近赤外分光法 (NIRS) による運動負荷後の 筋内酸素動態

——利き足と非利き足の違いによる検討——

*Muscle Oxygen Dynamics after Exercise Determined by Near-infrared Spectroscopy:
Examination of the Difference between the Dominant and Non-dominant Legs*

山本 裕晃¹⁾ 中村 朋博²⁾ 吉塚 久記^{3,4)} 森田 正治⁵⁾

HIROAKI YAMAMOTO, RPT¹⁾, TOMOHIRO NAKAMURA, RPT²⁾, HISAYOSHI YOSHIZUKA, RPT^{3,4)},
MASAHARU MORITA, RPT⁵⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Fukuoka Torikai Hospital: 6-8-5 Torikai, Jyonan-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 814-0103, Japan
TEL +81 92-831-6031 E-mail: h.yamamoto.28.0321@gmail.com

²⁾ Department of Rehabilitation, Fukuoka City Hospital

³⁾ Department of Physical Therapy, Yanagawa Rehabilitation School

⁴⁾ Saga University Graduate School of Medical Science

⁵⁾ Department of Physical Therapy, International University of Health and Welfare

Rigakuryoho Kagaku 31(5): 651–654, 2016. Submitted Mar. 9, 2016. Accepted Apr. 22, 2016.

ABSTRACT: [Purpose] To clarify whether or not differences can be observed after exercise in the level of fatigue and recovery characteristics of the dominant and non-dominant legs, and to help with determination of exercise prescription. [Subjects and Methods] The subjects were 11 healthy adults. After exercise on a bicycle ergometer, the dynamics of blood oxygen in the vastus lateralis were assessed for 10 minutes using near-infrared spectroscopy, and the temporal changes in total hemoglobin (ΔHbT), an index of fatigue, and differences between the dominant and non-dominant, and right and left legs were analyzed. [Results] No significant differences were found in the temporal changes of the dominant and non-dominant legs. However, in the differences between the right and left legs, ΔHbT of the dominant leg was significantly higher at 6 minutes, and showed a rising trend from 4 minutes, when the difference was not significant. [Conclusion] Consideration of the predominance of the dominant leg in muscle activity and fatigue could possibly be useful in both leg exercise tasks in physical therapy.

Key words: near-infrared spectroscopy (NIRS), muscle fatigue, dominant leg

要旨:〔目的〕両脚運動後の筋疲労の程度と回復特性について、利き足と非利き足で差がみられるのか否かを明らかにし、運動処方の一助とすることとした。〔対象と方法〕対象は健康成人 11 名とした。自転車エルゴメータ駆動後 600 秒における外側広筋の血中酸素動態を NIRS により評価し、疲労の程度を意味する total-Hb (ΔHbts) について、利き足と非利き足の推移と左右差を分析した。〔結果〕利き足と非利き足を問わず ΔHbts の推移には有意差を認めなかったが、左右差においては ΔHb360s で利き足が有意に高く、 ΔHb240s 以降で有意ではないものの高くなる傾向を示した。〔結語〕理学療法の両脚運動課題では、筋活動ならびに筋疲労における利き足の優位性を考慮することが有用となる可能性がある。

キーワード: 近赤外分光法, 筋疲労, 利き足

¹⁾ 福岡鳥飼病院 リハビリテーション部: 福岡県福岡市城南区鳥飼 6-8-5 (〒814-0103) TEL 092-831-6031

²⁾ 福岡市民病院 リハビリテーション部

³⁾ 専門学校 柳川リハビリテーション学院 理学療法学科

⁴⁾ 佐賀大学大学院 医学系研究科

⁵⁾ 国際医療福祉大学 福岡保健医療学部 理学療法学科

I. はじめに

理学療法の運動処方では、麻痺側や術側といった疾患側のほか、上肢では利き手の存在が考慮される。一方、利き足の定義には明確なものがなく、その役割が十分に考慮されていない。利き側とは、手や足など左右対となる器官の一侧が他方より認知的、運動的課題で成績が優れている現象¹⁾と定義される。利き足と非利き足の区別においては、主に体重を支える軸足に対して、ボールを蹴るといった比較的巧緻な動作を行う側が利き足²⁾と明記されることが多い。先行研究では、単関節運動時の大腿四頭筋機能や足把持機能には一侧の優位性が認められなかったとする報告³⁾がある。その一方、両脚運動である垂直跳び動作時の大腿直筋においては、非利き足よりも利き足で動員される運動単位数が多いことから、利き足の優位性を報告⁴⁾している。このように、利き足の定義は明確でないものの、単関節運動と両脚運動では利き足の優位性が異なることが示唆されている。このことは両脚運動時の利き足に筋疲労の違いを生じている可能性を示すが、その点に着目した報告はほとんどみられない。

そこで、本研究では両脚運動における利き足と非利き足の運動負荷実施後の筋疲労の程度ならびに回復特性について分析することとした。筋疲労の評価には、先行研究⁵⁻⁷⁾を参考に、近赤外分光法(Near Infrared Spectroscopy: NIRS)を用いた。NIRSは生体組織内のヘモグロビンと酸素との結合状態によって近赤外光の吸収特性が異なることを利用し、非観血的に血中酸素動態を計測する光計測法⁷⁾である。これまで脳内酸素動態の研究は数多く報告されており、近年では血中酸素動態から筋疲労評価の可能性を示唆している⁷⁾。しかし、運動実施後の回復特性について報告した研究例はまだ少ない。

本研究の目的は、運動負荷実施後の回復特性に着目して分析することでNIRSのさらなる有用性、ならびに利き足と非利き足における筋疲労の特徴を検討し、運動処方の一助となる新たな知見を得ることである。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は整形外科的および神経学的既往のない健常男女11名(男性6名、女性5名、年齢の平均±標準偏差: 25.9 ± 4.6 歳、身長: 164.9 ± 8.2 cm、体重: 56.6 ± 8.7 kg、BMI: 20.7 ± 1.8 kg/m²)とした。測定部位の皮下脂肪厚の影響を考慮するため、WHOの定義により肥満に該当するBMIが30 kg/m²以上の者は対象としなかった。また、利き足の設定は先行研究⁸⁾における「ボールを蹴る足が利き足である」との定義に従い、機能的に

働く足を聴取した。なお、対象11名の利き足は全て右側であった。

本研究はヘルシンキ宣言に従って、事前に研究の主旨を書面にて説明し、自由意志による参加を確認して実施した。なお、本研究は国際医療福祉大学の倫理審査委員会の承認を得て研究を開始した(承認番号: 13-1076)。

2. 方法

運動様式には、運動負荷の設定が簡易に行える自転車エルゴメータ(フクダ電子社製)を用いた。サドルの高さは、クランクの上向き垂直時を0°(上肢点)、下向き垂直時を180°(下肢点)とした際、下肢点で膝関節屈曲30°となるように設定した。また、下肢点にて足部をペダル中心上にベルト固定することで、代償動作が生じないように配慮した。

運動強度は、極端な高負荷量・低回転数および低負荷量・高回転数ではエネルギーロスし、運動効率が不良になる⁹⁾ため、1分毎に15 W漸増するRamp負荷法にて、対象者が一定のペダル回転数(60 rpm)を保てなくなるまで、もしくは自覚症状においてmodified Borg Scaleが最大の10.0に至る時点まで実施する程度とした。

運動の手順は、自転車エルゴメータ上の安静座位にて3分間の休息を取った後に駆動を開始し、運動終了後の疲労の程度を計測するため、駆動後は同じく自転車エルゴメータ上の安静座位にて10分間の休息を取ることを指示した。

分析方法として、駆動の主動作筋には種々の筋が考えられるが、先行研究^{10,11)}にて外側広筋の筋疲労が報告されているため、本研究の対象筋を外側広筋に設定した。NIRS(OEG-16, Spectratech社製)のプロープ貼付部位は先行研究¹²⁾を参考に、外側広筋の膝蓋骨12 cm上方の位置とし、左右それぞれに取り付け、送受光間距離は3 cmに設定した。プロープは760 nmおよび840 nmの2波長の光源部と受光部で構成され、組織への平均深度は光源部と受光部の距離の約半分となる¹³⁾ため、本研究の平均深度は皮膚表層より約1.5 cmと推定され、この範囲には脂肪が存在しないものと仮定して実施した。算出した項目についても先行研究⁷⁾を参考に、まず外側広筋の筋組織内の酸素化ヘモグロビン(OxyHb)と還元ヘモグロビン(DeoxyHb)における濃度長変化である $\Delta\text{Coxy} \cdot D$ と $\Delta\text{Cdoxy} \cdot D$ から、筋疲労の程度を意味する ΔHbts ($\Delta\text{Coxy} \cdot D$ と $\Delta\text{Cdoxy} \cdot D$ の差)の推移を求めた。次に、運動終了120秒後から600秒後までの間における120秒毎の ΔHbts を算出した。比較項目は、利き足と非利き足のそれぞれにおける120秒毎の ΔHbts の変化、ならびに利き足と非利き足における各 ΔHbts の差とした。統計学的解析には、計測値の分布の正規性と等分散性を確認した後、前者には一元配置分散分析、後者にはt検定を用いた。その際、

JSTAT for Windows を使用し、有意水準は 5% とした。

III. 結 果

外側広筋の ΔHbts の推移を表 1 に示す。利き足と非利き足のそれぞれにおける 120 秒毎の ΔHbts の変化において、分散分析では利き足と非利き足のどちらにおいても有意差を認めなかった。利き足と非利き足の間の比較においては、利き足の ΔHb360s が有意に高かった。また、 ΔHb240s 、 ΔHb480s 、 ΔHb600s は利き足で、 ΔHb120s は非利き足で有意でないものの高くなる傾向がみられた。

IV. 考 察

本研究では、運動負荷実施後の回復特性に着目して NIRS の分析を行い、利き足と非利き足における筋疲労の特徴を検討した。結果から、両側の外側広筋にはともにエルゴメータ駆動後 10 分に渡る筋疲労を生じるが、その程度は利き足が非利き足よりも優位にあることが示唆される。

ΔHb120s で非利き足の疲労が利き足より高くなる傾向がみられた要因には、運動終了後に酸素濃度が急激に上昇し、安静を超え 1~2 分でピークとなる高血流⁶⁾の影響が考えられる。また、筋活動後には動脈や静脈での血流の流入と貯留による運動性充血や運動後充血¹⁴⁾によって、筋の腫脹（高容積）を生じることが知られている。さらに、運動終了後には血管内や筋組織および組織間隙に血液や組織液が貯留するとされる。そのため、非利き足と比較して利き足の方が、過剰な水分の貯留により毛細血管の抵抗を高め、酸素の吸収を阻害したことにより、酸素吸収率が低下したものと考えられる。

また、 ΔHb240s から ΔHb600s で利き足が高い傾向を示した要因として、疲労の程度は筋活動量を反映していると考えられるため、両脚運動である自転車エルゴメータにおいて、利き足が優位に活動しやすい可能性が考えられる。先行研究では積分筋電図の上昇、ならびに周波数パワースペクトル中央値の低周波帯域への移行が運動開始 3 分後から認められたことや、酸素摂取量や心拍数の定常状態が認められなかったことから、組織への酸素の供給が不十分となり外側広筋の筋疲労を生じたことが示唆されている¹¹⁾。そのため、利き足の筋活動量が筋疲労に反映したものと考えられる。

本研究の限界として、NIRS により筋疲労の回復特性を定量的に評価できることの可能性が示唆されるものの、外側広筋の筋活動については不明な点がある。さらなる追究には筋電図を併用した検討が必要である。また、運動時の筋内酸素化レベルと運動後の酸素濃度の回復時間 (recovery time : Tr) は筋有酸素能力の指標とされてい

表 1 利き足と非利き足の ΔHbts の時間的变化

ΔHbts	利き足	非利き足
ΔHb120s	0.94 ± 1.43	1.01 ± 1.72
ΔHb240s	1.63 ± 1.12	1.27 ± 1.66
ΔHb360s	$1.36 \pm 0.96^*$	0.91 ± 1.41
ΔHb480s	1.22 ± 1.08	0.80 ± 1.15
ΔHb600s	1.08 ± 0.84	0.76 ± 1.13

* : $p < 0.05$.

るが、先行研究において正常域を対象とした例はみられない¹⁵⁾ことから、Tr についても追究が必要と考えられる。

以上のように、本研究は両脚運動である自転車エルゴメータを用いた運動負荷を行い、主動作筋の 1 つである外側広筋には、非利き足に比較して利き足での筋疲労が生じやすい可能性を示唆している。そのため、理学療法場面では麻痺側や術側といった疾患側を考慮するだけでなく、両脚運動課題では利き足が非利き足よりも優位に活動しやすいこと、ならびに筋疲労を生じやすいことの可能性を考慮し、運動処方を立案することが有用と考えられる。

引用文献

- 1) Touwen BC: Laterality and dominance. Dev Med Child Neurol, 1972, 14(6): 747-755.
- 2) 中村俊規, 橋本圭司, 小島秀吾・他: 利き手(利き目, 利き足)・半球機能—神経心理学と人間学的観点から—. 臨床精神医学, 2015, 44(増刊): 191-201.
- 3) 甲斐義浩, 村田 伸, 田中真一: 利き足と非利き足における足把持力および大腿四頭筋筋力の比較. 理学療法科学, 2007, 22(3): 365-368.
- 4) 升佑二郎, 駒形純也, 村松 憲・他: 垂直跳び動作における大腿直筋および大腿二頭筋の筋活動の左右差. 健康科学大学紀要, 2014, 10: 89-97.
- 5) 向井康詞, 朝野裕一, 熱田裕司: 近赤外分光法 (NIRS) による筋疲労評価の試み. 北海道理学療法, 1996, 13: 65-68.
- 6) 岩根久夫, 浜岡隆文: 近赤外分光法による生体内酸素動態の測定. 体力科学, 1995, 44(4): 475-480.
- 7) 村松慶紀, 小林 宏: NIRS による筋疲労の評価. 日本機械学会論文集, 2014, 80(814): DR0167.
- 8) 三上一貴: 軸足・利き足の検討. 理学療法研究, 1999, 16: 15-18.
- 9) 岩下篤司, 小西有人, 吉田正樹: ペダリング動作において一定仕事率での負荷量と回転数の組み合わせが下肢筋の筋活動へ及ぼす影響. 理学療法科学, 2013, 28(1): 135-139.
- 10) 樋口博之, 勝村俊仁, 浜岡隆文・他: ランプ負荷運動における外側広筋と大腿直筋の血液・酸素動態. 体力科学, 2000, 49(1): 183-191.
- 11) 池田由美, 竹井 仁, 富田 浩・他: 下肢筋疲労と運動負荷強度との関係. 理学療法科学, 1998, 13(1): 29-32.
- 12) 加藤幸司, 大西祥平: 間欠的運動時の局所骨格筋酸素動態

-
- の検討. 体育研究所紀要, 2006, 45(1): 7-12.
- 13) Patterson MS, Chance B, Wilson BC: Time resolved reflectance and transmittance for the non-invasive measurement of tissue optical properties. Appl Opt, 1989, 28(12): 2331-2336.
- 14) 鈴木正寛, 佐藤 崇, 小宮秀明: 上腕筋群における局所運動後の骨格筋の硬化と筋肉痛との関係. 理学療法科学, 2013, 28(3): 389-393.
- 15) 西尾進也: 近赤外分光法を用いた筋酸素能力の評価指標の正常域の設定およびその臨床応用. 東京医科大学雑誌, 1997, 55(2): 168-177.