

論文の内容の要旨

論文題目 酸素利用の非定常性および不均一性
に対する筋活動の関与

氏名 篠原 稔

第1章 研究目的と論文構成

運動中のエネルギー需要に対する酸素利用調節は、精巧なメカニズムによってコントロールされていると考えられるが、運動の条件によっては酸素利用に非定常性や不均一性が生じうる。しかし、それらが生じるメカニズムは未だ不明であり、その解明が求められている。本研究では、筋活動の補償的増加に着目して酸素利用の非定常性（酸素摂取量（ VO_2 ）の漸増）に対する筋活動の関与を明らかにし、また、筋の機械的活動に着目して酸素利用の不均一性に対する筋活動の関与を明らかにすることを目的とした。第2章では筋活動の補償的増加が発現する状況を明らかにし、第3章では筋活動の補償的増加と酸素利用の非定常性との関係を検討した。第4章では酸素供給不足と代謝産物蓄積を外因的に生じさせた場合（トレーニング）の適応について検討した。第5章では酸素利用の不均一性に対する筋活動の不均一性の関与について検討した。第6章では、第2章から第5章までの研究結果の総括論議を行った。

第2章 筋活動の補償的増加の発現

第2章では、筋活動の補償的増加が生じる状況と、その特性を検討した。まず、自転車運動における漸増負荷運動中の外側広筋の機械的活動（筋音図，MMG）と電気的活動（筋電図積分値，iEMG）を検討した結果、外側広筋の機械的活動はエルゴメータの負荷の上昇に伴い直線的に増

加していくが、これを実現するための電氣的活動は、高い負荷領域において非直線的に増加していくことが示された (2.1: 筋の機械的活動と電氣的活動)。ただし、休息を挟んだ一定パワー発揮において、外側広筋の電氣的活動と負荷とは非直線的にはならないこと、そして、高強度運動直後には筋の電氣的活動が過剰に必要とされることが示され (2.2: 筋活動の補償的増加の発現)、外側広筋の電氣的活動の非直線的増加には、高い負荷強度およびそれに伴う代謝産物蓄積の影響による補償的増加であることが示唆された。

代謝産物の蓄積は、高い負荷強度でなくとも、酸素供給制限による無酸素性エネルギー代謝の高進によって生じうるため、これらの要因は、エネルギー需要と酸素供給とのバランスおよびそれに伴う代謝産物蓄積の影響と換言できるであろうと考えられた。そこで、本来であれば筋活動の増加が起きないような低強度の運動中に動静脈血流制限を行い、酸素供給制限および代謝産物蓄積が筋の電氣的活動に及ぼす影響を検討したところ、筋の電氣的活動が顕著に増加することが示された (2.3: 酸素供給制限と代謝産物蓄積による筋活動の変化)。

第3章 酸素利用の非定常性に対する筋活動補償的増加の関与

第2章において、大腿四頭筋の収縮による一定の力発揮において、物理的強度が高い場合、酸素供給が制限された場合、代謝産物が蓄積するような場合には、筋の電氣的活動が増加していくことが示された。そこで第3章では、これらのそれぞれの状況を作り、 VO_2 漸増成分のメカニズムとして主働筋の筋活動の補償的増加が関与しているかどうかを検討することを目的とした。まず、自転車運動において、一定負荷運動中の VO_2 と外側広筋の iEMG を換気閾値 (VT) の上下で比較することにより、 VO_2 漸増成分が生じるか否かを定める強度が VT であること、そして、VT 以上の運動における大腿四頭筋の補償的活動増加が VO_2 漸増成分と密接に関係していることが示された (3.1: 高い強度で発現する VO_2 漸増成分と筋活動の対応)。続いて、低酸素ガス吸入によって酸素供給を制限して筋活動の増加を生じさせることにより、大腿四頭筋の筋活動の増加と VO_2 漸増成分の増加が生じることが示された (3.2: 酸素供給制限に伴う VO_2 漸増成分と筋活動の対応)。さらに、静脈血流制限によって代謝産物蓄積を高進させて筋活動の増加を生じさせることにより、大腿四頭筋の筋活動の増加が VO_2 漸増成分の増加と対応することが示された (3.3: 代謝産物蓄積に伴う VO_2 漸増成分と筋活動の対応)。また、活動筋を大腿四頭筋に限定した膝伸展運動では、活動筋局所における酸素利用の漸増を示唆する結果が得られ、トレーニング実験により、これが筋活動の補償的増加と関連していることが示された (3.4: 活動筋局所での酸素利用漸増と筋活動変化の対応)。

第4章 酸素供給不足と代謝産物蓄積を付加したトレーニング

第2章および第3章での検討対象は、酸素供給不足や代謝産物蓄積を一過性に引き起こした際の生体の反応であった。一方、運動トレーニング中に、この酸素供給不足や代謝産物蓄積を慢性的に生じさせることにより、それに対する生体の長期的な反応 (適応) として、どのような変化

が生じるのかを検討することを、第4章の目的とした。まず、高陽圧の負荷に伴う動静脈血流阻害によって酸素供給不足および代謝産物蓄積を高いレベルで生じさせて検討した結果、250torrの高陽圧を付加して筋力トレーニングを行うことにより、通常であれば筋力増加が期待されない40%MVCでの膝伸展運動によっても、筋力増加が得られることが示された(4.1:高陽圧を付加した筋力トレーニング)。一方、低陽圧の負荷に伴う静脈血流阻害によって主に代謝産物蓄積を生じさせて検討した結果、持久的トレーニング中に50torrの低陽圧を付加することによって、局所の酸素利用能および酸の緩衝能により大きな持久的トレーニング効果が得られることが示唆され、また、筋力も増加することが示された(4.2:低陽圧を付加した持久的トレーニング)。

第5章 酸素利用の不均一性に対する筋活動の不均一性の関与

運動中の活動筋における血流や酸素利用の状態を分析する場合、観血的な方法では、太い動静脈の血流や酸素飽和度が計測対象となるため、実際の分析結果は対象とする筋のみならず、他の協働筋や皮膚などを含む広い領域での血流や酸素利用状況の計測ということにならざるを得ない。しかし、たとえ同様な機能を有する協働筋であっても、その筋の特性によって酸素利用状況に不均一性が存在する可能性は考えられる。そして、もし、協働筋間において酸素利用動態の不均一性が存在するならば、それを引き起こす要因として、筋活動の不均一性が存在する可能性を指摘できる。

これまでに大腿四頭筋の活動や酸素利用の不均一性を比較した先行研究は存在しないが、大腿四頭筋のエネルギー利用の不均一性やトレーニングによる筋肥大の不均一性などは報告されているため、酸素利用や筋活動の不均一性も存在する可能性が高いと考えられる。実際、(3.2)において自転車運動中の大腿四頭筋内の筋活動の経時変化が筋によって異なる傾向が観察されている。近赤外分光法を利用することにより、非侵襲的に組織での酸素利用動態を観察することができるようになり、活動筋局所を対象に酸素利用動態を検討することができる。そこで、第5章では、これまで研究対象としてきた大腿四頭筋を対象として、協働筋間における酸素利用および筋活動の不均一性について検討することを目的とした。(5.1:協働筋間における酸素利用動態の不均一性)では、片脚膝伸展運動中に、大腿四頭筋において酸素利用動態の不均一性が示され、また、最大近辺における筋脱酸素化の停滞が示された。持久的鍛錬度の差異や筋線維組成の差異が酸素利用能力の差異を生み出し、それが協働筋間でも存在して影響していることが推察された。また、協働筋間における疲労のしやすさの差異が影響している可能性も指摘された。大腿四頭筋内においては、大腿直筋の酸素利用能力が低いことを示唆する結果となり、結果的に大腿直筋が最も疲労しやすいであろうと推察された。(5.2:協働筋間における筋活動の不均一性)では、筋電図上は大腿四頭筋内の不均一性が見いだされなかったが、筋の機械的活動を示す筋音図信号に、不均一性が見いだされた。すなわち、大腿直筋において疲労が先行したと考えられるデータが得られ、これは(5.2)の結果を指示するものであった。

第6章 総括論議

筋におけるエネルギー需要—酸素供給バランスを何らかの方法でマイナスに傾けることによって、筋の補償的活動増加が生じることが示された。通常の運動条件下では、これがVTよりも高い強度において生じ、酸素利用の非定常性としての VO_2 漸増成分の発現メカニズムに、密接に関与していることが明らかとなった。この知見は、これまで不明であった VO_2 漸増成分の発現メカニズムの解明に大きく寄与するものである。また、局所へ高低の陽圧を付加して酸素供給不足と代謝産物蓄積を高進させ、筋の補償的活動増加を生じさせたトレーニングでは、物理的負荷が小さくともより大きなトレーニング効果が得られ、主にTypell線維の機能向上が得られることが示唆された。

大腿四頭筋の各筋は膝伸展運動の協働筋であるにも関わらず、大腿直筋の特異性として酸素利用の不均一性が認められた。筋の電氣的活動からは必ずしも観察されない筋活動の不均一性が、筋の機械的活動の検討によって発見され、それが酸素利用の不均一性と対応することが示された。これらの不均一性の生じる原因として、筋線維組成の相違に起因する疲労進行度の不均一性の影響が推察された。生体における酸素利用を研究する場合には、主働筋というひとくくりの捉え方のみならず、各筋ごとに分けて捉えるという視点を導入することにより、新たな知見が得られると考えられる。また、筋の電氣的活動に加えて筋の機械的活動を検討することにより、neural inputとしての見かけ上の筋活動ではなく、mechanical outputとしての実際の筋活動を明らかにできることが示された。