

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

#### Relationship between skeletal muscle circulation and neuromuscular activity during fatiguing muscle contractions

(和訳: 疲労に至る筋収縮中の筋循環と神経-筋活動の関係)

氏名: 立 正伸

### 緒言

筋疲労に大きく影響する因子として知られているものに、活動筋での血液循環(筋への血液供給や筋の酸素消費)の低下がある [Sjogaard *et al.* 1988, Bystrom *et al.* 1991, Hogan *et al.* 1996]。一方、筋収縮性の低下は、運動単位の動員や発火頻度の増加といった神経-筋活動の変化を引き起こす。したがって、持久的な力発揮と筋疲労との関係を論ずる場合には、活動筋での血液循環、およびそれと神経-筋活動との相互関係を検証する必要がある。さらに、関節を介して力発揮を行う場合、力発揮には生理学的および解剖学的特性が異なる協働筋が動員され、活動筋での血液循環および神経-筋活動はその複雑さを増す。そのため、複数の筋が協働して活動する持久的力発揮においては、血液循環および神経-筋活動を力発揮に貢献するそれぞれの筋において個別に測定し、その関係を検討する必要がある。

本研究は、筋疲労を伴う持久的力発揮における運動中の活動筋での血液循環(筋循環)と神経-筋活動との関係について、1) 活動筋への血流の差異が筋循環および神経-筋活動に与える影響、2) 単一筋における筋循環と神経-筋活動の関係、および 3) 協働筋間における筋循環および神経-筋活動の差異、の 3 つの視点から検討することを目的とした。以前より、個々の筋の神経-筋活動は、表面筋電図を用いて測定されてきた。一方、近年の近赤外分光法の進歩は、筋収縮中の筋組織内における酸素利用動態の測定を可能にしている。近

赤外分光法によって測定される筋組織内の酸素利用動態は、筋への血液供給と筋での酸素消費のバランスを反映することから、活動筋での血液循環を表す指標として有用である。そこで本研究では、筋疲労に至る静的筋収縮において、活動筋の酸素利用動態を近赤外分光法により、神経-筋活動を表面筋電図法により分析した。

### 研究 1: 活動筋への血流の差異が筋の酸素利用動態および神経-筋活動に与える影響

姿勢の差異および阻血によって前脛骨筋への酸素供給を変化させたときの活動筋の酸素利用動態と神経-筋活動を明らかにすることを目的とした。

仰臥位で足関節を 90 度に固定し、下腿を垂直に下ろした姿勢(足垂下)と下腿を水平にした状態で台に載せた姿勢(足挙上)において、50%MVC での等尺性足関節背屈運動を、3 秒収縮-2 秒弛緩で疲労困憊に至るまで行った。運動中には前脛骨筋から表面筋電図(EMG)を導出し、同時に近赤外線分光装置により組織酸素飽和度指標( $StO_2$ )および総ヘモグロビン量(血液量)を測定した。さらに、本研究では、通常の流れ時(FREE)に加え、活動筋への血流を遮断した状態(OCCL)での測定も実施した。姿勢変化による影響に関する実験の結果、疲労困憊に至るまでの運動時間は足挙上( $261.7 \pm 57.9$  秒)において足垂下( $430.8 \pm 63.5$  秒)より有意に短くなった。筋内の血液量は足垂下より足挙上で大きく増加したが、その差は安静時での両者の血液量の差を上回らず、運動時の  $StO_2$  は足垂下より足挙上の方が低い値となった。また、足挙上では筋電図積分値(iEMG)増加および MPF 低下が足垂下より早期にみられた。これらの結果は、足挙上の方が足垂下より血流が少なく、酸素供給がより不足していたため、筋収縮性の低下が急速に生じたことを意味している。すなわち酸素供給の差異が活動筋の筋疲労の進行を異なったものとし、これが筋持久力における両姿勢間の違いを生む要因となっていたことが示唆された。

また、阻血下では両姿勢での運動時間に差はなく、FREE( $430.8 \pm 63.5$  秒)より OCCL( $154.2 \pm 7.7$  秒)では運動継続時間が有意に短くなった。運動時の  $StO_2$  は FREE より OCCL の方が有意に低い値となり、阻血により酸素供給が OCCL では FREE より不足していたことが確かめられた。また、iEMG 増加および MPF 低下は、OCCL において FREE より早い時点で発現し、このことより OCCL で早期に筋疲労が起きていたことが示された。しかし、疲労困憊時の iEMG は OCCL では FREE より低くなる傾向があった。この要因として、代謝産物蓄積にともなう group III、IV 線維活動の  $\alpha$  運動神経の抑制や、group Ia 線維から  $\alpha$  運動神経への興奮性入力の低下等 [Bigland-Ritchie *et al.* 1986、Garland & McComas 1990、Bongiovanni 1990] が起きている可能性が考察された。すなわち、OCCL における運動の持続時間低下には、酸素供給の差異による影響以外に、代謝産物

の蓄積に由来する求心性神経活動も関与することが示唆された。

## 研究 2： 単一筋における筋の酸素利用動態と神経-筋活動の関係

疲労困憊に至る足背屈運動において、主動筋として関節トルク発揮に大きく貢献する前脛骨筋の筋循環と神経-筋活動との関係を明らかにすることを目的とした。

漸増負荷(1 収縮毎に 1%MVC の増加)の静的足背屈運動を 4 秒収縮-2 秒弛緩で疲労困憊に至るまで繰り返した。この運動中、前脛骨筋から EMG を導出すると同時に、近赤外線分光装置により、StO<sub>2</sub> を測定した。その結果、StO<sub>2</sub> は運動初期に増加したが、時間経過と共に減少し、運動終盤ではほとんど変化を示さなくなった。筋電図積分値は運動開始後から運動強度の増加に伴い直線的に増加し、運動後半でその増加率は大きくなった。また、筋電図のパワースpekトルの平均周波数(MPF)は iEMG の急増とほぼ同時点から低下した。すなわち、運動中、StO<sub>2</sub> の低下率が頭打ちになるに伴い iEMG の増加率が大きくなり、MPF の低下が生じた。このことは、ある時点以降、運動強度の漸増に筋の酸素消費が追従していかず、設定された強度での筋活動の遂行に貢献する有酸素性代謝由来のエネルギー供給が不足すること、そして、その結果として生起する筋収縮性の低下を補償するために、運動単位の動員や発火頻度の増加がより顕著に生じたことを示すものと考えられた。

## 研究 3： 協働筋間における筋酸素利用動態および神経-筋活動の差異

疲労困憊に至る足底屈運動において、協働筋であるヒラメ筋(Sol)、腓腹筋内側頭(MG)および腓腹筋外側頭(LG)、それぞれの筋循環および神経-筋活動の差異を明らかにすることを目的とした。

漸増負荷(1 収縮毎に 1%MVC の増加)の静的足底屈運動を 4 秒収縮-2 秒弛緩で疲労困憊に至るまで繰り返した。運動中には Sol、MG および LG から EMG を導出し、同時に近赤外線分光装置により Sol および MG または MG および LG の StO<sub>2</sub> を測定した。その結果、MG と Sol の iEMG は、運動中ほぼ同様な変化を示し、運動の継続に伴い直線的な増加を示した。一方、LG の iEMG は運動前半において MG と比較して低い傾向にあった。MPF は 3 筋のなかで、MG でのみ運動終盤に有意な低下を示した。StO<sub>2</sub> は、MG の方が Sol より急激に低下し、疲労困憊時には有意に低い値となった。また、運動終盤で MG の StO<sub>2</sub> は頭打ちになる傾向がみられた。さらに、筋内での StO<sub>2</sub> には両腓腹筋間でも差が存在し、LG では MG よりも StO<sub>2</sub> の低下が始まる時点が遅く、またその低下の度合いは小さい傾向にあった。このような結果は、Sol に比べ MG への酸素供給が不十分であったこと、MG の酸素消費が頭打ちになっていったことを示すものであり、その要因として、筋線維組成におけ

る両筋間の差 [Johnson *et al.* 1973] が推察された。一方、StO<sub>2</sub> および MPF の変化に MG と Sol で違いが存在したにもかかわらず、iEMG の変化が両筋でほぼ同様という結果は、MG における筋収縮性の低下を補償するために、Sol において運動単位の動員および発火頻度の増加が生じた可能性を示すものと考えられた。さらに、本研究の結果は、生理学的特性の類似する腓腹筋間 (MG および LG) においてさえ、持久的運動中の血液循環と神経-筋活動には違いが存在することを示しており、その原因として、運動中の筋活動様式が筋間で異なることが考えられた。

## まとめ

本研究では、近赤外分光法と表面筋電図を用いることにより、疲労に至る静的筋収縮中の個々の筋における血液循環と神経-筋活動との関係について、活動筋への血流の差異が筋循環および神経-筋活動に与える影響(研究 1)、単一筋における筋循環と神経-筋活動の関係(研究 2)、および、協働筋間における筋循環および神経-筋活動の差異(研究 3)、の 3 つの視点から検討した。その結果、血流の制限による活動筋への酸素供給の差異は筋疲労の進行に違いを生じさせ、それが筋持久力を決定する因子となっていることが示唆された(研究 1)。また、漸増負荷の持久的力発揮においては、運動の後半に生じた活動筋の酸素利用動態の変化が神経-筋活動のそれと関連していることが示唆された(研究 2)。さらに、複数の筋が協働して力発揮を行う場合には、協働筋間では酸素利用動態に差異が存在し、これは主に筋の生理学的特性(筋線維組成)が起因していると考えられた。しかし、生理学的特性が類似している筋間であっても、持久的力発揮の際には血液循環と神経-筋活動との関係に差異の生じる可能性が示唆された(研究 3)。