

Eye Movements as Reflections of Comprehension Processes in Reading

Keith Rayner, Kathryn H. Chace, Timothy J. Slattery, & Jane Ashby

Department of Psychology

University of Massachusetts, Amherst

SCIENTIFIC STUDIES OF READING, 10 (3), 241-255, 2006

- 文章理解は様々な読書能力の上に成り立つ
 - 単語認識・読みの流暢さ・統語処理・単語の意味の知識など
- 読書中の眼球運動を見れば、その瞬間の理解処理についての価値ある情報が得られる (Rayner, 1997, 1998)

BASIC CHARACTERISTICS OF EYE MOVEMENTS DURING READING

- 読書中の眼球運動は主に3つの要素で構成
 - 跳躍 (saccades)・固視 (fixations)・逆行 (regressions)
- 私たちの眼は滑るように動くのではなく、約7~9文字分(≒1単語)の素早い運動(跳躍)と、約200~250msの停止(固視)を繰り返している
 - 新しい情報が符号化されるのは固視のとき
- 全時間のうち、約10~15%は文章を戻るように眼球を動かす(逆行)
 - 以前の内容の読み返し
- 文章が難しくなれば、一般に跳躍は短く、固視は長くなり、逆行は増える (Rayner, 1998)
 - 理解しづらい単語に出くわしたとき(非頻出語・同音異義語など)
 - 理解しづらい文構造に出くわしたとき(関係詞節・袋小路文¹など)
- 眼球運動測定の問題は、単語の処理時間が正確に計測できない点にある
 - 短い語や予測できる語は読み飛ばされ、難解な語は何度も読み返されるため
- 単語を対象とするときは、次のような指標が用いられる
 - 初期固視時間 (first-fixation duration)
 - ある単語について、最初に固視した時間
 - 凝視時間 (gaze duration)
 - ある単語について、固視した時間の合計

¹ 「ひまわりがすくすくと育っている畑がある。」, "The government plans to raise taxes were defeated."など、途中で混乱が生じる文。

- 全固視時間 (total fixation time)
 - ある単語について、固視した時間の合計 (逆行含む)

- 一方、語よりも高次の文章を対象にするときは、次のような指標が用いられる
 - 初期読書時間 (first-pass reading time)
 - ある領域において、最初に固視した時間
 - 全読書時間 (total reading time)
 - ある領域において、固視した時間の合計 (逆行含む)
 - 通過時間 (go-past time)
 - ある領域に入ってから出るまでの時間

- 最近の量的モデルは、読書中の眼球運動をよく説明している
 - E-Z Reader モデル (Pollatsek, Reichle, & Rayner, 2006; Rayner, Reichle, & Pollatsek, 1998, 2005; Reichle, Pollatsek, Fisher, & Rayner, 1998; Reichle, Rayner, & Pollatsek, 2003) と、
SWIFT モデル (Engbert, Longtin, & Kliegl, 2002; Engbert, Nuthmann, Richter, & Kliegl, 2005)
 - 「語彙処理 (単語認識) が眼球運動に影響する」という前提
 - ただし、計算が不可能な場合、より高次の理解処理が眼球運動に影響を与える
 - 奇妙な語や不可解な統語に出くわすと、より高次の理解処理が優先的に働くため (Rayner, Warren, Juhasz, & Liversedge, 2004; Frazier & Rayner, 1982)

- 本実験では、難しい文章ならば、固視回数・逆行確率・固視時間が増すことを示す
 - 流暢さ (Inhoff & Rayner, 1986; Rayner & Duffy, 1986)・予測しやすさ (Ehrlich & Rayner, 1981; Rayner & Well, 1996) などが単語の固視時間に影響する
 - しかし、文章の難しさが眼球運動に与える影響は明らかではない (Rayner, 1998)
 - 実験 1 文章全体の難しさ (グローバルな難しさ)
 - 実験 2 先行詞と照応形の不一致 (ローカルな難しさ)

EXPERIMENT 1

- 難／易いいずれかの長文を読んでいるときの眼球運動を観察
 - もし眼球運動が文章全体の難しさの影響を受けやすいなら、様々な眼球運動の指標と難しさの間に相関があるだろう
 - しかし、読書速度が固視回数の影響を受けるなら、固視時間と難易度は相関を持たないはず

Method

Participants.

- ネイティブな英語話者 16 名

Apparatus.

- 19 インチの液晶ディスプレイ (1280×1024)
- 画面から 80cm の位置にあご置きを設置し，なるべく頭が動かないようにした

- 眼球運動は SR EyeLink 2 を頭に装着し測定
 - － 瞳と角膜反射を追うことで，眼球運動を 4 ms ごとに記録
 - － 測定は右目のみ

- 平均固視時間・固視回数・総固視時間・総読書時間を測定

Materials.

- 平均 564 単語 ($SD = 20.5$) の 32 テーマの文章を用意
 - － 実験に参加しない 32 人に主観的な難易度評定を 10 件法で行わせた
 - － その結果，2.8 (比較的読みやすい) ~6.6 (かなり読みづらい) となった
- 難易度評定 4.3 の文章例は以下の通り

ヨウムは長い文や詩を復唱することができる。ヨウムは自身で音を選び取るだけでなく，それらを再編成して様々な単語と音の組み合わせを生み出すことができる。関連付けの力，要するに，あるものを特定の音や句に結び付ける能力をヨウムは有しているのである。(後略)

Procedure.

- 頭をモニター前で固定した後，キャリブレーションを行う
- 文章を自身のペースで読み進める
 - － このとき，平均固視時間・固視回数・総固視時間・総読書時間を測定
- 読み終わったらボタンを押し，4 択の理解度テストに答える
 - － このとき，正確性を測定
- 32 テーマの物語すべてで繰り返す

Results and Discussion

- 各指標間の相関は Table 1 が示すとおり

TABLE 1
Correlations of Average Fixation Duration (FD), Number of Fixations, and Total Reading Time With Passage Difficulty

	<i>Difficulty Rating</i>	<i>Average FD</i>	<i>No. of Fixations</i>	<i>Total Reading Time</i>
Average FD	.379*			
No. of fixations	.421*	.539**		
Total time	.446*	.676**	.984**	
Accuracy	-.184	-.269	-.217	-.238

* $p = .05$. ** $p = .01$.

- 固視回数 \leftrightarrow 総読書時間 ($r = .984$)
 - 難易度評定 \leftrightarrow 平均固視時間 ($r = .379$)
 - 難易度評定 \leftrightarrow 固視回数 ($r = .421$)
 - 難易度評定 \leftrightarrow 総読書時間 ($r = .446$)
 - 難易度評定と正確性の相関はなかった
- 32 テーマの文章を難易度評定の中央値で二分し、易文章（平均難易度評定 3.67）／難文章（同 5.15）として t 検定を行った結果が Table 2

TABLE 2
Mean Fixation Durations, Number of Fixations, and Total Reading Time for the Easy and Difficult Passages

	<i>Average Fixation Time (msec)</i>	<i>No. of Fixations</i>	<i>Total Reading Time (sec)</i>
Easy passages	267	475	126.8
Difficult passages	270	500	134.9
Difference	3	25	8.1

- 平均固視時間 易文章 < 難文章 ($t(15) = 4.16, p < .005$)
 - 固視回数 易文章 < 難文章 ($t(15) = 5.23, p < .001$)
 - 総読書時間 易文章 < 難文章 ($t(15) = 6.90, p < .001$)
 - 正確性 易文章 \approx 難文章 ($t(15) = 1.58, p > .05$)
- 眼球運動は文章全体の難しさを反映していることが確かめられた
 - しかし、難文章における総読書時間の増加は、固視回数の増加によるところが大きい
 - 効果量 (effect size) が比較的小さいが、眼球運動測定は高次の文章研究に有用であることが分かった

- 実験 2 では、よりローカルな領域でも、固視時間が難しさに影響されることを示す

EXPERIMENT 2

- 読者は新しい単語が現れたとき、その単語とそれまで作り上げてきた表象を結び付けながら読み進めていく
 - この結び付けは簡単だが、完璧に行うことは必ずしも必要ではない
 - ある程度の柔軟性は有益だが、時に重大な不一致の無視につながりかねない
- 不一致検出は処理の初期段階で行われると考えられている (Ferreira, Bailey, & Ferraro, 2002; Sanford & Garrod, 2005)
 - もし自身が持つ表象との適合度が十分ならば、不一致を検出し損ねて、その後の理解処理まで気付かないだろう
- Cook (2005) では、先行詞 (antecedent) と照応形 (anaphor) の不一致を扱っている
 - 例：「チェロが窓の側にあった。それはとても高価だった。」
 - 先行詞 → チェロ；照応形 → それ
 - 照応形を変化させ、2つの条件を設定
 - 先行詞と照応形が一致 チェローチェロ
 - 先行詞と照応形が不一致 チェローオーボエ
 - 照応形が含まれる領域の再読時間 一致 < 不一致
 - その次の領域（波及領域）の読書時間 一致 < 不一致
- 読者は不一致に気付いたので、照応形の箇所を読み直すことで、また、その次の箇所をゆっくり読むことで不一致を解消しようとした
- 先行詞と照応形との物理的な距離により、不一致箇所の扱い方が変わるだろう
 - 物理的に近いほうが遠いよりも不一致に気づきやすいはず
- 実験 2 の目的は、不一致検出における先行詞と照応形との距離の効果を検証すること
 - 文章処理の難しさの検証に眼球運動を用いることができるか

Method

Participants.

- ネイティブな英語話者 18 名

Apparatus.

- 参加者は NEC MultiSync FP 137 モニターから 75cm のところに座る
 - 画面には最大で 81 文字×11 行が表示可能
 - 2.6 文字で視角 1° と等しい
- 眼球運動の測定法は実験 1 と同じ

Materials.

- 6 テーマの文章 (平均 150 単語) を, それぞれ以下の要因をもとに操作
 - 要因 1 先行詞と照応形の関係 (一致/不一致)
 - 先行詞を操作し, 照応形は常に同じ
 - 要因 2 先行詞と照応形の距離 (短距離/中距離/長距離)
 - 中距離 約 50~55 単語
 - 長距離 約 120~125 単語
 - 以下は短距離条件における, 一致条件と不一致条件の例

- | |
|--|
| <p>1a. アリソンはつまみとして, <u>にんじん</u>スティックを頼むことを決めた. 数分後, ウェイターは水と<u>にんじん</u>スティックを彼女のところへ持ってきた.</p> <p>1b. アリソンはつまみとして, <u>セロリ</u>スティックを頼むことを決めた. 数分後, ウェイターは水と<u>にんじん</u>スティックを彼女のところへ持ってきた.</p> |
|--|

- 照応形の「にんじん」がターゲット語, 「スティックを彼女の」が波及領域²

- 操作チェックとして, 文章のうち 25% は最後に真偽判定課題があった

Design and procedure.

- 2 (関係: 一致/不一致) × 3 (距離: 短距離/中距離/長距離) の参加者内要因実験
 - 6 テーマあるので, 刺激は全 36 種類 (6×2×3)
- 眼球運動測定の手順は実験 1 と同様
- 参加者は 2 回の練習の後, 6 テーマの文章を読む (6 条件をひとつずつ)
 - 文章の順番はカウンターバランスをとった

Results and Discussion

- 照応形の固視時間
 - 凝視時間 一致 (219 ms) < 不一致 (236 ms) ($F(1, 17) = 4.98, p < .05$)

² 実際には英語であるので, 本来の波及領域は”sticks after only”.

- 通過時間 一致 (250 ms) < 不一致 (279 ms) ($F(1, 17) = 11.63, p < .01$)
 - 距離の主効果なし ($F < 1$)
- 先行詞と照応形が一致していないと、照応形を長く見た
- 読者は不一致をすぐに検出していた
- 距離は処理時間に影響を与えなかった
- 波及領域からの逆行確率
 - 近距離条件 一致 (5.3%) < 不一致 (18.1%) ($t(17) = 2.81, p = .012$)
 - 中距離条件 一致 (10.4%) \simeq 不一致 (12.2%)
 - 長距離条件 一致 (18.4%) \simeq 不一致 (19.7%)
 - 一致条件において,
 - 近距離 (5.3%) < 中距離 (10.4%) ($t(17) = 1.84, p = .08$)
 - 近距離 (5.3%) < 長距離 (18.4%) ($t(17) = 2.30, p < .05$)
 - 先行詞の再読時間 (second-pass reading time)
 - 一致 (32 ms) < 不一致 (66 ms) ($F(1, 17) = 10.04, p < .01$)
 - 近距離 (18 ms) < 中距離 (35 ms) ($t(17) = 2.13, p < .05$)
 - 近距離 (18 ms) < 長距離 (42 ms) ($t(17) = 2.19, p < .05$)
- 近くで不一致があると、先行詞への逆行が増える
- しかし、ある程度の距離があると、一致していても逆行するため、差がなくなる
- 距離が増すことで先行詞の表象が薄れてしまう
 - 不一致に気付きにくくなる
 - たとえ一致していても、表象の処理はしづらくなる
 - 「不一致はほぼ気付く」という Cook (2005) を補足する結果
- 距離が長くなるにつれ、先行詞の表象があまり正確ではなくなってくるが、距離を問わず、読者は先行詞を読み返していた

GENERAL DISCUSSION

- 本研究の2つの実験から分かったことは主に3点
 1. 眼球運動は文章全体の難しさに影響される
 2. 先行詞と照応形の不一致は、眼球運動から窺い知ることができる
 3. 先行詞と照応形の距離が近いなら、不一致により逆行が起きる
 - 特筆すべきは、中・長距離ならば一致と不一致の逆行確率に差がないこと

Eye Movement Recording as a Research Tool

- 理解過程や文章理解の分野では、総読書時間がよく用いられてきた
- しかし、それらの過程や時間的情報に関心があるなら、眼球運動がベストである
 - 様々な効果がいつ現れたかが細かく分かるため

Eye Movement Recording in School Settings

- 教育場面における眼球運動測定技術の実用性は疑問視されている
 - 解像度が高いものは高価で、耐久性が今一つで、持ち運びにくい
- しかしながら、いつかの導入例もある (Dolan, 2005; Evans & Saint-Aubin, 2005)
 - 正確性・耐久性・価格が見直されていけば、生徒がなぜ理解できないかの研究に使えるかもしれない
- 眼球運動を用いる利点
 - 記憶検索・発話・方略に汚染されない
 - 黙読ができる上級生や大人にも適用できる
 - 固視時間などから、文章理解を助ける潜在的処理への注意の強弱を推測できる
 - 不一致の高頻出語よりも不一致の低頻出語のほうが固視時間が長い
 - 単語認知処理が優先されて、低頻出語に気を取られる
 - 不一致に注意が向かない
 - 高頻出語よりも低頻出語のほうが固視確率が小さい
 - 新出語に注意が向かない
 - 符号化が十分になされず、後うまく再生できない
- 眼球運動を用いる上での但し書き
 - 読みは後天的に得られた技能であるので、個人差が大きい
 - 診断などの決定的な役割よりむしろ、個々の学習計画などの補助的な役割
 - データの時間的な正確性に難あり
 - 効果量がたった1秒ほど
 - 1参加者から信頼できるデータを得るには、数十の文章を読ませる必要あり
 - 刺激に用いる文章は細かい部分までしっかりと統制し、作らなければならない
 - 眼球運動は様々な認知処理に非常に敏感であるため
- これらの但し書きは確かにあるが、なぜ文章を理解できないのかを明らかにできるような眼球運動測定技術は今後発展していこう