

## 脳磁図 (MEG) による脳機能計測

渡邊昌子, 柿木隆介

岡崎国立共同研究機構生理学研究所統合生理研究施設

## はじめに

脳磁図 (magnetoencephalography, MEG) は、脳磁場計測装置 (脳磁計と略称される) を用いて記録される脳内の磁場活動である。MEG はいまだ普及率が低く、MEG を測定したことがない研究者は少なくないであろう。しかし、現在日本国内には約 30 台の脳磁計が稼動しており、これは世界で最も多く、日本は MEG 研究の最も進んだ国の一つである。MEG の紹介をするには、一般的に広く普及している脳波 (electroencephalography, EEG) と比較して説明するのが最も良い方法である。大脳皮質錐体細胞樹状突起の先端部より基部に向かって細胞内電流、すなわち興奮性シナプス後電位が流れる。電流が流れるとその周囲には必ず磁場が生じる。したがって、EEG (電場) と MEG (磁場) は同一の現象を異なる方法で見るといってもよいかもしれない。しかし、両者の決定的な違いは空間分解能である。脳と頭表の間には脳脊髄液、頭蓋骨、皮膚という導電率が大きく異なる三つの層がある。したがって、脳で発生した電場は大きな影響を受け、頭皮上に置いた EEG 電極から正確な脳の活動部位を知ることは困難である。しかし

MEG の場合、磁場は導電率の影響を全く受けないため、記録条件が良好ならば mm 単位で活動部位を正確に知ることができる。これが MEG の最大の長所である。また MEG は EEG と同様に ms 単位の高い時間分解能を有する。

MEG の最大の問題点は、脳から発生する磁場が地磁気あるいは周囲磁気 (電車, エレベーターなどにより発生する) などの 1 万分の 1~1 億分の 1 程度の極めて微少なものである点である。そのため、高性能の磁気シールドルーム、超伝導量子干渉素子 (SQUID と略) などのハイテクノロジーが必要となる。もう 1 点は、その高価格である。建物の改造費や周辺機器 (高性能コンピュータ等) を含めると、機種や環境にもよるが設置には 4~7 億円は必要である。また超伝導状態を維持するための液体ヘリウム代金と機器 (コンピュータを含む) の保守管理料等の維持費が年間 2000~3000 万円は必要である。技術面では、radial 方向 (頭皮に対して垂直方向) の双極子、すなわち主として脳回で発生する活動を記録することが困難であること (理由は専門的になるため省略させていただきたい) が最大の問題点であろう。しかし、ヒトの重要な機能の多くは脳溝に面した皮質で行われているので (例えば第一次感動運動

---

この総説は、第 29 回日本磁気共鳴医学会大会シンポジウム「マルチモダリティによる脳機能計測」での講演を中心にまとめたものである。

---

キーワード magnetoencephalography, electroencephalography, eyes, face, motion

野の3b野や4野), 予想されるほどには支障はないが, やはり片手落ちの感は否めないだろう. したがって, MEGとEEGの同時計測が理想的であることは間違いない.

現在, ヒトの高次脳機能の研究に関してはポジトロン断層撮影 (PET) と機能的MRI (fMRI) を用いた報告が圧倒的に多く, 特に米国では一大ブームである, といっても過言ではない. EEGとMEG検査の報告がまだまだ少ないのは, 複数の部位 (高次脳機能活動の遂行を単一の部位の活動で行うことは少ないと思われる) の活動を解析することが困難であることが最大の理由である. また, PETとfMRIは解剖学的部位の特定が主目的なので専門家ではなくても極めてわかりやすいのに比し, 研究者にとってもまた論文の読者にとってもEEGやMEGのような複雑な波形の分析やそれに関する高度なソフトウェアの理解はかなりの困難を伴う点も大きな障壁となっている. しかし, 以前に比して, PETやfMRIの研究者の中にも, EEGとMEGのもつ高い時間分解能が脳活動の解析には必須と考える人が増えてきているのも事実である. ある高次脳機能を行うときにはどの部位が活動しているか, を知った後は, 当然ながら, それらの部位においてどのような時間経過で活動が伝搬するか, あるいはどの程度時間的に重畳しながら平行して活動するのか, といった疑問がわいてくるからである. そのような重要な問題の解決にはEEGとMEGが最も適している.

生理学研究所の脳磁計 (図1) は, 米国BTi社製で直径14cmの中に37個のセンサーコイルが同心円上に配置されている. コイルの直径は約2cm, コイルの中心間距離も約2cmであり, 市販の脳磁計の中では最もコイルの配置が密な機器の一つである. 生理学研究所には2基が設置されており, 必要に応じて測定したい

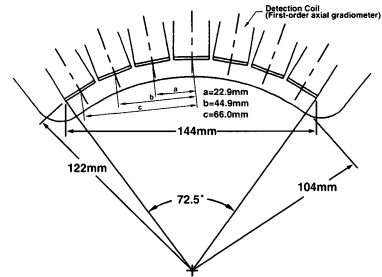
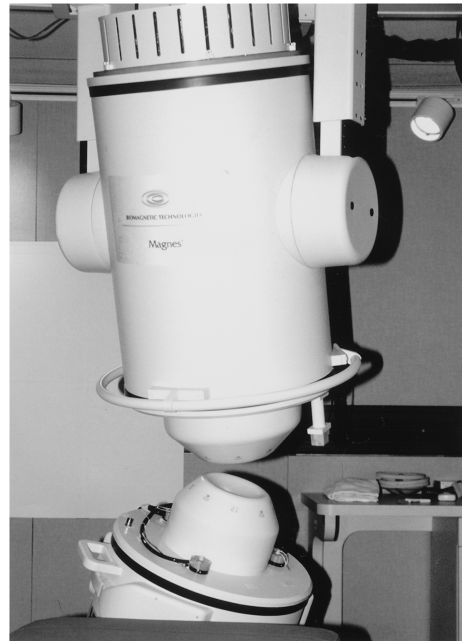


図1. 生理学研究所に設置されている脳磁計 (米国BTi社製, Magnex)

直径14cm内に37個の記録コイルが同心円状に配置されている. 生理学研究所には2基が設置されているが, 本稿で述べている「顔認知」の研究では下に据え置かれている1基のみを使用した.

部位に1基あるいは2基を置いて記録している. 記録されたMEGのroot mean square (RMS, 磁場強度の平方和の平方根) あるいはdipole momentを計算し, これを各潜時におけ

2001年10月19日受理

別刷請求先 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38 岡崎国立共同研究機構生理学研究所統合生理研究施設 渡邊昌子

る磁場強度および双極子強度と規定した。活動源の推定には単一等価電流双極子モデル (ECD モデル)<sup>1)</sup>を用いた。しかし、複数の活動源の存在が示唆される場合には、brain electric source analysis BESA)<sup>2)</sup>を用い、複数双極子モデルによる活動源推定を行った。ECD は被験者ごとに磁気共鳴映像 (MRI) によって作成された脳断層画像上に重ね合わせ、解剖学的な脳部位推定を行った。

本稿では「活動部位とその情報処理過程を詳細に検討できる」という MEG の長所を最大限に生かす方法の一つとして、何らかの刺激が与えられたときに出現する MEG (誘発 MEG) について解説する。紙幅の問題もあり、本稿では顔認知関連誘発 MEG に関する著者らの研究室での最近の知見をまとめたい。

### 顔認知機構の研究

サルでは、「顔」に対して特異的に反応する部位があることが報告されている<sup>3)</sup>。また近年はヒトにおいても、脳波の頭皮上あるいは皮質からの直接記録<sup>4),5)</sup>、PET<sup>6),7)</sup>、fMRI<sup>8)~10)</sup>などを用いた研究により、側頭葉下面の紡錘状回に「顔」に特異的に反応する部位があることが報告されてきた。また臨床的にも「顔貌失認」と称される特異な症状があり、両側あるいは右側の後頭側頭葉の障害により出現することが知られている<sup>11)</sup>。しかし、顔認知に関する情報処理過程の詳細はいまだ明らかにされていない。

脳磁図は、既述したように ms 単位の高い時間分解能と mm 単位の高い空間分解能を有するため、脳内情報処理過程の解析には最も適した検査方法である。最近では顔認知に関する MEG の研究も幾つか報告されている<sup>12)~15)</sup>。我々も MEG を用いて「ヒトの顔認知機構」について研究を行っている<sup>16)~19)</sup>。本稿では静止した画像に対する MEG と EEG 反応について簡単にまとめ、その後「目の動き」認知に関連する MEG 反応について詳述する。

### 静止顔認知に関する脳活動

まず静止した顔を見たときの MEG 反応を解析した。被験者の前方 1.5 m にスクリーンを設置し、固視点上にグレイスケールで刺激画像を提示した。刺激に用いた画像は(1)Face with opened eyes : 開眼正面向きの顔、(2)Face with closed eyes : 閉眼正面向きの顔、(3)Eyes : (4)の Scrambled face の上に(1)から目の部分のみ切り抜いて置いたもの、(4)Scrambled face : (1)から作成し(1)と平均輝度を等しくした無意味図形、(5)Hand : 左手、以上の 5 カテゴリーとした。なお、今回の実験に用いた刺激画像および刺激提示プログラムは、エール大学の Dr. McCarthy, Dr. Puce, Dr. Kirino の御好意により許可を得て使用したものである。

脳磁図記録では、すべての被験者で 1M と 2M の二つの成分が認められた。1M は両側半球の第一次視覚野、2M は側頭葉後下部の紡錘状回が活動源であった。2M は Face と Eyes に対してすべての被験者で認められた。Face with opened eyes と Face with closed eyes に対する反応には、潜時、振幅共に有意な違いは認められなかったが、Eyes に対する反応は Face に対する反応よりも有意に延長していた。脳波記録では、Face に対して明瞭な位相逆転 (頭頂部で陽性、後側頭部で陰性) を示す成分が認められた。右後側頭部 (T6') で記録された成分の振幅は、左後側頭部 (T5') で記録されたものより有意に大きかった。これらの結果から、ヒトの顔認知には紡錘状回が重要な役割を果たしており、右半球が左半球より優位であることが示唆された。

### 「目の動き」認知に関する脳活動

私たちは日常生活の中で、常に他者の動きを読み取りその意味を理解している。特に人の表情や視線の動きを読み取ることで、相手の精神状態や注意の方向を知ることができる。動きの認知は主に霊長類で研究が進んでおり、単ニューロン活動記録では、顔、特に目の方向の

変化に特異的に反応するニューロンがあることが報告されている<sup>20)</sup>。「仮現運動」は、実際には静止しているが位置が違う2枚の画像を続けて提示する刺激であり運動が知覚される。仮現運動も含めた視覚性運動の認知には中側頭葉(MT)若しくはV5と呼ばれる部位がかかわっている。ヒトを対象としたニューロイメージングの手法(機能的磁気共鳴画像:fMRI, ポジトロン断層撮影:PET)を用いた研究では、一般的に動きに感受性のある部位は後頭側頭境界付近に位置しており、ここがヒトのMT/V5野に相当すると考えられている。また、視線の動きのような生物学的な動きについては、MT/V5領域のみではなく上側頭溝(STS)も活動するとの報告がある<sup>21)</sup>。このように、ヒトの脳内では動きを認知する際に働く部位は一箇所だけではなく、幾つかの部位がそれぞれ異なる機能を有する可能性がある。最近私たちは、目の動きを見ているときの脳活動についてMEGを用いて時間的空間的に解析し、他の種類の動きも提示して動きの種類による違いを検討したので<sup>18)</sup>、本稿ではその結果を簡単にまとめた。

## 方 法

対象は健常成人12名(女性3名, 男性9名, 平均年齢31.5歳)である。

視覚刺激としては「仮現運動現象」を利用し、次の3種類の刺激を用いた(図2)。

- a) EYES: 同心円状パターンの上に、ヒトの顔が提示されている。第一刺激(S1)は目が正面を向いているが、第二刺激(S2)は目だけが向かって右に変位している。このS1とS2を刺激間隔0msで提示することで、あたかも目だけが正面から向かって右に動いたかのように見える。
- b) SIM: EYES刺激で用いた画像の顔の部分がモザイク処理されている。S1とS2では、顔の中の目にあたる部分のモザイクが

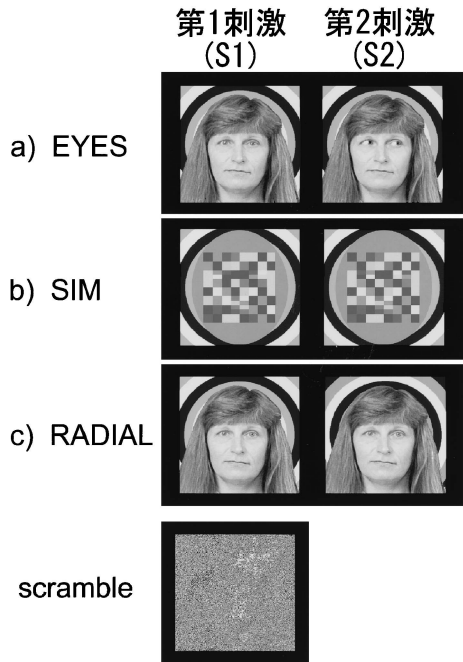


図2. 実験に用いた刺激

例示しているように、同じ大きさの写真(実際に使用したのはカラー写真)が刺激間隔0秒で続けて提示される。

a) EYES: 正面を向いている顔の中で目が向かって右へ動くように見える刺激。

b) SIM: 被験者の視野の中で相対的に「顔の中で目が位置する部分」のチェッカーパターンが動いて見える刺激。

c) RADIAL: 提示されている顔に変化はないが、背景の同心円状パターンが中心の方へ動いて見える刺激。

Scramble: a)の刺激から作成した無意味図形である。インターバルに提示し、第一次視覚野が常に刺激され続けている状態を保つ。(文献<sup>18)</sup>より改変)。

一部入れ替わっており、S1とS2を続けて提示することで、この部分にチェッカーパターンの動きが知覚される。

- c) RADIAL: S1とS2では提示されている顔はいずれも正面向きで変わらないが、背景の同心円状の模様が中心に向かって動いたかのように知覚される。

3種類の刺激の間には、S1として用いた画像をコンピュータ処理して、全体として同じ輝度と空間周波数をもつ無意味図形 (scramble) を提示した。

S1とS2の提示時間はいずれも800msで、この二つの刺激は刺激間間隔なしで提示される。Scrambleの提示時間は1000~1100msの間でランダムとした。3種類の仮現運動刺激はランダムな順序で提示され、被験者は固視点(刺激の中心点に提示される)を見つめた。刺激は磁気シールドルームの外からプロジェクターで天井に設置されたスクリーンに投影し、刺激の大きさは $9.7 \times 9.7^\circ$ とした。

MEGは右又は左後頭側頭部を中心にセンサーに頭を乗せる形で測定を行った。各刺激について100回の誘発脳磁場を記録しこの結果を加算平均して解析した。MEG記録と同時に眼電図(EOG)を記録し、大きな眼球運動が見られた場合は加算から除外した。

記録された成分は単一双極子モデル<sup>1)</sup>で十分に計算できるものであったので複数双極子モデルは用いなかった。各成分の頂点潜時、双極子モーメント、推定位置に関して条件差を要素と

してANOVAで解析し、有意な場合には( $P < 0.05$ ) Fischer's PLSDを用いて統計処理した。

## 結 果

右後側頭部より記録された、EYES刺激に対する誘発脳磁場の波形を図3に示す。S1提示後200ms以内に出現する誘発成分は「顔刺激」に対する反応と考えられるが、この成分については既に前項で述べている。本稿では「動き認知」に特異的と考えられる、S2提示後に認められる誘発成分(1M)に注目して検討を行った。

1M成分はすべての条件でS2提示後170~200msに出現した(図4)。1Mはすべての被験者で認められたが、信頼できる基準で位置推定できたのはEYESとRADIALでは12名中6名のみであった。またSIMで信頼できる双極子が推定できたのは1名のみであったため、EYESとRADIALで双極子が位置推定できた6名について、統計学的検定を行った(表1)。1Mの頂点潜時はEYESで $192.4 \pm 42.4$  ms (mean  $\pm$  standard deviation), RADIALで

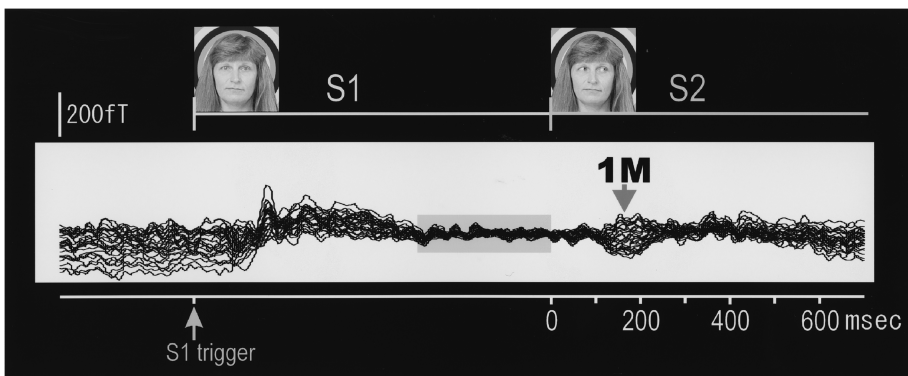


図3. 記録された波形の例

1名の被験者における右半球からの記録で37チャンネルの結果を重ね描きしている。S1提示後約180msに一つの誘発成分が認められるが、これは顔を認知したことによる誘発反応と考えられる。S2提示後190msに一つの誘発成分が認められ、これは「目の動き」による誘発反応と考えられる。(文献<sup>18)</sup>より改変)。

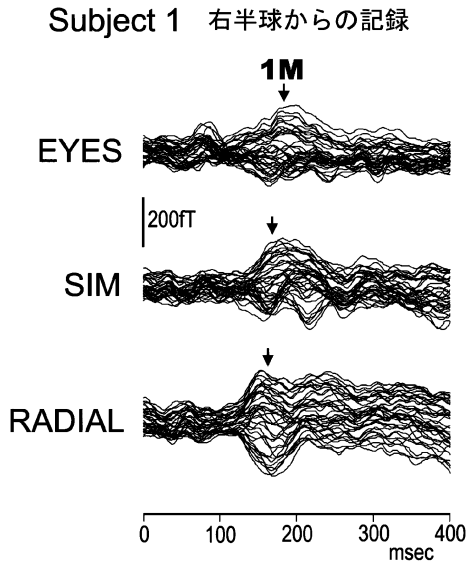


図4. 1名の被験者 (Subject 1) において各条件刺激に対して記録された波形の例  
右半球からの記録で37チャンネルの結果を重ね描きしている。S2提示時点を0msとし、S2提示後400msまでの記録を示す。すべての条件でS2提示後170~200msに一つの誘発成分が認められる。1Mの振幅はRADIALで最も大きい。(文献<sup>18)</sup>より改変)。

161.7 ± 36.5 ms であり、ANOVAにより刺激条件の有意な効果が認められた。

1Mは6名全員で中側頭葉後部、ヒトのMT/V5野とされる場所に位置推定された。双極子位置について統計検定したところ、EYESの電流双極子はRADIALに比較し平均約1cm程度有意に下方、後方に位置推定された。双極子モーメントは、EYESがRADIALより小さい傾向があったが統計学的な有意差は認められなかった(表1, 図5)。

左後側頭部より記録された、EYES刺激に対する誘発脳磁場の基本的な所見は右半球と同じであった。しかし、左半球では明らかな1Mが認められたのは全12名中6名のみであり、そのうち各成分について信頼できる電流双極子が推定できたのは3名のみであった。双極子

表1. EYESとRADIAL条件に対して誘発された1M成分の頂点潜時、および推定された電流双極子のモーメントおよび座標位置。6名の被験者の結果について、平均±標準偏差を示す。右半球より記録した結果。

	EYES	RADIAL
頂点潜時 (ms)	192.4 ± 42.2*	161.7 ± 36.5
双極子モーメント (nAm)	13.5 ± 7.0	27.0 ± 17.0
双極子座標位置 (cm)		
x (前後方向)	-3.2 ± 1.2*	-2.5 ± 1.5
y (左右方向)	-4.3 ± 0.6	-4.3 ± 0.7
z (上下方向)	5.5 ± 0.9*	6.2 ± 1.0

\*: p < 0.05

位置は右半球と同様、中側頭葉後部、ヒトのMT/V5野と思われる場所に推定された。

### 考 察

本研究では、仮現運動現象を用いることにより「目の動き」に対する誘発脳磁場(1M)を記録することができた。これは世界で初めての報告である。S1後の波形とS2後の波形は明らかに異なっている(図3)。したがって、本実験で記録された1M成分は「動き」特異性成分と考えられる。

EYESに対する1Mの頂点潜時はRADIALに対する頂点潜時と比較し有意に延長していた。この理由として刺激が提示される視野の違いが考えられる。EYESは視野の中心付近に、RADIALは視野の周辺部に提示された。もし周辺部に提示された刺激の方がより早くMT/V5野に達する経路をもっていたら潜時差が生じる。例えば、EYESはparvocellular系(小細胞系)でRADIALはmagnocellular系(大細胞系)の経路を通るとすれば、この潜時差は説明可能かもしれない。

今回の実験では、SIMに対し信頼できる電流双極子が位置推定できたのは一例のみだった。その理由としては、SIMにおけるチェッ

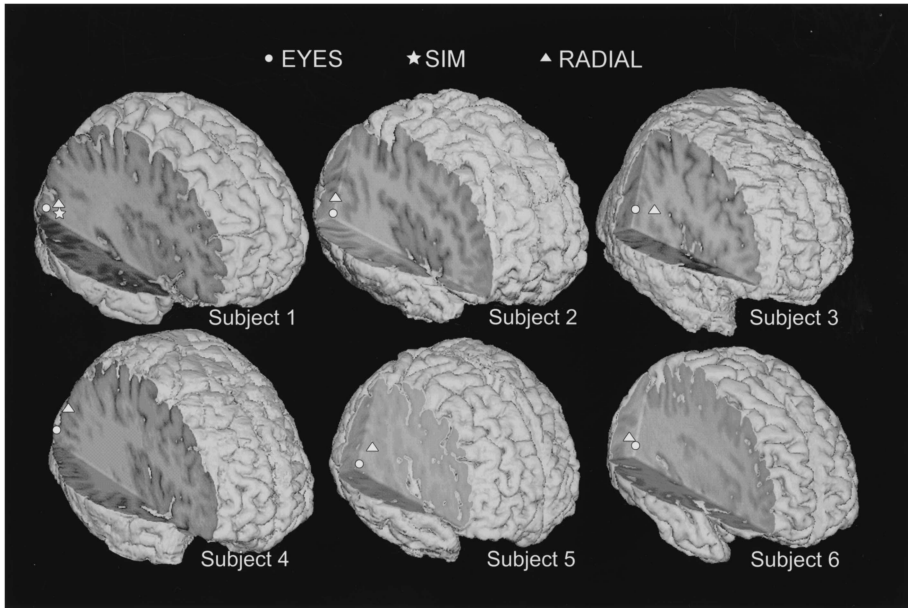


図 5. 右半球から記録された 1M 成分の活動源

脳磁図の結果から単一双極子モデルにより計算された双極子位置を MRI 上に投影したもの。右半球の記録を信頼できる双極子が計算できた 6 名について示す。すべての双極子は後頭側頭境界付近、下側頭溝に沿った部位に位置している。EYES の双極子は RADIAL と比較し下方、後方に位置している。SIM 条件で信頼できる双極子が位置推定できたのは Subject 1 のみであった。(文献<sup>18)</sup>より改変)。

カーパターンの動きは、輝度の似ているものが動くためわかりにくい、ということが考えられる。もう一つの可能性として、SIM 刺激は単なる動き以外にチェッカーパターンの変化等の別の要素が含まれている可能性があり、EYES と比較すると小さな複数の活動源が存在し、そのため単一双極子モデルでは活動源の位置推定が困難であったのかもしれない。

1M 成分の活動源は、ヒトの MT/V5 野とされる中側頭葉後部に位置推定された。これは私たちの研究室で行っている運動視に関する研究<sup>22)~26)</sup>と一致した所見であった。また、目の動きではない背景の模様への動きに対する活動源も中側頭葉後部に位置推定できたが、その位置は「目の動き」と比較し有意な違いが認められた。この結果は、ヒトの MT/V5 野の中に刺

激特異性の受容野分布があり、特に「目の動き」に特異的な部位が存在する可能性を示唆している。ただし、刺激が提示される視野の違いによる変化、すなわち MT/V5 野に retinotopy があり、視野の周辺部の刺激に対して活動するのは中心部よりもより上方、前方である可能性を考慮する必要がある。fMRI の研究では、MT/V5 野での明瞭な retinotopy の存在は否定されているが<sup>27)</sup>、その可能性は完全には否定できないだろう。今後は、他の顔の部位の動き、例えば「口の開閉運動」に反応する活動部位について実験し、この可能性についてさらに詳しく検討していく予定である。

今回の実験では、左半球では右半球の半数の例にしか有意な双極子は推定できなかった。これまで、MT/V5 野についてこのような左右半

球差があるとする報告はない。しかし、この実験と同様の刺激を用いた fMRI の報告<sup>21)</sup>では、有意ではなかったものの EYES に対し右半球の方がより強い活性化を示したとしている。また、Campbell ら<sup>28)</sup>によると、右後頭側頭領域に病変をもつ相貌失認の例では唇の動きは正常に認識できたが視線の向きを認識することができなかったとされる。一方、左の後頭側頭領域に病変をもつ例では、顔の認知や視線の認知に支障はなかったが唇の動きが読めなかった、とされる。このような報告から、「目の動き」の認知に関しても何らかの左右半球間差が存在する可能性が示唆される。

## ま と め

目の動きと背景の動きに対する脳活動を MEG 図を使って時間的空間的に解析した。ヒトの MT/V5 野は目の動きにも背景の動きにも活動し、左半球よりも右半球が優位であった。目の動きに対して誘発された成分の活動源は背景の動きに対するものより有意に後方、下方に位置推定された。MT/V5 野は他者の目の動きを認知する上で重要な役割を果たし機能別の受容野を有していることが示唆された。

## 結 語

側頭葉下面の紡錘状回、舌状回の機能の研究は現在の neuroimaging 研究分野の大きなトピックスの一つであり、この数年間に特筆すべき重要な研究が相次いで報告されてきた。この領域は、「顔認知」だけではなく形状認知の中核であることも知られている<sup>29),30)</sup>。活動部位の同定には fMRI や PET が優れているが、本稿で述べたような脳磁図・脳波のもつ ms 単位の高い時間分解能は様々な重要な情報を与えてくれる。今後は fMRI, PET と脳磁図の所見を総合的に判断していくことが重要となるだろう。なお、私達の研究室の他の主要な研究テ-

マは、体性感覚および痛覚誘発脳磁図であり、興味のおありになる方は総説<sup>31)~34)</sup>を御参照されたい。

## 謝 辞

本研究全般の遂行にわたり多大な御貢献をいただいたオーストラリア Swinburne 工科大学の Dr. Aina Puce に深謝いたします。また有意義な御助言および技術的援助をいただいた金桶吉起助教授と永田 治技官、竹島康之技官に深謝します。

## 文 献

- 1) Sarvas J: Basic mathematical and electromagnetic concepts of the biomagnetic inverse problem. *Physiol Med Biol* 1987; 32: 11-22
- 2) Scherg M. BESA-M (Version 2.1). MEGIS Software GmbH, Munich, FRG 1995
- 3) Yamane S, Kaji S, Kawano K: What facial features activate face neurons in the inferotemporal cortex? *Exp Brain Res* 1988; 73: 209-214
- 4) Allison T, Ginter H, McCarthy G, Nobre AC, Puce A, Luby M, Spencer DD: Face recognition in the human extrastriate cortex. *J Neurophysiol* 1994; 71: 821-825
- 5) Halgren E, Baudena P, Heit G, Clarke M, Marinkovich K, Chauvel P: Spatio-temporal stages in face and word processing. 1. Depth recorded potentials in the human occipital and parietal lobes. *J Physiol (Paris)* 1994; 88: 1-50
- 6) Sergent J, Ohta S, MacDonald B: Functional neuroanatomy of face and object processing: a positron emission tomography study. *Brain* 1992; 115: 15-36
- 7) Haxby JV, Horwitz B, Ungerleider LG, Maisog JM, Pietrini P, Grady CL: The functional organization of human extrastriate cortex: a PET-rCBF study of selective attention to faces and locations. *J Neurosci* 1994; 14: 6336-6353
- 8) Puce A, Allison T, Gore JC, McCarthy G: Face-sensitive regions in human extrastriate cortex studied by functional MRI. *J Neurophysiol* 1995;



- 74 : 1192–1199
- 9) Puce A, Allison T, Asgari M, Gore JC, McCarthy G : Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures : a functional MRI study. *J Neurosci* 1996 ; 16 : 5205–5215
  - 10) McCarthy G, Puce A, Gore JC, Allison T : Face-specific processing in the human fusiform gyrus. *J Cogn Neurosci* 1997 ; 9 : 605–610
  - 11) Damasio AR : Prosopagnosia. *Trends Neurosci* 1985 ; 8 : 132–135
  - 12) Lu ST, Hamalainen M, Hari R, Ilmoniemi R, Lounasmaa OV, Sams M, Vikman V : Seeing faces activates three separate areas outside the occipital visual cortex in man. *Neuroscience* 1991 ; 43 : 287–290
  - 13) Sams M, Hietanen JK, Hari R, Ilmoniemi R, Lounasmaa OV : Face-specific responses from the human inferior occipito-temporal cortex. *Neuroscience* 1997 ; 77 : 49–55
  - 14) Swithenby SJ, Bailey AJ, Brautigam S, Josephs OE, Jousmaki V, Tesche CD : Neural processing of human faces : a magnetoencephalographic study. *Exp Brain Res* 1998 ; 118 : 501–510
  - 15) Halgren E, Raij T, Marinkovic K, Jousmaki V, Hari R : Cognitive response profile of the human fusiform face area as determined by MEG. *Cerebral Cortex* 2000 ; 10 : 69–81
  - 16) Watanabe S, Kakigi R, Koyama S, Kirino E : Human face perception traced by magneto- and electro-encephalography. *Brain Res Cogn Brain Res* 1999 ; 8 : 125–142
  - 17) Watanabe S, Kakigi R, Koyama S, Kirino E : It takes longer to recognize the eyes than the whole face in humans. *Neuroreport* 1999 ; 10 : 2193–2198
  - 18) Watanabe S, Kakigi R, Puce A : Occipitotemporal activity elicited by viewing eye movements : a magnetoencephalographic study. *Neuroimage* 2001 ; 13 : 351–363
  - 19) Watanabe S, Kakigi R, Puce A : The spatiotemporal dynamics of the face inversion effect : a magneto- and electro-encephalographic study. *Brain*, in revision
  - 20) Perrett DI, Smith PAG, Potter DD, Mistlin AJ, Head AS, Milner AD, Jeeves MA : Visual cells in the temporal cortex sensitive to face view and gaze direction. *Proc R Soc Lond* 1985 ; B223 : 293–317
  - 21) Puce A, Allison T, Bentin S, Gore JC, McCarthy G : Temporal cortex activation in humans viewing eye and mouth movements. *J Neurosci* 1998 ; 18 : 2188–2199
  - 22) Kaneoke Y, Bundo M, Koyama S, Suzuki H, Kakigi R : Human cortical area responding to stimuli in apparent motion. *Neuroreport* 1997 ; 8 : 677–682
  - 23) Naito T, Kaneoke Y, Osaka N, Kakigi R : Asymmetry of the human visual field in response to apparent motion. *Brain Res* 2000 ; 865 : 221–226
  - 24) Lam K, Kaneoke Y, Gunji A, Yamasaki H, Matsumoto E, Naito T, Kakigi R : Responses of the human extrastriate cortex in detection of coherent and incoherent motion. *Neuroscience* 2000 ; 97 : 1–10
  - 25) Kawakami O, Kaneoke Y, Kakigi R : Perception of apparent motion is related to the neural activity in the human extrastriate cortex as measured by magnetoencephalography. *Neurosci Lett* 2000 ; 285 : 135–138
  - 26) Bundo M, Kaneoke Y, Inao S, Yoshida J, Nakamura A, Kakigi R : Human visual motion areas determined individually by magnetoencephalography and 3D magnetic resonance imaging. *Hum Brain Mapp* 2000 ; 11 : 33–45
  - 27) Tootell RBH, Reppas JB, Kwong KK, Malach R, Born RT, Brady TJ, Rosen BR, Belliveau JW : Functional analysis of human MT and related visual cortical areas using magnetic resonance imaging. *J Neurosci* 1995 ; 15 : 3215–3230
  - 28) Campbell R, Landis T, Regard M : Face recognition and lipreading : a neurological dissociation. *Brain* 1986 ; 109 : 509–521
  - 29) Okusa T, Kaneoke Y, Koyama S, Kakigi R : Random dots blinking : a new approach to elucidate the activities of the extrastriate cortex in humans. *Neuroreport* 1998 ; 9 : 3961–3965
  - 30) Okusa T, Kakigi R, Osaka N : Cortical activity related to cue-invariant shape perception in humans. *Neuroscience* 2000 ; 98 : 615–624
  - 31) Kakigi R, Watanabe S, Yamasaki H : The pain-related somatosensory evoked potentials. *J Clin Neurophysiol* 2000 ; 17 : 295–308

- 32) Kakigi R, Hoshiyama M, Shimojo M, et al. : The somatosensory evoked magnetic fields. *Prog Neurobiol* 2000 ; 61 : 495-523
- 33) 柿木隆介 : 体性感覚誘発脳磁図. 神経研究の進歩 1999 ; 43(4) : 561-571
- 34) 柿木隆介 : 痛覚認知の非侵襲的研究. 神経研究の進歩 1998 ; 42 : 396-405

## Non-invasive Investigation of Human Brain Functions Using Magnetoencephalography (MEG)

Shoko WATANABE, Ryusuke KAKIGI

*Department of Integrative Physiology, National Institute for Physiological Sciences  
Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585*

It is possible to identify the location of the activation of specialized motion processing regions in the human brain using either positron emission tomography (PET) or functional magnetic resonance imaging (fMRI). The temporal processing of information however, can only be studied to millisecond accuracy with magnetoencephalography (MEG) and electroencephalography (EEG). When compared with EEG, MEG offers advantages in localizing active neuronal sources. In addition to this advantage, MEG has excellent temporal resolution and minimal spatial smearing effects from cerebrospinal fluid, skull and scalp.

Previously, we recorded MEG and EEG on static faces (whole), isolated eyes and other stimuli such as scrambled faces and hands. We found face and eye specific components with peak latency of about 180 ms (Watanabe et al., 1999a, b). This component was detected in the right hemisphere in all subjects, and in the left hemisphere in half of the subjects. The equivalent current dipole (ECD) was located in the fusiform gyrus.

Next, using MEG, the temporal and spatial processing of "viewing" eye movements in 6 normal subjects was studied. Three visual stimulus types were studied: moving eyes (EYES), moving stimulated eyes (SIM), consisting of checks moving in the same spatial location as EYES, and an inwardly moving radial pattern (RADIAL). In all 6 subjects a large clear MEG component of 1M, with a mean peak latency of approximately 170 ms was seen in the right hemisphere in both RADIAL and EYES. The 1M to EYES was significantly longer in latency and smaller in amplitude than that seen to RADIAL. A left hemisphere 1M to EYES and RADIAL was seen in 3 of the subjects. In all subjects the equivalent current dipoles (ECD) for EYES and RADIAL were located near the occipito-temporal border (in both hemispheres), the MT/V5 homologue in humans. The ECD to EYES was significantly more inferior and posterior than that to RADIAL, with a calculated significant separation distance of about 1 cm. No ECD was estimated in the fusiform gyrus, a structure that plays a major role in stat-

ic face perception. Although the 1M was detected in all 6 subjects during SIM, our criteria for a reliable ECD could only be met for one subject.

Our results suggest that the cortex of human MT/V5 and the area surrounding it is active both in perception of eye motion and motion in general, especially in the right hemisphere. The areas responsive to eye motion were distinguishable from those responsive to radial motion. This data suggests that there may be specialization within regions of the human cortex that have previously been thought to be sensitive only to motion in general.