

体操競技の後方宙返りにおけるキネティクスの分析による着地動作方略の検討

宮崎彰吾¹⁾・藤井範久²⁾・山田 洋³⁾・館 俊樹⁴⁾

The study on landing strategy of backward somersault in artistic gymnastics by kinetic analysis.

Shogo MIYAZAKI, Norihisa FUJII, Hiroshi YAMADA and Toshiki TACHI

Abstract : The purpose of this study was to examine the backward somersault landing strategy of the gymnasts by using biomechanical approach. The nine male gymnasts were participated in this study. Kinematics and kinetics data of motion data were calculated.

As a result of increasing the impact of the somersaults at the landing, although joints works of the lower limbs (hip joint, knee joint, ankle joint) for absorbing increased, the hip and ankle joints increased the joints works by changing the moving during time of the joints, and the knee joint increased the joints works by increasing the joint torque. Furthermore, the knee joint had highly absorbing to translational movement, the ankle joint had a role to control of the body after LOW, and the hip joint generated extension torque so as not to make the trunk forward inclination.

It was suggested that the roles of the joints were changed for the impact at the landing, and the landing strategy was effective not only for translational movement but also for control of rotational movement.

Key words : landing strategy, kinetics analysis, impact

I. 緒言

体操競技では、その競技特性から着地動作を行う場面が多い。その際には、並進的な運動だけではなく、宙返りなどの回転運動を伴うことも多い。先行研究の多くはドロップ着地動作のように並進的な運動を対象としたものが多く、実際の宙返りの着地動作を対象として、その着地の際のキネティクスのデータを詳細に検討したものはあまり多くない。また、着地動作の先行研究は、着地時の下肢損傷予防の知見を得るためや、安全な着地動作について検討するものが多いが、競技のパフ

フォーマンスを考えたときには、その発揮されるパフォーマンスには競技者の意識的な動作方略や無意識的な動作選択が含まれていることが考えられる。

Gittoes et al.¹⁾ は、体操競技の平均台における後方宙返りの着地について検討しており、体操競技者は美的かつ安全な緩衝動作を行っていることを示唆している。また、体操競技者の着地特性は、他種目競技者とは異なることが報告されている。

McNitt-Gray et al.²⁾ は、体操競技者の着地動作は着地中の身体重心の変位が小さ

- 1) 茨城県立医療大学保健医学部
〒300-0331 茨城県稲敷郡阿見町阿見4669-2
- 2) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
- 3) 東海大学体育学部
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1
- 4) 静岡産業大学経営学部
〒438-0043 静岡県磐田市大原1572番地1

1. Ibaraki Prefectural University of Health Sciences
4669-2, Ami, Ami-machi, Inashiki-gun, Ibaraki
2. School of Health and Physical Education, University of Tsukuba
1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki
3. School of Physical Education, Tokai University
4-1-1, Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa
4. Shizuoka sangyou university
1572-1 Owara, Iwata, Shizuoka

く、下肢関節の角変位が小さいことが特徴であり、足関節と股関節の伸展モーメントを大きくすることで着地の衝撃の増大に対応していることを報告している。これは、体操競技者は競技特性に応じた着地動作方略を常に行っていることが考えられる。このように、体操競技者の着地動作には他種目の競技者とは異なる着地方略がみられ、それは体操競技の特性を反映しているものであると考えられる。

そこで本研究では、初期高を変えて着地時の衝撃を実験的に変化させることで、その際の衝撃に対する下肢のキネティクスの変数について分析し、体操競技者の宙返り着地方略について検討することを目的とした。

II. 方法

1. 実験課題

実験課題は、初期高の異なる後方かかえ込み宙返り (Tuck0: 地面から後方かかえ込み宙返り, Tuck30: 30cmの台から後方かかえ込み宙返り) とした (図1)。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行う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。

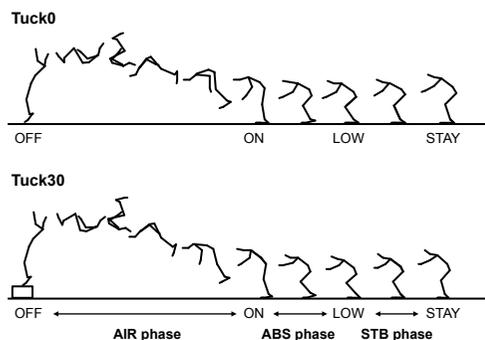


図1. 実験課題および局面定義

2. 被験者

被験者は大学男子体操競技者9名であった (Age: 20.1 ± 1.9 [year], Height: 1.66 ± 0.03 [m], Body mass: 61.2 ± 3.8 [kg])。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。

3. データ収集

赤外線カメラ (MX-T10およびMX-T20, Vicon Motion Systems Ltd.) 20台を用いた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の三次元座標データ (サンプリング周波数: 250Hz) を収集した。また、地面反力 (サンプリング周波数: 1000Hz) をフォースプラットフォーム (9287B, Kistler 社製) を用いて測定した。

4. 局面定義

地面への接地 (ON), 身体重心最下点 (LOW), 身体重心安定時 (STAY) をイベントとして、ON~STAYまでを分析範囲とした。また、ON~LOWまでをABS局面 (Absorb 局面), LOW~STAYまでをSTB局面 (Stabilize 局面) とした (図1)。

5. 算出項目および算出方法

1) 下肢関節角度および角変位

下肢関節角度 [deg] は、各関節 (股関節・膝関節・足関節) をはさむ2つのセグメントがなす屈曲伸展軸の角度として、股関節角度, 膝関節角度, 足関節角度を算出した。またABS局面における角変位を下肢関節角変位 [deg] とした。

2) 身体重心高

得られた身体各部の座標値から、阿江³⁾の身体部分慣性係数を用いて身体を15のセグメントリンクモデル化し、各セグメントの重心から身体重心を求めた。そして、身体重心の鉛直成分を身体重心高 [m] とした。

3) 下肢関節仕事

逆動力学演算によって算出した下肢関節のトルクパワーをABS局面の時間で積分することで、ABS局面における下肢関節仕事（股関節、膝関節、足関節）[J]を求めた。

4) 平均関節トルクパワー

ABS局面における、下肢関節のトルクパワーの平均値を、平均関節トルクパワー[W]とした。

5) 下肢関節屈曲時間

ABS局面における、下肢関節（股関節、膝関節、足関節）が最大屈曲するまでの時間を下肢関節屈曲時間[sec]とした。

6) 地面反力および力積

着地時に生じる地面反力の最大値を最大地面反力[N]とし、鉛直方向および前後方向の地面反力を各局面時間で積分することで、各局面における力積[Ns]を求めた。

7) 地面反力によるモーメントおよび角力積

地面反力ベクトルと身体重心から圧力中心までのベクトルの積から求めた、地面反力による身体重心まわりのモーメントの最大値を最大地面反力モーメント[Nm]とし、最小値を最小地面反力モーメントとした。また、地面反力モーメントを各局面時間で積分することで、各局面における角力積[Nms]を求めた。

6. データの規格化

求めた下肢関節トルクパワー・仕事、地面反力、力積、地面反力モーメント、角力積については、各被験者の身体質量[kg]によって規格化した。

7. 統計処理

各関節の変数における条件間の平均値の比較に、対応のあるt検定を用いた。身体重心高については、イベントと課題を変数とした二元配置分散分析を行い、有意差が認められた場合は多重比較検定としてBonferroni法を用いた。また、二変数の関係性を検討するためにピアソンの積率相関係数を用いた。統計的有意水準は5%とした。

III. 結果

1. 身体重心高と地面反力によるパラメーター

図2に各イベント時の身体重心高を示

した。ON（接地時）の重心高が最も高く、LOW（重心最下点）の重心高が最も低かった。またどのイベントにおいてもTuck30の方がTuck0に比べて重心高が高かった。

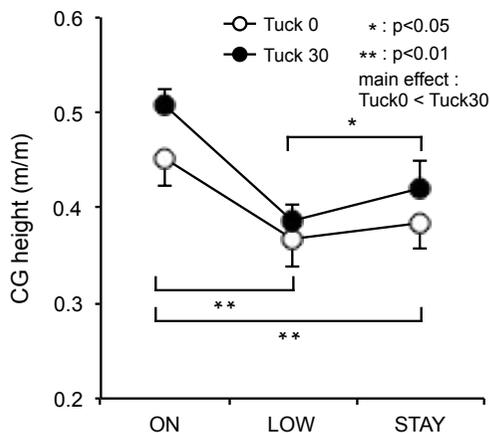


図2. 着地中の身体重心高

図3に最大地面反力モーメント (M_{CGmax}) と最小地面反力モーメント (M_{CGmin}) を示した。モーメントが正の値は身体の前方向回転方向に作用するモーメントであり、負の値は身体の後方向回転方向に作用するモーメントである。 M_{CGmax} には有意な差は見られなかったが、 M_{CGmin} についてはTuck30の方がTuck0よりも絶対値が大きかった。

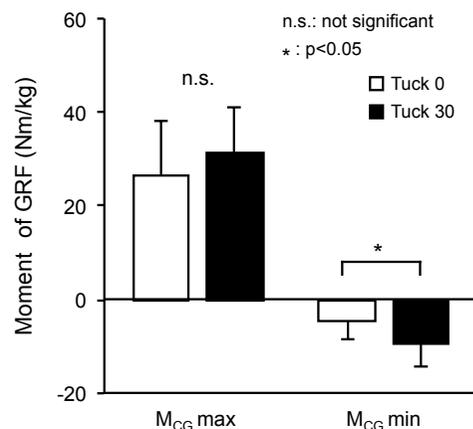


図3. 最大および最小地面反力モーメント

図4に鉛直方向の地面反力の力積を示した。ABS局面（ONからLOWまでの局面）の

力積はTuck30の方がTuck0よりも大きかった。STB局面 (LOWからSTAYまでの局面) の力積には有意差はみられなかった。

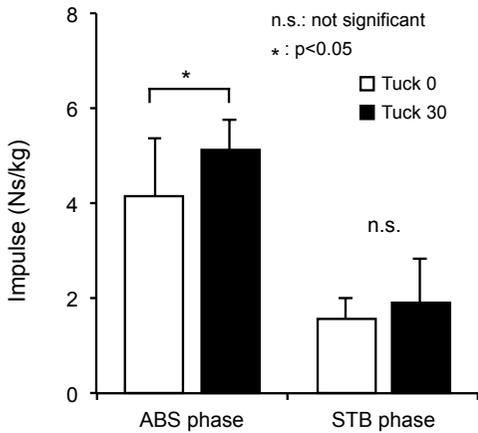


図4. 鉛直方向の地面反力の力積

図5に地面反力による身体重心まわりのモーメントの角力積を示した。ABS局面の角力積には有意差はみられなかったが、STB局面ではTuck30の方がTuck0よりも小さかった。

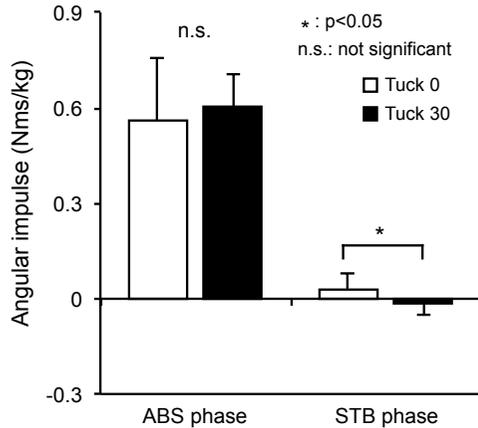


図5. 地面反力によるモーメントの角力積

2. 下肢関節のキネマティクスとキネティクス

図6にABS局面における下肢関節角変位を示した。股関節と足関節の角変位は、Tuck30の方がTuck0よりも大きかったが、膝関節の角変位には有意差は見られなかった。しかし、関節で比較すると膝関節の方が股関節・足関節よりも角変位が最も大きかった。

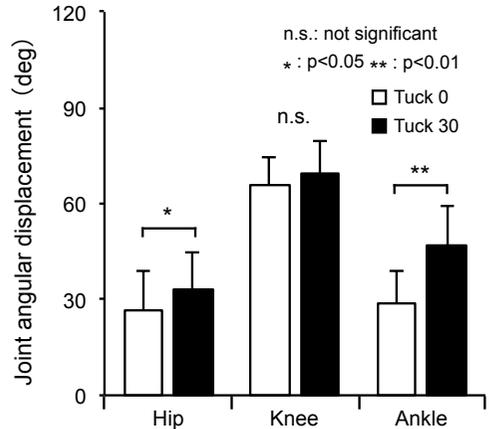


図6. ABS局面における下肢関節の角変位

図7に接地時の下肢関節角度と下肢関節仕事との関係を示した。股関節と足関節においては、接地時の関節角度と関節仕事との間に負の相関関係を示した (股関節: $r=-0.54$, 足関節: $r=-0.62$, $p<0.05$)。しかしながら膝関節においては、それらの変数の間には相関関係は見られなかった。また、股関節のみ接地時の関節角度がTuck30の方がTuck0よりも大きかった。下肢関節仕事はいずれの関節においても関節仕事の絶対値はTuck30の方がTuck0よりも大きかった。関節で比較すると膝関節の関節仕事の絶対値は最も大きかった。

表1にABS局面における下肢関節の平均トルクパワーおよび屈曲時間を示した。平均トルクパワーでは、膝関節においてのみ、Tuck30の方がTuck0よりも平均トルクパワーの絶対値が大きかったが、股関節と足関節に有意差はみられなかった。一方、屈曲時間では股関節と足関節はTuck30の方がTuck0よりも下肢関節の屈曲時間が長かったが、膝関節においては有意差はみられなかった。

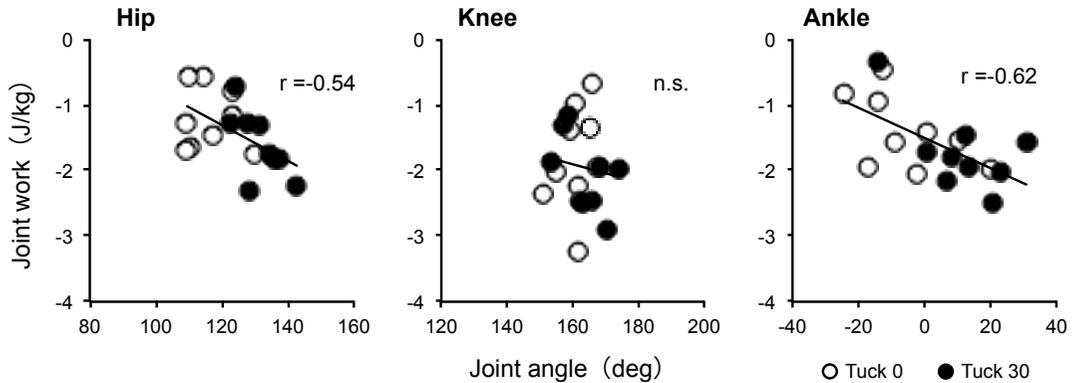


図7. 接地時の下肢関節角度と下肢関節仕事との関係

表1. 平均関節トルクパワーと関節屈曲時間

	joint torque power (W/kg)			Joint flexion time (sec)		
	Hip	Knee	Ankle	Hip	Knee	Ankle
Tuck0	-14.6±7.2	-16.7±8.4	-14.8±6.4	0.14±0.06	0.13±0.03	0.09±0.02
Tuck30	-13.9±7.8	-22.4±7.9	-18.6±7.7	0.16±0.03	0.12±0.04	0.12±0.02
	n.s.	Tuck0 > Tuck30	n.s.	Tuck0 < Tuck30	n.s.	Tuck0 << Tuck30

n.s. : not significant < : p<0.05 << : p<0.01

IV. 考察

1. 初期高増大による宙返り着地における下肢の緩衝性

初期高増大によって着地中の身体重心高は高くなった(図2)。身体重心高は身体の各部位の姿勢に依存すること、質量の大きい部位の姿勢の影響が大きいことを考えると、接地時には主に股関節が伸展位であることが大きく影響すると考えられる。また、ABS局面では、初期高の増大によって着地している時間が増大し、股関節と足関節の角変位と屈曲時間が増大した(図6, 表1)。このことから、股関節と足関節は接地時により伸展位にすることで着地中に関節を大きく動かしていたことが明らかになった。この動作によって着地の衝撃に対して緩衝的な作用をさせていたと考えられる。一方、地面反力の力積については、ABS局面ではTuck30の方が高い値を示している(図4)。これは、Tuck30は高い位

置から宙返りを行うため、接地時にTuck0よりも大きな運動量になり、それを緩衝するために大きな力積が必要になることを示している。STB局面では有意な差がみられないことから、ABS局面において大部分の運動量を力積によって相殺していたことを意味する。また、最大地面反力モーメントには有意な差はみられなかったこと(図3)、ABS局面の角力積に有意な差がみられなかったこと(図5)から、Tuck0とTuck30の課題には空中局面の身体重心まわりの角運動量には差がないことが分かる。

宙返り着地動作において、初期高の増大によって下肢関節の関節仕事の絶対値が増大した(図7)。関節仕事の負の仕事は、絶対値が大きいほどエネルギーの吸収していることを意味している。どの関節においても仕事の絶対値が増大していることから、初期高が高くなることで着地時の衝撃が大

きくなり、その衝撃を緩衝するための緩衝動作を下肢三関節によって行っていた。下肢関節角変位では、股関節と足関節の角変位が増大し、膝関節の角変位に変化はなかった(図7)。この角変位の増大は、接地時の関節角度がTuck0よりもTuck30の方が伸展位であったことによることが考えられる。また、関節仕事と接地時の関節角度との関係においては、股関節と足関節のみ負の相関関係が見られた(図7)。これは、股関節と足関節は接地時の関節角度がより伸展位になるほど、その関節の仕事が大きくなることを意味している。この結果はドロップ着地を対象とした先行研究とも一致する²⁾。一方、膝関節においては、関節仕事に違いがみられたが接地時の関節角度にばらつきが少なかったため、相関関係はみられなかった。さらに初期高が高くなることで、股関節と足関節は屈曲時間が長くなり、膝関節は平均トルクパワーの絶対値が大きくなった(表1)。この結果は、関節によって関節仕事が増大した要因が異なることを示している。

以上のことから、股関節と足関節は、接地時の関節を伸展位にして、より関節可動域を大きく動かして、より長く関節を屈曲させることで関節仕事を増大させており、膝関節は発揮するトルクを大きくすることで関節仕事を増大させていると考えられた。

2. 初期高増大における宙返り着地方略

初期高が高くなることで、空中局面の時間が長くなる。空中局面の時間が長くなることで、身体の回転が増加するため、下肢関節を伸展位でも着地が可能な姿勢になることができる。これにより、着地中に関節を大きく動かすことが可能になる。しかし膝関節においては、初期高が高くなっても接地時の関節角度に違いがなく、関節を大きく動かすことはしていなかった。これは膝関節では、Tuck0でも接地時には比較的伸展位であったことが理由として挙げられる。関節仕事からも分かるように、他の関節に比べて膝関節によるエネルギーの吸収が最も大きいことから、着地に際して緩衝能が高い膝関節を予め優先的に

伸展させていたことが推察される。宮崎ら⁴⁾は空中局面での回転方略においても関節を選択的に伸展させて着地の準備をしていることを示唆している。

一方、着地中の身体の前方後方回転の制御について考えてみると、ABS局面において地面反力による大きなモーメントが身体に作用している。運動量と同様に、この局面で大半の角運動量が角力積によって相殺されている。STB局面においては、Tuck30の方が身体を後方回転させる角力積が大きいこと(図5)、Tuck30の平均値は負の値を示していることから、Tuck30では、ABS局面で大きな角運動量を相殺し、前方回転させる角運動量の余剰分をSTB局面で身体を後方回転させる角運動量を生み出していると考えられるため、Tuck30のSTB局面で巧く身体の回転を制御していることが推察される。

また、身体を後方回転させるためには、足関節の底屈トルクの発揮が重要になる。これは立位時の姿勢制御に見られるankle strategyに近い方略であると考えられる⁵⁾。さらに、股関節の伸展トルクの発揮は体幹部を後傾させる作用があることから、体幹部の前傾に抗するように股関節が伸展トルクを発揮していたと解釈できる。慣性の大きな体幹部が前傾することで、身体重心が低くなることに大きく影響する。身体重心が低くなると、身体重心から足部の圧力中心までの距離が短くなり、地面反力による身体重心まわりのモーメントが小さくなる。これにより、身体の角運動量の変化が小さくなり、身体全体の回転に対する制御が行いにくくなる可能性があり、着地後に身体が前方および後方に転倒してしまう恐れがある。そのため、後方宙返りの着地時には、体幹部が低くならないように姿勢を制御しながら着地することが、回転の制御に影響していることが示唆された。

このように、膝関節は並進運動に対して緩衝性が高く、足関節は回転運動に対してLOW以降に身体を後方回転させて、姿勢を保持する役割を持っていた可能性があり、股関節は体幹部の前傾をさせないように伸展トルクを発揮していたことが考えられた。それ

ぞれの下肢関節によって並進および回転について緩衝するための役割が異なり、体操競技者が宙返り着地をする際に用いている方略は、並進の緩衝性だけでなく、回転の制御にも有効であることが示唆された。

【参考・引用文献】

- 1) Marianne J.R. Gittoes, Gareth Irwin, and David G. Kerwin : Kinematic Landing Strategy Transference in Backward Rotating Gymnastic Dismounts, *Journal of Applied Biomechanics*, 29, 253-260, 2013.
- 2) McNitt-Gray, JL : Kinetics of the lower extremities during drop landings from 3 heights. *Journal of Biomechanics*, 26, 1037-1046, 1993.
- 3) 阿江通良 : 日本人の幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *Japan Journal of Sports Sciences*,15(3), 155-162, 1996.
- 4) 宮崎彰吾, 藤井範久. 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. *バイオメカニズム学会誌*Vol.38 No4, 269-276, 2014.
- 5) Horak, F B & Nashner, L. M: Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations, *J. Neurophysiol.*,55(6), 1369-1381, 1986

