



# 低圧環境下での前額部 fNIRS 計測における皮膚血流と 脳酸素化動態の評価 —独立成分分析によるパイロットスタディー—

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)

Evaluation of Skin Blood Flow and Source-detector Distance on fNIRS-determined Cerebral Oxygenation by using Independent Component Analysis during Calculation Task under Hypoxic Environment

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



## Abstract

To evaluate of skin and brain layers' contribution, we measured functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) between light source and detector distance of 30, 15, and 11mm for forehead, in two male subjects under the altitude of 0m (1013 hPa) and 1500m (837 hPa) conditions including the calculation task, and used independent component analysis. Especially fNIRS between light source and detector distance of 30 and 11mm under the altitude of 0m condition including the calculation task was activated brain removed skin layer better than the distance of 30 and 15mm on independent component analysis. Our trial suggests that independent component analysis may be a useful tool to see a brain oxygenation states unaffected by skin blood flow.

(Tokai J. Sports Med. Sci. No. 27, 51-62, 2015)

## I. 緒言

機能的近赤外分光法 (fNIRS) は、生体内の血液血行動態を非侵襲的で姿勢に制約がなく、そしてリアルタイムに測定する方法として臨床医学のみならず、スポーツ医学等様々な研究分野で幅広く活用されている<sup>1-3)</sup>。fNIRS は、生体組織を透過する近赤外光の特性を利用して、主に毛細管由来の酸素化ヘモグロビン (HbO) と脱酸素化ヘモグロビン (HbR) の濃度長 (通常の近赤外光装置では、濃度と光路長の積の形で求まるので濃度長と呼ぶ) の経時変化 (NIRS 信号) から酸素化動態反応を測定することができる<sup>4)</sup>。しかしながら、fNIRS は皮膚表面に光源-検出センサー (Source-Detector:S-D) を設置して計測するため、皮膚血流の影響が含まれた酸素化動態反応を観測することになる<sup>5,6)</sup>。また前額部において、近赤外光の性質として、皮膚表面で S-D 距離を変化させることにより、浅い層から深い層まで光を透過させることができる。つまり、短い S-D 距離は皮膚層を、長い S-D 距離は皮膚層と脳実質層を透過すると考えられる。皮膚血流が特に問題になるのが、前額部の計測で、長い S-D 距離では、脳と皮膚の両方の情報が含まれている。しかしながら、どの程度皮膚の情報が脳の NIRS 信号に含まれているかは明らかではない。更に、脳の NIRS 信号のみを検出する方法は、未だ確定されていない<sup>5)</sup>。

その一方で、工学や統計学分野において、信号分離・抽出の技法が数多く存在し、その中でも多変量解析の一つである独立成分分析に注目が集められている。独立成分分析は、観測された信号を原信号と見なし、原信号には、本来の信号とそれはいくつかの独立成分が加わったものから成ると仮定する。原信号から任意の独立成分を除去後、復元された信号が求めるべき信号であるとする技法である<sup>7,8)</sup>。

そこで我々は、パイロットスタディとして、低圧環境下での前額部 fNIRS 計測における、本来

の脳酸素化動態の信号に、皮膚血流がどの程度関与するか評価を行うために、S-D 距離が異なる 30mm と 11mm、および 30mm と 15mm の NIRS 信号を計測し、独立成分分析を行い、得られた NIRS 信号から皮膚血流の影響が分離できるか比較検討した。

## II. 実験方法

対象者は、東海大学に所属している男性健康人 2 人で、被験者 1 は年齢 22 歳右利きで、被験者 2 は年齢 24 歳右利きである。これら被験者は、高地トレーニングや低圧トレーニング未経験者である<sup>9)</sup>。低圧負荷プロセスは、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。低圧室温度は 18℃ に設定した。前頭葉を賦活させる課題 (タスク) は、計算タスクとした。計算は 50 問とし、被験者にできるだけ速く解答するよう促した。この計算タスクは、標高 0 m と 1500m で行われた。各被験者に対する標高 0 m と 1500m の計算時間を記録し正解率を算出した。低圧負荷プロセスは、連続的に先ず標高 0 m で、約 2 分の安静後、1 回目の計算タスクを 2-4 分施行し、計算タスク後に安静を約 3 分とった。その後約 10 分で減圧し、標高 1500m とし約 5 分後に、同様に 2 回目の計算タスクを施行した。タスク終了後、約 10 分で加圧し標高 0 m とした。標高 0 m の 1 回目の計算タスク前安静時から、減圧、2 回目計算タスク、加圧終了後まで、連続的に前額部の fNIRS 測定を施行した。また、低圧負荷プロセスでは、TEIJIN 社製パルスオキシメータ PULSOX-Me300 を用い、被験者の左第 2 指より経皮的動脈血酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>) と脈拍数を記録した。標高 0 m と 1500m の各安静状態は、SpO<sub>2</sub> と脈拍数を監視し、生理的条件化であるか判断した。

計算タスクは、通常単純な 1 から 2 桁の四則演算であるが、予備実験で各被験者にその計算タス

クを行ったところ、NIRS 信号に殆ど変化がなかった。そのため、逐次的に1桁多くなる計算タスク<sup>10)</sup>を採用し、50問出題し、できるだけ速く解答するよう促した。この逐次的に1桁多くなる計算タスクでは、各被験者のNIRS信号に顕著な変化が認められた。また、各被験者には、内容を知らせずに標高0mと1500mで同じ計算タスクを行った。各計算タスク前後の安静では、紙上の黒点を凝視するように促した。

fNIRS 測定装置は、Spectratech 社製 OEG-SpO<sub>2</sub>を使用した。このfNIRS装置は、送光部波長が770と840nmでサンプリング時間が0.08192秒である。また、この装置は、光変調技術としてCDMA方式を採用しているため<sup>11)</sup>、回路規模縮小化に優れ、装置自体の携帯化と軽量化を実現しており、実際、低圧室の様な狭い空間においても測定可能である<sup>2, 12, 13)</sup>。更にCDMA方式は、送光と受光とを乱数コードにより特徴付けされているため、複数の送光点に対して1つの受光点でも、どこかの送光点からの信号であるか特定できる。

fNIRS 計測用のセンサーバンドは、脳酸素化動態と皮膚血流の影響を評価するために、複数のS-D距離を装備した2種類のものを作製した。通常の脳酸素化動態測定に用いるS-D距離30mmに11mmのホルダーを増設したものと、30mmに15mmのホルダーを増設したものである。このS-D距離が11mmおよび15mmの送光部からの光強度は、S-D距離が30mmの送光部からの光と比べ強いいため、適切な光学フィルターを貼付し、減光させた。

近赤外光送光部と受光部センサーの midpoint を fNIRS の測定点と考え、チャンネルと呼ぶ。図 1-(a) に送光部と受光部センサーとチャンネルの関係を示す。各々のセンサーは、センサーバンドに配置し、計10チャンネルとした。S-D距離が11mmおよび15mmの各チャンネルはセンサーバンド左と右にそれぞれ1つ設けた。図 1-(b) にS-D距離が30mmと11mm、図 1-(c) にS-D距離が30mmと15mmのセンサーを配置した様子を示す。図 2 に示すように、各被験者は、

前額部眼窩上15mm付近にチャンネル2と9が位置するようにセンサーバンドを装着した。そして、遮光のためのヘッドバンドをセンサーバンド上に固定し、低圧室内で計算タスクを行っている様子を図3に示す。

以前の我々の研究で示したように、各チャンネルから得られたデータは、修正ピア・ランバート則に基づき、酸素化ヘモグロビン (HbO) および脱酸素化ヘモグロビン (HbR) の濃度長の経時変化、すなわち NIRS 信号が得られる<sup>2)</sup>。

S-D 距離が30mmのNIRS信号には、脳酸素化動態に皮膚血流の影響を含むと考えられるため、S-D 距離11mmおよび15mmからのNIRS信号を用いて、脳酸素化動態から皮膚血流の影響を分離する解析方法、すなわち独立成分分析 (ICA) を行った<sup>8)</sup>。

ICA ソフトは、ビー・アール・システムズ社製 BBrainAnalyzer (Ver.1.04) を使用した。実際に用いたICAの概要は、

$$x(t) = A \cdot s(t)$$

$$s(t) = W \cdot x(t)$$

ここで、 $x(t)$  は各チャンネルから観測されたNIRS信号、 $s(t)$  は原信号、 $A$  は混合行列、 $W$  は分離行列である。非線形無相関化に基づく方法を用い、非線形性の評価関数として  $\tan h$  を選択した。原信号の  $s(t)$  は、いくつかの独立成分から成ると仮定し、任意の独立成分  $s'(t)$  を除去したい場合、混合行列  $A$  の選択された列の値は0となり修正混合行列  $A'$  が得られる。従って、任意の独立成分を除去した後の復元されたNIRS信号  $x'(t)$  は、

$$x'(t) = A' \cdot W \cdot s(t)$$

を計算することにより得られる。

この解析方法を用いてS-D距離11mmおよび15mmのNIRS信号、すなわち皮膚血流に由来する独立成分を除去することにより、S-D距離30mmのNIRS信号を復元し、脳の酸素化動態を評価した。また、ICAは被験者の前額部左と右に設置してある11mmあるいは15mmの短いS-D距離の2つのチャンネルに対して別々に行った。更

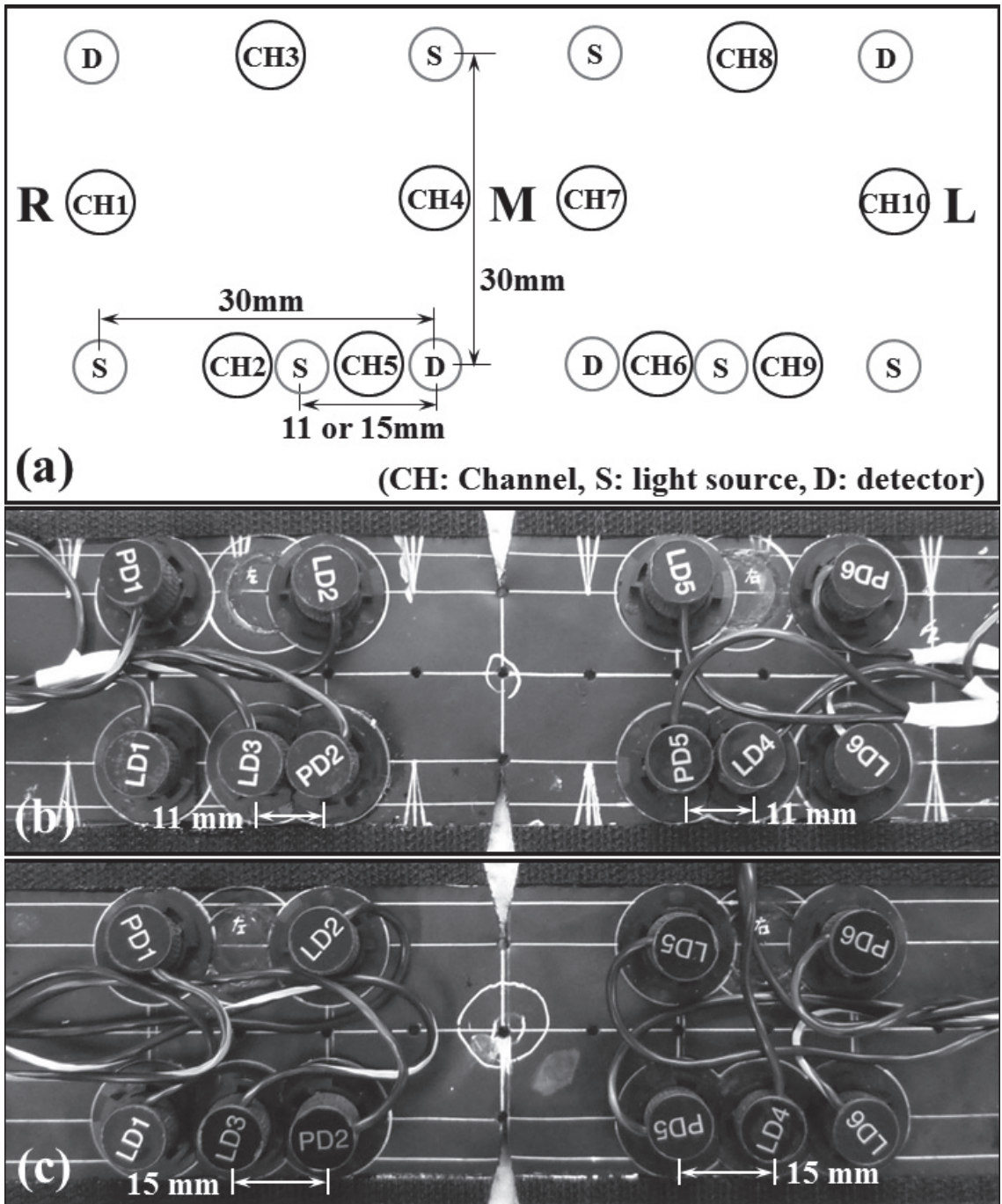


図1 fNIRSの送光部 - 受光部間 (S-D) 距離とその配置  
 (a) fNIRSの10チャンネルのS-D距離とその配置のシエーマ  
 (b) S-D距離11mmを含むセンサーバンド  
 (c) S-D距離15mmを含むセンサーバンド

Fig 1 fNIRS channels between light source and detector (S-D) distance, and its arrangement.  
 (a) Schematic view of ten fNIRS channels between light source and detector.  
 (b) The sensor band including S-D distance 11mm.  
 (c) The sensor band including S-D distance 15mm.

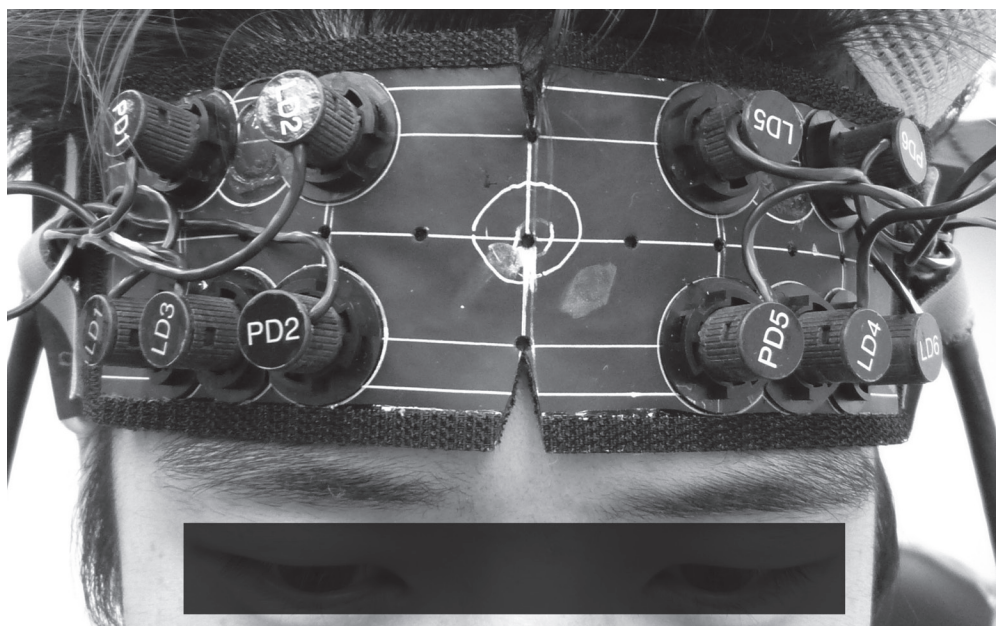


図2 被験者の前額部に装着されたセンサーバンド  
Fig 2 The sensor band on forehead.



図3 被験者がセンサーバンドを装着し低圧室内で計算タスクを行っている測定風景  
Fig 3 A subject attached sensor band during the calculation task in hypobaric chamber.

に、必要な場合、復元されたNIRS信号に適切なベースライン補正を行った。

尚、本研究は、東海大学が定める「人を対象とする臨床研究倫理委員会」より承認を受けている(承認番号：14006)。被験者に書面による同意説明を行った。

### Ⅲ. 結果および考察

代表的な低圧負荷プロセスにおける前額部のHbOとHbRの経時変化を図4-(a)に示す。チャンネル5と6のNIRS信号は、短いS-D距離(この図では15mm)に因るもので、チャンネル1-4と7-10のNIRS信号は、通常用いられているS-D距離30mmの因るものである。各チャンネルのNIRS信号は、標高0mと1500mの計算タスク中でHbOの増加とHbRの減少が認められた。また、標高1500mのHbOとHbRの変化は、標高0m比べ低下が認められた。

標高0mと1500mのチャンネル1-5(右前額部)の計算タスク中の独立成分(IC)を図4-(b)と(c)、同様にチャンネル6-10(左前額部)の計算タスク中のICを図4-(d)と(e)に示す。チャンネル1-5における標高0mと1500mの計算タスク中のICは各5計10種類に分離された。同様にチャンネル6-10の計算タスク中のICは各5計10種類に分離された。

皮膚血流に寄与すると考えられるS-D距離11mm(チャンネル5、右前額部)における、標高0mの計算タスク中のNIRS信号を図5-(a)に示す。ICAにより分離された2種類のICを除去し、復元されたNIRS信号を図5-(b)に示す。また、標高1500mの計算タスク中のNIRS信号を図5-(c)に示す。ICAにより分離された2種類のICを除去し、復元されたNIRS信号を図5-(d)に示す。図5-(b)と(d)から判るよう、分離された2種類のICを除去することにより、HbOとHbRの変化はほぼ消失した。図に示していないが、左前額部のチャンネル6に関して

も同様で、標高0mと1500mの計算タスク中のICAは、それぞれ2と3種類のICに分離され、それらを除去したNIRS信号のHbOとHbRの変化は消失した。このことから、S-D距離11mmで得られた2つあるいは3つのICは皮膚血流を代表すると考えられた。

S-D距離15mm(チャンネル5、右前額部)における、標高0mの計算タスク中のNIRS信号を図6-(a)に示す。ICAにより分離された3種類のICを除去し、復元されたNIRS信号を図6-(b)に示す。また、標高1500mの計算タスク中のNIRS信号を図6-(c)に示す。ICAにより分離された3種類のICを除去したNIRS信号を図6-(d)に示す。図6-(b)と(d)から判るよう、分離された3種類のICを除去することにより、HbOとHbRの変化は消失した。図に示していないが、左前額部のチャンネル6に関しても同様で、標高0mと1500mの計算タスク中のICAは、それぞれ3と2種類のICに分離され、それらを除去したNIRS信号のHbOとHbRの変化は消失した。このことから、S-D距離15mmは、S-D距離11mmと同様に、求められた2つあるいは3つのICが皮膚血流を代表すると考えられた。

上記の様に、前額部左右の短いS-D距離の各計算タスク中の信号を代表する2から3種類のICが求められたので、これらのICをS-D距離30mmのNIRS信号から除去し、残ったNIRS信号が脳の酸素化動態を表すと考えた。

標高0mと1500mの各計算タスク中のS-D距離11mmで求められたNIRS信号を図7に示す。標高0mの計算タスクに関しては、右前額部のチャンネル1と2、左前額部のチャンネル7と8でHbOの増加とHbRの減少が認められた。標高1500mの計算タスクに関しては、若干ではあるが、チャンネル1と7でHbOの増加とHbRの減少が認められた。このことから、S-D距離11mmから求められたNIRS信号は、標高0m、標高1500mの計算タスクでは脳の酸素化動態を反映すると考えられた。しかし、1500mでは0mの様なHbOの上昇が見られなかった。それは、

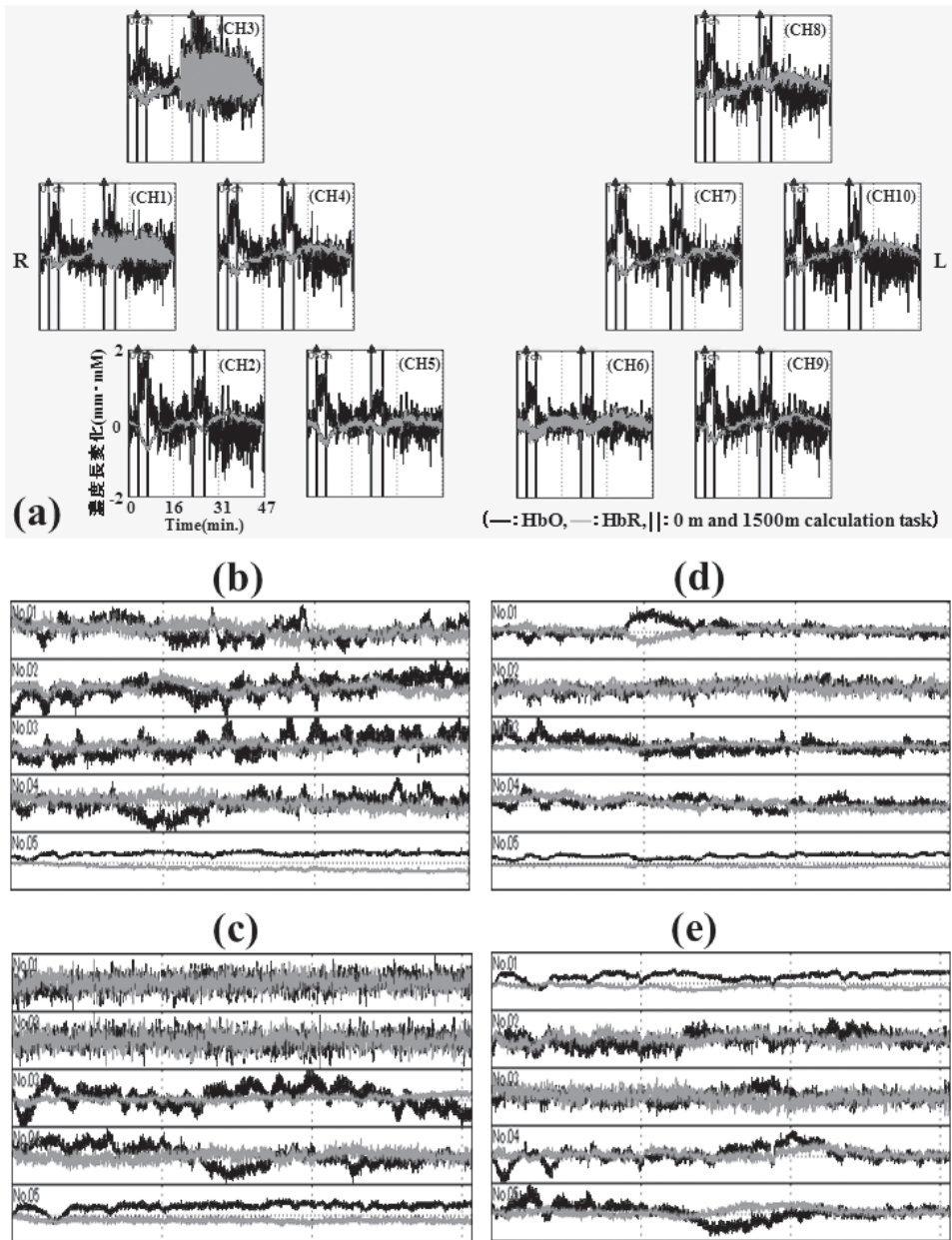


図 4 代表的な低圧負荷プロセスにおける前額部の HbO と HbR の経時変化と計算タスク中の各チャンネルから得られた NIRS 信号の独立成分 (IC)

- (a) HbO と HbR の経時変化
- (b) 標高0mのチャンネル1-5の計算タスク中の IC
- (c) 標高1500mのチャンネル1-5の計算タスク中の IC
- (d) 標高0mのチャンネル6-10の計算タスク中の IC
- (e) 標高1500mのチャンネル6-10の計算タスク中の IC

Fig 4 The typical time course of changes in HbO and HbR, and the independent components (ICs) during calculation task under the altitude of 0m and 1500m conditions.

- (a) The time course of changes in HbO and HbR.
- (b) ICs from channel 1-5 during calculation task of 0m condition.
- (c) ICs from channel 1-5 during calculation task of 1500m condition.
- (d) ICs from channel 6-10 during calculation task of 0m condition.
- (e) ICs from channel 6-10 during calculation task of 1500m condition.

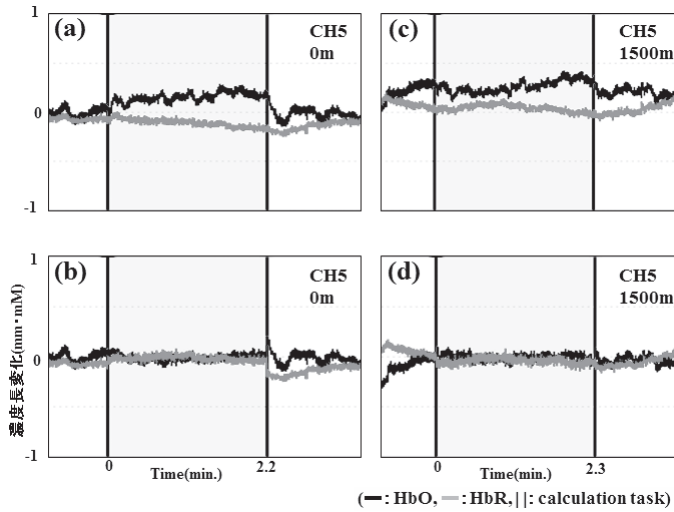


図5 S-D距離11mm(チャンネル5)における、標高0mと1500mの計算タスク中のNIRS信号とICAにより復元されたNIRS信号  
 (a) 0mのタスク中のNIRS信号  
 (b) 0mのタスク中の復元されたNIRS信号  
 (c) 1500mのタスク中のNIRS信号  
 (d) 1500mのタスク中の復元されたNIRS信号

Fig 5 NIRS signals and the reconstructed NIRS signals of S-D distance 11mm during calculation task under the altitude of 0m and 1500m conditions.

- (a) NIRS signal during task of 0m condition.
- (b) The reconstructed NIRS signal during task of 0m condition.
- (c) NIRS signal during task of 1500m condition.
- (d) The reconstructed NIRS signal during task of 1500m condition.

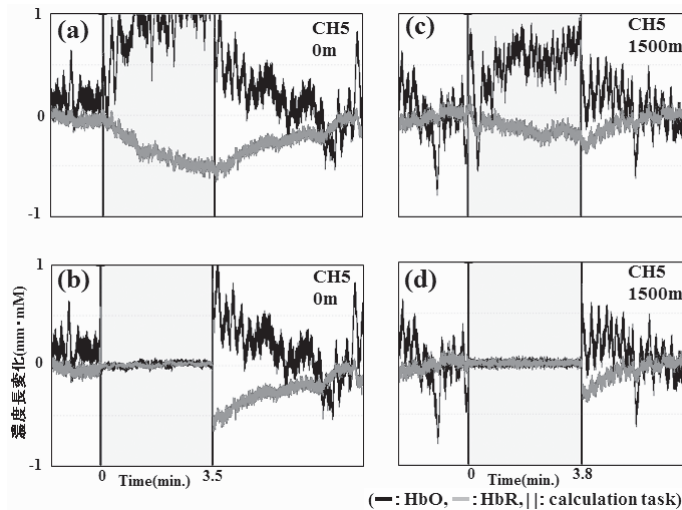


図6 S-D距離15mm(チャンネル5)における、標高0mと1500mの計算タスク中のNIRS信号とICAにより復元されたNIRS信号  
 (a) 0mのタスク中のNIRS信号  
 (b) 0mのタスク中の復元されたNIRS信号  
 (c) 1500mのタスク中のNIRS信号  
 (d) 1500mのタスク中の復元されたNIRS信号

Fig 6 NIRS signals and the reconstructed NIRS signals of S-D distance 15mm during calculation task under the altitude of 0m and 1500m conditions.

- (a) NIRS signal during task of 0m condition.
- (b) The reconstructed NIRS signal during task of 0m condition.
- (c) NIRS signal during task of 1500m condition.
- (d) The reconstructed NIRS signal during task of 1500m condition.



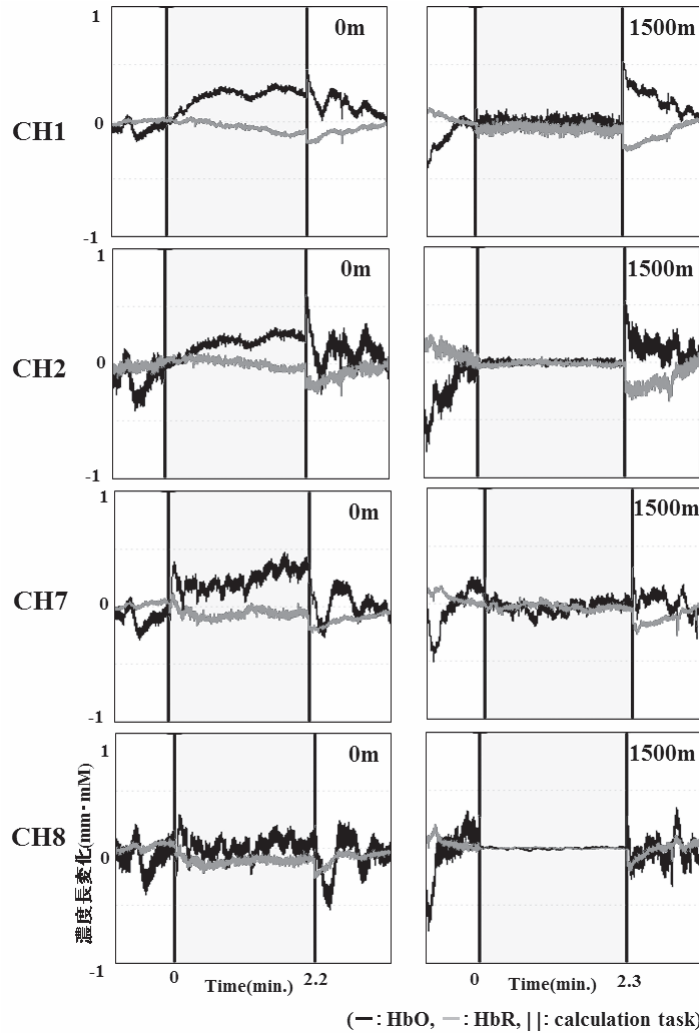


図7 チャンネル1、2、7、そして8での標高0mと1500mの各計算タスク中におけるS-D距離11mmの独立成分除去後の復元されたNIRS信号

Fig 7 The reconstructed NIRS signals of channel 1, 2, 7, and 8 removed the independent components of S-D 11mm during calculation task under the altitude of 0m and 1500m conditions.

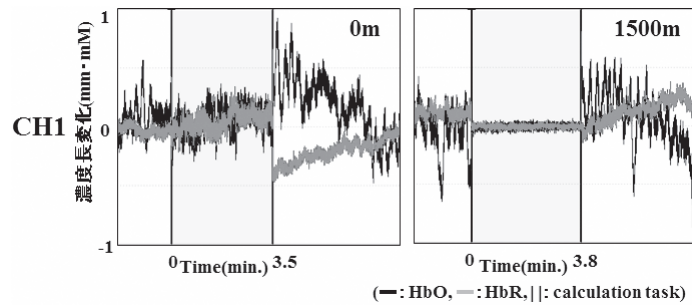


図8 チャンネル1での標高0mと1500mの各計算タスク中におけるS-D距離15mmの独立成分除去後の復元されたNIRS信号

Fig 8 The reconstructed NIRS signals of channel 1 removed the independent components of S-D 15mm during calculation task under the altitude of 0m and 1500m conditions.

表1 各被験者の0mと1500mの安静、計算タスク中のSpO<sub>2</sub>と脈拍数（平均±標準偏差）、計算タスク時間、そして計算の正解率  
Table 1 Physiological parameters (mean ± SD), the time required to task, and task-accuracy rate on each subjects.

| Subject 1                   | 0m       | 1500m    |
|-----------------------------|----------|----------|
| Rest-SpO <sub>2</sub> (%)   | 97.1±0.2 | 94.4±0.7 |
| Task-SpO <sub>2</sub> (%)   | 97.0±0.2 | 95.5±0.5 |
| Rest-pulse rate (Pm)        | 59.0±2.2 | 63.1±7.6 |
| Task-pulse rate (Pm)        | 68.3±5.3 | 69.4±3.4 |
| Time required to task (min) | 2.15     | 2.27     |
| Task-accuracy rate (%)      | 100      | 98       |
| Subject 2                   | 0m       | 1500m    |
| Rest-SpO <sub>2</sub> (%)   | 97.1±0.8 | 93.7±0.4 |
| Task-SpO <sub>2</sub> (%)   | 97.8±0.3 | 94.5±0.8 |
| Rest-pulse rate (Pm)        | 75.7±3.9 | 83.6±6.2 |
| Task-pulse rate (Pm)        | 78.6±4.3 | 78.1±4.3 |
| Time required to task (min) | 3.51     | 3.82     |
| Task-accuracy rate (%)      | 96       | 92       |

表1に示すように、経皮的動脈血酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>) が94.4%と低下しており、そのため、本来上昇すべき脳内のHbOが、上昇しなかったため、あるいは皮膚血流が脳以上に上昇したためと考えられた。

同様に、標高0mと1500mの各計算タスク中のS-D距離15mmで求められたチャンネル1のNIRS信号を図8に示す。図7で示した結果とは大きく異なり、同じチャンネル1のNIRS信号が、殆ど消失した。また、標高1500mの計算タスク中の復元されたNIRS信号は、0mのタスク中より顕著に消失した。図に示していないが、他のチャンネルの求められたNIRS信号も、同様に殆ど消失した。このことは、S-D距離15mmで求められたICは、他のチャンネルの信号成分と同一である事を示している。

Funaneらの報告<sup>7)</sup>によると、複数のS-D距離によって計測されたNIRS信号に関して、深い組織層（脳）に対する浅い組織層（頭皮や皮膚）の影響を定量化する分析法として、ICAが提案されている。その結果、ICAで浅い組織層を除去する適切なS-D距離は15mmを推奨している。しかしながら、我々の15mmの結果（図8）では、タスク中のNIRS信号は、消失してしまった。この消失は、我々のS-Dシステム（LEDとフォトダイ

オード（図1-(b)と(c)参照)では、S-D距離が15mmでも十分に深い組織層（脳）のNIRS信号が含まれており、ICAでは、脳のICを除去してしまうためと考えられる。我々のシステムでは、S-D距離11mm程度が妥当と考えられる。また、FunaneらのS-Dシステムは光ファイバーであり、点光源と点状の検出器と考えられるが、我々のシステムでは各々面状（外径11mm）である。つまり、我々の場合、光は最長の場合、プローブの両端の距離15+11=26mmの距離の光を含み、30mmに近い。このプローブの差異が結果に反映されていると考えられた。

標高1500mの計算タスク中のS-D距離11mmのICを除去した後、復元されたNIRS信号は微弱であった。各被験者の0mと1500mの安静、計算タスク中のSpO<sub>2</sub>と脈拍数、計算タスク時間、そして計算の正解率を表1に示す。今回の計算タスクは、逐次的に1桁多くなる計算タスク<sup>10)</sup>を採用し、50問出題し、できるだけ速く解答するように促した。また、予め被験者に知らせずに標高0mと1500mで同じ計算タスクを行った。内容を知らないとは言え、1500mで同じ計算タスクを行うことは、被験者心理として、慣れや集中力低下につながる可能性が考えられる。表1においても、被験者両者で計算タスク時間の延長や計算

の正解率の低下が認められた。今後、低圧環境下に適した計算タスクを検討したい。

#### IV. まとめ

パイロットスタディとして、前額部 fNIRS 信号から皮膚血流の影響を分離し、脳酸素化状態が評価できるか、独立成分分析 (ICA) により検討した。対象は、2 人の低圧トレーニング経験のない一般健常人とした。NIRS 計測は、通常用いられている送光部 - 受光部間 (S-D) 距離 30mm と、皮膚血流の影響を評価するための S-D 距離 11mm、あるいは 15mm を装備した 2 種類のセンターバンドを作製し行った。低圧負荷プロセスでは、標高 0 m と 1500m の計算タスクを行った。前額部左右の短い S-D 距離の各計算タスク中の独立成分 (IC) は、2 から 3 種類に分離された。S-D 距離 11mm から復元された NIRS 信号は、標高 0 m、標高 1500m の計算タスクでは脳の酸素化動態を反映した。しかし、標高 1500m の信号は弱かった。S-D 距離 15mm から求められた NIRS 信号は消失した。以上より本装置による fNIRS 計測において ICA は、最短 S-D 距離、11mm 程度で行う方が良いと考えられた。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) Endo K, Matsukawa K, Liang N, Nakatsuka C, Tsuchimochi H, Okamura H, and Hamaoka T. Dynamic exercise improves cognitive function in association with increased prefrontal oxygenation. *J Physiol Sci*, 63(4):287-98, 2013.
- 2) 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.
- 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) 灰田宗孝: 近赤外分光法 (NIRS) 信号の意味. 映像情報メディカル, 41 (9) : 892-896, 2009.
- 5) Hirasawa A, Yanagisawa S, Tanaka N, Funane T, Kiguchi M, Sørensen H, Secher NH, Ogoh S. Influence of skin blood flow and source-detector distance on near-infrared spectroscopy-determined cerebral oxygenation in humans. *Clin Physiol Funct Imaging*, Apr 20, 2014.
- 6) 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.
- 7) Funane T, Atsumori H, Katura T, Obata AN, Sato H, Tanikawa Y, Okada E, Kiguchi M. Quantitative evaluation of deep and shallow tissue layers' contribution to fNIRS signal using multi-distance optodes and independent component analysis. *Neuroimage*. Jan 15; 85 Pt 1:150-65, 2014.
- 8) Akgül CB1, Akin A, Sankur B. Extraction of cognitive activity-related waveforms from functional near-infrared spectroscopy signals. *Med Biol Eng Comput*, Nov; 44(11):945-58, 2006.
- 9) 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.
- 10) 川島 隆太: 「脳力」を鍛える大人の数字トレーニング. 宝島社, 2006
- 11) 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.
- 12) Kurita D., Terao T., Takizawa S., Kutsuzawa T., Haida M. Yagihara S., and Morozumi H.: Evaluation of the correlation between oxygen saturation calculated from NIRS signals and SpO2 from pulse oximetry for frontal area during acute hypoxic exercise. *Tokai J. Sports Med. Sci.*, 26: 59-67, 2014.
- 13) Kurita D., Terao T., Takizawa S., Kutsuzawa T., Haida M. Yagihara S., and Morozumi H.: A trial of simultaneous measurements using multichannel NIRS for frontal area and pulse oximetry for forehead

during acute hypoxic exercise. *Tokai J. Sports Med. Sci.*, 25: 79-87, 2013.