

論文の内容の要旨

論文題目

Functional Anatomy of the Left Frontal Cortex for Structure-dependent Sentence Processing in Vocal and Sign Languages

(音声言語および手話言語の構造依存的文処理に対する
左前頭皮質の機能解剖学)

氏名 犬伏 知生

1. 序論

語句同士を組み合わせるによって作られる文は、再帰的な文法構造を持っている。このような言語能力は人間のみが存在し、複雑で豊かな言葉の表現を生み出している。近年の脳機能イメージング研究により、左前頭皮質の一部である左下前頭回弁蓋部/三角部が文法処理に選択的に関与していることが示されている。一方、この部位における文法処理が、文の持つ意味情報や単語・文脈の持つ情報などの他の言語的要素の処理とどのように関わっているのかについては、まだ十分に分かっていない。そのため、文法処理と他の言語処理が左前頭皮質内でどのように時間的・空間的に統合されているのかを解明する必要がある。

この問題を明らかにするため、本研究では構造依存的文処理に対する左前頭皮質の機能解剖学について2つの異なる方向から焦点を当てた。一方は、意味情報に基づいた文法処理に対する左下前頭回の活動の時間的変化を検討した [1]。そのため、脳機能計測手法の中でも特に時間分解能に優れた脳磁図 (MEG) を用いて文法課題時の脳活動を計測し、意味的に異なる2種類の文の持つ語順の効果を検証した。他方、単語・文・文脈レベルでの処理の神経基盤について、左前頭皮質における空間的な統合を検討した [2]。空間分解能に優れた機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いて脳活動を計測し、さらに voxel-based morphometry (VBM) という手法で、実験参加者の各個人の言語能力と局所灰白質体積が相関する部位を同定した。

2. 研究 1. 二重目的語文の項構造による基本語順に依存した左下前頭回の活動変化

2.1. 導入

左前頭皮質の活動における文法処理と意味処理の時間的相互作用を明らかにするため、本研究では動詞句の項構造に着目した。項構造とは動詞句が各名詞句に与える意味役割（例えば、動作主、主題、着点など）とその関係を指し、日本語の二重目的語文はその項構造によって、物を移動し人物に所有させることを意味する文（possessor あり、P+文）と、物を移動することのみを意味する文（possessor なし、P-文）の 2 種類に分かれる。

P+文と P-文の各文で、「基本語順 (canonical, C)」と 2 つの目的語の順番を入れ替えた「かき混ぜ語順 (noncanonical, N)」についてテストした (図 1)。

かき混ぜ語順では言語学で提案されている「移動」という文法操作により、動詞とその直前にある名詞句の構造的距離が大きくなる。MEG を用いた先行研究により、単語間の構造的距離が近い目的語-動詞文において、文法課題に特異的な脳活動が示されており、先行する名詞句の文法的情報による処理の促進が示唆されている [3]。本研究では項構造によって決定される構造的距離に近いほど、動詞句の文法処理時の脳活動が増大することを検証した。

2.2. 実験方法

実験には 10 名の日本語母語話者が参加した。刺激文として、所有性 (P+文/P-文) と正規性 (基本語順/かき混ぜ語順) の 2 x 2 デザインの各条件の文を 50 文ずつ作成し、条件間で同じ与格名詞と動詞のセットを使用した。この他に正文と非文の刺激文を加えたものをランダムな順序で呈示し、参加者にその文法性を判断させた。

課題時の脳磁場を全頭型脳磁計測システム (MEGvision, 横河電機) で計測し、解析した。得られたデータから脳皮質表面上の電流密度分布を最小ノルム法により推定し、所有性と正規性の 2 要因について分散分析 (rANOVA) を行った。

2.3. 結果

課題時の脳皮質表面上の電流密度に対する解析の結果、動詞句呈示から 530 ms から 550 ms 後に、左下前頭回弁蓋部/三角部において、正規性の有意な主効果 (corrected $P < 0.05$) がみられた (図 2)。この部位の脳活動について paired t -test による検定をした結果、

P+文の基本語順と P-文のかき混ぜ語順の間で差が見られ、動詞だけでなく直前の名詞句が同一であっても、正規性の効果が存在することが確かめられた。

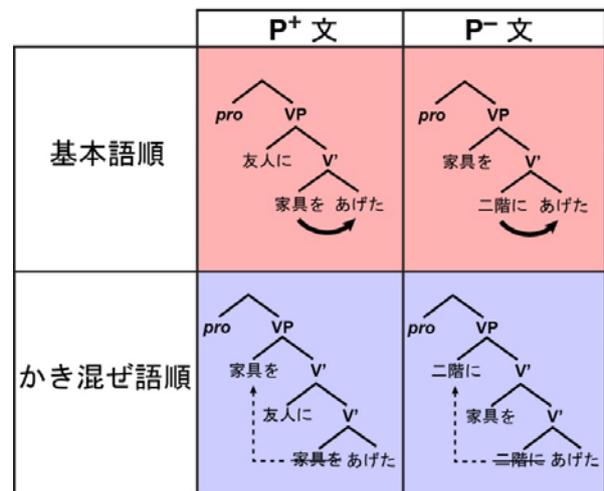


図 1: 研究 1 のパラダイム

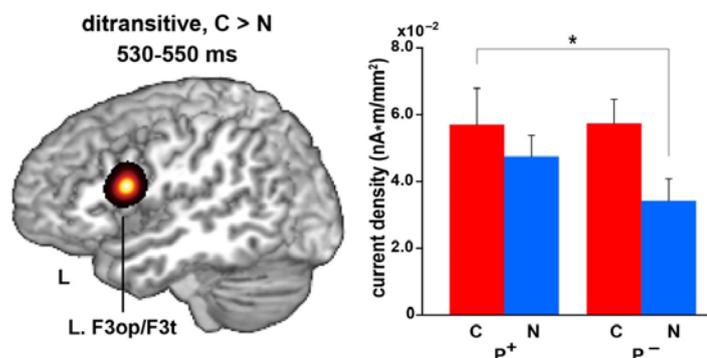


図 2: 正規性の効果が見られた領域とその電流密度

2.4. 考察

本実験で観察された基本語順における左下前頭回弁蓋部/三角部の活動の増大は、先行する2つの名詞句と動詞句の間の構造的距離の近さに応じて、名詞句の動詞への予測の効果が強くなったためであると考えられる。本結果は項構造に基づく文法構造の構築に左下前頭回が選択的に関わっていることを示している。

3. 研究 2. 手話における単語・文・文脈レベルの統合処理の機能解剖学

3.1. 導入

本研究では、音声言語と手話言語に共通して存在する単語・文・文脈処理の階層性を利用して、異なるレベルの言語情報の統合の処理基盤が左前頭皮質内でどのように空間的に統合されているのかを明らかにすることを目的とした。

本研究では、手話文における非単語の有無を判断する単語レベルの判断課題

(Word task)、文法の誤りを判断する文レベル

の判断課題 (Sent task)、会話における意味的な誤りを判断する文脈レベルの判断課題 (Disc task) の3種類の言語課題 (図3) を用いて、これらの課題時の脳活動を明らかにした。さらに、実験参加者の単語・文・文脈レベルの処理能力の個人差に着目して、各個人の課題成績と局所灰白質体積が相関する部位を同定した。

3.2. 実験方法

実験には28名のろう者が参加した。参加者はいずれも日本手話と書記日本語の使用者であった。実験では日本手話の文刺激を動画として呈示した。課題は上述の言語課題の他、2つの手話文の逆再生映像が同一か否かを判断する繰り返し課題 (R task) を用いた。

課題時の脳活動と参加者の脳構造を3TのMRI装置 (GE Signa HDxt 3.0T, GE Healthcare) を用いて計測し、解析した。fMRIによる脳活動については、年齢や性別、利き手指数、失聴時年齢、日本手話と日本語の獲得時年齢を共変量とすることで、それらの影響を排除してから課題間で比較した。VBMによる局所灰白質体積の比較では、これらの要因の他にR taskの成績の影響を排除して、各個人の課題成績と相関する部位を同定した。

3.3. 結果

R taskを対照条件とし、各課題時の脳活動を解析した結果、Word task、Sent task、Disc taskの順で、左前頭皮質の左外側運動前皮質から、左下前頭回弁蓋部/三角部、左下前頭回眼窩部へと広がっていく活動パターンが観察された (図4)。さらにこれら3領



図3: 言語課題で使用した文の例

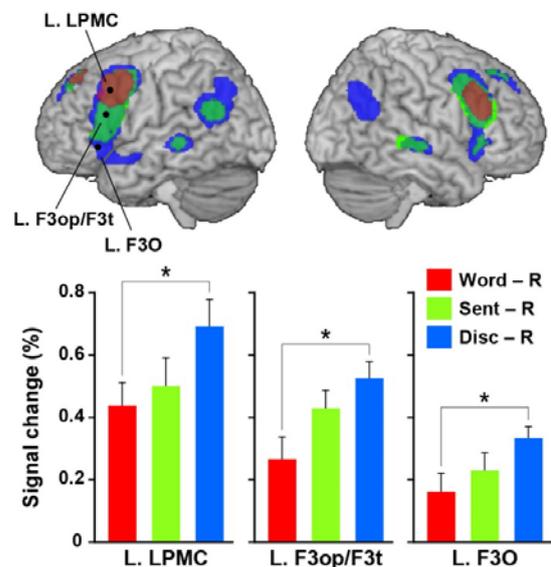


図4: 各課題時の脳活動

域の活動を課題間で比較した結果、すべての領域で Word task と Disc task の間に差がみられた。さらに、脳活動の左右差を解析した結果、Sent task と Disc task において、前頭皮質の活動は左優位だった。

各個人の課題成績と局所灰白質体積との相関は、課題ごとに異なる領域で有意であった (図 5)。Word task では左中心前回/中心後回、Sent task では右島皮質、Disc 課題では左下前頭回眼窩部と楔前部で正の相関がみられた。

3.4. 考察

左前頭皮質における脳活動のパターンは、単語・文・文脈という言語情報の統合のレベルに対応して、左前頭皮質が背側から腹側方向にかけて統合されることを示唆する。さらにこの活動は左優位であり、音声言語と手話言語の処理基盤に相同性がみられた。

課題成績と局所灰白質体積の相関がみられた領域に関して、左中心前回/中心後回は右手の運動/感覚を司る部位に相当し、島皮質と楔前部はそれぞれ構音と空間的注意に関与していると考えられ、手話文の処理を支える働きが示唆される。一方、Disc task において相関がみられた左下前頭回眼窩部は、脳活動の解析でも同じ課題で活動がみられた領域であり、この領域の文脈処理における重要な役割を解剖学的に支持する結果であった。

4. 総合考察

MEG によって明らかになった予測効果は、近年の理論言語学でその役割を強調されている構造的距離に依存するものであった。この知見は理論言語学と脳機能イメージング研究の統合によって明らかにされた。さらに、MRI によって明らかになった階層的な言語情報の統合に関する機能的・解剖的な神経基盤は、言語処理機構の解明において普遍性と個人差の両方から脳の機能的な研究と解剖的研究を融合することの重要性を示している。

5. 参考文献

- [1] Inubushi T, Iijima K, Koizumi M, and Sakai KL, *PLOS ONE* 7 (5), e37192, 1-11 (2012).
- [2] Inubushi T, and Sakai KL, *Front. Hum. Neurosci.* 7: 681, 1-13 (2013).
- [3] Iijima K, Fukui N, and Sakai KL, *Neuroimage* 44 (4), 1387-1396 (2009).

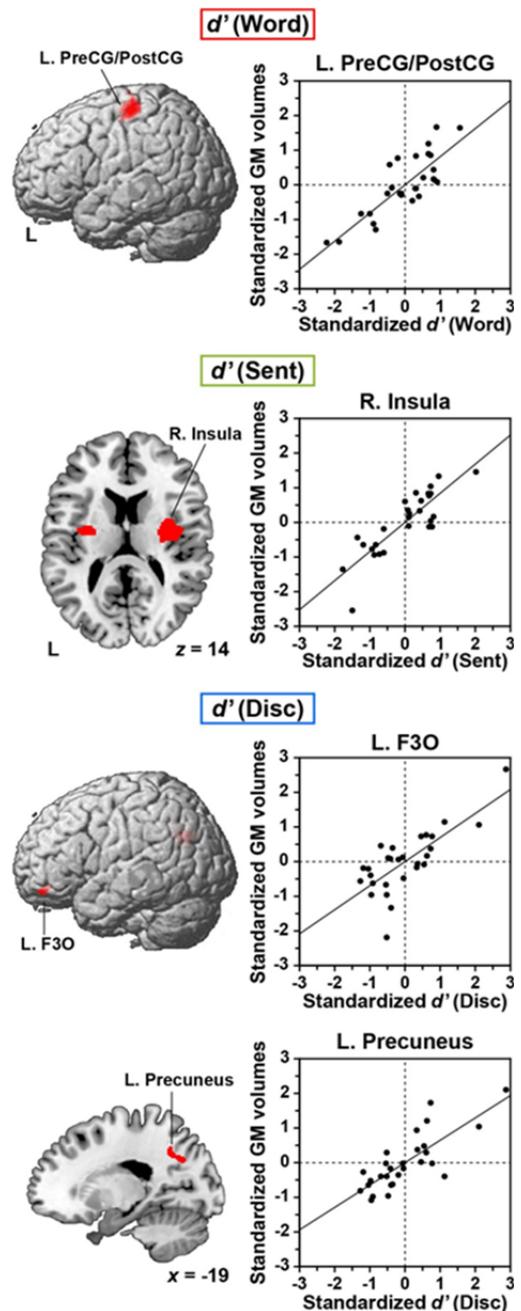


図 5: 課題成績と灰白質体積の正の相関が見られた領域