

論文の内容の要旨

論文題目 運動力学的解析法を用いたテニスのフォアハンドストロークの一研究

氏名 飯野要一

これまでに行われたテニスのフォアハンドストロークの動作の研究は、主に運動学と筋電図の手法を用いて行われてきた。しかし、これらの運動学と筋電図による研究では運動の原因となる力が調べられていないので、それらの研究から、身体のどの部分にどのような力が作用していることによって、動きが生じたかを理解することは難しい。本研究は、テニスのフォアハンドストロークを運動力学的に分析することを目的とした。まず、テニスのフォアハンドストロークにおいて重要であると考えられている体幹上下軸回りの体幹の回転に関して、下肢が直接作用する骨盤上下軸回りの骨盤の回転に注目した。また、上肢、下肢の各関節で発揮されたパワーとエネルギーの移動を調べ、各関節の役割をエネルギー論の観点から議論した。

1. 股関節を通じて骨盤に作用する骨盤上下軸回りのトルク

骨盤上下軸回りの骨盤の回転を生み出すために、下肢がどのように骨盤に作用しているのかを調べることを目的とした。被験者は、関東学生リーグ1部の大学男子テニス選手10名であった。被験者は、2台のフォースプレート¹に片足づつ乗ってクローズドスタンスのフォアハンドストロークを行った。一人の被験者につき最低3試行を、2台の同期した16mmカメラで毎秒200コマで撮影した。2台のフォースプレートの出力は、400Hzで記録された。各被験者が最良と判断した1試行を分析した。

マークと関節中心の3次元座標をDirect Linear Transformation法 (Adbel-Aziz and Karara, 1971)を用いて算出した。逆動力学法を用いて、足、膝、股関節の関節間力と関節モーメントを算出した。骨盤トルクを、骨盤の垂直軸回りに、股関節を通して骨盤に作用するトルクとして定義し、股関節の関節モーメントと関節間力から計算した。両股関節での関節間力と関節モーメント

の寄与を定量化し、比較するために、これらの寄与の曲線はバックスイングの後期とフォワードスイング期について、時間に関して積分された。それぞれの位相で積分された各成分による寄与は、Bonferroniの方法を用いて多重比較した。有意水準は、5%とした。

バックスイング後期(骨盤の前方回転の開始からラケットの前方運動の開始まで)において、骨盤トルクが、右の関節モーメントと左右の関節間力の寄与によって増加し、フォワードスイング期(ラケット前方運動の開始からインパクトまで)の初期に、 $57.4 \pm 19.8\text{Nm}$ のピークに達した。骨盤トルクに対する右股関節モーメントの正の寄与は、主として伸展モーメントによるものであった。バックスイング後期、フォワードスイング期で積分した右股関節モーメントの寄与は、右関節間力と、左の関節間力とモーメントのそれよりも有意に大きかった。

右股関節の伸展モーメントが骨盤トルクに最も寄与した。これは、ストローク中の右股関節の関節姿勢に関係していた。右股関節の伸展モーメントは、右股関節が外転位にあるとき、骨盤の上下軸の成分を持つ。右股関節の伸展モーメントが、骨盤トルクに大きく寄与し、右股関節の姿勢がそのモーメントが骨盤トルクを生み出す効果を決定するので、これはストローク中の右股関節の姿勢の重要性を示唆する。これらの知見に基づいて、フォアハンドにおいて体幹を十分に回転させることができない初心者初心者は、バックスイングの終わりまでに後脚の股関節を十分に屈曲させ、フォワードスイングにおいてボールにステップインするべきであることが示唆された。

2. 膝の曲げ伸ばしの制限が骨盤上下軸回りに骨盤に作用するトルクに及ぼす影響

本章の目的は、通常のスロークの下肢の動作と膝の動きを制限したスロークのそれとを運動力学的に比較し、膝の曲げ伸ばしの骨盤の回転を生み出すための役割を理解することであった。被験者、実験方法、分析方法とも第1章と基本的に同じである。通常のスロークに続いて、膝の曲げ伸ばしを制限したスロークを各被験者について最低3試行撮影した。1試行を分析し、通常のスロークと比較した。

NFでのインパクト直前のラケット先端の平均速度 $28.2 \pm 3.1\text{ m/s}$ は、RFでの速度 $25.9 \pm 2.7\text{ m/s}$ よりも有意に大きかった。バックスイング後期とフォワードスイング期に積分された平均の骨盤トルクの差は、有意水準に達しなかったが ($p = 0.06$)、RF スロークの方が、NF スロークよりも小さかった。バックスイング後期とフォワードスイング期で積分された骨盤トルクの寄与においてRFとNFの間に有意差があったのは右股関節モーメントであった。右股関節の外転モーメントのバックスイング後期の寄与は、RFのほうがNFよりも小さかった。フォワードスイングの始め、NFにおいて右股関節の外旋モーメントは骨盤トルクに正の寄与を示したが、RFにおいてはすべての被験者で負の寄与を示した。

骨盤トルクは、テニスのフォアハンドにおいて、上体を回転させ、肩の速度は上肢を通してラケットまで伝えられる(Groppel, 1989)。したがって、二つのスローク間の積分された骨盤トルクの差 ($p=0.06$)、これはほとんど有意なレベルの差であったが、二つのスロークのインパクト直前のラケット速度の差に対する主要な原因の一つかもしれない。

結果は、フォアハンドにおける膝の屈曲伸展の役割の一つは、右股関節の屈曲と内旋をもたらす、右股関節の大きな、外旋モーメントと外転モーメントあるいは伸展モーメントを発揮することによって、大きな骨盤トルクを生み出すのを助けることであることを示唆した。

3. 骨盤トルクと股関節モーメントの誤差と変動(再現性)

逆動力学によって計算された関節モーメント等は、多くの誤差要因によって影響を受ける。Cappozzo et al. (1975)の結果から、本章では、股関節中心と圧力中心の位置の誤差が、股関節モーメ

ントと骨盤トルクに与える影響を調べた。Knudson (1990) は、テニスのフォアハンドストローク中の上肢のキネマティクスの同一被験者の変動を調べ、角度データに比べて、速度、加速度データにおいて変動が大きいことを報告した。そして、微係数や運動力学的変数を扱う場合は、被験者の変動を考慮すべきであることを示唆した。3 試行を最も同じ条件で行ったと考えられる、3 試行の床反力曲線が最も似ていた 1 名の被験者に対して下肢の関節モーメントや骨盤トルクの 3 試行の変動を調べた。

圧力中心の位置は測定値からフォースプレートの x 軸と y 軸方向にそれぞれ $\pm 10\text{cm}$ シフトされた。同様に、股関節中心の位置は、測定値から骨盤の前後、内外側、上下方向にシフトされた。シフトの量は、Bell et al. (1990) によって報告された ASIS 間の距離の相対値として表された ASIS からの股関節中心の位置の標準偏差から決定された。

本研究で得られた、圧力中心と股関節中心の位置をシフトさせた時の骨盤トルクの最大値の変化量は、 $-7.8 \pm 2.3\%$ から $8.0 \pm 2.5\%$ であった。

関節モーメントや骨盤トルクは、無視できない誤差を含むことが示唆された。しかし、右股関節モーメントが、骨盤トルクに対して最も大きく寄与することは、誤差の影響を受けなかった。また、被験者内の変動も無視できないことが分かった。しかし、10 名の平均値を分析して得られた知見は、被験者内の変動に影響を受けないと考えられた。

4. 上肢、下肢の関節のパワー、エネルギーの移動

末端の速度を大きくする必要のあるスポーツ動作においては、エネルギーの移動が見られることが予想されるので、エネルギー論的観点から研究を行うことは、関節の役割について理解するために有用であると考えられる。この章では、上肢、下肢の関節での力学的エネルギーの生成、吸収、移動の割合を調べ、テニスのフォアハンドストロークにおける各関節の役割を、エネルギー論的に論じることを主な目的とした。

逆動力学法を用いて、右の肩、肘、手首の各関節の関節間力と関節モーメントを計算した。関節モーメントと角速度、関節間力と関節速度から、以下のパワーを計算した。関節モーメントパワー（関節モーメントがなす単位時間あたりの仕事）、セグメントに対する関節モーメントパワー＝関節モーメントによってセグメントになされる単位時間あたりの仕事、セグメントに対する関節間力パワー＝関節間力によってセグメントになされる単位時間あたりの仕事と関節モーメントによって移動するエネルギーの割合である。フィルターによるインパクトの大きな影響を受ける上肢については、インパクト前の -28.8ms までのデータを、仕事量の計算に用いた。

右下肢は、股関節伸展と足関節伸展のパワーが、バックスイング後期の最後からフォワードスイング期にかけて見られた。肩関節では、水平屈曲モーメントの正のパワーが見られた。フォワードスイング期に、内旋モーメントの正のパワーが見られた。

上肢、下肢の関節のなかでの力学的仕事の源は、最大のものが右股関節の伸展筋群であることが示唆された。次いで左膝関節の伸展、右足関節の伸展、左股関節の内転と伸展、右肩関節の水平屈曲の筋群の順であることが示唆された。

インパクト直前 (-28.8ms) までにラケットとラケットを持つ腕が得た体重当たりの力学的エネルギー 1.004J/kg のうち 81.2% が体幹から移動したエネルギーであることが分かる。下肢や体幹で生み出された力学的エネルギーが、肩関節で生み出されたエネルギーとあわせて、上肢を通じてラケットまで移動することによって、大きなラケット速度が生み出されていることが示唆された。

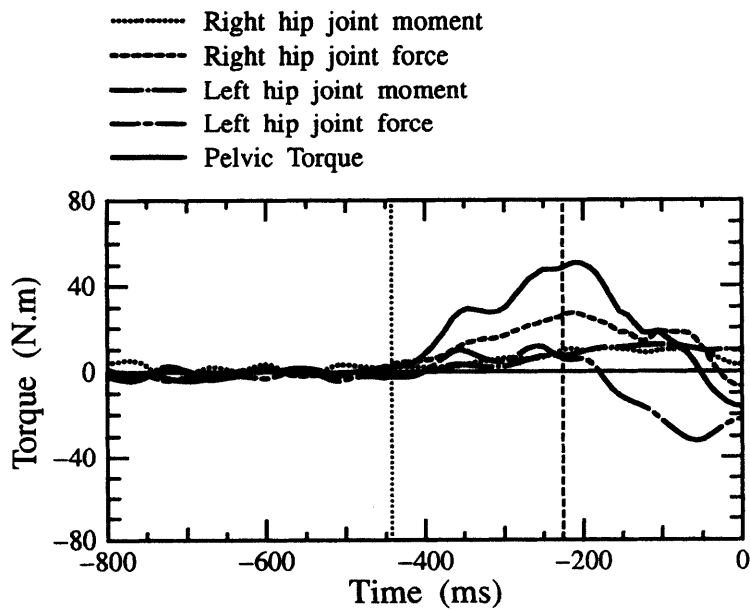


図 1: 代表的被験者の股関節の関節間力と関節モーメントの骨盤トルクへの寄与と骨盤トルク。

表 1: ストローク全体で関節モーメントがなした体重当たりの仕事 (J/kg)。上肢の関節モーメントの仕事は、-28.8ms までのデータから計算された。

		Positive Work		Negative Work	
		Mean	S.D	Mean	S.D
Right hip	Abd.Add	0.055	0.052	-0.113	0.030
	Ext.Flex.	0.672	0.206	-0.123	0.063
	Int.Ext. rot.	0.018	0.014	-0.015	0.010
Right knee	Ext.Flex.	0.061	0.043	-0.231	0.149
Right ankle	Ext.Flex.	0.202	0.141	-0.041	0.029
Left hip	Abd.Add	0.127	0.121	-0.228	0.070
	Ext.Flex.	0.187	0.090	-0.189	0.055
	Int.Ext. rot.	0.034	0.036	-0.038	0.024
Left knee	Ext.Flex.	0.219	0.113	-0.309	0.168
Left ankle	Ext.Flex.	0.067	0.044	-0.091	0.046
Shoulder	Hor. Ext.Flex.	0.151	0.096	-0.027	0.020
	Abd.Add.	0.051	0.027	-0.027	0.018
	Int.Ext rot.	0.093	0.038	-0.078	0.088
Elbow	Ext./Flex.	0.047	0.023	-0.044	0.027
	Pron./Supi.	0.009	0.010	-0.032	0.033
Wrist	Dorsi/Planter	0.011	0.006	-0.040	0.028
	Radial/Ulnar	0.009	0.003	-0.019	0.011