

B-17

短距離走における曲走路への進入局面での姿勢変化に必要な要件

A requirement for the body orientation change
during the approach phase to the bend section in sprinting○正 石塚 辰郎^{*1}, 正 仰木 裕嗣^{*1}
大沼 勇人^{*2}, 永原 隆^{*3}, 和田智仁^{*3}Tatsuro ISHIZUKA^{*1}, Yuji OHGI^{*1},
Hayato OHNUMA^{*2}, Ryu NAGAHARA^{*3} and Tomohito WADA^{*3}^{*1} 慶應義塾大学 Keio University^{*2} 関西福祉大学 Kansai University of Social Welfare^{*3} 鹿屋体育大学 National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

When a runner is approaching bend section, his trunk leans toward the inside of the track. The authors assumed that the ground reaction force moment around COG would contribute to inclination of runner's trunk during the approach phase to bend section. The purpose of this research was to examine how much the ground reaction force moment around COG contributes to inclination of runner's trunk during the approach phase to bend section. The authors conducted an experiment to obtain kinetic and kinematic parameters using 50 force platforms and the motion capture system during the approach phase to bend section (radius:38.2m). As a result, clockwise and anticlockwise ground reaction force moment of the antero-posterior axis around COG is balanced during the approach phase to bend section. Therefore, it is suggested that ground reaction force moment around COG is not a key factor for inclination of runner's trunk during the approach phase to bend section. Furthermore, the authors assume that gyroscopic effect by arm motion during the flight phase is a key factor for inclination of runner's trunk during the approach phase to bend section.

Key Words : Sprint Running, Bend Section, Mechanism, Orientation Change, Moment

1. 緒言

陸上競技短距離種目では、200m以上の種目で曲走路を疾走する局面が存在する。曲走路での疾走は大局的に見れば円運動だと思われがちだが、ランニングはジャンプの連続であるという前提を踏まえれば、曲走路での疾走は円運動ではなく多角形を描くことになる。つまり、地面反力が作用する接地中しか進行方向を変えることはできないということである。陸上競技では常に反時計回りに疾走するので、曲走路では左右どちらの足で接地した場合でも走路の内側に方向転換を続ける必要がある。

過去の研究から、直走路での疾走と曲走路での疾走では、疾走姿勢や走者に作用する地面反力が異なることがわかっている(Churchill, et al. 2015, Churchill, et al. 2016, Ohnuma, et al. 2018)。疾走姿勢に関しては、直走路で直立していた体幹が曲走路に進入すると走路に対して内倒するという現象が見られる。曲走路で走者が体幹を内倒させるのは、左右どちらの足で接地しても身体重心よりも走路の外側に接地することで地面反力が走路の内側方向に作用し、走路の内側に方向転換を続けるためだと考えられる。よって、曲走路に進入する際に体幹を内倒させることは、曲走路を走る上で重要なスキルであると予想される。しかし、これまでの研究では、走者がどのようなメカニズムで疾走姿勢を変化させているかはわかっていない。走者が姿勢を変化させる力学的な要因の1つとして地面反力によるモーメントが考えられる。SHD2018での筆者らの発表では、地面反力によるモーメントの釣り合いによって、曲走路に進入して内倒した体幹が一定の姿勢角を保っていることを明らかにした(石塚他, 2018)。一方で、直走路から曲走路に進入する際にどのようなメカニズムで内倒という姿勢変化が生じているかはわかっていない。そこで、本研究では、直走路から曲走路に進入する局面での地面反力によるモーメントの時系列変化から走者がどのような力学的な要因で姿勢を変化させているかを検討する。

2. 目的

本研究の目的は、直走路から曲走路に至る曲がり始めで体幹が内倒する際に地面反力によるモーメントの釣り合いがどのように変化するかを検討し、曲がり始めの姿勢変化のきっかけの解明につなげることである。

3. 方法

3・1 倫理審査

本実験は、慶應義塾大学 SFC 実験・調査倫理委員会において、研究課題「スプリント疾走中のコーナリングにおけるバイオメカニクス的研究」として 2017 年 6 月 26 日に承認を受けて行った。

3・2 実験環境および機器設備

フォースプレートが 50 台敷き詰められた 50m の直走路の 40m 付近から半径 38.2m の曲走路を作成した。本実験では、直走路 50m を疾走する試技 (Straight Through) と、直走路 40m を経て曲走路に進入する試技 (To Bend Section) の 2 種類の試技を実施するために、直走路の 30m 付近から直走路の 45m 付近までと作成した曲走路までを囲むようにモーションキャプチャカメラ (MAC3D, Raptor-12HS) を 32 台設置した。直走路の右方向を X 軸、前方向を Y 軸、上方向を Z 軸として、グローバル座標系を定義した。モーションキャプチャシステムの原点を元に解析を行った。また、直走路から曲走路へ切り替わりを示す線を移行線 (Transition Line) とする (図 1)。

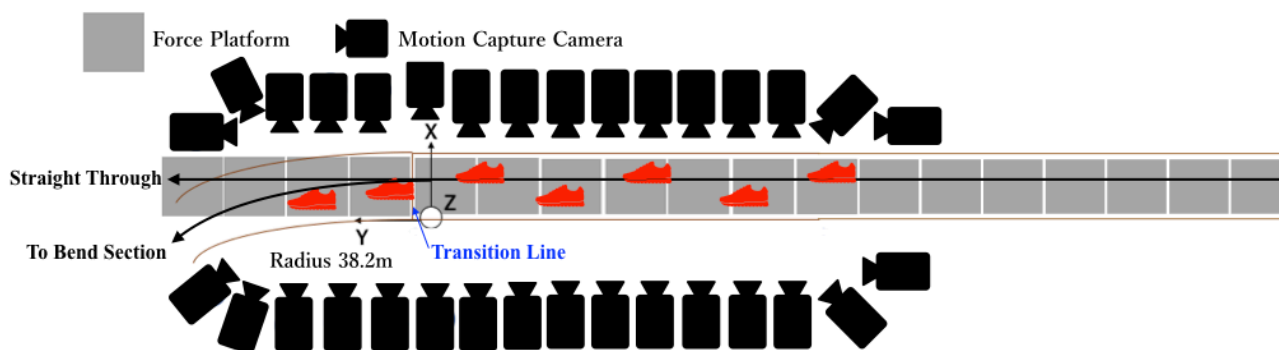


Fig1: Camera Set-up

3・3 被験者および測定

陸上競技短距離種目を専門とする大学生競技者 10 名を対象に実験を行った。本実験では、直走路を経て曲走路に進入する試技を 5 回、直走路のみを疾走する試技を 2 回、計 7 回の試技を各被験者に行ってもらった。

実験に先立ち、疾走中の被験者の全身の 3 次元運動を捉えるために、全身の解剖学的標識点に反射マーカークー計 43 個を貼付した。マーカークーは台座を介して両面テープで固定した。被験者に対しては、主観的強度で 9 割程度の努力度で疾走するように指示した。

モーションキャプチャカメラは 250Hz、モーションキャプチャシステムの計測区間のフォースプレートは 1000Hz で計測を行い、解析の際にモーションキャプチャシステムにフレーム数を合わせるようにした。

3・4 データ処理

10 名の被験者の試技のうちそれぞれマーカークーの欠損の少ない試技について解析を行った。モーションキャプチャシステムから得られた身体計測点 43 点の 3 次元座標とフォースプレートから得られた地面反力は、Butterworth 型ローパスフィルターを用いて平滑化した。遮断周波数は、それぞれ、12Hz、75Hz とした。

3・5 体幹の姿勢

本研究では、直走路から曲走路に進入する際にどのように姿勢が変化するかを定量化した。体幹が剛体であると仮定し、貼付した 3 点のマーカークーから体幹の局所座標系を算出し、体幹の局所座標系の方向余弦行列

のロール・ピッチ・ヨー角を算出した。以下に体幹の局所座標系の定義，ロール・ピッチ・ヨー角の算出で用いた変数の定義を示す（表 1，図 2）。

Table 1 Variables for Kinematics

\mathbf{r}_{RGT}	Position Vector of Right Greater trochanter
\mathbf{r}_{LGT}	Position Vector of Left Greater trochanter
\mathbf{r}_{GT}	Position Vector of Midpoint between Right and Left Greater trochanter
\mathbf{r}_{SMS}	Position Vector of Superior Margin of the Sternum
\mathbf{Trunk}_{ip}	Provisional i Axis Unit Vector of Trunk Local Coordinate System
\mathbf{Trunk}_i	i Axis Unit Vector of Trunk Local Coordinate System
\mathbf{Trunk}_j	j Axis Unit Vector of Trunk Local Coordinate System
\mathbf{Trunk}_k	k Axis Unit Vector of Trunk Local Coordinate System
\mathbf{E}	z Axis Unit Vector of Curved Path Coordinate System
\mathbf{R}_i	rotation matrix around i Axis
\mathbf{R}_j	rotation matrix around j Axis
\mathbf{R}_k	rotation matrix around k Axis
\mathbf{R}	rotation matrix
φ_{Trunk}	Roll Angle of Trunk
θ_{Trunk}	Pitch Angle of Trunk
ψ_{Trunk}	Yaw Angle of Trunk

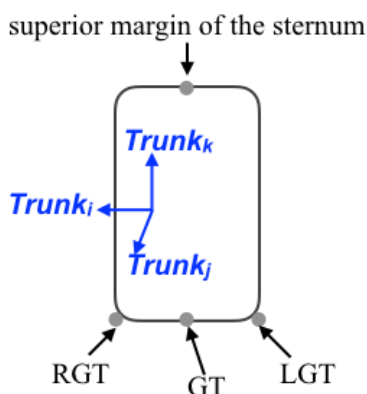


Fig2: Local Coordinate System of Trunk Segment

局所座標系の方向余弦行列の算出方法

左右の大転子の中点から右大転子に伸びるベクトルを体幹の局所座標系の仮の i 軸，左右の大転子の中点から胸骨上縁点に伸びるベクトルを k 軸として，k 軸と仮の i 軸の外積をとり，体幹を背中から腹部に貫く j 軸を算出した。さらに，j 軸と k 軸の外積をとり，i 軸を算出した。算出した i, j, k 軸の単位ベクトルを用いて体幹の局所座標系の方向余弦行列 \mathbf{E} を算出した。

$$\mathbf{Trunk}_{ip} = (\mathbf{r}_{RGT} - \mathbf{r}_{GT}) / \sqrt{(RGT_x - GT_x)^2 + (RGT_y - GT_y)^2 + (RGT_z - GT_z)^2} \quad (1)$$

$$\mathbf{Trunk}_k = (\mathbf{r}_{SMS} - \mathbf{r}_{GT}) / \sqrt{(SMS_x - GT_x)^2 + (SMS_y - GT_y)^2 + (SMS_z - GT_z)^2} \quad (2)$$

$$\mathbf{Trunk}_j = \mathbf{Trunk}_k \times \mathbf{Trunk}_i \quad (3)$$

$$\mathbf{Trunk}_i = \mathbf{Trunk}_j \times \mathbf{Trunk}_k \quad (4)$$

$$E = \begin{pmatrix} Trunk_i \\ Trunk_j \\ Trunk_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Trunk_{ii} & Trunk_{ij} & Trunk_{ik} \\ Trunk_{ji} & Trunk_{jj} & Trunk_{jk} \\ Trunk_{ki} & Trunk_{kj} & Trunk_{kk} \end{pmatrix} \quad (5)$$

回転行列(i→j→k)の算出方法

式5でi軸, j軸, k軸の各軸の回転行列を示す. i軸, j軸, k軸の順で回転させる場合の回転行列は, 式6のように算出できる.

$$R_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, R_j = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, R_k = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R = R_k \cdot R_j \cdot R_i = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \psi \sin \varphi \sin \theta + \cos \varphi \sin \psi & -\cos \varphi \cos \psi \sin \theta + \sin \varphi \sin \psi \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & \cos \psi \sin \varphi + \cos \varphi \sin \theta \sin \psi \\ \sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

体幹の局所座標系の方向余弦行列のロール・ピッチ・ヨー角の算出方法

式4で算出した体幹の局所座標系の方向余弦行列と式6で算出した回転行列が等しいことから以下のようにオイラー角を定義することができる.

$$E = R \quad (8)$$

$$\varphi_{Trunk} = -\tan^{-1} \frac{R_{kj}}{R_{kk}} = -\tan^{-1} \frac{Trunk_{kj}}{Trunk_{kk}} \quad (9)$$

$$\theta_{Trunk} = \sin^{-1} R_{ki} = \sin^{-1} Trunk_{ki} \quad (10)$$

$$\psi_{Trunk} = -\tan^{-1} \frac{R_{ji}}{R_{ii}} = -\tan^{-1} \frac{Trunk_{ji}}{Trunk_{ii}} \quad (11)$$

3・6 座標系

曲走路を疾走する場合, 直走路を基準にした座標系(O-XYZ系)では, 被験者の進行方向がY軸方向とは一致しない. そこで, 曲走路の回転中心を原点として, 被験者の移動軌跡に合わせて時々刻々回転する曲走路座標系(o-xyz系)を定義した(図3). 曲走路の回転中心から被験者の重心位置の路面への投影点に伸びるベクトルをx軸, 曲走路の回転中心から鉛直方向に伸びるベクトルをz軸として, x軸の単位ベクトルとz軸の単位ベクトルを外積することにより得られたベクトルをy軸の単位ベクトルとした. これによりy軸が常に走者の進行方向となる. 以降, 曲走路に進入する試技で解析した力学的変数は全て曲走路座標系で示した.

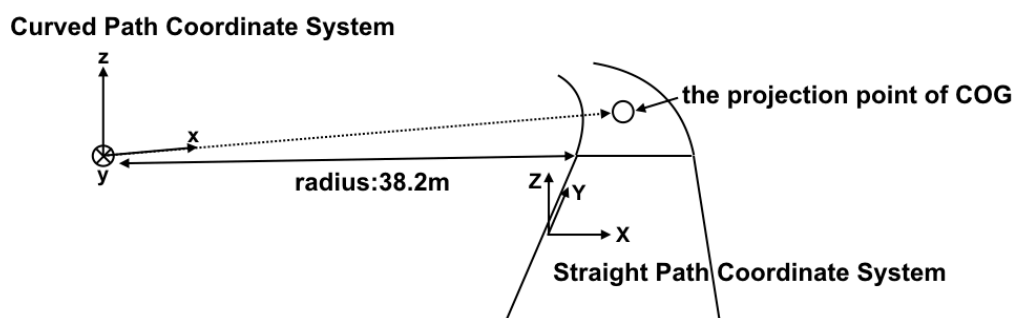


Fig.3: Curved Path Coordinate System

3・7 力学モデル

本研究で用いたモデルは長さ可変3次元倒立振り子モデルである。質量中心位置は身体重心推定式（阿江他，1992）を用いて推定した。解析したパラメーターは以下の表2と図4に示す。また，式11に地面反力に起因する重心周りのモーメント，式12に地面反力に起因する重心まわりのモーメントの角力積の算出方法を示す。

Table2 Variables for Kinetics

COG	Center of Gravity
COP	Center of Pressure
r	Position Vector from COP to COG
F_g	Ground Reaction Force
FM	Free Moment
M_{COG}	Moment of COG
I_{MCOG}	Impulse of Moment of COG

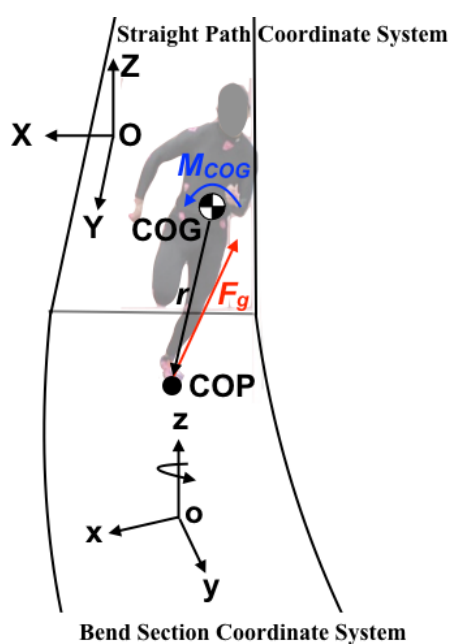


Fig.4: Kinetic Model

$$M_{COG} = r \times F_g + FM \quad (12)$$

$$I_{MCOG} = \int_{t_0}^{t_1} M_{COG} \quad (t_0 = \text{contact}, t_1 = \text{toe off}) \quad (13)$$

4. 結果

以下に、体幹の姿勢、重心まわりのモーメント、重心まわりのモーメントの角力積の代表例を示す。移行線以降に接地した歩数を1歩目、2歩目とし、移行線以前に接地した歩数は-1歩目、-2歩目と遡って数えることとする。

4・1 体幹の姿勢

以下に体幹の姿勢角を示す(図5)。図5の左側が直走路のみを疾走する試技(Straight Path)、右側が直走路から曲走路へ進入する試技(To Bend Section)である。上から φ_{Trunk} (i軸まわり)、 θ_{Trunk} (j軸まわり)、 ψ_{Trunk} (k軸まわり)の結果となる。 φ_{Trunk} は直走路のみの試技、曲走路へ進入する試技のどちらも-20度から-25度ほど前傾している。 θ_{Trunk} は、直走路のみの試技で5度から-5度の間を周期的に変化している。一方で、曲走路へ進入する試技では、-4歩目までは5度から-5度の間を周期的に変化しているが、-3歩目からは徐々に負の値に振れている。つまり、-3歩目から徐々に体幹が走路に対して内倒していることがわかる。 ψ_{Trunk} は、直走路のみの試技、曲走路へ進入する試技のどちらも20度から-20度の間を周期的に変化している。

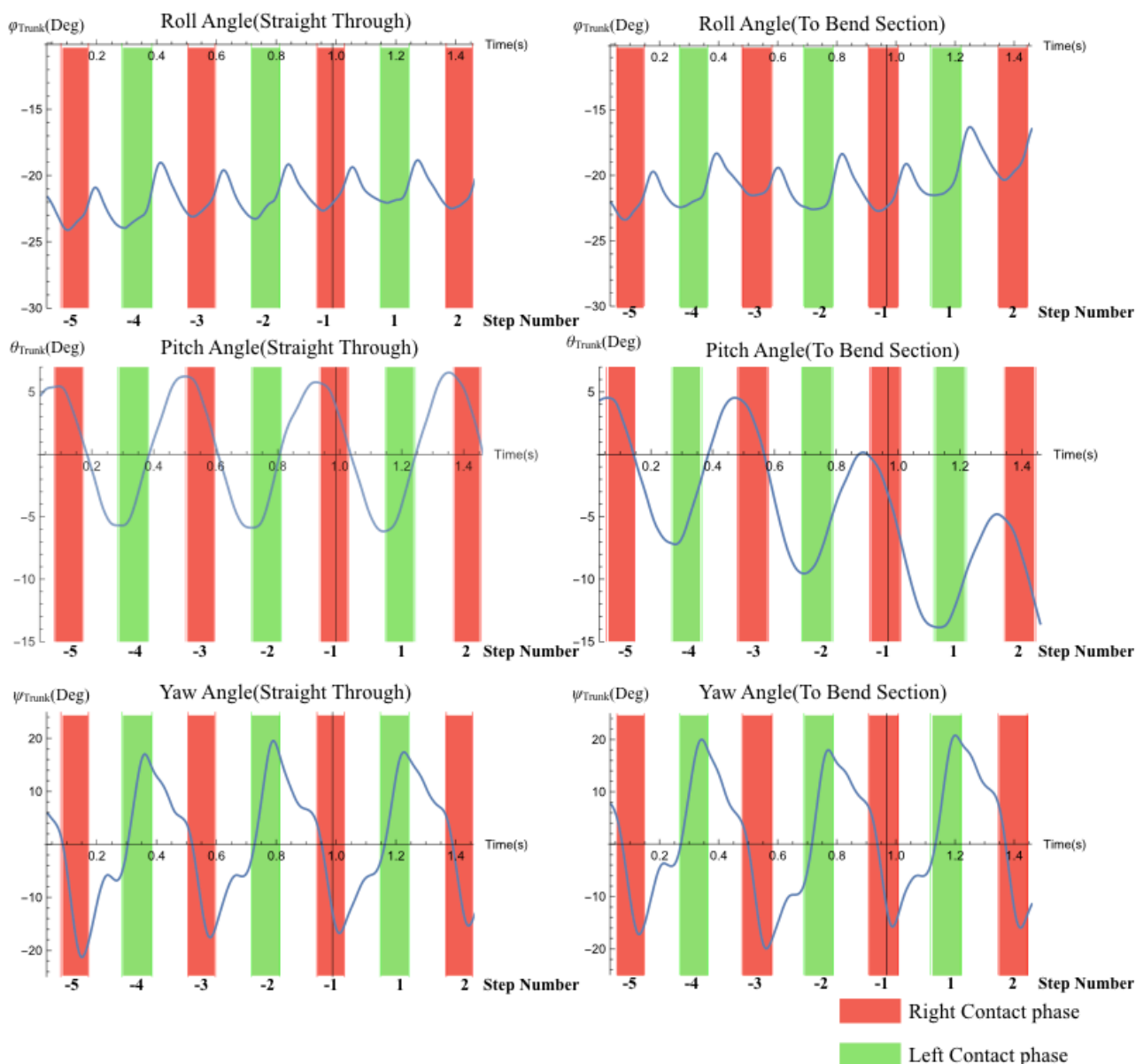


Fig5: Trunk Orientation

4・2 重心まわりのモーメント

代表例として示した θ_{Trunk} (j軸まわり)の結果では、曲走路に進入する際に-3歩目から徐々に内倒していくことがわかった。そこで、走者が姿勢を変化させる力学的な要因の1つとして考えられる地面反力による重心の前後軸まわりのモーメント (y軸) を示す (図6)。

重心の前後軸まわりのモーメント (y軸) は、直走路のみを疾走する試技 (図6左) と曲走路へ進入する試技 (図6右) のどちらも右足接地期は接地初期に主に負の値 (身体を内倒させるモーメント)、左足接地期は主に正の値 (身体を外倒させるモーメント) である。曲走路へ進入する試技では-3歩目から θ_{Trunk} (j軸まわり) に変化が見られたが、重心の前後軸まわりのモーメント (y軸) でも-3歩目以降は直走路のみの試技に比べて左足接地時の最大値が大きくなるといった変化が見られている。また、体幹が内倒し始めるタイミングで右足接地期に負の値 (身体を内倒させるモーメント) が小さくなることはなかった。

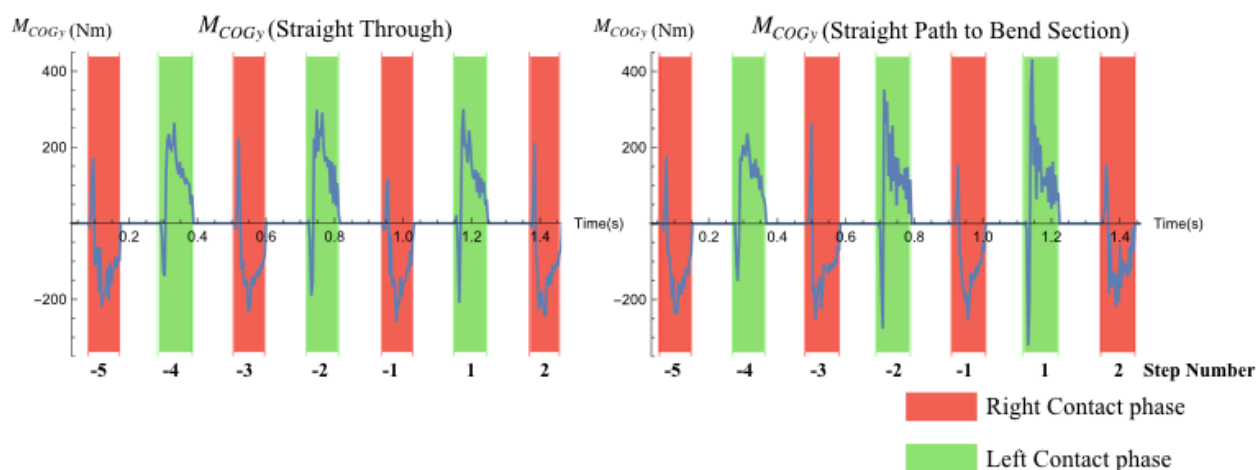


Fig6: Antero-Posterior axis of Moment around COG

次に、重心の前後軸まわりのモーメント (y軸) の角力積を示す (図7)。ここでは被験者の体重で除した結果を示す。

重心の前後軸まわりのモーメント (y軸) の角力積は、直走路のみを疾走する試技 (図7左) と曲走路へ進入する試技 (図7右) のどちらも右足接地時は-0.12 から-0.15 Nm/kg, 左足接地時は0.14 から0.15 Nm/kg である。曲走路へ進入する試技であっても、走行の1周期 (右足が接地してから右足が接地するまで) で見れば、重心の前後軸まわりのモーメント (y軸) の角力積は、ほぼ±0になることがわかった。つまり、地面反力に起因する重心まわりのモーメントは疾走時の姿勢変化に及ぼす原因とはなっていない可能性が示唆される。

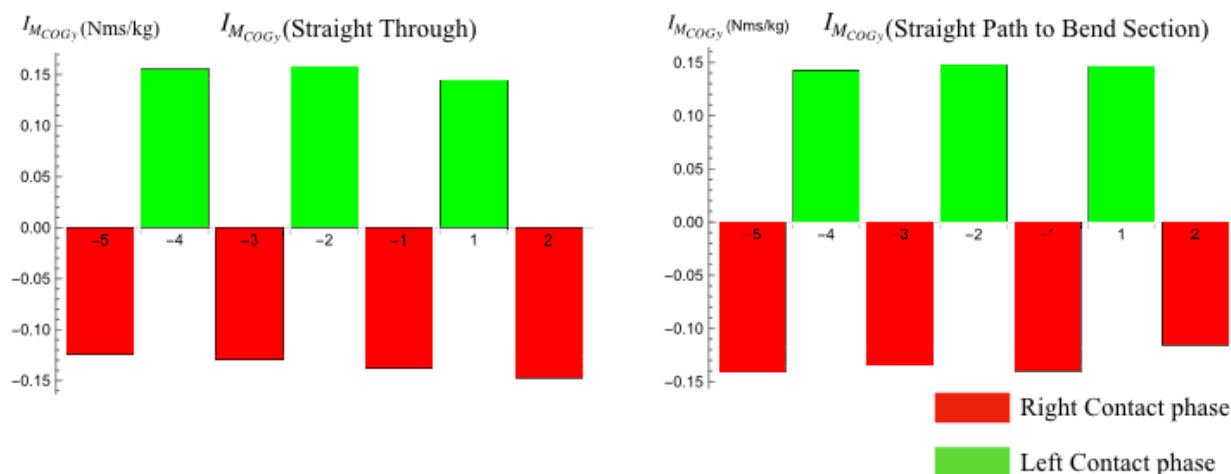


Fig7: Impulse of Antero-Posterior axis of Moment around COG

5. 考察

5・1 体幹の姿勢に関して

曲走路に進入する試技では、曲走路に進入する前から徐々に体幹が内倒していくことがわかった。また、傾き始めるタイミングは、代表例として示したものでは-3歩目であったが、他の被験者では-5歩目や-1歩目など様々な傾向が見られた。これは走者によって、曲走路に進入する戦略が異なる、個人差が大きい可能性を示唆していると考えられる。傾き始めるタイミングに関しては、さらなる検証が必要になると考えている。

5・2 重心まわりのモーメントに関して

重心の前後軸まわりのモーメント（y軸）は、右足接地期と左足接地期で正負が逆転したような波形が見られる。接地期だけで見れば周期的な波形であり、曲走路に進入する試技で体幹が内倒し始めるタイミングで負の値（内倒させるモーメント）が大きくなることは見られなかった。重心の前後軸まわりのモーメント（y軸）の角力積で見ても、走行の1周期で見ればほぼ±0になることがわかった。これらのことから、地面反力に起因する重心まわりのモーメントは曲走路進入時に体幹を内倒させる原因とはなっていないと考えられる。

5・3 角運動量保存則による姿勢変化の可能性

では、どのようなメカニズムで曲走路進入時に体幹を内倒させているのかを考えると、角運動量保存則による姿勢変化の可能性が考えられる。空中では重力以外の外力が生じないことから全身の角運動量は保存される。角運動量が保存されるのであれば姿勢変化は生じないように感じるが、実際には飛込み競技のように空中でひねり技を行うことが可能である。このような現象はジャイロ効果と呼ばれる。疾走では、直走路での前後軸まわり、鉛直軸まわりの脚がもつ角運動量は小さく、大きな左右軸まわりの角運動量を持っていると予想される。そこで、方向転換が生じ始めるタイミングで上肢を左右非対称に鉛直軸周りで動かすと、前後軸周りの回転が生じ、身体が走路の内側に傾くことが可能になると筆者らは予想している。曲走路に進入する局面では、ジャイロ効果によって体幹の内倒が生じるという可能性が高いと筆者らは考えている。

6. 結言

本研究で明らかになったことを以下に示す。

1. 曲走路に進入する前から徐々に体幹が内倒していて、内倒し始めるタイミングは個人差があること
2. 地面反力に起因する重心まわりのモーメントは曲走路進入時に体幹を内倒させる原因とはなっていないと考えられること

今後は、剛体リンクモデルを用いて、各体節の角運動量、全身の角運動量を算出し、角運動量保存則による姿勢変化が曲走路を疾走し始めるきっかけであるのか検証していく。

文 献

- (1) Churchill S. M., Trewartha G., Bezodis, I. N. and Salo. A. I. T., Force production during maximal effort bend sprinting: Theory vs reality. *Scandinavian Journal of Medicine Science in Sports*, Vol. 26, No. 10, pp. 1171-1179, 2016.
- (2) Churchill Sarah M., Salo, Aki I.T. and Grant Trewartha. The effect of the bend on technique and performance during maximal effort sprinting. *Sports Biomechanics*, Vol. 14, No. 1, pp. 106-12, 2015.
- (3) Ohnuma Hayato, Tachi Masanobu, Kumano Akihito, Hirano Yuichi. How to maintain maximal straight path running speed on a curved path in sprint events. *Journal of Human Kinetics*, 2018.
- (4) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志. 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム*, Vol. 11, pp. 23 - 33, 1992.

- (5) 石塚辰郎, 仰木裕嗣, 前田時生, 大沼勇人, 松尾彰文. 短距離走における曲走路への進入局面での力学量変化, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2018 講演論文集, 2018, No.U00059