

博士論文

一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作に関する  
バイオメカニクス的研究

平成 30 年度

清水 悠

筑波大学

# 一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作に関するバイオメカニクス的研究

平成 30 年度

清水 悠

筑波大学大学院 人間総合科学研究科 体育科学専攻

## 1. 研究背景

近年では、男子走幅跳において 8m を超える日本選手も増えてきているが、まだ世界と差があるのが現状である。スポーツバイオメカニクス分野からは、日本選手のさらなる競技力の向上に対して、世界一流選手の技術を研究して日本選手との技術の相違を明らかにすること、動作・技術改善に有効な知見を積み重ねること、ユース・ジュニア世代の競技者の指導に役立つ示唆を指導現場に提供することなどが必要である。現在の指導現場では、タブレット端末などの普及により、指導者だけでなく、選手自身も即時的・客観的に動作を観察する機会が増え、動作・技術改善への理解が深めやすくなっている（高瀬と中島，2015）。しかし、指導者を特に悩ますのは、「選手の動作が適切であるかどうか正しく評価すること」、あるいは、「どのように適切な動作へ導くかということ」である。多くの指導者は、経験や感覚に基づくイメージやより優れた技術をもつとされる熟練者の動作と比較することで動作の良し悪しを評価しているが、目標（モデル）となる選手の形態的・体力的要素や選手独自の癖を色濃く反映し、模範となる動作としては適さない場合がある（Ae et al., 2007）。このような問題に対し、Ae et al. (2007) や Murata et al. (2008) は、複数の熟練者から「標準（平均）動作モデル」を作成し、スポーツ動作をバイオメカニクス的に評価する方法を提案している。そこで、国内外の一流走幅跳選手の踏切準備および踏切動作から動作モデルを構築して指導現場へ提示できれば、走幅跳における踏切準備および踏切動作のための評価基準の 1 つになり得ると考えられる。

一方、一流選手やそれに近いレベルの選手ともなれば、走幅跳において欠かすことのできない動作を身に付けた上で、個性を伸ばしていくアプローチも重要となる。斉藤と阿江（1991）は、学生男子走幅跳選手の 48 試技を助走速度、水平減少量、鉛直初速度の 3 つの変数を用いて、異なる 12 の跳躍タイプに類型化を試みている。しかし、これら 3 つの変数と跳躍距離の間には高い相関関係が報告される場合が多く、跳躍技術というよりは跳躍距離を色濃く反映している恐れがある。また、跳躍タイプの総数がやや多く、指導現場での識別が困難であることに加え、各跳躍タイプの詳細な動作分析は行えていない。そこで、スポーツ競技者に対して多変量解析手法（クラスター分析法）を用いて客観的に分類を試みた先行研究（松田ら，2010；内藤ら，2013；山元ら，2014）などを参考に、走幅跳選手をより客観的に分類し、各跳躍タイプの動作的特徴を反映させた動作モデルを提供するなど、分類法や提示法を再検討していく必要がある。

このように、一流男子走幅跳選手を対象に、記録水準別や跳躍タイプ別の動作的特徴を反映させた動作モデルを構築することができれば、まだ一流ではない選手やその指導者は、走幅跳に欠かすことのできない動作の共通性の高い部分と跳躍タイプに応じた個別性の高い部分の動作的特徴を視覚的に判断することが容易になると考えられる。

## 2. 研究目的と研究課題

本研究の目的は、一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作のバイオメカニクスの特徴を明らかにするとともに、クラスター分析法により走幅跳選手を類型化して各跳躍タイプの動作の特徴を明らかにすることで、走幅跳選手の技術改善に役立つ基礎的知見と示唆を得ることである。研究目的を達成するために、以下の2つの研究課題を設定した。

### 【研究課題1：記録水準別にみた動作特徴の相違】

世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をバイオメカニクス的に比較し、その動作の特徴の相違を明らかにするとともに、走幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得ることである。

### 【研究課題2：跳躍タイプ別にみた動作特徴の相違】

世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をクラスター分析法により類型化し、各跳躍タイプの動作モデルを構築するとともに、その動作の特徴を明らかにして異なる跳躍タイプの走幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得ることである。

## 3. 研究方法

分析対象者は、国内外の一流男子走幅跳選手29名（国外14名，国内15名）であった。データ収集は、日本陸上競技連盟科学委員会の活動のもと、5つの公式競技会（2007年IAAF世界陸上競技選手権大会，2011年AAAアジア陸上競技選手権大会，2011年SEIKOゴールデングランプリ，2009年JAAF日本陸上競技選手権大会，2013年JAAF日本陸上競技選手権大会）で実施した。

各公式競技会の決勝に進出した走幅跳選手の試技から、最も公式記録の良かった試技で、かつ、自己ベスト記録に対する公式記録の達成率が90%以上である試技を分析対象試技として選出した。スタンド最上段に設置した2台のハイスピードカメラを用いて、踏切2歩前から踏切までの動作を撮影した（250 or 300Hz）。収集した映像より、身体分析点23点をデジタル化し、3次元DLT法により3次元座標値を取得した（毎秒125 or 150コマ相当）。最適遮断周波数を決定した後、平滑化作業を実施した（4.5～7.5Hz）。接地と離地を目視で読み取り、各イベント点と動作時間をもとに、各支持・滞空局面が100%となるように時系列データを規格化した。

標準動作モデルは、Ae et al.（2007）の方法を用いて、国内外の一流走幅跳選手から作成した。すなわち、各動作局面の経過時間や身長をもとに規格化した分析対象者の身体各部分の3次元座標値を平均することで構築した。

## 4. 研究成果

### 4-1. 研究課題1（記録水準別にみた動作特徴の相違）について

日本一流選手は、世界一流選手に比べて、跳躍距離や各時点における身体重心水平速度が有意に小さく、各歩の支持期における水平速度の減少量も大きい傾向にあった。また、

踏切 2 歩前離地時における鉛直上向き速度と踏切足接地時における鉛直下向き速度が有意に大きいという特徴が挙げられた。

日本選手の動作的課題として、①踏切 2 歩前支持期における過度な支持脚の屈曲伸展動作を用いていること、②踏切準備動作中に体幹が前傾から後傾に切り替わるタイミングが早いこと、③踏切足接地時に身体全体で過度な後傾姿勢を作っていることの 3 点が挙げられた。これらの動作は、踏切局面において身体の起こし回転動作を利用して大きな鉛直初速度を獲得することに効果的であったが、日本選手の場合にはパノートメート・ストライドの「長」の誇張や体幹部の過度な踏切準備動作などにより、各支持局面において大きな水平速度の減速を引き起こしていた。また、日本一流選手は、踏切 2 歩前離地時における左股関節と踏切 1 歩前離地時における右股関節の屈曲トルクの発揮が有意に小さかった。すなわち、踏切準備局面中の体幹の前傾をなるべく維持するためには、各歩の支持期後半から離地直後にかけて大きな遊脚股関節屈曲トルクを発揮し、体幹に対して前方回転のモーメントを作用させることが、体幹の前傾の維持には重要であると考えられる。

以上より、①踏切準備局面では、パノートメート・ストライドの「長」を誇張せず、遊脚足部がより低い位置を通過するような意識をもつこと、②踏切準備から踏切局面にわたって、遊脚股関節の大きな屈曲トルクを発揮することで体幹の前傾をなるべく維持し、より前方に跳び出す意識をもつことなどが、日本選手の技術指導に関する示唆として挙げられた。

#### 4-2. 研究課題 2 (跳躍タイプ別にみた動作的特徴の相違) について

本研究では、踏切足離地時のパラメータ (踏切スピード、跳躍角、跳躍高) のうち、跳躍距離との間に相関関係が認められなかった跳躍角を分類指標として選出し、クラスター分析法を用いて跳躍タイプの分類を試みた。その結果、クラスターの大きく分かれる点を参考に 4 つの異なる跳躍タイプに分類し、跳躍角の小さいものから順に Horizontal (H-type), Semi-Horizontal (SH-type), Semi-Vertical (SV-type), Vertical (V-type) type と名付けた。各跳躍タイプ間には、自己ベスト、分析に用いた跳躍距離、身長、体重および踏切時間のいずれの変数にも有意差がみられなかった。そのため、本研究から得られた分類結果は、跳躍距離や身体的特徴に依存しない跳躍タイプを提案することができていると考えられる。

身体重心の水平および鉛直速度に着目すると、各跳躍タイプ間には踏切 2 歩前接地時や踏切足接地時に有意差がみられなかったが、踏切中の速度変化に有意差がみられたことで、踏切足離地時に有意差がみられた。したがって、踏切中の身体重心の速度変化に影響を及ぼす踏切準備および踏切動作が跳躍タイプを分類する要因であると考えられる。特に、踏切足接地時の身体の後傾姿勢や身体重心高などに動作的相違がみられ、踏切中の身体の起こし回転動作に大きな相違が生じたことが、身体重心の速度変化にも大きな影響を及ぼしていたものと考えられる。

H-type や SH-type は、踏切準備局面中の体幹の前傾が大きい、踏切局面中の遊脚膝関節の屈曲が大きい、踏切足離地時の身体重心から踏切足までの距離や踏切脚下腿の前傾が大きい、踏切 2 歩前滞空期中の股関節屈曲トルクのピーク値が大きいなどの特徴がみられ、大きな身体重心水平速度をなるべく維持するような踏切準備および踏切動作であった。

V-type や SV-type は、踏切 1 歩前支持期中の支持脚膝関節の屈曲が大きい、踏切足接地時に体幹および踏切脚下腿の後傾が大きい、踏切中の鉛直上向きの平均力が大きいなどの特徴がみられ、踏切足まわりの身体の起こし回転動作を利用して、身体重心鉛直速度を獲得するような踏切準備および踏切動作であった。

以上より、H-type と SH-type は大きな身体重心の水平速度を維持することに動作的課題を有する選手に、V-type と SV-type は踏切局面において大きな鉛直速度を獲得することに動作的課題を有する選手に対する動作モデルとして指導現場で利用できると考えられる。特に、踏切準備局面の体幹の動作は、指導者が質的な観察によって見分けるための動作着眼点になり得るだろう。

## 5. 今後の課題

本研究では、一流男子走幅跳選手のデータを取得するために、公式競技会における試技を分析対象とした。そのため、各歩の支持期における地面反力を収集することができず、支持脚や踏切脚のキネティクスの分析やその機能について明らかにすることができなかった。今後は、高い技能をもつ選手などを対象に各歩の地面反力を計測し、支持脚や踏切脚の機能についても明らかにしていく必要がある。また、本研究では、走幅跳の主要な動作面である矢状面（YZ 平面）での 2 次元分析に留まっている。今後は、前額面からみた各跳躍タイプの動作的特徴についても明らかにしていく必要がある。

本研究では、体幹の姿勢が各跳躍タイプを見分けるための重要な着眼点であると示唆された。今後は、踏切足接地時における体幹の姿勢などに着目したチェックシートを作成して、指導現場でも簡便に跳躍タイプの分類できるような指標を提案し、その妥当性を検証していく必要がある。また、走スピード（例えば、50m 走）や脚筋力やパワー（例えば、踏切脚伸展筋力）に関わる変数なども計測して、走幅跳選手の能力に合った跳躍タイプを提案していく必要がある。

## 6. 博士論文に関わる主な業績

- 1) **Yutaka Shimizu**, Michiyoshi Ae, Norihisa Fujii and Hiroyuki Koyama (2018) : Technique Types of Preparatory and Take-off Motions for Elite Male Long Jumpers. **International Journal of Sport and Health Science**, Vol. 16, 200-210.
- 2) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也 (2011) : 標準動作モデルからみた一流走幅跳選手の踏切準備および踏切動作の特徴. **陸上競技研究**, 85, 23-30.

# 目次

目次 .....	i
表一覧 .....	iv
図一覧 .....	v
<b>1. 緒言 .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1 日本における男子走幅跳の現状と課題 .....	- 1 -
1.2 走幅跳技術の評価基準の必要性 .....	- 5 -
1.3 走幅跳選手の類型化の必要性 .....	- 7 -
1.4 研究目的 .....	- 11 -
1.5 研究課題 .....	- 11 -
1.6 作業上の仮定 .....	- 13 -
1.7 研究の限界 .....	- 13 -
<b>2. 文献研究 .....</b>	<b>- 14 -</b>
2.1 走幅跳のキネマティクスの研究 .....	- 14 -
2.1.1 踏切動作のキネマティクスの研究 .....	- 14 -
2.1.2 踏切準備動作のキネマティクス研究 .....	- 19 -
2.2 走幅跳のキネティクスの研究 .....	- 21 -
2.3 走幅跳選手の類型化に関する研究 .....	- 25 -
2.4 まとめ .....	- 29 -
<b>3. 研究方法 .....</b>	<b>- 30 -</b>
3.1 データ収集 .....	- 30 -
3.1.1 分析対象者および対象競技会 .....	- 30 -
3.1.2 走幅跳試技の撮影 .....	- 32 -
3.2 データ処理 .....	- 34 -
3.2.1 3次元座標値の算出と平滑化 .....	- 34 -
3.2.2 局面定義とデータの規格化 .....	- 36 -
3.3 標準動作モデルの作成 .....	- 36 -
3.4 算出項目 .....	- 38 -
3.4.1 身体重心の位置, 速度, 加速度 .....	- 38 -
3.4.2 角度, 角速度, 角加速度 .....	- 40 -

3.4.3	遊脚の関節トルク .....	- 40 -
3.4.4	体幹重心まわりの左右股関節力によるモーメントと股関節トルク .....	- 42 -
3.4.5	各歩の支持期における水平および鉛直方向の平均力 .....	- 44 -
<b>4.</b>	<b>世界および日本一流男子走幅跳選手における踏切準備および踏切動作のバイオメカニクス的特徴 (研究課題 1) .....</b>	<b>- 45 -</b>
4.1	目的 .....	- 45 -
4.2	方法 .....	- 46 -
4.2.1	分析対象者 .....	- 46 -
4.2.2	統計処理 .....	- 47 -
4.3	結果 .....	- 47 -
4.3.1	身体的特性と跳躍距離 .....	- 47 -
4.3.2	身体重心速度, 踏込角および跳躍角 .....	- 49 -
4.3.3	標準動作モデルからみた動作的特徴 .....	- 49 -
4.3.4	股関節および膝関節角度の時系列変化 .....	- 52 -
4.3.5	体幹, 大腿および下腿角度の時系列変化 .....	- 55 -
4.3.6	体幹重心まわりに作用する下肢キネティクスの時系列変化 .....	- 60 -
4.3.7	踏切準備および踏切中における各測定項目間の相関関係 .....	- 62 -
4.4	考察 .....	- 68 -
4.4.1	日本一流男子選手 (J 群) の踏切準備および踏切動作の特徴 .....	- 68 -
4.4.2	世界一流男子選手 (W 群) の踏切準備および踏切動作の特徴 .....	- 73 -
4.5	要約 .....	- 74 -
<b>5.</b>	<b>異なる跳躍タイプの走幅跳選手における踏切準備および踏切動作のバイオメカニクス的特徴 (研究課題 2) .....</b>	<b>- 77 -</b>
5.1	目的 .....	- 77 -
5.2	方法 .....	- 79 -
5.2.1	分析対象者 .....	- 79 -
5.2.2	統計処理 .....	- 79 -
5.3	結果 .....	- 80 -
5.3.1	跳躍距離と踏切足離地時のキネマティックパラメータとの関係 .....	- 80 -
5.3.2	跳躍タイプの分類 .....	- 80 -
5.3.3	各跳躍タイプの自己記録, 跳躍距離, 身体的特性および動作局面時間 .....	- 83 -
5.3.4	各跳躍タイプの身体重心速度に関する変数 .....	- 83 -
5.3.5	各跳躍タイプの身体重心高, 体幹角度および膝関節角度 .....	- 86 -
5.3.6	跳躍角との関係がみられた各タイプの動作的特徴 .....	- 88 -

5.3.7 各跳躍タイプの各支持期における平均力 .....	- 91 -
5.3.8 各跳躍タイプの股関節屈曲伸展トルクと体幹角度との関係 .....	- 93 -
5.4 考察 .....	- 96 -
5.4.1 一流男子走幅跳選手における跳躍タイプの分類の妥当性 .....	- 96 -
5.4.2 各跳躍タイプにおける踏切準備および踏切動作の特徴 .....	- 99 -
5.4.3 指導現場における各跳躍タイプの簡便的な分類とその有用性 .....	- 106 -
5.5 要約 .....	- 110 -
<b>6. 結論 .....</b>	<b>- 112 -</b>
6.1 世界および日本一流男子走幅跳選手における踏切準備および踏切動作の特徴に関して（研究課題 1 の研究成果） .....	- 112 -
6.2 異なる跳躍タイプの走幅跳選手における踏切準備および踏切動作の特徴に関して（研究課題 2 の研究成果） .....	- 113 -
6.3 今後の課題 .....	- 114 -
<b>参考文献 .....</b>	<b>- 119 -</b>
<b>博士論文に関連する業績一覧 .....</b>	<b>- 126 -</b>
<b>謝辞 .....</b>	<b>- 128 -</b>

## 表一覽

Table 3-1	Characteristics of the subjects. ....	- 31 -
Table 4-1	Physique and Jumping record of the subjects. ....	- 48 -
Table 4-2	Jumping distance and COM parameters for the World and Japan groups. .....	- 50 -
Table 4-3	Correlations between COM velocities. ....	- 63 -
Table 4-4	Correlations between COM velocities and the trunk angle. ....	- 65 -
Table 4-5	Correlations between COM velocities and the right knee angle. ....	- 66 -
Table 4-6	Correlations between COM velocities and the left knee angle. ....	- 67 -
Table 5-1	Jumping distance, physique and motion phase times in four technique types and all jumps. ....	- 84 -
Table 5-2	COM parameters in four technique types and all jumps. ....	- 85 -
Table 5-3	Average force for each jumping type and for all jumps. ....	- 92 -

## 図一覧

Figure 1-1	Changes in the World and Japanese national records for the men's long jump.	- 3 -
Figure 1-2	Changes in the 1 <sup>st</sup> , 3 <sup>rd</sup> , 8 <sup>th</sup> records at the Olympic and World championships and 1 <sup>st</sup> records at the Japan championships for the men's long jump.	- 4 -
Figure 1-3	Classified method by Saito and Ae (1991).	- 9 -
Figure 1-4	Outline of research.	- 12 -
Figure 2-1	Factor decision model of long jump (Hay et al. , 1986).	- 15 -
Figure 2-2	Factor of the vertical COM velocity during the takeoff phase (Ae, 1982).	- 18 -
Figure 3-1	Calibration points and camera setting for the competitions.	- 33 -
Figure 3-2	Definitions of the digitizing points and body segments.	- 35 -
Figure 3-3	The motion phases from the second last stride to the takeoff.	- 37 -
Figure 3-4	The process to produce the standard motion.	- 39 -
Figure 3-5	Definitions of the segment, joint, touchdown and takeoff angles.	- 41 -
Figure 3-6	Definition of the moments about the trunk center of gravity by the hip joint forces and hip joint torques.	- 43 -
Figure 4-1	Stick pictures for the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phase.	- 51 -
Figure 4-2	Changes in the hip joint angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases.	- 53 -
Figure 4-3	Changes in the knee joint angles of the World and Japan groups during the takeoff	

	preparation and takeoff phases. ....	- 54 -
Figure 4-4	Changes in the trunk angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases. ....	- 56 -
Figure 4-5	Changes in the thigh angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases. ....	- 57 -
Figure 4-6	Changes in the shank angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases. ....	- 58 -
Figure 4-7	Changes in the moments by hip joint forces and hip joint torques of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases. ....	- 61 -
Figure 4-8	Selected features of the preparatory and take-off motion for the Japan group. ....	- 69 -
Figure 5-1	Relationships between jumping distance and COM speed, takeoff angle, COM height and the horizontal and vertical COM velocities at the instant of the toe-off foot. ....	- 81 -
Figure 5-2	Jumping types classified by Ward's method of cluster analysis. ....	- 82 -
Figure 5-3	Averaged patterns of changes in the COM height, trunk angle and knee joint angles of the four technique types. ....	- 87 -
Figure 5-4	Standard motion patterns for each jumping type and for all jumps in the takeoff preparation and takeoff phases. ....	- 89 -
Figure 5-5	Standard motion patterns for H-type and SV-type in the take-off preparation and take-off phases with correlation coefficients of the angles to the take-off angle. ....	- 90 -
Figure 5-6	Standard motion patterns for H-type and V-type in the take-off preparation and take-off phases with average force vector. ....	- 94 -

Figure 5-7	Relationships between trunk angle at L1on and hip flexion-extension torques during the L2flight phase. ....	- 95 -
Figure 5-8	Trial of the jumping types classified by Ward's method of cluster analysis. ....	- 97 -
Figure 5-9	Difference of the changes in the COM velocities for H- and V-types during the take-off phase. ....	- 104 -
Figure 5-10	Relationships between jumping types and horizontal and vertical CG velocities at the instant of the toe-off foot. ....	- 107 -
Figure 5-11	The evolution model of the long jumper skills. ....	- 109 -
Figure 6-1	The stick pictures and GRF vector for the typical subject from L2on to TO in back views. ....	- 115 -
Figure 6-2	Depicts the trunk of a long jumper at the touchdown of the take-off foot for the four techniques: H-, SH-, SV-, and V-types. ....	- 117 -
Figure 6-3	Relationships between performance level and jumping types. ....	- 118 -

# 1. 緒言

## 1.1 日本における男子走幅跳の現状と課題

日本では、平成 13 年度からの概ね 10 年間（2001～2011 年）で目指していくスポーツ振興の基本方針である「スポーツ振興基本計画」が策定された。その中で、競技スポーツにおける具体的な政策目標として、「オリンピック競技大会をはじめとする国際競技大会における我が国のトップレベルの競技者の活躍は、国民に夢や感動を与え、明るく活力ある社会の形成に寄与することから、こうした大会で活躍できる競技者の育成・強化を積極的に推進する」ことが掲げられている（文部科学省，2001）。その後、スポーツ基本法の理念を具体化する「スポーツ基本計画」が策定され、平成 24 年度からの概ね 10 年間（2012～2022 年）を見通したスポーツ推進の基本方針として、「国際競技力の向上に向けた人材の養成やスポーツ環境の整備」や「オリンピック・パラリンピック等の国際競技大会の招致・開催等を通じた国際貢献・交流の推進」が掲げられている（文部科学省，2012）。2020 年には、東京でのオリンピック・パラリンピックの開催が決定し、競技スポーツに対する日本国民の関心は高まっている。

日本陸上競技連盟では、ユース・ジュニア世代からトップレベルに至る体系的な人材養成システムの構築を意図して、2014 年より「ダイヤモンドアスリート制度」を発足させ、2020 年に開催される東京オリンピックにおいて活躍が期待されるユース・ジュニア世代の

競技者を発掘し、中・長期的な強化に取り組んでいる。

阿江（2005）は、スポーツ技術の進歩には、（1）既成のフォームや技術にとらわれないで、選手や指導者の独創的なアイデアを実践する、（2）一流選手のフォームや技術の実態を捉えて、理論的に理解し、より合理的な技術を探求する、（3）人間の形態や機能などを技術という観点から認識し、より合理的な技術を考案し検証するという 3 つパターンがあると述べている。そして、近年のスポーツ科学の急速な発展に加え、選手や指導者にスポーツ科学の知見が広まったことで、上述した 3 つのパターンの内（2）のパターンの重要性が高まってきていると述べている。このように、一流選手のフォームや技術の実態を捉えることは非常に重要なことであると考えられる。

**Figure 1-1** は、男子走幅跳の世界および日本記録の変遷（1900～2015 年）を示したものである。日本選手は、1931 年に南部忠平選手が 7.98m の世界記録を樹立したが、1992 年に森長正樹選手が 8.25m を樹立した後、いまだ世界記録（マイク・パウエル選手、8.95m、2018 年現在）と大きな差があるのが現状である。同様に、世界記録も 20 年以上更新されておらず、人類初の 9m ジャンパーの出現が待ち望まれている。

**Figure 1-2** は、オリンピックおよび世界選手権大会における 1, 3, 8 位の公式記録と同年に開催された日本選手権大会の優勝記録の推移（2004～2017 年）を示したものである。近年では、8m を超える記録を持つ日本選手も徐々に増えてきているが、世界で活躍する選手はおろか、オリンピックや世界選手権大会などに出場する選手が少ないことも事実である。

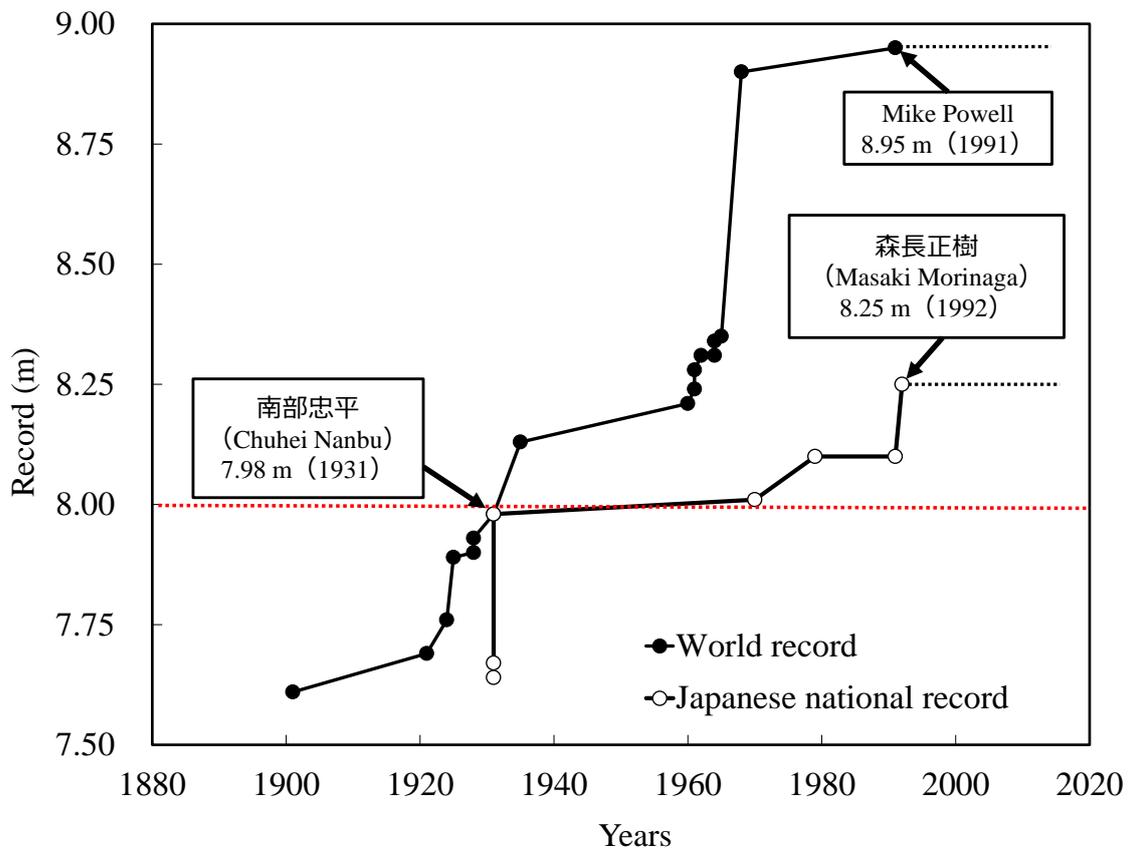
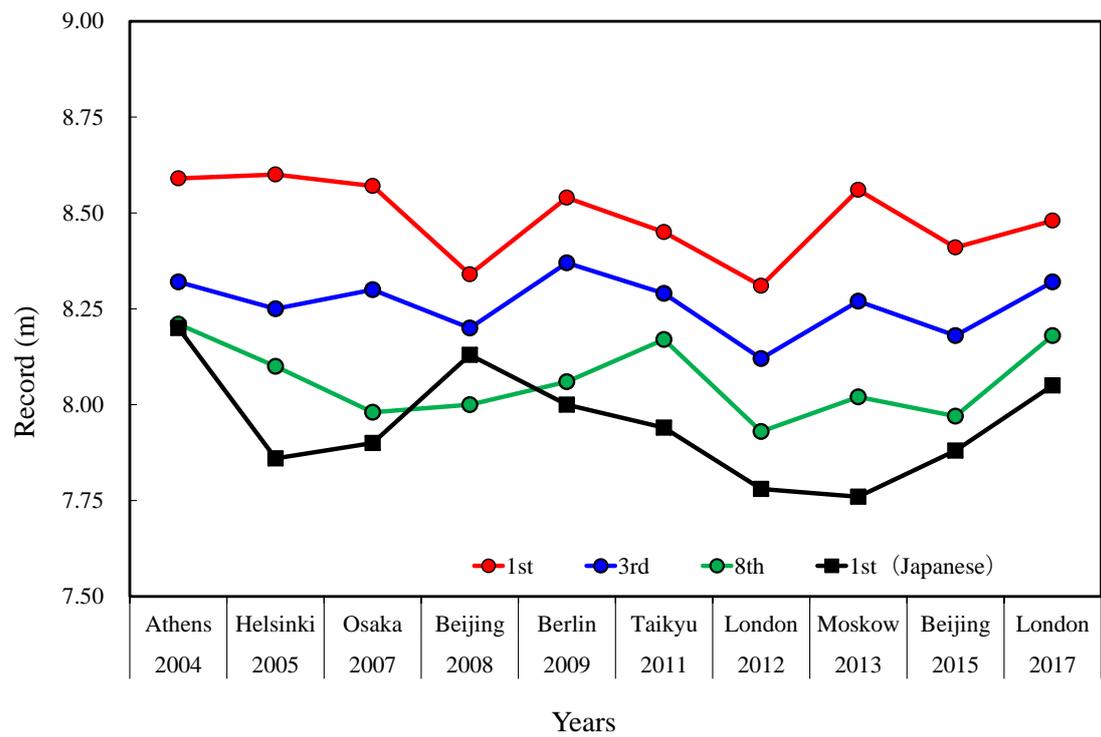


Figure 1-1 Changes in the World and Japanese national records for the men's long jump.



**Figure 1-2 Changes in the 1<sup>st</sup>, 3<sup>rd</sup>, 8<sup>th</sup> records at the Olympic and World championships and 1<sup>st</sup> records at the Japan championships for the men's long jump.**

一方、2004～2017年に開催されたオリンピックおよび世界選手権大会における8位の平均記録は $8.06 \pm 0.10$  mであり、日本記録（森長正樹選手、8.25 m、2018年現在）を下回っている。したがって、オリンピックや世界選手権大会の本番で日本選手が8m台の記録を安定して跳ぶことができれば、予選を勝ち上がり、決勝で活躍することも実現可能であると考えられる。そのためには、オリンピックや世界選手権大会の参加標準記録である8.10 mや派遣設定記録である8.26 m（2018年現在）を多くの選手が突破し、いかなる条件下においても8m台の記録を安定して出すことのできる記録水準に底上げする必要があるだろう。スポーツバイオメカニクス分野からは、日本選手のさらなる競技力の向上に対して、世界一流選手の技術を研究して日本選手との技術の相違を明らかにすること、動作・技術改善に有効な知見を積み重ねること、ユース・ジュニア世代の競技者の指導に役立つ示唆を指導現場に提供することなどが必要である。

## 1.2 走幅跳技術の評価基準の必要性

スポーツ動作を改善する場合には、①肉眼、感じ、経験などの主観に加え、映像などの客観的手段を利用した運動の観察、②目標とする動作との比較に基づく評価、③制限要因や技術的欠点の究明、④適切なトレーニング法のデザインと選択、⑤動作の変更とトレーニングという段階を繰り返すとされている（阿江と藤井、2002）。近年では、ICT（Information and Communication Technology）機器の普及により、指導者だけでなく、選手自身も即時的・

客観的に動作を観察する機会が増え、動作・技術改善への理解が深めやすくなっている（高瀬と中島，2015）。しかし、指導者を特に悩ますのは、「選手の動作が適切であるかどうか正しく評価すること」、あるいは、「どのように適切な動作へ導くかということ」である。多くの指導者は、経験や感覚に基づくイメージやより優れた技術をもつとされる熟練者の動作と比較することで動作の良し悪しを評価している。しかし、この評価法では、目標（モデル）となる選手の形態的・体力的要素や選手独自の癖を色濃く反映し、模範となる動作としては適さない場合がある（Ae et al., 2007）。

このような問題に対し、Ae et al. (2007) や Murata et al. (2008) は、複数の熟練者から「標準動作（平均動作）モデル」を作成し、スポーツ動作をバイオメカニクスの的に評価する方法を提案している。標準動作モデルは、優れた技能をもつ複数の熟練者の動作を平均したものであり、選手個人の癖などが目立ちにくくなるため、動作を評価する際の「基準」として適していると考えられる。また、この手法は、変動係数 (Coefficient of Variation, CV) を用いて選手間のばらつきの指標である動作変動度を算出することや標準化スコア (z-score) を用いて動作モデルからの逸脱度を示す動作逸脱度を定量化して併用することもできる。このように、視覚的な動作モデルの提示に加え、角度や速度といったバイオメカニクスのデータも併用することができるので、質的にも量的にも動作を評価するのに適していると考えられる。これまでのところ、一流選手のスプリント走動作（矢田ら，2011）や子どもの投動作（小林ら，2012）などの基礎的動作を中心に動作モデルの構築が進められている。

走幅跳は、基礎的動作である走動作と跳動作を組み合わせた複合動作であるが、動作モデルの構築および利用が可能であると考えられる。

走幅跳における跳躍距離の大部分は、踏切足離地時の身体重心（Center of mass, COM）の踏切スピード、踏切角（跳躍角）および踏切高によって決定付けられる（Hay et al., 1986）。走幅跳選手は、助走局面で獲得した助走スピード（身体重心の水平速度）をなるべく維持しながら、身体重心高を下げることや身体の後傾姿勢をとるなどの踏切準備技術（Lees et al., 1993, 1994）に加え、助走スピードをなるべく維持しながらも大きな鉛直速度に変換する踏切技術（Hay, 1993 ; Koyama et al., 2006）を身に付ける必要がある。しかし、これまでのところ、一流走幅跳選手の事例的な動作を報告した研究はあるものの、熟練者に共通する動作パターンを抽出し、視覚的・客観的に提示したものは見当たらない。そこで、一流走幅跳選手の踏切準備および踏切動作から動作モデルを構築して指導現場へ提示できれば、走幅跳における踏切準備および踏切動作のための評価基準の1つになり得ると考えられる。

### 1.3 走幅跳選手の類型化の必要性

1991年に行われた東京世界選手権大会の男子走幅跳を分析した報告（Fukashiro and Wakayama, 1992）によれば、走幅跳選手にはマイク・パウエル選手のような高い跳躍とカール・ルイス選手のような低い跳躍に代表されるように、異なる跳躍タイプの走幅跳選手の存在が指摘されている。指導現場では、「ルイス型（水平型）」や「パウエル型（鉛直型）」

といった呼び名で広がっているが（青山ら，2001），いまだ跳躍タイプを分類するための具体的な基準はなく，指導者の主観的・経験的な判断に委ねられているのが現状である．

齋藤と阿江（1991）は，学生男子走幅跳選手 24 名における成功試技と失敗試技の計 48 試技を対象として，①助走スピード，②踏切中の身体重心水平速度の変化量および③踏切足離地時の身体重心鉛直初速度の3変数をもとに12タイプに分類を試みている（**Figure 1-3**）．しかし，分類に用いた 3 変数は，走幅跳の跳躍距離と有意な正の相関関係が認められているという報告（Hay and Miller, 1985 ; Hay et al. , 1986 ; Lees et al. , 1993, 1994）が多数存在する．そのため，齋藤と阿江（1991）が分類に用いた 3 変数では，跳躍技術というよりもむしろ競技パフォーマンス（跳躍距離）の影響を色濃く反映している恐れがある．また，跳躍タイプの総数が多い（12 タイプ）ため，指導現場での識別が困難であることが予想される．さらに，齋藤と阿江（1991）の分類法は，上述した 3 変数の平均値と標準偏差をもとにやや主観的・直感的に分類していることも問題として挙げられる．

一方，近年ではスポーツ競技者に対して多変量解析手法（クラスター分析法）を用いて客観的に類型化を試みた先行研究（松田ら，2010；内藤ら，2013；山元ら，2014）がある．

松田ら（2010）は，水泳競技の 100m 自由形におけるストローク頻度とストローク長の観点から，水泳競技者 94 名を 4 つの泳タイプに分類している．内藤ら（2013）は，陸上競技の 100m 走におけるピッチとストライドの観点から，短距離走者 59 名を「ピッチ優位型」，「中間型」および「ストライド優位型」の 3 つのステップタイプに分類している．山元ら（2014）

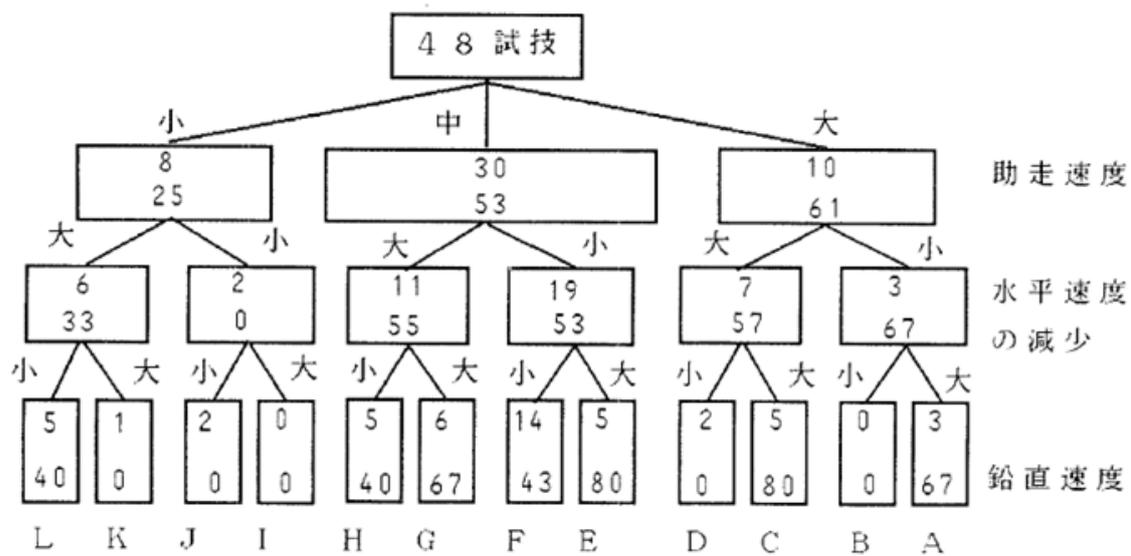


Figure 1-3 Classified method by Saito and Ae (1991).

は、陸上競技の400m走における100m区間タイム比の観点から、短距離走者154名を「スピード維持型」、「中間型」および「スピード低下型」の3つのレースパターンに分類している。このように、クラスター分析手法を走幅跳の類型化に応用して、走幅跳選手をより客観的に分類していく必要があると考えられる。また、跳躍タイプの総数をクラスター数によって選定することで指導現場での識別がより簡便になるようにするとともに、各跳躍タイプの動作的特徴を反映させた動作モデルを提供するなど、分類法や提示法を再検討していく必要があるだろう。

一流選手やそれに近い記録水準の選手になれば、走幅跳に欠かすことのできない基本的な動作を身に付けた上で、選手独自の個別性を伸ばしていくアプローチも重要となる。指導者が走幅跳選手の動作パターンを適切に評価するためには、踏切準備から踏切動作において、共通性の高い部分と個別性の高い部分を適切に判断できる指標を提示する必要があるが、走幅跳ではまだそのような指標を得るためのバイオメカニクスの知見がないようである。

そこで、走幅跳選手を異なる跳躍タイプに分類するための指標を統計的な手法（クラスター分析法）を用いて検討し、その跳躍タイプの動作的特徴を反映させた動作モデルを一流走幅跳選手のデータから構築することができれば、まだ一流ではない選手やその指導者は、走幅跳に欠かすことのできない動作の共通性の高い部分と跳躍タイプに応じた個別性の高い部分の動作的特徴を視覚的に判断することが容易になると考えられる。

#### 1.4 研究目的

本研究の目的は、一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作のバイオメカニクスの特徴を明らかにするとともに、クラスター分析法により走幅跳選手を類型化して各跳躍タイプの動作的特徴を明らかにすることで、走幅跳選手の技術改善に役立つ基礎的知見と示唆を得ることである。

#### 1.5 研究課題

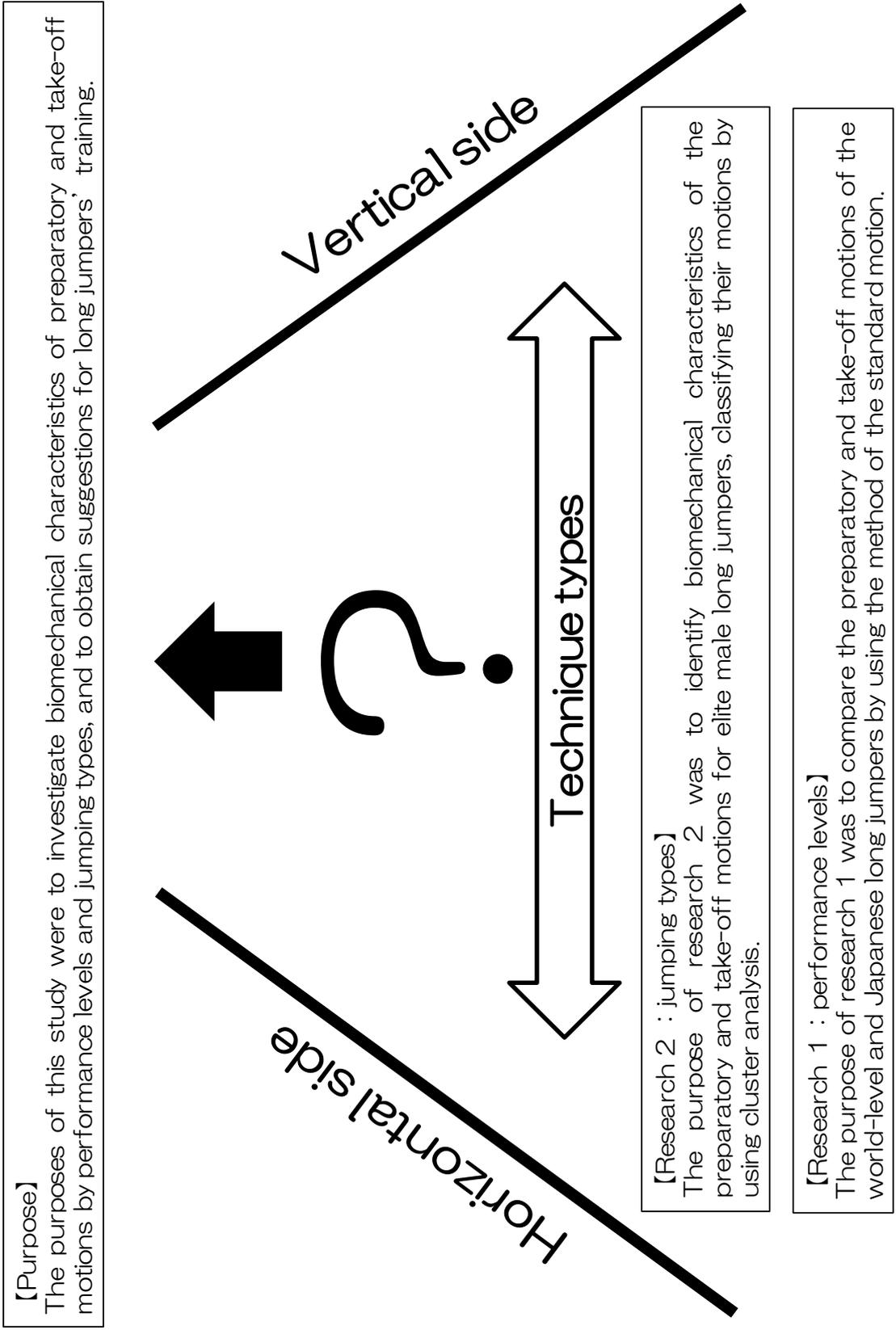
**Figure 1-4** は、本研究の研究目的および研究課題の概要を示したものである。本研究では、研究目的を達成するために、以下の2つの研究課題を設定した。

**【研究課題1：記録水準別にみた動作特徴の相違を明らかにする】**

研究課題1では、世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をバイオメカニクス的に比較し、その動作的特徴の相違を明らかにするとともに、走幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得る。

**【研究課題2：跳躍タイプ別にみた動作特徴の相違を明らかにする】**

研究課題2では、世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をクラスター分析法により類型化し、各跳躍タイプの動作モデルを構築するとともに、その動作的特徴を明らかにして異なる跳躍タイプの走幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得る。



**Figure 1-4 Outline of research.**

## 1.6 作業上の仮定

- ① 本研究で用いた公式競技会で収集した試技は、選手個々の特徴を反映したものである。
- ② 本研究で用いた身体部分慣性係数は、阿江（1996）の日本人アスリートを対象とした推定式であるが、国外の一流選手にも適用することができる。
- ③ 選手に作用する外力は、重力と地面反力のみで、空気抵抗は無視できる。
- ④ 身体は、14の部分からなる剛体リンクセグメントモデルとしてみなすことができる。

## 1.7 研究の限界

- ① 本研究で用いた分析対象者は、公式競技会における国内外の一流男子走幅跳選手を分析したものであるため、本研究で得られた知見を女子選手や小・中学生にそのまま適応するには限界がある。
- ② 本研究で用いた国内外の一流男子走幅跳選手の身長と体重については、公式競技会における公式プログラム、国際陸上競技連盟（IAAF）および日本陸上競技連盟（JAAF）のホームページなどから収集したものであるため、身長と体重の真値と異なる可能性がある。
- ③ 公式競技会における一流男子走幅跳選手の試技は、スタンド最上段に設置したハイスピードカメラによって撮影し、熟練した1名のデジタイザーが手動でデジタイズしたものであるが、データにはデジタイズ誤差が含まれている。

## 2. 文献研究

### 2.1 走幅跳のキネマティクスの研究

#### 2.1.1 踏切動作のキネマティクスの研究

走幅跳の運動局面は、助走、踏切準備、踏切、空中、着地の5つの局面に分けられる (Popov, 1965 ; 関岡, 1990). 走幅跳における跳躍距離は、空気抵抗の影響を無視した場合、踏切足離地時の身体重心のスピード、跳躍角および身体重心高に大きく依存する (Hay et al. , 1986). このうち、身体重心のスピードと跳躍角は、身体重心の水平および鉛直速度で構成されるため、踏切前各歩の接地および離地時における身体重心の水平および鉛直速度と跳躍距離との関係に着目した研究が数多くみられる.

Hay et al. (1986) は、欧米一流男子走幅跳選手 12 名を対象に、踏切 4 歩前から踏切におけるキネマティクスの変数を算出し、各変数間の相関係数を検討することで、跳躍距離を決定する要因モデルを作成している (**Figure 2-1**). その結果、跳躍距離は空中距離 ( $r = 0.93$ ) が、空中距離は踏切足離地時の踏切スピード ( $r = 0.83$ ) が、踏切スピードは水平初速度 ( $r = 0.77$ ) が、そして、水平初速度は踏切 4 歩前離地時の水平速度 ( $r = 0.72$ ) がそれぞれ大きく影響していると述べている. 深代と宮下 (1984) は、中・高校生における男子 22 名、女子 24 名を対象に、跳躍距離と助走速度の相関関係を検討した結果、男子は  $r = 0.76$ 、女子は  $r = 0.59$  であり、ともに高い相関係数がみられたことを報告している. 大村ら (1995) は、

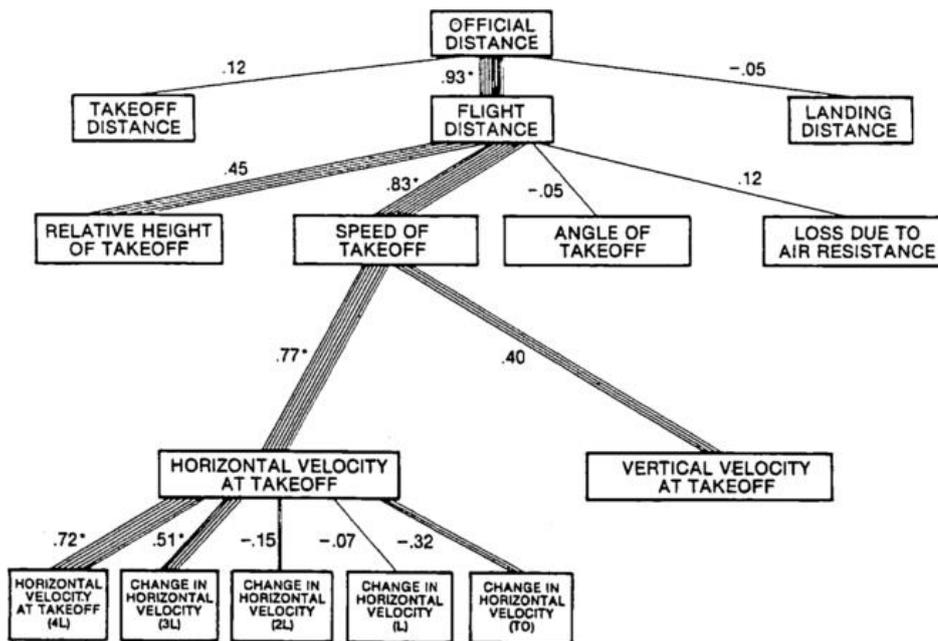


Figure 2-1 Factor decision model of long jump (Hay et al. , 1986).

中学男子 43 名を対象に、50m 走の疾走タイムと走幅跳の跳躍距離の相関係数を検討した結果、50m の疾走タイムが速い群の方が遅い群よりも跳躍距離が大きかったと報告している。植屋と中村（1984）は、小学生男女 20 名を対象に、50m の疾走タイムと走幅跳の跳躍距離の相関係数を検討した結果、男女ともに相関係数が大きかった（男子、 $r = 0.68$ ；女子、 $r = 0.58$ ）ことを報告している。このほかにも、助走局面で獲得した水平速度が大きいほど、大きな跳躍距離を獲得できると指摘した研究は多い（Hay and Miller, 1985 ; Hay, 1986 ; Hay and Nohara, 1990 ; Lees et al., 1993, 1994）。

これらをまとめると、走幅跳の跳躍距離を獲得するためには、記録水準、発達段階および男女の相違に関わらず、大きな身体の水平速度を獲得できるスプリント力が必要不可欠であると言える。

一方、踏切足離地時の身体重心の鉛直初速度は、跳躍距離との間に有意な正の相関関係が認められなかったという報告（松井ら、1973 ; Luhtanen and Komi, 1979 ; Hay et al., 1986 ; Muraki et al., 2008）が大半であるが、記録水準が上がるにつれて、その重要性が増すとの指摘もある。村木ら（2005）は、世界一流男子走幅跳選手 8 名および日本一流男子走幅跳選手 25 名の計 33 名を対象に、キネマティクスの分析を行った結果、①跳躍距離と踏切足離地時の水平初速度（ $r = 0.58$ ）と②跳躍距離と鉛直初速度（ $r = 0.59$ ）の相関係数は同程度であったことに加え、踏切中の水平速度の変化量と鉛直速度の変化量（ $r = -0.46$ ）、踏切中の鉛直速度の変化量と踏切足離地時の水平初速度（ $r = -0.37$ ）、踏切中の水平速度の変化量

と踏切足離地時の鉛直初速度 ( $r = -0.41$ ) との間に、それぞれ有意な負の相関関係が認められたと報告している。小山ら (2008) は、一流男子走幅跳選手 8 名を対象に、キネマティクスの分析を行った結果、踏切脚膝関節の最大屈曲時における鉛直速度と跳躍距離との間 ( $r = 0.78$ ) や、踏切足離地時における鉛直初速度と跳躍距離との間 ( $r = 0.68$ ) に有意な正の相関がみられたと報告している。青山ら (1992) は、水平速度を鉛直速度に変換するためには、踏切足接地時において下向きの踏込角をなるべく小さくすること、踏切中の身体重心の軌跡がなるべく大きな弧を描くようにする (曲率半径を大きくする) ことが重要であると報告している。また、阿江 (1982) は、踏切局面における鉛直速度の生成メカニズムを提唱している (**Figure 2-2**)。それによると、踏切局面における身体重心の鉛直速度の獲得要因は、①踏切足まわりの身体の起こし回転動作、②両腕と振上脚の振り上げ動作、③踏切脚の屈曲伸展動作の 3 つに大別される。そのなかでも、踏切足まわりの身体の起こし回転動作が水平速度から鉛直速度へ変換するために最も重要な動作であり、踏切前半に踏切足離地時の鉛直速度の 60~70% を獲得するとされている (Lees et al., 1993, 1994; Kakiyama and Suzuki, 2001; Koyama et al., 2009)。

以上より、踏切局面での技術的課題は、助走で獲得した水平速度の減少を最小限に抑えつつ、踏切足まわりの身体の起こし回転動作を利用して、効果的に水平速度から鉛直速度へ変換することにある (Popov, 1965; Hay et al., 1986; Hay, 1993; Koyama et al., 2006)。

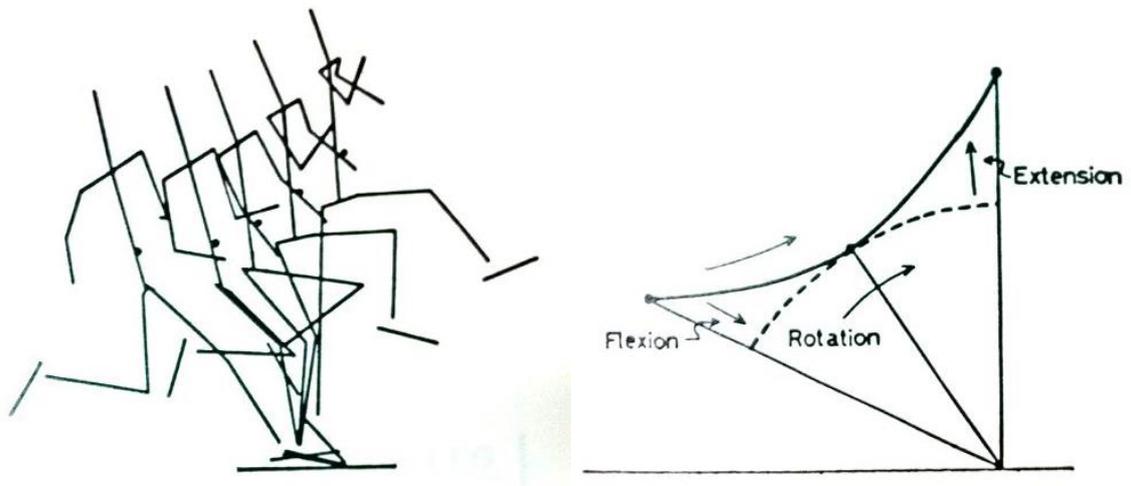


Figure 2-2 Factor of the vertical COM velocity during the takeoff phase (Ae, 1982).

### 2.1.2 踏切準備動作のキネマティクス研究

走幅跳の踏切準備局面では、踏切 2 歩前を長く、踏切 1 歩前を短くする「長－短」のストライドパターンが用いられることが多い（伊藤ら，2009）。踏切前 2 歩からのストライドが「長－短」となるのは走幅跳特有のパターンであり、「パノートメート・ストライド（penultimate stride）」と呼ばれている（Rogers, 2004；熊野と植田，2014）。大村ら（1995）は、一般体育における跳躍距離の大きな中学生の特徴として、パノートメート・ストライドが観察されたと報告している。パノートメート・ストライドは、踏切準備局面において、身体重心高を下げることに効果的であるが、強調しすぎると身体重心の水平速度の減少を招きやすいとの指摘もある（Hay et al., 1986；Rogers, 2004；熊野と植田，2014）。

踏切前半で身体の起こし回転動作を利用して効果的に身体重心の鉛直速度を獲得するためには、踏切足を身体重心のより前方に接地する必要がある。また、踏切足接地時に下向きの鉛直速度が大きくなると踏切前半での鉛直速度の増大を妨げることになるため、踏切足接地時までにはあらかじめ身体重心高を下げておくことが有効であるとされている（Lees et al., 1993, 1994；Kakihara and Suzuki, 2001；伊藤ら，2009）。

Hay and Miller（1985）は、オリンピックの決勝に出場した欧米一流女子走幅跳選手 12 名を対象に、踏切準備局面のバイオメカニクスの変数と跳躍距離との相関関係を検討した結果、跳躍距離は、踏切 2 歩前支持期における平均鉛直力（ $r = -0.56$ ）、踏切 2 歩前支持期における身体重心の鉛直速度の変化量（ $r = -0.59$ ）、踏切 2 歩前滞空期における空中時間（ $r =$

-0.66) との間に負の相関関係がみられたことから、踏切 2 歩前では身体重心高の上下動を抑え、踏切 2 歩前離地時の身体重心の鉛直速度を小さくすることが重要であると示唆している。志賀ら (2002) は、学生男子走幅跳選手 12 名を対象に、踏切準備局面のキネマティクスの変数と跳躍距離の相関関係を検討している。相関係数の大きかった変数として、①踏切局面の接地時間 ( $r = -0.61$ )、②踏切 1 歩前の支持脚膝関節が最も屈曲した時点での体幹の後傾角 ( $r = -0.58$ )、③踏切 1 歩前の支持脚膝関節が最も屈曲した時点での身体重心の水平速度 ( $r = 0.62$ )、④踏切 1 歩前離地時の身体重心の水平速度 ( $r = 0.77$ ) の 4 つが挙げられたことから、走幅跳の指導においては、踏切中の下肢の動作だけでなく、踏切 1 歩前の体幹の後傾姿勢や支持脚膝関節の屈曲伸展動作にも目を向ける必要があると述べている。

青山ら (2001) は、日本一流男子走幅跳選手 2 名の踏切準備の動作的特徴を事例的に検討した結果、2 名の選手に共通する動作的特徴として、踏切 2 歩前では支持脚の下肢 3 関節をあまり動かさずに乗り込んでいること、踏切 1 歩前では支持脚膝関節を屈曲させて身体を沈み込ませながら踏切足を積極的に接地していたことを報告している。Hay et al. (1986) によれば、踏切足の接地方法には、踏切脚を前から後ろに引くように動かし、踏切でのブレーキを軽減させる「積極的接地」と、踏切脚をなるべく固定して身体重心と踏切足の相対的な位置を変えない「固定式接地」の 2 種類があるとしている。

阿江ら (1999) は、国内外の一流男子走幅跳選手の踏切準備動作を比較した結果、多くの日本選手は、体幹が前傾から後傾に切り替わるタイミングが早かったために、踏切 1 歩

前における身体重心の水平速度の減少が大きかったと述べている。そこで、踏切準備局面では、体幹を垂直に保ち、踏切へと駆け上がるように意識し、水平速度の減少を最小限に抑えた踏切準備動作の習得が有効であると述べている。また、森長ら（2003）は、大学男子走幅跳選手 6 名を対象に、成功試技と失敗試技における踏切準備から踏切までの動作を比較した結果、成功試技の特徴に踏切準備局面での体幹の前傾の維持が挙げられたとし、阿江ら（1999）と同様の踏切準備動作習得の必要性を指摘している。

以上より、踏切準備局面の技術的課題は、助走で得た身体重心の水平速度の減少をなるべく抑えながら、踏切局面で効果的に身体重心の鉛直速度を獲得するために、あらかじめ身体重心高を下げるなどの踏切準備動作を行う必要があることがわかる（深代，1990；伊藤ら，2009）。また、踏切準備動作は、踏切局面の身体重心の速度変化や跳躍距離に与える影響が大きく、踏切準備および踏切動作を関連付けて指導する必要があると考えられる。これまでのキネマティクスの知見をまとめると、踏切準備動作における主な指導の着眼点は、踏切 1 歩前の支持脚膝関節の屈曲伸張動作や体幹の前後傾姿勢にあると考えられるが、その具体的な動作パターンや問題点の抽出法などは確立されていないようである。

## 2.2 走幅跳のキネティクスの研究

走幅跳の踏切は、0.1 秒程度の極めて短時間かつ爆発的に遂行される伸張－短縮サイクル（Stretch－Shortening Cycle：SSC）運動である（岡子，2005）。男子走幅跳選手の踏切では、

地面反力の鉛直方向の最大値が 8000N を超えるとともに、水平方向の最大値も 3000N に達すると述べている (図子, 2006).

Linthorne et al. (2011) は、熟練女子走幅跳選手 1 名を対象に、2, 4, 6, 8, 10 歩の助走歩数から短助走跳躍を行わせ、踏切中の地面反力と力積の変化を検討している。その結果、助走距離を伸ばすにつれて、助走スピードが増加するとともに、地面反力の水平方向のブレーキ成分は大きくなる傾向にあったが、水平方向の推進力成分に関しては各歩間で大きな変化はみられなかったと述べている。また、Kakahana and Suzuki (2001) は、男子走幅跳選手 2 名を対象に、3, 5, 9 歩の短助走跳躍における踏切中の地面反力を計測した結果、より鉛直方向に跳躍していた選手は、より水平方向に跳躍していた選手に比べ、地面反力の水平方向のブレーキ成分が大きく、水平方向の推進力成分は小さかったと述べている。

踏切中の踏切脚各筋群の機能に関する研究として、Stefanyshyn and Nigg (1998) は、バスケットボール選手 5 名と走幅跳選手 4 名を対象に、直線助走付き高跳と走幅跳における踏切脚各関節の関節トルクおよびトルクパワーを検討している。その結果、踏切局面全体を通して踏切脚の股関節は踏切足接地直後に大きな伸展トルクを発揮していること、膝関節と足関節は大きな伸展、底屈トルクを発揮していることなど、水平および鉛直の跳躍方向に関わらず、踏切脚各関節の関節トルクおよびトルクパワーの変化パターンは類似していると報告している。同様に、助走スピードが増大しても、踏切脚各関節の関節トルクおよびトルクパワーの変化パターンは、類似していたと述べている。

阿江ら（1989）は、大学男子走幅跳選手 7 名を対象に、踏切における踏切脚の関節トルクおよびトルクパワーを算出し、踏切脚筋群の機能を検討している。その結果、走幅跳の踏切における踏切脚では、膝関節伸筋群が Eccentric な筋収縮によって大きなトルクやパワーを発揮しており、踏切において最も大きな役割を果たすとしている。股関節屈筋群は Eccentric な筋収縮により踏切前半において股関節の伸展を抑制する役割があるが、踏切への直接的な貢献は少ないこと、足関節底屈筋群は大きなトルクやパワーを発揮することはないが、踏切後半において膝関節とともにパワーの発生源になっていることなどを報告している。

Muraki et al.（2005）は、日本一流男子走幅跳選手 4 名と学生男子走幅跳選手 7 名の計 11 名を対象に、渋川ら（1966）の方法を用いて、踏切脚をばね、ダンパ、ジャッキという 3 つの機械要素にモデル化して踏切脚の力学的機能を検討している。その結果、踏切足接地直後の衝撃局面においては主にばね力とダンパ力を発揮することで衝撃力を吸収しており、非衝撃局面においては主にばね力とジャッキ力を発揮することで身体重心高を積極的に大きくしていると報告している。

Muraki et al.（2008）は、男子走幅跳選手 11 名を対象に、踏切脚各関節が発揮した関節トルクによる角力積および仕事と身体重心速度の変化との関係について検討している。その結果、踏切前半の膝関節伸展トルクによる角力積と水平速度の減少量に有意な負の相関 ( $r = -0.69$ ) がみられたことから、踏切前半に大きな膝関節伸展トルクを発揮することが、水平

減速を小さくしながら水平速度を鉛直速度へ変換することに有効であると示唆している。

踏切中の踏切脚以外の身体各部の機能に関する研究として、志賀と尾縣（2004）は、大学男子走幅跳選手および混成選手 12 名を対象に、踏切動作中の踏切脚および振上脚の下肢キネティクスの変数を算出するとともに、等速性筋力測定器（Biodex）を用いて踏切脚の膝と股関節の等速性筋力を測定し、キネマティクスの変数とキネティクスの変数の関係を検討している。その結果、踏切後半において振上脚の股関節伸展トルクの発揮が大きい選手ほど跳躍角が小さいこと、踏切脚の膝関節伸展筋力が大きい選手ほど踏切中盤での踏切脚の膝関節角度を大きく保つことができることなどを報告している。

青山（2001）は、大学男子走幅跳選手 8 名を対象に、踏切動作中の身体各部の関節トルクおよび関節トルクパワーを算出し、身体各部の筋機能を検討している。その結果、両上肢では、踏切足接地直後に踏切脚側の肩関節屈筋群が Concentric なパワーを発揮することで身体を前方に加速するのに貢献しており、振上脚では股関節が踏切前半に屈筋群の Concentric なパワーを発揮、膝関節が踏切後半に伸筋群の Eccentric なパワーを発揮することで素早い振込動作を遂行していることを報告している。

このように、踏切動作中の地面反力の変化や踏切脚の機能について検討した研究が多くみられるが、記録水準や異なる跳躍タイプの走幅跳選手を対象に下肢キネティクスを比較したような研究は少ないようである。また、これまでに踏切準備動作中の下肢キネティクスを検討したような研究はみられないため、今後さらに検討していく必要があるだろう。

## 2.3 走幅跳選手の類型化に関する研究

レースタイムを競う陸上競技の走種目や水泳競技では、レースパターンの特徴からレースパターンのモデル化や類型化が検討されてきた。

阿江ら（1994）は、陸上競技の 100m 走におけるレースパターンを分析し、走スピード、ステップ長およびステップ頻度から定性的に 3 つのパターンに類型化し、各レースパターンの特徴を示している。また、各区間タイムとレースタイムとの直線回帰式などを利用することで、トレーニング場面で具体的な到達目標を見積もることができると述べている。

森丘ら（2000）は、陸上競技の 400m ハードル走におけるタッチダウンタイムからレースパターンを分析した結果、「ハイペース維持型」、「ハイペース低下型」、「イーブンペース型」の 3 つのレースパターンが存在したと報告している。また、それぞれのレースパターンにおける目標記録を達成するためのモデルタッチダウンタイムを提示している。

門野ら（2008）は、陸上競技の 800m 走における相対走スピード、身長比ストライドおよび相対ピッチの平均値をもとに記録水準に着目してレースパターンを類型化している。その結果、記録水準の高い群から順に、「前半ー平均ストライドー高ピッチ型」、「前半ー大ストライドー平均ピッチ型」、「後半ー平均ストライドー低ピッチ型」、「後半ー小ストライドー高ピッチ型」というがみられたと述べている。

このように、「ピッチ型」と「ストライド型」といったステップタイプの特徴や、「前半型」と「後半型」といったレースパターンの相違から、異なる走者存在の指摘や最適なレ

ースパターンが模索されてきた。

松田ら（2010）は、水泳競技の 100m 自由形におけるストローク頻度とストローク長の観点から、因子分析およびクラスター分析を用いて、水泳競技者 94 名を 4 つの泳タイプに分類している。分類された 4 つの泳タイプは、レースタイムに差がないにも関わらず、様々なストローク長とストローク頻度の組み合わせを有した泳者が存在したと指摘している。

内藤ら（2013）は、陸上競技の 100m 走におけるピッチとストライドの観点から、クラスター分析を用いて、短距離走者 59 名を「ピッチ優位型」、「中間型」および「ストライド優位型」の 3 つのステップタイプに分類している。その結果、各ステップタイプ間には 100m レースタイムや各区間の平均疾走スピードに差がないにも関わらず、100m の加速局面における疾走動態はステップタイプによって異なると報告している。

山元ら（2014）は、陸上競技の 400m 走における 100m 区間タイム比の観点から、クラスター分析を用いて、短距離走者 154 名を「スピード維持型」、「中間型」および「スピード低下型」の 3 つのレースパターンに分類している。その結果、「スピード低下型」は他のタイプと比較すると、400m タイムが有意に低かったことから、「スピード維持型」か「中間型」のレースパターンが有効であると報告している。

上述した 3 つの研究は、競技者に対して多変量解析手法（クラスター分析法）を用いて、定量的に類型化を試みた研究であるが、各タイプのレースパターン分析のみに留まっており、具体的な各タイプの動作的特徴や指導現場で簡便的に分類するための動作的着眼点ま

では示せていない。

一方、走幅跳に踏切準備および踏切動作に関する先行研究は、バイオメカニクス的手法である動作分析を用いて、走幅跳選手の類型化を模索してきた。

Fukashiro and Wakayama (1992) は、1991 年に行われた東京世界選手権大会におけるマイク・パウエル選手とカール・ルイス選手の踏切局面における動作的特徴の相違を検討している。それによると、パウエル選手は踏切中の水平速度の減少は大きい、大きな鉛直初速度を獲得して高い跳躍をしており（助走速度、11.00 m/s；跳躍角、23.1 deg；水平初速度、9.09 m/s；鉛直初速度、3.70 m/s）、ルイス選手は踏切中の水平速度の減少を抑え、大きな水平初速度を維持した低い跳躍であったと述べている（助走速度、11.06 m/s；跳躍角、18.3 deg；水平初速度、9.72 m/s；鉛直初速度、3.22 m/s）。すなわち、両者の助走速度が同程度であったにも関わらず、踏切動作の相違によって、高い跳躍と低い跳躍に大別できるという跳躍タイプの存在を示唆している。実際の指導現場においては、両者の踏切動作の特徴から、踏切脚膝関節を伸展させた状態で突っ張る踏切を有した「パウエル型」と踏切脚膝関節をやや屈曲させた状態で引っかく踏切を有した「ルイス型」というような表現で広まっている（青山ら、2001）。しかし、両跳躍タイプを分けるための具体的な指標や動作の着眼点は曖昧なままであり、多くの日本人走幅跳指導者は走幅跳選手に対して、画一的に起こし回転を利用して高く跳び上がることを強調しすぎているとの指摘もある（岡野、1989；関岡、1990；吉田、2011；森長、2016）。

齋藤と阿江（1991）は、学生男子走幅跳選手 24 名の成功試技と失敗試技の計 48 試技の踏切動作をキネマティクスの的に分析し、踏切足接地時の水平初速度、踏切前半における水平速度の変化量および踏切中間時における鉛直速度の 3 つの身体重心速度パラメータから踏切動作を 12 タイプへ類型化している。このうち、身体の後傾姿勢に関しては 2 つのタイプに大別され、「体幹を大きく後傾させるタイプ」と「振上脚を大きく後方に残すタイプ」が存在すると報告している。阿江（2002）は、上述した 12 タイプのうち、助走スピードは大きい、踏切での鉛直速度の獲得が小さかったタイプを「スピード型」、助走スピードはやや劣るが、鉛直速度が大きかったタイプを「パワー型（バネ型）」と呼んでおり、世界記録を樹立した際のパウエル選手の跳躍は、踏切における体幹の後傾はパワー型、振込脚の残し方はスピード型で、両タイプの良いところを組み合わせた「第 3 のタイプ」であったと述べている。しかし、この分類方法は跳躍タイプ数が多く、全タイプの詳細な動作の分析までは行っておらず、踏切準備動作の影響が跳躍タイプに与える影響などを考慮することができていないことが問題として挙げられる。

以上より、跳躍距離を競う走幅跳では、レースタイムを競う種目のように、区間タイムやタッチダウンなどの指導現場でも計測可能な指標が明確に提示できていないのが現状である。実際に指導場面で用いることを考えると、適切に分類することが可能な分類指標や各跳躍タイプのバイオメカニクスの特徴を反映した動作モデルを視覚的に提示する必要があるだろう。

## 2.4 まとめ

走幅跳の踏切準備および踏切動作に関するバイオメカニクスの研究は、各時点における身体重心速度と跳躍距離の関係に着目し、水平速度の減速を最小限に抑え、鉛直速度を効果的に獲得するための踏切準備および踏切動作をキネマティクスの的に検討した研究が多い。また、踏切中の踏切脚を中心とした身体各部の機能に関するキネティクスの研究など、跳躍距離を向上させるための技術や要因を明らかにすることを目的としている研究が数多くみられる。踏切足接地時の身体の後傾姿勢や身体重心速度の相違から様々な跳躍タイプが存在することが指摘されているにも関わらず、いまだ多くの日本人走幅跳指導者は走幅跳選手に対して起こし回転動作を利用して画一的に高く跳び上がることを強調しすぎているとの指摘もある。この問題は、異なる動作的特徴を有する走幅跳選手に関する研究が少なく、跳躍タイプを分類するための適切な指標や跳躍タイプに応じた指導への示唆が十分に得られていないことが一因である。走幅跳選手の指導に役立つ示唆を得ることを考えると、走幅跳選手を適切に類型化するための指標の提案、各跳躍タイプの特徴を有した動作モデルの構築、踏切準備から踏切動作を含めたバイオメカニクスの特徴を明らかにする必要があるが、まだそのような研究はないようである。

### 3. 研究方法

#### 3.1 データ収集

##### 3.1.1 分析対象者および対象競技会

分析対象者は、2007年から2013年に実施された5つの公式競技会に参加した世界および日本一流男子走幅跳選手29名であった。このうち、世界一流選手は14名で、日本一流選手は15名であった。研究課題1では世界一流選手は9名と日本一流選手は10名の計19名を、研究課題2では全分析対象者29名をそれぞれ対象とした。Table 3-1は、本研究で対象となった全分析対象者29名の身長、体重、当該競技会開催前の自己ベスト記録、当該競技会における公式記録、自己ベスト記録に対する公式記録の達成率、踏切脚および収集した対象競技会を示したものである。

対象競技会は、①2007年IAAF世界陸上競技選手権大会（大阪長居スタジアム，大阪），②2011年AAAアジア陸上競技選手権大会（ユニバー記念競技場，兵庫），③2011年SEIKOゴールデングランプリ（等々力陸上競技場，神奈川），④2009年JAAF日本陸上競技選手権大会（広島広域公園陸上競技場，広島），⑤2013年JAAF日本陸上競技選手権大会（味の素スタジアム，東京）であった。なお、本研究で用いたデータは、日本陸上競技連盟科学委員会バイオメカニクス班の活動によって得られたものである。大会主催者には、同委員会により、事前に文書および口頭で撮影の内容についての説明を行い、撮影の許可を得た。

**Table 3-1 Characteristics of the subjects.**

Subjects	Body height (m)	Body weight (kg)	Personal best (m)	Official distance (m)	Official distance / Personal best (%)	Take-off leg	Competitions
World 1	1.76	70	8.56	8.57	100.12	Left	2007 IAAF World Championships
World 2	1.84	73	8.41	8.47	100.71	Left	2007 IAAF World Championships
World 3	1.81	81	8.60	8.30	96.51	Right	2007 IAAF World Championships
World 4	1.75	70	8.27	8.25	99.76	Right	2007 IAAF World Championships
World 5	1.90	73	8.39	8.19	97.62	Left	2007 IAAF World Championships
World 6	1.83	73	8.62	8.17	94.78	Right	2007 IAAF World Championships
World 7	1.92	79	8.20	8.01	97.68	Left	2007 IAAF World Championships
World 8	1.84	63	8.39	7.98	95.11	Left	2007 IAAF World Championships
World 9	1.96	86	8.19	7.95	97.07	Left	2007 IAAF World Championships
World 10	1.82	70	8.27	8.19	99.03	Right	2011 Asian Athletics Championships
World 11	1.85	75	8.05	8.03	99.75	Right	2011 SEIKO Golden Grand Prix
World 12	1.84	83	8.54	8.07	94.50	Right	2012 SEIKO Golden Grand Prix
World 13	1.83	73	8.34	8.09	97.00	Right	2013 SEIKO Golden Grand Prix
World 14	1.85	75	8.05	8.05	100.00	Right	2011 Asian Athletics Championships
Japanese 1	1.79	73	8.09	8.00	98.89	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 2	1.79	74	7.90	8.00	101.27	Right	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 3	1.75	68	7.81	7.91	101.28	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 4	1.74	70	7.93	7.73	97.48	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 5	1.75	65	7.89	7.72	97.85	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 6	1.73	66	7.80	7.71	98.85	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 7	1.76	68	7.91	7.71	97.47	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 8	1.84	76	7.93	7.62	96.09	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 9	1.76	65	7.70	7.57	98.31	Right	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 10	1.71	61	7.72	7.49	97.02	Left	2009 Japan Championships in Athletics
Japanese 11	1.73	64	7.92	7.76	97.98	Left	2013 Japan Championships in Athletics
Japanese 12	1.77	64	8.11	7.75	95.56	Left	2013 Japan Championships in Athletics
Japanese 13	1.74	65	7.95	7.52	94.59	Right	2013 Japan Championships in Athletics
Japanese 14	1.74	70	7.73	7.40	95.73	Right	2013 Japan Championships in Athletics
Japanese 15	1.79	64	8.03	7.45	92.78	Right	2013 Japan Championships in Athletics
World	1.84 ± 0.06	74.57 ± 6.01	8.35 ± 0.19	8.17 ± 0.18	97.83 ± 2.11		
Japanese	1.76 ± 0.03	67.53 ± 4.29	7.89 ± 0.13	7.69 ± 0.19	97.41 ± 2.28		
All jumpers	1.80 ± 0.06	70.93 ± 6.23	8.11 ± 0.28	7.92 ± 0.30	97.61 ± 2.17		

### 3.1.2 走幅跳試技の撮影

**Figure 3-1** は、対象競技会における撮影設定を示したものである。スタンド最上段に設置した 2 台の高速 VTR カメラを用いて、踏切 2 歩前から踏切までの動作範囲が分析できるように撮影した。使用した高速 VTR カメラは、2007 年 IAAF 世界陸上競技選手権大会の撮影には HSV-500C<sup>3</sup> (NAC Image Technology Inc., Tokyo, Japan, 毎秒 250 コマ, 露出時間 1/1000 秒) を使用し、その他の競技会の撮影には EXILIM EX-F1 (CASIO Computer Co. Ltd., Tokyo, Japan, 毎秒 300 コマ, 露出時間 1/1000 秒) を使用した。

跳躍進行方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸、跳躍進行方向に直交する水平軸を X 軸とする右手座標系を定義した。撮影範囲は、X 軸方向 1.25 m, Y 軸方向 8.00 m, Z 軸方向 2.50 m とした。撮影した画像から DLT (Direct Linear Transformation) 法により 3 次元座標値を得るため、あらかじめ競技開始前に撮影範囲内の 10 箇所に 0.5 m 間隔毎に 6 つのコントロールポイントを取り付けたキャリブレーションポールを順次立ててキャリブレーションの撮影を実施した。なお、対象競技会の撮影は、公式競技会であったため、マーカーなどを選手に貼付することができなかった。

各公式競技会の決勝における各選手の試技から、最も公式記録の良かった試技で、かつ、自己ベスト記録に対する公式記録の達成率が 90 % 以上であることが確認された試技を分析対象試技とした。

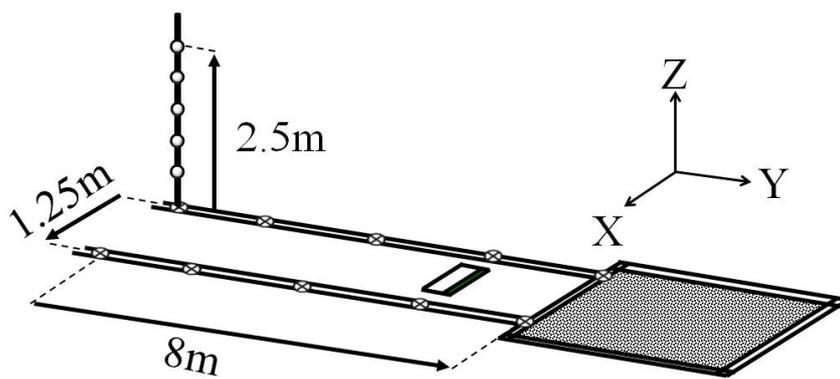
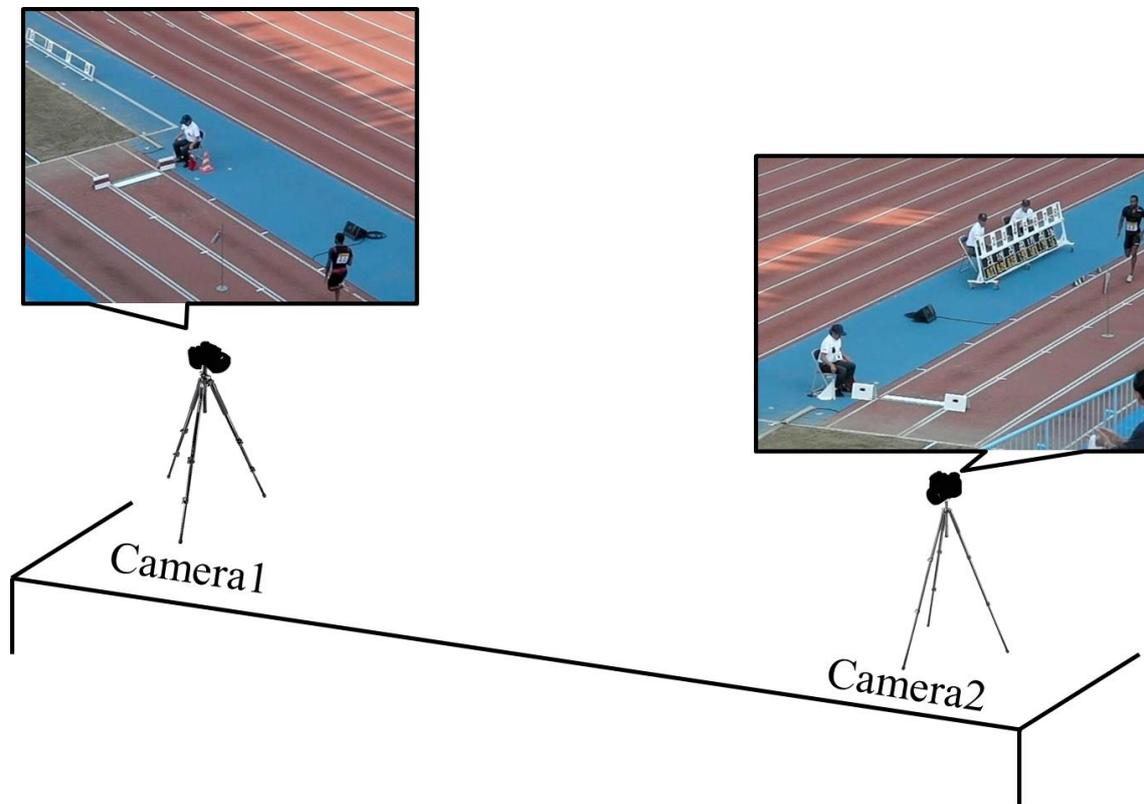


Figure 3-1 Calibration points and camera setting for the competitions.

## 3.2 データ処理

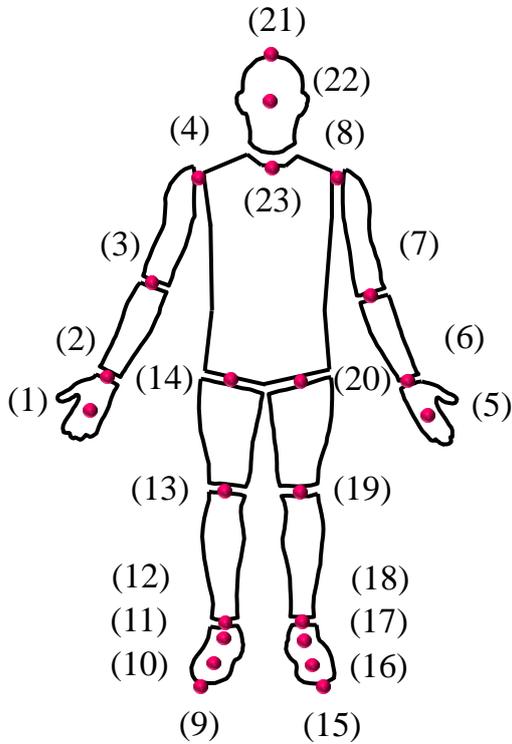
### 3.2.1 3次元座標値の算出と平滑化

**Figure 3-2** は、本研究で用いた身体分析点と剛体リンクモデルを示したものである。身体分析点は、左右の手先、手首、肘関節、肩関節、つま先、母子球、踵、足首、膝関節、股関節および頭部、耳珠点、胸骨上縁の計 23 点であった。剛体リンクモデルは、左右の手、前腕、上腕、足、下腿、大腿および頭部と体幹の計 14 セグメントモデルを使用した。

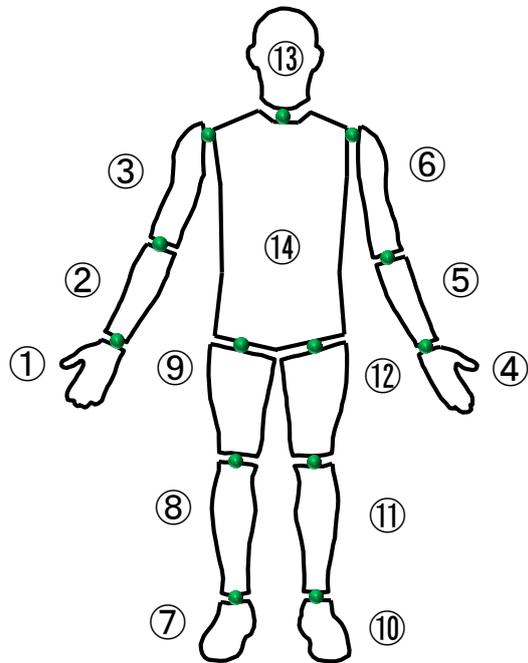
デジタイズには、Frame-DIAS IV system (DKH Co., Tokyo, Japan) を用いた。まず、踏切足接地や踏切足離地時の各イベントを目視で読み取り、2つの VTR 画像を同期した (Leitch et al., 1994)。本研究は、競技会の映像を用いた走幅跳の先行研究 (60 Hz, Hay and Nohara, 1990 ; Lees et al., 1994) よりも大きなサンプリング周波数 (250 – 300 Hz) を用いて同期しており、同期作業による誤差は先述した先行研究よりも小さいと考えられる。次に、踏切 2 歩前から踏切までの VTR 画像から身体分析点 23 点を 1 コマおき (毎秒 125 コマ、または、150 コマ相当) にデジタイズして 2 次元座標値を得た。その後、コントロールポイントの座標値から得られた DLT パラメータを用いて、3 次元 DLT 法により身体分析点 23 点の 3 次元座標値を算出した (Yeadon and King, 1999)。なお、これら一連のデジタイズ作業は、走幅跳の踏切準備および踏切動作のデジタイズ経験が豊富な分析者 1 名によって実施した。

得られた 3 次元座標値は、最適遮断周波数を決定した上で、Butterworth low-pass digital filter を用いて平滑化した (Wells and Winter, 1980)。最適遮断周波数は、4.5~7.5Hz であった。

**【Digitizing points】**



**【Body segments】**



- |                                    |                   |
|------------------------------------|-------------------|
| 1. HandR                           | 5. HandL          |
| 2. WristR                          | 6. WristL         |
| 3. ElbowR                          | 7. ElbowL         |
| 4. ShoulderR                       | 8. ShoulderL      |
| 9. ToeR                            | 15. ToeL          |
| 10. Ball of footR                  | 16. Ball of footL |
| 11. HeelR                          | 17. HeelL         |
| 12. AnkleR                         | 18. AnkleL        |
| 13. KneeR                          | 19. KneeL         |
| 14. HipR                           | 20. HipL          |
| 21. Verix                          |                   |
| 22. Ear                            |                   |
| 23. Superior margin of the sternum |                   |

- |              |
|--------------|
| 1. HandR     |
| 2. ForearmR  |
| 3. UpperarmR |
| 4. HandL     |
| 5. ForearmL  |
| 6. UpperarmL |
| 7. FootR     |
| 8. ShankR    |
| 9. ThighR    |
| 10. FootL    |
| 11. ShankL   |
| 12. ThighL   |
| 13. Head     |
| 14. Trunk    |

**Figure 3-2 Definitions of the digitizing points and body segments.**

### 3.2.2 局面定義とデータの規格化

**Figure 3-3** は、踏切準備および踏切動作の局面定義を示したものである。踏切準備および踏切動作は、接地 (on) と離地 (off) を基準に、踏切 2 歩前 (L2)、踏切 1 歩前 (L1)、踏切 (Takeoff) ごとに、支持期 (support phase) と滞空期 (flight phase) の計 5 局面に分けた。すなわち、踏切 2 歩前接地時 (L2on)、踏切 2 歩前離地時 (L2off)、踏切 1 歩前接地時 (L1on)、踏切 1 歩前離地時 (L1off)、踏切足接地時 (TD : Touchdown)、踏切足離地時 (TO : Toe-off) の 6 つのイベントを基準に、踏切 2 歩前支持期 (L2-support phase)、踏切 2 歩前滞空期 (L2-flight phase)、踏切 1 歩前支持期 (L1-support phase)、踏切 1 歩前滞空期 (L1-flight phase)、踏切支持期 (TO-support phase) の 5 つの局面に分け、各局面が 100% となるように 3 次のスプライン関数を用いて規格化した。また、踏切動作に関しては、踏切脚の膝関節が最も屈曲した時点 (MKF : Maximum knee flexion) を踏切中間時と定義し、TD から MKF までを踏切前半局面 (First-half phase)、MKF から TO までを踏切後半局面 (Second-half phase) とした。そして、踏切全体が 100% となるように、踏切前半局面と踏切後半局面をそれぞれ 50% として規格化した。なお、右脚踏切の分析対象者に関しては、X 座標を反転することで、左脚踏切の試技として取り扱った。

### 3.3 標準動作モデルの作成

標準動作モデルは、Ae et al. (2007) の方法を用いて、国内外の一流走幅跳選手から作成

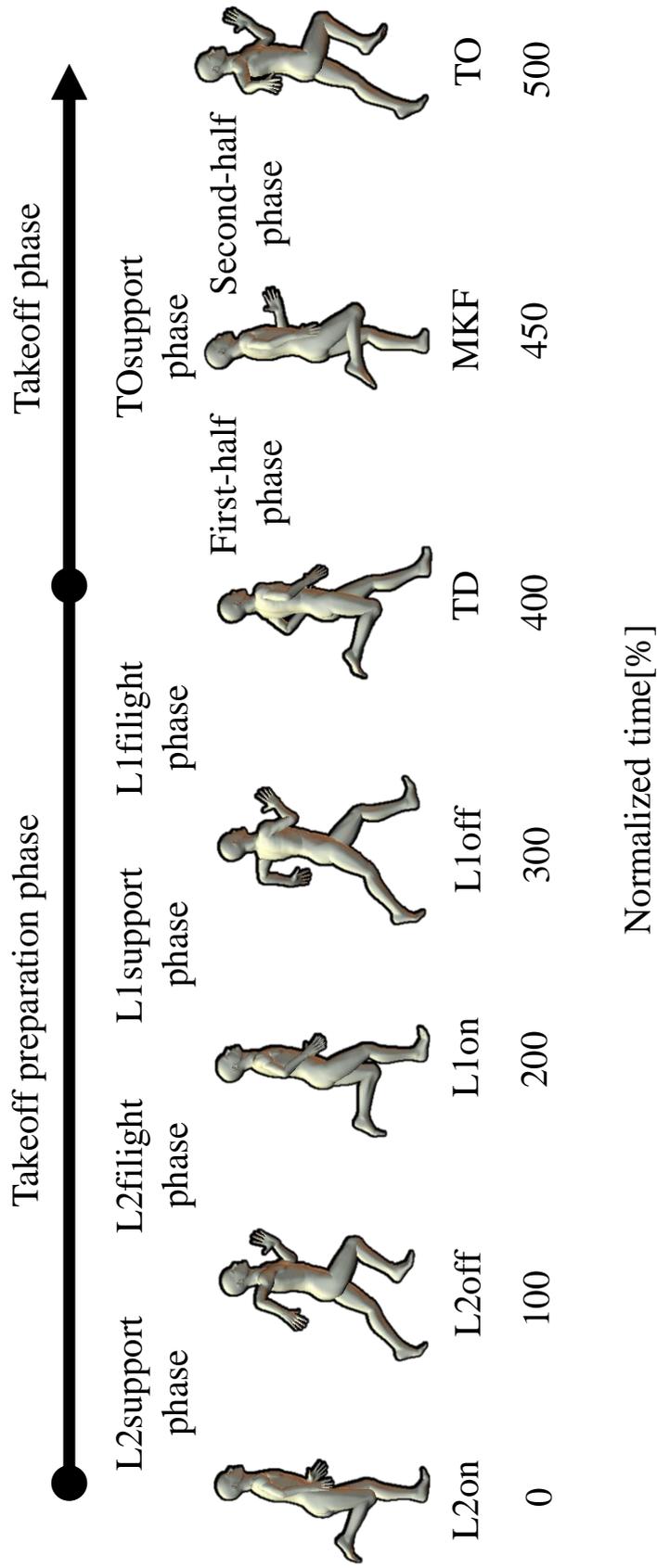


Figure 3-3 The motion phases from the second last stride to the takeoff.

した (Figure 3-4). すなわち, 各動作局面の経過時間で規格化した分析対象者の身体各部分の 3 次元座標値をもとにして, 以下の式で示すように作成した.

$$\mathbf{r}_{i,j} = \mathbf{R}_{i,j} - \mathbf{R}_{rp,j} \quad (3-1)$$

$$\mathbf{nr}_{i,j} = \frac{\mathbf{r}_{i,j}}{H} \quad (3-2)$$

$$\bar{\mathbf{r}}_j = \frac{\sum_{j=1}^n \mathbf{nr}_{i,j}}{n} \quad (3-3)$$

$$\overline{\mathbf{R}}_{rp} = \frac{\sum_{j=1}^n \mathbf{R}_{rp,j}}{n} \quad (3-4)$$

$$\overline{\mathbf{R}}_i = \bar{\mathbf{r}}_i + \overline{\mathbf{R}}_{rp} \quad (3-5)$$

ここで,  $\mathbf{r}_{i,j}$  は身体重心座標  $rp$  に対する身体各部位  $i$  の相対座標 (式 3-1),  $\mathbf{nr}_{i,j}$  は分析対象者の身長  $H$  で規格化した相対座標 (式 3-2),  $\bar{\mathbf{r}}_j$  は平均相対座標 (式 3-3),  $\overline{\mathbf{R}}_{rp}$  は身体重心の平均座標 (式 3-4),  $\overline{\mathbf{R}}_i$  は規格化した身体各部位  $i$  の平均座標 (式 3-5) を示している.

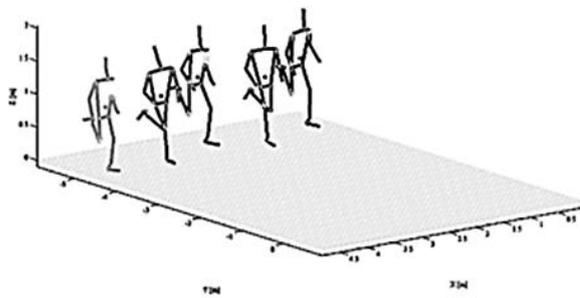
### 3.4 算出項目

本研究では, 踏切準備および踏切動作の 3 次元座標値を収集したが, 各項目の算出においては矢状面 (YZ 平面) の 2 次元座標値を用いた.

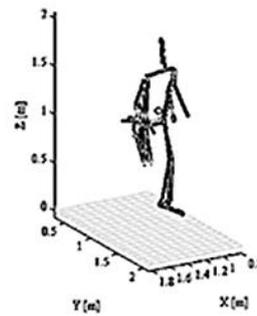
#### 3.4.1 身体重心の位置, 速度, 加速度

阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて, 分析対象者の身体計測点の 3 次元座標値と身体質量から部分 (14 セグメント) および全身の重心位置を算出した. 得られた部分および全身の重心位置を数値微分することで, 重心速度と重心加速度を算出した.

Step1: Collection of motion data for each subject



Step2: Normalization by time and subject's height



Step3: Averaging normalized coordinate data

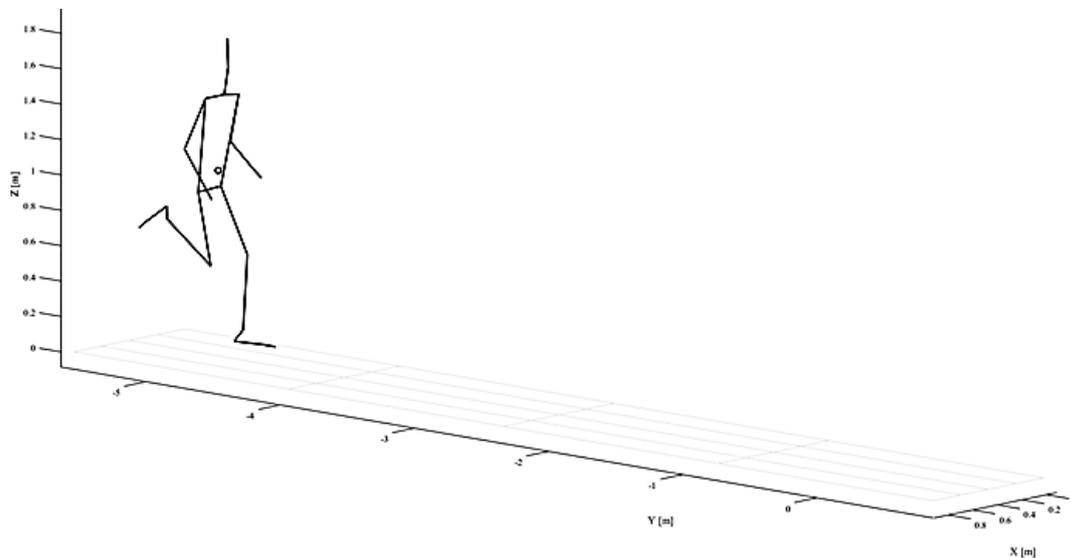


Figure 3-4 The process to produce the standard motion.

### 3.4.2 角度，角速度，角加速度

**Figure 3-5** は，踏込角，跳躍角，部分角度および関節角度の定義を示したものである．2次元矢状面（YZ 平面）における身体重心速度ベクトルと水平線のなす角を踏切足接地時では踏込角，踏切足離地時では跳躍角とした．

部分角度は，体幹，大腿および下腿角度を算出した．体幹角度は，左右股関節の midpoint から左右肩関節の midpoint を結ぶベクトルが鉛直上方へ向かうベクトルとなす角とした．大腿角度は股関節中心から膝関節中心を結ぶベクトルが，下腿角度は膝関節中心から足関節中心を結ぶベクトルが，それぞれ鉛直下方へ向かうベクトルとなす角とした．いずれも基準となる鉛直線から反時計まわりを正とし，正を後傾，負を前傾と定義した．

関節角度は，股，膝および足関節を算出し，それぞれ隣接する部分との相対角度とした．得られた部分および関節の角度を数値微分することで，角速度と角加速度を算出した．

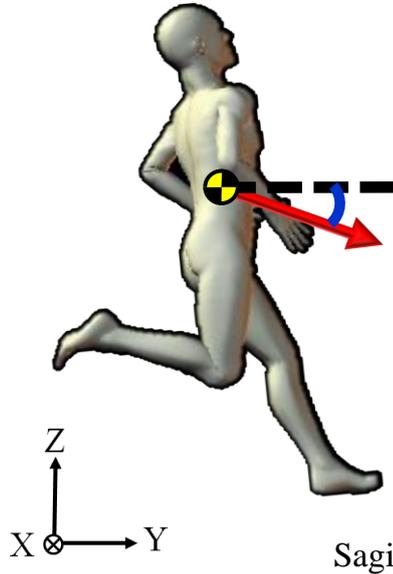
### 3.4.3 遊脚の関節トルク

2次元矢状面（YZ 平面）における逆動力学的手法を用いて，遊脚において足部から大腿に向かって運動方程式（3-6，3-7）を順に解くことで，足関節，膝関節および股関節の底背屈および屈曲伸展軸まわりの関節トルクを算出した．

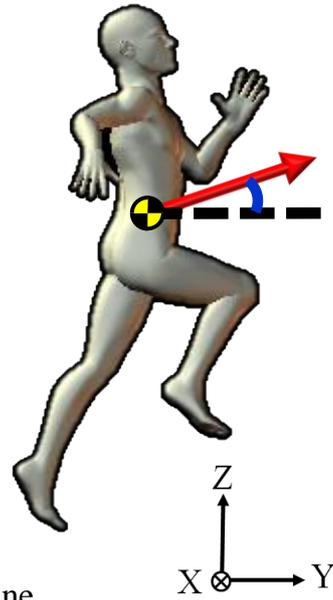
$$JF_d + JF_p + mg = ma \quad (3-6)$$

$$JT_d + JT_p + r_d \times JF_d + r_p \times JF_p = I \cdot \alpha \quad (3-7)$$

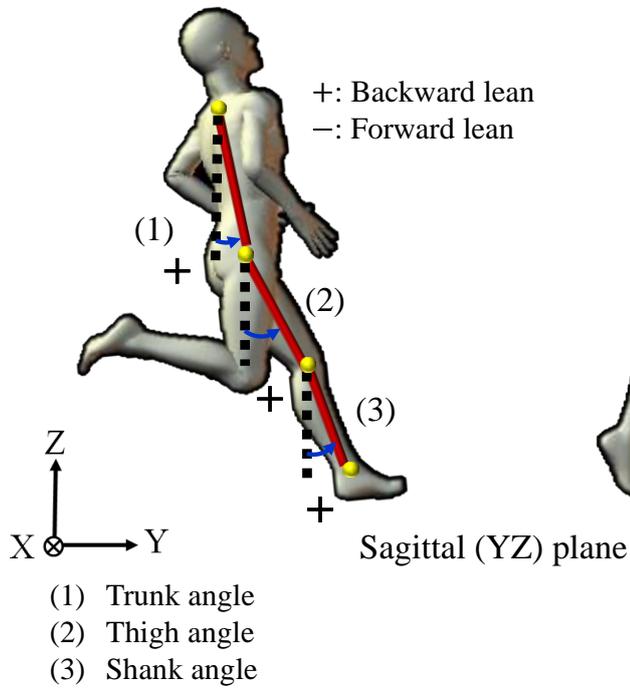
**【Touchdown angle】**



**【Takeoff angle】**



**【Segment angle】**



**【Joint angle】**

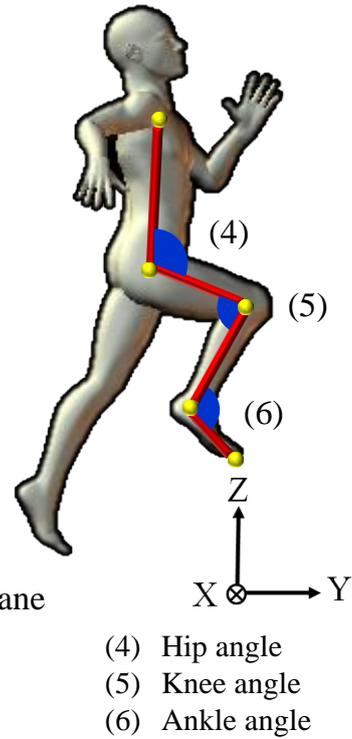


Figure 3-5 Definitions of the segment, joint, touchdown and takeoff angles.

ここで、 $m$ は部分質量、 $g$ は重力加速度、 $a$ は部分の重心加速度、 $JF_d$ は部分の遠位端に作用する関節力、 $JF_p$ は部分の近位端に作用する関節力、 $I$ は部分の慣性モーメント、 $\alpha$ は部分の角加速度、 $JT_d$ は部分の遠位端に作用する関節トルク、 $JT_p$ は部分の近位端に作用する関節トルク、 $r_d$ は部分重心から遠位端までのベクトル、 $r_p$ は部分重心から近位端までのベクトルをそれぞれ示している。なお、関節トルクは、伸展および底屈が正、屈曲および背屈が負となるように定義した。

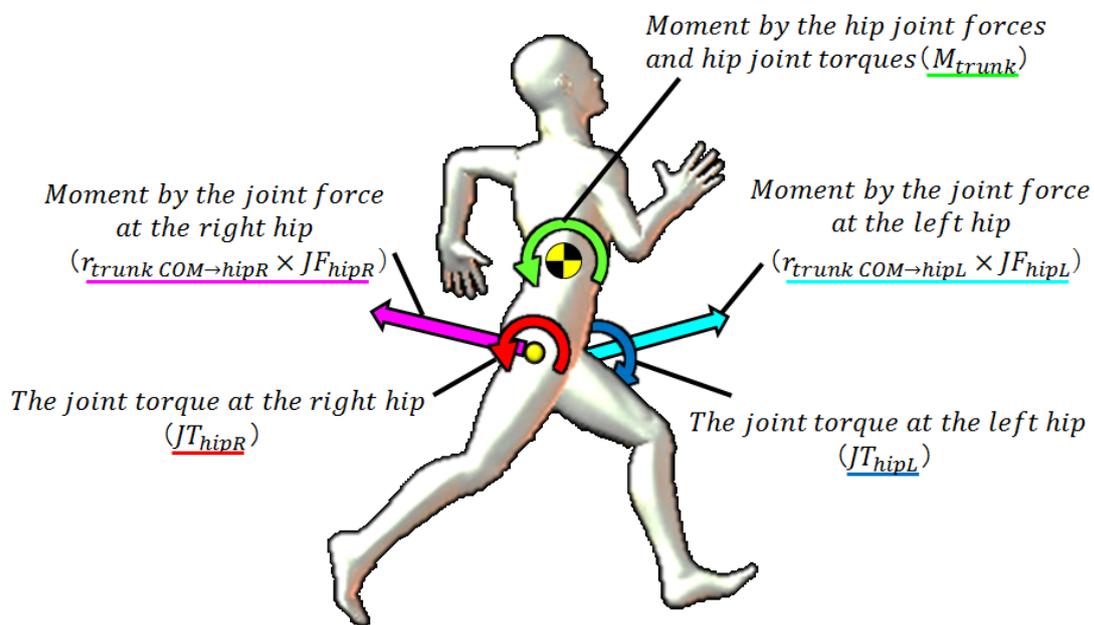
#### 3.4.4 体幹重心まわりの左右股関節力によるモーメントと股関節トルク

Figure 3-6 は、下肢から体幹に作用する左右股関節力によるモーメントと股関節トルクを示したものである。下肢から体幹に作用するモーメントは、左右股関節力によるモーメントと股関節トルクの合計値として、以下の式 (3-8) から算出した。

$$M_{trunk} = JT_{hipR} + JT_{hipL} + (r_{trunk\ COM \rightarrow hipR} \times JF_{hipR}) + (r_{trunk\ COM \rightarrow hipL} \times JF_{hipL}) \quad (3-8)$$

ここで、 $M_{trunk}$ は体幹重心まわりのモーメントの合計値、 $JT_{hipR}$ は右股関節トルク、 $JT_{hipL}$ は左股関節トルク、 $r_{trunk\ COM \rightarrow hipR}$ は体幹重心から右股関節までのベクトル、 $JF_{hipR}$ は右股関節力、 $r_{trunk\ COM \rightarrow hipL}$ は体幹重心から左股関節までのベクトル、 $JF_{hipL}$ は左股関節力をそれぞれ示している。反時計まわり（後方回転方向）が正、時計まわり（前方回転方向）が負となるように定義した。なお、上肢や頭部から体幹に作用するモーメントに関しては、体幹に対する影響が下肢に比べて小さいと推察されるために割愛した。

$$\underline{M_{trunk}} = \underline{JT_{hipR}} + \underline{JT_{hipL}} + (\underline{r_{trunk\ COM \rightarrow hipR}} \times \underline{JF_{hipR}}) + (\underline{r_{trunk\ COM \rightarrow hipL}} \times \underline{JF_{hipL}})$$



**Figure 3-6** Definition of the moments about the trunk center of gravity by the hip joint

forces and hip joint torques.

### 3.4.5 各歩の支持期における水平および鉛直方向の平均力

各歩の支持期における水平および鉛直方向の平均力は、Hay and Miller (1985) を参考に、

以下の式 (3-9, 3-10) から算出した。

$$AF_y = m \cdot \left\{ \frac{(\dot{y}_{off} - \dot{y}_{on})}{t} \right\} \quad (3-9)$$

$$AF_z = m \cdot \left\{ \frac{(\dot{z}_{off} - \dot{z}_{on})}{t} + g \right\} \quad (3-10)$$

ここで、 $AF_y$  と  $AF_z$  は平均力ベクトルの水平および鉛直成分、 $\dot{y}_{on}$ 、 $\dot{y}_{off}$ 、 $\dot{z}_{on}$ 、 $\dot{z}_{off}$  は接地時 (on) および離地時 (off) の身体重心の水平および鉛直速度、 $t$  は支持時間、 $g$  は重力加速度、 $m$  は身体質量をそれぞれ表している。また、平均力ベクトルと鉛直線とのなす角を平均力角度と定義した。平均力角度は、前方向が正、後方向が負となるように定義した。

## 4. 世界および日本一流男子走幅跳選手における踏切準備および

### 踏切動作のバイオメカニクス的特徴（研究課題 1）

#### 4.1 目的

走幅跳選手は、助走局面で獲得した助走スピード（身体重心の水平速度）をなるべく維持しながら、大きな鉛直速度をに変換する踏切技術（Hay, 1993 ; Koyama et al., 2006）に加え、助走スピードをなるべく維持しながら、身体重心高を低くすることや身体の後傾姿勢をつくるなどの踏切準備技術（Lees et al., 1993, 1994）を身に付ける必要がある。これまで、一流走幅跳選手の動作的特徴を事例的に検討した研究（Hay et al., 1986 ; 深代ら, 1994, 阿江ら, 1999）や、学生走幅跳選手の成功試技と失敗試技を比較し、成功試技の動作的特徴を明らかにした研究（森長ら, 2003）などがあるが、未熟練者が目標とすべき踏切準備および踏切動作のパターン、すなわち、動作モデルなどの視覚的な情報とともに提示することができていないと考えられる。走幅跳選手が身に付けるべき基本的な踏切準備および踏切動作を指導することを考えると、これまでの先行研究で得た知見を援用しながらも具体的な動作モデルを視覚的に準備しておくことが必要である。その動作モデルとして、一流選手の典型例のフォームを用いることはあるが、これらにはモデルとした選手特有の癖や身体的特徴が色濃く反映されていることが多く、指導する選手の技術を評価することや技術練習の動作モデルとして用いることには不適切な場合がある（Ae et al., 2007）。

このような問題を解決する 1 つの方法として、Ae et al. (2007) や Murata et al. (2008) は、複数の熟練者から平均動作（標準動作モデル）を作成し、それをを用いてスポーツ動作をバイオメカニクスの的に評価する手法を提案している。この手法を走幅跳に援用し、世界および日本一流走幅跳選手の踏切準備および踏切動作の特徴を視覚的に示せる動作モデルを作成することができれば、走幅跳の指導現場に役立つ基礎的知見になり得ると考えられる。

本章の目的は、世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をバイオメカニクスの的に比較し、その動作的特徴の相違を明らかにするとともに、走幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得ることである。

## 4.2 方法

データ収集、データ処理、算出項目、局面定義および標準動作モデルの作成方法は、第 3 章の研究方法で述べた通りである。そこで、ここでは、本章（第 4 章）に関する事項のみを述べる。

### 4.2.1 分析対象者

分析対象者は、第 3 章の研究方法で述べた世界および日本一流選手 29 名のうち、2007 年 IAAF 世界陸上競技選手権大会（大阪長居スタジアム，大阪）の男子走幅跳決勝に進出した世界一流男子選手 9 名（World-class athletes, 以下，W 群），および 2009 年 JAAF 日本陸上

競技選手権大会（広島広域公園陸上競技場，広島）の男子走幅跳に出場した日本一流男子選手 10 名（Japanese elite athletes, 以下, J 群）であった。

#### 4.2.2 統計処理

規格化時間 1% ごとに各測定項目の平均値と標準偏差を算出し，ノンパラメトリック手法である Mann-Whitney の U 検定を用いて，W 群と J 群の間の有意差を検定した。また，測定項目間の相関関係を検討するために，Pearson の積率相関係数を用いた。なお，すべての検定において有意水準は 5% とした。

### 4.3 結果

#### 4.3.1 身体的特性と跳躍距離

**Table 4-1** は，両群の身長，体重，自己ベスト記録および分析に用いた公式記録を平均値および標準偏差で示したものである。

身長では W 群は J 群よりも有意に大きかったが ( $p < 0.01$ )，体重では両群間に有意差はみられなかった。

自己ベスト記録と分析に用いた公式記録では，それぞれ W 群は J 群よりも有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。

**Table 4-1 Physique and Jumping record of the subjects.**

Subjects	Body height (m)	Body weight (kg)	Personal best (m)	Official distance (m)
World-class athletes (n=9)	1.85 ± 0.07	74.2 ± 6.8	8.40 ± 0.16	8.21 ± 0.21
Japanese elite athletes (n=10)	1.76 ± 0.04	68.6 ± 4.7	7.87 ± 0.11	7.75 ± 0.17
Difference	**	n.s.	**	**

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

#### 4.3.2 身体重心速度，踏込角および跳躍角

**Table 4-2** は，W 群および J 群の身体重心速度に関する変数を平均値および標準偏差で示したものである．各歩の接地時および離地時における身体重心水平速度をみると，L2on 時から TO 時にわたって W 群は J 群よりも 0.25～0.35 m/s 有意に大きかった．また，各歩の支持期における身体重心水平速度の変化量では，両群間に有意差はみられなかったが，いずれも W 群は J 群よりも身体重心の水平速度の減少量が小さい傾向にあった．

各歩の接地時および離地時における身体重心鉛直速度をみると，L2off 時では W 群は J 群よりも有意に鉛直上向きの身体重心鉛直速度が小さく ( $p < 0.01$ )，TD 時では W 群は J 群よりも有意に鉛直下向きの身体重心鉛直速度が小さかった ( $p < 0.01$ )．

さらに，TD 時における踏込角では W 群は J 群よりも有意に小さく ( $p < 0.01$ )，L2off 時における跳躍角では W 群は J 群よりも有意に小さかった ( $p < 0.01$ )．

#### 4.3.3 標準動作モデルからみた動作的特徴

**Figure 4-1** は，W 群と J 群における踏切準備および踏切動作の標準動作モデルをスティックで示したものである．なお，左脚（踏切脚）を実線で，右脚（振上脚）を破線で示した．

L2on 時 (**Figure 4-1** の **No. 1**) では，W 群では体幹が前傾していたのに対し，J 群では直立に近かった．**No. 2～3** では，W 群では右脚（遊脚）下腿の前傾が J 群よりも小さく，J 群では左脚（支持脚）大腿の前傾が W 群よりも大きかった．**No. 4～5** では，W 群では左脚足部

Table 4-2 Jumping distance and COM parameters for the World and Japan groups.

	L2		L1		TO		
	on	off	on	off	TD	TO	
Horizontal COM velocity (m/s)	World	10.61 ± 0.28	10.59 ± 0.37	10.61 ± 0.19	10.47 ± 0.27	10.30 ± 0.29	8.85 ± 0.33
	Japan	10.37 ± 0.26	10.27 ± 0.27	10.31 ± 0.25	10.13 ± 0.22	10.05 ± 0.22	8.57 ± 0.32
	Difference	*	*	*	*	*	*
Horizontal COM velocity during the support phase (m/s)	World	-0.03 ± 0.16		-0.14 ± 0.16		-1.46 ± 0.21	
	Japan	-0.09 ± 0.19		-0.17 ± 0.28		-1.48 ± 0.23	
	Difference	<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>	
Vertical COM velocity (m/s)	World	-0.45 ± 0.14	0.08 ± 0.25	-0.92 ± 0.15	0.07 ± 0.22	-0.10 ± 0.21	3.45 ± 0.29
	Japan	-0.52 ± 0.14	0.34 ± 0.13	-0.91 ± 0.14	0.04 ± 0.20	-0.41 ± 0.14	3.59 ± 0.18
	Difference	<i>n.s.</i>	*	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	*	<i>n.s.</i>
Vertical COM velocity during the support phase (m/s)	World	0.53 ± 0.36		0.99 ± 0.29		3.55 ± 0.31	
	Japan	0.86 ± 0.26		0.96 ± 0.31		4.00 ± 0.24	
	Difference	*		<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>	
COM angle at the touchdown (deg)	World	-2.4 ± 0.8		-5.0 ± 0.8		-0.6 ± 1.2	
	Japan	-2.9 ± 0.8		-5.1 ± 0.8		-2.3 ± 0.8	
	Difference	<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>		*	*
COM angle at the toe-off (deg)	World		0.5 ± 1.4		0.4 ± 1.2		21.3 ± 2.1
	Japan		1.9 ± 0.7		0.3 ± 1.1		22.8 ± 1.6
	Difference		*	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>

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

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

World group (n = 9, 8.21 ± 0.21 m)



Japan group (n = 10, 7.75 ± 0.17 m)

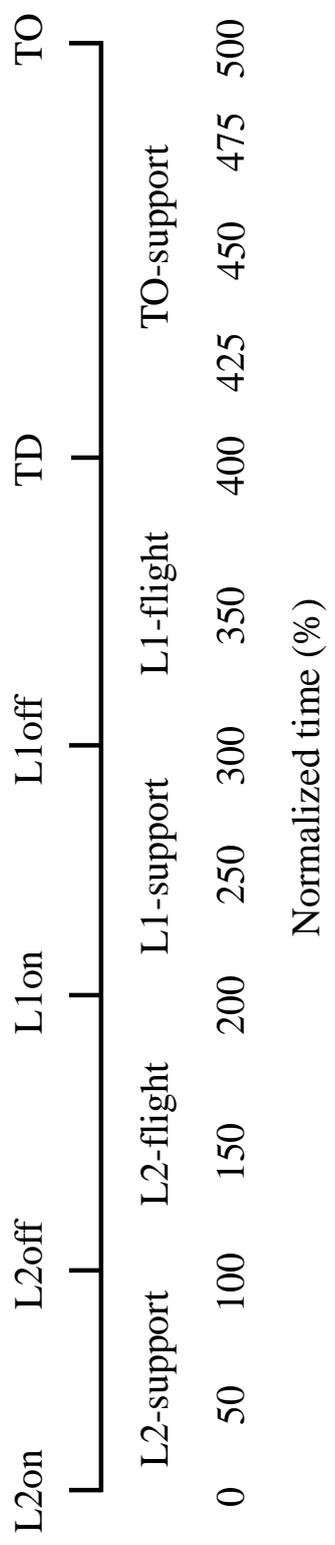
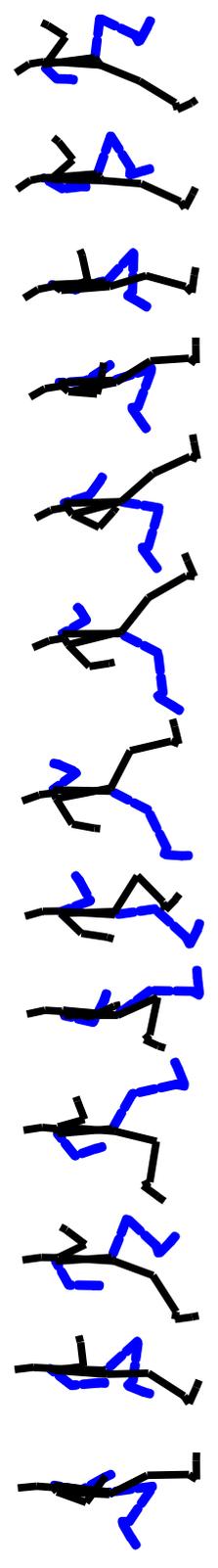


Figure 4-1 Stick pictures for the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phase.

がより低い位置を通過していたが、J群では左脚膝関節を大きく屈曲し、左脚足部がより高い位置を通過していた。No. 6~7では、W群では体幹の前傾が維持されていたのに対し、J群では体幹が前傾から後傾へと切り替わっていた。No. 8~10では、W群では体幹を直立近くで維持していたのに対し、J群では頭部と体幹の後傾、膝関節の伸展をより大きくしていた。No. 11~13では、先述したように両群間の跳躍角に有意差はみられなかったが、W群は体幹をやや前傾してより前方へ跳び出す踏切（跳躍角、 $21.3 \pm 2.1$  deg）を、J群は体幹をやや後傾してより上方へ跳び出す踏切（跳躍角、 $22.8 \pm 1.6$  deg）をしていた。

#### 4.3.4 股関節および膝関節角度の時系列変化

Figure 4-2はW群およびJ群の左右股関節角度、Figure 4-3は左右膝関節角度の時系列変化を平均値で示したものである。図中の実線はW群、破線はJ群の関節角度の変化を示している。また、両群間に統計的な有意差（ $p < 0.05$ ）がみられた時点には、図上方に丸印で示した。

右股関節では、L2支持期（L2on時、W群、 $154.5 \pm 11.9$  deg；J群、 $166.2 \pm 4.1$  deg； $p < 0.05$ ）、L2滞空期（L1on時、W群、 $129.3 \pm 2.8$  deg；J群、 $136.2 \pm 5.2$  deg； $p < 0.01$ ）およびL1滞空期（L1off時、W群、 $205.5 \pm 4.5$  deg；J群、 $212.5 \pm 3.1$  deg； $p < 0.01$ ）を通して、W群はJ群よりも有意に屈曲していた。

左股関節では、L2滞空期（L1on時、W群、 $141.0 \pm 14.5$  deg；J群、 $154.4 \pm 11.5$  deg； $p < 0.05$ ）

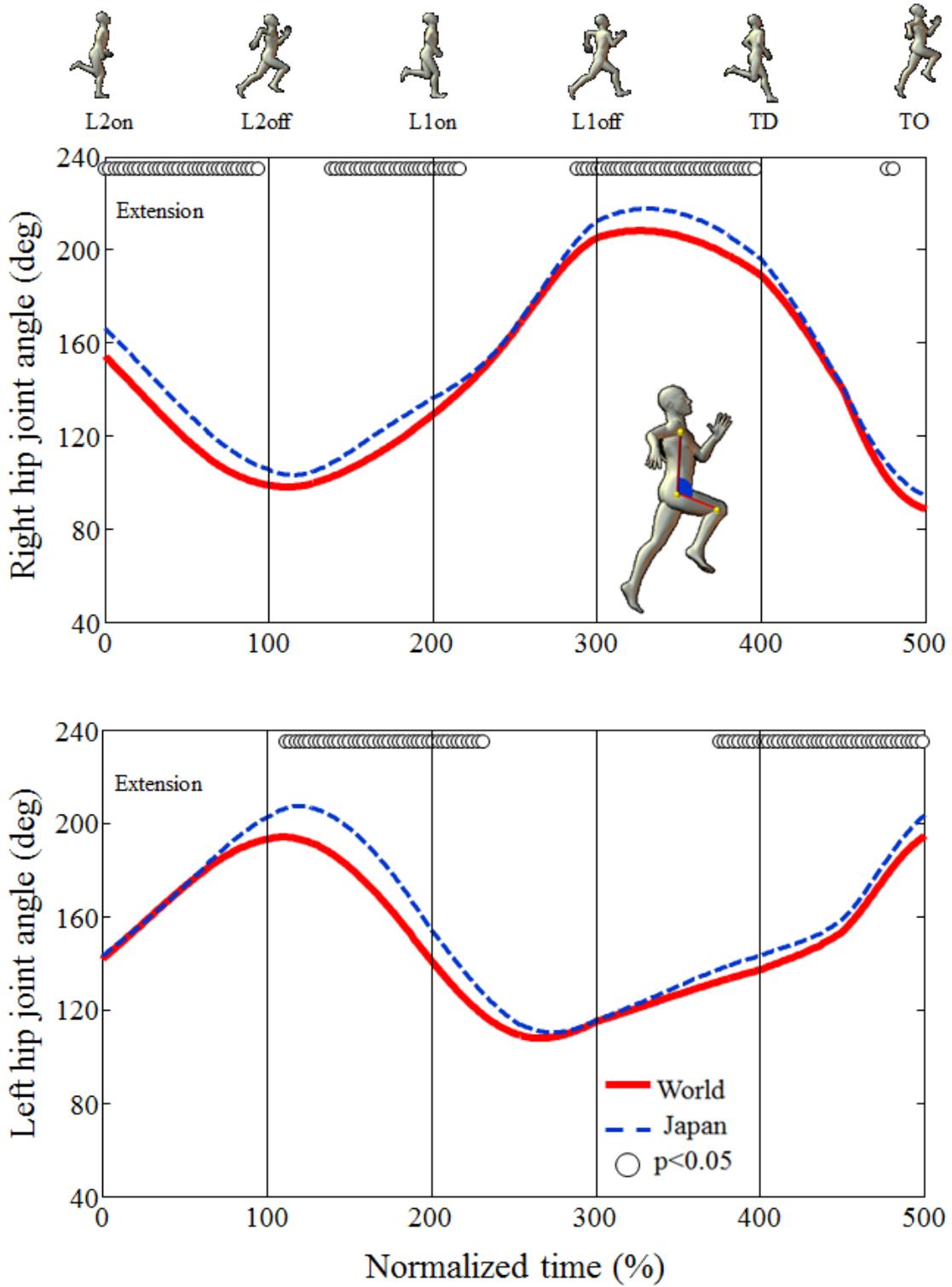


Figure 4-2 Changes in the hip joint angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases.

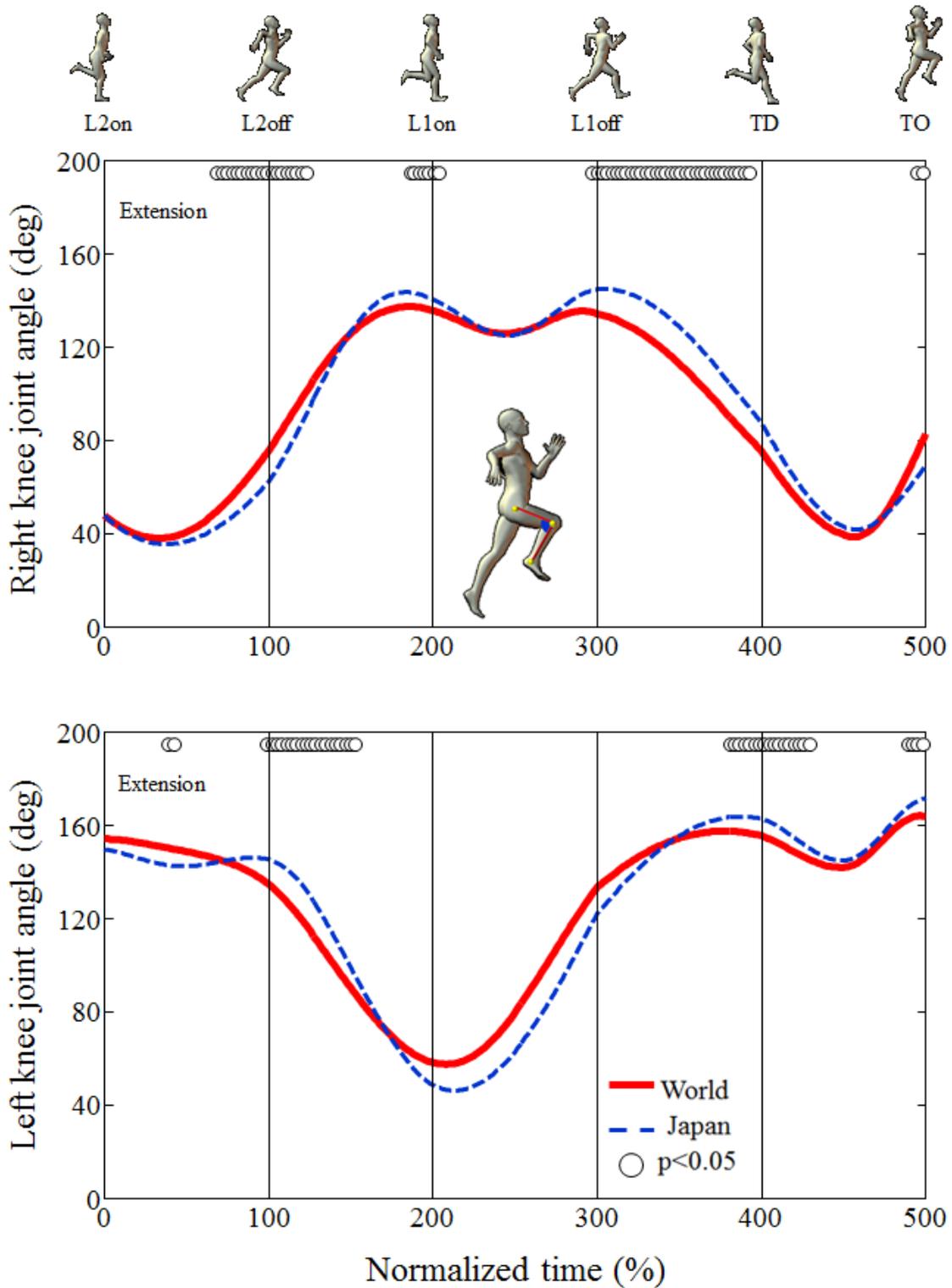


Figure 4-3 Changes in the knee joint angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases.

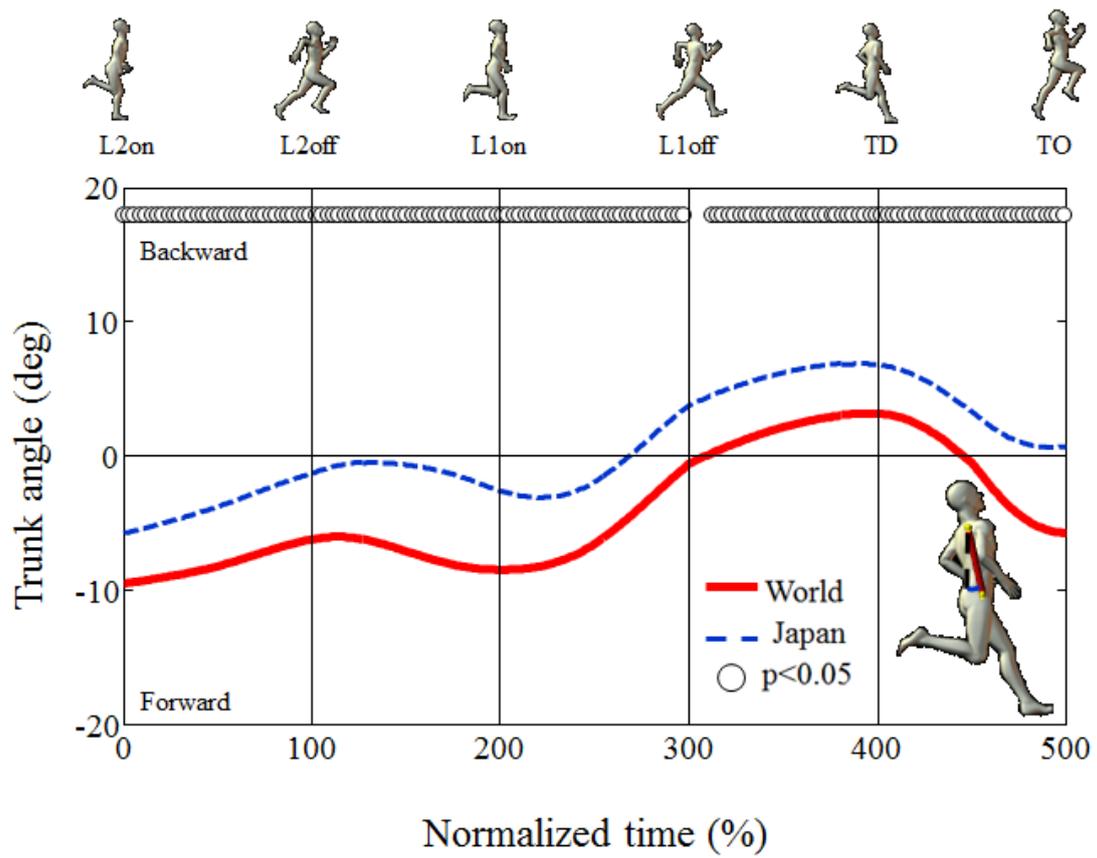
および TO 支持期 (TD 時, W 群,  $137.2 \pm 4.3$  deg ; J 群,  $143.3 \pm 4.1$  deg ;  $p < 0.05$ ) を通して, W 群は J 群よりも有意に屈曲していた。

右膝関節では, L2off 時において W 群は J 群よりも有意に伸展しており (L2off 時, W 群,  $75.8 \pm 11.8$  deg ; J 群,  $62.7 \pm 7.4$  deg ;  $p < 0.01$ ), L1on 時 (W 群,  $135.5 \pm 6.0$  deg ; J 群,  $140.6 \pm 4.1$  deg ;  $p < 0.05$ ) および L1off 時 (W 群,  $134.4 \pm 9.4$  deg ; J 群,  $144.7 \pm 5.8$  deg ;  $p < 0.05$ ) において W 群は有意に小さく (屈曲し), L1 支持期における変化量も小さかった。

左膝関節では, L2on 時において両群ともに有意な差はなく, 同程度の膝関節角度で接地していた (L2on 時, W 群,  $153.9 \pm 8.1$  deg ; J 群,  $150.1 \pm 4.6$  deg ; *n.s.*)。その後, W 群では L2off 時まで徐々に屈曲していたが, J 群では 50% 時に向けて屈曲し, L2off 時に向けて有意に伸展していた (L2off 時, W 群,  $134.5 \pm 10.1$  deg ; J 群,  $145.5 \pm 12.9$  deg ;  $p < 0.05$ )。TO 支持期においては, J 群は有意に伸展位で接地し (TD 時, W 群,  $155.7 \pm 7.1$  deg ; J 群,  $162.8 \pm 2.7$  deg ;  $p < 0.01$ ), 支持期中盤までに屈曲し, 離地に向けて有意に伸展していた (TO 時, W 群,  $163.8 \pm 4.4$  deg ; J 群,  $171.6 \pm 2.6$  deg ;  $p < 0.01$ )。

#### 4.3.5 体幹, 大腿および下腿角度の時系列変化

**Figure 4-4** には W 群および J 群の体幹角度, **Figure 4-5** には左右大腿角度, **Figure 4-6** には左右下腿角度の時系列変化を平均値で示した。なお, いずれの角度も基準となる鉛直線から反時計まわりを正とし, 正を後傾, 負を前傾と定義した。



**Figure 4-4** Changes in the trunk angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases.

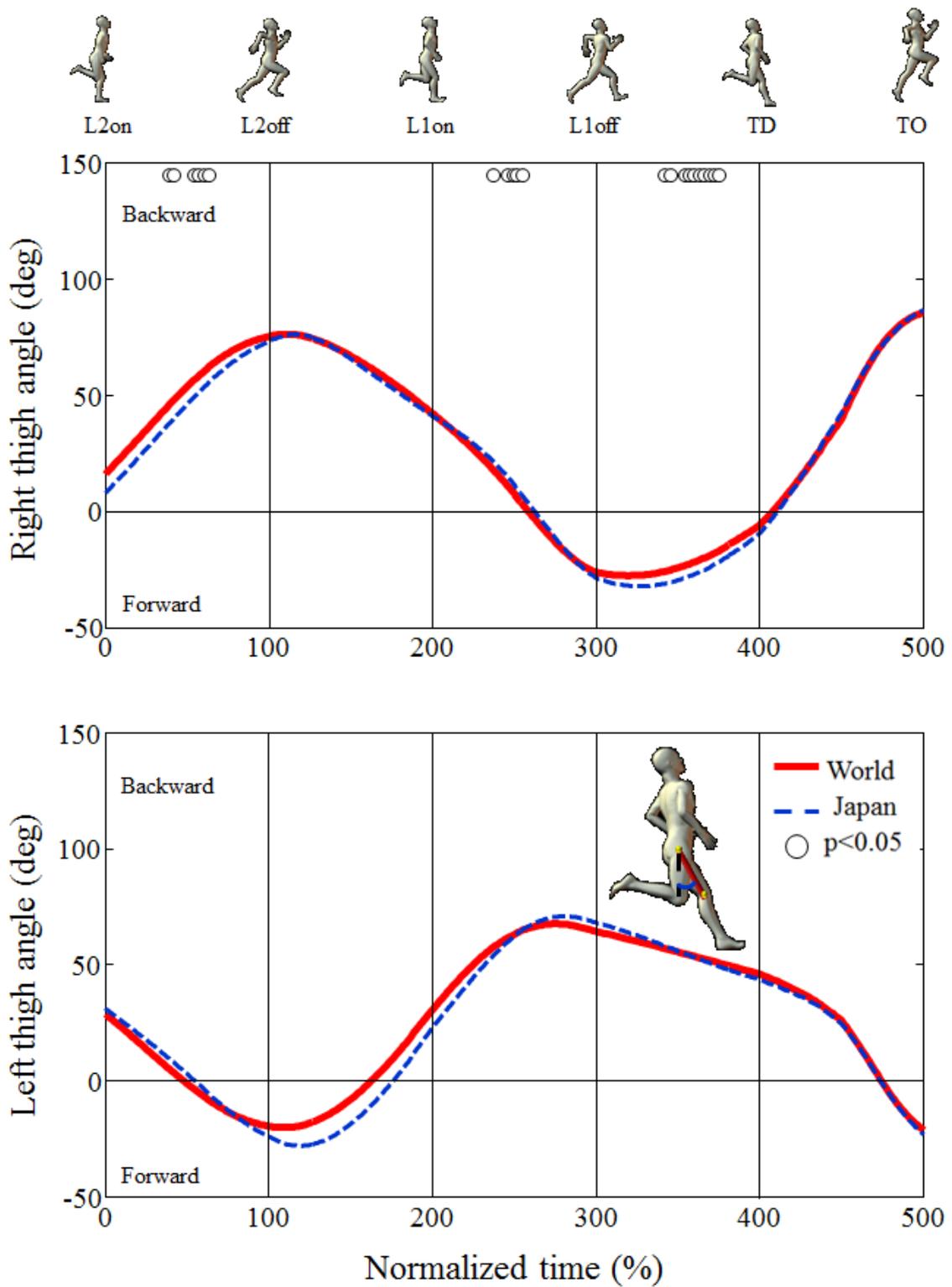


Figure 4-5 Changes in the thigh angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases.

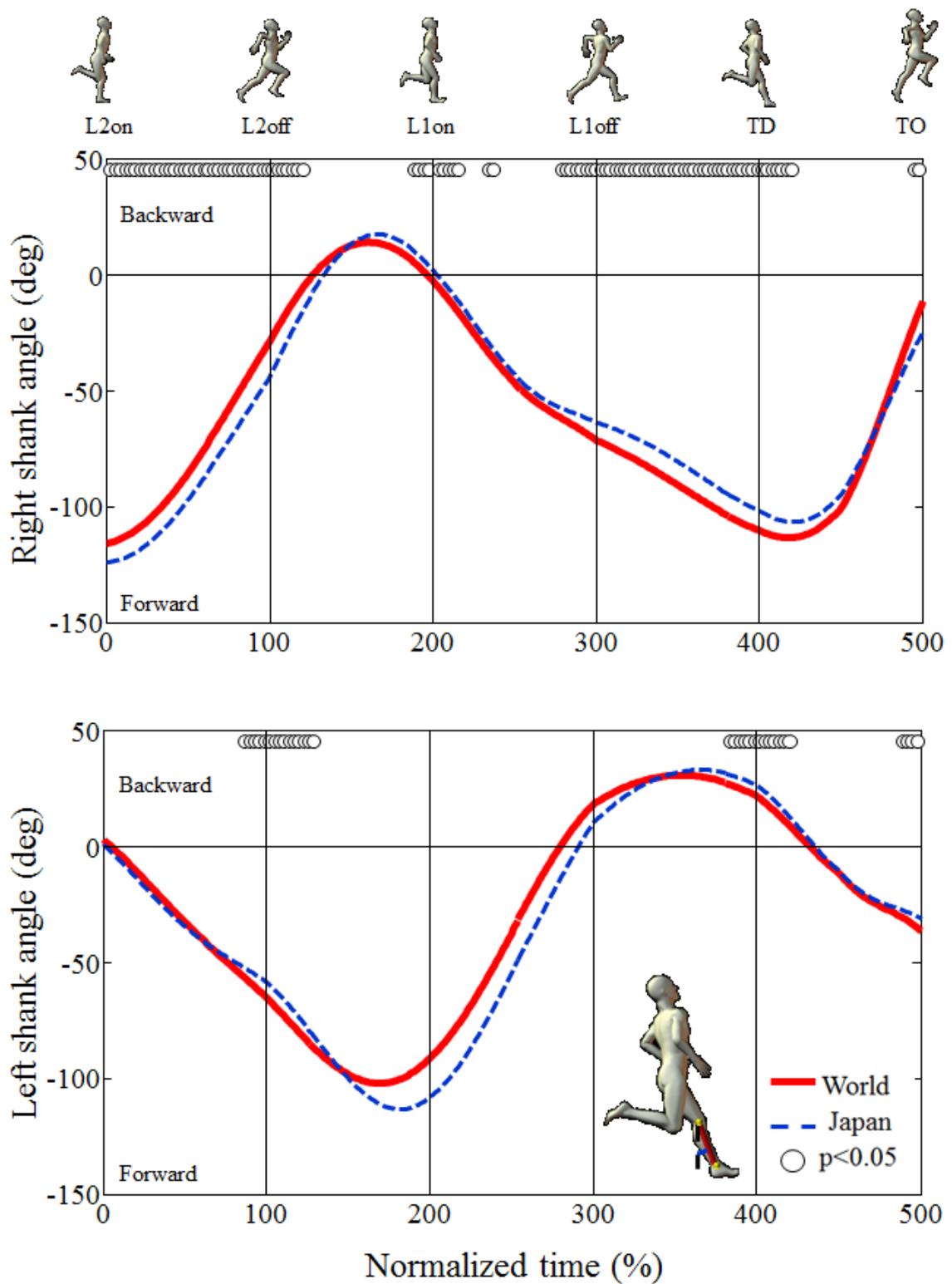


Figure 4-6 Changes in the shank angles of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases.

体幹では、いずれの時点においても、両群間に有意差がみられた。J群はL2on時ではW群よりも有意に前傾が小さく(L2on時, W群,  $-9.5 \pm 3.1$  deg; J群,  $-5.8 \pm 2.9$  deg;  $p < 0.05$ ), L1off時ではW群よりも有意に後傾が大きく(L1off時, W群,  $-0.5 \pm 4.5$  deg; J群,  $3.8 \pm 3.7$  deg;  $p < 0.05$ ), 前傾から後傾に切り替わるタイミングも250%時付近でW群よりも早かった。さらに、TO時ではW群はやや前傾していたのに対し、J群はわずかに後傾していた(TO時, W群,  $-5.7 \pm 4.7$  deg; J群,  $0.7 \pm 4.7$  deg;  $p < 0.05$ )。

右大腿では、L2支持期中盤においてW群はJ群よりも有意に後傾が大きく(47%時, W群,  $51.6 \pm 8.6$  deg; J群,  $44.0 \pm 5.5$  deg;  $p < 0.05$ ), L1支持期中盤においてW群はJ群よりも有意に後傾が小さく(250%時, W群,  $7.4 \pm 3.9$  deg; J群,  $11.4 \pm 3.0$  deg;  $p < 0.05$ ), L1滞空期中盤においてW群はJ群よりも有意に前傾が小さかった(350%時, W群,  $-23.1 \pm 5.9$  deg; J群,  $-28.6 \pm 4.0$  deg;  $p < 0.05$ )。

左大腿では、いずれの時点においても、両群間で有意差はみられなかった。L2on時では両群間に有意差はみられなかったが(L2on時, W群,  $28.9 \pm 5.4$  deg; J群,  $31.1 \pm 4.9$  deg; *n.s.*), 50%時ではW群はわずかに前傾していたのに対し、J群は後傾する傾向にあった(50%時, W群,  $-1.5 \pm 5.5$  deg; J群,  $2.9 \pm 6.7$  deg; *n.s.*)。

右下腿では、L2支持期を通してW群はJ群よりも有意に下腿の前傾が小さかった(L2off時, W群,  $-29.2 \pm 12.4$  deg; J群,  $-44.3 \pm 7.9$  deg;  $p < 0.05$ ) また、L1on時付近(L1on時, W群,  $-2.4 \pm 4.7$  deg; J群,  $1.8 \pm 3.2$  deg;  $p < 0.05$ ) およびL1滞空期(TD時, W群,  $-110.4$

$\pm 11.9 \text{ deg}$  ; J 群,  $-102.1 \pm 8.2 \text{ deg}$  ;  $p < 0.05$ ) において, W 群は J 群よりも有意に前傾が大きく, TO 時において W 群は J 群よりも有意に前傾が小さかった (TO 時, W 群,  $-11.7 \pm 9.1 \text{ deg}$  ; J 群,  $-24.5 \pm 8.7 \text{ deg}$  ;  $p < 0.05$ ).

左下腿では, L2off 時において W 群は J 群よりも有意に前傾が大きかった (L2off 時, W 群,  $-65.3 \pm 4.3 \text{ deg}$  ; J 群,  $-58.3 \pm 4.1 \text{ deg}$  ;  $p < 0.05$ ) また, TD 時において W 群は J 群よりも有意に後傾が小さく (TD 時, W 群,  $21.6 \pm 5.9 \text{ deg}$  ; J 群,  $26.4 \pm 3.4 \text{ deg}$  ;  $p < 0.05$ ), TO 時において W 群は J 群よりも有意に前傾が大きかった (TO 時, W 群,  $-37.0 \pm 4.6 \text{ deg}$  ; J 群,  $-31.4 \pm 3.8 \text{ deg}$  ;  $p < 0.05$ ).

#### 4.3.6 体幹重心まわりに作用する下肢キネティクスの時系列変化

**Figure 4-7** は, W 群および J 群の体幹重心まわりに作用する左右股関節力によるモーメントと股関節トルクの時系列変化を平均値で示したものである.

L2off 時において, W 群は J 群よりも左股関節の屈曲トルク (L2off 時, W 群,  $-3.7 \pm 0.6 \text{ Nm/kg}$  ; J 群,  $-2.9 \pm 0.6 \text{ Nm/kg}$  ;  $p < 0.05$ ) と右股関節力によるモーメント (L2off 時, W 群,  $1.5 \pm 0.3 \text{ Nm/kg}$  ; J 群,  $1.1 \pm 0.4 \text{ Nm/kg}$  ;  $p < 0.05$ ) の発揮が有意に大きかった. 一方, 右股関節の伸展トルク (L2off 時, W 群,  $2.2 \pm 0.7 \text{ Nm/kg}$  ; J 群,  $2.0 \pm 0.8 \text{ Nm/kg}$  ; *n.s.*), 左股関節力によるモーメント (L2off 時, W 群,  $2.9 \pm 0.3 \text{ Nm/kg}$  ; J 群,  $-2.6 \pm 0.7 \text{ Nm/kg}$  ; *n.s.*), の発揮にはそれぞれ有意差はみられなかった.

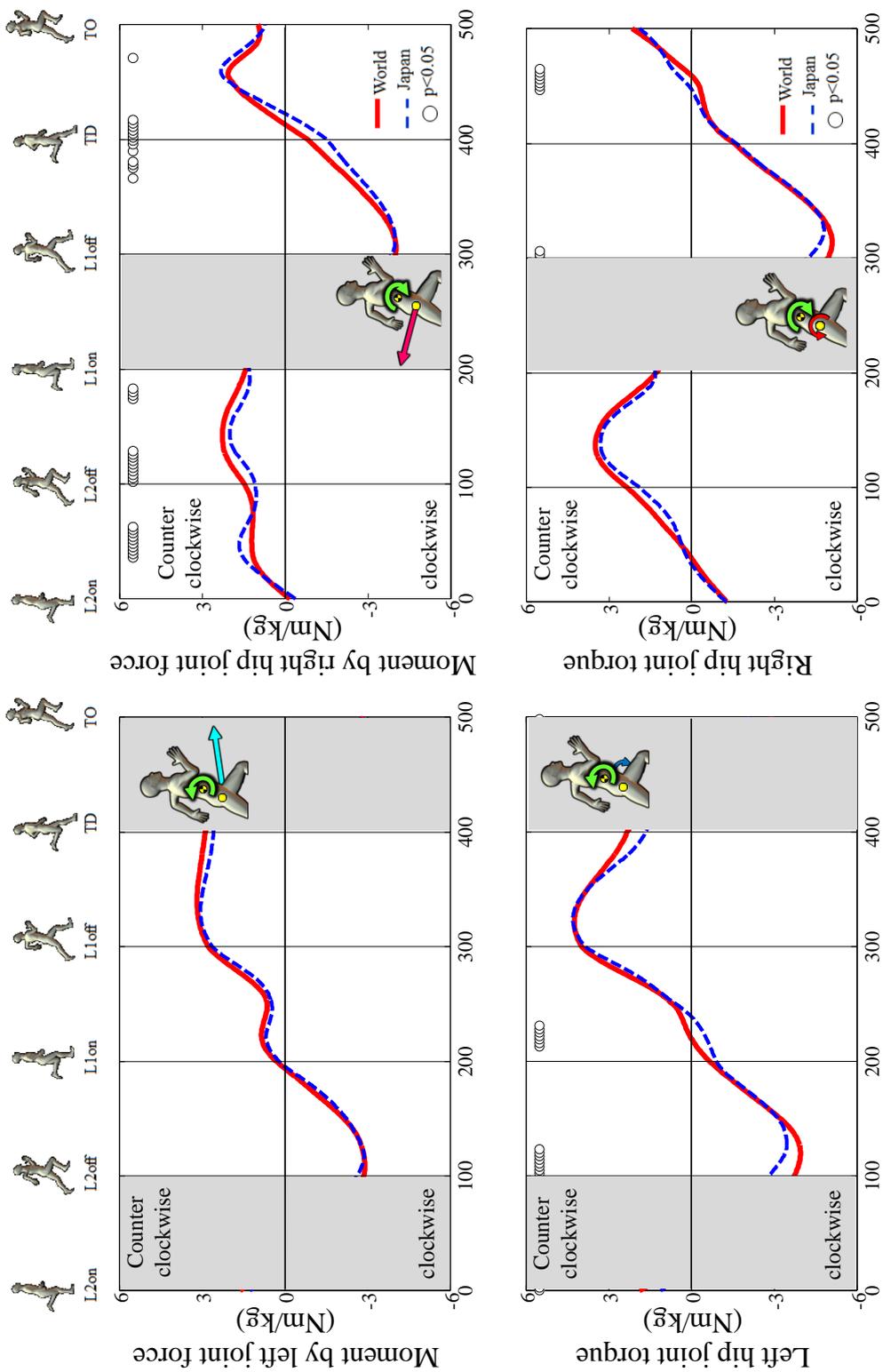


Figure 4-7 Changes in the moments by hip joint forces and hip joint torques of the World and Japan groups during the takeoff preparation and takeoff phases.

L1off 時において、W 群は J 群よりも右股関節の屈曲トルク (L1off 時, W 群,  $-5.0 \pm 0.6$  Nm/kg ; J 群,  $-4.2 \pm 0.4$  Nm/kg ;  $p < 0.05$ ) の発揮が有意に大きかった。一方、左股関節の伸展トルク (L1off 時, W 群,  $4.1 \pm 0.6$  Nm/kg ; J 群,  $4.0 \pm 0.7$  Nm/kg ; *n.s.*)、右股関節力によるモーメント (L2off 時, W 群,  $1.5 \pm 0.3$  Nm/kg ; J 群,  $1.1 \pm 0.4$  Nm/kg ; *n.s.*)、左股関節力によるモーメント (L2off 時, W 群,  $2.9 \pm 0.3$  Nm/kg ; J 群,  $-2.6 \pm 0.7$  Nm/kg ; *n.s.*) の発揮にはそれぞれ有意差はみられなかった。

#### 4.3.7 踏切準備および踏切中における各測定項目間の相関関係

**Table 4-3** は、跳躍距離と身体重心速度に関する項目間の相関関係を示したものである。跳躍距離と L2off 時 ( $r = 0.73$ ,  $p < 0.05$ )、L1off 時 ( $r = 0.71$ ,  $p < 0.05$ )、TO 時 ( $r = 0.56$ ,  $p < 0.05$ ) の身体重心水平速度との間に高い相関関係が認められた。一方、跳躍距離と鉛直初速度 ( $r = 0.00$ , *n.s.*)、跳躍角 ( $r = -0.22$ , *n.s.*) との間には有意な相関関係は認められなかった。

水平初速度は、踏切準備局面中の各歩のイベント時における身体重心水平速度 ( $r = 0.75 \sim 0.82$ ,  $p < 0.05$ ) との間に有意な正の相関関係が、鉛直初速度 ( $r = -0.63$ ,  $p < 0.05$ ) との間に有意な負の相関関係が認められた。鉛直初速度は、踏切中の水平速度の減少量 ( $r = -0.61$ ,  $p < 0.05$ ) と踏切中の鉛直速度の増加量 ( $r = 0.76$ ,  $p < 0.05$ ) との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。

**Table 4-3 Correlations between COM velocities.**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Record	HV L2on	HV L2off	HV L1on	HV L1off	HV MKF	HV MKF	VV TD	VV TD	VV MKF	HV TO	VV TO	Angle TO	∠HV L2on_TD	∠HV TD_TO	∠VV TD_MKF	∠VV MKF_TO	∠VV TD_TO
1	1.00	<b>0.59</b>	<b>0.73</b>	<b>0.66</b>	<b>0.71</b>	<b>0.60</b>	0.40	<b>0.47</b>	0.25	<b>0.56</b>	0.00	-0.22	0.06	0.14	-0.09	-0.32	-0.26
2		1.00	<b>0.94</b>	<b>0.84</b>	<b>0.91</b>	<b>0.81</b>	0.19	<b>0.67</b>	0.15	<b>0.82</b>	-0.32	<b>-0.55</b>	-0.25	0.31	-0.01	<b>-0.56</b>	-0.33
3			1.00	<b>0.87</b>	<b>0.88</b>	<b>0.79</b>	0.17	<b>0.60</b>	0.22	<b>0.78</b>	-0.13	-0.40	-0.17	0.25	0.05	-0.44	-0.20
4				1.00	<b>0.75</b>	<b>0.73</b>	0.28	<b>0.61</b>	0.06	<b>0.75</b>	-0.29	<b>-0.50</b>	-0.11	0.29	-0.16	-0.41	-0.37
5					1.00	<b>0.86</b>	0.28	<b>0.70</b>	0.17	<b>0.78</b>	-0.31	<b>-0.53</b>	-0.02	0.17	-0.06	<b>-0.58</b>	-0.39
6						1.00	-0.05	<b>0.86</b>	-0.03	<b>0.81</b>	-0.33	<b>-0.56</b>	0.37	0.02	0.01	-0.34	-0.18
7							1.00	0.01	0.17	0.13	-0.17	-0.17	-0.39	0.30	<b>-0.59</b>	-0.42	<b>-0.77</b>
8								1.00	-0.40	<b>0.89</b>	-0.58	<b>-0.76</b>	0.35	0.36	-0.33	-0.15	-0.38
9									1.00	-0.29	0.67	<b>0.58</b>	-0.29	-0.44	<b>0.70</b>	<b>-0.53</b>	0.33
10										1.00	-0.63	<b>-0.84</b>	0.03	<b>0.61</b>	-0.33	-0.34	<b>-0.49</b>
11											1.00	<b>0.95</b>	-0.05	<b>-0.61</b>	<b>0.68</b>	0.27	<b>0.76</b>
12												1.00	-0.05	<b>-0.67</b>	<b>0.60</b>	0.33	<b>0.73</b>
13													1.00	-0.45	0.04	0.33	0.22
14														1.00	<b>-0.58</b>	-0.12	<b>-0.59</b>
15															1.00	-0.13	<b>0.83</b>
16																1.00	0.45
17																	1.00

$p < 0.05$

**Table 4-4** は、跳躍距離および身体重心速度と体幹角度に関する項目間の相関関係を示したものである。L2on 時から TO 時における体幹角度と跳躍距離との間に高い負の相関関係 ( $r = -0.68 \sim -0.38$ ) が認められた。L1on 時の体幹の後傾角と TD 時の水平速度 ( $r = -0.60$ ,  $p < 0.05$ ), 水平初速度 ( $r = -0.72$ ,  $p < 0.05$ ), 鉛直初速度 ( $r = 0.57$ ,  $p < 0.05$ ), 跳躍角 ( $r = 0.69$ ,  $p < 0.05$ ), 踏切中の鉛直速度の増加量 ( $r = 0.52$ ,  $p < 0.05$ ) との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。また、TD 時の体幹の後傾角と水平初速度 ( $r = -0.65$ ,  $p < 0.05$ ), 鉛直初速度 ( $r = 0.69$ ,  $p < 0.05$ ), 跳躍角 ( $r = 0.74$ ,  $p < 0.05$ ), 踏切中の水平速度の減少量 ( $r = -0.56$ ,  $p < 0.05$ ), 踏切中の鉛直速度の増加量 ( $r = 0.68$ ,  $p < 0.05$ ) との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。

**Table 4-5** は、跳躍距離および身体重心速度と右膝関節角度に関する項目間の相関関係を示したものである。跳躍距離と L2off 時 ( $r = 0.54$ ,  $p < 0.05$ ), L1off 時 ( $r = -0.56$ ,  $p < 0.05$ ), TO 時 ( $r = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ) の右関節角度との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。また、TD 時の右膝関節角度と鉛直初速度 ( $r = 0.53$ ,  $p < 0.05$ ), 踏切中の鉛直速度の増加量 ( $r = 0.64$ ,  $p < 0.05$ ) との間にそれぞれ有意な正の相関関係が認められた。

**Table 4-6** は、跳躍距離および身体重心速度と左膝関節角度に関する項目間の相関関係を示したものである。跳躍距離と L1on 時 ( $r = 0.53$ ,  $p < 0.05$ ), TO 時 ( $r = -0.55$ ,  $p < 0.05$ ) の左関節角度との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。L2off 時の左膝関節角度と L2on 時 ( $r = -0.50$ ,  $p < 0.05$ ), L2off 時 ( $r = -0.59$ ,  $p < 0.05$ ), L1on 時 ( $r = -0.61$ ,  $p < 0.05$ ),

**Table 4-4 Correlations between COM velocities and the trunk angle.**

Trunk angle (deg)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		L2on	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
		L2on	L2off	L2off	L2off	L1on	L1on	L1off	L1off	TD	TD	TO
1	Record	<b>-0.48</b>	<b>-0.56</b>	<b>-0.63</b>	<b>-0.68</b>	<b>-0.59</b>	<b>-0.52</b>	-0.38	-0.40	-0.38	<b>-0.47</b>	<b>-0.47</b>
2	HV	-0.15	-0.27	-0.45	<b>-0.53</b>	<b>-0.57</b>	<b>-0.54</b>	-0.41	-0.44	-0.42	<b>-0.60</b>	<b>-0.63</b>
3	HV	-0.22	-0.37	<b>-0.54</b>	<b>-0.57</b>	<b>-0.55</b>	<b>-0.53</b>	-0.34	-0.35	-0.31	<b>-0.53</b>	<b>-0.56</b>
4	HV	-0.43	<b>-0.54</b>	<b>-0.60</b>	<b>-0.67</b>	<b>-0.61</b>	-0.45	-0.29	-0.34	-0.34	<b>-0.51</b>	<b>-0.55</b>
5	HV	-0.33	-0.44	<b>-0.60</b>	<b>-0.65</b>	<b>-0.63</b>	<b>-0.60</b>	<b>-0.50</b>	<b>-0.52</b>	<b>-0.50</b>	<b>-0.63</b>	<b>-0.66</b>
6	HV	<b>-0.48</b>	<b>-0.55</b>	<b>-0.67</b>	<b>-0.67</b>	<b>-0.60</b>	<b>-0.61</b>	<b>-0.52</b>	<b>-0.52</b>	-0.40	-0.32	-0.39
7	VV	-0.25	-0.22	-0.11	-0.21	-0.24	-0.15	-0.16	-0.23	-0.35	-0.44	-0.32
8	HV	<b>-0.50</b>	<b>-0.55</b>	<b>-0.58</b>	<b>-0.58</b>	<b>-0.62</b>	<b>-0.71</b>	<b>-0.70</b>	<b>-0.72</b>	<b>-0.64</b>	-0.35	-0.28
9	VV	0.22	0.28	0.21	0.23	0.30	0.41	<b>0.50</b>	<b>0.51</b>	<b>0.51</b>	0.10	0.00
10	HV	-0.34	<b>-0.47</b>	<b>-0.55</b>	<b>-0.62</b>	<b>-0.72</b>	<b>-0.77</b>	<b>-0.67</b>	<b>-0.68</b>	<b>-0.65</b>	<b>-0.58</b>	-0.47
11	VV	0.26	0.29	0.27	0.44	<b>0.57</b>	<b>0.54</b>	<b>0.63</b>	<b>0.67</b>	<b>0.69</b>	0.46	0.38
12	Angle	0.32	0.39	0.41	<b>0.56</b>	<b>0.69</b>	<b>0.69</b>	<b>0.71</b>	<b>0.74</b>	<b>0.74</b>	<b>0.55</b>	0.45
13	∠HV	<b>-0.55</b>	<b>-0.48</b>	-0.40	-0.26	-0.09	-0.15	-0.21	-0.17	0.00	0.42	0.36
14	∠HV	0.08	-0.06	-0.03	-0.16	-0.41	<b>-0.49</b>	-0.43	-0.45	<b>-0.56</b>	<b>-0.55</b>	-0.28
15	∠VV	0.36	0.39	0.25	0.34	0.42	0.44	<b>0.53</b>	<b>0.59</b>	<b>0.67</b>	0.40	0.23
16	∠VV	0.02	-0.03	0.04	0.20	0.26	0.09	0.07	0.10	0.13	0.39	0.44
17	∠VV	0.34	0.33	0.25	0.42	<b>0.52</b>	0.45	<b>0.52</b>	<b>0.58</b>	<b>0.68</b>	<b>0.58</b>	0.46

*p* < 0.05



**Table 4-6 Correlations between COM velocities and the left knee angle.**

Left knee angle (deg)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	L2on	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
1 Record	0.34	0.44	-0.37	-0.28	<b>0.53</b>	0.42	0.30	-0.01	-0.32	-0.14	<b>-0.55</b>
2 HV L2on	<b>0.51</b>	0.11	<b>-0.50</b>	<b>-0.52</b>	0.39	<b>0.50</b>	0.43	0.38	0.15	0.00	-0.39
3 HV L2off	<b>0.53</b>	0.18	<b>-0.59</b>	<b>-0.47</b>	<b>0.56</b>	<b>0.59</b>	<b>0.49</b>	0.37	0.09	-0.14	-0.41
4 HV L1on	0.39	0.12	<b>-0.61</b>	<b>-0.59</b>	0.37	<b>0.49</b>	0.45	0.26	-0.06	-0.21	<b>-0.53</b>
5 HV L1off	0.43	0.19	<b>-0.48</b>	<b>-0.50</b>	0.42	0.46	0.41	0.29	-0.06	-0.03	-0.41
6 HV TD	0.44	0.26	-0.36	-0.45	0.24	0.29	0.27	0.22	0.03	0.04	-0.31
7 VV TD	0.05	0.09	-0.15	-0.31	-0.01	0.08	0.06	-0.26	<b>-0.69</b>	-0.25	<b>-0.60</b>
8 HV MKF	0.44	0.26	-0.17	-0.32	0.04	0.08	0.10	0.06	-0.15	0.07	-0.30
9 VV MKF	-0.19	-0.13	-0.11	0.03	0.20	0.21	0.15	0.05	0.23	-0.06	0.02
10 HV TO	<b>0.52</b>	0.21	-0.37	-0.43	0.26	0.27	0.25	0.19	-0.11	-0.04	<b>-0.50</b>
11 VV TO	-0.24	-0.09	0.10	0.41	0.17	0.15	0.08	0.04	0.31	-0.03	0.45
12 Angle TO	-0.37	-0.15	0.22	0.46	0.02	-0.01	-0.04	-0.05	0.26	-0.01	<b>0.51</b>
13 ∠HV L2on_TD	-0.09	0.25	0.21	0.09	-0.22	-0.31	-0.25	-0.23	-0.18	0.08	0.12
14 ∠HV TD_TO	0.29	0.01	-0.16	-0.13	0.11	0.08	0.06	0.02	-0.23	-0.12	-0.43
15 ∠VV TD_MKF	-0.19	-0.17	0.02	0.25	0.17	0.11	0.08	0.24	<b>0.69</b>	0.14	0.45
16 ∠VV MKF_TO	-0.03	0.06	0.25	0.42	-0.06	-0.10	-0.11	-0.02	0.05	0.04	<b>0.49</b>
17 ∠VV TD_TO	-0.19	-0.12	0.16	<b>0.47</b>	0.12	0.04	0.02	0.20	<b>0.65</b>	0.14	<b>0.69</b>

$p < 0.05$

L1off 時 ( $r = -0.48, p < 0.05$ ) の身体重心水平速度との間にそれぞれ有意な負の相関関係が認められた。TD 時の左膝関節角度と踏切足接地時の鉛直速度 ( $r = -0.69, p < 0.05$ )、踏切中の鉛直速度の増加量 ( $r = 0.65, p < 0.05$ ) との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。TO 時の左膝関節角度と水平初速度 ( $r = -0.50, p < 0.05$ )、跳躍角 ( $r = 0.51, p < 0.05$ )、踏切中の鉛直速度の増加量 ( $r = 0.69, p < 0.05$ ) との間に有意な相関関係が認められた。

#### 4.4 考察

##### 4.4.1 日本一流男子選手 (J 群) の踏切準備および踏切動作の特徴

**Figure 4-8** は、J 群の踏切準備および踏切動作の主な特徴をまとめて示したものである。

W 群と比較した結果、J 群の踏切準備および踏切動作の主な特徴として、①L2 支持期において支持脚膝関節の屈曲伸展動作が大きいこと、②踏切準備局面において体幹が前傾から後傾に切り替わるタイミングが早いこと、③踏切足接地時において身体および体幹の後傾が大きいことが挙げられる。

走幅跳の踏切準備局面では、踏切 2 歩前を長く、踏切 1 歩前を短くする「長一短」のストライドパターン、いわゆる、「パノートメート・ストライド (penultimate stride)」が用いられることが多い (Rogers, 2004 ; 伊藤ら, 2009 ; 熊野と植田, 2014)。パノートメート・ストライドは、身体重心を下げることに効果的であるとされているが、強調しすぎると身体重心の水平速度の減速を招きやすいとの指摘もある (Hay et al., 1986 ; Rogers, 2004)。

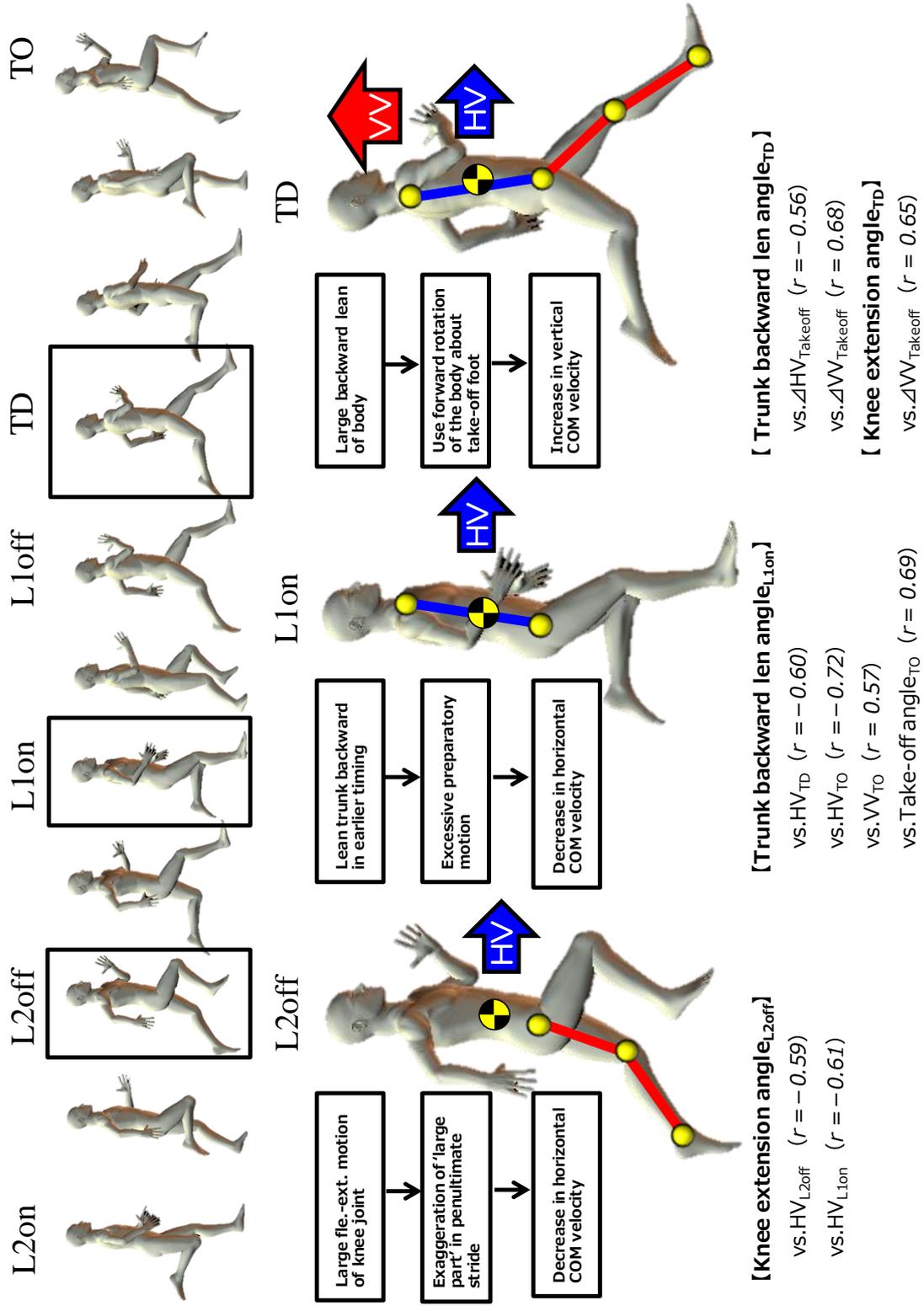


Figure 4-8 Selected features of the preparatory and take-off motion for the Japan group.

また、大村ら（1995）は、「短-長」のストライドパターンの場合、いわゆる「オーバーストライド」あるいは「間延び」した踏切準備動作となり、踏切動作の遅れを引き起こすため、改善する必要があると指摘している。

J群は、L2 支持期における支持脚膝関節の大きな屈曲伸展動作により、L2off 時の身体重心の鉛直速度および跳躍角が大きく、上方への動き（いわゆる、「浮く」動き）へとつながっていた。すなわち、J 群は、踏切準備局面における長-短のストライドパターンの「長」の部分を誇張した動作であったと言える。Hay and Miller（1985）は、欧米一流女子走幅跳選手 12 名の踏切準備および踏切動作のバイオメカニクスの分析を行い、跳躍距離との相関関係を検討した結果、①踏切 2 歩前支持期における平均鉛直力 ( $r=-0.56$ )、②踏切 2 歩前支持期における身体重心の鉛直速度の変化量 ( $r=-0.59$ )、③踏切 2 歩前滞空期における空中時間 ( $r=-0.66$ ) との間に負の相関関係がみられたことを報告している。また、青山ら（2001）は、良い踏切準備動作の特徴として、踏切 2 歩前で支持脚 3 関節をあまり動かさないで軸乗りに素早く乗り込むことや踏切 1 歩前で支持脚膝関節の屈曲を大きくして身体を沈み込ませることを挙げている。すなわち、踏切 2 歩前支持期では、身体重心高の上下動を抑え、踏切 2 歩前離地時の身体重心の鉛直速度を小さくするなど、長-短のストライドパターンの「長」の部分を誇張しすぎないことが重要であると示唆される。本研究において、L2off 時の左膝関節の伸展角度と L2off 時および L1on 時の身体重心水平速度との間には有意な負の相関関係 ( $r=-0.61$ ,  $p < 0.05$ ) が認められたことから、踏切準備局面で身体重心の水

平速度をなるべく維持するためには、踏切 2 歩前において支持脚膝関節の過度な屈曲伸展動作を抑え、上方へ浮き過ぎないことが重要であると考えられる。

志賀ら (2002) は、踏切 1 歩前の支持脚が最も屈曲した時点での体幹の後傾角と跳躍距離との間には負の相関関係が認められ ( $r = -0.58$ )、踏切 1 歩前の体幹の後傾姿勢にも視点を向ける必要があると指摘している。本研究の結果においても、L2on 時から TO 時における体幹角度と跳躍距離との間に、 $r = -0.68 \sim -0.38$  という高い負の相関関係が認められた。体幹の姿勢に関して、阿江ら (1999) は、体幹の質量は身体の中でも特に大きいため、身体重心の変化に多大な影響を与えることになり、体幹を起こすタイミングが早いことは助走速度の低下につながると述べている。本研究の結果では、L1on 時の体幹の後傾角度と踏切足接地時の水平速度 ( $r = -0.60, p < 0.05$ )、水平初速度 ( $r = -0.72, p < 0.05$ ) との間に有意な負の相関関係が認められ、鉛直初速度 ( $r = 0.57, p < 0.05$ )、跳躍角 ( $r = 0.69, p < 0.05$ ) および踏切中の鉛直速度の増加量 ( $r = 0.52, p < 0.05$ ) との間に有意な正の相関関係が認められたことから、踏切準備動作中の体幹の姿勢が身体重心速度の速度変化に与える影響は大きいと考えられる。J 群の場合には、踏切準備局面において、体幹を起こすタイミングが早かったことが、身体重心水平速度の減少を引き起こした要因の 1 つであると考えられる。この原因として、J 群は、L2off 時において左股関節の屈曲トルクが有意に小さかったことが考えられる (Figure 4-7)。L2off 時における大きな左股関節の屈曲トルクの発揮は、体幹に対して時計まわりのモーメントを生じるので、体幹の前傾を維持することに効果がある

と考えられる。

深代ら（1994）は、踏切中の踏切脚膝関節の最大屈曲が小さいほど鉛直初速度が大きく（ $r = 0.84$ ）、跳躍角が大きい（ $r = 0.85$ ）ことから、踏切脚膝関節をより伸展させて接地し、踏切中の最大屈曲が小さいほうが高い跳躍ができると述べている。J群は、踏切足接地時に体幹を大きく後傾させ、踏切脚膝関節をより伸展させた踏切姿勢をとっていたが、踏切中の最大屈曲はW群とほとんど変わらなかった。本研究の結果では、踏切足接地時の踏切脚膝関節の伸展角度と踏切前半および踏切中の鉛直増加量との間（踏切前半； $r = 0.69$ ,  $p < 0.05$ , 踏切全体； $r = 0.65$ ,  $p < 0.05$ ）、踏切足接地時の体幹の後傾角度と踏切前半および踏切中の鉛直増加量との間（踏切前半； $r = 0.67$ ,  $p < 0.05$ , 踏切全体； $r = 0.68$ ,  $p < 0.05$ ）には、それぞれ有意な正の相関関係が認められた。Lees et al.（1993）は、踏切前半で身体の起こし回転を利用して身体重心の鉛直速度を獲得するためには、踏切足を身体重心のより前方に接地する必要があると述べている。これらのことから、J群は踏切足まわりの身体の起こし回転を利用して、踏切中に大きな鉛直速度を獲得するような動作であったと考えられる。

しかし、踏切足接地時の体幹の後傾角度と踏切中の水平減少量との間（ $r = -0.56$ ,  $p < 0.05$ ）には、有意な負の相関関係が認められたことから、踏切足接地時に大きな身体の後傾をとることは、身体重心の水平減速を引き起こす要因にもなり得るため、指導の際には注意が必要であろう。

#### 4.4.2 世界一流男子選手（W 群）の踏切準備および踏切動作の特徴

W 群は、身体重心の水平速度が大きく、それをなるべく維持しようとする踏切準備および踏切動作であったと言える。W 群は、L2 支持期において、J 群ほどの顕著な支持脚膝関節の屈曲伸展動作はみられず、むしろ下腿を大きく前傾させながら離地していた。一流短距離選手は支持期後半に支持脚膝関節を伸展しないで、むしろ屈曲する傾向がみられるとの報告（福田ら、2008）や、大学跳躍選手を対象にしたスプリントトレーニング後には支持期後半に下腿が前方に倒れる動きが大腿、体幹の動作にも影響を及ぼし、身体全体の起し回転運動や倒れこみ運動によって身体重心の水平速度を増大させるようになったとの報告（図子ら、1993）がある。このことから、L2 支持期後半において、支持脚下腿を前傾させながら離地することは、上方へ身体が浮くのを防ぐとともに、身体重心水平速度の減少を軽減する要因の 1 つであると考えられる。

W 群では、踏切準備局面における遊脚のリカバリー動作において、遊脚膝関節の屈曲が小さく、遊脚足部がより低い位置を通過していた。また、L1on 時の遊脚膝関節の伸展角度は、跳躍距離 ( $r = 0.53, p < 0.05$ ) や L2off 時の身体重心の水平速度 ( $r = 0.56, p < 0.05$ ) との間にそれぞれ有意な正の相関関係が認められた。伊藤ら（2009）によれば、遊脚足部がより低い位置を通過する動作は「すり足（ヌカート）動作」と呼ばれ、接地のタイミングを早めることに効果的であるとされていることから、W 群が J 群より早いタイミングで踏切足を接地できた要因の 1 つであると推察される。

W 群は、L2 支持期から体幹の前傾をより長く保っており、踏切足接地時ではやや後傾していたものの、踏切足離地時では前傾してより前方へ飛び出す踏切をしていた。第 3 回世界陸上競技選手権大会の男子走幅跳を分析した深代ら（1994）によれば、踏切足離地時の体幹角度と跳躍記録との間には有意な相関関係（ $r = -0.76$ ）が認められ、踏切足離地時に体幹を前傾させたほうが跳躍距離は大きかったと報告している。本研究においても、踏切足離地時の体幹角度と跳躍記録の間には有意な相関関係が認められ（ $r = -0.47, p < 0.05$ ）、深代ら（1994）の結果を裏付ける結果となった。また、W 群は、L2off 時における左股関節と L1off 時における右股関節の屈曲トルクが有意に大きかったことから、踏切準備局面中の体幹の前傾をなるべく維持するためには、各歩の支持期後半から離地直後にかけて大きな遊脚股関節屈曲トルクを発揮し、体幹に対して前方回転のモーメントを作用させることが、体幹の前傾の維持には重要であると考えられる。両群間の体幹角度には、本研究の分析開始時点である踏切 2 歩前接地時からすでに有意差がみられたことから、踏切準備局面以前の助走局面から大きな遊脚の股関節屈曲トルクを発揮して、なるべく体幹の前傾を維持することが重要であることが示唆された。

#### 4.5 要約

本章（研究課題 1）の目的は、世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をバイオメカニクスの的に比較し、その動作的特徴の相違を明らかにするとともに、走

幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得ることであった。本研究で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 世界一流選手は、踏切2歩前接地から踏切足離地における身体重心水平速度が有意に大きだけでなく、各歩の支持期中における水平速度の減少も小さかった。
- 2) 世界一流選手は、踏切2歩前支持期に支持脚下腿をより前傾し、徐々に支持脚膝関節を屈曲していた。一方、日本一流選手は、踏切2歩前支持期に支持脚膝関節の屈曲伸展動作が大きいため、踏切2歩前離地時の身体重心鉛直速度が大きかった。
- 3) 世界一流選手は、踏切準備および踏切動作を通して、体幹の前傾を維持していた。一方、日本一流選手は、体幹を前傾から後傾に切り替えるタイミングが早く、踏切足接地時における後傾も大きかった。
- 4) 世界一流選手は、踏切2歩前離地後により遊脚足部が低い位置を通過するリカバリー動作がみられた。一方、日本一流選手は、遊脚膝関節をより大きく屈曲し、下腿を臀部の方向へ巻き込むリカバリー動作がみられた。
- 5) 世界一流選手は、日本一流選手よりも、踏切2歩前離地時における左股関節と踏切1歩前離地時における右股関節の屈曲トルクが有意に大きかった。

本章（研究課題1）の結果と考察から、走幅跳の技術指導に関して、以下のことが示唆さ

れた。①踏切準備局面では、踏切2歩前支持期中の支持脚膝関節を過度に屈曲伸展せずに、下腿を前傾しながら離地することで、遊脚足部がより低い位置を通過するように動かすことが早いタイミングで踏切足を接地するために効果的である、②踏切準備から踏切局面にわたって、遊脚股関節の大きな屈曲トルクを発揮することで体幹の前傾を維持し、より前方に飛び出すことなどが重要である。

## 5. 異なる跳躍タイプの走幅跳選手における踏切準備および踏切動作のバイオメカニクスの特徴（研究課題 2）

### 5.1 目的

Fukashiro and Wakayama (1992) は、1991 年世界陸上競技選手権大会（国立競技場，東京）において、マイク・パウエル選手（金メダリスト，8.95 m）とカール・ルイス選手（銀メダリスト，8.91 m）の踏切動作のバイオメカニクスの分析を行っている。それによると，両者の跳躍距離や助走速度はほぼ同程度であったにもかかわらず（パウエル選手，11.00 m/s；ルイス選手，11.06 m/s），パウエル選手は跳躍角の大きい跳躍であり（跳躍角，23.1 deg；水平初速度，9.09 m/s；鉛直初速度，3.70 m/s），ルイス選手は跳躍角の小さいであった（跳躍角，18.3 deg；水平初速度，9.72 m/s；鉛直初速度，3.22 m/s）と報告している。このことは，走幅跳選手には異なる跳躍タイプが存在することを示唆するものである。

これまでの先行研究では，記録水準の異なる走幅跳選手の動作を比較することで，指導に有効な示唆を得ているものが多い（Luhtanen and Komi, 1979；Hay, 1986；Lees et al., 1993, 1994）。しかし，多くの日本人走幅跳指導者は走幅跳選手に対して，画一的に起こし回転を利用して高く跳び上がることを強調しすぎているとの指摘もある（岡野，1989；関岡，1990；吉田，2011；森長，2016）。このような問題は，走幅跳選手を分類するための適切な指標や，異なる跳躍タイプの走幅跳選手を指導するための目標となる動作モデルがないことが一因

であると考えられる。

斉藤と阿江（1991）は、学生男子走幅跳選手 24 名の成功試技と失敗試技の計 48 試技の踏切動作を分析し、踏切足接地時の水平速度、踏切前半の水平減速量および踏切中間時における鉛直速度の 3 つの身体重心パラメータから踏切動作を 12 タイプに分類している。これは走幅跳選手の類型化を試みた数少ない知見であるが、跳躍タイプ数が多すぎることや各跳躍タイプの詳細な動作分析が行えていないことが問題として挙げられる。指導現場で用いるためには、跳躍タイプを絞り、より簡便に跳躍タイプを見極めることのできる指標や動作モデルの構築が必要であると考えられる。

多変量解析手法を用いた分類方法としてクラスター分析が挙げられ、高齢者の歩行動作（Watelain et al., 2000）、水泳の自由形泳者のストローク動作（松田ら, 2010）、100m の短距離走者の疾走動作（内藤ら, 2013）、400m 走者のレースパターン分析（山元ら, 2014）などの分類に応用されている。走幅跳においても、各跳躍タイプ別の踏切準備および踏切動作の動作モデルがあれば、走幅跳の基本的な技術や各跳躍タイプを特徴づける動作を具体的な動作モデルとして提示することが可能である。

本章の目的は、世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をクラスター分析法により類型化し、各跳躍タイプの動作モデルを構築するとともに、その動作的特徴を明らかにして異なる跳躍タイプの走幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得ることである。

## 5.2 方法

データ収集，データ処理，算出項目，局面定義および標準動作モデルの作成方法は，第3章の研究方法で述べた通りである．そこで，ここでは，本章（第5章）に関する事項のみを述べる．

### 5.2.1 分析対象者

分析対象者は，第3章の研究方法で述べた国内外の一流男子走幅跳選手29名であった．分析対象者の内訳は，世界一流選手が14名，日本一流選手が15名であった．

### 5.2.2 統計処理

分析対象者となった国内外の一流男子走幅跳選手29名の跳躍タイプを分類するため，踏切足離地時の跳躍角を指標として設定し，平方ユークリッド距離をもとにしたWard法によるクラスター分析を実施した（Ward, 1963）．

規格化時間1%ごとに各測定項目における跳躍タイプ間の有意差を検定するため，ノンパラメトリック手法であるKruskal-WallisのH検定と多重比較検定であるSteel-Dwass法を用いた．測定項目間の相関関係を検討するため，Pearsonの積率相関係数を用いた．跳躍タイプに関連する各動作要因の優先度を決定するため，重回帰分析を用いた．なお，すべての検定において有意水準は5%とした．

### 5.3 結果

#### 5.3.1 跳躍距離と踏切足離地時のキネマティクスパラメータとの関係

**Figure 5-1** は、全分析対象者 29 名の跳躍距離と踏切足離地時の身体重心スピード、身体重心高、跳躍角、踏切 2 歩前接地時の水平速度、水平初速度および鉛直初速度の散布図を示したものである。

跳躍距離と踏切足離地時の身体重心スピード ( $r = 0.63$ ,  $p < 0.05$ )、身体重心高 ( $r = 0.60$ ,  $p < 0.05$ ) との間には有意な正の相関関係が認められたが、跳躍角 ( $r = -0.06$ ,  $n.s.$ ) との間には相関関係は認められなかった。また、跳躍距離と踏切 2 歩前接地時の水平速度 ( $r = 0.64$ ,  $p < 0.05$ )、踏切足離地時の身体重心水平初速度 ( $r = 0.50$ ,  $p < 0.05$ ) との間にはそれぞれ有意な正の相関関係が認められたが、踏切足離地時の身体重心鉛直初速度 ( $r = 0.19$ ,  $n.s.$ ) との間には有意な相関関係は認められなかった。

#### 5.3.2 跳躍タイプの分類

**Figure 5-2** は、クラスター分析 (Ward 法) による跳躍タイプの分類結果を示したものである。跳躍距離との間に相関関係が認められなかった跳躍角を分類指標として、Ward 法によるクラスター分析を行った結果、クラスターが大きく分かれる点 (平方ユークリッド距離, 10.0) をもとに 4 つの跳躍タイプに分類した。

本研究では、跳躍角の低い跳躍タイプから順に、Horizontal type (H-type), Semi-Horizontal

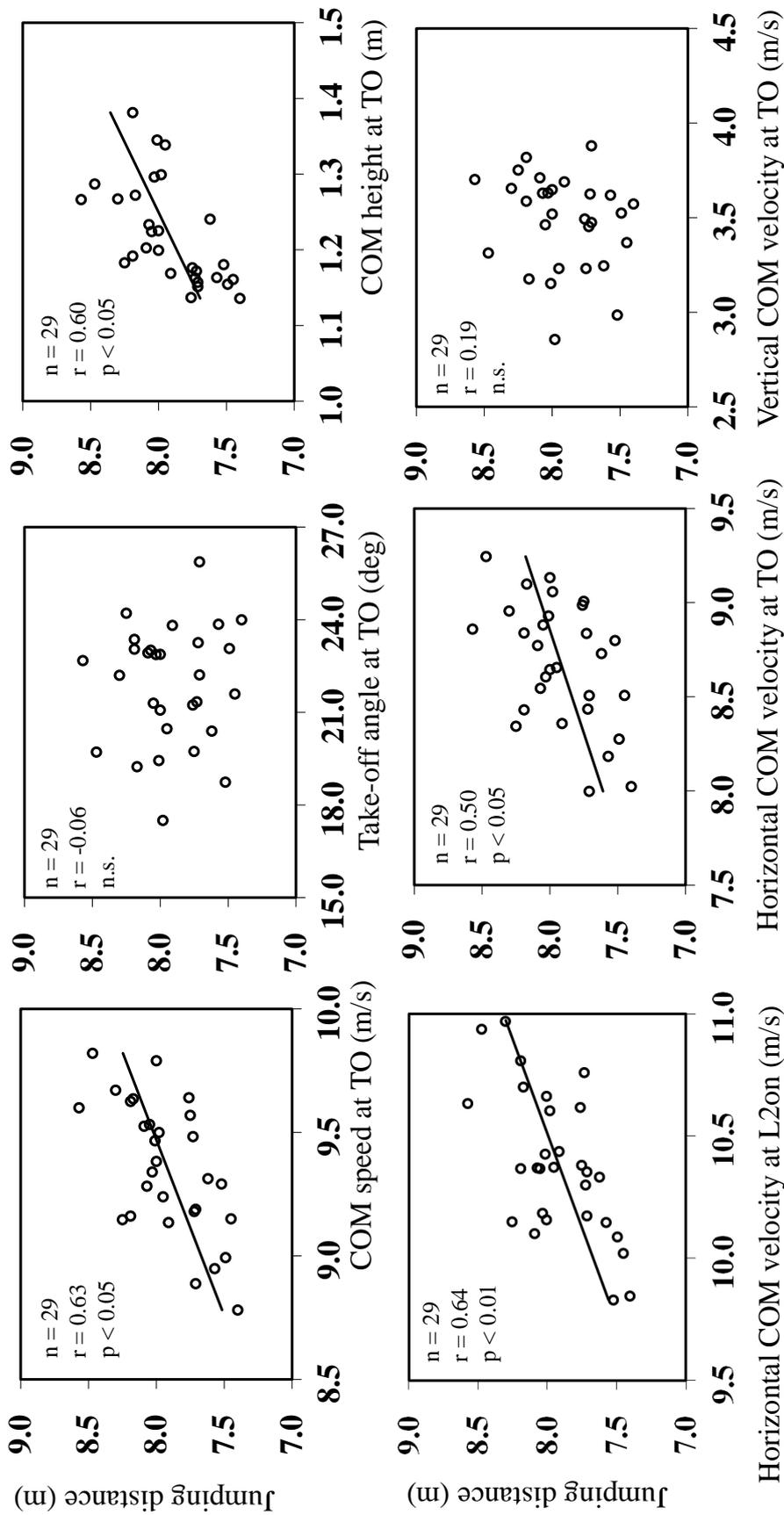


Figure 5-1 Relationships between jumping distance and COM speed, takeoff angle, COM height and the horizontal and vertical

COM velocities at the instant of the toe-off foot.

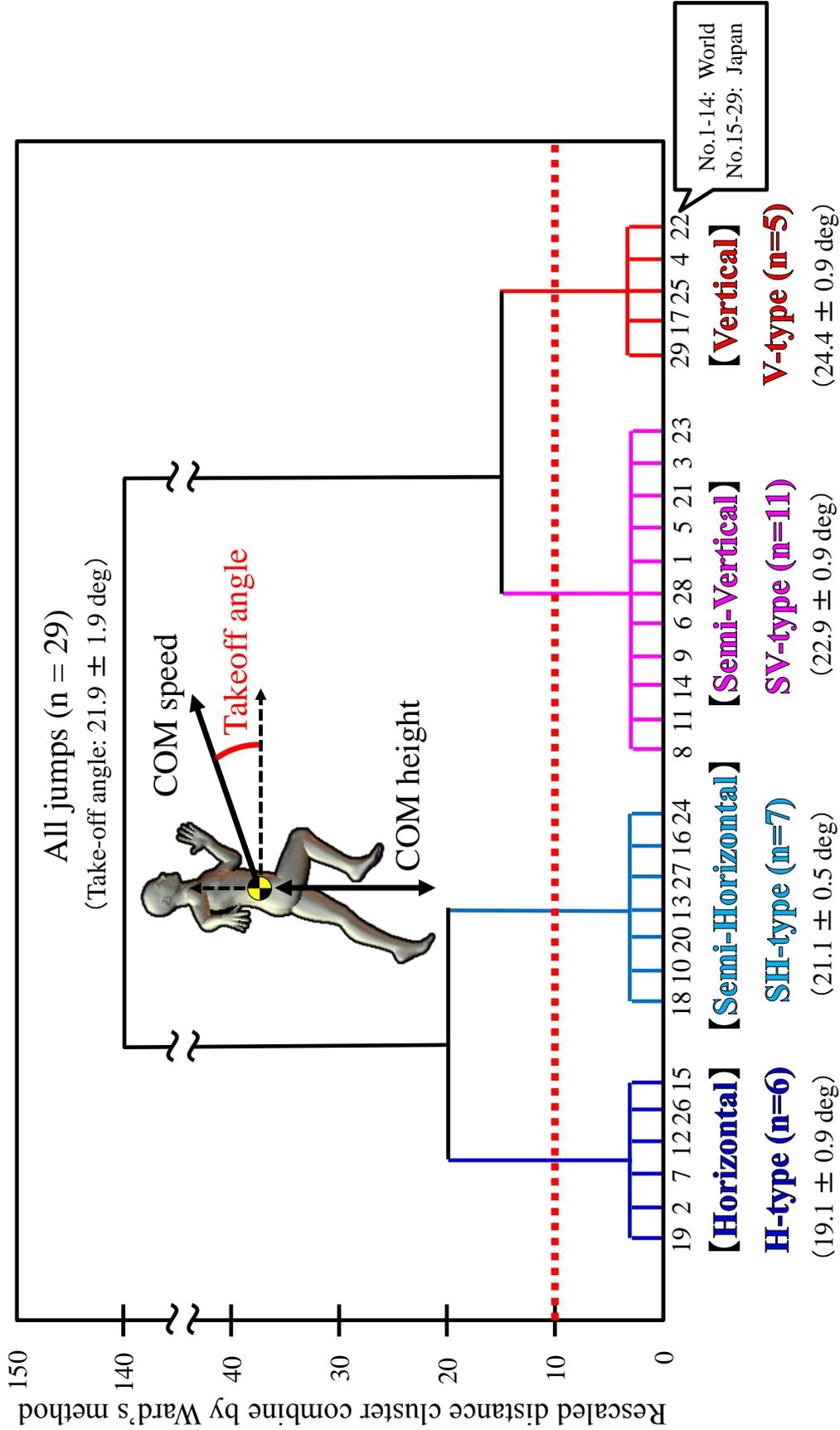


Figure 5-2 Jumping types classified by Ward's method of cluster analysis.

type (SH-type), Semi-Vertical type (SV-type) および Vertical type (V-type) と名付けた. H-type には 6 名 (跳躍角,  $19.1 \pm 0.9$  deg), SH-type には 7 名 ( $21.1 \pm 0.5$  deg), SV-type には 11 名 ( $22.9 \pm 0.9$  deg), V-type には 5 名 ( $24.4 \pm 0.9$  deg) がそれぞれ分類された. なお, 図中のクラスター下部に示した数字は, No.1~No.14 が世界一流選手, No.15~No.29 が日本一流選手を示している. すなわち, 跳躍距離が最も大きかった選手 (8.57 m) と 3 番目に大きかった選手 (8.30 m) は SV-type に, 2 番目に大きかった選手 (8.47 m) は H-type に分類された.

### 5.3.3 各跳躍タイプの自己記録, 跳躍距離, 身体的特性および動作局面時間

**Table 5-1** は, 各跳躍タイプの自己記録, 跳躍距離, 身体的特性および動作局面時間を示したものである. 自己記録, 跳躍距離, 身長および体重は, いずれの変数においても各跳躍タイプ間に有意な差はみられなかった. また, 踏切 2 歩前支持期, 踏切 2 歩前滞空期, 踏切 1 歩前支持期, 踏切 1 歩前滞空期, 踏切局面のいずれの動作局面時間においても各跳躍タイプ間に有意な差はみられなかった.

### 5.3.4 各跳躍タイプの身体重心速度に関する変数

**Table 5-2** は, 各跳躍タイプの身体重心に関する変数を示したものである. 身体重心水平速度は, L2on 時 ( $HV_{L2on}$ ) および TD 時 ( $HV_{TD}$ ) では各跳躍タイプ間に有意差はみられなかったが, TO 時 ( $HV_{TO}$ ) では有意差がみられた ( $H, SH, SV > V$  および  $H > SV; p <$

**Table 5-1 Jumping distance, physique and motion phase times in four technique types and all jumps.**

	H-type	SH-type	SV-type	V-type	All jumps	ANOVA for four types	Multiple comparison
Personal best (m)	8.28 ± 0.24	8.02 ± 0.10	8.20 ± 0.31	7.86 ± 0.23	8.11 ± 0.28	n.s.	—
Official distance (m)	7.98 ± 0.33	7.79 ± 0.22	8.03 ± 0.30	7.77 ± 0.33	7.92 ± 0.30	n.s.	—
Body height (m)	1.82 ± 0.06	1.81 ± 0.08	1.80 ± 0.05	1.75 ± 0.01	1.80 ± 0.06	n.s.	—
Body mass (kg)	69.50 ± 6.44	72.57 ± 7.66	72.09 ± 6.41	67.80 ± 2.28	70.93 ± 6.23	n.s.	—
L2-support phase (s)	0.101 ± 0.015	0.096 ± 0.014	0.099 ± 0.007	0.098 ± 0.007	0.098 ± 0.011	n.s.	—
L2-flight phase (s)	0.129 ± 0.014	0.130 ± 0.009	0.120 ± 0.017	0.126 ± 0.018	0.125 ± 0.015	n.s.	—
L1-support phase (s)	0.112 ± 0.009	0.115 ± 0.014	0.119 ± 0.010	0.112 ± 0.009	0.115 ± 0.010	n.s.	—
L1-flight phase (s)	0.076 ± 0.015	0.071 ± 0.007	0.064 ± 0.014	0.062 ± 0.012	0.068 ± 0.013	n.s.	—
Take-off phase (s)	0.127 ± 0.012	0.122 ± 0.005	0.125 ± 0.011	0.118 ± 0.009	0.124 ± 0.010	n.s.	—

*Notes:* The non-parametric Kruskal–Wallis H-test for the analysis of variance (ANOVA) was used to test for differences among the four jumping technique types, followed by the Steel–Dwass test for multiple comparisons. The symbol n.s. indicates no significant difference as the result of ANOVA. The mark — indicates no significant difference from the multiple comparison.

**Table 5-2 COM parameters in four technique types and all jumps.**

	H-type	SH-type	SV-type	V-type	All jumps	ANOVA for four types	Multiple comparison
	10.48 ± 0.38	10.45 ± 0.25	10.40 ± 0.29	10.15 ± 0.21	10.38 ± 0.30	n.s.	—
Horizontal COM velocity (m/s)							
HV <sub>L2on</sub>	10.27 ± 0.28	10.14 ± 0.17	10.08 ± 0.21	9.82 ± 0.26	10.09 ± 0.26	n.s.	—
HV <sub>TD</sub>	9.02 ± 0.15	8.82 ± 0.21	8.62 ± 0.21	8.18 ± 0.17	8.68 ± 0.33	**	H, SH, SV > V H > SV
Vertical COM velocity (m/s)							
VV <sub>TD</sub>	-0.11 ± 0.30	-0.25 ± 0.13	-0.21 ± 0.23	-0.15 ± 0.31	-0.19 ± 0.23	n.s.	—
VV <sub>TO</sub>	3.12 ± 0.17	3.40 ± 0.12	3.64 ± 0.09	3.70 ± 0.12	3.48 ± 0.25	**	V, SV > SH > H
∠ Horizontal COM velocity (m/s)							
∠ HV <sub>L2on-TD</sub>	-0.22 ± 0.28	-0.31 ± 0.17	-0.33 ± 0.15	-0.31 ± 0.20	-0.30 ± 0.20	n.s.	—
∠ HV <sub>TD-TO</sub>	-1.24 ± 0.19	-1.32 ± 0.13	-1.46 ± 0.15	-1.64 ± 0.14	-1.41 ± 0.20	*	V > SH, H
∠ Vertical COM velocity (m/s)							
∠ VV <sub>TD-TO</sub>	3.23 ± 0.42	3.64 ± 0.21	3.84 ± 0.23	3.85 ± 0.28	3.67 ± 0.36	*	SV > H
COM height (m)							
COMH <sub>TD</sub>	0.98 ± 0.04 (54.0 ± 0.8)	0.95 ± 0.06 (52.4 ± 1.6)	0.94 ± 0.04 (52.0 ± 1.3)	0.89 ± 0.02 (50.7 ± 1.0)	0.94 ± 0.05 (52.3 ± 1.6)	*	H > V (H > SV, V)
COMH <sub>TO</sub>	1.26 ± 0.07 (69.1 ± 1.6)	1.21 ± 0.07 (66.8 ± 1.3)	1.23 ± 0.07 (68.2 ± 2.6)	1.16 ± 0.02 (66.5 ± 0.9)	1.22 ± 0.07 (67.8 ± 2.1)	n.s.	—
COM distance (m)							
COMD <sub>TD</sub>	0.67 ± 0.08 (36.4 ± 3.6)	0.68 ± 0.03 (37.3 ± 1.8)	0.71 ± 0.05 (39.4 ± 2.3)	0.68 ± 0.04 (38.7 ± 2.1)	0.69 ± 0.05 (38.2 ± 2.7)	n.s.	—
COMD <sub>TO</sub>	0.50 ± 0.07 (27.3 ± 3.2)	0.42 ± 0.03 (23.2 ± 2.2)	0.39 ± 0.06 (21.6 ± 3.3)	0.35 ± 0.03 (20.1 ± 1.4)	0.41 ± 0.07 (22.9 ± 3.6)	*	H > V (H > SV, V)

*Notes:* COM height is given as a proportion of body height. COM distance is given as the ratio of distance between COM and the toe of take-off leg to body height. The non-parametric Kruskal–Wallis H-test for the analysis of variance (ANOVA) was used to test for differences among the four jumping technique types, followed by the Steel–Dwass test for multiple comparisons. Asterisks indicate significant difference (\*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ ) and the symbol n.s. indicates no significant difference as the result of ANOVA. The mark > indicates significant difference ( $p < 0.05$ ) and — indicates no significant difference and the from the multiple comparison.

0.01). 身体重心鉛直速度は, TD 時 ( $VV_{TD}$ ) では各跳躍タイプ間に有意差はみられなかったが, TO 時 ( $VV_{TO}$ ) では有意差がみられた ( $V, SV > SH, H$  および  $SH > H; p < 0.01$ ). 身体重心水平速度の変化量は, 踏切 2 歩前から踏切足接地までの水平減速度 ( $\Delta HV_{L2on-TD}$ ) では各跳躍タイプ間に有意差はみられなかったが, 踏切足接地から踏切足離地までの水平減速度 ( $\Delta HV_{TD-TO}$ ) では有意差がみられた ( $V > SH, H; p < 0.05$ ). 身体重心鉛直速度の変化量は, 踏切足接地から踏切足離地までの鉛直増加量 ( $\Delta VV_{TD-TO}$ ) において有意差がみられた ( $SV > H; p < 0.05$ ).

跳躍角は, 各タイプ間において有意差がみられた ( $V > SV > SH > H; p < 0.01$ ). 踏切足接地時の身体重心高 ( $COMH_{TD}$ ) は, 各タイプ間において有意差がみられた ( $H > SV, V; p < 0.05$ ) が, 踏切足離地時の身体重心高 ( $COMH_{TO}$ ) では有意差はみられなかった. また, 踏切足接地の身体重心距離 ( $COMD_{TD}$ ) は各跳躍タイプ間に有意差はみられなかったが, 踏切足離地時の身体重心距離 ( $COMD_{TO}$ ) では有意差がみられた ( $H > SV, V; p < 0.05$ ).

### 5.3.5 各跳躍タイプの身体重心高, 体幹角度および膝関節角度

**Figure 5-3** は, 各跳躍タイプの身体重心高, 体幹角度および膝関節角度の変化を平均値で示したものである. グラフ正值は, 体幹角度では後傾を, 膝関節角度では伸展を示している. また, 各タイプ間で有意差がみられた時点には, 各グラフ上部にマークを付けて示した (+: H-type vs. SH-type, ■: H-type vs. SV-type, ●: H-type vs. V-type, ◆: SH-type, vs. V-type).

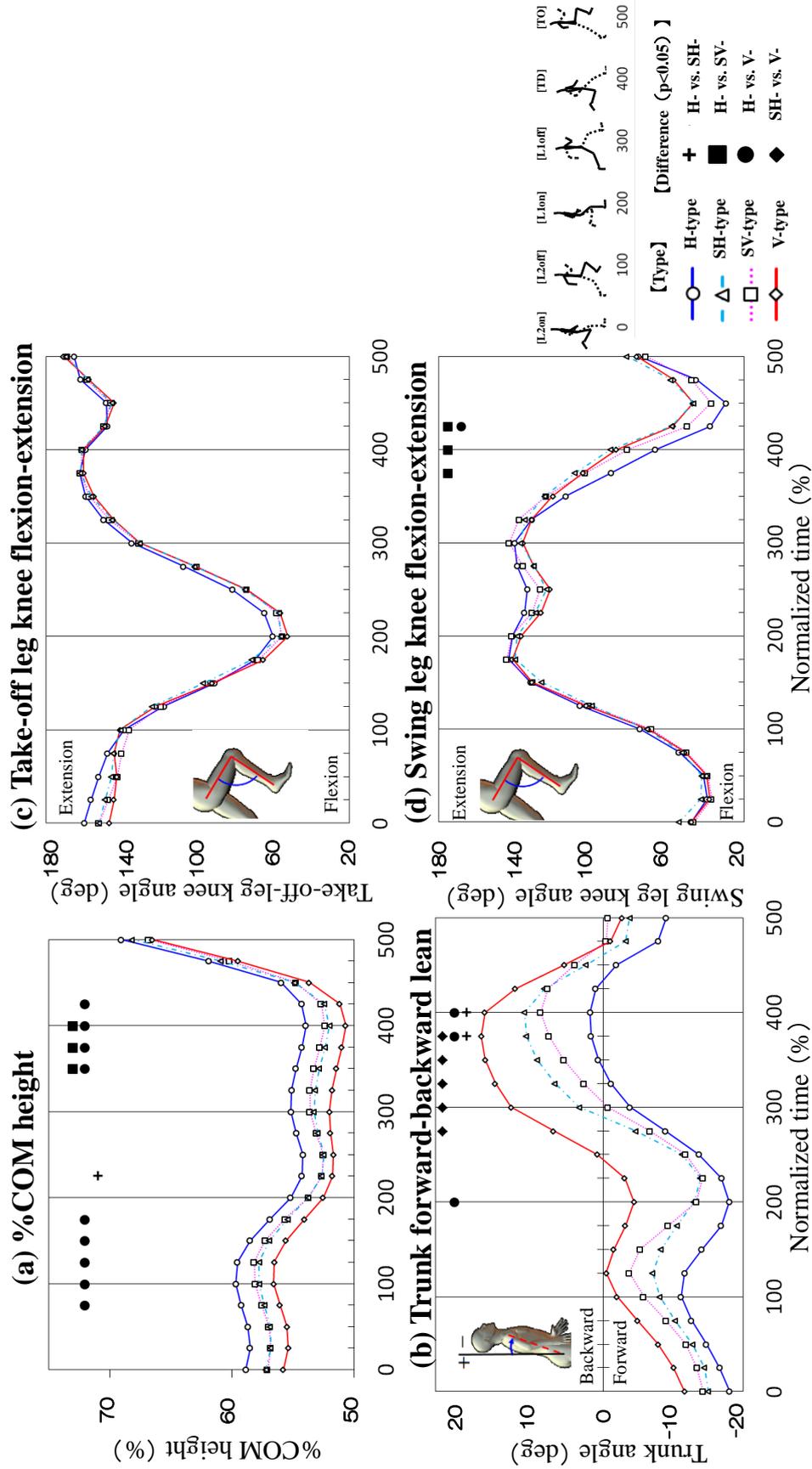


Figure 5-3 Averaged patterns of changes in the COM height, trunk angle and knee joint angles of the four technique types.

・**身体重心高 (Figure 5-3, a)** : H-type は, L2off 付近 (75-175%) において, V-type よりも有意に高かった. また, H-type は, TD 付近 (350-400%) において, SV-type と V-type よりも有意に高かった.

・**体幹角度 (Figure 5-3, b)** : H-type は, L1on 時 (200%) において, V-type よりも有意に前傾が大きかった. 体幹は, いずれの跳躍タイプにおいても, 250% (V-type) から 350% (H-type) において後傾から前傾に切り替わっていた. H-type は, TD 付近 (375-400%) において, SH-type と V-type よりも有意に後傾が小さかった.

・**膝関節角度 (Figure 5-3, c と d)** : 踏切脚 (左脚) の膝関節角度では, L2off 時から TO 時にわたって, いずれの跳躍タイプ間において有意な差はみられなかった. 一方, 振上脚 (右脚) の膝関節角度では, TD 付近 (375-425%) における H-type は, SV-type よりも有意に膝関節角度の伸展が小さかった. 同様に, H-type は, 425% 時において, V-type よりも有意に膝関節角度の伸展が小さかった.

**Figure 5-4** は, 各跳躍タイプにおける踏切準備および踏切動作の標準動作モデルをスティックピクチャーで示したものである.

### 5.3.6 跳躍角との関係がみられた各タイプの動作的特徴

**Figure 5-5** は, 分類指標である跳躍角と関節およびセグメント角度との間に有意な相関関係が認められた 6 変数を H-type と SV-type のスティック上に重ねて示したものである.

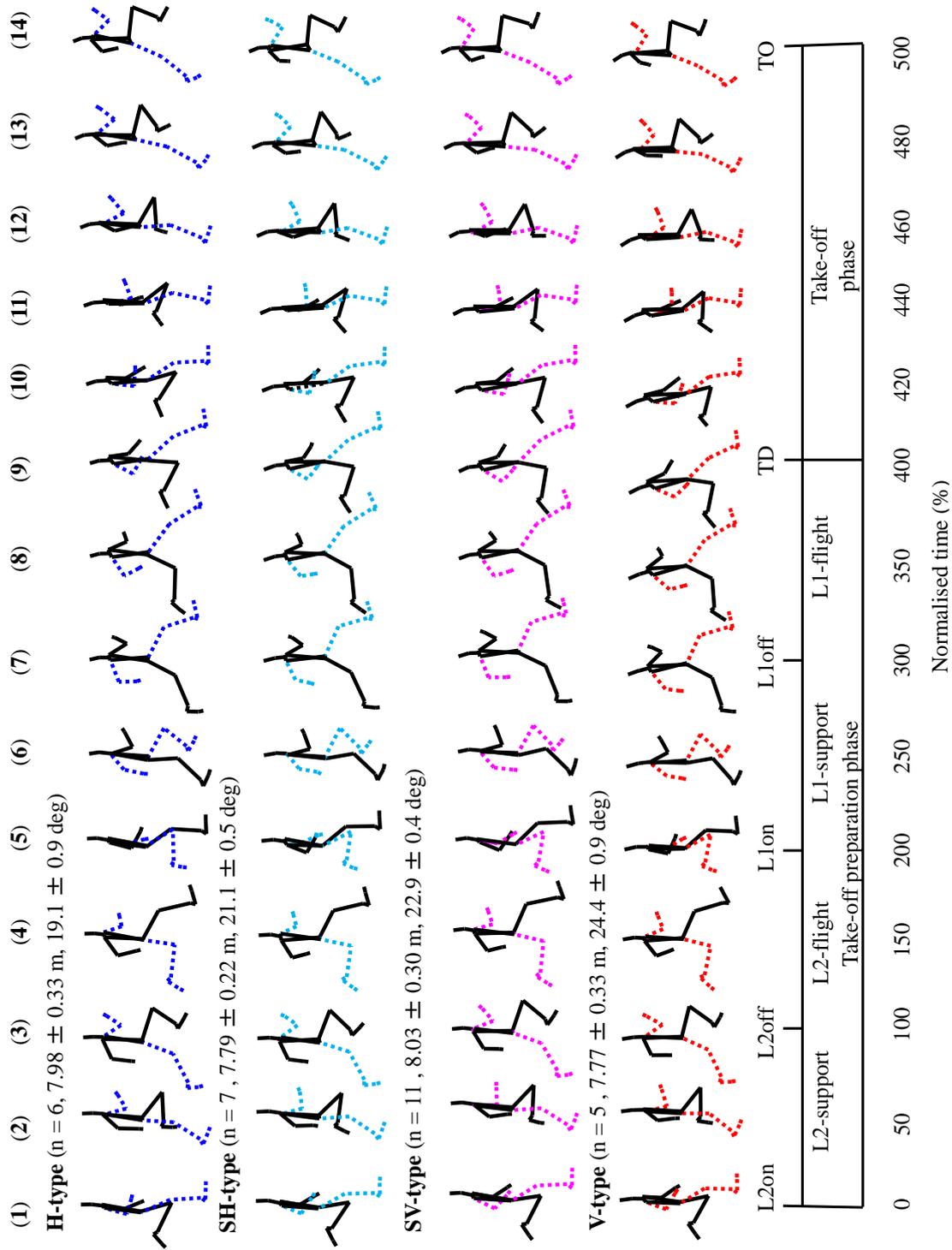
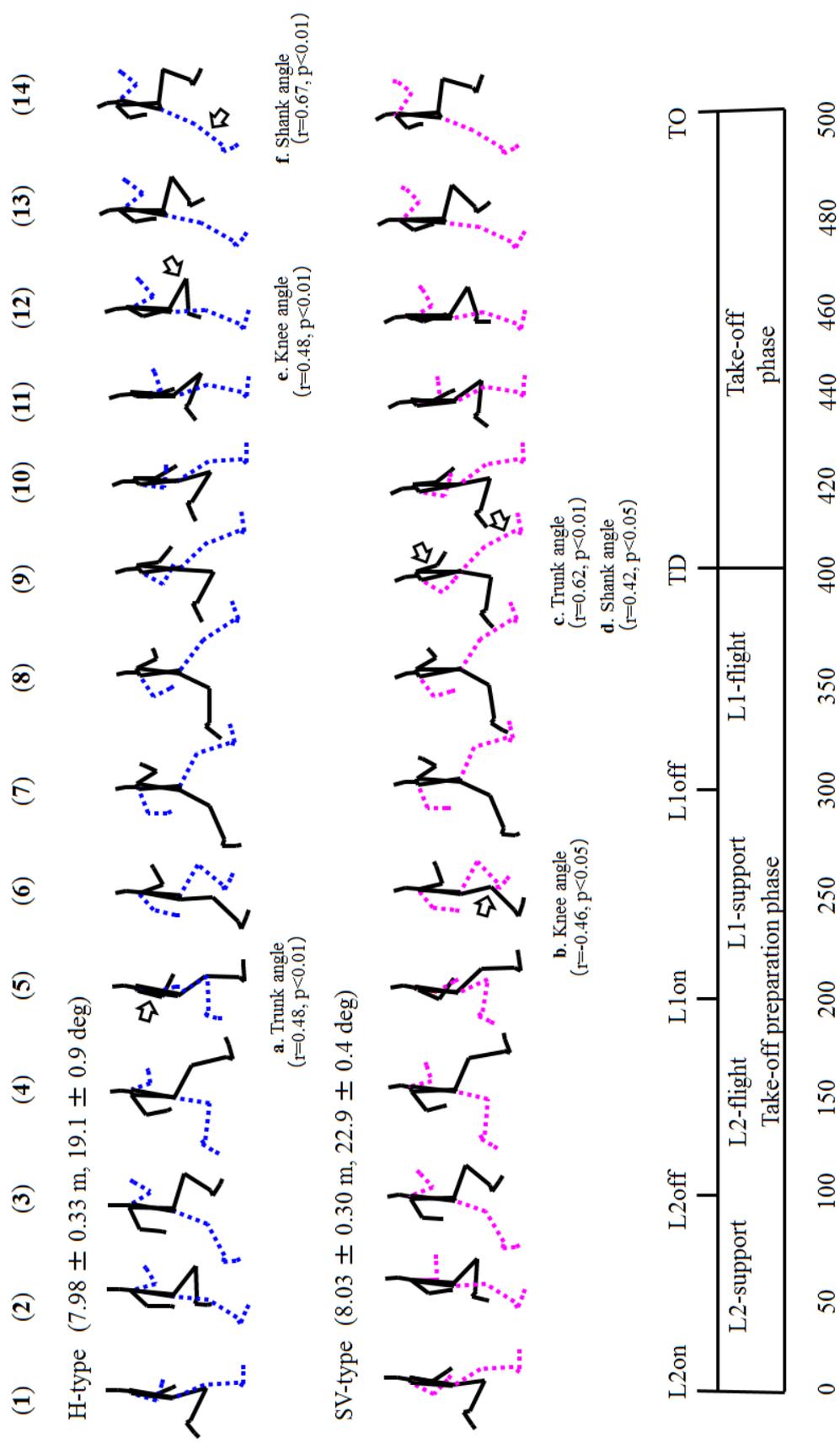


Figure 5-4 Standard motion patterns for each jumping type and for all jumps in the takeoff preparation and takeoff phases.



Notes: Correlation coefficients indicate relationships between the segment and knee joint angles and take-off angle at toe-off.

Figure 5-5 Standard motion patterns for H-type and SV-type in the take-off preparation and take-off phases with correlation coefficients of the angles to the take-off angle.

- (a) H-type は, L1on 時に体幹の前傾が大きかった ( $r = 0.48, p < 0.01, \text{No.5}$ ).
- (b) SV-type は, 250%時に支持脚膝関節の屈曲が大きかった ( $r = -0.46, p < 0.05, \text{No.6}$ ).
- (c) SV-type は, TD 時に体幹の後傾が大きかった ( $r = 0.62, p < 0.01, \text{No.9}$ ).
- (d) SV-type は, TD 時に踏切脚下腿の後傾が大きかった ( $r = 0.42, p < 0.05, \text{No.9}$ ).
- (e) H-type は, 450%時に踏切脚膝関節の屈曲が大きかった ( $r = 0.48, p < 0.05, \text{No. 12}$ ).
- (f) H-type は, TO 時に踏切脚下腿の前傾が大きかった ( $r = 0.67, p < 0.01, \text{No.14}$ ).

本研究では, (a) ~ (f) の 6 変数に対して, 重回帰分析を行った結果, 以下のような回帰式 (5-1) が得られた.

$$\text{Takeoff angle (deg)} = 0.10 \mathbf{a} - 0.03 \mathbf{b} + 0.13 \mathbf{c} + 0.01 \mathbf{d} + 0.04 \mathbf{e} + 0.18 \mathbf{f} + 29.1 \quad (5-1)$$

$$(R^2 = 0.761)$$

ここで, 上述した回帰式は, (a) ~ (f) の 6 変数で跳躍角の約 76% ( $R^2 = 0.761$ ) を説明できることを示す. また, 跳躍角の測定値と回帰式により得られた予測値との残差分析を行った結果, 残差は  $0.0 \pm 0.9 \text{ deg}$ , 残差範囲は  $-2.3 \sim 1.9 \text{ deg}$  であった. さらに, 標準化回帰係数 ( $\beta$ ) は, (f) TO 時における踏切脚下腿の前傾角度が 0.50, (c) TD 時における体幹の後傾角度が 0.25 の順に大きかった.

### 5.3.7 各跳躍タイプの各支持期における平均力

**Table 5-3** は, 各跳躍タイプおよび全分析対象者における各歩の支持期における平均力を

Table 5-3 Average force for each jumping type and for all jumps.

	H-type (n=6)	SH-type (n=7)	SV-type (n=11)	V-type (n=5)	All subjects (n=29)	ANOVA	Multiple comparison
Average horizontal force (N/kg)	L2support	1.0 ± 2.6	-0.0 ± 1.2	0.3 ± 1.7	-0.4 ± 1.2	0.2 ± 1.8	n.s.
	L1support	-0.0 ± 1.3	-0.6 ± 1.8	-0.9 ± 1.8	-1.2 ± 1.8	-0.7 ± 1.7	n.s.
	Tosupport	-9.8 ± 1.7	-10.8 ± 0.7	-11.7 ± 1.7	-13.9 ± 1.7	-11.5 ± 1.9	n.s.
	First	-19.3 ± 2.3	-18.1 ± 2.8	-22.0 ± 3.4	-22.1 ± 1.0	-20.5 ± 3.2	n.s.
	Second	-4.5 ± 1.8	-5.3 ± 2.5	-3.8 ± 4.1	-7.4 ± 2.4	-4.9 ± 3.2	n.s.
	L2support	15.5 ± 4.4	16.6 ± 1.2	16.6 ± 3.2	16.7 ± 2.8	16.4 ± 3.0	n.s.
Average vertical force (N/kg)	L1support	18.3 ± 1.8	19.3 ± 2.6	17.4 ± 2.5	14.6 ± 2.0	17.5 ± 2.7	n.s.
	Tosupport	35.4 ± 4.0	39.7 ± 2.2	40.7 ± 3.2	42.5 ± 2.6	39.7 ± 3.8	*
	First	53.6 ± 3.6	55.6 ± 4.5	56.9 ± 3.1	58.9 ± 5.7	56.2 ± 4.2	*
	Second	24.9 ± 4.2	28.0 ± 4.5	28.6 ± 4.4	29.5 ± 1.9	27.8 ± 4.2	n.s.
	L2support	3.1 ± 7.6	-0.0 ± 4.0	1.4 ± 6.0	-1.1 ± 4.3	1.0 ± 5.6	n.s.
	L1support	0.1 ± 4.0	-1.6 ± 5.5	-2.9 ± 6.1	-4.2 ± 6.6	-2.2 ± 5.6	*
Mean force angle (deg)	Tosupport	-15.5 ± 1.7	-15.3 ± 1.8	-16.0 ± 1.9	-18.1 ± 1.3	-16.1 ± 1.9	*
	First	-19.8 ± 2.2	-18.1 ± 2.9	-21.2 ± 3.3	-20.6 ± 1.1	-20.1 ± 2.9	n.s.
	Second	-10.2 ± 4.3	-10.6 ± 5.0	-7.1 ± 8.3	-14.1 ± 4.4	-9.8 ± 6.5	n.s.
	L2support	3.1 ± 7.6	-0.0 ± 4.0	1.4 ± 6.0	-1.1 ± 4.3	1.0 ± 5.6	n.s.

\* \* : p<0.01      \* : p<0.05

平均値および標準偏差で示したものである。水平成分の平均力では、各歩の支持期において各跳躍タイプ間に有意差はみられなかった。鉛直成分の平均力では、踏切局面 ( $V > SH, H; p < 0.05$ ) および踏切前半 ( $V > SH; p < 0.05$ ) において有意差がみられた。また、平均力角度では、踏切 1 歩前支持期 ( $V > SH; p < 0.05$ ) および踏切局面 ( $V > H; p < 0.05$ ) において有意差がみられた。

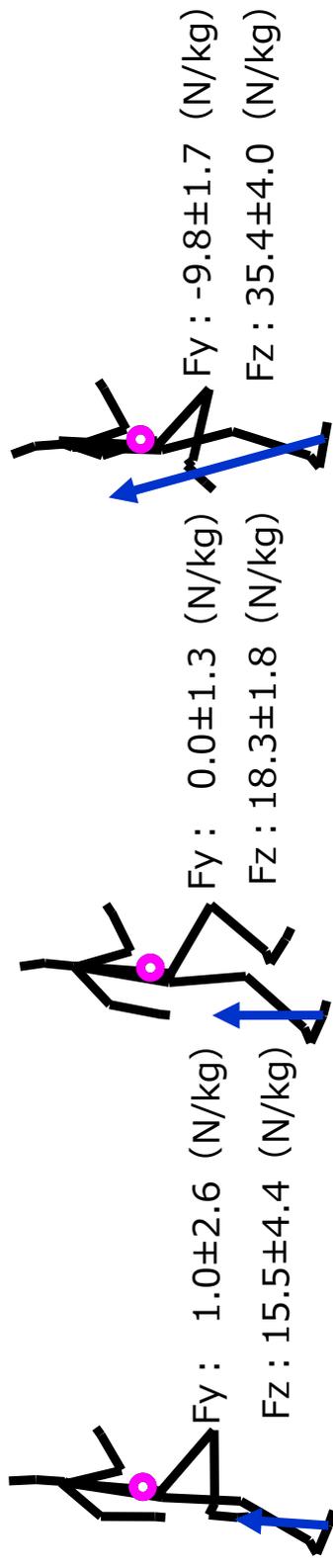
**Figure 5-6** は、H-type と V-type の各歩の支持期における平均力ベクトルを支持期中盤のスティック上に重ねて示したものである。なお、ここで示した COP (Center of pressure, 圧力中心) は、母子球に作用するものと仮定して図示している。

### 5.3.8 各跳躍タイプの股関節屈曲伸展トルクと体幹角度との関係

**Figure 5-7** は、踏切 2 歩前滞空期中の股関節屈曲伸展トルクのピーク値と踏切 1 歩前接地時の体幹の前後傾角の散布図を示している。踏切 2 歩前滞空期中の左脚の股関節屈曲トルクのピーク値と踏切 1 歩前接地時の体幹角度 ( $r=0.56, p < 0.05$ )、右脚股関節の伸展トルクと左脚股関節の屈曲トルクのピーク値の差分 ( $r=0.46, p < 0.05$ ) との間には、正の相関関係が認められた。

また、踏切 2 歩前滞空期中の右脚の伸展トルクと左脚の屈曲トルクのピーク値の差分は、跳躍角 ( $r=-0.40, p < 0.05$ )、踏切足接地時の体幹の後傾角 ( $r=0.55, p < 0.05$ ) との間に、それぞれ有意な相関関係が認められた。

### H-type (n=6, 7.98 ± 0.33 m)



### V-type (n=5, 7.77 ± 0.33 m)

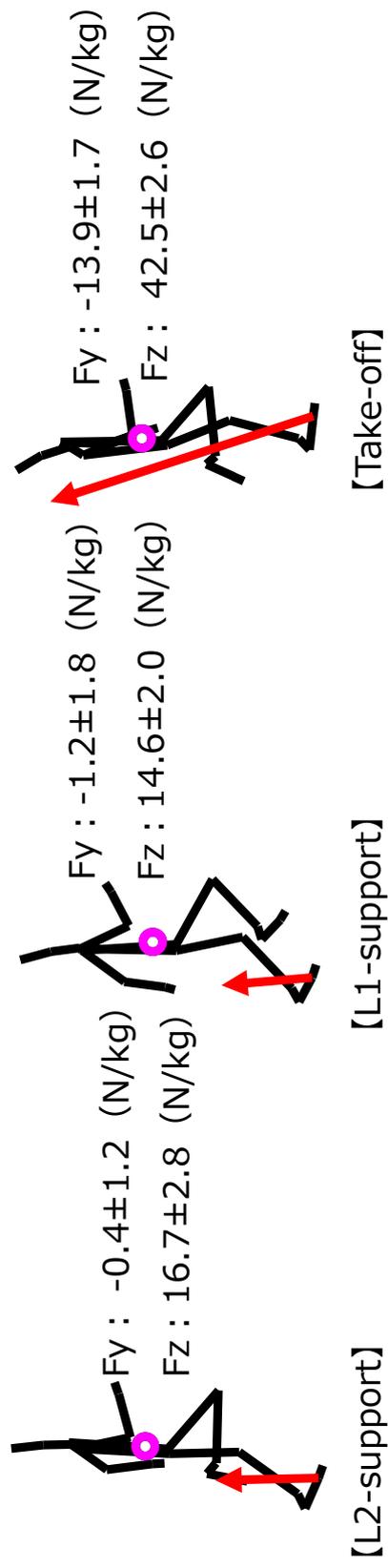


Figure 5-6 Standard motion patterns for H-type and V-type in the take-off preparation and take-off phases with average force vector.

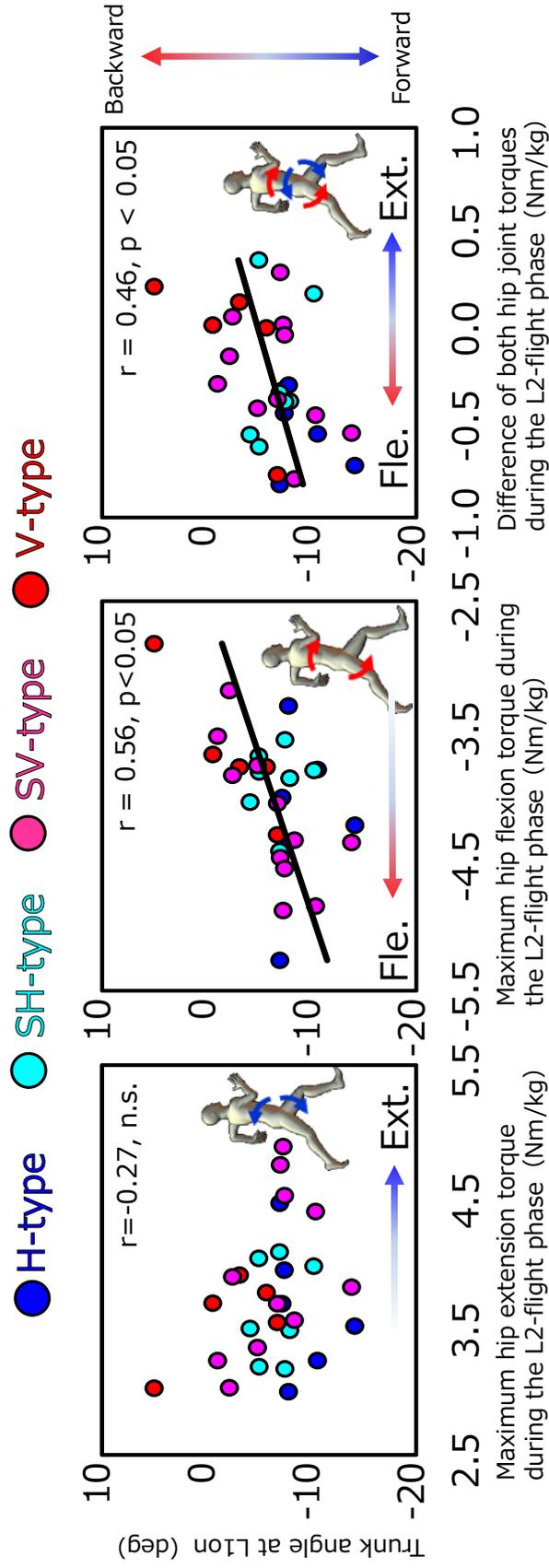


Figure 5-7 Relationships between trunk angle at L1on and hip flexion-extension torques during the L2flight phase.

## 5.4 考察

### 5.4.1 一流男子走幅跳選手における跳躍タイプの分類の妥当性

本研究では、跳躍距離との間に相関関係が認められなかった跳躍角 ( $r = -0.06$ , *n.s.*) を分類指標として選出した。なお、踏切足離地時のパラメータのうち、身体重心の鉛直初速度も跳躍距離との間に相関関係が認められなかったが ( $r = 0.19$ , *n.s.*)、一流男子走幅跳選手を対象とした先行研究では鉛直初速度と跳躍距離との間に有意な正の相関関係 ( $r = 0.78$ ) がみられたとの報告 (小山ら, 2008) や記録水準が上がるにつれて鉛直初速度の重要性が増すとの指摘 (村木ら, 2005) などがある。そのため、本研究では、一流選手を対象とした多くの先行研究においても跳躍距離との相関関係が指摘されていない跳躍角の方がより適した分類指標であると判断した。

本研究では、跳躍角をパラメータとした Ward 法によるクラスター分析を行い、クラスターが大きく分かれる点 (平方ユークリッド距離, 10.0) をもとに H-type (跳躍角,  $19.1 \pm 0.9$  deg), SH-type ( $21.1 \pm 0.5$  deg), SV-type ( $22.9 \pm 0.9$  deg), V-type ( $24.4 \pm 0.9$  deg) の4つの跳躍タイプに分類した。なお、本研究では、クラスターが大きく3つに分かれる場合 (距離, 20.0) と6つに分かれる場合 (距離, 6.0) についても検討した (Figure 5-8)。その結果、跳躍タイプが3つに分かれる場合では、各跳躍タイプ間の跳躍角において、H-type と SH-type との間に有意差がみられなかった。また、3つの場合には、各クラスターの人数が跳躍角の小さい順に6名、7名、16名と大きなバラつきが生じた。6つに分かれる場合には、1つの

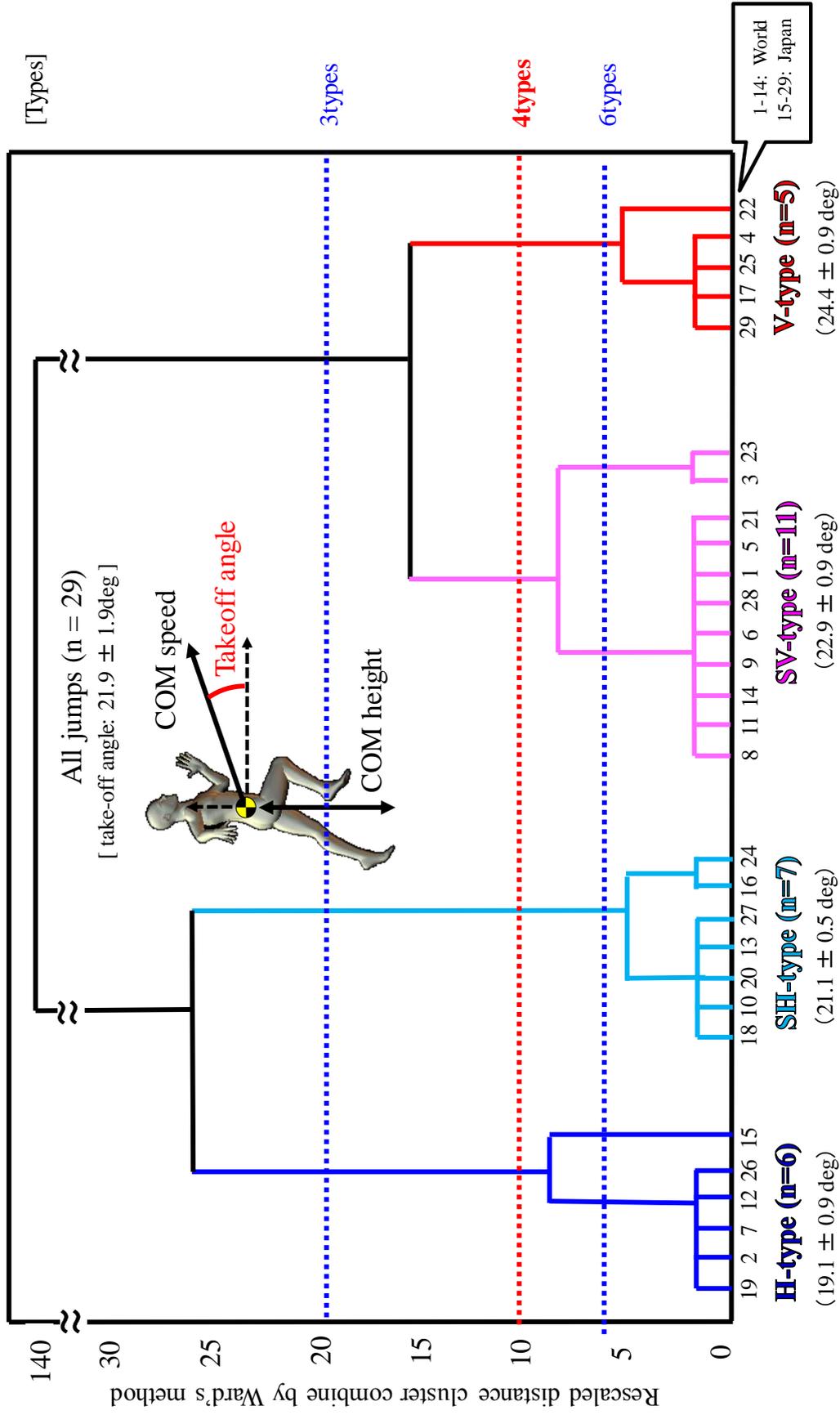


Figure 5-8 Trial of the jumping types classified by Ward's method of cluster analysis.

クラスター内に 1 名や 2 名のみしか該当しないタイプの存在が確認された。本研究では、各跳躍タイプの動作的特徴を反映させたモデル動作の作成を目指しているため、①各跳躍タイプ間に跳躍角の有意差がみられる、②各跳躍タイプの人数比率に大きな偏りがみられない 4 つのタイプに分類することが妥当であると判断した。

本研究で示した 4 つの異なる跳躍タイプ間には、跳躍距離、身長および体重は、各跳躍タイプ間において有意差はみられなかった (Table 5-1)。つまり、本研究で示した跳躍タイプは、跳躍記録や選手の身体的特徴に依存しない分類であると考えられる。また、踏切足接地時における身体重心の水平および鉛直速度は、各跳躍タイプ間において有意差はみられなかったが、踏切足離地時における身体重心の水平初速度および鉛直初速度には有意差がみられた (Table 5-2)。したがって、踏切局面中の身体重心水平および鉛直速度の変化に影響を及ぼす踏切準備および踏切動作（特に、身体重心高、体幹角度および膝関節角度）が、跳躍タイプを分類する要因であったと考えられる。片峯ら (1991) は、全助走における代表的な走幅跳の空中フォームである「反り跳」と「はさみ跳」を比較した結果、跳躍角は反り跳が平均  $21.5 \pm 1.8 \text{ deg}$ 、はさみ跳が  $20.0 \pm 1.1 \text{ deg}$  とほぼ同程度であったと報告している。本研究では、踏切足離地後の空中フォームについては検討していないが、空中フォームの相違が分類指標となる跳躍角や各跳躍タイプの踏切準備および踏切動作に与える影響は少なかったと推察される。

#### 5.4.2 各跳躍タイプにおける踏切準備および踏切動作の特徴

Fukashiro and Wakayama (1992) は、1991 年世界陸上競技選手権大会 (国立競技場, 東京) において、マイク・パウエル選手 (金メダリスト, 8.95 m) とカール・ルイス選手 (銀メダリスト, 8.91 m) の踏切動作の特徴を報告している。それによると、両者の跳躍距離や助走スピードはほぼ同程度であったにもかかわらず (パウエル選手, 11.00 m/s; ルイス選手, 11.06 m/s), パウエル選手は跳躍角の大きい跳躍であり (跳躍角, 23.1 deg; 水平初速度, 9.09 m/s; 鉛直初速度, 3.70 m/s), ルイス選手は跳躍角の小さい跳躍であった (跳躍角, 18.3 deg; 水平初速度, 9.72 m/s; 鉛直初速度, 3.22 m/s) と報告している。両選手の結果を本研究の分類した跳躍タイプに当てはめると、パウエル選手は SV-type, ルイス選手は H-type にそれぞれ該当すると言える。また、Fukashiro and Wakayama (1992) は、パウエル選手の動作的特徴として踏切足接地時に大きく体幹を後傾すること、ルイス選手の動作的特徴として身体重心高を高く維持しながら踏切足を接地することなどを挙げているが、これらの結果は後述する本研究の各跳躍タイプの動作的特徴と類似する傾向にあった。

斉藤と阿江 (1991) は、学生走幅跳選手 24 名の成功試技と失敗試技の計 48 試技の踏切動作を分析し、踏切足接地時の水平速度、踏切前半の水平減速量および踏切中間時における鉛直速度の 3 つの身体重心パラメータから踏切動作を 12 タイプに分類している。これは走幅跳選手の類型化を試みた数少ない研究であるが、跳躍タイプ数が多すぎることや各跳躍タイプの詳細な動作分析が行えていないなどの問題がある。一方、本研究で用いた方法

では、跳躍タイプ数を 4 つに絞ることができ、各跳躍タイプの身体重心に関する特徴や動作的特徴を詳細に明らかにすることができた。

本研究で得られた各跳躍タイプの身体重心に関する特徴は、次のようにまとめられる。

**H-type** は、助走で得た水平速度を踏切準備局面でなるべく維持しながら、身体重心高を高く保ち、踏切局面の水平速度の減速を小さくしていた。**V-type** は、踏切準備局面で身体重心高を下げることで、踏切局面で水平速度の減速が大きいが、大きな鉛直初速度を獲得していた。**SH-type** は、踏切準備局面で **H-type** と同程度の水平速度を維持していたが、踏切局面において **H-type** よりも水平速度の減速が大きかった。**SV-type** は、踏切局面において **H-type** よりも水平速度の減速が大きいが、**V-type** と同程度の鉛直速度を獲得していた。

また、これらの動作的特徴をまとめると以下のようなになる。

#### ①Horizontal type (**H-type**) の動作的特徴

助走局面で獲得した水平速度が大きいくほど、大きな跳躍距離を獲得できるとした研究は多い (Hay and Miller, 1985 ; Hay, 1986 ; Hay and Nohara, 1990 ; Lees et al. , 1993, 1994)。

**H-type** は、踏切準備および踏切局面でできる限り大きな水平速度を維持しようとする方略をとっていたものと考えられる。**H-type** の主な動作的特徴は、踏切準備局面で体幹の前傾を大きく保つこと (**Figure 5-3, b**)、踏切局面で振上脚の膝関節の屈曲を大きくすること (**Figure 5-3, d**) などであった。

踏切準備局面の体幹の動作に関して、阿江ら（1999）は、体幹の動作は身体の中でも特に質量が大きいため、身体重心速度の変化に与える影響が大きいと述べている。また、伊藤ら（2001）は、スプリント動作中に体幹を前傾させることは、より身体重心を前方へシフトできるため、加速局面において推進方向の地面反力を大きくすることができるかと述べている。本研究では、踏切 2 歩前滞空期中の遊脚の股関節屈曲トルクのピーク値と踏切 1 歩前接地時における体幹の前傾との間に正の有意な相関関係（ $r = 0.56$ ,  $p < 0.05$ ）があったことから、大きな遊脚股関節の屈曲トルクを発揮することが、体幹の前傾につながることを示唆された。さらに、踏切足離地時の跳躍角と体幹角度との間には、L1on 時（ $r = 0.48$ ,  $p < 0.01$ ）や TD 時（ $r = 0.62$ ,  $p < 0.01$ ）において有意な正の相関関係がみられた。つまり、走幅跳の踏切準備局面においても、滞空期に大きな遊脚股関節の屈曲トルクを発揮し、質量の大きな体幹の前傾をなるべく保つことは、身体重心を前方へシフトすることにつながり、その結果、同じ脚の動作であればブレーキ距離（身体重心と接地足との水平距離）を小さくすることができるため、水平速度の維持に効果があると推察される。したがって、踏切準備局面の体幹の動作は、H-type を指導者が観察によって質的に見分けるための重要な着眼点になると考えられる。

踏切局面の振上脚の動作に関して、Hay（1986）は、振上脚膝関節を大きく屈曲することは股関節まわりの振上脚全体の慣性モーメントを小さくできるため、振上脚を素早くスイングしやすくなると述べている。また、青山ら（1992）は、振上脚を素早くスイングする

ことは、振上脚股関節の正のパワーを発揮することにつながり、身体重心加速度の向上に効果があることを報告している。以上より、H-type のように踏切局面で振上脚の膝関節を大きく屈曲することは、水平速度の維持、あるいは、水平速度の減速を最小限に抑える効果があると考えられる。

## ②Vertical type (V-type) の動作的特徴

身体重心の鉛直初速度の重要性は、記録水準が上がるにつれて増すとされている（村木ら，2005；小山ら，2008）。V-type は、踏切局面で水平速度の減速が大きい、大きな鉛直初速度を獲得しようとする方略をとっていたものと考えられる。V-type の主な動作的特徴は、踏切 1 歩前支持期中に支持脚膝関節を大きく屈曲させることで身体重心高を下げること（Figure 5-3, a）、踏切足接地時に体幹の後傾が大きいこと（Figure 5-3, b）などであった。

踏切準備局面での身体重心高や体幹の動作に関して、Lees et al.（1993）は、踏切局面において、踏切足まわりの身体の起こし回転を利用して効果的に身体重心の鉛直速度を獲得するためには、踏切準備中に身体重心高を下げ、より身体重心の前方に踏切脚を接地する必要があると述べている。また、阿江ら（1989）は、踏切準備局面において、身体重心高を下げることや体幹を後傾させることは、身体重心の水平速度の減少を引き起こしながらも、踏切中の踏切足まわりの身体の起こし回転動作を利用して、身体重心の鉛直速度を獲得するために重要な動作であると述べている。本研究の結果から、V-type は、踏切中の鉛直

上向きの大きな平均力を獲得しながらも、ブレーキ成分の平均力も大きかった。したがって、過度に身体重心高を下げることや体幹を後傾する踏切準備動作は、身体重心水平速度の大きな減少を引き起こす要因にもなることが示唆された。

### ③Semi-horizontal type (SH-type) および Semi-vertical type (SV-type) の動作的特徴

SH-type と SV-type は、H-type と V-type の中間的な特徴を有する跳躍タイプであると言える。SH-type と SV-type の相違は、主に踏切準備動作中の体幹の前後傾動作と踏切 1 歩前支持期中の支持脚膝関節の屈曲動作にある。SH-type は、踏切準備局面中の体幹の前傾を維持し、踏切 1 歩前支持期の支持脚膝関節の屈曲が小さかったことで、身体重心高が SV-type よりも高く、身体重心の水平速度をより維持していた。一方、SV-type は、踏切 1 歩前支持期から滞空期にかけて、SH-type よりも体幹の後傾が大きく、やや水平速度の減速があるものの、大きな鉛直初速度を獲得することができていた。

以上のような各跳躍タイプ別の動作的特徴の相違は、踏切局面における身体重心の水平および鉛直速度の変化に与える影響が大きかったと考えられる。Figure 5-9 は、踏切局面における H-type と V-type の動作的特徴と身体重心の水平および鉛直速度の変化を反映した模式図である。模式図は、踏切足の接地点と身体重心点を結んだ線分とその線分に対して接線方向に作用する身体重心の速度ベクトル（起こし回転成分）をそれぞれ示している。

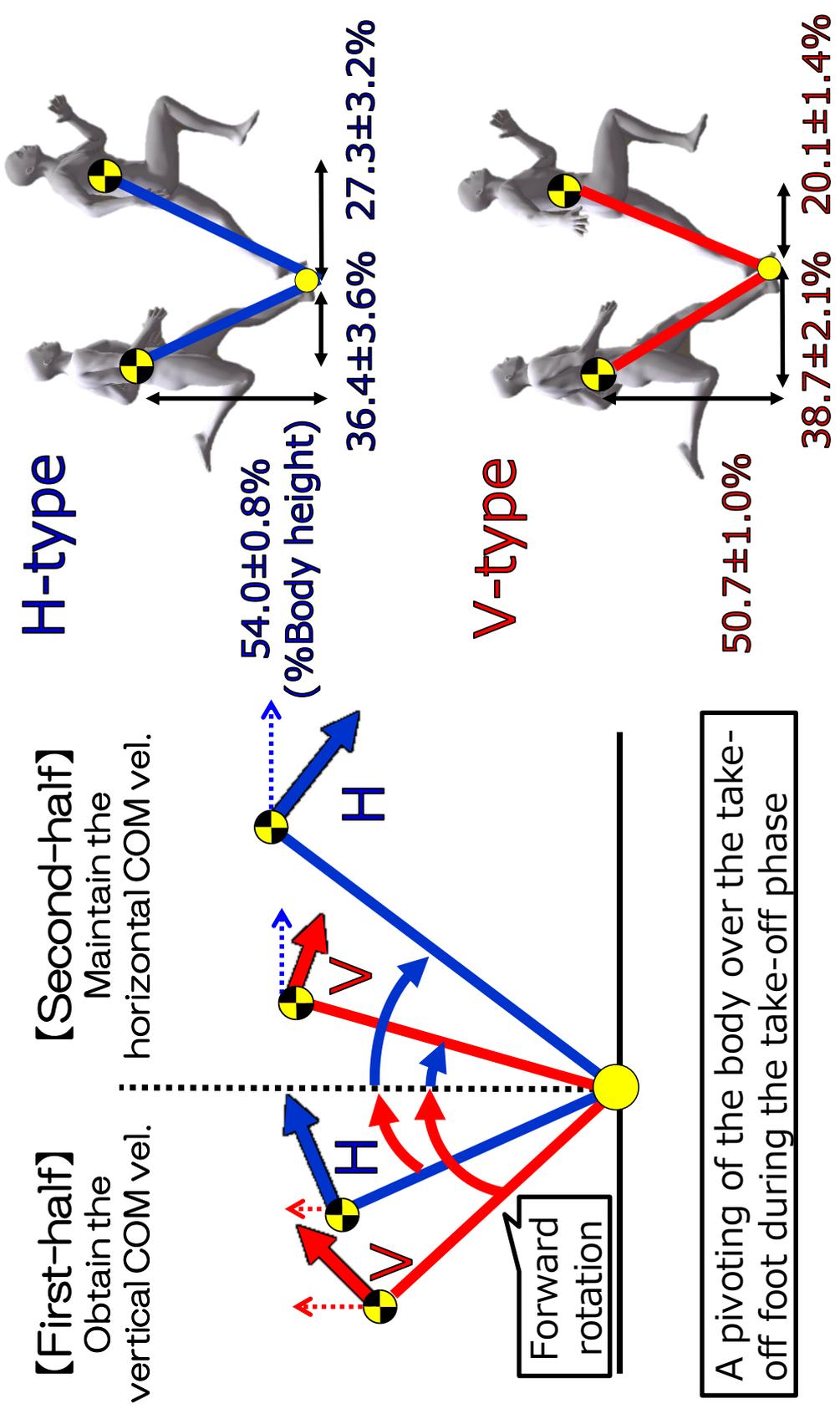


Figure 5-9 Difference of the changes in the COM velocities for H- and V-types during the take-off phase.

両タイプ間は、踏切足接地時の身体の後傾姿勢や重心高（身長比）などに有意差がみられており、踏切足接地時における身体の姿勢の相違が、踏切中の起こし回転動作による鉛直速度の獲得に影響を与えていたと考えられる。これまでの先行研究では、踏切足まわりの身体の起こし回転動作が水平速度から鉛直速度へ変換するために最も重要な動作であるとされてきた (Lees et al., 1993, 1994 ; Kakihara and Suzuki, 2001 ; Koyama et al., 2009)。

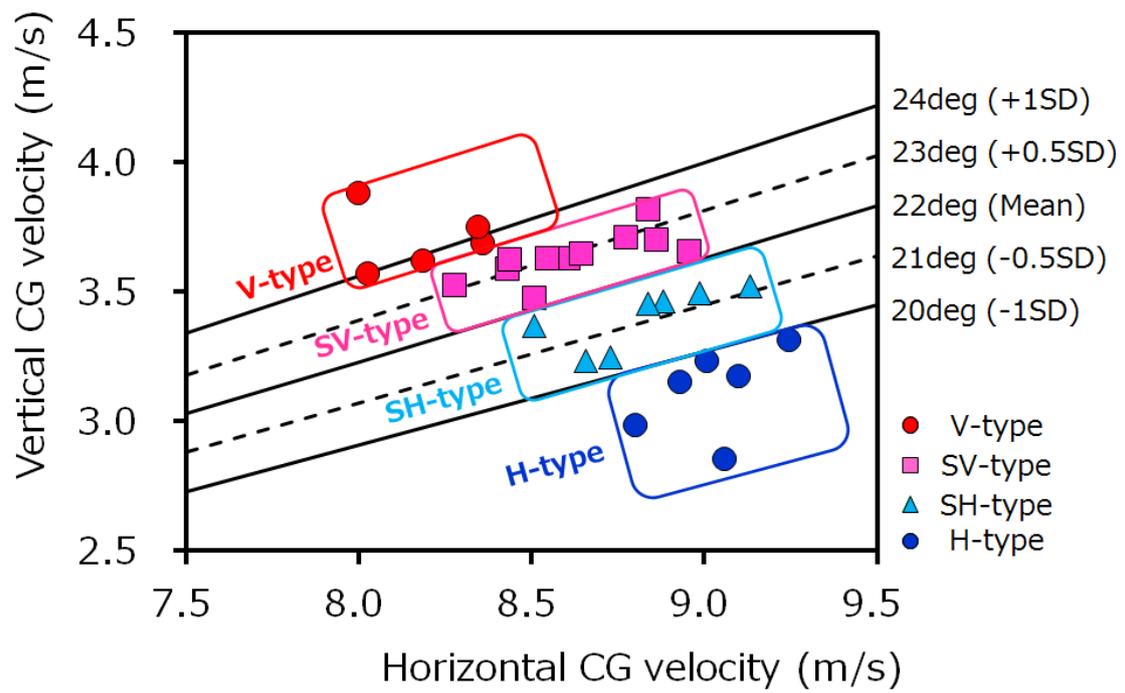
しかし、本研究で新たに跳躍タイプ別に踏切準備から踏切局面の動作分析を行った結果、各跳躍タイプで踏切中の起こし回転動作による鉛直速度の獲得に相違がみられた。すなわち、**H-type** は踏切前半に鉛直速度をあまり獲得することはできないが、踏切後半に踏切足離地時の身体重心距離 (COMD<sub>T0</sub>) を有意に大きくすることで身体重心水平速度をより維持するような起こし回転動作を利用していた。一方、**V-type** は身体の後傾姿勢や身体重心高を下げることで踏切前半に大きな鉛直速度を獲得していたが、踏切後半にあまり水平速度を維持することができないような起こし回転動作を利用していた。また、**SH-type** と **SV-type** は、上述した **H-type** と **V-type** の中間的な動作的特徴を有しており、起こし回転動作による鉛直速度の獲得も中間的な跳躍タイプであったと言える。

これまでは、各跳躍タイプの詳細な動作的特徴は提示されていなかったため、指導者の経験や感覚に跳躍タイプの分類が委ねられていた。今後は、選手の特性や発達段階を考慮して、指導者や選手が意図的に跳躍タイプを選択するができるとともに、各跳躍タイプの動作的特徴を反映させた動作モデルを参考に課題を修正することが可能になるだろう。

#### 5.4.3 指導現場における各跳躍タイプの簡便的な分類とその有用性

多くの走幅跳指導者は、走幅跳選手に対して起こし回転を利用して画一的に高く跳び上がることを強調しすぎていると指摘している（岡野，1989；関岡，1990；吉田，2011；森長，2016）。このような問題は、走幅跳選手を分類するための適切な指標や異なる走幅跳選手を指導するための分類指標や目標となる動作モデルがないことが一因である。本研究のように、各跳躍タイプの動作特徴や起こし回転動作の相違を反映させた視覚的な動作モデルを提供した研究は、これまでにないアプローチであると考えられる。

**Figure 5-4** で示した各タイプの標準動作モデルによるキネマティクスの特徴は、走幅跳選手の技術的欠点を明らかにし、適切な技術トレーニングをデザインするための指標として指導者や選手に提供できると考えられる。また、**Figure 5-5** で示した相関係数を示した動作モデルは、現場指導者が観察によって質的に分類するための着眼点を示すと考えられる。指導者は、標準化回帰係数が大きかった踏切足離地時における踏切脚下腿の前傾角度 ( $f$ ) や踏切足接地時における体幹の後傾角度 ( $c$ ) から優先的に観察すると、各跳躍タイプへの分類が簡便になると考えられる。さらに、**Figure 5-10** は、各跳躍タイプと水平および鉛直初速度の散布図を示しており、この図を参考にすれば、踏切足離地時の跳躍角などから大まかな跳躍タイプの分類の推定が可能になると考えられる。本研究の結果より、20 deg ( $-1.0SD$ ) よりも下は H-type, 21 deg ( $-0.5SD$ ) 付近は SH-type, 23 deg ( $+0.5SD$ ) 付近は SV-type, 24 deg ( $+1SD$ ) よりも上は V-type にそれぞれ該当する目安となるだろう。



**Figure 5-10 Relationships between jumping types and horizontal and vertical CG velocities**

**at the instant of the toe-off foot.**

走幅跳の踏切準備および踏切局面での技術的課題は、踏切準備局面において助走で獲得した大きな身体重心の水平速度をなるべく維持しながら、踏切局面において身体重心の水平速度の減少を最小限に抑えて、大きな鉛直速度を獲得することである (Ae et al., 1989 ; Hay, 1993 ; Koyama et al., 2006). 阿江 (2002) は、走幅跳の跳躍タイプには「スピード型」と「パワー型 (バネ型)」が存在するとともに、世界記録を樹立した際のパウエル選手の跳躍は、踏切における体幹の後傾はパワー型、振込脚の残し方はスピード型で、両タイプの良いところを組み合わせた第 3 のタイプであったと述べている。本研究の結果と照らし合わせると、H-type の動作は大きな水平速度を維持するスプリント能力を必要とするため「スピード型」、V-type の動作は踏切局面で大きな鉛直速度を獲得するためのパワー発揮を必要とするため「パワー型 (バネ型)」、SH-や SV-type が第 3 のタイプに該当すると推察される。

**Figure 5-11** は、各跳躍タイプの競技水準の向上を示した模式図である。走幅跳選手の記録水準は、①スピード型 (H-type) のまま上がっていく、②パワー型 (V-type) のまま上がっていく、③跳躍タイプを変化させながら上がっていくことなどが予想される。本研究より、H-type と SH-type は大きな身体重心の水平速度を維持することに動作的課題を有する選手に、V-type と SV-type は踏切局面において大きな鉛直速度を獲得することに動作的課題を有する選手に対する動作モデルになり得るだろう。

# Evolution of a long jumper

Good technique =

Fast speed + Less brake + Large vertical velocity

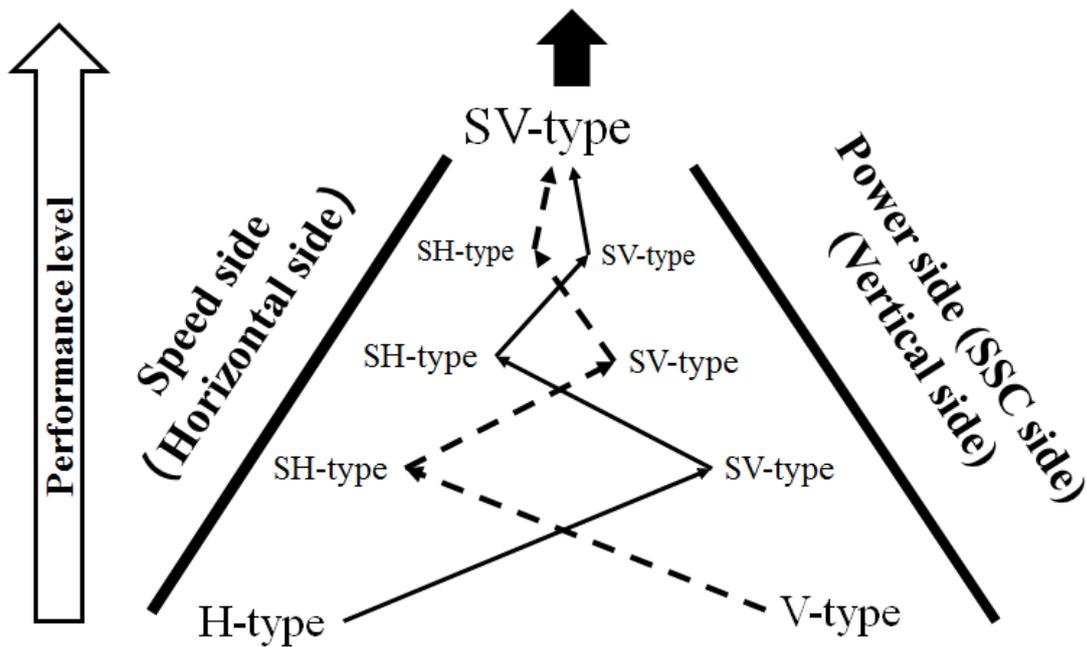


Figure 5-11 The evolution model of the long jumper skills.

## 5.5 要約

本章（研究課題2）の目的は、世界および日本一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作をクラスター分析法により類型化し、各跳躍タイプの動作モデルを構築するとともに、その動作的特徴を明らかにして異なる跳躍タイプの走幅跳選手を指導するための基礎的知見と示唆を得ることであった。本研究の結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 世界および日本一流男子走幅跳選手29名の踏切準備および踏切動作は、踏切足離地時の跳躍角をもとにしたクラスター分析の結果、Horizontal type (H-type), Semi-Horizontal type (SH-type), Semi-Vertical type (SV-type), Vertical type (V-type) の4つの跳躍タイプに分類された。本研究が提案する4つの跳躍タイプは、各跳躍タイプ間の躍距離、身長および体重に有意差がないことから、跳躍記録や選手の身体的特徴に依存しない分類であると考えられる。
- 2) 踏切足離地時の跳躍角と各関節およびセグメント角度との相関関係を検討した結果、①踏切2歩前接地時の体幹角度、②踏切1歩前支持期の支持脚膝関節角度、③踏切足接地時の体幹角度、④踏切足接地時の踏切脚下腿角度、⑤踏切局面中の振上脚膝関節角度、⑥踏切足離地時の踏切脚下腿角度の6角度に高い相関関係がみられ、跳躍タイプを識別する際の重要な動作着眼点として抽出された。
- 3) H-type と SH-type の選手は、①踏切準備局面中の体幹の前傾が大きい、②踏切局面中の

遊脚膝関節の屈曲が大きい，③踏切足離地時の身体重心から踏切足までの距離や踏切脚下腿の前傾が大きい，④踏切 2 歩前滞空期中の股関節屈曲トルクのピーク値が大きいなどの特徴を有しており，大きな身体重心水平速度をなるべく維持するような踏切準備および踏切動作であった。

- 4) V-type と SV-type の選手は，①踏切 1 歩前支持期中の支持脚膝関節の屈曲が大きい，②踏切足接地時に体幹および踏切脚下腿の後傾が大きい，③踏切中の鉛直上向きの平均力が大きいなどの特徴を有しており，踏切足まわりの身体の起こし回転動作を利用して，踏切中に大きな身体重心鉛直速度を獲得するような踏切準備および踏切動作であった。
- 5) 各跳躍タイプは，踏切足接地時の身体の後傾姿勢や身体重心高などに相違がみられ，踏切中の身体の起こし回転動作を利用した身体重心の速度変化にも相違がみられた。

本章（研究課題 2）の結果と考察から，走幅跳の技術指導に関して，以下のことが示唆された。①H-type と SH-type は大きな身体重心の水平速度を維持することに動作的課題を持つ選手に，V-type と SV-type は踏切局面において大きな鉛直速度を獲得することに動作的課題を持つ選手に対する動作モデルとして利用できる，②跳躍角と高い相関関係のみられた 6 角度，特に，踏切足接地時の体幹角度は，指導者が観察によって質的に見分けるための動作着眼点になり得る。

## 6. 結論

本研究の目的は、一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切動作のバイオメカニクスの特徴を明らかにするとともに、クラスター分析法により走幅跳選手を類型化して各跳躍タイプの動作的特徴を明らかにすることで、走幅跳選手の技術改善に役立つ基礎的知見と示唆を得ることであった。この目的を達成するために2つの研究課題を設定した結果、以下のことが明らかとなった。

### 6.1 世界および日本一流男子走幅跳選手における踏切準備および踏切動作の特徴に関して

#### (研究課題1の研究成果)

研究課題1では、世界および日本一流選手の踏切準備および踏切動作をバイオメカニクス的に比較した。その結果、踏切2歩前接地から踏切足離地における身体重心水平速度は、世界一流選手の方が有意に大きく、各歩の支持期中における水平速度の減少も小さかった。日本一流選手は、①踏切2歩前支持期における支持脚膝関節の屈曲伸展動作が大きく、踏切2歩前離地時の身体重心鉛直速度が大きいこと、②踏切準備局面において、体幹を前傾から後傾に切り替えるタイミングが早く、踏切足接地時の後傾も大きいこと、③踏切2歩前および1歩前離地時における遊脚股関節の屈曲トルクが小さいことなどが課題として挙げられた。

以上より、日本選手を指導するための技術指導に関して、①踏切準備局面では、踏切2

歩前支持期中の支持脚膝関節を過度に屈曲伸展させずに、支持脚下腿を前傾させながら離地することで、遊脚足部がより低い位置を通過するように動かすことが早いタイミングで踏切足を接地させるために効果的であること、②踏切準備から踏切局面にわたって、遊脚股関節の大きな屈曲トルクを発揮することで体幹の前傾を維持し、より前方に飛び出すことなどが重要であることが明らかとなった。

## 6.2 異なる跳躍タイプの走幅跳選手における踏切準備および踏切動作の特徴に関して

### (研究課題2の研究成果)

研究課題2では、世界および日本一流男子走幅跳選手29名を踏切足離地時の跳躍角をもとにクラスター分析を用いて分類し、各跳躍タイプの踏切準備および踏切動作をバイオメカニクス的に比較した。クラスター分析の結果、Horizontal type (H-type)、Semi-Horizontal type (SH-type)、Semi-Vertical type (SV-type) および Vertical type (V-type) の4つの跳躍タイプに分類された。本研究が提案する跳躍タイプは、跳躍距離、身長および体重に有意差がみられなかったことから、跳躍記録や選手の身体的特徴に依存しないと考えられる。H-type と SH-type の選手は、①踏切準備局面中の体幹の前傾が大きい、②踏切局面中の遊脚膝関節の屈曲が大きい、③踏切足離地時の身体重心から踏切足までの距離や踏切脚下腿の前傾が大きい、④踏切2歩前滞空期中の股関節屈曲トルクのピーク値が大きいなどの特徴を有していた。V-type と SV-type の選手は、①踏切1歩前支持期中の支持脚膝関節の屈曲が大きい、

②踏切足接地時に体幹および踏切脚下腿の後傾が大きい, ③踏切中の鉛直上向きの平均力が大きいなどの特徴を有していた.

以上より, H-type と SH-type は大きな身体重心の水平速度を維持することに動作的課題を持つ選手に, V-type と SV-type は踏切局面において大きな鉛直速度を獲得することに動作的課題を持つ選手に対する動作モデルとして利用できると考えられる. また, 跳躍角と高い相関関係のみられた 6 角度, 特に, 踏切足接地時の体幹角度は, 指導者が観察によって質的に見分けるための動作着眼点になり得る.

### 6.3 今後の課題

①本研究では, 一流男子走幅跳選手のデータを取得するために, 公式競技会における試技を分析対象とした. そのため, 各歩の支持期における地面反力を収集することができず, 支持脚や踏切脚のキネティクスの分析や機能を明らかにすることができなかった. 今後は, 高い技能をもつ選手などを対象に各歩の地面反力を計測し, 支持脚や踏切脚の機能についても明らかにしていく必要がある.

②本研究では, 走幅跳の主要な動作面である矢状面 (YZ 平面) での 2 次元分析を行った.

Shimizu and Ae (2013) と Shimizu et al. (2014) は, 支持脚や踏切脚の機能を 3 次元的に検討した結果, 各歩の支持期において股関節外転トルクの発揮が大きいことを報告しており, 前額面 (XZ 平面) からの観察も重要であることを指摘している (Figure 6-1). 今後は, 前額面からみた各跳躍タイプの動作的特徴についても明らかにしていく必要がある.

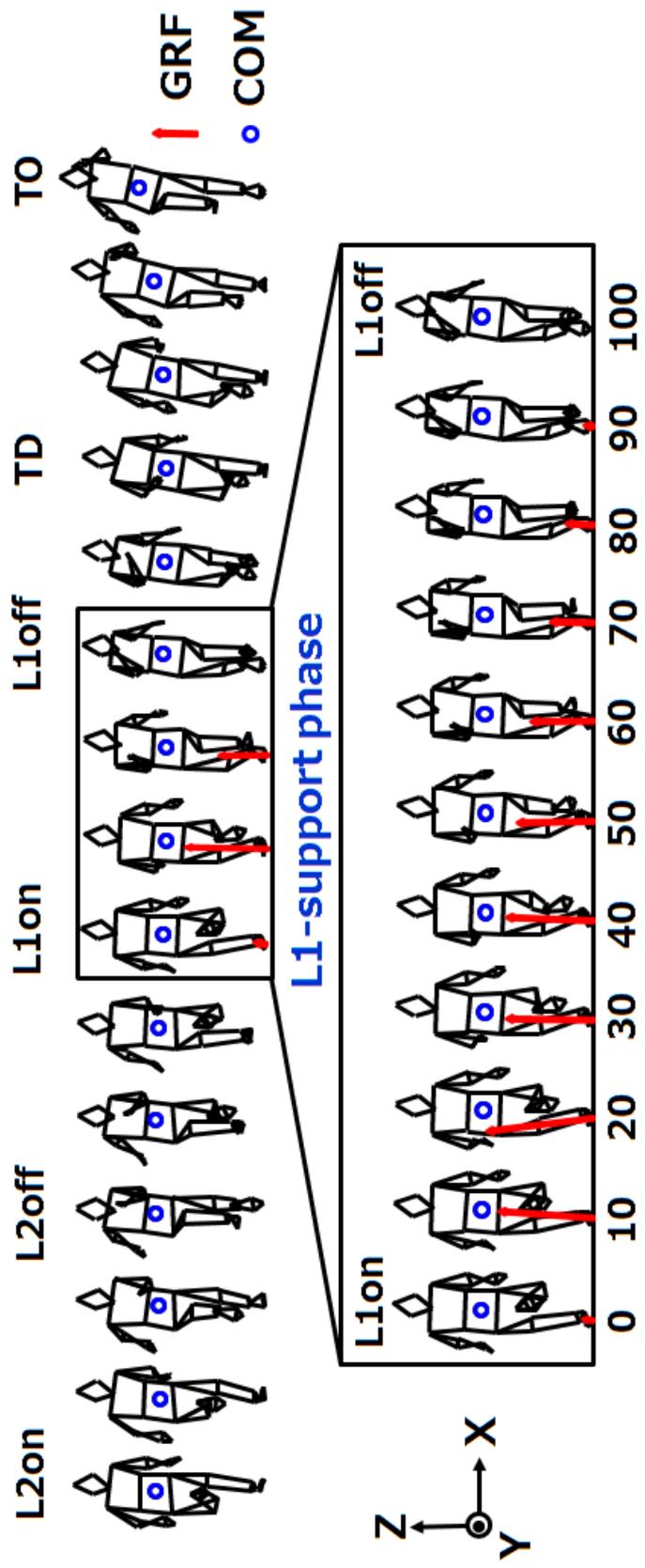


Figure 6-1 The stick pictures and GRF vector for the typical subject from L2on to TO in back views.

- ③**Figure 6-2** は、各跳躍タイプの踏切足接地時における体幹角度を示したものである。踏切足接地時の体幹角度は、踏切足離地時の跳躍角との間に有意な相関関係がみられるだけでなく、指導者がビデオなどを用いて視覚的に捉えやすい変数であると推察される。今後は、踏切足接地時における体幹角度をもとに、指導現場でも簡便に跳躍タイプの識別ができるような評価指標を提案し、その妥当性を検証していく必要がある。
- ④習熟度の低い選手では、記録水準が上がるにつれて、個人内の跳躍タイプが変化すると予想される (**Figure 5-11**)。今後は、走スピード (例えば、50m 走) と脚筋力やパワー (例えば、踏切脚伸展筋力) に関わる変数も収集して、走幅跳選手の能力に合った跳躍タイプを提案していく必要がある。
- ⑤**Figure 6-3** は、助走速度や跳躍距離と跳躍タイプとの関係を 3 次元プロットで示したものである。なお、図中のデータには、1991 年に行われた東京世界選手権大会のデータ (Fukashiro and Wakayama, 1992) も追加して示している。本研究では、国内外の一流男子走幅跳選手 29 名の最も記録の良かった 1 試技を分析対象とした。今後は、幅広い記録水準の分析対象者を増やすこと (横断的な研究アプローチ) や 1 名の選手から複数試技を収集すること (縦断的な研究アプローチ) を進め、各跳躍タイプにおける競技パフォーマンスの発達過程を検討していく必要がある。

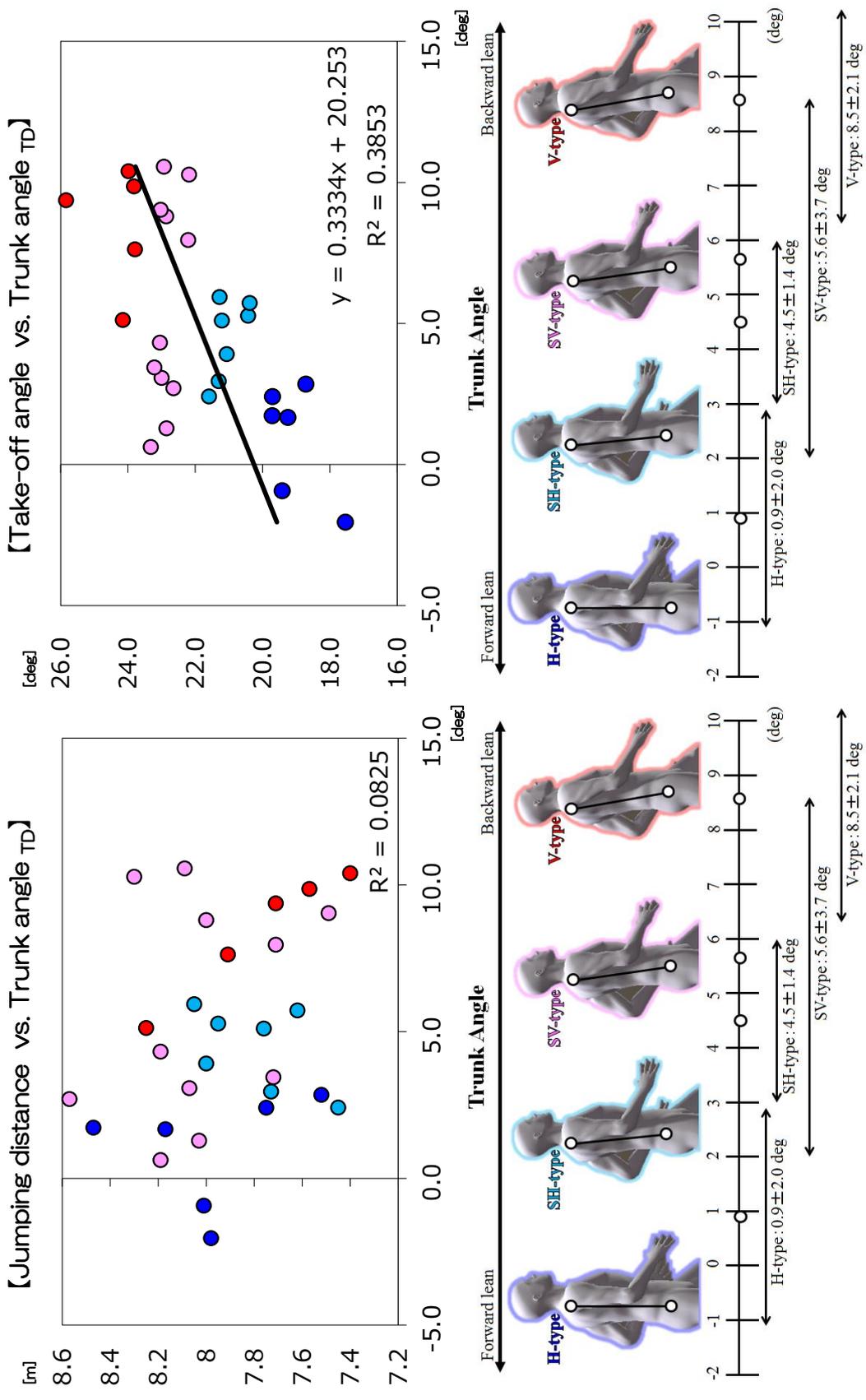


Figure 6-2 Depicts the trunk of a long jumper at the touchdown of the take-off foot for the four techniques: H-, SH-, SV-, and V-types.

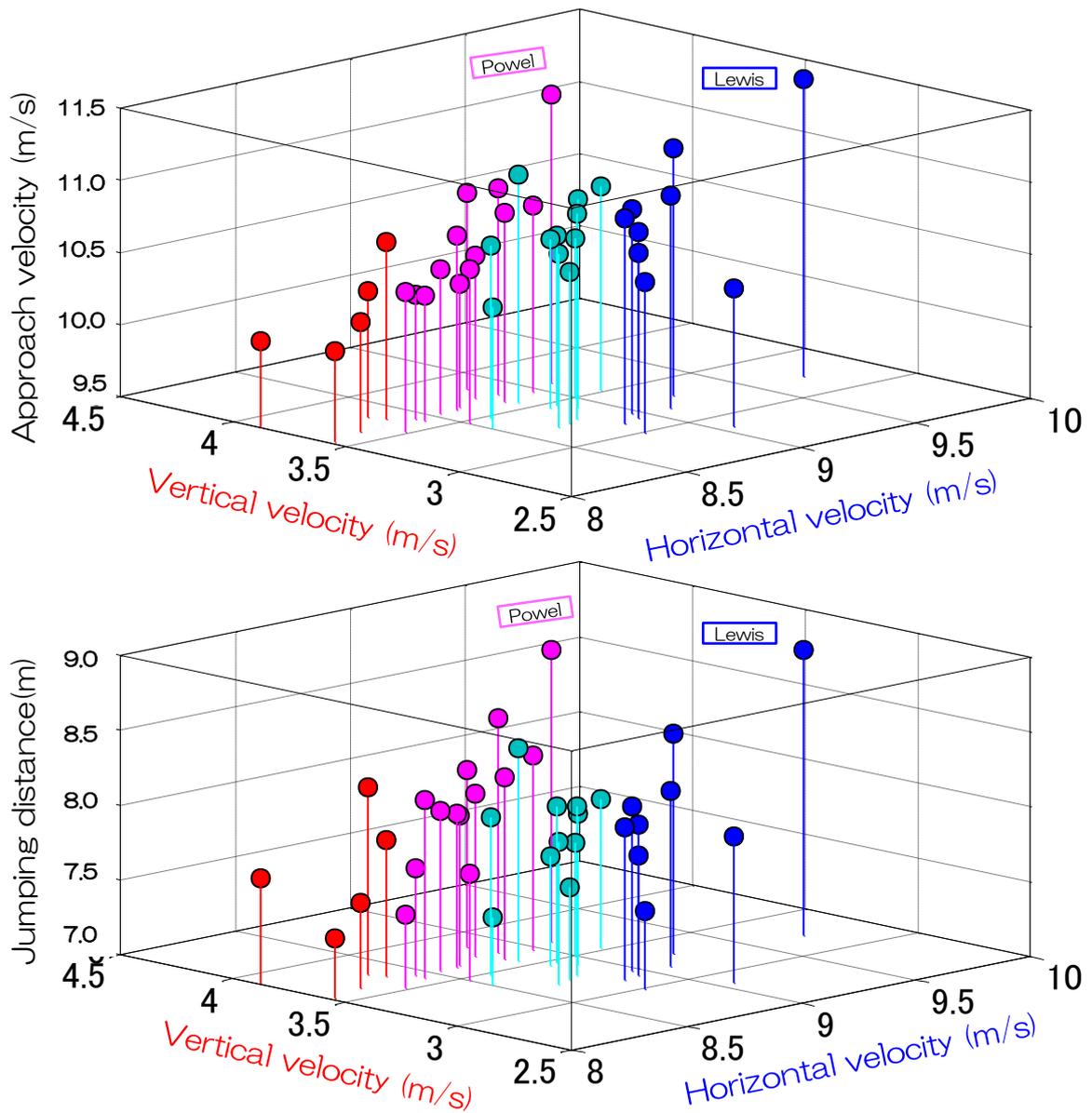


Figure 6-3 Relationships between performance level and jumping types.

## 参考文献

- 阿江通良（1982）高くとぶための跳に関する運動生力学的研究—踏切における身体各部の貢献度とメカニズム—。昭和56年度筑波大学博士論文。
- 阿江通良，村木征人，石川宣治，金高宏文，伊藤信之（1989）トルクおよびパワーからみた走幅跳における踏切脚筋群の機能。陸上競技紀要，2：2-9。
- 阿江通良，鈴木美佐緒，宮西智久，岡田英考，平野敬靖（1994）世界一流スプリンターの100m レースパターン疾走動作と速度との関係。体育学研究，43：260-273。
- 阿江通良（1996）日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数。Japanese Journal of Sports Science，15：152-162。
- 阿江通良，大村一光，金高宏文，飯干明，山田哲，伊藤信之，植田恭史（1999）一流選手走幅跳選手の踏切準備動作のバイオメカニクスの分析。平成10年度日本体育協会スポーツ医・科学報告，22：183-186。
- 阿江通良（2002）バイオメカニクスデータのコーチングへの活用。陸上競技研究，48：8-18。
- 阿江通良，藤井範久（2002）スポーツバイオメカニクス20講。朝倉書店。
- 阿江通良（2005）スポーツ選手のスキルフルな動きとそのコツに迫る。人工知能学会誌，541-548。
- Ae, M., Muraki, Y., & Koyama, H. (2007) A biomechanical method to establish a standard motion and identify critical motion by motion variability : With examples of high jump and sprint running. Bulletin of Institute of Health and Sport Sciences University of Tsukuba, 30 : 5-12.
- 青山清英，澤村博，加藤弘一，森田正利，五十嵐幸一，関岡康雄（1992）走幅跳の踏切動作に関する事例的研究—男子国内一流競技者を対象として—。陸上競技研究，11：14-20。
- 青山清英（2001）走幅跳の踏切動作における身体各部の筋機能に関するバイオメカニクスの研究。日本大学人文科学研究所研究紀要，62：135-143。

- 青山清英, 小山裕三, 澤村博, 菅生貴之 (2001) 国内一流走幅跳競技者の踏切, 踏切準備動作に関するバイオメカニクスの分析. *陸上競技研究*, 45 : 32-36.
- 深代千之, 宮下充正 (1984) 走幅跳における効果的動作の評価法. *第7回日本バイオメカニクス学会大会論集*, 走・跳・投・打・泳運動における“よい動き”とは, 66-70.
- 深代千之 (1990) 跳ぶ科学, 大修館書店.
- Fukashiro, S. & Wakayama, S. (1992) The men's Long Jump : World Record: Powell and Lewis. *New Studies in Athletics*, 53-56.
- 深代千之, 若山章信, 小嶋俊久, 伊藤信之, 新井健之, 飯干明, 淵本隆文, 湯海鵬 (1994) 走幅跳のバイオメカニクス. 世界一流選手の技術, ベースボールマガジン社, 135-151.
- 福田厚治, 伊藤章, 貴嶋孝太 (2008) 男子一流スプリンターの疾走動作の特徴—世界陸上東京大会との比較から—. *バイオメカニクス研究*, 12 (2) : 91-97.
- Hay, J. G. & Miller, J. A. (1985) Techniques used in the transition from approach to take-off in the long jump. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1 : 174-184.
- Hay, J. G. (1986) The Biomechanics of the Long Jump. In K. B. Pandolf (Ed.) , New York : Macmillan Publishing Co. , *Exercise and Sports Sciences Reviews*, 14 : 401-446
- Hay, J. G., Miller, J. A., & Canterna, R. W. (1986) The techniques of elite male long jumpers. *Journal of Biomechanics*, 19 (10) : 855-866.
- Hay, J. G. & Nohara, H. (1990) Techniques Used by Elite Long Jumps in Preparation for Take-off. *Journal of Biomechanics*, 23 (3) : 229-239.
- Hay, J. G. (1993) Citius, Alutius, Longius (Faster, Higher, Longer). *Journal of Biomechanics*, 26 (1) : 7-21.
- 伊藤浩二, 村木征人, 金子元彦 (2001) スプリント走加速局面における主観的努力度の変化がパフォーマンスに及ぼす影響. *スポーツ方法学研究*, 14 : 65-76.

- 伊藤信之, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也, 関子浩二, 松尾彰文, 山田真由美, 平野裕一  
(2009) 日本一流走幅跳選手における踏切準備動作. *陸上競技学会誌*, 7 (1) : 8-17.
- 門野洋介, 阿江通良, 榎本靖士, 杉田正明, 森丘保典 (2008) 記録水準の異なる 800m 走者のレースパターン. *体育学研究*, 53 : 247-263.
- Kakahara, W. & Suzuki, S. (2001) The EMG activity and mechanics of the running jump as a function of take-off angle. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11 : 365-372.
- 片峯隆, 金森隆, 中原一, 梶山彦三郎, 田口正公, 川上貢 (1991) 走幅跳における空中フォームの比較分析. *陸上競技研究*, 4 : 20-26.
- 小林育斗, 阿江通良, 宮崎朋世, 藤井範久 (2012) 優れた投能力をもつ小学生の投動作の特徴とその標準動作. *体育学研究*, 57 : 613-629.
- Koyama, H., Muraki, Y., & Ae, M. (2006) Immediate effects of the use of modified take-off boards on the take-off motion of the long jump during training. *Sports Biomechanics*, 5 (2) : 139-153.
- 小山宏之, 村木有也, 阿江通良 (2008) 大阪世界陸上大会男子走幅跳選手の踏切動作のバイオメカニクス. *バイオメカニクス研究*, 12 (2) : 127-133.
- Koyama, H., Ae, M., Muraki, Y., Yoshihara, A., & Shibayama, K. (2009) Biomechanical analysis of men's and women's long jump. *陸上競技研究紀要*, 5 : 107-118.
- 熊野陽人, 植田恭史 (2014) 学生走幅跳競技者における助走ラスト 2 歩の変化パターンと跳躍距離の関係に関する分析報告. *陸上競技研究*, 96 : 32-38.
- Lees, A., Fowler, N., & Derby, D. (1993) A biomechanical analysis of the last stride, touch-down and take-off characteristics of the woman's long jump. *Journal of Sports Sciences*, 11 : 303-314.
- Lees, A., Graham-Smith, P., & Fowler, N. (1994) A biomechanical analysis of the last stride, touchdown, and take-off characteristics of the men's long jump. *Journal of Applied Biomechanics*, 10 : 61-78.
- Leitch, J., Stebbins, J., Paolini, G. & Zavatsky, A. B. (1994) Identifying gait events without

- a force plate during running: A comparison of methods. *Gait & posture*, 33 (1) : 130-132.
- Linthorne, N. P., Backer, C., Douglas, M., M., Hill, G., A., & Webster, R., G. (2011) Take-off forces and impulses in the long jump. *Proceedings of the XXIX-th Congress of the International Society of Biomechanics in Sports*, 33-36.
- Luhtanen, P. & Komi, P. V. (1979) Mechanical power and segmental contribution to force impulses in long jump take-off. *European Journal of Applied Physiology*, 41 : 267-274.
- 松井秀治, 三浦望慶, 袖山紘, 小栗達也 (1973) 走り幅跳びの踏み切りにおける速度変化. *昭和48年度日本体育協会スポーツ科学研究報告*, 4 : 7-11.
- 松田有司, 山田陽介, 赤井聡文, 生田康志, 野村照夫, 小田伸午 (2010) 100m自由形におけるストローク頻度とストローク長からみた泳タイプ分類. *体力科学*, 59 : 465-474.
- 森丘保典, 杉田正明, 松尾彰文, 岡田英考, 阿江通良, 小林寛道 (2000) 陸上競技男子 400m ハードル走における速度変化特性と記録の関係—内外一流選手のレースパターンの分析から—. *体育学研究*, 45 : 414-421.
- 村木有也, 阿江通良, 小山宏之 (2005) 一流男子走幅跳選手の踏切準備および踏切局面における身体重心速度変化. *陸上競技研究紀要*, 1 : 142-146.
- Muraki, Y., Ae, M., Yokozawa, T., & Koyama, H. (2005) Mechanical properties of the take-off leg as a support mechanism in the long jump. *Sports Biomechanics*, 4 (1) : 1-15.
- Muraki, Y., Ae, M., Koyama, H., & Yokozawa, T. (2008) Joint torque and power of the takeoff leg in the long jump. *International Journal of Sport and Health Science*, 6 : 21-32.
- Murata, K., Ae, M., Uchiyama, H., & Fujii, N. (2008) A biomechanical method to quantify motion deviation in the evaluation of sports techniques using the example of a basketball set shot. *Bulletin of Institute of Health and Sport Sciences University of Tsukuba*, 31 : 91-99.
- 森長正樹, 安井年文, 重城哲, 加藤弘一, 岡野雄司, 小山裕三, 澤村博 (2003) 走幅跳の成功試技と失敗試技における踏切および踏切準備動作の相違. *陸上競技紀要*, 52:12-21.

森長正樹 (2016) 記録が伸びる！陸上競技 跳躍～走り幅跳び・三段跳び・走り高跳び・棒高跳び～ (コツがわかる本!). メイツ出版.

文部科学省 スポーツ・青少年局 (2001) スポーツ振興基本計画.  
[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/sports/plan/06031014.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/plan/06031014.htm), 最終参照日: 2019.1.11.

文部科学省 スポーツ・青少年局 (2001) スポーツ基本計画.  
[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/sports/plan/index.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/plan/index.htm), 最終参照日: 2019.1.11.

内藤景, 荻山靖, 宮代賢治, 山元康平, 尾縣貢, 谷川聡 (2013) 短距離走競技者のステップタイプに応じた 100m レース中の加速局面の疾走動態. *体育学研究*, 58: 523-538.

岡野進 (1989) 走幅跳・三段跳. 最新陸上競技入門シリーズ, ベースボールマガジン社.

大村一光, 福満隆徳, 飯干明, 末永政治, 烏丸卓三 (1995) 走幅跳の助走に関する研究—疾走能力別にみた全力助走と徐々助走の走り方の特徴—. *陸上競技研究*, 22: 10-17.

Popov, V. (1965) 走幅跳のトレーニング (岡本正己: 訳). ベースボールマガジン社.

Rogers, J. L. (2004) コーチングマニュアル (澤村博, 澤木啓祐, 尾縣貢, 青山清英: 訳). 陸上競技社.

齋藤望, 阿江通良 (1991) 走幅跳の踏切動作の類型化に関する研究. *陸上競技研究*, 7: 67-71.

関岡康雄 (1990) 陸上競技の方法. 道和書院.

志賀充, 永井純, 尾縣貢, 宮下憲, 大山卞圭悟 (2002) 走幅跳における踏切準備及び踏切局面の身体動作と記録の関係. *陸上競技研究*, 51: 9-17.

志賀充, 尾縣貢 (2004) 走幅跳競技者の下肢筋力と踏切中の Kinematics 及びキネティクス—膝関節と股関節に着目して—. *体力科学研究*, 53: 157-166.

渋川侃二, 春山国広, 三浦望慶 (1966) 身体脚部の力学的性質について. *東京教育大学体育学部スポーツ研究所報*, 4: 51-58.

Shimizu, Y. & Ae, M (2013) Three-dimensional analysis of the takeoff motion in the long jump. *The 31<sup>st</sup> Congress of the International Society of Biomechanics in Sports*, 16-19.

- Shimizu, Y., Ae, M. & Koike, S. (2014) Contribution of the joint torque of the take-off leg in the long jump. *The 32<sup>nd</sup> Congress of the International Society of Biomechanics in Sports*.
- Stefanyshyn, D. J., & Nigg, B. M. (1998) Contribution of the lower extremity joints to mechanical energy in running vertical jumps and running long jumps. *Journal of Sports Sciences*, 16 : 177-186.
- 高瀬淳也, 中島寿宏 (2015) 少人数における ICT を活用した体育授業の実践—5 名の複式学級における交流の広がりを目指したハードル授業事例から—. *教材学研究*, 第 26 巻, 173-180.
- 植屋清見, 中村和彦 (1984) 走幅跳の距離獲得条件—その定性的モデルと小学生における Limiting Factors—. *第7回日本バイオメカニクス学会大会論集*, 走・跳・投・打・泳運動における“よい動き”とは, 71-79.
- Ward, J. H. (1963) Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58 (301) : 236-244.
- Watelain, E., Barbier, F., Allard, P., Thevenon, A., & Angue, J. C. (2000) Gait Pattern Classification of Healthy Elderly Men Based on Biomechanical Data. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81 (5) : 579-586.
- Wells, R. P., & Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Human Locomotion*, I : 92-93.
- 山元康平, 宮代賢治, 内藤景, 木越清信, 谷川聡, 大山卞圭悟, 宮下憲, 尾縣貢, (2014) 陸上競技男子 400m 走におけるレースパターンとパフォーマンスとの関係. *体育学研究*, 59 : 159173.
- 矢田恵大, 阿江通良, 谷川聡, 伊藤章, 福田厚治, 貴嶋孝太 (2011) 標準動作モデルによる世界一流および学生短距離選手の疾走動作の比較. *陸上競技研究*, 87 : 10-16.
- Yeadon, M. R., & King, M. A. (1999) A method for synchronising digitised video data. *Journal*

*of Biomechanics*, 32 (9) : 983-986.

吉田孝久 (2011) 跳躍 (陸上競技入門ブック). ベースボール・マガジン社.

関子浩二, 高松 薫, 古藤高良 (1993) 各種スポーツ競技者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 (2005) スポーツアスリートにおけるばねに関する理論とその可能性. *陸上競技研究*, 60 (1) : 2-17.

関子浩二 (2006) 跳躍動作とその指導・トレーニング—プライオメトリックトレーニングに注目して—. *トレーニング科学*, 18 (4) : 297-305.

## 博士論文に関連する業績一覧

### 【学術論文】

- 1) **Yutaka Shimizu**, Michiyoshi Ae, Norihisa Fujii and Hiroyuki Koyama (2018) : Technique Types of Preparatory and Take-off Motions for Elite Male Long Jumpers. **International Journal of Sport and Health Science**, Vol. 16, 200-210. .
- 2) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也 (2011) : 標準動作モデルからみた一流走幅跳選手の踏切準備および踏切動作の特徴. **陸上競技研究**, 85, 23-30.

### 【国際学会発表 (査読付き国際会議論文)】

- 1) **Yutaka Shimizu**, Michiyoshi Ae, Hiroyuki Koyama : The takeoff preparation and takeoff motions for elite male long jumpers. The 33<sup>rd</sup> Congress of the International Society of Biomechanics in Sports (2015.6.29-7.3 University of Poitiers, France).
- 2) **Yutaka Shimizu**, Michiyoshi Ae, Hiroyuki Koyama, Yuya Muraki : A kinematic analysis of the takeoff preparatory motion of elite male long jumpers. The 5<sup>th</sup> Conference of the Asia Society of Sport Biomechanics (2014.9.02-9.4 National Taiwan Normal University, Taiwan).
- 3) **Yutaka Shimizu** and Michiyoshi Ae : Three-dimensional analysis of the takeoff motion in the long jump. The 31<sup>st</sup> Congress of the International Society of Biomechanics in Sports (2013.7.07-7.11 National Taiwan Normal University, Taiwan).
- 4) **Yutaka Shimizu**, Michiyoshi Ae, Hiroyuki Koyama : Biomechanical characteristics of takeoff preparation and takeoff motion in different jumping types of elite male long jumpers. The 30<sup>th</sup> Congress of the International Society of Biomechanics in Sports (2012.7.2-7.6 Australian Catholic University, Australia).
- 5) **Yutaka Shimizu**, Michiyoshi Ae, Hiroyuki Koyama : A biomechanical study of the takeoff preparation and the takeoff motions in elite male long jumpers. The 29<sup>th</sup> Congress of the International Society of Biomechanics in Sports (2011.6.27-7.1 University of Porto, Portugal).

## 【国内学会発表】

- 1) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之: 跳躍タイプ別にみた走幅跳の成功試技と失敗試技の特徴.  
第 66 回日本体育学会 (2015.8.25-8.30 立命館大学).
- 2) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也: 一流男子走幅跳選手の踏切準備局面における支持脚の Kinematics. 第 23 回日本バイオメカニクス学会 (2014.9.11-9.13 JISS).
- 3) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也: 走幅跳の踏切準備局面における体幹の動きについて. 第 64 回日本体育学会 (2013.8.25-8.30 立命館大学).
- 4) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也: 記録水準の異なる走幅跳選手の踏切準備および踏切動作における下肢キネティクスの特徴. 第 22 回日本バイオメカニクス学会 (2012.9.11-9.13 北翔大学).
- 5) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也: 跳躍タイプが異なる一流走幅跳選手の踏切準備および踏切動作の特徴. 第 63 回日本体育学会 (2012.8.22-8.24 東海大学).
- 6) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也: 一流走幅跳選手の類型化に関するバイオメカニクス的研究. 第 62 回日本体育学会 (2011.9.25-9.27 鹿屋体育大学).
- 7) **清水悠**, 阿江通良, 小山宏之, 村木有也: 一流走幅跳選手の踏切準備および踏切動作のバイオメカニクスの特徴—標準動作モデルを用いて—. 第 61 回日本体育学会 (2010.9.8-9.11 中京大学).

## 【受賞】

- 1) **New Investigator Award for poster presentation**: Three-dimensional analysis of the takeoff preparatory motion in the long jump. The 34<sup>th</sup> International Conference on Biomechanics in Sports (2016.07.18-22, Tsukuba University, Japan).
- 2) **New Investigator Award for poster presentation**: Three-dimensional analysis of the takeoff motion in the long jump. The 31<sup>st</sup> Congress of the International Society of Biomechanics in Sports (2013.07.07-11, National Taiwan Normal University, Taiwan).

## 謝辞

本研究は、私が筑波大学体育専門学群 3 年次にスポーツバイオメカニクス研究室に所属して以降、約 10 年にわたってご指導をいただいた阿江通良教授（現：日本体育大学）のご校閲と励ましのもとに行われたものである。阿江先生には、博士論文の作成に関わるあらゆる面で懇切丁寧なご指導をいただいただけでなく、研究者や教育者としての心構えや在り方についてもご教授いただいた。ここに深く感謝申し上げます。

また、筑波大学の藤井範久教授、高木英樹教授、小池関也准教授、木越清信助教には、博士論文の質を高める多くのご指導と懇切丁寧なご校閲をいただいた。京都教育大学の小山宏之准教授をはじめとする日本陸上競技連盟科学委員会の皆様には、データ収集や分析に関して多大なご協力をいただいた。島根大学人間科学部の先生方、清水研究室ならびに陸上競技部の皆様には、学位取得のため不在にした期間の業務に対し、多大なお力添えをいただいた。心より感謝申し上げます。

さらに、柴山一仁氏、小林育斗氏、阿江数通氏、村田宗紀氏、矢田恵大氏、築野愛氏、中谷英樹氏、三上慧氏、大津卓也氏、沼津直樹氏、広野泰子氏、高見裕大氏をはじめとするスポーツバイオメカニクス研究室の皆様には、幾度となくご助言やご協力をいただいたとともに、研究以外の場面でも常に暖かい励ましをいただいた。筑波大学時代に切磋琢磨した陸上競技部の同期の皆様からも、多くの励ましをいただいた。

最後に、私に筑波大学や筑波大学大学院への進学を勧め、最後まで応援してくれた家族に対して、心より感謝申し上げます。

今後は、「研究理論と実践指導を兼ね備えた人物」を目指し、研究活動や教育活動に尽力し続けることを誓います。

2019 年 2 月

清水 悠