

タロコ語文理解の処理負荷に及ぼす語順の影響： ERP および瞳孔反応を指標として

Word Order and Sentence Processing in Truku Language: Evidence from ERPs and Pupillary Responses

新国 佳祐[†], 矢野 雅貴^{†‡}
Keiyu Niikuni, Masataka Yano

[†] 東北大学, [‡] 日本学術振興会

Tohoku University, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)

keiyu@cog.is.tohoku.ac.jp

Abstract

This study explored the effects of word order (VOS order vs. SVO order) on the cognitive loads required to process Truku sentences. Truku language follows the verb-object-subject (VOS) basic word order, which allows us to investigate whether the subject-before-object (SO) word order is universally preferred to the object-before-subject (OS) order in sentence comprehension. We conducted two experiments in which the event-related brain potentials (ERP)/pupillary responses were recorded while the participants, who are native speakers of Truku, listened to Truku sentences. The results of the ERP experiment showed that SVO word-order sentences elicited a larger P600 effect than VOS order ones, suggesting that the word-order preferences in sentence comprehension are regulated by the language-specific (not universal) aspects of the basic word order.

Keywords — sentence comprehension, Truku language, word order, ERP, pupillometry

1. 目的

個別言語にはそれぞれに固有の基本語順が存在する。例えば、日本語は「太郎が花子を殴った」のような「S（主語）O（目的語）V（動詞）」語順が基本語順であると考えられており、基本語順から逸脱した「OSV（花子を太郎が殴った）」のような語順の文は、基本語順の文と比較して、処理に要する認知的負荷が大きいことが先行研究によって示されている[1]。日本語に限らず多くの言語は、主語が目的語に先行する SO 語順を基本語順に持ち、それらの言語においては OS 語順よりも SO 語順が文処理の際に選好されることが確かめられている[2,3,4]一方で、目的語が主語に先行する OS 語順を基本語順とする言語において、OS 語順が選好されるのか、それとも SO 語順が選好されるのかを実証的に示した研究は少ない。この点を明らかにすることは、言語にかかわらない人間の普遍的な認知特性が語順の選好性を規定している（普遍認知仮説）のか、それとも言語個別のパラメタ（基本語順）が語順の選好性を規定している（個別文法仮説）のかという問題の

解決につながる。

本研究では、オーストロネシア語族セデック語の一つであり、VOS 語順を基本語順とするタロコ語の文理解において、SO 語順文/OS 語順文の処理にかかる負荷を比較することにより、普遍認知仮説 vs. 個別文法仮説の問題にアプローチする。タロコ語は以下(1a,b)のように、基本語順である VOS の S を V の前に移動することによって、SVO 語順を派生できる[5]。

(1) Actor Voice (AV)

“The red kicks the blue”

- a. VOS: qmqah emqliyang niyi ka
kick.AV blue DET NOM
embanah niyi
red DET
- b. SVO: embanah niyi o qmqah
red DET FOC kick.AV
emqliyang niyi
blue DET

ここで、タロコ語は、Actor 項（上記では，“the red”）を主語として扱う Actor Voice (AV) 文の他に、Goal 項を主語として扱う Goal Voice (GV) 文が可能である。

(2) Goal Voice (GV)

“The red kicks the blue”

- a. VOS: qqahan embanah niyi ka
kick.GV red DET NOM
emqliyang niyi
blue DET
- b. SVO: emqliyang niyi o qqahan
blue DET FOC kick.GV
embanah niyi
red DET

実験では、語順 (VOS/SVO) に加えて Voice (AV/GV) を実験要因として操作し、文を聴いている際の ERP (事象関連電位) ならびに瞳孔反応を計測することにより、文処理中の認知的負荷についてオンライン指標に基づき検討する。SO 語順が基本語順である言語においては、SO 語順文理解時と比較して OS 語順文理解時に、文の統語的処理負荷の大きさを反映するとされる ERP 成分である P600 成分の振幅値が大きくなることが報告されている[6]。ERP 実験においてはこの P600 成分に着目し、タロコ語文理解の際にその振幅が条件間でどのように異なるのかを検討する。また、認知的な処理負荷の大きさは、瞳孔径の変化 (散大/縮小) からモニターできることが知られている[7,8]ことから、瞳孔反応計測実験においては、ERP 実験と同様の実験パラダイムのもと、文聴解時の瞳孔径変化量を条件間で比較する。

2. ERP 実験

方法

参加者 右利きのタロコ語母語話者 25 名 (男性 7 名, 女性 18 名, 平均年齢 61.5 歳, SD 12.5 歳) が実験に参加した。

材料 (1), (2)に示されるような他動詞文 48 文と、各刺激文が示す状況に関する絵を 48 枚用意した。刺激文に対応する 48 枚の絵のうち、24 枚は文の意味内容を正しく描写しており、残りの 24 枚は、例えば動作主と非動作主が逆になっているなどの理由で文の意味内容と絵が示す状況とが一致していなかった。

手続き 1 試行において、参加者は、語順 (VOS/SVO) × Voice (AV/GV) の 4 条件のいずれかに割り当てられた文をイヤホンを通して聴き、後続してモニターに視覚呈示される絵が文の意味内容と合致しているかをボタン押し反応により回答した。実験を通して参加者は 48 の刺激文を 4 条件下のいずれにおいても呈示されたため、合計の試行数は 192 試行となった。刺激文の呈示順序はランダムであった。文の呈示中はモニター中央に表示される注視点を常に凝視し、かつ瞬きおよび眼球運動を極力起こさないよう教示した。

EEG の記録 Brain Products 社製 QuickAmp (サンプリングレート 1000Hz) およびキャップマウントの Ag/AgCl 電極を用いて EEG を計測した。探索電極は 10-20 法における F3/4, C3/4, P3/4, O1/2, F7/8, T3/4, P7/8, Fz, Cz, Pz の 17 か所に、VEOG/HEOG 計測用の電極を左眼下/外側にそれぞれ設置した。オン

ラインでの EEG/EOG の記録には平均電位基準法を用い、オフラインで A1, A2 (左右耳朶) の平均値に再基準化した。記録は DC-200Hz のバンドパスフィルタをかけて実施し、記録中は電極インピーダンスを 10k Ω 以下に保った。

分析 刺激文の後に呈示される絵に対して正しく反応できていなかった試行を分析から除外した。ERP は、VOS/SVO 文構造における文末の S/O に当たる(1), (2)の下線部領域のオンセットにタイムロックして各試行の EEG 波形を加算平均することにより算出した。ERP 波形の算出にあたっては、まず各試行における分析対象領域オンセット-100ms~1000ms のデータを切り出し、0.1Hz-30Hz のバンドパスフィルタを適用した。次に、[9]に基づく独立成分分析を行い、アーチファクトとみなされる成分を波形から除外した後、-100ms~0ms をベースラインとして波形を補正し、参加者ごとに各条件で加算平均した。この際、 $\pm 100\mu V$ を超える振幅値サンプルを含む試行のデータは分析から除外した。

加算平均して得られた ERP 波形に対して、分析対象領域オンセットから 100-300ms, 300-500ms, 500-700ms, 700-900ms それぞれの時間窓における平均振幅値について、正中線に位置する電極部位 (Fz, Cz, Pz), 傍矢状洞部に位置する電極部位 (F3/4, C3/4, P3/4), 側頭部に位置する電極部位 (F7/8, T3/4, P7/8, O1/2) 分け、それぞれ語順 (VOS/SVO) と Voice (AV/GV) を参加者内要因に含む分散分析を行った。正中線電極の分析においては電極の前後位置 3 水準、それ以外の位置の電極の分析においては電極の前後位置 3 または 4 水準および左右位置 2 水準を分散分析の要因にそれぞれ含めた。分散分析においては必要に応じて Greenhouse-Geisser の ϵ による自由度調整を行った。

結果と考察

以下、分析時間窓ごとの主な統計解析の結果と、代表的な電極に関する全被験者の総加算平均結果を示す (図 1)。

100-300ms 時間窓 VOS 語順条件よりも SVO 語順条件で大きな陽性方向への波形のシフトを認める、正中線および傍矢状洞部での語順の主効果が有意であった (正中線: $F(1, 24) = 5.29, p < 0.05$ 傍矢状洞部: $F(1, 24) = 4.49, p < 0.05$)。

300-500ms 時間窓 頭頂部・後頭部を中心として頭皮領域全体的に、VOS 語順条件よりも SVO 語順条件で振幅値が大きいことを認める、全領域での語順の主効

果 (正中線: $F(1, 24) = 5.26, p < 0.05$, 傍矢状洞部: $F(1, 24) = 4.41, p < 0.05$, 側頭部: $F(1, 24) = 5.25, p < 0.05$) および語順×前後電極位置の交互作用 (正中線: $F(1, 24) = 9.85, p < 0.01$, 傍矢状洞部: $F(1, 24) = 19.73, p < 0.01$, 側頭部: $F(1, 24) = 11.28, p < 0.01$) が有意であった。また, SVO 語順条件>VOS 語順条件の振幅値の差が, AV 条件よりも GV 条件で大きいことを示唆する, 正中線・傍矢状洞部での語順×Voice の交互作用 (正中線: $F(1, 24) = 4.54, p < 0.05$, 傍矢状洞部: $F(1, 24) = 4.69, p < 0.05$) および傍矢状洞部と側頭部での語順×Voice×前後電極位置の交互作用 (傍矢状洞部: $F(2, 48) = 7.07, p < 0.05$, 側頭部: $F(3, 72) = 4.14, p < 0.05$) が有意であった。

500-700ms 時間窓 VOS 語順条件よりも SVO 語順条件で振幅値が大きいことを認める語順の主効果が側頭部において有意であった ($F(1, 24) = 4.26, p < 0.05$)。
700-900ms 時間窓 VOS 語順条件よりも SVO 語順条件で振幅値が大きいことを右半球においてのみ認める語順×左右電極位置の交互作用が, 傍矢状洞部で有意であった ($F(1, 24) = 8.84, p < 0.01$)。

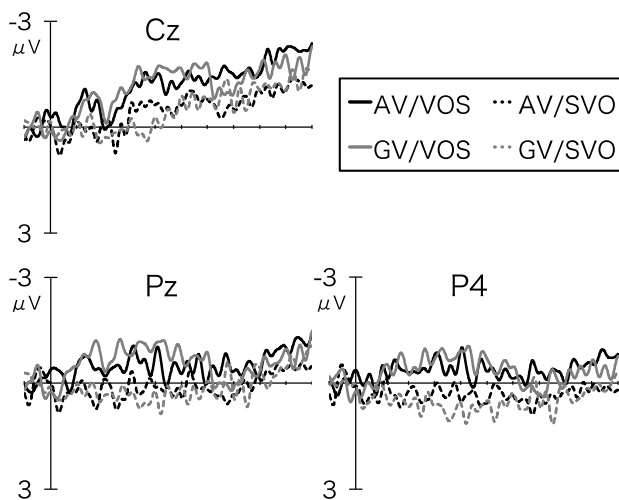


図1 条件ごとの ERP 総加算平均波形. 横軸は分析対象領域オンセット・100~1000ms 間の時間を表す (目盛り当たり 100ms).

以上のように, 全時間窓を通して, VOS 語順条件よりも大きな陽性方向への ERP 波形のシフトが SVO 語順条件で認められた。潜時帯はかなり早いものの, この陽性成分を P600 とみなせば, VOS 語順を基本語順とするタロコ語の文理解においては, OS 語順文よりも SO 語順文で処理にかかる負荷が大きいと結論することができる。さらに, 300-500ms 時間窓においては,

VOS 条件と比較した際の SVO 条件でのこの陽性成分の大きさが, AV 条件よりも GV 条件で大きいことを示す交互作用効果を得た。

3. 瞳孔反応計測実験

方法

参加者 タロコ語母語話者 14 名 (男性 5 名, 女性 9 名, 平均年齢 60.9 歳, SD 6.6 歳) が実験に参加した。

材料と手続き 用いた刺激文・絵と実験手続きは脳波実験と同一であった。ただし, 刺激音声はイヤホンではなくスピーカーを用いて呈示した。

瞳孔反応の計測 非装着型のアイトラッカー Tobii X3-120 (サンプリングレート 120Hz¹) を用いて文呈示中の瞳孔径 (mm) を計測した。

分析 全参加者の右眼の瞳孔径を分析に用いた。分析対象時間窓は, (1), (2)の下線部領域のオンセットから, 200ms-1400ms 間に設定した[8]。実験全体を通して, 欠測サンプルが多い参加者 7 名分のデータを分析から除外した。また, サンプル欠測率が 50%を超える試行のデータを分析から除外した。

次に, [8]に従い, 瞳孔径の計測サンプルを参加者ごとに標準化した後, 分析時間窓中の経過時間を説明変数, 標準化瞳孔径を目的変数とする単回帰分析により算出された傾きの値を, 瞳孔径変化量として以降の従属変数に採用した。瞳孔径は認知的な負荷が大きくなると散大する[7,8]ことから, この瞳孔系変化量の値が大きいほど, 分析対象領域の語の入力による認知的負荷の増大量が大きいと解釈できる。

算出された瞳孔径変化量について, 語順 (VOS/SVO) と Voice (AV/GV) を固定効果 (各水準を-0.5/0.5 にコーディング), 参加者と刺激文をランダム効果とする線形混合効果モデル分析を行った。上記二つの固定効果については交互作用を仮定し, さらに試行の系列順序および文・絵一致判断課題の正誤を固定効果としてモデルに投入した。

結果と考察

混合効果モデル分析の結果, Voice の主効果のみが有意であり ($\beta = 0.046, SE = 0.022, t = 2.03, p < 0.05$), 語順および語順×Voice の交互作用は有意でなかった ($ps > .10$)。最終モデルの推定値をもとに算出した条件ごとの平均瞳孔径変化量を図 2 に示す。

¹ アイトラッカーの仕様により, 瞳孔径計測はサンプリングレート 40Hz で行われた。

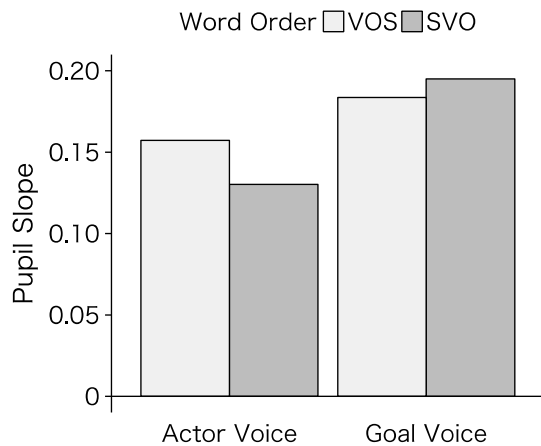


図2 モデルから推定された条件ごとの平均瞳孔径変化量

ERP 実験でみられた SVO 語順文>VOS 語順文の処理負荷量を示す結果は、瞳孔反応を指標とした場合には確認できなかった。しかしながら、ERP 実験における 300-500ms 潜時帯の結果と本実験の結果はいくらか整合的である。すなわち、(交互作用効果は有意ではないものの、) Voice 条件別に見ると、AV 条件では正の瞳孔径変化量(散大量)が VOS 条件>SVO 条件であるのに対して、GV 条件では SVO 条件>VOS 条件であるという非対称性がみられる。

4. 総合考察

ERP 実験においては、文処理の際に VOS 語順文よりも SVO 語順文で大きな陽性成分が観察された。この成分を P600 成分とみなす限りにおいて、OS 語順を基本語順に持つタロコ語では、SO 語順でなく OS 語順が処理の際に選好されると考えることができる。したがって、これまで主に SO 語順を基本語順とする言語を対象とした先行研究において確認されてきた SO 語順選好は、言語普遍的なものでなく、基本語順からの派生に伴う文の統語構造の複雑化が文処理における負荷の大きさ(選好性)の大部分を規定すると考えてよいだろう。この結論は、第1節で述べた個別文法仮説と整合的である。

ただし、ERP 実験における 300-500ms 時間窓分析および瞳孔反応計測実験の結果によって示された Voice による SVO 語順文-VOS 語順文間の処理負荷量差の非対称性は、語順の選好性がかならずしも言語個別のパラメタによってのみ規定されていない可能性を示唆する。(1)、(2)からも分かるように、タロコ語 AV-SVO 文および GV-VOS 文では、agent (動作主)

項-patient (被動作主) 項がこの順序で出現するのに対して、AV-VOS 文および GV-SVO 文では patient 項-agent 項の順序で出現する。仮に、文処理に要求される負荷量が、基本語順からの逸脱の有無だけでなく、agent 項と patient 項の出現順序によっても影響を受ける(agent-patient の順が選好される)と仮定すると、上記の非対称性は説明可能である。すなわち、AV 条件では、VOS 文は基本語順であるという点で処理に有利だが、agent-patient がこの順で出現しない(SVO 文はこの順で出現する)ことによる不利が差し引かれた結果、処理にかかる総負荷量は SVO 文とそれほど変わらなくなる。対して、GV 条件では VOS 文は基本語順であるという点、agent-patient 順で項が出現する点いづれにおいても SVO 文より処理には有利であり、結果として総負荷量は SVO 文よりもかなり小さくなると考えれば、実験結果とうまく整合する。

agent 項、patient 項の相対的出現順序が文処理における負荷量を規定するという考え方は、まさに人間の普遍的認知特性によって語順の選好性が規定されるとする普遍認知仮説と一致する。ゆえに、本研究の結果は、個別文法仮説を支持する一方で、これら二つの仮説を二項対立的に捉えるのではなく、言語個別のパラメタと人間の普遍的認知特性の相互作用を仮定することで、人間の言語処理の様式をさらに深く理解することができる可能性を示唆している。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15H02603 (研究代表者: 小泉政利) の助成を受けたものです。また、実験装置の一部(アイトラッカー)は、沖縄国際大学・里麻奈美先生が所有するものを使用させていただきました。

参考文献

- [1] 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*, Vol. 34, No. 3, pp. 281-332.
- [2] Bader, M., & Meng, M., (1999) "Subject-object ambiguities in German embedded clauses: An across-the-board comparison", *Journal of Psycholinguistic Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 121-143.
- [3] Kaiser, E., & Trueswell, J. C., (2004) "The role of discourse context in the processing of a flexible word-order language", *Cognition*, Vol. 94, No. 2, pp. 113-147.
- [4] Erdocia, K., Laka, I., Mestres-Missé, A., & Rodriguez-

- Fornells, A., (2009) "Syntactic complexity and ambiguity resolution in a free word order language: Behavioral and electrophysiological evidences from Basque", *Brain and Language*, Vol. 109, No. 1, pp. 1-17.
- [5] 月田尚美, (2009) "セデック語 (台湾) の文法", 博士論文
- [6] Ueno, M., & Kluender, R., (2003) "Event-related brain indices of Japanese scrambling", *Brain and Language*, Vol. 86, No. 2, pp. 243-271.
- [7] Hess, E. H., & Polt, J. M., (1964) "Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving", *Science*, Vol. 143, No. 3611, pp. 1190-1192.
- [8] Engelhardt, P. E., Ferreira, F., & Patsenko, E. G., (2010) "Pupillometry reveals processing load during spoken language comprehension", *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 63, No. 4, pp. 639-645.
- [9] Chaumon, M., Bishop, D. V. M., & Busch, N. A., (2015) "A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction", *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 250, pp. 47-63.