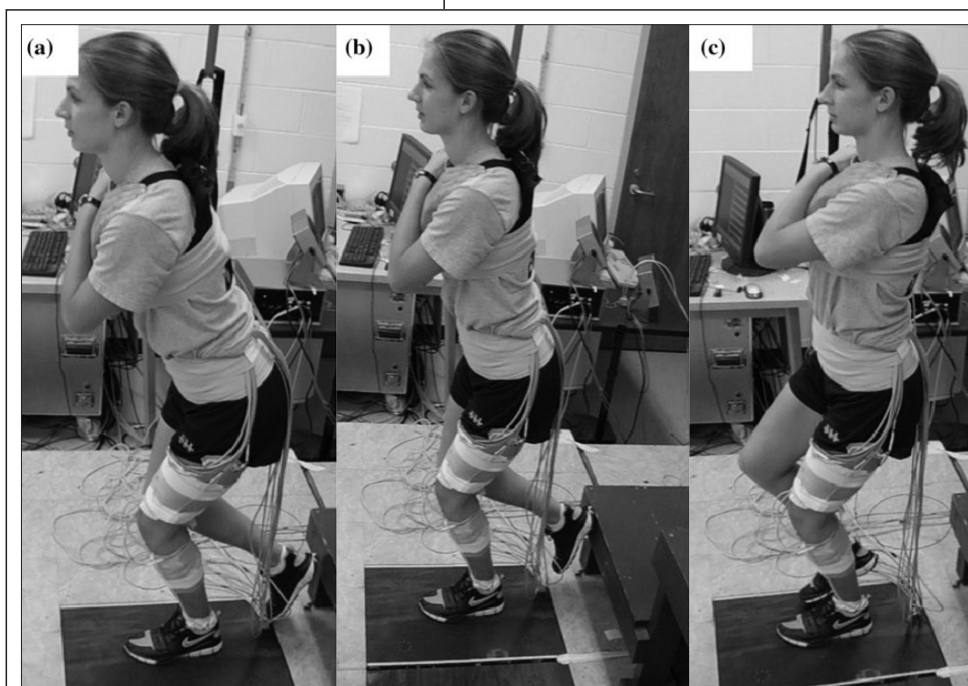


Sep-Oct Special

着地の研究

前十字靭帯損傷と足関節捻挫をめぐる



スポーツにおいて着地時に起こす外傷は多い。「着地と外傷」をテーマに特集を考えてみた。今月は、趣向を変えて、5人の先生に集まっていた。2人の先生には事前に用意していただいたパワーポイント資料とともにプレゼンテーションを行っていただき、その後3人の先生とともにディスカッションを行った。プレゼンテーションは、大阪体育大学の下河内洋平先生による非接触性ACL損傷と着地、関西医療大学の吉田隆紀先生による足関節捻挫と着地に関わる内容である。ディスカッション参加は、関西医療大学の井口理先生、内田靖之先生、鈴木俊明先生である。

- 1 スポーツ競技の減速動作中における非接触性 ACL 損傷と着地時の地面反力の関係について 下河内洋平 P.2
- 2 ジャンプ着地と障害予防 吉田隆紀 P.13
——慢性的足関節不安定性に着目して
- 3 ディスカッション P.20
出席者：下河内洋平、吉田隆紀、内田靖之、井口理、鈴木俊明

1

着地の研究

スポーツ競技の減速動作中における非接触性 ACL 損傷と着地時の地面反力の関係について

下河内 洋平

大阪体育大学、同大学院准教授
PhD, ATC

まず冒頭、下河内先生に標記タイトルで発表していただく。5人の先生によるディスカッションはP.20に掲載。

スポーツ外傷メカニズムと予防

まず、これはバスケットボールの映像(割愛)、このように着地した瞬間に前十字靭帯 (ACL) 損傷が発生しています。なぜ、このように ACL が断裂するかわからないので、外傷発生メカニズムと関連して地面反力について紹介したいと思います。

まず図1をご覧くださいなのですが、動作中の神経筋制御様式や身体ポジション

などにより、身体が外部から受ける力、また身体内部で発生する力、そのときの関節角度などがある特定の条件を満たしたときに、ある特定の組織のストレスを高め、外傷が発生するということが考えられます。また、それ以前に、性別、形態、筋力・体力、可動域、柔軟性、運動技術、神経筋制御などの危険因子が報告されていますが、もし、これらの危険因子が ACL 損傷発生に影響を与えているとすれば、これらの危険因子は直接的、間接的に ACL のストレスへ影響を与えていると考えられます。こういうメカニズムについても後ほど少し触れますが、トレーニング、装具、指導、コンディショニングが ACL 損傷予防に貢献するのであれば、それらの介入は、これらの危険因子に働きかけて修正を行ったり、急激な減速動作中の動き方や神経筋制御様式の修正を促したりすることで、急激な減速動作中の ACL のストレスを減少させ、予防につながっていると考えられます。しかし、どのような方向に修正するべきかは、結局



しもこうち・ようへい先生

えが根底にあり、私の研究がはじまっているのですが、最初に書いた論文が、“Mechanisms of Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury” (Shimokochi and Shultz 2008) というものです。あらかじめ設定した条件下で文献研究を行ったレビュー論文ですが、論文の選択条件に合致した文献を用いて、現在の非接触性 ACL 損傷のメカニズムや ACL へストレスをかける力の源を探り、論理的に ACL 損傷メカニズムを仮説として導き出したものです。私の現在の非接触性 ACL 損傷予防に関する考えは、この論文やその他いくつかの、この後に紹介する重要な研究報告が基盤となっています。

まず、なぜスポーツ医学界において ACL 損傷が重大問題になっているか。

アメリカ合衆国のみで推定年間 200,000 件発生しているという報告 (Miyasaka et al. 1991) があり、本学のアスレティックトレーニングルームでも 2009 年度のデータでは 18 件の ACL 再建手術の選手を扱っ

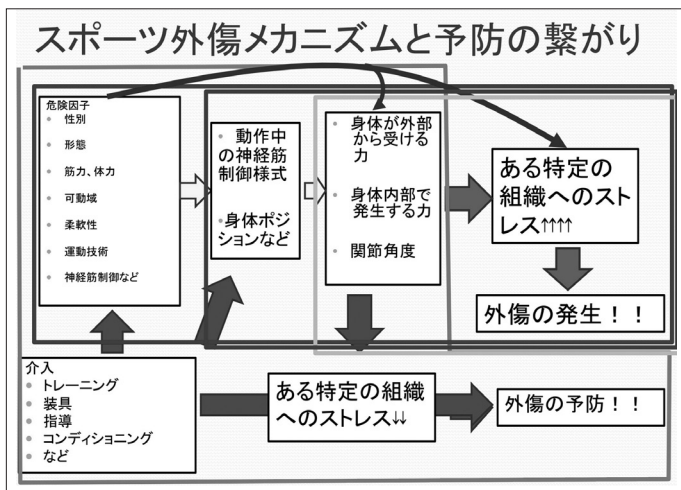


図1

ACL 損傷のメカニズムを理解しなければそれらを改善させる方向性はみえてきませんので、ACL 損傷予防を考えるうえで最も重要なことは、やはり、ACL 損傷メカニズムに関して、現在、最ももらしい仮説を理解することだと思います。

そのような考

ACL損傷時の体勢

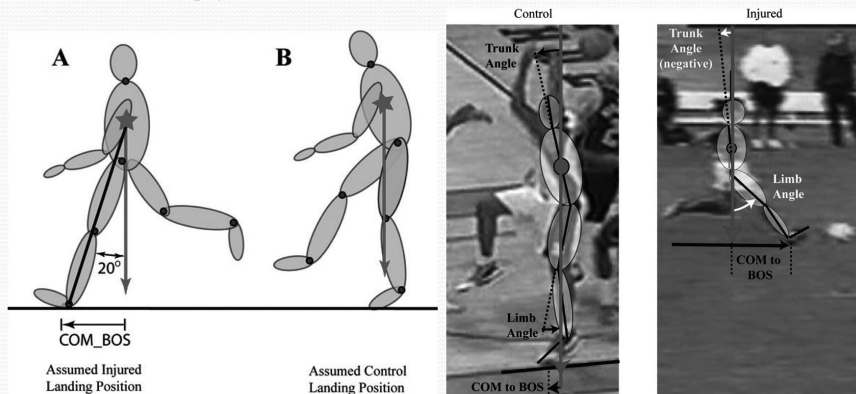


図 2

出典 (Sheehan et al. 2012)

ており、他の術後のリハビリ件数と比較しても最も多い数字となっています。

ACL 損傷の 70% は非接触性と言われています (Boden et al. 2000)。非接触性というのは、受傷時に地面反力以外の外力が身体に加わらないということで、ほとんどが急激な減速動作時に生じています。

特徴として、女性は男性の 2～8 倍発生率が高い (Agel et al. 2005, Hewett et al. 2007) と言われています。また、受傷から競技復帰まで 6～10 カ月程度かかり、長期間競技から離脱するということが、スポーツ選手にとっては重大な損傷と言えます。とくにバスケットボールやハンドボールなどの急激な減速-加速動作を頻繁に行うスポーツにおいては深刻な問題となっています。

こうした背景があり、ACL 損傷の予防について盛んに研究されています。

ACL 損傷発生と最大地面反力発生のタイミング

次に、ACL 損傷発生と最大地面反力発生のタイミングについて述べますが、まず、これまでの研究でわかっていることとして、非接触性 ACL 損傷は急激な減速動作中に最も頻繁に生じる傾向があります。力の大きさと方向は、質量と加(減)速度の積に一致する。運動中は身体質量の変化はほとんどありませんが、身体質量の加速度、減速度は大きく変化します。よって、運動中に身体が最も大きな衝撃を受けるときは、最も大きな身体重心の加速または減速が生じたときだと言えます。

もうひとつ、多くの ACL 損傷は、膝の屈曲角度が少ない接地直後に生じる傾向があるということが報告されています。

また、Krosshaug ら (2007) や Koga ら (2010) によって接地後 0.04 秒程度で ACL 損傷が発生している可能性が指摘されていて、片脚着地の場合、男性女性とも接地から平均 37msec 後、両脚着地では、男性は接地から平均 33msec 後、女性は平均 39msec 後、カット動作では、

男性は接地から平均 46msec 後、女性は平均 25msec 後に ACL 損傷が発生していると推測されています (Krosshaug et al. 2007)。「推察」という言葉を使った理由は、本当に断裂した瞬間はいつなのかは、実は誰にもわからないし、現在のところ実証する手段

は存在しないからです (倫理面などからも)。しかし、急激な減速動作中のこれらの時間内で何が起きているかをさまざまな角度から検証することは、最ももっともらしい非接触性 ACL 損傷メカニズムを導き出すために必要であるし、それがわかってくれば、ACL 損傷を予防するためには、その時間内の出来事をどのようにして安全でよい方向にもっていくことができるか、ということにつながっていくはずです。この後紹介するさまざまな研究報告などから総合的に考えると、Krosshaug ら (2007) や Koga ら (2010) の推測した ACL 損傷発生のタイミングは、現在最ももっともらしいと言えると思います。

ACL 損傷時の体勢

ACL 損傷時の体勢はどうか。Sheehan ら (2012) がビデオ解析し、矢状面での体勢を検証したものが図 2 です。A が

Meyer EG, Haut RC., *Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibiofemoral compression*, J Biomech. 2008 Dec 5;41(16):3377-83.

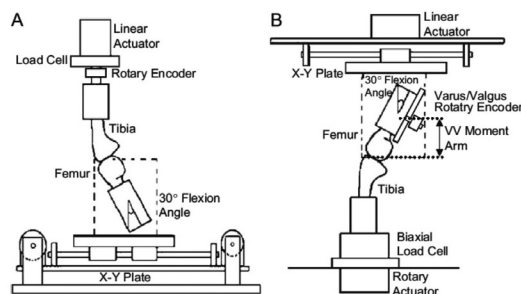


Fig. 1. Knee specimens potted, flexed, and attached to the compressive (A) and torsion (B) testing fixtures.

図 3

ACL 損傷時によくみられる体勢で、B が損傷していないときの着地の体勢です。A では、身体重心と仮定されたポイントが、接地した足よりも後方にあるということです。また、足はつま先から接地するのではなく、フラットな状態で接地していることが多いということです。逆に、体勢が十分コントロールされた状態で着地した場合、重心が足の上に乗る、つま先から接地していると、ACL 損傷は起こりにくいということです。Sheehan らは、このことから、ACL 損傷時には地面反力の吸収が効率的に行われず、脛骨大腿骨間力の鉛直成分は大きくなったと考えられると述べています。

では、なぜ脛骨大腿骨間力の鉛直成分が問題なのか。2008 年に Meyer と Haut が屍体を用い、脛骨 (Tibia) と大腿骨 (Femur) を図 3 のように装置に埋め込み、脛骨長軸に対して平行な圧縮力を ACL が

Kinetic and Kinematic Data

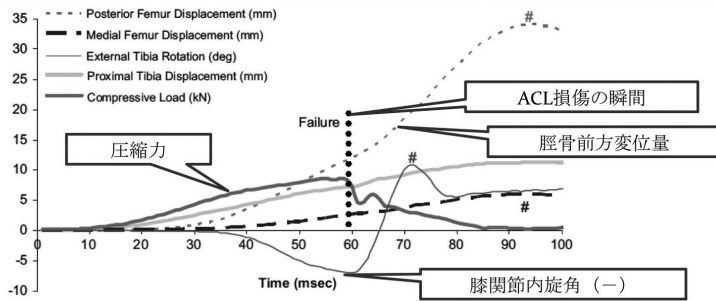


Fig. 2. A representative load and motion versus time plot during a failure test (32057L). The peak compressive loads and the corresponding proximal tibia displacements occurred at the failure time point as marked. All other motions were measured at their peak values, indicated by #.
(Meyer EG and Haut RC. 2008)

図 4

断裂するまで加えるという実験を行いました。水平面、前額面とも動くようになっていきます。屈曲伸展の動きのみ固定していません(膝屈曲 30 度)。その結果が図 4 です。圧縮力が上昇していくと、脛骨が大腿骨に対して前方にずれていきます。また、脛骨

は大腿骨に対して内旋していきます。縦の点線が ACL が断裂した瞬間です。そこから一気に脛骨は外旋しています。

では、ACL が断裂するのにどれくらいの圧縮力が必要だったか。この実験では、3200 ~ 8600N (320 ~ 860kg) の関節圧

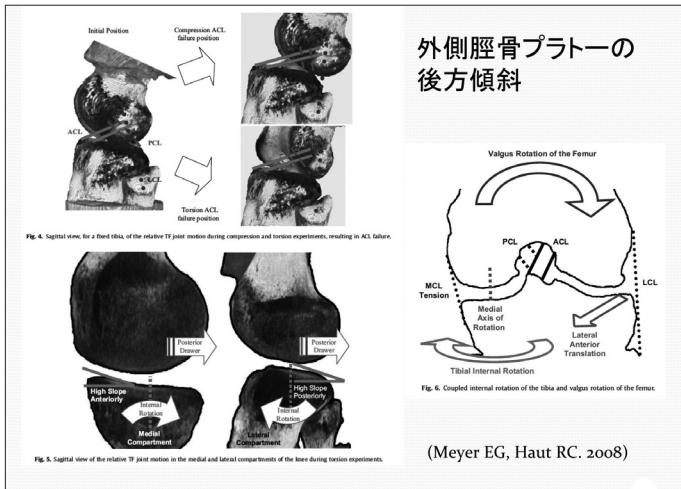


図 5

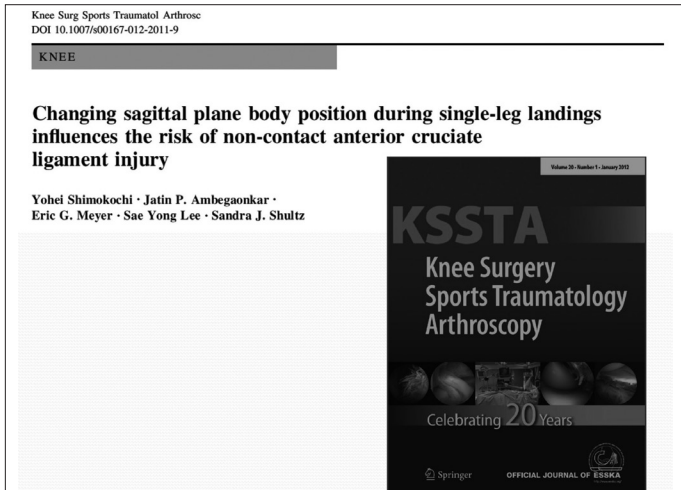


図 6

(2008) の仮説を示したのが図 5 です。図は、外側脛骨プラトーの後方傾斜を示したもので、脛骨の長軸に平行な圧縮力が前方剪断力に変わっていき、脛骨の外側が前方にずれていく。脛骨の外側は内側より大きく前方にずれるため、結果として内旋が生じ、最終的に ACL が断裂する。これが彼らの仮説です。

図 6 は私が書いた論文です (Shimokochi et al. 2013)。非接触性 ACL 損傷が頻発する体勢は、上体が起きているか後方へ倒れている、受傷時に ACL を損傷した脚が上体より前に出ている、足はフラットな状態で接地しているという特徴が報告されていますので、この研究では、図 7 のように、a. 上体を前傾してつま先から着地 (leaning forward landing: LFL)、b. その人の通常の着地 (self-selected landing: SSL)、c. 上体を起こして足はなるべくフラットな状態での着地 (upright landing: URL) の 3 つの着地動作を行ってもらいました。

その結果が図 8 ですが、a. SSL : 通常の着地では地面反力は体重の 4.6 倍、b. LFL : 重心を前にかけた場合は体重の 3.9 倍、c. URL : 上体を起こして踵から着地した場合は体重の 5.3 倍の鉛直成分が観察されました。最大地面反力の発生時期については、a 通常の着地では 52msec、b の重心を前にかけてつま先から着地した場合は 66msec で有意に延長しています。c の上

なぜ、こういう現象が起きたのか、Meyer と Haut

体幹の矢上面上の位置が着地動作中における ACL 損傷の危険性に及ぼす影響

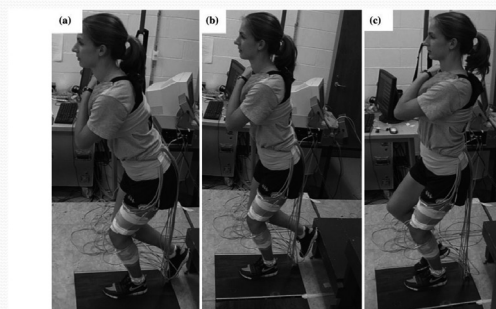


Fig. 1 Exemplar landing styles (a) leaning forward landing (LFL), (b) self-selected landing (SSL) and (c) upright landing (URL)

(Shimokochi et al. 2013 Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc)

図 7

2

着地の研究

ジャンプ着地と障害予防 —— 慢性的足関節不安定性に着目して

吉田隆紀

関西医療大学 保健医療学部 理学療法学科

次に、吉田先生には足関節捻挫後の問題と同症例のジャンプ着地、また再発予防についてプレゼンテーションしていただく。その後のディスカッションについては次項で紹介する。

最初に足関節捻挫について知っていただくために、足関節捻挫後に生じる問題を整理し、その後ジャンプ着地のデータを紹介します。次に、文献レビューをみながら足関節捻挫の再発予防について述べたいと思います。

足関節捻挫後に生じる問題点

足関節捻挫は、ラグビー、サッカー、バレーボールなどのコートゲームで発生することが多いと言われています。また接触プレーのなかで多く起きるとも言われています (Fong et al., 2007)。

足関節外側側副靭帯損傷では約 85% が前距腓靭帯損傷の単独損傷であり、約 20 ~ 40% が前距腓靭帯と踵腓靭帯の合併であると報告されています (Clanton T., 2009)。踵腓靭帯を損傷するのは背屈位での受傷ということになりますので、やや底屈位か中間位での内反捻挫が多いということになります。

内反捻挫における損傷部位は、圧倒的に前距腓靭帯の損傷率が 93% と多く、踵腓靭帯 80%、後脛骨筋腱は 53% 損傷するということがわかっています (Frey, 1996)。

受傷機転については、非接触型損傷が

22 ~ 39% で、主にジャンプ着地や方向転換動作時に生じることが多いと報告されています (McKay, 2007, Woods, 2003)。相手の足の上に着地して、あるいはタックルを受けて捻挫という接触型損傷のほうが多いのですが、それは予防しにくいものです。非接触型損傷はジャンプ着地やカッティングやターンなど方向転換時に起こることが多いとされています。また、片脚着地動作における衝撃吸収は他関節に比べ、足関節が最も寄与すると言われ (Schmitz et al., 2007)、下河内先生も述べておられたとおり、足関節が着地に重要な要素であると言えます。

足関節捻挫の問題として慢性的足関節捻挫不安定性 (Chronic Ankle Instability; CAI) があります。慢性的な不安定性は MAI (機械的不安定性) と FAI (機能的な不安定性) の 2 つに分類されています (図 1)。MAI は靭帯が損傷して足関節が弛緩する状態です。FAI は明らかな足関節に緩みはないですが、機能的に問題が生じている場合です。しかし両者の分類について

は、FAI のアンケート調査やレントゲン写真での足関節の緩みなどで行われることが多いですが、少し曖昧な評価で厳密な分類は難しいと言えます。実際は損傷が大きいと足関節の不安定性要素が大きく、FAI の症状を包括している



よしだ・たかき先生

状態になることが多く、両者が混在しているケースが多いのではないかと考えられます。

FAI の問題点としてよく言われているのは、急性捻挫後の 10 ~ 30% という発生率で比較的高いと言えます。一般的によく言われているのは、固有感覚機能の低下や腓骨筋群の筋収縮遅延化が存在するという

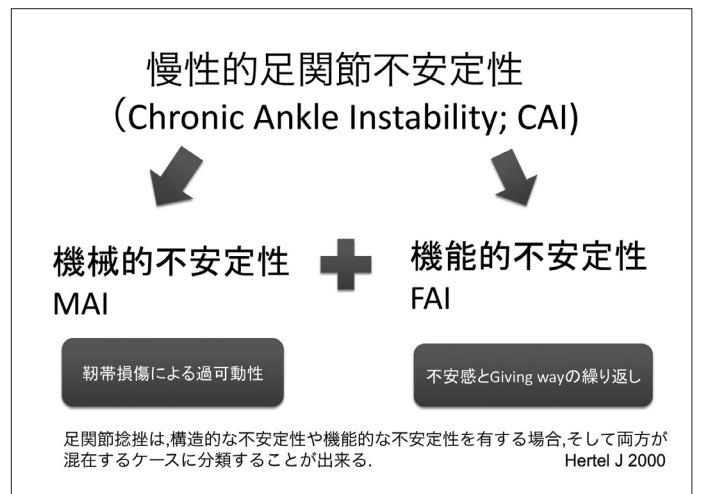


図 1



図2 重心動揺計の計測場面

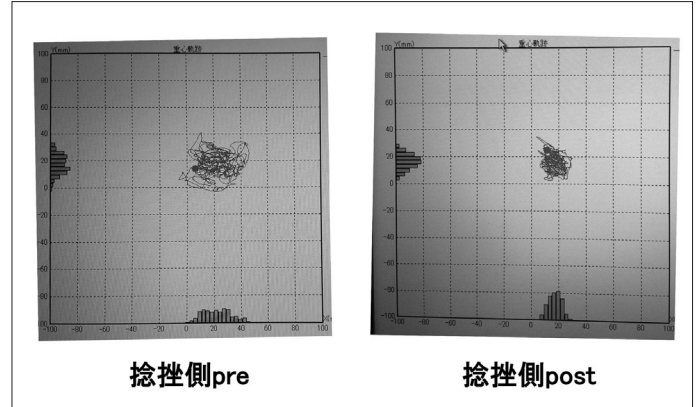


図3 総軌跡長の結果 (代表例)

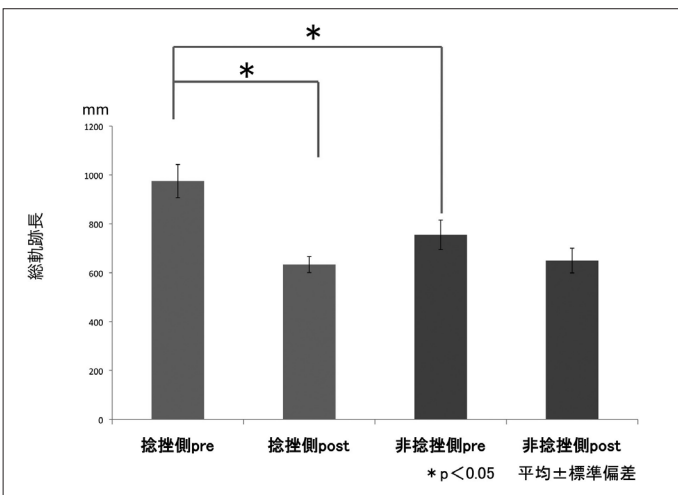


図4 総軌跡長 結果

報告が多くみられます。再発率は最も高いもので80%以上と非常に高く、足関節捻挫は再発率が高い障害であることが特徴でもあります。

ジャンプ着地と足圧中心軌跡長研究データ

次に、ジャンプ着地での機能的不安定性の症例を集めた研究データを少し紹介します。

対象・選考基準は大学サッカー部に所属する男子学生7名(平均年齢20.3歳、平均身長175.1cm、平均体重64.0kg)のデータを取りました。KarlssonのFAIのスコアを取り、明らかな構造的・機械的な不安定性は排除したいので、前方引き出しテストとMSG (medial subtalar glide) テストを実施し、不安定性があるものはできる

だけ除外して行いました。

方法として、まず重心動揺計に乗ってもらいます(図2)。図3は、足圧中心総軌跡長の代表的な結果です。捻挫側 pre と捻挫側 post は片脚立位時の総軌跡長を示しています。こ

の図は本誌第149号で「足関節捻挫後のパフォーマンス低下に対する新しい治療戦略」というタイトルで寄稿したのものにも収録されていますが、左は介入前です。右の介入後は軌跡長の外周面積も小さくなり、総軌跡長も短くなっているのがわかります。その総軌跡長の結果をグラフにしたの

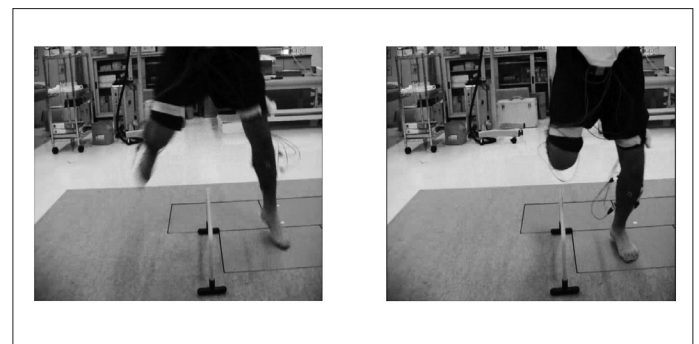


図5 フォースプレートによるジャンプ動作片脚着地時のCOP軌跡長の計測場面

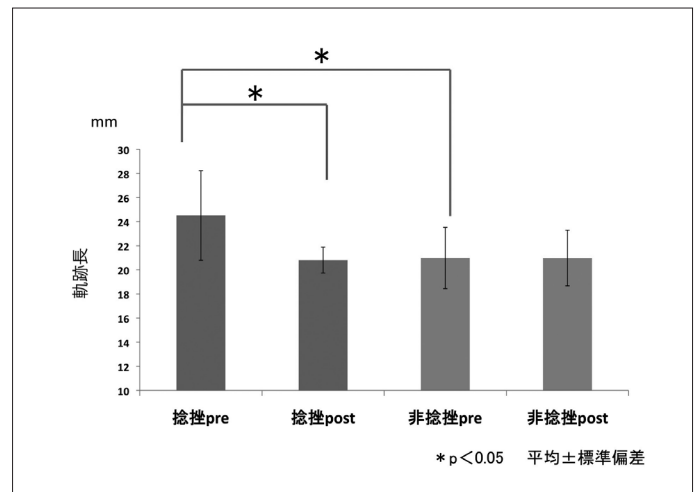


図6 軌跡長 結果①

が図4です。非捻挫側で比べても、有意に捻挫側のほうは重心の揺れが大きい結果となっています。

次にジャンプです。ジャンプは側方に30cmのミニハードルを連続で跳び越えてもらいます。課題としてはメトロノームで音に合わせて一定のリズムで跳んでもらい

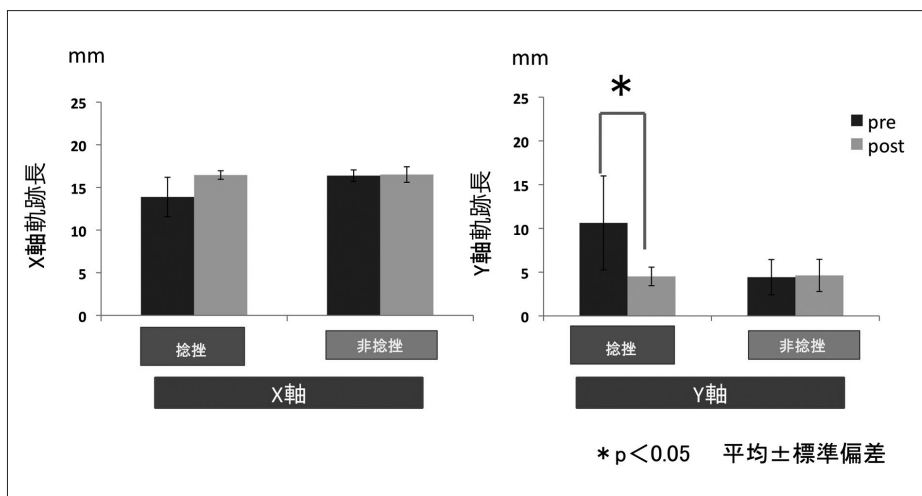


図7 軌跡長 結果② (X・Y軸)

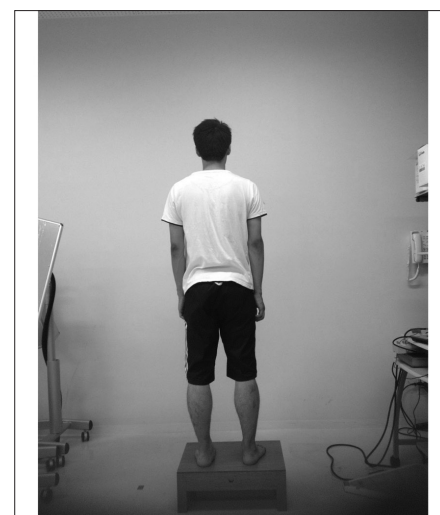


図9 慢性的な足関節捻挫後症例の立位姿勢

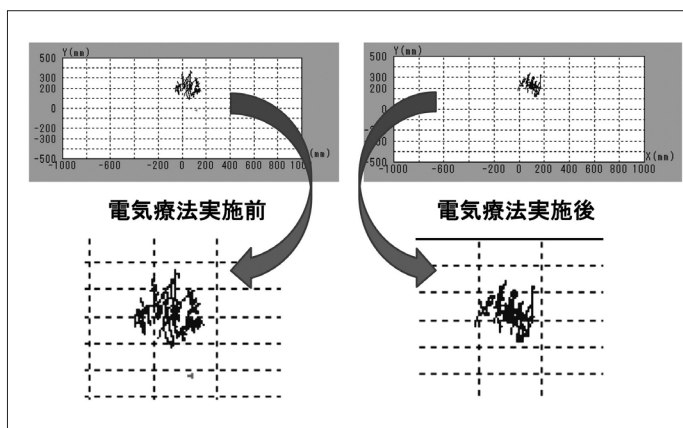


図8 側方へのジャンプ動作片脚着地時のCOP軌跡長(捻挫側の代表例)

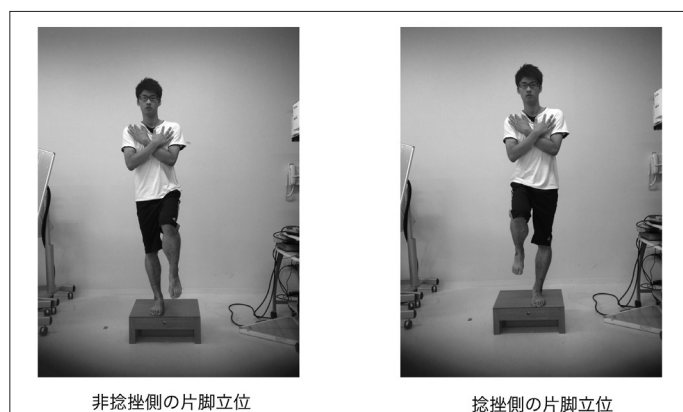


図10 片脚立位姿勢

- CAI群と健常群とは足関節周囲筋だけでなく、股関節周囲筋の中臀筋、大腿筋膜張筋の筋活動も異なりCAI群の方が筋活動の開始のタイミングが遅かったと報告。
Sara VD:2007
- 足関節内反捻挫後の慢性的な症状を有する者に患側の股関節外転筋の筋力低下が認められたと報告している。
Friel K: 2006
- CAI群は、Rotational squat 動作時の大殿筋活動が健常例よりも低いことが示されている。
Webster and Gribble, 2013

図11 足関節捻挫後と股関節の関係

ます(図5)。

図6は軌跡長の結果ですが、これも捻挫側のほうが非捻挫側より有意に軌跡長が長くなっています。ここで電気療法を実施しているのですが(preは実施前、postは実施後)、postでは改善がみられます(図7)。これは総腓骨筋神経に電気刺激を与え

ています。機能的不安定性を有する症例は、腓骨筋群の活動性が低下していますので、側方の動きで重心を制御できず、前後のバランス制御で安定しているということが考えられます。実際のCOP(Center of Pressure)の軌跡長(図8)をみると、横方向の揺れ幅はあまり変わりませんが、縦

ていますので、腓骨筋群が影響を受けていることが大きいと考えられます。グラフはY軸が前後の揺れ、X軸が側方への揺れを示しています。側方への揺れがほとんど変化なく、縦揺れが減少し

方向の揺れ幅が少し減っていることが観察されます。

足関節捻挫の再発予防

ここから足関節捻挫の再発予防について考えてみます。

図9は実際の症例ですが、この画像をみただけで、どちらが捻挫側かわかります。この場合は右足が捻挫側になります。重心がかなり左側に寄っているのがわかると思います。結構このような症例は多くみられます。捻挫側に体重を乗せることができていません。このような方は常に捻挫側に傾いた姿勢でいますので、片脚立位をとったときに捻挫側の股関節からグッと立ち直るフェイズが出てきます(図10)。重心側を支持できない、抑えるためにこの反応が出

3

着地の研究

ディスカッション

下河内先生、吉田先生のプレゼンテーションのあと、右記の先生を交え、ディスカッションを行った。ディスカッションは、下河内先生のプレゼンテーションのあとと、吉田先生のプレゼンテーションのあと、計2回行ったが、ここではまとめて掲載する。

1 下河内先生のプレゼンテーション後のディスカッション

「バランスのよい着地」

鈴木：まずスポーツのなかでの着地動作を考えると、今のお話では負荷を与えない着地がどういうものかよくわかりましたが、「正常な着地」「正しい着地」という定義はあるのでしょうか？

下河内：正常な着地、正しい着地の定義はそれを評価する基準により異なると思いますが、「バランスよく着地する」ということは膝の傷害予防の面では必要だと思います。それはどういうものか考えたのですが、動きだけで言うのなら、おそらく下肢3関節（股関節、膝関節、足関節）の屈曲の動きの同調度合が高いということがひとつ言えるのではないかと思います。膝は屈曲しているが、股関節の屈曲がほとんどみられない場合、あるいはその逆の場合も、「バランスよく」使えていないと思います。

「股関節を使いなさい」とよく言われていますが、先ほど述べたように、脛骨の前方への傾きという観点では、膝の屈曲は非常に重要だと思います。股関節周りを鍛えなさいとは言われても、大腿四頭筋を鍛えなさいとはあまり言われません。弱い選手は重心を落としなさいと言われると、膝を曲げるのではなく、股関節から曲げて上体を低くする。とくに疲れてくると、膝は伸びて股関節が屈曲した姿勢をとるようになります。それではパワーポジションもとれず、力が発揮できない。衝撃吸収が非常に効率よくできる下肢3関節が屈曲したポジションは、一般的にパワーポジションとも呼ばれ、力も発揮できるポジションであろうと考えられます。このポジションは、膝関節の安定性が最も高まるポジションでもある

と考えられます。試合の後半になってもそのポジションがとり続けられるように、膝や股関節周辺を鍛える必要があると思います。「正しい」というのは何をもち「正しい」とするかという問題になりますが、効率がよく安全な着地というのは、膝も股関節も足関節すべての関節でバランスよく衝撃を吸収する着地が最もよいだろうと思います。

Knee-in & toe-out

— ACL 損傷を起こす選手の熟練度はどうなのか？ トップクラスに近づくほど多いのか、初心者に近づくほど多いのか？ 上のレベルになるほうが多いように思いますが。

下河内：はっきりしたデータはありませんが、私もそのように思います。本学で女子ハンドボール部のトレーニング指導を行っているのですが、地面を強く蹴ることができると選手のほうが ACL 損傷については懸念があります。筋力もパワーもあって、激しく切り返す選手はみているとヒヤヒヤします。実際にそういうタイプの選手が ACL 損傷を起こすことがあります。そういう例が多いと感じています。

— Knee-in & toe-out に関してはどのように考えていますか？

Knee-in & toe-out は Hewett らの前向き研究において ACL 損傷の危険因子として報告されています。しかし、危険因子であるからといって、必ずしも実際の ACL 損傷時のメカニズムに関連しているとは限りません。たとえば、足のサイズが大きい低学年の子たちが成績がよい傾向にある、

■ディスカッション参加者

(演者のほか下記の3氏が参加、編集部からは清家)

内田靖之

関西医療大学
鍼灸師、JATI 認定トレーニング指導者、
日本体育協会公認 AT、修士（人間科学）

井口 理

関西医療大学ヘルスプロモーション整備
学科
柔道整復師、鍼灸師、スポーツ科学修士

鈴木俊明

関西医療大学保健医療学部理学療法学科
学科長
関西医療大学大学院保健医療学研究科
研究副科長 教授
理学療法士、医学博士

という、因果関係はないが相関関係はある、という関係性も考えていく必要があると思っています。Knee-in & toe-out はよくないと言われてはいますが、たとえば、足関節の背屈制限が強く過回内のため knee-in & toe-out している人では、knee-in & toe-out することでかろうじて膝を曲げることができるということも考えられると思います。そういう例では、そうして着地しているから ACL を損傷しないことも考えられます。つまり、足部を過回内させることで膝の屈曲を可能にし、脛骨の前方への傾き度合を増大させ、地面反力が脛骨を後方に押す力を増やしている、ということも考えられます。もし、knee-in & toe-out 自体が ACL 損傷を引き起こすのなら、もっと多くの選手が ACL を損傷しているはずですが。そう考えると、このようなタイプの knee-in & toe-out をしている人は、競技中に、先ほど述べたように上体が後方に傾き、膝がほとんど屈曲していないで大きな衝撃を受ける着地をしやすということも考えられます。つまり、足関節の背屈制限があり過回内をしていることで knee-in & toe-out が生じているとすると、その回内が起きない



しもこうち・ようへい先生

ように操作すると、背屈ができなくなり、膝も曲がらなくなり、そうなると、先ほど述べた脛骨への強い圧縮力を受けやすくなることも考えられると思います。そうすると、そのようなタイプの方は、ただ単に knee-in & toe-out を修正すれば ACL 損傷リスクが減るといことにはなり得ません。ACL の危険因子であるということと、それらの危険因子が直接的に ACL の発生に関わっているかという問題は別物の可能性もありますので、knee-in & toe-out と ACL 損傷との因果関係に関しては、もう少し検証が必要であると思っています。実際に、ACL 損傷の結果、膝崩れのようなことが起きて、knee-in & toe-out が生じているのか、knee-in & toe-out による膝崩れのために ACL が損傷しているのか、ということは、学術界ではオープンに議論されています。

鈴木：先生のご発表のなかで、屍体を用いた実験やコンピュータによるシミュレーションと臨床の結果とは一致しないことがあるというお話がありましたが、なぜそういうことがあるのかわかっているのでしょうか。

下河内：よくわからないのですが、もしかしたら、屍体の膝の関節包や筋などの組織をどのように処理しているかで結果が変わってくることも報告されていますし、骨の形状をどのようにしたかということもありますし、運動学的・動力的データに対してどのようなフィルターをかけて分析しているかなどということも影響してくるかもしれません。シミュレーションはしよせんシミュレーションとも言え、実際に起こっていることを再現しているとは限らない。そういうことがあり、臨床とは一致しないことはあるだろうと思います。

着地と膝屈曲角度

鈴木：私はスポーツが専門ではなく、体幹

機能などを研究してきたので、的外れな質問かもしれませんが、膝にかかる圧縮力の観点から、できるだけ屈曲位で最大地面反力を受けたほうがよいというのはわかったのですが、90度より30度のほうが圧縮力ははるかに大きいのでしょうか。完全伸展位であれば、圧縮力はもろにかかり、下腿が内旋していくということはわかるのですが、スポーツ動作であれば、完全伸展位もないことはないでしょうが、ある程度膝は屈曲位になっていることが多いと思います。すると、膝屈曲角度30度と90度では圧縮力はそんなに変わらないのではないかと思われるのですが。

下河内：同じ方向で同じ大きさの最大地面反力を受けたとすると、30度より90度のほうが脛骨長軸方向に働く大腿脛骨間力は間違いなく小さくなると思います。ひと昔前まで言われていたのは、膝をあまり屈曲しないで着地すると、大腿四頭筋が働いたとき膝蓋靭帯の張力による脛骨前方剪断力が生じやすいということでした。

しかし、もうひとつ言えることは、最大地面反力を受けたときの膝の屈曲角度が浅いと、脛骨の前方への傾きが少なくなることにより地面反力由来の脛骨後方剪断力が小さくなり、脛骨長軸方向に働く力、ひいては脛骨前方剪断力の大きさが高くなることも考えられます。以上のことから、膝の屈曲角度が浅い状態で最大地面反力を受けたほうがリスクは高まるだろうと考えられます。しかし、ひとつ興味深い論文があり、先ほどから紹介している Meyer や Haut らの研究グループによるものですが、彼らの研究グループはもともと自動車事故の研究をしていたようで、運転中に事故を起こしたとき、膝が挟み込まれて、それで ACL が損傷するというメカニズムを検証していたようです。そのようなメカニズムを、現在もウサギを使って実験しています。ウサギを上向き（仰臥位）に寝かせて、膝を90度屈曲位にし、上からおもりを落とすとして ACL を損傷させるというものです。この実験から考えられることは、もしかしたら、膝の屈曲角度は直接的には関係なく、脛骨に対してどういう角度で地面反力を受けるかということのほうが直接的な問題なのかもしれません。

鈴木：おもしろいですね。

下河内：よくわからないことですが…。

うひとつよくわからないことがあり、先ほど、これまでの研究結果を総合してみるとこういう仮説が言えるのではないかと述べましたが、確かに私の研究では地面反力が足関節から身体重心の前方に傾くと、大腿四頭筋よりハムストリングスなどによる膝関節屈曲モーメントが優位になるほうが働くようになります。この影響がどうなのか。主に大腿四頭筋の働きにより生じる膝伸展モーメントのピークはもう少しあとのことです。先ほど接地後37msecで脛骨の最大圧縮力が生じたということを述べましたが、最大膝関節伸展モーメントが片脚着地中に生じるのは、それよりも約25msecあたりです。ですから、通常の片脚着地においては、最大大腿脛骨間力が生じる少し後で、大腿四頭筋の活動が大きくなる。もしかしたら、通常の着地モデルではそういうことになるのかもしれませんが、もしかしたら、大腿四頭筋などの予備収縮度合などで、このようなタイミングの関係性も異なってくるのかもしれませんが。実はそのような実験も行う予定にしています。

疲労の問題

— バasketボールなどでジャンプ着地時に ACL 損傷が生じますが、その着地時に先生がおっしゃったように上体が後方に傾いていて着地した場合などがそうですが、空中動作なので、それは防ぎようがないように思うのですが、どうすればよい？

下河内：そのまま着地を無理やりせずに転がってしまうほうがよいかと思うのですが、試合中、転んだほうが安全でも、選手は無理やり着地をして転ばないようにすることがあり、我々にとっては怖いと思う瞬間です。ACL 損傷が起こるのは着地（接地）から0.04秒後だとすると、着地する前からなんとかしておかないと間に合わない。足が接地してからなんとかしようとしても無理だと思います。空中感覚や身体感覚の向上などいろいろなことをしておかないと、なかなか防げないと思います。安全な衝撃吸収の方法を考えると、いかに、衝撃吸収で下肢3関節の伸筋群をうまく使うか、ということが重要になってくると思いますが、そのためには、足をどの位置につくかも非常に重要になると思います。つまり、空中で足を適切な位置に移動させ、接地後に下肢伸筋群が使いやすい場所に接

地させなければ、接地後に効率的に安全な衝撃吸収をしようと思っても不可能になると思います。だから、下肢の伸筋群のみを鍛えるのではなく、脚の位置を調節するための股関節周りのその他の筋群の機能も向上させることは重要だと思います。そういう点から考えて、いろいろな方向にジャンプをさせて着地させるのはよい練習の一例かと思えます。

あとは膝を曲げないで着地しないということを見ると、試合の後半でかなり疲労してくると、膝を曲げられなくなるので、かなりしっかりした筋力トレーニングも必要だと思います。

鈴木：筋力トレーニングはやはり必要ですか？

下河内：基本的な筋肥大や筋力向上を目指す筋力トレーニングは絶対必要だと思います。それが基本的としてあったうえで、身体の使い方を覚えさせるようなファンクショナルトレーニング的なものがあるべきだと考えています。

鈴木：私はずっと筋電図研究を行っているのですが、たとえば接地して ACL が断裂するということは、接地してすぐに予防できるように筋が働いてくれれば断裂は防げるのでないかと考えると、パワーも大事だとは思いますが、より反応性を高めるようなトレーニングも大事なかもしれませんね。

——その反応性が疲労によって低下して、ゲームの後半や終わりのほうで ACL 損傷が起こるといふ傾向もある？

下河内：可能性としてあると思います。NCAA のデータでも試合の後半でケガの発生は増えていることが示されています。ただ、実際に ACL 損傷が生じたときに、身体がどのように衝撃を受け、身体内部でどのような力を発揮し、どのように骨が動いたかなどというデータは、技術的・倫理的な側面から測定できないので、仮説でしかものが言えないのですが。

ACL 損傷の予防

——先ほど、アメリカでは ACL 損傷が年間 20 万件発生しているということでしたが、これだけ世界中で外傷予防、とくに ACL 損傷については予防に取り組んでいても、発生数は減少していない？

下河内：全体的には減少していないと思

ますが、Hewett らの研究グループや、その他いくつかの研究グループの報告においては ACL 損傷は介入により減少したことを報告しています。このような報告から、「ACL 損傷予防のために推奨されるトレーニング」というものがつくられています。しかし、実際にトレーニング指導してみると、「これをやっておけば防げます」と言ってメニューを渡すだけで防げるかというと、それは無理です。チームや選手によってモチベーションも異なるし、練習量や質も異なりますので、ひとつのトレーニング方法がすべてのスポーツチームに適合させられるかと言ったら、それは無理だと思います。それよりも、ACL 損傷のメカニズムからトレーニング目標を導き出し、そのトレーニング目標を達成するためにトレーナー自らチーム状況に応じたトレーニングプログラムを作ることが重要だと思います。そして、選手には徹底的にトレーニングの意味や ACL 損傷予防のために必要なことを理解させ、すべてがうまくいったときに初めて予防できるのだらうと、つくづく思います。

鈴木：下河内先生の研究室で勉強させていただいている内田先生、井口先生のほうから何かつけ加えることがありますか？

内田：こういう意見をいただいて、それぞれの現場で活かすということにしています。私はサッカーが専門フィールドなのですが、足関節を使うというのはよく理解できます。疲労の話もありましたが、試合後半に外傷が多いということを考え、疲労に関するタスクを取り入れたメニューも用いて外傷予防を心がけています。



うちだ・やすゆき先生

井口：私は足関節を使ったバランスを中心に研究しています。まだ膝との関係を見るまでには至っていないので、今後はそのあたりも併せて考えていきたいと思っています。先ほども、着地動作では足関節の衝撃吸収が大きいという話がありましたが、そこから展開していこうとしている段階です。

鈴木：ジャンプとは違うのですが、我々の運動療法では、歩行で接地するとき、どちらかと言うと背屈位で入っていきます。ヒールからコンタクトして、そこで圧を与えるということをしています。ちょうど逆かなと思っていました。ACL に関しては脛骨が後方に行くので、つま先から着地したり、フラットに着地したほうが地面反力はより前方を通るのでよいというのはよくわかるのですが、歩行での捉え方とは逆になります。すると、膝の外傷という視点で考えると、歩行であまりヒールからのコンタクトを強調しすぎるのもよくないのかなという印象も受けました。

下河内：踵からついてつま先へというのも、前脛骨筋が働いていれば、いい減速の方法だと思います。ちゃんとしたデータはまだ出されていないと思いますが。

2 吉田先生のプレゼンテーション後のディスカッション

鈴木：井口先生は足部の仕事をされていますが、今の吉田先生の話についていかがですか？

井口：足関節捻挫の発生には底屈位が大きく関係するのではないかと考えています。私は修士論文において片脚開眼立ちのバランステストで足関節の動揺性をみたのですが、過去の捻挫の回数で 2 回以下の群と 3 回以上の群に分けて、足関節の矢状面と水

平面と前額面の角速度を算出しました。そして角速度の時系列データから平均周波数を算出し、その値を足関節動揺性と定義して検証を行いました。これまで足関節の動揺性を検証した先行研究では、足関節は中間位の状態、硬く安定した床面上で片脚バランステストを行い、そのときの圧力中心の軌跡に関する変数を足関節動揺性の指標として用いることが普通でした。しかし、

実際の捻挫の発生は底屈位で生じやすいことが報告されていますし、その肢位では構造的にも足関節は不安定になりやすい。足関節の不安定性を検証した過去の研究 (Knapp et al 2011) でも、床面を厳しい状況にするなど、通常の床上で行う片脚バランステストよりも難しいタスクで評価を行ったほうが、より足関節の不安定性を正確に評価できるのではないかと示唆しています。以上の知見に基づいて、修士論文では、片脚バランステストを、硬い水平の床面で行う条件、水平の床上にバランスマットを置き、その上で行った条件、足関節を底屈させる傾斜した床面上で行う条件、そして、傾斜した床面上にバランスマットを置き、その上で行う条件の4条件で行わせ、足関節の動揺度合を検証しました。検証の結果、平坦な床にマットを置いても足関節の動揺性に有意な差はみられませんでした。傾斜した床上にバランスマットを置いた条件だと、他の条件と比較し、とくに前額面で最も足関節の動揺性が高くなるという結果でした。また、捻挫3回以上の脚においては、マットを置いたときの足関節動揺性は、傾斜した床上にバランスマットを置いた条件のほうが平坦な床より水平面で高くなる結果でした。

下河内: 補足ですが、底屈位で不安定なバランスマットを置いたときに最も足関節の動揺性が高くなりましたが、おもしろいことに、底屈位でも、不安定なマットを置かない床条件の場合は、他の条件と比較し最も足関節の動揺性が低くなるという結果になりました。また、足関節は中間位となる水平で安定した床面上と、水平な床面上に不安定なバランスマットを置いた条件の間には足関節動揺性には有意差はありませんでした。

鈴木: それはおもしろいですね。

下河内: この研究では、足関節の動揺性は、足関節の角速度の時系列データから導き出された平均周波数をもとに評価しました。この変数を用いる利点は、角速度のデータは動く方向が変われば必ずプラスマイナスが変わりますので、どの程度頻繁に足が揺れ動いたか、ということの基準になります。つまり、頻繁に足が揺れる方向が変わっていれば、平均周波数は上がることになります。ただ、どれだけ揺れ幅が大きかったかという、振幅の度合は評価できませんので、

すべての側面から足関節の動揺性を反映しているわけではありません。しかし、我々のこの研究結果を考えると、底屈位にする足関節は構造的に不安定になって、それを筋肉でサポートしなくてはいけない部分が増えるだろう、ということはあるのではないかと思います。傾斜した、安定した床面上で片脚バランスを行う条件では、他の条件と比較して足関節の動揺性が低下する結果は、我々は、筋肉で支える度合が高くなった分、足関節周りを共収縮させ、動きの自由度を低下させたのではないかと予想しています。ガッチリ固めてしまって自由をなくしてしまって安定性を保つ。しかし、構造的に不安定な状況でマットを置いてしまうと共収縮ではどうしようもなくなってしまって、おそらく伸張反射がものすごく増える状態になり、動揺性が高まっているのではないかと考えています。足関節底屈位では構造的な機械的なサポートがなくなるので筋肉のサポートがより増える。足関節捻挫の予防を考えるのであれば、我々は、底屈位で不安定なマット上で行うようなバランストレーニングも必要になるのではないかと考えています。

鈴木: いろいろな筋肉が使われる必要性があるということですね。

下河内: 次はもっとしっかりと、足関節動揺性が変化する仕組みを検証するために、筋電図データも取って検証していくことが必要だと思っています。

鈴木: 吉田先生は、いかがですか？

吉田: 底屈位で不安定になる、これはそうだと思います。しかし、背屈制限がある選手が多いので、優先的にはそのファクターをつぶすことを行われたほうがいいのではないかと思います。代償的に前足部の関節が柔らかくなっていることが多いので、そこをチェックして、そこから下河内先生が言われたようなトレーニングに入っていくのがベターだと思います。

鈴木: 内田先生、先生の臨床ではどうですか？

内田: サッカーでは底背屈の制限を有する選手が多いので、お二人の研究は現場の示唆に富んでいますし、実際に使いやすいと思います。動揺性に対して、よく現場でバランスディスクを使うなどしていると思いますが、ポジションタスクで位置を維持しようとするのか、フォースタックスで外力に



いぐち・まこと先生

抵抗しようとするのか、おそらく制御メカニズムは変わってくると思うので、そういうところを現場で使っていければと思います。

鈴木: いろいろな場面に応じて、トレーニングのやり方は変える必要がある。

内田: 底背屈のトレーニングは当然必要ですし、バランスもそうですが、クリティカルなものはまだはっきりしていないと思うので、それがどうかというものを1つずつみつけられればと思っています。それにはこういった研究データなどを現場に活かしていけるといいですね。

下河内: 今年は井口先生の修士論文の研究結果があったので、足関節捻挫の予防も兼ねて本学の女子ハンドボール部の選手たちにつま先立ちで行うスクワットも一時期取り入れてみました。背屈制限がひどく、スクワットで膝が曲げられず下肢の筋群を鍛えきれない選手にも有効かと思い、取り入れたということもあります。

鈴木: 予防になりそうですね。

下河内: そんな気がするのですが、本当に予防につながっているかどうかはデータも何もありませんのでわかりません。ただ選手たちはこのようなスクワットでも100kg近く、またはそれ以上持ち上げていたので、慣れれば足関節周りの神経筋機能の向上と下肢の筋力向上を両立させられるのではないかと感じています。

鈴木: 私たちの運動療法のなかでは、踵を上げて母指にきちんと体重を乗せるようにして膝の屈伸のトレーニングを行っています。きちっと背屈と回内をさせて、足関節・足部の安定性を求めることを行っていますが、下河内先生のトレーニングはおもしろいと思います。

吉田先生が足部のアライメントの話を読みました。私の専門で興味のあるところで言うと、足部より上のアライメントが変わってくる。最初から足部で外側接地した