

## 前十字靱帯損傷リスクの簡便なスクリーニング指標としての 前額面膝関節偏位指標の提案

小笠原 一 生 白 木 仁 向 井 直 樹  
竹 村 雅 裕 宮 川 俊 平

### FRONTAL-PLANE KNEE DISPLACEMENT INDEX AS A SCREENING TOOL FOR RISK OF ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT INJURY

ISSEI OGASAWARA, HITOSHI SHIRAKI, NAOKI MUKAI,  
MASAHIRO TAKEMURA and SHUMPEI MIYAKAWA

#### Abstract

The aim of this study is to examine the potential of the two-dimensional posture evaluation method as a screening tool for detecting the high-risk population for anterior cruciate ligament injury.

Eleven healthy adults participated in this study. They jumped from a 31 cm-high box and landed on their dominant leg. Three-dimensional knee flexion/extension, knee valgus/varus and hip adduction/abduction angle during single-legged landing were calculated. At the same time, the Frontal-plane Knee Displacement index (FKD) -the knee joint position relative to the line between the hip and ankle joint- was measured.

FKD reflects the time variation of three-dimensional knee valgus and hip adduction angle very well.

Our results suggest that FKD has potential as a screening tool particularly for movement occurring primarily in the frontal-plane.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2008, 57 : 553~562)

**key word** : Prevention, Screening, Anterior cruciate ligament, Single-legged landing, Kinematics

#### I. 緒 言

膝前十字靱帯(anterior cruciate ligament : ACL) 損傷はスポーツ外傷の中でもとりわけ重篤な外傷である。ACL 損傷を負った選手は治療のために靱帯再建術が必要になる場合が多く、その場合はリハビリテーションによって長期間の競技離脱を余儀なくされる。ACL 損傷者には共通して観察される特徴がある。まずは下肢のアライメント異常である。過度な外反膝<sup>1)</sup>や過回内足<sup>2,3)</sup>が ACL 損傷の発生に寄与すると報告がある。また、全身弛緩性<sup>4,5)</sup>や膝関節自体の弛緩性<sup>6)</sup>の高さと ACL 損傷との関連が報告されている。さらに女性では性ホルモン動態が

ACL 損傷に関与すると考えられている<sup>7,8)</sup>。これら ACL 損傷者に見られる共通項は ACL 損傷の危険因子ととらえることができる。これらの危険因子を評価項目としてスクリーニングを行い、ハイリスクな集団を特定することは ACL 損傷の予防方策を効率的に進める上で不可欠である。

Hewett et al.<sup>9)</sup>は205名のアスリートを対象に、ジャンプ着地タスクの動作解析実験を行った。そしてその後2年間、ACL 損傷の発生を前向き的に調査した。その結果、調査期間中に ACL 損傷を経験した9名の被験者は他の被験者に比べてジャンプ着地時の膝関節外反角度および膝関節を外反強制する関節モーメント(膝関節外反モーメント)が有意に高値

を示したと報告した。この報告は、運動中の過度な膝関節外反や外反モーメントが ACL 損傷の危険因子となることを示すと同時に、運動中の膝関節の運動学を計測することで ACL 損傷のリスクをスクリーニングできる可能性を示すものである。これまで多数の報告によりジャンプ着地やカッティングといった荷重減速動作中に膝関節外反が生じることが確認されており、さらに ACL 損傷率が男性と比較して高い女性において膝関節外反が顕著である<sup>10)</sup>ことから、運動中に生じる膝関節外反は ACL 損傷のメカニズムになると推察されてきた。Hewett et al. はこれらの推察に対し前向き研究という形で ACL 損傷と膝関節外反との関連をより明確に示したと言える。先に挙げた下肢アライメント異常や関節弛緩性は静的な因子であった。一方、Hewett et al. の報告は、運動中に生じる関節の挙動をスクリーニング指標として注目した点で新規性があり、動的因素のスクリーニングの必要性を主張するものである。このような理由から ACL 損傷の危険因子をスクリーニングする過程において下肢の運動学、とりわけ膝関節外反を評価項目に加えることの意義は大きい。しかしながら一般にスポーツ現場において精密な動作解析は以下の点で困難な場合が多い<sup>11)</sup>。まず設備面である。運動計測に用いるカメラやモーションキャプチャシステム、データ収集機器には高価な機材が多く、誰もが容易に使用できる環境は稀である。さらに時間面の問題がある。3次元運動学解析に関わるデータ処理、およびデータの妥当性の検討は非常に時間がかかる作業である。加えて技術的問題として、運動学解析はある程度の工学的知識やプログラミングに関する技術が必要なことが挙げられる。これらの問題を解決し、臨床で動的な危険因子のスクリーニングを現実的にするためには、計測が簡便ながらも3次元的な下肢運動学を反映する評価指標の確立が望まれる。そこで本研究は前額面膝関節偏位指標(Frontal-plane Knee Displacement index; 以下 FKD と記述する)を提案する。FKD は荷重減速動作時に膝関節が体の正中方向に偏位した距離を前額面で計測したものである(Fig. 1)。FKD の利点は前額面上の2次元で計測するため、3次元運動学解析に比べて計測に必要な機器を大幅に縮小することができる。加えて、FKD は距離情報であるため、関節角度に比べて算出が容易であるという

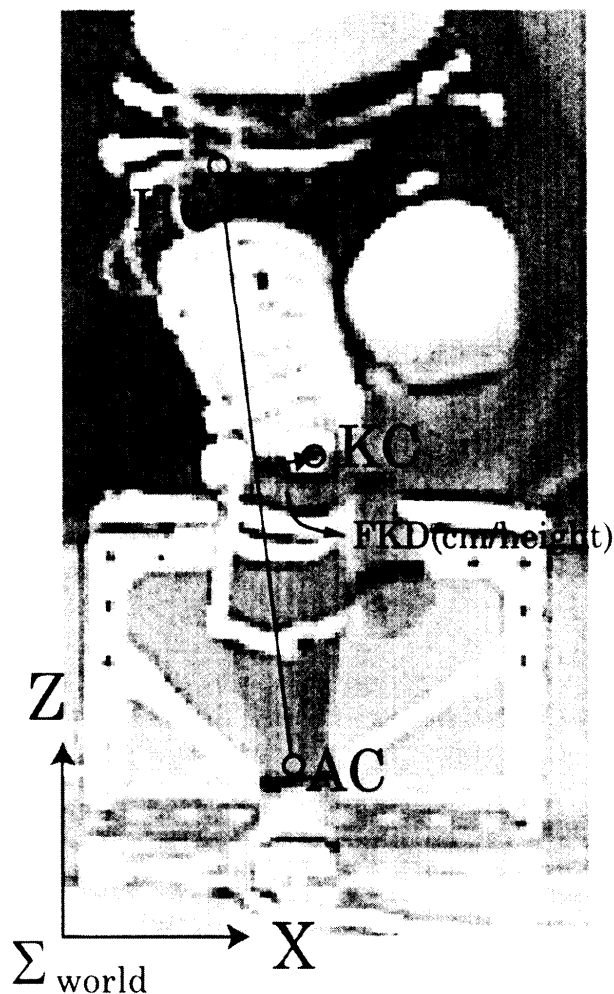


Fig. 1. The definition of Frontal-plane Knee Displacement index (FKD). On the two-dimensional plane which was spanned by X and Z-axis of world coordinate system, the distance between the center of knee joint (KC) and the line from the hip joint center (HC) to the ankle joint center (AC) was defined as FKD. When the KC shifted medially from the HC-AC line, FKD was expressed as a positive value.

利点もある。

さらに我々がFKDに注目したもう一つの理由は、膝関節が体の正中方向へ偏位した距離は、膝関節外反や股関節内転を含む肢位をひとつの変数で表現できると予想したからである。Hewett et al.<sup>9)</sup>が注目した膝関節外反は ACL 損傷の直接的なメカニズムとなりうるが、それが運動中に単独で生じることではない。膝関節外反は必ず股関節や足部の影響下で生じる関節肢位であり、実際の ACL 損傷の映像分析を行った研究では膝外反と同時に膝の回旋や股関節内外転、内旋が観察されたと報告している<sup>12)</sup>。とりわけ股関節の運動は膝関節に肢位に大きく影響することから<sup>10,13)</sup>、股関節の運動を考慮しつつ膝

関節の肢位を評価することが望ましい。荷重した状態で膝関節外反および股関節内転が増大した場合、膝関節が体の正中方向に偏位する。そこで我々は、その偏位距離を計測することにより、これら複数の関節にまたがる下肢肢位をひとつの距離変数で表現できるかと考えた。

我々はFKDをACL損傷の危険因子をスクリーニングする指標として臨床応用することを最終的な目標としている。そのためにはFKDが既にACL損傷の危険因子として報告されている<sup>9)</sup>膝関節外反をどれほど反映するかを検討しなければならない。加えて、膝関節外反に付随して生じる股関節の前額面の運動とFKDとの対応も確認する必要がある。また、前額面で計測したFKDが、前額面以外の次元、とりわけ膝関節の矢状面の運動にどの程度影響されるかを把握する必要がある。そこで本研究ではFKDの初歩的研究として、以下の仮説を検討する。

仮説 1) FKDは3次元的な膝関節外反/内反角度の時間変化を反映する。

仮説 2) FKDは3次元的な股関節内転/外転角度の時間変化を反映する。

仮説 3) FKDは矢状面上の運動学である膝関節屈曲角度の時間変化を反映しない。

## II. 方 法

### A. 対 象

膝関節に既往のない健常女性11名(身長 $165.9 \pm 7.2$  cm, 体重 $59.2 \pm 6.0$  kg, 年齢 $19.7 \pm 1.6$ 歳)を対象とした。我々は被験者に対して筑波大学人間総合科学研究科倫理委員会が承認した実験計画書を用いて研究の目的と内容が説明し、被験者はそれらを十分に理解した上で研究への参加を承諾した。実験に先立ち、Bonci<sup>14)</sup>の方法を参照して被験者の解剖学的特徴の評価を行った。その上で被験者の下肢関節に拘縮等が無いこと、下肢アライメント異常が無いことを確認した。なお、解剖学的特徴の評価の結果をTable 1に示した。

### B. 実 験

実験試技は31 cmの台からの片脚着地タスクであった。着地に用いる脚は通常ボールを蹴る脚とし、全員右脚であった。被験者は十分なウォーミングアップの後、身体計測点として両側の上前腸骨棘

Table 1. Physical and anatomical characteristics of subjects.

subjects	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	Q-Angle (deg)	Leg-Heel (deg)	Navicular drop (cm)	Thigh-foot angle (deg)	Hip ROM						Knee ROM		
								Ex	Flex	Add	Abd	Ext•rot	Int•rot	SLR	Ex	Flex
a	22	170.0	51.8	15	10	0.8	15	30	155	25	60	50	60	110	10	160
b	19	162.3	60.4	15	10	0.8	5	25	140	20	65	45	40	70	0	150
c	18	155.0	56.2	16	14	0.9	10	20	150	15	60	60	40	100	5	150
d	20	165.5	59.2	11	10	0.4	15	30	130	20	45	35	40	100	5	140
e	19	176.0	66.2	20	12	0.8	15	20	140	25	65	55	50	110	5	140
f	22	156.3	51.6	17	11	0.6	20	20	145	15	55	55	40	90	0	150
g	18	166.5	60.2	10	12	0.4	5	20	150	20	50	40	40	90	0	150
h	19	163.0	52.2	15	5	0.5	20	30	150	15	60	55	40	90	10	150
i	18	161.5	58.5	15	8	0.7	5	20	145	15	60	50	35	100	0	140
j	22	170.0	63.5	10	0	0.5	10	25	140	20	45	40	40	95	5	145
k	20	179.0	71.0	18	13	0.5	10	13	150	15	60	45	55	110	10	150
Average	19.7	165.9	59.2	14.7	9.5	0.6	11.8	23.0	145.0	18.6	56.8	48.2	43.6	96.8	4.5	147.7
SD	1.6	7.2	6.0	3.2	4.0	0.2	5.6	5.5	7.1	3.9	7.2	7.8	7.8	11.9	4.2	6.1

(ASIS), 大転子(GT), 着地脚の膝関節裂隙の外側(LK), 内側(MK), 膝蓋骨の左右端を結ぶ線分の中点(PT), 内果(MM), 外果(LM)にマーカーを貼付した. 被験者が着地する箇所には矢状方向に直線が引かれ, 被験者はこの直線に足の向きが沿うように着地することが求められた. また着地箇所には著者らが作成したフットスイッチを設けた. このフットスイッチは被験者が接地した瞬間にアナログ信号を出力し, さらに発光ダイオードが点灯するように設計されている. フットスイッチからの信号はサンプリング周波数 1000 Hz にて A/D 変換しパーソナルコンピュータに保存した. 片脚着地タスクは 3 台のデジタルビデオカメラ(DCR-TRV17; ソニー株式会社)を用いて撮影した. カメラ間の同期はフットスイッチにつけた発光ダイオードを点灯することにより行った.

着地後 2 秒間, 片脚立位を保てずに遊脚をついてしまった試行, 床の直線から足がずれて着地した試行, 体幹が著しく回旋, 傾倒して左右の ASIS, GT に貼付したマーカーが 3 台のカメラのうち 2 つ以上のカメラで認識できなかった試行は股関節中心を算出する過程での精度低下を懸念して失敗試行とした. 成功試技を 3 試技計測できた時点で実験を終了とした.

### C. データ処理

#### 1. 3次元座標の取得とキネマティックモデル

データ処理の対象は成功 3 試技とした. 片脚着地タスクの映像から, 3 台のカメラごとに被験者の体に貼付したマーカーの 2 次元座標を得た(サンプリング周波数 60 Hz). 2 次元座標データおよびフットスイッチからの信号は同期のためサンプリング周波数 100 Hz 相当のデータに補間処理を行った. カメラ 3 台分の 2 次元座標とカメラ定数から DLT 法を用いて 3 次元座標を算出した. 3 次元座標はバターワースフィルタ(カットオフ周波数 6 Hz)を用いて平滑化した. ASIS と GT の座標より股関節中心(HC)を推定した<sup>15)</sup>. MK, LK マーカーの中点を膝関節中心(KC)とした. また, MM, LM マーカーの中点を足関節中心(AC)とした. その上で, Fig. 2 が示すとおり pelvis, thigh, leg の 3 セグメントから成るリンクモデルを構築した. それぞれのセグメントにはローカル座標系( $\Sigma_{\text{pelvis}}$ ,  $\Sigma_{\text{thigh}}$ ,  $\Sigma_{\text{leg}}$ )を

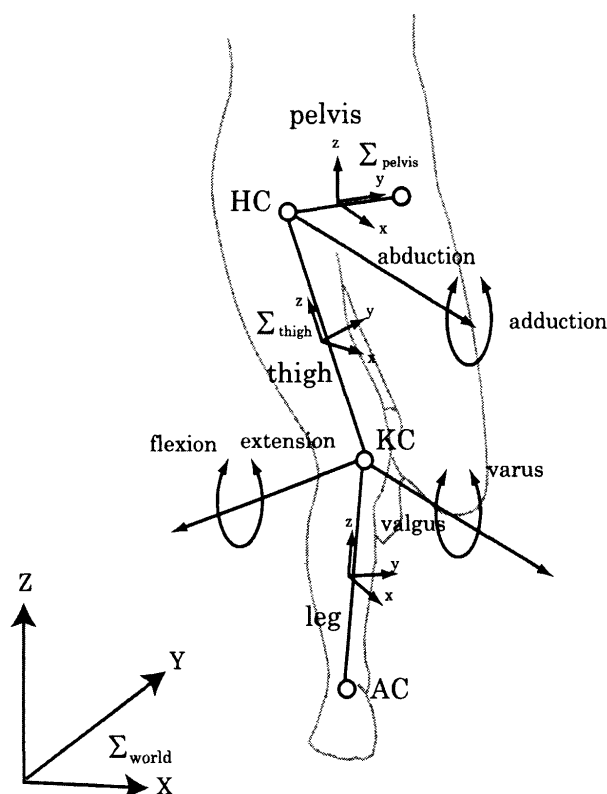


Fig. 2. The definition of kinematic link model and the joint angles. This model was consisted of pelvis, thigh and leg segments. Each segment had a local coordinate system. Knee flexion/extension was defined as the leg segment rotation occurring about y-axis of the thigh coordinate system. Knee valgus/varus was defined as the leg segment rotation occurring about the cross product made by the thigh y-axis and the leg z-axis. Hip adduction/abduction was defined as the thigh segment rotation occurring about the cross product made by the pelvis y-axis and the thigh z-axis. Knee flexion, knee valgus and hip adduction were expressed as positive value.

設定した.

#### 2. 3次元関節角度の算出

膝関節角度の算出は Grood et al.<sup>16)</sup>の方法を参照し, 膝関節伸展/屈曲はlegセグメントの $\Sigma_{\text{thigh}}$  y 軸まわりの運動とした. また, 膝関節外反/内反は leg セグメントの $\Sigma_{\text{thigh}}$  y 軸と $\Sigma_{\text{leg}}$  z 軸との外積で計算されるベクトルまわりの運動とした. 股関節内転/外転はWu et al.<sup>17)</sup>の方法に従い, thigh セグメントの $\Sigma_{\text{pelvis}}$  y 軸と $\Sigma_{\text{thigh}}$  z 軸との外積で計算されるベクトルまわりの運動とした. なお, 膝関節屈曲方向, 膝関節外反方向および股関節内転方向を正とした. 関節角度データの解析対象範囲は着地前 200 ms から着地後 500 ms までの 700 ms とし, 着地の瞬間を 0 ms とした.

## 3. 前額面膝関節偏位指標(FKD)の算出

以下の式により FKD を算出した。

$$FKD = \frac{[(AC_z - HC_z)KC_x + (HC_x - AC_x)KC_z + AC_x HC_z - HC_x AC_z]}{\sqrt{(HC_x - AC_x)^2 + (HC_z - AC_z)^2}} \times Height^{-1} \times 100$$

式 1

ここで HCx, HCz は絶対座標系における HC の座標の x 成分と z 成分である。同様に KCx, KCz は KC の x 成分, z 成分を示し, ACx, ACz は AC の x 成分と z 成分を示す。FKD は Fig. 1 が示す通り, 絶対座標系の XZ 平面に HC, KC および AC を投射し, HC と AC を結ぶ線分から KC の隔たっ

た距離を算出することに相当する。本研究では HC と AC を結ぶ線分から KC が内側へ距離を持った場合を正とし, 外側へ距離を持った場合を負とした。また, 算出した FKD は被験者の身長で除して標準化した。3次元関節角度と同様に, FKD の解析対象範囲は着地前 200 ms から着地後 500 ms までの 700 ms とした。

## D. FKD と 3 次元関節角度の相関

FKD と各 3 次元関節角度(膝関節屈曲/伸展, 膝関節外反/内反, 股関節内転/外転)間の相関係数を算出することにより, FKD と関節角度間の時間変化

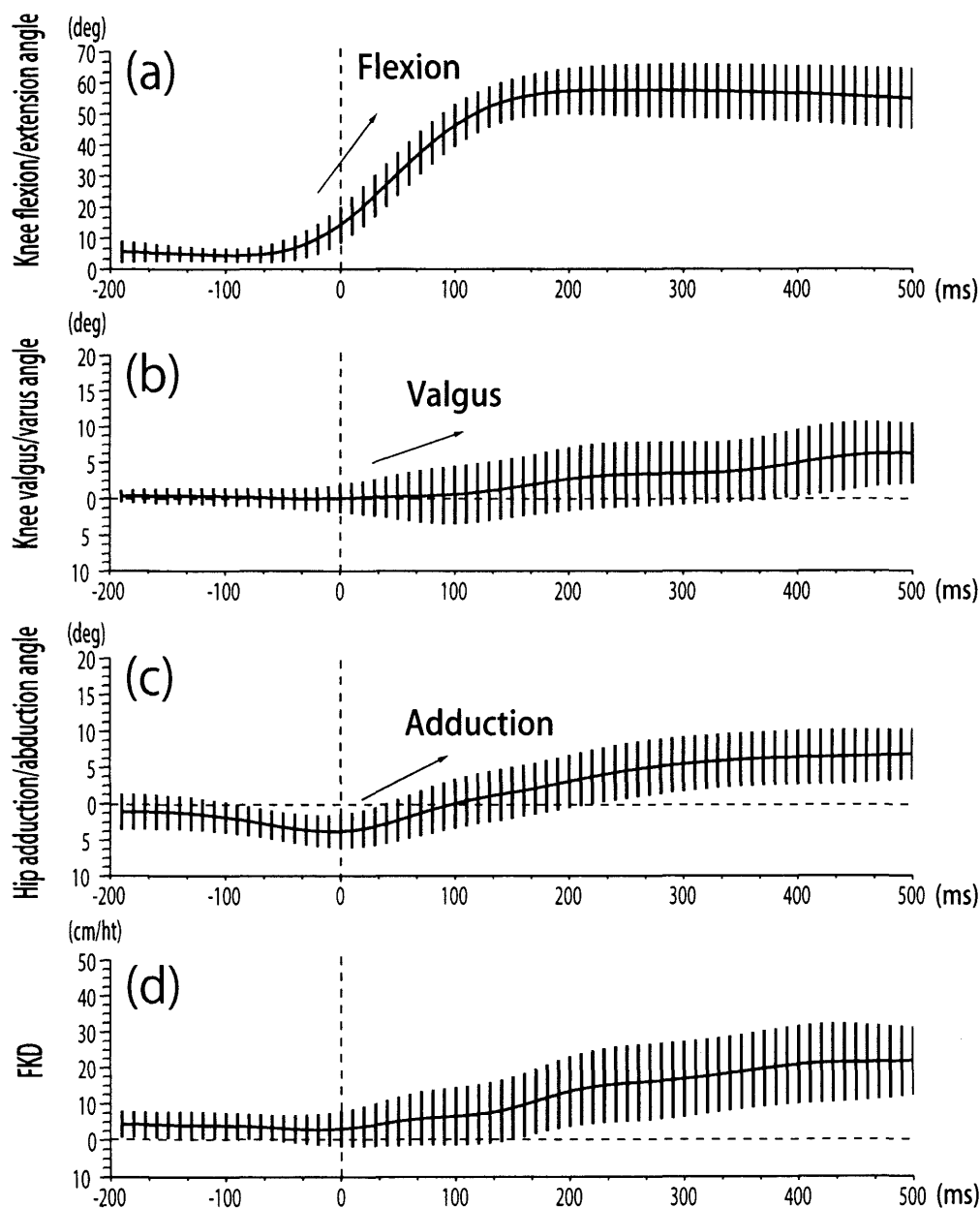


Fig. 3. Averaged three-dimensional joint angles (a; Knee flexion/extension angle, b; Knee valgus/varus angle, c; Hip adduction/abduction angle) and FKD as a function of time. The vertical dashed line indicates the timing of foot contact.

の類似性を検討した. FKD および各 3 次元関節角度はサンプリング周波数 100 Hz 相当で時間窓 700 ms 分のデータであるので, それぞれ 70 データポイントある. 被験者ごとに FKD と関節角度の同時刻のデータポイントを対応させて, 式 2 を用いて FKD と各関節角度間の相関係数を算出した. また全被験者の関節角度平均値と FKD の平均値の間の相関係数も同様に算出した.

$$R = \frac{\sum (angle_i - \overline{angle})(FKD_i - \overline{FKD})}{\sqrt{\sum (angle_i - \overline{angle})^2 \sum (FKD_i - \overline{FKD})^2}} \quad (i = 1, 2, \dots, 70)$$

式 2

### Ⅲ. 結 果

#### A. FKD および 3 次元関節角度の時間変化

Fig. 3 は片脚着地時の膝関節屈曲/伸展角度(a), 膝関節外反/内反角度(b), 股関節内転/外転角度(c), FKD(d)の時間変化を示したものである. 図中の垂直破線は足部が床に接地した瞬間(0 ms)を示している. 膝関節は接地前から屈曲し始め, 接地後に急峻に屈曲した. 接地後およそ 150 ms 以降は屈曲を止め, 関節角度を維持した(Fig. 3-a). 膝関節外反/内反角度は接地前に変化は見られず, 接地後に外反方向に増大した(Fig. 3-b). 股関節は接地前において外転方向に運動していたが接地を境に内転した(Fig. 3-c). FKD は, 接地前には変化が見られなかったが, 接地後に膝関節が内側に偏位したことから増大した(Fig. 3-d).

#### B. FKD と 3 次元関節角度間の相関係数

Table 2 には各被験者の, および平均した FKD と 3 次元関節角度の間の相関係数を示した. また, Fig. 4 は FKD を x 軸に, 3 次元関節角度を y 軸にとってプロットし両変数の関係を視覚的に示した. なお, 図中の矢印は時間経過の方向を表すものである. 膝関節屈曲/伸展角度は着地の開始と終了ではデータが回帰直線付近にプロットされるものの, 接地の瞬間である 0 ms を過ぎたあたりではプロットが上方に弧を描き(Fig. 4-a), 両変数の時間変化が類似していないことが示された. 相関係数は  $R = 0.82$  であった. 一方, 膝関節外反/内反角度(Fig. 4-b)および股関節内転/外転角度(Fig. 4-c)とFKDの関

Table 2. Correlation coefficients between each subject's and averaged three-dimensional joint angles and FKD.

#### Between each subject's joint angles and FKD

	Correlation coefficients		
	Knee flex/ex vs FKD	Knee val/var vs FKD	Hip add/abd vs FKD
subject a	0.85	0.98	0.97
subject b	0.35	0.92	0.94
subject c	0.65	0.98	0.87
subject d	0.83	0.97	0.97
subject e	0.86	0.96	0.94
subject f	0.82	0.94	0.95
subject g	0.91	0.30	0.98
subject h	-0.03	0.96	0.67
subject i	0.98	0.96	0.97
subject j	-0.82	0.60	-0.67
subject k	0.75	0.41	0.87

#### Between averaged joint angles and averaged FKD

	Correlation coefficients		
	Knee flex/ex vs FKD	Knee val/var vs FKD	Hip add/abd vs FKD
Averaged	0.83	0.98	0.98

係は, プロットが直線的に並び, 高い相関関係が認められた(FKD vs 膝関節外反/内反角度;  $R = 0.98$ , FKD vs 股関節内転/外転角度;  $R = 0.98$ ).

### Ⅳ. 考 察

#### A. FKD と 3 次元関節角度の関連

Hewett et al.<sup>9)</sup>により, ジャンプ着地時に生じる過度な膝関節外反は ACL 損傷の危険因子になることが報告されている. このことから, ACL 損傷のリスクをスクリーニングする際に, 動的な下肢運動学を評価することの意義は大きい. しかしながら, 一般に臨床で運動学解析を行うことは設備面や時間面での負担が大きく, さらに膝関節外反を屈曲と区別して算出するには 3 次元運動学解析に関する知識が必要となる. そのため臨床において多くの被験者を対象に運動学解析を行うことは困難な場合が多い. この問題に対して本研究は FKD を提案することで運動学解析の煩雑さを軽減し, 臨床における ACL 損傷リスクのスクリーニングに役立てることを目的としている.

Table 2 より FKD と膝関節外反角度および股関

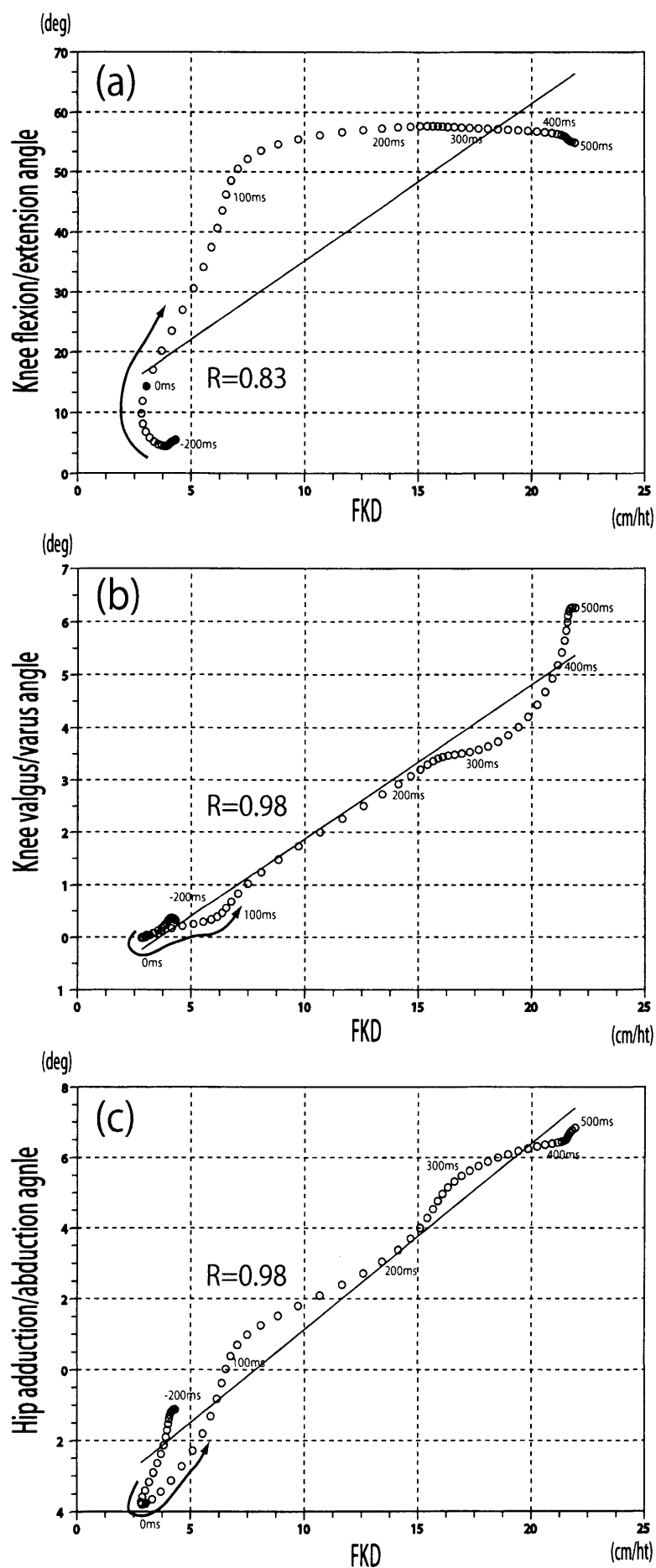


Fig. 4. Associations between the time-sequence (700 ms time-window of 100 Hz sampling frequency, i. e. 70 data points) of the three-dimensional joint angles and FKD. The vertical axis

represents the three-dimensional joint angle (a ; Knee flexion/extension angle, b ; Knee valgus/avrus angle, c ; Hip adduction/abduction angle) and the horizontal axis indicates FKD.

節内転角度の間には高い相関関係があった。Fig. 4 が示すとおり、FKD と膝関節外反、股関節内転の時間変化の類似性が視角的に確認できた。特に膝関節外反との間では、接地(0 ms)から接地後 200 ms 区間ではプロットがほぼ直線的であり、極めて類似した時間変化をしていたことが示された(Fig. 4-b)。これらの結果は仮説1および仮説2を支持すると考えられる。このことから FKD は2次元平面上の距離情報ながらも被験者の前額面で生じる3次元的な関節角度変化を反映した指標であることが示唆された。仮説3で検討した FKD と膝関節屈曲角度の関係であるが、Fig. 4-a が示すとおりプロットが上方に弧を描き、膝関節屈曲角度は前額面上の関節角度とは異なる特徴を持つ時間変化であったことが示された。FKD と膝関節屈曲/伸展角度の間の相関係数が  $R=0.83$  と決して低くないことから、FKD は矢状面上の関節運動を反映しないとした仮説3を完全に否定することはできないが、前額面上で起こる膝関節外反/内反や股関節内転/外転と対比して考えると FKD は矢状面上よりも前額面上で起こる関節角度変化を鋭敏に反映する指標であると考えることができる。

本研究と同様に、3次元運動学解析の煩雑さを避ける目的で3次元関節角度を2次元で表現しようとした試みがある。McLean et al.<sup>11)</sup> は3次元的に算出した膝関節外反角度と、それを前額面に射影した2次元的な膝外反角度との相関をサイドステップ、サイドジャンプおよびシャトルランの3つの動作タスクで評価した。その結果、サイドステップおよびサイドジャンプにおいて3次元膝外反角度と2次元膝外反角度のピーク値の間に中程度の相関が認められた。また、McLean et al. は2次元膝外反角度を測定する際に一般的な商用ビデオカメラを用いているため、臨床応用に期待できる手法である。しかしながらこの研究で算出された2次元膝外反角度は3次元膝外反角度よりも値が大きくなる傾向があり、解剖学的に想像しがたい数値となっている。また、この研究は膝関節外反のみに注目したものであり、股関節内転や膝関節屈曲といった他の関節運動との対応を検討していない。この点については、下肢関節

群の複合的な肢位を指標化しようと試みた本研究と異なる部分である。また、膝関節外反角度を距離情報で表現しようとした研究には以下のものがある。Ford et al.<sup>18)</sup> は両脚での着地後、即座に最大努力で垂直跳躍を行うタスクを用いて、その時の左右の膝関節間の距離を計測した。その上で膝関節外反角度と膝関節間の距離の性差を評価したところ、女性が男性に比べて有意に大きな膝関節外反角度を示し、膝関節間距離が減少した。この研究では、膝関節外反角度と膝関節間距離の間の相関関係は検証していないものの、文中には先行的に両変数間の相関関係が高いことを確認した上で計測を行ったとの記述がある。このことは本研究の結果と合わせて、距離情報が関節角度情報を間接的に反映しうる可能性を示すものであると考えられる。本研究を含め、これらの研究に共通する目的として ACL 損傷のリスクをスクリーニングする際の運動計測に関わる技術的、時間的な負担を軽減することがある。一般にスクリーニングは大人数を対象にして行われる場合が多いことから、運動計測の負担は可能な限り軽減されることが望ましい。本研究で提案した FKD や McLean et al.<sup>11)</sup> による2次元膝関節外反角度、Ford et al.<sup>18)</sup> による膝関節間距離は3次元的な膝関節外反角度を完全に再現するものではない。この点においては、スクリーニング目的の FKD と精度を求める運動学解析とは切り分けて考える必要がある。しかしながら、本研究の結果より FKD が3次元的な膝関節外反や股関節内転をある程度反映することが示されたので、FKD の限界を理解したうえで臨床応用に向けたさらなる研究を継続する意義は示されたと考える。

## B. FKD の限界

FKD は動作タスクに依存して変化することが考えられる。本研究では片脚着地タスクを採用したが、他のタスクにおいては FKD と3次元関節角度の相関の傾向は異なる可能性がある。この点から FKD を用いて評価を行う際は、動作タスクを統一して検討しなければならない。さらに本研究では片脚着地タスク中に体幹が回旋した試技や大きくバラ



ンスを崩して片脚立位を保てなかった試技を失敗試技として除外した。この理由として Fig. 1 で見た絶対座標系の XZ 平面に対して、被験者の前額面が大きく角度を持った場合、膝関節屈曲や股関節内転が見かけ上の膝関節外反角度に影響すると考えたためである。このことは FKD のみならず 3 次元関節角度を 2 次元で表現しようと試みる際に必ず考慮すべき問題である。既述したように McLean et al.<sup>11)</sup> は 3 次元膝外反角度と 2 次元膝外反角度の対応をサイドステップ、サイドジャンプ、シャトルランの 3 タスクを用いて評価したが、シャトルランでは 3 次元膝外反角度と 2 次元膝外反角度の相関が最も低かった。これはシャトルラン中に被験者の前額面が絶対座標系の XZ 平面に対して大きく角度を持つため、本来評価したい膝外反角度と除外したい膝屈曲角度などの他の運動とが前額面で区別できなくなったためである。これらのことから FKD を用いるには、被験者の前額面が絶対座標系の XZ 平面と終始一致するタスクを選定しなければならないという制約がある。

### C. 今後の課題と臨床応用

本研究は 11 名という少ない被験者を対象に FKD を提案した。今後 FKD を臨床利用可能な指標として確立させるためには、より大人数の被験者を対象とした調査を行い、被験者間の再現性を確認する必要があると考える。また、同様に被験者内での再現性も確認する必要がある。

FKD を計測する際に用いる動作タスクを同時に提案することも重要と考える。既述したように、被験者が回転するような動作タスクは FKD 計測に適していない。本研究では片脚着地を動作タスクとして用いたが、このタスクも場合によって体幹の回旋や傾倒が生じたので、今後はさらに安定した結果の得られる動作タスクで FKD 計測を行い最適な運動タスクを提案する必要があると考える。

また、FKD の増減に影響を与える運動学的変数で今回の実験では測定していないものとの対応も検討すべきと考える。具体的には股関節や膝関節の回旋角度である。片脚荷重位で体幹を回旋させず膝関節外反、股関節内転が生じた場合、足部が地面に拘束されているために膝関節や股関節には必ず回旋偏位が生じる。前額面の運動である膝関節外反や股関節

内転が ACL 損傷と関連深いという議論と並行し、膝関節の内外旋や股関節内旋もまた ACL 損傷時の姿勢として重要視されている下肢運動学である<sup>10)</sup>。加えて本研究の結果においても前額面以外の運動学である膝関節屈曲と FKD との間に比較的高い相関関係があったことから、膝関節や股関節の回旋も FKD の増減に関与していることが十分に考えられる。したがって、臨床応用の段に移る事前に FKD の膝、股関節回旋に対する敏感性も確認する必要がある。

本研究では 3 台のカメラを用いた運動計測環境にて被験者の体に貼付したマーカの 3 次元座標を取得し、その座標を絶対座標系 XZ 平面に射影して FKD を算出した。これは 3 次元関節角度を算出するために必要な手順であったが、FKD のみ算出するのであればカメラ 1 台で計測可能である。今後、別の機会にてより簡便な動作計測環境で FKD を算出する技術報告を行う予定である。

(受理日 平成20年8月7日)

### V. 参考文献

- 1) J. P. Shambaugh, A. Klein, J. H. Herbert. Structural measures as predictors of injury basketball players. *Med Sci Sports Exerc.* (1991), **23**(5), 522-527.
- 2) M. E. Beckett, D. L. Massie, K. D. Bowers, D. A. Stoll. Incidence of Hyperpronation in the ACL Injured Knee : A Clinical Perspective. *J Athl Train.* (1992), **27**(1), 58-62.
- 3) J. K. Loudon, W. Jenkins, K. L. Loudon. The relationship between static posture and ACL injury in female athletes. *J Orthop Sports Phys Ther.* (1996), **24**(2), 91-97.
- 4) J. M. Uhorchak, C. R. Scoville, G. N. Williams, R. A. Arciero, P. St Pierre, D. C. Taylor. Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: a prospective four-year evaluation of 859 West Point cadets. *Am J Sports Med.* (2003), **31**(6), 831-842.
- 5) G. D. Myer, K. R. Ford, M. V. Paterno, T. G. Nick, T. E. Hewett. The Effects of Generalized Joint Laxity on Risk of Anterior Cruciate Ligament Injury in Young Female Athletes. *Am J Sports Med.* (2008).
- 6) R. Ramesh, O. Von Arx, T. Azzopardi, P. J. Schranz. The risk of anterior cruciate ligament rupture with generalised joint laxity. *J Bone Joint Surg Br.* (2005), **87**(6), 800-803.
- 7) E. M. Wojtys, L. J. Huston, M. D. Boynton, K. P. Spindler, T. N. Lindenfeld. The effect of the menstrual cycle on anterior cruciate ligament injuries in women

- as determined by hormone levels. *Am J Sports Med.* (2002), **30**(2), 182-188.
- 8) E. M. Wojtys, L. J. Huston, T. N. Lindenfeld, T. E. Hewett, M. L. Greenfield. Association between the menstrual cycle and anterior cruciate ligament injuries in female athletes. *Am J Sports Med.* (1998), **26**(5), 614-619.
  - 9) T. E. Hewett, G. D. Myer, K. R. Ford, R. S. Heidt, Jr., A. J. Colosimo, S. G. McLean, A. J. van den Bogert, M. V. Paterno, P. Succop. 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.* (2005), **33**(4), 492-501.
  - 10) B. L. Zeller, J. L. McCrory, W. B. Kibler, T. L. Uhl. Differences in kinematics and electromyographic activity between men and women during the single-legged squat. *Am J Sports Med.* (2003), **31**(3), 449-456.
  - 11) S. G. McLean, K. Walker, K. R. Ford, G. D. Myer, T. E. Hewett, A. J. van den Bogert. Evaluation of a two dimensional analysis method as a screening and evaluation tool for anterior cruciate ligament injury. *Br J Sports Med.* (2005), **39**(6), 355-362.
  - 12) T. Krosshaug, A. Nakamae, B. P. Boden, L. Engebretsen, G. Smith, J. R. Slauterbeck, T. E. Hewett, R. Bahr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball : video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med.* (2007), **35**(3), 359-367.
  - 13) 小笠原一生, 宮永 豊, 白木 仁, 向井直樹, 竹村雅裕, 八十島 崇, 宮川俊平. 片脚着地時に見られた下肢 kinematics の性差. *体力科学.* (2006), **55**, 403-412.
  - 14) C. M. Bonci. Assessment and Evaluation of Predisposing Factors to Anterior Cruciate Ligament Injury. *J Athl Train.* (1999), **34**(2), 155-164.
  - 15) 倉林 準, 持丸正明, 河内まき子. 股関節中心推定法の比較・検討. *バイオメカニズム学会誌.* (2003), **27**(1), 29-35.
  - 16) E. S. Grood, W. J. Suntay. A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions : application to the knee. *J Biomech Eng.* (1983), **105**(2), 136-144.
  - 17) G. Wu, S. Siegler, P. Allard, C. Kirtley, A. Leardini, D. Rosenbaum, M. Whittle, D. D. D'Lima, L. Cristofolini, H. Witte, O. Schmid, I. Stokes. ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion--part I : ankle, hip, and spine. *International Society of Biomechanics. J Biomech.* (2002), **35**(4), 543-548.
  - 18) K. R. Ford, G. D. Myer, T. E. Hewett. Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Med Sci Sports Exerc.* (2003), **35**(10), 1745-1750.