



Title	強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車運動トレーニングが最大酸素摂取量及び筋機能に及ぼす影響に関する研究
Author(s)	苫米地, 伸泰
Citation	北海道大学. 博士(教育学) 甲第13625号
Issue Date	2019-03-25
DOI	10.14943/doctoral.k13625
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/77172
Type	theses (doctoral)
File Information	Nobuyasu_Tomabechi.pdf



[Instructions for use](#)

博士(教育学)学位論文

強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車運動トレーニングが
最大酸素摂取量及び筋機能に及ぼす影響に関する研究

北海道大学大学院教育学院

健康教育論講座 体力科学

苫米地 伸泰

主査

北海道大学大学院教育学研究院

教授 水野 眞佐夫

副査

北海道大学大学院教育学研究院 准教授 柚木 孝敬

北海道大学大学院保健科学研究院 准教授 寒川 美奈

立命館大学スポーツ健康科学部 教授 田畑 泉

目 次

副論文等一覧	・・・6
略・記号と用語	・・・8
第1章 緒言	
1 - 1. 高強度・短時間・間欠的トレーニング(HIIT)の特徴	・・・10
1 - 2. 自転車エルゴメータを用いた HIIT の意義	・・・12
第2章 同一仕事率で負荷と回転数の異なる自転車運動トレーニングに関する 研究小史	・・・15
2 - 1. 呼吸循環応答	・・・15
2 - 2. 最大酸素摂取量への効果	・・・16
2 - 3. 末梢の生理応答	・・・17
2 - 4. 最大筋力と筋パワーに及ぼす効果	・・・19
2 - 5. 至適回転数	・・・21
2 - 6. 自転車トレーニングで $\dot{V}O_{2max}$ と最大筋力及び筋パワー向上に必要な トレーニング期間	・・・22

第3章 研究目的	・・・24
----------	-------

第4章 研究課題Ⅰ

同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせの異なる強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転

車運動が学生アスリートの呼吸循環器応答，筋活動及び筋疲労に及ぼす影響

4 - 1. 目的	・・・26
-----------	-------

4 - 2. 方法	・・・27
-----------	-------

4 - 3. 結果	・・・31
-----------	-------

4 - 4. 考察	・・・33
-----------	-------

第5章 研究課題Ⅱ

同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせの異なる3週間の強度漸減・高強度・短時間・間

欠的自転車トレーニングが学生アスリートの最大酸素摂取量に及ぼす効果

5 - 1. 目的	・・・37
-----------	-------

5 - 2. 方法	・・・37
-----------	-------

5 - 3. 結果	・・・41
-----------	-------

5 - 4. 考察	・・・42
-----------	-------

第6章 研究課題Ⅲ

同一仕事量で負荷と回転数の異なる6週間の強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車
トレーニングが学生アスリートの最大酸素摂取量, 最大筋力及び筋パワーに及ぼす効果

6 - 1. 目的	・・・45
6 - 2. 方法	・・・45
6 - 3. 結果	・・・50
6 - 4. 考察	・・・55

第7章 総合考察

7 - 1. 総括	・・・58
7 - 2. 本研究の方法論の妥当性	・・・59
7 - 3. 本研究の意義	・・・60
7 - 4. トレーニング現場への応用	・・・61
7 - 5. 今後の課題	・・・64
7 - 6. 結論	・・・66

圖表一覽	• • • 68
謝辭	• • • 89
參考文獻	• • • 90

副論文等一覧

本博士論文は、以下に示す学術論文(投稿予定の論文も含む)及び学会発表のデータを基に執筆したものである。

【学術論文】

Tomabechi, N., Takizawa, K., Shibata, K., Ishihara, T., Mizuno, M. Acute physiological response to high-intensity intermittent cycling exercise with different loads in university athletes. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, to be submitted

Tomabechi, N., Takizawa, K., Shibata, K., & Mizuno, M. (2018). Effects of 3-Week Work-Matched High-Intensity Intermittent Cycling Training with Different Cadences on $\dot{V}O_{2max}$ in University Athletes. *Sports*, 6(4), 107.

Tomabechi, N., Takizawa, K., Shibata, K., Ishihara, T., Mizuno, M. Effects of 6-week high-intensity intermittent cycling training with different loads on $\dot{V}O_{2max}$ and muscle function in university athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, to be submitted

【学会発表】

苫米地伸泰，瀧澤一騎，柴田啓介，水野眞佐夫．同一仕事率で回転数の異なる高強度間欠的自転車運動の生理応答．第 73 回日本体力医学会大会．2018 年 9 月

苫米地伸泰，瀧澤一騎，柴田啓介，水野眞佐夫．同一仕事量で回転数の異なる高強度・間欠的自転車レーニングが最大酸素摂取量と筋機能に及ぼす効果．第 31 回日本トレーニング科学学会大会．2018 年 10 月（トレーニング科学研究賞 奨励賞）

略・記号と用語

ATP : Adenosine triphosphate アデノシン三リン酸

Ca²⁺ : Calcium ion カルシウムイオン

EMG : Electromyogram 筋電図

HIIT : High-Intensity Intermittent Training 高強度・間欠的トレーニング

HIICT : High-Intensity Intermittent Cycling Training 高強度・間欠的自転車トレーニング

Kp : Kilopond キロポンド

MICT : Moderate Intensity Continuous Training 中強度・持続的トレーニング

MJ : Mega Joule 総仕事量

MVC : Maximal Voluntary Contraction 最大随意収縮

PCr : Phosphocreatine クレアチンリン酸

pH : Potential of hydrogen 水素イオン指数

RER : Respiratory exchange ratio 呼吸交換比

RMS : Root Mean Square 二乗平方根

Rpm : revolution per minute 毎分回転数

TTE : Time to exhaustion 運動持続時間

$\dot{V}E$: Ventilation 分時換気量

$\dot{V}O_2$: Oxygen uptake 酸素摂取量

$\dot{V}O_{2max}$: Maximal oxygen uptake 最大酸素摂取量

$\dot{V}O_{2peak}$: Peak oxygen uptake 最高酸素摂取量

W : Watt 仕事率

WAnT : Wingate anaerobic test ウィンゲートテスト

第1章 緒言

高強度・間欠的トレーニング(High-Intensity Intermittent Training: HIIT)は、完全休息を挟みながら高強度(最大酸素摂取量の90%以上)の運動を繰り返すトレーニング法である(Gibala and McGee, 2008)。本章では、HIITの特徴及び自転車エルゴメータを用いてHIITを実施することの意義を概説する。

1-1. 高強度・短時間・間欠的トレーニング(HIIT)の特徴

HIITには、伝統的にスポーツ現場で実施されている中強度・持続的トレーニング(Moderate Intensity Continuous Training; MICT)と比較して、短時間でトレーニング効果が得られる利点がある。例えば、Tabata et al. (1996)は体育学を専攻する学生を対象として、10秒間の完全休息を挟みながら最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)の170%の高強度の自転車運動を7-8回繰り返すHIIT(所要時間約4分)と70% $\dot{V}O_{2max}$ の中強度での60分間のMICTをそれぞれ6週間実施させた。MICTでは $\dot{V}O_{2max}$ の向上は認められたものの、最大酸素借の向上は認められなかった。一方で、HIITでは $\dot{V}O_{2max}$ と最大酸素借の双方の向上が認められた(Tabata et al., 1996)。また、Matsuo et alは60-65% $\dot{V}O_{2max}$ の強度で40分間行うMICT、15秒間の休息を挟みながら120% $\dot{V}O_{2max}$ の強度で30秒間の自転車運動を7回繰り返すトレーニング(所要時間10分)、2分間の積極的休息(50% $\dot{V}O_{2max}$ で2分間の自転車運動)を挟みながら80-90% $\dot{V}O_{2max}$ の強度で3分間行うHIIT(所要時間18分)を8週間、週5回実施させ

た。その結果、MICT と比較して HIIT で $\dot{V}O_{2max}$ と安静時の 1 回拍出量の変化量が有意に高値を示した (Matsuo et al., 2014)。これらの知見から、HIIT は伝統的にスポーツ現場で行われている MICT と比較して、短時間で $\dot{V}O_{2max}$ や無酸素性能力の向上が見込めるトレーニング法であると考えられる。

また、HIIT は多くのスポーツと運動形態が類似している利点も有する。陸上競技や自転車競技などの記録型の競技を除いて、多くのスポーツでは試合中に高強度の運動が間欠的に繰り返される。高強度の運動を繰り返すためには、エネルギー源であるクレアチンリン酸(PCr)の再合成に関わる $\dot{V}O_{2max}$ のみならず、筋内の pH 低下を抑制する筋緩衝能の向上も不可欠である (Bishop et al., 2011)。Edge et al. (2006) は日常的にチームスポーツを実施している女子学生を対象に HIIT (90-100% $\dot{V}O_{2peak}$) と MICT (60-75% $\dot{V}O_{2peak}$) をそれぞれ 5 週間、週 3 回実施させた。その結果、MICT では筋緩衝能の向上が認められなかった一方で、HIIT で筋緩衝能が有意に向上したことを報告している (Edge et al., 2006)。これらの知見を踏まえ、試合中に高強度の運動を間欠的に繰り返す球技系の選手や格闘技の選手のための持久性トレーニングとして HIIT は実践されている (Turner and Stewart, 2014; Harris et al., 2018)。したがって、HIIT のより効果的な方法論を明らかにすることは、高強度の運動を繰り返す競技のアスリートに対して、短時間でより効果的なトレーニングを処方するための基礎的知見になるという点で意義深い。

1-2. 自転車エルゴメータを用いた HIIT の意義

HIIT は自転車エルゴメータを用いて実施することで安全かつ効果的に実施出来ると考えられる。先行研究では、HIIT は様々な運動様式で実施されていることが報告されている。Viana et al. の総説では HIIT 研究で最も用いられている運動様式は自転車エルゴメータ (39%) であり、次いでランニング (21%)、ケトルベル (11%) などの運動様式が用いられている (Viana et al., 2019)。その他にも、レジスタンストレーニングやサイドステップ、実際の競技を想定した形での HIIT も実施されている (Buchheit et al., 2009 ; Franchini et al., 2016 ; Francois et al., 2016 ; Thiebaud et al., 2018)。多くのスポーツでは疾走局面が存在するため、ランニングを用いた HIIT が効果的とも考えられるが、実際の競技時及びトレーニング時の傷害は走運動中に最も多く発生する (Hawkins et al., 2001)。一方で、運動中の前十字靭帯の歪みを比較した先行研究では、レジスタンス運動 (レッグエクステンション 3.8%, スクワット 3.6%) と比較して、自転車運動は約 1.7% と低値であることが報告されている (Fleming et al., 1998)。加えて、自転車運動はランニングと比較して筋ダメージを誘発する伸張性収縮の局面が少なく、短縮性収縮がメインの運動である (Bijker et al., 2002)。実際にアスリートの故障から復帰に向けてのリハビリテーションに自転車トレーニングが用いられている事例も報告されている (平田ら, 2016, 奈良ら, 2014) ことから、自転車エルゴメータは関節や筋への負担を最小限に留めながら HIIT を実施出来る運動様式であると考えられる。

また、自転車エルゴメータを用いた HIIT は最大筋力や筋パワーも向上させるとの報告も存在する (Tabata et al., 1990 ; 市橋ら., 2002, ; 市橋ら., 2004 ; Verney et al., 2006).

例えば, Tabata et al. は体育学を専攻する男子学生 6 名を対象として, $90\% \dot{V}O_{2max}$ の強度で自転車エルゴメータを用いた HIIT を 7 週間で合計 35 セッション実施した. その結果, $\dot{V}O_{2max}$ のみならず等速性 (角速度 30° , 60° , 120°) の膝伸展パワーが向上したことを報告している (Tabata et al., 1990). 加えて, Verney et al. の研究では最大心拍数の 70-95% の負荷で HIIT を 14 週間, 合計 42 セッション実施した結果, 等尺性及び等速性膝伸展筋力 (角速度 30° , 60° , 120°) が有意に向上したこと (Verney et al., 2006) . 通常最大筋力や筋パワーを高めることを目的する場合, アスリートはレジスタンストレーニングを実施する (National Strength and Conditioning Association, 2016). しかしながら, 実際のトレーニングの現場では脚筋群に傷害がなくとも, 関節等の傷害でレジスタンストレーニングが実施出来ないことがある. また, 肉離れからの復帰後のように伸張性収縮による負荷が大きいレジスタンストレーニングの実施が困難な状況も存在する. 前述の通り, 自転車運動は筋や関節への負担を最小限に抑制しつつ, トレーニング刺激を与えることが可能な運動様式である. したがって, $\dot{V}O_{2max}$ のみならず最大筋力や筋パワーの向上にも有効な高強度・短時間・間欠的自転車トレーニング (High-Intensity Intermittent Cycling Training ; HIICT) の方法論を明らかにすることは, レジスタンストレーニングの実施が困難な状況下のアスリートが最大筋力や筋パワーを維持・向上させるための基礎的知見にな

るという点で意義がある。これらの背景から、本研究では $\dot{V}O_{2max}$ などの有酸素性能のみならず、最大筋力や筋パワーなどの筋機能も改善する HIICT の方法論の構築を目的として、同一仕事量における負荷と回転数の差異に着目した。

第2章 同一仕事率で負荷と回転数の異なる自転車運動トレーニングに関する研究小史

HIIT は運動強度, 運動時間, 休息時間, 運動時間と休息時間の比率など様々なトレーニング変数で構成されるトレーニング法である (Buchheit and Laursen, 2013a ; Buchheit and Laursen, 2013b). 本研究では, 同じ時間かつ同じ仕事量でより効果的な HIICT の方法を明らかにすること, さらに $\dot{V}O_2\max$ をはじめとした有酸素性能力のみならず最大筋力や筋パワーなどの筋機能への効果も高めることを目的としている. ゆえに, 運動の所要時間を変えずに高い負荷を用いて自転車運動トレーニングを実施出来る同一仕事率及び同一仕事量における負荷と回転数の差異に着目した. 自転車運動の仕事率 (W) は負荷 (kp) と回転数 (rpm) の積から概算されることから, 同じ仕事率でも高負荷・低回転の HIICT と低負荷・高回転の HIICT を行うことが可能である (Hansen and Rønnestad, 2017). 本章では同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせの異なる自転車運動の呼吸循環応答・末梢の生理応答に及ぼす影響, $\dot{V}O_2\max$ や最大筋力や筋パワーへのトレーニング効果, さらにそれらの機能向上に必要なトレーニング期間について概説する.

2-1. 呼吸循環応答

同一仕事率で負荷と回転数の異なる自転車運動の生理的応答に関する研究は数多く実施されている. Gotshall et al. (1996) はサイクリストを対象に 200W の自転車運動を 70rpm,

90rpm, 110rpm で実施させた。その結果, 回転数が増加するにつれて 1 回拍出量, 心拍出量の増加に起因して $\dot{V}O_2$ が増加すること, また, 末梢血管抵抗と全身の動静脈酸素較差が回転数の増加に伴い低下することを示した(Gotshall et al., 1996)。同様に最大下運動中の $\dot{V}O_2$ をはじめとした呼吸循環器系への応答は低負荷・高回転の自転車運動で有意に高値を示すことが多数報告されている(Francescato et al., 1995; Kang et al., 2004; 汪ら., 2005; Tokui and Hirakoba., 2007, Tokui and Hirakoba, 2008; Kounalakis and Geladas, 2012, Hirano et al., 2015; Skovereng et al., 2016; Skovereng et al., 2017)。一方で, 100% $\dot{V}O_{2max}$ での自転車運動を 40rpm, 60rpm, 80rpm, 100rpm で実施させた Lollgen et al. (1980)の研究では, 負荷と回転数の組み合わせに関わらず運動中の $\dot{V}O_2$ に有意差は認められなかったことを報告している(Lollgen et al., 1980)。したがって, 同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせの異なる自転車運動中の $\dot{V}O_2$ 応答は強度(仕事率)に影響を受ける可能性がある。

2-2. 最大酸素摂取量への効果

先行研究では, 相対的な運動強度が高いほど $\dot{V}O_{2max}$ が向上を示した報告がある一方で(Matsuo et al., 2014), 総仕事量が同等であれば $\dot{V}O_{2max}$ への効果は運動強度に依存しないとの見解も存在する(Bishop et al., 2011; Edge et al., 2006; Scribbans et al., 2016)。Paton et al. (2009)は3年以上の競技歴を持つ男性サイクリスト 18 名を 30 秒間の休息を

挟みながら最大仕事率での 30 秒間のペダリング 5 セット行う HIIT を高負荷・低回転(60-70rpm)で行う群か低負荷・高回転(110-120rpm)のいずれかに振り分け、それぞれ 4 週間で合計 8 セッション実施した。その結果、HIIT を高負荷・低回転で実施した群で $\dot{V}O_{2max}$ の改善が認められた。しかしながら、Paton et al. (2009)の研究では低負荷・高回転群と比較して高負荷・低回転の HIIT で各セッションの仕事率が高値を示している(Paton et al., 2009)。各セッションの仕事率及びトレーニング期間を通じての総仕事量は $\dot{V}O_{2max}$ への効果に影響を及ぼすトレーニング変数であることから(Granata et al., 2016)、負荷と回転数の組み合わせの異なる HIICT が $\dot{V}O_{2max}$ に及ぼす効果を明らかにするためには、総仕事量を統一した条件下で効果を比較すべきである。しかしながら、同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせの異なる HIICT の $\dot{V}O_{2max}$ に及ぼす効果は明らかではない。

2-3. 末梢の生理応答

同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせの異なる自転車運動が末梢の生理応答に及ぼす影響については、一致した見解が得られていない。同一仕事量で負荷と回転の異なる自転車運動中の筋電図の平均振幅値を検証した先行研究では、低負荷・高回転の自転車運動と比較して、高負荷・低回転の自転車運動中で筋電図の平均振幅値が高値を示すこと(Deschenes et al., 2000, Sarre et al., 2003)、type II 線維の筋グリコーゲンの含有量が減少することが報告されている(Ahlquist et al., 1992)。その一方で、低負荷・高回転

の自転車運動の方が高負荷・低回転の自転車運動と比較して、筋電図の平均振幅値が有意に高値を示したとの報告もある (Bieuzen et al., 2007 ; Kounalakis and Geladas, 2012).

運動中の type II 線維の動員には筋酸素化レベルも影響する (Osawa et al., 2011). しかしながら、高負荷・低回転条件と比較して低負荷・高回転の条件で有意に酸素化ヘモグロビンが低値、脱酸素化ヘモグロビンが高値を示した報告がある一方で (岩川ら., 2001, Skovereng et al., 2016), 低負荷・高回転条件と比較して、高負荷・低回転条件で有意に酸素化ヘモグロビンや酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン濃度が低値を示した報告も存在し (汪ら., 2005 ; Hirano et al., 2015), こちらも一致した見解が得られていない. これらの研究は最大筋力や筋パワーなどの筋機能の向上を目的としていないことから、最大下の強度で実施されている. 自転車運動の筋活動及び筋酸素化レベルは負荷と回転数の組み合わせのみならず、強度 (仕事率) にも影響を受ける (三浦ら, 1999). 最大筋力の向上にはトレーニング時に最大随意収縮 (MVC) の 40% 以上に相当する強度が必要であると考えられているが (金久, 1990), Lollgen et al. (1980) の研究では、 $100\% \dot{V}O_{2max}$ での自転車運動中の発揮筋力は MVC の 30% に満たないことが報告されている (Lollgen et al., 1980). したがって、最大筋力や筋パワーを向上させるためには、 $100\% \dot{V}O_{2max}$ を超える強度を用いて HIICT を実施する必要がある.

2-4. 最大筋力及び筋パワーに及ぼす効果

HIICT が筋力に及ぼす効果を検証した先行研究では最大筋力が有意に改善されたとする報告がある一方で (Verney et al., 2006, 市橋ら., 2002, 市橋ら., 2004, Ozaki et al., 2015), 筋力の向上が認められなかったという報告も存在する (Clark et al., 2019 ; Astorino et al., 2012). 最大筋力の向上には MVC の 40%以上のトレーニング強度が必要であると考えられている (金久, 1990). Lollgen et al. (1980) は, $100\% \dot{V}O_{2max}$ での自転車運動を 40rpm, 60rpm, 80rpm, 100rpm で実施させた結果, いずれの回転数においても発揮筋力は MVC の 30%に満たないことを報告している (Lollgen et al., 1980). したがって, HIICT で筋力をより効果的に向上をさせるためには, $100\% \dot{V}O_{2max}$ を超える超最大強度が必要と考えられる. また, 同一仕事率の条件下では低負荷・高回転の自転車運動と比較して, 高負荷・低回転の自転車運動で有意に運動中の発揮筋力が高い (Lollgen et al., 1980 ; 汪ら., 2005 ; Bieuzen et al., 2007 ; Hirano et al., 2015). レジスタンストレーニングの研究においては, トレーニング中の発揮筋力が大きい高負荷のトレーニングが低負荷のトレーニングと比較して有意に筋力を向上させることが多数報告されている (Ogasawara et al., 2013 ; Tanimoto and Ishii., 2006 ; Mitchell et al., 2012 ; Morton et al., 2016 ; Jenkins et al., 2016 ; Schoenfeld et al., 2015 ; Schoenfeld et al., 2016 ; Counts et al., 2016). したがって, 同一仕事量で負荷と回転数の異なる超最大強度の HIICT においては, 高負荷・低回転の HIICT で有意に筋力が有意に向上する可能性がある. 一方で, 自

転車エルゴメータで設定出来る負荷(kp)には上限があるため、アスリートの $\dot{V}O_{2max}$ が高く、さらに体重が重い場合、現実的に高負荷・低回転のトレーニングの実施が困難な場面もある。このような条件下では高回転を用いなければならない。ゆえに、同一仕事量で負荷と回転数の異なる超最大強度の HIICT の負荷と回転数の相違が最大筋力に及ぼす効果を検証することは意義深い。

筋パワーとは力と速度の積で算出される筋機能であり、ジャンプ能力や方向転換能力に関わる筋機能である(Kawamori and Haff, 2004 ; Newton and Kraemer, 1994)。また、筋パワーの指標である立ち 5 段跳びの距離が長くなることにより、同一速度での走運動中の $\dot{V}O_2$ の低下、すなわちランニングエコノミーが向上し、5000m 走のパフォーマンスが向上することも報告されている(Paavolainen et al., 1999)。したがって、筋パワーは瞬発的能力と持久性パフォーマンスの双方に影響を及ぼす筋機能である。筋パワーは高負荷・低速度のレジスタンストレーニング、低負荷・高速度のレジスタンストレーニングの双方で向上する(Kawamori and Haff, 2004 ; Sakamoto et al., 2016)。したがって、高負荷・低回転の HIICT、低負荷・高回転の HIICT 双方で筋パワーが向上する可能性がある。

加えて、高負荷・低回転の HIICT は、短時間でのパワー発揮能力も高める可能性がある。Bieuzen et al. (2007)は換気性作業閾値の 80%相当の仕事率で 50 回転条件、被験者が自由に選択した回転数(87-93 回転)を用いる条件、110 回転条件の 3 条件をそれぞれ実施し、自転車運動中のペダリング中の発揮トルクのピーク値の出現点の相違を検証した。その結果、

その他の条件と比較して、50 回転条件がペダリング中の発揮トルクのピーク値の出現が速かったことを報告している (Bieuzen et al., 2007). したがって、ペダリング中に素早いトルク発揮を行う高負荷・低回転の HIICT で短時間でのパワー発揮能力が改善される可能性がある。しかしながら、同一仕事量で負荷と回転数の異なる HIICT が短時間でのパワー発揮能力に及ぼす効果は明らかではない。

2-5. 至適回転数

最大筋力や筋パワーへのトレーニング効果を高めるためには、70-110rpm 以外の回転数を用いる必要があると予想される。自転車運動中の疲労軽減、またはサイクリストのパフォーマンス向上の観点から負荷と回転数の組み合わせに着目した先行研究は数多く存在する (Takaishi et al., 1994; Takaishi et al., 1996; Lucia et al., 2001; Lucia et al., 2004; Foss and Hallen., 2004; Nielsen et al., 2004; Pierre et al., 2006, Abbiss et al., 2009; Nimmerichter et al., 2010; Stebbins et al., 2014; Whitty et al., 2016). 例えば、Takaishi et al. (1994) は自転車トレーニングを実施していない健康男性 8 名に 75% $\dot{V}O_2\text{max}$ の強度 (140W-210W) での自転車運動を 40rpm, 50rpm, 60rpm, 70rpm, 80rpm で実施させた。その結果、神経筋疲労の指標である筋電図の積分値の増加率 (iEMG-slope) は 70rpm で最も低いことを報告している (Takaishi et al., 1994). 自転車競技選手を対象とした研究では、Takaishi et al. (1996) は学生サイクリスト 6 名を対象に 85%

$\dot{V}O_2\max$ (200-240W)の強度での自転車運動を 50rpm, 60rpm, 70rpm, 80rpm, 90rpm, 100rpm でそれぞれ実施させた。その結果, 80rpm と 90rpm がその他の回転数と比較して iEMG-slope が低値を示した (Takaishi et al., 1996)。Lucia et al. (2004) はプロサイクリストを対象として, 最大仕事率の 75%の強度 (平均: 366 ± 37 W, 最小-最大: 310-420W) の自転車運動を 60rpm, 80rpm, 100rpm で実施させた。その結果, 100rpm がその他の回転数と比較して自転車運動中の外側広筋の筋活動や主観的運動強度 (RPE) が低かったことを報告している (Lucia et al., 2004)。また, 自転車運動中の下肢関節モーメントから筋への負荷を計測した結果, 90-110rpm でもっとも負荷が軽減されることも報告されている (Abbiss et al., 2009)。したがって, おおよそ 70-110rpm が下肢筋への負担の少ない回転数と考えられる。しかしながら, これらの知見は自転車運動中の疲労の軽減の観点から回転数に着目している。トレーニングとして下肢筋群に負荷を掛けるためには, 逆に疲労を誘発する必要がある。したがって, $\dot{V}O_2\max$ のみならず, 最大筋力や筋パワーを向上させる HIIT の方法論を明らかにするためには, 70-110rpm 以外の範囲の回転数を用いるべきである。

2-6. 自転車トレーニングで $\dot{V}O_2\max$ と最大筋力及び筋パワー向上に必要なトレーニング期間

自転車トレーニングでは, 筋機能と比較して呼吸循環器系の適応が早期に起きる。HIIT は 2-4 週間の短期間で $\dot{V}O_2\max$ を向上させることが報告されている (Tabata et al., 1996 ; Rodas et al., 2000 ; Hazell et al., 2010 ; Talanian et al., 2007 ; Astorino et al.,

2018 ; Bayati et al., 2011 ; Whyte et al., 2010). 一方で, Astorino et al. (2012)は活動的な若年男性及び女性を対象として, 5 分間の積極的休養を挟みながら, 体重の 7.5%の負荷(kp)を用いた 30 秒間の全力自転車漕ぎを 4-6 回繰り返す HIIT を 2 週間で合計 6 セッション実施させた. その結果, $\dot{V}O_{2max}$ の向上は認められたものの, 等速性(角速度 60° , 180°)の膝伸展筋力の向上は認められなかったことを報告している(Astorino et al., 2012). また, Hansen and Rønnestad(2017)は自転車トレーニングの神経筋適応には, 4 週間以上の期間が必要であることを報告している(Hansen and Rønnestad, 2017). これらの知見から, HIIT のトレーニング効果は最大筋力や筋パワーと比較して, $\dot{V}O_{2max}$ などの呼吸循環器系で早期に起こると考えられる. 実際のスポーツ現場, 特に学生スポーツの現場では期間が定められているため, 必然的にトレーニングに割ける期間も限られる. したがって, 短期間で $\dot{V}O_{2max}$ をより効果的に改善するための HIIT の確立の観点から負荷と回転数の組み合わせの差異に着目することは意義深い.

第3章 研究目的

同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせの異なる自転車運動に関する研究は、自転車運動中の疲労軽減、サイクリストのパフォーマンス向上の観点から多くの研究が行われている(Takaishi et al., 1994; Takaishi et al., 1996; Lucia et al., 2001; Lucia et al., 2004; Foss and Hallen, 2004; Nielsen et al., 2004; Pierre et al., 2006; Nimmerichter et al., 2010; Stebbins et al., 2014; Whitty et al., 2016). しかしながら、非サイクリストであるアスリートの $\dot{V}O_{2max}$ 、最大筋力及び筋パワーを向上させるためのより効果的な HIICT の確立の観点から負荷と回転数の組み合わせの差異に着目した研究は見られない.

ゆえに、本研究は同一仕事率で負荷と回転数の異なる高強度・短時間・間欠的自転車運動(High-Intensity Intermittent Cycling Exercise; HIICE)の生理応答及び同一仕事量で負荷と回転数の異なる HIICT が $\dot{V}O_{2max}$ 、最大筋力及び筋パワーに及ぼす効果を明らかにすることを目的として、3つの研究課題を設定した. 研究課題Ⅰでは、トレーニング効果の予測するために、同一仕事率で負荷と回転数の HIICE の生理応答を検証した. 研究課題Ⅱでは、 $\dot{V}O_{2max}$ に及ぼす短期的効果の検証を目的として、同一仕事量における負荷と回転数の異なる3週間の HIICT が $\dot{V}O_{2max}$ に及ぼす効果を検証した. 研究課題Ⅲでは、トレーニング期間を6週間に延ばし、最大筋力と筋パワーに及ぼす効果を検証した. 本研究では最大

筋力や筋パワーへのトレーニング効果を高めることも目的であることから、高負荷を用いたHIICTでは60rpm、低負荷を用いるHIICTでは120rpmを用いてHIICTをそれぞれ実施した。なお、本研究は北海道大学大学院教育学研究院倫理委員会の承認の基で実施し(承認番号：17-24)、被験者には事前に実験の内容やリスクを説明し、署名を得たうえで実施した。

第4章 研究課題 I

同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせの異なる強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車運動が学生アスリートの呼吸循環器応答，筋活動及び筋疲労に及ぼす影響

4 - 1. 目的

同一仕事率で負荷と回転数の異なる自転車運動の生理応答に関する先行研究は数多く行われている(Takaishi et al., 1994; Takaishi et al., 1996; LUCI[^]A et al., 2001; LUCI[^]A et al., 2004; Foss and Hallen., 2004; Nielsen et al., 2004; Pierre et al., 2006; Nimmerichter et al., 2010; Stebbins et al., 2014; Whitty et al., 2016). しかしながら，その多くはサイクリストのレース中の疲労軽減に有効な回転数の探索の観点から研究が実施されており，より効果的な HIICT の方法論の確立を目的とした知見は見られない。したがって，研究課題 I では，同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせの異なる高強度・間欠的自転車運動(High-Intensity Intermittent Cycling Exercise ; HIICE)が呼吸循環器応答，筋活動，筋疲労に及ぼす影響を明らかにし，より効果的な HIICT の確立の一助とすることを目的とした。

4 - 2. 方法

4 - 2 - 1. 実験デザイン

本研究は、疲労の影響を避けるために最低でも中 1 日の間隔を空けて、別日で 3 日実験日を設けた。1 日目は、漸増負荷試験による $\dot{V}O_{2max}$ の測定と、等尺性膝伸展運動における最大随意収縮(MVC)の測定練習を実施した。2-3 日目は HIICE を高負荷・60rpm 条件(High-Load・60rpm ; HL60)、低負荷・120rpm 条件(Low-Load・120rpm ; LL120)のいずれかで、ランダムに実施した。2-3 日目の実験の流れは Figure. 1 に示した。HIICE 中の生理学的な指標として呼気ガスと外側広筋の筋活動、HIICE による筋疲労の指標として、HIICE 前後で MVC を測定した。加えて、HIICE 直後に Borg スケールの修正版(CR-10)を用いて呼吸及び脚の主観的運動強度(以下：RPE)を調査した(Borg et al., 1985)。また、HIICE 後に 10 分間のクールダウンを経て、セッション全体を通じての RPE を測定した。

4 - 2 - 2. 被験者

本研究には、運動部またはサークルに所属する 9 名の男子学生が参加したが、後述する理由により 1 名のデータを除外したため、分析には 8 名のデータを用いた(年齢：20.0 ± 1.9 歳，身長：174.1 ± 5.1 cm，体重：65.7 ± 5.6 kg)。なお、被験者の実施していた競技の内訳は、サッカー3名，ノルディック複合3名，ソフトテニス1名，バレーボール1名であった。本研究の被験者は週 2 回以上の運動習慣を有していた。また、競技として

(例：自転車競技，トライアスロン)自転車トレーニングを実施している者や過去半年間下肢のレジスタンストレーニングを週2回以上継続している者は居なかった。

4 - 2 - 3. 最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)

各被験者の $\dot{V}O_{2max}$ と HIICE 実施の際の負荷設定のために，自転車エルゴメータ (Powermax-VII, Combi Wellness, Tokyo, Japan)を用いて漸増負荷試験を実施した。漸増負荷試験は3分間の安静を経て，60W(1kp)から開始し，3分毎に30W(0.5kp)ずつ負荷を漸増させ，各被験者が60rpmを維持することが不可能となるまで継続した。試験中の回転数はメトロノームと自転車エルゴメータの画面上に表示され，コントロールされた。試験中の酸素摂取量は呼吸代謝測定装置(VO2000, S&ME社)を用いてmixing chamber法にて10秒毎に測定され，試験を通じてのピーク値を最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)と定義した。

4 - 2 - 4. 呼気ガス

HIICE中は呼吸代謝測定装置(VO2000, S&ME Co. Ltd., Tokyo, Japan)を用いてmixing chamber法にて10秒毎に呼気ガスを採取し，休息時間を除いた運動中の酸素摂取量($\dot{V}O_2$)，呼吸交換比(RER)，分時換気量($\dot{V}E$)ピーク値を分析に採用した。

4 - 2 - 5. 表面筋電図(EMG)

HIICE 中の外側広筋の筋活動は、表面筋電図(BioLog DL-3100; S&ME 社)を用いて測定した。測定に先立ち皮膚インピーダンスを減らすために、被験筋の周囲を剃毛、研磨、アルコールで消毒した後に、双極の Ag/AgCl 電極(Vitrode F-150S, 日本光電)を筋腹に 20mm の電極間距離で貼付した。また、基準電極は腓骨頭頂部に貼付した。サンプリング周波数は 1000Hz とし、解析ソフト(m-Scope, S&ME 社)を用いて 20-500Hz の範囲にてバンドパスフィルターで処理された。セット中の二乗平方根(Root Mean Square ; RMS)を算出し、1セット目の値を Pre, 8 セット目の値を Post として分析に使用した。また、HIICE 前に測定した MVC の値で正規化をし、%MVC で表記した。

4 - 2 - 6. 最大随意収縮(MVC)

HIICE 前(Pre)と HIICE 後(Post)で筋疲労の指標として、等速性筋力測定装置測定(KIN-COM® , Chattecx, Inc., USA)を用いて、等尺性膝伸展運動における最大随意収縮(MVC)を測定した。被験者は直立で専用の椅子に腰掛け、大腿部と胴体を専用のベルトを用いて固定された。測定は全て右足で行い、1分間の休息を挟んで合計2回3秒間の最大筋力発揮を実施した (Shibata et al., 2015)。測定の際の膝関節の角度は 90° に規定した。分析には、2回の平均値を採用した。なお、実験初日に、試技の練習をそれぞれ実施した。

4 - 2 - 7. 強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車運動(HIICE)

本研究のHIICEプロトコルは、10秒間の完全休息を挟みながら、20秒ペダリングを8回60rpmか120rpmのいずれかで実施することとした。強度は初日に測定した $\dot{V}O_{2max}$ の135%から開始し、被験者が最終セットでも回転数を維持できるよう、強度を2回毎に5%ずつ漸減させることとした。なお、各被験者のHIICEを実施する際の仕事率(W)の算出には、漸増負荷試験中の各ステージ(W)と各ステージの $\dot{V}O_2$ のピーク値から算出された回帰式を用いた。また、各被験者のHIICTに用いた負荷(kp)は算出された仕事率(W)を本研究で用いた回転数である60もしくは120で除すことにより算出した。上記のHIICEプロトコルの主運動時間、休息时间、セット数はTabata et al.(1996), Tabata et al.(1997), Miyamoto - Mikami et al.(2018)の知見を参考とし、強度の漸減についてはde Oliveira et al.(2016)の知見を参考に予備実験を行いプロトコルを作成した(Tabata et al., 1996; Tabata et al., 1997; de Oliveira et al., 2016; Miyamoto - Mikami et al., 2018)。HIICEの負荷(kp)はTable.1に示した。運動中の回転数はメトロノームと自転車エルゴメータの画面に表示することにより、コントロールされた。分析にはHIICE中の各条件の仕事率、達成率(各条件の仕事率を事前に算出した仕事率で除した値)を用いた。なお、達成率が90%未満だった者は、HIICE中の回転数不足と判断し、データから除外した。

4 - 2 - 8. 統計分析

SPSS Statistics (version 24.0 for Windows, SPSS Inc., Chicago, Ill., USA)を用いて統計分析を実施した。HIICEの主観的運動強度(呼吸, 脚), 仕事率, 達成率, HIICE中の酸素摂取量, 呼吸交換比, 分時換気量のピーク値の条件間の比較には対応のある t 検定を用いて実施した。主観的運動強度(セッション)は正規性が認められなかったため, Wilcoxon の符号付き順位検定を用いて分析を実施した。各条件のRMSとMVCの比較には, 条件×時間(条件, 時間ともに対応あり)の二元配置分散分析を用いた。単純主効果検定には, Bonferroniを用いた。効果量はCohen's d (対応のない t 検定と単純主効果検定), r (Wilcoxon の符号付き順位検定)と $\text{partial } \eta^2$ (二元配置分散分析)をそれぞれ算出した。全ての値は平均値±標準偏差で表記し, 有意水準は5%未満とした。

4 - 3. 結果

被験者1名がHL60で達成率が90%に満たなかったため, 回転数不足と判断し除外した。ゆえに, 8名のデータを分析に採用した。

HIICE中の仕事率及び達成率はHL60とLL120の間で有意差は認められなかった(Table. 2)。

HIICE終了後の呼吸, 脚, セッション全体を通じてのRPEはいずれもHL60と比較して,

LL120 で有意に高値を示した(呼吸 : $P = 0.001$, Cohen' s d = 1.094, 脚 : $P = 0.001$, Cohen' s d = 1.214, セッション : $P = 0.016$, $r = 0.85$, Figure. 2 A-C). なお, 各条件での RPE の平均値は HL60 で呼吸 : 5 ± 2 , 脚 : 5 ± 2 , セッション : 4 ± 1 , LL120 で呼吸 : 7 ± 2 , 脚 : 7 ± 2 , セッション : 6 ± 1 であった.

HIICE 中の $\dot{V}O_2$, RER, $\dot{V}E$ のピーク値は, HL60 と比較して, LL120 で有意に高値を示した ($\dot{V}O_2$: $P = 0.011$, Cohen' s d = 1.107, RER : $P = 0.039$, Cohen' s d = 0.269, $\dot{V}E$: $P < 0.01$, Cohen' s d = 1.674, Figure. 3 A-C). なお, 各条件での $\dot{V}O_2$ のピーク値の平均値は HL60 で 52.5 ± 5.6 ml/kg/min (82.7 ± 7.0 % $\dot{V}O_{2max}$), LL120 で 58.3 ± 5.1 ml/kg/min (92.1 ± 7.6 % $\dot{V}O_{2max}$), RER のピーク値の平均値は HL60 で 1.12 ± 0.25 , LL120 で 1.20 ± 0.31 , $\dot{V}E$ のピーク値の平均値は HL60 で 106.0 ± 28.9 L/min, LL120 で 151.7 ± 25.6 L/min であった.

RMS は時間の主効果及び条件の主効果が認められたが(時間の主効果 : $P = 0.024$, partial $\eta^2 = 0.541$, 条件の主効果 : $P = 0.039$, partial $\eta^2 = 0.480$, Figure. 4), 条件×時間の交互作用は認められなかった(条件×時間の交互作用 : $P = 0.485$, partial $\eta^2 = 0.072$). なお, 各条件における RMS の平均値は HL60 Pre : 42.9 ± 20.2 %MVC, HL60 Post : 51.7 ± 19.5 %MVC, LL120 Pre : 48.9 ± 19.2 %MVC, LL120 Post : 56.0 ± 23.4 %MVC であった.

MVC は条件×時間の有意な交互作用が認められた(条件×時間の交互作用 : $P = 0.005$,

partial $\eta^2 = 0.697$, Figure. 5A). 単純主効果検定の結果, LL120 でのみ Pre から Post に掛けて MVC が有意に低下した ($P = 0.016$, Cohen' s d = 0.650). 加えて, Post において MVC は HL60 と比較して, LL120 で有意に低値を示した ($P = 0.013$, Cohen' s d = 0.333).

なお, 各条件における MVC の平均値は HL60 Pre : 255.2 \pm 83.2 N \cdot m, HL60 Post : 238.2 \pm 91.2 N \cdot m, LL120 Pre : 261.4 \pm 73.4 N \cdot m, LL120 Post : 207.9 \pm 90.5 N \cdot m であった. また, 体重当たりの MVC も同様に条件 \times 時間の交互作用が認められた (条件 \times 時間の交互作用 : $P = 0.005$, partial $\eta^2 = 0.692$, Figure. 5B). 単純主効果検定の結果, LL120 でのみ Pre から Post に掛けて MVC が有意に低下した ($P = 0.013$, Cohen' s d = 0.684).

加えて, Post において MVC は HL60 と比較して, LL120 で有意に低値を示した ($P = 0.019$, Cohen' s d = 0.347). なお, 各条件における体重当たりの MVC の平均値は HL60 Pre : 3.88 \pm 1.20 N \cdot m, HL60 Post : 3.64 \pm 1.41 N \cdot m, LL120 Pre : 3.97 \pm 1.02 N \cdot m, LL120 Post : 3.17 \pm 1.32 N \cdot m であった.

4 - 4. 考察

本研究は, 同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせが異なる HIICE の主観的・生理応答を検証した. その結果, HL60 と比較して, LL120 で有意に呼吸循環器及び末梢での生理的応答が促進された.

HL60 と比較して LL120 で RMS が高値を示した背景には, VE の亢進に伴う呼吸筋の仕事量

の増大が関与している可能性がある。同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせが異なる自転車運動に関する先行研究では、高負荷・低回転の自転車運動と比較して、低負荷・高回転の自転車運動で動作リズムの速さに起因して呼吸数が増え、 $\dot{V}E$ が亢進することが報告されている(Kounalakis and Geladas, 2012 ; Takano, 1993)。本研究では呼吸数は測定していないが、動作リズムの速い LL120 で $\dot{V}E$ が有意に高値を示した。したがって、先行研究と同様に LL120 では動作リズムの速さに起因して呼吸数が増加し、 $\dot{V}E$ が亢進されたと考えられる。Kounalakis and Geladas (2012) は 58-60% $\dot{V}O_{2peak}$ の強度での自転車運動を 40rpm 条件、80rpm 条件で 90 分間実施させ、呼吸循環応答及び筋酸素化レベルに及ぼす影響を比較した。その結果、40rpm 条件と比較して 80rpm 条件で運動中の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E$ 、呼吸数が有意に高値を示した一方で、外側広筋の酸素化ヘモグロビン及び総ヘモグロビン量は 40rpm 条件で有意に高値を示したことを報告している(Kounalakis and Geladas, 2012)。呼吸筋の仕事量増大に伴い呼吸筋への血流量が増大すると、血流の再配分により活動筋への血流量が減少する(Harms et al., 1997)。Kounalakis and Geladas(2012)は 80rpm 条件で呼吸筋の仕事量が増大し、下肢筋群への血流量が減少したため、40rpm 条件と比較して酸素化ヘモグロビンや総ヘモグロビン量が低値を示したと推察している(Kounalakis and Geladas, 2012)。また、Lollgen et al. (1980)は 100% $\dot{V}O_{2max}$ の負荷で 40rpm 条件、60rpm 条件、80rpm 条件、100rpm 条件を行い、呼吸循環器応答及び筋内の代謝応答を比較した。その結果、回転数の増大に伴い $\dot{V}E$ と筋中及び血中の乳酸値が増加したことを報告している(Lollgen et

al., 1980). 筋酸素化レベルの低下に伴い, type II 線維の動員が高まることが報告されている (Osawa et al., 2011). また, type I 線維と比較して type II 線維では筋グリコーゲンの含量が多く, ピルビン酸から乳酸を形成する乳酸脱水素酵素の活性も高いため, type II 線維の動員が高まると乳酸値も上昇する (Burke and Edgerton, 1975). 本研究では運動強度も高かったため, 先行研究と比較して LL120 で呼吸筋の仕事量が増大したと予想される. 加えて, 呼吸筋の仕事量の増大に起因して脚の血流量が減少及び筋の無酸素性代謝が促進され type II 線維の動員が高まったことにより, HIICE 中の RMS が HL60 と比較して高値を示したと推察される.

本研究では, 筋疲労の指標として HIICE 前後で MVC を測定した. その結果, HL60 と比較して, LL120 で有意に MVC の低下が認められた. 先行研究では, type II 線維は type I 線維と比較して, 疲労耐性が低いことが示されている (Burke and Edgerton, 1975). 本研究では, RMS の結果から, HL60 と比較して LL120 で有意に type II 線維の動員が高いと予想される. したがって, HL60 と比較して, HIICE 中に疲労耐性の低い type II 線維の動員が多かった LL120 で有意に MVC が低下したと推察される.

本研究では, HL60 と比較して, LL120 で $\dot{V}O_{2max}$ が有意に高値を示した. これらの結果は多くの先行研究を支持する結果である (Francescato et al., 1995; Gotshall et al., 1996; Kang et al., 2004; 汪ら., 2005; Tokui and Hirakoba, 2007; Kounalakis and Geladas, 2012; Hirano et al., 2015; Skovereng et al., 2016; Skovereng et al.,

2017). 先行研究では、低負荷・高回転の自転車運動で $\dot{V}O_2$ が増加する要因として、筋収縮の頻度の増加に伴い筋小胞体での Ca^{2+} の放出と取り込みの頻度が増加し、 Ca^{2+} の取り込みの際に筋小胞体で消費される ATP が増加することが挙げられる (Abbate et al., 2002 ; Tokui and Hirakoba, 2007). 加えて、本研究では HL60 と LL120 の筋活動の違いも $\dot{V}O_2$ の応答に関与している可能性がある。先行研究では、type I 線維と比較して、type II 線維で ATP を ADP と Pi に加水分解する酵素である ATPase の活性が高く ATP の消費が大きいことや、筋の収縮効率の指標である tension cost (発揮張力を ATPase の活性で除した値)が高いことが報告されている (Burke and Edgerton, 1975, Han et al., 2001). 本研究では、RMS が HL60 と比較して LL120 で有意に高かったことから、HL60 と比較して、LL120 で type II 線維が多く動員され、結果的に HIICE 中の $\dot{V}O_2$ が亢進された可能性がある。

本研究の結果から、HL60 の HIICT と比較して、LL120 の HIICT で筋機能が有意に高まると予想される。一過性の運動における筋活動や筋疲労の亢進は長期的な筋の成長を予測する因子であることが報告されている (Counts et al., 2016). 本研究では、HL60 と比較して、LL120 で呼吸循環器応答、筋活動、筋疲労の亢進された。これらの結果から、HL60 よりも LL120 が筋への負荷が大きく、最大筋力や筋パワーへのトレーニング効果が高いと予想される。

第 5 章 研究課題 II

同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせの異なる 3 週間の強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングが学生アスリートの最大酸素摂取量に及ぼす効果

5 - 1. 目的

研究課題 I の結果から HL60 と比較して、LL120 で呼吸循環器系への相対的強度が有意に高まることが明らかとなった。運動強度が高いほど $\dot{V}O_{2max}$ が高まるとの報告もあることから(Matsuo et al., 2014)、HL60 と比較して、LL120 で $\dot{V}O_{2max}$ が有意に改善される可能性がある。ゆえに、本研究の目的は、3 週間の LL120 が HL と比較して学生アスリートの $\dot{V}O_{2max}$ を改善するか否かを明らかにすることとした。

5 - 2. 方法

5 - 2 - 1. 実験デザイン

被験者をトレーニング開始前(Pre)で測定された $\dot{V}O_{2max}$ から算出された HIICT の仕事率を基に HIICT を高負荷・60rpm で行う群(High-Load・60rpm ; HL60, n = 9, 年齢 : 20.1 ± 0.8 歳, 身長 : 174.6 ± 4.8 cm, 体重 : 65.4 ± 3.9 kg)か低負荷・120rpm で行う群(Low-Load・120rpm ; LL120, n = 9, 年齢 : 20.0 ± 1.0 歳, 身長 : 173.2 ± 5.3 cm, 体重 :

64.4 ± 6.3 kg)のいずれかに振り分けた。両群とも HIICT を 3 週間で合計 9 セッション実施した。週ごとに HIICT の実施回数に偏りが出ないように、両群とも毎週最低でも 2 回 HIICT を実施することとした。トレーニング強度は 3 セッション毎に 2.5% ずつ漸増させた。全てのトレーニングセッションは専門的知識を有した検者の監督下で実施された。トレーニング期間の前後で $\dot{V}O_{2max}$ の測定を実施した。トレーニング期間後 (Post) の測定は、疲労の影響を避けるために、最後のセッションから最低でも中 1 日の間隔を空けることとした。また、circadian rhythm の影響を考慮し、Pre 及び Post の各測定はおおよそ同じ時間帯 (±2.5 時間以内) で実施した。

5 - 2 - 2. 被験者

研究課題 II には当初運動部またはサークルに所属する 21 名の男子学生が実験に参加したが、3 名の被験者が実験外での負傷によりトレーニングを完遂出来なかった。ゆえに、18 名 (HL60, LL120 各群 9 名ずつ) の被験者のデータを分析に用いた。なお、被験者が実施していた競技はそれぞれバレーボール (8 名)、ソフトテニス (3 名)、サッカー (3 名)、アルティメット (2 名)、バドミントン (1 名)、セーリング (1 名) であった。研究課題 I の被験者と同様に、研究課題 II の被験者も週 2 回以上の運動習慣を有しており、競技として (例：自転車競技、トライアスロン) 自転車トレーニングを実施している者や過去半年間下肢のレジスタンストレーニングを週 2 回以上継続している者は居なかった。

5 - 2 - 3. 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$)

各被験者の $\dot{V}O_{2max}$ と HIICT 実施の際の負荷設定のために、自転車エルゴメータ (Powermax-VII, Combi Wellness, Tokyo, Japan) を用いて漸増負荷試験を実施した。漸増負荷試験は研究 I と同様の方法で実施した。すなわち、3 分間の安静を経て、60W (1kp) から試験を開始し、3 分毎に 30W (0.5kp) ずつ負荷を漸増させ、各被験者が 60rpm を維持することが不可能となるまで継続した。試験中の回転数はメトロノームと自転車エルゴメータの画面上に表示されることにより、コントロールされた。試験中の酸素摂取量は呼吸代謝測定装置 (VO2000, S&ME 社) を用いて mixing chamber 法にて 10 秒毎に測定され、試験を通じてのピーク値を最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) と定義した。また、各被験者の有酸素性作業能力の指標として、漸増負荷試験における運動持続時間 (Time To Exhaustion ; TTE) も測定した。

5 - 2 - 4. 強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニング (HIICT)

研究課題 II も研究課題 I と同様のプロトコルで HIICT を実施した。すなわち、被験者は 10 秒間の完全休息を挟みながら、20 秒ペダリングを 8 回 60rpm か 120rpm のいずれかで実施した。強度は Pre で測定した $\dot{V}O_{2max}$ の 135% から開始し、被験者が最終セットでも回転数を維持できるよう、強度を 2 回毎に 5% ずつ漸減させることとした。各被験者の HIICE を実施する際の仕事率 (W) の算出には、漸増負荷試験中の各ステージ (W) と各ステージの $\dot{V}O_2$ のピ

ーク値から算出された回帰式を用いた。また、各被験者の HIICT に用いた負荷(kp)は算出された仕事率(W)を本研究で用いた回転数である 60 もしくは 120 で除すことにより算出した。運動中の回転数はメトロノームと自転車エルゴメータの画面に表示され、コントロールされた。研究Ⅱのトレーニング期間を通じての HIICT の負荷(kp)は Table.5 に示した。18 セッション合計の仕事率と合計の運動時間(各セッション 160 秒×18 セッション=2880 秒)を基にトレーニング期間を通じての総仕事量(Mega Joule ; MJ)を算出した。また、研究課題Ⅰ-Ⅱと同様に達成率(実際の仕事量を事前に算出した仕事量で除した値)を算出し、達成率が90%未満だった者はHIICT中の回転数不足と判断し、データから除外した。HIICT は毎セッション 90W で 10 分間のウォーミングアップを実施した後に実施した。また、HIICT 終了後は 90W で 5 分間のクーリングダウンを実施した。

5 - 2 - 5. 統計分析

SPSS Statistics (version 24.0 for Windows, SPSS Inc., Chicago, Ill., USA)を用いて統計分析を実施した。 $\dot{V}O_{2max}$ の Pre で群間に有意差があるか否かの確認、3 週間通じての仕事量、仕事量の達成率、 $\dot{V}O_{2max}$ の変化率の分析は対応のない t 検定を用いて実施した。 $\dot{V}O_{2max}$ と体重の群間差の分析には、群×時間(群：対応なし、時間：対応あり)の二元配置分散分析を用いた。単純主効果検定には、Bonferroni を用いた。効果量は Cohen' s d (対応のない t 検定と単純主効果検定)と partial η^2 (二元配置分散分析)をそれぞれ算出し

た。全ての値は平均値±標準偏差で表記し、有意水準は5%未満とした。

5 - 3. 結果

3週間、合計9セッションのトレーニングを完遂した18名の被験者全員が仕事量の達成率が90%を上回った。また、Preにおける $\dot{V}O_{2max}$ の値にはHL60とLL120の間で有意差は認められなかった($P = 0.967$, Cohen's $d = 0.020$, HL60: 59.2 ± 3.9 ml/kg/min, LL120: 59.3 ± 5.5 ml/kg/min)。

3週間合計の仕事量及び達成率は群間で有意差は認められなかった(Table. 4)。

体重はトレーニング期間前後で時間と群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった(時間の主効果: $P = 0.821$, partial $\eta^2 = 0.003$, 群の主効果: $P = 0.665$, partial $\eta^2 = 0.012$, 群×時間の交互作用: $P = 0.821$, partial $\eta^2 = 0.003$, HL60 pre: 65.4 ± 3.9 kg, HL60 post: 65.4 ± 3.8 kg, LL120 pre: 64.4 ± 6.3 kg, LL120 post: 64.3 ± 5.9 kg, 図表なし)。

$\dot{V}O_{2max}$ はトレーニング期間の前後で時間の主効果は認められたが、群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった(時間の主効果: $P = 0.016$, partial $\eta^2 = 0.311$, 群の主効果: $P = 0.915$, partial $\eta^2 = 0.001$, 群×時間の交互作用: $P = 0.680$, partial $\eta^2 = 0.011$, Figure. 6)。加えて、 $\dot{V}O_{2max}$ の増加率にも群間で有意差は認められなかった

($P = 0.675$, Cohen's $d = 0.201$, HL60 : $4.3 \pm 6.2\%$, LL120 : $3.2 \pm 5.5\%$). なお、各群の $\dot{V}O_{2max}$ の平均値はHL60 pre : 59.2 ± 3.9 mL/kg/min, HL60 post : 61.7 ± 4.4 mL/kg/min, LL120 pre : 59.3 ± 5.5 mL/kg/min, LL120 post : 61.1 ± 6.1 mL/kg/minであった.

TTE はトレーニング期間の前後で時間の主効果は認められたが、群×時間の交互作用は認められなかった(時間の主効果 : $P < 0.01$, partial $\eta^2 = 0.471$, 群の主効果 : $P = 0.954$, partial $\eta^2 = 0.000$, 群×時間の交互作用 : $P = 0.711$, partial $\eta^2 = 0.009$, Figure. 7). なお、各群のTTEの平均値はHL60 pre : 1365.2 ± 124.6 秒, HL60 post : 1408.8 ± 114.7 秒, LL120 pre : 1363.2 ± 96.3 秒, LL120 post : 1416.4 ± 88.5 秒であった.

5 - 4. 考察

本研究は、同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせが異なる3週間のHIICTが $\dot{V}O_{2peak}$ に及ぼす効果を比較した。3週間のトレーニングの結果、時間の主効果は認められたが、群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった。

本研究の結果は、総仕事量が同等であれば、 $\dot{V}O_{2max}$ に対するトレーニング効果は強度に依存しないことを示した先行研究の結果と一致する。Edge et al. (2006)は女子学生を対象に90-100% $\dot{V}O_{2peak}$ の強度で2分間の自転車運動を1分の休息を挟みながら6-10回実施す

る HIIT と $60-75\dot{V}O_{2peak}$ の強度で HIIT と同等の仕事量の MICT を 5 週間、週 3 回実施させ、 $\dot{V}O_{2peak}$ に及ぼす効果を比較した。その結果、HIIT と MICT で同等に $\dot{V}O_{2peak}$ が改善されたことを報告している (Edge et al., 2006)。本研究では、実験 I の結果から LL60 と比較して LL120 が相対的強度が高いと予想されるが、3 週間を通じての総仕事量は群間で有意差は認められなかった。総仕事量は、酸素利用能力に関わるミトコンドリアの含量や呼吸能に関わる酵素活性に関わるトレーニング変数である (Granata et al., 2016)。したがって、本研究では HL60 と LL120 で総仕事量が同等であったことに起因して、短期間 (3 週間) での $\dot{V}O_{2max}$ への効果に有意差が認められなかった可能性がある。

本研究では、漸増負荷試験における TTE は時間の主効果は認められたが、群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった。サイクリストを対象とした先行研究では、8 週間レジスタンストレーニングを実施した結果、 $\dot{V}O_{2max}$ の向上は認められなかったものの、最大筋力向上により運動効率が向上し、漸増負荷試験における TTE が向上したことが報告されている (Sunde et al., 2010)。本研究では 3 週間自転車トレーニングを実施したが、自転車トレーニングによる神経系の適応に 4 週間以上の期間を要すると考えられている (Hansen and Rønnestad, 2017)。本研究では最大筋力等の測定は実施していないが、トレーニング期間が 3 週間という短期間であったため、最大筋力の向上は起きなかったと予想される。また、HL60、LL120 共に $\dot{V}O_{2max}$ の向上が認められたことから、本研究における HL60 と LL120 の漸増負荷試験における TTE の向上は $\dot{V}O_{2max}$ の改善に起因していると推察さ

れる.

本研究では、2-4 週間の短期間の HIIT による $\dot{V}O_{2max}$ を報告した先行研究と比較して、被験者の初期の体力レベルが高いにも関わらず、 $\dot{V}O_{2max}$ の向上が認められた (HL60 : 59.2 ± 3.9 ml/kg/min ; LL120 : 59.3 ± 5.5 ml/kg/min ; 先行研究 : 32.8 - 57.3 ml/kg/min) (Tabata et al., 1996 ; Rodas et al., 2000 ; Hazell et al., 2010 ; Talanian et al., 2007 ; Astorino et al., 2012 ; Astorino et al., 2018 ; Bayati et al., 2011 ; Whyte et al., 2010). これらの結果から、本研究で用いた HIICT プロトコルは回転数に関わらず、3 週間で体力レベルの比較的高い被験者の $\dot{V}O_{2max}$ を改善することが示唆された。また、スポーツ現場ではトレーニングに割ける時間及び期間が限られていることが多い。したがって、本研究で用いた HIICT プロトコルは限られた時間・期間で最大酸素摂取量を高める HIIT プロトコルであると考えられる。

第 6 章 研究課題Ⅲ

同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせの異なる 6 週間の強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングが学生アスリートの最大酸素摂取量，最大筋力及び筋パワーに及ぼす効果

6 - 1. 目的

研究課題 I で HL60 と比較して LL120 で呼吸循環器系への相対的強度が高値を示したが，研究課題 II では HL60 と LL120 の間で $\dot{V}O_{2max}$ への効果に有意差は認められなかった．しかしながら，研究課題 I では HL60 と比較して LL120 で RMS が有意に高く，筋疲労の指標である MVC の低下も有意に高かった．これらの結果から，HL60 と比較して LL120 は HIICE 中の type II 線維の動員が多く，最大筋力や筋パワーへの効果が高い可能性がある．したがって，研究課題Ⅲでは，HL60 と比較して LL120 が学生アスリートの最大筋力と筋パワーを改善するか否かを明らかにすることを目的とした．

6 - 2. 方法

6 - 2 - 1. 実験デザイン

被験者をトレーニング開始前(Pre)で測定された $\dot{V}O_{2max}$ から算出された HIICT の負荷を基に HIICT を高負荷・60rpm で行う群(High-Load・60rpm ; HL60, n = 8, 年齢 : 20.3 ± 0.7

歳, 身長: 175.0 ± 5.0 cm, 体重: 65.3 ± 4.1 kg)か低負荷・120rpm で行う群(Low-load・120rpm ; LL120, n = 8, 年齢: 19.9 ± 1.0 歳, 身長: 173.6 ± 5.5 cm, 体重: 64.8 ± 6.7 kg)のいずれかに振り分けた. 両群とも HIICT を 6 週間で合計 18 セッション実施した. 週ごとに HIICT の実施回数に偏りが出ないように, 両群とも毎週最低でも 2 回 HIICT を実施することとした. トレーニング強度は 3 セッション毎に 2.5%ずつ漸増させた. 全てのトレーニングセッションは専門的知識を有した検者の監督下で実施された. トレーニング期間の前後で別日で 3 日測定日を設け, 1 日目は脚伸展パワー, 2 日目は $\dot{V}O_{2max}$, 3 日目は MVC とウィングートテストの測定を実施した. トレーニング期間後(Post)の測定は, 疲労の影響を避けるために, 最後のセッションから最低でも中 1 日の間隔を空けることとした. また, circadian rhythm の影響を考慮し, Pre と Post の各測定はおおよそ同じ時間帯(±3 時間以内)で実施した. $\dot{V}O_{2max}$ の測定のみ 9 セッション終了後(Inter)にも実施した.

6 - 2 - 2. 被験者

研究課題Ⅲには当初運動部またはサークルに所属する 19 名の男子学生が実験に参加したが, 3 名の被験者が実験外での負傷によりトレーニングを完遂出来なかった. したがって, 16 名(HL60, LL120 各群 8 名ずつ)の被験者のデータを分析に用いた. なお, 被験者が実施していた競技はそれぞれバレーボール(7 名), ソフトテニス(3 名), サッカー(3 名), アルティメット(2 名), バドミントン(1 名)であった. 研究課題 I - II の被験者と同様に, 研究

Ⅲの被験者も週 2 回以上の運動習慣を有しており、競技として(例：自転車競技，トライアスロン)自転車トレーニングを実施している者や過去半年間下肢のレジスタンストレーニングを週 2 回以上継続している者は居なかった。

6 - 2 - 3. 最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)

各被験者の $\dot{V}O_{2max}$ と HIICT 実施の際の負荷設定のために、自転車エルゴメータ (Powermax-VII, Combi Wellness, Tokyo, Japan)を用いて漸増負荷試験を実施した。漸増負荷試験は研究課題 I - II と同様の方法で実施した。すなわち、3 分間の安静を経て、60W(1kp)から試験を開始し、3 分毎に 30W(0.5kp)ずつ負荷を漸増させ、各被験者が 60rpm を維持することが不可能となるまで継続した。試験中の回転数はメトロノームと自転車エルゴメータの画面上に表示され、コントロールされた。試験中の酸素摂取量は呼吸代謝測定装置(VO2000, S&ME 社)を用いて mixing chamber 法にて 10 秒毎に測定され、試験を通じてのピーク値を最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)と定義した。また、研究課題 II と同様に各被験者の有酸素性作業能力の指標として、漸増負荷試験における TTE も測定した。

6 - 2 - 4. 最大随意収縮(MVC)

90W で 10 分間のウォーミングアップを経て、研究課題 I と同様の方法で等速性筋力測定装置測定(KIN-COM[®], Chattecx, Inc., USA)を用いて、最大筋力の指標となる等尺性膝伸

展運動における最大随意収縮(MVC)を測定した。すなわち、被験者は直立で専用の椅子に腰掛け、大腿部と胴体を専用のベルトを用いて固定された。測定は全て右足で行い、1分間の休息を挟んで合計2回3秒間の最大筋力発揮を実施した (Shibata et al., 2015)。測定の際の膝関節の角度は 90° に規定した。分析には、2回の平均値を採用した。なお、本測定の直前に試技の練習をそれぞれ実施した。

6 - 2 - 5. 脚伸展パワー

脚伸展パワー及び伸展速度は、脚伸展パワー測定装置 (Combi, Anaero Press 3500, Japan) を用いて測定を実施した。測定は、自転車エルゴメータを用いて10分間、90Wの負荷でウォーミングアップとダイナミックストレッチを行い、3回の試技の練習を実施した後に実施した。被験者は専用のシートに座り、両足をフットプレートの上に乗せて、膝関節を 90° となるように椅子の位置を調整した。フットプレートの負荷は被験者の体重と同等の負荷とした。被験者は合図と同時に可能な限り速く、力強くフットプレートを蹴り出すよう指示された。測定は15秒間の休息を挟みながら5回実施し、上位2つの平均値を分析に採用した (Yamaguchi and Ishii, 2005)。

6 - 2 - 6. 無酸素性パワー

MVC測定後5分間の休息を経て、自転車エルゴメータ (Powermax-VII, Combi Wellness,

Tokyo, Japan)を用いてウィングートテスト(以下 WAnT)を実施した。試験中の負荷は各被験者の体重の 7.5%とし、被験者は 30 秒間全力でのペダリングを実施した(Beneke et al., 2002)。Pre, Post それぞれの WAnT 中のピークパワー, ピーク回転数, 平均パワー, ピーク到達時間を分析に採用した。

6 - 2 - 7. 強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニング(HIICT)

研究課題Ⅲにおいても、研究課題Ⅰ-Ⅱと同様のプロトコルで HIICT を実施した。すなわち、被験者は 10 秒間の完全休息を挟みながら、20 秒ペダリングを 8 回 60rpm か 120rpm のいずれかで実施した。強度は Pre で測定した $\dot{V}O_{2max}$ の 135%から開始し、被験者が最終セットでも回転数を維持できるよう、強度を 2 回毎に 5%ずつ漸減させることとした。運動中の回転数はメトロノームと自転車エルゴメータの画面に表示することにより、コントロールされた。研究Ⅲのトレーニング期間を通じての HIICT の負荷(kp)は Table.5 に示した。18 セッション合計の仕事率と合計の運動時間(各セッション 160 秒×18 セッション=2880 秒)を基にトレーニング期間を通じての総仕事量(Mega Joule ; MJ)を算出した。また、研究課題Ⅰ-Ⅱと同様に達成率(実際の仕事量を事前に算出した仕事量で除した値)を算出し、達成率が 90%未満だった者は HIICT 中の回転数不足と判断し、データから除外した。研究課題Ⅱと同様に、HIICT は毎セッション 90W で 10 分間のウォーミングアップを実施した後に実施した。また、HIICT 終了後は 90W で 5 分間のクーリングダウンを実施した。

6 - 2 - 8. 統計分析

SPSS Statistics (version 24.0 for Windows, SPSS Inc., Chicago, Ill., USA)を用いて統計分析を実施した。各測定項目の Pre で群間に有意差があるか否かの確認、6 週間通じての仕事量、達成率、各測定項目の変化率の分析は対応のない t 検定を用いて実施した。脚伸展パワー、伸展速度、 $\dot{V}O_{2max}$ 、MVC、体重当たりの MVC、ウィングートテスト中のピークパワー、ピーク回転数、平均パワー、ピーク到達時間の群間差の分析には、群×時間(群：対応なし、時間：対応あり)の二元配置分散分析を用いた。単純主効果検定には、Bonferroni を用いた。効果量は Cohen' s d (対応のない t 検定と単純主効果検定)と partial η^2 (二元配置分散分析)をそれぞれ算出した。全ての値は平均値±標準偏差で表記し、有意水準は 5%未満とした。

6 - 3. 結果

脚伸展パワー、伸展速度、 $\dot{V}O_{2max}$ 、MVC、体重当たりの MVC、WAnT 中のピークパワー、ピーク回転数、平均パワー、ピーク到達時間の Pre の値には HL60 と LL120 の間で有意差は認められなかった。また、6 週間計 18 セッションのトレーニングを完遂した被験者全員が仕事量の達成率が 90%を超えていたため、各群 8 名ずつ計 16 名の被験者のデータを分析に採

用した.

6週間を通じての総仕事量と仕事量の達成率はHL60とLL120の間で有意差は認められなかった(Table. 6).

体重はトレーニング期間前後で時間と群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった(時間の主効果:P = 0.350, partial η^2 = 0.072, 群の主効果:P = 0.878, partial η^2 = 0.002, 群×時間の交互作用:P = 0.350, partial η^2 = 0.072, HL60 Pre: 65.3 ± 4.1 kg, HL60 Inter: 65.3 ± 4.0 kg, HL60 Post: 64.6 ± 3.8 kg, LL120 Pre: 64.8 ± 6.7 kg, LL120 Inter: 64.5 ± 6.2 kg, LL120 Post: 64.6 ± 6.5 kg, 図表なし).

$\dot{V}O_{2max}$ は時間の主効果は認められたが, 群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった(時間の主効果:P = 0.005, partial η^2 = 0.316, 群の主効果:P = 0.704, partial η^2 = 0.011, 群×時間の交互作用:P = 0.768, partial η^2 = 0.019). HL60 の $\dot{V}O_{2max}$ の平均値はPre: 58.6 ± 3.6 ml/kg/min, Inter: 61.1 ± 4.3 ml/kg/min, 61.0 ± 3.7 ml/kg/minであった. 一方で, LL120 の $\dot{V}O_{2max}$ の平均値はPre: 59.0 ± 5.8 ml/kg/min, Inter: 61.5 ± 6.4 ml/kg/min, 62.6 ± 3.3 ml/kg/minであった(Figure. 8).

TTE は時間の主効果は認められたが, 群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった(時間の主効果:P < 0.01, partial η^2 = 0.632, 群の主効果:P = 0.565, partial η^2 = 0.024, 群×時間の交互作用:P = 0.651, partial η^2 = 0.03). HL60 の TTE の平

均値は Pre : 1353.4 ± 127.6 秒, Inter : 1398.0 ± 117.7 秒, Post : 1433.6 ± 109.9 秒であった。一方で, LL120 の TTE の平均値は Pre : 1370.3 ± 100.4 秒, Inter : 1429.8 ± 84.4 秒, Post : 1475.4 ± 95.1 秒であった (Figure. 9)。

MVC は時間と群の主効果及び群×時間の交互作用はいずれも認められなかった (時間の主効果 : P = 0.186, partial η^2 = 0.121, 群の主効果 : P = 0.211, partial η^2 = 0.109, 群×時間の交互作用 : P = 0.153, partial η^2 = 0.140)。HL60 の MVC の平均値は Pre : 241.0 ± 50.9 N・m, Post : 240.0 ± 38.7 N・m であった。一方で, LL120 の MVC の平均値は Pre : 276.6 ± 100.7 N・m, Post : 300.8 ± 92.2 N・m であった (Figure. 10-A)。また, 体重当たりの MVC においても時間と群の主効果及び群×時間の交互作用はいずれも認められなかった (時間の主効果 : P = 0.231, partial η^2 = 0.101, 群の主効果 : P = 0.164, partial η^2 = 0.134, 群×時間の交互作用 : P = 0.168, partial η^2 = 0.131, Figure. 10-B)。なお, HL60 の体重当たりの MVC の平均値は Pre : 3.7 ± 0.7 N・m, Post : 3.7 ± 0.7 N・m であった。一方で, LL120 の体重当たりの MVC の平均値は Pre : 4.2 ± 1.3 N・m, Post : 4.6 ± 1.1 N・m であった (Figure. 10B)。

脚伸展パワーは時間の主効果は認められたが, 群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった (時間の主効果 : P = 0.004, partial η^2 = 0.457, 群の主効果 : P = 0.865, partial η^2 = 0.002, 群×時間の交互作用 : P = 0.264, partial η^2 = 0.088)。また, 伸展速度も時間の主効果は認められたが, 群の主効果及び群×時間の交互作用は認め

られなかった(時間の主効果 : $P = 0.003$, partial $\eta^2 = 0.469$, 群の主効果 : $P = 0.569$, partial $\eta^2 = 0.024$, 群×時間の交互作用 : $P = 0.104$, partial $\eta^2 = 0.178$). HL60 の脚伸展パワーの平均値は Pre : 1950.1 ± 232.2 W, Post : 2057.9 ± 242.0 W であった。一方で, LL120 の平均値は Pre : 1926.4 ± 506.4 W, Post : 2144.6 ± 443.2 W であった。また, 伸展速度の各群の平均値は HL60 で Pre : 2.39 ± 0.13 m/s, Post : 2.43 ± 0.14 m/s, LL120 で Pre : 2.26 ± 0.38 m/s, Post : 2.40 ± 0.34 m/s であった (Figure. 11 A-B).

各測定ポイントでのウィングートテストの負荷の平均値は, HL60 が Pre: 4.9 ± 0.3 kp, Post: 4.9 ± 0.3 kp, LL120 が Pre: 4.9 ± 0.5 kp, Post: 4.9 ± 0.5 kp であった。ウィングートテスト中のピークパワー, ピーク回転数そして平均パワーはいずれも時間の主効果は認められた(ピークパワーの時間の主効果 : $P = 0.029$, partial $\eta^2 = 0.298$, ピーク回転数の時間の主効果 : $P = 0.037$, partial $\eta^2 = 0.275$, 平均パワーの時間の主効果 : $P = 0.005$, partial $\eta^2 = 0.446$). しかしながら, 群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった(ピークパワーの群の主効果 : $P = 0.623$, partial $\eta^2 = 0.018$, ピークパワーの交互作用 : $P = 0.416$, partial $\eta^2 = 0.048$, ピーク回転数の群の主効果 : $P = 0.477$, partial $\eta^2 = 0.037$, ピーク回転数の交互作用 : $P = 0.192$, partial $\eta^2 = 0.118$, 平均パワーの群の主効果 : $P = 0.994$, partial $\eta^2 = 0.000$, 平均パワーの交互作用 : $P = 0.539$, partial $\eta^2 = 0.027$). HL60 のピークパワーの平均値は Pre : 683.3 ± 50.4 W,

Post : 699.5 ± 35.6 W, LL120 のピークパワーの平均値は Pre : 690.9 ± 91.9 W, Post : 724.1 ± 76.5 W であった。HL60 のピーク回転数の平均値は Pre : 143.6 ± 8.5 rpm, Post : 145.3 ± 11.3 rpm, LL120 のピーク回転数の平均値は Pre : 145.3 ± 13.3 rpm, Post : 151.6 ± 12.3 rpm であった。HL60 の平均パワーの平均値は Pre : 560.1 ± 42.3 W, Post : 579.4 ± 27.7 W, LL120 の平均パワーの平均値は Pre : 555.9 ± 62.1 W, Post : 584.0 ± 51.0 W であった (Figure. 12 A-C).

ウィングートテスト中のピーク到達時間は群×時間の有意な交互作用が認められた ($P = 0.024$, partial $\eta^2 = 0.315$, Figure. 12 D). 単純主効果検定の結果, HL60 のみで Pre から Post に掛けて有意にピーク到達時間が短縮された ($P = 0.009$, Cohen' s $d = 0.713$). また, ピーク到達時間の短縮率は LL120 に比べて HL60 で有意に高値を示した ($P = 0.005$, Cohen' s $d = 1.647$, 図表なし). HL60 のピーク到達時間の平均値は Pre : 8.30 ± 2.82 秒, Post : 6.54 ± 2.07 秒, LL120 のピーク到達時間の平均値は Pre : 6.86 ± 1.47 秒, Post : 7.20 ± 1.51 秒であった。また, ピーク到達時間の短縮率の平均値は HL60 が -18.6 ± 17.0 %, LL120 が 5.2 ± 11.3% であった。

6 - 4. 考察

研究課題 I の結果で HL60 と比較して LL120 で HIICE 中の RMS が有意に高く、筋疲労の指標である MVC の低下は有意に高値を示した。これらの結果から、HL60 と比較して LL120 で type II 線維の動員が有意に多かったことが推察される。これらの結果を踏まえ、研究課題 3 では HL60 と比較して LL120 で最大筋力や筋パワーが有意に改善されると仮説した。しかしながら、仮説に反して、最大筋力は両群でトレーニング期間前後で効果が認められず、脚伸展パワー、伸展速度、WAnT 時のピークパワー、ピーク回転数、平均パワーには時間の主効果は認められたが、群×時間の交互作用は認められなかった。一方で、WAnT 時のピーク到達時間のみ、HL60 でのみ有意に短縮された。

本研究では、HL60、LL120 共に MVC の向上が認められなかった。両群で MVC に効果が認められなかった要因として、HIICT 中の発揮筋力の不足が考えられる。最大筋力の向上には MVC の 40%以上の強度が必要であると考えられている(金久, 1990)。Lollgen et al. (1980) は、100% $\dot{V}O_2\text{max}$ の強度での自転車運動中のペダル踏力は回転数に関わらず、いずれも 30%MVC 未満であることを報告している(Lollgen et al., 1980)。これらの背景を踏まえ、本研究では Lollgen et al. (1980) が用いた強度を超える超最大強度(135% $\dot{V}O_2\text{max}$)を用いたが、両群ともに MVC の増加が認められなかった。したがって、超最大強度を用いた本研究においても HIICT 中の発揮筋力は最大筋力の 40%に満たなかった可能性がある。

本研究での脚伸展パワーの向上は、速度の向上によるものと予想される。筋パワーは筋力と速度の積で算出される (Kawamori and Haff, 2004)。本研究では、脚伸展パワー測定時の伸展速度は両群で増加が認められたが、最大筋力の指標である MVC は両群で効果が認められなかった。ゆえに、本研究における脚伸展パワーの向上は速度の向上に起因していると推察される。

本研究では HL60 と LL120 の間で脚伸展パワーへの効果に有意差は認められなかった。この要因として、HIICT 中の回転数の違いに伴う股関節と膝関節の発揮パワーの相違が関与している可能性がある。Skovereng et al. (2016a)は、逆動力学解析を用いて漸増負荷自転車運動中の膝関節と股関節の関節パワー(関節モーメントと関節角速度の積)をそれぞれ算出した。その結果、自転車運動中の仕事率(W)の増加に伴い、股関節伸展及び膝関節伸展のパワーが増加すること、そして仕事率が増加するに伴い膝関節伸展パワーの寄与率が低下する一方で、股関節伸展パワーの寄与率が増加することを報告している (Skovereng et al., 2016)。同様の方法を用いて、Skovereng et al. (2016b)は乳酸性作業閾値と同等の仕事率で回転数の異なる自転車運動中の膝関節と股関節の発揮パワーを算出した。その結果、回転数の増加に伴い、自転車運動中の股関節の発揮パワーの寄与率が低下する一方で、膝関節の発揮パワーの寄与率が増加し、特に膝関節伸展パワーが有意に向上することを報告している (Skovereng et al., 2016b)。これらの結果から、本研究では HIICT 中 HL60 は股関節伸展の発揮パワーが高く、LL120 は膝関節伸展の発揮パワーが大きかった可能性がある。

る。本研究で実施した脚伸展パワー測定は膝関節伸展と股関節伸展を伴う多関節運動である。したがって、HL60 は股関節の伸展パワー、LL120 は膝関節の伸展パワーが増加することにより、脚伸展パワーを同等に向上させたと推察される。

本研究では、WAnT 時のピーク到達時間が HL60 でのみ短縮された。この要因として、HIICT におけるペダル踏力のピーク値の出現のタイミングが関与している可能性がある。Bieuzen et al. (2007)は換気性作業閾値の 80%相当の仕事率で 50 回転条件、被験者が自由に選択した回転数(87-93 回転)を用いる条件、110 回転条件をそれぞれ実施し、自転車運動中のペダル踏力のピーク値の出現点を比較した。その結果、50 回転条件がその他の条件と比較して、ペダル踏力のピーク値の出現が有意に速かったことを報告している(Bieuzen et al., 2007)。本研究の HIICT の強度は Bieuzen et al. (2007)よりも高いが、LL120 と比較して HL60 で HIICT 中のペダル踏力のピーク値の出現が速かった可能性がある。また、早期にペダル踏力を立ち上げるトレーニングを継続したことにより、HL60 のみで WAnT におけるピーク到達時間が短縮されたと予想される。

実験Ⅲの結果から、同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせの異なる HIICT は 1) 負荷と回転数の組み合わせに関わらず最大筋力は向上しない 2) 負荷と回転数の組み合わせに関わらず、 $\dot{V}O_{2max}$ 、脚伸展パワー、伸展速度、WAnT のピークパワー、ピーク回転数、平均パワーは同等に向上する、3) WAnT のピーク到達時間は HL60 でのみ有意に短縮されることが明らかとなった。

第7章 総合考察

7 - 1. 総括

本研究では、実験ⅠにおいてHL60と比較してLL120で主観的運動強度が高値を示した。さらにHIICE中の呼吸循環応答、筋電図の平均振幅値も高値を示し、筋疲労も有意に促進された。ゆえに、同一仕事率の条件下においてHL60と比較してLL120は主観的及び生理学的強度が高いと考えられる。しかしながら、実験Ⅱでは、HL60とLL120の間で $\dot{V}O_{2max}$ に及ぼす効果には有意差は認められなかった。加えて、実験Ⅲにおいても6週間合計18セッションのトレーニングの結果、 $\dot{V}O_{2max}$ 、脚伸展パワー、伸展速度、WAnTのピークパワー、ピーク回転数、平均パワーがHL60とLL120で同等に向上し、WAnTのピーク到達時間はHL60でのみ有意に短縮された。これらの結果から、HL60はLL120と比較して主観的・生理学的強度が低いにも関わらず、ほぼ同等の効果が得られるトレーニング法であることが示唆された。また、多くの先行研究ではHIICTは比較的高回転(90rpm - 最大回転数)で実施されているが(Sleivert et al., 1995; Tabata et al., 1996; Rodas et al., 2000; 市橋ら., 2002; 市橋ら., 2004; Hazell et al., 2010; Bayati et al., 2011; Astorino et al., 2012; Miyamoto - Mikami et al., 2018), 本研究ではHL60及びLL120で $\dot{V}O_{2max}$ 及び筋パワーへのトレーニング効果は同等であった。したがって、HL60は従来実施されてきた比較的高回転のHIICTと同等の効果をもたらすことが示唆された。

7 - 2. 本研究の方法論の妥当性

本研究では、総仕事量を統一した条件下で HL60 と LL120 の生理応答及びトレーニング効果の比較を行うため、両条件・両群とも 60rpm で実施した漸増負荷試験の $\dot{V}O_{2max}$ を基準に負荷を算出した。先行研究において、Deakin et al. (2011)は回転数が一定で負荷を漸増させる漸増負荷試験(125W からスタートし、毎分 25W ずつ漸増、回転数は 90rpm を維持)と負荷が一定で回転数を漸増させる漸増負荷試験(被験者の体重当たり 2.75W の仕事率で 70 回転から開始し、毎分 10rpm ずつ回転数を漸増させる)が peak $\dot{V}O_2$ と最大仕事率に及ぼす効果を比較した。その結果、peak $\dot{V}O_2$ に有意差は認められなかったものの、最大仕事率は負荷を漸増させる漸増負荷試験を実施した条件が回転数を漸増させる漸増負荷試験を実施した条件と比較して有意に高値を示した(Deakin et al., 2011)。加えて、Zorgati et al. (2015) は非鍛錬者に最大仕事率の 90%の負荷を用いた自転車運動を 40rpm で行う条件と 100rpm で行う条件の運動持続時間を比較した結果、100rpm 条件の運動持続時間が有意に短かったことを報告している(Zorgati et al., 2015)。したがって、本研究で実施した漸増負荷試験プロトコルを 120rpm で実施した場合、60rpm で実施した場合と比較して、最大仕事率が有意に低下する可能性がある。加えて、漸増負荷試験の仕事率で有意差が認められ、そこから相対強度を算出した場合、トレーニング期間を通じての総仕事量に群間で有意差が認められる可能性がある。総仕事量はトレーニング効果に影響を及ぼすトレーニング変数である

り、トレーニング期間を通じての総仕事量が多いほど $\dot{V}O_{2max}$ や筋機能への効果が高いことが報告されている(Kramer et al., 1997 ; Tan, 1999 ; Granata et al., 2016). したがって、本研究で両条件、両群ともに60回転で実施した漸増負荷試験の $\dot{V}O_{2max}$ を基準にトレーニング負荷を算出したことは、総仕事量を統一した条件下で負荷と回転数の組み合わせの差異が生理応答及びトレーニング効果に及ぼす影響を明らかにするという観点から妥当であると考えられる。また、本研究では漸増負荷試験を60rpmで実施したため、トレーニングで用いた回転数による特異性が影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、研究課題IIと研究課題IIIで漸増負荷試験時の運動持続時間への効果には時間の主効果は認められたが、群の主効果及び群×時間の交互作用は認められなかった(Figure. 7, Figure. 9). これらの結果から、本研究の漸増負荷試験の結果には、トレーニング時の回転数による特異性はなかったと推察される。

7 - 3. 本研究の意義

本研究は、アスリー트의 $\dot{V}O_{2peak}$ 、最大筋力及び筋パワーを高めるためのより効果的なHIICT法開発の観点から、負荷と回転数の組み合わせの差異に着目した初めての研究である。先行研究では、サイクリストや非鍛錬者の自転車運動中の疲労を軽減するための同一仕事率における負荷と回転数の組み合わせの探索の観点から多くの研究が行われており、おおよそ70-110rpmが脚の疲労の少ない回転数であると考えられる(Takaishi et al.,

1994 ; Takaishi et al., 1996 ; LUCI ´ A et al., 2001 ; LUCI ´ A et al., 2004 ; Foss and Hallen., 2004 ; Nielsen et al., 2004 ; Pierre et al., 2006 ; Nimmerichter et al., 2010 ; Stebbins et al., 2014 ; Whitty et al., 2016). また, 非鍛錬者や有疾患者が, より効果的に自転車を用いた有酸素性トレーニングを実施するための同一仕事率における負荷と回転数の組み合わせの探索の観点からも多くの研究が行われており, それらの研究では最大下の強度が用いられている (Hirano et al., 2015 ; 矢部と西田., 2009). 本研究では, アスリートの $\dot{V}O_{2max}$ のみならず, 最大筋力や筋パワーをはじめとした筋機能も向上させることを目的としているため, $\dot{V}O_{2max}$ の 100%を超える超最大強度を用いて HIICT を実施した. 加えて, 実際のスポーツ現場ではトレーニングに割ける時間が限られている現実的な問題も踏まえ, 同じ短時間の中で生理的応答やトレーニング効果に影響を及ぼす可能性のある同一仕事量における負荷と回転数の組み合わせに着目した. したがって, 本研究で得られた知見は, アスリートが限られた時間の中でより効果的に HIICT を行うための基礎的知見になると考えられる.

7 - 4. トレーニング現場への応用

本研究では, 自転車エルゴメータを用いて実施した漸増負荷試験時の $\dot{V}O_{2peak}$ を基準に仕事率(W ; 負荷×回転数)を算出し, そこから実際にトレーニング時に用いる負荷(kp)を算出した. しかしながら, $\dot{V}O_{2max}$ を実際に測定するには, 専門的知識を有した検者や高価な

測定機器，測定のための時間を要する．したがって， $\dot{V}O_{2max}$ から算出した負荷値はトレーニング現場における実用性は低い．トレーニング現場で自転車エルゴメータでトレーニングする際の負荷値を算出する現実的な方法として，本研究で用いた WAnT のように体重に対する相対値から算出する方法がある (Beneke et al., 2002)．本研究では，HL60 の HIICT の負荷値は実験 I で体重の 8.5 - 9.6 % (体重：65.7 ± 5.6 kg, HIICE の負荷値：5.6 ± 0.6 - 6.3 ± 0.7 kp)，実験 II で 8.3 - 9.9 % (トレーニング開始時の体重：65.4 ± 3.9 kg, HIICT の負荷値：5.4 ± 0.4 - 6.5 ± 0.4 kp)，実験 III で 8.3 - 10.6 % (トレーニング開始時の体重：65.3 ± 4.1 kg, HIICT の負荷値：5.4 ± 0.3 - 6.9 ± 0.4 kp) であり，LL120 の HIICT の負荷値は実験 I で体重の 4.3 - 4.9 % (体重：65.7 ± 5.6 kg, 2.8 ± 0.3 - 3.2 ± 0.4 kp)，実験 II で 4.2 - 5.0 % (トレーニング開始時の体重：64.4 ± 6.3 kg, 2.7 ± 0.2 - 3.2 ± 0.2 kp)，実験 III で 4.2 - 5.4 % (トレーニング開始時の体重：64.8 ± 6.7 kg, 2.7 ± 0.2 - 3.5 ± 0.2 kp) であった．したがって，トレーニング現場で HIICT を実施する際は，体重の 8-10% 程度の高い負荷 (kp) を用いて HIICT を実施することにより，本研究の HL60 と同様の効果が得られる可能性がある．

LL120 と比較して，HL60 は競技練習及びその他のトレーニングとの両立が容易であると推察される．実際のスポーツ現場では，競技練習が最も重要であることは自明であり，トレーニングは競技練習のスケジュールの都合上，競技練習前，競技練習後どちらの条件下でも実施される可能性がある．Lyons et al. (2006) は局所的な筋疲労がサッカーのパスパ

パフォーマンスに影響を及ぼす影響を明らかにすることを目的として、学生サッカー選手を対象にサッカーのパスパフォーマンステスト(Loughborough Soccer Passing Test)を安静後に行う条件、スプリットスクワットを最大反復回数の70%の回数を1分間実施した後に行う条件、最大反復回数の90%の回数を1分間実施した後に行う条件の3条件を比較した。その結果、安静後条件及び最大反復回数の70%の回数を実施した条件と比較して、最大反復回数の90%の回数を実施した条件で有意にパスパフォーマンスが低下することを報告している(Lyons et al., 2006)。本研究(研究課題I)では、HL60と比較して、LL120においてHIICE前後で有意にMVCが低下し、低下率はそれぞれHL60で $-7.5 \pm 16.6\%$ 、LL120で $-22.2 \pm 19.5\%$ であった。運動前後のMVCの低下は筋疲労の指標であることから、HL60と比較してLL120は筋疲労が高かったと考えられる。したがって、競技練習前にLL120を実施した場合、競技練習のパフォーマンスが低下する可能性がある。一方で、競技練習後にLL120を実施した場合、競技練習の疲労により、HIICTを十分に遂行出来ない可能性がある。ゆえに、LL120のHIICTと比較して筋疲労が少なく、トレーニング効果が得られるHL60の方が競技練習との両立が容易であり、実践的なトレーニング法であると考えられる。

HIICTの過度な実施はアスリートのコンディションを悪化させる可能性がある。先行研究では高強度運動は中強度運動と比較して上気道感染症のリスクが高まることが報告されている(Nieman, 1994)。一方で、本研究と類似したHIICTプロトコル(体重の5%の負荷で10秒間の休息を挟みながら20秒全力漕ぎ×10セット)を実施した結果、炎症性サイトカイ

ンである Interleukin-6 は運動 1 時間後まで上昇するものの、24 時間後には安静時の値と有意差がなくなることが報告されている (Harnish and Sabo, 2016). ゆえに、高強度運動後の免疫応答については一致した見解が得られていない. しかしながら、秋本ら (1998) は高強度 (77-88%HRmax) トレーニングを 10 日間連続で実施させた結果、トレーニング期間前と比較してトレーニング期間後で免疫機能に関わる安静時の唾液中の分泌型免疫グロブリン A (secretory immunoglobulin A ; sIgA) の分泌速度が有意に低下することを報告した. 加えて、トレーニング終了 10 日後においても sIgA がトレーニング期間前と比較して有意に低値を示したことを報告している (秋本ら., 1998). これらの知見から、高強度のトレーニングは休息を挟まずに実施し続けると、免疫機能の低下を招きアスリートのコンディション不良を招くリスクが高まると予想される. トレーニングによる過度な疲労を防止するために、週 1-2 回完全休息を設けることが推奨されていることから (Johnson et al., 2008), HIICT もアスリートの体力レベルや競技練習での疲労等も考慮したうえで週 1-2 回の完全休息を設け実施すべきである.

7 - 5. 今後の課題

多くの競技では最大筋力や筋パワーなどの筋機能と持久性能の双方が必要となるため、持久性トレーニングとレジスタンストレーニングを組み合わせたコンカレントトレーニングが実施されている. したがって、今後本研究で用いた HIICT とレジスタンストレーニング

グを組み合わせた際の効果を検証することは意義深い。先行研究では、持久性トレーニングはレジスタンストレーニングの筋機能への効果、特に筋パワーへの効果を阻害することが報告されている (Wilson et al., 2012)。すなわち、レジスタンストレーニングのみを実施した場合と比較して、レジスタンストレーニングと持久性トレーニングを組み合わせた場合は筋パワーへの効果は低下する。また、運動時間と筋肥大、筋力、筋パワーの効果量の間には負の相関関係が認められているため (Wilson et al., 2012)、伝統的にスポーツ現場で実施されている MICT はレジスタンストレーニングの筋機能への効果を阻害する可能性が高い。一方、本研究で実施した短時間・高強度の HIICT では負荷と回転数の組み合わせに関わらず、脚伸展パワーを向上させた。ゆえに、レジスタンストレーニングと組み合わせた際に筋機能への効果を阻害しない可能性がある。加えて、高負荷を用いることにより、素早いパワー発揮能力に相乗効果をもたらし、持久性能力と筋機能を最大限に向上させる可能性がある。また、近年の研究で本研究と類似した HIICT プロトコル (170% $\dot{V}O_{2max}$ の強度で 10 秒の休息を挟みながら 20 秒ペダリングを 6-7 セット) を 6 週間実施した結果、大腿四頭筋とハムストリングスの筋横断面積が増加したことが報告されている (Miyamoto - Mikami et al., 2018)。したがって、レジスタンストレーニングと HIICT を組み合わせることで筋量に対しても相乗効果を誘発する可能性がある。筋機能も持久性能力もどちらも要求される競技のアスリートにより効果的なコンカレントトレーニングプログラムを処方するためには、今後レジスタンストレーニングと本研究で用いた HIICT を組み合わせたコ

ンカレントトレーニングが筋機能及び持久性能に及ぼす効果を検証する必要がある。

7 - 6. 結論

本研究は、同一仕事率で負荷と回転数の組み合わせの異なる強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車運動の主観的・生理的応答及び同一仕事量で負荷と回転数の組み合わせの異なる強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングが最大酸素摂取量，最大筋力及び筋パワーに及ぼす効果を検証した。結果の要約は以下の通りである。

- I) 高負荷・60rpm の強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車運動と比較して，低負荷・120rpm の強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車運動中で主観的運動強度，呼吸循環応答，筋活動，筋疲労が有意に促進される。
- II) 負荷と回転数の組み合わせの差異に関わらず，強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングは比較的短期間(3 週間)で学生アスリーの最大酸素摂取量を改善する
- III) 負荷と回転数の組み合わせの差異に関わらず，最大筋力は改善されない
- IV) 負荷と回転数の差異に関わらず，強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングは脚伸展パワー，伸展速度，ウィングテストのピークパワー，ピーク回転数，平均パワーを改善する

V) ウィンゲートテストのピーク到達時間は高負荷・60rpmの強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングでのみ短縮される。

これらの結果から、高負荷・60rpmの強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングは低負荷・120rpmの強度漸減・高強度・短時間・間欠的自転車トレーニングと比較して主観的・生理学的運動強度が低いにも関わらず、最大酸素摂取量や筋パワーに同等のトレーニング効果をもたらすことが示唆された。

図表(研究課題 I)

Table 1. load during high-intensity intermittent cycling exercise

Conditions	1-2 set (kp)	3-4 set (kp)	5-6 set (kp)	7-8 set (kp)
HL60	6.3 ± 0.7	6.1 ± 0.7	5.9 ± 0.7	5.6 ± 0.6
LL120	3.2 ± 0.4	3.1 ± 0.4	2.9 ± 0.3	2.8 ± 0.3

Values are mean ± SD.

Abbreviations : HL60, High-Load • 60rpm. LL120, Low-Load • 120rpm.

kp, kilopond.

Table 2. Comparisons of total work load and achievement rate throughout training period

	HL60	LL120	P Value	Cohen's d
Total work load (W)	2796.6 ± 303.7	2784.3 ± 296.6	0.822	0.041
Achievement rate (%)	97.8 ± 5.4	97.3 ± 1.6	0.797	0.127

Values are mean ± SD.

Abbreviations : HL60, High-Load - 60rpm. LL120, Low-Load - 120rpm.

W, Watt.

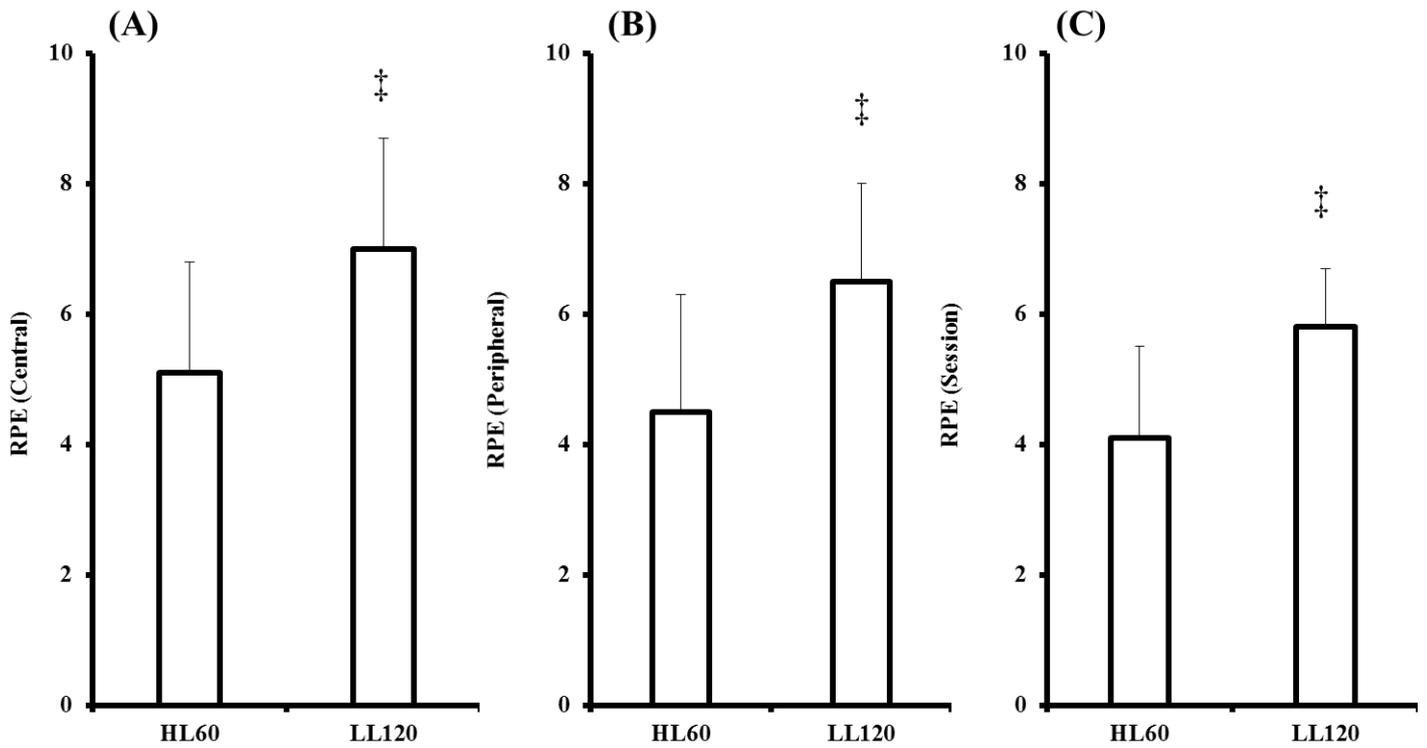


Figure 2 (A) – (C). Comparison of central or heart-and-lungs RPE (RPE central), peripheral or legs rating (RPE peripheral) and session RPE (RPE session) during HL60 and LL120

Values are mean \pm SD

‡ vs HL60 (P < 0.01)

Abbreviations : HL60, High-Load • 60rpm. LL120, Low-Load • 120rpm.

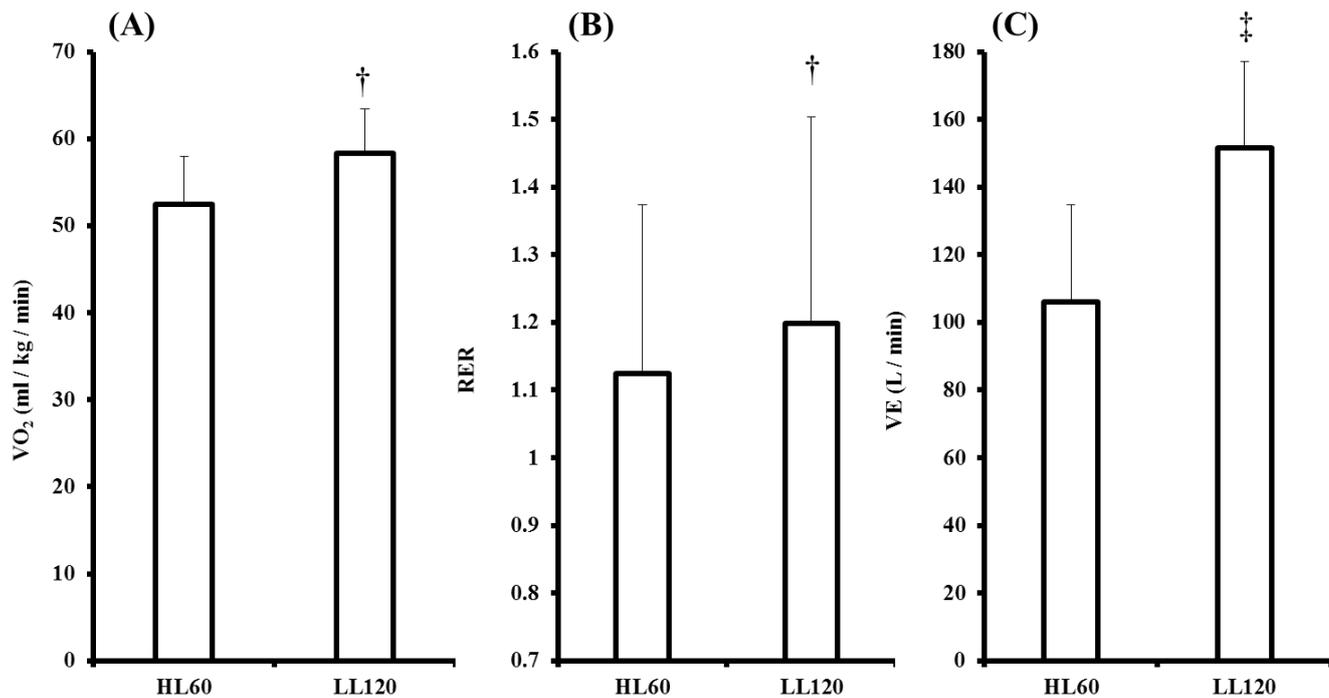


Figure 3 (A) – (C). Comparison of peak value of VO₂ (A), RER (B) and VE (C) during HL60 and LL120

Values are mean ± SD

† vs HL60 (P < 0.05), ‡ vs HL60 (P < 0.01)

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm. VO₂, Oxygen uptake consumption. RER, Respiratory Exchange Ratio, VE, Ventilation.

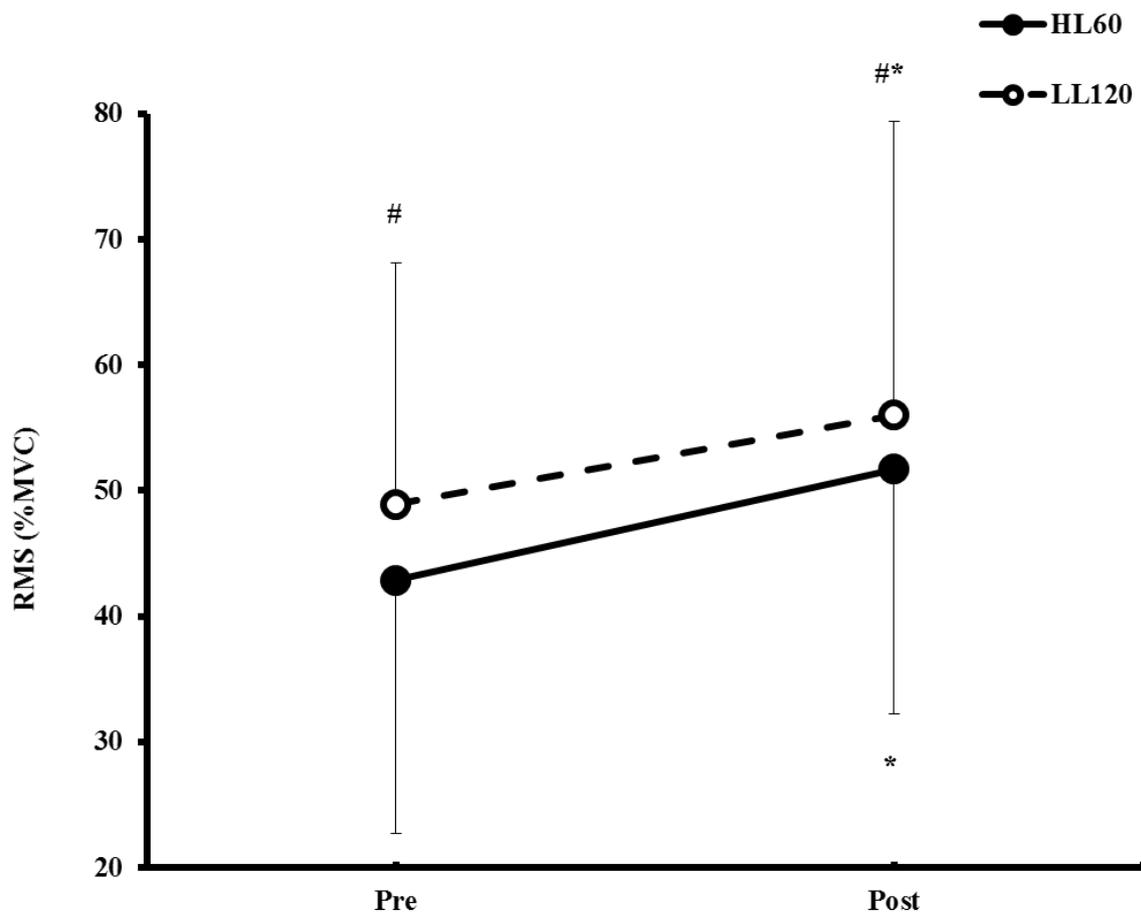


Figure 4. Comparison of RMS during each conditions

Values are mean \pm SD

* vs Pre (P<0.05), # vs Conditions (P<0.05)

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

RMS, Root Mean Square. MVC, Maximal Voluntary Contraction of Knee extension.

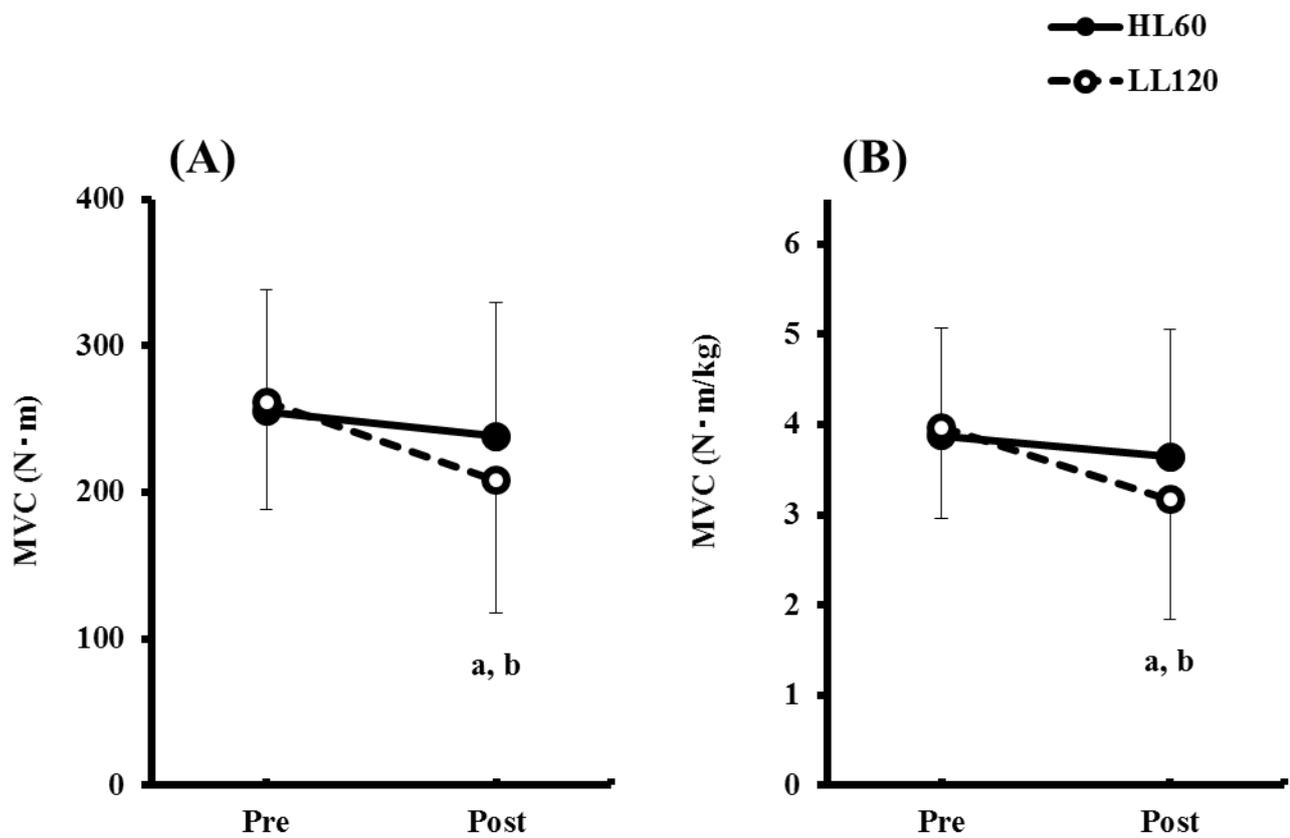


Figure 5 (A) – (B). Comparison of MVC (A) and MVC per body weight (B) between each group
 Values are mean \pm SD

a vs Pre (P<0.05), b vs HL60 Post (P<0.05)

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm. MVC, Maximal Voluntary Contraction of Knee Extension.

図表(研究課題Ⅱ)

Table 3. Average value of load of high-intensity intermittent cycling training throughout training period

group	session	1-2 set (kp)	3-4 set (kp)	5-6 set (kp)	7-8 set (kp)
HL60	1-3 session	6.2 ± 0.4	5.9 ± 0.4	5.7 ± 0.4	5.4 ± 0.4
	4-6 session	6.3 ± 0.4	6.1 ± 0.4	5.8 ± 0.4	5.5 ± 0.4
	7-9 session	6.5 ± 0.4	6.2 ± 0.4	6.0 ± 0.4	5.7 ± 0.4
LL120	1-3 session	3.1 ± 0.2	2.9 ± 0.2	2.8 ± 0.2	2.7 ± 0.2
	4-6 session	3.1 ± 0.2	3.0 ± 0.2	2.9 ± 0.2	2.8 ± 0.2
	7-9 session	3.2 ± 0.2	3.1 ± 0.2	3.0 ± 0.2	2.8 ± 0.2

Values are mean ± SD.

Abbreviations : HL60, High-Load • 60rpm. LL120, Low-Load • 120rpm.

kp, kilopond.

Table 4. Comparisons of total work volume and achievement rate throughout training period

	HL60	LL120	P Value	Cohen's d
Total work volume (MJ)	36.3 ± 2.3	35.9 ± 2.5	0.673	0.202
Achievement rate (%)	98.3 ± 1.0	97.9 ± 1.4	0.522	0.309

Values are mean ± SD.

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

MJ, Mega Joule.

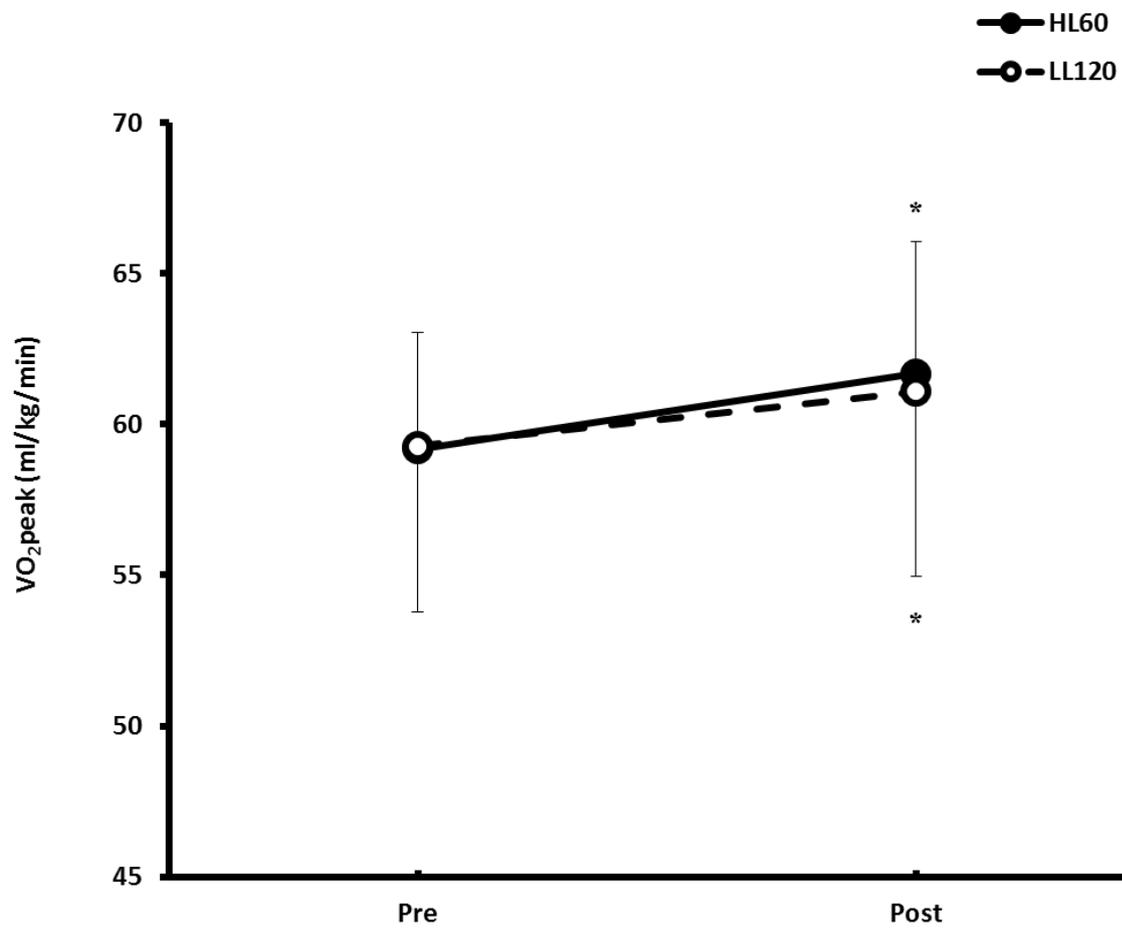


Figure 6. Comparison of VO₂peak between each group

Values are mean ± SD

* vs Pre (P<0.05) Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

VO₂peak, Peak Oxygen Uptake.

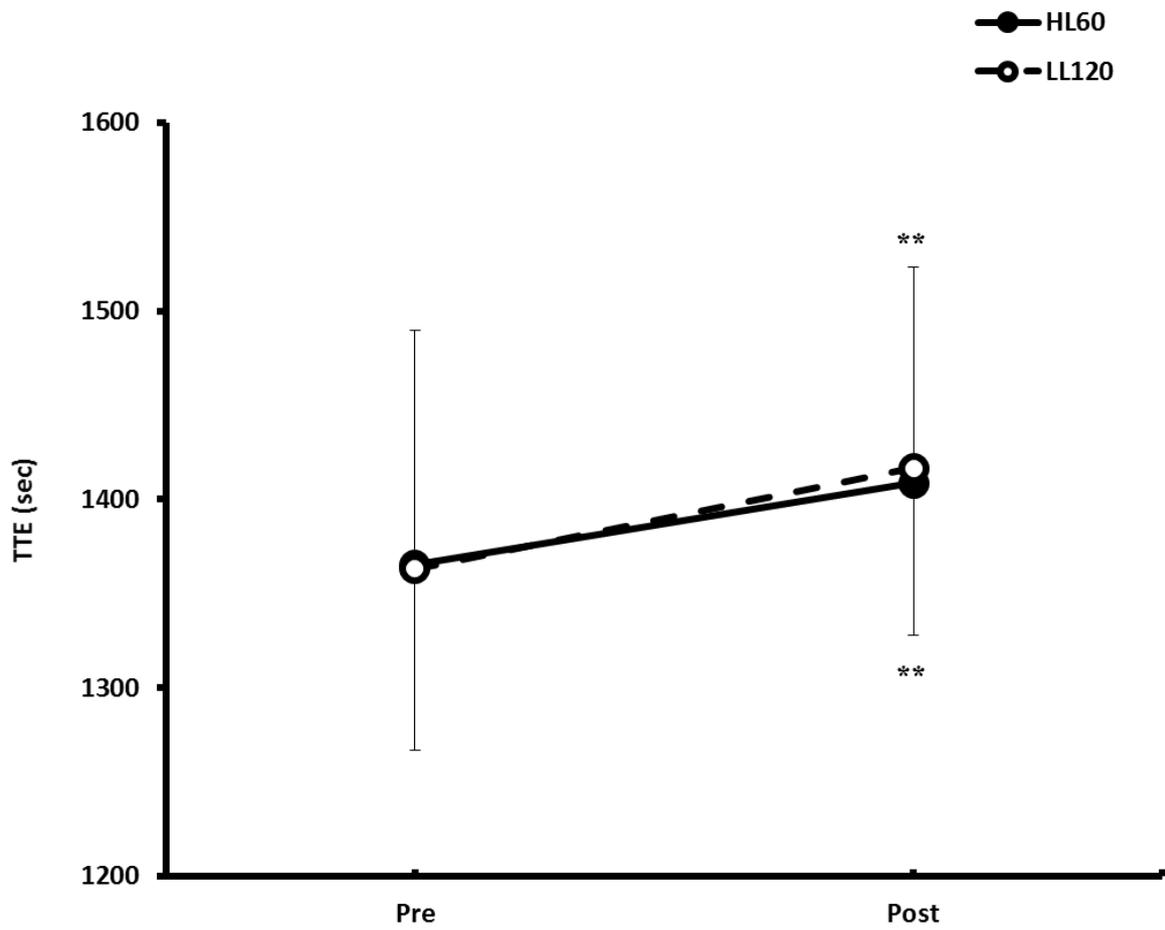


Figure 7. Comparison of TTE between each group

Values are mean \pm SD

**** vs Pre (P<0.01)**

Abbreviation : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

TTE, Time to exhaustion.

図表(研究課題Ⅲ)

Table 5. Average value of load of high-intensity intermittent cycling training throughout training period

group	session	1-2 set (kp)	3-4 set (kp)	5-6 set (kp)	7-8 set (kp)
HL60	1-3 session	6.1 ± 0.3	5.9 ± 0.3	5.6 ± 0.3	5.4 ± 0.3
	4-6 session	6.2 ± 0.3	6.0 ± 0.3	5.7 ± 0.3	5.5 ± 0.3
	7-9 session	6.4 ± 0.3	6.1 ± 0.3	5.9 ± 0.3	5.6 ± 0.3
	10-12 session	6.6 ± 0.4	6.3 ± 0.3	6.0 ± 0.3	5.8 ± 0.3
	13-15 session	6.7 ± 0.4	6.5 ± 0.4	6.2 ± 0.3	5.9 ± 0.3
	16-18 session	6.9 ± 0.4	6.6 ± 0.4	6.3 ± 0.4	6.1 ± 0.4
LL120	1-3 session	3.1 ± 0.2	3.0 ± 0.2	2.8 ± 0.2	2.7 ± 0.2
	4-6 session	3.2 ± 0.2	3.0 ± 0.2	2.9 ± 0.2	2.8 ± 0.2
	7-9 session	3.2 ± 0.3	3.1 ± 0.2	3.0 ± 0.2	2.9 ± 0.2
	10-12 session	3.3 ± 0.2	3.2 ± 0.2	3.1 ± 0.2	2.9 ± 0.2
	13-15 session	3.4 ± 0.2	3.3 ± 0.2	3.1 ± 0.2	3.0 ± 0.2
	16-18 session	3.5 ± 0.2	3.3 ± 0.3	3.2 ± 0.2	3.1 ± 0.2

Values are mean ± SD.

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

kp, kilopond.

Table 6. Comparisons of total work volume and achievement rate throughout training period

	HL60	LL120	P Value	Cohen's d
Total work volume (MJ)	147.7 ±8.3	148.9 ±10.3	0.803	0.128
Achievement rate (%)	97.6 ±1.4	97.4 ± 1.4	0.815	0.143

Values are mean ± SD.

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

MJ, Mega Joule.

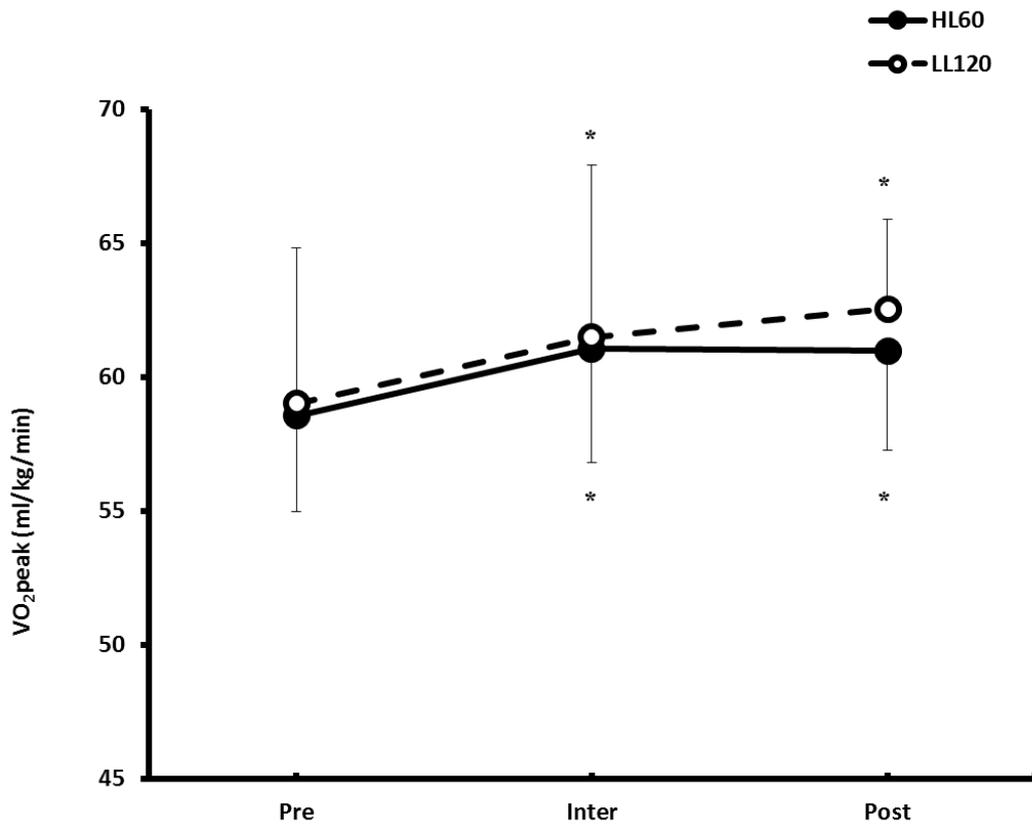


Figure 8. Comparison of VO₂peak between each group

Values are mean ± SD

* vs Pre (P<0.05)

Abbreviations : HL60, High-Load·60rpm. Low-Load·120rpm. VO₂peak, Peak Oxygen Uptake.

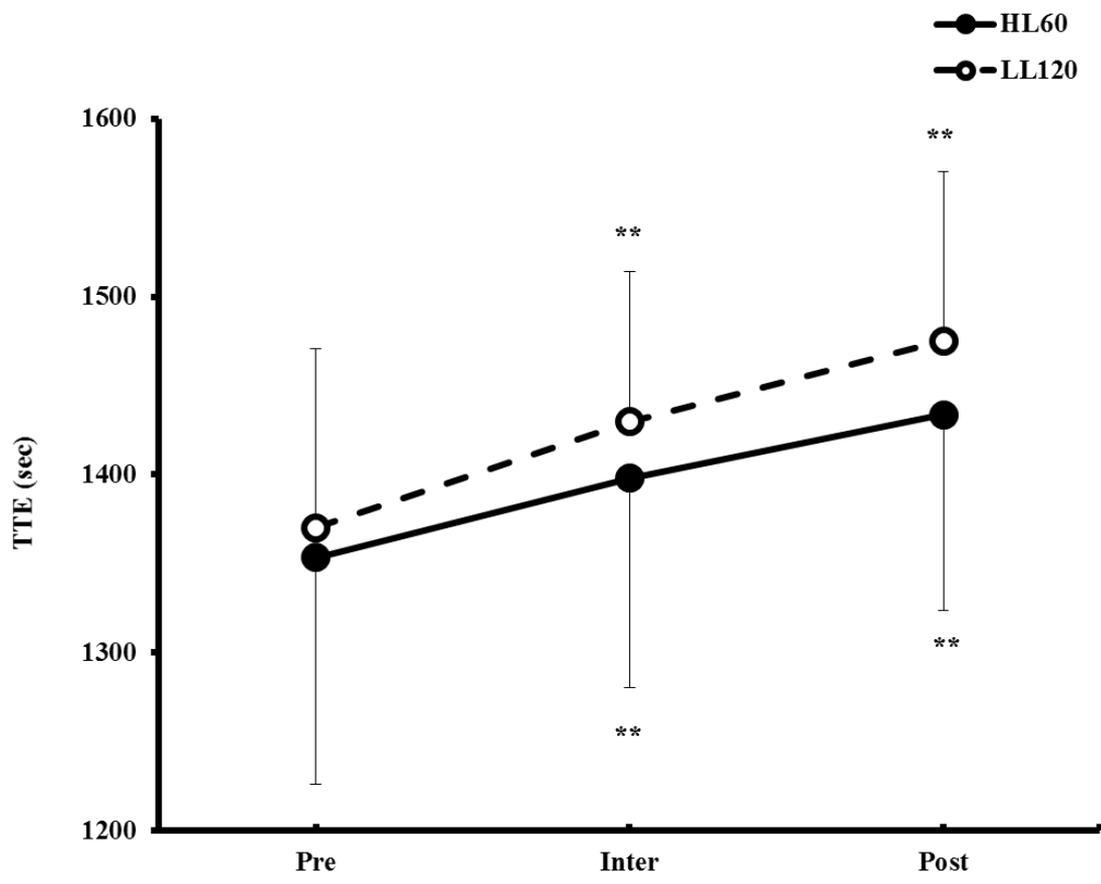


Figure 9. Comparison of TTE between each group

Values are mean \pm SD

** vs Pre (P<0.01)

Abbreviation : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm. TTE, Time to exhaustion.

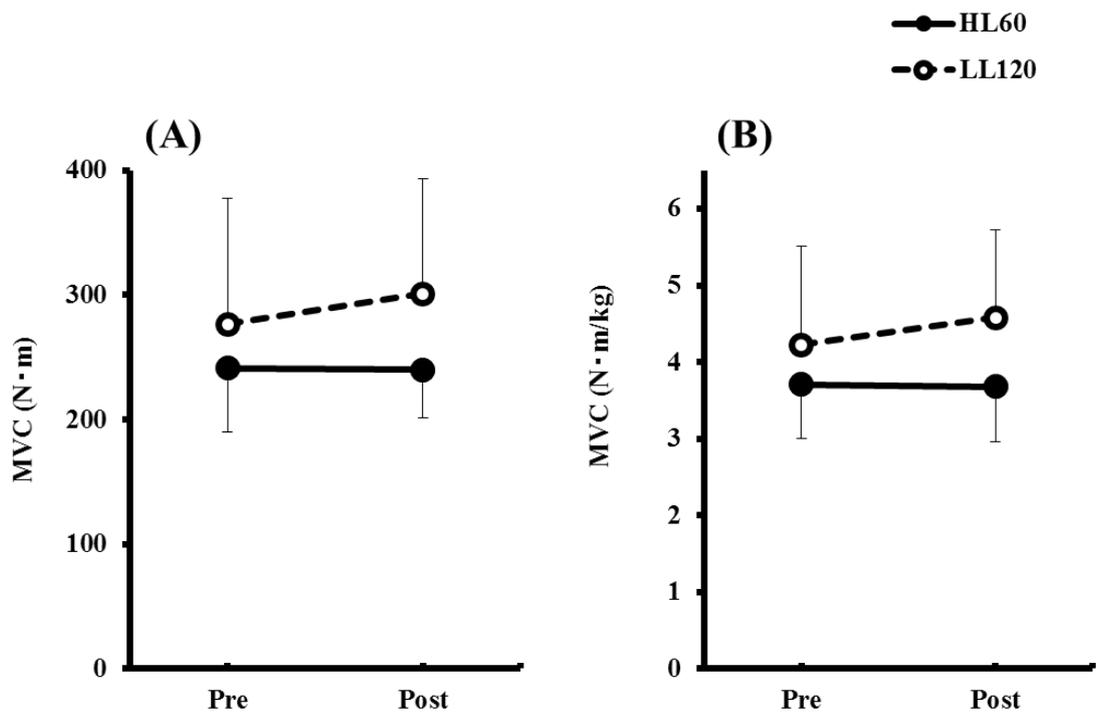


Figure 10 (A) – (B). Comparison of MVC (A) and MVC per body weight (B) between each group Values are mean \pm SD

Abbreviations : HL60, High-Load 60rpm. LL120, Low-Load 120rpm. MVC, Maximal Voluntary Contraction of Knee Extension.

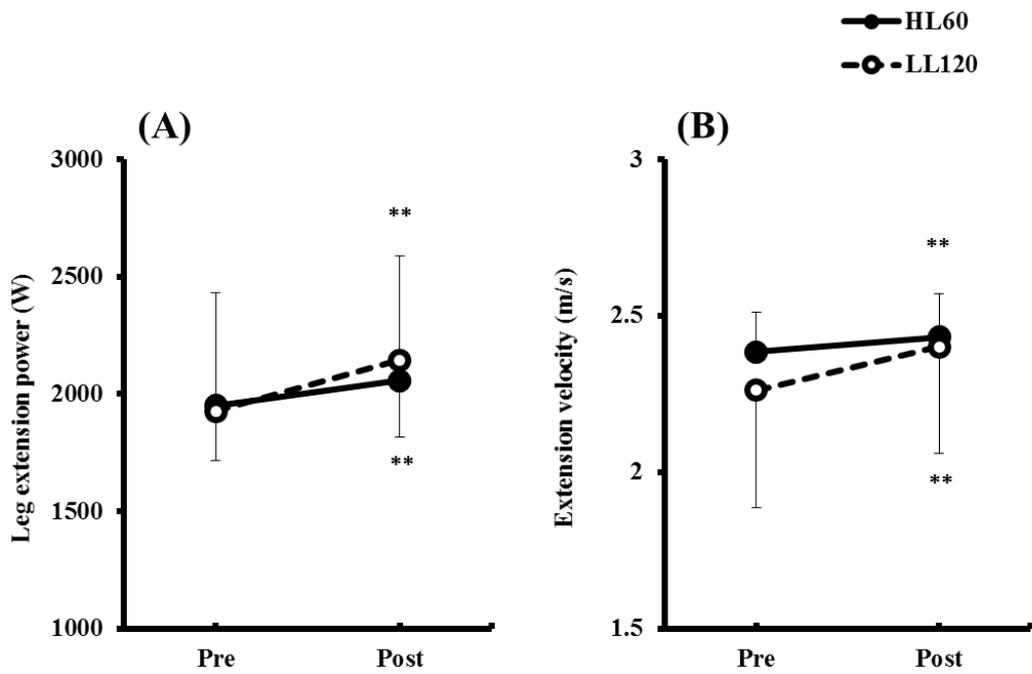


Figure 11 (A) – (B). Comparison of leg extension power (A) and extension velocity (B) between each group

Values are mean \pm SD

** vs Pre (P<0.01)

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

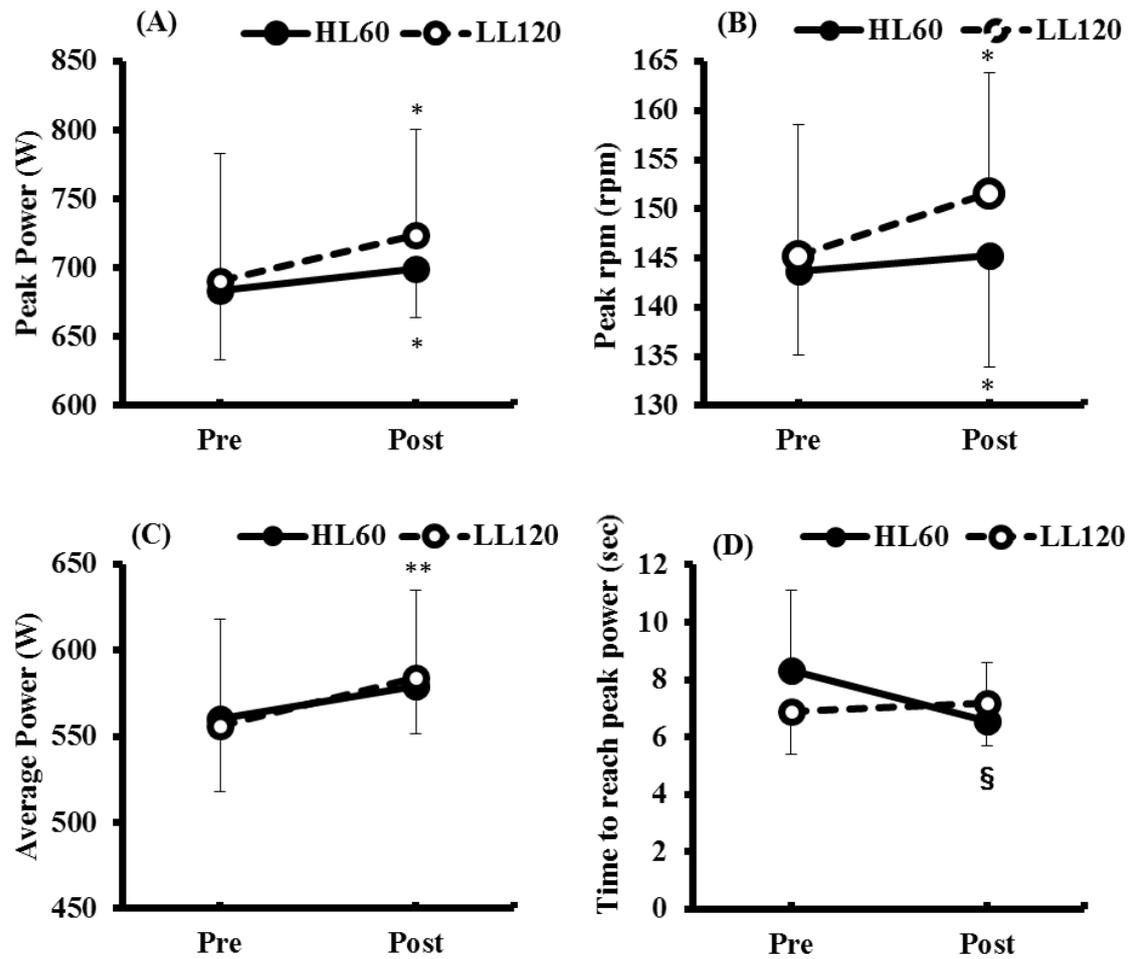


Figure.12 (A) - (D) Comparisons of change in peak power, peak rpm, average power and time to peak power during WAnT between HL60 and LL120

Values are mean \pm SD

P<0.05 vs Pre, ** P<0.01 vs Pre, § P<0.01 vs HL60 Pre

Abbreviations : HL60, High-Load · 60rpm. LL120, Low-Load · 120rpm.

WAnT, Wingate Anaerobic Test

謝辞

本論文は、北海道大学大学院教育学院に在籍中に行った研究の成果を学位論文としてまとめたものである。本研究を進めるにあたり、直接の御指導いただいた北海道大学大学院教育学研究教授・水野眞佐夫先生に深謝の意を表します。本稿執筆にあたり北海道大学大学院教育学研究准教授・柚木孝敬先生，北海道大学大学院保健科学研究院准教授・寒川美奈先生，立命館大学スポーツ健康科学部教授・田畑泉先生には副査として多大なご助言を頂きました。ここに深謝の意を表します。本研究を進める過程で議論重ね，有益なご助言をいただいた北海道大学大学院教育学院体力科学研究室の皆様，特に実験を共に行った当時学部4年・渡邊雅大氏に深謝の意を表します。また，本研究に協力していただいた被験者の皆様に深謝の意を表します。最後に，長きにわたり学生生活を支えてくれた父・司，母・篤子，姉・陽子に深謝の意を表します。

参考文献

- Abbate, F., De Ruiter, C. J., Offringa, C., Sargeant, A. J., & De Haan, A. (2002).
In situ rat fast skeletal muscle is more efficient at submaximal than at maximal
activation levels. *Journal of Applied Physiology*, 92(5), 2089-2096.
- Abbiss, C. R., Peiffer, J. J., & Laursen, P. B. (2009). Optimal cadence selection
during cycling. *International SportMed Journal*, 10(1), 1-15.
- Ahlquist, L. E., Bassett, D. R., Sufit, R., Nagle, F. J., & Thomas, D. P. (1992).
The effect of pedaling frequency on glycogen depletion rates in type I and type
II quadriceps muscle fibers during submaximal cycling exercise. *European Journal
of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 65(4), 360-364.
- 秋本崇之, 赤間高雄, 香田泰子, 和久貴洋, 林栄輔, 龍野美恵子, 杉浦弘一, 天野和彦,
河野一郎(1998). 高強度トレーニングによる安静時唾液中分泌型 IgA の変動. 体力科学
47(2), 245~252.
- Astorino, T. A., Allen, R. P., Roberson, D. W., & Jurancich, M. (2012). Effect of
high-intensity interval training on cardiovascular function, V02max, and
muscular force. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(1), 138-145.
- Astorino, T. A., Edmunds, R. M., Clark, A., King, L., Gallant, R. M., Namm, S., ...
& Wood, K. A. (2018). Increased cardiac output and maximal oxygen uptake in

- response to ten sessions of high intensity interval training. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 58(1-2), 164-171.
- Bayati, M., Farzad, B., Gharakhanlou, R., & Agha-Alinejad, H. (2011). A practical model of low-volume high-intensity interval training induces performance and metabolic adaptations that resemble 'all-out' sprint interval training. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(3), 571.
- Beneke, R., Pollmann, C. H., Bleif, I., Leithäuser, R., & Hütler, M. (2002). How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? *European Journal of Applied Physiology*, 87(4-5), 388-392.
- Bieuzen, F., Lepers, R., Vercauysen, F., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2007). Muscle activation during cycling at different cadences: effect of maximal strength capacity. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 17(6), 731-738.
- Bijker, K., De Groot, G., & Hollander, A. (2002). Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(6), 556-561.
- Bishop, D., Girard, O., & Mendez-Villanueva, A. (2011). Repeated-sprint ability- Part II. *Sports Medicine*, 41(9), 741-756.

- Borg, G., Ljunggren, G., & Ceci, R. (1985). The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 54(4), 343-349.
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013a). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part I: cardiopulmonary emphasis, *Sports Medicine*, 43(5), 313-38.
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013b). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part II: anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports Medicine*, 43(10), 927-954.
- Buchheit, M., Laursen, P. B., Kuhnle, J., Ruch, D., Renaud, C., & Ahmaidi, S. (2009). Game-based training in young elite handball players. *International Journal of Sports Medicine*, 30(4), 251-258.
- Burke, R. E. (1975). Motor unit properties and selective involvement in movement. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 3(1), 31-82.
- Clark, A., Annie, B., DeRevere, J. L., Astorino, T. A. (2019). Effects of various interval training regimes on changes in maximal oxygen uptake, body composition, and muscular strength in sedentary women with obesity. *European Journal of*

Applied Physiology, 1-10.

- Counts, B. R., Buckner, S. L., Dankel, S. J., Jessee, M. B., Mattocks, K. T., Mouser, J. G., ... & Loenneke, J. P. (2016). The acute and chronic effects of “NO LOAD” resistance training. *Physiology & Behavior*, 164, 345-352.
- de Oliveira, M. F. M. D., Caputo, F., Corvino, R. B., & Denadai, B. S. (2016). Short - term low - intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(9), 1017-1025.
- Deakin, G. B., Davie, A. J., & Zhou, S. (2011). Reliability and validity of an incremental cadence cycle $\dot{V}O_{2max}$ testing protocol for trained cyclists. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 9, 31-39.
- Deschenes, M. R., Kraemer, W. J., McCoy, R. W., Volek, J. S., Turner, B. M., & Weinlein, J. C. (2000). Muscle recruitment patterns regulate physiological responses during exercise of the same intensity. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 279(6), R2229-R2236.
- Edge, J., Bishop, D., & Goodman, C. (2006). The effects of training intensity on muscle buffer capacity in females. *European Journal of Applied Physiology*,

96(1), 97-105.

Fleming, B. C., Beynon, B. D., Renstrom, P. A., Peura, G. D., Nichols, C. E., & Johnson, R. J. (1998). The strain behavior of the anterior cruciate ligament during bicycling. *The American Journal of Sports Medicine*, 26(1), 109-118.

Foss, Ø., & Hallén, J. (2004). The most economical cadence increases with increasing workload. *European Journal of Applied Physiology*, 92(4-5), 443-451.

Francescato, M. P., Girardis, M., & Di Prampero, P. E. (1995). Oxygen cost of internal work during cycling. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 72(1-2), 51-57.

Franchini, E., Julio, U. F., Panissa, V. L., Lira, F. S., Gerosa-Neto, J., & Branco, B. H. (2016). High-intensity intermittent training positively affects aerobic and anaerobic performance in judo athletes independently of exercise mode. *Frontiers in Physiology*, 7, 268.

Francois, M. E., Durrer, C., Pistawka, K. J., Halperin, F. A., & Little, J. P. (2016). Resistance-based interval exercise acutely improves endothelial function in type 2 diabetes. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 311(5), H1258-H1267.

- Gibala, M. J., & McGee, S. L. (2008). Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 36(2), 58-63.
- Gotshall, R. W., Bauer, T. A., & Fahrner, S. L. (1996). Cycling cadence alters exercise hemodynamics. *International Journal of Sports Medicine*, 17(1), 17-21.
- Granata, C., Oliveira, R. S., Little, J. P., Renner, K., & Bishop, D. J. (2016). Mitochondrial adaptations to high-volume exercise training are rapidly reversed after a reduction in training volume in human skeletal muscle. *The FASEB Journal*, 30(10), 3413-3423.
- Haff, G. G., & Triplett, N. T. (Eds.). (2015). Essentials of strength training and conditioning 4th edition. Human kinetics.
- Han, Y. S., Proctor, D. N., Geiger, P. C., & Sieck, G. C. (2001). Reserve capacity for ATP consumption during isometric contraction in human skeletal muscle fibers. *Journal of Applied Physiology*, 90(2), 657-664.
- Hansen, E. A., & Rønnestad, B. R. (2017). Effects of Cycling Training at Imposed Low Cadences: A Systematic Review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(9), 1127-1136.

- Harms, C. A., Babcock, M. A., McClaran, S. R., Pegelow, D. F., Nickele, G. A., Nelson, W. B., & Dempsey, J. A. (1997). Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *Journal of Applied Physiology*, 82(5), 1573-1583.
- Harnish, C. R., Sabo, R. T. (2016). Comparison of two different sprint interval training Work-to-Rest ratios on acute inflammatory responses. *Sports Medicine-Open*, 2(1), 20.
- Harris, D. M., Foulds, S., & Latella, C. (2018). Evidence-Based Training Recommendations for the Elite Judoka. *Strength & Conditioning Journal*, in press
- Hawkins, R. D., Hulse, M. A., Wilkinson, C., Hodson, A., & Gibson, M. (2001). The association football medical research programme: an audit of injuries in professional football. *British Journal of Sports Medicine*, 35(1), 43-47.
- Hazell, T. J., MacPherson, R. E., Gravelle, B. M., & Lemon, P. W. (2010). 10 or 30-s sprint interval training bouts enhance both aerobic and anaerobic performance. *European Journal of Applied Physiology*, 110(1), 153-160.
- Hirano, M., Shindo, M., Mishima, S., Morimura, K., Higuchi, Y., Yamada, Y., ... & Kiyonaga, A. (2015). Effects of 2 weeks of low-intensity cycle training with

- different pedaling rates on the work rate at lactate threshold. *European Journal of Applied Physiology*, 115(5), 1005-1013.
- 平田圭, 吉本隆哉, 山本正嘉 (2016). 陸上競技長距離走選手が 3 ヶ月間にわたる下肢の故障期間に自転車および水中運動を用いて行った「積極的リハビリテーショントレーニング」の成功事例. *スポーツパフォーマンス研究*, 8, 100-116.
- 市橋則明, 池添冬芽, 大畑光司, 才藤栄一. (2002). 高負荷での自転車エルゴメーターによるペダリングトレーニングが筋機能に与える影響. *理学療法学*, 17(2), 101-106.
- 市橋則明, 池添冬芽, 大畑光司, 岡英世, 三浦元, & 才藤栄一. (2004). 自転車エルゴメーターによる高負荷短時間のペダリングトレーニングが下肢筋に与える影響. *理学療法学*, 31(6), 369-374.
- 岩川孝志, 中村好男, & 村岡功. (2001). サイクリストと非サイクリストにおけるペダリング運動中の大腿部の筋酸素化動態の比較. *体力科学*, 50(4), 491-500.
- Jenkins, N. D., Housh, T. J., Buckner, S. L., Bergstrom, H. C., Cochrane, K. C., Hill, E. C., ... & Cramer, J. T. (2016). Neuromuscular adaptations after 2 and 4 weeks of 80% versus 30% 1 repetition maximum resistance training to failure. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8), 2174-2185.
- Johnson, J. H. (2008). Overuse injuries in young athletes: cause and prevention. *Strength & Conditioning Journal*, 30(2), 27-31.

- Kang, J., Hoffman, J. R., Wendell, M., Walker, H., & Hebert, M. (2004). Effect of contraction frequency on energy expenditure and substrate utilisation during upper and lower body exercise. *British Journal of Sports Medicine*, 38(1), 31-35.
- Kawamori, N., & Haff, G. G. (2004). The optimal training load for the development of muscular power. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 675-684.
- Klentrou, P., Cieslak, T., MacNeil, M., Vintinner, A., & Plyley, M. (2002). Effect of moderate exercise on salivary immunoglobulin A and infection risk in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(2), 153-158.
- Kounalakis, S. N., & Geladas, N. D. (2012). Cardiovascular drift and cerebral and muscle tissue oxygenation during prolonged cycling at different pedalling cadences. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 37(3), 407-417.
- Kramer, J. B., Stone, M. H., O'bryant, H. S., Conley, M. S., Johnson, R. L., Nieman, D. C., ... & Hoke, T. P. (1997). Effects of single vs. multiple sets of weight training: impact of volume, intensity, and variation. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 11, 143-147.
- Lollgen, H., Graham, T., & Sjogaard, G. (1980). Muscle metabolites, force, and

- perceived exertion bicycling at varying pedal rates. *Medicine Science in Sports Exercise*, 12(5), 345-51.
- Lucía, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (2001). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(8), 1361-1366.
- Lucia, A., San Juan, A. F., Montilla, M., Cañete, S., Santalla, A., Earnest, C., & Pérez, M. (2004). In professional road cyclists, low pedaling cadences are less efficient. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(6), 1048-1054.
- Lyons, M., Al-Nakeeb, Y., & Nevill, A. (2006). Performance of soccer passing skills under moderate and high-intensity localized muscle fatigue. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(1), 197-202.
- Matsuo, T., Saotome, K., Seino, S., Shimojo, N., Matsushita, A., Iemitsu, M., ... & Mukai, C. (2014). Effects of a low-volume aerobic-type interval exercise on $\dot{V}O_{2\max}$ and cardiac mass. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 46(1), 42-50.
- Mitchell, C. J., Churchward-Venne, T. A., West, D. W., Burd, N. A., Breen, L., Baker, S. K., & Phillips, S. M. (2012). Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *Journal of*

Applied Physiology, 113(1), 71-77.

三浦哉, 荒木秀夫, & 的場秀樹. (1999). 自転車こぎ運動時の外側広筋および腓腹筋外側部における酸素化と筋放電量との関係. *体力科学*, 48(3), 413-419.

Miyamoto-Mikami, E., Tsuji, K., Horii, N., Hasegawa, N., Fujie, S., Homma, T., Uchida, M., Hamaoka, T., Kanehisa, H., Tabata, I., Iemitsu, M. (2018). Gene expression profile of muscle adaptation to high-intensity intermittent exercise training in young men. *Scientific Reports*, 8(1), 16811.

Morton, R. W., Oikawa, S. Y., Wavell, C. G., Mazara, N., McGlory, C., Quadriatero, J., Baechler, B.L., Baker, S.K., & Phillips, S. M. (2016). Neither load nor systemic hormones determine resistance training-mediated hypertrophy or strength gains in resistance-trained young men. *Journal of Applied Physiology*, 121(1), 129-138.

奈良春樹, 吉本隆哉, & 山本正嘉. (2014). ハムストリングスの肉離れを発症した陸上競技短距離選手に対する早期復帰のためのリハビリテーショントレーニング-自転車エルゴメータを用いた間欠的ペダリングの効果. *スポーツパフォーマンス研究*, 6, 289-299.

Newton, R. U., & Kraemer, W. J. (1994). Developing explosive muscular power: Implications for a mixed methods training strategy. *Strength & Conditioning*

Journal, 16(5), 20–31.

Nielsen, J. S., Hansen, E. A., & Sjøgaard, G. (2004). Pedalling rate affects endurance performance during high-intensity cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 92(1-2), 114–120.

Nieman, D. C. (1994). Exercise, infection, and immunity. *International Journal of Sports Medicine*, 15(3), S131–S141.

Nimmerichter, A., Eston, R., Bachl, N., & Williams, C. (2012). Effects of low and high cadence interval training on power output in flat and uphill cycling time-trials. *European Journal of Applied Physiology*, 112(1), 69–78.

Ogasawara, R., Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., & Abe, T. (2013). Low-load bench press training to fatigue results in muscle hypertrophy similar to high-load bench press training. *International Journal of Clinical Medicine*, 4(02), 114–121.

Osawa, T., Kime, R., Hamaoka, T., Katsumura, T., & Yamamoto, M. (2011). Attenuation of muscle deoxygenation precedes EMG threshold in normoxia and hypoxia. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(8), 1406–1413.

Ozaki, H., Loenneke, J., Thiebaud, R., & Abe, T. (2015). Cycle training induces muscle hypertrophy and strength gain: strategies and mechanisms. *Acta*

Physiologica Hungarica, 102(1), 1-22.

Paavolainen, L., Hakkinen, K., Hamalainen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999).

Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(5), 1527-1533.

Paton, C. D., Hopkins, W. G., & Cook, C. (2009). Effects of low-vs. high - cadence

interval training on cycling performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(6), 1758-1763.

Pierre, S., Nicolas, H., & Frederique, H. (2006). Interactions between cadence and

power output effects on mechanical efficiency during sub maximal cycling exercises. *European Journal of Applied Physiology*, 97(1), 133-139.

Rodas, G., Ventura, J. L., Cadefau, J. A., Cussó, R., & Parra, J. (2000). A short

training programme for the rapid improvement of both aerobic and anaerobic metabolism. *European Journal of Applied Physiology*, 82(5-6), 480-486.

Sakamoto, A., Sinclair, P. J., & Naito, H. (2016). Strategies for maximizing power

and strength gains in isoinertial resistance training: Implications for competitive athletes. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 5(2), 153-166.

Sarre, G., Lepers, R., Maffiuletti, N., Millet, G., & Martin, A. (2003). Influence

- of cycling cadence on neuromuscular activity of the knee extensors in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4-5), 476-479.
- Schoenfeld, B. J., Peterson, M. D., Ogborn, D., Contreras, B., & Sonmez, G. T. (2015). Effects of low-vs. high-load resistance training on muscle strength and hypertrophy in well-trained men. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(10), 2954-2963.
- Schoenfeld, B. J., Contreras, B., Vigotsky, A. D., & Peterson, M. (2016). Differential effects of heavy versus moderate loads on measures of strength and hypertrophy in resistance-trained men. *Journal of Sports Science & Medicine*, 15(4), 715-722.
- Scrribbans, T. D., Vecsey, S., Hankinson, P. B., Foster, W. S., & Gurd, B. J. (2016). The effect of training intensity on $\dot{V}O_2\text{max}$ in young healthy adults: A meta-regression and meta-analysis. *International Journal of Exercise Science*, 9(2), 230-247.
- Shibata, K., Takizawa, K., & Mizuno, M. (2015). Comparison between twelve and six sets of high load leg extension on muscle strength. *Malaysian Journal of Movement, Health & Exercise*, 4(1), 51-59.
- Skovereng, K., Ettema, G., & van Beekvelt, M. C. (2016). Oxygenation, local muscle

- oxygen consumption and joint specific power in cycling: the effect of cadence at a constant external work rate. *European Journal of Applied Physiology*, 116(6), 1207-1217.
- Skovereng, K., Ettema, G., & Van Beekvelt, M. (2017). The Effect of Cadence on Shank Muscle Oxygen Consumption and Deoxygenation in Relation to Joint Specific Power and Cycling Kinematics. *PloS one*, 12(1), e0169573.
- Sleivert, G. G., Backus, R. D., & Wenger, H. A. (1995). The influence of a strength-sprint training sequence on multi-joint power output. *Medicine and science in sports and exercise*, 27(12), 1655-1665.
- Stebbins, C. L., Moore, J. L., & Casazza, G. A. (2014). Effects of cadence on aerobic capacity following a prolonged, varied intensity cycling trial. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(1), 114-119.
- Sunde, A., Støren, Ø., Bjerkaas, M., Larsen, M. H., Hoff, J., & Helgerud, J. (2010). Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(8), 2157-2165.
- Tabata, I., Atomi, Y., Kanehisa, H., & Miyashita, M. (1990). Effect of high-intensity endurance training on isokinetic muscle power. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 60(4), 254-258.

- Tabata, I., Nishimura, K., Kouzaki, M., Hirai, Y., Ogita, F., Miyachi, M., & Yamamoto, K. (1996). Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and $\dot{V}O_{2\max}$. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28, 1327-1330.
- Tabata, I., Irisawa, K., Kouzaki, M., Nishimura, K., Ogita, F., & Miyachi, M. (1997). Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(3), 390-395.
- Takaishi, T., Yasuda, Y., & Moritani, T. (1994). Neuromuscular fatigue during prolonged pedalling exercise at different pedalling rates. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 69(2), 154-158.
- Takaishi, T., Yasuda, Y., Ono, T., & Moritani, T. (1996). Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(12), 1492-1497.
- Takaishi, T., Ishida, K., Katayama, K., Yamazaki, K., Yamamoto, T., & Moritani, T. (2002). Effect of cycling experience and pedal cadence on the near-infrared spectroscopy parameters. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(12), 2062-2071.
- Takano, N. (1993). Ventilatory responses during arm and leg exercise at varying

- speeds and forces in untrained female humans. *The Journal of physiology*, 468(1), 413-424.
- Tan, B. (1999). Manipulating resistance training program variables to optimize maximum strength in men: a review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 13(3), 289-304.
- Tanimoto, M., & Ishii, N. (2006). Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *Journal of Applied Physiology*, 100(4), 1150-1157.
- Thiebaud, R. S., Abe, T., Bravo, J. C., Giovannitti, N., & Sullivan, A. P. (2018). Muscle activation and heart rate responses to a side - step interval exercise. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 38(2), 285-290.
- Tokui, M., & Hirakoba, K. (2007). Effect of internal power on muscular efficiency during cycling exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 101(5), 565-570.
- Tokui, M., & Hirakoba, K. (2008). Estimation of oxygen cost of internal power during cycling exercise with changing pedal rate. *Journal of Physiological Anthropology*, 27(3), 133-138.
- Turner, A. N., & Stewart, P. F. (2014). Strength and conditioning for soccer

players. *Strength & Conditioning Journal*, 36(4), 1-13.

Verney, J., Kadi, F., Saafi, M. A., Piehl-Aulin, K., & Denis, C. (2006). Combined lower body endurance and upper body resistance training improves performance and health parameters in healthy active elderly. *European Journal of Applied Physiology*, 97(3), 288-297.

Viana, R. B., de Lira, C. A. B., Naves, J. P. A., Coswig, V. S., Del Vecchio, F. B., & Gentil, P. (2019). Tabata protocol: a review of its application, variations and outcomes. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 39(1), 1-8.

汪立新, 吉川貴仁, 原文貴, 中雄勇人, 鈴木崇士, & 藤本繁夫. (2005). 回転数・トルク数の調節が活動筋内の酸素動態およびエネルギー代謝に及ぼす影響. *体力科学*, 54(3), 229-235.

Whitty, A. G., Murphy, A. J., Coutts, A. J., & Watsford, M. L. (2016). The effect of low-vs high-cadence interval training on the freely chosen cadence and performance in endurance-trained cyclists. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 41(6), 666-673.

Whyte, L. J., Gill, J. M., & Cathcart, A. J. (2010). Effect of 2 weeks of sprint interval training on health-related outcomes in sedentary overweight/obese

men. *Metabolism*, 59(10), 1421-1428.

Wilson, J. M., Marin, P. J., Rhea, M. R., Wilson, S. M., Loenneke, J. P., & Anderson, J. C. (2012). Concurrent training: a meta-analysis examining interference of aerobic and resistance exercises. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(8), 2293-2307.

矢部広樹, & 西田裕介. (2009). 自転車エルゴメータによる回転数の違いが生体の酸素供給系と代謝需要系へ与える影響. *理学療法科学*, 24(4), 617-624.

Yamaguchi, T., & Ishii, K. (2005). Effects of static stretching for 30 seconds and dynamic stretching on leg extension power. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(3), 677-683.

Zorgati, H., Collomp, K., Boone, J., Guimard, A., Buttelli, O., Mucci, P., ... & Prieur, F. (2015). Effect of pedaling cadence on muscle oxygenation during high-intensity cycling until exhaustion: a comparison between untrained subjects and triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, 115(12), 2681-2689.