

## 立幅跳び踏切時における各関節でのパワー発揮の特徴

～垂直跳びとの比較から～

鳥海清司、天野義裕\*、寺澤健次\*

## The characteristics of the power exerted by each joint during take-off phase of standing long jump

～comparing with vertical jump～

Kiyoshi Toriumi, Yoshihiro Amano, and Kenji Terasawa

The purpose of this study was to determine the contribution of each joint to the power for standing long jump performance and elucidate the difference from that for vertical jump. The subjects were twenty male college students ( $19.6 \pm 0.7$  yrs,  $174.7 \pm 7.2$  cm,  $65.5 \pm 7.9$  kg) and performed the jumps with the maximum effort on the force-platform, by which the grand reaction force of take-off was obtained. The motion was simultaneously videotaped of "Hi-Speed" mode (200fps), for estimation of the power in each joint by means of link segment model. The results were as follows.

- 1) The link segment model was valid, because the grand reaction forces estimated through the model almost coincided with those obtained by the force-platform. This supported that the joint power calculated in this study was valid.
- 2) The power exerted by whole body during take-off in standing long and vertical jumps were  $1516 \pm 294.8$  (watt) and  $1210 \pm 247.0$  (watt), respectively, showing that standing long jump required more power than vertical jump.
- 3) Most of the power was exerted by lower extremities.
- 4) The contribution of the hip joint to total power was 52.3% in vertical jump and similarly 59.6% in standing long jump. In contrast, however, the contribution of the knee joint was 32.3% in the former and only 4.3% in the latter, suggesting that the knee joint is little included in standing long jump performance. The ankle joint exerted 17.5% of the total power for vertical jump while 37.2% for standing long jump.

(Res. J. Phys, Educ., Chukyo Univ., 30, 23-33, 1988)

## 結 言

様々なスポーツの場面、例えば、剣道の踏み込み、サッカーのゴールキーパーがボールに飛

びつくとき、ラグビーのセービング、競泳の飛び込みなどにおいて、短時間で水平方向に移動する動作が数多くみられる。

立幅跳びはこのような短時間に大きな力を発揮して水平方向に移動する動作の基本動作と考えられる。

一般に身体を遠くに移動させるためには、身

\*愛知教育大学

体重心にできるだけ大きな速度を与えることが必要である。身体重心に大きな速度を与えることは、身体重心にできるだけ大きな力を、できるだけ長い時間加えることによって可能である。つまり、身体重心に対して大きな仕事をすることが必要である。しかしスポーツ場面においては、動作時間が短いことが要求される。したがって、短時間に大きな仕事をしなければならないことになる。そこで単位時間あたりの仕事量、つまりパワー（P）を大きくすることが重要な問題になる。

これまで跳躍とパワーについての研究は、垂直跳びについて数多くなされてきた<sup>3),4),5),7),13),14),15),16)</sup>。

しかし立幅跳びについては、Lindeburg, A. F.

et. al.<sup>9)</sup> の脚伸展パワーとの関連についての報告のほかは、あまりみられない。

そこで本研究では、リンクセグメントモデルを用いて、立幅跳び踏切時における各関節のPを推定した。そして、各関節のPについて立幅跳びと垂直跳びを比較し、立幅跳びにおけるP発揮の特徴を検討した。

## 方 法

### 1) 被検者

本研究に参加した被検者は、健康な男子大学生20名であった。被検者の身長、体重、体節長を実測し、その値を被検者の年齢とともに表1に示した。

表1 被検者の身体特徴

No.	年齢 (歳)	身長 (m)	体重 (kg)	体節長(m)							
				手	前腕	上腕	頭・頸	体幹	大腿	下腿	足
1	19	1.756	86.2	0.147	0.236	0.317	0.339	0.465	0.454	0.417	0.118
2	20	1.684	55.8	0.146	0.232	0.306	0.332	0.480	0.399	0.396	0.159
3	19	1.701	64.0	0.147	0.251	0.312	0.345	0.455	0.408	0.424	0.120
4	20	1.682	66.4	0.139	0.252	0.271	0.342	0.502	0.394	0.386	0.130
5	19	1.823	65.6	0.152	0.278	0.323	0.343	0.493	0.498	0.420	0.134
6	21	1.752	67.8	0.139	0.235	0.298	0.331	0.497	0.464	0.398	0.123
7	21	1.742	71.0	0.143	0.212	0.316	0.315	0.463	0.472	0.419	0.125
8	20	1.770	62.4	0.146	0.234	0.339	0.337	0.530	0.429	0.408	0.130
9	20	1.715	61.8	0.145	0.240	0.318	0.324	0.490	0.433	0.408	0.132
10	19	1.700	56.0	0.155	0.247	0.290	0.316	0.497	0.413	0.410	0.122
11	20	1.961	78.2	0.155	0.286	0.341	0.355	0.611	0.457	0.470	0.149
12	20	1.676	56.6	0.136	0.219	0.308	0.298	0.516	0.419	0.373	0.118
13	19	1.738	63.2	0.143	0.240	0.321	0.332	0.534	0.407	0.398	0.137
14	20	1.804	57.8	0.150	0.255	0.319	0.344	0.520	0.454	0.414	0.129
15	19	1.828	67.4	0.153	0.256	0.330	0.322	0.550	0.451	0.428	0.135
16	19	1.653	54.0	0.140	0.232	0.303	0.318	0.465	0.421	0.381	0.126
17	19	1.722	69.6	0.152	0.237	0.285	0.347	0.515	0.395	0.393	0.125
18	19	1.835	76.4	0.153	0.259	0.333	0.337	0.550	0.438	0.442	0.140
19	19	1.730	66.0	0.143	0.256	0.318	0.328	0.469	0.440	0.425	0.159
20	20	1.665	63.4	0.141	0.242	0.292	0.322	0.480	0.411	0.390	0.114
平均	19.6	1.747	65.5	0.146	0.245	0.312	0.331	0.504	0.433	0.410	0.131
S.D.	0.7	0.072	7.9	0.006	0.017	0.018	0.013	0.037	0.028	0.022	0.012

### 2) 動作とその記述

被検者はキスラー社製フォースプレート上で両肢を挙上した直立の姿勢から反動・振込動作をもちいて、最大努力で立幅跳びおよび垂直跳

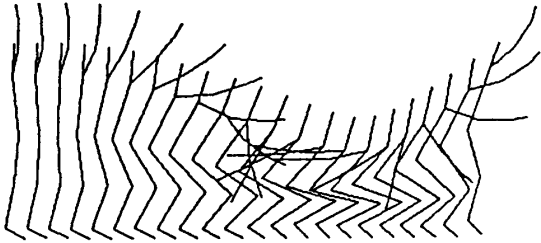
びをおこなった。踏切動作のスティックピクチャーを図1に示した。

図2に実験の概要を示した。

踏切動作中の床反力をフォースプレートで検

出すると同時に、その動作をナック社製 Hi-Speed Video (200fps)で撮影した。

垂直跳



立幅跳

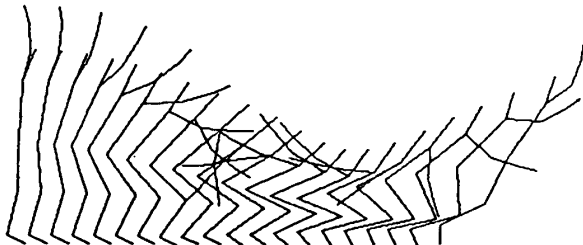


図1 跳躍動作のスティックピクチャー

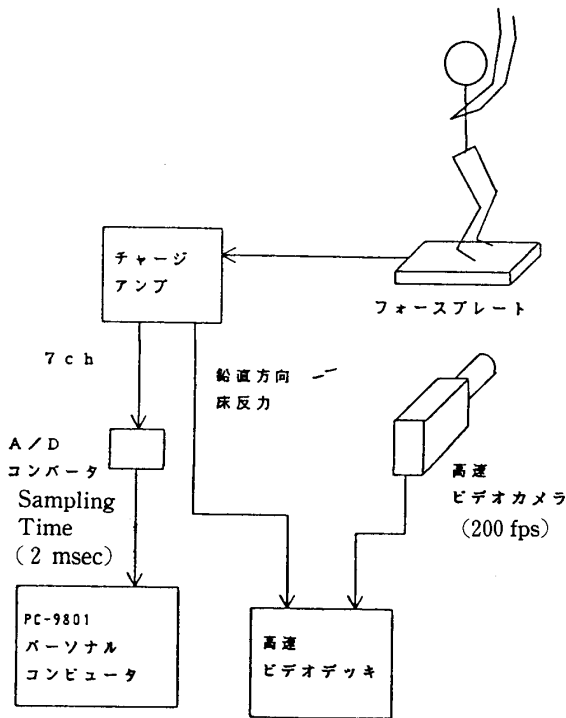


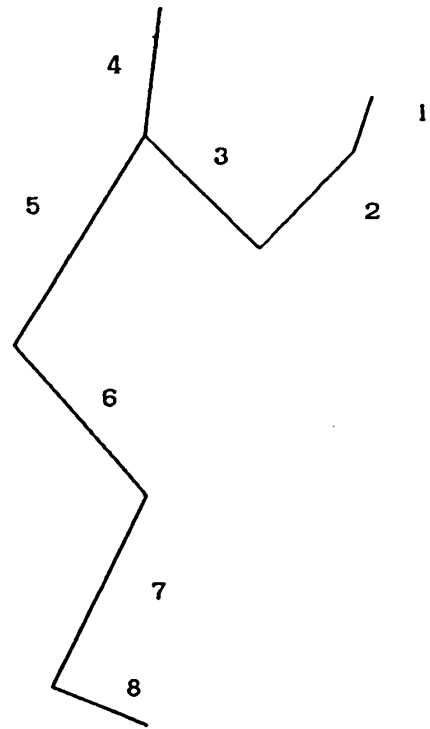
図2 実験の模式図

立幅跳びのパフォーマンスを跳躍距離（踏切時の足先から着地時のかかとまでの距離）と決め、メジャーで直接測定した。一方、垂直跳びでは床反力から算出した身体重心の移動距離をパフォーマンスとした。

3) データの処理

① 身体のモデリング

本研究にもちいた動作は、矢状面2次元平面内で行われると仮定した。そこで身体は矢状面に対して左右対称であり、いくつかの剛体がつながったものと仮定した。図3に頭・頸、体幹、手、前腕、上腕、大腿、下腿、足の8個の体節からなる身体のリンクセグメントモデルを示した。また各関節は1自由度を持つピンジョイント

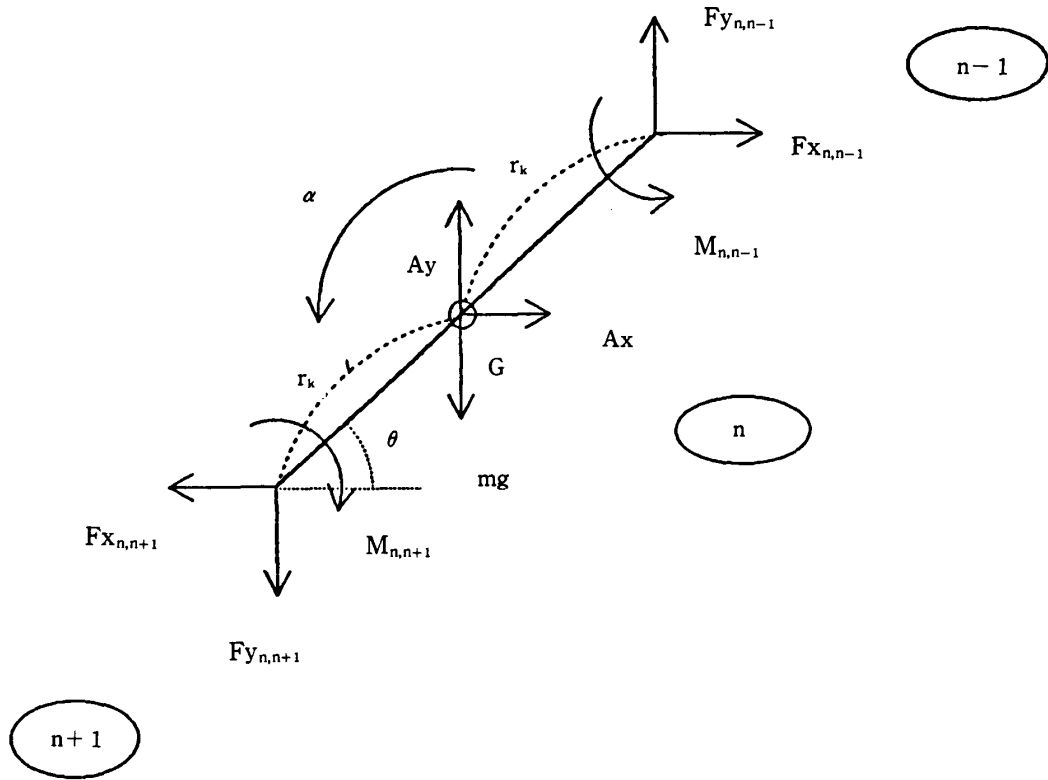


- 1 : HAND
- 2 : FOREARM
- 3 : UPPER ARM
- 4 : HEAD & NECK
- 5 : TRUNK
- 6 : THIGH
- 7 : SHANK
- 8 : FOOT

図3 身体のモデリング

トであるとした。各体節の質量、重心位置、慣性モーメントなどの身体係数は、Dempster<sup>2)</sup>を参考にし、Winter<sup>18)</sup>のもちいた方法に従っ

て算出した。ただし、上・下肢の各体節の係数は、左右の体節を合わせた値であった。



$F_{X_{i,j}}, F_{Y_{i,j}}$  :  $j$  から  $i$  に作用する力

$M_{i,j}$  :  $j$  から  $i$  に作用するトルク

$G$  : 体節重心

$\alpha$  : 角加速度

$A_x, A_y$  : 加速度

$m$  : 体節質量

$g$  : 重力加速度

$r_k$  :  $G$  から  $k$  側の体節端までの距離

$\theta$  : 体節が水平面となす角度

$$F_{X_{n,n+1}} = -m \cdot A_x + F_{X_{n,n-1}}$$

$$F_{Y_{n,n+1}} = F_{Y_{n,n-1}} - m \cdot (g + A_y)$$

$$M_{n,n+1} = -M \cdot I \cdot \alpha + M_{n,n-1} - F_{X_{n,n+1}} \cdot r_{n+1} \sin \theta - F_{X_{n,n-1}} \cdot r_{n-1} \sin \theta + F_{Y_{n,n+1}} \cdot r_{n+1} \cos \theta + F_{Y_{n,n-1}} \cdot r_{n-1} \cos \theta$$

図4 剛体  $n$  における運動方程式と記号の定義

## ② 動作の解析

動作を撮影したVideo画像から、被検者の各体節端の座標を1/100 sec間隔で数値化した。この座標データをデジタルフィルター（遮断周波数：立幅跳び、4.55 Hz、垂直跳び、4.10 Hz）をもちいて平滑化した。この平滑化した座標データを基にして体節重心座標、速度、加速度、関節間力、関節トルクなどを算出した。関節間力、関節トルクの算出にあたってはWinter<sup>18)</sup>を参考にして、各体節について運動方程式を構築し（図4）、上部の体節から下方の体節に向かって順次に解いて求めた。ただし、頭・頸、手の自由端においては、力、トルクはともに働かないものとした。また、足先はナイフエッジ状であるとして、トルクは働かないとした。

## ③ 床反力の解析

フォースプレートから得た床反力は、2 msec間隔でサンプリングし、フロッピーディスクに

保存した。保存したデータは後に、モデルから推定した床反力と比較した。

## ④ パワーの算出

パワー（P）は、次式によって求めた。

$$P_i = M_i \times \omega_i$$

$P_i$  : i 関節のパワー

$M_i$  : i 関節のトルク

$\omega_i$  : i 関節角速度

Pは各関節の伸展方向を正とした。

また、振込動作開始後に身体重心が最下点に達した時点から離地までを踏切動作とした。そして踏切動作中のPを台形公式により数値積分し、平均のパワー（ $\bar{P}$ ）を算出した。

## ⑤ 貢献度の算出

前進の $\bar{P}$ に対する各関節の $\bar{P}$ の割合を貢献度とし、以下の式のように計算した。

$$(\text{貢献度}) = \frac{(\text{各関節の}\bar{P})}{(\text{全身の}\bar{P})} \times 100 (\%)$$

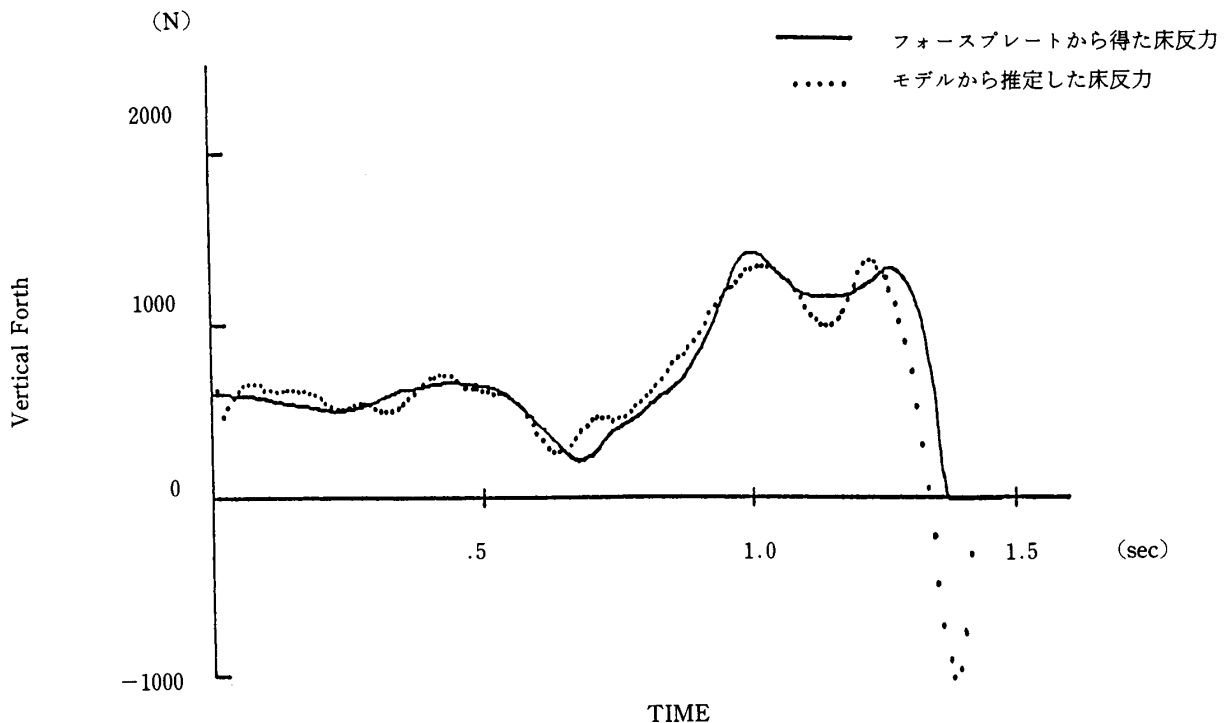


図5・A モデルから推定した床反力とフォースプレートから得た床反力の比較（垂直跳の鉛直方向）

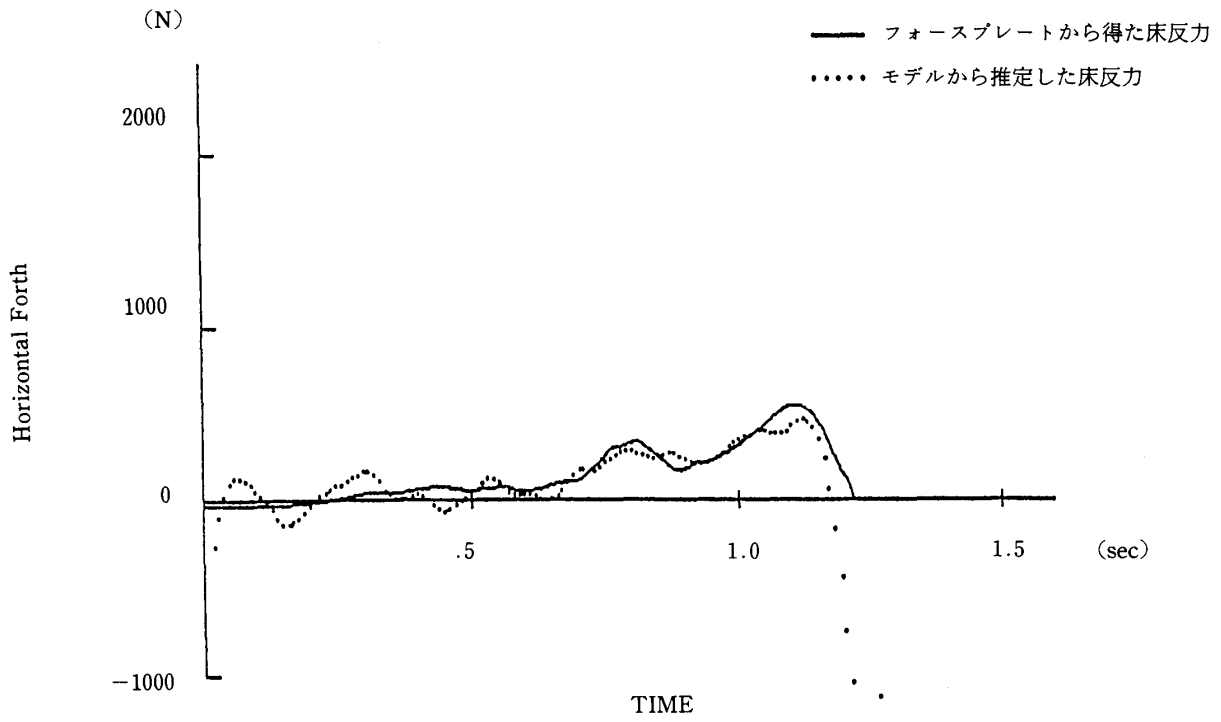


図5・B モデルから推定した床反力とフォースプレートから得た床反力の比較（立幅跳の水平方向）

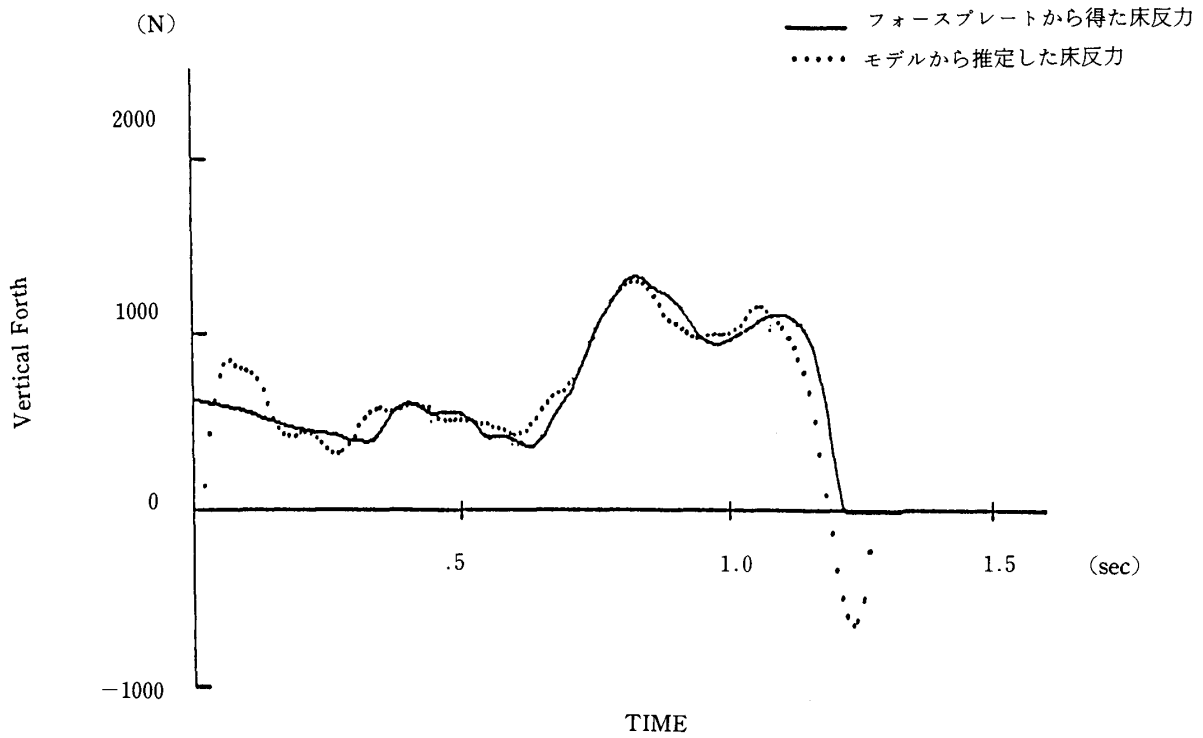


図5・C モデルから推定した床反力とフォースプレートから得た床反力の比較（立幅跳の鉛直方向）

#### 4) モデルの精度の検討

フォースプレートから得た床反力とモデルから推定した床反力を、立幅跳び（鉛直方向、水平方向）・垂直跳び（鉛直方向）について、それぞれ比較した（図5・A、B、C）。

フォースプレートから得た床反力を基準にすると、モデルから推定した床反力は、細かい振動を示していた。これはモデルから推定した床反力が位置データを2階微分して得たデータであり、大道ら<sup>10),12)</sup>が指摘するように、微分操作によって誤差の高周波成分が増幅されたためであろう。また特に、離地の瞬間に大きな歪があった。これには2つの原因が考えられる。1つは大道ら<sup>11)</sup>も指摘するように、本研究で対象とした動作が単発的動作であり、データの両端が不連続なために起きた。もう1つは、離地瞬間の床反力波形が矩形波のようになっており、ディ

ジタルフィルタを矩形波にたいしてもちいたときに起こるGibbsの現象<sup>6)</sup>のために起きた。

しかし全体的には、モデルから推定した床反力はフォースプレートから得た床反力とよく一致していた。

このことから本研究で用いたモデルは妥当であると判断した。したがって、本研究で扱うパワーも妥当であると判断した。

## 結 果

本研究の被検者の立幅跳び・垂直跳びのパフォーマンスの平均値はそれぞれ $2.322 \pm 0.229$ 、 $0.464 \pm 0.068$  (m)であった。

図6に各関節と全身の $\bar{P}$ を示した。全身の $\bar{P}$ は立幅跳び・垂直跳びそれぞれ $1516 \pm 284.8$ 、 $1210 \pm 247.8$  (watt)であった。また各関節の $\bar{P}$

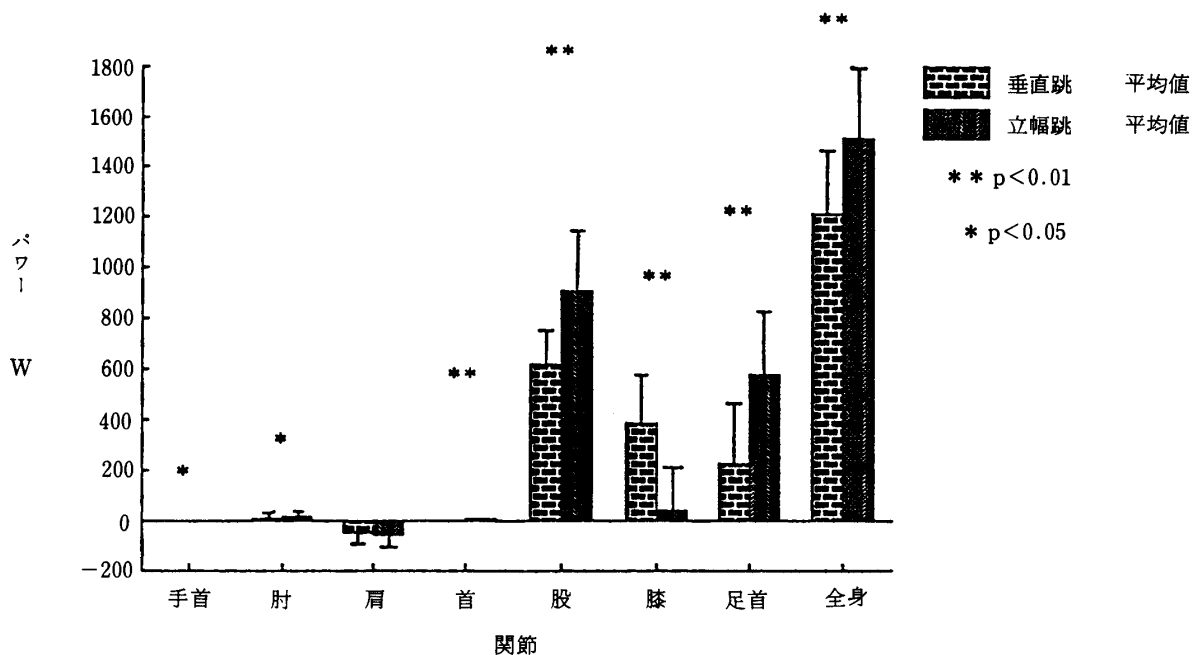


図6 各関節のパワー値

は立幅跳び、垂直跳びそれぞれ手関節 $3 \pm 1.9$ 、 $2 \pm 1.0$  (watt)、肘関節 $21 \pm 8.2$ 、 $14 \pm 9.3$  (watt)、肩関節 $-51 \pm 46.5$ 、 $-42 \pm 43.5$  (watt)、頸関節 $9 \pm 8.6$ 、 $1 \pm 7.3$  (watt)、股関節 $907 \pm 231.8$ 、 $623 \pm 124.7$  (watt)、膝関節

$46 \pm 178.8$ 、 $384 \pm 177.0$  (watt)、足関節 $580 \pm 253.1$ 、 $228 \pm 232.5$  (watt)であった。各関節の $\bar{P}$ では、肩関節、膝関節を除く全ての関節で、立幅跳びが垂直跳びより有意に大きかった。膝関節においては垂直跳びが立幅跳びより有意に大

きかった。

図7に全身に対する各関節のPの貢献度を示した。垂直跳びでは股関節、膝関節、足関節それぞれ52.3、32.3、17.9%、立幅跳びでは59.

6、4.3、37.2%であった。垂直跳び・立幅跳びともに貢献度のほとんどは下肢の関節がしめていた。また、最も貢献度が大きかったのは股関節であった。

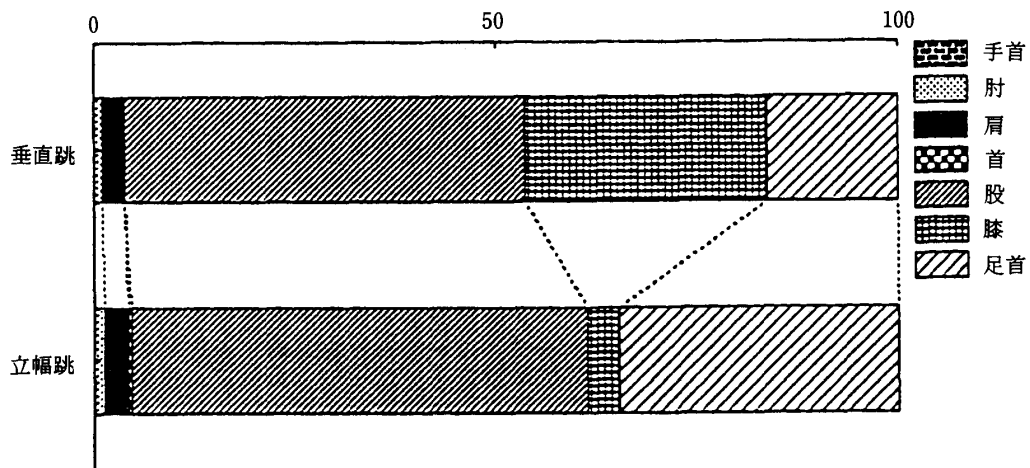


図7 パワーへの各関節の貢献度

貢献度のほとんどをしめた下肢の関節（股関節、膝関節、足関節）について、被検者No. 4, 15

の立幅跳びと、垂直跳びの踏切動作時の関節角速度、トルクとパワーの経時的变化について、

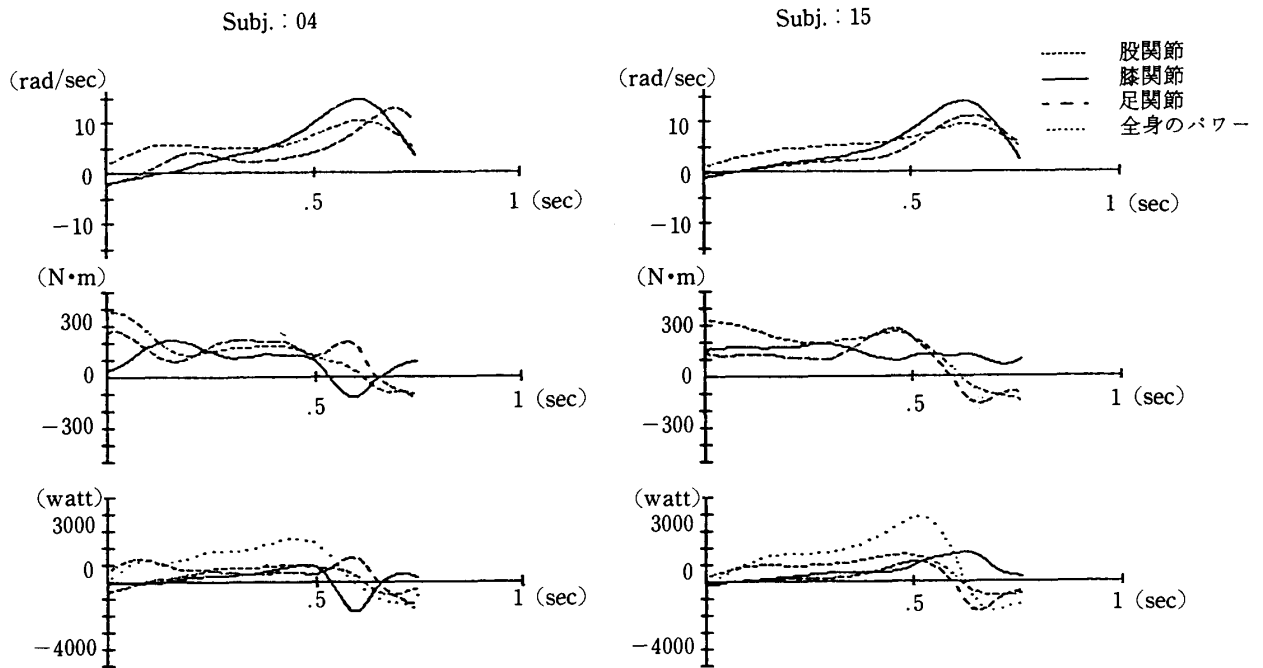


図8・A 垂直跳踏切時の下肢関節の角速度，トルク，パワー



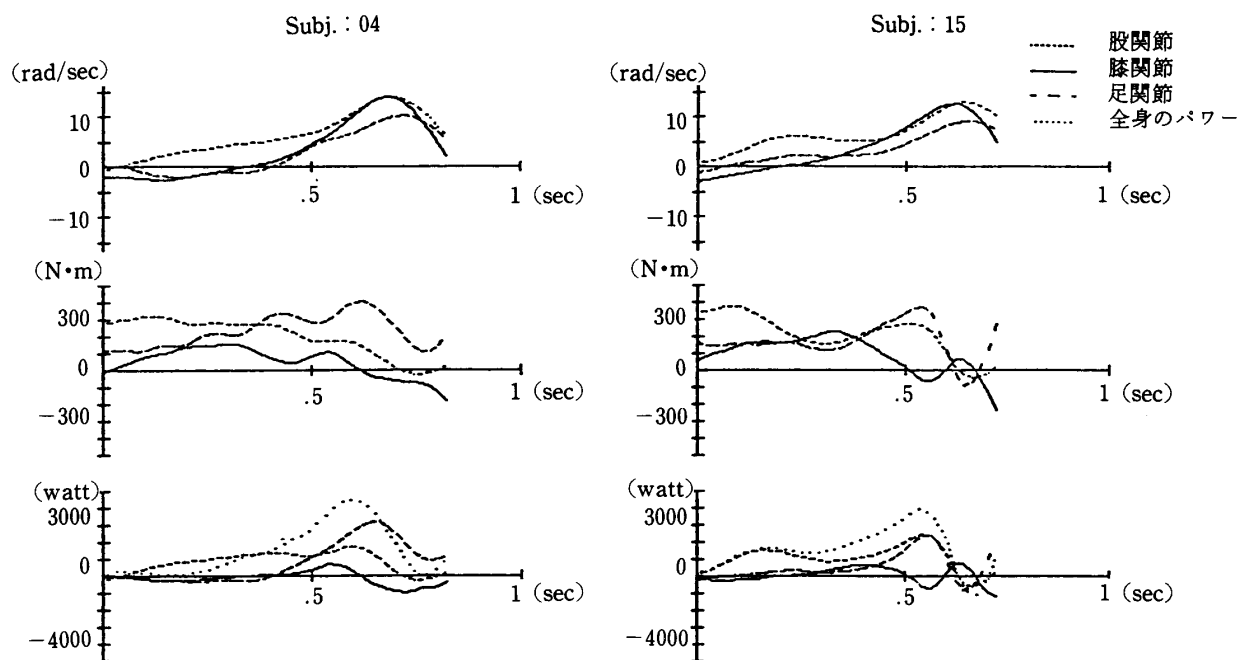


図8・B 立幅跳び踏切時の下肢関節の角速度，トルク，パワー

各々二例を図8・A、Bに示した。関節角速度は、立幅跳び・垂直跳びともに全ての関節で離地に向かって大きくなった。トルクは膝関節で、立幅跳び・垂直跳びの間に違いがあった。前者では離地時にトルクが低下したが、後者ではほぼ一定のトルクを維持していた。パワーは、立幅跳びでの膝関節を除く垂直跳び・立幅跳びでの各関節で、いずれも離地に向かって大きくなった。しかし立幅跳びでの膝関節では、パワーは常に0に近い値を示した。

## 考 察

垂直跳び・立幅跳びの踏切時における全身の $\bar{P}$ はそれぞれ $1210 \pm 247.8$ 、 $1516 \pm 284.8$ (watt)であった。金子ら<sup>7)</sup>は垂直跳び踏切時の $\bar{P}$ を床反力から算出し、 $1392.5 \pm 367.2$  (watt)、 $n = 211$ と報告した。また加納ら<sup>8)</sup>は立幅跳び踏切時の $\bar{P}$ を床反力から算出し、 $1205 \pm 203.7$  (watt)、 $n = 8$ と報告した。いずれも本研究の結果との間に有意な差があった。これは、その算出方法の違いによると考えられる。すなわち本研究では各関節の $\bar{P}$ の和として算出し、金

子ら<sup>7)</sup>、加納ら<sup>8)</sup>は床反力から $\bar{P}$ を算出しているためであろう。

$\bar{P}$ のほとんどは、垂直跳び・立幅跳びともに下肢の関節によって発揮されたものであった。これは、図7に示したように貢献度からも明らかであった。阿江ら<sup>1)</sup>は垂直跳び踏切中の各体節の運動量に関して、下肢の貢献度が大きいことを報告している。本研究の結果は、これと一致していた。下肢には大殿筋、大腿四頭筋等の大きな力を発揮することが可能な筋が存在している。このため跳躍の際には、下肢のはたす役割が大きくなると考えられる。

下肢の各関節の貢献度についてみると、垂直跳びでは股関節、膝関節、足関節それぞれについて、桜井ら<sup>14)</sup>は、34、37、29%と報告している。また、Hubbey & Wells<sup>5)</sup>は27.5、49.0、23.5%と報告している。本研究の結果は股関節、膝関節、足関節それぞれ52.3、32.3、17.5%であり、先行研究の値と差があった。しかし、先行研究での動作はスクワットジャンプであり、本研究では反動・振込動作を用いたジャンプであった。この動作の違いが貢献度の違いになったのであろう。また、立幅跳びについては

先行研究がないため比較ができなかった。

そこで垂直跳びと立幅跳びの貢献度について比較すると、膝関節と足関節において両者の間に大きな違いがあった。特に膝関節においては、立幅跳びでの貢献度が極端に小さくなっていた。膝関節の $\bar{P}$ 値を比較してみると垂直跳び、立幅跳びそれぞれ  $384 \pm 177.0$ 、 $46 \pm 178.8$  (watt) で、これもまた、立幅跳びの値が極端に小さかった。これは、 $P_i = M_i \times \omega_i$  のうち  $M_i$  が小さな値を示したためであった。 $M_i$  は膝関節より上部の体節の合成重心が膝関節と足先を結ぶ直線上を移動するような位置関係にあったために小さくなったのであろう。また、膝関節の $\bar{P}$ が小さくなった一方、足関節の $\bar{P}$ が大きくなっていた。膝関節のまわりには、大腿四頭筋、下腿三頭筋などの大きな筋があるにもかかわらず貢献度が小さいということは疑問である。本研究のモデルでは、各関節まわりには伸筋、屈筋(単関節筋)が各々1つあると仮定していた。しかし実際には各関節まわりには多関節筋が多く存在している。したがって、膝関節、足関節のパワーは、Van Ingen Schenau et. al.<sup>17)</sup> が推論するように、膝関節まわりの大きな筋が多関節筋であるため、膝関節まわりの筋の発揮したパワーが、足関節に転移したためであろう。

本研究でもちいたモデルでは、各関節まわりの筋の働きについてまで言及することは不可能であった。しかし、身体の動きの特徴については言及可能である。すなわち、立幅跳びは、垂直跳びに比べて、膝関節より上部の体節の合成重心が、膝関節と足先を結ぶ直線上を移動するような動作であることが特徴といえる。

## 要 約

本研究の目的は、立幅跳び踏切時に各関節で発揮されるパワーをリンクセグメントモデルを用いて算出し、その特徴を、垂直跳びのそれと比較して検討することであった。被検者として男子大学生20名(19.2±0.7歳、174.7±7.2cm、65.5±7.9kg)が参加した。動作の撮影を、被検者の右側方からHi-Speed Video (200fps)を

もちいておこなった。同時に動作中の床反力をフォースプレートから得た。全身のパワーに対する各関節のパワーの割合を貢献度とした。その結果は、以下のようであった。

- 1) リンクセグメントモデルは、このモデルから推定した床反力とフォースプレートから得た床反力とがほとんど一致していることから、本研究における数値に妥当性を与えると判断した。
- 2) 踏切時に発揮される平均のパワーは、立幅跳び(1516±284.8 watt)が垂直跳び(1210±247.8 watt)よりも大きかった。
- 3) パワーのほとんどは下肢の関節が発揮していた。
- 4) 股関節の貢献度は垂直跳び・立幅跳びそれぞれ52.3、59.6%で、全ての関節の中で最も大きかった。
- 5) 膝関節の貢献度は、垂直跳び、立幅跳びそれぞれ32.3、4.3%であった。立幅跳びでの膝関節の貢献度はないに等しかった。また、足関節の貢献度は垂直跳び・立幅跳びそれぞれ17.5、37.2%で立幅跳びの方が大きかった。

## 参考文献

- 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" 体育学研究、25-3: 233-243, 1980.
- 2) Dempster, W. T., Space requirements of the seated operator, WADC Technical Report: 55-159, Wright-Patterson Air Forth: Ohio, 1955.
- 3) Gray, R. K., K. B. Start, and D. J. Glencross, "A test of power", Research Quarterly, 33-1: 44-50, 1960.
- 4) Gray, R. K., K. B. Start, and D. J. Glencross, "A usefull modification of the vertical power jump", Research Quarterly, 33-2: 230-135, 1961.
- 5) Hubley, C. L. and D. P. Wells, "A

- work-energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump performance”, *European Journal of Applied Physiology*, 50 : 247-254, 1983.
- 6) ハミング (宮川洋・今川秀樹訳), デジタル・フィルタ, 科学技術出版社, Pp. 230, 1980.
  - 7) 金子敬二・黒田善雄・塚越克己・雨宮輝也・伊藤静夫・松井美智子, 「脚の伸展パワーに関する研究(第3報): 垂直跳における跳躍高と踏切時の力学量の関係について(その2)」日本体育協会スポーツ科学研究報告 3 : 1-13, 1982.
  - 8) 加納明彦・樋口憲生・小林平八・安田矩明・湯浅影元 「3-50歳代男女における立幅跳時の力学量」日本体育学会第38回大会号 B : 701, 1987.
  - 9) Lindeburg, F. A., D. K. Edwards, and W. D. Heath, “Effect of isometric exercise on standing broad jumping ability”, *Research Quarterly*, 34 (4) : 478-483, 1963.
  - 10) 大道等・宮下充正 「時系列データの微積分演算における基本的問題点」*体育の科学*, 31 (10) : 727-733, 1981.
  - 11) 大道等・宮下充正 「離散値データの三角級数表示: 三角関数による補間とフーリエ解析」*体育の科学*, 32(3) : 237-242, 1982.
  - 12) 大道等 「写真分析の読み取り誤差と微分演算: 速度・加速度算出の問題点」*ソニー・スポーツ・サイエンス*, 2 (3) : 182-199, 1983.
  - 13) 桜井伸二・池上康男・矢部京之助 「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」*総合保健体育科学*, 9 (1) : 91-94, 1986.
  - 14) 桜井伸二・池上康男・矢部京之助 「垂直跳び踏み切り動作において下肢関節の役割」, 石井喜八 (編), 第八回日本バイオメカニクス学会大会論集 “動きのコツを探る” : 98-101, 1987.
  - 15) Sargent, D. A., “The physical test of a man”, *American Physical Education Review*, 26 : 188-194, 1921.
  - 16) 渋谷侃二・春山国広 「垂直跳びの力学(第1報)」*東京教育大学体育学部スポーツ研究所報*, 3 : 52-58, 1965.
  - 17) Van Ingen Schenau, G. J., M. F. Bobbert, P. A. Huijing, and R. D. Woittiet, “The instantaneous torque-angular velocity relation in planter flexion during jumping”, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17 : 422-426, 1985.
  - 18) Winter, D. A., *Biomechanics of Human Movement*, John Wiley & Sons, Pp. 202, 1979.