

等尺性トルク課題における半腱様筋・大腿二頭筋の筋特異的な神経調節：Preferred

Direction 解析と生体力学モデル比較

1. 発表のポイント

- ・二関節筋であるハムストリングス(半腱様筋(ST)/大腿二頭筋長頭(BF))について、多方向の等尺性トルク発揮課題中の筋活動を解析し、筋活動の方向特性(Preferred Direction: PD)が筋ごとに異なるかを検証しました。

- ・結果として、ST と BF の PD は有意に異なり(平均差 約 41.9° , $p < 0.001$)、同じハムストリングス内でも空間的チューニング(方向選択性)が筋特異性であることが示されました。

- ・実際に計測した PD を、(A)モーメントアーム+筋の生理学的断面積を含む静的最適化モデル、(B)モーメントアームのみの機械的モデルの予測と比較したところ、特に ST は静的最適化モデルとの一致度が高く、機械的モデルより有意に良好でした。

- ・BF では、静的最適化モデルと機械的モデルの一致度に有意差がなく、ST と BF で神経調整の寄与が異なる可能性が示唆されました。

2. 発表概要

埼玉県立大学 研究開発センターの久保田圭祐特任助教(第一著者)、同学副学長の金村尚彦教授(責任著者)らの研究チームは、健常若年男性 21 名を対象に、股・膝関節 90° 位での座位にて、矢状面内 16 方向の等尺性トルク発揮課題を実施し、表面筋電図(EMG)から筋活動の Preferred Direction(PD)を測定しました。さらに、PD を生体力学モデルで予測し、実測した PD とモデル予測の一致を比較することで、方向特性に対する機械的要因および神経調整の関与を検討しました。

本研究成果は、2025 年 12 月 18 日に Journal of Neurophysiology 誌に掲載されました。

3. 研究内容

<研究背景>

ハムストリングス(ST、BF など)は股関節伸展と膝関節屈曲に関与する二関節筋であり、歩行・走行・ジャンプなど多様な運動に重要です。一方で、同じハムストリング内でも、解剖学的なモーメントアームや機能的役割が異なることが報告されており、筋活動の制御が一様ではない可能性があります。従来、EMG 振幅の大小で筋の役割差を議論する研究は多いですが、多関節トルク要求に対して筋活動がどの方向に最大化するか、という空間的特性(PD)から、筋ごとの制御戦略を比較する枠組みは限定的でした。そこで本研究では、PD を用いて ST と BF の方向特性を定量化し、さらにモデル予測との一致を検証しました。

<研究方法>

- ・対象者：健常若年男性 21 名
- ・課題：座位で股・膝関節を 90° 屈曲位に固定，右下肢で矢状面 16 方向の等尺性トルク発揮(図 1A)
- ・計測：力覚センサーと表面 EMG(大殿筋、大腿直筋、内側広筋、外側広筋、ST、BF)
- ・関節トルク推定：2 リンクモデル+逆動力学(endpoint force \rightarrow knee/hip torque \rightarrow 変換)(図 1B)

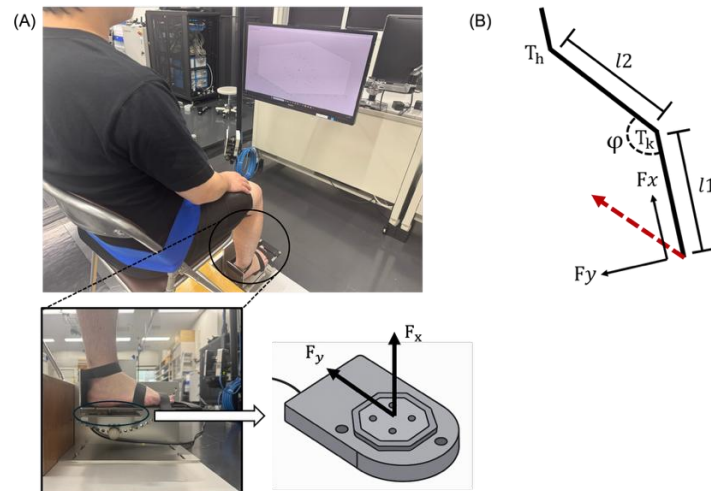


図 1. 計測セットアップと関節トルク推定の逆動力学モデル

- ・PD 算出：EMG を股・膝関節トルクで重回帰分析を行い、回帰係数ベクトル角度から PD を推定
- ・モデル予測：
 - 静的最適化(モーメントアーム+筋の生理学的断面積、目的関数：筋活動二乗和の最小)
 - 機械的モデル(モーメントアーム長のみ)
- ・一致度評価：cosine similarity(実測した PD と予測 PD のベクトルの一致)

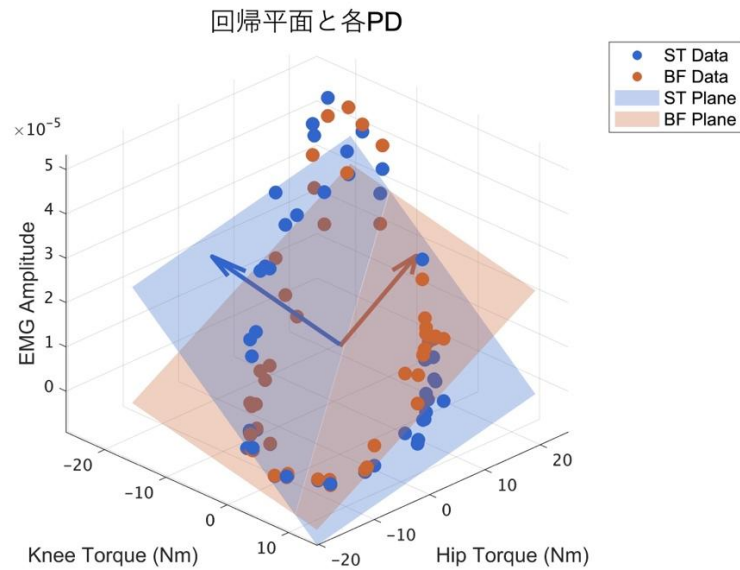


図 2. PD の算出方法

〈結果〉

1. ST と BF の PD は有意に異なる
 - ・ ST : $160.9^{\circ} \pm 17.9^{\circ}$
 - ・ BF : $116.3^{\circ} \pm 42.1^{\circ}$
 - ・ 差 : 平均 41.9° 、 $p < 0.001$
2. ST は静的最適化モデルと強く一致し、機械的モデルより有意に一致
 - ・ ST : 最適化 0.96 ± 0.08 vs 機械的モデル 0.82 ± 0.15 ($p = 0.0007$)
3. BF はモデル間で一致度差が有意でない (個人差が大きい)
 - ・ BF : 最適化 0.70 ± 0.35 vs 機械的モデル 0.76 ± 0.20 ($p = 0.3096$)

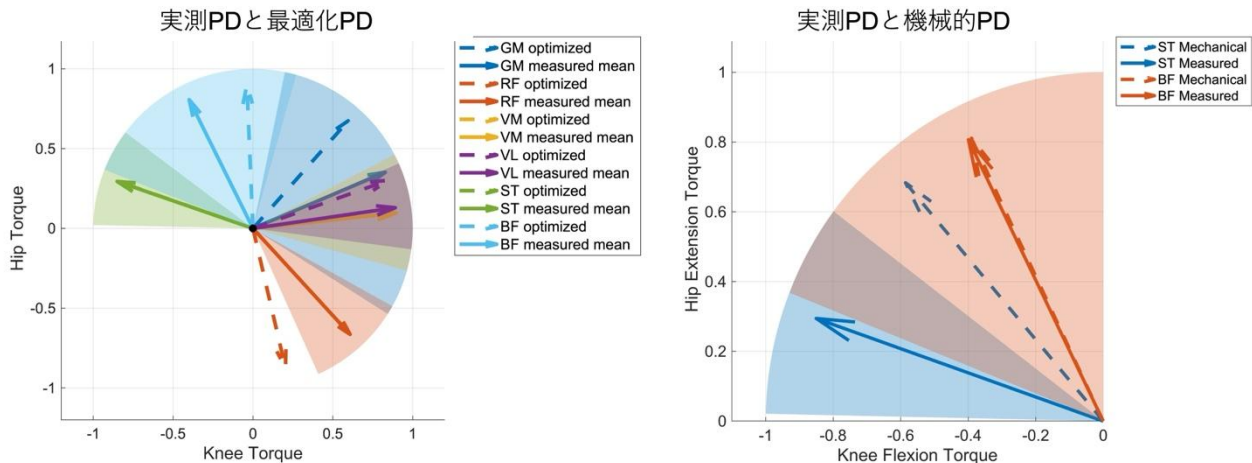


図 3

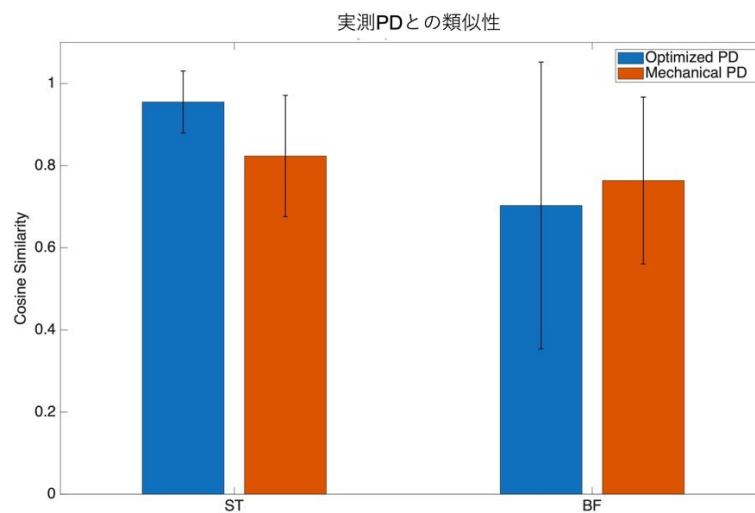


図 4

〈考察（本研究が示唆すること）〉

- ・ ST は機械的有利性（モーメントアーム）だけでは説明しきれず、形態（PCSA）を含む最適化的な配分、あるいは筋特異的な神経調節が方向特性に反映されている可能性が示されました。
- ・ BF は群平均との差としては機械予測に近い一方、個人差が大きく、同じ課題でも制御戦略が個体で分かれる可能性が示唆されます。
- ・ これらは「ハムストリングスを一括りに扱う」のではなく、ST と BF を分けて評価・介入する重要性（トレーニング／リハビリでの狙い分け）につながる可能性があります。

4. 用語解説

※1 Preferred Direction (PD)

多方向のトルク（または力）発揮課題において、筋活動（EMG）が最も高まる方向を表す指標。EMG

と関節トルクの回帰係数ベクトルの角度として推定される。

※2 静的最適化 (Static optimization)

所望の関節トルクを満たす筋活動の組み合わせを、ある目的関数（例：筋活動二乗和最小）で解く手法。モーメントアームや PCSA 等の生体力学パラメータを用いる。

※3 Cosine similarity

2つのベクトルの向きの一致度（-1～1）。1に近いほど方向が一致する（PDの一致評価に用いる）。

※4 PCSA (Physiological Cross-Sectional Area)

筋の生理学的横断面積。一般に最大筋力発揮能力と関連する形態指標。

5. 論文情報

雑誌名：Journal of Neurophysiology

題名：Muscle-Specific Neural Modulation in Biarticular Semitendinosus and Biceps Femoris during Isometric Torque Generation

著者：Keisuke Kubota, Taku Miyazawa, Keisuke Hirata, Naohiko Kanemura

DOI：<https://doi.org/10.1152/jn.00366.2025>

6. 問い合わせ先

埼玉県立大学 保健医療福祉学研究科/保健医療福祉学部 理学療法学科

副学長・教授 金村尚彦

E-mail：kanemura-naohiko@spu.ac.jp