

論文の内容の要旨

論文題目 クラシックバレエの脚の動作分析
～ルルベとフェッテについて～

氏名 井村 祥子

本研究の目的

ダンス科学の発展において、様々なダンスの基盤となっているバレエの動きを科学的に分析することは意義深い。しかし、バレエの動作分析は進んでいるとは言い難く、障害予防や教育指導の現場に生かせる科学的知見は乏しい。本研究では、バイオメカニクスの観点から、バレエ動作を理解することを目的とした。そこで、バレエの代表的回転技であるフェッテターンの回転の仕組みと、バレエで頻繁に使われる、脚の中程度の屈曲に次ぐ爪先立ち動作（ルルベ・アン・ポワント）の身体上昇の仕組みについて検討した。

フェッテターンの動作分析－連続回転の仕組み

バレエのフェッテターンは、連続回転が 32 回も行われる難易度の高い技である。本研究の目的は、そのターンの連続性について仕組みを調べるとともに、運動に必要な体肢の関節の発揮トルクを推定して、ターンに必要な体力を評価することであった。

ダンサー7名によるフェットターンを高速度映画カメラ3台で撮影し、それと同時に捉えた床反力データにより、逆動力学的手法を用いて全身各セグメントの角運動量、床から作用する摩擦によるトルク、各関節での発揮トルクを算出した。連続回転の仕組みについて明らかになったのは、次のことである。

1. 両肩関節と遊脚股関節において発揮される水平外転及び水平内転トルクによって体幹と体肢との間での角運動量の移動が起こり、それぞれの回転速度が変化する。つまりフェットターンの回転方向にトルクが発揮されることで、右上肢と遊脚の角速度が増加し、それらの角運動量が増加する。このとき体幹の角運動量がそれらの体肢へ移動したため、体幹の角速度は減少する。
2. 床からのトルクは、支持脚の足底が接地している間、体肢の身体長軸周りの回転によって増加し、外力として身体に作用する。これが角運動量を体肢に補充する。
3. 遊脚の股関節及び右肩関節で水平内転トルクを発揮して、それらの体肢の回転を止める。このことで角運動量が体幹に移動し、体幹の角速度が再び増加する。つまり1とは逆の事柄が起きる。
4. 左肩関節は、遊脚側の体肢とは逆方向に運動する。そのため遊脚の回転方向への加速が終わる時に、水平内転トルクが発揮される。その体幹への反作用は、体幹の前面が正面を向いている時間を長くすることに貢献する。

また、各関節での発揮トルクの強度の推定から、支持脚の股関節外転トルク、膝伸展トルク、足底屈トルクが最大に近いレベルで発揮され、回転中のバランス保持と下肢の屈伸を可能にしていることが分かった。

フェットターンのシミュレーションー回転の達成のためのトルク発揮パターン

フェットターンの動作分析によって、その回転の仕組みが明らかとなった。その回転のためのトルク発揮パターンは、回転速度の変化や、床の摩擦係数の変化に影響されるが、ダンサーがどのようなトルク発揮でそれらに対応しているかは不明である。そこで本研究では、フェットターンによる連続回転で、安定した回転を生み出す回転トルク発揮パター

ン、及び回転時間や摩擦係数の変化とそのパターンとの関連について調べることを目的とした。

平均的なダンサーの身体を、支持脚(L)及びそれ以外の部分(B)の二つに分けた。Bを回転させるトルク T, Bの初期角速度, Lに作用する床からの摩擦によるトルク T_F , 床との摩擦係数をモデルに入力し、それらのセグメントの身体長軸周りの角度及び角速度、一回転後の角速度の変化を調べた。そして次の結果を得た。

1. 安定した回転のための T と T_F のコントロールにおいて、それらの積分値が1回転でそれぞれ0となるようなトルク発揮パターンとなり、モデルの妥当性が立証された。
2. 回転時間や摩擦係数の変化に対し、発揮トルクの大きさを変え、発揮のタイミングを同じにして同様の回転角度を得られるトルク発揮パターンがあることが示された。これらのことから、発揮トルクの調整で回転の状況に応じることが出来ると分かった。
3. 上体と支持脚の回転角度差が大きすぎないなどの、身体セグメントの配置の制約が発揮トルクの範囲を限定する原因となることが考えられた。

またこれらの結果から、大きな摩擦力の変化を伴う地上での身体運動のシミュレーションは可能であり、自由度の大きい多リンクセグメントのモデルによる回転のシミュレーションでの検討事項が明らかとなった。

ルルベ・アン・ポワントの分析—ターンアウトの機能的役割

バレエの下肢の運動は、全て脚の外旋（ターンアウト）を伴う。ルルベ・アン・ポワント（以下ルルベ）とは、トゥシューズを履いてターンアウトをした下肢で行う、中程度の脚の屈曲後の軽い跳躍による爪先立ち動作のことである。これまでターンアウトによる股関節周りの筋の、上体の運動に対する作用などは詳しくは調べられていなかった。またルルベは、その間、上体の直立姿勢を保持する必要がある、脚による正確なバランス保持が要求されている。しかし、これまでの研究では膝・足関節の分析が主体となっており、股関節の運動と上体の運動の連関は検討されていなかった。股関節の矢状面に垂直な軸回りで

発揮されるトルクは、上体の前後傾を引き起こす作用を持つ。したがって、ターンアウトによってそのトルクが前額面に垂直な軸周りにも成分を持つことで、上体の前後傾は少なくなると仮説を立てた。本研究の目的はルルベの下肢の動作分析を行い、上体の運動制御に関する仮説の検証を行うことであった。

ダンサー7名によるルルベをハイスピードビデオカメラ4台で撮影し、それと同時に計測した床反力データにより、逆動力学的手法を用いて股・膝・足関節での運動学及び運動力学データを算出した。また上体の前後傾及び左右傾の角度と角速度を求めた。その結果次のことが分かった。

1. ルルベの目的である身体上昇は主に膝・足関節の仕事により行われていた。
2. 上体の前後傾及び左右傾は小さく、股関節では矢状面に垂直な軸回りの発揮トルクは小さく、前額面内に垂直な軸回りの発揮トルクは比較的大きかった。これはターンアウトした下肢でのルルベで生じる床反力の作用線が、股関節の前後の近い場所を通ったためであると考えられる。またターンアウトした両下肢での伸展は左右対称となり、前額面に垂直な軸回りの発揮トルクは相殺された。このことは上体の左右傾の安定化につながったと考えられる。
3. 筋活動では、腓腹筋両頭、内・外側広筋の活動が足底屈や膝伸展に貢献していると考えられる。大腿二頭筋の大きな筋活動は、ターンアウトに見られる特徴であったが、その筋活動の理由は不明である。

これらの結果から、ターンアウトには脚伸展中に上体の安定に貢献するという機能的役割があると考えられる。

三つの研究から得られた視点ーバレエにおける下肢の屈伸動作

これら三つの研究を通して、下肢の屈伸運動のコントロールが、バレエ運動において一つの重要な要素であると示唆された。シミュレーション研究から、フェットターンでは床から作用する摩擦力に影響する垂直抗力、および地面との接地半径の調節が、回転の成否に関係することが示唆される。またフェットターンの実験から、垂直抗力の変化は支持脚の屈伸により生み出され、そのトルク発揮での身体的負荷が比較的大きいことが推測された。またトゥシューズによるプリエからの爪先立ちでは、身体の上昇において、支持脚の屈伸動作を調整して上体を安定させる方法が取られていた。

バレエにおける下肢の屈伸動作として、プリエは準備運動やジャンプなどの前に必ず用いられる。今後のバレエの研究では下肢の屈伸について、膝関節、股関節及び体幹回りの各筋の貢献を検討することが課題のひとつになると考える。また下肢の屈伸に関わる筋活動を考えることは、膝関節伸展における運動痛の予防や、ターンアウトの程度による上体の動きの補償の仕方の解明に役立つと考える。

本研究で導かれた結論

本研究の結果から、バレエ動作の仕組みに関する二つの知見を得た。一つは回転運動に関する知見であり、もう一つはターンアウトの身体運動における機能に関する知見である。前者に関しては、地上で行われる身体の高軸周りの回転が、床との摩擦に大きく影響されること、また回転に関わるトルク発揮のパターンを変えることにより、その摩擦の変化に対応できることが分かった。後者に関しては、矢状面内の股関節運動における上体の姿勢保持との関連以外に、その面内から外れて脚の運動が起こることで上体の姿勢保持が強化されることが分かった。また検証した二つのバレエ動作では、ともに鉛直方向の床反力のコントロールが動作を遂行するための要となっており、下肢の屈伸に関するコントロールが重要であることが分かった。