

脳のイメージング：脳からの磁界反応

今田 俊明

NTT 基礎研究所

〒243-01 神奈川県厚木市森の里若宮3-1

1. まえがき

視覚情報処理を行なっている人間の脳の部位は主として後頭葉，側頭葉，頭頂葉である。この視覚機能を調べるのに，心理学的アプローチ，生理学的アプローチ，工学的アプローチがあるが，本稿では学際的アプローチの一つである脳磁界計測・解析について簡単に解説する。脳磁界計測・解析アプローチでは，心理学的アプローチと同様に視覚刺激を被験者に与えるが，被験者の回答反応を計測するのではなく，その脳の生理学的反応を直接観測する。視覚刺激としては，フラッシュ，チェッカボードパタンのオン・オフあるいは反転，ランダムドット，ランダムライン，テクスチャ，図形，文字，物品・人物・風景の絵・写真等が用いられる。一方，視覚刺激には極めて多くの可変パラメータがある。それらは，明るさ，色，大きさ，呈示時間，呈示時間間隔，視野内呈示位置，空間周波数，運動の方向・速さなどである。こういった視覚刺激を利用して，第1次視覚野，第2次視覚野といった解剖学的な対象，図形視，立体視，運動視といった機能に関連する対象などが研究されている。本稿では，こういった各種の視覚刺激に対する脳磁界反応について，これまでに発表されてきた論文をトピック別に紹介する。なお，本稿では，主として視覚刺激呈示後 100 ms 前後の長潜時反応に関する解説を行なう。

2. 脳磁界とは^{1,2)}

神経細胞が活動するときには，細胞内にイオン電流が流れ，それは細胞外にも流れ出て，良

導体である脳を巡る。この細胞外電流（体積電流とも呼ぶ；これに対して細胞内を流れる電流を印加電流と呼ぶ。印加電流は化学的エネルギーから変換された電流で，電池内部の電流，体積電流は電池につないだ導線を流れるオーミックな電流）は，導電率の低い頭骨から漏れ出て頭皮上を流れる。この電流による電位差は脳波と呼ばれる。脳波は基本的に細胞外に漏れ出た電流を計測している。

これらの電流から，アンペアの右ネジの法則に従う磁界が誘起される。この磁界は脳，頭骨，頭皮を通過して頭外に現れる。脳，頭骨，頭皮の透磁率と空気中の透磁率はほぼ同じであるから，脳内の磁界は，減衰はするが歪むことなく頭外に現れる。脳が球核であり，頭骨，頭皮がその回りを覆う球殻であると仮定し，その導電率が脳，頭骨，頭皮毎に一定であるという単純な球モデルを考えると，計算から次のような事実が導かれる。

1. 球内の半径方向の印加電流は球外には磁界を生じない。
2. 球内の接線方向（半径方向に直交する方向）の印加電流は球外に磁界を生じる。
3. 半径方向の磁界（これは球外での計測を考えると球面に垂直な法線方向となるので，磁界の垂直成分とも呼ぶ）には体積電流は全く寄与しない。

頭皮に垂直な磁界成分は，細胞外ではなく細胞内の電流（印加電流）によって生ずる磁界であり，その磁界の計測結果から逆に細胞内の神経電流を推定することができる。実際には，完全に垂直な成分を計測するのは難しいため，体

積電流による磁界も考慮に入れる。

この脳磁界は極めて微弱であり（数10～数100フェムトテスラ；地磁気の1～10億分の1）、超伝導現象を利用したSQUID（superconducting quantum interference device）を用いて計測を行なう。脳内で神経細胞が活動するときには、1個だけが活動するというより、多くの一まとまりの神経細胞群が活動すると考えられるので、脳磁界計測で得られる磁界信号は、一まとまりの神経細胞群の細胞内電流による磁界である。なお、現在の装置のノイズレベル、頭外での脳磁界の強度を考えると、脳内の神経細胞1個の活動を個別に計測することはできない。

3. 脳磁界の計測と解析

1995年3月にNTT基礎研究所に設置された全頭型脳磁界計測装置³⁾（Neuromag Ltd. 製, Finland）を図1(a)に示す。筒状の装置の底の部分（頭に接する部分）に磁界センサが122個配置されており（図1(b)）、この装置により、前頭、頭頂、側頭、後頭の部分から頭外に現れる脳磁界を同時に、1ミリ秒ごとに計測することができる。左視野に視覚刺激を呈示したときの122個の磁界センサから得られる反応磁界信号の磁界ボタンを等磁界線を用いて表現したのが図2である。刺激後80ms、130msにおける後頭部での磁界ボタンがそれぞれ(a)、(b)である。図の矢印は、脳内の活動が1個の電流ダイ

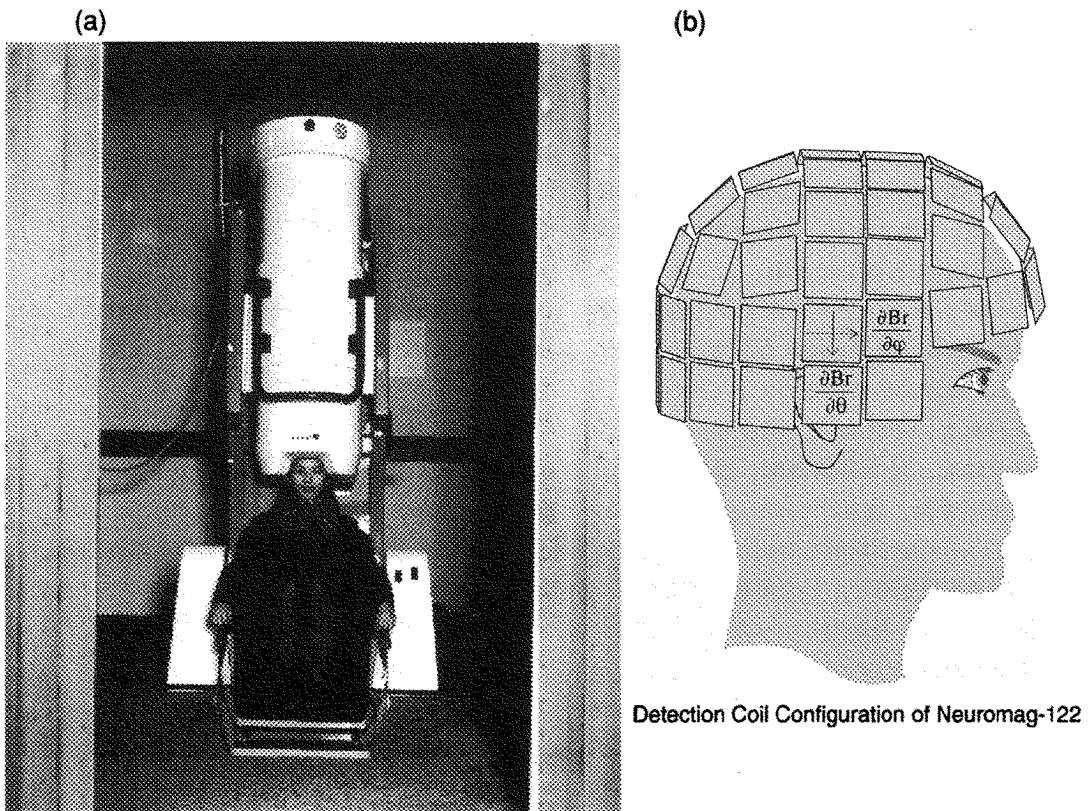


図1 (a) 1995年3月にNTT基礎研究所に設置された全頭型脳磁界計測装置（Neuromag Ltd. 製, Finland）。筒状の装置はアユワと呼ばれる液体ヘリウム容器。その底の部分（頭に接する部分）に磁界センサが122個配置されている。この装置は磁気ノイズを減衰させるための磁気シールドルーム内に設置されている。(b) 磁界センサの配置図。一つの正方形の中に2個のセンサがあり、このコイル面に垂直な磁界成分の上下、左右の差分を計測する。つまり、球座標系 (r, θ, φ) を仮定すると、磁束密度の r 成分 B_r の微分 $\partial B_r / \partial \theta$ と $\partial B_r / \partial \varphi$ を計測する。この装置により、前頭、頭頂、側頭、後頭の部分から頭外に現れる脳磁界を同時に、1ミリ秒ごとに計測することができる。

ポール（ある大きさ・方向の電流が流れる体積 0 の電流源）で近似できると仮定し、磁界ボタンからその発生源を計算して求めたもので、矢印の中央部が推定位置、矢印の方向が活動電流の方向である。これを同一被験者の磁気共鳴像に投影すると、それぞれ図 3 (a), (b) の位置となる。刺激後 80 ms で鳥距溝（第 1 次視覚野）と呼ばれる皮質部分が、刺激後 130 ms で右外側後頭皮質が主に活動していることが分かる。

脳磁界計測では、脳内の活動部位・活動の大きさなどをミリ秒の時間分解能で追跡することができる。また、活動部位（電流ダイポール）推定の空間的精度も数 mm といわれる。さらに、被験者に様々な課題を与えて、それを遂行するときの脳磁界パタンの時間変化、課題による差異などを解析して、視覚情報処理のメカニズム解明にアプローチできる。

4. 色反応

サルにおける色覚反応部位として、Zekiらは V4 領域を示した⁴⁾。一方、人間の視覚系における色に対する処理部分としても、Zeki が V4 領域を主張している⁵⁾。色刺激を用いた脳磁界計測で、その活動部位が明確に V4 であることを示した研究はまだない。

Plaulus らの脳波実験⁶⁾（色刺激に対しては潜時 87 ms の負ピーク、白黒刺激に対しては潜時 110 ms の正ピーク）を受けて、Krauskopf らは、直径 0.5° の円形刺激を左下視野に呈示

時間 360 ms、呈示間隔 (ISI) 600 ms で呈示した⁷⁾。刺激は、背景と同輝度の赤色、緑色、より高輝度の白色、低輝度の黒色の 4 種類である。赤色、緑色刺激に対する反応はまとめて加算平均し、白色、黒色の刺激に対する反応もまとめて加算平均した。

赤緑刺激に対して、P1 (88, 69 ms), N1 (152, 127 ms), P2 (217, 182 ms) の 3 個のピークが、白黒刺激に対して、P1 (63, 50 ms), N1 (142, 99 ms), P2 (205, 160 ms) の 3 個のピークが観測された。() 内は、大きく明瞭なピークを示した 2 名の被験者の潜時である。磁界ボタンを見ると、一人の被験者では、P1, N1, P2 の 3 個のピーク共に、輝度変調刺激と色度変調刺激とで差は見られない。もう一人の被験者では、最初の 2 個のピーク P1, N1 では差は見られないが、最後のピーク（潜時：輝度変調刺激 160 ms, 色度変調刺激 182 ms）では違いが見られる。推定電流ダイポールでは、位置の違いは僅かではあるが、電流の方向は 50° 異なっている。この結果から、著者らは、chrominance information の処理部位と luminance information の処理部位とは異なっていると主張しているが、今後被験者を増やしての実験が待たれる。

最近、小池らは、心理的に輝度を一致させた緑と赤の円形ボタンを 1.15 ~ 1.4 秒間隔で緑から赤へ（緑赤刺激）、赤から緑へ（赤緑刺激）と切り替える刺激を与えて、誘発脳磁界反

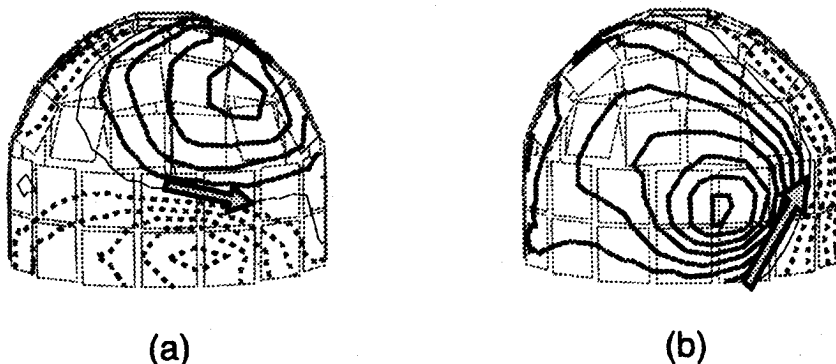


図 2 左視野に視覚刺激を呈示したときの 122 個の磁界センサから得られる反応磁界信号の磁界ボタン。(a) 刺激後 80 ms における後頭部での磁界ボタン。(b) 130 ms における後頭部での磁界ボタン。四角形は図 1 に示した磁界センサの位置。矢印は推定した電流ダイポールの位置。

応を計測している⁸⁾。緑赤刺激に対しては、潜時 150, 240 ms で、赤緑刺激に対しては、100, 180, 330 ms で大きな反応を観測しており、両者で潜時に差が見られる。しかし、白黒刺激との違いを見ていないので、上記 Krauskopf らとの対応を見ることはできない。

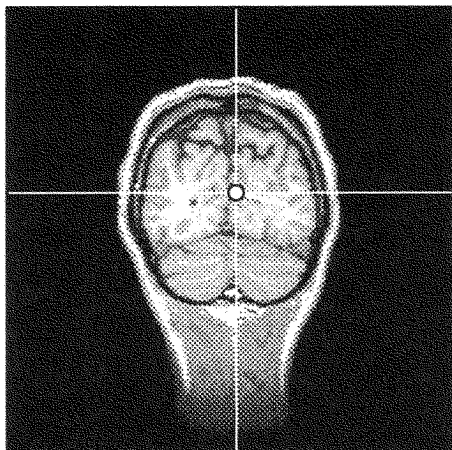
5. 空間周波数

網膜の中心部に多く存在する錐体に始まる Parvo 細胞系が色、形態を、周辺部に多く存在する桿体に始まる Magno 細胞系が動き、空間内位置を処理すると言われている。心理実験でも扱われる空間周波数の観点から見ると、高い空間周波数は形態認知などと関連していること

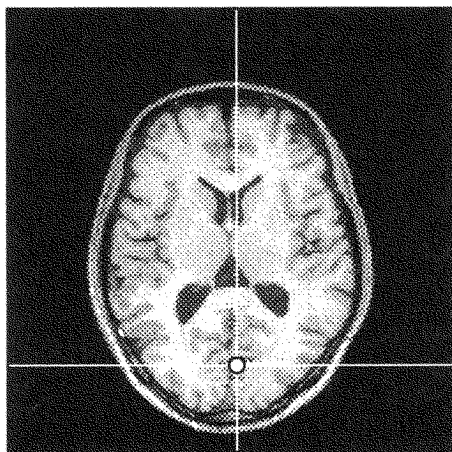
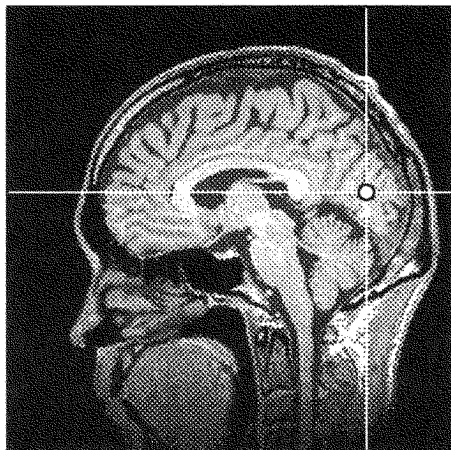
から Parvo 細胞系が、また、低い空間周波数は視野内位置などと関連していることから Magno 細胞系が主たる処理を受け持っているものと考えられる。種々の空間周波数グレーティング刺激を網膜上の様々な位置に呈示して、その誘発脳磁界反応を計測し、視覚系の活動を解析する研究が進んでいる。

Williamson らはオシロスコープスクリーンに縦方向の正弦波変調したグレーティング（約 0.3 ~ 10 cpd）を呈示した⁹⁾。実験 1 はグレーティングの平均輝度と等しいグレーの背景とグレーティングとが周波数 4 ~ 20 Hz で交互に等時間だけ呈示されるフリッカ条件、実験 2 はグレーティングの輝度が周波数 4 ~ 20 Hz で反転

冠状断面像



矢状断面像



軸位断面像

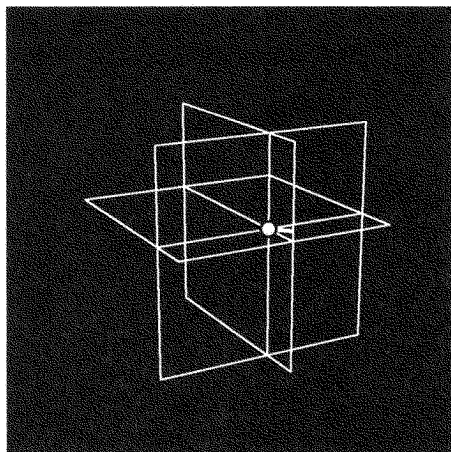
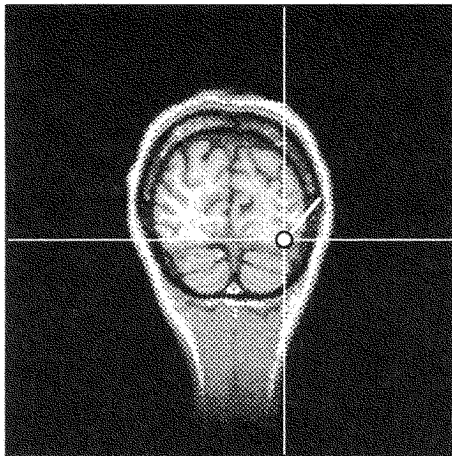


図 3 (a) 図 2 (a) の電流ダイポールを同一被験者の磁気共鳴像に投影した図。鳥距溝近傍に電流ダイポールが推定されている。左視野における刺激に対する反応であるので、右後頭葉が活動する。

するコントラストリバーサル条件である。

時間周波数が 13 Hz 以下のとき、空間周波数が 0.7 cpd 以上では、空間周波数が増大するほどピーク潜時が増大した。しかも、この増大変化は、Breitmeyer らの同様の刺激に対する反応時間の増大変化¹⁰⁾と一致した（運動系における時間遅れによる定数分を除く）。このことは、Breitmeyer らの反応時間変化が主として視覚系における変化によるものであることを示している。また、前述したように、低い空間周波数刺激に対しては Magno 細胞系が働き、高い空間周波数刺激に対しては Parvo 細胞系が働くことから、0.7 cpd 以上の空間周波数増大による潜時延長が、主として Parvo 細胞系によるものとも

冠状断面像

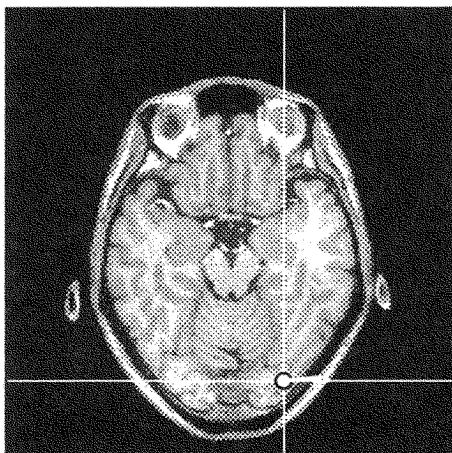
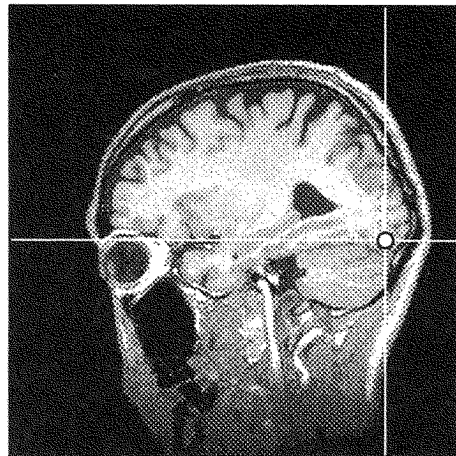


考えられる。

George らは、中心視野では高周波に対する反応がより大きく、周辺視野では低周波に対する反応の方がより大きくなるという結果を得ており¹¹⁾、前述した Williamson らの結果⁹⁾を支持している。すなわち、中心視野では空間的に細かい情報を処理し、周辺視野ではおおまかな情報を処理するという心理学的な知見と一致している。

Aine, George らは、周辺視野呈示刺激に対する反応の方が早いという結果を示している¹²⁾。彼女らは、右下視野内の中心窩から周辺に向けて 1.7°, 6°, 12° の位置に、3 個の円形正弦波グレーティングを呈示した。この呈示位置

矢状断面像



軸位断面像

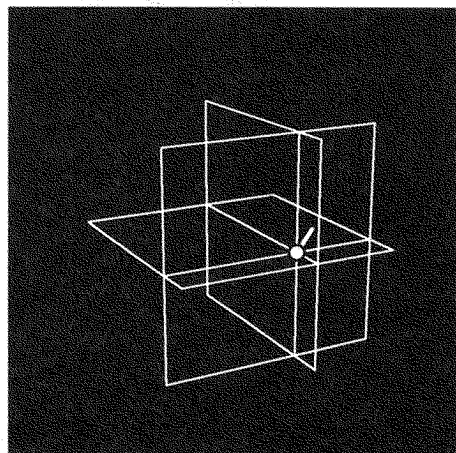


図 3 (b) 図 2 (b) の電流ダイポールを同一被験者の磁気共鳴像に投影した図。右外側後頭葉に電流ダイポールが推定されている。

は、中心窩、傍中心窩、周辺視に対応する。この刺激に対して、第1次視覚皮質、第2次視覚皮質、同側後頭葉、後頭頭頂部、後頭側頭部に電流ダイポールが推定された。後頭頭頂部の活動に対しては、中心視では、最初の波形ピークが約130 msであるのに、傍中心視、周辺視では110 msで既に波形ピークが見られる。これは、周辺視野に対応する Magno 細胞系の速い反応を反映していると考えられる。

6. Retinotopy

視野内の位置と視覚皮質の位置との間に対応関係があるという retinotopy は、動物では皮質内刺入電極による実験で明確に示されている。しかし、ヒトにおいては、視野欠損などと視覚皮質障害部位との対応から推測する以外には有効な方法が無く、明確には示されていない。しかし、脳磁界計測を用いた精度の良い活動部位推定方法などにより、部分的ではあるが、サル

などで示されている十字型モデル (cruciform model) にはほぼ一致する結果が得られている。しかし、最近では、この十字型モデルに一致しない結果も報告され始めている。

Aine, Supekら (1995) は、垂直正中線の右2.5°でかつ水平正中線の下2.5°, 8.5°, 12.5°の3ヶ所に、cortical magnification factor を考慮した大きさ (周辺視ほど大きなサイズ) の円形刺激を呈示し、誘発脳磁界を計測した¹³⁾。刺激のサイズは、中心視に一番近いところ (垂直正中線の右2.5°, 水平正中線の下2.5°) で0.25°の大きさである。この刺激に対して、有線野、後頭側頭、後頭頭頂の3ヶ所の活動部位を推定している。また、刺激後150 msの活動部位は、刺激位置が下に行くほどその活動部位が上方に位置するという retinotopic organization を示している。

Aine, Supekらは、その後の論文で、従来の十字型モデルとは一致しない結果を示してい

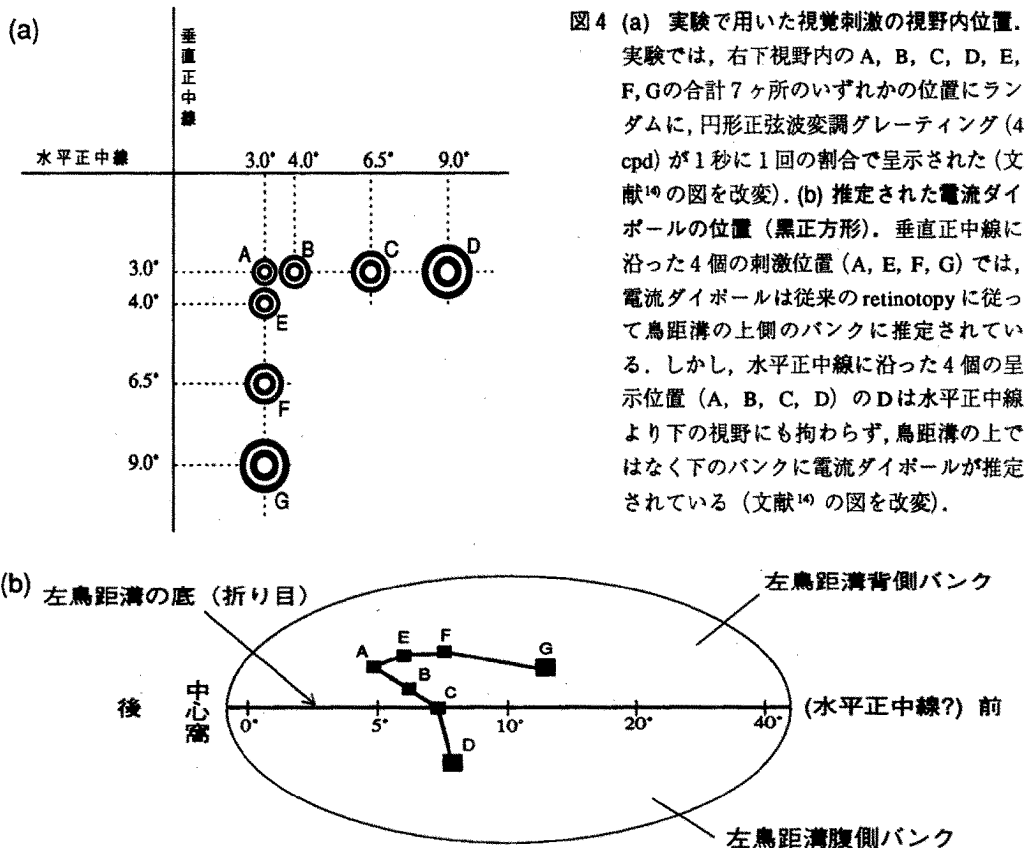


図4 (a) 実験で用いた視覚刺激の視野内位置。実験では、右下視野内のA, B, C, D, E, F, Gの合計7ヶ所のいずれかの位置にランダムに、円形正弦波変調グレーティング (4 cpd) が1秒に1回の割合で呈示された (文献¹⁰⁾の図を改変)。(b) 推定された電流ダイポールの位置 (黒正方形)。垂直正中線に沿った4個の刺激位置 (A, E, F, G) では、電流ダイポールは従来のretinotopyに従って鳥距溝の上側のバンクに推定されている。しかし、水平正中線に沿った4個の呈示位置 (A, B, C, D) のDは水平正中線より下の視野にも拘わらず、鳥距溝の上ではなく下のバンクに電流ダイポールが推定されている (文献¹⁰⁾の図を改変)。

る¹⁴⁾。彼女らは、図4(a)に示すように、右下視野内に、垂直正中線の右側3.0°で、水平正中線から3.0°、4.0°、6.5°、9.0°の位置、水平正中線の下側3.0°で、垂直正中線から3.0°（これは前記の垂直正中線に沿ったものと同じ位置）、4.0°、6.5°、9.0°の位置の合計7ヶ所のいずれかの位置にランダムに、円形正弦波変調グレーティング（4 cpd）を1秒に1回の割合で呈示した。Cortical magnification factor を考慮して、固視点から遠い位置に呈示する場合、刺激のサイズを大きくしている。刺激サイズ（円の直径）は、固視点が一番近い呈示位置（垂直正中線の3°右側で水平正中線の3°下側）で視角0.4°、最も遠いところで1.0°である。刺激の呈示時間は266 ms、コントラストは75%で、円形刺激部分の平均輝度は背景の輝度と等しい。

図4(b)に示すように、垂直正中線に沿った4個の刺激位置では、電流ダイポールは従来のretinotopyに従って鳥距溝の上側のバンクに推定され、しかも刺激位置が周辺視野に行くほど電流ダイポール位置は鳥距溝内で前方向に向かい、その前方への動きは鳥距溝の方向にほぼ一致している。しかし、水平正中線に沿った呈示位置では、中心視野に近い呈示位置では、電流ダイポールは従来のretinotopyに従って鳥距溝の上側のバンクに推定され、刺激位置が周辺視野に行くほど電流ダイポール位置は鳥距溝の前方向に向かうものの、その前方への動きは鳥距溝の方向に一致せず、より下方向に傾いている。その結果、水平正中線より下の視野に呈示したにも拘わらず、鳥距溝の上ではなく下のバンクに電流ダイポールが推定されている。つまり、水平正中線が鳥距溝の左右方向の奥の底の部分（鳥距溝の折り目の部分、lateral extent of the calcarine fissure）に対応しているのではない。

7. 視覚に関する高次認知

これまで述べてきた第1次視覚野における基本的な反応の他に、以下のような視覚認知に

関連する反応が報告されている。

藤巻ら（1995）はカタカナを黙読する課題で、黙読時のみに潜時400～600 msで内側面（帯状回付近）に活動が見られると報告している¹⁵⁾。

川勝らは漢字とランダムドットボタンとを呈示して漢字を黙読する課題で誘発MEG反応を計測している¹⁶⁾。その結果、後頭葉視覚野では、潜時100～200 msで、漢字に対する反応の方がランダムドットボタンに対する反応より大きく、さらに、漢字に対しては、左側頭葉で大きな反応が潜時300～500 msで見られた。今田らも、漢字とその送り仮名を同時に呈示して認識する実験を行ない、やはり潜時300～500 msで左側頭葉聴覚野近傍での反応を認めている¹⁷⁾。Imadaら（1995）は、視覚的注意に関連する脳磁界反応も解析している¹⁸⁾。それによれば、潜時150 ms前後で、左視野に注意しているときに左視野に呈示されたボタンに対する反応の方が、右視野に注意しているときに左視野に呈示されたボタンに対する反応より大きく、その活動部位は有線野（第1次視覚野）ではなく、外有線野（extrastriate cortex）であった。

8. おわりに

時間分解能、空間分解能に優れる脳磁界計測が始まって25年以上が経過した。最初の約20年は頭皮上の1ヶ所ずつで反応脳磁界を計測するという気が遠くなるような実験であったが、1989年頃から同時多点計測が始まり、現在では全頭から脳磁界反応を同時に計測できるまでに発展した。100倍以上のスピードで反応脳磁界が計測できる。実験パラダイムにもよるが、簡単な実験であれば、計測時間は数分であり、それで図3に示すような鳥距溝からの反応を捕捉できる。

脳磁界計測装置が高価であること、視覚刺激装置のむづかしさ（磁気ノイズを出さないこと！）から、限られた実験機関での研究しか見られていない。前述したように、視覚実験は多

様であり、進めるべき実験は数多く残されている。今後、地道に実験データを積み重ねると同時に、脳磁界計測の特質を生かした斬新な実験パラダイムによる実験研究が望まれる。

謝 辞

磁気共鳴像の撮像を快諾して頂いた郵政省通信総合研究所の藤田昌彦室長、宮内哲主任研究官に深謝します。様々な面で脳磁界研究をサポートして下さる NTT 基礎研究所長 池上徹彦博士、情報科学研究部長 石井健一郎博士に鳴謝します。

文 献

- 1) 今田俊明：脳磁界の計測と解析。電子情報通信学会誌, 74, 1298-1306, 1991.
- 2) 高倉公朋, 大久保昭行 (編) : MEG-脳磁図の基礎と臨床-。朝倉書店, 1994.
- 3) A. Ahonen, M. S. Hämmäläinen, M. J. Kajola, J. E. T. Knuutila, P. P. Laine, O. V. Lounasmaa, L. T. Parkkonen, J. T. Simola and C. D. Tesche: 122-channel SQUID instrument for investigating the magnetic signals from the human brain. *Physica Scripta*, T49, 198-205, 1993.
- 4) S. M. Zeki: Color coding in rhesus monkey prestriate cortex. *Brain Research*, 53, 422-427, 1973.
- 5) S. M. Zeki: A vision of the brain. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993.
- 6) W. M. Paulus, H. Plendl and S. Krafczyk: Spatial dissociation of early and late colour evoked components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 71, 81-88, 1988.
- 7) J. Krauskopf, G. Klemic, O. V. Lounasmaa, D. Travis, L. Kaufman and S. J. Williamson: Neuromagnetic measurements of visual responses to chromaticity and luminance. *S. J. Williamson, M. Hoke, G. Stroink and M. Kotani M (eds): Advances in Biomagnetism*. Plenum Press, New York, pp. 209 - 212, 1989.
- 8) 小池佑辰, 平田恵啓, 小林哲生, 栗城真也 : 色変化に伴う誘発脳磁界。日本生体磁気学会誌, 8, 78-79, 1995.
- 9) S. J. Williamson, L. Kaufman and D. Brenner: Latency of the neuromagnetic response of the human visual cortex. *Vision Research*, 18, 107-110, 1978.
- 10) B. G. Breitmeyer: Simple reaction time as a measure of the temporal response properties of transient and sustained channels. *Vision Research*, 15, 1411-1412, 1975.
- 11) J. S. George, C. J. Aine, P. A. Medvick and E. R. Flynn: Spatial/temporal resolution of multiple sources: Paths of activation in human visual cortex. *S. J. Williamson, M. Hoke, G. Stroink and M. Kotani (eds): Advances in biomagnetism*. Plenum Press, New York, pp. 197-200, 1989.
- 12) C. J. Aine, J. S. George, S. Supek, D. Ranken, E. Best, W. Tjee, E. Flynn, J. Lewine and C. Wood: Differences in the temporal dynamics of visual-evoked neuromagnetic activity for central versus peripheral stimulation. *Human Brain Mapping*, Supplement 1 (Abstracts of First International Conference on Functional Mapping of the Human Brain), p. 25, 1995.
- 13) C. J. Aine, S. Supek and J. S. George: Temporal dynamics of visual-evoked neuromagnetic sources: Effect of stimulus parameters and selective attention. *International Journal of Neuroscience*, 80, 79-104, 1995.
- 14) C. J. Aine, S. Supek, J. S. George, D. Ranken, J. Lewine, J. Sanders, E. Best, W. Tjee, E. R. Flynn and C. C. Wood: Retinotopic organization of human visual cortex: Departures from the classical model. *Cerebral Cortex*, in press.
- 15) 藤巻則夫, 平田恵啓, 栗城真也, 中島啓幾 : カタカナ文字黙読時の脳磁界計測 (2)。日本生体磁気学会誌, 8, 64-65, 1995.
- 16) 川勝真喜, 今田俊明, 益子拓徳, 小谷 誠 : 漢字及びランダムドットパターンに対する脳磁界反応。医用電子と生体工学 (日本ME学会雑誌論文号), in press.
- 17) 今田俊明, 川勝真喜, 小谷 誠, Riitta Hari : 文字認知に関連する誘発脳磁界の計測。日本生体磁気学会誌, 7, 230-233, 1994.
- 18) T. Imada, M. Kawakatsu and M. Kotani: Attention-related enhancement of extrastriate neuromagnetic signals. *The XIth International Conference on Event-Related Potentials of the Brain*, S-8-2, p. 43, 1995.