

新体操のフェッテピボットにおける踏み込み動作の バイオメカニクスの特徴

Biomechanical characteristics of movements of the support leg during fouette en tournant in rhythmic gymnastics

湯田 淳¹⁾ 山田 美恵子²⁾ 田 渕 舞³⁾ 石 崎 朔 子⁴⁾

Jun YUDA, Mieko YAMADA, Mai TABUCHI and Sakuko ISHIZAKI

Abstract

The purpose of this study was to identify the kinetic characteristics of movements of the support leg during fouette en tournant in rhythmic gymnastics. Each skilled and unskilled female gymnast performed the fouette en tournant with the 2 sequential turns on the laboratory floor; 2 synchronized high-speed video cameras (300 fps) were used to record their performance using the direct linear transformation (DLT) technique. The ground reaction forces (GRFs) of the support leg (left leg) were determined using a force platform (500 Hz). The GRFs and three-dimensional coordinates of the segment endpoints (25 points) were determined to calculate the kinetic and kinematic variables. Although the rotational velocity of a skilled gymnast increased after extension of the support leg (plie), that of an unskilled gymnast decreased. The vertical GRF produced by extension of the support leg was lesser for an unskilled gymnast (2.56 N/bw) than for a skilled gymnast (3.22 N/bw). Moreover, the support leg of an unskilled gymnast did not show adequate extension at the knee joint. Thus, the greater vertical GRF obtained by a larger knee extension of the support leg during the plie is an important factor for maintaining a greater rotational velocity during the fouette en tournant in rhythmic gymnastics.

keywords : *rhythmic gymnastics, fouette en tournant, three-dimensional motion analysis, ground reaction force*

I. 緒 言

様々なスポーツにおいてみられる回転運動の内、立位姿勢において鉛直軸まわりに回転する運動は重要な身体表現技法として体育・スポーツの様々な場面に取り入れられている。このような回転運動が行われる種目として新体操が挙げられ、特に、片脚支持姿勢でその場において連続して回転する動作であるフェッテピボットは、演技点を獲得するうえでの重要な動作として位置づけられている⁹⁾。フェッテピボットは fouette en tournant (フェッテアントゥールナン) と呼ばれ、クラシックバレエにおける連続した回転運動を示している。これは、両脚支持の姿勢から軸脚に乗って回転を始め、遊脚の側方への振り上げおよび振り下げを1

回転ごとに行いながら回転続ける運動である。また、動作中において、軸脚となる支持脚の屈曲とともに地面を踏み込む動作はプリエ、遊脚の膝関節を水平位で深く屈曲させる動作はパッセと呼ばれ、これらの動作は新体操競技では重要な評価ポイントとなっている。

立位姿勢での長軸回転運動については、舞踊における表現技法という観点からいくつかの報告がみられる。後藤と宮下²⁾は、バレエと体操競技の経験がある鍛錬者1名と非鍛錬者1名を用いて右脚を支持脚とするその場での回転を行わせ、鍛錬者では回転直後に軸脚へ体重を一気に移し、つま先立ちの高い姿勢になって回転していたことを報告している。また、森下と山本⁹⁾は、バレエ熟練度の異なる4名の被験者を用いてフェッテピボットを行わせ、熟練者では軸脚の屈曲に要する時間が短くなることによって回転速度が増大するという特徴がみられたことを報告している。さらに、村松ら⁶⁾は、プロフェッショナル・バレエダンサー1名を用いてピルエット回転動作(片脚で身体を支持し一

1) 日本女子体育大学 (講師)

2) 日本女子体育大学 (助教)

3) 筑波大学大学院生

4) 日本女子体育大学 (教授)

地点で回転する動作)を行わせ、成功試技と失敗試技との技術的相違について検討している。その結果、成功試技では頭頂から支持脚足先にかけての身体軸が床面に対して一直線に示され安定した動きになっていることから、回転運動における身体軸のコントロールの重要性について指摘している。このように熟練者と未熟練者との比較などから優れた回転動作の技術的特徴が明らかとなっている。一方、久埜⁴⁾は、10名の舞踊経験者を用いてフェットピボットの連続回転を行わせ、そのバイオメカニクスの特徴について検討している。その結果、①回転開始時には地面反力を抗力として身体重心を鉛直方向に加速し、四肢の動きによる向心力を得て回転を発生していること、②2回転目以降(片脚支持で回転を継続する場合)には特に遊脚による向心力が回転連続に影響を及ぼすことが報告されている。このように、舞踊における回転動作ではその技術的特徴がキネマティクスおよびキネティクスの詳細に検討されているが、演技点を競う新体操競技のフェットピボットに関しては十分に検討されていない。山田ら⁵⁾は、新体操の熟練者2名および未熟練者1名を用いてフェットピボットの技術的特徴を3次元動作分析法によって比較し、熟練者と未熟練者ではリエとパッセの姿勢およびそのタイミングが異なっていたことを報告している。しかし、ここではキネマティクスの分析によって遊脚の特徴については十分に検討されているが、キネティクスの分析が行われていないため支持脚の踏み込み動作についての技術的特徴は十分に検討されていない。

本研究の目的は、新体操選手のフェットピボットにおける支持脚による踏み込み動作のキネティクスの特徴について地面反力の変化から検討し、競技現場にお

ける指導に役立つ基礎的知見を得ることである。

II. 方 法

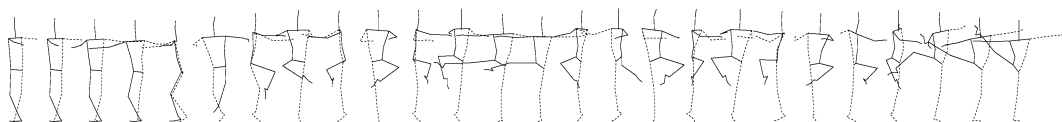
1. 被 験 者

被験者には新体操を専門とする女子大学選手2名を用いた。いずれの被験者も15~16年の経験年数を有しており、本研究では動作の習熟度を基準としてそれぞれ熟練者(身長、1.61m;体重、48.0kg)および未熟練者(身長、1.67m;体重、49.0kg)とした。なお、本研究における熟練者は、国内学生選手権大会等において上位に位置している選手である。

2. データ収集法

被験者には、実験室内に設置された計測範囲(幅1.9m、長さ1.9m、高さ2m)においてフェットピボットの右回り回転を行わせた。試技は、左脚を軸脚として右回り回転を2回連続して行い、左軸脚で地面を踏み込んだ後に再び右回り回転を2回連続して行うというものであった(図1)。撮影は2台の高速度ビデオカメラ(CASIO社製、EX-F1)により前方および右後方から行い(撮影スピードは300fps、露出時間は1/500s)、1台のフォースプラットフォーム(Kistler社製、Type 9281B)により回転中の軸脚となる左脚に作用する地面反力を測定した。フォースプラットフォームからの信号は専用アンプを介してA/D変換し、サンプリング周波数500Hzでパーソナルコンピュータに取り込んだ。また、同期ランプの画像への映し込みおよび同期信号のA/D変換ボードへの取り込みによって2台の高速度ビデオカメラおよび地面反力データとの同期を行った。

【熟練者】



【未熟練者】



図1 フェットピボットにおけるスティックピクチャー

3. 測定項目およびその算出法

3.1 3次元座標の算出

得られたVTR画像からVTR digitizer (DKH社製, Frame-Dias II)により身体各部位25点をデジタル化し, DLT法³⁾を用いて3次元座標を算出した。得られた3次元座標は, 残差分析法⁷⁾により最適遮断周波数を決定し, 4次のButterworth low-pass digital filterにより平滑化した。用いた遮断周波数は7.0~13.0Hzであった。その後, 阿江¹⁾の身体部分慣性係数を用いて身体重心の変位を算出した。

3.2 キネマティクスのパラメータの算出

図2に本研究で算出した肩の回転角度および膝関節角度の定義を示した。肩の回転角度は, XY平面(水平面)に投影した左肩関節点から右肩関節点を結ぶベクトルが静止座標系のX軸(左右方向軸)となす絶対角とし, これを数値微分することによって回転速度を算出した。膝関節角度は, 膝関節点から股関節点を結ぶベクトルと膝関節点から足関節点を結ぶベクトルのなす3次元相対角とし, 左右脚それぞれについて算出した。

3.3 地面反力の算出

静止座標系において算出された地面反力のX, YおよびZ成分をそれぞれ側方, 前後および鉛直成分とし

た。

4. 局面分け

本研究では, 肩を左方向に捻った姿勢からの動作スタート後, 肩が正面を向いた瞬間(肩の回転角度が0度になった時点)を回転動作開始時点とし, 肩の回転角度が360度まで増大する1回転目を回転局面1, その後, 720度まで増大する2回転目を回転局面2, 1080度まで増大する3回転目を回転局面3, 1440度まで増大する4回転目を回転局面4と定義した。なお, 動作を開始してから2回転目終了付近での踏み込み動作において, 右脚を上方に振り上げた後に支持脚である左脚の膝関節角度が最も小さくなった(深く屈曲した)時点を一歩の瞬間とし, その後遊脚である右脚の膝関節角度が最も小さくなった(深く屈曲した)時点を一歩の瞬間とした。また, この左軸脚での踏み込み動作において, 地面反力の鉛直成分が体重の10%を超えた時点(接地)から下回った時点(離地)までを踏み込み局面とした。

5. データの規格化

本研究では, 地面反力は被験者の体重(身体質量と重力加速度の積で, 本研究ではbwと表記)で除して示した。また, 踏み込み局面における時系列データは, その局面に要した時間で規格化した。

【肩の回転角度】

【膝関節角度】

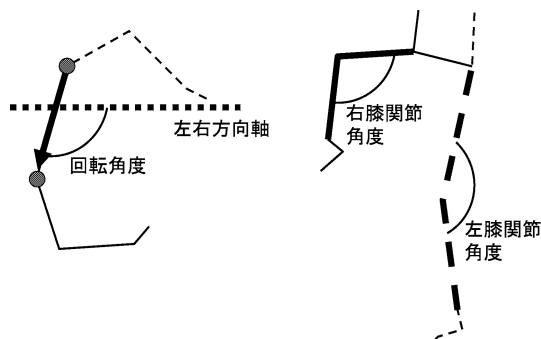


図2 本研究における角度定義

III. 結果

表1にフェットピボットにおける時間分析の結果を示した。一歩の瞬間ではいずれの被験者もほぼ同様の回転角度を示したが, 一歩の瞬間では熟練の方が回転角度は小さかった。各回転局面における所要時間はいずれの局面においても熟練の方が未熟練者よりも短く, 平均回転速度は熟練の方が未熟練者よりも大きかった。また, 平均回転速度は, 未熟練者では回転局面1から3にかけて順次値が減少していたのに対して, 熟練者では回転局面3において値が増大して

表1 フェットピボットにおける時間分析

	回転角度 (deg)		所要時間 (s)			平均回転速度 (deg/s)		
	一歩の瞬間	一歩の瞬間	回転局面1	回転局面2	回転局面3	回転局面1	回転局面2	回転局面3
熟練者	715	1007	0.45	0.60	0.52	780	589	671
未熟練者	711	1088	0.61	0.74	0.74	575	486	475

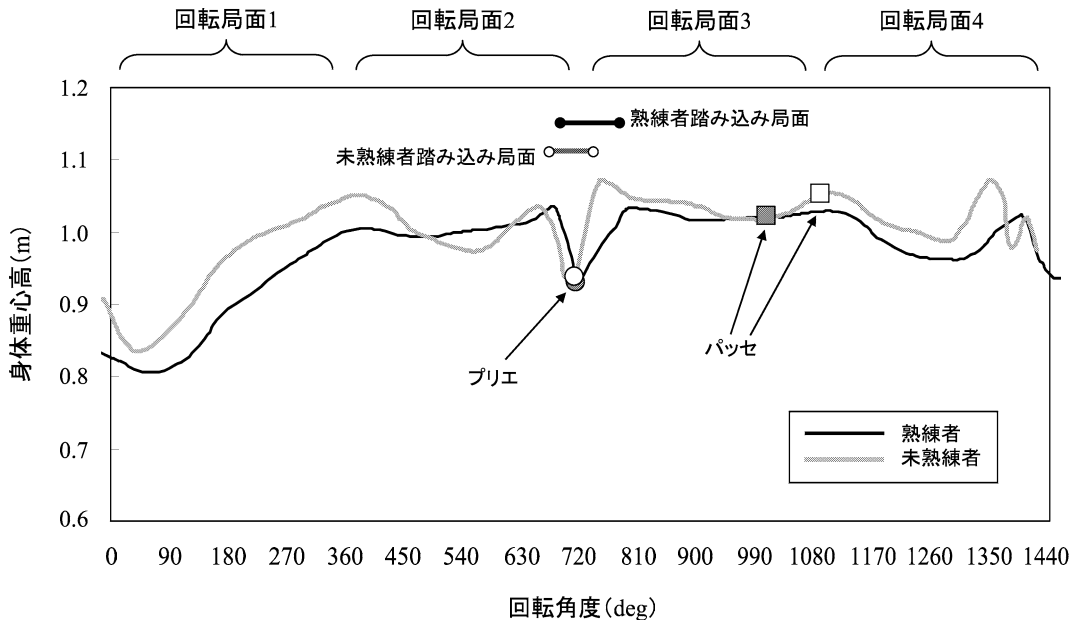


図3 フェットピボットにおける身体重心高の変化

いた。

図3にフェットピボットにおける身体重心高の変化を示した。いずれの被験者も動作開始後、身体重心高は急激に増大し、回転局面1では未熟練者の方が熟練者よりも大きな値を示した。その後、回転局面2では平均的にはいずれの被験者もほぼ同様の値を示したが、未熟練者では熟練者に比べて値の変動が大きかった。回転局面2の終盤において、いずれの被験者も踏み込み局面開始後リエの瞬間まで急激に値は減少し、その後踏み込み局面終了へ向けて急激に値は増大していた。回転局面3においては、いずれの被験者もほぼ同様の値を示していた。踏み込み局面における身体重心高をみると、開始時(熟練者では690度時点で1.01m、未熟練者では674度時点で1.02m)およびリエの瞬間(熟練者では715度時点で0.93m、未熟練者では711度時点で0.94m)においては、いずれの被験者もほぼ同様の値を示したが、終了時においては未熟練者(742度時点で1.05m)では熟練者(782度時点で1.02m)よりも値は大きかった。

図4にフェットピボットにおける踏み込み局面中の左支持脚の膝関節角度の変化を示した。いずれの被験者も踏み込み局面開始後、膝関節角度は減少し、リエの瞬間を迎える中盤で最も小さくなった後、再び増大するという変化を示した。膝関節角度は、踏み込み

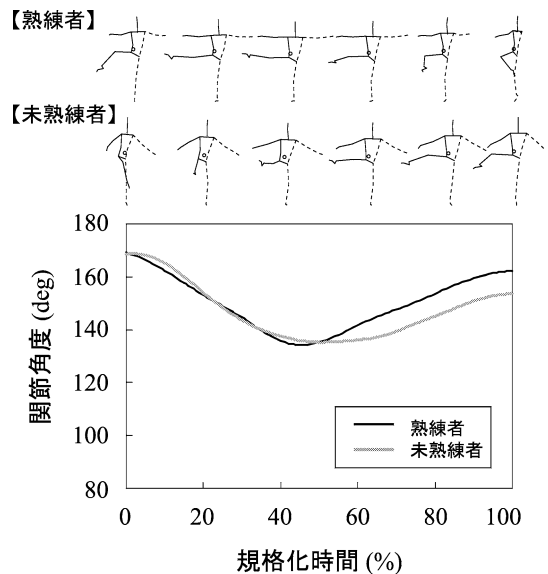


図4 フェットピボットにおける踏み込み局面中の左支持脚の膝関節角度の変化

局面開始(熟練者; 169度, 未熟練者; 168度)から最小値(熟練者; 134度, 未熟練者; 135度)を迎える中盤までは、いずれの被験者もほぼ同様の値を示したが、その後は熟練者の方が未熟練者よりも大きい値を示した。

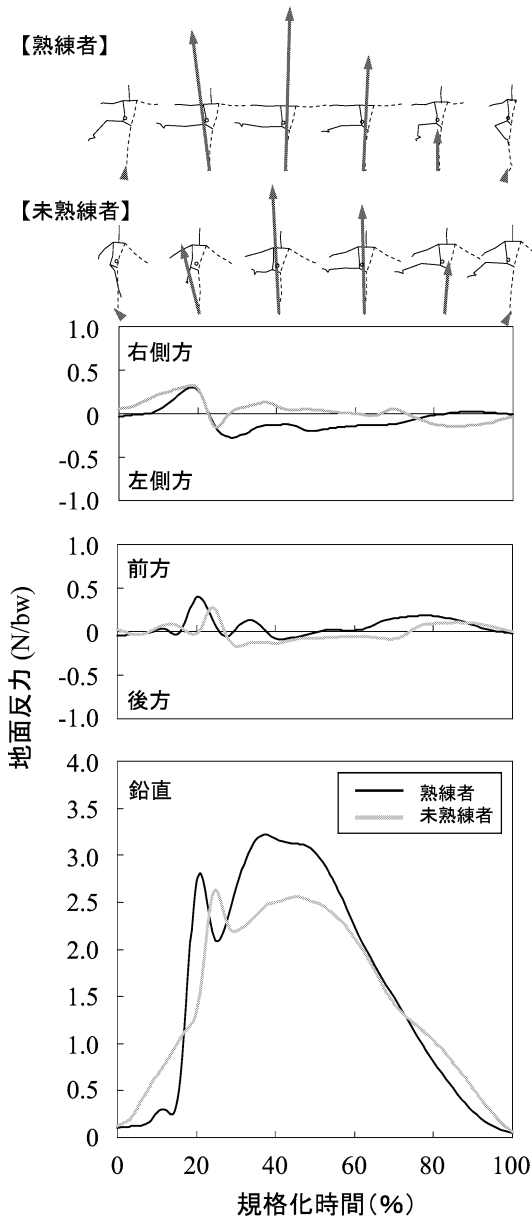


図5 フェットピボットにおける踏み込み局面中の地面反力の変化

図5にフェットピボットにおける踏み込み局面中の地面反力の変化を示した。鉛直成分では、いずれの被験者も踏み込み局面開始後に急増後、30%付近で一時的に減少したものの中盤で再びピークを示し、踏み込み局面終了へ向けて減少するという二峰性を示した。また、踏み込み局面中盤でみられたピーク値（第2ピーク）は熟練者（37%時点で3.22N/bw）の方が未

熟練者（45%時点で2.56N/bw）よりも大きかった。一方、側方および前後成分では、鉛直成分と比較して値は小さく、鉛直成分の第1および第2ピークがみられた時点において一時的に値は増大していた。

IV. 考 察

フェットピボットにおける評価では、大きな回転速度の獲得によってより多くの回転数を確保できることや、プリエおよびバッセのタイミングとその姿勢などが重要な評価ポイントとなっている⁹⁾。平均回転速度をみると、回転動作開始後のすべての局面において熟練者は未熟練者よりも大きな回転速度を獲得できており（表1）、熟練者では高得点が期待される優れたフェットピボットが行われていた。また、プリエの瞬間は、熟練者では715度、未熟練者では711度とほぼ同様の値を示し（表1）、いずれもほぼ2回転目終了時点（正面）でプリエを迎えるといた好ましい方向で踏み込み動作を行っていたといえる。しかし、その後のバッセの瞬間は熟練者の方が未熟練者よりも早く（図3）、プリエからできるだけ早いタイミングでバッセに移行することが望まれるといった評価の観点において熟練者は未熟練者よりも優れていた。これらのことから、本研究における熟練者は優れたフェットピボットを行っていたと評価でき、十分な評価が得られない未熟練者と比較することによって、フェットピボットのパフォーマンス向上に役立つ知見を得ることができると考えられる。

本研究におけるフェットピボット中の回転局面2終了付近においては、軸脚となる左支持脚でのつま先立ちで回転していた姿勢から踵を地面に勢い良く接地させ、支持脚の屈曲とともに地面を強く踏み込むといった動作（プリエ）が行われている。これは回転局面3においても大きな回転速度を持続するための動作と捉えられる。ここで、回転局面2から回転局面3にかけて熟練者では回転速度が大きく増大していたのに対して、未熟練者では低下していた（表1）。このため、回転局面3において大きな回転速度を獲得できていた熟練者は支持脚の踏み込み動作が優れていたといえよう。久埜⁴⁾は、フェットピボットにおいて回転を持続するためには、支持脚の踏み込みにおいて大きな鉛直地面反力を獲得し、身体重心を十分に上方に加速させる必要があることを報告している。また、山田ら⁸⁾は、プリエの瞬間は次の回転運動の充電ともいえる役割を

担っており、その後の回転のためにはより大きな地面反力を獲得する必要があると述べている。ここで、本研究における地面反力をみると、鉛直成分は踏み込み局面中全体を通して熟練者の方が未熟練者よりも大きく(図5)、このことが熟練者における踏み込み局面後の回転速度増大に貢献したと推察される。したがって、本研究の結果は久埜⁹⁾や山田ら⁸⁾の報告を強く支持しているといえる。

本研究における踏み込み局面中の地面反力の鉛直成分は二峰性を示した(図5)。前述の通り、地面の踏み込み時には高い剛性を持つ踵が勢い良く接地するため、接地の際には大きな衝撃力が発生する。このため、踏み込み局面初期にみられた第1ピークは衝撃力を表していると考えられる。その後、踏み込み局面後半においては支持脚の伸展が引き起こされるため、第2ピークは左支持脚による伸展力を反映していると考えられる。したがって、本研究では、支持脚による伸展力を反映する第2ピークを踏み込み動作における鉛直地面反力の最大値として用いることとする。最大鉛直地面反力は熟練者では3.22N/bw、未熟練者では2.56N/bwと熟練者の方が値は大きく(図5)、熟練者の方が下肢に大きな負荷がかかっていたと推察される。ここで、久埜⁹⁾は、舞踊経験者によるフェットピボットでの踏み込み局面中の鉛直地面反力は体重のおよそ2.4倍であることを報告しており、この値は本研究における未熟練者で得られた値とほぼ同様であった。これらのことから、フェットピボットでの踏み込み動作において、体重の3倍を超える値を示した熟練した新体操選手では舞踊経験者よりも下肢により大きな負荷がかかっているといえる。

鉛直地面反力の第1および第2ピークとの関係についてみると、熟練者では衝撃力となる第1ピークよりもその後の第2ピークの方が大きかったのに対して、未熟練者では第1ピークの方が大きい値を示した(図5)。一般的に、新体操選手は身体の形態的特徴が演技における評価に影響を及ぼすことを考慮し、極端な四肢の筋肥大を避ける傾向があるといえる。このため、競技現場では四肢での筋出力を高めるようなウエイトトレーニング等の高強度のレジスタンストレーニングは十分に実施されていないのが現状であろう。これらのことを考慮すると、新体操選手にとっては本研究においてみられたような鉛直地面反力の第1ピーク(衝撃力)は極めて大きな負荷であると捉えられる。また、本研究における被験者の筋力は、主観的にみて熟練者

では強く、未熟練者では著しく弱いといった体力的特性を有していた。このため、未熟練者において、第2ピークで第1ピークを越える大きな鉛直地面反力が獲得できなかった原因の一つとして下肢の筋力不足が挙げられる。すなわち、未熟練者では支持脚の踵接地時の衝撃力に十分に抗することができず、その後も支持脚を伸展する力を十分に発揮できなかった結果、踏み込み局面中の鉛直地面反力が小さかったと推察される。このことは、踏み込み局面における左支持脚の膝関節角度の変化からも以下の通り推察される。踏み込み局面中の左支持脚の膝関節角度はいずれの被験者も最大屈曲時の値はほぼ同様であったが、踏み込み局面終了に向けて熟練者では十分に伸展させているのに対して、未熟練者ではより屈曲している状態で踏み込み局面を終えていた(図4)。踏み込み局面中の支持脚の伸展においては大腿直筋が強く活動している⁹⁾ことを考慮すると、ここでは膝関節伸筋群がコンセントリックな収縮をすることによって大きな膝関節伸展トルクが発揮されていると推察される。そして、この際の膝関節伸展トルクが大きい場合は膝関節角速度の増大による膝関節の十分な伸展が起こるが、膝関節伸展トルクが小さい場合には膝関節は十分に伸展しない。これらのことから、未熟練者では支持脚の伸展において膝関節伸展トルクを十分に発揮できなかったために大きな鉛直地面反力が得られず、踏み込み局面後半において支持脚の膝関節が十分に伸展しなかったと推察される。なお、フェットピボットで高評価を得るためには、踏み込み局面終了後において支持脚を十分に伸展させ、軸脚を十分に伸ばした姿勢で回転を行うことが重要である⁹⁾。このため、未熟練者におけるフェットピボット動作改善のための課題は踏み込み動作時の大きな支持脚での膝関節伸展トルク発揮にあるといえ、これを可能にするための膝関節伸筋群の強化が重要といえる。

本研究では筋力測定等の被験者の体力的特性についてのデータ収集は実施しなかった。今後、習熟度に応じたフェットピボットにおける動作改善についての課題をより明確にするためには、動作の特徴を下肢筋力などの体力的要因と関連づけ、技術的および体力的側面からより詳細に検討する必要がある。また、踏み込み動作中の下肢関節トルク発揮等のキネティクスの特徴についても検討を進めることによって、指導現場でのトレーニングに対するより効果的な示唆が提示できると考えられる。

V. ま と め

本研究の目的は、新体操選手のフェットピボットにおける支持脚による踏み込み動作のキネティクスの特徴について地面反力の変化から検討し、競技現場における指導に役立つ基礎的知見を得ることであった。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- ① 踏み込み動作後の回転速度は熟練者の方が未熟練者よりも大きく、踏み込み動作後において熟練者では回転速度を増大させていたが、未熟練者では低下させていた。
- ② 鉛直地面反力は、第1ピークは衝撃力を、第2ピークは支持脚の伸展力を表すといった二峰性を示した。
- ③ 伸展力を反映する鉛直地面反力の第2ピークは、熟練者(3.22N/bw)の方が未熟練者(2.56N/bw)よりも大きく、いずれも支持脚には大きな負荷がかかっていた。また、未熟練者では先行研究による舞踊経験者とほぼ同様の値(体重の2.5倍程度)を示したが、熟練者では体重の3倍を超える大きな値を示した。
- ④ 未熟練者では、鉛直地面反力の第2ピークは第1ピークよりも小さく、支持脚の伸展の際に膝関節は十分に伸展していなかった。

以上のことから、新体操のフェットピボットにおいて大きな回転速度を維持するためには、支持脚の踏み込み動作における支持脚の十分な伸展によって大きな鉛直地面反力を獲得することが重要であることが明らかとなった。そして、支持脚の踏み込み動作においては、踵接地時に発生する衝撃力に耐えながら大きな脚伸展力を発揮し続ける必要がある、そのためには大きな膝関節伸展トルク発揮のための膝関節伸筋群の強化が課題となることが示唆された。

本研究は平成20年度日本女子体育大学共同研究「新体操における回転動作のキネティクスの分析」における成果をまとめたものである。

謝 辞

本実験に被験者として快くご協力頂いた日本女子体育大学新体操部選手各位に深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 阿江通良(1996)日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Sports Sciences* 15(3): 155-162.
- 2) 後藤かよ子, 宮下充正(1969) Dance Kinesiology—長軸回転動作の分析—. *体育の科学* 19(8): 499-507.
- 3) 池上康男, 桜井伸二, 矢部京之助(1991) DLT法. *Japanese Journal of Sports Sciences* 10(3): 191-195.
- 4) 久埜真由美(1992)クラシックバレエにみられる回転運動のバイオメカニクス. *体育の科学* 42(10): 807-812.
- 5) 森下はるみ, 山本高司(1973)舞踊における回転動作の研究 [II] ~fouette en tournant について~. *体育の科学* 23(5): 320-329.
- 6) 村松香織, 福岡 稔, 後藤真哉, 他(2005)舞踊におけるしなやかな動きのコントロール. *バイオメカニクス研究* 9(2): 94-103.
- 7) Winter, D.A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*. pp.41-43, John Wiley and Sons Inc.: New York.
- 8) 山田美恵子, 湯田 淳, 木皿久美子, 他(2008)新体操のフェットターンにおける熟練者と未熟練者の技術的相違. *日本女子体育大学スポーツトレーニングセンター紀要* 11: 21-27.
- 9) 財団法人日本体操協会(2009)新体操採点規則2009-2012.

(平成22年9月13日受付)
(平成22年10月13日受理)

