

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：33918

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18207

研究課題名（和文）前十字靭帯損傷における神経筋制御機構の解明と損傷予防プログラムの開発

研究課題名（英文）Underlying a neuromuscular control mechanism in anterior cruciate ligament injuries and development of injury prevention program

研究代表者

鳥山 実 (TORIYAMA, Minoru)

日本福祉大学・健康科学部・助教

研究者番号：10734551

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では膝前十字靭帯（ACL）損傷に係る複数の下肢関節運動の組み合わせにおける運動協調性を定量化する新たな解析法の開発、検証を行った。その結果、ACL損傷者および健常者ともに、閉眼での片脚スクワット時において、股関節屈曲/伸展-股関節外転/内転-膝関節屈曲/伸展の組み合わせにおける運動協調性が低下し、またACL損傷者の非損傷側では大腿直筋と大腿二頭筋の同時収縮活動が低下することが明らかとなった。これらの結果から、ACL損傷者はより不安定な環境での運動時に、特に非損傷側での運動協調性の低下とACLの伸長ストレスへの拮抗作用が低下し、ACL損傷のリスクが高ま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

本研究の結果から、ACL損傷者は特に不安定な環境において運動の協調性が低下し、非損傷側下肢においてACL伸張ストレスへの拮抗作用が低下するという特徴が明らかとなった。この結果によりACL損傷後の理学療法として、損傷側への下肢関節運動協調性を向上させる運動療法に加え、より不安定な環境における運動時に非損傷側の大腿直筋と大腿二頭筋の同時収縮機能を向上させることで、再損傷や反対側の損傷が予防ができる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to clarify the neuromuscular control mechanism related ACL injury, and to develop and validate a novel analytical method to quantify the motor coordination in a combination of multiple lower limb joint movements. The results of this study showed that both the ACL-injured and healthy subjects showed decreased motor coordination in the combination of hip flexion/extension - hip adduction /abduction - knee flexion/extension during single-leg squatting with closed eyes, and lower co-contraction of the quadriceps and biceps femoris muscles on the non-injured side of the ACL-injured subjects. These results suggest that ACL-injured patients may be at increased risk of ACL injury during exercise in a more unstable environment, with reduced motor coordination and reduced antagonist to the ACL, especially on the non-injured side.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：膝前十字靭帯 運動協調性 動作解析 筋電図

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯 (ACL) 損傷はスポーツ外傷の中でも重篤なものの 1 つであり、失われた機能を完全に回復するには外科的治療が必要である。一方で外科的治療を行うと長期間にわたる運動の制限が必要となるため患者の負担が大きく、また医療経済的にも不利益が生じる。したがって ACL 損傷は未然に予防することが重要であるが、ここ数年間における ACL 損傷の発生率に大きな変化はなく、また復帰後の再損傷率や反対側の損傷率は初回損傷率よりも高いといった報告も散見される。これらのことから ACL 損傷のリスクを解明し、より効果的な損傷予防プログラムを開発することは重要な研究課題である。

ACL 損傷を予防するためには、その解剖学的な走行から下肢関節の矢状面、前額面、水平面上の運動制御が必要となる。したがって、ACL 損傷の潜在的リスクを有する者はこの 3 次元的な下肢関節運動の協調性が破綻していることが予測される。ACL 損傷の要因として神経筋制御機構の破綻が挙げられており、ACL 損傷者や ACL 再建者では感覚入力系としての固有感覚受容機能が低下していることや、感覚情報統合および中枢神経系からの出力生成時の脳活動、最終効果器における下肢筋活動などが健常者と異なることが報告されている。これらのことから ACL 損傷のリスクが高い者はこれらの神経筋制御機構が破綻しているために 3 次元的な下肢関節運動の協調性が低下していることが推測されるが、その一方で 3 次元的な下肢関節運動の協調性を定量化する手法は現在のところ不十分である。

以上により、新たに 3 次元的な下肢関節協調運動の定量化手法を開発し、さらに最終効果器である下肢筋活動も同時に計測して ACL 損傷者と健常者の神経筋制御機構の違いを明らかにすることで、より効果的な ACL 損傷後の理学療法プログラムや ACL 損傷リスクを軽減できる予防損傷プログラム開発の一助となることが期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では以下の 2 つを目的として実施した。

- (1) 健常者における複数の関節運動の組み合わせにおける協調性を定量化できる新たな手法を開発する
- (2) 健常者と ACL 損傷者の損傷側と非損傷側を対象に課題動作時における下肢関節の協調性と筋活動を比較し、神経筋制御機能の違いを明らかにする

### 3. 研究の方法

#### (1) 研究 1

対象は健常成人女性 16 名 (年齢:  $21.1 \pm 0.4$  歳, 身長:  $1.58 \pm 0.06$  m, 体重:  $50.1 \pm 6.8$  kg, BMI:  $20.0 \pm 1.6$  kg/m<sup>2</sup>, 全て平均  $\pm$  標準偏差) とした。課題動作は片脚スクワット動作を採用し、膝関節運動における最大伸展位から最大屈曲位を経て最大伸展位までの運動を 1 回のスクワット動作とした。連続 12 回を 50BPM の速さで行い、最初と最後の 1 回を除いた 10 回を解析対象とした。上記動作課題を開眼条件、閉眼条件で行い、試行の間には十分な休憩時間を設けた。運動学データは赤外線カメラ 6 台で構成される 3 次元動作解析システム VICON NEXUS (Vicon Motion Systems, Oxford, UK) を使用してサンプリング周波数 200Hz で測定した。赤外線マーカーを身体 45 か所に貼付し、得られた座標データから Body Builder (Vicon Motion Systems, Oxford, UK) を用いて 15 剛体リンクモデルを作成し、オイラー角を用いて股関節屈曲伸展角度、膝関節屈曲伸展角度、膝関節内外反角度を算出した。協調性の解析には、オープンソースソフトウェアである Python 3.6.4 を用いて、3 つの関節運動の時系列データを主成分分析により 2 次元データに次元

削除を行い，得られた 2 つの時系列データに Vector Coding 法を用いて Coupling angle を求めた．Coupling angle の時系列データに対し，フラクタル時系列解析法の 1 つである Detrended Fluctuation Analysis (DFA) による自己相関性（ケーリング指数： $\alpha$ ）と，ランダム性の指標であるサンプルエントロピー（SampEn）を算出しそれぞれ定量化した．統計解析には SPSS statistics ver 24 を使用し，2 条件の値を対応のある t 検定（有意水準 5%）で比較した．

## （2） 研究 2

対象は健康成人女性 9 名（年齢：21.8±0.4 歳，身長：1.58±0.05m，体重：53.0±8.1kg，BMI：21.5±3.6kg/m<sup>2</sup>）と ACL 損傷者 3 名（男性 1 名，女性 2 名，年齢：25.0±10.4 歳，身長：1.62±0.10m，体重：60.4±11.9kg，BMI：22.9±2.3kg/m<sup>2</sup>）とした．課題動作は研究 1 と同様とした．運動学データは赤外線カメラ 16 台で構成される 3 次元動作解析システム VICON NEXUS（Vicon Motion Systems, Oxford, UK）を使用してサンプリング周波数 200Hz で測定し，その他解析方法は研究 1 と同様に実施した．運動の協調性の解析については，課題動作時の関節運動範囲がある程度相似し，かつ ACL 損傷に関連する関節運動を考慮して，組み合わせを股関節屈曲伸張運動，股関節内外転運動，膝関節屈曲伸張運動に変更し，その他は研究 1 と同様に解析した．筋活動データは無線表面筋電計 Trigno wireless system(Delsys Inc. Boston, MA)を使用してサンプリング周波数 1000Hz にて測定した．導出筋は大殿筋（Gmax），中殿筋(Gmed)，大腿直筋(RF)，大腿二頭筋長頭(BF)，前脛骨筋(TA)，腓腹筋内側頭(MG)とし，得られた筋電図生波形を全波整流し，100ms の二乗平均平方根(Root mean square: RMS)を求めたのち，各筋の MMT による最大筋活動を 100% として正規化した．RF と BF の同時収縮比（co-contraction index: CI）を Q-H CI，RF と MG の同時収縮比を Q-G CI として算出した．1 回のスクワット動作における膝関節の屈曲角度が増加している局面を屈曲局面，屈曲角度が減少していく局面を伸張局面とし，それぞれの局面で各筋の平均筋活動（mean RMS: mRMS）と Q-H CI および Q-G CI を求め，10 回の平均値を求めた．健康者は軸足（蹴り脚の反対側）を測定肢とし，ACL 損傷者は損傷側と非損傷側で測定を行い，それぞれ健康群，ACL 損傷側群，非損傷側群とした．統計解析には SPSS statistics ver 25 を使用し，3 群と開眼および閉眼条件の 2 要因とした 2 元配置分散分析と，群間の差には Sheffe の多重比較検定，条件の差には対応のある t 検定にて群間および条件間を比較した（有意水準 5%）．

## 4．研究成果

### （1） 研究 1

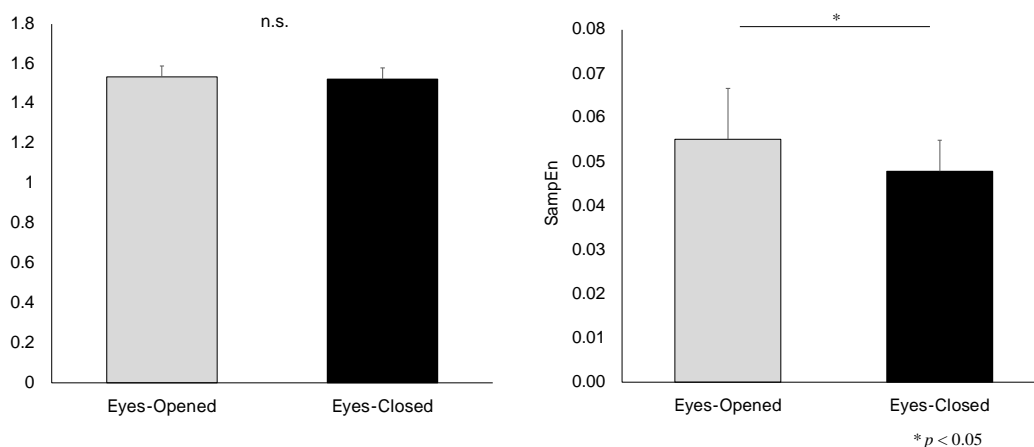


図 1 開眼条件と閉眼条件における DFA（左図）と SampEn（右図）の結果

図 1 は開眼条件および閉眼条件における Coupling angle の DFA と SampEn の結果を示している．DFA の結果に有意差は認められなかった（ $p = 0.56$ ）．SampEn については条件間における

有意差を認めた ( $p = 0.043$ )。SampEn は値が大きいほどランダム性が高いことを表し、規則性の低い時系列データであることを示している。よって閉眼条件においては今回の股関節屈伸-膝関節屈伸-膝関節内外反の組み合わせにおける運動の規則性が低下していることが明らかとなった。

(2) 研究2

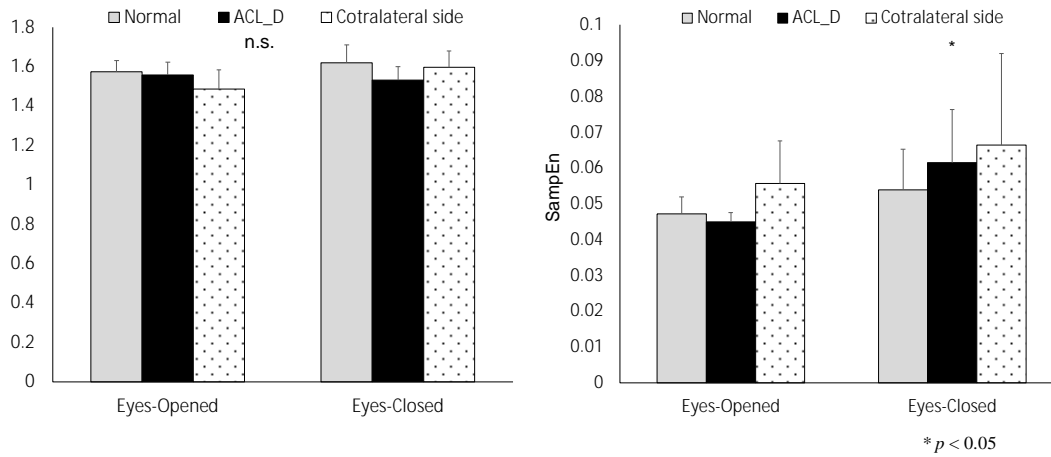


図2 開眼条件と閉眼条件における DFA (左図) と SampEn (右図) の結果

図2は健常群, ACL 損傷群, 非損傷側群における開眼条件および閉眼条件における Coupling angle の DFA と SampEn の結果を示しており, SampEn については条件による有意な主効果を認めた ( $p = 0.029$ ) が, 群による主効果および交互作用は認めなかった。これにより群に関わらず, 閉眼条件では股関節屈伸-股関節内外反-膝関節屈伸の組み合わせにおける運動の規則性が低下することが明らかとなった。

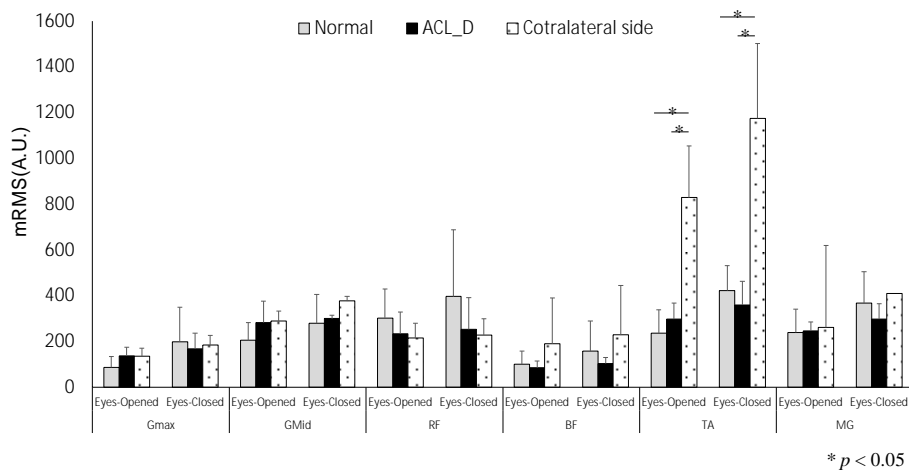


図3 屈曲局面における各筋の mRMS の結果

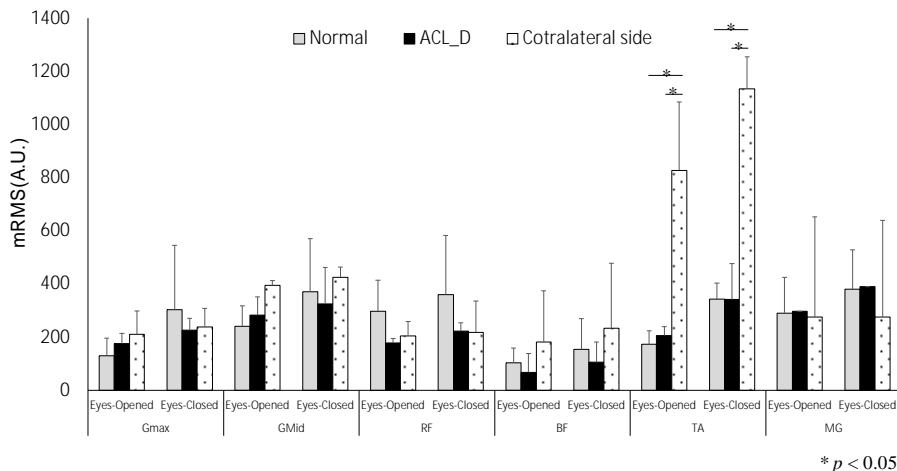


図4 伸展局面における各筋の mRMS の結果

図3, 4は開眼条件と閉眼条件における各筋の平均筋活動の結果を示しており, 前脛骨筋に関しては屈曲伸展の両局面において群 ( $p < 0.001, p < 0.001$ ) と条件 ( $p = 0.03, p < 0.001$ ) による有意な主効果を認めたが, 交互作用は認められなかった. ACL 損傷者は非損傷側において開眼, 閉眼に関わらず片脚スクワット動作時に前脛骨筋の活動が高まっていることが明らかとなった.

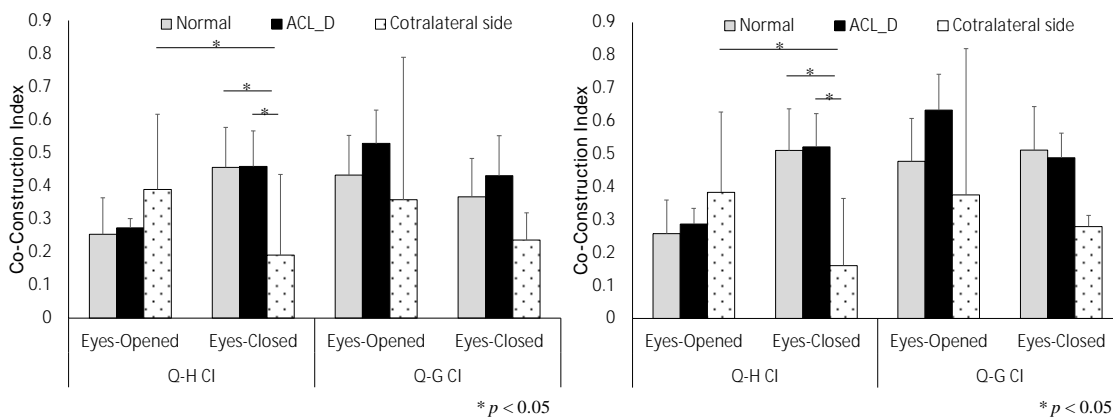


図5 屈曲局面(左図)と伸展局面(右図)における同時収縮比の結果

図5は開眼条件と閉眼条件における同時収縮比の結果を示しており, Q-H CI については屈曲伸展の両局面において有意な相互作用を認めた ( $p = 0.027, p = 0.007$ ). 課題動作時における大腿直筋と大腿二頭筋の同時収縮比は ACL 損傷者の非損傷側において特に閉眼時の片脚スクワット動作時に低下することが明らかとなった.

### (3) まとめ

研究1について, 片脚立位でのスクワット動作という支持基底面が減少する不安定な環境に加えて, さらに視覚情報を遮断することにより健常者でも複数の下肢関節運動の安定した反復運動が損なわれたと考えられる. 研究2について, 健常者と ACL 損傷者, ACL 損傷者の反対側において, 研究1と同様に複数の下肢関節運動の安定した反復運動が困難であった. また ACL 損傷者の非損傷側下肢については, 視覚を遮断した不安定な動作環境において前脛骨筋を優位とした動作戦略をとることが明らかとなった. 前脛骨筋は足関節戦略を優位にする際に活動が増加するため, 不安定な環境において足関節戦略による代償機構が機能したと推測される. さらに非損傷側下肢では大腿直筋と大腿二頭筋の同時収縮比が減少することが明らかとなった. 大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮比の減少は前方剪断力を増加させると報告されており, ACL 損傷者は素因として視覚を遮断した不安定な動作時に ACL 損傷のリスクの高い動作戦略を選択しているか, あるいは ACL 損傷後に動作戦略が変化している可能性が示された.

### (4) 今後の展望

今回の結果より動作の不安定性の指標として新たに複数関節の変動性が有用である可能性が示された. 今後は対象者数の拡大を図り, 健常者と ACL 損傷者との違いをより明確にすることで ACL 再建術後の運動療法プログラム考案の一助となることを目指す. また健常者でより大規模な計測を縦断的に行うことで ACL 損傷者に特徴的な指標を前向きに探索し, ACL 損傷リスクを抽出できるような新たな評価体系の構築に繋げていく.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鳥山 実	4. 巻 43
2. 論文標題 スクワット動作時における下肢関節運動の協調性と床反力との関係性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JOSKAS (日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会雑誌)	6. 最初と最後の頁 872-876
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 Okimoto Atsushi, Toriyama Minoru, Deie Masataka, Maejima Hiroshi	4. 巻 49
2. 論文標題 Decline of Hip Joint Movement Relates to Overestimation of Maximum Forward Reach in Elderly Persons	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Motor Behavior	6. 最初と最後の頁 611~618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00222895.2016.1250714	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Minoru Toriyama, Nana Okada, Risa Ota
2. 発表標題 Movement variability in female after ACL reconstruction during squat motions
3. 学会等名 13th International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (ISPRM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部 巧, 中前敦雄, 平田和彦, 鳥山 実, 浅枝 諒, 石川正和, 木村浩彰, 安達伸生
2. 発表標題 落下高度の非予測性が着地動作時の下肢体幹運動学・運動力学に与える影響
3. 学会等名 第11回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会 (11th JOSKAS)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部 巧, 中前敦雄, 平田和彦, 鳥山 実, 浅枝 諒, 石川正和, 木村浩彰, 安達伸生
2. 発表標題 着地高の非予測的環境での着地動作における膝前十字靭帯損傷発生の危険性について
3. 学会等名 第34回日本整形外科学会基礎学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部 巧, 中前敦雄, 平田和彦, 鳥山 実, 浅枝 諒, 石川正和, 木村浩彰, 安達伸生
2. 発表標題 落下高に対する予測の有無が着地時の下肢体幹運動に与える影響
3. 学会等名 第46回日臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥山 実
2. 発表標題 スクワット動作時における膝関節の動的不安定性と床反力との関係性
3. 学会等名 第9回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会 (9th JOSKAS)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳥山 実
2. 発表標題 スクワット動作速度の違いが下肢関節協調運動の変動性と床反力に及ぼす影響
3. 学会等名 第44回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 青木 主税 (編集), 飯田 修平 (編集)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 270
3. 書名 基礎から確認! PT臨床実習チェックリスト	

〔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
研究協力者	安達 伸生  (ADACHI Nobuo)  (30294383)		
研究協力者	中前 敦雄  (NAKAMAE Atsuo)  (60444684)		
研究協力者	阿部 巧  (ABE Takumi)		