

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 橋本 龍一郎

本論文は、左前頭前野において、文法処理に特化した脳領域が存在するか、あるいは、文法処理に関わる左前頭前野の活動は、一般的な言語性短期記憶で説明できるのかという問題について、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いて検討したものである。

これまでの機能イメージング研究により、左前頭前野において文法処理に選択的に関係している領域があることが報告されている一方、左前頭前野の活動を一般的なワーキングメモリによって説明しようとする研究も多い。この対立をめぐって、これまでに神経科学の分野で活発な論争が行われてきたが、どちらかの立場を決定的に支持する結果は今のところ報告されていない。左前頭前野の機能的役割は何かという問題が持つ意義は、神経科学という特定の分野にとどまらず、複数の関連分野に及んでいる。例えば、言語学・心理学において、文法に固有の神経基盤を認めるモジュール仮説と、すべての言語処理を単一の言語性ワーキングメモリシステムに帰属させる非モジュール仮説との論争は、現在でも大きな関心を集めている。従って、左前頭前野の活動が文法処理に特別なものか、あるいは言語性ワーキングメモリで説明できるかという問題は、神経科学・言語学・心理学を含めた認知科学の広い分野に対して影響を与える重要な問題である。

導入部分で、著者は、文法処理のモジュール仮説・非モジュール仮説をそれぞれ明らかにした上で、左前頭前野の機能に関する先行研究を、機能イメージング、神経心理学、および事象関連電位を含め幅広く概観している。これらの研究の蓄積にも関わらず、論争が未解決であることを示した後、とくに、過去のイメージング研究について、文法処理と言語性ワーキングメモリの負荷が解離できていないことが重大な問題として指摘された。そして、左前頭前野において、文法処理に特化した脳領域が存在するかを検討するためには、最小対を構成する、文法課題と言語性短期記憶課題を作成し、両者の脳活動を機能イメージングで検討することが必要であると述べられている。

導入部分の後半では、本実験パラダイムの概略が説明されている。文法処理と言語性ワーキングメモリを分離させるために、著者は、文法処理に固有の性質である構造依存性と、言語性短期記憶にも共通して観察される、線系順序性を対比させる実験パラダイムを考案した。文法処理の構造依存性と線形順序記憶を対比させた点は、本研究の新しい着眼点で

ある。また、行動実験や脳波の実験によって、文法処理は意識的な努力を伴わなくとも、自動的に行われることが明らかにされている。筆者は、文法処理の自動性が、意識的な努力や方略を要する言語性ワーキングメモリと比べて著しく異なっていることに注目し、意識的な文法判断を求めないが、文を読むことで自動的に起こる文法処理を検討する実験課題を考案した。文法処理の自動性と言語性ワーキングメモリの意識的な努力を伴う点を対比させる試みも、本研究の斬新な点である。

本実験では、文法判断課題2つ、文を記憶する課題、および互いに文法的なつながりのない文節列を記憶する課題の計4つの課題を作成した。これらの条件では、提示単語を同一にすることにより、単語の使用頻度や音節列の長さなど、単語レベルの要因を統制することに成功している。文法判断課題と文の記憶課題では、まったく同じ刺激文のセットを使用し、課題の内容だけが異なっている。一方、2つの短期記憶課題は、課題内容はまったく同じであるが、提示刺激が文か文節列かという点だけが異なっている。従って、文の記憶課題を導入することで、刺激を統制して課題を変える比較と、逆に課題を統制して刺激を変える比較の両方が可能となる。これら2つの最小対を同一の実験でデザインし、文法処理を検討した研究は、過去に例がなく、オリジナル性を高く評価できる。また、各課題が、文法処理、および言語性ワーキングメモリの要素を相対的にどの程度強く含むかを前もって予想できるため、各課題の脳活動を比較したときに、その結果がどの認知要素を反映しているかを明確に解釈できる点も評価に値する。

続く方法では、実験手続き、使用した機器、データ解析方法、および各課題の詳細な説明がなされている。本実験の特徴として、十分な数の被験者（16名）を集めた上で、被験者の分散を考慮してランダムイフェクトモデルを用いることにより、結果の信頼性を高めていることが挙げられる。データ解析では、機能イメージングの分野において現在最も標準的に使用されている解析ソフト (SPM99) を用いているため、他のイメージング研究との比較が容易である。また、各課題の説明では、例えば、記憶課題において、最後に提示される文節のペアに、オリジナルの文・文節列を一部修正したものをプローブとして提示するなど、被験者が実験者の意図しない方略で課題を解けないように細心の注意を払っている。また、語順が比較的自由的な日本語の特徴を利用して文型を6パターン設定し、各パターンについて異なる語彙を用いた文を12文作成するなど、できるだけ文にバリエーションを与えることによって、被験者の刺激・課題に対する馴れを防ぐ工夫がみられる。

結果では、まず4課題の正答率・反応時間を比較し、実験者の意図どおり、文節列記憶課題が最も課題難度が高く、ワーキングメモリの負荷が高いことが示された。イメージングデータの解析では、まず文記憶課題と文節列記憶課題を比較した。前述のように、記憶課題の内容・および使用単語は両条件で同じである。違いは、文記憶課題が自動的な文法処理を含む一方、文節列記憶課題は文レベルの文法処理を含まないこと、および言語性ワーキングメモリの負荷が4課題中最も高い点である。左前頭前野が言語性ワーキングメモリの要素で説明できるなら、文節列記憶課題に対してより大きな活動が観察されることが予想されたが、実際には、左前頭前野背部(L.DPFC)において、文記憶課題に選択的な反応がみられた。この結果は、一般的なワーキングメモリには還元できない、文法処理に特化した脳領域が、左前頭前野において存在することを示している。この2つの課題の比較は、左前頭前野の活動に関する二つの対立仮説のうち、どちらの立場をとるかによって、全く逆の結果が予想できたため、どちらの仮説が正しいかを明確に検証できた点が評価できる。

次に、文法判断課題と文節列記憶課題の比較をおこない、L.DPFCに加えて、左前頭回下部(L.IFG)において、文法判断課題に対して選択的な活動を観察した。この結果は、自動的な文法処理に加えて、文法処理が意識的に強く要求されたときに、L.IFGが活動することを示す重要な発見である。この左前頭前野の2つの領域の活動は、続く文法判断課題と文記憶課題の最小対の比較においても観察された。従って、本研究は、これら3つの比較を通して、一貫して左前頭前野において文法処理に特化した領域があることを示すことに成功している。また、右頭頂部や帯状回をはじめ、それぞれの比較において、記憶課題に対して選択的な活動を示した領域は、これらの領域が順序記憶やワーキングメモリの負荷に対して選択性があることを示した過去のイメージング研究の結果と一致しており、結果の信頼性を高めている。最後に、被験者の分散を考慮して、L.DPFCとL.IFGの各領域の脳活動について、被験者の平均と分散を示したグラフが提示された。統計検定により、L.DPFCはL.IFGよりも、文記憶課題と文節列記憶課題の脳活動の差が大きいことが明らかにされた。この結果は、左前頭前野において文法処理に関わるこれら2つの脳領域の間に機能分化があることを示唆している。

考察では、まず結論をまとめた後、左前頭前野が言語性ワーキングメモリに関連していることを示した過去のイメージング研究が概観されている。本研究の結果が、左前頭前野と言語性ワーキングメモリの関連性を否定するものではないが、少なくとも左前頭前野の一部は、ワーキングメモリや一般的な認知機能では説明できない、文法処理に特化した活動

があることが述べられている。さらに、意味処理や音韻処理など、文法処理以外の言語処理の要素と左前頭前野の関係を検討し、本研究で観察された結果は、おもに文法処理の活動を反映していると結論された。

本論文は、第一に問題設定において、神経科学だけでなく、言語学・心理学を含めた認知科学の幅広い分野に対して重要な意味を持つ問題を扱っていること、第二に、その問題に対して、機能イメージングの手法を用い、仮説検証型の明確な実験デザインを考案してアプローチしていること、第三に、現在のイメージングデータ解析の標準に照らして、厳正な解析手法をとっていること、第四に、得られた結果は、左前頭前野において、文理解に特化した領域が存在することを明確に支持するものであること、第五に、その結論は先行研究の成果に照らして斬新な成果であること、以上の五点が特に評価された。

したがって、本審査委員会は、東京大学大学院総合文化研究科課程博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと全員一致で認定した。

なお、本論文の一部は、“Specialization in the Left Prefrontal Cortex for Sentence Comprehension”という題で、Neuron 誌 35 巻, 589-597 頁に掲載されている。