

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

進行方向の転換を伴う走動作における
全身の回転運動メカニズム

The whole body rotation mechanism
during running with change of traveling direction

2016年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

佐藤 隆彦

SATO, Takahiko

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

第1章 緒論

1. 序・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P1
2. 用語の定義・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P6
3. 研究小史・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P8

第2章 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

1. 緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P23
2. 方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P26
3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P32
4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P35
5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P41

第3章 ターン走動作と曲線走動作における身体方位変化メカニズムの違い

1. 緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P42
2. 方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P46
3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P51
4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P55
5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ P62

第4章 ターン走動作とスワープ走動作における全身回転運動の違い

- 1. 緒言 P63
- 2. 方法 P64
- 3. 結果 P69
- 4. 考察 P72
- 5. まとめ P76

第5章 総括論議

- 1. 各章で得られた結果の横断的解釈 P77
- 2. 方向転換走動作における能力向上を目的としたトレーニング法の提案 P81
- 3. 方向転換走動作における障害リスクの評価 P85
- 4. 本研究のリミテーション P87

第6章 結論 P91

参考文献 P92

謝辞 P104

第1章 緒論

1-1 序

走動作とはアスリートが行う基本的な移動動作の一つである。走動作における移動速度は、様々な競技におけるパフォーマンスに影響する要因であり、陸上競技のようにそれ自体が競技結果に直結する競技も存在する。各種のフットボールに代表されるフィールド・コート競技では、相手選手をかかわすことや、ボールに素早く反応することを目的として、走動作中に進行方向の転換が行われる。このような進行方向の転換を伴う走動作（以下「方向転換走動作」と略す）における優れた能力は、ボールの獲得や相手選手から受ける妨害の回避を可能とする為、フィールド・コート競技における高い競技パフォーマンスに繋がると考えられる。方向転換走能力は、Agilityを規定する因子とされており（Sheppard and Young, 2006; Young et al., 2002）、様々な方向転換走動作の組み合わせによって構成される各種のAgility testのタイムとして一般的に評価される。フィールドホッケーやサッカーの選手を対象にした研究では、競技レベルが高い選手ほどAgility testのタイムが短い関係が示されている（Keogh et al., 2003; Reilly et al., 2000）。加えて、サッカー1試合に1人の選手が行う進行方向の転換は平均727回であること（Bloomfield et al., 2007）、また、フィールドホッケーの試合では方向転換走動作が一直線の疾走動作（以下「直線走動作」と略す）の約2倍の頻度で行われていること（Spencer et al., 2004; Spencer et al., 2005）が報告されている。これらの先行研究から、フィールド・コート競技において高頻度で行われる方向転換走動作の能力向上は競技パフォーマンスの向上に繋がると期待される。

方向転換走能力を規定する因子として、直線走能力、脚筋群特性、技術が挙げられてい

る (Brughelli et al., 2008; Young et al., 2002). このモデルにおける関係性は, Agility test のタイムと各因子の指標となる特定の変数との相関関係に着目することで広く検討されている. 直線走能力に着目した研究では, T test (Pauole et al., 2000; Peterson et al., 2006), 505 test (Gabbett et al., 2008), SEMO agility test (Mayhew et al., 1989), L run test (Gabbett et al., 2008) などの既存の Agility test や, 特定の方向転換走動作の組み合わせとして各研究で個別に設定したテスト (Buchheit et al., 2012; Buttifant et al., 2002; Condello et al., 2013; Little and Williams, 2005; Maylan et al., 1989; Ruscello et al., 2013; Young et al., 2015; Wong et al., 2012) のタイムと, 直線走テストにおけるタイム, 平均速度, 平均加速度との関係性をピアソンの積率相関係数を用いて検証している. 各研究における Agility test の設定, 直線走テストの設定, 相関係数, 有意水準についての詳細は次節の Table 1-1 に示す. これらの先行研究における大半の変数間に有意な関係性が見られたものの (Table1-1), 決定係数 R^2 が 50%に満たなければ各変数は独立だとする Thomas et al. (2010) の基準から, 方向転換走能力と直線走能力との関係性は低いという考察も見られる (Little and Williams, 2005; Ruscello et al., 2013). また, 方向転換走能力と脚筋群特性との関係性については, ジャンプ動作 (Castillo-Rodriguez et al., 2015; Lockie et al., 2014; Meylan et al., 2009; Pauole et al., 2000; Peterson et al., 2006; Roetert et al., 1992; Ruscello et al., 2013; Spiteri et al., 2014; Young et al., 2015), スクワット動作 (Meylan et al., 2009; Peterson et al., 2006; Spiteri et al., 2014; Young et al., 2015), Margaria-Kalamen test (Mayhew et al., 1989) から得られた変数を用いた先行研究において, 有意な相関関係が多数報告されている. 各研究における Agility test の設定, 脚筋群

特性評価テストの設定, 相関係数, 有意水準についての詳細は次節の Table1-2,1-3 に示す.

脚筋群特性の指標となる変数についても, 各種の Agility test のタイムとの間に有意な相関関係が見られたものの, 大半の報告において決定係数 R^2 は 50%に満たなかった. これらの先行研究の多くを引用したレビュー論文では, これまでに得られた研究成果を基に, 直線走能力および脚筋群特性における方向転換走能力との関係性は低いと述べられている (Brughelli et al., 2008; Sheppard and Young, 2010). 一方で, 特定の変数による数値化が困難な技術と方向転換走能力と関係性を検討した先行研究は, 進行方向の転換時における体幹の傾斜に着目した研究に限られており (Sasaki et al., 2011), 他の要因との関係性と比較して, これまでに得られた研究成果は顕著に少ない.

方向転換走能力の向上は, フィールド・コート競技における競技パフォーマンス向上に繋がると期待される為, 様々なトレーニングの効果検証が行われている. 方向転換走能力の向上を目的とした介入研究では, 8 件の研究で能力が向上したものの (Table1-4), 9 件の研究では向上しなかった (Table1-5). これらの先行研究におけるトレーニングの詳細に着目すると, 能力が向上した 8 件の報告の内の 6 件では長期間に渡る方向転換走動作の反復練習が取り入れられていた一方で, 能力が向上しなかった全ての研究では取り入れられていなかった. また, Young et al. (2001) の研究では, 方向転換走動作の反復練習を行わせた被験者群は方向転換走能力が向上した一方で, 直線走動作の反復練習を行わせた被験者群は直線走能力のみが向上し, 方向転換走能力は向上しなかった. 加えて, 下肢筋群のレジスタンストレーニングを行わせた多くの研究で, 筋力の向上が見られたものの, 方向転換能力の向上は見られなかった (Table1-5). これらの研究成果から, 方向転換走能力の

向上は、直線走能力や脚筋力の向上ではなく、方向転換走動作の反復練習により運動技術が習得・精錬されたことで生じたと考えられる。しかしながら、方向転換走能力と技術との関係性については十分な研究成果が得られておらず、技術の指標となる運動学的変数は特定されていない。相関分析により方向転換走能力と任意の運動学的変数との関係性を検討することは容易であるが、論理的な因果関係が無ければ能力の向上は期待できない。したがって、能力向上に繋がるトレーニング法を確立する為には、動作の観察結果から運動メカニズムを明らかにすることで、方向転換走動作における技術を規定し得る運動的特徴を特定する論理的なアプローチが求められる。

方向転換走動作における運動メカニズムに着目した先行研究では、水平面における身体重心の進行方向の転換と、新たな進行方向に身体を正対させる鉛直軸まわりの方位変化の観点から分析されている (Jindrich et al., 2006; Jindrich and Qiao, 2009; Qiao et al., 2014)。Baechle and Earle (2008) は、方向転換時はスプリントの加速時と同様の姿勢を新たな進行方向に向けて取ることが重要であると述べていることから、身体を新たな進行方向へ正対させる運動技術が、方向転換走能力に関係していると予想される。したがって、方向転換走動作における身体の方位変化を生み出す全身の回転運動メカニズムを明らかにすることで、技術を規定する運動学的因子を特定し得ると期待される。方向転換走動作は「オープンスキル」として状況に応じて様々な運動様式で行われる為、実験的に条件を設定することで運動様式の多様性を網羅することは困難である。そこで本研究では、実際の試合で行われる動作の分類法として確立されている Bloomfield movement classification (Bloomfield et al., 2004) に基づき、身体の方位変化における特徴が異なる 3 種の方向転

換走動作に着目した。それらの方向転換走動作は、①曲線走動作（進行方向に正対した姿勢を維持しつつ同方向への方向転換を複数歩で継続する曲線的な軌道の走動作）、②ターン走動作（走動作から一歩で急激に進行方向を転換し、新たな進行方向に身体を正対させ走動作を継続する動作）③スワープ走動作（走動作から一歩で急激に進行方向を転換するものの、身体は転換前の進行方向に正対した状態を維持する動作）である。本学位論文では、これらの 3 種の方向転換走動作について角運動量を用いた動力的分析を行うことで、方向転換走動作の技術を規定する運動学的因子を明らかにすることを目的とした。

1-2 用語の定義

進行方向の転換

意図的に獲得した地面反力の水平成分によって生じる，身体重心水平速度の方向の変化を進行方向の転換とする．方向転換走動作において，進行方向の転換は地面反力により接地期を通して連続的に生じており，接地直後に開始し，離地直前まで継続する．直線走動作の接地期に意図せず生じる身体重心水平速度の微細な方向の変化は，進行方向の転換に含まない．

全身の回転運動

身体重心まわり生じる身体を構成する各質点の相対運動を全身の回転運動とする．本研究では全身を 15 セグメントの剛体リンクと見なす為，全身の回転運動は，身体重心周りの各セグメント重心の運動と各セグメント重心まわりのセグメントの運動から構成される．

身体の方位変化

意図的に獲得した外的な回転効果およびセグメント間の作用・反作用によって生じる，身体重心を通る鉛直軸まわりの頭体幹セグメントの方位変化を身体の方位変化とする．直線走動作において意図せず生じる方位変化は，身体の方位変化に含まない．

直線走動作

一直線の軌道で疾走することを意図した走動作を直線走動作とする．直線走動作におい

て、進行方向の転換と身体の方位変化は伴わない。

曲線走動作

複数歩にわたって同一方向に進行方向の転換を行う走動作を曲線走動作とする。進行方向に正対した姿勢を維持する為の身体の方位変化が伴う。

ターン走動作

直線走動作から動作軌道を屈折させるように 1 歩で進行方向の転換を行い、新たな進行方向に身体を正対させ、直線走動作に回帰する一連の動作をターン走動作とする。

スワープ走動作

直線走動作から動作軌道を屈折させるように 1 歩で方向転換を行うものの、身体は転換前の進行方向へ正対した姿勢を維持し、再び進行方向を当初の方向へ転換することで、直線走動作に回帰する一連の動作をスワープ走動作とする。

1-3 研究小史

フィールド・コート競技における方向転換走能力の重要性

フィールド・コート競技では、相手選手よりも先にボールを確保する際や、相手選手からの妨害を回避する際など、試合状況に応じて素早く移動することが求められる場面が多く存在する。状況に応じて素早く移動する為には、適宜、進行方向の転換を行わなければならない。試合のように高速で疾走している際に進行方向の転換を行う能力である方向転換走能力は、Agility を規定する因子として広く知られている (Sheppard and Young, 2006; Young et al., 2002)。方向転換走能力は、様々な方向転換走動作の組み合わせによって構成される Agility test のタイムとして一般的に評価される。方向転換走能力とフィールド・コート競技におけるパフォーマンスの関係について、フィールドホッケーの競技レベルが高いチームの選手ほど方向転換走能力が高いと報告されている (Keogh et al., 2003)。また、サッカーにおいても同様に、競技レベルが高いチームの選手ほど方向転換走能力が高いと報告されている (Reilly et al., 2000)。加えて、これらの方向転換走動作はサッカー1試合に1人の選手によって平均 727 回行われることから、方向転換走能力はフィールド・コート競技における競技パフォーマンスを規定する重要な因子であると考えられる。

方向転換走能力を規定する因子

方向転換走能力を規定する因子として Young et al. (2002) は直線走能力、脚筋群特性、技術を挙げている。このモデルを改変した Sheppard and Young (2006) のモデルでは形態的特性が追加されているものの、更なる改変を加えた Brughelli et al. (2008) のモデル

では当初の3つの因子に回帰した。Sheppard and Young (2006) は形態的特性として体脂肪の特徴やセグメント長などを挙げているものの、前者は筋力増強を目的としたレジスタンストレーニングや技術練習によるカロリー消費により別の目的により変動する因子であり、後者は意図的に変化させることが困難である為、Brughelli et al. (2008) による改変で除外されたと予想される。

方向転換走能力と直線走能力との関係

方向転換走能力と直線走能力との関係性は、ピアソンの積率相関係数を用いて様々なテストを用いた評価の組み合わせについて広く検討されている (Table 1-1)。方向転換走能力の評価には、T test (Paoule et al., 2000; Peterson et al., 2006), 505 test (Gabbett et al., 2008), SEMO agility test (Mayhew et al., 1989), L run test (Gabbett et al., 2008) などの既存のAgility test や様々な方向転換走動作の組み合わせとして各研究で個別に設定したテスト (Buchheit et al., 2012; Buttifant et al., 2002; Condello et al., 2013; Little and Williams, 2005; Ruscello et al., 2013; Young et al., 2015; Wong et al., 2012) が用いられている。直線走能力の評価には一般的に直線走のタイムが用いられるが、平均速度や平均加速度といった運動学的変数を用いた研究も行われている (Peterson et al., 2006)。Table 1-1 に示した先行研究において、ほぼ全ての組み合わせに有意な相関関係が見られており、相関係数は最大で0.76 (Buchheit et al., 2012) であった。しかしながら、決定係数 R^2 が50%に満たなければ各変数は独立だという Thomas et al. (2010) の基準から、関係性が有意であるものの、方向転換走能力と直線走能力との関係性は低いという考察も見られる (Little

and Williams, 2005; Ruscello et al., 2013). Table1-1 に示した各研究の相関係数 r から算出される決定係数 R^2 は 12 件の内 3 件を除いて 50%に満たない. Table1-1 に示した先行研究の多くを引用した Brughelli et al. (2008) のレビュー論文においても, 同様の観点から, 方向転換走動作と直線走動作では運動としての性質の大部分が異なると述べている.

Table1-1 方向転換走能力と直線走能力の関係に着目した先行研究

Study	Subject	CODtest	Component	r	r ²	P
Buchheit et al, 2012	12 male regional to national level team sport players (Handball: 5; Soccer: 4; Basketball: 3)	27.6m zigzag sprint with 2 CODs (45°) 21.2m zigzag sprint with 2 CODs (90°) 19.2m zigzag sprint with 2 CODs (135°)	30m straight sprint time	0.76 0.63 0.68		0.01 0.05 0.05
Buttiffant et al, 2002	21 male junior national and state representative soccer players	20m zigzag sprint with 4 CODs	20m straight sprint time		0.109	
Condello et al, 2013	157 male rugby players belonging to one of the most prestigious youth clubs	15m zigzag sprint with 2 CODs (60°)	15m straight sprint time	0.75		0.01
Gabbett et al, 2008	42 rugby players belonging to the club reigning premier in the Gold Coast Rugby League	505 test Mod 505 test L run test	5m straight sprint time 10m straight sprint time 20m straight sprint time 5m straight sprint time 10m straight sprint time 20m straight sprint time 5m straight sprint time 10m straight sprint time 20m straight sprint time	0.52 0.57 0.58 0.61 0.62 0.62 0.57 0.64 0.73		0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01
Little and Williams, 2005	106 male professional soccer players	20m zigzag sprint with 3 CODs(100°)	10m straight sprint time Flying 20m sprint time	0.346 0.458	0.119 0.209	0.0005 0.0005
Mayhew et al, 1989	53 collegiate football players	SEMO Agility Run	10 yard sprint time 40 yard sprint time	0.50 0.46		0.01 0.01
Meylan et al, 1989	44 male and 36 female physical education university students	20m zigzag sprint with 2 CODs in dominant leg (180°) 20m zigzag sprint with 2 CODs in alternate leg (180°)	10m straight sprint time (Male) 10m straight sprint time (Female) 10m straight sprint time (Male) 10m straight sprint time (Female)	0.208 0.205 0.645 0.572		n.s. n.s. 0.01 0.01
Paule et al, 2000	152 male (Low participation: 47; Recreational: 58; Competitive: 47) and 152 female (Low participation: 44; Recreational: 52; Competitive: 56) college-aged participants	T test	40 yard straight sprint time (Male) 40 yard straight sprint time (Female)	0.55 0.73		0.05 0.05
Peterson et al, 2006	19 male and 36 female various sports college athletes	T test	Average acceleration during 20 yard straight sprint (Male) Average velocity during 40 yard straight sprint (Male) Average acceleration during 20 yard straight sprint (Female) Average velocity during 40 yard straight sprint (Female)	-0.491 -0.579 -0.630 -0.693		0.05 0.05 0.01 0.01
Ruscillo et al, 2013	17 male competitive level soccer players	30m sprint with 1 COD (180°) 30m zigzag sprint with 5 CODs (120°)	30m straight sprint time	0.219 0.346		0.05 0.01
Young et al, 2015	24 male Australian Rules football players at community level	6m sprint with 1 COD	10m straight sprint time	0.5		0.05
Wong et al, 2012	59 male (Physically active individuals: 25; Collage soccer players: 16; Professional soccer players: 18)	20m zigzag sprint with 4 CODs (100°)	20m straight sprint time	0.70		0.01

方向転換走能力と脚筋群特性との関係

方向転換走能力と脚筋群特性との関係性も、直線走能力と同様にピアソンの積率相関係数を用いて様々なテストによる評価の組み合わせについて広く検討されている (Table1-2, 1-3). 方向転換走能力の評価には, T test (Lockie et al., 2014; Pauole et al., 2000; Peterson et al., 2006; Spiteri et al., 2014), 505 test (Lockie et al., 2014; Spiteri et al., 2014), SEMO agility test (Mayhew et al., 1989), Spider test (Roetert et al., 1992) などの既存の Agility test や様々な方向転換走動作の組み合わせとして各研究で個別に設定したテスト (Castillo-Rodriguez et al., 2015; Meylan et al., 1989; Ruscello et al., 2013; Young et al., 2015) が用いられている. 一方, 脚筋群特性の評価にはジャンプ動作 (Castillo-Rodriguez et al., 2015; Lockie et al., 2014; Meylan et al., 2009; Pauole et al., 2000; Peterson et al., 2006; Roetert et al., 1992; Ruscello et al., 2013; Spiteri et al., 2014; Young et al., 2015), スクワット動作 (Meylan et al., 2009; Peterson et al., 2006; Spiteri et al., 2014; Young et al., 2015), Margaria-Kalamen test (Mayhew et al., 1989) が用いられている. Table 1-2, 1-3 に示した先行研究において, 大半の組み合わせに有意な相関関係が見られており, 相関係数は最大で 0.90 (Peterson et al., 2006) であった. これらの先行研究の内, 相関係数 r から推定される決定係数 R^2 が 50%を上回る研究は 10 件中 3 件であり (Lockie et al., 2014; Peterson et al., 2006; Spiteri et al., 2014), Thomas et al. (2010) の基準による関係性を認められる報告は半数に満たない. Table1-2, 1-3 に示した全ての組み合わせにおける相関係数 r の平均値は 0.49 であり, 一般的に『中間の強さ』と解釈される範囲である. しかしながら, この数値から算出される決定係数 R^2 は 24%程度であり, Thomas et al. (2015)

の基準に遠く及ばないことから，方向転換走能力と脚筋群特性との関係性は低いと考えられる．

Table 1-2 方向転換走能力と脚筋群特性との関係に着目した先行研究

Study	Subject	CODtest	Component	r	R2	P			
Castillo-Rodriguez et al., 2015	42 male undergraduate physical education students	10m sprint with 1 COD (180°)	CMI height	-0.595		0.01			
			CMI height in right leg	-0.471		0.01			
			CMI height in left leg	-0.214		0.01			
			DJ height from 30cm	-0.536		0.01			
			DJ height from 15cm	-0.482		0.01			
			CMI height	-0.385		0.01			
			CMI height in right leg	-0.487		0.01			
			CMI height in left leg	-0.249		0.01			
			DJ height from 30cm	-0.409		0.01			
			DJ height from 15cm	-0.367		0.05			
			CMI height	-0.568		0.01			
			CMI height in right leg	-0.642		0.01			
			CMI height in left leg	-0.329		0.05			
			DJ height from 30cm	-0.449		0.01			
			DJ height from 15cm	-0.451		0.01			
			Lockie et al., 2014	30 male recreational team-sport athletes	505 test in right leg	CMI height in right leg	-0.224		n.s.
						CMI height in left leg	-0.238		n.s.
Horizontal standing jump length in right leg	-0.484					0.01			
Horizontal standing jump length in left leg	-0.535					0.01			
Lateral standing jump length in right leg	-0.474					0.01			
Lateral standing jump length in left leg	-0.585					0.01			
CMI height in right leg	-0.062					n.s.			
CMI height in left leg	-0.033					n.s.			
Horizontal standing jump length in right leg	-0.306					n.s.			
Horizontal standing jump length in left leg	-0.370					0.05			
Lateral standing jump length in right leg	-0.318					n.s.			
Lateral standing jump length in left leg	-0.472					n.s.			
CMI height in right leg	-0.452					0.05			
CMI height in left leg	-0.232					n.s.			
Horizontal standing jump length in right leg	-0.569					0.01			
Horizontal standing jump length in left leg	-0.642					0.01			
Lateral standing jump length in right leg	-0.546					0.01			
Lateral standing jump length in left leg	-0.721		0.01						
CMI height in right leg	-0.380		0.05						
CMI height in left leg	-0.202		n.s.						
Horizontal standing jump length in right leg	-0.561		0.01						
Horizontal standing jump length in left leg	-0.558		0.01						
Lateral standing jump length in right leg	-0.467		0.01						
Lateral standing jump length in left leg	-0.665		0.01						
Mayhew et al., 1989.	53 collegiate football players	SEMO Agility Run	Power determined by Margaria-Kalamen test	0.22		n.s.			
			Power / Body mass	-0.43		0.01			

Table 1-3 方向転換走能力と脚筋群特性に着目した先行研究

Study	Subject	CODrest	Component	r	R2	p			
Meylan et al., 2009	44 male and 36 female physical education university students	20m zigzag sprint with 2 CODs in dominant leg (180°)	CMI height (Male)	-0.248		n.s.			
			Horizontal standing jump length (Male)	-0.489		0.01			
			Lateral standing jump length (Male)	-0.284		n.s.			
			CMI height (Female)	-0.493		0.01			
			Horizontal standing jump length (Female)	-0.470		0.05			
			Lateral standing jump length (Female)	-0.108		n.s.			
			CMI height (Male)	-0.410		0.01			
			Horizontal standing jump length (Male)	-0.460		0.01			
			Lateral standing jump length (Male)	-0.288		n.s.			
			CMI height (Female)	-0.517		0.01			
Paule et al., 2000	152 male (Low participation: 47; Recreational: 58; Competitive: 47) and 152 female (Low participation: 44; Recreational: 52; Competitive: 56) college-aged participants	20m zigzag sprint with 2 CODs in alternate leg (180°)	Lateral standing jump length (Female)	-0.399		n.s.			
			CMI height (Male)	-0.49		0.05			
			CMI height (Female)	-0.55		0.05			
			Peterson et al., 2006	19 male and 36 female various sports college athletes	T test	1RM squat	-0.784		0.01
						1RM squat / Body mass	-0.805		0.01
						CMI height	-0.856		0.01
						CMI peak power	-0.739		0.01
						Horizontal standing broad jump length	-0.900		0.01
						CMI height	-0.34		0.05
						Ruscello, et al., 2013	17 male competitive level soccer players	30m sprint with 1 COD (180°) 30m zigzag sprint with 5 CODs (120°)	CMI height
	0.68								0.01
Spiteri et al., 2014	12 female basketball athletes playing for the National league	T test				1RM squat / Body mass	-0.800		0.001
						1RM eccentric box squat / Body mass	-0.878		0.001
			1RM concentric box squat / Body mass	-0.791		0.001			
			Maximal isometric mid thigh pull / Body mass	-0.854		0.001			
			CMI average power / Body mass	-0.466		n.s.			
			1RM squat / Body mass	-0.804		0.001			
			1RM eccentric box squat / Body mass	-0.892		0.001			
			1RM concentric box squat / Body mass	-0.791		0.001			
			Maximal isometric mid thigh pull / Body mass	-0.792		0.001			
			CMI average power / Body mass	-0.166		n.s.			
Young et al., 2015	24 male Australian Rules football players at community level	6m sprint with 1 COD	3RM squat / Body mass	-0.204		n.s.			
			CMI peak power / Body mass	-0.209		n.s.			
			DJ height / Contact time	-0.645		0.01			

方向転換走動作と技術との関係性

方向転換走能力と技術との関係性に着目した研究は少ない。Sasaki et al. (2011) は 180° の進行方向の転換を 1 回含む 10m 走のタイムと、進行方向の転換を行う際の体幹の傾斜についてピアソンの積率相関係数により関係性を検討した。被験者が往復する走路を側方から見た面における鉛直軸と体幹長軸の成す角について、接地時、最大傾斜時、離地時における角度、および接地時から最大傾斜時まで、最大傾斜時から離地時までの角変位を算出し、方向転換走動作のタイムとの相関分析を行った。方向転換走動作のタイムと接地時から最大傾斜までの角変位の間には有意な相関関係が見られたが ($r=0.61$, $p=0.04$)、他の変数との間には関係性は見られなかった。また、被験者が往復する走路を前方から見た面における鉛直軸と体幹長軸の成す角についても同様の相関分析を行ったが、全ての変数に方向転換走動作のタイムとの関係性は見られなかった。

方向転換走能力の向上を目的とした介入研究

方向転換走能力の向上を目的とした介入を行った縦断研究では、トレーニングとして、直線走動作の反復練習 (Hoffman et al., 2004; Hoffman et al., 2005; Young et al., 2001)、脚筋群のレジスタンストレーニング (Christou et al., 2006; Cressey et al., 2007; Cronin et al., 2003; Fry et al., 1991; Gabbett 2006b; Harris et al., 2000; Hoffman et al., 2004; Hoffman et al., 2005; Kramer et al., 2003; Malisoux et al., 2006; Miller et al., 2006; Polman et al., 2004; Tricoli et al., 2005)、方向転換走動作の反復練習 (Christou et al., 2006; Cressey et al., 2007; Gabbett, 2006c; Hoffman et al., 2004; Hoffman et al., 2005;

Polman et al., 2004; Young et al., 2001), 競技の専門練習 (Christou et al., 2006; Cressey et al., 2007; Gabbett, 2006b; Gabbett et al., 2006; Gabbett, 2006c) を行わせた。各研究で用いられたトレーニングおよび Agility test の詳細を, 方向転換走能力の向上が見られた研究については Table1-4 に, 向上が見られなかった研究については Table1-5 に示した。方向転換走能力の向上が見られなかった 9 件の先行研究の内 2 件 (Hoffman et al., 2004; Hoffman et al., 2005) を除いて方向転換走動作の反復練習が取り入れられていなかった反面 (Table1-3), 方向転換走能力の向上が見られた 8 件の先行研究の内 2 件を除いて方向転換走動作の反復練習が取り入れられていた。方向転換走動作の反復練習を取り入れられていたにも拘らず, 方向転換走能力が向上しなかった 2 件の研究 (Hoffman et al., 2004; Hoffman et al., 2005) では, 方向転換走動作の反復練習を 15 週間の介入期間の内, 最終の 5 週間にのみ取り入れていたことから, 十分な効果が得られなかった可能性が考えられる。これらを除く, 介入期間を通して方向転換走動作の反復練習を行わせた全ての先行研究において, 方向転換走能力に向上が見られている。これらの先行研究から, 方向転換走能力の向上には, 実際に方向転換走を繰り返し練習が欠かせないと考えられている。

Table 1-4 介入により方向転換走能力の向上が見られた先行研究

Study	Subject	CODtest	Type of training	Frequency and duration of training
Gabbett et al., 2006	26 junior volleyball players	T test	Sport-specific training COD training	3sessions/wk 8wk
Gabbett., 2006	77 sub-elite rugby players	L run test	Sport-specific training COD training	2sessions/wk 14wk
Cressey, 2007	19 NSCA division 1 soccer players	T test	Resistance training Sport-specific training COD training	27sessions 10wk
Christou et al., 2006	18 adolescent male soccer players	50m sprint with 9CODs(180°)	Resistance training Sport-specific training COD training	2session/wk 16wk
Polman et al., 2004	36 elite female soccer players	L run test	Resistance training COD training	4sessions/wk 15wk
Malisoux et al., 2005	8 healthy active male	30m sprint with 5CODs(180°)	Resistance training	3sessions/wk 8wk
Young et al., 2001	27 recreational athletic males	30m sprint with 2(160° , 130° , 100°), 3, 4, or 5CODs(100°)	Sprint training COD training	3sessions/wk 9mo
Miller et al., 2006	28 recreational males and females	T test Illinois agility test	Resistance training	2sessions/wk 6wk

Table 1-5 介入により方向転換走能力の向上が見られなかった先行研究

Study	Subject	CODtest	Type of training	Frequency and duration of training
Cronin et al., 2003	40 recreationally active males and females	Modified T test	Resistance training	2 sessions/wk 10 wk
Fry et al.,1991	10 female NCAA division 1 volleyball players	T test	Resistance training	4 sessions/wk 12 wk
Gabbett, 2006	69 sub-elite male rugby league players	L run test	Resistance training Sport-specific training	2 sessions/wk 9 wk
Harris et al., 2000	41 trained males	10 yard sprint with 2CODs(180°)	Resistance training	4 sessions/wk 9 wk
Hoffman et al., 2004	20 male NCAA Division 3 football players	T test	Resistance training COD training	4 sessions/wk 15 wk
Hoffman et al., 2005	47 male NCAA division 3 football players	T test	Resistance training COD training	4 sessions/wk 15 wk
Kraemer et al., 2003	30 female college tennis players	Modified USTA agility test	Resistance training	3 sessions/wk 9 mo
Thomas et al., 2009	12 soccer player from semiprofessional football club's academy	505 test	Resistance training	2 sessions/wk 6 wk
Tricoli et al., 2005	32 male physical education students	Box test	Resistance training	3 sessions/wk 8 wk

フィールド・コート競技における動作の分類

フィールド・コート競技の試合中には、状況に応じて様々な動作が行われる。試合中の動作の分類にはTime-motion analysisを用いて、オーストラリアン・フットボール(Appleby and Dawson, 2002), ゲーリック・フットボール(McErlean et al., 2000) サッカー(Mayhew and Wenger, 1985; Reilly and Thomas, 1976), バasketボール (Taylor, 2003), フィールドホッケー (Spencer et al., 2004; Spencer et al., 2005), ラグビー (Docherty et al., 1988), ネットボール (Loughran and O'Donoghue, 1999) についての先行研究が行われている。これらの先行研究では、各研究で表現は異なるものの、“Standing”, “Walking”, “Jogging”, “Striding”, “Sprinting” など運動強度の観点から動作を分類し、各分類の頻度と時間などが示されており、運動様式の観点からの分類は行われていない。Wheeler et al. (2010) の研究では、ラグビーの試合中に行われる動作を運動強度に加えて運動様式の観点から詳細に分類した。相手選手のディフェンスラインに対する攻撃動作については、移動方向の観点から直角, 曲線, 水平方向に, ついては, 直進, サイドステップ, クロスオーバーステップに分類されている。また, 特定の相手選手をかわす攻撃動作については方向転換の角度から更に 3 段階 ($0^{\circ} \sim 20^{\circ}$, $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$, $60^{\circ} \sim$) に分類されている。このような進行方向の転換における角度の大きさに着目した分類はサッカーにおいても行われており, 同様に 3 段階の分類であるものの, 45° 未満は方向転換とは見なさず, $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ to the left, $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ to the right, $135^{\circ} \sim$ to the left or right と設定されている (Robinson et al., 2011)。また, 状況に応じて様々な動作が行われるフィールド・コート競技の特性を考慮した動作の分類法として Bloomfield movement Classification が確立さ

れている (Bloomfield et al., 2004). この分類法では進行方向の転換を伴う動作として、曲線走軌道で行われる走動作、(身体の方位変化を伴う) 急激な方向転換動作、身体の方位変化を伴わない急激な方向転換動作の 3 つの分類が設定されている。

方向転換走動作の運動メカニズム

剛体リンクとしての身体運動は、身体重心の運動と、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。この観点から、Patla et al. (1991) は歩行動作中の進行方向の転換が、身体重心の横方向への運動と鉛直軸まわりの身体の方位変化という 2 つの側面から特徴づけられると考察している。この 2 つの側面について、Jindrich and Full (1999) は昆虫を対象に前者を重心の水平速度の変化として、後者を上方から見た際に頭、胸、腹を通る長軸の水平面における角変位として定量した。この分析手法は、4 足歩行する動物の方向転換にも応用されている (Dames et al., 2006)。一方、2 足立ちのヒトが行う走動作においては、頭体幹の長軸が鉛直軸とほぼ一致していることに加え、四肢がダイナミックに運動する為、水平面において全身の方位を示す軸を設定することは困難である。そこで、ターン走動作を対象とした先行研究では、接地直前の角速度と接地期に生じた身体重心まわりのモーメントを時間積分することで全身の方位変化角度を推定した (Jindrich et al., 2006; Jindrich and Qiao, 2009; Qiao et al., 2014)。しかしながら、この手法では、初期角速度に骨盤の角速度を用いていること、身体重心を左右股関節中点に固定していること、全身を剛体として慣性モーメントを算出していること、セグメント間の作用・反作用による方位変化が考慮されていないことから、算出される全身の方位変化角度には大きな誤差

が含まれていると考えられる。

方向転換走動作における身体重心の運動

方向転換走動作における特徴的な身体重心の運動は、地面を蹴ることによって獲得した地面反力による身体重心の水平速度の変化である。ターン走動作を対象とした先行研究において、地面反力によって生じた身体重心水平速度の変化が実測されている (Jindrich et al., 2006)。また、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、進行方向の転換には内側下肢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、進行方向の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、曲線走動作における身体重心の運動については、走路半径の違いにより異なる特徴が明らかとなっている。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の特徴は連続的に変化すると報告されていることから (Chang and Kram, 2007)、曲線走動作で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身体重心の運動に異なる特徴が存在すると考えられる。

方向転換走動作における身体の方角変化

ターン走動作における身体重心まわりの全身の回転運動について、接地直前の角速度と

接地期に生じた身体重心まわりのモーメントを時間積分することで身体の方位変化角度を算出したシミュレーション研究が行われている (Jindrich et al., 2006; Jindrich and Qiao, 2009; Qiao et al., 2014). しかしながら, この先行研究では身体重心が左右股関節中心の中心に位置すると仮定した全身剛体モデルが用いられている為, 全身回転運動を発生させる主要因としての身体重心まわりのモーメントが正確に算出されておらず, 加えて, セグメント間の作用反作用が考慮されていないことから, 実際の方位変化との誤差が生じている可能性が高い. 一方, 曲線走動作における身体重心まわりの全身の回転運動は, 陸上競技用トラックにおける疾走動作について報告されている (東・矢内, 2012). この先行研究では身体重心まわりの全身の角運動量が実測されており, その水平成分の周期変化と体幹長軸成分から, 全身の角運動量の鉛直成分が反周回方向を向くにも拘らず, 周回方向へ身体が方位変化するメカニズムが明らかにされている.

第2章 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

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 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 (Reilly et al., 2010; Keogh et al., 2003), 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 (Patla et al., 1991; Jindrich and Full, 1999; Jindrich et al., 2006)。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で、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： $1.73 \pm 0.05\text{m}$ ，身体質量： $67.2 \pm 7.0\text{kg}$ ，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 2400Hz 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 240Hz に設定した 8 台の赤外線高速カメラ (Eagle, Motion Analysis corp.) を，2 台の地面反力計前後の 5m ，左右 2.3m ，高さ 2.1m 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 2-1)。平均 3 次元残差は， 0.5mm 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)。

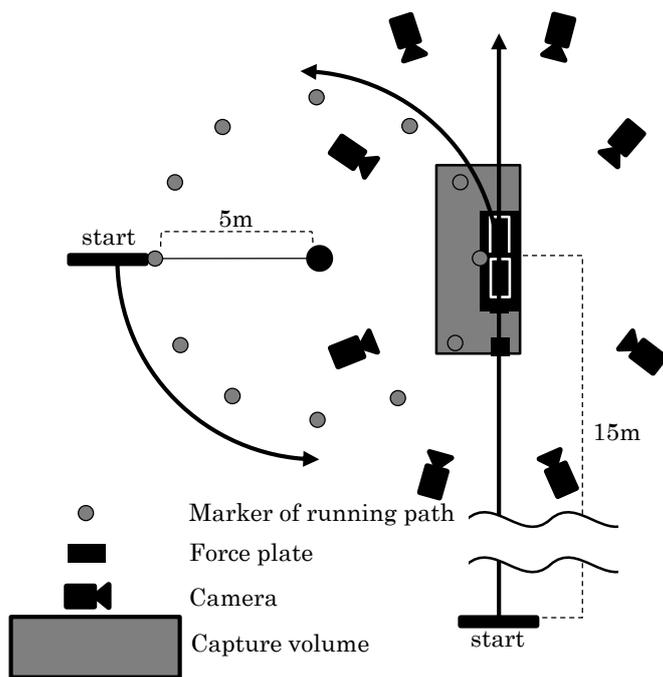


Figure 2-1 実験設定

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 5m/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 5m 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 15m 以上後方とした。地面反力計を中心とした 2m 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±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 12Hz 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 240Hz 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 20N 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 (Dapena, 1978; Hinrichs, 1987; 東・矢内, 2012)。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±標準偏差で示し、4 標本 (2 動作×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±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±標準偏差で示し、2way-ANOVA (2 動作×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期と左足接地期で正、左足空中期と右足接地期で負となる周期変化を示した (右足空中期： $3.6 \times 10^{-3} \pm 2.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、左足接地期： $3.5 \times 10^{-3} \pm 1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、左足空中期： $-3.2 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、右足接地期： $-2.7 \times 10^{-3} \pm 1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)。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 (右足空中期： $7.2 \times 10^{-3} \pm 3.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、左足接地期： $8.6 \times 10^{-3} \pm 2.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、左足空中期： $0.8 \times 10^{-3} \pm 3.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、右足接地期： $0.2 \times 10^{-3} \pm 4.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)。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 2-2)。

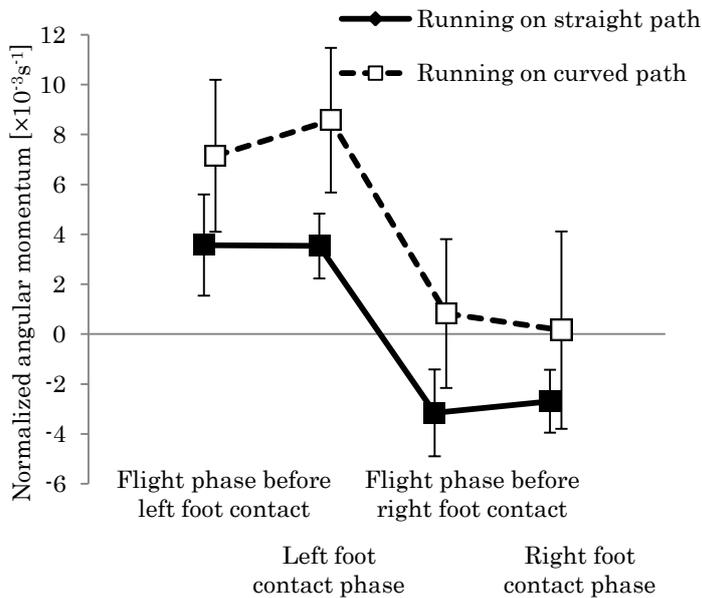


Figure 2-2 各期における角運動量の鉛直成分

5 セグメントに分類した角運動量の経時変化を Figure2-3 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 Figure2-3 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。

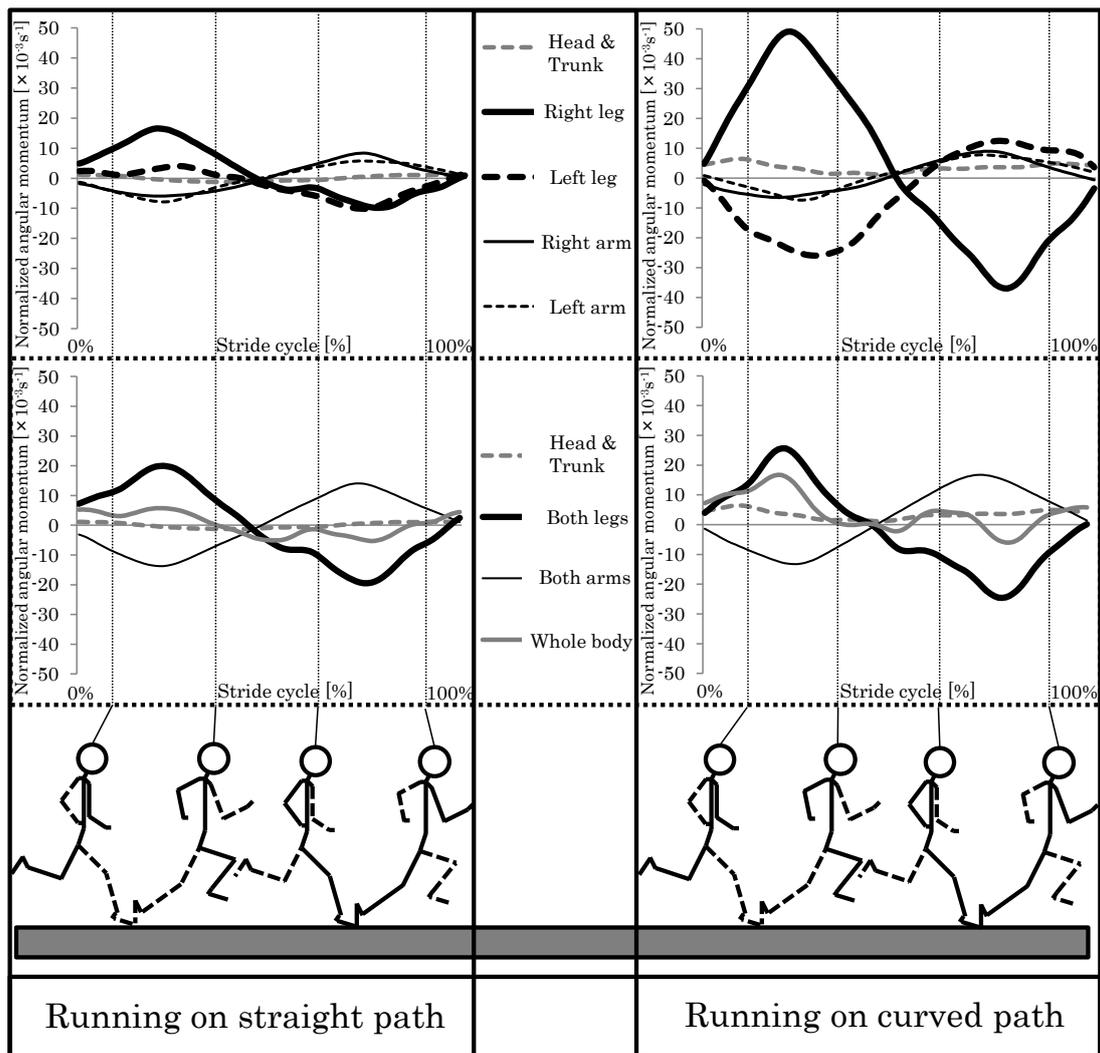


Figure 2-3 各セグメントの角運動量の経時変化

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、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 5m 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 Figure2-4 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によって、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。

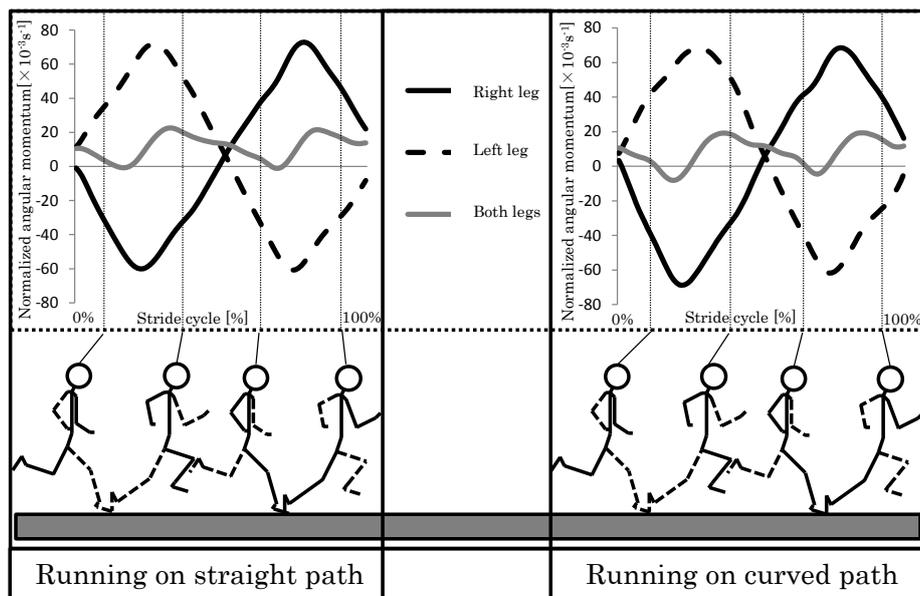


Figure 2-4 下肢が有する前回り方向の角運動量

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 Figure2-5 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 2-5 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 2-6).

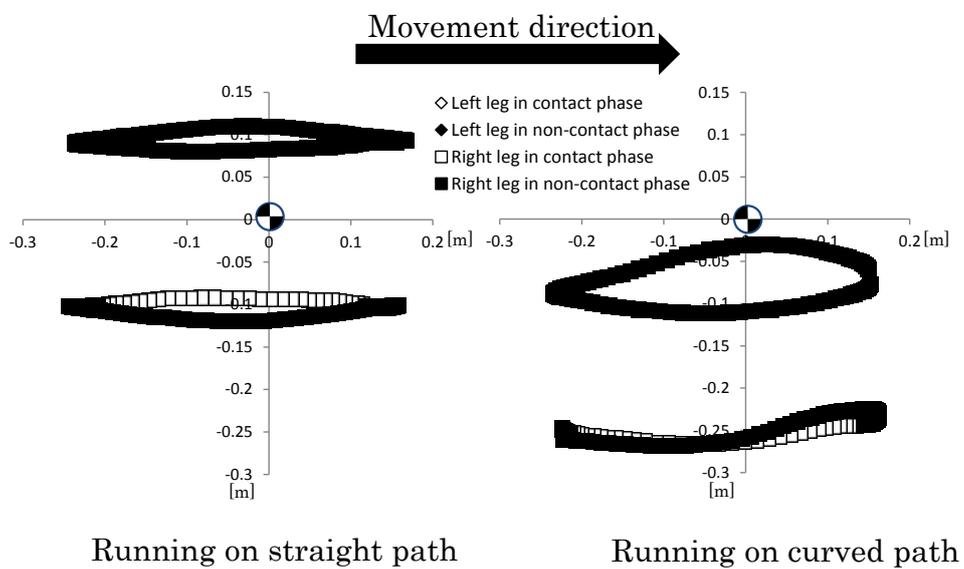


Figure 2-5 水平面における下肢重心の軌跡

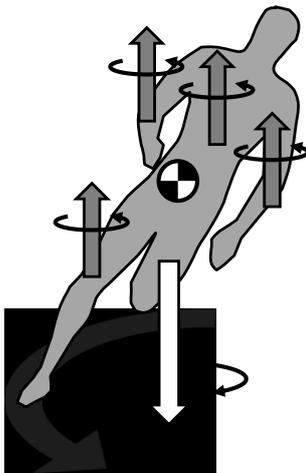


Figure 2-6 曲線走動作中のセグメント間に生じる作用・反作用

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。

第3章 ターン走動作と曲線走動作における身体方位変化メカニズムの違い

1. 緒言

フィールド・コートスポーツにおいて、選手は刻一刻と変化する試合状況に応じて、適宜、進行方向を転換することが求められる。進行方向の転換はサッカーの試合において一選手あたり平均 727 回行われると報告されている (Bloomfield et al., 2007)。また、フィールドホッケーやサッカーにおいて競技レベルが高い選手ほど方向転換を伴う疾走能力は高い (Keogh et al., 2003; Reilly et al., 2010)。これらの報告から、方向転換を伴う疾走能力はフィールド・コートスポーツにおける競技レベルを決定づける一因であると考えられる。Little and Williams (2005) はサッカー選手を対象に、一直線の疾走動作（以下「直線走動作」と略す）の能力を評価するテストと方向転換を伴う疾走能力を評価するテストを行わせた際、各テスト結果の相関係数は 0.2 であり、関係性は低かったと報告している。また、Young et al. (2001) の介入研究では、直線走動作と方向転換を伴う疾走動作のいずれか一方の技術向上を目的としたトレーニングを 6 週間行った結果、対象とした動作のタイムのみが向上し、他方は向上しなかった。これらの報告から、方向転換を伴う疾走動作と直線走動作における運動メカニズムは異なると考えられる。よって、方向転換を伴う疾走動作の能力向上の基礎となる運動メカニズムに関する知見を明らかにすることは、フィールド・コート競技における競技力向上に繋がると期待できる。

一般的なヒトの移動動作において進行方向を転換する際は、複数歩にわたり同方向への方向転換を継続し、最終的に目的の方向へと進路を取る。約 1m 幅の歩行路を前方へ移動している対象者に自由な軌道で進行方向を 90° 転換させた際、進行方向の転換は少なくとも

連続する3歩の接地期にわたって継続していた (Glaister et al., 2008). また, 0.75m 幅の歩行路において同様の動作を行わせた際, 身体重心は水平面上で複数歩にわたり曲線的な軌道を示した (Fino et al., 2015). このような複数歩にわたる曲線的な進行方向の転換は, 歩行動作中のみならず, 走動作中にも行われ, フィールド・コート競技においては相手選手との距離を保ちつつ相手陣内に攻め入る際などに用いられる (Wheeler et al., 2010). フィールド・コート競技ではこのような複数歩にわたり継続される曲線的な疾走動作 (以下「曲線走動作」と略す) が行われる一方で, 直線的な軌道の走行から1歩で急激に進行方向を転換する動作も行われる (Andrews et al., 1977). 1歩の接地期で行われる軌道を屈折させるような方向転換動作は, 目的地への到達に要する時間を短縮する際や相手選手をかかわす際に, より短時間で方向転換する為に用いられる. 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, 新たな進行方向への身体の方位変化が伴う軌道を屈折させるような方向転換動作はターン走動作に分類されている (Bloomfield et al., 2004). ターン走動作において生じる進行方向の転換と身体の方位変化は曲線走動作においても同様に生じる為, 一見, 類似の動作に見受けられる. しかしながら, これらの動作は動作の周期性, つまり, 進行方向の転換と身体の方位変化が周期的に継続されるか一時的に生じるかという点で大きく異なる. よって, これらの動作における全身運動メカニズムは異なると予想されるが, 動作間の違いに着目した研究は行われておらず, 具体的な差異は明らかとなっていない.

身体運動のモデル化の一つに, 「身体重心の運動」と「身体重心まわりの全身の回転運動」に分類する手法がある. この手法を用いて方向転換動作をモデル化した先行研究では, 身

体重心の進行方向を転換する **Deflection** と、身体の方角を新たな進行方向に向ける **Rotation** の複合であるとされている (Patla et al., 1991; Jindrich and Full, 1999; Jindrich et al., 2006). 前者のメカニズムは、地面を蹴ることによって獲得した地面反力による体重心の水平速度の変化であり、これはターン走動作と曲線走動作いずれにおいても行われる (Jindrich et al., 2006; Hamill et al., 1987). よって、体重心の運動はターン走動作と曲線走動作の間で共通していると考えられる。一方、後者のメカニズムは、主に全身が有する体重心まわりの角運動量と接地期に獲得した体重心まわりのモーメントによる鉛直軸まわりの身体の方角変化であると考えられる。接地期において同様の地面反力を獲得しようとも、各身体部位の姿勢が異なれば体重心まわりに生じる回転効果は異なる。加えて、剛体リンクとしての身体は、系全体として体重心まわりの角運動量を有さずとも、セグメント間の作用反作用を用いることにより方角を変化させることが可能である。よって、ターン走動作と曲線走動作における全身運動の違いは、身体を方角変化させる際の回転運動メカニズムにあると考えられる。

ターン走動作における体重心まわりの全身の回転運動について、接地直前の骨盤角速度と接地期に生じた体重心まわりのモーメントから時間積分を用いて方角変化角度を算出したシミュレーション研究が行われている (Jindrich et al., 2006). しかしながら、この先行研究では体重心が左右股関節中心の midpoint に位置すると仮定した全身剛体モデルが用いられている為、全身回転運動を発生させる主要因としての体重心まわりのモーメントが正確に算出されておらず、加えて、セグメント間の作用反作用が考慮されていないことから、実際の方角変化との誤差が生じている可能性が高い。一方、曲線走動作における身

体重心まわりの全身の回転運動は、陸上競技用トラックにおける疾走動作について報告されている（東・矢内, 2012）。この先行研究では体重心まわりの全身の角運動量が実測されており、その水平成分の周期変化と体幹長軸成分から、全身角運動量の鉛直成分が反周回方向を向くにも拘らず周回方向へ身体が方位変化するメカニズムが明らかにされている。しかしながら、陸上競技用トラックにおける動作とフィールド・コート競技で行われる動作は軌道半径が大きく異なる為、運動メカニズムが異なる可能性が考えられる。そこで本研究では、フィールド・コート競技で行われるターン走動作と曲線走動作について体重心の運動を統制した上で全身の回転運動を比較することで、ターン走動作と曲線走動作における鉛直軸まわりの身体の方位変化メカニズムの違いを明らかにすることを目的とした。

2.方法

2.1. 被験者

被験者は週 2 回以上の運動習慣を有する健常成人男性 10 名（身長： $1.74\pm 0.05\text{m}$ ，身体質量： $65.6\pm 5.0\text{kg}$ ，年齢： 22.1 ± 1.9 歳）であった。全被験者において，普段ボールを蹴る足は右足であり，利き足は被験者間で統一されていた。本研究は早稲田大学学術研究倫理委員会からの承認を得た。被験者に対して本研究の目的と実験参加による危険性を十分に説明した後に，書面を用いて実験参加の同意を得た。

2.2. 実験設定

実験試行は，サンプリング周波数を 2400Hz に設定した地面反力計（FP6012-15 Bertec corp.）を 1 台埋設した板張りの走路で行った。各身体部位に貼付した反射マーカの位置座標を取得する為に，地面反力計を含む前後 4m ，左右 1.8m ，高さ 1.8m の範囲が撮影できるようサンプリング周波数を 240Hz に設定した 8 台の光学式カメラ（Eagle, Motion Analysis corp.）を配置した（Figure 1）。平均 3 次元残差は， 0.5mm 未満であった。全身を頭，左右上腕，左右前腕，左右手，上脛，下脛，左右大腿，左右下腿，左右足の 15 セグメントからなる剛体リンクと見なし，各セグメントの慣性係数には阿江ほか（1992）が報告した数値を用いた。セグメントの位置と方位は，各セグメントに配置した 3 点または 4 点の反射マーカから計測した。各セグメントに配置した反射マーカの貼付位置は，頭部（4 点のマーカを貼付したヘッドバンド），左右肩峰，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 中手指節関節，左右第 5 中手指節関

節，胸骨上縁，第 7 頸椎，左右肋骨下端，左右上前腸骨棘，左右上後腸骨棘中点，左右大腿外側部（3 点のマーカを貼付したプレート），左右下腿外側部（4 点のマーカを貼付したプレート），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であった。これらの位置座標のみでは全てのセグメントの長軸及び長軸両端点の位置は定義できない。そこで，実験試行に先立ち，セグメントの長軸及び長軸両端点の位置を記録する為の立位姿勢によるキャリブレーション試行を行った。立位姿勢において，隣接するセグメントの長軸端点は連結する関節中心点と一致する。関節中心の位置座標を算出するために，左右大転子，左右大腿骨外側顆，左右大腿骨内側顆，左右外踝，左右内踝，に反射マーカを貼付した。また，頭頂，左右耳珠，左右シューズ爪先に貼付した反射マーカから，隣接セグメントが無い頭および足セグメントの長軸端点を算出した。これらの反射マーカは実験試行前に除去し，実験試行における各セグメントの長軸両端点の位置座標は，キャリブレーション試行における位置座標をもとに各セグメントに貼付された 3 点または 4 点の反射マーカから算出した（Söderkvist and Wedin, 1993）。

2-3 実験試行

各被験者はサイズの適した同モデルの屋内用シューズを着用し，準備運動の後に実験試行に十分に慣れるまで行った。実験試行は直線走動作，ターン走動作，曲線走動作の 3 動作であり，各動作 5 試行をランダムな順で行った（Figure3-1）。直線走動作は，直線軌道で普段通りの走動作を行うよう指示した。ターン走動作は，普段通りの走動作による助走から，走路上に示した 30° を成す 2 本の走路テープに沿って 1 歩の右足接地で左方向へ可

可能な限り軌道を屈折させるように方向転換し，新たな進行方向へ身体を正対させ，再び普段通りの走動作を行うよう指示した．曲線走動作は，半径 5m の円周上に中心角 30° 毎に設置したコーンに沿って可能な限り曲率を一定に保ちつつ，上方から見て反時計回り方向に走動作を行うよう指示した．また，全ての動作において可能な限り動作スピードを一定に保ち，地面反力計に右足で接地するよう指示した．ターン走動作と曲線走動作における走路は，予備実験を行い重心の方向転換角度が同程度になるように設定した．撮影区間における動作スピードを安定させる為に，全ての動作において地面反力計よりも手前に 15m 以上の助走区間を設けた．動作スピードを統制する為に，地面反力計直前 2m の区間の両端に光電管センサ（E3G-MR19T, Omron Corp.）を設置し，通過に要した時間を確認した．

目標動作スピードを 5m/s とし，区間通過時間から算出した動作スピードが 4.7m/s から 5.3m/s の範囲であること，および，足全体が地面反力計に接地していることを成功条件とし，規定の試行数が成功するまで繰り返した．

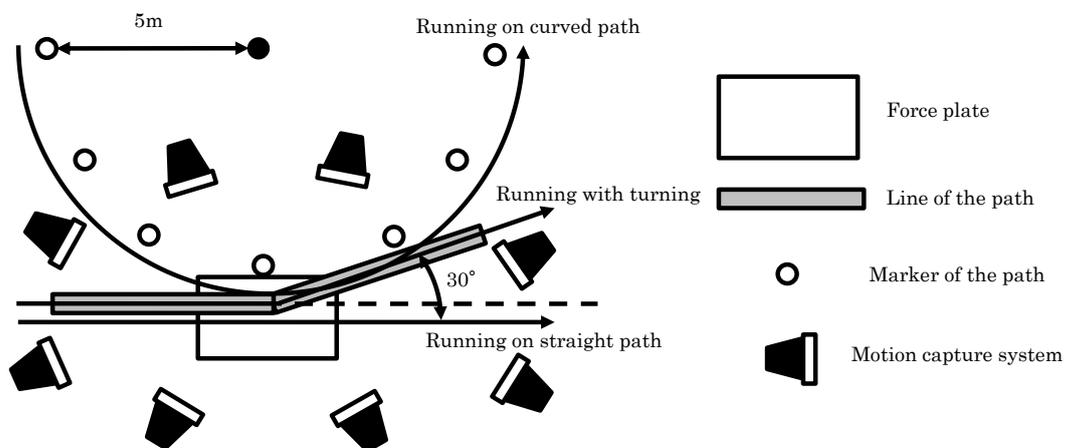


Figure 3-1 実験設定

2.4. データ処理

データ分析は数値解析ソフトウェア MATLAB (R2010a, Math Works) を用いて行った。

反射マーカの位置座標の平滑化には、遮断周波数を 12Hz に設定した 4 次の Butterworth low-pass filter を用いた。フィルターの特性は、本研究と同様の動作を対象に同様の機器およびサンプリング周波数によって反射マーカの位置座標を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、反射マーカの座標データと同期する為に 10 サンプルの平均値を用いて 240Hz にサンプルダウンした。接地期は地面反力の鉛直成分が 20N を上回る区間とした。分析区間は接地直前の空中期において身体重心位置が最高となったフレームから離地直後の空中期において身体重心位置が最高となったフレームまでとした。

2.5. 算出項目

①身体重心の運動

方向転換角度は身体重心の水平速度ベクトルの接地期における角変位とした。各フレームにおいて、前後のフレームを加えた 3 フレームの水平面上における身体重心を通る円の半径を算出し、それらの接地期における平均値を曲率半径とした。

②身体重心まわりの全身の回転運動

各フレームにおける身体重心を通る鉛直軸まわりの全身の角運動量を Dapena (1978) の方法を用いて算出した。空気抵抗を考慮しない前提のもと、角運動量が保存される接地直前の空中期および離地直後の空中期における全身の角運動量は、各期の全フレームを通

しての平均値とした。また、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角運動量とそれらの合計である全身の角運動量の経時変化を、3 次のスプラインを用いて接地直前空中期、接地期、離地直後空中期をそれぞれ 100 サンプルに標準化して示した。なお、先行研究 (Dapena, 1980; Hinrichs, 1987; 東・矢内, 2012) 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。

2.6. 統計分析

各被験者の代表値は各動作における 5 試行の平均値とした。方向転換角度と曲率半径は平均値±標準偏差で表し、一元配置分散分析 (3 動作) を用いて比較した。各空中期における全身の角運動量は平均値±標準偏差で表し、二元配置分散分析 (3 動作×2 期) を用いて比較した。全ての分散分析において事後比較には Tukey 法を用いた。有意水準は 0.05 とした。角運動量の経時変化は、全被験者の平均値を示した。

3. 結果

方向転換角度は、直線走動作において $0.8 \pm 0.4^\circ$, ターン走動作において $16.4 \pm 2.8^\circ$, 曲線走動作において $14.5 \pm 1.6^\circ$ であり、一元配置分散分析の結果に有意差が見られた ($p < 0.001$). 方向転換角度は、直線走動作が他の 2 動作と比較して有意に小さく ($p < 0.001$), ターン走動作と曲線走動作の間に差は見られなかった. 曲率半径は、直線走動作において $239.7 \pm 140.1\text{m}$, ターン走動作において $21.5 \pm 7.4\text{m}$, 曲線走動作において $23.9 \pm 7.3\text{m}$ であり、一元配置分散分析の結果には有意差が見られた ($p < 0.001$). 曲率半径は直線走動作が他の 2 動作と比較して有意に大きく ($p < 0.001$), ターン走動作と曲線走動作の間に差は見られなかった.

接地直前の空中期および離地直後の空中期における全身の角運動量について、二元配置分散分析の結果には有意な交互作用と両要因の主効果が見られた ($p < 0.001$) (Figure3-2). 接地直前の空中期における全身の角運動量は、直線走動作が他の 2 動作と比較して有意に小さく ($p < 0.001$), ターン走動作と曲線走動作の間に差は見られなかった. 離地直後の空中期における全身の角運動量は、曲線走動作が他の 2 動作と比較して有意に大きく ($p < 0.05$), 直線走動作とターン走動作の間に差は見られなかった.

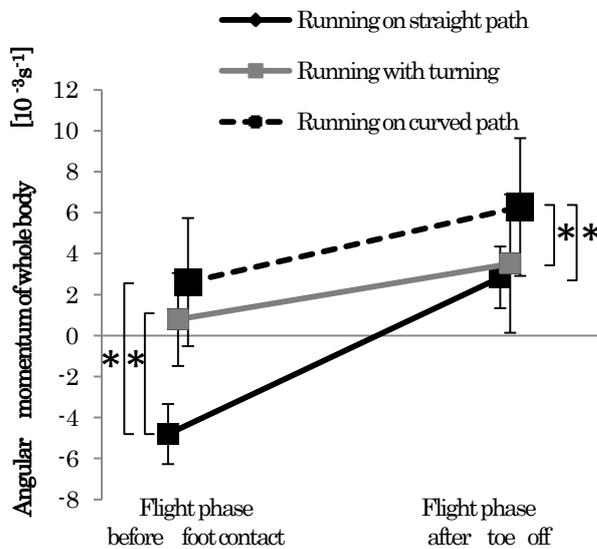


Figure 3-2 各空中期における全身の角運動量

各期を 100 サンプルに標準化して示された各セグメントおよび全身の角運動量について全被験者の平均値を算出し、その経時変化を Figure3-3 に示した。直線走動作では分析区間を通して概ね、左右下肢は反転換方向の角運動量を、左右上肢は転換方向の角運動量を有していた。また、直線走動作における左右下肢および左右上肢の角運動量は接地期においてピークが現れた。直線走動作における頭体幹および全身の角運動量は、接地期を通して反転換方向から転換方向に転換していた。これらの直線走動作における特徴は、全被験者について共通して観察された。ターン走動作および曲線走動作では分析区間を通して概ね、右下肢が反転換方向の角運動量を、他のセグメントが転換方向の角運動量を有していた。両動作ともに、接地期における右下肢の角運動量は反転換方向への変化を継続し、直線走動作と比較して有意に大きな約 3 倍のピーク値（直線走動作： $-10.8 \pm 2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、タ

ーン走動作： $-34.0 \pm 4.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，曲線走動作： $-34.3 \pm 3.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）を示した後に転換方向への変化を示した（ $p < 0.001$ ）。左下肢が有する転換方向の角運動量は，ターン走動作と曲線走動作の間で接地以降に異なる変化パターンが見られ，接地以降の区間を通しての平均値は曲線走動作の方がターン走動作と比較して有意に大きかった（ターン走動作： $4.3 \pm 1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，曲線走動作： $7.0 \pm 2.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）（ $p < 0.01$ ）。両動作とともに，接地直前の空中中期において転換方向であった全身の角運動量は，接地期を通して反転換方向に変化した後に転換方向に変化することで，離地後の空中期では転換方向に回帰していた。これらのターン走および曲線走動作における特徴は，全被験者について共通して観察された。

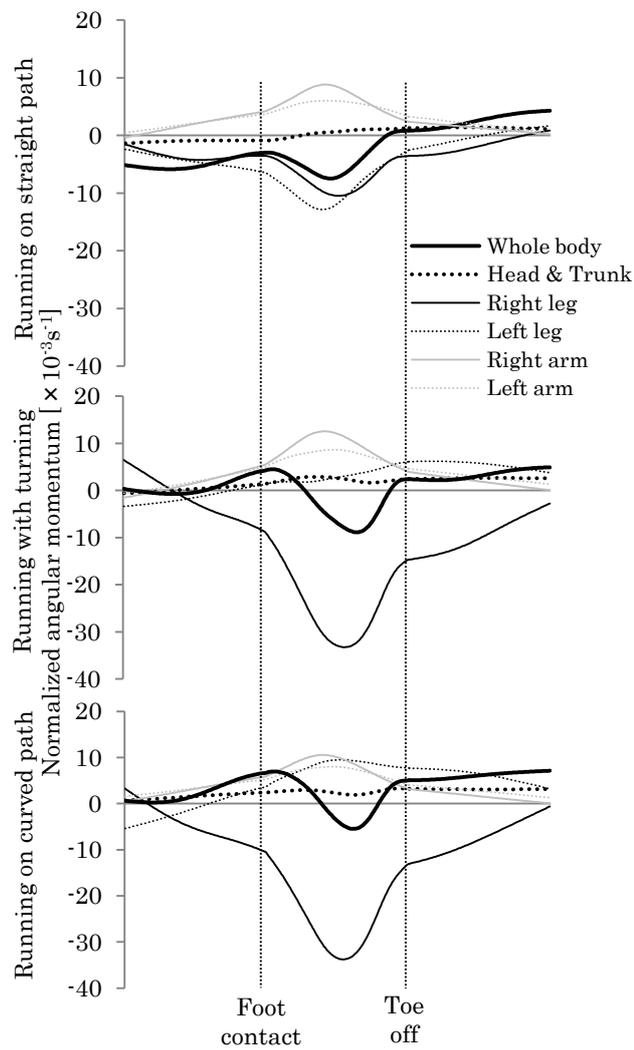


Figure 3-3 各セグメントの角運動量の経時データ

4. 考察

本研究の目的は、身体重心の運動を統制したターン走動作と曲線走動作における身体の方位変化メカニズムの違いを明らかにすることであった。身体重心を通る鉛直軸まわりの全身の回転運動を比較した結果、転換方向の全身の角運動量は接地直前の空中期においては両動作ともに直線走動作を上回っていたのに対して、離地直後の空中期においては曲線走動作のみが直線走動作を上回っており、ターン走動作における角運動量は直線走動作と同程度であった。また、両動作ともに、接地期において右下肢が有する反転換方向の角運動量は直線走動作の約 3 倍のピーク値を示した。一方、左下肢が有する転換方向の角運動量の接地以降の区間における変化パターンに、ターン走動作と曲線走動作の間で異なる特徴が見られた。

ターン走動作と曲線走動作における方向転換角度と曲率半径が直線走動作と異なっていた。これは、両動作ともに進行方向の転換が生じていたことを示すものである。また、方向転換角度と曲率半径においてターン走動作と曲線走動作の間に差がなかったことは、両動作の接地期において同様の軌跡で同程度の進行方向の転換が生じていたことを示す。これらの結果より、本研究で行われたターン走動作と曲線走動作における身体重心の運動は十分に統制されていたと考えられる。

Hinrichs (1987) は、直線走動作では走周期を通して身体の方位変化が生じないものの、身体重心に対して身体セグメントが相対的に運動することで、身体重心まわりの角運動量が生じることを報告している。本研究における角運動量はこの先行研究と同じ方法を用いて算出していることに加え、得られた直線走動作の分析結果に同様の特徴が見られたこと

から、本研究におけるデータ取得および変数の算出は妥当であったと考えられる。

接地直前の空中期では、身体の方位変化を生じない直線走動作と比較して、ターン走動作、曲線走動作ともに大きな転換方向の全身の角運動量が生じていた。また、この区間を通して両動作ともに右下肢の角運動量は転換方向から反転換方向への変化を、他のセグメントの角運動量は反対の変化を示した。空気抵抗を考慮しない場合、空中期において身体に重力以外の外力は生じない為、全身の角運動量は保存される。よって、空中期におけるセグメントが有する角運動量の変化は、セグメント間における作用・反作用に起因する角運動量の転移によって生じる。したがって、角運動量保存則に基づいて考察すると、これらの観察結果は前方にスイングする右下肢が有していた転換方向への大きな角運動量が、スイングの方向が後方に切り替わることで、他のセグメントに転移されたことを示している。これら一連の分析結果から、接地直前の空中期の前半区間において右下肢が既に有していた転換方向の角運動量を後半区間において転移させることで、他のセグメントの転換方向への方位変化が開始される回転運動メカニズムが、ターン走動作と曲線走動作の間で共通していることが明らかとなった。

ターン走動作と曲線走動作の接地期において、右下肢の角運動量が直線走動作の約 3 倍のピーク値（直線走動作： $-10.8 \pm 2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、ターン走動作： $-34.0 \pm 4.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、曲線走動作： $-34.3 \pm 3.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）を示すという共通の特徴が見られた。身体重心の進行方向を左斜前方へ転換する際、向心力（左方向への地面反力）が生み出すモーメントによって転倒したり、進行方向が意図しない方向へ変化したりしないよう、身体重心よりも右側へ適切な距離を取った位置に接地しなければならない。よって、進行方向の転換が生じるター

ン走動作と曲線走動作において、後方へスイングする右下肢が有する運動量の身体重心に対する回転半径は、直線走動作と比較して接地期を通して大きくなる（直線走動作： $0.09 \pm 0.01\text{m}$ ，ターン走動作： $0.21 \pm 0.01\text{m}$ ，曲線走動作： $0.22 \pm 0.01\text{m}$ ）。また、身体重心は接地期において地面反力により左方向へ運動を開始する為、接地位置から大きく動かない右下肢には身体重心に対して右方向への相対運動が生じる。身体重心に対して右方向へ運動する右下肢の角運動量は、身体重心よりも前方で運動している際は反転換方向、後方で運動している際は転換方向となる為、接地期を通して角運動量の方向が入れ替わる。これら一連の観察結果から、回転半径の大きな後方へのスイングによる継続的な反転換方向への角運動量に加えて、右方向への相対運動により生じる角運動量の方向が入れ替わることで、右下肢が有する角運動量が接地期において急激に変化していたことが示唆された。また、ターン走動作と曲線走動作の接地期において、右下肢が有する反転換方向の角運動量におけるピーク値は、全身の角運動量のピーク値の3倍程度大きかった。このようなピーク値における特徴は、全被験者について共通して観察された。これは、右下肢が有する角運動量に地面から受けたモーメントによる角力積を上回る変化が生じていたことを意味する。このような外的角力積を上回る角運動量変化は、他のセグメントとの作用反作用に起因して生じる。ターン走動作と曲線走動作の接地期では、後方へスイングされる右下肢が有する角運動量に外的角力積を上回る変化が生じることにより、他のセグメントに転換方向への回転効果をもたらされたものと考えられる。

離地直後の空中期においてターン走動作の全身の角運動量は直線走動作と同様であったにもかかわらず、その前半区間を通して右下肢以外のセグメントは直線走動作と比較して

顕著に大きな転換方向の角運動量を有していた。これらのターン走動作における分析結果は、離地直後の空中期において保存された全身角運動量が直線走動作と同程度であっても、右下肢のスイングの反作用により他のセグメントの転換方向への方位変化を継続させていたことを示すものである。また、曲線走動作においても、離地直後の空中期の前半を通じて右下肢が顕著に大きな反転換方向の角運動量を、他のセグメントが転換方向の角運動量を有する特徴が見られたことから、ターン走動作と同様に右下肢の後方へのスイングが身体の方位変化に貢献していたものと考えられる。離地直後の空中期における全身の角運動量は、ターン走動作では直線走動作と同様であった一方で、曲線走動作では他の 2 動作を上回っていた。このように、接地直前の空中期においては全身の角運動量にターン走動作と曲線走動作の間で差がなかったにもかかわらず、離地直後の空中期では異なっていたことから、接地期に曲線走動作の方がターン走動作よりも大きな角力積を獲得していたと考えられる。これらの結果から、離地後の空中期における身体の方位変化は、ターン走動作では右下肢の後方へのスイングの反作用により、曲線走動作では右下肢のスイングの反作用に加えて接地期に獲得したモーメントにより増大された全身角運動量により生み出されていたものと考えられる。

ターン走動作と曲線走動作における全身角運動量は、接地直前の空中期では同程度の大きさであった後に、離地直後の空中期では異なる大きさであった。このような異なる角運動量変化が生じた接地期において、ターン走動作と曲線走動作の間で左下肢の角運動量に異なる変化パターンが見られた。接地期を平均して左下肢は、直線走動作では負の角運動量を ($-4.4 \pm 1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)、ターン走動作では正の角運動量を ($4.3 \pm 1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)、曲線走

動作ではターン走動作を上回る正の角運動量を ($7.0 \pm 2.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 有していた。本研究で用いた角運動量の算出法において、下肢を構成する各セグメントの角運動量は、セグメント長軸のセグメント重心まわりの角運動量 (Local term) とセグメント重心の運動量の身体重心まわりのモーメント (Transfer term) の合計である (Dapena 1978)。直線走動作では下肢が矢状面上でスイングされる為、下肢を構成する各セグメントの長軸は概ね左右軸まわりに回転する。よって、下肢角運動量の Local term における鉛直成分は非常に小さく、下肢角運動量の鉛直成分の大半を Transfer term が占める。一方、ターン走動作と曲線走動作では全身の傾斜や新たな進行方向への脚のスイングにより、下肢角運動量の Local term における鉛直成分は直線走動作と比較して大きくなると考えられる。各動作において左下肢が有する角運動量の Local term の鉛直成分の接地期を通しての平均値は、直線走動作 ($0.4 \pm 0.2 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}]$) では他の 2 動作と比較して有意に小さく ($p < 0.001$)、ターン走動作 ($1.5 \pm 0.3 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}]$) と曲線走動作 ($1.6 \pm 0.3 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}]$) の接地期において左下肢は正の大きな Local term を有する共通の特徴が示された。Local term の鉛直成分に差がなかったことから、ターン走動作と曲線走動作における左下肢が有する角運動量の違いは、Transfer term の違いに起因すると考えられる。そこで、接地期における左下肢が有する角運動量の Transfer term を理解するため、身体重心に対する左下肢重心の軌跡を各動作の接地期について図示した (Figure3-4)。ターン走動作において、左下肢は進行方向に対して身体重心よりも左側をスイングするという直線走動作と同様の特徴が見られた。一方、曲線走動作において、左下肢は進行方向に対して身体重心よりも右側をスイングしていた。身体重心よりも右側を前方にスイングする左下肢は転換方向の角運動量を有する。これらの全被験

者に共通する観察結果から，曲線走動作では接地期に獲得した身体重心まわりのモーメントにより左下肢角運動量の **Transfer term** を増大させたことで，離地後の空中期においても身体の方位変化を生み出す全身の角運動量が維持されていたものと考えられる。

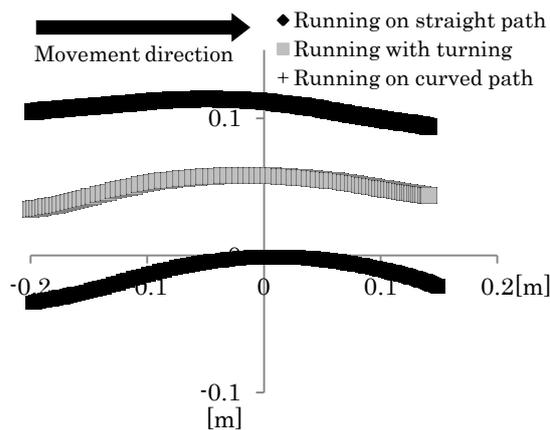


Figure 3-4 水平面における左下肢重心の軌跡

ターン走動作と曲線走動作の間で水平面における左下肢の運動が異なっていた (Figure3-4) ことから，身体各部位の傾斜の程度は異なっていたと予想される。ターン走動作と曲線走動作において，身体重心の進行方向を左斜前方へ転換する際，向心力が生み出すモーメントによって転倒したり進行方向が意図しない方向へ変化したりしないよう，身体重心よりも右側に適切な距離を取った位置に接地しなければならない。進行方向を基準とした前額面上で身体重心と爪先を結んだ線分と鉛直軸が成す角度について，ターン走動作と曲線走動作の接地期を通しての平均値に差は無かった (ターン走動作： $23.3 \pm 1.7^\circ$ ，曲線走動作： $23.0 \pm 2.0^\circ$)。一方，同平面上における上胴長軸上端点と下胴長軸下端点を結んだ線分と鉛直軸の成す角度は，曲線走動作の方がターン走動作と比較して有意に大きか

った (ターン走動作 : $4.6 \pm 2.7^\circ$, 曲線走動作 : $14.2 \pm 2.8^\circ$) . よって, 両動作とも身体重心に対する相対的な接地位置は同様であるものの, 体幹の傾斜の程度は大きく異なる (Figure3-5). 走周期を通して内傾姿勢を維持している曲線走動作に対して, ターン走動作では直線走動作と同様の助走から身体重心よりも外側に接地出来るよう, 右下肢のスイング軌道を変化させることが求められる. 身体重心よりも低い位置で右方向に運動する右下肢は進行方向後方から見て反時計回りの角運動量を有する為, 空中期にこの運動を開始すると他のセグメントには反作用として時計回りの運動が開始される. よって, ターン走動作では右下肢のスイング軌道の変更により体幹や左下肢に反作用が生じたことで, 曲線走動作よりも直立に近い姿勢となったと考えられる. これら一連の観察結果から, 転倒しない為に必要な身体重心と右下肢接地位置との水平距離が, 曲線走動作では全身の内傾姿勢を維持することで生み出されていたのに対して, ターン走動作ではセグメント間の作用反作用を用いて右下肢のスイング軌道を変更することにより生み出されていたことが示唆された.

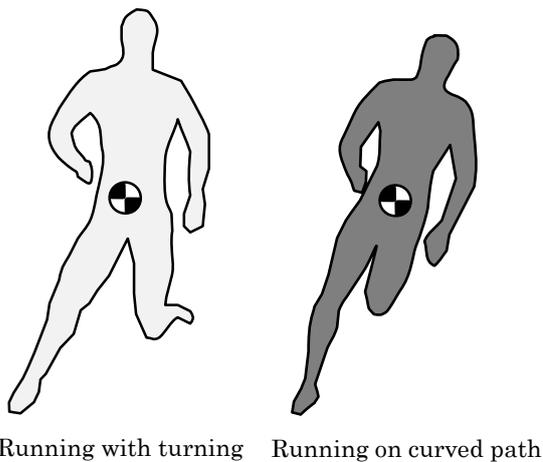


Figure 3-5 各動作における典型的な姿勢

5. まとめ

本研究の目的はターン走動作と曲線走動作における身体の方位変化メカニズムの違いを明らかにすることであった。本研究により、右下肢が既に有していた転換方向への角運動量を接地直前の空中期に他のセグメントへ転移させることで、これら頭体幹を含むセグメントの転換方向への方位変化が開始される点、および、接地期に獲得した身体重心まわりのモーメントによる角力積を上回る右下肢の角運動量変化により他のセグメントに対して転換方向への回転効果が反作用として生じる点が、ターン走動作と曲線走動作において共通していることが示された。また、ターン走動作では接地期に獲得した地面反力のモーメントにより全身の角運動量は直線走動作と同様の状態に回帰しているものの、離地後の空中期においても右下肢の後方へのスイングの反作用により他のセグメントの方位変化を継続させていることが明らかとなった。一方、曲線走動作では、右下肢のスイングの反作用に加えて、接地期に内側下肢を身体重心よりも外側でスイングすることにより転換方向の角運動量を増大させることで維持された全身の角運動量により、離地後の空中期においても身体の方位変化を継続していることが明らかとなった。

第 4 章 ターン走動作とスワープ走動作における全身回転運動の違い

1. 緒言

第 4 章ではターン走動作とスワープ走動作の比較を行う。これらの動作は、試合中に行われる動作の分類法である Bloomfield Movement classification (Bloomfield et al., 2004) において、急激に進行方向を転換する動作として挙げられている。これらの動作の違いは、身体の方位変化の有無であり、ターン走動作では新たな進行方向に身体を正対させる為の身体方位変化が生じるのに対して、スワープ走動作ではもともとの進行方向に正対したまま身体の方位変化は生じない。

第 2 章および第 3 章で着目した曲線走動作とターン走動作においては身体の方位変化が伴っていたのに対して、スワープ走動作においては身体の方位変化を要さない為、全身の回転運動が他の 2 動作と大きく異なると予想される。しかしながら、スワープ動作についての運動学的研究はこれまでに行われていない。そこで本研究では、同一の軌道でのターン走動作とスワープ走動作を比較することで、身体の方位変化の有無による全身の回転運動の違いを明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1. 被験者

被験者は週 2 回以上の運動習慣を有する健常成人男性 10 名（身長： $1.74 \pm 0.05\text{m}$ ，身体質量： $65.6 \pm 5.0\text{kg}$ ，年齢： 22.1 ± 1.9 歳）であった。全被験者において，普段ボールを蹴る足は右足であり，利き足は被験者間で統一されていた。本研究は早稲田大学学術研究倫理委員会からの承認を得た。被験者に対して本研究の目的と実験参加による危険性を十分に説明した後に，書面を用いて実験参加の同意を得た。

2.2. 実験設定

サンプリング周波数を 2400Hz に設定した地面反力計（FP6012-15 Bertec corp.）を 1 台埋設した板張りの走路において実験試行を行った。地面反力計を含む前後 4m，左右 1.8m，高さ 1.8m を撮影範囲とし，各身体部位に貼付した反射マーカの位置座標を取得する為に，サンプリング周波数を 240Hz に設定した 8 台の光学式カメラ（Eagle, Motion Analysis corp.）を配置した（Figure4-1）。平均 3 次元残差は，0.5mm 未満であった。全身を頭，右上腕，左右前腕，左右手，上脗，下脗，左右大腿，左右下腿，左右足の 15 セグメントからなる剛体リンクと見なし，各セグメントの慣性係数には阿江ほか（1992）が報告した数値を用いた。セグメントの位置と方位は，各セグメントに配置した 3 点または 4 点の反射マーカから計測した。各セグメントに配置した反射マーカの貼付位置は，頭部（4 点のマーカを貼付したヘッドバンド），左右肩峰，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 中手指節関節，左右第 5 中手指節関節，胸骨

上縁, 第 7 頸椎, 左右肋骨下端, 左右上前腸骨棘, 左右上後腸骨棘中点, 左右大腿外側部 (3 点のマーカを貼付したプレート), 左右下腿外側部 (4 点のマーカを貼付したプレート), 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であった。これらの位置座標のみでは全てのセグメントの長軸及び長軸両端点の位置は定義できない。そこで, 実験試行に先立ち, セグメントの長軸及び長軸両端点の位置を記録する為の立位姿勢によるキャリブレーション試行を行った。立位姿勢において, 隣接するセグメントの長軸端点は連結する関節中心点と一致する。関節中心の位置座標を算出するために, 左右大転子, 左右大腿骨外側顆, 左右大腿骨内側顆, 左右外踝, 左右内踝, に反射マーカを貼付した。また, 頭頂, 左右耳珠, 左右シューズ爪先に貼付した反射マーカから, 隣接セグメントが無い頭および足セグメントの長軸端点を算出した。これらの反射マーカは実験試行前に除去し, 実験試行における各セグメントの長軸両端点の位置座標は, キャリブレーション試行における位置座標をもとに各セグメントに貼付された 3 点または 4 点の反射マーカから算出した (Söderkvist and Wedin, 1993)。

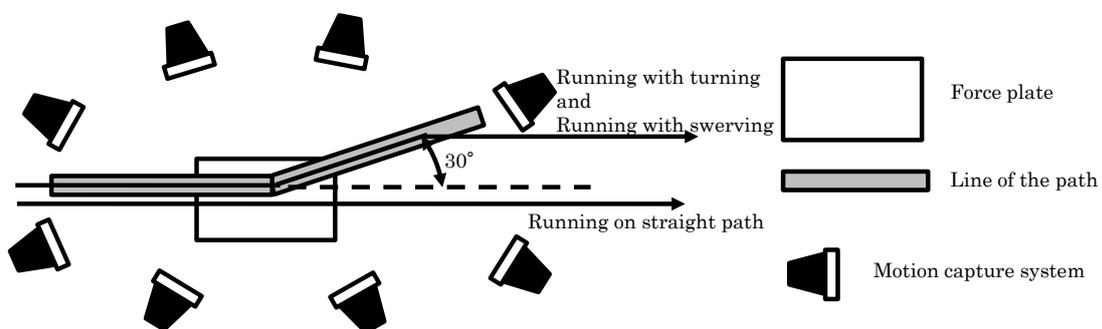


Figure 4-1 実験設定

2-3 実験試行

各被験者はサイズの適した同モデルの屋内用シューズを着用し、準備運動の後に実験試行の練習を十分に慣れるまで行った。実験試行は直線走動作、ターン走動作、スワープ走動作であり、各動作 3 試行をランダムな順で行った (Figure 4-1)。直線走動作は、直線軌道で普段通りの走動作を行うよう指示した。ターン走動作は、普段通りの走動作による助走から、走路上に示した 30° を成す 2 本の走路テープに沿って 1 歩の右足接地で左方向へ可能な限り軌道を屈折させるように方向転換し、新たな進行方向へ身体を正対させ、直後の左足接地で再度右方向に方向転換し、助走時の軌道と平行な軌道で直線走動作を行うよう指示した。スワープ走動作はターン走動作と同様の軌道で、右足接地期直後の空中期において身体を進行方向に正対させることなく、助走時の進行方向に正対した状態を維持するよう指示した。また、全ての動作において可能な限り動作スピードを一定に保ち、地面反力計に右足で接地するよう指示した。撮影区間における動作スピードを安定させる為に、全ての動作において地面反力計よりも手前に 15m 以上の助走区間を設けた。動作スピードを統制する為に、地面反力計直前 2m の区間の両端に光電管センサ (E3G-MR19T, Omron Corp.) を設置し、通過に要した時間を確認した。目標動作スピードを 5m/s とし、区間通過時間から算出した動作スピードが 4.7m/s から 5.3m/s の範囲であること、および、足全体が地面反力計に接地していることを成功条件とし、規定の試行数が成功するまで繰り返した。

2.4. データ処理

データ分析は数値解析ソフトウェア MATLAB (R2010a, Math Works) を用いて行った。反射マーカの位置座標の平滑化には、遮断周波数を 12Hz に設定した 4 次の Butterworth low-pass filter を用いた。フィルターの特性は、本研究と同様の動作を対象に同様の機器およびサンプリング周波数によって反射マーカの位置座標を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、反射マーカの座標データと同期する為、10 サンプルの平均値を用いて 240Hz にサンプルダウンした。接地期は地面反力の鉛直成分が 20N を上回る区間とした。分析区間は接地直前の空中期において身体重心位置が最高となったフレームから離地直後の空中期において身体重心位置が最高となったフレームまでとした。

2.5. 算出項目

①方向転換角度

方向転換角度は身体重心の水平速度ベクトルの接地期における角変位とした。

②肩角度

助走時の進行方向に対する横軸と両肩峰を結んだ線分の成す角度を肩角度とし、分析開始時、接地時、離地時、分析終了時の 4 時点において算出した。助走時の進行方向に正対した状態を 0° とし転換方向への回転を正、反転換方向の回転を負の角度として記述した。

②全身角運動量の鉛直成分

各フレームにおける身体重心を通る鉛直軸まわりの全身の角運動量を Dapena (1978)

の方法を用いて算出した。空気抵抗を考慮しない前提のもと、角運動量が保存される接地直前の空中期および離地直後の空中期における全身の角運動量は、各期の全フレームを通しての平均値とした。また、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角運動量とそれらの合計である全身の角運動量の経時変化を、3 次のスプラインを用いて接地直前空中期、接地期、離地直後空中期をそれぞれ 100 サンプルに標準化して示した。なお、先行研究 (Dapena, 1980; Hinrichs, 1987; 東・矢内, 2012) 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。

2.6. 統計分析

各被験者の代表値は各動作における 3 試行の平均値とした。方向転換角度は平均値±標準偏差で表し、ANOVA を用いて動作間で比較した。肩角度は平均値±標準偏差で表し、2way-ANOVA (3 動作×4 時点) を用いて動作間で比較した。各空中期における全身角運動量の鉛直成分は平均値±標準偏差で表し、二元配置分散分析 (3 動作×2 期) を用いて比較した。全ての分散分析において事後比較には Tukey 法を用いた。有意水準は 0.05 とした。角運動量の経時変化は、全被験者の平均値を示した。

3. 結果

方向転換角度は、直線走動作において $0.8 \pm 0.5^\circ$ ，ターン走動作において $12.1 \pm 4.0^\circ$ ，スワープ走動作において $10.8 \pm 3.7^\circ$ であり、直線走動作が他の2動作と比べて有意に小さく ($p < 0.001$)，ターン走動作とスワープ走動作の間に差は無かった。肩角度は、分析開始時、接地期において動作間差はなく、離地時および分析終了時においてはターン走動作が他の2動作と比較して有意に大きく ($p < 0.001$)，直線走動作とスワープ走動作の間に差はなかった (Figure 4-2)。

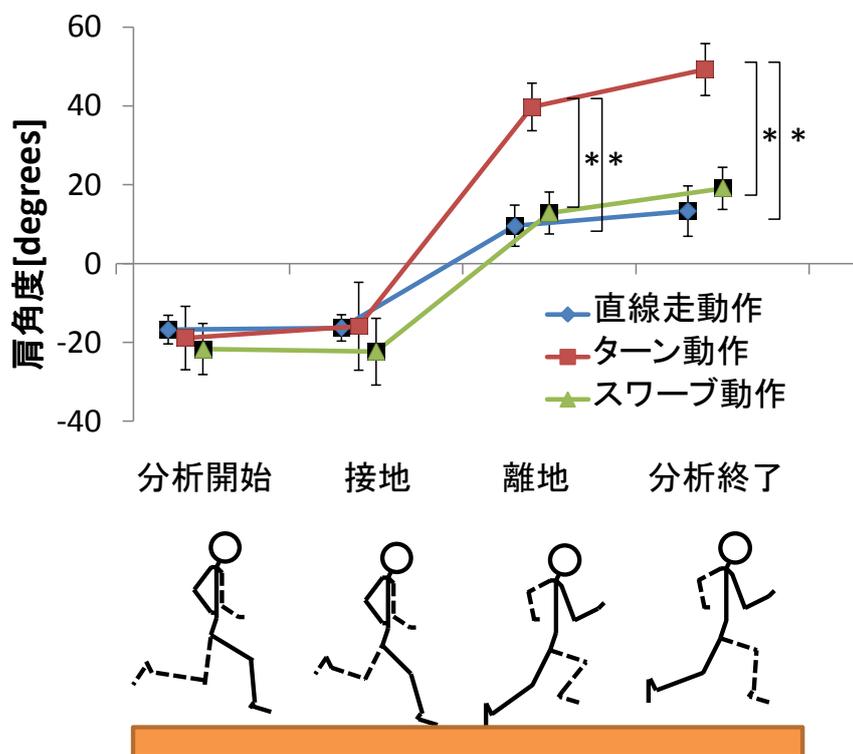


Figure 4-2 各局面における肩角度

全身角運動量の鉛直成分について、2way-ANOVAの結果に有意な交互作用、および動作と期の両主効果が見られた ($p < 0.001$)。全身角運動量の鉛直成分は、接地直前の空中期で

は全動作間に有意差 ($p<0.001$) が見られた一方で、離地直後の空中期では動作間差はなかった (Figure4-3).

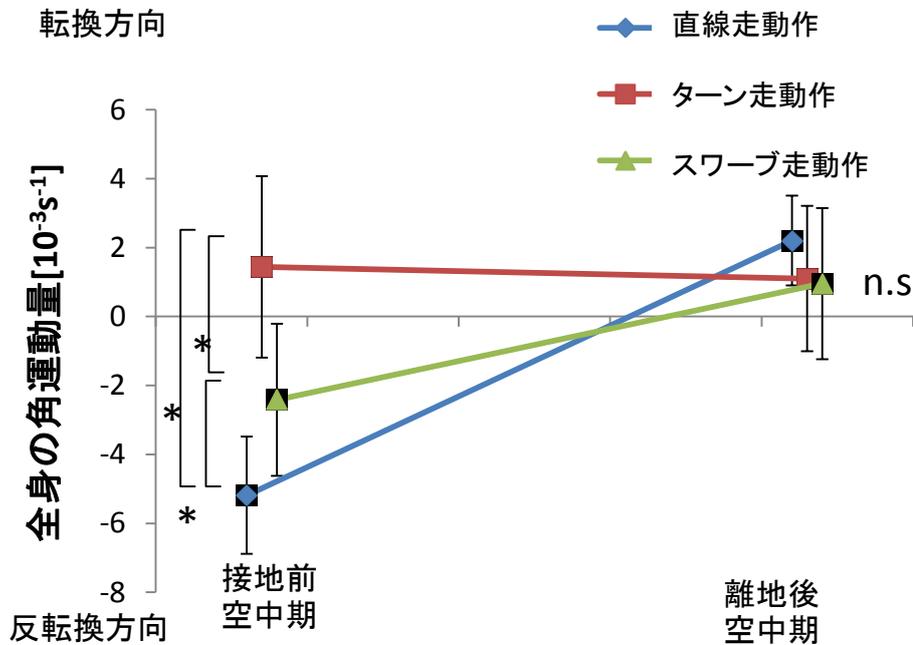


Figure 4-3 各空中期における全身の角運動量

5 セグメントに分類した角運動量の経時データ (Figure4-4) において、直線走動作では左右下肢が同位相の周期変化を、一方、左右上肢も同様に同位相の周期変化を示した。ターン走動作とスワープ走動作においては、各上肢は直線走動作と同様の変化を示した一方で、右下肢の角運動量が大きな反転換方向のピーク値を示す点で直線走動作とは異なる特徴が見られた。全身角運動量の鉛直成分に統計的有意差が見られた接地直前の空中期に着目すると、右下肢の角運動量はターン動作、スワープ動作ともに減少傾向を示すものの、ターン動作では分析開始時点で大きな転換方向の角運動量を有していた。また、左下肢の

角運動量は、直線走動作では接地期において右下肢を上回る反転換方向のピーク値を示した一方で、他の2動作にこのような特徴は見られなかった。

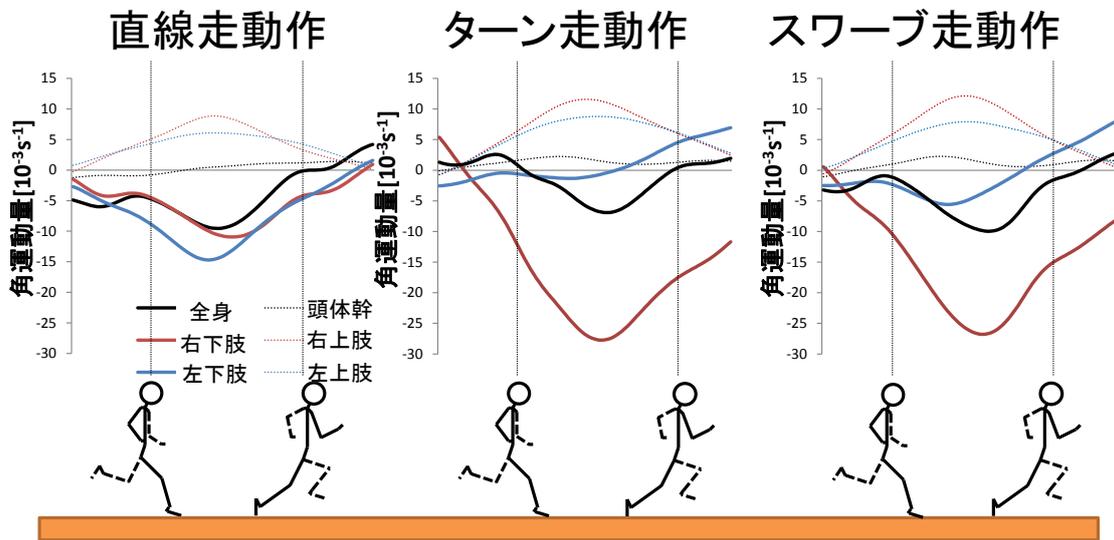


Figure 4-4 各セグメントの角運動量の経時データ

4. 考察

本研究の結果からターン走動作と同様にスワープ走動作においても方向転換前の空中期において既に準備動作が生じていることが示された。また、準備動作の程度はスワープ走動作の方がターン走動作と比較して小さいことが明らかとなった。

直線走動作における方向転換角度が他の 2 動作と比較して有意に小さく、加えて、ターン走動作とスワープ走動作の間に差がなかったことから、ターン走動作とスワープ走動作において接地期を通して同程度の進行方向の転換が行われていたことが示された。また、スワープ走動作における肩角度は全ての局面において直線走動作と差がなかったことから、方向転換に伴う身体の方位変化は生じていないことが示された。一方、ターン走動作では、離地時および分析終了時において直線走動作、スワープ走動作とは有意に異なる方位を示したことから、進行方向の転換に伴って身体を進行方向に正対させる為の方位変化が生じていたことが示された。これらの結果から全ての動作は設定条件通りに行われていたことが確認された。

接地直前の空中期における全身角運動量の鉛直成分が全動作間で異なっていたことから、ターン走動作とスワープ走動作では程度の異なる準備動作が生じていたことが示された。角運動量の経時データにおいて、ターン走動作とスワープ走動作では右下肢の角運動量に大きな減少方向への変化が見られた。また、分析開始時における右下肢の角運動量はターン走動作の方がスワープ走動作と比較して大きかったにも拘らず、接地時には右下肢の方が小さかった。これは接地直前の空中期後半において、ターン走動作の方がスワープ走動作と比較してより大きな転換方向の角運動量の転移および転換方向への反作用が他

のセグメントにもたらされたことを意味する。このように接地直前の空中期後半を通して右下肢の角運動量の変化パターンに各動作で異なる特徴が見られたことから、接地直前の空中期における全身角運動量の違いは、分析開始点において右下肢が有していた角運動量の違いによって生じたと予想される。全身の角運動量が保存される空中期におけるこのような変化は、セグメント間の角運動量の転移によって生じる。これらの結果から、ターン走動作ではスワープ走動作を上回る右下肢が有する転換方向の角運動量を他のセグメントに転移させることで、身体の方位を変化させていることが示された。

本研究で用いた角運動量の算出法において、下肢の角運動量はセグメント重心周りの角運動量と下肢が有する運動量の身体重心に対するモーメントの合計である。ターン走動作とスワープ走動作の間でセグメント重心周りの角運動量および下肢の運動量を比較したところ、平均値に差はなかった。したがって、ターン走動作とスワープ走動作における角運動量の違いは下肢重心と身体重心の位置関係の違いに起因していると考えられる。そこで身体重心に対する下肢重心の運動を **Figure4-5** に示す。接地直前の空中期において、ターン走動作の方がスワープ走動作よりも外側をスイングしている特徴が見受けられる。このようにターン動作ではスワープ動作と比較して身体重心から距離を大きく取った軌道で右下肢をスイングすることにより、より大きな転換方向の角運動量を準備していたことが示唆された。

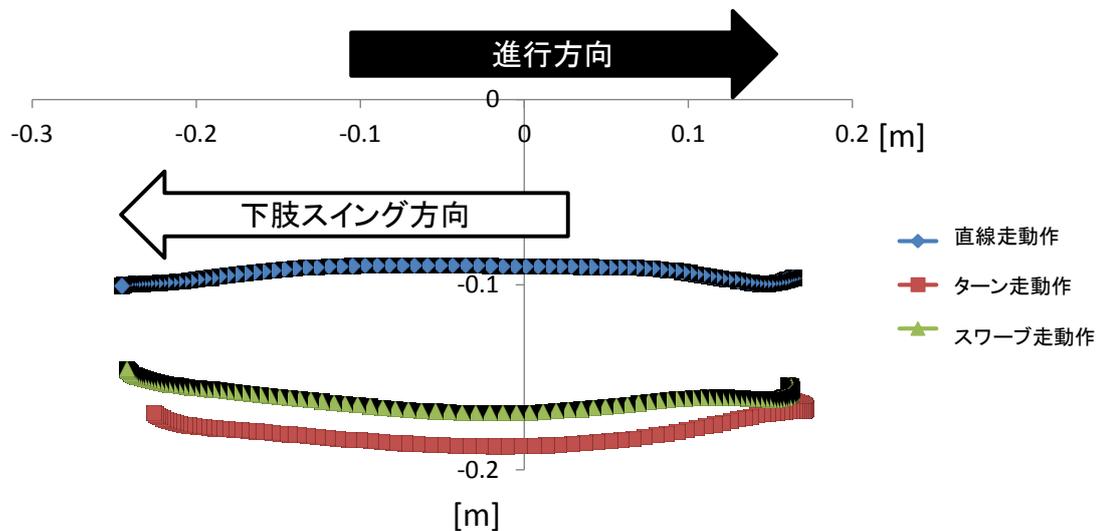


Figure 4-5 水平面における右下肢重心の軌跡

角運動量の経時データの結果において、分析区間全体を通して左下肢の角運動量に直線走動作と他の 2 動作で異なる特徴が見られた。右下肢と同様に、ターン走動作とスワープ走動作の間でセグメント重心まわりの角運動量および下肢の運動量の平均値に差がなかったことから、動作間で見られる左下肢角運動量の異なる経時変化も、下肢重心と身体重心との位置関係の違いに起因していると考えられる。接地直前の空中期に着目すると、下肢重心はターン走動作、スワープ走動作ともに、直線走動作よりも大きく内側を運動する特徴が見て取れる (Figure4-6)。このスイング軌道の違いが、左下肢の角運動量に動作間で異なる変化パターンを生み出したと考えられる。ターン走動作、スワープ走動作の接地直前の空中期における全身の角運動量が直線走動作と比較して転換方向にシフトした値であった。この差は、進行方向の転換を行う接地期以前の助走局面の接地期に生じた直線走動作とは異なる角力積に起因する。ターン走動作およびスワープ走動作が進行方向の転換を

開始する直前まで直線走動作と同様の角力積が獲得し続けたと仮定した場合、全身は直線走動作と同等の角運動量を有する為、本研究で得られた角運動量の結果と比較して、いずれかのセグメントの角運動量が減少するはずである。右足接地期に左方向へ進行方向の転換を行う場合、左下肢は身体重心の左側を前方へスイングする為、身体重心に対するモーメントアームが大きい程、角運動量は減少する。左下肢のスイング軌道をより外側にシフトさせることで、準備動作を伴わずにターン走動作およびスワープ走動作で進行方向を転換できる可能性が示唆された。

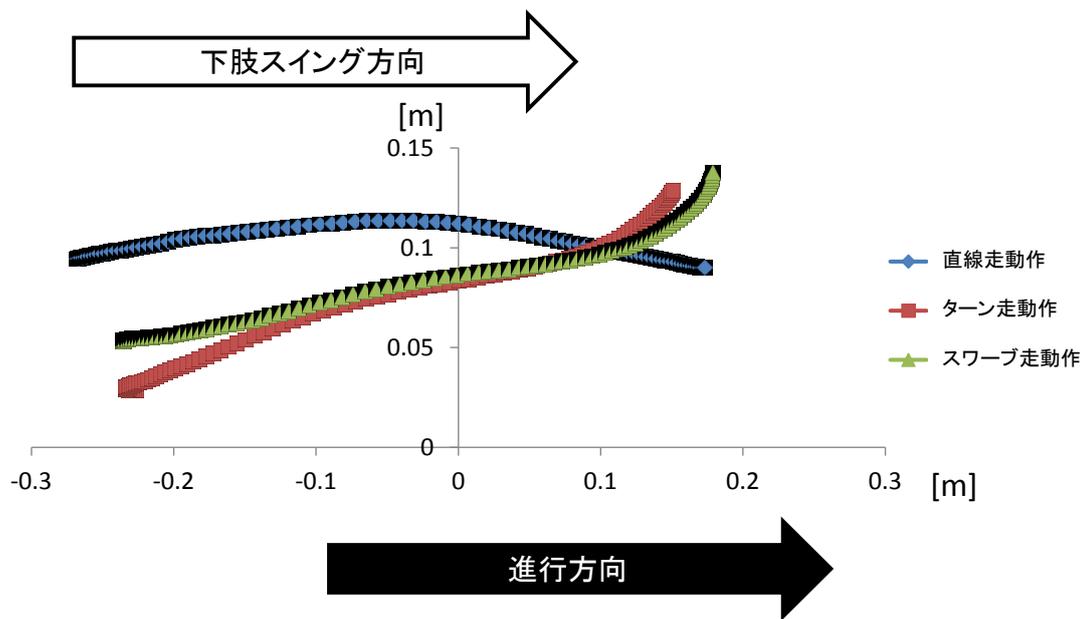


Figure 4-6 水平面における左下肢重心の軌跡

5. まとめ

本研究の目的はターン走動作とスワープ走動作における全身の回転運動の違いを明らかにすることであった。身体の方位変化に必要な右下肢の角運動量を事前に準備しなければならないターン動作と比較して、スワープ動作は少ない準備動作で進行方向を転換することが可能であった。方向転換の一步前の接地期において直線走動作と同様の角力積を獲得し、その後の空中期における左下肢の身体重心に対する回転半径を大きくすることで更に準備動作を抑制し得る可能性が示された。相手選手をかわす際やボールの動きに素早く反応する際などの準備動作が無い方が望ましい状況においては、ターン動作よりもスワープ動作の方が適していることが示唆された。

第5章 総括論議

5-1 各章で得られた結果の横断的解釈

第2章から第4章にかけて行われた各研究において、右足接地前後の空中期における全身角運動量の鉛直成分が共通して算出されている。本節ではこの変数に着目し、各章で得られた結果の横断的解釈について議論する。

直線走動作は第2章、第3章、第4章、全ての研究において同様の教示によって実施された。各研究において得られた直線走動作における全身角運動量の鉛直成分について2way-ANOVA（研究×局面）を用いて比較した。研究の要因は、2章、3章、4章であり、局面の要因は接地直前の空中期と離地直後の空中期であった。2way-ANOVAの結果に交互作用は見られず、局面の要因にのみ有意な主効果が見られた（ $p<0.001$ ）。また、曲線走動作における全身角運動量の鉛直成分についても同様に2way-ANOVA（研究×局面）を用いて比較した。研究の要因は3章と4章、局面の要因は接地直前の空中期と離地直後の空中期であった。2way-ANOVAの結果に交互作用は見られず、局面の要因のみに有意な主効果が見られた（ $p<0.001$ ）。研究間でそれぞれ共通した教示によって実施された直線走動作と曲線走動作において同様の結果が得られたことから、異なる被験者においても同様の運動様式で実験動作が行われており、データ取得の再現性も高かったと考えられる。

全ての研究を包括的に捉えた際に、研究デザインの如何により得られた知見が覆らないかを検討する為、各研究で得られた全身角運動量の鉛直成分について2way-ANOVA（動作×局面）を用いて横断的統計比較を行った。動作の要因は、直線走動作（2章、3章、4章）、曲線走動作（3章、4章）、ターン走動作#3（3章）、ターン走動作#4（4章）、スワープ走動

作の 5 水準，局面要因は接地直前の空中期，離地直後の空中期の 2 水準であった．ターン走動作は 3 章と 4 章の間で，分析範囲での設定条件は共通していたものの，その後の動作軌道についての設定が異なっていた為，ターン走動作#3 およびターン走動作#4 として個別の動作に規定した．2way-ANOVA の結果に有意な交互作用および両主効果が見られた．同局面における動作間で，全身角運動量の鉛直成分を Bonferroni 法により比較した (Figure 5-1)．曲線走動作における全身角運動量の鉛直成分が両局面において直線走動作を上回っていた ($p<0.001$)．この統計結果は，第 2 章の研究で得られた統計結果を支持するものであり，第 2 章で得られた知見の信頼性が確認された．ターン走動作#3 における全身角運動量の鉛直成分は，接地直前の空中期では曲線走動作と同等かつ直線走動作よりも大きく ($p<0.001$)，離地直後の空中期では直線走動作および曲線走動作と同等であった．第 3 章で得られた統計結果において，離地直後の空中期における全身鉛直角運動量はターン走動作よりも曲線走動作の方が大きかった ($p<0.05$) のに対して，横断的統計比較の結果に差は見られなかった ($p=0.56$)．第 3 章では，全身角運動量の鉛直成分における統計結果から，離地直後の空中期における身体の方位変化が曲線走動作では継続している一方で，ターン走動作#3 では生じていないことを示した．この特徴は，曲線走動作と直線走動作との対比較およびターン走動作#3 と直線走動作との対比較における結果を根拠としており，これらの対比較については横断的統計比較においても同様の結果が得られていることから，第 3 章で得られた知見は十分に信頼性が有ると考えられる．ターン走動作#4 における全身角運動量の鉛直成分は，接地直前の空中期では直線走動作 ($p>0.001$) およびスワープ走動作 ($p>0.01$) よりも大きく，離地直後の空中期においては直線走動作およびスワープ走動作

と同等であった。第 4 章で得られた統計結果において、接地直前の空中期における全身角運動量の鉛直成分は全動作間に有意差が見られたのに対して、横断的統計比較においてはスワープ走動作と直線走動作の間に差が見られなかった ($p=0.276$)。第 4 章においては、全動作間に有意差が見られた接地直前の空中期における全身角運動量の鉛直成分がターン走動作、スワープ走動作、直線走動作の順に大きかった結果から、進行方向の転換を行う接地期以前に生じる準備動作の程度はスワープ走動作の方がターン走動作よりも小さいという特徴を示した。一方、横断的統計比較においては異なる結果を示したものの、スワープ走動作と直線走動作の間に差が見られない結果は、スワープ走動作における準備動作の小ささを更に強調するものである。したがって、第 4 章で得られた知見は十分に信頼性が有ると考えられる。以上の横断的統計比較の結果から、第 2 章、第 3 章、第 4 章で得られた知見は研究デザインの如何により覆ることのない信頼性の有るものだと示された。

異なる研究で実施された動作の興味深い組み合わせとして、ターン走動作#3 とターン走動作#4 が挙げられる。これらの動作における設定条件は分析範囲においては共通しているものの、その後の範囲における設定条件が異なっていた。ターン走動作#3 においては分析対象の進行方向の転換を行った後、新たな進行方向への直線走動作を行わせた。一方で、ターン走動作#4 においては、分析対象の右足接地期において左方向への進行方向の転換を行った直後に、左足接地期で再度右方向へ進行方向の転換を行うことで、その後の直線走動作の軌道が助走時の軌道と平行になるよう設定した。ターン走動作では進行方向の転換を行う接地期以前に全身の回転運動において準備動作が生じるという第 3 章で得られた知見から、ターン走動作#4 の右足離地直後の空中期においては、その後に分析範囲外で行わ

れる右方向への進行方向の転換に向けての準備動作が生じていたと予想される。しかしながら、横断的統計比較の結果において、離地直後の空中期における全身角運動量の鉛直成分はターン走動作#3 とターン走動作#4 の間に差はなく、直線走動作との間にも差は無かった。これらの結果はターン走動作#4 において分析範囲外で行われた右方向へのターン走動作が、直線走動作と同様の状態から、つまり準備動作なしに行われた可能性を示唆するものである。ターン走動作#4 のように進行方向の転換を繰り返す動作は、一度の進行方向の転換とは異なる運動メカニズムによって行われている可能性が考えられる。今後の研究においては、分析区間を拡大し、複数回の進行方向の転換を組み合わせた動作を分析することで、準備動作を伴わない方向転換走動作の運動メカニズムを明らかにすることが期待される。

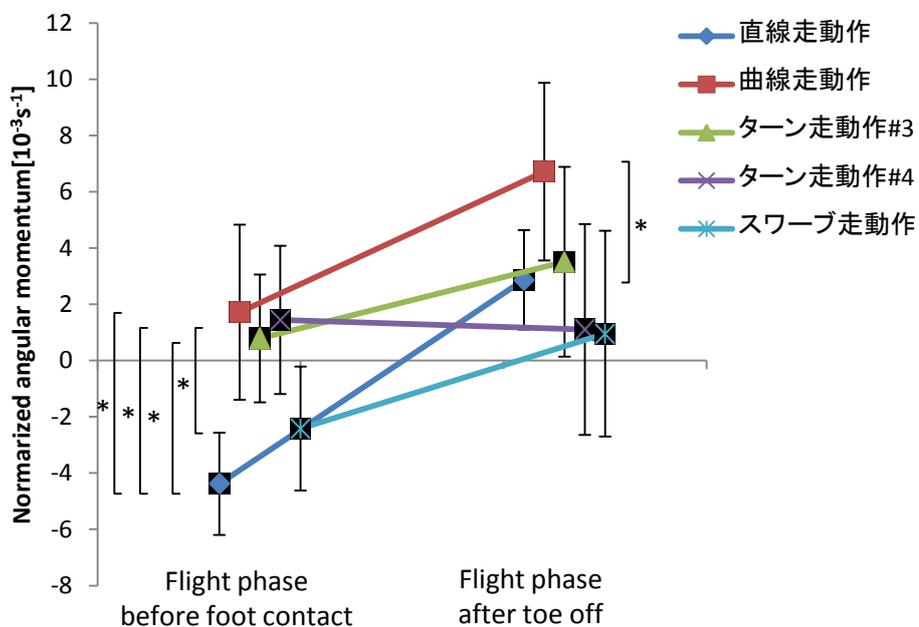


Figure 5-1 全身鉛直角運動量の横断的統計比較

5-2 方向転換走動作における能力向上を目的としたトレーニング法の提案

曲線走動作

第 2 章で行った研究により，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により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群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。また、第2章および第3章で行った研究により、曲線走動作では身体の方位変化を生み出す角運動量を維持する為に、接地期において左下肢を身体重心よりも右側でスイングする特徴が示された。動作スピードを向上させる為には、接地期に獲得する地面反力の左右成分の力積を増大させなければならない為、更なる全身の傾斜が求められる。角運動量を有していない状態で、左下肢が身体重心よりも右側に位置するほど全身を傾斜させた場合、身体重心が基底面から大きく逸脱する為に身体は転倒すると予想される。よって、曲線走動作中の極端な全身の傾斜は、全身が角運動量を有している為に可能となる特殊な姿勢であると考えられる。静的な状態では転倒してしまう程の極端な傾斜姿勢を習得する為には、転倒しないよう外的なサポートを受けつつ全身を傾斜させる感覚を習得することが望まれる。静的な状態で習得した全身を傾斜させる感覚を曲線走動作中に実践することで、より速い動作スピードでの疾走が可能となると期待される。

ターン走動作

第3章で行った研究により、ターン走動作と曲線走動作では身体の方位変化メカニズムが異なることが明らかとなった。よって、ターン走動作における能力を向上させる為には、

特有の運動メカニズムに基づいたトレーニングを行うことが求められる。ターン走動作は、相手選手を能動的にかわす際や、ボールや相手選手の動きに対して受動的に反応する際に用いられる。いずれの状況においても、準備動作なく進行方向を転換することが出来れば、総移動時間が短縮されることでより高い競技パフォーマンスに繋がると考えられる。ターン走動作における身体の方位変化は、主に右下肢から転移された角運動量と右下肢のスイングによる反作用によって生み出されていた。進行方向の転換以前から既に有していた右下肢の角運動量は、本研究のデータ取得において事前に動作の指示を与えたことに起因する可能性が考えられる。進行方向の転換以前にその兆候を出現させることなく身体を方位変化させる為には、右下肢のスイングによって獲得され得る反作用と接地期に獲得され得る転換方向へのモーメントのいずれかもしくは双方を増大させなければならない。接地位置は進行方向に対して身体重心よりも右側である為、接地期前半に生じるブレーキ方向の地面反力は反転換方向のモーメントを、後半に生じる加速方向の地面反力は転換方向のモーメントを生み出す。一方、地面反力の左右成分は接地期を通して左方向である為、接地位置が身体重心よりも前方に位置している区間では転換方向のモーメントを、後方に位置している区間では反転換方向のモーメントを生み出す。よって、水平面における地面反力の作用線が身体重心よりも前方を通過している区間において、転換方向へのモーメントを獲得することが可能となる。つまり、接地期に獲得する地面反力の力積を変化させることなく、より大きな転換方向の角力積を獲得する為には、地面反力の左右成分を接地期前半で大きく、接地期後半で小さくすることが求められる。また、右下肢の後方へのスイングによる反作用を大きくする為には、右下肢のスイング速度と身体重心に対するモーメント

アームを増大させることが求められる。直線走動作と同様の運動状態から、接地直前の空中期において右下肢を右方向に高速で運動させながら接地することで、接地期前半での左方向への地面反力および下肢のスイングによる反作用を増大させることで準備動作なしに身体を方位変化させることが可能となると考えられる。

スワープ走動作

スワープ走動作においては、他の方向転換走動作と比較して小さい準備動作で進行方向を転換し得ることが示された。フィールド・コート競技においては相手選手をかわす際やボールに素早く反応する際、準備動作なしに進行方向を転換できれば、目的を達成するまでの時間を短縮することが可能となる。前節で行った横断的統計比較においては、接地直前の空中期における全身角運動量の鉛直成分はスワープ走動作と直線走動作で同様であったことから、直線走動作中の任意のタイミングでスワープ走動作に移行することも可能だと期待される。準備動作なしにスワープ走動作を行う為には、セグメント間での作用・反作用を用いて進行方向の転換に必要な向心方向への地面反力を獲得し得る姿勢に変化させなければならない。事前の教示を与えず、直線走動作中にランプなどの合図で直後の接地期に進行方向の転換を行う練習により、セグメントの作用・反作用による姿勢制御の習得につながると期待される。

5-3 方向転換走動作における慢性障害リスクの評価

方向転換走動作における傷害リスクについては膝関節前十字靭帯損傷などの急性障害を対象に広く研究が行われている。(Besier et al., 2001; Cochrane et al., 2010; Dowling et al., 2010; Mclean et al., 1999) 一方, バスケットボール選手を対象とした障害に関する疫学調査において, 急性障害である膝関節の靭帯損傷および足関節捻挫に次いで, 足や下腿における疲労骨折の発生頻度が高いと報告されている (Dick et al., 2007). 下肢の疲労骨折は陸上競技の長距離選手に頻発する慢性障害として広く認知されているが, このような方向転換走動作を繰り返し行うフィールド・コート競技選手にも広く発症する.

下肢, 特に脛骨の疲労骨折については, 発症リスクについて地面反力の特徴から広く研究が行われている (Bennel et al., 2004; Clossley et al., 1999; Grimston et al., 1991; Zifchock et al., 2006). 一方で, 脛骨疲労骨折の既往歴の有無により特徴が異なっていたことから, 地面から受けるフリーモーメントも発症リスクの一つとして挙げられている (Miller et al., 2007; Milner et al., 2006; Pohl et al., 2008). 曲線走動作やターン走動作では身体の方角変化を伴う為, 身体重心まわりの地面反力モーメントとフリーモーメントにより直線走動作とは異なる回転効果を地面から得なくてはならない. また, スワープ走動作においても, 向心方向への地面反力が直線走動作とは異なる身体重心まわりのモーメントを生み出しながらも, 直線走動作と同様の角運動量変化を示したことから, フリーモーメントの特徴は直線走動作とは異なると予想される. 本節では, 直線走動作とは異なる特徴を示すと予想される方向転換走動作におけるフリーモーメントに着目し, フィールド・コート競技における脛骨疲労骨折の発症リスクについて検討する.

動作の分類は横断的統計比較と同様に 5 動作とし、先行研究 (Miller et al., 2007; Milner et al., 2006; Pohl et al., 2008) において既往歴の有無による差が見られたフリーモーメントの大きさの最大値を動作間で比較した。フリーモーメントは身体質量と身長²で標準化し、 10^{-3} を乗じて示した。フリーモーメントの大きさの最大値は、直線走動作において $62.4 \pm 14.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、曲線走動作において $65.6 \pm 38.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、ターン走動作#3 において $55.8 \pm 20.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、ターン走動作#3 において $56.4 \pm 19.2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、スワープ走動作において $51.1 \pm 19.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ であり、全動作間に差は見られなかった。脛骨疲労骨折の発症リスクとされているフリーモーメントの大きさの最大値について、各種の方向転換走動作における個別の特徴は見られなかった。各研究における被験者は、現在障害を有していないことを条件としてリクルートされた為、各被験者における脛骨疲労骨折の既往歴は不明である。脛骨疲労骨折の既往歴の有無に着目し、方向転換走動作におけるフリーモーメントを比較することで、方向転換走動作を頻繁に行うフィールド・コート競技における脛骨疲労骨折の予防に繋がる知見を明らかにすることが期待される。

5-4 本研究のリミテーション

本学位論文では、頭体幹の方位変化における特徴の違いから実験的に規定した 3 種の方向転換走動作を対象とした。しかし、実際のフィールド・コート競技における方向転換走動作は、刻一刻と変化する相手選手の動きやボールの位置などの状況に応じて、多種多様な運動様式で行われる。したがって、本研究で得られた知見を適用し得る範囲を特定する為には、運動様式の多様性における、本研究で対象とした動作の運動様式の位置づけを考察する必要がある。本学位論文において分析対象とした 3 種の方向転換走動作は、実際の試合で行われる動作の分類法である Bloomfield Movement Classification (Bloomfield et al., 2004) を基に規定した。したがって、実際の試合で行われる多種多様な方向転換走動作は、3 種の動作のいずれかに分類される為、本研究で明らかとなった各動作における運動学的特徴のいずれか、もしくは複数の特徴を複合的に有すると考えられる。3 種の方向転換動作に直線走動作を加えた 4 種の動作における運動様式に着目すると、ターン走動作と曲線走動作においては身体の方位変化が生じる一方で、スワープ走動作と直線走動作では生じない。また、動作の周期性に着目すると、曲線走動作と直線走動作では周期的に動きが反復される一方で、ターン走動作とスワープ走動作は直線走動作から突発的に生じる周期性の無い動作である。すなわち、これらの 4 種の動作における運動様式は、頭体幹の方位変化の有無と動作の周期性の有無についての各種の組み合わせに相当する。したがって、実際の試合で行われる方向転換走動作の多種多様な運動様式は、本研究で対象とした極端な運動様式で行われる 4 種の動作を端点とする 2 次元の連続性の中に存在すると考えることが出来る (Figure 5-2)。本研究で明らかとなった技術を規定する運動学的因子は、各種の

特定の運動様式に限定されたものではなく、これらが複合的に組み合わせられることで多種多様な運動様式における技術が形成されていると考えられる。

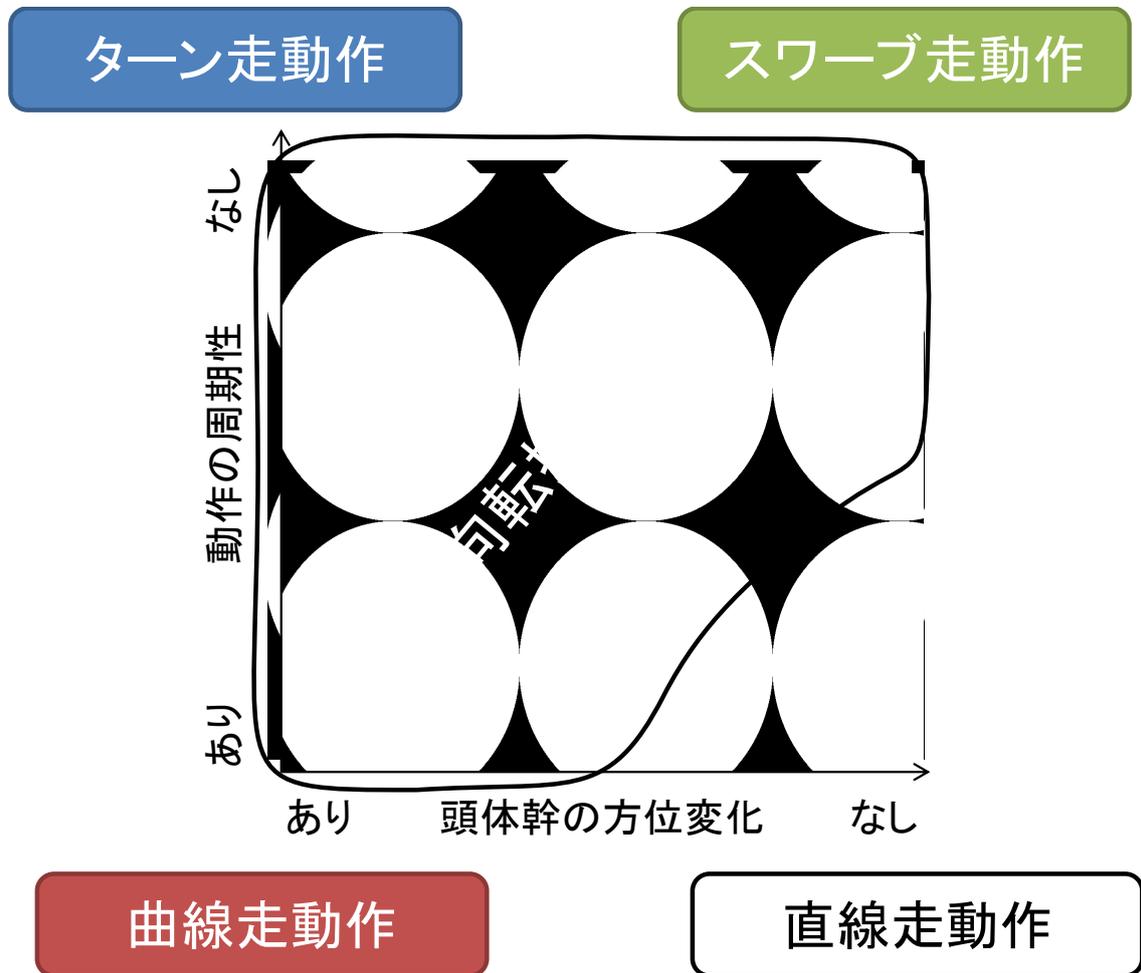


Figure 5-2 多種多様な方向転換動作における運動様式の連続性

各研究に参加した被験者が専門とする競技は様々であった。よって、本研究により明らかとなった特徴がフィールド・コート競技選手の特徴と正確に一致するかは定かでない。被験者 10 名の内、第 2 章では 8 名が、第 3 章および第 4 章では 6 名が方向転換走を頻繁に行う競技を専門としていた。また、他の競技を専門としていた被験者の結果に、異なる特

徴は見られなかった。加えて、各研究に参加した全被験者はアスリートの平均に準ずる身体特性であった。これらの内容から、本研究において明らかとなった知見は、一般的なアスリートがフィールド・コート競技で行う実際の動作にも適応し得ると考えられる。

各研究で行った方向転換走動作では進行方向の転換についての指示を事前に与えた為、事前の予測による動作への影響が生じていた可能性が考えられる。事前の予測による動作への影響を排除する実験方法として、ランプの点灯により進行方向の転換を指示する方法が一般的に用いられている。この方法を用いた Weinhandl (2013)や O'Connor (2009)の研究では、接地の瞬間とランプの点灯の間隔を可能な限り短くするよう試みたところ、接地位置の 3m 手前を通過した瞬間にランプを点灯させる設定となった。ランプが点灯した瞬間における被験者の位置から接地位置までの距離である 3m は、一般的なステップ長を大きく上回る為、3m の区間で方向転換直前の接地が行われていたと予想される。つまり、事前の予測を排除した先行研究における方向転換走動作においても、本研究の分析区間である接地直前の空中期では既に指示による影響が生じていたと考えられる。本研究ではターン走動作の助走を 10m と設定した為、3m 以上手前から事前の予測による準備動作が生じていた可能性は排除できないが、事前の予測なしのターン走動作においても接地直前の空中期は既に意思決定の後である為、本研究により得られた知見は事前の予測を伴わないターン走動作にも応用することが可能であると考えられる。また、本研究で設定した曲線走動作における走路半径は、周期的な走動作で 5m/s の走スピードを維持できる最小の半径として予備実験を経て設定した。よって、本研究における走スピードは指定した走路条件においては全力に近かったと予想される。したがって、本研究により得られた知見はフィールド・

コート競技の試合で実際に行われる全力での動作にも応用し得ると考えられる。

各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ける下肢の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起因していると予想される。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非対称性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。

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 5m/s に、軌道半径は 5m 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 5m/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、 5m/s の走スピードは 5m 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。

第6章 結論

本学位論文では、3種の方向転換走動作について角運動量を用いた動力的分析を行うことで、方向転換走動作の技術を規定する運動学的因子を明らかにすることを目的とした。各研究により、それぞれの運動様式における技術を規定する運動学的因子が以下のように明らかとなった。

- 同方向への身体の方位変化が周期的に継続する方向転換走動作においては、大きな全身の角運動量を維持すること、および、内側下肢の運動によって大きな反作用を生み出すことで頭体幹を方位変化させる技術が優れた技術に繋がることが示された。
- 身体の方位変化が突発的に行われる方向転換走動作においては、限られた地面反力から大きな角力積を獲得すること、および、接地する下肢セグメントの運動により大きな反作用を生み出すことで、頭体幹を方位変化させる技術が優れた能力に繋がることが示された。
- 身体の方位変化が生じない方向転換走動作においては、セグメント間の作用・反作用のみを用いて、進行方向の転換に要される向心力を獲得しうる姿勢を生み出すことが頭体幹を方位変化させる技術が優れた技術に繋がることが示された。

[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. *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
- Andrews, J.R., McLeod, W.D., Ward, T., and Howard, K. (1977) The cutting mechanism. *American Journal of Sports Medicine*, 5: 111-121.
- Appleby, B. and Dawson, B., (2002) Video analysis of selected game activities in Australian rules football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 5: 129-142.
- Ariel, V.D., Stefano, C., Ajit, M.W.C., and Thomas, P.A. (2010) Shoe-surface friction influences movement strategies during a sidestep cutting task: Implications for anterior cruciate ligament injury risk. *American Journal of Sports Medicine*, 38: 478-485.
- Baechle, T.R. and Earle, R.W. (2008) *Essentials of strength training and conditioning* (3rd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Bennel, K., Crossley, K., Jayarajan, J., Walton, E., Warden, S., Stephen, Z., Wrigley, T. (2004) Ground reaction forces and bone parameters in female s with tibial stress fracture. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36: 397-404.
- Besier, T.F., Lloyd, D.G., Ackland, T.R., Cochrane, J.L. (2001) Anticipatory effects on knee joint loading during running and cutting maneuvers. *Medicine and Science in*

- Sports and Exercise, 33: 1176–1181.
- 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.
- Brughelli, M., Cronin, J., Levin, G., and Chaouachi, A. (2008) Understanding change of direction, ability in sport: A review of resistance training studies *sports medicine*, 38: 1045-1063.
- Buchheit, M., Haydar, B., and Ahmaidi, S. (2012) Repeated sprints with directional changes: do angles matter? *Journal of Sports Sciences*, 30: 555-562.
- Buttifiant, D., Graham, K., and Cross, K. (2002) Agility and speed in soccer players are two different performance parameters. In: Spinks W, Reilly T, Murphy AJ, editors. *Science and football IV*. London: Routledge: 329-32.
- Castillo-Rodriguez, A., Fernandez-Garcia, J.C., Chinchilla-Minguet, J.L., and Carnero, E.A. (2012) Relationship between muscular strength and sprints with changes of direction. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26: 725-732.
- Chang, Y. H. and Kram, R. (2007) Limitations to maximum running speed on flat curves. *Journal of Experimental biology*, 210: 971-982.

- Christou, M., Smilios, I., Sotiropoulos, K., Volaklis, K., Piliandis, T., and Tokmakidis, S.P. (2006) Effects of resistance training on the physical capacities of adolescent soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20: 783-791.
- Cochrane, J.L., Lloyd, D.G., Besier, T.F., Elliott, B.C., Doyle, T.L.A., and Ackland, T.R. (2010) Training affects knee kinematics and kinetics in cutting maneuvers in sport. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42: 1535–1544.
- Condello, G., Minganti, C., Lupo, C., Benvenuti, C., Pacini, D., and Tessitore, A., (2013) Evaluation of change-of-direction movements in young rugby players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8: 52-56.
- Cressey, E.M., West, C.A., Tiberio, D.P., Kraemer, W.J., and Maresh, C.M. (2007) The effects of ten weeks of lower-body unstable surface training on markers of athletic performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21: 561-567.
- Cronin, J., McNair, P.J., and Marshall, R.N. (2003) The effects of bungy weight training on muscle function and functional performance. *Journal of Sports Sciences*, 21: 59-71.
- Crossley, K., Bennell, K.L., Wrigley, T., and Oakes, B.W. (1999) Ground reaction forces, bone characteristics, and tibial stress fracture in male runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31: 1088–1093.
- 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.
- Dick, R., Agel, J., and Marshall, S.W. (2007) National Collegiate Athletic Association injury surveillance system commentaries: introduction and methods. *Journal of Athletic Training*, 42 :173–182.
- Docherty, D., Wenger, H. and Neary, P. (1988). Time– motion analysis related to the physiological demands of rugby. *Journal of Human Movement Studies*, 14: 269-277.
- 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.
- Fino, P. C., Lockhart, T. E., and Fino, N. F. (2015) Corner height influences center of mass kinematics and path trajectory. *Journal of Biomechanics*, 48: 104-112.
- Fry, A., Kraemer, W.J., Weseman, C., Conroy, B.P., Gordon, S.E., Hoffman, J.R., and Maresh, C.M. (1991) The effects of an off-season strength and conditioning program on starters and non-starters in women’s intercollegiate volleyball. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 5: 174-181.
- Gabbett, T.J., Kelly, J.N., and Sheppard, J.M. (2008) Speed, change of direction speed, and reactive agility of rugby league players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22: 174-181.
- Gabbett, T.J. (2006) Skill-based conditioning games as an alternative to traditional conditioning for rugby league players. *Journal of Strength and Conditioning*

- Research, 20: 309-315.
- Gabbett, T., Georgieff, B., Anderson, S., Cotton, B., Savovic, D., and Nicholson, L. (2006) Changes in skill and physical fitness following training in talent-identified volleyball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20: 29-35.
- Gabbett, T.J. (2006) Performance changes following a field conditioning program in junior and senior rugby league players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20: 215-221.
- Grimston, S.K., Engsberg, J.R., Kloiber, R., Loiber, R., and Hanley, D.A. (1991) Bone mass, external loads, and stress fractures in female runners. *Journal of Applied Biomechanics*, 7: 293–302.
- Hamill, J., Murphy, M., and Sussman, D. (1987) The effects of track turns on lower extremity function. *International Journal of Sports Biomechanics*, 11: 251-256.
- Harris, G., Stone, M., O'bryant, H., Proulx C.M., and Johnson R.L. (2000) Short-term performance effects of high power, high force, or combined weight-training methods. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 14: 14-20.
- Hinrichs, R.N. (1987) Upper extremity function in running. II : Angular momentum considerations. *International Journal of Sport Biomechanics*, 3: 276-286.
- Hoffman, J.R., Cooper, J., Wendell, M., and Kang J. (2004) Comparison of Olympic vs traditional power lifting training programs in football players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18: 129-35.

- Hoffman, J.R., Ratamess, N.A., Cooper, J.J., Kang, J., Chilakos A., and Faigenbaum, A.D. (2005) Comparison of loaded and unloaded jump squat training on strength / power performance in college football players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19: 810-815.
- Hoffman, J., Ratamess, N., Klatt, M., Faigenbaum A.D., and Kang, J. (2007) Do bilateral power deficits influence direction-specific movement patterns? *Research in Sports Medicine*, 15: 125-132
- Jindrich, D. L. and Full, R. J. (1999) Many-legged maneuverability: Dynamics of turning in hexapods. *Journal of Experimental Biology*, 202: 1603-1623.
- 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.
- 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.
- Kraemer, W., Hakkinen, K., Triplett-Mcbride, N., Fry, A.C., Koziris, L.P., Ratamess, N.A., Bauer, J.E., Volek, J.S., McConnell, T., Newton, R.U., Gordon, S.E., Cummings, D., Hauth, J., Pullo, F., Lynch, J.M., Mazzetti, S.A., and Knuttgen, H.G. (2003) Physiological changes with periodized resistance training in women tennis players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35: 157-168.
- 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.
- Little, T. and Williams, A.G. (2005) Specificity of acceleration, maximum speed, and agility in professional soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19: 76-78.
- Lockie, R.G., Callaghan, S.J., Berry, S.P., Cooke, E.R.A. Jordan, C.A., Luczo, T.M., and Jefferies M.D. (2014) Relationship between unilateral jumping ability and asymmetry on multidirectional speed in team-sport athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28: 3557-3566.
- Loughran, B. and O'Donoghue, P. (1999). Time–motion analysis of work-rate in club netball. *Journal of Human Movement Studies*, 36, 37–50.
- Malisoux, L., Francaux, M., Nielens, H., Theisen, D. (2006) Stretch-shortening cycle exercises: an effective training paradigm to enhance power output of human single muscle fibers. *Journal of Applied Physiology*, 100: 771-779.
- Mayhew, J.L., Piper, F.C., Schwegler, T.M., Ball, T.A. (1989) Contributions of speed, agility and body composition to anaerobic power measurement in college football players. *Journal of Applied Sport Science Research*, 3: 101-106.
- Mayhew, S. and Wenger, H. (1985). Time–motion analysis of professional soccer. *Journal of Human Movement Studies*, 11, 49–52.
- McErlean, C., Cassidy, J. and O'Donoghue, P. (2000). Time–motion analysis of gender

- and positional effects on work-rate in elite Gaelic football competition. *Journal of Human Movement Studies*, 38, 269–286.
- McLean, S.G., Neal, R.J., Myers, P.T., and Walters, M.R. (1999) Knee joint kinematics during the sidestep cutting maneuver: potential for injury in women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1999;31:959-968.
- Meylan, C., McMaster, T., Cronin, J., Mohammad, N.I., Rogers, C., and DeKlerk, M. (2009) Single-leg lateral, horizontal and vertical jump assessment: Reliability interrelationships, and ability to predict sprint and change-of-direction performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23: 1140-1147.
- Miller, R.H., Lowry, J.L., Jason, S.M., and Gillette, C. (2007) Lower extremity mechanics of iliotibial band syndrome during an exhaustive run. *Gait and Posture*, 26: 407-413.
- Miller, M.G., Herniman, J.J., Ricard, M.D., Cheatham, C.C., and Michael, T.J. (2006) The effects of a 6-week plyometric training program on agility. *Journal of Sports Science and Medicine*, 5: 459-465.
- Milner, C.E., Ferber, R., Pollard, C.D., Hamill, J., Davis, I.S. (2006) Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38: 323-328.
- Novacheck, T. F. (1998) The Biomechanics of running. *Gait and Posture*, 7: 77-95.
- O'Connor, K. M. and Bottum, M. C. (2009) Differences in cutting knee mechanics

- based on principal components analysis. *Medicine and Science in Sports Exercise*, 41: 867–878.
- 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
- Pauole, K., Madole, K., Garhammer, J., Lacourse, M., and Rozenek, R. (2000) Reliability and validity of the t-test as a measure of agility, leg power, and leg speed in college-aged men and women. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 14: 443-450.
- Peterson, M., Alvar, B., and Rhea, M. (2006) The contribution of maximal force production to explosive movement among young collegiate athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20: 867-873.
- Pohl, M.B., Mullineaux, D.R., Milner, C.E., Hamill, J., and Davis, I.S. (2008) Biomechanical predictors of retrospective tibial stress fractures in runners. *Journal of Biomechanics*, 41: 1160-1165.
- Polman, R., Walsh, D., Bloomfield, J., and Nesti, M. (2004) Effective conditioning of female soccer players. *Journal of Sports Science*, 22: 191-203
- Reilly, T. and Thomas, V. (1976) A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play. *Journal of Human Movement Studies*, 2: 87-89.

- 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.
- Roetert, E.P., Garrett, G.E., Brown, S.W., and Camaione, D.N. (1992) Performance profiles of nationally ranked junior tennis players. *Journal of Applied Sport Science Research*, 6: 225-31.
- Ruscello, B., Tozzo, N., Briotti, G., Padua, E., Ponzetti, F., and D'Ottavio, S. (2013) Influence of the number of trials and the exercise to rest ratio in repeated sprint ability, with changes of direction and orientation. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27: 1904–1919.
- 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.
- Taylor, J. (2003) Basketball: Applying time motion data to conditioning. *Strength and Conditioning Journal*, 25: 57-64.
- Thomas, J.R., Nelson, J.K., and Silverman, S.J. (2010) *Research methods in physical activity* (6th ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Tricoli V.A., Lamas, L., Carnevale, R., Ugrinowitsch, C. (2005) Short-term effects on lower-body functional power development: weightlifting vs vertical jump training programs. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19: 433-437
- Weeler, K.W., Askew, C.D., and Sayers, M.G. (2010) Effective attacking strategies in rugby union. *European Journal of Sport Sciences*, 10: 237-242.
- Weinhandl, J.T., Earl-Boehm, J.E., Ebersole, K.T., Huddleston, W.E., Armstrong, A.S.R., and O'Connor, K.M. (2013) Anticipatory effects on anterior cruciate ligament loading during sidestep cutting. *Clinical Biomechanics*, 28: 655-663.
- 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.

- Wong, D.P., Chan, G.S., and Smith, A.W. (2012) Repeated sprint and change-of-direction abilities in physically active individuals and soccer players: Training and testing implications. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26: 2324–2330.
- Young, W.B., McDowell, M.H., and Scarlett, B.J. (2001) Specificity of sprint and agility training methods. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15: 315-319.
- Young W.B., James, R., Montgomery, I. (2002) Is muscle power related to running speed with changes of direction? *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 42: 282–288.
- Young, W.B., Miller I.R., and Talpey S.W. (2015) Physical qualities predict change-of direction speed but not defensive agility in Australian rules football. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29: 206-212.
- Zifchock, R.A., Davis, I., and Hamill, J. (2006) Kinetic asymmetry in female runners with and without retrospective tibial stress fractures. *Journal of Biomechanics*, 39: 2792–2797.

謝辞

本学位論文の執筆は、矢内利政教授（早稲田大学スポーツ科学学術院）の指導のもとに行われました。他大学からの進学を快く受け入れた頂いた矢内教授には、筆舌に尽くしがたい程に感謝致しております。6年間の指導により習得した知識や技能が、現在および未来の私を形成する重要な要素であることは疑いようもありません。これからは、矢内教授が目指されているスポーツ科学研究の発展に貢献することで、これまでの恩義に報いることができるよう努めて参ります。

副査として本学位論文の審査を引き受けた下さった川上泰雄教授（早稲田大学スポーツ科学学術院）、彼末一之教授（早稲田大学スポーツ科学学術院）に心より感謝申し上げます。審査過程で頂戴したご指摘やコメントは、本学位論文を発展させる上で大変有意義なものとなりました。

苦楽を共にした研究室の皆さまには大変感謝しております。矢内研究室に籍を置いた6年間は生涯忘れることの出来ない財産となりました。皆さまの支えや激励があったからこそ、本学位論文の完成に至ることができました。今後は一人の研究者として学术交流を継続して頂ければ幸いです。

最後に、三十路を迎えるまで学生を続けた私を温かく見守り支えてくれた家族と、新たに家族の一員となった妻、緑に感謝します。

2016年1月 佐藤隆彦