

原著論文

床運動における女子体操選手の後方伸身宙返り 2 回ひねりの 3 次元動作分析： ひねりの角運動量の発生タイプに着目して

針谷理栄子¹⁾, 阿江通良²⁾, 瀬尾京子³⁾, 畠田好章³⁾, 阿江数通⁴⁾

¹⁾ 日本体育大学大学院体育科学研究科コーチング学専攻

²⁾ 日本体育大学スポーツ文化学部

³⁾ 日本体育大学体育学部

⁴⁾ 茨城県立医療大学保健医療学部

Three-dimensional analysis of a double twist in a backward stretched somersault for female gymnasts in floor exercise: Focusing on to generate techniques the twist angular momentum

Rieko Harigai, Michiyoshi Ae, Kyouko Seo, Yoshiaki Hatakeda, Kazumichi Ae

Abstract: The aims of this study were to analyze a double twist in a backward stretched somersault performed by female gymnasts in floor exercise with the three-dimensional motion analysis technique, focusing on the angular momentum and angular velocity of the body, and to examine techniques to generate for obtaining basic instructional hints of the twist. Three varsity female gymnasts performing the twist angular momentum a double twist in a backward stretched somersault on the floor were captured by a three-dimensional motion analysis system (Vicon MX+) with 20 cameras at 250 Hz. The angular velocities and angular momenta of the whole body and body segments were calculated, based on Tang's method. The subject A generated the large angular momentum and velocity about the z axis of the trunk coordinate system during the take-off phase, and were categorized as a contact twist technique. In the airborne phase, the twist angular momentum of the subject A was further generated by pulling and swinging the twist-side arm backward and covering the quickly with the opposite side arm, as well as twisting the upper torso toward the direction of the twist. Much of the twist angular momentum of subject B was generated by pulling the opposite side arm toward the chest quickly from the latter half of the take-off phase to the airborne phase. The subject B could be categorized as an aerial twist technique. For non-skilled gymnasts it is recommended to begin twisting in earlier timing during the take-off phase and to move the opposite side arm toward the chest quickly.

抄録: 本研究の目的は、床運動における女子体操選手の後方伸身宙返り 2 回ひねりを 3 次元動作分析し、身体の角運動量や角速度に着目してその動作の特徴や身体操作を事例的に比較・検討し、指導に役立つ基礎的知見を得ることである。大学女子体操競技部員 3 名を対象に、後方伸身宙返り 2 回ひねりを三次元動作分析システム (Vicon MX+) の赤外線カメラ計 20 台を用いて 250 Hz で収集した。湯の方法により、全身および身体各部分の角運動量と角速度を算出した。被験者 A は、踏切局面において体幹座標系の z 軸まわりに大きな角運動量と角速度を生成した。これは、コンタクトツイストと呼ばれるものである。被験者 A の空中局面では、ひねり側の腕をひねり方向に引き、反ひねり側の腕を素早く胸の前に被せるように動かし、上腕をひねり方向に動かすことで全身のひねりの角運動量を生み出していた。被験者 B のひねりの角運動量は踏切局面から空中局面において、反ひねり側の腕を素早く胸の前に引きつけることで生成されていた。被験者 B はエアリアルツイストに分類できる。未熟練者である体操選手には、踏切局面の早い段階でひねりを開始し、ひねり方向とは反対の腕で胸を覆うように動かすことをすすめる。

(Received: March 4, 2021 Accepted: May 20, 2021)

Key words: female gymnasts, twist, three-dimensional motion analysis, angular momentum, angular velocity
キーワード: 女子体操選手, ひねり, 3 次元動作分析, 角運動量, 角速度

I. 緒 言

体操競技の床運動では、アクロバットの要素がDスコアに大きく関係するため、ひねり技や2回宙返りなどを取り入れた演技構成を行う選手が多い。なかでも、ひねり技は回転数を変化させることで、難度が変化し複数の技として演技構成に取り入れることができる。また、体操競技のルールでは、複数の技を組み合わせることで付与されるシリーズボーナスがあり、高難度のひねり技を組み合わせた演技を行う選手も多くみられる。さらに、女子採点規則¹⁾においても「ひねり(1回ひねり以上)を伴う宙返り」が構成要求として示されていることから、小学生から社会人まで幅広い層の女子選手がひねり技の習得に取り組んでいる。このように、ひねり技は選手にとって重要な技であり、効果的な指導が求められる技であるといえる。

吉本・渡辺²⁾は、競技歴6年の小学校6年生女子児童1名を対象に、「逆大和魂ひねり」と「後方3/4宙返り」という運動材を用いて、床運動において「後方宙返り1回ひねり」を習得させた事例を紹介している。湯ら³⁾は、力学モデルを用いて腕一ひねり動作(宙返り中に腕のスイングによって生じるひねり)発生について理論的解析を角運動量と角速度に着目して行い、その妥当性を検証するために、大学男子体操競技部員2名に跳馬の前転跳び1/2ひねり、1回ひねりおよび1回半ひねりを行わせ、その動作を3次元分析した。その結果から「腕のスイング角度が大きければ大きいほど、引き起こされるひねりが大きくなり、さらに、腕のスイングの時間が短ければ短いほど、より早く最大ひねり速度に達し、多回数のひねりの完成には有利である」、「腕スイングの方向によって、発生するひねり方向が左右される」と述べている。掃部・吉田⁴⁾は、ひねり宙返りの基本原理を「離陸時に宙返り軸の初期角度を得た後、身体を屈身形状に構え、身体をくねるか、ねじり、その後、早期に伸身形状に戻し、所望の旋回量に近づいたら、身体形状を調整して安定着地を図る」と表現している。さらにヒトがこの原理をどのように実践しているのかを分析するため、トランポリン競技者にひねり宙返りを実施させ、トランポリンの前面と側面から2台のビデオカメラにより実演技を撮影した。そして「後方1回宙返り半ひねりにおいて、ひねりが生じ始めるのは、演技の後半過ぎからであり、滞空の前半部分までは、身体を反らしているが、ひねりを誘発してからは身体を屈めている」と述べている。長野⁵⁾は、上下軸まわりの回転(ひねり)を変化させることにより、左右軸まわりの回転(後方宙返り)にどのような影響が現れるかを検討した。そして、床運動を得意とする大学男子体操競技部員4名に

後方伸身宙返り2回ひねりを実施させ、その動作を映画撮影法により分析し、「後方伸身宙返り2回ひねりの良否には、踏切直後に体幹を回転方向に湾曲させる側湾体勢が大きく作用する」ことを明らかにした。Yeadon⁶⁾は、コンピューターシミュレーション手法によりトランポリン競技におけるひねり動作発生タイプ分けを理論的に行い、ひねり動作には接床中にひねりを始めるコンタクトツイスト(Contact twist)と空中局面にてひねりを始めるエアリアルツイスト(Aerial twist)の2つのタイプがあると述べている。このモデルでは腕を伸展させたままの動作を仮定してシミュレーションを行なっているが、床運動におけるひねり動作では腕を屈曲したままであることが多いこと、さらに滞空時間、試技方向や着地後の姿勢などがトランポリン競技とは異なることを考えると、床運動で実施する際のひねり動作の場合とは相違があると考えられる。これらの研究はいずれも、ひねり動作やその発生機序に着目して理論的あるいは実験的に検討したものであり、選手固有の動作の特徴や身体操作について比較・検討はしていない。

男女ともに床演技に取り入れられているひねり技の一つとして後方伸身宙返り2回ひねり(以下、2回ひねりとする)がある。前述した通り、ひねり動作に関する研究はいくつか行われているが、それらの多くは男子選手を対象としたものであり、筋力・パワーなどに相違のある女子選手のものはいみじくない。また、ひねり技を実際に指導するうえでは、選手の動作の特徴、筋力・パワーなどを考慮する必要がある。さらに、男子選手と女子選手においても、形態的相違や筋力・パワーに相違があるので、女子選手のひねり動作と、男子選手のものでは異なる可能性があると考えられる。このように考えると、女子選手を対象にロングダート後転とびからの後方伸身宙返り2回ひねりを3次元動作分析し、その動作的特徴や身体操作を研究することは女子選手のひねり技の指導法を考えるうえで意義があることといえよう。

本研究の目的は、床運動における女子体操選手の後方伸身宙返り2回ひねりを3次元動作分析し、身体の角運動量や角速度に着目してその動作の特徴や身体操作を事例的に比較・検討し、指導に役立つ基礎的知見を得ることである。

表1 被験者の特性

被験者	身長 (m)	体重 (kg)	年齢 (歳)	競技歴 (年)
A	1.51	44.4	21	15
B	1.55	43.7	19	11
C	1.47	45.2	20	13

II. 方 法

2.1 被験者および試技

表1は本研究の被験者の特性を示したものである。本研究では、N大学体操競技部に所属する女子選手3名を被験者とした。被験者はいずれも2回ひねりを習得しているが、被験者Aは3回ひねりを習得している選手であり、被験者BおよびCは3回ひねりの習得を目指して練習中であった。

被験者には、N大学体操競技館に設置されたゆか運動専用の床上面にてロンダート後転とびからの後方伸身宙返り2回ひねりを、出来栄えなどをフィードバックしながら少なくとも3回行わせた。実施した技の評価を被験者自身に5段階で行わせ、評価点の最も高い1試技を分析対象とした。

計測に先立って指導者に了解を得たのち、被験者に対し研究の目的および実験試技内容の説明を行い、同意を得た。なお、本研究は日本体育大学研究倫理審査委員会の承認(承認番号:018-H35)を得て行われた。

2.2 データの収集および処理

本研究では、12m×12m四方の床の鉛直方向をZ軸、試技の方向(ロンダートの進行方向、床の対角方向)をY軸、Y軸に直交する方向をX軸とする右手系静止座標系を設定した。データ収集はN大学体操競技館で行った。被験者のひねり動作を3次元的に分析するため、光学式3次元動作データ収集システム(VICONシステム)の赤外線カメラ計20台を用いて、反射マーカを貼付した身体計測点の3次元座標データをサンプリング周波数250Hzで収集した。マーカは光反射素材を表面に貼った直径15mmあるいは14mmの球体であり、被験者の身体表面に47個(図1)を貼付した。

Viconシステムで得られた計測点の3次元座標データから、後転とびから着地までの区間の身体計測点の

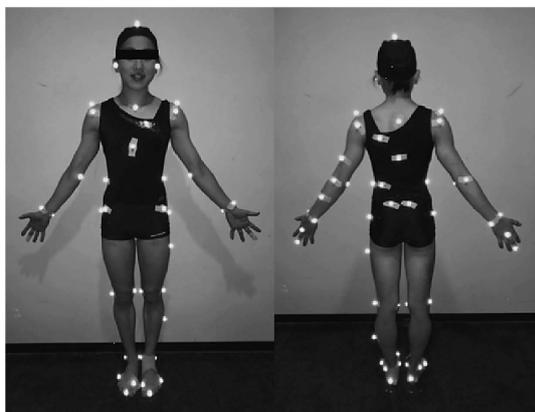


図1 反射マーカをの貼り付け箇所

3次元座標データを抽出した。なお、認識されなかったマーカがあった区間については、Vicon専門処理ソフト(Body Builder, Vicon Motion Systems社製)を用いて補間し、座標を推定した。なお、補間は空中局面にて身体に腕を引き付けた後の手および肘の内側、両脚が揃った後の膝内側、両足関節内側のマーカに対して行った。

計測した被験者の身体各部分の3次元座標は、Winter⁷⁾の方法によって最適遮断周波数(10-18Hz)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、母指球、足関節、膝関節については関節の周囲に貼付した2個のマーカの中点を、肩関節に関しては前後に貼付した2個のマーカの中点を関節中心とした。股関節は臨床歩行分析研究会の推定式を用い⁸⁾、大転子と上前腸棘点のマーカを結ぶ線上で大転子から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距離の18%を内挿した点を股関節中心とした。

2.3 測定項目および算出方法

1) 動作局面分け

動作局面は、ロンダートの着足から後転とびの着足までを後転とび局面、後転とびの着足から離床までを踏切局面、離床から1回ひねり完了までを1回ひねり局面、1回ひねり完了から着床までを2回ひねり局面、着床から5コマ後までを着地局面とした。なお、結果を示した図では、2回ひねり局面と着地局面をまとめて2回ひねり・着地局面とした。

2) 静止座標系と体幹座標系の定義

本研究では、先述した右手系静止座標系に加えて、身体座標系およびひねりを記述する基準としての体幹座標系を設定した。身体を15個の剛体(頭部、上腕、下腕、左右の上腕、前腕、手、大腿、下腿、足)が各々の関節の1点を介して接続された剛体系と仮定した⁹⁾。体幹座標系(図2)は、両大転子の midpoint から両肩

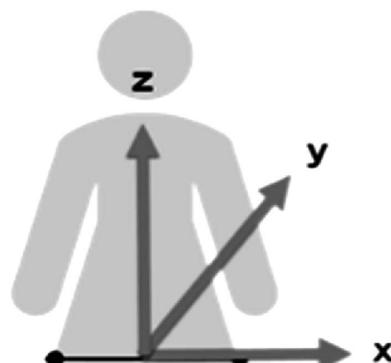


図2 後方からみた体幹座標系

の中点へ向かう方向をz軸、左大転子から右大転子へ向かう方向を仮のx軸(x'軸)とし、z軸ベクトルとx'軸ベクトルの外積によりy軸を、y軸ベクトルとz軸ベクトルの外積によりx軸を定義した。本研究では、x軸を宙返りの軸、z軸をひねりの軸とした。

3) 静止座標系における身体各部分の角速度の算出

下記の湯⁹⁾の方法により身体各部分の重心を通る軸まわりの角速度を算出した。

$$\begin{aligned}\omega_x &= \{(Y - Y_C)(V_Z - V_{ZC}) - (Z - Z_C)(V_Y - V_{YC})\}/r^2, \\ \omega_y &= \{(Z - Z_C)(V_X - V_{XC}) - (X - X_C)(V_Z - V_{ZC})\}/r^2, \\ \omega_z &= \{(X - X_C)(V_Y - V_{YC}) - (Y - Y_C)(V_X - V_{XC})\}/r^2,\end{aligned}$$

ここで、X, Y, Zは身体各部位(計測点)の座標、X_C, Y_C, Z_Cは部分重心の座標、V_{XC}, V_{YC}, V_{ZC}は部分重心の速度、rは部分重心と身体各部位(計測点)との距離である。

4) 静止座標系における全身および身体各部分の角運動量の算出

湯⁹⁾の方法にもとづき、静止座標系における身体部分*i*(15個)の角運動量*H_i*を以下の式により算出し、全身の角運動量(*H_w*)はその合計とした。

$$H_i = r_{iG} \times m_i V_{iG} + I_i \omega_i$$

ここで、*r_{iG}*は身体重心に対する身体各部分*i*の重心の相対位置ベクトル、*m_i*は身体各部分*i*の質量、*V_{iG}*は身体重心に対する身体各部分*i*の重心の相対速度ベクトル、*I_i*は身体各部分*i*の慣性テンソル、*ω_i*は身体各部分*i*の角速度ベクトルである。

身体各部分の慣性テンソルの導出は湯⁹⁾の方法により行い、被験者の身体各部分の慣性特性は阿江¹⁰⁾による係数を用いて推定した。

5) 体幹座標系における全身および身体各部分の角運動量の算出

宙返りおよびひねりの角運動量を求めるため、体幹座標系の各軸に静止座標系における全身あるいは身体各部分の角運動量を投影し、体幹座標系のx軸成分を宙返りの、z軸成分をひねりの角運動量とした。

6) 静止座標系における全身の角速度の算出

静止座標系における全身の角速度(*ω_x*, *ω_y*, *ω_z*)は、上述の4)で算出した全身の角運動量(*H_w*)を全身の慣性テンソル(*I*, 身体各部分の慣性テンソルの合計)で除して求めた。

$$H_w = I\omega$$

$$\omega = I^{-1}H_w$$

$$I = \sum_1^{15} I_i$$

$$I_i = RI_iR^T + m_iG_i$$

$$G_i = \begin{pmatrix} y^2+z^2 & -xy & -xz \\ -yx & x^2+z^2 & -yz \\ -zx & -zy & x^2+y^2 \end{pmatrix}$$

ここで、*I_i*は身体各部分*i*の慣性テンソル、*I*は身体各部分*i*の主慣性モーメント、*R*は身体各部分の変換行列、*R^T*は転置行列、*m_i*は身体各部分*i*の質量、*x*, *y*, *z*は身体重心に対する身体各部分の重心の相対座標である¹¹⁾。

7) 体幹座標系における全身の角速度の算出

宙返りおよびひねりの全身の角速度を求めるため、6)で算出した静止座標系における全身の角速度を体幹座標系のx軸およびz軸に投影した。

III. 結 果

本研究では、女子体操選手3名について計測したが、ひねりの開始、全身の角運動量などをみると、被験者AおよびCは主に踏切局面にて、被験者Bは踏切局面から空中局面にかけてひねりを生み出していた。そこで、典型例として、踏切局面においてひねりの角運動量(体幹座標系z軸まわり)の最大値の50%以上を生成し、空中局面において身体操作が小さかった被験者A(左ひねり)と、踏切局面でのひねりの角運動量の生成が50%以下で、空中局面にてひねり始めに大きく両腕を上げるなどして身体操作が大きかった被験者B(右ひねり)について詳細に検討することにした。また、本研究の被験者は後方伸身宙返り2回ひねりを安定して行える技能水準にあり、ひねりの角運動量の最大値の50%以上の生成を基準にタイプ分けを行ったので、個人内差よりも個人間の相違をとらえられていると考えられる。

3.1 全身の角運動量および角速度の変化

図3は被験者A(上)およびB(下)の全身の角運動量の変化を静止座標系について、図4は体幹座標系について示したものである。また、図5は全身の角速度の変化を体幹座標系について示したものである。いずれも、ロンダートの着足から2回ひねりの着床後5コマ(0.05秒)までの時間を100%として示した。

1) 静止座標系における全身の角運動量の変化

①被験者A(左ひねり, 図3上)

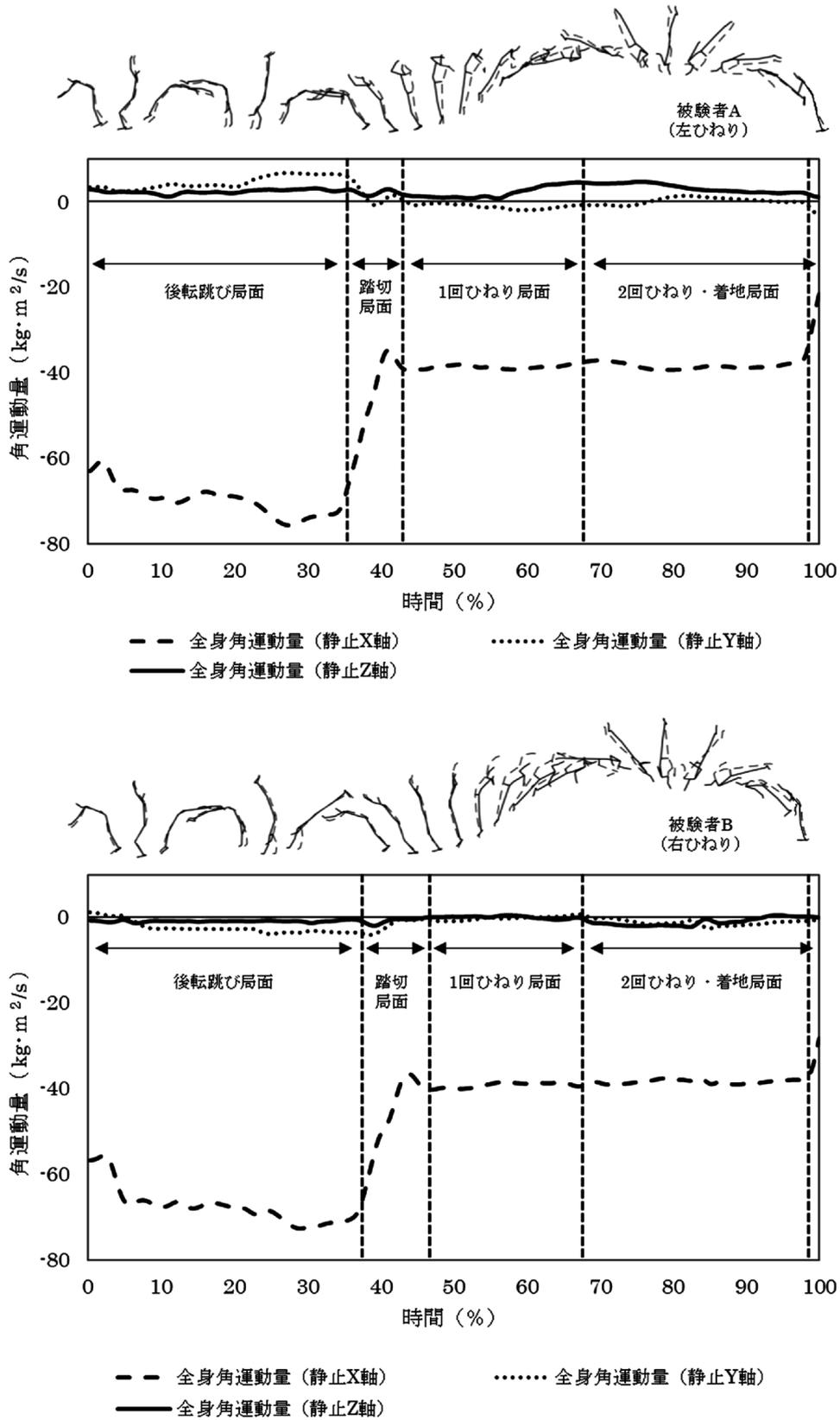


図3 被験者AおよびBの後方伸身宙返り2回ひねり中の静止座標系における全身の角運動量の変化

床運動における女子体操選手の後方伸身宙返り2回ひねりの3次元動作分析

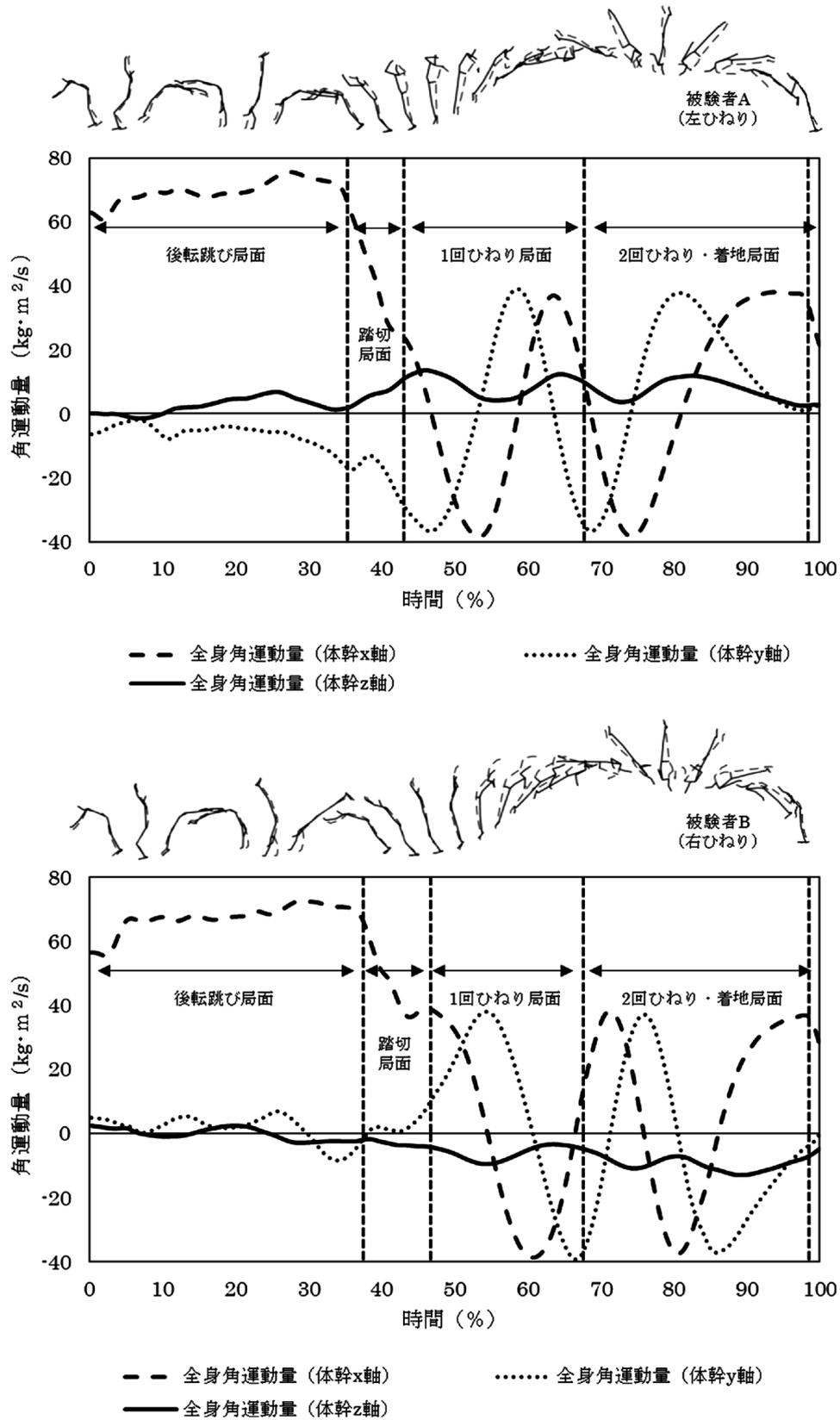


図4 被験者AおよびBの後方伸身宙返り2回ひねり中の体幹座標系における全身の角運動量の変化

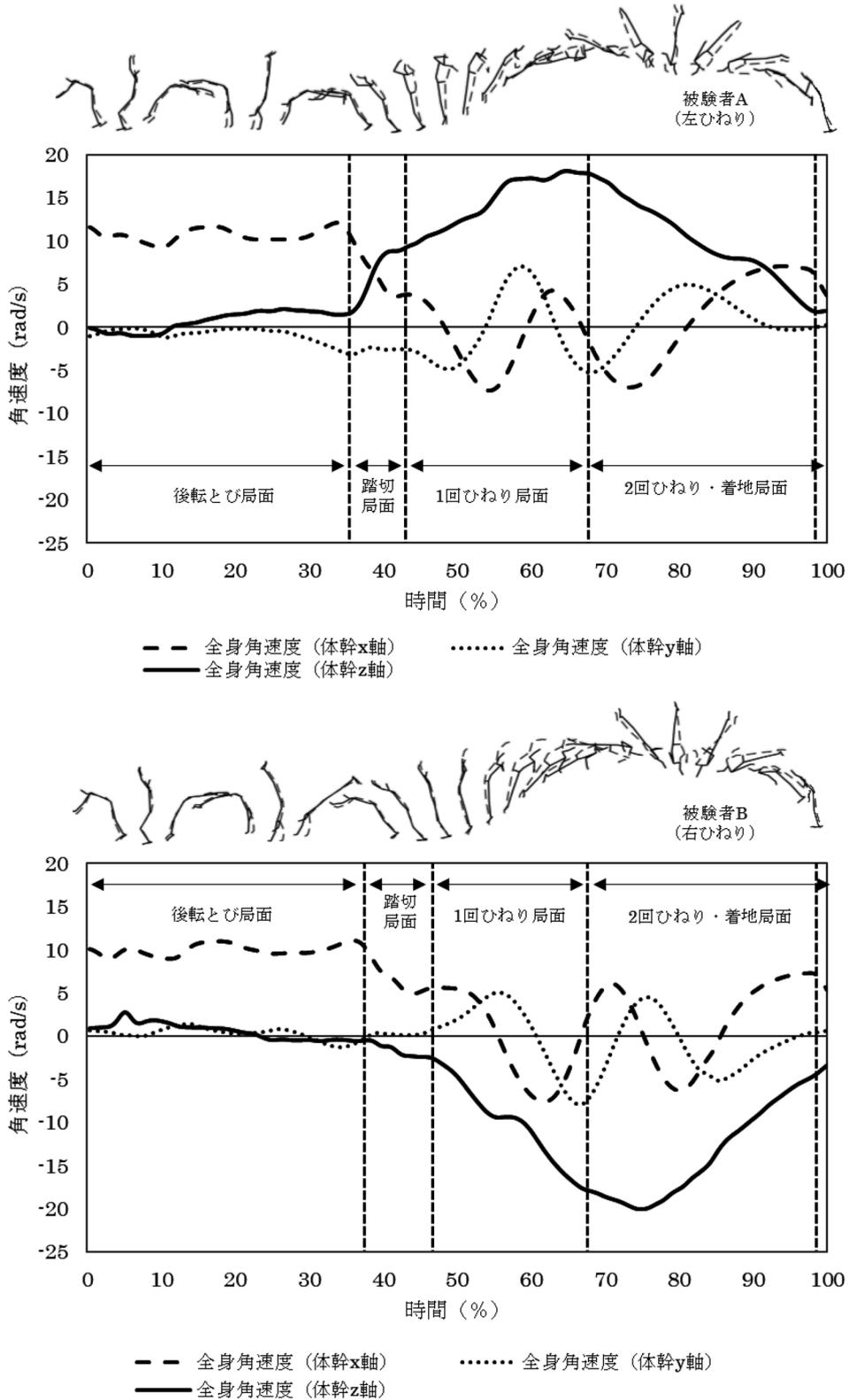


図5 被験者AおよびBの体幹座標系における全身の角速度の変化

被験者Aの分析試技における最大重心高は1.88 mであった。

全身の角運動量を静止座標系(図3上)についてみると、後転とび局面において大きなX軸まわりの負(後方宙返り)の角運動量(最大 $-75 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, 約28%時)が生み出されている。つづく踏切局面でこの角運動量は急激に減少するが、空中では $-40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ 前後で大きな変化はなく宙返りが持続され、着地後 $-20 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ あたりまで減少している。

②被験者B(右ひねり, 図3下)

被験者Bの分析試技における最大重心高は1.84 mであった。

全身の角運動量を静止座標系(図3下)についてみると、被験者Aと同様の変化を示し、後転とび局面において著しく大きなX軸まわりの負(後方宙返り)の角運動量(約 $-72 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, 約30%時)が生み出されている。つづく踏切局面にてこの角運動量は急激に減少するが、空中では $-40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ 前後に保たれており、宙返りが持続していることがわかる。そして、着床に向けて急激に減少している。

2) 体幹座標系における全身の角運動量の変化

①被験者A(左ひねり, 図4上)

全身の角運動量を体幹座標系(図4上)についてみると、上述したように後転とび局面ではx軸まわりの正(後方宙返り)の角運動量がみられるが、踏切局面において約 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ まで急激に減少している。そして、踏切局面においてすでにz軸まわりの正(左ひねり)の角運動量が増加(約 $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)して空中局面(1回ひねり)で変動しながらも(左ひねりの角運動量の最大値は約 $13.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, 約45%時)保持されていることがわかる。1回ひねり局面において体幹座標系のx軸(宙返り)とy軸(側方回転)の角運動量は大きく、側方回転と宙返りが位相ずれを生じ、左側方回転(負)しながら、前方宙返り(負)、そして右側方回転(正)しながら、後方宙返り(正)の順で行われていることがわかる。その後、2回ひねり・着地局面でも宙返りと側方回転の角運動量は同様の変化を示し、後方宙返りの角運動量は残るが、着地に向かってひねりと側方回転の角運動量は急激に減少している。

②被験者B(右ひねり, 図4下)

全身の角運動量を体幹座標系(図4下)についてみると、後転とび局面ではx軸まわりの正(後方宙返り)の大きな角運動量がみられ、踏切局面においては減少しているが、その減少は小さい。踏切局面ではわずかにz軸まわりの負の角運動量(右ひねり, 約 $-4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, 約47%時)が生じて、空中局面(1回ひねり～着地まで)で変動しながらも保持されている(右ひね

りの角運動量の最大値は約 $-13 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, 約90%時)。踏切局面におけるひねりの角運動量の生成は小さい。空中局面において体幹座標系のx軸(宙返り)とy軸(側方回転)の角運動量は大きく、後方宙返り、右側方回転、前方宙返り、左側方回転の順でみられ、その後着床に向かって減少している。

3) 体幹座標系における全身の角速度の変化

①被験者A(左ひねり, 図5上)

全身の角速度を体幹座標系(図5上)についてみると、踏切局面においてx軸まわりの正の角速度が減少しているが、z軸まわりの角速度が急増し、空中局面でもさらに増加して1回ひねり局面の後半で大きなひねり角速度に達している(約 18 rad/s , 約65%時)。しかし、2回ひねり・着地局面では、着地後に静止するための準備として急激に減少している。一方で、後方宙返りの角速度(x軸)が2回ひねり・着地局面において増加したのち、わずかに減少したのみで着地している。

②被験者B(右ひねり, 図5下)

全身の角速度を体幹座標系についてみると(図5下)、踏切局面においてx軸まわりの正の角速度が減少し、z軸まわりの負の角速度が増加している。空中局面ではさらに増加して2回ひねり・着地局面に入ってから、約 -20 rad/s (約75%時)に達している。後方宙返り回転の角速度(x軸)は2回ひねり・着地局面後半において増加している。

以上のことから、体幹座標系における全身の角運動量と角速度の変化をまとめると次のようになる。被験者Aは、踏切局面において後方宙返りの角運動量(x軸)を急減させ、大きな全身のひねりの角運動量を獲得していた。そして、空中局面では全身のひねりの角運動量はあまり増加しないが、全身のひねりの角速度は1回ひねり局面で増加していた。一方、被験者Bは、踏切局面における後方宙返りの角運動量の減少および全身のひねりの角運動量の増加は小さかった。空中局面では全身のひねりの角運動量はわずかに増加し、全身のひねりの角速度は2回ひねり・着地局面において最も大きくなっていった。このように、被験者Aでは踏切局面における全身のひねりの角運動量の生成が大きい実施であった。

3.2 体幹座標系z軸まわりの身体各部分の角運動量の変化

図6は、被験者Aの後転とび局面から2回ひねり・着地局面における体幹座標系z軸まわりの身体各部分の角運動量の変化を示したもので、図7は被験者Bのものである。それぞれ上図は右腕、左腕、頭部、上胴、下胴を、下図は右脚、左脚を示す。

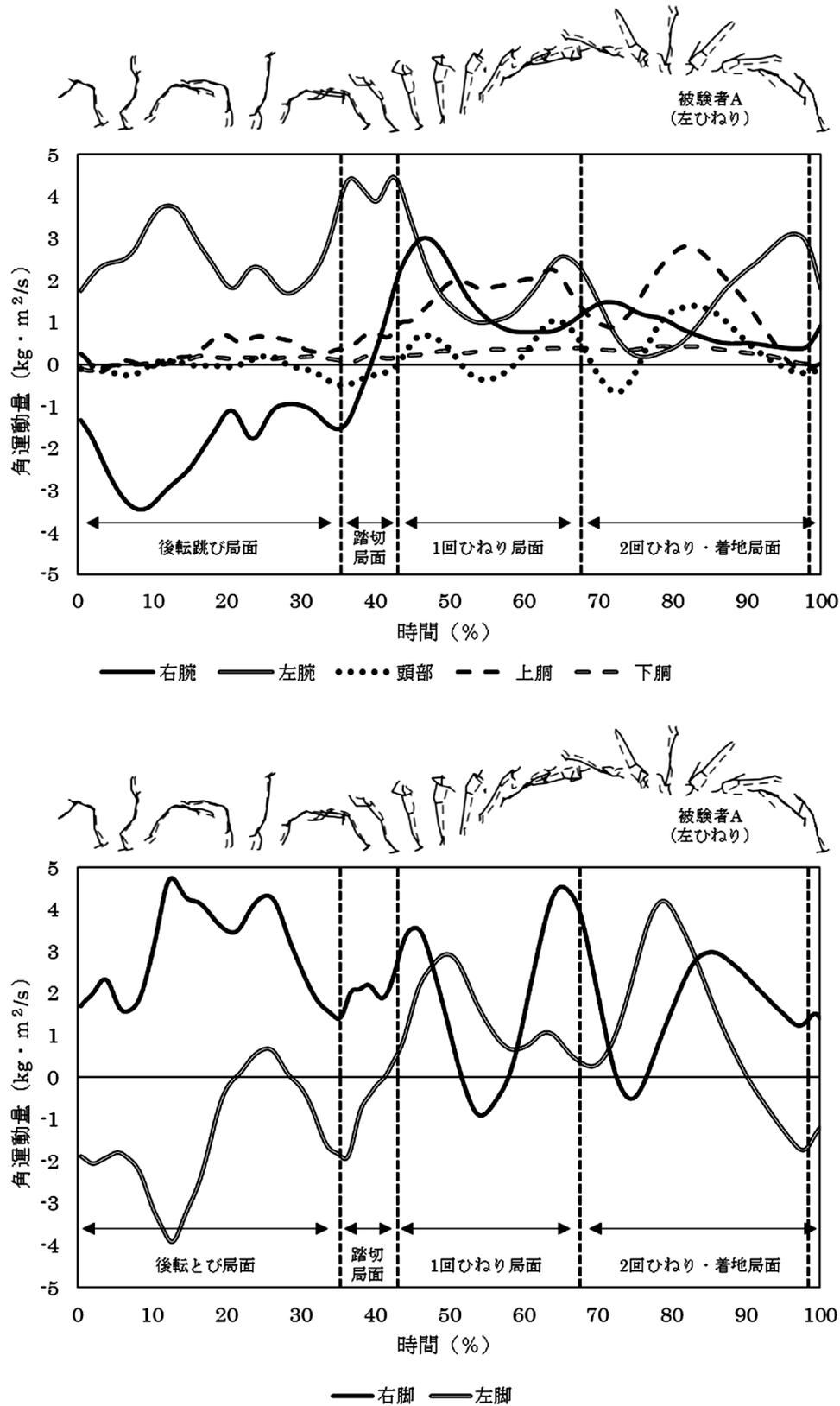


図6 被験者Aの体幹座標系z軸まわりの角運動量の変化

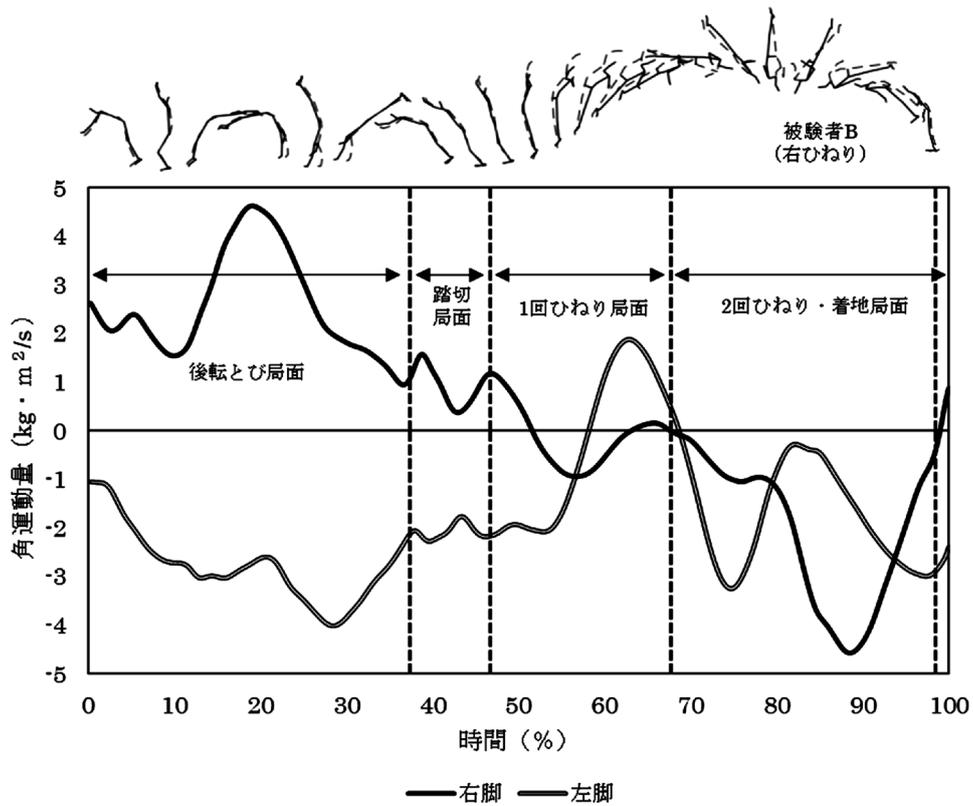
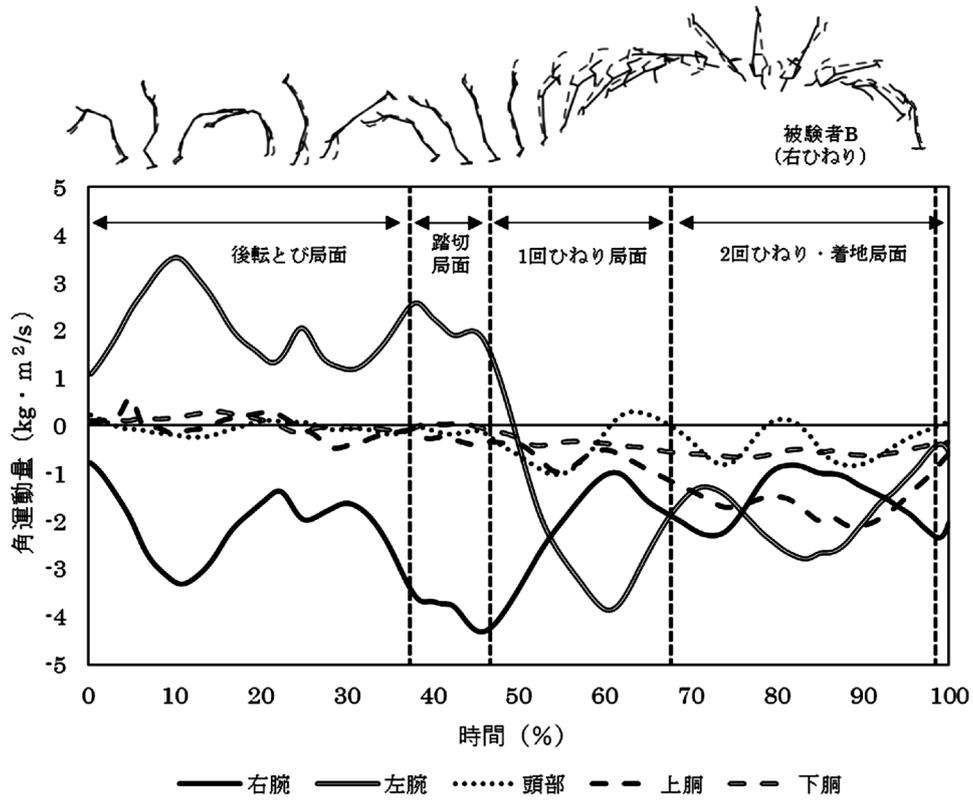


図7 被験者Bの体幹座標系z軸まわりの角運動量の変化

1) 被験者 A (左ひねり, 図 6)

踏切着足前の右脚の左ひねり(正)の角運動量は大きいですが、踏切着足に先立って急激に減少している(図6下, 約25%時以降)。左腕をみると、踏切着足前(図6上, 約25%時)に急増し、踏切局面においても大きな左ひねりの角運動量を生じていた。さらに踏切局面において、右腕の左ひねりの角運動量が急増し、上脗の左ひねりの角運動量も増加している。空中局面になると、左腕や右腕の左ひねりの角運動量は急減し、下脗のひねりの角運動量も小さいが、上脗、左脚の左ひねりの角運動量が保持されている。約55%時あたりから左腕の左ひねりの角運動量が増加し、上脗の左ひねりの角運動量とともに、全身の左ひねりの角運動量の増加(図4, 上)に貢献している。約70%時以降では、上脗と左脚の左ひねりの角運動量が急増し、全身の左ひねりの角運動量が再び増加している(図4, 上)。約80%時あたりから上脗が減少してくると左腕が増加しているが、着地前に両脚や全身の左ひねりの角運動量が減少している(図4, 上)。そして、2回ひねり・着地局面では他の身体各部分の左ひねりの角運動量が減少するが、左腕では増加している。

このように被験者Aでは、空中局面のみでなく、踏切局面において左右の腕、右脚、上脗によってひねり方向の角運動量を生み出していた。

2) 被験者 B (右ひねり, 図 7)

踏切局面において右腕と左脚で右ひねり(負)の角運動量を生じるが、左腕と右脚は逆の正の角運動量を生じるため、これらの部分の角運動量の多くが相殺されている。また、踏切局面において頭部、上脗、下脗の右ひねりの角運動量はほとんど生じていないことから、体幹は右ひねりの角運動量を生み出しておらず、左右の腕や脚の角運動量も全身のひねりへの貢献は小さい(図4, 下)。1回ひねり局面では、左右の腕で右ひねりの角運動量を生み出すが、その後右腕が減少し、さらに左脚は右ひねりとは逆の角運動量を生じ、上脗は右へ側屈して右ひねりの角運動量をわずかに増加するが、下脗は小さく、全身の右ひねりの角運動量の増加は小さい(図4, 下)。2回ひねり・着地局面になると、約75%時あたりで右腕や左脚の右ひねりの角運動量が減少するが、左腕、上脗、右脚により全身の右ひねりの角運動量が保持されている(図4, 下)。着床に向かっては、右脚、左腕、上脗の右ひねりの角運動量が減少しているが、右腕や左脚では増加しており、全身の右ひねりの角運動量の減少は小さい(図4, 下)。

このように被験者Bでは、踏切局面での四肢各部の体幹座標系z軸まわりの角運動量は大きいですが、その多

くが相殺されていた。空中局面において左腕および両脚、上脗により全身のひねり方向の角運動量を生み出し、保持していた。

IV. 考 察

4.1 ひねりの角運動量生成のタイプと身体操作について

Yeadon⁶⁾によると、ひねり発生のタイプには、コンタクトツイストとエアリアルツイストの2つがある。コンタクトツイストは、接床中、ひねり方向に身体の一部を回転させることによって、踏切局面においてひねりの角運動量が生成され得るというものである。一方、エアリアルツイストは、離床後、体幹を傾け、空中にて非対称に腕や体幹を動かすことで、慣性主軸を傾け、宙返りの角運動量を傾いた長軸(z軸)まわりに分解してひねりを生み出すというものである。

結果で述べた身体各部分の角運動量の変化からもみられるように、腕や上脗の動作がひねりの発生に大きな役割を果たしていることがわかった。すなわち、被験者Aでは左腕によって後転とび局面終盤から、さらに踏切局面において左腕、右腕、上脗、右脚で左ひねりの角運動量を生み出し、空中局面では上脗と左腕、そして左右の脚間で相互に角運動量を伝達しながら全身の左ひねりの角運動量を保持していた。このように踏切局面において両腕、上脗、右脚でひねりの角運動量を生み出す方法は、Yeadon⁶⁾のいうコンタクトツイストに相当し、空中局面の初期から大きなひねりの角運動量をもつタイプであるといえる。一方、被験者Bでは、踏切局面において上脗の右ひねりの角運動量はあまり生み出されておらず、左右腕の右ひねりの角運動量は大きいですが、それぞれ逆方向の角運動量のために相殺され、空中局面において左腕、両脚、ついで上脗のひねりの角運動量が増加していた。これは、Yeadon⁶⁾のいうエアリアルツイストに相当し、離床後にひねりの角運動量を生み出すタイプであり、全身のひねりの角運動量の最大値出現も遅かった。

以上のことから、コンタクトツイストタイプの被験者Aでは、後転とび局面・踏切局面から両腕と上脗を使って早期に左ひねりの角運動量を生み出しているのに対し、エアリアルツイストタイプの被験者Bでは、踏切局面での右ひねりの角運動量の増加は小さく1回ひねり局面から両腕の振りと体幹の側屈を使って右ひねりの角運動量を生み出していたことから、ひねりの角運動量発生のタイミングが遅かったといえるであろう。本研究の試技では、ひねり生成のタイプの違いは2回ひねりの成否には大きな影響を与えなかったようにみえるが、被験者Bでは着床直前でも体幹に右ひねりの角運動量がみられたことから、着地の準備が

床運動における女子体操選手の後方伸身宙返り2回ひねりの3次元動作分析

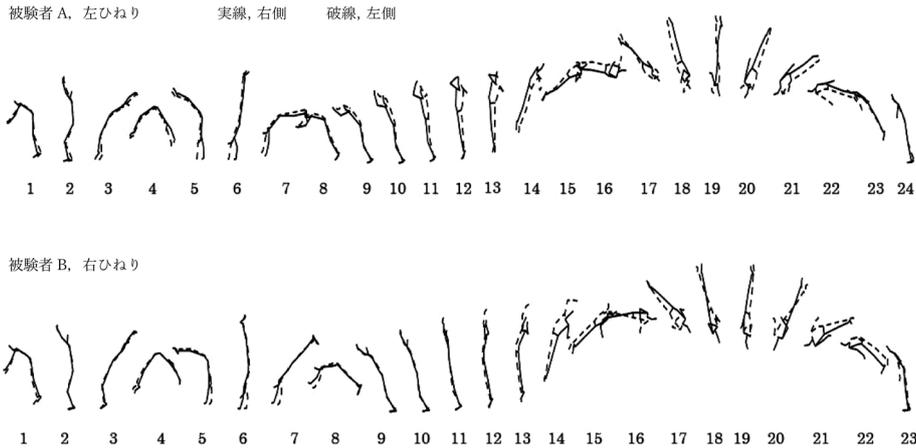


図8 側方からみた被験者AおよびBの後方伸身宙返り2回ひねり

遅れていたと推測される。

これらのひねり生成のタイプを考慮して、本研究の被験者の身体操作の特徴をまとめると、以下のようになる。

1) 被験者A (図8上, 左ひねり)

後転とび局面終盤から左腕と上脗により、さらに踏切局面において左腕をひねり方向(左)に引き、右腕を胸の前に被せるように動かすことで左ひねりの角運動量を生み出していた。被験者Aの動きの意識報告によると、ひねり始めの身体操作では、「ひねりでの軸ブレを防ぐためにひねり側(左)の肩を止めて反ひねり側(右)の腕を胸の前に被せにいくことだけを意識している」という。この動作は、図8上のNo. 13-16のように、反ひねり側(実線)の右腕を胸の前に被せるように動かしていることから確認できる。また、踏切局面にて、長野⁵⁾の示す側湾体勢が確認された(図8上, No. 12-13)。被験者Aの試技は、被験者Bと比較してひねり始めが早く、滞空時間が長いものであった。そのため、ひねり技実施中における空中局面での高さやひねり技終了後の着地姿勢の高さにおいては、高評価が獲得できると考えられる。

2) 被験者B (図8下, 右ひねり)

被験者Bは、踏切局面において体幹座標系における全身の角運動量や角速度の増加が小さかった。しかし、離床後の角運動量および角速度の増加が大きく、空中局面ではz軸まわりの負の角速度が、被験者Aよりも大きかった。また、角速度が最も大きくなる時点が被験者Aより遅かったが、これはひねり始めが遅かったことによると考えられる。踏切局面では、ひねり始めに左腕を斜め上に伸ばしやや外側に開いており(図8下, No. 11-13)、左腕は上脗のひねりと逆方向の角運動量をもっていた(図7)が、これはひねりを抑

制するものと考えられる。

被験者Bのひねり動作は長野⁵⁾のいう、ひねり始めが遅く回転不足のある試技と似た特徴を示した。被験者Bでは、宙返り後半において着床に向けて頭が下がり伸身姿勢が保てない状態(図8下, No. 21-22)がみられ、被験者Aと比較して頭の位置が低い着地であった。これは、踏切直後から両腕が上がり(図8下, No. 9-11)、ひねり始めが遅く、着床に向けてひねりを完了するタイミングが遅れたことにより体勢を整えることができなかつたためと考えられる。2回ひねりの良否には、踏切直後に回転方向に大きく体幹を側屈させることが効果的である⁵⁾とされていることから、被験者Bにおいても踏切直後に素早く側湾体勢を取り、早い時期にひねりを開始することで宙返り終盤にみられる、頭が下がり伸身姿勢が保てない状態も改善できると考えられる。したがって、後転とびの着足後、両腕を大きく上げるのではなく、胸の前方よりやや下に腕を残し、上体の起こしと同時に素早く側湾体勢をとり、早い時期にひねりを開始することで宙返り終盤での姿勢欠点を減らすことが可能であると考えられる⁵⁾。

被験者AおよびBにスティックピクチャー動画を観せて動作を確認させたところ、被験者Aの意識報告では、運動感覚と実際の動作が一致していることがわかった。一方、被験者Bでは、ロンダートでの起こしや後転とびでの蹴り方等の動作の意識はあると回答したが、細かい身体操作については意識できていなかった。また、練習時にビデオカメラなどにより自身の動きを確認すると、運動感覚と実際の動作が異なっている場合があることを認識していた。さらに、本研究の試技において「自分が思っているより、踏切局面時に両腕が大きく上がっている」ことを認識できたという。このように被験者Aは運動感覚が明確であり、実際の動作と自身の意識による身体操作が一致してい

るのに対し, 被験者Bは, 一致度が低いことが分かった。これらのことから今後は, 自身の動作を客観的に観察し, 運動感覚と動作を合わせていくことが技の改善や習得に役立つと考えられる。

本研究では, Yeadon⁶⁾のトランポリンを用いたシミュレーション研究で報告されたような腕を伸展した状態でひねり技を実施している被験者はいなかった。また, 男子選手に比べて, 女子選手では滞空時間が短いことを考えると, Yeadon⁶⁾の結果を実際のひねり技の指導にそのまま適用するには注意が必要であろう。そして, ひねりの角運動量の発生に着目してコンタクトツイストタイプとエアリアルツイストタイプがみられたが, これらがどのような身体操作によるものかを明らかにしたことは実際のひねり技の指導を考えるために意義あることであろう。

V. ま と め

本研究における女子体操選手では, 踏切局面からひねりの角運動量の生成が大きかったコンタクトツイストと, 踏切局面から空中局面にかけてひねりの角運動量の生成が大きかったエアリアルツイストの2つのタイプが確認された。事例とした2選手の角運動量の生成および身体操作をまとめると, 以下のようになる。

- ①コンタクトツイストタイプの被験者Aでは, 踏切局面においてひねり方向に肩を引く動作, ひねり方向とは反対の腕を胸の前に引きつける動作などがみられた。
 - ・全身の左ひねりの角運動量は, 踏切局面前半から生じていた。
 - ・踏切局面において両腕, 上腕, 右脚により左ひねりの角運動量を生じていた。
 - ・踏切局面において, ひねり側の肩を止め, 反ひねり側の腕を胸の前に被せるようにすることにより姿勢欠点の少ない高さのある実施になったと考えられた。
- ②エアリアルツイストタイプの被験者Bでは, 踏切局面において両腕を上げ, 腕を非対称に動かす動作や素早く胸の前に腕を引きつける動作がみられた。
 - ・全身の右ひねりの角運動量は, 踏切局面後半から空中局面にて生じていた。
 - ・空中局面において, 左腕および両脚, 体幹を側屈させるなどして右ひねりの角運動量を生じていた。
 - ・踏切直後に素早く側湾体勢を取り, 早い時期にひねりを開始することで宙返り終盤での姿勢欠点を減らすことが可能であると考えられた。

今後は, 被験者数やひねり回数を増し, 本研究で得られた知見を検証すること, ひねり発生のための身体操作をより詳細に検討し, 指導への示唆を得ることなどが課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり, 日本体育大学スポーツバイオメカニクス・船渡研究室, 日本体育大学女子体操競技部のみなさんには多大な協力を得ました。ここに記して感謝します。

文 献

- 1) 公益財団法人日本体操協会 (2017) 2017-2020 採点規則 体操競技女子. 公益財団法人 日本体操協会, p. 13.
- 2) 吉本忠弘・渡辺良夫 (2005) ゆか運動における「後方宙返り1回ひねり」の指導方法に関するモルフォロジー的考察. 体操競技・器械運動研究, 13: 95-104.
- 3) 湯 海鵬・阿江通良・横井孝志・渋川侃二 (1990) 空中における身体の腕一捻りに関する研究. バイオメカニズム, 10: 107-118.
- 4) 掃部雅幸・吉田和夫 (2003) ひねり宙返り運動の力学解析. 日本機械学会論文集, 69(680): 236-243.
- 5) 長野淳次郎 (1982) ゆか運動における後方伸身宙返り2回ひねりに関する運動形態学的研究. 天理大学学報, 33: 31-62.
- 6) Yeadon M. R. (2017) Airborne movements: Somersaults and twists. In: Müller B. et al. (eds.), Handbook of human motion, Springer: Cham, pp. 1-19.
- 7) Winter, D. A. (2005) Biomechanics and motor control of human movement (3th ed.), Wiley: New Jersey, pp. 49-50.
- 8) 倉林 準・持丸正明・河内まき子 (2003) 股関節中心推定方法の比較・検討. バイオメカニズム学会誌, 27(1): 29-36.
- 9) 湯 海鵬 (1995) 3次元の身体角運動量の算出法. 体育学研究, 40: 161-169.
- 10) 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. Japanese Journal of Sports Sciences, 15(3): 155-162.
- 11) 広瀬茂雄 (2013) ロボット工学 (改訂版)—機械システムのバクトル解析—. 裳華房: 東京, pp. 64-66.

〈連絡先〉

著者名: 針谷理栄子

住 所: 東京都世田谷区深沢 7-1-1

所 属: 日本体育大学大学院体育科学研究科博士後期課程
コーチング学専攻

E-mail: 19pdb06@nittai.ac.jp