

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24657169

研究課題名(和文) 血液酸素動態分析を用いた霊長類の歩行生理学の試み - 脳機能と筋活動を中心に -

研究課題名(英文) Applying NIRS in physiology of locomotion - with a focus on muscle activities

研究代表者

平崎 鋭矢 (Hirasaki, Eishi)

京都大学・霊長類研究所・准教授

研究者番号：70252567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：脳活動のイメージングに使われることの多いNIRS(近赤外線分光法)だが、単チャンネル計測では筋活動に関する報告もなされつつある。ただ、そうした研究の大半は、筋の生理学的特性の解明を目的としており、運動計測の手段としてNIRSを評価した例は少ない。本研究では、ヒト被験者が運動タスクを行なう際の筋の血液酸素動態をCW型NIRSで記録し、同時計測した筋電図およびビデオ映像を用いて、運動計測の手段としてのNIRS計測の可能性について検討した。その結果、筋の代謝、負荷、疲労を評価する際には有効であることが判明したが、反応の遅さや筋による血管圧迫、運動による加速度の影響など、克服すべき点も明らかになった。

研究成果の概要(英文)：NIRS technology has mainly been used to visualize cortical activities of the brain. Although one- or two-channel cw (continuous waveform) system is now increasingly used for muscle activity measurements, those studies mostly aim to elucidate muscles' physiological property. In this study, we recorded NIRS signals from human subjects during their motor tasks, and investigated potential benefits of NIRS technique in locomotion analysis. Results showed that the cwNIRS signals sampled at 60Hz corresponded well to the muscle activities; the oxyhemoglobin (O<sub>2</sub>Hb) concentration decreased when muscles were recruited. The baseline of modulation was lowered as muscle activity continued, corresponding to muscle fatigue. However, reaction rate seemed low. Muscle contraction itself becomes an artifact by inducing peristalsis. Although the NIRS signal is potentially useful as measure of fatigue and exercise intensity, there are several issues which require to be addressed in future studies.

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・自然人類学

キーワード：生体機構 ロコモーション

### 1. 研究開始当初の背景

(1) NIRS (近赤外分光法) とは、脳や筋といった生体組織の活動を、血液中のヘモグロビンの酸化状態とその変化 (血液酸素動態) を指標に調べようとする手法である。ヘモグロビンの酸化状態は、近赤外光を皮膚外部から照射し、組織を透過してきた光を分析することによって行う。近赤外光を使うのは、生体組織に対して透過性が高いためである。非侵襲的な計測方法であり、最近では装置が小型化されたこともあり、手軽に生体組織の活動を調べられる方法として注目されている。

(2) 多チャンネル計測によるトポグラフィが脳活動のイメージングに使われることの多い NIRS だが、このアプローチが有効なのは脳活動の分析に限らない。筋の局所的血液酸素動態を知ることは、運動時の筋の代謝や機能の理解に重要な貢献をなし得る。近年、少数チャンネルの cw (持続波) 型 NIRS の筋への応用が進み、知見も蓄積しつつある。ただ、そうした研究の大半は、筋の生理学的特性の解明を目的としており、運動計測の手段として NIRS を評価した例は少ない。

(3) 一方、ロコモーション時の四肢体幹の動きは、筋電図、運動学等などの手法で調べられてきた。しかし、そうした手法で計測できるのは、中枢由来の電気信号と、出力としての機械的活動であり、両者をつなぐ局所的代謝活動についてはほとんどわかっていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、運動時の筋の代謝を計測する手段として、NIRS 計測が持つ可能性について検討する。具体的には、ヒト被験者が歩行を含む運動タスクを行なう際の筋の血液酸素動態を 2 チャンネルの cw 型 NIRS で記録し、運動を記録したビデオ映像を用いて筋収縮と NIRS 信号の変化の対応付けを行う。また、同時に計測した筋電図との比較・検討も行なう。

### 3. 研究の方法

携帯型近赤外線組織酸素モニタ装置「Pocket-NIRS」(ダイナセンス社、浜松) を用い、ヒト被験者 (成人男子 2 名) が、運動タスクを行なう際の筋の血液酸素動態を記録した。運動タスクは、手根関節屈曲 (前腕屈筋群)、立位前傾、歩行 (いずれも腓腹筋内側頭) であった。

センサープローブ (8.7cm × 2.8cm, 10g) はゴム製で、送光部と受光部が収納されている。両者の間の距離は 3cm とした。一般に、NIRS 計測では、送受光部間距離の半分程度の深さの血液酸素動態を計測できると言われており、今回の条件では皮膚表面から 1.5cm 程度の部位を計測することになる。プローブは電気的な結線でコントローラ (10cm × 6cm × 1.85cm) につながり、信号はそこから Bluetooth 無線通信でホストコンピュータに

送られた。

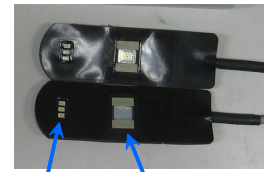


図 1. NIRS センサープローブ

同時に、同じ筋の筋電図記録も行なった (表面電極、Digitimer 社信号増幅器、Powerlab を使用)。電極はプローブにできるだけ近接させて置いた。NIRS と筋電図の同期については、同一スイッチで両者にそれぞれ 5V の信号を送ることによって確保した。また、同じスイッチで LED を発光させることで、ビデオ映像との対応もとった。

### 4. 研究成果

(1) 前腕屈筋群の低い周波数 (約 0.4-0.8Hz) での活動時における、血液中の酸化ヘモグロビン濃度変化 (oxy-Hb: 赤線)、脱酸化ヘモグロビン濃度 (deoxy-Hb: 青線) およびその和 (total-Hb: 緑線) の変化を図 2 に示す。まず、筋の収縮開始とともに、血流の急激な減少が見られた (図 2 の ①)。これは血管が圧迫されたためと考えられる。その後、酸化ヘモグロビン濃度は減少を続け、一方、脱酸化ヘモグロビン濃度は上昇に転じる (図 2 の ②)。血流量は徐々に回復する。酸化ヘモグロビン濃度の減少と脱酸化ヘモグロビン濃度の増加は、筋の活動によって局所的な酸素消費量が増加したことを示す。脳計測の場合は、活動している部位は酸化ヘモグロビン濃度が増加すると言われているが、筋活動の場合は逆の状態となった。

筋収縮が終了すると、酸化ヘモグロビン、脱酸化ヘモグロビンとも、ほぼ元のレベルに戻る (図 2 の ④)。ここに示すケースでは、収縮に力を入れすぎたためか、回復後に hypermia (充血) が見られた (図 2 の ③)。

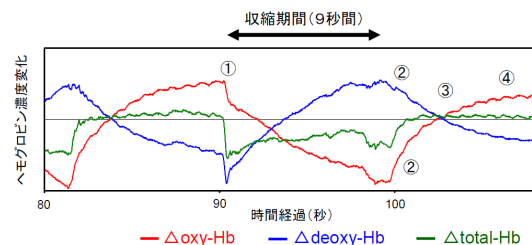


図 2. 前腕屈筋群の収縮時における NIRS 信号。

(2) 前腕屈筋群が約 0.4-0.8Hz で 125 秒間に渡って反復活動した際の酸化ヘモグロビン濃度、脱酸化ヘモグロビン濃度、血流量、および同時計測した筋電図 (EMG) の変化を図 3 に示す。125 秒間の活動全体を俯瞰すると、

開始直後に3つの波形は全て一旦降下する(筋による圧迫)。酸化ヘモグロビン濃度はその後降下を続け、脱酸化ヘモグロビン濃度と血流量は開始5秒前後から上昇に転じ、いずれも40秒前後でプラトーに達する。個々の収縮に対する反応(図3の細かな変動)を見ると、オレンジ色の縦線(図3の )で例示するように、筋の活動時に酸化ヘモグロビン濃度は降下し、脱酸化ヘモグロビン濃度は上昇する。(1)で述べた通りである。筋が収縮を継続している時に、その傾向は顕著となる(図3の )。筋活動と概ね対応していたと言える。ただし、筋電図の振幅とNIRS信号の振幅の間に明確な相関は無かった。

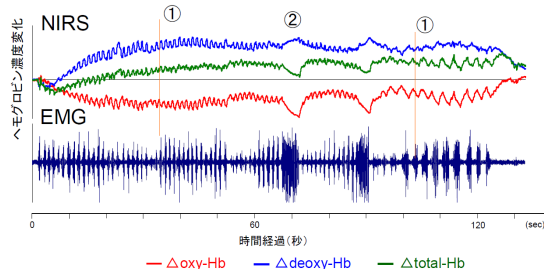


図3 . 前腕屈筋群の収縮における筋電図(EMG)とNIRS信号の対応 .

(3) 同一筋内で、計測場所の違いによるNIRS信号の変異を調べた例を図4に示す。酸化ヘモグロビン濃度bはCH1(近位部)とCH2(遠位部)で似た変化を示したが、脱酸化ヘモグロビン濃度の波形はCH間で大きく異なった。CH1では筋の収縮中に脱酸化ヘモグロビン濃度は降下するのに対し、CH2では上昇する(矢印。オレンジ点線の部分で明確)。CH1の部位では、筋収縮による血管圧迫が強かったのかもしれない。NIRSでは、EMGの場合以上に計測場所の影響を受けることを念頭において、計測前の波形チェックを入念に行うことが必要である。

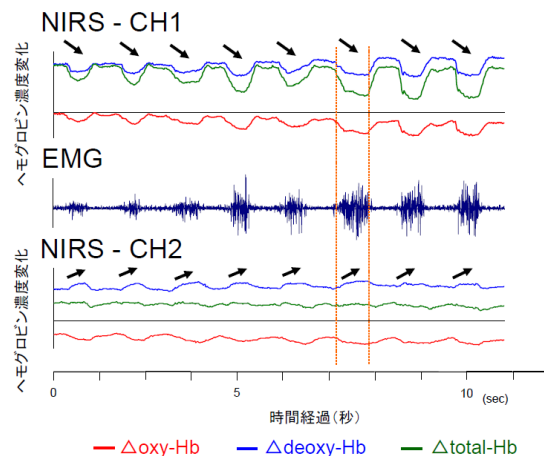


図4 . プローブの装着位置によってNIRS信号は異なる場合がある .

(4) 静止立位から10秒間の前傾姿勢を複数回繰り返した際の腓腹筋内側頭の活動を図5に示す。波形全体を俯瞰すると、被験者2名ともにおいて、筋の収縮とともに脱酸化ヘモグロビン濃度のレベルが上昇していた。しかし、個々の筋収縮について詳細に波形を観察すると、被験者間に相違が見られた。被験者1では、前傾姿勢への移行時にNIRSの3波形はいずれも階段状の上昇を示したが、被験者2では逆に減少した(矢印)。被験者2では、筋の収縮による血管の圧迫が強かったのかもしれない。この違いは、被験者間の戦略の相違か、プローブ設置の位置の相違によるものなのか、現時点では不明である。

また、前腕のケースと異なり、筋収縮の終了後に、血流量は回復するのではなく、急激に下降した(\*)。これは、直立姿勢と関わるのかもしれない。収縮の圧迫によって保持されていた血液が、筋の弛緩とともに重力によって下降したと考えられる。ただし、被験者2のdeoxy-Hbのみは、筋収縮終了時に急激な増加を示した。現時点では解釈できず、今後の課題とする。

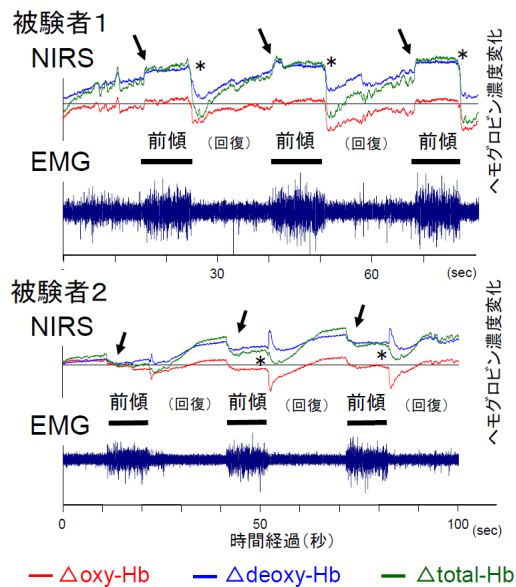


図5 . 前傾姿勢時の腓腹筋内側頭の収縮によるNIRS信号と筋電図信号 .

(5) 短い歩行路を3往復した際の、腓腹筋内側頭の筋電図とNIRS信号を図6に示す。NIRSプローブは筋電図電極の近位隣(CH1)と遠位隣(CH2)に装着した。全体としては、歩行開始とともに3波形とも降下し、終了後に元のレベルに向けて回復した。しかし、全てのヘモグロビン濃度変化が筋の収縮と明確に対応していたわけではなかった。歩行時には、血流量の変化が筋代謝以外の要因(例えば、下肢の振子運動から生じる求心加速度)

によって影響を受けるのかもしれない。他のケースとは異なり、酸化ヘモグロビン濃度のレベルが常に脱酸化ヘモグロビン濃度より高く、この理由も不明である。今回の実験では、歩行路、計測時間とも短かった。トレッドミルを用い、定常歩行のデータを多く集める必要がある。

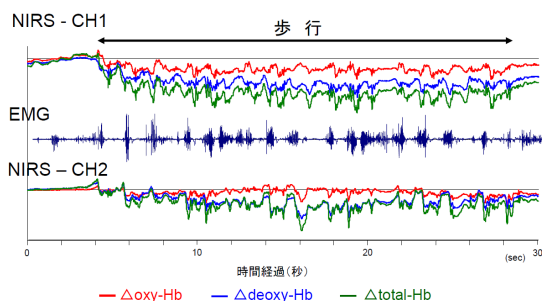


図6 .歩行時の腓腹筋内側頭収縮によるNIRS信号と筋電図信号。

(6) 今回の検討から、ロコモーション分析の手段としてのNIRS計測の長所と短所が明らかになった。長所としては、まず、非侵襲的、手軽、かつリアルタイムに筋の活動パターンを記録できる点が上げられる。特に、今回用いたPocket-NIRSは無線式かつ軽量であるため、自然な動きが計測できた。筋電図では周波数分析をしなければわかりにくい疲労の情報が目に見える形で得られることも大きな利点である。また、ロコモーション分析は複数の装置を用いることが多いが、NIRS信号は光によるため他の電氣的装置との干渉が少ないことも有利な点と言える。今回は行わなかったが、工夫次第で筋の詳細な代謝情報を測定できる可能性もある(一時的動脈血流遮断法など)。

一方、短所としては、空間分解能が悪い(プローブが大きい。光源と検出器の間に数cm必要) 得られるデータは相対的な変化であり、チャンネル間の直接比較や非連続的なデータの直接比較は難しい(赤外線照射から受光までの光路長が不明かつ変動するため) NIRS信号はHb濃度だけを反映しているわけではない(20%程度はミオグロビンも関ると言われる) 皮下脂肪が厚いと信号が減衰する、といったことが挙げられる。

については、送受光部間距離を短縮することで解決する。現在、開発業者とともに検討中であるが、既に述べたように送受光部間距離が短くなれば計測対象部位は浅くなる。例えば、送受光部間距離を5mmとすると、皮膚表面から深さ約2.5mm付近の部位を計測していることになり、筋活動を捉える手段としては適切ではなくなる。注意が必要である。は筋電図計測にも付き纏う問題であり、安静

時の値、運動時の最大値、動脈血流遮断時の最低値などを基準に補正するしかない。については、現在のところ分離する手段は無く、には修正法が提案されてはいるものの広く認められてはならず、いずれも今後の課題である。

(7) 本研究では、当初は、歩行時の皮質運動関連領域の局所的血液酸素動態を調べることも視野に入れていた。しかし、初年度の配分額が計測に不可欠なNIRS装置一式の価格を下回り、装置全体の購入完了が2年目にずれ込んだため、実験計画にも予定から約1年のずれが生じた。2年間の研究期間において、1年のずれは大きく、現時点では回収できていない。つまり、2年目に予定していた皮質運動関連領域の局所的血液酸素動態については、まだ計測を継続中である。成果が得られ次第、学会発表や論文等を通じて発信する。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

平崎 鋭矢、森 大志、NIRS信号を用いた筋活動分析の試み、第67回日本人類学会大会、2013年11月3日、つくば市。

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.pri.kyoto-u.ac.jp/shinka/keitai/members/hirasaki/research\\_hirasaki.htm](http://www.pri.kyoto-u.ac.jp/shinka/keitai/members/hirasaki/research_hirasaki.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平崎 鋭矢 (HIRASAKI, Eishi)  
京都大学・霊長類研究所・准教授  
研究者番号：70252567

### (2) 研究分担者

森 大志 (MORI, Futoshi)  
県立広島大学・保健福祉学部・教授  
研究者番号：50301726