

ひとはなぜ高速な言語処理ができるのか —BCCWJ-EyeTrack を用いた予備的調査—

矢野 雅貴 (東京都立大学 言語科学教室)

<https://massayano.github.io>

— 要旨 —

ひとが文を読む速度は、およそ 200-300 ms/語であると言われている。ところが、高い時間的分解能を持つ脳波計測を用いた研究では、各語に対して少なくとも 600 ms 程度処理が行われることが明らかとなっている。したがって、ひとは 1 語にかかる処理時間よりも速い速度で文を読んでいることになる。このような言語処理の高速性はどのような仕組みによって可能になっているのだろうか。本研究では、中心窩及び近中心窩において複数の語に対して並行的に語彙アクセスが行われるという仮説を立て、コーパスを用いた検討を行った。その結果、停留中の語だけでなくそれに後続する語の語彙特性が停留している語の読み時間に影響を及ぼしていることが明らかとなり、並行的な語彙アクセスが行われていることが示唆された。

1. 研究の背景と問い

人は普段、無意識的に文を処理しているが、このとき脳内では様々な処理が行われている。高い時間分解能を持ち、言語処理のタイムコースを記録できる脳波計測を用いた実験では、このような複雑な一連の処理を反映して各単語で少なくとも 600 ミリ秒 (0.6 秒) 程度の脳活動があることがわかっている(Osterhout & Holcomb, 1992)。従って文の理解は、600 ms/語 (毎秒 2 語) 程度の速度で行われると予想される。ところが、ひとが文を黙読するとき、その速度は、個人差があるものの、およそ 200-300 ms/語程度に達する(Brysbaert, 2019; Rayner, Schotter, Masson, Potter, & Treiman, 2016; Veldre & Andrews, 2014)。このような相反する観察を考えると「人はなぜ高速な言語処理ができるのか」という問いが生じる。この問いに答えるには、言語理解の高速性を保証する何らかの仕組みがあると考えなければならない。

そのような仕組みの候補としては、予測的処理をあげることができる(Federmeier, 2007; Kamide, Altmann, & Haywood, 2003; Kuperberg & Jaeger, 2016)。なぜなら、語が入力される前にある程度の処理が行われているとすれば、停留時に行わなければならない処理が少なくなるからである。しかし、自然な文章における予測可能性は極めて低いことや(e.g., Luke & Christianson, 2016)、予測の生成自体に時間がかかるという実験結果(e.g., Yano, 2018a, 2018b)を考えると、そのほかの要因が関与している可能性も考えられる。

本研究では、言語処理の高速化を可能にしている仕組みとして、複数の語に対する並行的な語彙アクセスがあるという仮説を立て、その仮説の検証を行った。読解中、ひとの目は、停留 (fixation) とサッカード (saccade) を繰り返している。サッカード中に視覚的情報は取得できないとされており、従って情報の取得が行われるのは停留中のみである。停留時、注視される語の情報は、目の

中心窩 (fovea) から入力される。中心窩に比べ解像度は劣るものの近中心窩 (parafovea) からもある程度の情報が入力される。もし停留中の語だけでなく、近中心窩から入力される後続語の情報も同時に処理することができるのであれば、これが、人間の言語処理を高速化させる仕組み (のひとつ) であると考えることができる。

2. 理論的対立

文字レベルでは、一般的に、パラレルな処理が行われると考えられているが、語レベルの情報が、パラレルに処理できるかについては複数の理論が存在する。¹ EZ Reader モデルに代表されるようなシリアル処理の立場では、文中の語は一語ずつ処理されると考える (Reichle, Liversedge, Pollatsek, & Rayner, 2009; White, Boynton, & Yeatman, 2019; White, Palmer, & Boynton, 2018)。一方、OB1-model (Snell & Grainger, 2019a, 2019b) や SWIFT モデル (Engbert, Longtin, & Kliegl, 2002; Engbert, Nuthmann, Richter, & Kliegl, 2005; Schad & Engbert, 2012) のようなパラレル処理の立場では、停留中に近中心窩に入力される語を含め、複数の語が並列的にアクセスされると考える。

前者のシリアル処理を支持する証拠として、例えば White et al. (2018) は次のような実験結果を報告している。実験ではまず画面に二つの語がごく僅かな時間 (例えば 50 ms)、同時に呈示され、実験参加者はその語のカテゴリを回答した。一方の語に注意を向けるキューが呈示される試行では 8 割程度正しく答えられるのに対して、両方の語に注意を向けなければならない試行においてはその正答率が有意に低下した。この結果は、複数の語 (の意味) には同時にアクセスできない証拠として解釈されている。ただし、White et al. (2018) が用いた課題は意識的な語彙処理を必要とするものであり、語彙処理が意識にのぼる程度まで処理が行われるという保証はないため、検証の方法に問題が残る (Snell & Grainger, 2019a)。

一方、Schotter (2013) は、gaze-contingent paradigm を用いた文読解時の眼球運動の計測結果から (限定的な) パラレル処理の可能性を主張している。この実験パラダイムでは、例えば "Sarah tried using curlers on her stubborn straight hair before ..." という文を実験参加者が読む際に、"using" の停留中、"curlers" を同義語 (synonym) である "rollers" または意味的に関係のない語 "suffice" に置き換えて一時的に呈示する。その後、実験参加者が using 以降を読み進めるときは "curlers" が呈示される (ため、実験参加者は単語の置換に意識的には気づかないことが多い)。実験の結果、一時的に意味的に無関連な語 "suffice" が呈示されたときに比べて同義語 "rollers" が呈示されたときのほうが "curlers" の読み時間が短くなった。この結果は、一時的に呈示された同義語が近中心窩においてアクセスされ、その情報がターゲット語 "curlers" の処理を促進させたこと (parafoveal preview benefit) を示唆している。しかし、言語や類似性の種類によってこのような parafoveal preview benefit が観察されるかが異なり、現時点で一貫した実験結果が得られていない (e.g., Hohenstein & Kliegl, 2014; Rayner & Schotter, 2014; Rayner, Schotter, & Drieghe, 2014)。

¹ ここでの「パラレル処理」・「シリアル処理」の理論的対立は、統語的曖昧性が生じたときに複数の統語構造を保持するかどうかという古典的な議論とは無関係である。

3. BCCWJ-EyeTrack を用いた予備的調査

シリアル処理モデルとパラレル処理モデルを区別する方法のひとつは、近中心窩に入力される後続語の性質によって停留している語の認知速度が変化するかを検討する方法である。もしパラレルな処理が行われるとすれば、停留中の語だけでなくそれに後続する語の性質が停留中の語の読み時間に影響を及ぼす可能性が考えられる。このような効果はシリアル処理モデルからは予測されない。

3.1 実験の目的

本研究では、日本語文の読解を促進させる仕組みとして中心窩・近中心窩でのパラレルな語彙アクセスがあるという仮説を立て、実験的にその仮説を検証することを目的とした。複数の語彙が同時に処理されている程度に応じて、その仕組みが、言語処理を高速化させる要因であると考えられることができる。本研究は、通常の読みにより近い状況下でパラレルな処理が可能であるかを検証するために、作例を用いた実験的研究ではなく、コーパス調査を行った(Kennedy & Pynte, 2005; Kliegl, Nuthmann, & Engbert, 2006)。

3.2 実験の方法

本研究では BCCWJ-EyeTrack(浅原, 小野, & 宮本, 2019)を用いた。BCCWJ-EyeTrack は「現代日本語書き言葉均衡コーパス (Balanced Corpus of Contemporary Written Japanese : BCCWJ)」に、眼球運動計測装置で計測した読解時間の情報を付与したデータベースである。本研究では、その中から first-fixation time (FFT) と first-pass time (FPT)のデータを使用した。実験参加者は日本語母語話者 24 名で、参加者の除外は行わなかった。

停留中に近中心窩に入力される後続語の情報にアクセスできているかを調べるには停留語及び後続語の処理の困難さに関連する指標が必要である。そこで本研究は、ロバストな効果を持つことが知られている頻度 (frequency) の情報を用いた(Rayner, 1998, 2009)。なお、頻度は読み飛ばし率 (skipping rate) との関連が指摘されているが(Rayner, Sereno, & Raney, 1996)、BCCWJ-EyeTrack では利用可能な情報ではないため、停留があった語のみのデータを使用した。

解析手順としてはまず、読み時間が記録されている文節 (例:「能力を」「覚えていた)」から語彙素 (例:「能力」「覚える)」を取り出し、BCCWJ 全体の頻度情報 (長単位) (<https://clrd.ninjal.ac.jp/bccwj/freq-list.html>) と統合した。このとき、数値や固有名詞は頻度情報が得られないため削除した (「8.2 トン」「33 歳」など)。次に、行末に呈示された語 (BCCWJ-EyeTrack 上で「行内最右要素 is_last == TRUE」) は、後続語が近中心窩の範囲内にはないと考えられるため、データを削除した。

FFT または FPT (log 値) を従属変数とし、中心窩語と近中心窩語の頻度 (z 値) を独立変数とした線形混合モデル (R lme4・lmerTest パッケージ) による検定を行った(Bates, Mächler, Bolker, & Walker, 2015; Kuznetsova, Brockhoff, & Christensen, 2017; R Core Team, 2021)。本実験の目的は、より適合度の高い統計モデルを構築することではないため、計算の収束も考慮してそれ以外の独立変数は含めなかった。ランダム切片・ランダムスロープは参加者 ID である。

3.3 実験の結果

線形混合モデルの結果、FFT 及び FPT において後続語の頻度の主効果が有意であった（表1・2）。さらに、anova 関数を用いて後続語の頻度情報を含まないモデルとの AIC 比較を行ったところ、後続語の頻度情報を含むモデルのほうが有意に適合度が良かった。

表 1. First-fixation time の結果

	Estimate	SE	<i>t</i>	<i>p</i>
(切片)	2.30	0.01	140.97	< 0.01
頻度	-0.02	0	-5.43	< 0.01 **
後続語の頻度	-0.02	0	-4.08	< 0.01 **

表 2. First-pass time の結果

	Estimate	SE	<i>t</i>	<i>p</i>
(切片)	2.45	0.02	108.8	< 0.01
頻度	-0.04	0	-11.25	< 0.01 **
後続語の頻度	-0.02	0	-6.05	< 0.01 **

4. 考察・結論

- 本実験の結果、初期の読みにおいて、中心窩語の頻度だけでなく、近中心窩語の頻度が、中心窩語の読み時間に影響を及ぼしていることが明らかとなった。この結果から、少なくとも日本語においては、**パラレルな語彙処理**が行われていることが示唆された。このような処理の仕組みが**言語処理を高速化させる要因**のひとつである可能性がある。
- ただし、以下にあげる課題もあり、今後、実験的な研究も必要である。
 1. 本実験は、コーパス調査であり語の長さが統制されていないため、後続語が近中心窩ではなく中心窩に入力されるような視角で呈示されるデータが一部含まれている可能性がある。また、コーパス調査では近中心窩に呈示される語の呈示時間を操作できないため、停留語の処理の終了後に後続語に注意がシフトしたというシリアル処理の可能性も残る。
 2. 頻度情報は後続語が持つ語彙情報のひとつであり、後続語に関するその他の情報がどのようなタイムコースで取り出されているかは明らかではない。また、Rayner (2009)や Angele et al. (2015)は、後続語が停留語の読みに影響を及ぼすかに関して一貫した結果が報告されていない要因の一つとして、コーパス分析／実験的研究という手法の違いを上げている。

参考文献

Angele, B., Schotter, E. R., Slattery, T. J., Tenenbaum, T. L., Bicknell, K., & Rayner, K. (2015). Do successor effects in reading reflect lexical parafoveal processing? Evidence from corpus-based and experimental eye movement data. *Journal of Memory and Language*, 79–80, 76–96.

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1–48.
- Brysbaert, M. (2019). How many words do we read per minute? A review and meta-analysis of reading rate. *Journal of Memory and Language*, 109, 104047.
- Engbert, R., Longtin, A., & Kliegl, R. (2002). A dynamical model of saccade generation in reading based on spatially distributed lexical processing. *Vision Research*, 42, 621–636.
- Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M., & Kliegl, R. (2005). SWIFT: A dynamical model of saccade generation during reading. *Psychological Review*, 112, 777–813.
- Federmeier, K. D. (2007). Thinking ahead: The role and roots of prediction in language comprehension. *Psychophysiology*, 44, 491–505.
- Hohenstein, S., & Kliegl, R. (2014). Semantic preview benefit during reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 40, 166–190.
- 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.
- Kennedy, A., & Pynte, J. (2005). Parafoveal-on-foveal effects in normal reading. *Vision Research*, 45, 153–168.
- Kliegl, R., Nuthmann, A., & Engbert, R. (2006). Tracking the mind during reading: The influence of past, present, and future words on fixation durations. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 12–35.
- Kuperberg, G. R., & Jaeger, T. F. (2016). What do we mean by prediction in language comprehension? *Language, Cognition and Neuroscience*, 31, 32–59.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest: Tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1–26.
- Luke, S. G., & Christianson, K. (2016). Limits on lexical prediction during reading. *Cognitive Psychology*, 88, 22–60.
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124, 372–422.
- Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, 62, 1457–1506.
- Rayner, K., & Schotter, E. R. (2014). Semantic preview benefit in reading English: The effect of initial letter capitalization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40, 1617–1628.
- Rayner, K., Schotter, E. R., & Drieghe, D. (2014). Lack of semantic parafoveal preview benefit in reading revisited. *Psychonomic Bulletin and Review*, 21, 1067–1072.

- Rayner, K., Schotter, E. R., Masson, M. E. J., Potter, M. C., & Treiman, R. (2016). So much to read, so little time: How do we read, and can speed reading help? *Psychological Science in the Public Interest*, 17, 4–34.
- Rayner, K., Sereno, S. C., & Raney, G. E. (1996). Eye movement control in reading: A comparison of two types of models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 1188–1200.
- Reichle, E. D., Liversedge, S. P., Pollatsek, A., & Rayner, K. (2009). Encoding multiple words simultaneously in reading is implausible. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 115–119.
- Schad, D. J., & Engbert, R. (2012). The zoom lens of attention: Simulating shuffled versus normal text reading using the SWIFT model. *Visual Cognition*, 20, 391–421.
- Schotter, E. R. (2013). Synonyms provide semantic preview benefit in English. *Journal of Memory and Language*, 69, 619–633.
- Snell, J., & Grainger, J. (2019a). Consciousness is not key in the serial-versus-parallel debate. *Trends in Cognitive Sciences*, 23, 814–815.
- Snell, J., & Grainger, J. (2019b). Readers are parallel processors. *Trends in Cognitive Sciences*, 23, 537–546.
- Veldre, A., & Andrews, S. (2014). Lexical quality and eye movements: Individual differences in the perceptual span of skilled adult readers. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67, 703–727.
- White, A. L., Boynton, G. M., & Yeatman, J. D. (2019). You can't recognize two words simultaneously. *Trends in Cognitive Sciences*, 23, 812–814.
- White, A. L., Palmer, J., & Boynton, G. M. (2018). Evidence of serial processing in visual word recognition. *Psychological Science*, 29, 1062–1071.
- 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.
- 浅原正幸, 小野創, & 宮本エジソン正. (2019). BCCWJ-EyeTrack: 『現代日本語書き言葉均衡コーパス』に対する読み時間付与とその分析. *言語研究*, 67–96.

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。
・日本学術振興会基盤研究 (B) 21H00524 (研究代表者：矢野雅貴)