

原著

超音波を用いた脛骨後方転位の定量的評価 — 健常膝における相対的・絶対的信頼性 —

沖本 遼^{1*}, 森内 俊貴¹, 砂野 徳志¹, 延川 祥大¹, 松尾 高行²¹ 社会医療法人行岡医学研究会 行岡病院リハビリテーション科² 大阪行岡医療大学医療学部

受付日 2019年11月15日

採択日 2020年5月11日

要旨

本研究の目的は、後十字靭帯(posterior cruciate ligament: PCL)損傷膝に対する超音波(ultrasound: US)による膝後方不安定性評価の確立である。両側健常膝に対し、USプローブの設定位置を一定化するための器具を用いた測定を考案し、測定的信頼性を検証した。背臥位膝屈曲90°立膝位にて、US gel padと自作の器具(custom-made device: CMD)を用いて測定した。静止画像より大腿骨内側上顆の頂点と脛骨前縁間の距離(femur-tibia-step-off: FTSO)をImage Jにて算出し、FTSOの左右差(side-to-side-difference: SSD)を指標とした。相対的信頼性は級内相関係数(intraclass correlation coefficients: ICC)を算出し、絶対的信頼性は、Bland-Altman分析により、系統誤差の有無を検証後、ICC(1, 3), (2, 1)を用いて標準誤差(standard error of the mean: SEM)、最小可検変化量(95% confidence intervals of minimal detectable change: MDC₉₅)を算出した。相対的信頼性では検者内・検者間ともに3回ICC(1, 3), (2, 1)で信頼性が高かった。絶対的信頼性では検者内・検者間ともに加算誤差・比例誤差は認められなかった。検者内MDC₉₅0.68mm, SEM0.25mm, 検者間MDC₉₅0.61mm, SEM0.22mmであった。FTSOのSSDの3回平均値は0.11±0.52mmであり、誤差の許容範囲内であった。本手法のUS測定は、3回平均値で相対的・絶対的信頼性が得られ、膝後方不安定性評価として有用である。

*責任著者

沖本 遼

社会医療法人行岡医学研究会

行岡病院リハビリテーション科

E-mail:

ryo271738@gmail.com

キーワード

後十字靭帯損傷

超音波

posterior sagging

はじめに

後十字靭帯(posterior cruciate ligament: PCL)は前外側線維側と後内側線維側に分けられ¹⁾、大腿骨内側顆の外側面と脛骨後顆間区を通る²⁾。作用として一般的に脛骨後方転位(posterior sagging)の制動を有する。Posterior saggingは背臥位膝屈曲位70°~90°の重力下・後方牽引で最も検出され³⁾、膝屈曲90°で最もPCLが緊張する⁴⁾と報告されている。

PCL損傷の典型的な受傷のメカニズムは膝屈曲位で脛骨前面から後方へ外力が加わり、受傷することが多い⁵⁾と報告

されている。PCL損傷の理学所見としてsagging徴候、補助診断として単純X線、MRIがある。Shinoらはposterior saggingの定量的評価として、両膝の側面単純X線撮影(gravity sag view: GSV)を行い、信頼性は高い⁶⁾と報告している。しかし、この評価は、被曝の関係から照射回数や測定環境が限定される。一方、超音波(ultrasonography: US)は被曝の影響はなく、簡便で、繰り返し測定ができ、測定肢位の制約が少ない⁶⁾。松尾らは前十字靭帯損傷膝を対象にUSを用いて膝前方不安定性評価を行い、骨の位置評価に精度

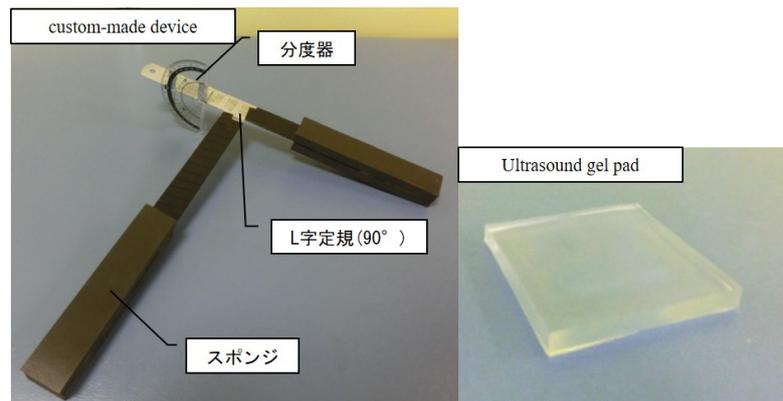


Fig 1. custom-made device and Ultrasound gel pad

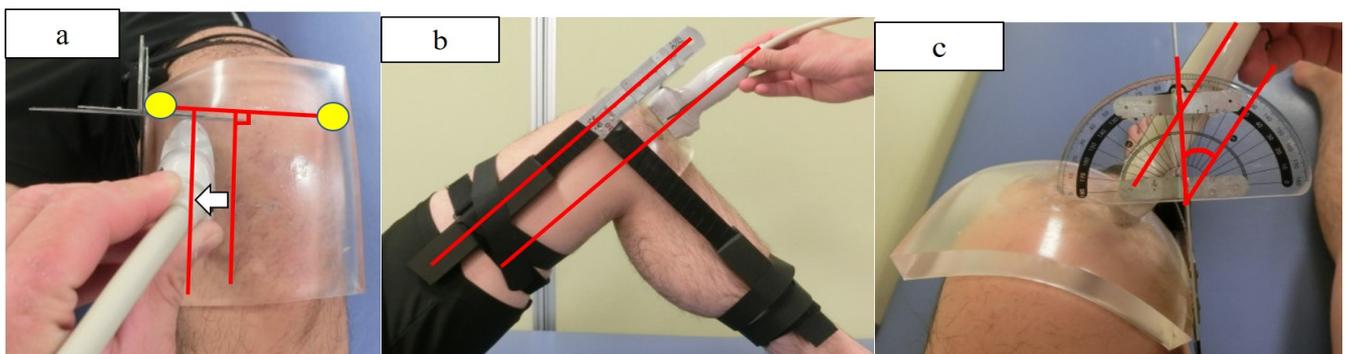


Fig 2. a) Probe setting position (frontal plane). Set perpendicular to the line connecting the medial femoral condyles and the lateral femoral condyles. Translates inward from there. b) Probe setting position (sagittal plane). The inclination of the probe is parallel to the femoral long axis. c) Probe setting position (horizontal plane). Parallel to a line set every 10°.

の高い CT による測定との比較を行った。その結果、両測定法間で誤差は少なく、十分な精度を有している⁷⁾と報告している。

PCL 損傷膝において GSV と同一肢位での US 測定は、症例により posterior sagging の程度が異なり、プローブの設置条件の統一が困難であり、再現性に欠ける測定であった。そこで我々は、プローブの設定位置を一定化するため、US gel pad と自作の器具(custom-made device: CMD)(Fig. 1)を作成し、前額面・矢状面・水平面の 3 軸を規定する測定法を考案した。

本研究の目的は、PCL 損傷膝に対する US による膝後方不安定性評価の確立のため、両側健常膝に対し、US gel pad と CMD を用いた測定の信頼性を検証することである。

本研究の仮説は、桑原ら⁸⁾による ICC 基準において「可能」以上であり、松尾ら⁷⁾と同様に誤差は低値となり、高い信頼性が得られると考えた。US 測定における大腿骨-脛骨位置の左右差は史野ら³⁾の GSV における健常膝での $-0.1 \pm 1.7 \text{ mm}$ と近似値となると考えた。

対象と方法

対象は、膝関節に外傷の既往のない両側健常膝 10 名 20 膝とした。性別は男性 7 名、女性 3 名、年齢は 25.2 ± 2.6 歳、身長は $166.9 \pm 5.8 \text{ cm}$ 、体重は $61.4 \pm 9.1 \text{ kg}$ であった。対象者に対し、事前に研究趣旨について十分に説明した後、同意を得て研究を行った。

本研究は拘束時間を 30 分以内とし、被検者から中止の要請がある際は中止とした。行岡病院の倫理委員会の承認(承認番号: 2019031501)を得て行った。

測定肢位は、GSV と同一肢位で、背臥位膝屈曲 90° 立膝位とした。使用機器は US Noblus と L64 リニアプローブ(日立アロカメディカル株式会社製)を使用した。US gel pad は ultrasound gel pad SONAGEL(東芝医療用品株式会社製)を使用し、膝前面に貼付し、CMD を大腿部に緊縛した。CMD を用いた基本軸の規定として、前額面は大腿骨内顆と外顆を触診し、2 点を結んだ線に垂直線(Fig. 2a)、矢状面は大腿骨長軸に平行な線(Fig. 2b)、水平面は 10° ごとに設定した線に平行(Fig. 2c)とした。基本軸を規定した後、膝蓋骨内

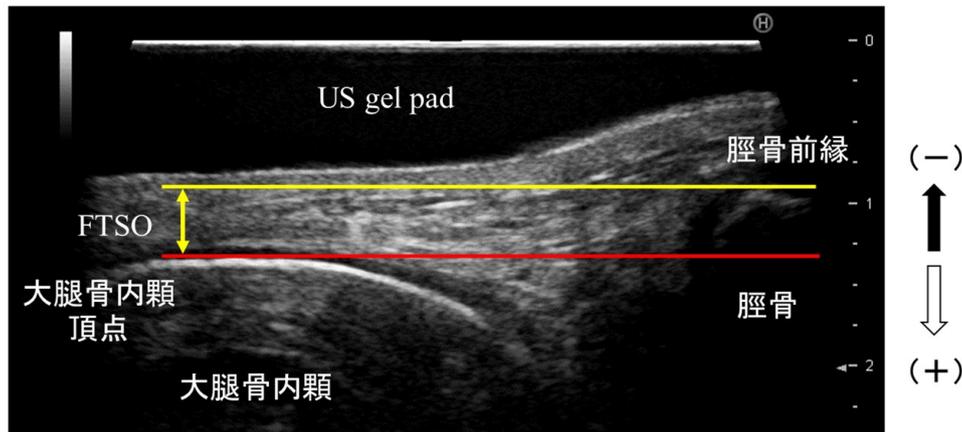


Fig 3. Femur-tibia-step-off: FTSO

FTSO is defined between the top of the medial femoral epicondyle and the anterior edge of the tibia.

The posterior dislocation is assumed to be +, and the anterior dislocation to be - with reference to the apex of the medial femoral epicondyles.

側縁から内側へプローブを移動させ、プローブの傾きを調整し、大腿骨内顆の最高点と脛骨を描出し、静止画保存した画像を Image J1.51(National Institutes of Health, <http://imagej.nih.gov/ij/>)を用いて解析し、大腿骨内側上顆の頂点と脛骨前縁間の Femur-tibia-step-off (FTSO)を測定し、大腿骨内側上顆の頂点を基準に後方転位を+, 前方転位を-と定義し、大腿骨-脛骨位置を算出した(Fig. 3). 各静止画像で算出した FTSO から左右差 (side-to-side-difference: SSD)を指標とし、測定し、脛骨後方転位の定量的評価を行った。2名の検者による再測定の検証は同一条件で行った。

精度の観点から測定回数を決定するために、平行テスト法で用いられる Spearman-Brown の公式 1 を用い、算出した⁹⁾。

$$k = \frac{\rho_2(1-\rho_1)}{\rho_1(1-\rho_2)} \dots 1$$

ρ_1 : ICC(1, 1)の結果
 ρ_2 : 目標とする係数数値

予備研究において信頼性があるとされる「可能」の最低限の ICC 0.60 が ICC(1, 1)で算出され、「良好」の最低限の ICC 0.80 を期待した場合、2.6回必要となり、繰り上げの3回測定を測定回数として決定した。一側を3回測定し、測定ごとにプローブのみを外し、静止画像を保存したのち、反対側を測定した。測定肢と2名の検者の測定はランダムに行った。相対的信頼性はエクセル統計ソフト Ver. 4.15 (Bellcurve for Excel) を使用し、級内相関係数(intraclass correlation coefficients: ICC)は FTSO-SSD を用いて検者内信頼性 ICC(1, 1), ICC(1, 3)と検者間信頼性 ICC(2, 1), とそれらの 95% 信頼区間(95% confidence intervals: 95%CI)を算出した。絶対的信頼性は Bland-Altman 分析¹⁰⁾

にて系統誤差の有無を検証後、FTSO-SSD の3回測定の平均値の ICC(1, 3), (2, 1)を用いて標準誤差(standard error of the mean: SEM), 最小可検変化量(95% confidence intervals of minimal detectable change: MDC₉₅)を算出した。^{11,12,13,14,15)}

結果

相対的信頼性の結果を示す(Table 1). ICC(1, 3)は 0.78 であり、検者内において1回測定より3回測定で ICC が高値であった。ICC(2, 1)は 0.72 であり、3回平均値を用いることで ICC が高値であった。検者内・検者間ともに相対的信頼性が高かった。絶対的信頼性の結果を示す(Table 2, 3). Bland-Altman 分析において検者内・検者間ともに加算誤差・比例誤差は認められなかった。誤差の許容範囲(95%CI)は検者内-0.93~1.15, 検者間-0.88~1.27 であり、FTSO-SSD は誤差の許容範囲内であった(Fig. 4). MDC₉₅は 1mm 未満であり、SEM は低値であった。FTSO-SSD の3回平均値は 0.11 ± 0.52mm であった。

Table 1. Relative reliability

The ICC (1,3) 0.78, ICC (2,1) 0.72 was a high value in three measurements, and the relative reliability was high.

	ICC	95%CI
(1,1)	0.53†	0.16~0.83
(1,3)	0.78†	0.36~0.94
(2,1)	0.72†	0.25~0.92

†: P<0.01

Table 2. Systematic error in Bland-Altman analysis
Although there was an addition error within and between the examiners, there was no proportional error.

	Bland-Altman分析				
	加算誤差		比例誤差		
	95%CI	加算誤差の有無	回帰直線の傾き	比例誤差の有無	
検者内	-1.12~1.20	無	r = 0.60	P = 0.07	無
検者間	-0.88~1.27	無	r = -0.28	P = 0.43	無

Table 3. Absolute reliability
MDC₉₅ was less than 1 mm both within and between examiners, and FTSSD was within the error range. The SEM value is low and the variation is small.

	FTSO-SSD (mm)	MDC ₉₅ (mm)	SEM (mm)
検者内	0.11 ± 0.52	0.68	0.25
検者間	0.19 ± 0.54	0.61	0.22

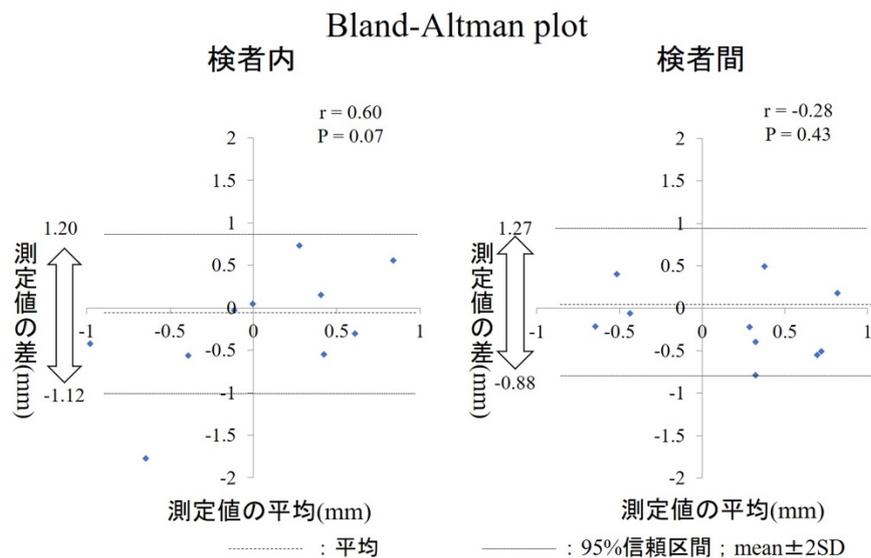


Fig 4. Bland-Altman plot
95% confidence intervals of average ± 2 SD (standard deviation). The SSD of FTSSO was within the error range.

考察

本研究の結果は、相対的信頼性で ICC(1, 3)は 0.78 であり、検者内において 1 回測定より 3 回測定で ICC が高値であった。ICC(2, 1)は 0.72 であり、3 回平均値を用いることで ICC が高値であった。桑原らによる ICC 基準⁸⁾において「良好」であり、本手法では検者内・検者間ともに高い信頼性が得られたと考えられた。

系統誤差について、本研究の結果は Bland-Altman 分析の Bland-Altman plot(Fig. 4)にて加算誤差では 95%CI が 0 を含み、正と負の両方向へプロットされており、比例誤差は認めなかった。とくに検者間においては相関係数が低値であり、p は高値であった。Bland らは加算誤差が認められない場合、Bland-Altman plot において、95%CI が 0 を含み、正と負の両方向へプロットされ、比例誤差が認められない場合、相関係数は低値を示し、p 値は高値を示す¹⁰⁾と報告していることから本手法では検者内・検者間ともに FTSSO-SSD は誤差の許容範囲内であると考えた。

Faber らは MDC₉₅ 以内の測定値の変化は測定誤差によ

るものである¹¹⁾と報告していることから、本研究の結果は検者間・検者内ともに FTSSO-SSD は MDC₉₅ の測定値以内であったことから測定誤差であると考えられた。

吉田らは健康人での足関節の前方引き出しテストにおいて外果-距骨間距離を US にて測定し、検者内・検者間ともに ICC 0.9 以上と高い再現性から US での定量評価の有用性¹²⁾を報告している。小川らは US にて健康人での脛骨大腿間距離を測定し、検者内測定誤差 0.30±0.21mm、検者間測定誤差 0.34±0.22mm であり、検者内・検者間ともに ICC 0.9 以上であり、再現性が高く、信頼性が高い⁶⁾と報告している。また松尾らは前十字靭帯損傷膝に対し、US 評価において CT と比較し、測定誤差が内側 0.2±1.1mm、外側 0.1±1.1mm であり、膝関節前方不安定評価は十分な精度がある⁷⁾と報告している。小川らは健康人での膝関節牽引時の関節裂隙距離の変化を US にて算出している。離開距離の平均値は検者 A 1.3mm、検者 B 1.6mm であり、MDC₉₅ は検者内 0.7mm、検者間 0.8mm¹⁶⁾と報告している。したがって、先行研究^{6,7,15,16)}から US を用いた定



量的評価は ICC 0.9 以上であり、測定誤差が 1mm 未満と高い再現性と信頼性がある。本研究は検者内・検者間ともに ICC0.7 以上と先行文献よりやや信頼性は低下するが、临床上簡便に測定が可能であると考えられた。信頼性が低下した原因として、膝関節前方からの US 測定は大腿骨内側顆の骨形態上、丸みがなだらかり、頂点の規定が困難であったことが信頼性の低下につながったと考えられた。临床上簡便に測定するため、プローブの設置を徒手にて行った。青木らはプローブ操作には専門的な知識や経験的な探查手技が必要となり、検査者に依存し、さらに診断時の定量的なデータ(押し付け力、押し込み深さ)は存在しない¹⁷⁾と報告しており、プローブ操作の熟練度が信頼性の低下に影響したと考えられ、本研究の限界であったと考えられた。信頼性を上げるためには測定時のプローブの設置位置の写真を撮るなどして設置位置を確認することが必要であると考えられた。

Moore らは PCL 損傷の重症度分類をグレード 0~3 の 4 段階に分類し、3~5mm の posterior sagging を部分損傷、6~10mm の posterior sagging を完全断裂、10mm 以上の posterior sagging を PCL の複合靭帯損傷と報告している¹⁸⁾。Shino らは GSV において PCL 損傷者 28 人中 27 人が 3mm 以上の posterior sagging がみられ、そのうち新鮮例で 5.6mm、陈旧例で 10.6mm の posterior sagging がみられたと報告しており³⁾、PCL 損傷において測定値が 1mm 単位の画像評価が必要となる。本研究では先行研究と比較し、検者内・検者間ともに ICC 0.7 以上であり、MDC₉₅ が検者内で 0.68mm、検者間で 0.61mm であることから、先行研究と同様の高い再現性と高い信頼性があり、US における膝関節後方不安定性評価は十分な精度があると考えられた。また MDC₉₅ が 1mm 以下であることから 1mm 単位の画像評価が可能であると考えられた。Shino らは、精度の高い X 線による GSV における健常膝の FTSSO-SSD は -0.1 ± 1.7 mm である³⁾と報告しており、本研究の US の FTSSO-SSD と比較すると、本研究では検者内 0.11 ± 0.52 mm、検者間 0.19 ± 0.54 mm であり、Shino ら³⁾の健常膝の GSV と近似値であることから、本手法は信頼性が高いと考えられた。

したがって US gel pad と CMD を用いた US 測定は、前額面・矢状面・水平面の 3 軸を規定し、プローブの設定位置を一定化することができ、検者内・検者間ともに 3 回測定の平均値で相対的・絶対的信頼性が得られたと考えられる。

今後は PCL 損傷膝に対し骨の位置評価で精度の高い X 線による GSV と本手法の US 測定との比較を行い、精度検証する予定である。

US gel pad と CMD を用いた健常膝による測定において 3 回平均値で相対的・絶対的信頼性が得られた。

謝辞

本研究は社団法人アスリートケアの 2018 年度研究助成によって実施させていただきましたことを深く感謝申し上げます。

文献

- 1) D.C. Covey, Alexander A. Sapega: Anatomy and function of the posterior cruciate ligament. Clin Sports Med 13(3); 509-18, 1994
- 2) 坂井建雄, 松村譲児: プロメテウス解剖学アトラス 解剖学総論/運動学第 3 版. 医学書院, 2017. 1.1, P446
- 3) Shino K, Mitsuoka T, Horibe S, et al.: The gravity sag view: a simple radiographic technique to show posterior laxity of the knee. Arthroscopy 16(6); 670-672, 2000
- 4) Miyasaka T, Matsumoto H, Suda Y et al.: Coordination of the anterior and posterior cruciate ligaments in constraining the varus-valgus and internal-external rotatory instability of the knee. J Orthop Sci 7(3); 348-53, 2002
- 5) Schulz MS, Russe K, Weiler A, et al.: Epidemiology of posterior cruciate ligament injuries. Arch Orthop Trauma Surg 123(4); 186-91, 2003
- 6) 小川大輔・竹井仁・市川和奈・他: 超音波画像を用いた脛骨大腿骨間の距離計測に関する信頼性. 日本保健科学学会誌 14(2); 99-106, 2011
- 7) 松尾高行, 史野根生, 興村慎一郎・他: 超音波による膝関節前方不安定性評価の精度検定. JOSKAS, 41(2); 480-481, 2016
- 8) 桑原洋一: 検者内および検者間の Reliability(再現性, 信頼性)の検討. 呼吸と循環 41(10); 945-952, 1993
- 9) 対馬栄輝: SPSS で学ぶ医療系データ解析第 2 版. P212, 東京図書, 2010
- 10) J. Martin Bland, Douglas G. Altman: STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING AGREEMENT BETWEEN TWO METHODS OF CLINICAL MEASUREMENT. Lancet, 1(8476); 307-10, 1986
- 11) Faber MJ, Bosscher RJ, van Wieringen PC: Clinimetric properties of the performance-oriented mobility assessment. Phys Ther, 86(7); 944-54, 2006
- 12) 下井俊典: 評価の絶対信頼性. 理学療法科学 26(3); 451-461, 2011

結語



- 13) 下井俊典, 谷浩明: 最小可検変化量を用いた2種類
の継ぎ足歩行テストの絶対信頼性の検討. 理学
療法科学 25(1); 49-53, 2010
- 14) Joseph P Weir: Quantifying test-retest reliability using the
intraclass coefficient and the SEM. Journal of Strength
and Conditioning Research. 19(1); 231-240, 2005
- 15) 吉田昌弘, 菅原一博, 吉田真, 他: 超音波画像に
よる足関節前方引き出しテストの定量評価の再現
性. 理学療法科学 25(4);499-503, 2010
- 16) 小川大輔, 宇佐英幸, 安彦鉄平, 他: 超音波画像
解析による正常膝関節牽引時の関節裂隙距離変化
値の信頼性—相対信頼性と絶対信頼性の検証—.
日本保健科学学会誌 15(2); 81-88, 2012
- 17) 青木悠祐, 榊田晃司: 走査手技解析に基づいた超
音波診断のための医療ロボットの開発. 電気設備
学会誌 28(12); 935-938, 2008
- 18) Moore HA, Larson RL: Posterior cruciate ligament
injuries. Results of early surgical repair. Am J Sports Med
8(2); 68-78, 1980



Original article

Quantitative evaluation of posterior tibial dislocation using Ultrasonography — Relative and Absolute Reliability of the Healthy Knee —

Ryo Okimoto¹, Toshitaka Moriuchi¹, Satoshi Sunano¹, Shota Nobekawa¹, Takayuki Matsuo²

¹ Department of Rehabilitation, Yukioka Hospital

² Faculty of Health Science, Osaka Yukioka College of Health Science

ABSTRACT

Objective:

This study aimed to evaluate the posterior cruciate ligament for posterior knee instability in injured knees using ultrasound.

Methods:

The reliability of measurement using an ultrasound gel pad and self-made instrument for both healthy knees was verified using a custom-made device. In the supine and standing positions, the knee was maintained at 90° flexion, and the femur-tibia-step-off was calculated; the side-to-side-difference served as an index.

Results:

The intraclass correlation coefficient the average value of 3 measurements was high among and between the examiners. According to the Bland-Altman analysis, the minimum detectable change was <1 mm, and the standard error was low among and between the examiners. The average value of the side-to-side-difference of the femur-tibia-step-off was 0.11 ± 0.52 mm.

Conclusion:

The femur-tibia-step-off can be determined with relative and absolute reliability for an average of 3 measurements obtained using ultrasound. ultrasound is useful for the evaluation of posterior knee instability.

Key words: posterior cruciate ligament injury, ultrasonography, posterior sagging