

# 博士論文

バレエダンサーにおける足底内在筋の  
ドゥミポワントでの活動とサイズの特徴

(Characteristics of the activity during demi-pointe  
and size of the plantar intrinsic foot muscles  
in ballet dancers)

2025 年 3 月

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科  
スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程

福山 弘

立命館大学審査博士論文

バレエダンサーにおける足底内在筋の  
ドゥミポワントでの活動とサイズの特徴

(Characteristics of the activity during demi-pointe  
and size of the plantar intrinsic foot muscles  
in ballet dancers)

2025 年 3 月

March 2025

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科

スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Sport and Health Science  
Graduate School of Sports and Health Science  
Ritsumeikan University

福山 弘

FUKUYAMA Hiroshi

研究指導教員：伊坂 忠夫教授

Supervisor: Professor ISAKA Tadao

## 目次

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 副論文一覧 .....                                | i  |
| 用語の定義 .....                                | ii |
| 略語一覧 .....                                 | iv |
| 第1章 緒論 .....                               | 1  |
| 1-1 序 .....                                | 1  |
| 1-2 文献研究 .....                             | 3  |
| 1-2-1 バレエの歴史 .....                         | 3  |
| 1-2-2 ポワント技法の習得とドゥミポワントとの関係 .....          | 3  |
| 1-2-3 ドゥミポワントでの姿勢制御 .....                  | 5  |
| 1-2-4 足部アーチ構造の安定化に関わる足底内在筋 .....           | 7  |
| 1-2-5 足底内在筋の評価方法 .....                     | 11 |
| 1-3 先行研究の問題点 .....                         | 13 |
| 1-4 研究目的 .....                             | 15 |
| 1-5 意義 .....                               | 17 |
| 第2章 両脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係 .....      | 18 |
| 2-1 背景 .....                               | 18 |
| 2-2 方法 .....                               | 19 |
| 2-2-1 対象者 .....                            | 19 |
| 2-2-2 実験設定 .....                           | 19 |
| 2-2-3 データ収集 .....                          | 22 |
| 2-2-4 データ解析 .....                          | 24 |
| 2-2-5 統計処理 .....                           | 26 |
| 2-3 結果 .....                               | 27 |
| 2-4 考察 .....                               | 31 |
| 2-5 小括 .....                               | 34 |
| 第3章 両脚および片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係 ..... | 35 |
| 3-1 背景 .....                               | 35 |
| 3-2 方法 .....                               | 37 |
| 3-2-1 対象者 .....                            | 37 |
| 3-2-2 実験設定 .....                           | 37 |
| 3-2-3 データ収集 .....                          | 40 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 3-2-4 データ解析 .....                   | 40 |
| 3-2-5 統計処理 .....                    | 41 |
| 3-3 結果 .....                        | 42 |
| 3-4 考察 .....                        | 46 |
| 3-5 小括 .....                        | 51 |
| 第4章 足底内在筋のサイズの特徴 .....              | 52 |
| 4-1 背景 .....                        | 52 |
| 4-2 方法 .....                        | 53 |
| 4-2-1 対象者 .....                     | 53 |
| 4-2-2 実験設定およびデータ収集・解析 .....         | 53 |
| 4-2-3 統計処理 .....                    | 56 |
| 4-3 結果 .....                        | 57 |
| 4-4 考察 .....                        | 61 |
| 4-5 小括 .....                        | 64 |
| 第5章 総括論議 .....                      | 65 |
| 5-1 各研究課題における結果の概要 .....            | 65 |
| 5-2 足底内在筋のドゥミポイントでの活動と姿勢動揺の関係 ..... | 67 |
| 5-3 足底内在筋のサイズの特徴 .....              | 68 |
| 5-4 足底内在筋のサイズと姿勢動揺の関係 .....         | 69 |
| 5-5 現場への応用 .....                    | 72 |
| 5-6 限界と今後の課題 .....                  | 74 |
| 第6章 結論 .....                        | 76 |
| 参考文献 .....                          | 77 |
| 謝辞 .....                            | 90 |

## 副論文一覧

本博士論文は、下記副論文をもとに作成したものである。

### 【第2章（研究課題1）】

**Fukuyama, H.**, Maeo, S., Kusagawa, Y., Ono, M., Watanabe, K., & Isaka, T. (2024). Plantar intrinsic foot muscle activity and its relationship with postural sway during tiptoe standing in ballet dancers and non-dancers. *Gait & Posture*, 108, 139-144. <https://doi:10.1016/j.gaitpost.2023.11.023>.

### 【第3章（研究課題2）】

**Fukuyama, H.**, Maeo, S., Kusagawa, Y., Sugiyama, T., Kanehisa, H., & Isaka, T. (2024). Differences in the size of individual plantar intrinsic foot muscles between ballet dancers and non-dancers. *Journal of Dance Medicine and Science*, Online ahead of print. [https://doi: 10.1177/1089313X241273887](https://doi:10.1177/1089313X241273887).

## 用語の定義

### バレエ

バレエには、クラシック・バレエ以外にも、モダンバレエなどがあるが、本博士論文では、フランスで体系化され、ロシアで発展したクラシック・バレエを「バレエ」と定義する。

### ポワント

ポワントは、フランス語で「先端」を意味し、トゥシューズの先端で立つ状態を示すバレエ特有の肢位である。本博士論文では、この肢位を「ポワント」と定義する。なお、ポワントと次に説明するドゥミポワントの違いは、中足趾節関節が中立位または軽度屈曲位にあるか、伸展位にあるかの違いにあり、両者に共通して、脛骨と中足骨を一直線に整列させることが理想とされる。

### ドゥミポワント

ドゥミは、フランス語で「半分」を意味し、ポワントの前段階の肢位と位置付けられている。本博士論文では、足関節底屈の参考可動域が  $45^{\circ}$  である健常者（非ダンサー）が行うつま先立ちとは区別して、バレエダンサーが行うつま先立ちを「ドゥミポワント」と定義する。

## 足底内在筋

足底内在筋は、足部の足底側に起始と停止部を持つ 4 層からなる 10 筋の総称であり、足部の関節に作用する。本博士論文では、この筋群を「足底内在筋」と定義する。

## 足関節底屈角度

足関節底屈角度は、矢状面における腓骨長軸への垂直線を基本軸とし、第 5 中足骨側の足底面を移動軸として計測する。したがって、足関節底屈角度は、距腿関節に加え、ショパール関節やリスフラン関節などの複数の足部の関節の底屈可動域が含まれる。本博士論文では、この角度を「足関節底屈角度」と定義する。

## 第 2 列

足関節と足部の内転・外転運動の基本軸（足部の長軸）は、第 2 中足骨であり、本博士論文では、第 2 趾、第 2 中足骨、中間楔状骨、舟状骨を結ぶラインのことを「第 2 列」と定義する。

## 略語一覽

MRI magnetic resonance imaging

ABH abductor hallucis

FDB flexor digitorum brevis

ABDM abductor digiti minimi

QP quadratus plantae

LUMB lumbricals

FHB flexor hallucis brevis

ADDH-OH adductor hallucis oblique head

ADDH-TH adductor hallucis transverse head

FDM flexor digiti minimi

INT plantar and dorsal interossei

MVC maximum voluntary contraction

RMS root mean square

CV coefficient of variation

## 第1章 緒論

### 1-1 序

バレエにおけるつま先立ちは、巧みな関節制御と高度な姿勢制御を要する特有の動作である。特にトゥミポワントは、トゥシューズの先端でつま先立ちを行うポワントの前段階の肢位として位置付けられ、この肢位での姿勢制御能力は、ポワント技法を習得する過程における傷害予防のために欠かせない要素とされている (Howse J & McCormack M, 2009; クリッピンガー, 2013; 水村 (久埜), 2020)。バレエ特有のつま先立ちでは、足部や足関節に特に負荷が集中することが示されており (Kadel et al., 2005; Pearson & Whitaker, 2012; Walter et al., 2011)、その負荷を支える基盤である足部アーチ構造の安定化に関与する筋は、姿勢制御において、重要な役割を果たすことが示唆される。

足部は複数の関節で構成され、負荷や機能的要求に応じて形を変えるアーチ構造を有している (Neumann, 2017)。この足部アーチ構造の安定化は、骨や靱帯、足底筋膜などの受動的な組織と足部外在筋の協調に加え、主に足部に起始・停止する足底内在筋によって達成されることが示唆されている (McKeon et al., 2015)。健常成人を対象とした研究では、足底内在筋の機能強化エクササイズが、足部アーチ構造の崩壊を軽減し、姿勢制御能力を改善させることが示されている (Jaffri et al., 2023; Mulligan & Cook, 2013)。また、バレエの指導現場でも、特にトゥシューズを履くダンサーに対し、これらのエクササイズが広く推奨されている (Howse J & McCormack M, 2009; Weiss et al., 2009; クリッピンガー, 2013)。しかし、ダンサーを対象とした足底内在筋の研究は依然として限られており、その機能的役割についてはさらなる研究が必要である。

足底内在筋は4層10筋から構成されており、個々の筋サイズは小さい。このような解剖学的特徴から、足底内在筋の評価方法には、筋活動を評価する筋電図法 (Ferrari et al., 2018,

2020; Kelly et al., 2014; Ridge et al., 2022) と筋サイズを評価する画像撮像法 (Franettovich Smith et al., 2021, 2022; Ishihara et al., 2022; Kusagawa et al., 2022a, 2022b) が主に用いられている。筋電図法は、動作時の生理学的応答を評価できる数少ない方法であり、従来の研究では、筋内筋電図法 (Kelly et al., 2012; Kurihara et al., 2020; Ridge et al., 2022) や表面筋電図法 (Protopapas & Perry, 2020; Tanabe et al., 2017) が用いられている。しかし、これらの方法には、侵襲性や測定範囲の制限といった課題がある。また、筋サイズは筋力や関節トルクの間接的な指標であり (Balshaw et al., 2021; Fukunaga et al., 2001)、長期的な反復負荷によって筋が肥大することは広く知られている (Emery et al., 2019; Mayes et al., 2018; McMillan et al., 2023)。超音波を用いた研究では、ダンサーの特定の足底内在筋が非ダンサーよりも大きいことが報告されている (Ishihara et al., 2022)。しかし、これまでにダンサーを対象として足底内在筋全 10 筋のサイズを検証した研究は存在せず、その全体像は明らかになっていない。

以上のように、足底内在筋は足部アーチ構造の安定化に寄与し、ダンサー特有のつま先立ちでの姿勢制御において、重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、ダンサーを対象とした足底内在筋の活動や形態的特徴に関する研究は不足しており、さらなる知見の提供が求められている。

## 1-2 文献研究

本節では、まずバレエの歴史的変遷について触れた後に、1) ポワント技法の習得とドゥミポワントとの関係、2) ドゥミポワントでの姿勢制御、3) 足部アーチ構造の安定化に関わる足底内在筋、4) 足底内在筋の評価方法、の4つの観点から先行研究の知見を概説する。

### 1-2-1 バレエの歴史

バレエはルネサンス期のイタリアに起源を持ち、17世紀にフランスのルイ14世が王立舞踊アカデミーを創立した際に、現存する身体のポジションや動きが確立された。日本のバレエは、大正時代にその歴史が始まり、文化として広く根付いたのは第二次世界大戦後であり、19世紀後半にロシアで発展したバレエの影響を強く受けている(水村(久埜), 2020)。現在、日本には4000以上のバレエ教室が存在し、その学習人口は26万人で、幼児から高齢者まで幅広い層に親しまれている(昭和音楽大学バレエ研究所, 2022)。また、1990年には国際ダンス医科学会が設立され、近年、バレエに関する研究は、パフォーマンス向上や傷害予防を目的に様々な領域で行われている。

### 1-2-2 ポワント技法の習得とドゥミポワントとの関係

バレエにおけるつま先立ちは、巧みな関節制御と高度な姿勢制御を要する特有の動作である。特に女性ダンサーは、支持基底面が極端に狭いトゥシューズの先端で姿勢を制御することが求められ、この技法はポワント(図1-1)と呼ばれる。ポワントでは、脛骨と中足骨を一直線に整列させ、足部アーチ構造をトゥシューズのソールに沿わせ、足趾を覆うトゥボックスと機能的に一体化させることが理想とされる(Howse J & McCormack M, 2009; Outevsky & Berg, 2022; Russell et al., 2010, 2011; Salzano et al., 2019; Shah, 2009)。

ポワントは当初、一部のダンサーによる曲芸的な技法として用いられていたが、1832 年の「ラ・シルフィード」で、妖精という非人間的な存在を表現するために採用されて以降、女性ダンサーにとって不可欠な技法となった。その後、19 世紀後半のロシアでは、32 回の連続回転や複雑なステップが取り入れられるなど、ポワント技法はさらに高度に発展した（富永, 2021）。

このように発展したポワント技法は、観客を魅了する一方で、足部および足関節に大きな負荷をかけることから（Kadel et al., 2005; Pearson & Whitaker, 2012; Walter et al., 2011）、バレエ特有の傷害リスクを伴う。先行研究では、女性ダンサーにおける傷害の約 62%が足部および足関節に集中し（Allen et al., 2013; Katakura et al., 2023; Ramkumar et al., 2016; Smith et al., 2015）、その多くはトゥシューズを履いて踊ることに起因することが報告されている（Katakura et al., 2023; Smith et al., 2015）。トゥシューズは、ポワントでの足部の関節アライメントの維持を補助する機能を持つが（Aquino et al., 2021; Bickle et al., 2018; Shah, 2009）、その構造上、高度なポワント技法に伴う筋骨格系の傷害を十分に防ぐことは難しい。こうした傷害リスクを背景に、成長期や発達過程にあるダンサーが、ポワント技法の習得のためにトゥシューズを履き始める適切な時期については、多くの議論が続けられている。一般的には、10～12 歳頃を目安に、下肢の関節の可動域やアライメント、筋機能の評価に加え、ポワントの前段階の肢位とされるドゥミポワント（図 1-1）での姿勢制御能力を基に判断することが推奨されている（Howse J & McCormack M, 2009; Weiss et al., 2009; クリッピンガー, 2013; 富永, 2021; 水村（久埜）, 2020）。

なお、ドゥミポワントは、中足趾節関節が伸展位であることを除けば、ポワント（中足趾節関節が中立位または軽度底屈位）と関節肢位が同様とされる（Howse J & McCormack M, 2009; クリッピンガー, 2013; 水村（久埜）, 2020）。ドゥミポワントでの姿勢制御は、ダンサ

一のパフォーマンス評価や傷害予防のためのスクリーニング指標として、重要視されており (de Mello et al., 2017; Gamboa et al., 2008; Rangel et al., 2020; Wilson & Deckert, 2009)、本博士論文の姿勢制御実験でも、足底内在筋の活動を評価するため、トゥシューズを使用せず、裸足でのドゥミポワントを採用している。

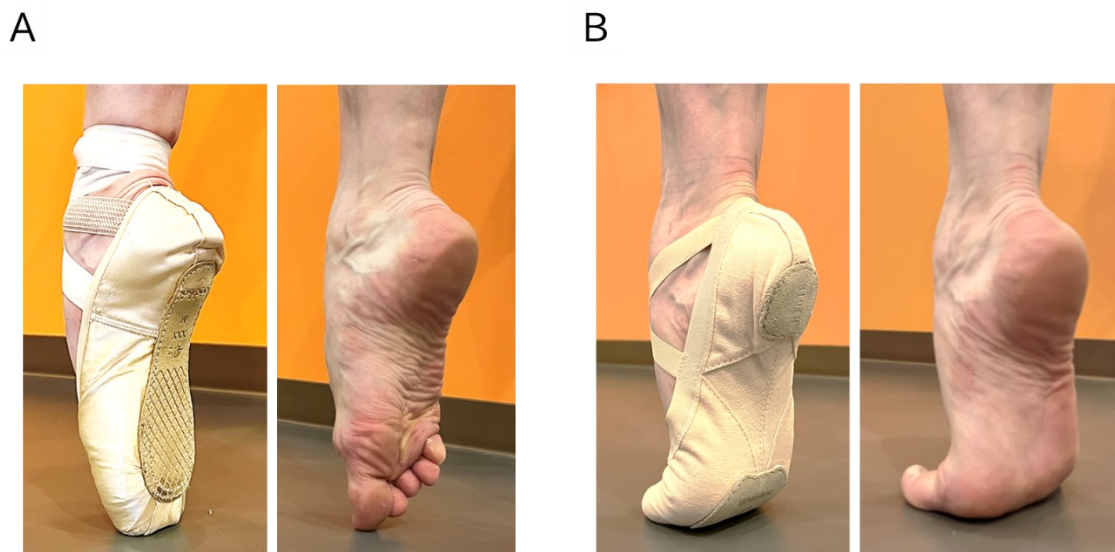


図 1-1. (A) ポワント（トゥシューズ）と (B) ドゥミポワント（バレエシューズ）

バレエダンサーが行うつま先立ちには、主にポワントとドゥミポワントの2つの肢位がある。

### 1-2-3 ドゥミポワントでの姿勢制御

ダンサーにとって姿勢制御能力の向上は重要な課題であり、特にバレエ特有のつま先立ちに関連する、多くの知見が報告されている。これまでの研究では、長期的なバレエトレーニングがドゥミポワントでの姿勢制御能力を向上させること (Costa et al., 2013; de Mello et al., 2017; Rangel et al., 2020)、ソールの剛性が低下したトゥシューズの使用がポワントでの姿勢動

揺を増加させること (Aquino et al., 2021; Bickle et al., 2018)、さらに、ポワントでの姿勢動揺が足関節捻挫の既往歴に関連すること (Lin et al., 2011) などが示されている。

姿勢は、中枢神経系で処理された感覚情報に基に、筋活動による運動出力を介して制御される (Horak, 2006; Palmieri et al., 2002)。踵が接地した通常の立位姿勢では、主に股関節と足関節を中心に制御が行われるが (Horak, 2006)、踵が離地するつま先立ちでは、これらに加えて足部の関節の制御が不可欠となる。健常成人を対象とした筋電図研究では、通常の立位姿勢からつま先立ちへの移行に伴い、下腿部に起始し足関節をまたぎ足部に停止する足部外在筋と、足部内に起始・停止する足底内在筋の活動レベルが、顕著に増加することが示されている (Ridge et al., 2022)。ダンサーを対象とした研究では、ドゥミポワントでの姿勢が、股関節や足関節、中足趾節関節周りのトルクを調整する複数の筋の協調によって制御されることが明らかになっている (Tanabe et al., 2014, 2017; Tsubaki et al., 2023)。また、踵が接地した状態からドゥミポワントへヒールレイズする動作 (バレエ用語でルルベ) における長母趾屈筋の過度な使用が腱炎を引き起こすことも広く知られている (Howse J & McCormack M, 2009; Kadel et al., 2005; Rowley et al., 2015, 2021)。しかし、ドゥミポワントでの姿勢制御に関するこれまでの研究では、主に足関節の底屈や背屈、中足趾節関節における屈曲や伸展に焦点が当てられており、足底内在筋が足部アーチ構造の安定化に果たす役割については十分に検討されていない。

足部アーチ構造は、複数の自由度がある多数の関節で構成され、その安定化が姿勢制御や足部傷害と関連することが報告されている (Fiolkowski et al., 2003; McKeon et al., 2015; Mulligan & Cook, 2013; Okamura et al., 2020)。特に、ダンサーの足部の関節は過可動性を示し、足関節最大底屈時の関節可動域の約 30%を、ショパール関節やリスフラン関節などの足部アーチ構造を構成する関節が占めることが報告されている (Russell et al., 2010, 2011)。これ

らの知見から、足部アーチ構造を安定化させる筋は、ドゥミポイントでの姿勢制御において、重要な役割を果たすと考えられる。

#### 1-2-4 足部アーチ構造の安定化に関わる足底内在筋

足部アーチ構造は、立位時に体重を支持する役割を持ち、歩行や走行などに伴う機能的要求に応じて、形状を変化させる (McKeon et al., 2015)。この構造は、内側と外側の縦アーチ、および横アーチ（前後）で構成され、骨、靱帯、足底筋膜などの受動的な要素によって支持される (Neumann, 2017)。しかし、姿勢要求が高く足部に大きな負荷がかかる条件では、足部アーチ構造の安定化は、足部外在筋と協調して、主に足底内在筋の能動的な収縮によって達成される (Kurihara et al., 2020; Ridge et al., 2022)。

足底内在筋は、足底に位置する 4 層 10 筋の筋群の総称であり、そのほとんどが足趾に停止部を持つことから（図 1-2、表 1-1）、足趾の関節において、底屈、背屈、内転、外転のいずれかに作用する。ただし、足底内在筋の各筋のサイズは小さく、モーメントアームも短い (Kura et al., 1997; Ledoux et al., 2001; Tosovic et al., 2012)。これらの形態的な特徴は、足底内在筋が大きな関節トルクを発揮するのではなく、主に足部アーチ構造の安定化を担うという理論を裏付けている (McKeon et al., 2015)。

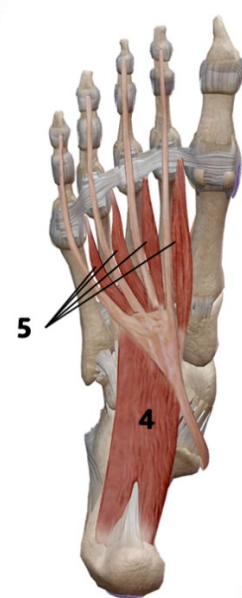
足底内在筋のうち、母趾外転筋 (abductor hallucis: ABH) と短趾屈筋 (flexor digitorum brevis: FDB) の活動は、内側縦アーチの挙上または崩壊の軽減に寄与することが明らかになっている (Fiolkowski et al., 2003; Kelly et al., 2014)。また、近年の研究では、つま先立ちのように踵が離地する肢位においても、ABH と FDB の活動が中足趾節関節の剛性や足底筋膜の張力を増加させ、足部アーチ構造を安定させることが示唆されている (Farris et al., 2020)。

健康成人を対象とした研究では、ショートフット・エクササイズやトウスプレッドアウト・エクササイズなど、足底内在筋の機能強化エクササイズが、足部アーチ構造の崩壊を軽減し、姿勢制御能力を向上させることが確認されている (Jaffri et al., 2023; Mulligan & Cook, 2013)。一方で、足底内在筋の機能低下は、特に高齢者の転倒リスクの増加や (Futrell et al., 2022; Quinlan et al., 2020)、外反母趾、足底筋膜炎、扁平足などの足部傷害と関連していることが示唆されており (Gooding et al., 2016; Kim et al., 2013; Moulodi et al., 2020; Okamura et al., 2020; Osborne et al., 2019)、これらのエクササイズは、医療現場のリハビリテーションだけでなく、バレエの指導現場でも、特にトウシューズを履くダンサーに必要なトレーニングとして推奨されている (Howse J & McCormack M, 2009; Weiss et al., 2009)。

さらに、足底内在筋は、関節トルクを発揮する力学的な役割だけでなく、皮膚にある感覚受容器と連携し、荷重の変化や足部アーチ構造の変形に関する固有感覚情報を提供する役割を果たすことが示唆されている (McKeon et al., 2015)。足底内在筋は、骨格筋の中でも筋紡錘の密度が高いことが報告されており (Peck et al., 1984)、これらの筋からの感覚フィードバックが立位での姿勢制御に寄与することが示されている (Felicetti et al., 2021; Knellwolf et al., 2019; Viseux, 2020)。



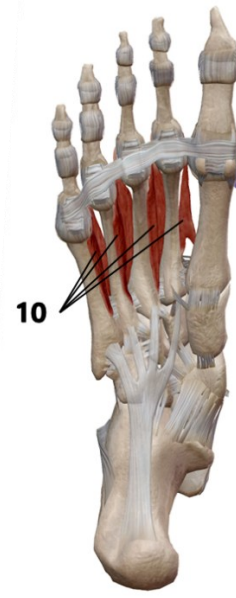
第1層



第2層



第3層



第4層

図 1-2. 4 層に分類される足底内在筋（右足）

(1) 母趾外転筋 (abductor hallucis: ABH)、(2) 短趾屈筋 (flexor digitorum brevis: FDB)、(3) 小趾外転筋 (abductor digiti minimi: ABDM)、(4) 足底方形筋 (quadratus plantae: QP)、(5) 虫様筋 (lumbricals: LUMB)、(6) 短母趾屈筋 (flexor hallucis brevis: FHB)、(7) 母趾内転筋斜頭 (adductor hallucis oblique head: ADDH-OH)、(8) 母趾内転筋横頭 (adductor hallucis transverse head: ADDH-TH)、(9) 短小趾屈筋 (flexor digiti minimi: FDM)、(10) 底側・背側骨間筋 (plantar and dorsal interossei: INT)。ヒューマン・アナトミー・アトラス 2025 (バージョン 2025.00.012)。2024 年 11 月 23 日、[www.visiblebody.com](http://www.visiblebody.com) より取得し、改変。

表 1-1. 足底内在筋の主な起始部、停止部、作用

| 筋       | 起始部         | 停止部                   | 作用                          |
|---------|-------------|-----------------------|-----------------------------|
| 第 1 層   |             |                       |                             |
| 母趾外転筋   | 踵骨隆起内側突起    | 第 1 基節骨底内側            | 第 1 中足趾節関節外転・屈曲             |
| 短趾屈筋    | 踵骨隆起内側突起    | 第 2～5 中節骨底内外側         | 第 2～5 中足趾節関節と近位趾節間関節屈曲      |
| 小趾外転筋   | 踵骨外側突起      | 第 5 基節骨底外側            | 第 5 中足趾節関節外転・屈曲             |
| 第 2 層   |             |                       |                             |
| 足底方形筋   | 踵骨隆起内側・外側突起 | 長趾屈筋腱                 | 第 2～5 遠位趾節間関節屈曲（長趾屈筋の作用の補助） |
| 虫様筋     | 長趾屈筋腱       | 第 2～5 趾基節骨内側・趾背腱膜     | 第 2～5 中足趾節関節屈曲と趾節間関節伸展      |
| 第 3 層   |             |                       |                             |
| 短母趾屈筋   | 楔状骨         | 第 1 基節骨底内外側           | 第 1 中足趾節関節屈曲                |
| 母趾内転筋斜頭 | 第 2～4 中足骨底  | 第 1 基節骨底外側            | 第 1 中足趾節関節内転                |
| 母趾内転筋横頭 | 第 3～5 中足骨頭  | 第 1 基節骨底外側            | 第 1 中足趾節関節内転                |
| 短小趾屈筋   | 第 5 中足骨底    | 第 5 基節骨底              | 第 5 中足趾節関節屈曲                |
| 第 4 層   |             |                       |                             |
| 底側骨間筋   | 第 3～5 中足骨内側 | 第 3～5 基底骨底内側          | 第 3～5 中足趾節関節内転              |
| 背側骨間筋   | 第 1～5 中足骨   | 第 2 基節骨内側・第 2～4 基節骨外側 | 第 2～4 中足趾節関節外転              |

### 1-2-5 足底内在筋の評価方法

足底内在筋の評価方法は、直接法と間接法に分類される (McKeon et al., 2015)。直接法では、足趾の関節に作用する足底内在筋の役割を検証するため、主に足趾屈筋力の評価が用いられている (Ishihara et al., 2022; Kurihara et al., 2014; Kusagawa et al., 2022a)。しかし、この方法は、足部外在筋の関与を分離できないという限界がある。そのため現在、足底内在筋を単独で評価する方法は、間接法である、動作時の筋活動を評価する筋電図法 (Ferrari et al., 2018, 2020; Kelly et al., 2014; Ridge et al., 2022) と、筋力や関節トルクの間接的な指標である筋サイズを評価する画像撮像法 (Franettovich Smith et al., 2021, 2022; Ishihara et al., 2022; Kusagawa et al., 2022a, 2022b) が主に用いられている。

筋電図法には、動作時の生理学的応答を評価できる限られた方法であり、侵襲的な筋内筋電図法と非侵襲的な表面筋電図法がある。従来、足底内在筋の活動の定量化には、筋サイズが小さいことによるクロストークの問題から、ワイヤー電極を筋内に挿入する筋内筋電図法が主に用いられてきた (Kelly et al., 2012; Kurihara et al., 2020; Ridge et al., 2022)。筋内筋電図法では、超音波法による撮像が容易な比較的表層に位置する筋（例えば ABH や FDB）が主な対象とされてきた (Kelly et al., 2012, 2014, 2015, 2019; Kurihara et al., 2020; Ridge et al., 2022)。一方、比較的サイズが大きい ABH や小趾外転筋 (abductor digiti minimi: ABDM)、短母趾屈筋 (flexor hallucis brevis: FHB) については、筋活動の信号を単一の箇所から取得する通常の表面筋電図法が使用されている (Protopapas & Perry, 2020; Tanabe et al., 2017)。さらに近年、複数の表面電極を用いる高密度表面筋電図法により、非侵襲的に足部アーチ構造内の広範囲にわたる足底内在筋の活動を評価できるようになった (Ferrari et al., 2018)。この方法を用いた研究では、足底内在筋の活動は、姿勢制御には、直接的には関与せず、足部アーチ構造の安定化に寄与することが示されている (Ferrari et al., 2020)。

画像撮像法では、超音波画像診断装置と磁気共鳴画像診断装置（Magnetic Resonance Imaging: MRI）が用いられている。超音波法は、機器がコンパクトで、MRI 法と比較して、検査コストが低く、リアルタイムで筋の動きや構造を観察できる点で優れている。ダンサーの足底内在筋のサイズを評価した唯一の研究では、足底表層に位置する ABH、FDB、FHB の3筋のみが評価され、ダンサーは非ダンサーと比べて、解剖学的断面積が大きいことが報告されている (Ishihara et al., 2022)。超音波法での筋サイズの評価では、主に解剖学的断面積や筋厚が用いられる (Mickle et al., 2013)。ただし、そのサイズは、測定箇所によって異なり、オペレーターの撮像技術に依存する可能性がある (Balshaw et al., 2021; Blazeovich et al., 2006; Fukunaga et al., 1992; Kusagawa et al., 2022a)。一方、MRI 法は、解像度が高く、オペレーターの撮像技術に依存しないという利点があり、筋サイズ測定のゴールドスタンダードとして認識されている (Cruz-Jentoft et al., 2010)。近年、健常成人を対象とした MRI 法の研究では、足底内在筋全 10 筋の体積が測定されている (Franettovich Smith et al., 2021, 2022)。

### 1-3 先行研究の問題点

先行研究の知見から、足底内在筋は足部アーチ構造の安定化に寄与し、ダンサーのドゥミポワントでの姿勢制御に重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、これまでの研究では、主に足関節底屈や中足趾節関節屈曲に焦点が当てられ、足部アーチ構造が体重支持の基盤として果たす役割については、十分に検証されていない。

足底内在筋の評価には、その解剖学的特徴に起因する制約があり、特に足部アーチ構造の安定化における役割を検証する方法は、間接法である筋電図法と画像撮像法に限られる。筋電図法による筋活動の評価は、特定の動作や姿勢制御中の筋の役割を解明するうえで、重要な所見を提供し、画像撮像法による筋サイズの評価は、筋の構造的特性や筋力、関節トルクとの関連性を明らかにするうえで有用である。

足底内在筋のほとんどはサイズが小さくクロストークの問題が存在するため、従来の筋電図研究では、侵襲的な筋内筋電図法が主に用いられてきた (Kelly et al., 2012; Kurihara et al., 2020; Ridge et al., 2022)。しかし、この方法はダンサーのパフォーマンスへの影響が懸念される。一方、足底内在筋のうち比較的大きな筋については、表面筋電図法が用いられている (Protopapas & Perry, 2020; Tanabe et al., 2017)。ただし、特定の筋の振幅を足底内在筋全体の代表値として扱うことには限界があり、筋群全体の活動を評価する方法の必要性がある。

さらに近年、高密度表面筋電図法の普及により、動作中の単一筋内における筋電図信号の部位差が多く報告されている。その要因として、電極位置と神経筋接合部との距離の変化が挙げられ、個人間の筋活動や姿勢動揺など、他のパラメータと筋活動の関係を検証する際には、関節角度条件を統一する必要性が指摘されている (Vieira & Botter, 2021; Watanabe et al., 2021a)。しかし、ドゥミポワントの姿勢制御に関するこれまでの研究では、足関節底屈角度を統一した条件で筋活動を評価した例はない。

また、ダンサーを対象とした足底内在筋のサイズに関する研究は非常に限られており、唯一の研究では、超音波法を用い、一部の筋が非ダンサーよりも大きいことが報告されている (Ishihara et al., 2022)。しかし、これまで足底内在筋全 10 筋を検証した研究は存在せず、足底内在筋全体の構造や特徴については十分に解明されていない。

## **1-4 研究目的**

本博士論文では、バレエダンサーを対象に、高密度表面筋電図法を用いて、非侵襲的に足部アーチ構造の広範囲にわたる足底内在筋の活動を評価し、姿勢動揺との関係を検証するとともに、MRI 法を用いて、足底内在筋全 10 筋の筋体積を評価する。これらの評価を統合的に行うことで、足底内在筋の機能や特徴をより明確に理解し、ダンサー特有の傷害予防やパフォーマンス向上に寄与する知見を得られることが期待される。

本博士論文の目的は、バレエダンサーにおける足底内在筋のドゥミポワントでの活動とサイズの特徴について明らかにすることである。この目的を達成するため、第 2 章から第 4 章では、以下の 3 つの研究課題を設定した。

### **第 2 章：研究課題 1**

両脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係

### **第 3 章：研究課題 2**

両脚および片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係

### **第 4 章：研究課題 3**

足底内在筋のサイズの特徴

さらに、第 2 章から第 4 章までの知見に基に、第 5 章では総括的な論議を行い、第 6 章にて結論を述べる。

### **第 5 章：総括論議**

足底内在筋のドゥミポワントでの活動とサイズの特徴

### **第 6 章：結論**

本博士論文の構成を図 1-3 に示す。

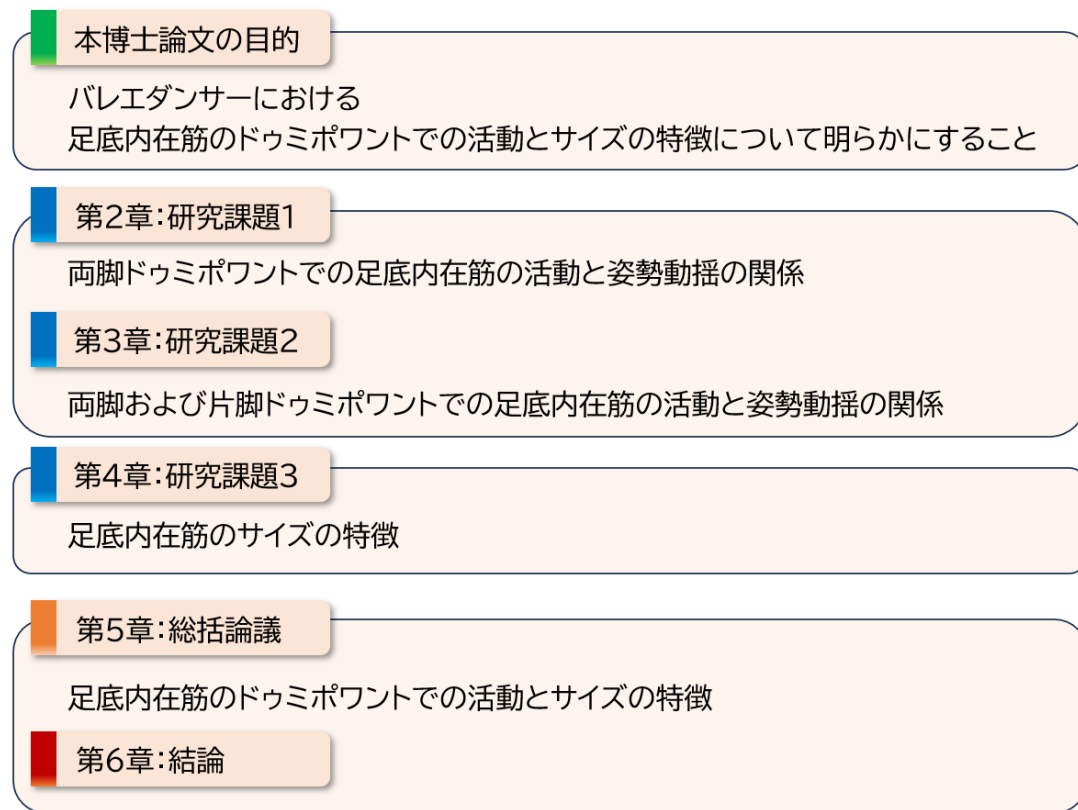


図 1-3. 本博士論文の構成

## 1-5 意義

本博士論文では、バレエダンサーにおける足底内在筋のドゥミポワントでの活動と姿勢動揺の関係、および足底内在筋のサイズの特徴に関する新たな知見を提供する。ダンサーにとって、姿勢制御能力の向上は重要な課題であり、特にダンサー特有の肢位では、巧みな関節制御と高度な姿勢制御が求められる。従来、バレエの指導現場では、傷害予防および姿勢制御能力の向上のために、関節可動域の改善や、関連する筋の機能強化などが推奨されてきた。しかし、体重支持の基盤となる足部アーチ構造の安定化に関与する足底内在筋については、評価方法に制約があり、ダンサーを対象とした研究不足が課題とされている。

本博士論文では、高密度表面筋電図法と MRI 法を活用して、ダンサーにおける足底内在筋の機能と特徴を包括的に評価し、その基礎的な知見を提供する。特に、ダンサー特有のつま先立ちにおける姿勢制御での足部への負荷のメカニズムや、その適応に関する知見は、姿勢制御能力の向上や傷害リスクの低減に寄与することが期待される。また、本博士論文で得られる成果は、バレエだけでなく、その他のスポーツ分野におけるパフォーマンスの向上や、足部に関連する傷害のリハビリテーションにも応用可能な知見を提供することが期待される。

## 第2章 両脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係

### 2-1 背景

足底内在筋は、立位での姿勢制御において足部アーチ構造を安定化させる重要な役割を果たすと考えられている (Ferrari et al., 2020; Fiolkowski et al., 2003; Kelly et al., 2014; McKeon et al., 2015; Mulligan & Cook, 2013)。しかし、従来の筋電図法には限界があり、ダンサーにおけるドゥミポワントでの足底内在筋の活動、特に足部アーチ構造の安定化に關与する足底内在筋の役割については十分に解明されていない。また、動作中の単一筋内における筋電図信号には部位差が認められるため、筋活動を個人間で比較する場合や、姿勢動揺など他のパラメータとの関係を検討する際には、同一の関節角度条件を使用することが適切であるとされている (Vieira & Botter, 2021; Watanabe et al., 2021a)。そこで本章では、足関節底屈角度を規定した条件で、高密度表面筋電図法を用いて、ダンサーおよび非ダンサーの両脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動を記録し、その活動と姿勢動揺の関係について検討した。

本章の目的は、1) ダンサーと非ダンサーを比較して、両脚ドゥミポワントでの姿勢動揺、足底内在筋の活動レベル、およびその時間的変動を評価すること、2) 規定した足関節底屈角度間における各変数の変化を検討することであった。本章では、1) ダンサーは非ダンサーに比べて、両脚ドゥミポワントでの姿勢動揺が少なく、足底内在筋の活動レベルが低く、時間的変動が少ない、2) ダンサーにおける両脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動レベルは、足関節底屈角度の増加に伴い増加する、という仮説を立てた。

## 2-2 方法

### 2-2-1 対象者

14名の女性バレエダンサー（年齢  $24.6 \pm 2.4$  歳；身長  $163.4 \pm 5.6$  cm；体重  $47.8 \pm 4.2$  kg；BMI  $17.9 \pm 1.2$  kg/m<sup>2</sup>；平均値 ± 標準偏差）と13名の非ダンサー（年齢  $23.2 \pm 1.6$  歳；身長  $163.4 \pm 3.8$  cm；体重  $58.2 \pm 4.5$  kg；BMI  $21.8 \pm 1.2$  kg/m<sup>2</sup>；平均値 ± 標準偏差）が本章の実験に参加した。ダンサーはバレエ歴が15年以上あり、週7.5時間以上のバレエトレーニングを受けていた。非ダンサーはバレエ経験がなく、少なくとも過去6ヶ月間、定期的な身体トレーニングプログラムに参加していなかった。両群とも、参加前3ヶ月以内に足関節と足部の負傷歴、および参加前1年間に手術歴はなかった。本章の実験の実施には、立命館大学のヒトを対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て（BKC-人医-2021-048）、対象者には、研究の目的、方法、および本実験における安全性について説明し、全対象者より書面による実験参加の同意を得た。

### 2-2-2 実験設定

姿勢制御課題は、足関節底屈20°、40°、60°の両脚ドゥミポワントを30秒間維持するものとした（Ferrari et al., 2018, 2020; Vieira & Botter, 2021; Watanabe et al., 2021b）。60°の課題は非ダンサーには困難であったため、ダンサーのみが実施した。姿勢制御課題中の足関節底屈角度は、電気ゴニオメータ（SG110、Biometrics 社製）で測定した。ゴニオメータの固定アームは矢状面において腓骨の長軸と、可動アームは第5中足骨側の足底面と一致させ、両足に取り付けた。足関節底屈角度は、距腿関節と複数の足部の関節（ショパール関節、リスフラン関節など）の合計であることに注意する必要がある。ゴニオメータのデータは、2台（片足につき1台）の16ビットA/Dコンバーター（Power Lab 16s、ADInstruments 社製）を経由し

て、対象者の目の高さにある前方約 1m に設置された 2 台の PC モニターにリアルタイムで視覚フィードバックとして表示された（図 3-1）(Saito et al., 2018)。

対象者は、最初にフォースプレート（SS-FP40AO-SY、スポーツセンシング社製）の上に立った。両手でバーを保持した状態でドゥミポワントを開始し、モニターを見ながら両足関節底屈角度を規定の角度に調整した後に、バーから手を離し、姿勢を保持した。試技中は、両足は肩幅で平行に保ち、膝は完全に伸展させ、両手は体の側面でリラックスさせた状態にした。姿勢要求の程度を考慮し、20°、40°、60°（ダンサーのみ）の順に試技を行うものとし、練習試技を実施し、手順に慣れた後、1 分以上の休憩を挟んで各角度の本試技を行った。データ分析には、成功した 3 試技の平均データが用いられた。成功試行とは、試行中に対象者がバーをつかんだり、足を踏み出したりすることなく、規定された角度を 30 秒間維持できた試行と定義する。



図 2-1. 実験設定

両足関節底屈角度をゴニオメータで測定し、2 台の PC モニターにリアルタイムで視覚フィードバックとして表示した。

### 2-2-3 データ収集

足底内在筋の単極性表面筋電図の振幅は、先行研究を参考に (Ferrari et al., 2018, 2020)、電極間隔 8mm、13 行 5 列 (1 電極を除く) の 64 チャンネルの高密度グリッド

(GR08MMM1305、OT Bioelettronica 社製) を用いて取得した (図 2-2A)。右足底の皮膚をサンドペーパーで軽く擦り、アルコールで洗浄し、踵骨隆起と中足骨頭を触診した後、これらの部位の中央に、高密度グリッドを第 2 中足骨の長軸に沿って配置した (図 2-2B) (Ferrari et al., 2018)。グリッドはテープで補強し、課題中に足底部との接触が一定になるようにした。リファレンス電極は右膝と左手首に配置した。

取得した筋電図データは、16 ビットのアナログ・デジタル変換器 (Quattrocento、OT Bioelettronica 社製) で増幅し、サンプリング周波数 2048Hz、バンドパスフィルタ 10-500Hz で取得した。足圧中心データは、サンプリング周波数 1000Hz、ローパスフィルタ 5Hz に設定されたフォースプレートを用いて取得した (図 2-1)。対象者は、検者による徒手抵抗 (座位、右膝完全伸展、足関節底屈 40°) に対して 5 秒間の最大随意収縮 (MVC: Maximum Voluntary Contraction) を、足趾屈曲 (全足趾) と足趾外転 (母趾と小趾) でそれぞれ 2 回ずつ行い、その間の筋電図振幅を記録した (F. P. Kendall et al., 2005; Ridge et al., 2022)。

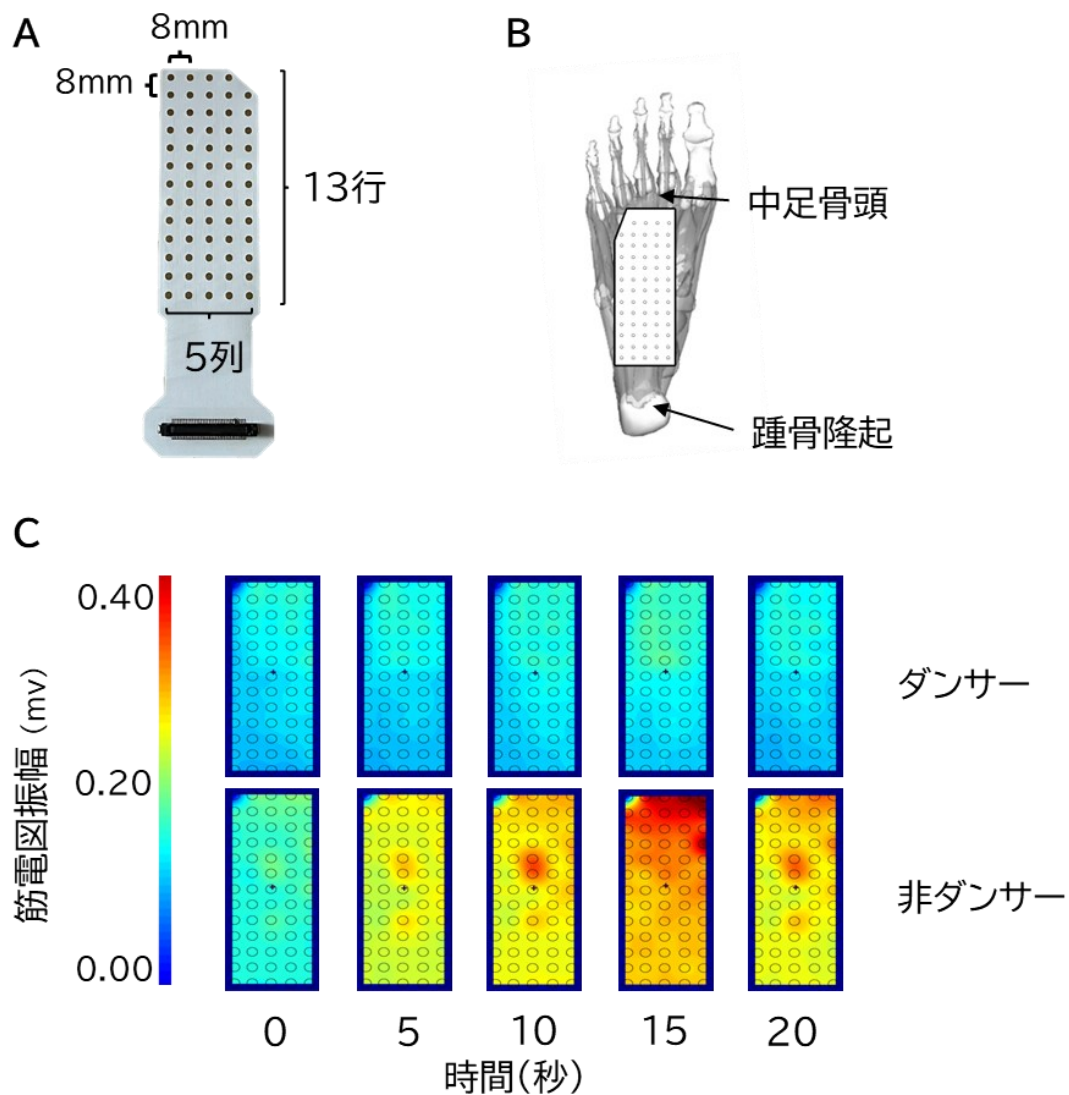


図 2-2. 高密度グリッドと足部への貼付位置

A : 13 行 5 列からなる高密度グリッドで、電極間距離は 8mm (小趾側先端角の 1 電極を除く)

であった ; B : 足底面の踵骨隆起と中足骨頭との間に電極を配置した。B の足部の画像は、

BodyParts3D を使用し、© The Database Center for Life Science により CC Attribution-Share Alike

2.1 Japan のライセンス下で提供されている ; C : ダンサーと非ダンサーの 20°課題における分

析区間の代表的な高密度表面筋電図振幅を示すカラーマップ、中心付近の点 (十字) は、筋電

図活動の重心を示している。

#### 2-2-4 データ解析

筋電図と足圧中心のデータは、16 ビット A/D コンバーター (Power Lab 16s、ADInstruments 社製) のトリガーを用いて同期した。解析区間は、30 秒間の課題のうち最初と最後の 5 秒間を除いた中間 20 秒間とした (図 2-3)。64 個の電極から記録された筋電図の生データを目視で検査し、ノイズが確認されたデータは、隣接する電極のデータで補完した (Ferrari et al., 2020)。各電極の生データは、二乗平均平方根 (RMS: Root Mean Square) 処理後、MVC (500ms の時間ウィンドウにおける最高値) によって正規化し、解析区間の平均振幅を算出した (図 2-3)。本章では、全 64 電極の筋活動レベル (%MVC) の平均値を代表値とした (Ferrari et al., 2018, 2020)。また、RMS 処理を実施した各電極データの平均値を標準偏差で割って変動係数 (Coefficient of Variation: CV) を算出し、全 64 電極の平均値を筋活動の時間的変動 (%) として代表値とした (Kurz et al., 2018; Lemos et al., 2015; Yaserifar & Souza Oliveira, 2022)。

足圧中心のデータからは、姿勢動揺の指標として、解析区間における足圧中心の前後方向の標準偏差 (前後方向の動揺) および左右方向の標準偏差 (左右方向の動揺)、平均の速度 (動揺速度)、足圧中心を包む 95%信頼楕円面積 (動揺面積) を算出した (Clifton et al., 2013; Moghadam et al., 2011; Palmieri et al., 2002)。

## 筋活動の解析手順

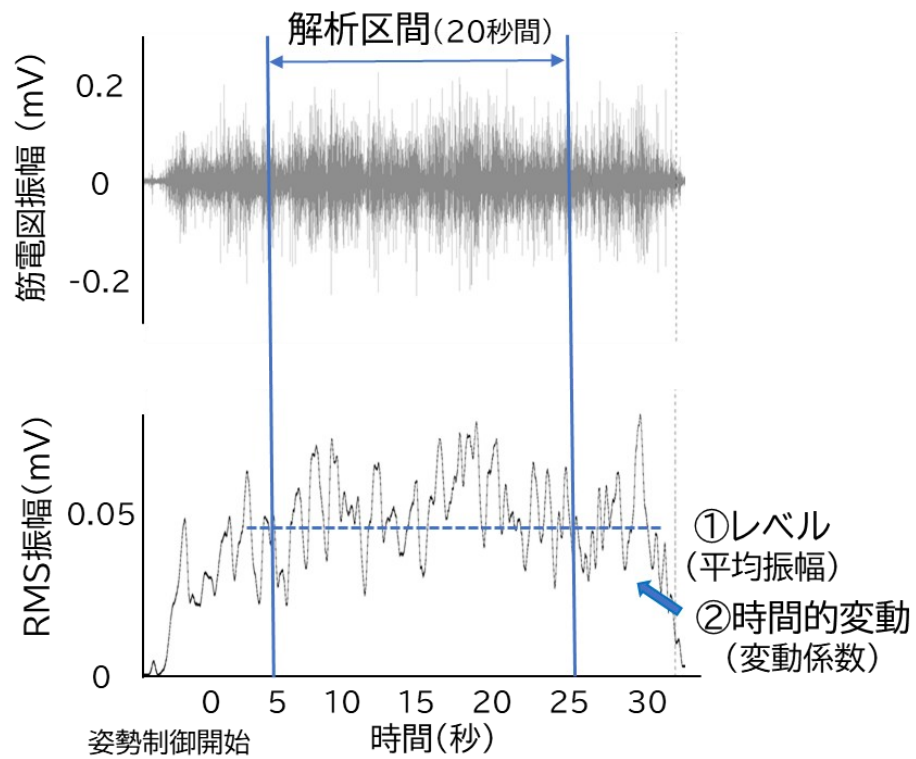


図 2-3. 筋活動の解析手順

#### 2-2-5 統計処理

すべての測定値は、平均値  $\pm$  標準偏差で示した。変数の正規性を確認するため、Shapiro-Wilk 検定を実施し、すべての変数が正規分布することを確認した。群間の比較には Welch の t 検定を使用した。また、各群の課題（角度）間の比較には、非ダンサーには対応のある t 検定、ダンサーについては反復測定の分散分析を行い、必要に応じて Bonferroni の事後検定を実施した。また、Pearson の積率相関係数を算出し、群ごとおよび全コホートにおける筋電図と足圧中心の変数間の関係を評価した。統計処理は SPSS ソフトウェア（SPSS statistics 28、IBM 社製）を使用し、有意水準は 5% に設定した。40°課題の非ダンサー1 名がバーから手を離した後に課題を遂行できなかったため、データを除外した。

### 2-3 結果

年齢と身長に有意差はなかったが、ダンサーは非ダンサーより体重と BMI が有意に低かった ( $p < 0.01$ )。

足圧中心の変数は、20°課題の左右方向の動揺と動揺面積を除いて、非ダンサーに比べ、ダンサーの方が有意に低かった ( $p < 0.05$ 、図 2-4)。筋電図の変数も、20°と 40°課題ともに、非ダンサーよりもダンサーの方が有意に低かった ( $p < 0.01$ 、図 2-5)。

ダンサーでは、20°と 40°課題の間で、足圧中心と筋電図の変数に有意差はなかったが、足圧中心の動揺面積は、20°課題より 60°課題で有意に低く ( $p < 0.05$ 、図 2-4)、筋活動レベルは有意に増加した ( $p < 0.01$ 、図 2-5)。非ダンサーでは、すべての足圧中心および筋電図の変数が、20°課題より 40°課題で有意に増加した ( $p < 0.05$ 、図 2-4 および 2-5)。

足圧中心の変数は、ダンサーと非ダンサーを含む全対象者において、20°と 40°課題の両方でほとんどの課題で筋電図の変数と有意に相関していた ( $r = 0.468-0.807$ 、 $p < 0.014$ 、表 2-1)。非ダンサーでは、筋活動レベルは、20°と 40°課題で動揺速度と相関し ( $r = 0.665$ 、 $r = 0.726$ 、それぞれ  $p < 0.05$ 、表 2-1)、40°課題では左右方向の動揺および動揺面積と相関していた ( $r = 0.654$ 、 $r = 0.629$ 、それぞれ  $p < 0.05$ 、表 2-1)。ダンサーでは、筋活動の時間的変動が 60°課題の動揺速度と強く相関していた ( $r = 0.700$ 、 $p < 0.01$ 、表 2-1)。

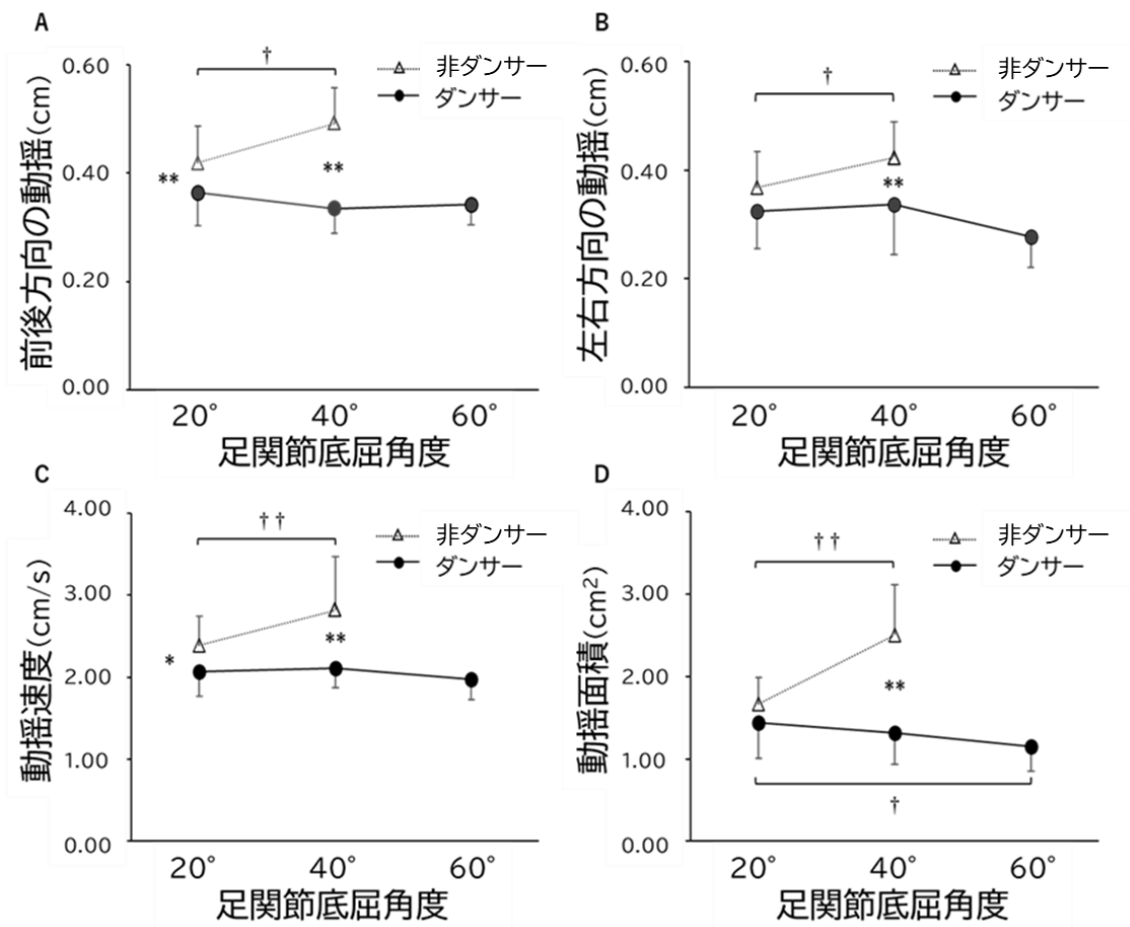


図 2-4. 群間と各群の課題間の足圧中心の変数 (A: 前後方向の動揺、B: 左右方向の動揺、C: 動揺速度、D: 動揺面積) の比較

\* $p < 0.05$ 、\*\* $p < 0.01$  (群間)、† $p < 0.05$ 、†† $p < 0.01$  (課題間)

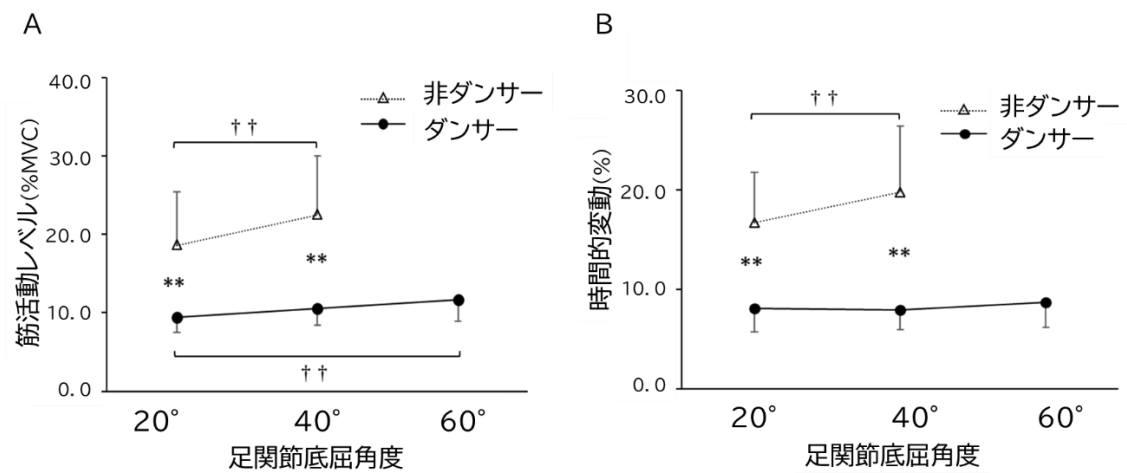


図 2-5. 群間と各群の課題間の筋電図の変数（A：筋活動レベル、B：時間的変動）の比較

\*\*p < 0.01（群間）、††p < 0.01（課題間）

表 2-1. 足圧中心と筋電図変数の相関係数

|                    |     | 筋活動レベル (%MVC) |        |         | 時間的変動 (%) |        |         |
|--------------------|-----|---------------|--------|---------|-----------|--------|---------|
|                    |     | ダンサー          | 非ダンサー  | 全対象者    | ダンサー      | 非ダンサー  | 全対象者    |
| 足圧中心               | 角度  | r             | r      | r       | r         | r      | r       |
| 前後方向               | 20° | -0.196        | 0.301  | 0.387   | 0.323     | 0.306  | 0.468*  |
| の動揺                | 40° | 0.070         | 0.454  | 0.744** | 0.280     | 0.563  | 0.805** |
| (cm)               | 60° | 0.193         |        |         | 0.260     |        |         |
| 左右方向               | 20° | 0.461         | 0.148  | 0.360   | 0.397     | -0.111 | 0.267   |
| の動揺                | 40° | 0.200         | 0.654* | 0.579** | 0.296     | 0.347  | 0.503** |
| (cm)               | 60° | -0.125        |        |         | 0.317     |        |         |
| 動揺速度               | 20° | 0.068         | 0.665* | 0.620** | 0.299     | 0.477  | 0.573** |
| (cm/s)             | 40° | 0.154         | 0.726* | 0.795** | 0.241     | 0.115  | 0.530** |
|                    | 60° | 0.23          |        |         | 0.700**   |        |         |
| 動揺面積               | 20° | 0.199         | -0.107 | 0.208   | 0.442     | -0.196 | 0.267   |
| (cm <sup>2</sup> ) | 40° | 0.327         | 0.629* | 0.807** | 0.422     | 0.350  | 0.734** |
|                    | 60° | 0.210         |        |         | 0.470     |        |         |

\*p < 0.05、\*\*p < 0.01

## 2-4 考察

本章は、高密度表面筋電図法を用いて、ダンサーの足底内在筋の両脚ドゥミポワントでの活動を評価した初めての研究である。主な結果は以下の通りである。1) ダンサーは、非ダンサーに比べ、姿勢動揺が少なく、足底内在筋の活動レベルと時間的変動が低い値を示した。2) ダンサーでは、20°課題から 60°課題へ移行しても姿勢動揺は増加せず、足底内在筋の活動レベルは増加した。さらに、60°課題では、筋活動の時間的変動が足圧中心の動揺速度と強い正の相関を示した。これらの結果は、仮説を支持し、特に足関節底屈角度が大きい肢位で、ダンサーの足底内在筋の活動が足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性を示唆し、本章の方法論の妥当性を支持している。

姿勢動揺について、20°課題および 40°課題のいずれにおいても、ダンサーは非ダンサーより少ない値を示した。この結果は、ダンサーが日常的にドゥミポワントでの姿勢制御を行っていることと一致する。課題間の比較では、非ダンサーでは、足関節底屈角度の増加に伴い姿勢動揺が増加した。この結果は、重心の上昇 (Nashner & McCollum, 1985) や関節適合性の低下 (Watanabe et al., 2012) によるものと考えられる。一方、ダンサーでは、足関節底屈角度が増加しても姿勢動揺は増加せず、むしろ 60°課題では 20°課題より足圧中心の動揺面積が減少した。この結果は、ダンサーが大きな足関節底屈角度でドゥミポワントを行うことが多く (Russell et al., 2010, 2011)、バランストレーニングが課題特異的である (Janura et al., 2019; Kritiyakiarana & Jongkamonwivat, 2016) ことに起因すると考えられる。今後は、各ダンサーの最大足関節底屈角度や片脚ドゥミポワントでの姿勢動揺を検証することで、さらなる有益な知見が得られることが期待される。

足底内在筋の活動レベルと時間的変動は、20°課題および 40°課題の両方で、非ダンサーよりダンサーの方が低い値を示した。図 2-2C のカラーマップは、代表的な高密度表面筋電図

振幅を示しており、群間での足底内在筋の活動の違いを視覚的に確認できる。全対象者における相関分析では、ほとんどの足圧中心と筋電図変数との間に有意な正の相関が認められ、姿勢動揺が増加すると、足底内在筋の活動レベルおよび時間的変動も増加することが示された。ドゥミポワントでの姿勢は、股関節や足関節、中足趾節関節周りのトルクを調整する複数の筋の協調によって制御されることが報告されている (Tanabe et al., 2014, 2017; Tsubaki et al., 2023)。足底内在筋は、小さな筋サイズと短いモーメントアームを持つことから (Kura et al., 1997; Ledoux et al., 2001; Tosovic et al., 2012)、主に足部アーチ構造の安定化に寄与する役割があるとされる (McKeon et al., 2015)。従来の健常成人を対象とした研究でも、足底内在筋の活動レベルは、片脚立ちやつま先立ちにおいて、姿勢動揺に応じて増加することが示されている (Kelly et al., 2012; Ridge et al., 2022) 一方、その活動が直接的に姿勢制御に関与しないことが報告されている (Ferrari et al., 2020)。本章の結果は、足底内在筋の活動は姿勢要求に依存するという先行研究の知見を支持するものである。

課題間の比較では、足関節底屈角度が増加すると、両群とも足底内在筋の活動レベルが増加することが示された。この増加の理由としては、以下の2つが考えられる。1つ目は、姿勢要求の増加に伴う姿勢動揺の増加である。非ダンサーでは、足関節底屈角度が増加すると筋活動の時間的変動も増加し、これらのことが、非ダンサーにおける足底内在筋の活動レベルが20°課題よりも40°課題で増加した主な理由を説明している。2つ目は、足部の関節への負荷の増加である。ドゥミポワントでは、通常の姿勢制御戦略（股関節および足関節の制御）に加えて、足部の関節の制御が重要となる。特に、ダンサーは足部の関節の可動性が高いことが報告されており (Russell et al., 2010, 2011)、最近の研究では、ドゥミポワントと同様の中足趾節関節伸展位における足底内在筋の能動的な活動は足部アーチ構造の安定化に寄与することが示されている (Farris et al., 2020; Kelly et al., 2019)。ダンサーでは、足関節底屈角

度が増加しても姿勢動揺と筋活動の時間的変動は増加しなかった。これらのことは、ダンサーにおいて、足底内在筋の活動レベルが 20°課題より 60°課題で増加した理由を説明するとともに、足底内在筋が、特に足関節底屈角度が大きいドゥミポワントにおいて、足部アーチ構造の安定化に関与する可能性を示唆している。

さらに、ダンサーの 60°課題では、筋活動の時間的変動が足圧中心の動揺速度と強い正の相関を示した。筋活動の時間的変動は、筋活動の安定性を示す指標であり (Kurz et al., 2018; Lemos et al., 2015)、関節トルクの安定性と関連することが示されている (Hirono et al., 2020; Tracy & Enoka, 2002; Yao et al., 2000)。この結果は、先述した課題特異性に起因し (Janura et al., 2019; Kritiyakiarana & Jongkamonwiwat, 2016)、ダンサーにおける課題間の筋活動レベルの増加の結果と併せて考えると、ダンサーの足底内在筋の活動は、足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性を示唆している。

## 2-5 小括

第2章では、両脚ドゥミポワントにおける足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係を検討した。その結果、ダンサーは、非ダンサーと比較して、両脚ドゥミポワントでの姿勢動揺が少なく、足底内在筋の活動レベルは低く、時間的変動も少ないことが明らかになった。また、ダンサーでは、足関節底屈角度が増加しても、姿勢動揺と足底内在筋の時間的変動は増加せず、一方で、60°の課題では20°の課題と比較して足底内在筋の活動が増加し、相関分析では、60°課題でのみ、筋活動の時間的変動が足圧中心の動揺速度と強い正の相関を示した。以上の結果から、ダンサーの足底内在筋の安定的な活動は、特に足関節底屈角度の大きい、足部への負荷が大きいドゥミポワントにおいて、足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性が示唆された。

## 第3章 両脚および片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係

### 3-1 背景

第2章の結果から、足底内在筋の活動は、姿勢動揺に応じて増加するという知見 (Kelly et al., 2012; Ridge et al., 2022) が支持され、ダンサーにおいては、特に足部への負荷が大きいドゥミポワントにおいて、足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性が示唆された。

バレエの振付では、非支持脚を多様な表現に活用できる片脚ドゥミポワントが頻繁に用いられる (Howse J & McCormack M, 2009; 水村 (久埜), 2020)。片脚ドゥミポワントでは、両脚ドゥミポワントと比較して、姿勢要求が増加し、足部への負荷も増加すると推察される。健康成人を対象とした先行研究では、両脚つま先立ちよりも片脚つま先立ちにおいて足底内在筋の活動が増加することが報告されている (Ridge et al., 2022)。ただし、この研究では、対象者が壁などに軽く触れることを許可しており、姿勢要求の条件が統一されていないという限界がある (Ridge et al., 2022)。また、ダンサーを対象に、足関節底屈角度を規定した条件で片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動を評価した研究はこれまで存在していない。そこで、本章では、第2章と同様のプロトコルを用い、ダンサーにおける両脚および片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係を検討した。

本章の目的は、1) ダンサーの片脚および両脚ドゥミポワントにおける足底内在筋の活動と姿勢動揺を比較すること、2) 各条件における足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係を検討することである。本章では、1) 足底内在筋の活動（レベルと時間的変動）と姿勢動揺は、片脚ドゥミポワントの方が両脚ドゥミポワントよりも有意に高い値を示す、2) 足底内在筋

の活動は、片脚ドゥミポワントと両脚ドゥミポワントの両方で姿勢動揺と関係するが、特に片脚ドゥミポワントにおいて強く関係する、という仮説を立てた。

### 3-2 方法

#### 3-2-1 対象者

11名の女性バレエダンサー（年齢  $25.1 \pm 2.3$  歳；身長  $163.9 \pm 6.3$  cm；体重  $47.9 \pm 4.9$  kg；BMI  $17.8 \pm 1.2$  kg/m<sup>2</sup>；平均値 ± 標準偏差）が本章の実験に参加した。対象者は、第2章の実験対象者のうち、片脚ドゥミポワント課題を実施できた11名のダンサーであり、両脚ドゥミポワントのデータは第2章で収集したものを使用した。ダンサーは15年以上のバレエ経験があり、週7.5時間以上のバレエトレーニングを受けていた。対象者は、参加前3ヶ月以内に足関節と足部の負傷歴、および参加前1年間に手術歴はなかった。本章の実験の実施には、立命館大学のヒトを対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て（BKC-人医-2021-048）、対象者には、研究の目的、方法、および本実験における安全性について説明し、全対象者より書面による実験参加の同意を得た。

#### 3-2-2 実験設定

姿勢制御課題は、足関節底屈60°で、両脚ドゥミポワントを30秒間、右脚の片脚ドゥミポワントを10秒間行うものであった（Ferrari et al., 2020; Watanabe et al., 2021a）。課題中の足関節底屈角度の測定には、電気ゴニオメータ（SG110、Biometrics 社製）を使用した。ゴニオメータの固定アームは矢状面で腓骨の長軸と、可動アームは小趾（第5中足骨）側の足底面と一致させ、両足に取り付けた。足関節底屈角度は、距腿関節と複数の足部の関節（ショパール関節、リスフラン関節など）の合計であることに注意が必要である。各脚のゴニオメータデータの視覚的フィードバックは、2台の16ビットA/Dコンバーター（Power Lab 16s；ADInstruments 社、オーストラリア）を介して、対象者の目の高さ、前方約1mに設置された2台のPCモニター上にリアルタイムで提供された（図3-1A）（Saito et al., 2018）。片脚課題では、左足のゴニオメータは取り外した。

対象者は、まずフォースプレート（SS-FP40AO-SY、スポーツセンシング社製）の上に立った。両脚課題では、両手でバーを保持した状態でドゥミポワントを開始し、両脚の体重が等しくなるようモニターを見ながら両足関節を規定の角度に維持できるようになった時点でバーから手を離した。両脚課題では、両脚を無理のない幅で平行に保ち、膝は完全に伸ばし、両手は体の側面でリラックスさせた。片脚課題では、両手でバーを持った状態で右脚ドゥミポワントを開始し、モニターを見ながら底屈角度をできるだけ規定の角度に維持できるようになった時点でバーから手を離し、姿勢を保持した。先行研究を参考に（de Mello et al., 2017; Lin et al., 2011）、片脚課題中、右脚はターンアウト（下肢の外旋）、左脚はルティレ（左小趾を右膝に付ける肢位）、上肢はアン・ナバン（両手の指先を体幹の前に置き、上肢を円形に保つ肢位）を維持した（図 3-1B）。姿勢要求の程度を考慮し、両脚課題、片脚課題の順に試行を行った。練習試行を行い手順に慣れた後、1 分以上の休息を挟んで各課題の本試行を行った。データ解析には、3 回の成功試行の平均データを用いた。成功試行とは、試行中に対象者が、規定された肢位を崩すことなく、またバーをつかんだり足を踏み出したりすることなく、規定された角度を維持できた試行と定義した。

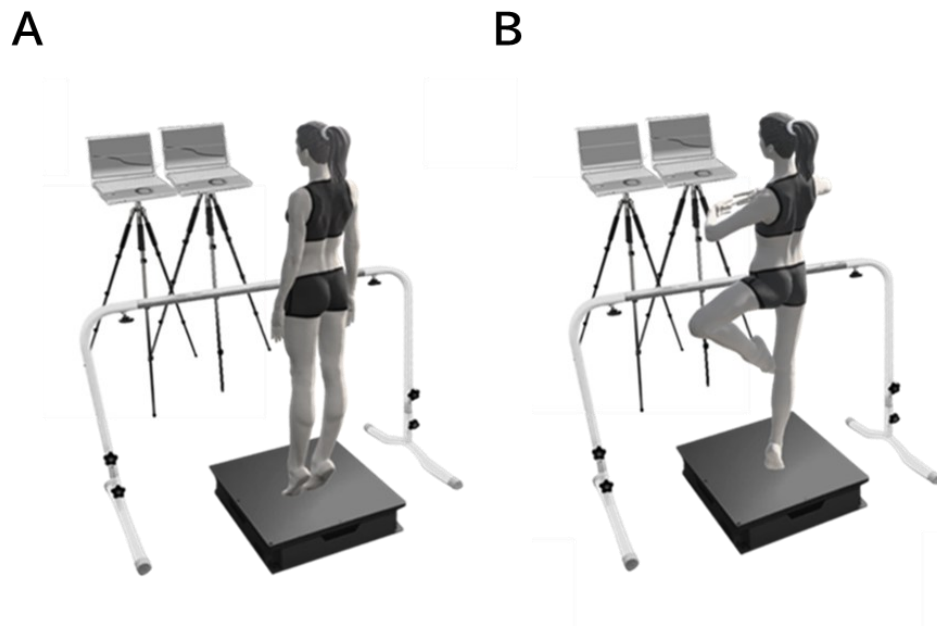


図 3-1. 実験設定

A：両脚課題では、ゴニオメータで測定した両足関節底屈角度を 2 台の PC モニターにリアルタイムで視覚フィードバックとして表示した。B：片脚課題では、右脚は最適なターンアウト（下肢の外旋）、左脚はルティレ（左小趾を膝関節へ付ける肢位）を維持した。上肢はアン・ナバン（両指先を体幹の前にし、上肢を円形にする肢位）。片脚課題における足関節底屈角度の視覚的フィードバックは右足のみであった。

### 3-2-3 データ収集

足底内在筋の単極性表面筋電図の振幅は、先行研究を参考に (Ferrari et al., 2018, 2020)、電極間隔が 8mm、13 行 5 列 (1 電極を除く) の 64 チャンネルの高密度グリッド

(GR08MMM1305、OT Bioelettronica 社製) を用いて取得した。右足底の皮膚をサンドペーパーで軽く擦り、アルコールで洗浄し、踵骨隆起と中足骨頭を触診した後、これらの部位の中央に高密度グリッドを第 2 中足骨の長軸に沿って配置した (Ferrari et al., 2018)。グリッドはテープで補強し、課題中に足底部との接触が一定になるようにした。リファレンス電極は右膝と左手首に配置した。取得した筋電図データは、16 ビットのアナログ・デジタル変換器

(Quattrocento、OT Bioelettronica 社製) を用いて増幅し、サンプリング周波数は 2048Hz、バンドパスフィルタは 10-500Hz に設定した。足圧中心データは、サンプリング周波数

1000Hz、ローパスフィルタ 5Hz に設定されたフォースプレートを用いて取得した (図 4-1)。

対象者は、検者による徒手抵抗 (座位、右膝完全伸展、足関節底屈 40°) に対して 5 秒間の MVC を、足趾屈曲 (全足趾) と足趾外転 (母趾と小趾) でそれぞれ 2 回ずつ行い、その間の筋電図振幅を記録した (F. P. Kendall et al., 2005; Ridge et al., 2022)。

### 3-2-4 データ解析

筋電図と足圧中心のデータは、16 ビット A/D コンバーター (Power Lab 16s、ADInstruments 社製) のトリガーを用いて同期した。解析区間は、両脚課題では 30 秒間の課題のうち、最初と最後の 5 秒間を除いた中間 20 秒間とし、片脚課題では 10 秒間の課題のうち、最初と最後の 2.5 秒間を除いた中間 5 秒間とした。64 個の電極から記録された筋電図の生データを目視で検査し、ノイズが確認されたデータは隣接する電極のデータで補完した (Ferrari et al., 2020)。各電極の生データは、RMS 処理後、MVC (500ms の時間ウィンドウに

における最高値)で正規化し、解析区間の平均振幅を算出した。本章では、全 64 電極の筋活動レベル (%MVC) の平均値を代表値とした (Ferrari et al., 2018, 2020)。また、RMS 処理を実施した各電極データの平均値を標準偏差で割って CV を算出し、全 64 電極の平均値を筋活動の時間的変動 (%) として代表値とした (Kurz et al., 2018; Lemos et al., 2015; Yaserifar & Souza Oliveira, 2022)。

足圧中心のデータからは、姿勢動揺の指標として、解析区間における足圧中心の前後方向の標準偏差 (前後方向の動揺) および左右方向の標準偏差 (左右方向の動揺)、平均の速度 (動揺速度)、足圧中心を包む 95%信頼楕円面積 (動揺面積) を算出した (Clifton et al., 2013; Moghadam et al., 2011; Palmieri et al., 2002)。

### 3-2-5 統計処理

変数の正規性を確認するため、Shapiro-Wilk 検定を用いた。両脚課題での筋活動レベルと筋活動の変動と片脚課題での動揺面積を除く、すべての変数で正規性を確認した。課題間の比較では、正規分布のデータには対応のある t 検定を、正規分布でないデータには Wilcoxon の符号付き順位検定を用いた。課題間の差の効果量は Cohen の d 値を算出し、trivial < 0.2、small 0.2-0.49、moderate 0.5-0.79、large  $\geq 0.8$  と解釈した (Cohen, 1988)。さらに、95%信頼区間を、推定統計量で評価した (Ho et al., 2019)。また、各課題における足圧中心と筋電図の変数との関係性を評価するため、正規分布データには Pearson の積率相関係数を、非正規分布データには Spearman の順位相関係数を用いた。すべてのデータの統計処理は SPSS ソフトウェア (SPSS statistics 28、IBM 社製) を使用し、有意水準は 5%とした。

### 3-3 結果

両脚課題に比べ、片脚課題では、足圧中心の動揺速度（両脚 vs 片脚、 $2.0 \pm 0.3$  cm/s vs  $5.1 \pm 0.4$  cm/s、 $p < 0.001$ 、 $d = 8.77$ 、図 3-2C）および筋活動レベル（両脚 vs 片脚、 $11.4 \pm 2.8\%$  MVC vs  $25.8 \pm 7.8\%$  MVC、 $p = 0.003$ 、 $d = 2.47$ 、図 3-3A）が有意に高かった。他の変数に関しては、課題間で有意差はなかった（ $p = 0.093-0.941$ 、 $d = 0.05-0.61$ 、図 3-2 および 3-3）。

片脚課題では、筋活動レベルと足圧中心の動揺速度（ $r = 0.666$ 、 $p = 0.025$ ）、筋活動の時間的変動と足圧中心の前後方向の動揺（ $r = 0.846$ 、 $p = 0.001$ ）および左右方向の動揺（ $r = 0.738$ 、 $p = 0.010$ ）との間に有意な相関が確認された（表 3-1）。両脚課題では、どの変数の組み合わせにも有意な相関は見られなかった（ $r = 0.097-0.559$ 、 $p = 0.074-0.778$ 、表 3-1）。

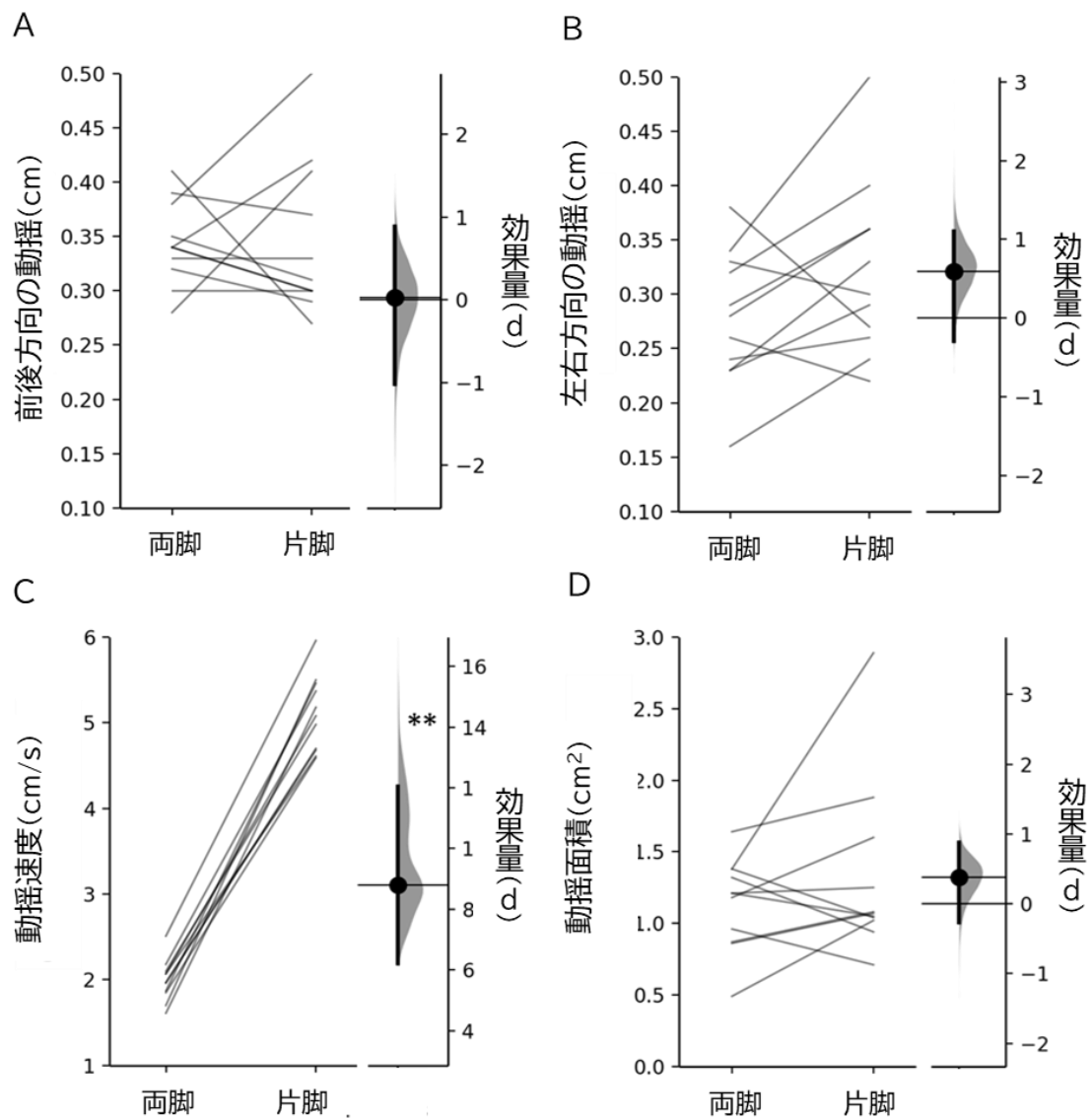


図 3-2. 両脚ドゥミポワントと片脚ドゥミポワントの足圧中心の変数（A：前後方向の動揺、B：左右方向の動揺、C：動揺速度、D：動揺面積）の比較

\*\* $p < 0.01$

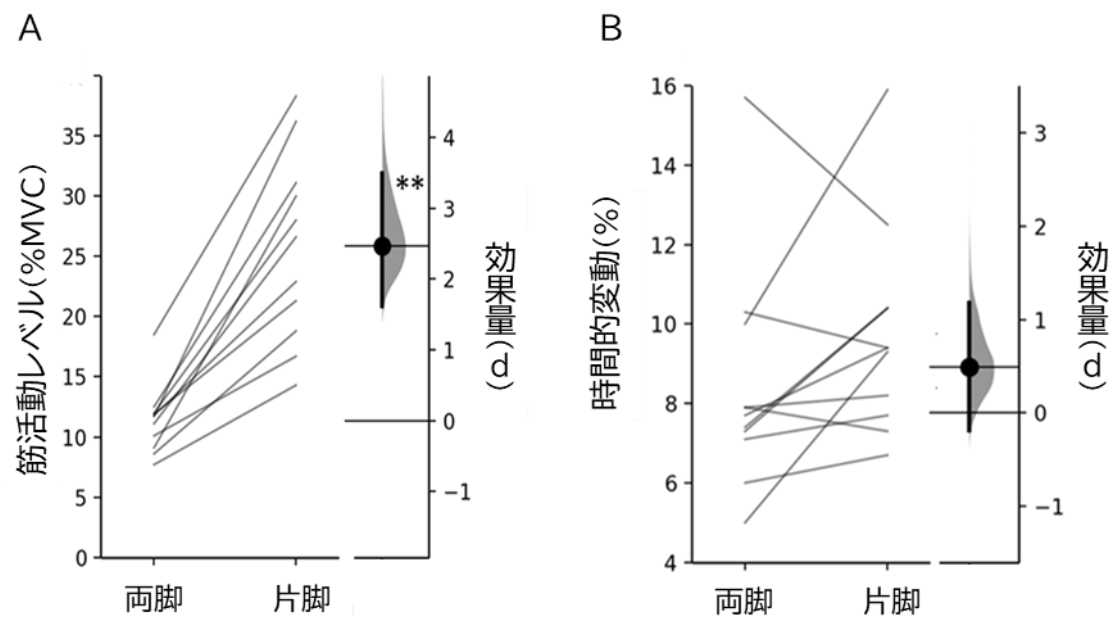


図 3-3. 両脚ドゥミポワントと片脚ドゥミポワントの筋電図の変数（A：筋活動レベル、B：時間的変動）の比較

\*\* $p < 0.01$

表 3-1. 足圧中心と筋電図変数の相関係数

| 足圧中心                       | 肢位 | 筋活動レベル<br>(%MVC) |         | 時間的変動<br>(%) |          |
|----------------------------|----|------------------|---------|--------------|----------|
|                            |    | r                | p       | r            | p        |
| 前後方向の動揺<br>(cm)            | 両脚 | 0.174            | 0.608   | 0.097        | 0.778    |
|                            | 片脚 | 0.083            | 0.808   | 0.846        | ** 0.001 |
| 左右方向の動揺<br>(cm)            | 両脚 | -0.210           | 0.536   | 0.340        | 0.306    |
|                            | 片脚 | -0.037           | 0.913   | 0.738        | ** 0.010 |
| 動揺速度<br>(cm/s)             | 両脚 | 0.282            | 0.400   | 0.559        | 0.074    |
|                            | 片脚 | 0.666            | * 0.025 | 0.499        | 0.118    |
| 動揺面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | 両脚 | 0.000            | 1.000   | 0.362        | 0.275    |
|                            | 片脚 | -0.191           | 0.574   | 0.301        | 0.368    |

\*p < 0.05、\*\*p < 0.01

### 3-4 考察

本章は、高密度表面筋電図法を用いて、ダンサーにおける足底内在筋の片脚ドゥミポワントでの活動を評価した初めての研究である。本章の主な結果は以下の通りである。1) 両脚課題に比べ、片脚課題の方が足圧中心の動揺速度と筋活動レベルが高かった。2) 片脚課題でのみ、足圧中心と筋活動の変数との間に有意な正の相関が認められた。これらの結果は、仮説を部分的に支持し、片脚ドゥミポワントでは、両脚ドゥミポワントに比べて、足部への負荷と姿勢要求が増加し、ダンサーにおける足底内在筋の活動は、片脚ドゥミポワントでの姿勢動揺と密接に関係していることを示唆している。

本章では、4つの足圧中心の変数のうち、動揺速度のみが、両脚課題よりも片脚課題で2.6倍高かった。この結果は、図3-2Cの個人プロットが示すように、すべてのダンサーで一貫していた。足圧中心の動揺速度は、足圧中心が1秒間に移動する平均距離を示し、値が大きいほど姿勢動揺が多いと解釈される (Moghadam et al., 2011; Palmieri et al., 2002)。姿勢の安定性は、主に以下の3つの条件によって制約される。1) 支持基底面が広い、2) 重心が支持基底面の中央に近い、3) 重心が低い (Horak, 2006; Nashner & McCollum, 1985)。両脚ドゥミポワントに比べ、片脚ドゥミポワントでは、両脚ドゥミポワントと比較して、条件1と2が特に不利となり、その結果、姿勢要求が高まり、姿勢動揺が増加する。本章の結果から、これらは、片脚ドゥミポワントに慣れたダンサーにおいても例外ではないことが示唆される。対照的に、他の3つの足圧中心の変数には有意差が認められなかった。これは、片脚課題でのダンサー間の反応が一貫していないためと考えられ、姿勢制御戦略に大きな個人差があることを示唆している。全体として、これらの結果は、ダンサーのドゥミポワントを運動課題に採用した研究において、足圧中心の動揺速度が姿勢動揺の代表的な変数として採用でき、他の変数が方向に関する情報を補足できることを示唆している。

片脚課題における筋活動レベル (%MVC) は、両脚課題よりも 2.2 倍高く、増加していた (図 3-3A)。非ダンサーを対象とした先行研究では、両脚ドゥミポワントと比べて片脚ドゥミポワントで、足底内在筋の活動レベルが 1.5~1.7 倍高かったことが報告されている (Ridge et al., 2022)。ただし、その研究では、足関節底屈角度を規定していないことに加え、対象者が壁などに軽く触れることが許可されており、姿勢要求の条件が統一されていなかった (Ridge et al., 2022)。両脚支持に比べ片脚支持では、足部にかかる体重負荷が 2 倍になることが予想されるため、本章で示された筋活動レベルの増加の大部分は、足部への負荷の増加によるものと考えられる。これにより、足底内在筋が負荷に対抗し、特に片脚ドゥミポワントにおいて足部アーチ構造の安定化に能動的に関与する証拠が示されたと考えられる。

一方、相関分析では、片脚課題において、筋活動レベルが足圧中心の動揺速度と正の相関 ( $r = 0.666$ ) を示し、活動の増加が姿勢動揺の増加に関連することが明らかになった。足底内在筋は、そのモーメントアームの短さから、大きな動揺に対応する関節トルクは発生させず、主に足部アーチ構造の安定化に関与することが示唆されている (McKeon et al., 2015; Neumann, 2017)。第 2 章においても、足底内在筋の活動の増加は姿勢動揺の増加と関連することが示されている。したがって、本章におけるこの結果は、足底内在筋の活動は、姿勢動揺に依存するという先行研究の知見を支持するものである。

予想に反して、筋活動の時間的変動には課題間で有意差が見られず ( $p = 0.142$ )、片脚課題では両脚課題よりも 1.2 倍高い値で、その効果量は小~中程度の境界線上にあった ( $d = 0.49$ ) (図 3-3B)。筋活動の時間的変動の高低は、筋活動の安定性を反映するため (Kurz et al., 2018; Lemos et al., 2015)、両脚課題よりも片脚課題で増加することが予想された。ただし、第 2 章でも、ダンサーは両脚ドゥミポワントにおける足関節底屈 20°、40°、60°課題での筋活動の時間的変動には有意差はなかったが、筋活動レベルは 20°よりも 60°の方が有意に高く、こ

これは本章の結果（すなわち、活動レベルは異なるが、安定性は同程度）と一致している。言い換えれば、これらの結果は、ダンサーにおいて、足底内在筋の活動は、両脚ドゥミポワントよりも片脚ドゥミポワントの方が高いものの、その活動は片脚ドゥミポワントでも両脚ドゥミポワントでも、それぞれのレベルで同様に安定していることを示唆しており、これは、片脚ドゥミポワントを可能な限り安定的に行うというダンサーの日常的なトレーニングでの適応によるものと考えられる。

また、筋活動の時間的変動は、片脚課題においてのみ足圧中心の前後方向および左右方向の動揺と強い正の相関を示した（ $r=0.846$  および  $0.738$ 、表 3-1）。これらのことから、筋活動はダンサーの片脚ドゥミポワントにおける両方向の姿勢動揺と関連しており、片脚ドゥミポワントでは筋電図と方向性を示す足圧中心データの変動性を表すこれらの指標が互いに感受性が高いことが示唆された。以前の研究では、非ダンサーにおける通常の片脚立ち（踵は床に付いている状態）での筋活動は、足圧中心の左右方向の動揺とのみ同期することが示されている（Kelly et al., 2012）。この研究間の相違の理由は、肢位の違いによる足部の関節の複合運動とウインドラスメカニズムによって説明できると考えられる。足部の関節は柔軟に形状変化する構造を有しており、片脚立ちでは、各関節は主に前額面（すなわち、左右方向）の姿勢動揺に対して協調的に反応する（McKeon et al., 2015; Neumann, 2017）。例えば、後足部の距骨下関節の外がえしは、中足部と前足部にあるショパール関節とリスフラン関節の内がえし（逆も同様）のような複合運動を引き起こし、内側縦アーチの崩壊をもたらす（Folckowski et al., 2003; Mulligan & Cook, 2013; Razeghi & Batt, 2002）。一方、ドゥミポワントでは、中足趾節関節の伸展に伴い、踵骨から足趾までを覆う足底筋膜が緊張し、内側縦アーチを挙上し足部の関節剛性を高めるウインドラスメカニズムが機能する。このメカニズムが機能すると、足部の関節が一体化するため、前述の関節の複合運動は減少する（Hicks, 1954）。

本章の知見は、足底内在筋が以前考えられていたよりも能動的にウインドラスメカニズムに関与するという最近の知見 (Farris et al., 2020; Kelly et al., 2019; Riddick et al., 2019; Welte et al., 2018) を支持するものであり、足底内在筋の活動が変動しない、すなわち、より安定していることが、特に片脚ドゥミポワントでの足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性を示唆する。

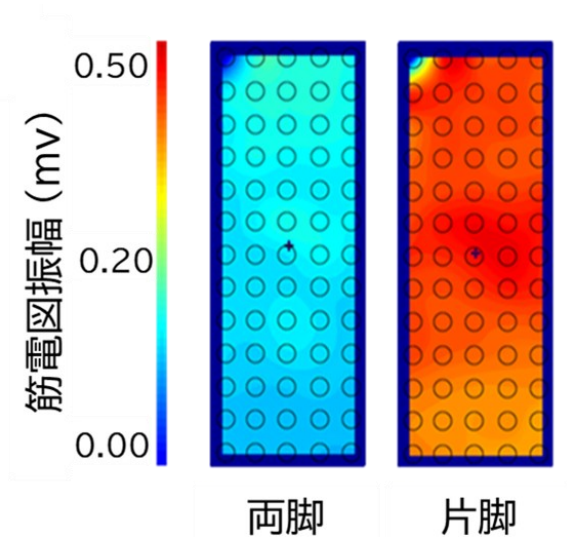


図 3-3. 両脚ドゥミポワントと片脚ドゥミポワント課題における分析区間の代表的な高密度表面筋電図振幅を示すカラーマップ

面筋電図振幅を示すカラーマップ

中心付近の点（十字）は、筋電図活動の重心を示している。

### 3-5 小括

第3章では、ダンサーにおける両脚および片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係を検討した。その結果、片脚ドゥミポワントでは、両脚ドゥミポワントと比較して、足底内在筋の活動レベルと足圧中心の動揺速度が有意に増加し、相関分析では、片脚ドゥミポワントでのみ、これらの変数間に正の相関が認められた。また、片脚ドゥミポワントにおける足底内在筋の活動の時間的変動は、足圧中心の前後方向と左右方向の動揺と強い正の相関を示した。これらの結果から、足底内在筋の安定的な活動は、特に、姿勢要求が高く、足部への負荷が大きい片脚ドゥミポワントにおける足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性が示唆された。

## 第4章 足底内在筋のサイズの特徴

### 4-1 背景

筋のサイズは、筋力や関節トルクを推定するための間接的な指標である (Balshaw et al., 2021; Fukunaga et al., 2001)。先行研究では、バレエ特有のつま先立ちにおいて、足部や足関節に特に大きな負荷がかかることが報告されている (Kadel et al., 2005; Pearson & Whitaker, 2012; Walter et al., 2011)。また、第2章および第3章の結果から、ドゥミポワントでの姿勢制御では、足関節底屈角度が増加し、片脚になることで足部への負荷が増加し、それに伴い足底内在筋の活動が増加することが示された。

特定の動作による長期的な反復負荷が、その動作に関与する筋の肥大を引き起こすことは広く知られている (Emery et al., 2019; Mayes et al., 2018; McMillan et al., 2023)。このため、ダンサーの足底内在筋も肥大している可能性が高いと考えられる。既存の唯一の研究では、超音波法を用いて測定された ABH、FDB、FHB の3筋の解剖学的断面積が、非ダンサーより大きいことが報告されている (Ishihara et al., 2022)。しかし、ダンサーを対象に、足底内在筋全10筋を検証した研究は存在せず、足底内在筋全体の構造や特徴については十分に解明されていない。

本章の目的は、MRI法を用いて、ダンサーと非ダンサーの足底内在筋を構成する全10筋の体積を算出し、そのサイズの違いと特徴を明らかにすることである。本章では、足底内在筋の総体積は、非ダンサーよりもダンサーの方が大きい、という仮説を立てた。

## 4-2 方法

### 4-2-1 対象者

15名の女性ダンサー（年齢  $24.8 \pm 2.5$  歳；身長  $163.8 \pm 5.7$  cm；体重  $48.0 \pm 4.3$  kg；BMI  $17.9 \pm 1.2$  kg/m<sup>2</sup>；平均値 ± 標準偏差）と15名の非ダンサー（年齢  $23.3 \pm 1.5$  歳；身長  $162.8 \pm 3.9$  cm；体重  $56.7 \pm 5.8$  kg；BMI  $21.4 \pm 1.8$  kg/m<sup>2</sup>；平均値 ± 標準偏差）が本章の実験に参加した。対象者は、第2章の対象者に、ダンサーは1名、ノンダンサーは2名が追加されている。ダンサーは15年以上のバレエ経験があり、週7.5時間以上のバレエトレーニングを行っていた。非ダンサーはバレエ経験がなく、少なくとも過去6ヶ月間、定期的な身体トレーニングプログラムに参加していなかった。両群の対象者とも、参加前3ヶ月以内に足関節と足部の負傷歴、および参加前1年間の手術歴はなかった。本章の実験の実施には、立命館大学のヒトを対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て（BKC-人医-2021-048）、対象者には研究の目的、方法や本実験における安全性などについて説明し、全対象者から書面による実験参加の同意を得た。

### 4-2-2 実験設定およびデータ収集・解析

MRIのfast spin-echoシーケンス（repeat time = 700 ms、echo time = 12 ms、slice thickness（スライス厚）= 3.5 mm、gap between slices = 0 mm、field of view =  $125 \times 125$  mm、flip angle = 120 degrees、matrix =  $1024 \times 1024$ ）を用いて、足底面に対して垂直に、足部の種子骨から踵骨結節までの領域を対象に、連続的に画像を取得した（Kusagawa et al., 2022a, 2022b）。

解析対象の筋は、ABH、FDB、ABDM、足底方形筋（quadratus plantae: QP）、虫様筋（lumbricals: LUMB）、FHB、母趾内転筋斜頭（adductor hallucis oblique head: ADDH-OH）、母趾内転筋横頭（adductor hallucis transverse head: ADDH-TH）、短小趾屈筋（flexor digiti minimi: FDM）、底側・背側骨間筋（plantar and dorsal interossei: INT）である。画像解析ソフト

(SliceOmatic version 5.0Rev-3b、Tomovision 社製) を使用し、検者 1 名が筋を確認できる最も近位から最も遠位までの画像において、各筋の輪郭を手作業でなぞり分割した (図 4-1)。

なお、骨、腱、脂肪、結合組織、神経組織、血管などの非収縮組織は目視で注意深く除外した。筋サイズの指標として、各画像における各筋の解剖学的断面積を合計し、スライス厚を乗じて、個々の足底内在筋の体積と足底内在筋 10 筋合計の体積 (総体積: WHOLE) を算出した。LUMB と INT は筋の境界が不明確であったため、これらの筋の中では分割せず、LUMB は 4 筋、INT は 7 筋を 1 筋群とした。本章の実験対象者 3 名について、筋体積の測定の評価者間再現性をクラス内相関係数 (ICC) で評価したところ (Kusagawa et al., 2022a, 2022b)、個々の筋の ICC (1、3) の値は 0.954-0.994 であり、優れた再現性が確認された。

絶対値の体積に加え、絶対値の体積を体重で除して正規化した相対値 (相対値)、および足底内在筋の総体積に対する個々の筋体積の割合 (%WHOLE) を各筋について算出した。結果は、これら 3 つの指標 (絶対値、相対値、%WHOLE) に基づいて評価した。群間差の効果量は Cohen の d 値を算出し、trivial < 0.2、small 0.2-0.49、moderate 0.5-0.79、large  $\geq 0.8$  と解釈した (Cohen, 1988)。

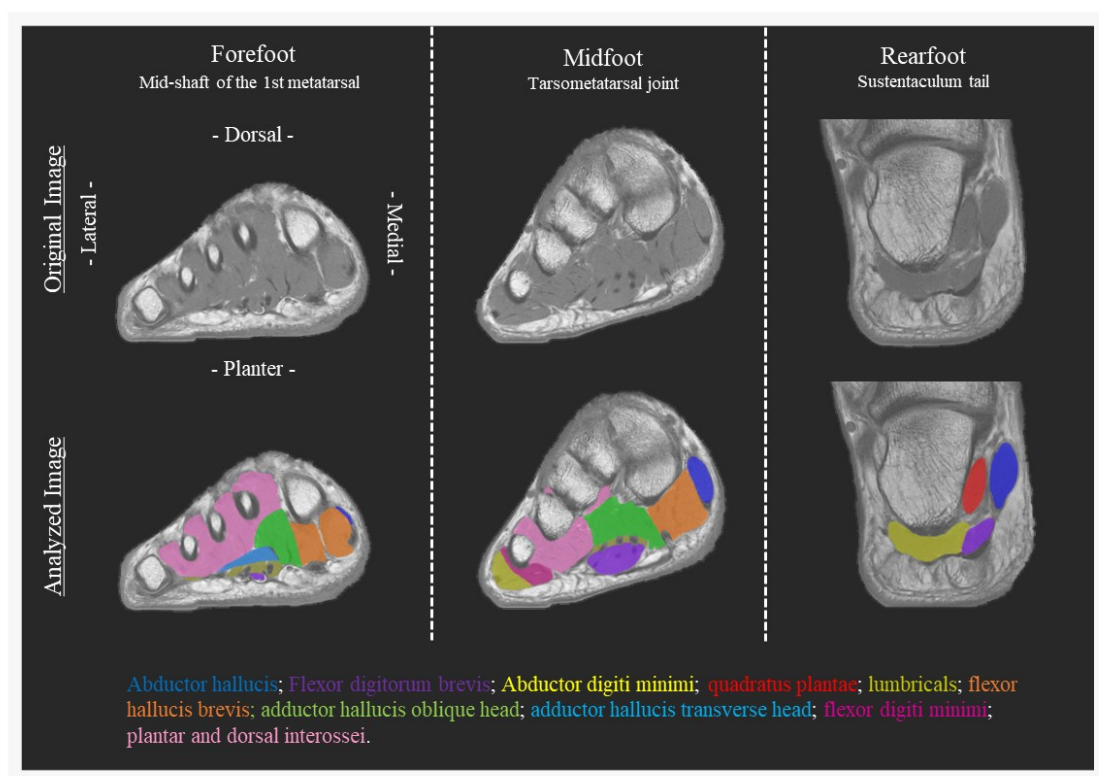


図 4-1. ダンサーの代表的な右足部の MRI 画像

上段が解析前の画像、下段が解析後の画像である。前足部（Forefoot）は第 1 中足骨幹部、中足部（Midfoot）はリスフラン関節、後足部（Rearfoot）は踵骨載距突起レベルの画像を示す。

母趾外転筋（abductor hallucis: ABH）；短趾屈筋（flexor digitorum brevis: FDB）；小趾外転筋（abductor digiti minimi: ABDM）；足底方形筋（quadratus plantae: QP）；虫様筋（lumbricals: LUMB）；短母趾屈筋（flexor hallucis brevis: FHB）；母趾内転筋斜頭（adductor hallucis oblique head: ADDH-OH）；母趾内転筋横頭（adductor hallucis transverse head: ADDH-TH）；短小趾屈筋（flexor digiti minimi: FDM）；底側・背側骨間筋（plantar and dorsal interossei: INT）。

#### 4-2-3 統計処理

変数の正規性は、Shapiro-Wilk 検定で確認した。ダンサーの ADDH-TH の相対値、非ダンサーの INT と WHOLE の絶対値、および FHB の%WHOLE を除き、すべての変数が正規分布していた。群間の比較には、正規分布している変数には独立標本 t 検定、正規分布していない変数には Mann-Whitney の U 検定をそれぞれ用いた。すべてのデータは SPSS ソフトウェア（SPSS statistics 28、IBM 社製）を用いて統計処理を行い、有意水準は 5%とした。

### 4-3 結果

年齢と身長で群間に有意差はなかったが、体重と BMI はダンサーが非ダンサーより有意に低値を示した ( $p < 0.001$ 、表 4-1)。

筋体積の絶対値では、ABH ( $p = 0.048$ 、 $d = 0.76$  [moderate])、FDB ( $p < 0.001$ 、 $d = 1.47$  [large])、QP ( $p = 0.022$ 、 $d = 0.88$  [large])、LUMB ( $p < 0.001$ 、 $d = 2.38$  [large])、FHB ( $p = 0.014$ 、 $d = 0.96$  [large])、INT ( $p = 0.011$ 、 $d = 0.99$  [large])、WHOLE ( $p = 0.015$ 、 $d = 1.13$  [large]) は、ダンサーが非ダンサーより有意に高値を示した (図 4-2A)。

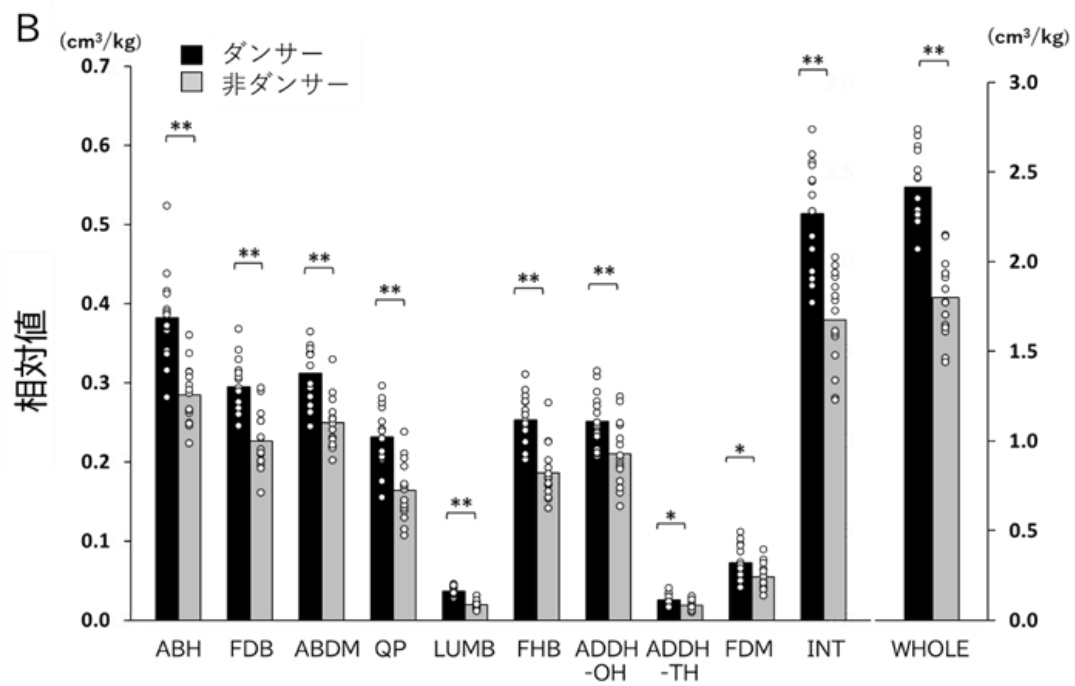
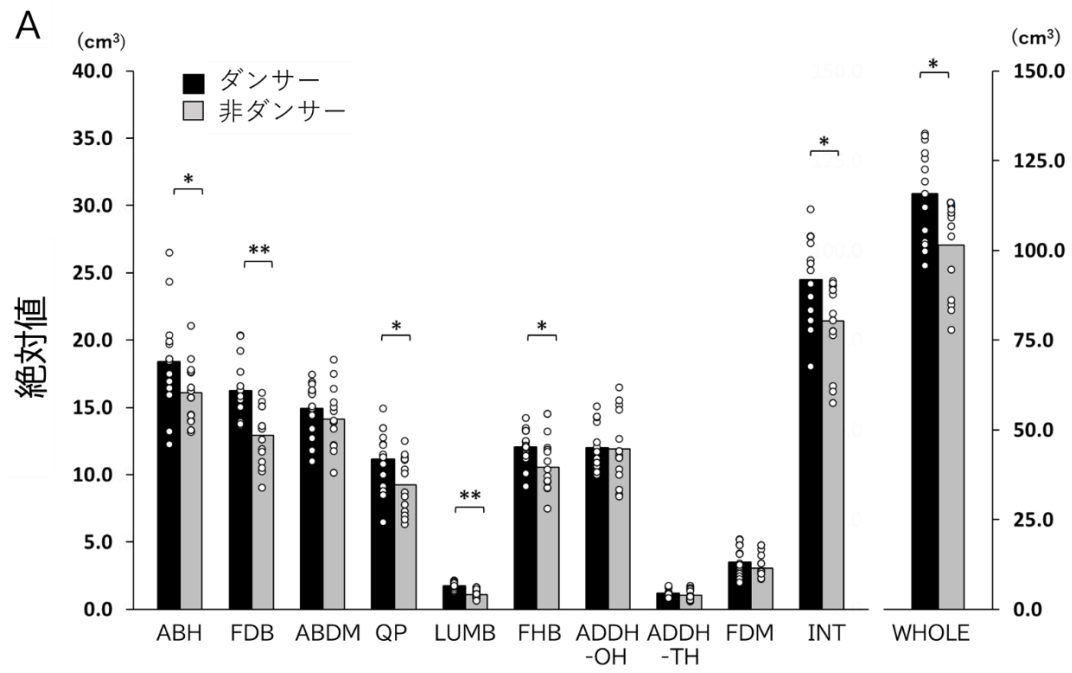
筋体積の相対値では、ABH ( $p < 0.001$ 、 $d = 2.02$  [large])、FDB ( $p < 0.001$ 、 $d = 1.84$  [large])、ABDM ( $p < 0.001$ 、 $d = 1.83$  [large])、QP ( $p < 0.001$ 、 $d = 1.77$  [large])、LUMB ( $p < 0.001$ 、 $d = 3.16$  [large])、FHB ( $p < 0.001$ 、 $d = 2.00$  [large])、ADDH-OH ( $p < 0.007$ 、 $d = 1.07$  [large])、ADDH-TH ( $p = 0.019$ 、 $d = 1.01$  [large])、FDM ( $p = 0.015$ 、 $d = 0.96$  [large])、INT ( $p < 0.001$ 、 $d = 2.08$  [large])、WHOLE ( $p < 0.001$ 、 $d = 2.96$  [large]) は、ダンサーが非ダンサーより有意に高値を示した (図 4-2B)。

筋体積の%WHOLE では、FDB ( $p = 0.014$ 、 $d = 0.95$  [large]) と LUMB ( $p < 0.001$ 、 $d = 1.68$  [large]) は、ダンサーが非ダンサーより有意に高値を示し、ABDM ( $p = 0.037$ 、 $d = 0.82$  [large]) と ADDH-OH ( $p = 0.009$ 、 $d = 1.04$  [large]) は、ダンサーが非ダンサーより有意に低値を示した (図 4-2C)。

表 4-1. 対象者の身体特性

|                          | ダンサー (n = 15) | 非ダンサー (n = 15) | p         | d    |
|--------------------------|---------------|----------------|-----------|------|
| 年齢 (歳)                   | 24.8 ± 2.5    | 23.3 ± 1.5     | 0.053     | 0.74 |
| 身長 (cm)                  | 163.8 ± 5.7   | 162.8 ± 3.9    | 0.595     | 0.20 |
| 体重 (kg)                  | 48.0 ± 4.3    | 56.7 ± 5.8     | < 0.001** | 1.71 |
| BMI (kg/m <sup>2</sup> ) | 17.9 ± 1.2    | 21.4 ± 1.8     | < 0.001** | 2.25 |

平均値 ± 標準偏差、\*\*p < 0.01



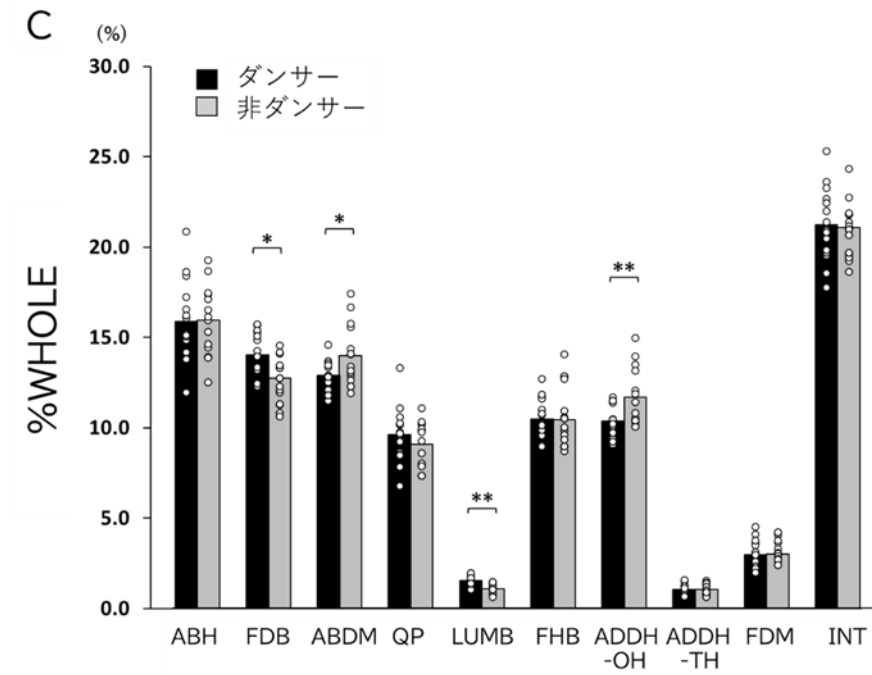


図 4-2. (A) 筋体積の絶対値、(B) 筋体積の絶対値を体重で正規化した相対値、(C) 足底内在筋の総体積に対する個々の筋体積の割合 (%WHOLE)

\* $p < 0.05$ 、\*\* $p < 0.01$ ；母趾外転筋 (abductor hallucis: ABH)；短趾屈筋 (flexor digitorum brevis: FDB)；小趾外転筋 (abductor digiti minimi: ABDM)；足底方形筋 (quadratus plantae: QP)；虫様筋 (lumbricals: LUMB)；短母趾屈筋 (flexor hallucis brevis: FHB)；母趾内転筋斜頭 (adductor hallucis oblique head: ADDH-OH)；母趾内転筋横頭 (adductor hallucis transverse head: ADDH-TH)；短小趾屈筋 (flexor digiti minimi: FDM)；底側・背側骨間筋 (plantar and dorsal interossei: INT)；足底内在筋の総体積 (WHOLE)。

#### 4-4 考察

本章は、MRI 法を用いて、ダンサーと非ダンサーの足底内在筋全 10 筋の体積を比較検討した初めての研究である。主な知見として、ダンサーの足底内在筋の総体積が非ダンサーよりも大きく、特に FDB と LUMB が顕著に大きいことが示された。この結果は、仮説を支持するとともに、バレエ特有のつま先立ちを含むトレーニングにおいて、特に FDB と LUMB が重要な役割を果たしている可能性を示唆している。

足底内在筋の総体積は、絶対値および相対値のいずれにおいても、非ダンサーよりもダンサーが大きかった。バレエ特有のつま先立ちでは、足部に大きな負荷がかかることが報告されており (Kadel et al., 2005; Pearson & Whitaker, 2012; Walter et al., 2011)、特有の動作による反復負荷が筋の肥大を引き起こすことは広く知られている (Emery et al., 2019; Mayes et al., 2018; McMillan et al., 2023)。本章の結果も、これらの知見を裏付けるものである。

3 つの筋体積指標で有意差が認められた FDB と LUMB は、第 2 列 (第 2 趾から舟状骨) の関節下に位置し、第 2～5 趾の中足趾節関節屈曲に作用するという共通点を持つ (Neumann, 2017)。特に、足関節底屈角度が大きいバレエ特有のつま先立ちでは、足部の長軸をなす第 2 列の関節を正確に整列させることが、姿勢の制御において重要である (Howse J & McCormack M, 2009; Kadel et al., 2005)。このような機能解剖学的な特徴は、非ダンサーと比較してダンサーの FDB と LUMB が大きいことを説明すると考える。以下では、FDB と LUMB の起始・停止や筋サイズの違いに基づく特有の役割についてさらに考察する。

第 1 層に位置する FDB は、踵骨結節と足底筋膜から起始し、第 2～5 趾の中節骨に停止する (Neumann, 2017)。筋電図研究では、FDB は足底筋膜の張力を調節することで足部アーチ構造の維持に寄与することが示唆されている (Farris et al., 2020)。さらに、FDB のサイズは横アーチの高さと正の相関関係があり (Nakayama et al., 2018)、最近のエビデンスでは、横アーチが縦アーチの剛性の 40%以上を担うことも示唆されている (Venkadesan et al., 2020)。特に

トゥシューズを履いて踊るダンサーには、第2中足骨基部（すなわち横アーチの要）に疲労骨折が発生しやすく、これはトゥシューズでのポワントにおいてその部分に過度な負荷がかかるためと考えられている (Kadel et al., 2005; Katakura et al., 2023)。これらの点から、FDBが非ダンサーに比べてダンサーで大きい理由を説明でき、この筋がバレエトレーニングにおいて足部への負荷を支持する重要な役割を果たしていることが示唆される。

第2層に位置するLUMBはサイズが小さく、大きな関節トルクを発生させることはできない (Neumann, 2017)。しかし、LUMBは第2～5趾の趾節間関節を伸展させる特有の作用を持ち、起始部である長趾屈筋腱と停止部である第2～5趾の伸筋組織の間で屈筋と伸筋の活動を調整する役割を担う (Hur et al., 2015; Neumann, 2017)。これまでの研究では、LUMBの萎縮が第2～5趾の変形（すなわち、第2～5趾の近位および遠位趾節間関節の屈曲）と関連することが示されている (Hur et al., 2015; Kimura et al., 2020)。ダンサーは、ポワントの際にトゥシューズのソールと足部を一体化させるために、趾節間関節を屈曲させないことが求められる (Howse J & McCormack M, 2009)。この動作は、LUMBの特有の作用に類似した足趾の動きの微細な調整が必要であり、ダンサーは日常的にトレーニングしている (Outevsky & Berg, 2022; Salzano et al., 2019)。これらの点から、今回の結果は、トゥシューズを履いて行うバレエの動作において、LUMBが実際に機能していることを示す可能性がある。

興味深いことに、ABDMとADDH-OHの%WHOLEの値は、非ダンサーよりダンサーの方が低かった。この結果については、以下の2つの可能性が考えられる。1つ目は、ABDMとADDH-OHは、主に足趾の外転と内転にそれぞれ作用すること、2つ目は、これらの筋は第2列以外の関節に作用することである（ABDMは第5中足趾節関節関節外転、ADDH-OHは第1中足趾節関節関節内転） (Neumann, 2017)。したがって、バレエトレーニングにおいては、ABDMとADDH-OHにはあまり負荷がかからず、これらの筋は、バレエの動作における第2列への負荷に対抗する役割を果たしていないと考えられる。ただし、今回の結果は、ダンサ

一において、これらの筋が萎縮していることを示すものではないだろう。なぜなら、絶対値の比較では、これらの筋のサイズは両群で同程度であり（図 4-2A）、相対値では、ダンサーの方が非ダンサーよりも有意に高値を示したからである（図 4-2B）。まとめると、これらの結果は、個々の足底内在筋がそれぞれの役割に応じて機能することを示唆している。

#### 4-5 小括

第4章では、ダンサーの足底内在筋の総体積が大きく、なかでも、特にFDBとLUMBが、非ダンサーに比べて大きいことが明らかになった。本章の結果から、ダンサーの足底内在筋は全体として大きく、特に、第2列の関節下に位置するFDBとLUMBが、バレエ特有の動作での長期的な反復負荷による適応を示す可能性が示唆された。

## 第5章 総括論議

本博士論文の目的は、バレエダンサーにおける足底内在筋のドゥミポワントでの活動とサイズの特徴について明らかにすることであった。本章では、各研究課題における結果の概要をまとめた後に、足底内在筋のドゥミポワントでの活動とサイズの特徴について総括的に議論する。また、第4章で検証したダンサーの足底内在筋のサイズの特徴を踏まえて、これらのサイズが片脚ドゥミポワントでの姿勢動揺に関係しているかを検討した後、本博士論文の研究成果の現場への応用、限界と今後の課題についても議論する。

### 5-1 各研究課題における結果の概要

#### 【第2章：研究課題1】両脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係

14名のダンサーと13名の非ダンサーを対象に、両脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺との関係を検討した。その結果、ダンサーは、ドゥミポワントでの姿勢動揺が少なく、足底内在筋の活動レベルとその時間的変動が、非ダンサーと比べて約半分であることが確認された。また、ダンサーは、足関節底屈角度が20°から60°に増加しても、姿勢動揺は増加しない一方で、足底内在筋の活動は増加することが示された。さらに、相関分析では、ダンサーの60°課題においてのみ、筋活動の時間的変動が姿勢動揺と強い正の相関を示した。

#### 【第3章：研究課題2】両脚および片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係

11名のダンサーを対象に、両脚ドゥミポワントと片脚ドゥミポワントでの足底内在筋の活動と姿勢動揺との関係を検討した。その結果、ダンサーの足底内在筋の活動レベルと姿勢動揺は、両脚ドゥミポワントよりも片脚ドゥミポワントで有意に増加することが確認された。

また、相関分析では、足底内在筋の活動（レベルと時間的変動）は、片脚ドゥミポワントでの姿勢動揺と正の相関を示した。

#### **【第4章：研究課題3】足底内在筋のサイズの特徴**

15名のダンサーと15名の非ダンサーを対象に、MRI法を用いて、足底内在筋を構成する全10筋の体積を算出し、そのサイズの違いを3つの指標（絶対値、体重割、%WHOLE）を用いて検討した。その結果、ダンサーの足底内在筋の総体積が非ダンサーより大きく、特に、FDBとLUMBが顕著に大きいことが明らかになった。

## 5-2 足底内在筋のドゥミポワントでの活動と姿勢動揺の関係

第2章と第3章では、足底内在筋のドゥミポワントでの活動（レベルと時間的変動）と姿勢動揺の関係を検証した。第2章の検証では、ダンサーは非ダンサーと比べ、両脚ドゥミポワントでの姿勢動揺が少なく、足底内在筋の活動は低く安定していることが明らかになった。足底内在筋は、モーメントアームが短く、先行研究では直接的に姿勢動揺を抑えるのではなく、足部アーチ構造を安定化させる役割があることが示唆されており (Ferrari et al., 2020; McKeon et al., 2015)、この結果は、先行研究の知見を支持するものである。さらに、両脚ドゥミポワントにおいて、非ダンサーとは異なり、ダンサーは、足関節底屈角度が増加しても両脚ドゥミポワントでの姿勢動揺は増加しない一方で、足底内在筋の活動レベルが増加した。このことは、足関節底屈角度が増加すると足部への負荷が増加することを示唆している。また、ダンサーにおいては、足関節底屈角度が大きい課題で、足底内在筋の活動の時間的変動が姿勢動揺と関係することが示された。これらのことから、足底内在筋の安定的な活動は、足部への負荷が大きいドゥミポワントでの足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性が示唆された。

第3章では、ダンサーにおける片脚ドゥミポワントにおける足底内在筋の活動と姿勢動揺の関係を比較検討した。その結果、ダンサーの足底内在筋の活動レベルと姿勢動揺は、両脚と比較して片脚ドゥミポワントで増加し、足部への負荷と姿勢要求の両方が増加することが示されました。また、相関分析では、これらの変数間に正の相関が認められた。さらに、足底内在筋の活動の時間的変動も、片脚ドゥミポワントでのみ姿勢動揺と強い正の相関が示した。これらの結果は、第2章の結果を補完し、ダンサーにおける足底内在筋の安定的な活動は、特に、片脚ドゥミポワント、つまり足部への負荷が大きく、姿勢要求が高いドゥミポワントでの足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性が示唆された。

### 5-3 足底内在筋のサイズの特徴

第4章の検証により、ダンサーは、非ダンサーと比べて、足底内在筋の総体積が大きいことが明らかになった。バレエ特有のつま先立ちにより、ダンサーの足部には大きな負荷がかかることが報告されている (Kadel et al., 2005; Pearson & Whitaker, 2012; Walter et al., 2011)。特有の動作による反復負荷により、その動作に関与する筋が肥大することは広く知られており (Emery et al., 2019; Mayes et al., 2018; McMillan et al., 2023)、本章の結果は、これらの知見を含め、第2章および第3章の結果を裏付けるものとなった。

さらに、ダンサーにおいては、足底内在筋全10筋のうち、特にFDBとLUMBが顕著に大きいことが示された。これらの筋は、足部の長軸である第2列の関節下に位置し、第2趾～5趾の中足趾節関節屈曲に作用するという共通点がある (Neumann, 2017)。さらに、FDBは、足部の縦アーチの剛性の40%以上を担う横アーチの形成において重要な役割を果たし (Nakayama et al., 2018; Neumann, 2017; Venkadesan et al., 2020)、LUMBは、トウシューズでポイントする際の足趾の微細な動きに関与するという特有の作用を持つ (Hur et al., 2015; Neumann, 2017; Outevsky & Berg, 2022; Salzano et al., 2019)。これらの筋の役割と特性は、バレエトレーニングによる長期的な反復負荷に対するダンサーのFDBとLUMBが肥大適応を説明する可能性がある。

第4章では、絶対値、相対値、そして%WHOLEといった3つの指標に基づいて足底内在筋のサイズを検証した。その結果、絶対値や%WHOLEの指標では、中足趾節関節内転・外転に作用するか、第2列以外（母趾や小趾）の関節に作用する筋のサイズは、非ダンサーとの有意差は認められなかった。これらの結果は、個々の足底内在筋がそれぞれの役割に応じて機能することを示唆している。

本博士論文で得られた知見の概要を図5-1に示す。

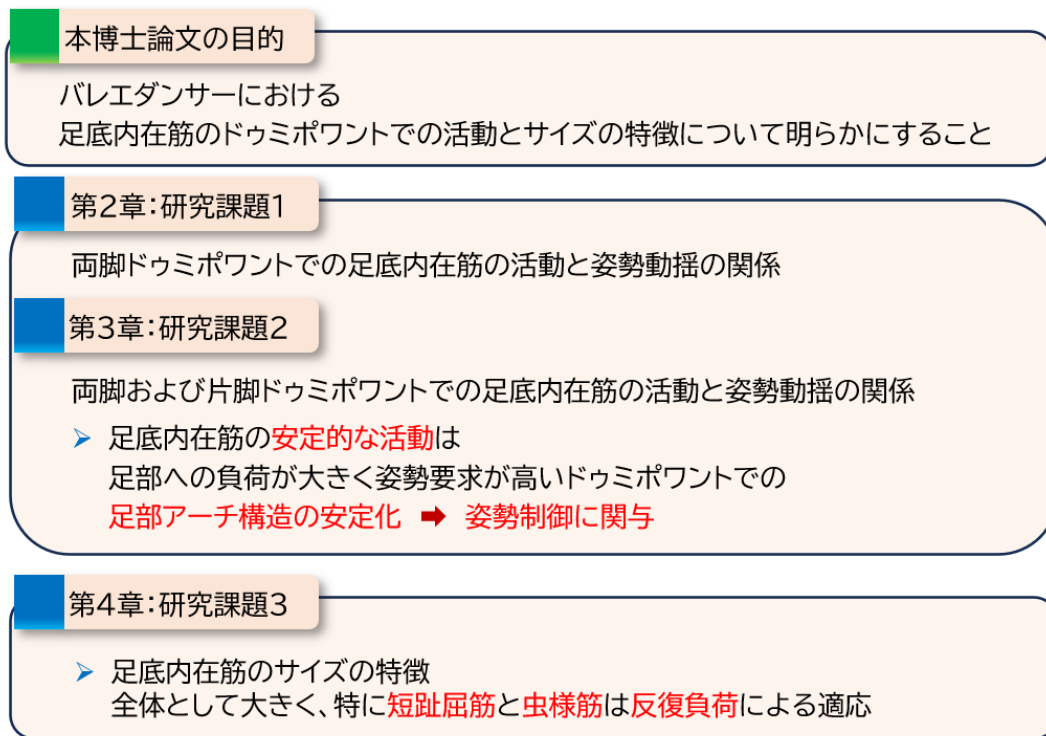


図 5-1. 本博士論文の知見の概要

#### 5-4 足底内在筋のサイズと姿勢動揺の関係

第4章で検証したダンサーの足底内在筋のサイズの特徴を踏まえて、これらのサイズがドゥミポワントでの姿勢動揺に関係しているかを検討するために、第3章の11名のダンサーを対象に、足底内在筋のサイズと片脚ドゥミポワントでの姿勢動揺の関係を検証した。

表 5-1 に示した第2章の片脚ドゥミポワントでの足圧中心のデータと第4章の足底内在筋の体積（相対値）のデータとの相関分析の結果によると、FDB と左右方向の動揺（ $r = -0.619$ 、 $p = 0.042$ ）、LUMB と動揺の面積（ $r = -0.669$ 、 $p = 0.024$ ）との間に負の相関が確認された。ダンサーの FDB と LUMB は、非ダンサーと比べて特に大きいことが第4章の検証により明らかになっている。筋体積は、関節トルクならびに筋力と強い相関を示すことは広く知られており（Balshaw et al., 2021; Fukunaga et al., 2001）、また、足底内在筋全10筋のうちこれら2つの筋は、姿勢制御時に必要な固有受容感覚情報を提供する筋紡錘の密度が特に高いことが報告されている（Peck et al., 1984）。したがって、これらの結果は、バレエトレーニングでの足部への反復負荷を支える役割に加え、ダンサーの片脚ドゥミポワントにおいて、

FDB と LUMB の発生させる力と感覚フィードバックが姿勢動揺を抑えることに関与する可能性を示唆している。

一方、QP と前後方向 ( $r = 0.635$ ,  $p = 0.036$ ) ならびに左右方向の動揺 ( $r = 0.665$ ,  $p = 0.026$ ) との間には正の相関が確認された。第 2 層に位置する QP は、踵骨足底面の内側・外側突起に起始し、FDB の 1 つ深層を並走して、長趾屈筋腱の外側縁に停止することから、長趾屈筋の作用を補助する (Neumann, 2017)。長趾屈筋は、第 2～5 趾の末節骨底に停止し、第 2～5 の足趾の屈曲に作用し、長趾屈筋腱を起始とする LUMB 特有の第 2～5 趾の趾節間関節伸展の作用と相反する (Neumann, 2017)。今回の結果は、QP の萎縮が姿勢動揺を少なくすることを示すものではないことには留意する必要がある。ただし、足部外在筋である長趾屈筋を含め、これら 3 つの足底内在筋 (FDB、LUMB、QP) の起始・停止ならびに作用には密接な関係があることは注目に値するだろう。

ジュニア期の女性ダンサー (年齢  $13.4 \pm 2.0$  歳; 身長  $155.2 \pm 7.0$  cm; 体重  $40.1 \pm 6.7$  kg; 平均値  $\pm$  標準偏差) の足趾外転筋力を評価した研究では、小趾外転筋力の強さが、片脚ドゥミポワントでの姿勢制御能力に関与することを報告している (福山 ほか, 2021)。小趾外転に作用する筋は、機能解剖学的には ABDM のみであり、足趾屈筋力の評価とは異なって、足部外在筋の関与は受けない。ただし、本章の結果からは、ABDM のサイズと姿勢動揺との関係は認められず、第 2 章の結果からもダンサーの ABDM のサイズは特に大きいことは示されなかった。この研究間の相違は、対象者の年齢やドゥミポワントでの足関節底屈角度の規定の有無などが原因である可能性があり、トレーニング介入や対象者の選定条件を変更するなどのさらなる検証が必要であろう。

表 5-1. 片脚での足圧中心の変数と個々の足底内在筋の体積（相対値）との相関係数

|                        | ABH    | FDB     | ABDM   | QP     | LUMB    | FHB    | ADDH-OH | ADDH-TH | FDM    | INT    | WHOLE  |
|------------------------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 足圧中心（片脚）               | r      | r       | r      | r      | r       | r      | r       | r       | r      | r      | r      |
| 前後方向の動揺（cm）            | -0.215 | -0.335  | 0.413  | 0.635* | -0.199  | -0.021 | 0.347   | -0.140  | -0.014 | 0.086  | 0.157  |
| 左右方向の動揺（cm）            | 0.256  | -0.619* | 0.181  | 0.665* | -0.303  | 0.055  | 0.269   | -0.240  | 0.334  | -0.162 | 0.249  |
| 動揺速度（cm/s）             | -0.362 | -0.233  | 0.134  | 0.519  | -0.406  | -0.162 | 0.058   | 0.267   | 0.558  | -0.407 | -0.158 |
| 動揺面積（cm <sup>2</sup> ） | 0.274  | -0.525  | -0.046 | 0.475  | -0.669* | 0.169  | -0.096  | -0.213  | 0.215  | -0.318 | -0.109 |

\*p < 0.05；母趾外転筋（abductor hallucis: ABH）；短趾屈筋（flexor digitorum brevis: FDB）；小趾外転筋（abductor digiti minimi: ABDM）；足底方形筋（quadratus plantae: QP）；虫様筋（lumbricals: LUMB）；短母趾屈筋（flexor hallucis brevis: FHB）；母趾内転筋斜頭（adductor hallucis oblique head: ADDH-OH）；母趾内転筋横頭（adductor hallucis transverse head: ADDH-TH）；短小趾屈筋（flexor digiti minimi: FDM）；底側・背側骨間筋（plantar and dorsal interossei: INT）；足底内在筋の総体積（WHOLE）。

## 5-5 現場への応用

本博士論文の研究成果は、足底内在筋の機能に関する理解を深め、姿勢制御能力の向上に寄与する可能性がある。バレエの指導現場では、トゥシューズ着用時の足部への大きな負荷や、足部および足関節の傷害の多さを背景に、足底内在筋の機能強化エクササイズが推奨されてきた (Howse J & McCormack M, 2009; Weiss et al., 2009)。しかし、これらのエクササイズは、主に非ダンサーを対象とした研究に基づいており、ダンサーを対象とした足底内在筋の研究は限られていた。

本博士論文の第2章および第3章では、ダンサーにおけるドゥミポワントでの姿勢動揺の少なさは、足部アーチ構造内の足底内在筋の安定的な活動と関連することが示された。また、足底内在筋の活動レベルは、足関節底屈角度の増加や両脚から片脚ドゥミポワントへの移行に伴い増加したものの、その増加は主に足部への負荷の増加と関連することが示唆された。この結果は、足底内在筋のエクササイズを活用する際、筋力発揮の大きさよりも、その安定性に重点を置くべきであることを示唆している。第2章の図2-2および第3章の図3-3で示したダンサーの高密度表面筋電図振幅のカラーマップは、足部アーチ構造内の足底内在筋が安定的に活動している様子を視覚的に示すものであり、両脚と片脚ドゥミポワントとの足部への負荷の違いを示す貴重な資料となる。

さらに、第4章の結果および第5章で示した相関分析から、ダンサーでは、足底内在筋全10筋のうち、特にFDBとLUMBが大きく、これらの筋が、片脚のドゥミポワントでの姿勢制御において重要な役割を果たす可能性が示唆された。FDBとLUMBは、共通して足部の長軸である第2列の関節下に位置し、第2～5趾の中足趾節関節屈曲に作用する (Neumann, 2017)。また、FDBは足部のアーチ構造のうち特に横アーチの形成、LUMBは趾節間関節伸展といった足趾の微細な動きに関与する (Neumann, 2017)。これらの筋の作用に着目した新

たなエクササイズを開発し、足部外在筋など姿勢制御に関与するその他の筋の作用にも考慮したトレーニングプログラムを導入し、トレーニング介入などの追加的な研究が行われることにより、現場での実践的な応用が進むことが期待される。

## 5-6 限界と今後の課題

本博士論文には、以下の限界がある。1 つ目に、非ダンサーは足底内在筋による力の生成に不慣れである可能性があり、MVC を適切に実行できず、結果として、第 2 章でのつま先課題中の足底内在筋の活動レベルを過大評価している可能性がある。第 2 章の知見のいくつかは MVC による正規化とは無関係であるが、足底内在筋の MVC の正規化方法 (F. P.

Kendall et al., 2005; Ridge et al., 2022) の妥当性については、さらなる研究が必要である。2 つ目に、第 2 章の課題の順序はランダムではなく、20°、40°、60° (ダンサーのみ) の順で実施した。このことから、特に非ダンサーにおいては疲労の影響が出た可能性があるが、すべての対象者が 20°課題を完了することを優先したため、この順序を意図的に選択した。したがって、潜在的な順序効果や疲労の影響を考慮したうえで本章の結果を解釈する必要がある。

3 つ目に、第 3 章で足関節底屈 60°に規定した片脚ドゥミポワント課題を遂行できたダンサーのサンプルサイズは比較的小さく ( $n = 11$ )、統計的な信頼性が低い可能性がある。今後は、より多くのダンサーを対象にした研究が必要である。4 つ目に、第 2 章と第 3 章で規定した足関節底屈角度は、多くの対象者が遂行可能な角度として選択した。これらの結果が、他の角度の課題にも適用できるかは不明であり、今後は、特により大きな足関節底屈角度で実験を行う必要があるだろう。5 つ目に、MRI 法での検証では技術的に困難であるが、足底内在筋のサイズは負荷の有無により異なることが示されており (Baellow et al., 2022; Jaffri et al., 2019)、ドゥミポワントのような機能的肢位での足底内在筋のサイズと機能との関係を検証することは今後の課題として重要である。また、本博士論文は横断的な研究であり、ダンサーのトレーニング頻度や期間、負荷などを厳密に統制していない。また、対象者の足関節底屈可動域や関節弛緩性、足部のアーチ高などの足部の形態的特徴や、外反母趾や扁平足などの足部の変形も各章の結果に影響を与える可能性がある。今後は、これらの要因を統制または

考慮した研究が必要である。さらに本博士論文で採用した方法論を拡張することで、傷害発生メカニズムの解明できる可能性がある。特に高密度表面筋電図法を用いて、足部傷害を持つ対象者の姿勢制御中の足底内在筋の活動の部位ごとの活動を検証するで、傷害予防やリハビリテーションにおける新たな視点を提供できる可能性がある。

## 第6章 結論

本博士論文は、バレエダンサーの足底内在筋のトゥミポワントでの活動とサイズの特徴を、高密度表面筋電図法と MRI 法を用いて検討した。その結果、ダンサーの足底内在筋の安定的な活動は、特に足部への負荷が大きく、姿勢要求が高いトゥミポワントでの足部アーチ構造の安定化を介して姿勢制御に関与する可能性が示唆された。また、ダンサーの足底内在筋は全体として大きく、特に FDB と LUMB は、バレエ特有の動作での長期的な反復負荷による適応を示す可能性が示唆された。

## 参考文献

- Allen, N., Nevill, A. M., Brooks, J. H. M., Koutedakis, Y., & Wyon, M. A. (2013). The Effect of a Comprehensive Injury Audit Program on Injury Incidence in Ballet. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 23(5), 373–378.  
<https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3182887f32>
- Aquino, J., Amasay, T., Shapiro, S., Kuo, Y.-T., & Ambegaonkar, J. P. (2021). Lower extremity biomechanics and muscle activity differ between “new” and “dead” pointe shoes in professional ballet dancers. *Sports Biomechanics*, 20(4), 469–480.  
<https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1561931>
- Baellow, A., Jaffri, A. H., Hertel, J., Higgins, M. J., Rangelcroft, C. M., Hryvniak, D. J., & Saliba, S. A. (2022). Intrinsic foot muscle size and quality in a single leg weight bearing position across foot posture types in individuals with Patellofemoral Pain compared to healthy. *Physical Therapy in Sport*, 54, 58–64.  
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.01.002>
- Balshaw, T. G., Maden-Wilkinson, T. M., Massey, G. J., & Folland, J. P. (2021). The Human Muscle Size and Strength Relationship: Effects of Architecture, Muscle Force, and Measurement Location. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 53(10), 2140–2151.  
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002691>
- Bickle, C., Deighan, M., & Theis, N. (2018). The effect of pointe shoe deterioration on foot and ankle kinematics and kinetics in professional ballet dancers. *Human Movement Science*, 60, 72–77.  
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.05.011>
- Blazeovich, A. J., Gill, N. D., & Zhou, S. (2006). Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed *in vivo*. *Journal of Anatomy*, 209(3), 289–310.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2006.00619.x>
- Clifton, D. R., Harrison, B. C., Hertel, J., & Hart, J. M. (2013). Relationship Between Functional Assessments and Exercise-Related Changes During Static Balance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(4), 966–972.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318260b723>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences (Second Edition)* (Lawrence Erlbaum Associates, Ed.). Routledge.
- Costa, M. S. da S., Ferreira, A. de S., & Felício, L. R. (2013). Equilíbrio estático e dinâmico em bailarinos: revisão da literatura. *Fisioterapia e Pesquisa*, 20(3), 299–305.

<https://doi.org/10.1590/S1809-29502013000300016>

Cruz-Jentoft, A. J., Baeyens, J. P., Bauer, J. M., Boirie, Y., Cederholm, T., Landi, F., Martin, F. C., Michel, J.-P., Rolland, Y., Schneider, S. M., Topinková, E., Vandewoude, M., Zamboni, M., & European Working Group on Sarcopenia in Older People. (2010). Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People. *Age and Ageing*, 39(4), 412–423.

<https://doi.org/10.1093/ageing/afq034>

de Mello, M. C., de Sá Ferreira, A., & Ramiro Felicio, L. (2017). Postural Control During Different Unipodal Positions in Professional Ballet Dancers. *Journal of Dance Medicine & Science : Official Publication of the International Association for Dance Medicine & Science*, 21(4), 151–155.

<https://doi.org/10.12678/1089-313X.21.4.151>

Emery, S., Cook, J., Ferris, A. R., Smith, P., & Mayes, S. (2019). Hip flexor muscle size in ballet dancers compared to athletes, and relationship to hip pain. *Physical Therapy in Sport*, 38, 146–151.

<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2019.05.003>

F. P. Kendall, K. McCreary, & P. G. Provance. (2005). *Muscle: Testing and Function with Posture and Pain* (5th edition).

Farris, D. J., Birch, J., & Kelly, L. (2020). Foot stiffening during the push-off phase of human walking is linked to active muscle contraction, and not the windlass mechanism. *Journal of the Royal Society Interface*, 17(168).

<https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0208>

Felicetti, G., Thoumie, P., Do, M., & Schieppati, M. (2021). Cutaneous and muscular afferents from the foot and sensory fusion processing: Physiology and pathology in neuropathies. *Journal of the Peripheral Nervous System*, 26(1), 17–34.

<https://doi.org/10.1111/jns.12429>

Ferrari, E., Cooper, G., Reeves, N. D., & Hodson-Tole, E. F. (2018). Surface electromyography can quantify temporal and spatial patterns of activation of intrinsic human foot muscles. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 39, 149–155.

<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2018.02.009>

Ferrari, E., Cooper, G., Reeves, N. D., & Hodson-Tole, E. F. (2020). Intrinsic foot muscles act to stabilise the foot when greater fluctuations in centre of pressure movement result from increased postural balance challenge. *Gait and Posture*, 79, 229–233.

<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.011>

- Fiolkowski, P., Brunt, D., Bishop, M., Woo, R., & Horodyski, M. (2003). Intrinsic pedal musculature support of the medial longitudinal arch: An electromyography study. *Journal of Foot and Ankle Surgery*, 42(6), 327–333.  
<https://doi.org/10.1053/j.jfas.2003.10.003>
- Franettovich Smith, M. M., Elliott, J. M., Al-Najjar, A., Weber, K. A., Hoggarth, M. A., Vicenzino, B., Hodges, P. W., & Collins, N. J. (2021). New insights into intrinsic foot muscle morphology and composition using ultra-high-field (7-Tesla) magnetic resonance imaging. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 22(1).  
<https://doi.org/10.1186/s12891-020-03926-7>
- Franettovich Smith, M. M., Mendis, M. D., Weber, K. A., Elliott, J. M., Ho, R., Wilkes, M. J., & Collins, N. J. (2022). Improving the measurement of intrinsic foot muscle morphology and composition from high-field (7T) magnetic resonance imaging. *Journal of Biomechanics*, 140.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111164>
- Fukunaga, T., Miyatani, M., Tachi, M., Kouzaki, M., Kawakami, Y., & Kanehisa, H. (2001). Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans. *Acta Physiologica Scandinavica*, 172(4), 249–255.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.2001.00867.x>
- Fukunaga, T., Roy, R. R., Shellock, F. G., Hodgson, J. A., Day, M. K., Lee, P. L., Kwong-Fu, H., & Edgerton, V. R. (1992). Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *Journal of Orthopaedic Research : Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 10(6), 928–934.  
<https://doi.org/10.1002/jor.1100100623>
- Futrell, E. E., Roberts, D., & Toole, E. (2022). The effects of intrinsic foot muscle strengthening on functional mobility in older adults: A systematic review. *Journal of the American Geriatrics Society*, 70(2), 531–540.  
<https://doi.org/10.1111/jgs.17541>
- Gamboa, J. M., Robert, L. A., & Fergus, A. (2008). Injury patterns in elite preprofessional ballet dancers and the utility of screening programs to identify risk characteristics. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 38(3), 126–136.  
<https://doi.org/10.2519/jospt.2008.2390>
- Gooding, T. M., Feger, M. A., Hart, J. M., & Hertel, J. (2016). Intrinsic foot muscle activation during specific exercises: A T2 time magnetic resonance imaging study. *Journal of Athletic Training*, 51(8),

644–650.

<https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.10.07>

Hicks, J. H. (1954). The mechanics of the foot. II. The plantar aponeurosis and the arch. *Journal of Anatomy*, 88(1), 25–30.

Hirono, T., Ikezoe, T., Taniguchi, M., Yamagata, M., Miyakoshi, K., Umehara, J., & Ichihashi, N. (2020). Relationship between ankle plantar flexor force steadiness and postural stability on stable and unstable platforms. *European Journal of Applied Physiology*, 120(5), 1075–1082.

<https://doi.org/10.1007/s00421-020-04346-0>

Ho, J., Tumkaya, T., Aryal, S., Choi, H., & Claridge-Chang, A. (2019). Moving beyond P values: data analysis with estimation graphics. *Nature Methods*, 16(7), 565–566.

<https://doi.org/10.1038/s41592-019-0470-3>

Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing*, 35(suppl\_2), ii7–ii11.

<https://doi.org/10.1093/ageing/afl077>

Howse J, & McCormack M. (2009). *Dance Technique and Injury Prevention (4th ed)*. Bloomsbury Publishing.

Hur, M. S., Kim, J. H., Gil, Y. C., Kim, H. J., & Lee, K. S. (2015). New insights into the origin of the lumbrical muscles of the foot: tendinous slip of the flexor hallucis longus muscle. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 37(10), 1161–1167.

<https://doi.org/10.1007/s00276-015-1488-6>

Ishihara, H., Maeda, N., Komiya, M., Tashiro, T., & Urabe, Y. (2022). Investigation of the Relationship Between the Morphology of the Toe Flexor Muscles in Ballet Dancers and the Postural Stability During Standing on Demi-Pointe: A Cross-Sectional Study. *Journal of Dance Medicine & Science : Official Publication of the International Association for Dance Medicine & Science*, 26(4), 205–212.

<https://doi.org/10.12678/1089-313X.121522a>

Jaffri, A. H., Hertel, J., & Saliba, S. (2019). Ultrasound examination of intrinsic foot muscles in patients with 1st metatarsophalangeal joint arthrodesis. *The Foot*, 41, 79–84.

<https://doi.org/10.1016/j.foot.2019.08.009>

Jaffri, A. H., Koldenhoven, R., Saliba, S., & Hertel, J. (2023). Evidence for Intrinsic Foot Muscle Training in Improving Foot Function: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Athletic Training*, 58(11–12), 941–951.

- <https://doi.org/10.4085/1062-6050-0162.22>
- Janura, M., Procházková, M., Svoboda, Z., Bizovská, L., Jandová, S., & Konečný, P. (2019). Standing balance of professional ballet dancers and non-dancers under different conditions. *PLoS ONE*, *14*(10).
- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224145>
- Kadel, N., Boenisch, M., Teitz, C., & Trepman, E. (2005). Stability of Lisfranc joints in ballet pointe position. *Foot & Ankle International*, *26*(5), 394–400.
- <https://doi.org/10.1177/107110070502600510>
- Katakura, M., Kedgley, A. E., Shaw, J. W., Mattiussi, A. M., Kelly, S., Clark, R., Allen, N., & Calder, J. D. F. (2023). Epidemiological Characteristics of Foot and Ankle Injuries in 2 Professional Ballet Companies: A 3-Season Cohort Study of 588 Medical Attention Injuries and 255 Time-Loss Injuries. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, *11*(1).
- <https://doi.org/10.1177/23259671221134131>
- Kelly, L. A., Cresswell, A. G., Racinais, S., Whiteley, R., & Lichtwark, G. (2014). Intrinsic foot muscles have the capacity to control deformation of the longitudinal arch. *Journal of the Royal Society Interface*, *11*(93).
- <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.1188>
- Kelly, L. A., Farris, D. J., Cresswell, A. G., & Lichtwark, G. A. (2019). Intrinsic foot muscles contribute to elastic energy storage and return in the human foot. *J Appl Physiol*, *126*, 231–238.
- <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00736.2018.-The>
- Kelly, L. A., Kuitunen, S., Racinais, S., & Cresswell, A. G. (2012). Recruitment of the plantar intrinsic foot muscles with increasing postural demand. *Clinical Biomechanics*, *27*(1), 46–51.
- <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2011.07.013>
- Kelly, L. A., Lichtwark, G., & Cresswell, A. G. (2015). Active regulation of longitudinal arch compression and recoil during walking and running. *Journal of the Royal Society Interface*, *12*(102).
- <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.1076>
- Kim, M.-H., Kwon, O.-Y., Kim, S.-H., & Jung, D.-Y. (2013). Comparison of muscle activities of abductor hallucis and adductor hallucis between the short foot and toe-spread-out exercises in subjects with mild hallux valgus. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, *26*(2), 163–168.
- <https://doi.org/10.3233/BMR-2012-00363>
- Kimura, T., Thorhauer, E. D., Kindig, M. W., Shofer, J. B., Sangeorzan, B. J., & Ledoux, W. R. (2020). Neuropathy, claw toes, intrinsic muscle volume, and plantar aponeurosis thickness in diabetic feet.

- BMC Musculoskeletal Disorders*, 21(1), 485.  
<https://doi.org/10.1186/s12891-020-03503-y>
- Knellwolf, T. P., Burton, A. R., Hammam, E., & Macefield, V. G. (2019). Firing properties of muscle spindles supplying the intrinsic foot muscles of humans in unloaded and freestanding conditions. *Journal of Neurophysiology*, 121(1), 74–84.  
<https://doi.org/10.1152/jn.00539.2018>
- Krityakiarana, W., & Jongkamonwiwat, N. (2016). Comparison of Balance Performance Between Thai Classical Dancers and Non-Dancers. *Journal of Dance Medicine & Science : Official Publication of the International Association for Dance Medicine & Science*, 20(2), 72–78.  
<https://doi.org/10.12678/1089-313X.20.2.72>
- Kura, H., Luo, Z. P., Kitaoka, H. B., & An, K. N. (1997). Quantitative analysis of the intrinsic muscles of the foot. *The Anatomical Record*, 249(1), 143–151.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0185\(199709\)249:1<143::AID-AR17>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0185(199709)249:1<143::AID-AR17>3.0.CO;2-P)
- Kurihara, T., Rowley, M., Reischl, S., Baker, L., & Kulig, K. (2020). Effect of a task's postural demands on medial longitudinal arch deformation and activation of foot intrinsic and extrinsic musculature. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 22(4), 1–15.  
<https://doi.org/10.37190/ABB-01623-2020-02>
- Kurihara, T., Yamauchi, J., Otsuka, M., Tottori, N., Hashimoto, T., & Isaka, T. (2014). Maximum toe flexor muscle strength and quantitative analysis of human plantar intrinsic and extrinsic muscles by a magnetic resonance imaging technique. *Journal of Foot and Ankle Research*, 7(1).  
<https://doi.org/10.1186/1757-1146-7-26>
- Kurz, E., Faude, O., Roth, R., Zahner, L., & Donath, L. (2018). Ankle muscle activity modulation during single-leg stance differs between children, young adults and seniors. *European Journal of Applied Physiology*, 118(2), 239–247.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-017-3764-0>
- Kusagawa, Y., Kurihara, T., Maeo, S., Sugiyama, T., Kanehisa, H., & Isaka, T. (2022a). Associations between the size of individual plantar intrinsic and extrinsic foot muscles and toe flexor strength. *Journal of Foot and Ankle Research*, 15(1).  
<https://doi.org/10.1186/s13047-022-00532-9>
- Kusagawa, Y., Kurihara, T., Maeo, S., Sugiyama, T., Kanehisa, H., & Isaka, T. (2022b). Associations of muscle volume of individual human plantar intrinsic foot muscles with morphological profiles of the foot. *Journal of Anatomy*, 241(6), 1336–1343.

- <https://doi.org/10.1111/joa.13753>
- Ledoux, W. R., Hirsch, B. E., Church, T., & Caunin, M. (2001). Pennation angles of the intrinsic muscles of the foot \$. In *Journal of Biomechanics* (Vol. 34).  
<http://www.elsevier.nl:80/inca/publica->
- Lemos, T., Imbiriba, L. A., Vargas, C. D., & Vieira, T. M. (2015). Modulation of tibialis anterior muscle activity changes with upright stance width. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25(1), 168–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.07.009>
- Lin, C.-F., Lee, I.-J., Liao, J.-H., Wu, H.-W., & Su, F.-C. (2011). Comparison of Postural Stability Between Injured and Uninjured Ballet Dancers. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(6), 1324–1331.  
<https://doi.org/10.1177/0363546510393943>
- Mayes, S., Ferris, A. R., Smith, P., & Cook, J. (2018). Obturator externus was larger, while obturator internus size was similar in ballet dancers compared to nondancing athletes. *Physical Therapy in Sport*, 33, 1–6.  
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2018.06.001>
- McKeon, P. O., Hertel, J., Bramble, D., & Davis, I. (2015). The foot core system: a new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function. *British Journal of Sports Medicine*, 49(5), 290.  
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092690>
- McMillan, R. M., Mayes, S., Cook, J., Semciw, A. I., Plass, L. M., & Pizzari, T. (2023). Gluteal Muscle Size and Quality in Professional Ballet Dancers Compared to Non-Dancing Athletes. *Journal of Dance Medicine & Science*, 1089313X2311771.  
<https://doi.org/10.1177/1089313x231177161>
- Mickle, K. J., Nester, C. J., Crofts, G., & Steele, J. R. (2013). Reliability of ultrasound to measure morphology of the toe flexor muscles. *Journal of Foot and Ankle Research*, 6(1).  
<https://doi.org/10.1186/1757-1146-6-12>
- Moghadam, M., Ashayeri, H., Salavati, M., Sarafzadeh, J., Taghipoor, K. D., Saeedi, A., & Salehi, R. (2011). Reliability of center of pressure measures of postural stability in healthy older adults: Effects of postural task difficulty and cognitive load. *Gait and Posture*, 33(4), 651–655.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.016>
- Moulodi, N., Azadinia, F., Ebrahimi-Takamjani, I., Atlasi, R., Jalali, M., & Kamali, M. (2020). The functional capacity and morphological characteristics of the intrinsic foot muscles in subjects with

- Hallux Valgus deformity: A systematic review. *The Foot*, 45, 101706.  
<https://doi.org/10.1016/j.foot.2020.101706>
- Mulligan, E. P., & Cook, P. G. (2013). Effect of plantar intrinsic muscle training on medial longitudinal arch morphology and dynamic function. *Manual Therapy*, 18(5), 425–430.  
<https://doi.org/10.1016/j.math.2013.02.007>
- Nakayama, Y., Tashiro, Y., Suzuki, Y., Kajiwar, Y., Zeidan, H., Kawagoe, M., Yokota, Y., Sonoda, T., Shimoura, K., Tatsumi, M., Nakai, K., Nishida, Y., Bito, T., Yoshimi, S., & Aoyama, T. (2018). Relationship between transverse arch height and foot muscles evaluated by ultrasound imaging device. *Journal of Physical Therapy Science*, 30(4), 630–635.  
<https://doi.org/10.1589/jpts.30.630>
- Nashner, L. M., & McCollum, G. (1985). The organization of human postural movements: A formal basis and experimental synthesis. *Behavioral and Brain Sciences*, 8(1), 135–150.  
<https://doi.org/10.1017/S0140525X00020008>
- Neumann, D. A. (2017). *Kinesiology of the musculoskeletal system: foundations of rehabilitation*. 3rd ed. .
- Okamura, K., Fukuda, K., Oki, S., Ono, T., Tanaka, S., & Kanai, S. (2020). Effects of plantar intrinsic foot muscle strengthening exercise on static and dynamic foot kinematics: A pilot randomized controlled single-blind trial in individuals with pes planus. *Gait & Posture*, 75, 40–45.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.030>
- Osborne, J. W. A., Menz, H. B., Whittaker, G. A., & Landorf, K. B. (2019). Muscle Function and Muscle Size Differences in People With and Without Plantar Heel Pain: A Systematic Review. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 49(12), 925–933.  
<https://doi.org/10.2519/jospt.2019.8588>
- Outevsky, D., & Berg, T. (2022). Dancer Education Beyond The Conservatory: The Health Education Benefits of Pre-season Screens for a Professional Ballet Company. *Research in Dance Education*, 23(1), 37–59.  
<https://doi.org/10.1080/14647893.2021.1993174>
- Palmieri, R. M., Ingersoll, C. D., Stone, M. B., & Krause, B. A. (2002). Center-of-Pressure Parameters Used in the Assessment of Postural Control. *Journal of Sport Rehabilitation*, 11(1), 51–66.  
<https://doi.org/10.1123/jsr.11.1.51>
- Pearson, S. J., & Whitaker, A. F. (2012). Footwear in Classical Ballet. *Journal of Dance Medicine & Science*, 16(2), 51–56.  
<https://doi.org/10.1177/1089313X1201600201>

- Peck, D., Buxton, D. F., & Nitz, A. (1984). A comparison of spindle concentrations in large and small muscles acting in parallel combinations. *Journal of Morphology*, 180(3), 243–252.  
<https://doi.org/10.1002/jmor.1051800307>
- Protopapas, K., & Perry, S. D. (2020). The effect of a 12-week custom foot orthotic intervention on muscle size and muscle activity of the intrinsic foot muscle of young adults during gait termination. *Clinical Biomechanics*, 78.  
<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2020.105063>
- Quinlan, S., Fong Yan, A., Sinclair, P., & Hunt, A. (2020). The evidence for improving balance by strengthening the toe flexor muscles: A systematic review. *Gait & Posture*, 81, 56–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.07.006>
- Ramkumar, P. N., Farber, J., Arnouk, J., Varner, K. E., & McCulloch, P. C. (2016). Injuries in a Professional Ballet Dance Company: A 10-year Retrospective Study. *Journal of Dance Medicine & Science*, 20(1), 30–37.  
<https://doi.org/10.12678/1089-313X.20.1.30>
- Rangel, J. G., Divino Nilo Dos Santos, W., Viana, R. B., Silva, M. S., Vieira, C. A., & Campos, M. H. (2020). Studies of Classical Ballet Dancers' Equilibrium at Different Levels of Development and Versus Non-Dancers: A Systematic Review. *Journal of Dance Medicine & Science: Official Publication of the International Association for Dance Medicine & Science*, 24(1), 33–43.  
<https://doi.org/10.12678/1089-313X.24.1.33>
- Razeghi, M., & Batt, M. E. (2002). Foot type classification: a critical review of current methods. *Gait & Posture*, 15(3), 282–291.  
[https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00151-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00151-5)
- Riddick, R., Farris, D. J., & Kelly, L. A. (2019). The foot is more than a spring: Human foot muscles perform work to adapt to the energetic requirements of locomotion. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(150).  
<https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0680>
- Ridge, S. T., Rowley, K. M., Kurihara, T., McClung, M., Tang, J., Reischl, S., & Kulig, K. (2022). Contributions of Intrinsic and Extrinsic Foot Muscles during Functional Standing Postures. *BioMed Research International*, 2022.  
<https://doi.org/10.1155/2022/7708077>
- Rowley, K. M., Jarvis, D. N., Kurihara, T., Chang, Y.-J., Fietzer, A. L., & Kulig, K. (2015). Toe Flexor Strength, Flexibility and Function and Flexor Hallucis Longus Tendon Morphology in Dancers and

- Non-Dancers. *Medical Problems of Performing Artists*, 30(3), 152–156.  
<https://doi.org/10.21091/mppa.2015.3029>
- Rowley, K. M., Shih, H. J. S., Traina, K., Winder, B., Mikkelsen, P., & Kulig, K. (2021). Effects of a “toes-off” modified heel raise on muscle coordination in non-dancers, dancers, and dancers with flexor hallucis longus tendinopathy. *Clinical Biomechanics*, 83.  
<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2021.105287>
- Russell, J. A., Kruse, D. W., Koutedakis, Y., Mcewan, I. M., & Wyon, M. A. (2010). Pathoanatomy of Posterior Ankle Impingement in Ballet Dancers. In *Clinical Anatomy* (Vol. 23, Issue 6, pp. 613–621).  
<https://doi.org/10.1002/ca.20991>
- Russell, J. A., Shave, R. M., Kruse, D. W., Koutedakis, Y., & Wyon, M. A. (2011). Ankle and foot contributions to extreme plantar- and dorsiflexion in female ballet dancers. *Foot and Ankle International*, 32(2), 183–188.  
<https://doi.org/10.3113/FAI.2011.0183>
- Saito, S., Obata, H., Kuno-Mizumura, M., & Nakazawa, K. (2018). On the skilled plantar flexor motor action and unique electromyographic activity of ballet dancers. *Experimental Brain Research*, 236(2), 355–364.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-017-5131-0>
- Salzano, A., Camuso, F., Sepe, M., Sellami, M., Ardigò, L. P., & Padulo, J. (2019). Acute effect of toe cap choice on toe deviation angle and perceived pain in female professional ballet dancers. *BioMed Research International*, 2019.  
<https://doi.org/10.1155/2019/9515079>
- Shah, S. (2009). Determining a young dancer’s readiness for dancing on pointe. *Current Sports Medicine Reports*, 8(6), 295–299.  
<https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e3181c1ddfl>
- Smith, P. J., Gerrie, B. J., Varner, K. E., McCulloch, P. C., Lintner, D. M., & Harris, J. D. (2015). Incidence and Prevalence of Musculoskeletal Injury in Ballet. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 3(7), 232596711559262.  
<https://doi.org/10.1177/2325967115592621>
- Tanabe, H., Fujii, K., & Kouzaki, M. (2014). Inter- and intra-lower limb joint coordination of non-expert classical ballet dancers during tiptoe standing. *Human Movement Science*, 34, 41–56.  
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.12.003>

- Tanabe, H., Fujii, K., & Kouzaki, M. (2017). Joint coordination and muscle activities of ballet dancers during tiptoe standing. *Motor Control*, 21(1), 72–89.  
<https://doi.org/10.1123/mc.2015-0002>
- Tosovic, D., Ghebremedhin, E., Glen, C., Gorelick, M., & Mark Brown, J. (2012). The architecture and contraction time of intrinsic foot muscles. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(6), 930–938.  
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2012.05.002>
- Tracy, B. L., & Enoka, R. M. (2002). Older adults are less steady during submaximal isometric contractions with the knee extensor muscles. *J Appl Physiol*, 92, 1004–1012.  
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol>
- Tsubaki, Y., Maeda, N., Suzuki, Y., Morikawa, M., Kuno-Mizumura, M., & Urabe, Y. (2023). Differences in Center of Pressure Displacement and Lower Limb Muscle Activity During Relevé Descending Phase Comparing Flat Shoes and Pointe Shoes. *Medical Problems of Performing Artists*, 38(2), 104–109.  
<https://doi.org/10.21091/mppa.2023.2013>
- Venkadesan, M., Yawar, A., Eng, C. M., Dias, M. A., Singh, D. K., Tommasini, S. M., Haims, A. H., Bandi, M. M., & Mandre, S. (2020). Stiffness of the human foot and evolution of the transverse arch. *Nature*, 579(7797), 97–100.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2053-y>
- Vieira, T. M., & Botter, A. (2021). The Accurate Assessment of Muscle Excitation Requires the Detection of Multiple Surface Electromyograms. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 49(1), 23–34.  
<https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000240>
- Viseux, F. J. F. (2020). The sensory role of the sole of the foot: Review and update on clinical perspectives. *Neurophysiologie Clinique*, 50(1), 55–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.12.003>
- Walter, H. L., Docherty, C. L., & Schrader, J. (2011). Ground reaction forces in ballet dancers landing in flat shoes versus pointe shoes. *Journal of Dance Medicine & Science : Official Publication of the International Association for Dance Medicine & Science*, 15(2), 61–64.
- Watanabe, K., Kitaoka, H. B., Berglund, L. J., Zhao, K. D., Kaufman, K. R., & An, K. N. (2012). The role of ankle ligaments and articular geometry in stabilizing the ankle. *Clinical Biomechanics*, 27(2), 189–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2011.08.015>

- Watanabe, K., Vieira, T. M., Gallina, A., Kouzaki, M., & Moritani, T. (2021a). Novel Insights into Biarticular Muscle Actions Gained from High-Density Electromyogram. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 49(3), 179–187.  
<https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000254>
- Watanabe, K., Vieira, T. M., Gallina, A., Kouzaki, M., & Moritani, T. (2021b). Novel Insights into Biarticular Muscle Actions Gained from High-Density Electromyogram. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 49(3), 179–187.  
<https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000254>
- Weiss, D. S., Rist, R. A., & Grossman, G. (2009). When can I start pointe work? Guidelines for initiating pointe training. *Journal of Dance Medicine & Science : Official Publication of the International Association for Dance Medicine & Science*, 13(3), 90–92.
- Welte, L., Kelly, L. A., Lichtwark, G. A., & Rainbow, M. J. (2018). Influence of the windlass mechanism on arch-spring mechanics during dynamic foot arch deformation. *Journal of The Royal Society Interface*, 15(145), 20180270.  
<https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0270>
- Wilson, & Deckert. (2009). A Screening Program for Dancers Administered by Dancers. *Journal Dance Medicine & Science*, 13(3), 67–72.
- Yao, W., Fuglevand, A. J., & Enoka, R. M. (2000). *Motor-Unit Synchronization Increases EMG Amplitude and Decreases Force Steadiness of Simulated Contractions*.
- Yaserifar, M., & Souza Oliveira, A. (2022). Surface EMG variability while running on grass, concrete and treadmill. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 62.  
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2021.102624>
- カレンクリッピンガー. (2013). 図説 ダンスの解剖・運動学大辞典 (森下はるみ, Ed.). 西村書店.
- 富永明子. (2021). トウシューズのすべて. 誠文堂新光社.
- 昭和音楽大学バレエ研究所. (2022). 日本のバレエ教育に関する全国調査.
- 水村 (久埜) 真由美. (2020). ダンサーのヘルスケア・トレーナー・医療者のための基礎知識— (NPO法人芸術家の薬箱, 水村 (久埜) 真由美, & 中村格子, Eds.). 医道の日本社.
- 福山弘, 栗原俊之, 福谷充輝, 佐藤隆彦, & 伊坂忠夫. (2021). ジュニア期の女性クラシックバレエダンサーの トゥミ・ポアントにおける姿勢制御能力と足趾筋力との関係. *バイオメカニクス研究*, 25, 1–7.  
[https://doi.org/10.32226/jjbse.2021\\_001](https://doi.org/10.32226/jjbse.2021_001)



## 謝辞

本博士学位論文の執筆にあたり、指導教員の伊坂忠夫教授には、博士課程前期課程からの7年にわたり多大なるご指導とご鞭撻を賜りましたことを、心より御礼を申し上げます。社会人として20年近いブランクを経ての進学に際し、快くご承諾いただいたこと、常にバイタリティ溢れる励ましの言葉を頂戴したことで、充実した学生生活を送ることができました。

本博士論文の審査をお引き受けいただきました、お茶の水大学の水村（久埜）真由美教授、立命館大学スポーツ健康科学部の真田樹義教授、篠原靖司教授には、貴重なご意見と的確なご助言を賜りましたこと、深く感謝申し上げます。

副論文執筆にあたり、共同研究者として多大なるお力添えをいただきました、鹿屋体育大学学長の金久博昭教授、中京大学スポーツ科学部の渡邊航平教授、立命館大学スポーツ健康科学部の前大純朗助教、立命館大学総合科学技術研究機構の杉山敬助教、草川祐生専門研究員に、厚く御礼申し上げます。共同研究や投稿論文の執筆を通じて、研究者としての心構えや視点を学ぶ機会をいただきました。また、実験にご協力いただいた研究対象者の皆様にも厚く感謝申し上げます。

研究遂行および学生生活の中で、多くのご意見やご助言を賜りました伊坂研究室の皆様、ならびに奥村悦子氏に心より感謝申し上げます。さらに、仕事と学生生活を支えてくれた家族、そしてこれまで関わってくださったすべての方々に、深い感謝の意を表します。

本博士論文は、多くの方々のご支援により完成することができました。この成果を、今後の研究活動や現場への還元に活かしてまいります。

2025年3月 福山 弘