

近赤外光イメージング装置を用いたヒト脳機能研究 — fNIRS の基礎 —



1. はじめに

人類の長い歴史の中で、ヒトの脳がどのような働きをしているかは、未だに最大の謎の一つです。思考、記憶、情動、知覚・認知、運動制御といったヒト脳の様々な働き（機能）は近年まで直接調べることができず、間接的な観察によって推測されてきました。しかし、科学技術の目覚ましい進歩によって脳の機能を可視化する技術が発達し、我々がある思考や行動をするときには脳のどの部分がどのように機能しているのか、突き止めることが可能になってきています。

脳の機能を可視化する「脳機能マッピング」は、脳の構造と機能を結びつけることにより、ヒト脳の仕組みを解明

する学問領域です。ここでは、脳は機能的に分化しており（脳の機能分化）、ある特定の作業を行う際、脳の特定の領域の神経細胞が活動することを利用しています。

脳機能マッピングの技術は、脳と精神の関連を明らかにするのみでなく、認知症、うつ病など脳疾患のメカニズムを解明し、その治療法を開発する上でも極めて有用です。さらに、考えたことを代替マシンに実行させるBMI（brain machine interface）の応用技術への発展など、未来の科学技術へ夢の広がる分野でもあります。本稿では、ヒト脳機能マッピングの研究領域におけるイメージング技術をご紹介します。

研究者のコメント 日本大学医学部脳神経外科・酒谷薫先生

光を用いて脳機能を非侵襲的に計測するfNIRSは、近年急速に進化を続ける脳科学の分野において大きな注目を集めています。さらにうつ病や統合失調症、あるいは認知症などの脳と心の疾患の診断や病態解明に応用されるようになってきました。本稿は、fNIRSの基礎原理から最近の研究まで分かり易くまとめられており、fNIRSを用いた研究に興味のある脳科学者や脳疾患に関わる臨床医にとって役に立つテキストだと思います。



2. 脳機能計測の装置

脳の機能を計測するには、様々な方法があります。ここでは代表的な非侵襲（体内に電極等を埋め込まない）脳機能計測装置についてご紹介します（表1）。

fMRI（functional magnetic resonance imaging：機能的磁気共鳴画像法）は磁場内の核磁気共鳴現象を利用して画像を得るMRIを用い、脳活動に伴う脳血流の変化を、BOLD信号^{注1}として検出する方法で、脳の深い領域まで高い空間分解能で活動領域のイメージングが可能です。現在、非侵襲脳機能計測手法の中で、最も多用されている脳機能計測手法です。

PET（positron-emission tomography：陽電子放射断層撮影法）は、刺激呈示によって変化する脳血流量、脳血液量などの絶対量をトレーサを通して計測することができます。ただし、放射性マーカーを注入する必要があり、計測時に放射性被ばくを伴いますので、完全な非侵襲ではありません。

EEG（electroencephalogram：脳波計）は脳の神経活動から生じる電気活動を測定し、頭皮上に設置した電極から神経活動の電気信号を捉えます。比較的簡便に扱え、古くから臨床や基礎研究で幅広く使用されています。

MEG（magnetoencephalogram：脳磁図）は電気活動を計測する点でEEGと似ていますが、頭皮電位ではなく、神経電流によって生じた磁場変動を直接捉えているため、脳内の各部位の信号源推定がしやすい特徴があります。

fNIRS（functional near infrared spectroscopy：機能的近赤外線分光分析法）は近赤外光を頭皮上から照射して、fMRIと同様に脳の活動に伴う血流変化を捉えます。fMRIやPETより簡便・安価であり、より日常に近い状態で計測が可能で、放射性物質も用いないという利点があります。一方で、脳の深部の画像を得にくいという欠点も持っています。

現状の非侵襲脳機能計測装置には、「これを使えば万能」というものは存在しません。研究目的や環境に合わせ、適切な測定装置を選び、その装置に適した実験を計画する必要があります。近年では複数のモダリティを組み合わせる同時計測も試みられています。

注1：Blood Oxygenation Level Dependent。脳の活動により、局所的な血中ヘモグロビンの酸素状態が変わります。この時の酸素化ヘモグロビン（反磁性）と脱酸素化ヘモグロビン（常磁性）の変化により周囲の磁性が変化し、これによる信号変化を捉えます。

表1 代表的な非侵襲脳機能計測装置

	MEG	PET	fMRI	EEG	fNIRS
	脳磁図	陽電子放射断層撮影法	機能的磁気共鳴画像法	脳波計	機能的近赤外線分光法
					
測定対象	磁気 神経電流	ガンマ線 脳血流量 脳血液量 代謝物質変化	電磁波 脳血流変化 (Deoxy-Hb)	電位 神経電流	近赤外光 脳血流変化 (Deoxy-Hb Oxy-Hb)
時間分解能	ミリ秒	分	秒	ミリ秒	百ミリ秒
特徴	神経の一次反応を高速にとらえる	血流+酸素・糖代謝をとらえ、定量性がある	形態情報も得られる	神経の一次反応を高速にとらえる	日常に近い動作課題も計測可能

3.fNIRS を用いた脳機能計測

fNIRS は、近年わが国を中心に研究・開発が進んでいます。fNIRS は前述のとおり、頭表上から近赤外線領域の微弱な光を照射し、少し離れた位置で反射光を測定することによって大脳皮質の脳血流変化を捉えることができます(図1)。

一般に、「送光プローブ」から近赤外線を照射すると、光は組織内を散乱・吸収しながら通過し、そのうちの一部は大脳皮質表面をかすめて3cm程度離れた位置に設置した「受光プローブ」に到達します。もし、この光が通過する間(光路)で脳が活動していれば、血管中に存在するヘモグロビン濃度の変化量が大きくなり、ヘモグロビン分子による光の吸収(吸光)が増加し、受光プローブに達する光の量が減少します。このため、受光プローブで検出される光量変化を経時的に計測すれば、計測している部位の脳活動の変化を連続的にモニタリングすることができます。他にも、近赤外光を吸収する主要な生体分子としてメラニン等がありますが、メラニンの量は短期間には変化しないため、頭の上から近赤外光を照射すれば、脳活動を反映した、ヘモグロビン分子の吸光変化が計測できます。

近赤外光の波長領域(およそ700~2500nm)は他の波長領域(例えば可視光領域)よりも生体を透過しやすいという性質があります。ヘモグロビンは組織へ酸素を供給するたんぱく質で、酸素と結合した「Oxy-Hb(酸素化ヘモグロビン)」と、酸素と結合していない「Deoxy-Hb(脱酸素化ヘモグロビン)」に分けられます。

fNIRS では、これらの吸光特性の違い(図2)から、脳活動に伴うヘモグロビンの酸素状態の変化を測定することができます。この計算には分光光度計で用いられるBeer-Lambertの原理を生体計測に応用したModified Beer-Lambert low (MBLL)^{注2}が使用されます。

通常 fNIRS の計測では、送光プローブと受光プローブの midpoint を計測点として「チャンネル」と呼びます。光を用いた脳機能計測の初期段階(Chance et al. 1993, Hoshi & Tamura 1993, Kato et al. 1993, Villringer et al. 1993)では、単チャンネル、または2~4チャンネルの計測が主流でしたが、現在ではより広い脳領域を計測するため、複数のプローブを組み合わせて複数の箇所を同時に計測するマルチチャンネルを用いた研究が多く行われています。通常、複数の点を同時に計測すると、チャンネル間のクロストーク(不要な信号の混入)が起こります。このため、光を変調させたり光の点灯時間を数ミリ秒単位で微妙にずらすなどの方法により、多点同時計測を実現しています。このような多チャンネルの計測により、脳のどの領域がどのように活動しているのか、2次元の画像情報として表示することができるようになり、脳機能の可視化を実現しています。

注2 : $\Delta A_\lambda = \Delta \ln(I_0/I)$, $\Delta A_\lambda = \epsilon_\lambda L \Delta C$, $\Delta C = \frac{\Delta A_\lambda}{\epsilon_\lambda L}$

詳細は M. Cope et al., Adv. Exp. Med. Biol., 222, 183 (1988) を参照のこと

反射測定により脳表データを検出

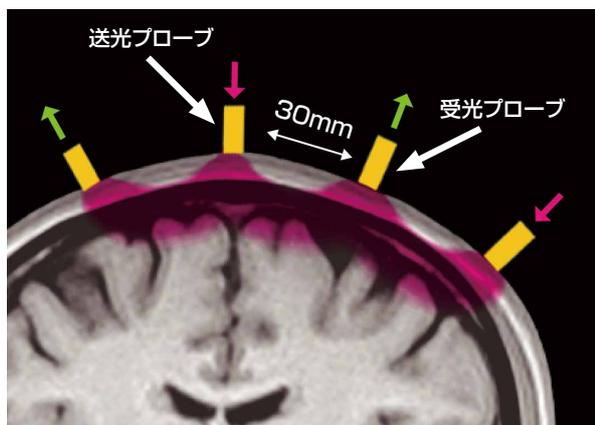


図1 fNIRS を用いた計測の原理

MRI画像を用いたfNIRS計測原理の模式図です。頭表に送光プローブと受光プローブを3cm程度の距離を離して設置し、送光プローブから照射した光を受光プローブで検出する様子を示しています。受光プローブでは頭皮、骨、大脳皮質表面などを通過した減衰光を受け取ります。

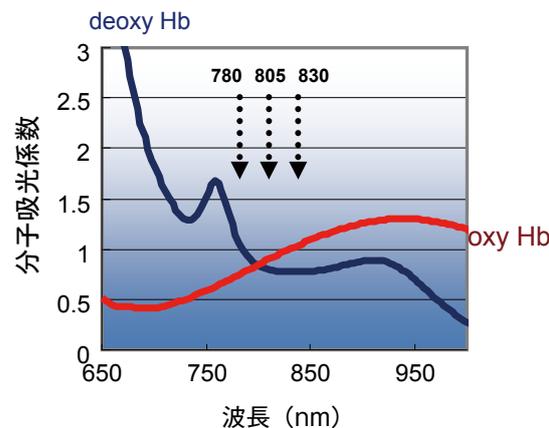


図2 ヘモグロビンの吸光係数

近赤外の波長領域は生体を透過しやすいという性質があり、「生態の窓」と呼ばれています。fNIRSではoxy Hb と deoxy Hbの吸光特性の違いを利用して、ヘモグロビン変化量を測定しています。FOIRE / OMMシリーズでは、近接した3波長(780, 803, 830nm)を計測に用いています。

fNIRS の計測では、図3のようにホルダと呼ばれるヘッドキャップをかぶり、そこへ計測ケーブル（プローブ+光ファイバケーブル）を装着するだけで、様々な環境で計測することが可能なため、近年急速に応用分野が広がっています。

fNIRS の特徴として、他の脳機能計測装置と比較して、低拘束性、簡便性、安全性などにおいて優れた点があります。例えばfMRI は頭部を固定した横臥状態という、課題によっては不自然な姿勢で計測することがあります。一方、fNIRS は通常の部屋において、座位のまま日常に近い状態で計測が可能です。もちろん、研究のためには様々な実験環境を整える必要がありますが、低拘束で計測できることは、より日常の環境に近い状態で脳機能を計測できるので、脳科学が広い分野へ浸透していく一助となっています。また、操作に特別な資格を要しないことや EEG のようにゲルを塗布する必要がないことから、実験者、被験者の双方に負担をかけないというメリットがあります。さらに、薬事認証取得のfNIRS（例えばOMM-3000シリーズ：製造販売認証番号21600B Z Z 00195000）は医療現場で診断等にも活用されています。安全性も高く、他の計測モダリティでは測定できない赤ちゃんや疾患のある患者さんの脳機能研究などにおいても有用です。

しかし一方で、いくつかの問題点や短所があることも指摘されています。計測を実施する際には、このようなfNIRS の短所も知っておく必要があります。まず、fNIRS は脳表層の活動情報は得られますが、脳の深部の情報を得ることが難しいことです。次に、脳の形態情報が得られないため、正確な位置情報が特定しにくいという問題点があります。最近の技術では脳の深さ方向を検出したり、脳の形態情報がわからなくても頭表上に設置したプローブ位置から、脳表上で計測部位を確率的に推定できる技術（Okamoto et al., 2005）が提案されています。さらには、fNIRS の2次元マップのような不均一なデータにも適用できる統計解析法としてNIRS-SPM（Ye et al., 2009）などが開発されています。新しい技術の使用に際しては注意が必要ですが、研究者のニーズに応えるための研究も日々発展しています。他の非侵襲脳機能計測モダリティに比べて比較的新しい技術であることから、技術開発、基礎研究、応用研究が同時的に進行しており、データの解析手法等が十分に確立していないのが現状ですが、一方で様々な点において開発・研究の可能性を持っています。

このようなfNIRS の長所と短所を理解した上で使用することにより、ヒトのダイナミックな脳活動を、非侵襲に計測し、可視化することが可能になるのです。



図3 fNIRS を用いた計測例

4.fNIRS 計測の方法

4-1. タスクデザイン

fNIRSの計測では、ある課題に対して脳のどの部位がどのような状態にあるのかを計測しますが、脳は常に活動しており、単に計測しただけでは何を測ったのかが明らかになりません。このため、計測の目的を明らかにし、目的に応じたタスクデザインを設定します。

fNIRS 計測では、ある行動を行っている（あるいは行っていない）期間Aと、別の行動を行っている期間Bの変化を計測し、期間AとBのヘモグロビンの変化を比較する、という方法で解析を行います（ただし、目的や条件によってはこの限りではありません）。一般に期間Aをレスト（あるいはコントロールタスク、ベースライン等）、Bをタスクと呼び、図4のような2種類のデザインの設定が可能です。ブロックデザイン（block design）はレストとタスクのヘモグロビン変化量の平均を比較します。一定期間タスクを行うことが可能な場合によく使用される方法で、課題設定が比較的簡便です。一方、イベントリレーティッド（event related design）はある事象（イベント）に関連して現れる変化を解析します。ある事象が起こる前の一定期間と事象が起こってからとの期間を比較して解析を行います。一定期間継続するのが困難な課題や複雑な課題設定を行う際に用いられます。

既に現象が明らかな課題については、先行研究の手法等を参考にして、課題の時間や刺激（課題開始の合図や課題画面、サンプルの呈示など）の呈示方法を設定します。初めて試みる課題の場合は予備実験などを通して、適切な課題時間や刺激を設定するとともに、コントロールとなる課題を検討します。例えば、発話を伴う語流暢課題（ある基準に従って、時間内に思いつく限りたくさん言葉を挙げる課題）を行うときには「発話をする」という行動と「語を想起する」という行動の足し合わせの結果が得られます。そこで、コントロール課題として無意味な言葉の繰り返し（例えば、「あ・い・う・え・お」の繰り返しなど）を行い、「発話をしている」という状態を計測することにより、「発話+語想起」から発話を取り除き、語想起に関わる反応のみを取り出すことができます。

計測時間は短いほうが計測対象者の負担が少ないため、短時間で効果的なデザインを設定する必要があります。一般的に、実験は装着から計測終了、その後のアンケートなど全てを含めて1時間以内に終了するのが望ましいと考えられます。また、計測の途中で適宜休憩を入れる必要もあります。実際の計測の前に計測者側も練習をしておくとうよいでしょう。

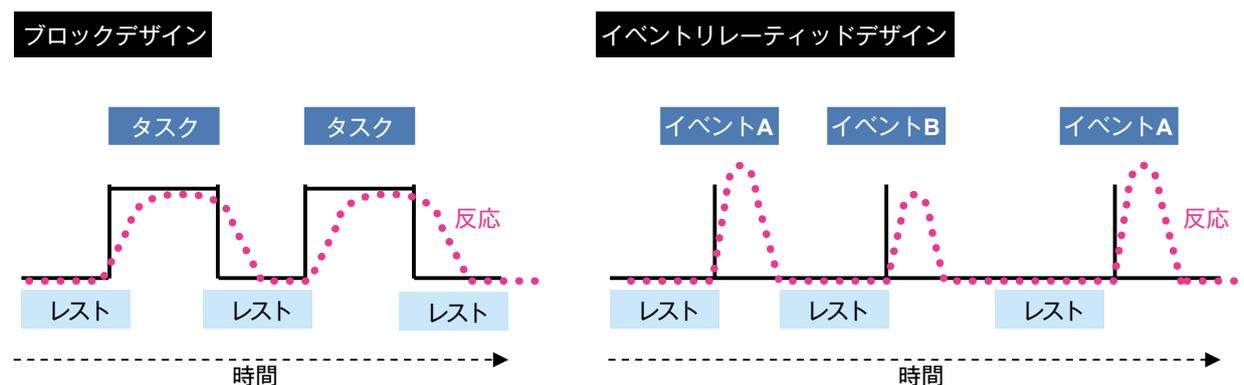


図4 タスクデザイン

ブロックデザインでは、一定のレスト期間と一定のタスク期間を繰り返し実施していきます。繰り返しの回数は条件に合わせて適切に設定する必要があります。イベントリレーティッドデザインでは、一定のレスト期間の後にイベントとなる刺激を呈示し、それに関連する反応を計測します。通常、タスク（あるいはイベント）が開始（発生）してから若干遅れて血流変化に反映されてくると考えられています。

4-2. プローブ装着部位

fNIRS計測ではどの部位を計測するか設定する必要があります。装置によって計測可能なチャンネル数が限られているため、計測したい部位を研究目的にあわせてカスタマイズします。

先行研究との比較であれば、計測条件を同一にするために、プローブの装着位置を再現する必要があります。先行研究がfNIRS以外の装置（例えばfMRIなど）の場合に

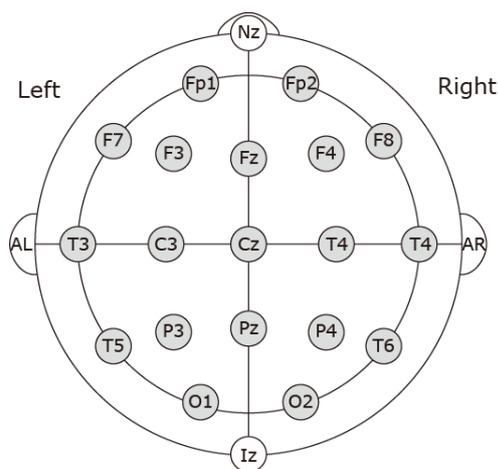


図5 国際10-20法による基準点

鼻根 (Nz) と後頭結節 (Iz) を結ぶ線と左右の外耳孔または耳介前点を結ぶ線をそれぞれ10%, 20%, 20%, 20%, 20%, 10%の割合で分割していきます。

4-3. 計測

計測の際には事前にインフォームドコンセントを得て計測の目的や内容を示し、計測対象者に対して不利益や不安が生じないようにします。計測の手順としては、頭部のサイズを測定してホルダを装着し、プローブを装着します。プローブ装着は頭表上から行うため、ホルダがしっかり頭部の形状に沿って装着できていること、プローブが頭皮上に密着していることが重要です。人によって顔に個性があるのと同じように、頭の形にも個性があり、ホルダの装着は基準点に合わせて慎重に行う必

は、課題に対する反応が得られると推測される部位周辺を推定してプローブ配置を決める必要があります。

脳波計測で使用される国際10-20法に基づいて頭部を計測し、目的とする計測部位周辺に基準点を設定することで、再現性よく計測部位を規定することができます。この際に三次元位置センサなどを用いてプローブ位置を確認しておくことをお勧めします。



図6 計測風景

実験の際にはモニタに注視点などを呈示し、視線を固定することにより、計測結果がより安定的に得られます。また、周りに余分な刺激のない環境をつくり、楽な姿勢で課題が行えるように配慮します。

があります。また、毛髪などが光を吸収することがあります。このため、耳搔きなどで髪の毛を分けて頭皮上にプローブが密着できるように工夫する必要があります。

装着が終わると、受光環境を調整して計測を始めます。実際の計測を始める前に、刺激呈示のタイミングや刺激強度など事前に練習をして計測対象者の不安を取り除き、精度よく実験を実施する必要があります。計測が終わると装着したプローブおよびホルダをはずします。

4-4. 結果の表示と解析

計測結果は、図7aのようなトレンドグラフとして時系列的に変化を見ることができます。例えば、前述のような語想起課題を行った場合、レスト期間（あ・い・う・え・おの繰り返し）とタスク期間ではOxy-Hb（図中の赤色のグラフ）が増加し、レスト期間に比べてタスク期間で、より脳内で酸素供給が行われていることがわかります。

計測結果の解釈は時系列に変化するマッピングを目視で観察するだけでなく、統計的手法を用いて条件にあった検定を行い、コントロール条件に比べて有意な差のある

チャンネルや課題を解析します。計測の目的や方法によって様々な解析方法がありますが、例えば前述のような語流暢課題を行った場合には、レスト期間とタスク期間のヘモグロビンの変化量の平均を算出し、t検定等によってそれらの平均間に差があるかを検定します。検定した結果をマッピング画像として表示し、判りやすく表示することも可能です（図7b）。解析方法には様々な注意点がありますので、適宜文献の参照が必要です。

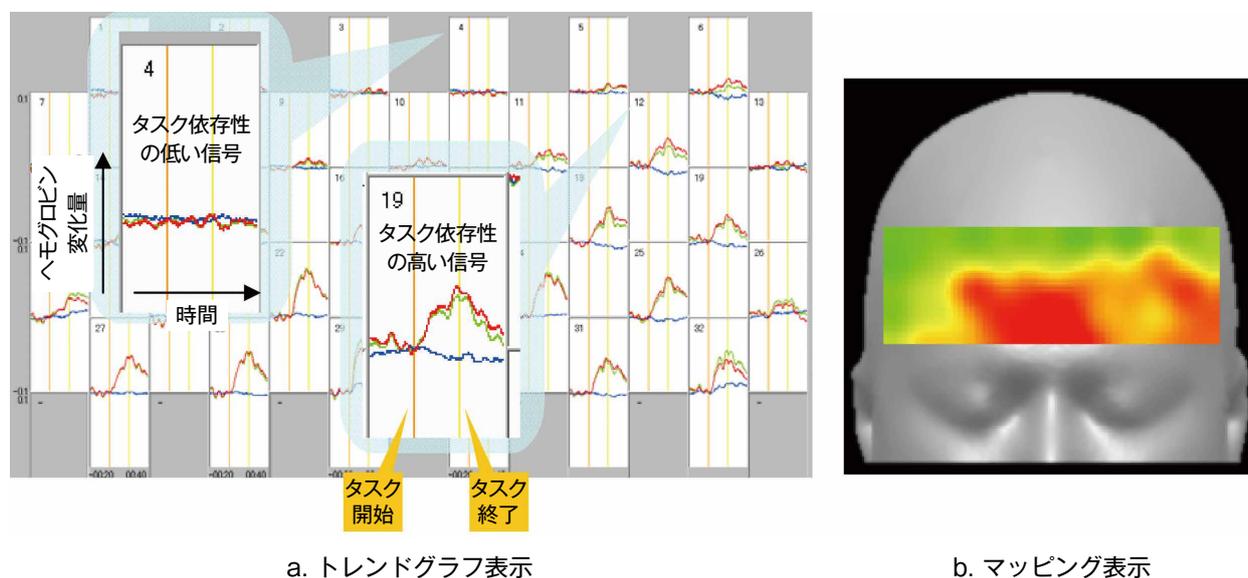


図7 計測結果の例

a. ヘモグロビンの相対的な変化を時系列で表示するグラフです。各ボックスは各チャンネルを表し、赤いグラフはOxy-Hb、青いグラフはDeoxy-Hb、緑のグラフはTotal-Hbを示します。例のような語流暢課題を実施すると、タスクが始まるとOxy-Hbが上昇し、終了すると下降するという変化が観察できます。

b. 血流の変化に合わせて各チャンネルを色付けし、その間を補完することで1枚の2次元マップとしてヘモグロビン変化の状態をわかりやすく表示することができます。また、レストとタスクのt検定を行い、その統計値を用いたマッピングを作成すれば、どの部位で有意な変化が見られる傾向にあるのか、大まかに知ることができます。計測部位の位置計測を行い、MRI画像と重ね合わせると、より効果的にマッピング画像を利用できます。

5.fNIRS 装置の特徴

5-1.FOIRE-3000 シリーズ

信頼性の高いデータを取得するためには、環境や行う課題に適切なスペックを有する装置を選択する必要があります。fNIRS装置は大きく研究用と医療用（薬事法承認装置）に分けることができます。研究用FOIRE-3000 シリーズ（図8）は様々な研究分野のニーズにこたえるため、優れた拡張性を有しています。脳科学研究のスピードが早い一方で、薬事法承認手続きを経て認可されるまでにかなりの時間を有します。研究用機器FOIRE-3000はその制約が無く、最新のソフトや外部計測機器との接続オプションをご利用いただくことができます。現在は脳科学分野のみならず、心理学、工学、教育学等に加え、産業応用の場などで幅広く活用されています。

■装置の特徴

FOIRE-3000 シリーズの光源には半導体レーザー（クラス1M^{注3}）を用いており、散乱の波長依存性を軽減するため、近接した3波長（780, 805, 830nm）を採用しています。光検出器は高感度かつダイナミックレンジの広い光電子増倍管を利用し、安定した計測を実現します。送光ファイバと受光ファイバの組数は4組、8組、12組、16組から選ぶことができ、2台接続すれば合計100チャンネル以上を計測することも可能です。



図8 FOIRE-3000 シリーズ

■ホルダの特徴

安定した高精度の計測を実現するためには、プローブをいかに頭表上に固定するかがポイントとなります。

FOIRE-3000 ではフレキシブルファイバホルダ（図9）を採用しています。ヒトの頭は様々な形や大きさをしていて、固定型のホルダでは、頭表上にうまくフィットしないことがあり、ずれやノイズの原因となります。子供から大人まで曲率の異なる様々な頭部形状にフィットする、フレキシブル型のホルダ「FLASH」（特許登録04254420）は、計測したい部位やサイズを自由に設定できます。標準搭載の頭頂用、側頭用ホルダに加え全頭をシームレスに計測するのに適した全頭用ホルダ^{注4}、前頭部を広く覆う前額用ホルダ^{注4}、新生児用の薄型直角ファイバ用ホルダ^{注4}等、研究用途に合わせてお選びいただけます。さらに、ホルダキット^{注4}を用いれば計測部位を自由にカスタマイズできます。

注3：レーザー製品の安全基準（JIS規格）中の低出力レーザー「クラス1M」を採用しています

注4：オプション品です



図9 FOIRE-3000 シリーズの様々なホルダ

a. b. 標準ホルダ c.前額用ホルダ d. 新生児用のホルダ（上）と薄型ファイバ（下） e. EEGと同時計測可能な全頭型ホルダ

■EEG やfMRI との同時計測

EEG 同時計測用ホルダ (図 9e) を使い、FOIRE-3000 (2台)、脳波計 (BioSemi社製ActiveTwo) からなるシステムを構築することで、fNIRS 最大100 チャンネル、脳波最大64チャンネルの同時計測が可能になります。また、ファイバを延長^{*}して、fMRI と同時計測が可能です。その他筋電計など、様々な生理計測機器のデータを取り込むことが可能です。これらの同時計測により、fNIRS の計測結果のみならず、ヒトの状態をより多角的に解析できます。また、自律神経系の活動を心拍変動解析システム^{注5}等を用いて同時計測し、抹消から中枢神経へ至る活動を包括的に捉えることができます。

■データ解析ソフトウェアの特徴

計測結果を迅速に解析するために、時系列モデルによるGLM統計解析ソフトウェア、独立成分分析 (ICA) ソフトウェア (特許登録04379155) を標準で搭載しています。計測したデータをその場ですぐに解析することが可能です。

■MRI 画像との重ね合わせ^{注5}

MRI 形態画像との重ね合わせにより、fNIRS による機能画像情報の位置精度が向上します。fNIRS のみでは、脳の構造が得られないため、鼻の付け根 (Nz)、後頭結節 (Iz) や左右耳介 (AR,AL) 等の基準点と、頭表に設置したプローブの位置を3次元磁気式デジタイザ^{注5}などで計測し、チャンネルの位置を算出して個人のMRI 画像と重ね合わせて表示することが可能です。

注5：オプション品です

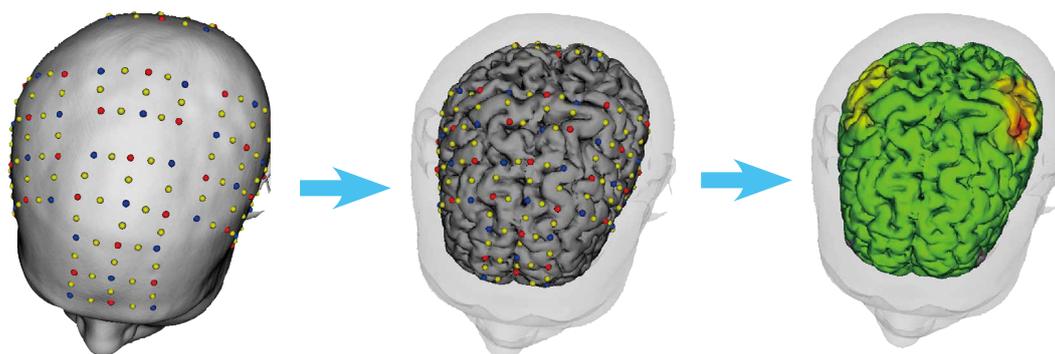


図 10 MRI 重ね合わせソフトウェア

基準点と、送光ファイバ、受光ファイバの3次元位置情報を計測します。MRI 重ね合わせソフトウェア上では図左のように頭表上の点が示されます。次に図中央のように頭表上の点から脳表上の点を推定します。最後に計測結果を重ね合わせると右図のように脳のどの部位で活動が見られたかが3次元画像として示されます。

5-2.OMM-3000 シリーズ

OMM-3000 シリーズは医療診断用装置として薬事認証を取得しています (医療機器製造販売認証番号：21600BZZ00195000)。臨床診断にも使用できることから、医学部や病院などに導入されています。現在は主に脳外科、精神科、リハビリテーション科などで活用されています。近年保険適用範囲においてもfNIRS が活用されはじめ、例えば高度先進医療におけるうつ病の鑑別診断補助などにおいて、OMM-3000 シリーズが導入されています。

※OMM-3000 シリーズはFOIRE-3000 シリーズと基本構成は同じですが、いくつかのオプション品が使用できないことがあります。詳しくはお問い合わせください。

6.FOIRE-3000 / OMM-3000 シリーズを用いた研究事例

6-1. 基礎的な研究 (fNIRS と fMRI との比較)

fMRI の主流となっているBOLDコントラスト法は、神経活動時の局所脳血流の上昇による脱酸素化ヘモグロビン濃度の低下を捉えることにより活動部位をイメージングしています。図11 は運動負荷 (grasp : 手を握る動作) 時の脳機能イメージングをfMRI とfNIRSで比較したものです^{*1}。fMRI (左) では、握った手と反対側の運動野に活動部位がイメージングされています。fNIRS (右) でもfMRI と同様の領域に、脱酸素化ヘモグロビンが低下し、酸素化ヘモグロビンが上昇する変化が二次元マッピング (MRI 画像に重ねて表示) としてイメージングされています。脳腫瘍や脳血管障害では神経活動時に脱酸素化ヘモグロビン濃度が低下しない症例が存在し、fMRI では活動部位を見逃すことが報告されています^{*2}。一方、fNIRS では酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの変化を別々に計測できるため、脳疾患の脳機能を正確にイメージングできる利点があります。

fMRI とfNIRS を比較することによって、fMRI による計測結果の解釈がfNIRS によって裏付けられると共に、複数の計測モダリティにより正確な脳機能マッピングを行うことが可能になります。

(データご提供：日本大学医学部・酒谷薫先生)

*1 酒谷他, 2006, 臨床脳波48 : 219-224

*2 Sakatani, et al, 2007. Review J Biomed Optics 12:062110,

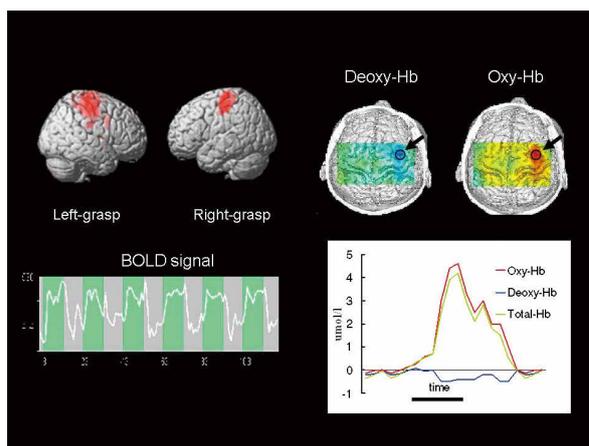


図 11 fMRI と fNIRS の計測結果

A : fMRIを用いた運動負荷 (grasp : 手を握る動作) によって、握った手と反対側の運動野領域に活動

B : fNIRSを用いた運動負荷によって脱酸素化、酸素化ヘモグロビンの変化が対応する運動野領域の二次元マッピング画像 (MRI画像に重ねて表示)

6-2. 診断や治療への活用 (神経リハビリテーションにおける fNIRS 研究)

近年、脳卒中後の機能回復など、神経リハビリテーションの分野においてfNIRSの応用研究が進められています。fMRI では被験者の安静が必須ですが、fNIRS は体動を伴うタスク環境下においても脳機能計測が可能です。このため、トレッドミルやエルゴメーター等で運動中にも計測ができ、運動および運動に伴う認知機能等に関連した大脳皮質の賦活情報が得られます。

リハビリの分野では、患者の回復過程をフィードバックすることにより効率的な回復を目指す「ニューロリハビリテーション」としても紹介されています。また、言語療法、作業療法などにおける様々なタスクに対しても計測が可能です。今後、このような診断や治療に直結する基礎研究が進めば、fNIRS を用いた診断や治療の補助の分野はますます広がることでしょう。

(データご提供：社会医療法人大道会森之宮病院・宮井一郎先生)

* Miyai et al, 2003, Stroke, 34, 2866-70.

<計測例>リハビリ前後の歩行時の脳活動を示します。

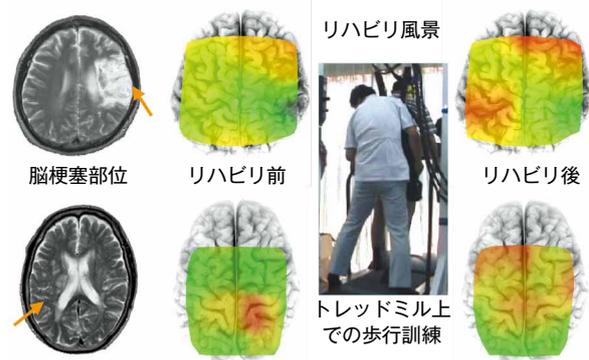


図 12 リハビリ前後の歩行時の脳活動

脳卒中患者2名のMRI画像 (矢印部が卒中部位)、リハビリ前における歩行中の脳活動、リハビリ後の脳活動。リハビリ前よりもリハビリ後のほうが卒中部位付近においても活動範囲が広がり、リハビリの効果として示されている。

6-3. 実験室環境における計測

脳機能計測においては、厳密なタスク依存信号を得るために、様々な条件を統制した実験室で計測を行います。fNIRS は計測環境や対象者の姿勢などの制限が少なく、心理実験などにも有効です。

例では、段階的に温度を調節できる温刺激装置に指をのせ、呈示される温度が何度か？を回答する課題中に、同時にスクリーン上に画像を呈示する課題を示しています。この画像が指先に呈示される温度（温/冷）のイメージと一致しているか不一致かによって、回答時の脳内の処理がどのように変化するか、計測しました。温度刺激と視覚刺激の「不一致群」と「一致群」のコントラスト（差分）をとると、不一致群のほうが一致群よりも有意な脳賦活が見られました（変化量：Oxy-Hb）。

このような心理学的実験手法を用いることによって、複雑なタスクを行うときの脳内処理の解析や、商品の感性評価などへつながる可能性があります。

<計測例> 不一致群と一致群のコントラストを示します。

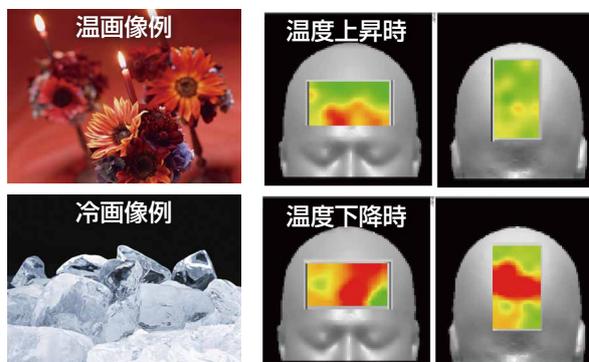


図 13 温度評定時の脳活動

温度表呈示に呈示した画像例（左）と一致/不一致条件のコントラストのマッピング画像（右）。

6-4. 日常生活における多様な環境での計測

例えばりんごの皮をむくという日常的な行動を行っているとき、脳のどの部位がどのように働いているのか、それが人や環境の特性によってどのように変わるのか、などを知るには、fNIRS を用いた計測が有効です。例では安静にしているとき（レスト）とりんごの皮をむいているとき（タスク）では前頭前野の働きが異なることを示しています。りんごの皮むきという動作は一見単純な行動のよう

に見えますが、ヒトの注意や作業記憶、運動調整機能など、様々な認知システムが働いています。被験者群の質を変えることによって熟練度との相関などを見ることも可能になります。

（データご提供：食品総合研究所・檀一平太先生^{注6}）

注6：現職は自治医科大学

※ Okamoto et al, 2004, *Neuroimage*, 21, 1275-88.

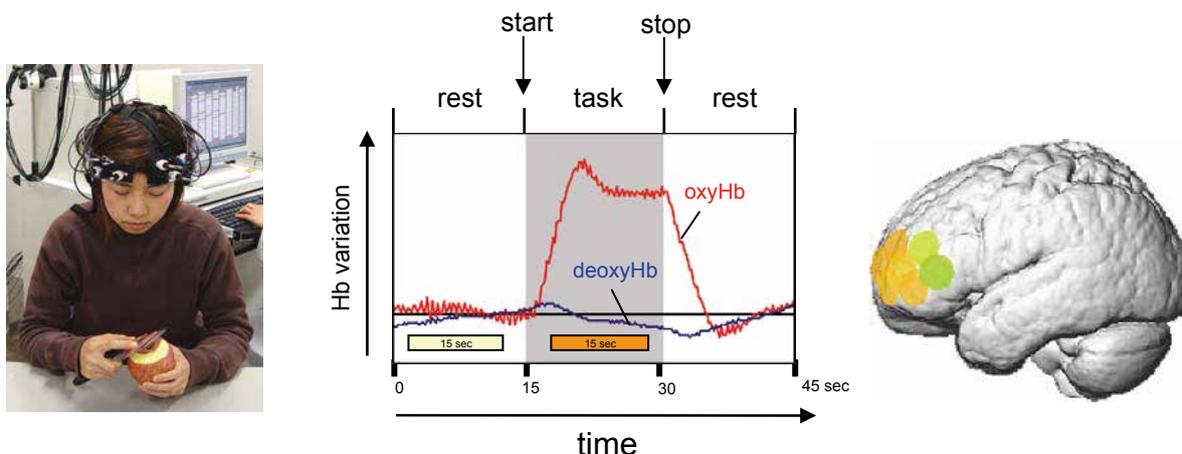


図 14 りんごの皮むき課題中の脳活動

りんごの皮むき実験風景（左）、計測時のヘモグロビン変化（中央）、前頭前野計測時の活動領域（右：黄色いほど変化が大きい）

7. おわりに

今世紀に入り、国のプロジェクトをはじめ、脳科学研究はますます加速をしています（図15）。これまでのような、「ある行動を行っているときの脳の活動はどのようになっているのだろうか？」という基礎的な研究のみならず、診断や治療への活用や、計測結果を解析して別の装置を制御するBMI、あるいは商品や広告の評価ツールとなったり、と様々な応用が考えられます。それぞれの研究目的に

応じて適切な装置と実験計画、解析を行うことによって脳科学はますます発展するでしょう。そのような流れの中、fNIRSは新たなフィールドに脳科学を導入するための鍵となります。弊社のFOIRE-3000 / OMM-3000 シリーズが皆様のご研究の一助となり、さらには脳科学の発展に寄与できれば幸いです。

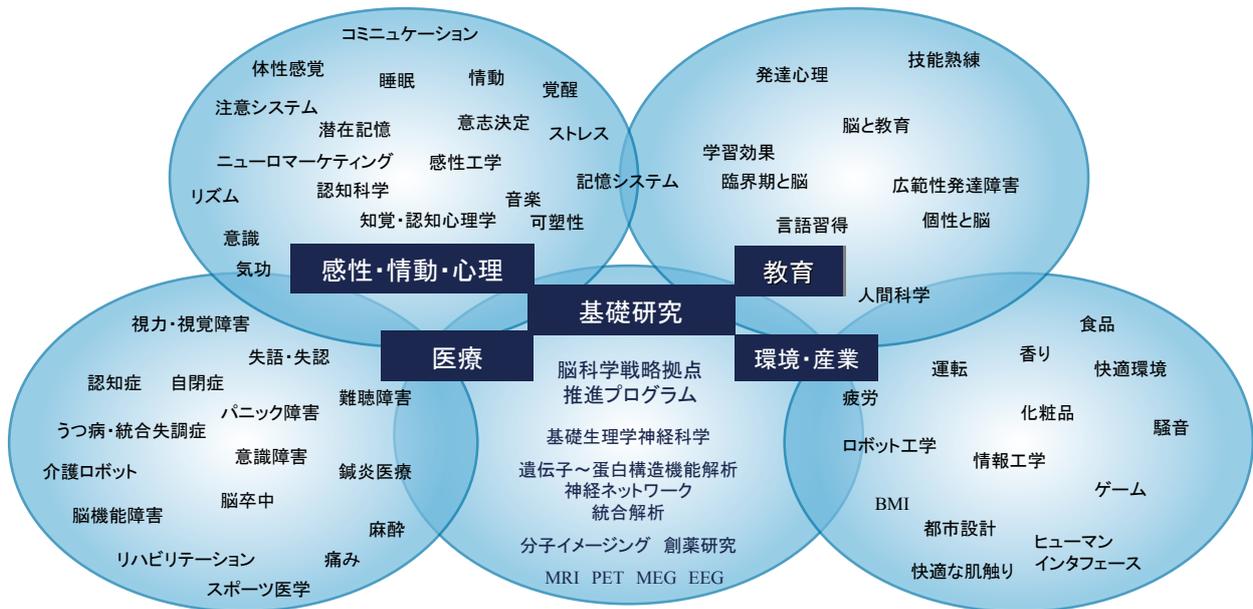


図 15 fNIRS が求められる研究分野の例

文献

Cope et al., *Adv. Exp. Med. Biol.*, 222, 183, 1988
 Chance et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.*, 90, 3770, 1993
 Hoshi and Tamura, *J. Appl. Physiol.*, 75, 1842, 1993
 Kato et al., *J. Cereb. Blood Flow. Metab.*, 13, 516, 1993
 Villringer et al., *Neurosci. Lett.*, 154, 101, 1993
 Okamoto et al., *Neuroimage*, 26, 18-28, 2005
 Ye et al., *NeuroImage*, 44, 428-47, 2009
 Okamoto et al., *Neuroimage*, 21, 1275-88, 2004

酒谷他, 2006, *臨床脳波*48 : 219-224
 Sakatani, et al. 2007. *Review J Biomed Optics* 12:062110,
 Miyai et al, 2003, *Stroke*, 34, 2866-70.
 Okamoto et al, 2004, *Neuroimage*, 21, 1275-88.
 福田正人編, 精神疾患とNIRS, 中山書店, 2009

本文書に記載されている会社名、製品名、サービスマークおよびロゴは、各社の商標および登録商標です。
 なお、本文中では「TM」、「®」を明記していません。
 本製品は、医薬品医療機器法に基づく医療機器として承認・認証等を受けておりません。
 治療診断目的およびその手続き上での使用はできません。
 トラブル解消のため補修用部品・消耗品は純正部品をご採用ください。
 外観および仕様は、改良のため予告なく変更することがありますのでご了承ください。

株式会社 島津製作所

分析計測事業部

604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町1

製品情報 価格お問合せ



東京支社 (官公庁担当) (03) 3219-5631 (大学担当) (03) 3219-5616 (会社担当) (03) 3219-5622	つくば支店 (官公庁・大学担当) (029) 851-8511 (会社担当) (029) 851-8515	名古屋支店 (官公庁・大学担当) (052) 565-7521 (会社担当) (052) 565-7531	広島支店 (082) 236-9652
関西支社 (06) 4797-7230	北関東支店 (官公庁・大学担当) (048) 646-0095 (会社担当) (048) 646-0081	京都支店 (官公庁・大学担当) (075) 823-1604 (会社担当) (075) 823-1603	九州支店 (官公庁・大学担当) (092) 283-3332 (会社担当) (092) 283-3334
札幌支店 (011) 700-6605	横浜支店 (官公庁・大学担当) (045) 311-4106 (会社担当) (045) 311-4615	神戸支店 (078) 331-9665	
東北支店 (022) 221-6231	静岡支店 (054) 285-0124	岡山営業所 (086) 221-2511	
郡山営業所 (024) 939-3790		四国支店 (087) 823-6623	

島津コーポレーション ☎ 0120-131691
 (操作・分析に関する相談窓口) IP電話等:(075) 813-1691