

AMCoR

Asahikawa Medical College Repository <http://amcor.asahikawa-med.ac.jp/>

心理学ワールド (2007) 38:25-28.

光で心を測る: 近赤外分光法と心理学

高橋, 雅治

光で心を測る — 近赤外分光法と心理学 —

旭川医科大学 高橋 雅治

はじめに

近赤外分光法は、心理学への幅広い応用が期待される新しい脳機能画像化法である。ここでは、そのしくみと研究例について紹介する。

光で脳を観るしくみ

近赤外分光法 (near-infrared spectroscopy: 以下 NIRS と略記) とは、「近赤外線」を使った「分光法」のことである。

赤外線 (infrared) とは、自然界に広く存在する、波長が約 700 nm から 1 mm の電磁波である。光を周波数で並べたとき、赤外線は、可視光の端に位置する赤色 (red) の外側、すなわち、周波数の低い方 (infra) に位置する。赤外線の中で、波長が可視光の赤色に近いものを、近赤外線 (near infrared) という。

一方、分光法 (spectroscopy) とは、スペクトル (周波数ごとの強度分布) を使って対象を調べる方法の総称である。周波数の異なる光が対象に吸収される量は、対象物質の性質や量によって異なる。これを利用して、対象に光をあてるだけで、対象の外部からその性質や量を知ることができる。

生体内で重要な役割を果たしているヘモグロビンが近赤線を吸収する量を周波数ごとに調べると、酸化ヘモグロビン (以下 oxy-Hb と略記) と脱酸素化ヘモグロビン (以下 deoxy-Hb と略記) で、各周波数の近赤線を吸収する量が異なる。そのため、ある周波数の近赤線の吸収量を、 oxy-Hb 、 deoxy-Hb 、および、他の組織による吸収量の和として表し、さらに、異なる周波数の近赤線を照射して得られる複数の式を連立方程式として解くことで、その組織に含ま

れる oxy-Hb と deoxy-Hb の量を推定することができる。

ヒトの頭皮に弱い近赤線を垂直に照射すると、頭皮、頭蓋骨、大脳皮質などにおける反射や吸収を経て、その一部が周辺の頭皮に戻ってくる。実際、近赤線の照射器と検出器を 3 cm 程度離して頭皮上に設置すれば、戻ってくる近赤線をうまく計測できることが経験的に知られている (図 1)。そして、戻ってきた近赤線の量に前述の計算方法を適用すれば、大脳皮質に含まれるヘモグロビンの量がわかるのである。

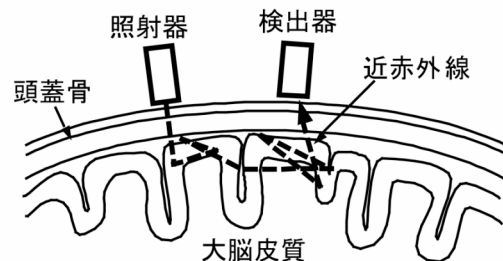


図 1 近赤外分光法の原理。頭皮上に配置した照射器から照射された近赤外線は大脳皮質付近で反射・屈曲し (点線の軌跡をたどり)、再び頭皮上に戻る。これを検出器で測定する。

頭皮から照射した近赤外線は瞬時に戻ってくるので、計測はきわめて高い時間解像度で行うことが可能である (通常は 10 Hz)。そのため、精神活動中に大脳皮質のヘモグロビン量が刻一刻と変化してゆく過程を、実験者はリアルタイムで観察することができる。

計測は、頭皮上の複数の位置で同時に行うこともできる。たとえば、照射器と検出器を格子状に配置すれば、照射器と検出器の間 (これをチャンネルという) にある oxy-Hb と deoxy-Hb の量を同時に推定することが可能となる。このとき、戻って

きた近赤外線がどの照射器からきたものであるかを区別するために、照射する近赤外線に周波数変調をかけておく。また、複数の位置における測定値から濃度分布関数を推定することにより、トポグラフィ(分布図)としてあらわすこともできる。さらに、得られたトポグラフィ画像を、MRI断層画像から合成した各被験者の脳の3次元立体画像上に貼り付けることで、おおよその測定位置を確認することも可能である(図2)。

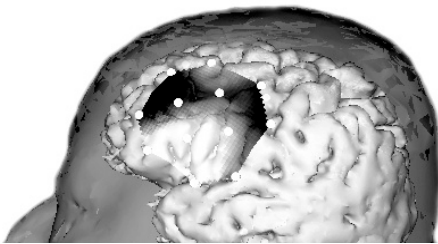


図2 NIRSに測定結果の例。図中の白い点は、12個の測定チャンネル(照射器と検出器の中間に位置する点)を表す。白い点に囲まれた領域中の黒い部分は、課題遂行中にoxy-Hbの量が増加したことを表す。

心理学への応用

(1)精神活動と酸素代謝

ヒトが精神活動を行うと、大脳の神経細胞の活動が亢進し、それにともない糖や酸素の代謝が数%程度増える。一般に、神経活動が亢進すると、酸素代謝が増えるために、活動部位のoxy-Hbは一時的に減少し、逆にdeoxy-Hbは一時的に増加すると考えられている。これを「初期下降(initial dip)」という。しかし、数秒程度で、oxy-Hbを補い、deoxy-Hbを運び出すために、血流量が大きく増加する。そのため、活動を開始してから数秒遅れで、oxy-Hbは増加し、deoxy-Hbは減少しはじめるとされている。

これまでの研究から、NIRSにより測定されたoxy-Hbやdeoxy-Hbの変化と、PET(ポジトロン断層法)による測定結果の間には、ある程度相関があることが示されている。ま

た、fMRIによる測定結果との間にも、ある程度対応関係があるとされている。だが、時間解像度の高いNIRSの測定結果が、PETやfMRIの結果とどのように対応するかについては、解決しなければならない問題が山積しており(たとえば、酸素消費があまりに急速に進むとdeoxy-Hbの増加とoxy-Hbの減少が観察される、という考えも提案されている、加藤ら、2006)、その詳細な対応関係について研究努力が続いている。

(2)研究の成果

これまでに、NIRSによる様々な大脳活動の計測結果が報告されている。その一端を以下に示す。

- 1 視覚課題中の視覚野におけるoxy-Hbの増加や減少
- 2 運動課題中の運動野、体性感覚野等におけるoxy-Hbの増加
- 3 言語課題中の言語野におけるoxy-Hbの増加や減少
- 4 ストループ課題中の前頭前野におけるoxy-Hbの増加
- 5 Go/No-Go課題中の前頭前野におけるoxy-Hbの増加
- 6 短期記憶課題中の背外側前頭前野におけるoxy-Hbの増加
- 7 線画のSD法評価課題中の体性感覚野におけるoxy-Hbの増加
- 8 空間的注意課題中の前頭前野におけるoxy-Hbの増加や減少
- 9 視覚運動課題中の前頭前野におけるoxy-Hbの減少

これらの知見は、NIRSが認知機能の基礎研究にとって有効な手法であることを示している。さらに、精神医学においても、うつ状態や統合失調症等の本質を反映する臨床指標としてのNIRSの有効性を示すデータが報告されている(Suto et al., 2004)。これらのことから、NIRSは、基礎および応用研究における有用な脳機能画像化法であることは明らかである。

(3)長所と短所

NIRSは、従来の手法と比べて、次のような長所を持っている(福田ら、2001; 牧ら、1997; 高橋、

2003)。

- 1 被験者への負荷が小さい
- 2 被験者が動くことができる
- 3 小型・軽量・安価である
- 4 無侵襲で倫理的問題が少ない
- 5 oxy-Hb と deoxy-Hb を分離して測定することができる
- 6 時間解像度が高い(1/10秒程度)
- 7 騒音が小さい

これらの中で、1から4がもたらす圧倒的な実用性は重要である。なぜならば、これにより、fMRIやPETでは考えられなかったような幅広い研究を行うことが可能になるからである。たとえば、歩行、音楽演奏、ダンス、計算等の各種運動を含む多様な認知活動と脳機能の関係を研究することができる。また、乳児、高齢者、患者等を対象とする研究もかなり容易になる。現在、これらの長所を生かした心理学研究が世界各地において続々と始まっている。

また、5と6の長所により、前述の初期下降も含めて、神経細胞の代謝変化と脳血流量の詳細な関係を研究することが可能にされた。さらに、7の長所により、fMRIのような騒音を伴う方法では難しかった聴覚関係の研究が容易になった。

一方、短所としては、以下の点が上げられる。

- 1 空間解像度が低い(通常は2cm程度)
- 2 計測領域が狭い
- 3 種類の異なる試行ごとの反応を計測することができない
- 4 相対値しか測定できない
- 5 脳の深部を測定することができない

これらの中で、1については、照射器と検出器の配置を工夫することで、空間解像度を1cm程度まで上げる試みが報告されている(加藤ら, 2006)。これは、fMRI等と比較しても、さほど見劣りしない解像度である。また、高解像度が必要とされるのは一部の機能局在研究であり、認知研究の多くはあまり高い解像度を必要としない。さらに、2の点は、全頭型のプローブが開発されたので、最近ではあまり大きな問題ではなくなった。加えて、3についても、従来脳波研究と同じように、事象関連型(event-related)の

実験方法が開発されたことで、種類の異なる試行ごとに測定できるようになった。

一方、4は、測定結果として得られるヘモグロビン濃度が、照射した近赤外線的光路長(どれくらいの距離を通過したか)という定数を含む相対値であるために発生する問題である。この問題はかなり深刻である。なぜならば、近赤外線的光路長は、被験者や実験条件等によって異なる可能性が大きいからである。たとえば、測定値に含まれる光路長の値が頭皮上の計測位置により異なるとすれば、異なる位置で同時に計測されたヘモグロビン変化量を直接比較することはできないことになってしまう。

この問題を解決するためには、近赤外線の投射から検出までの時間を精密に計測し、光路長を毎回正確に測定すればよい。しかし、この方法は、現時点では時間とコストがかかりすぎる。一方、光路長等に由来する信号変化の個人差の問題を解決するために、データ解析法を工夫する試みも提案されている(たとえば、Schroeter et al. 2004)。今後、これらのデータ解析法を取り入れた研究が累積し、かつ、さまざまな認知機能についてfMRIやPETと同様の計測が可能であることが経験的に確認されれば、この問題も解決されるだろう。

一方、5の問題は、動機づけや情動に関係する部位のほとんどが脳の深部にあることを考えると致命的であるように思われる。実際、対人認知や意思決定などといった心理学的に重要な問題には動機づけや情動が大きく関与している。従って、これらの研究にとって、大脳皮質の表面の血流量しか計測できないNIRSは、あまり役に立たないように思われる。

だが、最近、池上と高橋(2006)は、報酬確率の操作により実験的にフラストレーション状況を生み出したときの前頭前野の活動を計測し、被験者の対処不能感と血流量の低下の度合いの間に相関があることを報告している。報酬についてのフラストレーションには、線条体、帯状回前部、前頭前野などを含む神経系が関与していることが示唆されている。従って、その系の中で、

NIRSにより計測可能な部位の活動を計測することで、動機づけや情動をある程度研究できる可能性はある。

旭川医科大学での研究

旭川医科大学の心理学研究室では、NIRSを使って、注意課題やフラストレーション事態における脳活動の研究を行ってきた。これに加えて、最近では、付属病院の小児科と連携して、注意欠陥/多動性障害(ADHD)の患者の脳活動を分析し、ADHDの本質を反映する行動的および生物学的な指標の解明、ADHDの各種亜型についての精密な診断方法等につながるデータが集まりつつある。その報告は別稿に譲る。

おわりに

これまでに述べてきたように、NIRSは、脳機能イメージングの新しい手法として急速に確立されつつある。今後、その長所と短所を十分に考慮しながら応用を重ねることにより、心理学研究が大きく進展することが期待される。

文献

池上将永・高橋雅治 2006 強化確率の操作が感情状態および前頭前野活動に及ぼす影響—近赤外分光法を用いた検討—日本心理学会第70回大会発表論文集 p775.

加藤俊徳, 小池敏英, 前迫孝憲, 雲井未歆, 大川佳美, 成基香, 渡邊流理也: 高選択性近赤外分光機能画像法NIRS-Imagingによるブローカ野の脳血流動態と局在化に関する検討—単語復唱課題遂行時の特徴について—. 2004 臨床脳波, 46: 20-32

高橋雅治 2003 近赤外線分光法による高次脳機能の認知神経科学的解明 旭川医科大学フオ

ーラム, 4:25-29.

福田正人、伊藤誠、須藤友博、亀山正樹、山下裕、上原徹、井田逸郎、三国雅彦 2003 精神医学における近赤外線スペクトロスコピーNIRSの意義—精神疾患の臨床検査としての可能性—. 脳と精神の医学 14:155-171.

牧敦、山下優一、伊藤嘉敏、渡辺英寿、小泉英明 1997 光トポグラフィによる無侵襲脳機能計測. BME(生体医工学) 11:12-18.

Schroeter M T, Bucheler M M, Muller K, Uludağ K, Obrig H, Lohman G, & Tittgemeyer M, Villringer A & Cramon B Y 2004 Towards a standard analysis for functional near-infrared imaging *NeuroImage*, 21:283-290

Suto T, Fukuda M, Ito M, Uehara T, & Mikuni M 2004 Multichannel Near-Infrared Spectroscopy in Depression and Schizophrenia: Cognitive Brain Activation Study *BIOL PSYCHIATRY* 55:501-511