

## 進化言語学における認知バイアスの有効性

## Efficiency of Cognitive Biases in Language Acquisition

東条 敏\*<sup>1</sup>

Satoshi Tojo

\*<sup>1</sup>北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

The Japanese Society for Artificial Intelligence

Simon Kirby claimed that human could acquire language only with *learning bottleneck*, as opposed to *language acquiring device* (LAD) as universal grammar by Noam Chomsky, and proposed Iterated Learning Model (ILM). In that model, human infants try to find regularity in the utterances of his/her parents, and to build compositional grammar rules. Although ILM can show the development of language competency through generations, it is still hard to explain infants' phenomenal vocabulary acquisition by 18 months within a generation. It is considered that infants employ *cognitive biases*, which are illogical reasoning in general, to learn languages. We propose that such cognitive biases also would help to acquire syntactic rules, and thus, we implement such biases into grammar building program. As a result, we could boost the grammar acquisition in computer simulation.

## 1. はじめに

Noam Chomsky の普遍文法 (Universal Grammar) の考え方は、人間には持って生まれた言語獲得装置があると仮定するものである [1]。これに対して Simon Kirby は限定された入力数からの汎化能力のおかげで、そのような特殊な装置を仮定しなくても幼児は言語を獲得できるとした。Kirby の説明とは、幼児は親からの発話を聞く入力文数に限り (ボトルネック) があるが、その親からの発話から規則を構成することにより聞いてもいない文を発話できるようになるというものである。この幼児の言語獲得の計算モデルを繰り返し学習モデル (Iterated Learning Model; ILM) [2] という「繰り返し」とはここでは多数世代に渡る親と子の間における言語知識の受け渡しを指す。

進化言語学は言語の起源と進化に関わる学際的分野であり、言語学、認知科学、進化生物学、脳神経科学などにまたがる。この中で ILM は、実際にコンピュータシミュレーションを行って現象を観察するという構成論的アプローチの一つとして Edinburgh 大学の J. Huford らの提唱により始められた。同じ構成論的アプローチとして L. Steels の言語ゲーム [3] があり、これは実際のロボットを用いて視覚情報を用いてエージェント間の意味を共有するものである。本稿では構成論的アプローチにおけるこの意味共有の問題にも言及する。

## 2. 繰り返し学習モデル

ILM のコンピュータシミュレーションで受け渡される言語とは任意に設定された文字列である。まず親エージェントと子エージェントを会話のパートナーとして用意し、親エージェントは一方的に子エージェントに発話を行うものとする。親エージェントに対しては意味空間というものを与え、その中に主語・目的語となる名詞および述語動詞の「概念」を用意する。親エージェントは所定の概念を組み合わせて発話意図もしくは意味を構成し、それを親エージェントが持つ文法規則によって発話文字列に変換する。下記においては *john*, *read*, *book* と

いう概念が意味空間に与えられており、「John が本を読む」ことを意味した *read(john,book)* という述語-項構造を構成し、それを発話文字列に変換したものが 'jonreezabuk' であることを示す。

*read(john,book)* → (文法規則) → 'jonreezabuk'

子エージェントは親の発話意図 (意味表現) と発話文字列をペアで受け取るが、その文字列がどのような文法規則から生成されたものであることを知ることはできない。しかし子エージェントは文字列を蓄積して規則を発見することにより、自分で独自に文法規則を構成する能力を持つ。図 1 においては親のいくつかの発話から、子は共通部分を変数化する ('chunk' と呼ばれる) 方法により構成的な文法を作り出す過程を示す。この結果、子は親から聞いていない文、例えば 'Mary walks.' を発話できるようになる。

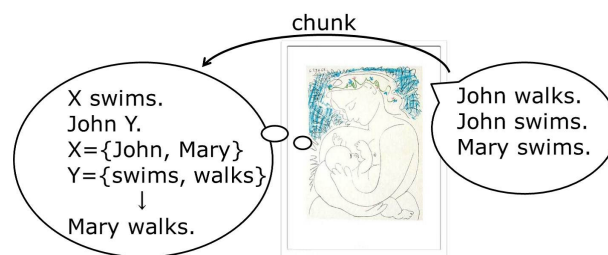


図 1: 変数化による汎化

次に、子エージェントは次世代の親エージェントとなり、新たな子に自分の作成した文法を用いて発話を行う。この過程を何世代も繰り返すことにより、子が発話できる文は増加し、同時に文の生成規則数も構造化されて減らすことができる。図 2 のグラフはわれわれのシミュレーションの結果で、文法規則数の減少と、子の発話できる文の種類の増加が世代を追って変化するようすが描かれている。

図 3 は幼児が行う文法規則の構成操作である。chunk は複数文の中から共通点を見出し、相違点を変数化する操作である。merge は同じ文字列を同じカテゴリーにまとめる操作、replace

連絡先: 東条 敏, 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科, 〒 923-1292 石川県能美市旭台 1-1, tojo@jaist.ac.jp

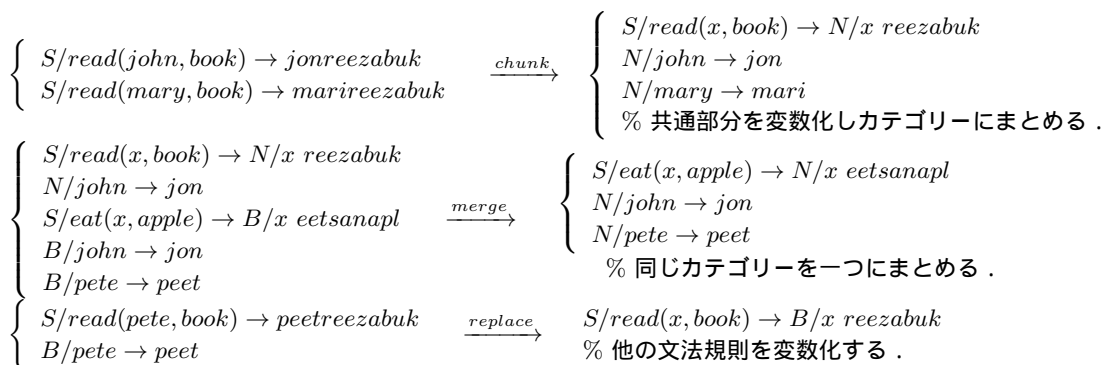


図 3: chunk/merge/replace の操作

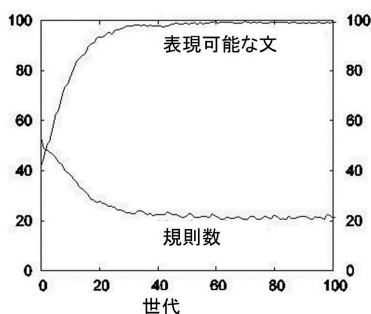


図 2: 生成可能な表現数と構成規則数の推移

は chunk/merge に関わり，文中から既知のカテゴリー部分を抜き出して構造化する規則である [5]．文中  $S$  は文に相当するカテゴリーであり，以下  $/$  (slash) に先行する大文字アルファベットはカテゴリー名， $/$  の後は意味表現， $\rightarrow$  の後の文字列が発話である．

### 3. 認知バイアス

われわれはこれまでに言語の進化と変化，および言語獲得についてさまざまな研究を遂行してきた．特に 2007 年以降，Kirby の繰り返し学習モデルに対して認知バイアスの導入を行った [6, 7]．認知バイアスには多種あるが，われわれが特に注目したのは対称性バイアスと相互排他性バイアスである．

対称性バイアスとは，幼児が実在物とその名前（ラベル）の対応付けを学習する際に，それらの間の一方向の学習づけから逆方向の類推を自然に行ってしまう認知バイアスである．図 4 ではチンパンジーにバナナ・リンゴの絵を見せて正しいほうのボタンを押すという訓練を行い十分に学習させた後，空腹のチンパンジーに好物のバナナを選ばせようとしてもボタンをランダムに押してしまうというものである．これはバナナ・リンゴの画像からボタンに向かってのは関連づけができて，逆方向の関連づけができていないことを意味する．ところが人間の幼児の語彙学習においては，物体を見せてその名前を憶えさせた後，名前のほうから逆にその名前の物体を複数の物体の中から選択することができる．

一方，相互排他性バイアスとは，ある刺激  $A$  に対して反応  $B$  が結びつけられた際， $B$  ではない反応に対してはその刺激として  $A$  以外のものを求める心理的偏向を指す．これを語彙獲得に読み換えると，ある物体に対して呼称を学習させた場合，

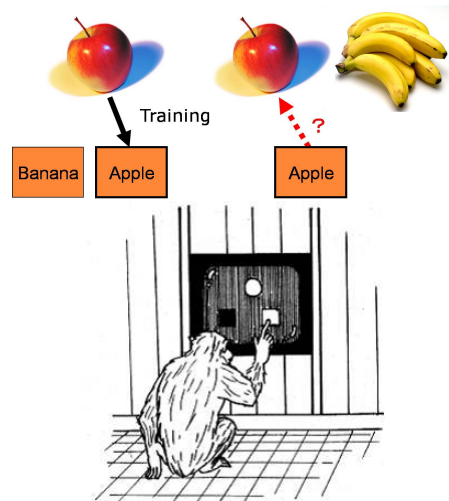


図 4: 対称性を学習しないチンパンジー

別の呼称を与えると別の物体を想起するということになる．

これら認知バイアスが幼児の語彙学習に有効に働くことはいくつかの認知科学的見地から報告がなされているが，われわれはこれらバイアスの働きを敷衍し，が文法規則の獲得にも有効であると考えた．発話はその意図（意味）から起こされ「意味  $\rightarrow$  発話」という図式が考えられる．しかし幼児が言語を学習する現実的な状況では，親の意図する意味がしばしば幼児に伝わらない場合がある．幼児が意味を得られなかった場合は，発話の側から逆方向に意味を推測しようとするはずであるが，これは対称性バイアスの援用であると考えられる．さらに一度「意味  $\rightarrow$  発話」の結びつきが知識として蓄えられれば異なる発話は異なる意図と考えるはずで，これは相互排他性バイアスの援用であると考えられる．われわれはこれらを構文規則の学習に組み込み，実験を行った．図 5 上段は認知バイアスを導入しない場合である．グラフ中のパーセント表示は，親の発話のうち意味とペアで渡されなかったもの，すなわち子が意味を理解できなかった発話の割合を表している．グラフから見てとれるとおり，この割合が高いほど生成可能な意味 (Expressible meaning) の増加は遅れることになる．一方図 5 下段は導入後の実験結果である．このグラフは上のグラフに比べて発話種類の増加が早く，かつ規則数の減じ方も早いのが見てとれる．したがって，対称性バイアスにより意味の類推を行ったほうが文法学習の効果が向上するという結果を得た．

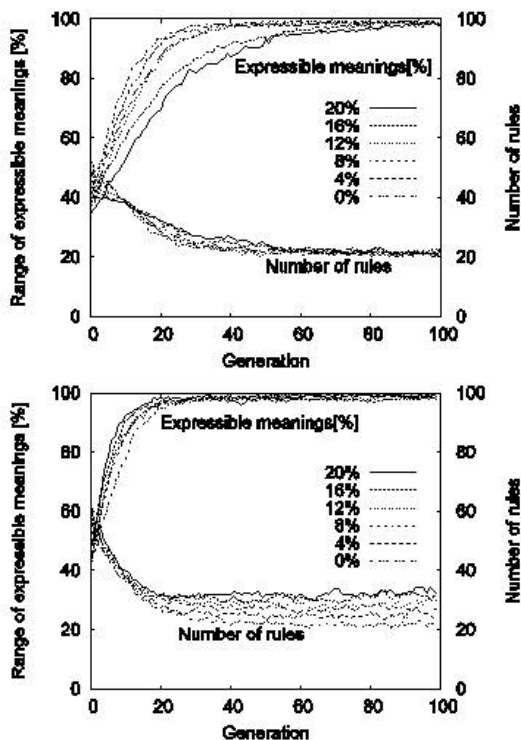


図 5: 対称性バイアスの効果

#### 4. 意味表現の問題

Kirby のモデルでは意味表現として述語-項構造を渡す．図 3 の例では発話 'jonreezabuk' の意味表現として *read(john,book)* を与えている．しかしそもそも構文規則が構成的になるのは意味表現が構成的であるからである．言語セマンティクスとして論理表現を仮定するのは構文が意味を規制するという伝統的な考え方に依拠するものであり，繰り返し学習モデルにおいては逆に構文規則の形を強く規制してしまう弊害がある．したがって「意味」は言語以外の別モデルで与えるべきである．

われわれは意味を視覚的な状況として設計した [4]．図 6 上段・下段はそれぞれ人工的なエージェントが発話（命令）を受ける前の状況，受け取った命令を実行した後の状況を表すものとする．このとき受け取った命令は「黒を白の隣に寄せる」と

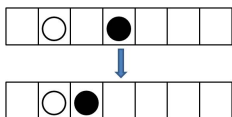


図 6: 視覚的变化と複数の意味表現

いうものであったかも知れないし「黒を左に一つ移動せよ」というものであったかも知れない．このように発話の意味が図のような状況を変化させるものとし，エージェントはその状況変化から発話の意味の推測を行うものとすることにより，(i) 意味を別モデルで与え，かつ (ii) 意味が発話が 1 対 1 ではない状況を設定した．この結果，容易に想像されるとおり言語獲得の過程は大幅に遅れることが観察された．

しかしながら「別モデルでの意味受け渡し」として視覚情報と結びつける試みは，構成論的アプローチの二つの潮流を橋

渡しするパラダイムを提唱するものであり，進化言語学の新たな課題となるものである．さらに非構成的な意味表現から構成的な文法規則を得るという試みは，人間のもつ言語規則のチョムスキー階層上への分類に対する問いかけにもつながる．ILM では左辺が単一のカテゴリーをもつ文脈自由規則を仮定したために文脈自由規則を獲得しているが，これはラーニングボトルネックから発話が汎化できるという主張とは独立なものであり，規則をどのように記述するかについてはさらに将来研究の余地がある．

#### 5. 言語間距離

これまで親から子への発話受け渡しのモデルでは，子の言語能力（発話可能文数・文法規則数）の向上は観察できたが，学習という意味において子が親の言語を正しく踏襲できたかどうかは検証されていなかった．そこで各世代間で親から見た子の，そして子から見た親の言語の類似性を計測した．まず各世代において統語規則をすべて展開し，生成可能な文のセットを生成する．次に世代間において文と文の間において最も近いペアをレーヴェンシュタイン距離で固定し，同距離の和を使って文集間（世代間）の距離を決定する．図 7 は親から見た子の距離である．一本の線はある世代の親から見た子孫の言語の距離であり，世代を隔たるにつれて距離は上昇していく．図 8 は逆に子から見た世代間の距離であり，一本の線はある世代の子を示し，先祖に遡るにつれて距離は大きくなっているようすが観察できる [8]．

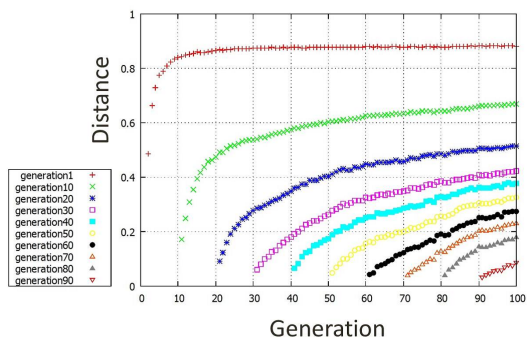


図 7: 親から見た子孫の言語距離

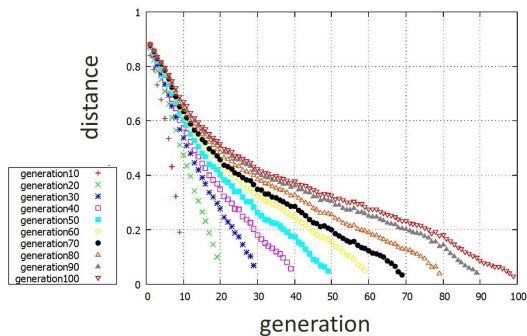


図 8: 子から見た先祖の言語距離

進化言語学の新しい試みの一つとして言語の分化を人工的に



シミュレートすることが考えられる。約 2000 年前のラテン語は現在のイタリア語・スペイン語・フランス語・ルーマニア語などに分化した。特にイタリア語とスペイン語の分離はわずか 1000 年前のこととされる。言語を分化させるきっかけは土着の独自の単語・言い回し、地理的な分離、他言語との接触などが考えられる。これは「ある言い方を学習すると他の言い方を拒絶する」という意味で排他性バイアスの働きと考えられる。われわれは現在、排他性バイアスによる言語分離のシミュレーションを言語間距離を測ることにより継続中である。

## 6. 文法圧縮のアルゴリズム

Kirby の定義した文法一般化のオペレーションは chunk と merge のみであるが、橋本らによって replace を独立したオペレーションとみなし三種類に整理された [5]。chunk/merge/replace は互いに関与するオペレータであり、この相互依存性が文法収束にどのように影響するかも検討を要する。図 1 を見てみると、幼児の学習戦略において chunk オペレーションの適用順序には恣意性がある。例えば chunk のしかたについては母親の発話のうち同一の ‘swims’ に対して John, Mary を変数化した ‘X swims.’ という規則を作るのと、主語 John の同一性に着目して ‘John Z.’ という規則を作るのではその後の一般化に向けて異なる道筋を辿る。しかもオペレーションにどのようなものを選ぶかには恣意性があり、独自のオペレータを組み込んだ研究も考えられる。

さらには、各オペレーションを適用する順序とタイミングの問題がある。本研究では意味空間が小さいことから、親から一発話について子が chunk などのオペレーションを起動すると仮定したが、認知科学的にはある程度のサンプルを貯めてから chunk 処理を起動するほうが自然である。ところが一方で、親からの発話を蓄積した後の chunk 操作は計算量の増大を招く。このように、認知科学的な視点からの妥当性と計算機科学的視点からの高速性からは最適アルゴリズムが異なる可能性がある。

## 7. 音楽の文法規則生成へ向けて

音楽は耳を使って認識し、咽喉を用いて発声する。したがって言語と同一の起源から進化したものであり、また今でも脳の同じ機能を使うことが指摘されている。特に人間の言語がほぼ文脈自由文法に則るということから、音楽にも同様の構造を仮定することが自然である [9]。実際音楽には遠隔の依存関係が指摘されており、また木構造による階層構造認識システムも構築されてきた [10]。

音楽を言語のように見立て文法を設定してパーサを作ろうという試みは T. Winograd あたりを嚆矢とし多くの試みが行われてきた。しかし和声進行を規則化しようにも和音の切れ目と和音名の同定が一般には困難であり、これはカデンツ認識に支障をきたす。和音進行を一意に解釈するのは困難であり、かつ O. Messiaen によれば現代の曲に至っては新しい和音は底をつき、Berklee method によるその記法も限界に来ている。さらに、音楽は言語のように厳格な生成の規範があるわけではなく、要所所との関係を維持すれば比較的自由的な進行が可能である。このような自由的な進行を寛容に捉えるパーサは実装困難である。われわれは現在、楽曲のスコアを XML で与え、類似構造を変数化することにより (図 9) 規則発見と進化 (自動作曲) を促すシステムを模索中である。

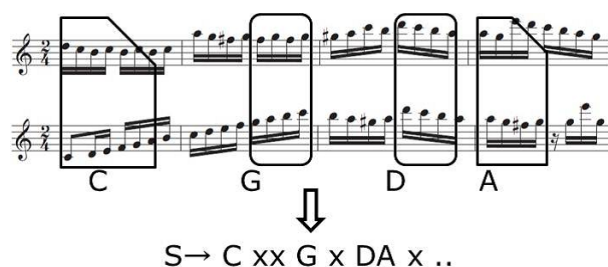


図 9: シンボル列からのチャンク処理による緩い規則の発見

## 参考文献

- [1] Bickerton, C.: *Language and Species*, University of Chicago Press (1990) (和訳: 寛静雄 監訳・ことばの進化論, 勁草書房 (1998))
- [2] Kirby, S.: Learning bottlenecks and the evolution of recursive syntax, *Linguistic Evolution through Language Aquisition*, Cambridge University Press (2002)
- [3] Steels, L.: Language Games for Autonomous Robots, in *IEEE Intelligent Systems*, vol.16, no.5 (2001)
- [4] Matoba, R., Sakamoto, S., and Hashimoto, T.: Cultural Evolution of Compositional Language under Multiple Cognition of Meanings, in *Proceedings of 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics* (2010)
- [5] Hashimoto, T. and Nakatsuka, M.: Reconsidering Kirby's compositionality model - towards modelling grammaticalisation, in *The Evolution of Language: Proceedings of the 6th International Conference (EVOLANG6)*, Cangelosi, A., Smith, A. D. M., Smith, K. (Eds.), pp. 415-416, World Scientific (2006)
- [6] 的場隆一, 中村誠, 東条敏. 構文獲得における対称性バイアスの有効性. *認知科学* vol.15, no.3 (2008)
- [7] Matoba, R., Nakamura, M., and Tojo, S.: Efficiency of the Symmetry Bias in Grammar Acquisition, In *Proc. of 3rd International Conference on Language and Automata Theory and Applications*, A.H.Dediu, A.M.Ionescu, and C.Martin-Vide(Eds), LNAI Vol.5457, Springer-Verlag (2009)
- [8] Matoba, R., Sudo, H., Hagiwara, S., and Tojo, S.: Evaluation of Efficiency of the Symmetry Bias in Grammar Acquisition, in *18th International Symposium on Artificial Life and Robotics* (2013)
- [9] Tojo, S., Hirata, K., and Hamanaka, M.: Computational Reconstruction of Cognitive Music Theory, *Journal of New Generation computing*, Vol.31-2 (2013)
- [10] Hamanaka, M., Hirata, K., Tojo, S.: Implementing 'A Generative Theory of Tonal Music', *Journal of New Music Research* 35(4), 249-277 (2007)