

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

**Computational principles of syntax in the language areas:**

**Verification of the syntactic operations using fMRI**

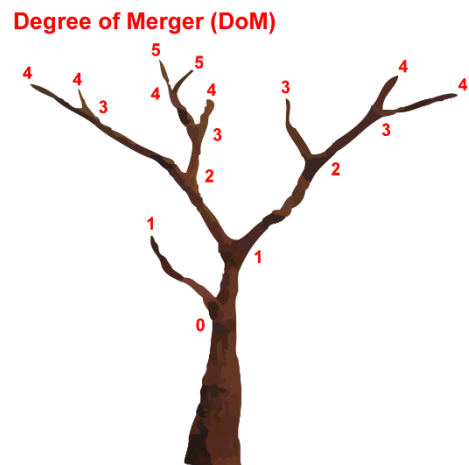
**(言語野における文法の計算原理：fMRI による統辞操作の検証)**

氏名 太田 真理

### 1. 背景と目的

言語は、人間に固有の高次脳機能である。理論言語学では、人間の脳に「普遍文法」に基づく言語能力が生得的に備わっていると提唱されてきた[1]。機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) を用いた研究により、人間の脳では文法の機能が左下前頭回に局在することが知られている[2]。しかしながら、「文法機能」が具体的にどのような演算によって支えられているのかは不明であった。本研究では、fMRI で計測した脳活動が、木構造の複雑さを定量化する「併合度」(degree of Merger, DoM) によって説明できることを初めて明らかにした (図 1) [3]。

まず、理論言語学で提案されている 2 つの基本的な統辞操作を、神経科学で初めて導入した。言語学によれば、文は木構造によって表すことができ、木構造は 2 つの単語からより大きな構造を作る「併合」(Merge) という操作によって作られる[4]。さらに言語学では、併合で作られた木構造の中で、2 つの単語間で関係する性質を探し、「サーチ」(Search) という言語操作が提案されてきた[5]。それらをさらに発展させて、文構造の処理に関する新たな仮説を 2 つ提案した[6]。



**図 1. 木構造と併合度**

木の枝別れの複雑さを表す指標として、枝分かれの深さである「併合度」を提案した。大本の幹を 0 として、枝分かれが進むごとに数を増やしていく。その最大数 (この例は 5) を、この木構造における併合度と呼ぶ。

仮説 I：木構造のある領域内の分枝の最大の深さで定義される「併合度」によって、木構造の複雑さが適切に定量化される。

仮説 II：ある言語表現（例えば文）の基本的な統辞構造は、「併合」と「サーチ」を生む機能要素（助詞や活用など）によって本質的に決定される。

## 2. 人間の脳における文法の計算：脳活動を説明可能な「併合度」

### 2.1. 仮説 I と仮説 II を検証する fMRI 実験

実験では、意味などの要因を統制して文法に注目するため、機能要素のみで作られる日本語文を用いた。日本語の母語話者 18 名が実験に参加した。実験では、3 種類の文を使用した。

埋め込み文：「太郎が花子が歌うと思う」と同じ木構造

単文：「太郎の兄が食べ始める」と同じ木構造

連文：「太郎が歌って花子が踊る」と同じ木構造

これらの木構造を作るには、「が・の・と・て」といった助詞が必要である。対照条件として、助詞を欠くために文の形を取らない、2 種類の文字列条件もテストした（図 2B）。

逆順文字列：前半と後半の文字列を逆順で提示

同順文字列：前半と後半の文字列を同順で提示

なお、「埋め込み文」と「逆順文字列」では、構成要素の対応関係が全く同じであるため、サーチの適用回数（サーチ数）や短期記憶の負荷が一致している。4 語の文（添え字の S）に加え、6 語の文（添え字の L）も使用して、さらに負荷の高い条件を用意した。

実験では次のような対応付け課題を行った。文条件では、主語と動詞の母音が対応するかどうかを判断させた。例えば「ざざが せさる」という文では、下線部の母音が同じ「ア」なので対応する。文字列条件では、対応する文字列が同じかどうかを判断させた。これらの文は単語ごとに視覚刺激として提示し、実験参加者は、最後の単語が出た後でボタンを押して解答した。これらの文や文字列を処理する時の脳活動を fMRI で計測して、文法処理に選択的な脳活動を調べた。fMRI の撮影には Hitachi 製 MRI 装置を使用し（静磁場強度 1.5 T、繰り返し時間 = 3 秒、解像度 =  $3 \times 3 \times 4 \text{ mm}^3$ ）、データの解析には脳活動解析用ソフトウェアである SPM5 および SPM8（Wellcome Trust Centre for Neuroimaging）を使用した。さらに領野間を連絡する神経線維を明らかにするため、拡散テンソル画像（diffusion tensor imaging, DTI）の撮影を行った。DTI の撮影には、GE 製 MRI 装置を使用し（静磁場強度 3 T、繰り返し時間 = 15 秒、解像度 =  $2 \times 2 \times 3 \text{ mm}^3$ ）、データの解析には FSL4.1.7（Oxford Centre for Functional MRI of the Brain's (FMRIB) Software Library）を使用した。

### 2.2. 「併合度」と「サーチ数」による脳活動の変化

併合度の差が最大である、6 語の埋め込み文と 4 語の単文の脳活動を比較した結果、左下前頭回と左縁上回に局所的な活動の変化が観察された（図 3A）。

次に、これらの領域において、「埋め込み文」と「単文」それぞれに対する脳活動から、最も単純な木構造を持つ「連文」に対する脳活動を差し引くことで、脳活動がどのように変化するかを詳しく調べた。従来の研究による文処理モデルを加えた 19 通りの可能性のうち、左下前頭回と左縁上回の活動を説明する要因は、それぞれ併合度と「併合度 + サーチ数（両者の和）」が唯一であった（図 3B）。さらに、構成要素同士の対応関係が完全に同じである、「埋め込み文」と「逆順文字列」の脳活動を比較した場合も、左下前頭回と左縁上回に局所的な脳活動が観察された。これらの結果は、仮説 I と仮説 II を支持する。

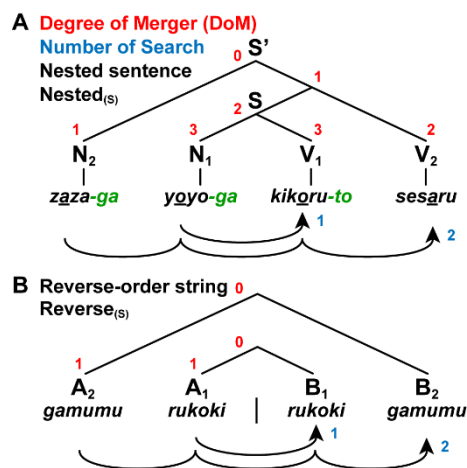


図 2. 文条件と文字列条件

(A) 刺激文は、非単語と日本語の助詞（緑字）によって構成される（N は名詞、V は動詞）。併合度は赤字で示し、サーチ数は青字で示す。矢印は、主語と動詞の対応を表す。

(B) 文字列条件は助詞を欠くため、部分的な木構造しか作られない。

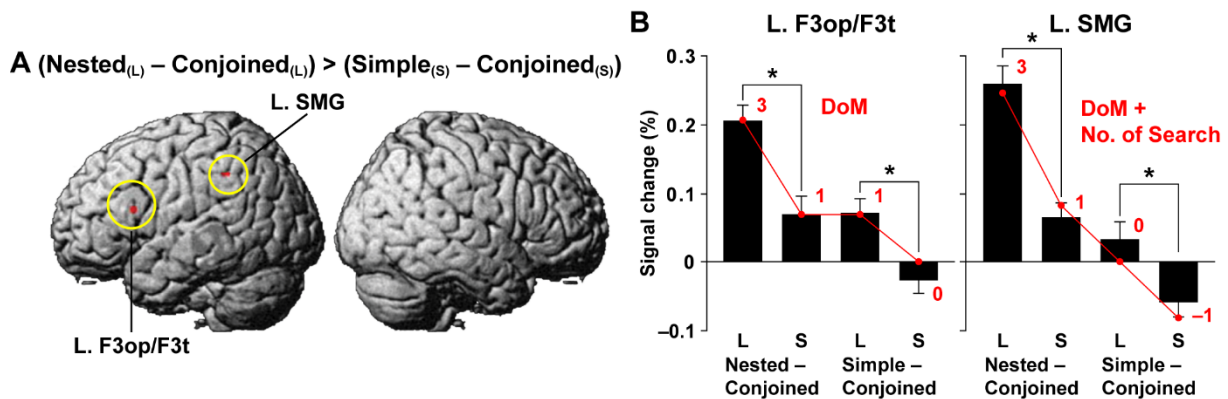


図3. 併合度とサーチ数による左下前頭回および左縁上回の選択的な活動の変化

(A) 6語(L)の埋め込み文と4語(S)の単文を比較した結果、左下前頭回と左縁上回に局所的な活動が観察された。

(B) 左下前頭回と左縁上回の活動は、それぞれ併合度(3, 1, 1, 0)と「併合度+サーチ数」(3, 1, 0, -1)によって説明された。赤点と赤線は、最適なモデルによる活動の予測を表す。

### 2.3. 左下前頭回と左縁上回の結合の重要性

左下前頭回と左縁上回の間の情報伝達を明らかにするため、動的因果モデル(dynamic causal modeling, DCM)による解析を行った。DCMとは、ある脳領域への入力や、領域間の情報伝達を仮定した時に、fMRIの信号をどの程度予測できるか調べることで、脳のネットワークを解析する手法である。その結果、左下前頭回から左縁上回へのトップダウンの情報伝達が明らかになった(図4)。また、DTIにより左上縦束・弓状束がその経路となることを確認した。左縁上回は、語彙処理に関係した領域と考えられている。左縁上回の活動から、木構造の情報に基づいて、語彙が処理されることが示唆された。以上の結果より、言語野の活動を変化させる要因が特定され、また文法処理を担うネットワークが明らかとなった。

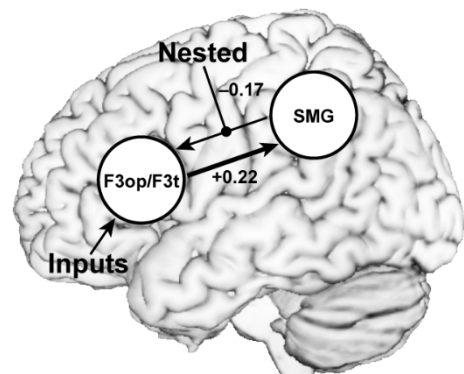


図4. 左下前頭回と左縁上回の間の情報伝達  
左下前頭回から左縁上回へトップダウンに情報伝達されるモデルが最適であった。太線は有意な結合を示す。

### 3. 仮説Iと仮説IIのさらなる検証

上記の仮説を、絵文マッチング課題を使った金野ら(2008)のfMRI実験の結果に適用し、さらなる検証を行った[7]。この実験では、「が」を引いてる」といった「能動文」、「が」にひかれる」といった「受動文」、「を」が引いてる」といった「かき混ぜ文」を用いた。さらに対照条件として、より簡単な木構造を持つ、「と」が歩いてる」といった「自動詞文」を用いた。実験参加者は、木構造の異なるこれらの日本語文を黙読し、絵が文の意味と合っているかどうかを判断した。

さらに新しい仮説IIIを提案した[6]。

仮説III:「併合度領域」は、「併合」の再帰的適用、「サーチ」の距離、および課題の必要性によってダイナミックに変化する。

併合は常により大きな構造を作るため、併合度領域は併合の再帰的適用に対応して大きくなる。サーチの距離とは、サーチが適用される要素同士の木構造上の距離である。課題の必要性とは、主語と動詞の対応のように、文の一部を理解する際に自然と要求される文法処理を含む。

まず、「受動文」と「能動文」を直接比較した結果、左下前頭回に局所的な脳活動が観察された。次に、この領域において、「能動文」、「受動文」、「かき混ぜ文」のそれぞれに対する脳活動から、最も単純な木構造を持つ「自動詞文」に対する脳活動を差し引くことで、脳活動がどのように変化するかを詳しく調べた。その結果、この左下前頭回の文法処理に選択的な活動は、3つの仮説に基づく併合度によって説明可能であった。

### 4. 総合考察

文法処理に関する先行研究に基づいて、仮説IIIのさらなる検証を行った。脳機能イメージングや心理言語学の研究では、目的格関係節、例えば“The boy<sub>i</sub> who<sub>j</sub> the girl likes <sub>t<sub>i</sub></sub> sings”(tは“who”の本来の

位置を表し、同一の添え字は対応を表す) の処理は、主格関係節、例えば “The boy<sub>i</sub> who<sub>i</sub> t<sub>i</sub> likes the girl sings”, の処理に比べて大きな負荷を生むことが報告されている。関係節の理解では、関係代名詞とそれに対応する要素をサーチすると考えられるが、目的格関係節では、主格関係節よりもサーチの距離が長いので併合度が増加する。従って、目的格関係節での負荷の増大は併合度によって直接的に説明可能である。また、「雪が積もる」のような2語の文に対して、文法判断課題、意味判断課題、音韻判断課題を課した fMRI 実験では、明示的な文法処理を必要とする文法判断課題に選択的な、左下前頭回の脳活動の増加が観察された[8]。この結果は、課題の必要性の違いによって、併合度領域が変化することを示唆する。さらに、同一の文に対して、主語 動詞、または名詞 代名詞の対応を判断する文法判断課題と、単語の順序を覚える短期記憶課題を課した fMRI 実験では、左下前頭回の脳活動が文法判断課題で選択的に増加することが報告されている[2]。この結果は、同じ文を提示した場合でも、課題の必要性に基づいてサーチの距離が変化することで、併合度領域が変化することを示唆する。

本研究では、言語野における文法の計算原理を解明するため、言語野の活動を十分に説明可能な最少の要因を特定した。言語の脳科学を進展させるためには、理論言語学の知見を神経科学の実験で検証していくことが重要である。文法の計算原理への将来の研究により、人間に固有の言語能力の理解がさらに深まると考えられる。

## 参考文献

1. Chomsky N (1957) *Syntactic Structures*. Mouton Publishers
2. Hashimoto R, Sakai KL (2002) *Neuron* **35**: 589-597
3. Ohta S, Fukui N, Sakai KL (2013) *PLOS ONE* **8**, e56230: 1-16
4. Chomsky N (1995) *The Minimalist Program*. The MIT Press
5. Fukui N, Sakai H (2003) *Lingua* **113**: 321-375
6. Ohta S, Fukui N, Sakai KL (2013) *Front. Behav. Neurosci.* **7**, 204: 1-13
7. Kinno R, Kawamura M, Shioda S, Sakai KL (2008) *Hum. Brain Mapp.* **29**: 1015-1027
8. Suzuki K, Sakai KL (2003) *Cereb. Cortex* **13**: 517-526