

認知アーキテクチャを利用した ことば遊びにおける音韻意識のモデル化 Modeling Phonological Awareness in Japanese Word Play using Cognitive Architecture

西川 純平[†], 森田 純哉[†]

Jumpei Nishikawa, Junya Morita

[†]静岡大学情報学部

Faculty of Informatics, Shizuoka University

bi16050@s.inf.shizuoka.ac.jp

j-morita@inf.shizuoka.ac.jp

概要

言語能力に関わる脳機能障害への注目を背景に、言語の習得支援に関する研究の需要が高まっている。本研究では、認知アーキテクチャを用いてことば遊びを行う認知モデルを構築し、シミュレーションにより言語習得に必要な音韻意識のモデル化を試みた。さらに、認知アーキテクチャのパラメータを調整することによって、しりとりを活用した音韻意識の訓練が実現可能であるか検討した。

キーワード： 言語 ACT-R しりとり

1. はじめに

言語の習得を支援することに関わる研究の需要が高まっている。この背景のひとつには、国際化と情報化の進展がある。第一言語が異なる人同士による共同作業が増加したことで、第二言語の利用が要求される場面も増えた。また別の背景として、言語の利用が困難となる脳機能障害への注目も挙げられる。人間の認知機能に関わる研究の進展によって、後天的要因による失語症だけでなく、自閉症などの先天性の障害から来る言語発達遅滞についても、その原因や対処が理解されるようになった。

第二言語の習得や、脳機能障害を持つ人による言語の習得は、典型的な第一言語の獲得プロセスと多くの点で異なっている。典型的な第一言語の獲得プロセスにおいて、乳幼児は養育者のふるまいを観察し、その模倣を行うことで言語を獲得していく [1]。このプロセスのなかで、乳幼児は、音の分節化のパターン、記号と対象の対応関係など、膨大なパラメ

ータの値を、共同注視や対称性バイアスなどの生得的に埋め込まれた認知的制約に誘導されながら推定している。それに対して、第二言語の習得や脳機能障害者の言語習得においては、生得的な制約を有効に活用することができない [2]。そのため、定型発達の第一言語話者と同等の言語スキルを得るにあたって、当人あるいはチュータによる多大な努力が費やされることになる。

こういった困難な学習を支援するためには、個人に応じた学習者モデルが必要である [3]。言語の習得につまずくといったとき、たとえば学習者が持っている語彙が不十分である、音節を切り出すことができていない、音節と文字の対応が取れていないなど、様々な原因が考えられる。学習支援システムのなかで、どのようなつまずきがどのような原因によって生じるのかが明確に切り分けられたモデルを参照することで、適切な介入を図ることができる。

上記の背景から、本研究では、言語の獲得に困難を抱えている個人の語彙をモデル化することを目指す。本研究の特徴は、言葉遊びを利用すること、認知アーキテクチャの知識やパラメータを、個人から受けたフィードバックをもとに推定することにある。前者のゲームとして、しりとりを扱う。後者の認知アーキテクチャには ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational) [4]を用いる。

本稿の構成は次の通りである。まず、2 節にて本研究と関連する研究をレビューする。そののちに、本研究で実装を進めているプロトタイプモデルとモデルを用いたシミュレーションを示す。最後に現状のまとめと今後の課題を示す。

2. 関連研究

2.1. しりとり利用

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。

しりとりは実装の容易さから、人と相互作用する様々なエージェントに組み込まれてきた。学術的には、しりとり課題中の言い淀みや間などを調整することで、ユーザによるエージェントの人間らしさの知覚を増強する研究などが行われている [5, 6]。

しりとりを利用することで、学習者の語彙のモデルを構築する学習支援システムの研究も行われている。山本と柏原によるシステム [7] では、英単語を用いたしりとりを学習者と対話的に行う。そのなかで、学習者の語彙の状態を推定し、学習者のレベルに応じた支援を行う。

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。いくつかの論文の中で、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。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 [8]。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。

本研究では、上記のようなしりとりを可能にする条件を、認知アーキテクチャ上にモデル化することを狙う。そのようなモデルをシステムに組入れることで、学習者の状態をモニタリングしつつ、困難な状況における言語の獲得を支援することを目指す。

2.2. 認知アーキテクチャの利用

認知アーキテクチャとは、個別の課題において生じ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 [4] を利用したモデルに注目する。

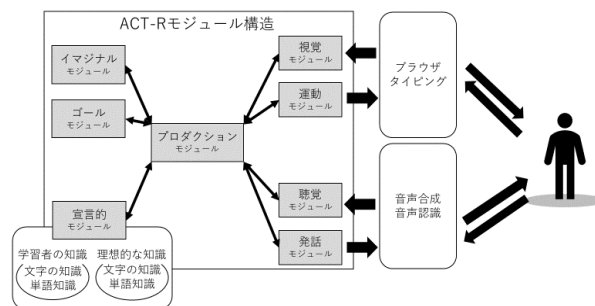


図 1 システム概要図

ACT-R は、複数のモジュールを持つプロダクションシステムである。モジュールの動作を規定する様々なパラメータが存在し、個人差のモデル化を容易にしている。また、外界とのインタラクションを受け持つモジュールを持ち、反応時間の予測が可能である。モジュールと脳部位との対応づけによって、fMRI などの生理データとの対応も可能となっている。

ACT-R を用いた言語の獲得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 [9]、幼児による名詞の学習などのモデル [10] 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 [11]。

しかし、認知アーキテクチャによるこれまでの研究において、しりとりを課題とした語彙獲得の研究は存在しない。2.1 にて述べたように、しりとりは音韻意識に関与する言語課題である。音声言語だけでなく、文字言語の習得との相関も指摘されている。つまり、しりとりは複数のモダリティに関与する言語課題である。そのようなモダリティ間のインタラクションを、ACT-R の保持するモジュール構造が有効にモデル化する可能性がある。

3. モデル

本研究が背景とする言語習得支援システムの概要を図 1 に示す。学習者の語彙構造の推定は、学習者としりとりを行うモデルのシステムを通じたインタラクションから行われる。このシステムでは、ACT-R モデルと人が、ブラウザに表示されたインタフェース、または音声によってしりとりを行う。ひらがな入力と音声インタフェースを組み合わせることで、音韻意識の獲得が困難な学習者への支援が有効に行われる可能性がある。以下の節にて、既に実装されたプロトタイプモデルの内部処理を記載する。

3.1. モデルの構成

しりとりプロセスを検討するため、簡易的なプロトタイプモデルを構築した。天野と近藤による『日本語の語彙特性』[12]に掲載されている親密度 4.0以上の単語 2,000 単語をモデルの知識として用いてしりとりを行っている¹。また、ユーザとのインタラクションを設けず、一人でのしりとりプロセスを扱っている。モデルは自身の想起した単語から、語尾文字を抽出し、それを語頭に持つ単語を想起し、連結していくことになる。以下に ACT-R のモジュール構造によって、このプロセスがどのように実現されるかを示す。

3.1.1. 宣言的モジュール

ACT-R の宣言的モジュールを用いて、しり通りの遂行に必要な知識をモデル化する。ACT-R における宣言的モジュールは、チャンクと呼ばれる構成要素からなる。本研究のモデルが保持するチャンクは、単語の知識（語彙）に関するものと、文字の知識に関するものがある。前者のチャンクとして、単語の文字列情報を表す `text-inf`、単語の語頭文字の知識である `word-heads`、単語の語尾文字の知識である `word-tails` というタイプを用意した。以下にそれぞれのタイプに含まれるチャンクの例を示す。

```
(ringo ISA text-inf text "ringo")
(word-head-ringo ISA word-heads
  meaning ringo
  head-char "ri")
(word-tail-ringo ISA word-tails
  meaning ringo
  tail-char "go")
```

各チャンクは、先頭にチャンク名が示され、その後スロット名と値の組が続く。チャンクのタイプは、ISA スロットの値によって示され、それぞれが異なるスロットを持つ。`text-inf` をタイプとするチャンクは、`text` という名前のスロットを持ち、文字列の情報 ("ringo") を保持する。`word-heads` タイプは、`word-name` スロットに単語の知識、`head-char` スロットに語頭文字の情報を持つ。`word-tail` チャンクも同様に、単語の知識と語尾文字を組み合わせた情報を保持している。

本研究における ACT-R モデルは、上記のような単語に関わる知識の他に、文字に関わる知識をチャンクとして持つ。以下に例を示す。

```
(a ISA kana string "a")
(i ISA kana string "i")
(u ISA kana string "u")
⋮
(n ISA kana string "n")
```

このチャンクは、先に示した単語に関わるチャンクの構成要素となる。つまり、本研究のモデルにおいて、このチャンクに関わる操作が、しりとりにおける単語から文字を切り出す音韻意識に対応すると言える。

また、本モデルはしり通りのゲーム中で既に回答された単語に関する知識を保持するためのタイプ `past` を持つ。このタイプは単語の知識 `past-word` と単語の文字列知識 `past-string` からなる。`past` タイプのチャンクは、はじめは宣言的モジュール内には存在せず、しり通りの進行に従って生成され、格納されてゆく。

3.1.2. ゴールモジュール

ゴールモジュールは、課題の状態を一時的に保持する。本モデルでは、ゴールモジュールに保持される短期記憶は、回答単語を表すスロット (`a-word`)、回答単語の語頭文字を表すスロット (`a-head`)、回答単語の語尾文字を表すスロット (`a-tail`) とモデルの状態を表すスロット (`state`) によって構成される。これらのスロットの値はプロダクションモジュールによって逐次的に挿入、更新される。

3.1.3. イマジナルモジュール

イマジナルモジュールは、モデルの保持する内的表象を表現するために利用される。イメージした情報をチャンクとして生成する機能を持つ。本モデルの中では、単語を回答した際に、回答済みの単語を表すチャンクを新たに生成し、宣言的モジュールへ格納する役割を果たす。

3.1.4. 発話モジュール

発話モジュールは、口から言葉を発したり、頭の中で言葉を思い浮かべたりするのにかかる時間をシミュレートする。本モデルはひとりで行うしりとりを対象としているが、回答となる単語や、回答を検索するための文字を発話したり、思い浮かべたりするために、随時発話モジュールを利用している。

3.1.5. 聴覚モジュール

聴覚モジュールは、耳で聞きとった音について、位置を把握したり、内容を理解したりするのににか

¹ 絶版により入手困難であったため、Web 上に抜粋されたリストを利用した。

る時間をシミュレートする。本モデルでは、聴覚的な情報の入力があるまで常に待機しており、入力があった時には、その情報を一旦バッファに保持したのち、宣言的知識として格納する操作を行う。

3.1.6. プロダクションモジュール

プロダクションモジュールは、他のモジュールが保持する情報や状態を利用しながら、ルールを選択、適用し、モジュールを操作する様々な処理を行う。以下に、本モデルにおけるプロダクションの働きと、しりとりプロセスを示す。

モデルは、単語の情報を受け取ると、しり通りのルールにのっとって単語を検索し回答する。図2は、モデルのルールをボックスで囲み、系列的に発火するルールを矢印で結んでいる。

モデルのプロセスは、回答候補を想起するプロセス（図2の左側の start から check-used まで）と想起された回答候補をチェックするプロセス（図2の check-used から右側のプロセス）に分けられる。

回答候補の想起プロセスにおいて、最初に単語の知識が、ゴールモジュールの a-word スロットに格納されている。この状態で、start ルールが発火し、a-word スロットの単語知識をもとに宣言的モジュール内の単語と語尾を結ぶ知識（word-tails をタイプとしたチャンク）が呼び出される。その後、focus-tail ルールが発火することで、語尾文字がゴールモジュールの a-tail スロットに格納される。retrieve-next-word ルールは、そのアルファベットを語頭に持つ単語（word-heads をタイプとしたチャンク）を検索する。単語が検索されると、単語知識を次のゴール（a-word スロット）にセットする（set-next-goal ルール）。この間の単語、文字が呼び出された時点において、発話および聴覚に関わるルールが随時発火し、単語や文字の発話、聴覚情報の取得を行う。以上で回答候補を想起するプロセスは終了となる。

この後、モデルは想起された回答候補が、課題中で既出でないかの判定を行う。モデルの宣言的モジュールは、過去に想起された単語を経験として保持している（past というチャンクタイプ）。check-used ルールによってその想起に失敗した場合（過去にその単語を想起した経験がない場合）、その単語を回答とし、start ルールに戻る。回答候補を手掛かりとした宣言的モジュールの検索によって、過去に想起した経験が思い出された場合（既出だった場合）、回答単語の語頭文字との関連記憶を検索し（back-head ルール）、語頭文字に着目し（focus-head ルール）、語頭文字の知識を検索して（retrieve-head-chara ルール）、再度文字知識から回答候補となる単語を検索するプロセスに入る。

また、focus-tail と retrieve-head-chara ルールにおい

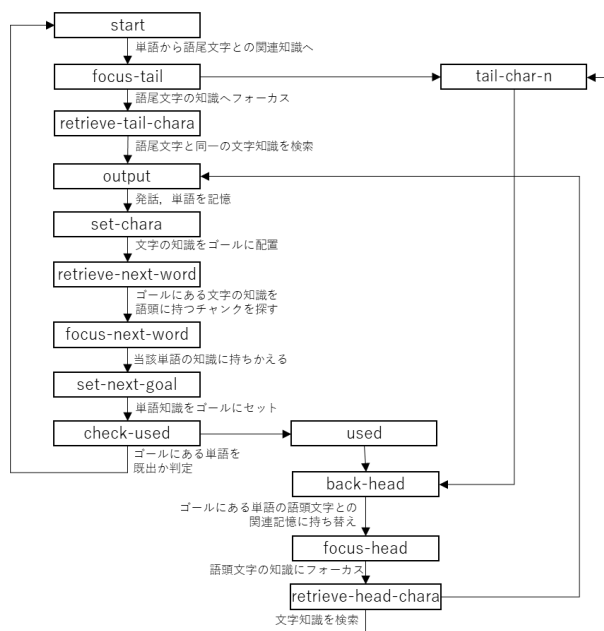


図2 モデルのプロセス

て「ん」で終わる単語が検索された場合、back-head ルールが発火することで、既出語が検索された場合と同じく単語を再検索するプロセスに入る。

3.2. 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。本研究において重要なパラメータは、宣言的モジュールからのチャンクの検索に関わるパラメータである。ACT-R において宣言的モジュールに格納されるチャンクは、活性値を持つ。活性値は学習や忘却、文脈などに対応する複数の項の加算として定義される。このうち、本研究において注目するのは、学習と忘却の効果を表す以下のベースレベルである。

$$B_i = \ln \left(\sum_{j=1}^n t_j^{-d} \right) + \beta_i$$

上記の式において、 B_i はあるチャンク i のベースレベルを表す。ベースレベルは、そのチャンクが参照された回数 n および ACT-R 内部でパラメータ (:bll) によって指定される減衰率 d と j 回目にチャンクが参照されてからの経過時間 t_j 、パラメータ (:blc) によって指定されるオフセット β_i から算出される。

ベースレベルを項として算出される活性値は、そのチャンクの想起に要する時間に影響する（活性値の高いチャンクほど素早く想起される）。さらに、活

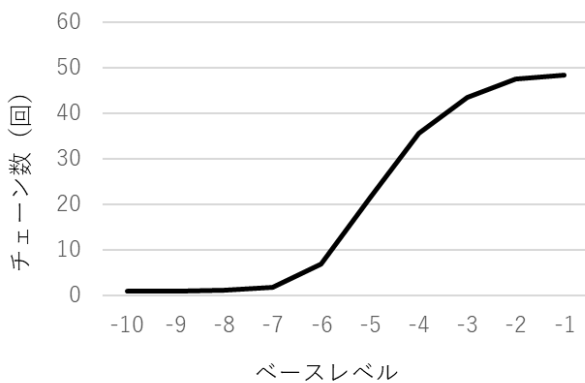


図 3 音韻意識と対応するチャンク活性によるしりとりチェーン数の変化

性値が一定(パラメータ:rtによって指定される閾値)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、ベースレベルをシミュレーションのパラメータとして指定することで、ACT-R 内部での知識の使われやすさを制御することができる。以下に示すシミュレーションでは、ベースレベルと関連するパラメータを操作することで、しり通りの遂行における音韻意識の役割としり通りの遂行における音韻意識の獲得を検討する。

4. シミュレーション

4.1. シミュレーション 1: しり通りの遂行

における音韻意識の役割

シミュレーション 1 では、しり通りの遂行における音韻意識の役割を検討した。本研究においては、人の音韻意識に対応する知識として kana タイプを想定している。よって、kana タイプの各チャンクの想起のされやすさ(活性値)は、発達過程における音韻意識の高まりと対応すると考える。

この想定から、各 kana タイプチャンクのベースレベルを複数の段階(-10~-1)に固定するシミュレーションを行った。また、検索の成功に関わる閾値(rt)、検索のノイズパラメータ(ans)、検索の遅延に関わるパラメータ(lf)は、ACT-R の他の研究を参考に設定した(rt=-5, ans=0.5, lf=0.05)。kana タイプチャンク以外のチャンクの活性値は 0 に固定した。

シミュレーションの各試行において、モデルは 500 秒間しりとりを繰り返した。この試行の中で、しりとりがつながった回数をチェーン数として記録した。

図 3 にシミュレーションの結果を示す。グラフの縦軸にチェーン数(1,000 回の実行の平均)、横軸に設定されたベースレベルを示す。図 3 より、ベースレベルの値が一定に達すると、チェーン数が極端に増加することがわかる。音韻意識と対応するチャンクの活性値がしり通りの成功に影響したことから、発達研究 [8] の知見と整合し、音韻意識がしり通りの成立に関与する条件となることが示される。なお、グラフ右側において、ベースレベルが十分に高くなるにつれて傾きが緩やかになっていることは、このシミュレーションにおいて、しり通りに利用可能な単語が開始時点で登録した 2,000 語に限られ、その後増加しないためであると考えられる。

シミュレーション 2: しり通りの遂行によ

る音韻意識の発達

シミュレーション 1 において、初期値として設定されたベースレベルは、シミュレーションの実行によって変動しなかった。それに対して、シミュレーション 2 では、しりとりを行うことで音韻意識を訓練することの可能性を検討する。つまり、しりとりを行って行く中で、モデルの保持する知識の活性が変動する状況を設定する。初期値を低く設定された kana タイプチャンクが、一度しり通りに成功することで、増加していくこと確認する。

この目的を達成するためには、シミュレーション 1 で行ったようなベースレベルを固定する操作を行うことはできない。ベースレベルの変動を計算するためには、式 1 における記憶検索のイベント j を定義しなければならない。今回のシミュレーションでは、各 kana タイプチャンクが過去に一度だけ利用され、それ以降使われていない状況を設定することで、チャンクのベースレベルの初期値を操作する。具体的には、ACT-R において各チャンクがもつ生成時間(creation-time)のパラメータを、kana タイプチャンクについて、-1,000,000,000 秒(31.7 年前)から 10 分の 1 ずつ減少させた 10 条件を設定する。さらに、減衰率(bll)について、0, 0.1, 0.5, 0.9 を設定する。減衰率が大きいほど、モデルのもつチャンクの活性値は時間の影響を大きく受けることになる。

上記の各設定について、シミュレーション 1 と同様、モデルは 500 秒間しりとりを繰り返す試行を 1,000 回実行した。Kana チャンクの creation-time を設定したこと、減衰率を設定したこと以外はシミュレーション 1 と同じパラメータの設定となっている。

シミュレーション結果を図 4 に示す。横軸は creation-time を表し、縦軸はチェーン数を表す。図より、減衰率によって、チェーン数のグラフが大きく

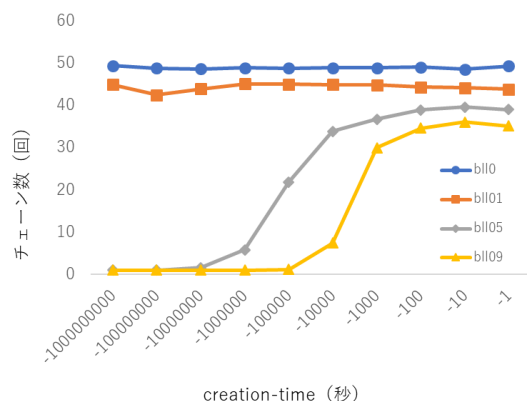


図 4 :bll と creation-time の指定によるしりとりチェーン数の変化

異なることが示される．減衰率が小さい時には，creation-time に関わらず，bll0 (bll = 0) と bll01 (bll = 0.1) のチェーン数は一定であり，他の条件のチェーン数よりも大きくなっている．減衰率は，活性値に対する時間の影響の大きさを表すため，この値が小さいときには，チャンク生成時間の影響を受けなかったものと考えられる．

一方で，減衰率が一定よりも大きい条件 (bll05: bll = 0.5, bll09: bll = 0.9) では，図 3 で観察されたものと類似したチェーン数の立ち上がりと収束が観察された．その立ち上がりは bll05 と bll09 で異なっている．bll05 は bll09 に比べ，creation-time の小さい段階において，しり通りのチェーンに成功することが示される．bll09 は creation-time がより最近にならないとチェーンに成功しないが，bll05 に比べれば，creation-time に対するチェーン数の伸びがより急激になっている．減衰率の高い状況においては，古い記憶に対して，最近検索された記憶項目の重みが大きくなる．このことから，bll09 におけるチェーン数の急激な伸びは，一旦用いられ始めた kana タイプチャンクの活性値がしり通りの遂行によって，増加していったことを示唆する．つまり，この結果は，人がしりとりを行うことによって，音韻意識を向上させる可能性を支持する．

5. まとめと今後

本稿では研究の最終的な目標を言語の習得に困難を抱えている個人の語彙をモデル化することとした．これを達成するために，ACT-R を用いてひとりしりとりを行うプロトタイプモデルを構築した．また，このモデルを用いてシミュレーションを行い，しりとり課題におけるモデルと人との類似点を確認した．このシミュレーション結果から，しりとりを利用さ

れる音韻知識や語彙知識をモデル化する手法が示唆され，それらの知識の活性値によって，音韻意識の高まりがしりとり課題に与える影響を再現できる可能性，およびしりとりを活用した音韻意識の訓練を実現できる可能性が示された．

本研究に対して，多くの課題が残されている．まず，シミュレーション結果の精査と，条件の異なるシミュレーションに対する結果の比較が必要である．また，モデルの発展が必要である．たとえば，本研究で構築したモデルは語彙に意味が欠如している．今後は，コーパスを用いることで，意味的制約を課したしりとりなどを行う語彙発達の課題により深く関わるしり通りのモデルの構築を目指す．さらに，本研究におけるモデルは，発話をするのみであり，インタラクションを実現する入出力の構造を持たない．今後，インタフェース部分やデータ保管方法に関する検討を加えることで，ユーザとのインタラクションを介した個人のモデル化を実現していく．この過程において，モデル及びシステムの妥当性を検証する実験も必要になるだろう．

文献

- [1] Tomasello M., (1999) "The cultural origins of human cognition", Harvard University Press.
- [2] Baron-Cohen S., (1997) "An Essay on Autism and Theory of Mind", The MIT Press.
- [3] Anderson J. R., Boyle C. F., and Reiser B. J., (1985) "Intelligent Tutoring Systems.", Science, Vol. 228, No. 4698, pp. 456-462.
- [4] Anderson J. R., (2007) "How can the human mind occur in the physical universe?", New York: Oxford University Press.
- [5] 大藤 聖菜, 妹尾 卓磨, 清丸 寛一, 川崎 邦将, 大澤 正彦, 長田 茂美, 今井 倫太, (2017) "予測的認知と「間」の関係ー言葉を話せないロボットによるしりとりを題材とした考察", HAI シンポジウム 2017.
- [6] 阪本 綾香, 林 勇吾, 小川 均, (2011) "コミュニケーションロボット PaPeRo による人間らしさの表出", HAI シンポジウム 2011.
- [7] 山本 米雄, 柏原 昭博, (1989) "知識定着を目的とした開放型 CAI のモデル化", 電子情報通信学会論文誌 D-2 情報・システム, Vol. 72, No. 9, pp. 1459-1471.
- [8] 高橋 登, (1997) "幼児のことは遊びの発達「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.
- [9] Taatgen N.A., Anderson J.R., (2002) "Why do children learn to say 'broke'? A model of learning the past tense without feedback.", Cognition, Vol. 86, No. 2, pp. 123-155.
- [10] Van Rij J., Van Rijn H., and Hendriks P., (2010) "Cognitive architectures and language acquisition: A case study in pronoun comprehension.", Journal of Child Language, Vol. 37, No. 3, pp. 731-766.
- [11] Matzig P., Vasishth S., Engelmann F., and Caplan D., (2017) "A computational investigation of sources of variability in

sentence comprehension difficulty in aphasia”,
Proceedings of the 15th International Conference on
Cognitive Modeling, pp. 1-6.

- [12]天野 成昭, 近藤 公久, (1999) “日本語の語彙特性 単語親密度”, Vol. 1, 三省堂.