

文理解における指示対象の曖昧性解消の発達過程：
 眼球運動と瞳孔径の変化による検討
**Development of Referential Ambiguity Resolution during Sentence
 Comprehension: A Study with Eye Movements and Pupil Dilations**

神長 伸幸[†], 大石衡聴[†], 馬塚 れい子^{†‡}
 Nobuyuki Jincho, Hiroaki Oishi, Reiko Mazuka

[†]理化学研究所, [‡]デューク大学

RIKEN Brain Science Institute, Duke University

njincho@brain.riken.jp

Abstract

This study investigated how 5- and 6-year-old children and adults resolved referential ambiguity when they listened to sentences containing color adjectives. We investigated whether the timing of disambiguation (at the prenominal adjective or at the noun) affected their eye movements (proportions of target object fixations) and pupil dilations in a visual world paradigm experiment. In the eye movement data, adults showed a reliable effect of the timing of disambiguation, while 5- and 6-year-olds only showed weak tendencies of the effect. In the pupil dilation data, adults showed larger dilations for the noun disambiguation condition than for the adjective disambiguation condition. Six-year-olds showed an effect in the opposite direction: larger dilations for the adjective disambiguation condition than for the noun disambiguation condition. Five-year-olds did not show any differences. Taken together, the results suggested that 6-year-olds and adults can resolve referential ambiguities incrementally, and that the eye movements and pupil dilations can be used complementarily to investigate spoken sentence comprehension. A caution for interpreting pupil dilations was also discussed.

Keywords — referential ambiguity, sentence processing, language development, visual world paradigm, pupillometry

1. はじめに

我々の日常会話では聞き手が話し手の発話内容を理解しながら自らの発話内容を用意し、聞き終えた直後に話し始める。これが円滑に進められるためには、聞き手は話し手が話し終えるのを待たずに、入力された情報を次々と処理しなければならない。このような話し言葉の理解における逐次性は、近年の視覚世界パラダイムと呼ばれる実験を用いて盛んに検討されている。例えば形容詞句

を含む文を聞く際、指示されるオブジェクトへの注視は形容詞またはそれに続く名詞の提示に伴って急速に増加する[1]。この知見は、最低限必要な情報を得た時点で聞き手が指示対象を特定していることを示している。また、幼児を対象とした研究でも指示対象の曖昧性解消過程が逐次的であることが示唆されている[2][3]。ただし、先行研究[2]において、画面に提示されたのは二つのオブジェクトのみであり、より複雑な視覚文脈状況においても同様の効果が見られるかどうか分からない。これに関して、先行研究[3]では、画面に四つのオブジェクトが提示される状況でも先行研究[2]と類似した結果が得られることを報告している。しかし、先行研究[3]の問題として、被験児数が11人と少なく、年齢が5歳から7歳と幅広かったことが挙げられる。近年の研究によって5歳前後は文理解の様式が大きく変化する時期であることが示唆されているが(例えば[4])、先行研究[3]の知見では、指示対象の曖昧性解消が何歳の段階で成人と同じようになるのかが分からない。そこで本研究は、形容詞句を含む文(例えば「緑のリスはどれ」)を聞く際の指示対象の曖昧性解消について5歳児、6歳児および成人の発達の変化を視覚世界パラダイム実験で検討した。

従来の視覚世界パラダイム実験では、指示対象となるオブジェクトの注視確率が主な指標とされてきた[1][4]。本研究の場合、名詞に先行する形容詞を聞いた時点で指示対象の曖昧性を解消できる場合は、名詞まで聞かなければ曖昧性を解消でき

ない場合と比べて指示対象の注視確率が早く増加すると予測される。ただし、幼児は一般に言語理解処理により多くの時間がかかり、眼球運動の統制が未熟で、ワーキングメモリ容量が小さいことから、成人に比べてオブジェクトの探索がより困難であると考えられる[5]。よって、言語理解を反映した注視確率の変化は、成人より遅いだけでなく、試行間のばらつきが大きくなり、曖昧性解消のタイミングによる差をオブジェクトの注視確率のみで検出するのは難しい可能性がある。そこで本研究はオブジェクトの注視確率に加えて聞き手の瞳孔径の変化量を検証する。瞳孔径は周囲の明るさだけでなく被験者の心的負荷に応じて変動することが知られている[6][7]。本研究では、瞳孔径を増加させる二つの要因を仮定する。一つは、指示対象の曖昧性を解消して支持対象へ注視点を移動させようとする時点で視覚的な探索の負荷が高まることである[8]。これが正しければ、形容詞を聞いて指示対象の曖昧性が解消される場合は、名詞まで聞かなければ曖昧性が解消できない場合に比べて視覚探索のタイミングが早まるので、瞳孔径も早く上昇すると予測される。もう一つの要因は、一時的な指示対象の曖昧性によるワーキングメモリの負荷の上昇することである。これが正しければ、形容詞を聞いた時点で曖昧性を解消できる場合に比べて、名詞まで聞かなければ指示対象の曖昧性を解消できない場合の心的負荷が高く、瞳孔径の拡張がより顕著に現れると予測される。

2. 方法

被験者. 5歳児 23名（男児 12名、女児 11名、年齢 5歳1カ月から 5歳11カ月）、6歳児 24名（男児 12名、女児 12名、年齢 6歳0カ月から 6歳11カ月）、成人 24名（男性 11名、女性 13名、年齢 19歳から 35歳、平均 27歳）が参加した。成人被験者および幼児被験者の保護者には研究の目的・方法等を実験参加前に説明した上で参加同意を得た。参加者には謝礼が支払われた。なお実験手続きについては理化学研究所倫理審査委員会による承認を得ている。

刺激文. 「緑のリスはどれ。」のような色の形容詞を含む日本語文を刺激文とした。色の形容詞は「緑の」「紫の」「ピンクの」「オレンジの」の四種類があった。また、オブジェクトを示す名詞は全て動物の名前であり、「ウサギ」「カエル」「かめ」「さかな」「サル」「ねこ」「ライオン」「リス」の八種類があった。刺激文は日本語を母語とする成人女性の発話を録音した。その際、形容詞または名詞に強調の抑揚がつかないように発話するよう教示した。形容詞句、名詞句、疑問詞の平均持続時間はそれぞれ 553ms (SD 55ms)、491ms (SD 71ms)、314ms (SD 29ms) だった。

視覚文脈. 四種類の動物の絵で構成される視覚刺激が作成された。四つのオブジェクトはピンク、緑、紫、オレンジのいずれかの色で塗られており、一画面には三種類の色が使われた。視覚文脈の要因として刺激文の形容詞が単一のオブジェクトに一致する条件（以下単一致条件、図 1(A)）と二つのオブジェクトに一致する条件（複数一致条件、図 1(B)）があった。単一致条件は形容詞を聞いた時点でターゲットを特定できるが、複数一致条件では名詞まで聞かなければターゲットを特定できなかった。

装置. 被験者の眼球運動測定には Tobii 社製 Tobii1750EyeTracker（サンプリング周波数 50Hz、平均測定誤差視角 0.5°）を用いた。刺激の提示、眼球装置の制御、反応の記録は E-prime1.2 と E-prime Extension for Tobii を使用して作成したプログラムを用いた。

手続き. 被験者は最初に眼球運動装置のキャリブレーションを行った。次に、課題内容が説明され、被験者は視覚文脈を提示された後に聞こえる刺激文に対応するオブジェクトを指差しで示すことを教示された。一つの試行は注視点の提示で始まり、被験者が 1 秒以上注視点を見たことを確認した後で視覚文脈が 2.5 秒提示された。その後、視覚文脈が画面に提示されたままの状態では刺激文が提示された。被験者の指差しを見て実験者が対応するオブジェクトをマウスでクリックすると視覚文脈が消えて、次の試行の注視点が提示された。

単一致条件と複数一致条件は各 10 試行で、ターゲットの色、オブジェクトの名前、場所がカウンターバランスされていた。また、フィラー試行として同様の刺激文に別の視覚文脈状況が 40 試行実施された。

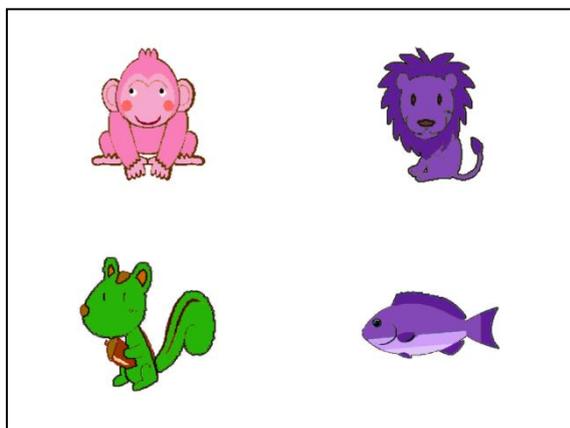


図 1 (A)単一致条件の刺激画面の例 (刺激文は「緑のリスはどれ」)

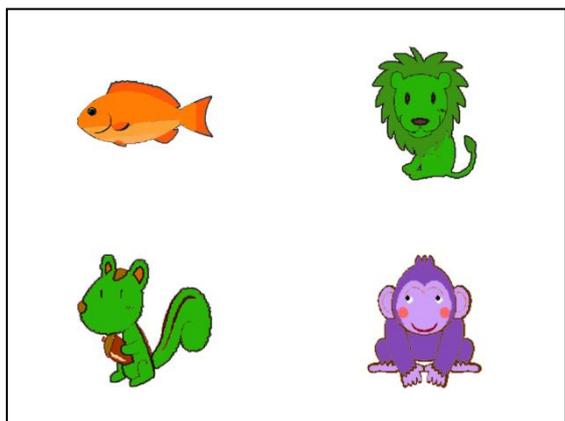


図 1 (B)複数一致条件の刺激画面の例 (刺激文は「緑のリスはどれ」)

3. 結果

被験者の注視点と画面内のオブジェクトの位置をもとに指示対象となるオブジェクト(以下、ターゲット)の注視確率の時系列変化を計算した。図 2 の実線が示すように、いずれの年齢群においても複数一致条件よりも単一致条件でターゲットの注視確率が早く増加するパターンが見られた。このパターンを統計的に解析するため、刺激文提示開始 200ms を基準に 500ms の時間窓を三つ作り、ターゲットの注視確率を従属変数、提示条件を固定要因 (単一致条件を-0.5、複数一致条件

を 0.5 とコーディングした)、被験者と刺激文をランダム要因とするロジスティック混合モデルで解析した[9]。解析には R プログラム言語(バージョン 2.15.1)のパッケージ lme4 (バージョン 0.999375-42)を用いた。ランダム要因については、被験者および刺激文について切片および提示条件のスロープの両者を仮定したモデルを最大モデルとし、尤度比検定によってよりシンプルなモデルとの比較を行い、最も適合度の高く、シンプルなモデルを最終モデルとして採用した。その結果、刺激文の開始 200ms から 700ms までの時間窓において条件差が有意になったのは成人群だけだった、 $Estimate = -0.4847$, $SE = 0.1588$, $z = -3.053$, $p = .002^1$ 。つまり、単一致条件よりも複数一致条件でターゲットの注視確率の上昇が有意に遅かったのは成人のみだった。他の二つの時間窓でも同様の解析を行ったが、いずれの群でも提示条件の効果は有意でなかった。

次に瞳孔径の変化量に関して、刺激文の提示開始前 500ms 間の瞳孔径の平均値をベースラインとし文の開始からの変化量を求めた(図 2 の点線を参照)。全ての群で瞳孔径は文の提示中に増加する傾向を示した。提示条件の効果を統計的に解析するため、上記の注視確率の解析と同じ三つの時間窓において右目から測定した瞳孔径を従属変数、提示条件を固定要因、被験者と刺激文をランダム要因とする線形混合モデルで解析した。モデルの選択方法は上記の注視確率の解析と同じだった。

その結果、提示条件による差は 6 歳児群と成人群で見られた。6 歳児群では、文の開始後 200ms から 700ms で単一致条件が複数一致条件より増加量が大きかった、 $Estimate = -0.033$, $SE = 0.015$, $t = -2.187^2$ 。最終モデルについてマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションを実施したところ推定値は有意に 0 より小さかった、 $p = 0.037$ 。

1 ランダム因子に関して被験者は切片と提示条件のスロープ、刺激文は切片のみを仮定するモデルが最終モデルとして採用された。

2 ランダム因子に関して被験者、刺激文ともに切片のみを仮定するモデルが最終モデルとして採用された。

また、図 2(B)で示されるように瞳孔径の変化は注視確率に比べて提示条件の差が早いタイミングで見られた。一方、成人群では、文の開始後 1200ms から 1700ms で複数一致条件が単一致条件より増加量大きい傾向が見られた、 $Estimate = 0.031$, $SE = 0.016$, $t = 1.914^3$ 。マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションの結果、推定値が 0 より大きい可能性は有意傾向だった、 $p = 0.0568$ 。5 歳児群ではいずれの時間窓でも提示条件の効果が見られなかった。

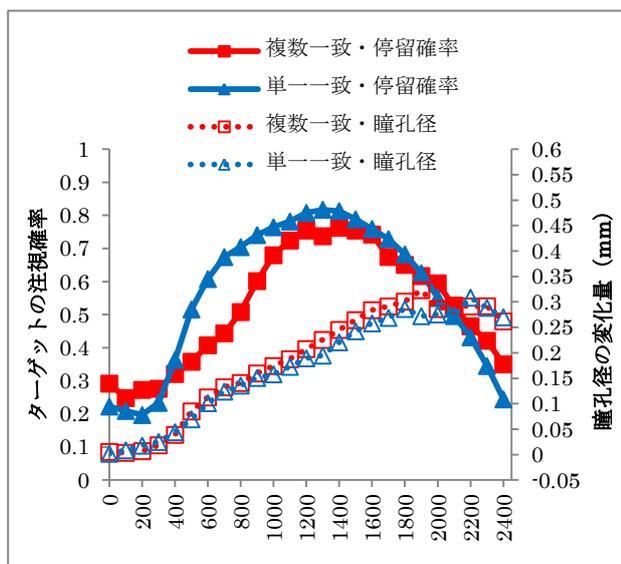


図 2 (A) 成人のターゲットの注視確率と瞳孔径の変化

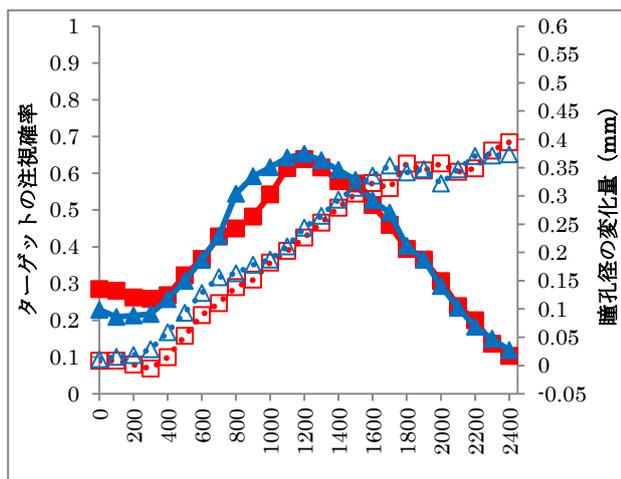


図 2 (B) 6 歳児のターゲットの注視確率と瞳孔径の変化

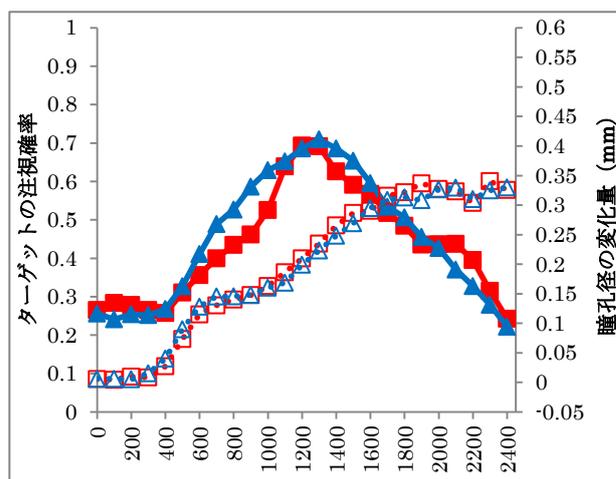


図 2 (C) 5 歳児のターゲットの注視確率と瞳孔径の変化

4. 考察

本研究では、オブジェクトの注視確率と瞳孔径の二つの指標に基づいて、形容詞を含む文を理解する際に指示対象の曖昧性解消が発達的に変化するのかを検討した。指示対象の注視確率の結果は、5 歳児、6 歳児、成人で類似していた。すなわち、名詞の時点で指示対象を特定できる場合（上記複数一致条件）と比較して、形容詞の時点で特定できる場合（上記、単一致条件）は指示対象の注視確率が早いタイミングで上昇した。しかし、統計解析に基づく、曖昧性解消のタイミング効果は成人で安定しているが、5 歳児や 6 歳児では有意差が出るほど大きな効果が見られなかった。幼児において曖昧性解消のタイミング効果が不安定であることについて、二つの要因が考えられる。一つは、幼児の言語処理のスピードが遅いので、形容詞の理解に遅れとばらつきが生じたためと考えられる。もう一つの可能性として、視覚探索の負荷が比較的高い幼児においては、形容詞の理解に困難がなくても実際にサカードを生成するタイミングに遅れとばらつきが生じたためと考えられる。このようにオブジェクトの注視確率データのみに基づく、幼児の結果は複数の原因によって説明可能である。しかし、瞳孔径データを合わせて考えた場合、少なくとも 6 歳児は形容詞の理解そのものは安定的に素早く行っていたと考えられる。なぜなら、6 歳児は形容詞で曖昧性を解消できる場合は、名詞で解消できる場合よりも瞳孔

³ ランダム因子に関して被験者、刺激文ともに切片のみを仮定するモデルが最終モデルとして採用された。

径の増加のタイミングが早かったからである。このような変化は、言語処理を反映したというよりも、ターゲットを特定して眼球運動を制御しようとする際に視覚探索の負荷を反映したためと考えられる。つまり、形容詞の理解処理を終えて指示対象を視覚文脈内で探索する段階での負荷によって瞳孔径が拡張したと考えられる。瞳孔径の変化量で有意な差が生じたタイミングが、ターゲットの注視確率に差の傾向が見られるタイミングに先行していることも視覚探索を反映しているという説明と矛盾がない。

ここで興味深いのは、成人が形容詞で曖昧性を解消できる場合に比べて、名詞で解消できる場合に瞳孔径の変化量が大きくなったことである。つまり6歳児で見られた結果と逆向きの効果が見られたのである。また、有意傾向が見られたタイミングも6歳児の結果とは異なっていた。このようなパターンは、指示対象の曖昧性によってワーキングメモリへの負荷が増大したことを反映して瞳孔径が大きく拡大したと解釈できる。成人は画面に四つのオブジェクトが提示されても視覚探索の負荷はほとんど生じないと考えられるので、指示対象の曖昧性の有無による違いが瞳孔径の変化量として検出できたと推測できる。同様の観点で6歳児のデータを解釈すれば、視覚探索の負荷が高いことを反映した瞳孔径の変化が、指示対象の曖昧性の効果を隠している可能性を指摘できる。

以上のような結果をまとめると、ある程度視覚文脈が複雑な場合、少なくとも6歳になる頃までに形容詞による指示対象の特定が逐次的に行われるようになると考えられる。ただし、幼児は視覚探索の負荷が比較的高いために、指示対象の曖昧性解消のタイミング効果が眼球運動に現れるのは6歳以降になるようである。

また、本研究は方法上の新たな試みとして、従来の視覚世界パラダイム実験で用いられてきた注視確率データに瞳孔径の変化を合わせて検討した。結果として、二つの指標を組み合わせることで、6歳児の曖昧性解消過程の逐次性を説明できた。今後の視覚世界パラダイムを用いた研究

においてもこれらの二つの指標を補完的に用いることで、結果の解釈の妥当性を高められると考えられる。ただし注意点として、本研究の結果は瞳孔径の拡張が複数の要因を反映する可能性を示した。したがって、瞳孔径データの解釈には何が瞳孔径の拡張に寄与するのかを慎重に検討する必要がある。

参考文献

- [1] Eberhard, K. M., Spivey-Knowlton, M. J., Sedivy, J. C., & Tanenhaus, M. K. (1995). Eye movements as a window into real-time spoken language comprehension in natural contexts. *Journal of Psycholinguistic Research*, 24(6), 409-436.
- [2] Fernald, A., Thorpe, K., & Marchman, V. A. (2010). Blue car, red car: Developing efficiency in online interpretation of adjective-noun phrases. *Cognitive Psychology*, 60, 190-217.
- [3] Sedivy, J., Demuth, K., Chunyo, G. & Freedman, S. (2000). Incremental referentially-based processing in children: Evidence from eye monitoring. Proceedings of the 24th BU Conference on Language Development. Boston: Cascadilla Press. Pp. 684-695.
- [4] Trueswell, J. C., Sekerina, I., Hill, N. M., & Logrip, L. (1999). The kindergarten-path effect: Studying on-line sentence processing in young children. *Cognition*, 73, 89-134.
- [5] Klein, C., & Foerster, F. (2001). Development of prosaccade and antisaccade task performance in participants aged 6 to 26 years. *Psychophysiology*, 38, 179-189.
- [6] Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, 154, 1583-1585.
- [7] Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1993). The intensity dimension of thought:

Pupillometric indices of sentence processing.
Canadian Journal of Experimental Psychology, 47, 310-339.

- [8] Porter, G., Troscianko, T., & Gilchrist, I. D. (2007) Effort during visual search and counting: Insights from pupillometry. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60, 211-229.
- [9] Jaeger, T. F. (2008). Categorical data analysis: Away from ANOVAs (transformation or not) and towards logit mixed models. *Journal of Memory and Language*, 59, 434-446.