

B-2

形態統語的逸脱文に対する適応効果—事象関連電位を指標として—

矢野 雅貴¹・諏訪園 秀吾²・荒生 弘史³・安永 大地⁴・大石 衡聴⁵

¹九州大学, ²独立行政法人国立病院機構 沖縄病院, ³大正大学, ⁴金沢大学, ⁵立命館大学

masayano@kyudai.jp / <https://massayano.github.io>

1. はじめに

従来、人間の文理解は、入力された情報をボトムアップ式に処理していると考えられていたが(cf. Pickering & Gambi, 2018)、現在では、様々なレベル（音、語彙、統語、意味）で後続する情報を予測しながら文理解が行われているという証拠が報告されている(Altmann & Kamide, 1999; Dikker et al., 2009; Ito et al., 2018; Kamide et al., 2003; Lau et al., 2013; Wicha et al., 2004; Yano, 2018a, 2018b)。このような予測的な処理では、予測されていない情報が入力されると処理コストが増大するが、そのような情報に何度も接するうちに、予測する情報を修正することで（すなわち適応することで）、予測エラーを減らすことができると考えられる。例えば、Fine et al. (2013)は、ガーデンパス文を繰り返し呈示するとコントロール条件文と読み時間の差が実験中に小さくなることを報告している（ガーデンパス文：The experienced soldiers warned about the dangers conducted ... vs. コントロール文：The experienced soldiers who were told about the dangers conducted ...）。しかし、適応はどの程度柔軟に行われるのか（例えば、非文のような言語的表象がない入力に対しても適応をするのか）といった点は明らかになっていない。

2. 事象関連電位実験

本研究では、言語処理システムが形態統語的逸脱文に対して適応的な振る舞いを見せるかどうかを調べるために、正文と非文の確率を操作した事象関連電位実験を行った。適応するかどうかは、実験中の P600 の変化を指標とした。P600 は、言語刺激の呈示開始後 600 ms 辺りに頂点潜時を持つ陽性成分（Positivity）で、（形態）統語的な違反（格・一致・島の制約・束縛など）に対してその振幅が増大する（P600 効果）(Friederici et al., 1993; Nakagome et al., 2001; Nashiwa et al., 2007; Osterhout & Holcomb, 1993; Yano & Sakamoto, 2016)。実験中に非文のほうが正文より多く呈示されると、P600 効果が減衰することが報告されているが(Coulson et al., 1998; Gunter et al., 1997; Hahne & Friederici, 1999)、実験中に P600 効果がどのように変化するかは明らかになっていない。

2.1. 実験参加者

実験参加者は、東北大学または九州大学の大学生 20 名（女性 10 名、男性 10 名、平均年齢 21.5 歳、SD 1.5 歳）であった。全員が右利きで、正常な視力（矯正視力も含む）を持ち、言語障害・精神障害の報告はない。実験は、それぞれの大学の倫理委員会の承認を受けて行われた。

2.2. 実験文

(1)のような正文と非文を使用した。ターゲット文の試行数のバランスを取るため、非文低確率ブ

ロック（正文と非文が 4：1）と非文・正文同確率ブロック（正文と非文が 1：1）における正文・非文の割合は、(2)のようなフィラー文の数で操作した（2 文節 26 文、3 文節 52 文）。¹

- (1) a. 正文：バラが 枯れた。 NP が + 自動詞 （下線は関心領域）
b. 非文：バラを 枯れた。 NP を + 自動詞
- (2) フィラー文
a. 息子が 小学校に/*を 行った。
b. 清掃員が 窓*に/を 拭いた。

ターゲット文（52 ペア）は、ラテン方格法に従って 2 リストに分配し、それにフィラー文を追加した（各ブロックの各リスト 130 試行）。各参加者には、2 つのリストを別の確率ブロック（低確率／同確率）で呈示した。ブロックの順序とリストは参加者間でカウンターバランスを取った。²

2.3. 実験手順

刺激文は、Presentation (Neurobehavioral Systems)を使用して文節ごとに呈示した。刺激呈示時間(DOS)は 800 ms、刺激呈示間隔(ISI)は 100 ms であった。最終文節の呈示終了から 500 ms に反応キュー（◆）を呈示し、実験参加者には文が容認できるか判断し YES または NO のボタン(Cedrus, RB-740)を押すように教示した。各ブロックの最初に、実験と同じ正文・非文割合で 10 試行の練習試行を呈示した。正文・非文割合が操作されていることは実験参加者に伝えられていない。

2.4. 脳波の記録・分析

脳波の記録には、Brain Products 製の QuickAmp 及び Ag/AgCl 電極を用いた。探査電極は、頭皮上の 17 カ所（F3/4, C3/4, P3/4, O1/2, F7/8, T7/8, P7/8, Fz, Cz, Pz）、眼電図記録用の電極は、左眼下・左眼左に設置した。電極間抵抗値は 10 kΩ 未満であり、サンプリング周波数 1000 Hz、DC-200 Hz のオンラインフィルタで記録した。解析時に両耳朶から記録した電位の平均値に再基準化を行った。

解析は、第 2 文節の-100 ms から 900 ms までをエポック化し、30Hz のハイカットフィルタを適用した（図 1 は 10Hz のハイカットフィルタをかけてある）。そのデータに対してベースライン補正を行った。その際、 $\pm 80 \mu\text{V}$ を超える電位を含む試行は、アーチファクトの混入があるとみなし除外した。

統計分析は、文法性（正文／非文）× 確率（低確率／同確率）× 試行順序（1-130 試行）を固定因子、実験参加者、実験文セット、電極位置（Cz, Pz, C3/4, P3/4, P7/8, O1/2）をランダム因子、300-500 ms、500-700 ms、700-900 ms における平均振幅を従属変数とした線形混合モデルを行った。正文は-0.5、非文は 0.5 でコード化しており、偏回帰係数は正の値のときは非文のほうが陽性、負の値のときは非文のほうが陰性であることを示す。最適モデルは、最大モデル(3)から順に、より単純なモデルと *lme4* の *anova* 関数で比較することにより選択した（後進ステップワイズ法）。*p* 値は、

¹ (1b)の第 1 文節呈示中に容認性を判断することができないように、フィラー文には「NP を他動詞。」が含まれる。

² ブロックの順序の効果は見られなかったため、その要因を固定因子として含まない統計結果を報告する。

lmerTest の *lmer* 関数で出力したものである。交互作用が見られた場合、各水準において下位検定を行った。連続量(試行順序)を含む交互作用が見られた場合、平均から $\pm 1SD$ の単純傾斜(*simple slope*)を求めた。

(3) $lmer(\text{MeanAmp} \sim G * P * TO + (1 + G * P | \text{Participant}) + (1 + G * P | \text{Set}) + (1 | \text{ch}), \text{data} = \text{data})$

G = 文法性、P = 確率、TO = 試行順序

2.5. 予測

もし言語処理システムが形態統語的逸脱に対して適応するとすれば、同確率ブロックの非文に対する P600 の振幅値の減少によって P600 効果は実験中に減衰すると予測される。その結果、非文に対する P600 効果は、同確率ブロックのほうが低確率ブロックよりも小さいと予測される。

2.6. 結果

容認度：文法性の効果が有意であり、正文のほうが非文より容認度が高かった($\beta = -8.88, t = -25.13, p < 0.01$)。文法性 × 確率 × 試行順序の交互作用が有意であったため($\beta = 1.49, t = 2.58, p < 0.01$)、下位検定を行ったところ、低確率ブロックの正文($\beta = 1.04, t = 2.58, p < 0.01$)と同確率ブロックの非文($\beta = 1.04, t = 2.58, p < 0.01$)において呈示順序効果があり、実験中に容認性が上昇した。

事象関連電位(ERP)：

- 300-500 ms：文法性 × 試行順序の交互作用と文法性 × 確率 × 試行順序の交互作用があり、同確率ブロックの後半において、正文に比べて非文で陰性効果が見られた。
- 500-700 ms：文法性の主効果が有意傾向で正文に比べて非文で P600 効果が見られた(表 1 左)。文法性 × 確率 × 呈示順序の交互作用があり、低確率ブロックでは P600 効果が見られたが、同確率ブロックでは見られなかった。
- **700-900 ms**：文法性 × 確率の交互作用が有意傾向であり、低確率ブロックのほうが同確率ブロックよりも非文に対する P600 効果が大きかった(表 1 右)。また、文法性 × 確率 × 試行順序が有意であり、ブロック毎に下位検定を行ったところ、両方のブロックで文法性 × 試行順序の効果が見られた(低： $\beta = 1.27, t = 4.56, p < 0.01$; 同： $\beta = -1.57, t = -5.72, p < 0.01$)。この結果は、低確率ブロックでは P600 効果が実験中に増大しているのに対して、同確率ブロックでは P600 効果が減少していることを示す。どの条件がこの P600 効果の増大・減少に影響しているかを調べるために各条件において試行順序の効果を検討したところ、すべての条件で試行順序の効果が有意であった(図 2)：低確率ブロックでは非文で P600 の増大、正文で P600 の減少が見られ、同確率ブロックでは逆に非文で P600 の増大、正文で P600 の減少が見られた。

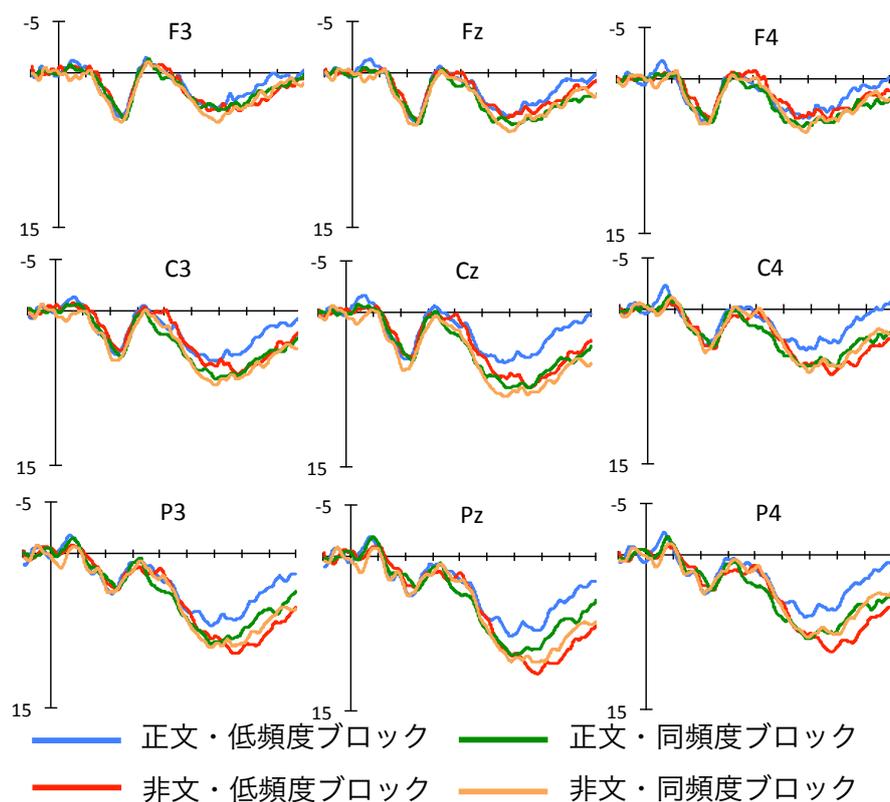


図 1. 第 2 文節における全試行の加算平均波形

横軸は時間 (1 目盛り 100 ms)、縦軸は電位量 (-5-15 μ v、陰性が上向き) を表す。

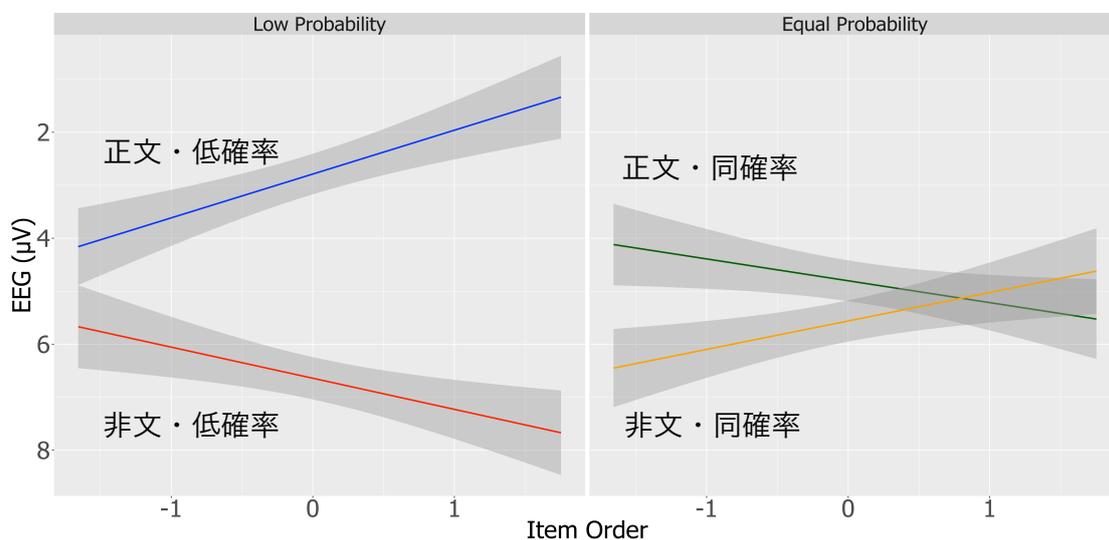


図 2. P600 の試行順序の効果.

横軸は試行順序 (z 値)、縦軸は電位量 (陰性が上向き) を表す。左が低確率ブロック、右が同確率ブロックの結果。

表 1. 500–700 ms (左) 及び 700–900 ms (右) における LME モデルの結果

	Estimate	SE	t	p		Estimate	SE	t	p
(Intercept)	6.76	0.83	8.12	< 0.01	(Intercept)	4.91	0.79	6.15	0.00
Probability (P)	0.52	0.88	0.58	0.56	Probability (P)	0.19	1.11	0.17	0.86
Grammaticality (G)	1.20	0.69	1.73	0.09 +	Grammaticality (G)	2.38	0.88	2.70	0.01 **
P × G	-1.2	1.35	-0.89	0.38	P × G	-3.00	1.63	-1.84	0.07 +
P × IO	-0.35	0.17	-1.95	0.05	P × IO	-0.2	0.19	-1.01	0.31
G × IO	-1.1	0.17	-6.21	< 0.01 ***	G × IO	-0.15	0.19	-0.75	0.45
P × G × IO	-2.57	0.35	-7.23	< 0.01 ***	P × G × IO	-2.85	0.39	-7.27	< 0.01 ***
Item Order (IO)	-0.22	0.08	-2.46	0.01 **	Item Order (IO)	-0.15	0.09	-1.53	0.12

3. 考察

同確率ブロックの非文に対する P600 の減少は、日本語話者が実験中に格助詞の逸脱に適応していることを示唆している。一方、正文における P600 の増大は、非文が何度も呈示されることにより、第 1 文節の情報に基づいて動詞を予測しなくなったために動詞位置での名詞句と動詞の統合コストが増大したためであると考えられる。一方、低頻度ブロックでの P600 効果の増大は、正文での P600 の減少と非文での P600 の増大が原因であった。このブロックでは非文の確率が低いため、参加者が第 1 文節の情報に基づいて動詞を予測するようになった結果、正文ではコストが減り、非文では再分析のコストが増大したためであると解釈できる。

4. 結論

- 日本語母語話者は、実験中に形態統語的逸脱文に対して適応的な振る舞いを見せる (P600 の減少)
- その適応には正文に対する処理コストとのトレードオフがある (P600 の増大)

参考文献

- Altmann, G. T. M., & Kamide, Y. (1999). Incremental interpretation at verbs: Restricting the domain of subsequent reference. *Cognition*, 73, 247–264.
- Coulson, S., King, J. W., & Kutas, M. (1998). Expect the unexpected: Event-related brain response to morphosyntactic violations. *Language and Cognitive Processes*, 13, 21–58.
- Dikker, S., Rabagliati, H., & Pykkänen, L. (2009). Sensitivity to syntax in visual cortex. *Cognition*, 110, 293–321.
- Fine, A. B., Jaeger, T. F., Farmer, T. A., & Qian, T. (2013). Rapid expectation adaptation during syntactic comprehension. *PLoS ONE*, 8. doi:10.1371/journal.pone.0077661
- Friederici, A. D., Pfeifer, E., & Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Cognitive Brain Research*, 1, 183–192.
- Gunter, T. C., Stowe, L. A., & Mulder, G. (1997). When syntax meets semantics. *Psychophysiology*, 34, 660–676.
- Hahne, A., & Friederici, A. D. (1999). Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis: Early automatic and late controlled processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 194–205.
- Ito, A., Pickering, M. J., & Corley, M. (2018). Investigating the time-course of phonological prediction in native and non-native speakers of English: A visual world eye-tracking study. *Journal of Memory and Language*, 98, 1–11.
- Kamide, Y., Altmann, G. T. M., & Haywood, S. L. (2003). The time-course of prediction in incremental sentence

- processing: Evidence from anticipatory eye movements. *Journal of Memory and Language*, 49, 133–156.
- Lau, E. F., Holcomb, P. J., & Kuperberg, G. R. (2013). Dissociating N400 effect of prediction from association in single word contexts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 484–502.
- Nakagome, K., Takazawa, S., Kanno, O., Hagiwara, H., Nakajima, H., Itoh, K., & Koshida, I. (2001). A topographical study of ERP correlates of semantic and syntactic violations in the Japanese language using the multichannel EEG system. *Psychophysiology*, 38, 304–315.
- Nashiwa, H., Nakao, M., & Miyatani, M. (2007). Interaction between semantic and syntactic processing in Japanese sentence comprehension. In T. Sakamoto (Ed.), *Communication skills of Intention* (pp. 311–318). Tokyo: Hituzi Syobo.
- Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1993). Event-related potentials and syntactic anomaly: Evidence of anomaly detection during the preception of continuous speech. *Language and Cognitive Processes*, 8, 413–438.
- Pickering, M. J., & Gambi, C. (2018). Predicting while comprehending language: A theory and review. *Psychological Bulletin*. doi:10.1037/bul0000158
- Wicha, N. Y. Y., Moreno, E. M., & Kutas, M. (2004). Anticipating words and their gender: An event-related brain potential study of semantic integration, gender expectancy, and gender agreement in Spanish sentence reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 1272–1288.
- Yano, M. (2018a). Predictive processing of aspectual information: Evidence from event-related brain potentials. *Language, Cognition and Neuroscience*, 33, 718–733.
- Yano, M. (2018b). Predictive processing of syntactic information: Evidence from event-related brain potentials. *Language, Cognition and Neuroscience*, 33, 1017–1031.
- Yano, M., & Sakamoto, T. (2016). The interaction of morphosyntactic and semantic processing in Japanese sentence comprehension : Evidence from event-related brain potentials. *Gengo Kenkyu*, 149, 43–59.

謝辞

本研究は、以下の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

日本学術振興会科学研究費基盤研究 (C) 17K02755 (研究代表者：大石 衡聴)

九州大学 QR プログラム わかばチャレンジ 30203 (研究代表者：矢野 雅貴)