



# 低酸素運動における前頭部多チャンネル NIRS と前額部パルスオキシメータの 同時測定の試み

— NIRS 信号の拍動成分の意味 —

栗田太作 (情報教育センター) 寺尾 保 (スポーツ医科学研究所)  
瀧澤俊也 (医学部内科学系神経内科) 沓澤智子 (健康科学部看護学科)  
灰田宗孝 (医療技術短期大学看護学科) 八木原 晋 (理学部物理学科)  
両角 速 (体育学部競技スポーツ学科)

A Trial of Simultaneous measurements using Multichannel NIRS for Frontal area  
and Pulse oximetry for Forehead during Acute hypoxic exercise

Daisaku KURITA, Tamotsu TERAOKA, Shunya TAKIZAWA, Tomoko KUTSUZAWA,  
Munetaka HAIDA, Shin YAGIHARA and Hayashi MOROZUMI



## Abstract

We measured multichannel near-infrared spectroscopy (NIRS) for frontal area and pulse oximetry for forehead simultaneously, in two male subjects during acute hypoxic exercise. Apparent  $SpO_2$  (App- $SpO_2$ ) value was defined by using the pulsatile component of the NIRS signals, oxy-hemoglobin and deoxy-hemoglobin. App- $SpO_2$  and  $SpO_2$  were measured during following six periods, at rest (6 minutes), walking exercise(6 minutes) by treadmill at a speed as fast as possible, and after exercise(6 minutes) in hypobaric chamber under the altitude of 0m (1013 hPa) and 1500m (837 hPa) conditions continuously. The time course of changes in App- $SpO_2$  and  $SpO_2$  values were different in nearly symmetric forehead areas during six periods, though the change in App- $SpO_2$  value with oxygenation was synchronized in another NIRS channel area during walking exercise under the altitude of 0m and 1500m conditions. Our trial suggests that App- $SpO_2$  may be a useful tool to see a brain oxygenation states unaffected by skin blood flow. (Tokai J. Sports Med. Sci. No. 25, 79-87, 2013)

## I. 緒 言

多チャンネル近赤外分光法 (NIRS) を用いた

光脳機能イメージングは、頭皮上に設置した複数の  
のオプトード (光照射部と光検出部の対) の組み  
合わせで得られた検出光データを用い、修正ビ  
ア・ランバート則により<sup>1)</sup>、脳内の酸素化ヘモグ

ロビン (HbO) および脱酸素化ヘモグロビン (HbR) 濃度長変化 (NIRS 信号) を求め、その経時変化より血液血行動態反応、またはその空間的分布より脳賦活領域を可視化する非侵襲的な技術である<sup>2)</sup>。

この技術は、脳のみならず筋にも応用され、急性低酸素状態における脳の酸素化と運動パフォーマンスの関連の研究がなされている<sup>3)</sup>。この研究では、脳や筋の酸素状態を評価する非侵襲的な測定法として、NIRS の有用性を提示している。

しかしながら、酸素状態を示す HbO および HbR 濃度長は、脳においては主に 2 つの問題点が存在している。1 つは、局所の脳内光路長が不明のためヘモグロビン濃度が直接求まらず、単位が濃度と光路長の積となり、濃度を定量化したのではなく、特定部位の被験者間の直接的な比較ができないことである。もう 1 つは、NIRS 信号に皮膚血流の変化などの生理的アーチファクトが混在しても、検出光として区別できないことである。特に前額部皮膚血流変化は、交感神経支配により課題と同期して変化する場合があり、前頭葉賦活による NIRS 信号との区別が困難となる<sup>4,5,6)</sup>。

従来、高速サンプリングが可能な多チャンネル NIRS 装置では、全チャンネルで NIRS 信号上を拍動する成分が確認されていた。この成分は、生体情報としてはアーチファクトと見なされ、平滑化やフィルタリングにより波形処理され、血液血行動態反応による HbO および HbR の経時変化のみ評価の対象となっていた。しかし近年、光変調技術として CDMA (符号分割多重: Code Division Multiple Access) 方式を採用した NIRS 装置では、高速サンプリングに加え、高い信号対ノイズ比 (SNR) を実現し<sup>7)</sup>、NIRS 信号上に出現する拍動成分の波形プロファイルが明確となり、その振幅や周期の変化が解析できるレベルまで向上した。特に HbO は元より、HbR の拍動成分の SNR が著明に改善され、これら拍動成分が何らかの生体情報と見なされるようになった。その一方で、パルスオキシメータ (POM) で観測される脈波が、NIRS 信号上の拍動成分と酷似し

ていることも認識されるようになった。POM は、計測された脈波から脈拍数や経皮的動脈血酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>)、すなわち皮膚に分布する末梢細動脈の酸素状態を百分率として数値化する。それに対し、NIRS 信号は一般的に毛細血管レベルのヘモグロビンを反映すると考えられているため、その拍動成分を適切に処理することにより、脳においては脳内の酸素状態を定量化できる可能性がある。

そこで我々は、パイロットスタディとして前頭部 NIRS 信号上の拍動成分を定量化するために、見かけの動脈血酸素飽和度 (App-SpO<sub>2</sub>) を定義した。そして、低酸素運動における前頭部多チャンネル NIRS と前額部 POM の同時測定を行ない、App-SpO<sub>2</sub> と SpO<sub>2</sub> の経時変化から、App-SpO<sub>2</sub> が、皮膚の影響を受けずに脳内の酸素状態を反映しているか検討した。

## II. 方 法

対象者は、東海大学に所属している男性健康人 2 人 (年齢 22 歳、右利き) である。これら被験者は、高地トレーニングや低酸素トレーニング未経験者である<sup>8)</sup>。低圧負荷は、低圧室を使用し標高 0 m (1013hPa) と 1500m (837hPa) に設定した。減圧速度はおよそ 10 分で 1500m とした。18℃ に設定した低圧室内で、運動負荷はトレッドミルによる歩行運動 (傾斜 1 度) とし、運動強度は被験者ができるだけ速く歩行できる速度とした。被験者 1 では時速 5.7km、2 では時速 5.5km であった。また各被験者の運動強度は、標高 0 m と 1500m で同じ時速とした。低圧運動負荷プロセスは、連続的にまず標高 0 m で運動負荷前の安静として椅子座位 3 分と立位 3 分の計 6 分、運動負荷を 6 分、運動負荷後の安静として立位 3 分と椅子座位 3 分の計 6 分とした。その後およそ 10 分で減圧し標高 1500m とし同様に、運動負荷前を 6 分、運動負荷を 6 分、運動負荷後を 6 分、そしておよそ 10 分で加圧し標高 0 m とした。この運動負荷

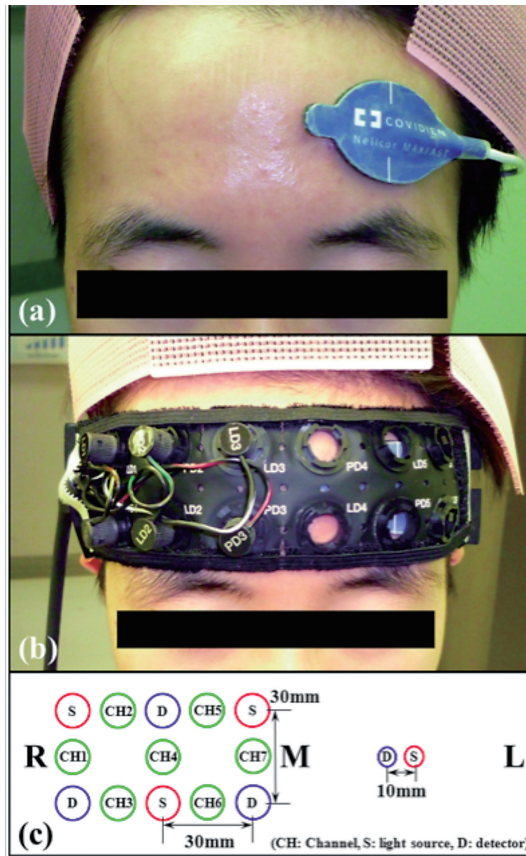


図 1 被験者のセンサーの配置

- (a) 前額部左にパルスオキシメータの専用センサーを設置した様子
- (b) 前頭部にセンターバンドを装着し NIRS センサーを右側に設置した様子
- (c) NIRS の7チャンネルとパルスオキシメータのセンサーのシエマ

Fig. 1 Optodes arrangement on subject

- (a) The pulse oximetry optode attachment on the left forehead.
- (b) The NIRS optodes arranged on the right forehead.
- (c) Schematic view of seven NIRS channels between light source and detector, and pulse oximetry optode.

における 6 分間歩行運動は、呼吸器疾患の診断を行う際、臨床の場で行われている方法であり<sup>9)</sup>、また以前我々の行ったアスリートを対象とした測定では、約 6 分間で各種パラメータが変化する時間でもある<sup>10)</sup>。

各被験者の低圧運動負荷における運動強度判定には、RPE (Ratings of Perceived Exertion：主観的運動強度) を用いて点数化した。

尚、低圧運動負荷における測定は、東海大学が定める「人を対象とする研究計画書」を提出し承認を受けた。被験者に書面による同意説明を行った。

測定装置は、多チャンネル NIRS に

Spectratech 社製 OEG-SpO<sub>2</sub>を、前額部 POM に NELLCOR 社製 N-600x を<sup>11)</sup>、また通常の手指 POM にコニカミノルタセンシング社製 PULSOX-Me300を使用した。図 1-(a) に被験者の前額部左に専用 POM センサーを設置した様子を示す。この前額部 POM センサーの送受光部の間隔は 1cm である。図 1-(b) に前頭部右に多チャンネル NIRS のセンターバンドを装着し近赤外光送光部と受光部センサーが 2 行 3 列で交互に 3 cm 間隔で配置した様子を示す。前額部 POM、N-600x はサンプリング時間が 2 秒で前額部左からの SpO<sub>2</sub>と脈拍数が得られる。手指 POM、PULSOX-Me300はサンプリング時間が 1 秒で右第 2 指から

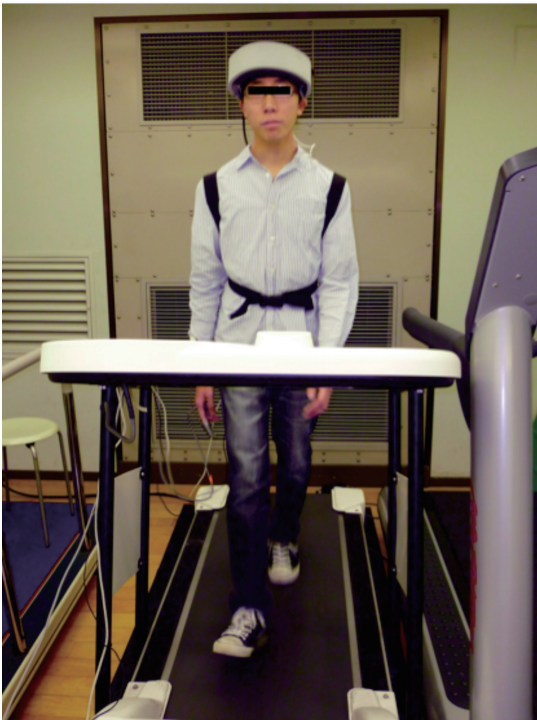


図2 各種センサーを装着し NIRS 装置を背負った被験者が低圧室内で運動負荷を行っている測定風景

Fig. 2 A subject attached optodes and shouldered NIRS apparatus during walking exercise by treadmill in hypobaric chamber.

の  $SpO_2$  と脈拍数が得られる。多チャンネル NIRS 装置 OEG- $SpO_2$  は、送光部波長が 770 と 840nm でサンプリング時間が 0.081 秒である。NIRS 信号の測定点、すなわちチャンネルは、赤外光送光部と受光部センサーの midpoint である。各々のセンサーは、図 1-(b) で示したように前額部右のみの配置であるため、7 チャンネルとなる。図 1-(c) に送光部と受光部センサーとチャンネルの関係をシェーマで示す。また、NIRS 装置 OEG- $SpO_2$  は、光変調技術として CDMA 方式を採用しているため<sup>7)</sup>、回路規模縮小化に優れ、装置自体の携帯性と軽量化を実現し、実際、被験者がこの装置を背負い計測可能である。低圧室内で各種センサーを装着し、NIRS 装置を背負った被験者が運動負荷を行っている測定風景を図 2 に示す。

修正ビア・ランバート則に基づく<sup>1)</sup>、各チャンネルの HbO および HbR の濃度長、すなわち NIRS 信号の経時変化は、適切なバンドパス処理

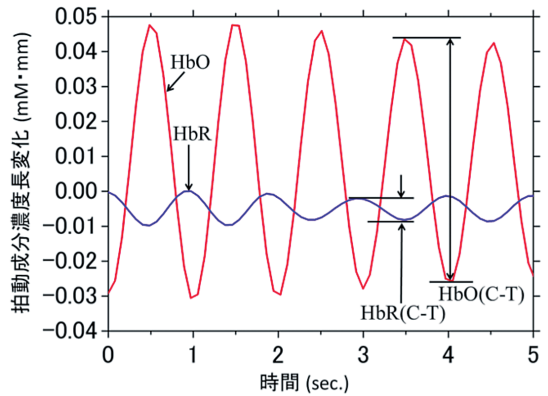


図3 適切なバンドパスフィルタ後の HbO (赤) および HbR (青) の拍動成分の経時変化 (5秒間) . HbO(C-T) および HbR(C-T) は各拍動成分における山から谷の強度を表す。

Fig. 3 The time course of changes in pulsatile components of HbO (red) and HbR (blue) after appropriate band pass filtering. HbO(C-T) and HbR(C-T) represent the intensity from the crest to the trough of each pulsatile component.

により拍動成分が抽出される。それら拍動成分を有する波形を図 3 に示す。ここで HbO および HbR の 1 拍動内での山 (C: crest) から谷 (T: trough) の強度を取り出し、次に示す校正式 (A) により、脳内の見かけの動脈血酸素飽和度 (Apparent  $SpO_2$ 、以下 App- $SpO_2$ 、単位は%) を定義した。

$$App-SpO_2 = \frac{HbO(C-T)}{(HbO(C-T) + HbR(C-T))} \times 100 \quad (A)$$

この (A) 式は、POM による  $SpO_2$  と同じ型であるが、HbO (C-T) および HbR (C-T) の単位が濃度長である。“App- $SpO_2$ ” と表現したのは、通常の POM は 2 波長の信号強度の比から、校正曲線により直接  $SpO_2$  を算出するためである。

### Ⅲ. 結果および考察

被験者 1 と 2 の低圧運動負荷プロセスにおける右前頭部の App- $SpO_2$ 、HbO、HbR の経時変化を図 4-(a) と (b) にそれぞれ示す。被験者 1 において、チャンネル 5 の App- $SpO_2$  は、標高 0 m および 1500m の 6 分間歩行運動中、低下が認めら

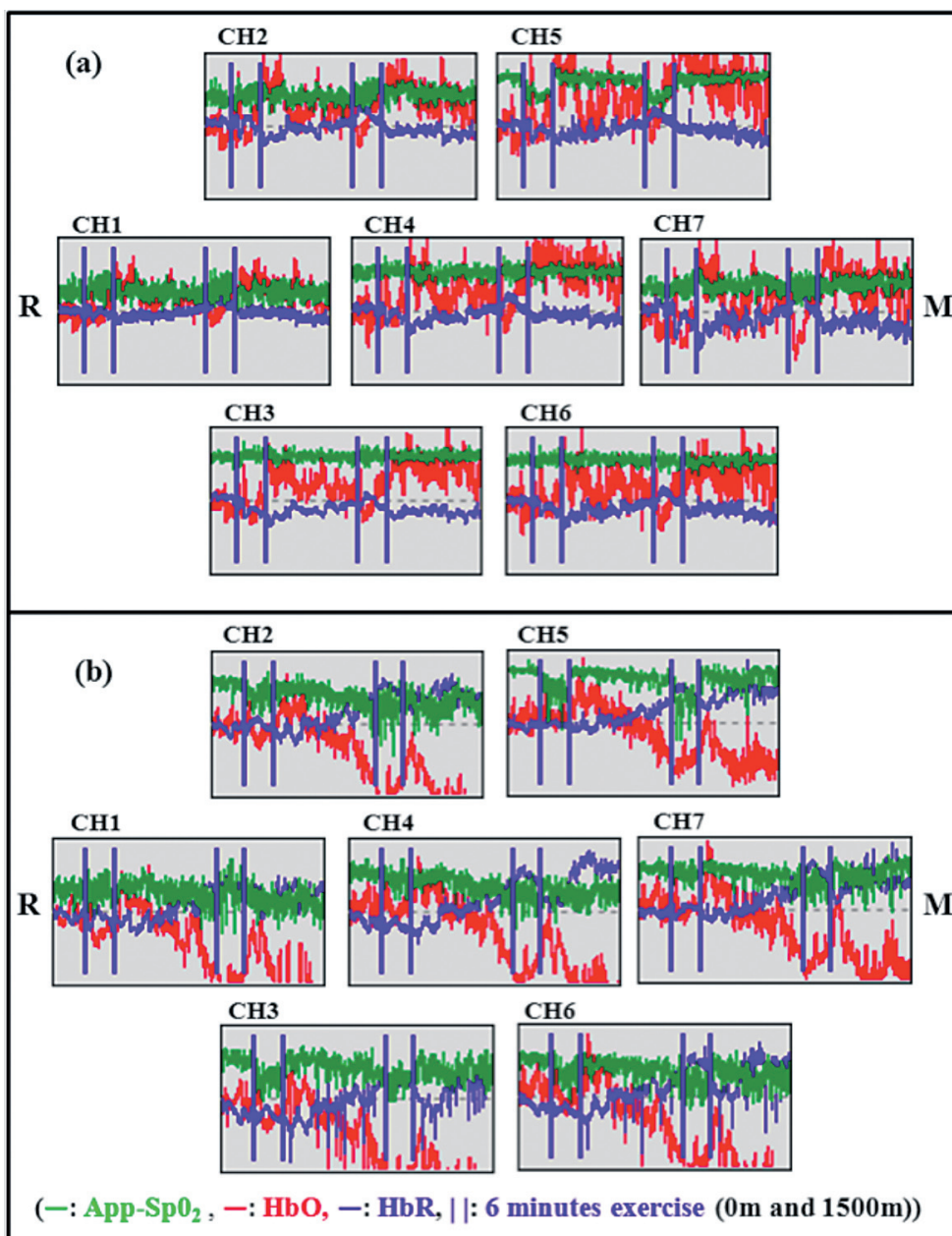


図4 低圧運動負荷プロセスにおける右前頭部での App-SpO<sub>2</sub>、HbO、HbR の経時変化 (被験者1 : (a)、被験者2 : (b))

Fig. 4 The time course of changes in App-SpO<sub>2</sub>, HbO and HbR in region of the right frontal area during the process of the rest and 6 minutes walking exercise under the altitude of 0m and 1500m conditions on subjects 1 (a) and 2 (b).

Number	Expressions
6	No exertion at all
7	Extremely light
8	
9	Very light
10	
11	Light
12	
13	Somewhat hard
14	
15	Hard (heavy)
16	
17	Very hard
18	
19	Extremely hard
20	Maximal exertion

	Subject 1	Subject 2
0 m	10	12
1500m	10	13

表1 RPE スケールと被験者の低圧運動負荷中の判定

(a) RPE スケール

(b) 二人の被験者の6分間低圧歩行運動中の判定

Table 1 Rating of Perceived Exertion (RPE) Scale and scores of two subjects during 6 minutes walking exercise under altitude 0m and 1500m conditions.

(a) RPE Scale.

(b) RPE scores of two subjects during 6 minutes walking exercise under altitude 0m and 1500m conditions.

れ、その他のチャンネルでは顕著な変化が認められなかった。また、HbO と HbR は、1500m では運動開始直後 HbO は低下し、その後急速に増加して運動前以上となった。この HbO の変化に対して HbR の変化は少ないが鏡像的に増加し、その後減少した。HbO の増加と HbR の低下は 0m および1500m の 6 分間歩行運動後にすべてのチャンネルで認められた。

被験者 2 において、チャンネル 2、3、5、6 の App-SpO<sub>2</sub> は、標高 0m および1500m の 6 分間歩行運動中、低下が認められ、その他のチャンネルでは顕著な変化が認められなかった。減圧中 App-SpO<sub>2</sub> は軽度低下、HbO は低下、HbR は増加を認めた。HbO は1500m の歩行中では増加に転じた。この HbO の変化に対して HbR は鏡像的な減少を認めた。HbO の増加と HbR の低下は、0m および1500m の歩行運動後にすべてのチャンネルで認められた。

表 1-(a) にスポーツ医学でよく用いられる

RPE (主観的運動強度) を示す。表 1-(b) に、この RPE 基づいた被験者 1 と 2 における標高 0m および1500m の 6 分間歩行運動中の RPE 判定を示す。被験者 1 ではそれぞれ10と10で、おおよそ“楽である”のに対し、被験者 2 では12と13で、おおよそ“ややきつい”と申告した。

低圧運動負荷プロセスにおける右前頭部での HbO、HbR の経時変化は、各々の被験者で 6 分間歩行運動中および運動後、同様な増減を示したが、被験者 2 において減圧し標高1500m に至るプロセスで HbR 増加、HbO 減少を示した。また、RPE 判定において、被験者 1 ではおおよそ“楽である”のに対し、被験者 2 ではおおよそ“ややきつい”と申告した。従って、被験者 2 では、減圧により脳内酸素状態が軽度に低下したと考えられ、App-SpO<sub>2</sub> も軽度に減少傾向を示している。あるいは低圧室という閉所による心理的要因による脳内酸素化の変化かもしれない。

被験者 1 と 2 の低圧運動負荷プロセスにおける

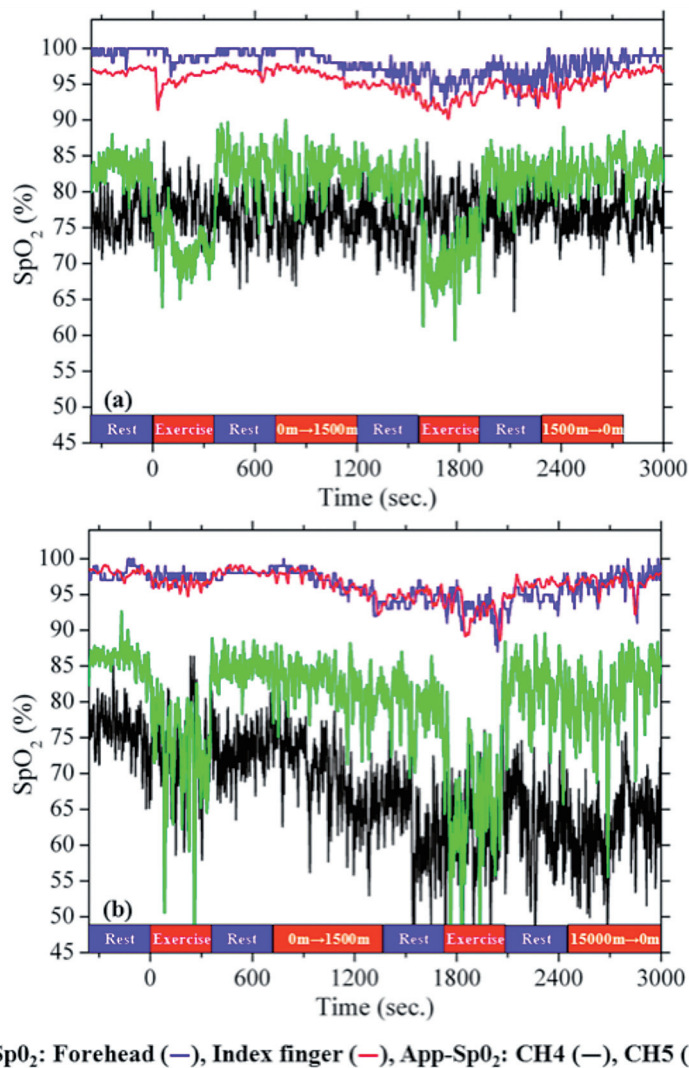


図5 低圧運動負荷プロセスにおけるNIRSによるApp-SpO<sub>2</sub>と前額部および第2指パルスオキシメータによるSpO<sub>2</sub>の経時変化(被験者1: (a)、被験者2: (b))  
 Fig. 5 The time course of changes in App-SpO<sub>2</sub> values using multichannel NIRS apparatus and SpO<sub>2</sub> values using two pulse oximetry devices during the process of the rest and 6 minutes walking exercise under the altitude of 0m and 1500m conditions on subjects 1 (a) and 2 (b).

NIRSによるApp-SpO<sub>2</sub>と前額部および手指POMによるSpO<sub>2</sub>の経時変化を図5-(a)と(b)にそれぞれ示す。App-SpO<sub>2</sub>はチャンネル4および5から、SpO<sub>2</sub>は左前額部および右第2指から得た。ここでNIRSチャンネル4の観測部位は、前額部POMのセンサーと正中に対して対称的に位置する。また、チャンネル5は4より、上方内側に位置し、6分間歩行運動中、顕著なApp-SpO<sub>2</sub>低下が認められた観測部位である。被験者1と2の両者で左前額部と右第2指のSpO<sub>2</sub>の経時変化は、

低圧運動負荷プロセスに依存し、0mの6分間歩行運動中で軽度減少、0mから1500mの減圧期間で減少、1500mの6分間歩行運動中で更に減少、1500mから0mの加圧期間で増加を示した。被験者1では左前額部と右第2指の値は絶対値で若干の差があり、左前額部POMの値は5%弱高い値を常に示し、負荷の状態にその値の差は依存しないようであった。また、被験者2では、左前額部と右第2指の値はよく一致した。このことから、2つのPOM測定装置の値は全身の血液

酸素飽和度を反映していると考えられた。また、上記の左前額部と右第2指の値の違いは、被験者により異なることから、皮下の骨の状態や、指など末梢の循環状態等の測定条件の違いを反映している可能性があると考えられるが、いずれが真の値に近いのかは、両 POM 装置とも市販品であり、詳細は不明である。

被験者1と2の両者で、対称的に同じ部位から得られたチャンネル4の App-SpO<sub>2</sub>と前額部 SpO<sub>2</sub>の経時変化は、関連性が認められず同期しなかった。それに対して上方内側に位置するチャンネル5の App-SpO<sub>2</sub>は、前額部 SpO<sub>2</sub>との関連性が認められた。また、1500mの6分間歩行運動中のチャンネル5の App-SpO<sub>2</sub>は、0mの運動中よりも低値を示した。

被験者1と2の低圧運動負荷プロセスにおける右前頭部での App-SpO<sub>2</sub>の経時変化は、6分間歩行運動中、主にチャンネル5のみの局所的な低下を認めた。この低下は、他のチャンネルでは見られないことから、局所的脳の賦活化、つまり、運動に対する精神活動を反映している可能性があるが、通常脳の活性化は HbO の増加と HbR の低下を伴い、単純に考えれば脳内酸素飽和度の増加を示すはずである。しかし、2症例とも低下を示した。もし App-SpO<sub>2</sub>が毛細管レベルの酸素飽和度を示すとすると、脳組織レベルでの酸素消費が増加するため、この値は脳活性化時に低下する可能性がある<sup>12)</sup>。この低下は、図5に示した前額部や手指の SpO<sub>2</sub>の低下よりも遥かに大きく、もし皮膚血流が混入しても、この App-SpO<sub>2</sub>の大きな低下は、説明がつかない。被験者2の低酸素歩行運動では、“ややきつい”と RPE で評価されたが、App-SpO<sub>2</sub>の変化がその運動中で大きいことも、App-SpO<sub>2</sub>が脳の活性化を反映しているという解釈を支持する。従って、チャンネル5の局所的な領域での App-SpO<sub>2</sub>の低下は、脳内の酸素状態を反映しているものと考えられる。

## V. まとめ

パイロットスタディとして2人の低酸素トレーニング経験のない一般健康人を対象とし、低圧運動負荷プロセスにおける前頭部多チャンネル NIRS と前額部 POM の同時測定を行った。NIRS チャンネルとその対称的に位置する前額部 POM から得られた App-SpO<sub>2</sub>と SpO<sub>2</sub>の経時変化は、低圧運動負荷プロセスにおいて同期しなかった。また、隣接するチャンネルでは6分間歩行運動中 App-SpO<sub>2</sub>は低下した。以上より、前頭部多チャンネル NIRS は、皮膚の影響を受けずに脳内の酸素状態を定量化できる可能性があると考えられた。今後、被験者の例数を重ね、更なる検討を行いたい。

### 参考文献

- 1) Delpy DT, Cope M, van der Zee P, Arridge S, Wray S, Wyatt J : Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement. *Phys Med Biol*, 33 (12) : 1433-1442, 1988.
- 2) 岡田英史 : 光脳機能イメージングの原理. *映像情報メディカル*, 41 (9) : 886-891, 2009.
- 3) Andrew W. Subudhi, Andrew C. Dimmen, and Robert C. Roach : Effects of acute hypoxia on cerebral and muscle oxygenation during incremental exercise. *J Appl Physiol*, 103 : 177-183, 2007.
- 4) Toshimitsu Takahashi, Yoriko Takikawa, Reiko Kawagoe, Satoshi Shibuya, Takayuki Iwano, Shigeru Kitazawa. Influence of skin blood flow on near-infrared spectroscopy signals measured on the forehead during a verbal fluency task. *NeuroImage*, 57 : 991-1002, 2011.
- 5) Louis Gagnon, Katherine Perdue, Douglas N. Greve, Daniel Goldenholz, Gayatri Kaskhedikar, David A. Boas. Improved recovery of the hemodynamic response in diffuse optical imaging using short optode separations and state-space modeling. *NeuroImage*, 56 : 1362-1371, 2011.
- 6) Louis Gagnon, Robert J. Cooper, Meryem A. Yücel, Katherine L. Perdue, Douglas N. Greve, David A.



- Boas. Short separation channel location impacts the performance of short channel regression in NIRS. *NeuroImage*, 59 : 2518-2528, 2012.
- 7) 大橋三男, 灰田宗孝: 低価格・高性能・光多点同時測定装置 Spectratech OEG-16について. *映像情報メディカル*, 41 (9) : 929-933, 2009.
- 8) 今川重彦: 高地・低酸素トレーニングの分子生物学. *医学のあゆみ*, 225 (13) : 1287-1292, 2008.
- 9) ATS statement: Guidelines for the Six-Minute Walk Test. *Am J Respir Crit Med*, 166 : 111-117, 2002.
- 10) Kurita D., Terao T., Takizawa S., Haida M., and Yagihara S. : A trial of simultaneous measurements of frontal cortex and lower-extremity muscles oxygenation during acute hypoxic exercise using multichannel NIRS. *Tokai J. Sports Med. Sci.*, 23 : 37-44, 2011.
- 11) Bebout DE, Mannheimer PD, Wun C-C. Site-differences in the time to detect changes in saturation during low perfusion. *Critical Care Medicine*, 29 (12) : A115, 2001
- 12) 灰田宗孝: NIRS (信号変化の原理と臨床応用). *脳循環代謝*, 17 (1) : 1-10, 2005.