論文の内容の要旨

論文題目

Syntactic predictive effects for sentence structures in the left inferior frontal gyrus

（左下前頭回における文構造への統辞的予測効果）

氏名　　飯島 和樹

1. 序論

言語は人間を他の動物から分かつ重要な能力である．現代の言語学は，再帰的に語句を埋め込むことによって階層的な統辞構造を形成する計算能力が人間言語の本質であることを明らかにしてきた．一方，近年の脳機能イメージング技術の発達によって，統辞と意味が脳内で異なる領野において処理されていることが示されている．統辞と意味の処理を分離するための方法論のひとつとして，最小対パラダイムが挙げられる．最小対パラダイムにおいては，正文と変則文との間で，統辞要素あるいは意味要素のどちらか一方だけが異なるものが用いられ，語彙の違いなどの他の要因の影響を排除することができる．これまで，こうした最小対パラダイムを用いて，目的語-動詞文（OV 文）に対する統辞課題と意味課題を比較する先行研究が行われてきた．機能的核磁気共鳴映像法 (fMRI) を用いた先行研究においては，意味判断と比べ，統辞判断が左下前頭回の活動を有意に増大させることが明らかになっている．また，経頭蓋磁気刺激 (TMS) を用いた先行研究においては，動詞提示後 150 ms における左下前頭回への TMS が，統辞判断に選択的に反応時間を短縮することが示されている．こうした従来の知見は，左下前頭回が統辞処理に重要な関与をしていることを示唆しているが，言語の本質であるとされる階層的な文構造が，言語理解において重要な予測的な処理にどのような影響を与えているのかについては未だ明らかではなかった．

本論文では，OV 文に加えて，主語-動詞文（SV 文）を統辞課題・意味課題に加えることで，階層的な文構造に基づいた予測的な言語処理について焦点を当て，左下前頭回におけるそうした処理の時間的詳細を明らかにすることを目的とした．さらに，予測的な言語処理が閾下（サブリミナル）に提示された言語刺激にどのような影響を受けるかを検証することで，その自動性を明らかにすることを目指した．超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いた脳磁図 (MEG) によって，神経活動に伴う微細な磁場の変化を高い時間分解能で計測した．

2. 実験 1: 文の統辞構造の構築の皮質ダイナミクス

2.1 導入

OV 文 (**図 1a**) および SV 文 (**図 1b**) は，ともに名詞と動詞からなるシンプルな二語文であるが，それぞれ異なる文構造を持つことが言語学において明らかになっている．OV 文においては，目的語は他動詞と直接結合し，動詞句 (VP) と呼ばれる構造を形成する．一方, SV 文においては, 主語は動詞句を介して間接的に動詞と結合する．

こうした文構造からの帰結として，目的語が結合できるのは他動詞のみであるのに対し，主語は特定の種類の動詞を要求しない．したがって，OV 文では，先行して提示される目的語の対格標識（「を」）によって，他動詞が唯一の可能な動詞であるという統辞的な予測が生じると考えられる．

被験者が文の統辞の正誤を判断する統辞課題では，意味の正誤を判断する意味課題と比べて，OV 文における統辞的予測効果がより強力に観察されると考えられる．また，そうした統辞的予測効果は，文構造の構築に関わる左下前頭回において観察されると予想される．こうした仮説に基づき，統辞課題における動詞に対する皮質の活動を，意味課題におけるものと比較した．

2.2 方法

刺激の視覚提示においては，名詞句と動詞の間の時間間隔を試行ごとに変化させ，先行する名詞句に対する脳活動の影響を除いて，動詞に対する脳活動のみを計測した (**図 1c**).

また最小ノルム法を用いて，皮質表面上に仮定した多数のダイポールによって脳活動を推定した．この場合，条件間比較を行う際，皮質上の多数のデータ点に関する多重比較の問題が生じるため，permutation test を応用し，データの正規性の仮定に依存することなく多重比較の問題を解決することに成功した．

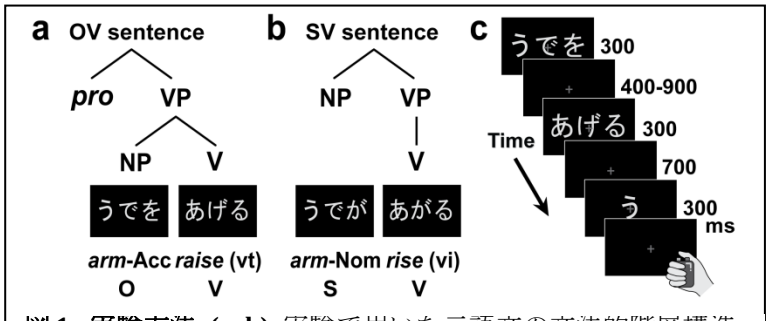


図 1. 実験方法 (a, b) 実験で用いた二語文の文法的階層構造. **(c)** 一施行における刺激提示.

2.3 結果

解析の結果，OV 文の正文が提示された条件では，統辞課題に選択的な反応が左下前頭回において，動詞提示後 120-140 ms という非常に早い時間帯で観察されたのに対し (**図 2a**), SV 文の正文では課題の効果は見られなかった (**図 2b**). この時間帯における左下前頭回の活動は，同一の正文を用いて行われた記憶課題や価値判断課題といった統制課題と比較した際にも，OV 文でのみ統辞課題に対して有意な選択性を示し，SV 文では課題の効果は見られなかった (**図 2c**). また非文を加えた解析においても，統辞課題に対する選択的活動は OV 文でのみ観察された．

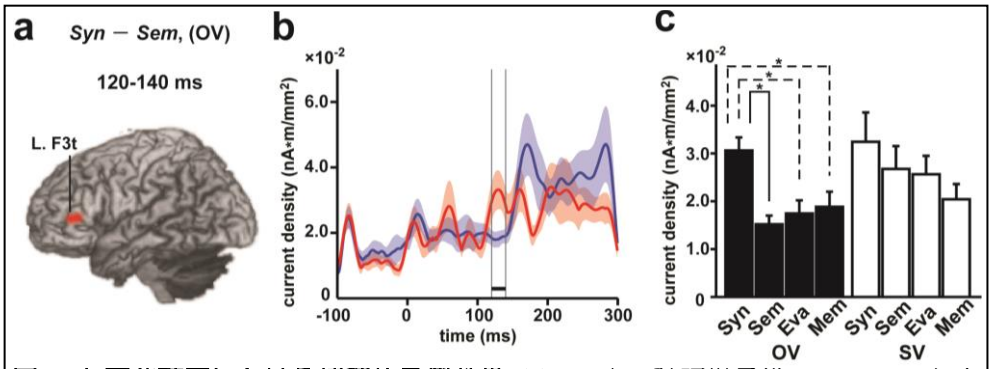


図 2. 左下前頭回における統辞的予測効果 (a) OV 文の動詞提示後 120-140 ms における，左下前頭回での統辞課題に選択的な活動．Syn: 統辞課題，Sem: 意味課題. **(b)** OV 文における動詞提示後の左下前頭回三角部の活動の時間変化 (赤: 統辞課題，青: 意味課題). **(c)** 各課題における 120-140 ms での左下前頭回の活動.

2.4 考察

これまでも報告されてきた統辞処理に選択的な左下前頭回の活動が，OV 文に選択的なものであり，また，120-140 ms という非常に早い段階で観察されることを明らかにした．この時間帯は TMS を用いた先行研究とも一致する．この結果は，左下前頭回の統辞処理に選択的な活動の増大が OV 文における統辞的予測効果を反映しているとする仮説を支持する．

3. 実験 2: サブリミナルな刺激による統辞的予測効果の促進

3.1 導入

実験 2 では，実験 1 で観察された，左下前頭回における統辞的予測効果が，どの程度自動的なものであるかを検証した．そこで，統辞課題を行っている際に，短時間の提示のため意識されないが効果を持つような動詞（サブリミナル動詞）を提示することで，左下前頭回における予測的な効果がどのように影響されるかを検証した．サブリミナル動詞は，被験者の意識に上らないものの，脳における自動的な処理に影響を及ぼし，後続するターゲット動詞における統辞的予測効果に影響を及ぼすものと考えらえる．なお，サブリミナル動詞の提示時間

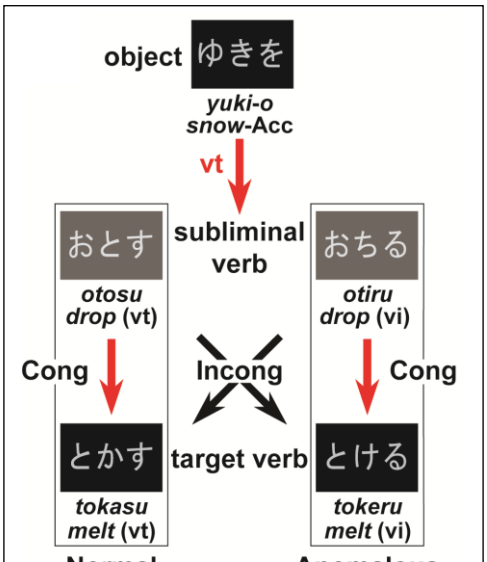


図 3. サブリミナルな刺激を用いたパラダイム 名詞句を提示した後，サブリミナル動詞を 34 ms 提示し，後続するターゲット動詞に対する統辞的予測効果への影響を検証した.

が 34 ms の提示時間であれば，被験者の意識に上らないことは，予備実験によって確認した．

名詞句（目的語／主語）の提示後に，閾下に動詞あるいは名詞を提示した（**図 3**）．予測効果は目的語によって生じ，サブリミナル動詞によって維持されると考えられる．さらに，サブリミナル動詞とターゲット動詞のタイプ（他動詞／自動詞）が一致している条件では，ターゲット動詞のタイプが，サブリミナル動詞によって既に決定されているため，ターゲット動詞に対する予測効果が顕著になると考えられる．

3.2 方法

皮質表面上に仮定した多数のダイポールによって脳活動を推定する最小ノルム法を用いた．また，実験 1 で用いられた permutation test を改良し，空間的に拡がりのある脳活動をクラスターとして，統計学的に適切に評価することに成功した．さらに，偏グレンジャー因果解析を用いて，統辞的予測効果に関わる複数の脳領域の間での情報の流れを可視化することを目指した．

3.3 結果

一致条件下におけるターゲット動詞に対する脳活動を OV 文と SV 文とで比較したところ，動詞提示後 150-170 ms において，左下前頭回の活動が OV 文で増大していることがわかった (**図 4**). また，逆に，70-90 ms における左縁上回および 280-300 ms における中帯状皮質の活動は，SV 文に比べ，OV 文で減少していることがわかった．さらに，後帯状皮質の活動は，一致条件と不一致条件の双方で，OV 文に比べ，SV 文で増大していることもわかった．

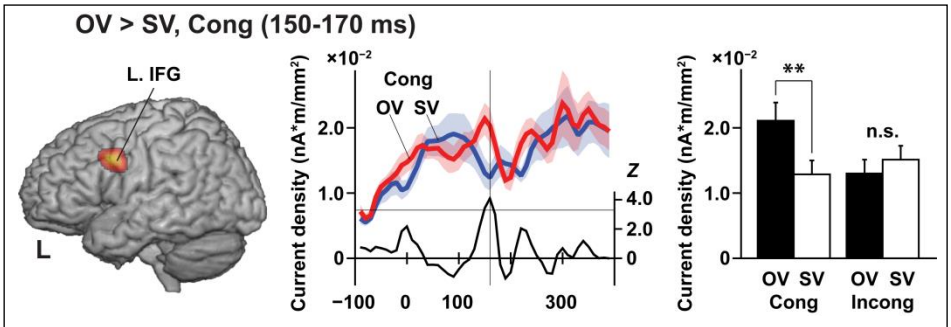


図 4. サブリミナル動詞による統辞的予測効果の促進 一致 (Cong) 条件においてターゲット動詞提示後 150-170 ms に観察された，OV 文に対する左下前頭回の神経活動の増大．

これらの領域間での情報の流れを調べるために，偏グレンジャー因果解析を行った結果，一致条件下では， 70-170 ms において，左下前頭回と中帯状皮質と双方向の相方向的な相互作用が，SV 文に比べ，OV 文で増大していることが分かった（**図 5A**）．また，170-270 ms においては，左下前頭回から左縁上回へのトップダウンの情報の流れが増大していることが明らかになった（**図 5B**）．

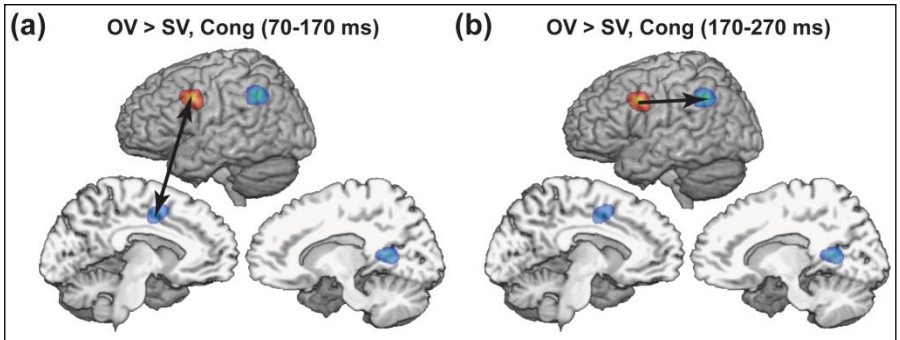


図 5. OV 文の一致条件において増大を示した情報の流れ (a) 動詞提示後，70-170 ms における左下前頭回と中帯状皮質との相互作用． **(b)** 170-270 ms における左下前頭回から左縁上回へのトップダウンの情報の流れ．

3.4 考察

一致条件下で提示されたサブリミナル動詞によって，OV 文のターゲット動詞に対する左下前頭回の活動が増大することから，左下前頭回の活動は，統辞的予測効果の自動性を反映するものであることが確かめられた．一致条件における左縁上回と中帯状皮質の活動の減少は，先行して提示したサブリミナル動詞によって，それぞれ，動詞のタイプ（他動詞／自動詞）と文法性（正文／非文）が予め特定されていることにより処理が節約された効果であると考えられる．さらに，統辞処理を担う左下前頭回が，統辞判断への形成に関わる中帯状皮質と相互作用し，また，語彙処理を担う左縁上回へ統辞情報を送ることで，サブリミナルに促進された統辞的予測効果が，他の領域の処理へと影響を及ぼす機序が明らかになった．

4. 総合考察

実験 1 と実験 2 の結果を踏まえ，統辞的予測効果の持つ高速性・無意識性・強制性という性質より，予測効果の自動性が結論できる。また実験 2 より，予測効果の促進は，(1) 統辞判断の形成，(2) 統辞情報の語彙情報への統合，という少なくとも二つのステップに関係することが明らかになった．これらの結果から，左下前頭回は，中帯状皮質および左縁上回へと，自動的で予測的な処理に必要な情報を伝達する中心的な役割を担うと考えられる．本研究は，左下前頭回における自動的な統辞処理の神経メカニズムの時間的な詳細を明らかにするものである．