

フィギュアスケートにおけるジャンプ動作の三次元的分析

Three dimensional analysis of jumping in figure skating

池上 康男* 桜井 伸二* 矢部 京之助*
池上 久子** 吉岡 伸彦***

Yasuo IKEGAMI*, Shinji SAKURAI*, Kyounosuke YABE*
Hisako IKEGAMI**, Nobuhiko YOSHIOKA***

Three dimensional filming technique was applied to analysis of jumping in figure skating. Three junior female figure skaters performed single Axel jump and their movement were filmed by two 16mm high speed camera whose shutter were synchronized at 100 fps. Direct linear transformation method was used to reconstruct three dimensional coordinates of object space from film image. The result from kinematic analysis indicated that axis of rotation during flight was not exactly vertical and slightly inclined. One and a half rotations of the single Axel jump was not completed within a flight time and the remaining part performed before take off and after landing on the ice. Force acting on the center of gravity of the skater's body (C.G.) showed that all the skaters used counter movement before take off. The result of analysis of power at C.G. suggested that power exerted during take off movement was limited in a jump with twist movement of body such as Axel jump.

〈目 的〉

フィギュアスケートの演技は、ジャンプ、スピンの、ステップシーケンスなどの動作の組み合わせにより成り立っている。これらの構成要素の内でも、身体の長軸回りの回転（いわゆる捻り）を伴ったジャンプを成功させることは、競技において高い得点を得るためには必須の条件であり、今日では3回以上の回転を伴ったジャンプも珍しくはない。しかしながら、これまでフィギュアスケートのジャンプ動作について運動学的あるいは力学的な観点から定量的な分析が行われた例はみあたらない。この分野での研究の遅れには様々な原因が考えられるが、従来行われてきた運動の二次元的記録による分析方法では回転を伴った動作の正確な記録が不可能

であったことが第一の原因と考えられる。このような身体の捻りや回転を伴った動作の運動学的あるいは力学的記録・分析には三次元的な方法が不可欠である。

そこで本研究では、フィギュアスケートにおける回転を伴ったジャンプの内でも最も基本的な種目の一つであるアクセルジャンプを対象に選び、最新の運動の三次元的記録法を用いて動作を記録し、回転を伴ったジャンプの定量的分析を試みた。あわせて、他のジャンプ動作との比較を可能にするため、踏切時のパワーや力などの力学量についても検討を加えた。

〈方 法〉

被験者は名古屋市内のフィギュアスケートク

* 名古屋大学総合保健体育科学センター
** 名古屋聖霊短期大学
*** 千葉大学
* Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University
** Nagoya Holy Spirit Junior College
*** Chiba University

ラブに所属する女子ジュニア選手3名であった。すべての選手ともジュニア選手権大会の出場資格である国際スケート連盟の6級を取得していた。各被験者の年齢、競技歴、身長および体重を表1に示した。

測定は屋内スケートリンクにて実施し、対象としたジャンプはシングルアクセルジャンプであった。各被験者におよその撮影範囲を示した上で、十分な練習の後に試技を行わせた。アクセルジャンプ(シングル)は左フォアアウトで踏み切り1回転半して右バックアウトで着氷するジャンプである。各試技を高さ約5mの観客席からフェイズロック機構によりシャッターの開閉が完全に同期された2台の16mm高速度カメラ(フォトソニックス社製1-PL)により毎秒100コマの速度で撮影した。観客席から試技の行われた氷上までの距離はおよそ30m、2台のカメラの光軸のなす角度は約60度であった。撮影速度の較正のために2台のカメラのフィルム的一端に10Hzのタイミングパルスを映し込んだ。また、カメラ間の同期の確認のためにイベントパルスを手動によって数回フィルムの他端に映し込んだ。

試技中の身体各部位の三次元座標の測定にはDLT法を用いた^{1,5)}。三次元座標を得るためのキャリブレーション用のコントロールポイントとして二つのリファレンスマークの付いた垂直ポールを用いた。試技に先だって、アイスホッケーのラインを基準に計測された氷上の複数の定められた位置に垂直ポールを順に立て、それらを撮影した。各々の位置における垂直ポールに取り付けられたリファレンスマークの画像を分析し、それらの実空間座標をもとに三次元座標の計算に必要な連立方程式の係数を求めた。そ

Table 1. Characteristics of Subjects.

Subj.	Age [year]	Experience [year]	Height [cm]	Weight [kg]
A	15	8	157	47
B	14	5	157	41
C	11	5	143	32

の後、2台のカメラによって得られた、試技中の身体の計測点のフィルム面上での座標を測定し、先に求めた係数を用いて連立1次方程式を解くことによって身体各部の三次元座標を求めた。

得られた身体各部位の三次元座標をもとに、計算により以下の運動学および力学的諸量を求めた。すなわち、運動学的データとして試技中の身体重心位置の変化、踏み切り時における重心の初速度およびその方向(投射角)、ジャンプ中の回転の指標として左右の肩を結んだ線分の角速度の三次元ベクトルを求めた。また、力学量として試技中に重心に加えられた力およびその力によるパワーの変化を求めた。なお、データの数値微分の際に発生するノイズを除去するため、10Hzの双方向バタースタイプのデジタルフィルターによるデータのスムージングを行った⁷⁾。

さらに、フィルム上の画像の観察から、離氷および着氷の瞬間をまたぐ2コマを目視により決定し、離氷時間をフィルムのコマ数として求めた。得られた離氷時間と離氷期における身体の平均の回転角速度から、実際に空中でなされた身体の回転数を求めた。なお、身体重心位置の計算には松井⁶⁾の重心係数を用いた。

〈結果と考察〉

図1に1名の被験者(A)について、ジャンプ中の滑走方向に対し側面から見た身体の動きを0.04秒毎のスティックピクチャーとして身体重心位置とともに示した。図で滑走方向は右から

SUBJ. A

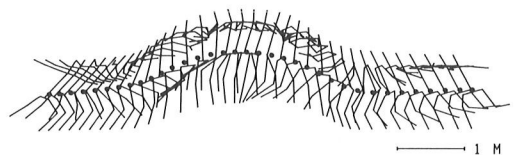


Fig. 1 Side view of single Axel jump of subject A. Stick pictures and centers of gravity (•) were drawn every 0.04 sec.

左である。離氷前に後方に引かれた上肢が踏み切りから着地にかけての期間で体側に引き寄せられ、着地の後に左右に広げられていることが観測される。また、下肢についても、踏み切り脚および着地脚の反対側について類似の動きが観察できる。これらの動きはすべての被験者に共通するものであり、素早く回転を終了させるために、離氷期を含む踏み切りから着地にかけての間で身体の回転速度を高める必要があり、そのために回転半径を減少させていると言える。これは、フィギュアスケートの演技を構成する要素の一つであるスピンにおける回転速度の調節と同様の原理によると考えられる。

図2に3名の被験者の鉛直上方より見た試技中の両肩（両肩峰点）を結んだ線と重心位置を0.02秒毎に示した。図1と同様に滑走方向は左向きである。3名の被験者とも、離氷期（空中）における上方から見た重心は必ずしも両肩の中心に位置していない。このことは、身体の回転の軸が鉛直ではなく、ある傾きを持っていることを示している。本研究では、回転軸が傾くことが対象とした被験者の技術レベルによるものか否かは明らかにできなかったが、踏み切り前の滑走から踏み切りにかけての間になされる、回転に必要な角運動量を生み出すための動作と関わりがある可能性が示唆された。

試技中の重心の垂直変位を図3に示した。また、踏み切り時に身体重心が持つ初速度の水平および垂直成分、投射角、ジャンプ中の身体重心の軌跡の最高点、ジャンプ動作前を基準としたジャンプ中の身体重心の垂直変位を表2に示した。重心の上昇高を表す垂直変位はジャンプ前の最も重心が低くなった時点を基準としたもの（Vertical Disp. of C.G. (1)）と離氷直前の重心位置を基準としたもの（Vertical Disp. of C.G. (2)）の両方を示した。ジャンプ中の重心の上昇高を決定する要因のうち最も重要なものが踏み切り時の身体重心が持つ初速度の垂直成分である。表2から、3名の被験者とも初速度の垂直成分はほぼ同じであり、初速度の方向である投射角の違いは主に初速度の水平成分によっていると言える。ジャンプ中の重心の最

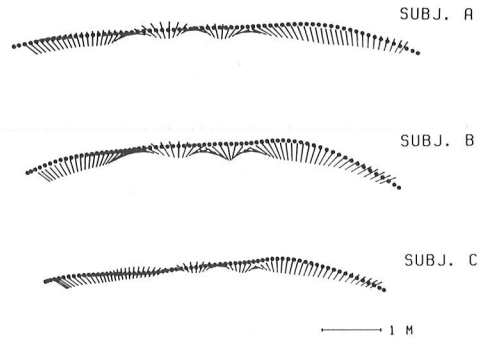


Fig. 2 Top view of movement of shoulder and center of gravity during jump. Each segment of line was drawn between both shoulders every 0.02 sec.

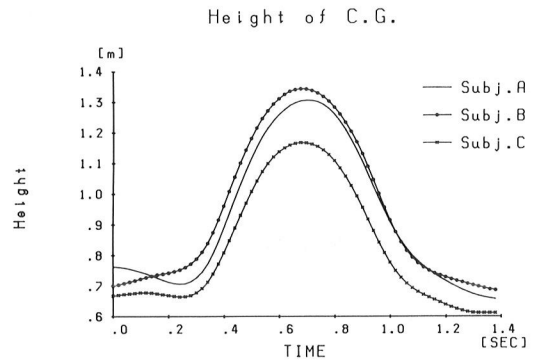


Fig. 3

高点では、被験者Cが最も低くなっているが、この被験者は身長が他の2名と比べて10cm以上低いため踏み切り前の重心位置がもともと低かったことによるものである。ジャンプ中の重心の上昇高についてみると、ジャンプ前の重心が最も低い状態からの上昇高は最も低い被験者Cで50cm以上となっているが、離氷直前の重心位置を基準にすると各被験者とも30cm前後であった。このことは、離氷前の踏み切り動作中に約30cm重心が持ち上げられることを示している。離氷後の重心上昇高は、日本人の一流選手についてビデオ撮影による滞空時間の測定から計算によって調べた吉岡の報告⁸⁾とほぼ一致している。滞空時間によって重心の上昇高を求める方法では、重心がジャンプの終了時に最

Table 2. Horizontal and vertical velocity and angle of projection of C.G. at take off, and maximum height and vertical displacement of C.G. during jump. Vertical displacements were measured from two different points; 1) lowest position of C.G. during take off movement (Vertical Disp. of C.G. (1)), 2) position of C.G. just before take off (Vertical Disp. of C.G. (2)).

Subj.	Horizontal Velocity [m/s]	Vertical Velocity [m/s]	Angle of Projection [deg.]	Max. Height of C.G. [m]	Vertical Disp. of C.G. (1) [cm]	Vertical Disp. of C.G. (2) [cm]
A	4.46	2.51	29.4	1.31	65.7	31.5
B	4.88	2.38	26.0	1.34	67.1	28.1
C	4.11	2.34	29.7	1.17	55.5	27.2

Table 3. Flight time, maximum force (Fmax) and power (Rmax) during take off movement, mean angular velocities and revolution of body (R) during flight.

Subj.	Flight Time [s]	Fmax. [N/kg]	Pmax. [W/kg]	Angular Vel. [rad/s]	R [1/s]
A	0.52	17.8	45.3	13.6	1.12
B	0.54	16.0	44.7	13.6	1.17
C	0.50	15.4	36.1	15.4	1.23

初（離水時）の高さまで落下するのに要した時間と重心の垂直変位との関係から求めるものであり、滞空時間をT、重力加速度をgとすれば上昇高Hは

$$H = (gT^2) / 8 \quad (1)$$

で表される。しかし、離水時と着水時の姿勢が異なると、重心が離水時と同じ高さまで落下した時点でまだ着氷が起きない場合があり、本研究で対象としたアクセルジャンプでは着氷時のバランスの乱れや転倒を防ぐため、着氷時の姿勢がかなり低く（図1参照）重心も離水時と比

べ低くなっている。このような形で滞空時間が測定され、重心の上昇高が求められると、実際の重心の上昇高を過大に評価する可能性がある。本研究においても(1)式から求めた重心の上昇高はいずれの被験者においてもフィルム分析によって得られた値を上回っていた。

ジャンプの滞空時間、踏み切り動作中に重心に加えられた体重当たりの力およびパワーの最大値を表3に示した。滞空時間は日本の一流選手1名について測定した吉岡の報告⁸⁾ (0.6秒)を下回っていた。このことは、本研究で対象と

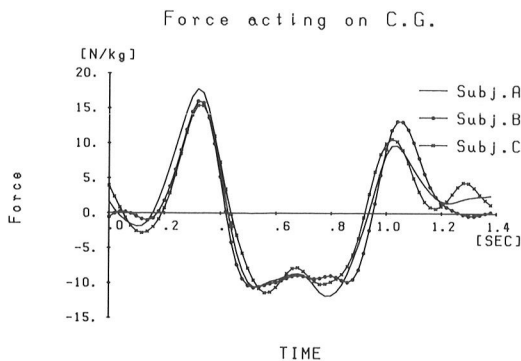


Fig. 4

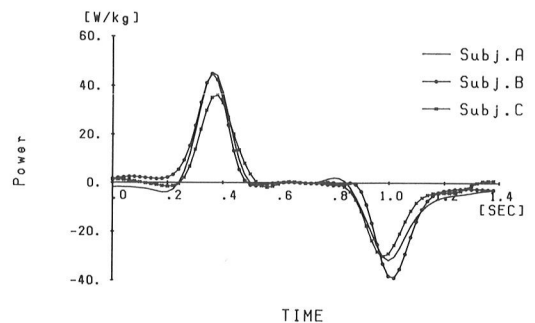


Fig. 5

したジュニア選手の氷上でのジャンプ力が一流選手に比べまだ劣っていることを示している。

ジャンプ中に重心に加えられた力およびその力によるパワーの変化を図4および図5に単位体重当りで示した。ジャンプ全体を通してみた重心に加えられた力およびパワーの変化は、3名の被験者ではほぼ同じであった。踏み切り動作においては、3名の被験者とも力の値が一旦負となっており、ジャンプ前に抜重がなされており、反動動作を伴ったジャンプとなっていることを示している。しかし、被験者によって抜重の度合は異なっており、このことは反動動作の強さの違いを示しているものと思われる。

スケートのジャンプに関してこのような力学的な分析が行われた研究報告はみあたらず、おそらく本研究が最初のものであろう。Bobbertら^{2,3)}は、片足の下腿三頭筋だけによるジャンプについてモデルおよび実測による検討を力およびパワーの面から加えているが、彼らの実測値によれば、体重83±10kgの被験者で約1800Wであった。また、Bobbertとvan Ingen Schenau⁴⁾は両足による垂直とびにおける足首、膝、腰の各関節が発揮するパワーについて検討しており、実測値によれば84±9.3kgの被験者で、足首、膝、腰の関節の発揮パワーの最大値はそれぞれ約2300, 2600, 1500Wであり、ジャンプ中の全最大パワーは5500Wを越えるものと思われる。本研究の結果はそれと比べ体重当りにしてもかなり低い値であった。垂直跳びと、フィギュアスケートのジャンプを直接比較することは妥当ではないが、氷上での滑走中のジャンプのうちでもアクセルジャンプのような回転を伴ったジャンプの踏み切り動作においては、パワーの発揮が制限される可能性を示唆しているものと思われる。

離氷期での身体の平均角速度と滞空時間から求めた空中での回転数を表3に示した。空中での回転数は1.1から1.2程度であり、このことは、アクセルジャンプの1.5回転のうち0.3~0.4回転が踏み切り前および踏み切り後の接氷期にな

されることを示している。

〈ま と め〉

フィギュアスケート女子ジュニア選手3名を対象とし、三次元の映画撮影法を用いてアクセルジャンプの運動学的および力学的な分析を試みた。その結果、空中での回転軸が鉛直ではなく傾いており、また、空中での実際の回転数は1回転半を下回っていた。踏み切り動作についてみるとすべての被験者とも反動動作を用いていることを示す抜重が認められた。踏み切り中に発揮されたパワーは垂直跳びなどの他のジャンプと比較してかなり低いものであり、滑走中に回転を伴ったジャンプを行う場合にはパワー発揮が制限されることが示唆された。

〈文 献〉

- 1) Abdel-Aziz, Y.I. and H.M.Karara: Direct linear transformation from comparator coordinates into object space in close-range photogrammetry. ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- 2) Bobbert, M.F., P. A.Huijing and G.J.van Ingen Schenau: A model of the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *J.Biomechanics*, 19: 887 - 898, 1986a.
- 3) Bobbert, M.F., P.A.Huijing and G.J.van Ingen Schenau: An estimation of power output and work done by the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *J.Biomechanics*, 19: 899 - 906, 1986b.
- 4) Bobbert, M. F. and G.J. van Ingen Schenau: Coordination in vertical jumping. *J.Biomechanics*, 21: 249 - 262, 1988.
- 5) 池上康男: 写真による運動の3次元解析法. *Jpn.J.Sports Sci.*, 2: 163-170, 1983.
- 6) 松井秀治: 運動と身体の重心. 体育の科学社, 東京, 1958.
- 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) 吉岡伸彦: フィギュアスケートのジャンプ. *Jpn.J.Sports Sci.*, 9: 210-214, 1983.

(1991年11月27日受付)

