

平行棒における 「懸垂前振り後方かかえ込み 2 回宙返り腕支持 (ベール)」 の運動力学的分析

Kinetic analysis of “from giant swing backward, double tucked salto backward to upper arm swing (Belle)” on parallel bars

土屋 純*, 田中 光**

Jun Tsuchiya*, Hikaru Tanaka**

*早稲田大学スポーツ科学学術院

* Faculty of Sport sciences, Waseda University

**洗足学園短期大学

** Senzoku Gakuen Junior College

キーワード: 体操競技, 平行棒, ベール, 関節トルク, 関節パワー

Key words: Gymnastics, parallel bars, Belle, joint torque, joint power

抄 録

本研究の目的は、体操競技男子平行棒における「懸垂前振り後方かかえ込み 2 回宙返り腕支持(ベール)」の運動力学的な特徴を明らかにし、さらに優れたベールの実施を可能にする運動技術をバイオメカニクス的に探ることである。

被験者は、競技会においてベールを実施した選手 38 名であった。ビデオ撮影によって得られた映像から、被験者の身体計測点の座標を求め、身体重心の速度、身体重心まわりの角運動量、股関節、肩関節のトルク、パワーを算出した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ベール実施の際に宙返りに至る後方車輪で発揮される肩関節伸展トルクの大きさは、股関節屈曲トルクの大きさに比べて 2~3 倍程度大きく、パワーも肩関節で発揮された値は股関節に比べて 2 倍程度大きかった。このことは、肩関節の伸展トルクとパワーの発揮がこの技の実施において重要な役割を果たしていることを示しており、肩関節伸展筋群の筋力獲得トレーニングが充分になされる必要があることを示唆していると考えられる。
- 2) 離手時の身体重心の鉛直速度と、宙返りに至る後方車輪実施時の股関節屈曲トルクのピーク値、肩関節伸展トルクのピーク値、股関節パワーのピーク値、肩関節パワーのピーク値との間には、いずれも統計的に有意な相関関係が認められなかった。宙返りの高さに影響を与える宙返りの離手時の身体重心の速度に影響を与え

る身体操作や筋力発揮についての検討が必要であろう。

- 3) 離手時の身体重心まわりの角運動量は、股関節屈曲トルクのピーク値と有意な相関関係にあった。このことは、股関節の「あふり」の力強さを強調する指導がなされる必要があることを示すものと考えられる。
- 4) 離手時の身体重心まわりの角運動量は、肩関節伸展パワーのピーク値と有意な相関関係にあった。このことは、単に大きな筋力を発揮するだけではなく、すばやく肩関節を伸展させ、高いパワーを発揮させる身体操作の指導とトレーニングが行われる必要があることを示唆していると考えられる。

スポーツ科学研究, 1, 1-9, 2004 年, 受付日:2004 年 9 月 30 日, 受理日:2004 年 10 月 28 日
連絡先: 土屋純, 〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15 早稲田大学スポーツ科学学術院 tsuchiya@waseda.jp

I. はじめに

体操競技の男子平行棒における「後方車輪から後方かかえ込み 2 回宙返り腕支持」は、1987 年の世界体操選手権ロッテルダム大会において、東ドイツ(当時)のベーレ選手によって始めて発表された。新しい技は発表者の名前を冠するという体操競技の慣例に従い、この技は「ベーレ」と呼ばれている。この技の運動課題は、その正式名称のとおり、後方車輪から後方にかかえ込み姿勢で 2 回宙返りし、再び平行棒上に両腕の上腕部で懸垂する(腕支持となる)ことであり、現行採点規則(財団法人日本体操協会,2001)では E 難度に位置づけられている。この技「ベーレ」は、現在では高得点を得るために多くの選手が演技の中に取り入れており、さらに回転姿勢を屈身にする、ひねりを加えるといった発展技も発表されている。競技会において多くの選手が実施するようになった現在、ベーレの出来栄が演技の優劣を決定する要因となることが考えられる。優れたベーレの実施条件として、運動の全局面に姿勢欠点がないことは当然として、宙返りがより高く、かかえ込み姿勢を明確に示した後、腕支持の前に身体を伸ばして回転の余裕を見せることがあげられる。

ベーレの運動技術については、藤原と水口(2001)が、宙返りに至る後方車輪中、「倒立からの振り下ろしで身体をまっすぐにして遠くを通す」、「抜きあふりを少し早めに行う」、懸垂からの上昇局面に

おいて「わきのしぼりと膝の送りをすばやく行う」ことを挙げている。彼らの言う「抜き」とは、後方車輪の懸垂局面において股関節の伸展と肩関節の屈曲を大きくして身体を反らせること、「あふり」とは、「抜き」の反動を使って股関節を屈曲、肩関節を伸展させること、「わきのしぼり」とは、肩関節を強く伸展させることで、いずれも体操競技のトレーニングの現場で用いられている言語である。

多くの選手が実施している技でありながら、ベーレをバイオメカニクスの詳細に分析した研究は見られない。ベーレのバイオメカニクスの特徴を明らかにすることは、その技の運動技術を明らかにする上で有効であり、それによって効果的な指導の手助けとなるものと思われる。

本研究では、競技会におけるベーレを分析対象として、まずベーレの運動力学的な特徴を明らかにする。さらにその宙返りの高さを離手時の身体重心の高さと共に決定する離手時の身体重心の鉛直速度と、宙返りの回転姿勢と回転速度を決定する離手時の身体重心まわりの角運動量が、宙返りにいたる後方車輪中、特に指導書で指摘されている「あふり」と「わきのしぼり」に関連した関節で発揮されるトルク、パワーとどのような関係にあるのかを明らかにする。

II. 方法

1. 被験者と撮影方法

本研究の被験者は、2002 年全日本体操競技選手権大会に出場し、バーレを実施した選手 38 名（身長 $1.65 \pm 0.05\text{m}$ 、体重 $59.16 \pm 4.05\text{kg}$ ）であった。

彼らの競技会中の平行棒の演技を、平行棒の側方 12m に設置したデジタルビデオカメラ（SONY, DCR-TRV900）により、毎秒 60 フィールド、露出時間 1/250 秒で撮影した。

撮影に先立って各選手に本研究の目的と方法を説明したうえで演技のビデオ撮影と本研究の被験者となることの同意を得た。

2. データ処理

撮影した各被験者のバーレについて、身体計測点 9 点（指先、手首、肘関節、肩関節、頭頂、大転子、膝関節、足関節、足先）の X（水平）、Y（鉛直）座標値を、後方車輪の開始から腕支持に至るまで、2 フィールド（30Hz）ごとに、ビデオ動作解析システム（DKH, Frame-DIAS II）を用いてデジタル化した。

デジタル化の後、実長に換算した各身体計測点の座標値は、それぞれの計測点の X、Y 座標ごとに、Winter（1990）の残差分析法を用いて遮断周波数（X 座標 2.4~4.2Hz、Y 座標 2.7~4.2Hz）を決定し、Butterworth digital filter（Winter, 1990）により平滑化した。

3. 測定項目と測定法

身体を頭部、体幹、上腕、前腕、手、大腿、下腿、足部の 8 つのセグメントからなる剛体リンクモデルにおきかえ、平滑化した各身体計測点の座標と、阿江（1996）の慣性係数を用いて、全身の重心、身体各セグメントの重心ならびに慣性モーメント、股関節、肩関節の屈曲伸展角度（図1）を算出した。さらに身体計測点、各セグメント重心、各関節角度を時間微分することによって速度、加速度、角速度、角加速度を求めた。

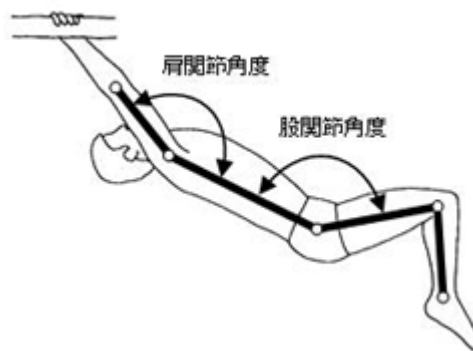


図1 関節角度の定義

これらのデータをもとに、Hay ら(1977)の方法によって身体重心まわりの角運動量を算出し、被験者の身長²と体重の積で除し、標準化した(Hinrichs ら、1983)。また、各セグメントについて運動方程式を立て、足部から順に解くことによって、股関節、肩関節のトルクを算出した。各関節のトルクは、伸展方向を正、屈曲方向を負とした。さらに、関節トルクと関節角速度の積から関節パワーを算出した。各関節トルク、パワーの値は、それぞれ被験者の体重によって除し標準化した。

離手時の身体重心の鉛直速度と身体重心まわりの角運動量が、後方車輪中に関節で発揮されるトルク、パワーとどのような関係にあるのかを明らかにするために、従属変数として離手時の身体重心の鉛直速度と身体重心まわりの角運動量を、説明変数として宙返りに至る後方車輪実施時の股関節屈曲トルクのピーク値、肩関節伸展トルクのピーク値、股関節パワーのピーク値、肩関節パワーのピーク値を算出した。

従属変数と説明変数の関連の検討にはピアソンの相関係数を算出し、有意水準を 5% とした。

Ⅲ. 結果

1. バーレの典型例

バーレ実施の典型例として 1 名の被験者について、図2にスティックピクチャーを、図3に後方車輪の開始

から離手までの後方車輪中の身体重心の鉛直速度、
 図4に標準化していない身体重心まわりの角運動量、

図5に肩・股関節トルク、図6に肩・股関節パワーをそ
 れぞれ示した。

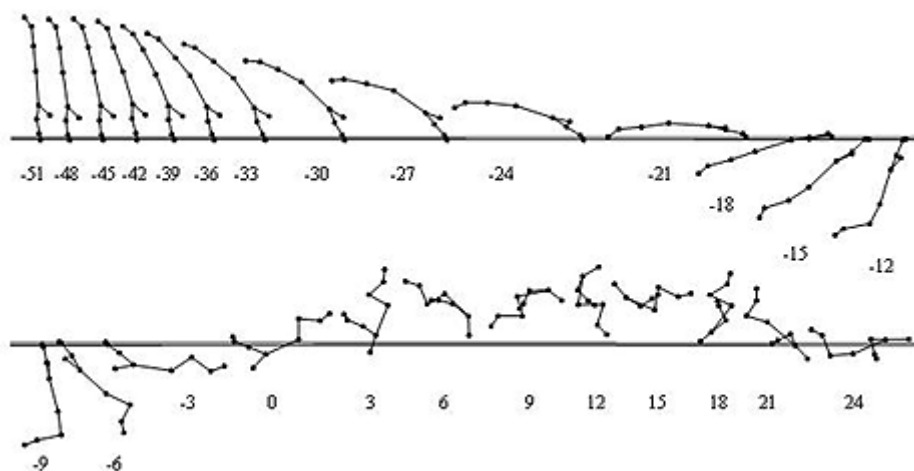


図2 ベーレのスティックピクチャー(典型例)

数字は離手までのフレーム数を表す

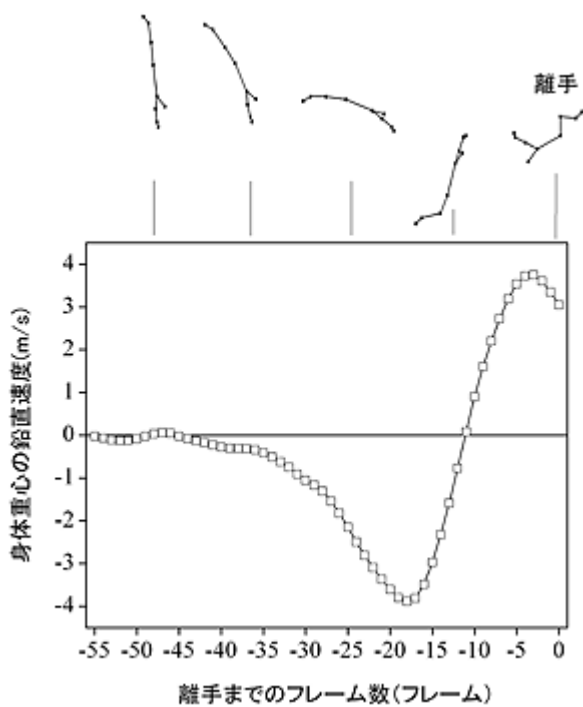


図3 ベーレ実施中の身体重心の鉛直速度の変化
 (典型例)

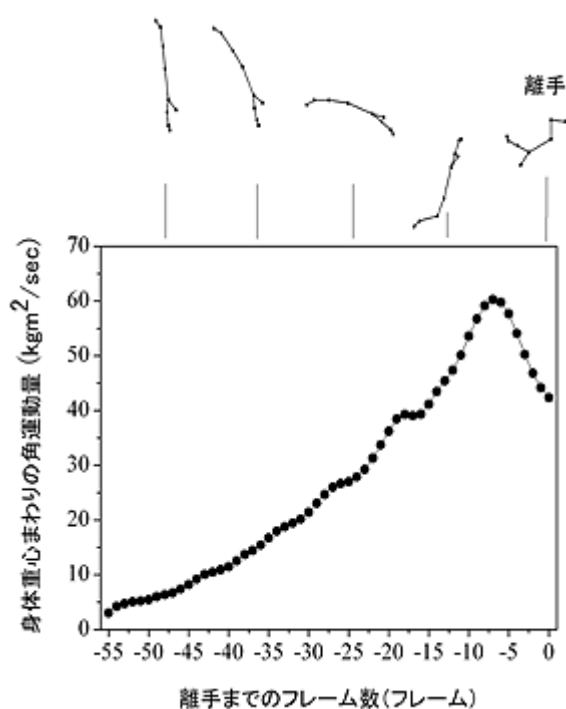


図4 ベーレ実施中の角運動量の変化
 (典型例)

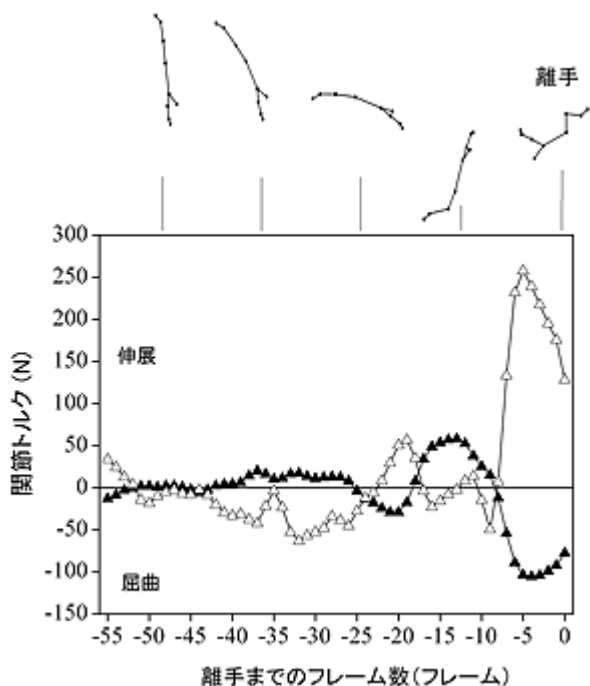


図5 ベール実施中の関節トルクの変化(典型例)

▲: 股関節 △: 肩関節

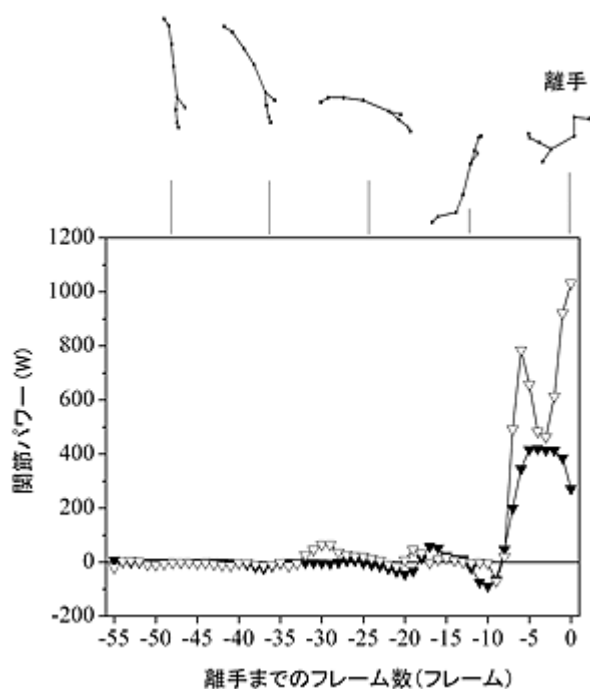


図6 ベール実施中の関節パワーの変化(典型例)

▼: 股関節 ▽: 肩関節

宙返りに至る後方車輪中のこうした変数の変化パターンは、各被験者において共通した特徴を示していた。すなわち、身体重心の鉛直速度は、後方車輪で倒立からの振り下ろしから懸垂姿勢に至る局面で負の値を示して最低値を示した後に、懸垂からの上昇局面で増加し、正の最大値を示した後、やや低下してから離手に至っていた(離手時の値: 3.21 ± 0.27 m/s、各被験者の平均 \pm SD 以下同じ)。身体重心まわりの角運動量については、倒立からの振り下ろしから一様に増加し、最大値を示した後に低下してから離手に至っていた(標準化後の離手時の値: 0.22 ± 0.02 /s)。股関節トルクは、懸垂の前後で伸展トルク(正)が発揮され、その後屈曲トルク(負)が発揮されて負のピーク(-1.38 ± 0.20 N/kg)を示した後、屈曲トルクの値が小さくなって離手に至っていた。肩関節トルクは懸垂後身体の上昇局面で大きな伸展トルクが発揮され、正のピーク(4.25 ± 0.61 N/kg)を示した後低下して離手に至っていた。肩関節伸展トルクの大きさは、股関節屈曲トルクの大きさに比べて 2~

3 倍程度大きかった。股関節パワーは、懸垂後身体の上昇局面において正のパワーが発揮されてピーク(6.25 ± 1.16 W/kg)を示した後低下して離手に至っていた。肩関節パワーも、懸垂後身体の上昇局面において正のパワーが発揮されピーク(12.24 ± 3.43 W/kg)と同時もしくはピーク後に離手に至っていた。肩関節で発揮されたピークパワーの値は、股関節のそれに比べて 2 倍程度大きかった。

2. 離手時の身体重心の鉛直速度と各変数の関係

図7は、離手時の身体重心の鉛直速度と、宙返りに至る後方車輪実施時の股関節屈曲トルク、肩関節伸展トルク、股関節パワー、肩関節パワーそれぞれのピーク値との関係を示したものである。各関節のトルク、パワーのピーク値は、離手時の身体重心の鉛直速度と有意な相関関係が見られなかった。

3. 離手時の身体重心まわりの角運動量と各変数の関係

図8は、離手時の身体重心まわりの角運動量と宙返りに至る後方車輪実施時の股関節屈曲トルク、肩関節伸展トルク、股関節パワー、肩関節パワーそれぞれのピーク値との関係を示したものである。離手時

の身体重心まわりの角運動量と有意な相関関係にあったのは、股関節屈曲トルクのピーク値($r=-0.331$, $p<0.05$)、肩関節パワーのピーク値($r=0.543$, $p<0.01$)であった。

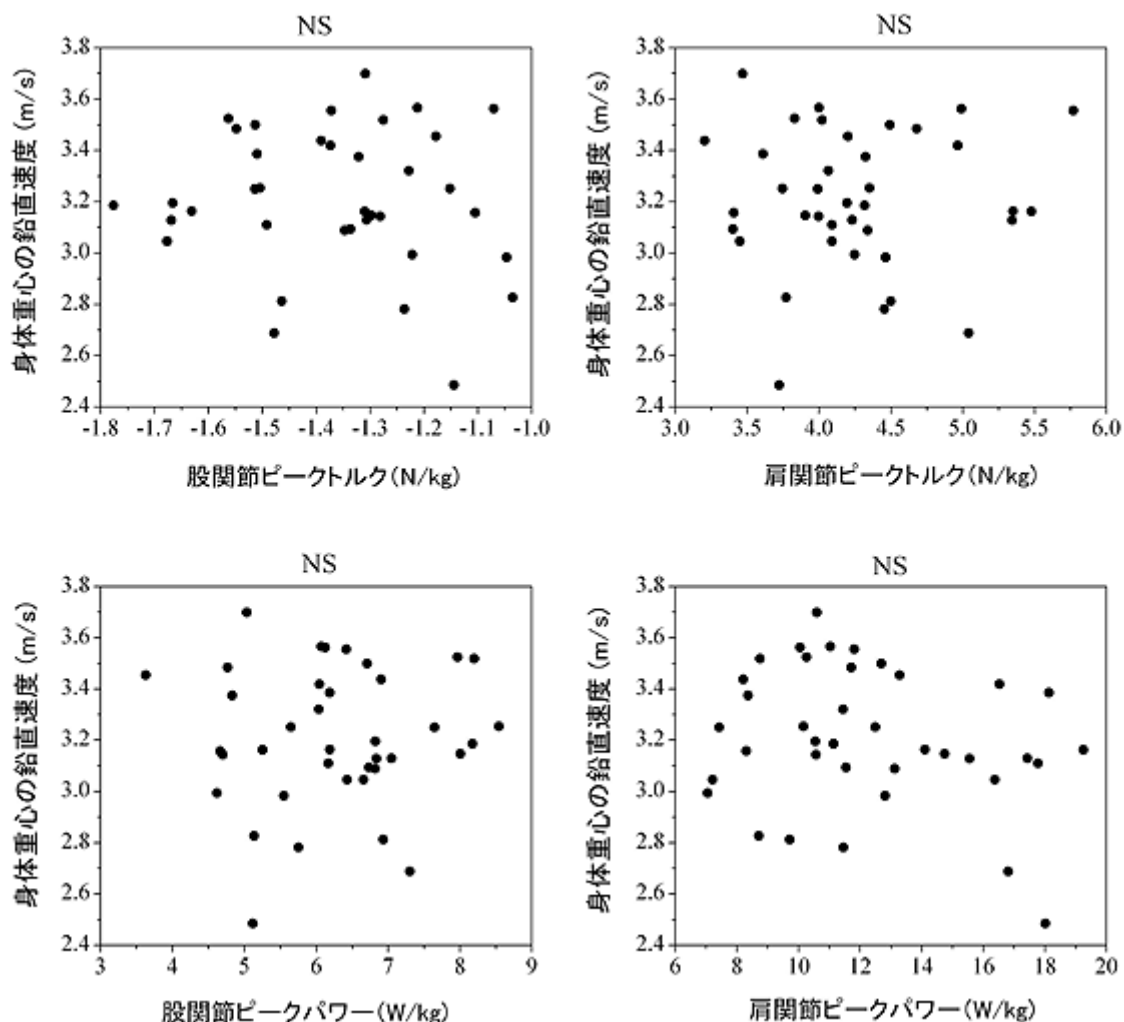


図7 離手時の身体重心の鉛直速度と運動力学的変数との関係

IV. 考察

体操競技における技の実施には、「完全な終末姿勢、あるいは熟練した実施」(財団法人日本体操協会,2001)が求められる。バーレにおける「完全な終末局面」とは、「かかえ込み体勢を開いて腕支持に至ること」(財団法人日本体操協会、2002)であり、習熟した実施では、宙返りに至る後方車輪では姿勢欠点(不必要な関節の曲がり)がなく、宙返りは高さがあり、明確なかかえ込み姿勢を示すことが要求される。この

うち宙返りの高さは、離手時の身体重心の高さとその鉛直速度に依存する。一方、明確なかかえ込み姿勢を示した後に身体を開くといった回転の姿勢と回転速度は、離手時の身体重心まわりの角運動量に依存する。

本研究では、バーレ実施の際の運動力学的な特徴を把握したうえで、宙返りの離手時における身体重心の鉛直速度と身体重心まわりの角運動量が、離手に至る後方車輪時に発揮される関節トルクおよび関

節パワーとどのような関係にあるのかを探ることを目的とした。特に本研究では、「あふり」、「わきのしぼり

と呼ばれる股関節の屈曲と肩関節の伸展のトルクおよびパワーに注目した。

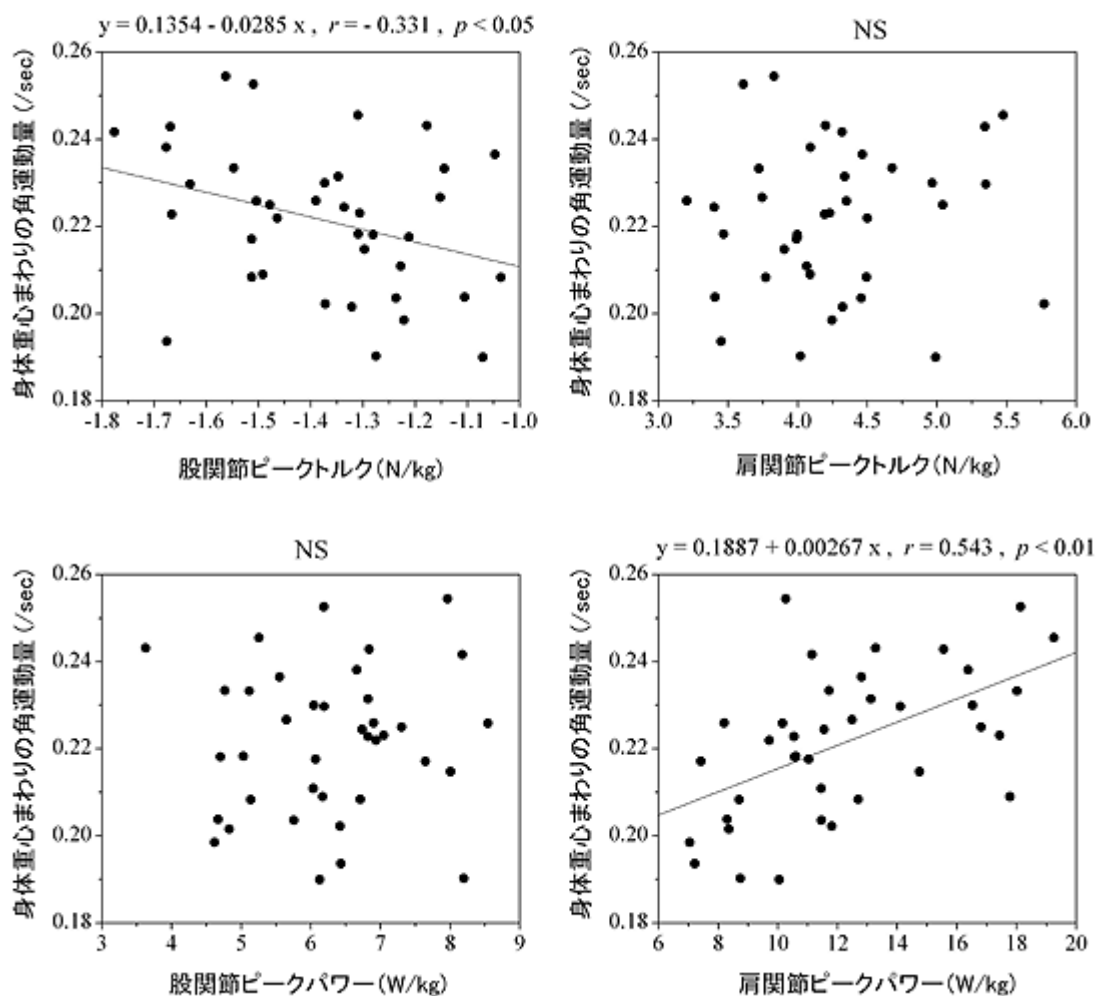


図 8 離手時の身体重心まわりの角運動量と運動力学的変数との関係

ベレー実施の際の運動力学的な特徴は、典型例で示したように、倒立からの振り下ろしから懸垂姿勢に至る局面で身体は鉛直下向きを増加させ、懸垂局面以降身体が上昇する局面で鉛直上向きの速度をもつ。後方車輪は手の握りを中心とした回転運動であるので、身体重心のこうした速度変化は容易に理解できるが、懸垂局面以降重力に逆らって身体を上昇させる必要がある、これが、鉄棒における後方車輪においても指摘されている(矢部ら、1987)「あふり」や「肩の引き」といわれる股関節の屈曲と肩関節の伸展によって発揮されたパワーによって可能となって

いることが本研究の結果からもうかがえる。また、ベレー実施の際に宙返りに至る後方車輪で発揮される肩関節伸展トルクは、股関節屈曲トルクに比較して 2～3 倍程度大きく、パワーも肩関節で発揮された値は股関節に比べて 2 倍程度大きかった。このことは、肩関節の伸展トルクとパワーの発揮がこの技の実施において重要な役割を果たしていることを示しており、肩関節伸展筋群の筋力・パワー獲得のためのトレーニングが充分になされる必要があることを示唆していると考えられる。

離手時の身体重心の鉛直速度と、宙返りに至る後

方車輪実施時の股関節屈曲トルク、肩関節伸展トルク、股関節パワー、肩関節パワーそれぞれのピーク値は、いずれも有意な相関関係が認められなかった。この結果は、本研究で取り上げた後方車輪実施時の運動力学的変数は、宙返りの離手時の鉛直速度には大きな影響を与えないことを示している。平行棒における後方車輪の実施時には、鉄棒のそれとは異なり、懸垂時に膝を曲げることで、両腕をそれぞれ回内させて両棒を握ること、さらには回転の後半で手を離して再び棒を握ることが必要とされる。こうした運動課題のために、車輪の回転を加速させることが鉄棒に比べて困難となる。車輪の回転速度が大きくなれば、宙返りの離手時に身体重心がもつ鉛直速度が大きくなることは自明である。一方で、回転速度を大きくすることが困難な条件をもつ平行棒の後方車輪では、選手間で後方車輪の回転速度が大きく異なることがないことが予想され、それが本研究の結果に現れていると考えられる。宙返りの高さに影響を与える宙返りの離手時の身体重心の速度について、これに影響を与える身体操作や筋力発揮についての検討が必要であろう。

離手時の身体重心まわりの角運動量は、股関節屈曲トルクのピーク値と負の有意な相関関係にあった。本研究では股関節トルクは伸展方向を正としているので、股関節の屈曲トルクのピーク値は負の値を示した。これが離手時の角運動量と負の相関関係にあるということは、股関節屈曲トルクが大きいほど離手時の身体重心まわりの角運動量大きいことを示している。つまり、離手時に大きな角運動量を得るうえで、股関節の屈曲トルクを大きく発揮することが必要であることが示唆される。すでに述べたように、懸垂局面以降の股関節の屈曲は「あふり」と呼ばれており、トレーニングの現場では、バーレの宙返りの際に大きな角運動量を得るために、この「あふり」の力強さを強調する指導がなされる必要がある。

また、離手時の身体重心まわりの角運動量は、肩

関節伸展パワーのピーク値と正の有意な相関関係にあった。肩関節パワーは、肩関節トルクと肩関節角速度との積で求められるので、トルクを大きくすることと角速度を高めることのどちらかあるいはその両方によってパワーを増大させることができる。肩関節トルクのピーク値とバーレの離手時の角運動量とは有意な相関関係がみられなかったことから、離手時の角運動量の増大には、肩関節で発揮されるトルクを大きくすること以上に肩関節の伸展をすばやくすることが重要であると考えられる。バーレの典型例で示したように、肩関節で発揮されるパワーのピークは、宙返りに至る離手とほぼ同時に示される。したがって、バーレの指導においては、離手まで肩関節の伸展をすばやく行うことを強調する必要がある。また、単に大きな筋力を発揮するだけでなく、すばやく肩関節を伸展させる高いパワー発揮を目指したトレーニングが行われることも重要であると考えられる。

V. まとめ

本研究は、現在多くの選手が実施している平行棒の「バーレ」について、その運動力学的な特徴をとらえ、その出来栄に影響を与えると考えられる離手時の身体重心の鉛直速度と身体重心まわりの角運動量が、宙返りにいたる後方車輪中、関節で発揮されるトルク、パワーとどのような関係にあるのかを明らかにすることによって、優れたバーレの実施を可能にする運動技術をバイオメカニクス的に探ることを目的とした。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) バーレ実施の際に宙返りに至る後方車輪で発揮される肩関節伸展トルクの大きさは、股関節屈曲トルクの大きさに比べて2~3倍程度大きく、パワーも肩関節で発揮された値は股関節に比べて約2倍大きかった。このことは、肩関節の伸展トルクとパワーの発揮がこの技の実施において重要な役割を果たしていることを示しており、特に

肩関節伸展筋群の筋力獲得トレーニングが充分になされる必要があることを示していると考えられる。

- 2) 離手時の身体重心の鉛直速度と、宙返りに至る後方車輪実施時の股関節屈曲トルク、肩関節伸展トルク、股関節パワー、肩関節パワーそれぞれのピーク値とは、いずれも有意な相関関係が認められなかった。宙返りの高さに影響を与える宙返りの離手時の身体重心の速度について、これに影響を与える身体操作や筋力発揮についての検討が必要であろう。
- 3) 離手時の身体重心まわりの角運動量は、股関節屈曲トルクのピーク値と有意な相関関係にあった。このことは、指導の現場では股関節の「あふり」の力強さを強調する必要があることを示していると考えられる。
- 4) 離手時の身体重心まわりの角運動量は、肩関節伸展パワーのピーク値と有意な相関関係にあった。単に大きな筋力を発揮するだけではなく、すばやく肩関節を伸展させて高いパワーを発揮させる身体操作の指導とそのためのトレーニングが行われる必要があるであろう。

本研究は、平成 15-16 年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 C(2),課題番号 15500463, 研究代表者:土屋純)によって行われた研究の一部である。

文 献

- 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. Jpn.J.Sports Sci., 5(3):155-162.
- 藤原佳市、水口晴雄(2001):平行棒. 男子ジュニア選手のためのトレーニングマニュアル(分担執筆). 日本体操協会男子体操競技委員会編、日本体操協会、東京、pp.238-239
- Hay,J.G,D.B.Wilson,J.Dapena and G.Woodworth (1977) : A computational technique to determine the angular momentum of a human body.J.Biomech.10:269-277.
- Hinrichs,R.N.P.R.Cavanagh and K.R.Williams (1983): Upper extremity contributions to angular momentum in running. In : Biomechanics VII-B, Matsui, H and Kobayashi, K (Eds), Human Kinetics Pub. Inc., Champaign, IL, 1983, pp.641-647.
- 矢部京之助、岡本敦、桜井伸二、池上康男(1987): 鉄棒における順手車輪の運動力学的分析. スポーツ医・科学、1(1) 49-57.
- Winter,D.A.(1990):Biomechanics and motor control of human movement 2nd.ed.. John Wiley & Sons Inc, New York, 1990.
- 財団法人日本体操協会(2002):男子体操競技委員会情報 5号、財団法人日本体操協会、東京、p30.
- 財団法人日本体操協会(2001):採点規則 男子 2001年版. 財団法人日本体操協会、東京、p18.