半径の小さな曲線走動作における身体の方位変化メカニズム

佐藤 隆彦¹⁾ 矢内 利政²⁾

Takahiko Sato¹ and Toshimasa Yanai²: How could runners rotate their bodies about the vertical axis so that the whole-body orientation could be maintained along a curved path? Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 60: 577-588, December, 2015

Abstract : The purpose of this study was to determine how runners sprinting along a curved path could rotate their whole-body about the vertical axis to keep facing towards ever-changing movement direction. 10 healthy men were asked to run at 5 m/s along a straight path (RS) and a curved path with a 5-m radius (RC). The running direction in RC was counterclockwise (CCW) as viewed from above. A motion capture system with 8 cameras was used to record the three-dimensional coordinates of reflective markers attached to each subject with the sampling frequency set at 240 Hz. The angular momentum of each body segment about the vertical axis passing through the center of mass of the entire body was determined for 1 complete stride cycle with the method described by Dapena (1978). The average value for the angular momentum of the entire body about the vertical axis was determined for each contact phase and each flight phase. Two-way ANOVA (2 movements $\times$ 4 phases) was used to test the significance of the main and interaction effects. In addition, the angular momentum was categorized into head and trunk, right leg, left leg, right arm, left arm, both arms and both legs, and the pattern of change in each category during the normalized stride cycle was compared between 2 movements. Two-way ANOVA demonstrated a significant main effect for both factors with no interaction. In all phases, the average angular momentum in RC was directed more toward CCW as viewed from above than that in RS. Whereas the angular momentum of the head and trunk in RS changed periodically from positive to negative values, that in RC maintained positive values throughout the stride cycle. The angular momentum of the right leg in RC changed periodically in the same phase as in RS, but that of the left leg changed in the reverse phase. The left leg not only moved back and forth in RC, but also moved from side to side, allowing it to undergo circular motion in a direction opposite to the body's rotation in the horizontal plane. Presumably, this circular motion generated reaction effects on the adjacent segments, causing the head and trunk to gain sufficient angular momentum to keep facing toward the running direction.

Key words : whole body movement, angular momentum, turning effect, action-reaction

キーワード : 全身運動, 角運動量, 回転効果, 作用反作用

1. 緒 言

フィールド・コート競技において試合状況は刻一刻と変化する為、選手は適宜、進行方向を転換しなければならない。先行研究において、サッ

カー 1 試合に 1 人の選手が行う方向転換は平均 727 回であり (Bloomfield et al., 2007), また, フィールドホッケー 1 試合に方向転換を伴う疾走動作が行われる回数は直線的な軌道を継続する疾走動作 (以下「直線走動作」と略す) と比較して約 2 倍であると報告されている (Spencer et

1) 早稲田大学スポーツ科学研究科
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15

2) 早稲田大学スポーツ科学学術院
〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15

連絡先 矢内利政

1. Graduate School of Sport Sciences, Waseda University
2-579-15, Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192

2. Faculty of Sport Sciences, Waseda University
2-579-15, Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192
Corresponding author tyandai@waseda.jp

al., 2004 ; Spencer et al., 2005). このように、フィールド・コート競技の試合において疾走中に進行方向の転換が生じる頻度は非常に高い。加えて、サッカーやフィールドホッケーの競技レベルが高い選手ほど方向転換を伴う疾走能力が優れていると報告されていることから (Keogh et al., 2003 ; Reilly et al., 2000), 方向転換を伴う疾走能力は選手の競技レベルを決定づける一因であると考えられる。よって、進行方向の転換を伴う疾走能力の向上は競技レベル向上に大きく貢献するものと期待できる。

フィールド・コート競技の試合中に行われる動作の分類法である Bloomfield Movement Classification において、方向転換が生じる動作として3種の分類が存在する (Bloomfield et al., 2004)。1つ目は身体の方位を変更することなく急激に進行方向を転換する動作、つまり、身体が正面を向いたまま移動方向だけが変化する動作であるスワープ動作、2つ目は身体の方位を新たな進行方向に変更しつつ進行方向を転換する動作であるターン動作、3つ目は曲線的な軌道で行われる疾走動作 (以下「曲線走動作」と略す) である。ターン動作とスワープ動作は直線走動作から1歩で進行方向を転換する動作であり、「カット動作」や「サイドステップ」などの呼称で運動学的研究が多く行われている。一方、曲線走動作を対象とした先行研究の多くが陸上競技用トラックにおける動作を対象としており、フィールド・コート競技で見られる軌道半径の小さな動作を対象とした研究は少ない。その為、フィールド・コート競技における指導の基礎となる軌道半径の小さな動作における運動メカニズムは十分に明らかとなっていない。

身体運動は「身体重心の曲線並進運動」と「身体重心まわりの全身の回転運動」にモデル化することができる。これを基にターン動作を対象とした先行研究では、身体運動を水平面上における身体重心の進行方向の転換である Deflection と、身体重心を通る鉛直軸まわりの身体の方位変化である Rotation にモデル化している (Jindrich and Full, 1999 ; Jindrich et al., 2006 ; Patla et al.,

1991)。曲線走動作では走周期を通して、身体重心の進行方向を走路に沿って転換させ、全身の方位を周回方向に変化させる。よって、Deflection と Rotation によるモデル化は曲線走動作にも適用出来ると考えられる。

曲線走動作における Deflection については、陸上競技用トラックにおける上方から見て反時計回り方向 (以下「左周り」と略す) の曲線走動作を対象とした先行研究において、地面反力の走路接線方向成分力積は各接地期で等しく、走路法線方向成分力積は左足接地期の方が右足接地期と比較して大きかったことから、身体重心の方向転換には内側下肢の方が大きく貢献するという特徴が報告されている (Hamill et al., 1987)。一方、半径5mの走路における左周りの曲線走動作では、身体重心の方向転換には外側下肢の方が大きく貢献すると報告されている (Smith et al., 2006)。このように、Deflection の特徴については軌道半径の異なる研究の間で一致した知見が得られていない。しかしながら、走路半径を6mから1mまで段階的に変化させた際、左周りの曲線走動作における各接地期に生じる地面反力は連続的に変化するとの報告があることから (Chang and Kram, 2007)、曲線走動作における Deflection は地面反力の左右バランスの差異により軌道半径によって異なる特徴が存在する可能性が示唆される。また、曲線走動作における Rotation については、身体重心まわりの全身の角運動量ベクトルの方位変化に着目した先行研究が行われている (東・矢内, 2012)。この研究では、外側足接地期に生じる水平面上における周回方向への角運動量ベクトルの方位変化が内側足接地期に生じる反周回方向への方位変化を上回ること、走周期を通して角運動量ベクトルを身体に対してほぼ一定方向に維持しつつ、体幹を鉛直軸まわりに方位変化させていたと報告されている。この研究では陸上競技用トラックにおける曲線走動作のみを対象としている為、地面反力の左右バランスが異なる他の軌道半径で行われた動作とは身体方位変化メカニズムが異なる可能性が考えられる。しかしながら、陸上競技用トラック以外の軌道半

径で行われる曲線走動作における Rotation に関する知見は得られていない．そこで本研究では、半径の小さな曲線走動作における全身の回転運動に着目し、鉛直軸まわりの身体の方位変化メカニズムを明らかにすることを目的とした．

2. 方 法

2.1. 被験者

週 1 回以上の運動習慣を有する健康な成人男性 10 名（身長： 1.73 ± 0.05 m，身体質量： 67.2 ± 7.0 kg，年齢： 25.9 ± 1.8 歳）が被験者として本研究に参加した．全被験者において，ボールを蹴る動作を得意とする足は右側であり，利き足は統制されていた．実験に先立ち，被験者に対して本研究の目的および実験参加による危険性についての十分な説明を行い，書面による実験参加の同意を得た．なお，本研究は早稲田大学研究倫理委員会の承認を得て実施した．

2.2. 実験設定

実験試行は，板張りの体育館に設置された走路で行った．走路には 2 度連続して接地できるようにサンプリング周波数を 2400 Hz に設定した 2 台の地面反力計（FP6012-15 Bertec corp.）を埋設した．各身体部位に貼付した反射マーカの 3 次元座標を取得するため，サンプリング周波数を 240 Hz に設定した 8 台の赤外線高速度カメラ（Eagle, Motion Analysis corp.）を，2 台の地面反力計前後の 5 m，左右 2.3 m，高さ 2.1 m の撮影範囲が全てのカメラの画角に収まるように配置した（Figure 1）．平均 3 次元残差は，0.5 mm 未満であった．阿江ら（1992）が報告した身体部分慣性係数を用いて身体モデルを定義するため，全身を左右足，左右下腿，左右大腿，下胴，上胴，左右上腕，左右前腕，左右手，頭部の 15 セグメントからなる剛体リンクとみなした．セグメントの位置と方位を計測するため，各セグメントには 3 点または 4 点の反射マーカを貼付した．反射マーカの貼付位置は，左右シューズ踵上部，左右シューズ踵下部，左右シューズ踵外側部，左

Figure 1 Overhead view of experimental setup.

右下腿外側部（4 点のマーカを貼付したプレート），左右大腿外側部（3 点のマーカを貼付したプレート），左右上前腸骨棘，左右上後腸骨棘中点，左右肋骨下端，胸骨上縁，左右肩峰，第 7 頸椎，左右上腕骨外側上顆，左右上腕骨内側上顆，左右尺骨茎状突起，左右橈骨茎状突起，左右第 2 中手指関節，左右第 5 中手指関節，頭部（4 点のマーカを貼付したヘッドバンド），であった．これらの反射マーカからでは各セグメントの長軸及び長軸両端点の位置を定義できないため，実験試行に先立ち，静止立位によるキャリブレーション試行を行った．静止立位においては，各セグメントの長軸両端点は隣接するセグメントと連結する関節中心点と一致する．したがって，キャリブレーション試行では関節中心点を算出できるよう，左右外踝，左右内踝，左右大腿骨外側顆，左右大腿骨内側顆，左右大転子に反射マーカを貼付した．また，足部と頭部における隣接するセグメントが無い長軸端点は，左右シューズ爪先，左右耳珠，頭頂に貼付した反射マーカから算出した．キャリブレーション試行の為に貼付した反射マーカは実験試行前に除去したため実験試行中の各セグメント長軸両端点の 3 次元座標は，キャリブレーション試行における位置関係を基に算出した（Söderkvist and Wedin, 1993）．

2.3. 実験試行

準備運動と実験試行の練習は各被験者が納得するまで行わせた。シューズは各被験者に適したサイズの同一モデルの室内用運動靴とした。実験試行は5 m/sの走スピードによる直線走動作と曲線走動作であり、各動作6試行をランダムな順番で行った。各動作6試行の内、3試行は2台の地面反力計に対して左足、右足の順に接地し、残りの3試行は逆の順で接地させた。実験試行における撮影範囲は1台目の地面反力計に接地する直前の空中期から2台目の地面反力計から離地した直後の空中期までであった。直線走動作はスタート位置からゴール位置までを直線的な軌道で走スピードを一定に保ちつつ普段通りの走動作を行うよう指示した。曲線走動作は中心角30°ごとにコーンを設置した半径5 mの走路を左周りに、走スピードと軌道半径を一定に保ちつつ走動作を行うよう指示した。地面反力計が埋設された分析区間における走スピードを安定させる為に、両動作ともにスタート位置は分析開始位置より15 m以上後方とした。地面反力計を中心とした2 m区間の通過に要した時間を光電管センサ(E3G-MR19T, Omron Corp.)で確認し、走スピードが設定の $\pm 5\%$ の範囲であること、および、接地時にシューズ全体が地面反力計に収まっていることを成功条件とし、条件を満たさなかった場合は試行を繰り返した。

2.4. データ処理

データ分析には数値解析ソフトウェアMATLAB (R2010a, Math Works)を用いた。反射マーカの3次元座標データは遮断周波数を12 Hzに設定した4次のButterworth low-pass filterを用いて平滑化した。フィルター特性は本研究と同様の動作における反射マーカの3次元座標データを同様の機器およびサンプリング周波数で取得した先行研究に倣い設定した(Sanna and O'Connor, 2008)。地面反力データは10サンプルの平均値を用いて240 Hzにダウンサンプリングし、反射マーカの3次元座標データと同期した。動作中における各身体部位の3次元座標

から各セグメント重心および身体重心の3次元座標を算出した。1度目の接地期開始直前の空中期において身体重心が最高となったフレームから、2度目の接地期終了直後の空中期において身体重心が最高となったフレームまでを分析区間とした。2台の地面反力計によって取得された地面反力の鉛直成分が20 Nを上回った区間をそれぞれ接地期とした。また、分析開始から1度目の接地期開始まで、1度目の接地期終了から2度目の接地期開始まで、2度目の接地期終了から分析終了までの3区間をそれぞれ空中期とし、1試行を5期に分割した。左足、右足の順に接地する試行においては各5期を分析開始から順に右足空中期、左足接地期、左足空中期、右足接地期、右足空中期と表記し、最初と最後の空中期は同一期と見なした。身体重心を原点とする移動座標系を各フレームについて定義した。空中期においては身体重心平均水平速度の方向を、接地期においては各フレームにおける身体重心瞬間水平速度の方向を前後軸として設定し、左右軸は前後軸と鉛直軸の外積として算出した。

2.5. 算出項目

① 各接地期における走スピード変化

身体重心の水平スピードについて、接地直前の空中期と離地直後の空中期との差分から、各接地期に生じた変化を走スピード変化とした。

② 動作面傾斜角度

直線走動作において身体は直立しているのに対して、曲線走動作において身体は走路に対して内傾する。本研究では走動作において矢状面上で円を描くように運動する下肢に着目し、身体の傾斜の指標として下肢の動作面の傾きを用いた。移動座標系における下肢3セグメント合成重心の3次元座標を左右下肢それぞれについて算出し、主成分分析を用いて近似面を定義した。近似面の傾斜角を、この面に直行するベクトルを左右一鉛直平面に投影した際に、投影ベクトルと左右軸とが成す角として算出した。左右それぞれの下肢について算出した近似面の傾斜角の平均値を動作面傾斜角度とした。左右軸を基準に外傾方向を正の角

度, 内傾方向を負の角度で表記した。

③ 各期における角運動量の鉛直成分

Dapena (1978) の方法を用いて各フレームにおける身体重心まわりの全身の角運動量を算出し, 周回方向を正, 反周回方向を負の値で示した。先行研究に倣い, 角運動量は身長²と身体質量の積により正規化することで単位は $[s^{-1}]$ とし, 10^{-3} を乗じて表記した (東・矢内, 2012; Dapena, 1978; Hinrichs, 1987)。算出した角運動量の鉛直成分について各期の全フレームの平均値を算出し, 各期における角運動量の鉛直成分とした。周回方向を正, 反周回方向を負の角運動量で表記した。

④ 角運動量の鉛直成分の経時変化

各フレームにおける全身の角運動量の鉛直成分を頭体幹, 右下肢, 左下肢, 右上肢, 左上肢の 5 セグメントに分類した。また, 各フレームにおける角運動量の鉛直成分を頭体幹, 両下肢, 両上肢の 3 セグメントに分類した。各分類および全身の角運動量の経時データは 3 次のスプライン補間を用いて分析区間を 100 サンプルに標準化した。

2.6. 統計処理

算出項目における各被験者の代表値は各動作 6 試行の平均値とした。各接地期における走スピード変化は平均値 $\pm$ 標準偏差で示し, 4 標本 (2 動作 $\times$ 2 期) それぞれについて 1 標本 t-test を行い, 各接地期における走スピード変化が 0 と異なるか否かを検定した。動作面傾斜角度は平均値 $\pm$ 標準偏差で示し, 対応のある t-test を用いて動作間で比較した。各期における角運動量の鉛直成分は平均値 $\pm$ 標準偏差で示し, 2way-ANOVA (2 動作 $\times$ 4 期) を用いて比較した。有意水準は 5% とした。角運動量の鉛直成分の経時変化は全被験者の平均値を示した。

3. 結 果

直線走動作と曲線走動作の各接地期における走スピード変化について, 全ての 1 標本 t-test の結果に有意性は見られなかった。両動作ともに各接

地期における系統的な走スピード変化は生じていなかった。

動作面傾斜角度は直線走動作において $-0.7 \pm 1.5^\circ$, 曲線走動作において $-38.3 \pm 4.8^\circ$ であり, 動作間に有意差が見られた ($p < 0.001$)。直線走動作ではほぼ直立していたのに対して, 曲線走動作では走路に対して約 40° 内傾していた。

角運動量の鉛直成分は, 直線走動作では右足空中中期と左足接地期で正, 左足空中中期と右足接地期で負となる周期変化を示した (右足空中中期: $3.6 \times 10^{-3} \pm 2.0 \times 10^{-3} s^{-1}$, 左足接地期: $3.5 \times 10^{-3} \pm 1.3 \times 10^{-3} s^{-1}$, 左足空中中期: $-3.2 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-3} s^{-1}$, 右足接地期: $-2.7 \times 10^{-3} \pm 1.3 \times 10^{-3} s^{-1}$)。一方, 曲線走動作では全ての期において正の角運動量であった (右足空中中期: $7.2 \times 10^{-3} \pm 3.0 \times 10^{-3} s^{-1}$, 左足接地期: $8.6 \times 10^{-3} \pm 2.9 \times 10^{-3} s^{-1}$, 左足空中中期: $0.8 \times 10^{-3} \pm 3.0 \times 10^{-3} s^{-1}$, 右足接地期: $0.2 \times 10^{-3} \pm 4.0 \times 10^{-3} s^{-1}$)。2way-ANOVA において交互作用は見られず, 動作および期の両主効果が見られた ($p < 0.001$) (Figure 2)。

5 セグメントに分類した角運動量の経時変化を Figure 3 上段に示す。直線走動作では上肢の角運動量が左右側間で同位相, および下肢の角運動量も左右側間で同位相の周期変化を示した。一

Figure 2 Mean vertical component of the angular momentum of whole body. The angular momentum was normalized by the body mass and the square of the body height.

Figure 3 Average changing patterns of the vertical component of the angular momentum.

方、曲線走動作では上肢の角運動量は左右側間で同位相の周期変化を示したが、下肢の角運動量は左右側間で逆位相の周期変化を示した。曲線走動作における右下肢の角運動量は直線走動作と比較して顕著に大きな値であり、左下肢の角運動量は直線走動作に対して逆位相の周期変化であった。直線走動作では頭体幹は正負が入れ替わる周期変化を示したのに対して、曲線走動作では走周期を通して正の角運動量を示した。全身および3セグメントに分類した角運動量の経時変化をFigure 3下段に示す。全身の角運動量は両動作ともに類似した変化パターンを示したものの、曲線走動作の角運動量は直線走動作と比較して正の方向にシフトした値で推移していた。両動作ともに両下肢と両上肢が逆位相の周期変化を示した。

両上肢および両下肢における周期変化の位相は両動作ともに共通していた。

4. 考 察

本研究は軌道半径の小さな曲線走動作において、身体の鉛直軸まわりの方位変化メカニズムを明らかにすることを目的とし、全身の回転運動を分析した。その結果、曲線走動作における角運動量の鉛直成分は、上肢が左右側間で同位相の周期変化をする点で直線走動作と共通していた一方で、下肢が左右側間で逆位相の周期変化をする点で異なっていた。また、両動作ともに両下肢の角運動量は両上肢とは逆位相の周期変化をしていた。頭体幹の角運動量は、直線走動作においては

正負が周期的に入れ替わっていたのに対し、曲線走動作では走周期を通してその方向は変化せず、常に正の角運動量であった。これらの各セグメントにおける特徴により、曲線走動作では走周期全体を通じて正の角運動量を有することで、周回方向への方位変化を生み出していることが示された。

直線走動作および曲線走動作の全接地期において系統的な走スピード変化は生じていなかった。この結果から、両動作ともに分析区間を通して走スピードは教示通りに維持されていたことが示された。

Hinrichs (1987) は走周期を通して身体の方位変化を生じない直線走動作においても、各身体セグメントが身体重心に対して相対的に運動することにより、身体重心まわりの全身の角運動量が生じることを報告している。本研究ではこの先行研究と同様の方法を用いて角運動量を算出しており、本研究で得られた直線走動作における角運動量がこの先行研究と同様の値および周期変化を示したことから、本研究のデータ取得および数値の算出は妥当であったと考えられる。

本研究で行った軌道半径の小さな曲線走動作における全身の角運動量の鉛直成分は、直線走動作と比較して正の方向にシフトし、走周期を通して概ね正の値で推移していた。曲線走動作において、顕著に大きな右下肢の角運動量が逆位相の左下肢の角運動量により相殺されることで、両下肢の角運動量の総量は直線走動作と同位相の周期変化を示した。直線走動作では、走周期を通して両下肢の角運動量の総量が両上肢の角運動量の総量を上回ること、全身の角運動量は両下肢と同様に正負が入れ替わる周期変化を示した。一方、曲線走動作では、両下肢の角運動量の総量が両上肢の角運動量の総量を大きく上回ることではなく、加えて頭体幹の角運動量が走周期を通して正の値であった為、全身の角運動量は走周期を通して概ね正の値で推移していた。これらの結果から、半径の小さな曲線走動作においては頭体幹および左右下肢の動きにより、走周期を通して全身が正の角運動量を有することで、身体は継続的に周回方向へ方位変化することが示された。

本研究で行った軌道半径の小さな曲線走動作では、身体を周回方向に方位変化させるために必要な全身の角運動量が走周期を通して維持されていた。この結果は、陸上競技用トラックでの曲線走動作における全身の角運動量の鉛直成分が走周期を通して負の値を示した報告（東・矢内, 2012）とは異なるものである。東・矢内（2012）は、身体が周回方向に方位変化するにも拘らず全身の角運動量の鉛直成分が負の値であった原因について、両下肢の前後方向へのスイングが回転半径（モーメントアーム）を変化させながら行われることによって生じた前まわりの角運動量（Hinrichs, 1987）が、曲線走動作時には身体が内傾していた為に、その鉛直成分が負の角運動量となったことに起因すると説明している。つまり、この負の角運動量が、頭体幹が走路に正対し続ける為に必要な正の角運動量を上回ったために、全身の角運動量の鉛直成分が走周期を通して負の角運動量となったとしている。本研究で行った曲線走動作では、陸上競技用トラックにおける全力疾走とは異なり、動作の軌道半径は 5 m と極めて小さかった為に疾走速度は低く、下肢が有する角運動量は小さかった。その為、走者は大きく内傾（約 40°）していたものの、負の角運動量として投影された成分は小さく、頭体幹が走路に正対し続ける為に必要な正の角運動量を上回るには至らなかったことが、先行研究との相違が生まれた原因であったと考えられる。この結果は、軌道半径の小さな曲線走動作における両下肢の周期運動が、先行研究において対象とされた陸上競技用トラックでの動作における周期運動とは異なる可能性を示すものである。

両下肢の周期運動を動作間で比較する為に、各動作における動作面傾斜角度に合わせて移動座標系を前後軸まわりに回転させた傾斜座標系を設定した。傾斜座標系における左右各下肢および両下肢の角運動量の前まわり成分を Figure 4 に示す。直線走動作では先行研究（Hinrichs, 1987）と同様に、後方へスイングする下肢が生み出す前回り方向の角運動量が前方へスイングする下肢が生み出す後回り方向の角運動量を上回ること、

Figure 4 Average changing patterns of the mediolateral component of the angular momentum.

両下肢の角運動量の総量は概ね前回り方向の値で推移していた。一方、曲線走動作では後方へスイングする下肢の前回り方向の角運動量が前方へスイングする下肢の後回り方向の角運動量を下回る局面が存在することで、両下肢の角運動量の総量が後回り方向の値を示す局面が見られた。これは直線走動作と同様の周期変化を示した陸上競技用トラックにおける曲線走動作を対象とした先行研究（東・矢内，2012）とは異なる結果であった。直線走動作における下肢の角運動量の大部分はセグメントが有する運動量の身体重心まわりのモーメントである（Hinrichs, 1987）との観察結果から、本研究で行った曲線走動作における下肢の周期運動においては、下肢合成重心の身体重心に対する相対速度（下肢質量と合わせて下肢の運動量を決定する因子）と身体重心に対する下肢合成重心のモーメントアームのいずれか、または双方に左右差が生じていたことが示唆される。これらの変数を、身体重心に対する下肢合成重心の相対合成速度と、身体重心と下肢合成重心との距離としてそれぞれ算出し、走周期通しての平均値を左右間で比較した。その結果、曲線走動作における下肢合成重心の相対合成速度にのみ有意な左右差が

見られた。この左右差は、曲線走動作において外側下肢が内側下肢よりも走路中心に対して歩隔程度外側をスイングすることで移動距離が大きくなった為、外側の右下肢が内側の左下肢よりも高速でスイングすることで生じたと考えられる。これら一連の結果は、半径の小さな曲線走動作では走路に対して外側の右下肢の方が内側の左下肢と比較して高速でスイングしており、曲線走における下肢の周期運動が直線走動作を傾斜させたものとは異なる左右非対称な周期運動であることを示すものである。

曲線走動作における下肢の左右非対称な周期運動は、全身の角運動量の傾斜座標系における左右成分のみならず、移動座標系の鉛直成分にも直線走動作とは異なる特徴を生み出し得る。直線走動作において左右各下肢の角運動量の鉛直成分は走周期を通して同位相の周期変化を示したのに対して、曲線走動作においては逆位相の周期変化を示した。これらの対称的な特徴を生み出す下肢の周期運動に着目する為に、各動作における水平面での左右下肢合成重心の運動を Figure 5 に示す。直線走動作では各下肢の軌跡が前後軸を挟んで左右に位置していた。この結果は、直線走動作では

Figure 5 Average trajectory of each leg on the horizontal plane.

身体重心に対して左右各下肢が点対称のスイングを行っていることを示すものである。一方、曲線走動作では各下肢の軌跡がともに前後軸より進行方向に対して右側に位置していた。これは、曲線走動作では身体が走路に対して内傾することで、左下肢が身体重心よりも右側で運動していたことを示すものと考えられる。直線走動作のように前後軸を挟んで左右で下肢が運動する場合、身体重心まわりの角運動量は同位相となるが、曲線走動作では左右下肢ともに身体重心の右側で運動することにより左右下肢の角運動量が逆位相となることが示された。また、直線走動作では両下肢ともに直線的な往復運動を行っていたのに対して、曲線走動作では左下肢が明らかな反周回方向の楕円軌道で運動することが示された (Figure 5 右)。このような楕円軌道で運動する左下肢は、後方へ移動する接地期には相対的に大きな負の角運動量を、前方へ移動するリカバリー期には相対的に小さな正の角運動量を身体重心まわりに有する。したがって、走周期全体で捉えた場合、この左下肢の運動は外力のモーメントにかかわらず、同系内の他のセグメントに周回方向への反作用を生み出す。これは外力が生み出すモーメントによる系全体の角運動量変化とは異なる、系内のセグメント

Figure 6 Action-reaction mechanism established by the rotational movement of left leg in the opposite direction of the path and that of the other segments in the direction of the path.

間に生じる相互作用である。走動作における任意のセグメントが有する角運動量の変化は、地面反力による系全体の角運動量変化による影響と、他のセグメントとの相互作用による影響の複合である。これらの結果は、軌道半径の小さな曲線走動作では頭体幹を周回方向に回転させるために必要な角運動量の一部が左下肢の運動によって生成されていたことを示すものと考えられる (Figure 6)。

本研究の結果から、軌道半径の小さな曲線走動作における四肢の周期運動は、直線走動作の周期運動とは異なる特徴を有することが示された。よって、軌道半径の小さな曲線走動作における疾走能力を向上させるには、これまでに確立されている直線走動作における疾走能力の向上を目的としたトレーニングのみならず、曲線走動作特有の動きを習得し、洗練させる必要があると考えられる。直線走動作における下肢のスイングは、矢状面上で行われる為、股関節と膝関節の屈曲伸展および足関節の底背屈により生み出される。これらの関節運動によって同様に生み出されるスクワット動作や垂直跳び動作の記録と直線走動作の疾走能力との間に有意な相関が報告されている為 (Wisloff et al., 2004)、直線走動作における疾走能力の向上を目的としたトレーニングは、一般的に矢状面上で生じる関節運動を対象に行われる。一方、軌道半径の小さな曲線走動作では、下肢の合成重心は矢状面上の軌道から外れ、水平面上で楕円を描くように運動していた。能動的に可能な膝関節の運動は屈曲伸展方向のみであり、足部の質量は下肢全体に対して非常に小さいことから、このような水平面上にける下肢合成重心の運動は直線走動作における周期運動に股関節の内外転が加わることで生み出されていると考えられる。直線走動作における推進方向への運動エネルギーの生成において股関節の内外転運動による貢献は3%と非常に小さく (Novacheck, 1998)、直線走動作における疾走能力の向上を目的とした股関節の内外転運動に関するトレーニングは一般的に行われていない。よって、軌道半径の小さな曲線走動作における疾走能力を向上させるためには、一般的に行われている直線走動作のトレーニングに加えて、股関節の内外転を伴う下肢の周期運動を習得すること、および高速度で股関節の内外転運動を行うトレーニングを実施することが必要であろう。本研究においては筋活動に着目していない為、曲線走動作において実際に股関節の内外転筋が大きく活動していたかは定かでない。本研究により示唆されたトレーニング法を確立する上で、曲線走動作中の筋活動に着目した更なる研

究が期待される。

本研究における被験者は様々な競技を専門とする成人男性であった。よって、本研究の結果にフィールド・コート競技選手の特徴が正確に反映されているかは定かでない。被験者10名の内8名は野球、サッカー、バスケットボール、アメリカンフットボール、バドミントンなどの軌道半径の小さな曲線走動作が行われ得る競技を専門としていた。また、陸上競技を専門としていた2名の結果に、他の8名の被験者と異なる特徴は見られなかった。加えて、全被験者の身体特性はアスリートの標準から大きく逸脱することはなかった。これらの内容から、本研究において得られた知見はフィールド・コート競技を行う一般的なアスリートに適応し得ると考えられる。また、本研究で行った直線走動作において下肢が有する角運動量の大きさは左右で異なっていた。直線走動作を対象とした先行研究において、下肢に関する多くの運動学的変数が左右で異なること (Exell et al., 2012)、身体の形態的左右差が大きいほど走動作における運動学的左右差が大きいこと (Seminati et al., 2013) が報告されている。加えて、大腿四頭筋およびハムストリングの筋力は利き側と非利き側で系統的に異なることが明らかとなっている (Lanshammer and Ribom, 2011)。これらの報告から、本研究で行った直線走動作において下肢が有する角運動量の左右非対称性は、全被験者の利き足を統一したことにより生じた機能的左右差により、全被験者の動作に共通した左右非対称性が生じたことが原因であると予想される。本研究では曲線走動作の特徴を直線走動作との比較により論じている為、直線走動作における左右差が本研究で得られた知見に及ぼす影響は無いと考えられる。また、本研究では各被験者における曲線走動作の疾走能力に関わらず、走スピードは5 m/sに、軌道半径は5 mに統一した。よって、被験者間での運動強度は統一されていなかった。本研究で設定した軌道半径は、予備実験を通して周期性を維持した動作により5 m/sの走スピードで疾走可能な最小の半径として設定した。つまり、5 m/sの走スピードは5 mの軌道半

径を維持した曲線走動作においては全力に近かったと予想される。よって、本研究により得られた知見は実際のフィールド・コート競技の試合で行われる鋭い軌道における全力での動作にも応用し得ると考えられる。

5. 結 論

本研究の目的は半径の小さな左周りの曲線走動作における全身の回転運動に着目し、鉛直軸まわりの身体の方位変化メカニズムを明らかにすることであった。本研究により、半径の小さな曲線走動作では右下肢が左下肢よりも高速でスイングする左右非対称な周期運動を行っており、身体の周期運動は直線走動作を単純に傾斜させたものとは異なることが明らかとなった。また、左下肢による反周回方向の回転運動が他の身体セグメントを周回方向に回転させるという、半径の小さな曲線走動作特有の身体の方位変化メカニズムが存在することが示された。

謝辞

本研究は、早稲田大学グローバル COE プログラム「アクティヴ・ライフを創出するスポーツ科学」の助成を受けたものである。

文 献

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特性の推定. バイオメカニズム, 11: 23-33.

東洋功・矢内利政 (2012) 陸上競技の短距離走における曲走路疾走中の身体の角運動量. バイオメカニクス研究, 16: 128-137.

Bloomfield, J., Polman, R., and O'Donoghue, P. (2004) The 'Bloomfield Movement Classification': Motion analysis of individuals in team sports. *International Journal of Performance analysis of sport-e*, 4: 20-31.

Bloomfield, J., Polman, R., and O'Donoghue, P. (2007) Physical demands of different positions in FA Premier League soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6: 63-70.

Chang, Y. H. and Kram, R. (2007) Limitations to maximum running speed on flat curves. *Journal of Ex-*

perimental Biology, 210: 971-982.

Dapena, J. (1978) A method to determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity. *Journal of Biomechanics*, 11: 251-256.

Exell, T. A., Gittoes, M. J. R., Irwin, G., and Kerwin, D. G. (2012) Gait asymmetry: Composite scores for mechanical analysis of sprint running. *Journal of Biomechanics*, 45: 1108-1111.

Hamill, J., Murphy, M., and Sussman, D. (1987) The effects of track turns on lower extremity function. *International Journal of Sports Biomechanics*, 3: 276-286.

Hinrichs, R. N. (1987) Upper extremity function in running. II: Angular momentum considerations. *International Journal of Sport Biomechanics*, 3: 242-263.

Jindrich, D. L., Besier, T. F., and Lloyd, D. G. (2006) A hypothesis for the function of braking forces during running turns. *Journal of Biomechanics*, 39: 1611-1620.

Jindrich, D. L. and Full, R. J. (1999) Many-legged maneuverability: Dynamics of turning in hexapods. *Journal of Experimental Biology*, 202: 1603-1623.

Keogh, J. W. L., Weber, C. L., and Dalton, C. T. (2003) Evaluation of anthropometric, physical, and skill-related tests for talent identification in female field hockey. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 28: 397-409.

Lanshammar, K. and Ribom, E. L. (2011) Differences in muscle strength in dominant and non-dominant leg in females aged 20-39 years - A population-based study. *Physical Therapy in Sport*, 12: 76-79.

Novacheck, T. F. (1998) The biomechanics of running. *Gait and Posture*, 7: 77-95.

Patla, A. E., Prentice, S. D., Robinson, C., and Neufeld, J. (1991) Visual control of locomotion: strategies for changing direction and for going over obstacles. *Journal of Experimental Psychology*, 17: 603-634.

Reilly, T., Williams, A. M., Nevill, A., and Franks, A. (2000) A multidisciplinary approach to talent identification in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 18: 695-702.

Sanna, G. and O'Connor, K. M. (2008) Fatigue-related changes in stance leg mechanics during sidestep cutting maneuvers. *Clinical Biomechanics*, 23: 946-954.

Seminati, E., Nardello, F., Zamparo, P., Ardigo, L. P.,

- Faccioli, N., and Minetti, A. E. (2013) Anatomically asymmetrical runners move more asymmetrically at the same metabolic cost. *PLoS One*, 8: e74134.
- Smith, N., Dyson, R., Hale, T., and Janaway, L. (2006) Contributions of the inside and outside leg to maintenance of curvilinear motion on a natural turf surface. *Gait and Posture*, 24: 453–458.
- Söderkvist, I. and Wedin, P. A. (1993) Determining the movements of the skeleton using well-configured markers. *Journal of Biomechanics*, 26: 1473–1477.
- Spencer, M., Lawrence, S., Rechichi, C., Bishop, D., Dawson, B., and Goodman, C. (2004) Time-motion analysis of elite field hockey, with special reference to repeated-sprint activity. *Journal of Sports Science*, 22: 843–850.
- Spencer, M., Rechichi, C., Lawrence, S., Dawson, B., Bishop, D., and Goodman, C. (2005) Time-motion analysis of elite field hockey during games in succession: a tournament scenario. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 8: 382–391.
- Wisloff, U., Castagna, C., Helgerud, J., Jones, R., and Hoff, J. (2004) Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 38: 285–288.

(平成27年 3 月13日受付)
(平成27年 7 月30日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2015/10/2