

博士論文

走高跳のパフォーマンス獲得に関わる技術要因の検討

平成 30 年度

筑波大学 人間総合科学研究科 コーチング学専攻

201630481

戸邊 直人

# 目次

表のタイトル一覧.....	i
図のタイトル一覧.....	ii
博士論文に関する業績一覧.....	iv
第1章 緒言.....	1
第2章 文献研究.....	4
1. 跳躍に関する研究.....	4
(1) 跳躍のメカニズム.....	4
(2) 跳躍の遂行に要求される能力.....	4
(3) 跳躍能力を高めるためのトレーニング.....	5
2. 走高跳に関する研究.....	6
(1) 走高跳の競技特性.....	6
(2) 走高跳の踏切動作における跳躍高獲得の機序.....	8
(3) 走高跳の踏切技術の類型化.....	9
(4) 高い競技力を有する選手の動作分析.....	10
(5) 走高跳のトレーニング.....	11
3. 文献研究で得られた知見.....	12
第3章 研究目的.....	14
1. 研究目的.....	14
2. 研究課題.....	14
第4章 研究の意義・仮説および限界.....	15
1. 研究の意義.....	15
2. 研究の仮説.....	15

3. 研究の限界 .....	15
(1) 対象者による限界 .....	15
(2) 研究の方法による限界 .....	16
4. 作業の仮定 .....	16
第5章 走高跳の踏切局面における身体動作および下肢3関節の力・パワー発揮特性（研究課題1） .....	18
1. 目的 .....	18
2. 方法 .....	19
(1) 対象者 .....	19
(2) 実験試技 .....	20
(3) 測定項目および測定方法 .....	20
(4) 算出項目 .....	21
(5) 動作の局面定義およびデータの規格化 .....	22
(6) 統計処理 .....	22
3. 結果 .....	22
4. 考察 .....	33
(1) 踏切局面における身体のキネマティクス .....	33
(2) 走高跳の踏切局面における下肢3関節キネティクスの特徴 .....	34
(3) トレーニング実践への示唆 .....	37
5. 要約 .....	38
第6章 走高跳の曲線助走における踏切準備動作の検討（研究課題2） .....	40
1. 目的 .....	40
2. 方法 .....	41
(1) 対象者 .....	41
(2) 実験試技 .....	41

(3) 測定項目および測定方法 .....	41
(4) 算出項目 .....	42
(5) 統計処理 .....	42
3. 結果 .....	43
.....	47
4. 考察 .....	51
(1) 踏切準備局面における身体重心高および身体重心水平速度の変化 .....	51
(2) 身体の傾きと膝関節角度からみた踏切準備動作 .....	52
(3) 現場への示唆 .....	53
5. 要約 .....	55
第7章 一流走高跳選手のパフォーマンス向上過程における縦断的動作分析 (研究課題3)	
.....	57
1. 目的 .....	57
2. 方法 .....	58
(1) 主体者および対象者 .....	58
(2) 対象期間 .....	58
(3) 競技活動に関する資料 .....	58
3. 結果 .....	61
1. 対象者のトレーニング過程および技術変化の概要 .....	61
(1) 対象期間におけるパフォーマンスの変化 .....	61
(2) 対象期間におけるトレーニングとその評価 .....	61
(3) 対象期間における走高跳パフォーマンスの定性的変化 .....	69
(4) バイオメカニクスの動作分析による走高跳パフォーマンスの定量的評価 .....	69
4. 考察 .....	72
(1) 対象期間における対象者の体力的要因の変化 .....	72

(2) 対象期間における対象者の技術変化 .....	73
5. 要約 .....	77
第8章 討論 .....	78
1. 走高跳のパフォーマンス決定に貢献する要因の検討 .....	79
(1) 踏切局面における鉛直速度獲得に貢献する要因 .....	79
(2) 踏切準備局面における有効な技術要因 .....	81
(3) 踏切準備局面から踏切局面における有効な技術要因の時系列的体系化 .....	82
2. 走高跳の競技実践時における個別性への配慮の重要性 .....	83
3. 今後の課題 .....	85
(1) 助走局面における動作の更なる解明 .....	85
(2) 空中局面の動作分析 .....	86
(3) 技術タイプの類型化 .....	86
(4) 縦断的分析や事例研究による知見の蓄積 .....	87
第9章 結論 .....	88
参考文献 .....	90
付録 .....	I
関節角度の算出方法および定義 .....	I
1. 関節軸座標系の定義 .....	I
2. 関節角度の定義 .....	IV
参考資料 .....	V

## 表のタイトル一覧

表 1 踏切時のキネマティクス変数と踏切離地時身体重心鉛直速度との相関係数

表 2 走高跳の踏切動作における各種キネティクス変数

表 3 キネティクス変数と鉛直速度との間の相関係数一覧

表 4 各局面における各種変数の一覧と多重比較

表 5 各局面における身体内傾角および身体後傾角と身体重心高との偏相関係数

表 6 対象期間における試合一覧

表 7 月毎のトレーニング概要

表 8 対象者の形態の変化

表 9 対象者の各種コントロールテストにおける記録の変化

表 10 踏切局面のバイオメカニクスのパラメーター

## 図のタイトル一覧

図 1 踏切動作中の身体重心高と身体重心鉛直速度の変化

図 2 踏切動作中の地面反力の変化

図 3 走高跳の踏切局面における股関節の関節角度, 角速度, 関節トルク, 関節トルクパワーの変化

図 4 走高跳の踏切局面における膝関節の関節角度, 角速度, 関節トルク, 関節トルクパワーの変化

図 5 走高跳の踏切局面における足関節の関節角度, 角速度, 関節トルク, 関節トルクパワーの変化

図 6 各局面における身体重心高

図 7 各局面における身体内傾角

図 8 各局面における身体後傾角

図 9 各局面における膝関節角度

図 10 各局面における膝関節角度と身体重心高の相関係数

図 11 対象者 G の身体重心の軌跡と各歩の接地位置

図 12 各種トレーニングにおける月毎の実施回数

図 13 月毎の各種トレーニング実施回数の割合の変化

図 14 対象期間における踏切動作の変遷

図 15 アームアクションの変更による踏切接地時の姿勢の変化

図 16 研究課題間における身体後傾角と身体重心鉛直速度との関係性の相異



## 博士論文に関する業績一覧

本論文は、以下に示した投稿論文、学会発表をまとめたものである。

### 【原著論文】

戸邊直人・林 陵平・苅山 靖・木越清信・尾縣 貢 (2018) 一流走高跳選手のパフォーマンス向上過程における事例研究. コーチング学研究, 31(2): 239-251.

戸邊直人・林 陵平・苅山 靖・木越清信・尾縣 貢 (2019) 走高跳の曲線助走における踏切準備動作の検討. 陸上競技学会誌, 17(1): 17-23.

### 【学会発表】

戸邊直人・苅山 靖・凶子浩二：男子走高跳トップ選手におけるパフォーマンスの向上とそのトレーニングに関するコーチング学的研究. ~オリンピック標準記録である 2m28 まで記録を向上させた男子選手の事例を手がかりにして~. 日本コーチング学会第 26 回大会：2014 年 3 月. (学会賞)

戸邊直人・苅山 靖・凶子浩二：3D キネティクスを用いた男子走高跳トップジャンパーの技術評価. 日本コーチング学会第 27 回大会：2015 年 3 月. (学会賞)

戸邊直人・林 陵平・苅山 靖・木越清信・尾縣 貢・凶子浩二：走高跳の踏切局面における 3D キネティクスと鉛直速度との関係. 日本陸上競技学会第 15 回大会：2016 年 12 月.

## 第1章 緒言

陸上競技の走高跳は曲線を用いた助走から片脚で踏み切り、どれだけ高いバーを越えることができるかを競う競技であり、踏切動作によって獲得した身体の鉛直速度がパフォーマンスの決定に深く関わっている(阿江, 1996a; 関岡・栗原, 1978). また, 走高跳の踏切動作は約 0.15 秒という極めて短い時間内に身体の屈曲伸展運動, 起こし回転運動, 脚や腕の振り込み動作の 3 つの要素によって, 身体の鉛直速度を獲得することを目的とした動作であり(阿江ほか, 2008; Dapena, 2000; Isolehto et al, 2007; 小林, 1979), 中でも起こし回転運動で獲得される身体の鉛直速度は, 踏切動作で獲得される身体の鉛直速度全体の 70%にも上ることが報告されている(阿江, 1996a). 一方で, 踏切動作中は, その短時間に身体の水平速度が約 4 m/s も減少することが報告されており(阿江ほか, 2008; Isolehto et al, 2007), さらに, 踏切動作中には体重の 5 倍以上もの地面反力が記録されたことが報告されていることから(Čoh, 2010), 踏切動作中の下肢では非常に大きな力・パワー発揮が遂行され, それがパフォーマンスの獲得に大きく貢献していることが考えられる. しかしながら, 踏切動作中に発揮された力やパワーとパフォーマンスとの関係性について検討した研究は見当たらず, 走高跳の踏切動作における下肢の力・パワー発揮特性の詳細な解明には至っていない. 加えて, これまでに走高跳の踏切局面における動作とパフォーマンスとの関係性について検討した研究は極めて少なく, より高いパフォーマンスを獲得するために要求される技術要因についても未解明な部分が多い.

また, 走高跳において今日の主流となっている背面跳は, 助走の軌跡がアルファベットの「J」の字のように前半部が直線, 後半部が曲線を描くことが特徴として挙げられる. 走高跳の助走では, 踏切動作で跳躍高の獲得に貢献している身体の起こし回転運動や身体の屈曲伸展運動(阿江ほか, 1983)といった要素を活用するために, 助走速度の低下を抑えつつ身体重心高を低下させること, 並びに, 踏切に向けて身体の身体後傾角を獲得することが主要な技術課題の 1 つであると考えられる(阿江, 1996a). このうち, 身体重心高を低下させ

る方法には身体の傾き（身体内傾と身体後傾）、膝関節を主とした下肢関節の屈曲が挙げられるが、身体後傾動作や膝関節の屈曲は助走速度の低下を招く恐れがある（関岡・栗原, 1978）。これに対して、曲線助走を用いることの利点を考えると、曲線助走を用いることによって、身体の身体後傾や膝関節の屈曲を抑えながら身体の身体内傾を生じさせることができるために、助走速度の減少を抑制しつつ、身体重心高を低下できることが挙げられる（Ae et al., 1986; 関岡・栗原, 1978）。Tidow（1993）は曲線助走において身体内傾角度 30 度の場合に 13%、35 度の場合で 18%、実際の距離にして 12-18 cm 身体重心高の低下が可能となることを報告している。これらのことから、走高跳では、より高く跳ぶという目的の達成に向けて、直線助走よりも曲線助走を用いることが有効であるとされている（Dapena, 1995）。他方で、助走速度の減速に繋がる身体後傾角が、踏切動作に向けてどの様に獲得されているかについて検討した研究は見当たらず、未解明である。背面跳の助走では、おおよそ踏切 4 歩前から曲線走が開始されることが報告されており（Dapena, 1995; 飯干ほか, 1993; Leite, 2013; 関岡・栗原, 1978; Schiffer, 2009）、身体の身体内傾動作および、それに伴う身体重心高の低下は踏切 4 歩前から開始されていることが推察される。走高跳では跳躍高を獲得する踏切局面がパフォーマンスの獲得に対する主要局面であるが（阿江ほか, 2008）、そこで要求される動作は、それ以前の局面における動作の影響を強く受けていることが推察される。したがって、曲線走と共に踏切動作の準備が開始される踏切 4 歩前から踏切にかけての踏切準備局面も、走高跳のパフォーマンスに大きな影響を与える局面であると考えられる。しかしながら、これまでに踏切 4 歩前から踏切にかけての身体重心高や身体内傾角度や身体後傾角度、下肢関節の屈曲角度の変化について検討した研究は見当たらない。

上述のことに加え、曲線助走の軌跡は助走速度やストライド長、選手の形態といった様々な要因によって変化し、それに応じて踏切準備局面から踏切局面における動作には選手間におけるばらつきが存在することが報告されている（阿江, 1996a; 阿江ほか, 2008; Isolehto et al., 2007; 渡辺, 2012）。このため、走高跳ではあらゆる技術タイプに共通してパフォー

マンズの獲得に有効な要因を明らかにすることに加えて、動作のばらつきを考慮した検討を行う必要がある（渡辺, 2010）、これまで踏切 2 歩前および踏切 1 歩前における動作の類型化が行われてきた（Ae et al., 1986; 関岡・栗原, 1978）。

また、この動作のばらつきは選手の個人内においても形態や体力的要因の変化などによって生じることが推察され、走高跳では個人のパフォーマンス向上の過程で技術特性が変化する可能性が示唆されている（渡辺・守田, 2012）。しかしながら、実際に個人の動作を縦断的に分析した研究は極めて少なく、その実態は明らかとなっていない。したがって、走高跳における個人内の技術変化について縦断的に検討することで、競技実践現場での取り組みに貢献し得る、有益な知見を明示することができると考えられる。

以上のことから、走高跳の踏切局面で鉛直速度獲得に貢献する要因および踏切 4 歩前から踏切にかけての踏切準備局面における有効な技術要因、そして、個人内の縦断的な動作分析によって個人内の技術変化について検討を行うことは、走高跳のパフォーマンス獲得に貢献する技術要因や、有効なトレーニング手法を明らかにするための重要な検討課題であると考えられる。

## 第2章 文献研究

### 1. 跳躍に関する研究

#### (1) 跳躍のメカニズム

跳躍は踏切動作を行って跳ね上がる運動であり、二足歩行を行うヒトの跳躍は脚で踏切動作が遂行される。また、跳躍動作の機序は動作の様式によってさまざまに異なっており、その場での鉛直方向への跳躍を片脚で行った場合と両脚で行った場合で、その片脚あたりの力・パワー発揮特性が異なっていることが報告されている（荻山ほか, 2012; 佐渡・藤井; 2014）。また、阿江ほか（1983）は、垂直跳、バレーボールのスパイクジャンプ、走高跳の踏切動作を分析し、それぞれの動作の相異について検討した。その結果、垂直跳では脚および上半身の伸展運動と腕の振り込み動作によって身体重心鉛直速度を獲得しているのに対し、バレーボールのスパイクジャンプと走高跳では、身体の起こし回転運動が身体重心鉛直速度の獲得に貢献しており、さらに、助走速度の高い走高跳でその貢献度がより高かったことが示されている。起こし回転運動は踏切脚が接地することで生じる、接地点を支点とした前方回転運動のことで、身体が起き上がることによって身体重心高が上昇し、身体重心鉛直速度の獲得に貢献していることが報告されている（村木, 1988）。以上のことから、その場での跳躍では、身体の屈曲伸展運動および腕や脚の振り込み動作が跳躍高の獲得に貢献しており、助走を用いた跳躍では、それらに加えて、身体の起こし回転運動が跳躍高の獲得に貢献していることが明らかとなった。

#### (2) 跳躍の遂行に要求される能力

跳躍の踏切では、主働筋となる下肢の筋群によって SSC が遂行されており（Komi and Bosco, 1978; Komi, 2003; Komi and Nicol, 2011）、垂直跳やリバウンドジャンプ、助走を用いた片脚跳躍などで下肢筋群の SSC の遂行能力が跳躍のパフォーマンスに深く関係していることが報告されている（Kakihana and Suzuki, 2000; 凵子・高松, 1995, 1996）。

一方で、跳躍の際に要求される下肢の力・パワー発揮特性はその運動様式によって異なっていることも報告されている。図子と高松（1995）は垂直跳で跳躍高を獲得するための能力と、リバウンドジャンプ運動（以下 RJ）で接地時間を短縮する能力はそれぞれ独立したものであることを示している。また、運動様式の違いは関節レベルでの力・パワー発揮にも影響を与えており、荊山ほか（2013）は RJ を片脚で遂行した場合は、両脚で遂行した場合に対して股関節の力学的仕事が多いことを報告している。さらに、同じドロップジャンプ運動（以下 DJ）でも、跳躍高の獲得を目的とした場合と接地時間の短縮を目的とした場合や、跳び降りる台高を変えることによって下肢 3 関節の仕事量の割合が変化することが報告されている（Bobbert et al., 1987a,b）。これらのことに加えて、梶谷ほか（2018）は、接地時間を変えたドロップジャンプを数種類、同じ被験者に行わせることで、個人によって最も高い跳躍高を獲得できる運動時間が異なることを示している。以上のことから、跳躍の遂行には SSC の遂行能力が関係しているが、跳躍の運動様式によって要求される能力や下肢の力・パワー発揮特性は異なり、さらに、より高い跳躍を遂行するために必要な運動時間（最適反動動作時間）は個人によって異なることが明らかとなった。

### (3) 跳躍能力を高めるためのトレーニング

跳躍能力を高めるためのトレーニングの代表としてプライオメトリクスが挙げられ、トレーニングの実践現場でも一般的に用いられている（荊山・図子, 2013; ラドクリフ・ファレンチノス, 2004; 図子, 2013）。また、プライオメトリクスはその効果も多くの研究によって検討されており、RJ や DJ の跳躍高の増大（Schmidtbleicher et al., 1988; Taube et al., 2012）、接地時間の短縮（池田・淵本, 2005; Taube et al., 2012; 図子, 2006）に効果があることが報告されている。さらに、トレーニングにおける特異性の法則（ザチオルスキー・クレーマー, 2009）を考慮すれば当然のことであるが、プライオメトリクスは用いた運動様式によってその効果が変わることが報告されている。例えば、接地時間の短いハードルジャンプトレーニングを実施したことによって、RJ における接地時間の短縮が見られたこと（池

田・淵本, 2005), トレーニングに用いる DJ の台高を変化させたことによって, 高い台高を用いた場合には DJ の跳躍高が増大し, 低い台高のみを用いた場合には接地時間が短縮したこと (Taube et al, 2012) が報告されている. 以上のことから, 跳躍能力を高めるためのプライオメトリクスは, 狙いとする跳躍の動作特性, 個人の跳躍能力の特性に配慮して選択する必要があると推察される.

## 2. 走高跳に関する研究

### (1) 走高跳の競技特性

陸上競技の走高跳は, 片脚による助走を用いた一回跳でどれだけ高くのバーを越えることができるかを競う競技である. 走高跳はその歴史の中で, はさみ跳, ウェスタンロール, ベリーロール, そして背面跳と, 主流となる跳躍法が変化し続けてきた競技である (Schiffer, 2009). 今日の主流である背面跳は, 助走の軌跡がアルファベットの「J」の文字のように, 後半部で曲線を描くことがその特徴であり (Tellez, 1993), 曲線走はおおよそ踏切 4 歩前から開始されることが報告されている (Dapena, 1995; 飯干ほか, 1993; Leite, 2013; 関岡・栗原, 1978; Schiffer, 2009).

助走に関する研究はこれまでに多く行われており, Dapena(1995), Tidow(1993)は力学的機序からより良い助走軌跡の選択方法について考察し, モデルを提示している. また, 関岡と栗原 (1978) は直線助走を用いるベリーロールを専門とする選手と, 曲線助走を用いる背面跳を専門とする選手の踏切 2 歩前から踏切にかけての動作を比較することで, 助走速度, 身体の傾き, 身体重心の位置について検討した. その結果, 曲線助走を用いた場合には, 直線助走と比較して踏切時の膝関節の屈曲動作が小さくなること, 踏切準備局面において助走速度の低下が抑えられることを報告している. さらに, このことについて, 曲線助走を用いることによって身体が曲線の内側に傾く身体内傾動作が生じることで, 膝関節の屈曲が小さい場合でも身体重心高を低下させることができ, 助走速度の減少を抑えつつ身体重

心高を低下させることができたと考察している。さらに、Dapena (1979) は、曲線助走を用いた場合と直線助走を用いた場合の比較を行い、直線助走を用いた場合に比べて、曲線助走を用いた方が、踏切接地時における身体内傾角が増大したこと報告をしている。また、踏切接地時の身体内傾角が大きいことによって身体重心高が下がり、踏切における重心の鉛直上向き方向の移動距離を増大させ、結果的に大きな身体重心鉛直速度を獲得できる可能性を示している。

さらに、Ae et al. (1986) は、5人の走高跳を専門とする選手の踏切1歩前から踏切動作にかけての動作分析を行い、踏切1歩前における膝関節および足関節角度の相違から選手を2つのタイプに分類した。一方のタイプは膝関節および足関節における屈曲動作が大きく、踏切1歩前の支持局面の前半で身体の内傾動作に依存して身体重心高を下げているが、その後は膝関節の屈曲に依存して身体重心高を減少させていた。このタイプは低い身体重心高、長い支持時間という特徴を持っていることから、踏切動作に向けて、大きな動作を作ることに寄与する可能性を示している。これに対して、もう一方のタイプは、膝関節および足関節における屈曲動作が小さく、身体重心高も高かった。このタイプはつま先が先に接地し、助走速度はほとんど減少しないという特徴を持っており、身体重心高を下げる際に助走速度の減少を軽減することができるが、支持時間が短いために良い姿勢で踏切動作に移行することが難しくなる可能性が示されている。そして、これらのタイプは両者においてそれぞれ良い点と悪い点が存在しており、選手の特性に応じて適切にタイプを選択する必要があると結論付けている。

以上のことから、背面跳びを用いる走高跳の助走では、曲線走による身体内傾動作によって、身体重心水平速度の減速を抑えつつ身体重心高の低下が可能となることが明らかとなっている。一方で、走高跳の助走において曲線走が開始されるのは踏切4歩前からであるのに対し、これまでに助走局面の動作分析を行った研究の多くは、踏切2歩前もしくは踏切1歩前から踏切動作にかけての局面を分析したものであり、曲線走が開始される踏切4歩前から踏切にかけての動作は明らかとなっていない部分が多い。



## (2) 走高跳の踏切動作における跳躍高獲得の機序

走高跳では、助走で獲得された身体重心の水平速度を踏切動作によって鉛直方向に変換することで跳躍を遂行している。そのため、より高いバーを越えることを目的とする走高跳では、踏切動作が最重要局面であると言えるだろう。ここではその動作の機序について検討する。

走高跳の踏切動作では、身体の回転運動、身体の屈曲伸展運動、脚や腕の振り込み動作の3つの要素によって身体重心鉛直速度を獲得している（阿江ほか, 2008; Dapena, 2000; 小林, 1979）。さらに、踏切接地時に後傾した身体が踏切中に起きることによって生じる起こし回転運動によって、踏切動作で獲得される身体の鉛直速度全体の60-65%を獲得していることが報告されている（阿江, 1996）。このことから、走高跳の踏切動作では起こし回転運動がパフォーマンスの獲得に大きく貢献していることが推察できる。

一方で、踏切時の地面反力を計測した研究では、下肢の屈曲が生じている局面で、体重の5倍以上に相当する最大地面反力が計測されたことが報告されており（Čoh, 2010）、また、走高跳の踏切動作を質量ばねモデルによって分析した研究では、地面反力の最大値はばねの圧縮変形の反作用として生じている可能性が報告されている（小林, 1979）。以上のことから、踏切動作では下肢のSSCによって非常に大きな力発揮が行われており、それがパフォーマンスの獲得に大きく貢献していると考えられる。これに対し、下肢における力・パワー発揮に関する研究では、Okuyama et al. (2003) が踏切動作中の下肢3関節の関節トルク、関節角速度、関節トルクパワーについて検討し、それぞれの推移について明らかにしている。また、関節トルクで特に大きな値を示した股関節外転トルクの最大値と、踏切接地時の身体内傾角および助走速度との間に有意な相関関係が認められたことを報告しているが、下肢3関節の力・パワー発揮と踏切動作によって獲得される身体重心鉛直速度との関係については未解明な部分が多い。

また、奥山ほか（2003）は振上脚股関節の関節トルクおよび振上脚股関節に作用する鉛

直関節力について検討し、踏切 1 歩前離地直後の早い段階から振り込み動作を行うことは踏切接地直後の地面反力の増大に貢献し、一方で、振り込み動作を遅らせることは踏切接地時の衝撃力を緩和することに貢献する可能性を示唆している。さらに、Tidow (1993)は、腕や脚の振り込み動作では、その運動エネルギーを最大限大きくすることが有効である可能性を示し、腕の振り込み動作は両腕で行うダブルアームが最も合理的で、振上脚も可能であれば膝を伸展させた状態で振り上げることが有効であると報告している。

### (3) 走高跳の踏切技術の類型化

背面跳を用いた走高跳では、曲線助走を用いることに起因して、助走軌跡の選択から、それに応じた踏切動作およびそれ以降の動作の選択が可能となり、様々な技術タイプが存在していることが示唆されている（渡辺, 2010, 2012）。これに対し、バイオメカニクスの手法を用いた研究では、Ae et al. (1986) が踏切 1 歩前局面における身体重心高の低下について分析し、身体の傾きに依存したタイプと、身体の傾きおよび下肢の屈曲に依存したタイプの 2 種類に分類している。また、踏切局面については、Okuyama et al.によって振り上げ脚を振り込むタイミングが早いタイプと遅いタイプの 2 種類に分類されている。さらに、Isolehto et al. (2007) は 2005 年の世界選手権ヘルシンキ大会の男子走高跳決勝進出者 13 名の動作分析を行い、対象者の中にはスピードフロップを用いる者とパワーフロップを用いる者がおり、また、踏切時の腕の振り込み動作はランニングアーム、シングルアーム、ファストダブルアーム、ワイドダブルアームの 4 タイプが認められたことを報告している。

一方で、運動学の手法を用いた研究では、走高跳の背面跳には、様々な技術タイプが存在しているため、1つの理想モデルの提示は困難であるとの報告がまとめられており（渡辺, 2010, 2012; 渡辺・森田, 2012; 渡辺ほか, 2009）、それぞれの技術タイプの特徴を明らかにしようとする試みが行われてきた。Reid (1986) は、踏切局面がスピードフロップとパワーフロップの 2 種類に分類されている。一方で、その分類ではスピードフロッパー

はパワーフロッパーよりも助走が長く、速度も速いといった客観的な点や、スピードフロッパーは体形が痩せ型でウェイトトレーニングをあまりしない傾向があるのに対し、パワーフロッパーは体重が重く、ウェイトトレーニングを多くする傾向があるといった判別の基準が定かではない点もあり、十分な分類が行われているとは言い難い。これに対し、渡辺（2007）は背面跳の技術にベリーロールの要素がどの程度取り入れられているかでパワーフロップをさらに2種類と、スピード・パワーフロップ、スピードフロップの4種類に分類を行っている。さらに、渡辺ほか（2009）は上述の4種類の中のスピードフロップをさらに踏切動作の仕方で分類し、その特徴について検討している。また、渡辺と守田（2012）は個人のトレーニング過程を運動学的に分析し、技術タイプの変化が生じた可能性を報告している。一方で、個人内の動作を縦断的かつバイオメカニクス的に検討した研究は見当たらない。

#### （4）高い競技力を有する選手の動作分析

走高跳の研究ではパフォーマンス獲得のために有効な要因を検討するために、世界トップレベルの選手を対象とした動作分析が多く行われてきた。ここではそれらの研究によって示された知見についてまとめる。

飯干ほか（1993）は1991年の世界選手権東京大会における男女の上位8人を対象に動作分析を行い、踏切1歩前接地時の身体内傾角は、男子選手よりも女子選手の方が大きかったのに対し、踏切接地時の身体内傾角は男子選手の方が大きかったことを報告している。また、Isolehto et al.（2007）は2005年の世界選手権ヘルシンキ大会の男子走高跳決勝に出場した13人の選手の動作分析を実施した。その結果、この大会に出場した選手には、大きく分けてスピードフロップとパワーフロップの2タイプがあり、スピードフロップを用いた選手では踏切動作における膝関節のスティフネスが高いことが高いパフォーマンスの獲得に有効である可能性を示唆している。また、踏切接地時の身体重心高はアームアクションの影響を強く受けており、身長2mの選手ではアームアクションの違いが、踏

切接地時身体重心高に 8cm もの差を生じさせることを報告している。さらに、Ae et al.

(2008) は 2007 年の世界選手権大阪大会の上位 3 選手の踏切 1 歩前と踏切の動作を比較し、身体の傾き角と膝関節角度は 3 者 3 様であったことを報告している。以上のことから、走高跳では世界トップレベルの選手でもその動作には大きなばらつきがあることが理解できる。

#### (5) 走高跳のトレーニング

競技スポーツのパフォーマンスを向上させるためには、トレーニングによってそのスポーツに内在する運動の動きを変容させることが必要不可欠であり、この動きには体力的要因と技術的要因の 2 つの要因が影響している (日本コーチング学会, 2017)。また、このことは当然、走高跳のパフォーマンス向上を目指したトレーニングにおいても考慮すべきであり、つまり、走高跳に必要な体力的要因と技術的要因のそれぞれを高めるためのトレーニングを実施する必要がある。

図子 (2012) は陸上競技の跳躍種目を専門とする 10 名の選手のトレーニングと体力の変遷を 3 カ月にわたって記録し、体力の変化が跳躍のパフォーマンスに与える影響について検討した。その結果、ウェイトトレーニングなど、筋力の向上を目的としたトレーニングでは、跳躍のパフォーマンスに直接的な効果が認められなかったのに対し、プライオメトリクスでは跳躍のパフォーマンスに直接的な効果が認められたことを報告している。また、Schiffer (2012) も走高跳のパフォーマンスの向上にプライオメトリクスが非常に有効であることを報告している。一方で、稲岡ほか (1993) は陸上競技の跳躍種目を専門とする 79 名の選手を対象に、リフティング系、ジャンプ系、スプリント系のコントロールテストを行わせ、種目ごとにコントロールテストの結果とパフォーマンスの高さの関係を検討した。その結果、走高跳選手のパフォーマンスはデブス三段跳、立五段跳、加速付き 30m バウンディングの結果との間に有意な相関関係が認められたことを報告しており、このことは、走高跳のパフォーマンスにはバリスティックな SSC (図子ほか, 1993) の遂行

能力が深く関わっていることを示唆していると考えられる。

上述の体力的要因に着目した研究に対して、渡辺と守田（2012）は1人の走高跳選手が技術を修正し、パフォーマンスを向上させた過程における技術トレーニングについて、運動学的に考察した。その結果、元々スピード・パワーフロップ型であった選手がスピードフロップに技術を変更し、また、その際には踏切時のアームアクションもダブルアームからシングルアームに変更したことで、選手の身体特性により適した動作を行うことができるようになり、パフォーマンスを向上させた可能性を示唆している。しかしながら、走高跳のトレーニングについて技術的要因に着目して検討した研究はほかに見当たらず、未解明なことが多い。したがって、トレーニングによって走高跳の技術的要因の変化およびそのパフォーマンスへの影響について検討した研究による知見を蓄積することが喫緊の課題であると考えられる。さらに、体力的要因と技術的要因は相互に影響し合うものであるために（グロッサー・ノイマイヤー, 1995）、2つの要因とパフォーマンスとの関係を包括的に検討する研究を行う必要があると考えられる。

### 3. 文献研究で得られた知見

以上の文献研究によって、走高跳のパフォーマンス獲得の機序について以下の知見を得ることができた。

- 1) 背面跳を用いた走高跳の助走では、おおよそ踏切4歩前から曲線走が開始され、踏切2歩前および1歩前では、身体の身体内傾動作と下肢関節の屈曲によって身体重心高を低下させている。
- 2) 走高跳の踏切動作では、身体の屈曲伸展運動、身体の回転運動、腕や脚の振り上げ動作によって身体の鉛直速度を獲得しており、その中でも身体の起こし回転運動が特に大きく貢献している。
- 3) 走高跳の踏切動作では、非常に短い時間で極めて大きな力やパワーが発揮されてお

り，それがパフォーマンスの獲得に深く関係していると考えられる。

- 4) 背面跳を用いた走高跳では，様々な技術タイプが存在しており，これまでの研究は技術を分類し，それぞれの特徴について検討したものが多。

一方，文献研究によって明らかとなった，走高跳のパフォーマンス獲得の機序に関する未解決の問題は以下の通りである。

- 1) 踏切動作中の下肢における力およびパワー発揮とパフォーマンスとの関係については検討されていない。
- 2) 背面跳を用いた走高跳の助走において，曲線走が開始されると考えられる踏切4歩前から踏切にかけて，どのような踏切準備動作が行われているかについて検討されていない。
- 3) 走高跳のパフォーマンスに関する縦断的な研究は少なく，個人内の技術変化については未解明な部分が多い。

## 第3章 研究目的

### 1. 研究目的

本研究の目的は、走高跳の踏切局面における下肢3関節のキネティクスの分析および全身のキネマティクスの分析、踏切4歩前から踏切にかけての踏切準備局面をキネマティクスの分析することによって、走高跳のパフォーマンス獲得に関わる要因について検討し、さらに、走高跳競技者の縦断的動作分析を行うことで、個人内の技術特性の変化について調査することとした。

### 2. 研究課題

上記の目的を達成するために、以下の研究課題を設定した。

#### 【研究課題1】

走高跳の踏切局面における身体重心鉛直速度の獲得に関わる要因について、下肢3関節のキネティクスのデータおよび全身のキネマティクスのデータを基に検討する（第5章）。

#### 【研究課題2】

走高跳の踏切準備局面の動作について、曲線走が開始されると考えられる踏切4歩前から踏切にかけての身体重心高および助走速度、身体の傾き角と膝関節角度の変化について検討する（第6章）。

#### 【研究課題3】

日本トップレベルの走高跳競技者が記録を向上させた過程に着目し、その間の技術の変化についてバイオメカニクスの観点から検討する（第7章）。

## 第4章 研究の意義・仮説および限界

### 1. 研究の意義

本研究では、走高跳の踏切4歩前から踏切動作においてパフォーマンスの決定に関与する要因について検討する。これによって、走高跳のパフォーマンスを高めるための有効な技術要因を明らかにし、さらに、有効なトレーニング手法について検討することができると考えられる。また、日本トップレベル競技者のパフォーマンス向上過程の技術の変化についてバイオメカニクス的に分析し、走高跳のパフォーマンス向上を目指した取り組みの中における技術変化について検討する。これによって、走高跳選手の個人内における技術変化の実態を明らかにすることができると考えられる。

### 2. 研究の仮説

- 1) 踏切動作では下肢3関節によって非常に大きな力・パワーが発揮されており、パフォーマンスの獲得に貢献している（第5章）。
- 2) 踏切4歩前から踏切にかけて、身体重心高は低下し、身体重心水平速度は増大する。また、それに伴って身体の傾き角や下肢関節の角度にも変化が生じる（第6章）。
- 3) 日本トップレベルの男子走高跳選手のパフォーマンス向上過程においては、個別的な技術の変化が生じている（第7章）。

### 3. 研究の限界

#### (1) 対象者による限界

本研究では大学陸上競技部またはクラブチームに所属している男子走高跳選手7名および、日本トップレベル男子走高跳選手を対象として踏切脚の関節キネティクスや全身のキ



ネマティクスについて検討した。そのため、本研究で得られた知見を他の年齢層、他の競技種目を専門とする競技者、女子選手および本研究で対象とした被験者とは異なる競技水準の競技者などにそのまま当てはめることには限界があると考えられる。

## (2) 研究の方法による限界

- 1) 本研究の第5章および第6章では、対象者に実験として走高跳を行わせたため、分析に用いられた跳躍の記録は各自の自己最高記録と比較して低く、また、試合における試技を分析した先行研究における分析試技の記録と比較しても低い。したがって、本研究で分析した試技における動作は対象者個人内、あるいは他の競技者との個人間で比較した際に必ずしも高いパフォーマンスが発揮されていなかったことに留意する必要がある。
- 2) 本研究の第5章では、下肢関節の角度変位について膝関節のみに着目しているため、股関節や足関節の影響については明らかにすることはできない。
- 3) 本研究の第7章では、試合における動作を分析したため、映像データの収集に際して時間や空間、人間的な制限が生じた。したがって第6章では踏切4歩前から踏切までの局面を分析している一方で、第7章では踏切局面のみの分析に留まっている。

## 4. 作業の仮定

本研究では、動作の分析をバイオメカニクスの手法を用いて行った。したがって、分析を行う際に以下の仮定を設けた。

- 1) 身体各セグメントは剛体であり、各関節は摩擦が無いピンジョイントとみなすことができる。また、身体各部位の質量や慣性特性は阿江(1996)の推定式を用いて算出できる。
- 2) 対象者に作用する外力は重力と地面反力のみであり、空気抵抗は無視できる。

- 3) 走高跳のパフォーマンス水準の大部分は踏切離地時の身体重心速度によって規定され、踏切局面が最重要局面と考えられる。したがって、各局面における有効な技術要因について分析するためには、踏切局面から踏切準備局面へと、実際の時系列に逆らう形で検討する必要がある。

## 第 5 章 走高跳の踏切局面における身体動作および下肢 3 関節の力・パワー発揮特性（研究課題 1）

### 1. 目的

陸上競技における走高跳の踏切動作では、体重の 5 倍以上もの地面反力が記録されたことが報告されており（Čoh, 2010）、踏切動作中の下肢では非常に大きな力・パワーが発揮され、それがパフォーマンスの獲得に大きく貢献していることが考えられる。

走高跳のような、助走を用いた片脚跳躍における下肢の力・パワー発揮に関する研究では、主に直線助走を用いた跳躍の分析によって（Kakihara and Suzuki, 2001; 志賀・尾縣, 2004; Stefanyshyn and Nigg, 1998; 藤林ほか, 2013）、その力・パワー発揮特性が明らかとされてきた。しかしながら、今日の走高跳では空中でバーに背を向ける姿勢となる背面跳が主流となっており、曲線を描く助走から、踏切動作では身体の長軸回りの回転を伴う特有の動作が用いられている。さらに、走高跳の助走を分析した研究では、身体重心を低下させる踏切準備局面において、身体の身体内傾動作を用いた曲線走特有の動作で身体重心を低下させており（関岡・栗原, 1978; Ae et al., 1986; Dapena, 1995; Panoutsakopoulos and Kollias, 2012）、また、これによって踏切動作も曲線助走を用いた場合に特有の動作が生じていることが推察される。以上のことから、走高跳の動作は、直線助走を用いた片脚跳躍の動作とは異なり、踏切局面における動作や下肢の力・パワー発揮特性にも固有の特徴を有していることが考えられる。これに対し、Okuyama et al. (2003) は、踏切動作における下肢 3 関節の関節トルクおよび関節トルクパワーについて報告しているが、踏切動作中に発揮された力やパワーとパフォーマンスとの関係性については検討した研究は見当たらず、走高跳の踏切動作における下肢の力・パワー発揮特性は、詳細な解明には至っていない。

一方で、走高跳の競技実践の現場では踏切動作における力・パワー発揮の増大を狙いとしたトレーニングが多く実施されている（稲岡ほか, 1993; Schiffer, 2012; 図子, 2013; 戸邊ほか, 2018）。これに対し、トレーニングにおける特異性の原則（ザチオルスキー・クレ

マー, 2009) を考慮すると, 走高跳のパフォーマンス向上を目的としたトレーニングをより効果的に実施するためには, 踏切動作における下肢の力・パワー発揮特性の解明が必要である.

また, これまでに走高跳の動作分析を実施した研究では, 踏切動作における各種のキネマティクスの変数の時系列的な変化について検討したものが多く (阿江ほか, 1983, 2008; Bruggemann, 1992; Dapena and Chung, 1988; I.A.A.F., 1986; Isolehto et al., 2007; Pavlovic, 2017; Panoutsakopoulos and Kollias, 2012), これらの研究によって, 走高跳の踏切動作における技術特性やその機序が明らかとされてきた. 一方で, 実際に走高跳のパフォーマンスを規定する踏切離地時鉛直重心速度と各種のキネマティクスの変数との関係性について検討した研究は見当たらず, 走高跳のパフォーマンス獲得に貢献する技術要因については未解明な部分が多い. したがって, これを明らかにすることができれば, 走高跳のパフォーマンス向上を目指す競技実践現場で即時的に役立て得る有益な知見の提示に繋がると考えられる.

以上のことから本研究課題では, 走高跳の踏切動作における全身のキネマティクスのパラメーターと踏切離地時鉛直重心速度との関係および下肢 3 関節の力・パワー発揮特性について検討することを目的とした.

## 2. 方法

### (1) 対象者

対象者には, 大学陸上競技部またはクラブチームに所属している左脚踏切を専門とする男子走高跳選手 7 名 (年齢,  $20.43 \pm 1.81$  years; 身長,  $1.78 \pm 0.09$  m; 体重,  $69.24 \pm 6.60$  kg; ベスト記録,  $2.08 \pm 0.13$  m) を用いた. 実験を開始するにあたり, すべての対象者に本研究の目的, 方法および実験に伴う安全性を十分に説明し, 実験への参加のための同意を得た. なお, これらの手順は, 筑波大学研究倫理委員会の承認を得て行われた (承認番号:

体 27-49 号).

## (2) 実験試技

本研究課題では全助走を用いた試合形式での走高跳を実験試技とし、対象者には全力で跳躍するよう指示した。その際のバーの高さの設定は、各対象者の指定した任意の高さから開始し、成功の度に 5 cm 間隔で上昇させ、同じ高さでの連続 3 回の失敗があるまで試技を行わせた。なお、分析試技については、成功試技のうちの最も記録が高いもので、かつ、踏切動作がフォースプラットフォーム上で行われたものとした。

## (3) 測定項目および測定方法

光学式自動動作分析装置 (Vicon motion System, 250 Hz) を用いて、各試技における助走から着地までの身体各部位 (47 点) の座標データを収集した。静止座標系は、地面と平行でかつバーと垂直に交わる軸を X 軸、地面と水平で、かつ、バーと平行の軸を Y 軸、鉛直軸を Z 軸とする右手座標系と定義した。また、本研究では、後述する踏切足接地時における身体重心速度ベクトルの水平成分を Y 軸、水平でかつ Y 軸に直交する軸を X 軸、鉛直を Z 軸とする右手系の座標系を対象者ごとに定義した。

得られた身体各部位の座標は、座標成分ごとに最適遮断周波数を Wells and Winter (1980) の方法にもとづいて決定し、Butterworth Low-Pass Digital Filter を用いて平滑化した。なお、決定された最適遮断周波数は 6–12 Hz の範囲であった。また、踏切動作における地面反力を測定するために、フォースプラットフォーム (Kistler 社製, 9287C) を用いて地面反力を測定した。地面反力は、1000 Hz のサンプリング周波数で A/D 変換した後、パーソナルコンピューター (DELL 社製, DXP061) に取り込み、X 軸、Y 軸、Z 軸成分を算出した。なお、X 軸成分は対象者からみて左方向の反力を正、右方向の反力を負の値、Y 軸成分は対象者からみて後方の反力を正、前方の反力を負の値とし、Z 軸成分は上方の反力を正、下方の反力を負の値とし、以下では X 軸を左右方向、Y 軸を前後方

向, Z 軸を鉛直方向の地面反力とする.

#### (4) 算出項目

本研究課題では, 運動自由度を 3 として, 14 の関節によって連結された 15 の剛体セグメントモデルを用いて全身をモデル化した. 測定によって得られた身体の 3 次元座標から, 阿江 (1996b) の身体部分慣性係数を用いて, 部分および全身の重心, 慣性モーメントを算出した. また, 身体重心の変位を時間微分することによって身体重心速度を算出した. さらに, 放物運動の式 (阿江・藤井, 2002) を用いて最大身体重心高の推定値を算出した. 身体の身体内傾角度および身体後傾角度については, 身体重心と踏切脚足関節を結んだ線分を X'-Z 平面および Y'-Z 平面に投影し, X'-Z 平面上で Z 軸となす角を身体の身体内傾角, Y'-Z 平面上で Z 軸となす角を身体の身体後傾角とし, それぞれ正の値を身体内傾と身体後傾, 負の値を外傾と前傾とした (戸邊ほか, 2018).

身体に貼付したランドマークをもとに, 下肢 3 関節の関節角度および角速度を算出するために, それぞれの関節中心を算出した. 足関節および膝関節については, 関節における内顆および外顆の midpoint, 股関節については, 臨床歩行分析研究会の提唱する推定法 (倉林ほか, 2003) を用いて関節中心および関節角度を算出した. 本研究では, 股関節では屈曲伸展, 内外転および内外旋角度を, 膝関節では屈曲伸展角度を, 足関節では底背屈および回内外角度を算出した. また, 算出された角度を時間微分することで角速度を算出した. 符号の正負については, 股関節では伸展および外転, 外旋を正の値, 屈曲および内転, 内旋を負の値, 膝関節では伸展を正の値, 屈曲を負の値, 足関節では底屈および回外を正の値, 背屈および回内を負の値として示した.

身体座標点の 3 次元座標値と, フォースプラットフォームにより計測された地面反力データとを用いて逆動力学的計算を行ない, 股関節屈曲伸展軸, 股関節内外転軸, 股関節内外旋軸, 膝関節屈曲伸展軸, 足関節底背屈軸, 足関節回内外軸周りの関節トルクを算出した. また, 関節トルクと関節角速度の内積を関節トルクパワー (以下, トルクパワー) とし, 正

および負のトルクパワーを時間積分することで関節仕事を算出した。なお、関節角度および関節トルクの算出に用いた座標系は荊山ほか（2013）の方法に準じた。

#### （5）動作の局面定義およびデータの規格化

本研究課題においては、踏切局面を踏切足接地から踏切足離地までとし、各対象者が踏切局面に要した時間を100%としてデータを規格化し、1%ごとに平均化した。なお、各キネティクス変数については対象者の体重で除すことによって規格化した。

#### （6）統計処理

各変数は平均値±標準偏差で示した。また、全ての統計処理には、統計パッケージ（SPSS ver. 22, IBM 社製）を用いた。各変数間の関係性の有無については相関係数をPearsonの方法を用いて算出し、有意性は危険率を5%未満で判定した。

### 3. 結果

表1には走高跳の踏切局面における身体のキネマティクスデータおよび、踏切離地時鉛直重心速度と各変数との相関係数を示した。本研究の実験試技における記録は $1.95 \pm 0.12$  mで、身体重心の最大到達高は $2.01 \pm 0.11$  mだったが、身体重心の推定到達高は $2.13 \pm 0.13$  mであった。身体重心の速度に着目すると、踏切接地時水平速度は $7.00 \pm 0.34$  m/s、踏切離地時鉛直速度は $4.16 \pm 0.24$  m/sであった。身体の傾き角度に着目すると、身体内傾角は踏切接地時に $-1.22 \pm 2.03$  deg.、踏切離地時に $-0.44 \pm 2.11$  deg.で、身体後傾角は踏切接地時に $36.24 \pm 2.35$  deg.、踏切離地時に $-4.86$  deg.であった。また、踏切離地時鉛直重心速度との間に有意な相関関係が認められた変数は、踏切接地時身体後傾角度 ( $r = 0.921$ ,  $p < 0.01$ ) と、踏切局面における身体重心水平速度の減少量 ( $r = 0.824$ ,  $p < 0.05$ ) であった。

図1には、踏切局面における身体重心高および身体重心鉛直速度の時系列な変位を規格

表1 踏切時のキネマティクス変数と踏切離地時身体重心鉛直速度との相関係数

変数		Mean ± SD	相関係数
記録 (m)		1.95 ± 0.12	-
身体重心高 (m)	接地時	0.86 ± 0.05	-0.309
	減少量	0.002 ± 0.001	-
	離地時	1.25 ± 0.06	0.128
	最大値	2.01 ± 0.11	-
	推定到達高	2.13 ± 0.13	-
身体重心水平速度 (m/s)	接地時	7.00 ± 0.34	0.583
	離地時	4.10 ± 0.19	-0.283
身体重心鉛直速度 (m/s)	接地時	0.21 ± 0.20	-0.285
	離地時	4.16 ± 0.24	-
身体内傾角 (deg.)	接地時	-1.22 ± 2.03	-0.466
	離地時	-0.44 ± 2.11	-0.542
身体後傾角 (deg.)	接地時	36.24 ± 2.35	0.921**
	離地時	-4.86 ± 2.11	0.384
接地時間 (s)		0.153 ± 0.006	0.413
水平速度減少量 (m/s)		2.90 ± 0.30	0.824*
踏切角度 (deg.)		46.89 ± 1.89	0.700

\*: p < 0.05, \*\*: p < 0.01



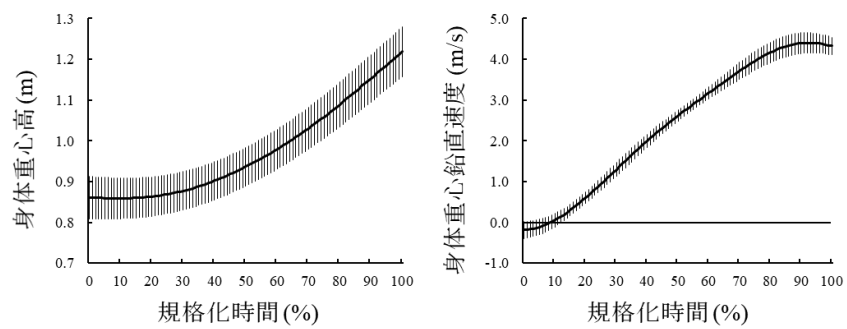


図1 踏切動作中の身体重心高と身体重心鉛直速度の変化

化時間で示した。身体重心高は、接地後 10 % 時付近にかけてわずかに (0.002 m) 減少が認められ、その後は離地にかけて増大した。

図 2 には踏切局面における地面反力の時系列的な推移を規格化時間で示した。X 軸, Y 軸, Z 軸いずれにおいても 20 % 時付近で最大値が記録された。X 軸では、60 % 時付近にかけて左方向の反力が認められ、60 % 時以降は右方向への反力に転じた。一方、Y 軸では、ほぼ全体を通じて後方への反力が記録され、身体の加速成分となる前方への反力は認められなかった。

表 2 には踏切局面における下肢 3 関節の関節トルクの最大値と股関節内外旋軸、足関節回内外軸の関節トルクの最小値、トルクパワーの最大値および最小値、関節仕事の値を示した。また、図 3 には踏切局面における股関節の関節角度および角速度、関節トルク、トルクパワーの時系列的な推移を規格化時間で示した。

股関節屈曲伸展軸に着目すると、角度変位では、接地から 10 % 時付近にかけて伸展した後、30 % 時付近にかけて屈曲し、以後は離地まで伸展したことが認められた。関節トルクでは、接地から 10 % 時付近にかけて伸展トルクの大きな鋭波が認められ、その後、わずかに屈曲トルクに転じた後、30 % 時付近にかけて再び大きな伸展トルクの発揮が認められた。また、その後は 60 % 時付近から離地直前まで屈曲トルクが発揮が認められた。伸展のトルクパワーでは、接地から 10 % 時付近まで大きな正のトルクパワーが発揮された後、30 % 時付近にかけて大きな負のトルクパワー発揮が認められた。その後は 40 % 時付近でわずかに正のトルクパワー発揮が認められた。

股関節内外旋軸に着目すると、角度変位では、接地から 40 % 時付近にかけて内転し、その後は離地まで外転したことが認められた。関節トルクでは、接地直後から 10 % 時付近にかけて外転トルクの第 1 波形が認められ、その後も 70 % 時付近にかけて外転トルクが発揮され続けたことが認められた。外転のトルクパワーでは、接地直後から 40 % 時付近にかけて負のトルクパワーが発揮され、その後は 70 % 時付近まで正のトルクパワー発揮が認められた。

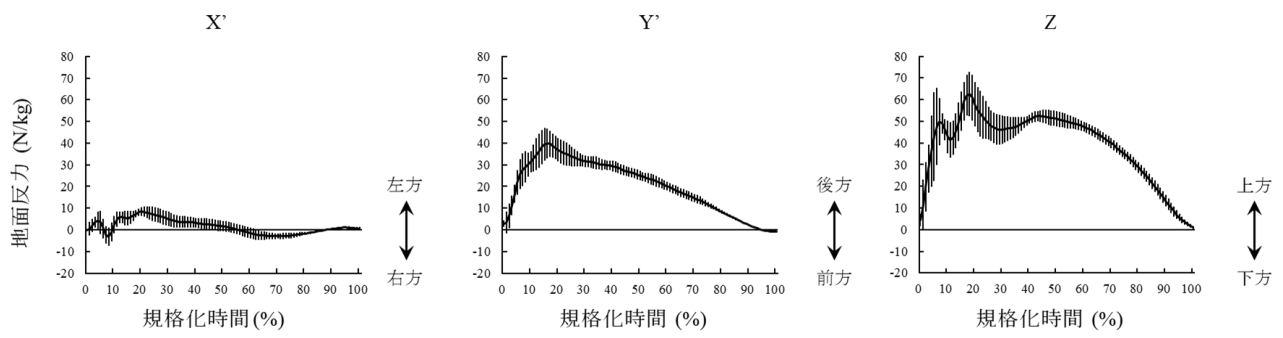


図2 踏切動作中の地面反力の変化

表 2 走高跳の踏切動作における各種キネティクス変数

	関節トルク (Nm/kg)		関節トルクパワー (W/kg)		関節仕事 (J/kg)		
	最小値	最大値	最小値	最大値	負	正	
股関節	屈曲伸展軸	-	11.96 ± 5.09	-35.32 ± 36.21	34.67 ± 24.19	-0.24 ± 0.38	0.15 ± 0.11
	内外転軸	-	8.76 ± 3.29	-51.75 ± 10.18	25.74 ± 6.38	-0.60 ± 0.46	0.40 ± 0.21
	内外旋軸	-1.44 ± 0.79	0.69 ± 0.26	-4.90 ± 1.97	10.96 ± 9.10	-0.04 ± 0.03	0.06 ± 0.03
膝関節	屈曲伸展軸	-	5.86 ± 1.29	-61.13 ± 13.35	41.80 ± 17.88	-1.90 ± 0.75	0.98 ± 0.33
足関節	底背屈軸	-	3.98 ± 0.22	-22.63 ± 7.83	33.54 ± 3.34	-0.70 ± 0.41	1.11 ± 0.36
	回内外軸	-1.69 ± 0.50	0.20 ± 0.14	-19.87 ± 5.31	4.92 ± 2.39	-0.11 ± 0.06	0.01 ± 0.01

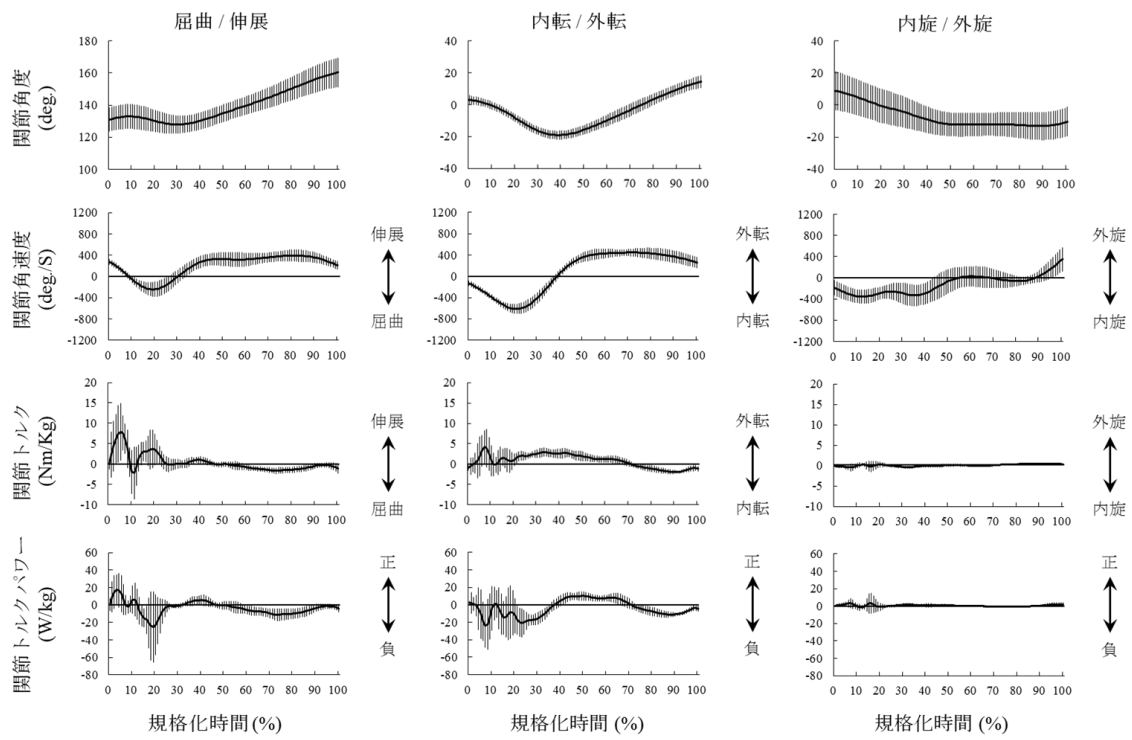


図3 走高跳の踏切局面における股関節の関節角度，角速度，  
関節トルク，関節トルクパワーの変化

股関節内外旋軸に着目すると、角度変化では、接地から 60% 時付近にかけて内旋し、90% 以降は外旋したことが認められた。また、関節トルクおよび外旋のトルクパワーは、全体を通じて低い値で推移したことが認められた。

図 4 には踏切局面における膝関節の関節角度および角速度、関節トルク、トルクパワーの時系列的な推移を規格化時間で示した。膝関節屈曲伸展軸の角度変化に着目すると、接地から 60% 時付近まで屈曲し、その後は離地まで伸展したことが認められた。関節トルクでは、接地直後から 10% 時付近まで伸展トルクの第 1 波形が認められ、その後、90% 時付近にかけて伸展トルクが発揮され続けたことが認められた。伸展のトルクパワーでは、10% 時付近から 60% 時付近まで大きな負のトルクパワー発揮が認められ、その後は 90% 時付近にかけて大きな正のトルクパワーが発揮された後、離地にかけてわずかに負のトルクパワーに転じたことが認められた。

図 5 には踏切局面における足関節の関節角度および角速度、関節トルク、トルクパワーの時系列的な推移を規格化時間で示した。足関節底背屈軸に着目すると、角度変化では、接地直後から 10% 時付近まで底屈し、その後は 60% 時付近まで背屈した後に離地にかけて底屈したことが認められた。関節トルクでは、接地直後から離地にかけて継続した底屈トルクが発揮が認められた。底屈の関節トルクパワーでは 10% 時付近から 60% 時付近まで負のトルクパワーが発揮された後、離地にかけては正のトルクパワーが発揮されたことが認められた。

足関節回内外軸に着目すると、角度変化では、接地から 20% にかけて極めて高い角速度で回外し、その後は離地にかけて回内したことが認められた。関節トルクは全体を通じて低い値で推移し、回外のトルクパワーでは、接地から 20% 時にかけて負のトルクパワー発揮が認められ、その後は低い値で推移したことが認められた。

表 3 には踏切離地時身体重心鉛直速度と踏切局面のキネティクスデータとの間の相関係数を示した。踏切離地時身体重心鉛直速度との間には、股関節外転のトルクパワー最大値 ( $r$

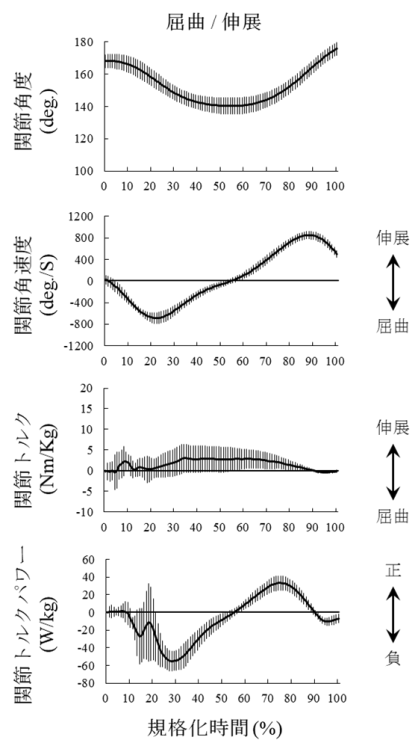


図4 走高跳の踏切局面における膝関節の関節角度、  
角速度、関節トルク、関節トルクパワーの変化

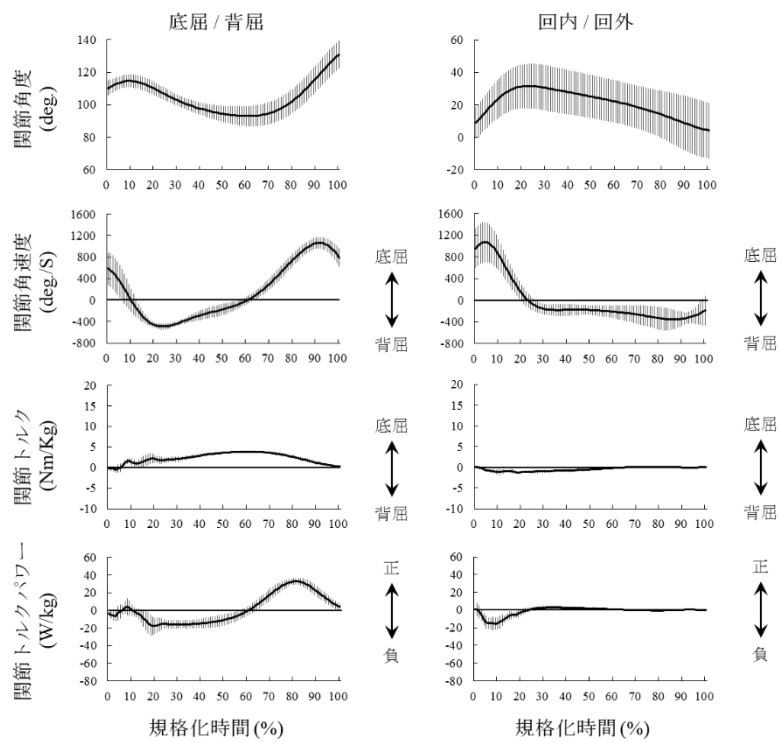


図5 走高跳の踏切局面における足関節の関節角度，角速度，  
関節トルク，関節トルクパワーの変化



表 3 キネティクス変数と鉛直速度との間の相関係数一覧

		関節トルク	関節トルクパワー		関節仕事	
		最大値	最大値	最小値	正	負
股関節	伸展	0.326	0.343	-0.716	0.465	-0.670
	外転	-0.146	0.793*	-0.593	0.762*	-0.655
膝関節	伸展	0.148	0.717	-0.596	0.091	-0.175
足関節	底屈	0.477	0.238	-0.116	0.595	0.598

\*:  $p < 0.05$

= 0.793,  $p < 0.05$ ) と股関節外転の正の仕事 ( $r = 0.762$ ,  $p < 0.05$ ) において有意な相関関係が認められた。

#### 4. 考察

本研究課題の目的は、走高跳の踏切動作における全身のキネマティクスのパラメーターと踏切離地時鉛直重心速度との関係および下肢 3 関節の力・パワー発揮特性について検討することであった。

##### (1) 踏切局面における身体のキネマティクス

踏切動作中の身体重心高の変位に着目すると (表 1, 図 1), 身体重心高の低下はわずかに  $0.002 \pm 0.001$  m のみで, 下肢関節が屈曲を続けている 10 % 時付近から身体重心高は増大したことが認められた (図 1,3,4,5). 走高跳の踏切動作では, 下肢の伸展動作に先行して身体重心高の増大が生じる High jump Paradox と呼ばれる現象が報告されており, このことは起こし回転運動の働きによるものであるとされている (阿江, 1996a). また, 走高跳の踏切動作で身体の前直速度を獲得するためには, 主に身体の屈曲伸展運動, 身体の起こし回転運動, 遊脚や両腕の振り上げ動作の 3 要素が協働しており, このうち, 身体の起こし回転運動によって獲得される鉛直速度が全体の 70 % にも及ぶことが報告されていることから (阿江, 1996a), 走高跳の踏切動作における起こし回転運動の重要性が伺える. これに対し, 本研究では, 踏切離地時の身体重心鉛直速度と踏切接地時の身体後傾角, 踏切局面における水平速度の減少量との間に有意な正の相関関係が認められた (表 1). これらの結果を解釈すると, 踏切接地時の身体後傾角が大きいことは, 踏切動作における起こし回転運動の運動量を増大させることに貢献し (阿江, 1996a), また, 上述の動作に付随して, 踏切接地時の身体後傾角がより大きく, 踏切動作における起こし回転運動の運動量が大きな踏切動作ほど, 水平速度の減少量も大きくなることが推察される. 以上のことから, 走高跳の踏切動作でよ

り大きな身体重心鉛直速度を獲得するためには、踏切接地時の身体後傾動作を大きくすることが有効であり、それに付随して水平速度の減少量が増大すると考えられる。

また、これまでは踏切動作による起こし回転運動をより大きく遂行するために、踏切接地時の身体後傾角に加えて身体内傾角の獲得が重要であることが指摘されてきた (Dapena, 1980, 2000; Leite, 2013)。一方で、本研究では上述の身体後傾角とは異なり、踏切離地時の身体内傾角は身体重心鉛直速度と有意な相関関係を示さなかった (表 1)。さらに、踏切接地時の身体内傾角度は  $-1.22 \pm 2.03$  deg と、先行研究による報告の平均値である 3.69 deg よりも小さな値を示し (IAAF, 1986; Ae et al., 2008)、平均すると、わずかながらも外傾していることが認められた。身体の身体内傾動作は、助走の曲線部において走速度の減少を抑えつつ身体重心を低下させることに貢献しており (関岡・栗原, 1978; Ae et al., 1986)、助走局面で生じた身体の身体内傾動作を踏切局面まで維持することが有効な技術であると指摘されてきたが (Tidow, 1993)、本研究の結果からは身体内傾動作を踏切局面まで維持することの有効性は示されなかった。一方で、踏切 1 歩前の身体内傾角が大きい場合には、踏切接地時の身体後傾角が大きい傾向が見られたという報告も存在している (関岡・栗原, 1978)。このことを考慮すると、身体の身体内傾動作は助走の曲線部において、走速度の減少の抑制と身体重心の低下の役割に加えて、踏切接地時の身体後傾角の獲得に貢献する役割を有していると考えられる。このことについては今後、助走から踏切動作にかけての身体内傾角と身体後傾角、身体重心高の変化を明らかにする、身体内傾動作の役割について検討される必要がある。

## (2) 走高跳の踏切局面における下肢 3 関節キネティクスの特徴

股関節屈曲伸展軸では (図 3)、関節トルクもトルクパワーも接地から 30% 時付近にかけて活発に発揮され、地面反力の前後成分および鉛直成分が最大値を示した 20% 時付近では、伸展トルクによる大きな負のトルクパワーを発揮していた。このことから、股関節伸展筋群はエキセントリックなパワー発揮によって踏切接地による衝撃に抗う働きをしたと考えら

れる。また、股関節屈曲伸展軸では関節トルク、トルクパワー共に接地瞬間から立ち上がり、他の関節軸よりも早い段階から力・パワーを発揮したことが見て取れる。この力・パワー発揮の様相は、走高跳と同じ動作形態（助走付き片脚跳躍）であるリバウンドロングジャンプ運動における、落下衝撃を増大させた場合と類似しており（藤林ほか, 2013）、このことから、股関節伸展筋群は助走を用いた片脚跳躍で、踏切接地時の衝撃が大きな場合に、その衝撃に抗するために最も早い段階から力・パワー発揮を行う特性を有していることが考えられる。一方、身体重心が上昇する局面（図 8: 10%時付近-100%時）では、股関節伸展トルクによる正のトルクパワー発揮はほとんど認められなかった。以上のことから、走高跳の踏切動作における股関節伸展筋群は、身体重心の上昇に対してよりも、上述の接地衝撃に対する役割を担っていることが推察される。

股関節内外転軸では（図 3）、主に踏切接地から 40%時付近にかけて外転トルクによる負のトルクパワーが発揮されており、股関節外転筋群がエキセントリックなパワー発揮を行うことで、股関節伸展筋群と同様、踏切接地時の衝撃に抗していると考えられる。このようなトルクやトルクパワー発揮は、片脚跳躍における特徴的なものであり、骨盤の挙上下制運動と深く関係し、身体の姿勢保持の役割（荻山ほか, 2018）も有していると考えられる。さらに、40%時付近から 70%時付近にかけては外転トルクによる正のトルクパワーが発揮されており、このような外転筋群によるコンセントリックな力・パワー発揮は、片脚跳躍における骨盤の挙上運動を導き、身体重心の鉛直速度の獲得に貢献していることが報告されている（荻山ほか, 2013; 佐渡・藤井, 2014）。本研究においても、外転トルクによる正のトルクパワー最大値および外転トルクによる正の関節仕事は、踏切離地時鉛直重心速度との間に有意な正の相関関係が認められたことから（表 3）、走高跳においても股関節外転筋群は身体の鉛直重心速度の獲得に貢献していることが推察できる。以上のことから、走高跳の踏切動作における股関節外転筋群は、踏切局面の前半ではエキセントリックなパワー発揮によって接地の衝撃への抵抗と姿勢保持の働きを、踏切局面の後半ではコンセントリックなパワー発揮によって、身体重心の鉛直速度の獲得に貢献する働きを有していることが考え

られる。

股関節内外旋軸では（図 3），接地から 60 %時付近にかけて内旋し，90 %以降は外旋したものの，関節トルク，トルクパワー共に踏切全体を通じて低い値であった。背面跳の踏切動作では，クリアランスに向けて身体の長軸周りの回転が発生するため，股関節内外旋に関する筋群の力・パワー発揮はこの動作と関係していることが推察される。しかしながら，実際には関節トルク，トルクパワーは共に低い値であったために，踏切動作で生じる身体の長軸周りの回転運動は，それ以外の要因による影響が大きいと考えられる。

膝関節屈曲伸展軸に着目すると（図 4），関節トルクでは 10 %時付近から 90 %時付近にかけて継続的に伸展トルクが発揮された。また，トルクパワーに着目すると，10 %時付近から 60 %時付近にかけて大きな負の伸展トルクパワーが発揮され，負の関節仕事は下肢 3 関節の中で最も大きな値を示した一方で，60 %時以降は大きな正の伸展トルクパワーを発揮した。走高跳の踏切動作では，起こし回転運動の鉛直移動距離を大きくするために，踏切中に膝関節をより伸展した状態で保持することが有効であると報告されており（阿江，1996a），さらに，走高跳と同様の助走付き片脚跳躍である走幅跳の踏切局面では，膝関節による緩衝によって，身体重心水平速度の減少量が増大する可能性が示唆されている（志賀・尾縣，2004）。以上のことから，走高跳の踏切局面における膝関節伸展筋群は，踏切接地後 10 %時から 60 %時にかけてはエキセントリックなパワー発揮を行い，踏切接地の衝撃に抗う働きと，起こし回転運動の鉛直移動距離を大きくする働きを，60 %時以降はコンセントリックなパワー発揮によって，身体の上昇に貢献する働きを有していることが推察できる。

足関節底背屈軸に着目すると（図 5），接地直後から踏切離地まで継続的に底屈トルクが発揮された。このトルクの最大値はあまり大きくないものの，10 %時付近から 60 %時付近にかけては継続的に負の底屈トルクパワーが発揮され，負の関節仕事は下肢 3 関節で 2 番目に大きな値を示した。さらに，60 %時以降には正のトルクパワー発揮が活発に行われ，正の関節仕事は下肢 3 関節で最も高い値を示した。足関節は下肢 3 関節の中で最も遠位に位置する関節であり，より近位に位置する膝関節や股関節で発揮された力を地面へと授受

する働きを有している（阿江ほか, 1995; 図子ほか, 1998）。さらに、足関節の特性として、アキレス腱という非常に長い腱を有している一方で、動作に関与する筋は他の 2 関節と比較して小さいことが挙げられる。以上のことから、走高跳の踏切局面における足関節底屈筋群は、発揮できる力は小さいものの、アキレス腱による弾性エネルギーの貯蔵と再利用によって（Komi and Bosco, 1978）、膝関節や股関節で発揮されたパワーを利用し、大きなパワーおよび仕事を発揮することで、10%時から60%時にかけてはエキセントリックなパワー発揮による踏切接地の衝撃に抗う働きと、60%時以降はコンセントリックなパワー発揮によって踏切終盤の身体の鉛直速度の獲得に貢献する働きを有していることが推察できる。

足関節回内外軸に着目すると（図 5）、発揮された関節トルクは小さいものの、踏切接地から 20%時付近にかけて非常に大きな角速度で回外したことが認められた。走高跳の踏切動作において足関節は、接地からその直後にかけて大きく変形することが報告されており（Čoh, 2010）、足関節回内外軸の急激な変位がこれに該当するものであると考えられる。足関節回内外軸の動作には大きな筋群や腱は関与しておらず、踏切接地時の衝撃を受け止めるために十分な力・パワー発揮を行うことができないために、急激な変位が生じていることが推察できる。また、この時に伸長される足関節内側の靭帯は、走高跳において障害が好発する部位であることが報告されており（水村ほか, 1988; Mok et al., 2011）、障害予防の観点から、足関節回外の急激な角度変位を抑制する試みが重要であろう。

### (3) トレーニング実践への示唆

走高跳の踏切動作における踏切脚のキネティクスに関して、本研究では股関節伸展筋群および外転筋群、膝関節伸展筋群、足関節底屈筋群が大きな力・パワーを発揮し、特に股関節外転筋群の働きが走高跳のパフォーマンスの獲得に強く関与していることが明らかとなった（表 2, 3, 図 3, 4, 5）。上記のことから、走高跳の踏切局面における下肢の力・パワー発揮の改善を目的としたプライオメトリクスやウェイトトレーニングでは、上述の力・パワー発揮がより強調される手段や方法を選択することが、より競技特異的なエクササイズ

になると考えられる。特に、本研究では股関節外転筋群とそれによる骨盤挙上の重要性が示されたことから、外転筋群の動員が活発になる片脚系のエクササイズ（吉田ほか, 2003）を選択すること、さらにその際には、骨盤挙上スクワット（荻山ほか, 2018）のような骨盤の挙上動作をより強調するエクササイズを導入することも重要であろう。

また、走高跳の動作分析では、しばしば、踏切離地時の身体重心高と踏切離地時の身体重心鉛直速度から身体重心の最高到達高を算出し、その値を身体重心の推定到達高として、パフォーマンスの評価に用いられてきた（阿江ほか, 2008；Ae et al. 2008）。これに対し、本研究では実際に身体重心が到達した高さを算出することができたため、先行研究と同様の方法で身体重心の推定到達高を算出し、両者の値を比較した（表 1）。その結果、身体重心の最大到達高は  $2.01 \pm 0.11$  m であったのに対し、身体重心の推定到達高は  $2.13 \pm 0.13$  m と、両者に約 10 cm もの差が生じていることが明らかとなった。一方、両者の間には高い相関係数 ( $r = 0.970$ ,  $p < 0.01$ ) も認められた。これらのことから、身体重心の推定到達高によって走高跳のパフォーマンスを推定することはできるものの、誤差が生じている可能性があることを理解しておく必要があると考えられる。

## 5. 要約

本研究課題の目的は、走高跳の踏切動作における全身のキネマティクスのパラメーターと踏切離地時鉛直重心速度との関係および下肢 3 関節の力・パワー発揮特性について検討することであった。本研究課題によって得られた知見は以下の通りである。

- 1) 走高跳の踏切動作において、より高い鉛直速度を獲得するためには踏切接地時の身体後傾角を大きくすることが望ましいと考えられる。また、その際には水平速度の大きな減少を伴うことが推察できる。
- 2) これまでに重要性が述べられてきた踏切接地時の身体内傾動作は、実際にはほとんど行われておらず、身体の鉛直速度の獲得には貢献していない可能性が示された。

- 3) 走高跳の踏切動作では、股関節伸展筋群は主に踏切接地の衝撃に抗う働きを、一方で、股関節外転、膝関節伸展、足関節底屈筋群は踏切接地の衝撃に抗う働きとともに、踏切後半に身体の鉛直速度獲得に貢献していることが示唆された。
- 4) 走高跳においてより高い身体の鉛直速度を獲得するためには、股関節外転筋群の大きなパワー発揮や、それに伴う骨盤の挙上運動が重要になる可能性が示唆された。

以上の結果は、走高跳の踏切動作におけるパフォーマンス決定要因と下肢3関節の力・パワー発揮特性を示すものであり、走高跳のパフォーマンス獲得のためのより専門性の高いトレーニングの実施に役立つものであると考えられる。



## 第6章 走高跳の曲線助走における踏切準備動作の検討（研究課題2）

### 1. 目的

今日の走高跳では、ほぼ全ての競技者が背面跳を用いている（Dapena, 1995）。背面跳を用いた走高跳の技術特性として、助走がアルファベットの「J」の字の様に、前半は直線、後半は曲線の軌跡を描くことが挙げられる（Tellez, 1993）。また、背面跳の踏切動作では、身体の回転運動、身体の屈曲伸展運動、腕や振り上げ脚の振上動作の3要素によって跳躍高を獲得しており（阿江, 1996a）、これらの要素を活用するために、踏切接地時には、身体重心高を十分に低下させておくこと、十分な助走速度を保持していることが必要であると考えられる。したがって、踏切動作に向かう助走局面では、助走速度の減速を抑えつつ、身体重心高を低下させることが主要な技術課題の1つであると言える。これに対し、曲線助走を用いることの利点は、曲線上を走る際に生じる身体の身体内傾動作によって、膝関節に代表される下肢関節の屈曲を抑えられるため、助走速度の減少を抑制しつつ、身体重心高を低下できることである（Ae et al., 1986; 関岡・栗原, 1978）。また、背面跳の助走では、踏切4歩前から曲線走が開始されることが報告されており（Dapena, 1995; 飯干ほか, 1993; Leite, 2013; 関岡・栗原, 1978; Schiffer, 2009）、身体の身体内傾動作および、それに伴う身体重心高の低下は、踏切4歩前から開始されていることが推察される。したがって、曲線走とともに踏切動作の準備が開始される踏切4歩前から踏切にかけての踏切準備局面を分析し、より有効な踏切準備動作について検討することで、走高跳のパフォーマンス向上に役立つ有益な知見を提示することができると推察される。しかしながら、これまでに曲線走が開始される踏切4歩前からの身体重心高や身体の傾き角度の変化について検討した研究は見当たらず、未解明な部分が多い。

そこで本研究では、背面跳を用いた走高跳の踏切4歩前接地から踏切接地までの局面を踏切準備局面と定義し、この局面を3次的に動作分析することで、身体内傾角、身体後傾角および膝関節角度、さらには身体重心高の変化の傾向を検討し、踏切準備動作の特性

を明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

### (1) 対象者

大学陸上競技部またはクラブチームに所属している左脚踏切を専門とする男子走高跳選手 7 名（年齢,  $20.00 \pm 2.45$  years ; 身長,  $1.76 \pm 0.09$  m ; 体重,  $68.24 \pm 6.17$  kg ; ベスト記録,  $2.09 \pm 0.12$  m）を対象とした。実験を開始するにあたり, すべての対象者に本研究の目的, 方法および実験に伴う安全性を十分に説明し, 実験への参加のための同意を得た。なお, これらの手順は, 筑波大学人間層科学研究科研究倫理委員会の承認を得て行われた（承認番号：体 27-49 号）。

### (2) 実験試技

本研究では全助走を用いた試合形式での走高跳を実験試技とし, 対象者には全力で跳躍するよう指示し, 成功試技はバーを落とさずに跳び越えることができた跳躍とした。また, バーの高さの設定は, 各対象者の指定した任意の高さから開始し, 成功の度に 5 cm 間隔で上昇させ, 試合と同様に, 同じ高さでの連続 3 回の失敗があるまで試技を行わせた。なお, 分析試技については, 成功試技のうちの最も記録が高いものとした。

### (3) 測定項目および測定方法

光学式自動動作分析装置（Vicon motion System, 250 Hz）を用いて, 成功試技における助走から着地までの身体各部位（47 点）の座標データを収集した。静止座標系は, 地面と平行でかつバーと垂直に交わる軸を X 軸, 地面と平行でかつバーと平行の軸を Y 軸, 鉛直軸を Z 軸とする右手座標系と定義した。また, 本研究では, 踏切 4 歩前から踏切にかけての各歩の接地時における身体重心速度ベクトルの水平成分を Y 軸, 水平でかつ Y 軸に直

交する軸を X 軸，鉛直を Z 軸とする右手系の移動座標系を対象者ごとに定義した。

得られた身体各部位の座標は，座標成分ごとに最適遮断周波数を Wells and Winter

(1980) の方法にもとづいて決定し，Butterworth Low-Pass Digital Filter を用いて平滑化した。なお，決定された最適遮断周波数は 6–12 Hz の範囲であった。

#### (4) 算出項目

本研究では，運動自由度を 3 とし，14 の関節によって連結された 15 の剛体セグメントモデルを用いて全身をモデル化した。測定によって得られた身体の 3 次元座標から，阿江 (1996b) の身体部分慣性係数を用いて，部分および全身の重心，慣性モーメントを算出した。また，身体重心の変位を時間微分することによって身体重心速度を算出した。身体の身体内傾角度および身体後傾角度については，身体重心と踏切脚足関節を結んだ線分を X-Z 平面および Y-Z 平面に投影し，X-Z 平面上で Z 軸となす角を身体の身体内傾角，Y-Z 平面上で Z 軸となす角を身体の身体後傾角とし，それぞれ正の値を身体内傾と身体後傾，負の値を外傾と前傾とした (戸邊ほか，2018)。また，身体重心の軌跡と各歩接地時の身体重心座標，接地足つま先の座標を X-Y 平面上に投影することで，身体の傾き角と足部接地点の関係性について検討した。

身体に貼付したランドマークをもとに，膝関節の屈曲伸展角度を算出するために，下肢 3 関節の関節中心を算出した。なお，関節角度の算出に用いた座標系は荊山ほか (2013) の方法に準じた。なお，以下では接地時身体重心高を身体重心高，接地時身体重心水平速度を水平速度，接地時身体内傾角度を身体内傾角，接地時身体後傾角度を身体後傾角，接地時膝関節角度を膝関節角度と表記する。

#### (5) 統計処理

各変数は平均値±標準偏差で示した。また，全ての統計処理には，統計パッケージ (SPSS ver. 22, IBM 社製) を用いた。各変数間の関係性の有無については相関係数を

Pearson の方法を用いて算出した。なお、身体重心高と身体内傾角および身体後傾角との関係性の有無については、身体内傾角は身体後傾角の、身体後傾角は身体内傾角の影響を考慮して偏相関係数を算出した。さらに、各変数の差の検定には、1 要因分散分析を用い、F 値が有意であると認められた場合には、Turkey の方法を用いて多重比較を行った。上述の検定における有意性は危険率を 5 %未満で判定した。

### 3. 結果

図 6 には踏切 4 歩前から踏切までの各局面における身体重心高の変位をグラフで示した。また、同様に図 7 には身体内傾角、図 8 には身体後傾角、図 9 には膝関節角度の変位をグラフで示した。さらに、表 4 にはこれらを一覧で示すとともに、各歩における水平速度および膝関節角度、さらに、各変数内で局面ごとの値を比較した結果について示した。身体重心高の局面間における差は認められず ( $F = 2.11, n.s.$ )、水平速度の局面間における差も認められなかった ( $F = 3.57, n.s.$ )。一方で、膝関節角度 ( $F = 7.39$ )、身体内傾角 ( $F = 57.20, p < 0.05$ )、および身体後傾角 ( $F = 149.69, p < 0.05$ ) では有意な差が認められた。身体内傾角では、踏切 4 歩前よりも踏切 2 歩前および踏切 1 歩前が有意に大きく、踏切よりもそれ以外の全ての局面が有意に大きいことが認められた。また、身体後傾角では、踏切 3 歩前よりも踏切 2 歩前および踏切 1 歩前が有意に大きく、踏切がそれ以外の全ての局面よりも有意に大きいことが認められた。加えて、膝関節角度においても、踏切の値がそれ以外の全ての局面よりも有意に大きいことが認められた ( $F = 7.39, p < 0.05$ )。

表 5 には各局面における身体内傾角および身体後傾角と身体重心高との間の偏相関係数を示した。身体内傾角では踏切 3 歩前、踏切 2 歩前、踏切 1 歩前で身体重心高との間に有意な負の相関関係 ( $p < 0.05$ ) が認められた。一方、身体後傾角では踏切において身体重心高との間に有意な負の相関関係 ( $p < 0.01$ ) が認められた。また、図 10 には各局面における膝関節角度と身体重心高との間の相関係数を示した。膝関節角度はいずれの局面においても身体重心高との間に有意な相関関係は認められなかった。

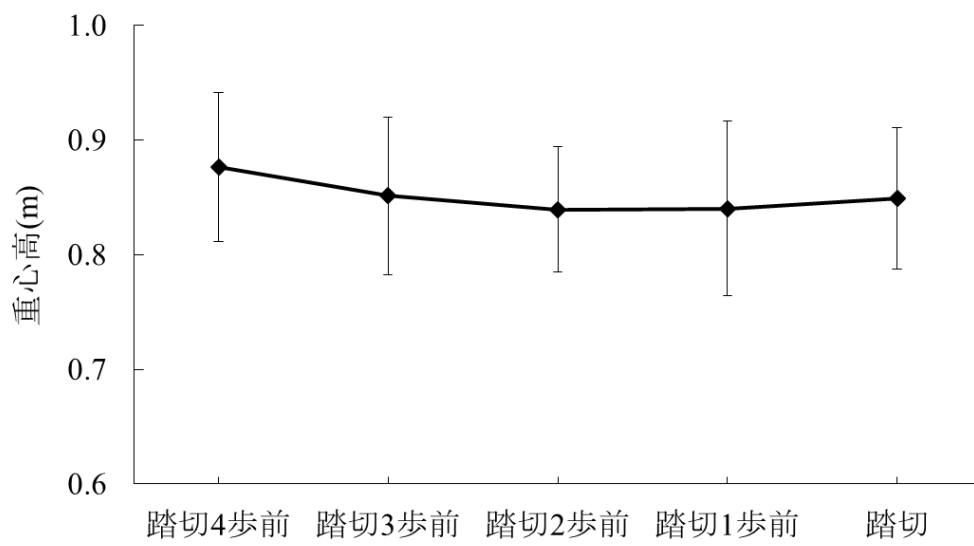


図6 各局面における身体重心高

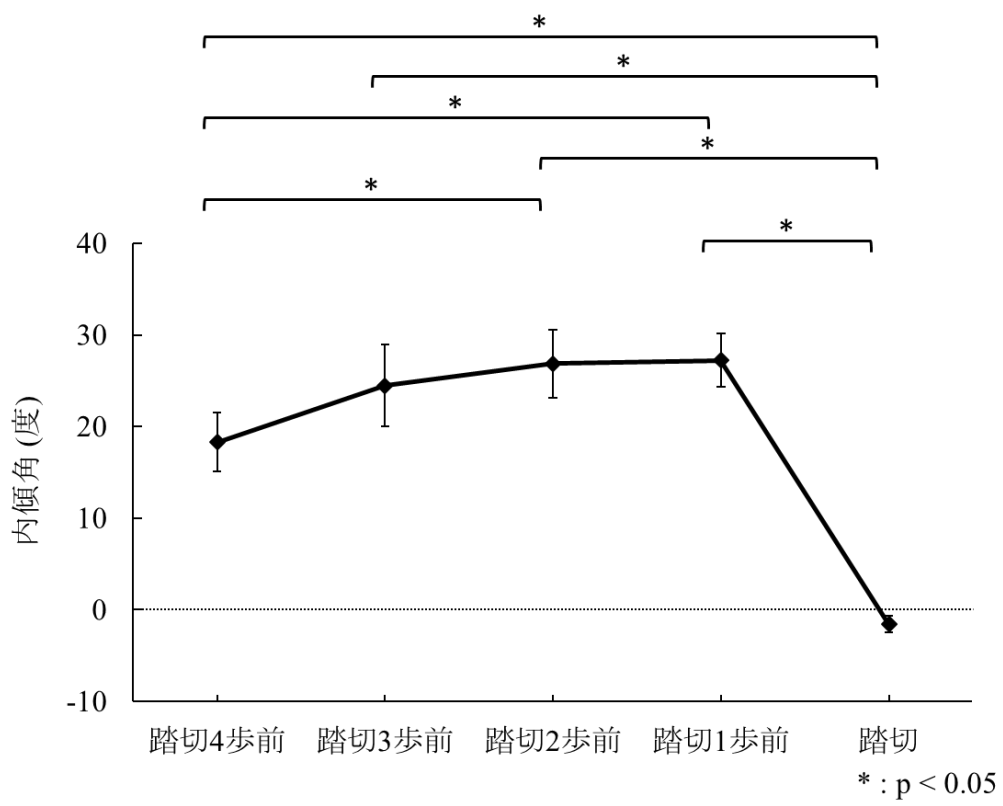


図7 各局面における身体内傾角

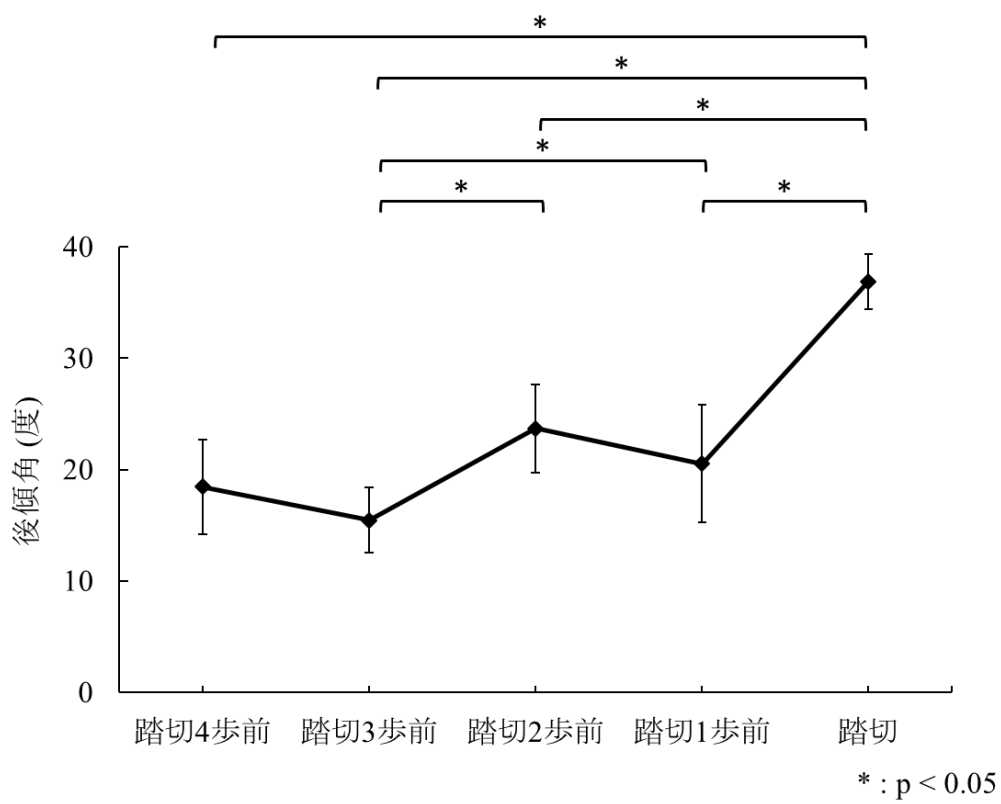


図8 各局面における身体後傾角

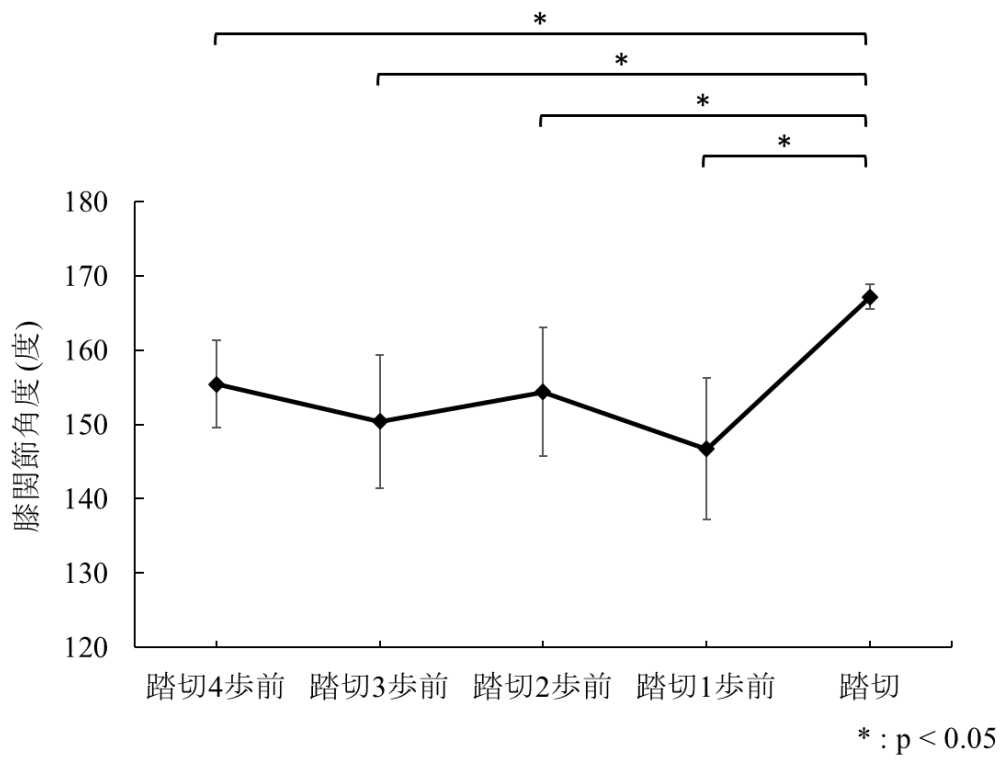


図9 各局面における膝関節角度



表 4 各局面における各種変数の一覧と多重比較

	踏切4歩前	踏切3歩前	踏切2歩前	踏切1歩前	踏切	分散分析 (F値)	多重比較検定
重心高 (m)	0.88 ± 0.06	0.85 ± 0.07	0.84 ± 0.05	0.84 ± 0.08	0.85 ± 0.06	2.11	n.s.
水平速度 (m/s)	6.61 ± 0.36	6.73 ± 0.31	6.88 ± 0.32	6.87 ± 0.27	6.84 ± 0.35	3.57	n.s.
内傾角 (度)	18.31 ± 3.25	24.47 ± 4.44	26.86 ± 3.73	27.25 ± 2.92	-1.57 ± 0.89	57.20*	1歩前,2歩前 > 4歩前 4歩前,3歩前,2歩前,1歩前 > 踏切
後傾角 (度)	18.45 ± 2.94	15.45 ± 2.94	23.69 ± 3.96	20.52 ± 5.28	36.90 ± 2.46	149.69*	1,2歩前 > 3歩前 踏切 > 4歩前,3歩前,2歩前,1歩前
膝関節角度 (度)	155.42 ± 5.87	150.39 ± 8.99	154.38 ± 8.65	146.72 ± 9.48	167.19 ± 1.65	7.39*	踏切 > 4歩前,3歩前,2歩前,1歩前

\* : P < 0.05

表 5 各局面における身体内傾角および身体後傾角と身体重心高との偏相関係数

	踏切4歩前	踏切3歩前	踏切2歩前	踏切1歩前	踏切
内傾角	-0.617	-0.850*	-0.795	-0.943**	-0.365
後傾角	-0.463	-0.552	-0.319	-0.812	-0.900*

\* :  $p < 0.05$ , \*\* :  $p < 0.01$

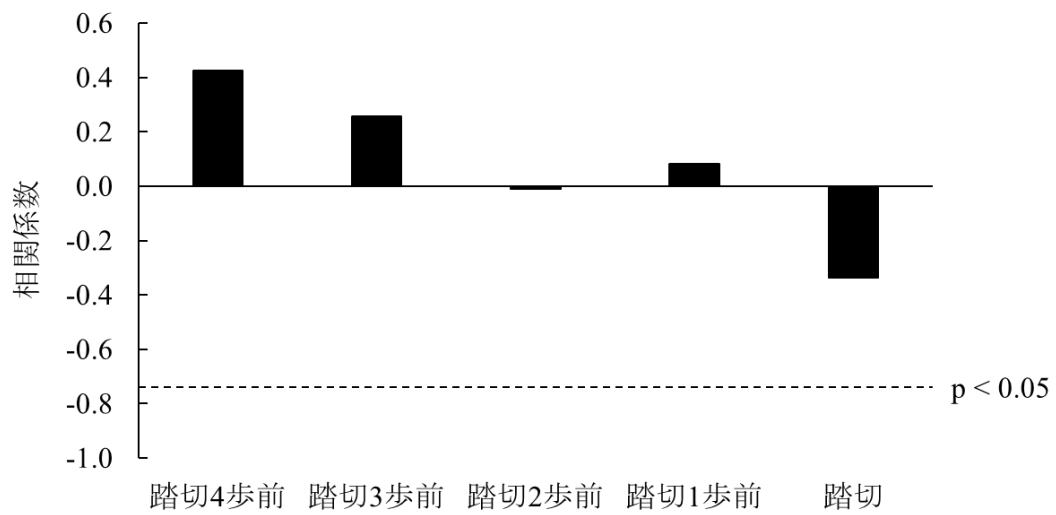


図 10 各局面における膝関節角度と身体重心高の相関係数

#### 4. 考察

走高跳の助走局面の動作を分析した従来の研究では、助走の軌跡について検討したものや、踏切1歩前もしくは踏切2歩前から踏切にかけての局面を動作分析したものが多いが、走高跳の特徴とも言える曲線走が開始される踏切4歩前からの動作を分析した研究は見当たらない。そこで本研究では、踏切4歩前から踏切にかけての踏切準備局面における動作の特性を明らかにすることを目的に、男子走高跳選手を対象とした3次元的動作分析を行った。

##### (1) 踏切準備局面における身体重心高および身体重心水平速度の変化

より高く跳ぶことは、踏切動作でより大きな身体重心鉛直速度を獲得することであると言い換えることができ、そのために、踏切動作中の身体重心高の上昇幅はより大きいことが望ましく、すなわち、踏切接地時の身体重心高をより低くすることがパフォーマンスの獲得に有効であると考えるのが自然である (Isolehto et al., 2007)。したがって、踏切準備局面では、踏切に向けて徐々に身体重心高が低下していくことが推察されるが (関岡・栗原, 1978)、本研究の結果で踏切4歩前から踏切にかけての局面で身体重心高の有意な減少が見られなかったことは (表4, 図6)、踏切4歩前接地から踏切接地にかけては身体重心高の維持が行われていることを意味していると考えられる。

また、水平速度についても、踏切4歩前から踏切にかけて有意な増大は認められず (表4)、このことは、踏切4歩前接地の時点で十分な水平速度が獲得されており、それ以降ではその維持が行われていることを意味するものであると考えられる。走高跳と同じ陸上競技の跳躍種目である走幅跳や三段跳は、助走速度がパフォーマンスの決定に深く関わることで報告されており (Koh and Hay, 1990a, b; 太田ほか; 2010)、これらの種目では、踏切時に大きな水平速度を有していることで高いパフォーマンスの獲得が期待できる。一方で、走高跳は至適な助走速度で踏み切ることが有効であるとされており (Alexander, 1990; Tellez, 1993)、本研究で記録された踏切の水平速度の平均も  $6.84 \pm 0.35$  m/s (表4)

であり、走幅跳を分析した研究と比較すると、その値は低かった（木野村ほか, 2012; 太田ほか, 2010; 志賀ほか, 2002）。しかしながら、走幅跳の一般的な助走歩数が 18 歩から 20 歩（木野村ほか, 2012）であるのに対し、走高跳の一般的な助走歩数が 8 歩から 12 歩（Tidow, 1993）であることを考慮すると、本研究において踏切 4 歩前の時点で十分な水平速度が獲得されていたことは、踏切 4 歩前までの限られた歩数で、十分な水平速度を獲得することに留意する必要性を示すものであると考えられる。

## (2) 身体の傾きと膝関節角度からみた踏切準備動作

ここでは、上述した走高跳の踏切準備局面における効果的な踏切動作への移行について、身体の傾き（身体内傾、身体後傾）と膝関節に代表される下肢関節の屈曲（Ae et al., 1986, 関岡・栗原, 1978）、から検討していく。

身体内傾角に着目すると、先行研究において身体の身体内傾動作による身体内傾角の獲得は、踏切 1 歩前および 2 歩前で水平速度の低下を抑えつつ身体重心高を低下させる役割を有していることが報告されている（Ae et al., 1986; 関岡・栗原, 1978）。これに対し本研究では、身体内傾角は踏切 4 歩前と比較して踏切 2 歩前および踏切 1 歩前の値が有意に大きいことが認められ、また、踏切 3 歩前と踏切 1 歩前において身体重心高との間に有意な負の偏相関関係が認められた（表 5）。以上の結果から、身体内傾角が踏切 3 歩前と踏切 1 歩前の踏切脚と逆の脚で接地する局面において、低い身体重心高の維持に大きく貢献していることが推察される。一方で、身体内傾角は踏切 1 歩前から踏切にかけて有意に減少して負の値に転じており（表 4, 図 7）、踏切接地時には身体重心高との間の有意な相関関係も認められなかった（表 5）。これらをまとめると、身体内傾角は、踏切 3 歩前と踏切 1 歩前の、踏切脚と逆の脚で接地する局面において低い身体重心高の維持に貢献しているものの、踏切時には消失し、身体重心高の維持にはあまり影響していないことが示された。

次に身体後傾角に着目すると、身体後傾角は踏切 4 歩前から踏切にかけて有意に増大していき（表 4, 図 8）、踏切で身体重心高との間に有意な負の偏相関関係（表 5）が認められ

た。踏切準備局面における身体後傾動作は助走速度の減少に繋がる可能性のあることから（関岡・栗原，1978），踏切準備局面では身体後傾角の増大を抑制しているものと考えられる。一方で，膝関節の屈曲や身体内傾動作がほとんど認められない踏切接地時には，身体後傾角が低い重心高の維持に大きな役割を果たしていることが推察され，踏切 1 歩前から踏切にかけての身体後傾角の獲得が踏切準備局面における非常に重要な技術要因の 1 つであると考えられる。以上のことから，踏切 4 歩前から踏切 1 歩前までの局面では水平速度の減少を抑えるために身体の後傾動作を抑えることが有効であり，続く踏切接地時には，低い重心高の維持のために大きな身体後傾角の獲得が有効である可能性が示された。また，この踏切 1 歩前から踏切にかけての身体後傾角の獲得が，踏切準備動作における非常に重要な技術要因の 1 つであることが推察される。

最後に，膝関節角度に着目すると，踏切準備局面における各歩の膝関節は踏切時よりも有意に屈曲しているものの（表 4，図 9），いずれにおいても身体重心高との間に有意な相関関係は認められなかった（図 10）。これらの結果は，踏切準備局面では膝関節の屈曲は生じているものの，身体重心高の低下にはあまり貢献していないことを意味していると考えられる。踏切準備局面における身体重心高の低下について Ae et al. (1986) は，身体の傾きに依存するタイプと下肢の屈曲に依存するタイプの 2 種類が存在することを報告している。このことを考慮すると，これまでに身体重心高の低下と関係性が認められた身体内後傾が小さい場合には，膝関節の屈曲による貢献が増大することが推察できる。

### (3) 現場への示唆

本研究では，踏切 1 歩前から踏切にかけて身体内傾角と身体後傾角は対照的な変化を示した（表 4，図 7，8）。このような変化を生み出す要因について，身体の傾きに影響し，かつ比較的操作が容易な足部の接地位置から検討した。図 11 には，最も自己記録の高い対

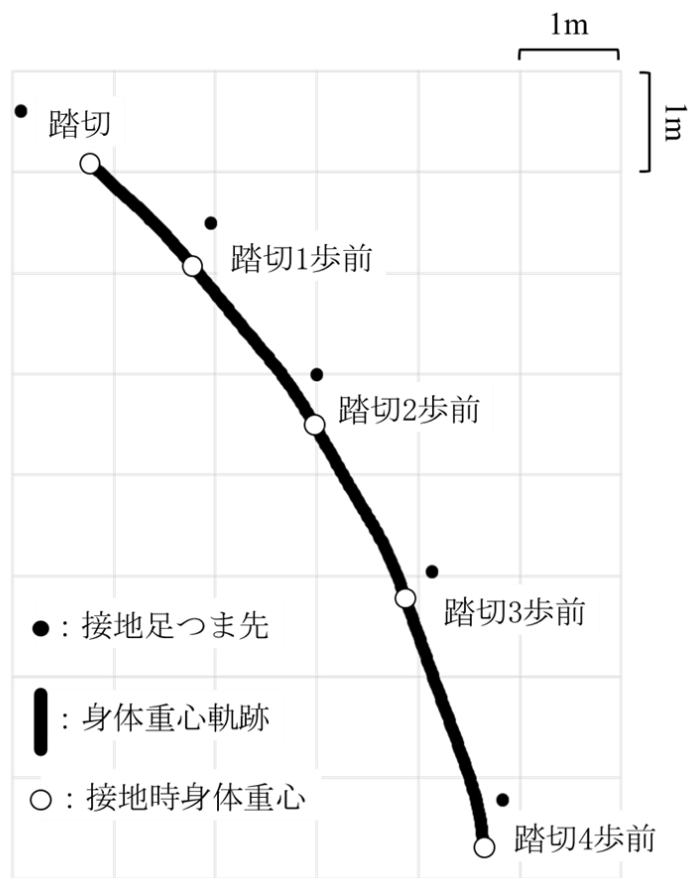


図 11 対象者 G の身体重心の軌跡と各歩の接地位置

象者 G の身体重心の軌跡と各歩接地時の身体重心、接地足つま先の座標を X-Y 平面上に投影したものを示した。踏切 4 歩前から踏切 1 歩前にかけては、身体重心の軌跡が描く曲線の外側に足を接地している傾向がみられ、これによって身体内傾角が生じていると考えられる。一方で、踏切接地時には身体重心に対しより前方へ足を接地し、大きな身体後傾角を獲得していることが見て取れる。また、踏切接地時には膝関節がより伸展している（表 4、図 9）ことで、身体セグメント長がより大きくなり、大きな身体後傾角の獲得に影響していると考えられる。

以上のことから、踏切 1 歩前から踏切にかけての身体内傾角と身体後傾角の対照的な変化は、踏切に向けて身体重心の進行方向に対する足部の接地点が変化したことによる影響が大きいと考えられる。また、足部接地位置を変化させることは比較的容易であると推察され、足部接地位置に着目して身体の傾き角をコントロールすることで有効な踏切準備動作の遂行が期待できると考えられる。

## 5. 要約

本研究課題では走高跳の助走の曲線部における身体重心高や身体の傾き角等の変化について検討することで、走高跳のパフォーマンス向上に役立つ有益な知見を提示することを目的に、走高跳の踏切 4 歩前接地から踏切接地にかけての局面を 3 次的に動作分析した。本研究から得られた走高跳の踏切準備動作に関する知見は以下の通りである。

- 1) 各歩の接地時における身体重心高および水平速度に有意な変化は認められなかったことから、これらの踏切準備に関わる要素は踏切 4 歩前から踏切にかけての局面では維持されていると考えられる。
- 2) 身体内傾角は、踏切 3 歩前と踏切 1 歩前の、踏切脚と逆の脚で接地する局面において低い身体重心高の維持に貢献しているものの、踏切時には消失し、身体重心高の維持にはあまり影響していないと考えられる。
- 3) 踏切準備局面では水平速度の減少を抑えるために身体後傾動作を抑えることが有効で



あり、一方で、続く踏切接地時には低い身体重心高の維持のために身体後傾角が貢献している可能性が示された。

- 4) 膝関節の屈曲は身体重心高の低下との関係性が認められなかったが、身体の傾き角が小さい場合には、その貢献度が高まると考えられる。
- 5) 踏切1歩前から踏切にかけての身体内傾角と身体後傾角が対照的な変化を示す局面では、足部の接地位置に着目して身体の傾き角をコントロールすることが有効であると考えられる。

以上の結果は、走高跳のより良い踏切準備動作を行うために役立つ、有益な知見であると考えられる。

## 第7章 一流走高跳選手のパフォーマンス向上過程における縦断的動作分析(研究課題3)

### 1. 目的

陸上競技の走高跳はどれだけ高いバーを跳び越えることができるかを競う種目であり、他の跳躍種目と比較して、助走において曲線を描くことが大きな特徴である。競技者はこの曲線走を利用することで、踏切準備局面において支持脚の屈曲だけではなく、曲線内側に身体を傾ける身体内傾動作にも依存して身体重心高を低下させることが可能となっている (Ae et al., 1986; Dapena, 2000; 関岡・栗原, 1978)。一方で、曲線助走の軌跡は助走速度やストライド長、競技者の形態といった様々な要因によって変化し、それに応じて踏切準備局面から踏切局面における動作には競技者間における大きなばらつきが存在することが報告されている (阿江, 1996a; 阿江ら, 2008; Isolehto et al., 2007; 渡辺, 2012; 渡辺・守田, 2012)。さらに、このばらつきは競技者の個人内においても形態や体力的要因の変化などによって生じ、走高跳では個人の技術特性がトレーニング過程の中で大きく変化することが考えられる。しかしながら、実際に個人の動作を縦断的に分析した研究は極めて少なく、その実態は明らかとなっていない。

したがって、走高跳における個人内の技術変化について検討することで、競技実践現場での取り組みに貢献し得る、有益な知見を明示することができると考えられる。そこで本研究課題では、日本トップレベルの高い競技力を有する1人の走高跳競技者が記録を向上させた事例に着目し、その間の動作をバイオメカニクスの的に分析することで、走高跳選手がパフォーマンスを向上させようとする取り組みにおける技術変化の実態を明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

### (1) 主体者および対象者

主体者および対象者は、陸上競技および走高跳の競技歴が10年の男子走高跳競技者であった。この競技者は中学から一般まで、全ての年代カテゴリーにおける全国大会で優勝経験のあるトップ競技者であった。なお、2014年に記録した自己ベスト2 m31は日本歴代3位、2014年の世界ランキング12位に相当する記録であった。また、対象者が所属するチームには、コーチやアシスタントコーチを始めとする指導スタッフが数名いたが、トレーニングの計画および実践、評価は自身で行う、セルフコーチングを実施している競技者であった。セルフコーチングは大学入学と同時に開始し、本研究の対象期間の起始年である2012年はその3年目であった。ただし、所属チームのコーチからは、試合におけるコーチングやトレーニングに関する相談や、月に3回程度と頻度は低いもののトレーニングにおける指導などのコーチングを受けていた。

### (2) 対象期間

対象期間は、2012年のシーズン最高記録を達成した2012年9月10日から、自己最高記録の2 m31を達成した2014年5月11日までとした。

### (3) 競技活動に関する資料

#### 1) トレーニング日誌

対象期間におけるトレーニング内容や走高跳の技術変化についてまとめるために、2012年9月から2014年5月までのトレーニング日誌の内容を整理統合した。トレーニング日誌は毎日記録されたもので、月ごとのトレーニング目標、各日のトレーニング内容および所感が記載されていた。また、試合の日については、ウォーミングアップおよび試合の内容と、所感が記載されていた。なお、これらのデータをもとに本研究で記載された内容については、その信頼性と妥当性を確保するために、本研究の共同研究者でもある対象者の

コーチが内容に齟齬がないことを確認した。

本研究では対象者が実施したトレーニングをスプリントトレーニング、ウェイトトレーニング、プライオメトリックトレーニング、テクニクトレーニングの4つに大別してそれぞれの回数をまとめた。

## 2) 形態およびコントロールテストの記録計測

形態の変化における体組成はInbody770 (Inbody社製)を用いて計測し、身長はデジタル身長計 (エー・アンド・デイ社製)を用いて計測した。また、コントロールテストにおける30 m加速走タイムは、30 mの加速区間を設けた30 m走のタイムを光電管

(Brower Timing社製)を用いて計測し、垂直跳の跳躍高および6回連続リバウンドジャンプのRJ-index (跳躍高/接地時間: 図子ら, 1993)は、マルチジャンプテスト (ディケイエイチ社製)を用いて計測した。さらに、ウェイトトレーニング種目におけるクリーンは、ハングポジションから実施しキャッチ動作までを完遂できた重量、スクワットは大腿と下腿のなす角が目測で90度になる姿勢までバーベルを下げ、その後立位まで挙上できた重量とした。なお、対象者が実施したコントロールテストは、陸上競技の跳躍種目を専門とする選手が体力的要因を評価するために一般的に用いられている種目であった (稲岡ほか, 1993; 図子, 2013; 図子・高松, 1996)。

## 3) 試合試技の映像

対象者の技術変化を定性的に評価するために、ハイスピードカメラ (EXLIM-EX-F1, CASIO社製)とビデオカメラ (HX-WA10-K, Panasonic社製)で撮影された試合試技の映像を用いた。これらの映像をもとに、研究主体者と本研究の共同研究者でもある対象者のコーチによって、対象期間における技術変化について定性的な確認を行った。

#### 4) バイオメカニクスの動作分析

##### ①対象競技会

本研究課題では、対象者が2012年シーズン最高を記録した第81回日本学生陸上競技対校選手権大会（競技会1）、およびその後に自己最高記録を樹立した第92回関東学生陸上競技対校選手権大会（競技会2）、第82回日本学生陸上競技対校選手権大会（競技会3）、セイコーゴールデングランプリ陸上2014東京（競技会4）を対象競技会として、競技会における最高パフォーマンスを記録した試技の動作を分析した。競技会の開催日および記録は以下に示した。

競技会1：2012年9月10日，2 m22（シーズン最高）

競技会2：2013年5月18日，2 m25（自己最高記録）

競技会3：2013年9月8日，2 m28（自己最高記録）

競技会4：2014年5月11日，2 m31（自己最高記録）

##### ②分析方法および算出項目

2台のハイスピードカメラ（EXLIM-EX-F1，CASIO社製）を用いて、毎秒300コマ、露出時間1/1000で各競技会における試技を撮影した。また、DLT法により3次元座標を算出するため、試技前にキャリブレーションポールを立て撮影した。撮影されたVTR画像から、踏切接地の10コマ前から踏切離地10コマ後までの身体分析点をビデオ動作解析システム（FrameDiasIV，ディケイエイチ社製、）を用いて身体分析点23点をデジタル化した。静止座標系は、地面と平行でかつバーと垂直に交わる軸をX軸、地面と平行でかつバーと平行の軸をY軸、鉛直軸をZ軸とする右手系座標とした。身体分析点の3次元座標はWells and Winter（1980）の方法を用いて分析点ごとに遮断周波数を決定し（X軸：7.5～10.5 Hz，Y軸：6.0～10.5 Hz，Z軸：7.5～10.5 Hz）、位相ずれのない4次のバターワースデジタルフィルターを用いて平滑化した。平滑化した身体分析点の座標データから、阿江（1996b）の身体部分慣性係数を用いて、身体部分および全身の重心（身体重心）を算出した。また、身体重心座標値を時間微分し、静止座標系のX軸成分とY軸成分

を合成することで身体重心速度を算出した。さらに、身体重心速度ベクトルの水平成分を Y 軸、水平でかつ Y 軸に直交する軸を X 軸、これに Z 軸を加えた移動座標系を定義し、身体重心と接地足の足関節中心を結んだ線分を YZ 平面および XZ 平面へ投影し、この線分が YZ 平面上で Z 軸となす角を身体後傾角、XZ 平面上で Z 軸となす角を身体内傾角として算出した。また、本研究では振込動作の評価変数を算出するために、左肩から右肩へ向かうベクトルを X' 軸、Z 軸と X' 軸の外積を Y' 軸、これに Z 軸を加えた移動座標系を定義した。さらに、肩関節中心と腕部の重心を結んだ線分を Y'Z 平面上へ投影し、Z 軸となす角を振込角度とし、さらに振込角度を微分することで振込角速度を算出した。

### 3. 結果

#### 1. 対象者のトレーニング過程および技術変化の概要

##### (1) 対象期間におけるパフォーマンスの変化

表 6 には対象者が対象期間において出場した全試合の記録を示した。対象者は、2013 年 5 月 18 日の関東学生対校選手権で 2 m25、2013 年 9 月 8 日の日本学生対校選手権で 2 m28、2014 年 5 月 11 日のセイコーゴールデングランプリで 2 m31 の自己最高記録を達成した。

##### (2) 対象期間におけるトレーニングとその評価

表 7 には対象期間における対象者のトレーニング概要をまとめた。対象者は、対象期間におけるトレーニング計画において、走高跳のパフォーマンスを構成する要因を最大筋力や力発揮能力などの体力的要因と、走高跳の動作における技術的要因の 2 つに大別し、これらを相互的または並行的に高めていくことによって走高跳のパフォーマンスを向上させることを目指していた。体力的要因を高めるためのトレーニングとしては、走能力向上を目的とした 100 m～200 m のスプリントトレーニング、主に最大筋力の向上を目的とした

表 6 対象期間における試合一覧

日付	大会名	場所	記録 (m)	備考
2012年9月10日	第81回日本学生対校陸上競技選手権	国立競技場(東京)	2.22	シーズン最高記録
9月23日	第25回六大学対校陸上競技選手権	千葉市総合スポーツセンター(千葉)	2.16	
10月6日	第67回国民体育大会	岐阜メモリアルセンター(岐阜)	2.21	
2013年1月20日	Best Western Games	グエクシヨール(スウェーデン)	2.15	
1月27日	Plasspollen	マルメ(スウェーデン)	2.20	
4月14日	筑波大競技会	筑波大学(茨城)	2.15	
4月28日	2013日本選抜陸上和歌山大会	紀三井寺運動公園(和歌山)	2.20	
5月18日	第92回関東学生対校陸上競技選手権	国立競技場(東京)	2.25	自己最高記録
6月9日	日本陸上競技選手権	味の素スタジアム(東京)	2.20	
7月7日	Universiade 予選	カザン(ロシア)	2.20	
7月9日	Universiade 決勝	カザン(ロシア)	2.20	
7月28日	第10回トワライト・ゲームス	織田フィールド(東京)	2.19	
8月10日	国民体育大会千葉県予選会	千葉市総合スポーツセンター(千葉)	2.23	
9月8日	第82回日本学生対校陸上競技選手権	国立競技場(東京)	2.28	自己最高記録
10月6日	第68回国民体育大会	味の素スタジアム(東京)	2.24	
10月19日	第53回実業団・学生対抗陸上競技選手権	Shonan BMW スタジアム平塚(神奈川)	2.20	
2014年1月27日	Ostravska latka	オストラヴァ(チェコ)	2.20	
2月2日	Russian Winter	モスクワ(ロシア)	2.24	
2月11日	Martin Kutman Memorial	タルトゥ(エストニア)	2.26	
2月15日	Müller Indoor Grand Prix	バーミンガム(イギリス)	2.20	
4月27日	2014日本選抜陸上和歌山大会	紀三井寺運動公園(和歌山)	2.20	
5月11日	セイコーゴールデングラブ陸上東京2014	国立競技場(東京)	2.31	自己最高記録

表 7 月毎のトレネーニング概要

月	Training Cycle	トレネーニング目標	トレネーニング日数	主なトレネーニング内容	トレネーニング拠点
2012年 9月	試合期	跳躍技術の安定	15日	TT, PT, WT(最大スピード法)	筑波大学
10月	試合期	筋量の増大, スプリント能力の向上	12日	TT, PT, WT(最大スピード法)	
11月	鍛錬期	筋量の増大, スプリント能力の向上	15日	WT(筋肥大法), ST(100m~150m)	
12月	鍛錬期	筋量の増大, スプリント能力の向上	20日	WT(筋肥大法), ST(100m~200m)	
2013年 1月	試合期	最大筋力の向上, タブルアームアクシヨンの定着	20日	PT, WT(最大筋力法), ST(100m~200m)	筑波大学
2月	鍛錬期	最大筋力の向上, タブルアームアクシヨンの定着	16日	TT, PT, WT(筋肥大法, 最大筋力法)	
3月	準備期	力発揮能力の向上, タブルアームアクシヨンの定着	18日	PT, WT(最大筋力法, 最大スピード法)	
4月	準備期	力発揮能力の向上, 助走から踏切局面にかけての動作の安定	15日	TT, PT, WT(最大筋力法, 最大スピード法)	
5月	試合期	力発揮能力の向上, 助走から踏切局面にかけての動作の安定	16日	TT, PT, WT(最大スピード法)	筑波大学
6月	試合期	より素早い振り込み動作の習得	15日	TT, PT, WT(最大筋力法)	
7月	準備期	より素早い振り込み動作の習得	12日	PT, ST(100m~120m)	
8月	準備期	試合前半で消耗した体力の改善, つぶれない踏切動作の習得	18日	TT, PT, WT(最大筋力法)	
9月	試合期	力発揮能力の向上, つぶれない踏切動作の習得	17日	TT, PT, WT(最大スピード法)	筑波大学
10月	試合期	つぶれない踏切動作の習得	12日	TT, WT(最大スピード法)	
11月	鍛錬期	筋量の増大	20日	WT(筋肥大法), スプリント(100m~200m)	
12月	鍛錬期	筋量の増大	21日	WT(筋肥大法), スプリント(100m~200m)	
2014年 1月	鍛錬期	最大筋力の向上, 跳躍の感覚を取り戻す	19日	TT, WT (最大筋力法)	筑波大学
2月	試合期	力発揮能力の向上, 跳躍の感覚を取り戻す	12日	TT, PT, WT(最大スピード法)	
3月	準備期	最大筋力の向上, 助走から踏切局面にかけての動作の安定	18日	TT, WT (最大筋力法)	
4月	準備期	力発揮能力の向上, 助走から踏切局面にかけての動作の安定	17日	TT, PT, WT (最大スピード法)	
5月	試合期	力発揮能力の向上, 助走から踏切局面にかけての動作の安定	4日	TT, WT (最大スピード法)	エストニア (1月19日~2月18日)

※ TT: テクニックトレネーニング, PT: プライオメトリックトレネーニング, WT: ウェイトトレネーニング, ST: スプリントトレネーニング



クリーンやスクワットといったウェイトトレーニング，力発揮能力の向上を目的としたボックスジャンプやハードルジャンプなどのプライオメトリックトレーニングを実施した。なお，ウェイトトレーニングでは，最大挙上重量の 60~70 %程度の重量を用いて疲労困憊まで挙上する筋肥大法，最大挙上重量に近い重量を用いて 1 セットあたり 1~2 回挙上する最大筋力法，非常に軽い重量を用いて可能な限り速く挙上する最大スピード法を用いた（グロッサー・ノイマイヤー，1995）。また，技術的要因を高めるためのトレーニングとして，走高跳の跳躍を行う跳躍練習と，その分習法としてのドリルを行うテクニクトレーニングを実施した。

図 12，図 13 は上記に示した各種トレーニングの実施回数とそれぞれの割合を月毎にまとめたものである。スプリントトレーニングは試合期における回数が少なく，ウェイトトレーニングは鍛錬期の 11 月から 1 月に高い頻度で実施された。また，プライオメトリックトレーニングは年間を通して安定した頻度で実施された。一方，テクニクトレーニングは 2012 年の 11，12 月には 1 回も実施されず，試合期の 1，2 月と 4 月から 9 月には多く実施された。なお，各年の 10 月は休養期間としたために，全てのトレーニングの頻度が低下している。

また，対象者は上記のトレーニングの成果の検証のために，形態の変化とコントロールテストの結果を記録した。表 8 は対象者の形態の変化を，表 9 は対象者が定期的に実施したコントロールテスト記録の変化をまとめたものである。

形態の変化に着目すると，わずかではあるが身長が増加が認められた。また，体重は鍛錬期に増加し，試合期には減少した傾向が認められ，筋量および体脂肪率もおおむね体重と同様の变化傾向が認められた。一方，コントロールテストの記録では，全ての種目において，徐々に記録が向上した。なお，本研究の対象期間において，対象者にはトレーニングの中断やトレーニングメニューの変更を要する怪我や故障，疾病等はなかった。

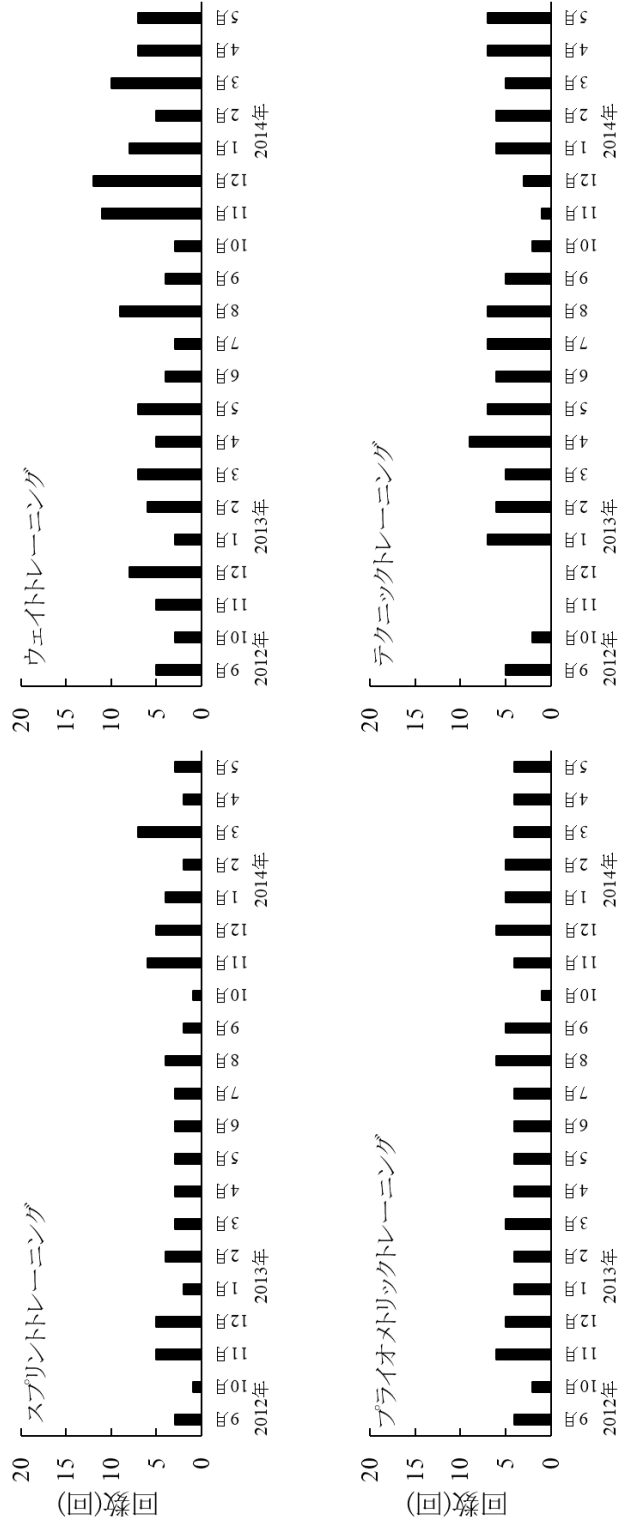


図 12 各種トレーニングにおける月毎の実施回数

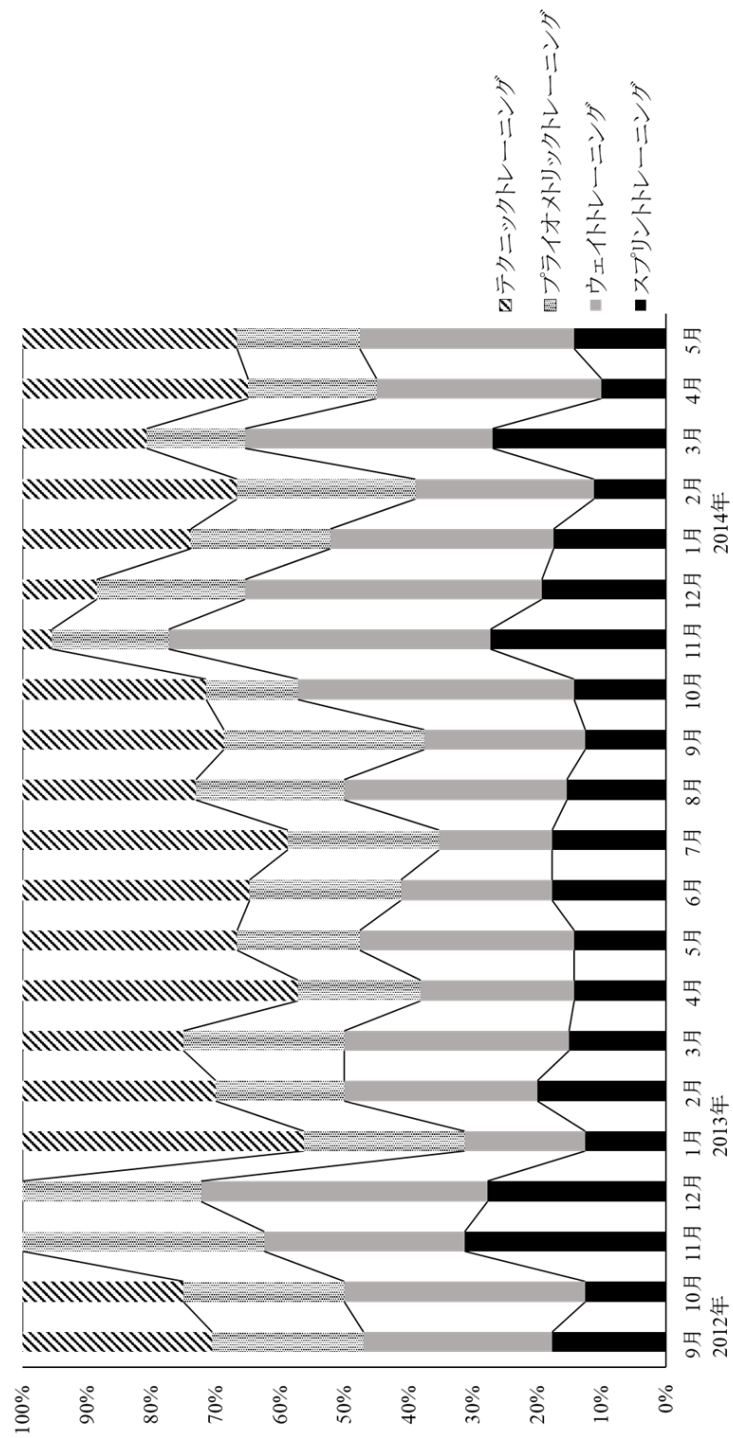


図 13 月毎の各種トレーニング実施回数割合の変化

表 8 対象者の形態の変化

	2012年												2013年												2014年				
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月								
身長 (cm)	193.0	193.0	193.0	193.0	193.0	193.0	193.1	193.1	193.1	193.1	193.1	193.1	193.1	193.1	193.1	193.2	193.2	193.2	193.2	193.2	193.2								
体重 (kg)	70.0	70.5	70.7	71.0	72.1	71.7	71.5	71.1	70.0	69.8	70.0	70.2	70.5	71.0	72.2	73.4	73.1	73.0	72.9	72.3	72.0								
筋肉量 (kg)	36.8	36.8	37.0	37.3	37.6	37.1	37.2	37.0	36.9	37.0	36.9	37.2	37.4	36.9	37.5	38.1	37.9	38.0	37.7	37.8	37.6								
体脂肪率 (%)	6.0	6.7	6.5	7.0	7.2	7.1	6.6	6.0	5.8	5.9	5.2	5.5	4.9	5.6	6.6	7.3	7.0	6.9	6.6	6.0	5.5								

表 9 対象者の各種コントロールテストにおける記録の変化

	2012年												2013年												2014年				
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月								
クリーン (kg)	85	90	90	95	95	100	100	100	105	100	95	95	105	-	95	110	115	110	115	120	110								
スクワット (kg)	130	-	140	145	160	-	175	165	-	-	160	150	170	-	160	170	185	-	180	190	-								
30m加速走 (s)	3.02	-	3.22	3.20	-	3.10	-	-	-	3.02	3.00	3.10	2.98	-	3.19	3.17	-	3.03	-	3.00	-								
立五段跳 (m)	15.80	-	15.70	15.40	16.20	15.75	15.80	16.00	16.30	16.20	16.00	16.15	16.20	-	15.75	15.80	16.10	16.00	16.15	16.35	16.30								
垂直跳 (m)	0.68	-	0.69	0.72	-	-	0.73	-	-	-	0.70	-	0.75	-	0.73	0.72	-	-	0.75	0.77	-								
RJ-index (m/s)	3.68	-	3.70	3.75	-	-	3.69	-	-	-	3.82	-	3.83	-	3.69	3.75	-	-	3.80	3.89	-								

### (3) 対象期間における走高跳パフォーマンスの定性的変化

図 14 は各ベストパフォーマンス試技の映像から、画像を切り出して作成した連続写真である。2012 年 9 月 10 日の試技ではシングルアームアクションを用いて跳躍を行っているのに対して、2013 年 5 月 18 日以降にはダブルアームアクションを用いて跳躍を行っていることが認められた。

### (4) バイオメカニクスの動作分析による走高跳パフォーマンスの定量的評価

表 10 には、踏切動作の接地時間、踏切接地時および離地時の身体重心高、身体重心の水平および鉛直速度、身体の内後傾角度、踏切局面における水平速度の減速量、振込角度および振込角速度を示した。

競技会 1 から 2 では、踏切接地時間、踏切接地時の身体重心水平速度、踏切離地時の身体重心鉛直速度、水平速度減速量が増大した。また、踏切接地時の身体の傾きでは身体内傾角が減少し、身体後傾角は増大した。振込動作では振込角度が増大し、振込角速度は減少したことが認められた。

競技会 2 から 3 では、接地時間、水平速度減速量が減少し、踏切接地時の身体重心水平速度、踏切離地時の身体重心鉛直速度は増大した。また、踏切接地時の身体の傾きは身体内傾角が増大し、身体後傾角は減少した。振込動作では振込角度が増大し、振込角速度は減少したことが認められた。

競技会 3 から 4 では、接地時間は減少した。一方で、踏切接地時の身体重心水平速度、踏切離地時の身体重心鉛直速度、水平速度減速量が増大し、また、踏切接地時の身体の傾き角度では身体内傾角が増大し、身体後傾角は減少した。振込動作では振込角度、振込角速度がともに減少したことが認められた。

競技会1 (2m22)



競技会2 (2m25)



競技会3 (2m28)



競技会4 (2m31)



図 14 対象期間における踏切動作の変遷

表 10 踏切局面のバイオメカニクスのパラメーター

接地時間 (s)	身体重心高 (m)		身体重心水平速度 (m/s)		身体重心鉛直速度 (m/s)		身体内傾角 (deg)		身体後傾角 (deg)		水平速度減速度 (m/s)	振込角度 (deg.)	振込角速度 (deg./s)	
	接地時	離地時	接地時	離地時	接地時	離地時	接地時	離地時	接地時	離地時				
競技会1	0.167	0.93	1.35	7.18	4.48	0.12	4.48	-1.30	1.39	38.29	-7.33	2.70	12.51	-563.66
競技会2	0.173	0.93	1.36	7.85	4.15	-0.32	4.58	-2.81	2.77	41.94	-6.38	3.70	40.38	-763.64
競技会3	0.160	0.91	1.37	7.70	4.47	-0.17	4.71	-1.06	1.12	40.52	-3.50	3.23	32.93	-799.06
競技会4	0.153	0.92	1.34	8.01	4.47	-0.09	4.93	2.79	0.24	36.74	-7.87	3.54	19.66	-1012.20



#### 4. 考察

本研究課題の目的は、日本トップレベルの高い競技力を有する走高跳競技者が記録を向上させた事例に着目し、その間の動作をバイオメカニクスの的に分析することで、走高跳競技者のパフォーマンス向上過程における技術変化の実態を明らかにすることであった。

##### (1)対象期間における対象者の体力的要因の変化

対象期間において対象者は、走高跳のパフォーマンスを構成する要因を体力的要因と技術的要因の2つに大別し、これらを高めることで走高跳の記録向上を目指していた。その間において、試合のない鍛錬期においては主に体力的要因を高めるためのトレーニングを中心としたプロトコルが実施され、一方で、試合期においては技術的要因を高めるためのトレーニングを中心としたプロトコルが実施された(表7, 図12, 13)。スポーツパフォーマンスを形成する要因としての体力的要因と技術的要因には階層性が存在し、より下層に位置づけられる体力的要因によって、上層に位置する技術的要因が規定されることが考えられる(図子, 2003, 2016)。したがって、対象期間における対象者の技術変化について論じることに先立って、体力的要因の変化による影響について検討する必要があると推察される。

体力的要因の変化に着目すると、対象者が実施したコントロールテストでは全ての種目で、記録の向上が認められた。走高跳の踏切動作は0.2秒以下(阿江ほか, 2008; Isolehto et al., 2007)の極めて短い接地時間で大きな力やパワー(Coh, 2010)を発揮することが要求される運動であり、踏切脚ではバリスティックなSSC運動(図子ほか, 1993)の遂行能力がパフォーマンスの決定に深く関係していることが推察される。バリスティックなSSC運動の遂行能力は、RJ-indexによって評価できることが示唆されており(図子, 1996; 図子, 高松, 1995; 図子ほか, 1993)、対象者のコントロールテストにおけるRJ-indexが向上していることから、対象期間を通じて走高跳の踏切動作で要求される下肢のバリスティックなSSC運動の遂行能力が改善したことが読み取れる。したがって、対象者は対象期間

において下肢におけるバリスティックな SSC 運動の遂行能力を向上させたことで、踏切時に踏切脚でより大きな力・パワー発揮を遂行できるようになったことが推察され、このことがパフォーマンスの向上に影響を及ぼしたと考えられる。

## (2) 対象期間における対象者の技術変化

### 1) アームアクションの変更がパフォーマンスに与えた影響

対象期間において対象者は、踏切時のアームアクションをシングルアームアクションからダブルアームアクションへと変更する大きな技術の変更を実施した。したがって、技術的要因の変化については、まず、腕の振込動作の変化が対象者のパフォーマンスに与えた影響について検討する。

振込動作の定量的データに着目すると（表 10）、競技会 2 では振込角度が最も大きな値を示し、振込動作は小さくかつ遅く遂行されたことが認められた。これに対し、競技会 3、4 と徐々に振込動作が改善され、競技会 4 では角速度は最も高い値を示し、競技会 1 と比較してより速く、競技会 2 および 3 と比較してより大きく速い振込動作が遂行されるようになったことが認められた。これらの変化は、動作変更の直後には未熟であったダブルアームアクションが本研究の対象期間を通して習熟していったことによって生じたものであると考えられる。

跳躍における振込動作は、反動動作や反作用として力積の獲得に貢献することが報告されており（阿江・藤井, 2002; Tellez, 1993; Tidow, 1993）、振込動作を片腕から両腕にし、さらにその動作を大きく速く遂行できるようになったことは、踏切動作においてより大きな力積の獲得に貢献したと推察される（奥山ら, 2003）。一方で、ダブルアームアクションでは振り込みに向けて両腕の動きを揃える動作が必要となり、踏切準備動作が複雑化することによって、助走速度の減少や身体重心高の増大などのロスが生じてしまう可能性があり（Dapena, 2000）、本研究の対象者においてもダブルアームアクションの変更前後の競技会 1 と競技会 2 で、踏切接地時間の増大や振込動作の遅れなどのロスが生じていること

が認められた。以上のことから、対象者が実施したアームアクションの変更は踏切準備動作におけるロスや振込動作の遅れを生じさせたものの、踏切局面ではより大きな力積の獲得に貢献し、パフォーマンスの向上に寄与したことが推察できる。さらに、上記の技術の変更および習熟に伴う力積の増大によって、踏切動作では下肢や体幹においてより大きな力・パワー発揮が要求されるようになったと考えられ、この技術変化は対象者の体力的要因の改善があったために、パフォーマンスの向上に貢献したと考えられる。

## 2) 対象者の技術変化の特性

対象者の動作分析を実施した各対象試合におけるバイオメカニクスのパラメーターの変化に着目すると（表 10）、パフォーマンスの向上に伴って認められた変化は、踏切接地時の身体重心水平速度の増大のみであった。走高跳の助走速度は走幅跳や三段跳と比較するとその値は小さく（阿江ほか, 2008; Isolehto et al., 2007; 木野村ほか, Koh and Hay, 1990a, b; 太田ほか; 2010; 志賀・尾懸, 2004）、より高いパフォーマンスの獲得に貢献する可能性は報告されていない。したがって、走高跳では踏切接地時の身体重心水平速度はパフォーマンス獲得のために、より高いことが望ましいという訳ではなく、選手の体力的、技術的特性に応じた至適速度が存在していると考えられる。これに対し、対象者は上述の体力的要因の向上や振込動作の変更および習熟といった技術的要因の変化などによって、大きな身体重心水平速度を保持した状態でも踏切動作が適切に遂行できるようになったために、踏切接地時の身体重心水平速度の増大が生じたと考えられる。即ち、対象者は対象期間内において体力特性や技術特性が変化したことで、至適助走速度の値がより大きくなったと推察される。

また、走高跳の踏切動作において身体の鉛直速度を獲得するためには、踏切脚の伸展動作、腕や遊脚の振込動作、身体の起こし回転運動が貢献しており、中でも踏切接地時における身体後傾動作によって生じる身体の起こし回転運動によって、全体の 70%もの鉛直速度が獲得されていることが報告されている（阿江, 1996a; Dapena, 2000; Tidow, 1993）。

これらのことから、走高跳における記録向上の過程では踏切接地時の身体後傾角は増大すること自然であると考えられる。しかしながら、本研究の対象者は記録向上の過程において、踏切接地時における身体後傾角は記録の向上に伴った変化（増大）を示さなかった。このことについて、身体後傾角は身体重心と足関節中心を結んだ線分が鉛直軸となす角度であり、ダブルアームアクションへの変更を行ったことや、アームアクション変更後の技術の習熟によって振込動作がより速く遂行されるようになったことで、踏切接地時の腕の位置に変化が生じたことにより踏切接地時の身体重心の位置が変化し、身体の身体後傾角に影響を及ぼしたと考えられる。例えば、振込動作を行う腕を片腕から両腕に変更したことで、踏切接地時に両腕が身体の後方に位置する姿勢となるために（図 15）、身体重心もより後方に移動し、身体の身体後傾角は増大したことが推察できる。一方で、振込動作の習熟によって踏切接地時により前方まで腕を振り込むことができるようになったことで、身体重心も前方へと移動し、身体の身体後傾角は減少したと考えられる。

また、先行研究による起こし回転運動の有効性に関する報告（阿江, 1996a; 阿江ほか, 1983; Dapena, 2000）を踏まえると、この踏切接地時の身体後傾角の減少は、走高跳のパフォーマンスを向上させるためには負の影響を及ぼすものであると考えられる。一方で、本研究の対象者は、踏切接地時の身体後傾角が減少し、起こし回転運動の獲得という点ではロスが生じたにも関わらず、上述の体力的要因の向上や、アームアクションの変更および改善を達成したことによって、パフォーマンスが向上したと推察される。

本研究課題における対象事例では、日本トップレベルの競技力を有する選手であっても、体力的要因の向上や、アームアクションの変更および習熟という大きな技術的要因の変化を経て、パフォーマンスが向上したことが認められた。一方で、この事例では踏切接地時の身体後傾角の増大は認められず、パフォーマンスの向上の過程で起こし回転運動の改善が生じなかったことが推察される。

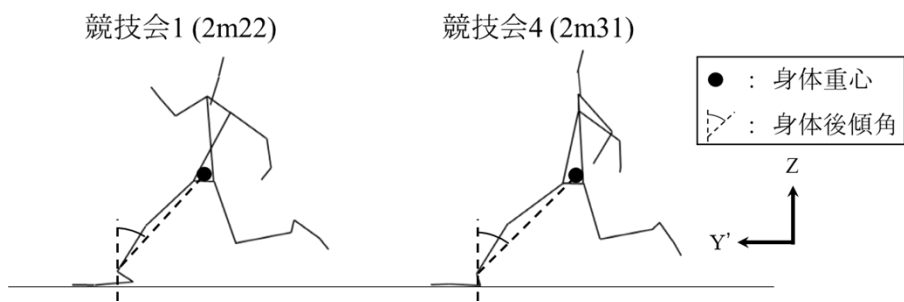


図 15 アームアクションの変更による踏切接地時の姿勢の変化

## 5. 要約

本研究では、日本トップレベルの高い競技力を有する走高跳競技者が記録を向上させた事例に着目し、その間の動作をバイオメカニクスの的に分析することで、走高跳選手のパフォーマンス向上過程における技術変化について検討した。本研究から得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本事例では対象者が達成した体力的要因の改善によって、踏切時に踏切脚でより大きな力・パワー発揮を遂行できるようになったことが、パフォーマンスの向上に貢献したと考えられる。
- 2) 対象者がアームアクションを変更し、その技術を習熟させたことで踏切時に獲得された力積が増大し、パフォーマンスの向上に貢献したと考えられる。
- 3) 本研究課題の事例では、踏切接地時の身体後傾角の増大は認められず、パフォーマンスの向上の過程で起こし回転運動の改善は生じていなかったと考えられる。

以上の知見は走高跳のパフォーマンス向上過程における技術変化の様相を示したものであり、競技実践現場や、今後の走高跳に関する研究に役立て得る有益なものであると考えられる。一方で、本研究で示された知見は1事例に過ぎず、今後、より多くの事例が報告されることによって、走高跳選手の個人内における技術変化について、より詳細に検討される必要があるだろう。

## 第8章 討論

これまでの走高跳に関する研究では、踏切局面(阿江ほか, 2007; Dapena and Chung; 1988; Isolehto et al., 2007) や踏切1歩前および踏切2歩前の踏切準備局面の動作(Ae et al., 1986; 関岡・栗原, 1978) をキネマティクスの的に分析したものや、助走の軌跡を分析したもの(Dapena, 1995; Leite, 2013) が多く行われてきた。しかしながら、曲線助走が開始される踏切4歩前から踏切にかけての動作の変化や、踏切局面における動作および踏切脚のキネティクスとパフォーマンスとの関係性については未解明な部分が多い。したがって、これらを明らかにすることができれば、走高跳のパフォーマンス獲得に貢献する要因の解明や、より効率的なトレーニング手法の提示に繋がると考えられる。

また、今日の主流となっている背面跳を用いた走高跳では、曲線助走を用いることに起因して様々な技術タイプが存在することが示唆されており(Ae et al., 1986; Isolehto et al., 2007; 渡辺・守田, 2012), トレーニング過程では、個人内でも大きな技術変化が生じる可能性があると考えられる。一方で、実際に1人の走高跳競技者の技術変化について、バイオメカニクスの手法を用いて縦断的に分析した研究は極めて少なく、その実態は未解明である。したがって、走高跳競技者の縦断的動作分析を行い、個人内の技術変化の様相を明らかとすることで、競技実践現場の取り組みの一助となり得る知見の提示が可能になることが期待できる。

上述のことに対して、本研究では走高跳の踏切局面における踏切離地時身体重心鉛直速度と関係性のある要因、および踏切準備局面における有効な技術要因の検討、そして、高い競技力を有する競技者のパフォーマンス向上事例における縦断的動作分析を行った。これらによって示された知見と先行研究で示されてきた知見とを総合することによって、走高跳のパフォーマンスを向上させるために要求される各種の要因を体系化することができ、さらには、より有効なトレーニング手法を明示することが可能になると考えられる。

## 1. 走高跳のパフォーマンス決定に貢献する要因の検討

本研究では、走高跳のパフォーマンス決定に関わる要因の解明を目的として、踏切局面および踏切準備局面における動作分析を行った。また、上記の目的を達成するために、走高跳のパフォーマンス決定における最重要局面である踏切局面の動作分析を研究課題 1、踏切準備局面の動作分析を研究課題 2 とし、実際の時系列に逆らって有効な技術要因に関する検討を行った。そこで、本項ではこれまでに明らかとなった踏切局面における鉛直速度獲得に貢献する要因と、踏切準備局面における有効な技術要因について整理し、実際の時系列順に体系化する。

### (1) 踏切局面における鉛直速度獲得に貢献する要因

研究課題 1 では 7 人の走高跳競技者を対象に、踏切局面のキネマティクス変数および下肢 3 関節のキネティクス変数と踏切離地時の身体重心鉛直速度との関係性について検討を行った。その結果、キネマティクス変数では、踏切接地時身体後傾角および踏切中の水平速度の減少量と、踏切離地時鉛直速度との間に有意な正の相関関係が認められた (表 1)。走高跳の踏切動作では、身体の起こし回転運動が身体重心鉛直速度の獲得に大きく貢献していることが報告されており (阿江, 1996a; 阿江ほか, 1983; Dapena, 1980, 2000; Leite, 2013), 踏切接地時の身体後傾角が大きいことで踏切動作における身体の起こし回転運動の運動量の増大が生じることが推察される。加えて、踏切接地時の身体後傾角が大きいことによって、踏切動作では大きなブレーキが生じると考えられる (阿江ほか, 1983)。

以上のことから、踏切接地時の身体後傾動作によって踏切局面における起こし回転運動が促進され、踏切離地時鉛直速度の獲得に貢献し、さらに、その際には水平速度の減少を伴うことが明らかとなった。

一方で、キネティクス変数では、股関節外転における正のパワー最大値および股関節外転における正の仕事と、踏切離地時鉛直速度との間に有意な正の相関関係が認められた

(表 3)。この結果は、踏切局面では股関節外転筋群のコンセントリックな働きが踏切離地



時鉛直速度の獲得に貢献していることを示唆するものであると考えられる。股関節外転筋群の働きは、その場での片脚跳躍において踏切離地時鉛直速度の獲得に貢献していることが報告されており（荻山ほか, 2013; 佐渡・藤井, 2014), 片脚跳躍に見られる特徴であると言える。さらに、股関節外転筋群の働きは、骨盤の挙上動作と密接に関係していることが報告されており（荻山ほか, 2013; 佐渡・藤井, 2014), 踏切時に骨盤の挙上を意識的に行うことで、股関節外転筋群を効果的に動員させることができると考えられる。また、骨盤の挙上動作を意識的に強調したスクワットエクササイズによって、両脚で行った場合と比較して股関節外転筋群の動員が促進されたことが報告されている（荻山ほか, 2018)。加えて、股関節外転筋群はスクワットエクササイズにおいても片脚で実施した際に、両脚で行った場合よりも活発に動員されることが報告されており（吉田ほか, 2003), 股関節外転筋群の働きを改善するためには、片脚によるトレーニング種目を選択することが望ましいと考えられる。

また、踏切局面における地面反力のうち、ブレーキ成分である Y 軸は 20% 付近において最大値が記録され（図 2), この時には股関節外転筋群に加え、股関節伸展筋群、膝関節伸展筋群、足関節底屈筋群が活発にエキセントリックな力・パワー発揮を遂行していたことが認められた（図 3, 4, 5)。踏切中の水平速度の減少は踏切局面における身体の起こし回転運動に付随して生じていることを考慮すると（阿江ほか, 1983), 股関節外転筋群、股関節伸展筋群、膝関節伸展筋群、足関節底屈筋群は、踏切時の衝撃に抗する働きを有していると考えられる。したがって、上述の筋群は踏切局面における「つぶれ」を抑制し（木野村ほか, 2013), 鉛直速度を獲得することに貢献していることが推察される。

以上のことから、起こし回転運動を遂行するための踏切接地時身体後傾角が踏切離地時鉛直速度の獲得に貢献していること、さらに、その際には水平速度の減少を伴うことが示された。また、踏切中の股関節外転筋群のコンセントリックな力・パワー発揮も踏切離地時鉛直速度の獲得に貢献しており、股関節外転筋群の能力を改善するためには片脚系エクササイズや、骨盤の挙上を強調したエクササイズが有効であると考えられる。加えて、上

述の踏切動作に付随する水平速度の減少には、股関節外転筋群、股関節伸展筋群、膝関節伸展筋群、足関節底屈筋群のエキセントリックな働きが貢献している可能性が示された。

## (2)踏切準備局面における有効な技術要因

研究課題 2 では、7人の走高跳競技者を対象に、踏切 4 歩前から踏切にかけての身体重心高や身体重心水平速度、身体の傾き角および膝関節角度の変化について検討した。その結果、踏切 4 歩前から踏切にかけて、各局面接地時の身体重心高および水平速度には有意な変化は認められなかった。このことから、身体重心高は踏切 4 歩前から踏切接地にかけての局面では維持されていることが推察される。一方で、走高跳の助走では概ね踏切 4 歩前から曲線走が開始され、それと同時に身体重心の低下が開始されると考えられてきた

(Dapena, 1995; 飯干ほか, 1993; Leite, 2013; 関岡・栗原, 1978; Schiffer, 2009)。しかしながら、実際には踏切 4 歩前以前の局面から身体重心高は低下している可能性が示され、多くの選手が助走の前半部に用いているバウンディングや大股走によって、直線走を行っている局面においても接地時の身体重心高が下げられていると考えられる。したがって、走高跳の助走では踏切に向けて徐々に身体重心高を低下させていくのではなく、踏切 4 歩前の時点では十分に身体重心高の低下がなされており、それ以降の局面では接地時の身体重心高は低く保たれていることが推察される。

また、踏切 4 歩前から踏切にかけての各歩接地時の身体重心高と身体の傾き角、膝関節角度との間の関係性について検討した結果、身体内傾角では踏切 3 歩前および踏切 1 歩前で身体重心高との間に有意な負の相関関係が認められ、身体後傾角は踏切において身体重心高との間に有意な負の相関関係が認められた (表 5)。一方で、膝関節角度はいずれの局面においても身体重心高との間に有意な相関関係は認められなかった (図 10)。したがって、踏切 3 歩前と踏切 1 歩前の、踏切脚と逆の脚で接地する局面での身体重心高の維持には身体内傾動作が貢献し、踏切接地時には身体後傾動作が身体重心高の維持に貢献していると考えられる。すなわち、踏切準備局面では、踏切 3 歩前と踏切 1 歩前では身体内傾動

作を積極的に遂行し、踏切接地時には大きな身体後傾姿勢を保持していることが望ましいと考えられる。

### (3)踏切準備局面から踏切局面における有効な技術要因の時系列的体系化

本研究の研究課題1では、踏切局面の各種キネマティクスデータおよびキネティクスデータと踏切離地時の身体重心鉛直速度との関係性について検討し、研究課題2では踏切準備局面における有効な技術要因について検討を行った。その結果をまとめると、まず、踏切準備局面が開始される踏切4歩前から踏切接地にかけての局面では身体重心高と助走速度は維持されていることが明らかとなった。また、その際に、踏切3歩前および踏切1歩前では身体内傾動作を行うことで、助走速度の低下を抑制しつつ、低い身体重心高の維持が可能となり、踏切時には身体後傾動作によって身体重心高の維持が行われていると考えられる。さらに、それらの身体の傾き角をコントロールする際には、足部接地点の位置をコントロールすることが有効である可能性が示され、曲線走の際には曲線の外側に足部を接地し、踏切時には進行方向に対して前方に足部を接地することで、踏切準備局面から踏切局面にかけての身体重心高および助走速度の維持を効果的に遂行できると考えられる。他方で、踏切接地時の身体後傾動作は、踏切中の起こし回転運動の遂行に関係して、踏切離地時の鉛直重心速度の獲得に貢献している可能性が示された(研究課題1)。したがって、踏切準備局面から踏切局面において有効な身体の傾き角のコントロールは、踏切局面の動作の改善にも貢献することができると考えられる。

さらに、踏切中の力・パワー発揮に着目すると、股関節外転における正のパワー最大値および正の仕事と踏切離地時鉛直速度との間に有意な正の相関関係が認められた(表3)。股関節外転筋群の働きはその場での片脚跳躍において重要な役割を有していることが報告されているが(荊山ほか, 2013; 佐渡・藤井, 2014)、本研究の結果から、走高跳においても踏切動作における股関節外転筋群のコンセントリックなパワー発揮が踏切離地時鉛直速度の獲得に貢献していることが明らかとなった。また、股関節外転筋群の働きは骨盤の挙

上動作と関係していることから（荻山ほか, 2018）、踏切局面で骨盤の振上脚側の挙上動作を強調することによって、踏切脚の股関節外転筋群の動員を促進できると推察される。加えて、先行研究の知見をまとめると（荻山ほか, 2012, 2013, 2018, 吉田ほか, 2003）、股関節外転筋群の力・パワー発揮能力を改善するためのトレーニングは片脚系のエクササイズや、骨盤の挙上を強調したスクワットが有効であると言える。一方で、走高跳の踏切局面で生じる地面反力のブレーキ成分の獲得には股関節伸展筋群、股関節外転筋群、膝関節伸展筋群、足関節底屈筋群のエキセントリックな働きが貢献していることが示唆された（図 2, 3, 4, 5）。

## 2. 走高跳の競技実践時における個別性への配慮の重要性

走高跳では曲線を描く助走の軌跡や踏切位置などに関するルール上の制限が少ないことから、パフォーマンスを高めるために取り得る技術選択の幅が広いことが特徴である（渡辺ほか, 2009; 渡辺・守田, 2012）。したがって、トレーニング過程では、競技者の個人内で大きな技術変化が生じることが考えられる。

研究課題 3 では、日本トップレベル走高跳競技者を対象に、2m22 から 2m31 まで記録を向上させた 1 年 8 カ月に亘る事例に着目して、その間の技術の変化についてバイオメカニクス的に検討をおこなった。その結果、対象の事例では踏切時のアームアクションをシングルアームアクションからダブルアームアクションに変更したこと（図 14）、そして、変更後にはその技術が習熟したことがパフォーマンスの向上に貢献した可能性が示唆された。また、研究課題 1 において、踏切離地時の身体重心鉛直速度と有意な正の相関関係が認められた踏切接地時の身体後傾角について、研究課題 3 の対象者における縦断的な変化と照らし合わせると（図 16）、異なった傾向が認められた。この結果は、対象者が行ったアームアクションの変更および習熟という大きな技術的要因の変化や、体力的要因の

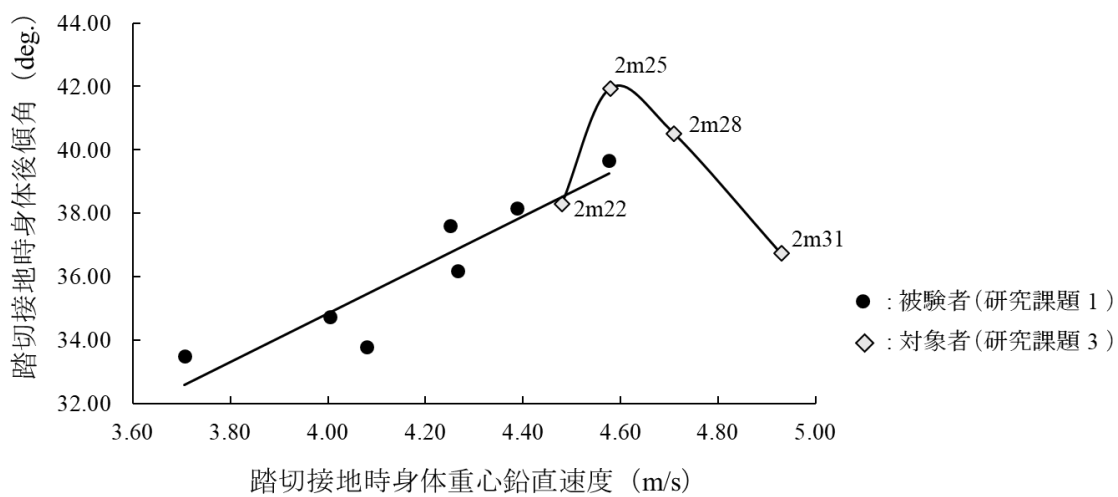


図 16 研究課題間における身体後傾角と身体重心鉛直速度との関係性の相異

向上によって、従来の研究（阿江, 1996a; 阿江ほか, 1983; Dapena, 2000）で有効性が示されてきた身体の起こし回転運動の改善に依存せずに、パフォーマンスの向上が達成されたことを示すものであると考えられる。したがって、走高跳のパフォーマンス向上の過程では、必ずしも有効とされている技術の改善が生じる訳ではなく、競技者ごとに特異的な技術、体力の変化が生じる可能性が示唆できる。すなわち、パフォーマンスの向上を目的としたトレーニングの過程では、競技者の技術、体力の変化を逐次評価し、パフォーマンスへの影響を検討することが必要であると考えられる。

なお、上述のことは多事象が複雑に絡み合って生じる（図子, 2013）、あらゆるスポーツパフォーマンスに共通して言えることであると考えられるが、パフォーマンスを高めるために取り得る技術選択の幅が広いとされる走高跳では（渡辺ほか, 2009; 渡辺・守田, 2012）、とりわけ重要であることが推察される。また、競技実践現場でトレーニング効果の評価や、パフォーマンスへの影響についての検討を適切に実施するためには、今後、走高跳の技術的多様性に対応した動作分析の実施や、様々なトレーニング事例や縦断的動作分析の結果を蓄積することが喫緊の課題であると考えられる。

### 3. 今後の課題

#### (1) 助走局面における動作の更なる解明

本研究では、これまでに分析が行われてこなかった踏切4歩前から踏切接地にかけての身体重心高および助走速度、身体の傾き角、膝関節角度の変化について検討を行った。しかしながら、その分析は各歩の接地時のみに留まっており、今後は各歩の接地中の変化についても検討を行う必要があると考えられる。また、研究課題3よりもさらに分析局面を広げ、直線助走を行っている局面の動作分析や、疾走時との動作の比較などを行うことによって、走高跳のパフォーマンス構造の更なる解明に繋がると考えられる。

## (2) 空中局面の動作分析

走高跳の動作を分析した研究では、助走局面および踏切準備局 (Ae et al., 1986; Dapena, 1995; Leite, 2013; 関岡・栗原, 1978), 踏切局面の動作分析 (阿江ほか, 2008; Ae et al., 2008; Dapena and Chung, 1988; Isolehto et al., 2007; 小林, 1979) が多く行われ、パフォーマンス構造や有効な技術要因に関する知見が報告されてきた。一方で、走高跳の踏切離地後に着目して動作分析を実施した研究は見当たらず、この局面の動作については未解明なことが多い。走高跳はどれだけ高くのバーを越えることができたかを競う競技であるために、バーを落とすか落とさないかのせめぎ合いを行っている空中局面はパフォーマンスの決定に非常に深く関係していることが推察される。したがって、今後は空中局面の動作を分析し、その特性を明らかにすると共に、より高いパフォーマンスを達成するために要求される要因の解明が行われることが課題であると考えられる。

## (3) 技術タイプの類型化

上述のように、走高跳はその自由度の高さから、多様な技術タイプが存在していることが報告されており、さらに、競技者の個人内においても技術タイプの変化が生じることがある (渡辺ほか, 2009)。これに対し、これまでも踏切準備局面における技術タイプの類型化を行った研究が行われてきたが (Ae et al., 1986; 関岡・栗原, 1978), 現状、バイオメカニクスの技術タイプの類型化が試みられてきたのは踏切 2 歩前および踏切 1 歩前のみで留まっており、十分な研究が行われているとは言い難い。したがって、今後は助走局面から踏切局面に至るまでの動作を詳細に分析することで技術タイプを類型化し、それぞれのタイプの特性と、より高いパフォーマンス達成の方略の解明に貢献する知見の明示が必要であると考えられる。

#### (4) 縦断的分析や事例研究による知見の蓄積

本研究では研究課題3で日本トップレベルの走高跳競技者のパフォーマンス向上事例を対象に縦断的動作分析を行い、走高跳のトレーニング過程における個別性に配慮した技術選択の重要性が明らかとなった。しかしながら、この事例は飽くまで1事例に過ぎず、また、アームアクションの変更を試みた特殊な事例であると言える。事例研究では、いくつかの事例における知見の蓄積によって一般化が可能となることから（森丘, 2014）、今後、より多くの縦断的分析や事例研究が行われ、実践的知見を積み上げていくことが課題であると考えられる。



## 第9章 結論

本研究の目的は、走高跳の踏切局面における下肢3関節のキネティクスの分析および高精度な測定機器を用いたキネマティクスの分析、踏切4歩前からの踏切準備局面における動作を分析すること、さらに、一流競技者のパフォーマンス向上事例を縦断的に分析することによって、走高跳のパフォーマンス獲得に関わる要因と、その機序について検討することであった。本研究によって得られた知見は以下の通りである。

- 1) 走高跳の踏切局面では、踏切接地時の身体後傾動作によって踏切中の起こし回転運動が促進されることで、踏切離地時鉛直速度の獲得に貢献していることが示唆され、その際には踏切中の水平速度の減少が伴うことが明らかとなった。一方、踏切中の下肢関節では、股関節外転筋群のコンセントリックな働きが踏切離地時鉛直度の獲得に貢献していることが示され、また、股関節外転筋群の力・パワー発揮能力を高めるためには、片脚系のエクササイズや、骨盤の挙上を強調したエクササイズが有効であると考えられる。【研究課題1】
- 2) 走高跳の踏切準備局面では、曲線走が開始される踏切4歩前接地時から踏切接地時にかけて、身体重心高および助走速度は維持されていることが明らかとなった。さらに、踏切3歩前および踏切1歩前では、接地時身体内傾角が助走速度の低下を抑制しつつ身体重心高を下げることに貢献し、踏切では接地時身体後傾角が身体重心高の低下に貢献していることが示唆された。【研究課題2】
- 3) 一流走高跳競技者の記録向上過程においては、踏切接地時の身体後傾角の増大は認められず、パフォーマンスの向上の過程で起こし回転運動の改善は生じなかったと考えられる。この結果は、アームアクションの変更と習熟といった技術的要因の変化や、体力的要因の向上などが影響して生じたものであると考えられ、競技実践現場における個別性への配慮の重要性を示すものである。【研究課題3】

以上の結果から、走高跳の踏切準備局面から踏切局面にかけての有効な技術要因が明らか

かとなった。さらに、今後は技術の類型化や、様々な選手における縦断的分析、あるいは、実践事例から有効な技術要因を明らかにする試みの重要性が提言できる。本研究によって提示された知見は走高跳のパフォーマンス獲得に関わる要因の解明と、有効なトレーニング手法の提示に貢献するものであると考えられる。

## 参考文献

阿江通良 (1996a) 陸上競技の高く跳ぶ動作と遠く跳ぶ動作「How they jump」. バイオメカニズム学会誌, 20(2): 57-62.

阿江通良 (1996b) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分係数. J. J. Sports Sci., 15(3): 155-162.

阿江通良・永原 隆・大島雄二・小山宏之・高本恵美・柴山一仁 (2008) 世界選手権男子走高跳上位入賞者の跳躍動作のバイオメカニクスの分析—トーマス選手の跳躍は新しい技術のヒントになるか—. バイオメカニクス研究, 12(2): 134-139.

Ae, M., Nagahara, R., Ohshima, Y., Koyama, H., Takamoto, M., and Shibayama, K. (2008) Biomechanical analysis of the top three male high jumpers at the 2007 World Championships in Athletics. New Stud. Athlet., 23(2): 45-52.

阿江通良・大木昭一郎・高松潤二 (1995) 垂直跳および着地動作におけるパワー発揮の大きさと下肢関節の貢献度. バイオメカニズム, 12: 97-108.

Ae, M., Sakatani, Y., Yokoi, T., Hashihara, T., and Shibukawa, K. (1986) Biomechanical analysis of the preparatory motion for takeoff in the fosbury flop. Int. J. Sport Biomech., 2(2): 66-77.

阿江通良・渋川侃二・石島繁・橋原孝博 (1983) 高さをねらいとする跳のバイオメカニクスの特性：垂直跳, バレーボールのスパイクジャンプおよび走高跳の踏切の比較. バイオメ

カニクス学会編, 身体運動の科学V: スポーツ・バイオメカニクスへの挑戦. 杏林書院: 東京, pp. 182-188.

Alexander, R. (1990) Optimum take-off techniques for high and long jumps. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, 329(1252): 3-10.

Dapena, J. (1995) How to design the shape of a high jump run-up. *Track coach*, 131: 4179-4181.

Dapena, J. and Chung, C., S. (1988) Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jump. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 20(3): 290-302.

藤林献明・苅山 靖・木野村嘉則・関子浩二 (2013) 水平片脚跳躍を用いたバリスティックな伸張-短縮サイクル運動の遂行能力と各種跳躍パフォーマンスとの関係. *体育学研究*, 58: 61-76.

グロッサー, マンフレート・ノイマイヤー, アウグスト (1995) 選手とコーチのためのスポーツ技術のトレーニング. 朝岡正雄・佐野 淳・渡辺良夫訳, 大修館書店:東京, pp.139-142.

飯干 明・阿江通良・結城匡啓・高松潤一・長沢光雄・湯 海鵬 (1993) 走高跳における世界一流ジャンパーの助走と踏切準備について. *日本体育学会第 44 回大会号*, 410.

稲岡純史・村木征人・国土将平 (1993) コントロールテストからみた跳躍競技の種目特性および競技パフォーマンスとの関係. *スポーツ方法学研究*, 6: 41-48.

Isolehto, J., Virravirta, M., Kyröläinen, H., and Komi, P. V. (2007) Biomechanical analysis of the high jump at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New Stud. Athlet.*, 22(2): 17-27.

Kakahara, W. and Suzuki, S. (2001) The EMG activity and mechanics of the running jump as a function of takeoff angle. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 11: 365-372.

荻山 靖・遠藤俊典・藤井宏明・森 健一・尾懸 貢・関子浩二 (2012) 片脚踏切を用いたリバウンド型ジャンプの動作および力発揮特性：両脚踏切を用いたリバウンド型ジャンプと比較して. *体育学研究*, 57: 143-158.

荻山 靖・藤井宏明・森 健一・関子浩二 (2013) 片脚および両脚リバウンドジャンプにおける 3 次元的な力発揮特性の相違. *体育学研究*, 58(1): 91-109.

荻山 靖・林 稜平・吉田拓矢・関子あまね・関子浩太佑・関子浩二 (2018) 骨盤の挙上運動を強調した片脚スクワットエクササイズの力学的特性. *体力科学*, 67: 187-197.

荻山 靖・関子浩二 (2015) バウンディングにおける Stiffness 特性へ影響する踏切脚の力およびパワー発揮：リバウンドジャンプとの比較から. *体育学研究*, 60(1): 137-150.

木野村嘉則・村木征人・関子浩二 (2012) 走幅跳における助走歩数を増やして踏切るための踏切動作：短助走跳躍から長助走跳躍に至る踏切動作等の変化率に着目して. *体育学研究*, 57(1): 71-82.

小林一敏 (1979) 走高跳の踏切についての力学的研究. *体育学研究*, 24: 79-86.

Komi, P. V. and Bosco, C. (1978) Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med. Sci. Sports*, 10: 261-265.

Koh, T. J. and Hay, J. G. (1990a) Landing leg motion and performance in the horizontal jumps I: the long jump. *Int. J. Sport Biomech.*, 6: 343-360.

Koh, T. J. and Hay, J. G. (1990b) Landing leg motion and performance in the horizontal jumps II: the triple jump. *Int. J. Sport Biomech.*, 6: 361-373.

倉林 準・持丸正明・河内まき子 (2003) 股関節中心推定方法の比較・検討. *バイオメカニズム学会誌*, 27: 29-36.

Leite, W. (2013) Biomechanical analysis of running in the high jump. *Pedagog. Psychol. Med.-Biol. Probl. Phys. Train. Sports*, 17(2): 99-105.

水村信二・山本利春・大西暁志・南谷和利 (1988) 大学走高跳び選手の踏切り脚の障害に関する研究. *日本体育学会第 39 回大会号*, 310.

Mok, K. M., Fong, D. T., Krosshaug T., Engebretsen, L., Hung, A. S., Yung, P. S., and Chan, K. (2011) Kinematics analysis of ankle inversion ligamentous sprain injuries in sports: 2 cases during the 2008 Beijing Olympics. *Am. J. Sports Med.*, 39: 1548-1552.

森丘保典 (2014) コーチング学における事例研究の役割とは? : 量的研究と質的研究の関係性. *コーチング学研究*, 27(2): 169-177.

Okuyama, Y., Ae, M., and Yokozawa, N. (2003) Three dimensional joint torque of the takeoff leg in the Fosbury flop style. In: Milburn, P., Wilson, B., and Yanai, T.(Eds.), International Society of Biomechanics XIXth Congress Abstract and Proceedings (CD-ROM), ISB/University of Otago.

奥山良樹・横澤俊治・村木有也・小山宏之・藤井範久・阿江通良 (2003) 走高跳の振上脚の効果に関するバイオメカニクス的研究. 日本体育学会第 54 回大会号, 1: 371.

太田洋一・中村 力・浦田達也・伊藤 章 (2010) 簡易な測定法を用いた走幅跳におけるパフォーマンスと助走・踏切速度の関係. コーチング学研究, 24(1): 27-33.

Panoutsakopoulos, V. and Kolliaa, A. (2012) 3D Biomechanical analysis of women's high jump technique. New Stud. Athlet., 27(3): 31-44.

佐渡夏紀・藤井範久 (2014) 片脚踏切型跳運動における体幹運動による跳躍高獲得の定量化：骨盤挙上下制運動に着目して. 陸上競技研究, 97: 27-40.

Schiffer, J. (2012) Plyometric training and the high jump. New Stud. Athlet., 27(3): 9-21.

関岡康雄・栗原崇志 (1978) 走高跳における曲線助走の効果に関する研究. 筑波大学体育紀要, 1: 77-86.

志賀 充・尾縣 貢 (2004) 走幅跳競技者の下肢筋力と踏切中のキネマティクス及びキネティクスの関係－膝関節と股関節に着目して－. 体力科学, 53: 157-166.

Tellez, K. (1993) Elements of the high jump. *Track Coach*, 125: 3987-3990.

Tidow, G. (1993) Model technique analysis sheets. Part VIII: The flop high jump. *New Stud. Athlet.*, 8(1): 31-44.

戸邊直人・林 陵平・苅山 靖・木越清信・尾縣 貢 (2018) 一流走高跳選手のパフォーマンス向上過程における事例研究. *コーチング学研究*, 31(2): 239-251.

渡辺輝也 (2007) 背面跳びの技術類型に関する運動学的考察. *陸上競技学会誌*, 5: 1-11.

渡辺輝也 (2010) 走高跳におけるバイオメカニクスの技術分析の研究動向の批判的検討. *陸上競技研究*, 81: 2-16.

渡辺輝也 (2012) 走高跳におけるスポーツ運動学的技術分析の研究動向の批判的検討. *体育学研究*, 57: 159-176.

渡辺輝也・朝岡正雄・宮下 憲・佐野 淳 (2009) 走高跳におけるスピードフロップの類型化に関する運動学的考察. *体育学研究*, 54(2): 327-342.

渡辺輝也・守田俊啓 (2012) 走高跳の技術トレーニングに関する運動学的一考察：男子大学生選手における技術修正プロセスの1例を対象として. *体育学研究*, 57: 683-698.

Wells, R. P. and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In: *Human Locomotion*, 1: (Proceedings of the First Biannual Conference of the Canadian Society of Biomechanics). pp.92-93.



吉田孝久・大山 下 圭吾・宮地 力・村木征人（2003）両脚および片脚スクワットでの静的最大筋力発揮時の運動特性：両脚・片脚レッグプレスとの比較から．スポーツ方法学研究，16：75-82.

ザチオルスキー・クレーマー：高松 薫・関子浩二訳（2009）筋力トレーニングの理論と実践．大修館書店，pp. 6-8.

関子浩二（2003）スポーツ練習による動きが変容する要因—体力要因と技術要因に関する相互関係．バイオメカニクス研究，7(4)：303-312.

関子浩二（2012）体育方法学研究およびコーチング学研究が目指す研究のすがた．コーチング学研究，25(2)：203-209.

関子浩二（2013a）筋力・パワー集中負荷方式およびプライオメトリクス強調方式のトレーニングナビリティーに関するトレーニング学的研究～跳躍競技者のプレシーズンにおけるトレーニング経過を手がかりにして～．陸上競技学会誌，11：39-49.

関子浩二（2013b）コーチング学研究投稿規定および投稿の手引きの改訂に関するお知らせ．コーチング学研究，27(1)：0.

関子浩二（2016）パフォーマンスの構造を理解しトレーニングサイクルを循環させる—特集：パフォーマンスを評価する—．コーチングクリニック，30(6)：4-7.

関子浩二・高松 薫（1995）バリスティックな伸張—短縮サイクル運動の遂行能力を決定す

る要因—筋力および瞬発力に着目して—. 体力科学, 44: 147-154.

関子浩二・高松 薫 (1996) “ばね”を高めるためのトレーニング理論. トレーニング科学, 8: 7-16.

関子浩二・高松 薫・古藤高良 (1993) 各種スポーツ選手における下肢の筋力およびパワー発揮に関する特性. 体育学研究, 38: 265-278.

関子浩二・西園秀嗣・平田文夫 (1998) 筋収縮の違いからみた下肢三関節のトルク発揮特性. 体力科学, 47: 593-600.

Čoh, M. (2010) Biomechanical characteristics of take off action in high jump –A case study. Serbian J. Sports Sci., 4(4): 127-135.

## 付録

### 関節角度の算出方法および定義

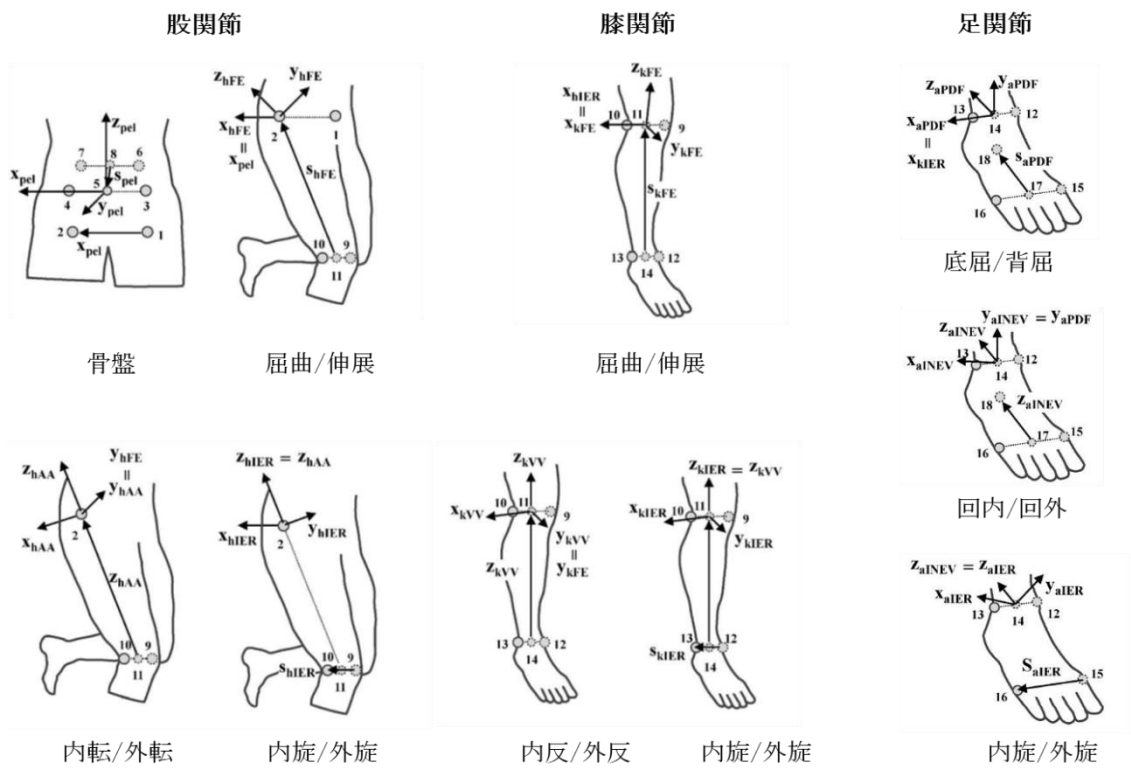
ここでは、本研究の第 6 章（研究課題 1）および 7 章（研究課題 2）における 3 次元的な関節角度の算出方法について補足説明を行う。

本研究では、荊山ほか（2013）の方法に順じて各関節角度および速度、関節トルク、関節トルクパワー、関節仕事を算出した（図 A-1）。

#### 1. 関節軸座標系の定義

まず、股関節については、臨床歩行分析研究会の推定法（倉林ほか，2003）を用いて関節中心を算出した。以下に、右下肢の関節における移動座標系の設定について述べるが、左下肢の関節についても、同様の方法を用いた。角度股関節については、左股関節中心から右股関節中心へ向かうベクトルを  $x_{pel}$  軸，左右上後腸棘骨の midpoint から左右上前腸棘骨の midpoint へ向かうベクトルを補助ベクトル  $s_{pel}$  軸とし， $x_{pel}$  軸と  $s_{pel}$  軸のベクトル積により  $z_{pel}$  軸を， $z_{pel}$  軸と  $x_{pel}$  軸のベクトル積により  $y_{pel}$  軸を定義し，これを骨盤座標系とした。骨盤座標系の  $x_{pel}$  軸を  $x_{hFE}$  軸，右膝関節中心から右股関節中心へ向かうベクトルを  $s_{hFE}$  軸とし， $x_{hFE}$  軸と  $s_{hFE}$  軸のベクトル積により  $z_{hFE}$  軸を， $z_{hFE}$  軸と  $x_{hFE}$  軸のベクトル積により  $y_{hFE}$  軸を定義し，これを股関節屈曲伸展座標系とした。股関節屈曲伸展座標系の  $y_{hFE}$  軸を  $y_{hAA}$  軸，右膝関節中心から右股関節へ向かうベクトルを  $s_{hAA}$  軸とし， $y_{hAA}$  軸と  $s_{hAA}$  軸のベクトル積により  $x_{hAA}$  軸を定義し，これを股関節内外転座標系とした。股関節内外転座標系の  $s_{hAA}$  軸を  $s_{hIER}$  軸，右膝関節内顆から右膝関節外顆へ向かうベクトルを  $s_{hIER}$  軸とし， $s_{hIER}$  軸と  $s_{hIER}$  軸のベクトル積により  $y_{hIER}$  軸を， $y_{hIER}$  軸と  $s_{hIER}$  軸のベクトル積により  $x_{hIER}$  軸を定義し，これを股関節内外旋座標系とした。

膝関節については，股関節内外旋座標系の  $x_{hIER}$  軸と同一方向の単位ベクトルを  $x_{kFE}$  軸とし，右内顆と右外顆の midpoint を右足関節 midpoint として，そこから右膝関節 midpoint へ向かうベク



※ 荻山ほか(2013)を参考に作成

図 A-1 関節角度の算出に用いた骨盤および下肢3関節の座標系

トルを  $skFE$  軸とした。さらに、 $skFE$  軸と  $xkFE$  軸の外積によって得られる方向の単位ベクトルを  $ykFE$  軸とし、 $xkFE$  軸と  $ykFE$  軸の外積によって得られる単位ベクトルを  $zkFE$  軸と定義した。そして、これら  $xkFE$ ,  $ykFE$ ,  $zkFE$  を軸とする座標系を膝関節屈曲伸展座標系とした。膝関節屈曲伸展座標系の  $ykFE$  軸と同一方向の単位ベクトルを  $ykVV$  軸とし、右足関節中点から右膝関節中点に向かう単位ベクトルを  $zkVV$  軸とした。さらに、 $ykVV$  軸と  $zkVV$  軸の外積によって得られる方向の単位ベクトルを  $xkVV$  軸と定義した。そして、これら  $xkVV$ ,  $ykVV$ ,  $zkVV$  を軸とする座標系を膝関節内外反座標系とした。膝関節内外反座標系の  $zkVV$  軸と同一方向の単位ベクトルを  $zkIER$  軸とし、右内顆から右外顆に向かう単位ベクトルを  $skIER$  軸とした。さらに、 $zkIER$  軸と  $skIER$  軸の外積によって得られる方向の単位ベクトルを  $ykIER$  軸とし、 $ykIER$  軸と  $zkIER$  軸の外積によって得られる単位ベクトルを  $xkIER$  軸と定義した。そして、これら  $xkIER$ ,  $ykIER$ ,  $zkIER$  を軸とする座標系を膝関節内外旋座標系とした。

足関節については、内踝および外踝の中点を関節中心とした。膝関節内外旋座標系の  $xkIER$  軸と同一方向の単位ベクトルを  $xaPDF$  軸とし、第一中足骨頭と第五中足骨頭の中点から踵に向かう単位ベクトルを  $saPDF$  軸とした。さらに、 $saPDF$  軸と  $xaPDF$  軸の外積によって得られる方向の単位ベクトルを  $yaPDF$  軸とし、 $xaPDF$  軸と  $yaPDF$  軸の外積によって得られる単位ベクトルを  $zaPDF$  軸と定義した。そして、これら  $xaPDF$ ,  $yaPDF$ ,  $zaPDF$  を軸とする座標系を足関節底背屈座標系とした。足関節底背屈座標系の  $yaPDF$  軸と同一方向の単位ベクトルを  $yaAA$  軸とし、第一中足骨頭と第五中足骨頭の中点から踵に向かうベクトルを  $zaAA$  軸として、 $yaAA$  軸と  $zaAA$  軸の外積によって得られる方向の単位ベクトルを  $xaAA$  軸と定義した。そして、これら  $xaAA$ ,  $yaAA$ ,  $zaAA$  を軸とする座標系を足関節回内外座標系とした。足関節内外転座標系の  $zaAA$  軸と同一単位ベクトルを  $zaPS$  軸とし、第一中足骨頭から第五中足骨頭へ向かうベクトルを  $saPS$  軸とした。さらに、 $zaPS$  軸と  $saPS$  軸との外積によって得られる方向の単位ベクトルを  $yaPS$  軸とし、 $yaPS$  軸と  $zaPS$  軸の外積によって得られる方向の単位ベクトルを  $xaPS$  と定義した。そして、これら  $xaPS$ ,  $yaPS$ ,

zaPS を軸とする座標系を足関節内外旋座標系とした。

## 2. 関節角度の定義

本研究では，解剖学的な可動域制限に基づき，股関節では屈曲伸展，内外転および内外旋角度を，膝関節では屈曲伸展角度を，足関節では底背屈および回内外角度について算出した。

股関節屈曲伸展角は，骨盤座標系の ype1 軸と股関節屈曲伸展座標系の yhFE 軸との角度差，股関節内外転角は，股関節屈曲伸展座標系の zhFE 軸と股関節内外転座標系の zhAA 軸との角度差，股関節内外旋角は，股関節内外転座標系の xhAA 軸と股関節内外旋座標系の xhIER 軸との角度差として，それぞれ算出した。なお，符号の正負については，伸展，外転および外旋を正，屈曲，内転および内旋を負とし，関節トルクについても同様に設定した。

膝関節屈曲伸展角は，股関節内外旋座標系の yhIER 軸と膝関節屈曲伸展座標系の ykFE 軸との角度差，膝関節内外旋角は，膝関節内外反座標系の xkVV 軸と膝関節内外旋座標系の xkIER 軸との角度差として，それぞれ算出した。なお，符号の正負については，伸展および外旋を正，屈曲および内旋を負とし，関節トルクについても同様に設定した。

足関節底背屈角は，膝関節内外旋座標系の ykIER 軸と足関節底背屈座標系の yaPDF 軸との角度差，足関節回内外角は，足関節底背屈座標系の zaPDF 軸と足関節内外転座標系の zaINEV 軸との角度差として，それぞれ算出した。なお，符号の正負については，底屈および回外を正，背屈および回内を負とし，関節トルクについても同様に設定した。

表 A-1 各種変数の変動係数【第 6 章】

	踏切4歩前	踏切3歩前	踏切2歩前	踏切1歩前	踏切
身体重心高	0.07	0.08	0.06	0.10	0.07
身体重心水平速度	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05
身体内傾角	0.18	0.18	0.14	0.11	-0.57
身体後傾角	0.23	0.19	0.17	0.26	0.07
膝関節角度	0.04	0.06	0.06	0.06	0.01

表 A-2 各局面における相対重心高と多重比較【第6章】

	踏切4歩前	踏切3歩前	踏切2歩前	踏切1歩前	踏切	分散分析 (F値)	多重比較検定
相対重心高 (%)	49.49 ± 2.51	48.04 ± 2.25	47.40 ± 2.17	47.40 ± 2.17	47.94 ± 1.55	2.17	n.s.

※相対重心高は身体重心高を身長で規格化することで算出した



表 A-3 相对重心高と各種踏切準備変数との相関係数【第 6 章】

		踏切4歩前	踏切3歩前	踏切2歩前	踏切1歩前	踏切
相对重心高	内傾角	-0.20	0.11	-0.01	-0.32	0.20
	後傾角	0.24	-0.58	0.22	-0.40	-0.61
	膝関節角度	0.27	-0.22	-0.13	-0.04	-0.03

表 A-4 対象者の踏切時における体幹捻転角度および角速度, 身体各部位の傾き角の比較【第 7 章】

	体幹捻転		脚内傾角 (deg.)		脚後傾角 (deg.)		体幹内傾角 (deg.)		体幹後傾角 (deg.)	
	接地時角度 (deg.)	接地時角速度 (deg./s)	接地	離地	接地	離地	接地	離地	接地	離地
競技会1	52.14	-420.71	6.48	-10.55	43.02	-0.63	6.67	4.29	16.28	-0.32
競技会2	61.88	-272.96	1.80	0.58	46.47	2.37	13.26	-4.22	12.88	-3.16
競技会3	42.84	-284.24	7.73	0.52	44.48	4.62	11.33	-2.31	17.67	1.74
競技会4	40.23	-718.45	10.2	-12.46	42.82	0.01	5.05	2.4	12.93	-4.28

表 A-5 対象者の踏切時における下肢 3 関節の角度変化量の比較【第 7 章】

	屈曲量	股関節 (deg.)			膝関節 (deg.)		足関節 (deg.)	
		伸展量	内転量	外転量	屈曲量	伸展量	背屈量	底屈量
競技会1	-	45.95	19.40	59.78	25.26	31.58	28.68	34.76
競技会2	-	43.96	44.75	47.45	16.75	33.42	15.28	30.78
競技会3	-	32.48	15.10	38.47	24.63	28.17	19.64	26.57
競技会4	-	48.95	44.49	46.73	24.60	42.80	34.16	39.69