

博士<リハビリテーション学>論文

定常および漸増負荷運動時の
リスク管理に関する研究

2020年3月

氏川 拓也

川崎医療福祉大学大学院
医療技術学研究科
リハビリテーション学専攻

目次

序章	1
第1章 冠動脈バイパス術後患者の離床プログラム実施中における 自律神経系活動の変化	
1. はじめに	9
2. 対象と方法	10
3. 結果	13
4. 考察	16
5. 引用文献	18
第2章 嫌気性代謝閾値での定常負荷運動後のクーリングダウンが 心拍変動に及ぼす影響	
1. はじめに	20
2. 対象と方法	21
3. 結果	23
4. 考察	27
5. 引用文献	28
第3章 下肢筋への静的及び動的ストレッチングによる漸増負荷運動時の 酸素摂取量および心拍変動, 筋酸素動態, 筋電図周波数に及ぼす影響	
1. はじめに	31
2. 対象と方法	32
3. 結果	36
4. 考察	46
5. 引用文献	48
終章	51

序章

厚生労働省発表の人口動態統計の概況によると、平成 29 年 1 年間の死因別死亡総数のうち、循環器系の疾患は 35 万 966 人で増加傾向であり、死因別死亡数全体の 26.2%を占め、悪性新生物に次ぐ日本人の死亡原因第 2 位となっている¹⁾。さらに、厚生労働省が 3 年ごとに実施している患者調査の平成 29 年調査によると、循環器系の疾患の患者数（継続的な治療を受けていると推測される患者数）は入院 228 万 6,000 人、外来 888 万 9,000 人で、入院と外来ともに患者数第 2 位となっている²⁾。循環器系の疾患は身体的・精神的障害をもたらし、日常生活動作 (Activities of Daily Living : ADL) や生活の質 (Quality of Life : QOL) の低下をきたすため、適切な治療と再発予防としてリハビリテーションが必要とされている。

循環器系の疾患に対するリハビリテーションは、心臓リハビリテーションと呼ばれており、日本心臓リハビリテーション学会ステートメントでは、「心血管疾患患者の身体的・心理的・社会的・職業的状态を改善し、基礎にある動脈硬化や心不全の病態の進行を抑制あるいは軽減し、再発・再入院・死亡を減少させ、快適で活動的な生活を実現することをめざして、個々の患者の医学的評価・運動処方に基づく運動療法・冠危険因子是正・患者教育およびカウンセリング・最適薬物治療を多職種チームが協調して実践する長期にわたる多面的・包括的プログラムをさす」と定義されている³⁾。2006 年に日本における心臓リハビリテーションは、冠動脈インターベンション治療の整備に比べて極端に未整備であるという報告がなされ、疾患別リハビリテーションへの変更と合わせて、心臓リハビリテーション施設認定基準はさらに緩和されてきた。2008 年には医師の直接監視も必須ではなくなり、現在、全国的に心臓リハビリテーションを行う施設が増えており⁴⁾、心臓リハビリテーションの需要も増加している。

心臓リハビリテーションの代表的な構成要素には、運動療法、患者教育、カウンセリングがあり、禁忌がない限り、運動療法、食事療法、薬物療法は生涯にわたって継続され、その中でも運動療法は理学療法士が主に携わる部分である。心臓リハビリテーションの効果に

は、運動耐容能向上、狭心症・心不全症状の軽減、冠危険因子・自律神経系・血液凝固能の改善、心臓病の再発や心臓死を軽減し、生命予後を改善することなどがある⁵⁾。また、心臓リハビリテーションには病期区分があり、急性期では早期離床やADL拡大、回復期・維持期では運動療法や運動耐容能評価などが各区分での介入としてあげられる。

急性期における早期離床とは、廃用症候群、各種合併症の予防および手術後早期の身体機能の改善やADLの再獲得を目的に、循環動態の安定化と並行して可及的早期より行うリハビリテーションである。日本循環器学会ガイドラインにおいても、「心臓外科手術後は、可及的早期に離床を進めることは妥当である（エビデンスレベルB）」と示されている⁵⁾。近年、手術の低侵襲化や手術後の管理の進歩により、離床の早期化も進み、待機手術症例で手術後8日目までに歩行が自立した順調例では、病棟内歩行自立日数が平均4.3日であったと報告されている⁶⁾。一方で、離床や歩行自立が遅延する症例も存在する。待機的手術における歩行自立遅延は、6.7～32.7%であり⁷⁻¹¹⁾、その要因としては、高齢¹⁰⁾、低心機能¹⁰⁾、術前腎機能障害^{7,8,10,12,13)}、術前低栄養¹⁴⁾、運動器疾患の既往⁷⁾、心臓外科手術後関連急性腎障害¹³⁾などがあげられていた。離床の早期化や遅延に対して、離床の可否判断、安全性の向上のためにリスク管理も重要になってくる。急性期における循環器系のリスク管理には血圧と心拍数のバイタルサインが安定していることが重要であり¹⁵⁾、心臓外科手術後の離床開始基準やステップアップの基準にも血圧や心拍数に関する記載がされている⁵⁾。バイタルサインの変動には自律神経系活動が関与しており¹⁶⁻¹⁸⁾、自律神経系活動の変化は、循環動態の不安定性、不応期の短縮やばらつきを生じ、心房細動や心室頻拍などの不整脈を誘発するとされ^{19,20)}、離床を進める際の障壁になり得る。そのため、表出されるバイタルサイン以外の自律神経系活動を把握することが、早期離床を安全に進める上で重要であるが、心臓外科手術後の離床中における自律神経系活動の変動については明らかになっていない。

急性期の早期離床の次段階として、回復期・維持期の運動療法や運動耐容能評価がある。本邦では、運動療法は無気的な代謝が加わる直前の運動強度である嫌気性代謝閾値（anaerobic threshold : AT）による運動処方を推奨する人が多い^{5,21)}。ATを基準にした運動強度は、長時間持続することが可能であり、運動強度の増加に対する心収縮能の応答も保

たれ、アシドーシスが起こらず、血中カテコラミンの著明な増加もないことから安全に運動療法を施行できる⁵⁾。このATは呼気ガス分析装置や心電計を用いた心肺運動負荷試験で求められ、運動強度や心拍数、代謝当量 (metabolic equivalents : METs) などの指標による運動処方が可能となる。運動療法中の安全性が確保される一方で、心疾患患者の運動トレーニング中の合併症を検討した報告では、少なくともその2/3以上が運動負荷前後に起きており、心房性頻拍や心停止などの心事故発生頻度が高いと言われている²²⁾。運動療法などの主運動前には、身体を安静から運動へ移行させるウォーミングアップと呼ばれる予備運動が行われる。ウォーミングアップには、体温 (筋温) の上昇、呼吸・循環機能の適応性向上、覚醒レベルの向上 (神経-筋反応時間の短縮)、柔軟性の増加、運動に対する精神的準備などの効果がある^{23,24)}。ウォーミングアップとして広く行われている運動にストレッチングがあり、主に静的ストレッチングと動的ストレッチングに分類される。しかしながら、ストレッチングの具体的な効果は十分に証明されておらず、主運動に貢献するかは議論が分かれ、外傷・障害予防効果については否定的な論文もある²⁵⁾。次に、主運動後に行う軽い運動はクーリングダウンと呼ばれ、主運動の強度を落とした運動やストレッチングなど整理体操が行われる。運動を急に中止することを誘因に、運動後に静脈還流量の減少や副交感神経活動が過度に上昇することがあり、徐脈、低血圧、めまいなどの症状を引き起こすことがあるが、クーリングダウンはそれらの予防に有効であるとされている^{5,26)}。しかしながら、日本循環器学会ガイドライン⁵⁾においても、運動後にクーリングダウンを行うことが推奨されているが、適正な強度に関しては触れられていないのが現状である。

これまでに述べた中にもあるように、自律神経系は運動と密接な関係がある。自律神経系は、循環、呼吸、代謝、消化、体温調節、排泄など自律機能を速やかに調節し、生体の恒常性維持に重要な役割を果たしている。自律神経系は交感神経系と副交感神経系より成り、内臓器官の多くは両系によって支配され、同一器官においては基本的に相反する作用を及ぼして、その機能を調節している²⁷⁻³⁰⁾。一般的に運動の際には、交感神経系の活動は高まり、心拍数と心拍出量の増加、筋の血管拡張、気管支拡張を引き起こし、身体を動かすのに適した状態になるように働く²⁸⁾。逆に、副交感神経系は、交感神経系と相反的に働くため、活動

が低下すると言われている。このように運動時の生体反応に自律神経系が密接に関係し、バイタルサインの異常や不整脈発症、血栓形成に関与しており^{16-18,31)}、自律神経系の変動を把握することはリスク管理をする上で重要となる。自律神経系の活動の一部である心臓自律神経系の活動を評価する方法に、心拍変動解析法がある。この方法は、非侵襲的な方法であり、連続した洞調律の RR 間隔の 1 拍ごとの変動を測定することにより心臓の自律神経系活動の指標となる。長時間心拍変動解析による予後予測には、主に時間領域の分析法が、短時間心拍変動解析による自律神経機能評価には主に周波数領域の分析法が用いられる³²⁾。周波数の解析方法としては、心電図の RR 間隔をコンピュータプログラムによって測定し、心電図から求めた 1 心拍ごとの RR 間隔をプロットした時系列データ波形（タコグラム）を作成する。タコグラムに周波数解析を施し、ゆっくりな波（低周波数帯）と速い波（高周波数帯）に周波数領域で分類し、交感神経活動や副交感神経活動の指標とするものである（図 1）^{33,34)}。この心拍変動には心拍数からは得られない情報が含まれている。それは交感神経機能の影響を含まない、純粋な心臓迷走神経性心拍数調節機能に関する情報である³²⁾。

これまでに述べた早期離床やウォーミングアップ、運動療法、心肺運動負荷試験、クーリングダウン中の自律神経系活動を評価することは、心臓リハビリテーションを進める上で重要な指標となると考えられる。

心臓リハビリテーションは Phase I の急性期、Phase II の前期回復期と後期回復期、Phase III の維持期に分類される。本論文では、心臓リハビリテーションの Phase I での早期離床、Phase II から III での運動療法、心肺運動負荷試験における介入による生体反応の変化について心臓自律神経系活動を中心に述べる。

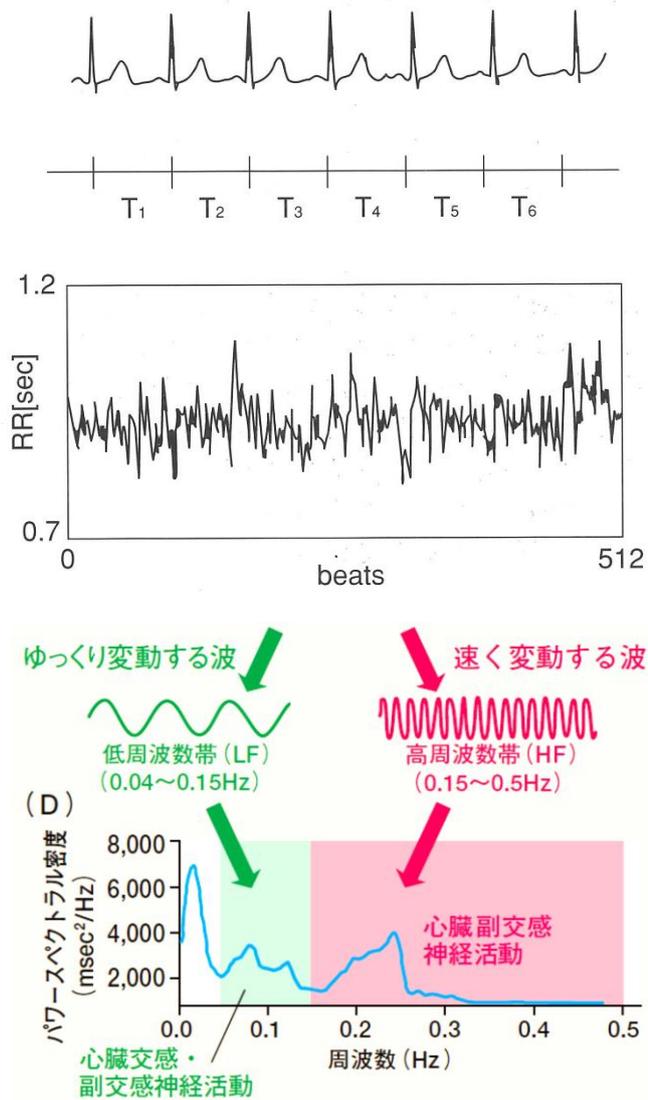


図1 心拍変動の周波数スペクトル解析の方法 (文献 33, 34 より一部改変)

引用文献

- 1) 厚生労働省ホームページ 平成 29 年 (2017) 人口動態統計 (確定数) の概況.
https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei17/dl/11_h7.pdf (2019 年 9 月 20 日引用)
- 2) 厚生労働省ホームページ 平成 29 年 (2017) 患者調査の概況.
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/17/dl/01.pdf>(2019年9月20日引用)
- 3) 日本心臓リハビリテーション学会 日本心臓リハビリテーション学会ステートメント
「心臓リハビリテーションの定義」. <http://www.jacr.jp/web/about/statement/> (2019 年 9 月 20 日引用)
- 4) 高橋哲也, 西川淳一: 心臓 (循環) 機能障害と理学療法, ビジュアルレクチャー内部障害理学療法学 (第 1 版). 高橋哲也 (編), 医歯薬出版, 東京, 2014, pp. 112-219.
- 5) 日本循環器学会ホームページ 循環器病の診断と治療に関するガイドライン (2011 年度合同研究班報告) 心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン (2012 年改訂版). http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2012_nohara_h.pdf (2019 年 9 月 20 日引用)
- 6) 高橋哲也, 櫻田弘治, 他: 心臓血管外科手術後リハビリテーション進行目安の検討.
心臓リハビリテーション. 2012; 17: 103-109.
- 7) 森沢知之, 湯口 聡, 他: 冠動脈バイパス述語リハビリテーション遅延の特徴とその関連因子. 日本集中治療医学会雑誌. 2014; 21: 601-606.
- 8) 澁川武志, 上坂建太, 他: 80 歳以上の高齢者における心大血管手術後 100m 歩行自立障害因子の検討. 理学療法学. 2015; 42: 487-493.
- 9) 田原将之, 齊藤正和, 他: 腹部大動脈瘤の人工血管置換術後における早期歩行自立後の課題—退院遅延因子となった遅発性合併症の分析. 心臓リハビリテーション. 2015; 20: 356-362.
- 10) 森沢知之, 湯口 聡, 他: 心臓外科手術後リハビリテーション遅延の特徴—多施設により検討. 総合リハビリテーション. 2015; 43: 459-464.

- 11) Tobita R, Iwata K, *et al.*: Clinical characteristics of functional recovery after coronary artery bypass graft surgery in Japanese octogenarians. *J Phys Ther Sci.* 2016; 28: 621-625.
- 12) 齊藤正和, 上坂建太, 他: 心臓外科手術後のカテコラミン投与量およびリハビリテーション進行に対する術前腎機能障害ならびに術後急性腎障害の影響の検討. *理学療法* 学. 2012; 39: 410-417.
- 13) Saitoh M, Takahashi T, *et al.*: Factors determining achievement of early postoperative cardiac rehabilitation goal in patients with or without preoperative kidney dysfunction undergoing isolated cardiac surgery. *J Cardiol.* 2013; 61: 299-303.
- 14) 櫻田弘治, 高橋哲也, 他: 術前栄養状態と心大血管手術後リハビリテーション進行の関連—geriatric nutritional risk index を用いた検証. *理学療法* 学. 2013; 40: 401-406.
- 15) 高橋哲也: 急性期における循環器系のリスク管理. *理学療法* 京都. 2006; 35: 75-80.
- 16) 井上 博: 心臓と自律神経—温故知新. *心電図.* 2016; 36: 315-327.
- 17) 友田芳夫, 上村史朗, 他: 発作性心房細動発症前における自律神経活動に関する検討. *J Cardiol.* 1998; 31: 11-17.
- 18) 久次米真吾, 野呂真人, 他: 心室頻拍発症時における自律神経変動と心拍変動の関係—MemCalc を用いて. *心臓.* 2007; 39: 40-45.
- 19) 川村祐一郎: 自律神経活動と心疾患—特に不整脈発症との関連. *旭川医科大学研究フ*ォーラム. 2010; 11: 37-45.
- 20) 下村 毅, 碓氷章彦, 他: 開心術後の心房細動発症における交感神経活性の関与. *日本心臓血管外科学会雑誌.* 2006; 35: 309-314.
- 21) 伊東春樹: AT を基準とした運動療法. *呼吸と循環.* 1992; 40: 1173-1182.
- 22) Haskell WL: Cardiovascular complications during exercise training of cardiac patients. *Circulation.* 1978; 57: 920-924.

- 23) 覚張秀樹, 広瀬統一: ウォーミングアップ・クーリングダウンにおけるストレッチング. 理学療法. 2004; 21: 1482-1491.
- 24) 形本静夫: ウォーミングアップの生理学. Jpn J Sports Sci. 1988; 7: 620-627.
- 25) Thacker SB, Gilchrist J, *et al.*: The impact of stretching on sports injury risk: a systematic review of the literature. Med Sci Sports Exerc. 2004; 36: 371-378.
- 26) 南谷和利: 障害予防としてのウォーミングアップとクーリングダウンの意義—内科的(循環器を中心に) 立場から. Jpn J Sports Sci. 1988; 7: 633-637.
- 27) 黒澤美枝子: 自律神経・内分泌, スタンダード生理学(第3版). 二宮石雄(編), 文光堂, 東京, 2013, pp. 29-50.
- 28) 古川直裕: 自律神経系, 医療系学生のための生理学概説(第3版). 喜多 弘(編), 大学教育出版, 岡山, 2012, pp. 85-90.
- 29) 黒澤美枝子: 自律神経系, 標準生理学(第8版). 本間研一(編), 医学書院, 東京, 2014, pp. 386-410.
- 30) 貴邑富久子, 根来英雄: 自律神経系と内臓機能, シンプル生理学(第7版). 南江堂, 東京, 2016, pp. 91-97.
- 31) 安達 仁: 運動処方の基本, 心肺運動負荷テストと運動療法. 南江堂, 東京, 2004, pp. 253-261.
- 32) 早野順一郎: 心拍変動による自律神経機能解析, 循環器疾患と自律神経機能(第2版). 井上 博(編), 医学書院, 東京, 2001, pp. 71-109.
- 33) 小川洋二郎, 岩崎賢一, 他: 周波数解析を用いた自律神経機能評価機器. Anesthesia 21 Century. 2011; 13: 20-25.
- 34) Furlan R, Guzzetti S, *et al.*: Continuous 24-hour assessment of the neural regulation of systemic arterial pressure and RR variabilities in ambulant subjects. Circulation. 1990; 81: 537-547.

第1章 冠動脈バイパス術後患者の離床プログラム実施中における自律神経系活動の変化

1. はじめに

集中治療室 (Intensive Care Unit : 以下, ICU) において, せん妄の発現頻度や期間を減少させるために, 早期離床および運動療法 (early mobilization) を実施することが推奨される¹⁾. さらに心臓血管外科手術後は呼吸器合併症やせん妄, 廃用症候群予防のために, 可及的早期に端坐位, 立位, 歩行などの離床を進めることは妥当であるとされ²⁾, 我が国の多施設大規模研究において冠動脈バイパス術 (Coronary Artery Bypass Grafting : 以下, CABG) 後に 100m 自立歩行が 8 日以内に獲得できた順調例では, 手術後平均 1.6 ± 0.9 日で立位が開始されているとの報告がある³⁾.

急性期における循環器系のリスク管理には血圧と心拍数のバイタルサインが安定していることが重要であり⁴⁾, 心臓外科手術後の離床開始基準やステップアップの基準にも血圧や心拍数に関する記載がされている²⁾. バイタルサインの変動には自律神経系 (Autonomic Nervous System : 以下, ANS) 活動が関与しており⁵⁻⁷⁾, 手術前と比べて手術後では交感神経活動の上昇, 副交感神経活動の低下が生じているとの報告がある⁸⁾. これら ANS 活動の変化は, 循環動態の不安定性, 不応期の短縮やばらつきを生じ, 心房細動や心室頻拍などの不整脈を誘発するとされ^{9,10)}, 離床を進める際の障壁になり得る. CABG 後の ANS 活動に関する先行研究において, 手術前と比較して手術後 1 日目では交感神経活動が有意に上昇, 副交感神経活動が有意に低下しているとされ⁸⁾, 手術後 1 日目の安静坐位時と同日の坐位での四肢自動運動時では ANS 活動に有意な差がない¹¹⁾と報告されている. また手術前の立位時と比較して手術後 6 週の立位時では副交感神経活動が上昇すると言われている¹²⁾. しかし, 手術前後の安静臥位時での比較や急性期以降の離床時の ANS 活動についての報告は散見されるが, 最も注意が必要である手術後 1~2 日目の離床時における ANS 活動に関する報告はない. CABG 後患者に対して背臥位から端坐位, 立位と離床を進める離床プログラム実施中における ANS 活動を明らかにすることは, バイタルサインとして表出される以外の変化を把握することができ, 早期離床を安全に進める上で新たな評価指標になり得る

と考えられる。

本研究の目的は、CABG 後 1～2 日目における離床プログラム実施中の ANS 活動を心拍変動解析から明らかにすることとした。

2. 対象と方法

2-1. 対象

本研究の対象は 2014 年 6 月から 2015 年 8 月までに、待機的に CABG を施行した狭心症患者のうち、本研究の趣旨を理解し同意が得られた症例、手術前に立位が可能であった症例、手術前に β 遮断薬内服症例で、なおかつ手術 1～2 日前に術前オリエンテーション¹³⁾を実施できた 29 症例とした。そのうち、日本循環器学会「心大血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン (2012 年)」に準じ²⁾、重篤な合併症などによって離床を進められなかった例 (4 例)、手術後に β 遮断薬非内服例 (1 例)、離床プログラム実施時にカテコラミン投与のあった例 (1 例)、非洞調律例 (3 例)、体外式ペースメーカ挿入例 (3 例)、ANS 指標の平均値 $\pm 3SD$ より外れ値¹⁴⁾のある解析不能例 (2 例) を除外した 15 例を今回の解析対象者とした。 β 遮断薬は ANS 活動に作用する可能性があるため^{15,16)}、本研究では手術前後に β 遮断薬を内服している症例に統一した。

本研究を実施する際には、調査開始時に紙面及び口頭にて研究の目的・方法に関して詳しく説明を行い、署名によって同意を得た。なお、本研究は心臓病センター榊原病院の倫理委員会の承認 (承認番号：第 20140401 号) を受け実施した。

2-2. 方法

周術期の心臓リハビリテーションは全症例、日本循環器学会ガイドライン²⁾の離床開始基準、ステップアップ基準に準拠して手術後 1～2 日目に背臥位から端坐位、立位と進めるプロトコルで実施した。

測定項目は ANS (交感神経、副交感神経) 指標、心拍数 (Heart Rate : 以下, HR), 収縮期血圧 (Systolic Blood Pressure : 以下, SBP), 呼吸数とした。ANS 活動の測定に必要な

な心電図記録には心電計 DYNASCOPE8000 シリーズ DS-8500 (フクダ電子) を用い、心拍変動周波数解析には周波数解析プログラム Memcalc/Tonam2C (GMS 社) を用いた。周波数成分の分類は、0.04~0.15Hz を低周波成分 (Low Frequency: 以下, LF), 0.15~0.40Hz を高周波成分 (High Frequency: 以下, HF) とし、HF を副交感神経活動の指標、LF/HF を交感神経活動の指標として用いた¹⁷⁾。HF を評価するためには約 1 分の記録が必要で、LF は約 2 分を必要とする¹⁸⁾。そのため、手術前後の各姿勢 (背臥位, 端坐位, 立位, 立位後背臥位) において解析データとして採用する測定時間を 2 分間として各姿勢の平均値を算出した。呼吸による ANS 活動の変動を避けるために、測定中は深呼吸や息こらえを行わず、定常呼吸を行うように指示した。深呼吸、咳嗽が生じた場合はその時間の記録を除外した。HR は ANS 指標と同様に、各姿勢において解析データとして採用する測定時間 2 分間の平均値を算出した。SBP は自動血圧計 CUF-8404 (フクダ電子) を用いて各姿勢で測定した。呼吸数は胸郭の動きを目視にて測定した。呼吸数による ANS 活動への影響を除くため、呼吸周波数 0.15Hz 以上、心拍呼吸比 2.0 以上の条件で行う必要があり¹⁷⁾、本研究では全症例条件を満たしていた。

研究プロトコルを図 1 に示した。手術前の心電図測定は手術前日に病室にて、背臥位の状態で心電計を装着し安静背臥位を 5 分間確保した後、HR と ANS 活動の測定を行った。安静背臥位の状態で 2 分間測定し、端坐位、立位を各 5 分間行い、各々の最後の 2 分間を解析データとして採用した。手術後は鎮静薬を終了し Richmond Agitation Sedation Scale (RASS) 0 で意思疎通が可能で、日本循環器学会ガイドラインの離床開始基準を満たしており、主治医から離床開始許可が出た時点で測定を行った。手術後の測定は、背臥位の状態で HR と ANS 活動の測定を開始した。安静背臥位を 5 分間確保した後の 2 分間を介入前背臥位の解析データとして採用した。離床前の準備運動として股・膝関節屈伸、足関節底背屈の下肢自動運動を約 5 分間行った後に、端坐位約 10 分間、立位約 5 分間を行った。端坐位と立位の最後 2 分間に静止時間を設け、この間のデータを解析データとして採用した。立位後に安静背臥位をとり、5 分前後経過した後の 2 分間を立位後背臥位の解析データとして採用した。

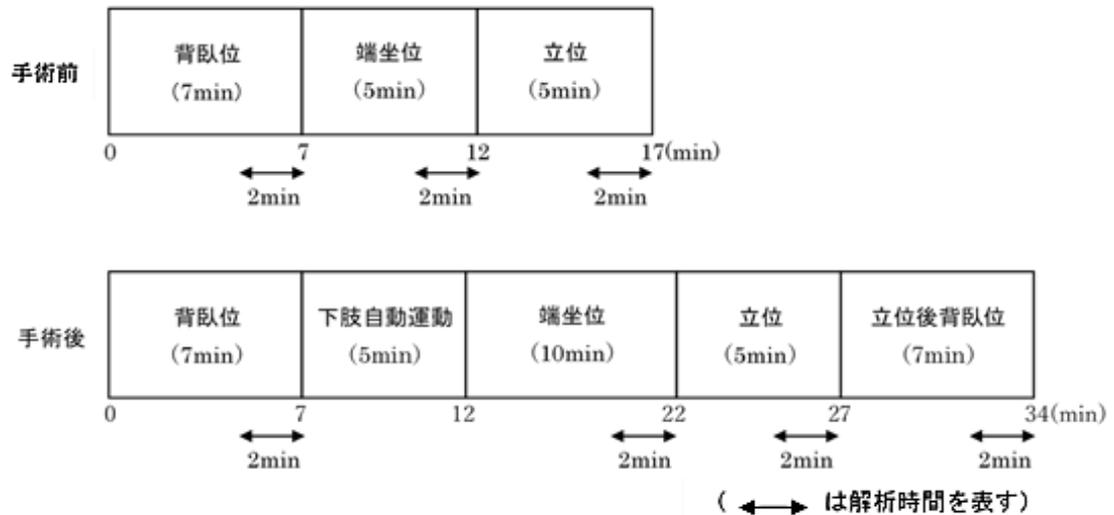


図1 研究プロトコル

患者基礎属性は診療記録より、基礎情報として年齢、性別、体格指数 (Body Mass Index : 以下, BMI), 狭心症の種類, 手術前情報として脳性ナトリウム利尿ペプチド (Brain Natriuretic Peptide : 以下, BNP), 血清クレアチニン, 糖化ヘモグロビン (Hemoglobin A1c : 以下, HbA1c), 糖尿病罹病歴, 左室駆出率, New York Heart Association (NYHA) 分類, 喫煙歴, β 遮断薬内服量, 手術情報として術式, 開胸部位, 手術時間, 麻酔時間, 出血量, 総水分バランス, 手術後情報として人工呼吸器挿管時間, 白血球数 (White Blood Cell : 以下, WBC), 心房細動発症, β 遮断薬内服量を調査した。

2-3. 統計解析

各項目の正規性は Shapiro-Wilk 検定にて確認した。手術前後の β 遮断薬内服量の比較, 手術前後の背臥位での SBP, HR, HF, LF/HF の比較, 手術前と手術後の背臥位と離床プログラム (端坐位, 立位, 立位後背臥位) 実施中の各姿勢での SBP, HR, HF, LF/HF の比較は対応のある t 検定を行い, 背臥位と離床プログラム実施中の各姿勢での多重比較は Holm 法を用いて補正した。ANS 指標の変化率の算出方法は, (端坐位または立位 - 背臥位) / 背臥位 $\times 100$ とした。結果の表記は平均値 \pm 標準偏差とした。統計学的解析には SPSS

ver.22.0 (IBM 社) を用い、有意水準は 5%とした。

3. 結果

患者基礎属性を表 1 に示した。平均年齢は 65.9 ± 11.1 歳、男性 12 例、女性 3 例であった。β 遮断薬内服量は手術前 $4.6 \pm 3.0\text{mg}$ 、手術後 $3.2 \pm 2.9\text{mg}$ であり、手術前後で有意な差が認められなかった。

表 1 患者基礎属性

年齢(歳)	65.9 ± 11.1
性別(男性/女性)(例)	12 / 3
BMI (kg/m^2)	24.5 ± 4.1
狭心症の種類(無症候性/労作性/不安定)(例)	6 / 9 / 0
手術前情報	
BNP(pg/mL)	56.5 ± 51.3
血清クレアチニン(mg/dL)	0.9 ± 0.2
HbA1c(%)	7.0 ± 1.2
糖尿病罹病歴(年)	8.5 ± 12.4
左室駆出率(%)	57.3 ± 14.5
NYHA分類(I/II/III/IV)	7 / 6 / 2 / 0
喫煙歴(喫煙歴なし/禁煙4週以上/禁煙4週未満/喫煙中)(例)	8 / 4 / 2 / 1
β 遮断薬内服量(mg)	4.6 ± 3.0
手術情報	
術式(Off-pump CABG/On-pump beating CABG/Conventional CABG)(例)	13 / 2 / 0
開胸部位(正中切開/左肋間開胸)(例)	10 / 5
手術時間(min)	267.9 ± 102.7
麻酔時間(min)	340.7 ± 100.2
出血量(mL)	1099.0 ± 1023.7
総水分バランス(mL)	1678.4 ± 708.7
手術後情報	
人工呼吸器挿管時間(min)	628.5 ± 251.6
WBC(μL)	11760.0 ± 5680.0
心房細動発症(例)	4
β 遮断薬内服量(mg)	3.2 ± 2.9

mean ± SD

BMI : 体格指数, BNP : 脳性ナトリウム利尿ペプチド, HbA1c : 糖化ヘモグロビン, NYHA : New York Heart Association, CABG : 冠動脈バイパス術, WBC : 白血球数

手術前後の離床プログラム実施中における SBP, HR, ANS 指標の比較を表 2 に示した。SBP は手術前後の背臥位の比較において、有意な差は認められなかった。手術後の背臥位との比較においては、手術後の端坐位で有意な差は認められなかったが、立位 ($p<0.05$) と立位後背臥位 ($p<0.01$) で有意に高値を示した。HR は手術前後の背臥位の比較において、手術後で有意に高値を示した ($p<0.01$)。手術前の背臥位との比較においては、手術前の端坐位と立位で有意な差は認められなかった。手術後の背臥位との比較においては、手術後の端坐位と立位後背臥位で有意な差は認められなかったが、立位で有意に高値を示した ($p<0.01$)。HF の手術前後の背臥位での比較においては、手術前と手術後の背臥位は $116.4 \pm 86.4 \text{ms}^2$, $12.5 \pm 9.8 \text{ms}^2$ であり、手術後で有意に低値を示した ($p<0.01$)。手術前の背臥位との比較においては、手術前の端坐位 $72.8 \pm 50.7 \text{ms}^2$ と立位 $47.0 \pm 27.8 \text{ms}^2$ で有意な差は認められなかった。手術後の背臥位との比較においては、手術後の端坐位 $7.4 \pm 4.5 \text{ms}^2$ ($p<0.05$) と立位 $4.9 \pm 2.9 \text{ms}^2$ ($p<0.01$) で有意に低値を示したが、立位後背臥位 $10.9 \pm 7.4 \text{ms}^2$ で有意な差は認められなかった。LF/HF は手術前後の背臥位の比較においては、手術前と手術後の背臥位は 1.5 ± 0.9 , 1.8 ± 1.1 であり、手術後で有意に高値を示した ($p<0.05$)。手術前の背臥位との比較においては、手術前の端坐位 2.0 ± 1.3 と立位 2.4 ± 1.4 で有意な差は認められなかった。手術後の背臥位との比較においては、手術後の端坐位 2.6 ± 1.7 と立位 3.1 ± 2.3 で有意に高値を示し ($p<0.05$)、立位後背臥位 1.9 ± 1.2 で有意な差は認められなかった。

手術前後の背臥位から各姿勢の ANS 変化率を表 3 に示した。HF は手術前および手術後の各々で背臥位から端坐位での変化率は $-18 \pm 6\%$ と $-24 \pm 47\%$ 、背臥位から立位での変化率は $-43 \pm 15\%$ と $-43 \pm 48\%$ であり、背臥位から各姿勢の変化率を手術前と手術後で比較し有意な差は認められなかった。LF/HF は手術前および手術後の各々で背臥位から端坐位での変化率は $41 \pm 14\%$ と $37 \pm 48\%$ 、背臥位から立位での変化率は $62 \pm 11\%$ と $66 \pm 73\%$ であり、背臥位から各姿勢の変化率を手術前と手術後で比較し有意な差は認められなかった。

表 2 手術前後の離床プログラム実施中における各指標の比較

	背臥位	端坐位	立位	立位後背臥位
SBP (mmHg)				
手術前	119.4±15.5			
手術後	119.3±9.4	122.6±10.7	127.7±13.4*	127.1±12.2**
HR (bpm)				
手術前	65.4±7.8	67.2±10.8	71.6±12.0	
手術後	90.1±8.7†	92.4±8.3	96.5±10.3**	90.3±8.4
HF (ms²)				
手術前	116.4±86.4	72.8±50.7	47.0±27.8	
手術後	12.5±9.8†	7.4±4.5*	4.9±2.9*	10.9±7.4
LF/HF				
手術前	1.5±0.9	2.0±1.3	2.4±1.4	
手術後	1.8±1.1†	2.6±1.7*	3.1±2.3*	1.9±1.2

平均値±標準偏差

手術前背臥位 vs 手術後背臥位 † : p<0.01

背臥位 vs 端坐位, 立位, 立位後背臥位 * : p<0.05 ** : p<0.01

SBP : 収縮期血圧, HR : 心拍数, HF : 高周波成分, LF : 低周波成分

表 3 手術前後の背臥位から各姿勢の ANS 変化率の比較

	手術前	手術後	P 値
HF 変化率 (%)			
端坐位	-18±6	-24±47	n.s.
立位	-43±15	-43±48	n.s.
LF/HF 変化率 (%)			
端坐位	41±14	37±48	n.s.
立位	62±11	66±73	n.s.

平均値±標準偏差

ANS：自律神経系，HF：高周波成分，LF：低周波成分

4. 考察

CABG 後早期の離床プログラム実施中における ANS 活動の変化について、心拍変動解析を用いて検討した。方法でも述べたように、 β 遮断薬が ANS 活動に作用する可能性がある^{15,16)}。その一方、Hogue ら⁸⁾は、手術後 1 日目の安静時においては β 遮断薬内服の有無は ANS 活動に影響を及ぼさなかったと報告しているが、その機序については明らかにされていない。本研究の対象は全員、手術の前後ともに β 遮断薬を内服しており、さらに手術前後における内服量に有意な差は認められていない。これらのことから、本研究で得られた手術前後の ANS 活動の変動に、 β 遮断薬が影響を与えたとは考えにくい。

Hogue ら⁸⁾は手術後 1 日目には交感神経活動が上昇、副交感神経活動が低下していると報告している。本研究においても、ANS 活動は手術前の背臥位と比較して、手術後 1~2 日目の背臥位では、交感神経活動が有意に上昇し、副交感神経活動が有意に低下しており、先行研究と同様であった。交感神経活動を上昇、副交感神経活動を低下させる要因として、生体侵襲による炎症や疼痛などの周術期ストレスが挙げられる。炎症性サイトカインは WBC 増多を引き起こし、交感神経活動を活性化させる¹⁹⁾。また、疼痛や不安などの周術期スト

レスがコルチコトロピン放出因子を増加させ、交感神経活動を上昇、副交感神経活動を低下させることが知られている²⁰⁾。本研究では手術後1～2日目のWBCは正常範囲より高値であり、周術期ストレスが生じていたため、それに伴って交感神経活動が上昇し、副交感神経活動が低下したと考えられる。

Bellwonら¹²⁾は手術後6週において、背臥位と立位の姿勢の違いではANS活動に有意な差が認められなかったと報告している。本研究でも、手術前において背臥位と立位の姿勢の違いではANS活動に有意な差が認められなかった。一方で、手術後1～2日目において背臥位から端坐位、立位と離床プログラムを進行することで、交感神経活動やSBP、HRが段階的に上昇、副交感神経活動が段階的に低下しており、手術前や急性期以降である手術後6週と比較して、手術後早期ではANS活動の変動が大きいことが推察される。また、背臥位から立位になることで重力負荷によって下肢への血流シフトや静脈還流量の減少が生じるが、これに対して、心肺圧受容器や頸動脈洞・大動脈弓の圧受容器が反応し、副交感神経活動の抑制、交感神経活動の亢進が生じる^{17,21)}。このような反射機構が働きANS活動に変化が生じ、SBPやHRの上昇が認められたと考えられる。手術前と比較して手術後の安静背臥位でのANS活動に有意な差が認められたため、安静背臥位を基準にしたANS活動の変化率を手術前と手術後で比較した結果、背臥位から端坐位、背臥位から立位の両方で、手術前後の変化率に有意な差を認めず、手術後も手術前と同程度の生体反応であることが示された。以上のことから、手術前と比較して手術後の安静背臥位でのANS活動に変化はみられるが、姿勢変化によるANS活動の変化率が手術前と同程度であれば離床を順調に進められる可能性が示唆され、早期離床により臥床に伴う合併症を予防することにつながるのではないかと考える。

本研究の対象は手術後の測定日数での影響を考慮し測定日数を統一したため、離床順調症例であり、離床遅延症例は含まれていない。手術後の離床遅延症例も一定数存在しており、今後は離床遅延症例を含めて検討していく必要があると考えられる。

5. 引用文献

- 1) 日本集中治療医学会 J-PAD ガイドライン作成委員会：日本版・集中治療室における成人重症患者に対する痛み・不穏・せん妄管理のための臨床ガイドライン．日本集中治療医学会雑誌． 2014; 21: 539-579.
- 2) 日本循環器学会ホームページ 循環器病の診断と治療に関するガイドライン（2011年度合同研究班報告）心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン（2012年改訂版）． http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2012_nohara_h.pdf（2019年7月2日引用）
- 3) 森沢知之, 湯口 聡, 他：心臓外科手術後リハビリテーション遅延の特徴—多施設による検討． 総合リハビリテーション． 2015; 43: 459-464.
- 4) 高橋哲也：急性期における循環器系のリスク管理． 理学療法京都． 2006; 35: 75-80.
- 5) 井上 博：心臓と自律神経—温故知新． 心電図． 2016; 36: 315-327.
- 6) 友田芳夫, 上村史朗, 他：発作性心房細動発症前における自律神経活動に関する検討． J Cardiol. 1998; 31: 11-17.
- 7) 久次米真吾, 野呂真人, 他：心室頻拍発症時における自律神経変動と心拍変動の関係—MemCalcを用いて． 心臓． 2007; 39: 40-45.
- 8) Hogue CW Jr, Stein PK, *et al.*: Alterations in temporal patterns of heart rate variability after coronary bypass graft surgery. Anesthesiology. 1994; 81: 1356-1364.
- 9) 川村祐一郎：自律神経活動と心疾患—特に不整脈発生との関連． 旭川医科大学研究フォーラム． 2010; 11: 37-45.
- 10) 下村 毅, 碓氷章彦, 他：開心術後の心房細動発症における交感神経活性の関与． 日本心臓血管外科学会雑誌． 2006; 35: 309-314.
- 11) Mendes RG, Simões RP, *et al.*: Is applying the same exercise-based inpatient program to normal and reduced left ventricular function patients the best strategy after coronary surgery? A focus on autonomic cardiac response. Disabil Rehabil. 2014; 36: 155-162.

- 12) Bellwon J, Siebert J, *et al.*: Heart rate power spectral analysis in patients before and 6 weeks after coronary artery bypass grafting. *Clin Sci.* 1996; 91: 19-21.
- 13) 西村真人, 河村知範: 術前における理学療法の実際, 心臓血管外科リハビリテーション—ゴールド・スタンダード—. 高橋哲也 (編), ヒューマン・プレス, 神奈川, 2018, pp. 40-49.
- 14) 宮原洋一: Monte Carlo simulation による外れ値検出方法の検討—第 1 報 平均値と標準偏差を用いる方法. *医学検査.* 1993; 42: 1830-1835.
- 15) 小川明宏, 丸岡 弘, 他: 急性心筋梗塞後の心臓自律神経障害と不安抑うつに対する急性期心臓リハビリテーションの効果— β 遮断薬投与による比較. *日本冠疾患学会雑誌.* 2015; 21: 93-100.
- 16) Goldsmith RL, Bigger JT, *et al.*: Long-term carvedilol therapy increases parasympathetic nervous system activity in chronic congestive heart failure. *Am J Cardiol.* 1997; 80: 1101-1104.
- 17) 林 博史: Introduction, 心拍変動の臨床応用—生理的意義, 病態評価, 予後予測. 林博史 (編), 医学書院, 東京, 1999, pp. 1-27.
- 18) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J.* 1996; 17: 354-381.
- 19) 丸藤 哲, 和田剛志: 神経内分泌・自律神経反応と炎症反応. *Thrombosis Medicine.* 2014; 4: 5-14.
- 20) 澄川耕二: 外科的侵襲と自律神経機能. *日本臨床麻酔学会誌.* 1997; 17: 209-216.
- 21) 麻野井英次: 自律神経系による循環調節, 循環器疾患と自律神経機能 (第 2 版). 井上博 (編), 医学書院, 東京, pp. 19-43.

第2章 嫌気性代謝閾値での定常負荷運動後のクーリングダウンが心拍変動に及ぼす影響

1. はじめに

運動負荷前後に心房性頻拍や心停止などの心事故発生頻度が高いと言われている¹⁾。運動や精神的緊張による交感神経興奮が不応期短縮、伝導性亢進から頻脈性不整脈を誘発し、副交感神経興奮が頻脈性不整脈を抑制することが報告されている^{2,3)}。また、運動を急に中止することを誘因に、運動後に静脈還流量の減少や副交感神経活動が過度に亢進することがあり、徐脈、低血圧、めまいなどの症状を引き起こすことがある^{4,5)}。運動後に行う軽い運動はクーリングダウン（cooling down：以下、CD）と呼ばれ、自律神経系の急激な変化を抑制する⁶⁾。そのため、運動直後の静脈還流量の減少抑制による低血圧や眩暈などの予防のために有効であるとされている^{4,5)}。日本循環器学会ガイドライン⁴⁾においても、運動後にCDを行うことが推奨されているが、適正な強度に関しては触れられていない。循環反応を調節している心臓自律神経活動の運動負荷後の経時的変化を調査することで、CD強度の違いによって心臓自律神経活動の変動がどのように変化するのか把握し、心臓自律神経活動におけるCDの適正強度を考えることは運動負荷を行う上で重要である。心臓自律神経活動は、心臓の拍動周期のゆらぎである心拍変動を解析することで、その指標として用いることが可能である⁷⁾。

また、心疾患患者に対する運動処方では、アシドーシスを生じないことや血中カテコラミンの著しい上昇がないことなどから無気的な代謝が加わる直前の運動強度である嫌気性代謝閾値（anaerobic threshold：以下、AT）による運動処方を推奨する人が多い^{4,8)}。

そこで本研究は、AT強度での定常負荷運動後におけるCDの強度が心拍変動解析から推定される心臓自律神経活動に及ぼす影響を明らかにするために、CDの強度の違いによる心臓自律神経活動の経時的変化を検討した。

2. 対象と方法

2-1. 対象

本研究の対象は自律神経および循環器系の疾患の既往歴を持たない健常成人男性 10 名 (年齢 22.0 ± 5.1 歳, 身長 167.8 ± 6.1 cm, 体重 62.6 ± 7.4 kg) とした. 本研究を実施する際には, 実験開始前に紙面及び口頭にて研究の目的・方法に関して詳しく説明を行い, 署名によって同意を得た. なお, 本研究は川崎医療福祉大学の倫理委員会の承認 (承認番号: 第 17-021 号) を受け実施した.

2-2. 方法

被験者には測定開始 24 時間前からアルコールの摂取や激しい運動を避け, また測定の 2 時間前から絶食とするように指示した. 運動強度を決定するため, 事前に心肺運動負荷試験 (cardiopulmonary exercise test : 以下, CPX) を実施した. CPX は自転車エルゴメーター (Strength ergo 8, 三菱電機エンジニアリング社) を使用し, サドルの高さをペダルが最低点に位置したときに膝関節が 30° 屈曲位, ペダルの足位置をペダル中心軸上に第 2 中足骨頭が位置するように設定した. 20watt/min のランプ負荷条件のもと, ペダル回転速度を 50rpm で保たせた. CPX の終点は, ①日本循環器学会「心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン (2012 年改訂版)」⁴⁾の運動負荷試験の中止基準に該当する場合, ②ペダル回転速度が 45rpm を下回る場合, ③運動終了の訴えがあった場合のいずれかとした. 運動中に呼気ガス分析装置 (AT-1100A, ANIMA 社) を用い breath-by-breath 法にて呼気ガスを測定し, AT を V-slope 法にて求め, AT レベルの負荷量 (watts) を定常負荷運動の運動強度に設定した.

AT 計測後, 疲労や心肺機能への影響を除外するため 2 日以上間隔をあけて, 次にあげる 3 つの条件下での運動をそれぞれ 48 時間以上の間隔をあけて行わせた. 無線心電計 (Trigno Wireless System, Trigno 社) を使用して心電図を記録しながら, 自転車エルゴメーター上での 5 分間の安静に続いて, 各被験者で計測された AT レベルでの定常負荷運動を 20 分間行わせた. その後, 3 条件の CD, ①静止座位をとり CD を行わない場合 (no cooling down :

以下, NCD), ②AT レベルの 50%強度の CD (AT₅₀), ③AT レベルの 75%強度の CD (AT₇₅) を 10 分間行わせた (図 1). ペダル回転速度は 50rpm とした. いずれの実験も被験者ごとに順番はランダムに行わせた. 心電図は胸部双極誘導 (CM5) を使用し, Windows 版 LabChart ver.7 (ADInstruments 社) を用いてハードディスクに記録した.



図 1 実験プロトコル

R-R 間隔による心拍変動周波数解析には心拍変動解析ソフト HRV ver.1 (ADInstruments 社) を用いた. 周波数成分の分類は, 0.04~0.15Hz を低周波成分 (Low frequency : 以下, LF), 0.15~0.40Hz を高周波成分 (High frequency : 以下, HF) とし, HF を副交感神経活動の指標, LF/HF を交感神経活動の指標として用いた⁷⁾. HF を評価するためには約 1 分の記録が必要であり, LF では約 2 分を必要とする⁹⁾. そこで, 運動開始前, 定常負荷運動中の最後, CD1 分直後, CD5 分前後, CD10 分直前の安定した 2 分間のデータを解析し, 心拍数 (Heart rate : 以下, HR), HF, LF/HF を算出した. 呼吸による心臓自律神経活動の指標への影響を除くため, 呼吸周波数 0.15Hz 以上, 心拍呼吸比 2.0 以上の条件で行う必要がある¹⁰⁾が, 本研究では全施行において条件を満たしていた.

2-3. 統計解析

統計学的手法に関して, 統計学的解析ソフトには SPSS ver.22.0 (IBM 社) を用い, 有意水準は 5%とした. HR, HF, LF/HF の全測定値の正規性は Shapiro-Wilk 検定にて確認した. 時系列に関して, 運動開始前, 定常負荷運動中, CD1 分・5 分・10 分の比較には反復測定分散分析, その後に多重比較検定 Tukey 法を使用した. また, 運動開始前, 定常負荷運動中の CD 条件間での比較には多重比較検定 Tukey 法または Games-Howell 法を用いた.

3. 結果

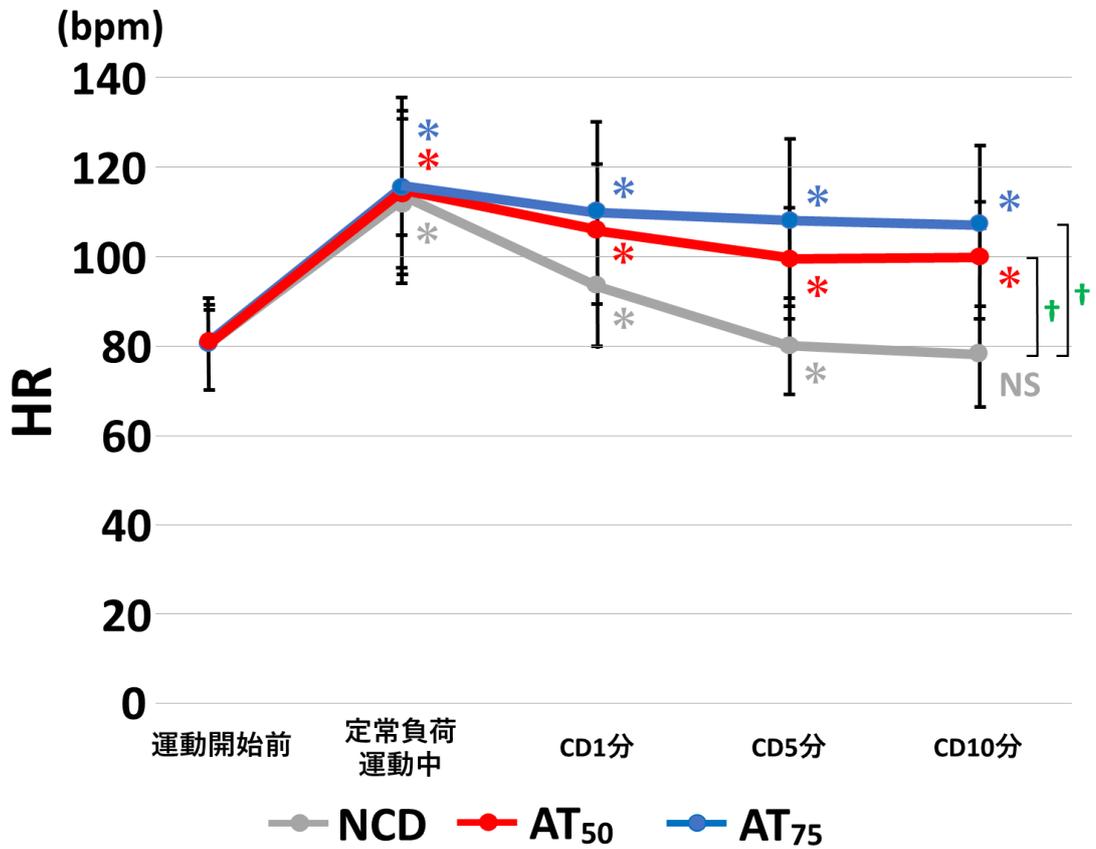
CPXによって得られたATレベルの負荷量は、 74.2 ± 22.6 (最小値 38, 最大値 108) wattsであった。表 1, 図 2 に HR の値を示した。運動開始前に比べ、ATレベルの定常負荷運動を行うと HR は有意に上昇した ($p < 0.05$)。しかし、運動開始前の HR, 定常負荷運動中の HR は 3 回の実験でそれぞれいずれも有意な差は認められなかった。定常負荷運動後の変化としては、NCD では、CD5 分で運動開始前と変わらないレベルに回復したのに対し、AT₅₀ および AT₇₅ においては、CD10 分でも運動開始前に比べ有意な HR の上昇が認められた ($p < 0.05$)。

表 1 CD 条件間における HR の経時的変化

条件	運動開始前	定常負荷運動中	CD1分	CD5分	CD10分
NCD	80.1 ± 9.1	113.4 ± 17.9 *	93.7 ± 13.8 *	80.0 ± 11.0	77.9 ± 11.4
AT ₅₀	79.7 ± 9.0	114.9 ± 18.1 *	105.3 ± 15.8 *	98.8 ± 12.3 *	99.4 ± 13.0 *
AT ₇₅	81.0 ± 10.2	115.4 ± 20.8 *	110.2 ± 20.7 *	108.4 ± 18.7 *	107.3 ± 18.2 *

平均値 ± 標準偏差 (単位 : bpm) (n=10)

運動開始前との比較 : *p<0.05



運動開始前との比較 : *p<0.05 条件間の比較 : † p<0.05

図 2 CD 条件間における HR の経時的変化

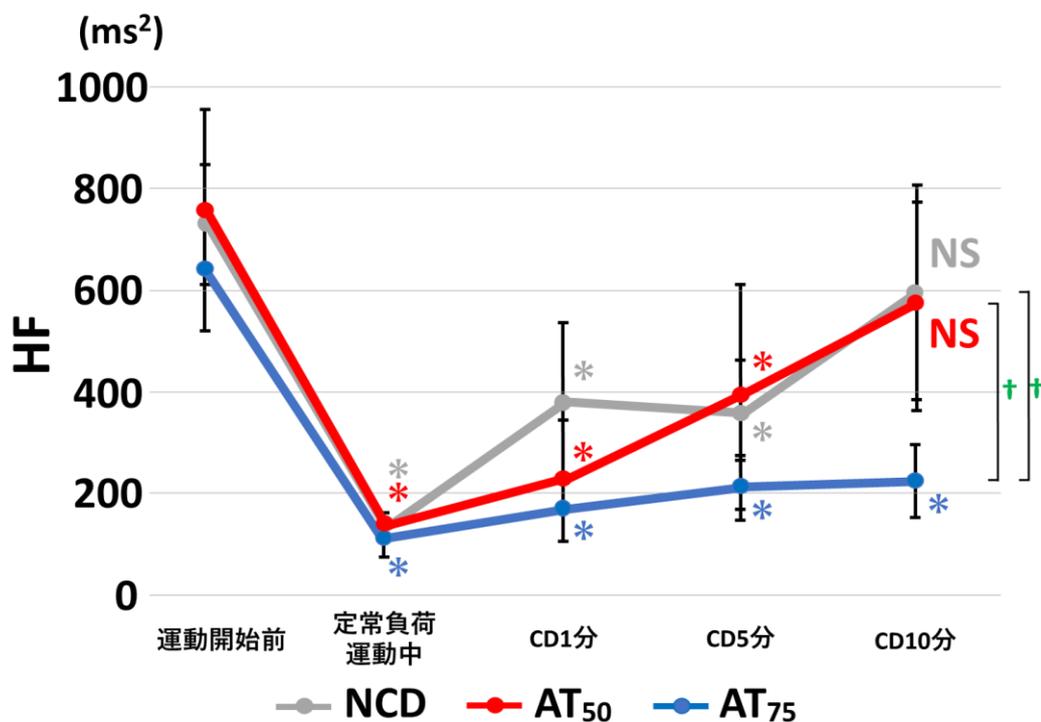
表 2, 図 3 に副交感神経活動の指標である HF の値を示した. 運動開始前に比べ, AT レベルの定常負荷運動を行うと HF は有意に低下した ($p<0.05$). しかし, 運動開始前の HF, 定常負荷運動中の HF は 3 回の実験でそれぞれいずれも有意な差は認められなかった. 定常負荷運動後の変化としては, NCD および AT₅₀ では, CD10 分で運動開始前と変わらないレベルに回復したのに対し, AT₇₅ においては, CD10 分でも運動開始前に比べ有意な HF の低下が認められた ($p<0.05$).

表 2 CD 条件間における HF の経時的変化

条件	運動開始前	定常負荷運動中	CD1分	CD5分	CD10分
NCD	731.9 ± 119.4	127.1 ± 15.9 *	380.0 ± 159.9 *	363.4 ± 98.9 *	598.2 ± 214.3
AT ₅₀	741.0 ± 221.3	132.7 ± 25.4 *	223.4 ± 122.4 *	391.5 ± 224.2 *	571.2 ± 207.1
AT ₇₅	639.3 ± 117.3	110.6 ± 41.7 *	167.9 ± 61.9 *	208.8 ± 66.0 *	222.7 ± 74.9 *

平均値 ± 標準偏差 (単位: ms²) (n=10)

運動開始前との比較: * $p<0.05$



運動開始前との比較: * $p<0.05$ 条件間の比較: † $p<0.05$

図 3 CD 条件間における HF の経時的変化

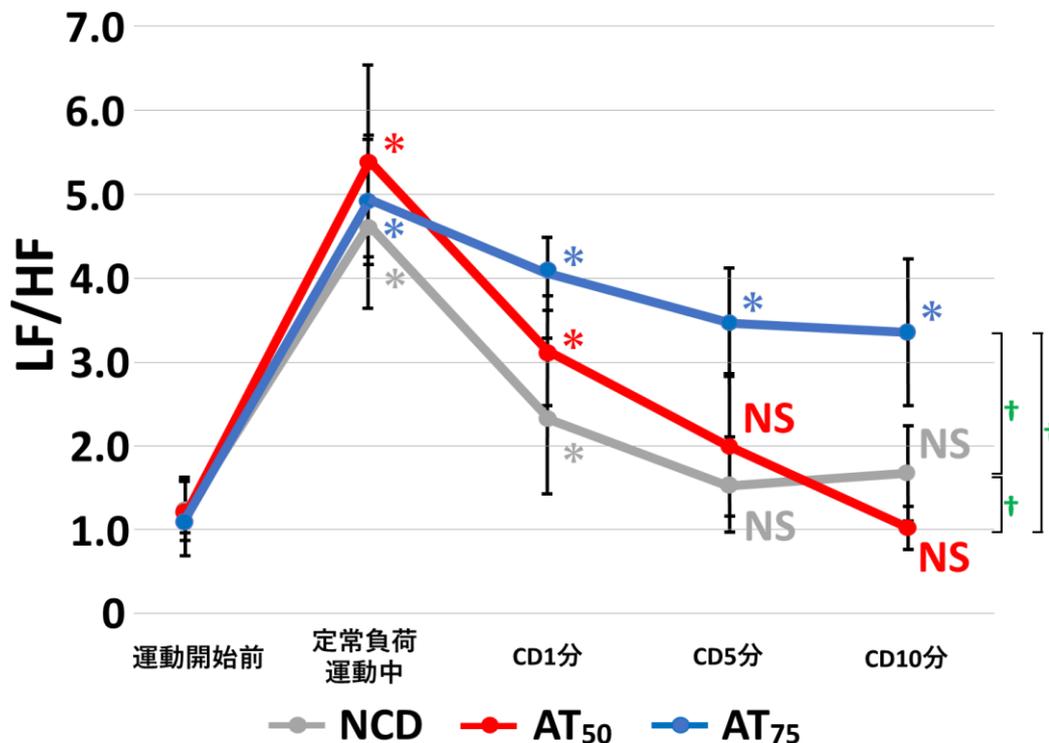
表 3, 図 4 に交感神経活動の指標である LF/HF の値を示した. 運動開始前に比べ, AT レベルの定常負荷運動を行うと LF/HF は有意に上昇した ($p<0.05$). しかし, 運動開始前の LF/HF, 定常負荷運動中の LF/HF は 3 回の実験でそれぞれいずれも有意な差は認められなかった. 定常負荷運動後の変化としては, NCD および AT₅₀ では, CD5 分で運動開始前と変わらないレベルに回復したのに対し, AT₇₅ においては, CD10 分でも運動開始前に比べ有意な LF/HF の上昇が認められた ($p<0.05$).

表 3 CD 条件間における LF/HF の経時的変化

条件	運動開始前	定常負荷運動中	CD1分	CD5分	CD10分
NCD	1.3 ± 0.3	4.7 ± 1.0 *	2.4 ± 0.9 *	1.5 ± 0.6	1.7 ± 0.6
AT ₅₀	1.7 ± 0.4	5.4 ± 1.2 *	3.1 ± 0.7 *	2.0 ± 0.9	1.0 ± 0.3
AT ₇₅	1.1 ± 0.3	5.0 ± 0.7 *	4.1 ± 0.4 *	3.5 ± 0.7 *	3.4 ± 0.9 *

平均値 ± 標準偏差 (n=10)

運動開始前との比較: * $p<0.05$



運動開始前との比較: * $p<0.05$ 条件間の比較: † $p<0.05$

図 4 CD 条件間における LF/HF の経時的変化

4. 考察

本研究では、自転車エルゴメーターを用いた AT レベルでの定常負荷運動後の CD 強度の違いが心拍変動から推定される心臓自律神経活動に及ぼす影響について検討した。健常者の場合、運動が始まると短時間のうちに副交感神経活動は減弱し始め、運動強度に応じて交感神経活動が亢進し、運動終了後は運動前の状態まで急激に戻るとされている^{11,12)}。また、AT 強度での定常負荷運動により、交感神経活動は亢進し、副交感神経活動は抑制されると報告されている¹³⁾。本研究においても 3 条件とも AT レベルでの定常負荷運動中には運動開始前と比較して HF が有意に低下し、LF/HF が有意に上昇していた。運動開始前と定常負荷運動中の測定値に 3 条件間で有意な差がなく、CD 前までは 3 条件とも同様な反応を示していたと考えられる。定常負荷運動後において、NCD では CD5 分には LF/HF、CD10 分には HF が運動開始前のレベルまで戻った。運動終了後は運動前の状態まで戻るとされており¹¹⁾、本研究においても同様の結果が得られた。また、副交感神経活動はウォーミングアップ開始時に低下してほぼ定常状態となるとされているが、交感神経活動は運動強度が強くなるほど上昇するとされている¹¹⁾。AT の運動強度では有意な上昇を示していたが、変動が大きくなかったため、運動開始前の状態に回復するのが副交感神経活動より早かったと考えられる。AT₅₀ では CD5 分には LF/HF、CD10 分には HF が運動開始前のレベルまで戻ったが、AT₇₅ では HF の上昇や LF/HF の低下が遅く、CD10 分では運動開始前のレベルまで戻らなかった。Karvonen 法の運動強度 k を 0.5 とした目標心拍数の 80%強度では、安静と比べて HF は抑制され、LF/HF は亢進するが、目標心拍数の 40%強度では HF と LF/HF とともに安静と比べて有意な変化はみられないと報告されている¹⁴⁾。健常者において Karvonen 法を用いる場合、AT レベルとなる k 値は 0.49 ± 0.13 である¹⁵⁾。従って、Karvonen 法の運動強度 k を 0.5 とした目標心拍数の 80%強度は AT の 80%強度前後であると考えられ、本研究の AT₇₅ と同程度であると推察される。同様に、目標心拍数の 40%強度は AT の 40%強度前後であると考えられ、本研究の AT₅₀ と同程度であると推察される。これらのことから、AT₇₅ では運動強度が高く、HF が低値、LF/HF が高値のまま推移し、AT₅₀ では HF の抑制、LF/HF の亢進が徐々に運動開始前の状態に戻ったと考えられる。

以上から AT レベルの 50%強度で 10 分間 CD を行うことは、副交感神経の再活性化や交感神経の低下に有効であり、AT レベルの 75%強度での CD は、副交感神経の再活性化や交感神経の低下には過度な運動であることが示唆された。

本研究では健常者を対象としたが、健常者と比較して心疾患患者において、安静時に交感神経活動の亢進や副交感神経活動の減弱がみられることがある¹⁶⁾。一方で、健常者と心疾患患者ともに運動中の交感神経活動と副交感神経活動には高度な負の相関関係があり、拮抗的に作動しているとされ¹⁷⁾、運動中の自律神経系活動の変動については同様な傾向を示している。さらに、心疾患患者においても運動後に副交感神経活動が急速に回復する症例も存在する¹⁸⁾。そのため、安静時の自律神経系活動に差はあるが、心疾患患者においても適応できる可能性があると考えられる。

本研究の課題としては、心拍変動解析による心臓自律神経活動の評価に焦点を当てて検討しており、呼気ガスなどについては検討できていない。呼気ガス分析に用いる程度の死腔でも心拍変動に影響を与えると報告があるため、本研究では使用しなかった。しかし、総合的に適切な CD 強度を決定するためには、その他の指標についても検討する必要がある。また、心疾患患者では安静時の心臓自律神経活動が健常者とは異なるため、このような患者における検討も必要である。

5. 引用文献

- 1) Haskell WL: Cardiovascular complications during exercise training of cardiac patients. *Circulation*. 1978; 57: 920-924.
- 2) 井上 博: 致死性心室性不整脈と自律神経. *J Electrocardiol*. 2007; 27: S4-5-4-7.
- 3) 井上 博: 心臓と自律神経—温故知新. *心電図*. 2016; 36: 315-327.
- 4) 日本循環器学会ホームページ 循環器病の診断と治療に関するガイドライン (2011 年度合同研究班報告) 心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン (2012 年改訂版). http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2012_nohara_h.pdf (2017 年 4 月 21 日引用)

- 5) 南谷和利：障害予防としてのウォーミングアップとクーリングダウンの意義—内科的（循環器を中心に）立場から. *Jpn J Sports Sci.* 1988; 7: 633-637.
- 6) 伊寫泰子, 片田志保美, 他：クールダウンの有無による心拍数減衰時定数（T30）の変化. *岐阜県理学療法士会学術誌.* 2011; 15: 12-13.
- 7) 早野順一郎：心拍変動による自律神経機能解析, 循環器疾患と自律神経機能（第2版）. 井上 博（編）, 医学書院, 東京, 2001, pp. 71-109.
- 8) 伊東春樹：ATを基準とした運動療法. *呼吸と循環.* 1992; 40: 1173-1182.
- 9) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J.* 1996; 17: 354-381.
- 10) 林 博史：Introduction, 心拍変動の臨床応用—生理的意義, 病態評価, 予後予測. 林博史（編）, 医学書院, 東京, 1999, pp. 1-27.
- 11) 天田浩司, 米持英俊, 他：心肺運動負荷試験における自律神経の経時的変化の特徴—heart rate variabilityを用いた検討. *別府大学紀要.* 2014; 55: 119-124.
- 12) 安達 仁：運動処方の基本, 心肺運動負荷テストと運動療法. 谷口興一（編）, 南江堂, 東京, 2004, pp. 253-261.
- 13) 西田裕介, 樋渡正夫, 他：施設入所高齢者における低強度運動負荷時の心拍変動—一周波数解析を用いた自律神経活動の評価. *理学療法学.* 2006; 33: 1-6.
- 14) 正保 哲, 洲崎俊男, 他：Karvonen法による運動負荷強度における生体反応. *理学療法科学.* 2011; 26: 33-39.
- 15) 北見裕史, 伊東春樹, 他：健常者及び成人病患者におけるAT時心拍数—カルボーネン法との比較検討. *体力科学.* 1996; 45: 693.
- 16) Porter TR, Eckberg DL, *et al.*: Autonomic pathophysiology in heart failure. Sympathetic-cholinergic interrelations. *J Clin Invest.* 1990; 85: 1362-1371.
- 17) 佐藤 廣, 山本真千子, 他：心不全患者における運動中の自律神経活動の変化. *自律神経.* 1994; 31: 14-20.

- 18) Chanavirut R, Makarawate P, *et al.*: Autonomic and cardio-respiratory responses to exercise in Brugada Syndrome patients. *J Arrhythm.* 2016; 32: 426-432.

第3章 下肢筋への静的及び動的ストレッチングによる漸増負荷運動時の酸素摂取量および心拍変動，筋酸素動態，筋電図周波数に及ぼす影響

1. はじめに

運動の前には傷害の予防かつ高い運動パフォーマンスを発揮するためにウォーミングアップ（warming up：以下，WU）が実施されることが多い。WUは筋収縮による血液循環の促進や筋温を上昇させ，結合組織の伸展性を高め，筋の弾性を高めることによる骨格筋の傷害を予防することを目的としている¹⁾。WUにはストレッチングがよく用いられており，筋を伸張させることによる筋の柔軟性向上などを目的に行われ，主に静的ストレッチング（static stretching：以下，SS）と動的ストレッチング（dynamic stretching：以下，DS）に分類される。SSはターゲットとなる筋群をゆっくりと関節可動域の限界まで伸張させ，限界の肢位で20～30秒保持する²⁾。反動を用いずにゆっくりと筋を伸張させることから，伸張された腱のゴルジ腱器官から信号が脊髄に入力され，脊髄内で抑制性ニューロンを介して伸張された筋の前角細胞を抑制する³⁾。ゆっくりと筋を伸張することで伸張反射が生じにくい方法であり，伸張された筋の筋緊張は低下する^{2,3)}。DSは自動運動により筋の伸張と短縮を繰り返すことで拮抗筋の伸張効果を得る方法である。また，DSでは関節可動域の最終域まで反動を使わずに大きく動かすことが基本とされ，最終域での相反抑制効果によって拮抗筋の伸張効果がより得られる⁴⁾。これまでストレッチングの即時的な効果に関しては，いくつか報告がされている。野口ら⁵⁾はヒラメ筋に対して2分間のSSを施行することで足関節背屈角度が有意に増大したが，ヒラメ筋血流量に有意な差を認めなかったと報告している。一方でDSに関しては，立位姿勢で膝関節伸展位での股関節屈曲運動を繰り返すことで，直後にハムストリングスの柔軟性が向上し，筋トルク値と筋電積分値が維持されたと報告されている⁶⁾。

漸増負荷運動により得られる嫌気性代謝閾値（anaerobic threshold：以下，AT）は酸素摂取量（oxygen uptake：以下， $\dot{V}O_2$ ）と二酸化炭素排泄量（carbon dioxide output：以下， $\dot{V}CO_2$ ）の平衡関係が保たれる最大の $\dot{V}O_2$ のことであり，運動耐容能の指標として知られて

いる⁷⁾。AT レベルでの運動であれば、血中カテコラミンの著明な上昇やアシドーシスが生じないとされ、運動処方の際に用いられている^{8,9)}。他にも漸増負荷運動により得られる最大負荷時の $\dot{V}O_2$ である最高酸素摂取量 (peak oxygen uptake ; 以下, peak) は、心疾患患者の予後の指標とされている⁷⁾。このような AT レベルや peak 到達時に、予め下肢筋に対して施行した SS もしくは DS が、運動耐容能や自律神経系にどのような影響を及ぼすかについて検討することは、WU 効果の検証やリスク管理において有意義であると考えられる。

そこで、本研究では健常成人男性を対象に、運動準備段階での 3 種類の WU、すなわち、下肢筋への SS もしくは DS の施行、コントロールとしての 20watt での自転車エルゴメーター駆動が、漸増負荷運動時の酸素摂取量、換気量、心拍変動、筋酸素動態、筋電図周波数にどのような影響を及ぼすかを比較検討した。

2. 対象と方法

2-1. 対象

本研究の対象は呼吸器、循環器疾患、ならびに下肢に運動器疾患の現病、既往のない健常成人男性 10 名 (年齢 20.6 ± 0.5 歳, 身長 168.3 ± 6.1 cm, 体重 62.8 ± 9.5 kg) とした。本研究を実施する際には、実験開始前に紙面及び口頭にて研究の目的・方法に関して詳しく説明を行い、署名によって同意を得た。なお、本研究は川崎医療福祉大学の倫理審査委員会の承認 (承認番号: 第 18-063 号) を受け実施した。

2-2. 方法

被験者には測定開始 24 時間前からアルコールの摂取や激しい運動を避けさせ、また測定の 2 時間前から絶食とさせた。実験の前に体調について聴取し、良好な場合に限り、実験を施行した。

2-2-1. 測定項目

心電図を導出するために無線搬送式心電計 (Trigno Wireless System, Trigno 社) を用

い、ボタン型ディスプレイ電極を前胸部に貼付した。筋電図を導出するために 3 軸加速度計内蔵の無線搬送式筋電計 (Trigno Wireless System, Trigno 社) を用い、センサーを外側広筋と腓腹筋外側頭に貼付した。貼付部位は、外側広筋では上前腸骨棘と膝蓋骨外側を結ぶ線の 2/3、腓腹筋外側頭では腓骨頭と踵を結ぶ線の 1/3 とした¹⁰⁾。導出した心電図と筋電図の記録には、Trigno Wireless System と接続したコンピューターで Windows 版 LabChart ver.7 (ADInstruments 社製) を用いた。筋酸素動態を測定するために近赤外線分光法 (Near-infrared spectroscopy : 以下、NIRS) (多チャンネル組織酸素計 Hb14-2, ASTEM 社) の空間分解分光法を用い、プローブを外側広筋と腓腹筋外側頭に貼付した。貼付部位は筋電計のセンサーの近接部位とし、測定データは計測表示プログラム Hb14 Ver1.04 で記録した。NIRS の測定値は、超音波診断装置 (Prosound SSD-3500SX, アロカ社) を用いて筋表面の皮下脂肪厚を測定し、補正した。呼気ガス濃度と換気量を測定するために、呼気ガス分析装置 (AT-1100A, ANIMA 社) の breath-by-breath 法を用い、測定データはソフトウェア AT-1100A で記録した。

2-2-2. 実験プロトコル

漸増負荷運動は自転車エルゴメーター (Strength ergo 8, 三菱電機エンジニアリング社) を使用し、サドルの高さはペダルが最低点に位置したときに踵をペダルの中央に置き、膝関節伸展位となるよう調節した。足部の位置はペダル中心軸上に第 2 中足骨頭が位置するように設定した。安静 3 分間の後、WU を 4 分間行わせ、20watt/min の漸増負荷運動をペダル回転率 60rpm で行わせた。漸増負荷運動の終点は、ペダル回転率が 50rpm を 3 秒以上下回った場合、もしくは被験者から運動継続困難の訴えがあった場合とした。

2-2-3. ウォーミングアップの種類

漸増負荷運動前に行う WU として、次の 3 条件を設定した。①20watt での自転車エルゴメーター駆動 (ergo 条件)、②外側広筋と腓腹筋外側頭に対する自己での SS 試行 (SS 条件)、③外側広筋と腓腹筋外側頭に対する DS 施行 (DS 条件) とし、各被験者には 3 条件

全ての実験に参加してもらい、実験の順番はランダムに決定した。これら 3 つの条件下での実験は、疲労の影響を除外するため、48 時間以上の間隔をあけて実施した。

ergo 条件では、サドルの高さと足部の位置は漸増負荷運動時と同条件とし、日本循環器学会・運動に関する診療基準委員会の報告¹¹⁾を参考にして、健常成人男性で用いられることの多い方法である自転車エルゴメーターを負荷強度 20watt、ペダル回転率を 60rpm で 4 分間維持させた¹²⁾。自転車エルゴメーター駆動は漸増負荷運動前に行われる WU として一般的であるため、コントロールとして用いた。SS 条件では、左大腿四頭筋、右大腿四頭筋、左下腿三頭筋、右下腿三頭筋の順にそれぞれ 20 秒間のゆっくり自分で伸張してもらう手順を 2 セット行わせた (図 1)^{13,14)}。伸張する強度は、適度な筋の張りを感じ、痛みを感じる手前とした¹⁵⁾。DS 条件では、大腿四頭筋群に対しては直立姿勢から股関節中間位を保持した状態での膝関節屈伸運動を、下腿三頭筋群に対しては立位での足関節底背屈運動をはじめにゆっくり大きく 5 回、続いて速くかつ力強く 10 回の施行を 1 セットとし (図 2)²⁾、大腿四頭筋群、下腿三頭筋群の順に 2 セットを繰り返した。

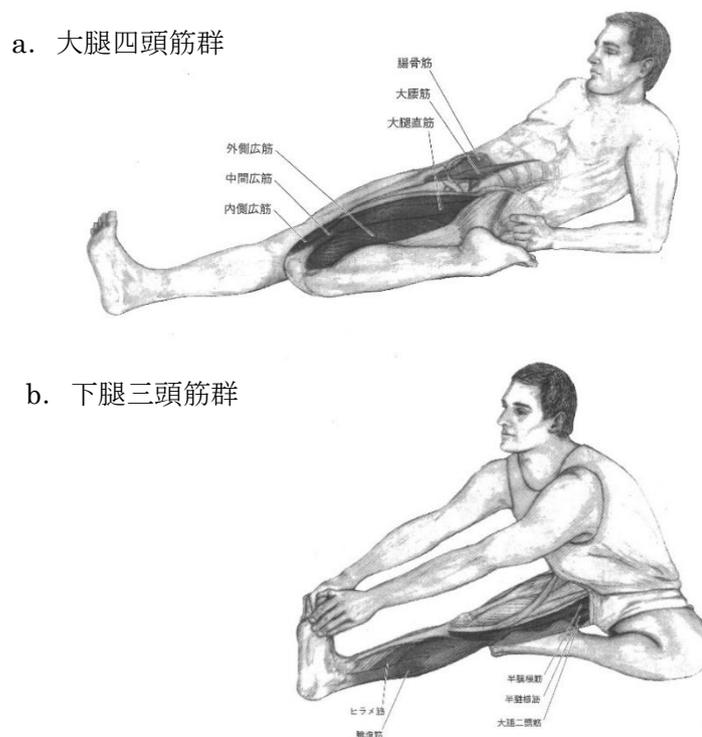
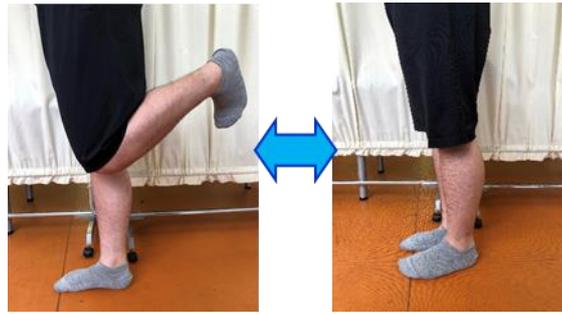


図 1 各筋群に対する静的ストレッチング (文献 13, 14 より引用)

a. 大腿四頭筋群



b. 下腿三頭筋群



図 2 各筋群に対する動的ストレッチング（文献 2 より引用）

2-2-4. 測定項目とデータ解析

3 軸加速度計よりペダリング動作 1 周期を求め、ペダリング動作 3 周期分をデータとして採用し、平均パワー周波数 (Mean Power Frequency : 以下, MPF) を算出し、筋疲労の指標とした¹⁶⁾。心拍数 (Heart Rate : 以下, HR) に加えて、心拍変動の周波数解析により、0~0.04Hz の超低周波成分 (Very Low Frequency : 以下, VLF), 0.04~0.15Hz の低周波成分 (Low Frequency : 以下, LF), 0.15~0.40Hz の高周波成分 (High Frequency : 以下, HF), 0~0.40Hz の全周波数成分 (Total Power : 以下, TP) を求めた。HF を TP と VLF で補正したものを HF normalized unit (HF nu) = $HF \times 100 / (TP - VLF)$ として副交感神経活動の指標、LF/HF を交感神経活動の指標とした。漸増負荷運動の終点付近では、R-R 間隔変動はホワイトノイズに近くなり自律神経活動に関する情報が著しく減少するとされているため¹⁷⁾、本研究では AT レベル以降における LF/HF と HF nu を解析対象から除外した。皮下脂肪厚で補正した酸素化ヘモグロビン量 (Oxygen Hemoglobin : 以下, Oxy-Hb) を測定して、10 秒間の平均値を算出し、筋酸素動態の指標とした。分時換気量 (minute ventilation : 以下, $\dot{V}E$), $\dot{V}O_2/kg$ を算出し、V-slope 法を用いて AT を決定した。 $\dot{V}O_2$ と

HR から一回心拍出量を算出し¹⁸⁾, SV と HR の積から心拍出量 (Cardiac Output : 以下, CO) を算出した. データの解析区間は安静時, WU 終了時, AT レベル, peak 到達時の 4 区間とした.

2-3. 統計解析

統計学的解析には, SPSS ver.22.0 (IBM 社) を用い, 有意水準は 5% とした. 条件間の比較には Friedman 検定の後, Wilcoxon の符号付順位検定を行い, Holm 法にて補正した.

3. 結果

実験環境は, 温度 $24.5 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$, 湿度 $44.8 \pm 6.1\%$ であった. また, 本実験では 3 種類の WU を施行したが, 実験を途中で中止した被験者はいなかった. HR, 交感神経活動の指標である LF/HF, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2/\text{kg}$, CO は安静時から WU 時, AT レベル, peak 到達時と徐々に上昇し, 副交感神経活動の指標である HF nu は徐々に低下した (図 3~5, 表 1~3).

3-1. 安静時における各指標の比較

WU を始める前の安静時において, 全てのパラメーター (HR, HF nu, LF/HF, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2/\text{kg}$, CO, 外側広筋と腓腹筋外側頭の Oxy-Hb) において 3 条件間に有意な差は認められなかった (図 3~5, 表 1~3).

3-2. WU 時における各指標の比較

ergo 条件および DS 条件では SS 条件と比べて, HR, LF/HF, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2/\text{kg}$, CO は有意な上昇が認められ ($p < 0.05$), HF nu, 外側広筋と腓腹筋外側頭の Oxy-Hb は有意な低下が認められた (図 3~5, 表 1~3).

3-3. AT 及び peak 到達時における各指標の比較

WU の違いが運動耐容能に及ぼす影響を検討するために、AT レベル及び最大負荷量を比較したが、AT レベルの負荷量、最大負荷量ともに 3 条件間に有意な差は認められなかった (図 7, 表 5)。また、測定した全てのパラメーター (HR, HF nu, LF/HF, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2/kg$, CO, 外側広筋と腓腹筋外側頭の Oxy-Hb, 外側広筋と腓腹筋外側頭の MPF) において 3 条件間に有意な差は認められなかった (図 3~6, 表 1~4)。

表 1 WU (ウォーミングアップ) 条件間における心拍変動の比較

		ergo	SS	DS
HR (bpm)	安静	75.1±6.4	75.1±6.9	73.2±9.0
	WU	92.9±6.5	81.1±7.1*	90.8±8.8 [†]
	AT	115.6±6.9	108.2±9.7	113.1±8.9
	peak	185.2±13.4	180.0±16.1	187.6±12.0
HF nu (nu)	安静	52.1±7.0	55.2±10.6	54.6±3.9
	WU	21.5±7.4	44.5±10.1*	19.3±7.2 [†]
	AT	6.3±3.0	8.4±2.2	7.2±2.4
LF/HF	安静	1.4±0.5	1.3±0.2	1.4±0.3
	WU	3.2±1.2	1.7±0.4*	3.0±0.2 [†]
	AT	7.5±3.1	8.0±1.3	7.5±1.6

平均値±標準偏差

*p<0.05 ergo 条件 vs. SS 条件, DS 条件 †p<0.05 SS 条件 vs. DS 条件

AT : 嫌気性代謝閾値 (anaerobic threshold) 到達時 ; peak : 最高酸素摂取量 (peak oxygen uptake) 到達時 ; SS : スタティックストレッチング (static stretching) ; DS : ダイナミックストレッチング (dynamic stretching) ; HR : 心拍数 (Heart Rate) ; HF : 高周波成分 (High Frequency) ; LF : 低周波成分 (Low Frequency)

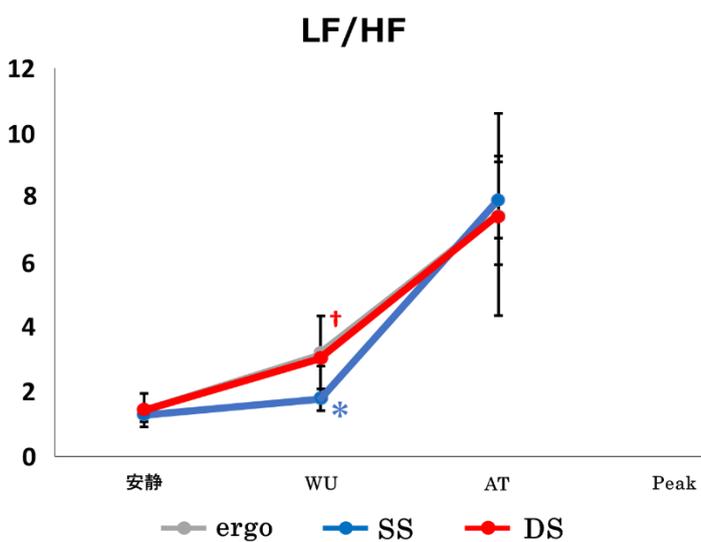
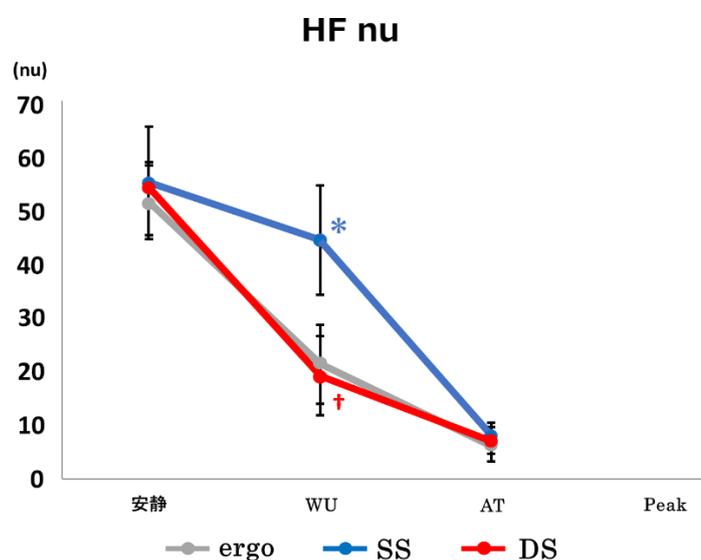
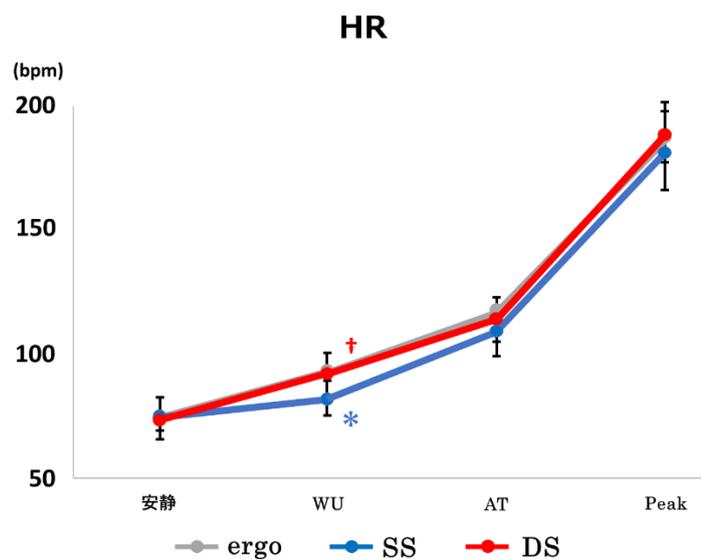


図3 WU条件間における心拍変動の比較

表 2 WU 条件間における呼気ガスと換気量の比較

		ergo	SS	DS
$\dot{V}E$ (L/min)	安静	7.0±1.8	6.9±1.4	6.6±1.7
	WU	13.7±1.9	9.9±1.6*	12.2±2.6 [†]
	AT	24.3±6.8	24.8±6.3	27.0±7.0
	peak	91.0±24.7	92.9±26.5	97.9±23.8
$\dot{V}O_2/kg$ (mL/min/kg)	安静	4.0±0.7	4.4±1.1	4.1±0.8
	WU	8.9±1.4	6.3±1.1*	7.6±1.3* [†]
	AT	17.9±4.9	18.1±3.5	20.5±6.4
	Peak	40.7±6.8	39.5±3.5	41.9±6.2
CO (L/min)	安静	3.7±0.7	4.0±0.6	3.8±0.9
	WU	7.0±1.0	5.3±0.9*	6.3±1.2 [†]
	AT	10.9±2.0	10.9±1.5	11.6±2.1
	peak	16.1±2.6	15.7±2.2	16.7±2.5

平均値±標準偏差

*p<0.05 ergo 条件 vs. SS 条件, DS 条件 †p<0.05 SS 条件 vs. DS 条件

$\dot{V}E$: 分時換気量 (minute ventilation); $\dot{V}O_2$: 酸素摂取量 (oxygen uptake); CO: 心拍出量 (Cardiac Output)

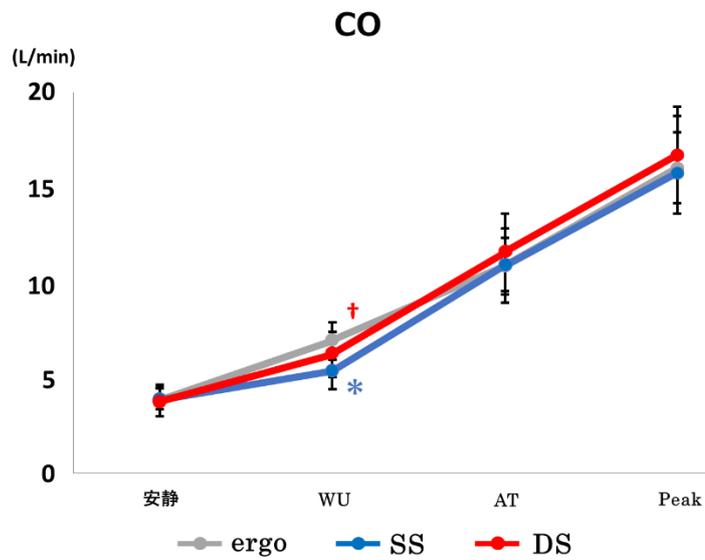
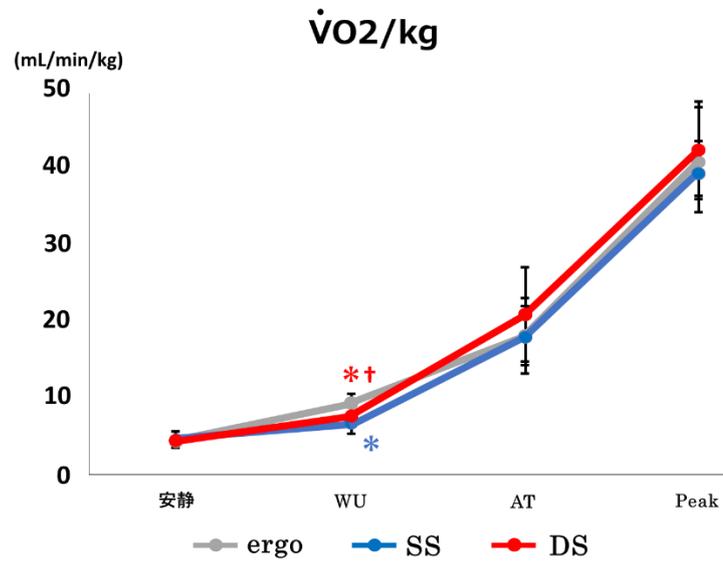
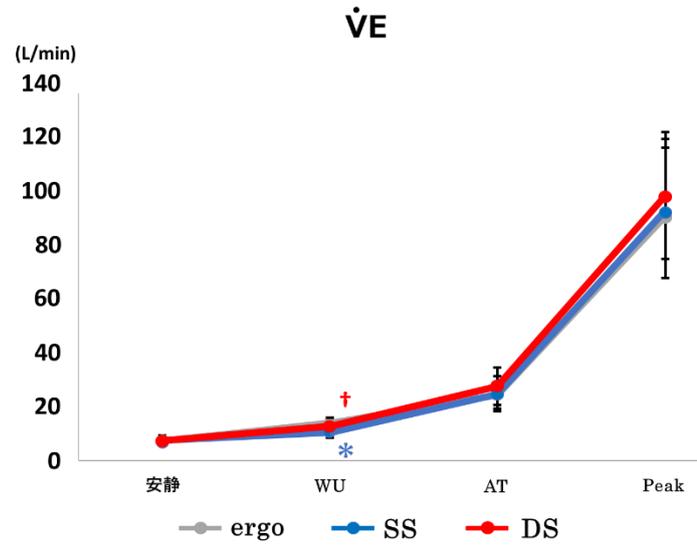


図 4 WU 条件間における呼気ガスと換気量の比較

表 3 WU 条件間における筋酸素動態の比較

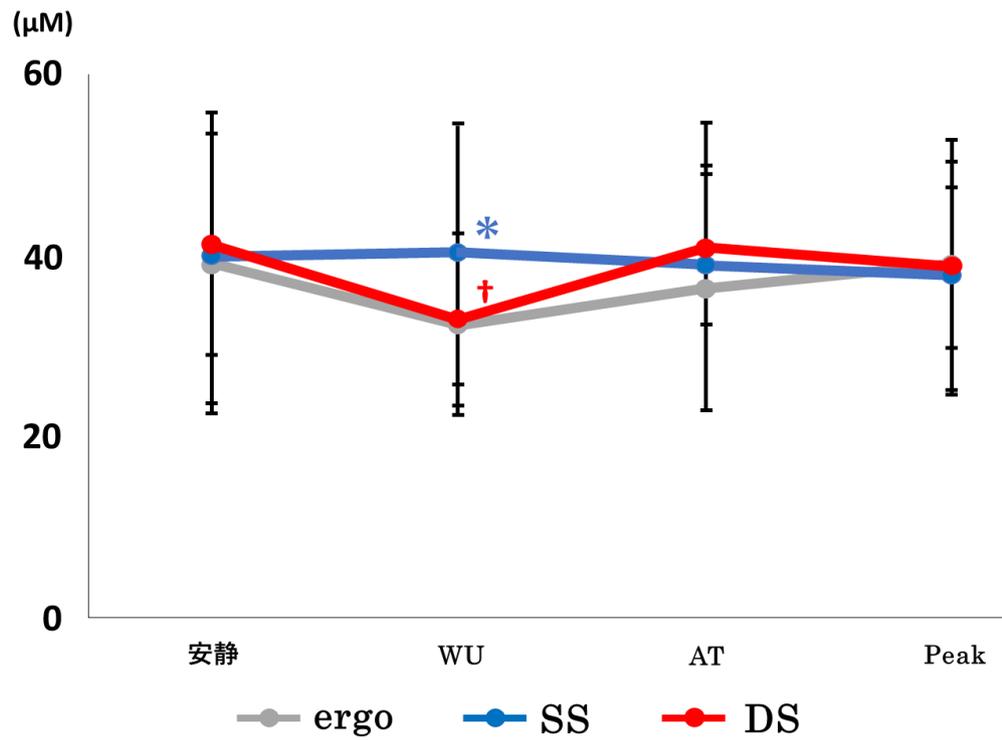
		ergo	SS	DS
Oxy-Hb (μM) 外側広筋	安静	39.0±16.6	39.7±16.1	41.2±12.3
	WU	32.3±10.0	40.2±14.4*	32.8±9.4 [†]
	AT	36.2±13.6	38.7±16.1	40.7±8.4
	peak	38.9±13.9	37.5±12.8	38.6±8.9
Oxy-Hb (μM) 腓腹筋外側頭	安静	50.1±12.8	42.5±12.9	51.8±15.4
	WU	35.6±9.9	42.7±12.4*	34.6±9.5 [†]
	AT	43.6±10.2	37.7±13.7	43.7±9.8
	peak	40.4±11.6	34.4±10.0	39.8±12.5

平均値±標準偏差

*p<0.05 ergo 条件 vs. SS 条件, DS 条件 †p<0.05 SS 条件 vs. DS 条件

Oxy-Hb : 酸素化ヘモグロビン (oxygen hemoglobin)

Oxy-Hb (外側広筋)



Oxy-Hb (腓腹筋外側頭)

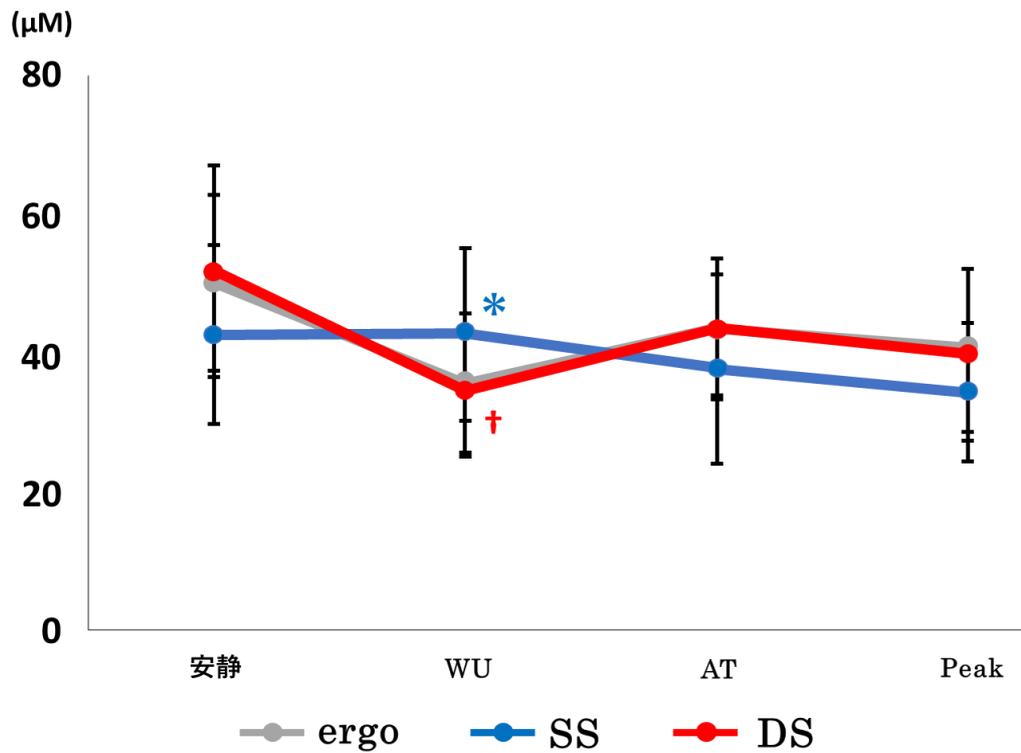


図5 WU条件間における筋酸素動態の比較

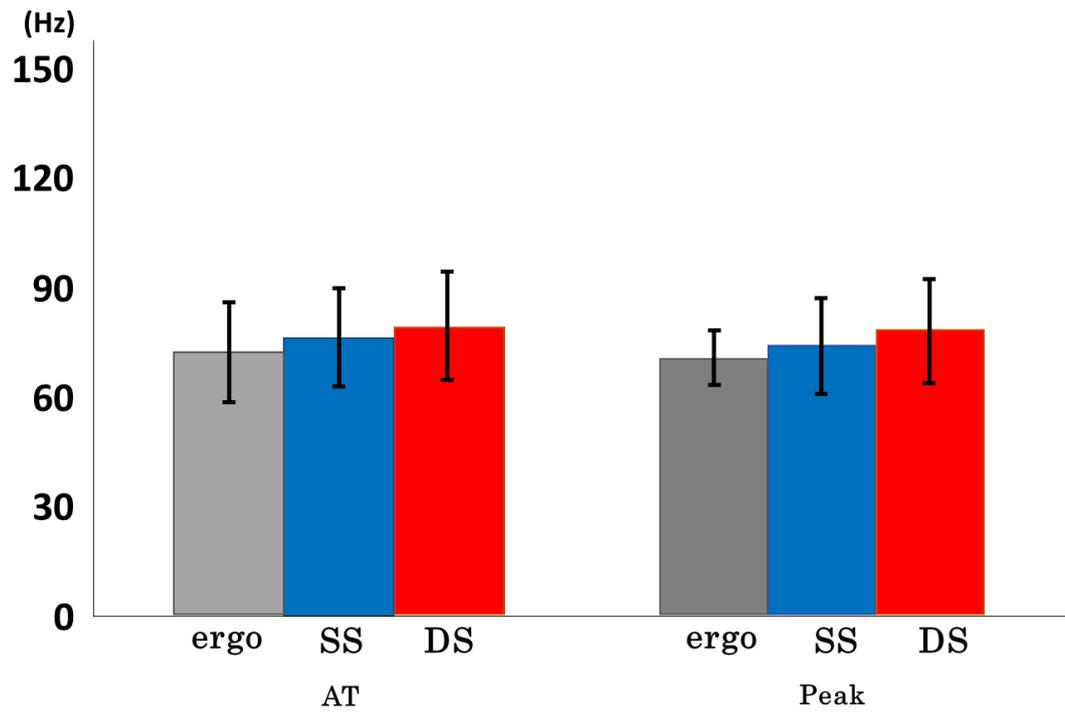
表 4 WU 条件間における筋電図周波数の比較

		ergo	SS	DS
MPF (Hz) 外側広筋	AT	72.2±13.8	76.1±13.9	79.4±15.3
	peak	70.2±7.5	73.4±13.5	77.9±14.5
MPF (Hz) 腓腹筋外側頭	AT	117.9±12.6	111.9±17.8	108.8±19.6
	peak	112.1±32.5	109.7±21.0	109.9±33.1

平均値±標準偏差

MPF : 平均パワー周波数 (mean power frequency)

MPF (外側広筋)



MPF (腓腹筋外側頭)

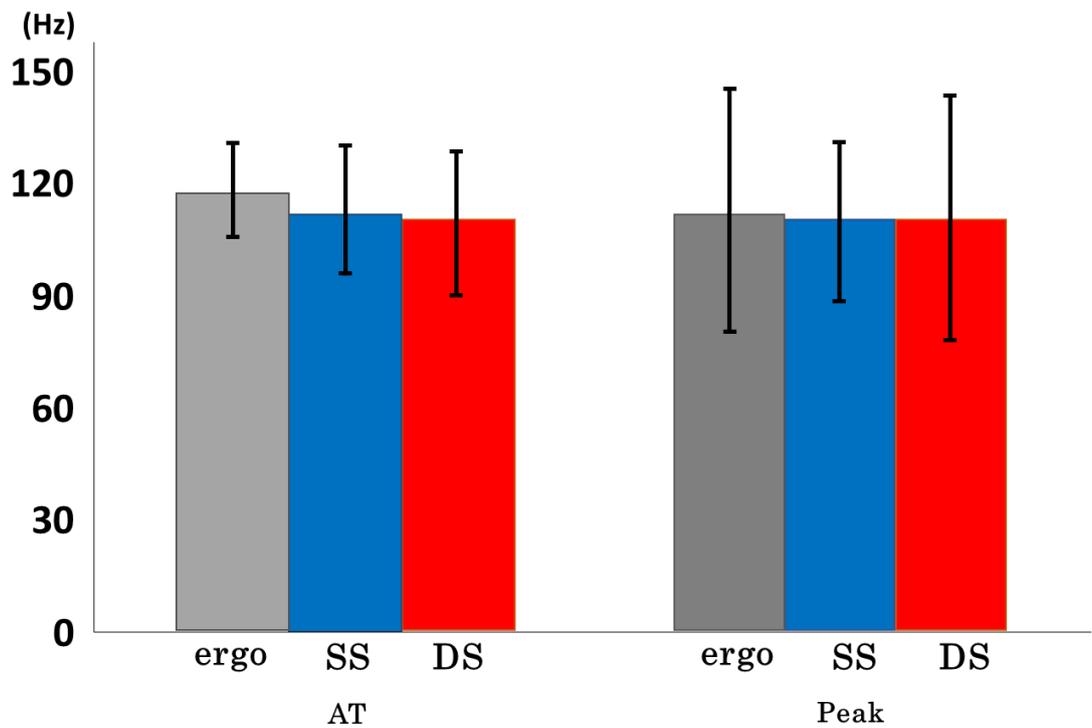


図6 WU条件間における筋電図周波数の比較

表 5 WU 条件間における負荷量の比較

		ergo	SS	DS
負荷量 (watt)	AT	85.0±19.6	82.5±16.2	87.6±22.8
	peak	237.3±42.4	232.7±43.6	241.1±45.9

平均値±標準偏差

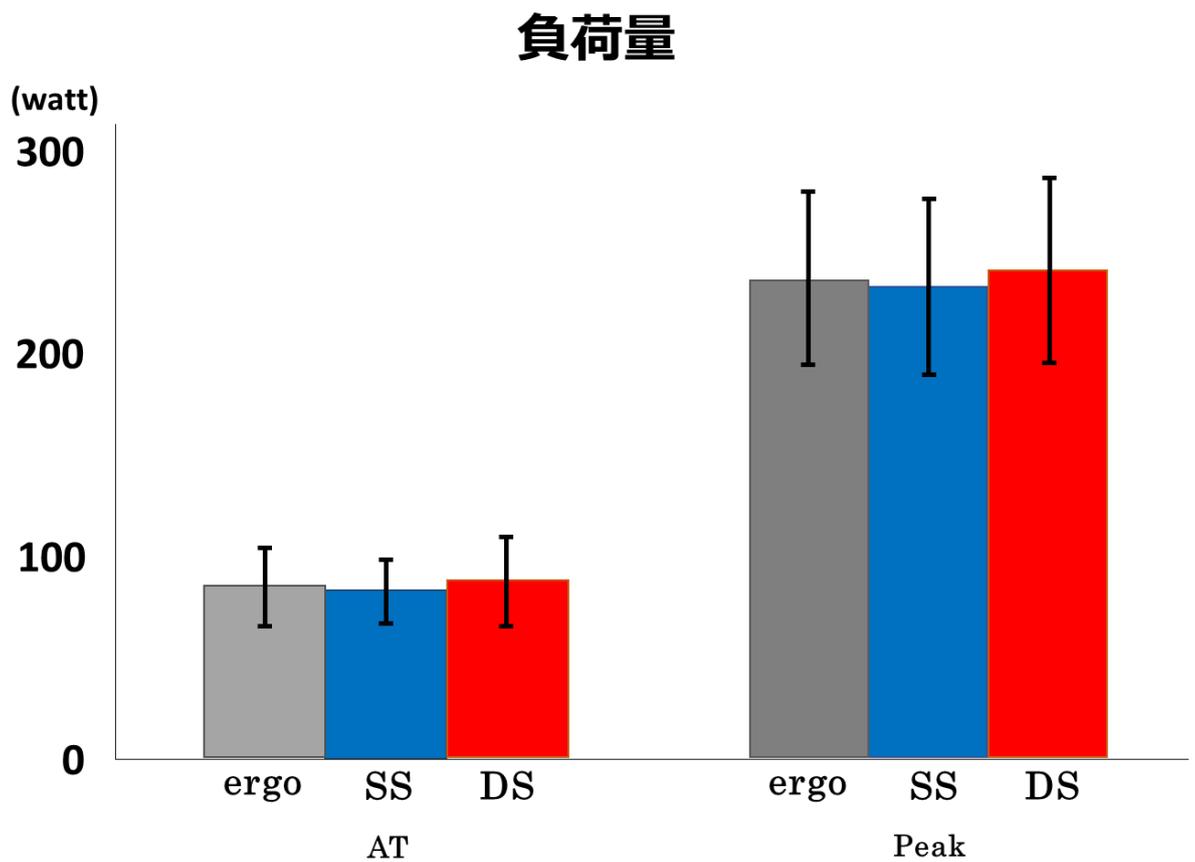


図 7 WU 条件間における負荷量の比較

4. 考察

WUとしてストレッチングは一般的に行われている。これまでにSSでは筋の柔軟性向上の効果があるとされているが、一時的に筋力低下が生じることがあると報告されている^{2,3,19)}。DSでは筋の柔軟性向上の他に、最大筋力や膝伸展パワーの増加、敏捷性の向上効果があるとされている^{6,20,21)}。同一被験者、同一の漸増負荷運動を用いて、下肢筋に対するSS及びDS、自転車エルゴメーター駆動がWU終了時やATレベル、peak到達時における運動機能や自律神経系に及ぼす効果について検討することは、WU効果の検証やリスク管理において必要である。そこで本研究では、下肢筋に対するSS及びDS、自転車エルゴメーター駆動によるWU終了時と漸増負荷運動時の酸素摂取量および心拍変動、筋酸素動態、筋電図周波数に及ぼす効果について検討した。

WU終了時においてSS条件よりergo条件とDS条件で、 $\dot{V}O_2/kg$ が高値を示しており、 $\dot{V}O_2$ は全身への外的負荷量を反映する指標とされていることから²²⁾、SS条件よりergo条件とDS条件で負荷強度が高かったと考えられる。SS条件よりergo条件とDS条件で、HR、LF/HF、 $\dot{V}E$ 、COが高値であり、HFnuが低値を示していたが、運動負荷がかかることでHR、LF/HF、 $\dot{V}E$ 、COの上昇、HFnuの低下を生じることから、SS条件よりergo条件とDS条件において負荷強度が高い状態であったことで生じていたと考えられる。また、Oxy-Hbでは、SS条件よりergo条件とDS条件で有意に低値を示した。これはergo条件とDS条件でSS条件より負荷強度が強く、末梢での酸素消費が高まったためと考えられる。SSは持続的に筋を伸張させることで、伸張された腱からのIb信号によって、脊髄前角細胞の興奮性を抑制し、その筋の緊張を和らげる作用がある³⁾とされており、能動的な筋収縮を伴わない方法である。一方で、DSは伸張したい筋の拮抗筋を反復して収縮させ、目的の筋を能動的な筋収縮を用いてストレッチングする方法であり、筋温の上昇効果と拮抗筋の収縮による相反抑制効果が影響しているとされている²³⁻²⁶⁾。自転車エルゴメーター駆動も能動的な筋収縮を伴っており、このような能動的な筋収縮の有無によってSS条件よりergo条件とDS条件で負荷強度が高くなっていたと考えられる。以上より、WU時には、SSと比較してergoとDSで呼吸器と循環器系への負荷や骨格筋の代謝向上が大

きく、運動への適応性を高める準備効果があることが示唆された。

全てのパラメーターにおいて、AT レベル、peak 到達時に各条件間で有意な差は認められなかった。筋疲労の指標である MPF は、外側広筋では 50~100Hz、腓腹筋では 100~200Hz であるが、筋疲労時は 40Hz 以下に徐波化するとされている²⁷⁾。本研究において、外側広筋は 70~80Hz、腓腹筋外側頭は 100~120Hz であり、40Hz 以下の徐波化は認められなかった。Petrofsky²⁸⁾は 60%もしくは 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ 負荷強度では運動開始 20 分後から低周波数帯へ移行し始めたと報告している。本研究における漸増負荷運動は全例で 20 分未満であったため、低周波数帯への移行がみられなかったと考えられる。さらに、足関節底背屈運動により上昇した HR や LF/HF、低下した HF が運動後 2 分には低下もしくは上昇していたと報告されている²⁹⁾。また、運動強度 75watt での自転車エルゴメーター駆動による WU 後、5 分以内に安静状態まで HR が戻っていたとされている³⁰⁾。これらの報告から、低強度の運動であれば 2 分以内に、中等度の強度の運動でも 5 分以内に安静状態まで戻ると推察される。本研究では自転車エルゴメーター駆動による WU を運動強度 20watt で施行し、WU から AT レベルまで 3 分強の時間があつたことから、WU 時に生じていた効果の差がみられなくなったと考えられる。さらに、漸増負荷運動では徐々に負荷強度が増加するため、3 条件間で有意な差が認められなかったと考えられる。以上のことから、WU 終了時において SS と比べ ergo と DS は運動への適応性を高める準備効果を有する可能性はあると思われる。しかし、漸増負荷運動のような徐々に負荷強度が上昇する運動様式においては嫌気性代謝閾値レベル以降の各指標にどの条件下でも差がないため、漸増負荷運動時には各個人の状態に適した WU を選択するべきであると思われる。しかしながら、今回漸増負荷運動という運動様式について検討したのみであり、急激に負荷強度を増加するような運動、もしくは定常負荷運動などの運動様式でもさらなる検討が必要であると考えられる。

心臓リハビリテーションの対象である心疾患患者において、軽症例ではミトコンドリア量の減少や機能低下などの骨格筋障害による $\dot{V}O_2$ 増加不足はみられず、健常者と同様な反応を示す³¹⁾とされ、軽症例においては本研究の結果を適応できる可能性がある。

5. 引用文献

- 1) 形本静夫：ウォーミングアップの生理学. *Jpn J Sports Sci.* 1988; 7: 620-627.
- 2) 山口太一, 石井好二郎：ストレッチングの方法と効果. *からだの科学.* 2005; 245: 24-31.
- 3) 今井覚志, 松本秀男：スタティックストレッチングの効果. *臨床スポーツ医学.* 2015; 32: 446-451.
- 4) 寒川美奈：ダイナミックストレッチングの基礎と効果. *臨床スポーツ医学.* 2015; 32: 452-455.
- 5) 野口綾利, 菅原和広, 他：足関節底屈筋群に対するストレッチング様式の違いがヒラメ筋 H 波および筋血流動態に及ぼす影響. *理学療法科学.* 2014; 29: 219-223.
- 6) 藤林直樹, 奈良里美, 他：ダイナミックストレッチングの即時効果に関する検討. *東北理学療法学.* 2014; 26: 84-89.
- 7) 安達仁：CPX の目的, CPX・運動療法ハンドブック (改訂 4 版). 中外医学社, 東京, 2019, pp. 1-10.
- 8) 伊東春樹：AT を基準とした運動療法. *呼吸と循環.* 1992; 40: 1173-1182.
- 9) 日本循環器学会ホームページ 循環器病の診断と治療に関するガイドライン (2011 年度合同研究班報告) 心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン (2012 年改訂版). http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2012_nohara_h.pdf (2019 年 10 月 17 日引用)
- 10) 下野俊哉：表面筋電図マニュアル (第 1 版). 酒井医療, 東京, 2010, pp. 123-159.
- 11) 日本循環器学会・運動に関する診療基準委員会：日本人の運動時呼吸循環指標の標準値. *Jpn Circ J.* 1992; 56:1514-1523.
- 12) 田嶋明彦, 西村美里, 他：運動後の酸素摂取量減衰と運動強度および最高酸素摂取量との関係. *臨床検査.* 2013; 57: 1053-1057.
- 13) 栗山節郎：大腿四頭筋, ストレッチングと筋の解剖 (原書第 2 版). 南江堂, 東京, 2013, pp. 107-114.

- 14) 栗山節郎：ハムストリングス，ストレッチングと筋の解剖（原書第2版）．南江堂，東京，2013，pp. 115-130.
- 15) 木元裕介，進藤伸一：ハムストリングスに対するスタティックストレッチングが筋力と関節可動域に与える影響の時間的变化．秋田大学保健学専攻紀要．2011；19：27-33.
- 16) 永田 晟：筋疲労と運動適応，筋と筋力の科学（第1版）．不味堂，東京，1984，pp. 115-125.
- 17) 藤澤宏幸：心電図解析による自律神経活動評価に関する研究．<http://ir.lib.muroran-it.ac.jp/dspace/handle/10258/2076>（2019年10月31日引用）
- 18) Stringer WW, Hansen JE, *et al.*: Cardiac output estimated noninvasively from oxygen uptake during exercise. *J Appl Physiol.* 1997; 82: 908-912.
- 19) Kay AD, Blazevich AJ: Effect of Acute Static Stretch on Maximal Muscle Performance: A Systematic Review. *Med Sci Sports Exerc.* 2012; 44: 154-164.
- 20) Yamaguchi T, Ishii K: Effects of static stretching for 30 seconds and dynamic stretching on leg extension power. *J Strength Cond Res.* 2005; 19: 677-683.
- 21) Amiri-Khorasani M, Sahebozamani M, *et al.*: Acute effect of different stretching methods on illinois agility test in soccer players. *J Strength Cond Res.* 2010; 24: 2698-2704.
- 22) 上嶋健治：心肺運動負荷試験を実施するにあたって，運動負荷試験 Q&A119（第2版）．南江堂，東京，2013，pp. 133-169.
- 23) 市橋則明：関節可動域制限に対する運動療法，運動療法学（第1版）．文光堂，東京，2014，pp. 148-171.
- 24) Manoel ME, Harris-Love MO, *et al.*: Acute effects of static, dynamic, and proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on muscle power in women. *J Strength Cond Res.* 2008; 22: 1528-1534.
- 25) Herda TJ, Cramer JT, *et al.*: Acute effects of static versus dynamic stretching on isometric peak torque, electromyography, and mechanomyography of the biceps

- femoris muscle. *J Strength Cond Res.* 2008; 22: 809-817.
- 26) Behm DG, Plewe S, *et al.*: Relative static stretch-induced impairments and dynamic stretch-induced enhancements are similar in young and middle-aged men. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2011; 36: 790-797.
- 27) 小木和孝, 袴田 忠: 筋疲労時の表面筋電図の周波数分析. *労働科学.* 1962; 38: 519-528.
- 28) Petrofsky JS: Frequency and amplitude analysis of the EMG during exercise on the bicycle ergometer. *Eur J Appl Physiol.* 1979; 41: 1-15.
- 29) 秋葉 崇, 小川明宏, 他: 足関節底背屈運動が血行動態と自律神経系に与える影響. *理学療法科学.* 2017; 32: 695-699.
- 30) 明珍美紀, 川口 徹: ウォーミングアップが心拍数と血圧に与える影響. *東北理学療法*学. 1996; 8: 44-46.
- 31) Jondeau G, Katz SD, *et al.*: Active skeletal muscle mass and cardiopulmonary reserve. Failure to attain peak aerobic capacity during maximal bicycle exercise in patients with severe congestive heart failure. *Circulation.* 1992; 86: 1351-1356.

終章 まとめ

本論文は、心臓リハビリテーションの Phase I から Phase III での早期離床や運動療法、心肺運動負荷試験における介入による生体反応の変化について心臓自律神経系活動を中心に述べた。第 1 章では、冠動脈バイパス術施行患者を対象とし、Phase I にあたる冠動脈バイパス術後早期の離床プログラム実施中の心臓自律神経系活動の変化について検討した。その結果、姿勢変化による心臓自律神経系活動の変化率が手術前と同程度であれば、離床を順調に進められる可能性が示唆された。第 2 章では、Phase II から III にあたる運動療法に関して、健常成人男性を対象とし、嫌気性代謝閾値での定常負荷運動後のクーリングダウンが心拍変動に及ぼす影響について検討した。その結果、嫌気性代謝閾値レベルの 50% 強度で 10 分間クーリングダウンを行うことは、副交感神経活動の再活性化や交感神経活動の低下に有効であることが明らかとなった。第 3 章では、Phase II から III にあたる心肺運動負荷試験に関して、健常成人男性を対象とし、運動準備段階における下肢筋への静的および動的ストレッチによる漸増負荷運動時の呼吸・循環機能および筋活動に及ぼす影響について検討した。その結果、ウォーミングアップにおいて静的ストレッチと比較して動的ストレッチでは酸素摂取量や換気量、自律神経系活動、局所骨格筋の代謝における主運動に対する適応性を高める効果があり、呼吸・循環機能に関してはよりウォーミングアップとしての効果が得られていた。第 2・3 章では健常者を対象として検討したが、健常者と比較して心疾患患者において、安静時に交感神経活動の亢進や副交感神経活動の減弱がみられることがある。しかし、健常者と心疾患患者ともに運動中の交感神経活動と副交感神経活動には高度な負の相関関係があり、拮抗的に作動しているとされ、運動中の自律神経系活動の変動については同様な傾向を示している。そのため、運動前後の自律神経系活動に差はあるが、心疾患患者においても適応できる可能性があると考えられる。

今後は、第 1 章では離床順調例だけでなく、離床遅延例での検討が必要であり、第 2・3 章では心臓リハビリテーションの対象者である心疾患患者での検討を行っていく必要がある。また、第 3 章では嫌気性代謝閾値や最大運動負荷における比較を行うために漸増運動

負荷で施行したが、ウォーミングアップ直後に定常負荷運動を行った際の呼吸・循環機能の比較を行っていく必要がある。今後、さらに研究を進め、得られた知見を臨床で生かしていきたい。

謝辞

本研究の実施に際してご協力をいただきました心臓病センター榎原病院のスタッフの皆様、被験者としてご協力をいただきました患者の皆様、川崎医療福祉大学の学部生の皆様に心よりお礼申し上げます。本論文の作成にあたり、ご指導ならびに貴重なご意見を賜りました審査員の先生方に心よりお礼申し上げます。最後に、論文作成にあたり終始ご指導ご鞭撻を頂きました本学古我知成教授に心より感謝致します。