体操競技の後方宙返りにおける空中局面の身体の回転方略

宮崎 彰 吾^{1†}, 藤井 範 久²¹ 筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻,² 筑波大学体育系

要旨: 本研究の目的は, 一般的に行われている2種類の後方宙返りの身体の回転方略を比較することであった. 男子大学体操競技者9名(身長: 1.66 ± 0.03 [m], 体重: 61.2 ± 3.8 [kg], 年齢: 20.1 ± 1.9 歳)を対象に, 異なる離地高からのかかえ込みと屈身の後方宙返りを行った. 身体重心まわりの角運動量, 離地時の身体重心の鉛直速度, 空中局面の慣性モーメントの変化について検討した. その結果, 慣性モーメントの大きさは離地高によって調節され, 慣性モーメントの変化のタイミングは空中姿勢に応じて調節されていることが明らかになった. つまり, 慣性モーメントの変化と大きさが後方宙返りを成功させるための重要かつ方略的なパラメーターであることが考えられた.

キーワード: 慣性モーメント, 角運動量, 着地動作, 動作分析

1. 背景および目的

様々な宙返りが存在する体操競技において, 宙返りは回転するだけでは成功とはならず, 宙返りを成功させるためには正しい着地を行う必要がある. 体操競技における正しい着地とは, 採点規則¹⁾に, 「偶然の結果により収められたものではなく, 準備がなされた着地である. 選手はひとつの技を十分にマスターし, 着地の前に回転力を抑え, 身体を伸ばして着地できる優れた技術によって演じるべきである.」と記述されている. 空中では重力以外の外力は加わらないため, 「回転力」を「角速度」と読み替え, 「身体を伸ばすこと」を「身体重心まわりの慣性モーメントの増大」と考えると, 着地する前に慣性モーメントを大きくすることで角速度を小さくして着地する技術を, 正しい着地の技術として捉えることができる.

採点規則では, かかえ込み姿勢の後方宙返りよりも屈身姿勢の後方宙返りの方が難しいと規定されている. その理由としては, 屈身姿勢はかかえ込み姿勢よりも膝関節が伸展位であるため, 回転し難いことが容易に想像できる. いずれの宙返りにおいても最終的には足部から着地して静止することが求められことから, 異なる姿勢の宙返りにおいても, 足部から着地できるように身体を回転させるためには, 異なる身体の回転方略を用いていることが考えられる.

また, 同じ姿勢の宙返りであっても, 空中局面の時間が異なる場合には, 異なる身体の回転方略を用いることで身体の回転を制御していると考えられる.

このように後方宙返りの着地の成否について身体の回転制御が重要な要素であることは考えられるが, 先行研究においては, 宙返りの踏み切り局面^{2,3)}や着地局面^{4,5)}について検討しているものが多く, 空中の身体操作(回転の制御)について検討しているものは少ない. 後方宙返りの身体の回転方略について検討することで, どのような方略を用いて身体の回転を制御しているか, さらに, なぜその方略を用いているのかに対する示唆を得ることができると考えられる.

そこで本研究では, 異なる空中姿勢および空中局面時間の後方宙返りにおける, 空中局面の身体の回転方略についてバイオメカニクスの観点から検討することを目的とした.

2. 方法

2.1 被験者

本研究の被験者はT大学体操競技部員の男性9名とした(身長: 1.66 ± 0.03 [m], 体重: 61.2 ± 3.8 [kg], 年齢: 20.1 ± 1.9 [year], 競技歴 10.1 ± 3.1 [year]). なお, T大学は団体総合で全日本選手権大会(日本国内トップレベルの大会)に出場できる競技レベルであった.

実験に先立って被験者に研究目的, 実験内容, データの取り扱いなどを説明し, 危険性や苦痛を感じた際には自らの意思によっていつでも中止できることを伝え, 口頭および書面にて協力の同意を得た. なお本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得た.

2014年5月8日受付 2014年8月5日受理

*本研究は第23回バイオメカニズムシンポジウムにて発表済みである.

†〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1

筑波大学人間総合科学研究科体育科学専攻

宮崎 彰吾

Tel: 029-853-5654 (内線直通)

E-mail: miyazaki@lasbim.taiiku.tsukuba.ac.jp

2. 2 実験課題

実験課題は立位姿勢から行う後方宙返りとした。この課題に空中局面の身体姿勢（空中姿勢）による2条件と、踏み切る初期高による2条件を設けた。なお、初期高の設定については、高すぎる初期高が被験者の心理的負担になり、課題が測定できないような事態を避けるために、事前に予備実験を行い、全被験者において心理的負担がないと思われる初期高を設定した。空中姿勢による条件は、「かかえ込みの姿勢（Tuck 条件）」と「屈身の姿勢（Pike 条件）」として、踏み切り初期高による条件は「地面から行う条件（0 条件）」と「台高 30[cm] から行う条件（30 条件）」とした。これらを組み合わせ、以下の4つの課題を設定した。

- ・地面から後方かかえ込み宙返り（Tuck-0）
- ・地面から後方屈身宙返り（Pike-0）
- ・台高 30cm から後方かかえ込み宙返り（Tuck-30）
- ・台高 30cm から後方屈身宙返り（Pike-30）

被験者には立位姿勢からの後方宙返りをできるだけ高く行うこと、さらに実際に競技会での試技のようにできる限り着地を止めるように指示した。また各課題において複数回の試技を行った。分析対象の試技は、後方宙返りの着地が止まり、かつ被験者の内省が最も良い試技とし、各課題1試技ずつを分析対象とした。

2. 3 データ収集

赤外線カメラ（MX-T10 および MX-T20, Vicon Motion Systems Ltd.）20 台を用いて光学式三次元自動動作解析システム（ViconMX+ システム, Vicon Motion Systems Ltd.）により、身体計測点 47 点に貼付した反射マーカーの三次元座標データ（サンプリング：250[Hz]）を収集した。

2. 4 データ処理

前後方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸、左右方向を X 軸とした右手系の静止座標系を設定した。

計測した身体各部に貼付したマーカーの3次元座標は、Wells and Winter の方法⁶⁾によって遮断周波数（7.7[Hz]～21.0[Hz]）を決定し、Butterworth digital filter を用いて平滑化処理を行った。

手関節、肘関節、拇指球、足関節、膝関節については、関節の周囲に貼付した2個のマーカーの中点を関節中心とした。また、肩関節については前後に貼付した2個のマーカーの中点を肩関節中心とした。股関節については臨床歩行分析研究会の推定式⁷⁾を用い、大転子と上前腸棘点のマーカーを結ぶ線分上に大転子から 1/3 の位置にある点を仮想標点とし、左右の仮想標点を結ぶ線分上で、左右大転子間の長さの 18[%] を内挿した点を股関節中心とした。

身体全身を 15 の剛体リンクセグメント（頭部、上胴、下胴、左右上腕部、左右前腕部、左右手部、左右大腿部、左右下腿部、左右足部）からなるモデルとして扱った。なお上胴と下胴の間には仮想的な関節があるものとした。

2. 5 算出項目と算出方法

(1) 鉛直方向の身体重心速度

阿江の身体部分慣性係数⁸⁾を用いて、身体分析点の座標データおよび事前に測定した被験者の体重から、身体部分および全身の重心位置、各セグメントの慣性パラメータを算出し、身体重心位置を数値微分することで身体重心速度 V_{cgz} [m/s] を算出した。

(2) セグメント角度および関節角度

セグメント角度は、矢状面（Y-Z 平面）における上胴セグメント（ θ_{Trunk} ）、大腿セグメント（ θ_{Thigh} ）および下腿セグメント（ θ_{Shank} ）と水平軸とのなす角度 [deg] を算出した。

関節角度 [deg] は各関節をはさむ2つのセグメントがなす角度として、膝関節角度（ θ_{Knee} ）、股関節角度（ θ_{Hip} ）、体幹角度（ θ_{Torso} ）を算出した。

(3) 身体重心まわりの慣性モーメント

式 (1) により身体重心まわりの慣性モーメント [kgm²] を算出した。

ここで、 I_{cg} は身体重心まわりの慣性モーメント、 I_i はセグメント i の慣性モーメント、 m_i はセグメント i の質量、 r_i は身体重心からセグメント i の部分重心への位置ベクトルである。なお、前額軸（X 軸）における身体重心まわりの慣性モーメントを求めた。

$$I_{cg} = \sum_i^{15} [I_i + m_i r_i^2] \quad (式 1)$$

(4) 身体重心まわりの角運動量

式 (2) により身体重心まわりの角運動量 [kgm²/s] を算出した。

ここで、 L_{cg} は身体重心まわりの角運動量、 I_i はセグメント i の慣性モーメント、 ω_i はセグメント i の角速度ベクトル、 r_i は身体重心からセグメント i の部分重心への位置ベクトル、 m_i はセグメント i の質量、 V_i は身体重心に対するセグメント i の部分重心速度ベクトルである。なお、前額軸（X 軸）の身体重心まわりの角運動量を求めて、被験者から見て後方を正の値とした。

$$L_{cg} = \sum_i^{15} [I_i \omega_i + r_i \times m_i V_i] \quad (式 2)$$

2. 6 分析範囲とデータの規格化

分析範囲は後方宙返りの足部離地から足部接地までの空中局面とした。また、離地から身体重心まわりの慣性モーメントの極小値の出現時期までを「Close Phase」として、その後接地までを「Open Phase」と定義して分析をおこなった。なお、分析範囲を 100[%] として時間を規格化した。

慣性モーメント [kgm^2] は, 被験者の質量 [kg] と身長 [m] の二乗で除して 100 を乗ずることで, 規格化しその割合を百分率で表した. 角運動量 [kgm^2/s] は, 被験者の質量 [kg] と身長 [m] の二乗で除して規格化した. したがって, 規格化後の単位はそれぞれ, 慣性モーメントは [%], 角運動量は [s^{-1}] となる.

2. 7 統計処理

離地時, 接地時それぞれの時点の変数について, 繰り返しのある二要因分散分析 (要因: 空中姿勢・初期高, 水準数: 2 水準) によって, 単純主効果と交互作用の検定を行った. また, 離地時の鉛直方向の身体重心速度と身体重心まわりの角運動量との相関分析にはピアソンの積率相関係数を用いた. なお統計学的有意水準は 5[%] とした.

3. 結果

3. 1 離地時および接地時のパラメータについて

(1) 離地時の鉛直方向の身体重心速度と身体重心まわりの角運動量について

表 1 に離地時の鉛直方向の身体重心速度 (V_{CGZ}) と身体重心まわりの角運動量 (L_{CG}) を被験者全員の平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) で示した. 鉛直方向の身体重心速度と角運動量は, 空中姿勢条件による有意な主効果を示したが, 初期高条件による主効果はなく, Tuck 条件は Pike 条件に比べて鉛直方向の身体重心速度が大きく ($F=5.7$, $p<0.05$) 角運動量が小さかった ($F=11.86$, $p<0.01$). 一方, 初期高が変わっても鉛直方向の身体重心速度と角運動量には有意な差はなかった.

図 1 に離地時の鉛直方向の身体重心速度と身体重心まわりの角運動量の関係をプロットで示した. 4 条件すべてのプロットにおける二変数の相関係数は -0.72 ($p<0.001$) であり, 強い負の相関関係を示した. 各条件での相関係数は, Tuck-0: $r=-0.70$ ($p<0.05$), Tuck-30: $r=-0.81$ ($p<0.01$), Pike-0: $r=-0.43$ ($p=0.25$, n.s.), Pike-30 は $r=-0.82$ ($p<0.01$) であり, Pike-0 のみ有意な相関関係ではなかった. Tuck 条件では初期高にかかわらず鉛直方向の重心速度が大きく, 角運動量が小さかった. 一方 Pike 条件では初期高にかかわらず鉛直

表 1 離地時の鉛直方向の身体重心速度と身体重心まわりの角運動量

	V_{CGZ} [m/s]	L_{CG} [s^{-1}]
Tuck-0	2.39 ± 0.14	0.24 ± 0.02
Pike-0	2.33 ± 0.11	0.27 ± 0.01
Tuck-30	2.37 ± 0.18	0.25 ± 0.03
Pike-30	2.25 ± 0.13	0.27 ± 0.02

主効果 (空中姿勢)	* Tuck > Pike	** Tuck < Pike
主効果 (初期高)	n.s	n.s
Mean $\pm$ SD	n: 9	* $p<0.05$ ** $p<0.01$

方向の重心速度が小さく, 角運動量が大きかった.

(2) 離地時と接地時の姿勢について

図 2 に各課題におけるスティックピクチャーの典型例を示した. また表 2 に離地時と接地時の各セグメント角度を全被験者の平均値と標準偏差で示した.

離地時には, θ_{Trunk} , θ_{Thigh} , θ_{Shank} は空中姿勢条件の主効果のみ示し, Tuck 条件の方が Pike 条件に比べて各セグメント角度が大きかった (θ_{Trunk} : $F=5.2$, $p<0.05$, θ_{Thigh} : $F=5.6$, $p<0.05$, θ_{Shank} : $F=5.1$, $p<0.05$).

接地時には, θ_{Trunk} は空中姿勢条件と初期高条件の有意な主効果を示した. Pike 条件の方が Tuck 条件に比べてセグメント角度が大きく ($F=50.3$, $p<0.001$), 0 条件の方が 30 条件に比べてセグメント角度が大きかった ($F=33.2$, $p<0.001$). θ_{Thigh} は空中姿勢条件のみ有意な主効果を示し, Pike 条件の方が Tuck 条件に比べてセグメント角度が大きかった ($F=19.3$, $p<0.001$). θ_{Shank} は各課題について有意な主効果はなかった.

3. 2 空中局面のパラメータの変化について

(1) 関節角度の変化について

図 3 に空中局面の θ_{Torso} (a), θ_{Hip} (b), θ_{Knee} (c) の時系列変化を全被験者の平均値で示した. いずれの角度においても, 初期高条件では概ね同様の変化パターンを示した. 空中姿勢条件では θ_{Torso} , θ_{Hip} , θ_{Knee} の変化のタイミングが異なったパターンを示した.

θ_{Torso} と θ_{Hip} では, 初期高条件によらず, Tuck 条件の方が Pike 条件よりも早いタイミングで屈曲していた. θ_{Torso} では最小値に大きな差はないが, 最小値のタイミングは Tuck 条件の方が Pike 条件より早かった. θ_{Hip} では, 空中

図 1 離地時の鉛直方向の身体重心速度と身体重心まわりの角運動量との関係

図2 各課題のスティックピクチャー (典型例)

図3 空中局面の各関節角度の時系列変化

表2 離地時と接地時の各セグメント角度

Mean±SD n:9	Take off			Landing		
	θTrunk	θThigh	θShank	θTrunk	θThigh	θShank
Tuck-0	0.895±0.096	1.269±0.071	1.785±0.099	3.289±0.232	1.544±0.045	1.851±0.097
Pike-0	0.817±0.117	1.169±0.117	1.693±0.099	3.768±0.206	1.661±0.085	1.843±0.139
Tuck-30	0.806±0.117	1.235±0.087	1.761±0.085	2.942±0.178	1.595±0.059	1.836±0.104
Pike-30	0.740±0.105	1.134±0.109	1.668±0.068	3.375±0.141	1.654±0.038	1.843±0.091
空中姿勢	* Tuck > Pike	* Tuck > Pike	* Tuck > Pike	*** Tuck < Pike	*** Tuck < Pike	n.s
初期高	n.s	n.s	n.s	*** 0 > 30	n.s	n.s
				* p<0.05	** p<0.01	*** p<0.001 (unit: rad)

姿勢条件において、最小値とそのタイミングには大きな違いはみられなかった。また、初期高条件にかかわらず、空中局面のおよそ70～80[%]以降に股関節が伸展し、その伸展変位はTuck条件の方がPike条件に比べて大きかった。θKneeは、空中姿勢条件においてTuck条件の方がPike条

件に比べて屈曲変位が大きく、Tuck条件の変化は二峰性を示していた。一方Pike条件は、離地後すぐに伸展し始めて、その後伸展位を保ったまま接地をしていた。

(2) 身体重心まわりの慣性モーメントの変化について

図4に空中局面における身体重心まわりの慣性モーメントの時系列変化を全被験者の平均値で示した。Tuck条件とPike条件の慣性モーメントの変化は異なるパターンを示し、0条件と30条件の慣性モーメントの変化は概ね同様の変化パターンを示した。

Tuck条件では、離地後に慣性モーメントが急激に減少し、60[%]付近で最小となった。一方Pike条件では、離地後に慣性モーメントは緩やかに減少していたが、30[%]付近から急激に減少した。Tuck条件とPike条件の慣性モーメントの最小値に違いはなかったが、最小値の出現時刻はTuck条件の方がPike条件よりも早かった。

図5に空中局面における慣性モーメントのClose PhaseとOpen Phaseの局面時間を全被験者の平均値と標準偏差で示した。Close Phaseの局面時間については、空中姿勢条

図4 空中局面の身体重心まわりの慣性モーメントの時系列変化

図5 空中局面におけるClose PhaseとOpen Phaseの局面時間

件の主効果のみ示し、Tuck条件の方がPike条件に比べて有意に短かった ($F=12.4$, $p<0.01$)。Open Phaseの局面時間については、空中姿勢条件と初期高条件の主効果を示した。Tuck条件の方がPike条件に比べて有意に長く ($F=17.3$, $p<0.001$)、30条件の方が0条件に比べて有意に長かった ($F=16.6$, $p<0.001$)。

(3) 身体重心まわりの慣性モーメントの変化率について

表3に身体重心まわりの慣性モーメント変化率の最小値と最大値およびその出現時刻を全被験者の平均値と標準偏差で示した。最小値については有意な差はなかったが、最小値の出現時刻については空中姿勢条件の主効果のみ示し、Tuck条件の方がPike条件に比べて有意に早かった ($F=21.5$, $p<0.01$)。最大値については、空中姿勢条件と初期高条件の主効果を示し、Tuck条件の方がPike条件に比べて有意に大きく ($F=6.53$, $p<0.01$)、0条件の方が30条件に比べて有意に小さかった ($F=4.1$, $p<0.05$)。最大値の出現時刻については、空中姿勢条件の主効果のみ示し、Tuck条件の方がPike条件に比べて有意に早かった ($F=23.4$, $p<0.01$)。

4. 考察

体操競技は採点競技であるため、技もしくは演技の「出来栄」の善し悪しが問われることになる。体操競技の評価の礎となる採点規則からも宙返りの着地では身体を伸ばして準備して行うことが求められている。また、宙返りの空中局面では、「かかえ込み (Tuck)」や「屈身 (Pike)」といった身体の姿勢を空中局面で明確に示さなければならないことも記述されている (採点規則 2013 年版)。このような空中姿勢の制限が加わりながら、身体の回転角度が過不足なく回転し、さらに接地時には身体を伸ばした姿勢になるようにすることが必要になる。

空中局面では、身体に加わる外力は重力のみとなり身体重心まわりにはモーメントが作用しないため、身体重心まわりの角運動量は保存される。角運動量は慣性モーメントと角速度の積で求められることから、身体重心まわりの慣性モーメントと身体の回転角速度が反比例の関係になる。つまり、身体重心まわりの慣性モーメントを変化させることで身体の回転角速度を変化させることができる。ま

表3 身体重心まわりの慣性モーメント変化率の最大値と最小値および出現時刻

	Minimum [s ⁻¹]	Time [s]	Maximum [s ⁻¹]	Time [s]
Tuck-0	-24.16±2.88	0.11±0.02	9.66±3.62	0.56±0.03
Pike-0	-23.21±4.26	0.19±0.07	6.52±2.41	0.60±0.02
Tuck-30	-24.13±2.42	0.11±0.01	11.53±3.63	0.56±0.05
Pike-30	-22.12±4.24	0.20±0.07	8.99±3.52	0.63±0.04
空中姿勢条件	n.s	** Tuck < Pike	** Tuck > Pike	*** Tuck < Pike
初期高条件	n.s	n.s	* 0 < 30	n.s
Mean ± SD n : 9			* p < 0.05 ** p < 0.01 *** p < 0.001	

た、宙返りから正確に着地するためには、空中局面の身体の回転角度を適切に制御することが必要となる。以上の観点から体操競技の宙返りにおける空中局面の身体の回転方略について考察していく。

4. 1 後方宙返りの身体の回転方略について

空中局面の時間は、初期高条件において 0 条件よりも 30 条件の方が有意に長かった (図 5) が、離地時の鉛直方向の身体重心速度には有意な差がなかった (表 1) ため、空中局面の時間の増大は初期高による影響であると考えられる。また、初期高条件による Close Phase の局面時間に変化はなかったが、Open Phase の局面時間は 0 条件よりも 30 条件の方が有意に長かったこと (図 5) から、初期高の増大による空中局面の時間の増大は、Close Phase の局面時間の増大ではなく、Open Phase の局面時間の増大であると言える。さらに、Open Phase の慣性モーメント変化率の最大値の結果 (表 3) から、初期高の増大にともない慣性モーメント変化率の最大値が増大していた。つまり、初期高が増大すると、空中局面の時間すなわち身体が回転する時間が増大するので、初期高が低い条件よりも慣性モーメントを増大させて身体の回転角速度を小さくしないと、身体が回転しすぎてしまい着地ができなくなる。以上の結果から、初期高の増大 (空中局面時間の増大) に対して、慣性モーメントの増加率を大きくすることで身体の回転角速度を小さくする身体の回転方略があることが示唆された。

身体重心まわりの慣性モーメントの変化は、身体重心から全身の各セグメント重心の位置ベクトルと各セグメントの質量に依存する。実際には、身体各関節角度が変化することによって、身体重心から各セグメント重心への位置ベクトルが変化する。そこで、慣性モーメントの変化 (図 4) と体幹部および下肢の関節角度の変化 (図 3) の変化のタイミングをみると、慣性モーメントの増大には股関節角度の増大が影響していると考えることができる。さらに Tuck 条件においては、ほぼ同時期に膝関節の伸展が大きくなっていることから、Tuck 条件では股関節と膝関節の両方を変化させて慣性モーメントを変化させていると考えられる。一方 Pike 条件においては、膝関節が伸展位であるという制約があるため、主に股関節の変化によって慣性モーメントを変化させる必要がある。つまり Tuck 条件の方が Pike 条件よりも Open Phase で慣性モーメントを増大させやすい、すなわち身体の回転角速度を減少させやすく、前述した身体の回転方略を利用しやすいことが考えられた。

本研究では、地面から宙返りを行う 0 条件と、30[cm] の台から宙返りを行う 30 条件のみの実施である。しかし、より初期高の大きい条件の場合、つまり初期高の増大による空中局面の時間の増大がより顕著な場合においては、前述した慣性モーメントの変化の大きさ (慣性モーメント変化率) を変える身体の回転方略では、身体の回転角度が大きくなり、着地ができなくなることが想定される。Tuck 条件

よりも Pike 条件の方が Close Phase の局面時間が有意に長い (図 5) ことは、慣性モーメントの変化のタイミングが異なることを示している。空中局面の序盤では Pike 条件においては慣性モーメントの急激な減少が Tuck 条件よりも遅れていた。Pike 条件の方が Tuck 条件よりも離地時の角運動量は大きいものの、急激な慣性モーメントの減少が遅いこと (図 4) で、この時期の身体の回転角度は Tuck 条件よりも Pike 条件の方が小さくなることが考えられる。そこで、Pike 条件では、Tuck 条件よりも慣性モーメントが小さい (身体の回転角速度が大きい) 時間を長くすること、すなわち Close Phase の時間の増大が必要となったと考えられる。これらの結果から、Close Phase と Open Phase の局面を切り替えるタイミングに見られる、慣性モーメントの変化のタイミングによる身体の回転方略があることが示唆された。この身体の回転方略は、空中姿勢条件において見られたが、初期高条件による慣性モーメントの変化率の最大値が 0 条件よりも 30 条件の方が大きいこと (表 3) を考えると、慣性モーメントの変化のタイミングによる身体の回転方略よりも、変化の大きさによる身体の回転方略の方が優先的に出現することが考えられた。

離地時の身体重心速度と角運動量の間には相反関係が見られた (図 1)。つまり一方が増大するともう一方が減少することを示している。空中姿勢条件では、この二つの変数があり異なること、初期高条件においては変化がないことから、空中姿勢などの宙返りの種類によって変化させていることが考えられる。仮に空中局面の慣性モーメントが変化しないとすると、Close Phase と Open Phase が出現せず、前述した二つの身体の回転方略を用いることができなくなるため、離地時の鉛直方向の重心速度と角運動量によって身体の回転角度が決定することは容易に想像できる。このような状況では、離地時の鉛直方向の重心速度と角運動量が身体の回転角度の決定に対して支配的であることは明白である。つまり離地時のパラメータ (鉛直方向の重心速度と角運動量) によって身体の回転方略があることが示唆された。また、離地時にこれらの変数が決まるため、この身体の回転方略は、空中局面での慣性モーメントの変化による二つの身体の回転方略よりも、時間的に先に用いられることになる。

4. 2 後方宙返りの身体の回転方略の選択と使用について

後方宙返りを行う際に前項で述べた身体の回転方略をどのように使っているか、なぜその方略を用いるのかについて検討してみる。先に述べたように時間経過を考えると、離地時のパラメータによる身体の回転方略が最初に行われていると考えられる。この方略は初期高条件には依存せず、空中姿勢条件において変化させる必要があった。被験者は日常的に宙返りを行っていること、また宙返りの成否は着地の成否によって明確に認識できることから、日々の練習の中にかかえ込みの宙返りと屈身の宙返りでは、離

地時のパラメータを変化させることによる身体の回転方略を経験的に行っていることの現れであることが考えられる。Hwang ら³⁾は異なる種類の後方二回宙返りの踏切中の身体重心速度と身体重心まわりの角運動量を検討して、空中姿勢の違いやひねりの有無によって踏切中および離地時の重心速度と角運動量が異なることを報告している。これは本実験の結果を支持するものであると考えられる。

初期高条件において、離地時のパラメータ(表 1)や姿勢(表 2)、さらに Close Phase の時間(図 5)に差がないことから、Close Phase における身体の回転角度も同程度になることが考えられる。その時期(規格化時間 60 ~ 70[%] 頃)の回転角度はおおよそ 180[deg] になり、図 2 から頭部が下になっている時期であることがわかる。先行研究によると体操選手は、宙返りを成功させるために視覚情報を利用していることが考えられている^{9,10,11)}。また佐藤¹²⁾はその視覚情報の利用は着地面を固視することによってなされていると報告している。すなわち規格化時間 60 ~ 70[%] から、地面を視覚的に捉えていることが考えられ、視覚情報を用いて身体の回転角度についてフィードバックを行い、回転角度を調整していることが考えられる。この視覚情報の利用は Open Phase で見られることから、慣性モーメントの変化率による身体の回転方略に用いられていることが考えられた。

5. まとめ

本研究は、異なる空中姿勢条件および異なる初期高条件の後方宙返りにおける身体の回転方略について検討した。その結果、後方宙返りの着地を成功させるために、空中姿勢条件が変わった時は、慣性モーメントを変化させるタイミングを変えていたこと、離地時の身体重心速度と角運動量を変えていたことが明らかになった。また、初期高条件が変わった時は、慣性モーメントの変化の大きさを変えていたことが明らかになった。以上のことから、異なる条件での後方宙返りは、着地を成功させるために異なる身体の回転方略を条件に応じて用いていることが示唆された。

参考文献

- 1) 公益財団法人日本体操協会審判委員会男子審判部：採点規則男子 2013 年版, 34, (2013).
- 2) Mkaouer, B., Jemni, M., Amara, S., Chaabèn, H. and Tabka, Z.: Kinematic and kinetic analysis of counter movement jump versus two different types of standing back somersault, *Science of Gymnastics Journal*, 4(3), 61-71, (2012).
- 3) Hwang, I., Seo, G. and Cheng, L. Z.: Takeoff mechanics of the double backward somersault, *International Journal of Biomechanics*, 6, 177-186, (1990).
- 4) McNitt-Gray, J. L., Hestera, D. M., Mathiyakoma, W. and Munkasyb, B. A.: Mechanical demand and multijoint control during landing depend on orientation of the body segments

relative to the reaction force, *Journal of Biomechanics*, 34, 1471-1482, (2001).

- 5) Mills, C., Pain, M. T. and Yeadon, M. R.: Reducing ground reaction forces in gymnastics' landings may increase internal loading, *Journal of Biomechanics*, 42, 671-678, (2009).
- 6) Wells, R. P. and David, A. W.: Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits, *Human locomotion I*, 92-93, (1980).
- 7) 倉林準, 持丸正明, 河内まき子: 股関節中心推定法の比較・検討, *バイオメカニズム学会誌*, 27(1), 29-36, (2003).
- 8) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定 (1 部 形態と運動の計測), *バイオメカニズム*, 11, 23-33, (1992).
- 9) Bardy, B. G. and Laurent, M.: How is body orientation controlled during somersaulting?, *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 24(3), 963-977, (1998).
- 10) Davlin, C. D., Sands, W. A. and Shultz, B. B.: The role of vision in control of orientation in a back tuck somersault, *Motor Control*, 5, 337-346, (2001).
- 11) Lee, D. N., Young, D. S. and Rewt, D.: How do somersaulters land on their feet?, *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 18(4), 1195-1202, (1992).
- 12) 佐藤佑介: 後方かかえ込み宙返りにおける視線移動パターン, *スポーツ心理学研究*, 35(2), 41-49, (2008).

宮崎彰吾 (みやざき しょうご)

2010 年東海大学大学院修士課程体育学研究科体育学専攻修了。2010 年修士 (体育学)。現在、筑波大学大学院博士後期課程人間総合科学研究科体育科学専攻在学中。体操競技および器械運動における身体動作のバイオメカニクスの研究に興味がある。国際バイオメカニクス学会、日本バイオメカニクス学会、日本体育学会、日本体操競技・器械運動学会の会員。(バイオメカニズム学会学生会員)

The Body Rotation Strategy of Backward Somersault in Artistic Gymnastics

Shogo MIYAZAKI^{1 †}, Norihisa FUJII²

¹ Doctoral Program in Physical Education, Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

² Faculty of Health and Sport Science, University of Tsukuba

Abstract : The purpose of this study was to compare the rotational strategies used for the execution of two types of commonly performed backward somersaults. Nine male university gymnasts (height: 1.66 ± 0.03 [m], weight: 61.2 ± 3.8 [kg], age: 20.1 ± 1.9 [year]) performed tuck and pike type backward somersaults from different takeoff heights. The angular momentum, vertical velocity of the center of gravity at takeoff, and changes in the moment of inertia during the airborne phase were examined. It was found that the magnitude of the moment of inertia was modulated according to the takeoff height and the timing of the moment of inertia was modulated according to the mid-air posture. Therefore, the timing and amplitude of the moment of inertia were concluded as being the critical and independent strategic parameters for performing a backward somersault successfully.

Key Words : Moment of inertia, Angular momentum, Landing motion, Motion analysis

Received May. 8, 2014 Accepted Aug. 5, 2014

[†]Shogo MIYAZAKI

University of Tsukuba

1-1-1, Tennodai, Ibaraki, 305-8577, JAPAN

Tel: 029-853-5654

E-mail: miyazaki@lasbim.taiiku.tsukuba.ac.jp