光トポグラフィー：新しい無侵襲脳機能計測法

○小泉英明, 牧 敦, 山本 剛 (日立製作所基礎研究所)

Optical Topography: A Novel Method for Noninvasive Brain-Function Analysis

Hideaki Koizumi, Atsushi Maki, Tsuyoshi Yamamoto
(Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

1. 緒言：光トポグラフィーは、近赤外光を用いて大脳皮質の活性化状態をイメージングする新しい無侵襲脳機能計測法である。頭皮の毛根の間のスペースに、フレキシブルな光ファイバーの先端を触れさせ、微弱な近赤外光を脳内へ照射する。そして、大脳皮質から反射してきた一部の近赤外光を用いて、大脳皮質内の酸化型ヘモグロビンと還元型ヘモグロビンの分布と動態を分光計測する。被検者に負担をかけない完全無侵襲な高次脳機能計測法であり、日常的な解放された環境下でも計測可能である点で、多くの新しい応用分野が期待される^{1,2)}。

2. 原理と装置：ヒトの頭部は外側から内側に向けて頭皮（毛髪を含む）、頭蓋骨、硬膜・軟膜、脳脊髄液層、大脳皮質（灰白質）、白質の順で層状構造をなす。電灯に手をかざすと光が透けて見えるように、頭皮などはかなり光を通す。しかし、一般に成人の頭蓋骨は光を極度に散乱・吸収すると考えられてきた。ところが、実際に頭蓋骨の散乱・吸収スペクトルを測定すると、波長 700~900 nm の近赤外領域で 0.1% 程度の光を透過させることが分かった。さらに、この波長帯で硬膜・軟膜、脳脊髄液層は比較的透明である。したがって、頭皮の外から直径 1 mm の光ファイバーで近赤外光を照射すると、一部の光は 30 mm 程度の深部まで到達し、白質や灰質（大脳皮質）で散乱・反射してふたたび頭皮の外まで戻ってくる。これを同じく直径 1mm の光ファイバーで検出すると大脳皮質の状態を分光計測できる。

被検者の安全性を確保するために、太陽光よ

り微弱な出力 1-10 mW 程度の半導体レーザーを光源として用いている。酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンの両方とも近赤外領域に吸収をもち、等吸収点は 800 nm 近傍にある。したがって、多波長の多点計測を適用することによりそれぞれの濃度を知ることができる。ただし、強い光散乱のために光路長が特定できない場合が多く、実際には濃度の変化を観測することになる。逐次計測法あるいは周波数変調の同時計測法により大脳皮質における酸化・還元ヘモグロビンのマップを作成できる。

大脳皮質は厚さ 2.5 mm 程度の 6 層構造をなし、神経と血管が密集している。機能領野によっては、神経は直径 0.4 mm 程度の柱状構造か

図1 光トポグラフィーのインターフェイス部

らなる機能単位を構成し、動脈・静脈がそれぞれ倒立・正立のヒマラヤ杉状に配置され、各機能単位について血液を灌流させている。神経活動と局所血行動態は密接にリンクしており、神経興奮時に局所の血流は数十%も増大する。これに伴って局所血液量（酸化・還元ヘモグロビンの総量に比例）や酸化・還元ヘモグロビン比率が変化する。このために、酸化・還元ヘモグロビンのマップから大脳皮質の活性化を描画できる。

3. 方法論的特徴：光トポグラフィは比較的簡便な装置であり、特殊な測定室を必要としない。完全に無害と考えられ、幼児にも適用可能と考えられる。また、他のモダリティと異なり、被検者が拘束されないために自然環境下での検査が可能となる。実験用システムでは大脳表面についての空間分解能はPET レベル（～2 cm）で、時間分解能はfMRI レベル（～0.5 s）である

4. 応用分野：光トポグラフィの応用可能性は多岐にわたる。脳神経外科領域では優位半球の同定³⁻⁴⁾、機能領野の術前・術中・術後評価、てんかんの焦点決定⁵⁾などがある。神経内科領域ではリハビリテーションの方針決定・効果の評価、失語症・言語障害などがある。精神科領域では精神症、睡眠、投薬評価などがある。また、基礎的な脳神経科学への応用は大脳皮質表面に関係する高次脳機能の計測、とくに言語系のほか、前頭前野に関係深い注意・抑止、一時記憶、報酬系などがある。そのほかストレスや痛みの計測、各制度の計測、機器の制御のためのインターフェイスなど、多くの斬新な応用が考えられる。

開発当初から東京警察病院脳神経外科の渡辺英寿部長をはじめとして、多くの異なった医学分野と共同研究進めている。おもな分野としては、①脳神経外科：てんかんの焦点同定、優位半球同定②神経内科：特殊脳の発達支援、筋萎縮性側索硬化症、失語症機序、③精神科：睡眠、④基礎：乳幼児認知発達、などがある。

参考文献

- 1) A. Maki, Y. Yamashita, Y. Ito, E. Watanabe, Y. Mayanagi and H. Koizumi: Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography, *Med. Phys.*, 22,1997-2005,1995.
- 2) H. Koizumi, Y. Yamashita, A. Maki, T. Yamamoto, Y. Ito, H. Itagaki and R. Kennan: Higher-order brain function analysis by transcranial dynamic NIRS imaging, *J. Biomed. Optics*, 4,403-413,1999.
- 3) T. Yamamoto, Y. Yamashita, H. Yoshizawa, A. Maki, M. Iwata, E. Watanabe, and H. Koizumi: Non-invasive measurement of language function by using optical topography, *SPIE*, 3597, 230-237, 1999.
- 4) E. Watanabe, A. Maki, F. Kawaguchi, K. Takashiro, Y. Yamashita, H. Koizumi, and Y. Mayanagi: Non-invasive assessment of language dominance with near-infrared spectroscopic mapping, *Neurosci. Lett.*, 256, 49-52,1998.
- 5) Watanabe, A. Maki, F. Kawaguchi, K. Takashiro, Y. Yamashita, H. Koizumi, and Y. Mayanagi: Non-invasive cerebral blood volume measurement during seizures using multi-channel near infrared spectroscopic topography, *J. Epilepsy*, 11,335-340,1998.