

論文

前方倒立回転とびにて前方回転の勢いの獲得に影響する  
運動形態の検討

岡部文武<sup>1)</sup>, 浅野佑樹<sup>1)</sup>, 内山由綺<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>早稲田大学スポーツ科学学術院

<sup>2)</sup>早稲田大学スポーツ科学研究科

キーワード: 器械運動, マット運動翻転技, 角運動量, キネマティクス, 2次元動作解析

【抄録】

本研究の目的は, 前方倒立回転とび(以下, 「前転とび」と略す)のキネマティクスと角運動量の変化を分析し, 前転とびにて前方回転の勢いを獲得できる運動形態を検討することであった. 本研究では体操競技を専門とする男子選手 5 名(年齢:21±1[歳], 身長:1.65±0.03[m], 体質量:60.0±2.4[kg])が実施する前転とびを分析対象とした. 分析項目は身体重心まわりの身体部分群(上肢, 頭部胴体, 振上脚, 踏込脚)と全身の角運動量, 踏込局面と着手局面における身体部分群の角運動量の変化量と変化率, 身体重心速度, 振上脚と踏込脚の関節角度, 身体背屈角度, 着手局面における身体回転角度, 振上脚と踏込脚の股関節角度の変化量とした. 本研究で得られた結果は, 以下の通りである.

- 1) 全身の角運動量は開始時点から踏込脚離足時点にて有意に増大し, 着手時点から離手時点にて有意に減少した( $p<0.05$ ).
- 2) 踏込局面では, 振上脚と踏込脚の角運動量が有意に増大した( $p<0.05$ ). 振上脚の運動形態に関して, 開始時点から踏込脚着足時点にて足関節角度と膝関節角度が有意に減少した後, 着手時点に向けて各関節角度が有意に増大した( $p<0.05$ ). また, 踏込脚の運動形態に関して, 振上脚離足時点から着手時点まで各関節角度が有意に増大した( $p<0.05$ ).
- 3) 着手局面では, 振上脚の角運動量が有意に減少し, 踏込脚の角運動量が有意に増大した( $p<0.05$ ). 着手局面では振上脚と踏込脚の股関節角度が有意に増大した( $p<0.05$ ). また, 踏込脚股関節角度の変化量が振上脚に比べて有意に高値を示した( $p<0.05$ ).
- 4) 身体重心速度の X 座標成分は, 開始時点から振上脚離足時点まで有意に増大し, 着手局面にて有意に減少した( $p<0.05$ ). また, Y 座標成分は開始時点から踏込脚離足時点と着手局面にて有意に増大した( $p<0.05$ ).
- 5) 身体背屈角度は振上脚離足時点から離手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ ).
- 6) 身体回転角度は着手時点にて  $52.1 \pm 4.0$ [deg.]を示した後, 離手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ ).

以上のことから, 前転とびに必要な全身の前方回転の勢いは踏込局面にて獲得されており, 着手局面では踏込局面にて獲得された前方回転の勢いを維持することが重要であると考えられる. 踏込局面では, 反動動作を伴った振上脚の伸展動作や, 振上脚の後方振上動作とそれに伴う反り動作によって全身の前方回転の勢いを強めていることが示唆された. さらに, 振上脚の後方振上動作と踏込脚の踏切動作をともに開始することが, 全身の前方回転の勢いの獲得に寄与したと考えられる.

着手局面では, 上下胴部と振上脚が一直線上に位置する姿勢で着手し, 起こし回転によって移動方向への身体重心速度を鉛直上方に転換していたと考えられる. また, 先行する振上脚の前方回転の勢

いを抑制する一方で、踏込脚を勢いよく後方に振り上げることで全身の前方回転の勢いを補完していたと考えられる。

スポーツ科学研究, 20, 114-125, 2023 年, 受付日:2023 年 3 月 30 日, 受理日:2023 年 10 月 4 日  
連絡先:岡部文武 359-1192 所沢市三ヶ島 2-579-15 早稲田大学スポーツ科学学術院  
f.okabe@aoni.waseda.jp

## I. 緒言

前方倒立回転とび(以下、「前転とび」と略す)は、立位姿勢から倒立姿勢を経過した後、空中にて前方回転し、再度立位姿勢に至る技である。前転とびは、学習指導要領解説保健体育編にて指定されるマット運動翻転技のなかで最も難しい技とされる(文部科学省, 2017, pp.63-67; 土屋, 2021, pp.60-65)。翻転技は手部や足部を回転中心として回転する非日常的な運動形態を示すため、教師は技の運動技術を熟知したうえで指導にあたることが要求される。

前転とびの運動技術は、推進力を獲得するためのホップ技術、両上肢で身体を空中に浮上させる着手技術、身体を背屈し(以下、「反り動作」と略す)前方倒立回転の勢いを高める回転加速技術で構成される(金子, 1982, pp.203-209)。さらに、着手技術は肩関節を屈曲させたまま上半身を振り下ろす動作(以下、「上体振下動作」と略す)、片脚の振上動作ともう片脚の踏切動作、両上肢で地面を強く押す動作(以下、「突上動作」と略す)で構成される(金子, 1982, pp.203-209; 中村ほか, 1999; 山下, 1983)。これらは定性的に評価された運動技術である。その一方で、着手技術にて獲得された地面反力が定量化され、着手までに獲得された推進力を鉛直上方に転換することで、空中における身体重心の最大到達位置(以下、「浮上高」とする)を高めることが重要であると報告されている(Exell et al., 2016; 小西ほか, 2018)。

これらの運動技術を習得させるために、指導現場では跳箱上で前方倒立回転を実施させ、跳箱よりも低い位置に設置されたマットに着地させる指導方法(以下、「落差法」とする)が有効とされる(金子, 1982, pp.204-209; 栗原・吉田, 2015; 三上ほか, 1992, pp.58-61; 高木ほか, 2018; 渡辺,

2006, pp.171-172)。また、落差法にて効率的に前転とびを習得させる際には、支持倒立の実践を通じて倒立姿勢を安定させる指導方法(高木ほか, 2018)や、片脚の振上動作と踏切動作を協調させるために壁倒立に取り組みさせる指導方法(栗原・吉田, 2015)が有効とされる。このほかにも、空中での浮上高を高めるために踏切板上にて突上動作を実施させる指導方法(三上ほか, 1992, pp.58-61)や、反り動作を習得させるためにブリッジ姿勢をつくらせる指導方法(栗原・吉田, 2015)が考案されている。これらの指導方法は着手技術と回転加速技術の分習的な指導方法であるため、前転とびでは、これら運動技術の習得が重要と認識されていると考えられる。

これまで前転とびの運動技術の解明や指導方法が考案されてきた。しかし、前転とびでは前方回転の勢いが重要とされるにも関わらず(金子, 1982, pp.203-209)、どのような動作によって前方回転の勢いを獲得しているのかを検討した研究は見当たらない。そのため、指導現場では前転とびの運動技術が十分に理解されないまま、前転とびが指導されている可能性があると考えられる。

回転の勢いは、角運動量によって評価できる。また、指導現場に資する知見を収集するためには、着手技術と回転加速技術実施中の運動の外見的特徴、すなわちキネマティクスを検討することが有効であろう。そこで、本研究の目的は、前転とびにおける着手技術と回転加速技術実施中のキネマティクスと角運動量を分析し、前転とびにて前方回転の勢いを獲得できる運動形態を検討することとした。

## II. 方法

### 1. 被験者

被験者は、W大学体操競技部に所属する男

子選手 5 名 (年齢:  $21 \pm 1$  [歳], 身長:  $1.65 \pm 0.03$  [m], 体質量:  $60.0 \pm 2.4$  [kg]) であった. 被験者には本研究の目的, 実験方法, 実験に伴う危険性を書面および口頭で説明し, 書面にて研究参加の同意を得た. なお, 本研究の実施にあたり, 早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会の承諾を得た (承認番号: 2022-280).

## 2. 実験試行

指導現場では, ホップ動作を伴う前転とびを学習させることが多い. 指導現場に資する前転とびの知見を収集する本研究の目的を鑑み, 実験試行は静止立位姿勢からホップ動作を伴う前転とびとした. 両足部を揃えて着床させた後, 静止できた試行を成功試行, それ以外を失敗試行とした. 失敗試行と認められた場合, 十分な休息を確保した後, 再度実験試行を実施させた. なお, 本

研究における各被験者の試行回数は 2 回から 5 回であった.

## 3. 映像収集

体操競技用ゆか (Senoh 社製) に長さ 6.0 [m], 高さ 2.4 [m] の 2 次元計測範囲を構築し, それぞれ X 軸, Y 軸と定義した. X 軸は移動方向を正, Y 軸は鉛直上方を正と定義した (Figure1). 2 次元計測範囲構築の際には, X 軸上に 1.0 [m] 間隔で 7 点, Y 軸上に 0.4 [m] 間隔で 7 点の合計 49 点の較正点を設定した. その後, 2 次元計測範囲内にて実験試行を実施する被験者を 1 台の高速カメラ (EXILIM EX-100PRO, CASIO 社製) を用いて撮影した (撮影速度: 120 [fps], 露出時間:  $1/3200$  [秒]). なお, 高速カメラは 2 次元計測範囲から 12.0 [m] 地点に設置した.

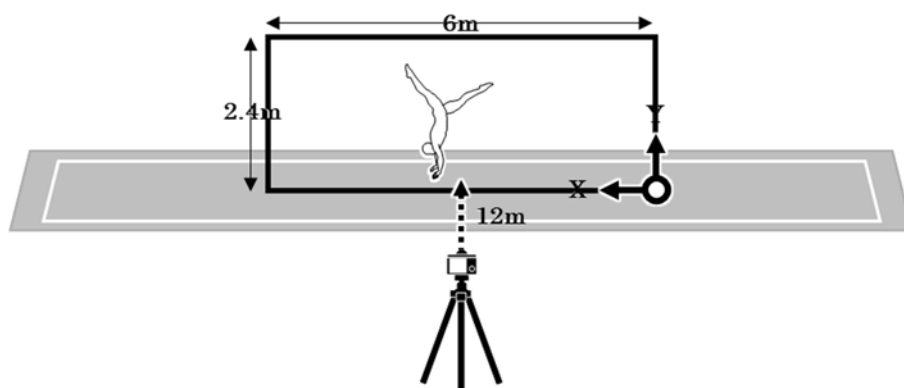


Figure 1. 実験設定図

## 4. 運動局面と脚の定義

ホップ動作直後に左右いずれかの着足時点から両脚足部着足時点进行分析区間とした. また, 両手部の着手と離手時点を撮影した映像から目視にて判断し, 分析区間を 3 つの運動局面に分類した (Figure2). 運動局面は, 分析区間開始時点 (以下, 「開始時点」と略す) から両手部着手時点を踏込局面, 着手時点から両手部離手時点を着

手局面, 離手時点から分析区間終了時点 (以下, 「終了時点」と略す) を空中局面と定義した.

前転とびでは, 左右脚を前後に開いた姿勢で着足した後, 後方に位置する脚を鉛直上方に振り上げる. そこで, 本研究ではより前方に着足させた脚を踏込脚, 最初に振り上げる, もう一方の脚を振上脚と定義した.

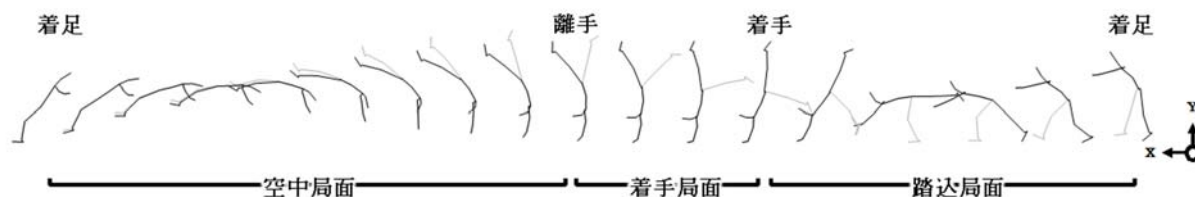


Figure 2. 運動局面の定義

### 5. 身体分析点の2次元座標値

2次元動作解析システム(Frame-DIAS V, Q'sfix社製)を用いて身体分析点23点(頭頂, 耳珠中点, 胸骨上縁, 左右肩峰, 左右肘関節中点, 左右手関節中点, 左右第3中手指関節, 左右肋骨下端, 左右大転子, 左右膝関節中点, 左右足関節中点, 左右踵骨隆起, 左右足先)を60[Hz]でデジタル化した。デジタル化によって取得された身体分析点のピクセル座標値を2次元DLT法により実長換算し, 身体分析点23点の2次元座標値を算出した。その後, 左右大転子を結ぶ線分の中点(以下, 「大転子中点」と略す)と左右肋骨下端を結ぶ線分の中点(以下, 「肋骨中点」と略す)を算出した。算出された2次元座標値について, 残差分析法(Wells and Winter, 1980)によって最適遮断周波数(8.52-13.92[Hz])を決定した後, 4次のButterworth low-pass filterによって平滑化した。平滑化された2次元座標値から身体を頭部, 上下胴部, 左右上腕部, 左右前腕部, 左右手部, 左右大腿部, 左右下腿部, 左右足部の15の身体部分で構成される剛体リンクモデルを定義した。その後, 阿江ほか(1992)の身体部分慣性係数を用いて, 身体重心および身体部分重心を算出した。

### 6. 分析項目と算出方法

分析項目は, 身体重心まわりの身体部分群(左上肢, 頭部胴体, 振上脚, 踏込脚)および全身の角運動量, 踏込局面と着手局面における身体部分群の角運動量の変化量と変化率, 身体重心速度, 踏込局面から着手局面における振上脚と踏込脚の関節角度(股関節, 膝関節, 足関節), 身体背屈角度, 着手局面における身体回転角度, 着手局面における振上脚と踏込脚の股

関節角度の変化量とした。

身体重心まわりの身体部分群と全身の角運動量は, Dapena(1978)の方法を用いて算出した。X軸とY軸に直行する軸を回転軸とし, 反時計まわりを正, 時計まわりを負としたうえで, 正方向への変化を前方回転, 負方向への変化を後方回転と定義した。前転とびでは左右上肢が対象的な運動形態を示すため, 本研究では左上肢に着目した。身体部分群の角運動量に関して, 左上肢は手部, 前腕部, 上腕部, 頭部胴体は頭部, 上下胴部, 振上脚と踏込脚は各脚の足部, 下腿部, 大腿部の角運動量の総和とした。また, 角運動量は被験者の身長 $^2$ 乗値と体質量の積で正規化することで単位を $[s^{-1}]$ とし, 表記が煩雑になることを回避するために $10^2$ を乗じた表記 $[10^2 \cdot s^{-1}]$ とした。身体部分群の角運動量の変化量は踏込局面と着手局面の終了時点と開始時点の差分とし, 変化率は踏込局面と着手局面における身体部分群の変化量を全身の変化量で除することで算出した。なお, 左上肢のみを算出したため, 変化率の合計が100%にならない。身体重心速度は, 身体重心の変位を時間微分することによって算出した。また, 振上脚と踏込脚の関節角度に関して, 股関節角度は下胴部と大腿部, 膝関節角度は大腿部と下腿部, 足関節角度は下腿部と足部のなす角度と定義した(Figure3)。身体背屈角度は肋骨下端から大転子に向かう下胴部ベクトルの逆ベクトルと上胴部のなす角度とし, 下胴部の逆ベクトルを基準として時計まわりを正, 反時計まわりを負の値で示した(Figure3)。身体回転角度は, 左第3中手指関節と身体重心を結ぶ線分がX軸の逆ベクトルとなす角度と定義した(Figure3)。着手局面における振上脚と踏込脚の股関節角度の変化量は, 離手時点から着手時点の股関節角度を減じることで算出した。

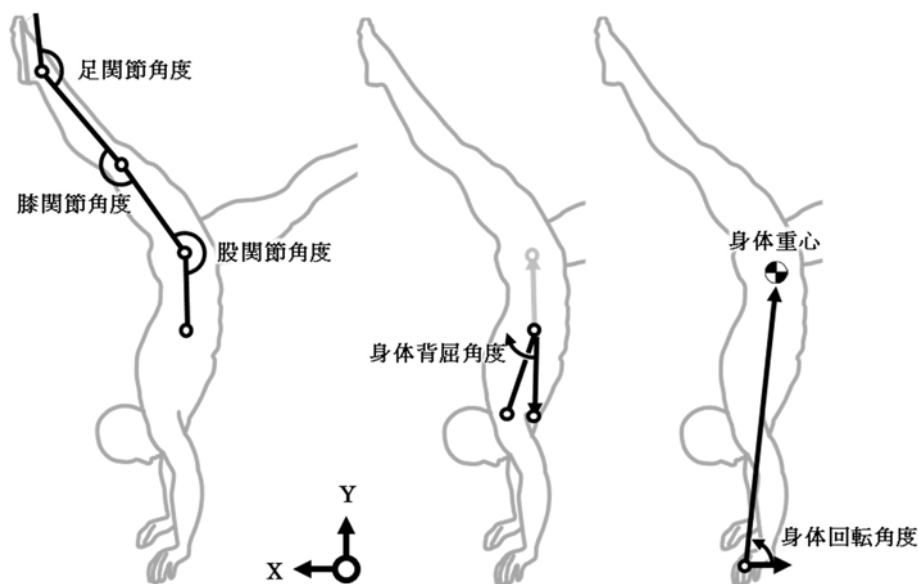


Figure 3. 関節角度, 身体背屈角度, 身体回転角度の定義

### 7. 統計処理

すべてのデータは, 平均値±標準偏差で表記した. 統計処理には, 統計解析ソフトウェア (SPSS Statistics ver.28, IBM 社製) を用いた. 本研究では開始時点, 踏込脚着足時点, 振上脚離足時点, 踏込脚離足時点, 着手時点, 離手時点, 終了時点进行分析時点とした. 身体重心まわりの身体部分群と全身の角運動量, 身体重心速度, 関節角度, 身体背屈角度の変化を検討するために, 分析時点を主要因とする Friedman の検定を行った. 分析時点の主効果が認められた場合, Wilcoxon の符号順位検定により隣接時点間 (開始時点と踏込脚着足時点, 踏込脚着足時点と振上脚離足時点, 振上脚離足時点と踏込脚離足時点, 踏込脚離足時点と着手時点, 着手時点と離手時点, 離手時点と終了時点) を比較した. ただし, 終了時点における関節角度と身体背屈角度, および身体重心速度に係る統計処理では, 離手時点と終了時点の比較を除外した. 身体回転角度, 着手局面における振上脚と踏込脚の股関節角度の変化量の比較には, Wilcoxon の符号順位検定を用いた. すべての統計処理にて, 危険率 5%未満を有意水準とし ( $p < 0.05$ ), Bonferroni の方法を用いて補正した.

### III. 結果

#### 1. 全身と身体部分群の角運動量の変化

Figure4 に, 全身と身体部分群の角運動量の変化を示した. 全身の角運動量は開始時点から踏込脚離足時点まで有意に増大し, 着手時点から離手時点まで有意に減少した ( $p < 0.05$ ). 身体部分群の角運動量に関して, 上肢は開始時点から振上脚離足時点まで有意に増大し, 着手時点から離手時点まで有意に減少した ( $p < 0.05$ ). 頭部胴体は開始時点から振上脚離足時点, 離手時点から終了時点まで有意に増大した ( $p < 0.05$ ). 振上脚は開始時点から踏込脚離足時点まで有意に増大した後, 踏込脚離足時点から離手時点まで有意に減少し, 離手時点から終了時点まで有意に増大した ( $p < 0.05$ ). 踏込脚は開始時点から離手時点まで有意に増大した後, 離手時点から終了時点まで有意に減少した ( $p < 0.05$ ).

Figure5 に, 身体部分群の角運動量の変化量と変化率を示した. 踏込局面ではすべての身体部分群の変化量が正の値を示し, 着手局面では左上肢と振上脚が負の値, 踏込脚と頭部胴体が正の値を示した. 踏込局面における変化率は左上肢が  $6.6 \pm 1.9[\%]$ , 振上脚が  $37.9 \pm 4.4[\%]$ , 踏込脚が  $30.0 \pm 3.5[\%]$ , 頭部胴体が  $19.4 \pm 0.5[\%]$  を示した. また, 着手局面では左上肢が  $10.2 \pm 8.5[\%]$ , 振上脚が  $230.4 \pm 92.1[\%]$ , 踏込脚が  $-124.9 \pm 77.7[\%]$ , 頭部胴体が  $-15.7 \pm 13.5[\%]$  を示した.

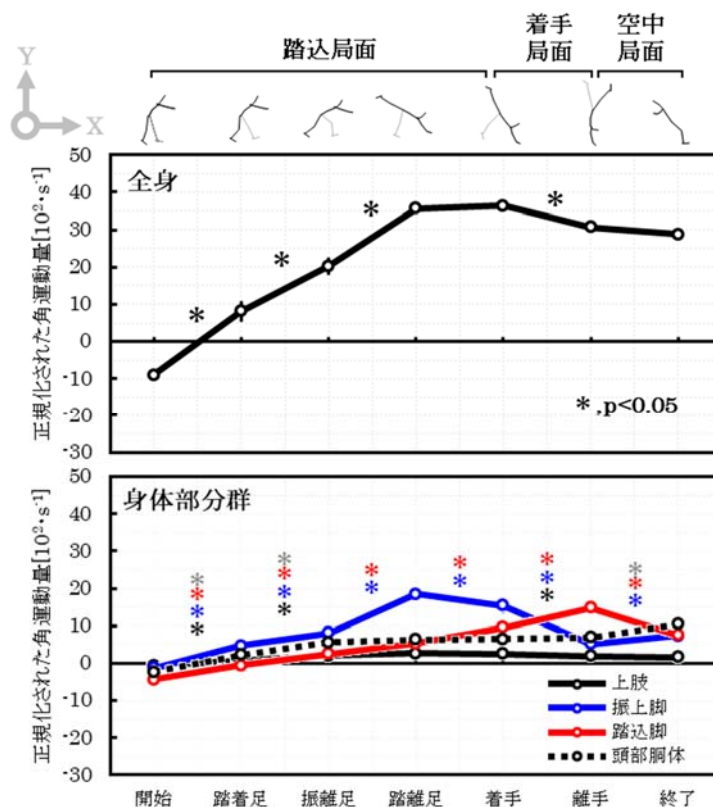


Figure 4. 全身と身体部分群の角運動量

時点の表記に関して、「踏足」「振離」「踏離」は、それぞれ踏込脚着足、振上脚離足、踏込脚離足を示す。また、スティックピクチャの進行方向は、グラフの変化に合わせるために反転した。

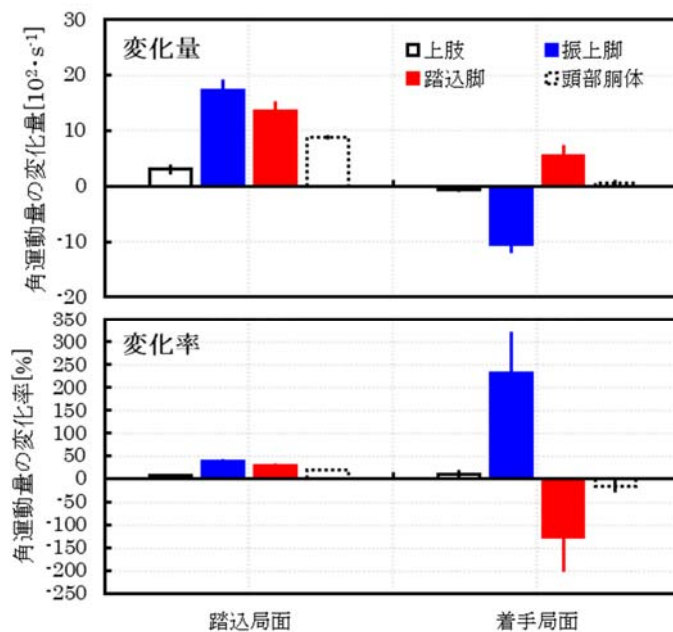


Figure 5. 身体部分群の角運動量の変化量と変化率

## 2. 身体重心速度の変化

Figure6 に、身体重心速度の変化を示した。X 座標成分は開始時点から振上脚離足時点まで有意に増大した後、着手時点から離手時点まで有意に減少した( $p<0.05$ )。Y 座標成分は開始時

点から踏込脚離足時点まで有意に増大した後、踏込脚離足時点から着手時点まで有意に減少し、着手時点から離手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。

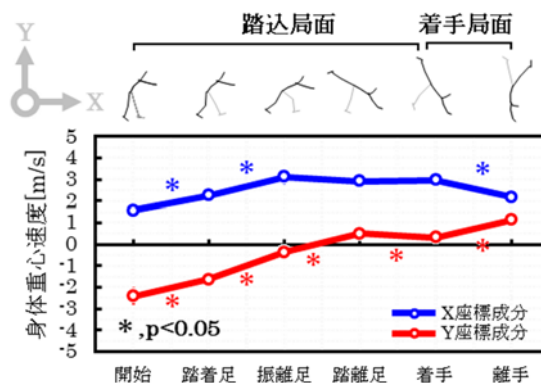


Figure 6. 身体重心速度

時点の表記に関して、「踏足」「振離足」「踏離足」は、それぞれ踏込脚着足、振上脚離足、踏込脚離足を示す。また、スティックピクチャの進行方向は、グラフの変化に合わせるために反転した。

## 3. 踏込および着手局面における関節角度、身体背屈角度、身体回転角度の変化

Figure7 に、振上脚と踏込脚における関節角度の変化を示した。振上脚に関して、足関節角度は開始時点から踏込脚着足時点まで有意に減少した後、振上脚離足時点から踏込脚離足時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。膝関節角度は開始時点から踏込脚着足時点まで有意に減少した後、踏込脚着足時点から踏込脚離足時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。股関節角度は踏込脚着足時点から離手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。踏込脚に関して、足関節角度は開始時点から振上脚離足時点まで有意に減少した後、振上脚離足時点から着手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。膝関節角度は開始時点から振上脚離足時点まで有意に減少した後、振上脚離足時

点から着手時点まで有意に増大し、着手時点から離手時点まで有意に減少した( $p<0.05$ )。股関節角度は開始時点から振上脚離足時点まで有意に減少した後、踏込脚離足時点から離手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。着手局面における股関節角度の変化量は振上脚が  $14.0 \pm 6.4$ [deg.]、踏込脚が  $78.3 \pm 10.0$ [deg.]であり、踏込脚が振上脚に比べて有意に高値を示した( $p<0.05$ )。

Figure8 に、身体背屈角度の変化を示した。身体背屈角度は振上脚離足時点から離手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。

Figure9 に、身体回転角度の変化を示した。身体回転角度は着手時点から離手時点まで有意に増大した( $p<0.05$ )。

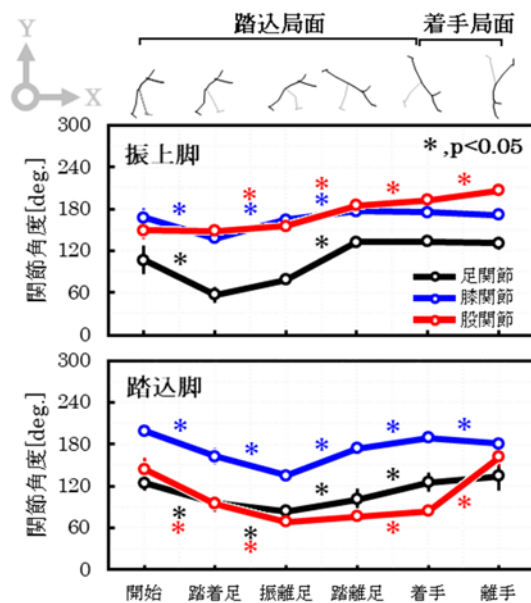


Figure 7. 振上脚と踏込脚における関節角度

時点の表記に関して、「踏着足」「振離足」「踏離足」は、それぞれ踏込脚着足、振上脚離足、踏込脚離足を示す。また、スティックピクチャの進行方向は、グラフの変化に合わせて反転した。

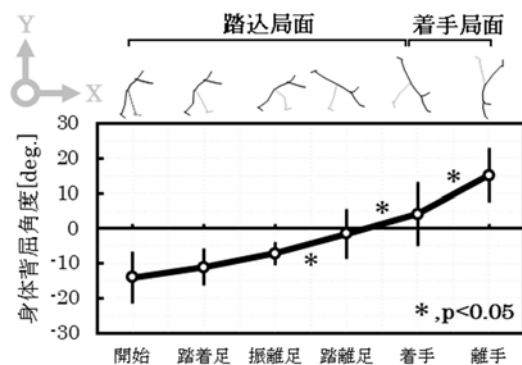


Figure 8. 身体背屈角度

時点の表記に関して、「踏着足」「振離足」「踏離足」は、それぞれ踏込脚着足、振上脚離足、踏込脚離足を示す。また、スティックピクチャの進行方向は、グラフの変化に合わせて反転した。

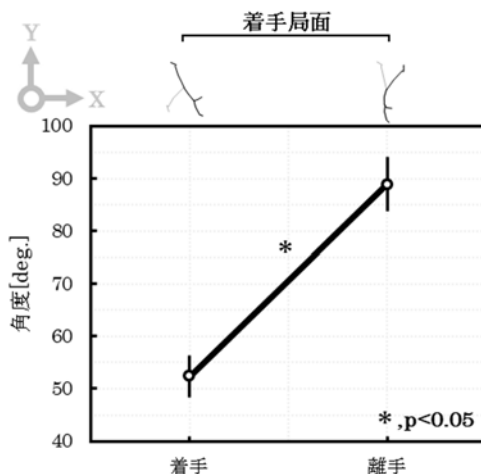


Figure 9. 身体回転角度

スティックピクチャの進行方向は、グラフの変化に合わせて反転した。



#### IV. 考察

##### 1. 全身の前方回転の勢いに関する考察

前転とびでは前方回転の勢いを強めることが重要とされる(金子, 1982, pp.203-209). 重力や空気抵抗以外の外力が作用しない空中局面では角運動量が保存されるため, 全身の角運動量は離手時点まで有意に増大すると予想された. しかし, 全身の角運動量は開始時点から踏込脚離足時点まで有意に増大した後, 着手時点から離手時点まで有意に減少した(Figure4). このことは, 前転とびにおける全身の前方回転の勢いは踏込局面にて強まり, 着手局面にて弱まることを示唆するものである. そこで, 以下では踏込局面における全身の前方回転の勢いを強めるキネマティクス, 着手局面にて全身の前方回転の勢いを弱めるキネマティクスを考察する.

##### 2. 踏込局面における前方回転の勢いとキネマティクスに関する考察

全身の角運動量が有意に増大する開始時点から踏込脚離足時点を通じて, 振上脚と踏込脚の角運動量が有意に増大した(Figure4). また, 踏込局面における身体部分群の角運動量の変化率は, 振上脚が  $37.9 \pm 4.4[\%]$ , 踏込脚が  $30.0 \pm 3.5[\%]$ , 頭部胴体が  $19.4 \pm 0.5[\%]$ , 左上肢が  $6.6 \pm 1.9[\%]$ であった(Figure4). これらのことから, 踏込局面では主に脚の前方回転の勢いが全身の前方回転の勢いに影響していると考えられる.

振上脚の運動形態に着目すると, 開始時点から踏込脚着足時点にて足関節角度と膝関節角度が有意に減少した後, 踏込脚離足時点に向けて足関節角度, 膝関節角度, 股関節角度が有意に増大した(Figure7). このことは, 踏込脚着足時点から踏込脚離足時点では, 振上脚における各関節を底屈あるいは伸展させながら後方に振り上げていた(以下, 「後方振上動作」と略す)ことを示唆するものである. また, 踏込局面における足関節と膝関節の運動は, 主動作に先行する反対方向への運動, すなわち反動動作と考えられる. 反動動作を伴う運動では, 筋の増強効果や弾性要素の貢献によって骨格筋の機械的仕事

量が増大する(深代, 2000; 杉崎ほか, 2004). 振上脚の後方振上動作にて前方回転の勢いを強めるためには, 地面を強く蹴る必要があり, その際には脚の伸展動作によって高い地面反力を獲得する必要がある. これらを鑑みると, 反動動作を伴う振上脚の伸展動作によって機械的仕事量を高め, 地面を強く蹴ることができたことで, 振上脚の前方回転の勢いを強めていたと考えられる. 反動動作に伴う機械的仕事量の様相は, 床反力計を用いたバイオメカニクス的研究によって解明される必要がある. 本研究は弾性のある体操競技用ゆかでの運動を対象としたため, 前転とび実施における反動動作の実態を検討することができなかった. しかし, これを検討することで, より効果的な前転とびの実施方法を解明できると考えられる. 今後は前転とびにおける反動動作の実態を解明する研究が期待される.

また, 土屋(2021, p.61)は振上脚の後方振上動作を実施する際には反り動作を実施することが重要であると指摘している. 上体振下動作に伴って反り動作を実施する場合, 振上脚股関節を伸展させて背中側に振り上げる必要がある. 身体背屈角度は, 振上脚離足時点以降に有意に増大することが示された(Figure8). また, 振上脚離足時点から踏込脚離足時点まで振上脚股関節角度は有意に増大するものの, 踏込脚股関節角度はあまり変化しなかった(Figure7). これらのことから, 踏込局面では振上脚の後方振上動作によって, 身体の背屈が誘発されていると考えられる. 踏込局面にて振上脚股関節は伸展し, 着手時点にて  $192.7 \pm 7.1[\text{deg.}]$ を示した(Figure7). また, 身体背屈角度は着手時点にて  $4.1 \pm 9.3[\text{deg.}]$ を示した(Figure8). このことから, 踏込局面では振上脚股関節の伸展動作によって, 振上脚を下胴部背中側のより上方に位置させるまで振り上げていたと考えられる. ここで, 身体重心速度の変化に着目すると, 振上脚離足時点から着手時点まで X 座標成分はあまり変化しないものの, Y 座標成分は有意に増大することが示された(Figure6). 振上脚離足時点から踏込脚離足時点では振上脚および全身の角運動量が有意に増大した

(Figure4)ことを鑑みると、踏込局面の振上脚離足時点以降では振上脚の後方振上動作とそれに伴う反り動作が、全身の前方回転の勢いに影響したと考えられる。なお、踏込脚離足時点から着手時点では踏込脚の前方回転の勢いが強まる一方で、振上脚の前方回転の勢いが弱まること示された(Figure4)。このことから、この時点間では踏込脚の前方回転を強めることで、全身の前方回転の勢いを補完していると考えられる。

踏込脚の運動形態に着目すると、開始時点から振上脚離足時点にて足関節、膝関節、股関節角度が有意に減少した後、足関節と膝関節角度が着手時点まで有意に増大し、股関節角度は踏込脚離足時点から着手時点まで有意に増大した(Figure7)。このことは、踏込局面では踏込脚の屈曲伸展動作が実施されていたことを示唆するものである。また、振上脚離足時点から着手時点では身体重心速度の Y 座標成分が有意に増大した(Figure6)。踏込脚の屈曲伸展動作によって移動方向への地面反力を獲得した場合、身体重心速度の X 座標成分も増大する。Y 座標成分のみを増大させる場合には身体重心をより鉛直上方に移動させる必要があることから、踏込脚の屈曲伸展動作は鉛直上方に向かって実施される必要があると考えられる。また、踏込脚の屈曲伸展動作を実施する際には、振上脚の後方振上動作と協調することが重要とされている(山下, 1983)。踏込脚の屈曲伸展動作が振上脚の後方振上動作に遅れて実施された場合、より身体が背屈した姿勢で踏切動作が実施されることになる。身体の背屈位が大きい姿勢では身体重心がより前方に位置するため、地面を強く踏み切ることが困難になると考えられる。本研究では振上脚離足時点から振上脚股関節の伸展動作と踏込脚の伸展動作が実施されることが示されたため(Figure7)、振上脚の後方振上動作に遅れることなく踏込脚の伸展動作が開始されたと考えられる。このとき、身体重心速度の Y 座標成分が増大することで全身の前方回転の勢いが強まるため、全身の前方回転の勢いを強める際には、振上脚の後方振上動作と踏込脚の伸展動作を同時に開始し、踏込脚

で地面を踏み切ることが重要であることが示唆された。

### 3. 着手局面における前方回転の勢いとキネマティクスに関する考察

全身の角運動量が有意に減少する着手局面では、すべての身体部分群の角運動量が正の値を示したが、左上肢と振上脚の角運動量が有意に減少し、踏込脚と頭部胴体の角運動量が有意に増大した(Figure4, Figure5)。振上脚と踏込脚の角運動量の変化率が高値を示し(Figure5)、踏込局面と同様に、脚の運動形態が全身の前方回転の勢いに影響したと考えられる。そのため、振上脚の前方回転の勢いが弱まったことで全身の前方回転の勢いは弱まるが、それを補完するように踏込脚の前方回転の勢いを強めていたと考えられる。着手局面では空中局面の浮上高を高めるために突上動作が実施される。また、空中局面では身体重心が放物運動を示すが、放物運動を示す物体の投射高は、身体重心速度や投射方向に依存する。したがって、前転とびにて浮上高を高める場合、前方への身体重心速度を鉛直上方に転換することが重要となる。着手時点では身体回転角度が  $52.1 \pm 4.0$ [deg.]であり(Figure9)、身体重心を着手地点よりも後方に位置させた姿勢であることが示された。このとき、身体背屈角度が  $4.1 \pm 9.3$ [deg.]、振上脚股関節角度が  $192.7 \pm 7.1$ [deg.]であったことから、上下胴部、振上脚が一直線上に位置するような姿勢であることが示された。このような姿勢で着手した場合、手部には移動方向とは逆方向の地面反力が作用するため、「起こし回転」(阿江, 1996)が発生すると推察される。起こし回転では移動方向への身体重心速度が鉛直上方に転換されるため、起こし回転は浮上高の増大に貢献する。着手局面では身体回転角度が有意に増大するとともに(Figure9)、身体重心速度の X 座標成分が有意に減少し、Y 座標成分が有意に増大した(Figure6)。そのため、着手局面では手部をより前方に着床し起こし回転を発生させて、身体重心速度を鉛直上方に転換させることが有効と考

えられる。さらに、移動方向への速度成分が高い程、転換後の身体重心速度の鉛直上方の速度成分は高くなる。身体重心速度の X 座標成分は、開始時点から振上脚離足時点まで有意に増大した後、あまり変化しなかった (Figure6)。この時点間では反動動作を伴う振上脚の伸展動作が実施されているため、振上脚の伸展動作によって移動方向への身体重心速度を高めた後、これを維持した状態で着手に至ることも重要と考えられる。

移動方向の身体重心速度を鉛直上方に転換した後は、左右両脚をより前方に移動させる必要がある。離手時点における振上脚股関節角度は  $206.7 \pm 8.2$  [deg.] であり、踏込脚股関節角度は  $162.0 \pm 13.7$  [deg.] を示した (Figure7)。このとき、身体背屈角度が有意に増大することを鑑みると (Figure8)、着手局面においても振上脚股関節を伸展動作させ、下胴部背中側のより後方に振上脚を位置させることで身体をより背屈させていたと考えられる。また、倒立位に至る過程で身体を背屈させることで、身体重心をより前方に移動させることができる。そのため、着手局面では反り動作によって身体重心がより前方に移動したことで、身体をより前方回転させることができたと考えられる。

#### 4. 本研究の限界と課題

本研究では、前転とびに必要な前方回転の勢いが踏込局面にて実施される振上脚の伸展動作や踏込脚の踏込動作によって獲得されていることが示唆された。踏切動作は大きな地面反力や外部トルクを獲得する役割を担っている。角運動量は外部トルクの時間変化に伴って変化するものの、本研究では地面反力を計測できておらず、前転とびにおけるキネティクスの特徴を詳細に議論できていない。今後は、地面反力を計測し、前転とびのキネティクスを分析することで運動技術を明らかにする必要がある。

## V. 結論

本研究の目的は、前転とびのキネマティクスと角運動量の変化を分析し、前転とびの勢いを獲得できる運動形態を検討することであった。本研

究では振上脚着足時点から両脚着足時点までの全身および身体部分群の角運動量、踏込・着手局面における身体部分群の角運動量の変化量と変化率、身体重心速度、振上脚と踏込脚の関節角度、身体背屈角度、着手局面における身体回転角度、振上脚と踏込脚の股関節角度の変化量を検討した。本研究で得られた結果は以下の通りである：

- 1) 全身の角運動量は開始時点から踏込脚離足時点にて有意に増大し、着手時点から離手時点にて有意に減少した ( $p < 0.05$ )。
- 2) 踏込局面では、振上脚と踏込脚の角運動量が有意に増大した ( $p < 0.05$ )。振上脚の運動形態に関して、開始時点から踏込脚着足時点にて足関節角度と膝関節角度が有意に減少した後、着手時点に向けて各関節角度が有意に増大した ( $p < 0.05$ )。また、踏込脚の運動形態に関して、振上脚離足時点から着手時点まで各関節角度が有意に増大した ( $p < 0.05$ )。
- 3) 着手局面では、振上脚の角運動量が有意に減少し、踏込脚の角運動量が有意に増大した ( $p < 0.05$ )。着手局面では振上脚と踏込脚の股関節角度が有意に増大した ( $p < 0.05$ )。また、踏込脚股関節角度の変化量が振上脚に比べて有意に高値を示した ( $p < 0.05$ )。
- 4) 身体重心速度の X 座標成分は、開始時点から振上脚離足時点まで有意に増大し、着手局面にて有意に減少した ( $p < 0.05$ )。また、Y 座標成分は開始時点から踏込脚離足時点と着手局面にて有意に増大した ( $p < 0.05$ )。
- 5) 身体背屈角度は振上脚離足時点から離手時点まで有意に増大した ( $p < 0.05$ )。
- 6) 身体回転角度は着手時点にて  $52.1 \pm 4.0$  [deg.] を示した後、離手時点まで有意に増大した ( $p < 0.05$ )。

以上のことから、前転とびに必要な全身の前方回転の勢いは踏込局面にて獲得されており、着手局面では踏込局面にて獲得された前方回転の勢いを維持することが重要であると考えられる。

踏込局面では、反動動作を伴った振上脚の伸展動作や、振上脚の後方振上動作とそれに伴う反り動作によって全身の前方回転の勢いを強めていることが示唆された。さらに、振上脚の後方振上動作と踏込脚の踏切動作をともに開始することが、全身の前方回転の勢いの獲得に寄与したと考えられる。

着手局面では、上下胴部と振上脚が一直線上に位置する姿勢で着手し、起こし回転によって移動方向への身体重心速度を鉛直上方に転換していたと考えられる。また、先行する振上脚の前方回転の勢いを抑制する一方で、踏込脚を勢いよく後方に振り上げることで全身の前方回転の勢いを補完していたと考えられる。

## 文献

- ・ 阿江通良 (1996) 陸上競技の高く跳ぶ動作と遠く跳ぶ動作-How they jump-. バイオメカニズム学会誌, 20:57-62.
- ・ 阿江通良・湯海鵬・横井孝志 (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性係数の推定. バイオメカニズム, (11):22-23.
- ・ Dapena, J. (1978) A method to determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity. *J. Biomech.*, 11:251-256.
- ・ Exell, T. A., Robinson, G. and Gareth, I. (2016) Asymmetry analysis of the arm segments during forward handspring on floor. *Eur. J. Sport Sci.*, 16:545-552.
- ・ 深代千之 (2000) 反動動作のバイオメカニクス: 伸張-短縮サイクルにおける筋-腱複合体の動態. *体育学研究*, 45:457-471.
- ・ 金子明友 (1982) 教師のための器械運動指導法シリーズ 2 マット運動. 大修館書店, pp.203-209.
- ・ 小西康仁・植村隆志・宮崎彰吾・村田憲亮・五十嵐健太・山田洋・小河原慶太 (2018) 前方倒立回転跳びにおける着手技術の力学的解析. *東海大学紀要. 体育学部*, 46:9-17.
- ・ 栗原英昭・吉田茂 (2015) 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.
- ・ 三上肇 (1992) マット運動の授業づくり. 高橋健夫ほか編, *器械運動の授業づくり*, pp.58-61.
- ・ 文部科学省 (2017) 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説. 東山書房, pp.63-67.
- ・ 中村剛・加藤澤男・渡辺良夫 (1999) 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. *筑波大学体育科学系紀要*, 22:33-42.
- ・ 杉崎範英・岡田純一・金久博昭・福永哲夫 (2004) 足関節の反動動作における弾性エネルギーが機械的仕事量および機械的パワーの増強に及ぼす影響. *人間工学*, 40:82-89.
- ・ 高木美智子・山脇恭二・福田道大 (2018) 支持倒立の練習が前方倒立回転とびの学習に与える影響. *岐阜大学教育学部研究報告. 自然科学*, 42:37-45.
- ・ 土屋純 (2021) *体操競技のバイオメカニクス*. 講談社, p.31, pp.60-65.
- ・ 渡辺良夫 (2006) 倒立回転跳びグループの学習. 三木四郎ほか編, 中・高校器械運動の授業づくり. 大修館書店, pp.171-172.
- ・ Wells, R. P., and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal noise in the kinematics of normal pathological and sporting gaits. *Human Locomotion*, 1:92-93.
- ・ 山下芳男 (1983) 床運動における前方倒立回転とびの技術に関する一考察. *岩手大学教育学部研究年報*, 43:69-79.