

Title	再帰的結合能力の起源と進化に関する構成的研究
Author(s)	外谷, 弦太
Citation	
Issue Date	2019-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/15782
Rights	
Description	Supervisor:橋本 敬, 知識科学研究科, 博士

氏 名	外谷 弦太		
学 位 の 種 類	博士(知識科学)		
学 位 記 番 号	博知第 246号		
学 位 授 与 年 月 日	平成 31 年 3 月 22 日		
論 文 題 目	再帰的結合能力の起源と進化に関する構成的研究		
論 文 審 査 委 員	主査 橋本 敬	北陸先端科学技術大学院大学	教授
	池田 満	同	教授
	Dam Hieu Chi	同	准教授
	日高 昇平	同	准教授
	岡ノ谷一夫	東京大学	教授

論文の内容の要旨

Human language has a hierarchical structure that does not appear on expression. In theoretical linguistics, this feature is produced by recursive application of the operation combining two lexical items, i.e., recursive combination (RC). The purpose of this thesis is to construct a reasonable scenario of how RC emerged and evolved. In this thesis, based on the knowledge of linguistics, animal behavior, cognitive science, neuroscience, and the existing hypothesis that the ability of RC in object manipulation was a precursor of RC in syntax, I made a new hypothesis that ability of representation operation gained the capability of RC through the object manipulation.

Under this hypothesis, I made a simulation to identify the environmental conditions under which the ability of RC of object evolves. Specifically, I made an agent that produced tools by combining objects, and I simulated evolution under several ecologically reasonable fitness functions using genetic algorithms. Regardless of whether RC is used or not, the types of tools that agents can make are the same. However, agents that use RC uses short-term memory, which increases operating costs. In environments where it is necessary to raise the production success rate by diversifying the production method of the production and environments that need to raise the invention probability of new products due to diversification of the production themselves, RC evolved beyond the cost barriers. It was also confirmed that the environment in which RC is adaptive occurs due to intense competition for resource acquisition.

Next, I made a simulation to clarify what kind of adaptive significance RC of representation evolved. I conducted a simulation where agents' behavior of combinatorial operation is optimized according to a reward function by Q-learning and genetic algorithm. There are two types of agent in this simulation. One is an agent learns the relation between input state and output state. Another one is an agent update the value of adaptive behavior without action by using the result of learning, that is, the agent performs thinking experiment by combining representations of action. To explore ecological condition for the evolution of RC from actions to action representations, I simulated the evolution and learning of non-RC

and RC as tool-making behavior under four conditions: if a fitness function for evolution changes according to tools made in previous generation; and if a reward function for learning changes according to tools made by oneself. I found that RC emerged only when reward changed and fitness did not. It suggests that RC in action representation evolve in an environment where making novel tools during one generation is rewarded.

In the discussion part, I suggested that the RC evolved as a heuristics that can obtain a reasonable solution in searching for a vast space in each cognitive domain including syntax.

Keywords: Recursive Combination, Evolution of Language, Grammar of Action, Hierarchical Structure, Constructive Approach

論文審査の結果の要旨

人間の言語能力は、計画や状況判断といった思考の道具・他個体と相互作用を行うメディアであり、様々な物質文化・精神文化といった知識一般の創造・共有・活用を可能にする。本研究は、このような知識創造は階層的に構造化された表現を生み出すしくみによって可能になると考え、また、階層性が **Merge** という語彙の再帰的結合によって生み出されるという生成言語学の考え方を採る。**Merge** の進化とは言語の起源の問題である。**Merge** の能力は道具製作のような物体を操作する運動機能が前駆体だったという「運動制御起源仮説」(藤田、2012)を採用し、道具製作という運動における再帰的結合の能力が進化し、表象操作に転移し得る条件を、物体操作・表象操作エージェントの進化シミュレーションにより検討した。

シミュレーション解析の結果、物体の再帰的結合は製作手法の多様化と製作物の多様化という機能を持ち、前者により複雑な製作物を作ることによって適応度が得られる場合、および後者により異なる製作物をたくさん作ることによって適応度が得られる場合において、再帰的結合が進化することがわかった。複雑な対象物を作る場合には前者の機能により探索が効率的になりロバスト性も高まるという新たな知見を示した。また、多様なものを作ることが適応的である環境として厳しい資源制約が考えられ、その環境では多様な道具をつくる **Generalist** への進化が起きることがわかった。道具製作における再帰的結合の進化のつぎの段階として、実際に道具を製作する手法の進化だけでなく、製作過程を表象として操作できるような能力が強化学習で高まるモデルを解析した。その結果、以前に作った道具を作ると報酬が下がるという動的な学習環境、かつ、前世代で作った道具を作っても適応度は変化しないという静的な選択環境において、再帰的結合を用いた製作過程を想定できるエージェントが進化することがわかった。

以上の結果を、考古学・人類進化・脳科学等の知見と付き合わせて考察し、再帰的結合の進化について以下のような仮説的シナリオを提示した。アフリカのサバンナ化による資

源獲得に対する選択圧の増加（300 万年前）、石器製作の開始による道具製作による新資源の獲得（260 万年前）、物体の再帰的結合の発生（27 万年前）、行動の組合せ空間の拡大によって行動表象操作の再帰的結合が発生した。

審査では、再帰的結合の進化シナリオとして新奇性があり、妥当だと考えられるものを提示していること、また、再帰的結合が持つ機能として提示した「製作物の多様化」は納得できるもので妥当であり、「製作手法の多様化」はノントリビアルで新奇性が高いことが認められ、論文の学術的意義も高く評価された。

以上、本論文は、言語起源において複雑な知識を生成する能力の基盤となる再帰的結合の進化という知識科学の基礎的な課題について、進化シミュレーションでその進化シナリオを示したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（知識科学）の学位論文として十分価値あるものと認めた。