

氏 名 内山 祐司

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1105 号

学位授与の日付 平成 19 年 9 月 28 日

学位授与の要件 生命科学研究科 生理科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 **Functional segregation of the inferior frontal gyrus for syntactic processes : A functional magnetic resonance imaging study**

論文審査委員 主 査 教授 柿木 隆介  
教授 定藤 規弘  
教授 伊佐 正  
准教授 飯高 哲也（名古屋大学）

## 論文内容の要旨

文章理解は、世の中についての知識を使って、単語と節の並びの情報を文法的、主題的な関係と組み合わせて処理することが要求される。この中には文章の意味を解析するために単語と節の並びに文法規則を適用する文法処理が含まれている。こうした文法処理には言語的情報を一時的に保持して操作することが必要になるため、文法処理は言語的ワーキングメモリシステムと何らかの関連があると考えることができる。文法処理システムとワーキングメモリシステムについては、2つの関係が考えられる。1つはワーキングメモリシステムの一部の機能として、文法処理システムが存在するという考え方で、もう1つはワーキングメモリシステムと独立したシステムとして文法処理システムが存在するという考え方である。これらのシステムは脳の神経基盤に立脚していると考えられるが、言語的ワーキングメモリシステムの神経基盤と文法処理システムの神経基盤との正確な関係については、未だ明らかになっていない。本研究では文法処理に関する神経基盤は言語的ワーキングメモリシステムと区別できると仮定し、文法処理に関する神経基盤を言語的ワーキングメモリと意味理解に関する神経基盤から分離するために機能的MRIによる実験を行った。

文法処理に関する神経基盤を意味理解と言語的ワーキングメモリの神経基盤から分離するため、18名の右利き被験者に音声言語課題を提示し実験を行った。2種類の課題セット（SYN/MEMとGP/NGP）を用いた。

SYN/MEMでは文章理解課題（SYN）、言語的ワーキングメモリ課題（MEM）と音の高低判定課題（CTRL）の3種類の課題を提示した。SYN課題は提示された文章を理解して主語述語の対応関係を答える課題で、MEM課題はSYN課題と同じ単語で文章を構成しない並びで提示して記憶し、その順番を答える課題である。MEM課題とCTRL課題の脳活動の差分から言語的ワーキングメモリに関する神経基盤を抽出し、SYN課題とMEM課題の脳活動の差分から文法処理と意味処理に関する神経基盤を抽出する。SYN課題とMEM課題はHashimoto(2002)で使われていた課題をもとに作成した。

もう一方のGP/NGPではガーデンパスになっている文章（GP）とガーデンパスになっていない文章（NGP）の主語述語判定課題と音の高低判定課題（CTRL）の3種類の課題を提示した。ガーデンパス文とは「父親が娘に水をかけた少年を怒った」のような文章で、この文章を前から分析していくと、「父親が娘に水をかけた」の時点でひとつの完結した文章構造ができるが、この後に「少年を」が続くため、この文章構造を破棄して再構築することが必要となる。この「少年を」のフレーズの部分で文章の再解析が行われるため、このフレーズで文章を読む時間がかかる事が知られている。この文章の再解析を行うためにガーデンパス文ではガーデンパスでない文章より文法処理負荷が高くなると考えられる。またこの文法処理を行うためにはそれまでの文章全体を思い出すことが必要のため、言語的ワーキングメモリ負荷が高くなっていると考えられる。GP課題、NGP課題ともにSYN課題と同様に文章提示後に主語述語の対応関係を答えさせた。このようなガーデンパス現象を用いてGP課題とNGP課題の差分から文法処理と言語的ワーキングメモリに関する神経基盤を抽出すると考えられる。課題は合成音声で作成し、ヘッドホンで被験者に提示した。被験者は、できるだけ早くボタンで課題

の真偽を答え、実験中は固視点を見るように指示した。fMRIによる脳活動計測データの解析はSPM2を用いた。統計的検定は18名のデータを用いてグループ解析で行った。

GPとNGPの課題の正答率に統計的な有意差は見られなかったが、反応時間はGP課題のほうがNGP課題より、わずかに長くなる傾向がみられた。この反応時間の遅延はガーデンパス現象によるものと考えられる。SYN/MEMとGP/NGPのCTRL課題での正答率は、ほぼ100%に近く、被験者の課題への注意レベルが常に実験中に維持されていたことを確認できた。

言語的ワーキングメモリに関する神経基盤（MEM課題とCTRL課題の差分：MEM-CTRL）は両側の下前頭回、中前頭回、前補足運動野、腹側運動前野、前帯状回、上頭頂小葉、下頭頂小葉、島、尾状核と小脳、左の上側頭回と中側頭回で活動が見られた。文法処理と意味処理に関する神経基盤（SYN課題とMEM課題の脳活動の差分：SYN-MEM）ではBA45とBA47を含む左下前頭回と左の上側頭回と中側頭回の活動が見られた。この結果はHashimoto (2002)の結果をほぼ再現している。また言語的ワーキングメモリとの課題負荷を比較するため、MEM課題とSYN課題の脳活動の差分について検討した。右の背側運動前野、下頭頂小葉と上頭頂小葉に活動が見られ、MEM課題はSYN課題より言語的ワーキングメモリの負荷が高いと考えられる。文法処理と言語的ワーキングメモリ処理に関する神経基盤（GP課題とNGP課題の差分：GP-NGP）では左の下前頭回(BA45)、中前頭回(BA46)、腹側運動前野、背側運動前野、前補足運動野と右小脳の活動が見られた。

下前頭回における文法処理、意味処理、言語的ワーキングメモリ処理に関する神経基盤を分離するため、言語的ワーキングメモリ処理に関する神経基盤（MEM-CTRL）、文法処理と意味処理に関する神経基盤（SYN-MEM）、文法処理と言語的ワーキングメモリ処理に関する神経基盤（GP-NGP）の重なりを下前頭回において比較した。言語的ワーキングメモリ処理に関連する神経基盤は下前頭回背側のBA44での脳活動が高く腹側に向かうにつれて脳活動が低下した。文法処理と言語的ワーキングメモリ処理に関連する神経基盤は下前頭回背側と腹側の中間に当たるBA45で活動が高まる傾向が見られた。文法処理と意味処理に関連する神経基盤は下前頭回の背側では活動が低く腹側のBA47で活動が高まる傾向となっていた。文法処理を含む2つの脳活動の差分（SYN-MEMとGP-NGP）でBA45において脳活動レベルの統計的検定を行ったところ有意差（対応のあるt検定  $p < 0.01$ ）が見られた。

これらの結果から左下前頭回において背側(BA44)は言語的ワーキングメモリ処理、腹側(BA47)は意味処理で、その間におけるBA45で文法処理が行われていることが示唆された。

#### 参考文献

Hashimoto R, Sakai KL (2002) Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron* 35:589–597.

## 論文の審査結果の要旨

申請者の博士論文は以下のような内容であった。

文章理解は、世の中についての知識を使って、単語と節の並びの情報を文法的、主題的な関係と組み合わせて処理することが必要となる。この中には言語的情報を一時的に保持して操作する言語的ワーキングメモリ処理、文章の文法構造を解析する文法処理、文章の意味の整合性を調べる意味処理が含まれていると考えられる。これらの処理は従来の研究から左下前頭回において行われていると考えられるが、詳細については未だ明らかになっていない。本研究では文法処理に関する神経基盤を言語的ワーキングメモリと意味理解に関する神経基盤から分離するために機能的MRIによる実験を行った。

2種類の課題セット (SYN/MEM と GP/NGP) を18名の右利き被験者に音声で提示し機能的MRI計測を行った。SYN/MEMでは提示された文章を理解して主語述語の対応関係を答える文章理解課題 (SYN)、言語的ワーキングメモリ課題 (MEM) と音の高低判定課題 (CTRL) の3種類の課題を提示した。MEM課題とCTRL課題の脳活動の差分から言語的ワーキングメモリに関する神経基盤を抽出し、SYN課題とMEM課題の脳活動の差分から文法処理と意味処理に関する神経基盤を抽出する。GP/NGPではガーデンパスになっている文章 (GP) とガーデンパスになっていない文章 (NGP) の文章理解課題と音の高低判定課題 (CTRL) の3種類の課題を提示した。ガーデンパス文では文章の再解析が必要なためガーデンパスでない文章より文法処理負荷が高くなる。またこの文法処理を行うためにはそれまでの文章全体を思い出すことが必要なため、言語的ワーキングメモリ負荷も高くなっている。このようなガーデンパス現象を用いてGP課題とNGP課題の差分から文法処理と言語的ワーキングメモリに関する神経基盤を抽出した。

機能的MRIによる計測の結果、言語的ワーキングメモリ処理に関連する脳活動 (MEM-CTRL) は左下前頭回背側のBA44での脳活動が高く腹側に向かうにつれて低下した。文法処理と言語的ワーキングメモリ処理に関連する脳活動 (GP-NGP) は左下前頭回背側と腹側の中間に当たるBA45で活動が高まる傾向が見られた。文法処理と意味処理に関連する脳活動 (SYN-MEM) は下前頭回の背側では活動が低く腹側のBA47で活動が高まる傾向となっていた。

これらの結果から左下前頭回において背側 (BA44) は言語的ワーキングメモリに関する神経基盤、腹側 (BA47) は意味処理に関連する神経基盤で、その間におけるBA45が文法処理に関する神経基盤であることが示唆された。

上記の内容は、既に申請者が第1著者として英文原著論文にまとめ、現在、欧米の一流誌に投稿中である。研究内容は非常にすぐれており、国際的にも高いレベルであると、審査委員全員が判断した。