

片脚垂直跳びテストを用いた 膝前十字靭帯再建術後における 膝伸展筋力推定式の妥当性

Validity of the knee extension muscle strength estimation formula after anterior cruciate ligament reconstruction using a single-leg vertical jump test

小杉 峻*¹, 山賀 寛*²

キー・ワード：anterior cruciate ligament reconstruction, knee extension muscle strength, return to sports
膝前十字靭帯再建術, 膝伸展筋力, スポーツ復帰

【要旨】 【目的】 膝前十字靭帯（以下、ACL）再建術後の片脚垂直跳び（以下、ジャンプ）テストを用いて作成した ACL 再建術後 6 ヶ月の膝伸展筋力推定式の妥当性を検証した。

【方法】 膝伸展筋力推定式 = $68.34 + (1.55 \times \text{患側ジャンプ高}) - (0.43 \times \text{体重}) - (11.29 \times \text{性別 (男性: 0, 女性: 1)})$ から算出した推定値と実測値間の誤差を Bland-Altman 分析にて明らかにした。さらに、スポーツ復帰時期における筋力基準値として体重比 80%（以下、%BW）のカットオフ値を術後 6 ヶ月の推定値から受信機操作特性曲線（以下；ROC）解析にて算出した。

【結果】 推定式に系統誤差は認めなかった。さらに、ROC 解析で得られた術後 10 ヶ月の筋力基準値のカットオフ値は、術後 6 ヶ月の推定筋力値 71.5%BW であった。

【結論】 ジャンプテストは、膝伸展筋力を推定する上で妥当な測定指標であることが明らかとなった。我々が作成した ACL 再建術後の膝伸展筋力推定式は、臨床上前問題とされる系統誤差を認めず、さらにはスポーツ復帰時期の筋力を予測できる可能性が示唆された。

はじめに

膝前十字靭帯（以下、ACL）再建術後は、膝関節の安定に関与する大腿四頭筋の筋力低下が生じやすく¹⁾、それは長期間に及び機能低下をきたす^{2,3)}。また、大腿四頭筋の筋力評価は、ACL 再建術後のスポーツ動作の開始や復帰を許可する重要な指標の 1 つとされている⁴⁻⁶⁾。大腿四頭筋の筋力を測る等速性膝伸展筋力（以下、膝伸展筋力）評価は、評価方法の再現性が高くゴールドスタンダードな方法として活用されている。しかし、測定可能な施設に限られることや測定に長時間を要

する欠点がある^{7,8)}。よって、簡易的に膝伸展筋力を評価する方法を開発することは臨床的に意義があると考えられる。そこで、我々は片脚垂直跳びテストを用いて膝伸展筋力推定式を作成した⁹⁾。

このように、新たに開発した評価指標を臨床応用する上で、評価指標に含まれる信頼性や妥当性について明らかにする必要がある。その中でも系統誤差のある評価指標は、検定や推定が本質的に無力といわれており、測定値の系統誤差の有無を確認する必要性が指摘されている¹⁰⁾。また、我々が作成した膝伸展筋力推定式は、ACL 再建術後 6 ヶ月の時期に限り有用性が認められている⁹⁾。ACL 再建術後の平均的なリハビリテーションプロトコルとして、術後 6 ヶ月からスポーツへ部分参加し、術後 10~12 ヶ月にスポーツへの完全復帰の許可

*1 国際医療福祉大学三田病院

*2 やまが整形外科

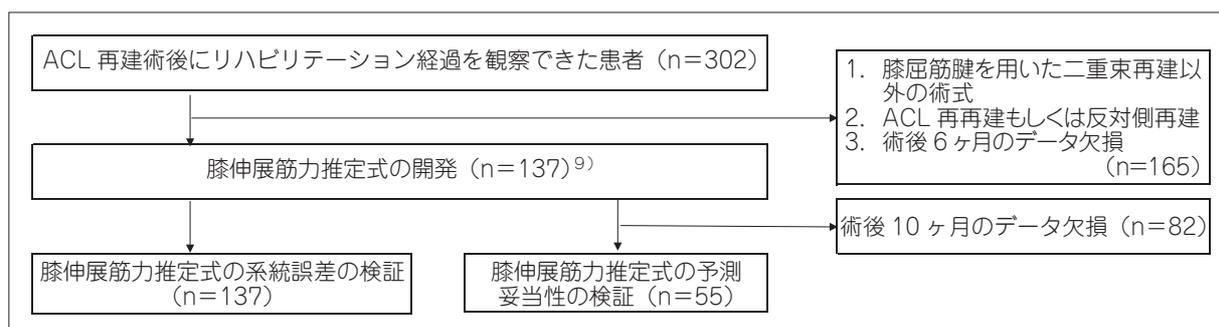


図1 対象者選定のフローチャート

が推奨されている^{11,12)}。一方で、スポーツ復帰を許可する指標としての筋力値は、筋力測定機器による測定値のばらつきや施設毎の術後リハビリテーションプロトコルの違いによって基準値は施設間で多少異なっている。加えて、復帰の判断時期に実施する評価において、必要な膝伸展筋力が不足していることが明らかになったとしても理学療法としての対応は後手となりやすい。そのため、スポーツへの復帰時期の前に筋力低下を予測できるかが臨床的な課題と言える。

スポーツへ復帰可能な膝伸展筋力の基準値は、角速度 60deg/sec にて膝伸展筋力の体重当たりのピークトルク値が 80% (以下, 80%BW) 以上といわれ、その許可基準で復帰した患者において良好な成績を得ていると報告されている^{13,14)}。この基準を達成できるかどうかを早い時期に予測できれば、復帰指標を満たさない患者に対して早期から対応策を考案することができ、臨床上有益な情報となる。

そこで本研究は、ACL 再建術後患者のジャンプ高を用いた膝伸展筋力の推定値と膝伸展筋力の実測値に含まれる系統誤差の有無について検証すること、そして、スポーツ復帰時期の目安である術後 10 ヶ月の膝伸展筋力を、術後 6 ヶ月の膝伸展筋力推定式から予測可能かどうかを検証し、同推定式の予測妥当性を明らかにすることを目的とした。

対象および方法

1 対象の選定と研究概要

平成 24 年 6 月から平成 27 年 12 月の間に整形外科クリニック (岐阜県岐阜市) の関連病院で ACL 再建術を施行し、同一の整形外科クリニックにてリハビリテーションを実施した患者 302 名の

うち、除外基準に該当した 165 例を除いた膝屈筋腱を用いた初回 ACL 再建術後 137 例を対象とし、カルテを用いた後方視的研究を行った。研究の流れ、対象者の選定、除外基準を図 1 にまとめた。対象に対して、実測膝伸展筋力とジャンプ高を用いた推定膝伸展筋力を測定し 2 値の系統誤差から推定膝伸展筋力の信頼性を確認した。さらに、137 名の中で術後 10 ヶ月に再評価を実施した 55 名を対象に予測妥当性を確認した。

本研究を実施するにあたり、対象者には研究の趣旨と方法について十分説明を行い、書面による同意を得て行った。また、研究実施機関における研究倫理審査委員会の位置づけとなる所属長会議において承認のうえ実施した。

2 方法

1) 患者属性

患者属性として、年齢、性別、体重を測定および診療録より収集した。

2) 身体機能、動作能力

①実測膝伸展筋力

膝伸展筋力は、BIODEX SYSTEM3 (Biodex medical inc, NY, USA) を用いて求心性等速度運動にて角速度 60deg/sec で 5 回測定し、得られた最大トルク値 (ft-lbs) を体重で除した体重比 (% BW) に換算した。

②ジャンプ高

ジャンプ高の測定は、デジタル式垂直跳び測定器ジャンプ MD (竹井機器工業社製, 日本) を用いて 3 回測定し最高値を採用した。方法としては、片脚静止立位の状態から膝関節を屈曲させ上肢の反動も利用し、最大努力で垂直方向へジャンプする。安全性を考慮し、両脚着地とした (図 2)。

3) 推定膝伸展筋力

筆者らが開発した下記の膝伸展筋力の推定式⁹⁾



図2 片脚垂直跳びテスト
片脚静止立位の状態から膝関節を屈曲させ上肢の反動も利用し、最大努力で垂直方向へ跳躍する。安全性を考慮し両脚着地とした。

表1 患者属性と測定結果

	ACL 再建術後症例 (n = 137)
年齢 (歳)	20.1 ± 7.6
性別 (男/女: 名)	52/85
体重 (kg)	61.3 ± 11.8
患側膝伸展筋力 (%BW)	74.1 ± 17.5
患側ジャンプ高 (cm)	25.4 ± 6.1

Data are mean ± SD

を用いて、対象患者の推定膝伸展筋力を算出した。

推定膝伸展筋力 (%BW) = 68.34 + (1.55 × 患側ジャンプ高) - (0.43 × 体重) - (11.29 × 男性: 0, 女性: 1)

3 統計学的解析

1) 推定膝伸展筋力と実測膝伸展筋力の系統誤差の有無

推定膝伸展筋力と実測膝伸展筋力の2値の差、ならびに2値の平均から Bland-Altman 分析を用いて系統誤差の有無を確認した。系統誤差には加算誤差と比例誤差があり、測定値の大小に応じた2値の誤差の分布に特定の傾向を認めないかどうかを確認した。

2) 予測妥当性

ACL 再建術後 10 ヶ月の実測膝伸展筋力の正規性を Shapiro-Wilk 検定にて確認した。術後 6 ヶ月時点での推定膝伸展筋力と術後 10 ヶ月時点での実測膝伸展筋力の関係性は、Pearson の積率相関分析を用いて確認した。さらに、術後 10 ヶ月にお

ける膝伸展筋力が 80%BW 以上となる術後 6 ヶ月の推定膝伸展筋力値のカットオフ値の算出には、術後 10 ヶ月の実測膝伸展筋力が 80%BW を有するかどうかを状態変数、術後 6 ヶ月の推定値を検定変数とし、受信機操作特性曲線(以下; ROC)解析を用いてカットオフ値を算出した。統計解析は SPSS for mac (バージョン 21.IBM) を使用し、いずれの検定も有意水準は 5% 未満とした。

結 果

1) 患者属性

対象者の患者属性と測定結果を示す(表1)。対象は 137 名(男性 52 名, 女性 85 名), 再建術時の平均年齢は 20.1 ± 7.6 歳, 測定時の平均体重は 61.3 ± 11.8kg, 患側膝伸展筋力は 74.1 ± 17.5%BW, そして患側ジャンプ高は 25.4 ± 6.1cm であった。

2) 推定膝伸展筋力と実測膝伸展筋力の系統誤差の有無

推定膝伸展筋力と実測膝伸展筋力の測定値の誤差を Bland-Altman plot にて確認したところ2つの測定値に加算誤差, 比例誤差は認めなかった(図3)。

3) 推定膝伸展筋力の予測妥当性

術後 6 ヶ月の推定膝伸展筋力と術後 10 ヶ月の実測膝伸展筋力との間の相関係数は 0.68 (p < 0.01) であった。ROC 解析で得られた術後 6 ヶ月の推定膝伸展筋力のカットオフ値は 71.5%BW であった(感度 0.821, 特異度 0.704, Area Under the

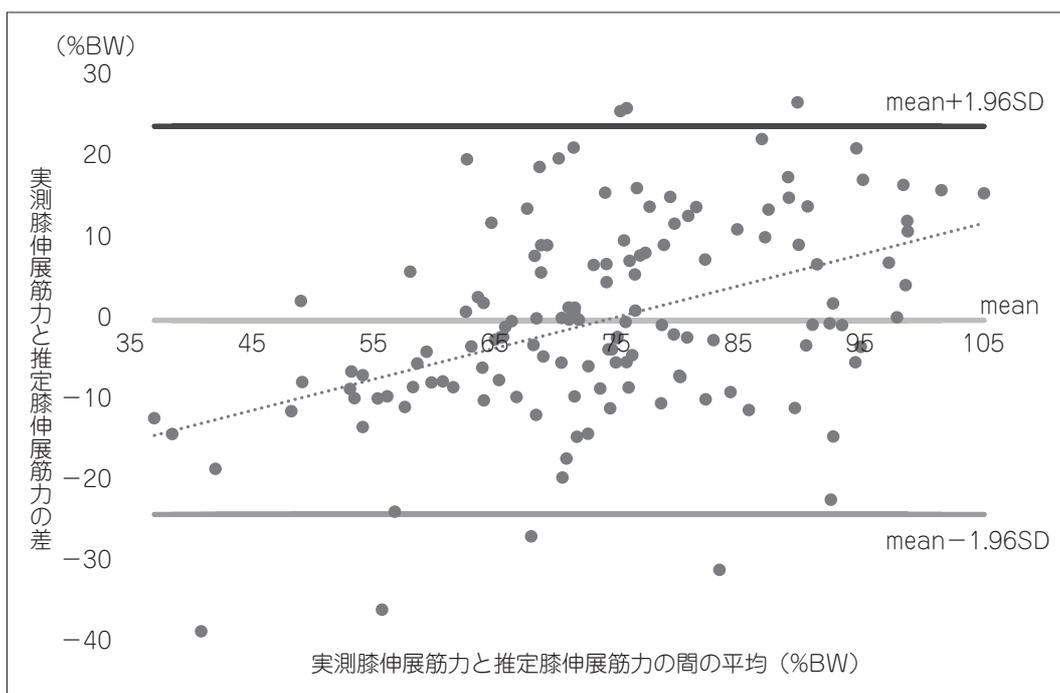


図3 実測膝伸展筋力と推定膝伸展筋力の Bland-Altman plot
系統誤差（加算誤差・比例誤差）は認められなかった。

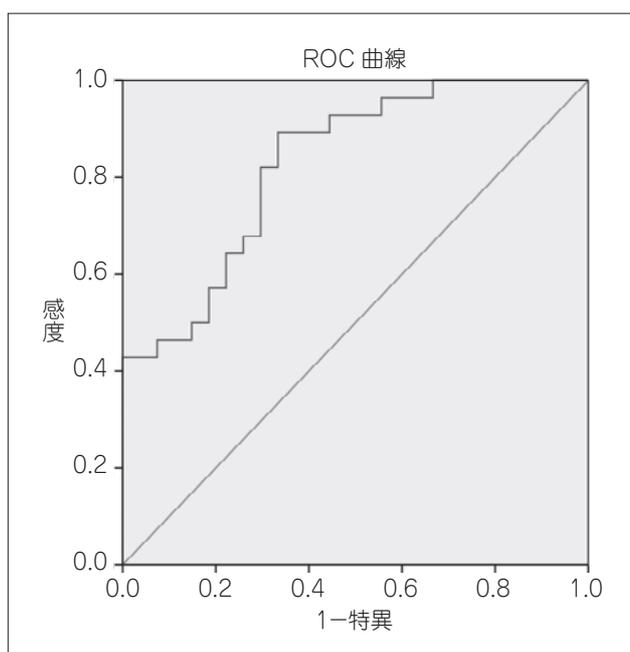


図4 術後10ヶ月の膝伸展筋力80%BWを状態変数とした術後6ヶ月の膝伸展筋力推定式のROC曲線

Curve : AUC 0.828 $p < 0.01$ (図4).

■ 考 察

1) 推定膝伸展筋力と実測膝伸展筋力の系統誤差の有無

膝伸展筋力推定式には、系統誤差（加算誤差・

比例誤差）を認めなかった。膝伸展筋力推定式の主な構成評価指標であるジャンプ高は、体重当たりの地面反力の大きさによって左右される。したがって、高いジャンプパフォーマンスを獲得するためには、下肢3関節の強力かつ素早い伸展トルクが必要だとされ^{15,16)}、さらには下肢の協調した運

動によって、各関節の伸展速度を上昇させるといわれている¹⁶⁾。ACL 再建術後患者において、筋力低下を生じやすい大腿四頭筋は、IIb 線維の割合が多いことに加え、筋線維が太く生理学的筋横断面積が大きい¹⁵⁾ ため、速い筋収縮や強い筋発揮張力の産出に適した収縮特性と形態特性を有すると考えられる。つまり、大腿四頭筋の筋力低下は、最大ジャンプの達成に必要な下肢伸展筋群のパワー発揮や下肢の協調した伸展活動を減少させると推察される。したがって、ACL 再建術後に機能低下をきたす大腿四頭筋の筋力回復と下肢筋群のパワーを反映するジャンプ高には強い関連があると考えられる。Bland-Altman 分析の結果、推定膝伸展筋力と実測膝伸展筋力の間に測定値の大小に応じた一定方向の誤差の偏り(加算誤差)、ならびに扇型の偏り(比例誤差)を認めておらず、膝伸展筋力とジャンプ高に関する上述した関係機序は筋力の大小に関わらず認められると考えられる。

2) 予測妥当性

本研究の結果、ACL 再建術後6ヶ月の推定膝伸展筋力と術後10ヶ月の実測膝伸展筋力の間には、有意な相関関係が認められた。さらに、術後10ヶ月の実測膝伸展筋力目標値である80%BW以上となる術後6ヶ月の推定膝伸展筋力のカットオフ値は71.5%BWで、感度と特異度はそれぞれ0.821, 0.704, AUCは0.828であった。これらの結果は、術後6ヶ月のジャンプテストを用いた膝伸展筋力推定式の術後10ヶ月の筋力を予測する指標としての有用性を示唆し、予測妥当性が確認されたと考えられる。術後6ヶ月の膝伸展筋力は、スポーツ復帰の可否と関係があり、復帰群において有意に高い筋力値を示すことがわかっている¹⁷⁾。スポーツ復帰の目安の時期であるACL再建術後10ヶ月の時点で膝伸展筋力を実測し、その可否を判断する施設も多い。ただし、復帰時期に目標とする膝伸展筋力に達していないことは、スポーツ復帰が遅れることを示唆するものと考えられる。術後6ヶ月の時点でジャンプ高を用いた膝伸展筋力推定式により、術後10ヶ月でのスポーツ復帰に必要な筋力を備えられるかどうかを推定できれば、より早期より理学療法プログラムを再考できる利点があると考えられる。さらに、我々の先行研究では、推定式の交差妥当性が認められており、基本属性、術式や術後プロトコルに大きな相違が無い場合において有用だと報告した¹⁸⁾。したがって、

我々が作成した推定式は、妥当性が保証されている推定式として臨床活用できると考える。

3) 研究の限界と課題

本研究における限界として、本研究で用いたACL再建術後患者の膝伸展筋力推定式は、後ろ向き研究で作成した評価指標であるため、重回帰分析における独立変数の選択に制約が生じた。今後、前向き研究として膝伸展筋力やジャンプ高と関連がある因子を整理し独立変数に加え、さらには膝伸展筋力を推定することを目的としたジャンプテストとして、ジャンプ動作における初期姿勢の規制や反動動作を抑制した方法^{19,20)}に修正することで、より有用な評価指標が作成できるものと考えられる。

結 語

ACL再建術後患者における膝伸展筋力推定式の妥当性を検証した。推定式には、系統誤差は認められない評価指標であることが示唆された。さらに、術後10ヶ月の膝伸展筋力を予測する指標としても、推定式の有用性が認められ、予測妥当性が確認された。つまり、高価な筋力測定機器を保有していない施設やスポーツ現場においてACL再建術後の膝伸展筋力の推定や、スポーツ復帰時期の筋力回復を予測する指標としてジャンプテストの有用性が示唆された。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、ご指導、ご協力いただきましたやまが整形外科ならびに朝日大学病院の先生の皆様に深く感謝いたします。

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) Hopkins JT, Ingersoll CD, Krause BA, et al. Effect of knee joint effusion on quadriceps and soleus motoneuron pool excitability. *Med Sci Sports Exerc.* 2011; 33: 123-126.
- 2) Laudner K, Evans D, Wong R, et al. Relationship Between Isokinetic Knee Strength And Jump Characteristics Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *The International Journal of Sports Physical Therapy.* 2015; 10: 272-280.
- 3) Thomas CA, Villwock M, Wojtys DE, et al. Lower

- Extremity Muscle Strength After Anterior Cruciate Ligament Injury and Reconstruction. *Journal of Athletic Training*. 2013; 48: 610-620.
- 4) Lentz AT, Zeppieri G, Tillman MS, et al. Return to Preinjury Sports Participation Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Contributions of Demographic, Knee Impairment, and Self-report Measures. *Journal of orthopaedic & sports physical therapy*. 2012; 42: 893-901.
 - 5) Kuenze MC, Foot N, Saliba AS, et al. Drop-Landing Performance and Knee-Extension Strength After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Athletic Training*. 2015; 50: 596-602.
 - 6) Kyritsis P, Bahr R, Landreau P, et al. Likelihood of ACL graft rupture: not meeting six clinical discharge criteria before return to sport is associated with a four times greater risk of rupture. *Br J Sports Med*. 2016; 50: 946-951.
 - 7) 奈良 勲, 岡西哲夫. 筋力の評価. In: 小林 武 (編). 筋力. 第1版. 東京: 医歯薬出版株式会社; 87-111, 2004.
 - 8) 仁賀定雄. 膝関節の筋力—アイソキネティックマシンの利用—. 計測と制御. 1992; 31: 383-390.
 - 9) 小杉 峻, 桑坪憲史, 河野公昭, 他. 膝前十字靭帯再建術後における片脚垂直跳びテストを用いた筋力推定式の有用性. *東海スポーツ傷害研究会誌*. 2017; 35: 43-45.
 - 10) 足立堅一. 誤差の分類とその対処法. In: 足立堅一 (編). 統計学超入門. 第2版. 東京: 篠原出版社; 137-144, 2007.
 - 11) 堀部秀二, 小柳磨毅, 境 隆弘, 他. 膝前十字靭帯再建術後の筋力トレーニング. *臨床スポーツ医学*. 2006; 23: 145-151.
 - 12) 長井寛斗, 黒田良祐, 木田晃弘, 他. ACL再建術の再建材料の差による後療法の違い. *臨床スポーツ医学*. 2014; 31: 110-114.
 - 13) 黄川昭雄, 山本利春, 佐々木敬之, 他. 機能的筋力測定・評価法—体重支持指数 (WBI) の有効性と評価の実際. *日本整形外科スポーツ医学会誌*. 1991; 10: 463-468.
 - 14) 原 邦夫. 膝前十字靭帯再建術後の早期競技復帰の可能性について. *臨床スポーツ医学*. 1989; 6: 1337-1344.
 - 15) 金子公宥, 福永哲夫. 跳動作. In: 金子公宥 (編). バイオメカニクス 身体運動の科学的基礎. 第2版. 東京: 株式会社杏林書院; 217-222, 2011.
 - 16) 深代千之. 跳躍動作のバイオメカニクス 跳躍の仕組み. *体育の科学*. 2007; 57: 492-499.
 - 17) 北口拓也, 佐藤のぞみ. 膝前十字靭帯再建術後スポーツ復帰に関わる因子—術前・術中所見での予測—. *スポーツ傷害 (J.sports Injury)*. 2008; 13: 12-13.
 - 18) 小杉 峻, 桑坪憲史, 河野公昭, 他. 膝前十字靭帯再建術後患者における片脚垂直跳びテストを用いた膝伸展筋力推定式の交差妥当性. *東海スポーツ傷害研究会誌*. 2018; 36: 34-38.
 - 19) Hara M, Shibayama A, Takeshita D, et al. The effect of arm swing on lower extremities in vertical jumping. *J Biomech*. 2006; 39: 2503-2511.
 - 20) Bobbert MF, Casius LJ. Is the effect of a counter-movement on jump height due to active state development. *Med Sci Sports Exerc*. 2005; 37: 440-446.
-
- (受付: 2020年6月12日, 受理: 2021年6月8日)

Validity of the knee extension muscle strength estimation formula after anterior cruciate ligament reconstruction using a single-leg vertical jump test

Kosugi, S.^{*1}, Yamaga, H.^{*2}

^{*1} International University of Health and Welfare Mita Hospital

^{*2} Yamaga orthopedic surgery

Key words: anterior cruciate ligament reconstruction, knee extension muscle strength, return to sports

[Abstract] We validated the validity of the knee extension muscle strength estimation formula of ACL reconstructed 6 months after using the single leg vertical jump test following anterior cruciate ligament reconstruction. We revealed error between the estimated value calculated from the knee extension muscle strength (%BW) estimation formula= $68.34 + (1.55 \times \text{jump height on the affected side}) - (0.43 \times \text{body weight}) - (11.29 \times \text{sex (male: 0, female: 1)})$ and actual measurement value by Bland-Altman analysis. The cutoff value of the muscle strength reference value of 80%BW at the time of returning to sports was also calculated from the estimated value for 6 months after surgery by ROC analysis. No systematic errors were observed in the estimation formula. The cutoff value of the muscle strength reference value for 10 months after surgery obtained by ROC analysis was also estimated from the muscle strength value of 71.5%BW 6 months after surgery. The Jump test was found to be a reasonable measurement index for estimating knee extension muscle strength. The knee extension muscle strength estimation formula after ACL reconstruction suggests that there are no systematic errors and that it is possible to predict muscle strength at the time of returning to sports.