

# 跳馬における跳躍板と選手との力学的相互作用

The interaction between the springboard and the gymnast's body

佐野真也 池上康男\* 布目寛幸\* 桜井伸二\*\*

Shinya SANO Yasuo IKEGAMI Hiroyuki NUNOME Shinji SAKURAI

\*名古屋大学 \*\*中京大学

## Abstract

In the gymnastic vault, an elastic spring board is used for take-off after approach run. The aims of this study were to investigate interaction between springboard and gymnast's body during take-off motion. The leg spring in the gymnastic vault was stiffer than those observed in other take-off motions with approach run (the long jump and vertical jump with approach run). Ferris and Farley (1997), though they used a hopping motion on the elastic surface, suggested that larger leg stiffness reduce the muscle work thereby saving the energy cost. Arampatzis et al. (2001) also showed that an increase in leg stiffness induced an effective re-use of the store energy in a sprung surface. It can be assumed that large leg stiffness during the take-off in the gymnastic vault enhances the elastic energy storage of the springboard and reduce the absorbed energy by the eccentric contraction of muscles.

Keywords :体操競技, 踏み切り動作, レッグスティフネス, エネルギー

## 緒言

体操競技の跳馬において、助走終盤の踏み切りでは跳躍板が利用される。踏み切りにおいて跳躍板は、競技者の運動の方向を変化させるとともに身体の回転(宙返り)を発生させるのに重要な役割を果たす。

跳躍板は高い弾性をもっているため、跳躍板を用いた踏み切り動作の特徴は、ばねの上での踏み切り動作だということができる。一方、人体も筋や腱などの弾性要素を備えており、跳躍動作においてはそれらの弾性を利用していることが知られている。そのため、跳馬の踏み切りにおいては、跳躍板と身体の弾性の双方を有効に利用できるような動作が行われていると考えられる。しかしながらこれまで、踏切における跳躍板と競技者の身体との相互作用に着目した研究はみられない。

踏み切り動作における跳躍板と身体との相互作用に関する研究がなされていなかった理由の一つに、跳躍板から身体へ加わる力の測定法が確立していなかったことが挙げられる。踏み切り時に足部と跳躍板が接触する部位および圧中心は一定でないため、ひずみ計の貼り付けで身体へ加わる力は計測できない。また、踏み切り時に跳躍板は加速度的に変形するため、単純に跳躍板を床反力計上へ設置しただけでは、跳躍板から身体へ加わる力を計測できない。これらの問題に対し、Sano et al. (2007)は、高速度ビデオカメラの映像から推定した跳躍板の慣性力を用いて床反力データを補正することにより、跳躍板から身体へ加わる力の推定を可能にした。この方法は、

跳躍板と身体との相互作用の研究にも応用が可能である。

本研究の目的は、体操競技の跳馬の踏み切りにおいて、跳躍板と身体との力学的な相互作用を明らかにすることである。

## 方法

被験者は、大学男子体操競技選手 10 名(20.5±2.3 歳, 1.71 ±0.04m, 62.3±5.0kg)であった。被験者は、競技会と同様の器具セットアップの元、前転とびを行なった。全ての試技は日本体操協会公認審判員によって採点された。各被験者に対し、最高得点を獲得した試技を分析の対象とした。

体育館の床に埋設した 4 枚の床反力計(Kistler, 9281B)上へ跳躍板(Senoh, Aj0504)を設置した。床反力(GRF)は、4 枚の床反力計から得られたデータ(1000Hz)を合計して求めた。踏切動作および跳躍板の挙動それぞれを側方より 500Hz のハイスピードビデオカメラ(NAC, HSV-C<sup>3</sup>) 2 台で 2 次的に同期撮影した。画像データと床反力データとの同期を行なうため、撮影範囲内に設置した発光ダイオードを発光させると同時に、床反力データへパルスを発生させた。

撮影された画像から、デジタルシステム(DKH, Frame-DIAS)によって、跳躍板の側面に 10cm 間隔で貼り付けた反射シールの実空間座標値を得た。スムージングによる座標値のゆがみの影響を避けるため、踏み切り局面に加え前後 20 コマずつもデジタルズを行なった。座標値はバターワース型のローパスフィルターによりスムージングを行ない、ノイズを除去した。遮断周波数は Winter(1990)の方法を用いて計

測点毎に決定した (16~34Hz)。

デジタルで得られた計測点の座標値により、跳躍板を29セグメントから成るリンクセグメントモデルにモデル化した。跳躍板から身体へ加わる力(BRF)は、Sano et al.(2007)の方法に従い、リンクセグメントモデルから求めた跳躍板の慣性力でGRFを補正することにより得た。

踏み切り中の競技者のレッグスティフネス ( $K_{LEG}$ ) は以下の方法で算出した。

$$K_{LEG} = BRF_{max} / \Delta r_{max}$$

ここで

$BRF_{max}$  = 脚の最大短縮時における BRF;  $\Delta r_{max}$  = 脚長(身体重心と拇指球との距離)の最大短縮長である。

### 結果および考察

足底から身体へ加わる力の最大値を脚長の最大短縮量で除したレッグスティフネス ( $K_{LEG}$ ) は、跳躍動作における脚全体の弾性的特性を表わす指標として知られている。跳馬踏み切りにおける片脚あたりの  $K_{LEG}$  ( $32.2 \pm 14.1 \text{ kN}$ ) は走り幅跳び ( $16.2 \pm 3.8 \text{ kN}$ ) のおよそ2倍という大きさであった(図1)。

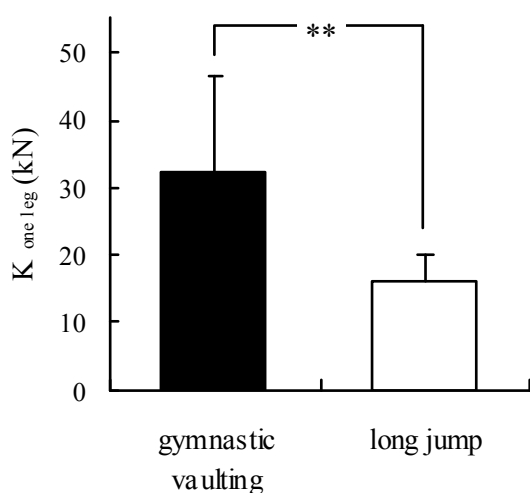


図1:レッグスティフネス

これは走り幅跳び以外の跳躍動作, 例えばrun and one leg jump (Laffaye et al., 2005)の11.5kNと比較しても非常に大きい(表1)。

跳馬踏切での  $K_{LEG}$  が大きい要因の一つとして、跳躍板を利用していること、すなわち sprung surface 上で跳躍を行っていることが考えられる。Arampatzis(2001)は leg stiffness を変化させて sprung surface 上へのドロップジャンプ実験を行い、leg stiffness を強めると sprung surface に蓄積される(さらに被験者に戻される)エネルギーが増大すること、positive phase で subject が発生させるエネルギーが減少すること、を示している。Ferris and Farley(1997)は stiffness の異なる surface 上で2Hzのホッピング実験を行い、stiffness の小さい surface 上では leg stiffness が大きくなること、結果として被験者と surface とのトータルの stiffness は全ての surface においてほとんど同じであったことを示し、stiffness の小さい surface での leg stiffness の増大は surface のなす仕事を増加・leg のなす仕事を減少させるためエネルギー効率が良くなると述べている。地面や床などの極端に stiffness の大きな surface 上で行われる他の跳躍動作に比べ、跳躍板という stiffness の小さい surface 上で跳躍を行うことへの対応として、跳馬の踏み切りでは leg stiffness を大きくしていると考えられる。

踏み切り前半に跳躍板へ蓄えられた弾性エネルギーは、後半の変形回復過程において消失していた(図2)。跳躍板のエネルギー効率は  $72.0 \pm 16.7\%$  であったが、ヒトの筋における効率は跳躍板よりもさらに小さいと考えられる。したがって、脚ばねを硬くする(レッグスティフネスを大きくすること)で跳躍板へのエネルギーの蓄積を大きくすることは、エネルギーの消失を抑制することになり、競技者のパフォーマンスを向上させるものと考えられる。

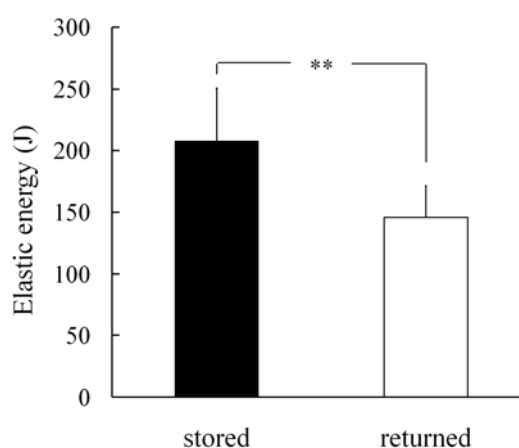


図2:跳躍板の弾性エネルギー

表1:跳馬踏み切りと他の跳躍動作におけるレッグスティフネスと脚長の最大短縮量

	gymnastic vaulting <sup>a</sup>	long jump <sup>b</sup>	run and one leg jump <sup>c</sup>
$K_{one\ leg} \text{ (kN)}$	$32.2 \pm 14.1$	$16.2 \pm 3.8$	11.5
$\Delta r_{max} \text{ (m)}$	$0.07 \pm 0.02$	0.17	$0.20 \pm 0.03$

<sup>a</sup> Results of present study; <sup>b</sup> results from Seyfarth et al.(1999); <sup>c</sup> results from Laffaye et al.(2005).

### 跳馬における跳躍板と選手との力学的相互作用

跳躍板を用いることでパフォーマンスは向上するが、それでもなお、踏み切りにおいて身体の力学的エネルギーにはロスが見られた(図3)。踏み切り開始時に元々あったエネルギーは、競技者の身体と跳躍板の中で熱エネルギーとなって消失したものと考えられる。跳躍板において消失したエネルギーの大きさは、競技者の身体において消失したエネルギーよりもはるかに小さかった(図2および図3)。これは、跳躍板の方が身体よりも効率が高いことを示すものであると考えられる。

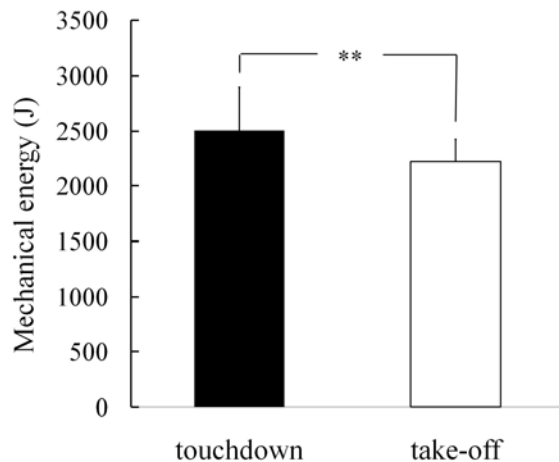


図3: 身体の力学的エネルギー

跳躍板の力-変形曲線において、変形が最大となる辺りで急峻なピークがみられるという特徴が観察された(図4)。このことは、足部が接触している部位が底付きを起こした状態となってもなお、力が増大していることを示している。したがって、実際の踏み切り中に跳躍板は、弾性エネルギーの蓄積に有効な範囲の限界まで変形していると考えられる。このことは言い替えると、弾性エネルギーの蓄積という点では競

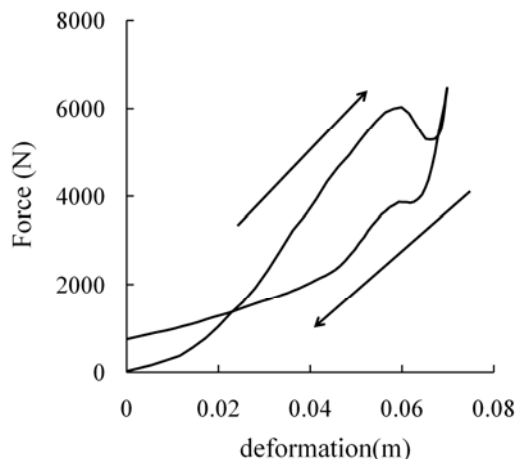


図4: 跳躍板の力-変形曲線

技者は跳躍板の性能をほぼ使い切っているということが出来る。したがって、跳躍板のさらなる改良やレギュレーションの変更により、さらに多くのエネルギーを蓄えられるようにすれば、跳馬のパフォーマンスはさらに向上する可能性があると考えられる。

### 参考文献

- 1) Arampatzis, A. Brüggemann, G P. Klapsing, G M.(2001). Leg stiffness and mechanical energetic processes during jumping on a sprung surface. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33, 923-931.
- 2) Ferris, D P. Farley, C T. (1997). Interaction of leg stiffness and surfaces stiffness during human hopping. *Journal of applied Physiology*, 82, 15-22.
- 3) Sano, S. Ikegami, Y. Nunome, H. Aprianono, T. Sakurai, S. (2007). The continuous measurement of the springboard reaction force in gymnastic vaulting. *Journal of Sports Sciences*, 25, 381-391.
- 4) Seyfarth, A. Blickhan, R. Van Leeuwen, J L.(2000). Optimum take-off techniques and muscle design for long jump. *The Journal of Experimental Biology*, 203, 741-750.
- 5) Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of human movement* (2nd edn.). New York: Wiley.

(提出期日 平成22年11月29日)