

前十字靱帯再建術後 アスリートに対する高強度インターバル トレーニングの実施効果

原

著

Efficacy of high intensity interval training on
intermittent endurance in athletes after anterior cruciate
ligament reconstruction

鈴木龍大^{*1}, 橘内基純^{*1}, 内田智也^{*1}, 松澤寛大^{*1}
坂田 淳^{*1}, 高橋達也^{*1,2}, 酒井忠博^{*1,2}

キー・ワード : anterior cruciate ligament reconstruction, high-intensity interval training, cycle ergometer
前十字靱帯再建術, 高強度インターバルトレーニング, 自転車エルゴメーター

【要旨】 膝前十字靱帯 (ACL) 再建術後アスリートに対する高強度インターバルトレーニング (HIIT) の効果を検討した。対象は当院で ACL 再建術を施行した 44 名とした。術後 3~6 か月に週 1 回, 自転車エルゴメーターによる HIIT を実施した者を介入群, それ以外を対照群とした。間欠的持久力の評価としてインターミッテントテストを実施し, ピークパワー (PP) とアベレージパワー (AP) を算出した。さらに, 膝筋力と関節不安定性を評価した。介入群と対照群の比較には, PP と AP, 膝筋力に対して分割プロットデザインによる分散分析 (時期要因×介入要因) を行い, 交互作用が認められた場合に単純主効果を検討した。また, 関節不安定性発生の比較には, Fisher の正確確率検定を行った。AP には有意な交互作用が認められた。術後 3 か月では介入群と対照群で有意差は認められなかったが, 術後 6 か月では介入群の方が対照群よりも高値であった。一方, PP にも有意な交互作用が認められたが, 各時期において介入群と対照群に有意差は認められなかった。健側と患側の膝伸展, 屈曲筋力はいずれにも交互作用は認められなかった。また, 関節不安定性の発生にも有意な群間差は認められなかった。以上より, ACL 再建術後 3~6 か月の期間における自転車エルゴメーターを用いた HIIT は, 間欠的持久力の向上に寄与する可能性が示唆された。

緒言

前十字靱帯 (anterior cruciate ligament : 以下, ACL) 損傷は重篤なスポーツ外傷の一つであり, 競技復帰を目標とした場合には ACL 再建術が第一選択とされる。受傷前と同じ競技レベルに復帰できる者は 60% 程度であることが報告されており¹⁾, 術後リハビリテーションでは受傷前レベル以

上へのパフォーマンスの回復が重要な課題となる。

アスリートが高いパフォーマンスを発揮するためには筋力, 持久力, スピード, コーディネーション, 柔軟性等の体力要素を高める必要があり, 運動休止によってこれらは低下する²⁾。特に持久力は運動休止後早期から低下し³⁾, ACL 再建術後では競技復帰前後で健常者より低いことが報告されている^{4,5)}。また, ACL 損傷が好発するサッカーなどの球技系競技では, 短時間の高強度運動を反復する間欠的持久力が重要であり⁶⁾, その回復は競技復帰やパフォーマンス向上に不可欠と考えられる。

間欠的持久力の向上には高強度インターバルト

*1 トヨタ記念病院トヨタアスリートサポートセンター

*2 トヨタ記念病院整形外科

Corresponding author : 鈴木龍大 (tatsuhiko_suzuki_ab@mail.toyota.co.jp)

表 1 当センターにおける ACL 再建術後のプロトコル

	ACL 再建術単独	半月板縫合あり
術後 0 週	関節可動域・荷重制限なし	免荷，膝屈曲 90° まで
術後 2 週		1/3 荷重開始
術後 3 週		1/2 荷重開始
術後 4 週		2/3 荷重開始 膝屈曲 120° まで
術後 5 週		全荷重開始
術後 6 週	自転車エルゴメーター開始	自転車エルゴメーター開始 屈曲制限なし
術後 3 か月	ジョギング開始	
術後 4.5 か月	スプリント開始	
術後 6 か月	非対人練習開始	
術後 7 か月	対人練習開始	
術後 8 か月	試合部分復帰	
術後 9 か月	完全復帰	

レーニング（high intensity interval training：以下，HIIT）が有効とされる⁷⁾。HIIT にはランニングや自転車エルゴメーターが用いられ，自転車エルゴメーターはグラフトへの負荷が低いことから⁸⁾，ACL 再建術後において安全に実施可能と考えられる。

しかしながら，ACL 再建術後に競技復帰を目指すアスリートを対象に自転車エルゴメーターを用いた HIIT が間欠的持久力に及ぼす影響を検討した報告はない。そこで本研究では，ACL 再建術後のアスリートに対する HIIT の効果を検討することを目的とした。

対象および方法

対象

本研究はランダム化比較対照試験とした（トヨタ記念病院倫理委員会承認，承認番号：R416）。研究期間は 2022 年 4 月から 2024 年 12 月とし，対象は当院でハムストリング腱を用いた解剖学的 ACL 再建術を施行し，競技復帰を目指すアスリートとした。対象数を統計学的パワーを元に計算し，各群最低 18 名で 95% の検出力が得られた。ドロップアウト例を 10% とし，目標対象数は 40 名とした。包含基準は週一回以上の通院が可能者，介入開始時に可動域制限または腫脹がない者，心疾患の既往歴または現病歴がない者とした。除外基準は 15 歳以下，スポーツ愛好家とした。対象者

は乱数表を用いて無作為に介入群と非介入群に振り分けた。対象者の基本特性（年齢，身長，体重，BMI，待機期間，患側，既往歴，術式，競技種目）は電子カルテを用いて調査した。ACL 再建術は整形外科医 4 名によって行われた。ACL 再建術を単独で施行した症例では術後の関節可動域制限と荷重制限は設けず，半月板縫合を施行した症例には可動域制限と免荷期間を設けた（表 1）。

介入

介入群は術後 3～6 か月に従来のリハビリテーションに加え自転車エルゴメーター（風神雷神，株式会社 OCL 社製）を用いた HIIT を実施した。HIIT は術後 3～6 か月の期間において週 1 回，合計 10 回実施した。HIIT のプログラムは有酸素性代謝に加え，無酸素性代謝や神経筋応答を引き出すため，短時間の最大努力の運動を繰り返す反復スプリントトレーニングに準じて設定し⁹⁾，負荷は体重の 3.0～7.5% kp（以下，%BW kp）まで週ごとに漸増した（表 2）。回転数をモニタリングすることで運動強度を担保した。また，患部の疼痛と腫脹の有無，関節可動域を確認し，安全面に配慮した。

間欠的持久力の評価

間欠的持久力は術後 3 か月と 6 か月に自転車エルゴメーターを用いてインターミッテントテスト（intermittent test：以下，IMT）で評価した。ウォーミングアップとして自転車エルゴメーター

表2 高強度インターバルトレーニングのプロトコル

週	運動時間 (秒)	休息時間 (秒)	回数	セット数	セット間の休息時間 (分)	負荷 (%BW kp)
1	10	30	8	1	-	3.0
2	10	30	8	1	-	3.5
3	10	30	8	1	-	4.0
4	10	30	8	1	-	4.5
5	10	30	8	1	-	5.0
6	10	30	8	1	-	5.5
7	10	30	5	2	5	6.0
8	10	30	5	2	5	6.5
9	10	30	5	2	5	7.0
10	10	30	5	2	5	7.5

とストレッチをそれぞれ5分実施した。IMTは運動時間6秒、休息時間25秒、10回1セット、負荷7.5%BW kpとし、10回の試行におけるパワーの最大値(peak power:以下、PP)と平均値(average power:以下、AP)の体重比を算出した。

膝関節の機能評価

術後3か月と6か月において、Lachman test, pivot shift test, 膝筋力測定を実施した。Lachman testとpivot shift testは整形外科医が実施し、対象がいずれの群か盲検化された。膝筋力は等速性筋力測定装置(BIODEX SYSTEM 4, Biodex Medical Systems社製)を用いて、60°/sec, 5回とし、最大トルクの平均値から体重比を算出した。

統計学的手法

基本特性の比較に対応のないt検定, Mann-Whitney U検定, χ^2 検定, Fisherの正確確率検定を実施した。HIITの介入効果を検証するため、PPとAP、膝筋力に対して分割プロットデザインによる分散分析(時期要因×介入要因)を行い、交互作用が認められた場合に単純主効果を検討した。さらに、関節不安定性の発生に対して、Fisherの正確確率検定を行った。有意水準は危険率5%未満とした。全ての統計学的解析には統計ソフト(SPSS ver.18.0 for Windows, IBM社製)を使用した。

結 果

ACL再建術を受けた者は255名であり、209名が包含基準を満たさなかった。2名が研究途中で脱落し、最終的に介入群と対照群はそれぞれ22名となった(図1)。介入群と対照群で基本特性に有意差は認められなかった(表3)。また、HIIT

に起因する有害事象は認められなかった。

PPに有意な交互作用が認められ、両群ともに術後3か月より6か月の方が高値であったが、いずれの時期においても介入群と対照群に有意差は認められなかった(表4)。APに有意な交互作用が認められ、両群ともに術後3か月より6か月の方が高値、術後3か月では介入群と対照群で有意差は認められなかったが、術後6か月では介入群の方が対照群よりも高値であった(表4)。

健側と患側の膝伸展、屈曲筋力は全てにおいて交互作用は認められなかった(表5)。時期要因に主効果が認められ、術後3か月より6か月の方が高値を示し、介入要因に主効果は認められなかった(表5)。

術後3か月から6か月の期間にLachman testが陽性となった者は介入群で0名、対照群で1名、pivot shift testが陽性となった者は介入群で2名、対照群で1名であり、関節不安定性の発生に有意な群間差は認められなかった(Lachman test, $p = .50$; pivot shift test, $p = .50$)。

考 察

本研究ではACL再建術後3~6か月におけるHIITの効果を検討した。HIITの介入効果はAPに対して認められたが、PP、膝筋力、関節不安定性への影響は認められなかった。

ACL再建術後には持久力が低下し、復帰前後で健常者より低いことが報告されている^{4,5)}。本研究では術後3~6か月にHIITを実施し、APが向上した。HIITは健常者において有酸素性代謝や無酸素性代謝、神経筋応答を高め、最大酸素摂取量を改善することが知られており^{9~11)}、IMTでのAP

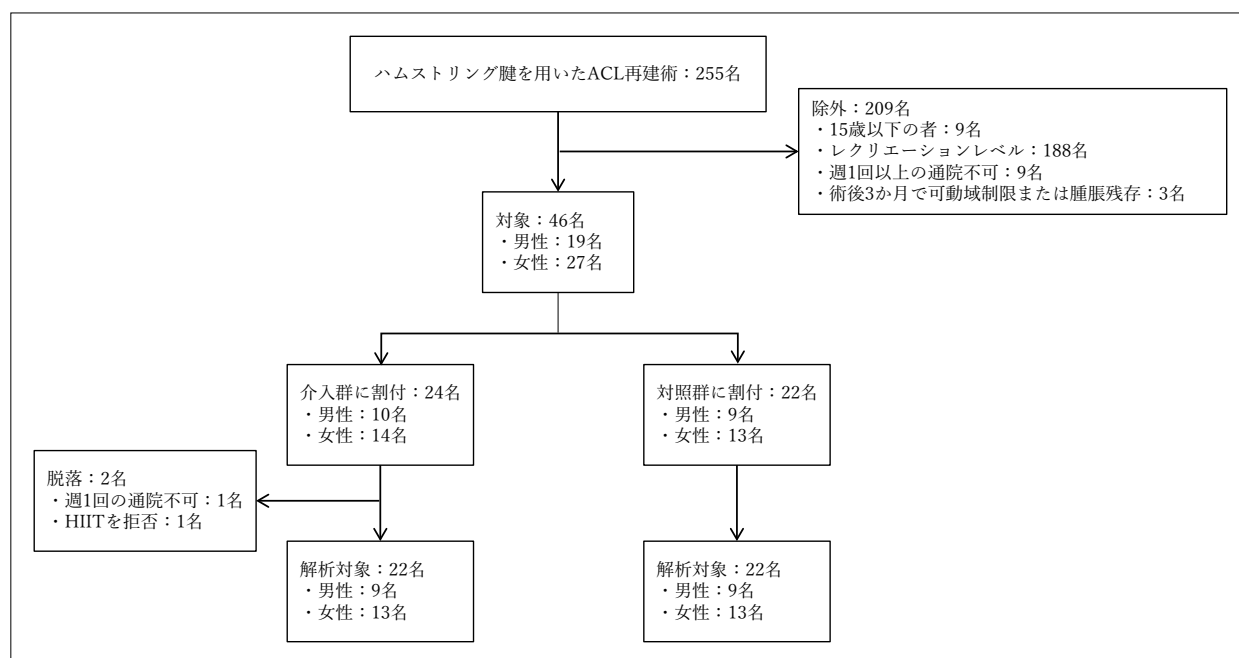


図1 フローダイアグラム

表3 対象者の基本特性

	介入群 n = 22	対照群 n = 22	p 値
手術時年齢 (歳)	18.9 ± 2.2	19.3 ± 2.9	.87 ^b
身長 (cm)	164.0 ± 6.3	164.0 ± 8.2	.99 ^a
体重 (kg)	60.6 ± 11.2	61.3 ± 11.8	.82 ^a
BMI	22.4 ± 3.0	22.6 ± 2.7	.79 ^a
待機期間 (日)	54.6 ± 21.7	50.5 ± 20.3	.70 ^b
患側 (人, 右/左)	8/14	10/12	.54 ^c
初回/対側損傷 (人, あり/なし)	19/3	22/0	.12 ^d
一重束/二重束 (人)	5/17	4/18	.50 ^d
内側半月板縫合 (人, あり/なし)	5/17	3/19	.35 ^d
外側半月板縫合 (人, あり/なし)	7/15	7/15	.50 ^d
競技種目 (人)			
サッカー	8	8	
バスケットボール	5	5	
ラクロス	4	4	
ラグビー	2	1	
ハンドボール	0	2	
テニス	1	1	
ソフトボール	1	1	
バレーボール	1	0	

a : 対応のない t 検定, b : Mann-Whitney U 検定, c : χ^2 検定, d : Fisher の正確確立検定

は間欠的持久力の指標になることから¹²⁾, HIIT は ACL 再建術後の間欠的持久力の向上に有効な方法と考えられる。

ACL 再建術後の持久力は術後 6 か月以降に評価されるが^{4, 5)}, 術後の運動休止による持久力低下

を考慮すると, より早期からの介入が必要となる。一方, グraftの成熟や骨孔との生着のため, 術後早期は過負荷を避ける必要があることから, 本研究では術後 3~6 か月に Graft への負荷が低い自転車エルゴメーターを用いて⁸⁾, IMT および

表 4 インターミッテントテストの結果

	介入群		対照群		交互作用		時期要因		介入要因	
	術後 3 か月	術後 6 か月	術後 3 か月	術後 6 か月	F	p	F	p	F	偏 η^2
ピークパワー (W/kg)	10.0 ± 1.1	11.3 ± 1.1	10.1 ± 1.3	10.9 ± 1.3	7.94	.01	介入群 対照群	< .001 < .001	23 3.78	.63 .07
アベレージパワー (W/kg)	7.4 ± 0.9	8.6 ± 0.9	7.2 ± 0.9	7.6 ± 0.9	27.72	< .001	介入群 対照群	< .001 < .001	.62 19.93	.44 < .001
										.01 .15 .03 0.49

表 5 膝筋力の結果

	介入群		対照群		交互作用		時期要因		介入要因	
	術後 3 か月	術後 6 か月	術後 3 か月	術後 6 か月	F	p	F	p	F	偏 η^2
膝伸展筋力 (Nm/kg)	256.3 ± 48.9	294.2 ± 66.4	265.6 ± 42.1	279.3 ± 46.1	3.31	.83	.14	.946	.07	.80
健側										< .01
患側	194.4 ± 42.1	245.4 ± 54.7	186.4 ± 43.3	220.1 ± 42.2	1.21	.28	.06	33.24	2.87	.11
膝屈曲筋力 (Nm/kg)										.12
健側	123.9 ± 29.6	141.7 ± 31.1	115.2 ± 28.3	133.7 ± 30.3	< .01	.95	< .01	17.78	1.86	.19
患側	101.6 ± 26.6	123.9 ± 25.2	92.3 ± 23.0	115.0 ± 29.5	< .01	.95	< .01	42.01	2.07	.17
										.08 .09

HIIT を実施した。その結果、疼痛や腫脹の増加、関節可動域制限といった有害事象や関節不安定性への悪影響は認められなかった。以上の点から、この方法は術後3から6か月の期間に安全に実施できる可能性がある。

本研究ではPPに対する時期の影響は認められたが、HIIT 介入の影響は認められなかった。高強度間欠的運動の前半のPPは無酸素性、後半のPPは有酸素性の体力要素と関連し^{13,14)}、ペダリング中のパワー発揮は下肢筋力に依存するとされている¹⁵⁾。本研究では、HIIT によるPPだけでなく膝筋力の向上も認められなかったことから、本研究で設定したHIITの実施条件はこれらの指標に対する影響が小さかった可能性がある。

本研究にはいくつかの限界がある。一つは本研究では対象者や医療提供者、測定者への盲検化ができていないことである。したがって、実行バイアスや検出バイアスが存在する可能性がある。二つ目は本研究において対照群では自転車エルゴメーターを用いた高強度運動を実施していないため、ペダリングの学習効果が影響している可能性がある。三つ目は本研究の対象に半月板縫合術を併用した症例が含まれ、これらの症例では術後早期のプロトコルが異なる点があげられる。半月板縫合併用例の割合は介入群と対照群で有意差は認められなかったことから、その影響は限定的と考えられる。しかしながら、術後プロトコルの違いがHIITの介入効果に及ぼす影響については十分に検討できておらず、今後の課題である。四つ目は本研究では関節不安定性の評価が定性的な方法に留まっていることである。今後は定量的な方法で関節不安定性を評価し、安全性を検討する必要がある。

結 語

本研究ではACL再建術後患者を対象とし、術後3~6か月におけるHIITが間欠的持久力と膝筋力、関節不安定性に及ぼす影響を検討した。HIITの実施によりPP、膝筋力、関節不安定性への影響は認められなかったが、APの向上は認められた。したがって、HIITはACL再建術後3~6か月の期間において間欠的持久力を向上させることができる方法として有用となる可能性がある。一方、ACL再建術後、関節可動域制限や腫脹が残存している症例や術前や術後の活動レベルが低い

症例に対するHIITの適応については慎重に判断する必要がある。

謝 辞

本研究の実施にあたり、多大なるご協力をいただいたトヨタ記念病院 小嶋秀明氏、山口春乃氏、西澤和氏、村田祐樹氏、佐藤桃子氏、名古屋大学 松浦唯氏に深謝いたします。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

著者貢献

鈴木龍大：概念化、プロジェクト管理、草稿の執筆
橋内基純：方法論、原稿の見直しとエディティング
内田智也：方法論、原稿の見直しとエディティング
松澤寛大：データ管理、正式な分析、原稿の見直しとエディティング

坂田淳：指導、原稿の見直しとエディティング

高橋達也：指導、原稿の見直しとエディティング

酒井忠博：指導、原稿の見直しとエディティング

文 献

- 1) Xiao M, van Niekkerk M, Trivedi NN, et al. Patients who return to sport after primary anterior cruciate ligament reconstruction have significantly higher psychological readiness: a systematic review and meta-analysis of 3744 patients. *Am J Sports Med.* 2023; 51: 2774-2783.
- 2) Mujika I, Padilla S. Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I: short term insufficient training stimulus. *Sports Med.* 2000; 30: 79-87.
- 3) Moore RL, Thacker EM, Kelley GA, et al. Effect of training/detraining on submaximal exercise responses in humans. *J Appl Physiol* (1985). 1987; 63: 1719-1724.
- 4) Almeida AM, Santos Silva PR, Pedrinelli A, et al. Aerobic fitness in professional soccer players after anterior cruciate ligament reconstruction. *PLoS One.* 2018; 13: e0194432.
- 5) Slater LV, Hart JM. Quantifying the relationship between quadriceps strength and aerobic fitness following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther Sport.* 2022; 55: 106-110.
- 6) Glaister M. Multiple sprint work: physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence

- of aerobic fitness. *Sports Med.* 2005; 35: 757-777.
- 7) Cadenas-Sanchez C, Fernandez-Rodriguez R, Martinez-Vizcaino V, et al. A systematic review and cluster analysis approach of 103 studies of high-intensity interval training on cardiorespiratory fitness. *Eur J Prev Cardiol.* 2023.
 - 8) Heijne A, Fleming BC, Renstrom PA, et al. Strain on the anterior cruciate ligament during closed kinetic chain exercises. *Med Sci Sports Exerc.* 2004; 36: 935-941.
 - 9) Buchheit M, Laursen PB. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med.* 2013; 43: 313-338.
 - 10) Helgerud J, Hoydal K, Wang E, et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc.* 2007; 39: 665-671.
 - 11) Seiler S, Joranson K, Olesen BV, et al. Adaptations to aerobic interval training: interactive effects of exercise intensity and total work duration. *Scand J Med Sci Sports.* 2013; 23: 74-83.
 - 12) Tanisho K, Hirakawa K. Training effects on endurance capacity in maximal intermittent exercise: comparison between continuous and interval training. *J Strength Cond Res.* 2009; 23: 2405-2410.
 - 13) 坂井 和, 水上 一, 齊藤 一, 他. 球技選手における間欠的なハイパワー発揮能力のトレーニング課題に関する研究: エネルギー産生能力のタイプに着目して. *体育学研究.* 2000; 45: 239-251.
 - 14) Sakai K, Sheahan J, Takamatsu K. The relationship between high power output during intermittent exercise and three energy delivery systems Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine. 1999; 48: 453-466.
 - 15) Ericson MO. Mechanical muscular power output and work during ergometer cycling at different work loads and speeds. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1988; 57: 382-387.
-
- (受付: 2025 年 11 月 6 日, 受理: 2026 年 3 月 30 日)

Efficacy of high intensity interval training on intermittent endurance in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction

Suzuki, T.^{*1}, Kitsunai, M.^{*1}, Uchida, T.^{*1}, Matsuzawa, K.^{*1}
Sakata, J.^{*1}, Takahashi, T.^{*1,2}, Sakai, T.^{*1,2}

^{*1} TOYOTA Athlete Support Center, TOYOTA Memorial Hospital

^{*2} Department of Orthopedic, TOYOTA Memorial Hospital

Key words: anterior cruciate ligament reconstruction, high-intensity interval training, cycle ergometer

[Abstract] This study evaluated the efficacy of high-intensity interval training (HIIT) in athletes following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. Forty-four patients who underwent ACL reconstruction at our institution were included and divided into two groups, the intervention group who performed weekly HIIT on a cycle ergometer between 3 and 6 months postoperatively and the control group, including the remaining patients. Intermittent endurance was assessed using an intermittent test measuring power (PP) and average power (AP). Knee function was evaluated based on knee strength (KS) and joint instability. A split-plot analysis of variance with two factors (time × intervention) was conducted for PP, AP, and KS; simple main effects were analyzed when interactions were significant. Joint instability was assessed using Fisher's exact test. Significant interaction was found for AP. While no between-group difference was found at 3 months, the intervention group showed significantly higher AP at 6 months. A significant interaction was also observed for PP with no significant between-group differences at either time point. No significant interactions were found for KS, and joint instability did not differ between groups. These findings suggest that HIIT using a cycle ergometer may improve intermittent endurance between 3 to 6 months following ACL reconstruction.