

区分	課程
----	----

(論文様式)

条件統制下における運動負荷が
起床時コルチゾール反応に及ぼす影響

スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻

220D01

小笠原 佑衣

研究指導

土屋 裕睦 教授

目次:

第 I 章 序論	1
1. 運動効果の二面性	1
2. 運動効果の二面性を説明する概念とその成り立ち	1
3. 運動に対する適応過程のモニタリングツールとその課題	2
4. コルチゾールを用いたモニタリング	3
4. 1. コルチゾールとは	3
4. 2. 運動時におけるコルチゾールの分泌とその役割	4
4. 3. 持久的運動とレジスタンス運動における急性のコルチゾールの分泌	5
4. 4. 継続的な運動負荷に対するコルチゾール反応の二極性	6
4. 5. 安静時コルチゾール濃度を用いたモニタリングの先行研究とその課題	7
4. 6. 起床時コルチゾール反応を用いたモニタリングの提案	8
4. 7. 運動に対する CAR の変化に着目した先行研究とその課題	10
5. 本研究の目的	11
5. 1. 本研究の目的と研究課題の設定	11
5. 2. 本研究を実施する意義	13
5. 3. 本論文の構成	13
第 II 章 異なる強度の運動の実施が翌日の CAR に及ぼす影響	15
1. 目的	15
2. 方法	15
2. 1. 実験対象者	15
2. 2. 実験デザイン	16
2. 2. 1. $\dot{V}O_2\max$ の測定	16
2. 2. 2. 実験セッションの実施	17
2. 2. 3. 帰宅後の測定	18
2. 2. 4. 翌日起床時の測定	18
2. 3. 測定項目	19
2. 3. 1. 運動セッション実施時における運動強度	19
2. 3. 2. 唾液中コルチゾール濃度	19
2. 3. 3. CAR に影響する要因の評価	20

2. 4. 統計処理.....	21
3. 結果.....	22
3. 1. 運動強度に関するデータ	22
3. 2. 実験セッション当日における唾液中コルチゾール濃度の変化.....	24
3. 3. 翌日起床時における CAR の比較.....	26
3. 4. CAR に影響する要因の評価	28
4. 考察.....	30
4. 1. 運動セッション実施時に測定された運動強度	30
4. 2. 実験セッション当日における唾液中コルチゾール濃度の変化.....	30
4. 3. 実験セッション翌日起床時における CAR の違い	31
第Ⅲ章 レジスタンス運動の実施が翌日以降の CAR に及ぼす影響	34
1. 目的.....	34
2. 方法.....	34
2. 1. 実験対象者	34
2. 2. 実験デザイン.....	35
2. 2. 1 1RM の測定.....	36
2. 2. 2. 実験セッションの実施	36
2. 2. 3. 帰宅後の測定.....	37
2. 2. 4. 翌日起床時の測定.....	37
2. 3. 測定項目	37
2. 3. 1. 唾液中コルチゾール濃度.....	37
2. 3. 2. CAR に影響する要因の評価	37
2. 4. 統計処理.....	38
3. 結果.....	40
3. 1. レジスタンス運動セッション時のデータ	40
3. 2. 実験セッション期間中における唾液中コルチゾール濃度の変化.....	40
3. 3. CAR に影響する要因の評価	42
3. 4. 個人差を考慮した事後分析.....	44
4. 考察.....	46
4. 1. 実験セッション期間中における急性の唾液中コルチゾール濃度の変化.....	46

4. 2. 実験セッション期間中における CAR の変化.....	47
第IV章 総括.....	49
1. 本研究のまとめ.....	49
2. 学術的意義および実践的意義.....	49
3. 本研究の限界と今後の展望.....	50
3. 1. 研究課題 1 の限界.....	50
3. 2. 研究課題 2 の限界.....	51
3. 3. 研究課題 1 と研究課題 2 で共通する限界.....	51
文献.....	53
関連論文.....	70

第 I 章 序論

1. 運動効果の二面性

運動は、心肺機能や代謝基質利用能の向上、筋肥大、最大筋収縮力の向上など、様々な代謝的、形態学的、神経学的変化を引き起こす (Baggish et al., 2008; Casaburi et al., 1987; Häkkinen, 1989; Holloszy et al., 1977; Rennie et al., 2004). 運動に起因する表現型の変化は、アスリートのパフォーマンス向上に限らず、一般人の身体にも有益な効果をもたらすことが報告されている (Pollock et al., 1998).

運動に対する表現型の変化を誘発するためには、関連する生理学的システムに過負荷をかける必要がある (Hellebrandt and Houtz, 1956). 運動における過負荷は、個人の適応能に対して適切な負荷設定で負荷後のリカバリーが充足している場合、特定のシグナル伝達経路を活性化し、細胞内外での適応をもたらす。その結果、生理学的システムの能力が向上し、必要な作業を完了することに適した状態に変化する (運動適応)。一方で、個人の適応能を超過する過度な負荷設定や負荷後のリカバリーの不足を伴う過負荷の繰り返しは、慢性的な疲労感やパフォーマンスの低下を伴う負の効果 (不適応) を引き起こす可能性がある (Fry et al., 1991). この不適応の状態を早期発見および予防し、より大きな運動適応を引き起こすためにも、運動に対する個人の適応過程のモニタリングが不可欠である。

2. 運動効果の二面性を説明する概念とその成り立ち

運動効果の二面性は、アロスタシスという概念から説明されている (McEwen, 1998). アロスタシスとは「変化による生体内の恒常性の維持」を意味し、急性ストレスに対して適応していく過程を説明する概念として用いられている (征矢・大岩, 2003, pp. 156-170).

従来、ストレスに対する生体の恒常性の維持機構の説明にはホメオスタシスという概念が用いられてきた (菅生ほか, 2019). ホメオスタシスは、20 世紀初期に Walter Bradford Canon の著書「Wisdom of the Body」によって広まった概念である (Canon, 1939). 急性ストレスに対する動物の反応を説明するための闘争・逃走 (fight or flight) 反応という造語も Canon によってつくられたものである。この反応は後に、Hans Selye が提唱した汎適応症候群の第一段階として認識されるようになった。Selye は、寒さや暑さ、外科手術、痛み、放射線、光、運動などの様々な刺激を用いて生体のホメオスタシスの乱れを誘発し、これをストレスと名付けた (Selye, 1936). また Selye はストレスの持

つ二面性について「ストレスによって活性化した生理的機構は身体を傷つけるだけでなく、回復・保護についても機能する」と述べており、一般的なストレス反応と疾病につながるストレス反応を区別するために、**distress** と **eustress** という用語が導入された (Selye, 1956). さらに、ホメオスタシスの機能だけではストレスに対する生体システムの定常性を説明できないことを認識し、新たな定常状態が設定される過程としてヘテロスタシスという造語を作り出した。ヘテロスタシスは、20 世紀終期に Peter Sterling と Joseph Eyer が提唱したアロスタシスの先駆けとなった概念である (McEwen, 1998; Schulkin 2004; Sterling and Eyer, 1988).

19 世紀以降、生理学や医学の分野で支持されてきたホメオスタシスは生体系が維持する体内環境が「変化しないことによる安定」と考えられている。一方で、アロスタシスはストレスに適応するために生理学的システムが反応し、生理的パラメーターの新たな定常状態が設定されることよってもたらされる「変化による安定」を意味している。しかしながら、個人の適応能を超えるストレスに曝され続け、これらの適応が慢性化および長期化することでアロスタシスが制御不能に陥り、身体の制御機能の変調や消耗、破綻が生じる。このとき、アロスタシスの破綻をきたす環境はアロスタティック負荷と定義されている (McEwen, 2007).

運動は、体温の上昇、体液および血液の pH の低下、浸透圧の増大、血糖の低下、機械的および物理的刺激の増大など、生物学的恒常性に対する多くの混乱を引き起こすため (跡見, 2003, pp. 131-155), 生理学的ストレス因子と考えられている。このホメオスタシスの乱れに対して、活動の維持、向上および体内環境の定常性を維持するために生理学的システムが亢進する。それぞれの生理学的変化は、実施した運動時間、強度、様式に応じて運動後の数分—数ヶ月間のリカバリー期に異なる経時的変化を示し、生体内で運動を維持するシステムが改善される (長谷川・山本, 2014, pp. 3-8). この一連のプロセスをアロスタシスと称し、運動適応は運動に対してアロスタシス機構が働いた結果としてもたらされるものと考えられる。また、不適応は個人の適応能を超える運動負荷に曝され続けることにより、アロスタティック負荷が増大した結果としてもたらされるものと考えられる。

3. 運動に対する適応過程のモニタリングツールとその課題

運動に対する適応過程をモニタリングする方法の 1 つは、アロスタシスによって惹起さ

れる生理学的反応の定量化によるものである。モニタリングツールに関する研究は、主にオーバーリーチングやオーバートレーニング症候群の文脈で実施されてきた (Kreher and Schwartz, 2012)。

これまでの知見から、モニタリングに有用な指標として、心拍数 (Achten et al., 2004; Bellenger, et al., 2016; Dressendorfer et al., 1985; Fry et al., 1992; Jeukendrup et al., 1992; Le Meur et al., 2013; Li et al., 2013; Wishnitzer et al., 1986), 心拍変動 (Bellenger et al., 2016; Bellenger et al., 2017; Le Meur et al., 2013; Mourot et al., 2004), 血糖 (Gastmann et al., 1998; Ishigaki et al., 2005; Kraemer et al., 2006; Lehmann et al., 1991), サイトカイン (Booth et al., 2006; Fry et al., 1992; Nieman et al., 2014; Smith, 2000), カテコールアミン (Lehmann et al., 1992), 成長ホルモン (Cadegiani and Kater, 2018; Kraemer et al., 2006), IGF-1 (Alves Souza et al., 2014), インスリン (Kraemer et al., 2006; Volek et al., 2004), およびテストステロン (Chicharro et al., 1998; Coutts et al., 2007; Griffith et al., 1990; Gustafsson et al., 2008; Hug et al., 2003; Ishigaki et al., 2005; Kraemer et al., 2004; Li et al., 2013; Moore and Fry, 2007) などの多くの安静時バイオマーカーが提案されている。

しかしながら、これらの指標の多くは採血による侵襲的かつ専門的な手法を必要とすることから、自宅での安静時サンプルの採取が困難であることが課題であった。心拍数および心拍変動は非侵襲的に測定可能であるが、モニタリングツールとしての一貫した結果は得られておらず、運動適応と不適応に起因する測定値の変化を区別できないことが課題として挙げられている (Meeusen et al., 2013)。

4. コルチゾールを用いたモニタリング

このような背景から、近年非侵襲的かつ簡便に採取できる唾液中バイオマーカーが着目されている。中でも、コルチゾールは唾液中と血液中の濃度の相関が非常に高い ($r = .80-.90$) ことから (Kirschbaum and Hellhammer, 1989), 血液に代わる指標として運動生理学分野の研究でも使用されるようになった (Gatti and De Palo, 2011; Lindsay and Costello, 2017; Papacosta and Nassis, 2011)。

4.1. コルチゾールとは

コルチゾールは、視床下部・下垂体・副腎皮質軸 (hypothalamic-pituitary-adrenal

axis, 以下「HPA 軸」と略す) から合成および分泌刺激を受ける糖質コルチコイドの一種であり, アロスタシスの重要なバイオメディエーターの 1 つとして考えられている。ストレス刺激は, 視床下部の神経分泌細胞から放出される副腎皮質刺激ホルモン放出ホルモン (corticotropin releasing hormone, 以下「CRH」と略す) の分泌を刺激する (Gabery et al., 2015)。次に, CRH は下垂体前葉の副腎皮質刺激細胞から門脈および全身への副腎皮質刺激ホルモン (adrenocorticotropic hormone, 以下「ACTH」と略す) の合成と分泌を刺激する。その後 ACTH は副腎皮質に作用し, コルチゾールの合成と最終的な分泌が刺激される。産生されたコルチゾールは, 標的細胞のグルココルチコイド受容体に結合することで, 中間代謝や神経系, 免疫系への作用, 許容作用など, 身体全体で様々な効果を発現する (Tharp, 1975)。

コルチゾールは主に血漿のコレステロールから生成され, 4 つの環を持つコステロイド構造を保持している。この脂溶性ホルモンは難水溶性であるため, コルチゾールは主に可溶性のタンパク質であるコルチコステロイド結合グロブリンに結合して血液中に運ばれる (Dunn et al., 1981)。循環しているコルチゾールの約 80% は結合型で, 生物学的に不活性と考えられている。また, 10% のコルチゾールはアルブミンに結合している (Levine et al., 2007)。残りの 10% のコルチゾールは非結合あるいは遊離型で (El-Farhan et al., 2017) 生物学的に活性と考えられており (Mendel, 1989), 代謝や免疫応答などで重要な役割を果たす。遊離型のコルチゾールは唾液腺に受動的に拡散し, 唾液の中で測定することができる。

HPA 軸はネガティブフィードバック機構を有しており, 循環中のコルチゾール濃度が増加すると, HPA 軸の上流にある下垂体および視床下部と大脳皮質にある受容体を標的としてその後の神経内分泌反応を阻害する (McEwen, 2007)。その結果, コルチゾールの消費速度が産生速度を上回り, 循環中のコルチゾール濃度が低下する。循環中のコルチゾールの生物学的半減期は 1.4—3 時間, 唾液中コルチゾールの生物学的半減期は 70 分前後とされている。

4. 2. 運動時におけるコルチゾールの分泌とその役割

運動時におけるコルチゾールの分泌は, 運動刺激による大脳皮質運動野の興奮およびそこからの中樞指令による遠心性の要因と (Kjaer et al., 1987), 筋組織内の機械的変化や化学的変化などの複合的な刺激による求心性の要因 (Vissing et al., 1994; Kjaer et al., 1989)

が視床下部の神経分泌細胞を刺激し、HPA 軸が興奮することによって生じると推察されている（征矢・大岩，2003，pp. 156-170）。視床下部は、身体の代謝基質の変化を感知する主要な場所の 1 つで、グルコースや脂肪酸、アミノ酸といった身体の代謝基質の変化に応じて神経内分泌反応を調整している（Blouet and Schwartz, 2010）。それにより、運動に対する代謝基質の利用可能性の増加にも対応している。

運動により分泌されるコルチゾールの主な機能は、活動中（Hackney et al., 2008）と回復中（Duclos et al., 1997）の両方において、代謝要求の大きさに応じて代謝基質の動員を高め、血糖濃度を維持することであることが示されている（Anderson and Wideman, 2017）。また、コルチゾールはタンパク質異化作用や強力な抗炎症作用を有しており（Tharp, 1975）、グルココルチコイド受容体への結合や細胞への取り込みを通して、筋組織の修復過程にも関与することが報告されている（Schakman et al., 2008）。これらのことから、コルチゾールは運動時に大きく変動する体内の生理反応を支えており、運動時および運動後のアロスタシスの過程において重要な役割を果たすことが示唆される。

4. 3. 持久的運動とレジスタンス運動における急性のコルチゾールの分泌

運動は大きく分けて持久的運動とレジスタンス運動の 2 つに分けられる（American College of Sports Medicine, 2013）。持久的運動の枠組みにおける急性のコルチゾールの分泌に関する研究は非常に多く、実施した運動強度に比例して代謝要求が高まり、コルチゾールの分泌が促進することが報告されている（Hill et al., 2008; VanBruggen et al., 2011）。McMurray and Hackney（2000）は先行研究の知見を集約し、コルチゾールの分泌を促進するために必要な運動強度の閾値は最大酸素摂取量（maximal oxygen uptake, 以下「 $\dot{V}O_2\text{max}$ 」と略す）の少なくとも 50—60%に収束すると述べている。持久的運動に対するコルチゾール濃度の増加は、運動強度（Hill et al., 2008; VanBruggen et al., 2011）と持続時間（Schwarz and Kindermann, 1989; Tremblay et al., 2005）など、対象者が完了した作業量に大きく依存するといわれている（Hough et al., 2011; Smilios et al., 2003）。

一方で、レジスタンス運動の枠組みでは、持久的運動と比較してコルチゾールの分泌に関わる代謝要求は顕著でないといわれている（Anderson et al., 2019）。しかしながら、レジスタンス運動がコルチゾールの分泌を促進するという報告もあり、レクリエーション活動としてトレーニングを実施している男性を対象に、最大挙上重量（one-repetition maximum, 以下「1RM」）と略す）の 45%（6 回の反復を 8 セット、セット間の休息 3 分）、

75% (10回の反復を10セット, セット間の休息2分), 88% (4回の反復を6セット, セット間の休息4分)の条件でスクワット運動を行った先行研究において, 45%1RMと88%1RMの条件ではコルチゾール濃度は変化しなかったが, 75%1RMの条件ではコルチゾール濃度が増加したことが報告されている (Crewther et al., 2008). また, 若い男性を対象に, 1RMの60% (15回の反復をそれぞれ2セットと4セット, セット間の休息2分), 75% (10回の反復をそれぞれ2セットと4セット, 6セット, セット間の休息2分), 88% (5回の反復をそれぞれ2セットと4セット, 6セット, セット間の休息3分)の条件で, ベンチプレス, ラットプルダウン, スクワット, オーバーヘッド プレスを含む複数の種目を組み合わせたレジスタンス運動を行った先行研究では, 75%1RMと60%1RMの条件において, 2セットのセッションと比較して, 4セットのセッションでコルチゾール濃度が増加したことを報告している (Smilios et al., 2003). 同じ研究において, 75%1RMの条件で4セットと6セットのセッションや, 60%1RMで2セットのセッションにおけるコルチゾール濃度が, 88%1RMの同じセット数の条件よりも高かったことが報告されている. これらの報告は, レジスタンス運動では負荷の強度よりも, 対象者が実際に完了した作業量がコルチゾールの分泌に影響することを示しており, 作業量の多いプロトコルでは代謝要求が高まり, コルチゾールの分泌が促進されると考えられている. 加えて, レジスタンス運動によって動員される筋肉量の大きさ (Kraemer and Ratamess, 2005) やセット間の休息の長さ (Kraemer et al., 1996) といった要因も代謝要求の大きさに関わり, コルチゾールの分泌に影響することが報告されている. このことから, レジスタンス運動におけるコルチゾールの分泌には負荷の強度や作業量だけでなく, 種目, 実施方法といった複合的な要因も影響すると考えられる.

4. 4. 継続的な運動負荷に対するコルチゾール反応の二極性

副腎皮質は, 継続的なストレス刺激に対して神経可塑的な変化を示すことが報告されている (Herman and Tasker, 2016). Viru et al. (1992)の報告では, 継続的な運動プログラムの後では, 絶対的に同じ運動負荷に対する急性のコルチゾール反応が低下することが示されている. 一方で, 同じ報告において, 相対的に同じ運動負荷が適用された場合, より大きな急性のコルチゾール反応を誘発することが示されている. このコルチゾール反応の増加はアロスタシスの過程として位置づけられ, 継続的な運動負荷に伴う副腎皮質肥大によるものである可能性があると考えられている (Bartalucci et al., 2012; Tharp, 1975).

通常、運動適応が生じた時点で肥大した副腎皮質は元の大きさに戻り、コルチゾール濃度も元の値に戻ることが示されている (Tabata et al., 1989). しかし、コルチゾール濃度の継続的な上昇は HPA 軸の調節不全を引き起こし、その後コルチゾールレベルが継続的に低下する可能性があることが報告されている (Steinacker et al., 2004). Lupie et al. (2001) は、短期的なストレスに対する一時的なコルチゾール分泌量の増加はアロスタシスの過程と考えられるが、長期的な上昇は抑うつ状態をもたらすだけでなく、ストレス関連疾患の一因となることを指摘している. 以上のことから、運動に対する HPA 軸の調節不全は「乱れ・適応・不適応」という可塑性の段階を伴う連続体と捉えることができ、運動適応と不適応は継続的な運動負荷に対するコルチゾール反応の増加と低下という二極性の変化から解釈可能であると考えられる.

4. 5. 安静時コルチゾール濃度を用いたモニタリングの先行研究とその課題

コルチゾールを用いた運動に対する適応過程のモニタリングには、起床時あるいは日中の安静時における一時点のコルチゾール値が一般的に使用されている. これまでの研究において、安静時コルチゾール濃度は継続的かつ強度の高い運動負荷によって増加 (Bonifazi et al., 2000; Steinacker et al., 2004) および低下 (Barron et al., 1985; Bosco et al., 1996; Lehmann et al., 1992) するという報告がなされている. また、減少した安静時コルチゾール濃度は、いずれもパフォーマンスの低下との関連が確認されている (Barron et al., 1985; Bosco et al., 1996; Lehmann et al., 1992). 継続的かつ強度の高い運動負荷によって安静時コルチゾール濃度に変化がみられなかったという報告もあるが (Filaire et al., 1998; Filaire et al., 2001), これらの報告から安静時コルチゾール濃度は継続的な運動負荷によって概ね増加と低下という二極性の変化を示しているようにもみえる. しかしながら、日中のコルチゾール濃度は急性ストレスなどの状況要因 (Adam and Gunnar, 2001) や日内変動 (Hellman et al., 1970; Peters et al., 2013; Weitzman et al., 1971) による影響を受けることが懸念される. また、Coste et al. (1994) は測定時刻を同じにした場合でも、二日連続で同じ時刻に評価したコルチゾール値の安定性が低い ($r = .18$) ことを報告していることから、日中のコルチゾール値を個人のモニタリングツールとして使用することに疑問が残る. また、起床時のコルチゾール濃度は起床直後から 30 分および 45 分間において急激な上昇を示すことが報告されている (Pruessner et al., 1997). したがって、起床後の測定時間を厳密に管理しなければ正確な測定値を検出できないとい

うサンプリングエラーの問題が生じている可能性がある。

4. 6. 起床時コルチゾール反応を用いたモニタリングの提案

コルチゾール濃度は一般的に朝に高く、夜に最低値を示すという日内変動が存在する (Hellman et al., 1970; Peters et al., 2013; Weitzman et al., 1971)。第 I 章 4. 5. において述べた起床直後から 30 分および 45 分間における急激なコルチゾール濃度の上昇は起床時コルチゾール反応 (cortisol awakening response, 以下「CAR」と略す) と呼ばれており (Pruessner et al., 1995), コルチゾールの典型的な日内変動から独立して生じることが報告されている (Wilhelm et al., 2007)。CAR は 20 世紀後期に Jens Pruessner によって初めて説明された現象である。その後の研究において, Pruessner et al. (1997) は 3 つの異なる研究と集団からの結果を発表し, それらはすべて, 起床時に遊離コルチゾールの増加 (5—9.5 nmol/l) を示すことを報告した。また, CAR を複数日で測定した際の個人内安定性 ($r = .39—0.67$) も確認されたことから, CAR が HPA 軸の機能を測定するための比較的安定したマーカーであると提案した。それ以来, 多くの研究者が CAR の研究を実施し, 精神神経内分泌免疫学の分野を中心に多数の心理的および身体的な変数との関係が示されてきた (Chida and Steptoe, 2009)。精神神経内分泌免疫学分野における過去の研究では, 日常生活ストレスの高い人や, 労働時間が長く仕事の悩みが多い人は CAR が高いことが報告されている (Gustafsson et al., 2008; Schlotz et al., 2004; Steptoe et al., 2004)。一方で, 慢性ストレスや慢性疲労, バーンアウト症候群の状態では, CAR が減弱することが報告されている (Lindeberg et al., 2008; Miller et al., 2007; O'Connor et al., 2009; Pruessner et al., 1999)。これらの報告から, CAR は反応性の形状に二極性の特徴があり, CAR の増加と減弱は, HPA 軸の乱れ・適応・不適応の進行過程を示す可能性のあることが推察されている (Chida and Steptoe, 2009)。

CAR の機能的役割はまだ明らかになっていないが, 最も有力とされている仮説は「その日の活動期に予測される要求に応じて CAR を調節し, 安静状態から活動状態への移行に必要なエネルギーを供給する」ことである。これは, 高齢者における CAR の評価の結果をもとに Adam et al. (2006) によって提案された仮説である。この研究では, CAR を測定する前日の悲しみや孤独などの感情が CAR の増加を予測し, CAR の減弱が CAR を測定した日の後半の疲労感を予測することを示している。そのため, 著者らは CAR がその日の活動期の需要を見越して個人にエネルギーを供給するシステムに寄与している可能性のあるこ

とを示唆し、上記の仮説を提案した。この仮説には、活動期の潜在的なストレス要因に対して心理的および生理学的システムを準備し、維持するというコルチゾールの役割も含まれる。一方で、CAR が減弱している場合は活動期への準備が不十分であるため、疲労感や倦怠感に関連すると考察している。この考察は、後に Powell et al. (2012) によって検討され、健康な参加者において、年齢、性別、睡眠の質、起床時間、経口避妊薬の使用といった共変量を調整した上で、CAR の増加が日常生活ストレスに対する苦痛の減弱と関連したことを示している。

CAR は起床直後から 15 分毎に 3—5 時点でサンプルを採取することによって評価される。このような方法によって評価される CAR は対象者によって反応のピークが異なる可能性があるため、起床直後からの変化量（以下「 Δ CAR」と略す）や変化率（以下「CAR%」と略す）、また反応性や総分泌量の曲線下面積（それぞれ area under the curve with respect to ground, 以下「 AUC_g 」と略す, area under the curve with respect to increase, 以下「 AUC_i 」と略す）を算出して解釈する方法もある (Pruessner et al., 1995; Pruessner et al., 2003)。 AUC_g は覚醒に対する反応だけでなく、副腎皮質からのコルチゾールの総出力を表している。また、 Δ CAR および CAR%, AUC_i は覚醒への反応のみを反映している。曲線下面積の安定性に着目した研究では、 AUC_g は連日 2 日間の測定において十分な安定性 ($r = .70$) が確認されている (Hellhammer et al., 2007)。一方で、同じ報告において AUC_i は状況要因の影響を受けやすく、 AUC_g と同等の安定性 ($r = .71$) を得るためには 6 日間の測定が必要であることが報告されている。

これまでの研究において、CAR は単一の要因による影響だけでなく、複数の要因により変動することが示されている (Law et al., 2013)。例えば、サンプリング時刻や睡眠の量と質、前日の経験、翌日の予想される需要、アルコール摂取量、月経周期などが挙げられる。これらの要因を十分に考慮して測定された CAR は費用対効果に優れ、ストレスに対する適応過程に応じて増加あるいは減弱するという頑健で一貫性のある二極性の結果が示される傾向のあることが報告されている (Wust et al., 2000)。このことから、反応性や曲線下面積の指標も含めて、CAR はストレスに対する適応過程を反映する非侵襲的かつ精度の高いモニタリングツールとして注目されており、CAR を運動負荷に対する適応過程のモニタリングツールとして使用することで、運動適応と不適応を非侵襲的かつ正確に解釈できる可能性があると考えられる。

4. 7. 運動に対する CAR の変化に着目した先行研究とその課題

運動に対する CAR の変化，特に運動適応と不適応という観点で実施された研究は非常に少ないが，近年少しずつ検討され始めている．慢性的な運動負荷に関する研究では，エリートレベルのトライアスロン選手においてシーズン開始後に CAR が増加し，シーズンが進行しても CAR がより高いレベルで安定することが示されている (Gouarné et al., 2005)．この研究の中では，オーバートレーニング症候群と診断された 2 名の選手の CAR にも着目されており，この 2 名の CAR はシーズン終了時において，シーズン開始前と比較して大幅に低下していたことが報告されている．この結果は，サンプルサイズが小さすぎるため慎重な解釈が必要であるが，Anderson et al. (2021) の研究においてもオーバートレーニング症候群を発症しているアスリートの CAR が健常な対象者と比較して低いことを示している．また，エリートサッカー選手を対象にした研究では，7 日間の強化トレーニング前後で，CAR が増加，あるいは変化なしおよび減弱の反応に分かれ，トレーニング期間後の CAR とカウンタームーブメントジャンプおよび 20 m シャトルランのパフォーマンスの変化率との間に正の相関 ($r = .74-.81$) がみられたことを示した (Minetto et al., 2008)．これらの知見を踏まえ，継続的かつ高強度の運動負荷に対する CAR の変化は，他の分野における報告と同様に増加と減弱という二極性の反応を示し，HPA 軸の乱れ・適応・不適応の進行過程を反映する可能性があることが推察されている (Anderson and Wideman, 2017)．

単発の運動負荷に関する研究では，レクリエーション活動として持久的トレーニングを実施している男女において，前日のトレーニング負荷は翌日の CAR との間に正の関連を示すことが報告されている (Anderson et al., 2018)．一方で，夜に行われたサッカーの試合 (Ucar et al., 2018) またはネットボール競技 (Juliff et al., 2018) を実施した翌日の CAR は，他の休息日に測定された CAR と比較して差がなかったことが報告されている．また，Garde et al. (2009) の報告においても，フィットネストレーニングとサーキットトレーニングタイプを含む運動プログラムを実施した翌日の CAR に変化がみられなかったことを示している．これらの運動負荷に対する CAR の変化の欠如については，導入された運動負荷が個人の適応能に対して軽いものであったことが要因として考えられている (Anderson and Wideman, 2017)．したがって，単発の運動負荷に対する CAR の変化には，運動時における急性のコルチゾール反応と同様に運動強度の閾値が存在する可能性のあることが推察される．

以上のことから、CAR は単発および継続的な過負荷を伴う運動負荷に対して増加あるいは減弱という二極性の変化を示し、その変化から運動適応と不適応を解釈しうる指標となる可能性が推察される。しかしながら、これらの知見はすべてフィールド研究によって検証されたものであるため、CAR に影響を及ぼしうる多数の交絡因子が統制されておらず、かつ対象者が実際に完了した作業量が示されていない。すなわち、先行研究において示されている運動負荷が実際に CAR に影響を及ぼしたかは明らかではない。したがって、CAR を運動負荷に対する適応過程のモニタリングツールとして提案するためには、条件統制下の実験において、運動負荷そのものが CAR に及ぼす影響について明らかにする必要があると考えられる。また、運動負荷に対する CAR の変化は、継続的な運動負荷が課された前後やその期間中の数時点で測定された報告が多く、単発の運動負荷が CAR に及ぼす影響に関する知見が少ないことも課題として挙げられる。継続的な運動負荷に対する効果は、単発の運動効果の蓄積により生じる (Coffey and Hawley, 2007) ことを踏まえると、まずは単発の運動負荷が CAR に及ぼす影響について検討する必要があると考えられる。

また、運動負荷に対する CAR の変化について検証した知見の中で、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響に着目した研究はなされていない。運動は大きく分けて持久的運動とレジスタンス運動の 2 つに分けられる (American College of Sports Medicine, 2013) が、高い負荷で伸張性収縮の繰り返しを伴うレジスタンス運動は、持久的運動よりも標的とする筋肉にかかる機械的ストレスが大きくなることが示されている (Douglas et al., 2017; Tee et al., 2007)。そのため、レジスタンス運動実施後の回復期において酸素摂取量やエネルギー消費量の増加が観察され (Melby et al., 1993; Schuenke et al., 2002)、運動誘発性筋損傷に関わる血液マーカーや筋肉痛が持久的運動を実施した後よりも高くなるなど、持久的運動とは異なる生理学的変化が引き起こされることが報告されている (Proske and Morgan, 2001)。したがって、レジスタンス運動による CAR の変化は持久的運動とは異なる結果が得られる可能性があることから、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響についても検討する必要があると考えられる。

5. 本研究の目的

5.1. 本研究の目的と研究課題の設定

以上より、本研究では単発の運動負荷に着目し、CAR に影響を及ぼす運動負荷の条件の一端を条件統制下の実験から明らかにすることを目的とした。その中でも特に、先行研究

を踏まえて推察された (1) CAR が変化する運動強度の閾値の存在と、先行研究において知見が不足している (2) レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響について検討することとした。本研究の目的を達成するために、2 つの研究課題を設定した。はじめに、CAR が増加する運動強度の閾値の条件を明らかにするために、異なる強度の運動の実施が翌日の CAR に及ぼす影響について検討する (研究課題 1)。次に、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響について検討するために、多くのレジスタンス運動のプログラムで一般的に用いられている種目と負荷設定である 75%1RM の強度とベンチプレス運動に着目し (Ratamess et al., 2007)、翌日以降の CAR に及ぼす影響について検討する (研究課題 2)。

過負荷を伴う運動負荷が CAR に影響を及ぼすメカニズムは明らかになっていないが、運動負荷に対するコルチゾールの分泌メカニズムと CAR の機能的役割から仮説を立てられると考えられる。運動時は運動野の興奮およびそこから指令による遠心性の要因と、筋肉内の機械的変化や化学的変化などの刺激による求心性の要因がコルチゾールの分泌メカニズムに影響すると推察されている。また、CAR の機能的役割は「その日の活動期に予測される要求に応じて CAR を調節し、安静状態から活動状態への移行に必要なエネルギーを供給する」ことであると仮説が立てられている。過負荷を伴う運動負荷により、運動誘発性の筋損傷や代謝基質の不足といった筋組織内の恒常性の乱れが翌日以降に残留することが報告されている (Proske and Morgan, 2001; Stožer et al., 2020)。したがって、過負荷を伴う運動負荷が課された翌日以降は通常時に必要なエネルギーに加えて回復のためのエネルギーが必要になると考えられる。その結果、筋組織からの求心性の入力が増加し、HPA 軸が刺激されることで、翌日以降の CAR に影響を及ぼすことが予測される。

過負荷を伴う運動負荷によって引き起こされる筋組織内の恒常性の乱れは、疲労や筋肉痛の自覚に関与するといわれている (Fares et al., 2022; Twist and Highton, 2013)。したがって、本研究で実施した運動負荷によって生じた筋組織内の恒常性の乱れを推察するための指標として、身体疲労と筋肉痛の程度を評価した。また、運動負荷が CAR に及ぼす影響について解釈する際、交絡因子となりうる要因を統制するために男性のみを対象者とし、サンプリング時刻や睡眠の量と質、起床時のストレスや気分状態を測定した。さらに、CAR を測定する前日からの活動やカフェイン、アルコールの摂取など、対象者の行動を制限した。

5. 2. 本研究を実施する意義

運動負荷が CAR に及ぼす影響について報告された知見は、すべてフィールド研究によって検証されたものであるため、CAR に影響を及ぼしうる多数の交絡因子が統制されておらず、かつ対象者が実際に完了した作業量が示されていない。そのため、先行研究において示されている運動負荷が実際に CAR に影響を及ぼしたかは明らかではない。条件統制下の実験において、運動負荷そのものが CAR に及ぼす影響について明らかにすることは、CAR を運動負荷に対する適応過程のモニタリングツールとして提案する上で重要だと考えられる。また、運動負荷に対する CAR の変化は、継続的な運動負荷が課された前後やその期間中の数時点で測定された報告が多く、単発の運動負荷が CAR に及ぼす影響に関する知見は少ない。継続的な運動負荷に対する効果は、単発の運動効果が蓄積した結果生じる (Coffey and Hawley, 2007) ことから、運動負荷が CAR に及ぼす影響を検討する上で、まずは単発の運動負荷が CAR に及ぼす影響について明らかにすることは重要である。研究課題 1 と研究課題 2 を実施することにより、CAR に影響を及ぼす運動負荷の条件の一端が明らかになり、運動負荷に対する CAR の変化について基礎的な知見が提供できると考えられる。したがって、本研究において得られた知見は、運動負荷に対する身体の適応過程のモニタリングツールとして CAR を提案するための有益な情報となるとともに、他の領域において CAR を評価する際の理解の促進にも繋がることが期待される。

また、本研究を通して運動負荷に対する CAR の変化を捉えうる実験プロトコルが確立することで、今後、運動負荷が CAR に及ぼす影響について、さらなる理解を追求する研究にも繋げることができると考えられる。

5. 3. 本論文の構成

本論文は 4 章から構成した。まず第 I 章では、運動効果の二面性という観点から、運動に対する身体の適応過程をモニタリングできる指標の必要性について述べ、既存のモニタリングツールの課題とその課題を解決しうる指標として CAR を提案した。また、運動が CAR に及ぼす影響に関する先行研究を概観し、運動負荷が CAR に及ぼす影響について、条件統制下の実験から検討する必要があることと、その意義について説明した。第 II 章では、異なる強度の運動の実施が翌日の CAR に及ぼす影響について検討した。本章は、研究課題 1 に対応している。第 III 章では、レジスタンス運動の実施が翌日以降の CAR に及ぼす影響について検討した。本章は、研究課題 2 に対応している。第 IV 章では、第 II 章と第 III

章の研究結果に基づき，本論文のまとめと学術的意義および実践的意義，本研究の限界，今後の展望についてまとめ，研究全体を総括した。

第II章 異なる強度の運動の実施が翌日の CAR に及ぼす影響

1. 目的

これまでの研究を踏まえると、CAR は単発および継続的な過負荷を伴う運動負荷に対して増加あるいは減弱という二極性の変化を示し、その変化から運動適応と不適応を解釈しうる指標となる可能性が推察される。また、単発の運動負荷に対する CAR の変化には、運動強度の閾値が存在する可能性のあることも推察される。しかしながら、これまでの知見はすべてフィールド研究によって検証されたものであるため、CAR に影響を及ぼしうる多数の交絡因子が統制されておらず、かつ対象者が実際に完了した作業量が示されていない。すなわち、先行研究において示されている運動負荷が実際に CAR に影響を及ぼしたかは明らかではない。また、単発の運動負荷が CAR に及ぼす影響に関する知見が少ないことも課題として挙げられる。継続的な運動負荷に対する効果は、単発の運動効果の蓄積により生じる (Coffey and Hawley, 2007) ことを踏まえると、まずは単発の運動負荷が CAR に及ぼす影響について、条件統制下の実験から明らかにする必要があると考えられる。

そこで本章では、単発の運動負荷と CAR に関する先行研究から推察された CAR が変化する運動強度の閾値の存在を明らかにするために、異なる強度の運動の実施が翌日の CAR に及ぼす影響について検討することを目的とした (研究課題 1)。フィールド研究の知見では、レクリエーション活動として持久的トレーニングを実施している男女において、前日のトレーニング負荷が翌日の CAR と正の関連を示したことが報告されている (Anderson et al., 2018)。したがって、研究課題 1 では実施した運動強度に比例して CAR が高い値を示すという仮説を立てた。

2. 方法

2.1. 実験対象者

実験対象者は、体育系大学に所属する健康な男子大学生 15 名とした (年齢 : 21.09 ± 1.6 歳, 身長 : 174.6 ± 4.3 cm, 体重 : 76.4 ± 9.6 kg, BMI : 25.0 ± 2.7 , $\dot{V}O_2\text{max}$: 39.4 ± 5.45 ml/kg/min)。実験実施前に喫煙習慣, 疾病および服薬の有無, 習慣的な起床時刻および就寝時刻, 食事制限の有無について確認し, ホルモン障害や精神疾患の既往歴, 喫煙習慣, 慢性的な低炭水化物食の摂取, タンパク質同化性ステロイドおよび非ステロイド性抗炎症薬の慢性的な使用が認められた場合は対象者から除外した。実験実施に先立ち, 全ての対象者に対して研究の目的と測定内容, 実験への参加は任意であること, 実験に参加しない

ことにより不利益を被ることがないこと、また本人の意志でいつでも実験の参加を辞退できることを口頭および書面で説明した上で、書面による同意を得た。なお、本研究は大阪体育大学倫理審査委員会の承認を受けて行った（承認番号：20-3）。

2.2. 実験デザイン

本研究では、運動強度による急性のコルチゾール濃度の変化を検証した先行研究の手続き（Hill et al., 2008; VanBruggen et al., 2011）を参考に、 $\dot{V}O_2\max$ の測定と、(1) 座位安静セッションおよび $\dot{V}O_2\max$ の (2) 40%, (3) 60%, (4) 80%の強度の運動セッションからなる 4 回の実験セッション、計 5 日間の実験プログラムを実施した。先行研究の手に則り、4 回の実験セッションはランダムな順序で、かつ 2 日以上の間隔を空けて実施し、複数のセッションを同日中に行うことはなかった（Hill et al., 2008; VanBruggen et al., 2011）。先行研究における各セッションの実施時間は 30 分間であったが、予備実験において大半の対象者が 80% $\dot{V}O_2\max$ の強度の条件を完遂できなかったことから（運動持続可能時間：22.8±4.7 分）、本実験における各セッションの実施時間は 20 分間に設定した。

コルチゾールの日内変動と、個体間および個体内の生理的変動を考慮し、各実験セッションの開始時刻は 18 時 ± 30 分以内とした。各測定は、実験セッション開始前 (Pre)、実験セッション終了直後 (Post-0)、実験セッション終了から 10 分後 (Post-10)、20 分後 (Post-20)、30 分後 (Post-30)、実験セッションから帰宅後の午後 9 時 (recovery 1)、午後 11 時 (recovery 2)、実験セッション翌日の起床時（起床直後：C₀、15 分後：C₁₅、30 分後：C₃₀）に行った。

実験による運動負荷以外の要因を排除するため、実験前日から中強度以上の運動と、カフェインおよびアルコールの摂取を禁止した。また、実験期間中は類似した食生活を維持し、実験 4 時間前と実験終了後の午後 8 時以降は食事および糖質の入った飲み物を飲まないように指示をした。

2.2.1. $\dot{V}O_2\max$ の測定

実験プログラムの初日は、対象者のスクリーニングと $\dot{V}O_2\max$ の測定を実施した。 $\dot{V}O_2\max$ の測定の 2 時間前から中強度以上の運動および食事、糖質およびカフェイン、アルコールの含まれた飲み物を禁止した。実験室に到着後、対象者は無負荷で自転車エルゴメーター（POWERMAX-VII, COMBI 社製、東京）を漕ぐウォームアップを 2 分間行った。

ウォームアップ終了後、自転車エルゴメーターを用いて漸増負荷運動を実施した。漸増負荷運動は毎分 60 回転で 30 W の負荷から開始し、対象者が疲労困憊に至るまで 2 分毎に 30 W ずつ負荷を増加した。漸増負荷運動実施時には 1 分毎の呼気ガスおよび心拍数 (heart rate, 以下「HR」と略す) を記録した。また、2 分毎の主観的運動強度 (the rating of perceived exertion, 以下「RPE」と略す) を測定した。先行研究の基準をもとに (VanBruggen et al., 2011), 作業負荷の増加に応じた $\dot{V}O_2$ の増加が 0.15 L/分以下にとどまる, あるいは HR が年齢予測最大値 $\pm 5\%$ の値を示す, 呼吸交換比が 1.1 以上を示す, RPE の評価が 18 以上を示すという 4 つの基準のうち 3 つを満たした場合において, $\dot{V}O_{2max}$ の測定は有効であるとみなした。

2.2.2. 実験セッションの実施

$\dot{V}O_{2max}$ の測定後, 対象者は 2 日以降 7 日以内に実験セッションを開始した。実験セッションは 20 分間座った姿勢で過ごす (1) 座位安静セッション (Control) と, $\dot{V}O_{2max}$ の (2) 40% (Low-intensity), (3) 60% (Moderate-intensity), (4) 80% (High-intensity) の強度の運動セッションを各日程でランダムな順序で実施した。各セッションは少なくとも 2 日以上の間隔を空けて実施した。対象者の体調や実験セッション外の活動による身体疲労の状況, 心理的な状況により, 実験セッションの実施が困難であると判断した場合は別日に実験セッションを延期した。

実験当日の朝, 中強度以上の運動と, 実験セッション実施の 4 時間前から食事および糖質の入った飲み物を禁止した。実験室に到着後, まずは対象者の唾液サンプルを採取した (Pre)。次に, その日の実験セッションの内容および実験セッション後の手続きについて説明を行った。その後, Control セッション実施日は, 座位の姿勢を維持し, 20 分後に唾液採取を行った (Post-0)。その際, 軽い談笑とスマートフォンおよびパソコンの使用は許可したが, 睡眠をとることは禁止した。運動セッション実施日は, ウォーミングアップとして $15-20\% \dot{V}O_{2max}$ の強度の運動を 2 分間行った。その後, 各強度の運動セッションを 20 分間実施し, セッション終了直後に唾液の採取を行った (Post-0)。運動セッション実施中は呼気ガスおよび HR, RPE の測定を実施した。

各実験セッション終了後, 対象者は 30 分間の回復期間が設けられた。その際, セッション終了から 10 分後 (Post-10), 20 分後 (Post-20) および 30 分後 (Post-30) に唾液を採取した。安静セッション実施時と同様, 回復期間中においても軽い談笑とスマートフォン

およびパソコンの使用は許可したが、睡眠をとることは禁止した。

各セッションの回復期間終了後に弁当が配布され、対象者は大学内で食事を行った。食事終了後、当日の夜および翌日の起床時に測定する内容と測定時の制限事項について説明を行った。その後、唾液採取用の小型チューブとストロー、翌日起床時に回答する質問紙を配布し、対象者を帰宅させた。

2.2.3. 帰宅後の測定

実験セッション後の対象者の回復状態を把握するために、帰宅後においても唾液採取を行った。また、実験セッション後のストレスおよびリカバリーの統制と唾液採取時のコンプライアンスの統制を行うために、帰宅後の就業および中強度以上の運動、食事、飲酒、糖質の含まれた飲み物を禁止した。また、唾液採取 1 時間前の飲水および入浴、はみがきを禁止した。実験セッション終了後に対象者が帰宅する時間帯および実験実施前に確認された対象者の習慣的な就寝時刻を考慮し、帰宅後の測定を実施する時刻は午後 9 時 (recovery 1) と午後 11 時 (recovery 2) に設定した。

帰宅後、各測定実施時刻の 15 分前に唾液採取のリマインド連絡を対象者に送信し、その後、対象者から唾液採取が滞りなく行われたことを確認した。recovery 2 の測定終了後、翌日の朝に実施する測定事項の確認連絡とともに、測定時の状況を記載するための Google フォームの URL を送信した。

2.2.4. 翌日起床時の測定

起床時の測定を実施するにあたり、起床後の 30 分間にはみがきおよび飲食、飲水、運動、入浴、二度寝を行わないように指示をしたが、着替えやトイレなど、覚醒水準に著しく影響を及ぼさない程度の通常の活動は許可した。唾液は起床直後 (C_0) および起床 15 分後 (C_{15})、起床 30 分後 (C_{30}) の 3 点で採取され、CAR として評価した。起床直後の唾液採取を行った後、配布した質問紙に回答するよう指示をした。また、起床直後から起床 30 分後にかけて、就寝時間、起床時間、唾液採取時間、睡眠時の出来事について Google フォームで回答し、起床 30 分後の唾液採取が終了し次第、回答を送信するよう指示をした。Google フォームの送信時刻と起床 30 分後の唾液採取の時刻に相違があった場合、対象者に起床時の測定状況が滞りなく行われたかどうかを確認した。二度寝および採取の遅延によって起床時の唾液採取に失敗した場合、別日に同じセッションを再度実施した。帰宅後

の夜および起床時に採取された唾液と質問紙は、対象者の自宅にある市販の冷蔵庫（4℃）で保管され、48時間以内に研究代表者のもとへ提出された。

2.3. 測定項目

2.3.1. 運動セッション実施時における運動強度

本研究の運動セッションにおける強度別の運動が適切な条件で実施されたこと評価するために、運動セッション実施時に対象者の呼気ガスおよびHR、RPEを測定した。

呼気ガスの測定には呼気ガス分析装置（AERO MONITOR AE 300S, MINATO MEDICAL SCIENCE 社製, 大阪）を用いた。測定方法は breath by breath 法を採用し、運動セッション中の20分間、継続して対象者の呼気ガスを測定した。呼気ガスから測定した酸素摂取量は7-10分と17-20分の平均値を採用した。HRの測定にはHRモニターV800（Polar社製, 東京）を用い、5分毎のHRを記録した。RPEの測定にはBorg（1973）によって作成され、小野寺・宮下（1976）によって日本語版への翻訳と客観的運動強度との関連性が検討されているRPEを用いた。RPEは安静時を示す6から最大心拍数に匹敵するほどの疲労困憊状態を示す20までの15段階を7つの言語で示しており、自己評価によって主観的に運動強度が評価できる尺度である。

2.3.2. 唾液中コルチゾール濃度

本研究の唾液検体は、口腔内で2分間自然に溜まった唾液をストローからプラスチック容器に流し入れるPassive Drool法で採取した。採取した唾液検体は遠心分離後、検体保存用の小型チューブに分注し、分析日まで-80℃で保存した。唾液中のコルチゾール濃度は、分析キット（Cortisol ELISA Kit (RE52611), IBL International 社製, Germany）を用い、Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay (ELISA) 法にて測定した。はじめに、7種類のスタンダード溶液と唾液検体をマイクロプレートに50 µl ずつ注入した。次に、複合酵素100 µl を各プレートに注入し、シェーカー（Titramax101, Heidolph 社製, Germany）で2時間反応させた。その後、プレートを洗浄機（Hydroflex, Tecan Janan 社製, 大阪）で洗浄し、気質溶液100 µl を各プレートに注入した後に再びシェーカーで30分間反応させた。最後に、停止液100 µl を各プレートに注入し、波長を450 nm に設定した吸光度計（サンライズレインボーサーモ RC-R, Tecan 社製, Switzerland）を用いてスタンダード溶液および唾液検体におけるコルチゾールの吸光度の計測を行った。キット

内のスタンダードサンプルの濃度および吸光度の値から 4-Parameter Sigmoid Minus Curve fit にあてはめ、コルチゾール濃度の推定を行った。

また CAR は、以下の先行研究の公式をもとに ΔCAR および $\text{CAR}\%$, AUC_g , AUC_i を算出した (Pruessner et al., 1995; Pruessner et al., 2003)。

$$\Delta\text{CAR} = \text{Maximum value of } [C_{15}] \text{ or } [C_{30}] - [C_0]$$

$$\text{CAR}\% = \frac{\Delta\text{CAR}}{[C_0]} \times 100$$

$$\text{AUC}_g = \frac{([C_0] + [C_{15}]) \times 15}{2} + \frac{([C_{15}] + [C_{30}]) \times 15}{2}$$

$$\text{AUC}_i = \text{AUC}_g - [C_0] \times 30$$

2.3.3. CAR に影響する要因の評価

筋肉内の恒常性の乱れを推察するための身体疲労および筋肉痛の程度と、CAR を評価する際の交絡因子となる起床時のストレスや睡眠の質は、Visual analog scale (以下「VAS」と略す) を用いて評価した。VAS は、設問に対する回答の最大値と最小値が記載された 10 cm の水平な直線上に対して、対象者の主観が合致するポイントに印をつけることで評価された。本研究において使用した身体疲労の教示内容については「運動によって生じる身体的な疲労を想定して回答してください。今のあなたの状態は以下の言葉にどのくらい当てはまりますか。」とし、左端が「まったく疲れていない」、右端が「非常に疲れている」とした。また、筋肉痛およびストレス、睡眠の質の教示内容については「今のあなたの状態は以下の言葉にどのくらい当てはまりますか。」とし、筋肉痛は左端が「痛みなし」、右端が「耐え難い痛み」、ストレスは左端が「ストレスなし」、右端が「最大のストレス」、睡眠の質は左端が「全く眠れなかった」、右端が「非常によく眠れた」とした。10 cm を 100 点とし、直線の左端から印をしたポイントまでの長さを mm 単位で数値化することで設問項目の測定値を求めた。

また、起床時の気分状態は日本語版 Profile of Mood States Second Edition 短縮版 (横山, 2015) の総合的不快感情得点 (total mood disturbance: 以下「TMD 得点」と略す)

を用いた。項目の評定は、0（まったくなかった）から 4（非常に多くあった）の 35 項目、「怒り-敵意」、「混乱-当惑」、「抑うつ-落ち込み」、「疲労-無気力」、「緊張-不安」、「活気-活力」、「友好」の 7 下位尺度からなり、横山（2015）によって信頼性と妥当性が確認されている。TMD 得点は「怒り-敵意」、「混乱-当惑」、「抑うつ-落ち込み」、「疲労-無気力」、「緊張-不安」の合計得点から「活気-活力」の得点を引くことによって算出される。

2. 4. 統計処理

全てのデータは平均値±標準誤差（Standard error, 以下「SE」と略す）で示した。実験期間中にカフェインの摂取が報告された 1 名の対象者は、その後も再測定が行われなかったため分析から除外した。実験セッション当日（セッション条件 [4] × 測定時点 [7]）と実験セッション翌日（セッション条件 [4] × 測定時点 [3]）における唾液中コルチゾール濃度の分析には、二要因反復測定分散分析を用いた。交互作用および主効果が認められた場合は Bonferroni 法による多重比較検定を行った。

Δ CAR, CAR%, AUC_g, AUC_i と起床時の身体疲労, 筋肉痛, ストレス, 睡眠の質, TMD 得点, 睡眠時間, 起床時刻, 起床直後の唾液採取時刻のセッション条件間の差の分析には、一要因反復測定分散分析を用いた。主効果が認められた場合は Bonferroni 法による多重比較検定を行った。

Mauchly の球面仮説が棄却された場合は、Greenhouse-Geisser の ϵ による自由度の修正を行った。効果量には偏イータ二乗（partial η^2 , 以下「 η_p^2 」と略す）を用い、 $\eta_p^2=0.01, 0.06, 0.14$ をそれぞれ効果量小, 中, 大とした（Larson-Hall, 2009）。全ての統計処理には IBM SPSS Statistics 27 を使用し、5%以下を有意差の判定基準、10%以下を有意傾向の判定基準とした。

3. 結果

3.1. 運動強度に関するデータ

各運動セッションにおいて測定された運動強度に関するデータを Table 1 に示した。セッション条件を独立変数、各測定項目を従属変数とした一要因反復測定分散分析を行ったところ、作業負荷、 $\dot{V}O_2\max$ 、心拍数、RPE の全ての測定項目において、有意な主効果が認められた。Bonferroni 法による多重比較検定の結果、全ての測定項目において、Low-intensity 条件よりも Moderate-intensity 条件で、そして他の 2 つの条件と比較して High-intensity 条件が有意に高い値を示した ($p < .05$)。

Table 1. Results of selected variables measured during each exercise trial (Means \pm SE, $n = 14$).

Measure	Low intensity (40%$\dot{V}O_2$max)	Moderate intensity (60%$\dot{V}O_2$max)	High intensity (80%$\dot{V}O_2$max)
Workload (W)	80.4 \pm 3.4	139.1 \pm 4.8	197.7 \pm 6.4
Heart rate (bpm)	101.5 \pm 2.9	128.0 \pm 3.1	157.8 \pm 2.9
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	15.5 \pm 0.7	24.7 \pm 1.1	34.1 \pm 1.2
% $\dot{V}O_2$ max	39.3 \pm 0.6	62.6 \pm 1.1	86.8 \pm 1.1
RPE	11.1 \pm 0.5	13.4 \pm 0.5	17.7 \pm 0.5

3. 2. 実験セッション当日における唾液中コルチゾール濃度の変化

Figure 1 に実験セッション当日における唾液中コルチゾール濃度の変化を示した。セッション条件および測定時点を独立変数、唾液中コルチゾール濃度を従属変数とした二要因反復測定分散分析を行った結果、セッション条件 ($F(3, 39) = 16.566, p = .000, \varepsilon = .653, \eta_p^2 = .560$) および測定時点 ($F(6, 78) = 25.375, p = .000, \varepsilon = .326, \eta_p^2 = .661$) において有意な主効果が認められた。また、セッション条件と測定時点の交互作用が認められた ($F(18, 234) = 12.800, p = .000, \varepsilon = .208, \eta_p^2 = .496$)。

測定時点において多重比較検定を行った結果、Control と Moderate-intensity 条件では、Pre と比較して Recovery 1 の時点において低い値を示した (順に $p < .05, p < .10$)。また、Low-intensity 条件では Pre と比較して Recovery 1 と Recovery 2 の時点において有意に低い値を示した ($p < .05$)。High-intensity 条件では、Pre と比較して Post-10, Post-20, Post-30 の時点で有意に高い値を示し、Recovery 2 の時点で有意に低い値を示した ($p < .05$)。

セッション条件において多重比較検定を行った結果、他の 3 つの条件と比較して Post-10, Post-20, Post-30 の時点において、High-intensity 条件で高い値を示した ($p < .05$, Moderate-intensity 条件の Post-10 の時点では $p < .10$)。Recovery 1 の時点では、Control および Moderate-intensity 条件と比較して、High-intensity 条件で有意に高い値を示した ($p < .05$) が、Recovery 2 の時点はセッション条件間で有意な差は認められなかった。

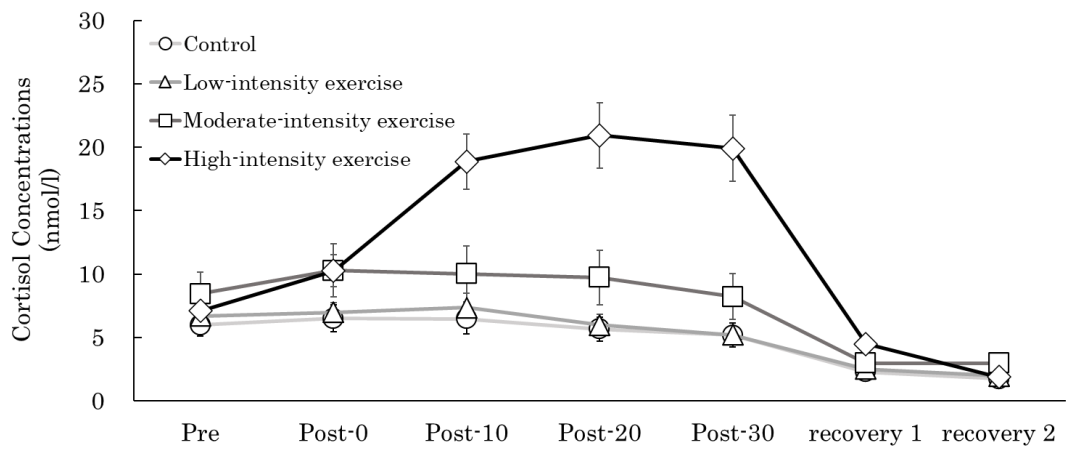


Figure 1. Cortisol concentrations for each experimental session. Depicted values are Mean \pm SE ($n = 14$).

3.3. 翌日起床時における CAR の比較

実験セッション翌日起床時における CAR を Figure 2 に示した。セッション条件および測定時点を独立変数、コルチゾール濃度を従属変数とした二要因反復測定分散分析を行った結果、セッション条件 ($F(3, 39) = 3.087, p = .038, \eta_p^2 = .192$) および測定時点 ($F(2, 26) = 21.437, p = .000, \varepsilon = .597, \eta_p^2 = .622$) において有意な主効果が認められた。また、セッション条件と測定時点の交互作用に有意傾向が認められた ($F(6, 78) = 12.800, p = .091, \varepsilon = .517, \eta_p^2 = .150$)。

測定時点において多重比較検定を行った結果、Low-intensity 条件では C_0 および C_{15} と比較して、 C_{30} の時点で高い値を示した (順に $p < .05, p < .10$)。Moderate-intensity と High-intensity 条件では、 C_0 から C_{15} 、 C_{30} にかけて有意に高い値を示した (いずれも $p < 0.05$)。セッション条件において多重比較検定を行った結果、 C_{30} の時点において、Control 条件と比較して High-intensity 条件で有意に高い値を示した ($p < .05$)。

CAR の反応性および曲線下面積の値を Table 2 に示した。セッション条件を独立変数、各項目を従属変数とした一要因反復測定分散分析を行った結果、 ΔCAR および AUC_i において有意および有意傾向で主効果が認められた (順に $F(3, 39) = 4.279, p = .001, \eta_p^2 = .248, F(3, 39) = 2.250, p = .098, \eta_p^2 = .148$)。多重比較検定を行った結果、 ΔCAR は Control 条件および Low-intensity 条件と比較して、High-intensity 条件において有意および有意傾向で高い値を示した (順に $p < .05, p < .10$)。 AUC_i は Control 条件と比較して High-intensity 条件において、有意傾向で高い値を示した ($p < .10$)。 $\text{CAR}\%$ と AUC_g には有意な主効果が認められなかった。

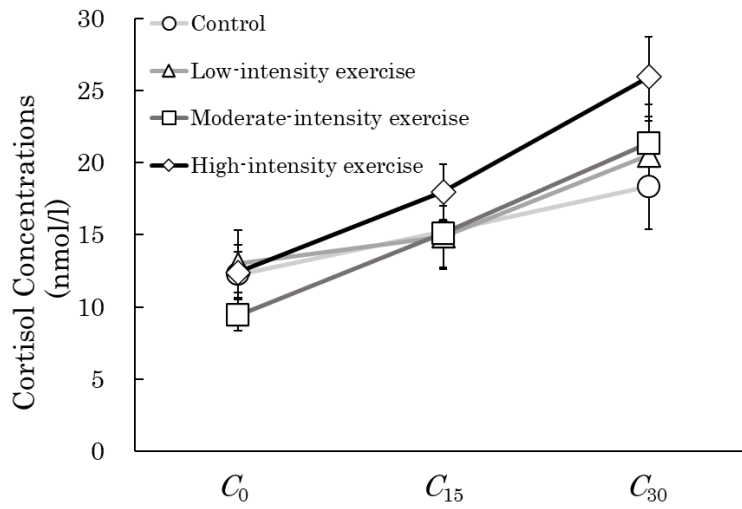


Figure 2. Cortisol awakening response on the day after each experimental session. Depicted values are Mean \pm SE ($n = 14$).

Table 2. Magnitude of change, relative change, and area under the curve of CAR (Means \pm SE, $n = 14$).

Measure	Control	Low intensity	Moderate intensity	High intensity
Δ CAR (nmol/l)	7.1 \pm 2.5	8.1 \pm 2.1	11.9 \pm 2.3	14.0 \pm 2.1* †
CAR% (%)	99.6 \pm 28.1	148.1 \pm 56.4	182.3 \pm 43.7	153.4 \pm 36.5
AUC _g (nmol/l \cdot 30 min)	457.6 \pm 73.1	474.3 \pm 57.5	457.0 \pm 62.8	557.1 \pm 57.2
AUC _i (nmol/l \cdot 30 min)	121.1 \pm 35.9	168.8 \pm 41.0	202.2 \pm 32.5	186.6 \pm 32.1*

* Significantly different ($p < .05$) and † marginal significance ($p < .10$) compared to Control and Low intensity, respectively.

3. 4. CAR に影響する要因の評価

Table 3 に実験セッション翌日の起床時における身体疲労および筋肉痛, ストレス, 睡眠の質, TMD 得点の結果を示した. また, Table 4 に各実験セッションにおける睡眠時間および起床時刻, 起床直後の唾液採取時刻を示した. セッション条件を独立変数, 各項目を従属変数とした一要因反復測定分散分析を行った結果, 身体疲労と筋肉痛において有意な主効果が認められた (順に $F(3, 39) = 4.592, p = .008, \eta_p^2 = .261, F(3, 39) = 3.325, p = .029, \eta_p^2 = .204$). 多重比較検定を行った結果, 身体疲労では Control 条件と比較して, Low-intensity 条件および High-intensity 条件で有意に高い値を示した ($p < .05$). 筋肉痛の多重比較検定では, Control 条件と比較して High-intensity 条件において, 有意傾向で高い値を示した ($p < .10$). その他の要因では, 有意な差は認められなかった.

Table 3. Comparison of factors affecting CAR between each experimental session (Means \pm SE, $n = 14$).

Measure	Control	Low intensity	Moderate intensity	High intensity
Physical fatigue	14.0 \pm 2.7	25.2 \pm 3.8*	24.1 \pm 5.3	29.9 \pm 3.9*
Muscle soreness	3.8 \pm 1.4	8.5 \pm 2.5	10.4 \pm 2.8	12.0 \pm 3.2†
Stress	18.0 \pm 3.5	29.0 \pm 4.3	21.0 \pm 4.9	28.3 \pm 4.9
Sleep quality	58.6 \pm 7.8	60.2 \pm 5.7	62.9 \pm 6.9	61.6 \pm 6.8
TMD score	103.6 \pm 3.8	104.9 \pm 3.3	103.4 \pm 3.9	107.1 \pm 3.2

* Significantly different ($p < .05$) and † marginal significance ($p < .10$) compared to Control.

Table 4. Comparison of sleeping hours, awakening time and first sampling time each experimental session (Means \pm SE, $n = 14$)

Measure	Control	Low Intensity	Moderate Intensity	High Intensity
Sleeping hours (h)	6.2 \pm 0.4	6.5 \pm 0.3	6.6 \pm 0.3	6.8 \pm 0.4
Awakening time	6:44 \pm 0:25	6:56 \pm 0:15	7:00 \pm 0:17	6:59 \pm 0:20
First sampling time	6:46 \pm 0:25	6:59 \pm 0:15	7:02 \pm 0:17	7:01 \pm 0:20

4. 考察

本章の目的は、CAR が変化する運動強度の閾値の条件を明らかにするために、 $\dot{V}O_2\max$ の 40%、60%、80%という異なる強度の運動の実施が翌日の CAR に及ぼす影響について検討することであった。その結果、実験当日の唾液中コルチゾール濃度は High-intensity 条件のみで上昇し、recovery 2 の時点で回復した。実験翌日の起床時では Control 条件と比較して High-intensity 条件において CAR が高値を示した一方で、他 2 つの条件は Control 条件との間に有意な差がみられなかった。加えて、CAR に影響しうる起床時の状況要因は、身体疲労と筋肉痛を除いて条件間で差がみられなかった。このことから、CAR は $80\% \dot{V}O_2\max$ の運動負荷によって増加することが示され、CAR が変化する運動強度の閾値の条件が条件統制下の実験において初めて実証された。

4.1. 運動セッション実施時に測定された運動強度

各運動セッションにおける運動強度に関するデータでは、すべての項目において、運動強度の増加に伴い、有意な高値を示した。Moderate-intensity 条件と High-intensity 条件における $\% \dot{V}O_2\max$ は基準を上回る結果（それぞれ 62.6 ± 1.1 , 86.8 ± 1.1 ）となったが、これは VanBruggen et al. (2011) の報告においても観察されている傾向（Moderate-intensity: 65.2 ± 7.7 , High-intensity: 85.0 ± 5.8 ）であった。このことから、本研究の運動セッションは強度を判別しうる適切な条件で行われたことが示唆された。

4.2. 実験セッション当日における唾液中コルチゾール濃度の変化

実験当日の唾液中コルチゾール濃度は、High-intensity 条件において Pre から Post-30 にかけて上昇した。一方で、Low-intensity 条件と Moderate-intensity 条件において、唾液中コルチゾール濃度の変化はみられなかった。この結果は、Moderate-intensity 条件を除き、実験プロトコルを参考にした先行研究と一致していた（Hill et al., 2008; VanBruggen et al., 2011）。運動負荷に対する急性のコルチゾール反応は、実施した運動の代謝要求の大きさに応じて生じる（McMurray and Hackney, 2000）ことから、本研究の High-intensity 条件が他 2 つの条件よりも代謝要求の高い運動負荷であったことが示唆される（McMurray and Hackney, 2000）。Moderate-intensity 条件では、実験手続きを参考にした先行研究とは異なる結果となったが、中強度の運動を実施してもコルチゾール濃度の上昇が生じないことを示す研究もある（Duclos et al., 1997; Jacks et al., 2002; Ortega

et al., 1993). このような反応の違いは、個人のフィットネスレベルや実施した運動時間の長さといった要因によって生じる可能性が示唆されている (Davies and Few, 1973; Hackney and Walz, 2013). 本研究の対象者は、持久的な運動を日常的に行ってはいないが、週に 2—3 日程度の身体活動の習慣があった。また、先行研究 (Hill et al., 2008; VanBruggen et al., 2011) の運動セッションの時間が 30 分であったのに対して、本研究では対象者のフィットネスレベルや運動習慣を考慮し、各運動セッションの時間を 20 分に変更した。したがって、対象者のフィットネスレベルに応じた運動時間の変更により、本研究の Moderate-intensity 条件が対象者にとって代謝要求の小さいプロトコルとなったため、実験当日の唾液中コルチゾール濃度が上昇しなかった可能性が考えられる。

High-intensity 条件における唾液中コルチゾール濃度は、recovery 2 の時点で Pre の値に回復した。HPA 軸はネガティブフィードバック機構を有しており、循環中のコルチゾール濃度が増加すると、HPA 軸の上流にある下垂体および視床下部と大脳皮質にある受容体を標的としてその後の神経内分泌反応を阻害するといわれている (McEwen, 2007)。その結果、コルチゾールの消費速度が産生速度を上回り、循環中のコルチゾール濃度が低下する。唾液中コルチゾールの生物学的半減期は 70 分前後であることを踏まえると、High-intensity 条件の recovery 2 の時点における唾液中コルチゾール濃度の回復は、HPA 軸のネガティブフィードバック機構が働いたことにより、コルチゾールの消費速度が産生速度を上回ったことで生じたと考えられる。すべての実験セッションにおいて共通して観察された recovery 2 の時点での唾液中コルチゾール濃度の低下は日内変動の影響と解釈できる。コルチゾール濃度は朝に高く、夜に低いという日内変動があるため (Hellman et al., 1970; Peters et al., 2013; Weitzman et al., 1971), recovery 1 と recovery 2 の時点の解釈は、その影響にも留意する必要がある。

4. 3. 実験セッション翌日起床時における CAR の違い

前日の夜にコルチゾール濃度が回復したにもかかわらず、High-intensity 条件の CAR は C_{30} の時点で Control 条件よりも高い値を示した。また、 ΔCAR と AUC_i においても、High-intensity 条件は Control 条件よりも高い値を示した。一方で、Low-intensity および Moderate-intensity 条件の CAR は Control 条件との間に有意な差はみられなかった。したがって、本研究では仮説を部分的に支持する結果が得られたことが示される。加えて、身体疲労と筋肉痛を除き、CAR に影響しうる起床時の状況要因は条件間で差がみられ

なかったことから、本研究の各条件において、概ね運動負荷以外の条件は取り除けたと推察される。この結果は、前日のトレーニング負荷と CAR との間に正の関連を示したフィールド研究の結果と概ね一致していたが (Anderson et al., 2018), 本研究の後に報告された緻密な条件統制下で実施された先行研究の結果とは異なっていた (Anderson et al., 2023). 本研究では, 40, 60, 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ の強度で 20 分間の運動負荷であったのに対して, Anderson et al. (2023) の研究では, より強固なコルチゾール反応を誘発するために最大出力の 70—75%の強度で 1 時間, かつ高温多湿の環境での運動負荷を課していた。したがって, Anderson et al. (2023) の運動負荷は本研究の運動負荷と比較して代謝要求の高いプロトコルであったことが推察され, 課された運動負荷の代謝要求の大きさの違いが先行研究の報告とは異なる結果となった可能性が考えられる。

CAR は過負荷を伴う運動負荷に対して増加あるいは減弱という二極性の変化を示すことが報告されており (Anderson and Wideman, 2017), 個人の適応能の範囲内で課された過負荷では増加し, 個人の適応能を超える過負荷では減弱することが推察されている。本研究と Anderson et al. (2023) の結果は, この推察と一致する可能性があると考えられる。本研究の High-intensity 条件は前者に該当したことから CAR が増加したが, 本研究よりも代謝要求の高いプロトコルであった Anderson et al. (2023) の運動負荷は後者に該当したことから CAR が減弱したと推察される。本研究の Low-intensity および Moderate-intensity 条件は急性のコルチゾール濃度に変化がなかったことから代謝要求の小さい運動負荷であったことが考えられ, 本研究の対象者にとって過負荷に該当しなかったため, CAR に影響がなかったと考えられる。

本研究において, 身体疲労と筋肉痛が High-intensity 条件を実施した翌日に Control 条件よりも高値を示していた。過負荷を伴う運動負荷によって引き起こされる筋組織の恒常性の乱れは, 疲労や筋肉痛の自覚に関与するといわれている (Fares et al., 2022; Twist and Highton, 2013). このことから, High-intensity 条件において, 翌日起床時まで筋組織における恒常性の乱れが残留していた可能性が推察される。近年では, 運動誘発性の筋損傷の発生に代謝要求の大きさが影響することが報告されており (Stožer et al., 2020), Callegari et al. (2017) は, 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動を実施した 24 時間後にクレアチンキナーゼや乳酸脱水素酵素といった運動誘発性の筋損傷に関わる血液マーカーが増加したことを示している。したがって, 代謝要求の高いプロトコルであった本研究の High-intensity 条件において生じた筋組織内の恒常性の乱れが翌日起床時に残留したことで, 通常時に必

要なエネルギーに加えて回復のためのエネルギーが必要となり，代謝基質の利用可能性が高まったことが推察される．その結果，筋組織からの求心性の入力が増加し，HPA 軸が刺激されたことで，翌日の CAR が増加したと推察される．

第Ⅲ章 レジスタンス運動の実施が翌日以降の CAR に及ぼす影響

1. 目的

運動が CAR に及ぼす影響について検証した知見の中で、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響に着目した研究はなされていない。運動は大きく分けて持久的運動とレジスタンス運動の 2 つに分けられる (American College of Sports Medicine, 2013) が、高い負荷で伸張性収縮の繰り返しを伴うレジスタンス運動は、持久的運動よりも標的とする筋肉にかかる機械的ストレスが大きくなることが示されている (Douglas et al., 2017; Tee et al., 2007)。そのため、レジスタンス運動実施後の回復期において酸素摂取量やエネルギー消費量の増加が観察され (Melby et al., 1993; Schuenke et al., 2002)、運動誘発性筋損傷に関わる血液マーカーや筋肉痛が持久的運動よりも高くなるなど、持久的運動とは異なる生理学的変化が引き起こされることが報告されている (Proske and Morgan, 2001)。したがって、レジスタンス運動による CAR への影響は持久的運動とは異なる結果が得られる可能性があることから、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響についても検討する必要があると考えられる。

本章では、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響について検討するために、75%1RM の強度とベンチプレス運動に着目し、翌日以降の CAR に及ぼす影響について検討することを目的とした (研究課題 2)。研究課題 2 では、レジスタンス運動が CAR に影響を与えるという仮説を立てたが、CAR は過負荷を伴う運動負荷に対して二極性の変化を示すという特徴があることや、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響に関する研究が不足していることから、影響の方向に仮説は立てなかった。

2. 方法

2.1. 実験対象者

実験対象者は、少なくとも 1 年以上レジスタンストレーニング経験のある、体育系大学に所属する健康な男子大学生 14 名とした (年齢: 21.09 ± 0.9 歳, 身長: 171.2 ± 5.8 cm, 体重: 68.3 ± 6.0 kg, BMI: 23.3 ± 1.4 , bench press 1RM: 88.08 ± 17.8 kg)。実験実施前に喫煙習慣、疾病および服薬の有無、習慣的な起床時刻および就寝時刻、食事制限の有無について確認し、ホルモン障害や精神疾患の既往歴、喫煙習慣、慢性的な低炭水化物食の摂取、タンパク質同化性ステロイドおよび非ステロイド性抗炎症薬の慢性的な使用が認められた場合は対象者から除外した。実験実施に先立ち、全ての対象者に対して研究の目的

と測定内容、実験への参加は任意であること、実験に参加しないことにより不利益を被ることがないこと、また本人の意志でいつでも実験の参加を辞退できることを口頭および書面で説明した上で、書面による同意を得た。なお、本研究は大阪体育大学倫理審査委員会の承認を受けて行われた（承認番号：20-19）。

2.2. 実験デザイン

本研究の実験プロトコルは、研究課題1の手順をもとに設定した。対象者は、1RMの測定と4日間連日の実験セッションを完了した。1RMの測定では、対象者のスクリーニングと1RMの測定を行った。4日間の実験セッションは、(1) ベースラインを測定するための2日間の座位安静セッションと(2) レジスタンス運動セッションに加えて、運動後8—72時間後に発生する遅発性筋肉痛の影響を考慮した(3) Recoveryセッションから構成された。実験セッションは1RM測定後の2日以降7日以内に行われた。

レジスタンス運動における単独の種目の影響を明らかにするために、レジスタンス運動セッションの種目はベンチプレス運動のみを選択した。ベンチプレス運動を選択した理由は、上半身の筋群を動員するレジスタンス運動として一般的にトレーニングプログラムの中に組み込まれており、運動後、運動誘発性の筋損傷に関わる血液マーカーや筋肉痛の増加が持続するためである(Ratamess et al., 2007; Uchida et al., 2009)。また、筋肥大を目的として多くのトレーニングプログラムで非常に一般的に使用されている、75% 1RMの強度に着目した(Ratamess et al., 2007)。

各実験セッションの開始時刻は、研究課題1と同様に18時±30分以内とした。各測定も研究課題1と同様に、実験セッション開始前(Pre)、実験セッション終了直後(Post-0)、実験セッション終了から10分後(Post-10)、20分後(Post-20)、30分後(Post-30)、実験セッションから帰宅後の午後9時(recovery 1)、午後11時(recovery 2)、実験セッション翌日の起床時(起床直後： C_0 、15分後： C_{15} 、30分後： C_{30})の時点で行った。

実験による運動負荷以外の要因を排除するため、実験セッション前日から実験セッション期間中にかけて中強度以上の運動と、カフェインおよびアルコールの摂取を禁止した。また、実験期間中は類似した食生活を維持し、実験4時間前と実験終了後の午後8時以降は食事および糖質の入った飲み物を禁止した。

2.2.1 1RMの測定

実験セッションの開始に先立ち、まずは対象者のスクリーニングとベンチプレス運動の1RMの測定を行った。1RMの測定はNSCAのガイドライン (Jeremy and Triple, 2015) を参考に実施した。はじめに、バーベルのみの20 kgの負荷で挙上動作の確認を行った。その後、予想される1RMの50%、75%、90%の順で負荷を増量し、最終的な1RMを決定した。ベンチプレス運動は、従来の肩幅あるいは肩幅から少し広めの手幅でバーベルを持ち、肘を完全に伸展させた状態から開始した。その後、バーベルを胸に軽く触れるまで下ろし、スタートポジションに戻すことを既定の挙上動作とした。なお、各試技は足を床につけた状態で、かつ腰、肩、頭をベンチに接触させ、反動をつけずに最高速度で挙上するように指示された (Hoffman, 2006)。各試技間の休息時間は2-4分間とした。挙上の際に関節が完全に伸展できなくなった時点、あるいは正しいフォームで挙上できなくなった時点のいずれかの前の重量を各対象者の1RMとした。

2.2.2. 実験セッションの実施

実験セッションは連日4日間で実施した。初日と2日目は、対象者のベースライン値を測定するためにそれぞれ20分間の座位安静セッションを実施した。3日目は、レジスタンス運動セッションを行った。実験室に到着後、対象者はウォームアップとして (a) バーベルのみの20kgの負荷で10回、(b) 40%1RMで10回のベンチプレス運動を行った。ウォームアップ終了後、75%1RMで最大10回/セットの反復を疲労困憊まで行った。セット間の休息は90秒とした。各セットで10回反復する、あるいは筋疲労に達するまでできるだけ多くの反復を行うように指示した。なお、筋疲労は自力で完全な挙上ができない状態とした (Gonzalez et al., 2018)。各セット終了後にRPEを用いて主観的運動強度を測定し、RPEが最大筋疲労の基準とされている19以上となるまでセッションを継続した (American College of Sports Medicine, 2013)。4日目には、1日安静に過ごすRecoveryセッションを実施した。

座位安静セッションおよびレジスタンス運動セッション当日の朝から起床時にかけての指示および測定は、研究課題1と同様 (第II章2.2.2.) の手順で実施した。Recoveryセッションは起床時のみの測定としたが、測定前日は大学内での測定を除き、座位安静セッションを実施した時と同様に過ごすように指示をした。実験期間中、対象者の体調や実験セッション外の活動による身体疲労および心理的な状況により、実験セッションの継続が困

難であると判断された場合は別日に実験セッションを延期した。

2.2.3. 帰宅後の測定

研究課題 1 と同様（第 II 章 2.2.3.）の手順で実施した。

2.2.4. 翌日起床時の測定

研究課題 1 と同様（第 II 章 2.2.4.）の手順で実施した。

2.3. 測定項目

2.3.1. 唾液中コルチゾール濃度

唾液サンプルの採取から解析までは、研究課題 1 と同様（第 II 章 2.3.2.）の手順で実施した。CAR は起床時刻や睡眠など、起床時の状況要因の影響を受ける可能性が懸念されるため、個人の特性値として安定した値を得るためには、2 日以上の測定が必要であることが報告されている（Hellhammer et al., 2007; 井澤ほか, 2010）。したがって、本研究では 2 日間の座位安静セッションの平均値を各対象者のベースライン値（Control）として使用した。また、 AUC_g は連日 2 日間の測定における安定性が確認されている一方で、 AUC_i の安定性を得るためには 6 日間の測定が必要であることが報告されている（Hellhammer et al., 2007）。本研究のベースライン値は連日 2 日間の測定によって得られたものであることから、 AUC_g のみの変化に着目した。 AUC_g は研究課題 1 と同様（第 II 章 2.3.2.）の方法で算出した。なお、本研究の座位安静セッションで測定された AUC_g においても連日 2 日間で有意な正の相関がみられ（1 日目： 416.4 ± 207.3 ，2 日目： 427.7 ± 232.7 ， $r = .801$ ， $p = .002$ ），個人内の安定性が確認された。なお、他の日に比べて知覚ストレスが高かった 1 名と身体疲労が高かった 1 名，起床時の唾液採取が 10 分遅れた 1 名の合計 3 名の座位安静セッション初日のデータは除外し，より良いコンプライアンスのもとで採取された 2 日目のデータのみを使用した。

2.3.2. CAR に影響する要因の評価

研究課題 1 と同様（第 II 章 2.3.3.）の手順で実施した。

2. 4. 統計処理

1 名の対象者は、実験セッション開始の 2 日前に授業内で行われたレジスタンス運動の影響を受けていることが懸念されたため分析から除外した。また、実験セッション期間中の全ての時点において CAR が減弱反応を示していた対象者 1 名についても、本実験以外の要因による不適応の状態が懸念されたため分析から除外した。

唾液中コルチゾール濃度と同様、全ての指標における Control のデータは 2 日間の座位安静セッションの平均値で示したが、唾液中コルチゾール濃度の分析（第 III 章 2. 3. 1.）で除外した 3 名の座位安静セッション初日のデータは、他の指標の分析でも除外した。全てのデータは平均値 \pm SE で示した。

本研究では、2 つの段階に分けて統計処理を行った。はじめに、本研究で設定した仮説を検証するための分析を行った。実験セッション当日（セッション [2] \times 測定時点 [7]）の唾液中コルチゾール濃度の変化と翌日（セッション [3] \times 測定時点 [3]）の CAR を分析するために、二要因反復測定分散分析を実施した。起床時の身体疲労、筋肉痛、ストレス、睡眠の質、TMD 得点、睡眠時間、起床時刻、起床直後の唾液採取時の分析には一要因反復測定分散分析を用いた。主効果が認められた場合は Bonferroni 法による多重比較検定を行った。

次に、個人差を考慮した事後分析を行った。まずは、Control からレジスタンス運動セッションおよび Recovery セッションにかけての AUC_g の増加率を算出した。その後、 AUC_g のピーク増加率の中央値を算出し、その中央値（19.4%）をもとに 2 つ（Responders: $n = 6$, non-Responders: $n = 6$ ）の群に分け、二要因反復測定分散分析（群 [2] \times セッション [3]）による AUC_g の比較を行った。この群分けは Minetto et al. (2008) の方法を参考にした。

次に、Responders と non-Responders が生じた要因を検討するために、レジスタンス運動セッションによって増加した身体疲労および筋肉痛の程度に着目し、CAR との関連を検討した。運動刺激による疲労から回復までの生理学的および心理学的変動の過程は個人内および個人間のばらつきの大きいことが示されており (Kellmann et al., 2018)、本研究においてもレジスタンス運動セッションの翌日と翌々日で CAR や身体疲労、筋肉痛のピークを示す時点が異なっていた。したがって、いずれの指標においても Control からの増加率および増加量のピーク値に着目し、 AUC_g のピーク増加率と、身体疲労および筋肉痛のピーク増加量との関係について、ピアソンの積率相関係数を用いて評価した。

一要因反復測定分散分析と二要因反復測定分散分析において Mauchly の球面仮説が棄却された場合は、Greenhouse-Geisser の ϵ による自由度の修正を行った。効果量には η_p^2 を用い、 $\eta_p^2=0.01, 0.06, 0.14$ をそれぞれ効果量小、中、大とした (Larson-Hall, 2009)。全ての統計処理には IBM SPSS Statistics 27 を使用し、5%以下を有意差の判定基準、10%以下を有意傾向の判定基準とした。

3. 結果

3.1. レジスタンス運動セッション時のデータ

レジスタンス運動セッションでは、セット毎に反復回数が減少し、対象者は最終的に 41.4 ± 11.1 回の挙上を完了した。また、最終セット後の RPE は 19.8 ± 0.1 であった。

3.2. 実験セッション期間中における唾液中コルチゾール濃度の変化

実験セッション当日の唾液中コルチゾール濃度および実験セッション翌日の CAR の変化を Figure 3 に示した。セッションおよび測定時点を独立変数、唾液中コルチゾール濃度を従属変数とした二要因反復測定分散分析を行った結果、実験セッション当日のコルチゾール濃度では、測定時点の有意な主効果が認められた ($F(6, 66) = 9.099, p = .004, \varepsilon = .255, \eta_p^2 = .453$)。セッションの主効果と、セッションおよび測定時点の交互作用は有意でなかった (順に $F(1, 11) = 0.280, p = .607, \eta_p^2 = .025, F(6, 66) = 0.976, p = .384, \varepsilon = .290, \eta_p^2 = .081$)。測定時点において多重比較検定を行った結果、Pre と比較して recovery 2 の時点で低い値を示した ($p < .10$)。

実験セッションの翌日の CAR では、測定時点で有意な主効果が認められた ($F(2, 22) = 18.062, p = .001, \eta_p^2 = .621$)。セッションの主効果と、セッションおよび測定時点の交互作用は有意でなかった (順に $F(2, 22) = 0.518, p = .365, \varepsilon = .635, \eta_p^2 = .032, F(4, 44) = 1.437, p = .259, \varepsilon = .505, \eta_p^2 = .116$)。測定時点において多重比較を行った結果、 C_0 から C_{30} にかけて有意な上昇を示した ($C_0 < C_{15} < C_{30}$, いずれも $p < .05$)。

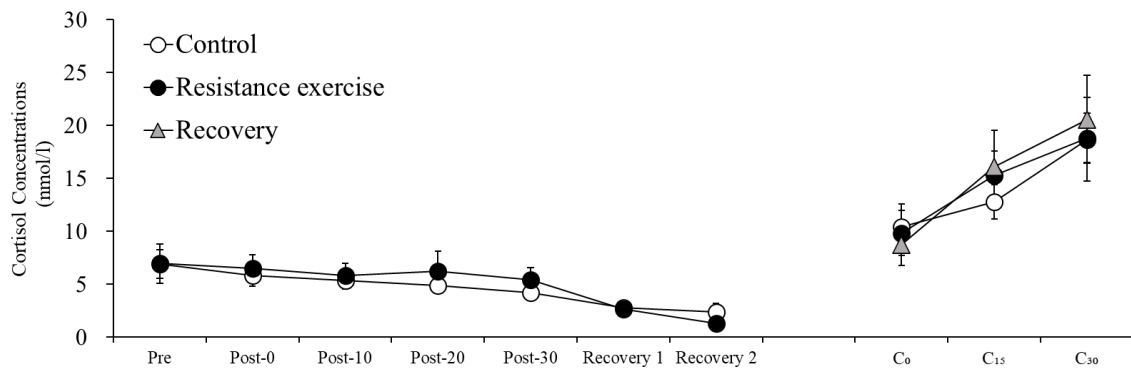


Figure 3. Cortisol data throughout the experimental session (Mean \pm SE, $n = 12$)

3. 3. CAR に影響する要因の評価

Table 5 に実験セッション翌日の起床時における主観的評価の結果を示した。また、Table 6 に実験セッション期間中における睡眠時間および起床時刻、起床直後の唾液採取時刻を示した。セッションを独立変数、各項目を従属変数とした一要因反復測定分散分析を行った結果、身体疲労と筋肉痛において有意傾向および有意な主効果が認められた（順に $F(2, 22) = 3.403, p = .052, \eta_p^2 = .236, F(2, 22) = 13.779, p = .001, \eta_p^2 = .556$ ）。多重比較検定を行った結果、身体疲労では Control と比較して Recovery セッションにおいて有意傾向で高い値を示した ($p < .10$)。筋肉痛の多重比較検定では、Control と比較してレジスタンス運動セッションおよび Recovery セッションにおいて、有意に高い値を示した ($p < .05$)。その他の要因では、有意な差は認められなかった。

Table 5. Factors influencing CAR as measured at awakening (Means \pm SE, $n = 12$)

Measure	Control	Resistance exercise	Recovery
Physical fatigue	11.6 \pm 2.8	23.4 \pm 5.3	26.4 \pm 5.5 [†]
Muscle soreness	3.5 \pm 1.7	37.0 \pm 7.4 [*]	37.4 \pm 5.0 [*]
Stress	14.7 \pm 3.1	13.5 \pm 2.9	19.7 \pm 5.1
Sleep quality	64.3 \pm 5.7	68.2 \pm 6.6	56.7 \pm 7.9
TMD score	97.9 \pm 3.4	96.8 \pm 3.4	97.5 \pm 3.5

* Significantly different ($p < .05$) and [†] marginal significance ($p < .10$) compared to Control.

Table 6. Comparison of sleeping hours, awakening time and first sampling time (Mean \pm SE, $n = 12$)

Measure	Control	Resistance exercise	Recovery
Sleeping hours (h)	6.9 \pm 0.4	6.9 \pm 0.3	6.9 \pm 0.4
Awakening Time	7:46 \pm 0:24	8:15 \pm 0:20	7:57 \pm 0:29
First Sampling Time	7:48 \pm 0:25	8:16 \pm 0:20	7:59 \pm 0:29

3. 4. 個人差を考慮した事後分析

各対象者の AUC_g のデータと AUC_g の群分け後の結果を Figure 4 に示した。群およびセッションを独立変数、 AUC_g を従属変数とした二要因反復測定分散分析を行った結果、群およびセッションの交互作用が有意であった ($F(2, 20) = 4.668, p = .047, \varepsilon = .597, \eta_p^2 = .318$)。また、群の主効果は有意傾向を示した ($F(1, 10) = 3.771, p = .081, \eta_p^2 = .274$)。セッションの主効果は有意でなかった ($F(2, 22) = 0.890, p = .426, \varepsilon = .597, \eta_p^2 = .082$)。群の多重比較検定では、Responders は non-Responders と比較して、レジスタンス運動セッションの時点で高い値を示し ($p < .10$)、Recovery セッションの時点で有意に高い値 ($p < .05$) を示した。セッションの多重比較検定を行った結果、Responders において、Control と比較してレジスタンス運動セッションおよび Recovery セッションで高い値を示した (順に $p < .05, p < .10$)。non-Responders では、セッション間で有意な差はみられなかった。

AUC_g のピーク増加率 (peak AUC_g , %Control: 25.6 ± 21.3) と身体疲労および筋肉痛のピーク増加量 (それぞれ, peak Δ physical fatigue: 18.3 ± 21.9 , peak Δ muscle soreness: 46.1 ± 18.8) の関係を Figure 5 に示した。相関分析の結果, peak AUC_g , %Control と peak Δ physical fatigue ($F(1, 10) = 6.656, r = -.633, p = .027$) および peak Δ muscle soreness ($F(1, 10) = 16.674, r = -.791, p = .002$) の間に有意な負の相関がみられた。

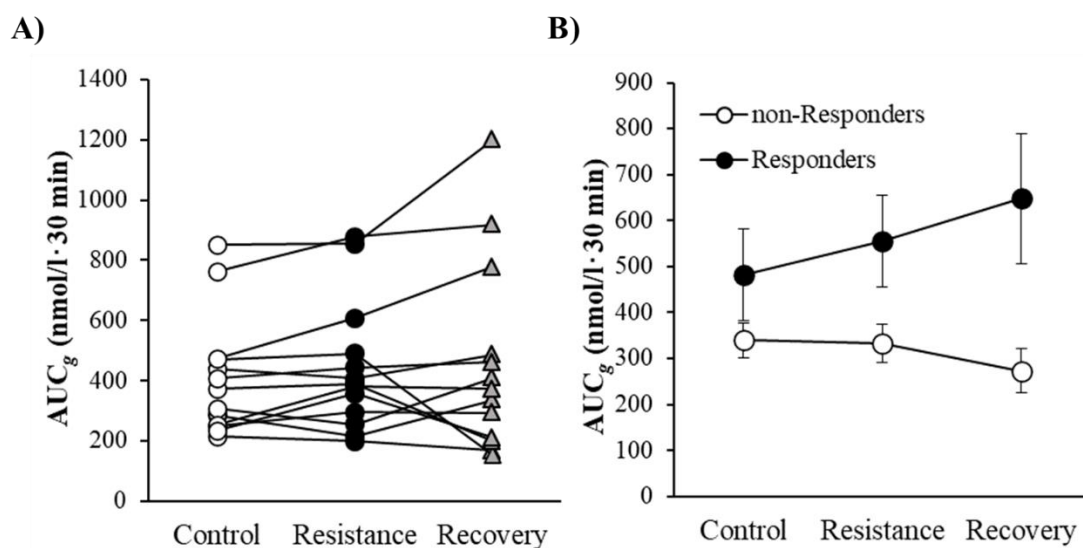


Figure 4. A) Individual AUC_g data and B) Mean ± SE levels of AUC_g in Responders ($n = 6$) and non-Responders ($n = 6$).

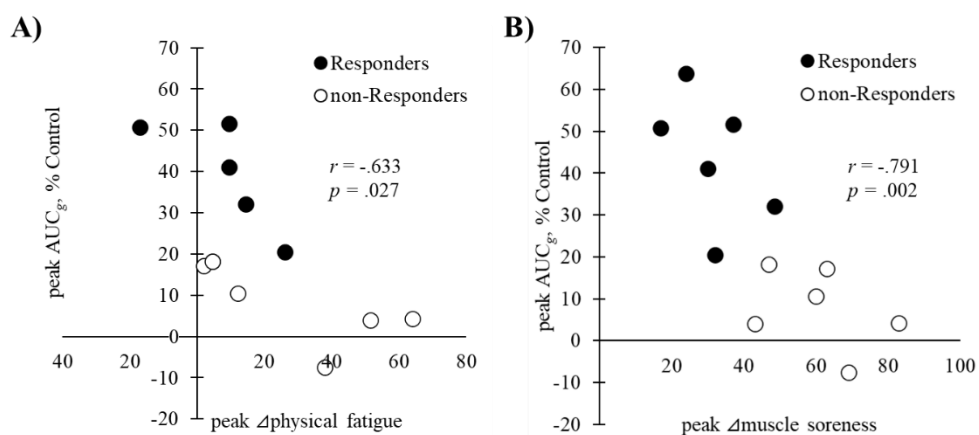


Figure 5. Relationship between peak AUC_g, % Control and A) peak Δ physical fatigue and B) peak Δ muscle soreness. The horizontal axis shows the peak increase in physical fatigue and muscle soreness, respectively, and the vertical axis shows the peak percentage increase in AUC_g.

4. 考察

本章の目的は、レジスタンス運動が翌日以降の CAR に及ぼす影響を検討することであった。本研究のレジスタンス運動セッションによって実験セッション当日の唾液中コルチゾール濃度は変化しなかった。一方で、CAR は増加 (Responders)、あるいは変化なし・減弱 (non-Responders) の 2 つの反応に分かれた。また、 AUC_g のピーク増加率と、身体疲労および筋肉痛のピーク増加量との間に負の相関がみられた。これらの結果から、75%1RM のベンチプレス運動を疲労困憊まで実施するレジスタンス運動によって、CAR は Responders と non-Responders に分かれ、それぞれ過負荷を伴う運動負荷に対する CAR の二極性の変化を反映している可能性のあることが示された。

4.1. 実験セッション期間中における急性の唾液中コルチゾール濃度の変化

本研究の対象者は、すべてのセットを通して合計 41.4 ± 11 回の挙上を完了し、最終セット後の RPE は 19.8 ± 0.1 を示した。最終セット後の RPE の値は、75%1RM で 10 回/セットを負荷調整しながら 5 セット行うという、同じ負荷強度の異なるプロトコルで実施された先行研究 (向本・鈴木, 2020) の値 (16.8 ± 1.8) と比較して高い値を示していた。このことから、本研究のレジスタンス運動セッションは、先行研究よりも強度が高いプロトコルであり、疲労困憊まで実施されたことが示唆される。にもかかわらず、実験セッション当日の唾液中コルチゾール濃度はレジスタンス運動セッションによって変化しなかった。この結果は、自転車エルゴメーターを用いた研究課題 1 や下半身および全身のより多くの筋肉量を動員する種目の結果とは異なるものであった (Crewther et al., 2008; Smilios et al., 2003) が、ベンチプレス運動がコルチゾール濃度に及ぼす影響について検討した先行研究の結果と一致していた (Geisler et al., 2019)。この違いが生じた要因は、レジスタンス運動によって動員される筋肉量の違いが挙げられる (Kraemer and Ratamess, 2005)。Crewther et al. (2008) と Smilios et al. (2003) の研究では、本研究で用いたベンチプレス運動と比較して、下半身および全身のより多くの筋肉量を動員するスクワットや複数の種目の組み合わせといった運動形態で実施されていた。一方で、本研究では先行研究と比較して動員される筋肉量の少ないベンチプレス運動を用いていた。レジスタンス運動において動員される筋肉量の大きさは代謝要求の大きさにも関わり、急性のコルチゾール濃度の増加に影響するといわれている (Kraemer and Ratamess, 2005)。したがって、本研究で用いたベンチプレス運動は動員される筋肉量が少なく、代

謝要求の小さいプロトコルであったため、急性のコルチゾール反応が生じなかったと考えられる。Pre から recovery 2 にかけてのコルチゾール濃度の低下はレジスタンス運動による影響ではなく、研究課題 1 と同様、日内変動によるものだと考えられる (Hellman et al., 1970; Peters et al., 2013; Weitzman et al., 1971)。

4. 2. 実験セッション期間中における CAR の変化

実験セッション期間中の CAR は対象者全体で見ると変化しなかったが、各対象者の変化に着目すると Responders と non-Responders に分かれた。また、 AUC_g のピーク増加率と、身体疲労および筋肉痛のピーク増加量との間には負の相関がみられた。この結果は、Control から Recovery セッションまでの期間において、Responders は筋肉痛と身体疲労の増加が小さく、non-Responders は筋肉痛と身体疲労の増加が大きいことを示している。起床時の状況要因の結果は、身体疲労と筋肉痛を除き、条件間で差がみられなかったことから、本研究においても概ね運動負荷以外の条件は取り除けたと推察される。したがって、本研究において観察された CAR の変化は Minetto et al. (2008) の報告と一致し、Responders と non-Responders はそれぞれ過負荷を伴う運動負荷に対する CAR の二極性の変化を反映している可能性が推察される。したがって、個人における CAR の変化の違いが、対象者全体の CAR の結果において差がなかった要因だと考えられる。本研究のレジスタンス運動セッションでは、研究課題 1 や後の Anderson et al. (2023) の研究で観察された、実験セッション当日における急性のコルチゾール濃度の増加が生じていない。にもかかわらず、翌日起床時の CAR に影響したことは、運動負荷に対する CAR の変化に、前日に課された運動負荷の代謝要求が必ずしも影響しない可能性が推察されることから、非常に興味深い結果だと考えられる。

本研究において、CAR が増加した Responders については、研究課題 1 と同様の解釈が可能であると考えられる。本研究のレジスタンス運動セッションによって、翌日に残留した筋組織内の恒常性の乱れに対して筋組織からの求心性の入力が増加し、HPA 軸が刺激されたことで、翌日の CAR が増加した可能性が推察される。一方で、CAR が変化なし・減弱を示した non-Responders については、強固なコルチゾール反応を誘発するための運動負荷を課した緻密な先行研究 (Anderson et al., 2023) の結果と一致し、個人の適応能を超える過負荷によって一時的にアロスタティック負荷が増大したことで、CAR が減弱した可能性が推察される。Anderson et al. (2023) は、この急激な過負荷後に生じた CAR の

減少を (1) コルチゾールの細胞への取り込みが増加したことによる循環からの除去, あるいは (2) コルチゾールの急激な上昇後に HPA 軸の複数のレベルで作用するネガティブフィードバック機構による減少という, 2 つの視点から考察している. 本研究では, レジスタンス運動セッション後にコルチゾールの急激な上昇は生じていないため, (1) のコルチゾールの細胞への取り込みが増加したことによる循環からの除去が CAR の減弱に影響したと考えられる.

循環中のコルチゾール濃度はコルチゾールの産生と消費の比率により決定する. コルチゾールはタンパク質異化作用や強力な抗炎症作用を有しており (Tharp, 1975), 運動後はグルココルチコイド受容体への結合や細胞への取り込みが増加することにより, 筋組織の修復過程にも関与することが報告されている (Schakman et al., 2008). 高い負荷で伸張性収縮の繰り返しを伴うレジスタンス運動は, 持久的運動よりも標的とする筋肉にかかる機械的ストレスが大きくなることから (Douglas et al., 2017; Tee et al., 2007), 運動後に運動誘発性の筋損傷に関わる血液マーカーや筋肉痛が増加することが報告されている (Proske and Morgan, 2001). 本研究で用いたベンチプレス運動は伸張性収縮と短縮性収縮の繰り返しを伴う運動であり, 先行研究において 75%1RM の強度でベンチプレス運動を行った後に, クレアチンキナーゼやプロスタグランジン E2 といった運動誘発性の筋損傷に関わる血液マーカーや筋肉痛の増加が報告されている (Uchida et al., 2009). 本研究においても先行研究と同程度の筋肉痛の値を示し, かつ対象者の筋肉痛が研究課題 1 よりも高い値を示した. これは上肢と下肢の結果であるため本質的な比較はできないが, CAR と身体疲労および筋肉痛の関連を踏まえると, 本研究のレジスタンス運動セッションによって, 特に non-Responders においてより大きな筋組織内の恒常性の乱れが引き起こされた可能性が推察される. その結果, 筋組織の修復を助けるためにグルココルチコイド受容体への結合や細胞への取り込みが増加し, 循環中のコルチゾール濃度の消費と産生における消費の比率が高まったことで, non-Responders という反応が生じたと考えられる.

第IV章 総括

1. 本研究のまとめ

本研究では単発の運動負荷に着目し、CAR に影響を及ぼす運動負荷の条件の一端を条件統制下での実験から明らかにすることを目的とした。本研究の目的を達成するために (1) CAR が変化する運動強度の閾値と (2) レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響に着目し、2つの研究課題に取り組んだ。その結果、以下の結論が得られた。

1. CAR が変化する運動負荷の条件には運動強度の閾値が存在し、CAR は $80\% \dot{V}O_{2max}$ の運動負荷によって増加する。
2. 75%1RM の疲労困憊に至るベンチプレス運動によって、CAR は Responders と non-Responders に分かれる。

2. 学術的意義および実践的意義

運動負荷が CAR に及ぼす影響について報告されたこれまでの知見は、すべてフィールド研究によって検証されたものであるため、CAR に影響を及ぼしうる多数の交絡因子が統制されておらず、かつ対象者が実際に完了した作業量が示されていない。そのため、先行研究において示されている運動負荷が実際に CAR に影響を及ぼしたかは明らかではなかった。本研究において、CAR に影響を及ぼす運動負荷の条件の一端を条件統制下の実験によって実証したことにより、運動負荷そのものが CAR に影響することが明らかになり、かつ運動負荷に対する CAR の変化について基礎的な知見を提供できたと考えられる。この知見は、運動負荷に対する身体の適応過程のモニタリングツールとして CAR を提案するための有益な情報となるとともに、他の領域において CAR を評価する際の理解も促進されることが考えられる。

また、本研究において CAR が変化した運動負荷の条件は、アロスタシスを経て運動適応に繋がる可能性がある一方で、アロスタティック負荷となる可能性もあると考えられる。したがって、アロスタティック負荷が増大した状態において本研究のような運動負荷が課された場合、不適応に繋がる可能性もあると推察される。このことから、本研究において得られた知見はスポーツ医・科学サポートに関わる研究者やトレーニング指導に関わる人、実際にトレーニングを行う人がトレーニング計画を立てる際の有益な情報となる可能性もあると考えられる。

さらに、本研究を通して運動負荷に対する CAR の変化を捉えうる実験プロトコルが確立したことの意義も大きく、今後、運動負荷が CAR に及ぼす影響について、さらなる理解を追求する研究にも繋げることができると考えられる。例えば、本研究の実験プロトコルを用いて継続的な運動負荷による影響を検討することで、現在推測に留まっている運動適応と不適応に起因する CAR の二極性の変化の根拠について検証できる可能性がある。また、本研究の実験プロトコルを運動負荷後の筋組織内の恒常性の乱れに関わる生理指標と合わせて検討していくことで、運動負荷が CAR に及ぼす影響のメカニズムに関わる部分についても検証できる可能性がある。さらに、本研究の実験プロトコルに心理状態や睡眠、栄養といった運動後のアロスタシスに影響しうる要因を組み込むことで、複合的な要因が CAR に及ぼす影響も検証できる可能性がある。これらの知見を積み重ねることで、モニタリングツールとしての CAR の有用性を示せる可能性があることから、将来的にはアスリートのオーバートレーニングやバーンアウトを非侵襲的かつ鋭敏に早期発見および予防するための手段として、CAR を提案できる可能性があると考えられる。したがって、本研究で確立された実験プロトコルは、今後運動生理学やスポーツ心理学、スポーツ医学などの様々な分野に対して領域横断的に寄与できる成果に繋がっていく可能性があると考えられる。

3. 本研究の限界と今後の展望

3.1. 研究課題 1 の限界

研究課題 1 では、対象者の日常生活に関わる要因による時期効果や運動の繰り返し効果（持ち越し効果）が各セッションにおける CAR の変化に影響している可能性が懸念される。しかし、本研究では先行研究の手続きに則り、各セッションはランダムな順序で、かつ 2 日以上の間隔を空けて実施した (VanBruggen et al., 2011)。また、各セッションを実施する前に対象者の身体疲労の状況や心理的な状況を念入りに確認し、実験セッションの実施が困難であると判断された場合は別日に実験セッションを延期した。このことから、本研究における時期効果と持ち越し効果の懸念は概ね取り除くことができたと考えられる。しかしながら、本研究の対象者数ではすべての条件を均等に割り付けることができないという限界もあるため、今後本研究と同じ実験プロトコルを用いて検討する際は、カウンターバランスをとることで、より順序効果の影響を相殺して検討することができると考えられる (三浦, 2006)。

3. 2. 研究課題 2 の限界

研究課題 2 は連日 4 日間で行うという研究デザインの特性上、研究課題 1 以上に時期効果の影響が懸念される。本研究では、レジスタンス運動が CAR に及ぼす影響について検討するために連日 4 日間の実験を実施したが、研究期間やコストの問題から、レジスタンス運動セッションの比較対象となる条件が設けられず、再現性の検討も行われなかった。本研究においても研究課題 1 と同様に、実験前に対象者の状況を念入りに確認していたことや、実際に観察された CAR と身体疲労および筋肉痛との関係を踏まえると、本研究において観察された CAR の変化はレジスタンス運動セッションの影響によって生じた可能性が高いと考えられる。しかしながら、研究デザインとサンプルサイズの限界から、本研究で観察された CAR の変化が、レジスタンス運動セッションの影響によって生じたことを完全に結論付けることはできない。加えて、本研究で実施したレジスタンス運動セッションはベンチプレス運動のみで構成されており、強度も 75%1RM のみでの検討であったことから、他のレジスタンス運動の種目や強度には結果を一般化できない。強度や作業量、動員される筋肉量は、レジスタンス運動によって生じる急性のコルチゾールの分泌に影響する (Crewther et al., 2008; Kraemer and Ratamess, 2005; Smilios et al., 2003) ことから、他の種目や強度で検討した場合、翌日以降の CAR の変化は本研究の結果とは異なる可能性が推察される。そのため、今後は異なる強度や種目による影響も検討すべきだと考えられる。

3. 3. 研究課題 1 と研究課題 2 で共通する限界

研究課題 1 と研究課題 2 に共通する 1 つ目の限界は、実験当日の夜および翌日起床時の測定を自宅で実施したことから、唾液採取が正確な時間に行われたかどうかを研究者が実際に確認することができない点である。しかしながら、本研究では自宅での測定にあたり、夜のリマインド連絡や、朝に記入する Google フォームの送信時刻の確認を行った。このことから、自宅での唾液採取におけるコンプライアンスは概ね遵守されていたと考えられる。CAR を用いた研究では、起床時の唾液の採取を正確に行うために宿泊施設の使用が推奨されることもある。一方で、宿泊施設の使用は睡眠の質や起床時のストレスといった CAR に影響を及ぼす交絡因子を誘発する可能性もあることから、自宅で測定を実施することの利点も述べられている (Stalder et al., 2016)。本研究では対象者の負担を可能な限り軽減するために自宅での測定を選択したが、より厳密な条件統制や唾液採取を行うためには、今

後宿泊施設の使用も検討する必要があると考えられる。

2 つ目の限界は、実験当日の夜から翌日起床時に測定された生理指標が唾液中コルチゾールのみであったため、本研究の中で考察された、過負荷を伴う運動負荷が翌日の CAR に影響を及ぼすメカニズムについては推測の域を出ない点である。筋肉痛や身体疲労の主観的な評価は、必ずしも運動誘発性の筋損傷に関わる血液マーカーと関連しないという報告もある (Cramer et al., 2007; Hayashi et al., 2017; Malm et al., 2004; Nosaka et al., 2002; Paulsen et al., 2010) ことから、主観的評価に基づくメカニズムの考察には限界がある。本研究では、主にコストの問題から主観的評価が採用されたが、今後はクレアチンキナーゼやプロスタグランジン E₂、乳酸脱水素酵素といった運動誘発性の筋損傷に関わる血液マーカーや、運動後の酸素摂取量やエネルギー消費量のような呼気ガスのデータも合わせて測定し、運動負荷が翌日の CAR に影響を及ぼすメカニズムについてより詳細に検討していく必要があると考えられる。

3 つ目の限界は、単発の運動による影響の検証に留まった点である。第 I 章で述べた運動適応と不適応が単発の運動効果の繰り返しによって生じる (Coffey and Hawley, 2007) ことを踏まえると、今後は継続的な運動負荷が CAR に及ぼす影響を検討していく必要があると考えられる。

以上のことに加えて、女性を含むより大きく多様なサンプルサイズや、他の運動様式での検討を行っていくことで、CAR に影響を与える運動負荷の条件やそのメカニズムがさらに解明されていくであろう。

文献

- Achten, J., Halson, S. L., Moseley, L., Rayson, M. P., Casey, A., and Jeukendrup, A. E. (2004) Higher dietary carbohydrate content during intensified running training results in better maintenance of performance and mood state. *Journal of Applied Physiology*, 96(4): 1331-1340.
- Adam, E. K., and Gunnar, M. R. (2001) Relationship functioning and home and work demands predict individual differences in diurnal cortisol patterns in women. *Psychoneuroendocrinology*, 26: 189-208.
- Adam, E. K., Hawkey, L. C., Kudielka, B. M., and Cacioppo, J. T. (2006) Day-to-day dynamics of experience-cortisol associations in a population-based sample of older adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(45): 17058-17063.
- Alves Souza, R. W., Aguiar, A. F., Vechetti-Júnior, I. J., Piedade, W. P., Rocha Campos, G. E., and Dal-Pai-Silva, M. (2014) Resistance training with excessive training load and insufficient recovery alters skeletal muscle mass-related protein expression. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(8): 2338-2345.
- American College of Sports Medicine. (2013) *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription* (9th ed.). Lippincott Williams & Wilkins: Philadelphia.
- Anderson, T., and Wideman, L. (2017) Exercise and the cortisol awakening response: A systematic review. *Sports Medicine-Open*, 3(1): 1-15.
- Anderson, T., Berry, N. T., and Wideman, L. (2019) Exercise and the hypothalamic-pituitary-adrenal axis: a special focus on acute cortisol and growth hormone responses. *Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research*, 9: 74-77.
- Anderson, T., Lane, A. R., and Hackney, A. C. (2018) The Cortisol awakening response: Association with training load in endurance runners. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(9): 1158-1163.
- Anderson, T., Vrshek-Schallhorn, S., Adams, W. M., Goldfarb, A. H., and Wideman, L. (2023) The effect of acute exercise on the cortisol awakening response. *European Journal of Applied Physiology*, 123(5): 1027-1039.

- Anderson, T., Wideman, L., Cadegiani, F. A., and Kater, C. E. (2021) Effects of overtraining status on the cortisol awakening response—endocrine and metabolic responses on overtraining syndrome (EROS-CAR). *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(7): 965-973.
- 跡見順子 (2003) 運動とストレスタンパク質. 竹宮隆・下光輝一編, 運動とストレス科学. 杏林書院: 東京, pp. 131-155.
- Baggish, A. L., Wang, F., Weiner, R. B., Elinoff, J. M., Tournoux, F., Boland, A., Picard, M. H., Hutter Jr, A. M., and Wood, M. J. (2008) Training-specific changes in cardiac structure and function: A prospective and longitudinal assessment of competitive athletes. *Journal of Applied Physiology*, 104(4): 1121-1128.
- Barron, J. L., Noakes, T. D., Levy, W., Smith, C., and Millar, R. P. (1985) Hypothalamic dysfunction in overtrained athletes. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 60(4): 803-806.
- Bartalucci, A., Ferrucci, M., Fulceri, F., Lazzeri, G., Lenzi, P., Toti, L., Serpiello, F. R., La Torre, A., and Gesi, M. (2012) High-intensity exercise training produces morphological and biochemical changes in adrenal gland of mice. *Histology and Histopathology*, 27: 753-769.
- Bellenger, C. R., Karavirta, L., Thomson, R. L., Robertson, E. Y., Davison, K., and Buckley, J. D. (2016) Contextualizing parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes with perceptions of training tolerance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(7): 685-692.
- Bellenger, C. R., Thomson, R. L., Robertson, E. Y., Davison, K., Nelson, M. J., Karavirta, L., and Buckley, J. D. (2017) The effect of functional overreaching on parameters of autonomic heart rate regulation. *European Journal of Applied Physiology*, 117(3): 541-550.
- Blouet, C., and Schwartz, G. J. (2010) Hypothalamic nutrient sensing in the control of energy homeostasis. *Behavioural Brain Research*, 209(1): 1-12.
- Bonifazi, M., Sardella, F., and Lupo, C. (2000) Preparatory versus main competitions: Differences in performances, lactate responses and pre-competition plasma

- cortisol concentrations in elite male swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, 82: 368-373.
- Booth, C. K., Probert, B., Forbes-Ewan, C., and Coad, R. A. (2006) Australian army recruits in training display symptoms of overtraining. *Military Medicine*, 171(11): 1059-1064.
- Bosco, C., Tihanyit, J., and Viru, A. (1996) Relationships between field fitness test and basal serum testosterone and cortisol levels in soccer players. *Clinical Physiology*, 16(3): 317-322.
- Cadegiani, F. A., and Kater, C. E. (2018) Hormonal response to a non-exercise stress test in athletes with overtraining syndrome: Results from the endocrine and metabolic responses on overtraining syndrome (EROS) - EROS-STRESS. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(7): 648-653.
- Cadore, E. L., Lhullier, F. L. R., Brentano, M. A., Da Silva, E. M., Ambrosini, M. B., Spinelli, R., Silva, R. F., and Krueel, L. F. M. (2008) Hormonal responses to resistance exercise in long-term trained and untrained middle-aged men. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(5): 1617-1624.
- Callegari, G. A., Novaes, J. S., Neto, G. R., Dias, I., Garrido, N. D., and Dani, C. (2017) Creatine kinase and lactate dehydrogenase responses after different resistance and aerobic exercise protocols. *Journal of Human Kinetics*, 58: 65-72.
- Cannon, W. B. (1939) *The wisdom of the body*. WW Norton and Company: New York.
- Casaburi, R., Storer, T. W., and Wasserman, K. (1987) Mediation of reduced ventilatory response to exercise after endurance training. *Journal of Applied Physiology*, 63: 1533-1538.
- Chicharro, J. L., López-Mojares, L. M., Lucía, A., Pérez, M., Alvarez, J., Labanda, P., Calvo, F., and Vaquero, A. F. (1998) Overtraining parameters in special military units. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69(6): 562-568.
- Chida, Y. and Steptoe, A. (2009) Cortisol awakening response and psychosocial factors: A systematic review and meta-analysis. *Biological Psychology*, 80: 265-278.

- Coffey, V. G., and Hawley, J. A. (2007) The molecular bases of training adaptation. *Sports Medicine*, 37: 737-763.
- Coste, J., Strauch, G., Letrait, M., and Bertagna, X. (1994) Reliability of hormonal levels for assessing the hypothalamic-pituitary-adrenocortical system in clinical pharmacology. *Journal of Clinical Pharmacology*, 38: 474-479.
- Coutts, A. J., Reaburn, P., Piva, T. J., and Rowsell, G. J. (2007) Monitoring for overreaching in rugby league players. *European Journal of Applied Physiology*, 99(3): 313-324.
- Cramer, R. M., Aagaard, P., Qvortrup, K., Langberg, H., Olesen, J., and Kjær, M. (2007) Myofibre damage in human skeletal muscle: Effects of electrical stimulation versus voluntary contraction. *The Journal of Physiology*, 583(1): 365-380.
- Crewther, B., Cronin, J., Keogh, J., and Cook, C. (2008) The salivary testosterone and cortisol response to three loading schemes. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(1): 250-255.
- Davies, C. T., and Few, J. D. (1973) Effects of exercise on adrenocortical function. *Journal of Applied Physiology*, 35: 887-891.
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., and McGuigan, M. (2017) Eccentric exercise: Physiological characteristics and acute responses. *Sports Medicine*, 47: 663-675.
- Dressendorfer, R. H., Wade, C. E., and Scaff, J. H. (1985) Increased morning heart rate in runners: A valid sign of overtraining? *Physician and Sportsmedicine*, 13(8): 77-86.
- Duclos, M., Corcuff, J. B., Rashedi, M., Fougere, V., and Manier, G. (1997) Trained versus untrained: different hypothalamo-pituitary adrenal axis responses to exercise recovery. *European Journal of Applied Physiology*, 75: 343-350.
- Dunn, J. F., Nisula, B. C., and Rodbard, D. (1981) Transport of steroid hormones: Binding of 21 endogenous steroids to both testosterone-binding globulin and corticosteroid-binding globulin in human plasma. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 53(1): 58-68.

- El-Farhan, N., Rees, D. A., and Evans, C. (2017) Measuring cortisol in serum, urine and saliva are our assays good enough? *Annals of Clinical Biochemistry*, 54(3): 308-322.
- Fares, R., Vicente-Rodríguez, G., and Olmedillas, H. (2022) Effect of active recovery protocols on the management of symptoms related to exercise-induced muscle damage: A systematic review. *Strength and Conditioning Journal*, 44(1): 57-70.
- Filaire, E., Bernain, X., Sagnol, M., and Lac, G. (2001) Preliminary results on mood state, salivary testosterone: cortisol ratio and team performance in a professional soccer team. *European Journal of Applied Physiology*, 86: 179-184.
- Filaire, E., Duché, P., and Lac, G. (1998) Effects of amount of training on the saliva concentrations of cortisol, dehydroepiandrosterone and on the dehydroepiandrosterone: Cortisol concentration ratio in women over 16 weeks of training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 78: 466-471.
- Fry, R. W., Morton, A. R., and Keast, D. (1991) Overtraining in athletes: An update. *Sports Medicine*, 12: 32-65.
- Fry, R. W., Morton, A. R., Garcia-Webb, P., Crawford, G. P. M., and Keast, D. (1992) Biological responses to overload training in endurance sports. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 64(4): 335-344.
- Gabery, S., Georgiou-Karistianis, N., Lundh, S. H., Cheong, R. Y., Churchyard, A., Chua, P., Stout, J. C., Egan, G. F., Kirik, D., and Petersén, Å. (2015) Volumetric analysis of the hypothalamus in huntington disease using 3T MRI: The IMAGE-HD study. *Plos One*, 10(2): e0117593.
- Garde, A. H., Persson, R., Hansen, Å. M., Österberg, K., Ørbæk, P., Eek, F., and Karlson, B. (2009) Effects of lifestyle factors on concentrations of salivary cortisol in healthy individuals. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*, 69(2): 242-250.
- Gastmann, U., Petersen, K. G., Böcker, J., and Lehmann, M. (1998) Monitoring intensive endurance training at moderate energetic demands using resting

- laboratory markers failed to recognize an early overtraining stage. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 38(3): 188-193.
- Gatti, R., and De Palo, E. (2011) An update: Salivary hormones and physical exercise. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21(2): 157-169.
- Geisler, S., Aussieker, T., Paldauf, S., Scholz, S., Kurz, M., Jungs, S., Rissmeyer, M., Achtzehn, S., and Zinner, C. (2019) Salivary testosterone and cortisol concentrations after two different resistance training exercises. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 59(6): 1030-1035.
- Gonzalez, A. M., Spitz, R. W., Ghigiarelli, J. J., Sell, K. M., and Mangine, G. T. (2018) Acute effect of citrulline malate supplementation on upper-body resistance exercise performance in recreationally resistance-trained men. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(11): 3088-3094.
- Gouarné, C., Groussard, C., Gratas-Delamarche, A., Delamarche, P., and Duclos, M. (2005) Overnight urinary cortisol and cortisone add new insights into adaptation to training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(7): 1157-1167.
- Griffith, R. O., Dressendorfer, R. H., Fullbright, C. D., and Wade, C. E. (1990) Testicular function during exhaustive endurance training. *The Physician and Sportsmedicine*, 18(5): 54-64.
- Gustafsson, H., Holmberg, H. C., and Hassmen, P. (2008) An elite endurance athlete's recovery from underperformance aided by a multidisciplinary sport science support team. *European Journal of Sport Science*, 8(5): 267-276.
- Gustafsson, K., Lindfors, P., Aronsson, G., and Lundberg, U. (2008) Relationship between self-rating of recovery from work and morning salivary cortisol. *Journal of Occupational Health*, 50: 24-30.
- Hackney, A. C., and Walz, E. A. (2013) Hormonal adaptation and the stress of exercise training: The role of glucocorticoids. *Trends in Sport Sciences*, 20(4): 165-171.
- Hackney, A. C., Battaglini, C., and Evans, E. S. (2008) Cortisol, stress and adaptation during exercise training. *Baltic Journal of Sport and Health Sciences*, 3: 34-41.

- Häkkinen, K. (1989) Neuromuscular and hormonal adaptations during strength and power training. A review. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 29(1): 9-26.
- 長谷川博・山本利春監 (2014) リカバリーの科学. NAP : 東京, pp. 3-8.
- Hayashi, K., Katanosaka, K., Abe, M., Yamanaka, A., Nosaka, K., Mizumura, K., and Taguchi, T. (2017) Muscular mechanical hyperalgesia after lengthening contractions in rats depends on stretch velocity and range of motion. *European Journal of Pain*, 21(1): 125-139.
- Hellebrandt, F. A., and Houtz, S. J. (1956) Mechanisms of muscle training in man: Experimental demonstration of the overload principle. *Physical Therapy Reviews*, 36(6): 371-383.
- Hellhammer, J., Fries, E., Schweisthal, O. W., Schlotz, W., Stone, A. A., and Hagemann, D. (2007) Several daily measurements are necessary to reliably assess the cortisol rise after awakening: State- and trait- components. *Psychoneuroendocrinology*, 32(1): 80-86.
- Hellman, L., Nakada, F., Curti, J., Weitzman, E. D., Kream, J., Roffwarg, H., Ellman, S., Fukushima, D. K., and Gallagher, T. F. (1970) Cortisol is secreted episodically by normal man. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 30(4): 411-422.
- Herman, J. P., and Tasker, J. G. (2016) Paraventricular hypothalamic mechanisms of chronic stress adaptation. *Frontiers in Endocrinology*, 7: 137.
- Hill, E. E., Zack, E., Battaglini, C., Viru, M., Viru, A., and Hackney, A. C. (2008) Exercise and circulating cortisol levels: The intensity threshold effect. *Journal of Endocrinological Investigation*, 31: 587-591.
- Hoffman, J. R. (2006) Muscular Strength. In *Norms for Fitness, Performance, and Health. Human Kinetics: Champaign*, pp. 32-36.
- Holloszy, J. O., Rennie, M. J., Hickson, R. C., Conlee, R. K., and Hagberg, J. M. (1977) Physiological consequences of the biochemical adaptations to endurance exercise. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 301(1): 440-450.

- Hough, J. P., Papacosta, E., Wraith, E., and Gleeson, M. (2011) Plasma and salivary steroid hormone responses of men to high-intensity cycling and resistance exercise. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1): 23-31.
- Hug, M., Mullis, P. E., Vogt, M., Ventura, N., and Hoppeler, H. (2003) Training modalities: Over-reaching and over-training in athletes, including a study of the role of hormones. *Best Practice and Research. Clinical Endocrinology and Metabolism*, 17(2): 191-209.
- Ishigaki, T., Koyama, K., Tsujita, J., Tanaka, N., Hori, S., and Oku, Y. (2005) Plasma leptin levels of elite endurance runners after heavy endurance training. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 24(6): 573-578.
- 井澤修平・小川奈美子・原谷隆史 (2010) 唾液中コルチゾールによるストレス評価と唾液採取手順. *労働安全衛生研究*, 3(2): 119-124.
- Jacks, D. E., Sowash, J., Anning, J., McGloughlin, T., and Andres, F. (2002) Effect of exercise at three exercise intensities on salivary cortisol. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 16(2): 286-289.
- Jeremy, M. S., and Triplet, N. T. (2015) Program design for resistance training. In Haff, G. G., and Triplett, N. T. (Eds.) *Essentials of strength training and conditioning* (4th ed.). Human Kinetics: Champaign, pp. 439-470.
- Jeukendrup, A. E., Hesselink, M. K., Snyder, A. C., Kuipers, H., and Keizer, H. A. (1992) Physiological changes in male competitive cyclists after two weeks of intensified training. *International Journal of Sports Medicine*, 13(7): 534-541.
- Juliff, L. E., Peiffer, J. J., and Halson, S. L. (2018) Night games and sleep: Physiological, neuroendocrine, and psychometric mechanisms. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(7): 867-873.
- 横山和仁監 (2015) *POMS2 日本語版マニュアル*. 金子書房：東京.
- Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., Erlacher, D., Halson, S. L., Hecksteden, A., Heidari, J., Kallus, K. W., Meeusen, R., Mujika, I., Robazza, C., Skorski, S., Venter, R., and Beckmann, J. (2018)

- Recovery and performance in sport: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2): 240-245.
- Kirschbaum, C., and Hellhammer, D. H. (1989) Salivary cortisol in psychobiological research: An overview. *Neuropsychobiology*, 22(3): 150-169.
- Kjaer, M., Secher, N. H., Bach, F. W., and Galbo, H. (1987) Role of motor center activity for hormonal changes and substrate mobilization in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 253(5): R687-R695.
- Kjaer, M., Secher, N. H., Bach, F. W., Sheikh, S., and Galbo, H. (1989) Hormonal and metabolic responses to exercise in humans: Effect of sensory nervous blockade. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 257(1): E95-E101.
- Kraemer, W. J., and Ratamess, N. A. (2005) Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Medicine*, 35(4): 339-361.
- Kraemer, W. J., Clemson, A., Triplett, N. T., Bush, J. A., Newton, R. U., and Lynch, J. M. (1996) The effects of plasma cortisol elevation on total and differential leukocyte counts in response to heavy-resistance exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 73: 93-97.
- Kraemer, W. J., French, D. N., Paxton, N. J., Häkkinen, K., Volek, J. S., Sebastianelli, W. J., Putukian, M., Newton, R. U., Rubin, M. R., Gómez, A. L., Vescovi, J. D., Ratamess, N. A., Fleck, S. J., Lynch, J. M., and Knuttgen, H. G. (2004) Changes in exercise performance and hormonal concentrations over a big ten soccer season in starters and nonstarters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(1): 121-128.
- Kraemer, W. J., Häkkinen, K., Newton, R. U., Nindl, B. C., Volek, J. S., McCormick, M., Lincoln, A. Gotshalk, S. E., Gordon, S. J., Steven J. F., Wayne W. C., Margot, P., and Evans, W. J. (1999) Effects of heavy-resistance training on hormonal response patterns in younger vs. older men. *Journal of Applied Physiology*, 87(3): 982-992.

- Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., Volek, J. S., Häkkinen, K., Rubin, M. R., French, D. N., Gómez, A. L., McGuigan, M. R., Scheett, T. P., Newton, R. U., Spiering, B.A., Izquierdo, M., and Dioguardi, F. S. (2006) The effects of amino acid supplementation on hormonal responses to resistance training overreaching. *Metabolism*, 55(3): 282-291.
- Kreher, J. B., and Schwartz, J. B. (2012) Overtraining syndrome: A practical guide. *Sports Health*, 4(2): 128-138.
- Larson-Hall, J. (2009) A guide to doing statistics in second language research using SPSS. Routledge: New York.
- Law, R., Hucklebridge, F., Thorn, L., Evans, P., and Clow, A. (2013) State variation in the cortisol awakening response. *Stress*, 16(5): 483-492.
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Gueneron, J., Vidal, P. P., and Hausswirth, C. (2013) Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(11): 2061-2071.
- Lehmann, M., Dickhuth, H. H., Gendrisch, G., Lazar, W., Thum, M., Kaminski, R., Aramendi, J. F., Peterke, E., Wieland, W., and Keul, J. (1991) Training overtraining. A prospective, experimental study with experienced middle- and long-distance runners. *International Journal of Sports Medicine*, 12(5): 444-452.
- Lehmann, M., Gastmann, U., Petersen, K. G., Bachl, N., Seidel, A., Khalaf, A. N., Fischer, S. and Keul, J. (1992) Training-overtraining: performance, and hormone levels, after a defined increase in training volume versus intensity in experienced middle-and long-distance runners. *British Journal of Sports Medicine*, 26(4): 233-242.
- Levine, A., Zagoory-Sharon, O., Feldman, R., Lewis, J. G., and Weller, A. (2007) Measuring cortisol in human psychobiological studies. *Physiology and Behavior*, 90(1): 43-53.
- Li, X., Huang, W. X., Lu, J. M., Yang, G., Ma, F. L., Lan, Y. T., Meng, J. H., and Dou, J. T. (2013) Effects of a multivitamin/multimineral supplement on young males

- with physical overtraining: A placebo-controlled, randomized, double-blinded cross-over trial. *Biomedical and Environmental Sciences*, 26(7): 599-604.
- Lindeberg, S. I., Eek, F., Lindbladh, E., Ostergren, P. O., Hansen, A. M., and Karlson, B. (2008) Exhaustion measured by the SF-36 vitality scale is associated with a flattened diurnal cortisol profile. *Psychoneuroendocrinology*, 33: 471-477.
- Lindsay, A., and Costello, J. (2017) Realising the potential of urine and saliva as diagnostic tools in sport and exercise medicine. *Sports Medicine*, 47(1): 11-31.
- Lupie, S. J., King, S., Meaney, M. J., and McEwen, B. S. (2001) Can poverty get under your skin? Basal cortisol levels and cognitive function in children from low and high socioeconomic status. *Development and Psychopathology*, 13: 653-676.
- Malm, C., Sjödin, T. L., Sjöberg, B., Lenkei, R., Renström, P., Lundberg, I. E., and Ekblom, B. (2004) Leukocytes, cytokines, growth factors and hormones in human skeletal muscle and blood after uphill or downhill running. *The Journal of Physiology*, 556(3): 983-1000.
- McEwen, B. S. (1998) Protective and damaging effects of stress mediators. *The New England Journal of Medicine*, 338(3): 171-179.
- McEwen, B. S. (2007) Physiology and neurobiology of stress and adaptation: Central role of the brain. *Physiological Reviews*, 87(3): 873-904.
- McMurray, R. G., and Hackney, A. C. (2000) Endocrine Responses to Exercise and Training. In Garrett J. R., W. E., and Kirkendall, D. T. (Eds.) *Exercise and Sport Science*. Lippincott Williams & Wilkins: Philadelphia, pp. 135-161.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., Raglin, J., Rietjens, G., Steinacker, J., and Urhausen, A. (2013) Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(1): 186-205.
- Melby, C., Scholl, C., Edwards, G., and Bullough, R. (1993) Effect of acute resistance exercise on postexercise energy expenditure and resting metabolic rate. *Journal of Applied Physiology*, 75(4): 1847-1853.

- Mendel, C. M. (1989) The free hormone hypothesis: A physiologically based mathematical model. *Endocrine Reviews*, 10(3): 232-274.
- Miller, G. E., Chen, E., and Zhou, E. S. (2007) If it goes up, must it come down? Chronic stress and the hypothalamic-pituitary-adrenocortical axis in humans. *Psychological Bulletin*, 133: 25-45.
- Minetto, M. A., Lanfranco, F., Tibaudi, A., Baldi, M., Termine, A., and Ghigo, E. (2008) Changes in awakening cortisol response and midnight salivary cortisol are sensitive markers of strenuous training-induced fatigue. *Journal of Endocrinological Investigation*, 31(1): 16-24.
- 三浦麻子 (2006) 技法 1 : 実験による評価. *人工知能*, 21(1): 102-110.
- Moore, C. A., and Fry, A. C. (2007) Nonfunctional overreaching during off-season training for skill position players in collegiate american football. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3): 793-800.
- Mourot, L., Bouhaddi, M., Perrey, S., Cappelle, S., Henriot, M. T., Wolf, J. P., Rouillon, J. D., and Regnard, J. (2004) Decrease in heart rate variability with overtraining: Assessment by the Poincaré plot analysis. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 24(1): 10-18.
- 向本敬洋・鈴木立紀 (2020) レジスタンス運動の三大基本種目における運動後過剰酸素消費. *運動とスポーツの科学*, 26(1): 1-10.
- Nieman, D. C., Luo, B., Dréau, D., Henson, D. A., Shanely, R. A., Dew, D., and Meaney, M. P. (2014) Immune and inflammation responses to a 3-day period of intensified running versus cycling. *Brain, Behavior, and Immunity*, 39: 180-185.
- Nosaka, K., Newton, M., and Sacco, P. (2002) Delayed-onset muscle soreness does not reflect the magnitude of eccentric exercise-induced muscle damage. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 12(6): 337-346.
- O'Connor, D. B., Hendrickx, H., Dadd, T., Elliman, T. D., Willis, T. A., Talbot, D., Mayes, A. E., Thethi, K., Powell, J., and Dye, L. (2009) Cortisol awakening rise in middle-aged women in relation to psychological stress. *Psychoneuroendocrinology*, 34(10): 1486-1494.

- 小野寺孝一・宮下充正 (1976) 全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性: Rating of perceived exertion の観点から. 体育学研究, 21(4): 191-203.
- Ortega, E., Collazos, M. E., Maynar, M., Barriga, C., and De la Fuente, M. (1993) Stimulation of the phagocytic function of neutrophils in sedentary men after acute moderate exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 66: 60-64.
- Papacosta, E., and Nassis, G. P. (2011) Saliva as a tool for monitoring steroid, peptide and immune markers in sport and exercise science. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14(5): 424-434.
- Paulsen, G., Cramer, R., Benestad, H. B., Fjeld, J. G., Mørkrid, L., Hallén, J., and Raastad, T. (2010) Time course of leukocyte accumulation in human muscle after eccentric exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(1): 75-85.
- Peters, C. J., Hill, N., Dattani, M. T., Charmandari, E., Matthews, D. R., and Hindmarsh, P. C. (2013) Deconvolution analysis of 24-h serum cortisol profiles informs the amount and distribution of hydrocortisone replacement therapy. *Clinical Endocrinology*, 78(3): 347-351.
- Pollock, M. L., Gaesser, G. A., Butcher, J. D., Després, J. P., Dishman, R. K., Franklin, B. A., and Garber, C. E. (1998) ACSM position stand: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(6): 975-991.
- Powell, D. J., and Schlotz, W. (2012) Daily life stress and the cortisol awakening response: Testing the anticipation hypothesis. *Plos One*, 7(12): e52067.
- Proske, U., and Morgan, D. L. (2001) Muscle damage from eccentric exercise: Mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of Physiology*, 537(2): 333-345.
- Pruessner, J. C., Hellhammer, D. H., and Kirschbaum, C. (1999) Burnout, perceived stress, and cortisol responses to awakening. *Psychosomatic Medicine*, 61(2): 197-204.

- Pruessner, J. C., Kirschbaum, C., and Hellhammer, D. H. (1995) Waking up-the first stressor of the day? Free cortisol levels double within minutes after awakening. *Journal of Psychophysiology*, 9: 365-365.
- Pruessner, J. C., Kirschbaum, C., Meinlschmid, G., and Hellhammer, D. H. (2003) Two formulas for computation of the area under the curve represent measures of total hormone concentration versus time-dependent change. *Psychoneuroendocrinology*, 28(7): 916-931.
- Pruessner, J. C., Wolf, O. T., Hellhammer, D. H., Buske-Kirschbaum, A., Von Auer, K., Jobst, S., Kaspers, F., and Kirschbaum, C. (1997) Free cortisol levels after awakening: A reliable biological marker for the assessment of adrenocortical activity. *Life Sciences*, 61: 2539-2549.
- Ratamess, N. A., Falvo, M. J., Mangine, G. T., Hoffman, J. R., Faigenbaum, A. D., and Kang, J. (2007) The effect of rest interval length on metabolic responses to the bench press exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 100: 1-17.
- Rennie, M. J., Wackerhage, H., Spangenburg, E. E., and Booth, F. W. (2004) Control of the size of the human muscle mass. *Annual Review of Physiology*, 66: 799-828.
- Schakman, O., Gilson, H., and Thissen, J. P. (2008) Mechanisms of glucocorticoid-induced myopathy. *The Journal of Endocrinology*, 197(1): 1-10.
- Schlottz, W., Hellhammer, J., Schulz, P., and Stone, A. A. (2004) Perceived work overload and chronic worrying predict weekend-weekday differences in the cortisol awakening response. *Psychosomatic Medicine*, 66: 207-214.
- Schuenke, M. D., Mikat, R. P., and McBride, J. M. (2002) Effect of an acute period of resistance exercise on excess post-exercise oxygen consumption: Implications for body mass management. *European Journal of Applied Physiology*, 86(5): 411-417.
- Schulkin, J. (ed.) (2004) *Allostasis, homeostasis, and the costs of physiological adaptation*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Schwarz, L., and Kindermann, W. (1989) β -Endorphin, catecholamines, and cortisol during exhaustive endurance exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 10(5): 324-328.

- Selye, H. (1936) A syndrome produced by diverse nocuous agents. *Nature*, 138: 32.
- Selye, H. (1956) *The stress of life*. McGraw-Hill: New York.
- Smiliios, I., Pilianidis, T., Karamouzis, M., and Tokmakidis, S. P. (2003) Hormonal responses after various resistance exercise protocols. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(4): 644-654.
- Smith, L. L. (2000) Cytokine hypothesis of overtraining: A physiological adaptation to excessive stress? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(2): 317-331.
- 征矢英昭・大岩奈青 (2003) アロスタシスからみた運動ストレスと内分泌反応. 竹宮隆・下光輝一編, *運動とストレス科学*. 杏林書院: 東京, pp. 156-166.
- Stalder, T., Kirschbaum, C., Kudielka, B. M., Adam, E. K., Pruessner, J. C., Wüst, S., Dockray, S., Smyth, N., Evans, P., Hellhammer, D. H., Miller, R., Wetherell, M. A., Lupien, S. J., and Clow, A. (2016) Assessment of the cortisol awakening response: Expert consensus guidelines. *Psychoneuroendocrinology*, 63: 414-432.
- Steinacker, J. M., Lormes, W., Reissnecker, S., and Liu, Y. (2004) New aspects of the hormone and cytokine response to training. *European Journal of Applied Physiology*, 91(4): 382-391.
- Stepptoe, A., Siegrist, J., Kirschbaum, C., and Marmot, M. (2004) Effort-reward imbalance, overcommitment, and measure of cortisol and blood pressure over the working day. *Psychosomatic Medicine*, 66: 323-329.
- Sterling, P., and Eyer, J. (1988) Allostasis: A new paradigm to explain arousal pathology. In: Fisher, S. and Reason, J. (eds.) *Handbook of life stress, cognition, and health*. JohnWiley and Sons: New York, pp. 629-649.
- Stožer, A., Vodopivec, P., and Bombek, L. K. (2020) Pathophysiology of exercise-induced muscle damage and its structural, functional, metabolic, and clinical consequences. *Physiological Research*, 69(4): 565-598.
- 菅生貴之・門岡晋・小笠原佑衣 (2019) 生理的指標を利用したアスリートに対するストレス研究—内分泌指標の研究への適用. *ストレス科学研究*. 34: 9-17.

- Tabata, I., Atomi, Y., and Miyashita, M. (1989) Bi-phasic change of serum cortisol concentration in the morning during high-intensity physical training in man. *Hormone and Metabolic Research*, 21(4): 218-219.
- Tee, J. C., Bosch, A. N., and Lambert, M. I. (2007) Metabolic consequences of exercise-induced muscle damage. *Sports Medicine*, 37: 827-836.
- Tharp, G. D. (1975) The role of glucocorticoids in exercise. *Medicine and Science in Sports*, 7(1): 6-11.
- Tremblay, M. S., Copeland, J. L., and Van Helder, W. (2005) Influence of exercise duration on post-exercise steroid hormone responses in trained males. *European Journal of Applied Physiology*, 94: 505-513.
- Twist, C., and Highton, J. (2013) Monitoring fatigue and recovery in rugby league players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(5): 467-474.
- Ucar, C., Özgöçer, T., and Yildiz, S. (2018) Late-night exercise affects the autonomic nervous system activity but not the hypothalamo-pituitary-adrenal axis in the next morning. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 58(1-2): 57-65.
- Uchida, M. C., Nosaka, K., Ugrinowitsch, C., Yamashita, A., Martins Jr, E., Moriscot, A. S., and Aoki, M. S. (2009) Effect of bench press exercise intensity on muscle soreness and inflammatory mediators. *Journal of Sports Sciences*, 27(5): 499-507.
- VanBruggen, M. D., Hackney, A. C., McMurray, R. G., and Ondrak, K. S. (2011) The relationship between serum and salivary cortisol levels in response to different intensities of exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3): 396-407.
- Viru, A., Karelson, K., and Smirnova, T. (1992) Stability and variability in hormonal responses to prolonged exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 13: 230-235.
- Vissing, J., Iwamoto, G. A., Fuchs, I. E., Galbo, H., and Mitchell, J. H. (1994) Reflex control of glucoregulatory exercise responses by group III and IV muscle

- afferents. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 266(3): R824-R830.
- Volek, J. S., Ratamess, N. A., Rubin, M. R., Gómez, A. L., French, D. N., McGuigan, M. M., Scheett, T. P., Sharman, M. J., Häkkinen, K., and Kraemer, W. J. (2004) The effects of creatine supplementation on muscular performance and body composition responses to short-term resistance training overreaching. *European Journal of Applied Physiology*, 91: 628-637.
- Weitzman, E. D., Fukushima, D., Nogeire, C., Roffwarg, H., Gallagher, T. F., and Hellman, L. (1971) Twenty-four hour pattern of the episodic secretion of cortisol in normal subjects. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 33(1): 14-22.
- Wilhelm, I., Born, J., Kudielka, B. M., Schlotz, W., and Wüst, S. (2007) Is the cortisol awakening rise a response to awakening? *Psychoneuroendocrinology*, 32(4): 358-366.
- Wishnitzer, R., Berrebi, A., Hurwitz, N., Vorst, E., and Eliraz, A. (1986) Decreased cellularity and hemosiderin of the bone marrow in healthy and overtrained competitive distance runners. *Physician and Sportsmedicine*, 14(7): 86-100.
- Wust, S., Wolf, J., Hellhammer, D. H., Federenko, I., Schommer, N., and Kirschbaum, C. (2000) The cortisol awakening response-normal values and confounds. *Noise and Health*, 2(7): 79.

関連論文

本論文は、以下に示した論文に基づき作成されたものである。

1. Ogasawara, Y. Kadooka, S. Tsuchiya, H., and Sugo, T. (2022) High cortisol awakening response measured on day following high-intensity exercise. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 11(2): 59-66.
2. Ogasawara, Y. Yoneyama, T. Ikuji, T. Tsuchiya, H., and Sugo, T. (2022) Cortisol awakening response is associated with fatigue following a single bench press exercise. *Journal of Physical Education and Sport*, 22(9): 1990-1998.

謝辞

たった2つの研究成果をまとめることに、4年もの時間がかかりました。この4年間は長いようで短く、でもとてつもなく遠く感じる本当に辛い時間でした。そんな中で、沢山の方々から大きなお力添えをいただき、ここまでたどり着くことができました。

まずは、本研究にご協力いただいた対象者の方々には心より御礼申し上げます。朝から晩、そして次の日の朝まで制限の続く負担の大きい実験への参加を快く引き受けていただき、そして最後まで参加し続けてくださりました。皆様がいなければこの博士論文が完成することはありませんでした。

指導教員である土屋裕睦先生には、博士後期課程での4年間で、温かく、時に厳しいご指導や励ましの言葉をいただきました。博士後期課程の3年間はコロナ禍の時期と被り、実験の実施が危うくなる可能性があったときには、実験が滞りなく行えるよう、真っ先に守っていただきました。そして、私が博士論文を仕上げることに苦戦していたときも、指導を諦めずに、根気強く向き合い続けていただきました。心より感謝申し上げます。

また、ご多忙の中、副査を引き受けてくださった平川武仁先生と下河内洋平先生には心より御礼申し上げます。お二人の先生には、博士論文が整合性の取れた内容で、かつより一層良いものになるよう沢山の的確なご指摘やご助言をいただき、博士論文の執筆にあたり多大なお力添えをいただきました。そして、平川先生には心理コースでのオンライン飲み会や大学内での会話を通して、研究や就職活動の進捗について気にかけていただき、博士後期課程での理想的な研究の進め方や大学教員としての1年目の過ごし方についてご助言をいただきました。下河内先生には、研究員として先生の研究室に所属してから現在に至るまでの2年間、他の研究室の大学院生であった私に対しても分け隔てなく接していただき、博士論文を執筆する過程で悩み、立ち止まってしまった際に、沢山の温かいご指導と励ましの言葉をいただきました。

本学の浜田拓先生には、研究計画の立案や実験によって得られたデータを解釈する際に沢山の貴重なご意見をいただきました。博士後期課程での研究を進める過程で思い悩み、浜田先生の研究室を訪れた際には、いつも温かく迎え入れていただきました。そして、ご多忙の中で、研究の議論をするために沢山の時間を割いていただきました。感謝してもしきれません。

また、足立哲司先生には、突然研究室を訪れた私に対して、呼気ガス分析装置の使い方を懇切丁寧にご教示いただきました。また、総合実験室や機器の使用を許可していただ

き、実験が滞りなく進められるようにと、沢山の細やかなお心遣いをいただきました。本当にありがとうございました。

本学の心理コースの先生方には、多くの場面で多大なご支援とご指導をいただきました。心より御礼申し上げます。博士前期課程のときの指導教員であった菅生貴之先生には、研究を進める過程で沢山の金銭的支援をしていただきました。また、リサーチプロポーザルや論文投稿のプロセスの中で、共同研究者として研究の内容について議論をしていただきました。博士前期課程の頃から、我が道を行くような研究テーマを選んでしまった私に対して、根気強くご指導とご支援を続けていただきました。手塚洋介先生には、博士前期課程の頃から、大学院生の研究会や博士論文の関連論文となった修士論文の口頭試問などを通して、沢山のご指導やご助言をいただきました。また、博士論文発表会の後にもお声がけいただき、博士論文の内容について、貴重なご示唆をいただきました。小菅萌先生には、大学院生の研究会やリサーチプロポーザルを通して、博士論文に関わる研究について、沢山の貴重なご意見をいただきました。白井麻子先生には、分析や書類の締切に追われて、夜遅くまで大学内で作業をしていた際に、いつも温かいお声がけをしていただきました。助手の竹中優子先生には、博士論文の執筆や博士論文審査の過程において、いつも細やかで温かいご指導とご支援をいただきました。竹中先生の温かく強いお力添えがあったからこそ、最後まで諦めずに頑張り切ることができました。また、前助手の中川裕美先生（北海学園大学）にも、様々なご助言やご支援をいただきました。いつ何を質問しても、すぐに的確なお返事をいただき、研究者としてはるか先に行く中川先生の凄さをいつも感じていました。そして、心理コースの大学院生やOBGの方々の存在が、博士後期課程での4年という時間を過ごす中で、とても大きな支えになりました。大学院生の研究会を通して研究に対するご助言をいただいたり、博士論文を提出する際や博士論文発表会と口頭試問の前などに心強いご支援や励ましの言葉をいただいたりと、大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

学部生のときの指導教員であった榎木泰介先生（大阪教育大学）には、博士前期課程を含む大阪体育大学大学院での6年間を過ごす中で、多くのことを相談させていただきました。大阪体育大学大学院での6年間の学びを通して、学部4年生のときに榎木先生からいただいたご指導が、研究者として生きる上で一生役に立つものであったことに気づきました。研究者としての道を進むにあたり、最初に研究の楽しさや苦しさを教えていただいたことに、心より御礼申し上げます。

本務校である大阪公立大学の先生方のご理解なくしては、博士論文の執筆はできませんでした。色々な業務が滞り、度々ご迷惑をおかけしてしまう私をいつも温かく受け入れていただき、また沢山のご支援をしていただき心より感謝申し上げます。

そして、大阪体育大学の大学院事務室の皆様には、大阪体育大学大学院での6年間を通して大変お世話になりました。皆様の温かいご支援なくしては、ここまでたどり着くことはできませんでした。本当にありがとうございました。

最後に、2つ山があれば勝手に困難な方を選び、あわよくば複数の山を同時に登ろうと無茶をし、失敗して山から転がり落ちては時に大泣きする頑固な私をいつも一番近くで支えてくれた方と、大学院への進学を反対し、私の行く末を心配しつつも「あなたがどうしてもしたいことなら」と背中を押してくれ、温かく見守り続けてくれた家族には心から感謝しています。

2024年2月8日 小笠原 佑衣