

D-1

壮年期日本語母語話者のかき混ぜ文聴覚理解における処理負荷—事象関連電位を指標として—

Auditory comprehension of Japanese scrambled sentences by aging adults: An ERP study

葛西 有代^{1,2}, 木山 幸子¹, 新国 佳祐³, 時本 真吾⁴, 汪 敏¹,

宋 歌¹, 程 鸞雅¹, 上埜 高志⁵, 小泉 政利¹

¹東北大学, ²総合リハビリ美保野病院, ³新潟青陵大学, ⁴目白大学, ⁵東北福祉大学

要旨: 壮年期日本語母語話者が、基本語順である主語-副詞句-目的語-動詞-助動詞の語順の文（例：「友子が/先週の日曜日/太郎を/ほめた/らしい」）と、かき混ぜ語順である目的語-副詞句-主語-動詞-助動詞の語順の文（例：「太郎を/先週の日曜日/友子が/ほめた/らしい」）を用いた聴覚理解実験に参加し、脳波を測定した。基本語順文の主語（例：「友子が」）に比べてかき混ぜ文の目的語（例：「太郎を」）では刺激呈示後 900-950 ms で有意な陰性波が、基本語順文の目的語に比べてかき混ぜ文の主語では 900-950 ms で有意な陽性波が惹起した。これらは、統語処理に関わる *sustained anterior negativity* と P600 効果であると考えられ、基本語順文よりかき混ぜ文の処理負荷が高いことが示唆される。P600 効果としては比較的遅いことについては、刺激呈示が先行研究とは異なる聴覚呈示であったことが影響している可能性がある。

日本語は、「太郎が花子を追いかけた」のような主語-目的語-述語動詞の語順が基本であるが（以下、基本語順文）、他に「花子を太郎が追いかけた」のような目的語-主語-述語動詞という語順（以下、かき混ぜ文）もある。かき混ぜ文は基本語順文の目的語を文頭に移動して導かれ、元の位置には痕跡 (*t*) が残り、目的語が埋語 (*filler*)、痕跡位置が空所 (*gap*) となる「埋語-空所の依存 (*filler-gap dependency*)」の関係が仮定される（柴田ら, 2006）。日本語母語話者において、かき混ぜ文の理解は、基本語順文の理解に比べ、反応時間が長く、誤答率が高い（Tamaoka et al., 2005; Koizumi et al., 2014）。また Ueno and Kluender (2003) は、かき混ぜ文の理解に伴う事象関連電位 (*event-related potentials: ERP*) において、作動記憶への負荷を反映した陰性成分 (*sustained anterior negativity*) や高次な処理を行う課題で観察される陽性成分 (P600) が惹起すると述べている。

こうしたかき混ぜ文での処理負荷の増大は、とりわけ言語機能に障害がある場合により顕著な影響を及ぼし得る。失語症は、脳損傷によって生じる言語機能の障害であり、失語症者は構造が複雑な文は構造が単純な文に比べて理解しにくい（藤田, 高橋, 豊島, 1977; 萩原, 1995）。失語症のような後天的な言語障害は壮年期以降に生じることが多く、また、日常生活では音声言語がコミュニケーションの基本である。しかし、上述の先行研究はいずれも若年層の母語話者を対象とした視覚呈示の実験による知見であり、壮年期の話者による聴覚処理の研究はこれまでのところまったく行われていない。そこで本研究では、壮年期日本語母語話者の文の聴覚処理において語順がどのように影響するかの基礎知見を得るために、かき混ぜ文と基本語順文を比較し、ERP を指標として処理負荷について検討した。

方法

実験参加者

視覚・聴覚に障害のない一般的な社会生活を送っている右利きの日本語母語話者 18 名であった。平均年

年齢は 55.28±7.26 歳、レーヴン色彩マトリックス検査 (杉下, 山崎, 1992) の平均得点は 33.70±2.00 で、知的機能に問題はなかった。教育年数は平均 14.83±2.36 年であった。本研究は、東北大学川内南地区「人を対象とする医学系研究」倫理審査委員会と、総合リハビリ美保野病院倫理審査委員会による承認を得て行った。参加者には事前に研究の趣旨を説明し同意を得た。参加後に、一定額の謝金を支払った。

刺激文

(1) のような、基本語順文 48 文とかき混ぜ文 48 文を用意した。基本語順文は主語 (第 1 文節) 一副詞句 (第 2 文節、第 3 文節) 一目的語 (第 4 文節) 一動詞+助動詞「らしい」(第 5 文節) の語順、かき混ぜ文は目的語 (第 1 文節) 一副詞句 (第 2 文節、第 3 文節) 一主語 (第 4 文節) 一動詞+助動詞「らしい」(第 5 文節) の語順とした。主語・目的語は共に有生物 (人の名前) を、動詞は単語親密度が 4 以上の他動詞 (天野, 近藤, 1999) を 24 種類用いた。文の動詞位置で文末効果 (wrap up effect) が出るのを避けるために、動詞の後ろに「らしい」を付加した。これらの文がランダムに呈示されるようにした。

(1) a. 友子が 先週の 日曜日 太郎を ほめた らしい (基本語順文)
 Tomoko-ga sensyuu-no-nichiyoubi Taro-o home-ta rashii
 Tomoko-NOM last Sunday-ADV Taro-ACC praise-PAST it seem that-AUX¹
 “It seemed that Tomoko praised Taro last Sunday.”

b. 太郎を 先週の 日曜日 友子が ほめた らしい (かき混ぜ文)
 Taro-o sensyuu-no-nichiyoubi Tomoko-ga home-ta rashii
 Taro-ACC last Sunday-ADV Tomoko-NOM praise-PAST it seem that-AUX
 “It seemed that Tomoko praised Taro last Sunday.”

刺激文は、日本語標準語を母語とする女声話者により、ややゆっくり録音された。praat (Boersma & Weenink, 2018) と Audacity (version 2. 2. 2, Free, open source, cross-platform audio software) を使い、主語と目的語 (第 1 文節と第 4 文節) は全て 980ms、動詞は 3 モーラ 600ms、4 モーラ 800ms、5 モーラ 1000ms、助動詞「らしい」は 600ms に編集した。副詞句はモーラ数が一定でないため編集しなかった (第 2 文節は平均 923.37±142.85ms、第 3 文節は平均 709.88±217.36ms)。主語と目的語の音の高さ (以下、Pitch) に有意な差はなかった ($t=1.092$, $p=0.278$, $d=0.111$, 95%CI [-1.237, 4.260])。各文節の間を 100ms とし文を構成し、聴覚呈示した。参加者が文を理解していることを確かめるために、各刺激文の後に質問を聴覚呈示した。質問は、各刺激文に対して主語 (例:「太郎がほめましたか」)、目的語 (例:「太郎をほめましたか」)、副詞句 (例:「先週の日曜日のことですか」)、動詞 (例:「ほめましたか」) の 4 種類を問うものを用意した。日本語標準語を母語とする男声話者が録音し、ランダムに呈示されるようにした。

手続き

脳波は課題開始時から課題終了時まで記録した。実験と機器の制御には Python (ver.2.7.3) を用いた。参加者は正面のモニターに表示された注視点を見ながら、前方のスピーカーから音声呈示される刺激文や質問文を聞いて、ボタン (Cedrus 製 Response Pads for fMRI Model RB-540) を押して「はい」または「い

¹ 本研究で使用する略号は次の通りである: NOM: 主格、ADV: 副詞、ACC: 対格、PAST: 過去、AUX: 助動詞

いえ」の応答をした(図1)。練習7試行後、本試行96試行を行った。

脳波計測

NEURO SCAN (A COMPUMEDICS COMPANY 1850 Paseo del Norte, Suite101 El Paso, Texas, USA (915) 845-5600), NuAmps (Digital Amplifier Model:7181, Voltage:5V, Power:2.5W) を用い、国際10-20法に基づいて配置した32のAg/AgCl電極(Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FC5, FC1, FCz, FC2, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, CP5, CP1, CP2, CP6, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, O2, Iz, VEOG, HGOG)により計測した。脳波測定用の帽子を使用し、電極用ジェルを頭皮に付け電極を設置した。平均電位基準法を用い、両耳朶から記録した電位の平均値を基準とした。電極間抵抗値は原則5kΩ未満になるようにした。

分析

正答率と反応時間は、線形混合効果(linear-mixed effect: LME)モデルにより分析した(Baayen, 2008)。正答率は、語順と質問の種類を固定要因、参加者と各刺激文をランダム要因とした。反応時間では、正答した反応のみを分析の対象とし、語順と質問の種類を固定要因、参加者と各刺激文をランダム要因とした。分析はR vers. 3.6.1上でパッケージlme4(Bates, Maechler, Bolker, & Walker, 2014)およびlmerTest(Kuznetsova, Brockhoff, & Christensen, 2014)を用いた。検定の有意水準は5%とした。

脳波の解析には、MATLAB上で処理されるEEG Lab(Swartz Center for Computational Neuroscience, UCSD, U.S.)を用いた。前処理は、全データを250Hzにダウンサンプリングし、1Hz以下の低周波成分を除去するためにハイパスフィルタを適用し、商用電源の交流周波数に由来するアーチファクトの低減を行った。各領域の-700msから1600msをエポック化した。その後独立成分分析を実施し、IC Labelで脳活動由来の可能性が70%未満で、かつ推定残差(residual variance)が15%を超える独立成分(IC)を除去した。残ったデータに対してベースライン補正及び加算平均を行った。質問文の正誤に関わらず、全試行を分析の対象とした。集団解析はMonte Carlo/permutationテストにより有意水準5%で統計分析を行い、cluster correctionで補正した。ベースラインは各文節の呈示開始前100msから呈示開始時とした。

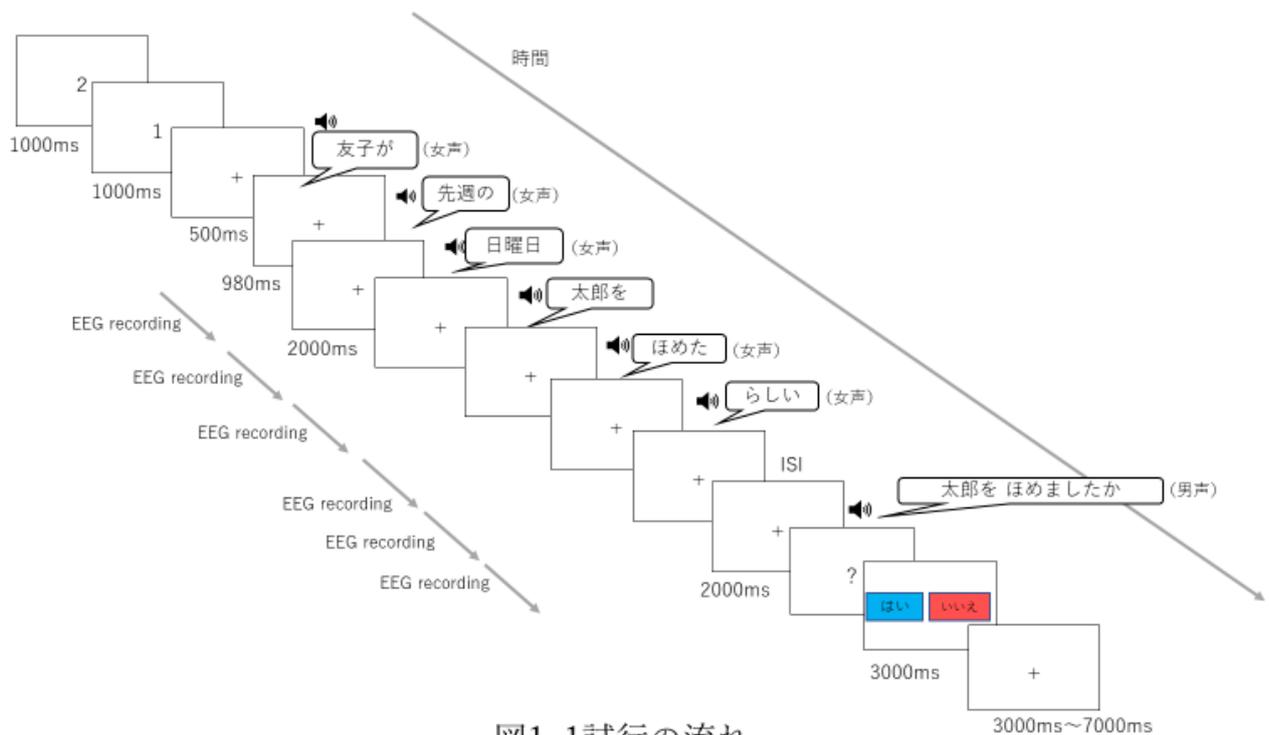


図1. 1試行の流れ

結果

正答率・反応時間

基本語順文とかき混ぜ文の正答率と反応時間(表 1) について LME を適用した結果 (表 2、表 3)、語順による差は有意ではなかったが、動詞を問う質問の正答率は、主語を問う質問の正答率より有意に正答率が高かった ($z = 2.424, p = 0.010$)。

ERP

まず第 1 文節の比較では、基本語順文の主語に比べてかき混ぜ文の目的語において、潜時帯 900-950 ms で頭頂部と左右側頭部で有意な陰性波が惹起した(図 2、図 3)。次に、第 4 文節の比較では、基本語順文の目的語に比べてかき混ぜ文の主語において、潜時帯 900-950 ms で全体にわたって有意な陽性波が惹起した(図 4、図 5)。さらに第 5 文節の動詞句の比較では、動詞呈示後 50-100 ms で前頭部・頭頂部・左右側頭部にわたって有意な陰性波が惹起し、助動詞「らしい」呈示後 800-850 ms で左側頭部から後頭部でかき混ぜ文において基本語順文に比べて有意な陰性波が観察された (図 6 から図 9)。

表 1. 平均正答率 (%) と平均反応時間 (ms)

語順	平均正答率	平均反応時間
基本語順文	94.33 (5.23)	659.70 (489.93)
かき混ぜ文	90.97(6.59)	696.52 (618.13)

注: 平均のカッコ内は標準偏差

表 2. 正答率に影響を及ぼす語順と質問の種類の影響

		推定値	95% CI [LL, UL]	z	p
(切片)		2.737	[2.151, 3.324]	9.150	<0.001
語順		-0.472	[-1.076, 0.132]	-1.531	0.126
質問の種類 (基準: 主語)	目的語	0.092	[-0.569, 0.754]	0.274	0.784
	動詞	1.803	[0.345, 3.260]	2.424	0.015
	副詞句	0.850	[-0.162, 1.862]	1.646	0.010
語順×質問の種類 (基準: 主語)	目的語	-0.367	[-1.217, 0.483]	-0.846	0.398
	動詞	14.865	[-112.582, 142.311]	0.229	0.819
	副詞句	0.109	[-1.227, 1.445]	0.160	0.873

注: CI: 信頼区間, LL: 下限, UL: 上限

表 3. 反応時間に影響を及ぼす語順と質問の種類を検討

		推定値	95% CI [LL, UL]	t	p
(切片)		-0.047	[-0.267, 0.261]	0.430	0.670
語順		0.066	[-0.106, 0.240]	0.756	0.450
質問の種類 (基準: 主語)	目的語	0.049	[-0.105, 0.204]	0.633	0.527
	動詞	0.013	[-0.175, 0.201]	0.133	0.894
	副詞句	-0.035	[-0.225, 0.154]	0.366	0.715
語順×質問の種類 (基準: 主語)	目的語	-0.012	[-0.233, 0.208]	0.111	0.912
	動詞	0.052	[0.218, 0.322]	0.377	0.706
	副詞句	0.054	[-0.216, 0.324]	0.394	0.694

注: CI: 信頼区間, LL: 下限, UL: 上限

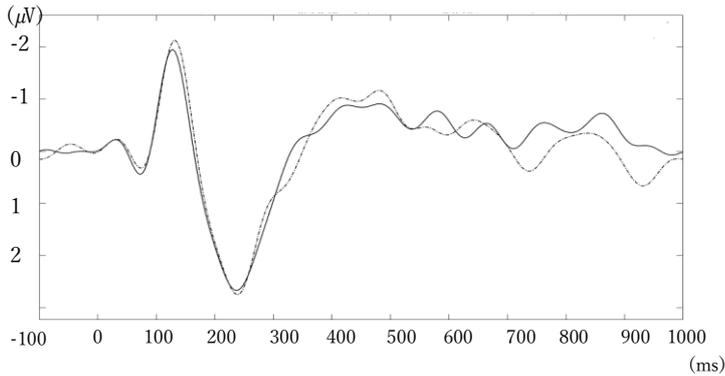


図2. 基本語順文の主語(破線)・かき混ぜ文の目的語(実線)の総加算平均波形。15Hz以下は除外した。

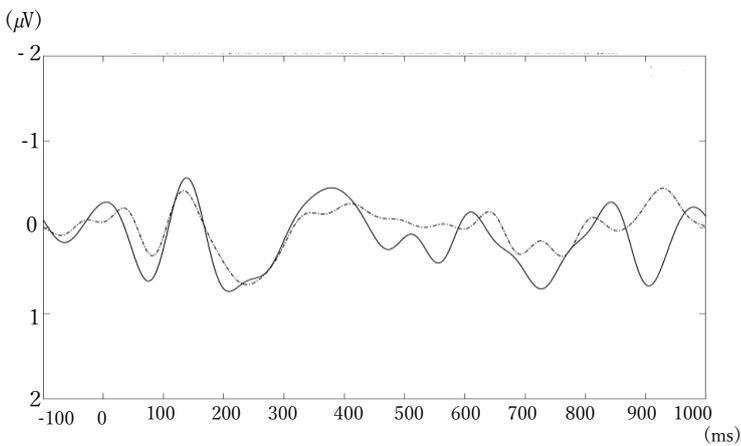


図4. 基本語順文の目的語(破線)・かき混ぜ文の主語(実線)の総加算平均波形。15Hz以下は除外した。

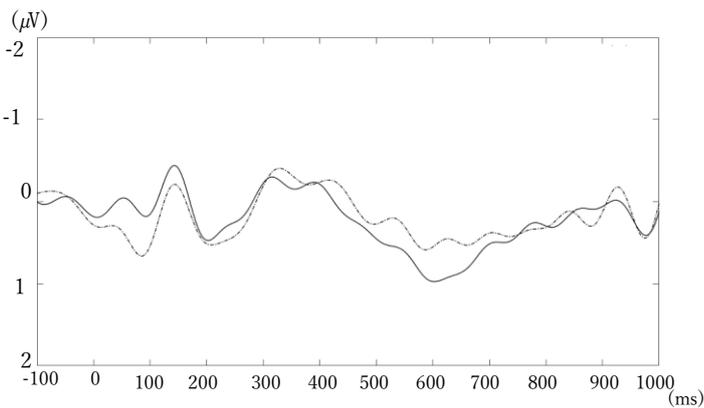


図6. 基本語順文の動詞(破線)・かき混ぜ文の動詞(実線)の総加算平均波形。15Hz以下は除外した。

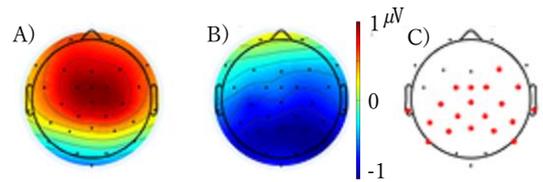


図3. 第1文節の刺激呈示後900-950msの頭皮上電位分布 A) 基本語順文の主語(主語-副詞句-目的語-動詞句)、B) かき混ぜ文の目的語(目的語-副詞句-主語-動詞句)、C) 基本語順文とかき混ぜ文の比較、赤:頭皮上電位に有意な差が認められた電極、黒:認められなかった電極

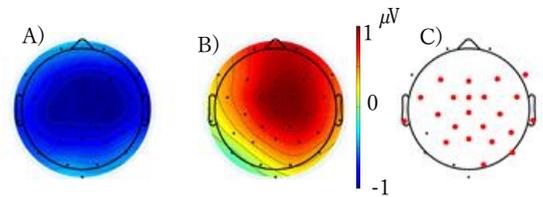


図5. 第4文節の刺激呈示後900-950msの頭皮上電位分布 A) 基本語順文の目的語(主語-副詞句-目的語-動詞句)、B) かき混ぜ文の主語(目的語-副詞句-主語-動詞句)、C) 基本語順文とかき混ぜ文の比較、赤:頭皮上電位に有意な差が認められた電極、黒:認められなかった電極

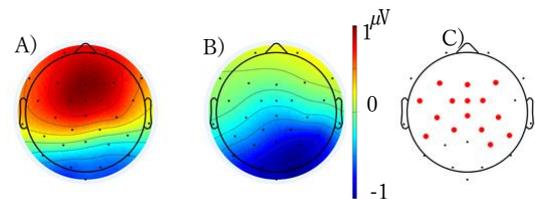


図7. 第5文節の刺激呈示後50-100msの頭皮上電位分布 A) 基本語順文の動詞(主語-副詞句-目的語-動詞-助動詞)、B) かき混ぜ文の動詞(目的語-副詞句-主語-動詞-助動詞)、C) 基本語順文とかき混ぜ文の比較、赤:頭皮上電位に有意な差が認められた電極、黒:認められなかった電極

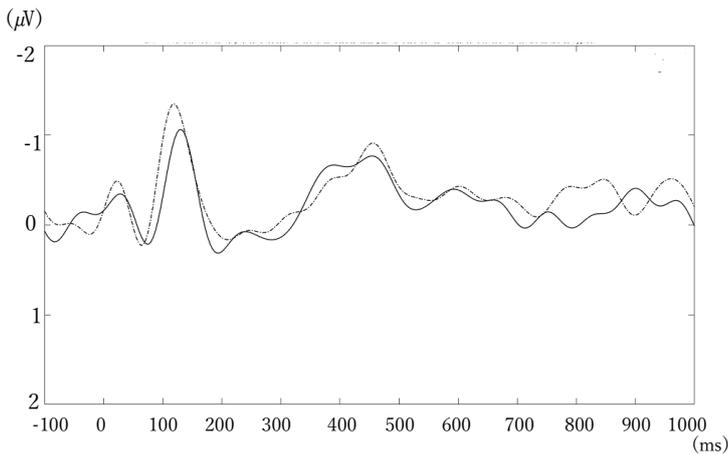


図 8. 基本語順文の助動詞「らしい」(破線)・かき混ぜ文の動詞「らしい」(実線)の総加算平均波形。15Hz 以下は除外した。

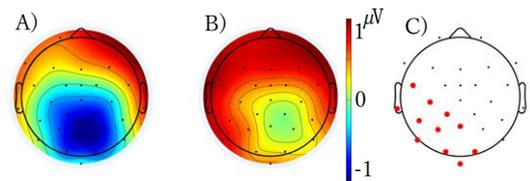


図 9. 助動詞「らしい」呈示後 800-850ms の頭皮上電位分布 A) 基本語順文の助動詞(主語-副詞句-目的語-動詞-助動詞)、B) かき混ぜ文の助動詞(目的語-副詞句-主語-動詞-助動詞)、C) 基本語順文とかき混ぜ文の比較、赤：頭皮上電位に有意な差が認められた電極、黒：認められなかった電極

考察

壮年の日本語母語話者が聴解により日本語他動詞文を処理する実験の結果、正答率と反応時間に語順による差は認めなかった。聴覚による文処理でかき混ぜ文が基本語順文に比べ正答率が低く反応時間が長いという Koizumi et al. (2014) の研究を支持する結果ではなかった。その理由としては、本研究では、今後失語症者に同様の課題を適用することを見込んで実験計画を立てたため、文をゆっくり呈示したこと、質問が易しかったことが考えられる。

ERP の結果では、語順による差が認められた。filler であるかき混ぜ文の目的語で基本語順文の主語に比べ有意な陰性波が惹起した。これは sustained anterior negativity (Ueno & Kluender, 2003; 安永, 2007) と解釈できる。また、gap の直前に位置するかき混ぜ文の主語において基本語順文の目的語に比べ有意な陽性波が惹起し、助動詞「らしい」においてもかき混ぜ文で基本語順文に比べ有意な陽性波が惹起した。これらは高次の言語処理を行う課題で観察される P600 効果 (松本, 2016) であると考えられる。さらに、gap 後に位置する動詞においては、かき混ぜ文で基本語順文に比べ有意な陰性波が認められた。これは anterior negativity (Ueno & Kluender, 2003) であると考えられる。sustained anterior negativity、P600、anterior negativity は、基本語順文に比べかき混ぜ文の処理負荷が高いことを反映するとされており (Ueno & Kluender, 2003; Yasunaga, Yano, Yasugi, and Koizumi, 2015)、本研究は先行研究を支持する結果となった。しかし、本研究において観察された陽性波は、P600 として解釈するにはやや遅い 900-950ms の時間帯で観察されている。これは、日本語のかき混ぜ文を視覚 (文字) 呈示した Ueno & Kluender, (2003) や、カクチケル語の複数語順におけるかき混ぜ文を聴覚 (音声) 呈示した Yasunaga.et.al. (2015) より遅い。この理由としては、主語・目的語を平均的な発話速度よりも遅い速さで聴覚呈示したこと、それに伴い助詞が呈示される時間も遅くなっていたこと、参加者が先行研究よりも高齢であったことなどが影響したためと考えられる。P600 は先行研究より遅い潜時帯で観察されたが、gap 後の動詞呈示時に生じた anterior negativity は Ueno & Kluender, (2003) よりも早い潜時帯で観察された。これは、かき混ぜ文の聴解では主語・目的語の処理には助詞の知覚が重要であるが、動詞の処理では語頭の音節やモーラを聴覚的に知覚した非常に早い段階で動詞であると認識され統語的な処理がなされることを示唆している。

以上のように、本研究は、日本語の音声言語のコミュニケーションにおいて、壮年期の母語話者が基本語順文よりかき混ぜ文において処理負荷をともなって処理していることを例証した。今後、失語症など患者の文理解の障害について研究し、効果的なりハビリテーションの方法を検討する上で基礎的な知見となると考えられる。

謝辞: 実験にご参加くださった皆様に深謝する。実験の実施にご協力くださった、直江大河さん、鈴木秀利さん、外館洗平さん、細越恵美子さん、古内いづみさん、大沢美穂さん、八木澤早紀さん、松原亜矢さんに深謝する。本研究は日本科学協会の 2019 年度 笹川科学研究助成 実践研究部門と、日本学術振興会 科学研究費基盤研究 (S) 19H05589 による助成を受けた。

参考文献

天野成昭, 近藤公久. (1999). *NTT データベースシリーズ日本語の語彙特性*, 東京: 三省堂.

Baayan, R. H. (2008). *Analyzing linguistic data: A practical introduction to statistics using R*. New York: Cambridge University Press.

Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1-6. Retrieved from

<http://CRAN.R-project.org/package=lme4>Kuznetsova, Brockhoff, & Christensen, 2014

Boersma, P., & Weenink, D. (2018). Praat: doing phonetics by computer. Version 6.0.37. Online: <http://www.praat.org/>.

藤田郁代, 高橋康子, 豊島経子. (1977). 失語症者における構文の理解の構造, *聴覚言語障害*, 6, 151-161.

萩原裕子. (1995). 文法の障害. *認知心理学 3 言語*. 東京: 東京大学出版会, 109-127.

Koizumi, M., Yasugi, Y., Tamaoka, K., Kiyama, S., Kim, J., Sian, J. E. A., Matzar, L. P. O. G., (2014). On the (non)universality of the preference for subject-object word order in Kaqchikel Maya. *Language*, 90(3), 722-736.

Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., Christensen, R. H. B. (2015). lmerTest: Tests for random and fixed effects for linear mixed effect models (lmer objects of lme4 package). R package version 2.0-6. Retrieved from <http://CRAN.R-project.org/package=lmerTest>.

松本敦. (2016). 認知活動との関連を探る 1: 事象関連電位. 開一夫, 金山範明編, 河内山隆紀, 松本敦, 宮越誠著, *脳波解析入門*. 東京大学出版会, 97-124

柴田寛, 杉山磨哉, 鈴木美穂, 金情浩, 行場次朗, 小泉政利. (2006). 日本語節内かき混ぜ文の痕跡位置周辺における処理過程の検討. *認知科学* 13(3), 301-315.

杉下守弘, 山崎久美子. (1992). *日本版レーヴン色彩マトリックス検査手引*. 日本文化科学社

Tamaoka, K., Sakai, H., Kawahara, J., Miyaoka, Y., Lim, H., & Koizumi, M. (2005). Priority information used for the processing of Japanese sentences: Thematic roles, case particles or grammatical functions? *Journal of Psycholinguistic Research*, 34, 281-332

Ueno, M., & Kluender, R. (2003). Event-related brain indices of Japanese scrambling. *Brain and Language*, 86, 243-271.

安永大地. (2007). 言語要素間の関連づけ処理を構成する下位処理について—数量詞と名詞句との関連付けに着目した研究—. *九州大学言語学論集*, 28, 1-38.

Yasunaga, D., Yano, M., Yasugi, Y., & Koizumi Masatoshi., (2015). Is the subject-before-object preference universal? An event-related potential in the Kaqchikel Mayan language. *Language, Cognition and Neuroscience*, 30(9), 1209-1229.