平行棒における「後方車輪から後方屈身 2 回宙返り腕支持」のバイオメカニクス的分析

Biomechanical analysis of “from giant swing backward, double piked salto backward to upper arm swing ” on parallel bars

土屋　純*, 村田浩一郎**

Jun Tsuchiya*, Koichiro Murata**

*早稲田大学スポーツ科学学術院

*Faculty of Sport sciences, Waseda University

**早稲田大学大学院人間科学研究科

**Graduate School of Human Sciences, Waseda University

キーワード: 平行棒, 屈身ベーレ, 関節トルク, 関節パワー

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

要　約

本研究の目的は、競技会におけるベーレと屈身ベーレの実施を分析対象として、両者の運動技術の類似点と差異をバイオメカニクス的に探ることであった。被験者は、2003 年全日本体操競技選手権大会に出場し、ベーレと屈身ベーレの両方を実施した選手 12 名であった。彼らの競技会中の平行棒の演技を撮影したビデオテープから、身体重心の速度、身体重心まわりの角運動量、膝関節、股関節、肩関節で発揮されたトルク、関節パワーを算出した。

宙返りの離手時に身体重心がもつ水平・垂直速度は、ベーレと屈身ベーレの間で有意な差は見られなかった。宙返りの離手時の身体重心まわりの角運動量は、ベーレよりも屈身ベーレのほうが有意に大きかった。 離手までの懸垂局面以降では、各関節トルクとパワーの動態に屈身ベーレとベーレでほとんど差が見られないが、離手時には屈身ベーレにおいて大きな股関節屈曲トルクと肩関節伸展トルクが発揮され、それぞれのトルク由来のパワーが大きいことが示された。このことは、トレーニングの現場において、屈身ベーレの実施時にはベーレに比べ、離手時において「股関節のあふり」と「肩関節の引き」がより強調される必要があり、さらには股関節屈曲トルクと肩関節伸展トルク、それらが発揮するパワーを大きくする体力的なトレーニングが必要となることを示唆していると考えられる。

スポーツ科学研究, 2, 20-28, 2005 年, 受付日:2005 年 4 月 19 日, 受理日:2005 年 5 月 2 日

連絡先: 土屋純, 〒359-1192 埼玉県所沢市三ケ島 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懸垂振動技のひとつに「後方車輪から後方かかえ込み 2 回宙返り腕支持」がある。これは、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運動課題をもつ技である（**図1**）。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ため、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、「ベーレ」と呼ばれている。さらに 1995 年の世界体操選手権鯖江大会において、ベーレの宙返り姿勢を屈身にした「後方車輪から後方屈身 2 回宙返り腕支持」が日本の田中選手によって発表された。この技は「屈身ベーレ」と呼ばれている（**図2**）。

図1.　後方車輪から後方かかえ込み2回宙返り腕支持（ベーレ）
（図2と運動方向を同じくするために左右反転してある）

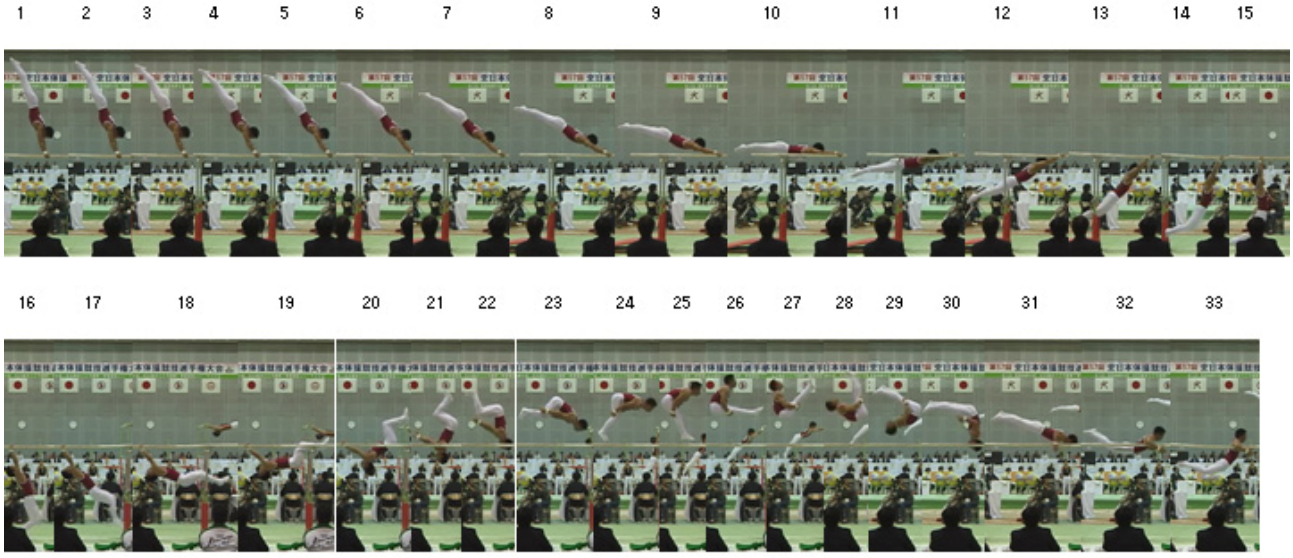

図 2.　後方車輪から後方屈身2回宙返り腕支持（屈身ベーレ）

体操競技男子 2001 年版採点規則（2001）では、ベーレはＥ難度、屈身ベーレはスーパーＥ難度に位置づけられている。現在の体操競技では高い得点を獲得するために、D、E、スーパーE 難度の技を実施

することが必要となっており、E 難度のベーレは多くの選手によって実施されており、スーパーE 難度の屈身ベーレもまた実施する選手が増加してきている。

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。しかしながら、屈身ベーレの技術について取り上げた指導書や研究は皆無である。屈身ベーレは上述のようにベーレの宙返り姿勢をかかえ込みから屈身に発展させた技であるため、その運動技術はベーレと類似していると考えられるが、この点について検討した研究は見られない。多くの選手が実施しているベーレと、今後さらに実施する選手が増加すると思われる屈身ベーレの運動技術の類似点や差異を検討することは、この技の指導において大きな手助けとなると思われる。

Ⅱ. 方法

1. 被験者と撮影方法

本研究の被験者は、2003 年全日本体操競技選手権大会に出場し、ベーレ（以下 TB）と屈身ベーレ（以下 PB）の両方を実施した選手 12 名（身長 1.61±0.04m、体重 58.54±3.97kg）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 TB、PB 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 フィールドごと（30Hz）に、ビデオ動作解析システム（DKH, Frame-DIASⅡ）を用いてデジタイズした。

デジタイズの後、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 2.7～4.3Hz）を決定し、Butterworth digital filter 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 つのゼ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、膝関節、股関節、肩関節の屈曲伸展角度、身体の回転角度（以下 RA）（**図3**）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。

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、被験者の身長の 2 乗と体重の積で除し、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（Winter,1990）を立て、足部から順に解くことによって、膝関節、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。また、各関節トルクは左右の合計とし、被験者の身体質量によって除し、標準化した。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。このとき関節角速度は伸展方向を正とした。

各被験者の動作には時間的な差異があるので、比較を容易にするために、算出した関節トルク、パワーのデータについて、3 次のスプライン関数を用いて RA15°ごとの時点の値を算出した。

TB と PB の差の検定には、Wilcoxon の符号付順位検定を用い、有意水準を 5%、有意傾向を 10%とした。

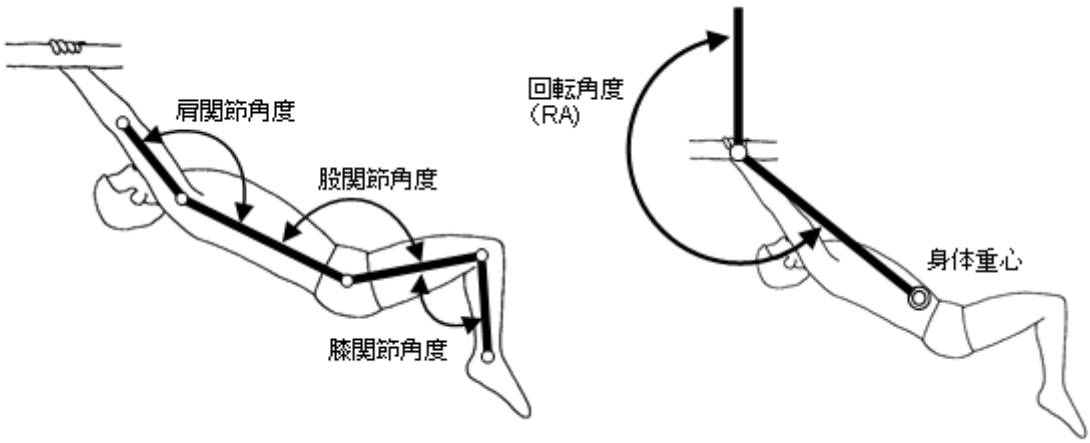

図3. 関節角度と回転角度の定義

Ⅲ. 結果

1. 離手時の変数

表1に、TBとPB 実施時の、宙返りに至る離手時の身体重心の速度と、身体重心まわりの角運動量について、各被験者の平均値と標準偏差を示した。

宙返りの離手時に身体重心がもつ水平速度は、TB (−0.56±0.29m/s) と PB (−0.65±0.30m/s) の間で有意な差は見られなかった。また、垂直速度も、TB (3.34±0.30m/s) と PB (3.37±0.17m/s) の間で有意な差は見られなかった。

宙返りの離手時の身体重心まわりの角運動量は、TB (0.23±0.01/s) よりも PB (0.26±0.02/s) のほうが大きく、両者の間に有意な差が見られた ($p<0.01$)。

表1 離手時の変数

	身体重心の水平速度 (m/s)	身体重心の鉛直速度 (m/s)	身体重心まわりの各運動量 (/s)
かかえ込み	−0.56 ± 0.29	3.34 ± 0.30	0.23 ± 0.01
屈身	−0.65 ± 0.30	3.37 ± 0.17	0.27 ± 0.02
有意差	なし	なし	あり ($p<0.01$)

2. 後方車輪中の変数

1) 関節角度

宙返りに至る後方車輪中の各関節角度の変化を**図4** に示した。

宙返りに至る後方車輪の実施中、懸垂局面において平行棒の高さの影響によって膝関節を屈曲する必要が生じる。そのため膝関節角度は後方車輪の回転に伴って小さくなり、TB と PB 実施時ともに、RA210° まで低下しており、両者の数値に有意な差は見られなかった。しかしながらRA225° 以降、TBとPB ともにやや増加してから再び低下するパターンは一致していたものの、離手までTBにくらべてPBのほうが有意に大きな値を示していた。

股関節角度は、倒立から振り下ろす際にやや減少、懸垂に至る局面で増加、身体の上昇局面で低下するパターンは TB と PB で共通していた。しかしながら、RA195° 以降の身体の上昇局面中、TB にくらべて PB のほうが有意に大きな値を示していた。

肩関節角度は、懸垂局面まで大きな変化がなく、身体の上昇局面において減少するパターンは TB と PB で共通していた。しかしながら、懸垂に至るRA150～165° 、離手の寸前である RA255° の時点で、TB にくらべてPBのほうが有意に小さな値を示していた。

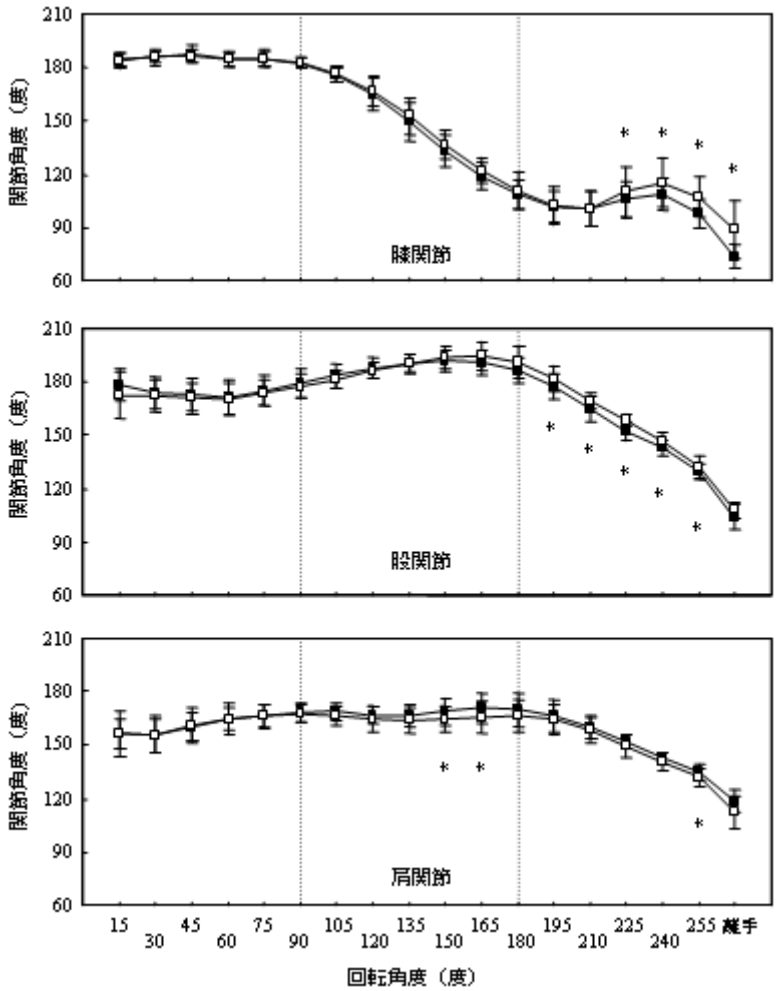

図4.　関節角度の変化

屈身ベーレ（PB）（平均±SD）　かかえ込みベーレ（TB）（平均±SD）

＊　有意差あり（ $p<0.05$ ）

2）関節トルク

宙返りに至る後方車輪中に各関節で発揮されたトルクの変化を**図5** に示した。

宙返りに至る後方車輪中に膝関節で発揮されたトルクは、倒立からの振り下ろし局面でほぼ 0 であったものが、懸垂局面中屈曲トルクが発揮され、それが減少して離手に至るパターンは TB と PB で共通していた。しかしながら、倒立からの振り下ろし局面である RA60° では、PB の実施時にわずかであるが伸展トルクが発揮されており、また、懸垂局面である RA165～180° と離手の時点では、TB にくらべて PB のほうが屈曲トルクの値が小さく、有意な差が認められた。

同様に股関節で発揮されたトルクは、懸垂に至る局面で伸展トルクが発揮され、懸垂局面以降身体が上昇する局面から離手まで屈曲トルクが発揮されるパターンは TB と PB で共通していた。しかしながら、倒立からの振り下ろし局面である RA60° では、PB の実施時にわずかであるが屈曲トルクが発揮されていたのに対して、TB の実施時にはわずかに伸展トルクが発揮されており、また、離手寸前の RA255° と離手の時点では、TB にくらべて PB のほうが屈曲トルクの値が大きく、有意な差が認められた。

肩関節で発揮されたトルクは、倒立からの振り下ろしから伸展トルクが徐々に増加し、懸垂以降身体が上昇する局面で急激に増加した後に減少して離手にいたるパターンは TB と PB で共通していた。しかし

ながら、懸垂に至る局面である RA165° の時点では PB の実施時に TB に比べて有意に大きな伸展トルクが発揮され、また離手の時点においても、TB にくらべて PB で有意に大きな伸展トルクが発揮されていた。

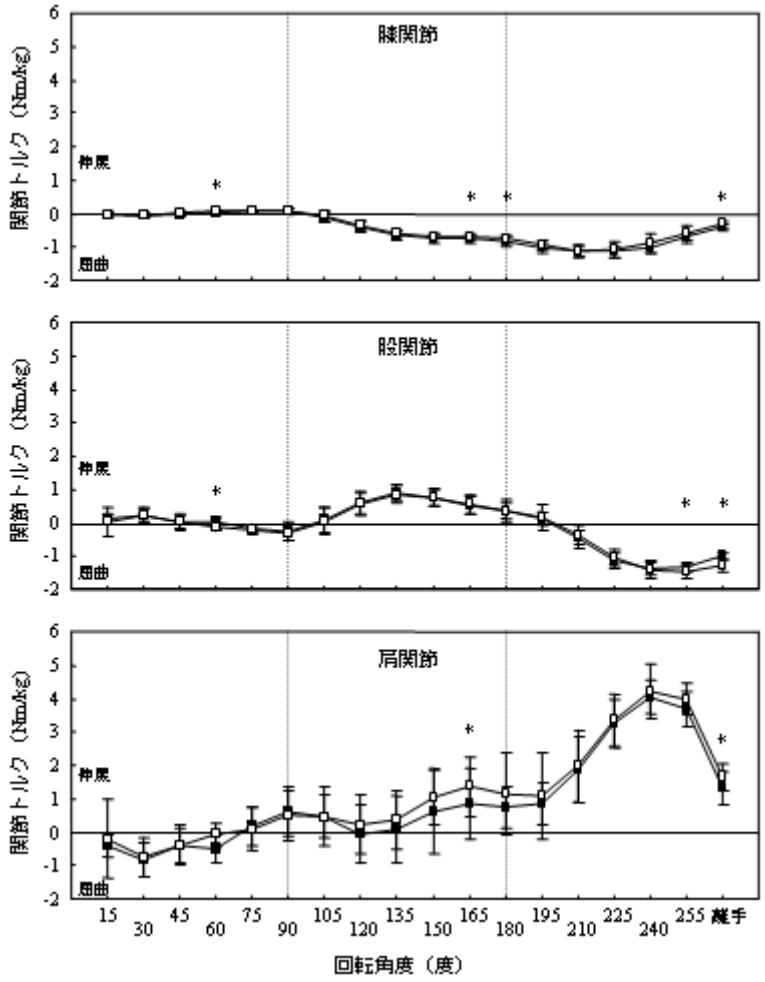

図5. 関節トルクの変化

屈身ベーレ（PB）（平均±SD）　かかえ込みベーレ（TB）（平均±SD）

＊ 有意差あり（ $p<0.05$ ）

3) 関節パワー

宙返りに至る後方車輪中に各関節で発揮されたパワーの変化を図6 に示した。

膝関節で発揮されたパワーは、懸垂に至る局面で増加して正の値を示し、身体が上昇する局面で減少して負の値を示した後再び増加して正の値を示し、減少して離手に至るパターンは TB と PB で共通していた。しかしながら、身体が上昇する局面で減少して負の値を示した RA225° の時点で、TB にくらべて PB のほうが有意に大きな負の値を示し、離手の時点では TB にくらべて PB のほうが有意に小さな正の値を示した。

股関節で発揮されたパワーは、懸垂に至る局面においてわずかに正のパワーが発揮され、懸垂局面で一旦減少した後、身体が上昇する局面で正のパワーが発揮された後にやや減少して離手にいたるパターンは TB と PB で共通していた。しかしながら、懸垂に至る局面である RA135° の時点では PB の実施時に

TB に比べて有意に大きな正のパワーが発揮され、また身体が上昇する局面である RA240° と離手の時点においても、TB にくらべて PB で有意に大きな正のパワーが発揮されていた。

肩関節で発揮されたパワーは、懸垂局面までほぼ 0 を示し、身体が上昇する局面で正のパワーが発揮されて離手に至るパターンは TB と PB で共通していた。しかしながら、TB の実施時には増加した正のパワーが減少して離手に至るのに対して、PB の実施時には減少の幅が小さく、離手の時点で TB にくらべて有意に大きな正のパワーが発揮されていた。

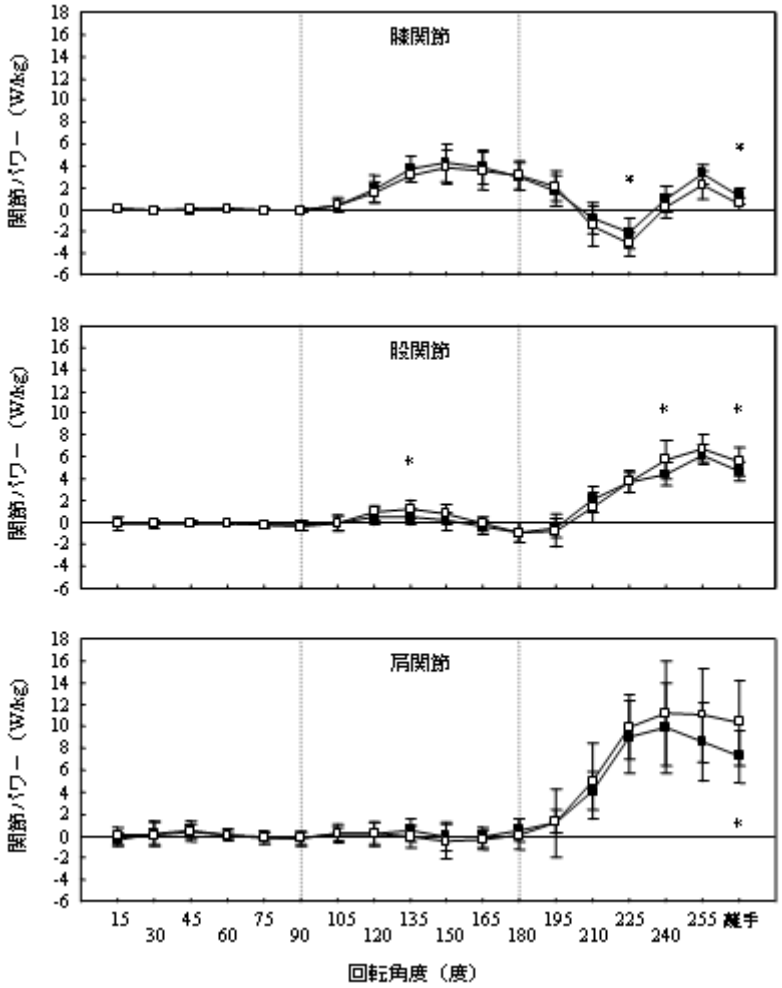

図6. 関節パワーの変化

屈身ベーレ（PB）（平均±SD）　かかえ込みベーレ（TB）（平均±SD）

＊ 有意差あり

Ⅳ. 考察

体操競技においては選手の演技を審判員が採点規則に則って採点することにより勝敗が決せられるが、演技を構成する一つ一つの技は、「安全で美しく、かつ正しい技術で実施（採点規則p17）」されることが求められている。本研究で取り上げた屈身ベーレについては、「最初の宙返りから明確な屈身姿勢を示さなければなら」ず、「屈身姿勢の遅いものや不明確な捌きは、かかえ込み2回宙返りと判定しスーパーE難度として認定しない。」（男子体操競技委員会情報5号,2001）とされている。したがって、宙返りへの離手後のできるだけ早い時点において屈身姿勢となる

ことが要求される。屈身ベーレはその正式名称のとおり後方車輪から宙返りに至るが、平行棒における後方車輪の実施時には器具の高さ（180cm）の制限から、懸垂時に膝関節を屈曲させることが必要とされる。そのため、宙返りに至る後方車輪の上昇を可能にするパワーを生み出す「あふり」といわれる股関節の屈曲を行う際には、膝関節は屈曲せざるを得ない。屈身ベーレは、離手時に屈曲した膝を上述のように宙返りのできるだけ早い時点で伸展させる必要があり、膝関節を屈曲させたまま行うベーレとは異なる技術が要求されると思われる。

後方車輪から宙返りに至る離手の時点で、身体重心の水平速度、垂直速度ともに、ベーレと屈身ベーレの間で有意な差は見られなかった。これは、宙返り時に身体重心が描く空間の軌跡は両者間で差がないことを示していると考えられる。

一方、離手時の身体重心まわりの角運動量は、ベーレよりも屈身ベーレの方が有意に大きかった。かかえ込みに比べて大きな回転半径をもつ屈身姿勢での宙返りを実施するには、かかえ込み宙返りに比べて大きな角運動量が要求されることは当然といえる。屈身ベーレでは、ベーレよりも大きな角運動量獲得のための運動技術が必要であり、この点がベーレと屈身ベーレの運動技術の差であると考えられる。

ここでは特に後方車輪の上昇と宙返りのためのパワーを生み出す「あふり」がなされる懸垂局面以降の両技の差異について考察してゆきたい。

本研究で明らかにされた膝関節角度の動態からは、屈身ベーレではベーレに比べ、懸垂局面以降宙返りの離手に至るまで膝関節の屈曲角度が小さく、また後方車輪の上昇局面において股関節角度は屈身ベーレの方がわずかではあるが大きかった。さらに、肩関節角度は離手の寸前の時点で屈身ベーレの方がわずかに小さかった。こうした関節角度の動態からは、屈身ベーレでは離手の寸前にすでに屈身体勢の先取りがなされていることが伺われる。

関節トルクの動態を見ると、離手時には屈身ベーレにおいて、ベーレに比べて膝関節屈曲トルクが小さく、股関節屈曲トルクが大きく、さらには肩関節の伸展トルクが大きかった。また、関節で発揮されたパワーは、離手の時点で屈身ベーレにおいてベーレに比べて膝関節で正のパワーが小さく、股関節で正のパワーが大きく、さらには肩関節で正のパワーが大きかった。関節トルクの符号から、それぞれの関節で発揮されたパワーは、膝関節では屈曲トルク、股関節で屈曲トルク、肩関節で伸展トルクによるものであることがわかる。したがって離手までの懸垂局面以降では、各関節トルクとパワーの動態に屈身ベーレとベーレでほとんど差が見られないが、離手時には屈身ベーレにおいて大きな股関節屈曲トルクと肩関節伸展トルクが発揮され、それぞれのトルク由来のパワーが大きいことが示された。

土屋と田中（2004）は、ベーレにおいて、離手時の身体重心まわりの角運動量は、後方車輪中の股関節屈曲トルクのピーク値、肩関節伸展トルクによるパワーのピーク値と、それぞれ有意な正の相関関係にあることを示している。本研究では関節で発揮されたトルクとパワーのピーク値と離手時の角運動量との関係は検討していないが、本研究の結果で明らかにされたように、屈身ベーレにおいてはベーレに比べて大きな回転半径で宙返りを行う必要があるため、離手時の身体重心まわりの角運動量が大きい。したがって、屈身ベーレにおいても、ベーレと同様、股関節で発揮される屈曲トルクと肩関節で発揮される伸展トルク、それらによるパワーを大きくすることが必要であり、離手の時点までそれらを維持する必要があることが示唆される。

トレーニングの現場においては、後方車輪で上昇する際の股関節屈曲動作は「あふり」、同じ局面での肩関節伸展動作は「肩の引き」という言葉で表現されている。したがって屈身ベーレの実施時には、ベーレに比べ、離手時において「股関節のあふり」と「肩関節の引き」がより強調される必要があり、さらには股関節屈曲トルクと肩関節伸展トルク、それらが発揮するパワーを大きくする体力的なトレーニングが必要となることが考えられる。

Ⅴ．まとめ

現在多くの競技会で実施されているベーレと、その発展技であり、より高難度の屈身ベーレをバイオメカニクス的に比較することにより、屈身ベーレの運動技術を探ることが本研究の目的であった。

競技会における両技の実施を撮影したビデオ画像から、身体重心の速度、身体重心まわりの角運動量、関節で発揮されたトルクとパワーを算出した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 宙返りの離手時に身体重心がもつ水平速度は、ベーレと屈身ベーレの間で有意な差は見られなかった。また、垂直速度も両者間で有意な差は見られなかった。
2) 宙返りの離手時の身体重心まわりの角運動量は、ベーレよりも屈身ベーレのほうが大きく、両者の間に有意な差が見られた。
3) 離手までの懸垂局面以降では、各関節トルクとパワーの動態に屈身ベーレとベーレでほとんど差が見られないが、離手時には屈身ベーレにおいて大きな股関節屈曲トルクと肩関節伸展トルクが発揮され、それぞれのトルク由来のパワーが大きいことが示された。
4) 関節トルクとパワーの動態から、屈身ベーレの実施時には、ベーレに比べ、離手時において「股関節のあふり」と「肩関節の引き」が、より強調される必要があり、さらには股関節屈曲トルクと肩関節伸展トルク、それらが発揮するパワーを大きくする体力的なトレーニングが必要となることが示唆された。

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., 15(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. Willson, J. Dapena and G. 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, pp.641-647.

土屋 純, 田中 光(2004):「懸垂前振り後方かかえ込み 2 回宙返り腕支持 (ベーレ)」の運動力学的分析. スポーツ科学研究, 1, 1-9.

Winter, D. A.(1990):Biomechanics and motor control of human movement 2nd.ed.. John Wiley & Sons Inc, New York.

財団法人日本体操協会(2001):体操競技採点規則男子 2001 年版.財団法人日本体操協会, 東京.

財団法人日本体操協会男子体操競技委員会(2002):情報5号,p15.