

膝前十字靭帯再建術後患者における筋力と両脚ジャンプ着地動作との関連

Relationship between muscle strength and kinematics during landing maneuvers in patients after anterior cruciate ligament reconstruction

梨本智史*1, 大森 豪*2, 佐藤 卓*3, 永野康治*4

キー・ワード : Anterior cruciate ligament reconstruction, landing maneuver, postoperative muscle strength
前十字靭帯再建術, ジャンプ着地動作, 術後筋力

〔要旨〕 膝前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament, ACL) 損傷の受傷機転は, カutting, ジャンプ着地での膝の軽度屈曲・外反が多い。ACL 再建術後には等速性膝伸展・屈曲筋力をもとに動作レベルを向上させるが, 術後の膝周囲筋力がジャンプ着地動作に与える影響については報告が少ない。今回 ACL 再建術後 29 症例を対象に術後筋力がジャンプ着地動作に与える影響を検討した。

術後 6 か月と 8 か月で等速性膝伸展, 屈曲筋力 (60°/sec, 180°/sec, 300°/sec) と Drop Vertical Jump (DVJ) を評価した。DVJ の評価項目は接地時と着地後の最大膝外反角度, 屈曲角度, 接地から最大角度までの角度変化とし, 筋力と DVJ それぞれについて, 6 か月と 8 か月とで比較した。また DVJ の評価項目の中で, 有意な変化のあった項目について筋力変化量との関連を検討した。

筋力は伸展, 屈曲ともにいずれの角速度でも 8 か月で有意に増加した。DVJ は, 接地時と最大膝屈曲角度が 8 か月で有意に増加した。DVJ での接地時, 最大膝屈曲角度の変化量は, どちらも筋力変化量との相関関係はなかった。

本研究の結果, 膝周囲筋力の改善がジャンプ動作の変化に直接結びつくわけではないことが示唆された。ACL 再建術後のリハビリテーションにおいて, ジャンプ等の動作トレーニングを筋力トレーニングと並行して行う必要性が示唆された。

はじめに

膝前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament, 以下, ACL) 損傷の発生頻度は, 日本の小中高校生を対象とした調査で 80-90 人/10 万人/年¹⁾と報告され, 比較的発生頻度の高いスポーツ外傷である。その受傷機転は, Cuttingなどの切り替えし, ジャンプ着地での膝の軽度屈曲・外反が多いとされる²⁾。受傷後, 競技復帰を望むアスリートには再建術が推奨され, 移植腱の修復過程³⁾を考慮すると, スポーツ復帰には術後 6 か月以上かかるとさ

れている⁴⁻⁶⁾。術後後期には等速性膝伸展・屈曲筋力の一つの指標にランニング, ジャンプへと動作レベルを向上させ^{5,6)}, 競技復帰の際の判断基準としても用いられている⁷⁾が, 筋力がジャンプ着地時の膝関節アライメントに対してどのように影響するかについては報告が少ない。再受傷予防の観点からも術後の膝周囲筋力と, ジャンプ着地動作のアライメントの関係は重要であると考えられる。

ACL 損傷に関連するジャンプ着地動作の解析は, 健常者で男女差を比較した検討や発生のメカニズムの検討など多数報告されている。両脚着地動作では女性が男性に比べ, 着地後の膝屈曲角度は小さく, 外反角度は大きい^{8,9)}ことが報告され, ACL 損傷の発生との関連が示唆されている。女性 205 名を対象とした前向き研究¹⁰⁾では, ACL 損傷例で着地時と最大膝外反角度が大きく, 最大膝屈

*1 新潟医療センターリハビリテーション科

*2 新潟医療福祉大学健康科学部健康スポーツ学科

*3 新潟医療センター整形外科

*4 日本女子体育大学体育学部スポーツ健康学科

曲角度は小さかったと報告されている。片脚着地動作では、女性で股関節内旋角度が大きく、膝関節屈曲角度は小さいこと¹¹⁾、接地時と最大膝屈曲時ともに膝外反角度が大ききこと¹²⁾が報告されている。これらの動作解析には、3次元動作解析システムが用いられているが、詳細な検討が行える反面、大掛かりな設備が必要となることから、臨床現場等での測定は困難である。

近年、ACL 損傷発生予測に向け、ジャンプ着地時の膝外反角度、屈曲角度に関して、3次元動作解析とデジタルビデオカメラによる2次元動作解析での相関報告が見られる。Myer ら¹³⁾は、膝屈曲角度に関して2次元動作解析と3次元動作解析の決定係数が0.90であったとし、Nagano ら¹⁴⁾は膝外反角度に関して決定係数が0.34であったとしている。これらの報告から、臨床現場でも、2次元動作解析にてジャンプ等の客観的評価が可能となってきたと推測される。

そこで本研究の目的は、リハビリテーション現場において2次元動作解析の手法を用いてACL 再建術後症例のジャンプ着地動作を解析し、術後の膝周囲筋力がジャンプ着地動作に与える影響を明らかにすることとした。本研究の仮説は、術後経過とともに膝周囲筋力およびジャンプ着地動作におけるキネマティクスが改善すること、また膝周囲筋力の改善はジャンプ着地動作における膝関節外反角度と屈曲角度の改善に相関することとした。

対象および方法

①対象

新潟県厚生農業協同組合連合会新潟医療センターにて初回 ACL 再建術を施行し、スポーツ志向の高い29症例(男性14名、女性15名、平均年齢 20.0 ± 5.5 歳)を対象とした。研究の趣旨を対象者(未成年である場合にはその保護者)に説明し、同意を得て実施した。術式は半腱様筋腱による解剖学的二重束再建術(Semitendinosus tendon: ST)15例、長方形骨付き膝蓋腱による再建術(Bone patella tendon bone: BTB)14例であった。再受傷例、反対側受傷例、複合靭帯損傷例は除外した。

術後のリハビリテーションプロトコールは、1-2週で関節可動域練習を開始、3-4週で全荷重、術後3か月でジョギング、4か月でランニング、5

か月で両脚ジャンプ、6か月で片脚ジャンプ、8か月でスポーツ復帰とし、プロトコールにそって介入が行えた症例に限定した。術後3-4か月程度までは、関節可動域練習や膝関節屈曲域での等尺性膝伸展運動、両脚スクワット、片脚スクワットを中心に実施した。術後5か月以降にはKnee-inを避けるような両脚ジャンプや片脚ジャンプを指導し、7か月以降には各種スポーツに特異的な動作練習を実施した。

②評価項目

術後6か月と8か月に筋力とジャンプ着地動作を評価した。

1) 筋力

BYODEX System4 (BIODEX, New York, USA)にて術側下肢の等速性膝伸展筋力、屈曲筋力のピークトルクを測定した。角速度は $60^\circ/\text{sec}$ 、 $180^\circ/\text{sec}$ 、 $300^\circ/\text{sec}$ とした。3回の測定値の最大値を採用し、得られたトルク値を体重で除し体重比(Nm/kg)を算出した。

2) ジャンプ着地動作

ジャンプ着地動作として、Drop Vertical Jump (以下、DVJ)¹⁰⁾を測定試技とした。DVJは31cm台から落下し、両脚で着地後すぐに最大垂直跳びを行った(図1)。両上肢は挙上して最大垂直跳びを行うように指示し、着地時の足幅は35cmに規定した。DVJがACL発生予測指標として妥当であるかは、賛否の報告^{10, 13, 15)}があるが、今回の研究の趣旨である術後筋力がジャンプ着地へ与える影響を検討するにあたり最も一般的なジャンプ試技と考えられ、DVJを本研究の測定試技とした。

骨マーカーを左右の上前腸骨棘・大転子・大腿骨外側上顆・膝蓋骨中央・外果・内外果中央に貼付し、ハイスピードカメラGoPro HERO4 (GoPro, Inc, San Mateo, CA, USA)2台を同期させ、矢状面・前額面から毎秒120フレームで撮影した。カメラは対象者が着地する位置から3.7mに設置し、高さ67.0cmに固定して撮影した。

撮影された動画は歪み補正変換の後に、画像解析ソフトImageJ (NIH, USA)を用いて膝外反角度、膝屈曲角度を接地時と、着地後の最大角度にて計測した。また、接地から最大角度までの変化量を算出した。接地はつま先が地面に触れた瞬間と定義した。外反角度は上前腸骨棘と膝蓋骨中央を結んだ線分と、膝蓋骨中央と足関節内外果中央を結んだ線分のなす角度とし、屈曲角度は大転子



図1 Drop Vertical Jump (DVJ)
31cm 台から落下し、両脚で着地後すぐに最大垂直跳びを行った。

表1 対象内訳

	29 例
性別 (男性/女性)	14 例/15 例
年齢	20.0 ± 5.5 歳
術式 (ST/BTB)	15 例/14 例

半腱様筋腱による解剖学的二重束再建術 (Semitendinosus tendon, ST)
長方形型骨付き膝蓋腱による再建術 (Bone patella tendon bone, BTB)

と大腿骨外側上顆を結んだ線分と、大腿骨外側上顆と外果を結んだ線分のなす角度とした。すべての変量は成功試技3回の平均値として算出した。また、測定は動作に伴う疼痛や不安感がないかを確認し、十分に練習を実施したのちに行った。

③統計学的検討

術側下肢に関して、筋力・ジャンプ着地動作の各評価項目の術後6か月と8か月での経時的変化を対応のあるt検定、Wilcoxon検定を用いて比較した。ジャンプ着地動作の測定項目の中で、有意な変化のあった項目について筋力変化量との関連をPearsonの相関係数を用いて検討した。統計ソフトはR2.8.1を使用し、いずれも有意水準は5%とした。

本研究の内容については新潟医療福祉大学倫理委員会(承認番号17581-150616)、新潟県厚生農業協同組合連合会新潟医療センター倫理委員会(No.2015-02)の承認を得て行った。

結果

対象の性別、年齢、術式を表1に示す。患側筋力は角速度60°/sec、180°/sec、300°/secいずれにおいても伸展、屈曲ともに術後6か月に比べ8か月で有意な増加がみられた(図2)。

DVJについて、接地の膝屈曲角度が19.6 ± 5.5度から22.4 ± 4.7度、最大膝屈曲角度が83.9 ± 13.3度から89.2 ± 14.0度と有意な増加がみられたが、それ以外の項目について6か月、8か月間で有意差はなかった(表2)。

変化の見られたDVJの接地時と最大膝屈曲角度の6か月から8か月での変化量について、筋力変化量との関係を見ると、いずれの角速度でも有意な相関関係は見られなかった(表3)。

考察

ジャンプ着地動作解析に関して、健常者を対象とした研究は多数みられるものの、ACL再建術後競技復帰前の症例を対象とした経時的変化の検討は少ない。一般にACL再建術後のリハビリテーションでは膝伸展筋力、屈曲筋力を指標に動作レベルを向上させていくが、術後の筋力がジャンプ着地等へどのように影響するかは報告が少ないため、今回検討を行った。

本研究の結果、競技復帰が近づく8か月において、膝伸展筋力、屈曲筋力ともに有意に増加し、DVJ時の接地、最大膝屈曲角度の増加がみられた。しかし、いずれも筋力の変化量との関連は認

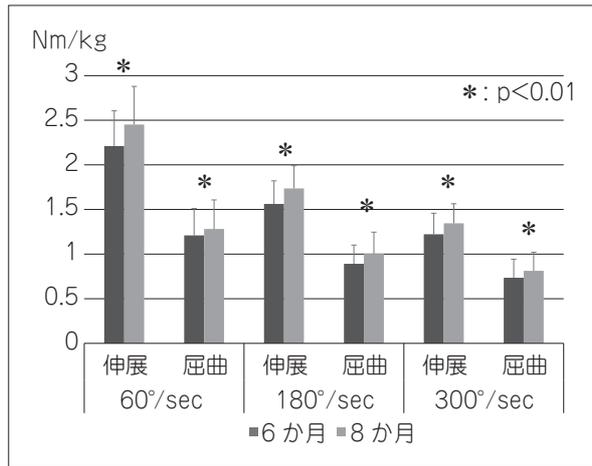


図2 筋力の経時的変化
患側筋力はいずれの角速度でも伸展，屈曲ともに有意な増加がみられた。

表2 DVJでの膝外反角度，膝屈曲角度の経時的変化

	6か月	8か月	p値
接地膝外反角度	2.5 ± 3.9	2.0 ± 3.9	.281
最大膝外反角度	11.0 ± 9.1	10.2 ± 7.6	.425
最大膝外反までの角度変化	8.5 ± 5.8	8.2 ± 5.4	.697
接地膝屈曲角度	19.6 ± 5.5	22.4 ± 4.7	.005*
最大膝屈曲角度	83.9 ± 13.3	89.2 ± 14.0	.009*
最大膝屈曲までの角度変化	64.4 ± 12.7	66.8 ± 13.5	.194

平均値 ± 標準偏差 (°)

* : p < 0.05

表3 ジャンプ着地と筋力との関係

		接地膝屈曲 角度変化量	最大膝屈曲 角度変化量	
筋力 変化量	60°/sec	伸展	R = 0.13 p = 0.52	R = 0.30 p = 0.11
		屈曲	R = 0.19 p = 0.32	R = 0.14 p = 0.46
	180°/sec	伸展	R = 0.092 p = 0.63	R = 0.028 p = 0.89
		屈曲	R = 0.26 p = 0.17	R = 0.25 p = 0.18
	300°/sec	伸展	R = 0.066 p = 0.74	R = 0.24 p = 0.20
		屈曲	R = 0.25 p = 0.19	R = 0.25 p = 0.19

ジャンプ着地動作の測定項目の中で，有意な変化のあった項目について筋力変化量との関連を検討した。

められず，膝周囲筋力の改善がジャンプ動作の変化に直接的に結びついたわけではないことが示唆された。筋力の増加に伴い，着地時の膝関節外反

角度の減少ならびに屈曲角度の増加が予想されたが，膝周囲筋力と，ジャンプ着地における膝関節角度との関連は少ないことが考えられた。

Hermanら¹⁶⁾は33名の健常女性に9週間の大腿四頭筋、ハムストリングス、中殿筋、大殿筋の筋力トレーニングを実施し、前後でのStop-Jump動作を評価したところ、股関節・膝関節周囲の筋力は増加したものの、着地後の膝屈曲角度、膝外反角度には有意な変化が見られなかったと報告し、ジャンプ動作の変化は筋力以外の関与も考えられている。Lim¹⁷⁾らは11名の高校女子バスケットボール選手に8週間の筋力強化、アジリティ、プライオメトリックトレーニングを実施したところ、リバウンドジャンプ着地時の膝屈曲角度や両膝関節間の距離は有意に増加したとしている。本研究において、研究期間である術後6-8か月のリハビリテーション内容やセット数を細かく規定、統一していたわけではないが、プログラムは主にジャンプ練習を中心に構成され、着地時に膝の外反を避けることや、膝の深屈曲を指導しており、今回DVJでの膝屈曲角度に改善が見られた一要因と考えられる。そのため、ACL再建術後後期のリハビリテーションにおいて、ジャンプ等の動作トレーニングを筋力トレーニングと並行して継続的に行う必要性が示唆された。

本研究の限界は、まず膝周囲筋のみしか評価しなかった点があげられる。Suzuki¹⁸⁾は内側方向への片脚ジャンプ着地動作を解析し、女子大学生において、股関節外転筋、外旋筋力との接地時の膝外反角度に負の相関、男子大学生において、股関節外旋筋力と最大膝屈曲角度に正の相関がみられたと述べている。今回のDVJにも股関節周囲筋の影響は十分に考えられるため、今後股関節周囲筋の影響も加味した検討が必要である。また術後症例を対象とすることで、これまでの健常者を対象とした報告に比べ、筋力が低下していることを予測したが、6か月時点で角速度60°/sでの膝伸展筋力体重比220%程度と術後筋力値としては高く^{19,20)}、健常者と近い集団であったためこのような結果であった可能性が考えられる。筋力値がより低い対象においては、ジャンプ動作改善のための必要条件としての筋力値が存在する可能性も考えられ、今後症例数を増やして検討する必要がある。

今回の結果を踏まえると、筋力評価のみでは術後後期の両脚ジャンプパフォーマンスを十分評価できていないとは言えず、ACL再建術後後期のリハビリテーションにおける、ジャンプ等の動作トレーニングの重要性が示唆された。また一方で、

臨床的にはACL再建術後のジャンプ動作等の評価法が確立しておらず、筋力評価が主要な評価と成らざるを得ない。より簡便なジャンプ動作の評価法の確立や再受傷に影響する因子の検討等を行っていきたい。

結 語

ACL再建術後29症例を対象に術後6か月と8か月で膝伸展・屈曲筋力とDVJにおける膝外反角度、屈曲角度を評価し、筋力とDVJそれぞれについて、6か月と8か月とで比較を行った。筋力は伸展、屈曲ともに8か月で有意な増加がみられた。DVJでは、接地時と最大膝屈曲角度が8か月で有意に増加したが、DVJでの接地・最大膝屈曲角度の変化量と、筋力変化量との関連を見ると、いずれも筋力変化量との相関関係はなかった。

謝 辞

最後に測定させていただいた患者様に深く謝意を表す。

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) 奥脇 透. スポーツ外傷の再受傷予防の取り組み：日本におけるスポーツ外傷サーベイランスシステム. 臨床スポーツ医学. 2014; 31(5): 412-417.
- 2) Olsen, OE, Myklebust, G, Engebretsen, L, Bahr, R. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. Am J Sports Med. 2004; 32(4): 1002-1012.
- 3) Marumo, K, Saito, M, Yamagishi, T, Fujii, K. The "ligamentization" process in human anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar and hamstring tendons: a biochemical study. Am J Sports Med. 2005; 33(8): 1166-1173.
- 4) Kvist, J. Rehabilitation following anterior cruciate ligament injury: current recommendations for sports participation. Sports Med. 2004; 34(4): 269-280.
- 5) 堀部秀二, 小柳磨毅, 境 隆弘, 史野根生. 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(2): 145-152.
- 6) 櫻井敬晋, 福林 徹. 前十字靭帯再建術後の筋力回復とスポーツ復帰. 臨床スポーツ医学. 2011; 28(1):

- 55-61.
- 7) Barber-Westin, SD, Noyes, FR. Objective criteria for return to athletics after anterior cruciate ligament reconstruction and subsequent reinjury rates: a systematic review. *Phys Sportsmed.* 2011; 39(3): 100-110.
 - 8) Yu, B, McClure, SB, Onate, JA, Guskiewicz, KM, Kirkendall, DT, Garrett, WE. Age and gender effects on lower extremity kinematics of youth soccer players in a stop-jump task. *Am J Sports Med.* 2005; 33(9): 1356-1364.
 - 9) Hughes, G, Watkins, J, Owen, N. Gender differences in lower limb frontal plane kinematics during landing. *Sports Biomech.* 2008; 7(3): 333-341.
 - 10) Hewett, TE, Myer, GD, Ford, KR, Heidt, RS Jr, Colosimo, AJ, McLean, SG, van den Bogert, AJ, Paterno, MV, Succop, P. 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.
 - 11) Lephart, SM, Ferris, CM, Riemann, BL. Gender differences in strength and lower extremity kinematics during landing. *Clin Orthop Relat Res.* 2002; (401): 162-169.
 - 12) Russell, KA, Palmieri, RM, Zinder, SM, Ingersoll, CD. Sex differences in valgus knee angle during a single-leg drop jump. *J Athl Train.* 2006; 41(2): 166-171.
 - 13) Myer, GD, Ford, KR, Khoury, J, Succop, P, Hewett, TE. Development and Validation of a Clinic-Based Prediction Tool to Identify Female Athletes at High Risk for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Am J Sports Med.* 2010; 38(10): 2025-2033.
 - 14) Nagano, Y, Sakagami, M, Ida, H, Akai, M, Fukubayashi, T. Statistical modelling of knee valgus during a continuous jump test. *Sports Biomech.* 2008; 7(3): 342-350.
 - 15) Krosshaug, T, Steffen, K, Kristianslund, E, Nilstad, A, Mok, KM, Myklebust, G, Andersen, TE, Holme, I, Engebretsen, L, Bahr, R. The Vertical Drop Jump Is a Poor Screening Test for ACL Injuries in Female Elite Soccer and Handball Players: A Prospective Cohort Study of 710 Athletes. *Am J Sports Med.* 2016; 44(4): 874-883.
 - 16) Herman, DC, Weinholt, PS, Guskiewicz, KM, Garrett, WE, Yu, B, Padua, DA. The effects of strength training on the lower extremity biomechanics of female recreational athletes during a stop-jump task. *Am J Sports Med.* 2008; 36(4): 733-740.
 - 17) Lim, BO, Lee, YS, Kim, JG, An, KO, Yoo, J, Kwon, YH. Effects of sports injury prevention training on the biomechanical risk factors of anterior cruciate ligament injury in high school female basketball players. *Am J Sports Med.* 2009; 37(9): 1728-1734.
 - 18) Suzuki, H, Omori, G, Uematsu, D, Nishino, K, Endo, N. The influence of hip strength on knee kinematics during a single-legged medial drop landing among competitive collegiate basketball players. *Int J Sports Phys Ther.* 2015; 10(5): 592-601.
 - 19) 松尾高行, 小柳磨毅. コンディショニングに用いる手法—損傷予防と競技復帰に向けて—筋力強化 競技復帰. *臨床スポーツ医学.* 2011; 28(1): 213-222.
 - 20) 田中龍太, 今屋 健, 藤島理恵子, 中山誠一郎, 川村麻衣子, 内山英司. 膝前十字靭帯再建術後における競技復帰時期の膝筋力の検討—性別・スポーツレベルを考慮した目標値—. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2016; 24(1): 51-57.

(受付：2017年5月2日，受理：2017年8月8日)

Relationship between muscle strength and kinematics during landing maneuvers in patients after anterior cruciate ligament reconstruction

Nashimoto, S.^{*1}, Omori, G.^{*2}, Sato, T.^{*3}, Nagano, Y.^{*4}

^{*1} Department of Rehabilitation, Niigata Medical Center

^{*2} Department of Health and Sports, Faculty of Health Sciences, Niigata University of Health and Welfare

^{*3} Department of Orthopedic Surgery, Niigata Medical Center

^{*4} Department of Health and Sports, Faculty of Physical Education, Japan Women's College of Physical Education

Key words: Anterior cruciate ligament reconstruction, landing maneuver, postoperative muscle strength

[Abstract] Although the activity level in patients after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) is often decided based on the knee muscle strength, there are some reports on the effect of muscle strength on landing maneuvers. The purpose of this study was to investigate the effects of knee muscle strength on landing maneuvers.

Twenty-nine patients who had undergone ACLR participated in this study. Isokinetic knee extensor and flexor muscle strength, and knee kinematic during Drop Vertical Jump (DVJ) were measured at 6 and 8 months following ACLR. In the DVJ, knee valgus and flexion angles at initial contact, maximum angles and angle changes during landing were recorded. Muscle strength and knee kinematics were compared between 6 and 8 months. The relationships between muscle strength changes and landing maneuver changes were also examined.

Muscle strength at 8 months was significantly higher than that at 6 months. In the DVJ, the knee flexion angle at initial contact and maximum knee flexion angle at 8 months were significantly larger than those at 6 months. There was no correlation between muscle strength changes and landing maneuver changes.

This study suggests that muscle strength improvement does not directly lead to changes in landing kinematics. Therefore, focusing on dynamic motion training such as landing, in parallel with muscle strength training, seems critical during rehabilitation after ACLR.