【原著】

前方倒立回転跳びにおける着手技術の力学的解析

小西康仁（東海大学体育学部非常勤講師）　植村隆志（体育学部競技スポーツ学科）
宮崎彰吾（茨城県立医療大学保健医療学部理学療法学科）　村田憲亮（鹿屋体育大学スポーツ・武道実践科学系）
五十嵐健太（東海大学大学院総合理工学研究科）　山田　洋（体育学部体育学科）
小河原慶太（体育学部体育学科）

Kinetic analysis of the push-off technique in Forward Handspring

Yasuhito KONISHI, Takashi UEMURA, Shogo MIYAZAKI, Kensuke MURATA,
Kenta IGARASHI, Hiroshi YAMADA and Keita OGAWARA

Abstract

The purpose of this study was to investigate the characteristics of an expert group in the push-off technique in Forward Handspring. We analyzed kinematics data and ground reaction force data for experts with experience of artistic gymnastics and unskilled persons who could safely perform Forward Handspring by themselves. The results were as follows.

1. The expert group had ideal motion with a large airborne phase in Forward Handspring.

2. The expert group made contact with the ground with an almost handstand posture and pushed off hard in a short time in the push-off phase.

3. The expert group applied a brake in the push-off phase, and changed the direction of the thrust to upwards.

（Tokai J. Sports Med. Sci. No. 30, 17−25, 2018）

Ⅰ．はじめに

学校体育で実施されている器械運動の種目の一つであるマット運動について、中学校及び高等学校の学習指導要領解説には、「器械の特性に応じた技に挑戦し、その技が出来る楽しさや喜びを味わうことの出来る運動である」[1, 2] と述べられている。本研究で取り上げる前方倒立回転跳びは、マット運動や跳び箱運動で実施される技の一つで、中学校及び高等学校では回転系の発展技として例示[1, 2] されている。

前方倒立回転跳びは、助走から身体を前傾させて足を振り上げてから倒立位になり、その振り上げた足の勢いを利用してマットを突き放し、空中局面を経過した後に着地するという運動構造である（図１）。手で床面を突き放して空中に浮遊する非日常的驚異性[3] を持っている前方倒立回転跳びは、器械運動で実施される技の中でも難易度が高く、ダイナミックな跳躍技であることから授業でもよく取り上げられ、子ども達も果敢に挑戦する憧れの技であると言える。

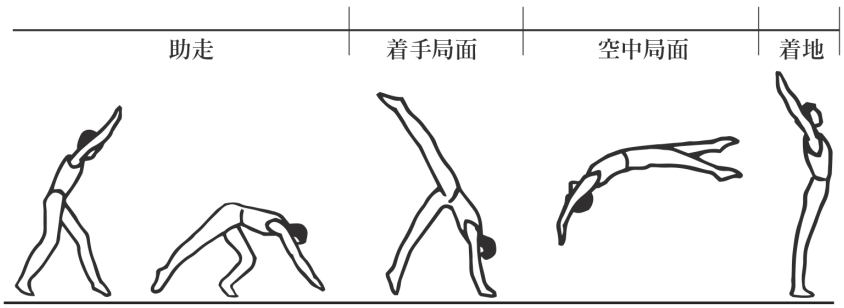


図１　前方倒立回転跳びの運動構造
Fig. 1 Mechanism of Forward Handspring.

実際の指導現場における前方倒立回転跳びの指導では、落差を利用した指導法[4, 5]やブリッジから移行した指導法[6, 7]が多く用いられている。また、学習者を幇助する場面も多く見られる。幇助について、小西らは「理想像を学習者に身につけさせるためには重要」[8]と述べており、水島も「幇助は技ができない学習者に対して成功体験させることに関して非常に有効である」[9]と述べている。

前方倒立回転跳びの着手局面について、山下は「着手局面は雄大な浮きを生み出すための重要な局面」[10]と述べており、金子も「この技の生命のように大切にされる局面」[11]と述べている。また、前方倒立回転跳びの着手技術について、山下は「鋭い振り上げと力強い踏みきりを協調させ、つき手を生み出す前提を作り出すことが重要」[10]と述べており、中村らは「振上げ脚の振り上げと踏み切り脚のけり出しによって加速された左右軸回転に手ジャンプを加えることによって、空中での浮きと回転を生み出す」[12]と述べている。また、金子も「着手技術は突きが十分に働いて次の局面を有効にする」[3]と述べていることから、前方倒立回転跳びにおいて着手局面は、その後に続く空中局面で浮きを生み出す重要な局面であり、技術が必要であることが伺える。

これまで前方倒立回転跳びの研究は多くなされてきたが、その指導法や技術に関する研究はキネマティクスデータを算出して検討したものが多く、キネティクスデータを検討した研究は少ない。そこで本研究は、熟練者と未熟練者の前方倒立回転跳びを対象に、キネマティクスデータと床反力データの比較から考察を行い、前方倒立回転跳びの着手技術の特徴を明らかにすることを目的とした。

Ⅱ．方法

１．被験者

被験者はＴ大学に所属する健康な男子大学生とし、熟練者と未熟練者を合わせて９名を選出した。選出した被験者のプロフィールは表１の通りである。本研究における熟練者とは、Ｔ大学体操競技部に所属し、競技歴が10年以上である被験者４名とした。また未熟練者とは、前方倒立回転跳びを恐怖心なく安全に一人で実施できるものの、着地で尻もちをついてしまう技術レベルの者とし、５名を選出した。被験者の身長や体重及びBMIについて、熟練者群と未熟練者群の間に有意な差は認められなかった（表１）。

なお、本研究は、東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の審査を受け、承認（承認番号：16096）を得て実施したものである。被験者にはあらかじめ本研究の目的、方法、それに伴う危険性などを口頭および文書で説明し、十分に理解を得た上で書面により同意を得た。

２．実験課題

被験者には、直立姿勢から片足を前に振り上げ

表1　被験者のプロフィール
Table 1 Subject Profile.

	熟練者群 n=4	未熟練者群 n=5
身長［m］	1.69 ± 0.01	1.71 ± 0.03
体重［kg］	58.75 ± 2.87	66.66 ± 2.23
ＢＭＩ	22.04 ± 1.00	22.69 ± 0.64
競技歴［年］	12 ± 2.16	なし

平均値 ±SD

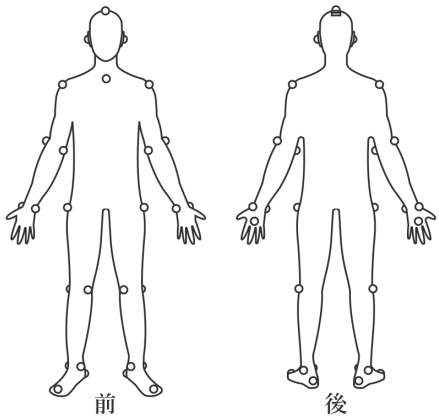


図2　反射マーカー貼付位置
Fig. 2 Reflective markers pasting position.

ながらとび上がり、もう一方の足で着地する、いわゆるホップをしてから前方倒立回転跳びを実施するよう指示した。安全面に考慮し、試技の前には十分なウォーミングアップと前方倒立回転跳びの練習を数回行わせ、試技の間には十分な休息時間を設けた。

被験者には、試技を成功させるために出来る限り最大努力で行うよう指示をした。また実施した試技に対して10段階で自己評価をさせて、試技の出来栄えを記録した。被験者の自己評価が8段階以上で最も自己評価の高かった試技を分析対象試技とした。

3．測定方法

1）動作の計測

動作の計測には、光学式3次元モーションキャプチャシステム（Mac3D、Motion Analysis 社製）を用いて行った。撮影の際には光学式赤外線カメラ（Raptor-E、1,280 × 1,024 pixel、130万画素、Motion Analysis 社製）を11台使用し、フレームレートは200 fps、シャッタースピードは1/1,000sで撮影した。

被験者の身体各部34点（頭頂・胸骨上縁・左右の耳珠点・肩峰・肘点内外・手関節内外・手先・大転子・膝内外・外踝内外・踵・母指球・足先・肋骨下端）に反射マーカーを貼付した（図2）。

2）床反力の計測

前方倒立回転跳びの手を着く位置にフォースプレート（FP6090-15、Bertec 社製）を設置し、手が着いている時の床反力を計測した。

なおフォースプレートからの床反力データは、モーションキャプチャシステムと同期し、サンプリング周波数1,000Hz で記録した。

4．分析方法

キネマティクスデータの算出には、動作解析ソフト（Frame-DIAS Ⅴ、DKH 社製）を用いた。なお、データはバターワース型デジタルフィルタ（Bryant 6 Hz）を用いて平滑化した。計測された身体各部の3次元座標値から、阿江ら[13]の身体部分慣性係数を用いて、身体合成重心位置（Center Of Gravity = COG）を算出した。

5．分析項目

図3は、前方倒立回転跳びの各局面における定義である。具体的には、手を着いて床反力の値が1.00 N 以上の時点を着手、1.00 N 以下になった時点を離手とし、着手から離手までの間を着手局面とした。また、着手局面の所要時間を着手時間とし、離手から着地までの間を空中局面とした。空中局面における床面から COG の高さを COG 最高到達点とした。また、着手時及び離手時の身体姿勢における角度定義について、左右手先中点か

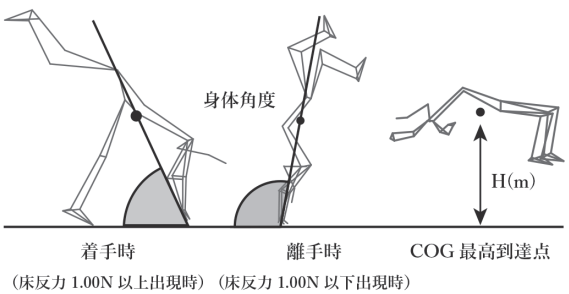


図 3　各局面における定義
Fig. 3 Phases definition.

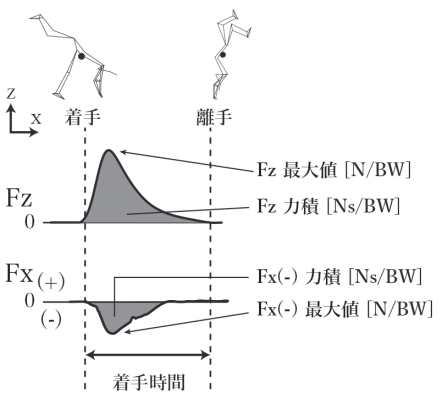


図 4　床反力データの定義
Fig. 4 Ground reaction force data in definition.

ら身体合成重心位置の線分と水平軸の成す角度を身体角度として算出した。

また、床反力データは図 4 に示すように左右の手が地面を押す際の体重あたりの最大値（N/BW、左右平均値）を求めた。なお、垂直方向の力を Fz、水平方向の力を Fy とし、Fy においては前方倒立回転跳びの進行方向を正の値 Fy（＋）、反対方向を負の値を Fy（−）とした。

各被験者の試技の特徴を捉えるために、以下の項目を分析項目とした。

1）空中局面における COG 最高到達点（m）
2）離手時の重心速度（m/s）
3）着手時の身体回転角度（deg）
4）離手時の身体回転角度（deg）
5）着手時間（s）
6）着手時の垂直方向（Fz）及び水平方向（Fy）の最大床反力（N）
7）着手局面における垂直方向（Fz）及び水平方向（Fy）の力積（NS）

6．統計処理

統計処理には，統計処理ソフト（SPSS Statistics 21，IBM 社製）を用いて，Mann-Whitney の U 検定を行った。なお、有意水準は 5 %未満とした。

Ⅲ．結果

図 5 は、熟練者と未熟練者の運動経過を示したスティックピクチャーと床反力ベクトルの典型例である。また各分析項目における結果は表 2 の通りであった。

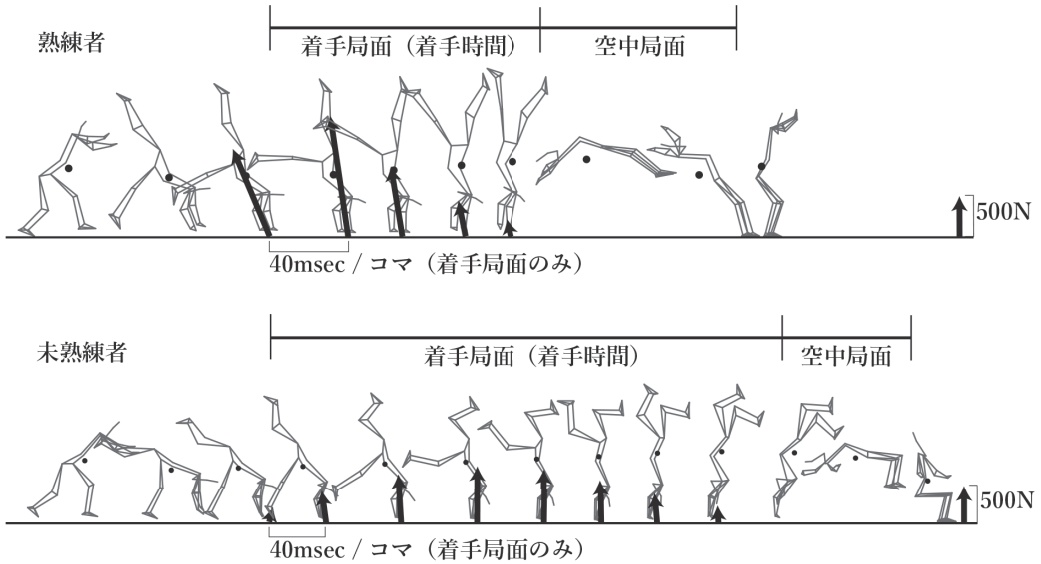


図 5　各被験者のスティックピクチャー（代表例）
Fig. 5 Subject's stick picture (Representative example).

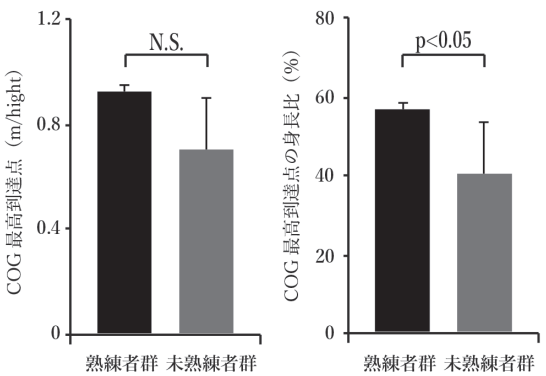


図 6　COG 最高到達点及び身長比
Fig. 6 Maximum reach of COG and height ratio.

表 2　各分析項目における結果一覧
Table 2 Result of analysis items.

項　目	単　位	熟練者群	未熟練者群
COG 最高到達点	m	0.93 ± 0.02	0.70 ± 0.19
COG 最高到達点の身長比	%	58.02 ± 1.96	40.39 ± 13.02
着手時の身体角度	deg	55.96 ± 1.96	46.64 ± 4.13
離手時の身体角度	deg	96.65 ± 4.44	148.24 ± 17.85
着手時間	sec	0.23 ± 0.02	0.49 ± 0.08
垂直方向の最大床反力	N/BW	33.72 ± 8.10	13.64 ± 3.89
水平方向の最大床反力	N/BW	- 8.54 ± 2.43	- 3.01 ± 1.17
垂直方向の力積	Ns/BW	2.68 ± 0.11	2.71 ± 0.17
水平方向の力積	Ns/BW	- 0.64 ± 0.05	- 0.29 ± 0.18

平均値 ±SD

1．空中局面における COG 最高到達点

図 6 は、空中局面における熟練者群と未熟練者群の COG 最高到達点と、COG 最高到達点の身長比である。COG 最高到達点において、熟練者群と未熟練者群には有意な差が認められなかった。また、COG 最高到達点の身長比において、熟練者群は未熟練者群よりも有意に大きい値を示した（$p<0.05$）。つまり、COG 最高到達点に有意な差はなかったものの、COG 最高到達点の身長比が高かったことから、熟練者群は未熟練者群よりも空中局面で高く跳んでいたことが明らかになった。

2．離手時の重心速度（m/s）

図 7 は、離手時における熟練者群と未熟練者群の垂直方向と水平方向の重心速度を示した図である。離手時における垂直方向の重心速度について、熟練者群は未熟練者群よりも有意に大きい値を示した（$p<0.05$）。また、離手時における水平方向の重心速度について、熟練者群と未熟練者群には有意な差が認められなかった。すなわち、熟練者群は垂直方向の重心速度が正の方向であったことから、離手時に上方向へ跳び出していることが明らかになった。また、未熟練者群は垂直方向の重

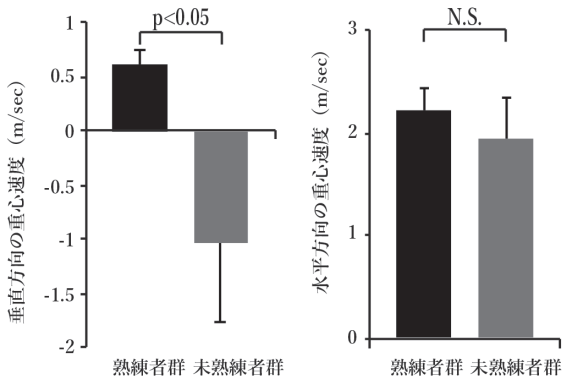


図 7　離手時の重心速度
Fig. 7 Velocity COG at push-off.

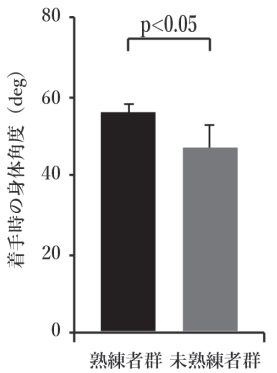


図 8　着手時の身体角度
Fig. 8 Body angle at push-on.

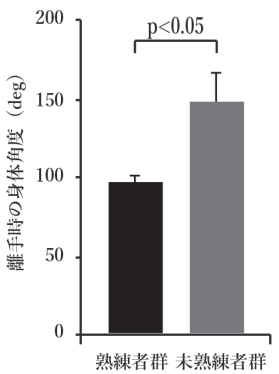


図 9　離手時の身体角度
Fig. 9 Body angle at push-off.

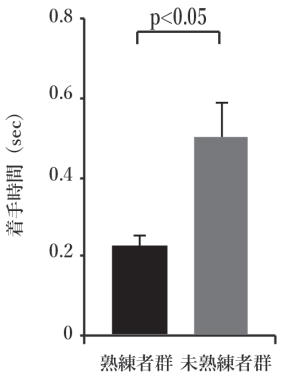


図10　着手時間
Fig. 10 Time on the push-off phase.

心速度が負の方向であったことから、離手時に下方向へ落下していることが明らかになった。さらに、水平方向の重心速度から、いずれの被験者も進行方向に跳び出していることが明らかになった。

3．着手時の身体角度（deg）

図 8 は、熟練者群及び未熟練者群の着手時における身体角度を示した図である。着手時の身体角度において、熟練者群は未熟練者群よりも有意に大きい値を示した（$p<0.05$）。つまり、熟練者群は未熟練者群よりも着手時の身体角度は大きく、より倒立位に近い身体姿勢で着手していたことが明らかになった。

4．離手時の身体角度（deg）

図 9 は、熟練者群及び未熟練者群の離手時における身体角度を表した図である。離手時の身体角度において、熟練者群は未熟練者群よりも有意に小さい値を示した（$p<0.05$）。つまり、熟練者群は未熟練者群よりも離手時の身体角度は小さく、より倒立位に近い身体姿勢で離手していたことが明らかになった。

5．着手時間（s）

図10は、熟練者群及び未熟練者群の着手時間を示した図である。熟練者群の着手時間は未熟練者群よりも有意に小さい値を示した（$p<0.05$）。つまり、熟練者群は未熟練者群よりも着手時間は短いことが明らかになった。

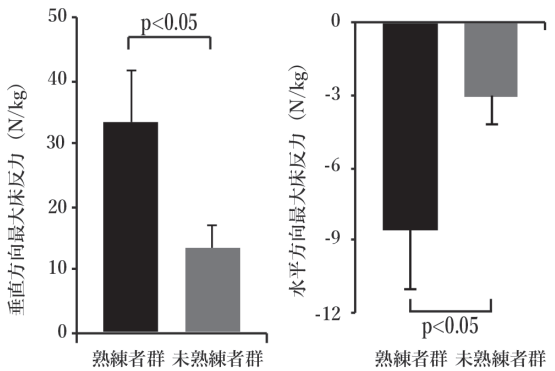


図11　着手時の最大床反力
Fig. 11 Ground reaction force at push-on.

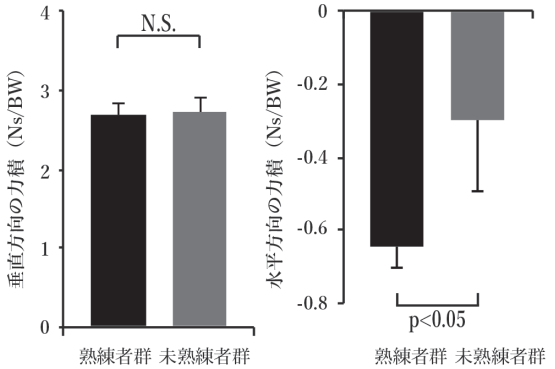


図12　着手局面における床反力の力積
Fig. 12 Impulse of the ground reaction force in push-off phase.

6．着手時の垂直方向（Fz）及び水平方向（Fy）の最大床反力（N）

図11は、熟練者群及び未熟練者群の着手時における垂直方向と水平方向の最大床反力を示した図である。垂直方向の最大床反力において、熟練者群は未熟練者群よりも有意に大きい値を示した（$p<0.05$）。また、水平方向の最大床反力において、熟練者群は未熟練者群よりも有意に負の方向に大きい値を示した（$p<0.05$）。つまり、熟練者群は未熟練者群よりも着手時における垂直方向の最大床反力は大きく、水平方向の最大床反力は負の方向に大きいことが明らかになった。

7．着手局面における垂直方向（Fz）及び水平方向（Fy）の力積（NS）

図12は、熟練者群及び未熟練者群の着手から離手までの垂直方向と水平方向の力積を示した図である。垂直方向の力積において熟練者群と未熟練者群には有意な差が認められなかった。水平方向の力積については、熟練者群は未熟練者群よりも有意に大きい値を示した（$p<0.05$）。つまり、熟練者群と未熟練者群の垂直方向の力積に差はなかったが、水平方向の力積は熟練者群の方が大きいことが明らかになった。

Ⅳ．考察

1．熟練者群と未熟練者群における空中局面の違いについて

図5の結果から、熟練者群と未熟練者群におけるCOG最高到達点に有意な差は認められなかったが、COG最高到達点の身長比において、熟練者群の方が未熟練者群よりも高い結果であった。また図6の結果から、水平方向の重心速度に群間の差は認められなかったが、垂直方向の重心速度から、熟練者群は上方向に跳び出しており、未熟練者群は下方向に落下していた。すなわち、熟練者群の前方倒立回転跳びは空中局面で浮きが見られる試技であったと言える。前方倒立回転跳びの空中局面について、中島らは「どのくらい浮き上がるかによって、前転とびの大きさが決まってくる」[14]と述べており、山下も「理想的な捌きは、着手後の空中局面において雄大な浮きを見せること」[10]と述べていることからも、熟練者群の前方倒立回転跳びは、空中局面で浮きが見られる理想的な捌きであったと考えられる。

2．着手局面について

次に着手局面についてである。山下は、「着手局面は雄大な浮きを生み出すための重要な局面」[10]と述べており、また金子も「着手技術は突きが十

分に働いて次の局面を有効にする」[3]と述べていることから、着手局面は前方倒立回転跳びにおいて最も重要な局面であると言える。

その重要な局面である着手局面を、着手時の身体角度と離手時の身体角度、着手時間の3つの観点から考察したところ、熟練者群は未熟練者群よりも着手時の身体角度は大きく、離手時の身体角度は小さかった。また、熟練者群の着手時間は、未熟練者群に比べ短い着手時間であった。すなわち、熟練者群は、倒立位に近い姿勢で着手し、短い着手時間で離手を行なっていたのに対し、未熟練者群は、倒立位より小さい角度で着手し、身体が倒立位を大きく越えてから、進行方向に倒れこむように離手していたと考えられる。山下は「着手中の停滞は、つき手が支え機能になる」[10]と述べており、未熟練者群のような長い着手時間は身体を支えていることはできるものの、床面を突き放すことが困難になると推察される。それに対して、熟練者群は、短い着手時間で着手から離手までを素早く行っていると考えられ、床面を突き放すことができていると推察される。また、熟練者群はより倒立位に近い身体姿勢で着手をし、素早く床面を突き放すことで上方向に跳び出し、空中局面で浮きが見られる前方倒立回転跳びを実施しているものと推察される。このことが、先に述べたCOG最高到達点の身長比が高くなっている一要因であり、空中局面で浮きが見られる雄大な前方倒立回転跳びを行うために有効な技術であると推察される。

以上のことから、前方倒立回転跳びの重要な局面である着手局面では、熟練者群のようにより倒立位に近い姿勢で着手をし、短い着手時間で素早く床面を突き放すことが重要であると示唆された。

3．着手局面における床反力データについて

次に着手局面における床反力データである。

図11の結果から、熟練者群は未熟練者群よりも着手時における垂直方向の最大床反力は大きく、水平方向の最大床反力は負の方向に大きかった。また、図12の結果から、着手局面における垂直方向の力積に差は認められなかったが、水平方向の力積は熟練者群の方が未熟練者群よりも大きい結果であった。すなわち、熟練者群は進行方向と逆の方向に力を加えて、強い力で床面を突き放しているのに対し、未熟練者群は進行方向と逆の方向に力を加えているものの、その力は弱く、熟練者群のように強い力で床面を突き放していなかった。未熟練者群のように、床面を強い力で突き放せていない要因として、先に述べた着手時間が長く着手局面が支え動作になっていると考えられ、これにより進行方向に倒れるような前方倒立回転跳びになってしまっているものと推察される。また熟練者群は、短い着手時間で未熟練者群とほぼ変わらない垂直方向の力積であることから、爆発的な力で床面を突き放していると考えられ、このことが空中局面で雄大な浮きを生み出す一要因であると推察される。さらに、熟練者群は未熟練者群よりも水平方向の最大床反力が負の方向に大きく力積も大きいことから、着手時に進行方向と逆の方向に力を加えることで運動にブレーキをかけていると考えられ、これにより上方向へ跳び出すためことが可能になっていると推察される。

以上のことから、着手局面では、熟練者群のように着手時にブレーキを働かせ、短い着手時間で床面を強い力で突き放なし、推進力を上方向に変えることが空中局面で浮きが見られる前方倒立回転跳びを実現するために重要であることが示唆された。

Ⅴ．結論

本研究は、前方倒立回転跳びの着手技術について、体操競技経験がある熟練者群と未熟練者群を対象に、キネマティクスデータと床反力データの比較から考察を行い、熟練者群に見られる特徴を明らかにすることを目的とした。その結果、以下のことが明らかになった。

1．熟練者群の前方倒立回転跳びは、空中局面で浮きが見られる理想的な捌きであった。
2．熟練者群は、着手局面において倒立位に近い姿勢で着手をし、短い着手時間で床面を強い力で突き放なすことが重要であると示唆された。
3．熟練者群は、着手局面においてブレーキを働かせ、推進力を上方向に変えることが重要であると示唆された。

熟練者群に見られる前方倒立回転跳びの着手局面における特徴として、以上のことが明らかになった。これらのことが、浮きが見られる雄大な前方倒立回転跳びを実施するために重要であることが示唆された。

参考文献

1）文部科学省：中学校学習指導要領解説保健体育編, 東山書房, 2008, 41-57.
2）文部科学省：高等学校学習指導要領解説保健体育・体育編, 東山書房, 2009, 30-42.
3）金子明友：体操競技のコーチング, 大修館書店, 1974, 10-15, 301-303, 299-303, 414-417.
4）高橋健夫, 三木四郎：器械運動授業づくり, 大修館書店, 1992, 58.
5）三木四郎, 加藤澤男, 本村清人編著：最新体育授業シリーズ　中・高校　器械運動の授業づくり, 大修館書店, 2006, 171-172.
6）栗原英昭, 吉田　茂：器械運動指導法研究プロジェクト実践編　道しるべ方式指導法～マット運動「前転とび（ハンドスプリング）」～, 体操競技・器械運動研究, 23, 35-49, 2015.
7）堀江健二, 小林幸子, 尾西奈美, 津端謙太：器械運動, 文化書房博文社, 2007, 63.
8）小西康仁, 植村隆志, 宮崎彰吾, 村田憲亮, 山田洋, 小河原慶太：前方倒立回転跳びの幇助に関する運動形態学的研究, 東海大学体育学部紀要, 第46号, 9-17, 2016.
9）水島宏一：器械運動の指導に関する研究, 東京学芸大学紀要第５部門, ６, 103-119, 2004.
10）山下芳男：床運動における前方倒立回転跳びの技術に関する一考察, 岩手大学教育学部研究年報43巻, 第１号, 69-79, 1983.
11）金子明友：体操競技＜男子編＞, 株式会社講談社, 1990, 50-52.
12）中村　剛, 加藤澤男, 渡辺良夫：器械運動におけるマット運動の「前方倒立回転とび」のつまずきに関する事例研究, 筑波大学体育系紀要, 22, 33-42, 1999.
13）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, バイオメカニズム, 11, 23-33, 1992.
14）中島光広, 太田昌秀, 吉田　茂, 三浦忠雄：器械運動ハンドブック, 大修館書店, 1979, 88.