

2011 年度修士論文

三段跳の各跳躍局面における
キネマティクス及びキネティクス解析

指導教員
伊坂忠夫

立命館大学大学院
スポーツ健康科学研究科
スポーツ健康科学専攻修士課程 2 回生
6211100007-2
小泉 和哉

修士論文の要旨

6211100007-2

小泉 和哉

「三段跳の各跳躍局面におけるキネマティクス及びキネティクス解析」

キーワード：三段跳，下肢関節，踏切，跳躍タイプ，キネティクス，キネマティクス

【目的】

これまでの三段跳に関するキネマティクス研究は、身体重心速度とパフォーマンスの関係、踏切脚の関節角度変位などの身体動作とパフォーマンスの関係についての検討がされてきている。しかしながら、身体動作と身体重心速度の関連性をみているものは見当たらない。パフォーマンスに影響を与える身体重心速度は、身体動作（各関節の動き、使われ方のタイミングなど）の違いによって変化することが考えられる。したがって、跳躍距離に加え、身体動作と身体重心速度の関連性を検討する必要がある。また、キネティクスでの先行研究はこれまで少なく、エネルギー、床反力といった観点からその特徴を明らかにしたものだけであり、キネマティクスとの関係性をみたものはない。身体運動を詳しく分析するためには、その運動がどのような力によって引き起こされているかを検討する必要がある。したがって、キネマティクス、キネティクスの両面においてその特徴と、互いの相互関係を検討することで、三段跳のパフォーマンスにおける新たな知見が得られると考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では、競技力、跳躍タイプ、成功試技と失敗試技のそれぞれの観点から、三段跳の3つの跳躍局面に着目し、パフォーマンスに影響を与える要因を明らかにすることを目的とした。

【方法】

被験者は、大学生男子三段跳選手14名（身長 $1.75 \pm 0.05\text{m}$ ，身体質量 $66.5 \pm 6.1\text{kg}$ ）とした。被験者に、屋外の全天候型跳躍ピット上での三段跳の全力試技を2～4本行わせた。その際に、3次元モーションキャプチャ装置（Motion Analysis社：MOTION CAPTURE MAC 3D System: Raptor-E, 15台：Frame rate: 200Hz）を用いて、ホップ、ステップ、ジャンプの各局面の跳躍動作を撮影した。被験者には計51点の反射マーカを貼付した。データ処理は、筋骨格モデル動作解析ソフトウェア（nac社：n-motion muscular）を使用しておこなった。筋骨格筋モデルは、産業技術総合研究所のAIST人体寸法データベース1997-98を用いて、身体形状の推定をおこなった。変位データの平滑化は、4次のバターワース型デジタルローパスフィルタを用い、遮断周波数は10Hzで行った。

【結果・考察】

三段跳におけるキネマティクスの結果、助走速度と総跳躍距離には有意な正の相関関係が認められた ($r=0.80$ $p<0.001$). 各局面でみるとホップでは離地瞬間の水平速度と鉛直速度が (それぞれ $r=0.58$ $p<0.05$, $r=0.85$ $p<0.001$), ステップでは離地瞬間の鉛直速度が ($r=0.78$ $p<0.001$), ジャンプでは離地瞬間の水平速度が ($r=0.75$ $p<0.01$) それぞれ有意な相関関係にあった. これらの結果から, 三段跳のパフォーマンスを向上させるためには, 速い助走をおこなうことが第一条件であり, 後の3回の跳躍では水平速度と鉛直速度のバランスを各局面の必要に応じてとっていくことが重要であることがわかった. 三段跳におけるキネティクスの結果, 各支持期に共通して膝関節が大きな負の仕事をしていた. その大きさは股関節と足関節の正の仕事よりも大きかった ($p<0.01$). 各支持期における下肢3関節の仕事の和は, ステップ局面における負の仕事が大きく, その差はホップとステップで有意な差であった ($p<0.01$). このことから, 下肢関節のトルク, パワー, 仕事は, 3回の跳躍をおこなうための働きをそれぞれがしており, それは競技力の差にかかわらず起こっていることがわかった.

三段跳をホップ優位型とバランス型の2タイプにわけて, パフォーマンスへの影響を検討した結果, それぞれの特徴を明らかにすることができた. ホップ優位型は, ホップ局面の水平速度の減少量が大きい ($p<0.01$), 鉛直速度の獲得量が大きい ($p<0.05$), 跳躍距離が有意に大きかった ($p<0.05$). しかし, ホップ局面の水平速度の減少がジャンプ局面まで影響していた. バランス型は, ホップ局面では低く跳び出すため ($p<0.001$), 水平速度の減少は少なかった ($p<0.01$). そのためジャンプ局面まで大きな水平速度を維持していた. 以上のことから, 跳躍タイプ別によって各跳躍局面の跳躍のバランスのとりかたが異なることが明らかになり, 水平速度と鉛直速度の配分の違いと, その違いが起こる局面を明らかにすることができた.

三段跳における成功試技と失敗試技において, キネマティクスとキネティクスの両面から比較検討した結果, 失敗試技においては, 膝関節角度の屈曲が大きかった. その原因として, ①膝関節に加わる衝撃が大きいこと, ②屈曲から伸展への切り換え時に大きな力を発揮できない, あるいは切り替えが遅いことの2点が考えられた. したがって, 失敗しないためには, ①接地時に伸筋群が大きな力を発揮するために伸筋群の予備緊張 **Active Landing** をおこなうこと, ②接地位置の問題 (L3), ③両腕や振上脚の振込動作のタイミングにあわせて踏切脚を伸展することが考えられた.

Abstract

6211100007-2 KOIZUMI Kazuya

Kinematic and Kinetic Analysis from Touch-down to Take-off in Triple Jump

key word : triple jump, lower limb joint, take-off phase, jump type, kinematics, kinetics

[BACKGROUND]

In kinematics research on triple jump, the run-up speed, the feature of change in the body center-of-gravity speed in each jump phase and body motion has been reported. Moreover, the feature of kinetics is clarified from viewpoints such as energy and ground reaction. There are a lot of studies of kinematics and kinetics, but nothing about correlation between these two studies. Therefore, it is necessary to examine the feature from correlation between kinematics and kinetics, not only from one of them.

The purpose of the present study was to clarify the factor what affects performance by paying attention to three jump phases in triple jump.

[METHODS]

Subjects were fourteen college male triple jumpers (height of 1.75 ± 0.05 m, body mass of 66.5 ± 6.1 kg). In an outdoor all weather type jump pit, they tried triple jump with maximal effort, and their jumping motions were videotaped by using 3D motion capture device (Motion Analysis: MOTION CAPTURE MAC 3DSystem: Raptor-E, 15 set: Frame rate: 200Hz). 51 reflective markers were attached on the subject. Data processing was conducted by using musculo-skeletal model operation analysis software (nac: n-motion muscular). Presumption of body figure was performed using the AIST measure-of-human-body database 1997-98 of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. The data was smoothed by a Butterworth fourth-order zero-lag filter with padded end-points and a cut-off frequency of 10Hz.

[RESULT & DISCUSSION]

The result of the kinematics in a triple jump, run-up speed was significantly correlated with total jump distance ($r=0.80$ $p<0.001$). Because of this result, in order to improve performance of triple jump, increasing run-up speed is important. Moreover, in each jump phase, horizontal and vertical velocity of take-off is important at hop phase ($r=0.58$ $p<0.05$, $r=0.85$ $p<0.001$, respectively), and vertical velocity of take-off is important at step phase ($r=0.78$ $p<0.001$) and horizontal velocity of take-off is important at jump phase ($r=0.75$ $p<0.01$).

The result of the kinetics in a triple jump, the joint power output of the lower limb has showed a common pattern in the support phases in three jumps. The work of knee joint was much more negative than that in other joints. From this, it is considered that knee joint behave as a shock absorber. However, when flexion angle of knee joint is too large, it leads to failure. It is important to pay attention about active landing, L3 and free limb motion for successful jump.

The difference of jump-type, hop dominated type and balanced type, became clear. Although the hop dominated type had the large amount of reduction on horizontal velocity at a hop phase ($p<0.01$), hop distance was significantly high ($p<0.05$) due to great gain of vertical velocity ($p<0.05$). The balanced type had little reduction of horizontal velocity at a hop phase ($p<0.01$) with low take-off angle. For this reason, difference of jump-type was due to distribution of horizontal and vertical velocity.

目次

第1章 序論	1
1.1 三段跳の競技特性	1
1.2 先行研究	3
1.2.1 三段跳のキネマティクス	3
1.2.2 三段跳のキネティクス	4
1.2.3 現場の予備的データ	6
1.3 本研究の目的	10
1.4 本論文の構成	11
第2章 実験方法	12
2.1 被験者	12
2.2 実験試技	12
2.3 撮影機器	13
2.4 撮影	14
2.5 データ処理	15
2.5.1 キネマティクスの算出項目と定義	16
2.5.2 キネティクスの算出項目と定義	18
第3章 三段跳におけるキネマティクス	19
3.1 測定項目	19
3.2 統計処理	19
3.3 結果	20
3.3.1 速度と跳躍距離について	27
3.3.2 膝関節と跳躍距離について	33
3.3.3 跳出角度と跳躍距離について	38
3.3.4 速度と身体動作について	43
3.4 考察	46
3.4.1 速度と跳躍距離について	46
3.4.2 膝関節と跳躍距離について	47

3.4.3	跳出角度と跳躍距離について	47
3.4.4	速度と身体動作について	48
3.5	結論	49
第4章	三段跳におけるキネティクス～下肢関節の関節パワー・仕事に着目して～	50
4.1	目的	50
4.2	測定項目	50
4.3	データ分析	51
4.4	結果	51
4.4.1	床反力	55
4.4.2	下肢関節トルクとパワーの発揮パターン	55
4.4.3	下肢関節トルクと跳躍距離	58
4.4.4	下肢関節パワーと跳躍距離	62
4.4.5	下肢関節仕事	66
4.5	考察	70
4.5.1	下肢関節トルクとパワーの発揮パターン	70
4.5.2	下肢関節ピークトルクとピークパワー	71
4.5.3	下肢関節仕事	71
4.6	結論	72
第5章	跳躍タイプ別にみた各跳躍局面の比較	73
5.1	目的	73
5.2	被験者	73
5.3	測定項目	74
5.4	統計処理	74
5.5	結果	75
5.5.1	ホップ局面について	75
5.5.2	ステップ局面について	78
5.5.3	ジャンプ局面について	80
5.5.4	跳躍タイプによる競技力への影響	82

5.6	考察	86
5.6.1	ホップ局面について	86
5.6.2	ステップ局面について	86
5.6.3	ジャンプ局面について	87
5.6.4	跳躍タイプによる競技力への影響	88
5.7	結論	90
第6章 成功試技と失敗試技の比較		91
6.1	目的	91
6.2	被験者	91
6.3	測定項目	92
6.4	結果	92
6.4.1	膝関節角度について	92
6.4.2	関節トルク, パワーについて	95
6.4.3	仕事について	103
6.4.4	身体動作について	107
6.5	考察	109
6.5.1	身体動作について	109
6.5.2	関節トルク, パワー, 仕事について	111
6.6	結論	113
第7章 総合討論		114
第8章 結論		121
文献		122
付録 床反力の推定値とフォースプレートの値の誤差		128

第1章 緒言

本章では、三段跳の競技特性と先行研究、予備実験ならびに本論文の目的について論ずる。

1.1 三段跳の競技特性

三段跳はホップ、ステップ、ジャンプの3つの連続した跳躍の合計水平距離を競う競技である。局面を大きく分けると助走、ホップ、ステップ、ジャンプ、着地に分類でき、助走後、最初の踏切と2回目の踏切は同じ脚でおこない、さらに逆の脚による1回の踏切及び両脚での着地から成り立っている。このことは、陸上競技における三段跳の競技規則として決まっている。このように3つの跳躍局面があることが三段跳の特徴であり、始めの踏切から第2回目の踏切までをホップ、第2回目の踏切から第3回目の踏切までをステップ、第3回目の踏切から両脚着地までをジャンプと呼んでいる（図 1.1）。

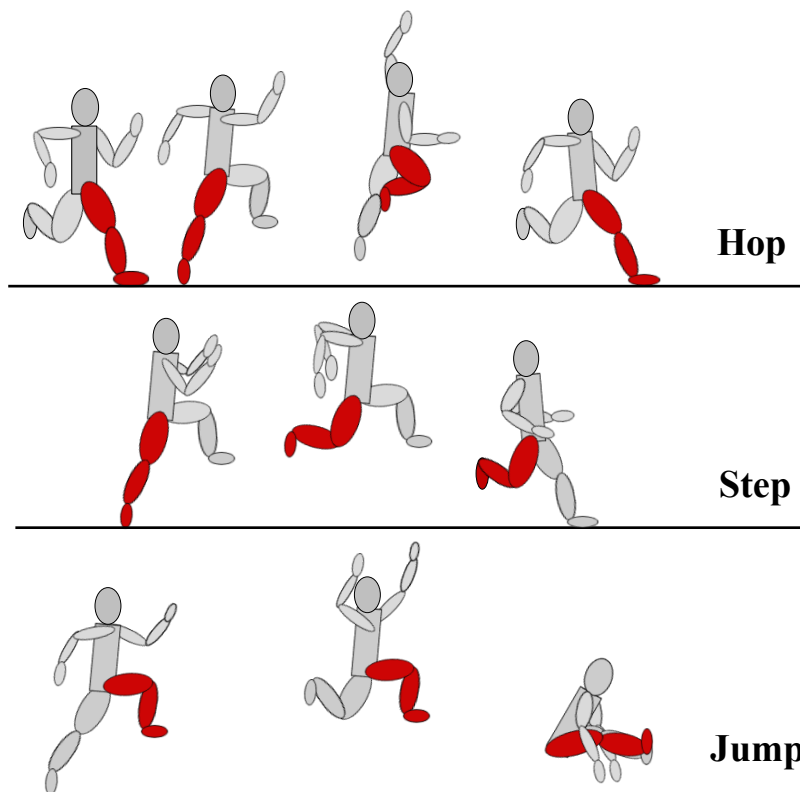


図 1.1 三段跳の跳躍

三段跳で出し得る記録は、助走によって得られる水平方向のスピードと、ホップ、ステップ、ジャンプの3つの全ての局面にわたって、助走スピードが保持され、公平に配分されるかどうかにかかっている[1].

さらにこの競技の難しさは、いずれの局面においても、踏切で十分な高さを生み出さなければならず、加えて各跳躍局面の着地で自分の体重を支えなければならない。このために要求される動きは、水平方向の抗力の大きさに応じられるようなものである。この抗力は、各競技者の質量、速度、重心の高さ、技術の程度などによって決まってくる。図1.2に示すように、物理的に三段跳の記録を決定する因子というものが報告されている[2].

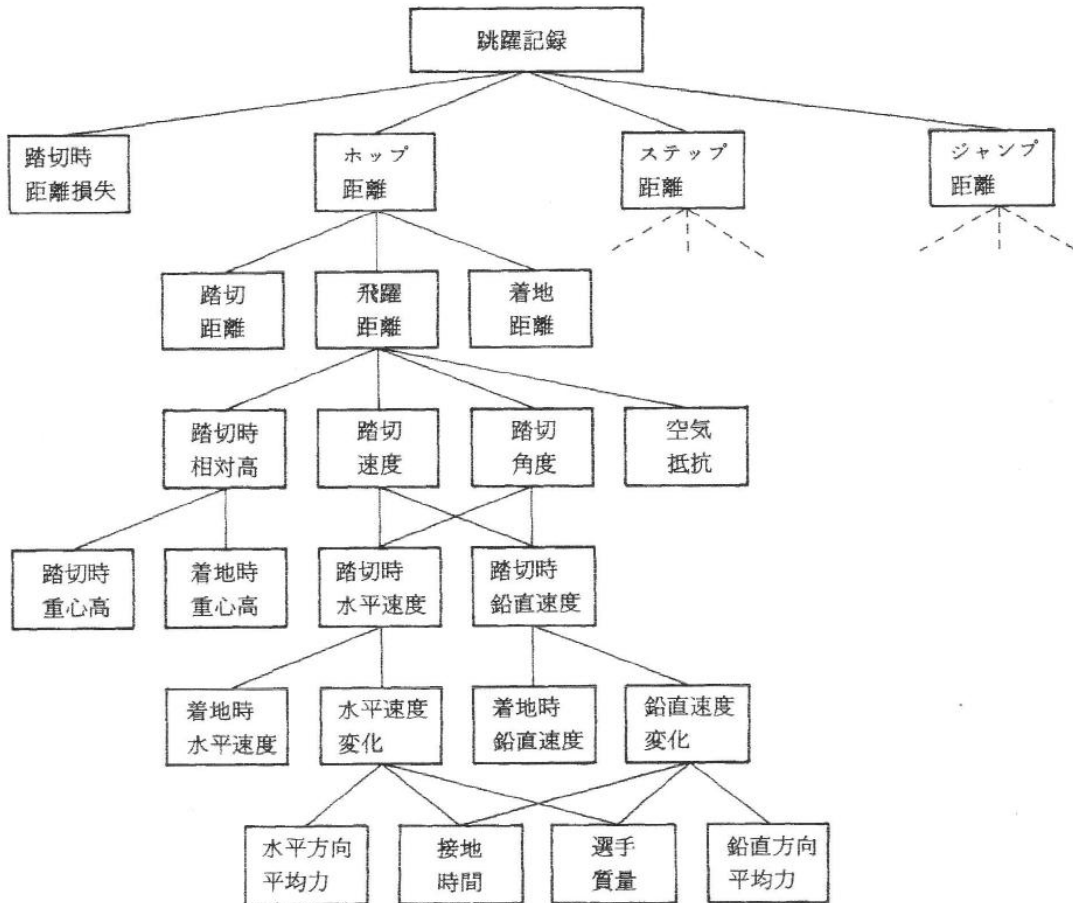


図 1.2 三段跳記録の決定因子

(Hay, J.G. and Miller, J.A. : Techniques used in the triple jump. J. Sports Biomech, 1: 185-196, 1985)

このように三段跳においては、ホップ一つの局面だけを見ても、踏切に関して重心高や踏切距離、身体重心の速度または選手の質量など、多くの因子が跳躍距離に影響していることがわかる。そのため、三段跳を研究する際には、あらゆる観点から競技の特徴や競技者の特性をあきらかにする試みがされている。

1.2 先行研究

先述したが、三段跳は助走、ホップ、ステップ、ジャンプ、着地という5局面で構成され、三段跳を研究する際、キネマティクス（運動学）とキネティクス（動力学）という2つの側面から取り組まれてきている。

1.2.1 三段跳のキネマティクス

これまでの研究では、水平方向への跳躍である三段跳・走幅跳ともに跳躍記録と助走速度には一定の相関関係が認められている[3][4][5][6]。浅見は[3]、助走速度（踏切線手前1mから6m区間）と跳躍距離との関係について、男女別（男130名、女78名）で検討し、記録水準が高くなるほど記録と助走速度の関係が高いことを明らかにしている。また白市らは[5]、最高記録試技と最低記録試技を比較し、助走が跳躍記録におよぼす影響について検討している。その結果、助走速度と跳躍記録には有意な相関がみられたことと、最高記録試技は最低記録試技よりも、助走速度が有意に高かったことを明らかにしている。

ホップ、ステップ、ジャンプの踏切に関する報告もある[7][8][9]。深代は[7]、踏切時の初速度と跳躍距離との関係について検討し、ホップとジャンプの局面においては水平方向の初速度と各跳躍距離との間には正の相関関係があったが、ステップではなかったと報告している。鉛直速度は、ホップとステップにおいて正の相関があることを報告した。このことから、三段跳のホップにおいては、助走で生まれた水平速度の影響を最も受けるが、三段跳全体で考えるとステップ、ジャンプという残りの跳躍局面のスピードロスの影響により、水平速度だけではなく、高さを生み出すために鉛直速度の必要性もあり、各跳躍局面でそれらの配分が異なることがわかる。植田らは[8]、世界一流選手と日本人選手を跳躍距離、接地時間と滞空時間から比較した。跳躍距離は、世界一流選手がホップ、ステップ、ジャンプ各跳躍距離において日本選手よりも有意に優っており、特にステップにおける差が大きく約1メートルの差があった。接地時間は、どちらの群もホップが一番短く、ステップ、ジャンプとなるにつれて長くなる傾向にあり、総接地時間でみると世界一流選手のほうが短かった。滞空時間は、どちらの群もジャンプが最も長く、次いでホップであり、ステップが最も短かった。白市は[9]、三段跳の好記録達成の要因分析として、成功試技と失敗試技の比較の中で、下肢関節の動作に着目した。その結果、最も衝撃を受けるホップからステップにかけての接地時には、その衝撃を緩和するために膝関節は屈曲するが、その屈曲を最小限におさえることが失敗しないための要因であると報告している。

以上のことをまとめると、三段跳のパフォーマンスを高めるためには、速いスピードで助走

を行い、そのスピードを維持しながらも各跳躍局面に応じた速度の配分が必要となる。また衝撃が大きなステップ局面において、失敗跳躍にしないためには、膝関節を屈曲させすぎないことが重要だと考えられる。しかし、先行研究では、跳躍距離と身体重心速度の関係、跳躍距離と身体動作の関係についてみているものはあるが、身体動作と身体重心速度の関連性をみているものは見当たらない。

また、跳躍のタイプについても研究がおこなわれている。三段跳では、記録に対するホップ、ステップ、ジャンプの割合を跳躍比といい(図 1.3)、その比率をもとに3つの跳躍タイプに分類されている[10]。「ホップ優位型跳躍 (hop-dominated technique)」は、ホップの割合がジャンプの割合よりも 2%以上大きいものであり、「ジャンプ優位型跳躍は (jump-dominated technique)」は、逆にジャンプの割合が 2%以上大きい。そして、ジャンプとホップで 2%以上の差がない場合を「バランス型跳躍 (balanced technique)」という。しかしこのような跳躍タイプ別にみた研究においても、これら跳躍タイプごとの各跳躍局面の特徴を検討したものは見当たらず、パフォーマンスへの影響はみられていない。

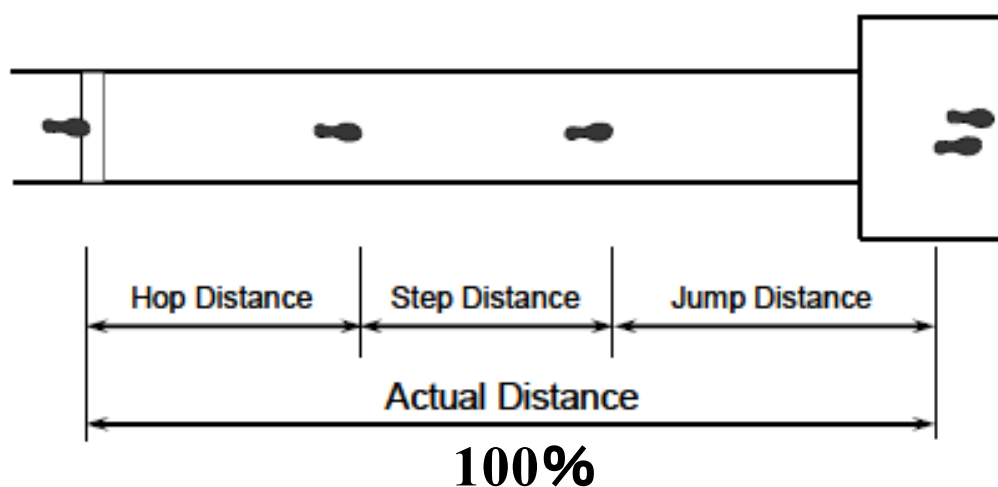


図 1.3 跳躍比

1.2.2 三段跳のキネティクス

深代は[11], 三段跳における機械的エネルギーを定量化し, 三段跳中のエネルギーの流れを推察した. 図 1.4 に示すように, 三段跳では総エネルギーの大部分は水平方向の運動エネルギーが占めている. 三段跳中の総エネルギーの変化をみると, 踏切前半に減少(負の仕事)し, 後半に増加(正の仕事)するが, 負の仕事に比べて正の仕事が少ないことから, 総機械的エネルギーは踏切ごとに減少していく.

1985 年に, Ramey らは初めて三段跳の地面反力をフォースプレートを用いて計測した[12]. 1 台のフォースプレートを用いてホップ, ステップ, ジャンプの地面反力を測定した. 三段跳における衝撃力は体重の 8~12 倍であり, 最も衝撃が大きい局面はステップだったと報告している. しかし, フォースプレートを 1 台しか使用できず, 三段跳の 3 つの踏切局面の衝撃力を同時に計測できないために, 一連の動作からの出来事に関しては検討できず, また床反力と速度の変化や身体動作などのキネマティクスとの関係については検討されていない.

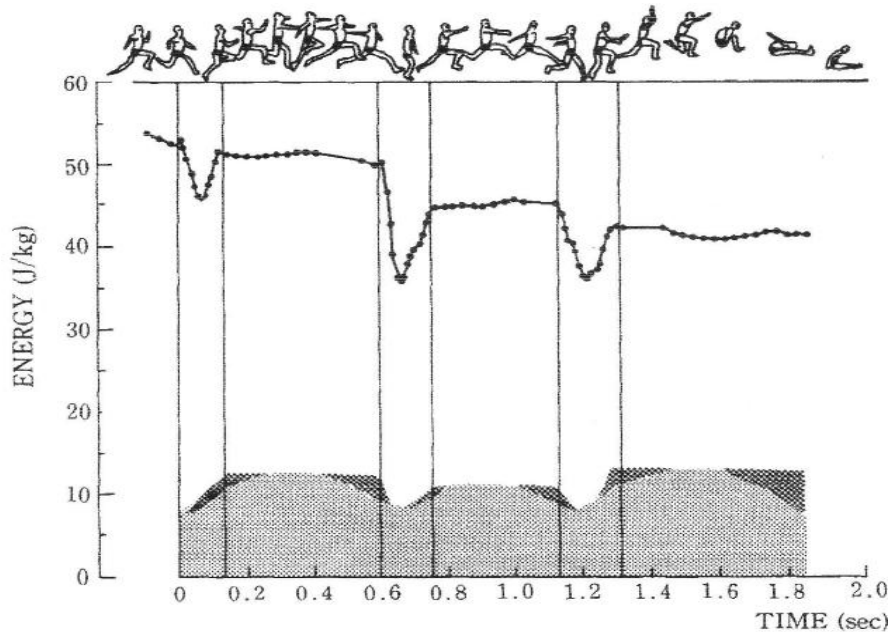


図 1.4 三段跳における身体重心のエネルギー変化

(Fukashiro, S. et al. : A biomechanical study of the triple jump. *Medicine & Science in Sports & Exercise*;13:233-237, 1981)

これら先行研究から, 三段跳のパフォーマンスを高めるためには以下のことが重要だと考えられる. 速いスピードで助走を行い, ホップ, ステップ, ジャンプの一連の跳躍の間に水平速度を減少させず鉛直速度を獲得すること, そしてステップ局面で失敗しないために膝関節を屈曲させすぎないことが重要である. しかし, 先行研究において, キネマティクスでは速度, 身体動作, キネティクスでは床反力, エネルギーといった個々の要因の特徴を明らかにした研究はあるが, キネマティクス間での関連あるいはキネティクスとキネマティクスの関連性についての検討は不十分である. そのため, これらキネマティクスとキネティクスから三段跳の特徴を明らかにするとともに, その相互関係を検討することで, 三段跳におけるメカニズムを明らかにできると考えられる.

1.2.3 現場の予備的データ

本研究を進めるにあたって、三段跳におけるパフォーマンスを決める要因の一つとして、ホップ、ステップ、ジャンプの各踏切時の膝関節のキネマティクスについて予備実験をおこなった。

被験者は、2010年近畿陸上競技選手権大会の男子三段跳選手10名、2010年日本学生陸上競技対校選手権大会男子三段跳選手29名の計39名を対象にした。

撮影は、ハイスピードデジタルカメラ（CASIO, EXILIM EX-F1）3台を用いて、毎秒300コマで撮影した。

データ分析は、得られた映像から、データ分析ソフトウェア「ダートフィッシュ」（ダートフィッシュジャパン）を用いておこなった。測定項目は、跳躍距離、跳躍比、膝関節角度とし、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面における膝関節角度の変化量と跳躍距離との関係を調べた。分析試技は、最も記録の良かったものとした。

その結果、被験者の跳躍記録は13m37～16m28であった。接地した瞬間から膝関節角度の最大屈曲位までの膝関節角度の変位は、ホップで 2.8° ～ 44.8° 、ステップで 10.8° ～ 51.9° 、ジャンプで 5.3° ～ 48.3° の間であった。各跳躍局面の膝関節角度の最大屈曲位から離地した瞬間までの膝関節角度の変位は、ホップで 16.9° ～ 61.3° 、ステップで 9.1° ～ 53.1° 、ジャンプで 14.6° ～ 68.6° の間であった。

総跳躍距離と膝関節角度の最大屈曲位までの変化量との間に関係性はみられなかった（図 1.5）。また各跳躍距離と膝関節角度の最大屈曲位までの変化量との間においても関係性はみられなかった（図 1.6）。各跳躍局面の接地した瞬間から膝関節角度の最大屈曲位までの屈曲の変位と伸展の変位の関係には有意な相関がみられた（図 1.7）。

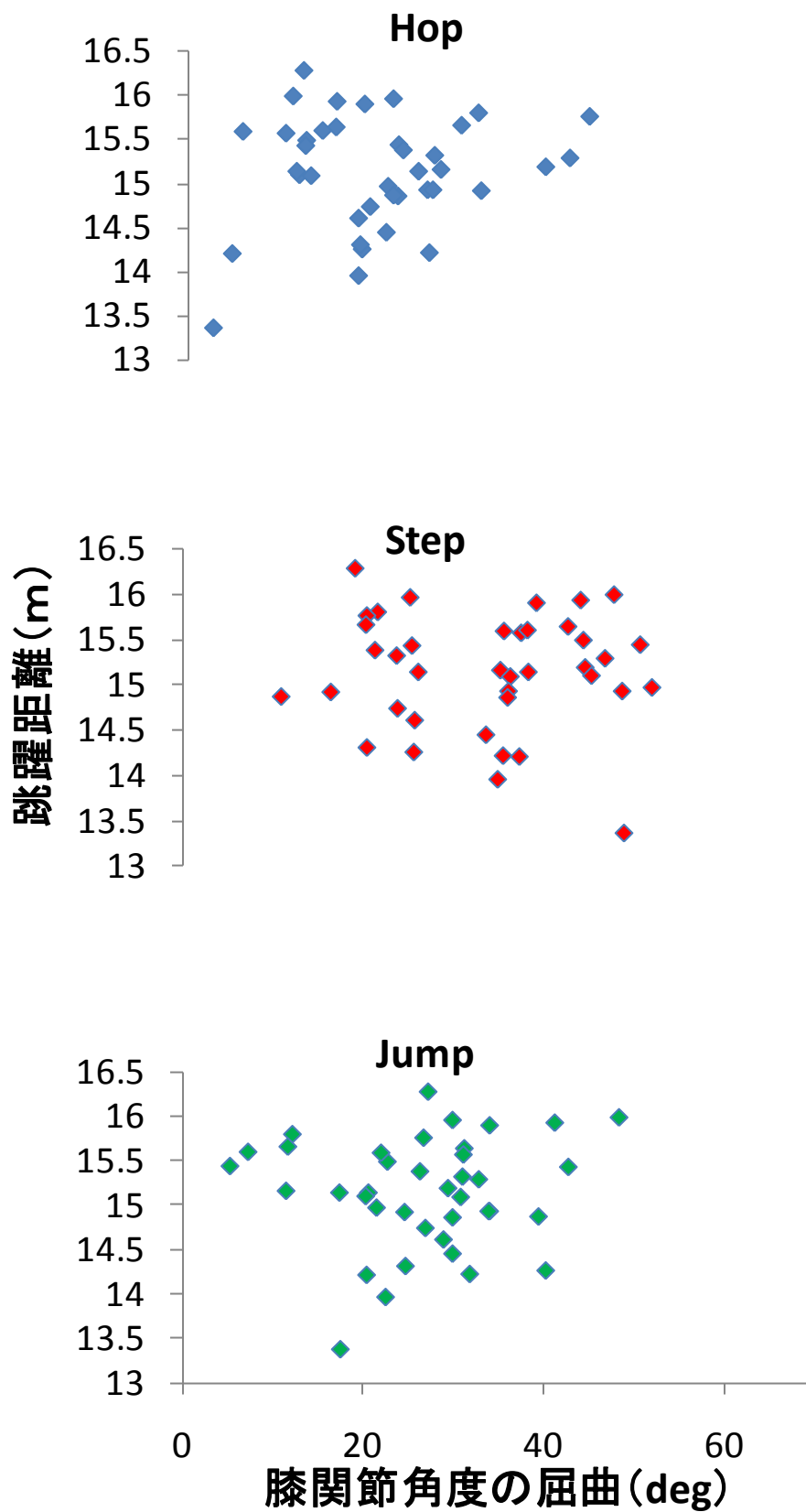


図 1.5 各踏切時の膝関節の屈曲と総跳躍距離との関係

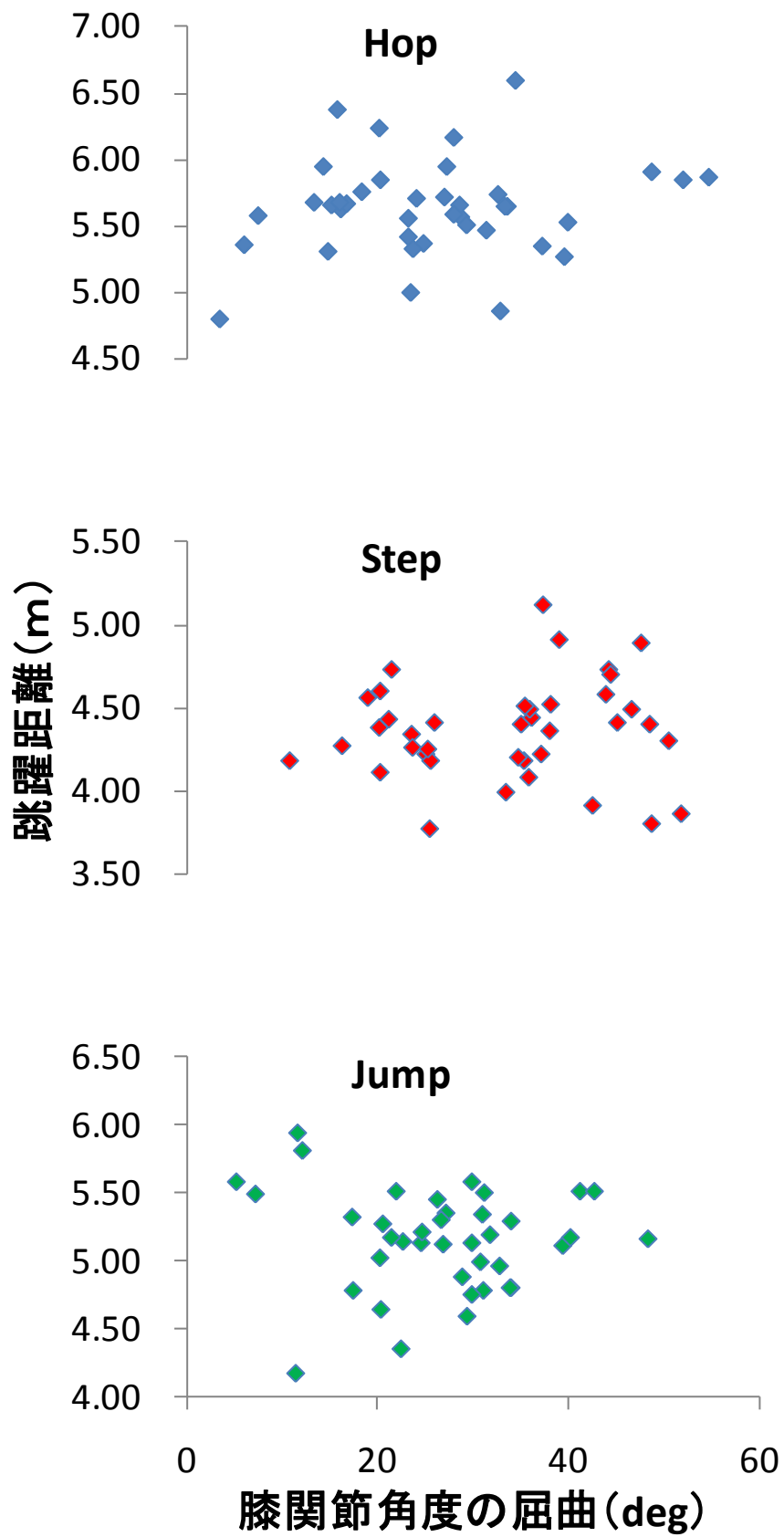


図 1.6 各踏切時の膝関節の屈曲と各跳躍距離との関係

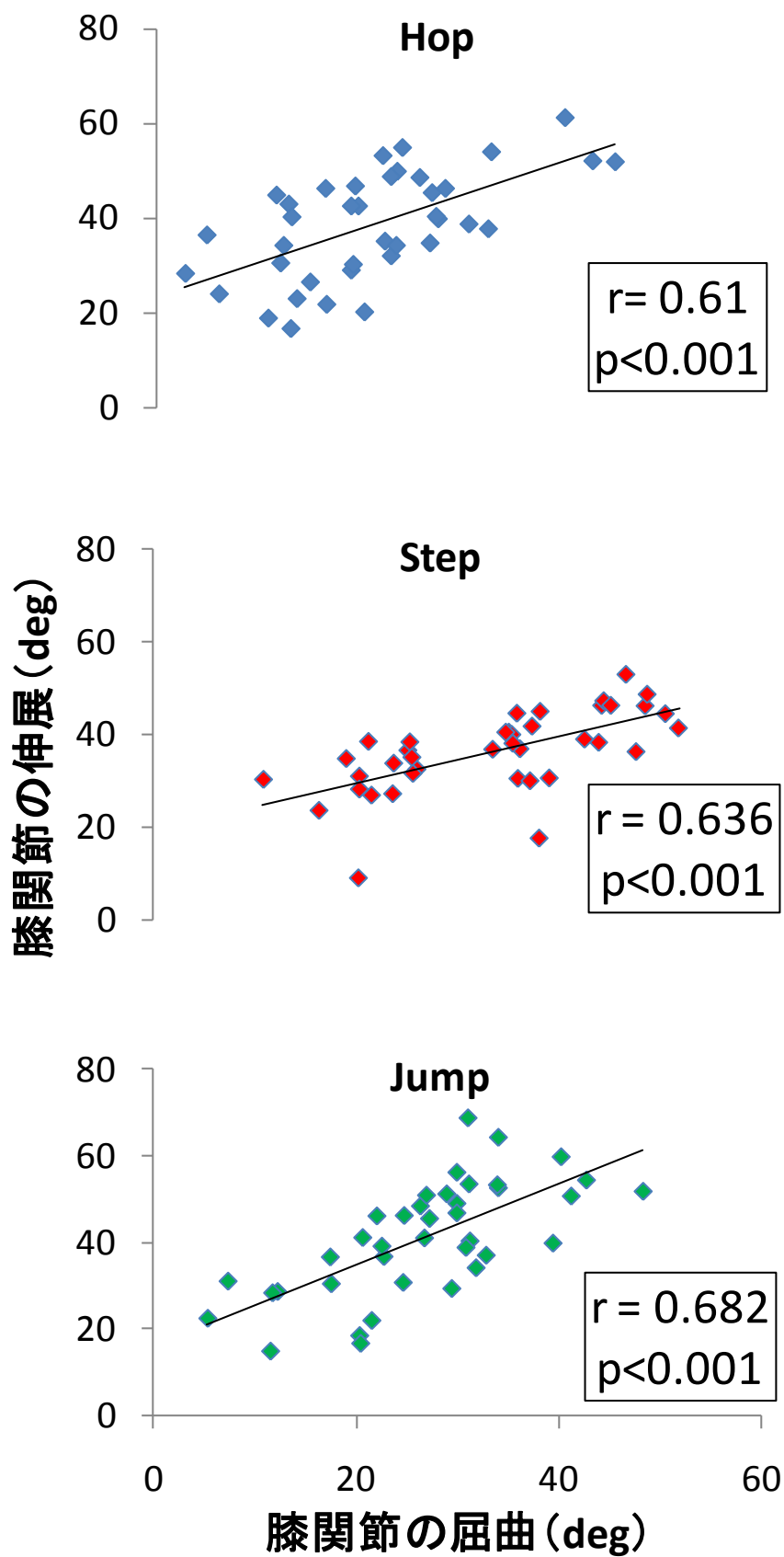


図 1.7 各接地時の膝関節の屈曲と伸展との関係

以上の結果から、競技力に関係なく、①膝関節の屈曲伸張が大きい選手、②膝関節の屈曲伸張が小さい選手がいることがあきらかとなり、三段跳で好記録を出すために身体動作として膝関節の屈曲・伸張は影響していないことが示唆された。また、各跳躍局面の接地した瞬間から膝関節角度の最大屈曲位までの屈曲の変位と伸張の変位の関係には有意な相関がみられたことから、成功試技においては、接地した際に膝関節を屈曲することで衝撃を緩衝し、その衝撃に耐えることで膝関節の伸張もできていることがわかったが、失敗試技と比較した際には、より膝関節が屈曲する傾向にあることも考えられた。

今回の実験では被験者数は多いが、分析ツールとしての精度は低いため、今後精度の高い撮影方法にて分析していく必要がある。

1.3 本研究の目的

1.2 節（先行研究）でも述べたように、三段跳に関する研究はあらゆる観点から行われてきている。キネマティクスでは、①身体重心速度とパフォーマンスの関係、②踏切脚の関節角度変位などの身体動作とパフォーマンスの関係についての検討がされてきている。しかし、それぞれパフォーマンスとの関連が検討されている③身体動作と身体重心速度、この 2 つの関連性をみているものは見当たらない。身体重心速度は、身体動作の違いによって変化することが考えられる。したがって、跳躍距離に加え、身体動作と身体重心速度の関連性を検討する必要がある。また、キネティクスでの先行研究は少なく、エネルギー、床反力といった観点からその特徴は明らかにされているが、その特徴とパフォーマンスとの関係は検討されておらず、キネマティクスとの関係性をみたものもない。身体運動を詳しく分析するためには、その運動がどのような力によって引き起こされているかを検討する必要がある。したがって、キネマティクス、キネティクスの両面においてその特徴と、互いの相互関係を検討することで、三段跳のパフォーマンスにおける新たな知見が得られると考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では、競技力、跳躍タイプ、成功試技と失敗試技のそれぞれの観点から、三段跳の 3 つの跳躍局面に着目し、パフォーマンスに影響を与える要因を明らかにすることを目的とした。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は、以下のとおりとした。第2章で本研究の実験方法について記した。第3章では三段跳のキネマティクスとして、身体重心速度と身体動作の観点から研究を実施し、跳躍距離との関係について検討した。第4章では三段跳のキネティクスとして、下肢関節のトルク、角速度、パワー、仕事量の観点から研究を実施し、跳躍距離との関係について検討した。そして第5章では三段跳の跳躍タイプ別にみた各跳躍局面の比較について研究を実施し、ホップ優位型とバランス型の特徴について検討した。第6章では成功試技と失敗試技の比較について研究を実施し、失敗の要因について検討した。第7章では第3章～第6章の4つの研究から得られた知見をもとに本研究の目的であるパフォーマンスに影響を与える要因について検討をおこなった。第8章では結論を記した。

第2章 実験方法

本章では、本研究における実験方法として、被験者、実験試技、撮影方法、測定項目とその定義について述べる。

2.1 被験者

被験者は、大学生男子三段跳選手14名（身長 $1.75\pm 0.05\text{m}$ 、身体質量 $66.5\pm 6.1\text{kg}$ ）とした（表 2.1）。撮影に先立ち、被験者には本研究の趣旨、内容を説明し、撮影及びデータを使用する同意を得た。

表 2.1 被験者の身体特性

被験者	身長(m)	身体質量(kg)	自己ベスト記録(m)	分析記録(m)	跳躍タイプ
1	1.80	69.0	15.61	14.78	Hop
2	1.81	73.0	15.09	14.38	Hop
3	1.68	58.0	15.39	14.26	Balance
4	1.74	65.0	14.95	14.19	Hop
5	1.78	79.0	16.13	14.17	Hop
6	1.82	74.0	14.98	14.17	Balance
7	1.77	65.0	15.32	14.07	Hop
8	1.73	62.0	15.20	14.06	Hop
9	1.67	63.0	14.98	14.01	Balance
10	1.76	66.5	14.91	13.98	Hop
11	1.73	61.5	15.19	13.94	Balance
12	1.68	59.0	13.64	13.67	Balance
13	1.74	64.0	13.39	13.61	Hop
14	1.73	65.0	12.71	12.16	Hop

2.2 実験試技

被験者に、試合時と同様の十分なウォーミングアップをするよう指示した。その後全天候型跳躍ピット上での三段跳の全力試技を2~4本行わせた。3~5章については、最も記録の良かった試技を分析対象とした。

2.3 撮影機器

3次元モーションキャプチャ装置（Motion Analysis 社: MOTION CAPTURE MAC 3D System: Raptor-E, 15台）を用いた。

3次元モーションキャプチャ装置の基本システム構成は、カメラ、ケーブル、ハブ、PCとなっている（図 2.1）。最大チャンネル数（分解能）は、128ch（12bit）である。表 2.2 にシステム仕様を示す。

● 標準的なシステム構成

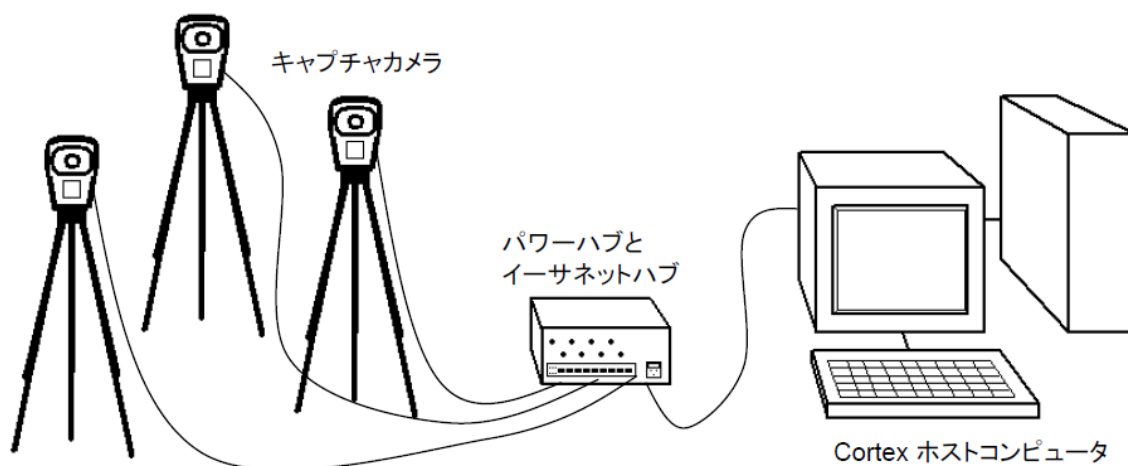


図 2.1 システム構成

表 2.2 システム仕様

システム仕様

キャリブレーション	ダイナミックキャリブレーション方式(Lフレーム:原点と座標軸のキャリブレーション、Tワンド:空間座標のキャリブレーション)
マーカ種類及び誤差	反射型マーカ マニュアル操作、又はテンプレートによる自動認識
アナログ収録	最大チャンネル数(分解能):128ch(12bit) 制御PCとの接続: BNC64ch接続ボックス+A/Dコンバータ(PCIカード)、又は接続ユニット(USB2.0)
データ補間	リニア、キュービックスプライン、ジョインバーチャル、リジットボディ
データ外部出力	TRB、TRC(マーカデータ)、HTR(スケルトンデータ)、HTR2、C3D、ASCII、DIFF、BVH(Skyスクリプト利用)
ソフトウェア	Cortex2(セットアップ・キャプチャ・ポストプロセスソフト、ライセンス、取扱説明書、USB dongle) CortexDV(DVキャプチャソフト、ライセンス、IEEE1394ケーブル)

2.4 撮影

撮影状況は図2.2, 図2.3に示した。屋外の全天候型跳躍ピットにおいて、ホップの踏切1歩前からジャンプの離地までの撮影範囲約11mで、ホップ、ステップ、ジャンプの各支持期の跳躍動作を撮影した (Frame rate: 200Hz)。被験者には下肢に24点, 体幹に8点, 上腕に14点, 頭部に5点の計51点の反射マーカを貼付した (図 2.4)。

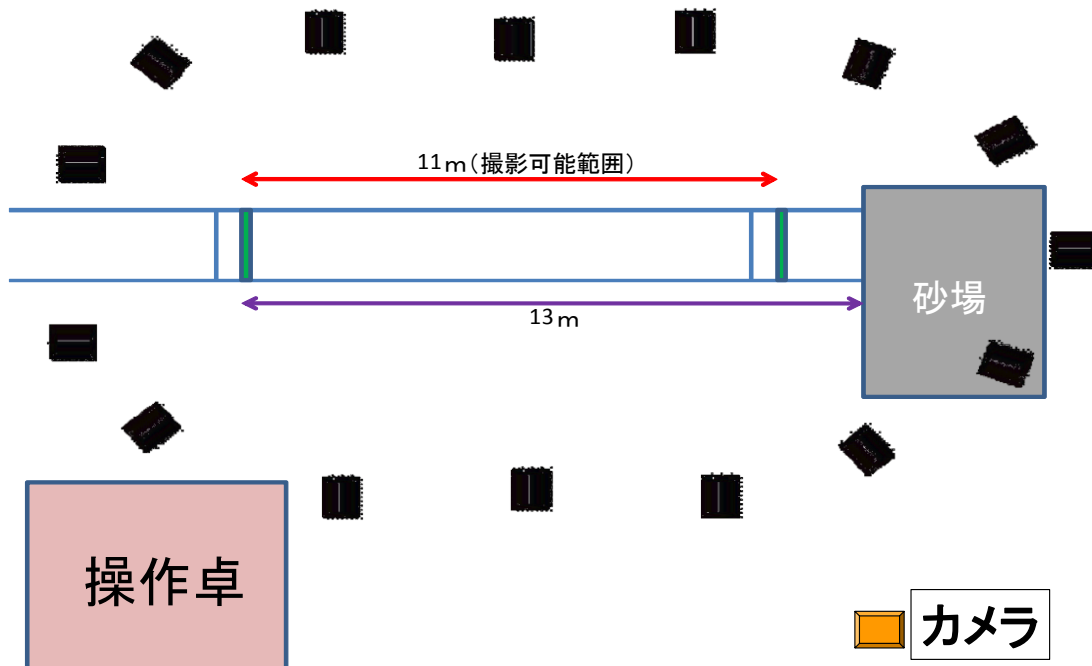


図 2.2 撮影エリアの見取り図



図 2.3 撮影風景

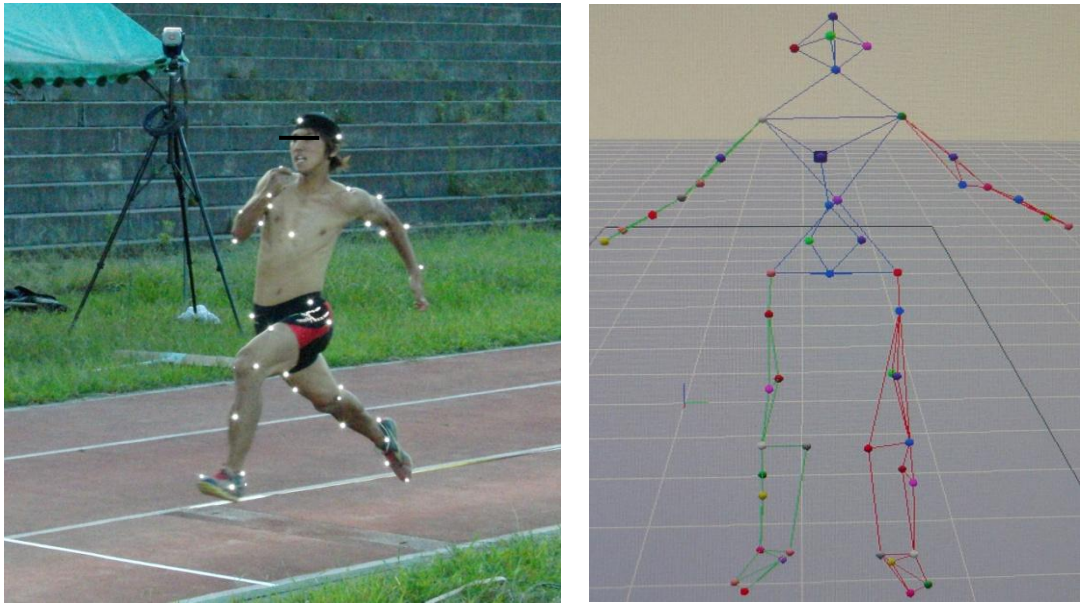


図 2.4 反射マーカ

2.5 データ処理

本研究では、筋骨格モデル動作解析ソフトウェア（nac 社：n-motion muscularous）を使用してデータ解析をおこなった（図 2.5）。身体セグメントの質量パラメータについては、産業技術総合研究所の AIST 人体寸法データベース 1997-98 を用いて求めた。位置データの平滑化には、4 次のバターワース型デジタルローパスフィルタを用いた。遮断周波数は 10Hz とした。

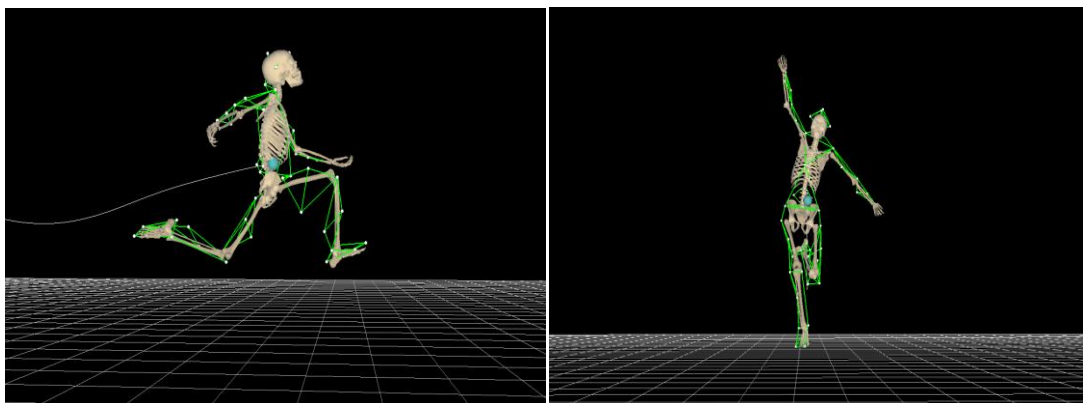


図 2.5 筋骨格モデル

2.5.1 キネマティクスの算出項目と定義

- ・跳躍距離：ホップ、ステップ、ジャンプの跳躍距離の合計を総跳躍距離とした。

ホップは踏切時の足先から接地したときの足先までの距離、ステップはステップ踏切時の足先から次の接地時の足先までの距離、ジャンプはジャンプ踏切時の足先から砂場へ着地した距離をそれぞれの跳躍距離とした（図 2.6）。

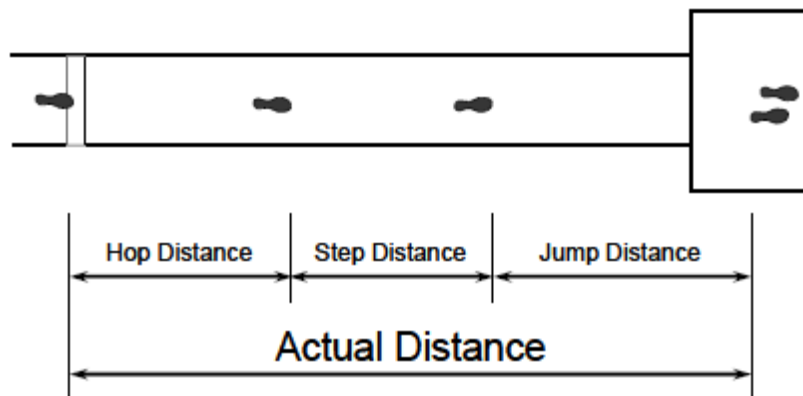


図 2.6 跳躍距離

- ・跳躍比：総跳躍記録に対する比率をもとにホップ、ステップ、ジャンプの割合を算出した。
- ・身体重心水平速度：身体重心が水平方向に進む速度
- ・身体重心鉛直速度：身体重心が鉛直方向に進む速度
- ・接地距離（L3）：接地した瞬間の踵と重心の水平距離
- ・離地距離（L1）：離地した瞬間のつま先と重心の水平距離

（図 2.7）

L1, L3 ともに身体重心から接地地点までの水平距離を身長で除し、100 を乗じた値とした。

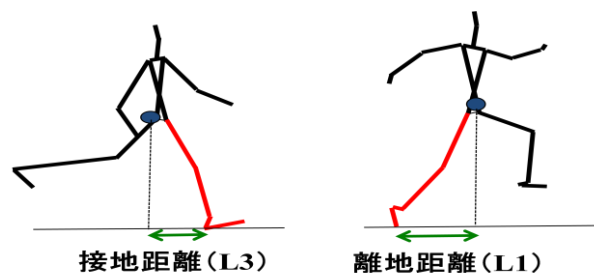


図 2.7 踏切距離

- ・接地時間：接地した瞬間（踵）から離地した瞬間（つま先）までの時間とした。
- ・滞空時間：離地した瞬間から次の局面で接地するまでの時間とした。
- ・入射角度：接地直前と接地瞬間の身体重心の水平方向への移動距離（a）と鉛直方向への移動距離（b）から算出した（式 2.1, 図 2.8）。
- ・跳出角度：離地瞬間と離地直後の身体重心の水平方向への移動距離（a）と鉛直方向への移動距離（b）から算出した（式 2.1, 図 2.8）。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (\text{式 2.1})$$

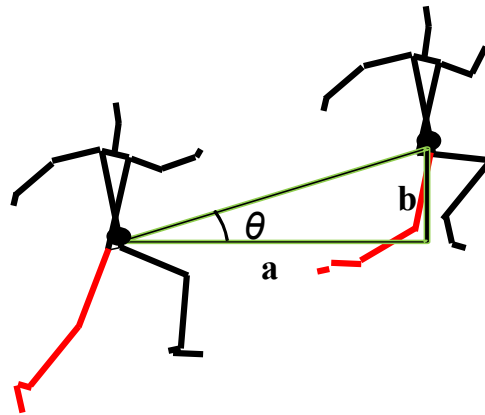


図 2.8 角度算出

- ・関節角度：胸骨上縁と大転子を結ぶ線分と大転子と膝関節中点を結ぶ線分のなす角度を股関節角度，大転子と膝関節中点を結ぶ線分と膝関節中点と外果点を結ぶ線分のなす角度を膝関節角度，膝関節中点と外果点を結ぶ線分と外果点と足先を結ぶ線分のなす角度を足関節角度とした（図 2.9）。

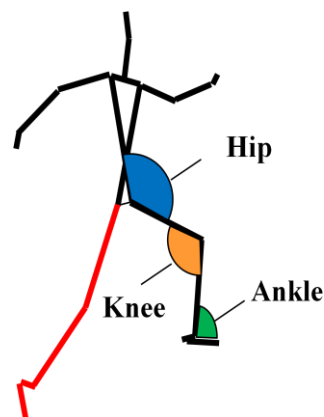


図 2.9 関節角度定義

2.5.2 キネティクスの算出項目と定義

- ・床反力：セグメントの加速度から、次式 2.2 の運動方程式により算出した (図 2.10)。

$$\sum_{k=1}^N m_k \cdot (\bar{a}_k + \bar{g}) \quad (\text{式 2.2})$$

m_k ; \bar{a}_k は、それぞれセグメント k の質量および加速度ベクトルである。
 \bar{g} は、重力加速度ベクトルである。

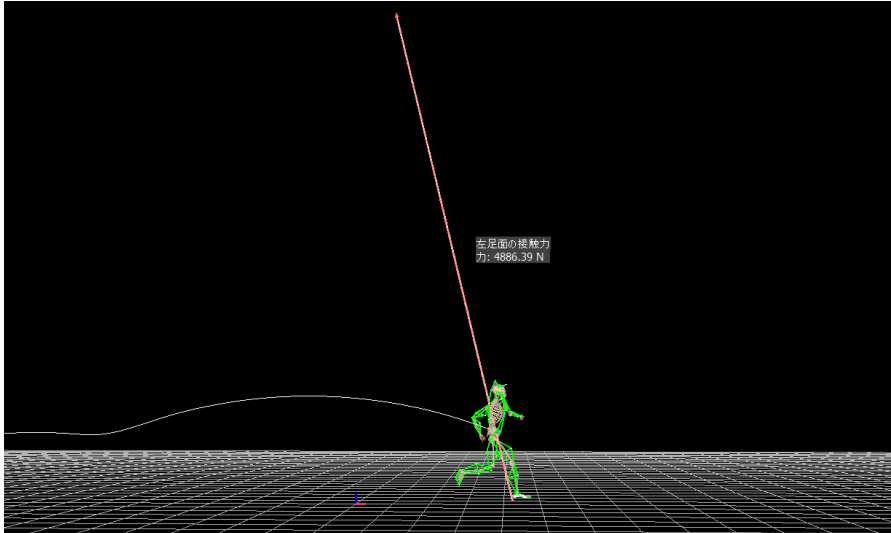


図 2.10 推定した地面反力

- ・下肢関節トルク：n-motionを用いて関節トルクを算出した。関節トルクは、身体質量で規格化した。伸展をプラス，屈曲をマイナスと定義した (図 2.11)。

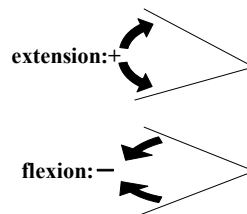


図 2.11 屈曲伸展

- ・下肢関節パワー：関節トルクに関節角速度を乗じて算出した (式2.3)。関節パワーは、身体質量で規格化した。また、プラスを正，マイナスを負と定義した。
 関節パワー(W/kg)=関節角速度(rad/s)*関節トルク(Nm/kg) (式2.3)
- ・下肢関節の仕事：関節パワーを動作区間（各接地時の接地瞬間から離地瞬間）にわたって時間積分して求めた。

第3章 三段跳におけるキネマティクス

本章では、三段跳におけるキネマティクスの観点から、その特徴とパフォーマンスとの関係を論ずる。

3.1 測定項目

本章で扱うキネマティクス項目は以下のものである。

- ・ 跳躍距離
- ・ 跳躍比
- ・ 身体重心水平速度
- ・ 身体重心鉛直速度
- ・ 膝関節角度
- ・ 接地時間
- ・ 滞空時間
- ・ 接地距離 (L3)
- ・ 離地距離 (L1)
- ・ 跳出角度

3.2 統計処理

本章では、各測定項目間の相関関係を明らかにするために、ピアソンの相関係数の検定を実施した。なお、有意水準は危険率5%未満とした。

3.3 結果

表 3.1～表 3.3 は本章の測定項目の測定結果を示したものである。なお、撮影範囲が踏切 1 歩前からジャンプの離地までの約 11m であったため、ジャンプ局面の滞空時間は算出できていない。

全被験者の跳躍記録の範囲は、12m16cm～14m78cm であった。ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍距離の範囲は、ホップ:4m58cm～5m81cm, ステップ:3m35cm～4m46cm, ジャンプ:3m81cm～5m08cm であった。ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍距離の平均値をみると (図 3.1), ホップ:5m28cm±0m34cm, ステップ:4m00cm±0m29cm, ジャンプ:4m68cm±0m35cm であり、先行研究[8]とほぼ同様の結果であった。ホップ、ステップ、ジャンプの跳躍比からみた跳躍タイプの結果は、ホップ優位型跳躍が 9 名、バランス型跳躍が 5 名で、ジャンプ優位型跳躍はいなかった (図 3.2)。

表 3.4～表 3.6 には、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面における、測定項目の各変数の相関関係を示した。この相関関係をもとに以下に結果を述べていく。

表 3.1 身体重心速度の測定結果

被験者	助走速度 (m/s)	水平速度(m/s)			鉛直速度(m/s)		
		接地瞬間 / 離地瞬間 / 減少量			離地瞬間 / 獲得量		
		ホップ	ステップ	ジャンプ	ホップ	ステップ	ジャンプ
1	9.45	9.02 / 8.44 / 0.58	7.89 / 7.52 / 0.36	7.00 / 6.11 / 0.88	2.69 / 2.95	2.16 / 3.91	2.57 / 4.24
2	9.40	8.98 / 8.56 / 0.41	7.99 / 7.47 / 0.51	6.86 / 6.02 / 0.83	2.36 / 2.88	1.92 / 3.86	2.39 / 3.99
3	9.57	9.12 / 8.50 / 0.60	8.08 / 8.00 / 0.07	7.44 / 6.57 / 0.86	2.53 / 2.92	1.61 / 3.64	2.61 / 3.97
4	9.37	9.06 / 8.14 / 0.92	7.58 / 7.28 / 0.29	7.58 / 5.84 / 0.85	2.85 / 3.11	1.79 / 3.73	2.68 / 3.69
5	9.67	9.14 / 8.55 / 0.57	7.87 / 7.47 / 0.39	6.90 / 6.23 / 0.66	2.73 / 3.04	1.99 / 3.89	2.17 / 3.57
6	9.61	9.15 / 8.64 / 0.51	8.16 / 7.69 / 0.46	7.29 / 6.41 / 0.86	2.28 / 2.70	1.60 / 3.40	2.50 / 3.85
7	9.25	8.76 / 8.38 / 0.37	7.77 / 7.29 / 0.47	6.76 / 6.13 / 0.63	2.48 / 3.01	1.81 / 3.88	2.33 / 4.02
8	9.56	9.13 / 8.46 / 0.66	8.05 / 7.77 / 0.27	7.26 / 6.57 / 0.78	2.68 / 2.94	1.15 / 3.33	2.15 / 3.76
9	9.12	8.82 / 8.40 / 0.41	7.95 / 7.44 / 0.50	6.94 / 6.19 / 0.74	2.26 / 2.53	2.03 / 3.74	2.41 / 4.21
10	9.12	8.76 / 7.96 / 0.79	7.72 / 7.03 / 0.67	6.89 / 6.22 / 0.65	2.54 / 3.09	2.20 / 4.45	2.29 / 3.95
11	9.35	9.00 / 8.42 / 0.57	7.92 / 7.43 / 0.48	7.20 / 5.97 / 1.23	2.38 / 2.67	1.74 / 3.48	2.93 / 4.43
12	9.17	8.87 / 8.36 / 0.50	7.87 / 7.23 / 0.64	6.54 / 5.75 / 0.78	2.44 / 2.61	1.98 / 3.90	2.39 / 3.76
13	8.78	8.38 / 8.01 / 0.36	7.63 / 7.37 / 0.25	6.73 / 5.96 / 0.75	2.43 / 2.74	1.77 / 3.85	2.68 / 3.93
14	8.56	8.19 / 7.63 / 0.55	7.15 / 6.46 / 0.68	5.84 / 5.10 / 0.73	2.17 / 2.46	2.08 / 3.90	2.24 / 3.77

表 3.2 跳躍距離と接地時間、滞空時間の測定結果

被験者	分析記録(m)	跳躍距離(m)			跳躍比(%)			接地時間 / 滞空時間(s)			総接地時間(s)
		ホップ	ステップ	ジャンプ	ホップ	ステップ	ジャンプ	ホップ	ステップ	ジャンプ	
1	14.78	5.59	4.46	4.73	37.8	30.2	32.0	0.105 / 0.560	0.120 / 0.460	0.145	0.370
2	14.38	5.44	4.29	4.65	37.8	29.8	32.3	0.130 / 0.490	0.160 / 0.425	0.175	0.465
3	14.26	5.28	3.90	5.08	37.0	27.3	35.6	0.125 / 0.520	0.130 / 0.345	0.160	0.415
4	14.19	5.74	3.76	4.69	40.5	26.5	33.1	0.110 / 0.600	0.140 / 0.390	0.140	0.390
5	14.17	5.81	4.14	4.22	41.0	29.2	29.8	0.115 / 0.580	0.130 / 0.450	0.145	0.390
6	14.17	5.22	3.93	5.02	36.8	27.7	35.4	0.145 / 0.470	0.160 / 0.340	0.160	0.465
7	14.07	5.28	4.12	4.67	37.5	29.3	33.2	0.140 / 0.505	0.170 / 0.400	0.190	0.500
8	14.06	5.70	3.35	5.01	40.5	23.8	35.6	0.110 / 0.580	0.110 / 0.290	0.150	0.370
9	14.01	4.98	4.28	4.75	35.5	30.5	33.9	0.115 / 0.480	0.130 / 0.445	0.170	0.415
10	13.98	5.15	4.22	4.61	36.8	30.2	33.0	0.120 / 0.530	0.160 / 0.440	0.160	0.440
11	13.94	5.10	3.86	4.98	36.5	27.6	35.7	0.125 / 0.485	0.150 / 0.360	0.150	0.425
12	13.67	5.16	4.18	4.33	37.7	30.6	31.7	0.110 / 0.505	0.155 / 0.435	0.155	0.420
13	13.61	4.90	3.79	4.92	36.0	27.8	36.1	0.115 / 0.505	0.130 / 0.380	0.150	0.395
14	12.16	4.58	3.77	3.81	37.7	31.0	31.3	0.115 / 0.485	0.150 / 0.440	0.180	0.445

表 3.3 膝関節角度と踏切距離, 跳出角の測定結果

被験者	膝関節角度(deg)						踏切距離(%)			跳出角度(deg)		
	接地瞬間 / 離地瞬間			屈曲 / 伸展			L3 / L1			ホップ	ステップ	ジャンプ
	ホップ	ステップ	ジャンプ	ホップ	ステップ	ジャンプ	ホップ	ステップ	ジャンプ			
1	149.7 / 156.0	158.2 / 163.1	159.8 / 156.9	20.1 / 26.4	26.9 / 31.9	36.5 / 33.5	16 / 17	14 / 21	17 / 16	18.1	16.4	23.3
2	162.8 / 171.3	167.7 / 164.0	162.5 / 167.5	23.0 / 31.5	31.9 / 28.2	28.9 / 33.9	16 / 25	20 / 22	17 / 23	15.5	14.3	21.6
3	163.9 / 168.2	164.7 / 172.4	160.2 / 163.2	23.9 / 28.2	21.7 / 29.4	31.3 / 34.3	21 / 22	12 / 29	16 / 15	16.8	11.5	21.7
4	151.9 / 151.8	154.7 / 151.0	149.7 / 165.6	26.3 / 26.2	33.1 / 29.5	20.2 / 36.2	18 / 16	14 / 25	12 / 19	19.7	13.9	24.5
5	152.7 / 156.4	161.5 / 175.8	158.6 / 155.7	25.4 / 29.1	18.5 / 32.8	26.3 / 23.3	19 / 18	15 / 21	19 / 25	17.9	15.2	19.3
6	171.3 / 161.8	171.4 / 160.1	167.0 / 168.8	41.5 / 31.9	41.8 / 30.5	30.8 / 32.5	23 / 25	18 / 29	23 / 17	15.6	11.9	21.5
7	162.1 / 162.1	165.0 / 160.5	160.1 / 161.3	28.1 / 29.2	36.0 / 31.5	35.9 / 35.9	20 / 26	18 / 32	16 / 16	16.5	13.8	20.8
8	163.1 / 156.7	161.4 / 156.3	166.1 / 170.2	31.0 / 19.2	33.5 / 27.5	27.3 / 31.5	17 / 17	14 / 28	18 / 19	17.8	8.4	18.0
9	163.9 / 153.5	168.6 / 154.5	164.9 / 160.5	31.1 / 20.7	35.1 / 21.0	39.9 / 35.5	18 / 20	18 / 21	16 / 20	15.2	15.7	21.5
10	142.5 / 145.4	168.3 / 161.9	163.9 / 174.9	16.5 / 19.4	35.9 / 29.5	25.0 / 36.0	19 / 17	15 / 29	21 / 23	18.1	17.4	20.0
11	157.9 / 164.7	163.1 / 164.9	159.8 / 178.2	23.8 / 30.6	33.4 / 35.2	21.9 / 40.3	17 / 25	16 / 29	14 / 23	16.0	13.3	26.1
12	160.0 / 161.7	171.0 / 166.1	166.8 / 169.4	22.8 / 24.5	36.3 / 31.4	31.1 / 33.7	16 / 19	19 / 27	22 / 29	16.2	15.3	22.4
13	158.6 / 166.7	169.1 / 170.7	163.8 / 162.2	21.5 / 29.6	26.5 / 28.0	28.6 / 27.0	14 / 19	12 / 23	19 / 16	16.9	13.5	24.0
14	162.6 / 151.4	170.6 / 160.9	165.0 / 162.7	27.2 / 16.0	35.4 / 25.7	38.1 / 38.1	17 / 16	18 / 20	19 / 17	16.0	18.2	24.4

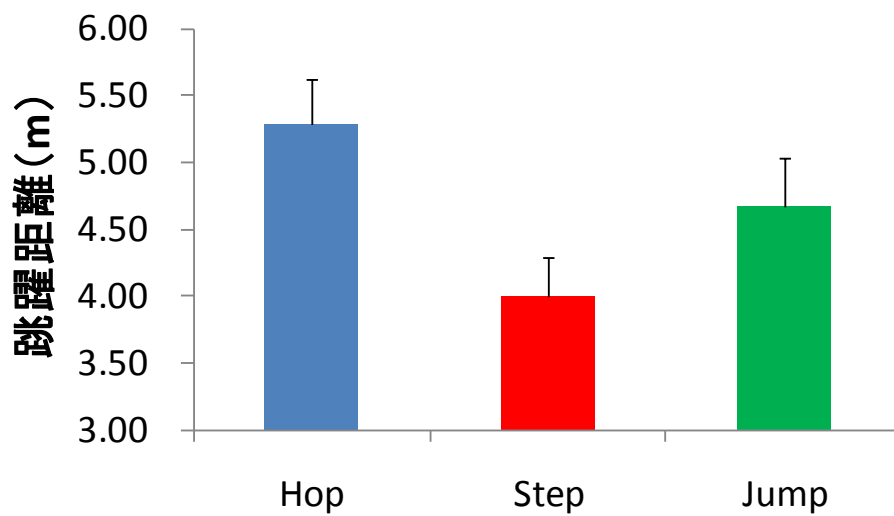


図 3.1 各跳躍距離の平均値

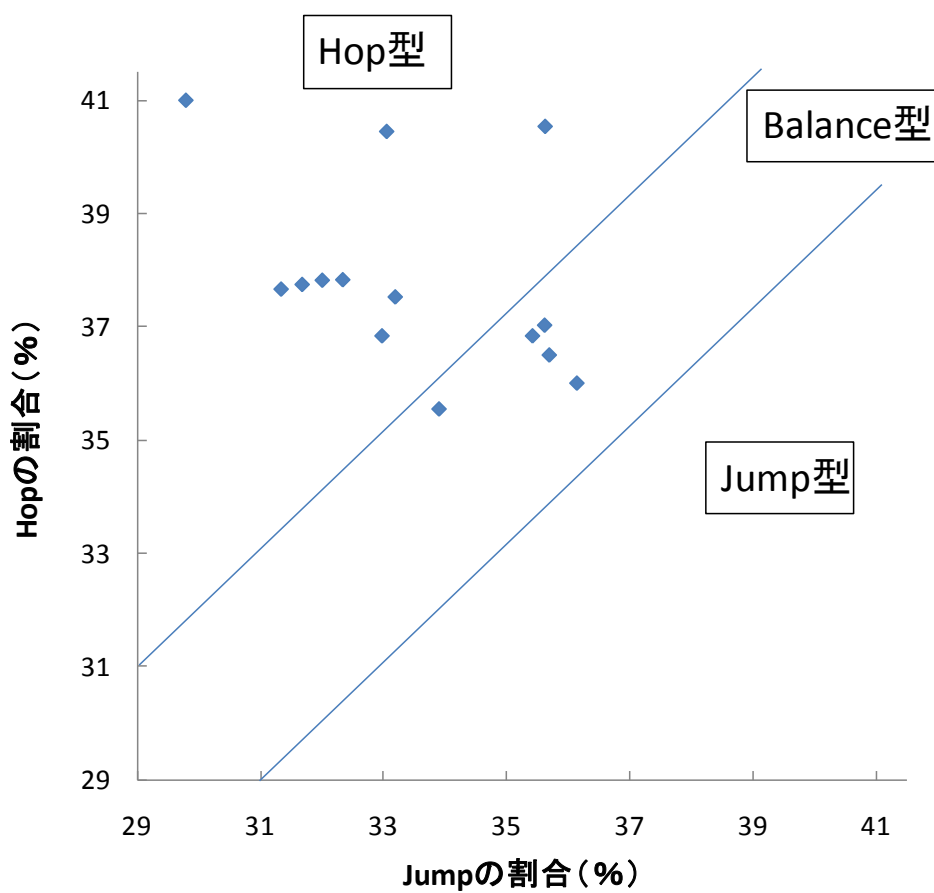


図 3.2 跳躍タイプ

表 3.4 ホップ局面における各変数の相関関係

	Hop跳躍距離 (m)	助走速度 (m/s)	L3 (%)	跳出角 (deg)	接地時間 (s)	滞空時間 (s)	L1 (%)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)
Hop跳躍距離 (m)		0.818 ***	.119	0.628 *	-.165	0.795 **	-.097	0.801 **	0.855 ***	0.589 *	.426	0.772 **	.003	.299
助走速度 (m/s)			.468	.236	.218	.402	.290	0.976 ***	.527	0.873 ***	.239	0.540 *	.269	.489
L3 (%)				-.052	0.689 **	-.106	.378	.406	-.029	.329	.160	.243	0.543 *	.197
跳出角 (deg)					-.502	0.926 ***	-0.619 *	.248	0.914 ***	-.179	0.781 **	0.769 **	-.358	-.137
接地時間 (s)						-0.573 *	0.859 ***	.129	-.434	.338	-.368	-.005	.477	0.532 *
滞空時間 (s)							-0.607 *	.402	0.957 ***	.038	0.677 **	0.742 **	-.254	-.128
L1 (%)								.237	-.415	0.556 *	-0.562 *	-.106	.329	0.725 **
接地瞬間 水平速度 (m/s)									.528	0.850 ***	.324	.487	.243	.425
離地瞬間 鉛直速度 (m/s)										.194	0.630 *	0.840 ***	-.298	.091
離地瞬間 水平速度 (m/s)											-.221	.214	.352	0.621 *
水平速度 減少量 (m/s)												.518	-.183	-.330
鉛直速度 獲得量 (m/s)													-.305	.220
膝関節屈曲 (deg)														.104
膝関節伸展 (deg)														

*:p < 0.05 **:p < 0.01 ***:p < 0.001

表 3.5 ステップ局面における各変数と相関関係

	Step跳躍距離 (m)	L3 (%)	跳出角 (deg)	接地時間 (s)	滞空時間 (s)	L1 (%)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)
Step跳躍距離 (m)		.326	0.637 *	.303	0.800 **	-.274	.148	0.785 **	-.073	.372	0.585 *	-.083	.081
L3 (%)			.277	0.682 **	.312	.024	.007	.237	-.369	0.777 **	.046	0.651 *	-.102
跳出角 (deg)				.332	0.936 ***	-.522	-0.613 *	0.971 ***	-0.762 **	0.674 **	0.786 **	.039	-.108
接地時間 (s)					.246	.367	-.160	.318	-.421	0.637 *	.327	0.566 *	.230
滞空時間 (s)										0.583 *	0.770 **	-.051	-.138
L1 (%)							.403	-.497	.334	-.095	-.213	.355	.400
接地瞬間 水平速度 (m/s)								-.446	0.895 ***	-.375	-.460	-.068	.205
離地瞬間 鉛直速度 (m/s)									-0.603 *	0.592 *	0.813 ***	-.050	-.044
離地瞬間 水平速度 (m/s)										-0.749 **	-0.562 *	-.339	.180
水平速度 減少量 (m/s)											.485	0.604 *	-.070
鉛直速度 獲得量 (m/s)												-.098	-.032
膝関節屈曲 (deg)													-.199
膝関節伸展 (deg)													

*:p < 0.05 **:p < 0.01 ***:p < 0.001

表 3.6 ジャンプ局面における各変数の相関関係

	Jump跳躍距離 (m)	L3 (%)	跳出色 (deg)	接地時間 (s)	L1 (%)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)
Jump跳躍距離 (m)		.339	-.070	-.274	.050	0.865 ***	.518	0.759 **	.387	.117	-.270	.019
L3 (%)			-.192	.492	.237	.415	.021	.383	.140	.227	.404	.023
跳出色 (deg)				-.118	-.433	-.334	0.784 **	-0.633 *	0.691 **	0.600 *	-.080	.477
接地時間 (s)					0.620 *	-.349	-.351	-.237	-.327	.211	0.615 *	.372
L1 (%)						.002	-.380	.213	-.520	-.078	.377	.304
接地瞬間 水平速度 (m/s)							.288	0.924 ***	.331	.039	-.291	-.146
離地瞬間 鉛直速度 (m/s)								-.033	0.834 ***	0.625 *	-.329	.339
離地瞬間 水平速度 (m/s)									-.055	-.174	-.174	-.335
水平速度 減少量 (m/s)										0.532 *	-.333	.445
鉛直速度 獲得量 (m/s)											.222	.434
膝関節屈曲 (deg)												.090
膝関節伸展 (deg)												

*:p < 0.05 **:p < 0.01 ***:p < 0.001

3.3.1 速度と跳躍距離について

助走速度と総跳躍距離との間には有意な相関関係がみられた ($r=0.80$ $p<0.001$, 図 3.3).

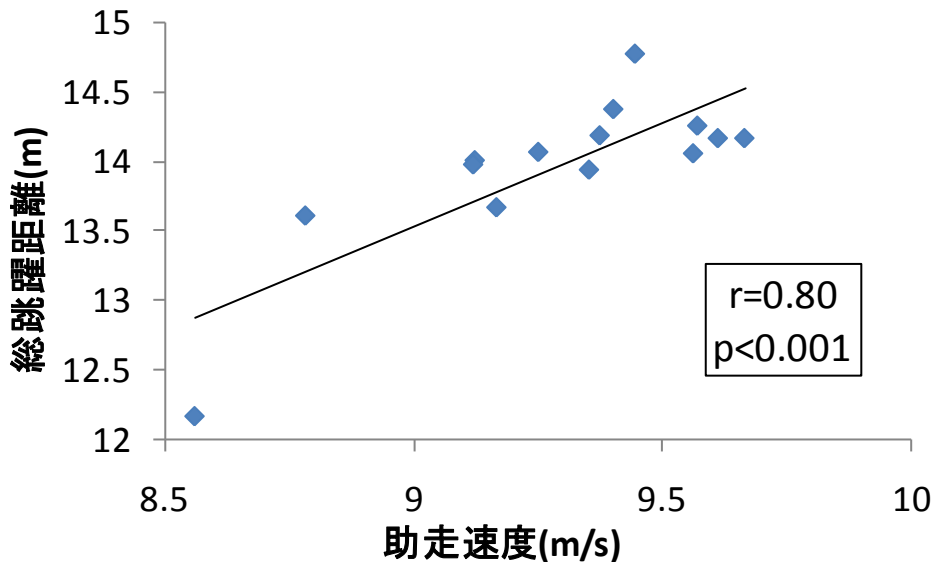


図 3.3 助走速度と総跳躍距離との関係

各跳躍局面の離地瞬間の水平速度と各跳躍距離との関係を見ると (図 3.4), ホップとジャンプには有意な相関関係がみられたが (それぞれ $r=0.58$ $p<0.05$, $r=0.75$ $p<0.01$), ステップには有意な相関関係はみられなかった. これは接地瞬間の水平速度と各跳躍距離との関係も同様であった (それぞれ $r=0.80$ $p<0.001$, $r=0.86$ $p<0.001$, 図 3.5). 各接地時における水平速度の減少量は, どの局面も跳躍距離との間に相関関係はみとめられなかった (図 3.6).

各跳躍局面の離地瞬間の鉛直速度と各跳躍距離との関係を見ると (図 3.7), ホップとステップには有意な相関関係がみられたが (それぞれ $r=0.85$ $p<0.001$, $r=0.78$ $p<0.001$), ジャンプには有意な相関関係はみられなかった. 各接地時における鉛直速度の獲得量は, 同様にホップとステップの跳躍距離との間に相関関係が認められた (それぞれ $r=0.77$ $p<0.01$, $r=0.58$ $p<0.05$, 図 3.8).

これらの結果は, 先行研究の報告と同様の結果であった [7].

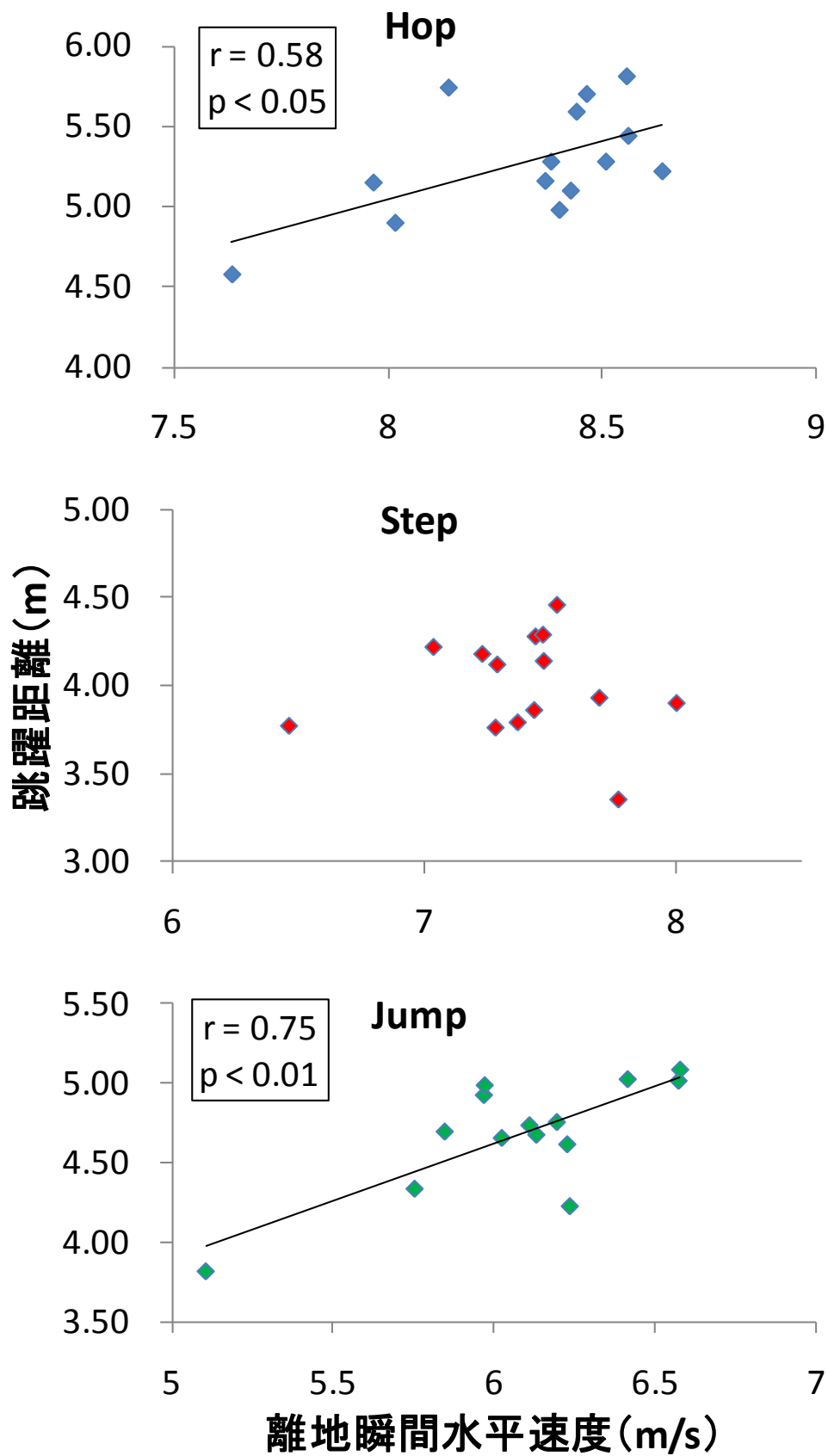


図 3.4 各跳躍局面の離地瞬間水平速度と各跳躍距離との関係

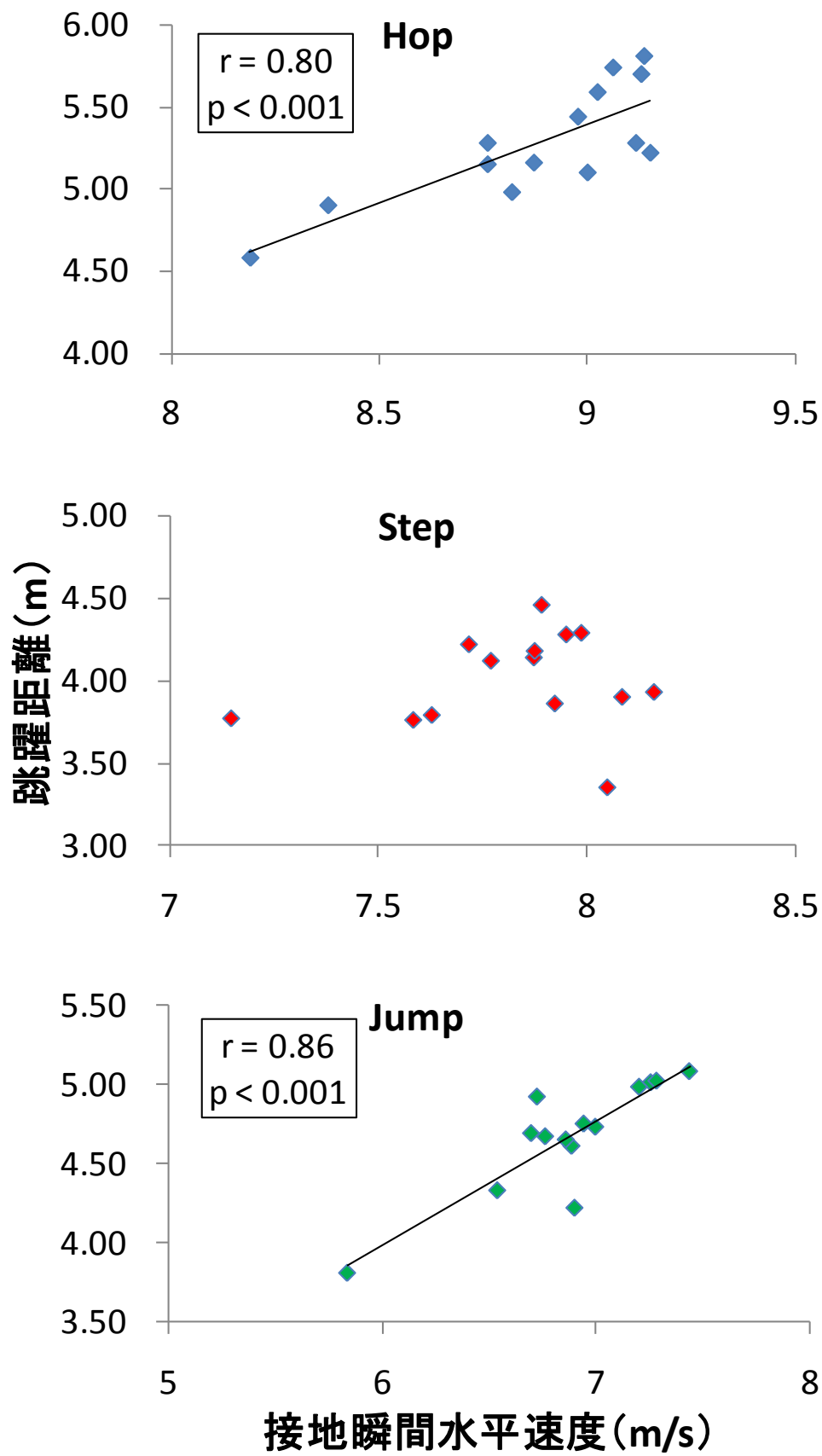


図 3.5 各跳躍局面の接地瞬間水平速度と各跳躍距離との関係

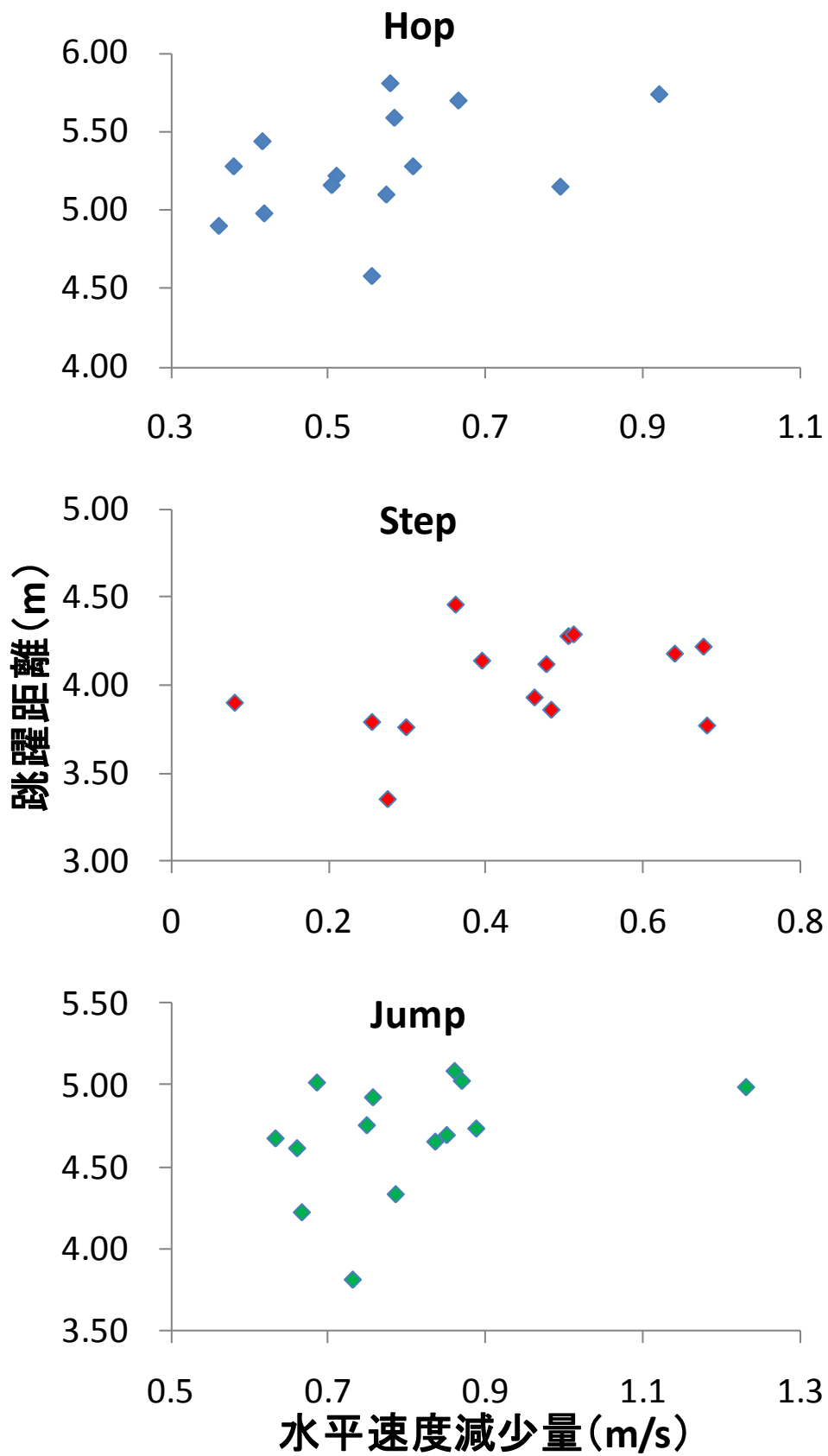


図 3.6 各跳躍局面の接地時の水平速度減少量と各跳躍距離との関係

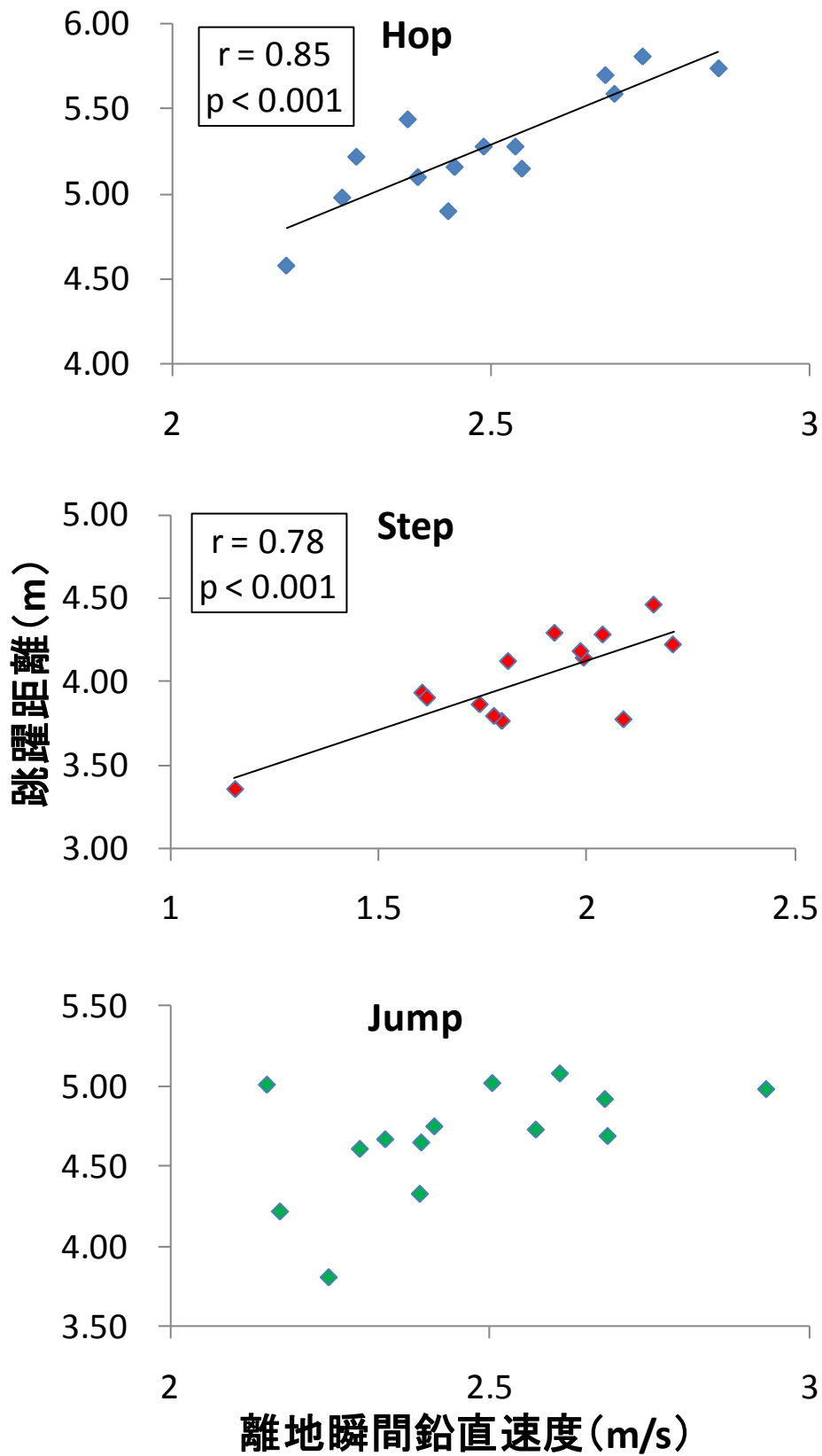


図 3.7 各跳躍局面の離地瞬間鉛直速度と各跳躍距離との関係

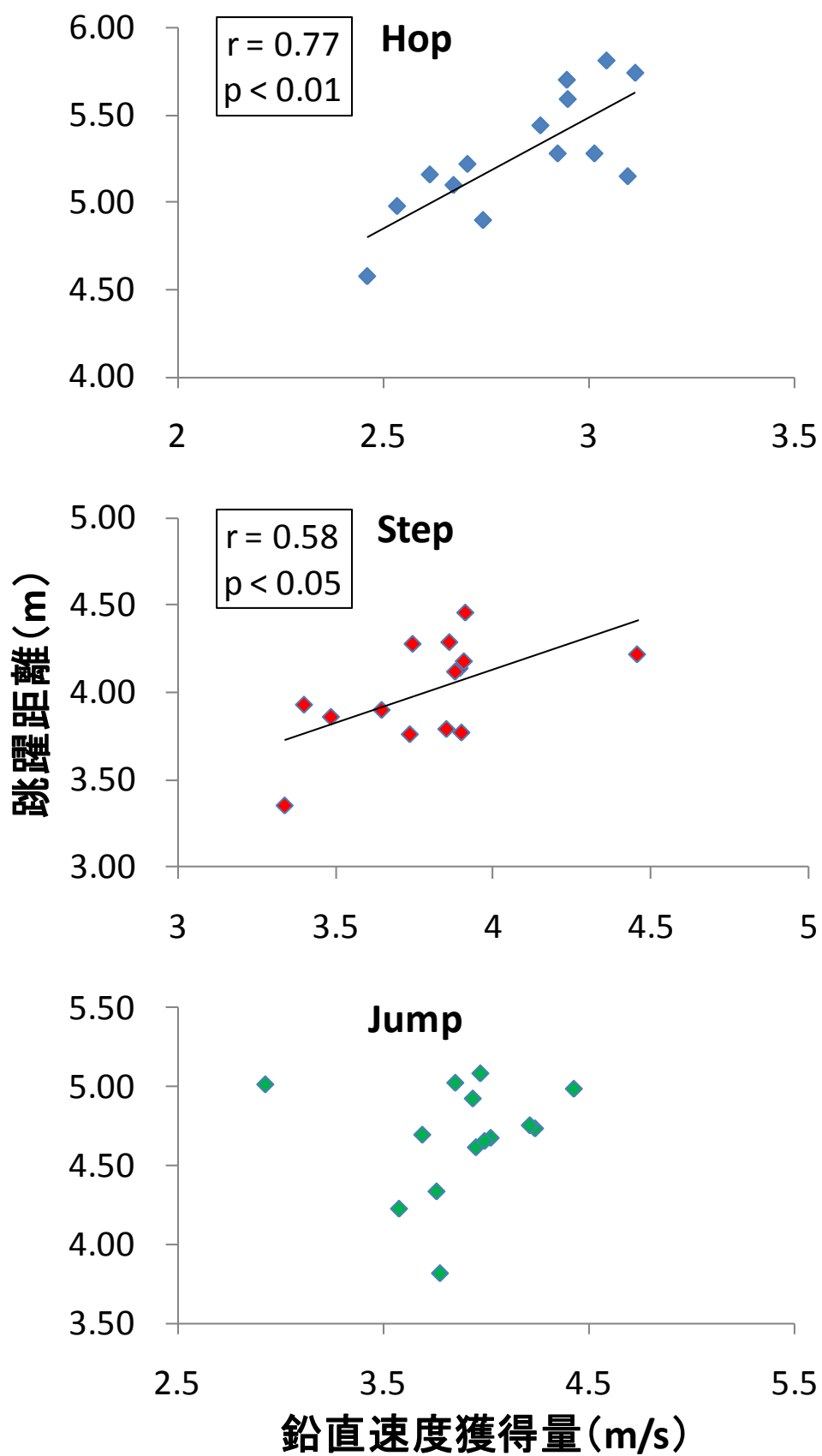


図 3.8 各跳躍局面の接地時の鉛直速度獲得量と各跳躍距離との関係

3.3.2 膝関節と跳躍距離について

膝関節の屈曲・伸展に関する結果は、本実験のものと予備実験のものを合わせて示した(図 3.9, 3.10)。本実験の結果では、各跳躍局面の接地した瞬間から膝関節角度の最大屈曲位までの膝関節の屈曲の変位は、ホップで $16.5^{\circ} \sim 41.5^{\circ}$, ステップで $18.5^{\circ} \sim 41.8^{\circ}$, ジャンプで $20.2^{\circ} \sim 39.9^{\circ}$ の間であった。各跳躍局面の膝関節角度の最大屈曲位から離地した瞬間までの膝関節の伸展の変位は、ホップで $16.0^{\circ} \sim 31.9^{\circ}$, ステップで $21.0^{\circ} \sim 35.2^{\circ}$, ジャンプで $23.3^{\circ} \sim 40.3^{\circ}$ の間であった。

本実験の結果においても、総跳躍距離と膝関節角度の最大屈曲位までの変化量との間に関係性はみられなかった(図 3.9)。なお予備実験と合わせてみても、有意な相関関係はみられなかった。

またホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍距離と膝関節角度の最大屈曲位までの変化量との間においても関係性はみられなかった(図 3.10)。同様に予備実験と合わせてみても、有意な相関関係はみられなかった。

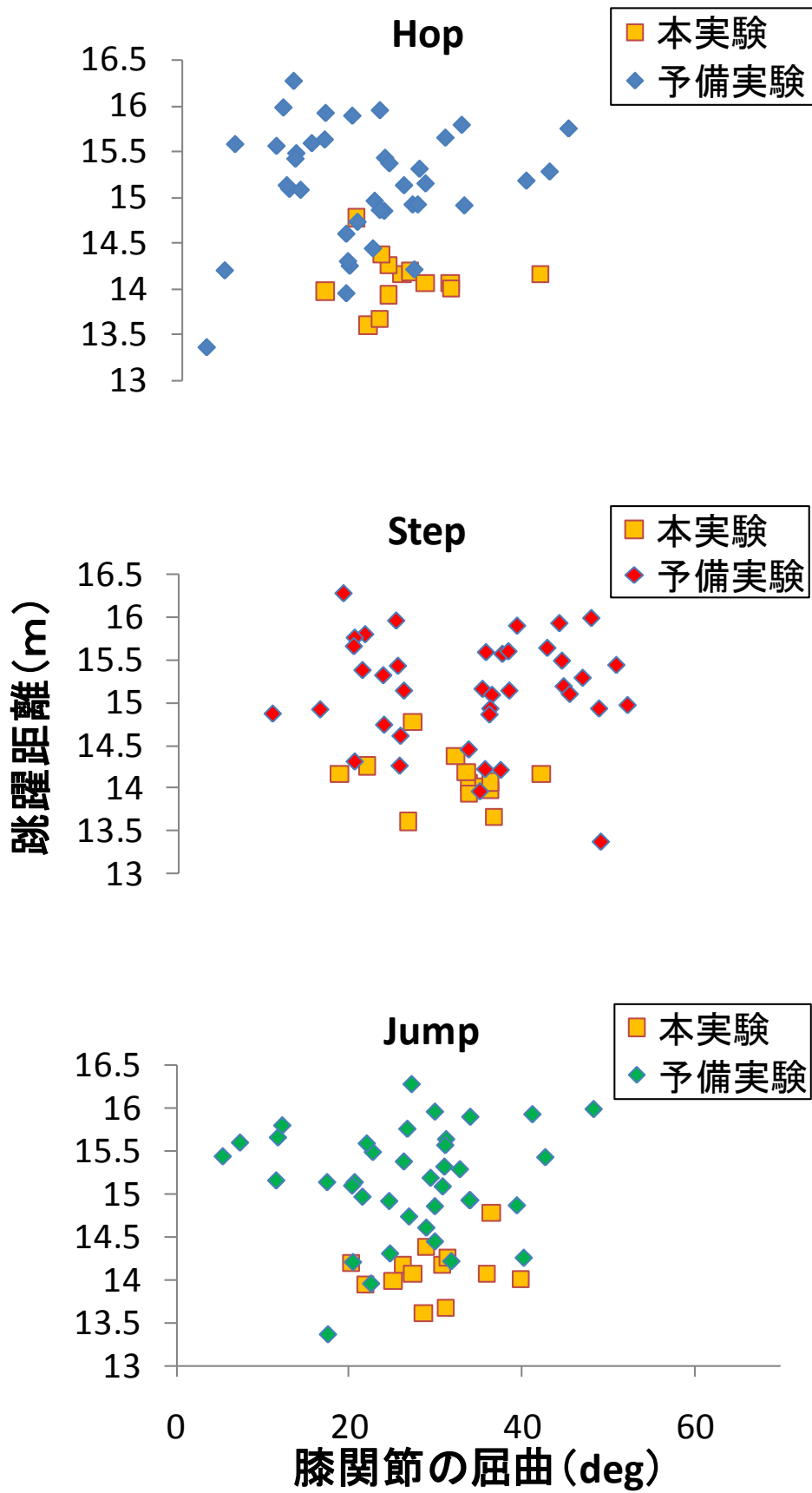


図 3.9 各跳躍局面の膝関節屈曲角度と総跳躍距離との関係

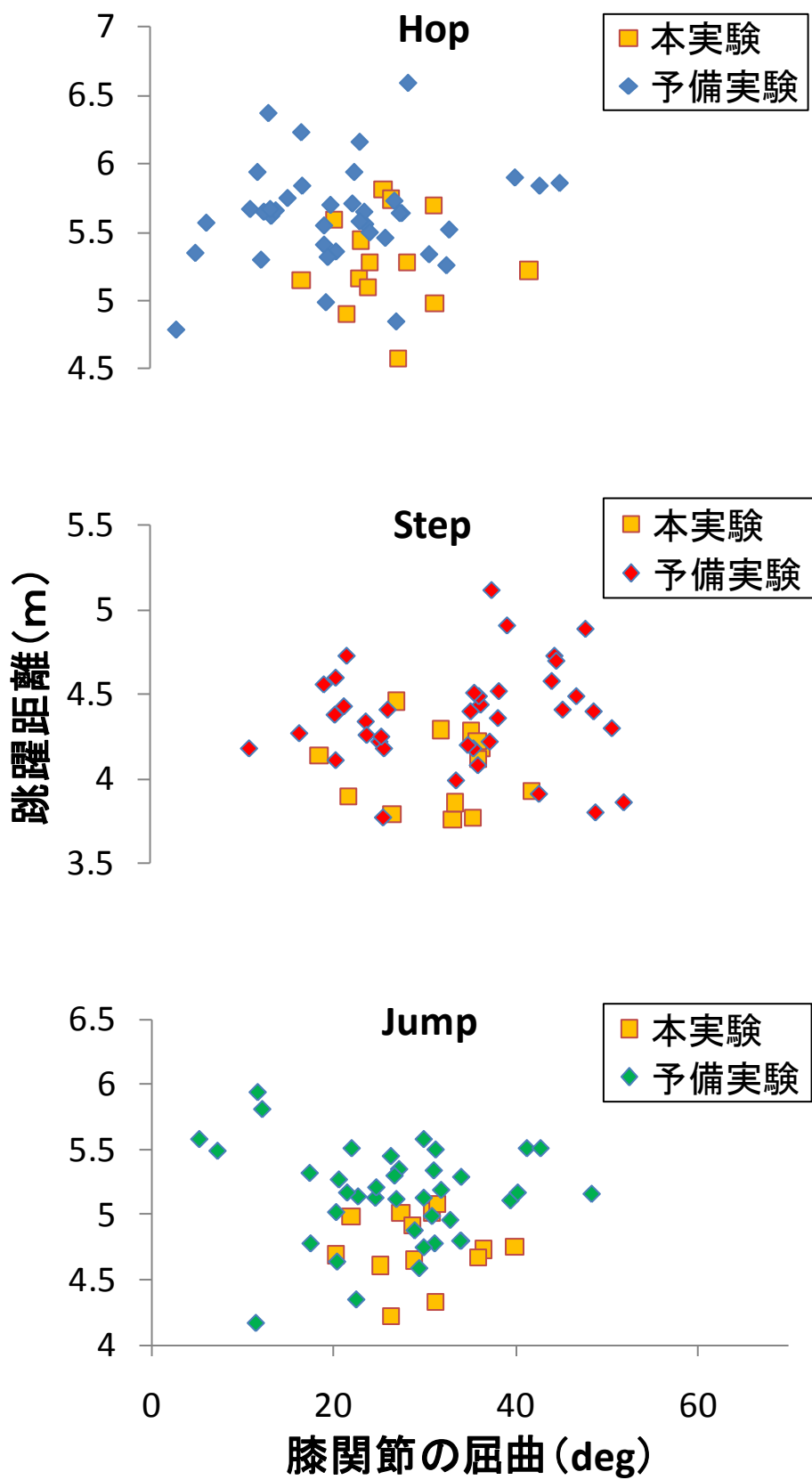


図 3.10 各跳躍局面の膝関節屈曲角度と各跳躍距離との関係

表 3.4～表 3.6 の結果から，膝関節の屈曲伸展と跳躍距離以外の変数との関係を検討してみると，ホップでは，膝関節の伸展が L1 と離地瞬間の水平速度と有意な相関関係にあった（それぞれ $r=0.72$ $p<0.01$, $r=0.62$ $p<0.05$ ）. しかし，そもそも被験者によって助走速度に差があったため，そのことを考慮して考える必要がある．まず，離地瞬間水平速度が最も高かった者と低かった者で比較検討し，2名の膝関節角度の変位をみると，離地瞬間水平速度が高い者のほうが膝関節の屈曲伸展ともに大きい傾向にあった（図 3.11）. この2名はもともと助走速度において，9.61m/s と 8.55m/s と大きな速度の差がみられたため，当然の結果と言える．そのため助走速度，水平速度減少量に差がない2名（それぞれ助走速度：9.56m/s と 9.57m/s, 水平速度減少量：0.66m/s と 0.60m/s）で検討してみると，膝関節の伸展は 19.2° と 28.2° で約 10° の差があったが，離地瞬間の水平速度には差がみられなかった（図 3.12）.

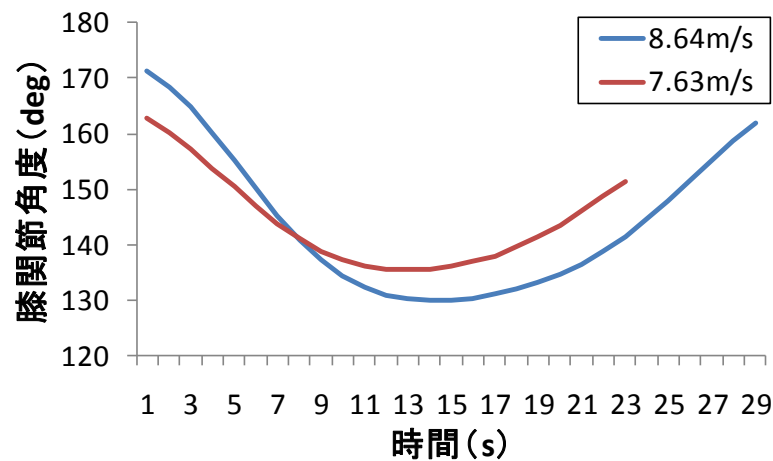


図 3.11 離地瞬間水平速度が最も高かった者と低かった者の膝関節角度の変位

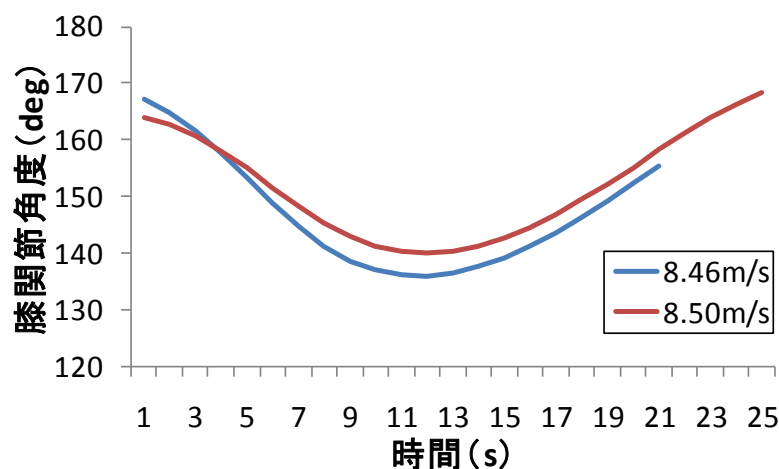


図 3.12 膝関節屈曲が最も大きかった者と小さかった者の膝関節角度の変位

次に、ステップでは膝関節の屈曲が水平速度の減少量と有意な相関関係にあった ($r=0.60$ $p<0.05$)。水平速度の減少が最も大きかった者と小さかった者の膝関節角度の変位をみると、膝関節の屈曲が小さいほうが水平速度の減少が少ないことは明らかであった(図 3.13)。

ジャンプにおいては、膝関節屈曲と接地時間のみ有意な相関関係が認められた ($r=0.61$ $p<0.05$)。

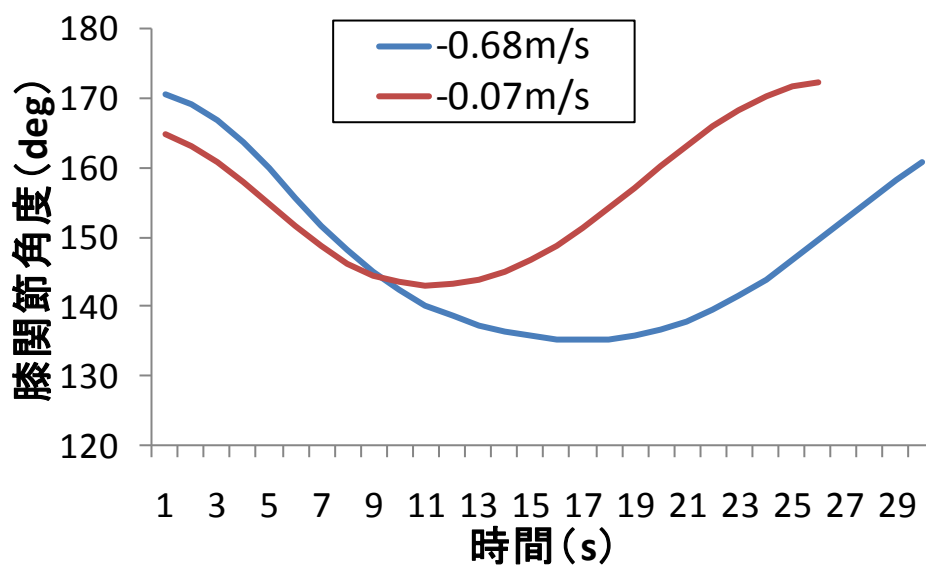


図 3.13 水平速度の減少が最も大きかった者と小さかった者の膝関節の角度の変位

3.3.3 跳出角度と跳躍距離について

膝関節以外の身体動作として、跳出角、滞空時間の影響をみた。まず、ホップとステップにおいて、各滞空時間と各跳躍距離に有意な正の相関関係が認められた（図 3.14）。

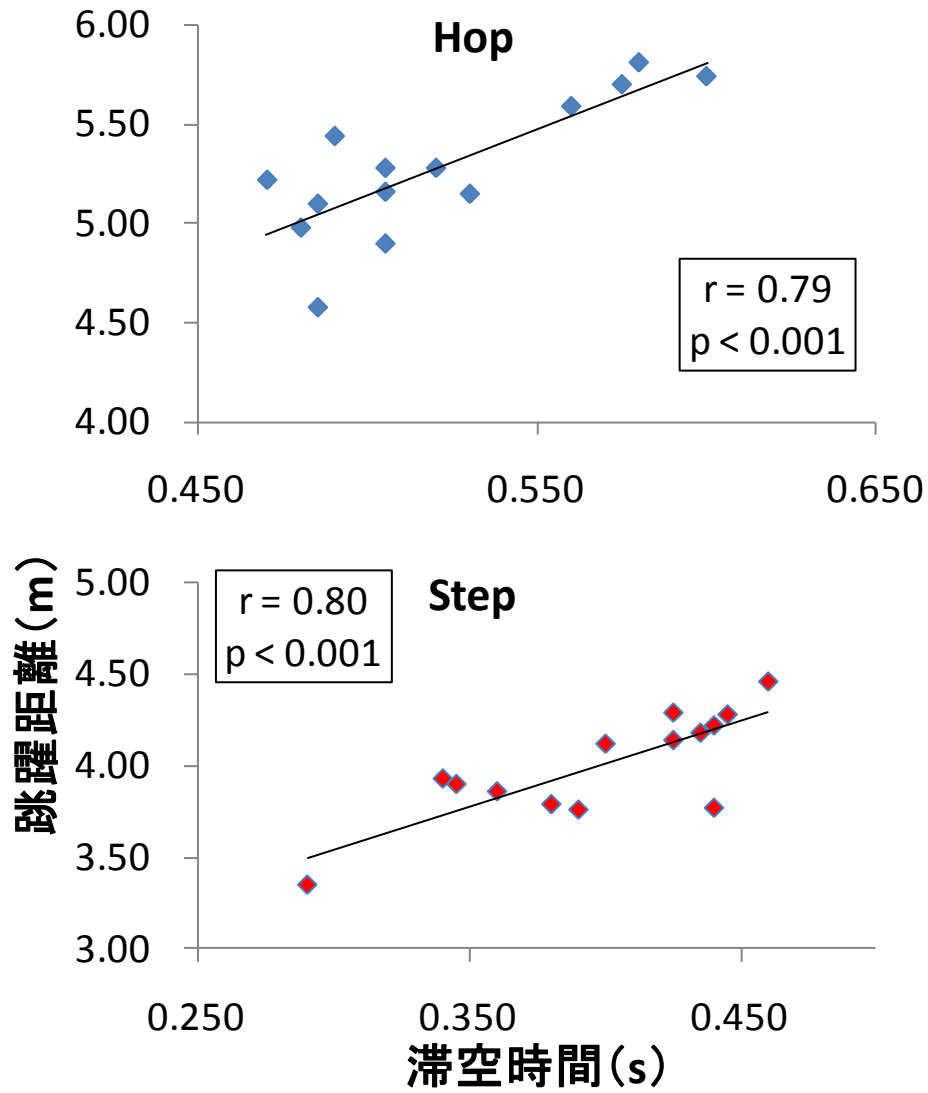


図 3.14 滞空時間と跳躍距離の関係

滞空時間は、跳出角と有意な正の相関関係が認められた (図 3.15)。跳出角と跳躍距離の関係を見ると、ホップとステップには有意な正の相関関係がみられたが (それぞれ $r=0.62$ $p<0.05$, $r=0.63$ $p<0.05$)、ジャンプは有意な相関関係はみられなかった (図 3.16)。跳出角と離地瞬間の鉛直速度との関係を見ると、ホップ、ステップ、ジャンプにおいて有意な正の相関関係が認められた (図 3.17)。また、跳出角と水平速度の減少量では、ホップ、ステップ、ジャンプ全てで有意な正の相関関係が認められた (それぞれ $r=0.78$ $p<0.001$, $r=0.67$ $p<0.01$, $r=0.69$ $p<0.01$, 図 3.18)。

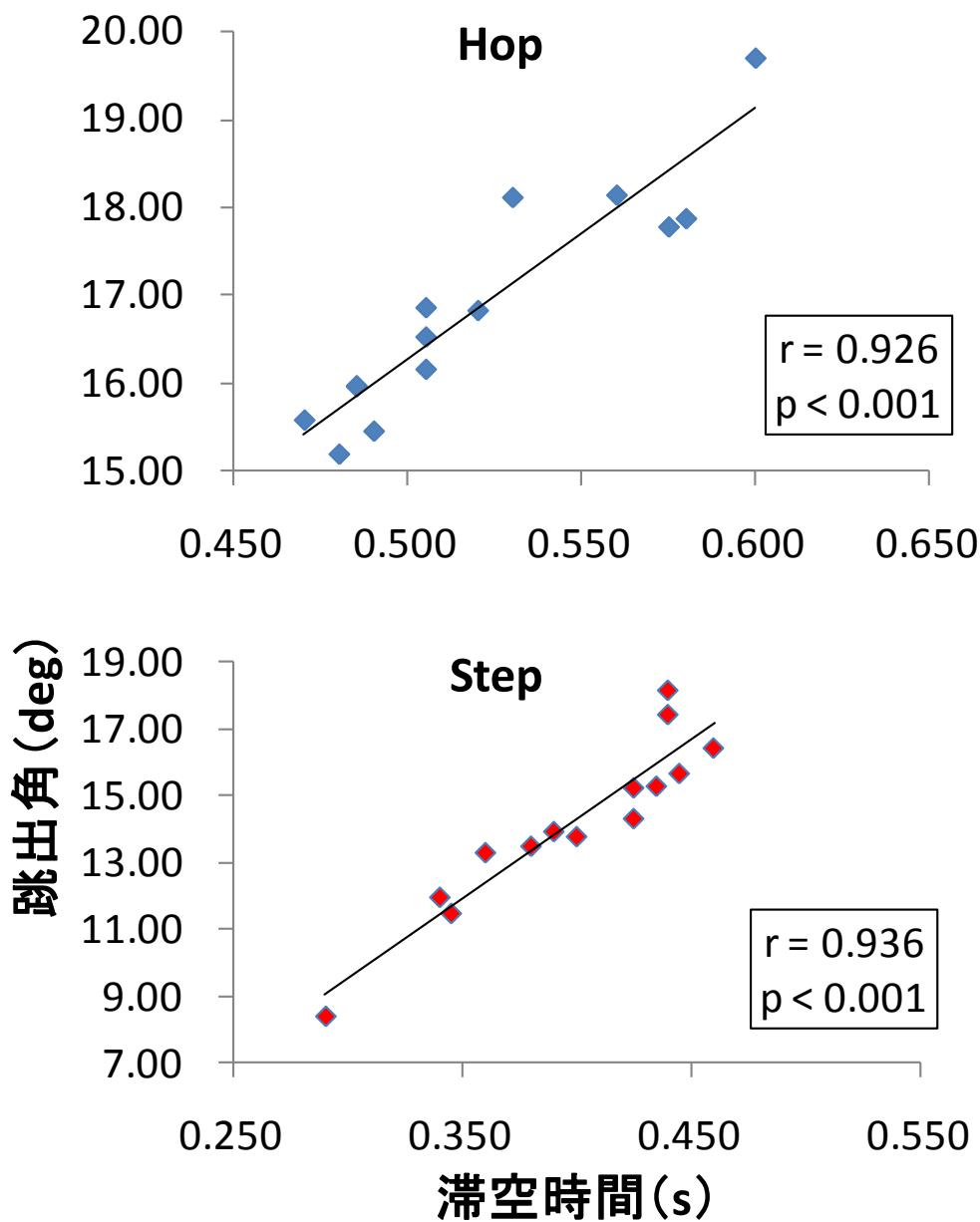


図 3.15 滞空時間と跳出角の関係

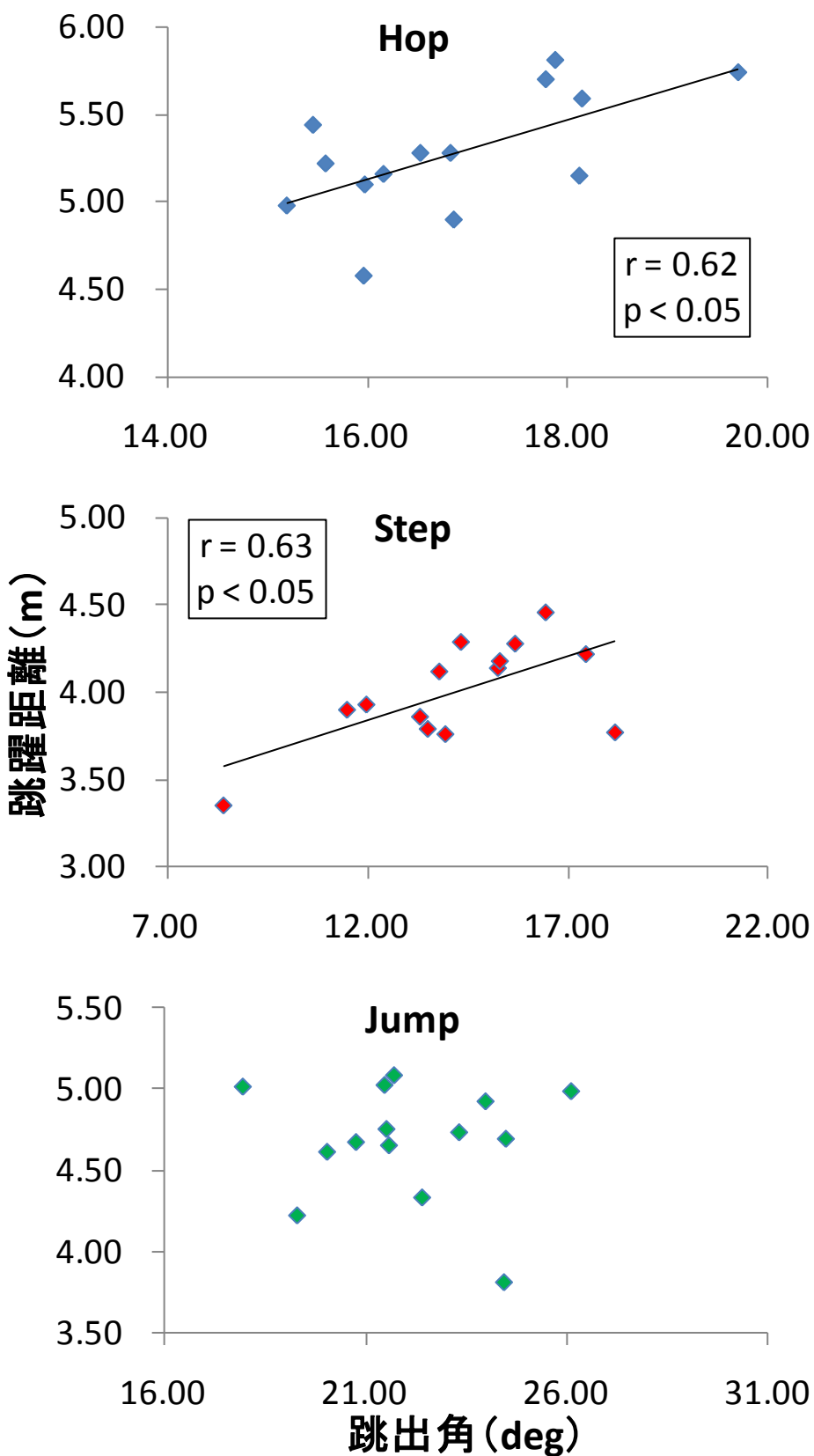


図 3.16 跳出角と跳躍距離の関係

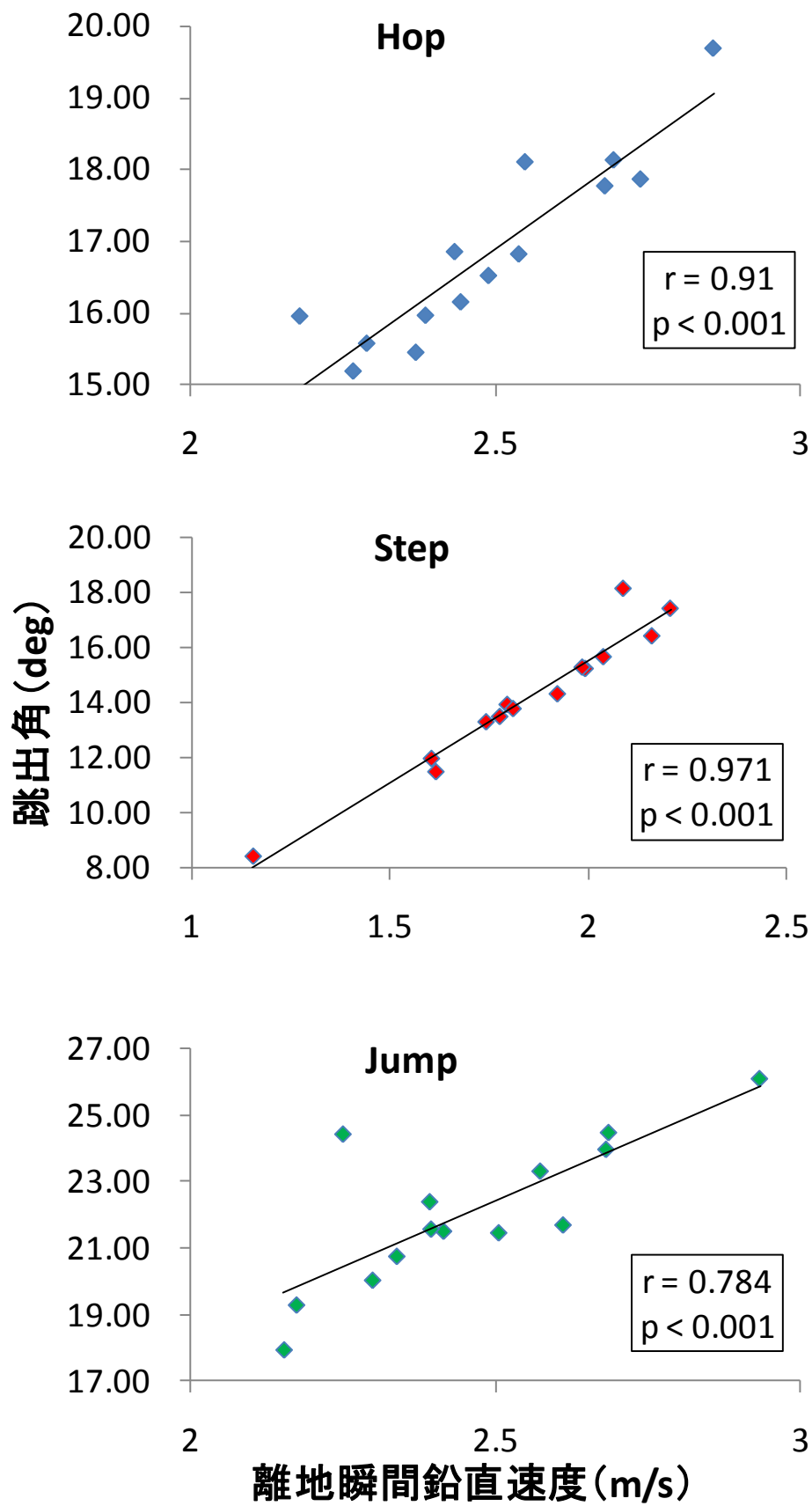


図 3.17 離地瞬間鉛直速度と跳出角の関係

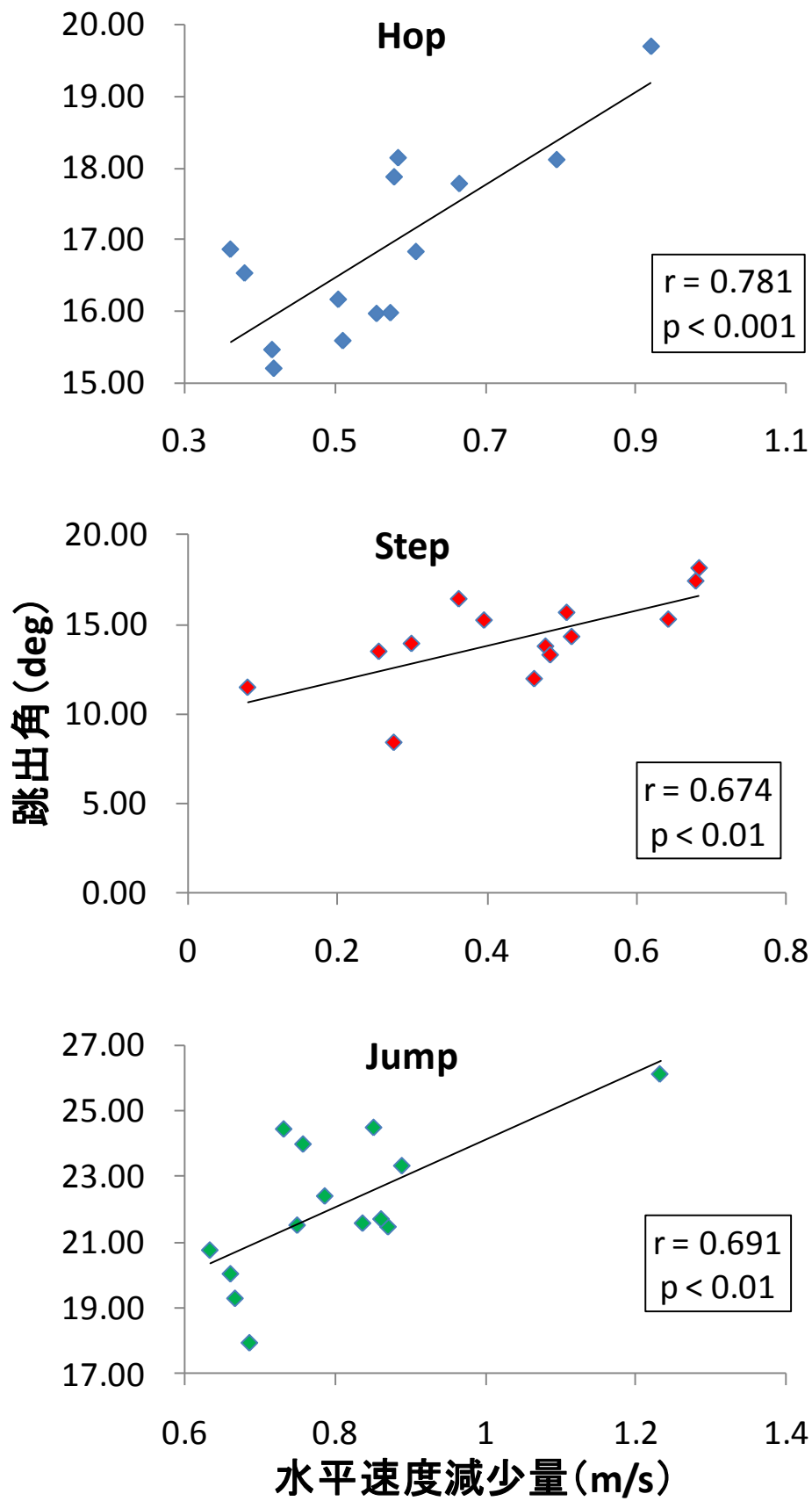


図 3.18 跳出角と水平速度の減少量との関係

3.3.4 速度と身体動作について

ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面において、L1, L3, 膝関節角度の身体動作の変数と、接地瞬間、離地瞬間の身体重心速度の変数のそれぞれの関係性を、表 3.4～表 3.6 の相関関係でみると、ホップにおいては、L1 と離地瞬間水平速度に有意な正の相関 ($r=0.55$ $p<0.05$), L1 と水平速度の減少量に有意な負の相関 ($r=-0.56$ $p<0.05$), 膝関節の伸展変位と離地瞬間の水平速度に有意な正の相関 ($r=0.62$ $p<0.05$) がそれぞれみられた (図 3.19). ステップにおいては、L3 と水平速度の減少量に有意な正の相関 ($r=0.77$ $p<0.01$), 膝関節の屈曲変位と水平速度減少量に有意な正の相関 ($r=0.60$ $p<0.05$) がみられた (図 3.20). なお、ジャンプにおいては身体動作と速度の間に有意な相関関係はみられなかった.

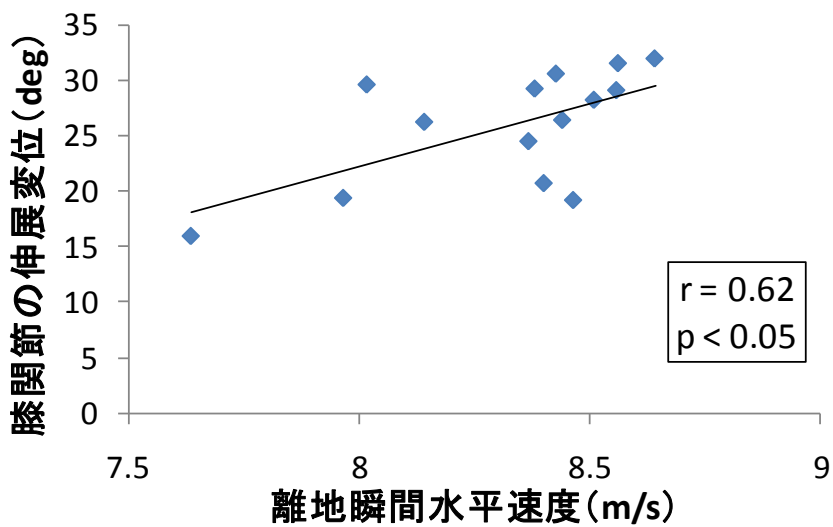
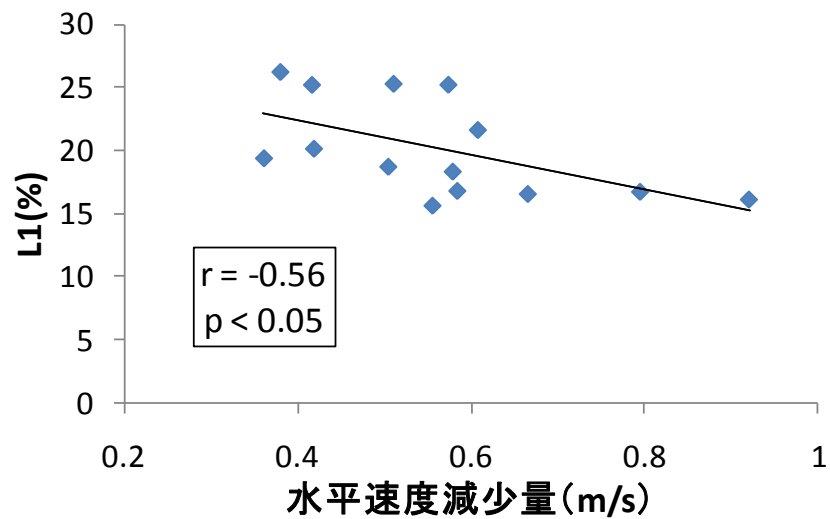
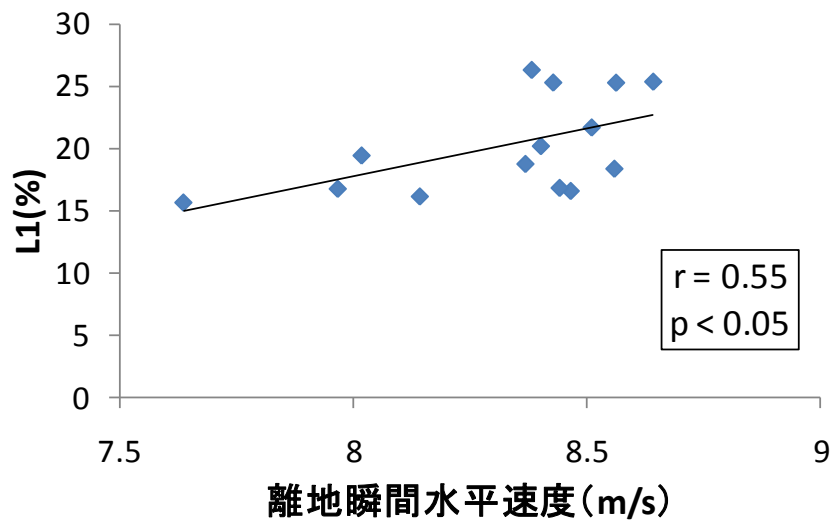


図 3.19 ホップ局面における速度と身体動作の関係

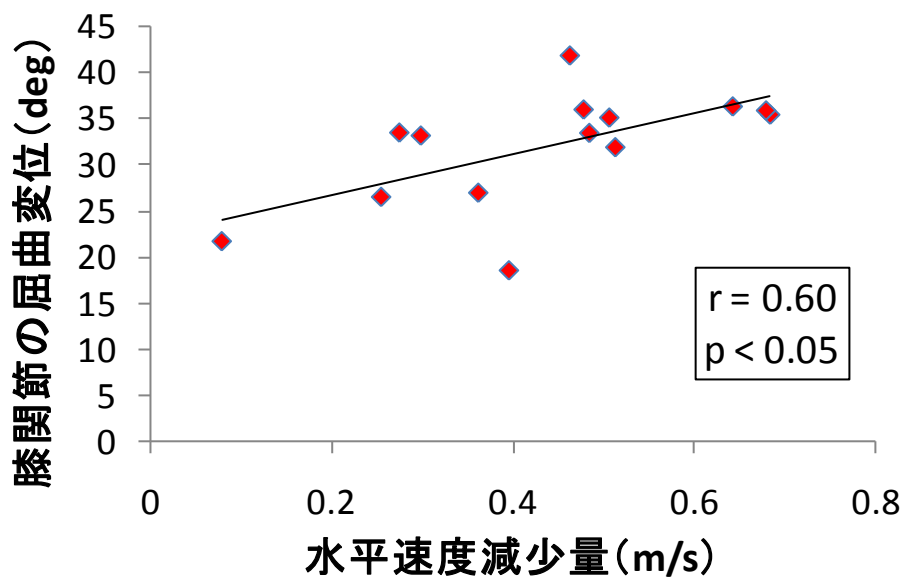
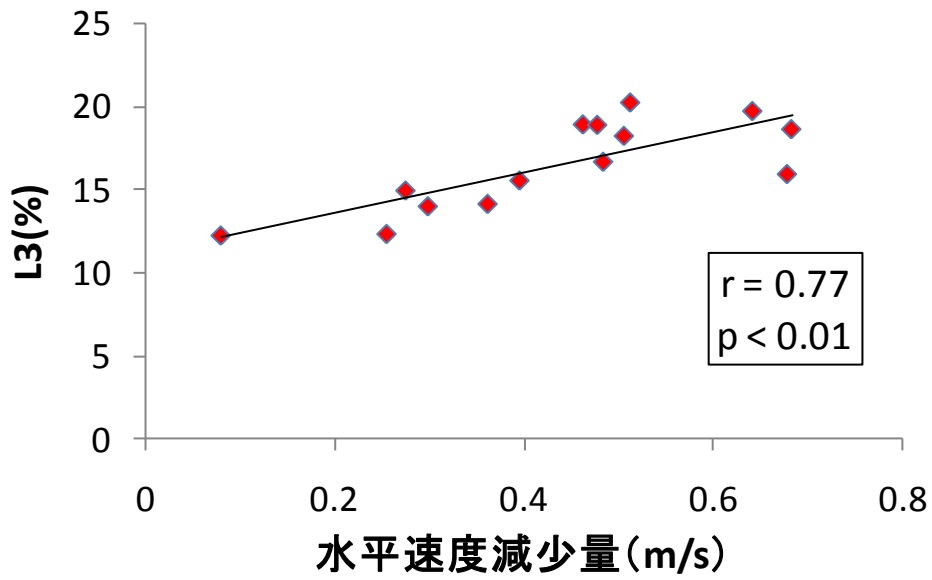


図 3.20 ステップ局面における速度と身体動作の関係

3.4 考察

3.4.1 速度と跳躍距離について

本研究において、助走速度と総跳躍距離に有意な相関関係がみられたことから ($p<0.001$)、三段跳において遠くへ跳ぶためには、助走で得られる水平速度が大きく関連していることが明らかとなった。そして、これは先行研究の報告[3][4][5][6]を支持する結果であった。

また、各跳躍局面の離地瞬間の水平速度と各跳躍距離との関係では、ホップとジャンプにのみ有意な相関関係がみられ (それぞれ $p<0.05$, $p<0.01$)、各跳躍局面の離地瞬間の鉛直速度と各跳躍距離との関係をみると、ホップとステップにのみ有意な相関関係がみられた ($p<0.001$)。このことは、深代の報告と同じ結果であり[7]、各局面によって、跳躍距離に結びつく速度は異なることを示している。ホップの跳躍距離に関しては、助走速度の影響を最も大きく受け、鉛直速度の影響も大きいことから、より高い水平速度で踏切に入った上で、鉛直速度を獲得する必要がある。しかし、それに伴い、次のステップの踏切時に大きな負荷がかかることが予想される。稲岡らは[13]、デプスジャンプにおいて至適負荷台高を検討しており、踏切の連続する跳躍種目の臨界点は台高 0.8m であると報告している。それは、台高が 0.8m 以上になると、膝関節の屈曲角度が増加し、負荷による衝撃力に耐えられなくなるからだと考察されている。したがって、一概にホップを全力で跳躍することが、総跳躍距離につながることは考えられない。もし、三段跳においても衝撃に耐えられる臨界点が存在し、それを明らかにできたとするなら、競技者は負荷の衝撃力を考慮した上で、ホップにおける最適な跳出角で跳躍することができると考えられる。しかし、三段跳はデプスジャンプと異なり、水平方向かつ片脚による跳躍であることを考慮する必要がある。

これまでに、三段跳においては水平速度の保持をすることが重要であると報告されているが[1]、本研究ではホップ、ステップ、ジャンプの全ての局面において、水平速度の減少量と跳躍距離との間に関係性がみられなかった。このことについては、以下のことが考えられる。①最も記録の良かった試技を対象にしていること、②被験者間の跳躍距離にあまり差がなかったこと、③跳躍タイプによる影響。つまり、本研究では、最も記録の良かった試技を対象に、記録が 14m 前後に集中し、跳躍タイプも考慮しなかったことの結果だと考えられる。

3.4.2 膝関節と跳躍距離について

本研究において、膝関節の屈曲が跳躍距離に影響するかを検討したところ、予備実験で得られた結果と同様に、関係性はみられなかった。これは予備実験における考察と同様に、膝関節の屈曲の大きさは競技力に関係することなく、膝関節の屈曲伸張が大きい選手と、膝関節の屈曲伸張が小さい選手がいると考えられる。しかしこれらの結果は、先行研究[9]で報告されているような、膝関節はできるだけ屈曲させないように跳躍したほうが跳躍距離につながるというものを支持する結果ではなかった。本章では成功試技のみの検討であったが、先行研究では、成功試技と失敗試技における検討であったため、このような結果になったのではないかと考えられる。志賀らは[14]、踏切前半で踏切脚の膝関節が急激に屈曲することは、膝関節の緩衝動作を伴い、接地時間を長くする可能性があるとして述べ、その結果として水平速度の減少が高まると述べている。このことは本研究においても示され、ステップ、ジャンプの局面において、膝関節の屈曲と接地時間との間には有意な正の相関関係が認められた ($p < 0.05$)。ステップにおいては、膝関節屈曲と水平速度減少量の間にも有意な正の相関関係が認められた ($p < 0.05$)。したがって、膝関節の屈曲に差があっても跳躍距離に影響しないということは、接地時に膝関節の屈曲が大きい選手は、水平速度の減少は大きいですが、その代わりにうまく鉛直速度への変換ができており、次の跳躍における跳躍角度、あるいは滞空時間の獲得に貢献していることが考えられる。このことから、ホップ、ステップ、ジャンプの各局面でどの変数をどの局面で必要とするのかは、跳躍タイプによって、あるいは個人によっても異なることが考えられる。

3.4.3 跳出角度と跳躍距離について

本章において、各滞空時間と各跳躍距離との関係を検討したところ、ホップとステップで有意な正の相関関係が認められた ($p < 0.01$)。このことは、長い時間跳んでいるほうが遠くへ跳べると物理的にも解釈できる。次に、滞空時間を長くするためには、高く跳ぶ必要があり、それは滞空時間と跳出角の相関関係からもわかる ($p < 0.001$)。そして高く跳ぶためには、鉛直方向の速度が必要となる。したがって、跳出角が大きくなれば、滞空時間が長くなり、跳躍距離につながる可能性がある。このことが言いきれない理由は、例えば鉛直方向 90° 近い角度で飛び出しても、跳躍距離にはつながらないからである[15]。走幅跳においては、至適な踏切角度についての研究がいくつ

かおこなわれてきているが[15][16]、三段跳においてそのような研究は見当たらない。また、高く飛び出すことに伴い、三段跳で重要視されている水平速度の減少が起きる可能性がある。このことについても志賀らは[14]、踏切前半局面の速度減少は、高い跳躍角度で飛び出すためには必要悪であるが、減速が大きくなりすぎると、最も重要な跳躍距離獲得条件である跳躍初速度が損なわれると述べている。このことから、本章では成功試技のみを対象としているため、各跳躍距離と水平速度の減少量には関係性がみられなかったと考えられる。以上のことから、三段跳において跳躍距離を獲得するためには、高く飛び出すことで跳躍距離を獲得するか、低く飛び出すことで水平速度を維持するかの2つの方法が考えられた。

3.4.4 速度と身体動作について

ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面において、L1, L3, 膝関節角度の身体動作の変数と、接地瞬間、離地瞬間の身体重心速度の変数のそれぞれの関係性をみると、ホップにおいては、L1と離地瞬間水平速度に有意な正の相関、L1と水平速度の減少量に有意な負の相関、膝関節の伸展変位と離地瞬間の水平速度に有意な正の相関がそれぞれみられた。L3, あるいはL1が大きくなると、接地時間は増大する。それに伴い、膝関節の屈曲と伸展をする時間が長くなり、速度に影響を与えられられるが、本研究の結果では膝関節の変位と水平速度の減少量には有意な差はみられず、膝関節の伸展においては、離地瞬間の水平速度と有意な正の相関関係がみられた。跳出角度と跳躍距離のところで述べたことと合わせると、ホップ局面において、三段跳で重要と考えられている水平速度を維持した状態でおこなうためには、膝関節の屈曲による水平速度の減少というよりも、その分膝関節を伸展させることにより、L1を大きくし、離地の瞬間に重心をより前方へ運び出すことが必要だと考えられる。反対に、ホップ局面において跳躍距離を得るために高さを出すには、水平速度の減少を伴うが、鉛直速度の獲得をする必要がある。これらの関係が、ホップの跳躍距離を決めるポイントであり、このことによって跳躍タイプに影響を与えているのではないかと示唆される内容である。つまり、ホップ優位型はホップ局面の割合が大きいため、ホップの踏切では水平速度の減少を伴うが、高さを出すことで跳躍距離を獲得していると考えられる。他のバランス型とジャンプ優位型は、ホップ局面における水平速度の減少を抑えるために、ホップの踏切では低く飛び出しているのではないかと考えられる。

ステップにおいては、L3 と水平速度の減少量に有意な正の相関、膝関節の屈曲変位と水平速度減少量に有意な正の相関がみられた。L3 が大きくなれば、まず大きなブレーキがかかると考えられる。さらに接地時間は長くなり、結果膝関節の屈曲する時間も長くなる。そのことで、接地前半において水平速度の減少が大きくなると考えられる。伊藤らは[17]、ハードル走における踏切時において、走速度の高い選手ほど水平速度の減少量が少なく、L3 の水平距離が小さいことを報告している。膝関節と跳躍距離の項においても考察したように、ステップの踏切における大きな衝撃を緩衝するためには、膝関節の屈曲動作は必要であるが、それに伴い水平速度の減少は大きくなる。水平速度の維持という意味では、ステップ局面において L3 を小さくし、膝関節の屈曲を小さくする必要がある。このことについても志賀らは[14]、踏切前半で膝関節の固定を重要視しており、そのためには、膝関節伸展筋を高めることが必要であると報告している。以上のことから、負荷の衝撃力が大きいと考えられるステップ局面において、膝関節屈曲による緩衝動作は必要であるが、そのことに伴う水平速度の減少を抑えるためには、膝関節をできるだけ屈曲させずに接地することが必要であると考えられる。

3.5 結論

三段跳のパフォーマンスを向上させるためには、速い助走をおこなうことが第一条件であり、その後の3つの跳躍において、水平速度と鉛直速度のバランスを各局面の必要に応じてとっていくことが重要である。三段跳において跳躍距離を獲得するためには、高く跳び出すことで跳躍距離を獲得するか、低く跳び出すことで水平速度を維持するかの2つの方法が考えられ、このことによって跳躍タイプに影響を与えているのではないかと示唆された。つまり、以下のことが示唆された。①ホップ優位型は、ホップの踏切では水平速度の減少を伴うが、高さを出すことで跳躍距離を獲得している、②他のバランス型とジャンプ優位型は、ホップの踏切では低く跳び出すことで、ホップ局面における水平速度の減少を抑え、残りの2つの局面まで水平速度を維持することを優先している。

身体動作として、膝関節は緩衝動作としての役割が大きいことが示唆された。また膝関節の屈曲が大きいほど水平速度の減少量が大きいため、局面によって膝関節の屈曲を抑えることが必要になることが考えられた。

第4章 三段跳におけるキネティクス ～下肢関節の関節パワー・仕事に着目して～

本章では、三段跳におけるキネティクスとして、下肢関節の関節パワー・仕事の特徴について述べ、パフォーマンスとの関係について論じる。

4.1 目的

身体運動にはエネルギーが必要である。高いエネルギーを最後まで維持することがパフォーマンスに影響し、そのエネルギーの増減には下肢関節の仕事が影響していると考えられる。つまりホップ、ステップ、ジャンプの各踏切時の下肢関節の仕事量を明らかにする必要がある。

そこで本章では、三段跳の各支持期における下肢3関節のパワー発揮・仕事の特徴を明らかにし、跳躍距離にどのような影響を与えるのかについて検討することとした。

4.2 測定項目

本章で取り扱う項目は以下のものである。

- ・跳躍距離
- ・身体重心水平速度
- ・身体重心鉛直速度
- ・接地距離 (L3)
- ・離地距離 (L1)
- ・接地時間
- ・関節角度
- ・床反力
- ・下肢関節トルク
- ・下肢関節パワー
- ・下肢関節の仕事

4.3 データ分析

ホップ、ステップ、ジャンプの各支持期は、接地の瞬間が0%、離地の瞬間が100%となるように正規化した。床反力のピーク値は、身体質量で除して求めた。下肢関節の仕事は、関節パワーが正の場合を正の仕事、負の場合を負の仕事に分けて算出している。

統計処理は、一元配置の分散分析(ANOVA) で、下肢3関節間あるいはホップ、ステップ、ジャンプの各局面間での仕事量の差を検定した。跳躍距離と各関節の仕事量との相関関係を明らかにするために、ピアソンの相関係数の検定を実施した。なお、有意水準は危険率5%未満とした。

4.4 結果

表 4.1～表 4.3 は本章の測定項目の測定結果をホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍ごとに示したものである。なお、膝関節における屈曲ピークトルクは、被験者によっては伸展トルクのみが発揮されている者と屈曲トルクを発揮する者がいたため(図 4.1)、表においては屈曲トルクの値がない場合がある。

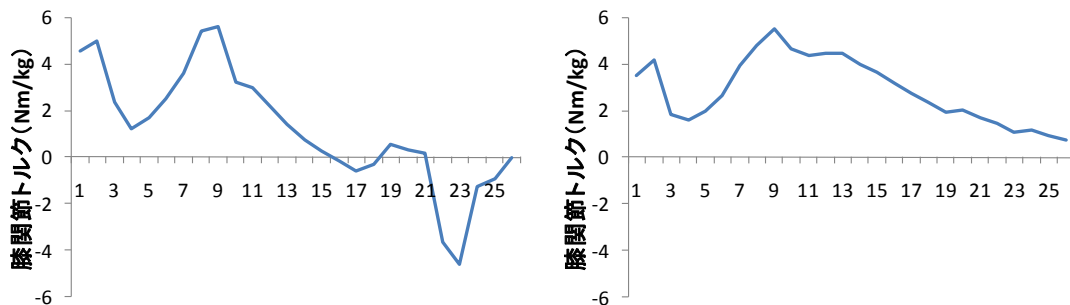


図 4.1 下肢関節トルク発揮のパターン

表 4.1 ホップ局面の床反力，下肢関節ピークトルク，下肢関節ピークパワー，下肢関節仕事の算出結果

被験者	分析記録 (m)	床反力		ピークトルク(Nm/kg)			ピークパワー(W/kg)			仕事(J/kg)			
		(N)	(N/kg)	伸展 / 屈曲			正 / 負			股関節	膝関節	足関節	3関節
				股関節	膝関節	足関節	股関節	膝関節	足関節				
1	14.78	4012.5	58.2	4.239 / -2.609	7.378 / -0.109	6.356 / -3.793	35.063 / -21.803	27.785 / -57.033	41.296 / -45.352	0.717	-1.030	-0.203	-0.517
2	14.38	3991.3	54.7	4.024 / -1.878	3.553 / -0.435	5.119 / -3.352	19.448 / -15.867	3.673 / -31.809	30.460 / -34.138	0.461	-0.980	0.460	-0.059
3	14.26	2623.2	45.2	4.111 / -2.271	5.418 / -0.111	3.865 / -2.581	23.331 / -18.866	12.509 / -42.696	34.570 / -17.551	0.100	-1.011	1.060	0.149
4	14.19	3312.7	51.0	6.675 / -2.920	7.217 / -	5.704 / -4.893	18.994 / -27.418	23.599 / -83.964	38.600 / -47.862	-0.465	-1.449	0.526	-1.388
5	14.17	4431.8	56.1	5.587 / -0.652	6.640 / -0.869	5.588 / -3.904	33.762 / -5.344	14.833 / -58.635	31.200 / -28.997	1.471	-1.750	0.177	-0.103
6	14.17	3423.9	46.3	6.232 / -2.524	6.626 / -0.568	5.331 / -1.894	35.813 / -21.885	14.997 / -59.068	30.166 / -34.453	1.000	-1.215	0.277	0.062
7	14.07	3149.6	48.5	4.544 / -2.201	5.240 / -0.813	5.279 / -2.471	17.683 / -14.873	6.767 / -47.497	42.147 / -26.372	0.433	-1.522	1.079	-0.010
8	14.06	3108.3	50.1	4.916 / -1.441	4.132 / -0.254	5.202 / -4.336	20.350 / -13.357	11.113 / -50.940	36.909 / -37.323	0.289	-1.372	0.103	-0.980
9	14.01	3100.3	49.2	4.924 / -2.808	4.884 / -	5.418 / -2.593	23.821 / -28.232	12.202 / -41.931	36.152 / -30.103	0.534	-0.995	0.225	-0.236
10	13.98	3626.1	54.5	3.128 / -2.630	6.600 / -1.458	4.775 / -3.311	15.580 / -29.006	13.667 / -40.989	34.681 / -22.528	-0.280	-0.848	0.583	-0.545
11	13.94	3339.2	54.3	5.513 / -1.978	3.577 / -1.194	4.626 / -3.421	25.721 / -22.870	11.846 / -32.562	36.864 / -36.715	0.290	-0.887	0.446	-0.150
12	13.67	2425.8	41.1	4.168 / -1.717	3.351 / -	5.990 / -2.720	16.862 / -15.976	13.180 / -31.595	31.208 / -45.154	0.196	-0.587	-0.400	-0.791
13	13.61	2983.5	46.6	4.187 / -2.803	5.974 / -	5.404 / -3.677	15.780 / -30.020	18.999 / -47.264	28.507 / -23.775	-0.816	-0.819	0.770	-0.865
14	12.16	2864.0	44.1	4.797 / -2.788	4.513 / -	4.632 / -2.752	21.189 / -23.484	5.289 / -40.719	23.782 / -31.255	0.698	-1.182	0.149	-0.336

表 4.2 ステップ局面の床反力，下肢関節ピークトルク，下肢関節ピークパワー，下肢関節仕事の算出結果

被験者	床反力		ピークトルク(Nm/kg)			ピークパワー(W/kg)			仕事(J/kg)			
	(N)	(N/kg)	伸展 / 屈曲			正 / 負			股関節	膝関節	足関節	3関節
			股関節	膝関節	足関節	股関節	膝関節	足関節				
1	4450.5	64.5	4.826 / -2.863	7.944 / -0.307	6.352 / -0.028	33.291 / -19.012	26.355 / -59.722	22.769 / -36.142	0.989	-1.263	-0.336	-0.610
2	5253.3	72.0	3.988 / -1.313	4.061 / -0.080	3.413 / -4.131	17.021 / -12.199	6.415 / -42.155	8.741 / -2.282	0.058	-1.605	0.315	-1.232
3	3175.4	54.7	3.233 / -1.850	5.190 / -0.806	4.995 / -1.835	16.850 / -13.876	9.754 / -36.202	44.862 / -17.409	0.106	-1.151	0.922	-0.123
4	3294.3	50.7	4.450 / -0.457	6.171 / -0.388	5.093 / -2.503	18.725 / -4.157	16.921 / -55.451	29.118 / -29.885	0.666	-1.920	-0.188	-1.442
5	4923.9	62.3	8.343 / -1.805	5.595 / -4.618	6.442 / -5.665	29.941 / -7.615	5.594 / -38.109	31.109 / -39.847	1.896	-1.257	-0.418	0.220
6	5509.0	74.4	6.367 / -1.218	4.669 / -1.150	5.233 / -0.282	28.704 / -8.117	13.152 / -47.892	26.086 / -35.833	0.674	-0.995	-0.253	-0.575
7	4704.3	72.4	3.781 / -2.566	5.007 / -0.138	5.103 / -1.521	11.520 / -18.968	11.292 / -42.388	25.361 / -13.821	-0.533	-1.264	0.944	-0.853
8	3114.6	50.2	4.070 / -1.787	4.918 / -0.075	5.697 / -1.290	21.198 / -16.527	11.106 / -50.621	23.357 / -26.075	0.117	-1.568	0.423	-1.027
9	4648.0	73.8	5.585 / -2.765	5.491 / -	5.150 / -4.251	9.361 / -20.956	13.498 / -52.061	34.523 / -33.207	-0.133	-1.518	-0.239	-1.890
10	4844.5	72.8	3.147 / -2.885	3.332 / -0.496	6.507 / -4.670	10.298 / -20.632	12.759 / -39.629	30.853 / -45.409	-0.611	-1.114	-0.011	-1.736
11	4135.2	67.2	3.431 / -2.221	3.773 / -1.158	4.293 / -1.193	11.816 / -17.933	11.854 / -37.153	31.933 / -27.857	-0.167	-1.348	0.507	-1.008
12	2855.0	48.4	3.586 / -1.787	4.703 / -	5.837 / -3.164	16.475 / -13.683	17.302 / -42.355	28.656 / -36.914	-0.079	-1.347	-0.418	-1.844
13	3886.3	60.7	3.811 / -1.918	4.514 / -	6.038 / -5.328	13.565 / -15.666	9.072 / -45.751	28.253 / -33.885	-0.205	-1.254	-0.080	-1.539
14	4306.2	66.2	7.238 / -2.010	5.757 / -0.183	4.284 / -1.846	15.640 / -13.023	11.581 / -48.357	25.780 / -30.359	0.313	-1.036	-0.042	-0.764

表 4.3 ジャンプ局面の床反力，下肢関節ピークトルク，下肢関節ピークパワー，下肢関節仕事の算出結果

被験者	床反力		ピークトルク(Nm/kg)			ピークパワー(W/kg)			仕事(J/kg)			
	(N)	(N/kg)	伸展 / 屈曲			正 / 負			股関節	膝関節	足関節	3関節
			股関節	膝関節	足関節	股関節	膝関節	足関節				
1	3969.5	50.2	5.916 / -2.016	7.187 / -0.262	5.947 / -1.070	21.283 / -17.120	35.524 / -72.698	26.347 / -48.059	1.038	-1.788	-0.822	-1.572
2	2560.8	41.3	6.429 / -2.349	4.273 / -	4.990 / -4.797	10.571 / -16.182	10.115 / -43.593	8.598 / -5.011	-0.364	-0.934	0.047	-1.250
3	4484.1	65.0	4.637 / -2.147	6.430 / -	4.717 / -2.460	23.031 / -15.366	12.228 / -53.195	28.453 / -19.524	0.504	-1.456	0.504	-0.447
4	3486.1	53.6	4.540 / -2.035	7.239 / -0.735	5.551 / -1.536	24.943 / -18.192	19.923 / -57.575	36.511 / -25.856	0.526	-1.359	0.635	-0.198
5	3713.8	58.9	4.688 / -1.914	4.816 / -0.061	3.783 / -1.474	19.855 / -11.114	14.226 / -35.503	18.257 / -11.067	0.930	-1.089	0.290	0.132
6	4831.8	65.3	6.229 / -2.457	4.684 / -0.410	6.146 / -2.711	29.354 / -19.673	8.701 / -33.686	39.665 / -22.138	1.589	-0.908	0.895	1.577
7	3033.2	47.4	6.465 / -1.563	4.154 / -	5.748 / -4.846	18.811 / -11.844	8.159 / -43.469	14.426 / -17.944	-0.009	-1.403	0.532	-0.879
8	2884.2	48.9	5.536 / -1.637	1.999 / -0.478	5.014 / -0.279	28.485 / -16.034	5.751 / -10.211	26.508 / -27.403	0.779	-0.322	-0.112	0.345
9	3885.3	59.8	6.252 / -2.812	7.154 / -0.002	6.036 / -2.087	20.293 / -22.050	22.052 / -67.750	42.762 / -41.107	-0.338	-1.477	0.405	-1.410
10	2826.3	48.7	4.662 / -3.102	3.911 / -0.423	6.519 / -3.558	14.198 / -20.098	8.651 / -34.189	22.497 / -35.923	-0.165	-0.826	-0.100	-1.091
11	4963.1	74.6	4.092 / -2.461	6.131 / 0.513	6.805 / -3.377	18.863 / -15.033	16.069 / -51.633	21.244 / -34.863	0.463	-1.266	-0.450	-1.253
12	3864.8	59.5	4.154 / -2.361	6.152 / -	6.001 / -1.422	11.274 / -17.602	16.207 / -59.224	29.730 / -17.730	-0.501	-1.375	0.962	-0.914
13	4394.4	71.5	3.761 / -1.670	6.587 / -0.476	5.827 / -1.186	14.696 / -10.789	9.593 / -42.695	35.896 / -31.263	0.481	-1.562	0.447	-0.634
14	5316.4	72.8	5.681 / -1.916	6.301 / -0.146	4.057 / -0.604	10.354 / -13.338	27.939 / -58.353	19.846 / -13.432	-0.193	-1.154	0.204	-1.142

4.4.1 床反力

床反力の大きさは、ホップ：2425.8N～4431.8N，ステップ：2855.0N～5509.0N，ジャンプ：2560.8N～5316.4N の範囲であった。身体質量で除した値では、ホップ：41.1N/kg～58.2N/kg，ステップ：48.4N/kg～74.4N/kg，ジャンプ：41.3N/kg～74.6N/kg の範囲であった。それぞれの平均値は、ホップは 3313.7N と 50.0N/kg ，ステップは 4221.5N と 63.6N/kg，ジャンプは 3872.4N と 58.4N/kg であり，いずれもステップにおける値が最も大きく，次にジャンプ，ホップという順であった。

4.4.2 下肢関節トルクとパワーの発揮パターン

下肢 3 関節における関節トルクは、ホップ，ステップ，ジャンプの各支持期で共通した発揮パターンであった（図 4.2）。股関節は，接地後に伸展トルクを発揮し，離地に向かうにつれて屈曲トルクを発揮していた。膝関節は，接地中伸展トルクを発揮していた。足関節は，接地後に屈曲トルクを発揮し，その後伸展トルクを発揮していた。

下肢 3 関節における関節パワーは、ホップ，ステップ，ジャンプの各支持期で共通した発揮パターンがみられた（図 4.3）。それは，股関節では接地後コンセントリックに働き，離地に向かうにつれてエキセントリックな働きをしていた。膝関節では，接地後エキセントリックに働き，接地後半にはコンセントリックな働きをしていた。足関節は，接地後コンセントリックに働き，その後膝関節の動きを追うようにエキセントリックに働いた後，コンセントリックな働きをしていた。

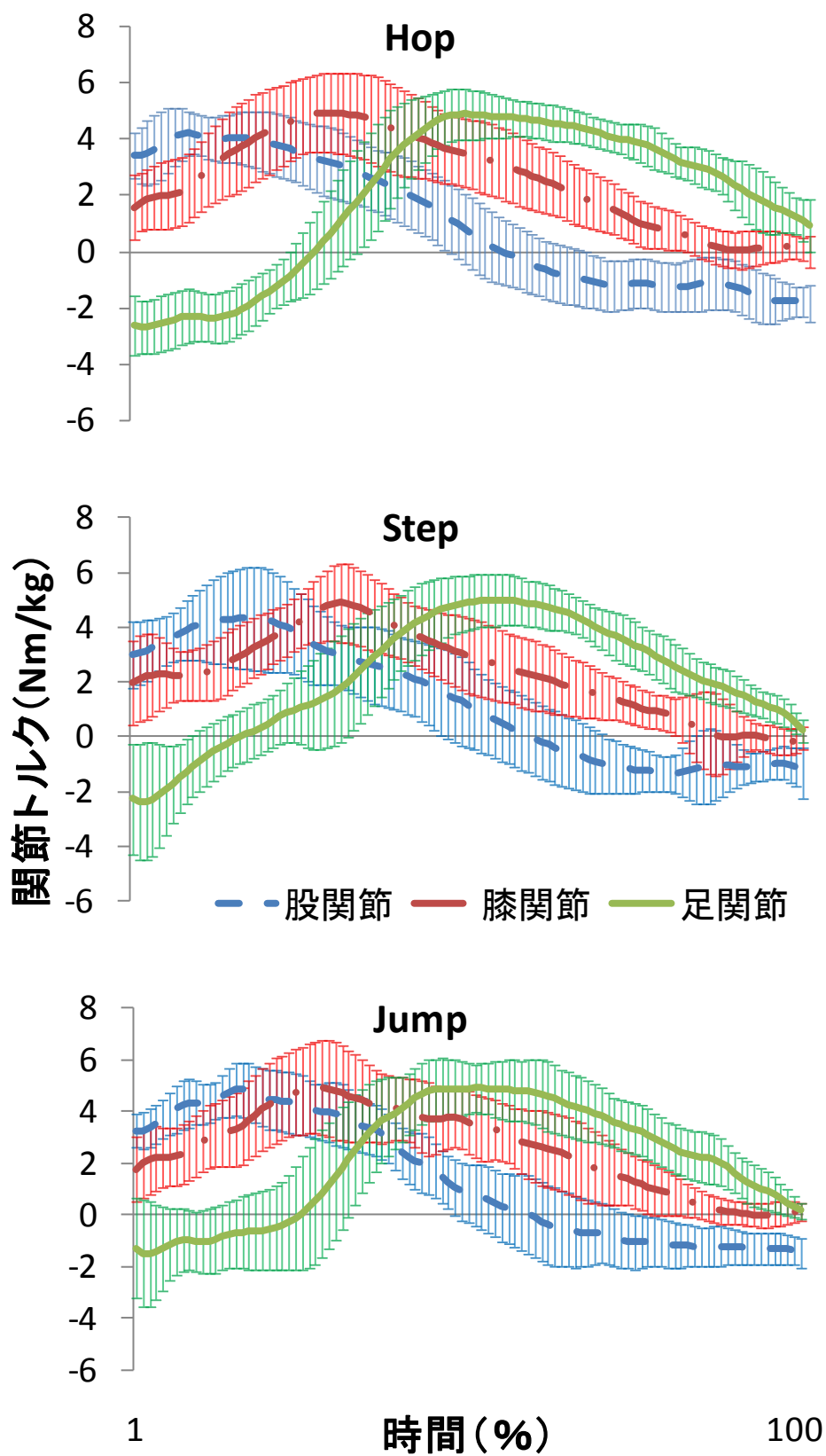


図 4.2 関節トルク

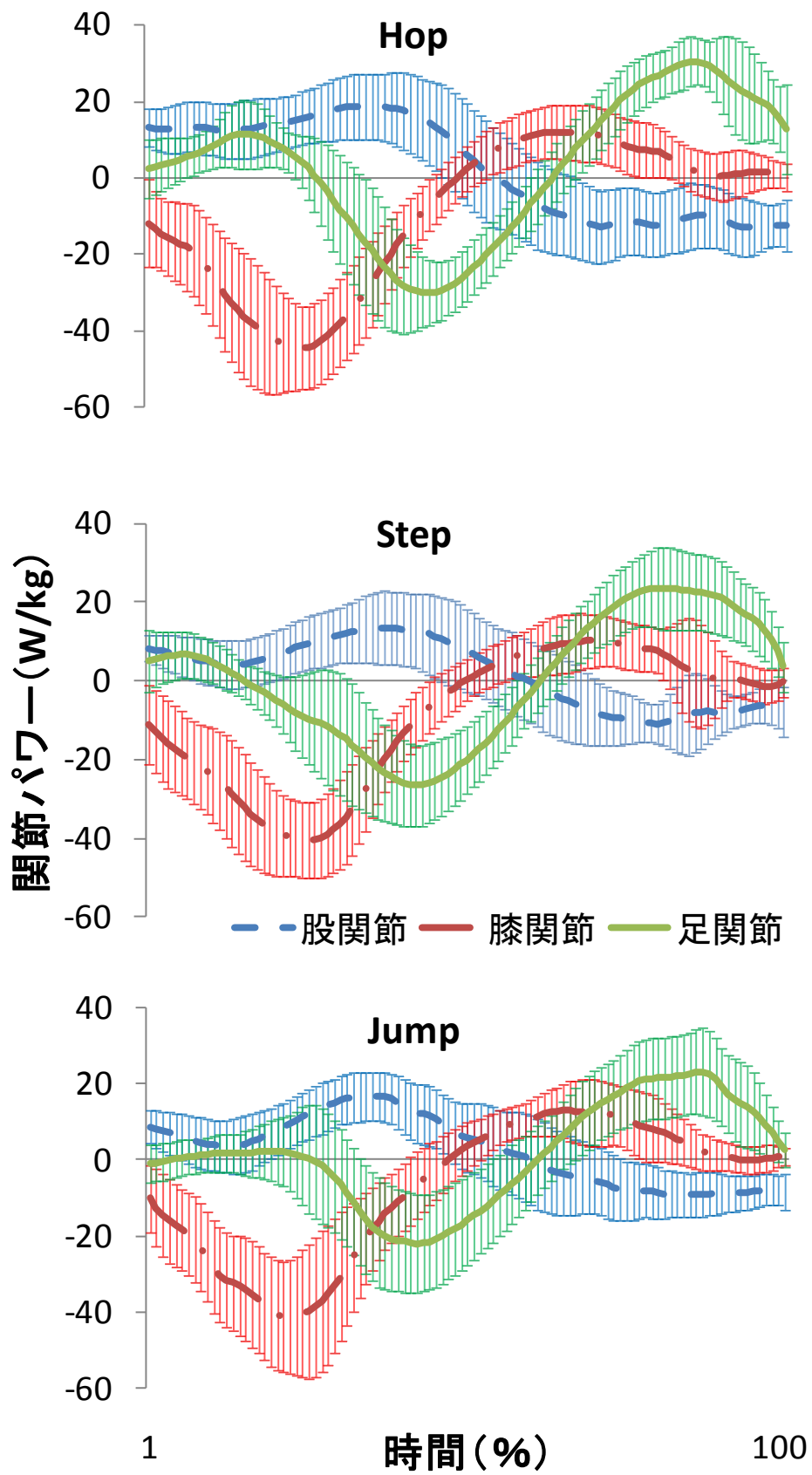


図 4.3 下肢関節パワー発揮の特徴

4.4.3 下肢関節トルクと跳躍距離

図 4.4～図 4.6 に、トルクのピーク値と跳躍距離の関係を示した。全体を通して、跳躍距離の増加に対してピーク値が増加する傾向にはなかった。

- ①：ホップの伸展トルクのピーク値は、跳躍距離にかかわらず、下肢 3 関節すべてにおいて高い値を示した。膝関節ではばらつきが大きく、一定の傾向がみられなかった。屈曲トルクのピーク値は、股関節においては跳躍距離に関係なくほぼ一定であったが、足関節では跳躍距離とともに上昇した ($r=-0.60$ $p<0.05$)。
- ②：ステップの伸展トルクのピーク値は、下肢 3 関節ともにホップよりも高い値を示し、ばらつきも大きかった。屈曲トルクのピーク値は、足関節においてばらつきが大きい傾向にあった。伸展屈曲ともに、跳躍距離に関係なくトルクのピーク値はほぼ一定であった。
- ③：ジャンプのトルクのピーク値は、膝関節の伸展トルクのピーク値と足関節の屈曲トルクのピーク値のばらつきが大きい傾向にあった。下肢 3 関節において、伸展屈曲ともに跳躍距離と関係性はみられなかった。

Hop

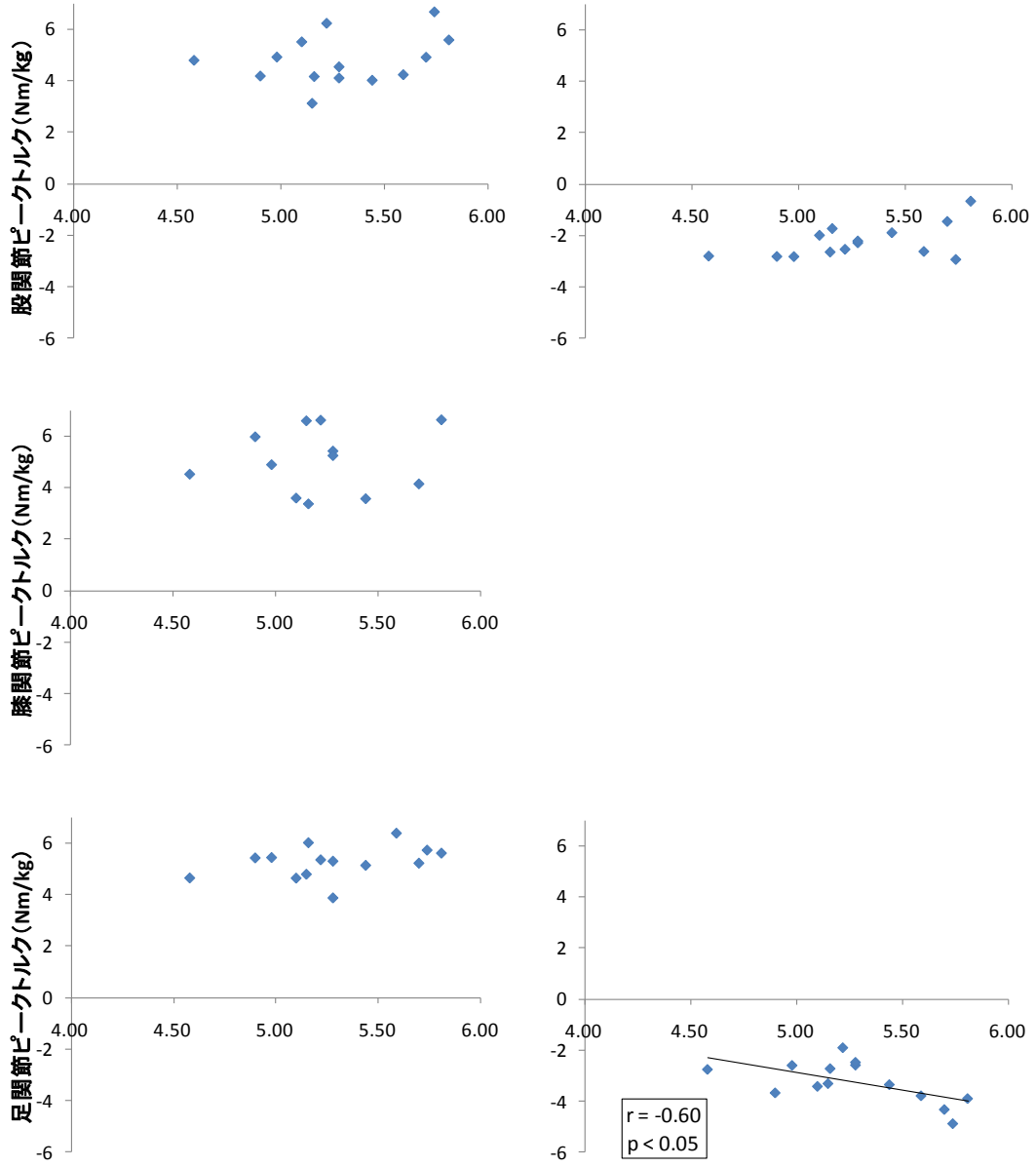


図 4.4 ホップ局面における下肢関節のピークトルクと跳躍距離との関係

Step

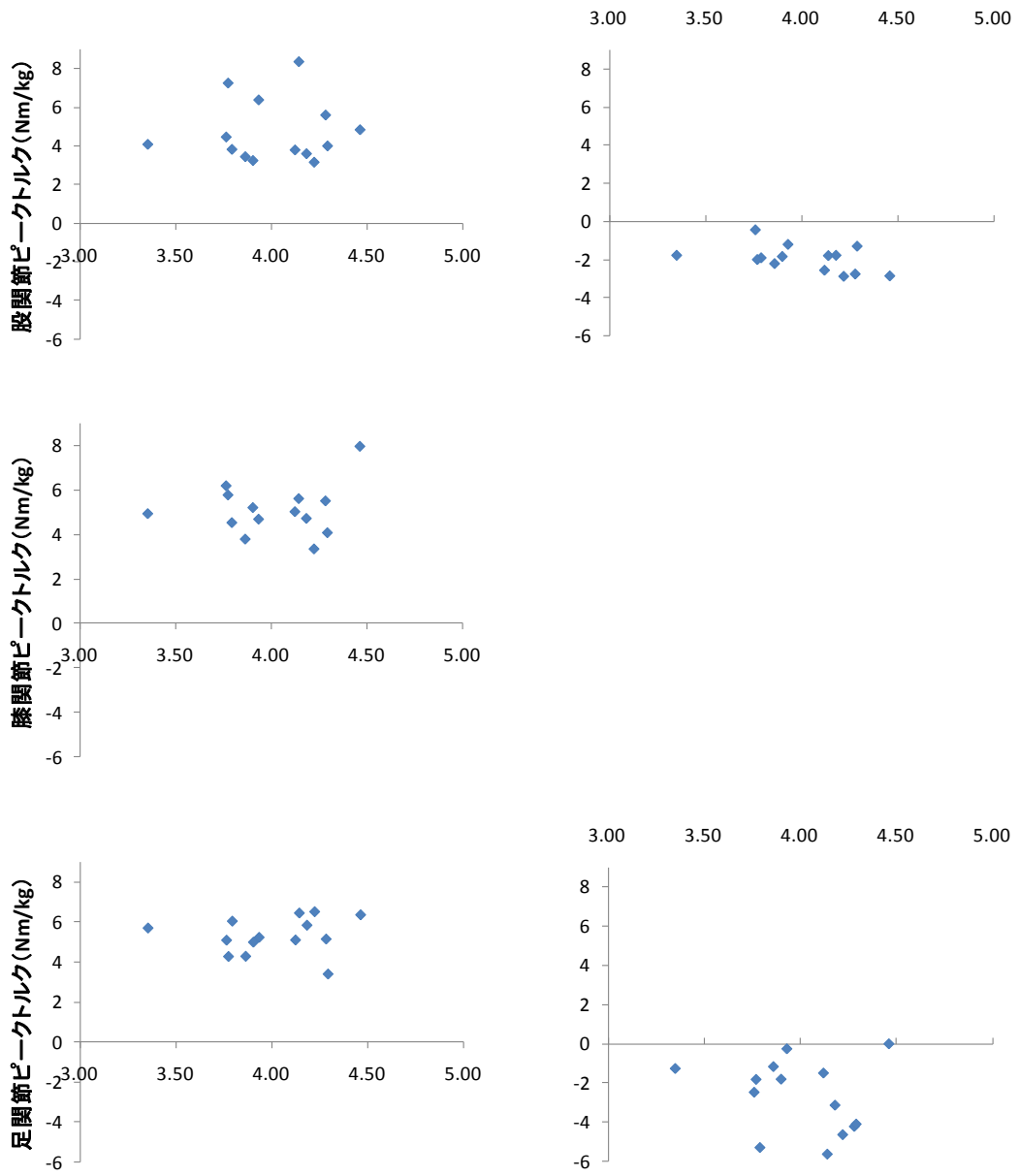


図 4.5 ステップ局面における下肢関節のピークトルクと跳躍距離との関係

Jump

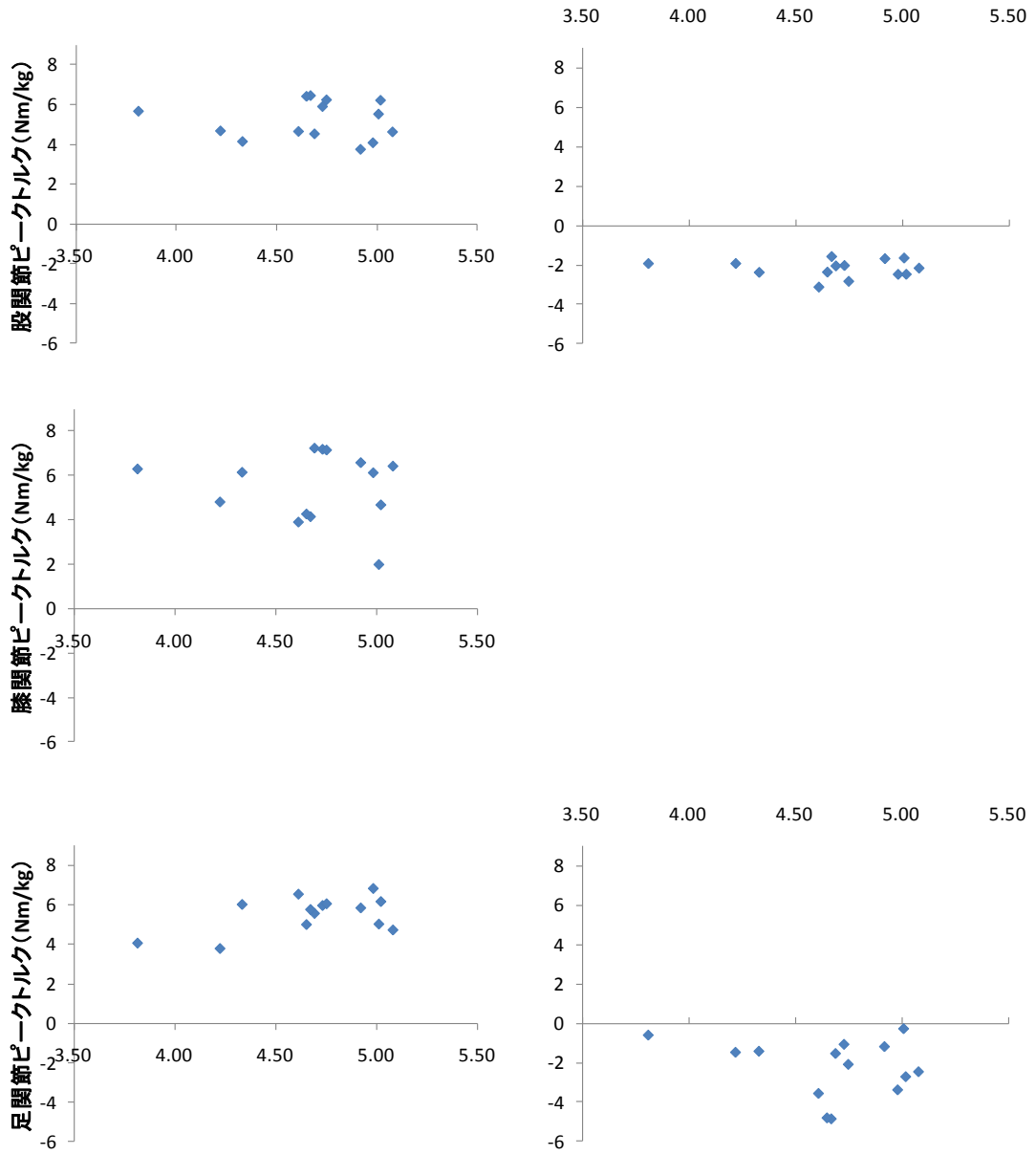


図 4.6 ジャンプ局面における下肢関節のピークトルクと跳躍距離との関係

4.4.4 下肢関節パワーと跳躍距離

図 4.7～図 4.9 に跳躍距離と下肢関節パワーのピーク値の関係を示した。

- ①：ホップの正パワーのピーク値は，跳躍距離に対して，ほとんど変化がみられなかった。負パワーのピーク値は，股関節においては跳躍距離の増加とともに減少し ($r=0.54$ $p<0.05$)，膝関節は跳躍距離の増加とともに上昇した ($r=-0.56$ $p<0.05$)。足関節では跳躍距離の増加に対する変化はみられなかった。
- ②：ステップでは，の正パワーのピーク値，負パワーのピーク値ともに，下肢 3 関節において跳躍距離に関係なくトルクのピーク値はほぼ一定であった。
- ③：ジャンプの正パワーのピーク値は，股関節で跳躍距離の増加とともに上昇した ($r=0.62$ $p<0.05$)。膝関節と足関節では，跳躍距離の増加に対する変化はみられなかった。負パワーのピーク値は，股関節では跳躍距離と関係なくほぼ一定であったが，膝関節と足関節においてはばらつきが大きく，跳躍距離に対する一定の傾向はみられなかった。

Hop

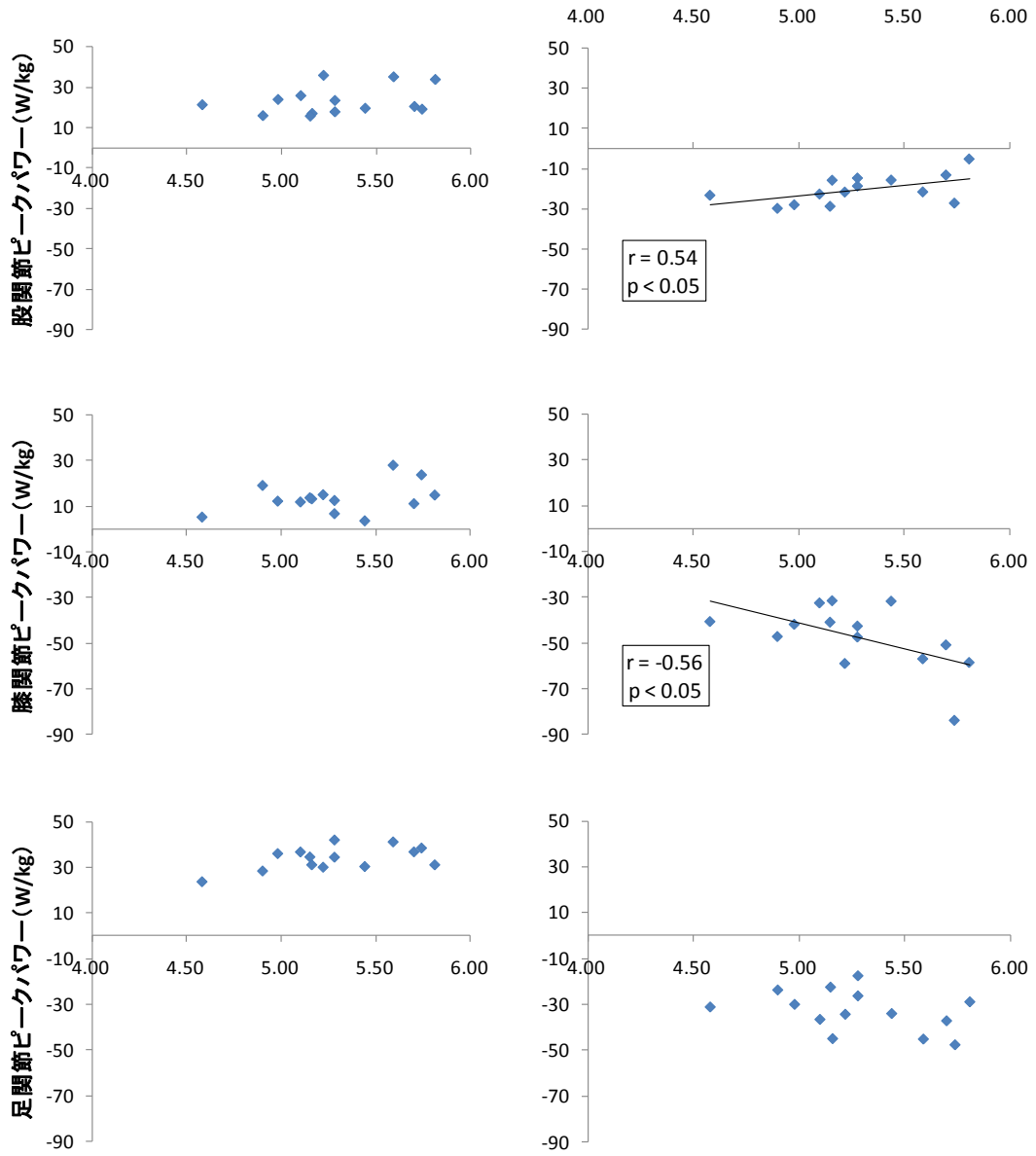


図 4.7 ホップ局面における下肢関節のピークパワーと跳躍距離との関係

Step

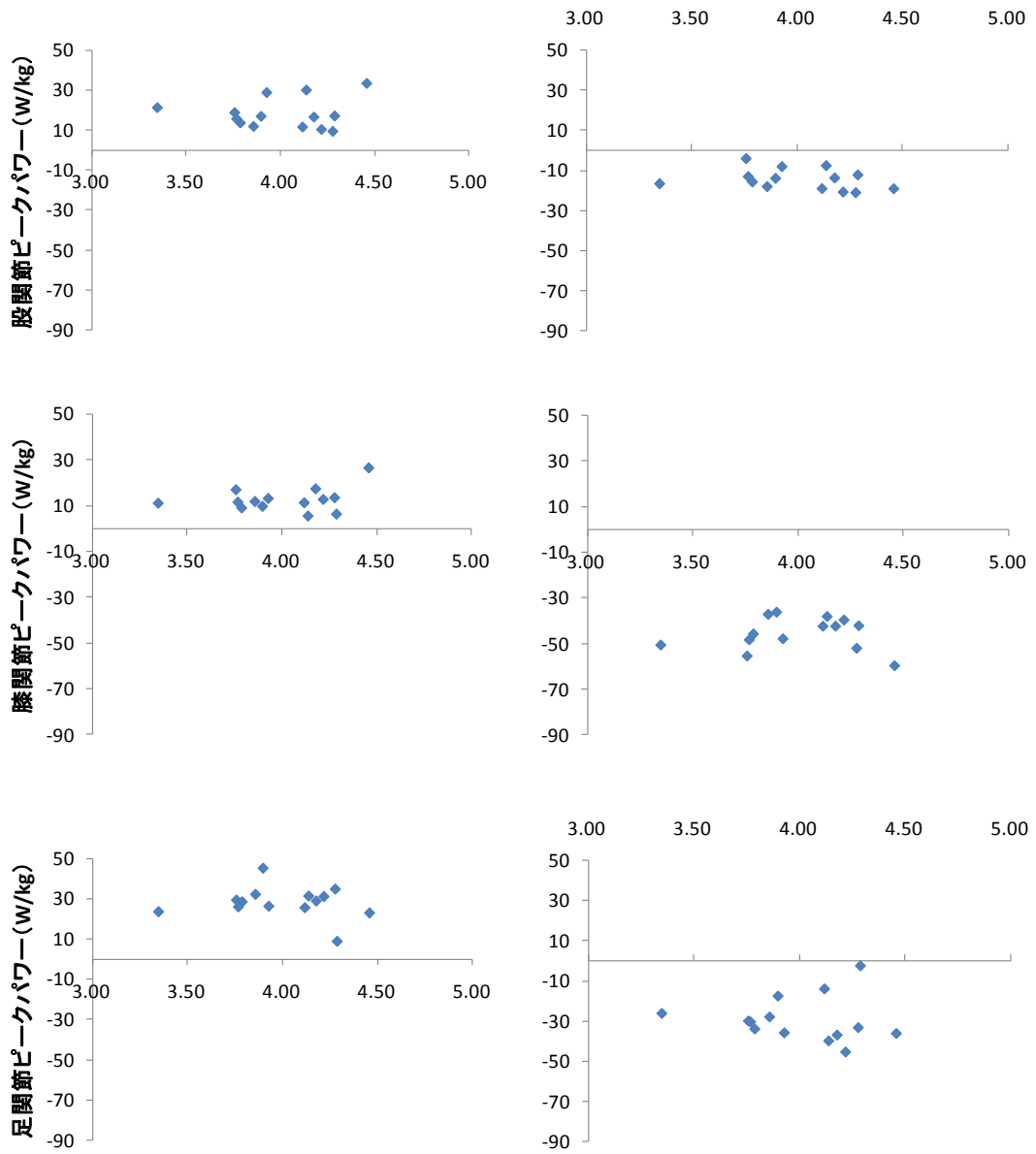


図 4.8 ステップ局面における下肢関節のピークパワーと跳躍距離との関係

Jump

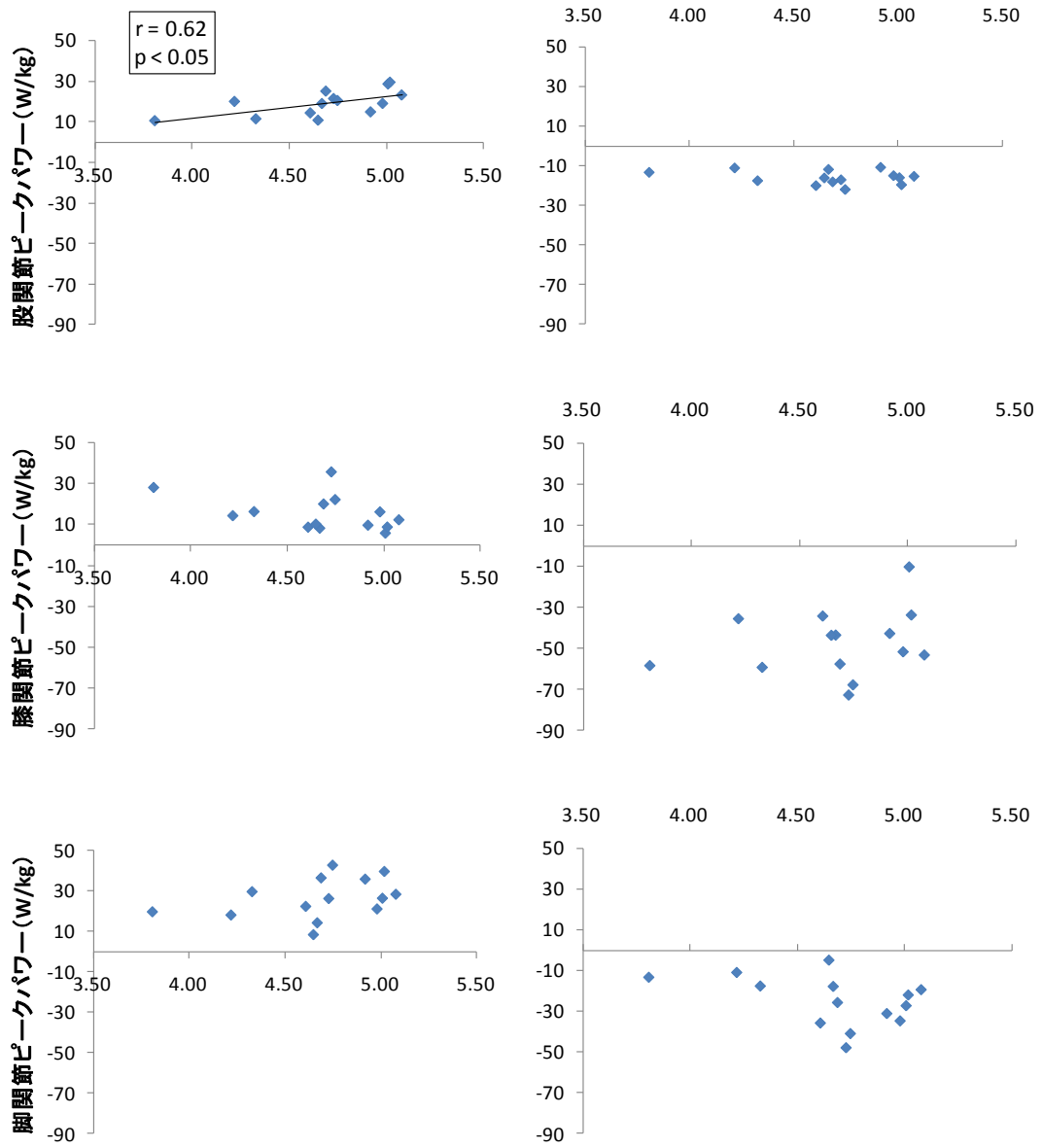


図 4.9 ジャンプ局面における下肢関節のピークパワーと跳躍距離との関係

4.4.5 下肢関節仕事

各支持期における仕事の特徴をみると (図 4.10)、各支持期に共通して膝関節が大きな負の仕事をしていた。その大きさは股関節と足関節の正の仕事よりも大きかった ($p<0.01$)。下肢3関節の仕事を正の仕事と負の仕事にわけてみると (図 4.11)、股関節ではホップ、ステップ、ジャンプ全ての局面において正の仕事も負の仕事も大きな差はみられなかったが、負の仕事よりも正の仕事の方が大きかった。膝関節においても、全ての局面において正の仕事も負の仕事も大きな差はみられなかったが、股関節とは反対に正の仕事が小さく、負の仕事が大きいくことがわかった。足関節では、全ての局面において正の仕事も負の仕事も大きな差はみられなかったが、負の仕事よりも正の仕事のほうが大きかった。下肢3関節で比較をすると、股関節と足関節は正の仕事、膝関節は負の仕事が大きいくことがわかった。

各支持期における下肢3関節の仕事の和をみると (図 4.12)、ステップ局面における負の仕事が大きいくことがわかった。その差は、ホップとステップで有意な差であった ($p<0.01$)。

これら下肢3関節の仕事量と跳躍距離との関係みると (表 4.4)、ホップの跳躍距離が膝関節の仕事と負の相関関係にあった ($r=-0.54$ $p<0.05$)。

表 4.4 下肢3関節と各跳躍距離との関係

	跳躍距離 (m)		
	Hop	Step	Jump
仕事Hip (J/kg)	.203	.071	.434
仕事Knee (J/kg)	-.546 *	.143	.039
仕事Ankle (J/kg)	-.106	-.288	-.088
仕事3関節 (J/kg)	-.217	-.081	.281

*: $p < 0.05$

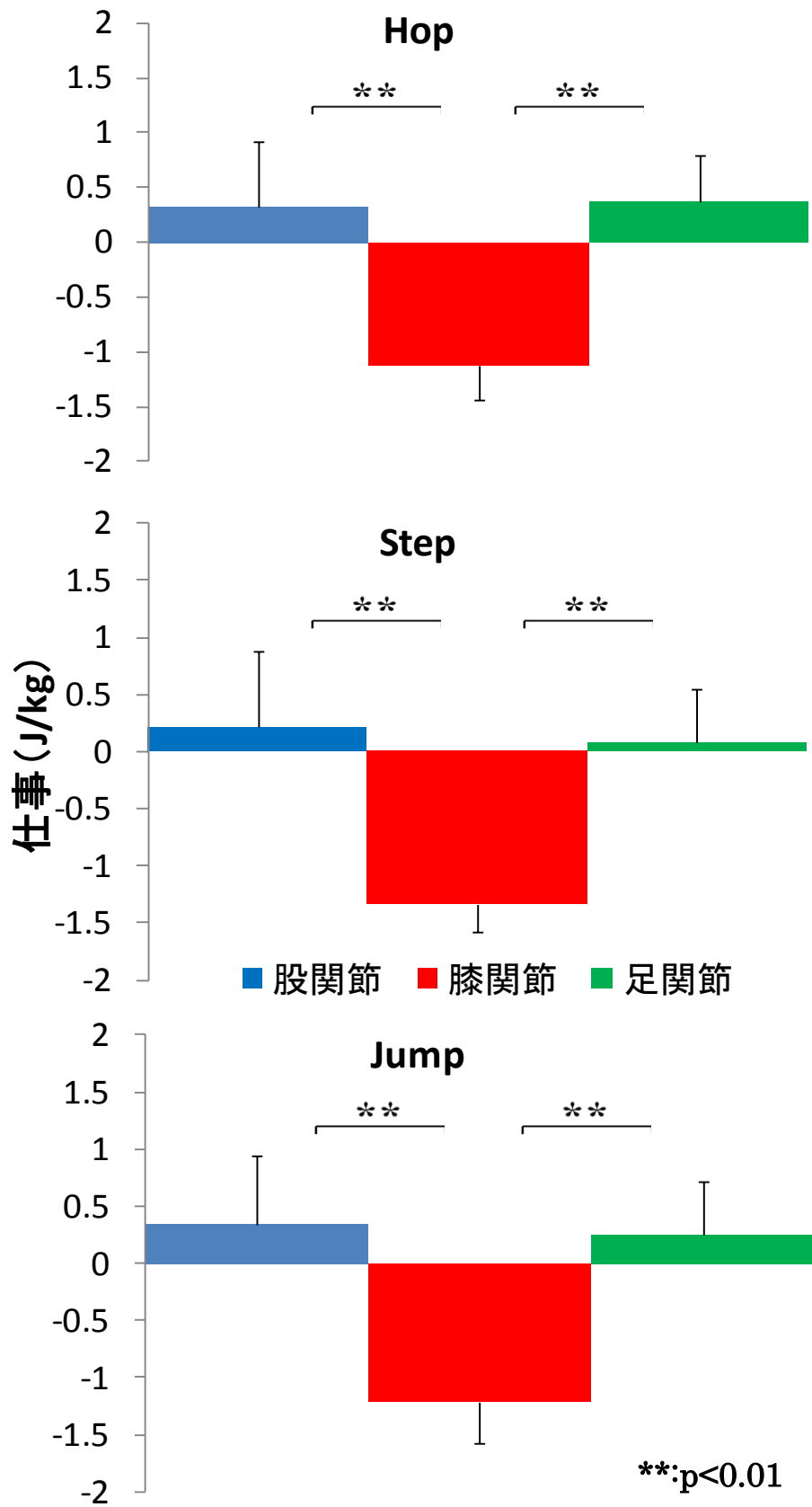


図 4.10 各接地時の下肢関節仕事

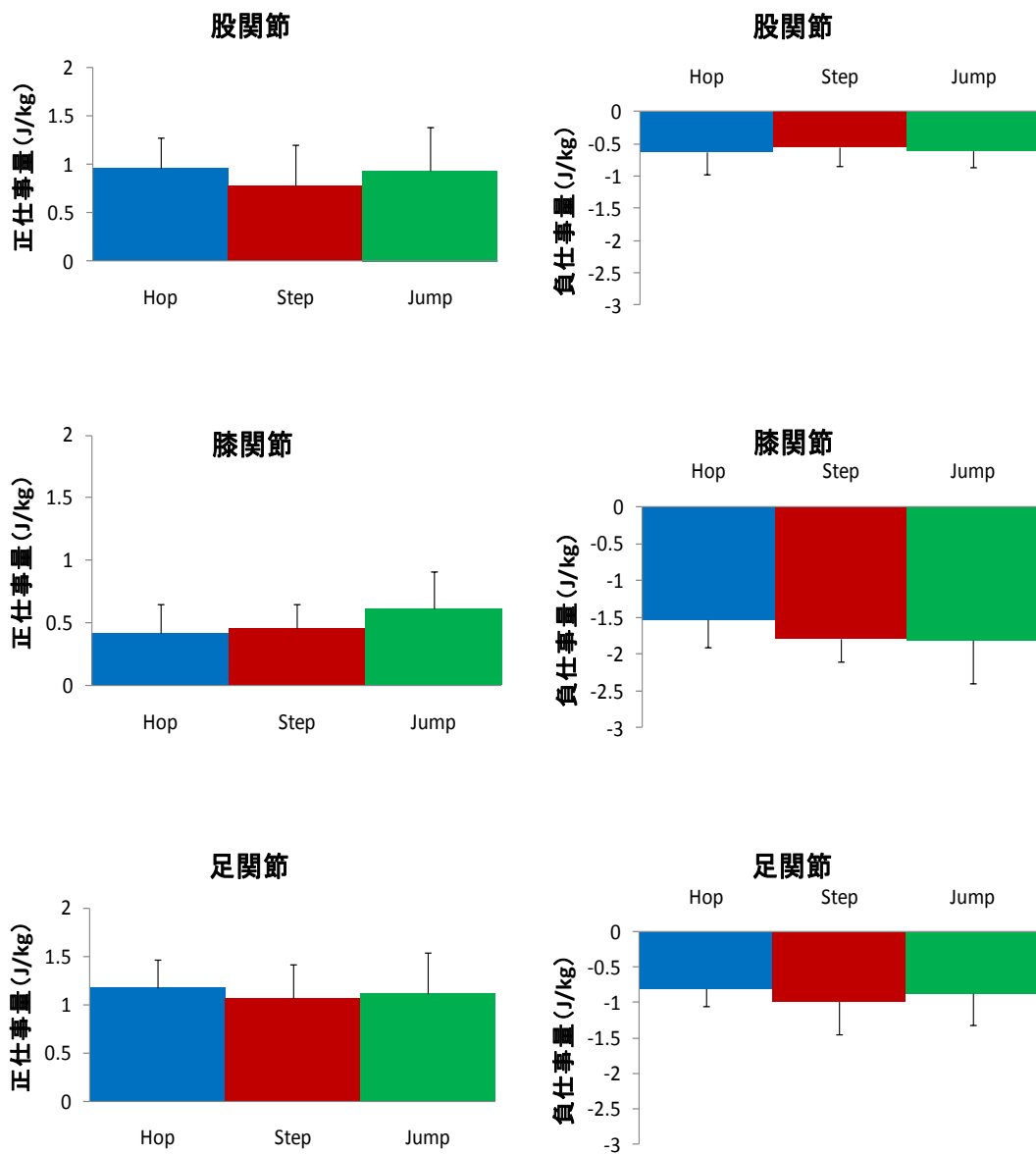


図 4.11 各接地時の下肢関節の正の仕事, 負の仕事

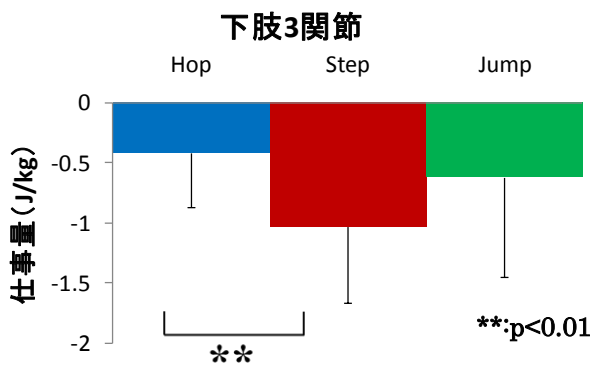


図 4.12 各支持期の下肢3関節仕事の和

次に、大きな負の仕事がみられた膝関節に着目をし、各局面において、膝関節の負の仕事が正の仕事にどう影響しているのかをみるために、仕事を正と負に分け、二つの関係を見た (図 4.13). ホップ、ステップ、ジャンプ全ての局面において、有意な相関関係が認められた (それぞれ $r=-0.53$ $p<0.05$, $r=-0.58$ $p<0.05$, $r=-0.84$, $p<0.001$).

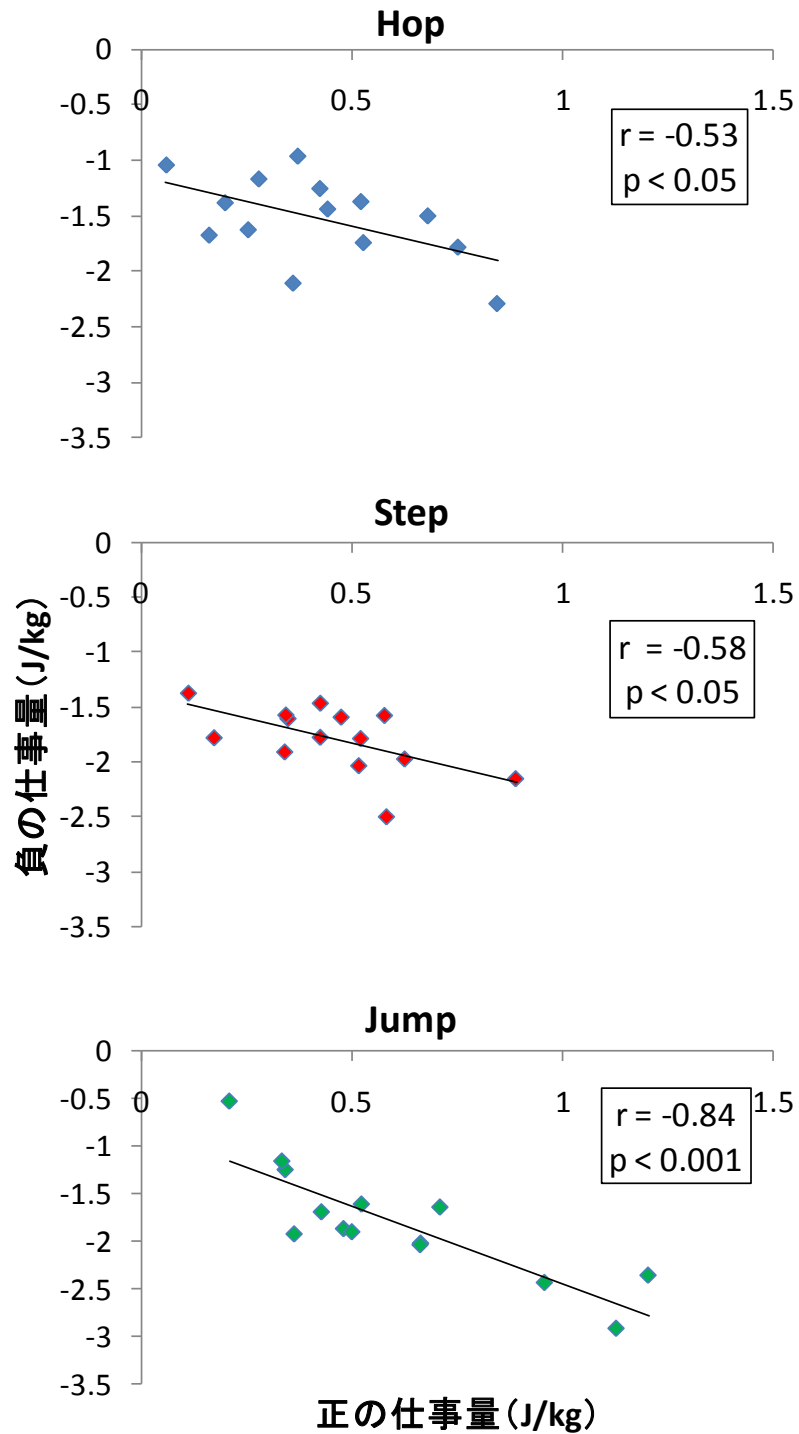


図 4.13 正の仕事と負の仕事の関係

4.5 考察

4.5.1 下肢関節トルクとパワーの発揮パターン

下肢3関節における関節トルクは、ホップ、ステップ、ジャンプの各支持期で共通した発揮パターンであった。この下肢関節のパワー発揮パターンは、走幅跳においても同様のことが報告されている[18]。小池らは[19][20]、跳躍動作の動力学的分析として、身体重心鉛直速度に対する下肢関節トルクの貢献度を検討しており、接地瞬間から身体重心最下点の局面では股関節の伸展トルクが貢献し、身体重心最下点から膝関節最大屈曲時の局面では膝関節の伸展トルクの貢献が最大になり、それに伴い足関節の底屈トルクの貢献も高まる。そして膝関節最大屈曲時から鉛直速度最大時の局面では足関節の底屈トルクの貢献が最大となると報告し、身体重心鉛直速度に対して大きく貢献する関節が、中枢から末端へと移行していくことを明らかにしている。このことから、本研究でみられた下肢関節トルクのパターンをみると、その報告と類似したようなパターンでトルクが発揮されていることから、ホップ、ステップ、ジャンプにおいて身体重心鉛直速度を獲得するための動作がおこなわれたと考えられる。また、股関節にみられた接地後半の屈曲トルクについては、スプリントやハードル走、走幅跳においても同様のことが明らかにされており[18][21][22][23]、接地後半局面における、股関節の過伸展を抑制する働きだと報告している。三段跳では、3回の跳躍を繰り返すこと、とくにホップと同じ脚でステップの踏切をするために、ホップ滞空期では脚を巻き込んでくる動作が必要となり、踏切中間から後半局面にかけて、支持脚の股関節屈曲トルクを発揮することで、股関節の過度な伸展を抑制していると考えられる。スプリントや走幅跳では、この股関節屈曲トルクの大きさと競技力に関連があったと報告されているが、本研究の結果では、股関節のピークトルクと跳躍距離の間に関係性がみられなかった。したがって、三段跳では競技力にかかわらず起こる関節トルクのパターンだと考えられる。また、スプリントにおいては接地中の足関節は伸展トルクのみが発揮され[17][21][22][23][24]、有効にSSC(stretch-shortening-cycle)を利用していると考えられるが、三段跳においては接地直後に屈曲トルクが発揮されている。これについては、三段跳はスプリントと違い、踵から接地に入ること、またそれに伴い接地瞬間に受ける大きな衝撃の緩和のために、足関節を固めるようにして接地をすることからの結果だと考えられる。

下肢3関節における関節パワーは、ホップ、ステップ、ジャンプの各支持期で共通した発揮パターンがみられた。このことから、接地前半では膝関節と足関節による衝撃緩和の

役割をしていることが考えられる。股関節においては、関節トルクと同じ波形パターンを示しており、股関節の身体動作としては伸展し続けているものの、接地後半では屈曲トルクが発揮されることで過伸展を抑制し、次の局面への準備動作としての結果だと考えられる。

4.5.2 下肢関節ピークトルクとピークパワー

常に高い値を示したピークトルクとピークパワーは、ホップ、ステップ、ジャンプにおける股関節、膝関節、足関節の伸展トルク、ホップ、ステップ、ジャンプにおける膝関節の負のパワーとホップにおける足関節の正のパワーであった。伊藤らは[21]、高い疾走速度を得るキック力の原動力は股関節の伸筋群であり、そのキック力を効果的に地面に伝達するため、地面からの衝撃力に対応するために、足関節は固定的に働いたほうがよいと述べ、それがスプリントにおいては重要であると報告している。本研究でみられた三段跳における結果では、スプリントと違い、ピークパワーの高い値が、正ではなく負のほうでみられたことは三段跳の特徴だと言える。しかし、ピークトルクとピークパワーは常に高い値を示したものの、跳躍距離に影響を与える結果ではなかった。それは、スプリント以上の衝撃を受けることから、必然的に大きな関節トルク、パワーを発揮することの結果だと考えられる。とくに膝関節における負のパワーは、スプリント時の約6倍のパワーが発揮されている。阿江らは[25]、台高を変えておこなう着地動作によるパワー発揮によって、負荷が大きくなれば、膝による負のパワーが増大し、衝撃緩和の役割を担っていると報告しており、そのことから三段跳の接地における膝関節の負のパワーが大きいことは、衝撃が大きく、膝関節によるエネルギーの吸収が大きいことが考えられる。

4.5.3 下肢関節仕事

各支持期における仕事の特徴をみると、各支持期に共通して膝関節が大きな負の仕事をしていた。その大きさは股関節と足関節の正の仕事よりも大きかった ($p<0.01$)。また、下肢3関節の仕事を正の仕事と負の仕事にわけ、下肢3関節で比較すると、股関節と足関節は正の仕事、膝関節は負の仕事が大きいことがわかった。各支持期における下肢3関節の仕事の和をみると、ステップ局面における負の仕事が大きいことがわかった。これらの結果について、三段跳では、ホップ脚と同じ脚でステップを行う、あるいは3回続けて跳躍をおこなうという意味では、2つ目のステップはホップとジャンプをつなぐ役割を演じており、膝に大きく負担がかか

ることからの結果であると考えられ、三段跳では膝関節によるエネルギーの吸収が大きく、膝関節の重要性が示唆された。ZACHARY らは[26]、跳躍中のアーム動作の有無による下肢の仕事の影響について検討しており、アーム動作があるほうが、下肢の仕事量も増加すると報告している。このことから、下肢の動作に加え、複雑なアーム動作を要する三段跳においても、少なからず下肢の仕事量に影響を与えていると考えられるが、本研究においてはアーム動作を考慮せずに検討したため不明である。このことは今後の検討課題である。

次に、大きな負の仕事がみられた膝関節に着目をし、各局面において、膝関節の負の仕事と正の仕事の影響を検討した。その結果、ホップ、ステップ、ジャンプ全ての局面において、有意な相関関係が認められた（それぞれ $r=-0.53$ $p<0.05$, $r=-0.58$ $p<0.05$, $r=-0.84$ $p<0.001$ ）。失敗試技の場合、極端な負の仕事が課せられると予想でき、その結果失敗試技となることが考えられる。本研究では全て成功試技であり、14m台を跳ぶためには、一定まで負の仕事が必要ということが示唆され、それに伴い正の仕事も大きくなることがわかった。また正の仕事と負の仕事をし合わせたものが総仕事であるが、この結果から、最終的な総仕事は同じになることが予想される。しかし、単純に負の仕事をした分だけ正の仕事をするわけではない。深代は[27]、人間の動作において最終的なパフォーマンスを最大にするために、力学的出力を最大にすることは有効ではなく、発揮された出力は動きの目的にしたがって適切に利用されなくてはならないと述べている。したがって、人によっては跳躍タイプによって仕事を出すタイミングや大きさが異なる可能性があると考えられた。

4.6 結論

以上の結果から、三段跳において下肢関節のトルク、パワー、仕事は、跳躍距離に直接影響をあたえるというよりは、3回の跳躍をおこなうための働きをそれぞれがしていることが考えられた。股関節は、3回の跳躍を繰り返すために、支持脚の屈曲トルクを発揮することで、股関節の過度な伸展を抑制している。膝関節は、大きな負荷の衝撃力に対して、衝撃緩和の役割を担っている。足関節は、身体重心鉛直速度に対して大きく貢献する関節であり、接地瞬間に受ける大きな衝撃の緩和の働きもしている。そしてこれらの下肢3関節の働きは、競技力の差にかかわらず起こっていることがわかった。

第5章 跳躍タイプ別にみた各跳躍局面の比較

本章では、ホップの割合がジャンプの割合よりも2%以上大きい「ホップ優位型跳躍 (hop-dominated technique)」と、ジャンプとホップで2%以上の差がない「バランス型跳躍 (balanced technique)」の2タイプにわけて、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面の違いを論ずる。

5.1 目的

これまでに三段跳における、跳躍タイプごとの各跳躍局面の特徴を検討したものは見当たらず、パフォーマンスへの影響はみられていない。しかし、先行研究で報告されているようなホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面における水平速度や鉛直速度の変化の違いが、跳躍タイプに影響を受けていることが考えられる。

このことから、跳躍タイプにわけてホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面を比較することで、タイプごとの特徴を明らかにし、それぞれのパフォーマンス向上のための要因を検討する。

5.2 被験者

本実験の被験者は、ホップ優位型跳躍9名とバランス型跳躍5名であった (図 5.1)。

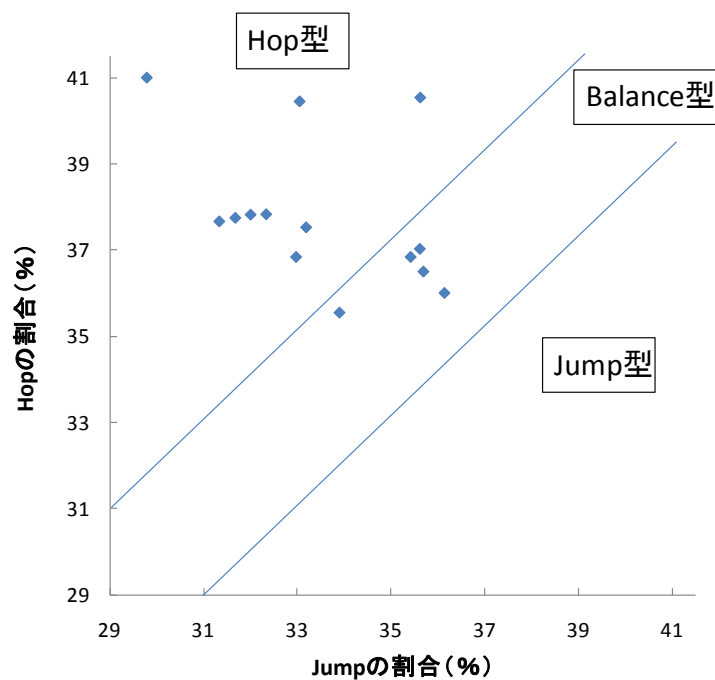


図 5.1 跳躍タイプ

5.3 測定項目

本章で扱う項目は以下のものである.

- ・跳躍距離
- ・跳躍比
- ・身体重心水平速度
- ・身体重心鉛直速度
- ・接地距離 (L3)
- ・離地距離 (L1)
- ・接地時間
- ・滞空時間
- ・入射角度
- ・跳出角度
- ・関節角度
- ・下肢関節トルク
- ・下肢関節パワー
- ・下肢関節の仕事

5.4 統計処理

統計学的検討を, ホップ優位型とバランス型で対応のない t 検定を用いておこなった. 有意水準は危険率 5%未満とした. なお対象としたものは全試技(着地ができていない等あきらかに失敗した試技は除いた)とし, ホップ優位型は $n=36$, バランス型は $n=14$ とした. また, 各測定項目間の相関関係を明らかにするために, ピアソンの相関係数の検定を実施した. なお, 有意水準は危険率 5%未満とした.

5.5 結果

表 5.1 に、ホップ優位型とバランス型の基礎的データを示した。身長，体重，総跳躍距離，助走速度において，両群に有意差はなかった。

表 5.1 基礎的データ

	HopType	BalanceType
身長 (cm)	174.8±3.9	176.3±5.9
体重 (kg)	66.5±5.6	67.3±6.5
跳躍距離 (m)	13.68±0.71	13.85±0.39
助走速度 (m/s)	9.20±0.34	9.31±0.34

5.5.1 ホップ局面について

表 5.2 に、ホップ優位型とバランス型のホップ局面におけるキネマティクスの統計結果を示した。跳躍距離と跳躍比には有意差が認められ，ホップ優位型の方がホップの跳躍距離，跳躍比ともに大きいという結果であった（それぞれ $p<0.05$ ， $p<0.001$ ）。ホップ優位型は L1，L3 とともに短く（ $p<0.01$ ），接地時間も短かった（ $p<0.01$ ）。膝関節の屈曲は小さく（ $p<0.05$ ），水平速度の減少が大きかった（ $p<0.01$ ）。しかし，鉛直速度の獲得量が大きく（ $p<0.05$ ），離地瞬間の鉛直速度が高いことから（ $p<0.001$ ），大きな跳出角につながっている（ $p<0.001$ ）。バランス型は L3，L1 がともに長く（ $p<0.01$ ），接地時間も長かった（ $p<0.01$ ）。膝関節屈曲は大きい（ $p<0.05$ ），その分伸展も大きく（ $p<0.05$ ），跳出角は低かった（ $p<0.001$ ）。水平速度の減少は少なかった（ $p<0.01$ ）。

表 5.2 ホップ局面のキネマティクスによる比較

	HopType	BalanceType	
跳躍距離 (m)	5.25±0.38	5.01±0.20	*
跳躍比 (%)	38.3±1.6	36.1±0.6	***
L3 (cm)	30.8±3.1	34.1±5.1	**
L1 (cm)	35.5±6.0	41.9±6.1	**
接地時間 (s)	0.119±0.009	0.128±0.009	**
滞空時間 (s)	0.520±0.039	0.474±0.032	***
入射角 (deg)	2.8±0.9	3.3±1.0	
跳出角 (deg)	16.9±1.2	15.3±1.1	***
接地瞬間水平速度 (m/s)	8.83±0.35	8.87±0.27	
離地瞬間鉛直速度 (m/s)	2.49±0.18	2.29±0.14	***
離地瞬間水平速度 (m/s)	8.25±0.34	8.41±0.23	
水平速度減少量 (m/s)	0.57±0.15	0.46±0.10	**
鉛直速度獲得量 (m/s)	2.83±0.22	2.72±0.14	*
膝関節屈曲 (deg)	25.6±3.5	29.0±7.2	*
膝関節伸展 (deg)	27.0±4.9	30.4±4.8	*
接地瞬間膝関節角度 (deg)	158.1±5.7	161.5±5.5	
離地瞬間膝関節角度 (deg)	159.4±7.4	163.0±5.0	

*:p < 0.05

** :p < 0.01

***:p < 0.001

表 5.3 に、ホップ優位型とバランス型のホップ局面におけるキネティクスの統計結果を示した。足関節の負のピークパワーはホップ優位型が ($p < 0.01$)、足関節の仕事量はバランス型が大きかった ($p < 0.05$)。

表 5.3 ホップ局面のキネティクスによる比較

	HopType	BalanceType	
Hip仕事量 (J/kg)	0.289±0.483	0.496±0.647	
Knee仕事量 (J/kg)	-1.074±0.287	-1.063±0.343	
Ankle仕事量 (J/kg)	0.299±0.395	0.617±0.361	*
下肢3関節仕事量 (J/kg)	-0.485±0.555	0.050±0.648	*
hip伸展ピークトルク (Nm/kg)	4.599±0.982	4.908±0.947	
hip屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-2.168±0.680	-2.133±0.364	
knee伸展ピークトルク (Nm/kg)	4.939±1.319	5.273±0.971	
knee屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-0.562±0.456	-0.660±0.350	
ankle伸展ピークトルク (Nm/kg)	5.323±0.670	4.998±0.525	
ankle屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-3.182±0.914	-2.722±0.749	
hip正ピークパワー (W/kg)	21.972±5.984	24.905±8.211	
hip負ピークパワー (W/kg)	-19.871±8.551	-18.753±6.527	
knee正ピークパワー (W/kg)	14.895±7.753	13.394±3.451	
knee負ピークパワー (W/kg)	-46.705±14.498	-45.319±9.348	
ankle正ピークパワー (W/kg)	33.768±6.043	34.053±6.281	
ankle負ピークパワー (W/kg)	-35.172±9.014	-28.343±6.773	**
床反力 (N)	3350.4±566.2	3057.4±258.8	

*: $p < 0.05$

**: $p < 0.01$

5.5.2 ステップ局面について

表 5.4 に、ホップ優位型とバランス型のステップ局面におけるキネマティクスの統計結果を示した。跳躍距離と跳躍比には、両群に有意差が認められなかった。ホップ優位型は入射角が大きく ($p<0.01$)、接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度は低い ($p<0.05$)、鉛直速度の獲得量が大きく ($p<0.01$)、跳出色角が大きくなっていた ($p<0.05$)。バランス型は接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度が高かった ($p<0.05$)。

表 5.4 ステップ局面のキネマティクスによる比較

	HopType	BalanceType	
跳躍距離 (m)	3.96±0.31	3.90±0.18	
跳躍比 (%)	29.0±2.2	28.2±1.3	
L3 (cm)	29.2±3.6	29.4±5.4	
L1 (cm)	45.7±5.9	50.1±7.4	
接地時間 (s)	0.146±0.015	0.148±0.013	
滞空時間 (s)	0.396±0.048	0.361±0.040	*
入射角 (deg)	15.0±1.4	13.8±1.0	**
跳出色角 (deg)	14.1±2.5	12.6±2.0	*
接地瞬間水平速度 (m/s)	7.77±0.34	7.95±0.19	*
離地瞬間鉛直速度 (m/s)	1.82±0.28	1.69±0.22	
離地瞬間水平速度 (m/s)	7.30±0.41	7.57±0.27	*
水平速度減少量 (m/s)	0.47±0.18	0.37±0.16	
鉛直速度獲得量 (m/s)	3.78±0.27	3.53±0.23	**
膝関節屈曲 (deg)	32.7±6.7	33.7±6.9	
膝関節伸展 (deg)	29.4±3.7	30.0±7.0	
接地瞬間膝関節角度 (deg)	164.1±5.2	165.6±3.4	
離地瞬間膝関節角度 (deg)	160.6±10.2	163.4±7.3	

*:p < 0.05

** :p < 0.01

表 5.5 に、ホップ優位型とバランス型のステップ局面におけるキネティクスの統計結果を示した。膝関節の伸展ピークトルクと足関節の屈曲ピークトルクが、ホップ優位型のほうが大きかった ($p < 0.05$)。

表 5.5 ステップ局面のキネティクスによる比較

	HopType	BalanceType	
Hip仕事量 (J/kg)	0.277±0.568	0.388±0.497	
Knee仕事量 (J/kg)	-1.502±0.484	-1.300±0.350	
Ankle仕事量 (J/kg)	0.140±0.502	-0.007±0.505	
下肢3関節仕事量 (J/kg)	-1.085±0.696	-0.920±0.695	
hip伸展ピークトルク (Nm/kg)	4.598±1.180	4.479±0.994	
hip屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-1.764±0.600	-1.561±0.643	
knee伸展ピークトルク (Nm/kg)	5.177±1.118	4.596±0.694	*
knee屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-0.564±0.877	-0.665±0.344	
ankle伸展ピークトルク (Nm/kg)	5.306±1.005	5.068±0.522	
ankle屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-3.275±1.620	-2.022±1.752	*
hip正ピークパワー (W/kg)	18.685±7.044	17.730±7.778	
hip負ピークパワー (W/kg)	-13.631±4.545	-12.581±5.553	
knee正ピークパワー (W/kg)	12.973±5.846	11.819±3.666	
knee負ピークパワー (W/kg)	-45.413±10.687	-42.808±8.826	
ankle正ピークパワー (W/kg)	26.313±6.055	28.846±7.373	
ankle負ピークパワー (W/kg)	-29.393±12.539	-29.892±7.547	
床反力 (N)	4005.6±794.8	3825.7±730.1	

*: $p < 0.05$

5.5.3 ジャンプ局面について

表 5.6 に、ホップ優位型とバランス型のジャンプ局面におけるキネマティクスの統計結果を示した。跳躍距離と跳躍比には両群に有意差が認められ、バランス型の方がジャンプの跳躍距離、跳躍比ともに大きいという結果であった ($p<0.001$)。ホップ優位型は L3 が短く ($p<0.05$)、接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度は低く ($p<0.01$)、離地瞬間の鉛直速度も低かった ($p<0.01$)。バランス型は L3 が長く ($p<0.05$)、接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度は高く ($p<0.01$)、離地瞬間の鉛直速度も高かった ($p<0.01$)。膝関節の伸展ピークトルクと股関節の負のピークパワー、足関節の正のピークパワーはバランス型が有意に高かった (それぞれ $p<0.05$, $p<0.05$, $p<0.01$)。

表 5.6 ジャンプ局面のキネマティクスによる比較

	HopType	BalanceType	
跳躍距離 (m)	4.46±0.35	4.93±0.21	***
跳躍比 (%)	32.5±1.5	35.6±1.0	***
L3 (cm)	32.1±3.4	35.4±3.8	*
L1 (cm)	36.0±7.3	36.2±5.0	
接地時間 (s)	0.163±0.013	0.159±0.007	
入射角 (deg)	13.0±2.3	12.2±1.7	
跳出角 (deg)	21.6±2.5	22.0±1.9	
接地瞬間水平速度 (m/s)	6.82±0.43	7.14±0.28	**
離地瞬間鉛直速度 (m/s)	2.36±0.20	2.54±0.17	**
離地瞬間水平速度 (m/s)	5.96±0.44	6.27±0.29	**
水平速度減少量 (m/s)	0.86±0.13	0.87±0.17	
鉛直速度獲得量 (m/s)	3.80±0.28	3.97±0.28	
膝関節屈曲 (deg)	31.0±6.1	29.5±4.9	
膝関節伸展 (deg)	32.4±5.8	34.7±4.4	
接地瞬間膝関節角度 (deg)	161.4±5.0	162.4±2.9	
離地瞬間膝関節角度 (deg)	162.8±10.2	167.6±7.6	

*: $p < 0.05$

**: $p < 0.01$

***: $p < 0.001$

表 5.7 に、ホップ優位型とバランス型のジャンプ局面におけるキネティクスの統計結果を示した。下肢 3 関節の仕事量は、両群に有意な差はみられなかった。ホップ、ステップとは違い、ジャンプでは股関節のパワーにおいて両群に有意な差が認められた。

表 5.7 ジャンプ局面のキネティクスによる比較

	HopType	BalanceType	
Hip仕事量 (J/kg)	0.419±0.649	0.494±0.573	
Knee仕事量 (J/kg)	-1.355±0.617	-1.296±0.293	
Ankle仕事量 (J/kg)	0.169±0.491	0.427±0.415	
下肢3関節仕事量 (J/kg)	-0.766±0.876	-0.374±0.824	
hip伸展ピークトルク (Nm/kg)	4.942±1.117	4.782±0.755	
hip屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-2.023±1.028	-2.315±0.629	
knee伸展ピークトルク (Nm/kg)	5.045±1.400	6.034±0.726	*
knee屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-0.511±0.284	-0.323±0.237	
ankle伸展ピークトルク (Nm/kg)	5.288±0.905	5.749±0.514	
ankle屈曲ピークトルク (Nm/kg)	-2.752±1.513	-2.394±1.206	
hip正ピークパワー (W/kg)	19.783±7.730	22.315±4.379	
hip負ピークパワー (W/kg)	-12.988±5.855	-18.137±6.341	*
knee正ピークパワー (W/kg)	14.464±7.579	14.467±4.949	
knee負ピークパワー (W/kg)	-43.667±16.657	-45.087±11.107	
ankle正ピークパワー (W/kg)	21.584±7.594	29.564±6.857	**
ankle負ピークパワー (W/kg)	-23.841±10.605	-25.007±8.163	
床反力 (N)	3767.5±854.6	3653.7±769.9	

*:p < 0.05

** :p < 0.01

5.5.4 跳躍タイプによる競技力への影響

ホップ優位型とバランス型それぞれにおいて、競技力との関係を検討するために、表 5.8 と表 5.9 にそれぞれのタイプのホップ、ステップ、ジャンプの跳躍距離と測定項目の各変数との相関関係を示した。

ホップ優位型は、まず助走速度に有意な正の相関関係がみられた ($r=0.78$ $p<0.001$)。それに伴い、ホップ局面においては接地瞬間、離地瞬間の水平速度、離地瞬間の鉛直速度が有意な正の相関関係にあった (それぞれ $r=0.76$ $p<0.001$, $r=0.62$ $p<0.001$, $r=0.81$ $p<0.001$)。鉛直速度獲得量に有意な正の相関関係がみられ ($r=0.60$ $p<0.001$)、跳出色と滞空時間ともに有意な正の相関関係にあった (それぞれ $r=0.44$ $p<0.01$, $r=0.82$ $p<0.001$)。キネティクスでは、ピークトルクで膝関節の伸展に正の相関 ($r=0.63$ $p<0.001$)、足関節の屈曲に負の相関 ($r=-0.66$ $p<0.001$) がみられた。ピークパワーでは、下肢 3 関節に相関関係がみられ、股関節は正のパワー発揮に正の相関 ($r=0.44$ $p<0.01$)、膝関節は正のパワー発揮に正の相関 ($r=0.52$ $p<0.01$)、負のパワー発揮に負の相関がみられ ($r=-0.70$ $p<0.001$)、足関節は正のパワー発揮に正の相関関係が ($r=0.35$ $p<0.05$) それぞれみられた。仕事量は膝関節に負の相関関係がみられた ($r=-0.52$ $p<0.01$)。

ステップ局面では、接地瞬間の水平速度に有意な正の相関関係がみられた ($r=0.35$ $p<0.05$)、離地瞬間では鉛直速度のみに有意な正の相関関係がみられた ($r=0.76$ $p<0.001$)。ホップと同様に跳出色と滞空時間には有意な正の相関関係がみられた ($r=0.55$ $p<0.001$, $r=0.80$ $p<0.001$)。キネティクスでは、ピークトルクで股関節の屈曲に負の相関関係が ($r=-0.40$ $p<0.05$)、足関節の伸展に正の相関関係がみられた ($r=0.39$ $p<0.05$)。ピークパワーでは、股関節の負のパワー発揮に負の相関関係 ($r=-0.38$ $p<0.05$)、足関節の負のパワー発揮に負の相関関係がみられた ($r=-0.36$ $p<0.05$)。

ジャンプ局面では、接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度が有意な正の相関関係を示した (それぞれ $r=0.82$ $p<0.001$, $r=0.79$ $p<0.001$)。跳出色は有意な負の相関関係がみられた ($r=-0.33$ $p<0.05$)。キネティクスにおいては、その変数においても有意な相関関係はみられなかった。

バランス型は、助走速度において有意な差はなかった。ホップ局面においては、接地瞬間の水平速度 ($r=0.56$ $p<0.05$)、離地瞬間の鉛直速度 ($r=0.73$ $p<0.01$)、水平速度の減少量 ($r=0.61$ $p<0.05$)、滞空時間 ($r=0.67$ $p<0.01$) にそれぞれ有意な正の相関関係がみられた。キネティクスでは、下肢 3 関節の合計仕事量に有意な正の相関関係が示された ($r=0.55$ $p<0.05$)。

ステップ局面では、離地瞬間の鉛直速度 ($r=0.75$ $p<0.01$)、跳出角 ($r=0.68$ $p<0.01$)、滞空時間 ($r=0.80$ $p<0.001$) にそれぞれ有意な正の相関関係がみられた。キネティクスでは、股関節において屈曲ピークトルクと負のピークパワーに有意な負の相関関係がみられた (それぞれ $r=-0.65$ $p<0.05$, $r=-0.56$ $p<0.05$)。

ジャンプ局面では、接地瞬間、離地瞬間の水平速度に有意な正の相関関係がみられた (それぞれ $r=0.75$ $p<0.01$, $r=0.68$ $p<0.01$)。キネティクスにおいては、ホップ優位型と同様にどの変数も有意な相関関係はみられなかった。

表 5.8 ホップ優位型の各跳躍距離と各変数の相関関係

Hop

	助走速度 (m/s)	L3 (%)	跳出色 (deg)	接地時間 (s)	滞空時間 (s)	L1 (%)	入射角 (deg)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)	
Hop跳躍距離 (m)	0.782 ***	.015	0.445 **	-0.338 *	0.825 ***	-.076	-.166	0.766 ***	0.812 ***	0.626 ***	0.362 *	0.608 ***	-.148	0.330 *	-0.576 ***	-.141	
	Hip仕事量 (J/kg)	Knee仕事量 (J/kg)	Ankle仕事量 (J/kg)	下肢3関節 仕事量 (J/kg)	hip伸展 ピークトルク (Nm/kg)	hip屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	knee伸展 ピークトルク (Nm/kg)	knee屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	ankle伸展 ピークトルク (Nm/kg)	ankle屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	hip 正 ピークパワー (W/kg)	hip 負 ピークパワー (W/kg)	knee 正 ピークパワー (W/kg)	knee 負 ピークパワー (W/kg)	ankle 正 ピークパワー (W/kg)	ankle 負 ピークパワー (W/kg)	床反力 (N/ kg)
Hop跳躍距離 (m)	.117	-0.525 **	.096	-.101	.252	-.018	0.635 ***	.347	.321	-0.669 ***	0.445 **	-.125	0.529 **	-0.702 ***	0.354 *	-.216	0.526 **

*p < 0.05 **p < 0.01 ***p < 0.001

Step

	L3 (%)	跳出色 (deg)	接地時間 (s)	滞空時間 (s)	L1 (%)	入射角 (deg)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)	床反力 (N/ kg)
Step跳躍距離 (m)	.006	0.558 ***	-.132	0.802 ***	-.231	-0.553 ***	0.352 *	0.762 ***	.154	.311	0.500 **	-0.337 *	.151	.166	0.363 *	0.405 *
	Hip仕事量 (J/kg)	Knee仕事量 (J/kg)	Ankle仕事量 (J/kg)	下肢3関節 仕事量 (J/kg)	hip伸展 ピークトルク (Nm/kg)	hip屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	knee伸展 ピークトルク (Nm/kg)	knee屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	ankle伸展 ピークトルク (Nm/kg)	ankle屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	hip 正 ピークパワー (W/kg)	hip 負 ピークパワー (W/kg)	knee 正 ピークパワー (W/kg)	knee 負 ピークパワー (W/kg)	ankle 正 ピークパワー (W/kg)	ankle 負 ピークパワー (W/kg)
Step跳躍距離 (m)	-.203	.294	-.181	-.092	-.311	-0.406 *	-.162	-.122	0.390 *	-.230	-.132	-0.383 *	.098	.141	.240	-0.364 *

*p < 0.05 **p < 0.01 ***p < 0.001

Jump

	L3 (%)	跳出色 (deg)	接地時間 (s)	L1 (%)	入射角 (deg)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)	床反力 (N/ kg)	
Jump跳躍距離 (m)	.102	-0.331 *	-.314	.241	-0.587 ***	0.822 ***	.232	0.799 ***	.032	-.155	.022	-.157	-.126	-.150	.161	
	Hip仕事量 (J/kg)	Knee仕事量 (J/kg)	Ankle仕事量 (J/kg)	下肢3関節 仕事量 (J/kg)	hip伸展 ピークトルク (Nm/kg)	hip屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	knee伸展 ピークトルク (Nm/kg)	knee屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	ankle伸展 ピークトルク (Nm/kg)	ankle屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	hip 正 ピークパワー (W/kg)	hip 負 ピークパワー (W/kg)	knee 正 ピークパワー (W/kg)	knee 負 ピークパワー (W/kg)	ankle 正 ピークパワー (W/kg)	ankle 負 ピークパワー (W/kg)
Jump跳躍距離 (m)	.034	-.054	-.226	-.139	.061	-.092	-.185	.059	-.128	-.148	.196	-.300	-.120	.048	-.135	-.115

*p < 0.05 ***p < 0.001

表 5.9 バランス型の各跳躍距離と各変数の相関関係

Hop

	助走速度 (m/s)	L3 (%)	跳出角 (deg)	接地時間 (s)	滞空時間 (s)	L1 (%)	入射角 (deg)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)
Hop跳躍距離 (m)	.508	.341	.527	.067	0.674 **	-.112	-.400	0.567 *	0.734 **	.388	0.618 *	.289	-.158	.217	.216	0.674 **

	Hip仕事量 (J/kg)	Knee仕事量 (J/kg)	Ankle仕事量 (J/kg)	下肢3関節 仕事量 (J/kg)	hip伸展 ピークトルク (Nm/kg)	hip屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	knee伸展 ピークトルク (Nm/kg)	knee屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	ankle伸展 ピークトルク (Nm/kg)	ankle屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	hip 正 ピークパワー (W/kg)	hip 負 ピークパワー (W/kg)	knee 正 ピークパワー (W/kg)	knee 負 ピークパワー (W/kg)	ankle 正 ピークパワー (W/kg)	ankle 負 ピークパワー (W/kg)	床反力 (N/kg)
Hop跳躍距離 (m)	.285	.194	.300	0.555 *	.151	.151	.287	.162	-.033	-.077	.477	.101	.122	.152	.331	-.051	.309

*p < 0.05 **p < 0.01

Step

	L3 (%)	跳出角 (deg)	接地時間 (s)	滞空時間 (s)	L1 (%)	入射角 (deg)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)	床反力 (N/kg)
Step跳躍距離 (m)	.078	0.686 **	-.418	0.807 ***	-.521	-.353	.121	0.757 **	-.174	.452	.471	-.299	.022	.041	.114	0.558 *

	Hip仕事量 (J/kg)	Knee仕事量 (J/kg)	Ankle仕事量 (J/kg)	下肢3関節 仕事量 (J/kg)	hip伸展 ピークトルク (Nm/kg)	hip屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	knee伸展 ピークトルク (Nm/kg)	knee屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	ankle伸展 ピークトルク (Nm/kg)	ankle屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	hip 正 ピークパワー (W/kg)	hip 負 ピークパワー (W/kg)	knee 正 ピークパワー (W/kg)	knee 負 ピークパワー (W/kg)	ankle 正 ピークパワー (W/kg)	ankle 負 ピークパワー (W/kg)
Step跳躍距離 (m)	-.243	.327	-.051	-.046	.067	-0.655 *	-.002	-.108	-.063	-.068	-.233	-0.569 *	-.187	.096	.349	-.168

*p < 0.05 **p < 0.01 ***p < 0.001

Jump

	L3 (%)	跳出角 (deg)	接地時間 (s)	L1 (%)	入射角 (deg)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)	床反力 (N/kg)
Jump跳躍距離 (m)	.400	-.137	-.231	.076	-0.729 **	0.756 **	.269	0.683 **	.071	-.242	-.259	.462	-.348	.302	-.253

	Hip仕事量 (J/kg)	Knee仕事量 (J/kg)	Ankle仕事量 (J/kg)	下肢3関節 仕事量 (J/kg)	hip伸展 ピークトルク (Nm/kg)	hip屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	knee伸展 ピークトルク (Nm/kg)	knee屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	ankle伸展 ピークトルク (Nm/kg)	ankle屈曲 ピークトルク (Nm/kg)	hip 正 ピークパワー (W/kg)	hip 負 ピークパワー (W/kg)	knee 正 ピークパワー (W/kg)	knee 負 ピークパワー (W/kg)	ankle 正 ピークパワー (W/kg)	ankle 負 ピークパワー (W/kg)
Jump跳躍距離 (m)	.146	.351	-.159	.147	.132	-.049	-.246	-.270	-.053	-.169	.324	-.072	-.030	.127	.018	.119

**p < 0.01

5.6 考察

5.6.1 ホップ局面について

ホップの跳躍距離はホップ優位型のほうが長かった ($p<0.05$)。ホップ優位型は L1, L3 とともに短いことから ($p<0.01$)、接地時間も短く ($p<0.01$)、膝関節の屈曲が小さかった ($p<0.05$)。このことに加えて、足関節の負のピークパワーが大きかったことから ($p<0.01$)、膝関節と足関節を固めた状態で踏切をし、水平速度を鉛直速度に変換できていると考えられる。このことは、起こし回転運動を効率よくおこなえていることからの結果だと考えられる。起こし回転運動とは走高跳、走幅跳で用いられている跳躍技法であり、スプリント時においても用いられている技術である[28]。棒を適切な接地角度になるように地面にむけて投射すると、水平方向のエネルギーが上昇方向のエネルギーに変換され、棒が跳ね上がる。これを人間の跳躍運動に応用し、跳躍時のエネルギーを脚の伸展運動ではなく、並進運動中に急激なブレーキをかけることで生み出す技法である。このことは Koh らによって blocking landing として報告されており[29]、L3 が大きいほど鉛直速度の獲得は大きくなると述べている。そのために、水平速度の減少が大きい ($p<0.01$)、代わりに鉛直速度の獲得ができ ($p<0.05$)、大きな跳出角につながり ($p<0.001$)、滞空時間も長くなることで ($p<0.001$)、ホップの跳躍距離が長くなっていると考えられる。バランス型は L3, L1 がともに長いことで ($p<0.01$)、接地時間も長くなり ($p<0.01$) 膝関節屈曲も大きい ($p<0.05$)、その分力積が大きくなっていたと考えられる。松尾は[30]、100m世界記録保持者（当時）のスタートダッシュを日本人トップスプリンターと比較した際に、世界記録保持者はピッチを獲得するよりも、接地時間を長くすることで力積を大きくして、重心を前方に運んでいたと報告している。そのことから、バランス型はホップ局面において、上方へというよりは、より前方へ跳び出すために、L1 を長くし、助走で得られた水平速度を維持するような、低い跳躍をしていたと考えられる。

5.6.2 ステップ局面について

ステップ局面では、両群において跳躍距離に差はなかった。ホップ優位型は、ホップ局面において跳出角が大きく、高い跳躍をしていることから、入射角が大きく ($p<0.01$) なっていると考えられる。またホップ局面において、水平速度を大きく減少しているため、接地瞬間の水平速度はバランス型よりも低い ($p<0.05$)、水平速

度の減少量に有意な差はなかった。このことについては、ホップ優位型、バランス型ともに身体動作としては膝関節の変化や L3 に違いがみられなかったこと、ホップ優位型のキネティクスとして、膝関節による伸展トルクと足関節の負のピークパワーが大きかったことによる緩衝動作からの結果だと考えられる。しかし、有意差はなかったものの水平速度の減少量はホップ優位型が大きい傾向にみられたことに加え、ホップ優位型は接地瞬間、離地瞬間の水平速度が低かったことから、鉛直速度の獲得量が大きく ($p<0.01$)、跳出角が大きくなっていた ($p<0.05$) と考えられる。そのため、ステップにおける滞空時間は長くなっているが、跳躍距離に有意差が表れなかったのは、水平速度の低さが原因だと考えられる。

バランス型は接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度が高く ($p<0.05$)、水平速度の減少量も有意差はないがホップ優位型よりも少ないため、ステップ局面においても水平速度を維持できていると考えられる。しかし、ステップでは鉛直速度を獲得できず、跳躍角も低いことから、ステップの跳躍距離にはつながっていない。先行研究において[8]、跳躍距離で世界一流選手と日本選手の大きな差はステップの距離であると報告されていることから、バランス型はステップにおいて、ホップ局面で維持した高い水平速度を利用し、鉛直速度をうまく変換できれば、ステップ跳躍距離につながり、パフォーマンスの向上につながるかもしれない。そのためには、ステップ局面において、起こし回転運動をうまくおこなうことが考えられるが、水平速度の減少に加え、大きな衝撃に対する緩衝がおこなえなくなると考えられる。小池は[20]、身体重心速度の鉛直成分獲得に対して、足関節トルクの貢献が最大であり、膝関節は水平速度の減少と跳躍高の獲得に貢献していると報告している。したがって、膝関節によって衝撃緩衝をしつつも、足関節は接地時に背屈しないように固めるようにして接地し、そのままの関節角度を保つことによって、受動的に大きなトルクを発生させることが必要となると考えられる。

5.6.3 ジャンプ局面について

ジャンプ局面では、跳躍距離はバランス型のほうが長かった ($p<0.001$)。ホップ優位型は、ホップ局面における水平速度の減少がジャンプ局面においても効いていて、接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度は低かった ($p<0.01$)。L3 が短いことから ($p<0.05$)、より身体重心に近い位置で接地していることがわかる。しかし、ホップ局面とは異なる

り、膝関節の屈曲が大きい傾向にあり、うまく起こし回転動作がおこなえず、離地瞬間の鉛直速度の低さにつながった ($p<0.01$)、あるいはホップ、ステップと水平速度の減少が大きかったため、ジャンプ局面においては高さを出すよりも、低い水平速度を活かすための結果として、跳出角度の低いライナー跳躍になっているのではないかと考えられる。バランス型は L3 が長く ($p<0.05$)、接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度は高く ($p<0.01$)、離地瞬間の鉛直速度も高かった ($p<0.01$)。このことから、ホップ、ステップと維持してきた高い水平速度を、ジャンプ局面において鉛直速度に変換できているのだと考えられる。そのことは、L3 が大きいことと、鉛直速度獲得に大きく貢献している足関節の伸展ピークパワーが有意に高かったことから ($p<0.01$) 説明できる。

5.6.4 跳躍タイプによる競技力への影響

・ホップ優位型

まず助走速度に有意な正の相関関係がみられたことから ($p<0.001$, 表 5.8)、ホップ優位型では助走速度の重要性がうかがえる。大きな助走速度の獲得に伴い、ホップ局面においてはホップの跳躍距離と接地瞬間、離地瞬間の水平速度、離地瞬間の鉛直速度がそれぞれ有意な正の相関関係にあった (それぞれ $p<0.001$)。また、鉛直速度獲得量と跳躍距離に有意な正の相関関係がみられ ($p<0.001$)、跳出角と滞空時間ともに跳躍距離と有意な正の相関関係にあった (それぞれ $p<0.01$, $p<0.001$)。これらの変数は、ホップ優位型の特徴、つまりホップ局面において跳躍距離を獲得するための大きな助走速度、離地時の水平速度と鉛直速度、跳出角といった項目に当てはまっていたことから、ホップ局面においては、よりホップ優位型の特徴を強調することが、跳躍距離につながると考えられる。さらに、膝関節の伸展ピークトルク、足関節の屈曲ピークトルクに相関関係がみられたことから、ホップ優位型の競技力の高い選手は、ホップ局面においてより鉛直速度の獲得に向けた力発揮をしていることが考えられた。小池は[20]、股関節は体幹の姿勢維持に貢献していると報告しており、本研究の結果において跳躍距離と股関節の正のパワーに有意な差がみられたことから、姿勢を維持することの重要性がうかがえる。また、膝関節に負の相関関係がみられたことから、ホップ局面においては緩衝動作というよりも、膝関節を固めることで起こし回転運動をすることが重要であると考えられた。

ステップ局面では、跳躍距離と接地瞬間の水平速度に有意な正の相関関係がみられた ($p<0.05$)、離地瞬間では鉛直速度のみに有意な正の相関関係がみられた ($p<0.001$)。ホップと同様に跳出角と滞空時間には有意な正の相関関係がみられた ($p<0.001$)。深代[7]が報告しているように、ステップ局面においては、容易に水平速度を維持できるが、それを維持しても跳躍距離につながらないことと同様に、鉛直速度や跳出角度といった上方への要因が重要であることが示唆され、そのために足関節における伸展トルクの大きさも必要になってくることが考えられた ($p<0.05$)。しかし、ホップ優位型では、ホップ局面での水平速度の減少が大きすぎても跳躍距離につながらないという意味でも、離地瞬間の水平速度にも有意差がみられたと考えられる。

ジャンプ局面では、接地瞬間、離地瞬間ともに水平速度が有意な正の相関関係を示した ($p<0.001$)。跳出角は有意な負の相関関係がみられた ($p<0.05$)。深代[7]の報告からも、ジャンプ局面においては水平速度の維持は困難であるが、それを維持することが跳躍距離を大きくすると述べられているので、そのことの結果だと考えられる。

以上のことから、ホップ優位型の選手がパフォーマンスを向上させるためには、本研究で明らかとなったホップ優位型の特徴を強調することが必要であると考えられた。つまり、ホップ局面において大きな助走速度、離地時の水平速度と鉛直速度、跳出角といった跳躍距離を獲得するための要因を高め、ホップの跳躍距離を伸ばすことが、総跳躍距離につながると考えられた。

・バランス型

助走速度において有意な差はなかった。バランス型の特徴として、ホップ局面から水平速度の減少を抑え、最後までその水平速度を維持するようなものであった。しかし、ホップ局面の跳躍距離は、離地瞬間の鉛直速度と滞空時間が関連しているという統計結果であった。そのことでホップの跳躍距離を伸ばす、つまりホップ局面において水平速度を減少させることにつながる。そのことでステップ局面での出来事の変化などから、バランス型がホップ優位型に変わる可能性がある。この結果は、バランス型としてパフォーマンスを向上させるために得策だとは言いきれない。本研究の結果からは、跳躍タイプによる跳躍距離への影響は明らかに出来ず、三段跳においてどの跳躍タイプが良いという答えはなく、バランス型がホップ優位型に変化した際の利益については、今のところ検討はできない。

ステップ局面では、ホップ優位型と同様に深代[7]の報告から、鉛直速度や跳出角度といった上方への要因が重要であることが示唆された。また股関節の屈曲トルク、負のパワーに有意差がみられたことから、離地後の過伸展抑制が重要であることが考えられた。

ジャンプ局面においても、ホップ優位型と同様の考察ができる。ジャンプ局面においては、水平速度を維持することが跳躍距離につながる。ジャンプ局面の跳躍距離を伸ばすためには2つの方策が考えられる。1つは、より高い助走速度を得て、その水平速度をジャンプまで維持し、ジャンプ局面において維持した高い水平速度を鉛直方向に変換すること。もうひとつは、ジャンプ局面において鉛直速度よりも水平速度を優先し、着地までその水平速度を維持することである。

5.7 結論

本章では、三段跳をホップ優位型とバランス型の2タイプにわけて、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面の違いを示すことで、それぞれの特徴を明らかにし、パフォーマンスへの影響を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1, ホップ優位型は、ホップ局面で大きな鉛直速度を獲得することで跳躍距離を伸ばしているが、代わりに水平速度の減少が大きかった。
- 2, バランス型は、ホップ局面からジャンプ局面にかけて、水平速度の維持に重点を置き、そのために低い跳躍をしていた。維持した高い水平速度を利用し、ジャンプ局面ではL3を大きくし、鉛直速度獲得に大きく貢献している足関節の伸展ピークパワーが有意に高かったことから、うまく鉛直速度に変換することで跳躍距離を伸ばしていた。
- 3, 各跳躍タイプにおいてパフォーマンスを向上させるためには、ホップ優位型はその特徴を強調することだと考えられた。つまり、ホップ局面において大きな助走速度、離地時の水平速度と鉛直速度、跳出角といった跳躍距離を獲得するための要因を高めることである。バランス型は水平速度を維持する中でも、ホップあるいはジャンプ局面において鉛直速度を獲得することが重要であると示唆された。

第 6 章 成功試技と失敗試技の比較

本章では、三段跳における成功試技と失敗試技において比較し、失敗を引き起こす要因について論ずる。

6.1 目的

これまで三段跳における成功試技と失敗試技における比較検討はいくつかおこなわれてきている[9][31]。その結果、いずれもステップ局面における膝関節の屈曲が大きいことが原因であると報告されているが、キネマティクスによる検討のみである。しかし成功試技と失敗試技において、キネティクス要因も影響していると考えられるため、本研究では、キネマティクスとキネティクスの両面から比較検討した。

6.2 被験者

検討する試技は、成功試技を最も記録の良かった試技あるいは着地動作までおこなえたもの、失敗試技を明らかに失敗したと判断できるもの（ホップ、ステップ、ジャンプの各踏切はおこなっているが、着地動作までおこなえていない試技）と定義した。そのことを踏まえ、本章の被験者は、明らかな失敗試技がみられた 2 名とした(表 6.1)。被験者 8 は試技 2 回目、被験者 12 は試技 3 回目が失敗試技であった。

表 6.1 被験者の特性

被験者 8	試技	跳躍距離(m)				被験者 12	試技	跳躍距離(m)			
		Hop	Step	Jump	Total			Hop	Step	Jump	Total
Hop型	1	5.51	3.49	4.96	13.96	Hop型	1	4.79	4.20	3.75	12.74
Hop型	2	5.27	2.94	3.87	12.08	Hop型	2	4.75	4.22	4.37	13.34
Hop型	3	5.70	3.35	5.01	14.06	Hop型	3	4.85	3.59	1.45	9.89
Hop型	4	5.40	3.89	4.76	14.05	Hop型	4	5.16	4.18	4.33	13.67

6.3 測定項目

- ・跳躍距離
- ・身体重心水平速度
- ・身体重心鉛直速度
- ・接地距離 (L3)
- ・離地距離 (L1)
- ・接地時間
- ・滞空時間
- ・入射角度
- ・跳出角度
- ・膝関節角度
- ・下肢関節トルク
- ・下肢関節角速度
- ・下肢関節パワー
- ・下肢関節の仕事

6.4 結果

6.4.1 膝関節角度について

図 6.1 から、被験者 8 の膝関節角度の変位をみると、ホップとステップにおいて、失敗試技では膝関節が大きく屈曲していることがわかる。跳躍距離と合わせてみると、膝関節の屈曲が大きい失敗試技においては、ホップの跳躍距離も低いものとなっている。図 6.2 から、被験者 12 の膝関節角度の変位をみると、ステップとジャンプにおいて、失敗試技では膝関節が大きく屈曲していた。跳躍距離と合わせてみると、膝関節の屈曲が大きい失敗試技においては、ステップとジャンプの跳躍距離が低くなっていた。このことから、被験者 8 においてはホップとステップの局面、被験者 12 においては、跳躍距離をみてもジャンプ局面では普段の踏切をおこなえていないと判断し、ステップの局面についてそれぞれ検討していくこととした。

なお、ここからは主に成功試技の中でも最も記録の良かった試技と失敗試技との比較をしていく。表 6.2 に、各被験者の失敗局面のキネマティックデータを示した。

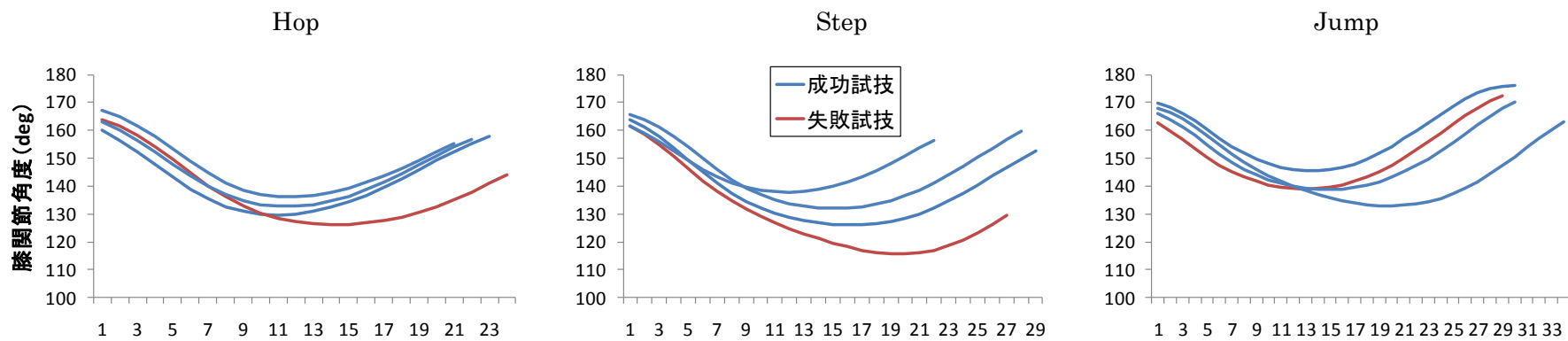


図 6.1 被験者 8 の各跳躍局面，各試技における膝関節角度の変化

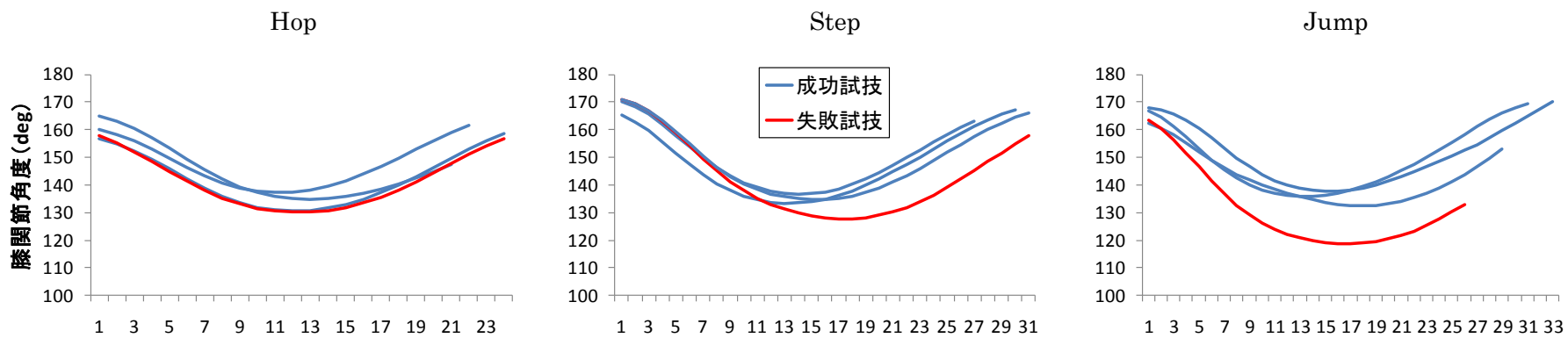


図 6.2 被験者 12 の各跳躍局面，各試技における膝関節角度の変化

表 6.2 各被験者の失敗局面のキネマティクスデータ

被験者 8 (Hop)

	助走速度 (m/s)	L3(cm)	入射角(deg)	接地時間(s)	L1(cm)	跳出角 (deg)	滞空時間(s)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)
失敗	9.46	31.7	3.1	0.120	39.2	15.5	0.505	9.15	0.87	8.56	0.59	1.27	37.7	17.9	163.9	144.1
成功	9.56	30.1	2.4	0.105	28.7	17.8	0.575	9.13	2.68	8.46	0.67	2.95	31.1	19.3	163.1	156.8

被験者 8 (Step)

	L3(cm)	入射角(deg)	接地時間(s)	L1(cm)	跳出角 (deg)	滞空時間(s)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)
失敗	24.8	13.3	0.135	48.5	6.6	0.240	8.02	2.39	7.80	0.23	4.19	46.1	14.1	161.7	129.7
成功	25.9	16.1	0.140	50.0	8.4	0.290	8.05	1.15	7.77	0.27	3.34	33.5	27.5	161.4	156.3

被験者 12 (Step)

	L3(cm)	入射角(deg)	接地時間(s)	L1(cm)	跳出角 (deg)	滞空時間(s)	接地瞬間 水平速度 (m/s)	離地瞬間 鉛直速度 (m/s)	離地瞬間 水平速度 (m/s)	水平速度 減少量 (m/s)	鉛直速度 獲得量 (m/s)	膝関節屈曲 (deg)	膝関節伸展 (deg)	膝関節接地時 (deg)	膝関節離地時 (deg)
失敗	29.4	13.7	0.155	53.0	11.9	0.345	7.91	1.60	7.50	0.41	3.38	43.3	30.0	171.0	157.8
成功	33.2	14.0	0.155	46.3	15.3	0.435	7.87	1.99	7.23	0.64	3.91	36.4	31.5	171.1	166.2

6.4.2 関節トルク，パワーについて

膝関節角度の変化による力学的影響をみるために，下肢3関節のトルク，関節角速度，関節パワーの変化をみた。図6.3に被験者8のホップ局面における成功試技と失敗試技の比較，図6.4に被験者8のステップ局面における成功試技と失敗試技の比較，図6.5に被験者12のステップ局面における成功試技と失敗試技の比較をそれぞれ示した。なお，接地期は接地の瞬間が0%，離地の瞬間が100%となるように正規化し，50%の位置にラインを引いた。

被験者8のホップ局面では，関節トルクにおいて接地前半で股関節伸展トルクが，接地後半で膝関節伸展トルクが失敗試技で大きい傾向にあった。関節角速度において，股関節と膝関節ではあまり大きな差はみられなかったが，足関節において伸展トルクに移行するタイミングに差がみられ，失敗試技のほうがタイミングが早かった。関節パワーにおいて，股関節では大きな差はみられなかったが，膝関節では負のパワーの大きさに差がみられ，失敗試技のほうが大きい傾向にあった。足関節でも負のパワーの大きさに差がみられ，成功試技のほうが大きい傾向にあった。

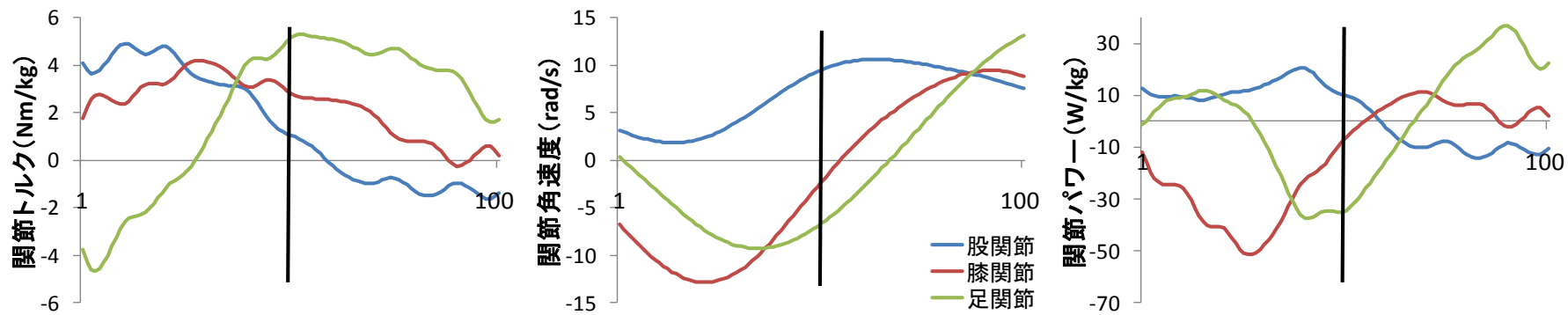
被験者8のステップ局面では，関節トルクにおいてはホップ局面同様に，接地前半で股関節伸展トルクが，接地後半で膝関節伸展トルクが失敗試技で大きい傾向にあった。足関節には大きな差はみられなかった。関節角速度において，股関節では接地後半に成功試技で大きい傾向にあった。膝関節は大きな差がみられ，失敗試技において伸展に移行するタイミングが大きく遅れていることがみてわかる。足関節でもタイミングに差がわずかにみられたが，膝関節とは反対に失敗試技のほうが伸展に移行するタイミングが早かった。関節パワーにおいて，股関節では正のピークパワーのタイミングが失敗試技のほうが早かった。膝関節はパワーの大きさに差はみられないが，失敗試技において正のパワーに移行するタイミングが遅れているため，負のパワー発揮の時間が長くなっている。足関節は，成功試技のほうが負のパワー発揮が大きい傾向にあった。

被験者12のステップ局面では，関節トルクにおいては股関節で伸展トルクから屈曲トルクに移行するタイミングが失敗試技のほうが早かった。膝関節では，接地後半における伸展トルクが失敗試技で大きい傾向にあった。足関節は，伸展トルクのピークのタイミングに差がみられ，失敗試技のほうがそのタイミングが早かった。関節角速度においては，股関節ではあまり大きな差はみられなかったが，膝関節ではわずかであるが失敗試技において伸展に移行するタイミングが遅れていた。足関節は膝関節とは反対に失敗試技のほうが伸展に移行するタイミングが早かった。関節パワーにおいて，股関節で正のピーク値と正

から負に移行するタイミングに差がみられ、成功試技では正のピーク値が大きく、正のパワー発揮の時間が長かった。膝関節では、負のパワーの大きさに差はみられなかったが、負から正に移行するタイミングが成功試技のほうが早く、負のパワー発揮をしている時間が短かった。足関節では、負のパワー発揮から正のパワー発揮への移行のタイミングが、失敗試技のほうが早く、負のパワー発揮の時間も短かったが、接地後半での正のパワーピーク値は成功試技のほうが大きかった。

Hop (被験者 8)

成功



失敗

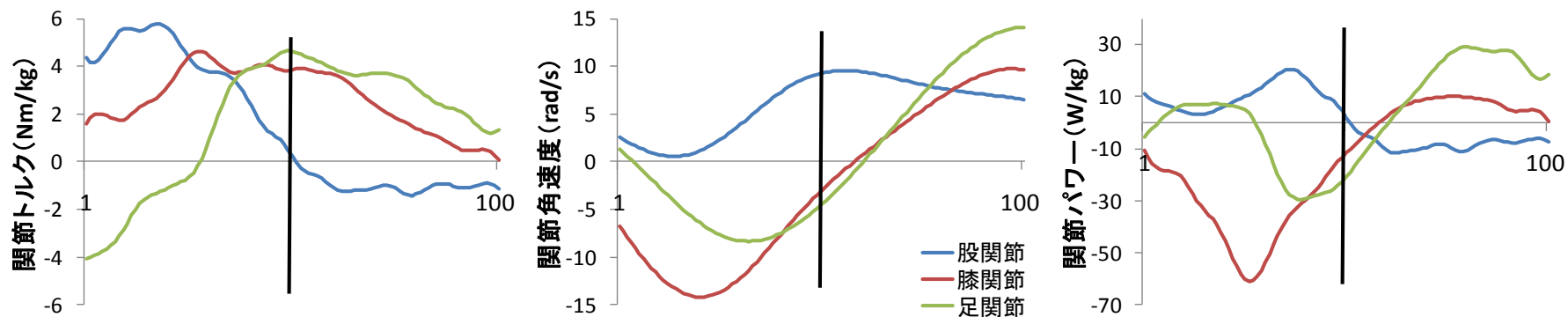
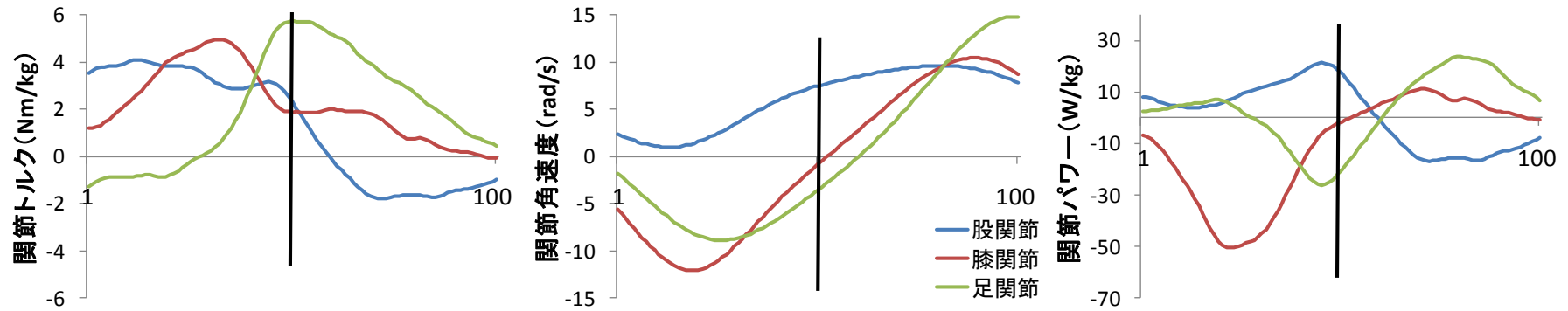


図 6.3 被験者 8 のホップ局面における成功試技 (上) と失敗試技 (下) の下肢関節トルクと関節角速度, 関節パワーの変化

Step (被験者 8)

成功



失敗

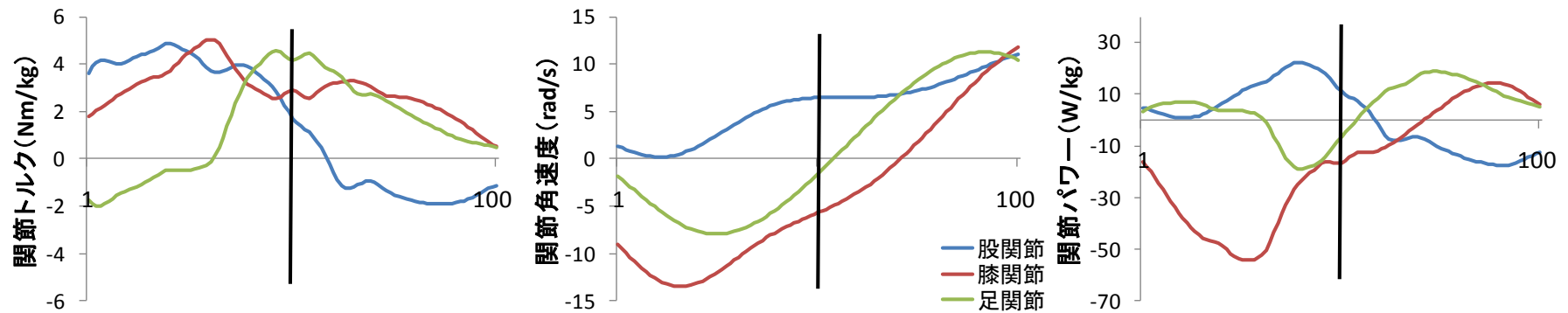
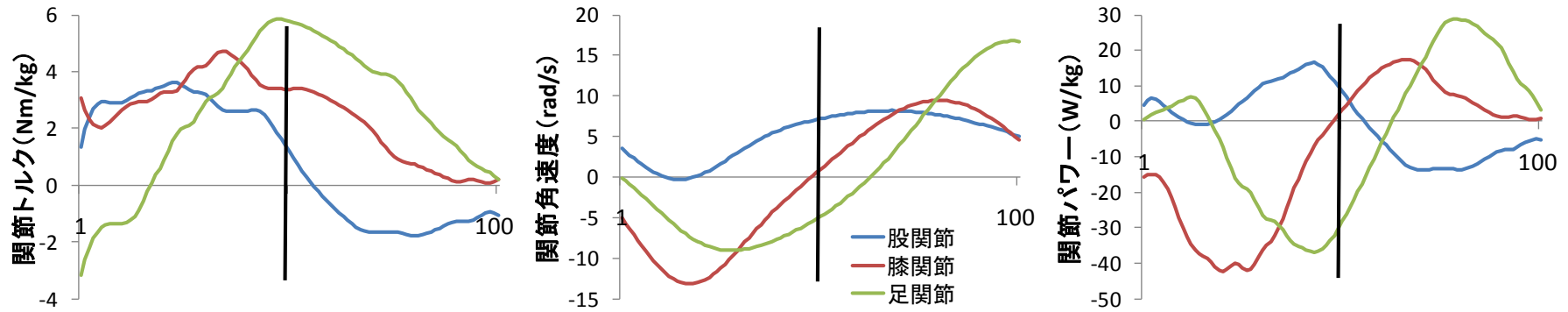


図 6.4 被験者 8 のステップ局面における成功試技 (上) と失敗試技 (下) の下肢関節トルクと関節角速度, 関節パワーの変化

Step (被験者 12)

成功



失敗

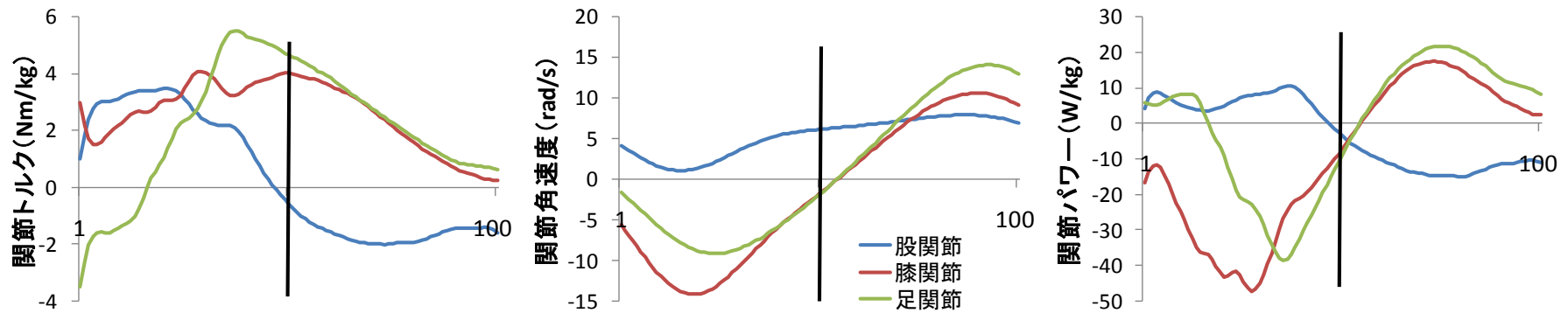


図 6.5 被験者 12 のステップ局面における成功試技 (上) と失敗試技 (下) の下肢関節トルクと関節角速度, 関節パワーの変化

図 6.6 と図 6.7 に、被験者 8 のホップ局面とステップ局面、被験者 12 のステップ局面における膝関節の関節トルク、角速度、パワーについて、それぞれ成功試技 3 試技と失敗試技の比較を示した。

被験者 8 のホップ局面では (図 6.6 上)、関節トルク、角速度、パワーの波形において、成功試技と失敗試技で大きな差はみられなかったが、関節角速度において、失敗試技は成功試技に比べて遅れた傾向にあった。被験者 8 のステップ局面では (図 6.6 下)、失敗試技において接地前半で関節トルク発揮が小さく、接地後半にもう一度ピークがくるような発揮パターンであった。また関節角速度は、屈曲ピークのタイミングに変わりはみられないが、ピークから下がり始める際の立ちあがり失敗試技では遅く、そのまま接地後半にまで続いていた。関節パワーでは、失敗試技は関節角速度の影響を受け、接地中間において負のパワー発揮の時間が長い傾向にあった。

被験者 12 のホップ局面では (図 6.7 上)、関節トルク、パワーの波形において、成功試技と失敗試技で一定のパターンはみられなかった。関節角速度において、失敗試技がというよりむしろ、成功試技でも遅れる傾向にある試技があった。被験者 12 のステップ局面では (図 6.7 下)、関節トルクにおいて、成功試技がピーク値を発揮しているポイントで、失敗試技では発揮されず、接地後半におけるトルク発揮が大きい傾向にあった。関節角速度は、波形において成功試技と失敗試技で大きな差はみられなかったが、失敗試技は成功試技に比べて遅れた傾向にあった。関節パワーは、失敗試技において負のパワー発揮の時間が長い傾向にあった。

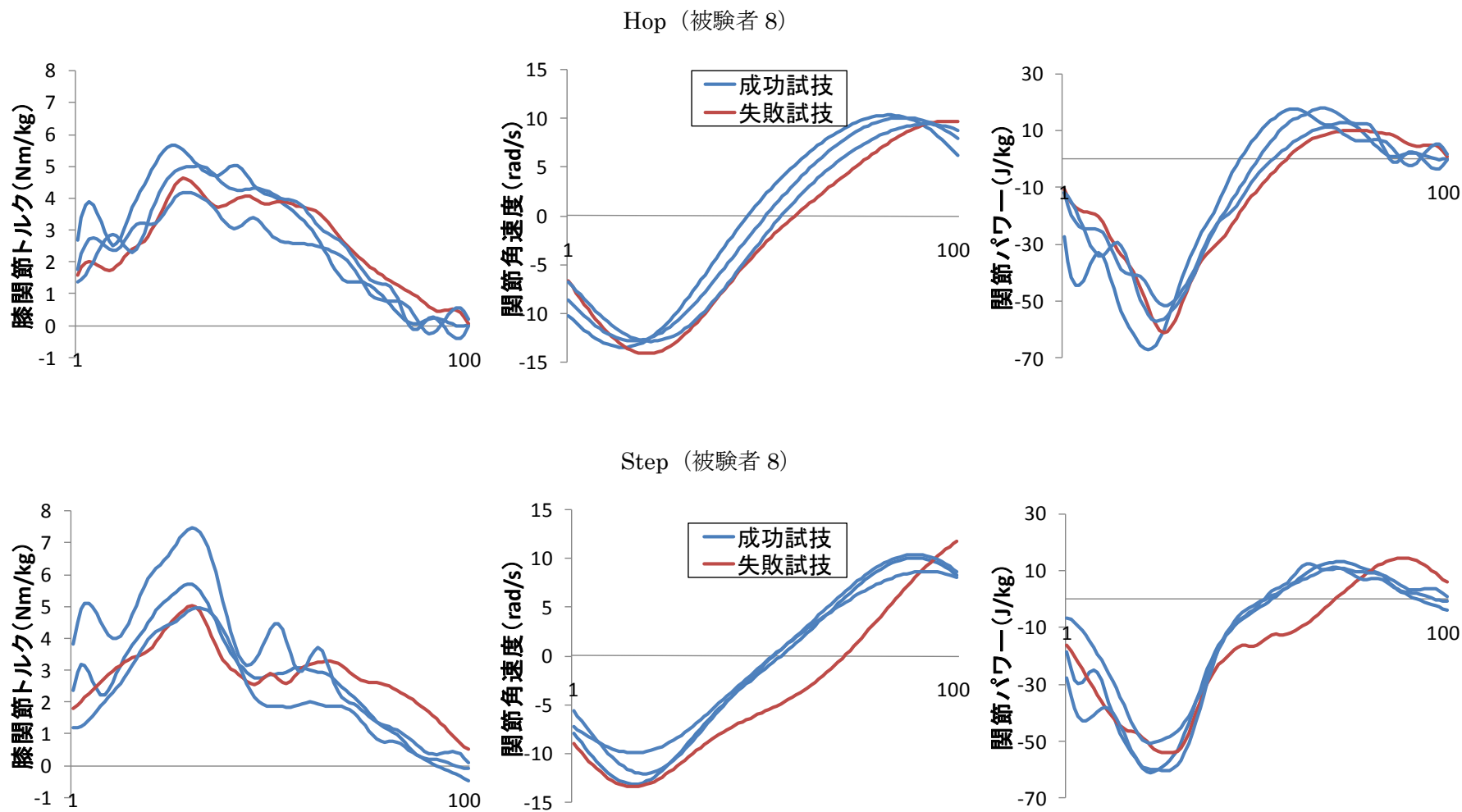


図 6.6 被験者 8 のホップ (上), ステップ (下) 局面における膝関節トルク, 角速度, パワーの変化

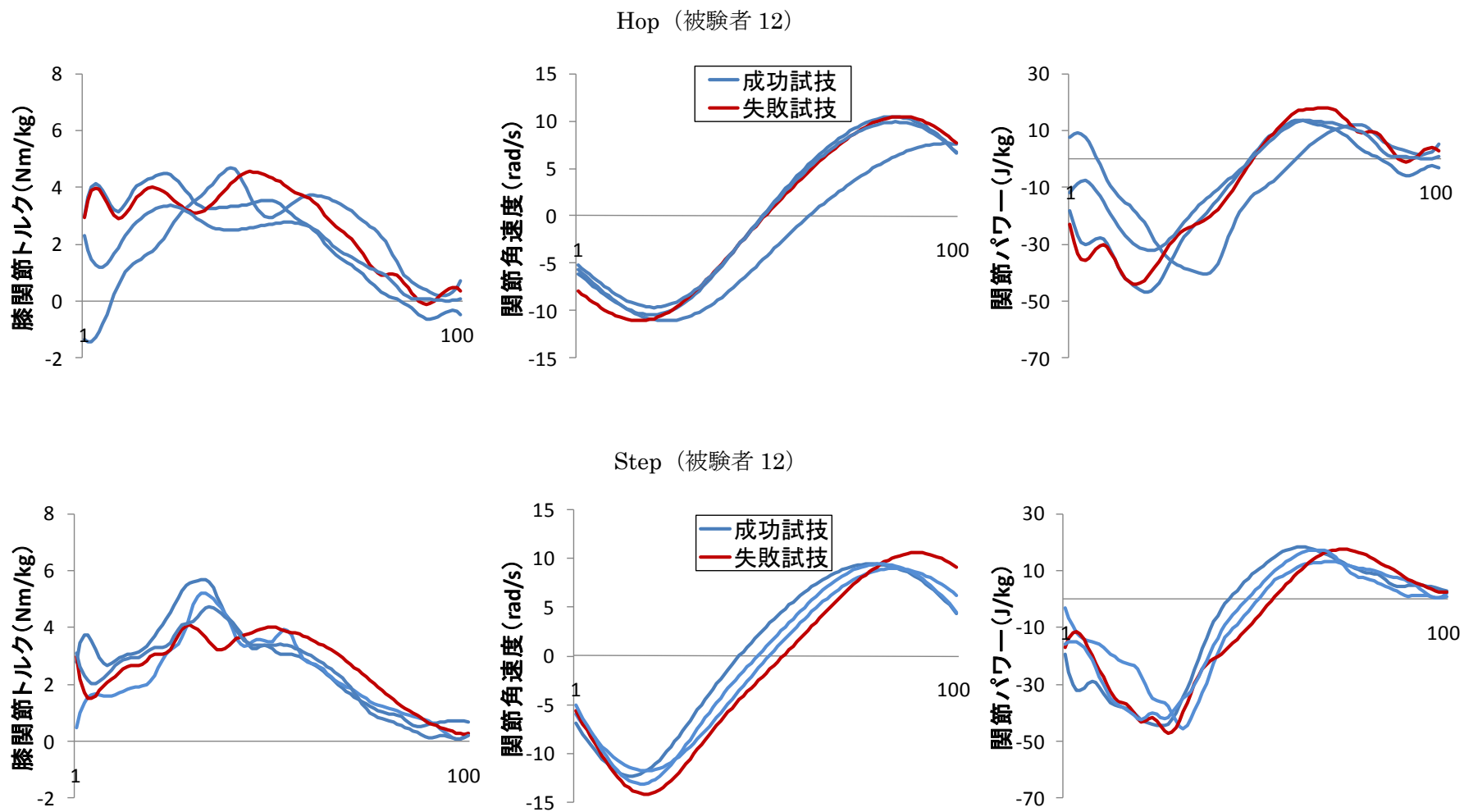


図 6.7 被験者 12 のホップ (上), ステップ (下) 局面における膝関節トルク, 角速度, パワーの変化

6.4.3 仕事について

図 6.8～図 6.10 に、被験者 8 のホップ局面とステップ局面、被験者 12 のステップ局面における下肢関節の仕事量について、それぞれ成功試技と失敗試技の比較を示した。

被験者 8 のホップ局面において (図 6.8), 股関節は成功試技: 0.289J/kg と失敗試技: 0.127J/kg , 膝関節は成功試技: -1.372J/kg と失敗試技: -1.669J/kg , 足関節は成功試技: 0.103J/kg と失敗試技: 0.424J/kg , 下肢 3 関節の合計は成功試技: -0.979J/kg と失敗試技: -1.116J/kg であった。被験者 8 のステップ局面において (図 6.9), 股関節は成功試技: 0.117J/kg と失敗試技: 0.098J/kg , 膝関節は成功試技: -1.567J/kg と失敗試技: -2.237J/kg , 足関節は成功試技: 0.423J/kg と失敗試技: 0.600J/kg , 下肢 3 関節の合計は成功試技: -1.027J/kg と失敗試技: -1.539J/kg であった。

被験者 12 のステップ局面において (図 6.10), 股関節は成功試技: -0.078J/kg と失敗試技: -0.467J/kg , 膝関節は成功試技: -1.346J/kg と失敗試技: -1.460J/kg , 足関節は成功試技: -0.418J/kg と失敗試技: 0.015J/kg , 下肢 3 関節の合計は成功試技: -1.843J/kg と失敗試技: -1.911J/kg であった。

大きな変化がみられた膝関節の仕事を、成功試技を 100%とした場合の失敗試技を割合で示すと、被験者 8 はホップ: 121%, ステップ: 142%と、失敗試技で明らかに大きいことがわかった。被験者 12 では、ステップ: 108%と、成功試技と失敗試技ではあまり大きな差はみられなかった。

図 6.11 と図 6.12 に、被験者 8 のホップ局面とステップ局面、被験者 12 のステップ局面における膝関節の仕事量を、正と負に分けてそれぞれ成功試技と失敗試技の比較を示した。被験者 8 は、正の仕事においてはホップ局面の成功試技: 0.253J/kg , 失敗試技: 0.332J/kg とステップ局面の成功試技: 0.341J/kg , 失敗試技: 0.386J/kg と、成功試技と失敗試技の間に差はみられないが、負の仕事量はホップ局面の成功試技: -1.625J/kg , 失敗試技: -2.002J/kg とステップ局面の成功試技: -1.908J/kg , 失敗試技: -2.624J/kg と、失敗試技のほうが大きかった。被験者 12 のステップ局面は、成功試技は正: 0.626J/kg , 負: -1.973J/kg と、失敗試技は正: 0.718J/kg , 負: -2.179J/kg と、正の仕事も負の仕事も、失敗試技は成功試技と比較して、負の仕事がわずかに大きく、正の仕事もわずかに大きかった。

被験者 8

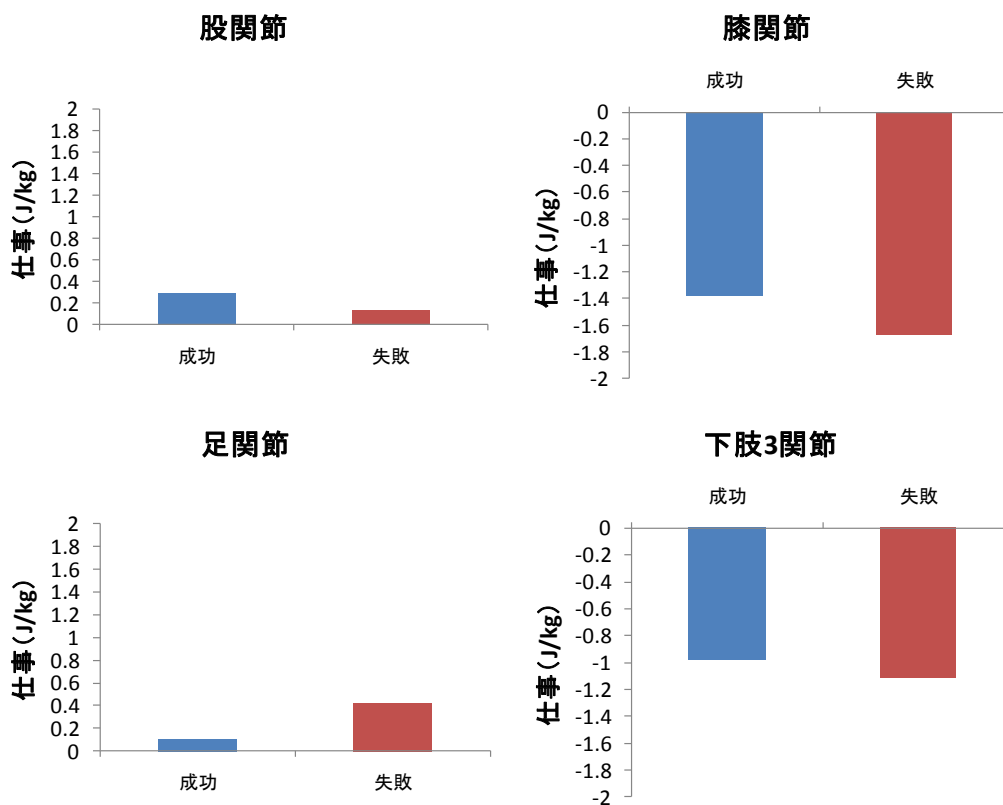


図 6.8 被験者 8 のホップ局面における成功試技と失敗試技の下肢関節仕事の比較

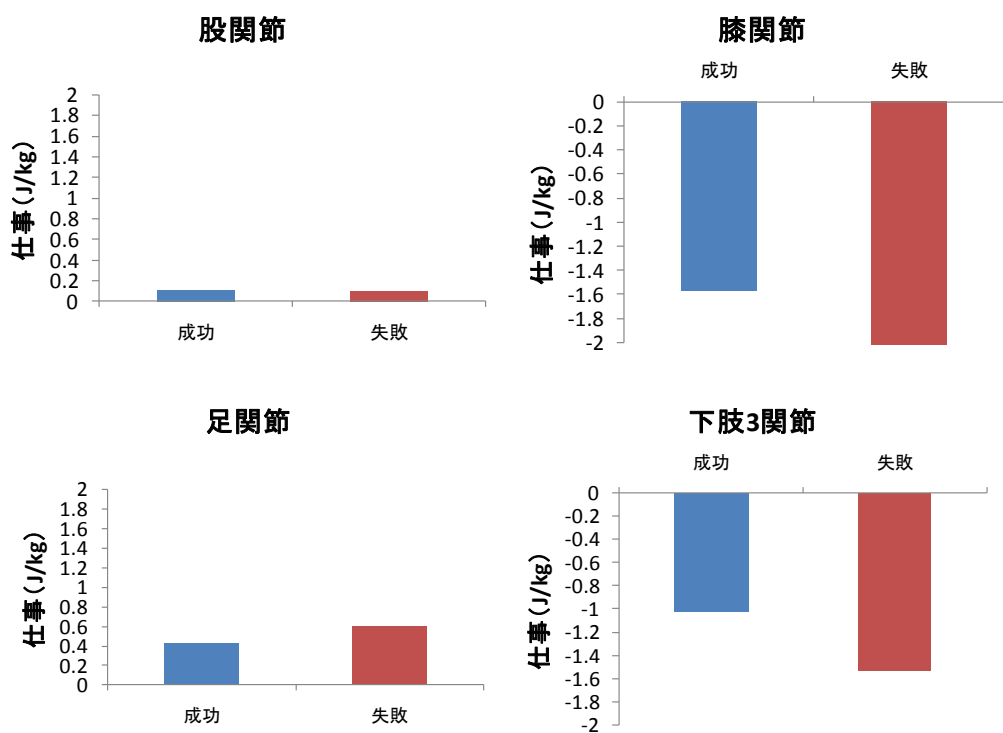


図 6.9 被験者 8 のステップ局面における成功試技と失敗試技の下肢関節仕事の比較

被験者 12

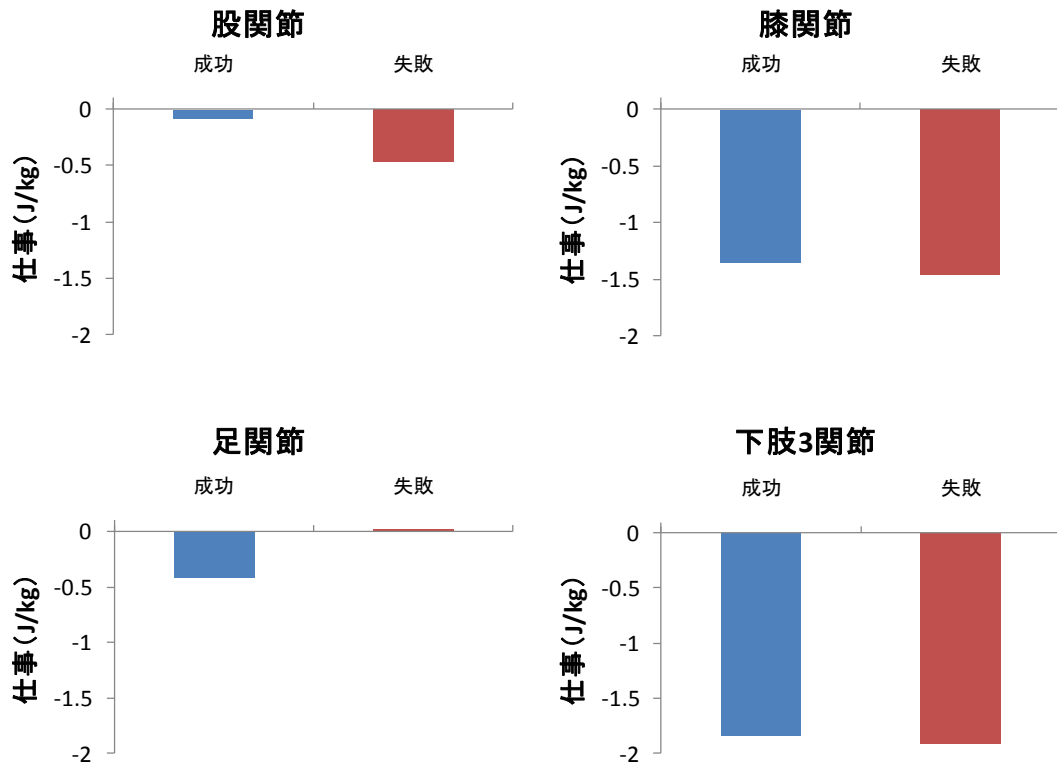


図 6.10 被験者 12 のステップ局面における成功試技と失敗試技の下肢関節仕事の比較

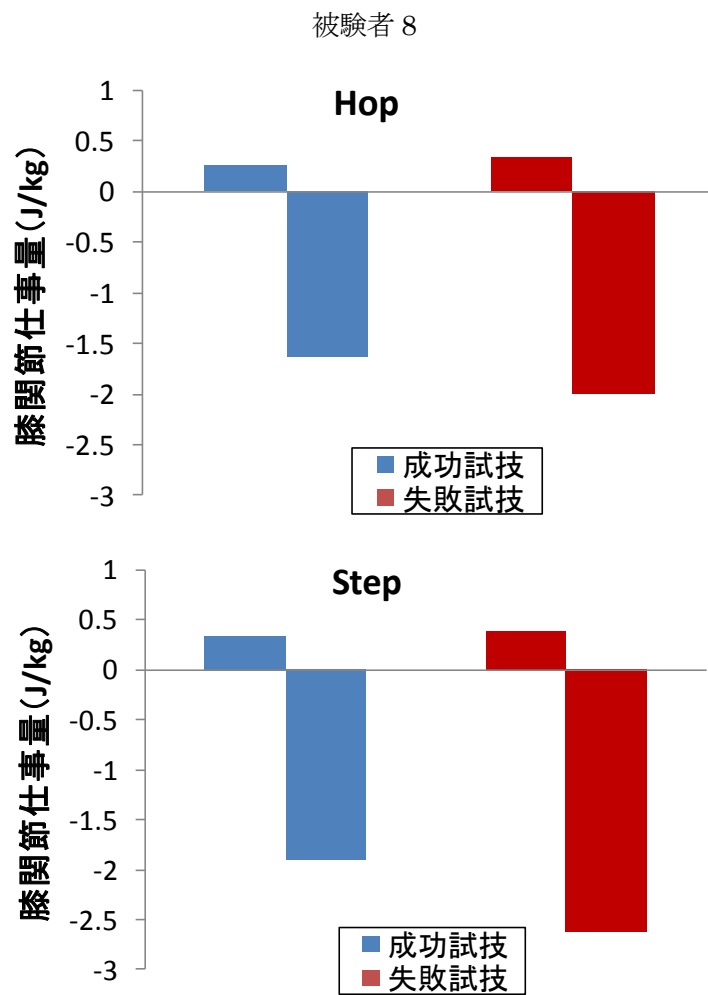


図 6.11 被験者 8 のホップ局面（上）とステップ局面（下）における成功試技と失敗試技の膝関節の正と負の仕事

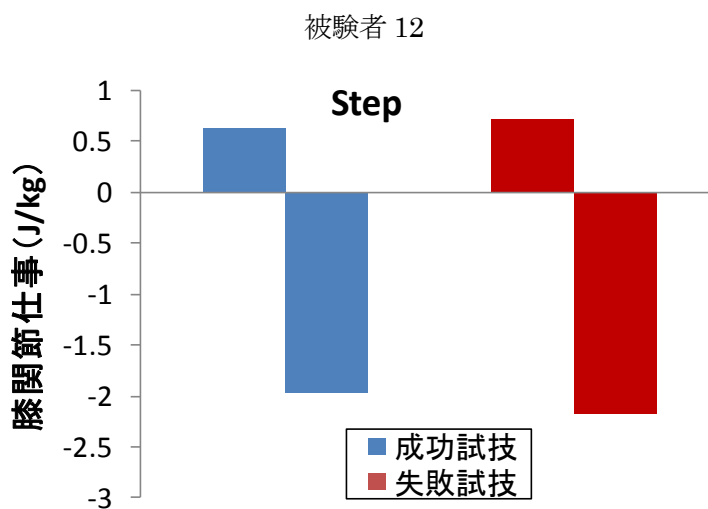


図 6.12 被験者 12 のステップ局面における成功試技と失敗試技の膝関節の正と負の仕事

6.4.4 身体動作について

膝関節角度や関節トルク、パワーに伴い、L3やL1の接地時あるいは離地時の身体姿勢も影響していると考えられるため、成功試技と失敗試技においてL3とL1で比較をおこなった（図 6.13～図 6.15）。

被験者 8 のホップ局面において（図 6.13）、L3 は成功試技：30.1cm、失敗試技：31.7cm と大きな差はみられなかったが、L1 では成功試技：28.7cm、失敗試技：39.2cm と差がみられた。ステップ局面においては（図 6.14）、L3 は成功試技：25.9cm、失敗試技：24.8cm とあまり差はみられず、L1 も成功試技：50.0cm、失敗試技：48.5cm と大きな差はみられなかった。

被験者 12 のステップ局面において（図 6.15）、L3 は成功試技：33.2cm、失敗試技：29.4cm とわずかな差がみられ、L1 では成功試技：46.3cm、失敗試技：53.0cm と差は大きくなっていた。

Hop (被験者 8)

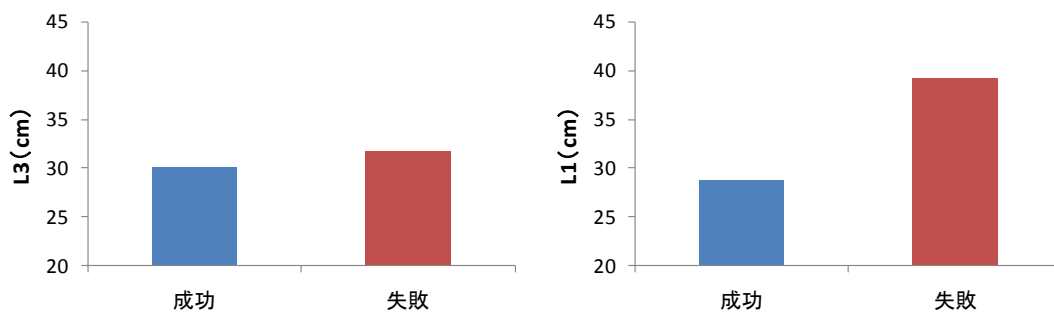


図 6.13 被験者 8 のホップ局面における成功試技と失敗試技の L3 と L1 の比較

Step (被験者 8)

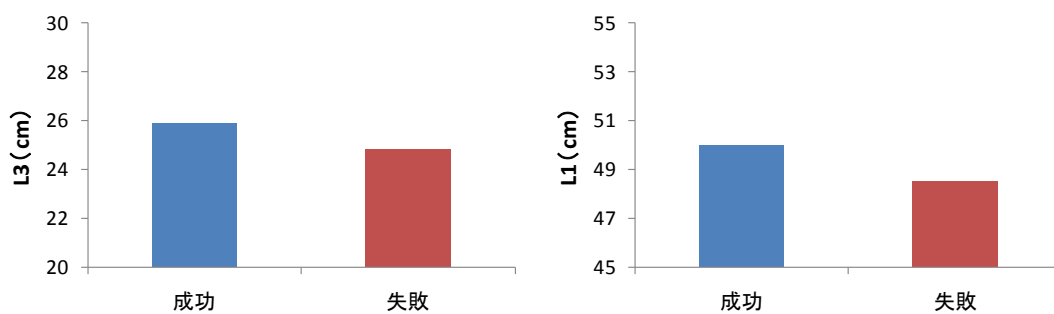


図 6.14 被験者 8 のステップ局面における成功試技と失敗試技の L3 と L1 の比較

Step (被験者 12)

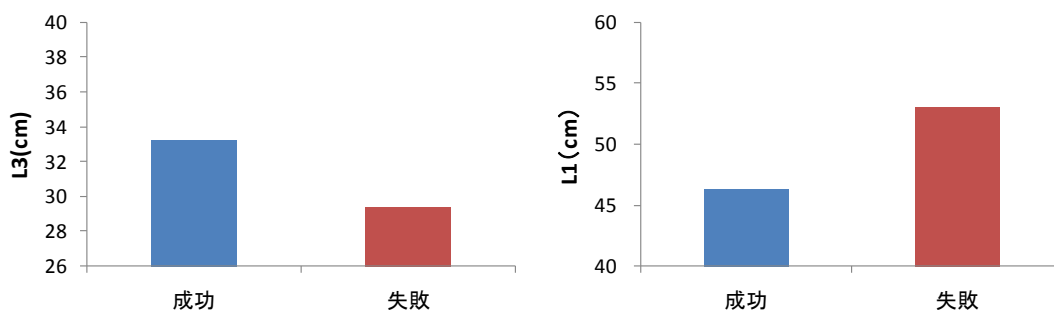


図 6.15 被験者 12 のステップ局面における成功試技と失敗試技の L3 と L1 の比較

6.5 考察

6.5.1 身体動作について

白市は[9]、三段跳の好記録達成の要因分析として、下肢関節の動作に着目し、成功試技と失敗試技の比較をしている。その結果、最も衝撃を受けるステップの接地時に、その衝撃を緩和するために膝関節は屈曲するが、失敗試技においては膝関節の屈曲変位が大きくなることから、失敗はステップ局面に多く起こることと、その局面において膝関節屈曲を最小限におさえることが失敗しないための要因であることを報告している。宮田ら[31]は、各踏切動作における下肢3関節の動作に着目し、成功試技と失敗試技において比較検討している。その結果、失敗試技において、ホップ局面に比べ、ステップとジャンプ局面における膝関節と足関節の角度の変化が大きかったことを報告している。以上のことから、三段跳における失敗試技は、ステップ局面における下肢の挙動が影響していることがわかる。本研究においても、失敗試技がみられた2例は、どちらもステップ局面において成功試技との大きな違いがみられた。また被験者8に関しては、ホップ局面においても失敗試技につながる動作がみられ、その結果ステップ局面の失敗動作に影響していることが考えられた。この2例の跳躍タイプは、どちらもホップ優位型跳躍であったため、ホップ局面における出来事も総跳躍距離に大きく影響していることが考えられた。成功試技において、踏切前半では、体幹や踏切脚の伸筋群は地面から加わる大きな力によって強制伸張され、後半では伸展する。すなわち、伸筋群がエキセントリックな筋収縮によって大きな力を発揮した状態からコンセントリックな筋収縮に移って爆発的に体幹や踏切脚の関節を伸展する。このことは、本研究の第4章においても明らかにした。ここでのポイントは、屈曲から伸展への切り換え時に発揮されている力が大きく、しかも切り替えが素早くおこなわれることである[32]。そのためには、接地時に伸筋群が大きな力を発揮できる活動状態にならなければならないので、接地前における伸筋群の予備緊張が必要になる。つまり、Active Landingという技術が役立つと考えられる。Active Landingとは、踏切における主動筋群を予め意図的に緊張させて、踏切脚を積極的にたたきつけるように着地するという動きである[32]。Kohらは[33]、三段跳における踏切脚の動作に着目し、このActive Landingは跳躍距離に大きな影響を与えたとし、とくにステップの踏切では重要であると報告をした。このことを踏まえ、2名の失敗試技において考察する。

被験者8は、ホップ局面において、L3に成功試技と失敗試技で大きな違いはない

が、その後失敗試技では膝関節屈曲が大きい、つまりホップ優位型の特徴である起こし回転運動がうまくおこなえていなかったと考えられる。その結果接地時間が長くなり、L1 も大きくなっている。そして十分に膝関節の伸展がおこなえないまま離地をおこなったゆえに、水平速度の減少量は少ないが、低い跳躍となっていた。したがって、被験者 8 はこの時点で、ホップ優位型の特徴を強調するどころか、不完全な踏切のままバランス型に近いホップをおこなっていたと考えられる。次に続くステップ局面では、接地瞬間の膝関節角度、L3 に大きな差はみられない。しかしその後、失敗試技において膝関節の屈曲が大きくなり、ほぼ伸展しないまま離地をしている。王らは[34]、衝撃を受ける下肢節の負荷および最適動作に関する研究をおこない、膝関節の可動範囲が $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲に制限された場合は、可動範囲が制限されていない $30^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の場合に比べて、足関節と膝関節にかかる衝撃力は大きくなり、膝関節の動きが制限されると、下肢筋肉の能動収縮がうまく機能せず、緩衝器としての機能がなくなるため、下肢関節に伝わる衝撃は大きくなると報告している。また稲岡らは[13]、デプスジャンプにおいて、Active Landing を用いることで、至適負荷台高を着地動作の違いと関連づけて報告している。その結果、1.0m 以上の台高では、負荷による衝撃力に耐えられなくなり、意図した跳躍動作が行えなくなることで、そして Active Landing は大きな衝撃力に抗して着地動作を行え得ることを示した。大宮らは[35][36]そのことをバウンディング（交互片脚連続跳躍）において検討し、跳躍距離に及ぼす要因の一つとして、Active Landing の有効性と、速度の増大に応じて脚の振り戻し速度の重要性を示唆している。阿江は[32]、両腕や振上脚の振込動作が、接地後半における胴体や踏切脚への負担を軽減し、伸展を助長する働きがあり、このときに踏切脚をタイミングよく伸展することが望ましいと述べている。これらの報告を合わせて考えると、失敗試技において膝関節に加わる衝撃が大きかった。また、バランス型に近いホップ局面の動作への変化から、十分な滞空時間を獲得できなかったために、Active Landing をおこなえなかった、あるいは、両腕や振上脚による振込動作がタイミングよくおこなえなかったと考えられる。Active Landing がおこなえず、踏切脚への負担を軽減できなかった結果、衝撃に耐えることができず、衝撃緩衝の機能を優先したと考えられる。

被験者 12 は、ステップ局面における接地瞬間の膝関節角度に差はみられないが、L3 において失敗試技のほうが小さい傾向にあった。つまり、失敗試技では重心に近

い位置につばった状態で接地に入っていた。佐野らは[37]、起こし回転の接地角度を鉛直に近づけることで、上昇ではなく、水平方向に進むことを報告している。しかし被験者 12 は、その後膝関節の屈曲が大きくなっていることから、うまく起こし回転運動がおこなえず、伸展が不完全なまま離地をおこなっていた。そのため、うまく上方あるいは前方へ跳ね返ることができず、つぶれた状態で重心は前方へ移動し、L1 は失敗試技のほうが大きくなっていた。また伊藤らは[17]、L3 の水平距離が小さいほど水平速度の減少量が少ないことを報告している。ステップの踏切における大きな衝撃を緩衝するためには、膝関節の屈曲動作は必要であるが、それに伴い水平速度の減少は大きくなる。以上のことを踏まえ、被験者 12 のステップ局面において、成功試技と失敗試技の水平速度の減少量は、失敗試技のほうが小さかったことについて、失敗試技では L3 が小さく、膝関節の屈曲が大きかったことから、水平速度の減少量に関して矛盾が起きている。それは、L3 が小さいことで接地前半におけるブレーキが少なかったこと、そして、鉛直速度を獲得できないまま重心を前方へ移動したことで、水平速度は保たれたのではないかと考えられる。

6.5.2 関節トルク、パワー、仕事について

上述した身体動作と合わせて、キネティクスについて考察していく。王らは[38]、下肢の衝撃吸収メカニズムについて明らかにし、膝を深く曲げると上体、足首にかかる加速度や力は軽減されるが、膝の筋肉にかかる負荷は大きくなると報告している。吉田らは[39]、ドロップ着地における関節モーメントによる下肢の支持について検討し、体重負荷中の崩れ落ち防止は下肢 3 関節を取り巻く筋群を強調させることによりおこなわれると報告している。そして、体重負荷中に膝関節が崩れ落ちると、足関節と股関節も同様に崩れ落ちが起きる。ゆえに崩れ落ちを防止するには下肢 3 関節モーメントによる下肢の支持が必要であると報告している。宮下は[40]、ピークトルクを発生する時の関節角度と角速度に注目し、両者の関係は、筋力を出力するタイミングを反映していると報告している。これらの報告に加え、失敗試技においては足関節の伸展ピークトルクの発揮パターンに、膝関節トルクの増減が同期している傾向がみられたことから、膝関節角度の変化に影響を受けて、足関節トルクのピーク値やトルクの出力するタイミングがずれているのではないかと考えられた。

白田は[41]、膝関節伸展制限下での膝関節伸筋群、屈筋群の等速度性筋出力を測定

し、最大トルク値が発揮された膝関節角度が、屈曲ではより屈曲位に偏位する、つまり運動開始時の膝関節角度に応じて、最大トルクが発揮されるポイントは影響されることを明らかにし、この関係を筋の収縮要素が興奮するまでの時間の遅れ、モーメントを発揮するまでの時間の必要性のためと報告している。古泉らは[42]、陸上競技選手における脚筋力特性の評価をおこない、膝関節屈曲時における角速度と 0deg/s 時のピークトルク値を基準にした相対的ピークトルク値をみた際、三段跳選手は、 60deg/s 時のとき、どの競技選手よりも大きなピーク値を示し、さらに 100% を超える値であったことを報告している。これらのことから、失敗試技に共通してみられた膝関節伸展トルクの 2 つ目のピークは、膝関節が深く曲がった結果発揮されたトルクであることが考えられる。

また野崎は[43]、筋活動レベルと関節トルクの関係について、股関節と膝関節の二関節筋から検討しており、膝関節伸展・屈曲トルクを発揮したときに、無意識のうちどの程度の股関節トルクが生じているかを調べた。その結果、被験者によって膝関節トルクを発揮する際のストラテジーが異なり、また同じ膝関節伸展といっても、単関節筋に負荷がかかる者もいれば、二関節筋に負荷がかかる者もいることを明らかにしている。このことから、単一関節トルク発揮課題において、筋活動レベルの調節に影響していることがわかるが、三段跳のようなバリストティックな動作を伴う場合においても、例外ではないと考えられる。したがって、三段跳では接地中において、膝関節が伸展トルクを常に発揮しているが、その際に起こっている股関節のトルク発揮は、三段跳の動作の結果生じているのか、あるいは異なるストラテジーの結果起きている現象なのかについて、とくに失敗試技と成功試技の比較をする際には考慮する必要があると考えられた。

仕事においては、被験者 8 はステップ局面での膝関節屈曲が大きく時間も長かったため、膝関節伸展トルクの 2 つ目のピークがみられても、仕事としては失敗試技のほうだが、膝関節の負の仕事が大きかったと考えられる。被験者 12 における失敗試技においては、膝関節角度の屈曲は大きかったものの、関節角速度としては成功試技と失敗試技で大きな差がなかった。そのため、負のパワーが大きいことから、エネルギー吸収が大きいのが、膝関節の伸展トルクの 2 つ目のピークの影響を受けた大きな正のパワーから、成功試技と失敗試技では膝関節の仕事量にはあまり差がみられなかったと考えられる。

6.6 結論

本章では、三段跳における成功試技と失敗試技において、キネマティクスとキネティクスの両面から比較検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1, 失敗試技においては、膝関節角度の屈曲が大きかった。その原因として、①膝関節に加わる衝撃が大きいこと、②屈曲から伸展への切り換え時に大きな力を発揮できない、あるいは切り替えが遅いことの2点が考えられた。したがって、失敗しないためには、①接地時に伸筋群が大きな力を発揮するために伸筋群の予備緊張 **Active Landing** をおこなうこと、②接地位置の問題 (**L3**)、③両腕や振上脚の振込動作のタイミングにあわせて踏切脚を伸展することが考えられた。
- 2, 失敗するキネティクス要因は、トルクのピーク値や出力するタイミングが影響していると考えられた。運動開始時の膝関節角度に応じて、最大トルクの発揮されるポイントは影響されることから、接地中のトルクのピーク値や出力するタイミングを左右するのは **L3** であり、さらに膝関節が屈曲することで発揮されるトルクに、下肢 3 関節は影響を受け、接地中のトルクのピーク値や出力するタイミングが変化することが考えられた。
- 3, ホップ優位型は、ホップ局面で失敗すると続くステップにも大きく影響を受け、ホップ局面におけるホップ優位型の特徴を強調することの重要性が示唆された。

以上の結果から、三段跳における成功試技と失敗試技を、キネマティクスとキネティクスの両面から比較検討し、その要因を明らかにすることができた。

第7章 総合討論

本研究の目的は、三段跳の3つの跳躍局面に着目し、パフォーマンスに影響を与える要因を明らかにすることとした。そのために、キネマティクスとキネティクスの両面からパフォーマンス向上のための要因を検討し、さらに跳躍タイプ別にみた特徴と、成功試技・失敗試技の要因についてそれぞれ明らかにした（図7.1）。

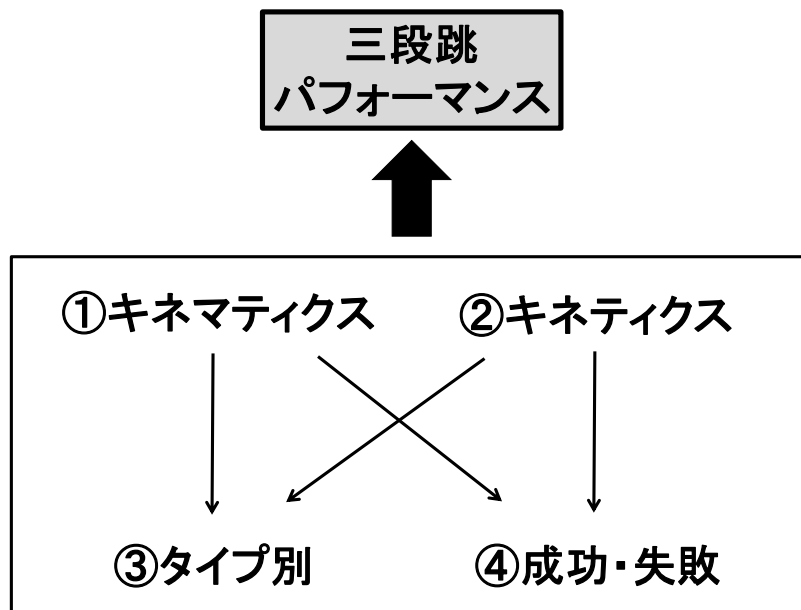


図7.1 本研究における三段跳のパフォーマンスへのアプローチ

1, 三段跳におけるパフォーマンスに影響を与える要因

ここでは、第3章から第6章の研究結果に基づいて、三段跳におけるパフォーマンスへの影響について検討したい。

第3章と第4章においては、競技力の違いによるパフォーマンスの影響を検討した。第3章では、三段跳におけるキネマティクスとして、跳躍距離と速度、あるいは身体動作の相互関係について検討した。その結果、三段跳のパフォーマンスを向上させるためには、速い助走をおこなうことが第一条件であり、水平速度と鉛直速度のバランスを各局面の必要に応じてとっていくことが重要であることが示唆された。第4章では、三段跳におけるキネティクスとして、踏切脚の下肢関節トルク、下肢関節パワー、下肢関節仕事に着目し、その発揮パターンの特徴について明らかにし、跳躍距離への影響について検討した。その結果、三段跳において下肢関節のトルク、パワー、仕事

は、跳躍距離に直接影響をあたえるというよりは、3回の跳躍をおこなうための働きをそれぞれがしており、それは競技力の差にかかわらず起こっていることがわかった。

第5章では、三段跳をホップ優位型とバランス型の2タイプにわけて、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面の違いを示すことで、それぞれの特徴を明らかにし、パフォーマンスへの影響を検討した。その結果から、三段跳の跳躍タイプによって、3つの跳躍のバランスのとりかたが異なり、水平速度や鉛直速度をどの局面でどのように配分するのか、またそのためにどういった身体動作をしているのかを明らかにすることができた。

第6章では、三段跳における成功試技と失敗試技において、キネマティクスとキネティクスの両面から比較検討した。その結果から、失敗する要因である膝関節の屈曲は、Active Landing ができていないこと、接地位置の問題(L3)が考えられ、キネティクス要因は、膝関節が屈曲することで発揮されるトルクに下肢3関節は影響を受け、接地中のトルクのピーク値や出力するタイミングが変化することを明らかにできた。

図7.2は、これらの結果から、三段跳のパフォーマンスを発揮する要因、向上させるための要因についてまとめたものである。三段跳のパフォーマンスを向上させるためには、大きな助走速度を獲得すること、そしてその助走速度をホップ、ステップ、ジャンプの3つの全ての局面にわたって保持、スピードコントロール、公平に配分されるかどうかにかかっている[1]。そのことに加え、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍において大きな衝撃を緩和しながら、かつ上方へ跳び出すための鉛直速度と角度が必要になる。本研究においてまず着目したのが、膝関節であった。膝関節の働きは衝撃緩衝であり、膝関節の屈曲によって、エキセントリックな筋収縮、負の仕事をするので、衝撃を吸収していることがわかった。しかし、その屈曲が大きすぎると、失敗試技につながることを考えられた。このことは、先行研究においても報告されており[9][31]、本研究でも膝関節が成功と失敗を分ける重要な要因であることが示唆された。その原因として、膝関節屈曲から伸展への切り換え時に発揮されている力と、切り替えの速さである[32]。したがって、失敗しないためには、接地時に伸筋群が大きな力を発揮できるActive Landingをおこなうこと、さらに接地したときのL3の影響や、両腕と振上脚の振込動作のタイミングにあわせて踏切脚を伸展することが考えられた。しかし、本研究では事例研究として、明らかな失敗例が2例しかなく、失敗する

原因を、確かな根拠の元に示すことができなかった。

また本研究では、跳躍タイプ別に検討することで、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面で、跳躍のバランスのとりかたが異なることを明らかにし、水平速度と鉛直速度の配分の違いと、その違いが起こる局面を明らかにすることができた。つまり、どの要因をどの局面で協調するかによって、その身体動作は変わり、跳躍タイプも変わることがわかった。しかし、本研究においては、ホップ優位型とバランス型の特徴を明らかにできたが、パフォーマンスに対してどちらのタイプが有益かということについては検討できず、ジャンプ優位型の特徴についても明らかにすることはできなかった。走高跳においても、背面跳びの跳躍タイプが、スピードタイプとパワータイプに分けて考えられると言われているが[44]、特徴を考える上で便宜上分類しており、どちらのタイプが良いということでもなければ、どちらのタイプにも分類できないこともあると言われている。

また、踏切局面において、起こし回転運動と **Active Landing** の重要性が示唆された。起こし回転運動は、これまでも多く述べられており、スプリント[28][45]や跳躍[32][44]、さらに投擲種目においてもその考えが取り入れられている[46]。跳躍力の要素は、①身体の起こし回転によるもの、②両腕や振上脚の振込動作によるもの、③踏切脚および体幹の屈曲伸展によるものの3つに大別できる[32]。身体の起こし回転による鉛直速度を大きくするには、まず第1に踏切に移った瞬間の身体重心の水平速度、すなわち助走速度の大きいことが重要である。しかし、接地後身体重心のスピードが急激に低下すると、身体の起こし角速度が小さくなるので、踏切前半における身体重心のスピードの減少を小さくする技術（例えば、踏切への踏込角を小さくし、身体重心が滑らかに動くようにする、両腕や振上脚を振り下ろすなど）を用いたり、意図的におこなうべきではないが、踏切脚の屈曲も回転半径を小さくし、身体が回転するのを容易にする。また両腕や振上脚を後方に残し、身体を大きく後傾して踏切に移ることも重要である。Kohら[29]によって、踏切脚動作は **Active Landing** と **Blocking Landing** に分類されているが、本研究の結果から、各跳躍距離に対してホップでは **Blocking Landing**、ステップとジャンプでは **Active Landing** が重要であることが考えられた。

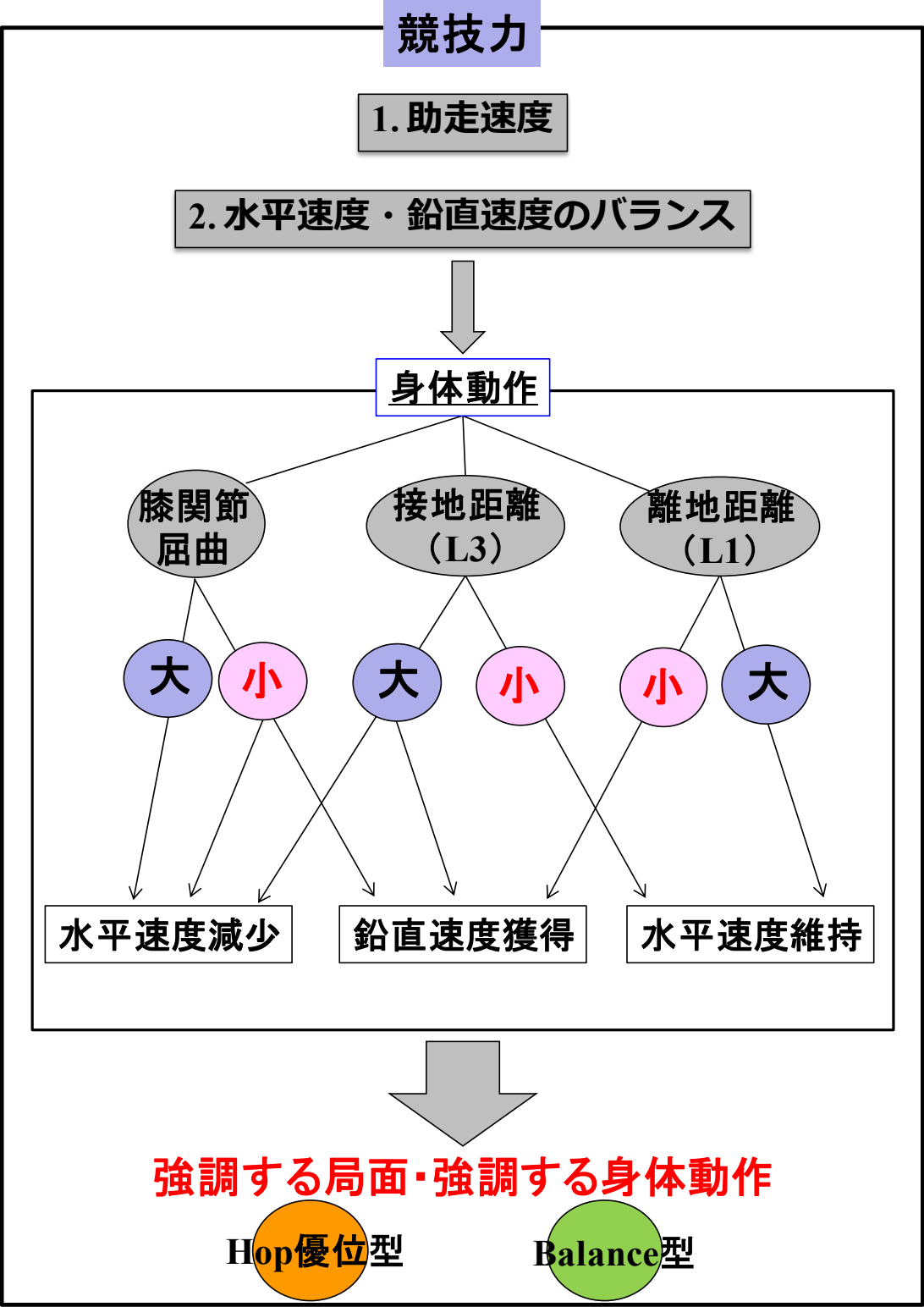


図 7.2 三段跳におけるパフォーマンス向上の要因

2, 実践への示唆

三段跳において、これまでに競技レベル・跳躍タイプ別にみた意識の実践研究がおこなわれ[47], 意識強度からみても競技レベルには差があり, 跳躍タイプによっても特徴があることを報告している. このように, 実際の選手の身体動作と選手の意識を把握することは, コーチの立場においても指導する際の有益な指標となる. 指導現場において, 三段跳で跳躍タイプに関する指導というものはこれまでにみられてはこなかった. しかし, 三段跳を指導する上で, 跳躍タイプという指標を用いて指導することが, 選手ごとに指導する際は役立つツールになるのではないかと考える. なぜなら, 選手の各踏切での出来事・現象は, 跳躍タイプによって異なるからである. そのため指導者は, 現有の体力に応じた技術を指導するとともに, 体力の向上に取り組みながら一段上の技術を習得させるべきである[48]. その意味でも, 跳躍タイプごとの特徴を明らかにできた本研究の結果は, 今後指導現場における有益なデータとなるであろう.

3, 今後の課題

本章では, 三段跳におけるキネマティクスとキネティクスの両面から, 競技力, 跳躍タイプ別, 成功と失敗の関係について, 第3章から第6章で得られた成果に基づいて考察を進めてきた. その結果, それぞれの観点から得られた結果の位置づけと関係が明らかにされた. しかし, 本研究で得られた知見は, 競技力, 分析対象範囲, 2次元解析というところに課題が残っている. したがって, 本研究の結果に加え, 多数の事例に当てはめてみて検討する必要がある. そして今後, このような研究がおこなわれることによって, 屋外におけるあらゆる種目の知見が得られることとなる. しかしこの種の研究がおこなわれていなかった現在においては, 本研究の結果は, 三段跳のコーチングや技術トレーニングにおける選手の自己観察内容やコーチの他者観察内容を考えるための起点となっただろう. 以下, 本研究の課題について述べる.

・被験者

本研究では, 競技力に関して幅広い自己記録を持った三段跳選手を対象とし, 実験をおこなったが, 分析対象となった記録が最上位の記録と最下位の記録では約2m50cmの差があったものの, ほぼ14m前後に集中してしまった. したがって, 競

技力を上げるための知見として、少し課題となる結果であったと考えられる。しかし、その中でもわずかな差がパフォーマンスを決定することが、本研究の結果でも改めて示すことができた。今後は、幅広い競技力での検討と、ジャンプ優位型の検討、失敗試技の増加によって、本研究の知見を確かなものにできると考えられる。

・踏切脚以外の貢献

本研究では、三段跳のパフォーマンスに関する要因を、踏切脚に着目して検討した。しかし、人体は上腕、前腕、大腿、下腿、体幹というようにいくつかの体節の集合体である[49]。これらの体節はそれぞれが運動をおこない、パフォーマンスに対して貢献しているのである。さらには、これらの体節が相互に作用していることも忘れてはならない。つまり、今回みていない振上脚（逆脚）や両腕の動作・出来事は、三段跳のパフォーマンスを評価する上で、無視することができない。先行研究では走幅跳、三段跳、走高跳の各跳躍種目において、振上脚やアーム動作を取り上げて、パフォーマンスとの関係を検討している[14][50][51][53][54]。志賀らは[14]、走幅跳において踏切後半局面に振上脚の股関節伸展トルクが強く作用する場合、跳躍角を低く抑えられると報告している。Yuらは[50]、三段跳においてアーム動作は鉛直速度の獲得に貢献するが、水平速度の減少を引き起こすことと、振上脚はステップとジャンプ局面において鉛直速度の獲得に貢献することを報告し、これら自由肢の動作が身体重心の速度に影響を与えていると述べている。LEESらは[51]、走高跳における鉛直速度と自由肢（両腕と振上脚）の関係を検討しており、離地時の鉛直速度や角運動量を生み出すために必要なパフォーマンスに影響を与える技術は、腕と脚の相互関係によって決まると示唆している。村木は[52][54]、三段跳における下肢の基本運動様式の観点から、ピストン型とスイング型の存在を報告し、スピードを利用した跳躍をおこなうためには、スウィング動作を強調した技術が必要であることを明らかにした。このように、跳躍運動は、踏切脚の出来事だけでは評価できないことがわかる。したがって本研究で得られたデータも、踏切脚以外の身体動作や力発揮との関係をみていくことで、三段跳のパフォーマンスを考えるための起点となるであろう。

・3次元解析

三段跳や走幅跳などの競技は、矢状面だけの出来事では評価することはできない。しかし、3次元による解析によって検討されたものは少ない。走幅跳における報告では[55]、いくつかの変数がパフォーマンスに影響していると述べているが、決定的な評価はされずにまとめられている。三段跳においては、Yuらが報告している[50]。踏切脚以外の自由肢（両腕と振上脚）とパフォーマンスとの関係を検討し、自由肢によって各踏切時の重心角運動量は変化するが、跳躍距離に影響は与えないことを報告している。さらにYuらは[56]、角運動量とパフォーマンスとの関係を検討し、前額面でみたステップ離地時の身体重心角運動量の大きさが、ジャンプの跳躍距離に影響していることを明らかにした。このことから、矢状面だけではわかりえないことが3次元解析によって明らかになると言える。したがって、単純に前額面あるいは水平面でみた身体動作や姿勢と速度の相互関係を検討するだけでも、新たな知見が得られるかもしれない。

以上のように、三段跳という競技においてはまだまだ明らかにされていないことが多く、それらを明らかにしていくことはパフォーマンスの向上には欠かせない。つまり、三段跳という競技を研究するという点では、まだまだ解明する余地があると言えるであろう。よって、本研究の結果に加え、その課題とその関連性を示すことができれば、三段跳におけるパフォーマンス向上への確かなエビデンスが獲得できるであろう。

第8章 結論

本研究の目的は、三段跳の3つの跳躍局面に着目し、パフォーマンスに影響を与える要因をキネマティクスとキネティクスの両面から明らかにすることであった。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- 1, 三段跳のパフォーマンスを向上させるためには、大きな助走速度を獲得することが重要であり、各局面でみるとホップでは離地瞬間の水平速度と鉛直速度が、ステップでは離地瞬間の鉛直速度が、ジャンプでは離地瞬間の水平速度がそれぞれ重要である。
- 2, 膝関節は、キネマティクスにおいてもキネティクスにおいても、跳躍距離との関係性はみられなかった。しかし、膝関節の仕事は、各踏切局面で負に大きく、とくにステップでは大きかったため、衝撃吸収の働きをしていることが考えられた。したがって、膝関節はパフォーマンスの向上というよりは、衝撃緩衝作用のために必要な要因であることが示唆された。
- 3, 膝関節の働きは衝撃緩衝であり、膝関節の屈曲によって、エキセントリックな筋収縮をするが、膝関節の屈曲が大きすぎた場合は失敗につながる。その原因は、膝関節屈曲から伸展への切り換え時に発揮されている力と、切り替えの速さであり、失敗しないためには大きな力で接地することを可能とする **Active Landing** と、接地中のトルクのピーク値や出力するタイミングを左右する **L3**、そして両腕と振上脚の振込動作のタイミングの重要性が示唆された。
- 4, 跳躍タイプ別によって、ホップ、ステップ、ジャンプの各跳躍局面で、跳躍のバランスのとりかたが異なることが明らかになり、水平速度と鉛直速度の配分の違いと、その違いが起こる局面を明らかにすることができた。つまり、ホップ優位型は、ホップの踏切では水平速度の減少を伴うが、高さを出すことでホップの跳躍距離を獲得している。バランス型は、ホップの踏切では低く跳び出すことで、ホップ局面における水平速度の減少を抑え、残りの2つの局面まで水平速度を維持することを優先していることがわかった。

これらのことから、三段跳において助走速度の重要性と、膝関節による衝撃緩和の必要性が示唆された。また、跳躍タイプによる特徴が明らかとなり、このことが指導現場における新たな指標となることが考えられた。

文献

- [1] G.ダイソン：陸上競技の力学. 大修館書店, 1972
- [2] Hay,J.G. and Miller, J. A. : Techniques used in the triple jump. J. Sports Biomech, 1: 185-196, 1985
- [3] 浅見美弥子：走幅跳, 三段跳における助走速度が跳躍距離におよぼす影響について. 東京女子体育大学紀要 23, 69-75, 1988-03
- [4] LISA A. BRIDGETT & NICHOLAS P. LINTHORNE : Changes in long Jump take-off technique with increasing run-up speed. Journal of Sports Sciences; 24(8):889-897, 2006
- [5] 白市純也, 淵本隆文：三段跳における助走の重要性和助走イメージに関する研究. 大阪体育大学紀要 38, 71-79, 2007-03
- [6] LEE NOLAN, ADRIAN LEES : Touch-down and take-off characteristics of the long jump performance of world level above- and below-knee amputee athletes. Ergonomics, 43(10), 1637-50, 2000
- [7] 深代千之：走幅跳びと三段跳びの Biomechanics. J. Sports Sci.2(8):600-613, 1983
- [8] 植田恭史, 鎌田貴, 古谷嘉邦：三段跳における世界一流選手と日本の 15~16m, 13~14m 選手との比較—跳躍距離, 跳躍比, 接地時間と滞空時間について—. 東海大学紀要 体育学部 19, 49-56, 1989
- [9] 白市純也：三段跳における好記録達成の要因分析, 大阪体育大学紀要 39, 301, 2008-03
- [10] Hay, J. G. : The biomechanics of the triple jump : A review. J. Sport Sci. 10, 343-378, 1992
- [11] Fukashiro, S. et al. : A biomechanical study of the triple jump. Medicine& Science in Sports & Exercise, 13, 233-237, 1981
- [12] Ramey, M. R. and Williams, K. R. : Ground reaction forces in the triple jump. Int. J. Sports Biomech. , 1 : 233-239, 1985
- [13] 稲岡純史, 村木征人, 阿江通良：デプスジャンプトレーニング—主働筋の予備緊張をともなう積極的接地 (Active Landing) の有効性. トレーニング科学研究会編, Vol. 4, No.1, 1992
- [14] 志賀充, 尾縣貢：走幅跳競技者の下肢筋力と踏切中のキネマティクス及びキネティクスの関係—膝関節と股関節に着目して—. 体力科学 53, 157-166, 2004

- [15] NICHOLAS P. LINTHORNE, MAURICE S. GUZMAN, & LISAA. BRIDGETT :
Optimum take-off angle in the long jump. *Journal of Sports Sciences*, 23(7), 703-712,
2005
- [16] 坪井一洋：着地時の重心低下を考慮した走り幅跳びの最適踏切角. 日本機械学会論文集
(C編) 74 (743), 1841-1848, 2008
- [17] 伊藤章, 富樫勝：ハードル走のバイオメカニクス的研究：スプリントとの比較. 体育学
研究 42, 246-260, 1997
- [18] 青山清英：走幅跳の踏切動作における身体部位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, 2001
- [19] 小池関也, 森洋人, 阿江通良：多体系の運動方程式に基づく跳躍動作の動力学的分析 (身
体重心鉛直速度に対する下肢関節トルクの貢献度). 日本機械学会ジョイント・シンポジ
ウム 2006 講演論文集, No. 06-35, 2006
- [20] 小池関也：スポーツ動作における関節トルクの役割とプレイヤーの感覚. スポーツ工学,
No.5, 15-21, 2010
- [21] 伊藤章, 斉藤昌久, 淵本隆文：スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピ
ークパワー, および筋放電パターンの変化. 体育学研究 42, 71-83, 1997
- [22] 遠藤俊典, 宮下憲, 尾縣貢：100m 走後半の速度低下に対する下肢関節のキネティクス
的要因の影響. 体育学研究 53, 477-490, 2008
- [23] 藤井範久, 宮下憲, 阿江通良：ハードル走における下肢 3 次元関節トルクおよび関節ト
ルクパワー. バイオメカニクス研究, Vol. 1, No. 1, 41-50, 1997
- [24] Paul DeVita, Michael Torry, Kathryn L. Glover and David L. Speroni : A
FUNCTIONAL KNEE BRACE ALTERS JOINT TORQUE AND POWER
PATTERNS DURING WALKING AND RUNNING. *J. Biomechanics*, Vol. 29, No.5,
pp.583-588, 1996
- [25] 阿江通良, 大木昭一郎, 高松潤二：垂直跳および着地動作におけるパワー発揮の大きさ
と下肢関節の貢献度. バイオメカニズム 12, 97-108, 1994
- [26] ZACHARY J. DOMIRE & JOHN H. CHALLIS : An induced energy analysis to
determine the mechanism for performance enhancement as a result of arm swing
during jumping. *SPORTS BIOMECHANICS*, Vol. 9, No.1, 38-46, 2010

- [27] 深代千之：反動動作のバイオメカニクス：伸張－短縮サイクルにおける筋－腱複合体の動態. 体育学研究, 45, 457-471, 2000
- [28] 長山真洋, 高橋隆行：三次元動作解析を用いた疾走動作コーチングの基礎的分析. 計測自動制御学会東北支部 第 269 回研究集会, 資料番号 269-10, 2011
- [29] Koh T. J., Hay J. G. : Landing Leg Motion and Performance in the Horizontal Jumps I : The Long Jump. INTERNATIONAL JOURNAL OF SPORT BIOMECHANICS, 6, 343-360, 1990
- [30] 松尾彰文：最大化スピード練習の効果を高めるための提案－ランニングパフォーマンスへの応用－. 体育の科学, Vol. 58, No.11, 2008
- [31] 宮田駿, 本道慎吾, 澤村博, 青山清英：三段跳における踏切動作の変動特性に関するバイオメカニクス的研究. 陸上競技研究 77, No.2, 24-32, 2009
- [32] 阿江通良：陸上競技のバイオメカニクス. 日本陸上競技連盟編, 陸上競技指導教本基礎理論編, 大修館書店, 東京, 33-53, 1992
- [33] Koh T. J., Hay J. G. : Landing Leg Motion and Performance in the Horizontal Jumps II : The Triple Jump. INTERNATIONAL JOURNAL OF SPORT BIOMECHANICS, 6, 361-373, 1990
- [34] 王永金, 松久寛, 本田善久：衝撃を受ける下肢関節の負荷および最適動作に関する研究. 日本機械学会論文集 (C 編) 64 (628), 4806-4813, 1998
- [35] 大宮真一, 合屋十四秋：バウンディングの跳躍距離に及ぼす要因－地面反力と重心速度に着目して－. 愛知教育大学保健体育講座研究紀要, 27, 21-26, 2002
- [36] 大宮真一, 合屋十四秋：陸上競技選手のバウンディング動作－助走速度の変化に伴う地面反力と踏切脚動作の検討－. 愛知教育大学保健体育講座研究紀要, 28, 37-43, 2003
- [37] 佐野明人, 池俣吉人, 宮本裕貴, 丸山信太郎, 藤本英雄：起こし回転型受動走行と平衡点解析. 日本機械学会論文集 (C 編) 76 (767), 1763-1769, 2010
- [38] 王永金, 松久寛, 本田善久：下肢の衝撃吸収メカニズム. 日本機械学会論文集 (C 編) 61 (592), 4704-4709, 1995
- [39] 吉田康行, 丸山剛生：ドロップジャンプ着地における関節モーメントによる下肢の支持. バイオメカニクス研究, Vol. 8, No.1, 2-11, 2004
- [40] 宮下智：筋出力特性に注目した新しい筋力評価の試み－最大筋力発揮関節角度と角速度との関係から－. リハビリテーション医学 35, 223-229, 1998

- [41] 臼田滋:膝関節等速度性運動における伸展制限の筋出力に与える影響. 群大医短紀要 13, 81-86, 1992
- [42] 古泉一久, 塚田勇, 横内靖典:陸上競技選手における脚筋力特性の評価. 城西大学研究年報, 自然科学編 24, 101-107, 2000
- [43] 野崎大地:筋活動レベルは関節トルクに応じてどのように調節されているのか?—二関節筋の存在が意味すること—. バイオメカニクス研究, Vol. 9, No.1, 3-9, 2005
- [44] 阪本孝男:実践陸上競技—フィールド編—. 日本陸上競技連盟編, 大修館書店, 25-49, 1990
- [45] 関子浩二, 永原隆, 石井泰光:スプリントパフォーマンスの向上に対するプライオメトリックスの可能性. スプリント研究, 17, 21-31, 2007
- [46] 金高宏文, 渡壁史子, 松村勲, 瓜田吉久:やり肘痛を持つ大学女子・やり投げ選手の投動作の改善過程—走高跳の踏切練習を手がかりにした肘痛を発生しない投げ動作創発への取り組み—. スポーツパフォーマンス研究, 1, 94-109, 2009
- [47] 黒須崇仁, 植田恭史:三段跳の競技レベル・跳躍タイプ別にみた意識. 東海大学紀要, 体育学部, 37, 47-53, 2007
- [48] 尾縣貢:スポーツ技術と身体能力. 体育の科学, Vol.54, No.2, 104-107, 2004
- [49] 金洪兵:三段跳に関する科学的研究について. 中京大学体育学論業, 35-1, 75-85, 2003
- [50] Bing Yu, James G. Andrews: The Relationship Between Free Limb Motions and Performance in the Triple Jump. JOURNAL OF APPLIED BIOMECHANICS, 14, 223-237, 1998
- [51] A. LEES, J. ROJAS, M. CEPERO, V. SOTO, M. GUTIERREZ: How the free limbs are used elite high jumpers in generating vertical velocity. Ergonomics, 43 (10), 1622-36, 2000
- [52] 村木征人:三段跳の運動構造と技術の進化. 東京女子体育大学紀要, 6, 34-47, 1971
- [53] 青山清英, 越川一紀, 青木和浩, 森長正樹, 吉田孝久, 尾縣貢:国内一流走幅跳選手におけるパフォーマンスに影響を与える質的要因と量的要因の関係に関する事例的研究—選手の自己観察内容とバイオメカニクスの分析結果の関係から—. 体育学研究, 54, 197-212, 2009
- [54] 村木征人:Triple Jumpにおける効果的Limb Action. Swing Typeの運動に着目して. 東京女子体育大学紀要, 5, 96-106, 1970

- [55] PHILIP GRAHAM-SMITH, ADRIAN LEES : A three-dimensional kinematic analysis of the long jump take-off. *Journal of Sports Sciences*, 23 (9), 891-903, 2005
- [56] Bing Yu, James G. Hay : Angular Momentum and Performance in the Triple Jump: A Cross-Sectional Analysis. *JOURNAL OF APPLIED BIOMECHANICS*, 11, 81-102, 1995

謝辞

本研究及び本論文の作成を進めるにあたり、終始丁寧な御指導を頂いた伊坂忠夫教授、吉岡伸輔助教に心より感謝の意を表します。

また、本研究に対し、多くのご助言を頂きました栗原俊之助手、大塚光雄助手、大阪体育大学（学術振興会所属）の國部雅大氏、応用スポーツ科学領域の先生方、屋外実験において予備実験・本実験の際にご協力いただいた株式会社ナックイメージテクノロジーの方々、日々の研究活動や事務処理などにおいて、多くのお世話を頂いた秘書の奥村悦子氏に深く感謝いたします。

さらに、ご多忙にも関わらず快く被験者を引き受けてくださった立命館大学、天理大学、同志社大学、大阪大学、中京大学、大阪教育大学、京都教育大学、びわこ成蹊スポーツ大学の陸上競技部関係者の皆様、そしてなにより大掛かりな屋外実験に最後まで協力してくださった伊坂研究室の方々、立命館大学体育会陸上競技部の皆様に、厚くお礼申し上げます。

付録 床反力の推定値とフォースプレートの値の誤差

本付録では、フォースプレートを使用せずに推定した床反力と、実際にフォースプレートを用いて算出した床反力の値の誤差について述べる。

このことを検討するにあたって、フォースプレートから得た床反力と推定した床反力を、ドロップジャンプと三段跳（ホップからステップ）について、それぞれ比較した（図 1, 図 2）。全体的に、モデルから推定した床反力は、フォースプレートから得た床反力とよく一致しており、ピーク値においても誤差はわずか5%以内の範囲であった。

このことから、本研究で用いたモデルは妥当であると判断した。

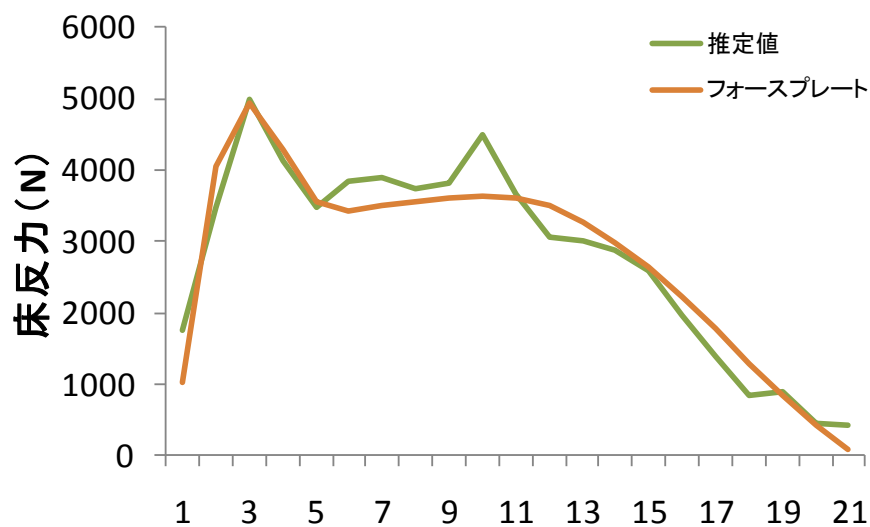


図 1 ドロップジャンプにおけるフォースプレートからの床反力と推定した床反力

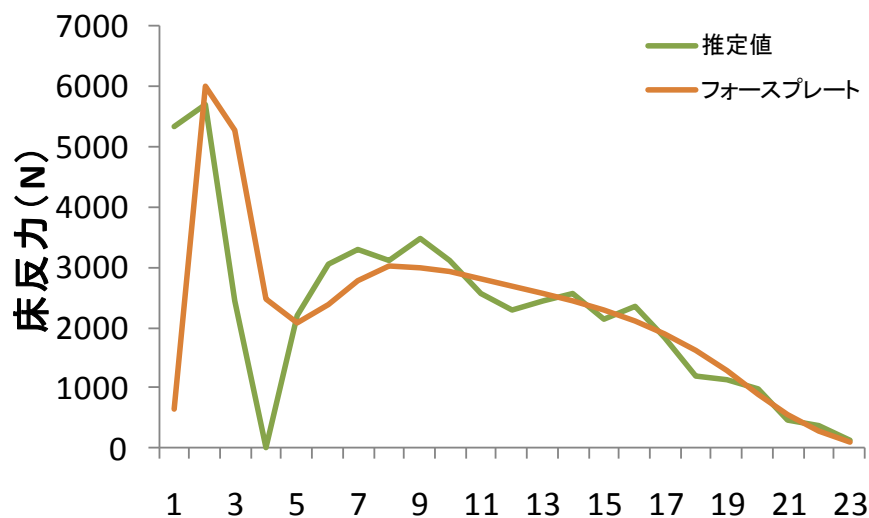


図 2 三段跳（ホップからステップ）におけるフォースプレートからの床反力と推定した床反力