

早稲田大学審査学位論文

博士(スポーツ科学)

陸上競技の曲走路における短距離走動作の解析

A biomechanical analysis of curved sprinting

in Track and Field

2019年 7月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

東 洋功

AZUMA, Hiroyoshi

研究指導教員 : 矢内 利政 教授

# 目次

第1章	諸論	
1	序	1
2	研究小史	2
第2章	曲線走の運動学的分析	
1	はじめに	6
2	方法	7
3	結果と考察	19
4	まとめ	26
第3章	曲線走の運動力学的分析	
1	はじめに	27
2	方法	29
3	結果	35
4	考察	40
5	まとめ	44
第4章	総括討議	45
第5章	結論	52
	参考文献	54
	謝辞	57

# 第 1 章 諸論

## 1. 序

陸上競技の短距離種目は、競技場が直走路と曲走路で構成されているため、直走路だけを疾走する 100m 走などの競技もあれば、200m や 400m など直走路に加えて曲走路を疾走する競技もある。走種目はゴールタイムを競う競技であるから、短距離走者は直走路と同様、曲走路においても高い速度で疾走することが要求される。

直走路と比較して曲走路の疾走動作が明らかに異なる点は、1) 走者の進行方向、2) 身体正面の向き、3) 走行姿勢と 4) 上肢下肢動作である。つまり、直線走は、走者の進行方向が一定で、身体正面は一定方向を向き続け、姿勢は直立し、上肢と下肢は左右対称な動作であるが、曲線走は、進行方向が曲走路の円弧に沿って一步ごとに変化し、身体正面の向きは曲走路の周回方向へ回転し続け、姿勢は曲走路の内側（進行方向に対して左側）に身体全体を傾斜させた内傾姿勢で、上肢下肢が左右非対称な動きである。

これまで曲線走に関するバイオメカニクス研究は、走動作の基本的な指標であるピッチやストライド、走動作のフォーム分析に代表される Kinematic 分析と、地面反力や関節トルクなどを計測または算出した Kinetic 分析からなる。これら先行研究の内容を精査すると、算出値について直線走と曲線走で比較したものや、曲線走において左右差を比較したものなど、descriptive なものが多い。しかし、曲線走を特徴づける動作の成り立ちを紐解くような研究は少なく、曲走路の疾走動作を特徴づける因子の一つである身体の向きの変化のメカニズムについては、これまでに解明されていない。したがって、どのような力が働くことで身体の向きを常に変化させ、曲走路を疾走しているのかは、まだ明らかになっていない。よって、進行方向を変化させ、かつ、身

体の向きも常に変化させる曲線走の成り立ちを深く理解するために、本研究では曲走路疾走における身体の向きの変化の力学的メカニズムを明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究小史

陸上競技トラックの曲走路における疾走動作の研究は 1970 年代から行われ、主に直走路との走動作を比較したもの、または、曲線路疾走中の四肢動作の左右差について明らかにしたものに大別される。

### ① 疾走速度

曲線路の疾走速度が、直線路よりも低下すると示した報告が多い。Churchill et al. (2011) は、400m トラックの第 2 レーン（曲率半径 32.72m）を全力で走行した時の疾走速度と、直線路の疾走速度を比較した。その結果、疾走速度は、直線路が左区間（左足の接地期とそれに続く空中期のこと）9.86m/s、右区間（右足の接地期とそれに続く空中期のこと）9.80m/s に対して、曲線路が左区間 9.39m/s、右区間 9.33m/s となり、左右の両区間において有意に低下した。同じく疾走速度の低下を示した Viellehner et al. (2016) は、曲率半径 36.5m の曲線路を全力の 90% で走行させた結果、直線走が左区間 9.57m/s、右区間 9.56m/s に対し、曲線走が左区間 9.38m/s、右区間 9.38m/s となり、左区間においてのみ疾走速度が有意に低下した。一方、Alt et al. 2015 のように疾走速度に有意な低下が認められなかった研究（400m トラック第 1 レーンの曲率半径 36.5m の曲線路を最大下の速度で走行させ、直線路の左区間 9.24m/s と右区間 9.25m/s は、曲線路の左区間 9.26m/s と右区間 9.39m/s との間に有意な差はないとした）もあるが、古くに Stoner and Ben-Sira (1978) が 12m 区間

の通過タイムを直走路と曲走路(曲率半径 37.72m)で比較した結果, 曲走路が 0.0201s 有意に遅いことを示したように, 曲走路の疾走速度は直走路より低下するとした研究が多い.

## ② ストライドとピッチ

疾走速度 [m/s] は, ストライド [m] とピッチ [Hz] の積で示される. ピッチは接地時間 [s] と滞空時間 [s] の和の逆数であることから, 曲線走と直線走の疾走速度の違いを, 疾走速度を規定する距離の要因であるストライドと, 時間の要因である接地時間と滞空時間に着目した研究が行われた.

Churchill et al. (2012) や Ishimura et al. (2013), Viellehner et al. (2016) は, 曲線走における左足接地時間が直線走のときや曲線走の右足接地時間よりも長く, 接地時間と滞空時間を合わせた時間も増加するため, 左区間のピッチは右区間よりも低いと報告した. また, 右区間については, 接地時間および滞空時間が, 直線走のときや曲線走の左区間と比較して, それぞれ短くなるため, ピッチが左区間よりも増加し, ストライドは低下すると述べている.

## ③ 左右の四肢動作の比較

曲線走では身体を曲走路内側(進行方向の左側)へ傾ける内傾姿勢をとるため, 曲走路の内側と外側で四肢動作に左右差があるとの仮説を検証する研究がなされた.

Hamill et al.(1987)は, 曲率半径 31.5m の曲走路を 6.31m/s で走行させ, 曲走路内側の左足の後足部(rearfoot)の回外角度(pronation)が最大 22.56°であり, これは右足 12.49°より大きいことを報告し, 左足は土踏まずがより地面と接する overpronation type であることを明らかにした. また, Alt et al.(2015)は, 曲走路(曲

率半径 36.5m) を最大の 90% の速度で走行させ、左足の接地時間の増加が (左足 : 107.5ms, 右足 : 95.7ms, 直線走 : 104.4ms), 左足関節の外がえし (eversion) 角度 (左足 : 12.7°, 右足 : 2.6°, 直線走 : 6.6°), 左股関節の内転 (左足 : 13.8°, 右足 : 5.5°, 直線走 : 8.8°) および外旋 (左足 : 21.6°, 右足 : 12.9°, 直線走 : 16.7°) のそれぞれの角度の増大に関連すると報告した。

#### ④ 地面反力

直線走では、疾走中の走者の身体重心は、進行方向へほぼ一直線に進んでいくが、曲線走では曲走路の曲率に合った円軌道上を進む。質点の円運動には向心力が必要であることから、曲線走においてその力が測定され、左右差が明らかになった。

Hamill et al.(1987)は、曲線走における地面反力の力積を算出し、その鉛直および前後方向の成分を直線走と比較した。その結果、直線走とも、また曲線走の左右の間にも有意な差はみられなかったが、向心力方向の力積を体重で正規化すると、左足接地期 0.4918 Ns/kg が直線走 0.0305 Ns/kg よりも大きく、かつ、曲線走の右足接地期 0.2398 Ns/kg よりも大きいことを報告した。同様に Churchill et al.(2012)も、地面反力の向心力成分の力積は、左足接地期 39.9 Ns が右足接地期 24.7 Ns よりも大きな値を示した。また、ブレーキ成分の力積は、左足接地期 16.6 Ns が直線走 14.0 Ns よりも大きく、かつ、曲線走の右足接地期 12.4 Ns よりも大きな値を示すことも明らかにした。

以上のように曲線走の動作分析は左右差に着目した運動学的な分析についてはなされてきたが、運動力学的な分析については、地面反力の計測や関節トルクの算出にみにとどまり、曲線走の動作を成立させる力学的メカニズムまで言及したものはみられ

ない。特に、曲走路の疾走動作を特徴づける因子の一つである身体の向きの変化に関しては、現時点では皆無である。

## 第2章 曲線走の運動学的分析

### 1. はじめに

曲線走の特徴は、①進行方向が曲走路の円弧に沿い、②走者の身体が曲走路の周回方向を向き続け、③内傾姿勢をとり、④上肢下肢が左右非対称になっていることである。特に、直線走との明確な相違点として、身体を曲走路内側（進行方向の左側）へ傾ける内傾姿勢があることから、下肢の動作には地面に近い曲走路の内側の左脚と地面から離れる外側の右脚に左右差があるとの仮説を検証する研究がなされてきた。Churchill et al. (2012) や Ishimura et al. (2013), Viellehner et al. (2016) が、曲線走において左足区間は接地時間が長くなるためピッチが低下し、右足区間は接地時間と滞空時間がそれぞれ短くなるためピッチが増加し、ストライドは低下すると述べている。このように先行研究では曲線走の動作が左右差に着目して調べられているが、この章では、曲線走の力学的成り立ちをより深く理解するため、まず曲線走の疾走動作の運動学的特徴を明らかにすることを目的とした。

表 2-1 直線走と曲線走の動作形態の違い

	直線走	曲線走
1) 進行方向	一定	曲走路の円弧に合わせて変化
2) 身体正面の向き	一定	曲走路の周回方向に向く
3) 姿勢	ほぼ直立	内傾姿勢
4) 左右の上肢下肢運動	対象	非対称



## 2. 方法

### <sup>1</sup>2.1 被験者

被験者は、大学陸上競技部に所属する男子短距離選手 10 名 (身長  $1.75\pm 0.05\text{m}$ , 身体質量  $66.5\pm 5.6\text{kg}$ , 200m ベスト記録  $22.12\pm 0.47\text{s}$ ) であった (表 2-2). 被験者には実験の内容を十分に説明し, 実験への参加の同意を得た. また, 本実験は中京大学生命情報理工学部倫理審査委員会の承認を得た<sup>1</sup> (承認番号 1001).

表 2-2 被験者の身体的特徴および 100m と 200m のベスト記録

Subject ID	Height[m]	Weight[kg]	Age[yr]	100m[s]	200m[s]
A	1.73	57.0	21	10.76	21.60
B	1.75	63.0	20	11.22	22.20
C	1.72	67.0	21	10.69	21.79
D	1.81	75.0	18	10.74	21.76
E	1.79	71.5	19	11.43	22.30
F	1.67	61.5	19	10.70	21.65
G	1.72	61.0	19	11.24	23.00
H	1.70	65.0	22	11.35	22.55
I	1.83	72.0	19	10.72	21.69
J	1.80	72.0	19	11.35	22.63
Mean	1.75	66.5	19.7	11.02	22.12
SD	0.05	5.6	1.2	0.30	0.47

<sup>1</sup> 本実験データは, 指導教員が中京大学に所属し, 著者が同大学大学院博士課程在学中に取得したものであり, その後, 指導教員が早稲田大学へ, 著者が同大学大学院博士課程に移動した際, 匿名化された実験データが早稲田大学にて分析され本学位論文となった.

## 2.2 実験試技

被験者には、各自で行った 30 分前後のウォーミングアップの後、スパイクを着用させ、第 3 種公認陸上競技場（単心円）の第 2 レーン（曲率半径 39.148m）を全力疾走させた。3 歩分の疾走動作が撮影できるよう撮影区間を第 4 曲走路の約 7m の区間に設定した。ここに撮影区間を設けた理由は、走者にとってこの区間は曲走路の後半部分であり、直走路に向けて走速度を増加させやすいためである。この撮影区間を走者が最大速度で疾走することができるよう、被験者には撮影区間から約 40m 以上後方からスタートを行わせた。1 人の被験者につき全走行距離約 60m の試技を 2 試行ずつ行わせ、走行後の被験者による内省報告に基づき、よい評価を下した試技をその被験者の分析対象とした。

## 2.3 データ収集

図 2-1 に示すように曲走路の疾走動作は、電氣的に同期した 4 台の高速度ビデオカメラ（VFC-1000, 朋栄社）を用いて、フレーム速度 125Hz, シャッター速度 1/1000s で撮影した。4 台のカメラのうち 2 台のカメラは、撮影区間を前半（camera 1）と後半（camera 2）にわけ、走者の側方からみた動作を記録できるよう曲走路内側に設置した。もう 1 台のカメラ（camera 3）は、走者を正面からみた動作が記録できるよう設置し、残り 1 台（camera 4）は曲走路の外側に設置した。

静止座標系は、原点 O を第 4 曲走路にある 4×100m リレーで用いるテーク・オーバー・ゾーンの入り口を示す白線のアウトコース側とし、原点 O から曲走路内側に向かう白線の方を Y 軸、走者の進行方向にむかう方向を X 軸、鉛直上向き方向を Z 軸とした（図 2-1）。キャリブレーションは、フレームに 68 個の球状マーカーが約 30 cm 間隔でとりつけられた校正器を用いて行った。

## 2.4 データ処理

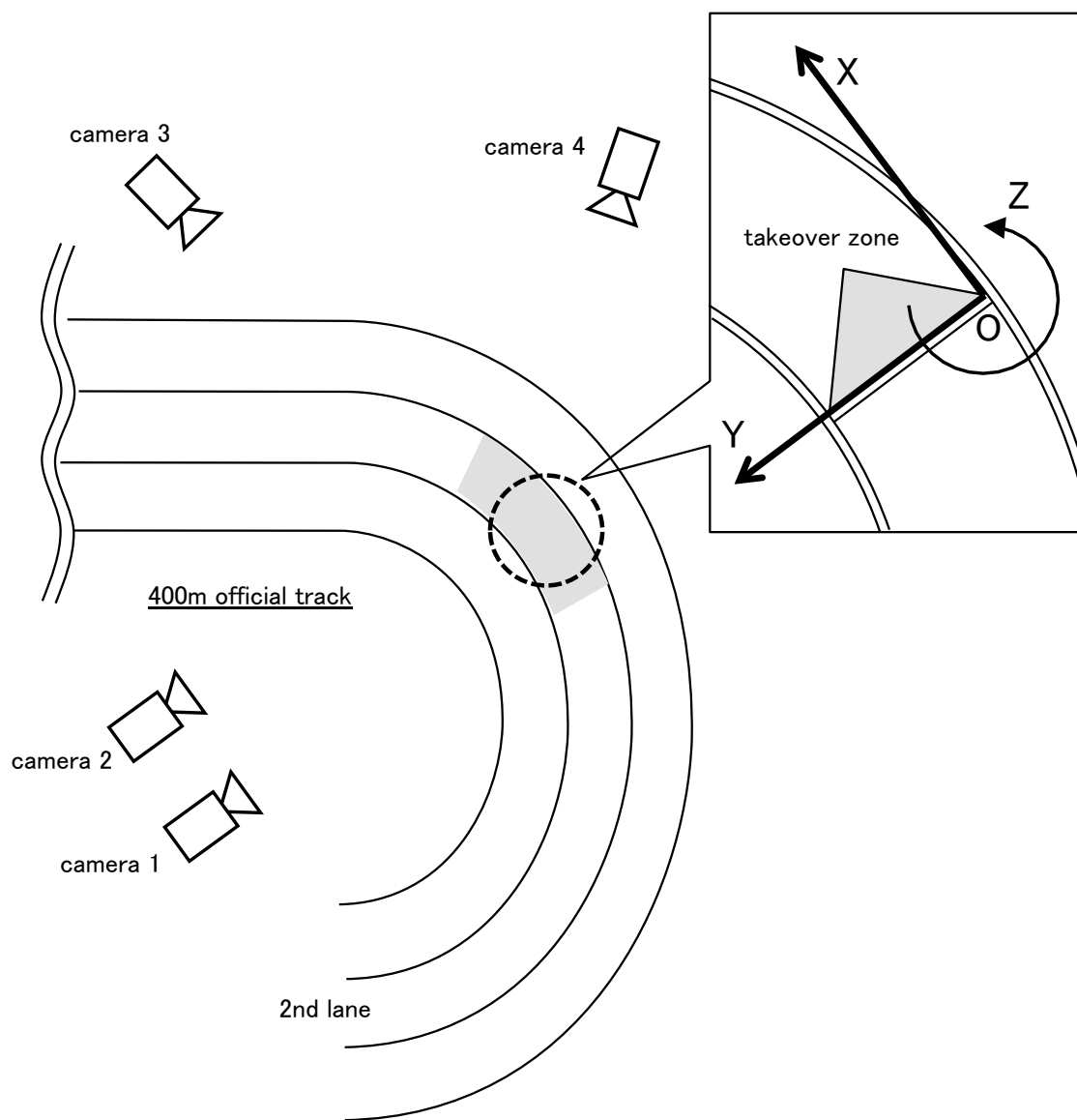


図 2-1 実験場面の模式図

走者の身体は、剛体からなる 14 の体節がそれぞれ連結した剛体リンクモデルとみなし、これを構成する各体節の両端となる 21 の身体標認点を定めた (図 2-2)。身体標認点は阿江ら (1992) が報告したデジタイジングポイントから左右の肋骨下端の 2 点を除いた点である。身体標認点のデジタイズは、4 台のビデオカメラから得られた映像をもとに、ソフトウェア (Frame-DIAS II, DKH 社) を用いて 62.5Hz で行い、DLT

法により標認点の 3 次元座標を得た。走運動の分析区間は、左足接地から走周期の 1 周期半後の右足接地までの 3 歩分とした。キャリブレーションによって算出された球状マーカーの 3 次元位置座標と球状マーカーの実空間内の位置座標との標準誤差は、X 軸、Y 軸および Z 軸についてそれぞれ 3.0mm、5.0mm および 2.3mm であった。身体標認点の 3 次元位置座標は、Yu et al. (1999) の方法により最適遮断周波数 (X 座標 13.5Hz, Y 座標 4.3Hz, Z 座標 4.0Hz) を決定し、その遮断周波数をもとに 4 次のデジタルバタワースフィルタ (Winter 1990) により平滑化を行った。

1		頭頂
2		両耳珠点の midpoint
3		胸骨上縁
4	右	肩関節中心
5		肘関節中心
6		手関節中心
7		第 3 中手指節関節
8	左	肩関節中心
9		肘関節中心
10		手関節中心
11		第 3 中手指節関節
12	右	股関節中心
13		膝関節中心
14		足関節中心
15		踵骨隆起
16		つま先
17	左	股関節中心
18		膝関節中心
19		足関節中心
20		踵骨隆起
21		つま先

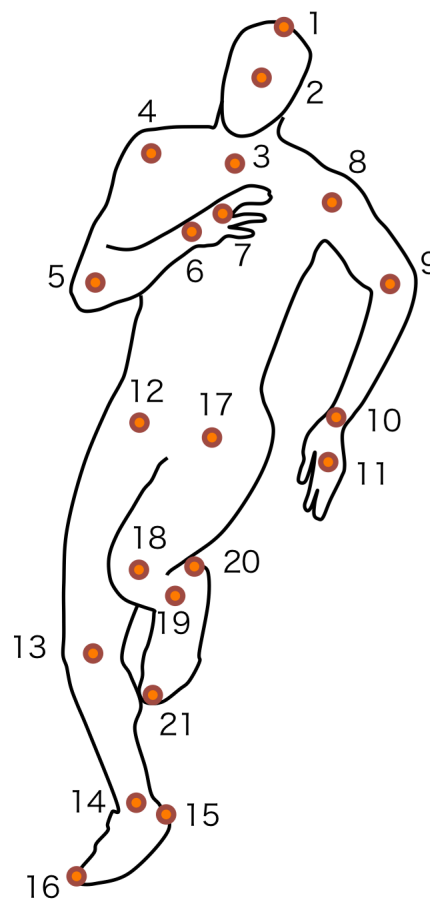


図 2-2 身体標認点

阿江ら (1992) の身体モデルから左右の肋骨下端を除いた点を身体の標認点とし、この点をもとに身体を 14 個の体節にわけ、それぞれの体節を剛体とみなす剛体リンクモデルによって、身体重心および体節や全身の角運動量を求めた

## 2.5 算出項目

### ① 身体重心と疾走速度

身体重心[m]は、平滑化された身体標認点の3次元位置座標をもとに阿江ら(1992)の身体部分係数を用いて算出した。走者の疾走速度は、身体重心の位置変化の時間微分値である、身体重心の速度[m/s]とした。

### ② 接地時間と空中時間

接地時間とは、疾走中においてどちらか一方の足が地面と接している時間[s]のことであり、空中時間は両方の足が地面から離れている時間[s]のことである。いずれも側方や前方に接地したカメラから得られた映像をもとに目視でコマ数を数え、時間として算出した。

### ③ ストライド

一方の足が地面から離れた地点から、次の足が地面に接した地点までの水平直線距離として求め、その後、被験者の身長による値の大小の影響を取り除くため、ストライド距離を各被験者の身長によって除した。

### ④ ストライドに占める Takeoff 距離と Landing 距離

図 2-3 にあるように、Takeoff 距離は一方の足が地面から離地するときにおけるつま先点と身体重心とを結ぶ水平距離として、Landing 距離は一方の足が地面と接地する時点におけるつま先点と身体重心とを結ぶ水平距離として定義した。Takeoff 距離と Landing 距離は、ストライドに占める割合をみるため、それぞれの距離を被験者のストライドで除した値とした。

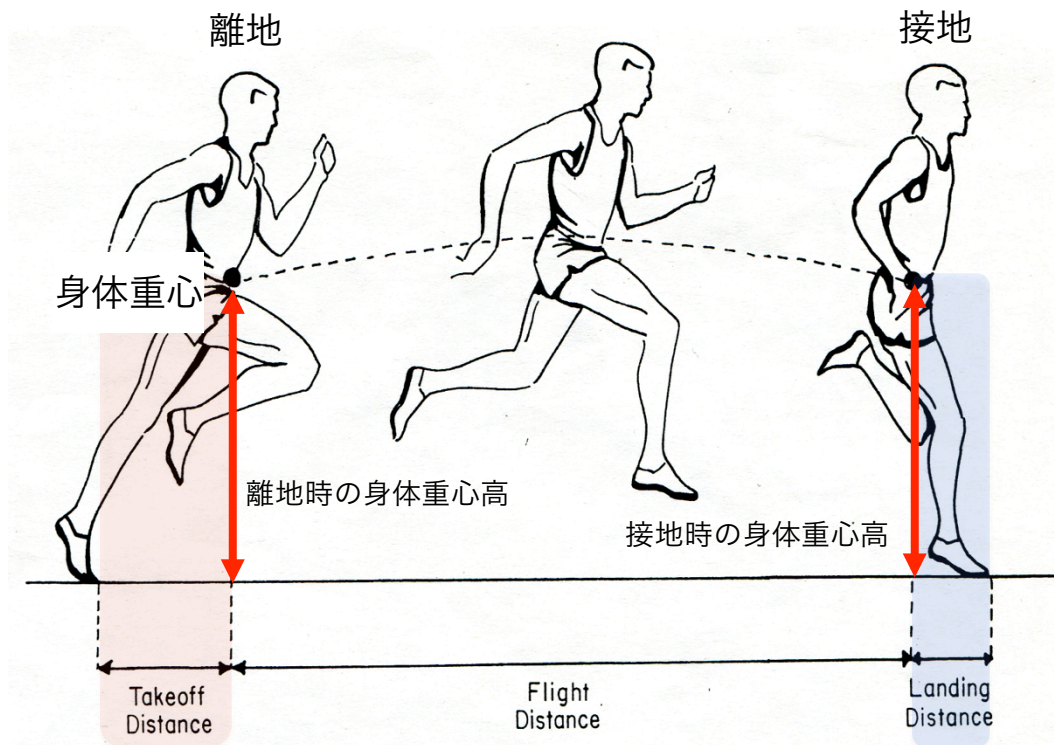


Figure 15-1. Contributions to the total length of a runner's stride.

### 図 2-3 ストライドに占める Takeoff 距離と Landing 距離および身体重心高

Takeoff 距離とは、離地瞬間のつま先点から身体重心をとる鉛直線までの水平距離のことで、図中の Takeoff Distance を指す。Landing 距離とは、接地瞬間のつま先点から身体重心をとる鉛直線までの水平距離のことで、図中の Landing Distance を指す。図は Hay JG(1993) より引用

#### ⑤ 接地時と離地時の身体重心高

接地と離地の時点における身体重心の鉛直高[m]として算出した (図 2-3)。

#### ⑥ 身体長軸の傾斜角

曲線走では身体が内傾姿勢をとり進行方向も常に変化するため、静止座標系のみで身体動作の諸変数を表すことは困難である。例えば、静止座標系の Y 方向がいつも身体の左方向を指すとは限らないため、図 2-4 にあるように、身体の前後軸，左右軸お

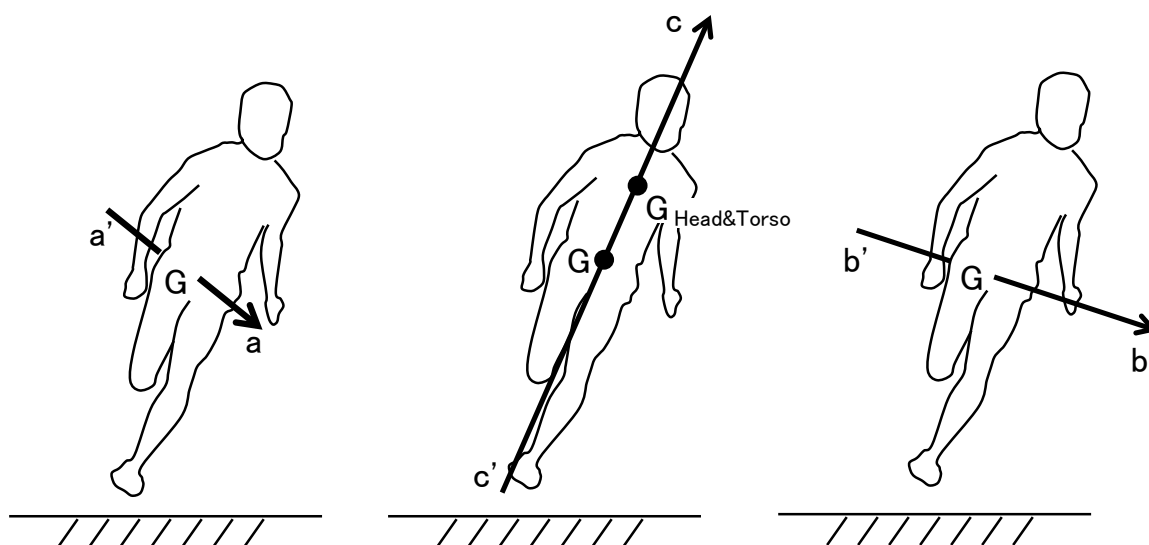


図 2-4 身体の前軸  $aa'$  と長軸  $cc'$ ，左右軸  $bb'$

前後軸  $aa'$  は身体重心の速度ベクトルの方向とし，長軸  $cc'$  は身体重心から頭部と胴体を合わせた合成重心に向かう軸，左右軸  $bb'$  は長軸と前後軸との外積とした。これら軸の正の方向は，前後軸は速度ベクトルの向く（前向き）方向，長軸は頭頂（上向き）方向，左右軸は曲走路内側（左向き）方向とした。

よび長軸に相当する軸を定めた。前後軸  $aa'$  は身体重心の速度ベクトルの方向とし，長軸  $cc'$  は身体重心から頭部と胴体を合わせた合成重心に向かう軸，左右軸  $bb'$  は長軸と前後軸との外積とした。これら軸の正の方向は，前後軸は速度ベクトルの向く（前向き）方向，長軸は頭頂（上向き）方向，左右軸は曲走路内側（左向き）方向とした。これら 3 軸は互いに直交ではないが，曲走路疾走中の身体の姿勢を表す軸として用いた。

曲線走では身体が内傾姿勢をとるため，姿勢の傾きやその左右差を調べるため，身体の長軸  $cc'$  の傾斜角を求めた。図 2-5 にあるように，まず前後軸  $aa'$  を水平面に投影した水平前後軸  $x'$  を定め，この軸と鉛直軸との外積として水平左右軸  $y'$  を定義した（正の方向は曲走路の外側に向かう方向とした）。これら  $x'$ ， $y'$  軸と鉛直軸を用いて身体の

長軸  $cc'$  の傾斜角を算出した。これは、前傾後傾を表す角度  $\theta_{Forward/Backward}$  と内傾外傾を表す角度  $\theta_{Inward/Outward}$  としてそれぞれ定めた。前傾後傾角  $\theta_{Forward/Backward}$  は、水平前後軸  $x'$  と鉛直軸とがつくる平面に長軸  $cc'$  を投影し、この線分が鉛直軸となす角度とした。進行方向への角度変化を正としこれを前傾、その反対方向を後傾とした。内傾外傾角  $\theta_{Inward/Outward}$  は、水平左右軸  $y'$  と鉛直軸とがつくる平面に長軸  $cc'$  を投影し、この線分が鉛直軸となす角度とした。曲走路内側方向への角度変化を正としこれを内傾、その反対方向を外傾とした。

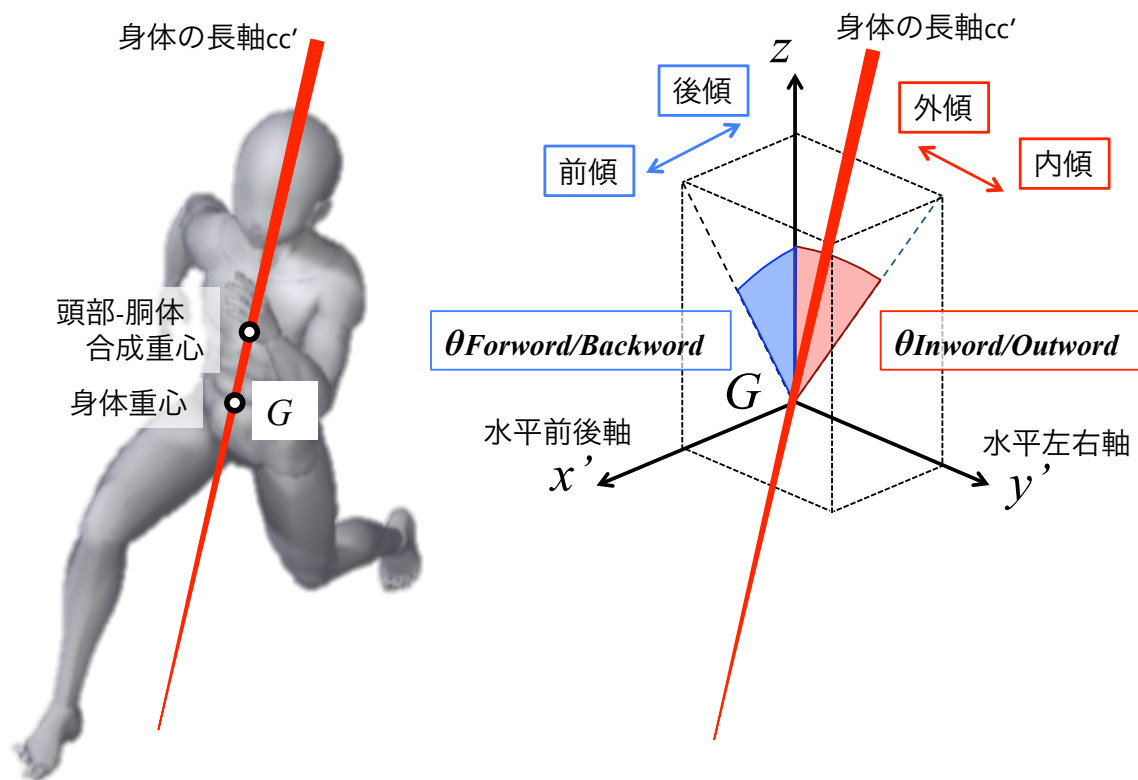


図 2-5 身体長軸  $cc'$  の前傾・後傾角度と内傾・後傾角度



### ⑦ 身体重心速度の水平成分ベクトルの角度変化

空中期における身体重心の移動を水平面に投影すると一直線になるため、身体重心の移動を最小二乗法により一次回帰直線として近似し、これを空中期における身体重心速度の水平成分ベクトルとした。次に、接地期をはさんだ2つの空中期において、このベクトルの向きが変化した角度を求め、これを、身体重心速度の水平成分ベクトルの角度変化 [°] とした。角度変化の向きが曲走路内側へ変化する方向を正とし、左右の接地期について算出した (図 2-6)。

### ⑧ 接地足の踏み出し角度

接地足の踏みだし角度とは、一方のつま先接地位置から次のつま先接地位置を結ぶ線分と、同様にして求めた次のつま先接地位置を結ぶ線分とがなす角度 [°] のことで、本研究では線分の向きが曲走路内側へ変化する方向を正として算出した (図 2-6)。

### ⑨ 関節角度 (股関節・肩関節・膝関節・肘関節)

股関節屈曲角度は、身体重心の速度ベクトル (疾走速度) と身体長軸がつくる平面に股関節中心と膝関節中心を結ぶ大腿長軸の線分を投影し、その線分と身体長軸がなす角度 [°] として求めた。身体の長軸と大腿が一直線をなす起立姿勢を 0° とし、股関節の屈曲を正、伸展を負とした。肩関節屈曲角度も上記と同様に、身体重心の速度ベクトル (疾走速度) と身体長軸がつくる平面に肩関節中心と肘関節中心を結ぶ上腕長軸の線分を投影し、その線分と身体長軸がなす角度 [°] として求めた。身体の長軸と上腕が一直線をなす起立姿勢を 0° とし、肩関節の屈曲を正、伸展を負とした。膝関節角度は、大腿長軸と下腿長軸がなす角度として求めた。大腿と下腿の長軸が一直線になった姿位を 180° とした。肘関節角度は、上腕長軸と前腕長軸がなす角度と

して求めた。上腕と前腕の長軸が一直線になった姿位を  $180^\circ$  とした。

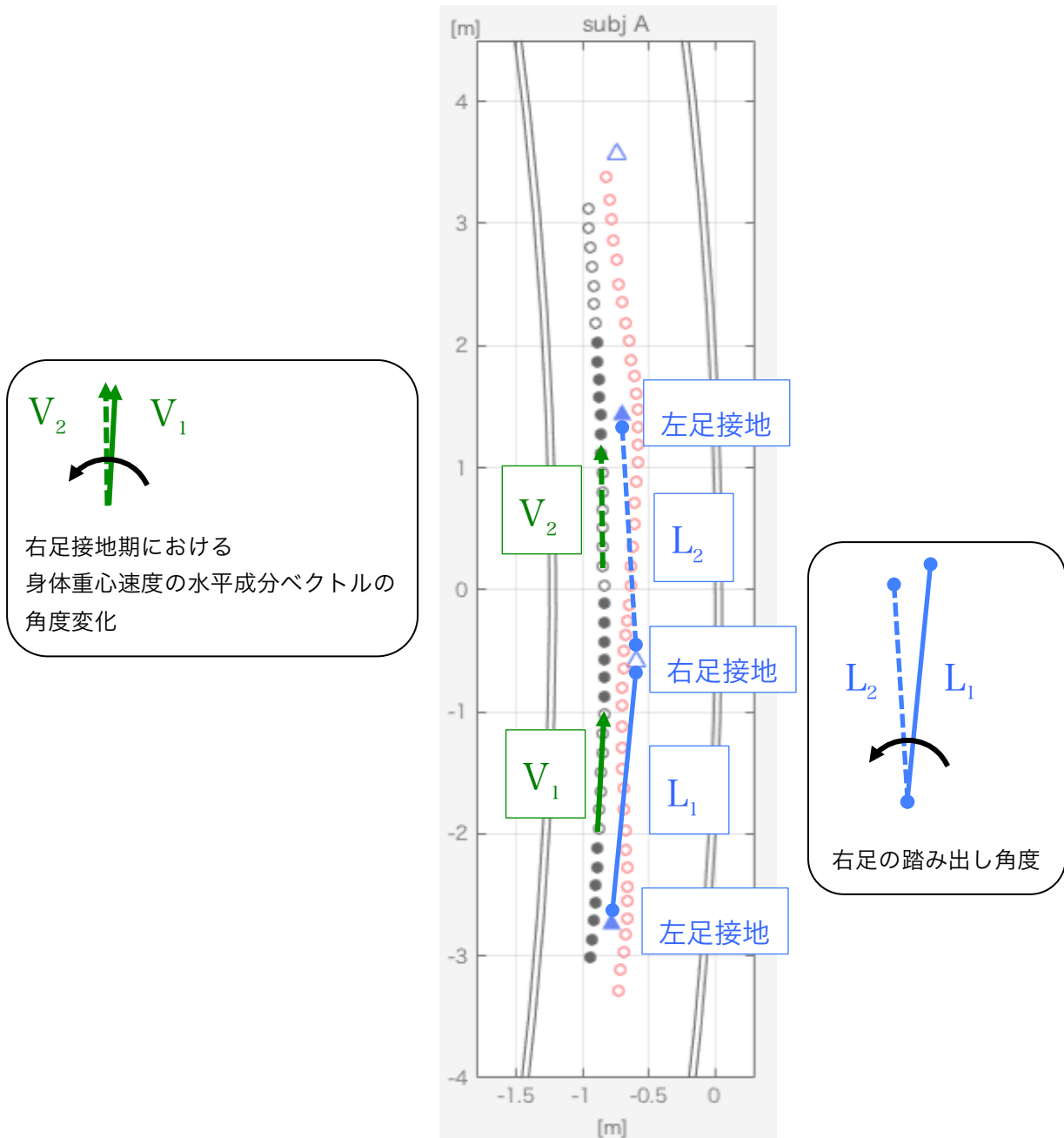


図 2-6 身体重心速度の水平成分ベクトルの角度変化と接地足の踏み出し角度  
 (図左側) 右足接地期前と後の空中期における身体重心速度の水平成分ベクトルを  $V_1$  と  $V_2$  とするとき、二つのベクトルがなす角度を右足接地期における身体重心速度の水平成分ベクトルの角度変化 $[\circ]$ と定めた。(図右) 左足接地点と次の右足接地点、さらに次の左足接地点までを結ぶそれぞれの線分を  $L_1$  と  $L_2$  とするとき、二つの線分がなす角度を、右足の踏み出し角度 $[\circ]$ と定めた。同様の考えにより左足接地期においても両変数を求めた。

⑩ 身体重心と身体長軸が地面と接する点

身体重心の地面（XY 平面）における位置と，身体長軸  $cc'$  が地面（XY 平面）と交差する点（図 2-7）を求めた。さらに，左右足の接地位置を求め，身体重心や身体長軸に対しての足のつき方を求めた。

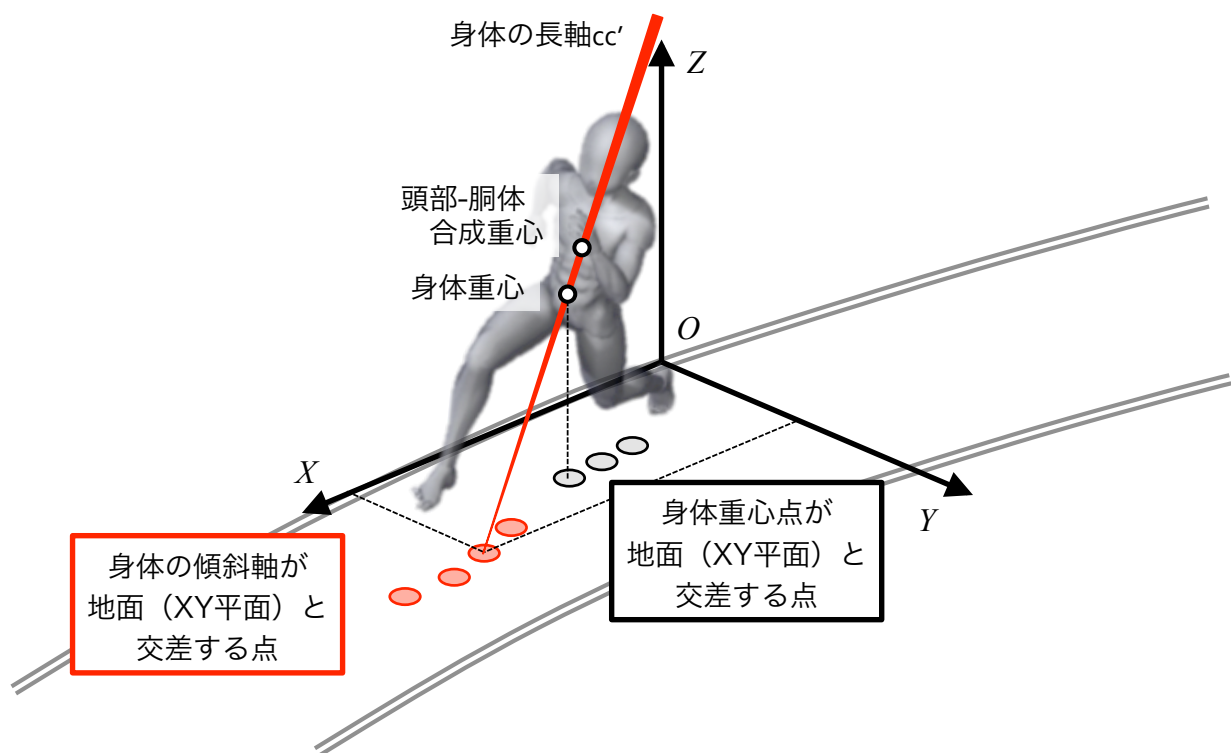


図 2-7 地面（XY 平面）における身体重心点の位置と身体長軸が地面（XY 平面）と接する点の軌跡

## 2.6 統計処理

疾走速度は、左区間と右区間における平均値と標準偏差として算出した。各区間は該当する足の接地期とそれに続く空中期を合わせた区間を指す。その他の算出項目である接地時間や空中時間、ストライドの距離、接地時と離地時の身体重心高、身体傾斜角の前傾後傾角度および内傾外傾角度、空中期における身体重心速度の水平成分ベクトルの角度変化のいずれにおいても左区間と右区間における平均値と標準偏差を算出した。また、関節角度については左区間と右区間における最大値と最小値を求め、それぞれの平均値と標準偏差を算出した。これら算出したすべての項目は、左区間と右区間の平均値について危険率5%未満とする対応のあるt検定を用いた。

### 3. 結果と考察

#### 算出項目の左右差

表 2-3 にあるように、疾走速度は、左区間 9.62m/s が右区間 9.64m/s であり、有意な差は認められなかった。疾走速度を規定する距離の因子と時間の因子についてそれぞれみると、まず時間の因子である接地時間と空中時間は、接地時間においてのみ左足接地期 0.106s よりも右足接地期 0.097s が有意に短かった ( $p<0.05$ )。距離の因子であるストライドに関しては、左右の区間において有意な差はなく、Takeoff 距離や Landing 距離においても左右区間では有意差がなかった。曲線走では内傾姿勢をとり走行するため、左右の動作に違いが生じ、ピッチやストライドに関係する項目に左右差が現れると考えられ、先行研究でも右区間のストライドが短くなることや空中時間が長くなること (Churchill et al.:2012) が報告されているが、本実験では右足の接地時間の減少しか左右の差は認められなかった。また、接地時と離地時における身体重心の鉛直高を身長で正規化した値については、接地時においても離地時においても左右差は認められなかった。これは左右の接地期において、地面反力の鉛直方向の力積成分に差がなかったことを意味しており、曲線走では内傾した姿勢をとりつつも、身体重心の移動は直線走と同じように左右の高低差のないものであったと考えられる。

身体長軸の前傾後傾角度および内傾外傾角度を表 2-4 に示す。身体長軸の前傾後傾の角度については、接地時点および離地時点の角度に左右差はなく、また、接地期や空中期に変化した角度においても有意な差がなかった。しかし、身体長軸の内傾外傾角度については、接地時点において、左区間 16.9°が右区間 10.1°より有意に大きく ( $p<0.05$ )、また、離地時においても、左区間 15.6°が右区間 11.7°より有意に大きかった ( $p<0.05$ )。また、身体長軸の内傾外傾角度が接地期や空中期において変化した角度は、接地期では左右の差はないが、空中期においては左区間-4.1°より右区間 5.0°が、

絶対値の比較において有意に大きな変化を示した ( $p < 0.05$ ). つまり, 身体長軸の動きは, 前傾後傾方向については左右の違いはないが, 内傾外傾方向に関しては, 左足接地期には身体が深い内傾姿勢であり, 右足接地期では浅い内傾姿勢であった. また, 身体長軸は左足接地期とこれに続く空中期は身体を起こすよう変化し, 右足接地期とその後の空中期は, 身体を寝かすよう変化した.

表 2-3 左区間と右区間における Kinematic データ

	Left		Right		
	Mean	SD	Mean	SD	
Velocity [m/s]	9.63	0.23	9.64	0.25	
Contact time [s]	0.106	0.01	0.097	0.01	*
Airbone time [s]	0.103	0.01	0.098	0.01	
Stride	1.19	0.04	1.17	0.06	
Takeoff distance	0.31	0.04	0.30	0.02	
Landing distance	0.20	0.02	0.22	0.04	
CM height at touchdown	0.53	0.01	0.53	0.01	
CM height at takeoff	0.53	0.01	0.53	0.01	
$\theta_{L\_velocity}, \theta_{R\_velocity}$ [°]	3.2	0.4	3.1	0.4	
$\theta_{L\_stride}, \theta_{R\_stride}$ [°]	7.9	3.0	-2.2	2.2	*

\* 左区間と右区間のあいだに有意な差 ( $p < 0.05$ ) がみられた

$\theta_{L\_velocity}, \theta_{R\_velocity}$  は, 身体重心速度の水平成分ベクトルの角度変化,

$\theta_{L\_stride}, \theta_{R\_stride}$  は, 接地足の踏み出し角度を表す

表 2-4 左区間と右区間における身体長軸の傾斜角度

	Left		Right		
	Mean	SD	Mean	SD	
<b>Touchdown</b>					
$\theta_{\text{Forward/Backward}}$	1.1	1.9	0.4	2.5	
$\theta_{\text{Inward/Outward}}$	16.9	2.4	10.1	2.1	*
<b>Takeoff</b>					
$\theta_{\text{Forward/Backward}}$	5.2	1.9	5.6	2.2	
$\theta_{\text{Inward/Outward}}$	15.6	2.0	11.7	2.0	*
<b>Contact phase</b>					
$\Delta \theta_{\text{Forward/Backward}}$	4.5	1.4	5.5	1.5	
$\Delta \theta_{\text{Inward/Outward}}$	-1.3	1.2	1.6	1.0	
<b>Airborne phase</b>					
$\Delta \theta_{\text{Forward/Backward}}$	-5.1	1.4	-5.5	1.4	
$\Delta \theta_{\text{Inward/Outward}}$	-4.1	0.8	5.0	1.0	*

\* 左区間と右区間のあいだに有意な差 ( $p < 0.05$ ) がみられた

接地期における身体重心速度の水平成分ベクトルの角度変化については, Churchill et al.(2012)は, 左足接地期により大きく角度変化を示すと報告したが(左足接地期  $4.2^\circ$ , 右足接地期  $2.6^\circ$ ), 本実験では左右の区間において有意な差はみられず (表 2-3), どちらかの空中期で進行方向をより変化させて走行していることは認められなかった。つまり, 向心力である地面反力の水平方向の力積成分に関しては, 左右の接地期において差なかったことを意味する。しかし, 接地足の踏み出し角度 (表 2-3) は, 左区間  $7.9^\circ$ が右区間 $-2.2^\circ$ より絶対値の値が有意に大きかった ( $p < 0.05$ )。つまり, 右足はほぼ前方に接地するが, 左足は曲走路の内側へと接地する左右の足のはこび方に違いが見られた。

次に関節角度の可動域（表 2-5）についてみると，股関節，膝関節，肩関節，肘関節のなかで，左右の値において有意な差が確認できたのは，股関節角度の最大値のみであり，左区間 72.9°が右区間 66.6°より有意に大きな値であった ( $p<0.05$ )。Alt et al.(2015)は矢状面内の関節運動においては左右に有意な差はないとしたが，ここでは右足接地期やそれに続く空中期において左の大腿が右よりも高く上がっていたことを示した。

表 2-5 左区間と右区間における関節可動域

	Left		Right		
	Mean	SD	Mean	SD	
<b>Hip</b>					
Flexion[ ° ]	72.9	4.2	66.6	3.9	*
Extension[ ° ]	-29.0	3.2	-26.2	4.3	
<b>Knee</b>					
Flexion[ ° ]	22.3	4.8	20.3	5.0	
Extension[ ° ]	144.0	2.6	143.5	5.9	
<b>Shoulder</b>					
Flexion[ ° ]	76.7	6.3	76.5	12.4	
Extension[ ° ]	-87.2	0.5	86.7	1.1	
<b>Elbow</b>					
Extension[ ° ]	117.4	12.0	115	14.9	
Flexion[ ° ]	37.3	9.7	34.1	6.9	

\* 左区間と右区間のあいだに有意な差 ( $p<0.05$ ) がみられた

図 2-8 に身体重心の地面 (XY 平面) における位置と身体長軸 cc'が地面 (XY 平面) と接する点，ならびに左右の接地足の位置を示した。この図から左右の足の接地位置は，身体重心の位置よりも常に曲走路外側であり，また，身体長軸 cc'が地面と交差す



る点をまたぐようであることがわかった。

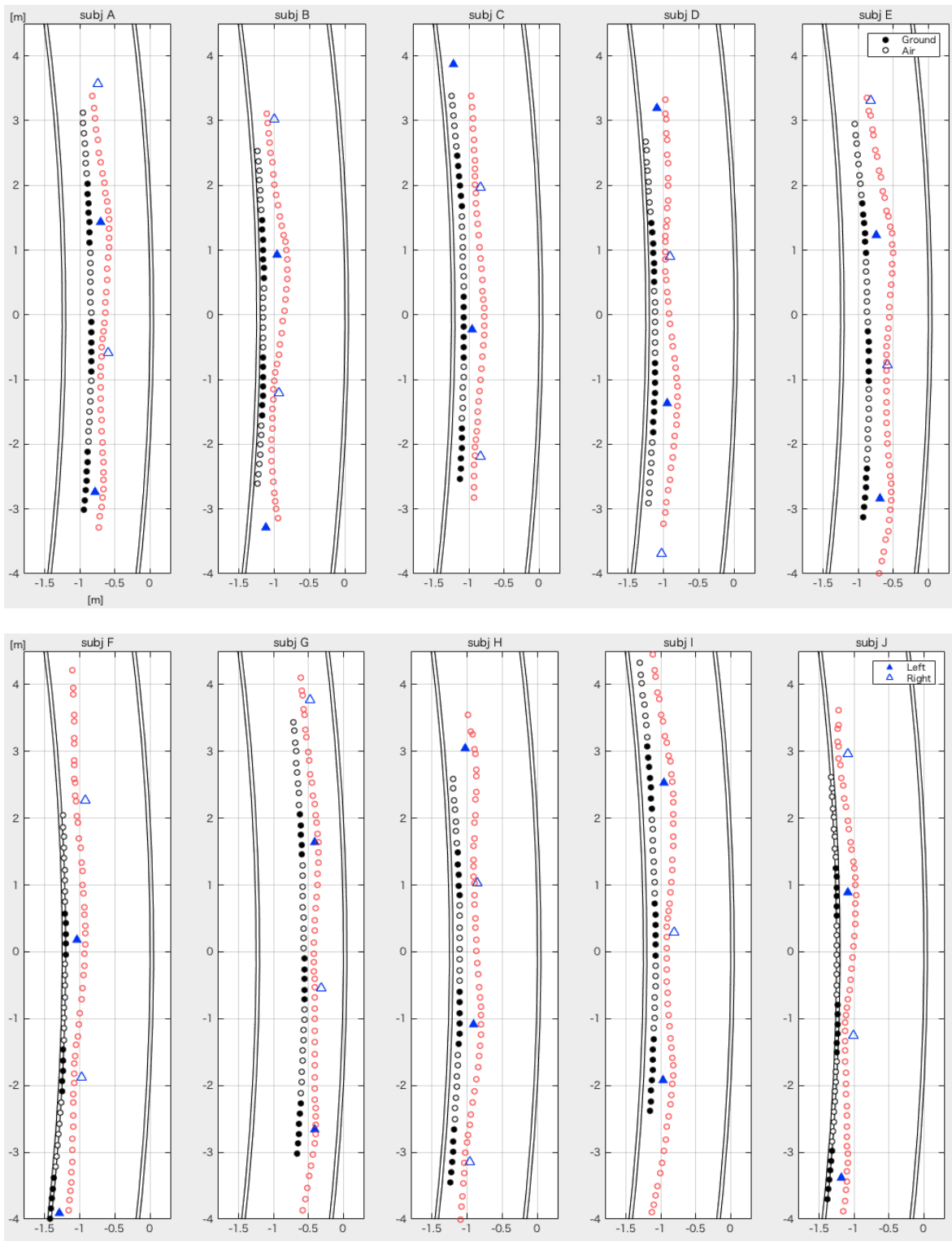


図 2-8 水平面内における身体重心と身体長軸の軌跡，および接地足の位置

曲走路を下から上に向かって走行する図。図中の黒色は身体重心点（黒丸が接地期，白抜き丸が空中期）を表す。赤色は身体長軸が地面と交差する点を表し，青色は接地位置（青色三角塗りつぶしが左足の接地点，青色三角白抜きが右足接地点）を表す。縦軸と横軸の単位は[m]。

身体長軸をまたぐよう接地することと右足の接地時間の長さの関係について探ると、仮に図 2-9 の A のように身体長軸  $cc'$  が地面と交わる点上に左右の足が接地するなら、身体重心からみた足の接地から離地まで移動する距離は左右でほぼ等しくなるが、B

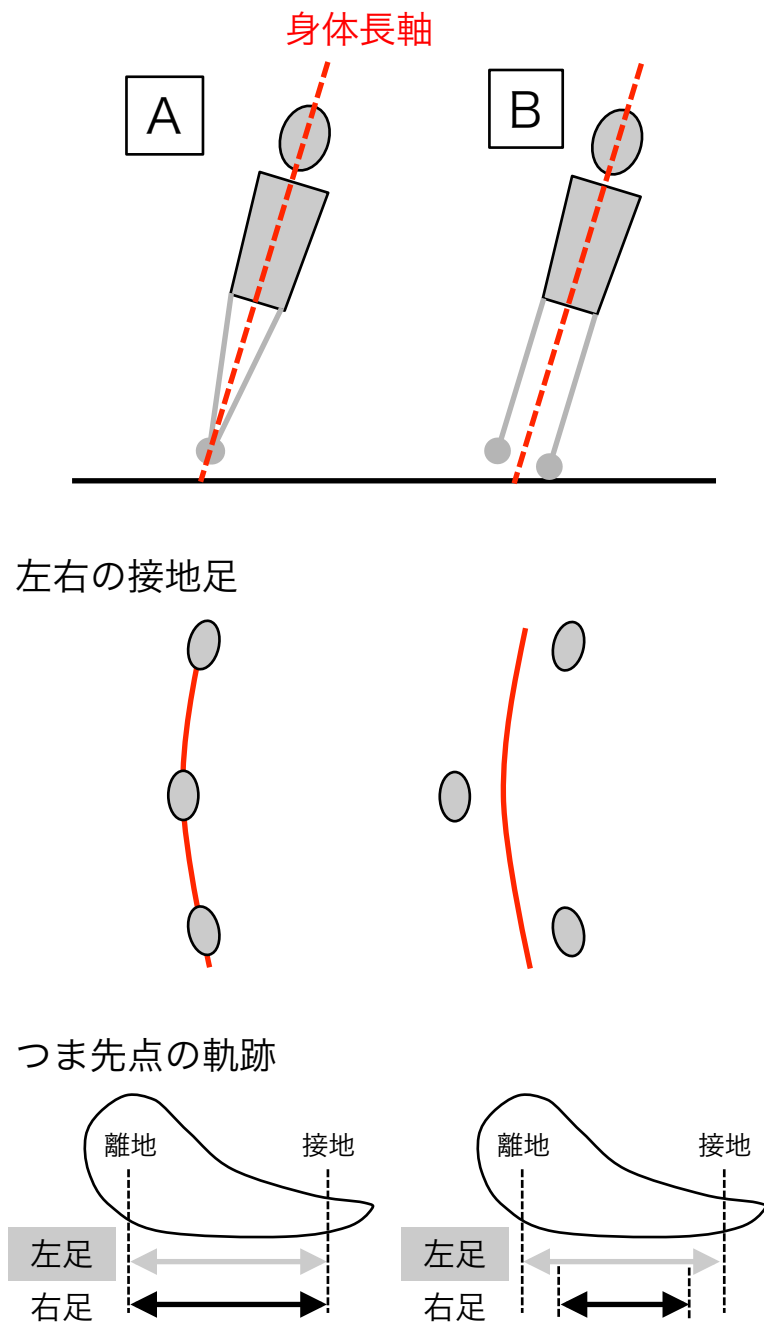


図 2-9 身体長軸  $cc'$  と地面 (XY 平面) との交点および左右足の接地位置  
 曲線走は内傾姿勢をとるが、A のように左右の足が身体長軸  $cc'$  の地面との交点上に接地するのであれば、身体重心からみた左右の足の移動距離はほぼ等しくなるが、実際は B のように左右の足が身体長軸  $cc'$  の地面との交点をまたぐように接地するため、右足が地面から離れることにより、右足の移動距離は左足よりも短くなる。

のように身体長軸  $cc'$  が地面と交わる点をまたぐように左右の足が接地すると、右足が地面から高く離れた位置にあるため、身体重心からみた右足の接地から離地まで移動する距離は、必然的に左よりも短くなる。つまり、右足接地期の時間が左足よりも短いのは、内傾した身体長軸をまたぐよう左右の足が接地していたためと考えられる。

#### 4. まとめ

本章の結果を以下に要約する。

- 1) 疾走速度の大きさ，及び疾走速度（身体重心速度の水平成分ベクトル）の向きの変化に左右差がない。
- 2) 右足接地期の時間は左よりも短い，ストライドに左右差はない。
- 3) 接地足を踏み出す方向は，左足から右足を踏み出す方向はほぼ前方であるが，右足から左足を踏み出す方向は曲走路内側である。
- 4) 肩関節まわりの腕振り可動域に左右差はないが，股関節まわりの大腿可動域は左脚の方が右側より大きい。
- 5) 左右の接地足は身体重心からみると常に曲走路の外側に着地するが，身体の長軸に対しては，これをまたぐよう左右の足が接地しており，このような接地の仕方が，右足の接地時間の短さを生じさせていると考えられる。

以上が，曲線走の左右差に着目した運動学的特徴として明らかとなった。

### 第 3 章 曲線走の運動力学的分析

#### 1. はじめに

直走路と曲走路の走運動を比較すると、進行方向と身体の向きが両者で異なる。直走路を疾走する際、進行方向は直線方向であり、身体の向きは走路の進行方向に正対する。これに対し曲走路を疾走する際、進行方向は曲走路の接線方向であるから刻一刻とその方向は変化し続ける。また身体の向きは曲走路の周回方向（左方向）へ向き続けるように回転する必要がある。この曲線路の走運動は、①身体重心の曲線（円）運動と、②身体の重心まわりの回転運動の 2 つからなる運動であると単純モデル化することができる。身体重心が円運動を行うためには向心力が必要であるが、この力は左右それぞれの接地期において、地面反力の水平成分として身体に作用することが明らかにされている（Hamill et al. 1987）。Hamill et al.(1987)は、400m トラックの曲走路（曲率半径 31.5m）を走速度 6.31m/s で疾走した時、地面反力の左右方向成分の力積は、左右どちらの接地期においても直線走より有意に大きな向心力方向の値を示すこと、また左足接地期(0.4918 Ns/kg)に作用する力積は、右足接地期(0.2398 Ns/kg)よりも向心力方向に有意に大きいことを示した。すなわち、走者の身体重心の進行方向は、鉛直上方からみて曲走路の接線方向に向くよう一歩ごとに変化していたことがわかる。一方、身体の重心まわりの回転運動については、これまで力学的な研究は行われておらず、その仕組みは明らかにされていない。

身体の回転運動を定量する物理量として角運動量がある。体操競技のような全身の回転運動では、身体が角運動量をもつことは容易に理解できるが、走運動においても身体は角運動量をもつ。疾走中、両脚は常に前方回転運動を行う。身体の中でも両脚の質量は比較的大きく、疾走中その運動は速いため、全身の角運動量は「前回り」の

成分をもつことが直線走で明らかにされている (Hinrichs 1987). この前回りの角運動量は、ベクトルで表すと走者に対して左方向を向く。よって走運動は常に左方向に向く角運動量ベクトルをもつ運動である。

直線走に対し曲線走の場合、進行方向は常に曲走路の接線方向と一致するため、身体の向きは周回方向へ変化し続けることになる。よって、常に走者の左方向に向く角運動量ベクトルも、一歩ごとに周回方向へその向きを変化しなければならない。全身の角運動量の向きや大きさの変化は、空気抵抗による影響が無視できるほど小さい場合、接地期において身体に作用する地面反力によってのみ起こる。このことから、接地期における全身の角運動量の向きや大きさの変化パターンを分析することにより、走者の身体が回転する様子を客観化することができ、曲線走の運動力学的な成り立ちを理解できると考えられる。よって、本研究の目的は、曲走路疾走中における全身の角運動量の変化を明らかにし、前回りの角運動量をもつ走者がどのように身体の向きを周回方向に変化させるのかを検討することとした。

## 2. 方法

被験者, 実験試技, データ収集, データ処理の項目については第 2 章に順ずる

### 2.1 算出項目

#### ①角運動量

全身の角運動量は, まず体節の角運動量  $\mathbf{H}_i$  を移動座標系 Gxyz (静止座標系 OXYZ と各軸が平行であり, かつ原点が身体重心(G)に一致する座標系 (図 3-1) について算出した). すなわち, 体節の重心と G を結ぶ線分が単位時間内に移動することによって生じた面積速度とその体節の質量との積を 2 倍した値 ( $\mathbf{H}_i^{Transfer}$ :transfer-term), およびその体節の慣性モーメントと角速度の積 ( $\mathbf{H}_i^{Local}$ :local-term) の和として求めた (Dapena 1978).

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{H}_i^{Transfer} + \mathbf{H}_i^{Local}$$

$$\mathbf{H}_i^{Transfer} = m_i(\mathbf{r}_{i1} \times \mathbf{r}_{i2}) / \Delta t$$

$$\mathbf{H}_i^{Local} = m_i(|\mathbf{r}_{RGi}|^2)\theta_i / \Delta t = I_i \omega_i$$

ここで,  $m_i$  は体節  $i^{th}$  の質量,  $r_i$  は身体重心から体節  $i^{th}$  の重心に向かう位置ベクトル,  $r_{i1}$  から  $\Delta t$  後の位置ベクトルを  $r_{i2}$ ,  $r_{RGi}$  は体節  $i^{th}$  の重心を通る左右軸まわりの回転半径 (the radius of gyration about the transverse axis),  $\theta_i$  は  $\Delta t$  の間に  $r_{RGi}$  が移動した角度変化,  $I_i$  は体節  $i^{th}$  の重心を通る左右軸まわりの慣性モーメント (the moment of inertia about the transverse axis),  $\omega_i$  は体節  $i^{th}$  の長軸の角速度とした. そして, すべての体節における角運動量の総和を x 軸, y 軸および z 軸成分ごとにそれぞれ求め, これを全身の角運動

量  $H_x$ ,  $H_y$  および  $H_z$  とした.

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \sum_i^{14} [H_i^{Transfer} + H_i^{Local}]$$

ただし胴体部分については Dapena (1978)が示した算出方法にならい, その長軸まわりにもつ角運動量 (local-term) も加算した.

身体は曲線走において曲走路内側に傾いた姿勢をとり, その進行方向も変化する特徴を有する. このことから, 移動座標系 ( $G_{xyz}$ ) について算出した角運動量は, 各成分が身体に対して前方回転の方向を表すのか後方回転なのかを理解することが困難である. そこで, 角運動量は移動座標系 ( $G_{xyz}$ ) について表すだけでなく, 身体の前後軸, 左右軸および長軸に相当する軸の成分  $H_{aa'}$ ,  $H_{bb'}$  および  $H_{cc'}$  として表した (図 3-1). 前後軸  $aa'$  は身体重心の速度ベクトルの方向とし, 長軸  $cc'$  は身体重心から頭部と胴体を合わせた合成重心に向かう軸, 左右軸  $bb'$  は長軸と前後軸との外積とした. これら軸の正の方向は, 前後軸は速度ベクトルの向く (前向き) 方向, 長軸は頭頂 (上向き) 方向, 左右軸は曲走路内側 (左向き) 方向とした. これら 3 軸は互いに直交ではないが, 曲走路疾走中の身体の姿勢を表す軸として用いた. さらに頭部と胴体のセグメントを足し合わせた頭部胴体部分の角運動量の長軸  $cc'$  方向成分  $H_{cc'_{Head\&Torso}}$  を求めた. この部分は身体の体幹部に相当するため, この角運動量の正負の符号および大きさから身体の向きが変化する方向やその大きさがわかる. 本研究ではこの成分をもとに身体の向きの変化を議論した. なお, 角運動量の単位は, 先行研究 (Dapena 1980 : Hinrichs 1987 : Yu and Hay 1995) にならい, 各被験者の身体質量[kg]と身長[m]を



二乗したものと積 $[kg \cdot m^2]$ で除すことによって正規化[単位： $s^{-1}$ ]をした。全身の角運動量を算出する際には、被験者の身長や体重の影響を受ける。このため体格の異なる被験者らが示す角運動量およびその平均値の解釈をより容易にするため上記のような

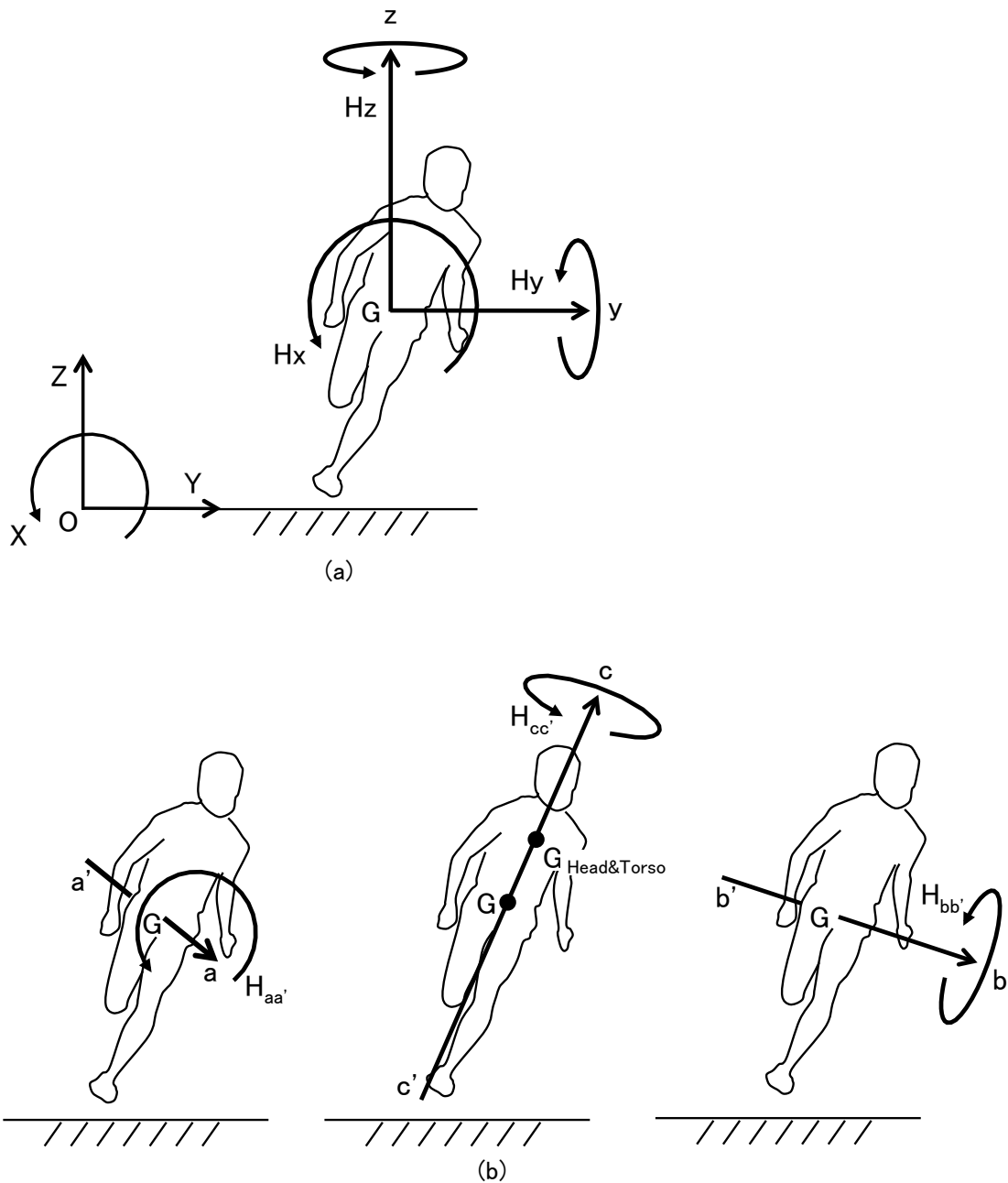


図 3-1 移動座標系と身体の姿勢に合わせた座標系

(a)静止座標系  $OXYZ$  と移動座標系  $Gxyz$

(b)身体の前後軸  $aa'$ 、長軸  $cc'$ 、左右軸  $bb'$ を示した座標系

正規化を行った。またこの正規化に伴い、算出された角運動量は小数点2桁以下の値となる。このような数値を本文や表に多く挙げると0が羅列するため、表記状の煩雑さをなくすよう数値に  $10^3$  を乗じた。

## ②角運動量の向きの変化角度

右足接地期において、全身の角運動量の水平成分の向きが変化した角度  $\theta_R$  は、水平面に投影した全身の角運動量の向きの変化として求めた。つまり  $\theta_R$  は、右足接地期前の空中期における全身の角運動量の水平成分の平均値を  $H_{RFS}$ 、右足接地期後の空中期における全身の角運動量の水平成分の平均値を  $H_{RTO}$  としたとき、 $H_{RFS}$  と  $H_{RTO}$  とがなす角度として算出した。左足接地期における  $\theta_L$  についても同様の方法で求めた。 $\theta_R$  と  $\theta_L$  は、鉛直上方からみて反時計まわりの角度変化（つまり、曲走路の周回方向と同じ方向への変化）を正の値とした。

## ③足の接地位置と身体長軸の傾斜角

接地期における身体重心からみたつま先点の位置の水平左右軸成分を水平距離  $D_R$ 、 $D_L$  として左右足それぞれについて算出した。水平左右軸は、前後軸  $aa'$  を水平面に投影した水平前後軸を定め、この軸と鉛直軸との外積として定義した（正の方向は曲走路の外側に向かう方向とした）。また、この座標軸を用いて身体の長軸  $cc'$  の傾斜角を求めた。これは、前傾後傾を表す角度  $\theta_{Forward/Backward}$  と内傾外傾を表す角度  $\theta_{Inward/Outward}$  としてそれぞれ定めた。前傾後傾角  $\theta_{Forward/Backward}$  は、水平前後軸と鉛直軸とがつくる平面に長軸  $cc'$  を投影し、この線分が鉛直軸となす角度とした。進行方向への角度変化を正としこれを前傾、その反対方向を後傾とした。内傾外傾角  $\theta_{Inward/Outward}$  は、水平左右軸と鉛直軸とがつくる平面に長軸  $cc'$  を投影し、この線分が鉛直軸となす角度とした。

曲走路内側方向への角度変化を正としこれを内傾, その反対方向を外傾とした.

## 2.2 統計処理

角運動量は、分析区間に要した時間が 100%となるよう被験者ごとに時間の正規化をおこない、x 軸、y 軸および z 軸の成分ごとに同時点について平均値と標準偏差を算出した。また、分析区間における最初の左足接地から始まる走運動の 1 周期分を対象として、接地期、空中期および全走周期のそれぞれにおける全身の角運動量  $H_x$ 、 $H_y$  および  $H_z$  の平均値と標準偏差を算出した。同様に、全身の角運動量の前後、左右および長軸方向成分  $H_{aa'}$ 、 $H_{bb'}$ 、 $H_{cc'}$  および頭部胴体部分の角運動量の長軸方向成分  $H_{cc'_{\text{Head\&Torso}}}$  についても、平均値と標準偏差をそれぞれ算出した。つま先点の水平距離  $D_R$  および  $D_L$  は、各被験者の接地時間における平均値を求め、全被験者についてその平均値と標準偏差を算出した。走者の疾走速度、長軸  $cc'$  の前傾後傾角  $\theta_{\text{Forward/Backward}}$  および内傾外傾角  $\theta_{\text{Inward/Outward}}$  は、各被験者の全走周期における平均値を求め、全被験者の平均値と標準偏差として表した。

$H_{cc'}$  および  $H_{cc'_{\text{Head\&Torso}}}$  について、これら 1 周期の平均値が周回方向の成分をもつのか、または 1 周期の間の変化量はないのか、つまりそれぞれの平均値が 0 よりも大きいかどうかを調べるために一標本 t 検定と 95%信頼区間を用いた。同様に  $D_R$  および  $D_L$  についても、接地足が身体重心よりも曲走路外側に接地するのか内側に接地するのか、または身体重心のほぼ真下に接地するのか、つまり接地期における平均値が 0 よりも大きいかどうかを調べるため、一標本 t 検定と 95%信頼区間を用いた。また、右足接地期の  $\theta_R$  と左足接地期の  $\theta_L$  の比較には、 $\theta_R$  と  $\theta_L$  の絶対値について対応のある t 検定を用いた。これら検定に用いた危険率は 5%未満を有意とした。

### 3. 結果

分析区間における曲走路の疾走速度は  $9.6 \pm 0.2 \text{ m/s}$  であった。身体重心からみたつま先点の水平距離は、右足接地期では  $D_R = 0.25 \pm 0.02 \text{ m}$  (95%信頼区間: 0.24 から 0.27m), 左足接地期では  $D_L = 0.18 \pm 0.04 \text{ m}$  (95%信頼区間: 0.16 から 0.21m) であり, それぞれ0より有意に大きな値 (右足  $p < 0.05$ , 左足  $p < 0.05$ ) を示したため, 両足はともに身体重心よりも曲走路外側に接地していたことが確認された。身体の長軸  $cc'$  は, 走周期を通して前傾位 ( $\theta_{\text{Forward/Backward}} = 3.1 \pm 1.9^\circ$ ) であり, かつ内傾位 ( $\theta_{\text{Inward/Outward}} = 13.9 \pm 2.1^\circ$ ) であった。また, 前傾角度は左右足ともに接地期ではより前傾方向へ, 空中期では後傾方向へ変化した。内傾角度は, 右足接地期とそれに続く空中期ではより内傾方向 (曲走路の内側方向) へ, 左足接地期とそれに続く空中期では外傾方向へ変化した (図 3-2)。

移動座標系 (Gxyz) からみた全身の角運動量を図 3-3 に示す。  $H_x$  は右足接地期に正から負の値へ, 左足接地期に負から正の値へ大きく変化した。  $H_y$  は接地期の間に大きく増減したが, 各接地期における総変化量はほぼ0であり, 走周期を通じて常に正の

表 3-1 左右の接地期と空中期および走周期における身体の角運動量

	Left				Right				One stride cycle	
	Contact phase		Airbone phase		Contact phase		Airbone phase		Mean	SD
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD		
$H_x$	9.0	4.9	17.5	5.0	-11.2	4.6	-24.9	4.5	-2.0	1.5
$H_y$	37.1	5.2	23.4	4.2	46.8	4.2	24.6	3.8	32.8	2.8
$H_z$	-5.2	5.0	-10.2	2.7	-13.8	2.9	-0.5	3.6	-7.4	2.1
$H_{aa'}$	7.7	4.7	17.6	4.9	-10.5	3.8	-24.1	4.7	-2.0	1.3
$H_{bb'}$	37.0	5.1	25.1	3.9	48.7	4.2	24.3	3.6	33.5	2.8
$H_{cc'}$	6.6	5.8	-3.5	2.9	-5.4	3.6	4.1	4.6	0.5	3.1
$H_{cc' \text{ Head\&Torso}}$	1.3	0.9	-2.9	0.8	1.1	2.0	2.4	0.6	0.4	0.2

角運動量の値は正規化しており, 単位は  $[\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}]$  で表記した

値 ( $32.8 \times 10^3 \pm 2.8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) であった (表 3-1). これら変化の結果, 全身の角運動量の水平成分の向きは, 右足接地期には曲走路の周回方向と同じ向きである反時計まわりに  $\theta_R = 84 \pm 14^\circ$  変化し, 左足接地期にはその反対方向である時計まわりに  $\theta_L = -75 \pm 14^\circ$  変化した (表 3-2). また  $\theta_R$  の絶対値は  $\theta_L$  の絶対値よりも有意に大きかった ( $p < 0.05$ ). これは, 全身の角運動量の水平成分の向きが, 走周期をとおして時計回りと反時計回りに規則的に向きを変えるものの, 1 走周期における総変化量は常に反時計回り (曲走路の周回方向) への変化であったことを示す.

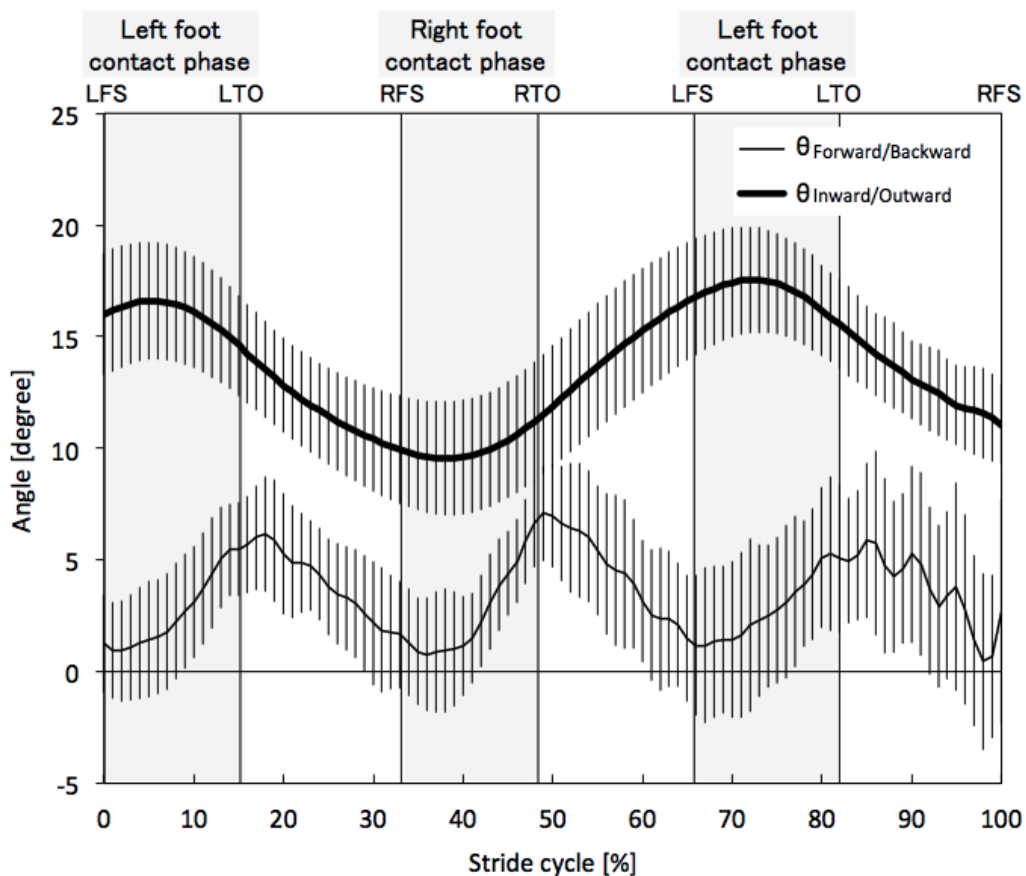


図 3-2 身体長軸の前傾後傾角度  $\theta_{\text{Forward/Backward}}$  と内傾外傾角度  $\theta_{\text{Inward/Outward}}$ .  
LFS = 左足接地時点, LTO = 左足離地時点, RFS = 右足接地時点, RTO = 右足離地時点

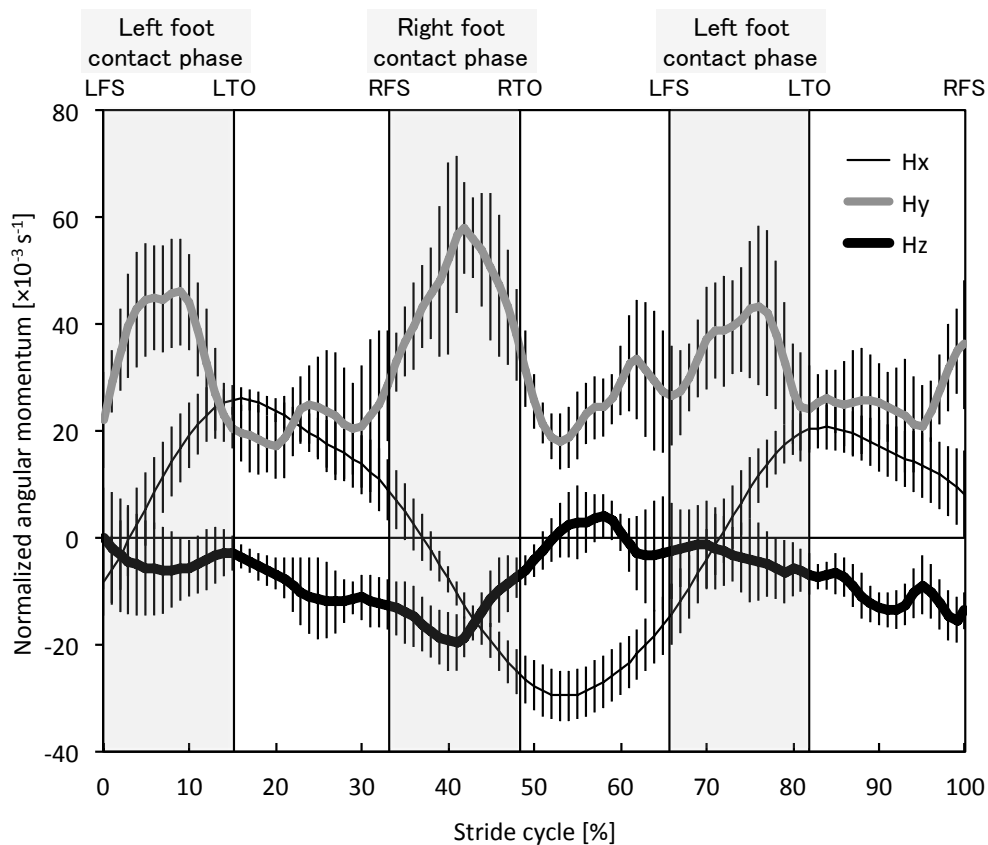


図 3-3 移動座標系 Gxyz における全身の角運動量

LFS = 左足接地時点, LTO = 左足離地時点, RFS =右足接地時点, RTO =右足離地時点

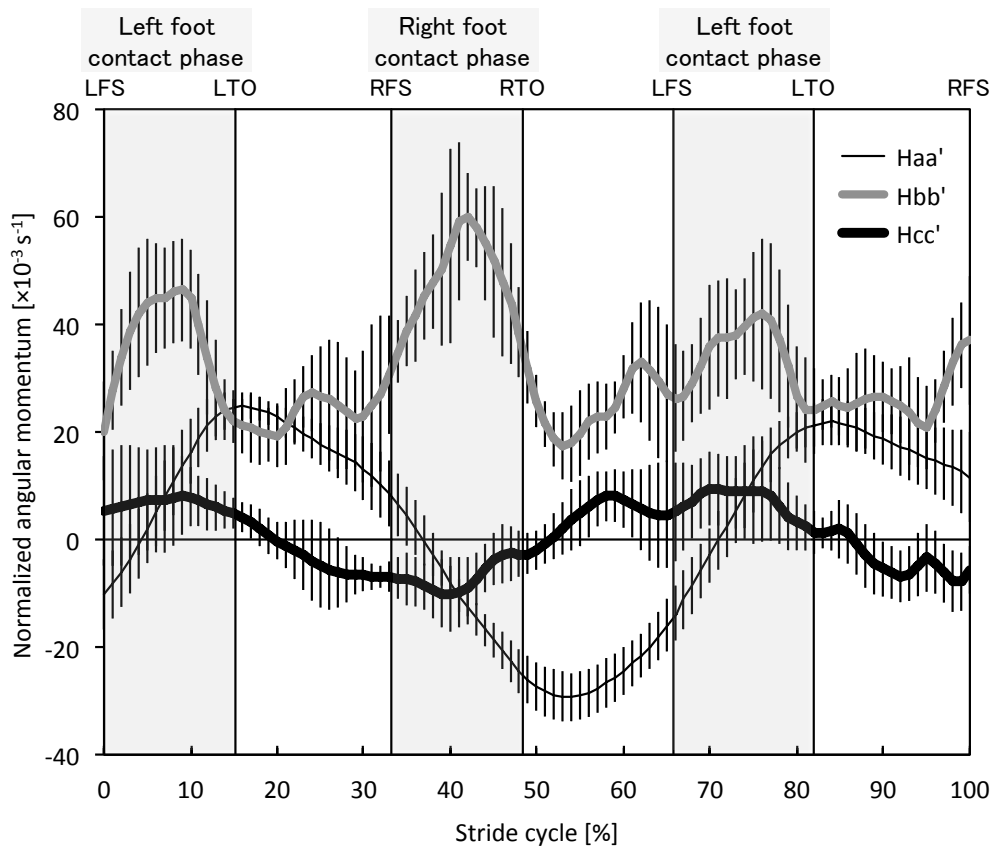


図 3-4 前後軸 aa', 左右軸 bb', 身体長軸 cc'における全身の角運動量

LFS = 左足接地時点, LTO = 左足離地時点, RFS =右足接地時点, RTO =右足離地時点

全身の角運動量の前後，左右および長軸方向成分についての結果を表 3-1 および図 3-4 に示す。また，左右成分については，頭部と胴体部，両腕部，および両脚部のそれぞれについての結果も図 3-5 に示す。前後軸方向成分  $H_{aa}$  は， $H_x$  と同様に接地期において向きが逆転した。また，左右軸方向成分  $H_{bb}$  については，走周期をとおして常に前回りの角運動量 ( $33.5 \times 10^3 \pm 2.8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) をもつこと，その角運動量の大部分は脚の運動によること (図 3-5) が確認された。長軸方向成分  $H_{cc}$  は，走周期の平均値が  $0.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  (95%信頼区間： $-1.7 \times 10^3$  から  $2.7 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) で，その値と 0 との間には有意な差がなかった ( $p > 0.05$ ) ことから，走周期中に身体の向きが規則的に変化しつつも走周期全体の総変化量はほぼ 0 であることが確認された。一方， $H_{cc\_Head\&Torso}$  は，走周期平均値が  $0.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  (95%信頼区間： $0.3 \times 10^3$  から  $0.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) で，その値が 0 よりも有意に大きかった ( $p < 0.05$ ) ことから，走者の体幹部は走周期全体を通じて曲走路の周回方向に回転していたことが確認された。

表 3-2 水平面内における角運動量ベクトルの変化角度[°]

Subject ID	$\theta_R$	$\theta_L$
A	85	-87
B	102	-94
C	56	-55
D	90	-80
E	87	-80
F	70	-59
G	77	-57
H	75	-72
I	91	-74
J	103	-92
Mean	84	-75
SD	14	14

\*  $\theta_R$  と  $\theta_L$  のそれぞれの絶対値の値において有意な差 ( $p < 0.05$ ) がみられた



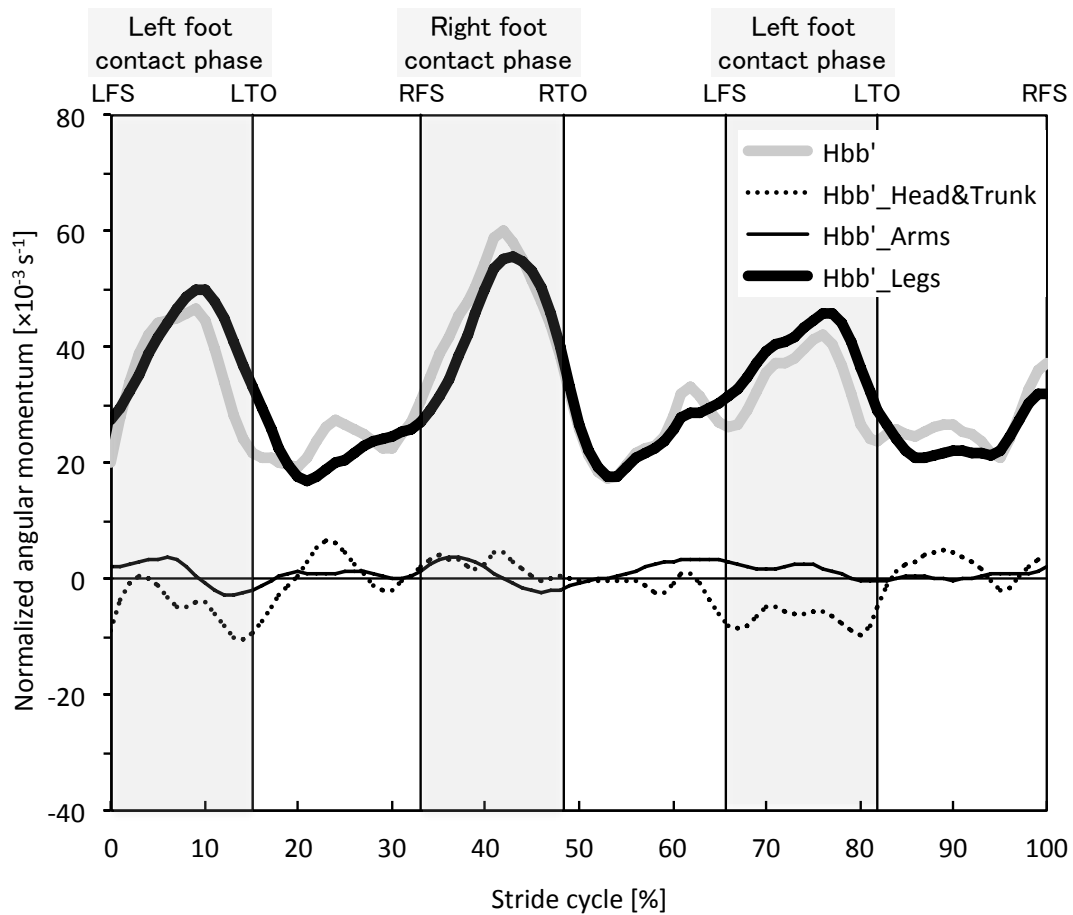


図 3-5 全身の角運動量の左右軸 bb'成分( $H_{bb}$ )

同軸における角運動量の頭部胴体部分 ( $H_{bb\_Head\&Torso}$ ), 両腕部分 ( $H_{bb\_Arms}$ ), 両脚部分 ( $H_{bb\_Legs}$ ) LFS = 左足接地時点, LTO = 左足離地時点, RFS = 右足接地時点, RTO = 右足離地時点

## 4. 考察

本研究は、曲走路疾走中における全身の角運動量の変化を明らかにし、前回りの角運動量をもつ走者がどのように身体の向きを周回方向に変化させるのかを検討することを目的とした。その結果、①全身の角運動量の水平成分の向きは左右足の接地期にそれぞれ時計回りと反時計回りに向きを変えるものの、走周期全体では反時計回り（曲走路の周回方向）への変化であったこと、②全身の角運動量の長軸方向成分 ( $H_{cc}$ ) は、走周期中に身体の向きが規則的に変化しつつも走周期全体の総変化量はほぼ0であったこと、③頭部と胴体部は走周期をとおしてその長軸まわりに周回方向の角運動量をもつことが明らかとなった。これらの結果は、①走者が前回りの角運動量をもつ脚部を周回方向に向け続けることができたのは、身体がその長軸方向に角運動量を保持していたからではなく、全身の角運動量の水平成分が接地期に向きを変えたためであること、及び、②体幹部が周回方向に向け続けることができたのは、頭部と胴体部がその長軸まわりに角運動量をもっていたためであることが示された。

### 4.1 角運動量の転移

曲線走では身体の向きが曲走路の周回方向へと変化し続けるため、本研究では全身の角運動量の鉛直軸成分 ( $H_z$ ) は正の値をもつことが予想されたが、この成分は左右いずれの局面においても、また1周期の平均値においても負の値であった（表 3-1 および図 3-3）。この成分が負の値であることは周回方向とは逆の回転方向を示すため、身体全体が曲走路外側に向くことが考えられる。しかしながら、このように全身角運動量の鉛直軸成分が負の値をもつ場合であっても周回方向へと身体の向きを変化させ続けることは、角運動量の転移によって可能である。曲線走では、全身がもつ負の角運動量 ( $-1.7 \text{ kgm}^2/\text{s}$ ) を上回る勢いの負の角運動量を上肢と下肢で生み出すことによ

り ( $-1.9\text{kgm}^2/\text{s}$ ), その補償作用として頭部胴体部が正の角運動量, つまり周回方向へと向く角運動量成分 ( $0.2\text{kgm}^2/\text{s}$ ) を得ることができる. 同様のことが左右軸方向でもみられ, 前まわりの角運動量成分を常にもつにもかかわらず, 走行中に身体が前方回転しない理由を理解できる (Hinrichs 1987) .

#### 4.2 角運動量の鉛直成分 $H_z$ および長軸成分 $H_{cc'}$

全身の角運動量の xyz 成分 ( $H_x, H_y, H_z$ ) と身体の前後軸, 左右軸および長軸成分 ( $H_{aa'}, H_{bb'}, H_{cc'}$ ) をそれぞれについて比較すると, 鉛直成分 ( $H_z$ ) と長軸成分 ( $H_{cc'}$ ) の値が大きく異なる (表 3-1 および図 3-3, 図 3-4).  $H_z$  は走周期を通して負の値であるのに対し,  $H_{cc'}$  は正負が周期的に変化する.  $H_z$  の経時変化をみると, 左足離地後の空中期 ( $-10.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) から右足離地後の空中期 ( $-0.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) へ値が増加することは, 右足接地期において正の方向に角運動量が増加したことを示している. 同様に考えると左足接地期においては角力積が負の方向に作用したことがわかる.  $H_{cc'}$  においてもやはり, 左足離地後の空中期 ( $-3.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) から右足離地後の空中期 ( $4.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) へ値が増加し, 右足接地期において正の方向へ, 左足接地期においては負の方向へ角力積が身体へ作用したことがわかる. つまり, 数値の上では  $H_z$  と  $H_{cc'}$  は異なるように見えるが, それぞれの接地期における角力積の作用する方向は同じであり, グラフの上では  $H_{cc'}$  の波形を負の方向へシフトさせると  $H_z$  にほぼ一致することになる. これは全身の角運動量ベクトルを表す際に用いた座標系の違いを反映するものである. すなわち, 曲線走では身体が曲走路内側に内傾 ( $\theta_{\text{Inward/Outward}} = 13.9^\circ$ ) した姿勢をとるため, 角運動量の身体長軸成分 ( $H_{cc'}$ ) だけではなく左右軸成分 ( $H_{bb'}$ ) もが鉛直成分 ( $H_z$ ) として投影され (図 3-6), その結果として鉛直成分の値が身体長軸成分と比べて負の方向にシフトした数値になった

のである。

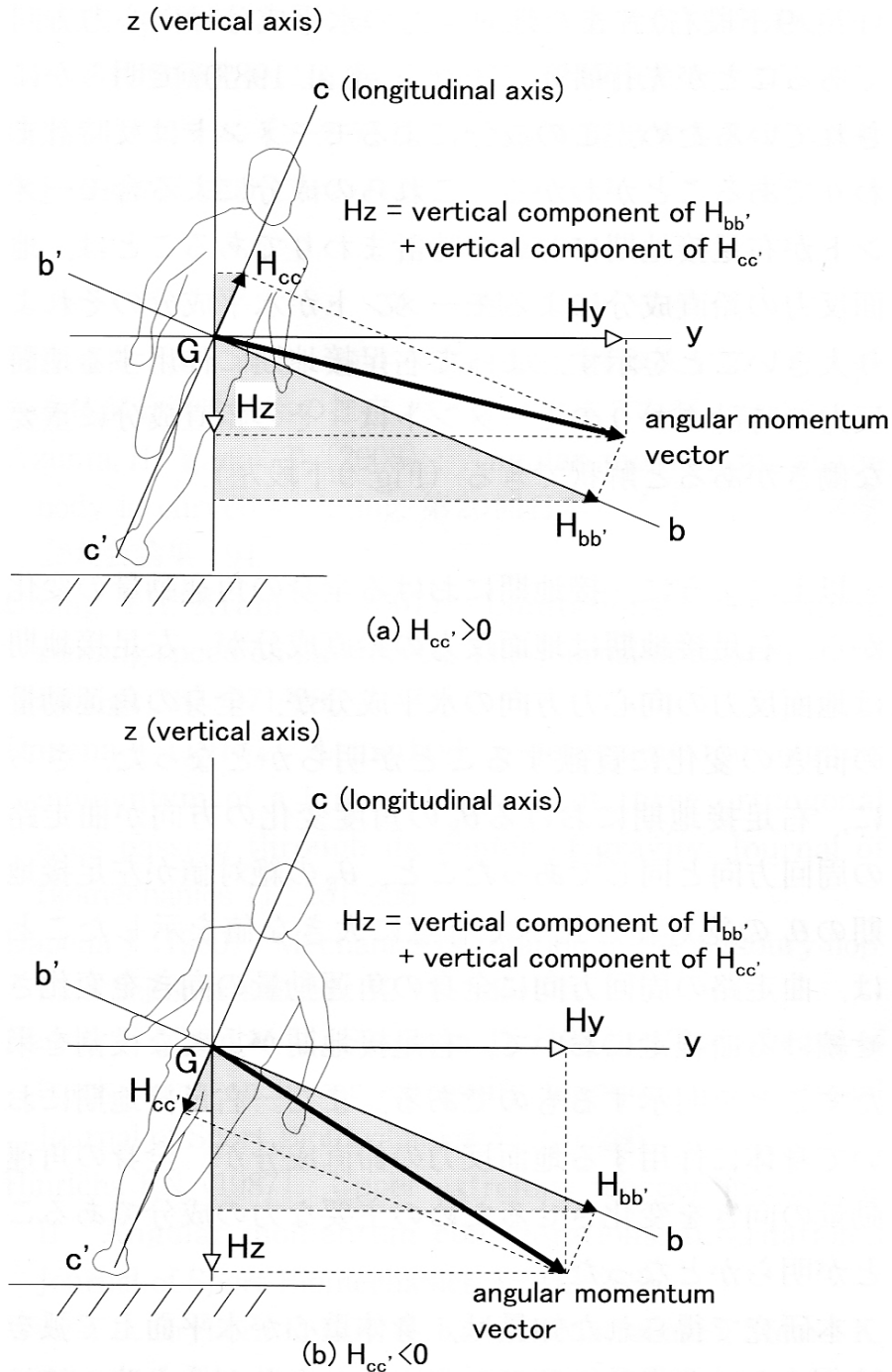


図 3-6 yz 平面に投影した全身の角運動量

移動座標系の軸で表した角運動量の  $H_z$  成分は、角運動量ベクトルが下方を向き続けるため、走周期をとおして常に負を示すが、左右軸  $bb'$  に対する角運動量ベクトルは上方下方と変化するため、身体長軸の角運動量  $H_{cc'}$  は、a) 左足接地期で正、(b) 右足接地期で負の値を示す。

### 4.3 身体の前後軸, 左右軸, 長軸における角運動量 $H_{aa'}$ , $H_{bb'}$ , $H_{cc'}$ と身体の向きの変化

全身の角運動量について, 先行研究で報告された直線走の結果 (Hinrichs 1987) と本研究で示された結果を比較すると, 身体の前後軸と左右軸成分については同様の結果であった。つまり, 身体の前後軸方向については, 右足接地期では正から負の値へ変化し, 左足接地期ではその反対方向の変化であったこと (図 3-4), 身体の左右軸方向については, 走周期をとおして常に前回りの角運動量をもち (図 3-4), これは脚の前方回転の動作に起因すること (図 3-5), これらのことが曲線走でも同様の結果であった。一方, 全身の角運動量の長軸方向成分は直線走とは異なる結果を示した。直線走ではこの成分は走周期をとおして正負の値を規則的に繰り返すものの, 1 走周期における総変化量は 0 となる (つまり, 直線の進行方向に身体が正対し続ける) ことが明らかになっている (Hinrichs 1987)。これに対して, 曲線走では曲走路の周回方向に身体の向きが変化し続けるため, 全身の角運動量は身体長軸にその回転方向の成分をもつことが予想される。しかしながら, 本研究ではそのようには示されず, 頭部胴体部分のみが長軸まわりに角運動量をもった ( $H_{cc'_{\text{Head\&Torso}}}$  の走周期平均値  $0.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 95%信頼区間  $0.3 \times 10^{-3}$  から  $0.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )。このことから, 体幹部が曲走路の周回方向に向き続けるように回転するのは, この角運動量成分により頭部と胴体の方向を曲走路の周回方向へ変化させていたことに起因することが本研究の結果から明らかになった。

## 5. まとめ

本章の結果を以下に要約する.

- 1) 曲線走は, 角運動量ベクトルを曲走路と同じ周回方向へ回転し続ける必要があるが, それは右足接地期において起こり, また, その変化角度の大きさは, 周回方向の反対へと向きを変える左足接地期よりも, 1 走周期をとおして大きい.
- 2) 全身の角運動量の身体長軸成分は, 1 走周期をとおして曲走路と同じ周回方向の成分をもつと予想されるが, その総変化量は 0 である.
- 3) しかし, 頭部と胴体部分はその長軸方向にもつ角運動量成分は, 1 走周期をとおして曲走路と同じ周回方向の成分をもつ.

したがって, 曲線走では, 全身の角運動量の水平成分が接地期に向きを変えること, また, 頭部と胴体部分が身体長軸に角運動量成分をもつこと, これらのことにより, 脚部と体幹部の向きが曲走路の周回方向へ向き続けるため, 身体の向きは曲走路の周回方向へ変化することが可能となる.

## 第4章 総括論議

第2章、第3章で明らかになった曲線走の結果を踏まえ、ここでは曲線走を成立させる身体重心の円運動と身体重心まわりの回転運動に起因する接地期における地面反力について議論する。

### 1 身体重心速度ベクトルの変化からわかる右足接地期の地面反力

曲線走において、走者の身体重心速度（左区間： $9.63 \pm 0.23 \text{m/s}$ 、右区間： $9.64 \pm 0.25 \text{m/s}$ ）、および身体重心速度の水平成分ベクトルが左右の接地期で変化する角度の大きさ・方向（左区間： $3.24 \pm 0.35^\circ$ 、右区間： $3.04 \pm 0.40^\circ$ ）ともに左右差はなかった（図4-1左）。これらは、接地期における地面反力の力積の水平成分ベクトルが左右足において同様であったことを示す。つまり、走者は左右両区間を通じて一定の疾走速度を保ちつつ、かつ身体重心が曲走路に沿って移動するよう向心力方向へ加速していたことを意味する。一方、左右の接地足の踏みだし角度において方向は反対であり、その大きさに有意な差（ $p < 0.05$ ）があった（表2-13）。つまり、左足接地期から右足を踏み出すときは、前のステップとほぼ同じ方向（ $-2.2 \pm 2.2^\circ$ ）に右足を踏み出すが、右足接地期から左足を接地する時は前のステップよりも大きく左方向（ $7.9 \pm 3.0^\circ$ ）にシフトした位置に踏み出していた（図4-1右）。このように、身体重心は左右両区間を通じて曲走路の曲率に合った軌跡を描き移動するものの、接地する足のポジショニングについては、右足はほぼ前方方向へ、左足は曲走路内側へ向けて踏み出すという特徴が明らかとなった。

ストライドとピッチ（一步に要する接地時間と滞空時間の和の逆数）については、ストライド（左区間： $2.14 \pm 0.07 \text{m}$ 、右区間： $2.11 \pm 0.11 \text{m}$ ）と滞空時間（左区間： $0.10$

$\pm 0.01s$ , 右区間:  $0.10 \pm 0.01s$ ) においては有意な差はなく, 接地時間においてのみ右足  $0.097s$  が左足  $0.106s$  より有意に短い結果 ( $p < 0.05$ ) を示した. 上記に述べたように接地期における左右足の力積は同様であるため, 右足の接地時間がより短いことは, 右足接地期により大きな向心力方向成分と鉛直方向成分の地面反力が走者に作用していたことを示すものである.

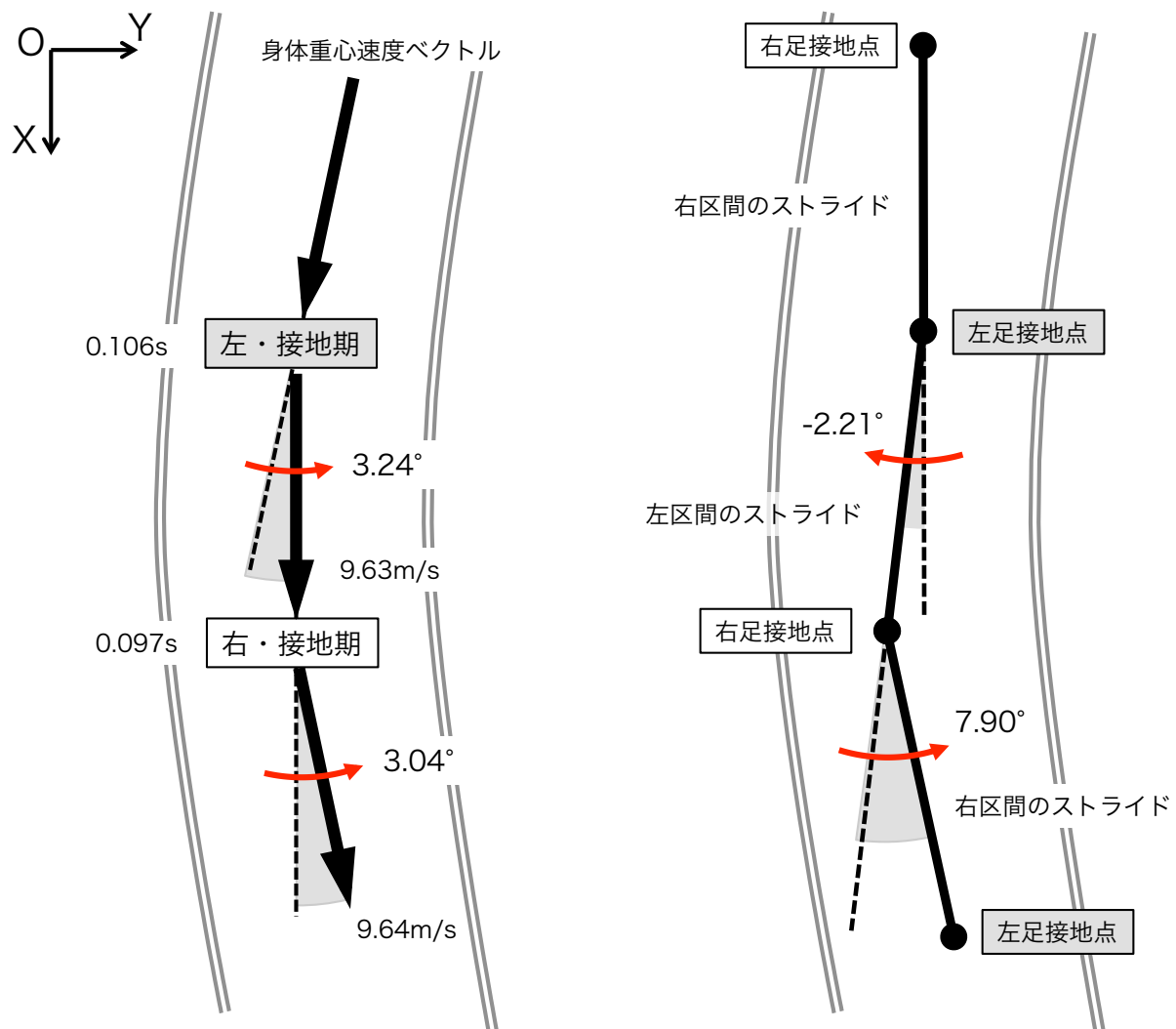


図 4-1 疾走速度と身体重心の速度ベクトルの変化角度および接地時間 (左図) とストライドと接地足の踏み出し角度 (右図)

(左図) 疾走速度 (左区間  $9.63m/s$ , 右区間  $9.64m/s$ ) と身体重心の速度ベクトルの変化角度 (左区間  $3.24^\circ$ , 右区間  $3.04^\circ$ ), および接地時間 (左区間  $0.106s$ , 右区間  $0.097s$ ) を示す.

(右図) 左足から右足を踏み出す角度は  $-2.21^\circ$  で曲走路外側方向であり, 右足から左足を踏み出す角度は  $7.90^\circ$  で曲走路内側方向.



これらのことから、走者は右足接地期の局面において、大きな力を受けつつも、足の運びを調整することで、身体重心の円運動や移動に左右差を生じさせない滑らかな曲線走を可能なものに行っていると考えられる。

## 2 全身の角運動量 $H_x$ , $H_y$ および $H_z$ によって示される角運動量の向きの変化と地面反力

接地期における全身の角運動量の向きや大きさの変化は、身体重心まわりの角力積が走者に働くことによって生じる。この角力積の方向は、走者に作用する地面反力の身体重心まわりのモーメントの方向を意味する。すなわち、全身の角運動量の変化から、その変化を生じさせることができる地面反力の成分が明らかになる。

### ・左足接地期

本研究の結果より、左足接地期における全身の角運動量の水平成分は、鉛直上方からみて時計まわりに回転することを示した ( $\theta_L = -75 \pm 14^\circ$  および図 4-2 の① $H_{LFS}$  から② $H_{LTO}$  への変化)。これは走者の前後軸について前方に向かう角力積が走者に作用したことを示す (図 4-3 上段左)。この角力積の回転方向は走者の前方からみて反時計まわりであるから、地面反力のベクトルは走者の身体重心に対し曲走路内側を通過することがわかる (図 4-3 中段左)。この地面反力は矢状面で鉛直成分と水平成分とに分解できる。左足接地期では、つま先の接地位置は身体重心よりも曲走路外側 ( $D_L = 0.18\text{m}$ ) であるから、地面反力の鉛直成分は身体重心よりも曲走路外側を通過することがわかる (図 4-3 下段左)。また曲線走における地面反力の水平成分は常に向心力方向であることが報告されている (Hamill et al.1987)。よって、地面反力の鉛直成分は身体重心まわりに時計まわりのモーメントを生み出し、水平成分は反時計まわりのモーメン

トを生み出す。これらの合モーメントが左足接地期において反時計まわりであることは、地面反力の水平成分によるモーメントが鉛直成分のそれより大きいことを示す。ゆえに左足接地期において反時計まわりのモーメントを生み出すためには、向心力方向に向く地面反力の水平成分に重要な働きがあると解釈できる（図 4-3 下段左）。

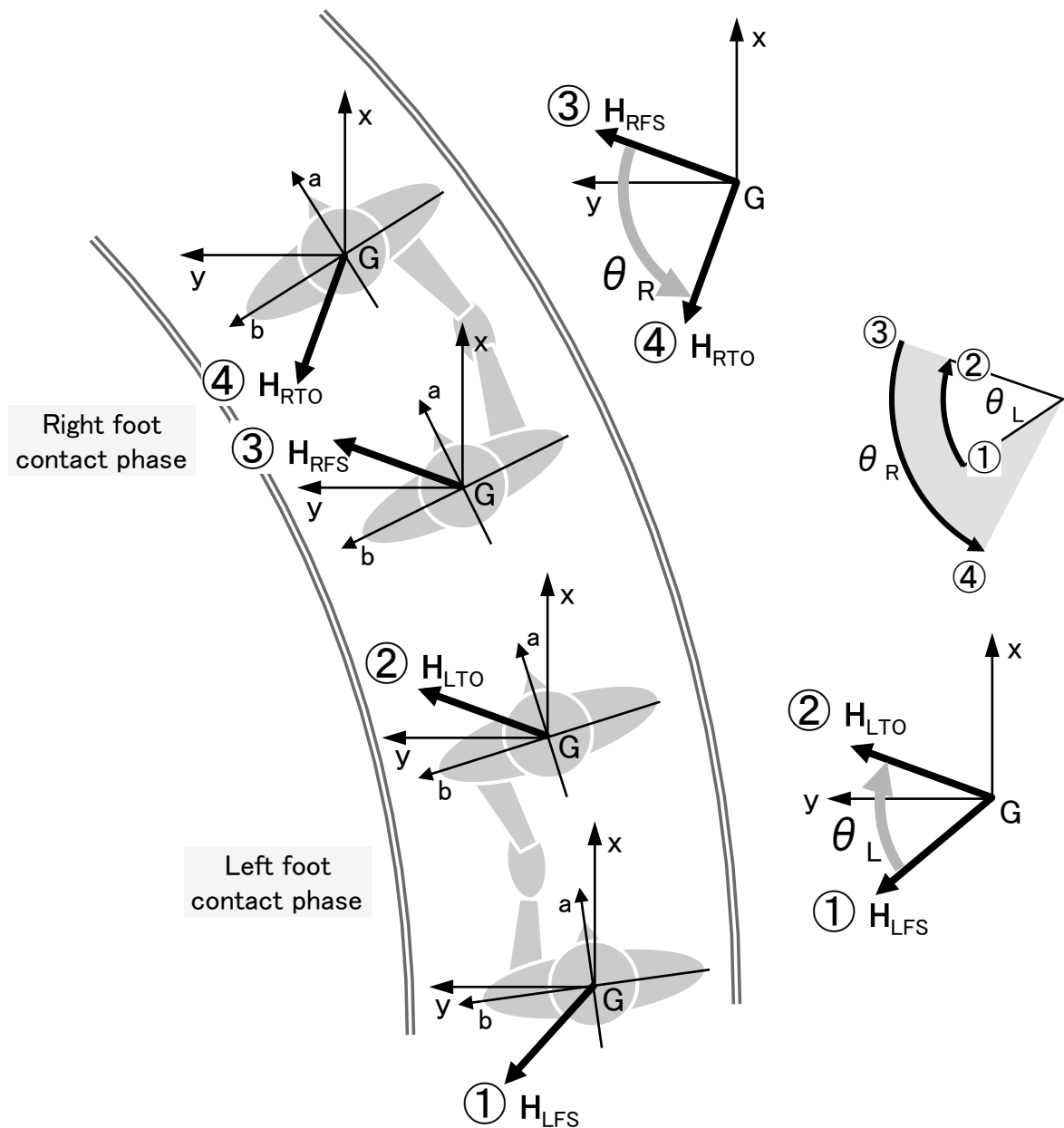


図 4-2 水平面に投影した全身の角運動量

左足接地期における角運動量ベクトルの変化角度  $\theta_L$  は、左足接地時の角運動量ベクトル ( $H_{LFS}$ ) と左足離地時の角運動量ベクトル ( $H_{LTO}$ ) とがなす角度で表す。同様に、右足接地期における角運動量ベクトルの変化角度  $\theta_R$  は、右足接地時の角運動量ベクトル ( $H_{RFS}$ ) と右足離地時の角運動量ベクトル ( $H_{RTO}$ ) とがなす角度で表す。

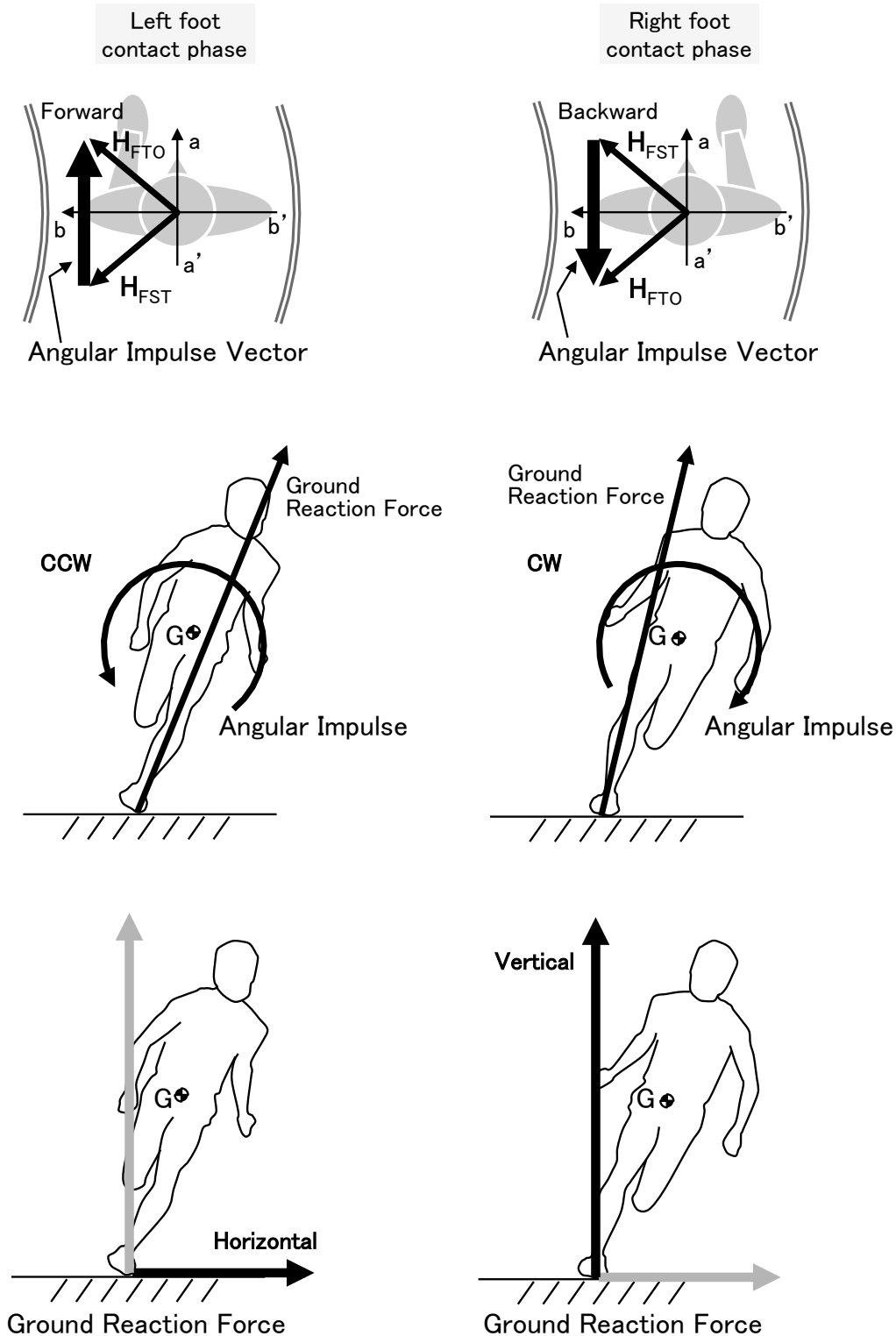


図 4-3 角運動量の変化と角力積, および地面反力の関係図

上段: 接地期における前まわり角運動量ベクトルの向きの変化 ( $H_{FST}$ : 接地時の角運動量ベクトル,  $H_{FTO}$ : 離地時の角運動量ベクトル) と角力積の方向. 中段: 前後軸  $aa'$  まわりの角力積の回転方向とその回転を作り出す地面反力の身体重心に対する作用方向. 下段: 中段の角力積の回転方向と同じ回転方向の力のモーメントをつくる地面反力の成分.

・右足接地期

右足接地期についても同様に分析すると、全身の角運動量の水平成分は、鉛直上方からみて反時計まわりの回転を示した ( $\theta_R = 84 \pm 14^\circ$  および図 4-2 の③ $H_{RFS}$  から④ $H_{RTO}$  への変化)。これは走者の前後軸について後方に向かう角力積が走者に作用することを示す (図 4-3 上段右)。この角力積は、走者の前方からみて時計まわりの回転方向であるから、地面反力のベクトルは走者の身体重心に対し曲走路外側を通過することがわかる (図 4-3 中段右)。この地面反力の鉛直成分によるモーメントの方向は、つま先点の接地位置が身体重心よりも曲走路外側であることから ( $D_R = 0.25\text{m}$ ) 時計まわりを示す (図 4-3 下段右)。また地面反力の水平成分は向心力方向であることが先行研究 (Hamill et al.1987) で明らかにされているため、この成分によるモーメントは反時計まわりであることがわかる。これらの成分による合モーメントが右足接地期において時計まわりであることは、地面反力の鉛直成分によるモーメントが水平成分のそれより大きいことを示す。よって右足接地期に作用する地面反力の時計まわりのモーメントは、その鉛直成分に重要な働きがあると解釈できる (図 4-3 下段左)。

以上のように、接地期における全身の角運動量の変化から、右足接地期は地面反力の鉛直成分が、左足接地期は地面反力の向心力方向の水平成分が、全身の角運動量の向きの変化に貢献することが明らかとなった。さらに、右足接地期における  $\theta_R$  の角度変化の方向が曲走路の周回方向と同じであったこと、 $\theta_R$  の絶対値が左足接地期の  $\theta_L$  の絶対値と比べて有意に大きな値を示したことは、曲走路の周回方向に全身の角運動量の向きを変化させ続ける曲線走において、右足接地期が重要な役割を果たすことを明示するものである。また、右足接地期において身体に作用する地面反力の鉛直成分が、全身の角運動量の向きを変化させるための主要な力の成分であることが明らかとなった。

本研究で得られた知見は、身体重心が水平面上で弧を描くように曲走路を移動し、身体の向きが曲走路の接線方向に向き続ける曲線走（本研究では陸上競技場の曲走路で曲率半径が39.148m）において、つまり、角運動量ベクトルの向きが変化し続ける運動において、その力学的仕組みを説明するものである。したがって、サッカーなどのフィールド競技でみられるカッティングのように、進行方向を急に変更する動作の力学的仕組みを説明するものではない。このような動作では、必ずしも身体重心の進行方向の変化に伴って、身体の向きも同じ方向に変化するとは限らないため、角運動量ベクトルの向きが、身体の移動に伴って変化しない可能性が考えられる。また、身体に作用する角力積の方向や、それを生み出す地面反力の成分も曲線走とカッティング動作では異なることが考えられる。したがって、陸上競技の曲線走とカッティングのような方向変更動作を、同一の力学的現象として捉えることはできないため、本研究より得られた知見をカッティング動作に応用するには、十分な考慮が必要である。しかし、本研究で明らかになった右足接地期における地面反力の鉛直成分の役割やその重要性は、曲線走の走法やスパイクシューズの開発への提言として応用が期待できると考えられる。

## 第 5 章 結論

本学位論文の目的は、陸上競技における曲線走の特徴である、進行方向を変化させ、かつ、身体の向きも常に変化させる曲線走の成り立ちを深く理解するために、その力学的メカニズムを明らかにすることであった。その結果、曲線走を成立させる身体重心の曲線運動と、身体重心まわりの回転運動に起因する接地期に身体に作用する地面反力について以下のことが明らかとなった（図 5-1）

- 1) 曲線走における身体重心の円運動は、左右の接地期に身体へ作用する地面反力の向心力成分によって起こり、その大きさは右足接地期においてより大きいこと。また、右足から左足を踏み出す足の運びが曲走路内側へと大きくなされたが、身体重心の移動は滑らかであったこと。
- 2) 身体の向きも常に変化させる曲線走は、曲走路の周回方向へ全身の角運動量の向きを変化させ続ける運動であり、その向きの変化角度は、曲走路と同じ周回方向へ回転する右足接地期が、反対方向へ回転する左足接地期よりも大きいこと。また、右足接地期において、走者に作用する角力積の回転方向は、地面反力の鉛直方向成分による身体重心まわりのモーメントの方向と一致すること。

以上のように、右足接地期に走者に作用する地面反力が、曲線走の運動を成り立たせる力学的メカニズムとして重要な働きをすることが示された。

# 曲線走の2つ向きの変化

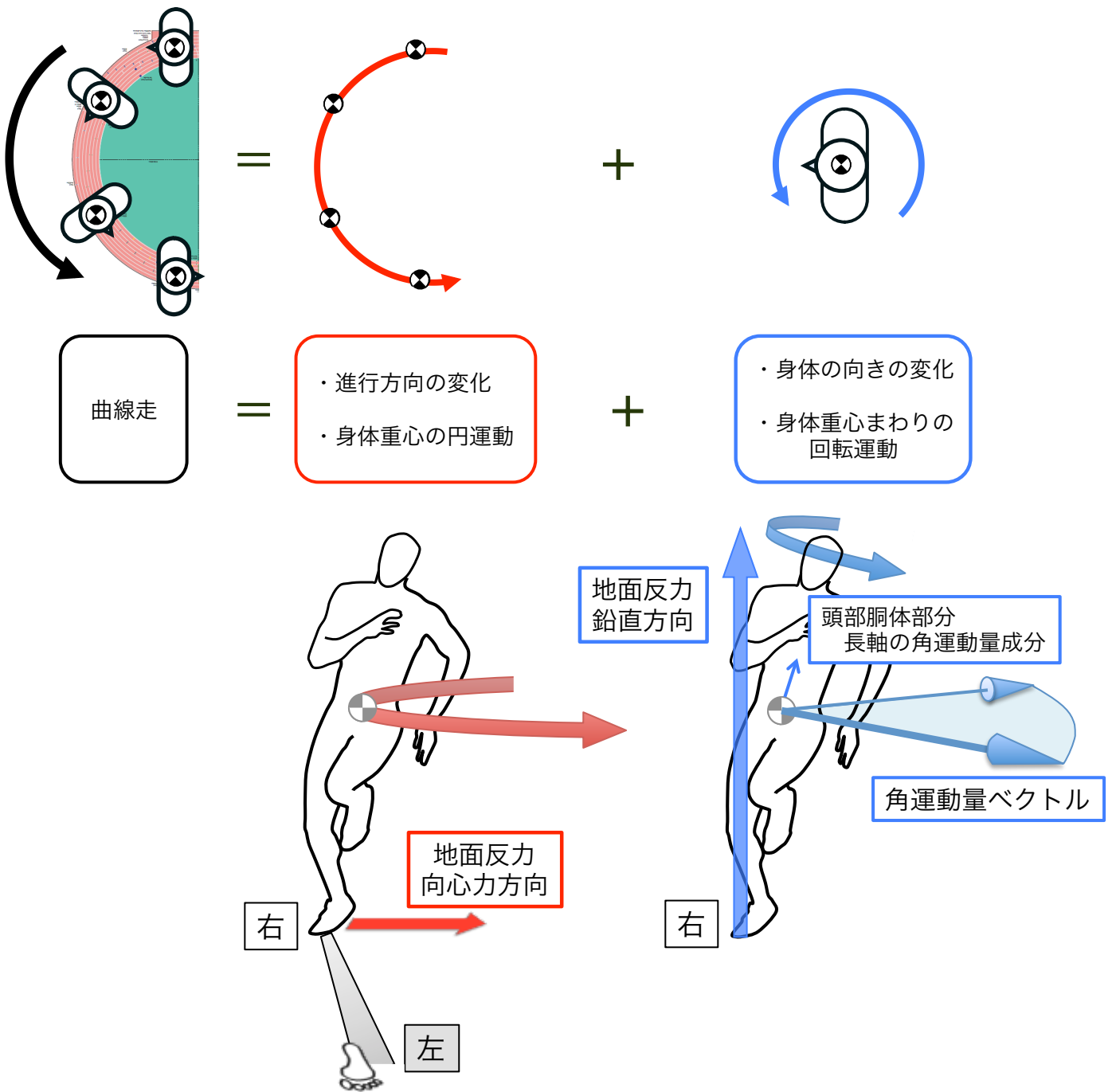


図 5-1 曲線走を成り立たせる 2 つの向きの変化

(上段の模式図) 曲線走は、進行方向の向きと身体の向きの 2 つの向きの変化によって表すことができる。進行方向の向きの変化は身体重心の円運動で置き換えられ、身体の向きの変化は身体重心まわりの全身の回転運動で置き換えられる。(下段の人体図) 身体重心の円運動は、右足接地期に地面反力の向心力方向成分がより強く働くこと、右足から左足を踏み出す方向をコントロールすることが左足に比べ特徴的であり、身体重心まわりの回転運動は、右足接地期における地面反力の鉛直成分が、前まわり角運動量ベクトルを身体の後方へ回転させること、頭部胴体部分に曲走路の周回方向に向かう角運動量成分を持つことによって可能となる。

## 参考文献

- 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(1部 形態と運動の計測). バイオメカニズム11, 23-33.
- Alt, T., Heinrich, K., Funken, J., Potthast, W., 2015. Lower extremity kinematics of athletics curve sprinting. *J. Sports Sci.* 33, 552-560.
- Chang, Y.H., Kram, R., 2007. Limitations to maximum running speed on flat curves. *J. Exp. Biology.* 210, 971-982.
- Churchill, S.M., Salo, A.I.T., Trewartha, G., 2015a. The effect of the bend on technique and performance during maximal effort sprinting. *Sports Biomechanics* 14, 106-121.
- Churchill, S.M., Trewartha, G., Bezodis, I.N., Salo, A.I.T., 2015. Force production during maximal effort bend sprinting: Theory vs reality. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 26, 1171-1179.
- 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.
- Dapena, J., 1980. Mechanics of rotation in the Fosbury-flop. *Med. Sci. Sports Exerc.* 12 (1): 45-53.
- Greene, P.R. 1985. Running on flat turns: experiments, theory, and applications. *J. Biomech. Eng.* 107, 96-103.
- Hamill, J., Murphy, M., Sussman, D., 1987. The effects of track turns on lower extremity function. *J. Appl. Biomechanics* 3, 276-286.
- Hay, J. G., 1993. *Track and field: running. The biomechanics of sports techniques*



(4th ed.). Prentice Hall, pp. 396–411.

Hinrichs, R.N., 1987. Upper extremity function in running.II: Angular momentum considerations. *Int. J. Sports Biomechanics* 3. 242-263.

Ishimura, K., Tsukada, T. Sakurai, S., 2013. Relationship between sprint performance and stride parameters in curved sprinting. *International Symposium on Biomechanics in Sports: Conference Proceedings Archive* 31.

Quinn, M.D., 2009. The effect of track geometry on 200- and 400-m sprint running performance. *J. Sports Sci.* 27, 19-25.

Smith, N.A., Dyson, R.J., Hale, T., 1997. Lower extremity muscular adaptations to curvilinear motion in soccer. *J. Human Movement Studies* 33, 139-153.

Stoner, L.J., Ben-Sira, D., 1978. Sprinting on the curve, In Terauds, J. and Dales, G.G. (ed.), *Science in athletics*, 167-173.

Viellehner, J., Heinrich, K., Funken, J., Alt, T., Potthast, W. 2016. Lower extremity joint moments in athletics curved sprinting. *International Conference of Biomechanics in Sports* 34.

Wilson, D., Bryborn, R., Guy, A.I, Katz, D., Matrahazi, I., Meinel, K., Salcedo, J., Wauhkonen, K., 2008. *IAAF Track and Field Facilities Manual 2008 Edition*. 14-17.

Winter, D.A., 1990. *Biomechanics and motor control of human movement*. 36-41, John Wiley & Sons, New York.

Yu, B., Hay, J.G., 1995. Angular momentum and performance in the triple jump: A cross-sectional analysis. *Journal of Applied Biomechanics* 11, 81-102.

Yu, B., Gabriel, D., Noble, L., An, K., 1999. Estimate of the optimum cutoff

frequency for the butterworth low-pass digital filter. *Journal of Applied Biomechanics* 15, 318-329.

## 謝辞

本学位論文は、矢内利政教授の御指導のもと執筆いたしました。中京大学と早稲田大学の博士課程では中途退学や復学などいろいろございましたが、長きにわたり継続して変わらぬ御指導を賜りましたこと、ここに厚く御礼申し上げます。矢内先生からは、身体運動の力学的研究に対して、合理的な方法で結果を出し、そこから力学原理に沿って論理的に結論を導くよう努めること、また、そのためには何事に対しても決してあきらめない強い意志を持つことを学ばせていただきました。ことを成すものと、成さざるものの違いをよく理解できたつもりでございます。

また、副査でいらっしゃいます彼末一之教授や川上泰雄教授、また研究室の皆様にも合わせて感謝申し上げます。多くの方々からの有形無形の助言や叱咤激励は、刺激となり論文執筆はもちろん研究に対する姿勢とは何かにおいて大変貴重な教えを賜りました。これに深く感謝申し上げ、末筆であり、大変勝手ではございますが、これにてお礼とさせていただきます。

2019年7月 東 洋功