

## 3-6 言語処理の脳活動及び解析方法

### 3-6 *Neural Activation Related To Language Processes and An Analysis Method*

藤巻則夫 早川友恵

FUJIMAKI Norio and HAYAKAWA Tomoe

#### 要旨

言語はヒトにおいて特に発達した機能であり、情報通信技術にとって必要不可欠の基本的な要素である。本稿では、機能的磁気共鳴画像装置 (fMRI) や脳磁界計測装置 (MEG) などを使った言語脳機能計測についての研究成果を紹介する。我々は、空間分解能に優れた fMRI と時間分解能に優れた MEG データを組み合わせるにより、高い信頼性をもって脳活動の時間・空間的挙動を解析する独自のデータ解析方法を開発し、語彙判断、内語処理及び視標検出実験のデータに応用してその有用性を示した。そして文字や単語の視覚的形態、音韻、意味処理に対応する脳活動を分離計測し、また速読者を使って文章を読む際の脳活動計測を行い、読み速度依存性を調べた。最後に最近行っている意味及び反復プライム実験と言語脳活動モデル化の試みについて触れる。

Language has especially been developed in human species, and is indispensable for information and communications technologies. In this review paper, we introduce our researches on measurements of brain functions related to language with functional magnetic resonance imaging (fMRI) and magnetoencephalography (MEG). We developed a method of analyzing spatial and temporal brain activations with high reliability by using both fMRI data with a fine spatial resolution and MEG data with a fine temporal resolution, and applied it to data of lexical decision, inner speech, and visual search experiments. We measured and separated brain activations for visual-form, phonological, and semantic processes of characters and words. We also measured dependence of brain activations on reading speeds when rapid readers read sentences. Finally we also introduce our recent research on semantic and repetition priming experiments and modeling of language brain activations.

#### 【キーワード】

言語, 脳活動, fMRI, MEG, 逆問題

Language, Neural activation, fMRI, MEG, Inverse problem

### 1 まえがき

言語は人において特に発達した脳の機能である。我々は言語を使用して、様々の情報処理を行っている。日々の思考は、言語によって行っている部分が多く、また人類の文化・文明も言語によって成り立っているところが大きい。この言語機能をつかさどっているのは我々の脳であり、人工的な機械が大変進んでいる現在でも、ヒトと同じレベルで言語処理をすることはできない。どのようなメカニズムでこのような優れた

機能がヒトの脳の中で実現されているかというなどは、科学的な興味を強く引き、またそれを解明することにより将来の情報通信の発展に重要なヒントが得られると思われる。

文字や単語の処理を行う際には、視覚形態処理・音韻処理・意味処理がなされる。さらに単語を並べた文章では統語処理が行われる。これらの処理が脳のどこで、いつ行われるかを調べるため、脳波 (EEG)、ポジトロン CT (PET)、脳磁界 (MEG)、機能的磁気共鳴画像 (fMRI)、近赤外光イメージング (NIRS) などの方法により脳活

動計測が行われている。これらのいわゆる非侵襲計測法によれば、脳の活動を頭の外から計測することができ、動物実験や脳損傷患者の研究しかなかった時代と比較し、健常者を使った実験がふんだんに行えるようになった。特に90年代以降、これらの装置の進展に伴い、脳研究が急速に進展し、多数の研究結果が報告されつつある。特に動物実験で調べることの困難な言語機能については、非侵襲脳機能計測は重要な研究手段と言える。

我々は、MEGとfMRIを使い、日本語の「読み」について脳活動計測を行ってきた。fMRIは空間分解能に優れ、MEGは時間分解能に優れている。一長一短のあるこの二つの方法から得られた信号を組み合わせる独自の方法を開発し、高い信頼性をもって脳活動源の時間的・空間的振る舞いを解析できるようにした。本稿ではこのような解析方法の開発及び単なる線分の検出や文字・単語から文章までの言語処理にかかわる脳活動計測結果をまとめ、また最近行っているプライミング実験の紹介と今後のモデル化への端緒などについて記す。

## 2 語彙判断の脳活動計測

### 2.1 実験課題<sup>[1]</sup>

言語処理は複数の処理からなる。文字や単語については脳内で語彙にかかわる処理が行われ、大きく分けると視覚的な文字の形やつづりに関する形態処理、言語を音として表現し処理する音韻処理及び語彙レベルでの意味処理の三つがある。文章については、単語のならばと意味との対応付けにかかわる統語処理が加わる(図1)。脳内言語処理メカニズムを解明するため、これらの処理に対応する脳活動の部位と時刻を知ることが有用と思われる。本章では、単語の処理と脳活動の関連を調べる実験について述べる。

単語を視覚的に呈示し、形態、音韻、意味のどれかの処理だけを被験者に要求し、その処理に関する脳活動を計測しようとしても、これは無理である。知っている単語であれば、脳内では自動的に三つの処理が行われることが知られている。そのため、文字を変形して読めなくした疑似文字に水平線が含まれるか否かの判断(形

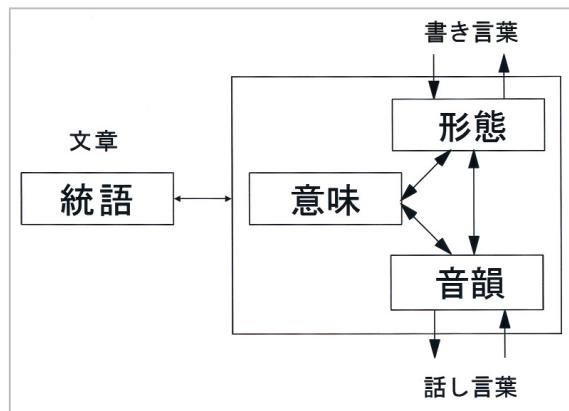


図1 脳内言語処理

態処理)、カナ文字が母音[a]を含むか否かの判断(形態+音韻処理)、文字列が単語か無意味かの判断(形態+音韻+意味処理)など、処理を段階的に変えた実験課題を作った(図2)。

なお図中、処理の右肩の記号「'」は文字列についての処理を表す。これらの課題を行う際の脳活動を比較することにより、個々の処理に対応する脳活動を分離検出しようという試みである。このような課題を使った実験は、英語圏での詳細な研究が先行したが、報告間に矛盾があるとの指摘もなされており、これを日本語、特にアルファベットと同様に表音文字であるカナ(厳密には、音節文字)を使った図2の課題を用い、空間分解能に優れたfMRIと時間分解能に優れたMEG(図3)を使って脳活動計測を行った。

### 2.2 fMRI計測<sup>[1]</sup>

我々の使用している磁場強度1.5テスラのMRI装置(Siemens A G, Vision)を図3左に示す。fMRIは、脳活動に伴う血流変化に基づく磁気共鳴信号の変化(BOLD信号)をとらえる。脳が活動すると酸素供給を増やすため活動部位付近で局所的に血流量が増大し、酸素消費量を上回る供給がなされる結果、常磁性の性質を持つ脱酸素化ヘモグロビン(他の成分や組織は反磁性)が減少し、局所的な磁場不均一が減少するため、磁気共鳴信号の見掛けの緩和時定数が長くなり、信号が(数%程度)増大する。通常このようなメカニズムが信号の起源と考えられているが、血行動態は複雑な現象であり異論もある。しかしながら、これまで多くの脳機能について実験がなされ、観測された結果の多くは、過去の脳

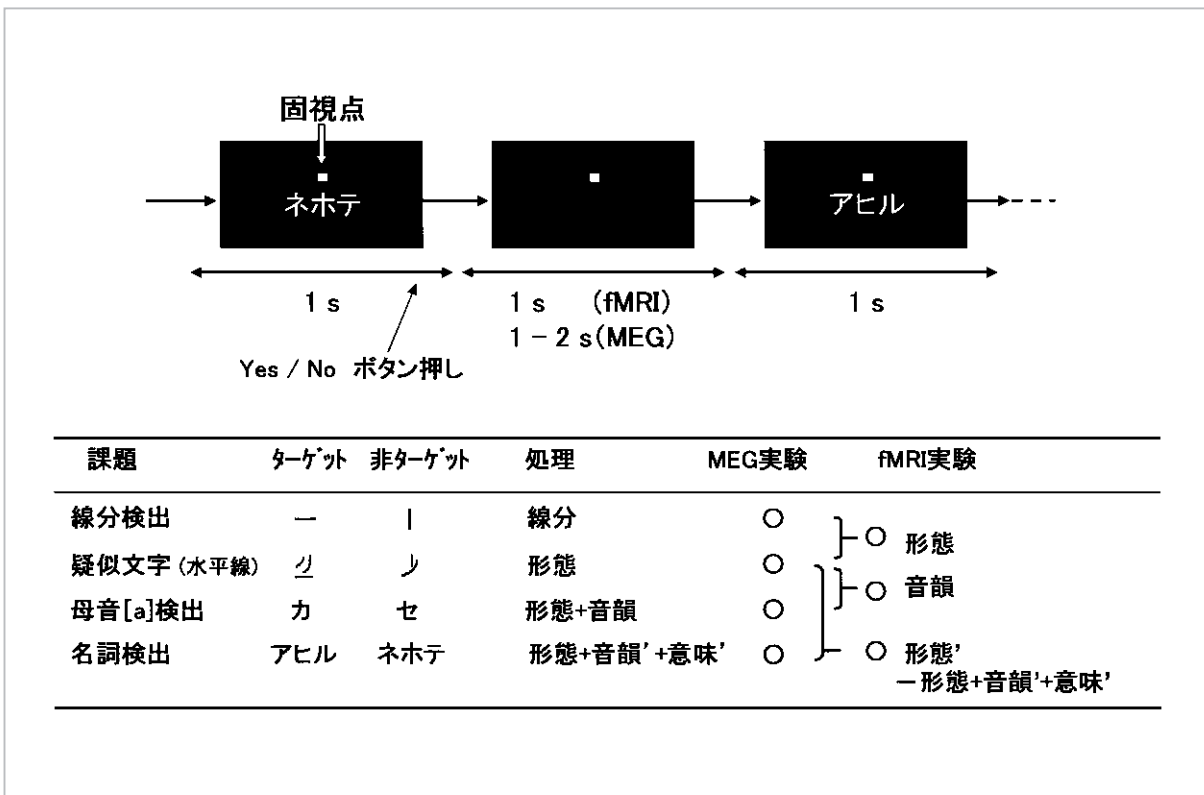


図2 文字・単語実験課題

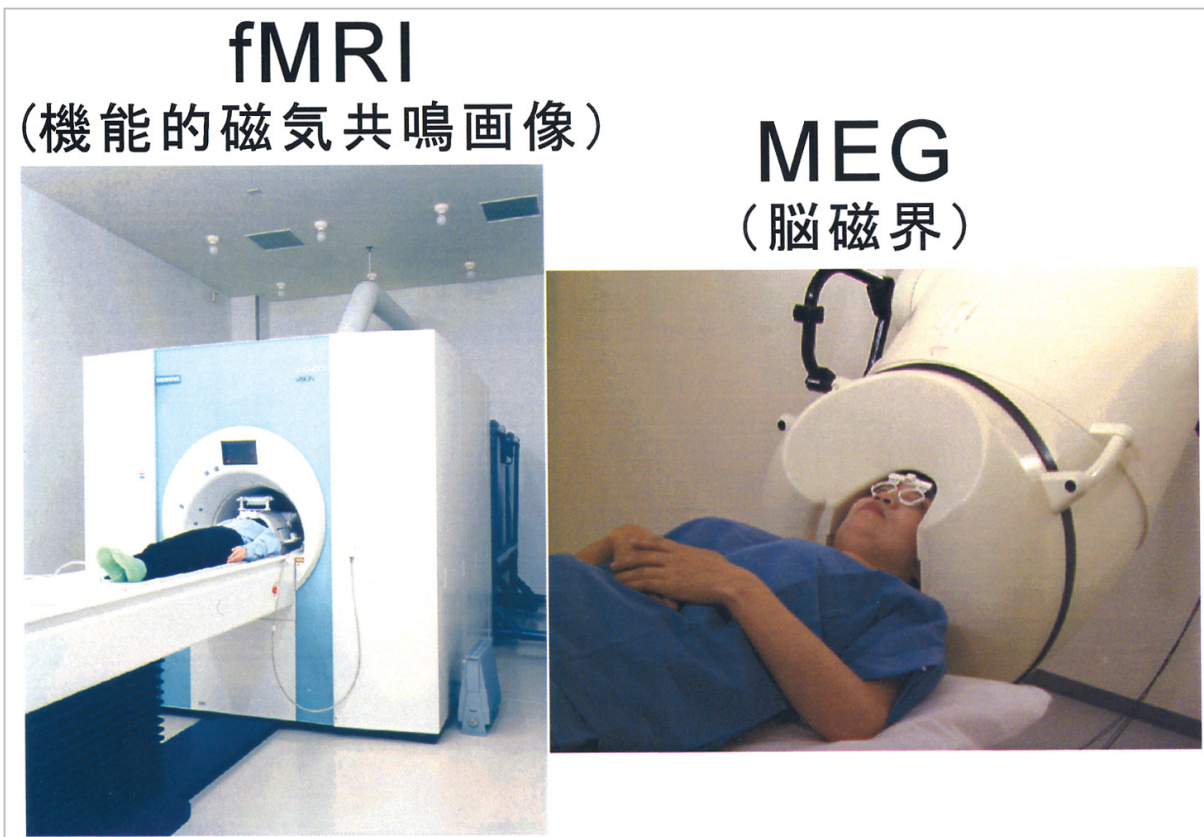


図3 fMRI及びMEG装置

研究からみて妥当な活動部位を示している。なお撮像には、空間的に傾斜した磁場を使い、フーリエ変換により画像を構成する巧みな方法が使われており、一般に多数の脳活動が生じていても、数ミリといった高い空間分解能で活動の空間分布(機能画像)が得られるのが特徴である。同じMRI装置で、組織の違いによる緩和時間の差を画像化することにより構造画像も得られ、この二つを重ねることにより脳活動位置を詳細に検討することができる。同様に血流変化をとらえるPETと比較すると、fMRIでは放射性同位元素を使用しないため、同じ被験者で繰り返し実験ができ、より非侵襲性が高い。脳活動が変化してから、血流変化を生じるまでに数秒以上の遅れ(hemodynamic delay)があるため、神経細胞の活動をとらえるには、時間分解能が足りない。実際の実験においては、二つ(test及びcontrol条件)ないしそれ以上の課題をそれぞれhemodynamic delayより十分長く(例えば、数十秒程度)交互に行って脳活動の課題間の差を得た

り(block-design)、刺激に対する信号の応答波形を計測する(event-related fMRI)。

本稿では、前者のblock-designによる実験を行い、図2に示す課題の対について、条件間の信号の差から、課題に含まれる処理の差にかかわる脳活動位置を得る(cognitive subtraction)実験を行った。4秒に1回の頻度で撮像し、毎回、頭部全体を16枚のスライスでカバーした。雑音を重ねた小さな信号をとらえるため、一実験当たり124回の撮像(約8分)を行った。計測結果はソフトウェアspm99(The Wellcome Department of Cognitive Neurology, London)により解析した。三つの実験について11人の被験者から得られた脳活動を正規化し、標準脳に重ねた結果(Random effects analysis)を図4に示す。形態処理にかかわる脳活動が、後頭/後頭側頭下部に、音韻処理は左側頭後上部(いわゆるウェルニケ野付近)と左前頭下部(いわゆるブローカ野付近)に現れ、また意味処理は音韻処理部位と重なるとの結果を得た。

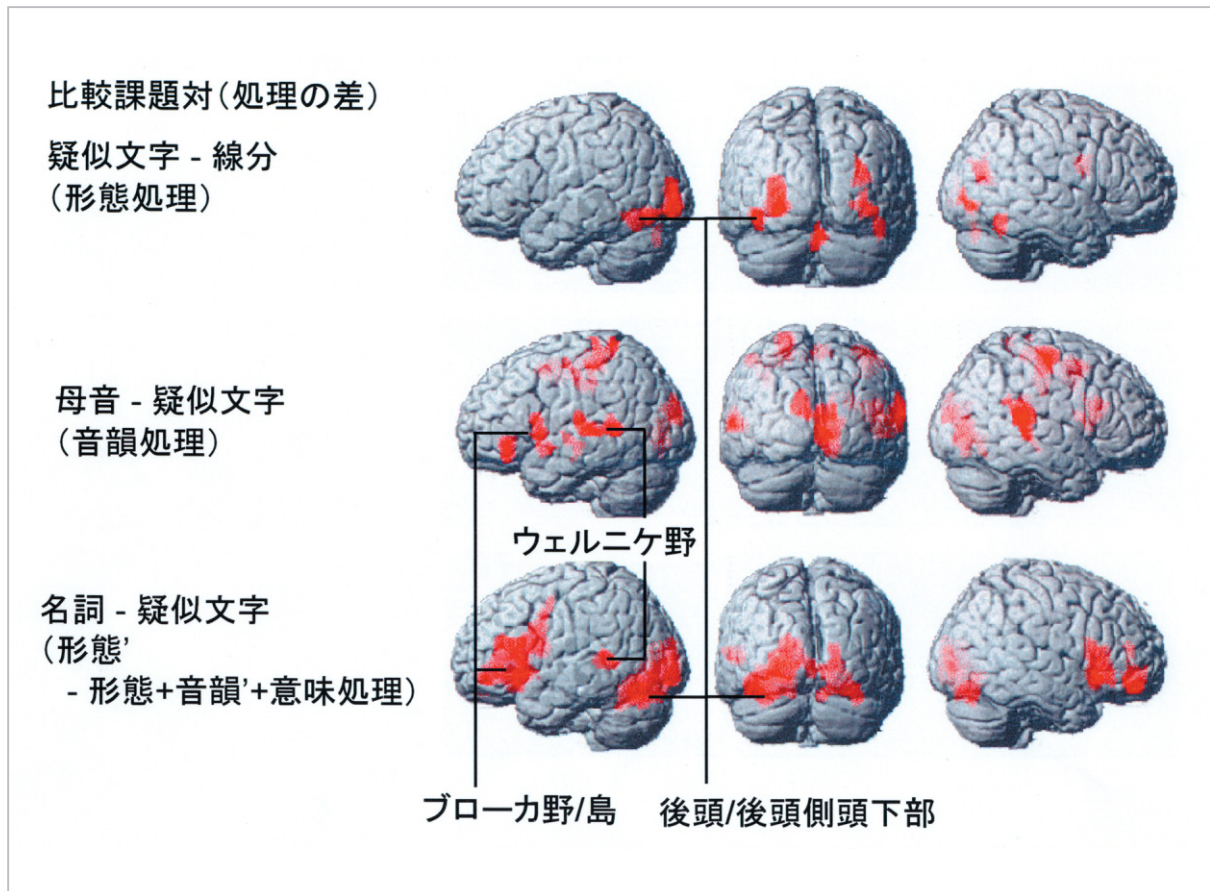


図4 fMRIにより検出された脳活動

図4に示す画像は、結果を見やすくするために検定水準が多少あまい(名詞-疑似文字が uncorrected probability (pu): 0.001, 母音-疑似文字及び疑似文字-線分が pu: 0.01) が、これとは別に個々の被験者ごとに有意な信号変化を示す voxel 数を抽出・分析し、また疑似文字、母音課題については文字列を使った実験結果も比較検討し、これらの部位が言語処理に関連して確かに有意に活動したことを確認している。特にウェルニケ野とブローカ野は、失語症に密接にかかわる部位であり、それぞれ話し言葉の理解や発話にかかわることが知られている。形態処理については、詳細な分析の結果、次の二つの点があった。

- (1) 形態処理は実在のカナ文字と疑似文字とで脳活動に有意な差がなかった。英語(アルファベット)を使った過去の実験について、実在の単語やそれに近い疑似単語に対してのみ活動する visual word-form center があるか否かという議論が行われているが、今回の結果は、実在のカナ文字ないしカナ表記単語にのみ活動する部位はなかったことを示す。
- (2) 一つの文字の呈示では、後頭/後頭側頭下部の活動は左右差がないが、複数の文字が呈示されると左半球側の活動が右半球側より有意に大きくなった。失語の症例研究、電気刺激、Wada法などを含む過去の様々な脳研究から、右利きのヒトのほとんどは、言語の主要な処理が左半球側(言語優位半球)で行われることが知られているが、今回の結果は、形態処理に関して、文字ないし疑似文字が一つでは左右差がないが、それらを複数並べた単語ないし単語に近い視覚形態を持ったものの処理から言語処理特有の左半球優位の脳活動分布が現れることを示している。

意味処理については音韻処理部位以外に新たな活動部位が検出できなかったが、ウェルニケ野や前頭下部付近が意味処理にかかわるとの過去の知見もあり、音韻処理部位と重なっている可能性が高い。ただし意味処理には多数の部位がかかわるとの報告もあり、例えば今回の結果において被験者の半数以下ではあるが活動のみられた左側頭前部も、カテゴリ処理などの意味処理にかかわると報告されている。

## 2.3 MEG計測<sup>[2]</sup>

我々の使用している148チャンネル全頭型MEGシステム(BTi, Magnes 2500 WH)を図3右に示す。脳の中には多数の神経細胞があり、処理ごとにそれを担う細胞群が電気信号をやり取りすることにより情報処理を行う。MEGは神経細胞を流れる微弱な電流が作る磁界を、高感度の超伝導磁気センサーで検出する装置である。この装置では、148個のセンサーが頭を取り囲んで配置され、時々刻々変化する磁界の空間分布を計測する。通常、錐体細胞と呼ばれるタイプの神経細胞が活動する際に、入力部分である樹状突起を流れるイオン電流(一次電流)が作る磁場を計測すると考えられており、局在した領域で万~十万個程度の細胞が同時に発火すると観測可能な大きさの磁界が生じる。脳波(EEG)も脳磁界(MEG)もこのような電気現象をとらえる方法であり、時間分解能はミリ秒程度と、神経細胞の活動をとらえるために十分である。ただしEEGでは上記の一次電流に伴ってその周囲に生じる戻り電流(二次電流)分布に伴う頭皮上での電位を計測するため、脳内の導電率分布の影響を強く受ける。一方MEGは一次及び二次電流が作る磁場を計測する。脳表に垂直な一次電流が作る磁界は、二次電流が作る磁界に打ち消されて計測できないので、MEGでは脳表に対し接線方向の電流が作る磁界を計測する。したがって脳回の活動はとらえず、脳溝付近の脳活動をとらえる。通常接線成分電流が作る磁界のうち、脳表に対し垂直な磁界成分を計測するが、それに寄与するのは一次電流のみであり、脳内では磁界はゆがみなく通る(比透磁率がほぼ1)ため、脳波と比べMEGの方が空間分解能は高いと考えられる。しかしながら上記のような事情のため、EEG及びMEGは相補的な情報源である。双方とも脳活動を頭の外で測る非侵襲計測方法であり、同一被験者で繰り返し実験することに問題はない。

なおfMRIやPETとは異なり、通常MEGでは条件間の脳活動の差はとらず、課題にかかわる脳活動を丸ごと計測する。刺激に対する応答は、1回だけの計測では雑音に比べ信号が小さいため、高次機能にかかわる計測において秒程度の時間のデータを測る場合、100ないし200回計測

し加算平均する。我々が通常使う計測条件は、サンプリング周波数が678 Hz、周波数帯域はDC - 200 Hzで、計測後に帯域通過型デジタル・フィルター(帯域: 0.3 - 40 Hzないし1 - 40 Hz)をかける。

脳内活動源のモデルとして、局所的に発火した多数の神経細胞の電流をまとめて一つの電流ベクトルで表し、これを(等価電流)ダイポールと呼ぶ。ダイポールの大きさは電流とその長さの積である。計測した磁界分布から、ダイポールを推定することを逆問題と呼ぶ。残念ながら一般の電流分布を求める逆問題は数学的に唯一の解がないことが知られていて、何らかの条件を加えないと解が求まらない。しばしば用いられるのは、ダイポールが一つであるという仮定(単一ダイポール近似)であり、適当な初期値から、収束計算により解を求めることができる。刺激に対する応答については、100 ms程度までの早期成分についてはこの仮定が合うことが多いが、後期成分は脳活動が広がり、単一ダイポール近似が成り立たない場合も出てくる。この近似の妥当性をみるため、幾つかの基準(95 %信

頼体積が4.2 cm<sup>3</sup>以下、計測磁界と計算磁界の一致度(goodness-of-fit)が90%以上、10 ms以上近い位置に留まる停留性などを満たしたものを解としている。複数のダイポールを解くマルチ・ダイポール逆問題については後述する。

図2の四つの課題について、1人の被験者について計測したMEG波形を図5に示す。また、単一ダイポール近似により計算したダイポールをMRI構造画像に重ねて表示した例を図6に示す。この例は、名詞検出課題の最初の大きなピークについての計算例であり、潜時(刺激からの経過時間)が100 msにおいて、磁界の湧き出しと吸い込みのピークを含む38個のセンサー(図中赤丸印内)から得た磁界分布を使って計算している。ダイポールは鳥距溝付近に求まったが、これは視覚情報が最初に大脳に入る部位として知られている。このような計算をピーク付近ごとに行い、fMRI実験から得られた活動部位と処理の関連とを併せて図7にまとめた。形態処理にかかわる脳活動が100 ms付近より後頭部ないし後頭側頭下部で始まり、音韻ないし意味処理にかかわる脳活動はこれより遅く、200 ms以降に左側頭

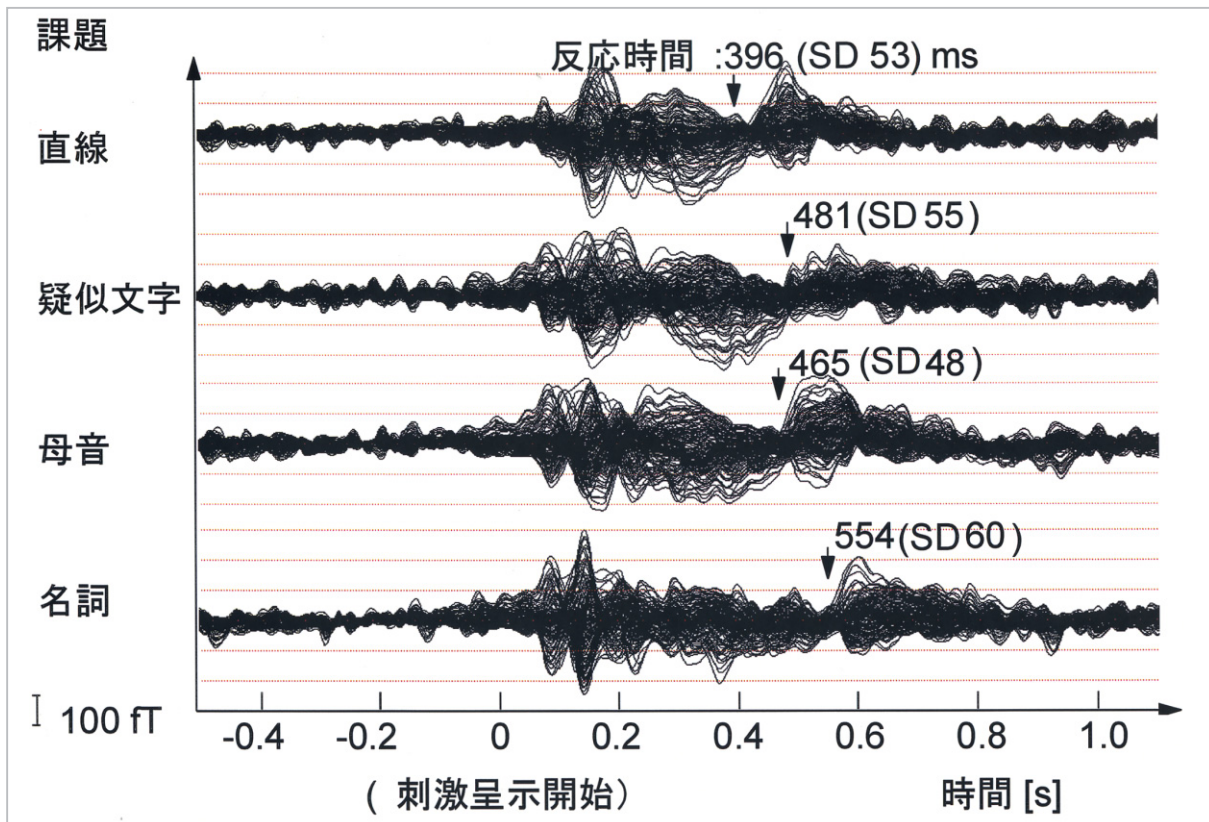


図5 MEG波形

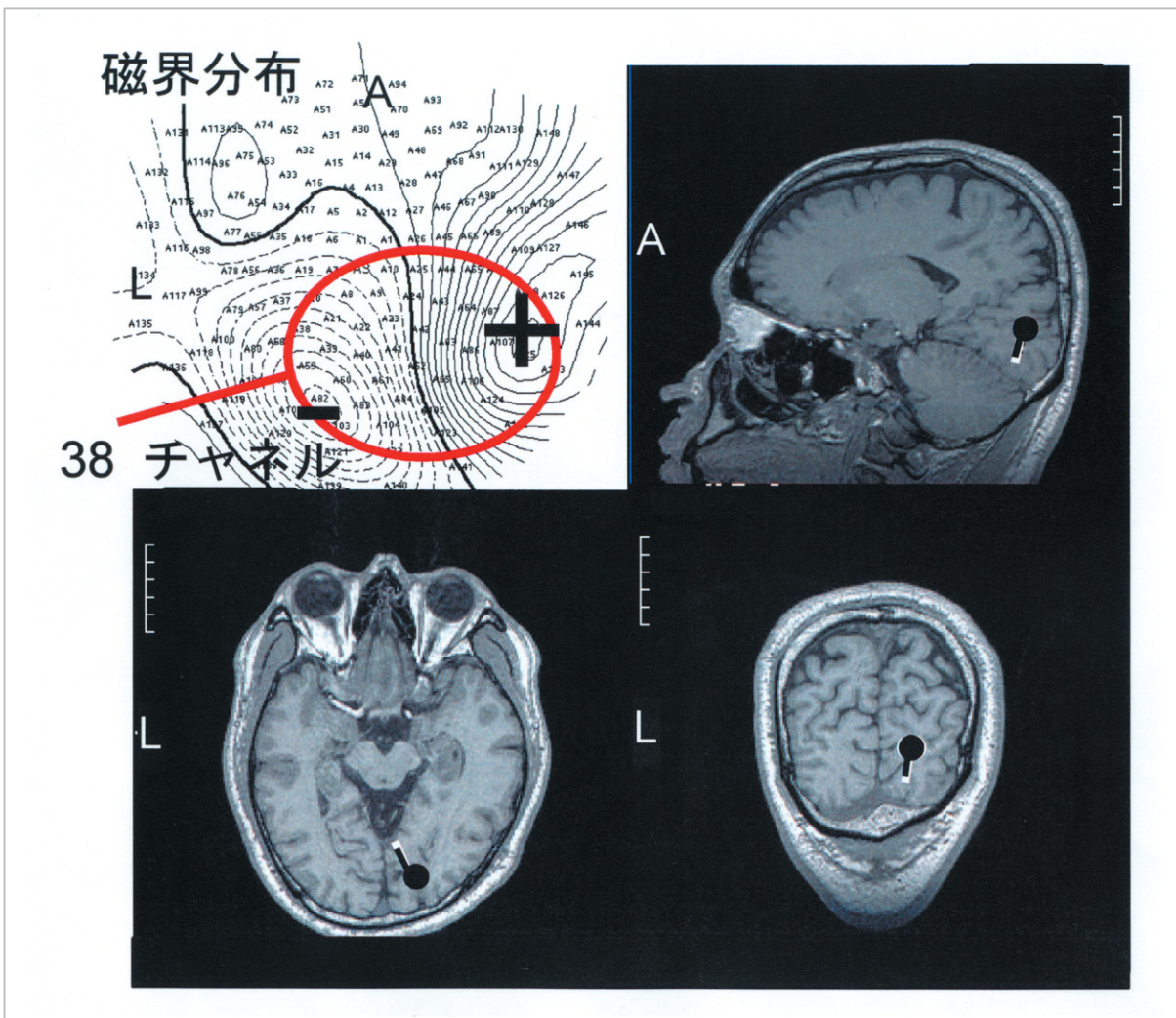


図6 名詞検出課題の潜時 100 ms における磁界分布とダイポール

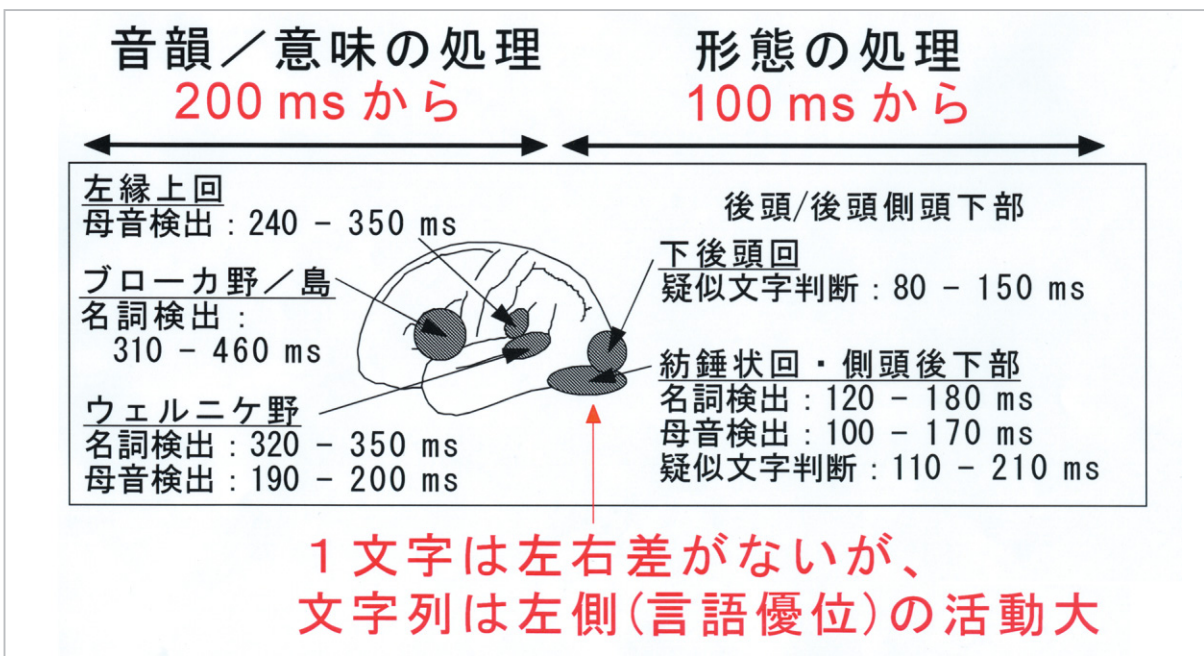


図7 文字・単語のfMRI及びMEG実験結果のまとめ

後上部いわゆるウェルニケ野と縁上回付近及び左前頭下部いわゆるブローカ野ないし島付近で観測された(図7)。

### 3 fMRIを利用したMEGダイポール解析方法

#### 3.1 fMRIとMEG(単一ダイポール近似解析)の計測データの比較<sup>[3]</sup>

前述のように、fMRIとMEGは全く異なる性質の信号をとらえる計測方法である。すなわちfMRIはBOLD効果により脳活動に伴う血流変化を磁気共鳴信号により計測する間接的な計測でありhemodynamic delayにより数秒以上のゆっくりした変化をとらえる。一方MEGは神経細胞の電気的な活動を磁界として直接計測するが、脳表に対し接線成分電流のみを測る。両者の比較は容易ではないが、刺激に誘発されるMEGの早期成分について、単一ダイポール近似により得たダイポール位置とfMRI活動位置を比較することが可能である。手の指に電気刺激を行って、20 ms成分のダイポールについて比較した例を図8に示す。被験者、指、手の左右を変えた実験により16データを得たが、fMRIではBrodmann 3b野及び1/2野に活動が現れた。視床から体性感覚情報が多く投射される3b野について比較すると、ダイポール位置がfMRI活動領域内に含まれる場合が8例あり、含まれない残りの8例について3b野のfMRI活動範囲からの位置ずれは、8 mm(標準偏差(SD)は4 mm)であった(図8)。しかしながらこの差は、それぞれの計測方法の誤差や二つの結果を合わせる際の誤差などの評価値、約6 mmと同程度であるため、体性感覚刺激の早期成分について言えば、MEGとfMRIとで活動位置に有意な差はないと判断される。

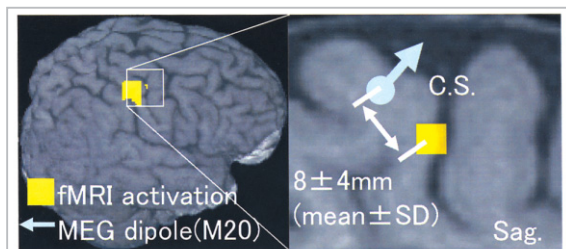


図8 手指電気刺激に対するMEGデータから得たダイポールとfMRI活動領域

他の刺激に対する脳活動や、後期成分など高次機能を反映する脳活動とその部位について、両者を厳密に確認する方法はない。個々の計測データについては、被験者間の再現性や、得られた脳活動と過去の脳研究の知見との比較などでその信頼性の確認をする必要がある。両者の計測結果に差の生じる例としては、例えばblock-designにより体性感覚や聴覚刺激を2秒に1回程度の割合で呈示し、単にそれを受け止めるだけの課題を実験すると、MEGでは100回程度の加算平均により、きれいな波形が得られるが、fMRIでは体性感覚野や聴覚野の活動は出づらい。ただし刺激頻度を高くすると脳活動が現れる。fMRIではhemodynamic delayによる積算効果のため、時間的に短い活動が低頻度で生じる場合、信号値が減るためにこのようなことになると考えられる。またcontrol条件にかかわる脳活動は、test条件とcontrol条件の引き算により消えてしまう。このようにMEGに寄与する活動源がfMRIでは見えない(fMRI-invisible dipole)場合がある。また、それとは逆にfMRIでは活動が観測され、MEGには寄与しない場合もある。例えばMEGでは脳回の活動をとらえていないとか、フィルターによって低周波成分をカットしたとか、誘発成分の加算平均をとる際に刺激に同期しない成分が小さくなるなどの原因で、このようなことが生じ得る。

#### 3.2 fMRIにより位置情報を与えるMEGダイポール解析方法(fMRI-constrained dipole推定法)<sup>[4]</sup>

fMRIは空間分解能がよく、例えば1.5 Tの装置では、3 - 4 mmの大きさのvoxel単位で脳活動の空間分布が得られる。実際には雑音を抑えるために使用する空間フィルターによっても空間分解能が決まるが、典型的には多数の脳活動がある場合にも、数mmの空間分解能でそれぞれの活動位置を示す。一方MEGについてはMEGデータだけからマルチ・ダイポールの解を唯一に求めることができない。したがって、fMRIにより得られた活動位置の情報を利用してマルチ・ダイポール解を得ようとする考えは有望であり、言語など高次脳機能を反映する後期成分の活動源が、数学的条件の成否などによらず求められ



るという意味で高い信頼性をもって解析できるであろう。このような考えに基づいて我々が開発した方法では、fMRIの活動範囲を2 cm程度の寸法に分割し、その分割単位ごとにダイポールを置いてその位置を固定する。そしてMEGの情報から時々刻々かわるダイポール・モーメントの大きさとその向きを決める(図9)というものである。上記の分割サイズは、多数の場合についてのシミュレーションにより計測脳磁界をダイポールでうまく説明できる条件(計測脳磁界と計算磁界の相関が平均94%から決めたものである。この分割方法によると、言語課題についてfMRIで検出した典型的な脳活動に対し、ダイポール数は数十になるが、未知数すなわちダイポール数の2倍(ダイポール一つ当たり、接線成分の電流が2自由度を持つ)がMEGセンサの数(我々の場合、148)すなわち計測データ数以下であれば他の条件なしに解が唯一に求まる。ただし、ダイポールの置き方が離散的であるため、一般にダイポール位置と真の脳活動源位置との間にはずれが生じる。この結果、ダイポール・モーメントを、その計算磁界と計測脳磁界との誤差の

自乗和を最小にする条件でフィットすると、近傍他のダイポール・モーメントにしわよせが生じる。これはクロストークと呼ばれる。ダイポールの位置とモーメントの向きについての多数のシミュレーションの結果、位置関係に強く依存するが、(上記の2 cm程度の分割単位にダイポールを置いた場合には)数cm以内のダイポールが大きなクロストークを受ける可能性が高いことが示された。そのため2 cm以内及び4 cm以内の2段階で、時間相関の高いダイポールがあれば、それらは区別できないと判断してモーメントのベクトル和をとるようにした。これをグループ化と呼ぶ。したがって、この方法による空間分解能は数cm程度となる。これはMEGの単一ダイポール近似による解析の誤差(信号対雑音比が3以上あれば、数mm)と比べると劣るが、複数のダイポールをfMRI以外の条件(例えばよく行われる電流ノルムに関する数学的条件など)を使わずに解を求めることができ、信頼性の高い解と言える。

上記の方法では、fMRIにより活動が求まらなかった部位にはダイポールを置かないため、

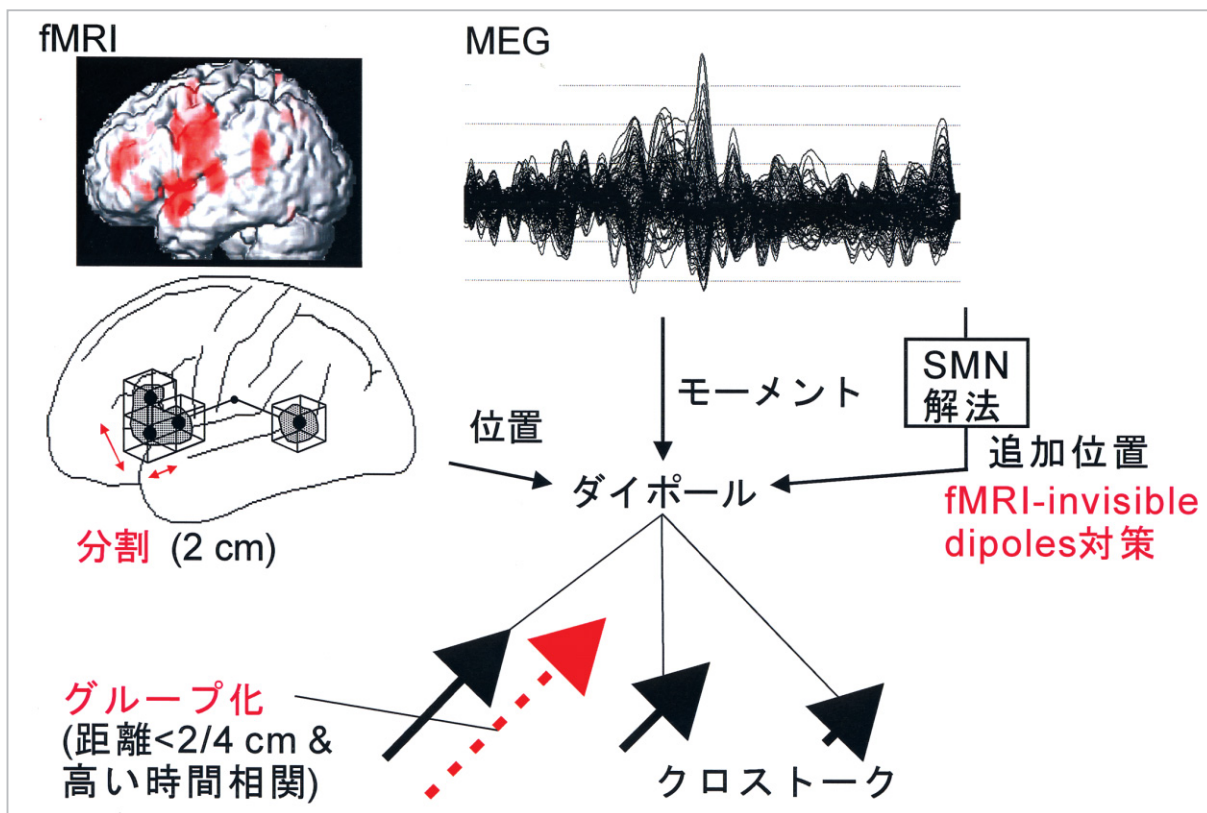


図9 fMRI-constrained dipole 推定法

fMRI-invisible dipoleは求まらない。これを補うため、本方法では、東大の岡部先生より提供いただいたSelective Minimum Norm (SMN)法を併用した。SMNは、頭部を例えば1 cm程度の間隔のメッシュに切り、計測データ数から求め得るダイポール個数分のメッシュ点の組合せの中で、一乗電流ノルムを最小にする解を求め、さらに雑音レベル以下のダイポールは捨てるというマルチ・ダイポール逆問題解法である。SMNによって得られた解ダイポール位置がfMRIから得られた位置より2 cm以上離れている場合は、これをfMRI-invisible dipoleと判断してその位置を解ダイポール群に加える。そして普通40-60個程度になる、すべてのダイポールモーメントを計測磁界にフィットする(図9)。もしもSMNによっても見逃したfMRI-invisible dipoleがあつて、またその近傍にダイポールがなく、離れた位置に他のダイポールが置かれる場合には、遠方まで大きなクロストークが生じ得る。ただし万が一そのような大きな位置ずれとなる場合には、本方法では、有意なダイポールを決める際に雑音に比べ有意であることのほか、計測磁界と計算

磁界の相関がよい(94%以上)、磁界の寄与率が低すぎない(>20%)という条件も課しており、誤った解を出すのではなく、有意な解がないと表示する。

MEGのマルチ・ダイポールを解くための他の方法として、錐体細胞がある脳表のメッシュ点のみにダイポールを置き、数千個のダイポール・モーメントをminimum normなどの数学的条件により求めたり、やはりfMRIデータを利用し、数千~数万個のメッシュ点に位置を固定したダイポールについて、Wiener推定によりモーメントを求める、などの方法が提案されている。後者についてfMRI-invisible dipoleがある場合にfMRIの活動の有無に応じてprior(先見情報)の値の選び方により解が大きく変わるなどの問題も指摘されている[5]。

2で紹介した語彙判断実験データに本fMRI-constrained dipole解析法を使って得られた解の一例を図10に示す。モーメント強度が雑音レベルより有意に大きく、寄与率が低すぎない(有意な活動が得られた)潜時帯を赤枠で示す。後頭部や後頭側頭下部などの活動が100 ms程度から始

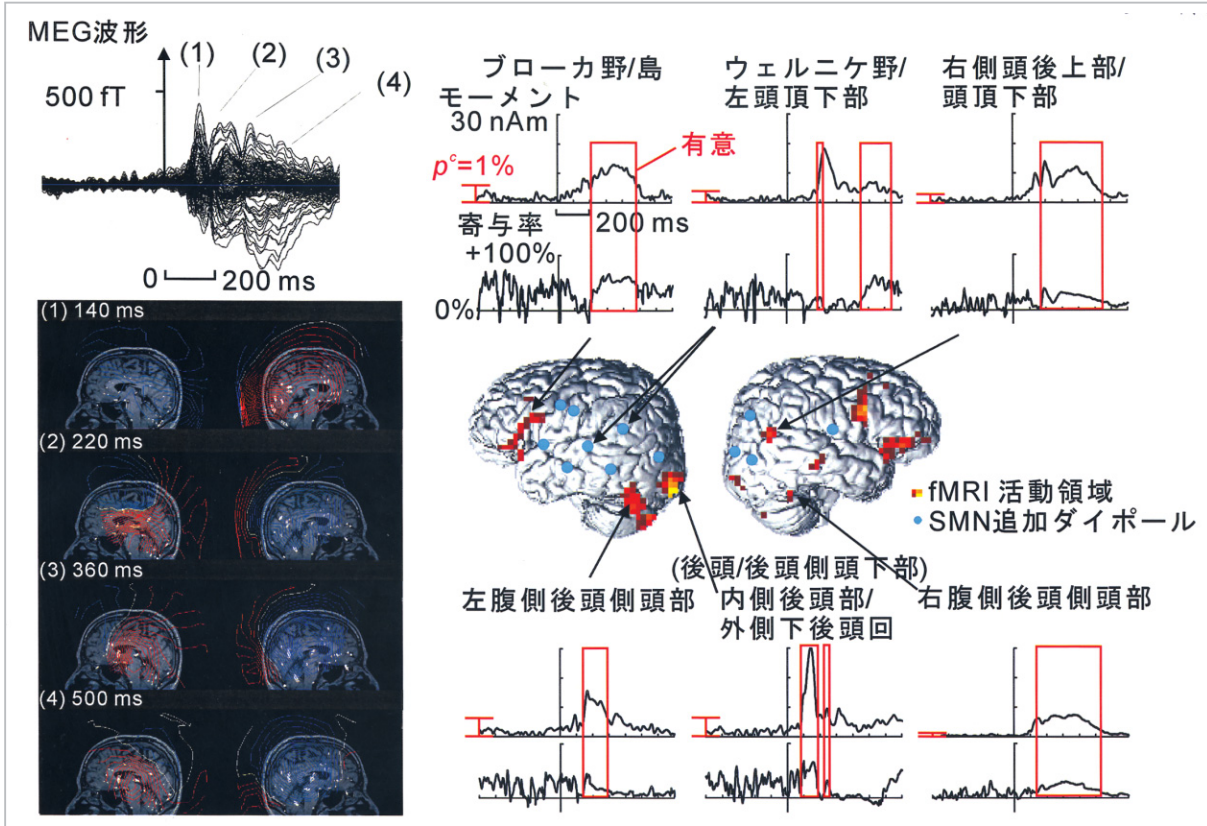


図10 語彙判断課題の脳活動のfMRI-constrained dipole推定

まり、ウェルニケ野、ブローカ野付近の活動が200 ms以降に見られ、単一ダイポール近似による解と矛盾しない。しかしながら、後頭/後頭側頭下部の活動は、単一ダイポール近似では、200 ms程度までしか求まっていないが、このマルチ・ダイポール解析によれば、後期まで長く続くことが示された[6]。これに関する論文を現在投稿中である。

### 3.3 応用例 1 (内語実験) [7]

この節では、内語(言葉を声に出さず心の中で言う)の脳活動データに前節の解析方法を使った例について述べる。語彙判断課題を使って、音韻処理にかかわる脳活動を計測・解析したが、その音韻処理には、見た文字からの音韻変換、母音[a]の音韻分析、これらの課題に付随する内語などが含まれている。これを分離する試みとして、内語だけの脳活動を計測する実験(図11)を行った。これは元々短期記憶課題として使われているスタンバーク課題ないしdelayed-matching課題であり、順に呈示される3ないし6個の文字を記憶に入れ(記銘)、リハーサルにより記憶を維持し(内語)、最後に一つの文字が呈示されて記憶した文字列の中に含まれているか否かを判断してボタン押しで答える(照合)、という三つの処理を順に行う課題である。今回の実験

ではその内のリハーサルにおける内語の処理の脳活動を計測する。MEG計測のため内語開始の時刻(トリガ)が必要であるので、リハーサル期間に3回合図を出し、合図を見るごとに一回内語を行うようにした。fMRIではhemodynamic delayのため三つの処理にかかわる脳活動を分離しようとする、それぞれの期間を十分長くならないと分離できず、長い時間の実験となる。そのため通常は三つの処理を分離せずに、記憶すべき文字数などの処理負荷を変えた条件間の比較により処理と活動の関係を解析する機会が多い。なお、MEGは時間分解能が高いため、各処理期間を特別に長くする必要はない。

この課題についてfMRI及びMEG計測を行った。fMRIのcontrol条件は記銘においてカナ文字の代わりにランダムドットパターンを呈示し、記銘、リハーサル(内語)をせず、照合期間では、ランダムドットパターンが現れたらすぐにボタンを押すようにした。本fMRI-constrained dipole解析法により解析した結果を一人の被験者について図12に示す。この例では、左半球において有意なダイポール・グループは現れず、右半球の幾つかの部位に活動が生じた。語彙判断に関しては、活動が左半球(言語優位半球)側に現れたが、それとは逆である。この課題ではリハーサル期間に音韻変換や音韻分析はせず内語だけ

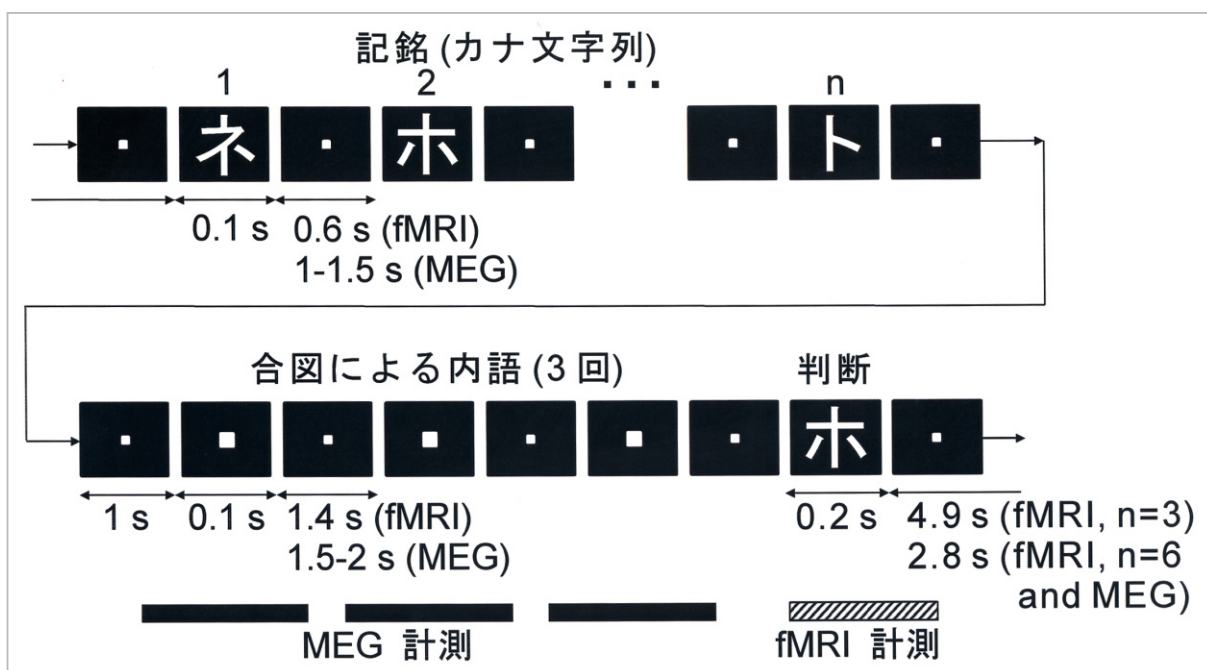


図11 内語実験の刺激

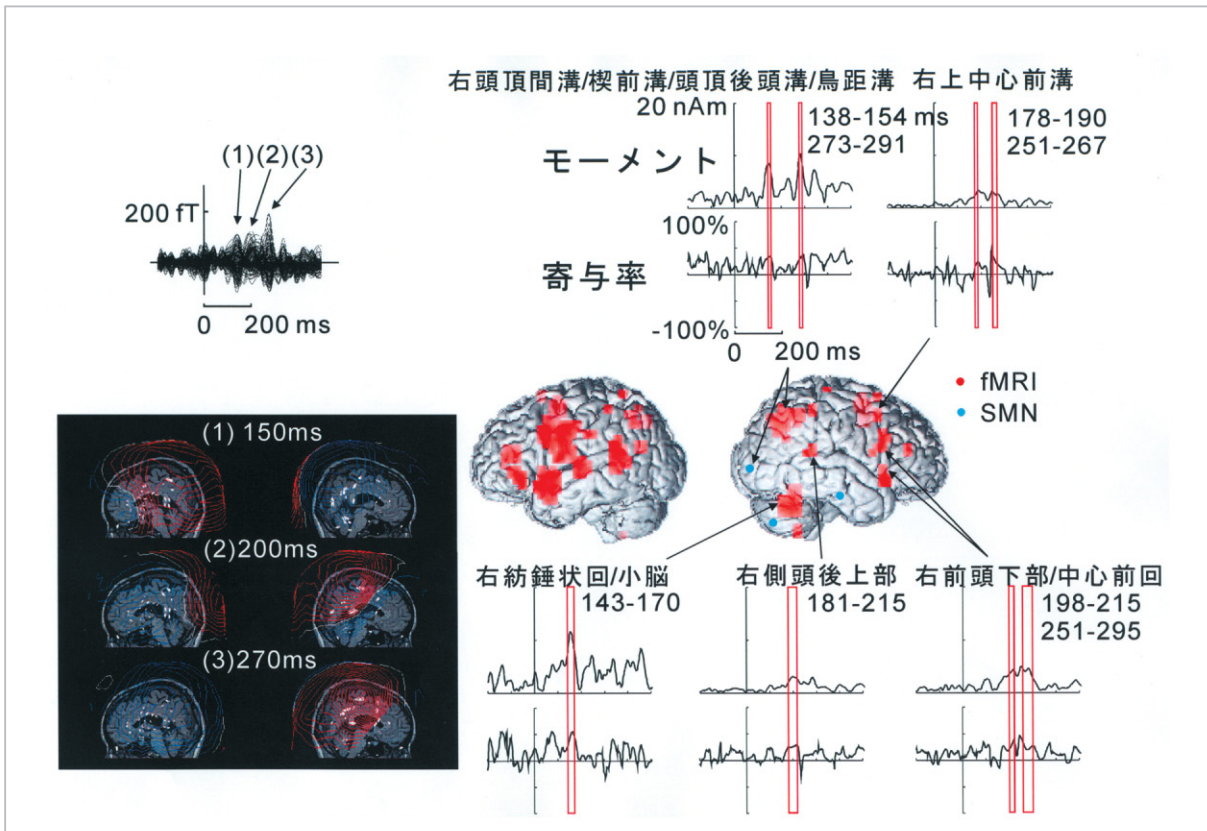


図 12 内語課題の脳活動のfMRI-constrained dipole 推定

を要求しており、なおかつ無意味な文字列の内語であり、また合図により内語を3回繰り返すという課題であることから、ピッチやリズムといった韻律 (prosody) の処理が行われた可能性がある。この解釈に関し、過去にピッチ、リズム、音楽などの課題で右半球側の脳活動が観測されたとの報告があり、それらと矛盾しない。

### 3.4 応用例2 (視標検出実験) [8] [9]

日常生活において文章を読み、その意味を把握しようとする時、我々は文字や単語の形態処理とともに、行に添って背景から単語を抽出する作業を繰り返している。また、単語は読むことはできるが複数の単語が呈示されると隣接した行の文字との入れ替わりなどが生じる注意性失読症が示すように、空間注意も必要である。しかしながら、単語の形態的特徴処理、特に注意・情報抽出などの複数の処理が、いったいヒトの脳のどこでいつ行われるのかは不明である。そこで、我々は文章中から単語を探す際に必要とされる脳活動を明らかにするため、まずは極めて単純な線分の検出課題を用い、前出のマル

チ・ダイポール解析を行った。その結果、視覚形態の特徴処理にかかわる領域である鳥距溝及びその近傍 (図 13A) が刺激後約 100 ms 頃に、また形態処理を行う紡錘状回及びその近傍がその約 15 ms 後に活動することが分かった。鳥距溝は初回の活動から約 100 ms 後に再度活動する。視標の分離抽出や空間注意にかかわる上側頭溝や頭頂間溝は、視覚野の初回の活動の直後に活動し、抽出すべき情報があるときに増強することが分かった。左右半球の頭頂間溝を比較すると、右頭頂間溝の活動が優位であることも明らかになった (図 13B)。背景から特定の視標を見つけ出す処理は、情報の抽出という点で視覚に特化したものでなく、他の感覚モダリティにも共通している。さらに文章読みには前後の意味的関連など、言語特有の処理が加わると考えられる。この研究は、今後、視覚呈示した文章中の単語処理の研究に発展させたいと考えている。このように複数個の脳部位の活動時間と活動の順序を明らかにすることは、ヒトの脳の処理システムを理解するために必要不可欠であり、マルチ・ダイポール解析はその道を開いたと云えよう。

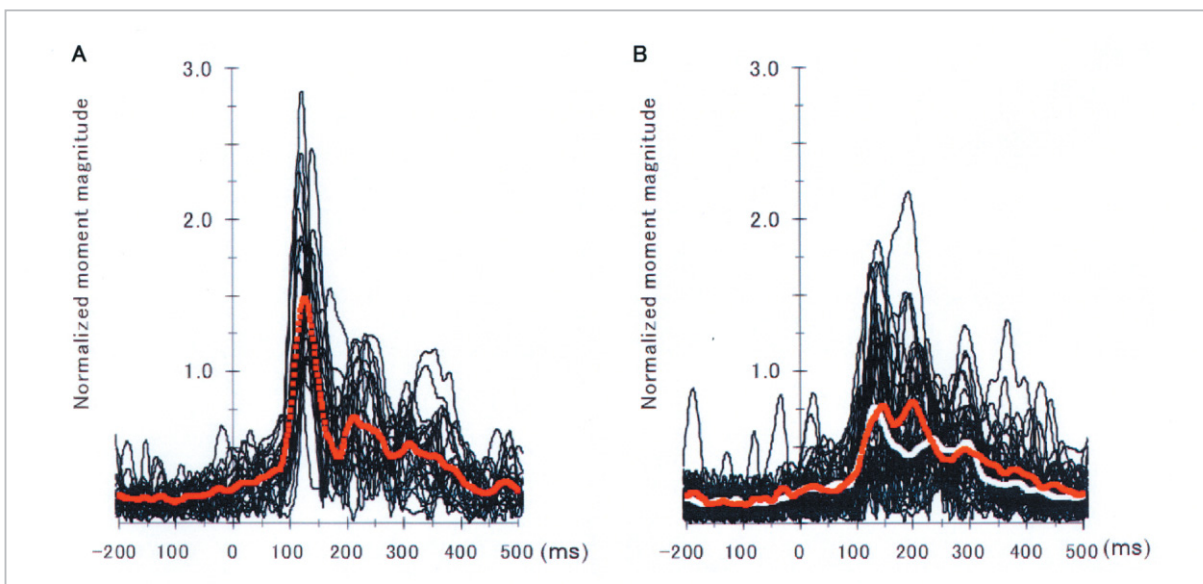


図 13 fMRI-constrained dipole 推定によって明らかにした鳥距溝(A)と頭頂間溝(B)の脳活動( $n = 24$ ) (A)黒線は各被験者の脳活動であり、赤線はその平均値を示す。(B)黒線は各被験者の脳活動であり、赤線は右頭頂間溝、白線は左頭頂間溝の平均値を示す。

#### 4 文章処理の脳活動計測<sup>[10]</sup>

文章処理には、単語についての語彙処理のほかに統語処理が加わる。これらを分離する試みに関する報告がある。我々が行ったのは、本に書かれた文字と同様に縦書きで表示した小説(夏目漱石の「こころ」ほかを使用)を単に読むという課題の実験である。この実験では処理ごとの脳活動を分離することは難しいが、文章の自然な読みにおける言語処理の脳活動を計測することができる。その際、読み速度すなわち処理負荷を変えて脳活動がどのように変化するかを調べた。速読の訓練を受けた被験者4人と、訓練を受けていない通常の被験者4人について、それぞれ通常の読み速度と速く読む場合の二通りの脳活動を計測した。普通のヒトが読む速さは、1秒当たり数単語程度であるが、速読者が速読を行う場合はそれより2桁速い速度(文庫本見開き1ページ当たり1秒程度)で読み、その内容が把握できる。このため、極めて広い速度範囲にわたる脳活動の速度依存性を計測することができた。文字を広い視野範囲に呈示してそれを読む課題では、大きな眼球運動が生じ、MEGでは大きなartifact(見たい脳活動以外の原因による磁界)が重なり脳活動計測は困難である。そのためfMRIを使って計測した。block-designによる実験を行い、小説を読むtest条件と、小説を疑似文字列に

置き換えて呈示しそれにそって目を動かす control条件を、40秒程度ごとに交互に繰り返した。1人の速読者の計測結果を図14に示す。この例では、速読の際にウェルニケ野付近の脳活動が減少した。被験者全部のデータをまとめると、速読者の極めて速い読みにおいて、ウェルニケ野やブローカ野といった言語野における脳活動が減少する傾向があることが分かった。過去に、単語の処理に関して1秒当たり1単語程度の速度領域において、単語呈示頻度が増えると脳活動が増えたという報告がある。今回はそれよりも1-2桁速い速度領域において逆に脳活動が減少するという結果であった。ウェルニケ野とブローカ野は音韻処理にかかわる部位であり、今回の結果は、被験者が内語処理を省略して高速の読みを実現している可能性を示唆する。ただしこの二つの領域は、意味処理と統語処理にもかかわるといふ報告があり、これらの処理を減らした読みを反映した可能性もある。

なお、速読者が縦書きの文章を速読する時に、1列ごとの上下方向の眼球運動がなくなり、ほぼ水平方向に眼球が動くことが以前より知られている。この上下方向の眼球運動の減少や今回観測された脳活動の減少は、速読者がその訓練において、これらの処理を減らすことにより高速の読みを実現するストラテジーを得たことを示唆している。ただし、速読時の内容把握の程度、

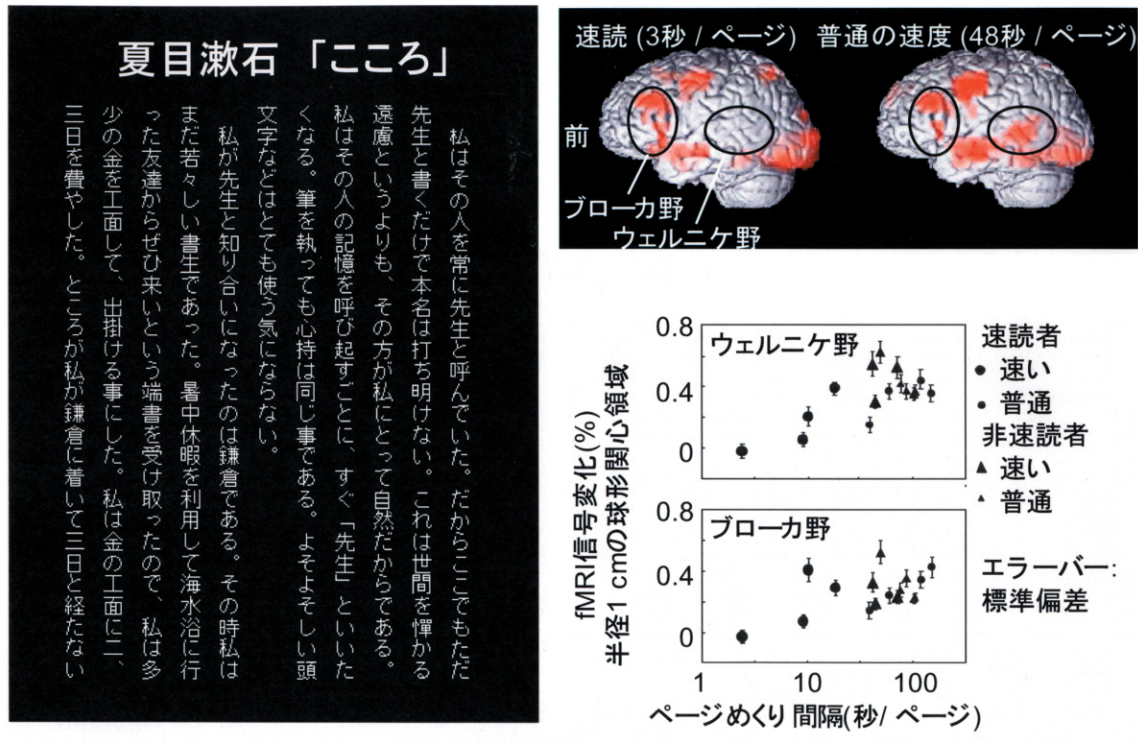


図 14 文章の読みの課題、速読者の脳活動、言語野の脳活動の読み速度依存性

すなわち意味・文法処理が定量的にどの程度行われたかの客観的指標がなく、今後の検討課題として残されている。

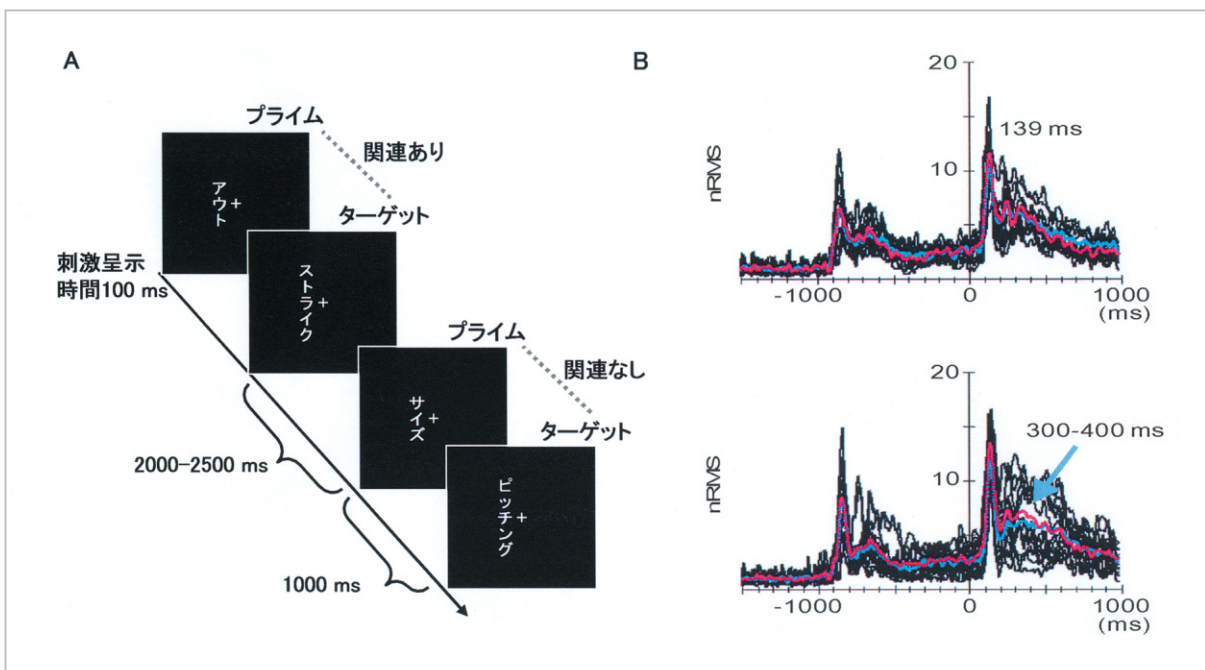
## 5 言語プライム実験

現在我々のグループでの研究は、前述の語彙判断実験のような単語一つの処理から、単語二つを呈示する実験に発展しつつある。一つの単語(ターゲット)の処理が、それより時間的に前に呈示された単語(プライム)の処理に影響される様子を見る実験である。これは一つの単語の実験と多数の単語が並ぶ文章実験との間をつなぐ実験と言える。また、単語処理間の相互作用を見ることにより、言語処理のモデル化に有用なデータが得られることが期待される。このためプライムとターゲットの語彙的関連を変えたり、時間間隔を変えた実験を開始している。以下に最近の研究について紹介する。

### 5.1 意味プライム [11]

プライミング効果の研究材料として、視覚呈示した単語がよく用いられ、意味的関連を持つ

先行単語(プライム)によって、後発単語(ターゲット)のカテゴリ判断が促進されることが知られている。これが意味的文脈効果といわれる現象であるが、促進効果が言語処理にかかわる脳のどこでいつ生じるかといったメカニズムは明らかになっていない。NTTのデータベースから文字数・単語親密度及び表記妥当性を統制したカタカナ単語を抽出し、プライムとターゲットが意味的に関連する状態とそうでない状態のMEGを比較した。被験者には、左視野に呈示したターゲットの単語が教示したカテゴリと一致するかどうかを判断してボタン押しをする課題を与えた(図15)。その結果、意味的に関連する場合、ターゲット単語の呈示後140 ms ころから右後頭領域の視覚形態処理を行う紡錘状回及びその近傍の神経活動が上昇し(有意水準  $p < 0.01$ )、その後300-400 ms の間に言語優位半球側である左側頭の活動が増大することが分かった ( $p < 0.03$ )。また、ターゲット呈示前の磁場強度から一次回帰直線を求めると、これらの領域はターゲット呈示前に上昇していることが分かった。これらの結果は、プライム単語処理が行われるとプライム単語及びそのカテゴリに含ま



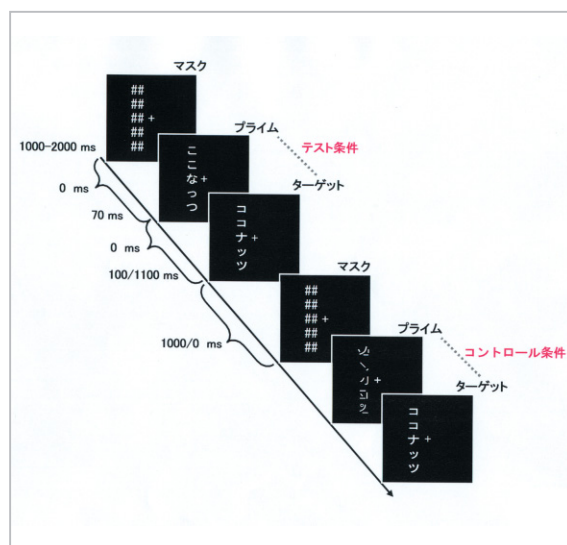
**図 15** 意味的文脈効果 実験課題と結果  
 (A) 実験課題 カテゴリー判断「野球」の例を示す  
 (B) 右後頭領域と左側頭領域の磁場強度の時間変化 赤線は意味的関連あり条件の平均値 (n = 8)、青線は関連なし条件の平均値 (n = 8)

れる他の単語にかかわる部位の活性度が上昇し、意味的に関連するターゲットが入力する場合はその処理にかかわる活性度がプライム処理時の活性度に重畳する。すなわち文字・単語の形態的特徴処理及び意味処理過程が促進することを示している。今後は、これら脳部位の神経活動のdelay要素・時定数・興奮性又は抑制性の結合の要素を入れた言語処理のモデル化を目指している。

ムあり)、疑似文字列を呈示するか(プライムなし)の2条件で実験した。何もない背景に刺激を呈示するのではなく、マスク、プライム、ターゲットと刺激を切り替える呈示の仕方であるため、視覚初期の処理にかかわるMEG成分は小さいが、視覚形態の高次処理から音韻、意味などの語彙処理にかかわるMEG成分が計測できる。これまでのMEG実験により、プライムがある場合はない場合と比べて反応時間が早くなり、後

### 5.2 反復マスクド・プライム [12]

プライムとターゲットの時間間隔を短くした極限として、マスク、プライム、ターゲットを順に入れ替えるmasked priming課題の実験を行った(図16)。短時間呈示されるプライムはマスク及びターゲットにはさまれており、それぞれが順向性及び逆向性のマスクング効果を持つため、プライムの内容は意識にはのぼらないが、ターゲットの処理に影響することが知られている。これは自動的な処理を見る実験である。被験者はターゲット(カナ表記)単語について、あらかじめ教示したカテゴリに属するか否かを判断し、ボタン押しで答える。プライムはターゲットと同じ単語をかな表記で呈示するか(プライ



**図 16** 反復マスクド・プライム実験の刺激

期 (> 350 ms) の活動が大きくなる例が見いだされている。言語処理にかかわる脳活動のモデル化として処理要素ごとにノードを設け、その活性化が関連するノード間で線形結合により伝搬するコネクショニスト・モデルが報告されている。例えばこのようなモデルでプライムの有無を比較すると、プライム有りの場合は、プライムによる語彙の活性化が行われるため、引き続き呈示されるターゲットに対する活性化はより早く、より大きくなり、反応時間の短縮や脳活動の増大を定性的に説明できる(図17)。ただしこの例では、興奮性の結合のみを考慮し、抑制性の結合をいれていない。詳細な検討及び実験との対応はこれからである。

なお、このようなプライミング実験において得られる波形についての詳細な条件間比較のため、新たな信号処理方法の提案[13]や波形成分の起源を探る研究[14]が行われている。

## 6 むすび

ヒトの脳内言語処理メカニズムを解明するため、言語処理の脳活動を、fMRIとMEGなどにより計測する研究を紹介した。ヒトにおいて特に発達した言語機能は、非侵襲計測法による脳機能計測がことさら重要である。我々は、空間分解能のよいfMRIと時間分解能に優れたMEGデータを組み合わせることにより、信頼度の高い複数の活動源解析方法を開発した。これらの計測・解析法を駆使し、単語レベルでの形態、音韻、意味処理の脳部位と活動時間を解析した。形態処理は後頭ないし後頭側頭下部において、文字呈示から100 ms程度より脳活動が開始する。音韻ないし意味処理は、左側頭後上部(いわゆるウェルニケ野付近)や左前頭下部(ブローカ野付近)において200 ms以降に開始することが分かった。視覚形態処理について実在のカナ文字とこれに近い疑似文字とでは脳活動に有意な差が

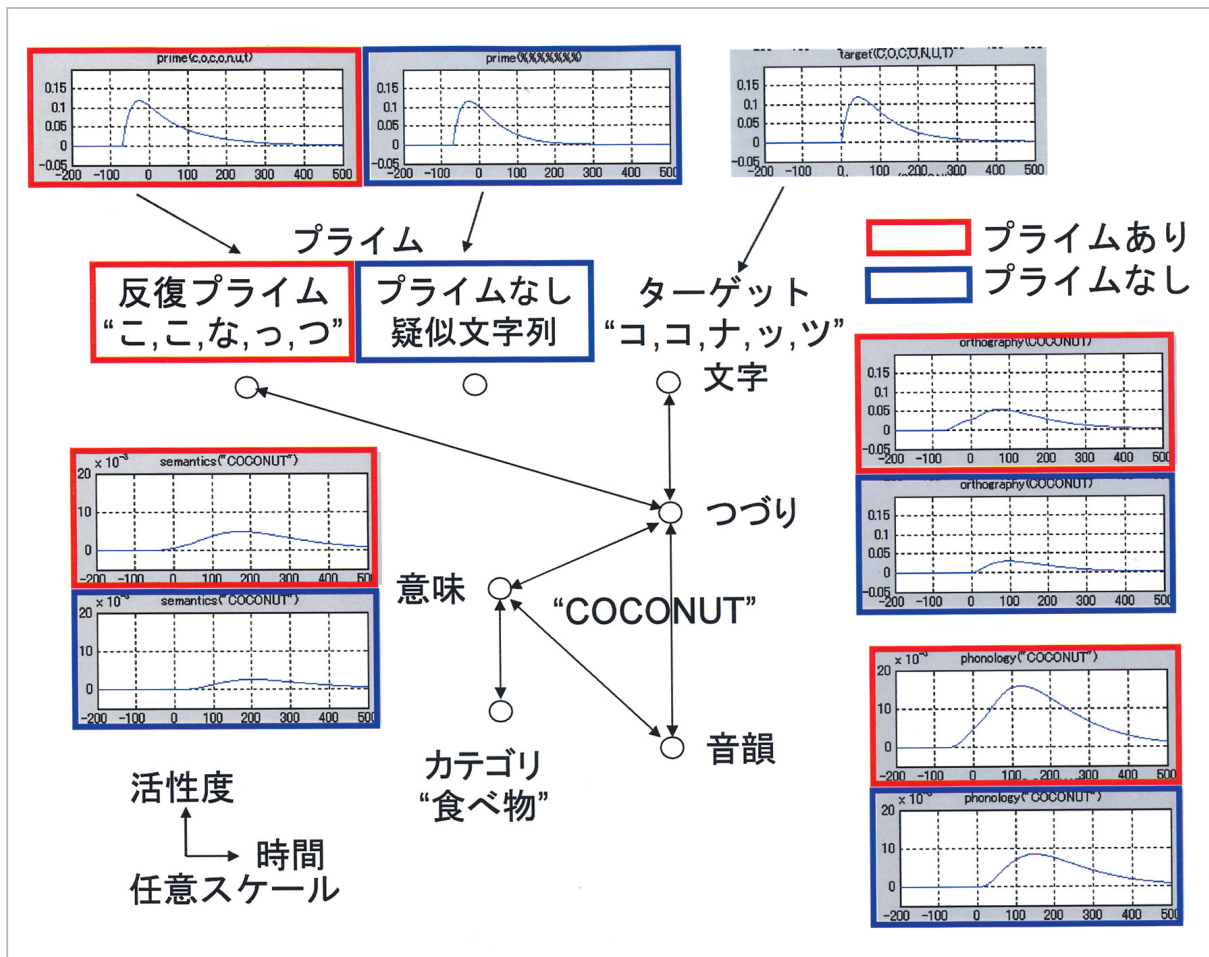


図17 語彙処理のコネクショニスト・モデル



なく、単語レベルから言語処理の特徴である左半球が優勢な活動分布が生じる。なお、内語に関して prosody 処理を反映したと思われる右半球側の活動が観測されている。また、非言語刺激を使った視標検出実験により、初期の処理にかかわる脳活動が100 ms位から後頭部(鳥距溝付近)において始まり、その15 ms後に視覚形態処理が後頭側頭下部(紡錘状回付近)において、また、背景からの視標分離処理、空間注意にかかわる脳活動が上側頭溝付近及び頭頂間溝付近において生じることを明らかにした。文章の読みについて速読者を使った実験を行い、読み速度が極めて速い速読では、左半球側の言語野の脳活動が減少し、音韻などの処理を省略して高速に読むストラテジーをとることを示唆している。さらに最近のプライミングを使った二つの単語の処理間の相互作用を調べる実験と言語処理のモデル化の端緒などについて触れた。言語処理は多数の処理要素の絡む複雑なネットワークにより実現していると考えられる。定量的モデル化により、そのアルゴリズムを明らかにすることを目指して研究を進めていきたい。そのよう

な脳と等価な定量的モデルが作られるようになれば、情報通信のインターフェースの改良や、行き届いた応答をする使いやすい情報処理装置の設計などに寄与すると思われる。また、臨床研究から得られた処理の図式との比較などを通して医学への貢献も可能かもしれない。将来、十分な精度で脳の振る舞いをシミュレートするモデルが作れるようになった暁には、それはヒトと同じレベルで言語機能を人工的に実現できることを意味するようと思われる。さらに意志、価値判断などの要素を入れると、究極の人工知能(ヒトと区別つかない応答をする機械)の実現も遠い将来可能になるのかもしれない。

## 謝辞

本研究について、SMNを提供・議論いただいている東京大学教授 岡部洋一氏、プライム実験などで共同研究を行っている東京大学助教授 眞溪歩氏、速読に関し共同研究を行っているNBS日本速読教育連盟理事長の佐々木豊文氏に感謝します。

## 参考文献

- 1 N. Fujimaki et al., "Functional magnetic resonance imaging of neural activity related to orthographic, phonological, and lexico-semantic judgments of visually presented characters and words", Human Brain Mapping, Vol.8, pp.44-59, 1999.
- 2 N.Fujimaki et al., "MEGs during judgment of visual characters --- Comparison with fMRI ---", Proceedings of the 11th International Conference on Biomagnetism, pp.664-667, 1999.
- 3 宗綱信治他, "MEGとfMRIにより計測した手指電気刺激時の脳活動位置の比較", 日本生体磁気学会論文集, Vol. 16, pp. 226-227, 2003.
- 4 N. Fujimaki et al., "An fMRI-constrained MEG source analysis with procedures for dividing and grouping activation", NeuroImage, Vol.17, pp.324-343, 2002.
- 5 C-H. Im et al., "fMRI constrained MEG source imaging and consideration of fMRI invisible sources", presented at Biomag2004, Aug. 9-12, 2004, Boston.
- 6 N. Fujimaki et al., "Lexical judgments analyzed using fMRI-constrained MEG-dipoles", presented at KIT International Symposium on Brain and Language, Dec. 12-13, 2002, Kanazawa, Japan.
- 7 N. Fujimaki et al., "Right-lateralized neural activity during inner speech repeated by cues", NeuroReport, Vol. 15, pp.2341-2345, 2004.
- 8 T. Hayakawa et al., "Information flow related to visual search assessed using magnetoencephalography", Cogn. Brain Res., 15, pp.285-295, 2003.
- 9 早川友恵 他, "視覚探索にともなう視覚野の活動の時間特性 —fMRIの活動部位を制約条件にした脳磁界のマルチダイポール解析—", 第17回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.182-185, 2002.

- 10 N. Fujimaki et al., "Neural activation dependent on reading speed during covert reading of novels", NeuroReport, Vol. 15, pp.239-243, 2004.
- 11 T. Hayakawa et al., "Semantic contextual effects on early neural activities for visual-word processing", presented at Biomag2004, Aug. 9-12, 2004, Boston.
- 12 N. Fujimaki et al., "Magnetic responses to visually presented words with masked repetition priming", presented at Biomag2004, Aug. 9-12, 2004, Boston.
- 13 A. Matani et al., "MEG latency difference measurement for priming experiments", presented at Biomag2004, Aug. 9-12, 2004, Boston.



藤巻則夫

基礎先端部門関西先端研究センター  
脳情報グループ主任研究員 工学博士  
脳科学



早川友恵

基礎先端部門関西先端研究センター  
脳情報グループ専攻研究員 博士(心理学)  
脳科学