

博士論文

ファストウォーキングの生理学的・力学的特性

-同一速度でのランニングと比較して-

(Physiological and mechanical loading

characteristics of fast walking.

-Comparison with running at equivalent speed-)

2023 年 9 月

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科

スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程

牧野 晃宗

立命館大学審査博士論文

ファストウォーキングの生理学的・力学的特性

-同一速度でのランニングと比較して-

(Physiological and mechanical loading

characteristics of fast walking.

-Comparison with running at equivalent speed-)

2023 年 9 月

September 2023

立命館大学大学院スポーツ健康科学研究科

スポーツ健康科学専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Sport and Health Science

Graduate School of Sport and Health Science

Ritsumeikan University

牧野 晃宗

MAKINO Akitoshi

研究指導教員：後藤 一成教授

Supervisor: Professor GOTO Kazushige

目次

原著論文の一覧

表のタイトル一覧

図のタイトル一覧

略語の一覧

I. 緒言	1
II. 問題点、研究目的および研究課題	10
III. 【研究課題 1】	12
1. 緒言	
2. 方法	
3. 結果	
4. 考察	
5. 結論	
IV. 【研究課題 2】	25
1. 緒言	
2. 方法	
3. 結果	
4. 考察	

5. 結論	
V. 【研究課題 3】	39
1. 緒言	
2. 方法	
3. 結果	
4. 考察	
5. 結論	
VI. 総合討論	52
VII. 総括	60
VIII. 結論	61

参考文献

謝辞

原著論文の一覧

本博士論文は、以下の副論文をまとめたものである。

【副論文】

1. **Makino A**, Yamaguchi K, Sumi D, Ichikawa M, Ohno M, Goto K. Comparison of energy expenditure and substrate oxidation between walking and running in men and women.

Phys Act Nutr 2022;26:8-13.

2. **Makino A**, Yamaguchi K, Sumi D, Ichikawa M, Ohno M, Nagano A, Goto K. Ground reaction force and electromyograms of lower limb muscles during fast walking.

Front Sports Act Living 2023;4:1055302.

表のタイトル一覧

Table 1. Summary of the previous studies.

Table 2. Changes in HR and RPE.

図のタイトル一覧

Figure 1. An energy cost of locomotion while walking and running at different speeds.

Figure 2. A typical change in energy expenditure during exercise.

Figure 3. Comparison of energy expenditure (EE) at different speeds in males and females.

Figure 4. Comparisons of carbohydrate (CHO) oxidation and fat oxidation in males and females.

Figure 5. Anterior-posterior component of ground reaction force.

Figure 6. Vertical component of ground reaction force.

Figure 7. Averaged surface electromyography (aEMG).

Figure 8. Averaged surface electromyography (aEMG).

Figure 9. Changes in blood lactate and glucose concentrations.

Figure 10. Changes in serum growth hormone, glycerol, myoglobin and haptoglobin concentrations.

Figure 11. Comparisons of energy expenditure (EE), carbohydrate (CHO) oxidation and fat oxidation during each exercise.

Figure 12. Changes in heart rate, rating of perceived exertion for breath and leg muscles (RPE) during each exercise.

略語の一覧

aEMG; Averaged surface electromyography

ANOVA; Analysis of variance

BFL; Biceps femoris long muscle

BW; Body weight

cfPWV; Carotid-femoral pulse wave velocity

CHO; Carbohydrate

EE; Energy expenditure

EMG; Surface electromyography

EOTS; Energetically optimal transition speed

FW; Fast walking

GH; Growth hormone

GM; Gluteus maximus muscle

GRF; Ground reaction force

HR; Heart rate

HR_{peak}; Peak heart rate

Mb; Myoglobin

METs; Metabolic equivalents

MG; Gastrocnemius medialis muscle

MVC; Maximal voluntary contraction.

MWS; Maximal walking speed

PTS; Preferred transition speed

RF; Rectus femoris muscle

RPE; Ratings of perceived exertion

SBP; Systolic blood pressure

SOL; Soleus muscle

SSC; Stretch shortening cycle

TA; Tibialis anterior muscle

TNF- α ; Tumor necrosis factor alpha

$\dot{V}CO_2$; Carbon dioxide output

$\dot{V}E$; Minute ventilation

VL; Vastus lateralis muscle

$\dot{V}O_2$; Oxygen uptake

$\dot{V}O_{2ax}$; maximal oxygen uptake

$\dot{V}O_{2peak}$; Peak oxygen consumption

I. 緒言

1. 身体活動の不足が健康関連指標に及ぼす影響

運動不足が健康に及ぼす影響は、これまでに十分に報告されている(World Health Organization; WHO, 2018)。世界における死亡原因の主要因子には、高血圧、喫煙、高血糖、運動不足、過体重および肥満が含まれ、非感染性疾患の原因とされている(WHO, 2009)。これらの中でも運動不足は、心血管系疾患および腫瘍性疾患のリスクを高めることが知られている(Patterson et al., 2018)。そのため、非感染性疾患の予防をねらいとした身体活動を促進する取り組みが、世界各国で行われてきた(WHO, 2010)。また、運動不足の軽減をねらいとして、WHO 加盟国では身体活動に関する世界行動計画が承認された。さらに、2018 年の世界保健総会において、2030 年までに身体活動が不十分とされる青少年の割合を 15%低下させるという新しい目標が合意された(WHO, 2018)。我が国においても、生活習慣病の発症予防や生活習慣の改善などを基本的な方向とし、健康寿命の延伸を目的に「健康日本 21」が推進されてきた(Ministry of Health, Labour and Welfare, 2007)。この取り組みでは、食事、喫煙および糖尿病などの危険因子や疾患の管理を監視および改善するための指標が設定された。しかしながら、肥満は 40 – 60 歳の女性で減少したが、20 – 60 歳の男性で増加しており(Ministry of Health, Labour and Welfare, 2011)、依然として問題の解決には至っていない。

このような運動不足による世界共通の問題を解決するためには、疾病予防に資する身体活動の習慣的な実施が重要である(Ikeda et al., 2012)。習慣的な身体活動は、糖代謝(Umpierre et al., 2013)と脂質代謝(Goto et al., 2007)をいずれも改善し、体重および体脂肪量を減少させる(Karstoft et al., 2013)。また、心肺機能(Sazlina et al., 2020)および心血管系機能の改善(Tordi et al., 2010)、筋量および筋力の増加(Larsson et al., 2019)にも貢献する。アメリカスポーツ医学会(ACSM)のガイドライン(2017)は、1 週間あたり 150 – 300 分の中強度での有酸素性運

動、75–150 分の高強度の有酸素性運動、または中強度と高強度の両方の有酸素性運動の組み合わせが推奨されている。その際の運動様式はさまざまであるが、サイクリング、ウォーキングおよびランニングなどが想定されている。

しかしながら、継続性が低い運動プログラムでは望ましい運動効果を期待することができない(Kruegle et al., 2012; Miller et al., 2015)。そのため、健康維持・増進を目的とした運動プログラムでは、継続性に優れた内容を選定することが重要となる。つまり、健康維持・増進を目的とした運動プログラムにおいて高い効果を得る上では、提供された内容(運動強度、時間、頻度など)を遵守することが極めて重要となる(Burgess et al., 2017)。しかしながら、一般に高強度および長時間の運動プログラムでは継続性が低下し、運動の習慣化は容易ではない(Ekkekakakis et al., 2011)。そのため、日常生活のなかで容易に実施できる継続性の高い運動プログラムの提案が求められる。

2. ファストウォーキングの効果

健康維持・増進を目的とした身体運動は、ウォーキング、ランニング、サイクリング、スイミングなど多岐にわたるが、通常速度よりも速い速度で歩くファストウォーキング^(注1)(FW)の効果が注目されている(Masuki et al., 2017)。一般に、自転車ペダリングは実施しやすいとされているが、専用の機器(自転車エルゴメータ)を必要とする。ランニングは特別な機器・器具を必要としないが、変形性関節症やアキレス腱炎といった整形外科的な問題を抱える対象者、体重過多や身体活動レベルが低い対象者への適応は必ずしも適切でない。これらに対して、ウォーキングはランニングに比較して傷害のリスクが低い(Colbert et al., 2000)。しかしながら、身体活動の強度として用いられるメッツ(METs)に着目すると、ランニングが 8.0 METs であるのに対してウォーキングは 3.5 METs に過ぎず(Ainsworth et al., 2011)、エ

エネルギー消費量(EE)の小さいことが筋機能、全身持久力や体組成の改善などを図る上で弱点の1つとなっている。この問題に対して、FWは解決策の1つになることが期待されている。特に、FWと緩歩を交互に「インターバル形式」で実施するインターバルファストウォーキング(注²)(インターバルFW)は実用的な方法として注目されている(Masuki et al., 2017)。

FWやインターバルFWの長期効果を検討した研究結果を概観すると、体組成の改善や全身持久力の向上など健康増進に有益な効果が認められている(Nemoto et al., 2007)。また、複数の先行研究では、最高酸素摂取量($\dot{V}O_{2peak}$)の70–85%に相当する強度のFWと $\dot{V}O_{2peak}$ の40%以下に相当する強度の緩歩を組み合わせたインターバルFWが用いられている(Nemoto et al., 2007; Okamoto et al., 2018; Masuki et al., 2019)。 $\dot{V}O_{2peak}$ の増加と生活習慣病の症状の改善には関連があり(Sawada et al., 2003; Lee et al., 2005)、健康寿命の延伸を図る上でも全身持久力の向上は重要である。Morton et al. (2010)の研究では、最高心拍数の80%に相当する運動強度で25分から55分のFWを週4回・7週間実施した結果、2型糖尿病患者における $\dot{V}O_{2peak}$ の増加と運動能力の改善が認められた。同様に、Karstoft et al. (2017)の研究では、54% $\dot{V}O_{2peak}$ での3分間の緩歩と89% $\dot{V}O_{2peak}$ での3分間のFWを1セットとし、これを10セット行うインターバルFWによるトレーニングを週5日・8週間実施した結果、24時間内での間質液中のグルコース濃度の最高値および平均振幅値がいずれも有意に低下することが示された。このように、FWやインターバルFWを用いた運動プログラムの有益な効果は、これまでも複数報告されている。

FWを用いたトレーニングでは、有酸素性能のみでなく、脚筋力の向上も期待できる。元来、ウォーキングなどの持久力トレーニングは、有酸素性能と心血管指標の改善に有効な運動様式として周知されている。先行研究では、5ヶ月間のインターバルFW(70–85% $\dot{V}O_{2peak}$ での3分間のFWとの40% $\dot{V}O_{2peak}$ 以下での3分間の緩歩を1セットとし、5

セット以上実施)によるトレーニングの結果、 $\dot{V}O_{2peak}$ の増加および血圧の低下が認められた(Nemoto et al., 2007; Masuki et al., 2019)。また、高齢者を対象に9週間のFWによるトレーニングによって、下肢筋群の筋肥大と最大筋力の増加が認められた(Ozaki et al., 2019)。さらに、Kubo et al. (2008)は、6ヶ月のFWによるトレーニングの結果、膝屈筋と背屈筋の筋厚、膝関節屈筋および足関節底背屈筋の最大筋力の増加を認めている。これらに対して、複数の横断的研究においては、持久性トレーニング(ウォーキング、ジョギング、サイクリング)が筋量、筋横断面積や筋機能(最大筋力、筋パワーなど)の顕著な改善を引き起こさないことが示唆されている(Klitgaard et al., 1990)。したがって、FWやインターバルFWによる長期のトレーニングは、筋力トレーニングと同様に、最大筋力および筋パワー、筋量の増大などを期待できると考えられる。Table 1には、FWの急性効果および長期のトレーニング効果をまとめた。

Table 1. Summary of the previous studies.

References	Intervention Intensity d/Wk, Period	Main outcomes
Masaki et al., 2017	3 min @ 40 % $\dot{V}O_{2peak}$ + 3 min above 70 % $\dot{V}O_{2peak}$, over 5 sets 4 d/Wk, 5 months	$\dot{V}O_{2peak}$ ↑ , Leg strength ↑ , LSD score ↓
Nemoto et al., 2007	3 min @ 40 % $\dot{V}O_{2peak}$ + 3 min above 70 % $\dot{V}O_{2peak}$, over 5 sets 4 d/Wk, 5 months	BW ↓ , Leg strength ↑ , $\dot{V}O_{2peak}$ ↑ , SBP ↓
Okamoto et al., 2018	3 min @ 30 % $\dot{V}O_{2peak}$ + 3 min above 70 % $\dot{V}O_{2peak}$, over 5 sets acute	cfPWV ↓
Masaki et al., 2019	3 min @ 40 % $\dot{V}O_{2peak}$ + 3 min above 70 % $\dot{V}O_{2peak}$, over 5 sets 4 d/Wk, 5 months	$\dot{V}O_{2peak}$ ↑ , lifestyle-related diseases score
Morton et al., 2010	5 min @ 80 % HR_{peak} + 1 min rest, 6 sets 4 d/Wk, 7 weeks	HR_{peak} ↑ , $\dot{V}O_{2peak}$ ↑
Karstoft et al., 2017	3 min @ 54 % $\dot{V}O_{2peak}$ + 3 min @ 89 % $\dot{V}O_{2peak}$, 10 sets 5 d/Wk, 8 weeks	maximum glucose levels ↓ mean amplitude of glycaemic excursions ↓
Ozaki et al., 2019	3 min @ 65-75 %HHR + 2 min @ self-selected speed, over 5 sets 4 - 5 d/Wk, 9 weeks	muscle thickness of the thigh ↑, MVC ↑
Kubo et al., 2008	40 min @ a self-selected speed 4 d/Wk, 6 months	knee extensors/flexors ↑ , MVC ↑
Brown et al., 2018	5 min @ 80 % $\dot{V}O_{2max}$ + 5 min @ 30 % $\dot{V}O_{2max}$, 3 sets acute	IL-6 ↑ , TNF- α ↑
Deguchi et al., 2018	10 % and 20 % faster speeds than natural walking acute	postprandial blood glucose levels ↓

$\dot{V}O_{2peak}$; peak oxygen consumption, BW; body weight, SBP; systolic blood pressure, cfPWV; carotid-femoral pulse wave velocity, HR_{peak} ; peak heart rate, MVC; Maximal voluntary contraction. $\dot{V}O_{2max}$; maximal oxygen uptake. IL-6; Interleukin 6. TNF- α ; Tumor necrosis factor alpha.

3. FW が抱える課題

FW による望ましい効果を得る上では運動強度(歩行速度)の設定が重要であるが(Masaki et al., 2019)、至適な歩行速度は個々の体力レベルや運動習慣によっても異なると推察される。特に、ウォーキング時の速度上昇に伴う EE の変化の様相は、ランニングなどの他の運動様式と大きく異なることが指摘されており(Farley and McMahon, 1992)、注意が必要である。ウォーキングとランニング時の EE の推移を比較した先行研究では、ランニングでは同じ距離をウォーキングで完遂した場合に比較して、EE が高値を示すことが示されている(Batliner et al., 2017; Pauley et al., 2016; Wilkin et al., 2012)。これに対して、Rotstein et al. (2005)は、運

動学的に「ウォーキング」から「ランニング」へ「自然に走り出す速度(PTS)」におけるエネルギーコスト(Figure 1 内の A に相当)は、ウォーキングがランニングに比較して有意に低い一方で、PTS を上回る速度ではエネルギーコストが均衡となる(EOTS)ことを指摘している(Figure 1 内の B に相当)。

このことは、ウォーキングとランニングの EE の推移は運動強度(速度)に応じて異なり、PTS を超えるような高速度域ではウォーキング時の EE はランニング時を上回る可能性を示すものである。一方、Rotstein et al. (2005)の研究では、ウォーキング時にエネルギーコストが上回る絶対的な速度が概ね 8.0 km/h であることを提示したが、相対的な速度(最高歩行速度に対する割合など)を明示するには至らなかった。最高歩行速度は個人によって異なることを考慮すると、ランニングに比較して EE が増加する FW 時の歩行速度を、最高歩行速度に対する相対値として示すことが必要と考えられる。

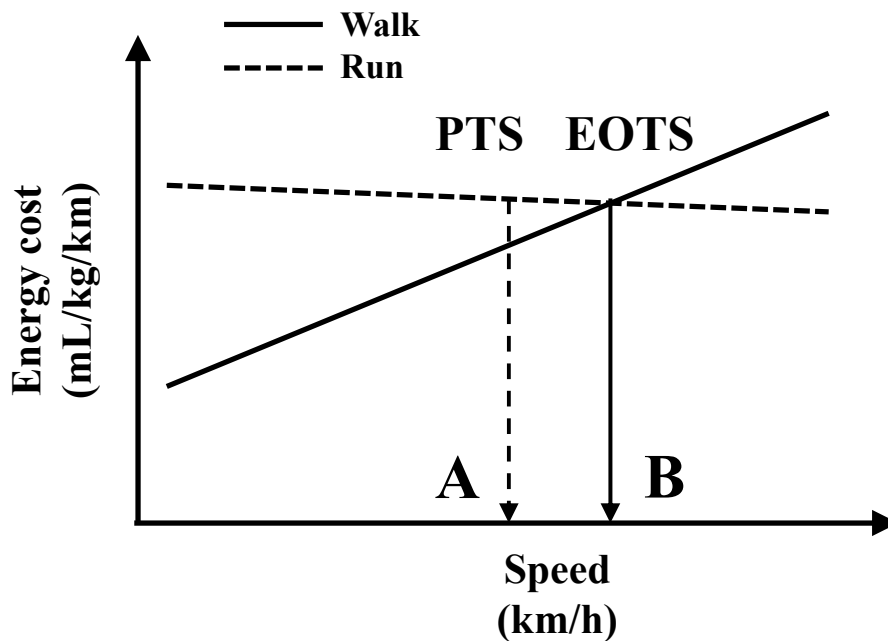


Figure 1. An energy cost of locomotion while walking and running at different speeds.

PTS; the preferred transition speed, EOTS; the energetically optimal transition speed.

(Modified from Rotstein et al., 2005)

これまでに、FW によるトレーニングに伴い筋機能の改善がみられることが報告されている(Ozaki et al., 2019)。その一方で、FW を用いたトレーニングが、下肢筋群の形態や機能の改善にもたらす要因(トレーニング刺激)は十分に整理されていない。先述したように、持久性トレーニング(ウォーキング、ジョギング、サイクリング)は筋肥大や筋機能の顕著な改善を示さない(Klitgaard et al., 1990)。これらに対して、高齢者を対象に、最高心拍数の 65–80 % に相当する強度で 3 分間の FW と自己選択した強度で 2 分間の緩歩を 1 セットとし、5 セット以上行うインターバル FW によるトレーニングを週 4 - 5 日・9 週間継続した結果、下肢筋群の筋厚および膝関節の最大筋力(MVC)がいずれも増加した(Ozaki et al., 2019)。

長期間のトレーニングに伴う筋適応は、毎回のトレーニング時における筋活動レベルと関連する(Wakahara et al., 2013)。また、歩行速度は接地直後および立脚期における鉛直方向

の地面反力(GRF)に強く影響することが示されている(White et al., 1996)。ウォーキング時の鉛直方向における GRF は速度の上昇に対して直接的に増加するのではなく、U 字カーブの変化を示す。また、鉛直方向における GRF が最も低くなる速度は個人によって異なる(Masani et al., 2002)。その一方で、ランニング時の鉛直方向における GRF は速度の上昇に比例して、直線的に増加する(Keller et al., 1996)。これらの諸点は、ウォーキング時の速度上昇に伴う筋活動や GRF の変化はランニング時とは異なることを示唆するものである。したがって、FW によるトレーニングが筋形態や筋機能の適応に影響する要因を把握する上では、一過性の FW 時の筋活動と GRF の双方を詳細に検討することが必要であると考えられる。

FW やインターバル FW による長期のトレーニング効果が報告されている一方で、一過性の運動に伴う糖代謝や脂質代謝、また、これらに関連する内分泌応答の特性は明らかになっていない。例えば、運動に伴う成長ホルモン(GH)の分泌は脂質代謝を亢進し、運動後の血中遊離脂肪酸濃度やケトン体濃度の上昇、脂質酸化量の増加を引き起こす(Goto et al., 2007)。この点からも、FW やインターバル FW 時の筋活動や GRF をランニングと比較することに加えて、糖・脂質代謝や GH を含む内分泌指標に及ぼす影響を検討することは有意義と考えられる。

FW やインターバル FW の効果を検証した先行研究の多くは、通常速度でのウォーキングまたは運動介入を実施しない群を対象群(コントロール群)として位置づけ、ランニングの効果と比較した例はみられない。そのため、健康増進に資する効果が既に報告されているランニングに対して、FW やインターバル FW を用いた運動プログラムの優位性は明示されていない。また、先行研究の多くでは高齢者(Nenoto et al., 2009; Masuki et al., 2019)や 2 型糖尿病患者(Karstoft et al., 2013; Karstoft et al., 2017)など、その対象者がきわめて限定されている点も留意すべきである。したがって、今後は、多様な年代や体力特性を有する者を対象に、FW

やインターバルFWの効果を検討することが必要である。

[用語の定義]

(注1)ファストウォーキング(FW)

本論文では、個々の通常歩行速度に比較して速い速度(最高歩行速度の80%を上回る速度を目安とする)における歩行を「ファストウォーキング(FW)」と定義する。

(注2)インターバルファストウォーキング(インターバルFW)

本論文では、緩歩(低強度)とFW(高強度)を繰り返し行う負荷様式を「インターバルファストウォーキング(インターバルFW)」と定義する。なお、これは一過性の運動のことを意味し、インターバルファストウォーキングを継続的(習慣的)に実施することは、「インターバルFWを用いたトレーニング」と表記する。

II. 問題点、研究目的および研究課題

問題点

文献研究の結果、検討すべき問題点として以下の諸点を抽出した。

問題点 1. 一定の速度以上では、ランニング時に比べウォーキング時の EE が高値を示す可能性が指摘されている。一方、ウォーキング時の EE がランニング時の EE を上回る相対的な運動強度(最高歩行速度に対する割合)は明示されていない。

問題点 2. 速度上昇に伴う GRF の変化の様相は、ウォーキングとランニングで異なる。しかし、FW 時と同一速度でのランニング時の GRF と筋活動の双方を比較した研究がみられない。

問題点 3. 一過性の FW やインターバル FW に伴う糖代謝や脂質代謝の特性は十分に検討されていない。また、これらに関わる内分泌応答にも不明な点が多い。

研究目的

本博士論文では、FW の負荷特性をエネルギー代謝、GRF および筋活動、代謝・内分泌応答の観点から、同一速度でのランニングとの比較を通して明らかにすることを目的とした。

研究課題

上述の目的を達成するために、以下の 3 つの研究課題を設定した。

研究課題 1. FW 時のエネルギー代謝の特性(対応する問題点：問題点 1)

研究課題 2. FW 時の GRF および筋活動の特性(対応する問題点：問題点 2)

研究課題 3. インターバル FW に対する糖・脂質代謝、および内分泌応答の特性(対応する問題点：問題点 3)

【研究課題 1】 FW 時のエネルギー代謝の特性

1. 緒言

習慣的な持久性トレーニングの実施は、糖代謝(Umpierre et al., 2013)や脂質代謝(Goto et al., 2007)および心血管系機能(Tordi et al., 2010)を改善し、体重および体脂肪量を減少させる(Karstoft et al., 2013)。その際に用いられる運動様式はさまざまであるが、その中でもウォーキングは特別な器具を必要としないことから汎用性が高い。ウォーキングを用いた先行研究では、2型糖尿病患者の $\dot{V}O_{2peak}$ と運動能力の改善(Morton et al., 2010)、および閉経後の女性における基礎体力と脂質代謝の改善が認められた(Walker et al., 1999)。しかしながら、これらの結果は研究間で必ずしも一致しておらず、ウォーキングによるトレーニング効果、有益な適応が認められなかった研究も散見される(Leon et al., 1996)。

ウォーキングの長期効果が認められなかった要因として、運動強度の不足が挙げられる。身体活動の強度として用いられる METs では、ランニングは 8.0 METs に対しウォーキングは 3.5 METs に過ぎない(Ainsworth et al., 2011)。この問題点に関して、FW は解決策の 1 つになることが期待される。Nemoto et al. (2007)は、 $\dot{V}O_{2peak}$ の 70-85 % に相当する強度での FW と $\dot{V}O_{2peak}$ の 40 % 以下に相当する強度でのウォーキングをそれぞれ 3 分間繰り返すインターバル FW によるトレーニングを 5 ヶ月間行った結果、50% $\dot{V}O_{2peak}$ でのウォーキングによるトレーニングと比較して $\dot{V}O_{2peak}$ と下肢の最大筋力がいずれも大きく増加し、収縮期血圧はより一層低下したことを報告している。同様に Morikawa et al. (2011)は、4 ヶ月間のインターバル FW によるトレーニングの結果、 $\dot{V}O_{2peak}$ が増加し、生活習慣病に関連する指標も改善されたことを認めている。しかしながら、これらは、「FW」と「連続的なウォーキング」に対する代謝・心血管適応を比較したものであり(Leal et al., 2020; Francis et al., 2021)、「FW」

と「ランニング」の直接的な比較は行われていない。

この点に関して、ランニング時の EE は走行速度に比例して直線的に増加するが、ウォーキング時の EE は非線形に増加し、一定の速度以上ではランニングに比べ EE が大きくなることが指摘されている(Rotstein et al., 2005)。しかしながら、Rotstein et al. (2005)の研究では、ウォーキング時の EE がランニング時の EE を上回る絶対的な強度(km/h など)や相対的な強度(最大歩行速度や $\dot{V}O_{2peak}$ に対する割合など)は提示されていない。脚筋力(Stephen and David, 1996)や身長(Murray et al., 1966)は歩行速度に影響し、最高歩行速度も個々により異なる。したがって、FW による効果的なトレーニングプログラムを構築する上では、至適な歩行速度を最高歩行速度や $\dot{V}O_{2peak}$ に対する相対値として提示することが重要と考えられる。

これまで、インターバル FW によるトレーニングによって、体重および体脂肪量の減少が認められているが(Karstoft et al., 2013)、FW 中の炭水化物酸化量および脂肪酸化量の様相については明らかにされていない。ウォーキングでは速度の上昇に伴い、ピッチおよびストライドは増加する(Bovi et al., 2011)。このことには脚のスイング速度の増加が関与し、速筋線維の動員を伴いエネルギー代謝が変化する可能性も考えられる。

そこで研究課題 1 では、同一の速度におけるウォーキング時とランニング時のエネルギー代謝を比較することを目的とした。本研究課題では、最高歩行速度に近い速度では、ウォーキング時の EE と炭水化物酸化量がランニング時よりも大きくなると仮説を設けた。

2. 方法

(1) 被験者

外科的既往歴や外傷性疾患のない一般成人 34 名(男性 18 名、女性 16 名)を被験者とした。被験者の年齢、身長、体重は、男性では 23 ± 3 歳、 170.1 ± 5.7 cm、 64.9 ± 8.7 kg、女性

では 22 ± 1 歳、 158.3 ± 6.3 cm、 51.5 ± 6.8 kg (平均値 \pm 標準偏差)であった。全ての被験者に対して、本研究の目的および方法、危険性について書面と口頭で説明した上で参加の同意を得た。なお、本研究は、立命館大学人を対象とする医学系研究倫理審査委員会により承認を得て実施した。

(2) 研究デザイン

被験者は、ウォーキング(Walk)条件およびランニング(Run)条件を異なる日の同一時間帯に実施した。本研究では、最高歩行速度(MWS)に至るまでの速度域におけるウォーキング時とランニング時のエネルギー代謝を比較することをねらいとした。そのため、2条件の実施順序はランダムではなく、はじめに Walk 条件を実施し、その後に Run 条件を実施した。条件間には、2-3 日の間隔を設けた。各運動中には、エネルギー代謝指標(EE、炭水化物酸化量、脂質酸化量)、心拍数(HR)および主観的運動強度(RPE)の変化を評価した。被験者は、各条件の少なくとも 24 時間前から激しい運動およびカフェインとアルコールの摂取を、2 時間前からは一切の食事を避けた(水の摂取のみ認めた)。

Walk 条件では、トレッドミル(E95Ta; Life Fitness, 東京, 日本)を用いて 3.0 km/h で 3 分間のウォーキングを開始した。その後、1 分間に 0.5 km/h ずつ速度を漸増し、規定のフォームでのウォーキングが維持できなくなった時点で運動を終了した。規定のフォームによるウォーキングの定義は、1) 両足が接地している区間があること、2) 接地時において膝関節が大きく屈曲していないこと、3) 著しい身体の上下動がないことをすべて満たしていることとした。また、この際速度を MWS と定義した。Run 条件では、5.0 km/h で 3 分間のランニングから開始し、MWS を 2.0–3.0 km/h 上回る速度まで、毎分 0.5 km/h 増加させた。ランニング時には各速度に応じた動作を行わせ、滞空期(両足が接地していない局面)が存在することを確認した。

(3) 測定項目

各運動中には、代謝分析測定装置(AE-300S; ミナト医科学株式会社, 大阪, 日本)を用いて、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$)および分時換気量($\dot{V}E$)を breath-by-breath 法にて評価した。また、得られたデータは 30 秒毎の平均値として示した。測定前には、 O_2 センサと CO_2 センサは既知濃度のガスを用いて校正し、換気センサは 2 L シリンジを用いて校正した。

運動中の EE は Weir (1949)の式から算出した。

$$EE \text{ (kcal/min)} = 3.9 \times \dot{V}O_2 \text{ (L/min)} + 1.1 \times \dot{V}CO_2 \text{ (L/min)}$$

炭水化物酸化量および脂質酸化量は、Jeukendrup and Wallis (2005)の式を用いて算出した。

$$\text{炭水化物酸化量 (g/min)} = 4.210 \times \dot{V}CO_2 - 2.962 \times \dot{V}O_2$$

$$\text{脂質酸化量 (g/min)} = 1.695 \times \dot{V}O_2 - 1.701 \times \dot{V}CO_2$$

HR は、ワイヤレス HR モニタ(RCX5; Polar Electro, Kempele, Finland)を用いて、連続的に計測した。RPE は、関連する先行研究との比較のために 10 段階のボルグスケールを用いて (Chiu et al., 2007)、各速度での運動終了直後に呼気および脚の主観的運動強度を評価した (Christian et al., 2014)。

各条件におけるエネルギー代謝指標の変化を比較するために、2つの方法を用いて正規化を行った。1つ目の方法では、Run 条件の初速である 5.0 km/h を 0%、MWS を 100%として 20%ごとに区分した。2つ目の方法では、MWS に対する相対速度(%MWS)として表した。

(4) 統計解析

すべての結果は平均値(mean) ± 標準偏差(SD)で示した。反復測定による二元配置の分散分析(ANOVA)を行い、各変数の主効果(速度および条件)または交互作用(速度 × 条件)に有意性が認められた場合には、Tukey 法による多重比較を行った。すべての統計処理において 5 %水準未満をもって有意と判定した。

3. 結果

(1) エネルギー消費量(EE)

Figure 2 には、各条件における EE の典型的な変化(男性 1 名、女性 1 名)を示した。Run 条件では、速度の増加に伴い EE は直線的に増加した(1 次回帰の決定係数; $R^2=0.9914$, 2 次回帰の決定係数; $R^2=0.9891$)。その一方で、Walk 条件では EE が非直線的に増加し(1 次回帰の決定係数; $R^2=0.9334$, 2 次回帰の決定係数; $R^2=0.9944$)、男性では 8.0 km/h 以上で急激に増加した。その結果、8.0–10.0 km/h の速度域においては、Run 条件よりも Walk 条件で EE が高値を示した。さらに、女性においても同様の傾向が認められた。

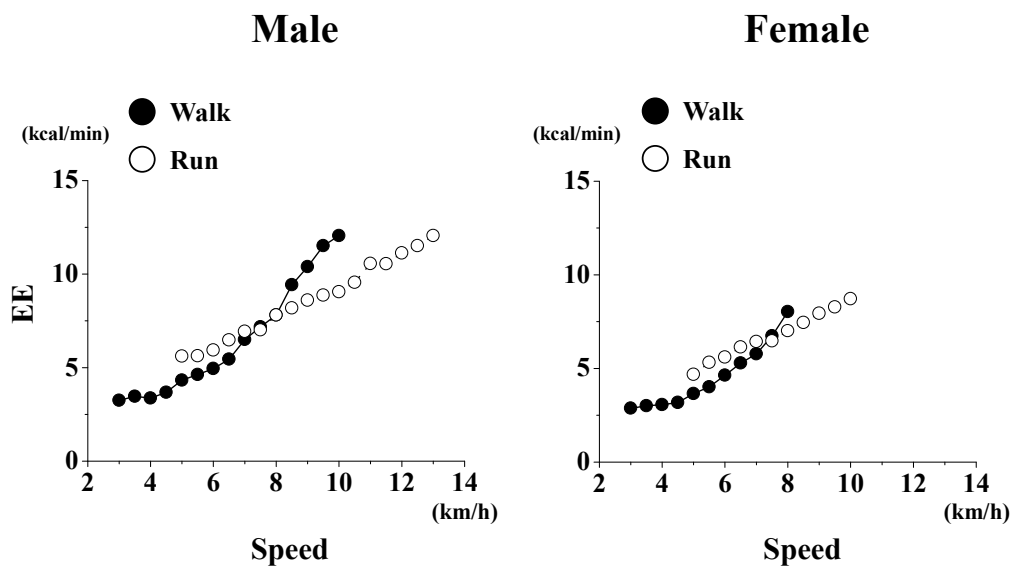


Figure 2. A typical change in energy expenditure during exercise.

Figure 3 には、相対的な速度(5.0 km/h を 0 %、MWS を 100 %と定義)での EE の変化を示した。EE の変化には、速度(男女ともに $p < 0.001$)と条件(男性; $p < 0.05$ 、女性; $p < 0.001$)の有意な主効果、および有意な交互作用(男女ともに $p < 0.001$)が認められた。男性では、0 - 40 % 区間($57 \pm 5 \% - 74 \pm 3 \% \text{MWS}$ に相当)において、Walk 条件が Run 条件に比較して有意に低値を示した(すべて $p < 0.001$)。その一方、80 - 100 % 区間においては、Walk 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した($92 \pm 2 \% - 100 \% \text{MWS}$ に相当) (80%; $p < 0.01$ 、100%; $p < 0.001$)。女性では、0 - 50 % 区間($66 \pm 5 \% - 83 \pm 3 \% \text{MWS}$ に相当)において、Walk 条件が Run 条件に比較して有意に低値を示した(すべて $p < 0.001$)。100 % 区間(100 %MWS に相当)においては、Walk 条件が有意に高値を示した($p < 0.01$)。

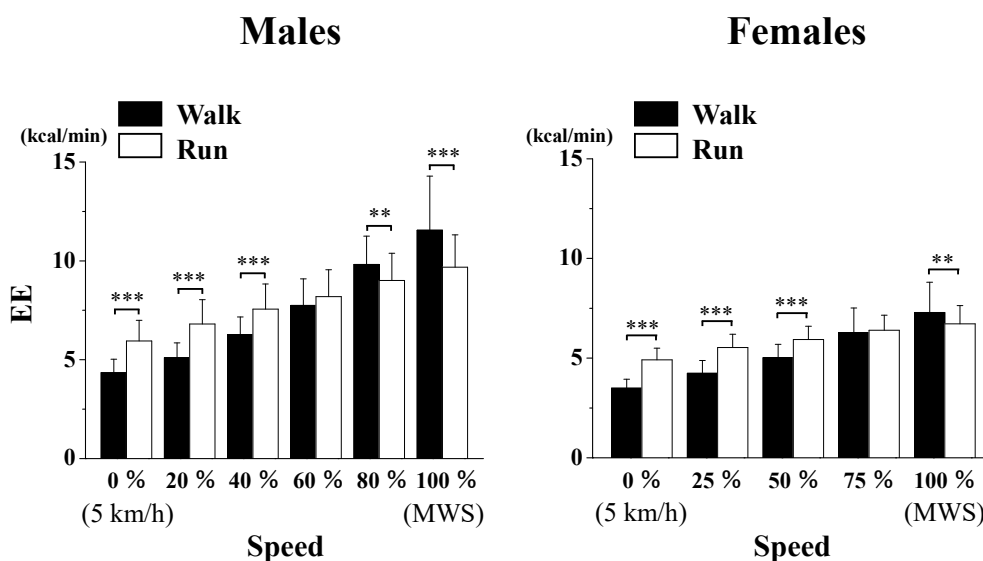


Figure 3. Comparison of energy expenditure (EE) at different speeds in males and females. Values are means \pm SD. Significant difference between conditions in each relative speed (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

(2) 炭水化物酸化量および脂質酸化量

Figure 4 には、相対的な速度での炭水化物酸化量および脂質酸化量の変化を示した。炭水

化物酸化量の変化には、速度の有意な主効果(男女ともに $p<0.001$)および交互作用(男女ともに $p<0.001$)が認められたが、条件の主効果は認められなかった。男性では、0-40 %区間($57 \pm 5\%$ - $74 \pm 3\%$ MWS に相当)において、Walk 条件が Run 条件に比較して炭水化物酸化量が有意に低値を示した(0 %、40 %; $p<0.05$ 、20 %; $p<0.001$)。一方、80-100 %区間($92 \pm 2\%$ - 100% MWS に相当)においては、Walk 条件が Run 条件に比較して炭水化物酸化量が有意に高値を示した(すべて $p<0.001$)。女性では、0-50 %区間において、Walk 条件が Run 条件に比較して炭水化物酸化量が有意に低値を示した($66 \pm 5\%$ - $83 \pm 3\%$ MWS に相当) (0 %、50 %; $p<0.05$ 、25 %; $p<0.01$)。一方、75-100 %区間($93 \pm 1\%$ - 100% MWS に相当) においては、Walk 条件が Run 条件に比較して炭水化物酸化量が有意に高値を示した(75 %; $p<0.05$ 、100 %; $p<0.001$)。

脂質酸化量の変化には、速度(男性; $p<0.001$ 、女性; $p<0.01$)と条件(男性; $p<0.01$ 、女性; $p<0.05$)の有意な主効果および相互作用(男女ともに $p<0.001$)が認められた。男性では、80-100 %区間($92 \pm 2\%$ - 100% MWS に相当)において、Walk 条件が Run 条件に比較して脂質酸化量が有意に低値を示した(80 %; $p<0.01$ 、100 %; $p<0.001$)。女性では、75-100 %区間($93 \pm 1\%$ - 100% MWS に相当)において、Walk 条件が Run 条件に比較して脂質酸化量が有意に低値を示した(75 %; $p<0.01$ 、100 %; $p<0.001$)。

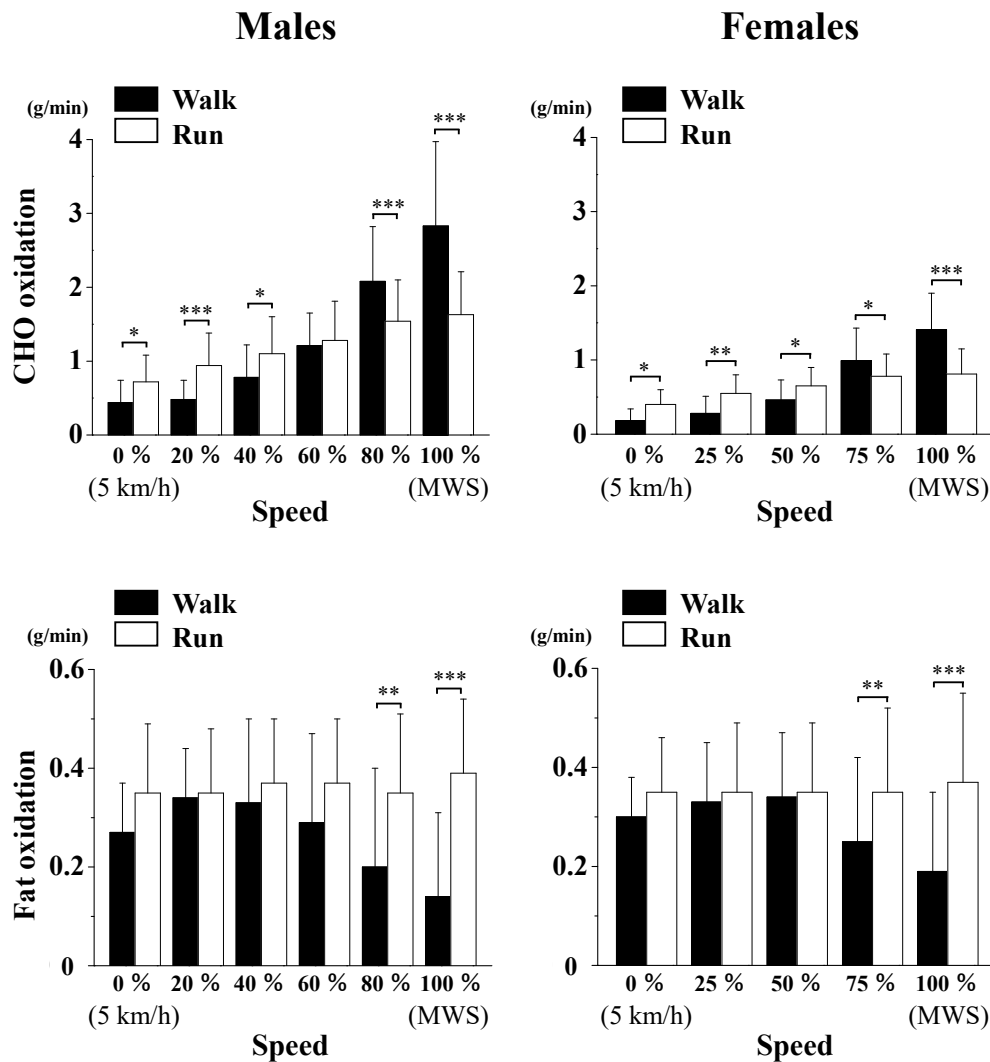


Figure 4. Comparisons of carbohydrate (CHO) oxidation and fat oxidation in males and females.

Values are means \pm SD. Significant difference between conditions. (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

(3) 心拍数(HR)および主観的運動強度(RPE)

Table 2 には、HR および RPE の変化を示した。HR には速度の有意な主効果(男女ともに $p < 0.001$)および交互作用(男女ともに $p < 0.001$)が認められたが、条件の主効果はみられなかった(男性; $p = 0.217$ 、女性; $p = 0.124$)。男性では、0–20%区間において、Walk 条件が Run 条件

に比較して HR が有意に低値を示した($57 \pm 5\%$ - $66 \pm 3\%$ MWS) (いずれも $p < 0.05$)。80 - 100 % 区間においては、Walk 条件が Run 条件に比較して HR が有意に高値を示した($92 \pm 2\%$ - 100% MWS に相当) (すべて $p < 0.001$)。女性では、0 - 50 % 区間($66 \pm 5\%$ - $83 \pm 3\%$ MWS)において、Run 条件よりも Walk 条件で HR が有意に低値を示した(0 %; $p < 0.001$ 、25 %; $p < 0.01$ 、50 %; $p < 0.05$)。

男性では、呼吸の RPE(RPE_{breath})の変化に、速度と条件の有意な主効果(いずれも $p < 0.001$)、および相互作用($p < 0.05$)が認められた。さらに、 RPE_{breath} は、すべての相対的な速度区間において、Walk 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した(0 %; $p < 0.05$ 、40 %、60 %; $p < 0.01$ 、その他すべて $p < 0.001$)。女性では、 RPE_{breath} には速度と条件の有意な主効果が認められたが(いずれも $p < 0.001$)、相互作用($p = 0.275$)は認められなかった。脚の RPE(RPE_{leg})の変化には、速度(男女ともに $p < 0.001$)と条件(男女ともに $p < 0.001$)の有意な主効果および交互作用(男女ともに $p < 0.001$)が認められた。男性では、すべての相対的な速度区間で Walk 条件が Run 条件に比較して RPE_{leg} が有意に高値を示した(0 %; $p < 0.05$ 、20 %; $p < 0.01$ 、その他すべて $p < 0.001$)。同様に女性でも、すべての相対的な速度区間において、Walk 条件が Run 条件に比較して RPE_{leg} は有意に高値を示した(0 %; $p < 0.05$ 、その他すべて $p < 0.001$)。

Table 2. Changes in HR and RPE.

Relative Speed		0%	20%	40%	60%	80%	100%	
		phase	phase	phase	phase	phase	phase	
		(5 km/h)					(MWS)	
Males								
Speed	(km/h)	5.0 ± 0.0	5.8 ± 0.3	6.5 ± 0.3	7.2 ± 0.4	8.0 ± 0.5	8.8 ± 0.7	
	(%MWS)	57 ± 5	66 ± 3	74 ± 3	83 ± 3	92 ± 2	100 ± 0	
HR (bpm)	Walk	105 ± 11 [*]	113 ± 14 [*]	123 ± 14	135 ± 15	152 ± 20 ^{***}	165 ± 20 ^{***}	
	Run	112 ± 9	120 ± 11	126 ± 12	132 ± 12	140 ± 14	142 ± 20	
RPE	breath	Walk	1.9 ± 0.8 [*]	2.4 ± 0.9 ^{***}	2.7 ± 0.9 ^{**}	3.3 ± 1.2 ^{**}	4.1 ± 1.5 ^{***}	4.8 ± 2.0 ^{***}
		Run	1.4 ± 0.6	1.6 ± 0.7	2.0 ± 0.8	2.6 ± 0.9	3.1 ± 0.9	3.4 ± 1.0
	leg	Walk	2.1 ± 0.5 [*]	2.6 ± 0.8 ^{**}	3.3 ± 1.0 ^{***}	3.9 ± 1.2 ^{***}	5.4 ± 1.6 ^{***}	6.4 ± 2.1 ^{***}
		Run	1.4 ± 0.5	1.8 ± 0.6	2.2 ± 0.7	2.4 ± 0.9	2.9 ± 1.1	3.4 ± 1.1
Females								
Speed	(km/h)	5.0 ± 0.0	5.8 ± 0.3	6.4 ± 0.3	7.1 ± 0.5	7.7 ± 0.6		
	(%MWS)	66 ± 5	75 ± 3	83 ± 3	93 ± 1	100 ± 0		
HR (bpm)	Walk	105 ± 12 ^{***}	115 ± 12 ^{**}	125 ± 15 [*]	146 ± 18	152 ± 18		
	Run	121 ± 16	129 ± 16	135 ± 16	140 ± 14	146 ± 14		
RPE	breath	Walk	2.3 ± 0.6 [*]	2.8 ± 0.7 ^{***}	3.2 ± 0.8 ^{**}	3.8 ± 0.8 ^{***}	4.4 ± 1.0 ^{***}	
		Run	1.7 ± 0.6	2.0 ± 0.5	2.4 ± 0.6	2.9 ± 0.7	3.4 ± 0.7	
	leg	Walk	2.3 ± 0.6 [*]	3.1 ± 0.6 ^{***}	3.7 ± 0.7 ^{***}	4.9 ± 1.1 ^{***}	5.8 ± 1.5 ^{***}	
		Run	1.8 ± 0.6	2.1 ± 0.6	2.6 ± 0.7	3.1 ± 1.0	3.3 ± 1.0	

Values are means ± SD. (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

4. 考察

相対的な速度区間が 80–100% 区間(92 ± 2%MWS に相当)のウォーキングでは、同一速度でのランニングに比較して EE が高値を示すことが明らかになった。また、この傾向は男女で共通してみられ、明らかな性差は認められなかった。これらのことから、ウォーキング時の EE は速度の上昇に伴い急激に増え、同一の速度におけるランニング時を上回ることが示された。

Run 条件における EE は、速度の上昇に伴い直線的に増加した。しかしながら、Walk 条件の EE は、7.5 km/h 以上の速度域で顕著に増加した。Rotstein et al. (2005)は、PTS(ウォーキングからランニングへ自然と移行する速度)は、EOTS(ウォーキング時とランニング時における EE が均衡になる速度)に比較して有意に低いことを指摘した。一方、Rotstein et al. (2005)の研究では、ランニングに比較して EE が増加するウォーキングの速度を具体的に明示するには至らなかった。本研究課題において、Walk 条件の EE が Run 条件を上回る閾値は、男性で 60% 区間($83 \pm 3\%$ MWS に相当)、女性で 75% 区間($93 \pm 1\%$ MWS に相当)で認められた。また、この際の絶対的な速度は、男性では 8.0 ± 0.5 km/h、女性では 7.7 ± 0.6 km/h であった。興味深いことに、これらの速度は、PTS として過去に報告されているものと同程度であった(Mercier et al., 1994)。したがって、PTS を上回る速度域でウォーキングを実施した場合には、EE が急増するものと考えられる。Mercier et al. (1994)は、速度の上昇に伴いウォーキング時の EE が急速に増加する要因として、FW 時の歩幅が同程度の速度でのランニング時よりも長いことを指摘している。さらに、FW 時の上半身の前傾姿勢や姿勢制御に伴う筋活動によって同一の速度でのランニングに比較して EE が増加した可能性も考えられる。

運動時の炭水化物酸化量や脂質酸化量は、運動強度に強く影響される(Romijn et al., 1993)。一般に、ウォーキング時は脂肪利用が優先され、運動中および運動後の脂肪の酸化が促進される(Bogdanis et al., 2008)。しかしながら、本研究課題では、男性では 80 - 100% 区間($92 \pm 2\%$ - $100 \pm 0\%$ MWS に相当)、女性では 75 - 100% 区間($93 \pm 1\%$ - $100 \pm 0\%$ MWS 相当)において、Run 条件が Walk 条件に比較して炭水化物酸化量が有意に高値を示した。筋線維の動員パターンは筋の収縮速度と関連し、筋の収縮速度が遅い場合には遅筋線維の動員が、速い場合には速筋線維の動員がそれぞれ優位になる(Johnson et al., 1973)。本研究では、運動後に血中乳酸およびグルコース濃度を測定することはできなかったが、80% 区間以上の速いウ

ウォーキング速度($92 \pm 2\%$ MWS に相当)を用いることで、速筋線維の動員が増加し、糖代謝が亢進していたものと考えられる。

HR は、低速度域では Walk 条件が Run 条件に比較して低値を示したが、速度の上昇に伴い Walk 条件が Run 条件を上回る様相を示した。この様相は EE および炭水化物酸化量と類似し、エネルギー代謝とも関連していたと考えられる。このことは、同一速度であっても FW ではランニングに比較して心血管系への負荷が大きかったことを示唆しており、FW の特徴の一つとして考えられる。

研究課題 1 から得られた知見は、健康増進をねらいとした FW によるトレーニングプログラムの開発に有用であると考えられる。本研究課題では、機械的変数(ピッチ、歩幅、GRF など)を評価することはできなかったが、ウォーキング時ではいずれかの足が継続的に地面に接触しているため、ランニング時よりも GRF が小さくなると予想される。また、運動時(接地時)中の機械的ストレスが小さいことは、体力レベルが低い人や肥満の人、高齢者などの集団にとって好ましいと考えられる。MWS は年齢や体力レベルによって異なるが、本研究課題の結果から、 92% MWS 以上でのウォーキングが、同等の速度でのランニングに比べて EE を増加させる効果が大きいと考えられた。なお、2 型糖尿病の高齢者におけるインターバル FW によるトレーニングの有用性を検討した Karstoft et al. (2017)の研究では、 $89\% \dot{V}O_{2peak}$ での 3 分間の FW を行い、その後 $54\% \dot{V}O_{2peak}$ で 3 分間のウォーキングを行う(合計 10 回反復)運動プログラムを実施している。この際、FW 時の平均歩行速度は 6.0 ± 0.1 km/h であり、本研究課題で示された MWS の 92% での FW に匹敵する速度設定であったと推定される。

5. 結論

80%区間($92 \pm 2\%$ MWS に相当)以上の速度では、ウォーキング時の EE および炭水化物酸化量は、同一速度のランニング時に比較して大きいことが明らかになった。また、約 80 – 90 %MWS の速度では、同一速度でのランニングに比較して EE が亢進するため、FW によるトレーニング時の速度設定の方法として推奨されたと考えられた。

【研究課題 2】 FW 時の GRF および筋活動の特性

1. 緒言

研究課題 1 では、ウォーキング時の EE および炭水化物酸化量は、速度の上昇に伴い非線形的に増加することが示された。特に、男性では 8.0 km/h を超える速度でのウォーキングは、同一速度におけるランニングに比較して EE および炭水化物酸化量を増加させた。これまでに、FW 時の至適な運動強度(速度)は示されていなかったが、男女ともに、80%MWS を超えるような速度において、同一速度におけるランニングよりも EE および炭水化物酸化の亢進することを明らかにした。しかしながら、研究課題 1 では、FW 時の力学的変数について検討することができなかった。

FW 時の力学的変数と筋活動は、通常のウォーキングやランニングと異なると考えられる。また、これらは長期のトレーニングに対する筋適応とも関連すると推察される。17 週間または 5 ヶ月間のインターバル FW は、膝の伸筋と屈筋の筋力を増加させることが報告されている(Okazaki et al., 2013; Ozaki et al., 2019)。その一方、Kubo et al. (2008)の研究では、6 ヶ月間の通常ウォーキングが膝関節の屈曲筋力を増加させたが、伸展筋力の有意な増加は認められなかった。つまり、FW によるトレーニングに対する筋適応は、通常速度でのウォーキングと同様ではないと考えられる。

研究課題 1 において、FW 時の EE が同一速度でランニング時を上回ったことを踏まえると、FW 時とランニング時の前後方向における GRF や下肢筋群の活動レベルは異なると推察される。Young-Hui and Rodger(1999)は、ランニング時における EE の増加は、前後方向における GRF の力積の増大が要因であると指摘している。一方、鉛直方向における GRF は速度の上昇に比例して大きくなり、U 字カーブとなるような変化を示す。また、鉛直方向に

における GRF が最も低くなる速度は個人によって異なる(Masani et al., 2002)。さらに、ウォーキングでは速度の上昇に伴い、ピッチおよびストライドは増加する(Bovi et al., 2011)。その一方、ランニング時の鉛直方向における GRF は速度の上昇に比例して、直線的に増加する(Keller et al., 1996)。さらに、ウォーキング時に比較してランニング時は速度の上昇に伴うピッチの増加が少なく、主にストライドの増加により速度を増加させる(Hansen et al., 2017)、つまり、ウォーキング時とランニング時では速度上昇に対するキネティクスおよびキネティクスの戦略が異なると考えられる。そのため、FW、通常ウォーキング、FW と同一速度でのランニング時の力学的な変数を比較することは有意義であろう。

そこで研究課題 2 では、FW 時と同一速度におけるランニング時の GRF および下肢筋群の筋活動を比較することを目的とした。本研究課題では、両足支持期を有する FW 時は滞空期を有するランニングと比べて GRF が小さいという仮説を設けた。また、ウォーキングでは速度上昇に伴いストライドおよびピッチが増加することを踏まえ、FW 時には下肢筋群の筋活動が、加速局面で亢進し、ストレッチ - ショートニング サイクル(SSC)を利用するランニング時ではブレーキ局面で亢進することを予想した。

2. 方法

(1) 被験者

外科的既往歴や外傷性疾患のない成人男子学生 8 名(平均値 \pm 標準偏差: 年齢 22 ± 1 歳、身長 172.1 ± 1.7 cm、体重 62.1 ± 7.0 kg)を被験者とした。全ての被験者に対して、本研究課題の目的および方法、危険性について書面と口頭で説明した上で参加の同意を得た。なお、本研究は、立命館大学人を対象とする医学系研究倫理審査委員会により承認を得て実施した。

(2) 研究デザイン

● 最高歩行速度(MWS)

被験者はトレッドミル(E95Ta; Life Fitness, 東京, 日本)を用いて、時速 4.0 km で歩行を開始した。その後、毎分 0.5 km/h ずつ速度を漸増し、規定のフォームでのウォーキングが維持できなくなった時点で運動を終了した。規定のフォームによるウォーキングの定義は、研究課題 1 と同一とした。また、規定のフォームでの最終ステージでの速度を MWS と定義した。

● 本測定

フォースプレート内蔵トレッドミル(HPT-2200D; Tec Gihan Co., Ltd., 京都, 日本)を用いて、45 %MWS で 4 分間のウォーキング(SW)条件を実施した後、85 %MWS で 4 分間のランニング(Run)条件またはファストウォーキング(FW)条件を実施した。なお研究課題 1 により、通常歩行速度は 45 %MWS に相当すると推定されたことから、SW 条件ではこの速度(強度)を用いた。また、ウォーキング時とランニング時における EE が同程度となる速度は MWS の 83 – 93 %の速度域で出現することが明らかにされたため、FW 条件の速度(強度)として 85%MWS を用いた。各条件間には 3 分間の休息時間を設けた。実施順序による影響を排除するために、はじめに SW 条件を実施し、その後の Run 条件と FW 条件はランダムに実施した。各条件の運動中には、GRF、表面筋電図(EMG)、HR、RPE を評価した。被験者は、少なくとも 24 時間前から激しい運動およびカフェインとアルコールの摂取を、2 時間前からは一切の食事を避けた(水の摂取のみ認めた)。

(3) 測定項目

- 地面反力(GRF)および表面筋電図(EMG)

2 枚のフォースプレートを備えたデュアルベルトトレッドミル(HPT-2200D; Tec Gihan Co., Ltd., 京都, 日本)を用いて、各運動中の GRF を測定した。記録した鉛直方向および前後方向における GRF はそれぞれ 40 Hz および 60 Hz のバターワース型ローパスフィルタでフィルタ処理をした。GRF のデータは、鉛直成分と前後成分を分析対象とし、鉛直方向における GRF の 50 N を閾値とした。また、足が接地してから離地するまでを接地局面、足が接地してからブレーキ成分と加速成分が入れ替わるまでをブレーキ局面、入れ替わってから足が離地するまでを加速局面をそれぞれ定義した。得られた値は被験者間で比較するために、体重で除して正規化を行った(%BW)。

EMG は表面電位計測装置(SX230-1000, Biometrics, Gwent. UK)を用いて、筋腹へ表面電極を貼付し、双極誘導法により導出した。被験筋は右下肢の大殿筋(gluteus maximus muscle; GM)、大腿直筋(rectus femoris muscle; RF)、大腿二頭筋(biceps femoris long muscle; BFL)、外側広筋(vastus lateralis muscle; VL)、内側腓腹筋(gastrocnemius medialis muscle; MG)、ヒラメ筋(soleus muscle; SOL)および前脛骨筋(tibialis anterior muscle; TA)とした。電極を貼付する際、アーティファクトを取り除くため、電極貼付部位の角質を削り取り、アルコール消毒を行った。各筋の電極貼付位置は、SENIAM プロジェクトガイドライン(Hermens et al., 2000)の推奨に従って設定し、テスト手技による EMG 反応によって適正であることを確認した。EMG のデータは、20 – 450 Hz のバターワース型バンドパスフィルタでフィルタ処理した後に全波整流し、60 Hz のバターワース型ローパスフィルタ処理を行った。その後、安定した 10 ステップを抽出し、EMG 波形を加算平均し、筋活動波形を算出した。得られた筋活動波形データから、各局面における平均振幅値(aEMG)を算出した。被験者間で比較するために、

MVC 時の筋活動で正規化を行った(%MVC)。

GRF と EMG は、16 ビットアナログ/デジタル変換器(LabChart; AD Instruments, Sydney, Australia)を備えたデータ収集・分析システム(PowerLab/16SP; AD Instruments, Sydney, Australia)を用いて、サンプリング周波数 1 kHz で記録された。

- 心拍数(HR)と主観的運動強度(RPE)

ワイヤレス HR モニタ(RCX5; Polar Electro, Kempele, Finland)を用いて、各条件での運動中に HR を連続的に計測した。また、関連する先行研究との比較のために 10 段階のボルグスケールを用いて(Chiu et al., 2007)、各速度終了時に運動中における呼吸および脚の RPE を評価した(Christian et al., 2014)。

(4) 統計解析

すべての結果は平均値(mean)± 標準偏差(SD)で示した。対応のある一元配置の ANOVA を行い、主効果の有意性が認められた場合には、Tukey 法による多重比較を行った。すべての統計処理において 5 %水準未満をもって有意と判定した。

3. 結果

(1) 地面反力(GRF)

Figure 5 には、前後方向における GRF の平均力および力積を示した。ブレーキ局面における平均力は、FW 条件が SW 条件および Run 条件に比較して有意に高値を示し(SW; $p < 0.001$ 、Run; $p < 0.01$)、Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p < 0.05$)。加速局面における平均力は、FW 条件が SW 条件および Run 条件に比較して有意に高値を示した(ともに

p<0.001)。ブレーキ局面における力積は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に低値を示した(SW; p<0.01、FW; p<0.001)。加速局面における力積は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に低値を示した(SW; p<0.01、FW; p<0.001)。

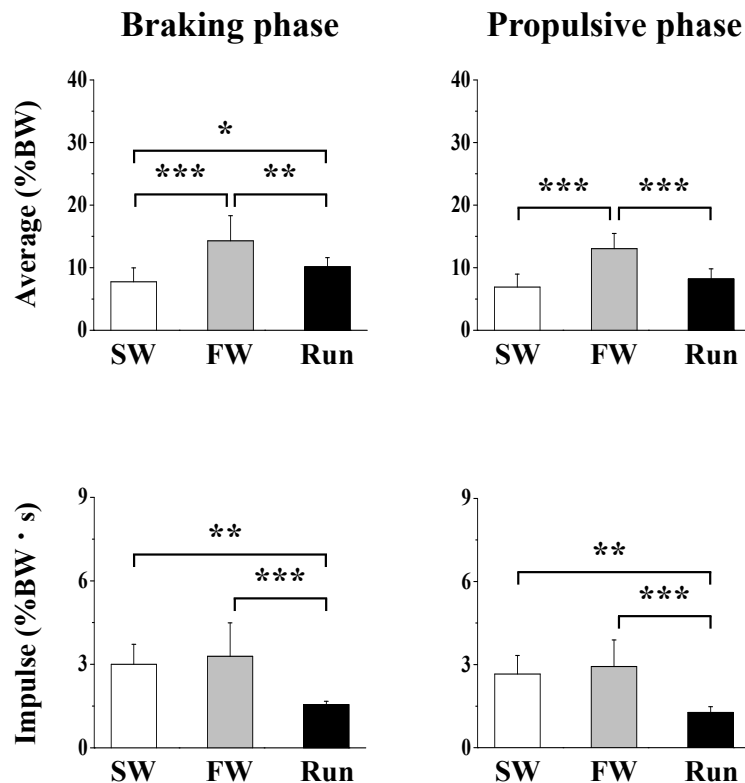


Figure 5. Anterior-posterior component of ground reaction force.

Values are means \pm SD. Significant difference between trials (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$). SW; Slow walk trial. FW; Fast walk trial. Run; Run trial.

Figure 6 には、垂直方向における GRF のピーク値、平均力および力積を示した。ピーク値は、FW 条件および Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示し(ともに $p<0.001$)、Run 条件が FW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.001$)。同様に平均力でも、FW 条件および Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示し(FW; $p<0.05$ 、Run; $p<0.001$)、Run 条件が FW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.01$)。力積は、FW 条件および Run 条件が SW

条件に比較して有意に低値を示し(ともに $p < 0.001$)、Run 条件が FW 条件に比較して有意に低値を示した($p < 0.05$)。

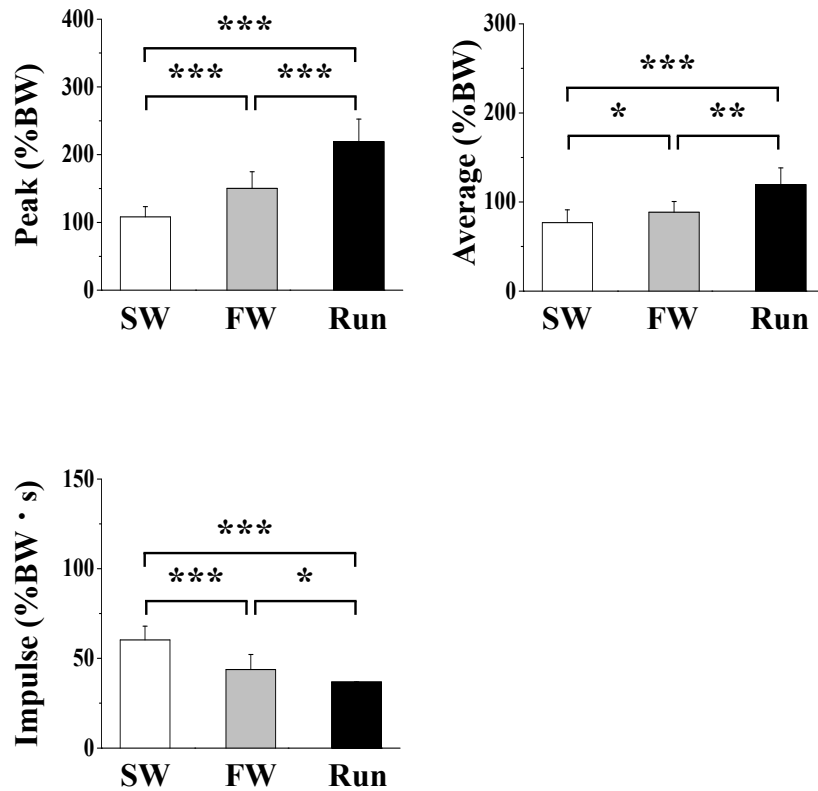


Figure 6. Vertical component of ground reaction force.

Values are means \pm SD. Significant difference between trials (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$). SW; Slow walk trial. FW; Fast walk trial. Run; Run trial.

(2) 表面筋電図(EMG)

Figure 7 には、接地局面、ブレーキ局面および加速局面における GM、BFL、RF、VL の aEMG を示した。接地局面における GM の aEMG は、Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p < 0.01$)。ブレーキ局面における GM の aEMG は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に高値を示し(SW; $p < 0.001$ 、FW; $p < 0.05$)、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p < 0.05$)。接地局面における BFL の aEMG は、Run 条件が SW

条件および FW 条件に比較して有意に高値を示し(SW; $p<0.001$ 、FW; $p<0.05$)、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.01$)。ブレーキ局面における BFL の aEMG は、FW 条件および Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した(FW; $p<0.01$ 、Run; $p<0.001$)。加速局面における BFL の aEMG は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に高値を示した(SW; $p<0.001$ 、FW; $p<0.01$)。接地局面における RF の aEMG は、FW 条件および Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した(FW; $p<0.05$ 、Run; $p<0.01$)。ブレーキ局面における RF の aEMG は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に高値を示し(SW; $p<0.001$ 、FW; $p<0.05$)、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.05$)。接地局面における VL の aEMG は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に高値を示し(ともに $p<0.001$)、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.01$)。ブレーキ局面における VL の aEMG は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に高値を示し(ともに $p<0.001$)、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.05$)。

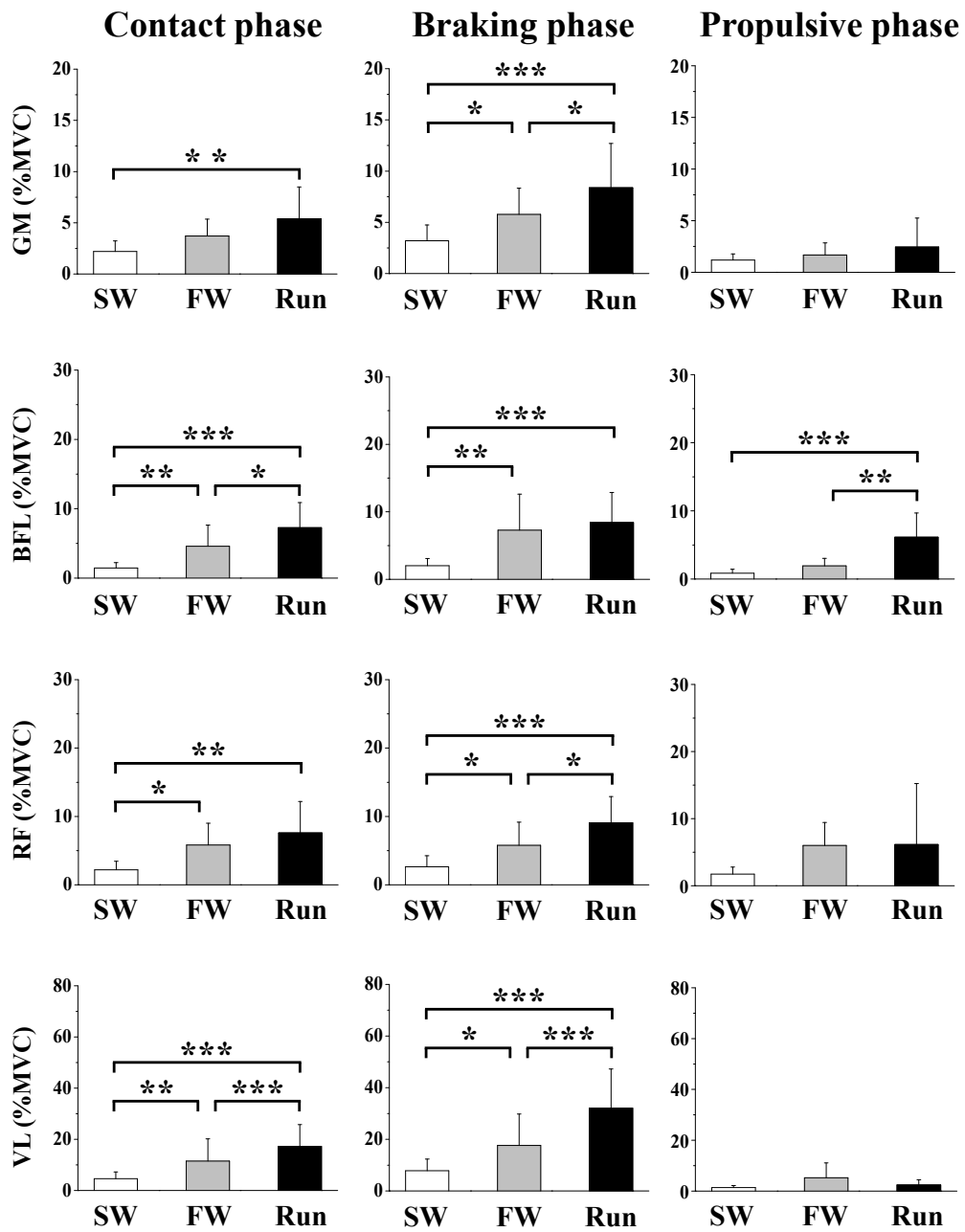


Figure 7. Averaged surface electromyography (aEMG).

Values are means \pm SD. Significant difference between trials (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$). SW; Slow walk trial. FW; Fast walk trial. Run; Run trial. GM; Gluteus maximus muscle, BF; Biceps femoris muscle, RF; Rectus femoris muscle, VL; Vastus lateralis muscle.

Figure 8 には、接地局面、ブレーキ局面および加速局面における MG、SOL および TA の aEMG を示した。接地局面における MG の aEMG は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に高値を示し(SW; $p < 0.001$ 、FW; $p < 0.01$)、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p < 0.05$)。ブレーキ局面における MG の aEMG は、Run 条件が FW 条件および SW 条件に比較して有意に高値を示した(ともに $p < 0.001$)。加速局面における MG の aEMG は、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p < 0.05$)。接地局面における SOL の aEMG は、Run 条件および FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した(ともに $p < 0.001$)。ブレーキ局面における SOL の aEMG は、Run 条件が SW 条件および FW 条件に比較して有意に高値を示した(ともに $p < 0.001$)。加速局面における SOL の aEMG は、FW 条件が SW 条件および Run 条件に比較して有意に高値を示した(ともに $p < 0.001$)。すべての局面における TA の aEMG は、FW 条件が SW 条件および Run 条件に比較して有意に高値を示した(接地局面; ともに $p < 0.001$ 、ブレーキ局面; ともに $p < 0.01$ 、加速局面; ともに $p < 0.001$)。

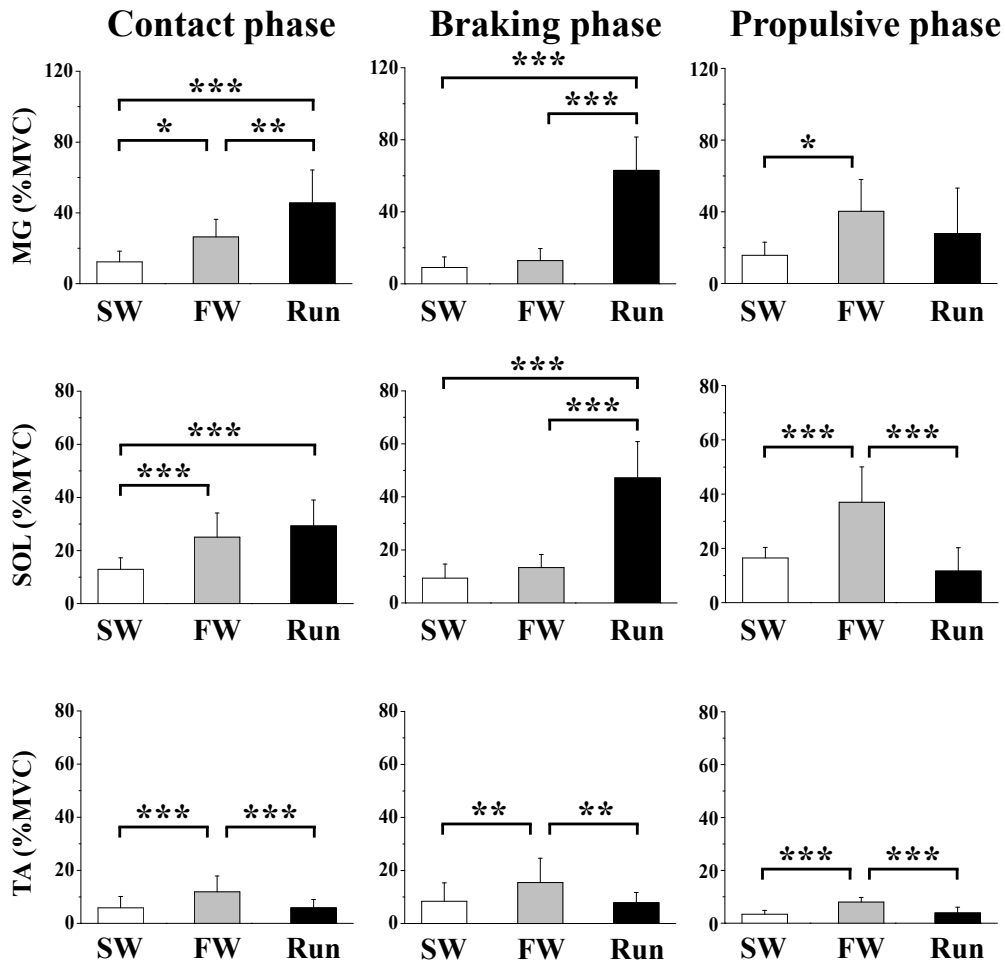


Figure 8. Averaged surface electromyography (aEMG).

Values are means \pm SD. Significant difference between trials (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$). SW; Slow walk trial. FW; Fast walk trial. Run; Run trial. MG; Gastrocnemius medialis muscle, SOL; Soleus muscle, TA; Tibialis anterior muscle.

(3) 心拍数(HR)と主観的運動強度(RPE)

HR は、FW 条件および Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示したが(いずれも $p < 0.001$)、FW 条件と Run 条件では有意差は認められなかった。呼吸における RPE(RPE_{breath}) は、FW 条件および Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示したが(FW; $p < 0.001$ 、Run; $p < 0.01$)、FW 条件と Run 条件で有意差は認められなかった。脚における RPE(RPE_{leg})は、FW 条件が SW 条件および Run 条件に比較して有意に高値を示し(SW 条件; $p < 0.001$ 、Run 条

件; $p < 0.01$)、Run 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した($p < 0.001$)。

4. 考察

本研究課題では、FW 時と同一速度におけるランニング時の GRF と下肢筋群の筋活動を比較した。その結果、前後方向における GRF は FW 条件が Run 条件に比べ高値を、鉛直方向における GRF は Run 条件が FW 条件に比べ高値を示した。さらに、ブレーキ局面における筋活動は Run 条件が FW 条件に比べ高値を、加速局面においては FW 条件が Run 条件に比べ高値を示した。これらの結果から、FW は同一速度でのランニングと比較して、接地衝撃時の機械的ストレスが小さいこと、特に加速局面において筋活動が亢進すること示された。

研究課題 1 では、8.0 km/h 以上の FW 時はランニング時に比較して EE の大きいことが明らかになった。Young-Hui and Rodger (1999)は、ランニング時における EE の増加は、前後方向における GRF の力積の増加が要因であると指摘している。本研究課題では、FW 条件および SW 条件の前後方向における力積は同程度であり、いずれも Run 条件に比較して大きかった。また、鉛直方向における平均力は FW 条件が Run 条件および SW 条件に比べて有意に高値を示した。鉛直方向における平均力の増加は、ランニング時における EE の増加と関連していることが報告されている(Taylor et al., 1980; Farley et al., 1992)。研究課題 1 では、80 %MWS 以上の FW 時における EE は同一速度でのランニング時に比べて高値を示した。本研究課題では、前後方向における GRF の平均力は FW 条件が Run 条件に比べて高値を、鉛直方向における GRF の平均力は Run 条件が FW 条件に比べて高値を示した。これらの結果から、FW とランニングでは、速度の上昇に伴う EE の増加の要因は異なり、FW 時の EE の増加は、おもに前後方向における GRF の平均力の増加と関連しているものと考えられた。

研究課題 1 では、ウォーキング時の EE と炭水化物酸化量は速度上昇に伴い非線形的に増加することが認められた。GM における筋活動のピークは、足が地面へ接地したタイミングで出現する(Gazendam and Hof, 2007)。本研究課題において、ブレーキ局面における GM、RF および VL の aEMG は、Run 条件が FW 条件に比較して有意に高値を、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した。加えて、ブレーキ局面におけるこれらの筋群における aEMG は、鉛直方向における GRF の平均力と類似した傾向を示した。また、ランニング時ではブレーキ局面において接地時の衝撃により下肢関節が屈曲し、加速局面で伸展する。そのため、弾性エネルギーの貯蔵と放出により、力学的なエネルギーの交換が行われる(Cavagna, 1977)。これらのことから、Run 条件では、GM、RF および VL が接地の衝撃に対して筋活動が増加したものと考えられる。

Gazendam and Hof (2007)は、ウォーキング時およびランニング時の EMG の様相にはハムストリングでの差は少ないが、下腿の筋群では大きな違いがあることを報告している。本研究課題において、ブレーキ局面における MG および SOL の aEMG は、Run 条件がウォーキング条件(SW 条件および FW 条件)に比較して有意に高値を示した。しかしながら、加速局面における MG の aEMG は、FW 条件が SW 条件に比較して有意に高値を示した。また、加速局面における SOL の aEMG は、FW 条件が SW 条件および Run 条件に比較して有意に高値を示した。単関節筋である SOL は、SSC 中に主に力発揮または荷重伝達として機能し、二関節筋の MG は細かい腱のひずみを調整する役割を果たす(Ishikawa and Komi, 2008)。そのため、ブレーキ局面における aEMG では SOL の筋活動が亢進したと考えられる。さらに、加速局面での前後方向における GRF の力積および平均力は、FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した。加速局面における足関節底屈筋の力発揮は、主に前後方向における GRF に影響し(Anderson and Pandey, 2003; Neptune et al., 2004)、足関節の可動域は歩行速

度の上昇に伴い増加する(Sun et al., 2018)。これに伴い、MG および SOL の収縮速度も増加するが、SOL は単関節筋であるのに対し、MG は二関節筋で自然長が相対的に長いため、筋の力 - 長さ関係からより大きな力発揮が必要となる(Neptune and Sasaki, 2004)。これらの結果から、速度の上昇に伴うウォーキング時の EE の増加には、足関節底屈筋群が地面を蹴り出す際の筋活動の亢進が関係していると考えられた。また、本研究課題において、FW 条件における TA の aEMG の増加は、足関節を背屈位に維持し、足関節の安定性の向上に貢献していたと推察された(Mian et al., 2006)。

本研究課題では、研究課題 1 をもとに MWS を用いて歩行速度を相対的に決定した。その結果、FW およびランニング時の HR に有意差は認められなかった。一方で、RPE は、FW 時がランニング時に比較して有意に高値を示し、この結果は研究課題 1 と同様であった。また、TA では、ブレーキ局面および加速局面いずれにおいても、FW 時の aEMG はランニング時よりも高値を示した。これらの結果も、FW の負荷特性を示すものと考えられる。

5. 結論

FW では、同一速度でのランニングに比較して鉛直方向における GRF が有意に低値を示した。また、下肢の平均筋活動(GM、RF、SOL)は、FW とランニングで同程度であった。しかしながら、下肢筋の活動パターンは、同一の速度であっても FW とランニングで異なる様相を示した。ランニングでは、主にブレーキ局面において TA を除くすべての筋が活動し、FW では、主に加速局面において SOL の筋活動が増加した。これらの結果から、FW 時は同一速度でのランニング時に比較してメカニカルストレスが小さく、特に加速局面において下腿筋群の筋活動の亢進することが明らかとなった。

【研究課題3】 インターバルFW に対する糖・脂質代謝および内分泌応答の特性

1. 緒言

研究課題1および2では、FW時のEE、GRFおよび筋活動を同一速度でのランニングと比較した。その結果、研究課題1では、ウォーキング時のEEおよび炭水化物酸化量が、速度の上昇に伴い非線形的に増加することが示された。特に、男性では8.0 km/hを超える速度でのウォーキングは、同程度の速度におけるランニングと比較してEEおよび炭水化物酸化量を増加させた。次いで、研究課題2では、FW時には鉛直方向におけるGRFが同一速度でのランニング時と比較して小さく、前後方向におけるGRFは大きいことが示された。また、下肢筋群の活動パターンがFWと同一速度でのランニングで異なることが示され、ランニング時は主に接地時の衝撃に応じて筋が活動し、FW時では推進力の獲得に応じてヒラメ筋の筋活動が増加していると考えられた。

FWやインターバルFWによるトレーニングに伴う体組成の改善(Karstoft et al., 2013)やインスリン感受性の改善(Morikawa et al., 2009)などの効果が報告されている一方で、これらの要因は明確にされていない。この際には、一過性のFWやインターバルFWに対する脂肪分解や糖代謝・脂質代謝に関連した内分泌応答を検討することが必要である。また、FWでは、鉛直方向におけるGRFのピーク値が同一速度でのランニングに比較して低値を示した(研究課題2)。ランニング時では、FW時に比較してブレーキ局面におけるaEMGが高値を示した。つまり、接地時における身体への衝撃はランニング時がFW時に比較して大きいことを示唆している。なお、ランニングの接地時に生じる下肢への繰り返しの負荷は、障害リスクとも関連することから(Burr et al., 1990; Grimston et al., 1991; Zifchock et al., 2006; Nielsen et al., 2013)、FWに伴う運動誘発性の筋損傷や炎症の程度はランニングに比較して軽度であ

ると考えられる。

そこで研究課題 3 では、FW とランニングの糖・脂質代謝、内分泌応答、筋損傷や炎症応答を比較することを目的とした。本研究課題では、FW ではランニングと比較して糖代謝が亢進し、溶血の程度や筋損傷の程度は抑制されるという仮説を設けた。

2. 方法

(1) 被験者

外科的既往歴や外傷性疾患のない健康な成人男性 9 名(平均値 ± 標準偏差: 年齢 24 ± 2 歳、身長 168.2 ± 4.0 cm、体重 62.7 ± 8.0 kg)を被験者とした。全ての被験者に対して、本研究の目的および方法、危険性について書面と口頭で説明した上で参加の同意を得た。なお、本研究は、立命館大学人を対象とする医学系研究倫理審査委員会により承認を得て実施した。

(2) 研究デザイン

被験者は、実験期間を通して 4 回実験室へ来室した。1 回目および 2 回目の来室時(事前測定)に、トレッドミル(E95Ta; Life Fitness, 東京, 日本)を用いて MWS を評価し、運動強度を決定した。3 回目および 4 回目の来室時(本測定)では、ファストウォーキング(FW)条件またはランニング(Run)条件での本測定を実施した。本測定における各条件の実施順序はランダムとした。被験者は、24 時間前から激しい運動およびカフェインとアルコールの摂取を、前日の 20 時以降からは一切の食事を避け(水の摂取のみ認めた)、絶食の状態測定に臨んだ。

FW 条件では、40%MWS で 2 分間のウォーキングと 80-95%MWS で 3 分間の FW を 1

セットとし、合計 8 セット実施した(40 分間の運動)。Run 条件では、FW 条件と同一速度で 40 分間のランニングを実施した。各運動中には、エネルギー代謝指標(EE、炭水化物酸化量、脂肪酸酸化量)、HR および RPE を評価した。さらに、運動開始前(Pre)、終了直後(Post)および運動終了 1 時間後(P1)に採血し、血液指標の変化を評価した。

(3) 測定項目および方法

事前測定

- 最高歩行速度(MWS)

トレッドミル(E95Ta; Life Fitness, 東京, 日本)を用いて、時速 6.0 km からウォーキングを開始した。その後、時速 8.0 km までは毎分 1.0 km/h、以降は毎分 0.5 km/h ずつ速度を漸増させ、規定のフォームでの運動が維持できなくなった時点で終了した。ウォーキングの定義は、研究課題 1 および 2 と同一とした。また、規定のフォームによるウォーキングの最高速度を MWS と定義した。

- 本測定における速度の算出

被験者は 90 %MWS で 3 分間のウォーキングを行い、RPE が 5 – 7(0 – 10 スケールで評価)、HR が 150 – 170 bpm の範囲に含まれるか否かを評価した。範囲外の場合は、適切な範囲に含まれるよう歩行速度を 5%増減させた。さらに、十分な休息を設けた後に、3 セットの FW を実施し、歩行速度を個々に決定した。なお、これらは MWS の測定日とは異なる日に実施した。

(3) 本測定

● 血液指標

被験者は前日の夕食以降、絶食の状態に来室した。採血は前腕静脈から実施し、Pre(運動開始前)、Post(運動終了直後)および、P1(運動終了1時間後)の3回実施した。採取した血液から、血中グルコース、乳酸、血清ハプトグロビン、ミオグロビン(Mb)、GH、グリセロール濃度を測定した。

採取した血液は4℃、3000 rpm で10分間の遠心分離し、血清を得た。得られた血清は、解析までの間、-80℃の超低温冷凍庫内で保存した。血中グルコース濃度および乳酸濃度は、グルコース分析装置(Freestyle, Nipro Corporation, 大阪, 日本)、乳酸分析装置(Lactate Pro, Arkray, Inc., 京都, 日本)を用いて採血後直ちに測定した。血清ハプトグロビン、Mb、およびGH濃度の測定は、臨床検査会社(株式会社エスアールエル)に委託した。血清グリセロール濃度の測定には、市販のキット(Cayman Chemical, Ann Arbor, MI, USA)による酵素測定免疫法を用いた。また、血清グリセロール濃度の測定はすべてのポイントで2回実施し(2重測定)、得られた値の平均値を代表値として用いた。血清 Mb およびハプトグロビン濃度においては、運動に伴う上昇の程度を条件間で比較するために、運動後における最高値を Pre に対する相対値(%)として算出した。それぞれのアッセイ内における変動係数は、ハプトグロビン; 3.20%、Mb; 2.32%、GH; 1.22%、グリセロール; 1.58%であった。

● エネルギー代謝指標

運動中には、代謝分析測定装置(AE-300S; ミナト医科学株式会社, 大阪, 日本)を用いて、 $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ を breath-by-breath 法にて評価した。測定前には、 O_2 センサと CO_2 センサは既知濃度のガスを用いて校正し、換気センサは2Lシリンジを用いて校正した。

運動中の EE は Weir (1949)の式から算出した。

$$EE \text{ (kcal/min)} = 3.9 \times \dot{V}O_2 \text{ (L/min)} + 1.1 \times \dot{V}CO_2 \text{ (L/min)}$$

炭水化物酸化量および脂質酸化量は、Jeukendrup and Wallis (2005)の式を用いて算出した。

$$\text{炭水化物酸化量 (g/min)} = 4.210 \times \dot{V}CO_2 - 2.962 \times \dot{V}O_2$$

$$\text{脂質酸化量 (g/min)} = 1.695 \times \dot{V}O_2 - 1.701 \times \dot{V}CO_2$$

- 心拍数(HR)と主観的運動強度(RPE)

ワイヤレス HR モニタ(RCX5; Polar Electro, Kempele, Finland)を用いて、各条件で連続的に HR を 1 秒毎に計測した。関連する先行研究との比較のために 10 段階のボルグスケールを用いて(Chiu et al., 2007)、各条件の運動中における呼吸および脚の RPE を 5 分毎に評価した(Christian et al., 2014)。

(4) 統計解析

すべての結果は平均値(mean) ± 標準偏差(SD)で示した。反復測定による二元配置の ANOVA を行い、各変数の主効果(時間および条件)または交互作用(時間 × 条件)に有意性が認められた場合には、Tukey 法による多重比較を行った。すべての統計処理において 5%水準未満をもって有意と判定した。

3. 結果

(1) 血中グルコースおよび乳酸濃度

Figure 9 には、血中グルコース濃度および乳酸濃度を示した。血中グルコース濃度には、

時間($p<0.001$)のみに有意な主効果が認められ、いずれの条件においても Post が Pre に比較して有意に低値を示した(FW; $p<0.001$ 、Run; $p<0.01$)。血中乳酸濃度には、時間($p<0.05$)と条件($p<0.01$)の有意な主効果、および有意な交互作用($p<0.05$)が認められた。FW 条件では、Post が Pre に比較して有意に高値を示したが($p<0.01$)、Run 条件では運動前後での有意差は認められなかった。また、Post では、FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.001$)。

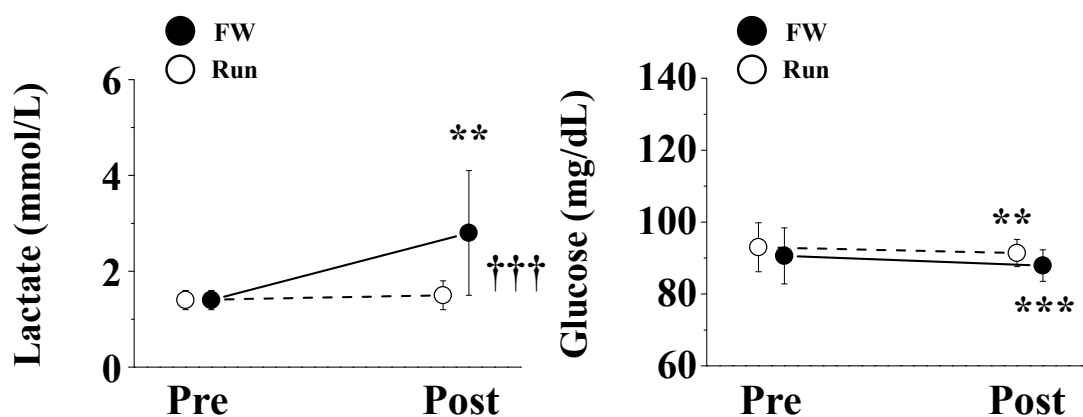


Figure 9. Changes in blood lactate and glucose concentrations.

Values are means \pm SD. Significant difference versus between Pre (** $p<0.01$, *** $p<0.001$). Significant difference between conditions (††† $p<0.001$).

(2) 血液指標

Figure 10 には、血清 GH、グリセロール、Mb およびハプトグロビン濃度を示した。血清 GH 濃度には、時間($p<0.01$)と条件($p<0.05$)の有意な主効果および交互作用($p<0.05$)が認められた。Run 条件では、Post が Pre に比較して有意に高値を示し($p<0.001$)、FW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.01$)。血清グリセロール濃度には、時間($p<0.001$)の有意な主効果および交互作用($p<0.01$)が認められた。両条件ともに、Post が Pre に比較して有意に高値を示し(FW; $p<0.05$ 、Run; $p<0.001$)、Run 条件が FW 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.001$)。

血清 Mb 濃度には、時間の有意な主効果のみが認められた($p<0.001$)。一方、運動による上昇の程度を増加率で比較した結果、FW 条件が Run 条件に比較して有意に低値を示した($p<0.05$)。血清ハプトグロビン濃度には、有意な主効果および交互作用は認められなかった。

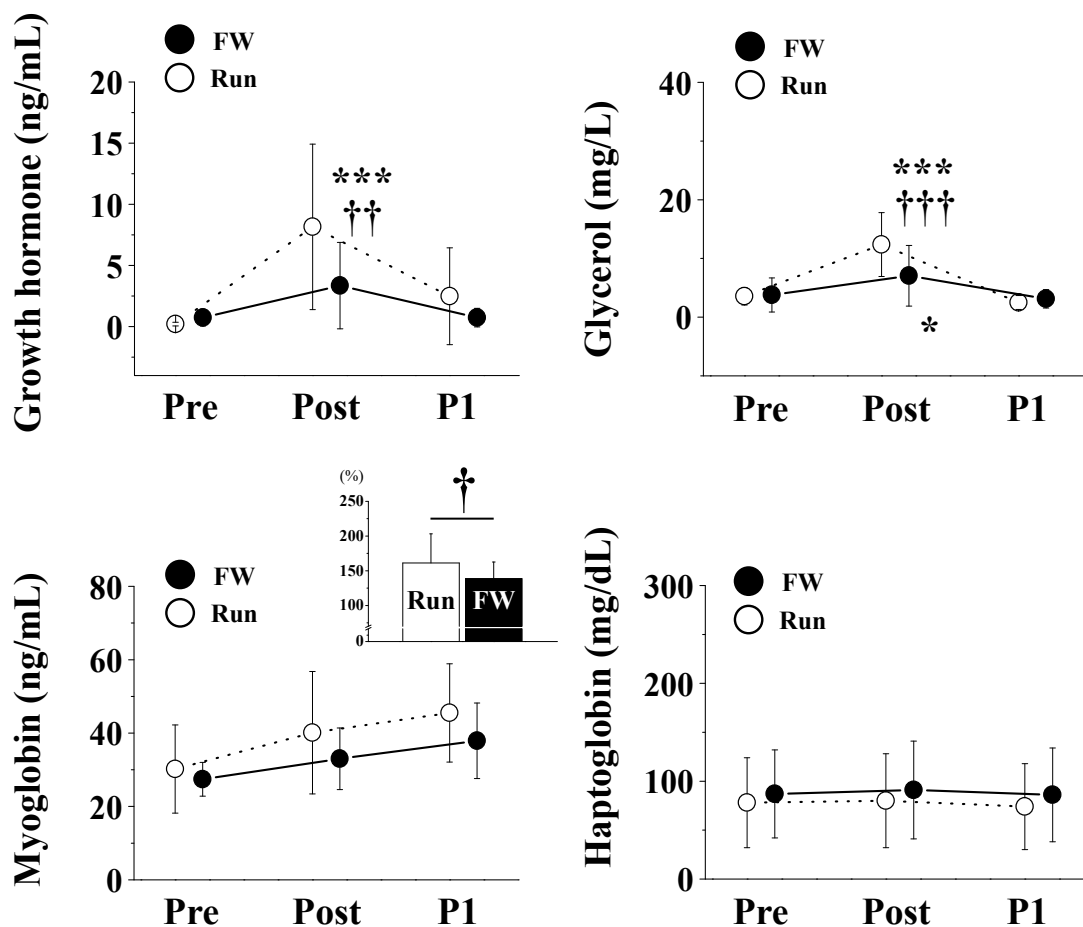


Figure 10. Changes in serum growth hormone, glycerol, myoglobin and haptoglobin concentrations.

Values are means \pm SD. Significant difference versus between Pre (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$). Significant difference between conditions († $p<0.05$, †† $p<0.01$, ††† $p<0.001$).

(4) エネルギー代謝指標

Figure 11 には、EE、炭水化物酸化量および脂質酸化量を示した。EE には、時間の有意な

主効果が認められた一方で($p<0.001$)、いずれの時点においても、条件間での有意差は認められなかった。炭水化物酸化量には、時間の有意な主効果($p<0.001$)および交互作用($p<0.001$)が認められた。運動開始 5 分においてのみ、FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.001$)。脂質酸化量には、時間の有意な主効果($p<0.001$)および交互作用($p<0.001$)が認められた。運動開始 5 分の時点においてのみ、FW 条件が Run 条件に比較して有意に低値を示した($p<0.05$)。

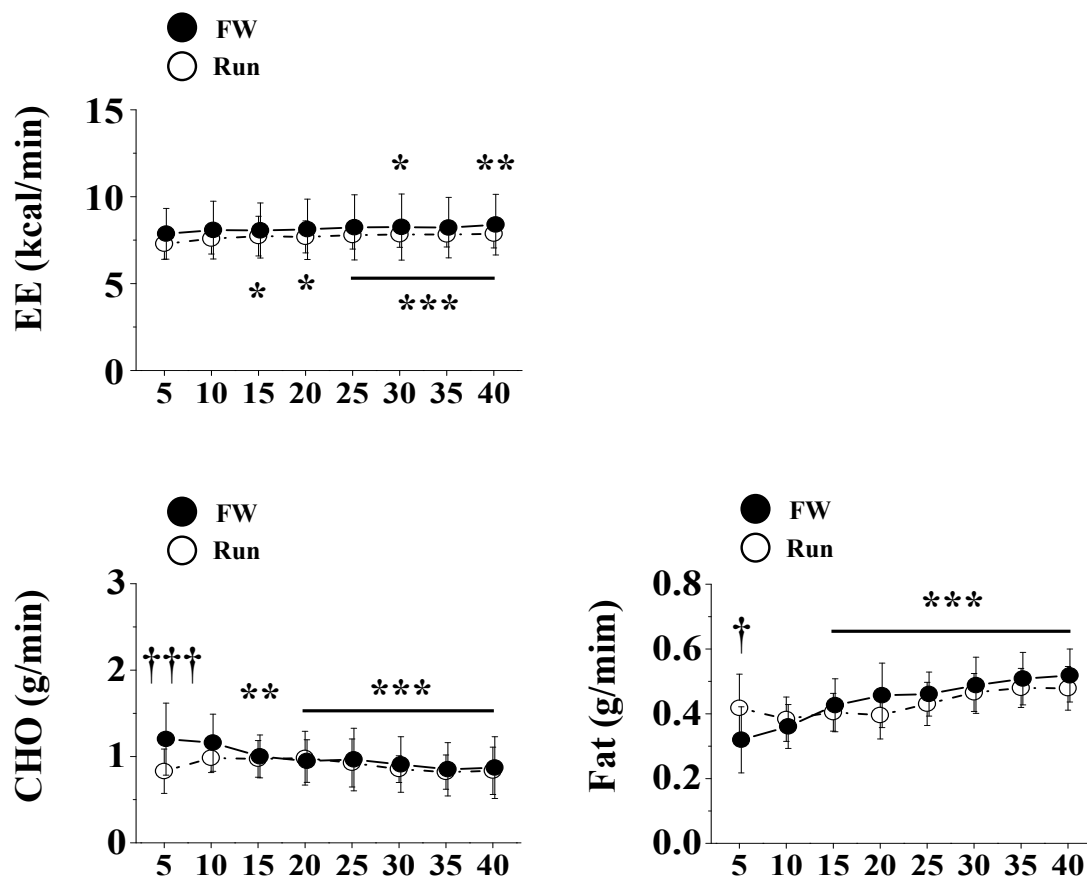


Figure 11. Comparisons of energy expenditure (EE), carbohydrate (CHO) oxidation and fat oxidation during each exercise.

Values are means \pm SD. Significant difference versus between Pre (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$). Significant difference between conditions (\dagger $p<0.05$, $\dagger\dagger$ $p<0.001$).

(3) 心拍数(HR)と主観的運動強度(RPE)

Figure 12 には、HR および RPE を示した。HR には、時間の有意な主効果($p<0.001$)および交互作用($p<0.05$)が認められた。運動開始 5 分から 20 分において、FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した($p<0.05$)。呼吸の RPE では、時間($p<0.001$)と条件($p<0.05$)の有意な主効果が認められた。運動開始 20 分から 40 分において、FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した(すべて $p<0.05$)。脚の RPE では、時間($p<0.001$)と条件($p<0.01$)の有意な主効果が認められた。また、すべての時点において、FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した(5 分; $p<0.05$ 、その他; $p<0.01$)。

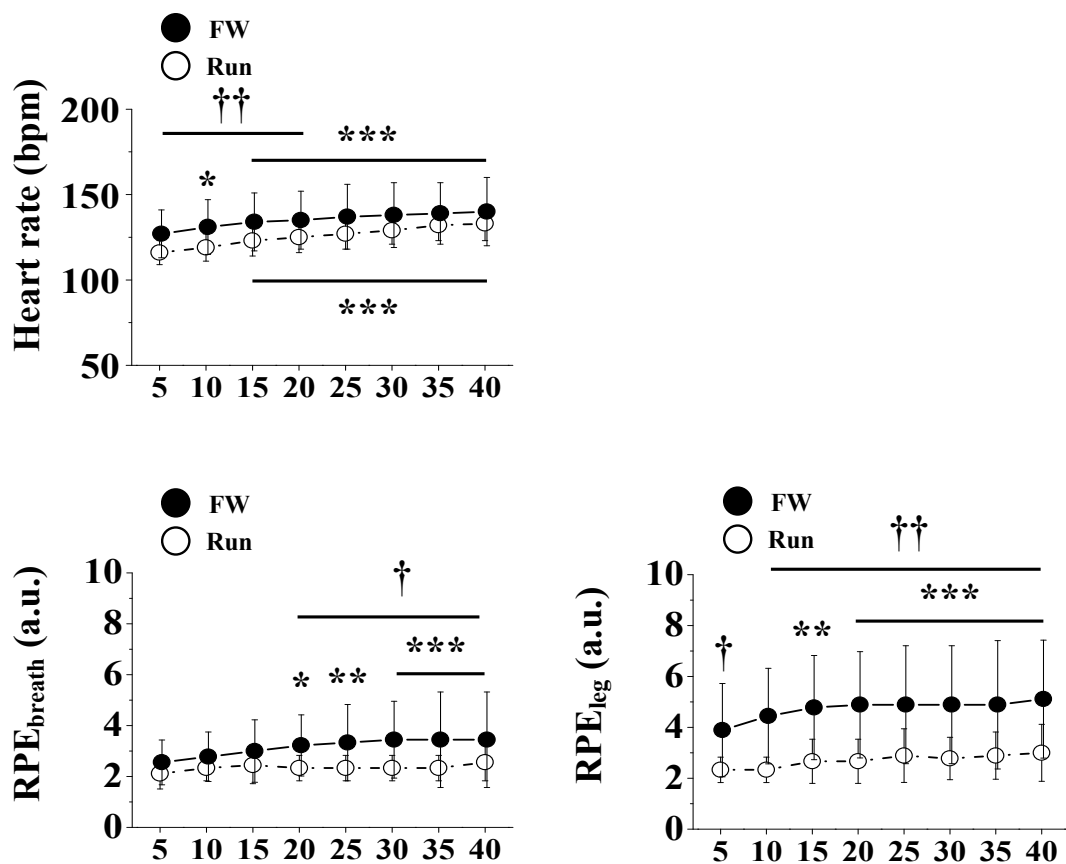


Figure 12. Changes in heart rate, rating of perceived exertion for breath and leg muscles (RPE) during each exercise.

Values are means \pm SD. Significant difference versus between Pre (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$). Significant difference between conditions (\dagger $p<0.05$, $\dagger\dagger$ $p<0.01$).

4. 考察

本研究課題では、FW とランニングに対する代謝・内分泌、筋損傷や炎症応答を比較した。その結果、FW では、ランニングと比較して糖代謝は亢進することが示された。また、FW ではランニングと比較して、筋損傷の程度は緩和されることが示された。一方で、運動に伴う GH の分泌応答や脂質分解の程度は FW において軽度であり、溶血の程度には条件間で差がみられなかった。

(1) 運動誘発性の代謝・内分泌応答

運動直後における血中乳酸濃度は、FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示した。一方で、血中グルコース濃度の変化に条件間での有意差は認められなかったが、運動前後で有意な低下がみられた。研究課題 2 において、FW では同一速度のランニングと比較して、加速局面における下腿の筋活動が亢進することが示された。そのため、FW ではランニングに比較して、糖の利用が亢進していた可能性が考えられる。一方で、本研究課題において、血中グルコース濃度の変化に条件間で差がみられなかったことから、FW においてみられた糖代謝の亢進はおもに筋グリコーゲンの利用の増加を反映し、血中グルコースの筋での取り込み・利用や肝臓からのグリコーゲン分解を大きく促進するものではなかったと推察される。

運動後の血清 GH 濃度は、Run 条件が FW 条件に比較して有意に高値を示した。運動誘発性の GH の分泌は、運動後における脂質分解を促進する(Wee et al., 2005)。そのため、FW はランニングに比較して脂質の分解が軽減される可能性が示された。また、運動直後の血清グリセロール濃度は、Run 条件が FW 条件に比較して有意に高値を示した。これらの結果から、運動誘発性の脂肪分解は、Run 条件が FW 条件に比較して亢進していたと考えられる。

一方、先述した通り、FW 条件では運動に伴う血中乳酸濃度の上昇が Run 条件に比較して有意に大きかったことから、筋グリコーゲンの利用が亢進したものと推察される。毎回の運動時における筋グリコーゲン利用の増加はクエン酸合成酵素活性やミトコンドリア新生、糖輸送担体タイプ 4 の発現を亢進させる生理的刺激となり (Burgomaster et al., 2005; Serpiello et al., 2012)、長期的には、骨格筋での脂肪の酸化能の向上に貢献する。また、運動時における筋グリコーゲン利用の増加はインスリン感受性を向上させる (Richter et al., 1982; Mackenzie et al., 2011)。したがって、本研究課題で認められた FW に伴う糖利用の亢進は、先行研究で報告された $\dot{V}O_{2peak}$ の向上 (Nemoto et al., 2007) やインスリン感受性の改善 (Karstoft et al., 2017) にも寄与していると予想される。

EE には条件間での有意差は認められなかったが、両条件とも、運動の経過に伴い増加した。また、炭水化物酸化量には、運動開始から 5 分の時点で FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示したが、その後、条件間での有意差はみられなかった。その一方で、脂質酸化量は運動開始から 5 分の時点で条件間に有意な差が認められたが、その後の時間帯で条件間での有意差はみられなかった。したがって、運送全体を通した炭水化物酸化量と脂質酸化量には、FW 条件と Run 条件の間で大きな差はないものと解釈できる。

(2) 溶血および筋損傷

研究課題 2 では、ランニング時は FW 時に比較して鉛直方向における GRF の平均値およびピーク値は有意に高値を示した。ランニングの接地時に生じる下肢への繰り返しの負荷は、障害リスクと関連している (Burr et al., 1990; Grimston et al., 1991)。これに関連して、Laughon et al. (2003) は、鉛直方向における GRF の軽減が障害リスクを軽減する可能性を指摘している。このことから、特に健康増進をねらいとした運動処方を実施する上では、鉛直

方向における GRF を軽減することが有効なアプローチであると推察される。また、ブレーキ局面における下肢筋群における筋活動は、ランニング時が FW 時に比較して BFL および TA を除くすべての筋で有意に高値を示した。ランニング時のブレーキ局面における筋活動の増加は、接地の衝撃に対する筋活動を反映していると考えられる。興味深いことに、運動前後における血清 Mb 濃度の増加率は、Run 条件が FW 条件に比較して有意に高値を示した。運動前後での血清 Mb 濃度の一過性の上昇は、運動誘発性の筋損傷の間接指標として広く用いられている(Clarkson and Hubal, 2002)。これらの結果から、FW はランニングに比較して運動誘発性の筋損傷の程度が低いことが示唆された。

血清ハプトグロビン濃度は、運動誘発性の溶血の間接指標として用いられている(Sumi et al., 2021)。ランニングの接地時に足裏に衝撃が課され、これが絶え間なく繰り返されることで赤血球が破壊され溶血が生じる。溶血に伴い赤血球内の鉄が血中に逸脱し、このことは鉄欠乏の要因ともなる(Telford et al., 2003)。また、溶血が生じた際には、血清ハプトグロビン濃度が低下し、遊離ヘモグロビン濃度は上昇する(Lippi and Sanchis-Gomar, 2019)。研究課題 2 において、鉛直方向における GRF のピーク値は、FW 時が同一速度のランニング時に比較して低値を示した。そのため、FW に伴う溶血の程度は、同一速度でのランニングと比較して緩和されることを予想していた。しかしながら、運動前後での血清ハプトグロビン濃度の変化には条件間で有意差は認められず、運動誘発性の溶血に大きな違いは示されなかった。この要因としては、FW 時およびランニング時の速度が 7.7 ± 3.4 km/h であり絶対的な速度が遅いこと、また、運動時間(40 分間)が比較的短かったことから、溶血の程度自体が軽度であったことが考えられる。

運動に伴う健康増進を達成する上では、運動の習慣化(継続)が重要である。この点で、FW 条件は Run 条件よりも RPE が高値を示したため、運動の継続性が低下することも懸念され

る。しかしながら、FW を用いた長期トレーニングでは、通常ウォーキングを用いた運動プログラムに比較して継続率の高いことが既に示されている (Masuki et al., 2015; Francis et al., 2021)。さらに、FW 条件は Run 条件に比較して、運動誘発性の筋損傷の程度が軽度であることも示唆された。これらの結果から、FW を用いた運動プログラムは、筋損傷の程度や炎症反応が小さく、習慣的に実施しやすい方法であると推察される。一方で、本研究課題は長期のトレーニングに伴う継続率や心理的指標(動機、達成感、自己肯定感など)の変化を直接確認したものではない。この点については、今後、検討する必要がある。

5. 結論

FW ではランニングと比較して糖代謝が亢進し、運動に伴う GH の分泌応答や脂質分解の程度は FW において軽度であった。一方、運動に伴う筋損傷の程度は、FW において緩和された。これらの結果から、FW はランニングと比較して、筋損傷の程度を軽減した上で糖代謝を亢進させることが示唆された。その一方、インターバル FW による GH の分泌応答は、同一速度でのランニングに比較して亢進しないことが示された。

VI. 総合討論

本博士論文では、一過性のFWの負荷特性をエネルギー代謝(研究課題1)、GRFおよび筋活動(研究課題2)、代謝・内分泌応答、筋損傷や炎症応答(研究課題3)の観点から、同一速度でのランニングと比較することにより明らかにすることを目的とした。研究課題1においては、ウォーキングでは速度の上昇に伴いEEと炭水化物酸化量が非線形に上昇すること、高速度域でのFWでは同一速度でのランニングと比較してEEが高値を示すことが明らかとなった。研究課題2においては、FW時は同一速度でのランニング時と比較して鉛直方向のGRFが小さいこと、下肢の平均筋活動はFW時とランニング時で同程度であるが、活動パターンは異なることが明らかとなった。研究課題3においては、FWはランニングと比較して筋損傷の程度が軽度である一方で、血中乳酸濃度の上昇の程度が大きいことから、糖代謝を亢進させることが示唆された。これらの知見を踏まえ、総合討論では各研究課題から得られた結果を総合的に考察する。

1. FWの生理学的・力学的特性

FWによる望ましい効果を得る上では運動強度(歩行速度)の設定が重要となる一方で(Masuki et al., 2019)、FWやインターバルFWによるトレーニング効果を検討した先行研究においても、適切な歩行速度に関しては十分に言及されていない。先行研究の多くでは、 $70 - 85\% \dot{V}O_{2peak}$ でのFWと $40\% \dot{V}O_{2peak}$ 以下での緩歩を組み合わせたインターバルFWによる方法が用いられている(Nemoto et al., 2007; Okamoto et al., 2018; Masuki et al., 2019)。一方で、ウォーキングではある閾値を上回る速度から酸素摂取量が急増する(研究課題1)。したがって、ランニングやペダリングでの運動と同様に、 $\dot{V}O_{2peak}$ の値をもとに $\dot{V}O_2$ と歩行速度

の一次回帰式から相対的な速度を評価する方法は必ずしも最適ではないと考えられる。そこで研究課題 1 では、 $\dot{V}O_{2peak}$ ではなく MWS に対する相対速度を用いてウォーキング時とランニング時における EE の様相を比較した。

研究課題 1 の結果、 $92 \pm 2 \%MWS$ に相当する速度域でウォーキング時の EE がランニング時を上回った。また、この傾向は男女で共通してみられ、明らかな性差は認められなかった。さらに、ウォーキング時の EE は歩行速度の上昇に伴い直線的に増加するのはなく、ある閾値から急増する様相が明らかとなった。そのため、先述したように、ランニングと同様に、速度 $\dot{V}O_{2peak}$ の 1 次(直線)回帰式から最大下の速度を算出する手段では運動強度(歩行速度)を正確に設定することが難しいと考えられた。なお、先行研究では、年齢から推定される最高心拍数を用いて運動強度(歩行速度)を定めた例もみられる(Swoap et al., 1994; Bernard et al., 2016; Blain et al., 2017; Ozaki et al., 2019; Francis et al., 2021)。一方で、運動開始から心拍数が定常になるまでには時間を要するため、研究課題 3 で用いたようなインターバル FW による負荷形態では、最高心拍数に対する相対値で歩行速度を管理することには限界があるう。

FW は、下肢筋群の形態および機能の向上に有効であることが示されている(Kubo et al., 2008; Ozaki et al., 2019)。一般に、低～中強度で実施する持久性トレーニング(ウォーキング、ジョギング、サイクリング)では顕著な筋肥大や最大筋力の増加は生じない(Klitgaard et al., 1990)。また Leon et al. (1996)は、12 週間のウォーキングと階段昇降による EE の増加は、体力指標および心血管疾患リスクの改善に繋がらないことを報告している。しかしながら、FW を用いたトレーニングでは、下肢筋群の筋肥大や最大筋力の増加が認められた(Kubo et al., 2008; Ozaki et al., 2019)。これらの背景をふまえ、研究課題 2 では、 $85 \%MWS$ での通常速度でのウォーキング時(SW 条件)、ウォーキング時(FW 条件)、ランニング時(Run 条件)の

GRF および下肢筋群の筋活動を比較した。その結果、接地局面では、BFL および VL、MG の筋活動が同一速度でのランニング時に比較して有意に低値を示し、その他の筋(GM、RF、SOL)の筋活動に有意差は認められなかった。鉛直方向における GRF の成分は接地時の衝撃に関連する(Worp et al., 2015)。また、鉛直方向における GRF のピーク値は、ランニング時が FW 時に比較して大きな値を示したことから、ランニング時の接地局面における BFL および VL、MG の筋活動亢進は、主に衝撃に対する作用を反映していると考えられる。

ブレーキ局面においては、ランニング時が FW 時に比較して、MG および SOL の筋活動が亢進した一方で、加速局面では、FW 時がランニング時に比較して、SOL の筋活動が亢進するという特徴的な様相を示した。前後方向における GRF の力積は、歩行速度(Peterson et al., 2011)およびランニング時の EE 増加に関連する(Young-Hui and Rodger, 1999)。ブレーキ局面は衝撃への緩和、加速局面は前方への推進に関わることを考慮すると、ランニング時では腱などの弾性体を利用する筋の振る舞いを示すのに対し、FW 時では下腿筋群の活動亢進により推進力を得ていると考えられる。長期間のトレーニングに伴う筋適応は、毎回のトレーニング時における筋活動レベルと関連する(Wakahara et al., 2013)。インターバル FW において、下腿筋群は特に加速局面の「蹴り出し動作時」に筋活動が亢進していたと考えられる。そのため、インターバル FW は同一速度でのランニングに比較して特に下腿筋群の筋形態や筋機能の改善に対して効果的であると推察される。その一方で、大腿部を構成する筋群においては、FW 時の筋活動はランニング時を上回る結果は得られなかった。したがって、インターバル FW によるトレーニングに伴う大腿部の最大筋力や筋厚の増加(Kubo et al., 2008)の要因は、本研究の結果から明示されなかった。

1 日 60 分間の通常ウォーキングによるトレーニングを週 3 日・18 週間継続した先行研究では、下肢筋群の筋量および最大筋力の増加は認められなかった (Okazaki et al., 2001)。

これに対して Nemoto et al. (2007)は、FW によるトレーニングが通常ウォーキングによるトレーニングに比較して膝関節伸展・屈曲力を大きく増加させたことを報告している。研究課題 2 において、大腿部における筋活動(接地局面、ブレーキ局面)は、FW 時が通常ウォーキング時に比較して有意に高値を示した。このことから、同じウォーキング動作であっても、速度の上昇に伴い大腿部の筋活動は増加することが示された。FW 時における筋活動の増加は、長期のトレーニングに伴う筋機能や形態(筋量など)の改善効果とも関連しているものと推察される。なお、Nemoto et al. (2007)は FW を用いたトレーニングにおいて、下肢筋群の最大筋力を増加させる上では、毎回のトレーニング時に、高強度での筋収縮が重要であることを指摘している。この点から、MWS の 85 %に相当する強度で実施した FW(研究課題 2)においても、通常速度でのウォーキングに比較して速筋線維の動員が亢進していたものと考えられる。

研究課題 1 において、MWS の 80 %に相当する強度における EE および炭水化物酸化量はウォーキング時がランニング時に比較して有意に高値を示した。一方で、インターバル FW を実施した研究課題 3 においては、FW 時とランニング時で EE および炭水化物摂取量に有意な差は認められなかった。しかしながら、運動直後の血中乳酸濃度は FW が同一速度でのランニングに比較して有意に高値を示した。研究課題 1 と研究課題 3 において結果の相違が生じた要因は明らかでないが、研究課題 3 では、FW(80 %MWS で 3 分間の運動)と緩歩(40%MWS で 2 分間の運動)を交互に繰り返すインターバル FW による運動を用いたことが挙げられよう。すなわち、FW 後に実施した緩歩の区間において、呼吸循環系や活動筋に対する負荷が軽減され、このことが EE や炭水化物酸化量に影響していることが考えられる。今後は、インターバル FW による運動全体を通して、EE や炭水化物酸化量を亢進させることのできる至適な FW と緩歩との時間配分(ワーク・レスト比)を検討することも必要であろう。

う。一方で、運動前後における血中グルコース濃度の変化には FW 条件と Run 条件の間で有意差がみられなかったことを考慮すると、FW でみられた糖代謝の亢進は、おもに、筋グリコーゲンの利用亢進を反映していると推察される。

一般に、ウォーキング時には脂肪利用が優先され、運動中および運動後に脂質酸化が促進される(Bogdanis et al., 2008)。研究課題 1 においても、低速(時速 5.0 – 6.5 km 程度)でのウォーキング時の炭水化物酸化量は、同一速度でのランニング時に比較して有意に低値を示し、脂質酸化量は高値傾向を示した。一方で、ウォーキング時およびランニング時の EE が同程度の速度域(時速 7.0 km 付近)において、ウォーキング時がランニング時に比較して炭水化物酸化量が有意に高値を、脂質酸化量が有意に低値を示した。また、インターバル FW(3 分間の FW、2 分間の通常ウォーキングを 8 セット)を用いた研究課題 3 においても、FW の局面はランニング時に比較して炭水化物酸化量が有意に高値を、脂質酸化量が有意に低値を示した。これらの結果は、FW では通常速度でのウォーキングと比較して無酸素性のエネルギー供給が増加し、糖代謝を亢進させることを示している(Friedmann et al., 2007; Ogawa et al., 2007)。一方、運動直後における血清 GH 濃度は、FW 時がランニング時に比較して有意に低値を示した。運動に伴う GH の分泌増大には中枢性および末梢(活動筋)性の要因の双方が関与するが、特に、活動筋での代謝物の蓄積がグループ III、IV の求心性神経からのフィードバックを介して、GH 分泌を刺激する(Pierce et al., 2006)。研究課題 3 で示されたように、運動直後の血中乳酸濃度は FW 条件が Run 条件に比較して有意に高値を示したことから、活動筋での代謝物の蓄積も FW 条件において亢進していたと予想される。それにも関わらず、運動前後での血清 GH 濃度の上昇が Run 条件で亢進していた要因は明らかでない。今後は、FW 時の中枢性の賦活の程度(セントラルコマンドの変化)にも注視した上で、その負荷特性を検討する必要がある。

研究課題 3 において、運動前後における血清グリセロール濃度の上昇の程度(脂質分解の指標)は、ランニングが FW に比較して大きいことが認められた。このことには、運動直後での血清 GH 濃度がランニング条件において有意に高値を示した結果が関連しているかもしれない。一方で、FW 時はランニング時に比較して血中乳酸濃度の上昇が大きいことが認められた。運動に伴う筋グリコーゲン量の低下は、運動終了後に安静時の脂質酸化を数時間にわたり充進させる(Wee et al., 2005)。したがって、研究課題 3 では、運動終了後 1 時間までの脂質代謝の評価に留まっているが、FW では運動後における脂質酸化が長時間にわたり充進していた可能性は否定できない。今後は、運動後における安静時の脂質酸化量、EE を長時間にわたり検討することも有用であると考えられる。

FW によるトレーニングを実施する上では、FW と緩歩を交互に組み合わせるインターバル FW の形式の汎用性が高いと考えられる。研究課題 1 では、ウォーキング時の RPE は同程度の EE となる同一速度でのランニング時に比較して高値を示した。研究課題 3 でも、呼吸の RPE は運動開始 20 分以降、脚の RPE はすべての時点において、インターバル FW 時がランニング時に比較して有意に高値を示した。これらは一見、運動の継続性に対して悪影響を及ぼすようにも思われる。しかしながら、インターバル FW と一定速度でのウォーキングに伴う感情(楽しさ)の変化を比較した先行研究によると、HR および EE はインターバル FW 時が一定速度でのウォーキング時に比較して有意に高値を示す一方で、「楽しさ」はインターバル FW 時が有意に高値を示した(Francis et al., 2021)。同様に、高強度でのインターバルランニングは中程度の継続的な運動に比較して「楽しさ」の評価が高く、運動継続性の向上に関連することも示唆されている(Bartlett et al., 2011)。また、Nose et al. (2009)は 5 ヶ月間の一定速度でのウォーキングトレーニングでは達成率が低かったことを指摘している。さらに、高強度のインターバルトレーニングは中強度の一定負荷によるトレーニングに比

較して、短いトレーニング時間で有酸素性能力の向上を期待できる点も重要である(Dausin et al., 2007; Helgerud et al., 2007; Burgomaster et al., 2008)。

2. 本研究における課題および今後の課題

研究課題 1~3 はいずれも一過性の運動を用いており、長期のトレーニングに伴う適応を検証したものではない。したがって今後は、本研究で用いた FW やインターバル FW によるトレーニングを長期間継続した際の体力指標(最大筋力、筋パワー、有酸素性能力、歩行能力など)や筋形態(筋横断面積、筋量など)、糖代謝・脂質代謝、体組成などの変化を検討することも有意義と考えられる。さらに、定期的な運動は骨代謝に対しても好影響をもたらす。この際には、おもに接地時に課される骨へのストレスが、骨形成を促進することが示唆されている(Fuchs et al., 2001)。一方で、FW 時の鉛直方向への GRF は同一速度でのランニングと比較して小さいことから、運動に伴う骨代謝の改善効果が緩和される可能性は否めない。この点に関しては、FW によるトレーニングに伴う骨密度の変化を、ランニングによるトレーニングと比較することで明らかにできよう。さらに、これらの指標に加えて、トレーニングの継続率や心理指標の変化にも注視することで、本博士論文では検討することができなかった負荷特性を明示できると考えられよう。

Morikawa et al. (2011)は、FW によるトレーニング効果が、トレーニング開始時の体力レベルの相違に影響されることを指摘している。研究課題 1~3 においては、重篤な既往歴のない健康な若者を選定した。今後は、運動習慣をもたない中高齢の男女を対象に、FW によるトレーニングの効果を検討することも重要である。また、その際には、事前に MWS の評価を行い、FW 時の歩行速度を MWS に対する相対値として個々に設定することが重要と考えられる。

本研究では、一過性のFWの生理学的・力学的特性をランニングと比較するために、ランニング時の速度はFW時と同一に規定した。そのため、本研究で得られた知見は、ランニング全般に対するFWやインターバルFWの優位性を示すものではない。今後は、本研究で設定した条件よりも速い速度域でのランニングとの特性の相違についても、焦点をあてる必要があると考えられる。これらの検討を踏まえ、運動実施者の体力特性やねらいに応じて、FW(インターバルFW)やランニングを意図的・計画的に使い分けることが理想の形式になると予想される。

VII. 総括

本博士論文では、FW の負荷特性をエネルギー代謝、GRF および筋活動、代謝・内分泌応答の観点から、同一速度でのランニングとの比較を通して明らかにすることを目的とした。

研究課題および結果の概要

上述の目的を達成するために、以下の研究課題を設けた。また、各研究課題における主要な結果は以下の通りである。

【研究課題 1 FW 時のエネルギー代謝の特性】

92 ± 2 %MWS 以上の速度では、ウォーキング時の EE および炭水化物酸化量は、同一速度のランニング時よりも大きいことが明らかになった。また、ウォーキングでは速度の上昇に伴い、EE と炭水化物酸化量が非線形に増加すること、高速度域でのウォーキング(FW)では、同一速度でのランニングと比較してエネルギー代謝が亢進することが示された。さらに、80 %MWS 程度の速度は、同一速度でのランニングに比較して EE が亢進するため、FW によるトレーニング時の速度として推奨されると考えられた。

【研究課題 2 FW 時の GRF および筋活動の特性】

FW では、同一速度でのランニングに比較して鉛直方向における GRF が有意に低値を示した。また、下肢の平均筋活動(GM、RF、SOL)は、FW とランニングで同程度であった。しかしながら、下肢筋群の活動パターンは、同一の速度であっても FW とランニングで異なる様相を示した。ランニングでは主にブレーキ局面において、TA を除くすべての筋が活動し、

FW では主に加速局面において、SOL の筋活動が増加した。これらの結果から、FW 時は同一速度でのランニング時に比較してメカニカルストレスが小さく、特に加速局面において下腿筋群の筋活動が亢進することが明らかとなった。

【研究課題3 インターバルFW に対する糖・脂質代謝および内分泌応答の特性】

インターバルFW ではランニングと比較して糖代謝が亢進し(血中乳酸濃度の上昇により評価)、運動に伴うGH の分泌応答や脂質分解の程度はFW において軽度であった。一方、運動に伴う筋損傷の程度は、FW において緩和された。これらの結果から、FW はランニングと比較して、筋損傷の程度を軽減した上で、糖代謝を亢進させることが示唆された。その一方、インターバルFW によるGH の分泌応答は、同一速度でのランニングと比較して亢進しないことが示された。

VIII. 結論

研究課題1~3の結果から、FW では同一速度でのランニングと比較してエネルギー消費および糖代謝が亢進すること、鉛直方向の地面反力が小さく、特に加速局面におけるヒラメ筋での筋活動の増加することが明らかになった。また、インターバルFW では、同一速度でのランニングと比較して運動誘発性の筋損傷が緩和されることが認められた。したがって、本研究から得られた知見は、FW の負荷特性を、一過性の運動時の生理学的・力学的観点から新たに示したものである。また、これらの負荷特性が同一速度で行うランニングと異なることを示唆するものである。

参考文献

1. ACSM. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription. tenth ed. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer; 2017.
2. Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, et al. 2011 Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc* 2011;43(8):1575–81.
3. Anderson FC, Pandy MG. Individual muscle contributions to support in normal walking. *Gait Posture*. 2003;17(2):159-169.
4. Baldwin KM, Fitts RH, Booth FW, Winder WW, Holloszy JO. Depletion of muscle and liver glycogen during exercise. Protective effect of training. *Pflugers Arch* 1975;354(3):203–12.
5. Bartlett JD, Close GL, MacLaren DP, Gregson W, Drust B, Morton JP. High-intensity interval running is perceived to be more enjoyable than moderate-intensity continuous exercise: implications for exercise adherence. *J Sports Sci*. 2011;29(6):547-553.
6. Batliner ME, Kipp S, Grabowski AM, Kram R, Byrnes WC. Does Metabolic Rate Increase Linearly with Running Speed in all Distance Runners? *Sports Med Int Open* 2018;2(1):E1–E8.
7. Bernard PL, Tallon G, Ninot G, et al. Influence of a brisk walking program on isokinetic muscular capacities of knee in sedentary older women. *Aging Clin Exp Res* 2016;28(26):1219–26.
8. Blain H, Jaussent A, Picot MC, et al. Effect of a 6-Month Brisk Walking Program on Walking Endurance in Sedentary and Physically Deconditioned Women Aged 60 or Older: A Randomized Trial. *J Nutr Health Aging* 2017;21(10):1183–9.
9. Bogdanis GC, Vangelakoudi A, Maridaki M. Peak fat oxidation rate during walking in sedentary overweight men and women. *J Sports Sci Med* 2008;7(4):525–31.
10. Bovi G, Rabuffetti M, Mazzoleni P, Ferrarin M. A multiple-task gait analysis approach: kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects. *Gait Posture*. 2011;33(1):6-13.
11. Burgess E, Hassmén P, Pumpa KL. Determinants of adherence to lifestyle intervention in adults with obesity: a systematic review. *Clin Obes* 2017;7(3):123–35.
12. Burgomaster KA, Howarth KR, Phillips SM, et al. Similar metabolic adaptations

during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *J Physiol*. 2008;586(1):151-160.

13. Burgomaster KA, Hughes SC, Heigenhauser GJF, Bradwell SN, Gibala MJ. Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. *J Appl Physiol (1985)* 2005;98(6):1985–90.
14. Burr DB, Milgrom C, Boyd RD, Higgins WL, Robin G, Radin EL. Experimental stress fractures of the tibia. Biological and mechanical aetiology in rabbits. *J Bone Joint Surg Br* 1990;72(3):370–5.
15. Brown M, McClean CM, Davison GW, Brown JCW, Murphy MH. The acute effects of walking exercise intensity on systemic cytokines and oxidative stress. *Eur J Appl Physiol*. 2018;118(10):2111-2120.
16. Cavagna GA. Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle_Cavagna, 1977. *Exerc Sport Sci Rev* 1977;5:89–129.
17. Chang YH, Kram R. Metabolic cost of generating horizontal forces during human running. *J Appl Physiol (1985)* 1999;86(5):1657–62.
18. Chiu MC, Wang MJ. The effect of gait speed and gender on perceived exertion, muscle activity, joint motion of lower extremity, ground reaction force and heart rate during normal walking. *Gait Posture*. 2007;25(3):385-392.
19. Christian RJ, Bishop DJ, Billaut F, Girard O. The role of sense of effort on self-selected cycling power output. *Front Physiol* 2014;5:115.
20. Clarkson PM, Hubal MJ. Exercise-induced muscle damage in humans. *Am J Phys Med Rehabil* 2002;81(11 Suppl):S52–69.
21. Colbert LH, Hootman JM, Macera CA. Physical activity-related injuries in walkers and runners in the aerobics center longitudinal study. *Clinical Journal of Sport Medicine* 2000;10(4):259–63.
22. Danielsen CC, Andreassen TT. Mechanical properties of rat tail tendon in relation to proximal-distal sampling position and age. *J Biomech* 1988;21(3):207–12.
23. Daussin FN, Ponsot E, Dufour SP, et al. Improvement of VO₂max by cardiac output and oxygen extraction adaptation during intermittent versus continuous endurance training. *Eur J Appl Physiol*. 2007;101(3):377-383.
24. Deguchi K, Enishi T, Sato N, et al. Acute effect of fast walking on postprandial blood glucose control in type 2 diabetes. *Diabetol Int*. 2015;7(2):119-123.
25. Ekkekakis P, Parfitt G, Petruzzello SJ. The pleasure and displeasure people feel when they exercise at different intensities: decennial update and progress towards a

- tripartite rationale for exercise intensity prescription. *Sports Med* 2011;41(8):641–71.
26. Farley CT, McMahon TA. Energetics of walking and running: insights from simulated reduced-gravity experiments. *J Appl Physiol (1985)* 1992;73(6):2709–12.
 27. Francis K, Williamson T, Kelly P, Phillips SM. Continuous walking and time- and intensity-matched interval walking: Cardiometabolic demand and post-exercise enjoyment in insufficiently active, healthy adults. *J Sports Sci* 2021;39(1):23–30.
 28. Fuchs RK, Bauer JJ, Snow CM. Jumping improves hip and lumbar spine bone mass in prepubescent children: a randomized controlled trial. *J Bone Miner Res.* 2001;16(1):148-156.
 29. Gazendam MGJ, Hof AL. Averaged EMG profiles in jogging and running at different speeds. *Gait Posture* 2007;25(4):604–14.
 30. Global Recommendations on Physical Activity for Health Global Recommendations on Physical Activity for Health. 2010.
 31. Goto K, Ishii N, Mizuno A, Takamatsu K. Enhancement of fat metabolism by repeated bouts of moderate endurance exercise. *J Appl Physiol (1985)* 2007;102(6):2158–64.
 32. Grimston SK, Engsberg JR, Hanley DA. Bone mass, external loads, and stress fracture in female runners. *Int J Sport Biomch* 1991;7:293-302.
 33. Hansen EA, Kristensen LAR, Nielsen AM, Voigt M, Madeleine P. The role of stride frequency for walk-to-run transition in humans. *Sci Rep.* 2017;7(1):2010.
 34. Helgerud J, Høydal K, Wang E, et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(4):665-671.
 35. Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, Rau G. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *J Electromyogr Kinesiol* 2000;10(5):361–74.
 36. Ikeda N, Inoue M, Iso H, et al. Adult mortality attributable to preventable risk factors for non-communicable diseases and injuries in Japan: a comparative risk assessment. *PLoS Med* 2012;9(1):e1001160.
 37. Ishikawa M, Komi PV. Muscle fascicle and tendon behavior during human locomotion revisited. *Exerc Sport Sci Rev.* 2008;36(4):193-199.
 38. Jeukendrup AE, Wallis GA. Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *Int J Sports Med* 2005;26 Suppl 1:S28–37.

39. Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci.* 1973;18(1):111-129.
40. Karstoft K, Clark MA, Jakobsen I, et al. The effects of 2 weeks of interval vs continuous walking training on glycaemic control and whole-body oxidative stress in individuals with type 2 diabetes: a controlled, randomised, crossover trial. *Diabetologia* 2017;60(3):508-17.
41. Karstoft K, Winding K, Knudsen SH, et al. The effects of free-living interval-walking training on glycemic control, body composition, and physical fitness in type 2 diabetic patients: a randomized, controlled trial. *Diabetes Care* 2013;36(2):228-36.
42. Keller TS, Weisberger AM, Ray JL, Hasan SS, Shiavi RG, Spengler DM. Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1996;11(5):253-259.
43. Klitgaard H, Mantoni M, Schiaffino S, et al. Function, morphology and protein expression of ageing skeletal muscle: a cross-sectional study of elderly men with different training backgrounds. *Acta Physiol Scand* 1990;140(1):41-54.
44. Kruegle E. Factors that motivate obese and overweight patients to adhere to lifestyle change: Approaching long-term weight management with health promotion as the ultimate goal. *NOVIA University of Applied Sciences* 2012;2:34.
45. Kubo K, Ishida Y, Suzuki S, et al. Effects of 6 months of walking training on lower limb muscle and tendon in elderly. *Scand J Med Sci Sports* 2008;18(1):31-9.
46. Larsson L, Degens H, Li M, et al. Sarcopenia: Aging-Related Loss of Muscle Mass and Function. *Physiol Rev* 2019;99(1):427-511.
47. Lughton CA, Davis IM, Hamill J. Effect of strike pattern and orthotic intervention on tibial shock during running. *J Appl Biomech* 2003;19(2):153-68.
48. Leal JM, Galliano LM, Vecchio FB. Effectiveness of high-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training in hypertensive patients: a systematic review and meta-analysis. *Curr Hypertens Rep* 2020;22(3):26.
49. Lee S, Kuk JL, Katzmarzyk PT, Blair SN, Church TS, Ross R. Cardiorespiratory fitness attenuates metabolic risk independent of abdominal subcutaneous and visceral fat in men. *Diabetes Care* 2005;28(4):895-901.
50. Leon AS, Casal D, Jacobs D Jr. Effects of 2,000 kcal per week of walking and stair climbing on physical fitness and risk factors for coronary heart disease. *J Cardiopulm Rehabil.* 1996;16(3):183-192.

51. Lippi G, Sanchis-Gomar F. Epidemiological, biological and clinical update on exercise-induced hemolysis. *Ann Transl Med* 2019;7(12):270.
52. Lord SR, Lloyd DG, Li SK. Sensori-motor function, gait patterns and falls in community-dwelling women. *Age Ageing*. 1996;25(4):292-299.
53. Mackenzie R, Maxwell N, Castle P, Brickley G, Watt P. Acute hypoxia and exercise improve insulin sensitivity (Sr^{2*}) in individuals with type 2 diabetes. *Diabetes Metab Res Rev* 2011;27(1):94–101.
54. Masani K, Kouzaki M, Fukunaga T. Variability of ground reaction forces during treadmill walking. *J Appl Physiol (1985)*. 2002;92(5):1885-1890.
55. Masuki S, Mori M, Tabara Y, et al. The factors affecting adherence to a long-term interval walking training program in middle-aged and older people. *J Appl Physiol (1985)* 2015;118(5):595–603.
56. Masuki S, Morikawa M, Nose H. High-intensity walking time is a key determinant to increase physical fitness and improve health outcomes after interval walking training in middle-aged and older people. *Mayo Clinic Proceedings* 2019;94(12):2415–26.
57. Masuki S, Morikawa M, Nose H. Interval walking training can increase physical fitness in middle-aged and older people. *Exerc Sport Sci Rev* 2017;45(3):154–62.
58. Mercier J, Le Gallais D, Durand M, Goudal C, Micallef JP, Préfaut C. Energy expenditure and cardiorespiratory responses at the transition between walking and running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1994;69(6):525–9.
59. Mian OS, Thom JM, Ardigò LP, Narici MV, Minetti AE. Metabolic cost, mechanical work, and efficiency during walking in young and older men. *Korean J Sports Med* 2006;186(2):127–39.
60. Ministry of Health, Labour and Welfare (2007) [Annual health, labour and welfare report 2007–2008.]. Tokyo: Ministry of Health, Labour and Welfare.
61. Miller BML, Brennan L. Measuring and reporting attrition from obesity treatment programs: A call to action! *Obes Res Clin Pract* 2015;9(3):187–202.
62. Morikawa M, Okazaki K, Masuki S, et al. Physical fitness and indices of lifestyle-related diseases before and after interval walking training in middle-aged and older males and females. *Br J Sports Med* 2011;45(3):216–24.
63. Morton RD, West DJ, Stephens JW, Bain SC, Bracken RM. Heart rate prescribed walking training improves cardiorespiratory fitness but not glycaemic control in people with type 2 diabetes. *J Sports Sci* 2010;28(1):93–9.

64. Murray MP, Kory RC, Clarkson BH, Sepic SB. Comparison of free and fast speed walking patterns of normal men. *Am J Phys Med.* 1966;45(1):8-23.
65. Nemoto K-I, Gen-no H, Masuki S, Okazaki K, Nose H. Effects of high-intensity interval walking training on physical fitness and blood pressure in middle-aged and older people. *Mayo Clinic Proceedings* 2007;82(7):803–11.
66. Neptune RR, Sasaki K. Ankle plantar flexor force production is an important determinant of the preferred walk-to-run transition speed. *J Exp Biol.* 2005;208(Pt 5):799-808.
67. Neptune RR, Zajac FE, Kautz SA. Muscle force redistributes segmental power for body progression during walking. *Gait Posture.* 2004;19(2):194-205.
68. Nielsen RO, Nohr EA, Rasmussen S, Sørensen H. Classifying running-related injuries based upon etiology, with emphasis on volume and pace. *Int J Sports Phys Ther.* 2013;8(2):172-179.
69. Nose H, Morikawa M, Yamazaki T, et al. Beyond epidemiology: field studies and the physiology laboratory as the whole world. *J Physiol.* 2009;587(Pt 23):5569-5575.
70. Ogawa T, Hayashi K, Ichinose M, Wada H, Nishiyasu T. Metabolic response during intermittent graded sprint running in moderate hypobaric hypoxia in competitive middle-distance runners. *Eur J Appl Physiol* 2007;99(1):39–46.
71. Okamoto T, Min S-K, Sakamaki-Sunaga M. Acute effect of interval walking on arterial stiffness in healthy young adults. *Int J Sports Med* 2018;39(7):495–501.
72. Okazaki K, Kamijo Y-I, Takeno Y, Okumoto T, Masuki S, Nose H. Effects of exercise training on thermoregulatory responses and blood volume in older men. *J Appl Physiol (1985)* 2002;93(5):1630–7.
73. Okazaki K, Yazawa D, Goto M, et al. Effects of macronutrient intake on thigh muscle mass during home-based walking training in middle-aged and older women. *Scand J Med Sci Sports.* 2013;23(5):e286-e292.
74. Ozaki H, Nakagata T, Yoshihara T, et al. Effects of progressive walking and stair-climbing training program on muscle size and strength of the lower body in untrained older adults. *J Sports Sci Med* 2019;18(4):722–8.
75. Patterson R, McNamara E, Tainio M, et al. Sedentary behaviour and risk of all-cause, cardiovascular and cancer mortality, and incident type 2 diabetes: a systematic review and dose response meta-analysis. *Eur J Appl Physiol* 2018;33(9):811–29.
76. Pauley A, Dixon CB, Rawson ES, McConnell TR. The impact of body composition on energy expenditure during walking and running in young adults. *J. Exerc. Physiol. Online* 2016;19(1):66-76.

77. Peterson CL, Kautz SA, Neptune RR. Braking and propulsive impulses increase with speed during accelerated and decelerated walking. *Gait Posture*. 2011;33(4):562-567.
78. Pierce JR, Clark BC, PLOUTZ-SNYDER LL, Kanaley JA. Growth hormone and muscle function responses to skeletal muscle ischemia. *J Appl Physiol (1985)* 2006;101(6):1588–95.
79. Piercy KL, Troiano RP, Ballard RM, et al. The Physical Activity Guidelines for Americans. *JAMA* 2018;320(19):2020–8.
80. Richter EA, Garetto LP, Goodman MN, Ruderman NB. Muscle glucose metabolism following exercise in the rat: increased sensitivity to insulin. *J Clin Invest* 1982;69(4):785–93.
81. Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, et al. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 1993;265(3 Pt 1):E380–91.
82. Rotstein A, Inbar O, Berginsky T, Meckel Y. Preferred transition speed between walking and running: effects of training status. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37(11):1864–70.
83. Sawada SS, Lee I-M, Muto T, Matuszaki K, Blair SN. Cardiorespiratory fitness and the incidence of type 2 diabetes: prospective study of Japanese men. *Diabetes Care* 2003;26(10):2918–22.
84. Sazlina SG, Sooryanarayana R, Ho BK, et al. Cardiovascular disease risk factors among older people: Data from the National Health and Morbidity Survey 2015. *PLoS ONE* 2020;15(10):e0240826.
85. Serpiello FR, McKenna MJ, Bishop DJ, et al. Repeated sprints alter signaling related to mitochondrial biogenesis in humans. *Med Sci Sports Exerc* 2012;44(5):827–34.
86. Sumi D, Hayashi N, Yamaguchi K, Badenhorst CE, Goto K. Hepcidin response to three consecutive days of endurance training in hypoxia. *Eur J Appl Physiol* 2021;121(4):1197–205.
87. Sun D, Fekete G, Mei Q, Gu Y. The effect of walking speed on the foot inter-segment kinematics, ground reaction forces and lower limb joint moments. *PeerJ* 2018;6:e5517.
88. Swoap RA, Norvell N, Graves JE, Pollock ML. High versus moderate intensity aerobic exercise in older adults: psychological and physiological effects. *J Aging Phys Act* 1994;2(4):293–303.
89. Taylor CR, Heglund NC, McMahon TA, Looney TR. Energetic cost of generating muscular force during running: a comparison of large and small animals. *J Exp Biol*

1980;86(1):9–18.

90. Tordi N, Mourot L, Colin E, Regnard J. Intermittent versus constant aerobic exercise: effects on arterial stiffness. *Eur J Appl Physiol* 2010;108(4):801–9.
91. Umpierre D, Ribeiro PAB, Schaan BD, Ribeiro JP. Volume of supervised exercise training impacts glycaemic control in patients with type 2 diabetes: a systematic review with meta-regression analysis. *Diabetologia* 2013;56(2):242–51.
92. van der Worp H, Vrieling JW, Bredeweg SW. Do runners who suffer injuries have higher vertical ground reaction forces than those who remain injury-free? A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2016;50(8):450-457.
93. Wakahara T, Fukutani A, Kawakami Y, Yanai T. Nonuniform muscle hypertrophy: its relation to muscle activation in training session. *Med Sci Sports Exerc* 2013;45(11):2158–65.
94. Walker KZ, Piers LS, Putt RS, Jones JA, O'Dea K. Effects of regular walking on cardiovascular risk factors and body composition in normoglycemic women and women with type 2 diabetes. *Diabetes Care* 1999;22(4):555–61.
95. Wee J, Charlton C, Simpson H, et al. GH secretion in acute exercise may result in post-exercise lipolysis. *Growth Horm IGF Res* 2005;15(6):397–404.
96. Weir Jb. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 1949;109(1-2):1–9.
97. White SC, Tucker CA, Brangaccio JA, posture HLG. Relation of vertical ground reaction forces to walking speed. *Gait & Posture* 1996;4(2):206
98. Wilkin LD, Cheryl A, Haddock BL. Energy expenditure comparison between walking and running in average fitness individuals. *J Strength Cond Res* 2012;26(4):1039–44.
99. World Health Organization. Global action plan on physical activity 2018-2030: more active people for a healthier world. 2018
100. World Health Organization. Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks. 2009.
101. Zifchock RA, Davis I, Hamill J. Kinetic asymmetry in female runners with and without retrospective tibial stress fractures. *J Biomech.* 2006;39(15):2792-2797.

謝辞

本学位論文をまとめるにあたり、指導教員である立命館大学大学院 スポーツ健康科学研究科 後藤一成教授には、親切丁寧なご指導を賜りました。研究や教育に向かう姿勢や考え方ははじめ、今後の研究活動において大きな財産を得ることができました。また、長野明紀教授には、バイオメカニクス的見解の点で、多くのご支援、ご指導を賜り、心より感謝申し上げます。

本学位論文の審査にあたり、早稲田大学 スポーツ科学学術院 宮下政司教授、立命館大学大学院 スポーツ健康科学研究科 篠原靖司教授、真田樹義教授には貴重な時間を割いて副査を務めていただきました。細部に至るまでの確なご意見・ご助言を賜りましたこと、深く感謝いたします。

後藤研究室の皆様には、惜しめない協力と闊達な議論を行う機会をいただきました。皆様のお力添えいただいたおかげで、研究を円滑に進めることができました。心から感謝いたします。特に、本研究科修了生の水野沙洗先生、同期となる林七虹さん、山口慶一さんには私生活も含め大変お世話になりました。研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に、心より感謝申し上げます。

最後になりますが、今日に至るまで温かく見守り、支えてくれる両親、姉、義兄に感謝の意を表します。