

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19477

研究課題名（和文）足圧中心位置に着目した膝前十字靭帯再建術後の代償的運動制御メカニズムの解明

研究課題名（英文）Investigation of the compensatory motor control mechanism after anterior cruciate ligament reconstruction: focus on the center of pressure control

研究代表者

石田 知也 (Ishida, Tomoya)

北海道大学・保健科学研究院・助教

研究者番号：30759642

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、スポーツの基本動作であるスクワット動作を対象として、膝前十字靭帯再建術後に認められる代償的運動制御のメカニズムを、足圧中心位置の制御に着目することによって明らかにすることを目的とした。本研究より、足圧中心前後位置の左右非対称性は膝前十字靭帯再建術後のスクワット動作における非対称的な運動制御に関連していることが明らかとなった。また、視覚的フィードバックを用いて足圧中心位置を左右対称的に保持するようなスクワットトレーニングが、膝前十字靭帯再建術後の左右対称的な運動制御の獲得に繋がる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膝前十字靭帯再建術後の非対称的な運動制御は、競技パフォーマンス低下や高い再受傷率との関連が報告されていることから、本研究の成果は膝前十字靭帯再建術後の競技パフォーマンス向上や再受傷予防に繋がることが期待される。また、スクワット動作は荷重下における基本動作として、筋力トレーニングや動作評価として広く用いられている。本研究の知見はスポーツ選手のトレーニングや、様々な疾患のリハビリテーションなどにおいても広く活用することができ、学術的および社会的意義を有した成果であったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The present study showed that the asymmetry in center of pressure (COP) position is associated with compensatory motor control during double-leg squatting after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR), and that visual feedback training regarding symmetry in COP position improves symmetry in knee extensor moment as well as COP position during double-leg squatting after ACLR.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：膝前十字靭帯 リハビリテーション スクワット 足圧中心 運動制御

## 1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯 (anterior cruciate ligament; ACL) 損傷は頻度が高く、重篤なスポーツ外傷の一つである。受傷後は膝崩れが残存するため、外科的な ACL 再建術と半年以上のリハビリテーションが必要となる。再建術の進歩により、多くの選手がスポーツ復帰可能とはなったが、競技パフォーマンスの低下や、高い再受傷率などの問題は未だ解決されていない (Wiggins et al., Am J Sports Med. 2016)。大腿四頭筋筋力の健側と患側の差 (健患差) はパフォーマンス低下や再受傷リスクと関連するが、術後 2 年においても筋力の健患差は残存する (Petersen et al., Arch Orthop Trauma Surg. 2014)。ACL 再建術後に十分な機能回復を得るための方法は確立できておらず、機能評価やトレーニング方法の再考が求められている。

患側の大腿四頭筋負荷を減じる非対称的な代償動作は、走行、スクワット動作、ジャンプ着地動作など様々な動作で報告されている。このような代償動作は、大腿四頭筋の筋力低下の結果であると同時に、筋力の回復を阻害する要因にもなる。代償的運動制御のメカニズムを解明し、改善する方法を確立することが ACL 再建術後の機能回復に必要である。

スクワット動作は筋力トレーニングとしてだけでなく、スポーツにおける基本動作の評価としてもよく用いられる。ACL 再建術後では、大腿四頭筋の筋活動を反映する膝関節伸展モーメントが健側と比較して患側で低値を示す。この膝関節伸展モーメントの減少は、単純な患側荷重量の減少だけでなく、患側の足関節・股関節伸展モーメントの相対的な増加による、非対称的な運動制御により代償されている (Roos et al., J Neuroeng Rehabil. 2014)。しかし、膝関節をはじめとする下肢関節角度には明らかな健患差は検出されておらず、膝関節伸展モーメントを他関節で代償するメカニズムは解明されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は、スポーツの基本動作であるスクワット動作を対象として、ACL 再建術後に認められる、患側の膝関節伸展モーメントが減少し、足関節・股関節伸展モーメントが増加する代償的運動制御のメカニズムを、足圧中心 (center of pressure; COP) 位置の制御に着目することによって明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) スクワット動作における COP 位置と膝関節伸展モーメントの関連

ACL 再建術後症例 24 名、健常例 28 名を対象とし、両脚スクワット動作の三次元動作解析を行った。三次元動作解析システム (Cortex, Motion Analysis Corp.) を用いて、7 台の高速度カメラ (Hawk camera, Motion Analysis Corp.) と 2 台の床反力計 (Type 9286, Kistler AG) を同期させ計測した。下肢関節モーメントは逆動力学解析により算出した (Visual3D, C-Motion Inc.)。非対称性の指標として、各変数の limb symmetry index (LSI) を以下の式により算出した。

$$LSI = \frac{\text{患側 (非利き足)}}{\text{健側 (利き足)}} \times 100[\%]$$

膝関節伸展モーメント、サポートモーメント (膝、足、股関節伸展モーメントの和) に対する膝関節伸展モーメントの比の LSI を従属変数、COP 前後位置の LSI を独立変数とし、膝関節伸展モーメントの非対称性と COP 前後位置の非対称性の関連について検証した。

### (2) COP 位置の変化がスクワット動作における下肢関節モーメントに与える影響

#### 前後の変化について

健常者 16 名を対象とした。前方に設置したモニターに COP 位置を映し出し、COP 前後位置を足長の  $45 \pm 2.5\%$  (後方条件)、 $55 \pm 2.5\%$  (前方条件) に保持するよう指示した条件において両脚スクワット動作の三次元動作解析を行った。COP 位置のフィードバックには LabVIEW (National Instruments Corp.) を用いた。三次元動作解析については研究 (1) と同様の方法を用いた。COP 前方条件と後方条件の間で下肢関節モーメントを比較し、COP 前後位置が下肢関節モーメントに与える影響を検証した。

#### 左右対称性の影響について

ACL 再建術後 27 名を対象とした。両脚スクワット動作中の COP 位置を前方に設置したモニターに映し出し、COP 前後位置を可能な限り左右で一致させるように指示を与えた。COP 位置のフィードバックには LabVIEW (National Instruments Corp.) を用いた。スクワット動作の三次元動作解析については研究 (1) と同様の方法で実施した。本研究は、COP 前後位置の非対称性を修正した効果を検証することを目的としたため、介入前の COP 前後位置の LSI が 110% 以上であった症例を対象とし、介入前とフィードバック中の膝関節伸展モーメントを比較した。

#### 4. 研究成果

##### (1) スクワット動作における COP 位置と膝関節伸展モーメントの関連

ACL 再建術後症例では COP 前後位置の LSI と膝関節伸展モーメント対サポートモーメント比の LSI の間に有意な関連を示した (図 1)。健常例においては, COP 前後位置の LSI と膝関節伸展モーメントの LSI の間に有意な関連を認められた (図 2)。これらの結果から, 両脚スクワット動作における COP 前後位置の左右非対称性は膝関節伸展モーメントの左右非対称性と関連することが明らかとなり, 臨床における評価指標の一つとなりうることを示唆された。

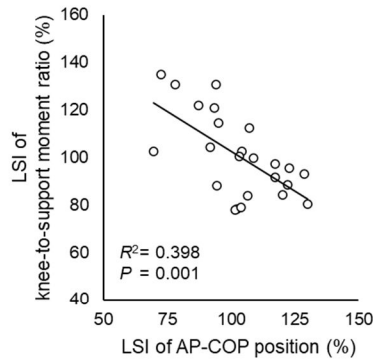


図1. COP前後位置のLSIと膝関節伸展モーメント対サポートモーメント比のLSIの関連 (ACL再建術後症例24名) (“Pelvic Rotation Is Associated With Asymmetry in the Knee Extensor Moment During Double-Leg Squatting After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction”by Ishida T, Samukawa M, Koshino Y, Ino T, Kasahara S, Tohyama H, 2022, J Appl Biomech. 2023;39(1):62-68. より改変)

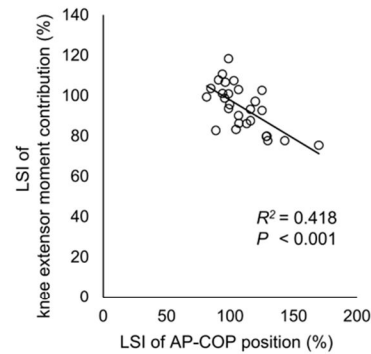


図2. COP前後位置のLSIと膝関節伸展モーメントのLSIの関連 (健常例28名) (from “The center of pressure position in combination with ankle dorsiflexion and trunk flexion is useful in predicting the contribution of the knee extensor moment during double-leg squatting”by Ishida T, Samukawa M, Kasahara S, Tohyama H, 2022, BMC Sports Sci Med Rehabil. 2022;14(1):127. used under CC BY 4.0/cropped from original)

##### (2) COP 位置の変化がスクワット動作における下肢関節モーメントに与える影響

###### 前後の変化について

COP 前方条件の COP 前後位置は  $53.5 \pm 2.4\%$ , 後方条件は  $44.4 \pm 2.1\%$  であり, 視覚的フィードバックにより意図した COP 前後位置に保持することができていた。各条件間の下肢関節伸展モーメントの比較では, 前方条件に比し後方条件では膝関節伸展モーメントが有意に増加した一方で足関節底屈モーメントは有意に低下した (図 3)。股関節伸展モーメントに条件間の差は認めなかった。これらの結果より, COP 前後位置の視覚的フィードバックは, 両脚スクワット動作中の膝関節伸展モーメント, 足関節底屈モーメントを調整するトレーニング方法として有用であることが明らかとなった。

###### 左右対称性の影響について

COP 前後位置の視覚的フィードバックにより, COP 前後位置の LSI は有意に減少し, 対称性は改善された (介入前 132%, 介入後 113%,  $P < 0.05$ )。一方で, 膝関節伸展モーメントの LSI は有意に大きくなり, フィードバックトレーニングにより対称性が改善した (介入前 87%, 介入後 101%,  $P < 0.05$ )。本研究結果より, COP 前後位置の左右対称性についての視覚的フィードバックを用いたスクワットトレーニングは, ACL 再建術後のスクワット動作における膝関節伸展モーメントの対称性改善に効果的であることが明らかとなった。

##### (3) 成果のまとめ

本研究より, COP 前後位置の左右非対称性は ACL 再建術後のスクワット動作における代償的な運動制御に関連していることが明らかとなった。また, 視覚的フィードバックを用いて COP 位置を左右対称的に保持するよう意識したスクワットトレーニングが, 左右対称的な運動制御の獲得に繋がる可能性が示された。ACL 再建術後の非対称的な運動制御は, 競技パフォーマンス低下や高い再受傷率との関連が報告されていることから, 本研究の知見は ACL 再建術後の競技パフォーマンス向上や再受傷予防に繋がることを期待される。

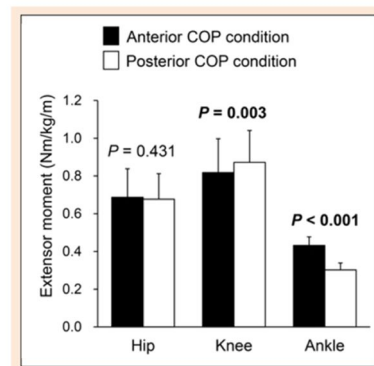


図3. COP前方条件と後方条件における下肢関節伸展モーメントの比較 (from “Effects of Changing Center of Pressure Position on Knee and Ankle Extensor Moments During Double-Leg Squatting”by Ishida T, Samukawa M, Endo D, Kasahara S, Tohyama H, 2022, J Sports Sci Med. 2022;21(3):341-346. used under CC BY-NC-ND 4.0)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ishida Tomoya, Samukawa Mina, Koshino Yuta, Ino Takumi, Kasahara Satoshi, Tohyama Harukazu	4. 巻 39
2. 論文標題 Pelvic Rotation Is Associated With Asymmetry in the Knee Extensor Moment During Double-Leg Squatting After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Biomechanics	6. 最初と最後の頁 62-68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1123/jab.2022-0204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ishida Tomoya, Samukawa Mina, Endo Daisuke, Kasahara Satoshi, Tohyama Harukazu	4. 巻 21
2. 論文標題 Effects of Changing Center of Pressure Position on Knee and Ankle Extensor Moments During Double-Leg Squatting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Sports Science and Medicine	6. 最初と最後の頁 341-346
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.52082/jssm.2022.341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ishida Tomoya, Samukawa Mina, Kasahara Satoshi, Tohyama Harukazu	4. 巻 14
2. 論文標題 The center of pressure position in combination with ankle dorsiflexion and trunk flexion is useful in predicting the contribution of the knee extensor moment during double-leg squatting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation	6. 最初と最後の頁 127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s13102-022-00523-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ishida Tomoya, Samukawa Mina, Koshino Yuta, Ino Takumi, Kasahara Satoshi, Tohyama Harukazu	4. 巻 -
2. 論文標題 Interlimb asymmetry in knee extension moment during double-leg squatting is associated with persistent quadriceps weakness after ACL reconstruction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Orthopaedic Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 石田 知也、寒川 美奈、遠山 晴一	4. 巻 39
2. 論文標題 ACL再建膝に対する運動動作の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 臨床スポーツ医学	6. 最初と最後の頁 948-953
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松本尚, 井野拓実, 石田知也	4. 巻 37
2. 論文標題 膝前十字靭帯損傷に対する理学療法診断の進め方	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 理学療法	6. 最初と最後の頁 1106-1118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石田知也, 越野裕太, 山中正紀	4. 巻 37
2. 論文標題 膝内側側副靭帯損傷に対する理学療法診断の進め方	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 理学療法	6. 最初と最後の頁 1094-1105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石田知也, 井野拓実, 越野裕太, 寒川美奈, 遠山晴一	4. 巻 37
2. 論文標題 下肢スポーツ外傷・障害の受傷バイオメカニクスとリスク要因	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本義肢装具学会誌	6. 最初と最後の頁 11-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ishida Tomoya, Ueno Ryo, Kitamura Yu, Yamakawa Yoshiki, Samukawa Mina, Tohyama Harukazu
2. 発表標題 The Relationship Between Center of Pressure Position and Knee Extensor Moment During Double-leg Squatting
3. 学会等名 ISB/JSB 2023 Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山川 由起、石田 知也、北村 優、寒川 美奈、遠山 晴一
2. 発表標題 両脚スクワット動作における足圧中心の前後方向における相対的位置が下肢関節モーメントの対称性に与える影響
3. 学会等名 第25回日本体力医学会北海道地方会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石田 知也、寒川 美奈、越野 裕太、井野 拓実、笠原 敏史、遠山 晴一
2. 発表標題 膝前十字靭帯再建術後の大腿四頭筋筋力低下の残存と両脚スクワット動作における膝関節伸展モーメントの非対称性の関連
3. 学会等名 第9回日本スポーツ理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田 知也、寒川 美奈、越野 裕太、井野 拓実、笠原 敏史、遠山 晴一
2. 発表標題 膝前十字靭帯再建術後の両脚スクワット動作における膝関節伸展モーメントの非対称性と骨盤回旋の関連
3. 学会等名 第33回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田 知也、寒川 美奈、越野 裕太、井野 拓実、笠原 敏史、遠山 晴一
2. 発表標題 膝前十字靭帯再建術後の両脚スクワット動作における膝関節伸展モーメントの非対称性と足圧中心位置の関連
3. 学会等名 第14回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会・第48回日本整形外科スポーツ医学会学術集会 ( JOSKAS-JOSSM 2022 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤 大輔、石田 知也、寒川 美奈、笠原 敏史、遠山 晴一
2. 発表標題 両脚スクワット動作中の足圧中心位置フィードバックによる下肢関節モーメントの変化
3. 学会等名 第24回日本体力医学会北海道地方会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田知也，寒川美奈，遠山晴一
2. 発表標題 ACL再損傷予防を目指した動作評価と理学療法
3. 学会等名 第32回日本臨床スポーツ医学会学術集会 ( 招待講演 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ishida T, Samukawa M, Ino T, Watanabe K, Sabashi K, Hori T, Koshino Y, Tohyama H
2. 発表標題 Association between lower-limb joint loading pattern and center of pressure during squat exercise in subjects with anterior cruciate ligament reconstruction
3. 学会等名 The 23th International Society of Electrophysiology and Kinesiology Virtual Congress ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 遠山晴一, 寒川美奈, 石田知也 (松本秀男、近藤英司 編集)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 中山書店	5. 総ページ数 400
3. 書名 下肢のスポーツ外傷・障害 [ 大腿・膝関節・下腿・足関節・足部 ]	

1. 著者名 石田知也 (小林 匠、窪田 智史 編集)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 672
3. 書名 軟部組織損傷・障害の病態とリハビリテーション	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------