

2021 年度 修士学位論文

題目：等尺性トレーニング実施時の関節角度が
ハムストリングスの筋量および筋力に及ぼす影響
—最大筋力発揮の至適角度と筋伸張位となる角度での比較—

立命館大学大学院
スポーツ健康科学研究科 博士課程前期課程
スポーツ健康科学専攻 2 回生

学生証番号： 6232200009-5

氏 名： 桜井 洸

2021 年度修士学位論文

等尺性トレーニング実施時の関節角度が

ハムストリングスの

筋量および筋力に及ぼす影響

—最大筋力発揮の至適角度と筋伸張位となる角度での比較—

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 博士課程前期課程 2 回生

6232200009-5

桜井 洸

等尺性トレーニング実施時の関節角度が ハムストリングスの 筋量および筋力に及ぼす影響

—最大筋力発揮の至適角度と筋伸張位となる角度での比較—

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科 博士課程前期課程 2 回生

桜井 洸

要旨

キーワード：レジスタンストレーニング, 等尺性収縮, 筋長, 筋肥大, 関節角度特異性

【目的】

本研究では、膝関節屈曲筋群を対象に、関節トルク（筋力）が最大となる関節角度（Optimal 条件）または筋が伸張位となる関節角度（Long 条件）で行う等尺性膝関節屈曲トレーニングが、ハムストリングスの筋量および筋力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

【方法】

トレーニング習慣のない健常成人男子 31 名を対象とし、等尺性膝関節屈曲トレーニングを実施するトレーニング群（ $n = 20$ ）と、通常の生活を行うコントロール群（ $n = 11$ ）に振り分けた。トレーニングは、座位にて実施した。トレーニング実施条件として、片脚を膝関節屈曲筋力が最大となる至適関節角度でトレーニングをする Optimal 条件（膝関節角度 $39 \pm 18^\circ$, 112 ± 28 Nm）、逆脚を Long 条件（膝屈曲 0° , 100 ± 18 Nm）とし、各条件において最大筋力の 70% に相当する等尺性膝関節屈曲筋力発揮を 5 秒間（+5 秒間休息）の 10 回反復を 5 セット行った。トレーニングの実施頻度および期間は週 2 回 12 週間とし、介入前後で 7 つの膝関節角度（0, 20, 30, 40, 50, 65, 85°, 完全伸展位 = 0° ）で

の等尺性膝関節屈曲筋力およびハムストリングスの筋体積を測定した。

【結果】

コントロール群は、全ての測定項目で有意な変化を示さなかった。トレーニング群では、ハムストリングスの筋体積が両条件ともに有意に増加し、その程度は Long 条件が Optimal 条件よりも有意に大きかった (+15.4% vs +8.2%, $P < 0.001$)。筋力は、両条件ともにトレーニングを行った関節角度付近で大きく改善する関節角度特異性が観察されたが、全関節角度における筋力の曲線下面積の変化の程度は、Long 条件と Optimal 条件で有意な差はなかった (+31% vs +43%, $P = 0.405$)。

【考察】

筋体積の増加が Optimal 条件より Long 条件が大きかった背景には、筋伸張位での運動では筋内がより低酸素状態となり、代謝的負担が高まったことにより筋肥大が促された可能性がある。筋力に関しては、筋肥大の影響に加え、主に神経系の改善（力発揮中に動員される運動単位の数・発火頻度の増加）により筋力の増加および関節角度特異性が生じたと考えられる。

【結論】

本研究により、ハムストリングスを対象とした等尺性膝関節屈曲トレーニングでは、筋量の変化は Long 条件が Optimal 条件よりも大きいことが明らかとなった。一方、筋力の改善には関節角度特異性がみられるが、関節可動域全体を通した筋力の改善の程度は、Long 条件と Optimal 条件とで同程度であることが明らかとなった。

The effects of isometric training performed at the optimal joint angle for maximum torque production versus at long muscle length on muscle size and strength of the hamstrings

Graduate School of Sports and Health Science, Ritsumeikan University

Hikaru Sakurai

Abstract

Key words: resistance training, isometric contraction, muscle length,
muscle hypertrophy, joint-angle specificity

【Purpose】

The purpose of this study was to investigate the effects of isometric knee flexion training performed at the optimal joint angle for maximum torque production versus at long muscle length on muscle size and strength of the hamstrings.

【Methods】

Thirty-one healthy adults were divided into a training group (n = 20) and control group (n = 11). The training group performed knee flexion training in a seated position with one leg at the optimum knee joint angle (OPT: $39 \pm 18^\circ$, 112 ± 28 Nm) and the other leg at long muscle length (LONG: 0° , 100 ± 18 Nm) at 70% of maximal voluntary torque of the corresponding joint angle for 10 reps/set (5-s contraction and 5-s relaxation), 5 sets/session, 2 sessions/week for 12 weeks. Isometric knee flexion torque

(at 0, 20, 30, 40, 50, 65, 85°) and muscle volume of hamstrings were assessed before and after the intervention.

【Results】

No significant changes were found in all variables in the control group. In the training group, muscle volume significantly increased in both legs with a greater degree in the LONG than OPT condition (15.4% vs 8.2%, $P < 0.001$). Changes in muscle strength demonstrated joint-angle specificity in both training conditions (i.e., pronounced increases around the training angle vs. others), but changes in total muscle strength (area under the curve) across the entire knee joint angles were not significantly different between the LONG and OPT conditions (+31% vs +43%, $P = 0.405$).

【Discussion】

The greater muscle hypertrophy for the LONG than OPT condition may be related to that isometric training at long muscle length results in greater muscle oxygen consumption (i.e., metabolic stress), which is thought to promote muscle hypertrophy. Regarding the changes in muscle strength, increased muscle size and particularly the adaptations in the nervous system (e.g., increased motor unit recruitment and/or firing frequency during force production) may have contributed to increasing muscle strength and demonstrated joint-angle specificity.

【Conclusion】

Hamstrings muscle size can be more effectively increased by isometric knee flexion training performed at the LONG than OPT condition. Both training conditions increase muscle strength in a joint-angle specific manner, but are similarly effective in increasing total muscle strength over the wide range of motion.

目次

第1章 緒言	1
1-1. 序	1
1-2. 研究小史	2
1-2-1. ハムストリングスの機能解剖学的特徴	2
1-2-2. 等尺性トレーニング	3
1-2-3. 異なる関節角度で行う等尺性トレーニングが筋量に及ぼす影響	4
1-2-4. 異なる関節角度で行う等尺性トレーニングが筋力に及ぼす影響	6
1-3. 目的および仮説	6
第2章 方法	8
2-1. 対象者	8
2-2. 実験概要	9
2-2-1. トレーニング条件設定	9
2-2-2. トレーニング内容	11
2-2-3. 測定項目	12
A. 等尺性膝関節屈曲筋力	12
B. ハムストリングスの筋体積	13
2-2-4. 統計処理	14
第3章 結果	16
3-1. トレーニング実施負荷の変化	16
3-2. ハムストリングスの筋体積	17
3-3. 等尺性膝関節屈曲筋力	19

第4章 考察	22
4-1. 本研究の主な結果	22
4-2. Long 条件でのトレーニングが筋量増加に有効な理由	22
4-2-1. 筋肥大の筋間差	23
4-3. 等尺性トレーニングが筋力に及ぼす影響とその関節角度特異性	24
第5章 結論	25
引用・参考文献	26
謝辞	31

第1章 緒言

1-1. 序

ハムストリングスは、疾走運動の成立およびそのパフォーマンスに重要な役割を果たす一方、肉離れが生じやすい (Askling et al. 2014)。そのようなスポーツ傷害後のリハビリテーションの現場では、関節角度を固定して力発揮をする等尺性トレーニングが広く用いられている。また、近年では、等尺性トレーニング時の関節角度に着目し、筋が伸張位となる関節角度 (Long 条件) と、筋が短縮位となる関節角度 (Short 条件) の2条件で等尺性トレーニングを実施し、その効果を比較した研究が数を増している (Kubo et al. 2006; Alegre et al. 2014; Noorkoiv et al. 2014; Akagi et al. 2020)。

最近のレビュー論文 (Oranchuk et al. 2018) によると、等尺性トレーニング後の筋肥大は、Long 条件が Short 条件よりも大きいということが指摘されている。また、筋力の変化は、トレーニング実施角度付近で最も改善するものの、Long 条件で行う方がより幅広い関節角度で筋力の改善が認められたと報告する先行研究も存在する (Kubo et al. 2006; Akagi et al. 2020)。

一方、発揮可能な関節トルク (以下、筋力) は、関節角度によって変化し、単一の関節角度で等尺性トレーニングが実施される場合は、一般的に発揮筋力 (関節トルク) が最大となる至適関節角度 (Optimal 条件) 付近の関節角度が採用されることが多い (Jones et al. 1987; Garfinkel et al. 1992; Balshaw et al. 2016; Waleed S et al. 2017; Lanza et al. 2019)。しかし、上述の先行研究で採用されたトレーニング条件は、Long と Short の2条件間に限られ、Optimal 条件でのトレーニングの効果と比較した例はない。また、大腿部の筋群に対する等尺性トレーニングの効果については、これまでのところ主に膝関節伸展筋群 (大腿四頭筋) を対象に検討されてきており (Jones et al. 1987; Garfinkel et al. 1992; Kubo et al. 2001, 2006; Alegre et al. 2014; McMahon et al. 2014; Noorkoiv et al. 2014; Balshaw et al. 2016; Waleed S et al. 2017; Lanza et al. 2019)、膝関節屈曲筋群 (ハムストリングス) の筋量および筋力の両変数に対する等尺性トレーニングの効果の実態は不明な点が多い。

そこで本研究は、Long および Optimal 条件となる膝関節角度で行う等尺性膝関節屈曲トレーニングが、ハムストリングスの筋量および筋力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

用語の定義

- ・ Optimal：関節トルク（筋力）が最大となる至適関節角度。
- ・ Long：至適関節角度よりも筋が伸張された状態。本研究では、膝関節完全伸展位（解剖学的基本姿勢 = 0°）とする。
- ・ Short：至適関節角度よりも筋が短縮された状態。

略語の解説

- ・ MVC (Maximum Voluntary Contraction)：最大随意収縮
- ・ MRI (Magnetic resonance imaging)：磁気共鳴画像
- ・ AUC (Area Under the Curve)：曲線下面積

1-2. 研究小史

等尺性トレーニングに関する先行研究は数多く存在する。ここでは、まず本研究の対象筋であるハムストリングスの機能解剖学的特徴に関する知見を要約する。その後、主にスポーツ傷害後のリハビリテーションとして用いられる等尺性トレーニングの効果について、運動時の関節角度に着目した先行研究の知見を要約し、本論文の目的および仮説を述べる。

1-2-1. ハムストリングスの機能解剖学的特徴

ハムストリングスは、大腿二頭筋短頭、大腿二頭筋長頭、半腱様筋、および半膜様筋の4筋によって構成され、膝関節屈曲の主働筋であると同時に、股関節伸展にも作用する (Kulig et al. 1984)。ハムストリングスは、疾走運動の成立およびそのパフォーマンスに重要な役割を果たすと考えられており、実際、陸上短距離走ではハムストリングスが大きな選手ほど疾走タイムが速い (Miller et al. 2021)。また、サッカー選手を対象に、同筋に対するレジスタンストレーニングの効果を検証した先行研究 (Ishoi et al. 2018) によると、膝関節屈曲筋力に加え、疾走タイムの改善が報告されている。このように、ハムストリングスは疾走動作に大きく貢献する筋であるが、肉離れが生じやすいことも分かっている (Askling et al. 2014)。例えば、日本陸上競技連盟が2017年度の全日本インカレおよび全日本大学駅伝出場者男女909名を対象に行ったスポーツ外傷・障害調査では、男女ともに短距離および跳躍種目において肉離れの受傷割合が高く、受傷部位の大半がハムストリ

ングスと最も多い (図 1)。ハムストリングスの肉離れの主要原因としては、1) 拮抗筋である大腿四頭筋との筋力差、および 2) 接地時 (膝関節伸展位) の股関節屈曲筋群に対する強い伸張性の負荷が考察されている (「臨床スポーツ医学」(2017) , 奥脇透, 文光堂, 34, 744 頁)。このような背景から、ハムストリングスの筋力、特に筋伸張位 (膝関節伸展位) での筋力を高めることは、同筋の肉離れ発生リスクを低下させると考えられている (Askling et al. 2014)。

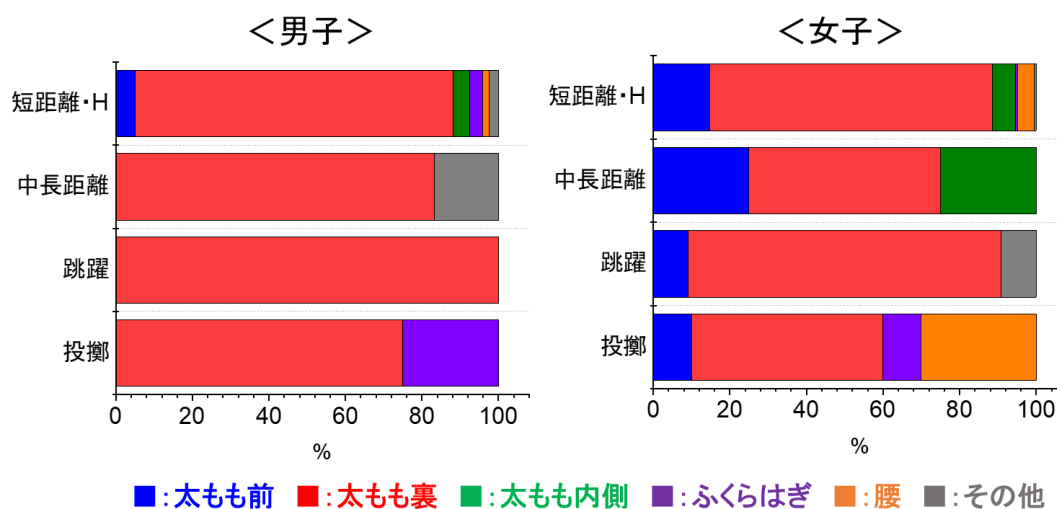


図 1：陸上競技全日本インカレ・全日本大学駅伝出場者の肉離れ受傷部位
(陸上競技ジュニア選手のスポーツ外傷・障害調査 2018 大学生アスリート調査,
日本陸上競技連盟 より作図)

1-2-2. 等尺性トレーニング

筋の収縮様式は、筋が伸ばされながら力を発揮する伸張性収縮、筋が縮みながら力を発揮する短縮性収縮、および筋が長さを変えずに力を発揮する等尺性収縮の 3 つに分類される (「第 3 版 NSCA 決定版 ストレングストレーニング&コンディショニング」(2010) , Thomas R. Baechle & Roger W. Earle 編, 金久博昭監修, ブックハウス HD, 85-86 頁)。そのうち、等尺性収縮は、スポーツ傷害を負ったアスリートに対し、リハビリテーションの現場で広く用いられている (Oranchuk et al. 2018)。その理由として、等尺性運動は、関節角度を固定して行うことに加え、筋力の発揮水準を実施者本人がコントロールしやすいことから、筋や関節に対して急激な負荷が加わらず、安全性の高いトレーニング様式とされている (Oranchuk et al. 2018)。

ヒト生体において、等尺性収縮によって発揮可能な筋力の水準は、関節角度によって変化する（図2）。これは、主にサルコメアにおけるアクチンフィラメントとミオシンフィラメントの重なりを反映している（Gordon et al. 1966）。近年では、トレーニング時の関節角度に着目し、筋が伸張位となる関節角度（Long 条件）と筋が短縮位となる関節角度（Short 条件）の2条件で等尺性トレーニングを実施し、その効果を比較した研究が数を増している。（Kubo et al. 2006; Alegre et al. 2014; Noorkoiv et al. 2014; Akagi et al. 2020）。

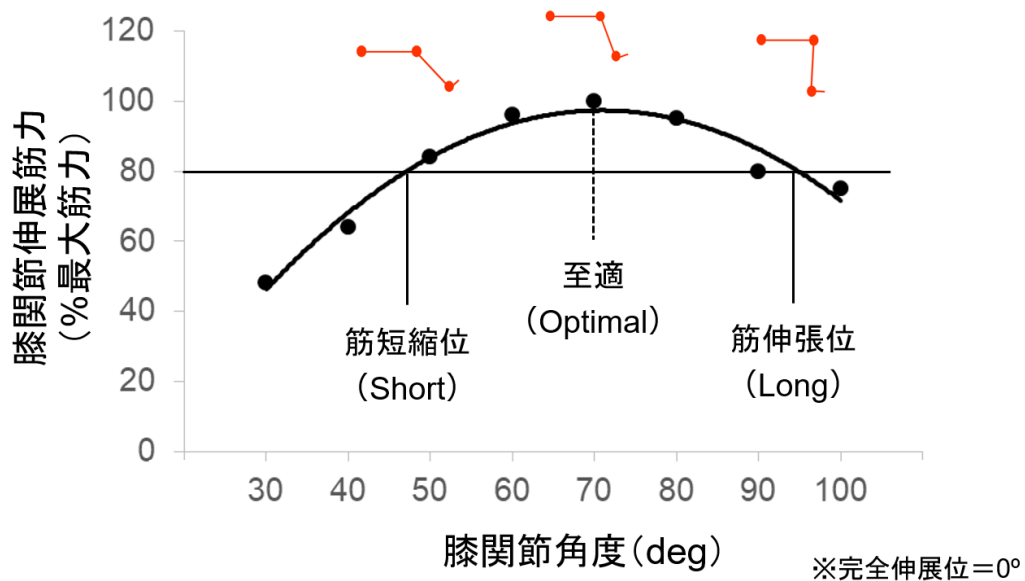


図2：座位における膝関節角度と等尺性膝関節伸展筋力の関係
(Noorkoiv et al. 2014 より作図)

1-2-3. 異なる関節角度で行う等尺性トレーニングが筋量に及ぼす影響

等尺性トレーニングによる筋肥大効果に関する最近のレビュー論文（Oranchuk et al. 2018）によると、Long 条件でトレーニングを行うことにより、Short 条件で行う場合に比べ、筋肥大効果が大きくなることが指摘されている（等尺性トレーニング後の1週間あたりの筋肥大率：Long 条件（+0.86~1.69%） vs Short 条件（+0.08~0.83%））。このような報告を考慮すると、筋量の増加を目的に等尺性トレーニングを行う場合、Short 条件よりも Long 条件での実施が有効であると考えられる。その理由として、1) Long 条件となる筋伸張位での運動では、筋内が低酸素状態となり、代謝的負担が高まること（de Ruiter

et al. 2005)、および 2) 筋肥大を促すインスリン様成長因子 (Insulin-like Growth Factor-1: IGF-1) が多く分泌されること (McMahon et al. 2014) が考えられている。

一方、単一の関節角度により等尺性トレーニング介入を行う場合は、最も大きな筋力が発揮できる至適関節角度 (Optimal 条件) 付近が採用されるケースが多い (Jones et al. 1987; Garfinkel et al. 1992; Balshaw et al. 2016; Waleed S et al. 2017; Lanza et al. 2019)。しかし、先行研究において、等尺性トレーニングによる筋肥大効果を Optimal 条件と他の関節角度条件とで直接的に比較した例はない。一方、膝関節伸展筋群を対象に等尺性トレーニングを実施し、介入前後で筋体積を測定した複数の先行研究 (Kubo et al. 2001, 2006; Noorkoiv et al. 2014; Balshaw et al. 2016) を抽出し、1 週間あたりの筋肥大率をトレーニングが実施された膝関節角度別にみると、Short < Optimal < Long 条件となる (図 3)。したがって、Long 条件でのトレーニングは、Optimal 条件でのトレーニングよりも筋肥大効果が大きい可能性がある。しかし、図 3 は、トレーニング内容 (筋収縮時間・実施期間など) が異なる複数の研究の結果をまとめたものであり、同一研究内で関節角度以外のトレーニング内容を統一して、Long および Optimal 条件となる関節角度で行う等尺性トレーニングによる筋肥大効果を実際に確認する必要がある。

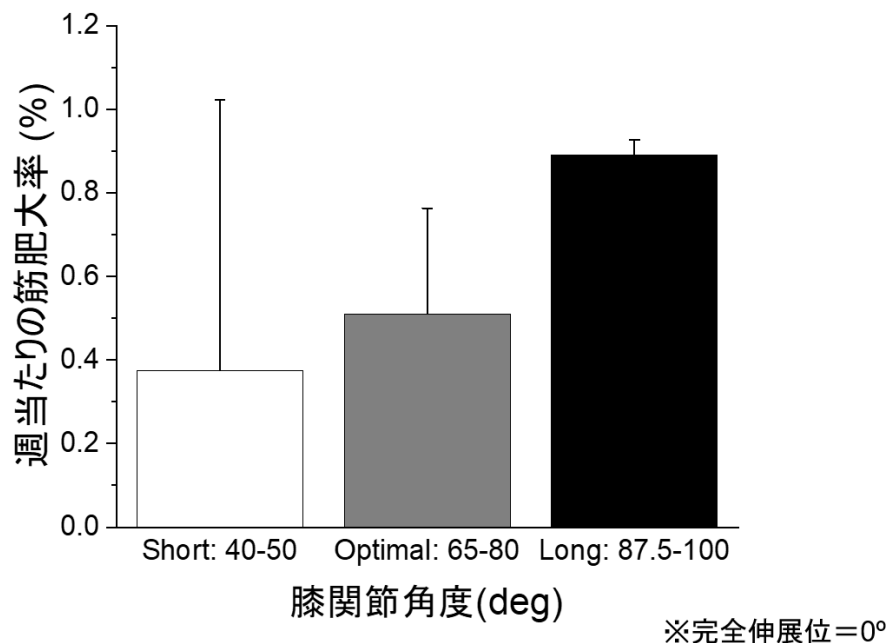


図 3 : 膝関節伸展トレーニングが実施された膝関節角度と週毎の筋肥大率の条件別の比較 (筋体積を測定した Kubo et al. 2001, 2006; Noorkoiv et al. 2014; Balshaw et al. 2016)

より作成)

1-2-4. 異なる関節角度で行う等尺性トレーニングが筋力に及ぼす影響

等尺性トレーニングでは、トレーニングを行った関節角度付近において筋力の改善度が大きくなる「関節角度特異性」がある (Kubo et al. 2006; Noorkoiv et al. 2014; Lanza et al. 2019; Akagi et al. 2020)。一方、膝関節伸展筋群を対象に Long (膝関節屈曲 100°) および Short 条件 (50°) で等尺性膝関節伸展トレーニングを行った Kubo et al. (2006) は、両条件ともにトレーニングを行った関節角度付近で膝関節伸展筋力が改善する関節角度特異性が観察されたが、Long 条件の方が Short 条件よりも幅広い関節角度条件下で筋力が改善したことを報告している。また、前脛骨筋を対象に Long (足関節底屈 40°) および Short 条件 (0°) で等尺性足関節底屈トレーニングを行った Akagi et al. (2020) によると、両条件ともにトレーニングによって足関節底屈筋力が有意に改善したが、Long 条件では幅広い関節角度で Optimal 条件に近い力の発揮が可能になったと述べられている。しかし、Optimal 条件での等尺性トレーニングによる筋力の改善効果について、他の関節角度条件でのトレーニングの効果と比較した研究はない。

1-3. 目的および仮説

リハビリテーションプログラムとして活用される大腿部の等尺性トレーニングの効果は、これまでのところ膝関節伸展筋群 (大腿四頭筋) を対象としたものが全てであり、肉離れの好発部位である膝関節屈曲筋群 (ハムストリングス) に対するトレーニングの効果の実態は不明な点が多い。したがって、ハムストリングスを対象により効果的な等尺性トレーニングの方法を究明することは、スポーツ現場のニーズに応える高い社会的意義を有するといえる。また、等尺性トレーニング時の関節角度に着目した先行研究が増加する中で、これまで、Long 条件でのトレーニングは、Short 条件でのトレーニングよりも筋量および筋力の改善効果が大きいことが報告されている。しかし、一般的に単一の関節角度で等尺性トレーニングが実施される場合、Optimal 周辺の関節角度が採用される場合が多いが、Optimal 条件でのトレーニング効果と他の関節角度条件でのそれとを比較した研究はない。そのため、Long および Optimal 条件で行う等尺性トレーニングの効果を検証することは、筋量および筋力の増加により効果的なトレーニング実施時の関節角度条件を明らかにすることに繋がり、本研究から得られる結果は、等尺性トレーニングを採用する際の関節角度

を決定するうえで、有用な情報になると期待できる。

そこで、本研究では、膝関節屈曲筋群を対象に **Long** および **Optimal** 条件で行う等尺性膝関節屈曲トレーニングがハムストリングスの筋量および筋力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

本研究の仮説は以下の通りである。

- 1) 筋量については、Oranchuk et al. (2018) および先行研究の知見の要約 (図 3) に基づき、「トレーニングによる筋量の変化は **Long** 条件が **Optimal** 条件よりも大きい」(仮説 1)。
- 2) 筋力に関しては、等尺性トレーニング後の関節角度特異性 (Kubo et al. 2006; Noorkoiv 2014; Lanza et al. 2019; Akagi et al. 2020) に基づき、「膝関節伸展位 (ハムストリングス伸張位) での筋力の増加は **Long** 条件が大きく、至適関節角度付近の筋力の増加は **Optimal** 条件が大きい」(仮説 2)。

第2章 方法

本研究は、Long および Optimal 条件で等尺性膝関節屈曲トレーニングを実施し、ハムストリングスの筋量および筋力に及ぼす影響を検証した。なお本研究は、立命館大学「人を対象とする医学系研究倫理審査委員会」の承認を得た上で実施した（承認番号：BKC-人医-2020-020）。

2-1. 対象者

対象者は、過去1年間にハムストリングスを対象としたレジスタンストレーニングの実践習慣（ ≥ 30 分/日， ≥ 2 日/週， ≥ 12 週間）のない一般健康若齢男子31名とし、図4に示したフローチャートに基づき、トレーニング群20名（年齢： 22.9 ± 2.3 歳，身長： 1.73 ± 0.1 m，体重： 63.9 ± 4.9 kg）と、コントロール群11名（年齢： 24.3 ± 2.4 歳，身長： 1.72 ± 0.1 m，体重： 64.9 ± 5.0 kg）に分類した。対象者の除外基準として、以下の3条件を設定した。

- 1) 身体に外傷を負っている、または疾患に罹患している等の理由から治療中である。
- 2) 精神や身体に障害を有している。
- 3) 外傷等により日常動作を行う際に特別な器具を有している。

研究を実施するにあたって、対象者に対して実験に関する十分な説明を事前に行い、実験参加に対する同意を得た。

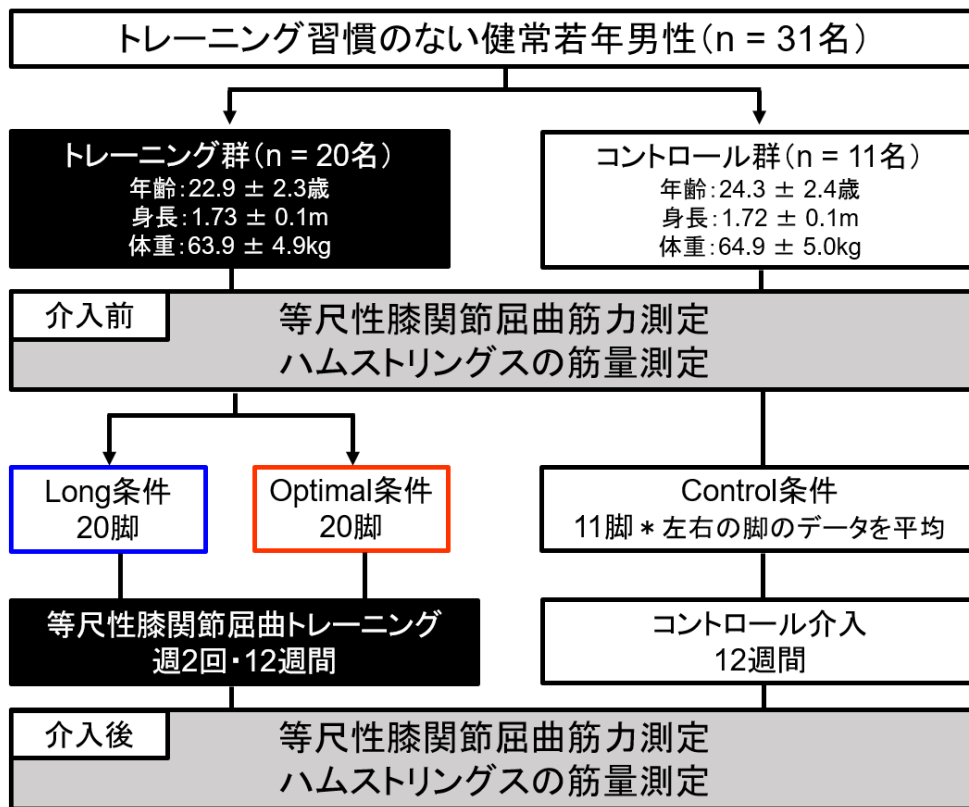


図 4：対象者の実験の流れ

2-2. 実験概要

介入前後において、ハムストリングス各筋および全体の筋体積、等尺性膝関節屈曲筋力を測定した。トレーニング群は、各脚を Long および Optimal 条件に振り分け、等尺性膝関節屈曲トレーニングを週 2 回の頻度で 12 週間実施した。コントロール群は、介入前後の測定のみ参加し、介入期間中は下肢に過度の負荷がかかるような運動は極力避け、通常通りの生活を送るよう指示をした。また、介入前後の測定では片脚ずつ両脚を測定したが、コントロール群では個人ごとに左右の脚のデータを平均したものを 1 名分のデータとして採用し、Control 条件のデータとした (図 4 参照)。トレーニング群のトレーニング条件および設定とその内容、ならびに各測定項目の測定方法は以下に示す通りであった。

2-2-1. トレーニング条件設定

全ての対象者に対し、介入前に等尺性筋力測定装置 (Iso-systems-knee, 立命館大学工作センター作成: 図 5) および張力計 (UNCLB-2KN, ユニパルス社製) を用いて、座位 (股関節角度 = 90°) で、等尺性膝関節屈曲筋力を 7 つの関節角度 (0, 20, 30, 40, 50, 65, 85°,

完全伸展位 = 0°) で片脚ずつ測定した。分析には、Lab Chart7.0 (ADInstruments 社製) を用いた。筋力 (関節トルク) は、張力計から取得した張力 (N) に筋力測定装置の回転中心から張力計までの距離 (レバーアーム長 : m) を乗じることで算出した。測定にあたり、全対象者は、実施日の 3~5 日前に筋力発揮練習を 4 つの関節角度 (0, 20, 65, 85°) で行った。測定前には、ウォームアップとして膝関節角度 65°において最大下での力発揮 (最大随意収縮 (MVC) の 50%で 5 回、75%で 3 回、90%で 1 回) を実施した後に、7 つの関節角度 (0, 20, 30, 40, 50, 65, 85°) において最大筋力の測定を行った。測定は、3 秒かけて MVC に到達するよう少しずつ力を増加させ、その後、約 3 秒間維持するように行わせた。試行間には約 2 分の休憩を設けた。測定試行は 2 回とし、左右交互に測定を行った。各個人の膝関節角度と屈曲筋力の関係 (図 6) に基づき、トレーニング群 20 名の左右の脚を以下の 2 条件のいずれかに振り分けた (20 脚/条件) * : 1) 膝関節屈曲筋力が最大となる至適関節角度でトレーニングをする脚 (Optimal 条件 : $39 \pm 18^\circ$, $112 \pm 28 \text{ Nm}$)、および 2) ハムストリングスが伸張位となる膝関節角度でトレーニングをする脚 (Long 条件 : 膝屈曲 0° , $100 \pm 18 \text{ Nm}$)。なお、被検者が全力を出せるよう、力発揮中に検者は声をかけ励まし続けた。

* : 各対象者の各関節角度における膝関節屈曲筋力において、最大筋力が得られた膝関節角度、すなわち Optimal となる膝関節角度がより屈曲位にある脚を Optimal 条件とした (例 : Optimal となる膝関節角度が右脚で 40° 、左脚で 30° であった場合、右脚を Optimal 条件、左脚を Long 条件とした)。Optimal となる膝関節角度が両脚で同じであった場合、その関節角度での筋力と、膝関節伸展位 (0° : 筋伸張位) での筋力により差がある脚を Long 条件とした。これらはともに、Optimal 条件と Long 条件の関節角度および発揮筋力 (関節トルク) の条件間差を強調するためであった。

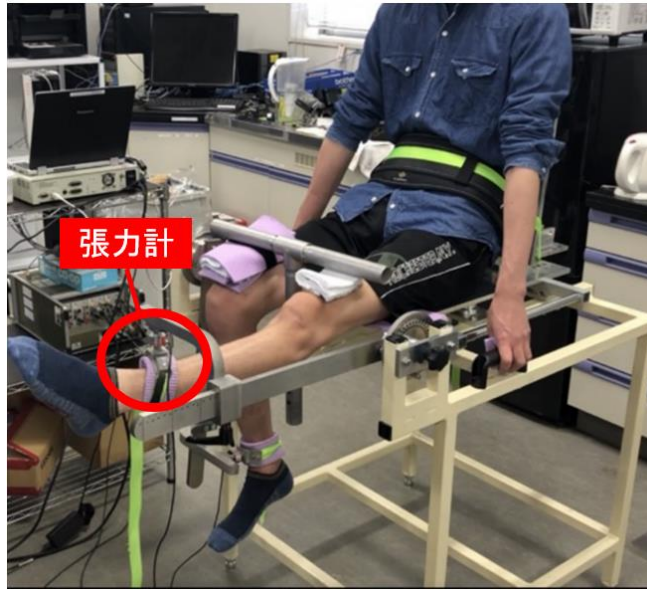


図 5：特注の等尺性筋力測定装置

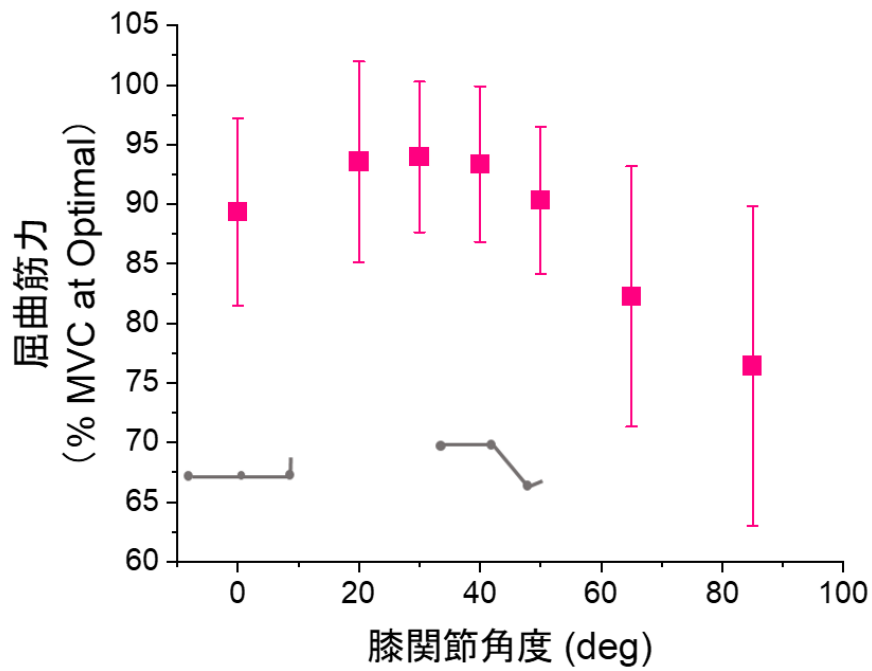


図 6：トレーニング群における膝関節角度と等尺性膝関節屈曲筋力の関係 (n = 20)

2-2-2. トレーニング内容

トレーニング群は、筋力測定と同様の装置を用いて、各脚に割り振られた条件に対応した関節角度において、等尺性膝関節屈曲トレーニングを 2~3 日の間隔をあげ週 2 日の頻度で 12 週間行った。トレーニング内容は、それぞれの条件における 70%MVC の力発揮と

し、5秒間の収縮と5秒間の休息を1セット毎に10回反復、1セッション毎に5セットを片脚ずつ交互に実施した（セット間休憩は3分間）。図7に運動中の屈曲筋力の生データを示した。ただし、トレーニング1～2セッション目は、トレーニングに不慣れな状態での過度な負担による怪我を避けるため、負荷を50%MVC、60%MVCと漸増させ、3セッション目以降から、70%MVCとした。3セッション目（負荷：70%MVC）以降のトレーニングにおいて、設定負荷で規定の回数（10回×5セット）を2セッション連続して遂行することができた場合、次のセッションでは負荷を5%増加させた。同様の条件で、その後のトレーニングにおいても、設定負荷で規定の回数を2セッション連続して遂行できた場合は、次のトレーニングで負荷を漸増させた。トレーニングの実施順序として、片方の脚のトレーニング（10回反復）を終えた後、もう一方の脚のトレーニングを行い、次のセッションでは、その順序を各対象者で入れ替えた。全てのトレーニングに先立ち、ウォームアップとして、50%MVCで5秒間の力発揮を片脚ずつ5回実施させた。

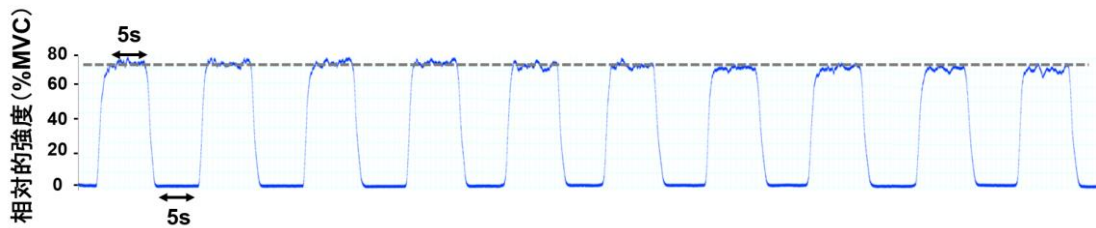
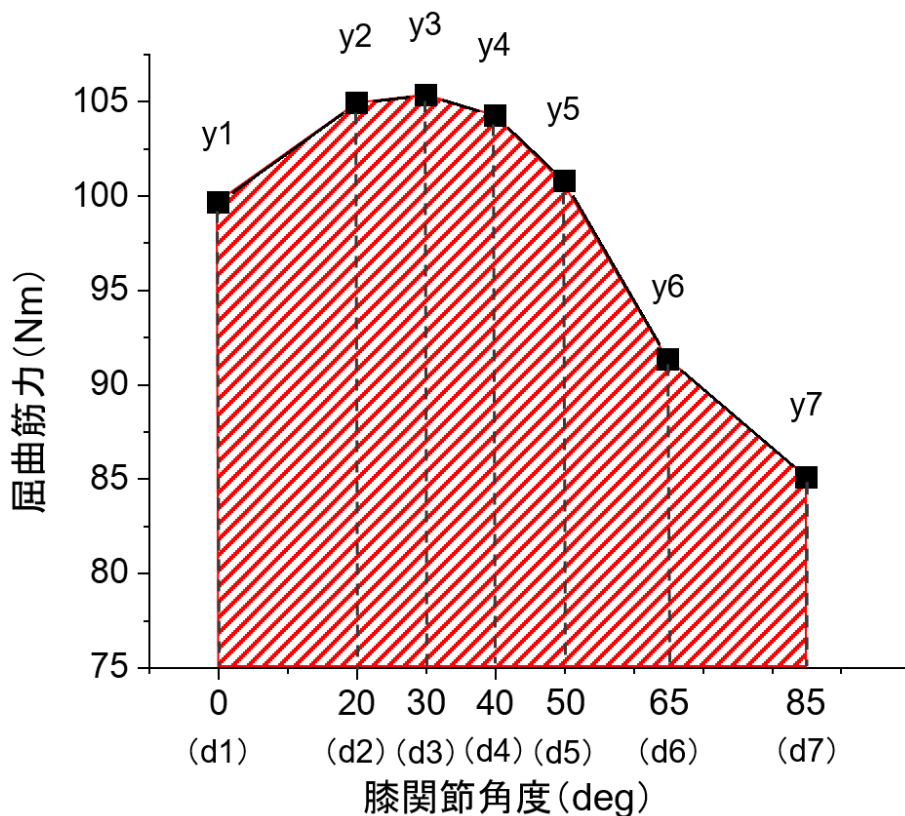


図7：運動中の屈曲筋力データの取得例（1セット分）

2-2-3. 測定項目

A. 等尺性膝関節屈曲筋力

トレーニング群およびコントロール群ともに、「2-2-1. トレーニング条件設定」に記載の方法により、等尺性膝関節屈曲筋力を介入前後に測定した。なお、コントロール群は、介入前と同様に、介入後においても測定日の3～5日前に筋力発揮練習を行った。各関節角度における2回の最大筋力発揮のうち大きい値を採用し、7つの角度で同様に分析を行った。また、関節可動域全体を通した筋力の改善の程度を比較するために、各条件（脚）で7つの関節角度における筋力の曲線下面積（Area Under the Curve: AUC, Nm・deg）を図8および以下の式を基に算出した。



$$\text{AUC} = \frac{(y_1 + y_2)(d_2 - d_1)}{2} + \frac{(y_2 + y_3)(d_3 - d_2)}{2} \cdot \cdot + \frac{(y_6 + y_7)(d_7 - d_6)}{2}$$

図 8 : AUC の算出方法

B. ハムストリングスの筋体積

トレーニング群およびコントロール群ともに、3 テスラ MRI 撮像装置 (MAGNETOM Skyra, Siemens) を用いて、左右の大腿部の T1-MRI (スライス厚: 5mm, ギャップ: 5mm) を介入前後で取得した (図 9)。測定姿勢は仰臥位とし、測定中はリラックスして静止するよう指示した。分析には専用のソフト (Horos, The Horos Project) を用いて、ハムストリングス各筋の横断面積を、起始部および停止部 (筋が見え始める画像と消失する直前の画像) ならびにその間を 1 枚おきに計測した (図 9)。飛ばした画像については、横断面積を計測した画像間において横断面積に直線関係があることを仮定し、計測画像の値を平均した値とした (Maeo et al. 2018)。同様に、ギャップ分についても、前後の画像の値を平均した値とした。各筋において、実測および算出した全ての横断面積を合算し、スライス厚 (5mm) を乗じることにより筋体積を算出した。また、4 筋全体の筋体積 (4 筋の筋体積

の和) を算出した。また、分析者は、バイアスがかからないよう被検者を匿名化したうえで分析を行った。

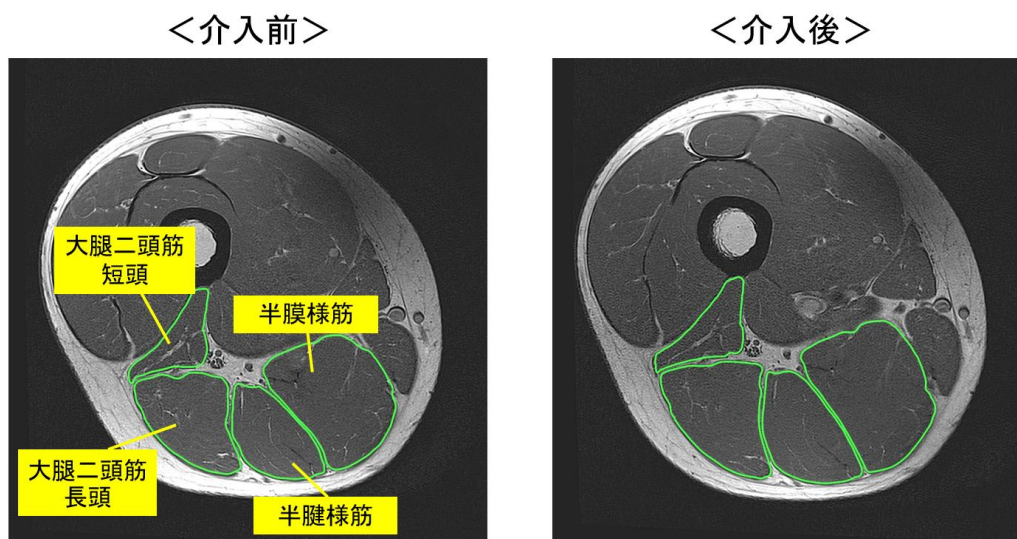


図 9 : 介入前後における大腿部の MRI の例

2-2-4. 統計処理

基本統計量は平均値±標準偏差で表記した。

トレーニング群におけるトレーニング実施負荷の変化を、二元配置反復測定分散分析 (2 条件 × 24 セッション) で検定した。

ハムストリングスの筋体積の変化について、筋および全体のそれぞれで、二元配置反復測定分散分析 (2 時間 × 3 条件) を行った。交互作用が認められた場合、ハムストリングス各筋および全体のそれぞれにおいて、各条件で対応のある t-test を用いて介入前後の筋体積を比較した。また、筋体積の変化 (Δcm^3) の条件間差を一元配置分散分析およびボンフェローニ検定により比較した。

等尺性膝関節屈曲筋力の変化について、三元配置反復測定分散分析 (2 時間 × 3 条件 × 7 角度) を行った。条件に関する交互作用が認められた場合、各条件において測定した関節角度ごとに、対応のある t-test を用いて介入前後の筋力を比較した。また、筋力の変化 (ΔNm) について二元配置反復測定分散分析 (3 条件 × 7 角度) を行った。交互作用が認められた場合、各関節角度で一元配置分散分析およびボンフェローニ検定を行い、条件

間の差を検証した。全関節角度における筋力の曲線下面積（AUC）は、二元配置反復測定分散分析（2 時間 × 3 条件）で検定した。交互作用が認められた場合、対応のある t-test を用いて介入前後の AUC を各条件で比較した。また、AUC の変化（ $\Delta \text{Nm} \cdot \text{deg}$ ）について、一元配置分散分析およびボンフェローニ検定を行い、条件間の差を検証した。なお、全ての検定において、有意水準は $P < 0.05$ とした。

第3章 結果

20名のトレーニング群のうち、1名が介入中盤でドロップアウトした。また、別の1名が、トレーニング期間の終盤（9週・19セッション目）で下腿部の痛みによりトレーニングを中止したが、同対象者はトレーニング介入の約8割を実施していたため、介入（10週間）後の筋体積の測定は実施した（筋力測定は実施なし）。さらに、別の1名は、全てのトレーニング介入を完遂したが、介入後の筋体積の測定の後、筋力測定の際にハムストリングスに痛みを訴えたため、介入後の筋力測定を中止した。そのため、解析に用いたトレーニング群のデータサンプル数は、LongおよびOptimal条件ともに、介入前後の筋体積がn = 19脚、介入前後の筋力がn = 17脚、トレーニング実施負荷の推移がn = 18脚として報告する。また、11名のコントロール群のデータは、上述の通り個人内の左右のデータを平均し、全ての項目についてControl条件はn = 11脚として解析した。

3-1. トレーニング実施負荷の変化

図10は、トレーニング群におけるトレーニング実施負荷の絶対値（出力トルク：Nm）および相対値（力発揮水準：%MVC）を示したものである。絶対的負荷における二元配置分散分析の結果、条件（ $P=0.025$ ）およびセッション（ $P<0.001$ ）のそれぞれに有意な主効果が認められ、それらの交互作用（ $P=0.638$ ）は有意ではなかった。これは、絶対的負荷はOptimal条件がLong条件よりも常に有意に大きく、同様に変化（増加）したことを意味している。相対的負荷における二元配置分散分析の結果、セッションにのみ有意な主効果が認められ（ $P<0.001$ ）、条件の主効果（ $P=0.646$ ）およびそれらの交互作用（ $P=1.000$ ）は有意ではなかった。これは、相対的負荷は全てのセッションでOptimal条件とLong条件で有意な差はなく、同様に変化（増加）したことを意味している。

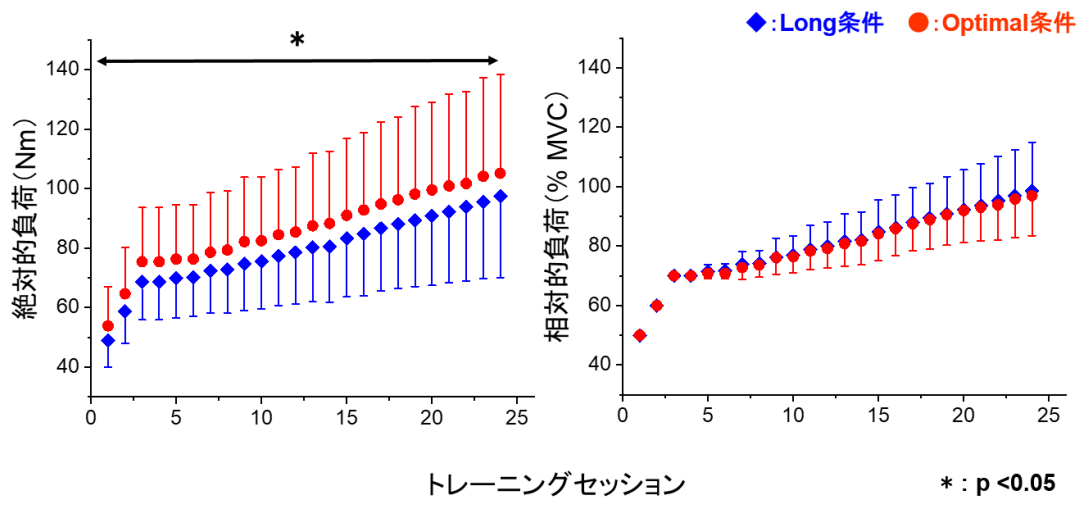


図 10 : 等尺性膝関節屈曲トレーニングにおける絶対的負荷（出力トルク：左）および、相対的負荷（力発揮水準：右）の推移（n = 18）

3-2. ハムストリングスの筋体積

表 1 は、介入前後におけるハムストリングス各筋および全体の筋体積を示したものである。二元配置分散分析の結果、ハムストリングス各筋および全体の筋体積において交互作用が認められた ($P < 0.001$)。対応のある t-test の結果、Long 条件ではハムストリングス各筋および全体の筋体積に ($P < 0.001$)、Optimal 条件では、半膜様筋 ($P = 0.797$) を除く 3 筋および全体の筋体積に、それぞれ有意な増加が認められた ($P < 0.001$)。Control 条件の筋体積には、いずれの筋および全体においても介入前後で有意な変化は観察されなかった。

表 1 : 介入前後におけるハムストリングス各筋および全体の筋体積

	Long条件 (n = 19脚)		Optimal条件 (n = 19脚)		Control条件 (n = 11脚)		交互作用 (P値)
	介入前	介入後	介入前	介入後	介入前	介入後	
筋体積 (cm ³)							
大腿二頭筋短頭	88.8 ± 22.2	99.5 ± 25.1***	84.4 ± 18.0	95.1 ± 19.2***	94.1 ± 20.8	93.2 ± 21.0	P < 0.001***
大腿二頭筋長頭	181.7 ± 29.2	209.5 ± 34.8***	181.5 ± 34.0	191.1 ± 32.9***	177.0 ± 26.1	175.0 ± 25.9	P < 0.001***
半腱様筋	194.9 ± 42.3	234.5 ± 56.6***	190.9 ± 38.9	227.1 ± 51.8***	194.3 ± 36.1	192.4 ± 36.8	P < 0.001***
半膜様筋	226.8 ± 45.1	253.6 ± 41.5***	230.8 ± 45.8	230.4 ± 47.5	234.8 ± 40.8	233.7 ± 39.9	P < 0.001***
全体	692.2 ± 109.8	797.1 ± 121.2***	687.6 ± 106.3	743.7 ± 115.9***	700.1 ± 85.2	694.3 ± 86.0	P < 0.001***

図 11 は、介入によるハムストリングス各筋および全体の筋体積の変化 (Δ cm³) を示したものである。各筋および全体のそれぞれにおける一元配置分散分析の結果、Long 条件は Control 条件よりも全ての筋および全体で有意に大きい筋体積の変化を示した (P < 0.001)。Optimal 条件は、Control 条件と比べ、半膜様筋 (P = 1.000) を除く 3 筋および全体において有意に大きい変化を示していた (P < 0.032)。トレーニング条件間の比較では、大腿二頭筋長頭、半膜様筋、およびハムストリングス全体において Long 条件が Optimal 条件よりも有意に大きな筋体積の増加を示したが (P < 0.001)、大腿二頭筋短頭および半腱様筋では、Long および Optimal 条件間で有意な差が認められなかった (P = 1.000)。

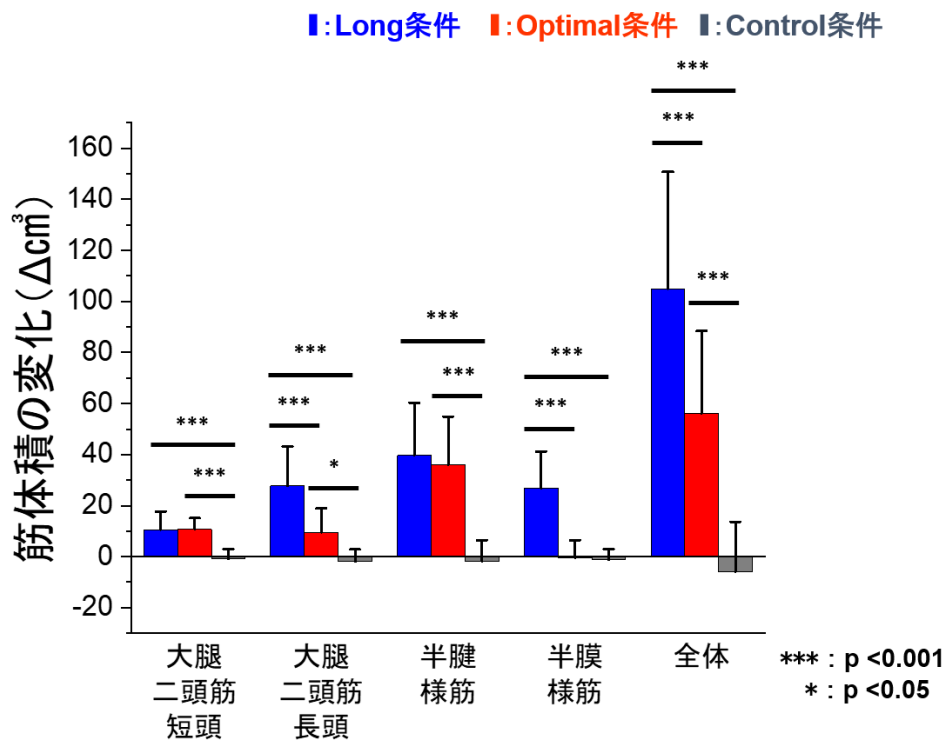


図 11 : トレーニングによるハムストリングス各筋および全体の筋体積の変化
(トレーニング群 : n = 19 脚 コントロール群 : n = 11 脚)

3-3. 等尺性膝関節屈曲筋力

図 12 は、介入前後における等尺性膝関節屈曲筋力を示したものである。三元配置分散分析の結果、時間 × 条件 × 角度に有意な交互作用が認められた (P = 0.002)。各関節角度における対応のある t-test の結果、屈曲筋力は Long および Optimal 条件ともに、測定を行った全ての膝関節角度で有意に増加した (P < 0.001)。Control 条件では、いずれの関節角度においても介入前後で有意な変化は認められなかった。

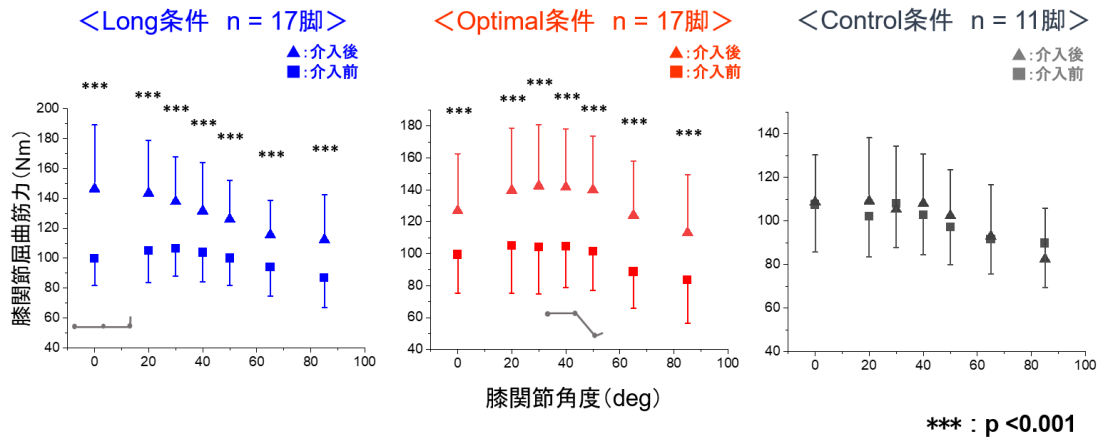


図 12：介入前後における等尺性膝関節屈曲筋力

図 13 は、介入による等尺性膝関節屈曲筋力の変化 (ΔNm) を示したものである。各関節角度における一元配置分散分析の結果、Long 条件は Control 条件と比べ、 50° と 60° を除く全ての関節角度で有意に大きな変化を示していた ($P < 0.024$)。Optimal 条件は Control 条件と比べ、全ての関節角度で有意に大きな変化であった ($P < 0.005$)。トレーニング条件間の比較では、Optimal 条件のトレーニング実施角度付近である 50° では、Optimal 条件が Long 条件よりも有意に大きかった ($P = 0.043$)。Long 条件のトレーニング実施角度である 0° では、Long 条件が Optimal 条件よりも大きな値であったが、有意ではなかった ($P = 0.136$)。

全関節角度における筋力の曲線下面積 (AUC) は、二元配置分散分析の結果、有意な交互作用が認められた ($P < 0.001$)。対応のある t-test の結果、Long 条件 (介入前 vs 介入後： 8406 ± 1446 vs 11037 ± 2022 Nm \cdot deg) および Optimal 条件 (介入前 vs 介入後： 7862 ± 1686 vs 11261 ± 2836 Nm \cdot deg) では有意な AUC の増加が認められた ($P < 0.001$)。Control 条件では有意な変化はなかった (介入前 vs 介入後： 8434 ± 1356 vs 8596 ± 1850 Nm \cdot deg)。介入による AUC の変化 ($\Delta Nm \cdot deg$) に関する一元配置分散分析およびボンフェローニ検定の結果、AUC の変化は Long 条件 (2631 ± 1371 $\Delta Nm \cdot deg$) と Optimal 条件 (3399 ± 1807 $\Delta Nm \cdot deg$) が Control 条件 (162 ± 920 $\Delta Nm \cdot deg$) よりも有意に大きかったが ($P < 0.001$)、Long 条件と Optimal 条件との間に有意な差はなかった ($P = 0.405$)。

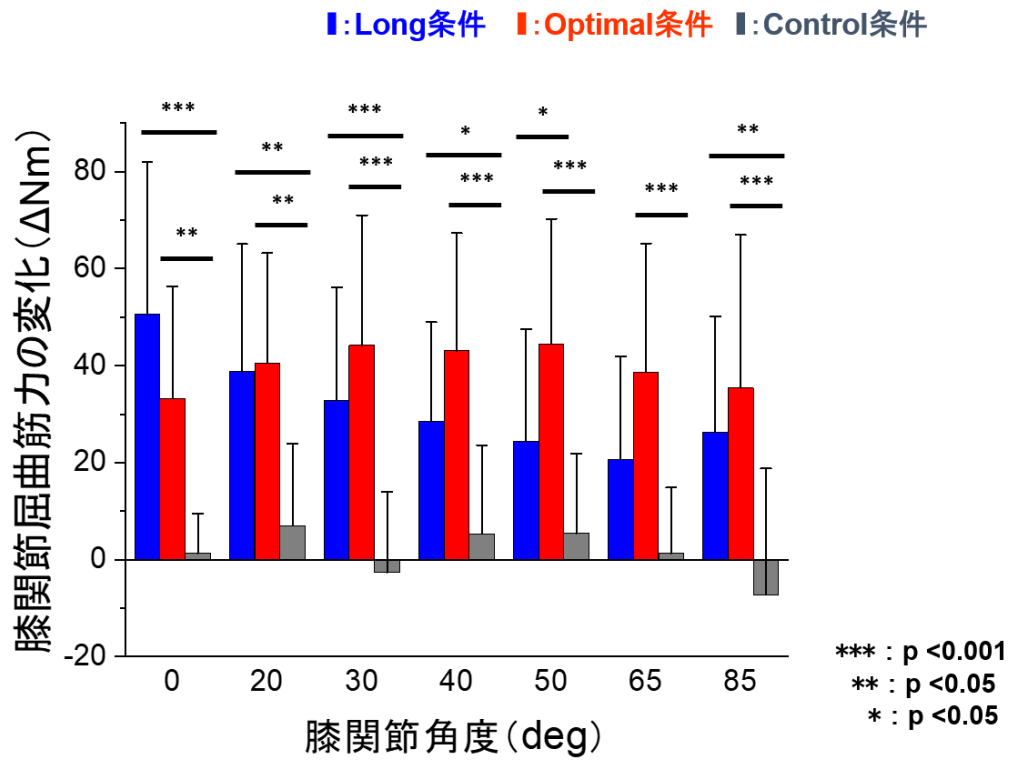


図 13 : トレーニングによる等尺性膝関節屈曲筋力の改善の程度
 (トレーニング群 : n = 17 脚 コントロール群 : n = 11 脚)

第4章 考察

4-1. 本研究の主な結果

本研究では、異なる関節角度で行う等尺性トレーニングが筋量、筋力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、膝関節屈曲筋群を対象に Long または Optimal 条件となる関節角度で等尺性膝関節屈曲トレーニングを 12 週間行った。その結果、1) ハムストリングス全体の筋量の増加は Long 条件が Optimal 条件よりも有意に大きく、2) 筋力は、両条件ともにトレーニングを行った関節角度付近で大きく増加する関節角度特異性が観察された。これらの結果は、本研究の仮説を支持するものであった。また、全関節角度における筋力の曲線下面積 (AUC) の変化の程度は、Long 条件と Optimal 条件で有意な差はなかった。以下、これら主知見に関して考察する。

4-2. Long 条件でのトレーニングが筋量増加に有効な理由

ハムストリングス全体の筋肥大効果は、Long 条件が Optimal 条件よりも有意に大きかった (図 11)。この結果は、Long 条件でのトレーニングは筋肥大効果が大きいことを、Short 条件でのトレーニングとの比較から検証した先行研究 (Alegre et al. 2014; Noorkoiv et al. 2014; Akagi et al. 2020) を支持すると同時に、運動中により大きな筋力を発揮する Optimal 条件 (図 10 左) と比較した場合でも、Long 条件の方が筋肥大効果が大きいことを示唆している。

トレーニング実施時の関節角度によって筋肥大効果が異なる理由は、未だ明らかとなっていない。しかし、関節角度の違いによって運動中の筋内の酸素動態が異なることが要因の一つとして考えられており、de Ruiter et al. (2005) は、Long 条件での運動は Short 条件と比べ、筋内がより低酸素状態となることを報告している。また、本研究と同じ筋力の発揮条件において、膝関節伸展筋群が Long および Optimal 条件となる膝関節角度で等尺性膝関節伸展運動 (50%MVC) を実施した際の筋酸素飽和度 (StO₂) を測定した結果 (桜井ら, 2021) によると、測定対象とした外側広筋、内側広筋、および大腿直筋の 3 筋に共通して、安静時の StO₂ は条件間で差は認められなかった。しかし、運動中には、両条件ともに StO₂ が減少し、その程度は Long 条件が Optimal 条件よりも大きかった。このような結果は、Long 条件での運動では、Optimal 条件での運動よりも筋内が低酸素状態になることを示唆している。その理由として、関節角度による筋血流量の変化が影響し

ている可能性があり、事実、筋が伸ばされることで筋血流量が減少することが認められている (McDaniel et al. 2012)。他にも、筋が伸ばされた状態でのトレーニングにより、筋肥大に関連する IGF-1 が多く分泌する (McMahon et al. 2014) ことなどが考えられている。しかし、それらのいずれの要因についても筋肥大の程度との関連性は明らかにされておらず、異なる関節角度でのトレーニングが筋肥大効果に違いをもたらすメカニズムについては今後の研究課題である。

4-2-1. 筋肥大の筋間差

本研究で実施した等尺性膝関節屈曲トレーニングによる筋肥大の程度を筋別にみた場合、大腿二頭筋長頭および半膜様筋の筋体積の変化は、Long 条件が Optimal 条件よりも有意に大きく、大腿二頭筋短頭および半腱様筋の筋体積の変化は、Long 条件と Optimal 条件間で有意な差が認められなかった (図 11)。この結果は、ハムストリングスという同一筋群内においても、運動中の関節角度が筋肥大の程度に及ぼす影響は、筋によって異なることを意味している。特に半膜様筋は、Optimal 条件でのトレーニングによって唯一筋肥大が生じなかった筋であり (表 1)、同筋を肥大させるには、筋伸張位での運動が必要となることを示唆している。興味深いことに、半膜様筋は、バレエのような膝を極端に伸展させる種目で肉離れが起りやすい (Askling et al. 2007)。これは、膝関節の屈曲運動中に半膜様筋が動員される度合いは、関節角度によって異なる可能性を示唆している。山崎ら (2019) は、シーテッド (股関節角度 = 90°) およびプローン (股関節角度 = 0°) レッグカールにおいて、異なる膝関節角度で半膜様筋の筋活動水準を測定し、両種目ともに膝関節が伸展位 (0°) に近づくほど、同筋の筋活動水準が増加したことを報告している。このような結果について、山崎ら (2019) は、膝関節角度の変化によるモーメントアーム長の違いを指摘しており、実際、半膜様筋の膝関節屈曲モーメントアーム長は、膝関節伸展位でピークとなることが報告されている (Buford et al. 1997)。また、半膜様筋と同様に、Long 条件と Optimal 条件とで筋肥大の程度に条件間差が認められた大腿二頭筋長頭は、ハムストリングスを構成する 4 筋の中でも、疾走局面、とりわけ接地時において肉離れが起りやすい (奥脇. 2017)。疾走動作中における接地時は、股関節が屈曲し、膝関節が伸展された状態にあり、その時のこれらの関節の角度は、Long 条件でのトレーニング時のものに類似している。これらの知見を考慮すると、大腿二頭筋長頭や半膜様筋、特に後者は、Long 条件 (膝関節伸展位) での膝関節屈曲運動でより動員されるため、これらの筋の筋肥

大を促すためには、筋伸張位での運動が重要であると考えられる。

4-3. 等尺性トレーニングが筋力に及ぼす影響とその関節角度特異性

Long 条件および Optimal 条件ともに、全ての膝関節角度で有意な筋力の増加が認められた (図 12)。また、その改善の程度は、Optimal 条件のトレーニング実施角度に近い 50° では Optimal 条件が Long 条件よりも有意に大きく、Long 条件のトレーニング実施角度である 0° では、有意ではないものの Long 条件が Optimal 条件よりも大きかった (図 13)。等尺性トレーニングによる筋力の改善の程度には、トレーニングを行った関節角度付近で大きくなる関節角度特異性があることが知られており (Kubo et al. 2006; Noorkoiv et al. 2014; Lanza et al. 2019; Akagi et al. 2020)、本研究の結果もこれを支持する。その主な要因として、神経系の適応が考えられる。Lanza et al. (2019) は、膝関節角度 65° で等尺性膝関節伸展トレーニングを 4 週間実施し、介入前後で等尺性膝関節伸展筋力と、運動中の大腿四頭筋の筋活動水準を 35, 50, 65, 80, 95° で測定した結果、トレーニングを行った関節角度付近 (35, 50, 65, 80°) で筋力が有意に改善し、それに対応するように膝関節角度 35, 50, 65° で筋活動水準が有意に増加したことを報告している。このように、トレーニングによる筋力の改善と、主働筋の筋活動水準の変化は密接に関係することは複数の研究で確認されており (Alegre et al. 2014; Noorkoiv et al. 2014; Balshaw et al. 2016)、トレーニングによる筋活動水準増加の要因の 1 つとして、単一の関節角度で動員できる運動単位の数および、その発火頻度の増加が指摘されている (Sale, 1988; Gabriel et al. 2006; Folland and Williams 2007)。本研究では、筋電図を用いて運動中の筋活動水準の測定を行っていないため、トレーニングによって神経系の適応が生じたかは不明である。しかし、上述の先行研究の知見、ならびに本研究において筋肥大の程度は Long 条件が Optimal 条件よりも優れていたにもかかわらず、至適関節角度付近での筋力の改善は Optimal 条件でのトレーニングの方が優れていたことを考慮すると、本研究の結果においても、筋力の変化は神経系の適応が大きく影響していると考えられる。

第5章 結論

本研究は、等尺性膝関節屈曲トレーニング実施時における膝関節角度の違いが、ハムストリングスの筋量および膝屈曲筋力に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、関節トルク（筋力）が最大となる関節角度（Optimal 条件）、または筋が伸張位となる関節角度（Long 条件）でのトレーニングを12週間（週2回）実施した。その結果、

- 1) ハムストリングスの筋量の増加には Long 条件でのトレーニングが有効であること
- 2) 筋力の増加には関節角度特異性の影響が存在するが、関節角度可動域全体における筋力の増加という点では、トレーニング時における関節角度条件間に有意な差はないことが明らかとなった。

引用・参考文献

Akagi R, Hinks A, & Power GA. (2020). Differential changes in muscle architecture and neuromuscular fatigability induced by isometric resistance training at short and long muscle-tendon unit lengths. *J Appl Physiol.* 129: 179-184.

Arnason A, Andersen TE, Holme I, Engebretsen L, & Bahr R. (2008). Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. *Scand J Med Sci Sports.* 18: 40-48.

Alegre LM, Ferri-Morales A, Rodriguez-Casares R, & Aguado X. (2014). Effects of isometric training on the knee extensor moment-angle relationship and vastus lateralis muscle architecture. *Eur J Appl Physiol.* 114: 2437-2446.

Askling CM, Tengvar M, Saartok T, & Thorstensson A. (2007). Acute first-time hamstring strains during slow-speed stretching. Clinical, magnetic resonance imaging, and recovery characteristics. *Am J Sports Med.* 35: 1716-1724.

Askling CM, Tengvar M, Tarassova O, & Thorstensson A. (2014). Acute hamstring injuries in Swedish elite sprinters and jumpers: a prospective randomised controlled clinical trial comparing two rehabilitation protocols. *Br J Sports Med.* 48: 532-539.

Balshaw TG, Massey GJ, Maden-Wilkinson TM, Tillin NA, & Folland JP. (2016). Training-specific functional, neural, and hypertrophic adaptations to explosive- vs. sustained-contraction strength training. *J Appl Physiol.* 120: 1364-1373.

Bourne MN, Duhig SJ, Timmins RG, Williams MD, Opar DA, Najjar AA, Kerr GK, & Shield AJ. (2017). Impact of the Nordic hamstring and hip extension exercises on hamstring architecture and morphology: implications for injury prevention. *Br J Sports Med.* 51: 469-477.

Buford WL. Jr, Ivey FM. Jr, Malone JD, Patterson RM, Peare GL, Nguyen DK, & Stewart, AA. (1997). Muscle balance at the knee-moment arms for the normal knee and the ACL-minus knee. *IEEE Trans Rehabil Eng.* 5: 367-379.

de Ruiter CJ, de Boer MD, Spanjaard M, & de Haan A. (2005). Knee angle-dependent oxygen consumption during isometric contractions of the knee extensors determined with near-infrared spectroscopy. *J Appl Physiol* 99: 579–586.

Folland JP, & Williams AG. (2007). The adaptations to strength training. *Sport Med* 37: 145-168.

Gabriel DA, Kamen G, & Frost G. (2006). Neural adaptations to resistive exercise. *Sport Med* 36: 133-149.

Garfinkel S, & Cafarelli E. (1992). Relative changes in maximal force, EMG, and muscle cross-sectional area after isometric training. *Med Sci Sports Exerc.* 24: 1220-1227.

Gordon AM, Huxley AF, & Julian FJ. (1966). The Variation In Isometric Tension With Sarcomere Length In Vertebrate Muscle Fibers. *J. Physiol.* 184: 170-192.

Ishoi L, Hölmich P, Aagaard P, Thorborg K, Bandholm T, & Serner A. (2018). Effects of the Nordic Hamstring exercise on sprint capacity in male football players: a randomized controlled trial. *J Sports Sci.* 36: 1663-1672.

Kubo K, Kanehisa H, Ito M, & Fukunaga T. (2001). Effects of isometric training on the elasticity of human tendon structures in vivo. *J Appl Physiol.* 91: 26-32.

Kubo K, Ohgo K, Takeishi R, Yoshinaga K, Tsunoda N, Kanehisa H, & Fukunaga T. (2006). Effects of isometric training at different knee angles on the muscle-tendon

complex in vivo. *Scand J Med Sci Sports*. 16: 159-167.

Kulig K, Andrews J. G, & Hay, J. G. (1984). Human strength curves. *Exerc Sport Sci Rev*. 12: 417-466.

Lanza MB, Balshaw TG, & Folland JP. (2019). Is the joint-angle specificity of isometric resistance training real? And if so, does it have a neural basis? *Eur J Appl Physiol*. 119: 2465-2476.

Maeo S, Shan X, Otsuka S, Kanehisa H, & Kawakami Y. (2018). Neuromuscular adaptations to work-matched maximal eccentric versus concentric training. *Med Sci Sports Exerc*. 50: 1629-1640.

McDaniel J, Ives SJ, & Richardson RS. (2012). Human muscle length-dependent changes in blood flow. *J Appl Physiol* 112: 560-565.

McDonagh MJN, & Davies CTM. (1984). Adaptive response of mammalian skeletal muscle to exercise with high loads. *Eur J Appl Physiol* 52: 139-155.

McMahon G, Morse CI, Burden A, Winwood K, & Onambele GL. (2014). Muscular adaptations and insulin-like growth factor-1 responses to resistance training are stretch-mediated. *Muscle Nerve*. 49: 108-119.

Miller R, Balshaw TG, Massey GJ, Maeo S, Lanza MB, Johnston M, Allen SJ, & Folland JP. (2021). The Muscle Morphology of Elite Sprint Running. *Med Sci Sports Exerc*. 53: 804-815.

日本陸上競技連盟. (2019). 陸上競技ジュニア選手のスポーツ外傷・障害調査 ～第4報 (2018年)～ 大学生アスリート調査. (最終閲覧日: 2022/1/5) .
https://www.jaaf.or.jp/files/upload/202005/16_125001.pdf

Noorkoiv M, Nosaka K, & Blazevich AJ. (2014). Neuromuscular adaptations associated with knee joint angle-specific force change. *Med Sci Sports Exerc.* 46: 1525-1537.

奥脇透. (2017). 臨床スポーツ医学 (日本臨床スポーツ医学会) . 34, 文光堂: 744-815 「アスリートの肉離れー今、何が問題なのかー 肉離れの現状」

Oranchuk DJ, Storey AG, Nelson AR, & Cronin JB. (2019). Isometric training and long - term adaptations: Effects of muscle length, intensity, and intent: A systematic review. *Scand J Med Sci Sports.* 00: 1-20.

桜井洸, 前大純朗, 永原悠利, 杉山敬, 金久博昭, 伊坂忠夫. (2021/9/17～9/30) . 最大筋力発揮の至適関節角度と筋がより伸張する関節角度で行う等尺性運動時の筋酸素飽和度の比較. 第76回日本体力医学会大会(オンライン開催).

Sale DG. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 20: 135-145.

Thomas R. Baechle & Roger W. Earle 編. (2010). 第3版 NSCA 決定版 ストレングストレーニング&コンディショニング, 金久博昭監修.ブックハウス HD: 85-86.

Jones DA, & Rutherford OM. (1987). Human Muscle Strength Training: The Effects Of Three Different Regimes And The Nature Of The Resultant Changes. *J Physiol.* 391: 1-11.

Waleed SM, Ragab KE, & Ahmed SA. (2017). Influence of Isometric Exercise Training on Quadriceps Muscle Architecture and Strength in Obese Subjects with Knee Osteoarthritis. *Int J Med Res Health Sci.* 6: 1-9.

山崎由紀奈, 柏木悠, 山岸道央, 船渡和男. (2019). ハムストリングスの筋長変化に伴う膝

関節屈曲最大トルク及び筋放電量の変化. 体育測定評価研究. 18 卷: 47-58.

謝辞

本研究を遂行し、修士学位論文を作成するにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました指導教員である伊坂忠夫教授に感謝の意を表します。また、修士学位論文のご指導を下さった副査の長野明紀教授、永浜明子准教授に深く感謝をいたします。そして研究計画からデータ分析、結果の解釈、考察、結論に至るまで丁寧かつ手厚いご指導をいただきました金久博昭教授、前大純朗助教、杉山敬特任助教、スポーツ健康科学部の教員の皆様、そして伊坂研究室の皆様に厚くお礼を申し上げます。さらには、実験のご理解をいただき、快く被験者を引き受けてくださった皆様に深く感謝をいたします。最後に、大学院での研究活動を暖かく見守り応援してくれた家族に改めて感謝の意を表します。