

最近の技術から

光による脳機能計測

田 村 守

北海道大学電子科学研究所 T060 札幌市北区北12条西6丁目

1. はじめに

光通信を中心とした近赤外領域の光学技術の発展と、生体組織がこの領域の光に対し高い透過性を持つという二つの偶然が、医学・生物学における“脳の時代”と工学技術における“光の時代”を結びつけるきっかけとなつた¹⁾。光を用いた脳機能計測（特に人の高次脳機能）は、脳神経系が活性化されると、エネルギー消費が増大し、これが脳血流の増加を引き起すという原理に基づく。ここで血液中に含まれるヘモグロビン（Hb）は酸素化型（oxy-Hb），脱酸素化型（deoxy-Hb）に特徴的な700～1200 nm 領域に吸収帯を持つので、これを外部から測定すれば良い。すでに近赤外光を利用した酸素モニター（波長は 780, 805, 830 nm）が臨床で 1000 例近く本邦でも利用されており、われわれはこの酸素モニターを人の脳活動のイメージングに応用している。ここではその最近の成果を述べたい²⁾。

2. 人の脳機能イメージング

写真（図 1）は実際の光脳機能イメージングの測定の様子を示す。被験者の“ハチ巻”の中に 1 組の照射および受光用プローブが頭部の 5箇所（左右の前頭葉（LF, RF）および側頭葉（LT, RT）と後頭葉（LO））に装着してある。実験台上に 5台の酸素モニターが置いてある。一台の酸素モニターから 3種の異なる波長の光が時分割で照射されているので、合計 15種の照射光が同時に脳組織を散乱しながら“走り回っている”。相互に干渉しないことを確かめたあと、被験者に暗算を行った時の脳局所の計測例を図 2 に示す³⁾。被験者に矢印 1 から 2 の間で次々と問題を出し、答えを言ってもらった。左右の前頭葉および左側頭葉は暗算の開始とともに血液量および酸素化 Hb の増加が見られ、顕著な活性化が起こっている。この時、右側頭葉と後頭葉は働いていない。暗算修了後、左側頭葉はすぐに元の安静時のレベルに戻るのに対し、左右前頭葉の戻りは遅い。この暗算の場合は、左右前頭葉は同じように活性化されたが、負

荷（task）の種類によっては、左右半球の差が際だって見える場合がある。図 3 はその一例で、被験者に個人的な質問をして、感情の激しい動き（emotional task）が生じた際の左右前額部のトレースである⁴⁾。質問後、左前額部では 1 秒以内に急激な血流増加と酸素化 Hb の増加が見られ、その後ゆっくりと元のレベルに戻っていく。一方右前額部は質問後、ゆっくりと酸素化 Hb の増加、脱酸素化 Hb の減少が起こり、血液の増加はほとんど起

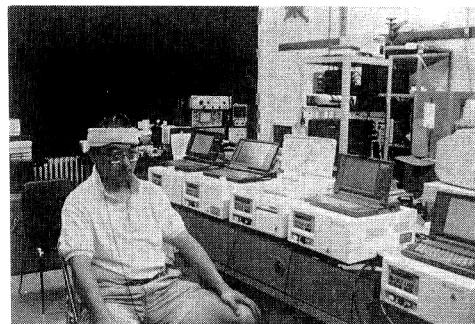


図 1 光脳機能イメージングの測定。5台の近赤外酸素モニター（右の実験台）を同時に動かす。

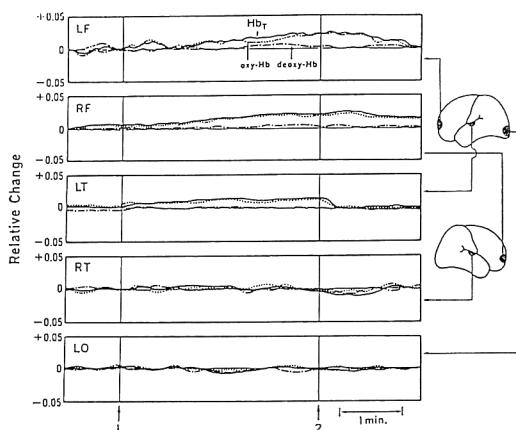


図 2 暗算を行っている時の脳局所（5箇所）の近赤外計測例。図 1 の被験者に答えるてもらった。LF：左前頭葉，RF：右前頭葉，LT：左側頭葉，RT：右側頭葉，LO：左後頭葉 (oxy-Hb；酸素化 Hb, deoxy-Hb；脱酸素化 Hb, t-Hb；全 Hb 量)。

きていない。この結果は、前頭葉は論理的思考が要求される mental task より、感情の動き(emotional task)により強く活性化され、また通常、左脳優位であるため、明らかに左脳は右脳より早く、かつ激しく活動している。質問の音声は耳からの神経信号が側頭葉の一次聴覚野へ入り、次に連合野で言語として理解し、それが前頭葉で、被験者にとって“個人的な質問”として理解するその全プロセスが1秒以内に脳内で情報処理が行われていることになる。一方、右脳では酸素化 Hb の上昇が見られるとき、血流はほとんど増加していない。言い換えると、右脳の酸素消費は下がる。したがって右脳は“不活性化”され、右脳と左脳で逆のことが起きていることになる。この事実が何を意味するのか、現時点ではわからないが、左右の脳の cross-talk を考える上で興味深い。この左右脳の優位性は、男性と女性および右利きか左利きかで明らかに差がある²⁾。

3. 現状と展望

図2, 3に光を用いた脳機能計測の例を紹介したが、まだまだプリミティブである。特に解像度と内部の代謝を知り得る PET (positron emmission tomography)

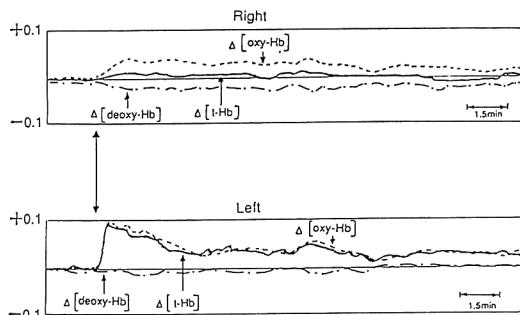


図3 個人の質問を受けた左右前頭葉の計測例

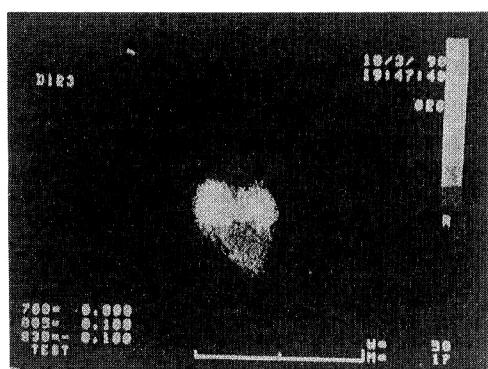


図4 ファイバーコリメーターを用い通常の X線 CT アルゴリズムを利用した“直進光型”光 CT 像。麻酔ラット。

や MRI (magnetic resonance imaging) に比べれば欠点も明らかであろう。現在の空間分解能は、装着した照射および受光用プローブの距離で決まり、~3 cm 程度離すと、表面から ~3 cm 程度の深さの情報を検出しているとしかいえない。また、検出された酸素化 Hb や血液量の絶対値が求められない。これらはすべて、生体組織が強い多重散乱系であることを基づく⁵⁾。現在のところ、ピコ秒やフェムト秒領域の短パルス光を利用した“飛行時間—time of flight—”から光子の飛行距離(pathlength)を微視的に求めて、絶対吸光度を決定するか、光拡散方程式を解析的に解いて、そこに含まれる散乱係数 μ_s 、および吸収係数 μ_a を実測値と合わせるかの二つの方法が提案されている。この時、散乱と吸収の二つのプロセスが独立に扱えるか否か論争が続いている⁵⁾。

図4はラット頭部の光 CT 像である。この像是空間的にコリメートした光を用いたもので、一応左右大脳半球を観測できる。われわれの生体では $\mu_s=10 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_a=0.01 \text{ mm}^{-1}$ 程度なので、直進光はほとんどなく、また、光の減衰も $10^{-12} \sim 10^{-14}$ に達する。したがって新生児頭部 (~10 cm) の CT 像をどのような手法を用いても“直進光”を利用する限り不可能である。この場合散乱したすべての光を利用した新しい手法が望まれる。現在、われわれは、三組のピコ秒半導体レーザーと 64 個の高速ホトマルおよび 64-channel の TAC (time-amplitude converter) および CFD (constant fraction discriminator) を装備した新生児用飛行時間型光 CT を試作中である。画像再構成アルゴリズムや散乱系の光の挙動の基本問題も含め、技術的に非常に多くの困難を伴っているが、これらを克服できれば医用光学がさらに大きく進むと信じている。

付記：最近、Stanford 大のグループが人新生児の光 CT 像を発表した。(D. Benaron, Applied Optics, 投稿中, 私信)

文 献

- 1) 田村 守：“続、光を用いた生体計測—光 CTへの道”，O plus E, 1990. 5月～1991. 9月まで連載。
- 2) 田村 守, 星 詳子：“光を用いた脳活動の無侵襲計測”, 応用物理, 63 (1994) 232-239.
- 3) Y. Hoshi and M. Tamura: “Dynamic multichannel near-infrared optical imaging of human brain activity,” J. Appl. Physiol., 75 (1993) 1842-1846.
- 4) Y. Hoshi and M. Tamura: “Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neuronal function during mental work in man,” Neurosci. Lett., 150 (1993) 5-8.
- 5) 片山 薫, 西村吾朗, 田村 守：“散乱系での光の挙動”, 光学, 23 (1994) 297-303.

(1994年8月17日受理)