

平成30年6月25日現在

機関番号：82404

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K02554

研究課題名(和文) 日本語の文処理とワーキングメモリの相互作用の脳メカニズムの解明

研究課題名(英文) Brain mechanisms of interaction between working memory and sentence processing in Japanese

研究代表者

幕内 充 (Makuuchi, Michiru)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所 脳機能系障害研究部・研究室長

研究者番号：70334232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：かき混ぜ文は、正準語順文に比べ処理負荷が高いことが脳機能画像法により複数の言語で確認されている。ではなぜ負荷の高いかき混ぜ文が産出されるのか。日本語書き言葉コーパスの分析によると目的語が従属節で修飾されて「重く」なっている場合にかき混ぜ文が産出されることがある。このようなタイプのかき混ぜ文を処理する際の脳メカニズムをfMRIを用いて検討した。結果は、産出が生じやすいタイプでは、かき混ぜによる処理コストの上昇がなかった。つまり、短期記憶における系列位置効果と似て、修飾されて情報量の多い名詞句を文頭に置くことにより、文の処理コストが下がることが、かき混ぜ構文を選択する動機の一つであると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Neuroimaging studies have observed that scrambling construction requires more cost for processing in many languages. Why we produce such a costly sentences? Analysis of Japanese corpus found that scrambled sentences often have 'heavy' object noun phrase (NP) modified with a clause. We examined brain activation during the processing of sentences with heavy object NP. Results showed that the heavy object NP scrambling did not cause brain activation increase compared to its canonical counterpart. We conclude that the motivation to produce scrambled word orders is that placing the longer NP at the sentence initial position can mitigate the cost of processing than having it in the middle position as in the serial order effect in working memory.

研究分野：認知神経科学

キーワード：かき混ぜ文 fMRI 日本語 系列位置効果 ワーキングメモリ

### 1. 研究開始当初の背景

申請者は文処理とワーキングメモリの関係の解明という問題に対し認知神経科学的研究を行って来た。ヒトの言語能力は他の認知能力から独立しているという仮説は有力であるが、例えば長くて複雑な文の理解などのように、実際の言語使用においてはワーキングメモリ容量の制限によって文処理が難しくなる場合がある。それゆえ言語運用の脳メカニズムを考える際にはワーキングメモリの果たす役割を考慮する必要があるのである。申請者がマックス=プランク認知神経科学研究所に所属していた時(2006-2012)に、

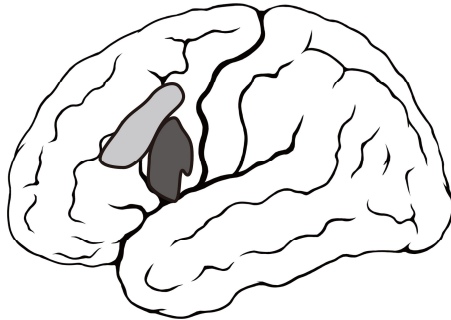


図1

ドイツ語の中央埋め込み文を調べた fMRI 実験で、統語処理の脳内機構(図1、ブローカ野後部)がワーキングメモリの脳内機構(淡灰部、ブローカ野上部)と解剖学的に分離しているが、白質繊維によって連絡を持ち、複雑な文の処理に際して協働していることを明らかにした(Makuuchi et al., 2009 PNAS)。さらに申請者らはドイツ語のかき混ぜ文理解の fMRI 実験(Makuuchi et al., 2013a Cereb Cortex)で、フィラーとギャップの距離に比例して言語野の賦活が大きくなることを示し、力動的因果モデル(dynamic causal model)という分析法で言語処理の脳内機構とワーキングメモリの脳内機構が階

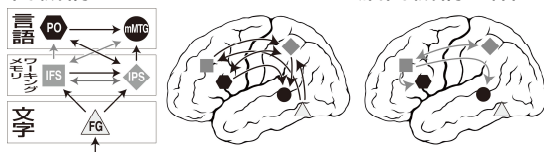


図2

層的な関係を持って協働していることを明らかにした(図2、Makuuchi et al., 2013b Cortex)。帰国後(2012-)は、言語能力と諸認知機能の関係を調べ、文章読解成績とオペレーション・スパンという複雑ワーキングメモリ課題の成績との有意な相関を見出した(平成24・25年度科研費研究活動スタート支援の成果)。

#### 研究動向と問題点

・かき混ぜ文処理におけるフィラー・ギャップ距離に比例した言語野の活動は、移動という言語現象の神経学的実在証明とされてきた。しかし意味をほとんど変えないのに処理コストが高い、かき混ぜという操作がなぜあるのか。これを考えると、これまでの脳機能

画像実験はかき混ぜ文という言語現象を理解するには生態学的妥当性(ecological validity)を欠いていたと言える。

・日本語書き言葉コーパスの分析によるとかき混ぜ文が産出されるのは A.目的語が従属節で修飾されて「重く」なっているか、B.既出の事物に言及する場合だという(Yamashita 2002 TEXT)。

・上の A と B のような、適切な文脈下で提示された生態学的妥当なかき混ぜ文の処理ではフィラー・ギャップ距離に比例した活動増加(あるいは正準語順文との差異)は見られないのではないか。先行文によって文頭名詞句(非主格)が焦点であることが即座に指示され、フィラー記憶の増強とギャップ予測の強化が生じると予想される。

・文字列や数字列の短期記憶では初頭効果(primacy effect)と新近効果(recency effect)により、列の先頭と末尾の項の記憶が残りやすく、中央部は忘れやすいという傾向がある。この系列位置効果、あるいは短期記憶の制約的性質に注目すれば、かき混ぜは、重要情報を文頭という特別な位置に置き、前文との繋がりを強化する操作であると理解できる。

・上に挙げた「フィラー・ギャップ処理の強化」と「初頭効果による情報強調」はともにワーキングメモリの操作の問題として定式化できるだろう。

### 2. 研究の目的

日本語のかき混ぜという言語現象は、移動でありながら義務的ではない、等の興味深い性質がある。かき混ぜ文は、正準語順文に比べ大脳での処理負荷が高いことが脳機能画像法により複数の言語で確認されている。しかし、なぜそのように高負荷な構造が必要なのか、という動機を考慮することがかき混ぜという言語現象の全貌を捉えるためには必要であろう。日本語書き言葉コーパスの分析によると目的語が従属節で修飾されて「重く」なっている場合にかき混ぜ文が産出されることがある。このようなタイプのかき混ぜ文を処理する際の脳メカニズムを fMRI を用いて検討した。

### 3. 研究の方法

#### 自己ペース読み実験

・心理言語学的手法を用いて、目的語が長いかき混ぜ文は短い場合に比べて処理負荷が軽減されるという仮説を検証した。

・SOV あるいは OSV の語順を持つ他動詞文を刺激とし、S または O に修飾句を付加することで、主語が長い文(例: 真剣な顔付きのアキラがアイコを叱った)または目的語が長い文(例: 真剣な顔付きのアイコをアキラがおちくった)を作成した。

・刺激文の容認度判定も行わせた。

・16名の右利き日本語母語話者(平均年齢

24.3 歳, レンジ 20-33 歳, 5 人が女性) の協力を得た。

#### fMRI 実験 1

- ・健常者を対象にした機能的 fMRI 実験を行った。語順 (SOV / OSV) および名詞句の相対的長さ (重主語 / 重目的語) を操作し、2 要因デザイン (計 4 条件) の刺激を作成した。これらの文を読んで理解する際の脳活動を fMRI で計測した。

- ・刺激は各条件 30 文を、文節ごとに提示した。各文節の提示時間は 700 ms、文節間のインターバルは 100 ms とした。

- ・左下前頭回、左後部中側頭回、左背側運動前野などを関心領域とし、刺激提示後の血流動態反応を計算して条件間比較を行った。

- ・22 名の右利き日本語母語話者 (平均年齢 24.7 歳, レンジ 19-35 歳, 13 人が女性) の協力を得た。

#### fMRI 実験 2

- ・自然な文の理解は統語処理および意味処理を伴う。下前頭回における BA44 と 45、および側頭皮質における ATL と pMTG が、これらの処理に対して異なる役割を果たすという仮説を fMRI で検討した。

- ・かき混ぜ文において、名詞句を無意味な語で置き換えてジャバウォッキ文にして、かき混ぜの効果と名詞句の有意性の効果を調べた。

- ・24 名の右利き日本語母語話者 (平均年齢 22.8 歳, レンジ 18-35 歳, 17 人が女性) の協力を得た。

- ・意味 (自然: NATL、無意味: NONS) × 語順 (SOV, OSV) の 2×2 デザイン

- ・NATL-SOV: 乱暴な総督が長官を殴った。

- ・NATL-OSV: 長官を乱暴な総督が殴った。

- ・NONS-SOV: PP な AA が EE を V した。

- ・NONS-OSV: EE を PP な AA が V した。

- ・各条件 40 文

- ・60% (24 文) は文の終了から 1 s 後にプロンプ (例: 総督が殴った。) を提示し、マッチング課題を実施した。

- ・2 セッションに分割して fMRI 計測を実施した (各条件の刺激提示数はセッション間で等しくなるよう統制した)。

## 4. 研究成果

### 自己ペース読み実験

- ・容認度評価実験を行った結果、かき混ぜ文であっても目的語が長い条件は、主語が長い条件よりも文法的な容認度がより高く評定されることが明らかとなった (図 3)。

- ・自己ペース読み実験を行ったところ、目的語が長いかき混ぜ文では主語が長いかき混ぜ文よりも読み時間が早まることが示された (図 4)。

- ・これらの結果は、目的語が長いかき混ぜ文の処理負荷は軽減されるという仮説を支持

するものといえる。

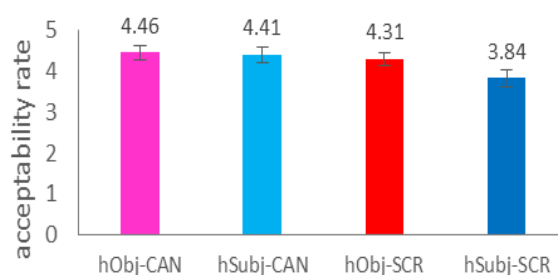


図 3 容認度評価 (N=16)

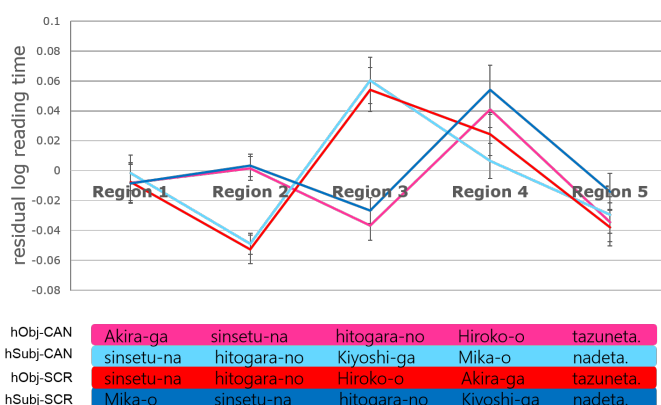


図 4 自己ペース読み時間 (N=25)

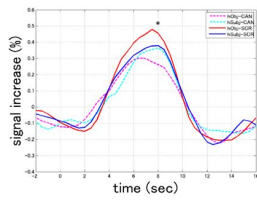
#### fMRI 実験 1

左下前頭回三角部に隣接する前頭弁蓋の op9 (Amunts et al., 2010) と呼ばれる領域では、重主語かき混ぜ文で他の 3 条件と比べて有意に高い活動が見られた。一方、左下前頭回弁蓋部 (PO) および左後部中側頭回 (pMTG) は、名詞句の相対的長さに関わらず正準文よりかき混ぜ文に対して高い活動を示した。これは左 op9 がオンライン文処理における短期記憶負荷、即ち線的距離を反映しているのに対し、左 PO と左 pMTG は階層構造の複雑さ、つまり構造的距離を反映するものと考えられた。結果は、産出が生じやすいタイプではかき混ぜによる処理コストの上昇がなかった。つまり、修飾されて情報量の多い名詞句は文頭に置くことにより、文の処理コストが下がることが、かき混ぜ構文を選択する動機の一つであると考えられる。さらに、ワーキングメモリ負荷に応じた部位 (重い目的語のかき混ぜに反応する) と、言語学的な負荷に応じた部位 (かき混ぜに反応する) が分離して左前頭葉にあることが分かった。

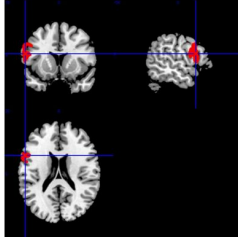
## 語順の主効果 下前頭回

L inferior frontal gyrus (BA44 anatomical ROI)

Main effect of WORD ORDER was significant only at 8 sec.



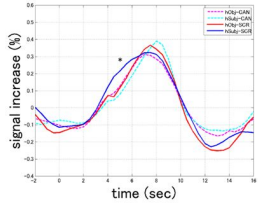
• 2-way ANOVAs were performed at 4, 5, 6, 7, 8 sec from the sentence onset.



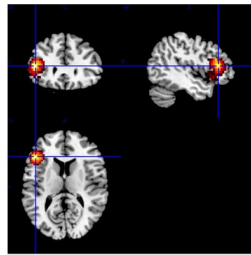
L inferior frontal gyrus (a peak of Koizumi et al., 2012)

[-46 30 12]

Interaction was significant only at 5 sec.



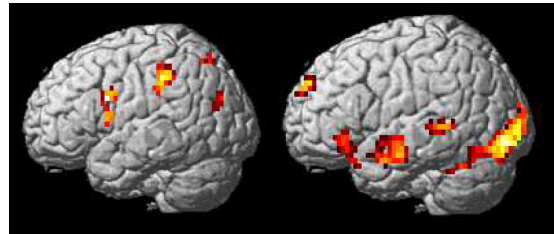
• 2-way ANOVAs were performed at 4, 5, 6, 7, 8 sec from the sentence onset.



## fMRI 実験 2

かき混ぜの効果は統語処理を司るブローカ野に、有意性の効果は左側頭葉前部に同定された。これは統語処理と意味処理が脳内で分離されていることを示唆する。我々はこの発見を統語-背側経路、意味-腹側経路という神経伝達路の分離の一つとして論じる。

• pMTG は SOV 語順よりも OSV 語順に高く応答し、ATL は NONS 文よりも NATL 文に強く活動した。これは前者が統語処理に、後者が意味処理に関与することを意味している。



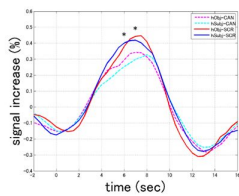
nonsense > natural    natural > nonsense  
p < 0.001 uncorrected, k > 40

## 交互作用 中側頭回後部

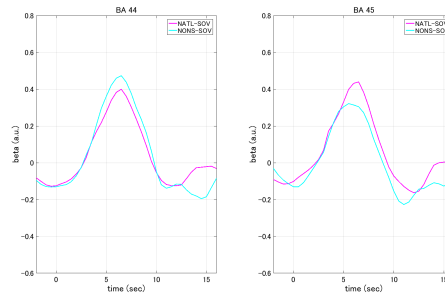
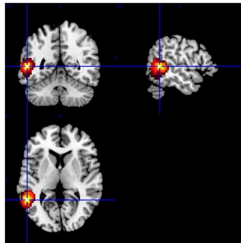
L posterior middle temporal gyrus (a peak of Kinno et al. 2008)

Main effect of WORD ORDER was significant at 6 and 7 sec.

[-54 -51 6]



• 2-way ANOVAs were performed at 4, 5, 6, 7, 8 sec from the sentence onset.



• BA 45 は NONS 文よりも NATL 文に、BA 44 は NATL 文よりも NONS 文に強く応答した。また OSV 文が提示された条件では、文提示後 8 s において BA 45 よりも BA 44 が高い活動を示していた。BA 45 は統語処理ではなく意味処理に関与しており、BA 44 は統語処理に関係するため、より階層的に複雑な文に対しては BA 44 のほうがより強く活動したのではないかと考えられる。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

1. Emiliano Zaccarella, Lars Meyer, Michiru Makuuchi, and Angela D. Friederici. Building by syntax: The neural basis of minimal linguistic structures. *Cereb Cortex*. 査読有 2017 Jan 1;27(1):411-421. doi: 10.1093/cercor/bhv234.

2. Andrea Santi, Angela D. Friederici, Michiru Makuuchi and Yosef Grodzinsky. An fMRI Study Dissociating Distance Measures Computed by Broca's Area in Movement Processing: Clause boundary vs Identity. *Front Psychol*. 査読有 2015; 6: 654. Published online 2015 May 20. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00654.

[学会発表](計2件)

1. 岩淵俊樹・幕内充 . 文処理脳メカニズムにおける構造的距離と線的距離の処理負荷の分離 . 日本言語学会第 153 回大会, 福岡大学, 2016 年 12 月 3 日-4 日 (発表日: 3 日).

2. 岩淵俊樹・水落(遠藤)智美・幕内充 . かき混ぜ文の処理における名詞句の長さの影響: 実験研究 . 日本言語学会第 151 回大会, 名古屋, 2015 年 11 月 28 日-29 日 (発表日: 29 日).

[図書](計1件)

1. 幕内充 「成人失語」 発達科学ハンドブック 8 脳の発達科学 第 14 章、日本発達心理学会 (編集) 榊原 洋一、米田 英嗣 (責任編集)、新曜社 (2015/9/1)、344 ページ、ISBN-10: 4788514443 、 ISBN-13: 978-4788514447.

[その他]

ホームページ等

<http://www.rehab.go.jp/ri/noukinou/hibrain/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

幕内 充 (MAKUUCHI, Michiru)

研究者番号: 70334232

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所 脳機能系障害研究部・研究室長

(4)研究協力者

岩淵 俊樹 (IWABUCHI, Toshiki)

研究者番号: 20711518

浜松医科大学・子どものこころの発達研究センター・特任助教