

2つの再帰「階層的埋め込み」「自己参照」： その適応的機能の差異とヒトにおける実現

Two recursions, "hierarchical embedding" and "self-reference": Difference of their adaptive functions and implementations in humans

外谷 弦太[†], 浅野 莉絵[‡], 橋本 敬[†]
Genta Toya, Rie Asano, Takashi Hashimoto

[†]北陸先端科学技術大学院大学, [‡]ケルン大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology, University of Cologne
{toyagent, hash}@jaist.ac.jp

Abstract

Recursion is often understood in two ways: “hierarchical embedding” as a structure and “self-reference / self-invocation of a function” as an operation. In the controversy surrounding recursion in language and in comparison between the abilities of humans and animals, these two types of recursion were sometimes confused and misunderstood. To avoid the confusion, it is necessary to clarify the difference between these two. The former refers to the structure itself, and the latter the operation to produce the structure. In this presentation, we demonstrate that the conceptual essence of recursive operation is not the existence and generation of a certain hierarchically embedded structure but the creation of new embedded structures indefinitely. Additionally, it is indicated that the ecological environment of humans was likely to make the latter adaptive, and the human brain has a neural infrastructure that realizes the recursive operation.

Keywords — Recursive Operation, Hierarchical Embedding, Adaptive Function, Cognitive Control

1. はじめに

再帰の解釈には、構造としての「階層的埋め込み」と、操作としての「ある関数の自己参照・自己呼び出し」という二種類が考えられる。言語文における「再帰」論争やヒトと動物との比較認知実験において、二つの再帰はときに混同され、ときに誤解されてきた[1][2]。この先、再帰に関する研究で同様の混乱を招かないためには、前者が構造そのものを指し、後者が構造を作り出す操作を指すということの差異を明確にしておかねばならない。本発表では、再帰的操作の概念的な本質は、ある階層的埋め込み構造の存在やその生成ではなく、新たな埋め込み構造を無限に創り出せることにあることを主張する。そして、ヒトの生態学的環境は後者を適応的にするものであった可能性が高く、また、ヒトの脳には再帰的操作を実現する神経基盤が備わっていることを示す。

2. 再帰的操作の機能と比較認知

現在の理論言語学（生成文法）において再帰は、「語要素の組み合わせによって生成された句や文を、別の語要素と組み合わせる」という再帰的組み合わせ操作「Merge」として定義されている[3][4][5]。これは、ある操作（ここでは組み合わせ操作）によって作られたものを操作対象とし、その操作自身を適用する、すなわち関数の用い方でいうと自己参照・自己呼び出しするという点で、組み合わせの再帰関数の一種と捉えることが可能である。

この再帰的な組み合わせ操作は物体操作のレベルでもヒトで特異的に観察され、ヒトの生態学的環境において適応的機能が存在することが推測される[6]。物体を組み合わせる操作に関する再帰的操作の進化シミュレーションを用いた研究から、Toya & Hashimoto (2015)は、新奇な埋め込み構造を生成・探索することが適応的な場合に、再帰的操作が選択され得ることを示している[7]。

ヒトと動物の埋め込み構造生成・探索の比較からは、ヒト以外の動物は新奇な構造の生成・探索に対して適応しているわけではない可能性が高いと考えられる。動物が生成する複雑な埋め込み構造の代表例として、ジュウシマツのさえずりがある。ジュウシマツのメスは歌要素を反復するだけの線形性の高い歌よりも、線形性の低い複雑な歌を好む[8]。そのため、ジュウシマツのオスは歌要素を組み合わせたチャンク、チャンクを組み合わせたフレーズ、フレーズを組み合わせた歌全体という埋め込み構造をもつ複雑な歌を歌う[9]。しかし、歌を親から学習するジュウシマツは、歌の階層ごとに異なる処理規則を脳の各部位に学習し、それに則る形で埋め込み構造を生成しており、これは、学習した規則から大きく外れる構造を生成できないという点で、再帰的操作と本質的に異なっている[10]。ジュウシマツの歌は全て求愛のための信号であり、ヒトの

言語のように多様な意味を持つ必要がない[11]. 親鳥がもつ複雑な歌の学習に特化した結果, このような階層的な学習-再生のシステムが形成されたと考えられる.

3. ヒト脳の再帰的操作メカニズム

対して, 学習により習慣化した埋め込み構造にとどまらない柔軟な構造の生成・探索が可能なヒトの脳は, 要素の選択・組み合わせ・並べ替えという再帰的操作に必要な機能を有していると考えられ, 少なくとも運動・行動については, これが実証的に示されつつある. ヒト脳における被殻と尾状核からなる背側線条体は, 特定の実行機能や運動機能, 刺激応答学習などを含む認知を担い, 将来的な報酬の手がかりに対して動機づけを与える黒質緻密部や腹側被蓋野, 側坐核とともに, 新たな運動の組み合わせをエンコードするとされている[12][13][14]. 線条体ニューロンは直接路, 間接路, ハイパー直接路のシグナルを介して視床ニューロンや大脳皮質と連携し, 必要な運動と不必要な運動の選択を行っていると考えられる[15][16]. そして, 大脳基底核から視床を経由し大脳皮質に繋がるループ回路が, 運動・行動要素の並べ替えを行うと考えられている[12]. これらの回路によって生成される運動が, 新たな運動系列の一部となることで, 関連する回路の参照・呼び出しが自己言及的に行われ, 再帰的操作が実現される.

4. 新奇性創出のための再帰的操作

なぜヒトは再帰的操作が可能なのか. その理由を考えるために, 埋め込み構造を「探索する」場合における再帰的操作の適応性に注目する. ヒトは身体と環境の関係を道具の使用や制作によって調整することで, 遺伝的進化による形態自体の変化を介さず生存・生殖資源へのアクセス方法の変化を可能としている. ある手順を生成する関数を, 別の手順を生成する際に参照・呼び出しできるということは, 探索コストの削減という形で適応的に機能するだろう. ここから, 様々な状況に適した道具を創造する際, その新奇な制作手順を探索するという目的において, 再帰的操作が適応性を発揮したという仮説を主張する. この能力の汎化の先に, 社会的知能, 計算, 言語, そして芸術のような場に応じたインスタンスをその場で生成・探索する創造的活動があると推測することもできる. ゲーム的状况において相手の予想を覆すには, それまでにない戦略を打ち立てねばならないし, この世に存在する数

や計算手順を全て記憶することは不可能である. 言語に関しても計算と同じことが言える. 芸術は創造性を惹起するための装置という側面を持ち, ゆえに新奇性が常に求められている. こうした推測は, 行動, 言語, 音楽, 計算能力が部分的に神経基盤・メカニズムを共有するという仮説と一致する[17][18][19].

結論として, ヒトは「組み合わせた要素を別の要素と組み合わせる」という自己参照的な「再帰的組み合わせ操作」の能力を有しており, それは埋め込み構造の学習-再生システムにはない創造性をもたらしていると言える. 再帰的思考には, 学習した埋め込み構造を生成できるだけでなく, 様々な埋め込み構造を新たに創り出せるという事実が求められる.

参考文献

- [1] 藤田耕司, (2012), “統語演算能力と言語能力の進化”, 藤田耕司, 岡ノ谷一夫編『進化言語学の構築—新しい人間科学を目指して』, pp. 55-75.
- [2] Martins, M. D., (2012), “Distinctive signatures of recursion”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol. 367, No. 1598, pp. 2055-2064.
- [3] Chomsky, N., (1993), “A minimalist program for linguistic theory”, In: Hale, K. and Keyser, S., editors, *The View from Building 20: Essays in Linguistics in Honor of Sylvain Bromberger*, pp. 1-52.
- [4] Chomsky, N., (2013), “The Dewey Lecture 2013: What kind of creature are we?”, *The Journal of Philosophy*, Vol. CX, pp. 645-700.
- [5] Everaert, M. B. H., Huybregts, M. A. C., Chomsky, N., Berwick, R. C., & Bolhuis, J. J., (2015), “Structures, not string: Linguistics as part of the cognitive sciences.”, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 19, pp. 729-743.
- [6] Greenfield, P. M., (1991), “Language, tools and brain: The ontogeny and phylogeny of hierarchically organized sequential behavior”, *Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 14, pp. 531-551.
- [7] Toya, G. & Hashimoto, T., (2015), “Computational study on evolution and adaptability of recursive operations”, In *International Symposium on Artificial Life and Robotics 20th (CD-ROM)*, pp. 68-73.
- [8] Okanoya, K. (2010), 『さえずり言語起源論 新版: 小鳥の歌からヒトの言葉へ』, 岩波書店.
- [9] Okanoya, K. (2004), “The Bengalese finch: A window on the behavioral neurobiology of birdsong syntax”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1016, pp. 724-735.
- [10] 奥村哲, 山下祐一, 岡ノ谷一夫, 谷淳 (2011), “実験モデルとしての鳴禽類の歌制御システム”, *日本神経回路学会誌*, Vol. 18, No. 3, pp. 135-146.
- [11] Berwick, R. C., Okanoya, K., Beckers, G. & Bolhuis, J. J., (2011), “Song to Syntax: The Linguistics of Birdsong”, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 15, pp. 113-121.
- [12] Graybiel, A. M., (2000), “The basal ganglia”, *Current Biology*, Vol. 10, No. 14, pp. 509-511.

- [13] Graybiel, A. M., (2005), "The basal ganglia: learning new tricks and loving it", *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 15, No. 6, pp. 638-644.
- [14] Malenka, R. C., Nestler, E. J., Hyman, S. E., Sydor, A. & Brown, R. Y., (2009), *Molecular neuropharmacology: a foundation for clinical neuroscience*, McGraw-Hill Education books.
- [15] Nambu, A., Tokuno, H. & Takada, M., (2002), "Functional significance of the cortico-subthalamo-pallidal 'hyperdirect' pathway", *Neuroscience Research*, Vol. 43, No. 2, pp. 111-117.
- [16] Nambu, A., (2008), "Seven problems on the basal ganglia", *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 18, No. 6, pp. 595-604.
- [17] Fitch, W. T. & Martins, M. D., (2014), "Hierarchical processing in music, language, and action: Lashley revisited", *The Year in Cognitive Neuroscience*, Vol. 1316, pp. 87-104.
- [18] Asano, R. & Boeckx, C. (2015), "Syntax in language and music: What is the right level of comparison?" *Frontiers in Psychology*, Vol. 6, pp. 1-16.
- [19] Fujita, K., (2016), "On the parallel evolution of syntax and lexicon: A Merge-only view", *Journal of Neurolinguistics*, Vol. 43, pp.178-192.