

2022 年度 修士学位論文

題目：中年の一般市民ランナーを対象とした
高負荷レジスタンストレーニングと
プライオメトリックトレーニングが
長距離走パフォーマンスに及ぼす影響

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：6232200003-6

氏 名：永原 悠利

2022 年度 修士学位論文

中年の一般市民ランナーを対象とした
高負荷レジスタンストレーニングと
プライオメトリックトレーニングが
長距離走パフォーマンスに及ぼす影響

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

6232200003-6

永原 悠利

中年の一般市民ランナーを対象とした 高負荷レジスタンストレーニングと プライオメトリックトレーニングが 長距離走パフォーマンスに及ぼす影響

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

永原 悠利

要旨

キーワード：コンカレントトレーニング，ランニングエコノミー，タイムトライアル

【背景】

ランニングと高負荷レジスタンストレーニング（heavy resistance training: HRT）あるいはプライオメトリックトレーニング（plyometric training: PT）の複合トレーニングは，長距離走パフォーマンスを向上させるが，より効果的なトレーニング様式であるかは明らかになっていない．そこで，本研究は，近年急増している中年の一般市民ランナーを対象に，ランニングと HRT あるいは PT の複合トレーニングがランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の違いを明らかにすることを目的とした．

【方法】

研究 1) システマティックレビュー&メタ解析

PubMed, Web of Science および SPORTDiscus の 3 つの電子データベースを用いて論文を特定し，最終的に 22 報の論文が選定基準を満たした．それぞれの論文から，HRT および PT が長距離走パフォーマンスに及ぼす効果を抽出し，メタ解析を実施した．

研究 2) ランダム化比較実験

中年の一般市民ランナー男女 20 名を招集し、ランニングと HRT を実施する群 (HRT 群, n = 10) もしくは PT を実施する群 (PT 群, n = 10) にランダムに振り分けた。全ての対象者は、日常のランニングに追加して、割り当てられたトレーニングを 10 週間週 2 回実施した。HRT は、レッグプレスやレッグカール、カーフレイズを 50-90%の最大挙上重量 (以下 1RM) の負荷で実施し、PT はカウンタームーブメントジャンプ (以下 CMJ)、リバウンドジャンプ、ハードルホップ、ドロップジャンプを実施した。介入前後でレッグプレスやレッグカール、カーフレイズの 1RM, CMJ やドロップジャンプの跳躍高および接地時間, 8, 10, 12 km/h のランニングエコノミー, 5 km タイムトライアル, 最大酸素摂取量やその走速度を測定した。

【結果】

研究 1) システマティックレビュー&メタ解析

HRT がランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす効果量は PT より高値を示した。サブグループ解析の結果、若年のランナーが長い期間トレーニングを実施することで、HRT と PT とともにランニングエコノミーの効果を増大させることが示された。

研究 2) ランダム化比較実験

HRT 群は 3 つの挙上タスクの全てをおよそ 20%向上させた一方で、PT 群はレッグカールの 1RM のみ有意に向上させた。また、跳躍パフォーマンスの変化については、有意な時間の主効果のみが確認され、これは両群ともに跳躍パフォーマンスを向上させたことを示した。しかし、HRT 群と PT 群においてランニングエコノミーや 5 km タイムトライアル、最大酸素摂取量やその走速度に有意な変化は確認されなかった。

【結論】

中年の一般市民ランナーを対象とした、ランニングと HRT あるいは PT の複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす効果は小さくなく、それらの効果は同程度であることが示された。

The Effects of Heavy Resistance Training and Plyometric Training for Improving Long-Distance Running Performance for Middle-Aged Recreational Runners.

Graduate School of Sport and Health Science Ritsumeikan University

Yuuri Eihara

Abstract

Keywords: Concurrent training, running economy, running time trial

Background:

As an adjunct to running training, heavy resistance training (HRT) and plyometric training (PT) have recently drawn attention as potential training modalities that improve running economy and running time trial performance. However, the comparative effectiveness is unknown, especially targeting middle-aged recreational runners who actively participate in the marathon events. The present master thesis aimed to determine the effects of HRT vs. PT, as an adjunct to running training, on running economy and running time trial performance in middle-aged recreational runners.

Methods:

Study 1) Systematic review and meta-analysis

Electronic databases of PubMed, Web of Science, and SPORTDiscus were searched. Twenty-two studies completely satisfied the selection criteria. Data on the effects of HRT and PT on running economy and running time trial performance were extracted.

Study 2) Randomized-controlled trial

Twenty middle-aged recreational runners were randomly allocated into HRT or PT

group (n = 10/group). All participants conducted the prescribed training programs twice a week over 10 weeks, as an adjunct to daily running training. HRT program consisted of leg press, leg curl, and calf raise with 50-90% 1RM while PT program included counter-movement jump (CMJ), rebound jump, hurdle hop, and drop jump. Before and after the intervention period, the participants were tested for body composition, one repetition maximum (1RM) values of leg press, leg curl, and calf raise, jump performance (CMJ and drop jump height, and drop jump index), running economy at 8, 10, 12 km/h, 5 km running time trial, maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$), and running velocity at which $\dot{V}O_{2max}$ appeared ($v\dot{V}O_{2max}$).

Results:

Study 1) Systematic review & meta-analysis

The pooled effect size for HRT on running economy was greater than that of PT. The effect on running time trial performance was also larger in HRT than that in PT. Greater effects were evident when young runners performed training for a longer period in both HRT and PT.

Study 2) Randomized-controlled trial

HRT approximately 20% increased 1RM of the three lifting tasks, while PT 9% significantly enhanced the 1RM of leg curl only. There were the significant main effects of time in the scores of CMJ and drop jump without significant interaction, suggesting that both groups enhanced jump performance between pre- and post-intervention. However, HRT and PT did not show significant improvement in running economy at 8, 10, and 12 km/h, 5 km running time, $\dot{V}O_{2max}$, and $v\dot{V}O_{2max}$.

Conclusions:

The effects of HRT and PT, as adjunct to running training, on running economy and running time trial performance were not large, and these effects would be comparative in middle-aged recreational runners.

目次

用語の定義.....	1
序.....	3
第1章 緒言	4
1-1 ランナーの現状.....	4
1-2 長距離走におけるランニングエコノミーの役割.....	4
1-3 高負荷レジスタンストレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響	5
1-4 プライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響	7
1-5 本研究の目的と構成.....	8
1-5-1 研究意義と目的	8
1-5-2 本研究の構成.....	9
第2章：高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：システムティックレビュー&メタ解析	11
2-1 目的	11
2-2 方法	11
2-2-1 論文選定プロセス	11
2-2-2 選定基準	12
2-2-3 データ抽出	12
2-2-4 統計解析	13
2-3 結果	15
2-3-1 研究選定	15
2-3-2 統計的異質性および出版バイアス.....	17
2-3-3 高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の比較	27

2-3-4	高負荷レジスタンストレーニングがランニングエコノミーに及ぼす影響についてのサブグループ解析.....	27
2-3-5	プライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーに及ぼす影響についてのサブグループ解析.....	29
2-4.	考察.....	30
2-5	小括.....	33
第3章：高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：ランダム化比較実験		34
3-1	目的.....	34
3-2	方法.....	35
3-2-1	目的を達成するためのアプローチ.....	35
3-2-2	対象者.....	36
3-2-3	研究プロトコル.....	38
3-2-4	トレーニング介入.....	41
3-2-5	統計解析.....	45
3-3	結果.....	46
3-4	考察.....	52
3-6	小括.....	55
第4章 総合討論.....		56
4-1	複合トレーニングの効果に影響を及ぼす要因の検討.....	57
4-1-1	トレーニング期間によるランニングエコノミーの改善効果への影響	57
4-1-2	ランナーの競技レベルおよび年齢によるランニングエコノミーの改善効果への影響	59
4-1-3	トレーニング動作によるランニングエコノミーの改善効果への影響	61
4-2	先行研究における知見とランダム化比較実験の結果の照合	62
4-3	現場への応用.....	63
4-4	今後の展望.....	63

第 5 章 結論	64
参考文献.....	65
謝辭.....	77
付録 研究報告一覽.....	78

用語の定義

筋力トレーニング：特定の負荷に対して、筋（群）を運動させることを通して、筋力や筋持久力を向上させることを目的としたトレーニング。筋力トレーニングは、そのサブカテゴリーとして、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングなどを含む^[1]。

高負荷レジスタンストレーニング：最大筋力を向上させることを目的としたトレーニングであり、高負荷で実施するトレーニング。最大挙上重量（1 repetition maximum：以下 1RM）の 80-100%の負荷で実施するトレーニング^[1]。

プライオメトリックトレーニング：ストレッチ-ショートニングサイクル（stretch-shortening cycle：以下 SSC）を利用するトレーニングであり、跳躍パフォーマンスやパワー発揮能力の向上を目的とするトレーニング^[1]。

長距離走：長距離（3000 m 以上）のランニング^[2]。長距離走パフォーマンスは、主に 3000 m 以上の距離を完走するタイム（タイムトライアルパフォーマンス）から評価される。また、最大酸素摂取量や血中乳酸閾値、ランニングエコノミーなどの有酸素性能力や最大酸素摂取量の走速度といった無酸素性能力も長距離走パフォーマンスを反映する^[3]。本修士論文においては、タイムトライアルパフォーマンスに加えて、ランニングエコノミーや最大酸素摂取量の走速度を長距離走パフォーマンスの評価指標として採用した。

一般市民ランナー：先行研究において、競技レベルは最大酸素摂取量に強く依存することが報告されている^[2, 4]。男性ランナーは、55 ml/kg/min 以下、女性ランナーは 45 ml/kg/min の最大酸素摂取量を有していれば、一般市民ランナーと定義した。

最大挙上重量（1RM）：特定の動作を実行する際の、1 回挙上できる最大の重量。

ストレッチショートニングサイクル (SSC) : ジャンプやランニング動作における接地時に、筋腱複合体が伸張性に収縮することによってエネルギーを貯蓄し、その蓄積したエネルギーや伸張反射を利用し、直後の短縮性収縮時に大きなパワーを発揮する筋腱の一連の動態^[5].

最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: 以下 $\dot{V}O_{2\max}$) : 1 分間で身体に取り込むことができる酸素の最大量を体重で正規化した値^[6].

ランニングエコノミー : 最大努力以下の走速度における安定した酸素摂取量もしくはエネルギーコストから求められる走行中のエネルギー消費量^[7]. 最大努力以下の走速度は呼吸商 (Respiratory exchange ratio: RER) ≤ 1.00 の走速度とする.

序

長距離走パフォーマンスは、さまざまな生理学的因子によって規定される。これらの因子の中でも、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2\max}$)、血中乳酸閾値およびランニングエコノミーは、16 km の走タイムを 95.7%の精度で予測することができる^[3]。 $\dot{V}O_{2\max}$ や血中乳酸閾値は筋繊維タイプ^[8, 9]や遺伝的要因^[10]に大きく影響を受けることから、トレーニングによる向上には、長い年月を要する。一方で、最大以下の走速度で走行中の酸素摂取量もしくはエネルギー消費量と定義されるランニングエコノミーは、比較的トレーニングによって改善しやすく、ランニングエコノミーのみでも長距離走パフォーマンスと強く関連することが報告されている^[11]。したがって、長距離走者を対象とした先行研究においては、トレーニングによる長距離走パフォーマンスの変化を評価するために、タイムトライアルパフォーマンスだけでなく、ランニングエコノミーが評価指標として頻繁に採用されている。

ランニングエコノミーは、長期的なランニングトレーニングによって改善することが報告されているが^[12]、既に高いランニングエコノミーを有するランナーのランニング量を増加させたとしても、その改善効果は小さいことが知られている^[13]。しかし、近年のレビュー論文では、ランナーの競技レベルに関わらず、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが、タイムトライアルパフォーマンスを 3-5%、ランニングエコノミーを 4%ほど改善させることが明らかにされた^[2, 4]。ただし、これら複合トレーニングのどちらがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスを向上させるのかは未だ明らかになっていない。近年、中年の一般市民ランナーの競技人口の増加およびランナーの競技志向性が上昇していることを考慮すると^[14]、彼らを対象に、長距離走パフォーマンス向上のための効果的なトレーニング方法の解明は有意義であるといえる。

そこで本修士論文では、中年の一般市民ランナーを対象に、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の違いを明らかにすることを目的とする。

第1章 緒言

1-1 ランナーの現状

ランニングは最も競技人口の多いスポーツの一つであり、世界的に実施されている。また、COVID-19 流行下の現代においては、新たに約 28%の人が習慣的なランニングを始めたことが報告されている^[15]。これらのランナー人口の増加に加えて、2001 年から 2018 年にかけて、マラソンイベントの参加人口は 1.5 倍増加しており、特に 30-50 歳のランナーが最も多い^[16]。しかし、一般市民ランナーの大半は、競技力の向上を目指しているにもかかわらず^[14]、仕事や家庭での時間の増加によって、長距離走パフォーマンスを向上させるためのトレーニングを実施する時間が限られている。したがって、競技力の向上を念頭にトレーニングを実施しているエリートランナーだけでなく、中年の一般市民ランナーのパフォーマンス向上に対する関心が上昇している現代においては、様々な競技レベルのランナーに対して、長距離走パフォーマンスを効果的かつ効率的に向上させるトレーニング方法を解明することは重要な課題である。

1-2 長距離走におけるランニングエコノミーの役割

長距離走パフォーマンスにおいて重要な役割を持つ生理学的な因子としては、最大酸素摂取量（maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2max}$ ）や血中乳酸閾値、ランニングエコノミーが挙げられる^[3]。とりわけ、ランニングエコノミーは、トレーニングの長さ^[12]や同程度の $\dot{V}O_{2max}$ を持つランナーのパフォーマンスを規定するといったエビデンスに基づいて^[3]、長距離走パフォーマンスの評価指標として注目されている。実際に、Fay et al.^[17]は、ランニングエコノミーと 5 km, 10 km, そして 16 km における走タイムの全てと有意な相関関係にあることを示した。さらに、5 km タイムと 14.5 km/h のランニングエコノミー、10 km タイムと 12.9 km/h のランニングエコノミー、そして 16 km タイムと 11.8 km/h のランニングエコノミーがより強い相関関係を持ったことも示された^[17]。このように、ランニングエコノミーとタイムトライアルパフォーマンスの関係性は、走速度によって変動するものの、これらの変数の関係性はおよそ 30 年間一貫して報告されている^[18-23]。

このランニングエコノミーとタイムトライアルパフォーマンスの関係性に加えて、多

くの先行研究では、ランニングエコノミーの改善とタイムトライアルパフォーマンスの向上が同時に示されている^[2, 4, 24]。ランニングエコノミーの改善がタイムトライアルパフォーマンスの向上に関係する理由として、走行中のエネルギー消費量を減少させることによって余力を持って走ることができるようになることが考えられる。先行研究では、ランニングと 10 週間の高負荷レジスタンストレーニングの複合トレーニングは、ランニングエコノミーを有意に改善させ、10 km の走タイムを有意に短縮させた^[25]。とりわけ、タイムトライアルの周回タイムに着目すると、10 週間の介入前後で 0-7000 m の走タイムに有意な変化は見られなかったものの、高負荷レジスタンストレーニングを実施した群において、介入後の 7500-10000 m の走タイムは介入前と比較して有意に短縮していた^[25]。すなわち、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングの複合トレーニングによるランニングエコノミーの改善は、0-7000 m におけるランニング中のエネルギー消費量を抑制し、結果としてラストスパートに十分な余力を残すことができるようになったのではないかと推察できる。このように、ランニングエコノミーの改善は、タイムトライアルパフォーマンスに好影響を及ぼすことが予測できることから、多くの先行研究ではランニングエコノミーの改善を通してタイムトライアルパフォーマンスを効果的に向上させるトレーニング方法について調査されている。

1-3 高負荷レジスタンストレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響

ランニングエコノミーを改善させるためのトレーニングとして、体幹筋トレーニングや呼吸筋トレーニング、下肢の筋力トレーニングなどの様々なトレーニングが挙げられる^[26-30]。しかし、先行研究によると、ランニング中のエネルギー消費量の大部分は、ランニング中の下肢の筋群が収縮することによって消費されるエネルギー消費量から説明できると推測されている^[31]。この考えに加えて、ランニング中における血流の 8 割ほどは下肢の筋群に流れることを考慮すると^[32]、下肢筋群の機能を向上させることは、ランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスを向上させる上で合理的であると思われる。特に、ランニングに追加して実施する高負荷レジスタンストレーニングはランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスを効果的に向上させることが示されている^[24]。高負荷レジスタンストレーニングがランニングエコノミーおよびタ

イムトライアルパフォーマンスを向上させるメカニズムについては、神経的な適応や筋線維タイプの推移、腱特性の変化が関係していると考えられる^[12]。

ランニングと高負荷レジスタンストレーニングの複合トレーニングでは、持久走トレーニングによって活性化される AMPK が、タンパク質合成を促進する mTOR の活性を阻害する干渉作用によって、筋肥大はほとんど引き起こされないため^[33]、筋力を増加させる主な要因は神経的な適応によるものである。高負荷レジスタンストレーニングを実施することによって、最大随意収縮中（maximal voluntary contraction: MVC）の筋活動の増加や下肢の連動性の向上、接地前から筋が活動することによる共収縮の効率化が引き起こされる^[34]。MVC 中の筋活動の増加は、ランニング動作のような最大以下の力発揮時における相対的な筋活動量を低下させる^[35]。この相対的な筋活動量とランニング中の酸素摂取量の間には正の相関関係があることが報告されており^[36]、ランニング中の筋活動量の減少は優れたランニングエコノミーに貢献していることが推察できる。また、先行研究において、高負荷レジスタンストレーニングによって引き起こされる下肢の連動性や共収縮の向上は、立脚期において効率的に力を発揮することや高い脚剛性で走行することができると考えられている^[34, 37-39]。とりわけ、高い脚剛性で走行することは、立脚初期における衝撃力を推進期における足趾離地時にエネルギーを再利用することができ、優れたランニングエコノミーを実現する^[39, 40]。このように、高負荷レジスタンストレーニングによるランニングエコノミーを改善させるメカニズムとして、神経筋機能の向上は重要な役割を果たす。

また、レジスタンストレーニングはその負荷や速度に関係なく、速筋線維である type II X の割合を減少させ、中間筋である type II A や遅筋線維である type I の割合を増加させる^[41]。中間筋や遅筋線維は、速筋線維と比較して運動中のエネルギー効率に優れていることが知られており^[42]、実際に、type II A 線維や type I 線維の割合とランニングエコノミーの間には有意な相関関係があることが報告されている^[43]。そのため、高負荷レジスタンストレーニングによる筋線維の移行もまた、ランニングエコノミーを改善させる可能性がある。ただし、対象者や筋生検における対象筋などの方法論的な違いによって、一貫した結果は得られていない^[44, 45]。したがって、高負荷レジスタンストレーニングによる筋線維タイプの推移がランニングエコノミーの改善に及ぼす影響について、対象者や対象筋によっては結果が異なる可能性がある。

加えて、先行研究においては、足関節底屈動作の高負荷かつ等尺性のレジスタンス

レーニングが実施されており[35, 46, 47], 腱特性の変化とランニングエコノミーの改善が報告されている[35, 47]. その理由として, 足関節底屈の等尺性トレーニングによる足関節底屈筋力の向上や腱特性の変化が, ランニング中の伸張性収縮期および短縮性収縮期におけるヒラメ筋の収縮速度を熱エネルギー効率(エンタルピー効率)の優れた収縮速度に調整することが挙げられている[35]. ヒラメ筋はランニング中における推進力のおよそ50%を担っていることが報告されており[48], ヒラメ筋の収縮における熱エネルギー効率の向上がランニングエコノミーを改善させたと考えられる. 高負荷レジスタンストレーニングは多関節の動作を含むレッグプレスなどのランニング動作と類似した動作で実施することが推奨されているが[49, 50], 上述の通り, 等尺性トレーニングによる足関節底屈筋力の増加や腱特性の変化によってもランニングエコノミーは改善する可能性がある. 以上のことから, ランニングと高負荷レジスタンストレーニングの複合トレーニングは, 下肢の筋腱複合体の生理学的および神経学的変化を通して, ランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスを効果的に向上させることが理解できる.

1-4 プライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響

ランニングとプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングもまた, ランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスを向上させることが報告されているが[2, 4], そのメカニズムについてはあまり理解されていない. しかし, 先行研究では, プライオメトリックトレーニングによるランニング中の最大発揮パワーの向上率とランニングエコノミー(ランニング中の酸素摂取量)の変化率の間には, 有意かつ強い負の相関関係($r=-0.86$)があったことが示されている[51]. 加えて, 10週間の縄跳びトレーニングを実施した研究では, 短い接地時間で高く跳躍する能力を反映するドロップジャンプ指数の向上率は, 3 km 走タイムの短縮率の39.4%を説明しうることも報告されている[52]. このように, プライオメトリックトレーニングはストレッチショートニングサイクル(stretch-shortening cycle: SSC)の遂行能力の向上[20]やドロップジャンプ指数のような短い接地時間で大きなパワーを発揮する能力の向上によって, ランニングエコノミーの改善やタイムトライアルパフォーマンスの向上に関係している可能性がある.

これに関連して, プライオメトリックトレーニングは高負荷レジスタンストレーニング

グと比較して、より限られた時間で力を発揮する必要のあるスプリント能力の向上に有効であることも明らかになっている^[53]。このスプリント能力といった無酸素性能力は有酸素性能力とともに、長距離走パフォーマンスに貢献することが知られている^[25, 54, 55]。例えば、 $\dot{V}O_{2max}$ が記録された走速度 ($v\dot{V}O_{2max}$) は無酸素性能力でありながら、長距離走パフォーマンスと強く関連する^[3, 19, 21]。また、ランニングに追加して高負荷レジスタンストレーニングのみを実施した群 (HRT 群) と高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングを実施した群 (HRT+PT 群) におけるランニングエコノミーの改善の程度を比較した研究では、HRT 群における 16 km/h のランニングエコノミーには有意な改善が確認されなかったが、HRT+PT 群では 16 km/h のランニングエコノミーが有意に改善したことが示された^[56]。これらの速い走速度におけるランニングエコノミーの改善や無酸素性能力の向上が大きいことは、プライオメトリックトレーニング特有の適応であると考えることができる。

1-5 本研究の目的と構成

1-5-1 研究意義と目的

上述の通り、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングは長距離走パフォーマンスの向上にそれぞれ有効であるという見解があるにもかかわらず、どちらのトレーニングが有効であるのかは明らかになっていない。これを明らかにすることは、競技力向上を目的とするエリートランナーやその指導者、限られた時間の中で競技力向上を目指す一般市民ランナーといった幅広い層のランナーに、トレーニングプログラム構築の際に重要な知見を提供できる。そこで、本研究は、長距離走者、特に中年の一般市民ランナーを対象として、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の違いを明らかにすることを目的とした。まず、この主題に関連する先行研究のシステマティックレビューとメタ解析を実施し、現在までに蓄積された知見をまとめた (第 2 章)。そして、第 2 章から明らかとなった先行研究の知見や限界点を踏まえて、実証的に介入研究を行い (第 3 章)、本研究課題の解明を目指した。

1-5-2 本研究の構成

本論文は、緒言（第1章）、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：システムティックレビュー&メタ解析（第2章）、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：ランダム化比較実験（第3章）、総合討論（第4章）、そして結論（第5章）から構成される。

第1章：緒言

長距離走パフォーマンスに関係する因子や長距離走パフォーマンスを向上させる意義について述べた上で、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスを向上させるメカニズムについて、先行研究の知見から検討し、本修士論文の研究目的を設定した。

第2章：高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：システムティックレビュー&メタ解析

現在までに蓄積された先行研究のシステムティックレビューとメタ解析を実施し、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響に関する知見をまとめた。

第3章：高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：ランダム化比較実験

第2章のシステムティックレビューとメタ解析から得られた知見および限界点を踏まえ、中年の一般市民ランナーを対象にランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響について実証的に明らかにした。

第4章：総合討論

以上の結果に基づき、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムト

ライアルパフォーマンスに及ぼす影響について、対象者の特性やトレーニング期間、トレーニングの動作速度の観点から総括的に考察した。

第5章：結論

本修士論文から得られた知見より、長距離走者、とりわけ中年の一般市民ランナーにおいて、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響について結論した。

第2章：高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリック トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：システマ ティックレビュー&メタ解析

2-1 目的

本システマティックレビューとメタ解析の目的は、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響に関する調査を実施した先行研究の知見をまとめ、両複合トレーニングの効果を推定することとした。

2-2 方法

2-2-1 論文選定プロセス

システマティックレビューとメタ解析は Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA) に準じて実施された。著者は、PubMed, Web of Science および SPORTDiscus の 3 つの電子データを用いて以下の検索式で論文を検索した：("strength training" OR "plyometric training" OR "explosive training" OR "resistance training" OR "weight training" OR "concurrent training" OR "muscle training" OR "isometric training" OR "concentric training" OR "eccentric training" OR "depth jumps" OR "muscular endurance training") AND (running OR marathon OR "distance running" OR "distance runner*" OR "endurance running" OR "endurance runner*" OR "endurance athlete*") AND ("running performance" OR "running economy" OR "time trial" OR " $\dot{V}O_{2max}$ " OR "oxygen consumption" OR "oxygen uptake" OR "energy cost" OR "blood lactate" OR speed OR "running speed" OR "lactate threshold" OR "run* time") NOT "review". これらの検索は、2022 年 5 月 7 日に実施し、以降の論文については除外した。

2-2-2 選定基準

ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響について調査した研究を特定したのち、それらの論文から以下の基準を全て満たす研究を採用した。研究は、著者ともう一人の独立した検者によって選定され、級内相関係数 (inter-rater reliability: IRR) と Cohen' κ が算出された。検者間で不一致があった場合、議論を経て一致させた。

- 中、長距離走者を対象とした研究であること。また、クロスカンントリーランナーやデュアスリート、トライアスリートの身体特性や $\dot{V}O_{2max}$ は、中、長距離走者と類似しているため、これらのアスリートを対象とした研究も採用した^[57, 58]。
- ランニングとの複合トレーニングとして、高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングのみを実施していること。
- トレーニング介入期間が 4 週間以上であること。これは筋力トレーニング経験のない個人の神経適応が観察される最短の期間は 4 週間であるという報告に基づく^[59-61]。
- 評価指標として、ランニングエコノミー、もしくは 3 km 以上のタイムトライアルパフォーマンスのどちらかが介入前後で測定されていること。
- コントロール群は介入群と同程度のランニングトレーニングのみしか実施していないこと。
- トレーニング内容が再現可能なほど詳細に記載されていること。
- 対象者が健康的でない、もしくは何らかの疾患を有していないこと。
- サプリメントなどのエルゴジェニックエイドを使用していないこと。
- 英語で書かれた原著論文であること。

2-2-3 データ抽出

上記の選定基準にて採用された論文から、対象者の特性 ($\dot{V}O_{2max}$, 対象者の数, 性別, 年齢), トレーニングプロトコール, ランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスの介入前後における平均値と標準偏差を抽出した。もし、これらの数値データが論文に記載されていない場合は、対応する論文の責任著者に連絡を取り可能な限りデータを収集した。

2-2-4 統計解析

ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響を評価するためにメタ解析を実施した。介入群とコントロール群の介入前後の変化の程度を示す効果量 Hedges' g と 95%信頼区間 (confidence interval: CI) は、サンプルサイズ、介入前後の平均値および標準偏差から算出された^[62]。この算出された効果量は、変量効果モデルのフォレストプロットにて統合された。選定された論文が複数のトレーニング群を設定している、もしくは複数の走速度でランニングエコノミーを測定している、タイムトライアルを複数の走距離で測定している場合、Cochrane's handbook のガイドラインに則り、それらの結果を統合した^[63]。加えて、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングの効果を比較せず、それぞれのトレーニング自体の効果を推定するために、サンプルサイズによる重み付け平均値を計算した。もし、効果量が論文内に記載されていれば、その論文の記載と本研究の計算が一貫しているか確認しつつ、本研究の計算から算出された効果量を採用した。特に断りのない限り、全てのデータは効果量 Hedges' g [95% CI の下限, 上限]と表すこととする。

Hedges' g は、正負に関係なく、trivial < 0.2; small 0.2-0.5; moderate 0.5-1.0; large > 1.0 と解釈した^[64]。95% CI に関して、効果量の 95% CI が 0 を跨げば、アウトカムは有意な変化をしていないとした^[65]。また、ランニングエコノミーの改善やタイムトライアルパフォーマンスの向上は、それぞれ酸素摂取量・代謝コストの減少、完走タイムの短縮を示すため、効果量や変化率が負の値であればアウトカムが向上したことを表す。例えば、95% CI が 0 を跨がず、上限下限ともに負の値を示せば有意なアウトカムの向上、一方で 95% CI が 0 より一貫して大きければ有意なアウトカムの悪化を示すこととした^[65]。

メタ解析に加えて、ランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに影響を与えうる以下の変数をモデレーター変数として、サブグループ解析を実施した：

- 1) $\dot{V}O_{2\max}$; 2) 対象者の年齢 ; 3) 介入期間。 $\dot{V}O_{2\max}$ については、以下の式 (Equation 1) で性差を考慮して、介入群の $\dot{V}O_{2\max \text{ Nor}}$ を算出した^[2, 4, 66, 67]。

$$\text{Equation 1 } \dot{V}O_{2\max \text{ Nor}} = \frac{(n_F \cdot n_M) \times 5}{n_F + M} + \dot{V}O_{2\max \text{ BL}}$$

ここで、 n_F と n_M はそれぞれ介入群の女性と男性のサンプルサイズ、 $\dot{V}O_{2\max \text{ BL}}$ は介入

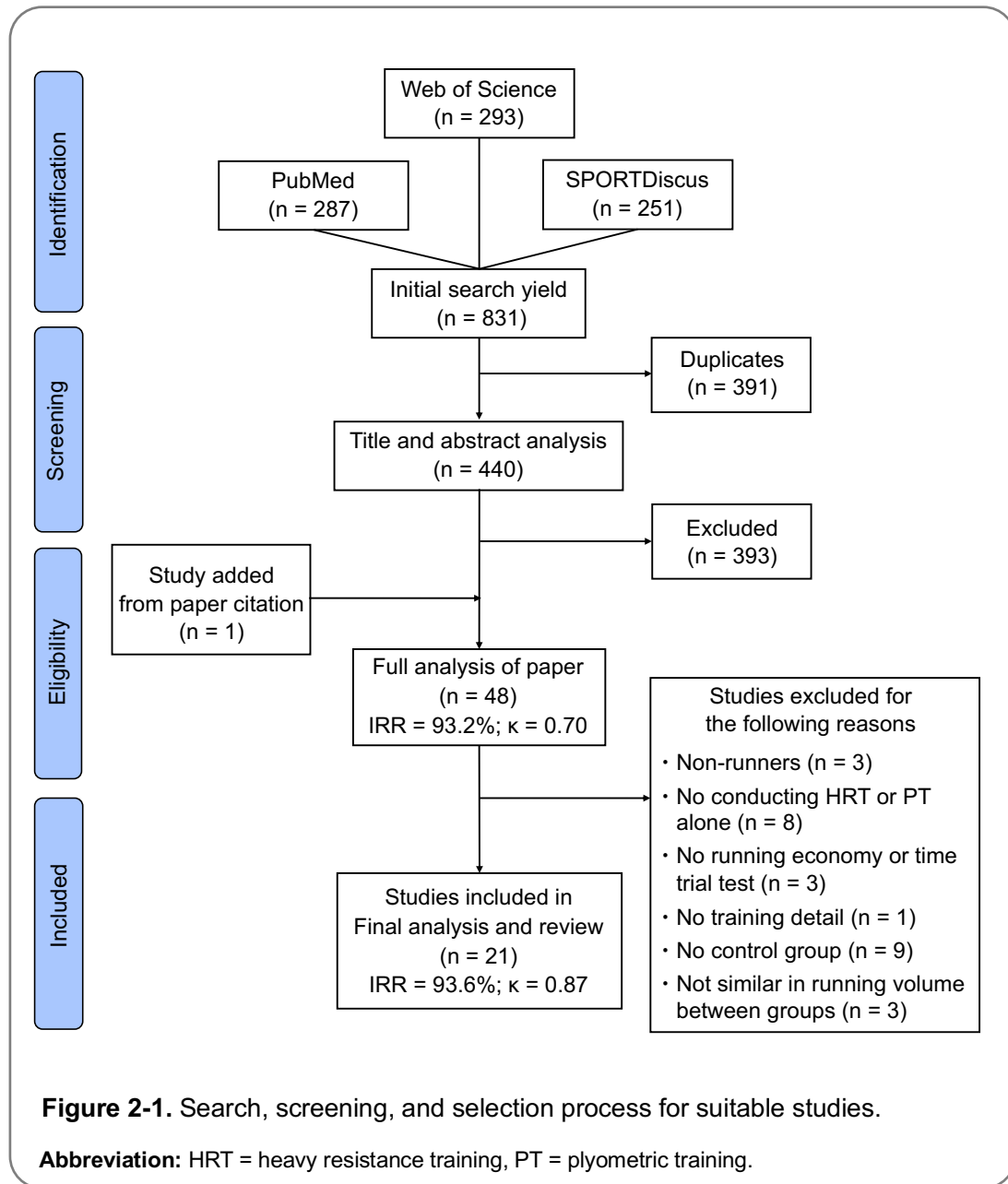
前の $\dot{V}O_{2\max}$ である。そして、 $\dot{V}O_{2\max\text{Nor}} \geq 50 \text{ ml/kg/min}$ を Lv.1 ランナー、 $50 < \dot{V}O_{2\max\text{Nor}} < 60 \text{ ml/kg/min}$ を Lv.2 ランナー、 $\dot{V}O_{2\max\text{Nor}} \leq 60 \text{ ml/kg/min}$ を Lv.3 ランナーとした。対象者の年齢や介入期間は、高負荷レジスタンストレーニングもしくはプライオメトリックトレーニングを採用した論文の中央値によって分類した：年齢（高負荷レジスタンストレーニング，21-35 歳と 34-44.8 歳；プライオメトリックトレーニング，20.7-25 歳と 27.3-34 歳），介入期間（高負荷レジスタンストレーニング，6-8 週間と 10-14 週間；プライオメトリックトレーニング，4-6 週間と 8-10 週間）。これに加えて、高負荷レジスタンストレーニングについては、介入期間を通した最大のトレーニング強度（ $< 90\% \text{ 1 repetition maximum [1RM] or } > 4\text{RM}$ と $\geq 90\% \text{ 1RM or } \leq 4\text{RM}$ ）やトレーニング様式（動的トレーニングと等尺性トレーニング）で分類した^[67, 68]。

さらに、統計的異質性を調査するために I^2 検定とコクランの Q 検定を実施し、出版バイアスをファンネルプロットにて評価した。 I^2 は 25 と 50, 75%でそれぞれ small, moderate, large と解釈した^[69]。コクランの Q 統計量が計算され、 $k - 1$ (k = 採用した研究数) の自由度を持つ χ^2 分布と比較することによって、p 値を取得した^[39]。ファンネルプロットは Egger's 検定によって対称性が評価され、 $p < 0.05$ であれば有意な出版バイアスがあると解釈した。全ての統計解析は RStudio (version 2022.02.0+443, Boston MA) を用いて実施した。

2-3 結果

2-3-1 研究選定

初めの検索によって 831 本の検索結果が検出された (Figure 2-1). その後, $n = 391$ の論文が重複していたため除外され, $n = 393$ の論文がタイトルとアブストラクト分析に基づいて除外された. 一つの論文が先行研究の参考文献リストから追加されたため, 選定基準に基づくフルテキスト分析は $n = 47$ の論文に対して実施された (IRR: 93.2%, Cohen's $\kappa = 0.70$) [25, 35, 46, 47, 51, 52, 54-56, 67, 70-106]. 除外された理由について, Figure 2-1 にて示す. 結果として 22 の研究を選定した (IRR: 93.6%, Cohen's $\kappa = 0.87$) [25, 35, 46, 47, 52, 54, 55, 92-106]. Cohen's κ は“十分”から“ほとんど完璧”と判断された[107]. これら 22 の論文のうち, 1 つの研究グループが 1 つの研究を 2 報の論文に分けて結果を報告していたため [96, 97], これらの論文は 1 つの研究とした. そして, 21 の研究のうち, ランニングエコノミーを測定した論文が 18 [25, 35, 46, 47, 54, 55, 92, 93, 95-99, 101-105], タイムトライアルパフォーマンスを測定した論文が 10 であった[25, 52, 55, 94, 100-104, 106]. また, 高負荷レジスタンストレーニングを実施した研究が 12[25, 35, 46, 47, 55, 92-99], プライオメトリックトレーニングを実施した研究は 9 であった[52, 54, 100-106] (Table 2-1, 2-2).



2-3-2 統計的異質性および出版バイアス

出版バイアスについて、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーに及ぼす影響を調査した研究においては、有意な出版バイアスは検出されなかった (Figure 2-2A). 加えて、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングがタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響を調査した研究においても有意な出版バイアスはみられなかった (Figure 2-2B). 高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響を調査した研究では、 I^2 検定とコクランの Q 検定いずれにおいても有意な統計的異質性は検出されなかった. この結果は、プライオメトリックトレーニングがタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響を調査した研究においても同様であった (Figure 2-3, 2-4).

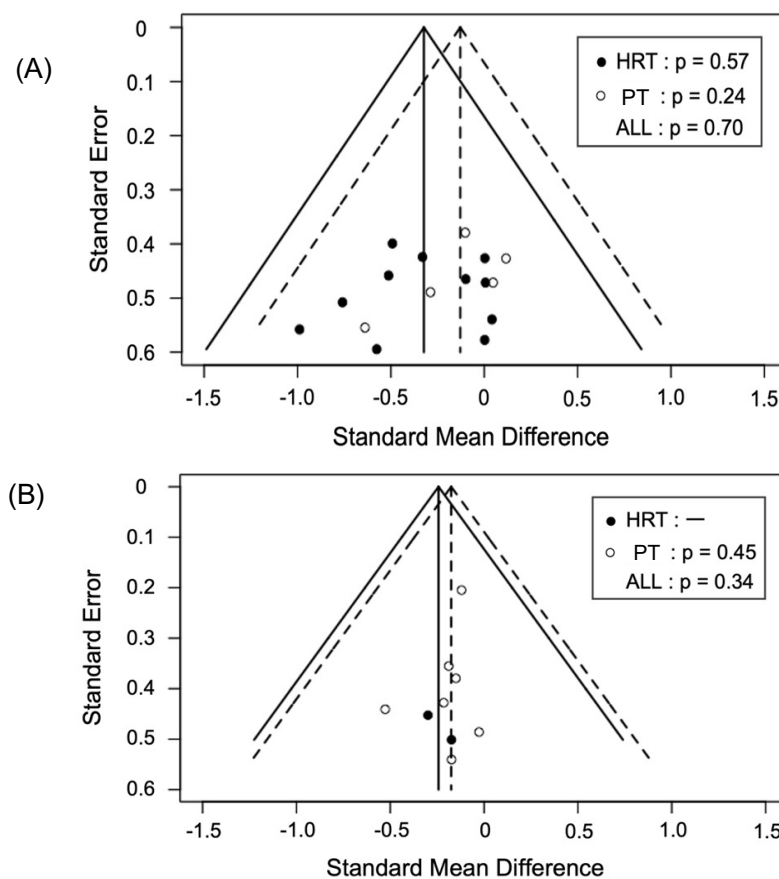


Figure 2-2. Funnel plots of the included studies that examined the effects of heavy resistance training (HRT: solid line) and plyometric training (PT: dash line) on (A) running economy and (B) running time trial performance.

Table 2-1. Study designs, training variables, and the results of the studies adopting heavy resistance training.

Study designs				Training programs		Results	
Level	Author	Group	Number : sex, age	Period (wks)	Max load through the intervention	Running economy	Running time trial performance
1	Albracht & Arampitzis ^[47]	HRT	13: M, 27 ± 5	14	90% MVC	10.8 km/h: -5.0%, g = -0.92 [-1.72, -0.12] 12.6 km/h: -3.4%, g = -0.55 [-1.33, 0.23]	-
		C	13: M, 25 ± 3		-	10.8 km/h: 0.0%, g = 0.00 [-0.76, 0.76] 12.6 km/h: 0.0%, g = 0.00 [-0.76, 0.76]	-
1	Bohm et al. ^[35]	HRT	13: M = 9, F = 4, 29 ± 5	14	90% MVC	9 km/h: -3.8%, g = -0.59 [-1.37, 0.19]	-
		C	10: M = 3, F = 7, 31 ± 3		-	9 km/h: -0.9%, g = -0.10 [-1.98, 0.78]	-
1	Damasceno et al. ^[25]	HRT	9: M, 34.1 ± 7.7	8	3RM	12 km/h: -1.4%, g = -0.16 [-1.08, 0.76]	10 km: -2.5% (p = 0.039)
		C	9: M, 32.9 ± 9.2		-	12 km/h: -1.9%, g = -0.17 [-1.09, 0.75]	10 km: -0.7% (NS, p ≥ 0.050)
1	Ferrauti et al. ^[92]	HRT	11: M = 9, F = 2, 40.0 ± 11.4	8	DRT: 3RM MET: 20RM	8.6 km/h: 5.1%, g = 0.60 [-0.26, 1.46] 10.1 km/h: 2.2%, g = 0.30 [-0.54, 1.14]	-
		C	11: M = 7, F = 4, 40.0 ± 11.4		-	8.6 km/h: 4.0%, g = 0.34 [-0.50, 1.18] 10.1 km/h: 4.6%, g = 0.55 [-0.29, 1.39]	-

Table 2-1. Continue.

Study designs				Training programs		Results	
Level	Author	Group	Number : sex, age	Period (wks)	Max load through the intervention	Running economy	Running time trial performance
1	Festa et al. ^[55]	HRT	11: M = 6, F = 5, 44.2 ± 6.0	8	No numerical data	8.5 km/h: -6.3%, g = -0.80 [-1.63, 0.09]	2 km: -4.5%, g = -0.47 [-1.31, 0.37] 10 km: -6.1%, g = -0.71 [-1.57, 0.15]
		C	9: M = 6, F = 3, 45.4 ± 8.0		-	8.5 km/h: 0.8%, g = 0.06 [-0.85, 0.99]	2 km: -2.2%, g = -0.18 [-1.10, 0.74] 10 km: -2.5%, g = -0.14 [-1.06, 0.78]
1	Karsten et al. ^[94]	HRT	8: M = 5, F = 3, 39 ± 5.1	6	80% 1RM	-	5 km: -3.5%, g = -0.23 [-1.21, 0.75]
		C	8: M = 6, F = 2, 30 ± 7.7		-	-	5 km: 0.5%, g = 0.03 [-0.95, 1.01]
2	Johnston et al. ^[93]	HRT	6: F, 30.3 ± 1.4	10	6RM	12.8 km/h: -4.1%, g = -0.66 [-1.82, 0.50] 13.8 km/h: -3.8%, g = -0.61 [-1.77, 0.55]	-
		C			-	12.8 km/h: 0.5%, g = 0.13 [-1.01, 1.27] 13.8 km/h: 0.9%, g = 0.22 [-0.92, 1.36]	-

Table 2-1. Continue.

Study designs				Training programs		Results	
Level	Author	Group	Number : sex, age	Period (wks)	Max load through the intervention	Running economy	Running time trial performance
2	Piacentini et al. ^[95]	HRT	6: M = 4, F = 2, 44.2 ± 3.9	6	90% 1RM	9.8 km/h: -0.5%, g = -0.04 [-1.18, 1.10] 10.8 km/h: -6.2%, g = -0.62 [-1.78, 0.54] 11.8 km/h: 2.8%, g = 0.24 [-0.90, 1.38]	-
		HRT	5: M = 3, F = 2, 44.8 ± 4.4		70% 1RM	9.8 km/h: -1.7%, g = -0.25 [-1.50, 1.00] 10.8 km/h: -1.3%, g = -0.19 [-1.42, 1.04] 11.8 km/h: -1.2%, g = -0.12 [-1.35, 1.11]	-
		C	5: M, 43.2 ± 7.9		-	9.8 km/h: 0.0%, g = 0.04 [-1.19, 1.27] 10.8 km/h: -1.3%, g = -0.19 [-1.42, 1.04] 11.8 km/h: -1.2%, g = -0.12 [-1.35, 1.11]	-
2	Vikmoen et al. ^[96, 97]	HRT	11: F, 31.5 ± 8.0	11	4RM	10 km/h: -0.5%, g = -0.10 [-0.98, 0.78]	-
		C	8: F, 34.9 ± 7.5		-	10 km/h: 0.3%, g = 0.05 [-0.93, 1.03]	-
3	Fletcher et al. ^[46]	HRT	6: M, 22.2 ± 3.1	8	80% MVC	12.3 km/h: 1.0%, g = 0.12 [-1.02, 1.26] 13.9 km/h: -0.2%, g = -0.03 [-1.17, 1.11] 15.6 km/h: -0.5%, g = -0.10 [-1.24, 1.04]	-
		C	6: M, 26.3 ± 6.0		-	12.3 km/h: 0.0%, g = 0.00 [-1.14, 1.14] 13.9 km/h: 0.2%, g = 0.04 [-1.10, 1.18] 15.6 km/h: -0.2%, g = -0.06 [-1.20, 1.08]	-

Table 2-1. Continue.

Study designs				Training programs		Results	
Level	Author	Group	Number : sex, age	Period (wks)	Max load through the intervention	Running economy	Running time trial performance
3	Millet et al. ^[98]	HRT	7: M, 24.3 ± 5.2	14	90% 1RM	15.0 km/h: −6.9%, g = −0.87 [−1.97, 0.23] 17.5 km/h: −5.6%, g = −0.85 [−1.95, 0.25]	–
		C	8: M, 21.4 ± 2.1		–	15.0 km/h: 7.1%, g = 0.74 [−0.28, 1.76] 17.5 km/h: 5.4%, g = 0.49 [−0.51, 1.49]	–
3	Storen et al. ^[99]	HRT	8: M = 4, F = 4, 28.6 ± 10.1	8	4RM	70% of $\dot{V}O_{2max}$: −5.0%, g = −0.97 [−2.01, 0.07]	–
		C	9: M = 5, F = 4, 29.7 ± 7.0		–	70% of $\dot{V}O_{2max}$: 1.8%, g = 0.23 [−0.75, 1.21]	–
Summary		–	Total size 216	9.6 [8.0, 11.2]	–	Weighted average by sample size HRT group: g = −0.43 [−0.69, −0.17] C group: g = 0.07 [−0.06, 0.21]	Weighted average by sample size HRT group: g = −0.44 [−0.48, −0.39] C group: g = −0.07 [−0.20, 0.06]

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, DRT = dynamic resistance training, MET = muscle endurance training, C = control, M = male, F = female, RM = reputation maximum, reps = repetitions, wk = week, MVC = maximum voluntary contraction, $\dot{V}O_{2max}$ = maximal oxygen consumption, SD = standard deviation, NS = no significant differences ($p \geq 0.05$) pre and post.

Notation of results: The results for running economy were represented as "running speed: parameter; percentage changes, Hedges' g [95% CIs]."

Regarding running time trial performance, represented as "running distance: percentage changes, Hedges' g [95%]."

Data provided in the paper were described if we could not calculate the effect sizes due to the lack of data.

Table 2-2. Study designs, training variables, and the results of the studies adopting plyometric training.

Study designs				Training programs		Results	
Level	Author	Group	Level	Period (wks)	Training	Running economy	Running time trial performance
1	Garcia-Pinillos et al. ^[52]	PT	51: M=27, F=24, 27.2 ± 8.6	10	Jump rope	–	3 km: –3.0%, g = –0.31 [–0.72, 0.10]
		C	45: M=24, F=21, 26.1 ± 6.3		–	–	3 km: –1.5%, g = –0.13 [–0.56, 0.30]
1	Machado et al. ^[100]	PT	8: M 39.0 ± 4.0	8	45-cm drop jump.	–	10 km: –11.6%, g = –0.89 [–1.91, 0.13]
		C	8: M 39.0 ± 4.0		–	–	10 km: –0.3%, g = –0.03 [–1.01, 0.95]
1	Pellegrino et al. ^[101]	PT	11: M = 7, F = 4, 32.5 ± 2.0	6	Squat jump, etc. Refer to Spurrs et al. ^[83]	7.7 km/h: –0.5%, g = –0.16 [–1.00, 0.68] 9.2 km/h: –1.0%, g = –0.38 [–1.22, 0.46] 10.6 km/h: –1.3%, g = –0.40 [–1.24, 0.44] 12.1 km/h: –0.8%, g = –0.24 [–1.08, 0.60] 13.5 km/h: 2.3%, g = 0.65 [–0.21, 1.51] 15.0 km/h: –0.3%, g = –0.07 [–0.91, 0.77] 16.4 km/h: 5.8%, g = 1.07 [0.17, 1.97]	
		C	11: M = 7, F = 4, 34.2 ± 2.6		–	7.7 km/h: 1.8%, g = 0.62 [–0.24, 1.48] 9.2 km/h: 2.3%, g = 0.93 [0.05, 1.81] 10.6 km/h: 2.9%, g = 1.01 [0.13, 1.89] 12.1 km/h: –0.7%, g = –0.22 [–1.06, 0.62] 13.5 km/h: –2.8%, g = –0.79 [–1.65, 0.07] 15.0 km/h: –3.1%, g = –0.81 [–1.67, 0.05] 16.4 km/h: –4.4%, g = –0.46 [–1.30, 0.38]	

Table 2-2. Continue.

Study designs				Training programs		Results	
Level	Author	Group	Level	Period (wks)	Training	Running economy	Running time trial performance
2	Ache-Dias et al. ^[54]	PT	9: :M = 4, F = 5, 24.3 ± 3.1	4	Continuous jump.	9 km/h: -2.1%, g = -0.14 [-1.06, 0.78]	-
		C	9: :M = 4, F = 5, 31.3 ± 5.7		-	9 km/h: -1.3%, g = -0.07 [-0.99, 0.85]	-
2	Berryman et al. ^[102]	PT	11: M, 31 ± 7	8	Drop jump (20, 40 or 60 cm)	12 km/h: -6.9%, g = -0.99 [-1.87, -0.11]	3 km: -4.8%, g = -0.44 [-1.28, 0.40]
		C	5: M, 29 ± 11		-	12 km/h: 0.0%, g = 0.00 [-1.23, 1.23]	3 km: -3.0%, g = -0.18 [-1.41, 1.05]
2	do Carmo et al. ^[103]	PT	15:M, 33.3 ± 6.1	9	Squat jump, etc. Refer to Spurrs et al. ^[83]	Average of 10 km/h, 12 km/h: -0.9%, g = -0.15 [-0.89, 0.59]	10 km: -1.0%, g = -0.16 [-0.89, 0.57]
		C	13:M, 33.3 ± 6.1		-	average of 10 km/h, 12 km/h: 0.0%, g = 0.00 [-0.76, 0.76]	10 km: 0.1%, g = 0.06 [-0.70, 0.82]
2	Spurrs et al. ^[104]	PT	8: M, 25 ± 4	6	Squat jump, etc.	12 km/h: -6.7%, g = -0.42 [-1.42, 0.58] 14 km/h: -6.4%, g = -0.42 [-1.42, 0.58] 16 km/h: -4.2%, g = -0.28 [-1.26, 0.70]	3 km: -1.6%, g = -0.13 [-1.11, 0.85]
		C	9: M, 25 ± 4		-	12 km/h: 0.5%, g = 0.04 [-0.88, 0.96] 14 km/h: 0.5%, g = 0.04 [-0.88, 0.96] 16 km/h: 0.5%, g = 0.04 [-0.88, 0.96]	3 km: -0.5%, g = -0.09 [-1.01, 0.80]

Table 2-2. Continue.

Study designs				Training programs		Results	
Level	Author	Group	Level	Period (wks)	Training	Running economy	Running time trial performance
2	Turner et al. ^[105]	PT	10: M = 4, F = 6, 34 ± 12	6	Vertical jump, etc.	9.7 km/h: NS 11.3 km/h: improve, p < 0.05	–
		C	8: M = 4, F = 4, 27 ± 5		–	9.7 km/h: NS 11.3 km/h: NS	–
3	Ramirez-Campillo et al. ^[106]	PT	17: M = 9, F = 8, 22.1 ± 2.7	6	Drop jump only.	–	2.4 km: –4.0%, g = –0.39 [–1.08, 0.30]
		C	15: M = 10, F = 5, 22.1 ± 2.7		–	–	2.4 km: –1.3%, g = –0.11 [–0.84, 0.62]
Summary		–	Total size 263	6.9 [5.8, 8.0]	–	Weighted average by sample size PT group: g = –0.21 [–0.64, -0.21] C group: g = 0.05 [–0.23, 0.33]	Weighted average by sample size PT group: g = –0.39 [–0.54, –0.24] C group: g = –0.12 [–0.19, -0.04]

Abbreviation: PT = plyometric training, C = control, M = male, F = female, reps = repetitions, wk = week, vLT = velocity of lactate threshold, NS = no significant differences (p ≥ 0.05) pre and post.

Notation of results: The results for running economy were represented as "running speed: parameter; percentage changes, Hedges' g [95% CIs]."

Regarding running time trial performance, represented as "running distance, percentage changes, Hedges' g [95% CIs]."

Data provided in the paper were described if we could not calculate the effect sizes due to the lack of data.

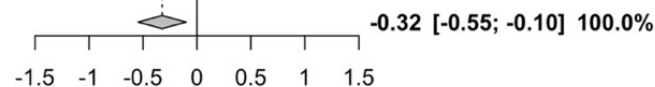
Heavy resistance training

Study	Experimental			Control			Standardised Mean Difference	SMD	95%-CI	Weight
	Total	Mean	SD	Total	Mean	SD				
Millet et al. [98]	8	-0.86	1.39	7	0.62	1.42	←	-0.99	[-2.08; 0.10]	6.8%
Storen et al. [99]	9	-0.97	1.50	8	0.23	1.50	←	-0.76	[-1.75; 0.24]	8.2%
Johnston et al. [93]	6	-0.64	1.31	6	0.17	1.29	←	-0.58	[-1.74; 0.59]	5.9%
Festa et al. [55]	11	-0.80	1.40	9	-0.11	1.13		-0.51	[-1.41; 0.39]	10.0%
Albracht and Arampatzis. [47]	13	-0.74	1.51	13	0.00	1.38		-0.49	[-1.27; 0.29]	13.2%
Bohm et al. [35]	13	-0.59	1.43	10	-0.10	1.42		-0.33	[-1.16; 0.50]	11.7%
Vikmoen et al. [96, 97]	8	-0.10	1.49	11	0.05	1.41		-0.10	[-1.01; 0.81]	9.7%
Fletcher et al. [46]	6	-0.00	1.33	6	-0.01	1.34		0.00	[-1.13; 1.13]	6.3%
Ferauti et al. [92]	11	0.45	1.46	11	0.44	1.40		0.00	[-0.83; 0.84]	11.6%
Damasceno et al. [25]	9	-0.16	1.41	9	-0.17	1.41		0.01	[-0.92; 0.93]	9.5%
Piacentini et al. [95]	5	-0.09	1.30	11	-0.16	1.79		0.04	[-1.02; 1.10]	7.2%

Random effects model 99

101

Heterogeneity: $I^2 = 0\%$, $p = 0.91$



Plyometric training

Study	Experimental			Control			Standardised Mean Difference	SMD	95%-CI	Weight
	Total	Mean	SD	Total	Mean	SD				
Berryman et al. [102]	11	-0.99	1.56	5	0.00	1.21	←	-0.64	[-1.73; 0.45]	13.5%
Spurrs et al. [104]	8	-0.37	1.37	9	0.04	1.35		-0.29	[-1.25; 0.67]	17.3%
do Carmo et al. [103]	15	-0.15	1.46	13	0.00	1.40		-0.10	[-0.84; 0.64]	28.8%
Ache-Dias et al. [54]	8	-0.07	1.41	9	-0.14	1.41		0.05	[-0.91; 1.00]	17.6%
Pellegrino et al. [101]	11	0.47	1.54	11	0.28	1.60		0.12	[-0.72; 0.95]	22.8%

Random effects model 53

47

Heterogeneity: $I^2 = 0\%$, $p = 0.84$

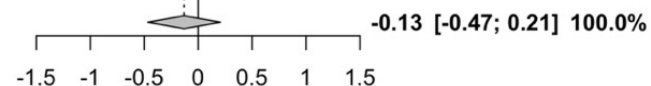
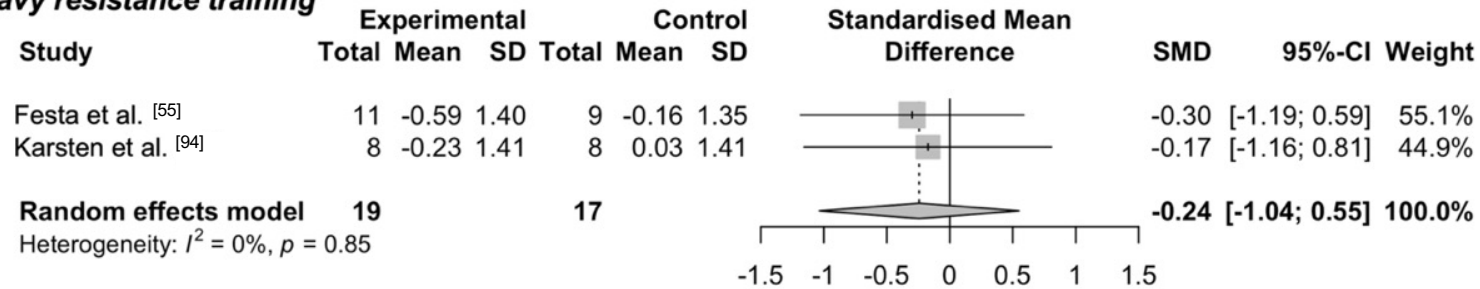


Figure 2-3. Forest plots of the effects of heavy resistance (upper) and plyometric (lower) training on running economy. Each plot consists of standardized mean difference (SMD) and its 95% CIs.

Heavy resistance training



Plyometric training

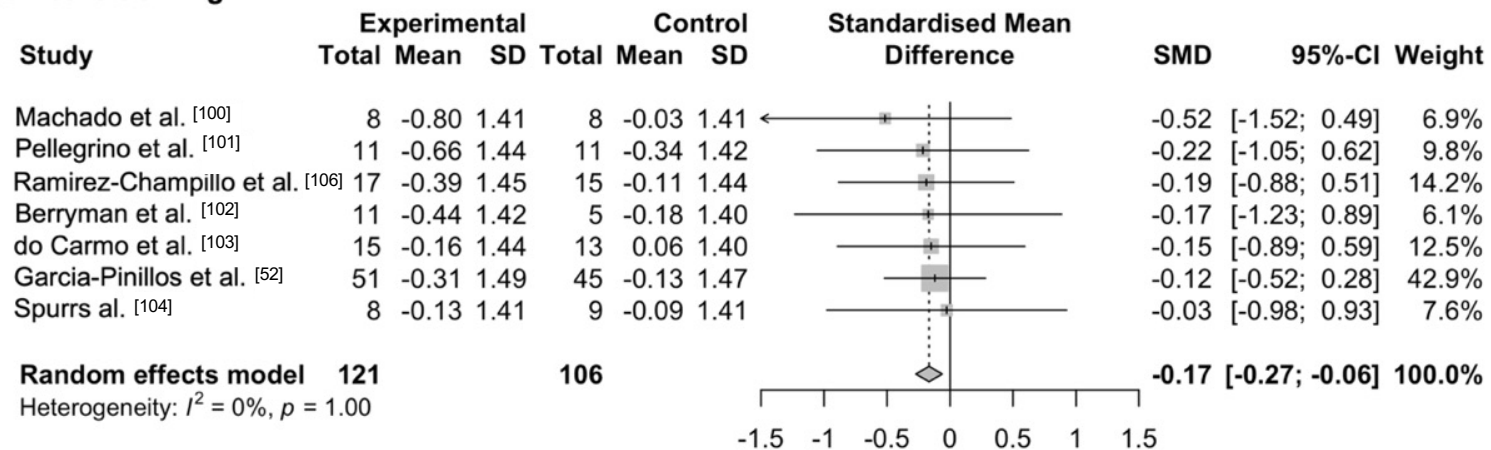


Figure 2-4. Forest plots of the effects of heavy resistance (upper) and plyometric (lower) training on running time trial performance. Each plot consists of standardized mean difference (SMD) and its 95% CIs.

2-3-3 高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の比較

高負荷レジスタンストレーニングもしくはプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルに与える影響について調査した研究のサンプルサイズの合計は、それぞれ 216 と 263 であった。両トレーニングのトレーニング期間については、高負荷レジスタンストレーニングは 9.6 [95% CI: 8.0, 11.2]週間、プライオメトリックトレーニングは 6.9 [95% CI: 5.8, 8.0]週間であった (Table 2-1, 2-2)。

高負荷レジスタンストレーニングがランニングエコノミーに及ぼす統合された効果量はプライオメトリックトレーニングのそれよりも大きいことが示された ($g = -0.32$, small vs. -0.17 , trivial; Figure 2-3)。さらに、タイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響についても、高負荷レジスタンストレーニングの方が大きいことが示された ($g = -0.24$, small vs. -0.17 , trivial; Figure 2-4)。

2-3-4 高負荷レジスタンストレーニングがランニングエコノミーに及ぼす影響についてのサブグループ解析

サブグループ解析の結果、Lv.3 のエリートランナーが高負荷レジスタンストレーニングを実施した際のランニングエコノミーに及ぼす効果量は、Lv.2 および 1 ランナーよりも大きかった (Lv. 3 [エリート] vs. Lv. 1-2 [サブエリート], $g = -0.61$, moderate vs. -0.18 to -0.27 , trivial-small; Table 2-3)。この傾向は、年齢 (若年 vs. 中年, $g = -0.51$, moderate vs. -0.12 trivial), トレーニング強度 ($\geq 90\%$ 1RM or ≤ 4 RM vs. $< 90\%$ 1RM or > 4 RM, $g = -0.31$, small vs. -0.17 , trivial), そしてトレーニング期間 (10-14 vs. 6-8 週, $g = -0.45$, small vs. -0.21 , small) においても確認された。加えて、 $\geq 90\%$ 1RM or ≤ 4 RM の強度で実施された、および 10 週間以上実施された高負荷レジスタンストレーニングがランニングエコノミーに及ぼす効果量に関連する 95%信頼区間は 0 を跨がなかった (Table 2-3)。タイムトライアルパフォーマンスについては、高負荷レジスタンストレーニングがタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響を調査した研究が不足していることから、サブグループ解析は実施できなかった。

Table 2-3. Subgroup analyses regarding effects of heavy resistance training on running economy.

Moderator variables	Hedges' g [95% CIs LL, UL]	Interpretation
$\dot{V}O_{2\max}$ level		
Lv. 1 (Recreational level)	−0.27 [−0.59, 0.04]	Small
Lv. 2 (Moderate level)	−0.18 [−0.92, 0.56]	Trivial
Lv. 3 (Elite level)	−0.61 [−1.84, 0.63]	Moderate
Age		
Young (21.0-31.5 years)	−0.51 [−0.83, −0.19]	Moderate
Old (34.1-44.8 years)	−0.12 [−0.41, 0.17]	Trivial
Training load		
< 90% 1RM or > 4RM	−0.17 [−1.05, 0.70]	Trivial
≥ 90% 1RM or ≤ 4 RM	−0.31 [−0.61, −0.02]	Small
Training modality		
Dynamic training	−0.32 [−0.64, 0.00]	Small
Isometric training	−0.33 [−0.89, 0.22]	Small
Intervention period		
Short (6-8 weeks)	−0.21 [−0.56, 0.15]	Small
Long (10-14 weeks)	−0.45 [−0.83, −0.08]	Small

Data are standardized mean difference for effect size values (Hedges' g).

Hedges' g represents time (pre vs. post) by group (experimental vs. control) interaction.

Abbreviation: CIs = confidence intervals, LL = lower limit, UL = upper limit.

2-3-5 プライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーに及ぼす影響についてのサブグループ解析

プライオメトリックトレーニングにおいても、Lv.2 ランナーがプライオメトリックトレーニングを実施した際のランニングエコノミーに及ぼす影響の効果量は、Lv.1 ランナーのそれよりも大きかった (Lv. 2 vs. Lv. 1, $g = -0.20$, small vs. 0.12, trivial; Table 2-4). 競技レベルと同様に、若年ランナーにおける効果量は中年ランナーよりも大きく (若年 vs. 中年, $g = -0.26$, small vs. -0.01 , trivial), 長い介入期間のトレーニング実施した際の効果量は短い介入期間よりも大きいことが示された (8-10 vs. 4-6 週, $g = -0.26$, small vs. -0.06 , trivial). タイムトライアルパフォーマンスについては、高負荷レジスタンストレーニングと同様、プライオメトリックトレーニングがタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響について研究数が少ないため、サブグループ解析は実施できなかった。

Table 2-4. Subgroup analyses regarding effects of plyometric training on running economy.

Moderator variables	Hedges' g [95% CIs LL, UL]	Interpretation
Performance level		
Lv. 1 (Recreational level)	0.12 [-0.72, 0.95]	Trivial
Lv. 2 (Moderate level)	-0.20 [-0.62, 0.22]	Small
Lv. 3 (Elite level)	-	
Age		
Young (24.3-31.0 years)	-0.26 [-1.09, 0.58]	Small
Old (32.5-33.3 years)	-0.01 [-1.38, 1.37]	Trivial
Intervention period		
Short (4-6 weeks)	-0.06 [-0.67, 0.55]	Trivial
Long (8-10 weeks)	-0.26 [-0.67, 0.15]	Small

Data are standardized mean difference for effect size values (Hedges' g).

Hedges' g represents time (pre vs. post) by group (experimental vs. control) interaction.

Abbreviation: CIs = confidence intervals, LL = lower limit, UL = upper limit.

2-4. 考察

本システムティックレビューとメタ解析から得られた主な知見は以下の通りである：1) ランニングに追加して実施する高負荷レジスタンストレーニングはプライオメトリックトレーニングよりもランニングエコノミーの改善に効果的である可能性が示唆された；2) タイムトライアルパフォーマンスの向上に関しても、高負荷レジスタンストレーニングの方がプライオメトリックトレーニングと比較して効果量が高値を示した；そして、3) ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーに及ぼす効果は、トレーニング期間やランナーの年齢、ランナーの競技レベルをサブグループとして扱うことで変化した。これらの結果は、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスを向上させる上で、特に若年もしくは競技レベルの高いランナーがトレーニングを長い期間実施する際に、効果的である可能性が示唆された。

本システムティックレビューとメタ解析の結果より、効果量における点推定値およびその 95%信頼区間による区間推定のどちらの観点からも、高負荷レジスタンストレーニングはランニングエコノミーに有益な効果をもたらす可能性が示された。一方、プライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーに及ぼす影響が小さかった理由として挙げられる要因は、トレーニング期間の違いである。高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングのトレーニング期間の平均とその 95%CI は、それぞれ 9.6 [95%CI: 8.0, 11.2] 週間と 6.9 [95%CI: 5.8, 8.0] 週間であった。先行研究 [20, 108, 109] やサブグループ解析の結果からも示されているように、プライオメトリックトレーニングによってランニングエコノミーの改善効果を増大させるためには、長期間の介入が必要であると考えられている。これらの先行知見があるにも関わらず、8 つの研究のうち、6 つの研究で介入期間は 6 週間以内に設定されていた。この介入期間の短さは、プライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスを向上させるのに十分ではなかった可能性が考えられる。

また、サブグループ解析の結果から、トレーニング期間だけでなく、ランナーの年齢や競技レベル、高負荷レジスタンストレーニングの負荷がランニングエコノミーに及ぼす効果に影響する可能性が示唆された。第 4 章にて別の観点からも考察を記載するが、特にプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーに及ぼす影響は、Lv.1 ラ

ランナーにおいて Lv.2 ランナーよりも小さくなることが示された。この結果は、Lv.1 ランナーの筋力が低いことが関係している可能性がある。Lv.1 ランナーを対象とした研究は 1 つのみであったが^[101]、プライオメトリックトレーニングによって 7.7-10.6 km/h のランニングエコノミーは改善したが、一方で 12.1-16.4 km/h の速い走速度では、ランニングエコノミーが悪化したことを示した。先行研究の結果から、走速度が 7.2 km/h から 18.7 km/h に変化すると、接地時間は 343 ms から 183 ms に減少することがわかっている^[48, 110]。すなわち、速い走速度のランニングエコノミーを改善させるためには、短い接地時間で跳躍する能力が必要になると推測できる。しかし、筋力が低ければ、ドロップジャンプを実施する際の接地時間は長くなることが明らかになっている^[111]。さらに、高いパフォーマンスを有するランナーは下肢の筋力が高いことが報告されている^[112]。これらの先行知見から、Lv.1 ランナーは Lv.2 ランナーと比較して筋力が低く、短い接地時間でのプライオメトリックトレーニングが実施できなかったのではないかと考えられる。

また、高負荷レジスタンストレーニングにおいても、若年ランナーを対象とした際には、中年ランナーを対象とした際と比較してランニングエコノミーに対する効果が大きかった。同様に、競技レベルの高いランナーは、競技レベルの低いランナーよりもトレーニング効果が大きいことが示されている (Table 2-4)。これらのランナーの競技レベルや年齢が、トレーニング効果を低減させるメカニズムについては不明であるが、一般市民ランナーもしくは中年のランナーを対象としたいくつかの先行研究において、トレーニングによる筋力や跳躍パフォーマンスの向上を示しているものの、有意なランニングエコノミーの改善は示されていない^[25, 89]。しかし、Piacentini et al.^[95]は、6 週間の介入期間であったが、85-90% 1RM の負荷で中年ランナーがレジスタンストレーニングを実施したところ、6.2%のランニングエコノミーの改善を示した。実際に、サブグループ解析では、トレーニング期間を通した最大の負荷が、90% 1RM 以上もしくは 4RM 以下であれば、ランニングエコノミーの改善は中程度であることが示されている (Table 2-3)。そのため、中年の一般市民ランナーを対象として高負荷レジスタンストレーニングを実施する場合、最大に近い強度で実施することでランニングエコノミーの改善効果が増大する可能性がある。

一方で、高負荷レジスタンストレーニングがタイムトライアルパフォーマンスに影響はプライオメトリックトレーニングのそれよりも大きかったが、高負荷レジスタンストレーニングの信頼区間は 0 を跨いでいた。これは、高負荷レジスタンストレーニングを

実施した研究でタイムトライアルパフォーマンスを評価した研究が少ないこと、およびタイムトライアルパフォーマンスについての効果量を報告していない研究が存在することが一因である。例えば、Damasceno et al.^[25]は、高負荷レジスタンストレーニングが10 km のタイムトライアルパフォーマンスを向上させたが、数値データを報告していなかったため、効果量の計算が不可能であった。そのため、高負荷レジスタンストレーニングがタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響については、研究数の増加が必要とされる。

このように、本システムティックレビューとメタ解析では、ランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスの改善の程度に関する効果量を推定した。しかし、研究間の方法論の違いを考慮すると、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングの効果を直接比較したわけではない。さらに、高負荷レジスタンストレーニングおよびプライオメトリックトレーニングがタイムトライアルパフォーマンスにどのような影響を及ぼすかを調査した研究数が少なかった。したがって、高負荷レジスタンストレーニングがプライオメトリックトレーニングよりも長距離走パフォーマンスを向上させる上で、真に効果的であるのかは実証されていない。

2-5 小括

本システムティックレビューとメタ解析は、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響に関する先行研究の知見をまとめ、トレーニングの効果を推定することであった。この目的を達成するために、先行研究の結果を収集し、システムティックレビューとメタ解析を実施した。本研究の結果から、以下のことが明らかとなった：

1. ランニングと高負荷レジスタンストレーニングの複合トレーニングは、プライオメトリックトレーニングよりもランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスを向上させるために有効なトレーニング様式である可能性が示唆された。
2. ただし、両複合トレーニングがランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響は小さかった。
3. ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーに及ぼす効果は、トレーニング期間やランナーの年齢、ランナーの競技レベルをサブグループとして扱うことで変化した。

しかし、本システムティックレビューとメタ解析には、いくつかの限界点が挙げられた。すなわち、1) トレーニング期間がランニングエコノミーに及ぼす効果に影響するといった知見が示されたにも関わらず、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングのトレーニング期間が有意に異なっていたこと、2) 対象者がプライオメトリックトレーニングを短い接地時間で実施できていたかどうか不明であること、そして 3) 両複合トレーニングの効果を直接的に比較できていないことである。したがって、続く章では、明らかとなった限界点を考慮した上で、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の違いについて、実証的に明らかにすることを目的として研究を実施した。

第3章：高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリック トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響：ランダム 化比較実験

3-1 目的

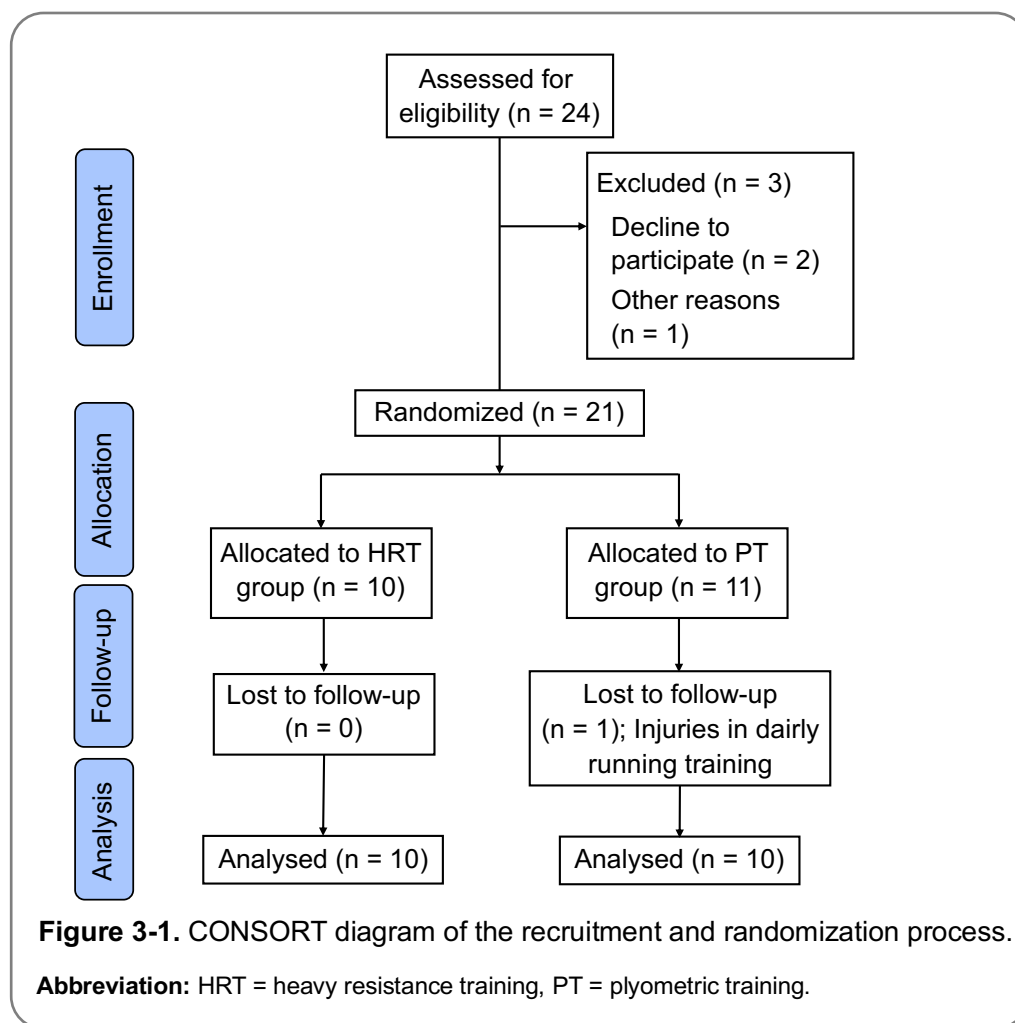
第2章より、先行研究における以下3つの限界点が挙げられた：1) ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニング期間が異なっていた点、2) プライオメトリックトレーニングを短い接地時間で実施できていなかった可能性がある点、3) 両複合トレーニングの効果を直接比較できていない点である。第2章におけるサブグループ解析の結果では、中年もしくは一般市民ランナーが複合トレーニングから得られる効果は小さいことが示されたが、彼らを対象として、長期間のトレーニングを実施した研究はこれまでにない。近年、中年の一般市民ランナーが増加している一方で^[16]、家庭や仕事に多くの時間を費やしているため、彼らを対象として、長距離走パフォーマンスを向上させるための効果的なトレーニング方法を解明することは有意義であると考えられる。10週間以上のトレーニング期間を設定することで、両複合トレーニングの効果が増大することが示されていることから、中年の一般市民ランナーを対象としたトレーニングであっても、長距離走パフォーマンスを効果的に向上させうると考えられる。

したがって、本研究の目的は、先行研究における限界点を克服しつつ、中年の一般市民ランナーを対象に、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングのどちらがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスを向上させる上で効果的か明らかにすることとした。仮説は、(仮説1) 高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響は同程度であることとした。ただし、スプリント能力の向上効果については、高負荷レジスタンストレーニングよりもプライオメトリックトレーニングの方が大きい^[53]、(仮説2) 無酸素性能力の一つである $\dot{V}O_{2\max}$ については、プライオメトリックトレーニングが高負荷レジスタンストレーニングと比較して改善効果が大きいこととした。

3-2 方法

3-2-1 目的を達成するためのアプローチ

本研究は、中年の一般市民ランナーを対象者とし、縦断的なランダム化比較を研究デザインとして採用した。研究の介入前と介入後において以下のパラメータについて評価した：体組成や1RM、跳躍パフォーマンス、ランニングエコノミー、5 km 走タイム、 $\dot{V}O_{2\max}$ 、 $v\dot{V}O_{2\max}$ 。そして、研究対象者をランニングと高負荷レジスタンストレーニングを実施する群（heavy resistance training group: HRT 群）とプライオメトリックトレーニングを実施する群（plyometric training group: PT 群）の2群にランダムに振り分けた。両群ともにそれぞれに割り当てられたトレーニングを10週間週2回実施した。対象者の選定フローを Figure 3-1 にて示す。



3-2-2 対象者

対象者は、21名の30-50歳の一般市民ランナーとした。全ての対象者は、日常的に週2回以上のランニングトレーニングを実施していた。対象者には、介入期間中は介入前のランニング量を維持し、ランニング量を1週間ごとに記録するよう指示をした。研究の開始前に、対象者は研究に関するリスクおよび利益について十分な説明を受け、対象者より書面によって実験参加の同意を得た。本研究は、立命館大学の人を対象とする研究倫理審査委員会の「人を対象とする研究倫理」の承認を受け実施した（BKC-LSMH-2021-086）。最終的に、20名の対象者が研究を完遂した（Figure 3-1）。対象者は年齢、性別、 $\dot{V}O_{2\max}$ 、5 kmの走タイム、週の走行距離に基づいて層別ランダム化にてHRT群とPT群に振り分けられた。層別ランダム化はR 4.1.0（version 2022.02.0+443, Boston MA）を使用して実施した。Table 3-1にて対象者の身体的特性およびそれらの介入前後の変化について記載した。

Table 3-1. The characteristics of participants and these changes between pre- and post-test.

	HRT group		PT group		P value
	Pre	Post	Pre	post	
Age [years]	43.8 ± 5.4	–	41.4 ± 6.3	–	0.39
Running experience [years]	10.1 ± 5.0	–	10.8 ± 4.0	–	0.77
Height [cm]	166.6 ± 7.7	166.7 ± 8.1	167.7 ± 9.7	167.9 ± 9.7	0.79
Body mass [kg]	58.3 ± 9.3	58.4 ± 9.5	61.4 ± 14.2	61.6 ± 14.7	0.57
Body fat percentage [%]	18.0 ± 6.6	17.0 ± 5.4	18.2 ± 5.4	17.3 ± 6.0	0.64
Muscle volume [kg]	45.1 ± 8.8	45.7 ± 8.7	46.9 ± 9.5	47.6 ± 10.2	0.54
Running volume [km/wk] ^a	37.5 ± 16.7	28.5 ± 24.0	44.8 ± 27.1	43.1 ± 21.0	0.49
$\dot{V}O_{2max}$ [ml/kg/min]	47.1 ± 6.6	47.4 ± 5.6	46.4 ± 8.1	45.9 ± 6.4	0.84
5 km running time [s]	1295.3 ± 190.6	1311.5 ± 174.6	1293.5 ± 107.4	1318.1 ± 186.0	0.86

Each p value is the results of t-test at pre-test.

The values and p value in 5 km running time was represented to eliminate missing data (HRT n = 8, PT n = 9).

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training

^a Significant time by group interaction effect (p < 0.05).

3-2-3 研究プロトコール

介入前測定と介入後測定

介入前測定および介入後測定ともに2日間に渡って実施した。初日は、体組成や1RM、跳躍パフォーマンス、ランニングエコノミー、 $\dot{V}O_{2max}$ 、 $v\dot{V}O_{2max}$ の測定を実施し、2日目には5 kmのタイムトライアルパフォーマンスについて測定した。1日目と2日目の間隔は48時間以上空けることとした。対象者には、測定までの3時間はカフェインを、24時間はアルコールを控えるように指示をし、介入前測定と介入後測定は同じシューズを着用するよう指示した。全ての測定は、対象者の概日リズムの影響を避けるため、介入前テストと介入後テストは同様の時間帯に実施された (± 1.5 時間)。

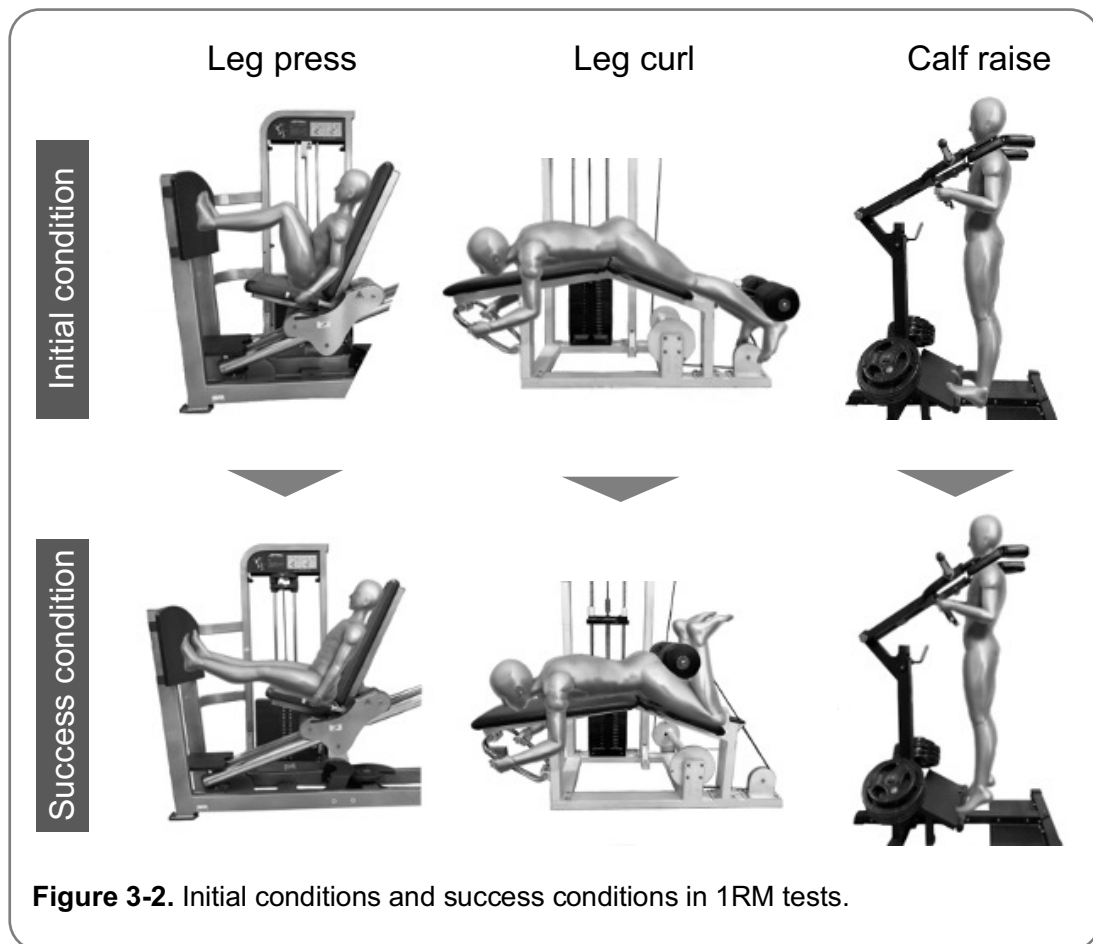
体組成の測定

身長と体重は全自動身長計付き体重計 (WB-510, TANITA 社製, Tokyo, Japan) を用いて計測した。これらの計測結果からボディマス指標 (Body mass index: BMI) を算出した。また、体脂肪率や筋肉量は体組成計を用いて、計測した (InBody770, InBody Japan Co. Ltd., Tokyo, Japan)。

最大挙上重量 (1 repetition maximum: 1RM) の測定

1RM 測定は、レッグプレス (Hammer Strength, Life fitness Japan 社製, Tokyo, Japan), プローンレッグカール (prone leg curl machine, Senoh 社製, Chiba, Japan), カーフレイズ (V squat, Wild fit 社製, Osaka, Japan) の3種目において実施した。十分なストレッチの後、対象者は体重や年齢から推定した1RMの50%の負荷で5回挙上してウォームアップをした。ウォームアップ後、4-6回の試技を通して、実際の1RMを決定した。試技間の休息時間は2分とした。それぞれの種目における初期の関節角度と成功条件は以下の通りとした (Figure 3-2): レッグプレスについて、初期角度は膝関節角度および足関節を90°に設定し、椅子に深く座るように指示した。膝関節が完全に伸展した際、その試技を成功とみなした。プローンレッグカールは、膝関節を完全に伸展させ、シューズの踵の襟部分がクッションの中央に位置するように設定した。膝関節が限界まで屈曲した際、成功試技とした。カーフレイズにおいては、股関節が0°、膝関節が完全伸展位、そして足関節が完全に背屈した状態を初期状態とした。無負荷の状態で

挙上できた高さを予め記録し、負荷のある状態でその高さまで足関節を底屈して挙上できれば成功とした。



跳躍パフォーマンス測定

1RM テスト実施後、対象者は垂直跳び (counter-movement jump: CMJ) と 30 cm 台からのドロップジャンプを実施した。対象者はそれぞれのジャンプを 3-5 回練習した。CMJ では、腕の振りを利用し、最大の跳躍高を記録できるよう急速に沈み込みスクワット動作によって垂直に跳ぶように指示した。跳躍高は、光学式ストライド計測システム (Opto-jump-next, Microgate 社製, Bolzano, Italy) にて記録した。この試技を 3 回行い、跳躍高が最も高い試技をデータ分析に含めた。ドロップジャンプにおいては、30 cm の高さの台に立ち、箱から落ちるように着地し、短い接地時間で高く跳躍するように指示をした。跳躍高、接地時間、そしてこれら 2 つから算出されるドロップジャンプ指数を Opto-jump-next にて測定した。この試技を 3 回繰り返し、跳躍高が最も高かった試技をデータ分析に含めた。もし、跳躍高が最も高かった試技が 2 つ以上あった場合、接地時間の最も短い試技を採用した。

ランニングエコノミーおよび最大酸素摂取量の測定

ランニングエコノミーと $\dot{V}O_{2\max}$ はトレッドミル (Valiant ultra; Lode BV 社製, Groningen, The Netherlands) を用いて測定された。酸素摂取量は breath-by-breath 法にて呼気ガス分析機 (AE-310s, Minato Medical Science 社製, Osaka, Japan) を用いて測定し、心拍数は心拍センサー (Polar H10, Polar 社製, Kempele, Finland) を用いて測定を実施した。対象者はウォームアップと馴化のために、5 分間 8 km/h の速度でトレッドミル上にて走行した。そして、ウォームアップ後、3 分の休息を挟み、8, 10, そして 12 km/h の速度で 3 分間走行を開始した。ランニングエコノミーはそれぞれの試技における最後の 1 分間の平均酸素コスト (ml/kg/km) として定義した。それぞれの試技間の休息は 3 分とした。すべてのランニングエコノミー測定中の呼吸交換比率 (respiratory exchange ratio: RER) の平均値は 1.00 を下回っていた。

この最大以下の走行テストの後 3 分間の休息を挟み、 $\dot{V}O_{2\max}$ とその走速度を決定するために、走速度を時間に応じて増加させていく漸増負荷試験を実施した。始めの速度は 12 km/h に設定し、1 分間で 1 km/h ずつ増加させ、14 km/h に達した後は 1 分間で 0.6 km/h ずつ増加させた。この漸増負荷試験は対象者が実験検者に対してこれ以上走ることができない旨を伝えた際に終了とした。ただし、対象者が限界であることを伝える前

に、疲労困憊に達した際は、直ちに走行を終了した。以下の 2 つの条件を満たした際、疲労困憊と定義した：1) 年齢から予測される最大心拍数 ($208 - \text{対象者の年齢} \times 0.7$) の 90%に達した、2) RER が 1.10 を超えた。 $\dot{V}O_2$ の値は 30 秒ごとに平均化し、最も $\dot{V}O_2$ の値が高い 30 秒を $\dot{V}O_{2\max}$ とし、その時の走速度を $v\dot{V}O_{2\max}$ とした。また、実験環境は介入前後のテスト間で同様になるよう調整した (22-24°C)。

5 km タイムトライアルの測定

測定の 2 日目は、全天候型 400 m トラックで 5 km のタイムトライアルを実施した。30 分のウォームアップ後、5 km のランニングテストを走行し、口頭にてテスト中は全力を尽くすよう伝えた。

3-2-4 トレーニング介入

トレーニング期間中、対象者は週 2 回の筋力トレーニングを実施し、セッション間は最低 48 時間以上間隔を空けるよう指示された。加えて、介入期間中は普段通りのトレーニングを継続するように説明したが、筋力トレーニングの 6 時間前は疲労による発揮筋力の低下を避けるために^[33]、ランニングトレーニングの実施を控えるよう指示した。筋力トレーニングは割り当てられたトレーニングを実施した (Table 3-2)。全てのセッションは監督され、トレーニング全体の時間、脚の主観的疲労度 (rate of the perceived exertion: RPE)、そして全身の RPE が 0 (何も感じない) から 10 (耐えられないほど苦しい) の尺度で記録された (Figure 3-3) ^[113]。トレーニング強度はこれら 3 つの観点から考慮することとした。

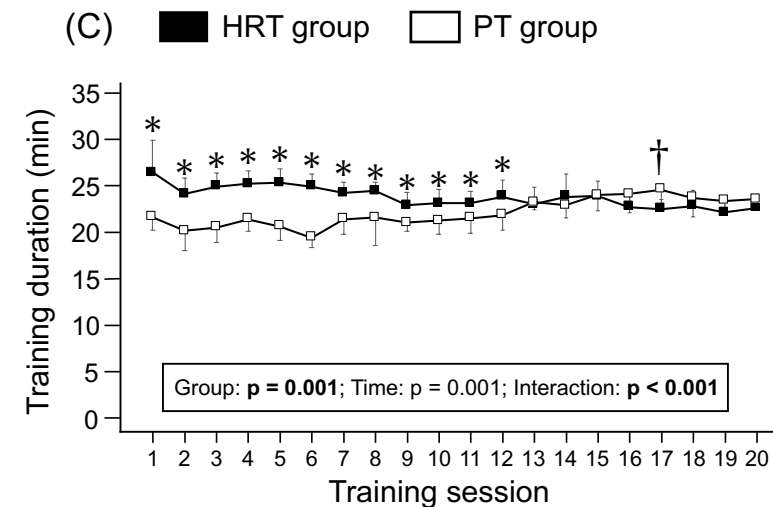
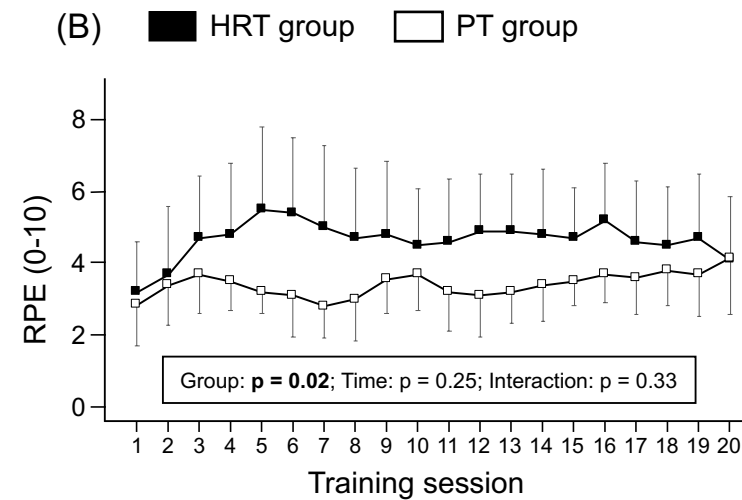
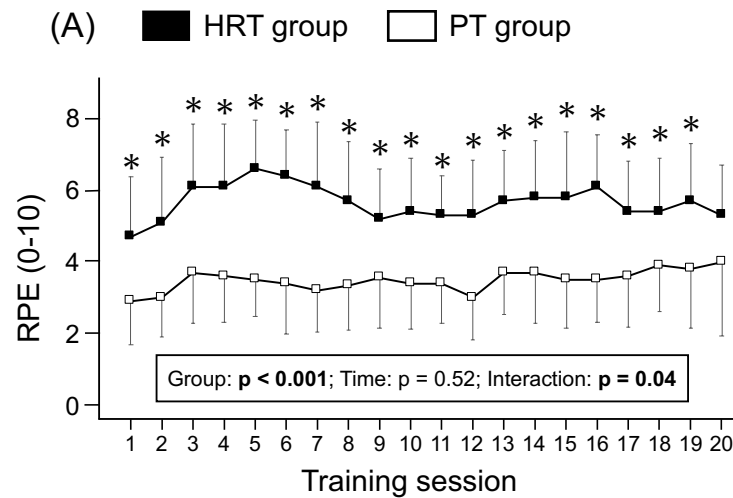


Figure 3-3. The mean difference in (A) RPE in legs, (B) RPE in whole bodies, and (C) training duration between HRT group and PT group (mean $\pm$ SD).

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training.

* denotes significant ($p < 0.05$) difference to PT group in post hoc t-test.

† denotes significant ($p < 0.05$) difference to HRT group in post hoc t-test.

高負荷レジスタンストレーニング

HRT 群はレッグプレス、ブローンレッグカール、そしてカーフレイズをそれぞれ 3 セット実施した。トレーニング負荷と回数は、1-2 週は 50-60% 1RM の負荷で 10 回実施し、トレーニング最後の 9-10 週は 90% 1RM の負荷で 4 回実施するように変化させた (Table 3-2)。トレーニングは瞬発力を使わない、かつ短縮性と伸張性収縮の段階にてそれぞれ 2 秒ずつ費やすよう、60 bpm のテンポに設定したメトロノームに合わせて動作を実行するように指示をした。セット間の休息は 2 分に設定した。

プライオメトリックジャンプトレーニング

PT 群は CMJ、ドロップジャンプ、リバウンドジャンプ、そしてハードルホップのような様々なジャンプ動作を実施した (Table 3-2)。始めの 2 週間において、対象者は CMJ と両脚ハードルホップを 8-10 回 × 3 セット、3 回リバウンドジャンプを 6-8 セット実施した。その後の 4 週間は、20 cm ドロップジャンプを 8-10 回 × 3 セット、両脚ハードルホップを 8-10 回 × 4 セット、そして 5 回リバウンドジャンプを 4-6 セット実施した。最後に、30 cm ドロップジャンプを 8-10 回 × 3 セット、片脚ハードルホップを 8-10 回 × 3 セット両脚で実施し、5 回リバウンドジャンプを 7-8 セット実施した。対象者は、CMJ を除くすべてのジャンプ動作はできる限り短い接地時間で高く跳躍するように指示された。トレーニング中の接地時間は、マットスイッチプラットフォームシステム (Multi jump tester, DKH 社製, Tokyo, Japan) にて測定し、ドロップジャンプおよびリバウンドジャンプの接地時間が 300 ms 以内で可能な限り短くなるよう指示し、接地時間を監督した。もし接地時間が 300 ms を超えた場合は、その接地時間を対象者にフィードバックし、接地時間を短くするよう伝えた。

Table 3-2. Training program in heavy resistance training and plyometric training.

		1-2 week	3-4 week	5-6 week	7-8 week	9-10 week
HRT group		<i>Preparation</i>	<i>Training intervention</i>			
Leg press	Load	50-60% 1RM	75% 1RM	80% 1RM	85% 1RM	90% 1RM
Leg curl						
Calf raise	Sets × reps	3 × 10	3 × 8	3 × 6	3 × 5	3 × 4
PT group		<i>Preparation</i>	<i>Training intervention</i>			
CMJ	Sets × reps	3 × 8-10				
3RJ	Sets × reps	6-8 sets				
BL hurdle hop	Sets × reps	3 × 8-10	4 × 8-9	4 × 10		
20 cm DJ	Sets × reps		3 × 8-9	3 × 10		
5RJ	Sets × reps		4-5 sets	6 sets	6-7 sets	8 sets
SL hurdle hop	Sets × reps				3 × 8-9	3 × 10
30 cm DJ	Sets × reps				3 × 8-9	3 × 10

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training, reps = repetitions, CMJ = counter-movement jump, RJ = rebound jump, BL = both legs, DJ = drop jump, SL = single leg.

3-2-5 統計解析

記述的統計はすべて平均値とその標準偏差として表す。PT 群における 1 人の対象者が、実験とは別の日常のトレーニングで発生した傷害を理由に実験からドロップアウトした。残りの全てのランナー（10 人/グループ）は 90%以上のトレーニングセッションを完遂したため、分析に含めた。しかし、3 人の対象者（HRT 群：2 人，PT 群：1 人）は、気温が 30°Cを超過したことによって、5 km のタイムトライアルを中止したため、5 km のタイムトライアルにおけるサンプルサイズは HRT 群で 8 人と PT 群で 9 人であった。ベースラインにおいてグループ間で年齢やランニングの経験年数、身長、体重、体脂肪率、筋量、週のランニング量、 $\dot{V}O_{2max}$ 、そして 5 km の走タイムに違いがあるかどうか評価するために、これらの変数についてグループ間の対応なし t 検定を実施した（Table 3-1）。分布の正規性および等分散性は、それぞれ Shapiro-Wilk 検定と Bartlett 検定にて検証された。しかし、いくつかの変数で等分散性が認められなかったため、すべての変数は混合効果モデルにて検定された。混合効果モデルは、トレーニングに関連した影響を評価するための要因として、時間（介入前測定 vs. 介入後測定）とグループ（HRT 群 vs. PT 群）、これらの交互作用について評価した。混合効果モデルにて、有意な交互作用が認められた際に、事後検定として介入前と介入後の値を比較するため、t 検定を実施した。それぞれのグループにおいて、Hedge's g が算出され、介入前後のアウトカムの変化の程度を推定した。Hedge's g は trivial < 0.2; small 0.2-0.5; moderate 0.5-1.0; そして、large > 1.0 と解釈した^[64]。統計解析は RStudio（version 2022.02.0+443, Boston MA）を用いて実施した。 $\alpha < 0.05$ を有意水準とし、帰無仮説を棄却することとした。

3-3 結果

全てのデータについて、ベースラインで有意差は確認されなかった ($p=0.39-0.84$). また、体重や体脂肪率、筋肉量、 $\dot{V}O_{2max}$ に有意な主効果および交互作用はみられなかった (Table 3-1). 一方、週のランニング量について、有意なグループの主効果および交互作用は確認されなかったものの、有意な時間の主効果が確認された. 介入前後における両群の 1RM や跳躍パフォーマンス、ランニングエコノミー、タイムトライアルパフォーマンス、 $v\dot{V}O_{2max}$ についてのデータおよび効果量を、Table 3-3 にて示す. 有意な時間の主効果と交互作用が全ての 1RM テストで検出された. HRT 群は 3 つの挙上タスクにおける 1RM を介入前後で有意に向上させたが、PT 群はレッグカールの 1RM のみ有意に向上させた (Figure 3-4). また、全ての跳躍パフォーマンスについて、有意な交互作用は確認されなかったものの、有意な時間の主効果が確認された (Figure 3-5). しかし、全ての走速度のランニングエコノミーについては、有意な主効果および交互作用がみられなかった (Figure 3-6). 同様に、5 km タイムトライアルパフォーマンスと $v\dot{V}O_{2max}$ について、有意な主効果および交互作用は確認されなかった (Figure 3-7).

Table 3-3. The changes of muscle strength, jump performance, and running performance between pre- and post-training intervention in heavy resistance and plyometric training group (mean $\pm$ SD, Hedge's g).

	HRT group			PT group		
	Pre	Post	g	Pre	Post	g
Leg press 1RM [kg] ^{a, b}	125.0 $\pm$ 46.7	150.0 $\pm$ 52.1 ^c	0.48	135.5 $\pm$ 58.8	134.0 $\pm$ 55.1	-0.03
Leg curl 1RM [kg] ^{a, b}	37.7 $\pm$ 12.3	44.9 $\pm$ 12.2 ^c	0.91	36.2 $\pm$ 13.3	39.3 $\pm$ 14.0 ^c	0.22
Calf raise 1RM [kg] ^{a, b}	113.5 $\pm$ 35.5	137.5 $\pm$ 42.8 ^c	0.58	117.5 $\pm$ 33.5	122.5 $\pm$ 41.0	0.13
CMJ height [cm] ^b	32.7 $\pm$ 7.5	35.4 $\pm$ 7.6	0.34	28.0 $\pm$ 10.2	29.8 $\pm$ 9.6	0.17
Drop jump height [cm] ^b	25.7 $\pm$ 5.1	28.1 $\pm$ 5.2	0.45	24.1 $\pm$ 9.0	28.8 $\pm$ 8.3	0.52
Drop jump index [m/s] ^b	1.00 $\pm$ 0.16	1.11 $\pm$ 0.22	0.55	1.03 $\pm$ 0.45	1.30 $\pm$ 0.46	0.57
Running economy @ 8 km/h [ml/kg/km]	209.7 $\pm$ 25.5	207.8 $\pm$ 24.4	-0.07	213.1 $\pm$ 11.7	205.9 $\pm$ 10.5	-0.62
Running economy @10 km/h [ml/kg/km]	201.8 $\pm$ 20.5	199.7 $\pm$ 18.4	-0.10	200.9 $\pm$ 13.2	196.5 $\pm$ 8.2	-0.38
Running economy @12 km/h [ml/kg/km]	195.4 $\pm$ 20.2	191.3 $\pm$ 16.0	-0.22	194.9 $\pm$ 12.2	189.9 $\pm$ 6.7	-0.49
5 km running time [s]	1295.3 $\pm$ 190.6	1293.5 $\pm$ 107.4	-0.01	1311.5 $\pm$ 174.6	1318.1 $\pm$ 186.0	0.04
$\dot{V}O_{2max}$ [km/h]	15.3 $\pm$ 1.2	15.6 $\pm$ 1.1	0.25	15.1 $\pm$ 1.7	15.2 $\pm$ 1.6	0.06

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training.

^a Significant time by group interaction effect ($p < 0.05$).

^b Significant main effect of time ($p < 0.05$).

^c Significant difference (post hoc t test) to pre ($p < 0.05$).

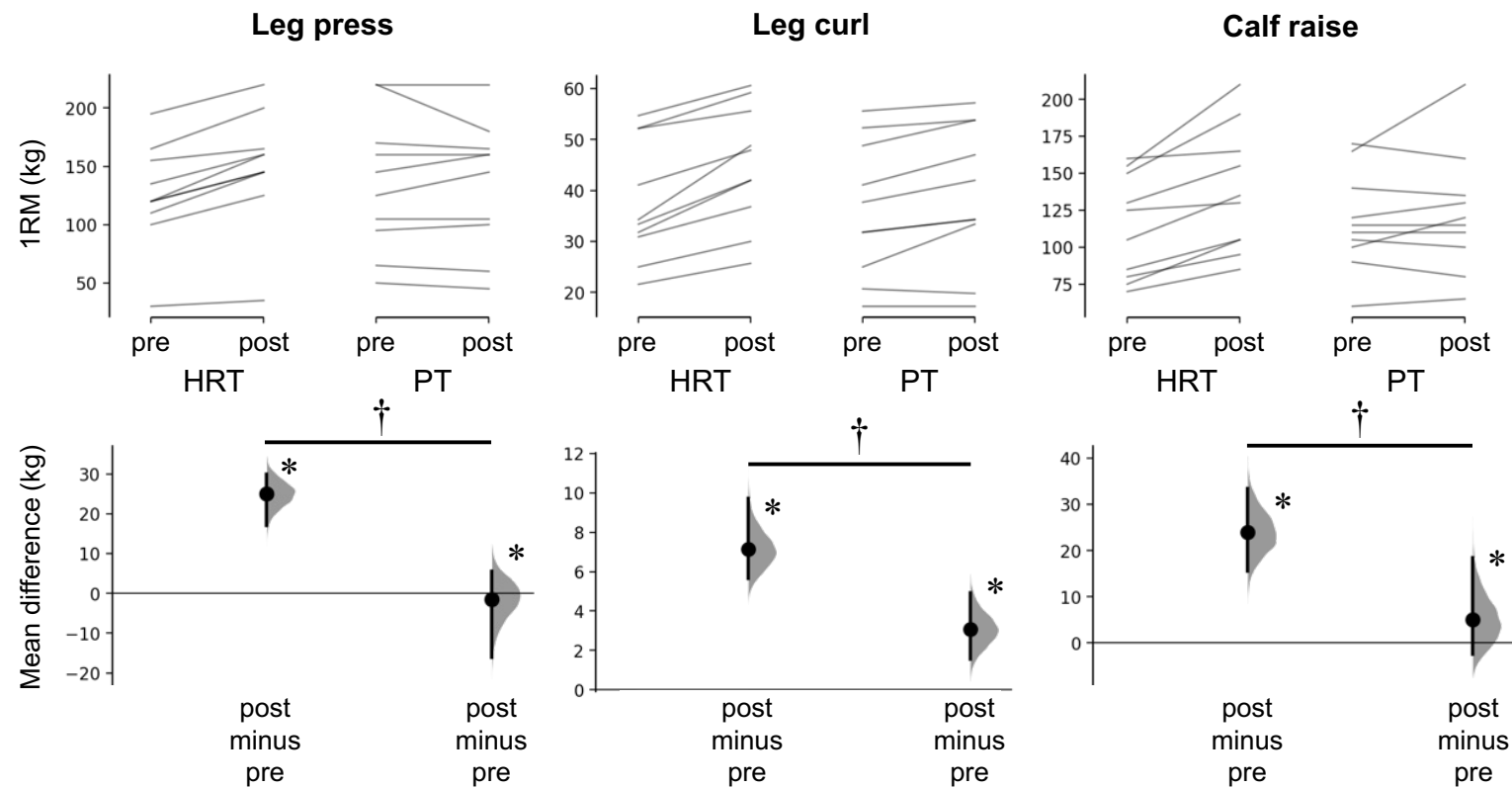


Figure 3-4. The magnitudes of the change in 1RM between pre- and post-test. The upper plot in each graph means the changes of individuals; the lower plot represents the mean differences of each variable between pre- and post-test.

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training.

† denotes a significant interaction between time and group; * denotes a significant main effect of time.

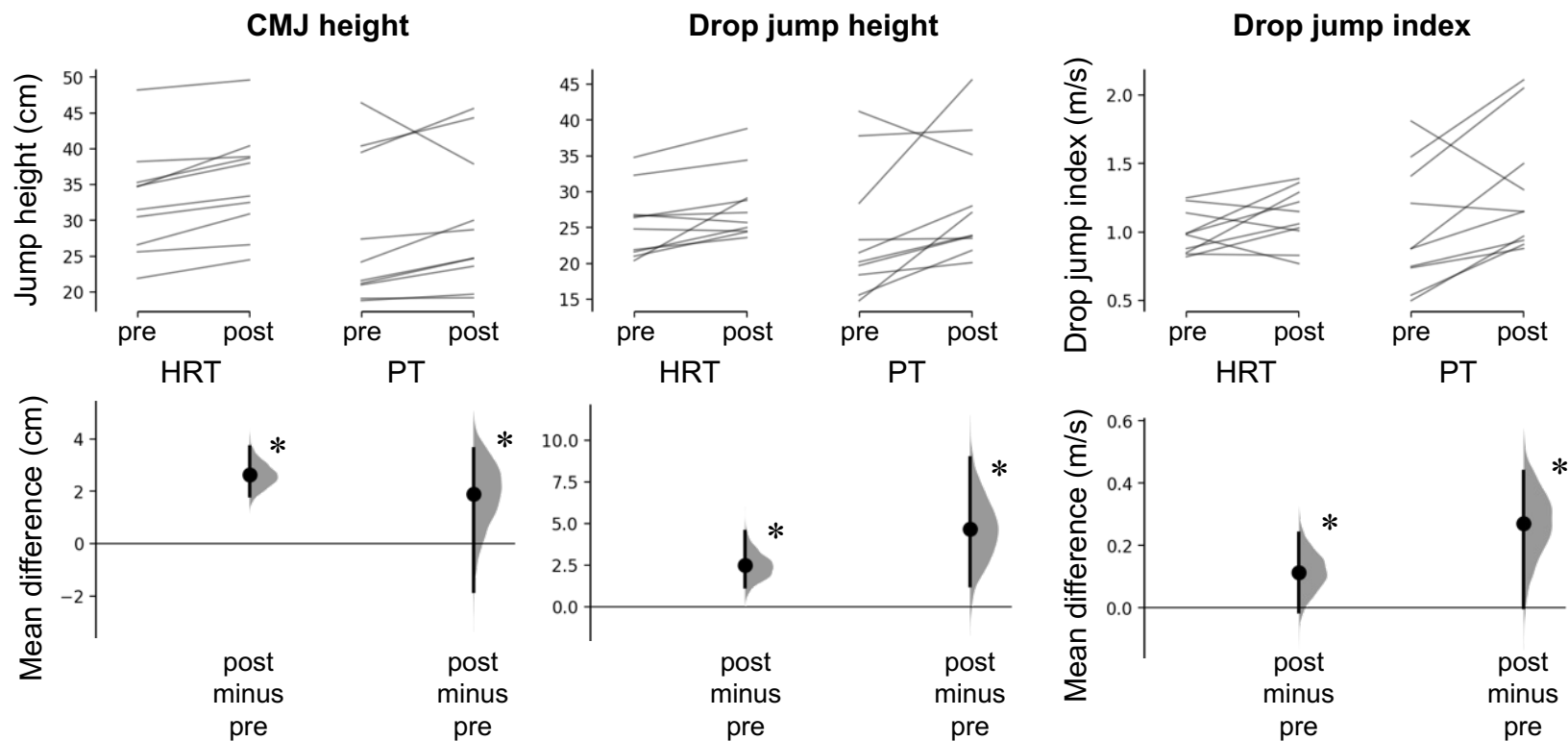


Figure 3-5. The magnitudes of the change in jump performance between pre- and post-test. The upper plot in each graph means the changes of individuals; the lower plot represents the mean differences of each variable between pre- and post-test.

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training.

* denotes a significant main effect of time.

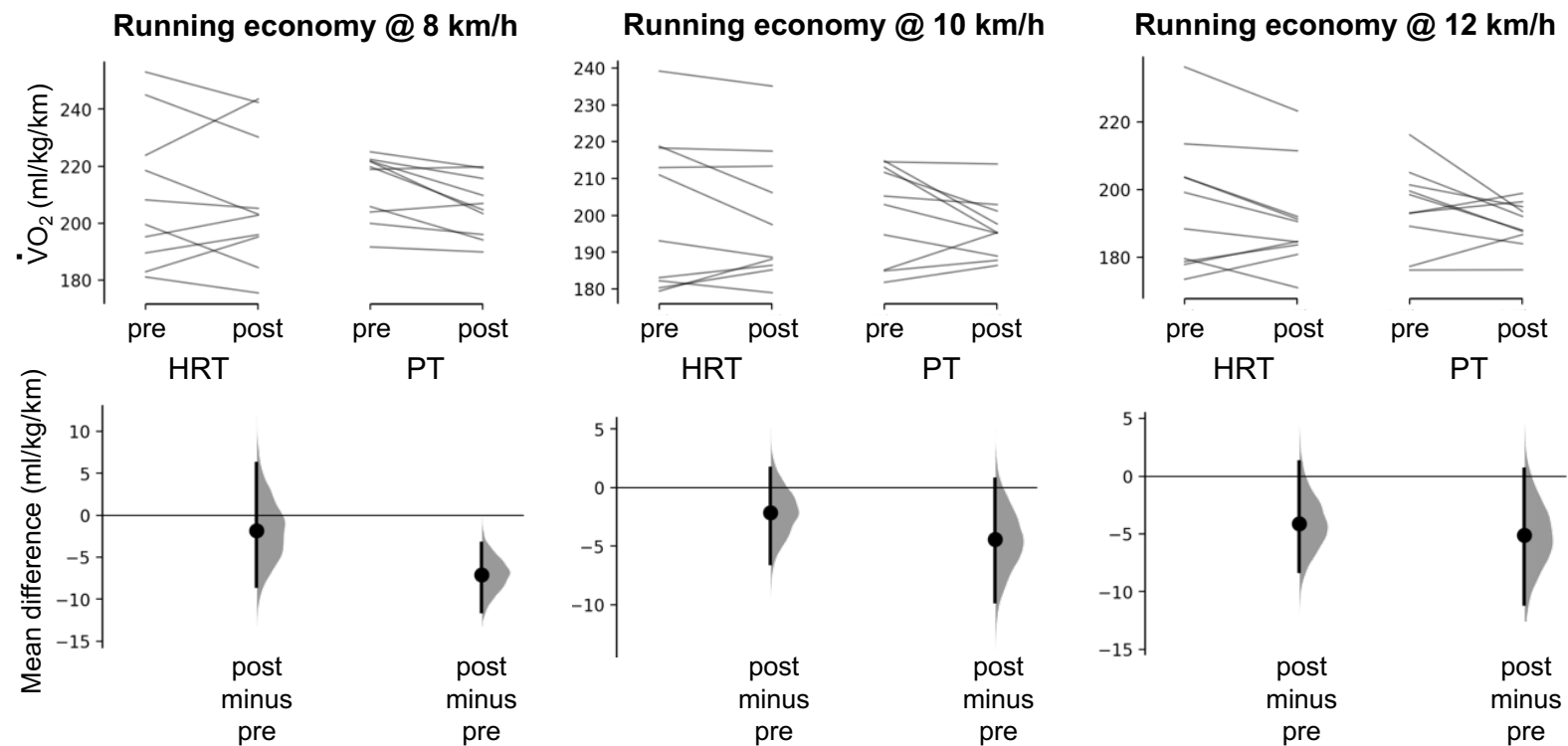


Figure 3-6. The magnitudes of the change in running economy between pre- and post-test. The upper plot in each graph means the changes of individuals; the lower plot represents the mean differences of each variable between pre- and post-test.

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training

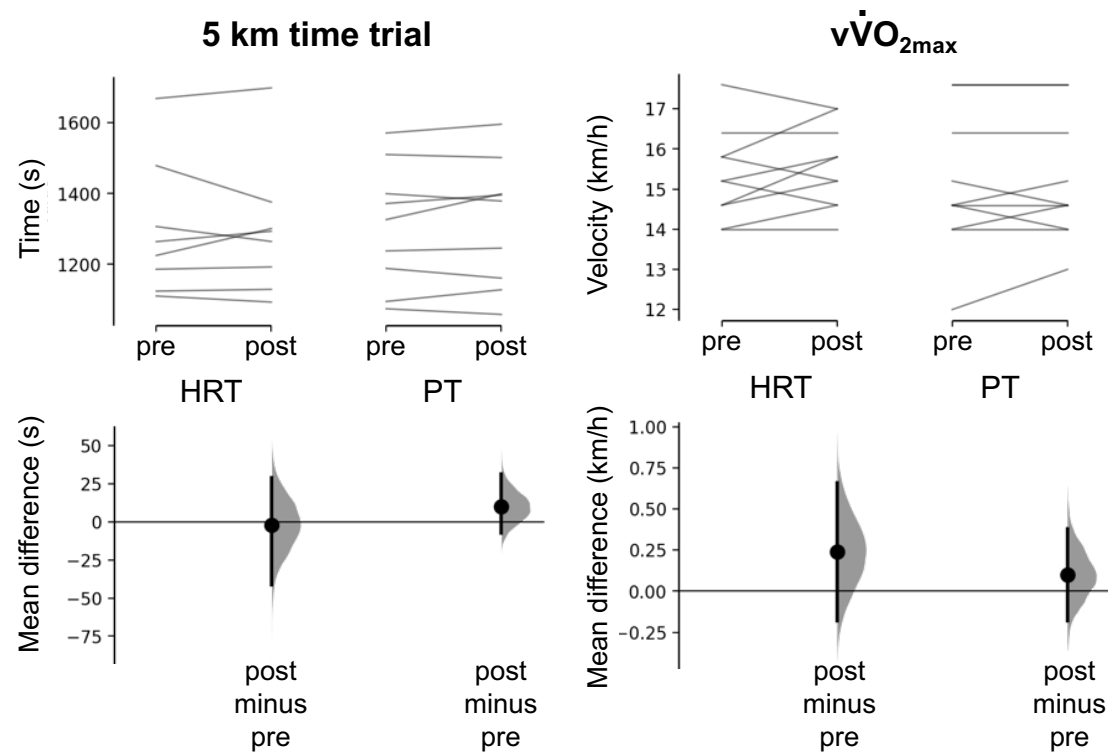


Figure 3-7. The magnitudes of the change in 5 km time trial performance, and $\dot{V}O_{2\max}$ between pre- and post-test. The upper plot in each graph means the changes of individuals; the lower plot represents the mean differences of each variable between pre- and post-test.

Abbreviation: HRT = heavy resistance training, PT = plyometric training.

3-4 考察

本研究の主な知見として、HRT 群は筋力および跳躍パフォーマンスの増加を示し、PT 群は跳躍パフォーマンスの向上を示したが、長距離走パフォーマンスを有意に改善させなかった。本研究では、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが、ランニングエコノミーに及ぼす影響は同程度であると仮説を立てた。ランニングエコノミーが両群ともに有意に改善しなかったが、改善の程度は同程度であったため、この仮説は受け入れられた。加えて、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングによる、5 km タイムトライアルや $\dot{V}O_{2\max}$ の有意な改善は示されなかった。この結果から、プライオメトリックトレーニングが 5 km タイムトライアルや $\dot{V}O_{2\max}$ に及ぼす影響は高負荷レジスタンストレーニングより大きいという仮説は棄却された。ランニングエコノミーは、5 km のタイムトライアルパフォーマンスに貢献するだけでなく、 $\dot{V}O_{2\max}$ とも関連するという知見があるため、これらタイムトライアルパフォーマンスや $\dot{V}O_{2\max}$ が有意に向上しなかった理由として、ランニングエコノミーに有意な改善がみられなかったためであると考えられる。両複合トレーニングがランニングエコノミーを有意に改善させなかった理由として、ランナーの身体的特性や統計的パワーの不足が挙げられる。

本考察も第 4 章にて詳しく記載するが、多くの先行研究では、筋力や跳躍パフォーマンスの向上は、必ずしもランニングエコノミーを有意に改善させるとは限らないことが示されている。例えば、高負荷レジスタンストレーニングもしくはプライオメトリックトレーニングによって 1RM の 17-25% の有意な向上を示し、ランニングエコノミーの有意な改善を示す研究がある [56, 74, 98] 一方で、18-23% の 1RM の向上を示すもののランニングエコノミーが有意に改善しない [25]、もしくは有意に悪化することを示す [89] 研究も存在する。同様に、有意な CMJ 跳躍高の向上を示したとしても、ランニングエコノミーが改善するかどうか一貫した結果は得られていない [95, 105]。これらの 1RM や CMJ 跳躍高の有意な向上とランニングエコノミーの有意な改善を同時に示した研究は、若年のエリートもしくはよくトレーニングを積んだランナーが対象者として招集されていた。一方で、ランニングエコノミーの有意な改善を示さなかった研究では、一般市民ランナーが対象者であった。すなわち、高負荷レジスタンストレーニングやプライオメトリックトレーニングによるランニングエコノミーの改善効果は競技レベルや年齢に影響される可能性が考えられる。

加えて、統計的検出力が不足していたことが長距離走パフォーマンスを有意に向上させなかった一因である可能性がある。本研究のランニングエコノミーについての交互作用の検出力（1-β）は、事後検定の結果およそ 0.70 であった。そのため、本研究では、確率論的視点のみからの結果の解釈を避けるために、効果量 Hedge's *g* を用いた（Table 3-3）。結果として、プライオメトリックトレーニングは small から moderate の大きさをランニングエコノミーを改善させ（Hedge's *g* = -0.38 to -0.62）、8 km/h のランニングエコノミーについては 3.3% の改善を示した。一方で、高負荷レジスタンストレーニングの効果量は、trivial から small にとどまり（*g* = -0.07 to -0.22）、ランニングエコノミーの変化の程度は -0.9 から -2.1% であった。これらの結果は、第 2 章におけるシステムティックレビューとメタ解析の結果と異なる結果であった。本ランダム化比較試験では、第 2 章で挙げられたトレーニング期間やジャンプ動作中の接地時間といったプライオメトリックトレーニングを実施する上での問題点に注意し、トレーニングを実施した。これらの問題点に注意することで、ランニングとプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす効果の程度はやや増大した一方で、統計的な検出力の不足によって有意な交互作用が検出されなかったと考えられる。

一方で、本ランダム化比較実験にはいくつかの限界点が存在する。それは、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングの主観的強度やトレーニング時間を揃えられなかった点である。これは、傷害予防の観点からプライオメトリックトレーニングの強度やトレーニング時間を増加させることができなかったことで、プライオメトリックトレーニングの強度が低下したためである。しかし、第 2 章で記載した通り、プライオメトリックトレーニングの実施期間が短ければランニングエコノミーに及ぼす効果は小さくなることが示されているが、プライオメトリックトレーニングの強度は跳躍パフォーマンスの向上効果に影響しない可能性が先行研究にて報告されている^[114]。本研究の目的は、それぞれのトレーニングによる筋力や跳躍パフォーマンスの向上がどのように長距離走パフォーマンスに影響するのかを検証することを目的とした。トレーニング強度が跳躍パフォーマンスの向上効果に大きく影響しないこと、および本研究において筋力や跳躍パフォーマンスは有意に向上したことから、トレーニング強度や時間が揃わなかった点が長距離走パフォーマンスを有意に向上させなかった主要な理由とはならないと考えられる。

また、介入中における週のランニング量が有意に減少していた。特に、介入期間中の

ランニング量は持続させるように指示をしていたものの、HRT 群における週のランニング量は平均 24.0%減少していた。この介入期間中におけるランニング量の減少は、PT 群よりも有意に高い下肢および身体全体の RPE や有意に長いトレーニング時間が原因であると思われる (Figure 3-3)。しかし、先行研究では、ランニングとレジスタンストレーニングの複合トレーニングにおけるランニング量を 40.0-58.0%減少させたとしても、ランニングエコノミーは有意に改善することが示されている^[74,77]。ただ、トレーニング内容については、先行研究では間欠性のインターバルトレーニングが実施されていた^[74,77]。すなわち、トレーニング量ではなく、トレーニング内容がトレーニング効果に影響を及ぼす可能性が考えられる。本研究においては、間欠性のインターバルトレーニングを取り入れていたランナーもいればそうでないランナーもいたため、トレーニング内容がトレーニング効果にどのように影響したかは不明である。そのため、第 4 章 総合討論にて、トレーニング効果に影響する要因について、第 2 章および第 3 章の結果から考察する。

3-6 小括

本研究は、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーとタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の違いを明らかにすることとした。本研究の結果から、以下のことが明らかとなった：

1. ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングは効果的に下肢筋力や跳躍パフォーマンスを向上させた。
2. ただし、中年の一般市民ランナーを対象とした、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングは長距離走パフォーマンスを有意に改善させなかった。
3. 両複合トレーニングがランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響は同程度であった。

以上のことから、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす効果は、同程度であることが示された。また、これらの複合トレーニングの効果は、システムティックレビューとメタ解析の結果と同様に、小さいことが示された。

第4章 総合討論

本修士論文では、第2章において先行研究の知見とそれらの限界点をまとめ、第3章においてランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響について検証した。第2章 システマティックレビューとメタ解析では、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスおよびランニングエコノミーに及ぼす影響は小さいことが示されたが、高負荷レジスタンストレーニングの効果量は、プライオメトリックトレーニングの効果量と 95% CI が重なっているが、高値を示した。そして、ランダム化比較実験においては先行研究における限界点を克服しつつ研究を実施した。その結果、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングは、ランニングエコノミーやタイムトライアルパフォーマンスに有意な影響を及ぼさないことが示された。これらの結果から、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響は小さくなく、その効果は同程度であることが示唆された。ランダム化比較実験において長距離走パフォーマンスの変化の程度は有意ではなく、特にタイムトライアルパフォーマンスが有意に改善しなかった理由として、ランニングエコノミーの有意な改善がみられなかったことが要因であると考えられる。そこで、本章では、第2章および第3章の結果に基づいて、高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングを実施するランナーのトレーニング期間や競技レベル、年齢、トレーニングの動作速度がランニングエコノミーの改善効果に影響している可能性について考察する。

4-1 複合トレーニングの効果に影響を及ぼす要因の検討

4-1-1 トレーニング期間によるランニングエコノミーの改善効果への影響

トレーニング期間について、高負荷レジスタンストレーニングおよびプライオメトリックトレーニングどちらにおいても、10 週間以上の介入が必要であると第 2 章で考察した（再掲 Table 4-1, 4-2）。しかし、本ランダム化比較実験では、10 週間のトレーニング期間を設定したものの、中年の一般市民ランナーを対象としたトレーニングでは、ランニングエコノミーについて有意な時間の主効果は認められなかった。この理由として、トレーニング期間を長く設定したとしても、後述するランナーの特性やトレーニングの動作速度によって、トレーニング効果が低減したのではないかと考えられる。

Table 4-1. Subgroup analyses regarding effects of heavy resistance training on running economy.

Moderator variables	Hedges' g [95% CIs LL, UL]	Interpretation
Performance level		
Lv. 1 (Recreational level)	-0.27 [-0.59, 0.04]	Small
Lv. 2 (Moderate level)	-0.18 [-0.92, 0.56]	Trivial
Lv. 3 (High level)	-0.61 [-1.84, 0.63]	Moderate
Age		
Young (21.0-31.5 years)	-0.51 [-0.83, -0.19]	Moderate
Old (34.1-44.8 years)	-0.12 [-0.41, 0.17]	Trivial
Training intensity		
< 90% 1RM or > 4RM	-0.17 [-1.05, 0.70]	Trivial
≥ 90% 1RM or ≤ 4 RM	-0.31 [-0.61, -0.02]	Small
Training modality		
Dynamic training	-0.32 [-0.64, 0.00]	Small
Isometric training	-0.33 [-0.89, 0.22]	Small
Intervention period		
Short (6-8 weeks)	-0.21 [-0.56, 0.15]	Small
Long (10-14 weeks)	-0.45 [-0.83, -0.08]	Small

Data are standardized mean difference for effect size values (Hedges' g).

Hedges' g represents time (pre vs. post) by group (experimental vs. control) interaction.

Abbreviation: CIs = confidence intervals, LL = lower limit, UL = upper limit.

Table 4-2. Subgroup analyses regarding effects of plyometric training on running economy.

Moderator variables	Hedges' g [95% CIs LL, UL]	Interpretation
Performance level		
Lv. 1 (Recreational level)	0.12 [-0.72, 0.95]	Trivial
Lv. 2 (Moderate level)	-0.20 [-0.62, 0.22]	Small
Lv. 3 (High level)	-	
Age		
Young (24.3-31.0 years)	-0.26 [-1.09, 0.58]	Small
Old (32.5-33.3 years)	-0.01 [-1.38, 1.37]	Trivial
Intervention period		
Short (4-6 weeks)	-0.06 [-0.67, 0.55]	Trivial
Long (8-10 weeks)	-0.26 [-0.67, 0.15]	Small

Data are standardized mean difference for effect size values (Hedges' g).

Hedges' g represents time (pre vs. post) by group (experimental vs. control) interaction.

Abbreviation: CIs = confidence intervals, LL = lower limit, UL = upper limit.

4-1-2 ランナーの競技レベルおよび年齢によるランニングエコノミーの改善効果への影響

若年ランナーを対象として高負荷レジスタンストレーニングを実施した際には、中年ランナーを対象とした際と比較してランニングエコノミーに対する効果が大きかった。同様に、競技レベルの高いランナーは、競技レベルの低いランナーよりもトレーニング効果が大きいことが示されている (Table 4-1)。一方で、Piacentini et al.^[95]は、6週間の介入期間であったが、85-90% 1RM の負荷で中年ランナーがレジスタンストレーニングを実施したところ、6.2%のランニングエコノミーの改善を示した。しかし、ランダム化比較実験では、中年の一般市民ランナーを対象に、高負荷レジスタンストレーニングの負荷を 90% 1RM まで増加させたものの、ランニングエコノミーの有意な改善が確認されなかった。その理由として、トレーニングの負荷とは別の要因が影響している可能性がある (後述 4-1-3)。

また、プライオメトリックトレーニングについても、ランニングエコノミーに及ぼす影響は、Lv.1 ランナーにおいて Lv.2 ランナーよりも小さくなることが示されている (Table 4-2)。この結果は第 2 章の限界点で述べたように、競技レベルの低いランナーの筋力は低いことが関係している可能性がある^[112]。筋力が低ければ、ドロップジャンプを実施する際の接地時間は長くなることが明らかになっており^[111]、競技レベルの高いランナーは下肢の筋力が高いことが報告されている^[112]。また、若年ランナーも中年ランナーよりも大きな筋力を有していることも示されている^[115]。そのため、競技レベルの低いランナーもしくは中年ランナーはよくトレーニングされたランナーと比較して筋力が低く、短い接地時間でのプライオメトリックトレーニングが実施できず、ランニングエコノミーの改善効果も小さくなるのではないかと推測できる。

これらのランナーの競技レベルや年齢とプライオメトリックトレーニングの効果に関連して、ランダム化比較実験では、PT 群においてランニングエコノミーの変化率とベースラインでの競技力を表す $\dot{V}O_{2max}$ もしくは筋力を表す 1RM との間に中程度の相関関係が示された。具体的には、ベースラインにおける $\dot{V}O_{2max}$ が 8 km/h ($r = -0.61, p = 0.06$) や 10 km/h ($r = -0.53, p = 0.11$) におけるランニングエコノミー (走行中の $\dot{V}O_2$) の変化率と、ベースラインにおけるレッグカールやカーフレイズの 1RM が 8 km/h (レッグカール: $r = -0.53, p = 0.10$; カーフレイズ: $r = -0.51, p = 0.12$) や 10 km/h (カーフレイズ: $r = -0.63, p = 0.04$) におけるランニングエコノミーの変化率の間に中程度の相関

関係があることが示された (Table 4-3). この結果は、競技レベルもしくは筋力の高いランナーがプライオメトリックトレーニングを実施することで、ランニングエコノミーが大きく改善する傾向にあることを示している. さらに、PT 群において、ベースラインの 1RM と短い接地時間で高く跳んでいるかを示すドロップジャンプ指数の間にも中程度の相関関係がみられており、このドロップジャンプ指数とランニングエコノミーの変化率との間にも相関関係が確認された (Table 4-3). これは、高い筋力を有する対象者はプライオメトリックトレーニングを、ランニングエコノミーを改善させるために十分な負荷で実施できていた可能性を示唆している. これらの結果を統合すると、システムティックレビューとメタ解析において、中年もしくは一般市民ランナーがプライオメトリックトレーニングを実施することによるランニングエコノミーへの改善効果が小さかったことは、上述のように彼らの筋力が低いことによって、高いドロップジャンプ指数でトレーニングを実施できていなかったことに起因している可能性がある. 反対に、中年の一般市民ランナーは筋力を増加させた後、プライオメトリックトレーニングを実施することで、ランニングエコノミーの改善効果は増大する可能性が考えられる.

Table 4-3. The correlation coefficients and their interpretations among $\dot{V}O_{2\max}$, 1RM, drop jump index at baseline, and the percentage changes of running economy between pre- and post-test in PT group.

	The percentage change of running economy			Drop jump index at baseline
	8 km/h	10 km/h	12 km/h	
$\dot{V}O_{2\max}$ at baseline	$r = -0.61$ moderate	$r = -0.53$ moderate	$r = -0.17$ weak	$r = 0.92^*$ Strong
1RM of leg press at baseline	$r = -0.39$ fair	$r = -0.40$ fair	$r = -0.24$ weak	$r = 0.61$ moderate
1RM of leg curl at baseline	$r = -0.53$ moderate	$r = -0.20$ weak	$r = -0.12$ weak	$r = 0.59$ moderate
1RM of calf raise at baseline	$r = -0.51$ moderate	$r = -0.63^*$ moderate	$r = -0.41$ fair	$r = 0.49$ fair
Drop jump index at baseline	$r = -0.72^*$ moderate	$r = -0.70^*$ moderate	$r = -0.55$ fair	—

The correlation coefficient is interpreted as weak ($0.0 < r < 0.25$), fair ($0.25 \leq r < 0.50$), moderate to good ($0.50 \leq r < 0.75$), and strong ($0.75 \leq r < 1.00$)^[116].

* denotes a significant correlation between variables.

4-1-3 トレーニング動作によるランニングエコノミーの改善効果への影響

上記のトレーニング期間や競技レベルおよび年齢だけでなく、高負荷レジスタンストレーニングにおける動作速度もまたランニングエコノミーの改善効果に影響している可能性がある。ランダム化比較実験では、高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす効果の違いを検出するために、両トレーニングの動作速度に大きな違いを出した。つまり、高負荷レジスタンストレーニングは4秒（短縮性収縮2秒，伸張性収縮2秒）で1動作を完遂するように対象者に指示をし、プライオメトリックトレーニングではできる限り短い接地時間（300 ms 以内）で動作を実施するように指示をした。先行研究では、ランニングエコノミーと力の立ち上がり率（rate of force development: RFD）の間に有意な相関関係があると報告されている^[117]。また、RFDを向上させるためには、素早い動作を意識して高負荷のレジスタンストレーニングを実施することや短い接地時間でジャンプ動作を実施することが

重要であることが示唆されている^[118]。実際に、いくつかの研究では、トレーニングによる RFD とランニングエコノミーの両方の向上を示しているが^[99, 104]、Taipale et al.^[28]の研究では、筋力や CMJ の跳躍高が向上したにもかかわらず、RFD とランニングエコノミーのどちらとも有意に改善しなかったことが報告されている。そのため、本ランダム化比較実験におけるランニングと高負荷レジスタンストレーニングの複合トレーニングのランニングエコノミーに対する効果は $g = -0.07$ から -0.22 と小さかった理由の一つとして、トレーニングの動作速度が挙げられる可能性がある。反対に、爆発的なパワー発揮能力の向上を目的として実施したプライオメトリックトレーニングでは、神経的適応を促進することができ、ランニングエコノミーに及ぼす効果量は、 -0.38 (small) から -0.62 (moderate) とやや高値を示したのではないかと考えられる。将来的な研究では、トレーニングによる筋力や跳躍パフォーマンスの変化だけでなく、RFD のような神経筋の変化についても評価する必要がある。

4-2 先行研究における知見とランダム化比較実験の結果の照合

本修士論文におけるランダム化比較試験においては、中年の一般市民ランナーを対象に 10 週間のトレーニング介入を実施した。高負荷レジスタンストレーニングでは、10 週間以上のトレーニング期間を設けることでトレーニング効果が増大することが、Table 4-1 のサブグループ解析にて示されたが ($g = -0.45$, small)，ランダム化比較実験では、ランニングエコノミーに及ぼす効果量は -0.07 (trivial) から -0.22 (small) であった。このランダム化比較実験における小さい効果量は、高負荷レジスタンストレーニングの動作速度を 4 秒（短縮性収縮 2 秒，伸張性収縮 2 秒）かけて、1 動作を実施させたことがその要因として挙げられる。

一方、Table 4-2 では、8 週間以上プライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーに及ぼす効果量は、 $g = -0.26$ (small) であった。ただし、ランダム化比較実験では、プライオメトリックトレーニングがランニングエコノミーに及ぼす効果量は、 -0.38 (small) から -0.62 (moderate) とやや高値を示した。その理由として、トレーニング期間を 10 週間以上に設定した研究がほとんどないことや接地時間を統制した研究がないことが考えられる。本ランダム化比較実験においては、トレーニング期間を長く設定したことや高いドロップジャンプ指数（特に筋力の高い対象者）でトレーニングを実施できていたことが、ランニングエコノミーへのトレーニング効果を推定値よりも増大させた理由になる可能性がある。

4-3 現場への応用

これまでの結果から、若年かつ競技レベルの高いランナーが長期間の高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングを実施する場合、ランニングエコノミーを中程度改善させることが示唆された。また、その際には、高負荷レジスタンストレーニングを実施する方が良い可能性がある。一方で、中年かつ競技レベルの低いランナーは、どちらのトレーニングからも大きな恩恵を受けることができないと考えられる。しかし、本修士論文におけるランダム化比較実験においては、プライオメトリックトレーニングを 10 週間実施することやジャンプ動作を短い接地時間（あるいは高いドロップジャンプ指数）で実施することによって、ランニングエコノミーは small から moderate の程度で改善することが示された。加えて、筋力の高い対象者がプライオメトリックトレーニングを実施することで、ランニングエコノミーの改善効果は増大する傾向にあることから、高負荷レジスタンストレーニングを実施し筋力を向上させた後に、プライオメトリックトレーニングを実施することで、長距離走パフォーマンスを向上させる上で効果的である可能性がある。一方で、高負荷レジスタンストレーニングを実施する際には、速い動作速度を意識して実施することで、RFD の向上やそれに伴うランニングエコノミーの改善がみられると推測できる。

4-4 今後の展望

上述したような、動作速度を統制したトレーニング効果やサブグループ毎に提案する適切なトレーニング方法は、本修士論文の結果に基づく推察に留まっている。そのため、今後は対象者の筋力レベルによってプライオメトリックトレーニングの効果が異なるのか、動作速度の異なる高負荷レジスタンストレーニングを実施した際に、長距離走パフォーマンスに及ぼす効果が異なるのか、などの検証が必要である。さらに、下肢の筋力や跳躍パフォーマンスだけでなく、RFD といった神経筋要因やランニングバイオメカニクス[40, 119, 120]、シューズ[121-123]、環境要因[124, 125]など他の要因もランニングエコノミーに強く関係している可能性が考えられる。将来的な研究として、筋力や跳躍パフォーマンスといった神経筋特性が他の変数と比較して、長距離走パフォーマンスにどの程度貢献しているか複合的に調査する必要もある。

第5章 結論

本修士論文では、中年の一般市民ランナーを対象として、ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングがランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響の違いを明らかにすることを目的とした。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが、ランニングエコノミーおよびタイムトライアルパフォーマンスに及ぼす影響は大きくないことが示された。
2. ランニングと高負荷レジスタンストレーニングあるいはプライオメトリックトレーニングの複合トレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響は、ランナーの競技レベルや年齢、トレーニング期間、トレーニングの動作速度によって影響を受けることが示唆された。
3. 中年の一般市民ランナーを対象とした両複合トレーニングは長距離走パフォーマンスを有意に改善させず、それらの効果に大きな違いは確認されなかった。

参考文献

1. Bachero-Mena B, Pareja-Blanco F, González-Badillo JJ. Effects of resistance training on physical performance in high-level 800-meter athletes: A comparison between high-speed resistance training and circuit training. *J Strength Cond Res*, 35(7):1905-1915, 2021.
2. Blagrove RC, Howatson G, Hayes PR. Effects of strength training on the physiological determinants of middle- and long-distance running performance: A systematic review. *Sports Med*, 48(5):1117-1149, 2018.
3. McLaughlin JE, Howley ET, Bassett DR, Thompson DL, Fitzhugh EC. Test of the classic model for predicting endurance running performance. *Med Sci Sports Exerc*, 42(5):991-997, 2010.
4. Denadai BS, de Aguiar RA, de Lima LC, Greco CC, Caputo F. Explosive training and heavy weight training are effective for improving running economy in endurance athletes: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, 47(3):545-554, 2017.
5. Bosco C, Rusko H. The effect of prolonged skeletal muscle stretch-shortening cycle on recoil of elastic energy and on energy expenditure. *Acta Physiol Scand*, 119(3):219-224, 1983.
6. Martin-Rincon M, Calbet JAL. Progress update and challenges on VO₂max testing and interpretation. *Front Physiol*, 11:1070, 2020.
7. Shaw AJ, Ingham SA, Folland JP. The valid measurement of running economy in runners. *Med Sci Sports Exerc*, 46(10):1968-1973, 2014.
8. Faria EW, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med*, 35(4):285-312, 2005.
9. Farina D, Ferguson RA, Macaluso A, De Vito G. Correlation of average muscle fiber conduction velocity measured during cycling exercise with myosin heavy chain composition, lactate threshold, and VO₂max. *J Electromyogr Kinesiol*, 17(4):393-400, 2007.
10. Hagberg JM, Moore GE, Ferrell RE. Specific genetic markers of endurance performance and VO₂max. *Exerc Sport Sci Rev*, 29(1):15-19, 2001.
11. Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance

- of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 12(5):357-360, 1980.
12. Barnes KR, Kilding AE. Strategies to improve running economy. *Sports Med*, 45(1):37-56, 2015.
 13. Midgley AW, McNaughton LR, Jones AM. Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance. *Sports Med*, 37(10):857-880, 2007.
 14. Jeffery KA, Butryn TM. The motivations of runners in a cause-based marathon-training program. *J Sport Behav*, 35:300-319, 2012.
 15. Nicholas R. Running boom: 28.76% of runners started during the pandemic. RunRepeat, 2021. <https://runrepeat.com/new-pandemic-runners>
 16. Anderson JJ. The state of running 2019. RunRepeat, 2021. <https://runrepeat.com/state-of-running>
 17. Fay L LB, Lafontaine TP, . Physiological parameters related to distance running performance in female athletes. . *Med Sci Sports Exerc*, 21(3):319-324, 1989.
 18. Tanaka K. A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc*, 16(3):278-282, 1984.
 19. Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK. Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol*, 97(1):1-8, 2006.
 20. Markovic G, Mikulic P: Neuro-musculoskeletal and performance adaptations to lower-extremity plyometric training. In: *Sports Med*. vol. 40; 2010: 859-895.
 21. Dellagrana RA GL, Santos BV, Hernandez S, da Silva SG, de Campos W. Physiological, anthropometric, strength, and muscle power characteristics correlates with running performance in young runners. 29(6):1584-1591, 2015.
 22. Abad CC, Barros RV, Bertuzzi R et al. 10 km running performance predicted by a multiple linear regression model with allometrically adjusted variables. *J Hum Kinet*, 51:193-200, 2016.
 23. Alvero-Cruz JR, Carnero EA, Garcia MAG et al. Predictive performance models in long-distance runners: A narrative review. *Int J Environ Res Public Health*, 17(21), 2020.
 24. Eihara Y, Takao K, Sugiyama T et al. Heavy resistance training versus plyometric training for improving running economy and running time trial performance: A

- systematic review and meta-analysis. *Sports Med Open*, 8(1):138, 2022.
25. Damasceno MV, Lima-Silva AE, Pasqua LA et al. Effects of resistance training on neuromuscular characteristics and pacing during 10-km running time trial. *Eur J Appl Physiol*, 115(7):1513-1522, 2015.
 26. Taipale RS, Mikkola J, Nummela A et al. Strength training in endurance runners. *Int J Sports Med*, 31(7):468-476, 2010.
 27. Mikkola J, Vesterinen V, Taipale R, Capostagno B, Hakkinen K, Nummela A. Effect of resistance training regimens on treadmill running and neuromuscular performance in recreational endurance runners. *J Sports Sci*, 29(13):1359-1371, 2011.
 28. Taipale RS, Mikkola J, Vesterinen V, Nummela A, Hakkinen K. Neuromuscular adaptations during combined strength and endurance training in endurance runners: maximal versus explosive strength training or a mix of both. *Eur J Appl Physiol*, 113(2):325-335, 2013.
 29. Taipale RS, Mikkola J, Salo T et al. Mixed maximal and explosive strength training in recreational endurance runners. *J Strength Cond Res*, 28(3):689-699, 2014.
 30. Taipale RS, Forssell J, Ihalainen JK, Kyrolainen H, Hakkinen K. A 10-week block of combined high-intensity endurance and strength training produced similar changes in dynamic strength, body composition, and serum hormones in women and men. *Front Sports Act Living*, 2:581305, 2020.
 31. Fletcher JR, MacIntosh BR. Running economy from a muscle energetics perspective. *Front Physiol*, 8:433, 2017.
 32. Joyner MJ, Casey DP. Regulation of increased blood flow (hyperemia) to muscles during exercise: a hierarchy of competing physiological needs. *Physiol Rev*, 95(2):549-601, 2015.
 33. Fyfe JJ, Bishop DJ, Stepto NK. Interference between concurrent resistance and endurance exercise: molecular bases and the role of individual training variables. *Sports Med*, 44(6):743-762, 2014.
 34. Kyröläinen H, Belli A, Komi PV. Biomechanical factors affecting running economy. *Med Sci Sports Exerc*, 33(8):1330-1337, 2001.
 35. Bohm S, Mersmann F, Santuz A, Arampatzis A. Enthalpy efficiency of the soleus

- muscle contributes to improvements in running economy. *Proc Biol Sci*, 288(1943):20202784, 2021.
36. McCormack WP, Yoo CJ, Harpstrite KM et al. Submaximal neuromuscular economy is related to cardiorespiratory fitness in endurance-trained runners. *J Electromyogr Kinesiol*, 48:69-75, 2019.
 37. Heise GD, Morgan DW, Hough H, Craib M. Relationships between running economy and temporal EMG characteristics of bi-articular leg muscles. *Physiology and Biochemistry*, 17:128-133, 1996.
 38. Tam N, Santos-Concejero J, Coetzee DR, Noakes TD, Tucker R. Muscle co-activation and its influence on running performance and risk of injury in elite Kenyan runners. *J Sports Sci*, 35(2):175-181, 2017.
 39. Li F, Newton RU, Shi Y, Sutton D, Ding H. Correlation of eccentric strength, reactive strength, and leg stiffness with running economy in well-trained distance runners. *J Strength Cond Res*, 35(6):1491-1499, 2021.
 40. Folland JP, Allen SJ, Black MI, Handsaker JC, Forrester SE. Running technique is an important component of running economy and performance. *Med Sci Sports Exerc*, 49(7):1412-1423, 2017.
 41. Schuenke MD, Herman JR, Gliders RM et al. Early-phase muscular adaptations in response to slow-speed versus traditional resistance-training regimens. *Eur J Appl Physiol*, 112(10):3585-3595, 2012.
 42. van der Zwaard S, de Ruiter CJ, Noordhof DA et al. Maximal oxygen uptake is proportional to muscle fiber oxidative capacity, from chronic heart failure patients to professional cyclists. *J Appl Physiol (1985)*, 121(3):636-645, 2016.
 43. Hunter GR, McCarthy JP, Carter SJ et al. Muscle fiber type, Achilles tendon length, potentiation, and running economy. *J Strength Cond Res*, 29(5):1302-1309, 2015.
 44. Staron RS, Leonardi MJ, Karapondo DL et al. Strength and skeletal muscle adaptations in heavy-resistance-trained women after detraining and retraining. *J Appl Physiol (1985)*, 70(2):631-640, 1991.
 45. Staron RS, Karapondo DL, Kraemer WJ et al. Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women. *J Appl Physiol (1985)*, 76(3):1247-1255, 1994.

46. Fletcher JR, Esau SP, MacIntosh BR. Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners. *Eur J Appl Physiol*, 110(5):1037-1046, 2010.
47. Albracht K, Arampatzis A. Exercise-induced changes in triceps surae tendon stiffness and muscle strength affect running economy in humans. *Eur J Appl Physiol*, 113(6):1605-1615, 2013.
48. Dorn TW, Schache AG, Pandy MG. Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *J Exp Biol*, 215(Pt 11):1944-1956, 2012.
49. Young WB. Transfer of strength and power training to sports performance. *Int J Sports Physiol Perform*, 1(2):74-83, 2006.
50. Gamble P. Implications and applications of training specificity for coaches and athletes. *Strength Cond J*, 28(3), 2006.
51. Giovanelli N, Taboga P, Rejc E, Lazzar S. Effects of strength, explosive and plyometric training on energy cost of running in ultra-endurance athletes. *Eur J Sport Sci*, 17(7):805-813, 2017.
52. Garcia-Pinillos F, Lago-Fuentes C, Latorre-Roman PA, Pantoja-Vallejo A, Ramirez-Campillo R. Jump-rope training: improved 3-km time-trial performance in endurance runners via enhanced lower-limb reactivity and foot-arch stiffness. *Int J Sports Physiol Perform*:1-7, 2020.
53. Behm DG, Young JD, Whitten JHD et al. Effectiveness of traditional strength vs. power training on muscle strength, power and speed with youth: A systematic review and meta-Analysis. *Front Physiol*, 8:423, 2017.
54. Ache-Dias J, Dellagrana RA, Teixeira AS, Dal Pupo J, Moro AR. Effect of jumping interval training on neuromuscular and physiological parameters: a randomized controlled study. *Appl Physiol Nutr Metab*, 41(1):20-25, 2016.
55. Festa L, Tarperi C, Skroce K et al. Effects of flywheel strength training on the running economy of recreational endurance runners. *J Strength Cond Res*, 33(3):684-690, 2019.
56. Li F, Wang R, Newton RU, Sutton D, Shi Y, Ding H. Effects of complex training versus heavy resistance training on neuromuscular adaptation, running economy and 5-km performance in well-trained distance runners. *PeerJ*, 7:e6787, 2019.

57. Hue O, Gallasis DL, Chollet D, Prefaut C. Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake in present triathletes. *Can J Appl Physiol*, 25(2):102-113, 2000.
58. Gianoli D, Knechtle B, Knechtle P, Barandun U, Rust CA, Rosemann T. Comparison between recreational male Ironman triathletes and marathon runners. *Percept Mot Skills*, 115(1):283-299, 2012.
59. Mayhew TP, Rothstein JM, D. FS, Lamb RL: Muscular adaptation to concentric and eccentric exercise at equal power levels. In: *Med Sci Sports Exerc.* vol. 27; 1995: 868-873.
60. Baroni BM, Rodrigues R, Franke RA, Geremia JM, Rassier DE, Vaz MA. Time course of neuromuscular adaptations to knee extensor eccentric training. *Int J Sports Med*, 34(10):904-911, 2013.
61. Maeo S, Shan X, Otsuka S, Kanehisa H, Kawakami Y. Neuromuscular adaptations to work-matched maximal eccentric versus concentric training. *Med Sci Sports Exerc*, 50(8):1629-1640, 2018.
62. Nakagawa S, Cuthill IC. Effect size, confidence interval and statistical significance: a practical guide for biologists. *Biol Rev Camb Philos Soc*, 82(4):591-605, 2007.
63. Higgins JP, Green S. Cochrane handbook for systematic reviews of interventions version 5.1.0. The Cochrane Collaboration., 2011. www.handbook.cochrane.org
64. Cohen J: Statistical power analysis for the behavioral sciences. Second edition. New York University; 1988.
65. du Prel JB, Hommel G, Rohrig B, Blettner M. Confidence interval or p-value?: part 4 of a series on evaluation of scientific publications. *Dtsch Arztebl Int*, 106(19):335-339, 2009.
66. Jones AM: Middle- and long-distance running. In: Sport and Exercise Physiology. Testing Guidelines: Volume I - Sport Testing. In: *The British Association of Sport and Exercise Sciences Guide: Sport Testing V 1 (BASES)*. edn. Edited by Winter EM, Jones RCR, Davison PD, Bromley TH. Mercer; 2006: 147-154.
67. Beattie K, Carson BP, Lyons M, Rossitter A, Kenny IC. The effect of strength training on performance indicators in distance runners. *J Strength Cond Res*, 31(1):9-23, 2017.
68. Jeukendrup AE, Craig NP, Hawley JA. The bioenergetics of World Class Cycling.

- J Sci Med Sport*, 3(4):414-433, 2000.
69. Higgins JPT, Green S. Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. 2011. https://handbook-5-1.cochrane.org/front_page.htm
 70. Bluett KA, Croix MBA, De Ste Lloyd RS. A preliminary investigation into concurrent aerobic and resistance training in youth runners. *Isokinetics and Exercise Science*, 23(2):77-85, 2015.
 71. Lathop MC, Brown EW, Womack CJ, Ulibarri VD, Paton C, Osmond P. Biomechanical and physiological effects of plyometric training on adolescent cross-country runners. *Int J Appl Sports Sci*, 13(2):12-26, 2001.
 72. Li F, Nassis GP, Shi Y et al. Concurrent complex and endurance training for recreational marathon runners: Effects on neuromuscular and running performance. *Eur J Sport Sci*:1-11, 2020.
 73. Mikkola J, Rusko H, Nummela A, Pollari T, Hakkinen K. Concurrent endurance and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance runners. *Int J Sports Med*, 28(7):602-611, 2007.
 74. Skovgaard C, Christensen PM, Larsen S, Andersen TR, Thomassen M, Bangsbo J. Concurrent speed endurance and resistance training improves performance, running economy, and muscle NHE1 in moderately trained runners. *J Appl Physiol (1985)*, 117(10):1097-1109, 2014.
 75. Gomez-Molina J, Ogueta-Alday A, Camara J, Stickley C, Garcia-Lopez J. Effect of 8 weeks of concurrent plyometric and running training on spatiotemporal and physiological variables of novice runners. *Eur J Sport Sci*, 18(2):162-169, 2018.
 76. Trowell D, Fox A, Saunders N, Vicenzino B, Bonacci J. Effect of concurrent strength and endurance training on run performance and biomechanics: A randomized controlled trial. *Scand J Med Sci Sports*, 32(3):543-558, 2022.
 77. Vorup J, Tybirk J, Gunnarsson TP, Ravnholt T, Dalsgaard S, Bangsbo J. Effect of speed endurance and strength training on performance, running economy and muscular adaptations in endurance-trained runners. *Eur J Appl Physiol*, 116(7):1331-1341, 2016.
 78. Schumann M, Mykkanen OP, Doma K, Mazzolari R, Nyman K, Hakkinen K. Effects of endurance training only versus same-session combined endurance and strength training on physical performance and serum hormone concentrations in

- recreational endurance runners. *Appl Physiol Nutr Metab*, 40(1):28-36, 2015.
79. Schumann M, Pelttari P, Doma K, Karavirta L, Hakkinen K. Neuromuscular adaptations to same-session combined endurance and strength training in recreational endurance runners. *Int J Sports Med*, 37(14):1136-1143, 2016.
 80. Chtara M, Chamari K, Chaouachi M et al. Effects of intra-session concurrent endurance and strength training sequence on aerobic performance and capacity. *Br J Sports Med*, 39(8):555-560, 2005.
 81. Lum D, Barbosa TM, Aziz AR, Balasekaran G. Effects of isometric strength and plyometric training on running performance: A randomized controlled study. *Res Q Exerc Sport*:1-9, 2022.
 82. Stohanzl M, Balas J, Draper N. Effects of minimal dose of strength training on running performance in female recreational runners. *J Sports Med Phys Fitness*, 58(9):1211-1217, 2018.
 83. Roschel H, Barroso R, Tricoli V et al. Effects of strength training associated with whole-body vibration training on running economy and vertical stiffness. *J Strength Cond Res*, 29(8):2215-2220, 2015.
 84. Damasceno M, Pasqua L, Gáspari A et al. Effects of strength training on bioenergetics parameters determined at velocity corresponding to maximal oxygen uptake in endurance runners. *Sci Sports*, 33(6):e263-e270, 2018.
 85. Jones TW, Shillabeer BC, Ryu JH, Cardinale M. Influence of a concurrent strength and endurance training intervention on running performance in adolescent endurance athletes: An observational study. *J hum Sport Exerc*, 13(4), 2018.
 86. Esteve-Lanao J, Rhea MR, Fleck SJ, Lucia A. Running-specific, periodized strength training attenuates loss of stride length during intense endurance running. *J Strength Cond Res*, 22(4):1176-1183, 2008.
 87. Saunders PU, Telford RD, Pyne DB et al. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J Strength Cond Res*, 20(4):947-954, 2006.
 88. Bertuzzi R, Pasqua LA, Bueno S et al. Strength-training with whole-body vibration in long-distance runners: a randomized trial. *Int J Sports Med*, 34(10):917-923, 2013.
 89. Kelly C, Burnett A, Newton M. The effect of strength training on three-kilometer

- performance in recreational women endurance runners. *J Strength Cond Res*, 22(2):396-403, 2008.
90. Bonacci J, Green D, Saunders PU, Franettovich M, Blanch P, Vicenzino B. Plyometric training as an intervention to correct altered neuromotor control during running after cycling in triathletes: a preliminary randomised controlled trial. *Phys Ther Sport*, 12(1):15-21, 2011.
 91. Luckin-Baldwin KM, Badenhorst CE, Cripps AJ et al. Strength training improves exercise economy in triathletes during a simulated triathlon. *Int J Sports Physiol Perform*, 16(5):663-673, 2021.
 92. Ferrauti A, Bergermann M, Dernandez J. Effects of a concurrent strength and endurance training on running performance and running economy in recreational marathon runners. *J Strength Cond Res*, 24(10):2770-2778, 2010.
 93. Johnson RE, Quinn TJ, Kertzer R, Vroman NB. Strength training in female distance runners. *J Strength Cond Res*, 11(4):224-229, 1997.
 94. Karsten B, Stevens L, Colpus M, Larumbe-Zabala E, Naclerio F. The effects of a sport-specific maximal strength and conditioning training on critical velocity, anaerobic running distance, and 5-km race performance. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(1):80-85, 2016.
 95. Piacentini MF, Ioannon G, Comotto S, Spedicato A, Vernillo G, Torre AL. Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. *J Strength Cond Res*, 27(8):2295, 2013.
 96. Vikmoen O, Raastad T, Seynnes O, Bergstrom K, Ellefsen S, Ronnestad BR. Effects of heavy strength training on running performance and determinants of running performance in female endurance athletes. *PLoS One*, 11(3):e0150799, 2016.
 97. Vikmoen O, Ronnestad BR, Ellefsen S, Raastad T. Heavy strength training improves running and cycling performance following prolonged submaximal work in well-trained female athletes. *Physiol Rep*, 5(5), 2017.
 98. Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc*, 34(8):1351-1359, 2002.
 99. Storen O, Helgerud J, Stoa EM, Hoff J. Maximal strength training improves

- running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc*, 40(6):1087-1092, 2008.
100. Machado AF, Castro JBP, Bocalini DS, Figueira Junior AJ, Nunes RAM, Vale RGS. Effects of plyometric training on the performance of 5-km road runners. *Journal of Physical Education and Sport*, 19(1):691-695, 2019.
 101. Pellegrino J, Ruby BC, Dumke CL. Effect of plyometrics on the energy cost of running and MHC and titin isoforms. *Med Sci Sports Exerc*, 48(1):49-56, 2016.
 102. Berryman N, Maurei D, Bosquet L. Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *J Strength Cond Res*, 24(7):1818-1825, 2010.
 103. do Carmo EC, Barroso R, Gil S et al. Can plyometric training change the pacing behaviour during 10-km running? *Eur J Sport Sci* 1-10, 2022.
 104. Spurrs RW, Murphy AJ, Watsford ML. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol*, 89(1):1-7, 2003.
 105. Turner AM, Owings M, Schwane JA. Improvement in running economy after 6 weeks of plyometric training. *J Strength Cond Res*, 17(1):60-67, 2003.
 106. Ramírez-Campillo R, Álvarez C, Henríquez-Olguín C et al. Effects of plyometric training on endurance and explosive strength performance in competitive middle- and long-distance runners. *J Strength Cond Res*, 28(1):97-104, 2014.
 107. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33:159-174, 1977.
 108. Yamanaka R, Ohnuma H, Ando R et al. Sprinting ability as an important indicator of performance in elite long-distance runners. *Int J Sports Physiol Perform*, 15:1-5, 2019.
 109. Hudgins B, Scharfenberg J, Triplett NT, McBride JM. Relationship between jumping ability and running performance in events of varying distance. *J Strength Cond Res*, 27:563-567, 2013.
 110. Hamner SR, Delp SL. Muscle contributions to fore-aft and vertical body mass center accelerations over a range of running speeds. *J Biomech*, 46(4):780-787, 2013.
 111. Matic MS, Pazin NR, Mrdakovic VD, Jankovic NN, Ilic DB, Stefanovic DL. Optimum drop height for maximizing power output in drop jump: The effect of

- maximal muscle strength. *J Strength Cond Res*, 29(12):3300-3310, 2015.
112. Nikolaidis PT, Knechtle B. Force-velocity characteristics and maximal anaerobic power in male recreational marathon runners. *Res Sports Med*, 28(1):99-110, 2020.
 113. Mohammadzadeh GA, Antonellis P, Malcolm P. Differences between joint-space and musculoskeletal estimations of metabolic rate time profiles. *PLoS Comput Biol*, 16(10):e1008280, 2020.
 114. Chmielewski TL, George SZ, Tillman SM et al. Low- versus high-intensity plyometric exercise during rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*, 44(3):609-617, 2016.
 115. Nikolaidis PT, Del Coso J, Rosemann T, Knechtle B. Muscle strength and flexibility in male marathon runners: The role of age, running speed and anthropometry. *Front Physiol*, 10:1301, 2019.
 116. Correlation. In: *Foundations of clinical research: Applications to practice*, 3rd Eds. edn. Edited by Portney LG, Watkins MP: McGraw Hill; 2017.
 117. Zhang Q, Nassis GP, Chen S, Shi Y, Li F. Not lower-limb joint strength and stiffness but vertical stiffness and isometric force-time characteristics correlate with running economy in recreational male runners. *Front Physiol*, 13:940761, 2022.
 118. Guerriero A, Varalda C, Piacentini MF. The role of velocity based training in the strength periodization for modern athletes. *J Funct Morphol Kinesiol*, 3(4), 2018.
 119. Moore IS. Is there an economical running technique? A review of modifiable biomechanical factors affecting running economy. *Sports Med*, 46(6):793-807, 2016.
 120. Preece SJ, Bramah C, Mason D. The biomechanical characteristics of high-performance endurance running. *Eur J Sport Sci*, 19(6):784-792, 2019.
 121. Rodrigo-Carranza V, Gonzalez-Mohino F, Santos-Concejero J, Gonzalez-Rave JM. The effects of footwear midsole longitudinal bending stiffness on running economy and ground contact biomechanics: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Sport Sci* 1-14, 2021.
 122. Hoogkamer W, Kipp S, Spiering BA, Kram R. Altered running economy directly translates to altered distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc*, 48(11):2175-2180, 2016.
 123. Hoogkamer W, Kram R, Arellano CJ. How biomechanical improvements in

- running economy could break the 2-hour marathon barrier. *Sports Med*, 47(9):1739-1750, 2017.
124. Lorenzo S, Minson CT, Babb TG, Halliwill JR. Lactate threshold predicting time-trial performance: impact of heat and acclimation. *J Appl Physiol (1985)*, 111(1):221-227, 2011.
125. James CA, Hayes M, Willmott AGB et al. Defining the determinants of endurance running performance in the heat. *Temperature (Austin)*, 4(3):314-329, 2017.

謝辞

本修士学位論文の執筆にあたり、多くの方々よりご指導、ご支援賜りましたことをここに深謝いたします。研究指導教員として、何度もご迷惑をおかけしましたが、懇切丁寧な研究指導、親身なご助言を賜った立命館大学スポーツ健康科学部・伊坂忠夫教授に心から感謝の意を表します。また、副査をお引き受けいただき、かつ丁寧なご指導をしていただきました長野明紀教授、岡本直輝教授に厚く御礼申し上げます。

鹿屋体育大学金久博昭学長には、研究計画から実験設定、データの分析・解釈に至るまで、本研究すべてにおいて丁寧かつ手厚いご指導をいただきました。修士学位論文のみならず、研究計画・実験設定・データ解釈、学会発表や論文投稿の添削に至るまで、本研究全体において丁寧かつ手厚いご指導をいただきました前大純朗助教に心から感謝致します。杉山敬助教には、研究内容のアドバイスや学会発表資料についての添削、研究の立案について手厚くご指導をいただきました。高尾憲司さんには、ご多忙の中、研究の立案や方法論、対象者の招集にご助力いただきました。立命館大学理工学部 野方 誠教授には、研究についてのご助言やトレーニング参加にご協力いただきました。また、ご多忙にも関わらず実験のご理解を頂き快く実験の参加を引き受けて下さった皆様ならびに、日々の研究活動や事務処理などにおいて多くのお世話をして頂いた秘書の奥村悦子氏に深く感謝致します。大学院生活を通して、研究内容についての丁寧なコメントやアドバイスをいただき、時には議論していただきました研究室の先生方、私のことを気にかけていただき、優しく接していただきました先輩方、大学内だけでなくプライベートでも仲良くしていただいた同輩・後輩の皆様は心から感謝致します。お世話になった方々の御名前を全て挙げきれませんが、皆様のお陰で充実した大学院生活を送ることができました。

最後に、大学院での生活・研究活動ではいくつか辛い時期もありましたが、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。

付録 研究報告一覧

【学術雑誌】

Eihara Y., Takao K., Sugiyama T., Maeo S., Terada M., Kanehisa H., Isaka T. Heavy resistance training versus plyometric training for improving running economy and running time trial performance: A systematic review and meta-analysis. Sports Med - Open, 138(8), 2022.

【国際学会発表】

Eihara Y., Takao K., Sugiyama T., Maeo S., Terada M., Kanehisa H., Isaka T. Resistance training versus plyometric training for improving running economy and running time trial performance: A systematic review and meta-analysis. The 27th European College of Sport Science, Sevilla Spain, 8. 2022.

【ポスター発表・査読あり】

【国内学会発表】

永原悠利, 高尾憲司, 杉山敬, 前大純朗, 金久博昭, 伊坂忠夫. 中長距離ランナーを対象とした筋力トレーニングによる生理学的変数の変化はパフォーマンスの改善に関係するか? : システマティックレビュー. 第 76 回日本体力医学会大会, オンライン開催, 2021 年 9 月.

【口頭発表・査読あり】

永原悠利, 前大純朗, 伊坂忠夫. ランニングエコノミーと垂直剛性およびストライド変数の関係性に基づく経済的なランニングスタイルの探求: システマティックレビュー&メタ解析. 第 28 回日本バイオメカニクス学会大会, 筑波大学, 2022 年 11 月.

【口頭発表・査読あり】

永原悠利, 高尾憲司, 杉山敬, 前大純朗, 金久博昭, 伊坂忠夫. 高負荷レジスタンストレーニングとプライオメトリックトレーニングが長距離走パフォーマンスに及ぼす影響. 第 35 回日本トレーニング学会大会, 国立スポーツ科学センター, 2022 年 12 月.

【ポスター発表・査読あり】