

最大握力運動時の前頭葉の酸素動態

Frontal Lobe of Oxygen Dynamics at the Time of Maximum Grip Strength Exercise

高元宗一郎、古賀 浩二、久保山直己

Soichiro Takamoto, Kouji Koga, Naomi Kuboyama

最大握力運動時の前頭葉の酸素動態

高元宗一郎、古賀 浩二、久保山直己¹

西九州大学健康栄養学部健康栄養学科、大阪商業大学総合経営学部公共経営学科¹

(平成27年2月25日受理)

和文要旨

本研究では、最大努力握力運動中に前頭葉の酸素動態、最大努力握力、表面筋電図を同時に測定し、前頭葉の酸素動態が最大握力発揮の状態（運動性疲労）を反映しているかどうかについて検討した。測定は、成人男性18名に対して測定を行った。最大努力握力では、運動中期及び運動初期と運動終期で有意な差が認められた。積分筋電図では運動初期に対し、中期及び終期のすべての間で有意差が認められた。筋放電の中心周波数では、運動初期と運動中期の間及び、運動初期と運動終期の間には有意な差が認められた。しかし、左前頭葉の酸素化ヘモグロビン量については、有意な差が認められなかった。これらの結果より、末梢では運動性疲労が生じたにもかかわらず、中枢の脳神経細胞は活動していることが示唆された。このことから、運動中の前頭葉の酸素動態は一運動野の酸素動態とは異なり、運動中に発生し増大する運動性疲労を反映していないことが明らかとなった。

キーワード：運動性疲労、筋放電、NIRS

1 はじめに

ある一定強度以上で筋収縮を繰り返すと、筋は疲労し運動継続が困難になる。筋疲労は、一般的に、「求められた、あるいは、期待された出力に対して筋群もしくは筋がそれを維持することができなくなる」と定義されている¹⁾。一方で、運動中の活動筋の筋放電量に着目し、「運動中の筋放電量が増加を伴う現象」とする解釈もある²⁾³⁾。ヒトの随意運動は脳で形成された運動命令が脊髄を介し筋繊維に伝達され収縮することで発現される。運動中には疲労が生じ、運動発現のレベルが徐々に低下する。疲労は突発するのではなく、徐々に増大する。疲労困憊になると運動を継続することが困難になる。運動によって生じる疲労を運動性疲労と呼び、精神性疲労と区別される。運動性疲労は情報伝達に関与する神経系と筋系のシステムの両面から研究が展開されているが、これは運動による主従関係の観点から中枢系と末梢系とに分けられる。つまり、運動を発生させる側の問題と運動を行う側の問題が想定される。中枢及び末梢の要因は様々に指摘されているが、共通した要因としては、シナプス伝達効率の低下、エネルギー枯渇、血流不全などが挙げられる。当然ながら、運動性疲労は少なからず中枢及び末梢の両方の要因が相互に影響することで生じる。1900年代の研究では、疲労の主要因は中枢ではなく末梢にあると結論付けられてきた⁴⁾。当時の研究は運動中に中枢の活動を測定する計測機器が十分に発達していなかったため、研究対象が末梢の活動に限定されていた。しかし、近年科学技術の発達により、運動中に脳の血流量、血液量及び放射性同位体の動態などが測定できるようになり、間接的であるが中枢の活動を観察できるようになり始めた。そして、運動性疲労は、末梢だけでなく中枢においても関連する現象が確認されるようになってきた⁵⁾。最近では高強度運動や長時間運動後における中枢の疲労現象が指摘されている⁵⁾。脳組織の活性は、経頭蓋磁気刺激装置や機能的磁気共鳴画像(functional Magnetic resonance imaging : fMRI) などを用いて研究されてきた¹¹⁾。しかし、これらの機器を用いて、運動中の疲労困憊に至るまでの脳活性の変化を捉え続けることは技術的に困難である。一方、近赤外分光法装置(near infrared spectroscopy ; NIRS) は、絶対的な指標となりえないものの、動的な運動条件下で時系列的に計測が可能であり、実際の運動に近い形で計測が可能であるという利点を持つ。この NIRS は他の脳神経の活動を計測する機器と比べ、被験者に対する拘束性が低い。還元型ヘモグロビン濃度([Hb]) に対する感受性が低いという欠点は持つが動的運動中の脳活動を測定するには、この計測機器が優れている。NIRS で計測できる指標は、一般に、還元型ヘモグロビン濃度 [Hb] と酸化型ヘモグロビン

濃度([HbO₂]) である。ある条件に対して、一般に、[HbO₂] が上昇し [Hb] が低下した状態を酸素化が上昇したと言う。そして、この状態の時、脳の活動レベルが上昇したと考える。これは、神経活動時の局所脳血流量は安静時の50%程度上昇するのに対し、酸素消費量が5%程度しか上昇しないという神経活動と局所脳血流量との関係をもとにしている⁴⁾⁵⁾。NIRS を利用した運動中の一次運動野の酸素動態が関連する研究では疲労困憊時には安静時よりも低いレベルにまで活動が低下することを報告している⁶⁾⁷⁾。その活動の低下は活動肢に対して対側の一次運動野のみならず、同側の一次運動野でも確認された⁸⁾⁹⁾。そして、これは力調節に同側一次運動野が関連していることも示唆している¹⁰⁾。前頭葉は脳全体の司令塔として知られている。前頭葉は二十数個の領域に分かれており、その中でも、運動を用いる研究では前頭前野の測定がおこなわれることが多い。運動に限らず、前頭葉は様々な刺激に対する反応を確認する際に測定される。2002年に Watanebe et al.¹¹⁾が行った研究では、NIRS を用いて心的疲労により前頭葉の活動が低下することが、明らかにされた。しかし運動性疲労に関しては前頭葉の酸素動態が反映しているかどうかは不明である。そこで本研究では、最大努力握力運動中に前頭葉の酸素動態、最大努力握力、表面筋電図を同時に測定し、前頭葉の酸素動態が最大握力発揮の状態(運動性疲労) を反映しているかどうかについて検討した。

2 方 法

2.1 被験者

成人男性(年齢 24 ± 3 歳 身長 174.3 ± 4.7 cm 体重 67.2 ± 7.6 kg) 18名が参加した。すべての被験者は右利きであった。被験者は心疾患及び血管系疾患などはなく健康であった。被験者は、測定の10時間前から食事及びアルコールの摂取が禁止された。被験者は、実験内容についての説明を受け、書面にて同意し本実験に参加した。

2.2 測定方法

実験室は静かな状態で室温 22°C 、湿度60%程度に保たれた。被験者はマット状に仰向けの状態で測定された。被験者は視覚的刺激を防止するためアイマスクを着用し、右手でデジタル握力計を全指で握るように求められた。デジタル握力計のグリップ調整は測定前に各被験者が行った。近赤外分光法装置(Hamamatsu photonics NIRO 200, Japan) の2つのプローブは左右の前頭葉にそれぞれ装着し頭部の血液動態を測定した。各プローブの発光部と受光部との距離は4.5cmとした。被験者は仰向けの状態で2分間安静を保ち、その後音刺激の合図に3秒間の最大握力発揮と3秒間の安静を5分間繰り返した。

2.3 統計処理

運動初期、運動中期及び運動終期のデータはANOVA（一元配置分散分析）を行いBonferroniによる多重比較検定を行った。全てのデータは平均値±標準偏差で表し統計処理においては、5%未満を有意水準とした。

2.4 NIRS

NIRSは脳における酸素代謝や血液循環の変化を非侵襲的に測定できる。Millikanらにより初めて生体での組織酸素動態計測装置として応用され、JobsisとChanceらによりヒトの脳および骨格筋における酸素動態の計測が行われた。NIRSによる組織酸素動態の測定原理は高い組織透過性及びヘモグロビン/ミオグロビン(Hb/Mb)の吸収係数の波長依存による。NIRSは頭皮上より近赤外光を頭蓋内に向けて照射し、脳を通過して頭蓋骨に出てきた近赤外光を測定する。測定される指標は、酸化型Hb(oxy-Hb)と還元型Hb(deoxy-Hb)の濃度変化である。NIRSはこの光が通過するすべての組織の酸素代謝や血液循環を反映している。つまり、NIRSにおけるoxy-Hbとdeoxy-Hbの濃度変化は、近赤外光が通過する全組織を分母とした濃度変化として表示される点である。そのため単位はHb量(mol)/組織容積(L)として表わされる。またoxy-Hb量とdeoxy-Hb量の和は総Hb量(total-Hb)の濃度変化を表しており、血液量の変化を示している。本実験で使用したNIRSは他のHbの酸素飽和度(Tissue Oxygenation Index: TOI)及びtotal-Hbの相対濃度(Tissue Hemoglobin Index: THI)の測定も可能であった。

3 結果

3.1 左前頭葉の酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)量

左前頭葉のoxy-Hb量は、運動初期は -0.09 ± 0.29 mol/L、運動中期は -0.33 ± 0.17 mol/L、運動終期は -1.21

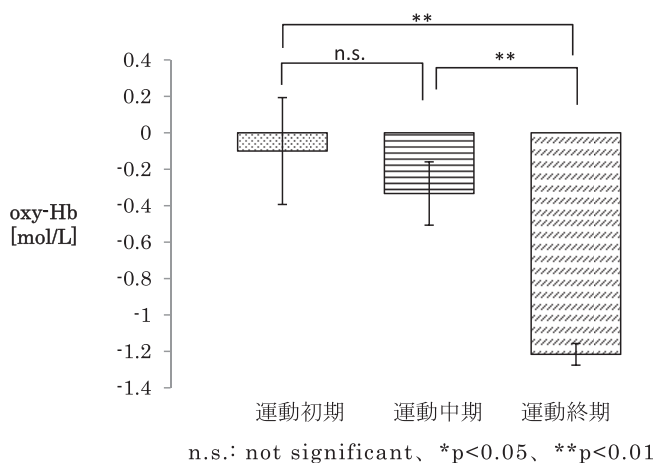


図1：運動初期、運動中期及び運動終期における左前頭葉のoxy-HBの変化

± 0.06 mol/Lであった。運動初期及び運動中期の間に有意な差は認められなかった。運動中期及び運動終期との間には有意な差が認められた。

3.2 最大努力握力の変化

最大努力握力は5分間に50回測定した。1回目から5回目までを運動初期、23回から27回目までを運動中期、46回目から50回目までを運動終期とし、各運動期の5回分の平均値を用いた。

最大努力握力は、運動時初期は 30.37 ± 3.79 kg、運動中期は 17.98 ± 0.71 kg、運動終期は 15.04 ± 0.17 kgであった。運動初期と運動中期及び運動初期と運動終期で有意差が認められた。

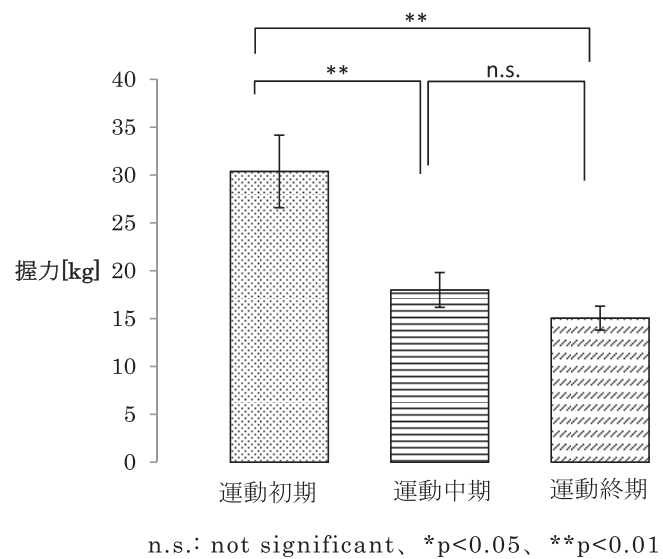


図2：運動初期、運動中期及び運動終期における最大努力握力の変化

3.3 積分筋電図(integrated electromyogram: iEMG)の結果

運動中に表面筋放電図法により筋電位の導出を行っ

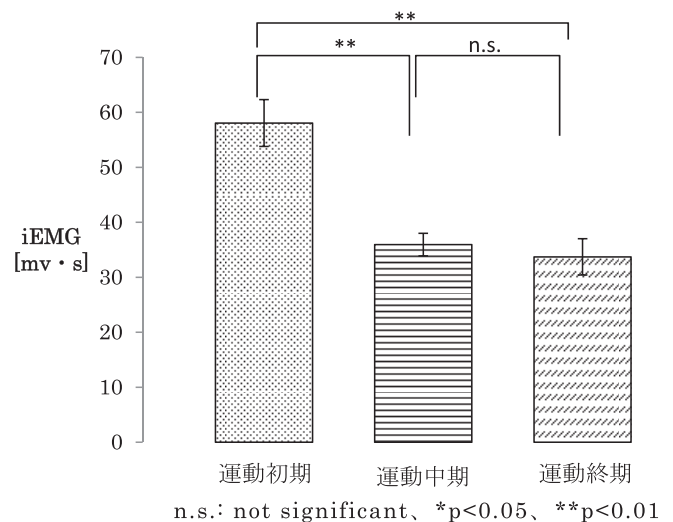


図3：運動初期、運動中期及び運動終期におけるiEMGの変化

た。表面筋電図は腕橈骨筋及び総指伸筋で測定し iEMG で示した。

iEMG は、運動時初期では $58.04 \pm 4.25 \text{ mV} \cdot \text{s}$ 、運動中期では $35.94 \pm 2.06 \text{ mV} \cdot \text{s}$ 、運動終期では $33.70 \pm 3.29 \text{ mV} \cdot \text{s}$ であった。運動初期に対し、中期及び終期のすべてで有意差が認められた。

3.4 運動時の筋放電における中心周波数の変化

運動中に表面筋放電図法により筋電位の導出を行い、得られた筋電位のデータのうち、運動中（デジタル握力計を握っている状態）の時系列データから中心周波数を求めた。

中心周波数は、運動時初期では $135.60 \pm 2.51 \text{ Hz}$ 、運動中期では $132.21 \pm 1.97 \text{ Hz}$ 、運動終期では $129.84 \pm 2.86 \text{ Hz}$ であった。運動初期と運動中期との間及び、運動初期と運動終期の間には有意な差が認められた。運動中期と運動終期には有意な差は認められなかった。

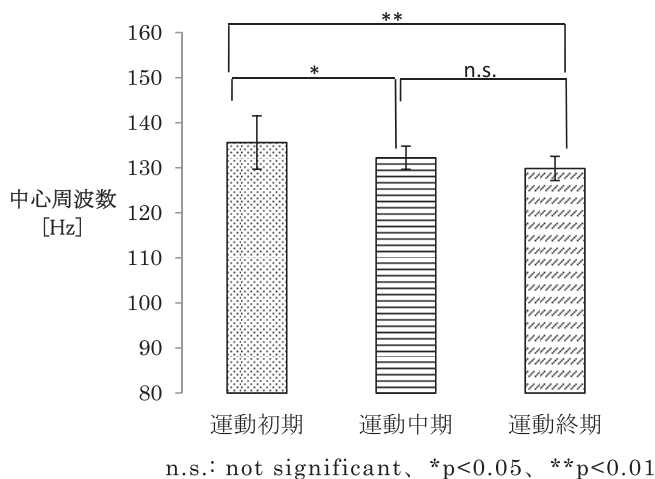


図4：運動初期、運動中期及び運動終期における運動時筋放電の中心周波数の変化

4 考 察

最大努力握力は、運動初期、運動中期そして運動終期になるにつれ、明らかに低下した。運動性疲労とは運動に必要なとされる力を発揮できなくなった状態と定義されている。この定義に当てはめると、明確に運動性疲労が生じている。iEMGの結果では運動初期と比べ、運動中期、運動終期へと明らかに減少している。筋組織における疲労の指標となる iEMG の増加が認められない事を考慮すると、運動初期で既に運動ニューロンのサイズの移行及び筋の動員が完了していると考えられる。そのため運動中期及び運動終期では筋群の活動の減衰により iEMG が低下したと考えられる。中心周波数の結果では運動初期から運動中期については、明らかな周波数の低下が認められるが、運動中期から運動終期については低下が認められない。表面筋電図のパワースペクトルは筋

疲労に伴いその成分が低域に集中する特徴があることが知られており¹²⁾、今回の結果もその事を示唆していると考えられる。運動中期から運動終期での周波数の低下が見られないのは、運動中期の段階で既に運動性筋疲労が高まっている状態のためだと考えられる。このように iEMG および中心周波数の指標では、末梢において運動初期から運動中期の間に運動性疲労を示唆している。しかし、左前頭葉の oxy-Hb は運動初期と運動中期に有意な差は認められなかった。つまり、末梢では運動性疲労が生じたにもかかわらず、中枢の脳神経細胞は活動し続けていた事になる。このことは解剖学的構造の経路から、運動性疲労が増大する中でも、前頭葉から運動野へ対して調整された運動指令を発信していると考えられる。しかしながら、運動性疲労の終盤、つまり疲労困憊に達するとその酸素動態は安静レベルよりも低くなり、oxy-Hb の値からも運動性疲労を確認することが可能であろう。

5 結 論

運動中の前頭葉の酸素動態は一運動野の酸素動態とは異なり、運動中に発生し増大する運動性疲労を反映していないことが明らかとなった。

6 参考文献

- 1) B Bigland-Ritchie, D Jones, G Hosking: Central and peripheral fatigue in sustained voluntary contractions of human quadriceps muscle, *Clin Sci*, **54**, 609, (1978)
- 2) J Kent-Braun: Noninvasive measures of central and peripheral activation in human muscle fatigue, *Muscle Nerve*, **20**, 98, (1997)
- 3) M Tachi, M Kouzaki, H Kanehisa, T Fukunaga: The influence of circulatory difference on muscle oxygenation and fatigue during intermittent static dorsiflexion, *Eur J Appl Physiol*, **91**, 682, (2004).
- 4) P Fox, M Raichle: Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxidative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects, *Proc Natl Acad Sci USA*, **83**, 1140, (1986)
- 5) S Yevgeniy, D Aniruddha: Anticipatory haemodynamics signals in sensory cortex, *Nature*, **457**, 475, (2009)
- 6) K Shibuya, M Tachi: Oxygenation in the motor cortex during exhaustive pinching exercise, *Resp Physiol Neurobiol*, **153**, 261, (2006)
- 7) K Shibuya, N Kuboyama: Human motor cortex oxygenation during exhaustive pinching motor task, *Brain res*, **1156**, 120, (2007)

- 8) K Shibuya, N Kuboyama: Bilateral motor control during motor tasks involving the nondominant hand, *J Physiol Anthropol*, **28**, 165, (2009)
- 9) K Shibuya, T Sadamoto, K Sato, M Moriyama, M Iwata: Quantification of delayed oxygenation in ipsilateral primary motor cortex compared with contralateral side during a unimanual dominant-hand motor task using near-infrared spectroscopy, *Brain Res*, **1210**, 142, (2008)
- 10) S Yevgeniy, D Aniruddha: Anticipatory haemodynamics signals in sensory cortex, *Nature*, **457**, 475, (2009)
- 11) A Watanabe, N Kato, T Kato: Effects of creatine on mental fatigue and cerebral hemoglobin oxygenation, *Neurosci Res*, **42**, 279, (2002).
- 12) K Kogi, T Hakamada: Frequency analysis of the surface electromyogram in muscle fatigue, *J.Sci.Labour*, **28**, 519, (1962)

Frontal Lobe of Oxygen Dynamics at the Time of Maximum Grip Strength Exercise

Soichiro Takamoto, Kouji Koga, Naomi Kuboyama¹

Department of Health and Nutrition Science, Faculty of Health and Nutrition Nishikyushu University,

¹Department of Business Administration, Osaka University of Commerce Science

(Accepted: February 25 , 2015)

Abstract

Neuroimaging studies have reported that the cerebral oxygenation decreases at voluntary exhaustion during several exercises. Near-infrared spectroscopy (NIRS) allows non-invasive monitoring of the change in cerebral oxygenation during exercise. The aim of this study was to investigate the interaction between the changes in oxygenation of the prefrontal cortex and the force of maximal voluntary muscle contraction (MVC) during repetitive handgrip MVC exercise. Eighteen healthy male subjects performed a maximal handgrip task (3-s contractions/3-s rest, 50 contractions). The force of MVC decreased significantly during exercise ($p < 0.05$). The prefrontal cortex oxygenation in contralateral side to exercising hand increased after the start of exercise, then gradually decreased with the increased contractions ($p < 0.05$, respectively). In addition, there was no significant relationship between the cerebral oxygenation and the ratio of the force of MVC ($p > 0.05$). The results of the present study indicate that the changes in the prefrontal cortex oxygenation do not necessary follow the voluntary exhaustion during an exercise.

Key words : Motility fatigue, Muscle discharge, NIRS