

## 近赤外分光法を用いた健常筋の機能評価

浜岡 隆文

**要 旨**：近赤外分光法(NIRS)の筋代謝測定指標の生理学的妥当性に関するエビデンスについて解説した。とくに以下の点に着目した。1)NIRS を用いた肢の静脈血(動静脈酸素較差)の情報の取得には、複数箇所(3箇所)の測定が必要な場合がある。2)一時的動脈血流遮断時の脱酸素化率は筋酸素消費量を反映する指標となる。3)筋酸素消費量の回復時定数は、筋有酸素能の指標となる。

(J Jpn Coll Angiol, 2010, 50: 461-465)

**Key words**: exercise, muscle metabolism, muscle oxygenation, physiological validity

### はじめに

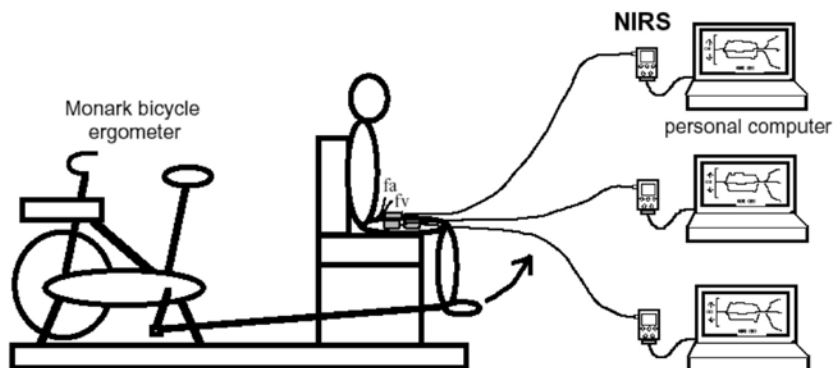
末梢筋の循環・代謝の非侵襲的測定法として用いられる近赤外分光法(NIRS)による筋酸素動態の測定において、NIRS シグナルの起源、シグナルの定量化、測定中の光学特性の変化等の物理学的問題点については、未だ解決されていない状況である<sup>1)</sup>。しかし、NIRS は、他の類似情報の測定機器である磁気共鳴分光法(MRS)、ポジトロン放射型横断層撮影法(PET)、超音波ドプラ法に比べて、小型、軽量、容易な操作性の点で優れている。この測定上の利点を生かして、これまでも健康科学や臨床科学分野における NIRS による筋酸素動態の測定が数多く行われてきた<sup>1)</sup>。

これまで用いられてきた NIRS 指標としては、酸素化レベル(酸素化ヘモグロビンおよびミオグロビン)、酸素化レベルの運動後の回復時間、運動時の酸素摂取量(一時的動脈血流遮断時の脱酸素化率)、運動初期の脱酸素化率およびその動態などがある。しかし、これらの指標が、既存の確立された信頼できる指標と同等の生理学的意義を有するか否かについての検証は必ずしも十分とはいえない。そこで本稿では、これまで確認されている NIRS 測定指標の生理学的妥当性に関するエビデンスについて解説する。

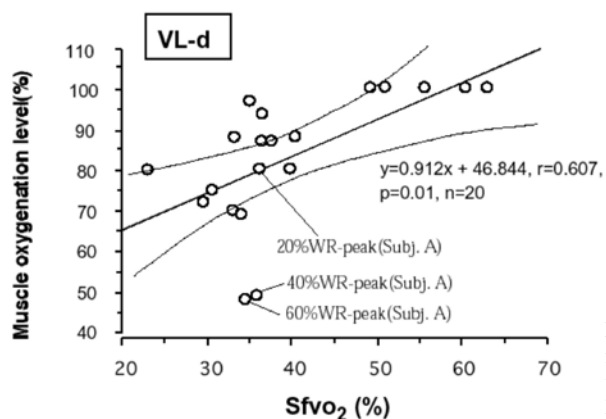
### NIRS 測定値と静脈血酸素飽和度との関連

NIRS により測定した筋酸素化レベルもしくは筋酸素飽和度が、静脈血酸素飽和度と一致するか否かについて検討した研究では、ほとんどの研究では両指標の一致を報告<sup>2-5)</sup>しているが、一致しないと報告<sup>6,7)</sup>もみられる。両指標が一致しないと報告されている場合には、理由の一つに、測定部位の違いが考えられる。つまり、NIRS 測定は局所筋のごく限られた部位での酸素化情報であり、一方、静脈血酸素飽和度は活動筋のみならず非活動部位を含めた肢全体の酸素化情報を反映するはずである。

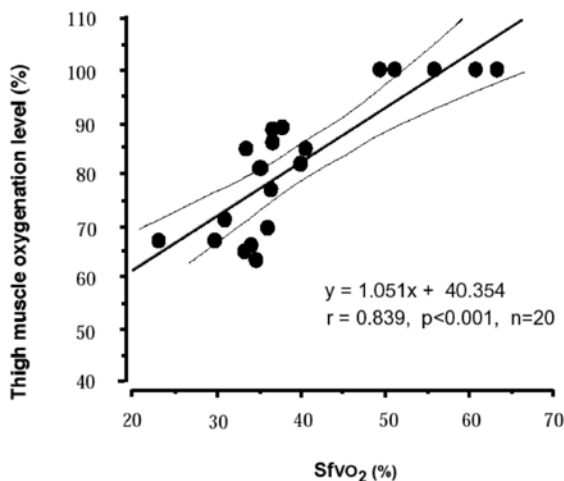
そこでわれわれは、NIRS の測定部位を 3 箇所(外側広筋近位部と遠位部、および大腿直筋筋腹)とし、筋酸素化レベルと静脈血酸素飽和度との関連を検討した<sup>3)</sup>(Fig. 1)。測定の結果、外側広筋遠位部においては、両指標の相関が低く、ばらつく傾向にあった(Fig. 2)が、3 箇所の筋酸素化レベルの平均値と静脈血酸素飽和度との相関は良好であり、ばらつきも小さくなる傾向となった(Fig. 3)。以上のことから、肢全体の酸素飽和度変化を NIRS により推測する場合には、1 箇所の測定ではその妥当性が低くなる可能性があり、その妥当性を高めるためには、複数箇所の測定を行う必要があることが示唆された<sup>5)</sup>。



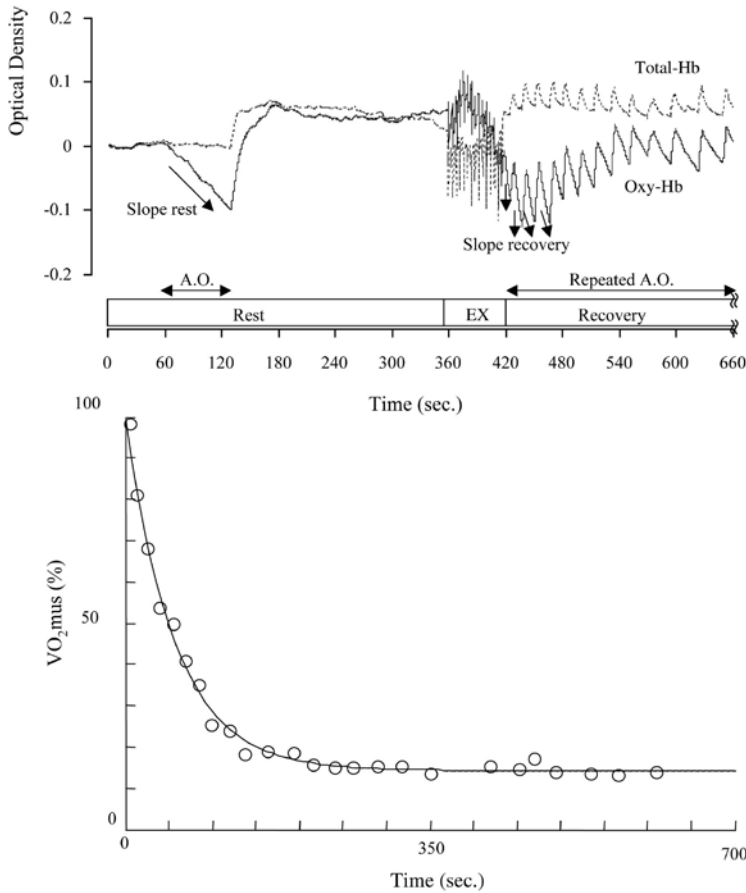
**Figure 1** Experimental setup. The subject was seated on a high chair. Two catheters were emplaced in the subject in the proximal direction in the right femoral artery (fa) and vein (fv), and the near infrared spectroscopy probe was placed in both the proximal and distal portion of the right vastus lateralis and in the rectus femoris, in which muscle oxidative metabolism was estimated.  
Revised from Eur J Appl Physiol, 2005, 95: 361–370.



**Figure 2** Correlation between muscle oxygenation level and femoral venous  $O_2$  saturation ( $S_{fv}O_2$ ) in distal region of the vastus lateralis (VL-d).  
Revised from Eur J Appl Physiol, 2005, 95: 361–370.



**Figure 3** Correlation between thigh muscle oxygenation level and femoral venous  $O_2$  saturation ( $S_{fv}O_2$ ). The thigh muscle oxygenation level values shown are the mean of the value of each individual's oxygenation level in the proximal region of the vastus lateralis, the distal region of the vastus lateralis, and the proximal region of the rectus femoris.  
Revised from Eur J Appl Physiol, 2005, 95: 361–370.



**Figure 4** Upper panel: Schematic representation of typical changes in muscle oxygenated hemoglobin and myoglobin (Hb/Mb). Schematic representation of muscle oxygen consumption ( $VO_{2mus}$ ) and typical changes in muscle oxygenated Hb/Mb at rest, during exercise, and recovery.  $VO_{2mus}$  was calculated from the rate of decline of oxygenated Hb/Mb during arterial occlusion at rest (Slope rest) and recovery period (Slope recovery). Lower panel: Typical kinetics of  $VO_{2mus}$  recovery after exercise. Time constant for this subject was 55.8 s. Revised from Dyn Med, 2004, 3: 2.

### NIRS 測定値と筋酸素消費量との関連

NIRSにより測定された指標は筋酸素化に関するものであり、筋代謝を特異的に評価するためには、筋酸素消費量の測定を行う必要がある。一時的動脈血流遮断法は、筋への酸素の供給を遮断することで、そのときの酸素化ヘモグロビンの低下率もしくは脱酸素化ヘモグロビンの増加率が筋での酸素消費量を反映することを応用した方法である。運動時の酸素消費量は、安静時の値に対する比として算出される。この方法で評価した運動時の骨格筋酸素消費量の測定の妥当性については先行研究<sup>8)</sup>により検証されている。その際の注意点としては、筋酸素化レベルが低下している最中にNIRSによりモニターされる総ヘモグロビン量が一定であること、運動後の一時的動脈血流遮断時の酸素化レベルが低下しすぎないこと、短時間の遮断により評価すること等があげられる。

### NIRS 測定値と筋有酸素能との関連

筋有酸素能は、有酸素トレーニングにより増加し、身体不活動や加齢により低下することが知られている。筋有酸素能の研究には、バイオプシーにより採取した筋標本による分析化学的手法が用いられていた。バイオプシー法の利点は非常に多種類の代謝物質の評価が可能なことにより特定の代謝経路を調べることができるが、侵襲的であるという欠点を有している。この点から、これまでヒトを対象として局所筋の有酸素能を測定することは容易ではなかった。

MRSを用いると筋内クレアチンリン酸(PCr)濃度が非観血的に測定でき、最大下運動後のPCrの再合成速度により筋有酸素能が評価されてきた<sup>8)</sup>。つまり、運動後のPCrの回復は酸素消費量を反映しており、McCullyら<sup>9)</sup>はMRSで測定したPCrの回復速度と筋バイオプシーによ

り得られたミトコンドリアの酸化系酵素活性値との間に有意な相関関係が認められることを報告している。

そこでわれわれは、NIRSによる筋酸素消費量の測定法を用いた筋有酸素能の評価方法を考案した<sup>10)</sup>。まず、安静時に一時的動脈血流遮断法により安静時の酸素消費量を求める。その後、最大下運動を行い、運動終了直後から10秒ごとまたは20秒ごとを目安に繰り返し動脈血流遮断を行う(Fig. 4 上段)。その際の酸素化ヘモグロビンの低下率(筋酸素消費量)を求め、安静時の低下率に対する割合を時系列でプロットする(Fig. 4 下段)。このプロットを基に酸素消費量低下の回復時定数を算出する。これまでの検討により、ギプス固定による筋機能の低下に伴い、酸素消費量の回復時定数が延長し、ギプス固定中に持久トレーニングを行うことにより、時定数が短縮することがわかっている<sup>10)</sup>。

### まとめ

1) NIRSを用いた肢の静脈血(動静脈酸素較差)の情報取得には、複数箇所での測定が必要な場合がある。

2) 一時的動脈血流遮断時の脱酸素化率は筋酸素消費量を反映する指標となる(ただし、MRSを併用すれば、酸素消費量の定量化が可能である)。

3) 筋酸素消費量の運動後の回復時定数は、筋有酸素能の指標となる。

### 謝 辞

本研究の一部は、科研費の助成(基盤研究B: 課題番号17300221)によって行われたことを明記し、深謝する。

### 文 献

1) Hamaoka T, McCully K, Quaresima V et al: Near-infrared spectroscopy/imaging for monitoring muscle oxygenation

and oxidative metabolism in healthy and diseased humans. *J Biomed Opt*, 2007, **12**: 62105–62120.

- 2) Boushel R, Pott F, Madsen P et al: Muscle metabolism from near infrared spectroscopy during rhythmic handgrip in humans. *Eur J Appl Physiol*, 1998, **79**: 41–48.
- 3) Wilson JR, Mancini DM, McCully K et al: Noninvasive detection of skeletal muscle underperfusion with near-infrared spectroscopy in patients with heart failure. *Circulation*, 1989, **80**: 1668–1674.
- 4) Mancini DM, Bolinger L, Li H et al: Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *J Appl Physiol*, 1994, **77**: 2740–2747.
- 5) Esaki K, Hamaoka T, Radegran G et al: Association between regional quadriceps oxygenation and blood oxygen saturation during normoxic one-legged dynamic knee extension. *Eur J Appl Physiol*, 2005, **95**: 361–370.
- 6) Costes F, Barthelemy JC, Feasson L et al: Comparison of muscle near-infrared spectroscopy and femoral blood gases during steady-state exercise in humans. *J Appl Physiol*, 1996, **80**: 1345–1350.
- 7) MacDonald MJ, Tarnopolsky MA, Green HJ et al: Comparison of femoral blood gases and muscle near-infrared spectroscopy at exercise onset in humans. *J Appl Physiol*, 1999, **86**: 687–693.
- 8) Sako T, Hamaoka T, Higuchi H et al: Validity of NIR spectroscopy for quantitatively measuring muscle oxidative metabolic rate in exercise. *J Appl Physiol*, 2001, **90**: 338–344.
- 9) McCully K, Fielding R, Evans W et al: Relationships between in vivo and in vitro measurements of metabolism in young and old human calf muscles. *J Appl Physiol*, 1993, **75**: 813–819.
- 10) Motobe M, Murase N, Osada T et al: Noninvasive monitoring of deterioration in skeletal muscle function with forearm cast immobilization and the prevention of deterioration. *Dyn Med*, 2004, **3**: 2.

## Functional Evaluation of Healthy Muscle Using Near-infrared Spectroscopy

Takafumi Hamaoka

Department of Sports Performance, National Institute of Fitness and Sports, Kagoshima, Japan

**Key words:** exercise, muscle metabolism, muscle oxygenation, physiological validity

This study reviewed the evidence for the physiologic validity of parameters determined using near-infrared spectroscopy (NIRS). It is concluded that 1) monitoring multiple sites would be needed for obtaining venous information of the extremities, 2) the deoxygenation rate during transient arterial occlusion is a reflection of muscle oxygen consumption, and 3) the time-constant for muscle oxygen consumption during recovery after exercise is a parameter for evaluating muscle oxidative capacity. (J Jpn Coll Angiol, 2010, **50**: 461–465)