

両脚および片脚ジャンプ着地動作における下肢筋活動開始時間の違い

佐々木理恵子 浦辺幸夫 藤井絵里 松林善人 小川洋介

目 次

要約	1
I. 緒言	2
II. 方法	3
III. 結果	6
IV. 考察	10
V. 謝辞	12
VI. 参考文献	13

両脚および片脚ジャンプ着地動作における下肢筋活動開始時間の違い

佐々木理恵子 浦辺幸夫 藤井絵里 松林善人 小川洋介

要約

【背景】ジャンプ着地動作は、足関節捻挫や膝前十字靱帯損傷などスポーツ外傷の生じやすいスポーツ動作のひとつである。そのため、スポーツ外傷予防の観点からこれまでに多くの研究が行われてきた。これまでに行われてきた研究をみると、ジャンプ着地時の下肢アライメントやその際の下肢筋の活動に焦点を当てたものが多く、下肢筋の活動がいつ始まるかについての検討はされていない。加えて、ジャンプ着地動作肢位は事前に課題動作として両脚もしくは片脚のいずれかに指定されていることが多く、ジャンプ着地動作途中に着地肢位が指定された研究は少ない。本研究では、実際のスポーツ動作を考慮し、ジャンプ着地動作開始後に着地肢位を指定することで、事前に着地肢位をして指定した着地動作との筋活動開始時間の違いを示すことを目的とした。

【対象と方法】健康な大学生 8 名を対象とした。40cm 台からのジャンプ着地動作を行い、事前に着地肢位を両脚か片脚に指定した着地動作と、着地動作開始後に視覚刺激にて着地肢位を両脚か片脚に指定する着地動作を行った。内側広筋、外側広筋、半膜様筋、大腿二頭筋の筋活動を筋電図で計測し、各着地動作の 4 筋の活動開始時間の差および着地肢位の指定の有無による各筋の活動開始時間の差を比較した。

【結果】全ての着地動作で半膜様筋と大腿二頭筋の筋活動が内側広筋や外側広筋の筋活動より先行して生じていた。ジャンプ着地動作開始後に着地肢位を視覚刺激にて指定した場合は、統計学的に有意差は認められないものの、筋活動開始時間が遅れる傾向があった。

【結論】ジャンプ着地など関節に衝撃が加わる際には、事前に筋活動を開始し衝撃に備えているとされる。ジャンプ着地動作時には、ハムストリングの筋活動が大腿四頭筋の筋活動よりも先行して生じることで、衝撃に備えている。ジャンプ着地動作開始後に着地肢位が指定されることで筋活動開始時間が遅れると、衝撃に備えることができず外傷の発生のリスクとなる可能性がある。

I. 緒言

ジャンプ着地動作は、スポーツ活動中に多く見られる動作であり、スポーツ外傷の生じやすい動作の一つである。なかでも膝前十字靱帯 (anterior cruciate ligament; ACL) 損傷は、男性と比べ女性で 2~8 倍多い発生率を有し^{1)~5)}、さらに 10 代の若年女性で頻発するスポーツ外傷であるとされている^{6), 7)}。加えて、いったん損傷するとスポーツ復帰するには再建術とその後のリハビリテーションが必要となるために、スポーツ復帰までには半年から一年近くもの時間が必要となる。再建術後には、再断裂や反対側の ACL 断裂が生じやすいとの報告もあり⁸⁾、加えて、二次的な半月板損傷が生じる危険性や⁹⁾、変形性膝関節症に移行する危険性もあるため^{10), 11)}、いかに断裂しないよう予防するかが重要となる。

これまで ACL 損傷予防目的のため、諸家らにより、ACL 損傷発生の原因にはいくつかあることが報告されてきた。例えば、ジャンプ着地動作時に膝が外反する knee-in toe-out と呼ばれる不良肢位をとりやすい下肢のアライメント不良が考えられている¹²⁾。加えて、膝関節の構造上、脛骨を前方へ牽引する働きをもつ大腿四頭筋の筋力が、脛骨を後方へ引くハムストリングの筋力よりも大きいこと^{13), 14)}も ACL 損傷の発生リスクとなりうると考えられている。ジャンプ着地動作時の下肢筋活動については、大腿四頭筋の筋活動量がハムストリングの筋活動量よりも大きくなることも原因として考えられているが^{15)~19)}、下肢筋の活動がいつ開始するのかについての検討は行われていない。ACL 損傷はジャンプ着地動作時に足部が床に接地してから 100ms 間に生じるという報告もあることから^{20)~22)}、筋がいつ活動を開始するのかを明らかにすることは重要である。さらに、実際のスポーツ活動中でのジャンプ着地肢位は、その時の周囲の状況に応じて着地肢位が決められる。しかしながら、実験室内で行われるジャンプ着地動作の研究では、事前にジャンプ着地肢位を指定して行われることがほとんどである。そのため、本研究では、ジャンプ着地動作を行う前にあらかじめ着地肢位を両脚もしくは片脚に指定した着地動作時の筋活動開始時間と、ジャンプ着地動作開始後に着地肢位を視覚刺激にて両脚もしくは片脚に指定したジャンプ着地動作で、下肢の筋活動開始時間が異なるかを明らかにすることを目的に行った。

Ⅱ. 方法

1. 対象

本研究の対象は、特別な運動習慣がなく、かつ下肢に特別な疾患のない健康な成人女性 8 名とした。年齢は 21.1 ± 1.5 歳、身長は 160.8 ± 8.0 cm、体重 50.6 ± 1.5 kg であった。

2. 実験方法

課題動作は、40cm 台からのジャンプ着地動作とした (Fig. 1)。まず、課題 1 としてあらかじめジャンプ着地肢位を両脚着地もしくは片脚着地いずれかの着地肢位に指定した着地動作 (事前指定あり両脚着地、事前指定あり片脚着地)、課題 2 としてジャンプ着地動作開始後に、着地肢位を両脚もしくは片脚のいずれの着地動作を行うのかを指定した着地動作とした (事前指定なし両脚着地、事前指定なし片脚着地)。課題 1 のジャンプ着地動作は両脚および片脚着地をそれぞれ 3 回ずつ行った。課題 2 の着地動作は、両脚もしくは片脚着地動作をランダムにそれぞれ 3 回ずつになるように行った。課題 2 の着地肢位の指定は、対象の前方に設置した LED ランプが、ジャンプ着地動作開始後に点灯すれば片脚着地、点灯しなければ両脚着地動作とした。LED ランプは、同一の検者が視覚的にジャンプ着地動作が開始したと判断した時点でスイッチを押し、点灯させた。対象には、いずれの課題動作も 40cm 台からの踏み切り時に上方へ跳躍することなく、台の前方へ降りるようなジャンプ着地動作を行うように口頭で指示を与え、対象間のジャンプ高を統一させた。着地後に姿勢を保持できずに足部位置が移動した試行は除外し、成功した試技を採用した。

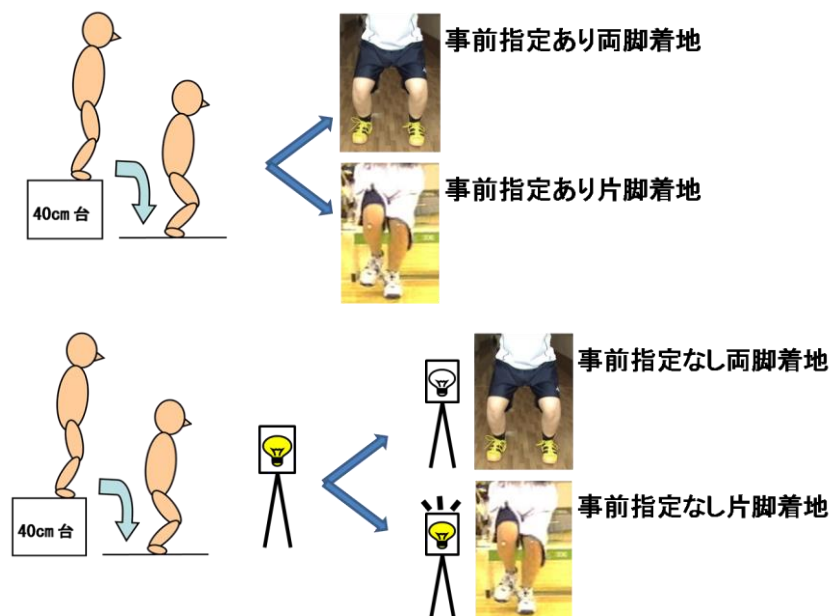


Fig.1 課題動作の設定

着地肢位およびジャンプ着地動作前にあらかじめ着地肢位の指定の有無により、4 種の異なる着地動作を課題動作とした。

3. 筋活動の測定方法

ジャンプ着地動作時に、40cm 台の台上での足尖離地から床面への足尖接地までに生じた下肢筋の活動を表面筋電図(P-EMG plus、追坂電子機器)を用いてサンプリング周波数 1000Hz にて計測した。記録用電極は、生体用表面電極(ブルーセンサ、Ambu A/S)を使用した。双極誘導方を用い、電極中心間距離は 30mm とした。被験筋は全ての着地動作で、大腿四頭筋から内側広筋および外側広筋の 2 筋、ハムストリングから半膜様筋と大腿二頭筋の 2 筋の合計 4 筋とした。電極は Delagi らの方法を参考にして貼付し²³⁾、左下肢の筋活動を計測した。事前に皮膚表面を皮膚前処理剤(スキンピュア、日本光電株式会社)で十分に研磨し、アルコール綿で清拭した。

筋活動開始時間は、台上からの足尖離地後 100ms 間の筋活動を全波整流した波形を基準とし、床面への足尖接地前に、筋活動の振幅が基準の平均+3SD を越えた地点を筋活動開始地点と定義した(Fig. 2)。足尖離地および足尖接地は、左足部母趾球にフットスイッチ(DKH 社)を貼付し判定した。各ジャンプ着地動作は足尖離地から足尖接地までを 100%と基準化し、足尖離地後何%の地点で筋の活動が開始するのかを求めた。

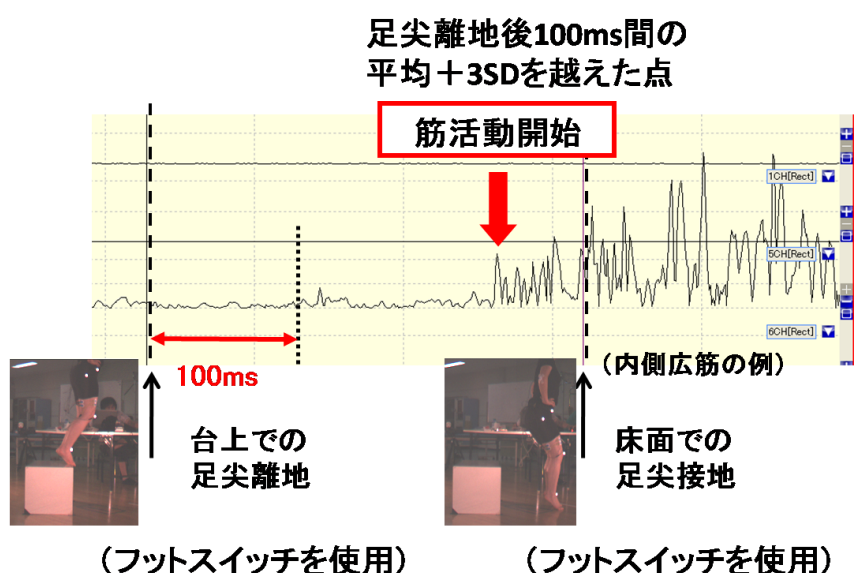


Fig.2 筋活動開始時間

足尖離地後 100ms 間の波形を基準とし、足尖接地前に基準の振幅平均+3SD を越えた地点を筋活動開始時間と定義した

4. 統計解析

事前指定あり両脚着地および片脚着地、事前指定なし両脚着地および片脚着地の各ジャンプ着地動作における 4 筋の活動開始時間の差は一元配置分散分析にて検定し、有意差のある項目間では多重比較検定 (Scheffé's F test) を行った。加えて、事前指定あり両脚着地と事前指定あり片脚着地の 2 動作間での 4 筋の活動開始時間の差、事前指定なし両脚着地と事前指定なし片脚着地の 2 動作間での 4 筋の活動開始時間の差、事前指定ありおよび事前指定なしの両脚着地動作間の 4 筋の活動開始時間の差、事前指定ありおよび事前指定なしの片脚着地動作間の 4 筋の活動開始時間の差の検定には、それぞれの筋において対応のある t 検定を用いた。いずれも危険率 5%未満を有意とした。

Ⅲ. 結果

1. 事前指定あり両脚着地と事前指定あり片脚着地の筋活動開始時間について

事前指定あり両脚着地は、 $382.4 \pm 87.3\text{ms}$ でジャンプ着地動作が行われていた。事前指定あり両脚着地において、4 筋の活動開始時間に有意な差は認められなかったが、大腿四頭筋と比べ、ハムストリングが 5～7%早く活動を開始していた (Fig. 3)。

事前指定あり片脚着地は、 $429.0 \pm 98.9\text{ms}$ で行われ、4 筋の活動開始時間に有意差はみられなかったが、大腿四頭筋と比べハムストリングでは 1～2%早く活動を開始していた (Fig. 4)。

両脚と片脚を比較すると、内側広筋と外側広筋がいずれも片脚着地動作時に有意に活動開始時間が早期化していた ($p < 0.05$)。

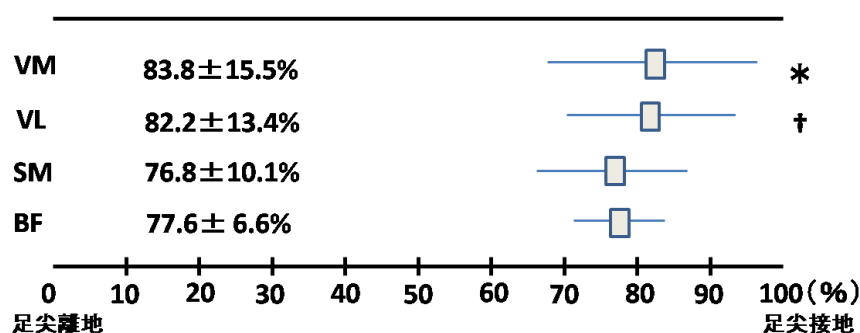


Fig.3 事前指定あり両脚着地の筋活動開始時間

着地動作は $382.4 \pm 87.3\text{ms}$ で行われていた。4筋の活動開始時間に有意な差は認められなかったが、大腿四頭筋と比較してハムストリングの筋活動が 5～7%早く活動を開始していた。

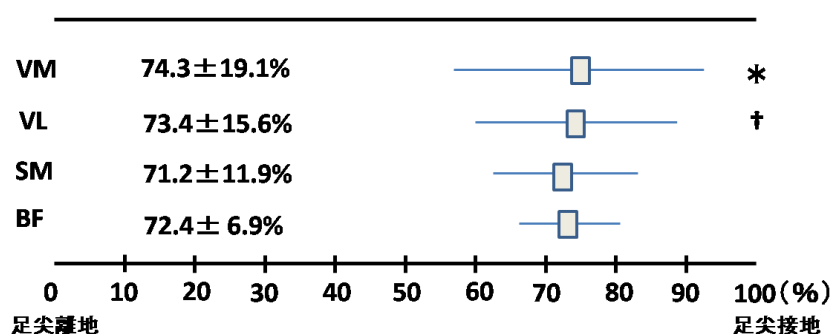


Fig.4 事前指定あり片脚着地の筋活動開始時間

着地動作は $429.0 \pm 98.9\text{ms}$ で行われていた。4筋の活動開始時間に有意な差は認められなかったが、大腿四頭筋と比較してハムストリングの筋活動が 1～2%早く活動を開始していた。

2. 事前指定なし両脚着地と事前指定なし片脚着地の筋活動開始時間について

事前指定なし両脚着地は、 $400.4 \pm 67.2\text{ms}$ で行われていた。外側広筋は、半膜様筋と大腿二頭筋と比較して筋活動が有意に遅れて生じていた (Fig. 5、 $p < 0.05$)。

事前指定なし片脚着地は、 $407.8 \pm 68.4\text{ms}$ で行われており、4 筋の活動開始時間に有意な差は認められなかった。しかしながら、ハムストリングが大腿四頭筋と比較して 6～11%早く活動を開始していた (Fig. 6)。

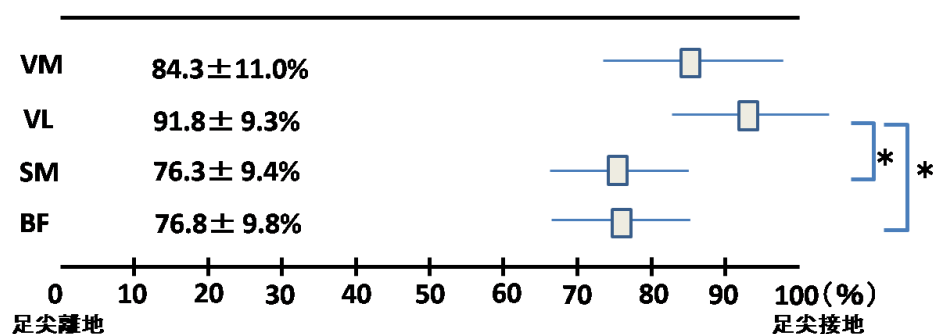


Fig.5 事前指定なし両脚着地の筋活動開始時間

着地動作は $400.4 \pm 67.2\text{ms}$ で行われていた。外側広筋が半膜様筋および大腿二頭筋と比較して有意に筋活動開始時間が遅延していた。

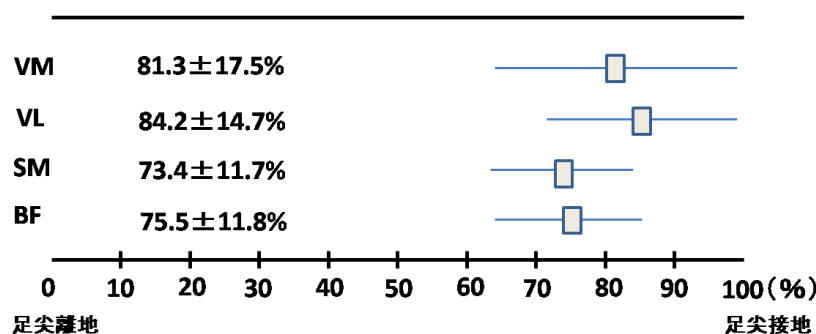


Fig.6 事前指定なし片脚着地の筋活動開始時間

着地動作は $407.8 \pm 68.4\text{ms}$ で行われていた。4 筋の活動開始時間に有意な差は認められなかったが、ハムストリングの筋活動が大腿四頭筋と比較して 6～11%早く生じていた。

3. 事前指定あり両脚着地と事前指定なしの両脚着地の筋活動開始時間について

事前指定の有無で比較すると、事前指定なしの場合、統計学的に有意な差は認められないものの、大腿四頭筋の内側広筋で 1%程度、外側広筋で 9%程度の活動開始時間が遅れる傾向があった。ハムストリングの活動開始時間は事前指定の有無では違いが見られなかった (Table. 1)。

Table. 1 事前指定ありと事前指定なしの両脚着地の筋活動開始時間

4 筋でいずれも事前指定の有無による筋活動開始時間の有意差は認められなかったが、事前指定がない場合、筋活動が 1～9%程度遅れる傾向があった。

両脚着地		筋活動開始 (%)
VM	事前指定あり	83.8 ± 15.5
	なし	84.3 ± 11.0
VL	事前指定あり	82.2 ± 13.4
	なし	91.8 ± 9.3
SM	事前指定あり	76.8 ± 10.1
	なし	76.3 ± 9.4
BF	事前指定あり	77.6 ± 6.6
	なし	76.8 ± 9.8

4. 事前指定あり片脚着地と事前指定なしの片脚着地の筋活動開始時間について

事前指定の有無で比較すると、両脚の場合と同様に、事前指定なしの場合も統計学的に有意差は認められないものの、内側広筋で7%程度、外側広筋で11%程度、半膜様筋で2%程度、大腿二頭筋で3%程度遅れる傾向が認められた (Table. 2)。

Table. 2 事前指定ありと事前指定なしの両脚着地の筋活動開始時間

4 筋でいずれも事前指定の有無による筋活動開始時間の有意差は認められなかったが、事前指定がない場合、筋活動が 2～11%程度遅れる傾向があった。

	片脚着地	筋活動開始 (%)
VM	事前指定あり	74.3 ± 19.1
	なし	81.3 ± 17.5
VL	事前指定あり	73.4 ± 15.6
	なし	84.2 ± 14.7
SM	事前指定あり	71.2 ± 11.9
	なし	73.4 ± 11.7
BF	事前指定あり	72.4 ± 6.9
	なし	75.5 ± 11.8

IV・考察

本研究は、ジャンプ着地動作時の下肢筋活動開始時間を、事前に着地肢位を指定したジ着地動作とジャンプ着地動作開始後に着地肢位を指定した着地動作で違いを明らかにするために行った。DeMont ら (2004) は、関節に負荷が加わる際には、あらかじめ筋活動を開始することで関節に加わる衝撃から関節を保護していると報告している¹⁶⁾。さらに、筋放電が生じてから、筋力が得られるまでには時間を要するという報告があることから²⁴⁾、ジャンプ着地動作時に着地前から下肢筋の活動が開始することが重要である。本研究の結果から、全てのジャンプ着地動作でハムストリングの筋活動がジャンプ着地動作の 70% 台で活動を開始し、大腿四頭筋はハムストリングの活動開始後に筋活動が開始され、大腿四頭筋の筋活動よりも早くハムストリングの筋活動が開始する傾向が認められた。ACL 損傷の危険因子に注目すると、一般に大腿四頭筋の収縮は脛骨を大腿骨に対して前方へ牽引する作用を有するため ACL に負荷をかけ、そのいっぽうで、ハムストリングは脛骨を後方へ牽引するため、ACL の保護に役立つとされている^{13), 14)}。そのため、ACL 損傷の発生頻度の高いジャンプ着地動作時にハムストリングの筋活動が大腿四頭筋の筋活動よりも早く活動を開始することは、ACL 損傷予防およびジャンプ着地動作時の膝関節の保護には重要な役割を果たしていると考えられる。

着地動作前にあらかじめ着地肢位を指定した場合、両脚着地と片脚着地では片脚着地動作時に大腿四頭筋の筋活動が早く生じていることが明らかとなった。加えて、筋活動が開始されてから十分な筋力が得られるまでには時間を要することからも^{22) - 24)}、両脚着地の場合と比較すると、片脚着地では、下肢関節に加わる衝撃がより増大するため、両脚着地よりも片脚着地で筋の活動開始時間が早まることは、外傷予防の観点からも、関節を保護する上で必要となつたのであろう。しかしながら、ハムストリングの筋活動開始時間は有意な早期化は認められなかった。ACL の保護には、ハムストリングの収縮力が重要になる。そのため、本研究の結果のように、大腿四頭筋の筋活動開始時間が早期化する一方で、ハムストリングの筋活動開始時間に変化がみられなかったことは、片脚ジャンプ着地時に膝関節に加わる衝撃に対応することができなくなり、ACL 損傷発生の危険性が高まる可能性が示唆される。本研究実施中に、もちろん ACL 損傷が生じることはなかったが、ジャンプ着地時に大腿四頭筋の筋活動開始時間が早期化しても、ハムストリングの活動開始時間が極端に遅延するようなことがあれば、ジャンプ着地時に膝関節に加わる衝撃に備えることができず、受傷する可能性があるとも考えられる。

ジャンプ着地動作開始後に着地肢位の指定を行う場合、両脚着地と片脚着地を比較すると、両脚着地において大腿四頭筋の外側広筋の筋活動開始時間がハムストリングの筋活動よりも遅れて生じていた。さらに、着地動作前にあらかじめ着地肢位を指定している着地動作と着地動作開始後に着地肢位を指定した着地動作では、統計学的に有意差は認められなかったものの、両脚の場合は大腿四頭筋の筋活動が、片脚の場合には大腿四頭筋およびハムストリングの筋活動がそれぞれ遅れる傾向が認められた。これは、事前に着地肢位を準備してジャンプ動作を行うことと比べて、着地肢位が不明で、ジャンプ着地動作開始

後に着地肢位が視覚刺激にて指定されるため、視覚刺激を認知してから着地肢位になるように身体の調整を行う必要があるため、遅れが生じたと考えられる。しかしながら、本研究ではジャンプ着地動作時に事前に着地肢位の指定がある着地動作とジャンプ着地動作開始後に着地肢位を指定される着地動作での筋活動開始時間に明確な違いを見出すことはできなかった。

本研究の限界と今後の展望には以下の3点が挙げられる。まず第一に、今回の研究では着地肢位を決定する視覚刺激を検者が操作していたため、視覚刺激を与える時間が厳密に統一できていないことが挙げられる。ジャンプ着地動作開始後のどの時点での視覚刺激であれば、対象が指定どおりのジャンプ着地肢位を取れるのか、またどの地点の視覚刺激から対応できなくなるのかを今後検討していきたい。第二に、今回の研究は、対象に対して、ジャンプ着地動作開始後にLEDライトが点灯すれば片脚着地、点灯しなければ両脚着地という指示を与えた上で実施した。そのため、対象はLEDライトが点灯するかもしれないという予測の元にジャンプ着地動作を開始していた。すなわち、両脚着地を予測してジャンプ着地動作を行った者や片脚着地を予測してジャンプ着地を行った者が対象によって異なっていた。その結果、予測通りに着地動作が行えた試技と予測と異なっていたが着地動作が行えた試技が混在し、心理的な影響を取り除けず、成功した試技であっても対象によっては予測通りの試技と予測に反していたが成功した試技を同じものとして解析した可能性がある。第三に、本研究ではジャンプ着地動作後に足部の移動のない成功した試技を採用して、下肢の筋活動開始時間を計測したが、ACL損傷の危険性を考えると、着地動作後に足部が移動してしまったような失敗した試技でよりACL損傷の危険性が高まるとも考えられる。よって、今後は成功した試技のみではなく、失敗した試技の筋活動開始時間にも注目したいと考える。

ACL損傷は若年女子スポーツ選手にとって最も避けたい膝関節外傷のひとつである。受傷機転となるジャンプ着地動作時の下肢の筋活動開始時間が、着地肢位や着地肢位が決定されるタイミング、その他の要因によって影響を受けることが明らかになることで、今後のACL損傷予防トレーニング内容を検討する際に役立つと考える。女子スポーツ選手の活躍が目覚ましい昨今、女子スポーツ選手の更なるパフォーマンス向上のために、研究を継続していきたい。

V.謝辞

稿を終えるに当たり、本研究にご支援を賜りました上月スポーツ・教育財団へ心から感謝の意を表します。

VI.引用文献

- 1) Griffin, L.Y., et al.: Noncontact anterior cruciate ligament injuries. Risk factors and prevention strategies. J. Am. Acad. Orthop. Surg. 8(3): 141-150, 2000
- 2) Arabdt, E., et al.: Knee injury patterns among men and women in collegiate basket ball and soccer. NCAA data and review of literature. Am. J. Sports Med. 23(6): 694-701, 1995
- 3) Gwinn, D. E., et al.: The relative incidence of anterior cruciate ligament injury in men and women at the United States Naval Academy. Am. J. Sports Med. 28(1): 98-102, 2000
- 4) Garric, J. G., et al.: Anterior cruciate ligament injuries in men and women. How common are they? Prevention on noncontact ACL injury. American Academy of Orthopedic Surgeons 1-9, 2000
- 6) de Loës M., et al.: A 7-year study on risks and costs of knee injuries in male and female youth participants in 12 sports. Scand. J. Med. Sports 10(2): 90-97, 2000
- 7) Shea K. G., et al.: Anterior cruciate ligament injury in pediatric and adolescent soccer players. J. Pediatr. Orthop. 24(6): 623-638, 2004
- 8) 浦辺幸夫: 膝前十字靱帯治療経験と損傷予防の視点. Sportsmedicine 72: 32-34, 2005
- 9) Segawa H., et al.: Long-term results of non-operative treatment of anterior cruciate ligament injury. Knee 8(1): 5-11, 2001
- 10) McDaniel W. J., et al.: Untreated ruptures of the anterior cruciate ligament. A follow-up study. J. Bone Joint Surg. Am. 62(5): 696-705, 1980
- 11) Dunn W. R., et al.: The effect of anterior cruciate ligament reconstruction on the risk of knee reinjury. Am. J. Sports Med. 32(8): 1906-1914, 2004
- 12) 加賀谷善教, 他: 高校バスケット選手のメディカルチェックの性差. 膝外反量とその要因に関する検討. 日本臨床スポーツ医学会誌 17(2): 353-361, 2009
- 13) Markolf K. L., et al.: In vivo knee stability. A quantitative assessment using an instrumented clinical testing apparatus. J. Bone Joint Surg. Am. 60(5): 664-674, 1978
- 14) Solomonow M., et al.: The synergistic action of the anterior cruciate ligament and thigh muscles in maintaining joint stability. Am. J. Sports Med. 15(3): 207-213, 1987
- 15) Moul J. L., et al: Differences in selected predictors of anterior cruciate ligament tears between male and female NCAA division I collegiate basketball players. J. Athl. Train. 33(2): 118-121, 1998

- 16) DeMont R. G., et al.: Effect of sex on preactivation of the gastrocnemius and hamstring muscles. *Br. J. Sports Med.* 28(2): 120–124, 2004
- 17) DeMorat G., et al.: Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am. J. Sports Med.* 32(7): 477–482, 2004
- 18) Urabe Y., et al.: Electromyographic analysis of the knee during jump landing in male and female athletes. *Knee* 12(2): 129–134, 2005
- 19) Hewett T. E., et al.: Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am. J. Sports Med.* 33(4): 492–501, 2005
- 20) Bodegain J. A., et al.: Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics* 23(6): 573–378, 2000
- 21) Decker M. J., et al.: Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clin. Biomech.* 18(7): 662–229, 2003
- 22) Schmitz R. J., et al.: Sex differences in lower extremity biomechanics during single leg landings. *Clin. Biomech (Fristol, Avon)* 22(6): 681–687, 2007
- 23) Delagi E. F., et al.: Anatomical guide for the electromyographer. Charles C Thomas Publisher, Springfield, pp 170–171, 184–185, 192–195, 1981
- 24) Zhou S., et al.: Effects of fatigue and sprint training on electromechanical delay of knee extensor muscles. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physio.* 72(5–6): 410–416, 1996