

G-006

高炭酸ガスおよび低酸素が一定強度の運動中に脳波に及ぼす影響 Hypercapnia and/or Hypoxia on EEG during Constant Intensity Exercise

早坂 太一[†] 峰野 侑也[†] 室賀 翔[‡] 山下 湧人* 加藤 貴英[†]
Taichi Hayasaka Yuya Mineno Sho Muroga Yuto Yamashita Takahide Kato

1. はじめに

高炭酸ガス(CO₂)吸入による動脈血二酸化炭素分圧(PaCO₂)の増加[1][2]や低酸素ガス吸入による動脈血酸素分圧(PaO₂)の減少は、呼吸中枢を刺激して換気を亢進する。高炭酸ガスや低酸素吸入下における運動中の換気量の変化と呼吸中枢への影響を示す脳波解析データの関係を調べることは、運動生理学や健康科学において非常に重要であると考えられるが、関連する研究成果は示されていない。

本研究では、空気吸入/高炭酸ガス(3%CO₂、21%O₂)吸入/低酸素ガス(16%O₂)吸入の3条件下で、被験者に自転車エルゴメータによる運動を行わせた際の脳波と呼吸応答を計測し、CO₂を吐き出すための換気増大や酸素不足を補うための換気増大と呼吸中枢との関係を解析する。

2. 生理心理実験

本実験は20代の健常な男性6名の被験者に対して実施した。豊田工業高等専門学校「人を対象とする研究倫理審査」に承認を受け、被験者にインフォームドコンセントを得た上で実施した。運動中の呼吸応答パラメータは呼吸ガス分析器(ミナト医科学 AE310S)を用いて測定した。

2.1 予備実験

被験者に、自転車エルゴメータ(コンビウエルネス 75KLIII)を用い、40Wから始めて毎分20Wずつ上昇させていく漸増負荷法で、通常空気/高炭酸ガス/低酸素ガス吸入下でそれぞれ最大酸素摂取量(VO₂max)の測定を行った。ペダルを漕ぐペースは毎分70回転とした。

2.2 本実験

本実験は、運動前の安静状態を10分間、運動を6分間、運動後の回復状態を6分間の合計22分間で行う形式で、空気吸入下、高炭酸ガス吸入下、低酸素ガス吸入下の3条件下で中強度運動と高強度運動を実施した。各被験者の予備実験結果より、中強度運動時は45%VO₂max程度、高強度運動時は80%VO₂max程度になるときの負荷強度にそれぞれ設定した。公平性を期すために、被験者には吸入気体の条件は知らせない。また、実験順序は中強度→高強度の順で行い、同強度における気体条件は無作為の順番とした。実験時の様子を図1に示す。

2.3 脳波計測

ワイヤレス脳波計(Emotiv EPOC Flex)を用いて開眼状態での脳波を計測した。この脳波計は伸縮性のあるキャップタイプであるため、運動中の振動によるノイズ発生をある程度抑えることができると考えられる。EPOC Flexの電極

[†] 豊田工業高等専門学校

National Institute of Technology, Toyota College

[‡] 東北大学 Tohoku University

* 中京大学 Chukyo University



図1 生理心理実験の様子

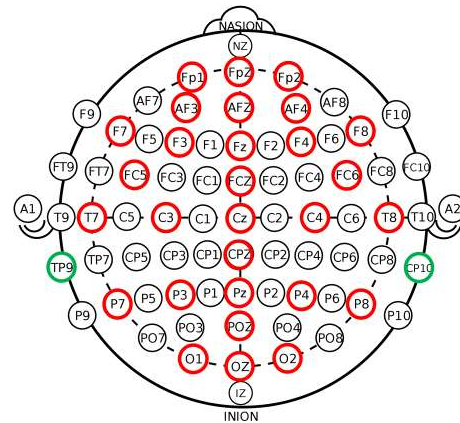


図2 脳波計の電極配置

(赤丸の箇所、緑丸は基準電極、上方が鼻側)

配置を図2に示す。脳波の解析には、Matlab EEGLAB Toolboxを用いた。

3. 実験結果

図3に、本実験における6名の被験者から計測された脳波のパワースペクトル(2~36Hz)を示す。図3(a)は中強度、(b)は高強度運動時の結果である。いずれも青線が31電極の平均をとった各被験者のパワースペクトルで、黒太線が被験者間の平均パワースペクトルである。また、図3(a)および(b)について、左列から高炭酸ガス、空気、低酸素ガス吸入条件の結果、上段から安静時、運動時、回復時の6分間の平均パワースペクトルを示している。体動や瞬き等によるノイズは、Matlab EEGLAB ToolboxのArtifact Subspace Reconstruction (ASR)機能を利用して除去した。

図3について、ガス吸入条件については、中強度運動時ではα波(8~12Hz)付近を除く周波数帯域で、高強度運動時ではすべての周波数帯域で、統計的有意差(有意水準5%)が見られた。運動前後の時間帯については、中強度運動時では統計的有意差は見られず、高強度運動時ではα波および

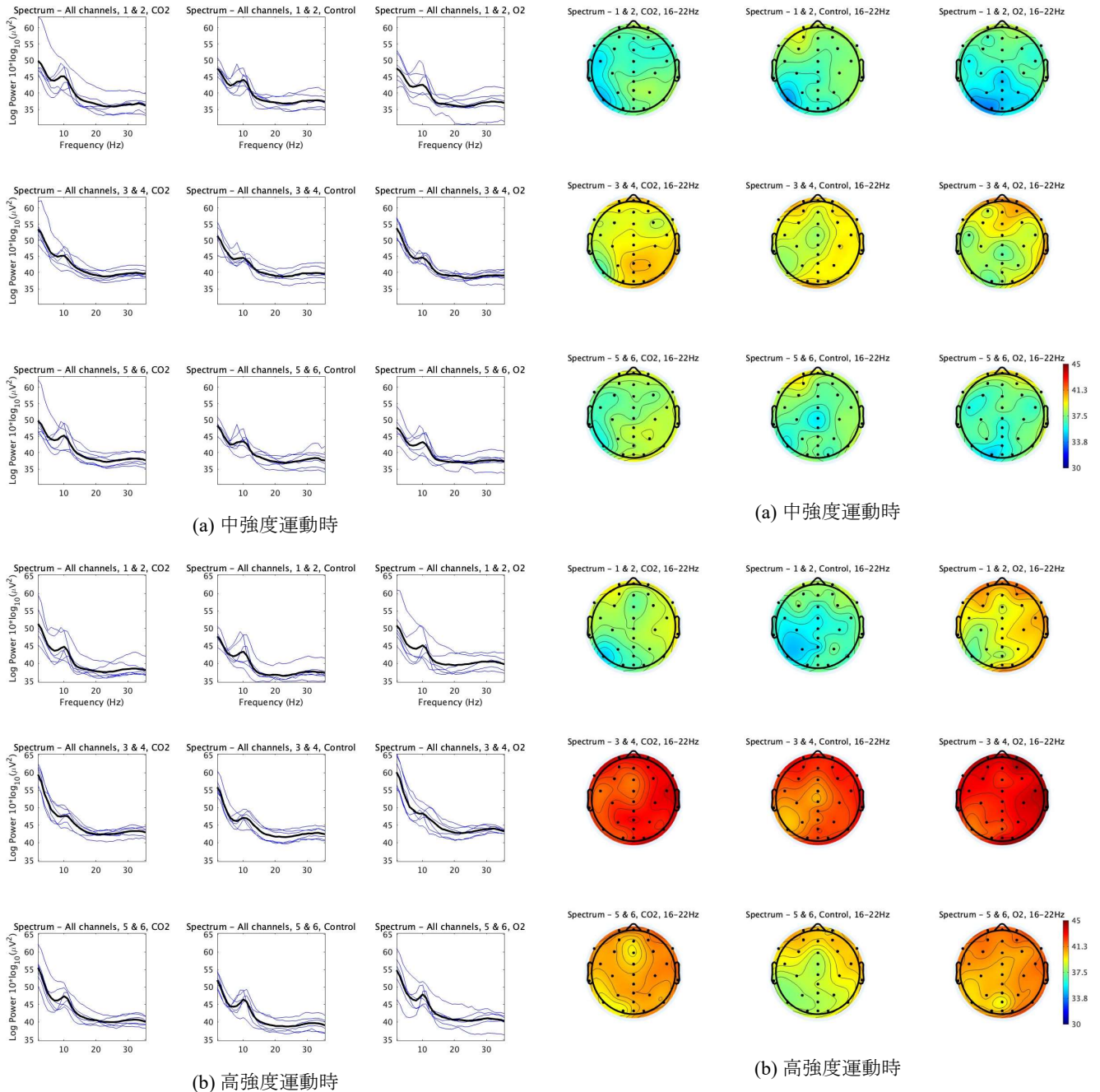


図 3 脳波のパワースペクトル

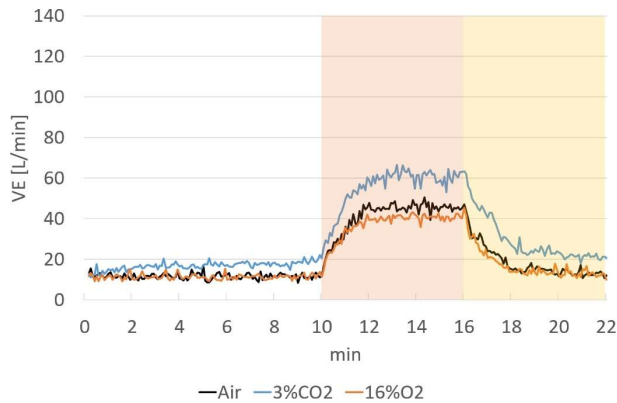
図 4 脳波のトポグラフィマップ

16~22Hz の帯域の β 波で有意差が見られた。いずれの運動強度においても、両者の交互作用は見られなかった。ガス吸入条件について、脳波のパワースペクトルに特徴の相違が現れたことはもちろんだが、安静→運動→回復に至る過程で、高負荷の運動強度の場合に、 α 波や β 波といった高周波成分に違いが現れた点で、非常に興味深い結果となっている。

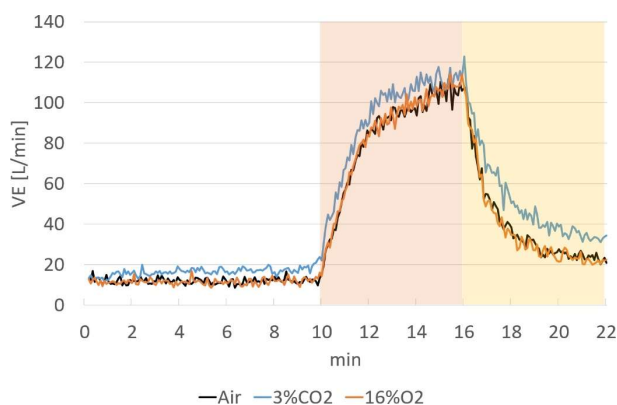
図 4 に、6 名の被験者における β 波(16~22Hz)付近の周波数帯域の平均トポグラフィマップを示す。図 4(a)は中強度、(b)は高強度運動時の結果である。図 4(a)および(b)について、左列から高炭酸ガス、空気、低酸素ガス吸入条件の結果、上段から安静時、運動時、回復時の 6 分間の平均マ

ップを示している。高強度運動時において、同様に運動前後の時間帯に対する統計的有意差が見られた周波数帯域である α 波と比較すると、特に運動時と回復時における β 波パワースペクトルの相違が顕著であった。ガス吸入条件については、空気吸入下とそれ以外の場合とで、明確な相違が見られる。

図 5 に、6 名の被験者における平均換気量 VE の時間変化を示す。図 5(a)は中強度、(b)は高強度運動時の結果である。運動強度によらず、高炭酸ガス吸入下の条件では、1 分あたりの換気量は他の場合と比較して多くなっている。低酸素ガス吸入下では空気吸入下とほぼ同じ時間的変化を示しており、図 4 の結果との相違が見られる。



(a) 中強度運動時



(b) 高強度運動時

図5 換気量の時間的変化

4. 考察

本研究とは対照的に、過少換気に伴って PaCO_2 の上昇と PaO_2 の減少が生じた場合、大脳新皮質から計測される脳波に対して速波が見られることが知られている[3][4]。図3および図4に示した本研究の結果は、運動の有無に関わらず、こうした知見に合致している。また、有酸素運動を行い一定以上の運動負荷を与えると、血中のエンドルフィンの濃度が上昇することが分かっている[5][6]。ガス吸入条件、および安静→運動→回復に至る過程で、中強度運動時に見られなかった α 波成分の変動が高強度運動時で観測されたのは、エンドルフィン濃度の変化に伴うものであることが示唆される。リカンベント型エルゴメータ駆動時の脳波に関する先行研究[7]においても、本研究における高強度運動に対応する 200W の運動強度について、ほとんどの部位の電極で α 波成分の上昇が報告されている。

図4に示した β 波成分について、高強度運動から回復時にかけて、高炭酸ガスおよび低酸素ガス吸入条件の方が、空気吸入条件よりも、パワースペクトルの変化が小さい。高炭酸ガス吸入によって運動時の呼吸交換比が低くなるメカニズムは、二酸化炭素排出量(VCO_2)の低下に起因することが知られている[1][2]。さらに、一定負荷運動時の酸素摂取量(VO_2)および VCO_2 の変化が高炭酸ガス吸入によってより急峻になる可能性が示されており[8]、図5に示した結果は、このことをある程度裏付けていると見ることができる。

本研究における実験結果は、図4に示されるような、 PaCO_2 の上昇または PaO_2 の減少による呼吸中枢への刺激の相違が影響していると考えられる。一方で、空気吸入条件と比較した、低酸素ガス吸入による PaO_2 の減少によるパワースペクトルの増大は、図5に示すような換気量の差には現れなかった。このことは、脳-神経系を含めた、呼吸中枢から肺への情報処理が、 PaCO_2 の上昇および PaO_2 の減少とでは異なり、呼吸回数および1回あたりの呼吸における換気量を制御しているのではないかと考えられる。図4に示した β 波成分のトポグラフィマップについては、やや右側優位の大脳半球の機能差を示唆する実験結果となっており、統計的有意差はみられないものの、下部前頭葉で同様の実験結果が得られている研究[7]もある。ガス吸入条件による情報処理過程での相違点が、今後こうした観点からも解析できる可能性があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、生理心理実験を行い、運動時の呼吸応答特性と脳活動の関係性を高炭酸ガスおよび低酸素ガス吸入下で比較・検証した。運動強度の違いによって、 α 波および β 波の一部の帯域で、ガス吸入条件および運動前後の時間帯による統計的有意差が見られ、換気量の時間的変化を含めた考察を行った。

今後は、こうした研究の成果を、呼吸疾患のメカニズムや、アスリートのトレーニング、リハビリテーションなどの研究分野に適用すべく、換気量の時間的変化を数理モデル化し、脳波との相関をより詳細に解析する予定である。

謝辞

被験者として実験にご協力頂いた中京大学スポーツ科学部/大学院スポーツ科学研究科の皆様にご感謝申し上げます。本研究は JSPS 科研費 21K11463 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T Kato, T Matsumoto, and S M Yamashiro. "Effect of 3% CO₂ inhalation on respiratory exchange ratio and cardiac output during constant work-rate exercise," *J Sports Med Phys Fitness*, vol.62, no.2, pp.175-182 (2021)
- [2] T Kato, T Matsumoto, A Tsukanaka, M Nakano, R Ito, M Amano, M Cole, and S M Yamashiro, "Effect of hypercapnic severity on plasma ammonia accumulation and respiratory exchange ratio during incremental exercise," *Int J Sports Exerc Med*, vol.1, no.3, p.14 (2015)
- [3] 茅原正, "坐禅時の呼吸, 脳波と脳血流 —その相互関連性に関する総合的検討・考察—," 駒澤大学心理学論集, no.19, pp.11-22 (2017)
- [4] 熊谷洋, 酒井文徳, "脳波に及ぼす呼吸の影響," 神経進歩, vol.7, no.3, pp.65-74 (1963)
- [5] 藤井寿充, "運動ストレスが脳内の β -エンドルフィンの発現に及ぼす影響," 松本歯科大学博士論文 (2020)
- [6] 見正富美子, 林達也, 柴田真志, 吉武康栄, 西嶋泰史, 森谷敏夫, "有酸素運動における脳波・血中 β -エンドルフィンの動態," 体力科学, vol.45, no.5, pp.519-526 (1996)
- [7] S P Bailey, E E Hall, S E Folger, and P C Miller, "Changes in EEG during graded exercise on a recumbent cycle ergometer," *J. Sports Sci. Med.*, vol.7, pp.505-511 (2008)
- [8] T Kato, S Muroga, S M Yamashiro, and T Matsumoto, "Effect of 3% CO₂ inhalation on pulmonary gas exchange kinetics during constant work rate exercise," *Gazz Med Ital Arch Sci Med*, vol.181, no.5, pp.328-336 (2022)