

膝関節角度の変化から見たフリップジャンプの特徴について

山下 篤央・久米 雅・森井 秀樹

女子フィギュアスケート選手4名(13.5±2.64歳、競技歴7.75±4.26年)を被験者に、ジャンプ動作を解析し、左側膝関節角度の変化からフリップジャンプの特徴を検討した。その結果、1回転と2回転のジャンプでは、膝関節の屈曲角度は大きく、しかし、3回転では小さい値を示した。さらに競技レベルが高い選手の膝関節の伸展時間は顕著に短く、Stretch-shortening cycle (SSC) を積極的に活用していることが明らかとなった。

キーワード：フィギュアスケート、女子選手、Stretch-shortening cycle

1. はじめに

フィギュアスケートにおけるジャンプスキルは、高得点を生み出す。しかし、難易度の高い3回転ジャンプを成功させるには、強く、そして速い筋収縮が必要となる。

フリップジャンプは、トージャンプの一種で、アクセル、ルッツに次ぐ、難易度の高いジャンプであり、しばしばトリプル・フリップからトリプル・トゥループのコンビネーションで高得点を狙う内容がプログラムに導入されている。

本研究では、先行研究¹⁾に基づき、強く、速い筋収縮が、難易度の高いジャンプを成功させる上での必要条件であると仮定し、1回転から3回転のフリップジャンプにおける左側膝関節角度の変化から、フィギュアスケートの3回転ジャンプの特徴を明らかにする。

2. 方法

a) 被験者

被験者は女子フィギュアスケート選手4名であった。各被験者の年齢、競技歴、級、競技レ

ベルについては、Table 1に示す。各被験者は、事前に測定内容および手順について説明を受け、同意を得た上で測定に参加した。被験者には測定の途中で辞退可能な事を伝えた。また、本研究は、本学の倫理規定に基づき実験を行った。

Table 1 被験者の条件

	年齢(歳)	競技歴(年)	級	競技レベル
被験者A	10	6	5	5級県大会上位
被験者B	16	7	7	7級地区大会上位
被験者C	13	6	7	全国大会入賞
被験者D	15	12	7	全国大会上位

b) 測定および解析方法

本研究の解析対象動作は、1回転から3回転のフリップジャンプであった。被験者には、各ジャンプの試技間に十分な休息時間を与え、ジャンプ動作の繰り返しによる筋疲労を最小限にした。

被験者には関節角度測定のために、身体両側面の手関節・肘関節・肩関節・大転子・膝関節・足関節の12箇所にマーカーを貼付し、1回転から3回転(被験者A,Bは1・2回転のみ、被験者Dは2・3回転のみ)のフリップジャンプをそれぞれ5回実施した。

ジャンプの撮影には、1秒間に30フレーム撮影できる一般的なデジタルビデオカメラを用い

た。撮影した映像は0.033秒間隔で静止画に分割し、画像解析ソフト Image-J 1.46r にて大転子、膝関節、足関節の3点から左側膝関節角度を算出した。角度の算出区間は3点のマーカーが目視可能となった画像から左脚がリンクから離れる直前までとした。これらのデータより最大屈曲から最大伸展までの数値を Fig.1 から Fig.3 に示した。また、各回転における急激に膝関節の伸展が始まる点の角度 (Fig.4)、最大伸展角度 (Fig.5)、最大伸展角度から急激に膝伸展が始まる角度を引いた値 (Fig.6)、急激に膝伸展が始まる角度から最大伸展に至るまでの時間 (Fig.7) を算出した。尚、本研究では、膝関節完全伸展時の角度を 180° とし、この角度からの屈曲角度を表記している。

3. 結果

Fig.1 には、被験者 A,B,C のフリップジャンプ 1 回転時における膝関節角度の経時変化を示した。各被験者の最大屈曲角度は 106° ~ 114° を示し、最大伸展角度は 175° ~ 177° を示した。また、被験者 A は 8 フレーム、B は 4 フレーム、C は 6 フレームと異なるフレーム数で膝関節の急激な伸展が認められた。

2 回転時 (Fig.2) では、最大屈曲角度が 102°

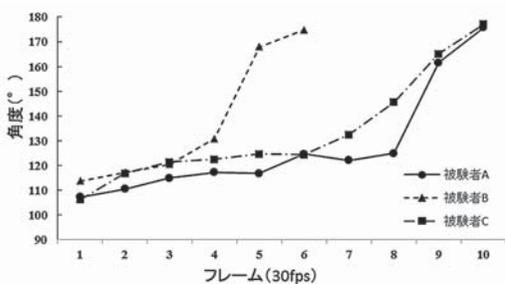


Fig.1 1 回転時における左側膝関節角度の経時変化

~ 120° を示し、最大伸展角度は 167° ~ 177° であった。また、1 回転時と同様に膝関節が急激に伸展する場面が、被験者 A では 10 フレーム、被験者 B,C,D では 6 ~ 7 フレームで見られた。さらに、急激な伸展が見られてから最終フレームへの変化 (2 フレーム) は、被験者 B,C,D で同様の傾向を示した。

3 回転 (Fig.3) は、被験者 C と D のみが成功した。両被験者ともに最大屈曲角度が 92° ~ 98° であった。また、他の回転と同様に急激な膝関節の伸展が見られるが、被験者 D は 1 フレームで最大伸展に到達した。

Fig.4 には、各回転における膝関節伸展の開始時の角度を示した。被験者 A は、1 回転よりも 2 回で大きい値を示したが、被験者 B,C では 1 回転よりも 2 回転で小さい値が認められた。また、被験者 C,D の 2 回転と 3 回転を比べると 3 回転

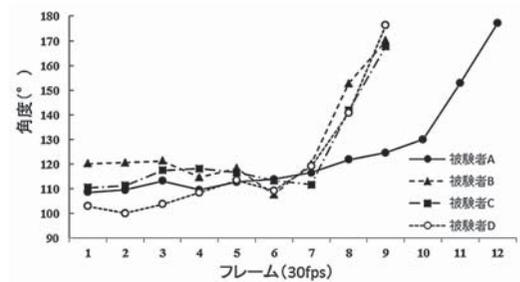


Fig.2 2 回転時における左側膝関節角度の経時変化

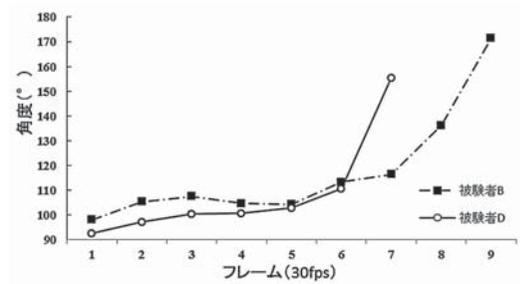


Fig.3 3 回転時における左側膝関節角度の経時変化

で大きい値が認められた。

Fig.5には、膝関節最大伸展角度を示した。Fig.4と同様に被験者Aは1回転よりも2回転で大きく、被験者B,Cは回転数の増加と共に小さい値が認められた。しかし、被験者Cの2回転と3回転では3回転で大きい値を示し、逆に、被験者Dでは3回転で小さい値を示した。

Fig.6には、膝関節伸展開始角度と最大伸展角度の差を示した。被験者Aは、1回転よりも2回転で小さい値を示すが、被験者B,Cは1回転よりも2回転で大きい値を示した。また、被験者C,Dの2回転と3回転を比べると両被験者ともに3回転で小さい値が認められた。

Fig.7には膝関節伸展時間を示した。被験者Aにおいて回転数における時間の違いは認められなかった。被験者Bは、回転数の増加に伴い時間の長い値を示した。一方、被験者Cは、1回転より2回転の時間が短く、2回転と3回転での

違いは認められなかった。被験者Dでは、回転数の増加に伴い短い値が認められた。

4. 考察

a) フィギュアスケートの特異的なジャンプ動作が跳躍に及ぼす影響

一般に言われるジャンプ（距離を跳ぶ、または、高く跳ぶなど）には次のようなメカニクスが存在する²⁾。①並進運動時の速度、②並進運動のエネルギーを垂直運動のエネルギーへ移行、③跳躍力を生み出す脚部の伸展運動、④並進運動から垂直運動へ移行する力（この力は、腕の振りとフリーレッグから生まれる）の4要素が存在する。垂直跳びは、③と関係し、地面を押す力が跳躍高に影響を及ぼす³⁾。また、この力は、急速な膝関節の伸展により起こり、その結果、身体を垂直方向に移行する。

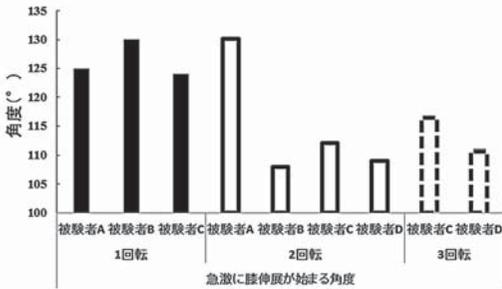


Fig.4 各回転における左側膝関節伸展の開始角度

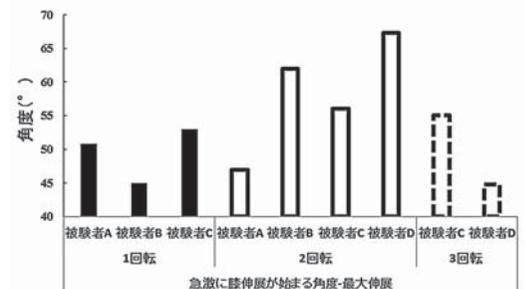


Fig.6 左側膝関節伸展開始角度と最大伸展角度の差

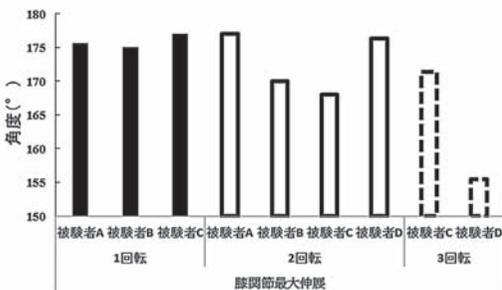


Fig.5 左側膝関節最大伸展角度

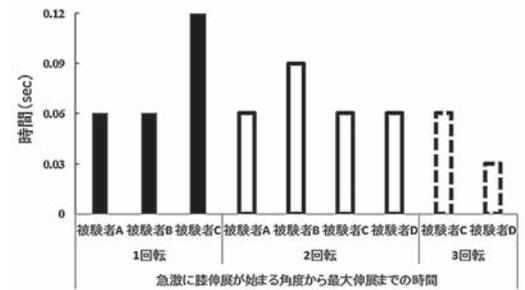


Fig.7 左側膝関節伸展時間

多くの先行研究において、適切な関節運動のタイミングと動きの連続性が垂直方向の跳躍に影響することを明らかにしている⁴⁾。また Bobbert³⁾らは、股関節、膝関節、足関節の動きの連続性の遅延が、地面を押し出す力の低下に繋がり、特に足関節の底屈制限は、重心の加速を低下させると報告している。フィギュアスケートでは、スケート靴により足関節の底背屈は著しく制限される⁵⁾。その為、フィギュアスケート競技のジャンプは、バレーボール、バスケットボールのジャンプとは異なる。Haugenauer⁵⁾らは、フィギュアスケート靴を着用した際の垂直跳びの足関節、膝関節、股関節の動きの連続性を調査し、その結果、スケート靴の着用により足関節の底背屈と膝関節の動きの制限を明らかにしたが、股関節の角速度には影響を与えないと報告している。これらの報告から、フィギュアスケート競技におけるジャンプ動作は、主に股関節の動きによって行われている可能性が示唆される。

一方、Houdijk⁶⁾らは、同様に足関節の動きを制限されるスピードスケートの推進力は、膝関節の動きが増大と関連すると報告している。また、スピードスケート靴では中足趾関節に足底中心が置かれ、エッジの前方に体重が位置する。フィギュアスケートでは各ジャンプによってエッジ上の体重の位置が変わる。フリップジャンプでは、左側足底部の前方外側のエッジに体重がかかり、ジャンプする。このことは、スピードスケート同様に、膝関節の動きが増大することを示唆する。

b) 回転数と膝伸展筋の筋収縮様式の関係

本研究の膝伸展開始直前の屈曲角度 (Fig.4) の結果、被験者 B,C では1回転よりも2回転の方が小さい値を示した。しかし、被験者 C,D の

2回転と3回転の比較では、3回転の方が大きい値を示した。また、膝関節最大伸展 (Fig.5) も同様に被験者 B,C では1回転よりも2回転の方が小さい値であった。

ジャンプの種類は異なるが、アクセルジャンプの跳躍高と回転数の多さは筋力発揮と相関関係を示す報告がある⁷⁾。回転数の多いジャンプを行うためには、膝は深く屈曲させた状態から伸展される。しかし、急激に膝関節の伸展が始まる角度から最大伸展角度を引いた膝関節伸展角度 (Fig.6) では、被験者 B,C の2回転では、1回転に比べ大きく、C,D の3回転では、回転数の増加にともない小さい値を認めた。一方、この角度に至るまでの時間 (Fig.7) は、被験者 B は1回転より2回転で長く、C では短かった。2回転と3回転を比較すると、被験者 C に変化が認められず、被験者 D の3回転では短い値を示した。この結果は、回転数の増加により、膝の屈曲から伸展までの動きの幅や時間が短くなり、これは、“筋線維の長さ”と筋力の関係”と “Stretch-shortening cycle (SSC)” によると考えられる。

一般的に、最大膝伸展力は、膝関節屈曲角度 70° の位置において発揮される。また、膝伸展筋 (外側広筋) の長さは100%になる⁸⁾。本研究では、完全膝伸展位 180° を基準として関節角度の値を表した。1回転では、106° ~ 113°、2回転では 102° ~ 120° がジャンプ時の最大屈曲角であり、110° が筋線維の至適長にあたる角度になる。1回転と2回転の結果は、筋線維の至適長での力発揮であり、SSC を活用していないと考えられる。

SSC を最大に活用することができる筋長は、安静時の長さから20%伸長した状態である⁹⁾。スケート靴による足関節の可動域制限を考慮し、筋力が最大に発揮することができる筋長と

角度を基準に SSC が最大発揮する角度を算出した場合、144°となる。そして、足関節可動制限を考慮すると膝関節屈曲角度は小さくなる。3回転 (Fig.3) での膝関節最大屈曲角度は、92°～98°であった。この値は、SSC を活用し、回転数の多いジャンプを行うために必要な至適角度と考えられる。

SSC は、筋の伸張性活動から短縮性活動が瞬時に起こる筋の収縮様式であり、両活動間の時間が遅延すれば、伸張時に蓄積された“筋の伸び”の力は失われ、SSC は活用できない。この様式は、100分の1秒内で起こる。世界トップクラスの走り高跳び選手の跳躍直前の地面接地時間は、0.12秒と報告している¹⁰⁾。また、瞬時の筋伸張は、神経-筋系の回路を刺激し伸張反射を起こす。短縮性活動から発揮される力と重なり、総合的に大きな筋力を生み出す。本研究では、急激に膝関節の伸展が始まる角度から最大伸展角度を引いた膝関節伸展角度に至るまでの時間は、回転数が多くなれば短くなることを示した。これは、回転数の多いジャンプを成功させるには、SSC による蓄積された力と伸張反射による複合した力発揮が必要であると考えられる。

c) 競技レベルによる跳躍の違い

本研究では、3回転フリップジャンプを成功したのは被験者 C と D であった。両者は、全国大会レベルに出場する選手であり、特に被験者 D は、全国大会において常に上位に位置し、3回転ジャンプの成功率は高い。被験者 C の3回転は未完成のところがあり、成功確率は被験者 D に比べ低い。本研究の実験中においても被験者 C の3回転フリップジャンプの成功率は、約40%であった。

被験者 C と D の2回転フリップジャンプにお

ける急激に膝関節の伸展が始まる角度から最大伸展までの時間は、それぞれ0.09秒、0.12秒であった。しかし、3回転では、0.09秒 (被験者 C)、0.03秒 (被験者 D) となった。4回転トゥーループの動作解析を行った研究¹¹⁾では、Toepick から左側膝関節角度が0° (本研究では膝関節完全伸展を180°としている) となるまでの伸展時間で4回転ができない選手の3回転の伸展時間は、0.14 ± 0.08秒、4回転ができる選手では、0.14 ± 0.05秒であり、回転数の多いジャンプ時における膝伸展時間が短いことは明らかである。この結果は、本研究における被験者 D の結果と類似する。被験者 C と D の2回転時の膝関節伸展時間は、それぞれ長いですが、3回転では、被験者 D は C に比べ著しく短い値を示している。このことから、3回転の成功率が高い選手は、膝伸展時間が短く、大きなパワーを生み出して垂直方向へ力を伝えていることが示唆される。

d) 現場への応用

本研究では、3回転の成功率の高い選手は膝伸展時間が短く、大きなパワーを生み出して垂直方向へ力を伝えていることを示唆した。これは、SSC と伸張反射の複合的な力発揮によるものと考えられる。先行研究^{1,11)}において、3回転と4回転トゥーループの跳躍高に差はなく、回転数を増加させるには、跳躍高よりも跳躍幅が必要であることを報告している。従って、難易度の高いジャンプを成功させるには、SSC を活用した並進運動的ジャンプをトレーニングに取り入れる必要がある。

5. まとめ

本研究の目的は、左側膝関節角度の変化から

フィギュアスケートにおける3回転フリップジャンプの特徴を明らかにすることである。

その結果、1回転と2回転のフリップジャンプでは、難易度が高くなれば、膝関節の屈曲角度は小さく、逆に最大伸展角度は大きい値を示した。しかし、3回転では、膝伸展開始直前の屈曲角度は大きく、さらに競技レベルが高い選手の膝伸展時間は顕著に短く、SSCを積極的に活用していることが明らかとなった。

フィギュアスケートにおけるジャンプ動作は、単純な垂直方向への跳躍ではなく、距離を跳ぶ跳躍である。その為、競技力の向上には、SSCを積極的に活用し、跳躍幅を増加させるようなプライオメトリックトレーニングの導入が重要となる。

本研究の被験者は、競技歴、年齢、競技レベルも異なることから、同一ジャンプであっても、その特徴は異なる。しかし、フィギュアスケート選手におけるジャンプ動作は、足関節の底背屈制限から、股関節での動作が膝関節の屈曲伸展に影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、本研究では、股関節の屈曲・伸展動作を見極めることはできなかった。今後は、股関節の運動からフィギュアスケートのジャンプ動作を解析し、その特徴を明らかにする必要があると考える。

参考文献

- 1) 山下 篤央, 久米 雅, 森井 秀樹. フィギュアスケートにおける2回転と3回転フリップジャンプの動作解析, 京大文教短期大学 研究紀要 第51集, pp87-91, 2012
- 2) Jarver, J. The Jumps, Tafnews Press, pp10, 1994
- 3) Bobbert, MF. and van Ingen Schenau, GJ. Coordination in vertical jumping, Journal of Biomechanics 21, pp249-262, 1998
- 4) Hudson, JL. Coordination of segments in the vertical jump, Medicine and Science in Sports and Exercise 18, pp242-251, 1986
- 5) Haguenaer, M., Legreneur, P., and Monteil, KM. Influence of figure skating skates on vertical jumping performance, Journal of Biomechanics 39, pp699-707, 2006
- 6) Houdijk, H., de Koning, JJ., Bobbert, MF., and de Groot, G. How klapskate hinge position affects push-off mechanics in speed skating, Journal of Applied Biomechanics 18, pp292-305, 2002
- 7) Podolsky, A., Kaufman, KR., Cahalan, TD., Aleshinsky, SY., and Chao, EYS. The Relationship of Strength and Jump Height in Figure Skaters, American Journal of Sports Medicine 18, pp400-405, 1990
- 8) 金子 公廣, 福永 哲夫. バイオメカニクス 身体運動の科学的基礎, 杏林書院, pp42-43, 2004
- 9) Wilmore, JH. and Costill, DL. Physiology of Sport and Exercise, Human Kinetics, pp40, 1994
- 10) Chu, DA. Jumping into Plyometrics 2nd edition, Human Kinetics, pp4, 1998
- 11) Kind, D., Smith, S., Higginson, B., Muncasy, B., and Sheirman, G. Characteristics of Triple and Quadruple Toe-Loops Performed during The Salt Lake City 2002 Winter Olympics, Sports Biomechanics 3 (1), pp109-123, 2004