

二者関係の概念化に基づく構文交替の文化進化

岩村入吹 橋本敬

JAIST

{ibuki_iwamura,hash}@jaist.ac.jp

概要

進化言語学は、動物コミュニケーションシステムと比較しながら、人間言語の普遍的性質や文法一般の起源・進化・創発を説明しようとする。中には、同世代内でのコミュニケーションや、親の発話と子の学習が繰り返す世代間継承を対象とした文化進化研究がある。本研究では、同一状況を言語使用者の概念化によって表現の仕方を変える構文交替現象が世代間継承で創発する条件をシミュレーションにより示す。ここでは親が事象を**概念化**して**発話**し、子が概念化された意味を**推論**し発話と事象の関係を**学習**する状況を世代間継承と見做す。推論成功の確率が非常に高い場合のみ構文交替が生じた。

1 はじめに

人間言語の起源・進化・創発という現象を説明するためには、言語化石なる人類学的証拠は得にくく、また一回性 (singular) の出来事であることから、計算機上で言語現象を模倣することで理解を進める構成論的なアプローチが有効である。言語という記号システムを長い歴史の中で人々が相互作用して作り上げた社会文化的構築物としてみた時、言語を文化進化研究の俎上に載せることができる。Kirby は、言語の文化進化研究において代表的な「**繰り返し学習モデル (Iterated Learning Model; ILM)**」を提唱した [1]。これは前世代の個体の発話データを学習した個体が今度は、次世代の個体が学習するためのデータを発話をするという、学習と発話が連鎖する文化進化のモデルである。言語創発最初期には意味と形式の対応関係がたとえランダムだとしても、その対応関係が学習と発話の連鎖を通じて規則的になり、複合的な意味をより単純な部分の意味の組み合わせで表現できる構成性 (Compositionality) が創発する。Kirby らにとっての「言語起源・進化・創発」とは、「言語らしきもの (原型言語)」が徐々に構成性などの普遍的性質を帯びて「完全な言語 (現

存する言語)」になる過程である。

これまで、構成論的な方法に絶えず寄せられる恣意的なモデル化への懐疑を避けるべく、様々な学習機構 (ルールベース、ニューラルネット、ベイズなど) による感度分析により ILM の頑健性が検証されきたものの、意味構造の設計には議論の余地がある。例えば述語論理 (確定節文法) [2], 素性 (feature) の順序集合 [3], 属性 (attribute) の順序集合 [4] が意味構造の記述に使われているが、こうした設計は、**外部事象の集合が意味であることを前提**にし、また、**意味の構成要素同士の「関係性」を操作する自由度はない**という制約を内包する。

機能主義言語学に属する認知言語学では、言語は認識の反映であるというテーゼ¹⁾を基に、言語使用者内部の意味に注目する。ここでの意味は、真理値が決まる客観的な外部事象ではなく、言語使用者が外部事象をある特定の「**観点 (perspective)**」からの「**捉え方 (construal)**」を採用して「**概念化 (conceptualization)**」することで形成される [6]。ここには事象の構成要素同士の「**関係性**」を言語使用者がある程度主観的に操作する自由度がある。例えば、figure/ground や trajector/landmark の選択は、「**際立ち (salience あるいは prominence)**」といった認知的動機づけ [7] こそあれ、本来言語使用者に選択の自由がある。ただし、意味が言語使用者内部にあるならば、外部世界の共有だけでは他者には不可知であり、意図共有 [8] に基づいた推論が必要となる。特に、構成的な文法がなかったと想定される言語創発最初期において、意味と形式の対応関係が構造化されていないことは、言語使用者の概念化を推論することを難しくさせるはずだ。

本研究は、これまでの言語の文化進化研究の構成論的手法と認知言語学の知見を組み合わせ、より具体的な言語現象の起源・進化・創発を解明することを目指す。すなわち、親は外部事象を主観的に概念化して発話し、子は推論して学習するという世代間

1) このテーゼに関する哲学的批判は [5] を参照

継承において、概念化された意味が形式に反映される条件をシミュレーションにより調べる。

2 背景

2.1 繰り返し学習モデル

[9]では、「繰り返し学習」を再帰的な表現を使って、文化進化一般に当てはまる定義を与える。繰り返し学習とは、他個体の行動を観察し帰納推論して獲得した行動を、また他の個体が帰納推論する過程である。すなわち、内在的な能力の直接継承（遺伝など）ではなく、外在化した行動の観察と学習を通じて間接的に継承される文化進化の過程である。外在化した行動を言語に当てはめたのが図1の上半分である。親の発話と子の学習が循環する。

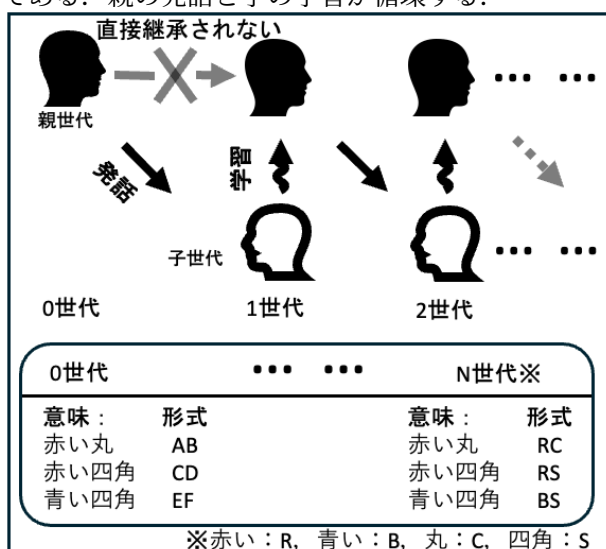


図1 繰り返し学習モデル・構成性創発

ここでは、言語が意味と形式の対応関係²⁾としてモデル化される。親は言語知識を全て発話せず、かつ子も親の全発話を正確に学習できないことから、親と子の言語知識にボトルネックがある。つまり、子は意味空間の一部しか受け取れない。しかし、学習できない残りの意味空間をも発話するには、子は汎化学習をする必要がある。ボトルネックと汎化学習により、始めは意味と形式の対応関係が総体的であっても、徐々に対応関係が圧縮され、構成的になっていくことが示された。

2.2 概念化と構文交替

認知言語学では、言語使用者が知識や能力を使って外界を概念化することを重視する。動的な

2) 「表現体系」という言葉が使われることもある [10]。

認知過程としての概念化は、「捉え方 (construal)」に本質的に依存する。[11, Ch.3] は、捉え方を specificity(詳述性)・focusing(焦点化)・prominence(際立ち)・perspective(観点)の4つに分類した。中でも我々は際立ちに属す「Trajector/Landmark」に注目する。この道具立ては、関係性の記述における非対称性を扱う。TrajectorもLandmarkも際立ちを持つが、Trajectorの方が主要な(primary)対象で、Landmarkはその他の(other)対象である[7]。対象の一つ一つの概念化が完了しても、それらをどのような関係性(主要かその他か)をもつものとして概念化するかは未完了である。典型的には、動作動詞における動作主がTrajectorで、被動作主がLandmarkに対応するが、より広く関係性の記述に適用可能である。言語使用者の概念化によって、使われる構文が異なる場合がある(図2)。

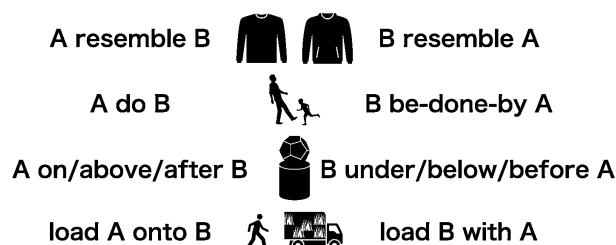


図2 概念化と構文交替

2.3 構成性の評価指標

構成性 (compositionality) は、2通りの方向から定義づけが可能である。全体を部分に還元できる性質(全体→部分)という意味を強調すれば、「複合的な意味をより単純な意味の規則的な組合せとして表現できる性質」[12]という「分節化可能な程度」として定義でき、部分によって全体を構築する性質(部分→全体)という意味を強調すれば、形式全体の意味が部分的な意味から決定される性質[13]という「合成可能な程度」として定義できる。構成性の間接的な指標として、分節化可能性は圧縮できた**ルールの総数**、合成可能性は未知の意味に対応できる**表現力**を用いることができる。

進化的言語学の文脈で最も代表的な構成性の評価指標は、**Topographic Similarity (TopSim)**である[14, 15]。TopSimは言語全体の統計的性質を見る。具体的には、2つの意味の距離と各々に対応する形式の距離の相関係数を計算する。言語が構成的ならば、意味が類似していると形式も類似し、意味が類似していないと形式も類似しない[16]という直感を

表現できる。

意味や形式の類似度は、それぞれ、Hamming 距離と Levenshtein 距離で計算され、特に Levenshtein 距離の計算方法には最大形式長で標準化 (Normalized) しないもの [14] とするもの [17] とがある。また相関係数も、ピアソン相関係数 [18] とスピアマン相関係数 [15] とがある。

3 実験

3.1 言語知識

エージェントは、右辺に意味、左辺に形式からなるルールを言語知識として持つ。まず、意味構造の設計について。概念化の本質は、関係性の自由度である。関係性の自由度を単純化させ、述語の取る項を2つに限定する。これは、2つのうちどちらかに注目する非対称性という概念化の本質を捉えている。本研究では、意味構造を大きく2つに分け、外部事象を述語項構造で、概念化を CV0, CV1 の2値 (Conceptualization Value) で表す。

$$S/\text{predicate}(\text{argument}_i, \text{argument}_j)/CV$$

次に、形式は、長さ L のアルファベット $A = \{a, b, c, \dots, z\}$ 文字列である。言語知識のうち、例えば、**文ルール**と**単語ルール**はそれぞれ

$$S/\text{kick}(\text{john}, \text{mary})/0 \rightarrow abc$$

$$S/\text{kick}(\text{john}, \text{mary})/1 \rightarrow def$$

$$N/\text{john} \rightarrow gh$$

とする (大文字アルファベットは非終端記号)。

3.2 学習アルゴリズム

学習は、[2] を参考に、汎化学習するための3つのルールベースのアルゴリズム Chunk, Category-Integration, Replace からなる。

- **Chunk** : 2つの文ルールの汎化と単語の分節化

$$\text{Rule 1: } S/\text{kick}(\text{john}, \text{mary})/0 \rightarrow abc\underline{j}kde$$

$$\text{Rule 2: } S/\text{kick}(\text{john}, \text{anya})/0 \rightarrow abc\underline{st}ude$$

↓

$$\text{Rule 3: } S/\text{kick}(\text{john}, Y)/0 \rightarrow abcQ/Ydef$$

$$\text{Rule 4: } Q/\text{mary} \rightarrow jk$$

$$\text{Rule 5: } Q/\text{anya} \rightarrow stu$$

- **Category-Integration** : カテゴリーの統合

$$\text{Rule 1: } \underline{W}/\text{anya} \rightarrow jk$$

$$\text{Rule 2: } \underline{U}/\text{anya} \rightarrow jk$$

$$\text{Rule 3: } S/\text{kick}(\text{john}, Y)/0 \rightarrow abc\underline{U}/Ydef$$

↓

$$\text{Rule 1: } W/\text{anya} \rightarrow jk$$

$$\text{Rule 4: } S/\text{kick}(\text{john}, Y)/0 \rightarrow abcW/Ydef$$

- **Replace** : 単語ルールによる文ルールの汎化

$$\text{Rule 1: } Q/\text{mary} \rightarrow \underline{j}k$$

$$\text{Rule 2: } S/\text{kick}(\text{john}, \text{mary})/1 \rightarrow abc\underline{j}kde$$

↓

$$\text{Rule 1: } Q/\text{mary} \rightarrow jk$$

$$\text{Rule 3: } S/\text{kick}(\text{john}, Y)/1 \rightarrow abcQ/Yde$$

Chunk は文ルール同士を比較するため CV を区別して学習する。よって、CV 別で異なる汎化ルールが作られる。一方、Category-Integration と Replace は、CV のない単語ルールを使用する。これにより、単語ルールだけは各 CV の言語知識を越境する。単語ルールを持つというのは、概念化とは独立に、行為それ自体や対象それ自体といった単一の意味要素を特定していることと見做す。

3.3 設定

- 世代構成員 : 1
- 世代数 : 400
- 意味空間の大きさ³⁾ : $96 = 4 \times 4 \times 3 \times 2$

i	関係性要素 P_i	j	対象要素 X_j	CV
1	eat	1	alice	0
2	follow	2	bob	
3	get	3	carol	1
4	help	4	david	

- 形式長 : 3 以上 10 未満
- ボトルネック : $48 = 24 \times 2$ (各 CV から半分)
- 推論成功確率 : 正しい CV を受け取る確率
- 学習 : 1 発話ごとに学習

3.4 評価指標

本研究では、表現力が 0.8 以上で、かつ、全ルール数が 24 個未満で、かつ、汎化されていない文ルール数が 1 個未満である状態が 30 世代以上続く世代を、「安定して」言語知識が継承されている連続世代とした。この連続世代における言語知識を調べる。特に、概念化された意味が形式にどのように反映されているのかを捉えるため、大きく分けて、CV のみが異なるルール同士を評価する指標と学習の過程では区別される CV0 と CV1 を統合して、1つの言語知識として評価する指標がある。⁴⁾

3) 再帰的用法 $\text{John}_i \text{loveshim}_i$ は含まない。

4) CV のみが異なるルールの意味の距離は、通常の意味要素の距離の半分 (0.5) とした。

概念化とは独立に、行為それ自体や対象それ自体といった単一の意味要素を特定できる学習アルゴリズムの設計になっているため、各意味に対応する形式（分節化された単語）は共通する。ただし、CVの違いによってその語順構造が異なる場合がある。そこで、形式を index 単位で比較して語順が類似しているかを測る指標と、bag 単位で比較して語順を無視して形式要素が類似しているかを測る指標を用意した。

4 結果・考察

推論成功確率が非常に高い (1.0) 場合 CV によって異なる語順構造を持ち、異なる冗長な形式をもつ構文が生じた。例えば、推論成功確率=1.0 における、seed 値 = 5 の 150 世代目の言語知識の抜粋（一部改変）。

$$S/p(x,y)/0 \rightarrow cA/xB/pA/yj$$

$$S/p(x,y)/1 \rightarrow A/ygA/xB/pwi$$

CV0 の時は、SVO 言語のような語順構造を持つが、CV1 の時は OSV 言語のような語順を持っている。p(x,y) が同じ意味要素であっても異なる語順構造によって概念化が反映されていると言える。概念化に応じて構文が使い分けられている、と判断した。一方で推論成功確率が低い (0.1 以上 0.9 未満) 場合 CV に関わらず語順構造が同じ構文になった。例えば、推論成功確率=0.9 における、seed 値=92 の 50 世代目の言語知識の抜粋（一部改変）。

$$S/p(x,y)/0 \rightarrow A/ymB/pdA/x$$

$$S/p(x,y)/1 \rightarrow A/ymB/pdA/x$$

他には、推論成功確率=0.5 における、seed 値=46 の 85 世代目の言語知識の抜粋（一部改変）。

$$S/eat(x,y)/0 \rightarrow ivA/xrkA/y$$

$$S/eat(x,y)/1 \rightarrow ivA/xrkA/y$$

である。これらの世代の言語知識において、単語ルールは意味を区別した形式を持っている。しかし、どちらも CV に関わらず全くルールを持っている。そのため、CV の異なる意味が同じ形式で発話される。同じ形式であることを理由に、概念化を形式に反映できず、同じ構文を使用していると判断した。

以上のことは、用意した評価指標に現れた。横軸は推論成功確率である。言語知識が「安定」している連続世代 [3.4 節] における、形式距離の時間平均の seed 平均を縦軸にとっている。CV が異なると異なる語順構造を持ちやすい推論成功確率の高い場合

の言語知識では、CV のみが異なる意味に対応する形式の距離は長くなる。

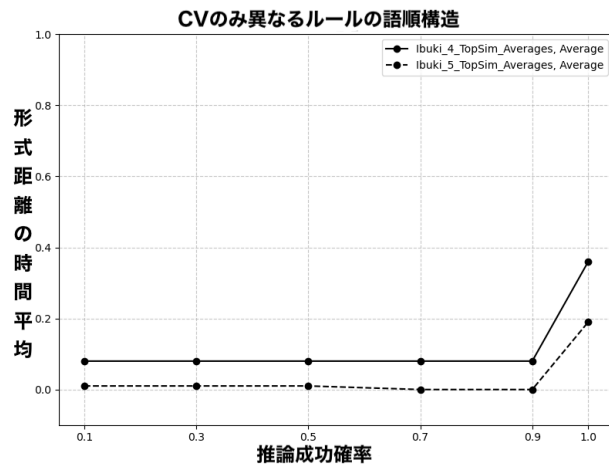


図3 語順構造の測定

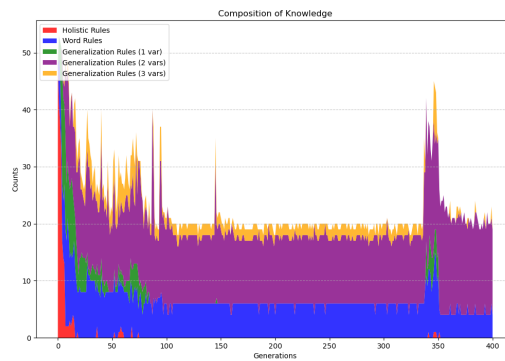


図4 推論成功確率 1.0 の言語知識 (seed 値=89)

推論成功確率の高低が概念化の区別を異なる構文で表現できるかどうかに影響を与えるという結果は、学習アルゴリズムに起因すると考えられる。Chunk では CV を区別するため、各 CV の言語知識で異なる構造をもつ発話を受け取っても、明確に区別して学習できる。しかし、推論成功確率が少しでも各 CV 間が無関係ではなくなる。より汎化したルールを持つには、CV を区別しない同じ語順構造のルールを持つに至ったと考えられる。

5 おわりに

本モデルでは、話者が事象を概念化して発話し、聴者が概念化された意味を推論し発話と事象の関係を学習する状況を世代間継承と見做した。結果として、推論成功確率が非常に高いと概念化された意味を異なる構文で表現し、推論成功確率が少しでも下がれば類似の構文で表現することが示された。

参考文献

- [1] Simon Kirby. Spontaneous evolution of linguistic structure — an iterated learning model of the emergence of regularity and irregularity. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Vol. 5, No. 2, pp. 102–110, 2001.
- [2] Simon Kirby. Learning, bottlenecks and the evolution of recursive syntax. **Linguistic evolution through language acquisition: Formal and computational models**, pp. 173–204, 2002.
- [3] Simon Kirby, Monica Tamariz, Hannah Cornish, and Kenny Smith. Compression and communication in the cultural evolution of linguistic structure. **Cognition**, Vol. 141, pp. 87–102, 2015.
- [4] Yi Ren, Shangmin Guo, Matthieu Labeau, Shay B Cohen, and Simon Kirby. Compositional languages emerge in a neural iterated learning model. **arXiv preprint arXiv:2002.01365**, 2020.
- [5] 酒井智宏. 認知言語学と哲学—言語は誰の何に対する認識の反映か—. **言語研究**, Vol. 144, pp. 55–81, 2013.
- [6] Ronald W Langacker. Conceptualization, symbolization, and grammar. In **The new psychology of language**, pp. 1–37. Psychology Press, 2014.
- [7] Ronald W. Langacker. **Concept, Image, and Symbol: The Cognitive Basis of Grammar**. Mouton de Gruyter, 1990.
- [8] Michael Tomasello. **Constructing a language: A usage-based theory of language acquisition**. Harvard university press, 2005.
- [9] Simon Kirby, Tom Griffiths, and Kenny Smith. Iterated learning and the evolution of language. **Current opinion in neurobiology**, Vol. 28, pp. 108–114, 2014.
- [10] 外谷弦太. 言語進化に関する文献紹介. **認知科学**, Vol. 27, No. 1, pp. 76–83, 2020.
- [11] Ronald W Langacker. **Cognitive grammar: A basic introduction**, Vol. 535. Oxford University Press, 2008.
- [12] 上田亮, 谷口忠大, 鈴木麗璽, 江原広人, 中村友昭, 岩村入吹, 橋本敬. 言語とコミュニケーションの創発に関する構成論的研究の展開. **認知科学**, Vol. 31, No. 1, pp. 172–185, 2024.
- [13] R Cann. Formal semantics: An introduction, 1993.
- [14] Henry Brighton and Simon Kirby. Understanding linguistic evolution by visualizing the emergence of topographic mappings. **Artificial life**, Vol. 12, No. 2, pp. 229–242, 2006.
- [15] Rahma Chaabouni, Eugene Kharitonov, Diane Bouchacourt, Emmanuel Dupoux, and Marco Baroni. Compositionality and generalization in emergent languages. **arXiv preprint arXiv:2004.09124**, 2020.
- [16] 上田亮, 石井太河, 鷺尾光樹, 宮尾祐介. 範疇文法導出を用いた創発言語の構成性の評価. **言語処理学会 第29回年次大会 発表論文集**, 3 2023.
- [17] Simon Kirby, Hannah Cornish, and Kenny Smith. Cumulative cultural evolution in the laboratory: An experimental approach to the origins of structure in human language. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Vol. 105, No. 31, pp. 10681–10686, 2008.
- [18] Henry Brighton, Kenny Smith, and Simon Kirby. Language as an evolutionary system. **Physics of Life Reviews**, Vol. 2, No. 3, pp. 177–226, 2005.