

ジュニア女子バドミントン選手の 片脚着地特性と発育に伴う体格変化による影 響—片脚ドロップ着地テストと試合中の体幹加 速度に着目した短期縦断検討—

原 著

Characteristics of single-leg landing in junior female badminton players and the effects of growth-related physical changes: a short-term longitudinal study focused on the single-leg drop landing test and trunk acceleration in match situations

笹木正悟*1, 永野康治*2, 市川 浩*3

キー・ワード : single-leg landing, trunk acceleration, growth-related changes
片脚着地, 体幹加速度, 発育変化

【要旨】 本研究はジュニア期の発育に伴い、女子バドミントン選手の片脚着地特性がラボテストおよび試合場面でどのように変化するかを検討することを目的とした。さらに、発育に伴う体格の変化が、個人の片脚着地特性の変化と関係するのかが検証した。ジュニア女子バドミントン選手7名を対象とし、1年以上の観察期間を空けて2回の身体計測、片脚ドロップ着地テストを実施した。また、加速度センサを用いてバドミントン試合時の体幹加速度を計測し、合成加速度が4Gを超える高加速度着地の発生頻度および成分加速度の大きさを算出した。観察期間前後において身長、体重およびbody mass index (BMI) は増加した一方で、片脚ドロップ着地の床反力およびcenter of pressure (COP) 軌跡長、試合時の体幹加速度に有意差はみられなかった。一方で、2回の測定値同士の関係性をみると、片脚着地テストにおける鉛直最大床反力、出現時間、loading rate、試合における高加速度着地の発生頻度、成分加速度において強い相関関係がみられた。さらに、体重変化と高加速度発生頻度の変化量、BMI変化とCOP軌跡長の変化量が有意な相関を示すことが確認できた。このことから、ジュニア期におけるラボテストおよび試合場面の片脚着地は「個人の特異性」に強く依存する一方で、体格変化自体が着地特性に影響を及ぼす場合があると考えられた。

緒言

ジュニア期の外傷・障害予防は、スポーツ医学における重要な課題の1つである。ジュニア期は身長・体重といった身体成熟が続く時期であり、発育段階によって身体各部の長さや重さの比率も

異なる¹⁾。そのため、生物学的な身体成熟と変化が、スポーツ活動時の動作や力学特性にも影響を与える可能性が考えられる。

スポーツ外傷・障害の予防を考えるうえで「メカニズムの理解」は重要なプロセスである。メカニズムを理解するためには、全身や局所のバイオメカニカルな特徴だけでなく、競技に特化したプレー状況、自身と相手との相互作用から作られるアクションなどを加味しながら、外傷・障害の発生につながる誘発事象を整理していくことが必要

*1 東京有明医療大学保健医療学部

*2 日本女子体育大学体育学部健康スポーツ学科

*3 新潟医療福祉大学健康科学部健康スポーツ学科

である²⁾。そのため、実験室で得られる基礎データに加えて、実際のスポーツ現場で生じるリアリティの高い場面や動作に目を向けることは、予防に向けたヒントやエビデンスの構築につながる。

膝前十字靭帯 (ACL) 損傷は思春期の女子に急増する重症度の高い下肢外傷の1つであり、本邦においては高校2年生が発生頻度のピークとなっている³⁾。近年の研究では、同年代のジュニア女子選手であっても、スポーツ種目によって誘発事象となる相互作用 (接触の有無) やアクション (着地や方向転換) は異なり⁴⁾、競技特性が受傷メカニズムに強く影響することが確認されている。特に、「ネット型」球技である女子バレーボールにおいては95%が非接触 (Non-contact ; 90/100件) もしくはインダイレクト (Indirect contact ; 5/100件) によるACL損傷であり、他の「ゴール型」球技や「武道」種目とは異なる傾向を示している⁴⁾。つまり、相手コートに侵入することなく、ネットを挟んで攻防を楽しむ「ネット型」球技において相手との偶発的な接触によるACL損傷は少なく、個人の動作やプレー特性が受傷メカニズムに関与すると考えられる。

「ネット型」球技に分類されるバドミントンにおいても、女子選手は中学生から高校生にかけてACL損傷の発生頻度が増加している³⁾。特に、バドミントンでは「オーバーヘッドストローク後の片脚着地」がACL損傷の好発場面として報告されており⁵⁾、こうした年代における個人の着地特性の変化が、ACL損傷に影響を及ぼす可能性も推察できる。女子ジュニア選手のラボテストでは、大きな床反力を伴うスティッフな着地様式がACL損傷リスクを増大させると報告されている⁶⁾。また、バドミントンの試合で発生する「オーバーヘッドストローク後の片脚着地」について、思春期前後⁷⁾ や中高生⁸⁾ では身体に受ける高衝撃頻度は異なる傾向を示している。しかしながら、これらは横断データによる研究事例であり、同一人物の着地特性がジュニア期にどのように変化するかといった縦断的検討はなされていない。特に、バドミントンの競技特性を加味した「メカニズム」を考えるうえで、試合中の着地特性に目を向けて変化を検証することは意義深いと考える。

そこで本研究はジュニア期の発育に伴い、女子バドミントン選手の片脚着地特性がラボテストおよび試合場面でどのように変化するのか検討する

ことを目的とした。さらに、発育に伴う体格の変化が、個人の片脚着地特性の変化と関係するのか検証することを目的とした。

■ 方 法

1. 対象

過去に手術歴がなく、競技歴4年以上を有する健常なジュニア女子バドミントン選手7名を対象とした。対象者のラケット保持側 (利き手) は全員右手であり、ボールを蹴りやすい足 (利き足) は全員右足であった。対象者ならびに保護者には事前に研究の目的、方法、倫理的配慮等に関する説明を十分に行い、文章にて参加の同意を得られた者を対象者とした。なお、本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、東京有明医療大学倫理審査委員会の承認を得て実施した (承認番号: 有明医療大倫理承認第0219号)。

2. データ収集

全ての対象者には、1年以上の観察期間 (417 ± 46日) を空けて、以下の測定をそれぞれ2回ずつ (test-1, test-2) 実施した。1回目の測定時 (test-1) における対象者の年齢は 14.6 ± 1.8 歳、2回目の測定時 (test-2) は 15.7 ± 1.7 歳であった。

1) 身体計測

身長 (Seca 213) および体重 (TANITA HD-661) を計測し、そこから body mass index (BMI) を算出した。また、片脚ドロップ着地テストにおける center of pressure (COP) 軌跡長を正規化するため、両足の足長を計測した。

2) 片脚ドロップ着地テスト

対象者には裸足かつ両手を脇の下に組んだ状態で高さ20cmの台から片脚で前方にジャンプし、フォースプレート (SS-FP40UD, 1000-Hz) 中央部に同脚で着地後、5秒間の片脚立位を保持するよう指示を与えた。先行研究⁹⁾ で用いられている「動的バランスシステム」音声ガイダンスに従って行い、対象者は左右それぞれ6回の計測 (試技間のインターバル: 8秒間) を実施した。着地後5秒間の片脚支持を保てないこと、立位保持のため支持基底面を移動させること、脇の下から腕組を外すことは失敗試技とし、再試行を実施した。床反力データから個人特異性が高いと考えられている¹⁰⁾。(a) 鉛直最大床反力、(b) 鉛直最大床反力の出現時間、(c) loading rate (鉛直最大床反力/同出現時間)、(d) 着地後0.02秒から0.2秒までのCOP

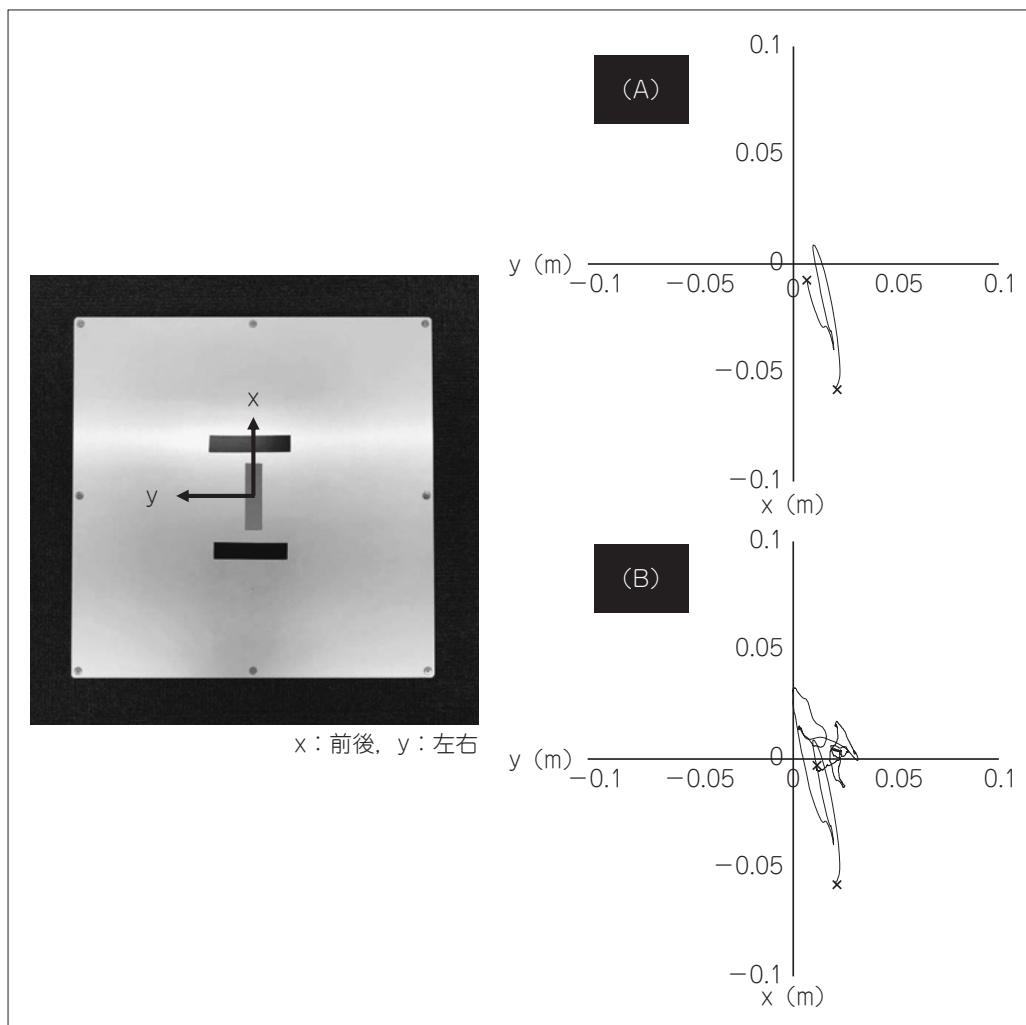


図1 COP軌跡
 (A) 着地後0.02秒から0.2秒までのCOP (軌跡長:0.156 m), (B) 着地後0.02秒から5秒までのCOP (軌跡長:0.437 m) の代表例を示す

軌跡長, (e) 着地後0.02秒から5秒までのCOP軌跡長(図1)を算出し, 左右合計12回の平均値を各個人の代表値とした. 各対象者によって異なる体格の影響を補正するため, 鉛直最大床反力は体重で, COP軌跡長は足長で正規化した. (a)~(e)の測定値は専用のソフトウェア(SS-FPSW01)から自動的にデータ算出され, 着地動作におけるフォースプレートへの接地は「鉛直床反力が10Nを越えた場合」と規定した. 予備調査として, 6回ずつの平均値を代表値として左右の比較(Wilcoxon符号付順位検定)を行った結果, 全ての項目について統計学的な有意差はないことを確認した.

3) 試合の体幹加速度

対象者の体幹上部背面に専用ベストを用いて3軸ワイヤレス加速度センサ(Sports Sensing WS

1201, 100-Hz)を装着し, シングルスゲーム(21ポイント先取, ラリーポイント制)を1試合(2ゲーム)実施した. 測定前には, 各軸を重力方向に向けた場合のセンサ加速度が「1G」となるよう設定および補正処理を行った. 上背部にセンサを装着することで, バドミントン試合中の体幹長軸に対する左右方向の加速度をx軸(A_x), 上下方向の加速度をy軸(A_y), 前後方向の加速度をz軸(A_z)として計測した(図2). また, 加速度と同時にプレー場面をデジタルビデオカメラ(Sony HDR-CX590V, 60-Hz)で撮影した. 加速度データとビデオ映像を同期させるため, 加速度の測定開始時に発光装置によるトリガ信号を出力し, ビデオカメラに記録した.

計測された成分加速度(A_x , A_y , A_z)から合成加速度($=\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$)を算出し, バドミン

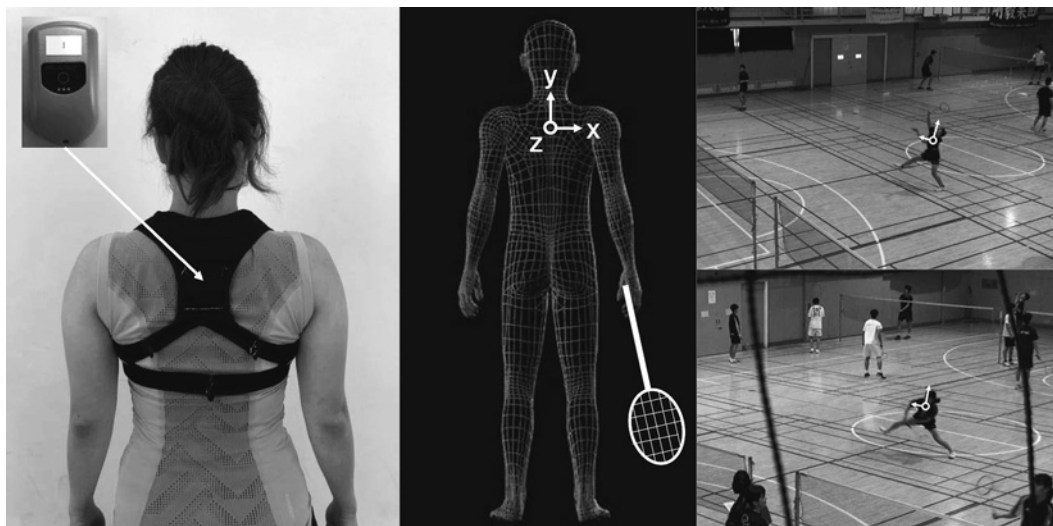


図2 加速度センサの装着位置と各軸成分加速度

トン試合中に合成加速度が「4G」を超えたプレーを先行研究^{7,8,11)}と同様に高加速度動作として抽出した。高加速度動作の場面を判定するため、カスタマイズされたタグ切りアプリケーション（株式会社スポーツセンシング社製）を使って合成加速度が4Gを越えた瞬間の時間を特定し、映像解析ソフトウェア（Dartfish Connect Plus 9.0）を用いて時間とビデオの同期作業を行った。本研究では、高加速度動作を10種類（①オーバーヘッドストローク後の片脚着地、②アンダーハンド/サイドストローク後の踏み込み、③スプリットステップ後の切り返し、④オーバーヘッドストローク前の踏みきり、⑤スプリットステップの予備動作、⑥切り返し、⑦スプリットステップ、⑧バックステップ、⑨ストップ、⑩その他）に分類し、高加速度動作の場面判定を行った。動作分類の判定は1名の検者によって行われたが、判定に迷った場面については複数の検者によるコンセンサスメーティングを実施した。判定された場面の中から合成加速度が4Gを超える「オーバーヘッドストローク後の片脚着地」を抽出し、発生頻度（1分間あたりの発生回数）および各軸の成分加速度の大きさを算出した。成分加速度の大きさについて「合成加速度4Gを超えるオーバーヘッドストローク後の片脚着地」で記録された成分加速度の平均値を各個人の代表値とした。

3. 統計処理

統計的検定量の算出には、IBM SPSS Statistics (ver.22) を用いた。2回の測定値の差 (test-1 vs

test-2) を比較するため Wilcoxon の符号付順位検定を行い、検定統計量 Z から効果量 (Effect size : ES[r]) を算出した。また、2回の測定値の関係性 (between test-1 and test-2) を検討するため、Pearson の積率相関係数を求めた。さらに、観察期間中の体格変化が片脚ドロップ着地テストおよび試合時の体幹加速度の変化と関係するのかが検討するために、2回の測定値の変化量 (test-2 - test-1) を用いて Pearson の積率相関係数を求めた。統計学的有意水準は5%未満とした。

結果

2回の測定 (test-1, test-2) における平均値および標準偏差を表1に示した。観察期間前後において、身長、体重、BMIは有意に増加していた ($p < 0.05$, $ES=0.89$)。しかし、片脚着地テストおよび試合時の体幹加速度における全ての指標について、統計学的な有意差はみられなかった。

2回の測定 (test-1, test-2) で実施された同一指標同士の関係性を表2に示した。片脚着地テストにおける鉛直最大床反力 ($r=0.874$, $p < 0.05$)、鉛直最大床反力の出現時間 ($r=0.897$, $p < 0.01$)、loading rate ($r=0.953$, $p < 0.01$) は、test-1 と test-2 の間で強い相関関係を示した。また、試合時の体幹加速度について、合成加速度 $> 4G$ となる片脚着地頻度 ($r=0.817$, $p < 0.05$, 図3)、その時の x-軸加速度 ($r=0.778$, $p < 0.05$)、y-軸加速度 ($r=0.916$, $p < 0.01$, 図4)、z-軸加速度 ($r=0.884$, $p < 0.01$) は、test-1 と test-2 の間で強い相関関係を示した。

表 1 観察期間前の比較 (test-1 vs test-2)

| | test-1 | test-2 | ES (r) | p-value |
|--------------------------|-----------|-----------|--------|---------|
| 身体計測 | | | | |
| 身長 [m] | 1.54±0.08 | 1.57±0.05 | 0.89 | <0.05 |
| 体重 [kg] | 45.9±8.9 | 50.5±7.7 | 0.89 | <0.05 |
| BMI [kg/m ²] | 19.1±2.5 | 20.4±2.1 | 0.89 | <0.05 |
| 片脚着地テスト | | | | |
| 鉛直最大床反力 [×BW] | 3.86±1.00 | 3.94±0.96 | 0.13 | 0.735 |
| 床反力出現時間 [ms] | 57.3±13.1 | 55.2±17.6 | 0.38 | 0.310 |
| Loading rate [N/s/BW] | 75.9±42.4 | 83.2±46.9 | 0.45 | 0.237 |
| COP 20ms-200ms [m/m] | 0.64±0.22 | 0.69±0.13 | 0.32 | 0.398 |
| COP 20ms-5s [m/m] | 2.65±0.21 | 2.43±0.32 | 0.70 | 0.063 |
| 試合の体幹加速度 | | | | |
| >4G 片脚着地頻度 [case/min] | 1.25±0.72 | 1.33±0.67 | 0.19 | 0.612 |
| 片脚着地 x-軸 加速度 [G] | 2.02±1.04 | 1.90±0.77 | 0.17 | 0.443 |
| 片脚着地 y-軸 加速度 [G] | 4.08±0.93 | 4.15±0.98 | 0.25 | 0.670 |
| 片脚着地 z-軸 加速度 [G] | 1.27±0.58 | 1.01±0.53 | 0.74 | 0.051 |

mean±SD, ES = Effect Size

表 2 観察期間前後の関係性 (between test-1 and test-2)

| | Correlation coefficients (r) | p-value |
|----------------|------------------------------|---------|
| 片脚着地テスト | | |
| 鉛直最大床反力 | 0.874 | <0.05 |
| 床反力出現時間 | 0.897 | <0.01 |
| Loading rate | 0.953 | <0.01 |
| COP 20ms-200ms | 0.634 | 0.126 |
| COP 20ms-5s | 0.733 | 0.061 |
| 試合の体幹加速度 | | |
| >4G 片脚着地頻度 | 0.817 | <0.05 |
| 片脚着地 x-軸 加速度 | 0.788 | <0.05 |
| 片脚着地 y-軸 加速度 | 0.916 | <0.01 |
| 片脚着地 z-軸 加速度 | 0.884 | <0.01 |

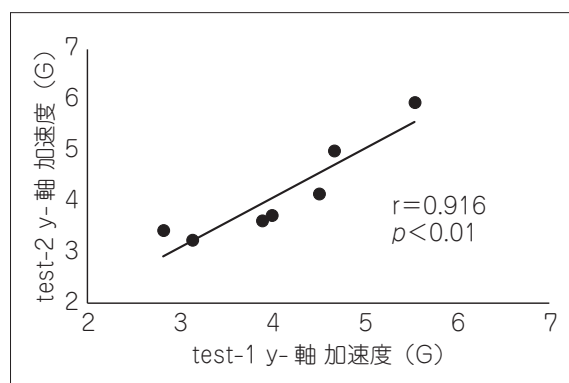


図 4 観察期間前後における y-軸成分加速度の関係

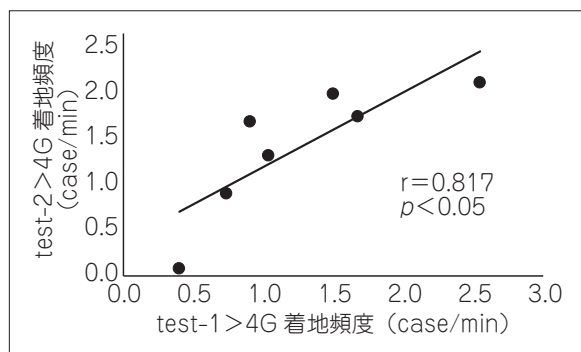


図 3 観察期間前後における合成加速度>4G 片脚着地頻度の関係

体格の変化量と片脚着地テストおよび加速度計測における各指標の変化量の相関係数を表 3 に示した。test-1 と test-2 における体重の変化量は、合成加速度>4G となる片脚着地頻度の変化量と負の相関を認めた ($r=-0.769, p<0.05$, 図 5)。また、BMI の変化量は片脚着地テストにおける COP 軌跡長 (着地後 0.02 秒から 0.2 秒まで) と正の相関を認めた ($r=0.762, p<0.05$, 図 6)。

■ 考 察

1) 観察期間前後の比較

2 回目 (test-2) の身長, 体重, BMI は 1 回目 (test-1) に比べて有意に大きかった。対象者の 1 回目測定時の年齢は平均 14.6 歳であり, 発育による体格変化が生じることは正常な現象と考える。全国平均の統計値を用いると, 女子では 12 歳以前

表3 体格の変化量と片足着地テストおよび加速度の変化量の相関係数

| Correlation coefficients (r) | 身長 | 体重 | BMI |
|------------------------------|--------|---------|--------|
| 片脚着地テスト | | | |
| 鉛直最大床反力 | 0.225 | 0.131 | 0.072 |
| 床反力出現時間 | -0.254 | 0.093 | 0.269 |
| Loading rate | 0.107 | -0.155 | -0.221 |
| COP 20ms-200ms | 0.162 | 0.605 | 0.762* |
| COP 20ms-5s | 0.214 | 0.416 | 0.421 |
| 試合の体幹加速度 | | | |
| >4G 片脚着地頻度 | -0.594 | -0.769* | -0.620 |
| 片脚着地 x-軸 加速度 | 0.091 | 0.245 | 0.154 |
| 片脚着地 y-軸 加速度 | -0.465 | -0.199 | 0.154 |
| 片脚着地 z-軸 加速度 | 0.330 | -0.067 | -0.365 |

* : $p < 0.05$

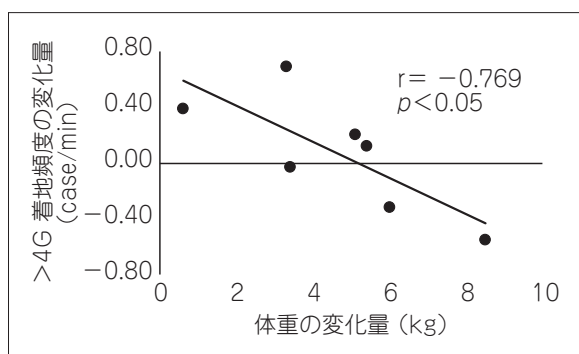


図5 体重変化量と合成加速度>4G着地頻度変化量の関係

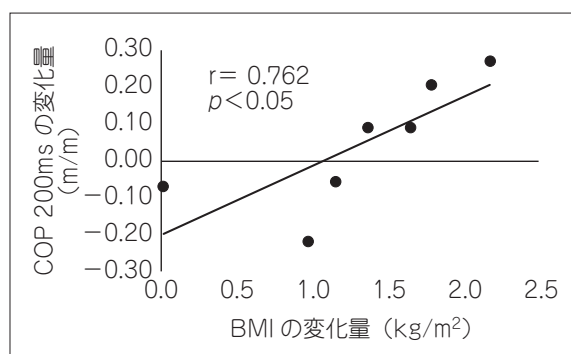


図6 BMI変化量と200ミリ秒COP軌跡長変化量の関係

に身長最大発育速度年齢 (peak height velocity age : PHV age) を迎え、その後も16歳まで身長増加は続いている¹⁾。高石ら¹²⁾は、体重最大発育速度年齢 (peak weight velocity age : PWV age) はPHV ageより遅れて出現すると報告しており、中学生以降は特に体重増加の影響を受けやすいと考えられる。本研究においても、対象者の体重は観察期間前後で 4.6 ± 2.5 kg (range : 0.6-8.5kg) の増量を認めており、このことがBMIの増加 (1.3 ± 0.7 kg/m², range : 0.7-1.3kg/m²) に影響を与えている。その一方で、片脚着地テストおよび試合時の体幹加速度における各評価項目において、観察期間前後における有意差はみられなかった。本研究では測定時の体格で補正された数値を採用しているため、これらを統計値として扱う場合、観察期間前後での差が生じにくかったと考えられた。また、両足での drop vertical jump (DVJ) を使った1年間の縦断研究においても、ジュニア女子が着

地時に発生する体重当たりの鉛直最大床反力に変化は生じていない¹³⁾。これは男子とは明らかに異なる性差であり、片脚着地を用いた本研究は先行研究を支持する結果となった。

2) 観察期間前後の関係

片脚着地テストにおける鉛直最大床反力および同出現時間、loading rateは、観察期間前後で強い正の相関を認めた。このことから、着地直後に発生する床反力の大きさやタイミングは、ジュニア期に生じる着地様式の変化よりも、個人が有する特性に依存すると考えられた。本研究のデザインとして、観察期間中には着地動作に対する介入プログラムは実施せず、あくまでも通常練習のみによる経過観察をおこなった。鉛直最大床反力の出現時間はtest-1で 57 ± 13 ミリ秒、test-2で 55 ± 17 ミリ秒と極めて短いことから、着地直後に自然にみられる力学指標は、発育のみで急激に変化する可能性は少ないと考えられた。小笠原ら¹⁰⁾も、

鉛直最大床反力や loading rate は体格補正を行っても偏差比が1以上を保つことを報告しており、床反力の出現時間を含めて個人特異性が非常に高い指標であると結論づけている。また、本研究の対象者は7名と過少に関わらず、COP軌跡長においても効果量は中程度以上(200ミリ秒 $r=0.634$, 5秒 $r=0.733$)の相関傾向を示しており、今後サンプルサイズを増やす中で検出力を高めることが必要であると考えられた。

また、試合時の体幹加速度について、オーバーヘッドストローク後に4Gを超えた片脚着地の発生頻度は観察期間前後で強い正の相関関係を示した。つまり、バドミントンの試合という相手との相互作用を以て生じる場面であっても、高加速度となる片脚着地は、個人のプレーや動作特性に依存して出現すると考えられた。体幹上部¹⁴⁾や腰部¹⁵⁾に装着した加速度センサの値は、フォースプレートから出力される床反力と相関することが確認されている。ACL受傷場面のビデオ分析では体重の約3.2倍(range: 1.8-4.5×BW)の鉛直床反力が確認されている¹⁶⁾ことから、先行研究^{7,8,11)}同様に高加速度動作の閾値を「合成加速度>4G」と定義した。本研究で設定された閾値(4G)がACL損傷リスクに与える直接的な影響については、今後さらなる検証が必要である。しかしながら、同様の閾値を用いた先行研究¹⁷⁾において、バドミントン特異的なACL受傷メカニズム⁵⁾である「オーバーヘッドストローク後の片脚着地」が試合中に最頻する高加速度動作として検出されている。このことは、「合成加速度>4G」という1つの閾値が、バドミントン競技に特化したACL損傷のハイリスク場面をスクリーニングするための一助になることも考えられる。また、ACL損傷の発生頻度が急増する高校生は、中学生に比べて閾値4Gを超える試合中の片脚着地頻度が約1.5倍高いと報告されており⁸⁾、間接的なACL損傷リスクにつながる可能性を示唆している。本研究で抽出された高加速度の片脚着地は全てACL受傷に至っていないケースであるが、Bahr & Krosshaug²⁾が提唱する“Comprehensive model for injury causation”を考えた場合、こうした動作を繰り返す選手に他の要因(内的/外的因子、誘発事象となる不良アライメントなど)が作用する結果として、外傷・障害が発生しうると考えられる。本研究では動作(キネマティクス)の解析を行っていないが、先行研究¹¹⁾

においてオーバーヘッドストローク後の体幹加速度は静止座標系に対する体幹および下肢キネマティクスと有意に相関すると報告されている。スポーツ現場で生じる高加速度の着地頻度は個人内で大きく変動しないことから、ジュニア早期に試合中の衝撃負荷を繰り返し受けやすい選手をピックアップし、個別のアプローチを図れる可能性が示唆された。さらに、4Gを超える片脚着地のy-軸加速度をみてみると、x-軸およびz-軸加速度より大きく、観察期間の前後で最も強く相関していた。つまり、体幹長軸方向への成分加速度が片脚着地での合成加速度を高める主成分であり、その大きさは試合における個人ごとの着地特性がより反映されると考えられた。

3) 体格および片脚着地の変化量の関係

観察期間前後における体重の変化量は、試合中の高加速度着地の変化量と負の相関関係を示した。つまり、ジュニア期に体重増加が大きかった選手ほど、試合中の高加速度の発生頻度は減少する傾向を示した。体重増加を含むジュニア期の成熟速度には個人差があり、ある時点での生物学的な成熟度は必ずしも暦年齢と一致しない¹⁾。つまりジュニア期においては、程度の差はありながらも早熟と晩熟の選手が混在している。本研究で体重増加が大きかった2名は観察期間前後で6kg以上増加しており、調査期間が対象者の発育ピークと重なっていたと考えられる。体重が急激に変化した選手で試合における高加速度着地の発生頻度が減少傾向を示すことは興味深く、体重増加により相対的な運動遂行能力は一旦低下し、結果として高加速度を生じさせる動作ができなくなったとも推察できる。大概ら¹⁸⁾は体重差が顕著な思春期初期と中期以降の着地動態を比較し、膝外反を伴うACL損傷危険率は中期以降の選手に高いことを報告している。つまり、体重急増時に実験的なACL損傷危険率は高くなる一方で、フィールドレベルにおける衝撃負荷を表す高加速度頻度が減少することで、ACL損傷につながる誘発事象を回避させている可能性も示唆された。また、試合での片脚着地は抗重力方向へのジャンプ運動となるため、急激な体重増加に筋出力の向上が伴わず、ジャンプの高さや総数が減少している可能性もある。女子選手における体重当たりの膝伸展筋力は9~13歳まで増加する一方で14歳以降に停滞する¹⁹⁾ことから、本研究の対象者にも急激な筋力向上が

あったとは考えにくい。その一方で、体重増加が小さかった選手の中には、高加速度着地の発生頻度が増加する選手もみられた。PWV ageを迎えたあとの体重増加スピードは停滞に向かうことから、体質量の変化に適応し、着地後の速度変化が大きいダイナミックな動きへと移行した選手もいると推察できる。

また、観察期間前後におけるBMIの変化量は、片脚ドロップ着地テストにおけるCOP軌跡長(0.02秒から0.2秒)の変化量と正の相関関係を示した。BMIは体重と身長から算出される体格指標であるが、ジュニア選手は成人選手と異なり両方の変数(体重・身長)がBMIに影響を与える。つまり、ジュニア期でBMIの増加が大きいということは、身長の伸びに比して体重が増えた選手であるということがみてとれる。本研究では、BMI増加量が大きい選手ほど接地直後のCOP軌跡長は延長しており、増加した質量に対する重心コントロールが難しくなっていると考えられた。着地後0.2秒のCOP軌跡長は着地後1秒間における全長の約50%を占め、特に「動的」になりやすい局面であることが示されている²⁰⁾。COP軌跡長と膝屈曲伸筋筋力の関係性は極めて低い²¹⁾ことから、ジュニア期におけるBMIの過大な変化が片脚着地時の神経筋制御に影響を及ぼす可能性が示唆された。

4) 本研究の課題と応用

対象者7名のため統計学的な検出力が低いこと、約1年の観察期間を1回挟むだけの短期縦断研究である点が課題であり、今後はサンプルを増やした中で「ジュニア期」を長期的に捉えた縦断的検討が望まれる。また、本縦断研究は発育の指標として暦年齢を基準とした変化のみを用いており、対象者の生物学的成熟度を考慮できていない。ジュニア期の成熟速度には個人差があることから、骨年齢や性年齢を統一した対象者におけるPWV age前後の変化を探ることが、今後の課題としてあげられる。さらに、本研究で高加速度として設定した閾値(4G)がACL損傷に及ぼす影響、発育に伴う高加速度動作のキネマティクス(アライメント)変化については、多角的な検討が必要である。本研究ではバドミントンを事例として、試合場面における競技特異的な片脚着地に焦点をあてた。こうした取り組みを他競技にも応用することで、予防に向けたメカニズムの一助になると

期待できる。

結 語

本研究はジュニア期の発育に伴い、女子バドミントン選手の片脚着地特性がラボテストおよび試合場面でどのように変化するのかを縦断的に検証した。1年を超える観察期間をあけて計測を行ったところ、片脚着地テストにおける鉛直最大床反力、出現時間、loading rate、試合における高加速度着地の発生頻度、成分加速度が2回の測定間で強い相関関係を示した。さらに、体重変化が試合時の高加速度発生頻度の変化量と相関すること、BMI変化がラボテストでのCOP軌跡長の変化量と相関することが確認できた。つまり、ジュニア期におけるラボテストおよび試合場面の片脚着地は「個人の特異性」に依存する一方で、体格変化自体が着地特性に影響を及ぼす場合があると考えられた。

謝 辞

本研究はJSSP科研費(17K18200)の助成を受けたものです。研究にご協力いただいた選手、保護者、指導者の皆さまに感謝いたします。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- 1) 飯田悠佳子. 身体の発育と発達. 日本アスレティックトレーニング学会誌. 2018; 4: 3-10 doi: 10.24692/jstaj.4.1_3.
- 2) Bahr R, Krosshaug T. Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. Br J Sports Med. 2005; 39: 324-329 doi: 10.1136/bjsm.2005.018341.
- 3) Takahashi S, Okuwaki T. Epidemiological survey of anterior cruciate ligament injury in Japanese junior high school and high school athletes: cross-sectional study. Res Sports Med. 2017; 25: 266-276 doi: 10.1080/15438627.2017.1314290.
- 4) Takahashi S, Nagano Y, Ito W, et al. A retrospective study of mechanisms of anterior cruciate ligament injuries in high school basketball, handball, judo, soccer, and volleyball. Medicine (Baltimore). 2019; 98: e16030 doi: 10.1097/MD.00000000000016030.
- 5) Kimura Y, Ishibashi Y, Tsuda E, et al. Mechanisms

- for anterior cruciate ligament injuries in badminton. *Br J Sports Med.* 2010; 44: 1124-1127 doi: 10.1136/bjsm.2010.074153.
- 6) Leppänen M, Pasanen K, Kujala UM, et al. Stiff landings are associated with increased ACL injury risk in young female basketball and floorball players. *Am J Sports Med.* 2017; 45: 386-393 doi: 10.1177/0363546516665810.
 - 7) 笹木正悟, 永野康治, 市川 浩. 成長期女子バドミントン選手の体幹加速度の特徴—オーバーヘッドストローク後の片脚着地に着目して—. *バイオメカニクス研究.* 2019; 23: 71-80.
 - 8) Sasaki S, Nagano Y, Ichikawa H. Differences in high trunk acceleration during single-leg landing after an overhead stroke between junior and adolescent badminton athletes. *Sports Biomech.* 2020; doi: 10.1080/14763141.2020.1740310. Online ahead of print.
 - 9) 小笠原一生, 小柳好生, 木村佳記, 他. 片脚着地時の姿勢戦略に基づく非接触型前十字靭帯損傷の潜在リスク同定. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2017; 25: 346-353.
 - 10) 小笠原一生, 木村佳記, 佐藤睦美, 他. 新規な動的バランス評価指標の開発とその個人特異性に関する研究. *臨床バイオメカニクス.* 2016; 37: 311-317.
 - 11) Sasaki S, Nagano Y, Ichikawa H. Loading differences in single-leg landing in the forehand- and backhand-side courts after an overhead stroke in badminton: A novel tri-axial accelerometer research. *J Sports Sci.* 2018; 36: 2794-2801 doi: 10.1080/02640414.2018.1474535.
 - 12) 高石昌弘. 思春期身体発育のパターンに関する研究-2- 女子の身長発育速度, 体重発育速度および初潮年令について. *小児保健研究.* 1969; 26: 280-285.
 - 13) Quatman CE, Ford KR, Myer GD, et al. Maturation leads to gender differences in landing force and vertical jump performance: a longitudinal study. *Am J Sports Med.* 2006; 34: 806-813 doi: 10.1177/0363546505281916.
 - 14) Nagano Y, Sasaki S, Higashihara A, et al. Relationships between trunk and knee acceleration and the ground reaction force during single limb landing. In: *ISBS - Conference Proceedings Archive.* 2016; 875-878. Available at: <https://ojs.sub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/7079> [Accessed 7 May, 2020].
 - 15) Rowlands AV, Stiles VH. Accelerometer counts and raw acceleration output in relation to mechanical loading. *J Biomech.* 2012; 45: 448-454 doi: 10.1016/j.jbiomech.2011.12.006.
 - 16) Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *Am J Sports Med.* 2010; 38: 2218-2215 doi: 10.1177/0363546510373570.
 - 17) Nagano Y, Sasaki S, Higashihara A, et al. Movements with greater trunk accelerations and their properties during badminton games. *Sports Biomech.* 2020; 19: 342-352 doi: 10.1080/14763141.2018.1478989.
 - 18) 大槻玲子, 馬越博久, 福林 徹. 成長期女子バスケットボール選手における膝前十字靭帯損傷リスクの評価. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2014; 22: 51-58.
 - 19) Barber-Westin SD, Noyes FR, Galloway M. Jump-land characteristics and muscle strength development in young athletes: a gender comparison of 1140 athletes 9 to 17 years of age. *Am J Sports Med.* 2006; 34: 375-384 doi: 10.1177/0363546505281242.
 - 20) 木村佳記, 小笠原一生, 杉山恭二, 他. 片脚ドロップ着地テストによる動的バランス評価. *臨床スポーツ医学.* 2019; 36: 492-497.
 - 21) 木村佳記, 米谷泰一, 前 達雄, 他. 片脚ドロップジャンプ着地テストによる動的バランス評価—足圧中心軌跡長と筋力の相関—. *スポーツ傷害.* 2014; 19: 41-43. http://www.sports-injury.jp/pdf/19_19.pdf [参照日 2020年5月7日].

(受付: 2020年3月13日, 受理: 2020年8月31日)

Characteristics of single-leg landing in junior female badminton players and the effects of growth-related physical changes: a short-term longitudinal study focused on the single-leg drop landing test and trunk acceleration in match situations

Sasaki, S.^{*1}, Nagano, Y.^{*2}, Ichikawa, H.^{*3}

^{*1} Faculty of Health Sciences, Tokyo Ariake University of Medical and Health Sciences

^{*2} Department of Sports Wellness Sciences, Japan Women's College of Physical Education

^{*3} Department of Health and Sports, Niigata University of Health and Welfare

Key words: single-leg landing, trunk acceleration, growth-related changes

[Abstract] This longitudinal study was conducted to determine the characteristics of single-leg landing changes in laboratory-based trials and actual games among junior athletes. Seven female junior badminton players underwent anthropometric (stature, height), laboratory-based (drop landing test), and field-based (assessment of trunk acceleration during a match) measurements twice within a follow-up period of longer than 1 year. The maximum vertical ground reaction force (GRF), time to peak landing force, and center of pressure (COP) trajectory were measured with the drop landing tests. The participants also played singles badminton matches while wearing a triaxial accelerometer. The moments that generated >4 G of resultant acceleration were extracted, and the frequency of >4 G resultant acceleration was calculated. The pre- and post-trial maximum GRF, time to peak GRF, loading rate in the drop landing tests, and frequency of >4 G single-leg landing during game situations were correlated. Changes in body weight and body mass index were also significantly correlated with changes in the frequency of >4 G landing during games and COP trajectory during drop landing tests, respectively. These findings suggest that single-leg landings both in laboratory and game environments are specific for each athlete, while anthropometric changes affect the characteristics of single-leg landings among junior players.