

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2009

課題番号：18320062

研究課題名（和文）日本語における単語認知・文理解の脳イメージング研究

研究課題名（英文）A Neuroimaging Study of Japanese Lexical and Sentential Processing

研究代表者

宮本 正夫（MIYAMOTO TADAO）

東北大学・大学院国際文化研究科・教授

研究者番号：30374979

研究成果の概要（和文）：脳イメージング手法を用い、日本語における単語、形態素、統語、語用論レベルまでの言語処理の特性を探った。その特性を把握する為に日本語母語話者の言語処理みではなく非母語話者のそれをも調べた。結論としては、日本語処理の諸面を脳活動として同定する事が可能であること、そしてその脳活動が日本語に特有に関わる面もあれば、自然言語処理の普遍性に関わる面もあることが理解できた。更には、脳イメージング手法の基礎研究にも従事し、EEG と fMRI の同時計測手法の確立を行うとともに、大脳皮質における EEG の発生源推定についてこれまでとは異なった知見を提示した。

研究成果の概要（英文）： To understand the nature of Japanese language processing, this research project based on neuroimaging techniques examined lexical, morphological, sentential, and pragmatic aspects of the language. The Japanese language processing was also examined by contrasting the performance of native speakers with that of non-native speakers. These fMRI studies were able to demonstrate that some aspects of the Japanese language processing is unique, while some others are universal in nature. In addition, we conducted basic neurological studies in which we proposed a new methodology for simultaneous recording of EEG and fMRI and provided a new insight for better understanding of EEG source localization.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,990,850	900,000	3,890,850
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	9,190,850	2,760,000	11,950,850

研究分野：人文学

科研費の分科・細目：言語学・言語学

キーワード：言語の生物学的基盤

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初は、脳イメージングの手法を用いた日本語の研究は数が限られ、せいぜい

文字処理あるいは統語処理に関するもののみであり、異なった言語レベルでの日本語の脳イメージングの研究は皆無と言える状態

であった。このプロジェクトでは出来る限り領域を広げて日本語処理の研究を行い、日本語の処理が他言語のそれと比べユニークなものか否かを理解しようとした。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、「単語レベルでの視覚的・聴覚的情報を踏まえた語彙処理」及び「語彙情報をベースにした文処理」の二領域を主な研究対象とし、脳イメージングの手法を用い、言語処理に関わった脳活動とそのネットワーク構成を明らかにする事をその目的とした。

(2) また実験手法として EEG と fMRI の同時計測法の確立を行い、その実装性を検証するとともに、その新規の計測手法を用いて、EEG 計測時の信号がどれほど実際の脳神経細胞活動を描写しているのか、数理モデルを駆使して実証した。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者の宮本正夫は、主指導教員としてその博士論文を指導した横山悟（現在、東北大学・加齢医学研究所・助教）を連携研究者として研究体制を築き、COE, JST, CREST 等の大型研究プロジェクトに助けられるかたちで研究に従事した。手法として用いた主なものはシーメンス社製の 1.5 テスラ fMRI であった。

(2) 研究分担者のホルヘリエラは、過去 4 年程の間に、物理学、医学、薬学、工学、心理学、統計学等の分野の異なる研究員・院生 10 名程からなる研究体制を築き、7 テスラ MRI 装置、二光子顕微鏡など世界水準のラボ環境のなかで自らの研究の一旦として当プロジェクトに関わった。

4. 研究成果

(1) 漢字仮名処理：1960年代辺りから、表意文字としての漢字と表音文字としての仮名の両方を用いる日本の書記体系は、その書記形態のみならず脳内での処理メカニズムもユニークなものであり、文字から直接意味に至る漢字処理ルートと文字から音を介してのみ意味に至る仮名処理ルートの二つが存在するという Dual Route Hypothesis が頻繁に唱えられ、数多くの心理実験が行われてきた。しかしそれを支持する証拠は失語症学では見られるものの、その緻密な神経ルートを見極める脳イメージング実験研究は数少ない。そこで単語処理研究の一貫として、42名の健常者を用いて漢字仮名の意味処

理に関わる fMRI 実験を行った。結果としては、完全に Dual Route Hypothesis を支持することとなった。すなわち漢字は文字から直接その意味に辿る事が可能であり、そのルートは以下の脳領域から成る：左下側頭回、左海馬傍回、左海馬、左尾状核、及び右前紡錘状回。他方仮名処理は文字から音への変換が不可欠であり、それは左下後頭回で行われる。（第30回日本神経科学大会発表より）

(2) 品詞情報に関わる単語処理：単語処理研究の一貫として品詞 (parts of speech classification) の神経的基盤を一連の fMRI 実験で検証した。結果としては、まず、記憶に関与するとされる中側頭回においてどの品詞にも共通して脳活動が観察された。しかし品詞の違いによって脳活動が異なる部位も観察された。特に modification (修飾) 関係と predication (叙述) 関係の二対極でその異なりが顕著であった。前者においては推測 (inference) 機能で知られる右眼窩前頭皮質での脳活動が見られた。恐らくは日本語においては、修飾語 (例：形容詞) を処理する時点で既に後続の被修飾語 (例：名詞) が何であるかを推測していることに因るのであろう。また、後者においては語意と統語の連結機能で知られる側頭皮質での脳活動が観察され、叙述関係とは統語的機能を司る動詞とその項 (arguments) の意味連結からなる事を脳イメージング手法で確かめる結果となった。ともかくも単語処理に関わる一連の脳イメージング研究でもって、文法概念である「品詞」が神経的基盤を持つものであることを示すことができた。（*Studies in Language Sciences* (印刷中) などより）

(3) 名詞・動詞の処理：名詞処理と動詞処理の乖離は失語症研究などにおいては頻繁に報告されている。しかし名詞と動詞が脳内の異なった部位で処理されているのか否か、あるいは受動態に見られるような動詞形態素の処理が脳活動として観察し得るものか否かは定かではない。それらを少しでも明らかにする為に健常者を対象に日本語の名詞・動詞の処理中の脳活動を fMRI を用いて計測した。結果としては、名詞と動詞の処理においては共通した神経基盤 (両側下前頭皮質、両側後頭皮質、左中側頭皮質、左下側頭皮質) が関わっている事実が確かめられた。しかし動詞の処理のみにおいて左中側頭皮質での強い脳活動が観測され、名詞と動詞の処理がまったく同じ脳部位で行われるものではないことも判明した。更に、動詞形態素の処理においては、左半球の下前頭葉で脳活動が顕著であった。この脳領域は文法処理に関わることから、動詞形態素の処理は脳内では文法規則の一部として取り扱われている

ことが示唆された。(Journal of Cognitive Neuroscience (2006)などより)

(4) 分節処理：宮本が主指導教員として指導をした大嶋が、日本語の文理解処理における文から句への分節処理 (phrasal segmentation) を博士論文のテーマとして取り上げ、分節処理に関わる脳内の処理段階の解明に向け視覚・聴覚刺激を用いて fMRI 実験を行った。その理論上の目的は、直列処理モデルと並列処理モデルの2つの文理解モデルの正当性・妥当性を明らかにすることであった。視覚刺激を用いた fMRI 実験の結果としては、分節の処理においては左下前頭回の眼窩部の関与が認められた。当初予測した統語領域 (BA44/45) の関与も認められたが、分節処理に限っての強い脳活動とは見なし得なかった。更に上と同デザインで聴覚刺激を用いた fMRI 実験を行った。ここでもやはり左下前頭回の眼窩部の関与が認められた。また統語領域の関与も認められたが、やはり分節処理に限っての脳活動とは見なし得なかった。上の視覚・聴覚の実験結果を受けて、句への分節処理が、視覚・聴覚のモダリティに関わらず、普遍的な神経基盤を持つ言語処理機能であること、又、統語レベルの句への分節処理には韻律情報処理の関与が認められないことを指摘し、分節処理を含む文理解処理を、並列処理モデルで説明するのが妥当と結論付けた。(NeuroImage 36 (Supplement 1) などより)

(5) 受動文の処理：形態素レベルおよび文レベルでの研究の一旦として受動文処理の脳計測を行った。理論言語学では受動文は能動文と比べ特殊な統語処理が必要であると見なされている。またブローカ領域がその処理に関わっているのではないかとの仮説が失語症学などの分野では提唱されている。しかしながら脳活動としての受動文処理については不明な点が多い。そこで20名の健常者に文処理中に agent と patient の違いを判断させる課題を課して受動文処理の fMRI 計測を行った。結果としては統語処理が関与するとされるブローカ領域においては能動文と受動文の間で特に顕著な脳活動の異なりは見られなかった。むしろ受動文の処理は能動文のそれに比べ、左半球の頭頂葉と前頭葉の弁蓋部で顕著な脳活動を示した。この結果をもとに、失語症者に見られる受動文理解の欠陥はブローカ領域ではなく、頭頂葉と前頭葉の弁蓋部での損傷によるものではないかと述べた。(NeuroImage 36 (Supplement 1) などより)

(6) 文処理と作業記憶の関連性：言語と記憶の関わりは自然言語処理を理解する上で

避ける事のできないテーマである。例えば言語処理は作業記憶の一部と見なし得るものなのか、それともそれとはまったく独立的に機能するシステムなのであるのか。このような疑問に少しでも答える為に、文構築作業 (sentence structure building) と作業記憶の一旦である実行機能 (executive function) の関わりを、日本語母語話者を被験者として fMRI 計測で検証した。結果としては、これまで言われていた文理解に特異的に反応する脳内の領域 (左半球の背外側前頭前野および中側頭回) は、文構築作業に関わる課題のみではなく実行機能に関わる課題でも顕著な脳活動を示した。これから言えることは、それらを言語処理特有に関わると脳領域であると見なすのは誤りであり、むしろ実行機能に関わる脳領域と見なすのが妥当である。すなわち文構築作業とは実行機能に依って行われる作業であると見なすべきである。この示唆をもって、文処理に特異的に関わる脳部位が存在すると言うこれまでの知見とは異なる統語処理モデルを提示した。(IEICE Technical Report TL2007-9 などより)

(7) Linguistic Empathy の処理：日本語に見られる授受表現 (-あげる、-くれる) は linguistic empathy (言語的共感) を表すものであり、英語などのヨーロッパ諸言語では見る事のできない統語・語用論レベルでの現象である。Linguistic empathy が脳活動として同定し得るものであるか否かを検証する為に、28名の日本語母語話者を被験者として fMRI 実験を行った。「主語+目的語+動詞-あげる・くれる」の文を提示しそれらの acceptability (容認性) を計った。その結果、行動データでは、「-あげるタイプの文」と「-くれるタイプの文」の処理の間で何らの違いは見いだせなかった。しかし脳イメージングデータでは、「-くれるタイプの文」は「-あげるタイプの文」に比べ、運動前野において顕著な脳活動を示した。この脳領域が attention shift (注意移動) 機能に関わることから、linguistic empathy とは (作業記憶の一機能である) attention shifting process と見なすのが妥当であると述べた。すなわち授受表現のメカニズムとしては、「-あげる」表現が linguistic empathy 処理でのデフォルト・モードとして設定されており、「-くれる」表現の場合には linguistic empathy の再処理が必要となる。この再処理とは、脳機能としては、attention shifting process に他ならない。(Journal of Neurolinguistics (2009) などより)

(8) L2 単語学習に関する縦断的研究：母語話者による日本語 (L1) の処理をより良く

理解する為に、日本語を第二言語 (L2) とする学習者と母語話者との比較研究をも行った。その一つは、L2 単語記憶に関わる縦断的な脳活動の測定である。これまでの縦断的な脳の可塑性 (plasticity) に関する研究では、文法規則の習得における左下前頭回での可塑性が報告されている。文法規則ではなく L2 の単語習得においてもそのような可塑性が観察され得るものか否かを検証する為に、中国人の日本語学習者を被験者として3ヶ月の期間を空けて2回 fMRI 撮像を行った。刺激として名詞、動詞、受け身形態素-rare を伴った動詞、疑似語の四種を語彙判断課題の為に用意した。撮像結果としては、四種の語彙のうち、動詞に関してのみ、左下前頭回でその可塑性を示す脳活動の上昇が見られた。これをもって、語彙のうちでも少なくとも動詞は、その習得を脳の可塑性として観察し得ることが示唆された。(NeuroImage 3 1 (Supplement 1) などより)

(9) L2 単語習得と脳活動：第二言語 (L2) 習得に関する脳イメージング研究においては、第二言語学習者は、たとえば単語処理において、語彙習得の未熟さ或は単語処理の不慣れさ故に母語話者よりもより活発に脳を活動させると言われている。しかし可能性としてはその反対もあるのではなからうか。すなわち未熟さ故に L2 習得に必要とされる脳部位を有効に使うことが出来ず、それ故低下した脳活動を計測する事になるのではなからうか。この可能性の有無を検証する為に、初級レベル20名の中国人日本語学習者の日本語単語理解中の脳活動と、10名の日本語母語話者の日本語単語理解中の脳活動を比較した。単語刺激としては名詞、動詞、受動動詞、疑似語の四種を用意し語彙判断課題を課した。結果としてはまず左半球の下前頭回と頭頂葉において学習者においてのみ顕著な脳活動が見られた。これは、学習者の日本語習熟度が低いことによる課題遂行時の困難度が原因であると見なされる。より重要な発見は、左半球の中側頭回で母語話者では顕著な脳活動が見られたにも関わらず、学習者においてはそこでの脳活動は顕著なものではなかった。これは、左中側頭回が記憶に関わることをもって、学習者の脳内にはまだ、日本語単語が適切な記憶としては定着していないことに因るものであることを示唆するものである。依って本研究は言語習得の未熟さが脳活動の低下を招く可能性のあることを示した。(NeuroImage 3 6 (Supplement 1) などより)

(10) EEG と fMRI の同時計測に関する基礎研究：脳イメージングに用いられている fMRI は、脳に害を及ぼす事のない非侵襲性

とその優れた空間解析度故に、言語処理に関わる脳活動の計測に用いられ、言語処理が脳のどの部位で行われているのか、高精度に検出が可能である。しかし fMRI は、脳神経細胞活動を直接計測するのではなく、血流に含まれるヘモグロビン酸化に伴う局所磁性の変化から、間接的に脳活動を推測している。また、その時間的解析度は数秒単位であり、ミリ秒単位での脳活動を把握するには適した手法ではない。この弱点を補足するのが神経細胞活動にともなう電流値を測定する EEG (Electroencephalography) である。研究分担者のホルヘリエラは、空間解析度の優れた fMRI の利点と時間解析度の優れた EEG の利点を生かした融合計測開発の為に理論的研究を行い、大脳新皮質のコラムという神経細胞群の中の錐体細胞の神経活動をモデル化し、人間の EEG-fMRI 同時計測から神経活動と脳血流の関係を明らかにした。従来の方法では、神経活動を予測するために EEG と fMRI のデータを独立に解析することが主流であったが、ホルヘリエラが提案した手法では、EEG と fMRI の両者の利点を生かしつつも、EEG の直接的な神経活動と fMRI 信号に關与する血管動態反応との架け橋を可能にし、脳機能イメージングに關与する複数の生理パラメータを予測することが可能な新たな数理モデル提唱した。しかし、人間の EEG-fMRI 実験では、得られる生理指標の範囲が限られており、これらのモデルを進化させるためには、侵襲的な生理指標の計測が可能な動物モデルの構築が必要となる。そこでホルヘリエラは、小動物、特にげっ歯類を対象にして新たな EEG の電極の開発を行った。さらに fMRI との同時計測の可能性を検証し、ラットの前足刺激下による EEG と fMRI の同時計測を行い、顕著な信号の損失無しにその計測が可能であることを証明した。

(NeuroImage (改訂中)) これらの手法は、今後各種動物の病態モデルに適用される見通しであり、今後の使用範囲が広がっていくことが予想される。また、二光子顕微鏡、7テスラ MRI 装置、EEG との融合実験装置などを用い、ホルヘリエラは彼が指導する研究員・大学院生達と共に積極的に脳イメージングの為に基礎研究活動を行った。その一例が電気伝導率分布の研究である。

(11) 電気伝導率分布に関する研究：大脳新皮質における数百マイクロから数ミリメートル単位の局所神経活動を観測するための計測法として多電極アレイを用いた多電極細胞外記録法が挙げられる。多電極細胞外記録法では、電極を神経細胞外に配置するため、周囲の神経細胞の活動を間接的に観測する事となる。その為にこの方法では、得られた電気信号データから神経細胞活動を推定するための解析法が必

要となる。電流密度源 (CSD) 解析法がその一つであり、観測電気信号の低周波成分 (<200Hz) として定義され、細胞外局所電位 (LFP) に対して適用される。LFP は、電極周囲神経細胞のシナプス入力に伴った Na^+ イオン、 Ca^{2+} イオン等の細胞内流入電流、そして細胞内から外に流出する帰還電流に起因する発生電位が細胞外空間を經由して電極に到達したものであり、CSD 解析法は神経活動に伴う上記の電流密度源分布と、それによる発生電位分布の関係を記述する Poisson 方程式の逆問題として定式化される。オームの法則、および電流連続の式から導かれる Poisson 方程式は、導電性媒質における電位勾配の変化と電流密度源の関係を表し、その解は媒質の形状と電気伝導率分布に依存する。従来の CSD 解析法においては、大脳新皮質は均質で等方性の電気伝導率分布をもつ無限媒質と仮定されてきた。しかしながら、大脳新皮質は有限媒質かつ複雑な幾何構造をとり、6 層構造という不均質かつ異方的な神経分布を持つ。これらの解剖学的特徴から、実際の大脳新皮質はより複雑な電気的特性を持つと考えられる。また単純な仮定を用いた CSD 解析法において生じる推定の誤差は実際の大脳新皮質の形状や不均質・異方性に依存することが考えられる。本研究では上記の仮説を検証するため大脳新皮質のような層構造を持ち、異方性を有するような電気伝導率分布を推定する方法論を開発し、ラットの体性感覚野に適用した。同時に、蛍光染色法を用いて同領野の神経細胞、アストロサイト、オリゴデンドロサイトの染色を行い、各層におけるこれらの細胞の分布と電気伝導率推定値を比較した。その結果、主に第 5 層に強い異方性を持ち、全体として不均質な電気伝導率分布が推定され、これらの値は同領野の神経分布に依存することが示唆された。更に、推定した電気伝導率分布を用いてシミュレーションを行い、CSD 解析への影響を調べた結果、20%以上の大きな誤差が生じた。以上の結果により、実際の大脳新皮質は不均質で異方性を有することが分かり、単純な CSD 解析を大脳新皮質に適用することの危険性を指摘することができた。(Journal of Neurophysiology (印刷中) などより)

(12) EEG の発生源推定に関する研究: 頭皮上に電極を配置して観測される電位である脳波 (EEG) は、大脳新皮質のコラムという神経細胞群の中の錐体細胞の神経活動が主な信号源となっている。特に、コラムの第 5 層にある錐体細胞は、他の神経細胞に比べサイズが大きく、神経発火を起こした際、脳表の法線方向に生じる電流量も多い。しかし、脳波は電位であり、電極近辺の電位の総和であり、神経活動を間接的にしか知ることができない。コラム内の神経活動から生じる電流源を推定するためには、脳全体・頭蓋・頭皮が異なる電気伝導率をもつ体積導体モ

デルを作成し、コラムでの神経活動を電気双極子の電流源として仮定した上で、計測された脳波から逆問題を解く方法 (CSD 解析) が提案されている。しかしより精度の高い電流源を推定するために、脳や頭蓋などの形態情報を考慮にいった体積導体モデルを作成することと、どのような電流源を発生するコラム神経活動ダイナミクスを仮定するのが、大変重要となる。しかし、実際にコラム内で起こっている神経活動と CSD 解析の仮定の間には、生理学的視点から隔りがある。コラム内の電流源推定モデルを近似する方法が単純化されているため、大まかな電流源の推定を行うことしかできない。そこで、ウィスターラットを用いた多電極アレイ (MEA) による細胞外電位記録 (LFP) と EEG の同時計測により EEG から現実的な電流源を推定した。EEG および細胞外電位記録データから刺激応答の平均を求め、脳全体および体性感覚野パレル領野における CSD 解析を行った。従来の研究で仮定されていた大脳新皮質における電流源が電気双極子であるという仮定が適切でないことを、細胞外電位記録から求めた電流源密度より明らかにした。感覚系の神経入力、視床から第 4 層に入り、第 2 層・第 5 層へと伝搬して大きな電流源を発生する。つまり、単純な電気双極子だけでは、コラム内で起きている複雑な層間の相互作用を表現するには乏しい。そこで、単極子、双極子などを組み合わせた現象がコラム内で起きていることを明らかにした。更に、EEG の逆問題を解いて求めた CSD 解析から得られたコラム内における電流源密度は、LFP から求めた電流源密度によって説明できることがわかった。これらのことから、LFP・EEG の同時計測から、脳形態およびコラム内神経活動ダイナミクスを考慮に入れた CSD 解析による推定法が、正確に神経活動部位を局所化することができ、さらにコラム内の神経活動を推定することが可能であると示唆された。(Current Opinion in Neurology (印刷中) などより)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Riera J.、A. Sumiyoshi、Brain Oscillations: Ideal Scenery to Understand the Neurovascular Coupling、Current Opinion in Neurology、査読有、2010、印刷中
- ② Kambara T.、S. Yokoyama、K. Takahashi、N. Miura、T. Miyamoto、D. Takahashi、S. Sato、R. Kawashima、Lexical Categories and the Human Brain: An fMRI Study、Studies in Language Sciences、査読有、

2010、印刷中

- ③ Yokoyama, S., K. Takahashi, T. Kambara, T. Miyamoto, K. Yoshimoto, R. Kawashima, Working Memory System as a Sentence Processor in the Human Brain, *IEICE Technical Report*, 査読有、TL2007-9-33、2007、89-92
- ④ Yokoyama, S., T. Miyamoto, J. Riera, J. Kim, Y. Akitsuki, K. Iwata, K. Yoshimoto, K. Horie, S. Sato, and R. Kawashima, Cortical Mechanisms Involved in the Processing of Verbs: An fMRI Study, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 査読有、18、2006、1304-1313

[学会発表] (計8件)

- ① Tadao Miyamoto, Kanji and Kana Processing、招待講演、Cuban Neuroscience Center and Department of Foreign Languages・Havana University、2009年9月8日、キューバ・ハバナ
- ② Jorge Riera, The Most Important Neuronal Signatures in Neuroimaging: A View of the Mesoscale、24th Annual Meeting of Japan Biomagnetism and Bioelectromagnetics Society、2009年5月29日、金沢

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 正夫 (MIYAMOTO TADAO)
東北大学・大学院国際文化研究科・教授
研究者番号：30374979

(2) 研究分担者

リエラ ホルヘ (RIERA JORGE)
東北大学・加齢医学研究所・准教授
研究者番号：80374982

(3) 連携研究者

横山 悟 (YOKOYAMA SATORU)
東北大学・加齢医学研究科・助教
研究者番号：20451627

後藤 太邦 (GOTO TAKAKUNI)
東北大学・加齢医学研究所・教育研究支援者
研究者番号：40447181

(4) 研究協力者

大嶋 秀樹 (OSHIMA HIDEKI)
東北大学・大学院国際文化研究科
博士課程後期3年の課程修了

神原 利宗 (KAMBARA TOSHIMUNE)
東北大学・加齢医学研究所
医科学専攻博士課程3年

住吉 晃 (SUMIYOSHI AKIRA)
東北大学・加齢医学研究所
医科学専攻博士課程3年

畑中 (森戸) 里衣子 (HATANAKA RIEKO)
東北大学・加齢医学研究所
医科学専攻博士課程4年

小川 剛史 (OGAWA TAKESHI)
東北大学・加齢医学研究所
医科学専攻博士課程4年