

A-1 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

岩渕 俊樹、幕内 充

(国立障害者リハビリテーションセンター)

1. はじめに

入力された単語系列から文の持つ階層構造を構築することは、文処理における最も重要な側面のひとつである。このような階層処理を行うためには、入力された系列を一時的に保持する記憶メカニズムが必要であると考えられる。文理解のパフォーマンスが個人の言語性ワーキングメモリ (verbal working memory: VWM) の容量によって影響されることから、Just and Carpenter (1992) は共通の有限な認知的リソースが文処理と VWM の双方に割り当てられるという仮説を提唱した。しかし脳損傷により VWM の容量が低下している患者でも文理解が損なわれない場合があることから、統語処理と VWM は分離しているという主張もある (Waters & Caplan, 1996; Caplan & Waters, 1999)。Makuuchi et al. (2009) は左下前頭回における弁蓋部 (pars opercularis: PO) が統語処理に、左下前頭溝が VWM に関与していることを fMRI 実験により明らかにし、統語処理と VWM の神経基盤が分離していることを示した。しかしながら VWM 課題によって PO が活動することを報告している研究も多く (Paulesu et al., 1993; Schumacher et al., 1996)、統語処理と VWM の神経解剖学的な分離に関する証拠は十分ではない。

本研究はかき混ぜ文を利用して構造的距離 (structural distance) と線的距離 (linear distance) に応答する脳部位を fMRI で同定し、統語処理と VWM の神経基盤の分離を目指した。依存関係を持つペア間の構造的距離は間に介在するノード数によって定義され (O'Grady et al., 2003)、線的距離はペア間の語数によって定義される (Gibson, 1998)。日本語のかき混ぜ文 (object-subject-verb 文: OSV 文) は目的語名詞句の文頭への移動を含むため、正準語順文 (subject-object-verb 文: SOV 文) よりも複雑な階層構造を持つ。一方、移動した名詞句 (filler) と本来の生起位置 (gap) のあいだの線的距離は、VWM の負荷を反映する。主語または名詞句の相対的な長さ (重さ) を修飾句の付加によって変化させ、filler-gap 間の線的距離を操作した。主語が長く目的語が短い重主語かき混ぜ文 (例. [[バレリーナを]][[軽薄な態度のコーチが]][t[叩いた。]]]) は、目的語が長く主語が短い重目的語かき混ぜ文 (例. [[悪趣味な格好のバレリーナを]][[コーチが]][t[叩いた。]]]) に比べ filler-gap 間の線的距離が長い。一方、これらの OSV 文はともに目的語名詞句の移動を含んでおり、filler-gap 間の構造的距離は等しい。そのため構造的距離に関わる脳領域は、名詞句の重さに関わらず OSV 文に高い活動を示すことが予測される。それに対し、VWM に関わる領域は SOV 文では活動が低く、かつ重主語の OSV 文では重目的語の OSV 文よりも強く活動し、語順×重名詞句の交互作用を示すと考えられる。これらの文を理解しているときの fMRI 計測し、構造的距離と線的距離に関わる脳部位を同定した。

2. 方法

2-1. 実験協力者

健常な右利きの日本語母語話者 22 名 (男性 9 名、女性 13 名、19-35 歳、平均 24.7 歳) が参加した。3 名の参加者は実験課題の正答率が低かった (いずれかの実験条件で 65%未満だった) ため分析から除外した。以下に示す結果は 19 名 (男性 8 名、女性 11 名、19-35 歳、平均 24.0 歳) の

行動データおよび fMRI データに基づく。本実験は国立障害者リハビリテーションセンターの倫理委員会による承認を受け、すべての実験参加者からインフォームド・コンセントを取得した上で実施された。

2-2. 刺激

文中の目的語が長い重目的語 (heavy object : hO) の文と、主語が長い重主語 (heavy subject : hS) の文を設定することで、filler-gap 間の線的距離に応答する脳領域を検討した。hO と hS のそれぞれについて、正準語順 (SOV) とかき混ぜ語順 (OSV) を設けることにより、語順 (SOV, OSV) × 重名詞句 (hO, hS) の 2 要因デザインとした。まず 30 の職業名詞ペア (例. コーチ、バレリーナ) を用意し、主語および目的語に使用した。次に 2 文節から成る修飾句 (例. キザっぽい格好の) を 30 個作成し、先述の名詞句に付加することにより、30 個から成る名詞句リストを 2 つ作成した。これらのリストの一方は hO 文に、もう一方は hS 文に割り当てた。3 つの他動詞 (叩いた／殴った／蹴った) のいずれかとこの名詞句リストを組み合わせることで、hO-SOV、hS-SOV、hO-OSV、hS-OSV の各条件について 30 文ずつを作成した。以下に各条件の例を示す。

hO-SOV : コーチがキザっぽい格好のバレリーナを叩いた。

hS-SOV : キザっぽい格好のコーチがバレリーナを叩いた。

hO-OSV : キザっぽい格好のバレリーナをコーチが叩いた。

hS-OSV : バレリーナをキザっぽい格好のコーチが叩いた。

また、メインの 4 条件のみの繰り返しによって実験協力者がこれらの構文に特化したストラテジーを用いることを避けるため、上の各条件における最初の名詞句を主題化した文 (例. コーチはキザっぽい格好のバレリーナを叩いた。) をフィラー文として用いた。

2-3. 実験手続き

文は高速逐次視覚提示法 (rapid serial visual presentation paradigm) により、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。各文は常に「昨日の夜遅く」という定形の副詞句から始めることとした。実験は 3 セッション (各セッションおよそ 16.2 分) で構成され、各セッションではメイン 4 条件をそれぞれ 10 文ずつ提示した。試行の 40% では、最後の文節が消えてから 1000 ms 後にプローブ文 (例. コーチがバレリーナを叩いた。) を提示した。実験協力者はプローブ文の意味が直前の文と比べて一致するかどうかを判断し、なるべく早く正確にボタン押しによって回答するよう教示された (プローブ課題)。実験参加者は MRI の撮像セッション前に、上述のプローブ課題 32 試行から成る練習セッションを最大 4 回実施した。

2-4. MRI 撮像

3 T MRI スキャナ (MAGNETOM Skyra; Siemens, Erlangen, Germany) を用いて撮像を行った。各実験セッションにつき 485 スキャンを gradient-echo echo-planar imaging (EPI) シーケンスにより収集した (撮像パラメータ : repetition time = 2,000 ms, echo time = 30 ms, flip angle = 90 degrees, field of view = 192 × 192 mm, matrix 64 × 64, 35 axial slices, slice thickness = 3 mm with 1 mm gap)。実験セッションの終了後、すべての実験協力者につき構造画像を撮像した (撮像パラメータ : MPRAGE sequence, TR = 2,300 ms, TE = 2.98, inversion time = 900 ms, flip angle = 9 degree, field of view = 256 × 256 mm, matrix 256 × 256, sagittal 224 slices, 1 mm isotropic resolution)。

2-5. MRI 分析

fMRI データの分析には SPM12 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) を用いた。前処理として EPI 画像のリアラインメントとスライスタイミング補正、EPI 画像と構造画像の位置合わせ、Montreal Neurological Institute (MNI) 空間への脳の形態標準化を順に行い、最後に EPI 画像の平滑化を行った。その後、一般線形モデルによって各ボクセルにおける実験条件の効果を推定した。文の提示区間 (5.5 s) およびプローブ文の提示区間 (3 s) をボックスカー関数でモデル化し、血流動態反応関数と重畳することで得られたリグレッサーを計画行列に含めた。リグレッサーの数はメインの文 4 条件とフィラー文 4 条件、およびそれぞれに対するプローブ文 (8 条件) の合計 16 である。メイン文、フィラー文を含む 8 条件 (effect of interest) の少なくともひとつで活動する統計的マップ ($p < 0.001$ uncorrected for multiple comparisons) を実験参加者ごとに推定し、このマップを後述する volume of interest (VOI) 分析で用いた。

統語処理と VWM の神経基盤を同定するため、本研究は先行研究に基づいて左下前頭回の弁蓋部 (PO)、三角部 (pars triangularis: PTr)、左 PTr に隣接する前頭弁蓋 (op9)、左後部中側頭回 (posterior middle temporal gyrus: pMTG)、左運動前野背外側部 (dorsal premotor cortex: PMd) という 5 つの関心領域 (VOI) を定め、各 VOI における試行に対する血流動態の時間的変化 (trial time course: TTC) を計算した。前述した Makuuchi et al. (2009) をはじめ、PO が統語処理において重要な役割を担っていることは多くの研究により示唆されてきた。また Kinno et al. (2008) によれば、日本語のかき混ぜ文の処理では左 PTr (MNI 座標: -52, 21, 18)、左 pMTG (MNI 座標: -54, -54, 3)、および左 PMd (MNI 座標: -39, 0, 45) が活動する。一方、Koizumi et al. (2010) が かき混ぜ文と正準文の比較により報告している MNI 座標 (-42, 24, 6) は左 PTr に隣接する前頭弁蓋に位置しており、この領域は op9 と呼ばれる (Amunts et al., 2010)。左 PO の VOI は、44 野の細胞構築学的な事前情報に基づいて作成した (詳細は Makuuchi et al. 2009 を参照)。44 野内において、effect of interest で活動したボクセルを実験協力者ごとに同定し、そのボクセル群を VOI とした。左 op9、PTr、pMTG、PMd は上に示した MNI 座標から 10 mm 以内の範囲において、effect of interest で活動する局所ピークを中心とした半径 10 mm 球を VOI として定義した。各 VOI の時系列データを抽出し、Makuuchi et al. (2013) と同様の方法を用いて TTC を計算した。文提示のオンセットから 5 s から 10 s の区間において 1 s ごとに語順 (SOV, OSV) × 重名詞句 (hO, hS) の 2 要因分散分析を行い、語順の主効果または語順 × 重名詞句の交互作用を示す領域を探索した。

3. 結果

3-1. 行動データ

プローブ課題における正答率および平均反応時間を実験参加者ごとに算出し (表 1)、語順 (SOV,

表 1. プローブ課題の平均正答率および反応時間。カッコ内の数値は平均値の標準誤差。

	hO-SOV	hS-SOV	hO-OSV	hS-OSV
正答率 (%)	89.47 (2.10)	92.98 (1.59)	91.23 (2.06)	83.77 (2.51)
反応時間 (ms)	1547.4 (50.9)	1570.1 (56.2)	1571.7 (41.6)	1646.7 (42.3)

SOV, 正準語順 ; OSV, かき混ぜ語順 ; hO, 重目的語 ; hS, 重主語。

OSV) × 重名詞句 (hO, hS) の 2 要因分散分析を行った。正答率については交互作用 ($F(1,18) = 6.72, p < 0.05$) が有意であったが、語順の主効果 ($F(1,18) = 3.92, p > 0.05$) および重名詞句の主効果 ($F(1,18) = 1.00, p > 0.3$) は見られなかった。単純主効果検定を行ったところ、hS における語順の効果 ($F(1,36) = 10.58, p < 0.005$)、および OSV における重名詞句の効果 ($F(1,36) = 6.64, p < 0.05$) が有意だった。反応時間では有意な主効果および交互作用は見られなかった (語順 : $F(1,18) = 2.53, p > 0.1$, 重名詞句 : $F(1,18) = 3.77, p > 0.05$, 交互作用 : $F(1,18) = 1.31, p > 0.2$)。

3-2. fMRI データ

VOI 分析の結果、語順 × 重名詞句の交互作用が見られたのは op9 のみであり、文提示後 5 s ($F(1,18) = 7.17, p < 0.05$) の時点であった。語順の単純主効果は hS では有意だったが ($F(1,36) = 7.87, p < 0.05$)、hO では有意でなかった ($p > 0.8$)。また、op9 では語順および重名詞句の主効果は有意でなかった ($ps > 0.1$)。有意な語順の主効果を示した領域は PO および pMTG であった。PO では文提示後 8 s で ($F(1,18) = 4.36, p > 0.05$)、pMTG では文提示後 6 s ($F(1,18) = 7.83, p < 0.05$) と 7 s ($F(1,18) = 8.50, p < 0.05$) で語順の主効果が見られた。これらの領域では重名詞句の主効果および交互作用は見られなかった ($ps > 0.4$)。最後に、重名詞句の主効果は文提示後 7 s 時点の PTr ($F(1,18) = 4.43, p < 0.05$)、6-7 s 時点の PMd (6s: $F(1,18) = 7.12, p < 0.05$, 7s: $F(1,18) = 10.32, p < 0.01$) で有意であった。PTr と PMd では語順の主効果および交互作用は見られなかった ($ps > 0.2$)。

4. 考察

グローブ課題における hS-OSV の正答率は hO-OSV 条件および hS-SOV 条件よりも低く、hO-OSV と hO-SOV のあいだでは差が見られなかった。この結果は hS-OSV 文が他の条件に比べて処理負荷が高いことを示しており、同じ実験デザインを用いて行われた文の容認度評定および自己ペース読み課題においても同様の結果が得られている (岩渕・水落・幕内, 2015)。また、この結果はかき混ぜ文が hO の場合に多く産出され、hS ではほとんど使われないというコーパス研究とも合致している (Yamashita, 2002; Kondo & Yamashita, 2011)。これまでかき混ぜを伴う OSV 文は基本的に SOV 文よりも難しいと考えられてきたが、以上のデータは重い目的語を文頭へ移動する場合、かき混ぜの処理負荷が軽減され、正準語順と比べてもさほど負荷が大きくなることを示唆している。hS-OSV では filler-gap 間の線的距離が長く、hO-OSV では短いため、VWM の負荷は前者のほうが後者よりも高くなる。したがって、hO でかき混ぜ文の処理負荷が軽減されていたことは VWM の負荷の違いによって説明される。VWM の負荷の違いに対する脳活動の変化は語順 × 重名詞句の交互作用として同定されるが、この活動パターンは左 op9 のみで見られた。左 op9 の活動は hS-OSV に対して選択的に増加しており、これは filler と gap のあいだにおける VWM システムの活動を反映していると解釈できる。一方、左 PO および pMTG は名詞句の重さにかかわらず OSV に対して SOV よりも高い活動を示した。移動後の目的語名詞句と本来の生起位置のあいだの構造的距離は hO-OSV、hS-OSV で共通なので、これら 2 領域は依存関係を持つペア間の構造的距離に応答する領域であると考えられる。要素間の線的距離は文の意味に対する決定要因ではなく、構造的距離のみが文の意味の計算に関わる。たとえば “Instinctively, eagles that fly swim.” という文において副詞 *instinctively* と線的距離がより近い動詞は *fly* であるが、この副詞は構造的距離がより近い動詞 *swim* と関連付けられる (Chomsky, 2013)。PO および pMTG という 2 つの領

域は構造的距離に応答することから、言語処理においてより中核的な役割を果たしていると考えられる。一方、左下前頭回に非常に近いものの細胞構築学的に異なる領域である op9 は、文中で依存関係を持つ要素間の線的距離に応答する。本研究の結果は構造的距離と線的距離の神経基盤が分離していることを示しており、統語処理と VWM が共通のリソースに支えられているという立場 (Just & Carpenter, 1992) ではなく、むしろ統語処理と VWM が異なるシステムを持つという立場 (Waters & Caplan, 1996; Caplan & Waters, 1999) を支持するものといえる。

参考文献

- Amunts, K., Lenzen, M., Friederici, A. D., Schleicher, A., Morosan, P., Palomero-Gallagher, N., & Zilles, K. (2010). Broca's region: novel organizational principles and multiple receptor mapping. *PLoS Biol*, **8**, e1000489.
- Caplan, D., & Waters, G. S. (1999). Verbal working memory and sentence comprehension. *Behav Brain Sci*, **22**, 77-94.
- Chomsky, N. (2013). Problems of projection. *Lingua*, **130**, 33-49.
- Gibson, E. (1998). Linguistic complexity: locality of syntactic dependencies. *Cognition*, **68**, 1-76.
- 岩渕俊樹・水落（遠藤）智美・幕内充（2015）. 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.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: individual differences in working memory. *Psychol Rev*, **99**, 122-149.
- Kinno, R., Kawamura, M., Shioda, S., & Sakai, K. L. (2008). Neural correlates of noncanonical syntactic processing revealed by a picture-sentence matching task. *Hum Brain Mapp*, **29**, 1015-1027.
- Koizumi, M., Kim, J., Kimura, N., Yokoyama, S., Sato, S., Horie, K., & Kawashima, R. (2012). Left inferior frontal activations differentially modulated by scrambling in ditransitive sentences. *Open Med Imaging J*, **6**, 70-79.
- Kondo, K. & Yamashita, H. (2011). Why speakers produce scrambled sentences: An analysis of a spoken language corpus in Japanese. In H. Yamashita, Y. Hirose, J. L. Packard (eds.), *Processing and Producing Head-Final Structures* (pp.195-217). New York: Springer.
- Makuuchi, M., Bahlmann, J., Anwender, A., & Friederici, A. D. (2009). Segregating the core computational faculty of human language from working memory. *Proc Natl Acad Sci USA*, **106**, 8362-8367.
- Makuuchi, M., Grodzinsky, Y., Amunts, K., Santi, A., & Friederici, A. D. (2013). Processing noncanonical sentences in broca's region: reflections of movement distance and type. *Cereb Cortex*, **23**, 694-702.
- O'Grady, W., Miseon, L., & Miho, C. (2003). A subject-object asymmetry in the acquisition of relative clauses in Korean as a second language. *Studies in Second Language Acquisition*, **25**, 433-448.
- Paulesu, E., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, **362**, 342-345.
- Schumacher, E. H., Lauber, E., Awh, E., Jonides, J., Smith, E. E., & Koeppel, R. A. (1996). PET

evidence for an amodal verbal working memory system. *Neuroimage*, **3**, 79-88.

Waters, G. S., & Caplan, D. (1996). Processing resource capacity and the comprehension of garden path sentences. *Mem Cognit*, **24**, 342-355.

Yamashita, H. (2002). Scrambled sentences in Japanese: Linguistic properties and motivations for production. *Text*, **22**, 597-633.