

## 垂直跳び踏み切り動作において下肢関節が 発揮するトルクとパワー

### TORQUE AND POWER EXERTED BY THREE JOINTS IN LOWER EXTREMITIES DURING TAKE-OFF PHASE OF VERTICAL JUMP

桜井伸二\*, 池上康男\*, 矢部京之助\*

Shinji SAKURAI \*, Yasuo IKEGAMI \*, Kyonosuke YABE \*

Motion in a take-off phase of a maximal vertical jump starting from a static squat position was analyzed. Changes in torque and power of hip, knee and ankle joints were determined during the take-off phase with the help of anthropometric data, kinematic data obtained from position sensor system, and four segment mechanical model. Peak torque of hip, knee and ankle joints were 210 Nm, 194 Nm, and 213 Nm, respectively. Work done by the extensor muscles at the hip, knee and ankle joints through the take-off phase were 103 J, 113 J, and 90 J respectively. These results suggest the importance of all three major leg extensor muscle groups to increase the mechanical energy of the whole body. It is concluded that many more selective studies will be necessary before it is possible to clarify the role of each joint in the take-off phase of the vertical jump.

#### 【はじめに】

垂直跳びの跳躍高は全身の瞬時パワー発揮能力の良い指標とされ、体力テストの項目にも含まれている<sup>(3)</sup>。この垂直跳び動作に関して Luhtanen & Komi<sup>(6)</sup>は各関節でおきる運動を個別に行なわせることにより、また Ae & Shibukawa<sup>(1)</sup>はフィルム分析より求めた身体各部の運動量の変化に相対運動の観点を導入することにより、それぞれ身体各部が垂直跳びのパフォーマンスに及ぼす貢献度について考察している。

垂直跳び動作においても動作のみならず骨格筋の活動である。一つの関節について協同筋と拮抗筋の作用が総合されて関節トルクとなり、さらに複数の関節の角度変化が総合された結果が「動き」となって表出される。それゆえ、垂直跳びの動作においてそれに関与する関節が発揮するトルクやパワーの変化を求めることは、バイオメカニクスの課題として非常に重要なものである。特に

踏み切り動作における各関節の貢献度を求める際にはこの関節トルクや関節パワーの考え方に基づくことが重要であると考えられる。

Hubley & Wells<sup>(4)</sup>はフィルム分析法により求めた踏み切り動作中の下肢各関節のトルク変化とそれぞれの仕事量については報告しているが、そのパワー変化については述べていない。また Van Ingen Schenau, et al<sup>(8)</sup>は圧力盤とフィルム分析法を併用して、足関節発揮パワーのピーク値が 2499watt にも及ぶことを報告しているが、他の関節については何ら明らかではない。またこれらの研究において得られた結果の精度はいずれも明らかではない。

本研究の目的は、垂直跳びの踏み切り動作中の下肢の関節が発揮するトルクやパワーの変化を求めることにより、跳躍動作における下肢関節のそれぞれの貢献度を検討することである。

\*名古屋大学総合保健体育科学センター

\*Reserch Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University

〔方 法〕

被検者は成人男子1名(30yrs, 170 cm, 60.0 kg)であった。被検者に圧力盤(キスラー社)の上で垂直跳びを行なわせた。両手を腰の後ろで組み、膝関節を予め90度前後に曲げ、反動や腕の振り上げなどはさせず最大努力で跳び上がるよう指示した。この時、被検者の肩・腰(大転子)・膝・外果・第5中足指節関節点に発光ダイオードを固定し、ポジションセンサシステム(セルコム社)を利用して動作中の各点の位置変化を求めた。ポジションセンサシステムのカメラは被検者の左側方5.5m, レンズ高1.1mに光軸が各点の運動平面と垂直になるよう留意して設置し、サンプリング周波数は52.08 Hzとした。

〔頭+頸+両腕(手を含む)+体幹部〕, 〔両大腿部〕, 〔両下腿部〕, 〔両足〕をそれぞれ1個の剛体として扱い、身体は以上の4つの体節より成るものとした〔図1〕。それゆえ本研究では、関節トルク, パワー等については両側の合計した値で示されることになる。

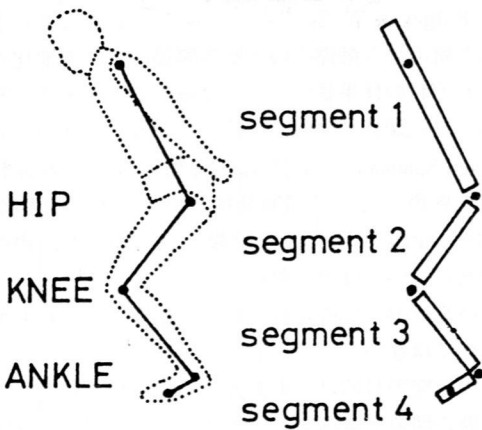


Fig. 1. Four segment mechanical model with three joints.

各点の座標値, 各体節の角度のデータ列を数値微分し, 速度, 加速度, 角速度, 角加速度を求め, その後に4.34 Hzのデジタルフィルターを用いて各データ列の平滑化を行なった<sup>(7)(10)</sup>。各体節

について運動方程式を立て上部の関節から順にその発揮する関節トルク等を求めた。関節トルクとその関節角速度を乗ずることにより, 関節パワーを求めた。尚, 身体計測学的な変数は Dempster<sup>(2)</sup>および Widule<sup>(9)</sup>の報告に基づき, また〔頭+頸+両腕(手を含む)+体幹部〕の部分についてはそれらの値をもとに合成し,

- 重心位値(股関節-肩関節) : 64.0%
- 質量比 : 67.8%
- 重心点回りの慣性モーメント : 2.173kg.m

とした。

圧力盤より得られた床反力に関する信号は, PCMデータレコーダ(NF回路設計ブロック社, RP-882)で記録し, ミニコンピュータ(Nova-01, データゼネラル社)を用いて100HzでAD変換した。これをポジションセンサシステムから得られた情報の信頼性の検討を行うために用いた。

〔結 果〕

鉛直方向の床反力の変化について, 圧力盤から得られたデータとポジションセンサシステムを用いて得られたデータを比較し, 図2に示した。圧力盤の記録から求めた離地は, この図で1.68秒の時点であった。離地から離地中, 着地にかけて, 両データの間にはやや食い違いが見られた。圧力盤のデータを基準とすると, ポジションセンサシステムを用いて力学的に求めたデータに, やや誤

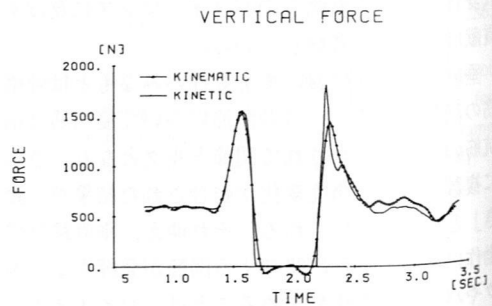


Fig. 2. Comparison of vertical floor reaction force during squat jump between force platform technique (kinetic) and kinematic technique with Selspot System (kinematic).

差が生じていることが認められた。しかし本研究で対象としたところの、離地に向かって身体を大きく加速する踏み切りの局面では、両者はほぼ一致していた。

図2と同じ被検者の同じ試行について、踏み切り動作中の(A)関節角度、(B)関節角速度、(C)体節の機械的エネルギー、(D)関節トルク、(E)関節パワー、(F)鉛直方向床反力の変化を図3に示した。なお、関節トルクについては関節を伸展させる方向を正にした。

各関節を予め曲げ、準備姿勢をとった状態で、各関節には60・100N・m程度のトルクが加わっていた。上方へ動き始める際には、各関節の伸展トルクはほぼ同時期に増加を始めた。トルクの最大値はそれぞれ股関節210N・m、膝関節194N・m、足関節213N・mで、各関節で大きな違いは認められなかった。足関節のトルク発揮が離地直前まで最も長く続いていた。

各関節のパワー発揮は離地直前の約0.2秒間にその大部分が行なわれていた。パワーが発揮される順序は足-膝-股関節と、下位の関節より順に増大を始めていたが、その時間的なずれは小さなものであった。パワーのピーク値は股関節1134Watt、膝関節1220Watt、足関節565Wattであった。足関節のピークパワーが最も小さいが、発揮時間が長かった。全身のパワー発揮の最高値は2897wattであった。このパワーの変化から、数値積分により各関節がなした仕事を求めたところ、それぞれ股関節103J、膝関節113J、足関節90Jであった。

【考 察】

ポジションセンサシステムのデータの力学的な分析によって求められた鉛直方向床反力を、圧力盤からの信号と比較すると、特に離地および着地の瞬間で両者の差は大きかった。これはその瞬間の信号の周波数成分がかなり高く、ポジションセンサシステムのデータが平滑化により歪められたためと考えられる。しかしながら、本研究で対象とした踏み切りの動作中においては、両者はよく一致していた。小林<sup>(5)</sup>は身体各部に装着した加

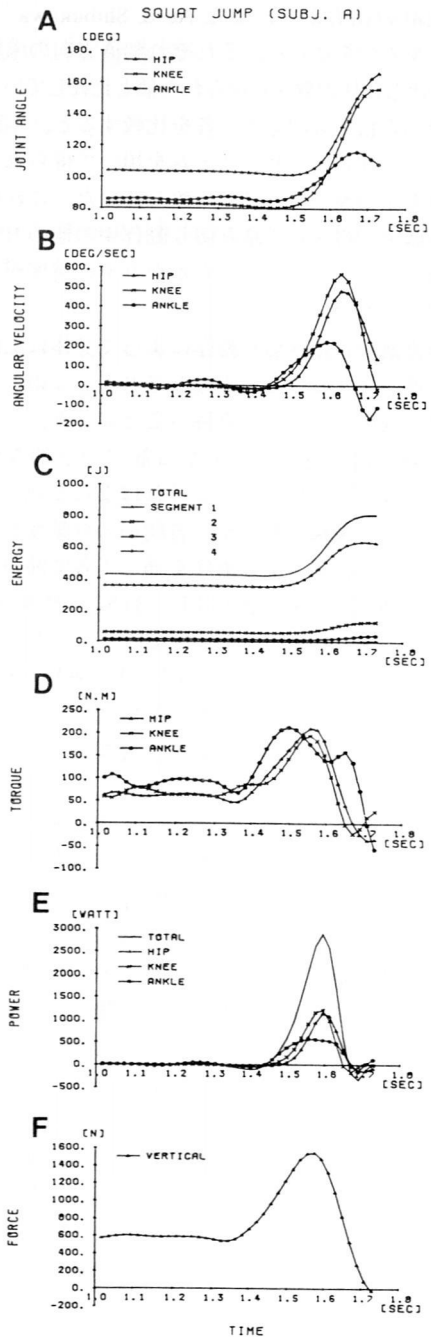


Fig. 3. Changes in (A) joint angle, (B) joint angular velocity, (C) mechanical energy of each segment, (D) joint torque, (E) joint power and (F) vertical floor reaction force during take-off phase in the squat jump. The instant of take-off lies at 1.68 sec.

速度計の出力から、また Ae & Shibukawa<sup>(1)</sup> はフィルム分析法から、それぞれ鉛直方向の床反力を算出し、圧力盤から得られた値と比較している。本研究の結果も加えて三者を比較すると、本研究でポジションセンサシステムを用いて得られた値が最も圧力盤の値と良く一致していた。これにより本研究で得られた踏み切り動作中の他の力学的変数（パワー、トルク）もかなりその精度が高いと考えられた。

垂直跳びは踏み切り動作によって身体に上向きの速度を与えることによりなされる。このことは身体が運動エネルギーを持つことになり、その為には各関節の運動にあずかる筋は力学的な仕事（エネルギー発揮）をしなければならない。このエネルギー発揮の観点から各関節の貢献度を比較したところ、踏み切り動作を通じて各関節が発揮する仕事量は、股関節103 J（34%）、膝関節113 J（37%）、足関節90 J（29%）と、三者ともほぼ同程度の役割を果たしていることが推察された。

これにたいして、Hubley & Wells<sup>(4)</sup> は膝関節で発揮される仕事量が49%で、股関節（28%）や足関節（23%）より大きな貢献をしていたこと、およびその膝関節の貢献度も20-72%と大変大きな個人差があったことを報告している。また Van Ingen Schenau, et al<sup>(8)</sup> は足関節で 2499watt の瞬時パワーが発揮されたことを報告している。この値は本研究で得られた565wattの4.4倍の値であり、主としてこの大きな差は足関節トルクよりもむしろ足関節角速度の違いによっていた。またパワー発揮の時間的な関係については、小林<sup>(5)</sup> は腕の振り上げ動作を伴った垂直跳びにおいて股関節、膝関節、足関節の順でパワー発揮が開始されると述べている。本研究では時間的なずれは僅かではあるが、これとは全く逆の結果が得られた。

以上に述べた先行研究と本研究で得られた結果の差異は、先に述べた各研究の精度に基づく部分もあると考えられる。また、Hubley & Wells<sup>(4)</sup>、Van Ingen Schenau, et al<sup>(8)</sup> の被検者がバレーボ

ール選手であること、小林<sup>(5)</sup> が対象とした動作は腕の振り込み動作を伴った垂直跳び動作であること、といった被検者や動作の違いによるのかもしれない。今後は対象者を広げ、本研究と同様の方法で解析を進める必要があると考えられた。

また、図3(C)で離地時において全身の機械的エネルギーが増加を続けている時点で(E)では既に各関節のパワーが0となっていた。このためには他にパワーの発揮源を考えねばならない。今後は中足指節関節を主とした足骨間の関節がなす仕事量等も考慮して検討を進めていく必要があろう。

## 【文 献】

- 1) Ae, M. and K. Shibukawa : A biomechanical method for the analysis of the contribution of the body segments in human movement. With an example of vertical jump take-off. Jap. J. Phys. Educ. 25 : 233-243, 1980.
- 2) Dempster, W. T. : Space requirements of the seated operator. Write-Patterson Air Force Base, Ohio, WADC TR 55-159, 1955.
- 3) 春山国広 : パワーの診断と評価, 日本体育学会測定評価専門分科会 (編), 体力の診断と評価, 大修館書店, 1977, pp73-82.
- 4) Hubley, C. L. and R. P. Wells : A work-energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump performance. Eur. J. Appl. Physiol. 50 : 247-254, 1983.
- 5) 小林一敏 : 跳のパワーの発生位相, 身体運動の科学 I, Human Power の研究, 杏林書院, 1974, pp.86-98.
- 6) Luhtanen, P. and P. Komi : Segmental Contribution to forces in vertical jump. Eur. J. Appl. Physiol. 38 : 181-188, 1978.
- 7) 桜井伸二, 池上康男 : フィルムデータの平滑化法について, 総合保健体育科学, 8 : 95-102, 1985.
- 8) Van Ingen Schenau, G. J., M. F. Bobbert, P. A. Huijing and R. D. Woittiez : The instantaneous torque-angular velocity relation in planter flexion during jumping. Med. Sci. Sports Exerc., 17 : 422-426, 1985.
- 9) Widule, J. : Segmental moment of inertia scaling procedure. Res.Quart. 47 : 143-147, 1976.
- 10) Winter, D. A. : Biomechanics of human movement. John Wiley & Sons, New York, 1979, PP.25-39.

(昭和61年1月26日受付)