

〔博士論文概要〕

# 運動前自発的過換気が高強度運動および回復時の 生理応答に及ぼす影響に関する研究

令和2年度

土橋 康平

筑波大学大学院 人間総合科学研究科 体育科学専攻

陸上競技短距離走のような短時間高強度運動のパフォーマンスを向上させるためにはトレーニング時に無酸素性代謝を亢進する必要があり、その方法として短時間高強度の運動やそれを繰り返す高強度間欠的運動が挙げられる。一方で、短時間の高強度運動後には頭痛や失神などが生じる場合があり、それには末梢血管拡張による血圧低下が影響していると示唆されている。従って、短時間高強度運動時には、その後の回復時の循環応答を含めた生理応答を検討することで安全に運動を行う生理学的知見を得られるかもしれない。運動前に随意的に換気量を増加させる（自発的過換気）と短時間高強度運動時の有酸素性代謝が低下し、それを代償するように無酸素性代謝が増加することに加え、心拍数も低下することが報告されている。しかしながら、運動前自発的過換気が高強度運動および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす影響について、その特性（どのような運動形式や強度で影響を受けるか）やメカニズムは明らかではない。

そこで、本研究では、運動前自発的過換気が運動時および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす影響について、異なる運動強度（研究課題1）と間欠的な運動モデル（研究課題2）を用いてその特性を検討し、そのメカニズムについて呼吸筋の仕事量増加と低二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）血症それぞれが及ぼす影響（研究課題3）、自発的過換気の継続時間（研究課題4）、および末梢化学受容器が及ぼす影響（研究課題5）に焦点を当てて検討することを目的とした。

【研究課題1】運動前自発的過換気が異なる運動強度における運動および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす影響

高強度運動時とは対照的に、自発的過換気が中強度運動時の呼吸代謝および

循環応答に及ぼす影響を検討しているいくつかの先行研究では、自発的過換気が運動時の酸素摂取応答や心拍数に影響を及ぼさなかったことを報告している。従って、呼吸代謝や循環応答が大きく変化する高強度運動時に自発的過換気の影響を受けるのかもしれないがこれについては明らかではない。そこで研究課題 1 では、幅広い運動強度を用いて運動前自発的過換気が運動および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす影響について検討した。1 分間の低、中、高強度 (30、75 および 120%最大酸素摂取量強度) 一定負荷運動および回復時の呼吸代謝および循環応答を、運動前に 1) 自由呼吸で安静をとる条件、および 2) 20 分の自発的過換気を行う条件の計 6 条件で比較・検討した。

その結果、運動時の酸素摂取量および循環応答 (心拍数、動脈血圧) は運動強度に関係なく過換気によって抑制されたが、回復時の心拍抑制応答は中強度以上の運動後で見られた。

#### 【研究課題 2】高強度間欠的運動時の呼吸代謝応答に関する研究—自発的過換気と低酸素環境との比較—

高強度間欠的運動時を低酸素環境下で行うと、運動パフォーマンスに影響を及ぼさず、有酸素性エネルギー代謝が低下し、それを代償するように無酸素性エネルギー供給量が増加することが報告されている。また、運動前に自発的過換気を行ってから 30 秒間の全力自転車運動を行うと、過換気を行わない場合よりも有酸素性エネルギー供給量が低下し、それを代償するように無酸素性代謝が亢進することが報告されている。しかしながら、運動前自発的過換気が高強度間欠的運動時の呼吸代謝応答に及ぼす影響は明らかではなく、その程度を低酸素と比較したものもない。そこで、研究課題 2 では高強度間欠的運動 (30 秒の運動を 4 分間の休息を挟んで 3 回繰り返す) 時の呼吸代謝応答およびパフォーマンスを 1) 自由呼吸、2) 自発的過換気および 3) 低酸素 (高度 2,500 m 相当) の 3 条件で比較・検討した。

その結果、自発的過換気によって 1 回目の運動時の有酸素性代謝および心拍数 (回復時を含む) が抑制されたが、その効果は運動を重ねることで減弱したこと、中等度の低酸素は自由呼吸 (常酸素) と比較して高強度間欠的運動時の呼吸代謝応答に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

#### 【研究課題 3】運動前自発的過換気あるいはそれに伴う低 CO<sub>2</sub> 血症が高強度運動および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす影響

自発的過換気を行うと、体外へ CO<sub>2</sub> が過剰に排出され、低 CO<sub>2</sub> 血症が生じる。

この低 CO<sub>2</sub> 血症により運動時の活動筋血流量が低下することや、有酸素性代謝に必要なピルビン酸脱水素酵素の活性が低下することが報告されており、これらが運動時の酸素摂取量を低下させる要因であると考えられる。一方で、自発的過換気はそもそも安静時より呼吸筋の仕事量を増加させる。先行研究では、呼吸筋の仕事量増加（過換気中に CO<sub>2</sub> を吸入し、低 CO<sub>2</sub> 血症を起こさない）は高強度運動時の活動筋への血流配分や安静時の自律神経活動を変化させることを報告している。従って、自発的過換気（呼吸筋の仕事量増加）あるいはそれに伴う低 CO<sub>2</sub> 血症のどちらが運動時の有酸素性代謝や循環応答の抑制に寄与しているかは明らかではない。そこで研究課題 3 では運動前自発的過換気あるいはそれに伴う低 CO<sub>2</sub> 血症が短時間高強度運動（120%最大酸素摂取量強度で 1 分間の一定負荷運動）および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす影響を、運動前に 1) 自由呼吸で安静をとる条件、2) 自発的過換気を行う条件、および 3) 過換気を行いながら CO<sub>2</sub> を吸入し、低 CO<sub>2</sub> 血症を起こさない 3 条件間で比較・検討した。

その結果、高強度運動時の有酸素性代謝の抑制は自発的過換気およびそれに伴う低 CO<sub>2</sub> 血症の両方が寄与する一方で、高強度運動および回復時初期の循環応答（心拍数、動脈血圧）の抑制は低 CO<sub>2</sub> 血症が影響していることが明らかとなった。

**【研究課題 4】** 運動前自発的過換気の継続時間の違い（5 分および 20 分）が高強度運動および回復時の呼吸代謝、循環応答および発揮パワーに及ぼす影響

体内にある CO<sub>2</sub> を 90%以上排出するには、過換気を 15 分以上行う必要があることが示唆されていることから、自発的過換気が運動時の呼吸代謝応答に及ぼす影響を検討している多くの先行研究では 15 分以上の運動前自発的過換気を行っている。これに加え、15 分以上の過換気は血中の CO<sub>2</sub> 分圧だけでなく、活動筋の水素イオン濃度も低下させ、細胞内アルカローシスを生じさせることが先行研究で報告されている。従って、血中の CO<sub>2</sub> 分圧の低下に加え、この細胞内アルカローシスが運動時や回復時の呼吸代謝および循環応答の抑制の要因かもしれないがこれについては明らかではない。短時間（e.g., 5 分間）の自発的過換気では細胞内アルカローシスは生じないため、過換気の継続時間を変えることで血中の CO<sub>2</sub> 分圧の低下と細胞内アルカローシスそれぞれの影響を検討することができると考えられる。また、もし短時間の自発的過換気でも高強度運動時のパフォーマンスに影響を及ぼさずに有酸素性代謝を抑制するのであれば、無酸素性代謝を亢進する方法として、時間の観点からもトレーニング現場への応用が行いやすいかもしれない。そこで研究課題 4 では高強度一定負荷運動（研

究課題 3 と同様) および 30 秒間の全力自転車運動を用いて、運動時および回復時の呼吸代謝、循環応答および発揮パワーに及ぼす運動前自発的過換気の継続時間の違い (5 分および 20 分) の影響を明らかにすることを目的として実験を行った。

その結果、5 分間の自発的過換気は自由呼吸と比較して全力運動時のパフォーマンスに影響を及ぼすことなく、有酸素性代謝を抑制した。また、その程度は 20 分間のそれと比較して同程度であった。運動時および回復時の動脈血圧は 5 分間の過換気でも抑制された一方で、心拍数の抑制は 20 分間の自発的過換気のみで見られたことが明らかとなった。

#### 【研究課題 5】 運動前自発的過換気が末梢化学受容器反射に及ぼす影響

頸動脈小体に位置する末梢化学受容器は、本来血中の酸素分圧の低下を感知することで換気や循環応答を増加させるが、血中の  $\text{CO}_2$  分圧の変化も感知する (貢献度は中枢の化学受容器よりは小さい)。先行研究では中強度一定負荷運動時に低酸素吸入により末梢化学受容器を刺激すると、常酸素条件と比較して心拍数、動脈血圧が増加し、末梢の血管抵抗が増加することで活動筋血流量を減少させることを報告している。この活動筋血流量の低下は中枢化学受容器を活性化した際には見られないため、末梢化学受容器は運動時の交感神経活動の亢進や血流調節に重要な役割を担っていると考えられる。別の先行研究では高酸素吸入により末梢化学受容器の働きを一時的に抑制すると、運動時の筋交感神経活動が低下し、活動筋血流量が増加したことを報告している。従って、低  $\text{CO}_2$  血症が末梢化学受容器の活性を抑制しているならば、それによって高強度運動時の循環応答を抑制するかもしれないがこれについては明らかではない。そこで、研究課題 5 では運動前自発的過換気が高強度運動および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす末梢化学受容器の影響を明らかにすることを目的として実験を行った。

研究課題 3 と同様の運動プロトコルを用いて、その際の呼吸代謝および循環応答を運動前に 1) 自由呼吸で安静をとる条件、2) 高酸素を吸入し、末梢化学受容器を抑制する条件、3) 20 分間の自発的過換気を行う条件、および 4) 20 分間の自発的過換気を行いながら高酸素を吸入する 4 条件で比較・検討した。

その結果、過換気による心拍数の抑制には末梢化学受容器反射の抑制が一部影響していることが示唆された。一方で、末梢化学受容器反射は動脈血圧の調節には影響を及ぼさないことが示唆された。

以上の結果は、運動前自発的過換気が短時間高強度運動および回復時の呼吸代謝および循環応答に及ぼす影響やそのメカニズムの解明に寄与し、無酸素性代謝を亢進するための方法や高強度運動を安全に行う方法の開発に大きく寄与すると考えられる。

(3968/4000 字)