



Title	呼吸制御と運動制御の連関に関する研究：呼吸介入が下腿三頭筋収縮に及ぼす影響〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	波多野，慶
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(教育学)
Dissertation Number	甲第15801号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92365
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	HATANO_Kei_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称：博士（教育学）

氏名：波多野 慶

学位論文題名

呼吸制御と運動制御の連関に関する研究
～呼吸介入が下腿三頭筋収縮に及ぼす影響～

身体運動を行うと呼吸の増進（換気亢進）が生じる。呼吸の主な役割は、酸素（oxygen: O_2 ）の取り込みと二酸化炭素（carbon dioxide: CO_2 ）の排出を行い、動脈血の O_2 分圧（arterial partial pressure of oxygen: PaO_2 ）と CO_2 分圧（arterial partial pressure of carbon dioxide: $PaCO_2$ ）の恒常性維持を支えることである。その一方で、近年、従来から知られている呼吸の役割とは異なる側面の存在が知られつつある。筆者はこれまでの研究において、脊髄運動ニューロン（motoneurons: MNs）の活動を反映する体肢筋活動が、換気亢進を引き起こす呼吸介入によって増強されることを報告している。筆者による報告は、呼吸が PaO_2 や $PaCO_2$ の恒常性維持だけでなく、四肢の運動制御にも関与していることを示唆する。しかしながら、その詳しい機序は不明である。本研究において、呼吸介入が体肢筋活動を増強する機序を明らかにし、運動時の呼吸の多様な役割を示すことは呼吸制御と運動制御の連関に関する学術的知見を得るとともに、身体教育学の観点からも重要な意義を有する。また、本研究で得られる成果は、将来的にリハビリテーションや運動トレーニングにおける呼吸介入を用いた方法論の提案に繋がることが期待される。以上のことから、本研究の目的は、呼吸介入による筋活動への影響の調査を通じて、呼吸制御と運動制御の連関を検討することとした。

学位論文は全4章で構成される。第1章では、運動制御に対する呼吸介入の影響に関する先行研究を概観し、本研究における具体的な課題の抽出を行った。先行研究では、下腿三頭筋の自己持続性筋活動（self-sustained muscle activity: SSMA）が、外部死腔換気（external dead space ventilation: EDSV）により増強されることが示されている。SSMAとは、脛骨神経への連続電気刺激によって安静筋に誘発される筋活動であり、脊髄 MNs の持続性内向き電流（persistent inward currents: PICs）を推定する指標である。PICs は MNs の興奮性調節を行う神経活動であり、筋収縮力の調節に寄与している。また、PICs は体幹や脚の抗重力筋を支配する MNs で生じやすいことから、姿勢保持に寄与していると考えられている。EDSV は、外部死腔内に滞留した自らの呼気を再び吸入することで低 O_2 曝露と高 CO_2 曝露をもたらす、化学受容器の反応を介した換気亢進を引き起こす呼吸介入である。EDSV が SSMA を増強させた要因として、換気亢進そのものの影響が挙げられる。呼吸は、主に体幹部の呼吸筋と呼ばれる骨格筋の活動によって行われており、換気亢進は呼吸筋活動の増大によってもたらされている。先行研究からは、呼吸筋に由来する求心性神経の活性化が、体肢筋を支配する MNs の興奮性を増大させることが知られている。そのため、EDSV による SSMA の増強は、換気亢進時における呼吸筋の求心性神経の活性化が要因である可能性がある。一方、換気亢進を引き起こす生理的変化（ PaO_2 の低下と $PaCO_2$ の上昇）が SSMA 増強に影響している可能性もある。SSMA をもたらす MNs の PICs は、

神経伝達物質セロトニンによって活性化することが知られている。このセロトニンを放出する脳幹延髄縫線核のセロトニン作動性ニューロンは中枢化学受容器の一部を構成している。そして、セロトニン作動性ニューロンは PaO_2 の低下や PaCO_2 の上昇に反応することが知られている。つまり、EDSV 時の低 O_2 曝露もしくは高 CO_2 曝露、あるいはその両方がセロトニンによる PICs の活性化を引き起こし、その結果として SSMA の増強が生じることが考えられる。以上のことから、EDSV による SSMA 増強の機序を明らかにするために、これらの影響因子を個別に検討することを本研究の課題とした。また、リハビリテーションやスポーツの現場における応用へ繋げる観点から、随意収縮力と呼吸介入の関係を検討することも本研究の重要な課題である。したがって、本研究では随意的な筋力発揮時の PICs に対する呼吸介入の影響も検討することとした。

第 2 章では、本研究で行われた 3 つの実験的検証を示した。実験 I では 11 人の被験者を対象に、4 つの呼吸条件（通常呼吸 [normal breathing: NB], EDSV, 低 O_2 ガス (15.8% O_2) 吸入 [hypoxic gas inhalation: HX], 随意過換気 [voluntary hyperventilation: VH]) による SSMA への影響を検討した。NB は自然呼吸による統制条件とした。HX の低 O_2 曝露と VH の換気亢進の影響は、それぞれ EDSV によるものと同程度になるよう設定した。各条件で 2 分間の呼吸介入を 3 回実施した。実験 I と II において、SSMA は右脚の脛骨神経への電気刺激によって同側のヒラメ筋に誘発し、表面筋電図法によって 30 秒間測定された。実験の結果、EDSV が SSMA を増強することが確認された。一方で、HX と VH は SSMA を変化させなかった。この結果は、低 O_2 曝露と換気亢進は、EDSV による SSMA 増強の主な要因ではないことを示唆する。実験 II では、 CO_2 単体の影響を確認するために 10 人の被験者を対象に、3 つの呼吸条件（NB, 4% CO_2 , 7% CO_2 ガス吸入）において、SSMA に対する高 CO_2 曝露の影響を検討した。 CO_2 濃度が一定以上に高まることで、脊髄 MNs に対する抑制性の影響が生じる可能性があるため、吸入 CO_2 ガス濃度の違いの影響も検討した。各条件で 2-3 分間の呼吸介入を 3 回実施した。実験の結果、4% CO_2 と 7% CO_2 の両条件で SSMA が増強された。この結果は、高 CO_2 曝露が EDSV による SSMA 増強の要因であることを示唆する。また、4-7% CO_2 の範囲では、SSMA に対して抑制性の影響を及ぼさないことを示した。実験 III では 17 人の被験者を対象に、実験 II と同じ 3 つの呼吸条件において、随意収縮時の PICs に対する高 CO_2 曝露の影響を検討した。最大筋力の 5% による右脚の足関節底屈時に、脛骨神経への電気刺激を行い、力の増大 (30 秒間) を随意収縮時の PICs の指標とした。各条件で PICs の指標の誘発を 5 回実施した。実験の結果、随意収縮時の PICs に対する高 CO_2 曝露の影響は確認されなかった。この結果は、随意収縮時に誘発した力の増大には高 CO_2 曝露による PICs の促進が反映されないことを示唆する。

第 3 章では、実験的検証の結果に基づいた総合考察と、本研究の限界および今後の展望を示した。本研究では、実験 I で低 O_2 曝露と換気亢進が SSMA に影響しなかったが、実験 II では高 CO_2 ガス吸入が SSMA を増強した。高 CO_2 曝露が SSMA を増強したことの背景機序として、脳幹のセロトニン作動性ニューロンが PaCO_2 の上昇に反応して活性化し、脊髄に放出されたセロトニンが脊髄 MNs の PICs を促進したことが推測される。また、セロトニン作動性ニューロンは中枢化学受容器の一部を構成しており、呼吸制御に寄与している。これらのことから、化学受容器は呼吸制御において重要な役割を果たすが、実際には呼吸だけでなく、セロトニン性の神経修飾を促進するかたちで四肢の運動制御にも関与することが考えられる。本研究では運動制御に対する呼吸介入の影響をより明らかにするために、随意収縮時に誘発した力の増大を PICs の指標として評価したが、高 CO_2 曝露の影響は確認されなかった（実験 III）。今後、呼吸制御への刺激すなわち呼吸介入が運動制

御に及ぼす影響を解明するためには、呼吸介入の方法や運動機能の評価方法の改善、さらには背景機序に関与していると考えられるセロトニン作動性ニューロンの活性化の推定といった課題があり、それらを解決することが必要であると考えられる。

第4章では本研究の結論を提示した。本研究では、EDSVによるSSMAの増強の要因が高CO₂曝露であることを支持する結果が得られた。これは、脊髄MNsのPICsが高CO₂曝露によって促進されることを示唆している。しかしながら、随意収縮時に誘発したPICsの指標に対する高CO₂曝露の影響は確認されず、呼吸介入による随意収縮力への影響に関する示唆は得られなかった。