

令和 7 年 6 月 25 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2022 ~ 2024

課題番号：22K11404

研究課題名 (和文) 腰痛を慢性化させる神経基盤の解明：筋シナジーに基づく新たなバイオマーカーの開発

研究課題名 (英文) Unraveling the neural basis of chronic low back pain: a new biomarker based on muscle synergy analysis

研究代表者

斎藤 寛樹 (SAITO, HIROKI)

東京工科大学・医療保健学部・助教

研究者番号：80865410

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)：腰痛は有症率および再発率が非常に高く、休職などによる労働生産性の低下や医療費の増大に大きく寄与している。しかし、腰痛を引き起こす異常な運動様式については未だ十分に解明されていない。本研究では、慢性腰痛患者における体幹筋シナジーの異常に注目し、その慢性化要因を調査した。健康な被験者と比較した結果、腰痛患者では特に体幹伸展動作中に筋シナジーの数および構成が著しく異なっており、体幹の安定性に関する筋群の過剰な活動が認められた。本研究の結果から、リハビリテーションにおいてこの異常な筋シナジーを正常化することが、慢性腰痛の改善につながる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、慢性腰痛の病態理解において筋シナジーという神経筋制御の視点から新たな知見を提供した。特に、運動の方向特異的な筋シナジー変化を定量的に示したことは、腰痛患者における異常運動様式の理解を深めるとともに、腰痛の慢性化メカニズムの解明に重要な示唆を与える。さらに本研究で明らかになった筋活動パターンの異常は、リハビリテーションプログラムの個別化や運動療法の効果向上に寄与し、臨床現場での治療戦略の最適化に直結する。

研究成果の概要 (英文)：Low back pain has very high prevalence and recurrence rates, significantly contributing to decreased workforce productivity due to sick leave and increasing healthcare costs. However, the abnormal movement patterns that potentially lead to low back pain remain insufficiently understood. This study focused on abnormalities in trunk muscle synergies among patients with chronic low back pain (CLBP) to investigate factors contributing to chronicity. Compared with healthy subjects, individuals with CLBP exhibited significant differences in the number and composition of muscle synergies, particularly during trunk extension movements. Specifically, CLBP patients showed excessive activation of muscle groups associated with trunk stability. These findings suggest that rehabilitation aimed at normalizing these abnormal muscle synergies may lead to improvements in chronic low back pain.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：慢性腰痛 体幹筋シナジー 運動制御

1. 研究開始当初の背景

腰痛は世界的に最も障害をもたらす原因であり、患者の生活の質 (QOL) を著しく低下させるだけでなく、医療費の増大や労働生産性の損失など莫大な社会経済的負担を引き起こしている。特に慢性腰痛は有病率が高く、痛みが長期化するメカニズムについて未解明の部分が多い。例えば、痛みが持続することで身体の動きや筋肉の使われ方にどのような変化が生じるのか、その詳細な機序は十分に明らかになっていない。

慢性腰痛患者では体幹筋の活動パターンに変調が起きている可能性が指摘され、筋電図 (EMG) を用いた神経生理学的評価によりその異常を捉えようとする研究が進められてきた。しかし、既存の研究では慢性腰痛患者の体幹筋活動に関する結果は一貫性がなく、個人差が大きく矛盾する報告も多い。この要因として、従来の表面筋電図では体幹のごく一部の筋しか測定できず、体幹全体の協調的な筋活動を十分に把握できていないことが挙げられる。体幹には多数の筋群が存在し、それらが解剖学的・神経学的に連結して協調的に機能するため、複数筋の活動パターンを統合的に評価することが重要である。

近年、筋シナジー (筋協調パターン) 解析が注目されている。筋シナジーとは、中枢神経系が多数の筋肉を少数のグループ (モジュール) にまとめて制御し、複雑な運動を効率化するという理論モデルである。筋電図データに非負値行列因子分解などのアルゴリズムを適用することで、協調的な筋活動のパターンを定量的に評価できる (図 1)。この手法を用いて慢性腰痛患者の運動制御特性を解明することを試みた。

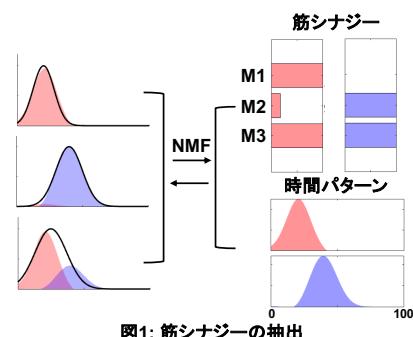


図1: 筋シナジーの抽出

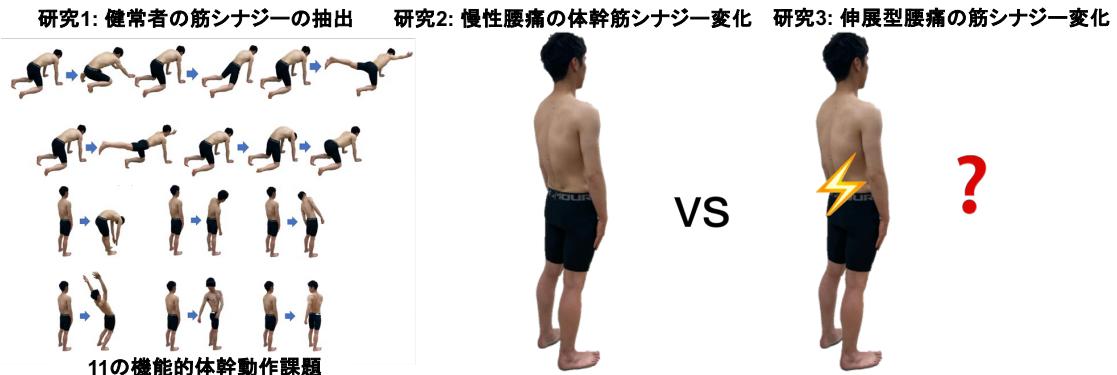
2. 研究の目的

本研究は、筋シナジーの異常と慢性腰痛との関連を明らかにし、その知見を将来的に運動機能の評価指標として活用できる可能性を検討することを目的としている。具体的には、健常者と慢性腰痛患者を対象に体幹筋シナジー構造を比較することで、慢性腰痛に伴う体幹の神経筋協調パターンの変化を解明しようと試みた。特に、本研究では左右対称・非対称を含む 11 種の体幹運動課題中に抽出される筋シナジーを両群で比較し、筋シナジーの構成 (筋の組み合わせ) および時間的パターンにおける差異を検証した。さらに、各筋シナジーの変動性 (再現性や個人差の程度) に着目し、グループ間での筋シナジーパターンのばらつきの違いを解析することで、慢性腰痛患者に特徴的な運動制御戦略 (パターンが画一化しているのか、多様化しているのか) を評価した。

これらのアプローチにより、慢性腰痛患者における体幹筋協調の異常を定量的に把握し、それを客観的な運動機能指標 (バイオマーカー) として活用できる可能性を検討する。筋シナジー解析による神経生理学的指標は、病態の解明のみならず治療介入の効果判定にも役立つ効率的なツールとなり得るため、本研究成果は将来的なリハビリテーション評価法の開発にも資する期待される。

3. 研究の方法

図2: 研究計画



研究計画を図 2 に示す。腰痛に対する筋シナジー解析はこれまでほとんど行われていなかったため、本研究 1 ではまずその前段階として、評価するための動作選定および健常者における筋シナジーのばらつきを検証した。具体的には、臨床現場で比較的よく用いられる 11 種類の課題動作を選定し、体幹の主要な筋 12 部位 (腹直筋、外腹斜筋、脊柱起立筋など) の筋電図を記録した。記録された筋電図データに対して非負値行列因子分解を適用し、筋シナジーを抽出した。抽出された筋シナジーの数および構成、各筋活動の寄与度について解析を行い、健康な被験者間

における筋シナジーパターンの変動性を評価した。これにより、慢性腰痛患者における筋シナジーの異常を客観的に比較・評価するための基準を設定した。

その後、本研究2では慢性腰痛患者と年齢・性別をマッチさせた健常対照を対象に実験を実施した。慢性腰痛群には3か月以上持続する非特異的腰痛がある者を含め、直近数か月間に痛みの増悪と寛解を繰り返しているケースも対象とした。対照群は医療を要するような腰痛の既往がない健常者から募集した。両群とも重大な脊椎疾患や神経疾患、下肢への放散痛を伴う腰痛を有する者、最近の手術歴がある者は除外し、特に慢性腰痛群では直前に急性増悪があつたり鎮痛薬や筋弛緩薬を常用している者も除いた。被験者には前述の11種類の体幹運動・姿勢課題を実施してもらい、課題実施中に筋電図データを収集し、非負値行列因子分解解析を用いて筋シナジーを抽出・評価した。さらに研究3では、慢性腰痛の中でも特にスポーツ領域でも問題となっている伸展型腰痛の筋シナジー異常についても検証した。

4. 研究成果

健常者からは右脊柱起立筋群パターン、左脊柱起立筋群パターン、両側腰部脊柱起立筋群パターン、両側広背筋および上部脊柱起立筋群パターン、両側腹部筋パターンという5つの明確な筋シナジーが抽出された。さらに、これらの筋シナジーパターンは研究代表者が過去の研究 (Saito et al., 2021, Sensors) で24種類の多様なヒトの日常動作（歩行、ジャンプ、方向転換、姿勢保持など）から抽出した筋シナジーと非常に類似していることが確認された。この結果から、本研究で選定した11種類の課題動作はヒトが日常的に使う多様な運動や姿勢を効果的に反映していることが示された。また、健常被験者間の筋シナジーの類似性は高かったが、一定の個人差やばらつきが見られ、これが後の慢性腰痛患者との比較解析における基準として用いられた。以上のようにして、本研究では腰痛患者に対する筋シナジー解析の妥当性を高め、解析結果の解釈をより正確かつ客観的に行うための基盤を構築した。

研究2では健常対照群・慢性腰痛群それぞれのデータから抽出された筋シナジーを比較したところ、およそ5~6個の基本的な筋シナジーが両群で確認された。筋シナジーの抽出数自体に群間の大きな差はなく（健常群 5.2 ± 0.8 個、慢性腰痛群 5.0 ± 0.8 個、平均士SD）、各シナジーの筋の組み合わせパターンおよび時間プロファイルも両群間で高い類似性を示した。これは、慢性腰痛の有無にかかわらず人間の体幹に共通の基本協調戦略が存在する可能性を示唆するものである。実際、健常者と慢性腰痛患者は同様の筋モジュール（例えば脊柱起立筋群と腹筋群の協調など）を共有しており、痛みがあっても体幹の協調構造自体は大枠では保たれていることが示された。興味深いことに、筋シナジーの使われ方のばらつきには健常者と患者で顕著な違いが見られた。例えば、腰部脊柱起立筋が主に関与するある筋シナジーでは、CLBP患者間でそのパターンが非常に類似しており（個人間の変動性が小さく）、皆がほぼ同じ協調パターンを用いていることが分かった。健常者では個人ごとに多少のパターンの差異があるのに対し、慢性腰痛患者ではこのシナジーが画一化していることになり、腰部の筋機能低下により協調戦略が固定化してしまっている可能性がある。実際、この筋シナジーは腰部の主要な背筋である脊柱起立筋群の協調モジュールであり、痛みによりこれら筋の働きが制限されることで他の代替パターンが取りにくくなっている可能性がある（図3）。

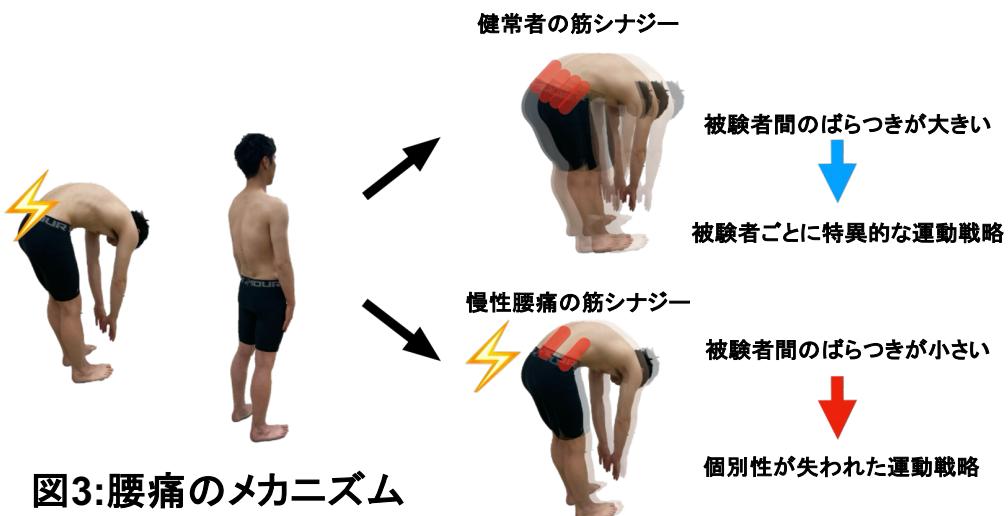
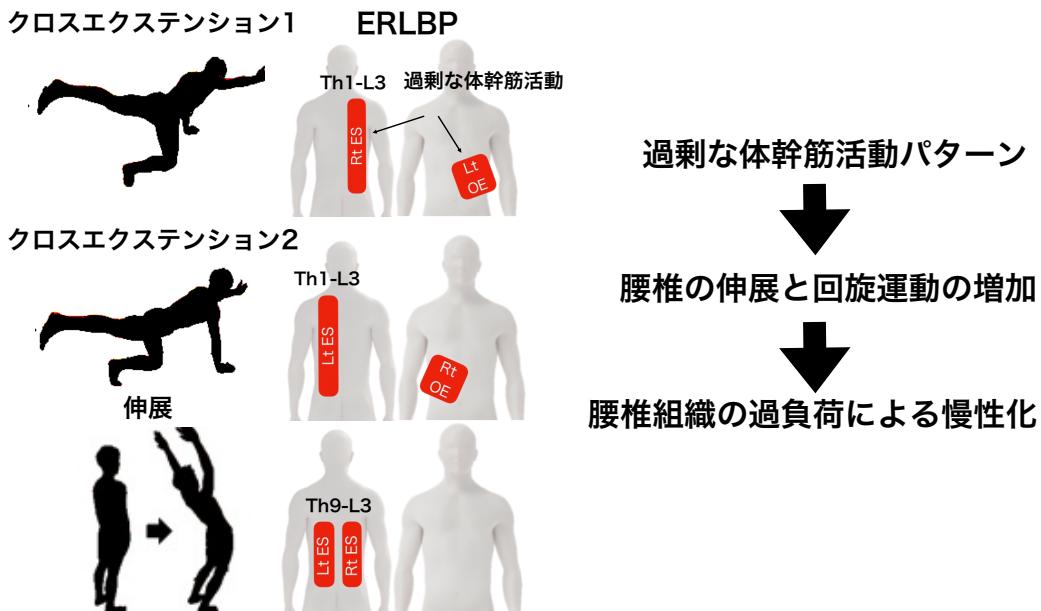


図3:腰痛のメカニズム

研究3では、脊柱の伸展方向で痛みが生じやすいタイプの腰痛（いわゆる伸展関連腰痛、ERLBP）の患者では、ある特定の課題で通常より多くの筋シナジーを必要とすることが明らかになった。例えば、四つ這いで対角の手足を挙上するクロスエクステンション（体幹の安定性と僅かな回旋・伸展を伴う課題）や、立位で上体を反らす後屈課題では、伸展関連腰痛患者では健常者より有意に筋シナジーの数（協調モジュール数）が増加していた。健常者では各課題につき概ね2種類の協調パターンで対応できていたのに対し、伸展関連腰痛患者ではそれに加えて余分な協調パターン（健常者には見られない追加の筋シナジー）が出現していた。これは言い換えれば、患者は同じ動作を行うのにより多くの筋肉を同時に動員する過剰な協調が起きていることを示す。

こうした過剰な筋の共同収縮（コントラクション）は脊柱を過度に安定化させ（いわば体幹を固めすぎてしまう状態）、腰椎が常に反り気味（過伸展位）になる頻度を高める結果となり、そのことが腰痛の発症・遷延に寄与している可能性がある。実際、本研究の伸展関連腰痛患者では伸展方向の課題でのみ筋シナジー構造の変化が顕著であり、痛みと運動制御の乱れが特定の方向に依存して現れることが示唆された（図4）。この知見は、慢性腰痛の中でも痛みの誘発要因に応じて筋協調の適応の仕方が異なることを意味し、腰痛の病態を理解する上で痛みのタイプ別に評価する重要性を示している。

図4: 伸展型腰痛(ERLBP)の慢性化メカニズム



この他に、実験や解析が順調に進んだため最終年度では腰痛患者の異常な筋シナジー（シナジーの増加）に基づき、その正常化を目指した介入法の開発を行った。まず、慢性腰痛患者では特定の筋活動が過剰に協調していることが明らかになった。このため、リハビリテーションにおいては、この過剰な筋協調を是正し、必要最小限の筋シナジーで効率的に体幹を安定化・運動させる訓練が有効であると考えられる。つまり、「固まりすぎた筋協調パターンをほぐす」というアプローチが重要となる。具体的には、さまざまな姿勢や動作を組み合わせた神経筋再教育トレーニングを通じて、過度に緊張した体幹筋をリラックスさせ、骨盤と胸郭の動きを分離して協調させる練習が推奨される。そこで近年保存療法として注目されるヨガベースのエクササイズが、通常の体幹トレーニングに比べ、運動制御改善においてどのような利点を持つかを検討した。その結果、ヨガでは股関節の安定化筋群と上部背筋群をより活性化することが明らかとなった。またスポーツリハで用いられる前方ジャンプの筋シナジー解析を行ったところ、遠くへ跳ぶ動作では腹筋群に加え、股関節外転・内転筋群が活性化される一方、背筋群の活動増加は見られなかつた。したがって、背筋群の過活動が腰痛の一因と推測される患者に対しては、ヨガや下半身にフォーカスしたトレーニングにより、上部の背筋、腹筋群や下肢筋群が活性化され、下部背筋群の活動が相対的に低下し、腰痛が軽減する可能性が示唆された。

本研究で示された筋協調構造の解析は、今後新たな評価法や介入法の開発を促進する科学的な基盤となるものであり、慢性腰痛の発生メカニズムに迫るとともに、より効果的なリハビリテーションや予防戦略の構築に貢献するものである。本研究の成果は、これまで国内外で十分に行われてこなかった慢性腰痛患者における体幹筋シナジー解析という視点から得られたものであり、特に体幹の協調性に着目した点で極めて独創的かつ先駆的である。従来の腰痛研究では個々の筋活動や筋力に焦点が当てられることが多かったが、本研究では筋活動をグループ化した協調パターン（筋シナジー）という新たな観点から評価を行い、慢性腰痛に伴う運動制御異常を定量的かつ包括的に明らかにした。さらに、筋シナジー解析手法を臨床応用に向けて体系化し、慢性腰痛のタイプごとに特異的な運動制御特性を明示した点においても、学術的および臨床的に大きなインパクトを与えるものである。このような研究成果は、慢性腰痛の病態解明および個別化リハビリテーション戦略の構築に資する重要な研究として、国内外の関連分野で高く位置づけられることが期待される。

今後の展望として、筋シナジー解析を活用したリハビリテーション介入の効果について、より大規模かつ前向きな研究を通じて評価し、エビデンスの構築を進めていく必要がある。これにより臨床現場において簡便かつ客観的に患者の病態評価が可能となり、個別化された治療プログラムの選択支援が期待される。さらに、今後は国際的な共同研究を推進し、多様な人種、年齢、疾患サブタイプにおける筋シナジーの特徴を比較・解析することで、慢性腰痛の病態メカニズム解明に向けてさらなる知見を蓄積することを目指す。これにより、本研究は慢性腰痛研究における世界的にも高い独自性とインパクトをもつ重要な基盤研究として位置付けられるであろう。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] 計7件 (うち査読付論文 7件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 4件)

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Saito Hiroki, Iwai Yumeka, Yamano Ayu, Matsushita Kazuya, Yokoyama Hikaru, Nakazawa Kimitaka, Ito Sakiko | 4. 卷 44 |
| 2. 論文標題 Comparing muscle coordination patterns in yoga-focused exercises with those in standard stabilization exercises | 5. 発行年 2025年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Bodywork and Movement Therapies | 6. 最初と最後の頁 245 ~ 250 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbmt.2025.05.059 | 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 Hiroki Saito, Ayu Yamano, Nanae Suzuki, Kazuya Matsushita, Hikaru Yokoyama, Joachim Van Can, Kimitaka Nakazawa | 4. 卷 In press |
| 2. 論文標題 Muscle Synergies in Single-Leg Hops: Neuromuscular Adaptations for Increased Hop Distance | 5. 発行年 2025年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Biomechanics | 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) 10.1123/jab.2024-0132 | 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 Hiroki Saito, Ayu Yamano, Nanae Suzuki, Kazuya Matsushita, Hikaru Yokoyama, Joachim Van Cant, Kimitaka Nakazawa | 4. 卷 - |
| 2. 論文標題 Muscle Synergies in Single-Leg Hops: Neuromuscular Adaptations for Increased Hop Distance | 5. 発行年 2025年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Biomechanics | 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) 10.1123/jab.2024-0132 | 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 |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Saito Hiroki, Yokoyama Hikaru, Sasaki Atsushi, Nakazawa Kimitaka | 4. 卷 20 |
| 2. 論文標題 Muscle synergy patterns as altered coordination strategies in individuals with chronic low back pain: a cross-sectional study | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation | 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) 10.1186/s12984-023-01190-z | 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 Saito Hiroki、Yokoyama Hikaru、Sasaki Atsushi、Nakazawa Kimitaka | 4.巻 - |
| 2.論文標題 Direction-Specific Changes in Trunk Muscle Synergies in Individuals With Extension-Related Low Back Pain | 5.発行年 2024年 |
| 3.雑誌名 Cureus | 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) 10.7759/cureus.54649 | 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 Abu Bakar Florian、Staal J. Bart、van Cingel Robert、Saito Hiroki、Ostelo Raymond、van Dieën Jaap H. | 4.巻 18 |
| 2.論文標題 Not all movements are equal: Differences in the variability of trunk motor behavior between people with and without low back pain? A systematic review with descriptive synthesis | 5.発行年 2023年 |
| 3.雑誌名 PLOS ONE | 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) 10.1371/journal.pone.0286895 | 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 Saito Hiroki、Yokoyama Hikaru、Sasaki Atsushi、Matsushita Kazuya、Nakazawa Kimitaka | 4.巻 13 |
| 2.論文標題 Variability of trunk muscle synergies underlying the multidirectional movements and stability trunk motor tasks in healthy individuals | 5.発行年 2023年 |
| 3.雑誌名 Scientific Reports | 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) 10.1038/s41598-023-28467-6 | 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 該当する |

[学会発表] 計5件(うち招待講演 1件/うち国際学会 3件)

| |
|---|
| 1.発表者名 斎藤寛樹 |
| 2.発表標題 NEUROMECHANICAL STRATEGIES FOR LONGER FORWARD JUMPS: A MUSCLE SYNERGY ANALYSIS OF SINGLE LEG HOPS |
| 3.学会等名 The 29th Annual Congress of the European College of Sport Science |
| 4.発表年 2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiroki Saito |
| 2. 発表標題 NEUROMECHANICAL STRATEGIES FOR LONGER FORWARD JUMPS: A MUSCLE SYNERGY ANALYSIS OF SINGLE LEG HOPS |
| 3. 学会等名 The 29th Annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 斎藤寛樹 |
| 2. 発表標題 Direction specific changes in trunk muscle synergies in individuals with extension-related low back pain |
| 3. 学会等名 11th Interdisciplinary World Congress on Low Back & Pelvic Girdle Pain (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 斎藤寛樹 |
| 2. 発表標題 筋協調パターン解析に基づいたモーターコントロールアプローチの可能性：運動機能テストと段階的エクササイズ選択の根拠 |
| 3. 学会等名 第11回日本運動器理学療法学会学術大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 斎藤寛樹 |
| 2. 発表標題 Muscle Coordination Patterns Underlying a Variety of Human Movements: Implications for Motor Control Impairment |
| 3. 学会等名 Miami Project Seminar Series at University of Miami (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Not all movements are equal

https://www.crd.york.ac.uk/prospero/display_record.php?RecordID=180003

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 |
|-------|---|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 横山 光 (Yokoyama Hikaru) (30896832) | 東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (12605) | |

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 |
|---------|---------|
| | |