ピエゾ効果による圧電変化をチャージアンプにて増幅する¹⁰⁾。それを電磁オシログラフに描出させた。垂直, 左右, 前後方向(それぞれ F_z , F_x , F_y で示す), そして垂直方向のトルクも測定した。三方向の床反力波形の面積を求め(プランメーターにて計算), 合算したものを着地動作時の運動量とした。すなわち, $\sqrt{F_z^2 + F_x^2 + F_y^2} = F_{z+x+y}$ で示されるように F_{z+x+y} を求めて, 運動量とした。なお, 積分計算した時間は 0.8 秒に区切った¹³⁾。

3) 外部負荷

台高の変化と共に着地動作時の運動量が変化す

るので, ジャンプ台の高さを 15cm→33cm→67cm→125cm とほぼ倍増の変化を与えた。位置のエネルギーが変化すれば, 運動エネルギーも変化し, そして着地動作時の運動量にも変化を与えろと考え, 次式を設定した。

$I = W \cdot v$ (I : 運動量, W : 重量, v : 落下速度) この式の W を若干変化させるために体重に錘りを付加する方法をとり, 1kg→2kg→4kg→8kg と増加させた。そのためにウェイト・スーツを用いて, 錘りを身体に密着させ, 振動がおこらないように固定した。(これを加重と表現する)

4) 16mm 映写機によるキネマティックス・アナリシス

外部負荷による動作フォーム, すなわち落下フォーム(とびおり動作)と着地フォームを身体各関節部分の角度変化を中心に分析した。

5) 被検者

着地動作可能な健常な男子 8 人を選んだ。平均体重 56.5kg, 平均身長 166.4cm, 平均年齢は 38 歳であった。

III. 結 果

1) 台高変化による緩衝的着地動作時の運動量と身体各部分の角度変化

被検者中, 典型的なデータ例として, 4 名を選んで, 各被検者ごとの着地動作時の運動量をまと

Fig. 1. Experimental system to analyze absorbability of landing motion

Fig. 2. Relationship between height of jumping down stand and the impulsive force

めたものが図2である。身体各部分の角度変化をまとめたものが図3である。ジャンプ台高を15 cm から125cm へと倍増させ、その時の運動量と角度変化をまとめた。

台高と運動量との関係を調べると、被検者 Ma と Sa の回帰曲線は

$$I_{Ma} = 0.108 \log H + 44.0$$

(I: 運動量, H: 台高)

$$I_{Sa} = 0.071 \log H + 70.0$$

となり、少ない運動量と低い勾配を示した。

他方 Hi と Mu の回帰曲線は、

$$I_{Hi} = 0.160 \log H + 53.5$$

$$I_{Mu} = 0.190 \log H + 60.3$$

となり、多い運動量と高い勾配を示した。すべての被検者において、緩衝的な柔らかい着地動作時の運動量は、台高の対数に応じて比例的に変化することがわかった。

足首、膝、腰部における角度変化は、台高の変化と共により一層身体各部分は深く曲げられ、角度変化も大きくあらわれる傾向がある。特に被検者 Ma と Sa の場合は、67cm の台高によって、急激に大きくなる特徴をもっている。33cm 台高より 67cm への倍増された時に身体各部分の対応はより一層顕著に应答したことを示している。他

Fig. 3. Change of angles of ankle, knee and hip on effect of Height of stand

Fig. 4. Relationship between additional load to the body weight and impulsive force

Fig. 5. Change of angles of ankle, knee and hip on effect of additional load

方被検者 Hi の角度変化が 67cm 台高で 逆に減少し, Mu の変化はあまり増加しなかった。

2) 加重による緩衝的着地動作時の運動量と身体各部分の角度変化

外部から 1, 2, 4, 8 kg の錘りを付加し, 倍増変化された場合, 着地動作時の運動量と身体各部分の角度変化をまとめた。

運動量については, 15cm 台高と 67cm 台高の両条件時について図 4 にまとめ, 角度変化については, 67cm 台高の場合のみ図 5 にまとめた。4 人の被検者について回帰曲線を算出した。その結果, 加重の対数的変化に対応して, 運動量が整数倍に変化することがわかった。ただし, 被検者 Sa のみ, 加重と運動量との関係は一次的な比例直線を示した。その関係式は 67cm 台高で, 被検者 Hi と Mu の場合

$$I_{Hi} = 0.80 \log W + 68.7$$

$$I_{Mu} = 1.77 \log W + 69.3$$

を示した。

被検者 Ma と Sa の場合は,

$$I_{Ma} = 1.56 \log W + 58.1$$

$$I_{Sa} = 1.37 \log W + 71.5$$

の回帰式が得られ, いずれも前者のグループよりも高い勾配を示した。15cm 台高の場合も同じ傾向を示した。

67cm 台高の時の加重の変化と共に, 身体各部分の角度は複雑に変化し, 一定の傾向を示さなかった。被検者 Ma と Sa は 4 kg 負荷の時に小さい角度を示し, 被検者 Hi は 2 kg 負荷のときに大きい角度を示した。各被検者ごとに加重によって, 着地フォームや各身体各部分の角度は大きく変化した。加重による着地動作の変容は, 各個人差が大きいことを示している。

IV. 論 議

1) 着地動作の運動調節学的検討

柔らかく着地することは, 床面上に与える運動量を最小にすることであり, 身体全体の緩衝能が発現された場合と考える。柔らかい着地のために全身を使って動作しようとした場合, 最も強調されるのが両腕の反動的な振り込みと膝関節の屈曲であろう。(図 3, 5 参照) 本実験では, 0.8 秒の時間的な力積を計算した結果であるから, 0.1~

0.2 秒の短時間の場合には, 別の様相を呈すると思われる。Roy 等¹³⁾ は, 0.2 秒を提唱しているが, 著者等は 0.8 秒によって, 真の着地動作全体を評価し得ると考える。着地動作の運動学的な解釈は, 床面に生体が触れた瞬間ではなく, その後の動作を含み, 着地時の衝撃力を柔らげる動作も含むと解釈する¹⁴⁾。0.1~0.2 秒の短時間の力積であれば, その床反力波形(特に垂直方向)の立ち上がり勾配や振幅値が大きくあらわれるに過ぎず, 着地動作の全体像が評価し難いと思われる。

2) 着地動作時の生体応答について

本稿は, フォース・プレート上の着地動作で生体は外部的に振動しないことを仮定した研究であった。しかし実際には身体内部の運動素子が振動現象を起こしていると考えられる。実際の測定でも床面上での振動やはね返りはみられない。しかし, 関節部, 身体全体, 筋系の運動諸器官内で振動現象が存在し, それは上肢や足首, 膝関節が重要な役目を任なっていると考えられる²⁾。一部あらわれている運動現象として, 約 2.5 Hz のおそい振動波形が足の着地後にあらわれている。しかし高い周波数の振動はみられなかった。外部にあらわれた振動がないために理論的な運動量の計算においても反跳係数(e)を 0 とし, 床面上に身体が接触したままの状態を考えて, 力積を計算してきた。すなわち, 外面上非弾性的落下衝突の場合で, 着地前後の速度は不変とした。物体と生体の差を見出すために, 物体の落下現象と生体の着地動作とを比較してみた。物体が床面上に落下すれば必ず, 振動現象が起こる。生体は外部的に振動しないが, その硬さと弾性は床反力波形の勾配で推察されよう⁶⁾。当然, 動的な硬さともいえるが, それに関与しているが, 生体(主に関節部, 骨, 筋系)の弾性と推察される。これを裏付けるのは, 外部にスプリングを付加した時の着地動作の力積量の変化である⁴⁾。勿論, 身体内部で 2~3 度の振動現象は発しているだろう。物体では反跳係数(e)が存在し, 減衰振動をする³⁾。反跳係数 e は,

$$e = \sqrt{\frac{h'}{h}}$$

(h: 最初の高さ, h': 次の高さ)

で示される。それがために物体は衝突後の速度に

比例するわけであるが, 生体では, 着地後の速度を同じとする¹⁾。

$$e = \frac{v_2 - v_1}{u_1 - u_2}$$

ただし, v_1 : 生体の落下速度

v_2 : 生体の着地後の速度

u_1 : 床面の着地前の速度

u_2 : 床面の着地後の速度

この式より, 分子は $v_2 = v_1$ となり, 分母は ∞ となって, 反跳係数 e は 0 となる。このような物体の振動と比較して, はね返りを 0 とすることに問題が生じ, 当然生体内部の諸器官で同じように減衰振動的なはね返り現象が発生していると考えられる¹³⁾。

3) 緩衝的着地動作時の運動量と台高変化

着地動作をすべて柔らかいとはびおり動作に固定し, ジャンプ台高を変化させながら, その時の運動量と足首, 膝, 腰部の角度変化を求め, 台高変化に応じた運動量を調べた。その関係は対数的関係にあり, 一般的に,

$$I = A \log H + B \quad (I: \text{運動量}, H: \text{高さ})$$

で示される。すなわち, 運動量の発現は高さというパラメーターに対して, 対数的な関係で作用するといえる。運動量(力積, 仕事量, 撃力)は, 台高によって比例的に変化し, 身体の運動機能の発現様相を高さの要因から調べられる。

$$I = W \cdot \sqrt{2gh} \quad (h: \text{高さ})$$

の運動方程式で示されるように, I と h とは二次的な比例関係にある。しかし生体の落下着地実験では, 高さ (h) と運動量 (I) とは対数的な比例関係にあるといえる。運動量は上記の式より, h の変化と共に I は h の 2 乗根で決まる。柔らかく着地するために, 台高の増大は, 位置のポテンシャルを増加させることになるので, 運動機能, 緩衝的な運動調節上一種の外乱として作用する。これをいかに巧みに吸収していくのが課題となる⁸⁾。

台高が整数倍に変化するに伴って, 運動量は対数的な加算によって増加する。換言すると位置エネルギー(ポテンシャル)は増加しても, それに比例した運動量の増大はみられない。すなわち, 身体は, エネルギーの一部を身体内部で保存するか, 吸収して, 全ポテンシャルを使用できないことになる⁸⁾。ということは, 生体の保護と安全の

ために必要なことであり, 高所からのとびおり動作に必要な能力といえる。このような能力は, 生体の特徴であり, 高い台高になればなるほど生理学的な運動機能が介入できなくなり, 経験と訓練によって可能な運動生理能力といえよう⁷⁾⁹⁾。

4) 運動量と加重の変化

外部に付加する錘りの量を 1, 2, 4, 8 kg をと整数倍増した場合, 着地動作時の運動量 (0.8 秒間) は加重の対数倍に増加していった。ただ例外として被検者 Sa の一時的な比例関係もみられたが, 他の 7 名の被検者はすべて, 対数関係を示した。 $I = W \cdot \sqrt{2gh}$ の式で, W すなわち体重に加重し, W' と変化させた場合であり, I は W から W' に増加したことによって, 比例的に影響を受ける。しかしながら上式の関係は生体の落下着地動作時の場合には該当せず, 物体の比例関係は生体の対数関係に変わってきた。これは, 台高の変化の場合と同様に, 加重の増加は生体に大きな影響を与え, 錘りの倍増に応じて生体の応答が不可能なことを示しているようである。すなわち, 加重増加によって, 生体は物体に近づく傾向を示し, 運動生理的な機能の発揮がみられないようである。

物体の場合は, $I = W \cdot v$ (v : 落下速度) の式より, W が W' と変化し, $I' = W' \cdot v$ すなわち, $I' = (W + w)v$ (w : 加重錘り) となり, $I' = Wv + wv$ が導かれる⁶⁾。 w の増加によって運動量 I' は wv のみの加算で増加するにすぎない。他方生体の運動量は w の錘り付加によって対数的に倍増していく関係があり, 生体と物体との差が著明である。これは生体にわずかの量の錘りを制御しながら着地することの難しさを示し, 8 kg の錘りでは緩衝的な運動機能の発現が妨げられたことを示すようである。換言すると加重によって, より多くあらわれた運動量を生体内部で吸収することが不可能となったようである。1, 2 kg 程度であればその影響は少なく, 4 kg 以上の加重が限界値ではなかろうかと思われる。

V. 要 約

柔らかい着地動作を実施し, その時の運動量を床反力の力積から評価した。その結果, 外部に各種の負荷を与え, すなわち, 台高の変化と加重錘

りによってとびおり時の位置のエネルギーを増大させた。そして、その時の運動量を測定し、着地動作時の緩衝的運動機能の調節状態を観察した。その結果、次の要約を得た。

1) 0.8秒間の着地動作時の運動量によって、生体の緩衝的な運動調節状態が考察可能となった。

2) 台高の対数的な変化とともに、着地動作時の運動量は比例的に変化し、 $I = A \log H + B$ の回帰式で表現された。そして、足首、膝、腰部の角度は、台高の増大とともに大きく屈曲していった。

3) 外部に錘りを付加することによって、その量の対数変化に応じて運動量が変化し、 $I = A \log (W + w) + B$ の回帰式で表現された。

4) 着地動作時の身体各部分の角度変化は、錘り付加とともに一定の変化を示さず、複雑な身体フォームを発現した。そして錘り付加によって着地動作の個人差を増大させていった。

5) 着地動作において、外部に現われる振動は観察されなかった。

6) 物体と生体との落下実験比較から、生体はとびおり時の位置エネルギーをすべて運動エネルギーに変換しなかった。

7) 生体外部に錘りを付加し、台高を増加させることによって、理論値以上に大きな力積があらわれた。

(受付 昭和54年2月23日)

参 考 文 献

- 1) Alexander, R.McN. and Goldspink, G. (1977): Mechanics and energetics of animal locomotion. Chapman and Hall, London, 168-203.
- 2) Cappozzo, A., Figura, F., Leo, T., and Marchetti, M. (1978): Biomechanical evaluation of above-knee prostheses. Biomechanics V-A, University Park Press, London, 366-372.
- 3) Feynman, R.P., Leighton, R.B. and Sands, M.L., (1977): 力学, 坪井忠二訳, 9版, 岩波, 東京.
- 4) 日丸哲也, 永田 晟, 金本益男, 室 増男, 北 本 拓 (1974): とびおり動作の着地時 shock の研究 (1) — 緩衝作用の過程について —, 東京都立大学体育学研究室紀要, 5, 29-36.
- 5) Jansen, E.C. and Jansen, K.F., (1978): Vis-velocitas-via: alteration of foot-to-ground forces during increasing speed of gait. Biomechanics VI-A, University Park Press, London, 267-271.
- 6) 柿内賢信 (1976): 物理学, 丸善, 東京.
- 7) Lauer, L., (1957): Physiological study of motion. Advan. Manage., 22, 17-24.
- 8) 宮地 力, 小林一敏, 大島義晴 (1978): 着地動作の力学的考察, 第4回キネシオロジーセミナー演資料.
- 9) Miller, D.I. and Nelson, R.C., (1973): Biomechanics of sport. Lea and Febiger, Philadelphia, 53-61.
- 10) Payne, A.H., Slater, W.J., and Telford, T., (1968): The use of a force platform in the study of athletic activities. A preliminary investigation, Ergonomics, 11, 123-143.
- 11) Ramey, M.R. (1970): Force relationships of the running long jump. Med. Sci. Sports, 2, 146-151.
- 12) Ramey, M.R. (1973): Use of force plates for long-jump studies. Medicine and Sport, Biomechanics, III, University Park Press, London, 370-380.
- 13) Roy, B., Youm, Y. and Roberts, E.M. (1973): Kinematics and Kinetics of the standing long jump in 7, 10, 13 and 16 year old boys. Medicine and Sport, Biomechanics, III, University Park Press, London, 409-416.
- 14) 末利 博, 千駄忠臣 (1976): 調整力の指標としての緩衝能の発達と緩衝能テストの検討, 体育科学, 4, 142-149.
- 15) 山下 忠, 加藤了三, 矢田部皓史 (1973): 直立および歩行時での垂直力作用点の移動パターン, バイオメカニズム (2), 東京大学出版会, 313-320.