

しりとり単語系列の特徴を制御する認知的要因に関する 認知モデルを利用した調査

西川純平¹ 佐々木康佑¹ 森田純哉¹

¹ 静岡大学

nishikawa.jumpei.16@shizuoka.ac.jp

sasaki.kosuke.19@shizuoka.ac.jp

j-morita@inf.shizuoka.ac.jp

概要

LLMの進展は目覚ましく、人間の言語機能に迫る部分もある。伴って、人間の言語使用を理解するための研究の意義も高まっている。本研究では、言語使用に関するシンプルな課題として「しりとり」に注目し、その特徴に関わる認知的要因を明らかにすることを目的とする。このために、認知アーキテクチャの基本的な記憶メカニズムを基盤としてしりとりの遂行をモデル化し、そのパラメータを調整するシミュレーションによって、しりとりの単語系列に現れる特徴を調査する。結果として、語彙の活性化と抑制や意味的な連想の設定によって、特徴の異なるしりとり単語系列が得られた。しりとりの特徴を制御可能なモデルの構築により、HAI研究や言語獲得支援研究への刺激としての応用が期待される。

1 はじめに

近年、大規模言語モデル (LLM) の進展が目覚ましく、人間の言語機能に迫る部分もある。このことに伴って、人間の言語使用を理解するための研究の意義も高まっている。人間の行動は記憶をベースとする特徴がある (IBLT; instance based learning theory) [1]。心理学や認知科学は、そのような過程を支配する少数の原理的な法則を追求する試みである。つまり、LLMのようなデータから学習するのではなく、演繹的あるいはアブダクティブなアプローチである。

人間の認知過程を説明・予測するために、計算機プログラムの実行と対比することは LLM の発展以前から行われてきた。認知モデリングと呼ばれる伝統的なアプローチである。認知モデルを構築するための基盤として、認知アーキテクチャが開発されて

いる。認知アーキテクチャは心理学、認知科学的な理論に基づいて開発され、課題の達成に要求される種々の要因を切り分けたモデルを構築可能な構造やパラメータを備える。代表的な認知アーキテクチャである ACT-R (Adaptive Control of Thought – Rational) の記憶プロセスは活性化値によって制御される。活性化値は個々の記憶に付与される数値であり、ベースレベル活性化値 (学習と忘却) と活性化拡散 (連想や文脈) などから計算される。この特徴は他のアーキテクチャや言語の認知モデルにおいても同様である [2, 3]。

本研究では、人間の言語使用に関するシンプルな課題として「しりとり」に注目し、その特徴に関わる認知的要因を明らかにすることを目的とする。このために、認知アーキテクチャを用いて構築されたしりとりの認知モデルを利用する。認知アーキテクチャの基本的な記憶メカニズムを基盤としてしりとりの遂行をモデル化し、そのパラメータを調整したシミュレーションによって、しりとりの単語系列に現れる特徴を調査する。

2 関連研究

2.1 しりとりと言語学習

しりとりにおいて、参加者は、先行して答えられた単語の語尾文字を頭文字とする単語を回答する。ゲーム中で既に使われた単語や、特定の語尾文字をもつ単語を回答した場合は負けとなる。この手順は複数名で行われることが多いが、幼児向けの語彙学習の教材には、一人でのしりとり遊びを行わせるものも存在する。

失語症の治療、あるいは自閉症の療育など、言語聴覚療法においても、しりとりは頻繁に用いられて

いる。いくつかの研究で、療育中の自閉症児の検査にしりとりが利用されていることが示されている [4, 5]。しりとりを可能にする条件は、定型発達の幼児を対象とした横断的な調査によって明らかにされている [6]。音を音素に分割する音韻意識が必要であること、心的な語彙辞書に音韻による索引が付与されていることが必要であるとされている。さらに、音韻による語彙への索引付けには、かな文字の獲得が有効であることを示している。

2.2 認知モデリング

認知アーキテクチャは、個別の課題において生起する認知プロセスをモデル化する基盤である。認知アーキテクチャを利用したモデルにより、課題の達成に要求される種々の要因を切り分けたモデルを構築できる。様々な認知アーキテクチャが開発されるなかで、本研究では ACT-R [7] を利用したモデルに注目する。

ACT-R を用いた言語使用に関する研究は多く行われている。英語の学習における不規則動詞の獲得に関わるモデル [8]、幼児による名詞の学習などのモデル [9] が構築されている。脳機能障害に関わる検討もなされており、失語症の文理解において生じるエラーを ACT-R のパラメータによって説明した研究も存在する [10]。

ACT-R によるしりどりのモデルとして、著者ら [11] は、記憶の活性値と音韻意識を対応づけるシミュレーションを行なった。その結果、音韻意識の高まりによってしりどりの継続数が増加すること、しりどりの遂行に伴って音韻意識が増強されることを示した。この結果は、先述の高橋による調査 [6] と整合的なものといえる。

2.3 従来研究の限界と本研究の目的

ここまで示したように、人間の言語使用に関連する研究領域では、発達過程の調査のためにしりどりが利用され、しりどりを課題とするモデルやシステムも開発されてきた。しかし、これまでの研究では、しりどり中の行動の多様性に関わる認知的要因は明らかにされていない。高橋の研究では、ヒントを提示することの効果を実験的に示しているものの、問いに対して1つの単語を回答するといった限定的なしりどりのみを課題とした [6]。また、著者らによるモデル化 [11] においては、音韻処理に関する誤りに注目しており、しりどりに出現する単語の特

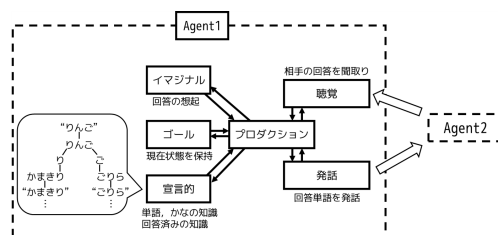


図 1: モデル概観

徴（系列長や単語の意味など）に関する詳細な検討は行われていない。これらの限界を踏まえ、本研究では、対話的にしりどりをを行う一連のプロセスをモデル化し、その結果として得られるしりどり単語系列を特徴づける認知的要因を観察することを狙う。

3 モデル

3.1 モデルの構成

先行研究 [11] において、認知アーキテクチャ ACT-R [7] を用いたしりどりのモデルがすでに実装されている。このモデルは ACT-R のパラメータを設定することでその振る舞いを調整することができる。本研究では、言語使用に関するシンプルな課題として「しりどり」に注目していることから、しりどり中に出現する単語の身近さと、対話の文脈に相当する単語の連想にまつわるパラメータに着目する。

本研究で構築したモデルの概観を図 1 に示す。このモデルには、個人に対応するエージェント（破線で囲まれた範囲）が含まれ、交互に単語を回答することでしりどりを繋げる。エージェント中のボックスは ACT-R の各モジュールに対応する。以下では、このような ACT-R のモジュール構造のなかで、しりどり単語系列を特徴づけると考えられる宣言的記憶の設定と、その検索に関するパラメータを示す。

3.1.1 モデルの宣言的記憶

ACT-R の宣言的モジュールを用いて、しりどりの遂行に必要な記憶をモデル化する。ACT-R の宣言的モジュールにおいて、記憶はチャンクと呼ばれる構成要素からなる。本モデルでは、各単語の発音（音のパターン）と表記をつなぐ「単語チャンク」、各モーラの発音と表記を表す「モーラチャンク」、単語を構成するモーラを示す「単語-モーラの関連チャンク」の3種類を持つ。宣言的記憶では、これ

ら3種類のチャンクがネットワークとして接続される。図1の宣言的モジュールから出る吹き出しはこの構造を示している。エージェントはこのネットワークをたどることで、前の単語とモーラを介してつながる答えの単語を検索する。

3.1.2 モデルのパラメータ

ACT-Rのモジュールは、数値的なパラメータによって調整される¹⁾。本研究においては、宣言的記憶を検索することに関わるパラメータ(活性化値、式1)が重要となる。活性化値は学習と忘却(ベースレベル活性化値と呼ばれる)、文脈(活性化拡散と呼ばれる)などに対応する複数の項と、各検索のタイミングで付与されるノイズの加算として定義される。本研究においては、しり通りの単語系列の特徴として、使用される単語の身近さを表現するためにベースレベル活性化値に、対話中の連想を表現するために活性化拡散に注目する。

$$A_i = B_i + S_i + \epsilon_i \quad (1)$$

まず、単語の身近さを表現するためのパラメータとして学習と忘却の効果(ベースレベル活性化値)を設定する。式2において、 B_i はチャンク*i*のベースレベル活性化値を表す。ベースレベル活性化値は、そのチャンクが参照された回数 n 、初めてチャンクが参照されてからの経過時間 L 、減衰率 d およびオフセットの数値 β_i から算出される。 d と β_i は、それぞれひとつの数値によって設定されるパラメータであり全てのチャンクに対して共通の影響を及ぼす。チャンク(単語)ごとの身近さは n および L を調整することで可能となる。

$$B_i = \ln\left(\frac{n}{1-d}\right) - d \times L + \beta_i \quad (2)$$

式3の S_i は、活性化拡散と呼ばれ、他のモジュールが保持しているチャンクからの影響を表し、文脈の効果に対応する。本研究では、単語の連想を表現するためにこのパラメータに着目する。 S_i は、ある検索の際にチャンク i に付与される活性化拡散の数値である。 k は、活性化が拡散するようパラメータによって設定されたモジュールであり、 j は活性化ソースと呼ばれる、 k が保持するチャンクと検索キューが共通して持つ値である。チャンク i がその要素として値 j を持つとき、モジュール k に設定

された活性化量を活性化ソース j の数で割った値が W_{kj} となる。 S_{ji} は活性化ソース j とチャンク i への関連付けの強さであり、式4で表される。ここで、 S は連想強度の最大値を設定するパラメータである。第2項はFan効果[13]と呼ばれ、宣言的記憶全体に含まれる値の数 $slots_j$ と、値 j をもつチャンク i のスロット数 $slots_{ji}$ から計算される。

$$S_i = \sum_k \sum_j W_{kj} S_{ji} \quad (3)$$

$$S_{ji} = S - \ln\left(\frac{1 + slots_j}{slots_{ji}}\right) \quad (4)$$

これらの要素を項として算出される活性化値は、そのチャンクの想起に要する時間に影響する(活性化の高いチャンクほど素早く想起される)。さらに、活性化が閾値よりも低いチャンクは、長時間の検索の試行が行われた後に失敗する。つまり、シミュレーションの進行にともなう活性化値の変化を観察することで、ACT-R内部での知識の使いやすさの変化を推測することができる。

3.2 シミュレーション

3.2.1 シミュレーション設定

上述した設定を持つ2体のモデルがしりとりをするシミュレーションを実施した。モデルが持つ語彙には、幼児・児童の連想語彙表[14]に含まれる反応語の2,436語を利用した。この表は、参加者が刺激語(たとえば「動物」)に対して知っていることばを40分間にできるだけたくさん回答するという課題から作成された。参加者は3歳児、4歳児、5歳児、6歳児、小学1年生、小学2年生、小学3年生、小学4年生、成人に区別された。

この語彙に対応するチャンクのそれぞれに対して、単語の身近さの表現のために、ベースレベル活性化値を設定する。連想語彙表(「動物」に対して46人の3歳児が「象」を回答したなどといった情報)を元に、式2の L と n に代入する値を計算する。本モデルでは成人を想定して L を設定した(たとえば、3歳児の回答した単語は、 $L = 21 - 3$ 年間 = 567,648,000秒)。さらに、単語 w に対する n (n_w) は式5にあてはめた。ここで、 i は参加者の年齢である。 N_{wi} は、単語 w を回答した年齢 i の参加者の人数を示す。さらに1人が1日に1度その単語を参照したという仮定に基づき365をかけた。

1) 詳細はACT-Rのマニュアル[12]を参照

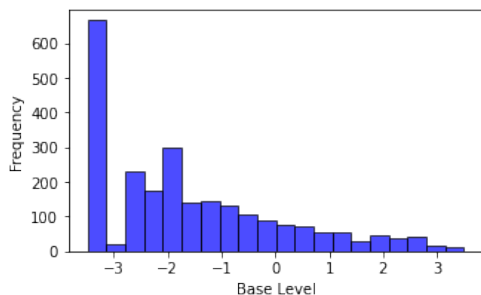


図 2: ベースレベル活性値のヒストグラム

表 1: シミュレーション結果. モデルごとのしりとり系列の特徴.

| | $S = 0$ | $S = 35$ | $S = 100$ |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| 終了条件 | 3/7/0/0 | 0/6/2/2 | 0/4/1/5 |
| しりどりの長さ | 11.9 (6.89) | 13.7 (5.56) | 12.4 (6.42) |
| カテゴリ数 | 6.5 (2.62) | 2.6 (1.50) | 2.9 (1.37) |
| カテゴリ数がしりどりの長さに占める割合 | 0.60 | 0.20 | 0.25 |

$$n_w = \sum_i (N_{wi} \times 365) \quad (5)$$

また、しりとり中の単語の連想を表現するために、活性化拡散を導入する。モデルが持つ語彙のそれぞれに、幼児の連想語彙表 [14] における刺激語をカテゴリとして紐づけた。しりとりにおける一つ前の単語のカテゴリを、ゴールモジュールに配置することで、単語検索の際に単語の意味に関する連想、あるいは文脈の効果が見られることを狙う。また、連想の強さの影響を調査するために式 4 の S を 0 (活性化拡散オフ)、35 (式 1 の B_i と S_i の影響が同程度になる調整)、100 (極端に大きい値) の 3 段階に操作した。

3つのモデルを用いて、3分間を上限とするしりとりそれぞれ 10 回実施した。しりとりは、単語想起の失敗や、しりどりのルール違反 (語尾「ん」の単語や既出語の回答) によっても終了した。

3.2.2 結果

図 2 は、前節で述べた計算方法によって算出されたモデルの語彙のベースレベル活性値に関するヒストグラムである。この図ではベースレベル活性値の値が小さい語彙が多く、値が大きくなるにつれて徐々に数が少なくなっている。つまり、よく知られた一部の単語や、やや身近でない多くの単語といっ

た関係を連想課題から取り出せたと言える。また、最も値の小さいビンが極端に大きいことは、ごく少数の低年齢の参加者が回答した単語が多く存在することを示唆する (たとえば、「動物」に対する「ヤッターマン」という 3 歳児の回答)。

表 1 に、3つのモデルが実行したしりとりに関してその特徴を整理した。終了条件の値は左から、時間制限、検索失敗、既出語の回答、語尾「ん」の単語の回答によって終了したしりどりの回答を示す。しりどりの長さおよびカテゴリ数には 10 回の平均値を示し括弧内に標準偏差を示した。まず、しりとり中に使用された単語のカテゴリ数については、 $S = 35$ および $S = 100$ において少なくなっている。これは、モデルの想定したとおり、単語の連想が起こり、同じカテゴリ内でしりとりが行われたことを意味する。さらに、しりどりが終了した条件に着目すると、いずれの条件でも検索失敗が多く、 $S = 100$ では、語尾「ん」の単語の回答による終了が最も多くなっている。本研究のモデルは、先行研究の設定 [11] をもとに、しりどりのルールに違反する単語が検索された場合、再度検索を行うプロセスを含む、 $S = 100$ のモデルにおいては、連想強度が活性値 (式 1) に占める割合が極端に大きくなったことから、再検索のプロセスを経ても特定の単語にこだわるような振る舞いをしたことが考えられる。

4 まとめ

本稿では、人間の言語使用に関する理解に向けて、シンプルな課題として「しりとり」に注目し、そのパフォーマンスに関わる認知的要因を明らかにすることを目的とした。認知アーキテクチャ上に構築されたしりどりの認知モデルを用いたシミュレーションを通して、連想語彙表に基づくベースレベル活性値の設定 (語彙の活性化と抑制)、単語のカテゴリ情報を利用した活性化拡散 (意味的な連想) の設定によって、特徴の異なるしりとり単語系列が得られた。

今後は、構築されたモデルの振る舞いに関する更なる検証が必要である。これは、得られたしりとり系列を評価させる参加者実験や、人間の言語習得過程におけるしりどりの特徴に関する調査 [15] との比較によって可能である。このような、しりどりの特徴を制御可能なモデルの構築により、HAI 研究や言語獲得支援研究への刺激としての応用が期待される。

参考文献

- [1] Cleotilde Gonzalez, John F Lerch, and Christian Lebiere. Instance based learning in dynamic decision making. **Cognitive Science**, Vol. 27, No. 4, pp. 591–635, 2003.
- [2] John E Laird, Christian Lebiere, and Paul S Rosenbloom. A standard model of the mind: Toward a common computational framework across artificial intelligence, cognitive science, neuroscience, and robotics. **AI Magazine**, Vol. 38, No. 4, pp. 13–26, 2017.
- [3] Frank E. Ritter, Farnaz Tehranchi, and Jacob D. Oury. ACT-R: A cognitive architecture for modeling cognition. **WIREs Cognitive Science**, Vol. 10, No. 3, p. e1488, 2019.
- [4] 大石敬子. 学習障害における言語の問題. 聴能言語学研究, Vol. 11, No. 2, pp. 57–63, 1994.
- [5] 日山美子. 自閉症児の読み書きの発達を促すための指導: 認知特性を踏まえた音節分解の指導. 筑波大学特別支援教育研究, Vol. 6, pp. 31–36, 2012.
- [6] 高橋登. 幼児のこぼ遊びの発達: “しりとり”を可能にする条件の分析. 発達心理学研究, Vol. 8, No. 1, pp. 42–52, 1997.
- [7] John R. Anderson. **How can the human mind occur in the physical universe?** Oxford University Press, 2007.
- [8] Niels A. Taatgen and John R. Anderson. Why do children learn to say “broke”? a model of learning the past tense without feedback. **Cognition**, Vol. 86, No. 2, pp. 123–155, 2002.
- [9] Jacolien Van Rij, Hedderik Van Rijn, and Petra Hendriks. Cognitive architectures and language acquisition: A case study in pronoun comprehension. **Journal of Child Language**, Vol. 37, No. 3, pp. 731–766, 2010.
- [10] Paul Mätzig, Shravan Vasishth, Felix Engelmann, David Caplan, and Frank Burchert. A computational investigation of sources of variability in sentence comprehension difficulty in aphasia. **Topics in cognitive science**, Vol. 10, No. 1, pp. 161–174, 2018.
- [11] Jumpei Nishikawa and Junya Morita. Cognitive model of phonological awareness focusing on errors and formation process through shiritori. **Advanced Robotics**, Vol. 36, No. 5-6, pp. 318–331, 2022.
- [12] Dan Bothell. **ACT-R 7.21+ reference manual**, 2020.
- [13] John Robert Anderson. Retrieval of propositional information from long-term memory. **Cognitive Psychology**, Vol. 6, No. 4, pp. 451–474, 1974.
- [14] 国立国語研究所. 幼児・児童の連想語彙表. 東京書籍, 1981.
- [15] 田中駿, 牛山道雄, 清水里美, 郷間英世. しりとりを通してみた幼児の言語発達. LD 研究, Vol. 33, No. 2, pp. 187–195, 2024.