



Title	脳は文字をどこで読むのか？
Author(s)	栗城, 真也; 平田, 恵啓
Citation	電子科学研究, 4, 13-21
Issue Date	1997-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24369
Type	departmental bulletin paper
File Information	4_P13-21.pdf



脳は文字をどこで読むのか？

量子計測研究分野 栗城真也, 平田恵啓

ヒトの脳神経の活動によって生じる磁場を計測して高い時空間分解能で無侵襲的に活動位置を推定することができる。この手法 (MEG: Magnetoencephalography) を用いて、日本語のかな文字を見た時の脳の活動を観察した。その結果、文字呈示後の 150~250 ms の間に、後頭葉から側頭葉へと視覚情報が移動することが分かった。文字や単語の理解は、その形態や学習に応じた固有の経路に沿って、情報の形態を変えながら後頭から前頭へと流れる一連の活動プロセスであると推察される。

1. はじめに

ヒトの脳の働きを無侵襲的に観察する方法は極めて限られており、1990 年以前には PET (Positron Emission Tomography) による脳血流量の計測が主であったが、1993 年には脳血液の灌流量や酸素化状態を検出する fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging) が出現した。fMRI は PET と同様に代謝情報を計測するが、放射線による身体への影響なしに脳活動が観察できるという利点がある。

MEG (Magnetoencephalography) は脳神経が活動するときに流れる細胞内電流が作る磁場を計測するもので、PET や fMRI に比べるとより直接的に脳神経の活動を観察できる。MEG は 1980 年代の初期にはすでに一部の研究者によって、聴覚や視覚、体性感覚などの感覚刺激に反応する脳内部位を推定する研究が行われていた。1990 年頃より、SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) に関する超伝導エレクトロニクス技術が急速に発展し、現在では多チャンネルの大型 SQUID 磁束計により脳のかなりの部分、あるいは脳全体から MEG 信号を一度に計測できるようになった。

MEG は PET や fMRI より時間分解能が高く、脳神経活動のリアルタイム観察が可能である。通常の脳の活動では 1 秒以内で要素的反応が完了するので、MEG のもつミリ秒の時間分解能は極めて有益である。近年では感覚神経の活動だけではなく、言語や記憶、

認識などの高次脳機能の解明を目指した新しい MEG 研究が芽生えつつある。

2. 言語機能に関するモデル

言語はヒトが他の動物と一線を画す固有の機能である。言語は多くの構成要素からなる総合的な機能であり、例えば聴覚性と視覚性言語に分けることができよう。聴覚性言語は、音声の音響的な性質の分析、音声としての認識 (母音や子音の識別、音素のつながりの分析など)、単語理解、意味理解、分脈の把握といった階層的な機能から成り立つ。視覚性言語は文字を視覚的に捉えることから始まるが、意味や分脈の理解に至るところは聴覚性言語と同じである。いずれの場合も言語の出力は、発話ないし書字によりなされる。

「単語を声を出して読む」プロセスについてみると、脳の障害部位と欠損機能の関連を調べた臨床研究に基づいて提案された古典モデル (Wernicke-Geschwind model^[1]) がある。図 1 に示すように、このモデルでは、まず、後頭葉の視覚野が活動して文字に関する初期の視覚処理を行う。その視覚情報は後頭葉と側頭葉の境界にある角回という場所で音韻変換を受け、すなわち文字情報から音情報へと変換され、左側頭葉・後部に位置する Wernicke 領野で意味理解がなされる。つぎに意味情報は左前頭葉に運ばれ、Broca 領野で音声を構築するための調音処理を受けたのち、その上部にある運動野から発話のための命令を出力する。

Wernicke-Geschwind モデルは要素的プロセスが

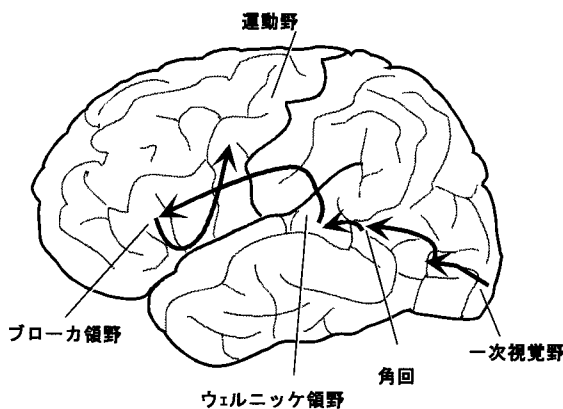


図1 単語を声を出して読むときの脳内プロセスに対する Wernicke-Geschwind モデル。

直列に連結したものである。これに対して PET 測定と結びついた心理学的研究からは、内的活動の状態により異なるプロセスが介在し得ること、直列だけではなく並列的に結合したいろいろな処理ネットワークが存在し得ることが指摘されている^[2,3]。また、視覚文字が音に変換されることなしに、シンボリックな方法で一度に意味理解に至る可能性も考えられる。我々日本人には、漢字を見た瞬間に意味が分かることがある。このような場合における脳活動はシンボリック・プロセスによるのかもしれない。さらに、PET による研究からは、文字だけではなく視覚単語認知に相当する要素プロセスがあり、脳内にはそれに対応する活動領域があるとする考え方がある^[4]。この考えでは、文字の視覚情報処理よりも一歩進んだ、単語としての形態やつづり (orthographic form あるいは lexicon) を認知する活動があるとしている。

これらはいずれも確定的なモデルではない。今後、PET だけではなく、fMRI や MEG を含めて多方面からのアプローチで明らかにする必要がある。

3. 文字認知・認識プロセス

これから述べる研究は、視覚性言語機能の最小単位として (単一) 文字の認知・認識を取り上げ、その時の脳内神経の活動を MEG で調べたものである^[5,6]。このような文字処理が基本となって単語や文の処理や理解が行われるので、文字処理の神経活動の理解が視覚性言語研究の出発点と考えた次第である。

文字の認知・認識には、文字のもつ傾きをもった線

分や点、角などのいくつかの視覚的な特徴が複数の視覚領野で分析され、さらに視覚連合野や他の高次皮質で文字として認識される複数の直並列的な神経活動が対応すると思われる。表意、表音文字である日本語の漢字と仮名では全く異なる認知・認識が行われる可能性があるため、ここでは仮名を扱うこととし、さらに前述したように視覚文字が音に変換されることを前提とする。そのために、被験者 (被測定者) には音韻変換が不可避的に行われるような課題を遂行させることとした。また、音韻に変換されずに認識されるものを対照するため、同様な実験様式に基づいた読めない記号の文字を使った実験も行うこととした。

これらの実験の目的は、音韻変換を伴う仮名文字の処理に関わる神経活動は後頭葉、側頭葉のどこで、どのような時間経緯でなされるのか？ また、読めない記号のような疑似文字は仮名文字とは違う過程で処理されるのか？ を明らかにすることにある。

4. 実験方法

刺激文字と実験課題

図2には仮名文字と疑似文字を使った遅延照合課題を模式的に示してある。この課題では、sample とよばれる3つの平仮名 (単語にならないような組み合わせ) を一瞬 (0.2秒間) 呈示し、それから1.8~2.8秒のランダムな時間後に1つのカタカナ (probe) を同じく0.2秒間呈示する。被験者は probe のカナの読みが sample のいずれかの仮名の読みと一致するかどうかを照合し、なるべく早く判断する。ここで、読みが一致する確率は約50%である。仮名とカナの形態が異なり (類似した形態の文字、例えば“キ”や“リ”などは除外してある)、この課題の遂行時には音韻変換が行われると仮定できる。probe 呈示の2秒あとには丸印が呈示されるので、被験者は照合結果 (合あるいは否) を左右いずれかのマウスのボタン押しで回答する。このボタン押しは MEG 記録期間のあとに行われるので、運動にともなう脳活動の反応は含まれない。また、回答結果を解析することにより、被験者が正しく課題を行ったかどうかをチェックできる。

一度の測定ではこのような試行を100回繰り返して行ったが、測定に先立ち被験者は高い正当率で、かつ一定のリズムで照合判断ができるように練習を行っている。これは、MEG 反応の同期性を高めて信号強度を

HIRAGANA	あ	か	は	な
KATAKANA	ア	カ	ハ	ナ
	[a]	[ka]	[ha]	[na]
PSEUDO-CHAR.	ㇰ	ㇱ	ㇲ	ㇳ

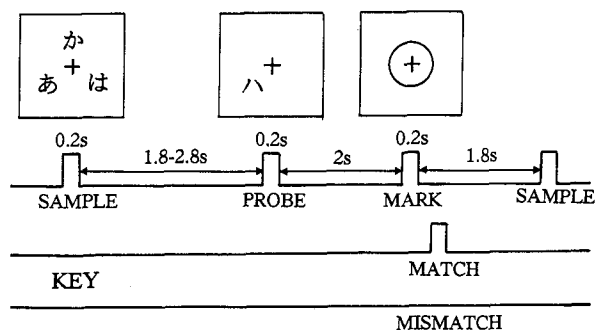


図2 仮名文字と疑似文字を使った遅延照合課題。仮名文字(平かなとカタカナ)と疑似文字の例を上にし、文字呈示をボタン押し回答にタイムチャートを下に示す。

高めるためである。MEG 信号は単一カナ文字である probe に対する反応を計測することとし、probe の立ち上がりトリガとしてその前後 -400~1,200 ms の期間の信号を取り込み、100 試行にわたって加算平均した。そのうち、さらに雑音低減のために帯域フィルタにより 1~40 Hz の周波数制限を行った。

カナ文字の構成要素である線分を任意の方向に平行移動する操作により疑似文字を合成し(図2参照)、これらの疑似文字を使って先の音韻照合と同様な実験パラダイムを構成した。ここで sample は3文字の疑似文字であるが、反応時間測定の実験からカナ文字課題との難易度を同じくするために3疑似文字はすべて同一としてある。probe は同じ種類の単一疑似文字であり、照合による一致・不一致の確率は50%である。また、MEG の記録期間や加算平均などはカナ文字と同じ条件である。文字の大きさはカナ、疑似文字とも視角にして1.3度、固視点から1.1度左下方に変位した位置(左1/4視野刺激)に呈示している。

疑似文字はカナと同じ線分要素からなるため、物理的にはカナと等価な刺激である。しかし、読むことができない(音韻変換しない)のでその照合は図形的な

特徴によってのみ可能である。この図形的照合は、先の音韻的照合に対する対照である。しかし、二つの実験は数カ月の期間を隔てて行った別個のもので、被験者も音韻的照合実験の5人に対し、図形的照合では6人(うち3人は二つの実験に共通)である。また、異なる視覚刺激発生装置(CRTとプロジェクタ)を使用したため、刺激文字の明るさは音韻照合実験では0.2 cd/m²であるのに対し、図形照合では4.3 cd/m²であった。これは主観的な明るさにして約2~3倍の違いがある。

MEG 計測と活動源解析

MEG の計測は37チャンネル SQUID 磁束計(岡崎生理学研究所・統合生理研究施設)を2基用いて行った。測定部位は主に後頭部と側頭部である。後者の場合、被験者はベッドに横臥して上下2基の SQUID のデュワー間に頭部を挟み、後方から前方に至る数箇所にて記録範囲を変化させて測定を行った。結果的には後頭葉から側頭葉までの活動を観測したことになる。

加算平均と帯域フィルタリングを行った MEG 信号は波形や磁場分布を解析し、高振幅値の波形が正負の双極子性磁場分布をもつ時間帯では、連続的に一定(3.5 ms)の間隔で単一の等価電流双極子(ECD: Equivalent Current Dipole)の推定計算を行った。得られた双極子は、双極子磁場と測定磁場との一致の指標である GOF (Goodness of Fit) 値が90%以上のものを選択し、かつ同一の時間区分にある連続した双極子は平均してそのパラメータである座標、電流モーメントなどの値をもつ一つの MEG 活動源とした。

MEG 測定を行ったすべての被験者に対して MRI の撮像を行った。その際、頭部上の基準となる鼻根点、左右の耳孔前点、頭部中心点(Cz)の位置にビタミンEカプセルを置くことによりマーカを断層像中に記録した。その後、MR 座標はこれらのマーカの位置を基準として MEG 座標へ変換し、つぎに MEG 座標中で推定した ECD の位置を MR 断層像に重ねて解剖学的な部位との検討を行った。

図3には MEG 信号解析の実際を説明するために、左右脳半球の MEG 反応の解析例を示す。上から順に、37チャンネルの MEG 波形から高振幅の反応波形(正と負)を選択したもの、90%以上の GOF 値で ECD が計算された潜時(波形中のカーソル)の磁場分布、そ

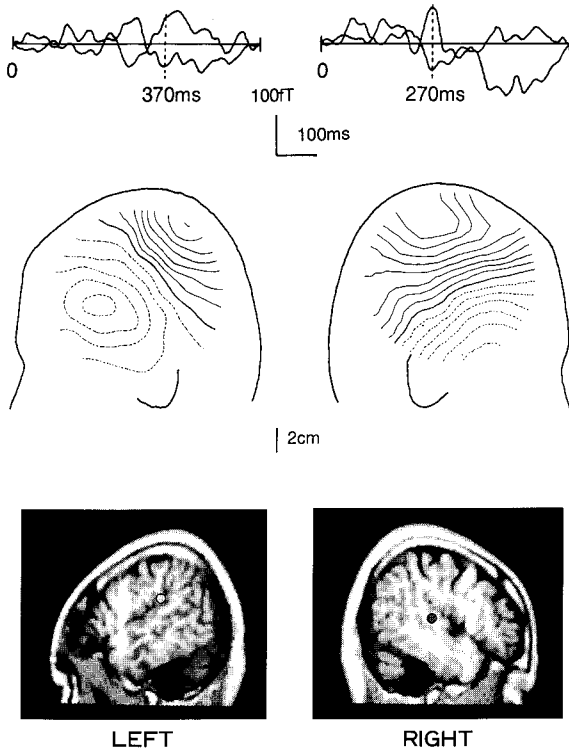


図3 MEG 信号解析の説明のための図。MEG 反応波形と ECD (等価電流双極子) が計算された潜時をカーソルで示す(上)。カーソルの潜時における双極子性磁場分布を表す等磁場線図中と ECD の位置を MRI 断層像に重量させたもの(下)。

の ECD 位置を MR 画像中へ重ねたものである。MEG 波形のピーク振幅は約 100 fT のオーダーであるが、数 100 fT の振幅をもつ通常の感覚刺激誘発 MEG 反応と比べると低振幅である。したがって、波形の輪郭がスムーズでないのは雑音の影響と思われる。また、主要なピーク潜時は約 150 ms 以上あり、2 次以降の反応に属する。

カーソルで示した潜時では、正(頭部から湧き出し)と負(頭部への吸い込み)の磁場は同程度の振幅があり、磁場分布も双極子性を示している。その結果得られた ECD は、左脳半球では側頭葉の脳溝であるシルビウス裂の後端にあり、右脳半球では側頭葉側面上の側頭回近傍にある。なお、カーソル以外の潜時でも反応ピークが存在するが、それらの ECD 位置は必ずしも同じではなく、あるいは図 3 の記録範囲外にある場合もある。そのような場合、磁場分布は正または負の一方に偏ったものになる。前述したように、側頭部のいろいろな位置で繰り返し測定を行ったのは、い

ろな部位にある ECD の反応を適当な測定位置で捉えるためである。

5. 実験結果

反応波形と磁場分布

MEG 計測中の遅延照合課題の遂行率はいずれの被験者も 90% 以上、典型的には 95% 以上あり、被験者は正確に課題を行ったと推定される。また、別個に行った反応時間測定の結果からは、カナと疑似文字の課題の反応時間の被験者間平均値は、それぞれ 669, 606 ms であった。2 つの課題は、ほぼ同じ難易度であると推定される。

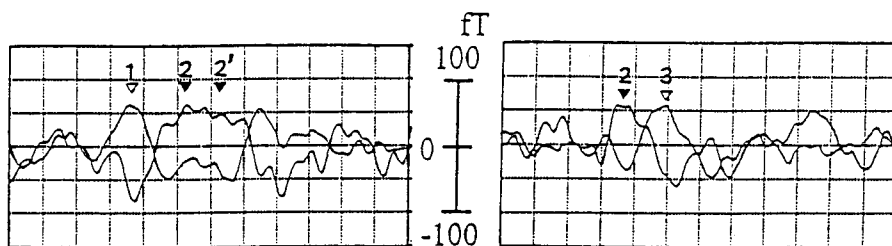
カナ文字課題と疑似文字課題の MEG 反応は、主要なピークを選択することにより潜時の順に M 1, M 2, M 3 の 3 つの分けることができた。カナ文字反応 (M 1 : 155-210, M 2 : 210-280, M 3 : 270-410 ms), 疑似文字反応 (M 1 : 125-180, M 2 : 180-250, M 3 : 250-460 ms) である。図 4 には、ある被験者について左右脳半球のカナ文字、疑似文字反応波形を示す。M 1 ~ M 3 反応を矢印で示したが、黒三角は基準を満たす ECD が計算されたピーク、白三角はピークはあるが ECD が求められなかったものである。通常、3 つのピークは、順次、磁場の符号を潜時とともに交替するが、左脳のカナ文字反応 M 2 のように、ひとつの反応が 100 ms 以上にわたって持続する場合もある。被験者による個別の内的プロセスを窺わせて興味深い。

図 5 は違う被験者の例であるが、M 2 反応の ECD ピーク潜時で描いた磁場分布を示している。推定される ECD の位置が潜時や刺激文字により異なるため最適な MEG の計測位置は少しずつ異なっているが、いずれも正負の磁場を含む双極子性分布であることが分かる。ここで、実線は湧き出し、破線は吸い込み磁場であり、カナ文字反応では 20 fT, 疑似文字反応では 10 fT 間隔で等高線を描いてある。

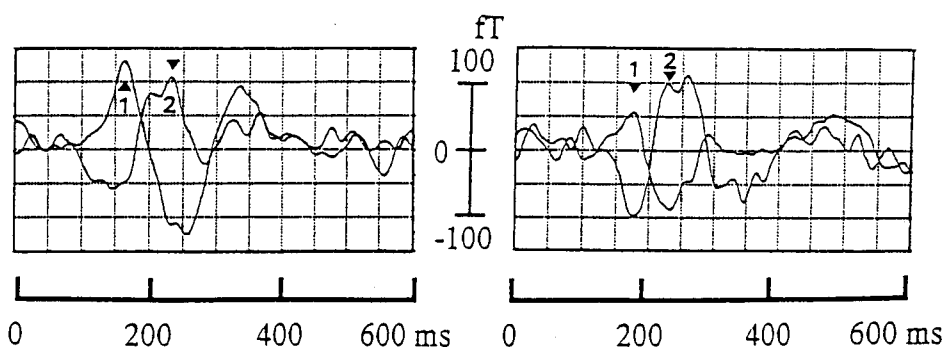
ECD の解剖学的位置

カナ文字反応と疑似文字反応で見られた ECD の典型的な解剖学的位置を図 6, 図 7 に示す。カナ文字反応 (図 6) では、数字で示した潜時で分かるように、早期成分である M 1 (190 ms) は後頭葉と頭頂葉の境界に位置する頭頂後頭溝 (POS : parietooccipital sulcus) にあり、第 2 成分 M 2 (270 ms) は左の側頭葉中

LETTER TASK



PSEUDO-LETTER TASK

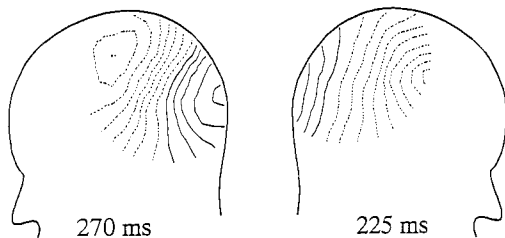


LEFT HEMISPHERE

RIGHT HEMISPHERE

図4 カナ文字刺激(上)と疑似文字刺激(下)のMEG反応波形。正と負の大きな振幅を持つ波形を選択し、M1～M3反応ピークをマークしてある。

LETTER TASK



PSEUDO-LETTER TASK

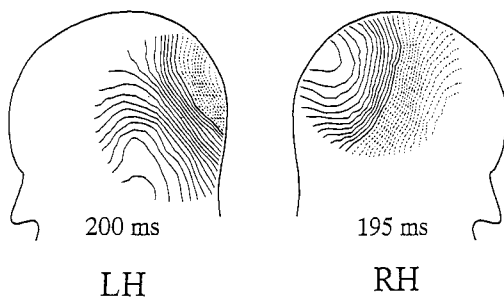


図5 カナ文字刺激(上)と疑似文字刺激(下)のM2反応における等磁場線図。実線が湧き出し、破線が吸い込み磁場を表す。

程にある上側頭溝(STS: superior temporal sulcus), 第3成分M3(370ms)はシルビウス裂(外側溝: LaS: lateral sulcus)にある。ここで、線分はECD電流の向きを表したものであるが、ECDが存在する脳溝にほぼ垂直であることが分かる。MEGの活動源は大脳皮質の錐体細胞に流れるシナプス電流(EPSP電流)であるとされているが、脳溝に垂直な電流は脳溝内の皮質に活動源があることを示唆している。

疑似文字反応(図7)では、M1成分(150,160ms), M2成分(215,235ms)は後頭葉から側頭葉にかけて脳底部(小脳の上)にある紡錘状回(FG: fusiform gyrus)に位置している。脳溝では側副溝(CoS: collateral sulcus)あるいはその外側にある後頭側頭溝(OTS: occipito temporal sulcus)が対応する。また、M2成分(200ms)はM3成分(310ms)とともに右側頭葉にあるものもある。それぞれ、STS後部、LaS後端に位置している。

図8はカナ文字課題(A)と疑似文字課題(B)で得られたMEG反応の脳内位置をまとめたものであ

LETTER TASK

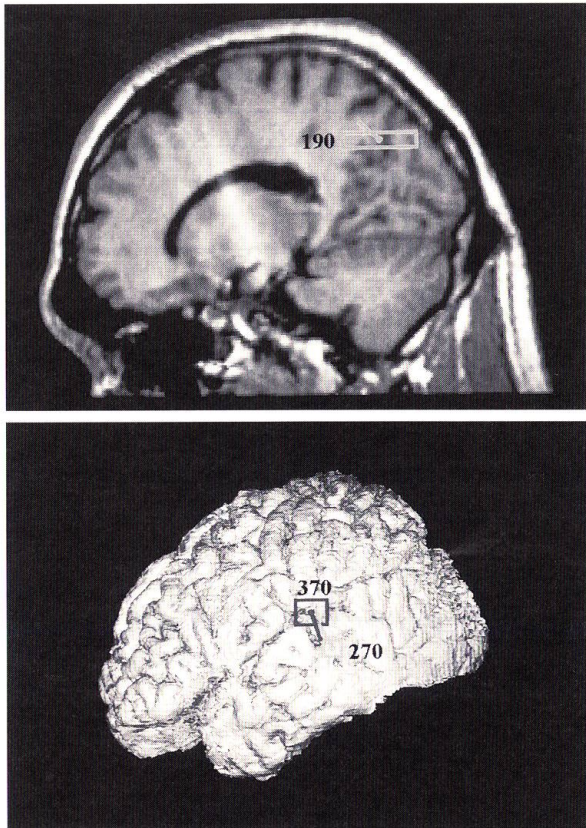


図6 カナ文字刺激に対する主なMEG反応の活動源位置。

PSEUDO-LETTER TASK

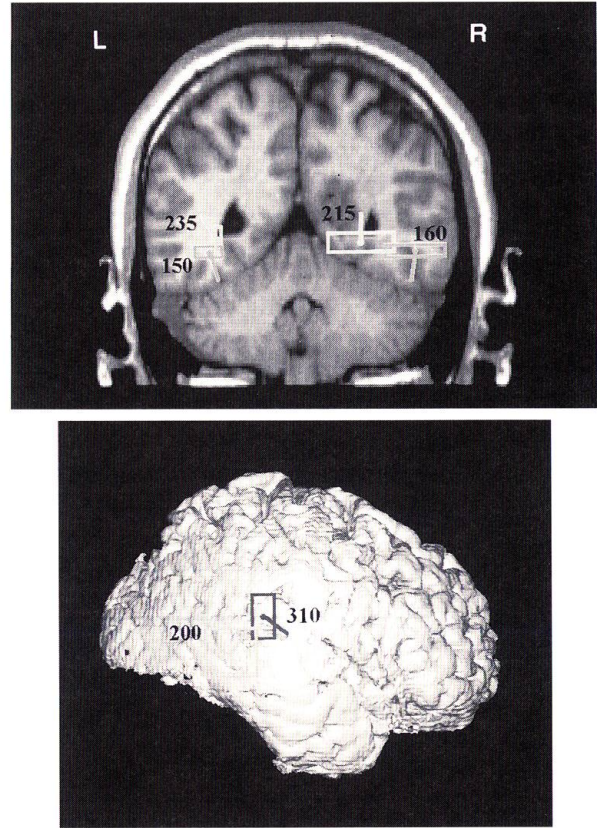


図7 疑似文字刺激に対する主なMEG反応の活動源位置。

り、MR画像中のECDの位置をもとに脳溝などの構造に対応させて模式的な脳地図に転写してある。文字反応(A)の上図は脳縦裂から15-25mm離れた内側矢状面であり、下図は外側面である。疑似文字反応(B)の上図は左下の外側図に縦縞で示した位置での冠状面である。活動源に付けた番号は被験者を表し、M1-M3反応をシンボルで区別してある。

図8の活動源地図から特徴的な点をまとめると以下のようなになる。

- ・後頭葉内側のカナ文字反応の初期、中期(M1, M2)成分は上下に(POSからFGまで)散逸していて、被験者による位置の相違がある。
- ・カナ文字反応の中期、後期(M3)成分は左右の側頭葉後部に集中しており、左脳半球の活動が右半球よりも活発である。
- ・疑似文字反応の早期、中期成分の多くは後頭・側頭接合部底面(FG)に集中しており、左側の活動が活発である。

・疑似文字反応の中期、後期成分は右脳半球の側頭葉後部にほとんど局在している。

6. 考 察

この研究で行った二つの実験から、後頭葉を中心とした視覚領野における早期活動(約200ms以前)からすでに読める文字と読めない記号文字で解剖学的な位置に違いがあること、また、その後の潜時(約250ms以降)ではともに側頭葉の後部と側頭・頭頂境界が活動の中心となるが、文字の違いにより半球間に活動の偏りがあることが分かった。

視覚呈示された単語処理に関わる脳活動についてはPetersenら^[2-4]による先駆的な研究がある。読める単語、疑似単語(単語のようなつづり)、読めない単語(発音出来ないアルファベット列)、読めない疑似文字列を被験者に見せた時のPET測定の結果から、後頭葉左内側の高次視覚領野(図8Aの左上図にある内側面の活動が下方へも広がった領域)が視覚単語認知(形態

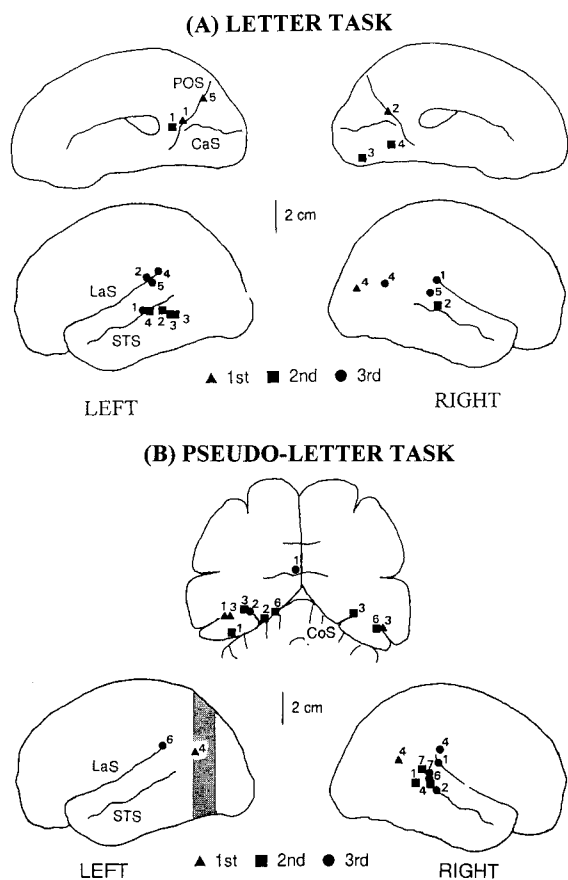


図8 カナ文字刺激(A)と疑似文字刺激(B)のMEG反応(M 1 = 1st, M 2 = 2nd, M 3 = 3rd)の位置を模式的な脳地図のプロットしたもの。(A)の上図は内側面、下図は外側面を表し、(B)の上図は下図外側面に記入した線の位置での冠状断面である。主要な脳溝を線で示し、被験者を番号で識別してある。

やつづりにより単語 (orthographic form) として認知する活動) に特異的に関わっている場所であり、これに対して単語の意味理解に関わる場所は左前頭葉にあるとされた^[4]。また、単語の韻を検出する課題を用いた実験からは、左側頭・頭頂境界付近が音韻処理に関する場所であると推定された^[3]。

この研究のあと、単語や意味処理の脳内プロセスを調べる多くのPET測定が行われたが、視覚単語の認識 (word recognition) の活動は左側頭葉後部 (図6下のような活動位置) にあり、後頭葉内側にはとくに単語処理に関連した活動はないとする結果^[7]、一方、左側頭葉後部は音韻処理に関連し、補足運動野と左の前頭葉中下部が内的なスピーチを介して単語認識 (lexical decision) を担う^[8]、とする報告などがあり、統一

的な結果は得られてない。また、最近のFMRI測定の実験では、後頭葉内側の視覚高次領野は疑似単語や読めない単語よりも真の単語刺激により強く活動するので単語認知に関連している、また、前頭葉 (前頭前野) の外側部は音韻的処理に最も強く関わる、単語の意味処理はむしろ側頭葉の中・上部が関連するとしている^[9]。ただし、この研究では左と右脳の区別はされていない。

PETやFMRI測定では代謝活動を計測するので、対象とする機能に直接関連しない脳活動も検出され、また、信号のSN比は数%以下と低い。このために、測定したい機能を含む課題とそれを含まない課題間で信号の差分を取って統計処理を行う。その結果、対照とする基準状態の選択により測定結果が変化する可能性がある。また、とくにPETでは多くの被験者間にわたって加算平均を行うので、個体による活動の違いは観測できない。現在のFMRIの技術では脳全体を観測することができず、限られた枚数のスライス (断層) 画像しか得られないので、測定断層以外の場所で起きていることは分からない。PETやFMRIの測定結果に時として見られる不一致の誘因にはこのような背景があると思われる。

これに対しMEGはSN比が高く、差分法によらずに個人ごとに活動源を計算してその場所を特定できる。さらに、広い体積の領域、あるいは脳全体が観測できる。したがって高い時間分解能とあわせて、PETやFMRIとは違った基準で脳の活動を定量化することができる。

この研究で用いたのは単一の文字であるが、文字が読める・読めないに依存した後頭部の活動が見られたことは、Petersenら^[4]の単語認知スポットの考え方には矛盾しない。しかし刺激が文字列からなる単語ではないこと、文字活動の個人差が大きいこと、実験条件の差異 (カナと疑似文字の実験間で刺激の明るさが異なる) が疑問点として挙げられる。これらを明らかにするためには、文字単語を用いたMEG実験が必要と思われる。

カナ文字に見られた左側頭後部とその上の側頭・頭頂境界の活動は、意味を持たない単一の文字刺激であることとPetersenら^[3]やPriceら^[8]の結果とを考えると、音韻変換の機能が第一に考えられる。最近、国内では日本語の文字や漢字を用いたMEG研究

が盛んであるが、そこでも側頭葉の活動が報告されており^[10,11]、なんらかの音韻的なプロセスが関連していると考えられる。

また、実験で用いた遅延照合課題は、その遂行には短期記憶の再生 (retrieval) がともなっている。ここで、韻の検出課題を使った Paulesu ら^[12] の PET 測定では、左の側頭・頭頂境界 (縁状回付近: 図 6 の 370 msECD のある位置) が音韻の短期記憶に関わっているため、記憶との関連が推察される。一方、前頭葉の Broca 野とその近傍は内的スピーチを介して音韻的記憶の保持と関わっていると推察されており^[12-14]、側頭・頭頂境界の記憶スポットがあるとする両者の機能的関連に興味を持たれる。

カナ文字の場合、左側頭の大きな活動のほかに右側頭の対応する位置にも活動が見られた。また、疑似文字では右側頭のみが活動した。実験課題からは右脳の機能として、カナや疑似文字の図形的処理が考えられるが、それらは後頭葉の視覚高次領野 (例えば図 7 上の後頭・側頭底面の紡錘状回など) が第一に可能性がある。ここで、紡錘状回やその内側の舌状回は、少しずつ違った位置で単語認知 (単語認識の前処理) や、色あるいは顔の認知に関わる、とする電極記録の結果がある^[15,16]。日本語の平仮名单語を音読する課題を用いた PET 測定の実験では、後頭葉の内側・外側部に加え、左側頭後方の下部領域で活動が観測されている^[17]。ここで、後者の側頭後下部は紡錘状回を含んでいる。他方、単語黙読時には、左側頭部のほかに右側頭にも活動が見られている^[8]。現在のところ、後頭・側

頭下部領域の活動との関連のなかで、右側頭部が文字や単語の認識にどのような役割を果たしているのかは不明である。

6. おわりに

自然科学のアプローチでは現象を分解可能な最小の要素にまで還元して理解し、しかるのちに複雑な現象を合成 (再構成) する方法が一般的である。自然科学はこれまで再現可能な現象をもっぱら研究対象としてきたが、脳活動のような生体の現象は複雑で個体間の差異が激しく、観察結果の意義を統計的な分析で評価する側面をもっている。MEG による言語機能の研究の端緒として、われわれは文字を視覚性言語機能の最小単位として仮定し、文字の認知・認識プロセスの脳内活動を観察しようとした。これは従来の自然科学的なアプローチに乗っ取ったものであるが、このように、ヒトの脳機能を要素的なコンポーネントに分解して解析する方法が常に正しいかどうかは、研究の節目ごとに反復自問する必要があるだろう。

この研究の MEG 測定は、著者の一人 (栗城) が併任している生理学研究所・統合研究施設で行ったものである。同施設の永田治、竹島康行両技官の実験協力に感謝する。また、課題に用いた疑似文字の作成は富士通研究所の藤巻則男主任研究員によっている。MRI 撮像にあたっては、札幌柏葉脳神経外科 (柏葉武院長、ほかの方々) のご協力を得た。ここに、感謝申し上げる。

【参考文献】

- [1] Geschwind, N., *Sci. Am.*, 241, 158 (1979).
- [2] Posner, M. I., Petersen, S. E., Fox, P. T. and Raichle, M. E., *Science*, 240, 1627 (1988).
- [3] Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M. and Raichle, M. E., *J. Cogn. Neurosci.*, 1, 153 (1989).
- [4] Petersen, S. E., Fox, P. T., Snyder, A. and Raichle, M. E., *Science*, 249, 1041 (1990).
- [5] Kuriki, S., Hirata, Y., Fujimaki, N. and Kobayashi, T., In: *Visualization of Information Processing in the Human Brain: Recent Advances in MEG and Functional MRI (EEG Suppl. 47)* (eds. Hashimoto, I., Okada, Y. C. & Ogawa, S.), Elsevier Science B. V., 209 (1996).
- [6] Kuriki, S., Hirata, Y., Fujimaki, N. and Kobayashi, T., *Cogn. Brain Res.*, 4, 185 (1996).
- [7] Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, W.D., Friston, K., Weiller, C. and Frackowiak, R., *Brain*, 115, 1769 (1992).
- [8] Price, C. J., Wise, R. J. S., Watson, J. D. G., Patterson, K., Howard, D. and Frackowiak, R. S. J., *Brain*, 117, 1255 (1994).
- [9] Pugh, K. R., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Bronen, R. A.,

- Shankweiler, D. P., Katz, L., Fletcher, J. M. and Gore, J. C., *Brain*, 119, 1221 (1996).
- [10] 川勝真喜, 今田俊明, 益子拓徳, 小谷誠, *医用電子と生体工学*, 33, 18 (1995).
- [11] 小山幸子, 柿木隆介, 宝珠山稔, *日本生体磁気学会誌*, 9, 28 (1996).
- [12] Paulesu, E., Frith, C. D. and Frackowiak, R. S. J., *Nature*, 362, 342 (1993).
- [13] McCarthy, G., Blamire, A. M., Rothman, D., Gruetter, R. and Shulman, R. G., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 90, 4952 (1996).
- [14] Fiez, J. A., Raife, E. A., Balota, D. A., Schwarz, J. P., Raichle, M. E. and Petersen E., *J. Neurosci.* 16, 808 (1996).
- [15] Nobre, A. C., Allison, T. and McCarthy, G., *Nature*, 372, 260 (1994).
- [16] Allison, T., Begleiter, A., McCarthy, G., Roessler, E., Nobre, A. and Spencer, D. D., *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 88, 343 (1993).
- [17] Sakurai, R., Momose, T., Iwata, M., Watanabe, T., Ishikawa, T. and Kanazawa, I., *Neuro. Rep.*, 4, 327 (1993).