

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



博 士 論 文

再帰的結合能力の起源と進化に関する構成的研究

指導教員 橋本 敬 教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科 知識科学専攻

1560003 外谷 弦太

審査委員：	橋本 敬	教授（主査）
	池田 満	教授
	Dam Hieu Chi	准教授
	日高 昇平	准教授
	岡ノ谷 一夫	教授（外部審査員）

提出年月：2019 年 3 月

目 次

第1章	はじめに 一言語の起源に対する接近法	1
1.1	言語の階層構造と再帰的結合	2
1.1.1	ヒト言語の特徴：階層構造と再帰的結合	2
1.1.2	語彙項目の再帰的結合能力に関する既存研究	5
1.1.3	残された問題：語彙項目の再帰的結合能力の起源と進化	9
1.1.4	本研究の目的	10
1.2	再帰的結合の進化シナリオと本研究の立場	11
1.2.1	妥当な進化シナリオの条件	11
1.2.2	語彙項目以外の操作対象に見られる階層構造の生成	12
1.2.3	Merge の運動制御起源仮説	14
1.2.4	再帰的統語の社会的認知起源仮説	16
1.2.5	本研究の立場と仮説の統合	17
1.2.6	本研究で明らかにすること	19
1.3	妥当な仮説形成のための構成的アプローチ	20
1.3.1	起源と進化の問題への接近法	20
1.3.2	全体論的現象としての進化と構成的アプローチ	21
1.3.3	アブダクティブな推論を補助する構成的アプローチ	22
1.4	本論文の構成	23
第2章	再帰的結合の進化シナリオ解明に関わる既存・関連研究の整理	24
2.1	物体操作における再帰的結合	24
2.1.1	物体操作と再帰的結合	24
2.1.2	ヒト以外の動物における物体の再帰的結合	25
2.1.3	人類史における道具製作	27
2.1.4	シミュレーションにおける物体操作と再帰的結合	28

2.2	表象操作における再帰的結合	29
2.2.1	表象操作と再帰的結合	29
2.2.2	ヒト以外の動物における表象操作と再帰的結合	31
2.2.3	連合主義と表象主義	32
2.2.4	計算モデルにおける表象操作	32
2.3	認知一般における再帰的結合	33
2.3.1	ヒトの認知一般に見られる階層構造の生成	33
2.3.2	認知一般における再帰的結合の神経基盤	34
2.3.3	認知一般における再帰的結合の機能的モデルの提案	36
第3章	物体操作における再帰的結合の進化シミュレーション	39
3.1	物体操作の進化シミュレーションの方法と狙い	39
3.1.1	遺伝的アルゴリズムを用いた再帰的結合の適応性の探索	39
3.1.2	物体操作の再帰的結合の適応性に関する予測	40
3.1.3	製作物はどのようにして多様化するのか	41
3.2	物体操作の進化シミュレーションの設計	42
3.2.1	物体操作モデル	42
3.2.1.1	物体操作エージェント	42
3.2.1.2	再帰的結合操作のモデル化	43
3.2.2	進化シミュレーションの設計	44
3.2.2.1	状態遷移表の遺伝子符号化	44
3.2.2.2	進化シミュレーションの流れと選択メカニズム	46
3.2.2.3	適応度関数	47
3.3	物体操作の進化シミュレーションの結果と分析	49
3.3.1	シミュレーションの基本設定	49
3.3.2	F_I : 任意の製作	50
3.3.3	F_{II} : 特定の製作	52
3.3.4	F_{III} : 可能な限り多様な製作	56
3.3.5	操作コストと操作の失敗確率の影響	60
3.3.6	F_{IV} : 道具製作による有限資源の獲得競争	62
3.4	物体操作の進化シミュレーションの議論	67

3.4.1	再帰的結合の適応性：製作経路と製作物の多様化.....	67
3.4.2	人類史における物体操作能力の進化：操作コストの低下と製作の失敗率の増大 ..	68
3.4.3	再帰的結合による物質文化の多様化：道具を用いた資源獲得競争	70
3.4.4	物体操作の進化シミュレーションにおける結論	71
第4章	行動表象操作の進化シミュレーション.....	73
4.1	行動表象操作の進化シミュレーションのねらい.....	74
4.1.1	学習による環境への適応.....	74
4.1.2	学習経験に基づく計画.....	75
4.1.3	学習経験に基づく思考実験	76
4.2	行動表象操作の進化シミュレーションの設計	77
4.2.1	行動表象操作モデル	77
4.2.1.1	Q 学習.....	77
4.2.1.2	行動表象の操作と行動系列の生成	79
4.2.1.3	報酬関数	82
4.2.2	進化シミュレーションの設計.....	83
4.2.2.1	エージェントの能力の遺伝子符号化	83
4.2.2.2	進化シミュレーションの流れ	84
4.3	行動表象操作の進化シミュレーションの結果と分析	85
4.3.1	シミュレーションの基本設定.....	85
4.3.2	任意の道具製作	85
4.3.3	新奇な道具製作（個人）	88
4.3.4	新奇な道具製作（集団）	93
4.4	行動表象操作の進化シミュレーションの考察	94
4.4.1	行動表象の操作における再帰的結合の適応性	94
4.4.2	行動表象の操作における再帰的結合の進化プロセス	95
4.4.3	シミュレーションの今後の課題	97
第5章	議論	99
5.1	シミュレーション結果と考察のまとめ	99
5.1.1	物体操作の進化シミュレーションの結果と考察	99
5.1.2	再帰的結合の抽象的な進化シナリオ.....	100

5.2	シミュレーション結果と関連研究の整合性.....	101
5.2.1	ヒト以外の生物に再帰的結合が観察されにくい理由	101
5.2.2	再帰的結合と探索空間の拡張の一般性.....	102
5.3	再帰的結合の進化シナリオ.....	104
5.4	再帰的結合能力の進化シナリオ改善に向けた今後の課題	106
5.4.1	再帰的結合能力の脳機能モデルの改善.....	106
5.4.2	再帰的結合モデルの階層構造分析能力に関する解析	108
5.4.3	動物における再帰的結合能力の有無に関する行動学的分析.....	108
5.4.4	人類進化における再帰的結合能力の出現に関する考古学的分析	109
第6章	結論	110

目 次

図 1.1 言語の構造依存性	4
図 1.2 Merge とその再帰的適用.....	5
図 1.3 言語能力の極小モデル.....	8
図 1.4 行動の文法 (adapted from Greenfield, Nelson, & Saltzman, 1972).....	13
図 1.5 行動と統語の平行進化 (藤田, 2012)	15
図 1.6 行動表象の操作, 物体操作, 認知一般の表象操作の段階的進化仮説	19
図 2.1 ナッツ割りの階層構造 (松沢, 2000)	26
図 2.2 認知一般に見られる階層構造	34
図 2.3 再帰的結合の認知一般モデル	37
図 2.4 再帰的結合の表象操作モデル	38
図 3.1 反復的結合と再帰的結合	44
図 3.2 状態遷移規則の遺伝子配列への符号化.....	45
図 3.3 図 3.2 と対応する状態遷移図の一部.....	46
図 3.4 状態遷移規則の遺伝子配列への符号化.....	49
図 3.5 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_I , 200 試行の平均)	51
図 3.6 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_I , 1 試行)	52
図 3.7 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_{II} , 200 試行の平均)	53
図 3.8 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_{II} , 1 試行)	54
図 3.9 構成要素の種類数と最大構成要素数ごとの 再帰的結合を使用するエージェントの割 合 (F_{II} , 200 試行の平均, 10,000 世代目)	56
図 3.10 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_{III} , 200 試行の平均)	57
図 3.11 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_{III} , 1 試行)	57

図 3.12 再帰的結合による遷移規則に対応する変異距離の短縮	58
図 3.13 構成要素の種類数と最大構成要素数ごとの 再帰的結合を使用するエージェントの割合 (F_{II} , 200 試行の平均, 10,000 世代目)	59
図 3.14 操作コストごとの再帰的結合を使用するエージェントの割合 (200 試行の平均)	61
図 3.15 結合失敗率ごとの再帰的結合を使用するエージェントの割合 (200 試行の平均)	62
図 3.16 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_{IV} , 200 試行の平均)	63
図 3.17 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移 (F_{IV} , 1 試行)	64
図 3.18 資源獲得競争の強さごとの各結合を使用するエージェントの割合	65
図 3.19 資源獲得競争の強さと, 作った製作物の種類数に応じた 全エージェントの分布 (F_{IV} , 200 試行の平均. (a) 3,000 世代目と(b) 10,000 世代目)	66
図 3.20 資源獲得競争の強さと, 作った製作物の種類数に応じた 再帰的結合エージェントの分布 (F_{IV} , 200 試行の平均. (a) 3,000 世代目と(b) 10,000 世代目)	66
図 3.21 人類の物体操作能力の進化.....	69
図 4.1 強化学習の枠組み	78
図 4.2 物体操作と行動表象操作の状態遷移表, および想定される脳機能的モデル	81
図 4.3 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移 (R_I , 200 試行の平均)	86
図 4.4 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移 (R_I , 1 試行)	87
図 4.5 エージェント一頭あたりの再帰的結合の使用回数の世代変移 (R_I , 1 試行)	88
図 4.6 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移 (R_{II} , 200 試行の平均)	89
図 4.7 (a) 再帰的結合を使用するエージェントの進化と, (b) 行動表象の操作確率および操作回数上限に対する, 報酬割引の影響 (R_{II} , 200 試行の平均. 1,000 世代目)	90
図 4.8 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移 (R_{II} , 1 試行)	91
図 4.9 エージェント一頭あたりの再帰的結合の使用回数の世代変移 (R_{II} , 1 試行) ...	92

図 4.10 (a) 再帰的結合を使用するエージェントの割合と, (b) 表象操作確率と使用回数 上限に対する, 表象操作コストの影響 (R_{II} , 200 試行の平均. 1,000 世代目)	93
図 4.11 (a) 再帰的結合を使用するエージェントの割合と, (b) 表象操作確率と使用回数上 限に対する, 報酬割引の影響	94

表 目 次

表 3.1 物体操作シミュレーションの基本パラメータ	50
表 4.1 エージェントの遺伝子	84
表 4.2 行動表象操作モデルの基本パラメータ	85

第1章 はじめに

一言語の起源に対する接近法

本研究では、時間的・空間的に一次元の系列で表現される「ことば」の意味が、その系列が有しうる階層構造に依拠して解釈される（Chomsky, 1957; Fujita, 2011; Everaert et al., 2015）、というヒト言語の特徴に着目する。本研究の目的は、このヒトに特異的な行動形質がどのような生態的環境に対する適応性を持ち、どのようなプロセスやメカニズムをもって進化してきたのかという問題について、蓋然性の高いシナリオを構築することである。そのために、理論言語学の分野で提唱されている仮説に基づいたモデルを作成し、計算機シミュレーションを用いた構成論的手法と、動物行動学、古人類学、神経科学、情報科学など多分野の証拠を組み合わせ、仮説の妥当性の検討・精緻化を行った。

本章では、まず研究の背景として、

- 本研究の主題・主目的はどのようなものか
- その主題は既存研究においてどのように説明されているのか
- どのような未解決の問題が残っているか、またなぜ未解決なのか
- その問題の解決にはどのような学問的意義や社会的意義があるのか

という点について明示する。そして、

- その問題に対する本研究の立場・仮説はどのようなものか
- 問題解決のためにどのような手法を用いるか
- 問題をどこまで明らかにするか

という点について述べる．最後に本稿の構成を示す．

1.1 言語の階層構造と再帰的結合

1.1.1 ヒト言語の特徴：階層構造と再帰的結合

ヒトは、自身で思考し行動するなかで、あるいは他個体と相互作用を行うなかで、言語を道具として用いている．言語は、食物や住居、道具などの物質文化、および学術や道徳、宗教などの精神文化といった知識一般を創造・共有・活用することを可能とする点で、ヒトに他の生物とは異なる生態学的性特徴をもたらす．ゆえに、言語はヒトの本性を解明するうえで最も重要な能力のひとつとして、言語学を筆頭に、哲学、心理学、文化人類学、社会学などの人文社会系分野、および、生物学、生物人類学、認知科学、情報科学などの理工系分野で研究されてきた（橋本，2014）．

そしてこれまでに、ヒトの言語がどのように特徴づけられるか、ヒトの成長過程でどのような発達を経るか、ヒトの脳のどのようなメカニズムによって処理されるか、といった直接調査することが可能な諸問題については多くの知見が得られてきた．しかし、この特異な形質がなぜ、どのようにしてヒトに生じたのかという、言語の起源と進化の謎は、直接的な調査が不可能であり、未だ明らかになっていないことが多い問題とされている（Hauser, et al., 2002）．ヒトという生物の行動特性を知るうえで、ヒトに特異的と考えられる認知システムの起源と進化を明らかにすることは避けて通れない道である．そうした理由から近年、共創言語進化学（Evolinguistics¹）という研究分野の構築が進みつつある（橋本，2004；岡ノ谷・藤田，2011）．

言語の進化を研究する、と言ったとき、一般には二通りの解釈が存在する．一つは言語の文化的進化、すなわち形式と意味のマッピングや語の合成性といった言語知識に共通する性質の出現や成立の研究を行うこと（Kirby, 2000, 2017; Steels et al., 2002），もう一つは言語の生物学的進化、すなわち言語知識を生み出す能力の発生や変化の研究を行うことである．二つの研究は、ヒトの言語が有する性質のどこからがヒト固有の生物学的形質に依存して生み出されるもので、どこからが文化的に作られ

¹ <http://evolinguistics.net>

うるものなのかという領分の問題において、多くの実験や議論がなされる関係にある。そして本論文は、言語能力の生物学的進化について研究を行うものである。

では、ヒトの言語能力が他の生物の類似する能力と比較してどのような点で特殊であり、進化的な説明を必要とするのだろうか。一言に言語能力といっても、様々な認知能力が複雑に組み合わさって言語の運用が成立していることは自明である (Hauser, et al., 2002)。本論文ではそうした広義の言語能力の起源や進化を問うことはせず、ヒトの言語が有しており、かつ他の動物には見られない特徴と、それを生じさせる能力（狭義の言語能力）に焦点を絞ることにする。

ヒトの言語は、他個体とのコミュニケーションに用いられるツールとして自然界に存在するものの中で唯一、階層構造を有すると考えられている (Hauser et al., 2002)。ここで階層構造とは、構成要素同士の結合関係のことである²。言語文における階層構造は、節や句や語、あるいは形態素といった語彙項目がもつ意味の係り受け関係に対応する。図 1.1 は、同じ構成要素の同じ順序からなる表現でも、それら要素同士の結合関係によって、異なる意味をもつ表現として解釈されうることを示す。例えば、「最新情報学」という文は、{{最新, 情報}, 学} という階層構造で捉える場合は「最新情報に関する学問」すなわちニュースの学問と解釈でき、{最新, {情報, 学}} という階層構造で捉える場合は「最新の情報学」と解釈することが可能である。この特徴は、言語学の分野では意味の構造依存性と呼ばれ、ヒトの言語が線形の記号列として扱われていないことの証拠とされる (Fujita, 2009; Everaert et al., 2015)。ヒト以外の動物のコミュニケーションに、意味の構造依存性は観察されていない³。この事実からは、ヒトが他の動物と異なる認知能力を有している可能性が示唆される。それはどのような認知能力だろうか。

² 文、節、句、語という段階的構成そのものが階層構造と呼称される場合もあるが、本論文では一貫して二要素間の結合関係を階層構造と呼ぶこととする。

³ Suzuki et al. (2016) では、シジュウカラに異なる意味をもつ鳴き声を人工的に組み合わせて聞かせた際の反応から、この鳥が複合的な意味を理解できることが報告されている。しかし、これは線形順序に則った行動であり、階層構造に則った行動が示されたとは言えない。

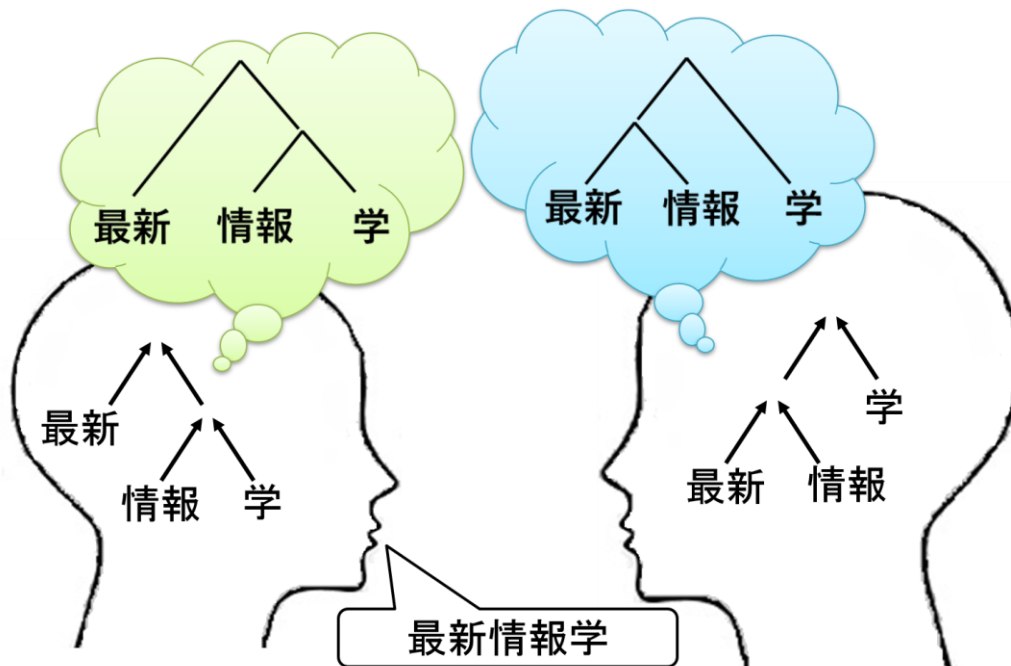


図 1.1 言語の構造依存性

理論言語学では、言語表現の階層構造は「Merge」と呼ばれるヒト固有の統語操作によって生成されると説明される．図 1.2 に、Merge による階層構造の生成過程を示す．Merge は二つの語彙項目を結合して新たな語彙項目を一つ作り出す操作である．新たにできた語彙項目もまた Merge によって別の語彙項目と結合することで、あらゆる表現を作り出すことが可能になっている（Chomsky, 1995, 2013; Boeckx, 2013; Everaert et al., 2015）．これを再帰的な Merge⁴といい、階層構造はこの Merge をどのような二対象に適用していくかで決定される．この二つの対象を結合させてユニットを作り、それをまた別の対象と結合させるという再帰的な操作は、階層構造として最も単純な形式である二分木構造を作る上での最小要件である（Chomsky, 1993; Boeckx, 2013）．本研究では、この階層構造生成に必要最小限である、語彙項目の再帰的結合能力をヒトに固有⁵の言語能力とする仮定（藤田, 2012; Fujita, 2016）に則

⁴ あるいは回帰的な Merge.

⁵ 意味と表現のマッピングはヒト以外の動物においても観察される．しかし、その表現の結合による意味の合成が示された例はシジュウカラ（Suzuki et al., 2016）のみである．シジュウカラの鳴き声における複合的意味がヒトと同様の再帰的結合能力によって処理されているかは、まだ明らかになっていない．

り，この能力の進化に関する問題を扱うこととする。

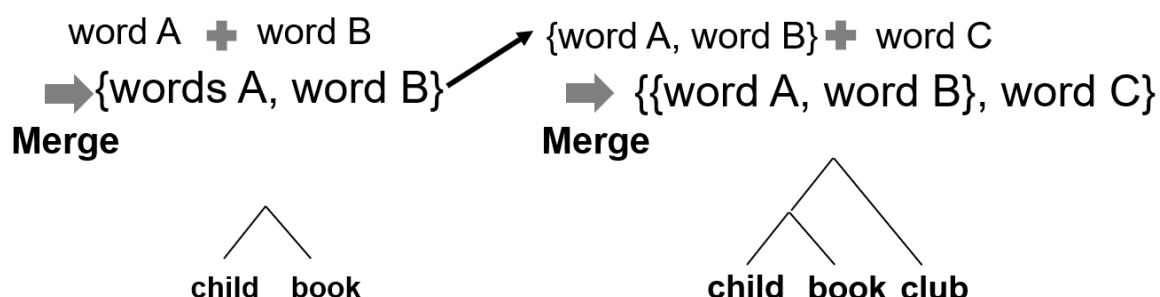


図 1.2 Merge とその再帰的適用

1.1.2 語彙項目の再帰的結合能力に関する既存研究

再帰的結合能力の進化へと話を移す前に，本研究の位置づけをより明確にするため，これまでにこの能力がどのように研究され，どのようなことが明らかになっているかを説明する．言語学において，ヒトに普遍であり同時に特異である「言語能力」を研究することの重要性を最初に説いたのは N. Chomsky である (Chomsky, 1957)．Chomsky によって提唱された生成文法理論は，ヒトに特異な形質として言語能力 (Faculty of Language) を指定し，その「UG⁶」と呼ばれる初期状態が，「パラメータ」と呼ばれる外部刺激を受けて異なる安定状態へと達した結果が，母語話者の持つ言語能力である，と主張する (Chomsky, 1973)．こうした仮説が立てられた理由は，生成文法以前の記述的・個別説明的であった言語学に体系性を導入するためであった．生成文法は，語彙項目の結合規則を司る統語のレベルと，語彙項目そのものが内包する意味のレベルで異なる処理モジュールを想定し，前者を狭義の言語能力としている (藤田, 2012)．例えば，「Colorless green ideas sleep furiously.」という文は，意味的には容認できなくとも統語的には妥当であると判断できる．これは文の意味理解において，統語論的知識と意味論的知識が独立して使われることを示している．

実際，神経生理学的に，統語情報の処理と意味情報の処理は部分的に独立して行われることが fMRI⁷や EEG⁸による脳活動の計測から明らかにされている (Friederici,

⁶ 初期の生成文法理論では Universal grammar と呼ばれていた．

⁷ functional Magnetic Resonance Imaging, 機能的核磁気共鳴画像法

⁸ Electroencephalogram, 脳電図

2017). Goucha & Friederici (2015) は、被験者に以下の 3 条件で文を提示し、その際の脳活動を fMRI を用いて計測した。

- A. 通常の文（实在語文条件）
- B1. 文の一部を擬似語⁹に置換（擬似語文条件）
- B2. B1 の語順を変則化（擬似語列条件）
- C1. B1 の擬似語から形態学的要素を除去（無意味音節文条件）
- C2. C1 の語順を変則化（無意味音節列条件）

語順の変則化とは、一般によく使われる語順とは異なる順序に語を並べ替えることである。条件 B では B1 時処理から B2 時処理の脳活動を差し引くことで、統語処理と形態派生処理を抽出し、条件 C では C1 時処理から C2 時処理の脳活動を差し引くことで統語処理のみを抽出する。結果として、A の实在語条件では下前頭回（ブロードマンエリア（以下 BA）44, BA45, BA47）の大部分、側頭葉前部、および上側頭回後部／上側頭溝後部を含む左半球で広く活性化した。B の擬似語条件では BA44 と BA45 の活動が抽出され、派生形態処理が必要な場合は意味処理の際に活性化することが知られている BA45 の活性が増大することがわかった。派生形態が存在せず、屈折形態のみが存在する C の無意味音節条件では、BA44 のみの活動が抽出された。以上から、純粋な統語情報の処理には BA44 が使われ、付加的な意味情報の処理に BA45 が使われることが示唆される。

意味情報の処理に関しては、語彙意味の統合や語彙の予測的活性化を反映する ERP¹⁰成分である N400 を単語レベルと文レベルを分けた条件で観測する実験もなされており、単語レベルを超える意味的推論が必要となる場合は文の処理中に N400 が変動することがわかっている（Baggio et al., 2009）。例えば、文末単語の処理において、

- A. The journalist began the article.
- B. The journalist wrote the article.

⁹ 形態学的要素を持った实在しない単語。

¹⁰ Event Related Potential, 事象関連電位。

という二文を与えた際に、Bのほうが平均して N400 の持続時間が長かった。これは、B の文のほうが単語間の関連性が強く、文全体の意味を理解する際に文レベルの推論の必要性が低いためであると考えられる。この結果から、異なるレベルでの言語理解に関する処理、および、単語知識に関する処理が存在することが示唆される。

生成文法はこれまでに、複数の統語操作からなる言語理論によって、様々な言語表現に説明を与えてきた。そして近年は、統語操作や統語規則の生物学的起源を考えるために、理論の説明力を保ったまま、操作の数を最小限に抑える取り組みを試みている (Chomsky, 1993)。この取り組みはミニマリスト・プログラムと称されている。ミニマリスト・プログラムでは言語能力を図のようなモデル¹¹に基づいて捉える (藤田, 2012)。このモデルでは言語能力の下位部門として、単語や慣用句の意味に関する情報を保存するための語彙部門 (レキシコン) と、それを運用するための感覚・運動部門および概念・意図部門という二つを想定する。図中赤で示される語彙部門と UG にあたる統語演算部門、すなわち再帰的結合能力は自律的な認知モジュールとされているが、このモジュールがどのように使われ、どのような安定状態へと向かうかは、図中青で示す周辺モジュールが担うとされる。

¹¹ この抽象的なモデルは作業仮説的に考案されたものであり、実際の神経基盤モデルだと主張されているわけではない。神経学的な妥当性を求めて考案されたモデルとしては、Friederici (2011) が挙げられる。

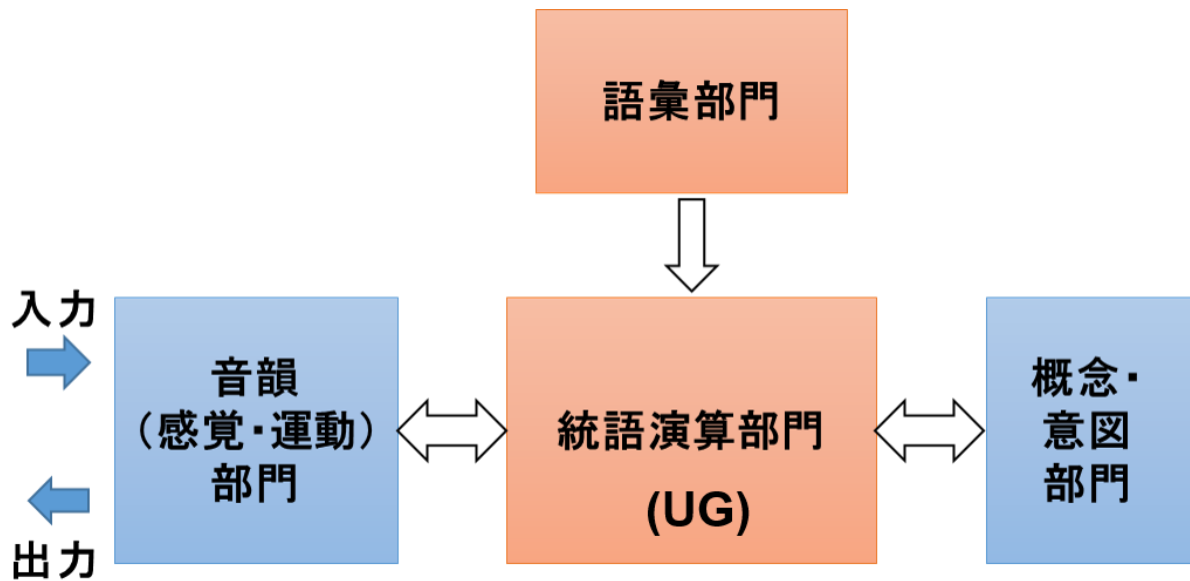


図 1.3 言語能力の極小モデル

1.1.1 節で説明した Merge は、極小モデルの中の統語演算部門の主成分である。Merge はもともと階層構造を産出するための装置として最低限必要なものはなにかという問いのもと考案された「素句構造理論」のなかで提唱された概念である (Chomsky, 1995)。素句構造理論は、語彙部門から選びだした個々の語彙項目同士を結合することによって、選ばれた語彙の素性に従った句構造が生成されることを保証する仕組みについて説明を与えた。この理論によれば、Merge は二つの語彙項目、もしくは語彙項目から組み立てられた句構造を適用対象とする。以下の例は **the** を構成する統語素性によって駆動された、名詞句を構成するという自律的で無意識的な認知過程である。そのため、これは言語使用者が意図的に行える操作ではない。

例) Merge(the, boy) → {the, boy}

このような統語過程の分析は認知発達の側面からも試みられた (Brown, 1973)。例えば統語操作の発達において、幼児は生後 12 ヶ月から 26 ヶ月頃に、まず二語文の使用を獲得する。そののち、前置詞や複数形への屈折形態を扱えるようになり、生後 31 ヶ月を過ぎる頃には三語文を使えるようになる。三語文を獲得してからは動詞の過去形、三単現、決定詞、疑問形などの屈折形態が現れるようになる。語彙項目の結

合は、語彙項目そのものが増加する時期、統語素性や文法を獲得する時期などと比較して、かなり早い段階で獲得されていることがわかる。

近年の計測機器の発展により急速に発達した神経生理学の分野では、先に示した Gauche & Friederici (2015) のような実験手法によって2つの語彙項目の結合を BA44 が担うということが示唆されている。Zaccarella & Friederici (2015) は以下の2条件で脳活動の違いを調査した。

- A. 前置詞句を作成する。
- B. 文章を作成する。

同数の単語を含む両条件は、単語リストを提示する条件と比較して、BA44 および上側頭溝後部の活性化が見られた。また、BA45 は文章作成条件にのみ存在する動詞に関連して活性化した。以上より、BA44 は語彙項目の結合にとって重要な機能をもつと考えられる。

語彙項目の再帰的結合に関する神経基盤が、ヒトの成長のどの段階で形成されるかについても複数の研究結果が存在する (Dehaene-Lambertz et al., 2002; Dehaene-Lambertz et al., 2006; Skeide et al., 2014)。それらによれば、ヒトは生後およそ3年で語彙情報へのアクセスや音韻処理といったボトムアップな情報処理能力を獲得し、そののち意味関係や統語関係の分析といったトップダウンの処理を発達させていくと考えられている (総説として Skeide & Friederici, 2016)。この仮説は、Brown (1972) で、およそ三歳を境に三語文以上の文生成が始まることと整合的である。

1.1.3 残された問題：語彙項目の再帰的結合能力の起源と進化

本論文が目指すのは、大きく言えば、言語能力の研究を通したヒトの生態学的本性の解明である。言語能力を生物が持ちうる形質の一つと措定することで、その形質を進化生物学や動物行動学といった生物学分野の枠組みによって定義でき、分析することが可能となるということは最初に述べた。動物行動学の研究において重要視されるフレームワークに「Tinbergen の4つのなぜ」がある。これは生物のある行動がなぜ存在するのかという問いに対して、以下の4つの答え方があることを示したものである (Tinbergen, 1963)。

- 至近要因：その行動が引き起こされている生理学的メカニズムはどのようなものか。
- 発達要因：その行動は、個体の一生の間にどのような発生と発達を経て完成されるのか。
- 究極要因：その行動は、どのような環境に対する適応的機能があることに応じて進化したのか。
- 系統進化要因：その行動は、その生物の祖先型からどのような進化を経て出現してきたのか。

1.1.2 節で示したように、語彙項目の再帰的結合については、これまで神経処理メカニズムと言語獲得、つまり至近要因と発達要因の面から研究が行われてきた。その結果、他の生物と神経生理学的に共通する部分や、神経学的に妥当性をもつモデルが提案されている。本研究ではこれらの知見をもとに、4つのなぜのうちの後者2つ、すなわち再帰的結合がその関連遺伝子を保存・増殖させる上でどのような環境に対する機能性を発揮してきたのか、および、その適応的機能はどのような進化プロセスによって出現し、変化しつつ受け継がれてきたのか、という問いを扱う。

1.1.4 本研究の目的

本研究の目的は、言語の階層構造を生成する再帰的結合能力の適応的機能と進化プロセスを明らかにすることである。そのために、1.2 節で述べる再帰的結合能力の進化シナリオを採用し、1.3 節で説明する構成的アプローチの観点から、再帰的結合能力の適応性について計算機シミュレーションを用いた仮説の検討を行う。この目的を達成することで、既存の証拠と矛盾のない再帰的結合操作の進化シナリオを構築し、未だ検討されていない論点や他分野の証拠との新たな関連性を導き出すことが可能となる。

1.2 再帰的結合の進化シナリオと本研究の立場

1.2.1 妥当な進化シナリオの条件

この 1.2 節では再帰的結合能力の進化について立てられた複数の仮説を総括し、本研究で採用する再帰的結合の運動制御起源仮説が有望な点と、他の仮説との統合可能性について論じる。仮説の妥当性の高さを判断するための基準として、ここでは進化的連続性を導入する。進化的連続性は、1.1.3 節で説明した系統進化要因を特定することと強く関わる。すなわち、ある生物の遺伝的形質は、突然変異によってどこからともなく生じた変異として説明されるのではなく、なんらかの祖先型に由来した変異として説明されることが望ましい。

ある形質がいかにして進化したかを説明するメカニズムは主に三種類が提案されている¹² (Gould & Vrba, 1982)。

- A) 自然選択適応理論：ある環境に対する形質がもつ何らかの適応性が、その形質の特徴が強い生物個体の生存可能性を引き上げ、漸進的な進化を促した。
- B) スパンドレル理論：進化の副産物としてできた形質が、たまたまその環境において都合のよいものであった。
- C) 前適応理論：ある機能を持っていた形質（前駆体と呼ばれる）が、別の機能を兼ねるようになった。例として、鳥の羽毛（体温維持→飛行）や、蜂の針（産卵管→毒針）など。

これを語彙項目の再帰的結合能力の場合に言い換えると次のようになる。

- A) 自然選択適応理論：コミュニケーションや思考に対する語彙項目の再帰的結合の何らかの適応性が、その漸進的な進化を促した。
- B) スパンドレル理論：複数の能力が進化の結果としてたまたま組み合わさったことにより、語彙項目の再帰的結合能力が創発した。

¹² 三つの理論は相互に否定しあうものではなく、生物進化を説明する上で想定可能なメカニズムを分類したものである。ゆえに組み合わせて使用することが可能である。

C) 前適応理論：ある機能を持っていた形質（前駆体と呼ばれる）が，語彙項目の再帰的結合の機能を兼ねるようになった．

A の自然選択適応だけでは，ヒト以外の生物が，そのコミュニケーション能力の進化の延長として，語彙項目の再帰的結合を用いたコミュニケーションを行わない理由を説明することが難しい．さらに，漸進進化による説明は，例えばフィンチのくちばしの形状に関して説明が可能であっても，くちばしという形質がどのように生じたかという起源の問題を説明することは難しい．今回の問題に言い換えれば，語彙項目がない状態で再帰的結合がなんの役に立つのかわからない．B のスパンドレル理論は，副産物がなぜ再帰的結合能力だったのかという根本的な問いに答えることができない¹³．A の自然選択適応理論に，C の前適応理論を組み合わせると，既存の形質の延長線上に新たな形質や機能が進化するというメカニズムを想定でき，A や B の抱える問題を克服可能である．

1.2.2 語彙項目以外の操作対象に見られる階層構造の生成

語彙項目の再帰的結合という形質に対して，連続的な前適応的進化が可能な前駆体を想定する．語彙項目の操作に限らず，再帰的結合操作の能力は，幼児を対象とした物体操作の発達に関する研究において発見されている（Greenfield et al., 1972）．Greenfield ら（1972）はカップを組み合わせる際の方略を言語の階層構造のように定式化し，これを図 1.4 に示す行動の文法とした．

¹³ ここで求められるのは，メカニズム的な説明ではなく，ある形質が適応形質として選択された理由である．

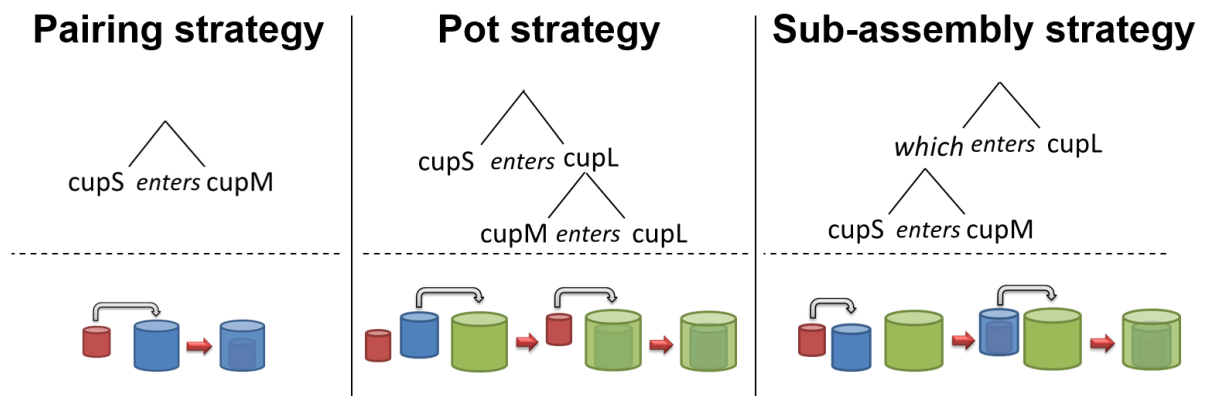


図 1.4 行動の文法 (adapted from Greenfield, Nelson, & Saltzman, 1972)

行動の文法は、カップ二つを組み合わせるペアリング戦略、一つのカップに別のカップを組み合わせる行動を繰り返すポット戦略、組み合わせたカップを操作して別のカップやカップの組み合わせと組み合わせるサブアセンブリ戦略に分類され、ポット戦略とサブアセンブリ戦略はともにペアリング戦略を使用する。このうち、組み合わせたものをさらに別のものと組み合わせるという点で、サブアセンブリ戦略は再帰的結合だと言えることができる。以降、ポット戦略を「反復的結合」、サブアセンブリ戦略を「再帰的結合」と呼び分けることにする。この呼び分けは、ポット戦略が一つの対象に別の何かを繰り返し組み合わせる操作であること、サブアセンブリ戦略が一度結合したユニットを保持し、別の対象に結合する操作であることからきている。二つの操作はどちらかがどちらかの下位クラスに属するというものではない¹⁴。

カップの組み合わせ実験において、生後 20 ヶ月から 32 ヶ月までのヒト幼児は 8 名中 1 名しか再帰的結合を行わなかったが、生後 36 ヶ月からは 8 名中 3 名が再帰的結合を行うようになった。再帰的結合が行動として観察されることは再帰的結合能力の存在を直接は意味しないが、ヒト幼児は再帰的結合をトレーニングなしで使用するようになる (Greenfield 1991; Hayashi, 2007) ため、再帰的結合に適した認知システムを進化させている可能性が高い。加えて、物体の再帰的結合の発達は統語における再帰的結合の発達と相関性がある。行動の文法が最初に見出されたカップの組み合わせ実験において、ヒト幼児は物体の組み合わせにおける再帰的結合の使用と並行して、接

¹⁴ ただし、どちらも互いの操作によって作られた組み合わせを操作対象とする場合はありうる。

続詞を用いた二語文以上の言語文による発話，すなわち統語における再帰的結合を行うようになった（Greenfield et al., 1972）．こうした事実から，物体操作と言語との間には相同性があると考えられてきた（Greenfield et al., 1972; Greenfield, 1991; Conway & Christiansen, 2001）．神経学的にも，物体の再帰的結合に関わる BA44 は，埋め込み型の人工文法を入力した際に賦活する脳部位ということが，実験的にもメタ分析的にも示されている（Bahlmann et al., 2008; Fitch & Friederici, 2012）．また，外傷性ブローカ失語症¹⁵の患者は階層構造を有する図形の構築に支障をきたすことがわかっている（Grossman, 1980）．さらに，この脳部位は音楽における拍子の階層構造や四則演算における階層構造の処理の際に賦活することも示されている（Koechlin & Jubault, 2006; Nakai & Sakai, 2014; Nakai & Okanoya, 2018）．ここから，再帰的結合操作が階層構造の生成や処理一般において，再帰的結合を司る神経基盤が共有されているという仮説を立てることができる．この仮説についての詳細は第二章で述べる．

物体の再帰的結合は，ヒトの近縁であるチンパンジーを対象とした認知実験（Greenfield, 1991; Hayashi, 2007）でも発見されている．大人のチンパンジーを対象とした実験室実験では当初，反復的結合までしか発見されていなかったが，のちに学習によって再帰的結合も可能であることが明らかになった（Matsuzawa, 1991; Hayashi, 2007）¹⁶．このことは 1.2.3 節で説明する Merge の運動制御起源仮説を，進化的連続性という側面から支持する根拠にもなっている（Fujita, 2016）．ただし，チンパンジーの場合は実験前にトレーニングを必要とすることから，物体操作における再帰的結合の基盤的認知システムを有している可能性は低い．

1.2.3 Merge の運動制御起源仮説

これまでに挙げた研究結果をもとに，理論言語学の分野で，物体の再帰的結合能力を前駆体として語彙項目の再帰的結合能力が進化したという仮説が立てられている（Fujita, 2009, 2016）．この仮説は「Merge の運動制御起源仮説」と呼ばれており，Fujita (2009)以前には，Maynard Smith ら（1995）が類似の説を提案している．図 1.5 は藤田

¹⁵ BA44 はブローカ野に属する．

¹⁶ ただし，この事実からは物体を再帰的に組み合わせるという行動がチンパンジーにおいて観察されたという以上のこと，例えばチンパンジーが再帰的結合能力をもつといった主張はできない．学習によって一つ一つの行動を連合させることは可能であり，実際にチンパンジーはヒトと異なり実験前のトレーニングを必要とする．

(2012)における、物体操作を前駆体とした統語操作の進化シナリオを示したものである。図 1.5 における Pot-Merge は Core Merge の反復的結合を指し, Sub-Merge は Core Merge の再帰的結合を指す。藤田 (2012) によれば, サブアセンブリ戦略は進化と発達の両面においてヒトが最終的に獲得する最も複雑な操作様式だと考えられ, Core Merge から Sub-Merge への進化は, 行動の文法におけるペア戦略からサブアセンブリ戦略への各段階を前駆体とし, その推移と平行的に前適応によって生じたとされる。ヒト以外の動物で観察されづらい, 道具製作のような適応度を高める行動と結びつきやすい点が, 物体操作における再帰的結合を表現の再帰的結合の前駆体とする理由になる。

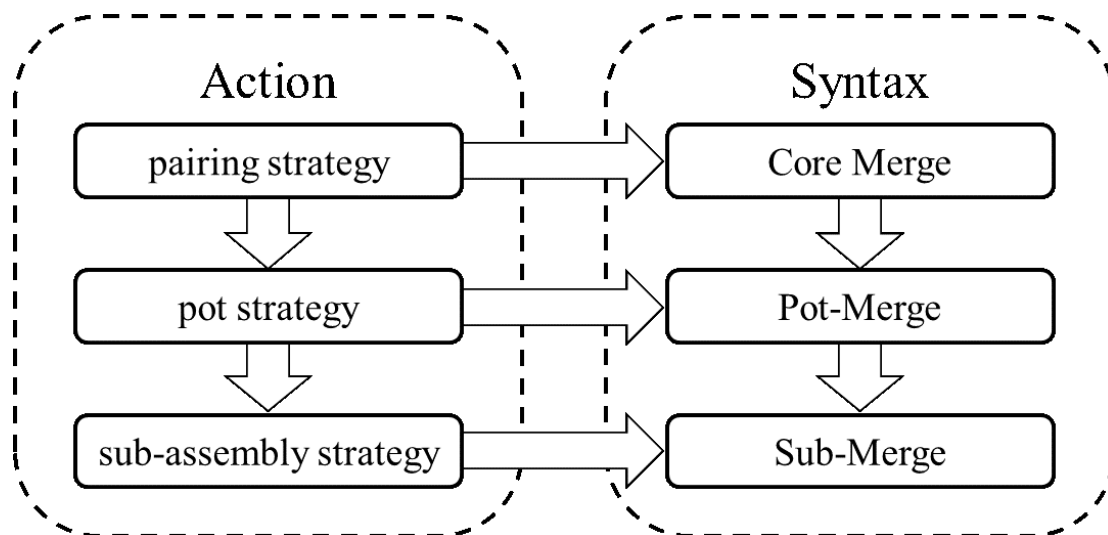


図 1.5 行動と統語の平行進化 (藤田, 2012)

藤田 (2012) の進化仮説は, 発達における最終到達点であるサブアセンブリ戦略が, 進化においても最終到達点であったという前提を有する。これは「個体発生は系統発生を反復する」というヘッケルの反復説に準じていると言える。個体発生における系統発生の反復は, 生物のある生理システムが, その構成要素となるサブシステムなしに正常に働かないという条件下において不可避免的に生じる現象であると考えられる。では, ポット戦略とサブアセンブリ戦略の間にそのような要請は存在しうのだろうか。行動の文法の定義において, ペアリング戦略を実行するシステムは, 組み合わせ動作を必要とするポット戦略とサブアセンブリ戦略にとって必須であると考えら

れるが、ポット戦略とサブアセンブリ戦略の間にそのような関係はない。よって、ポット戦略—サブアセンブリ戦略間や Pot-Merge—Sub-Merge 間に順序的必然性はないように思える¹⁷。

Fujita (2016) ではこのシナリオがより具体化され、物体の再帰的結合能力から、音のラベルを伴う認知一般的なイメージ、すなわち記号の再帰的結合が進化したのち、統語における再帰的結合能力が進化したという進化プロセスが提示された。この仮説がどの程度生態学的に妥当なものであるかは、仮説を精緻化するということも含めて、なんらかの方法で確かめる必要がある。

1.2.4 再帰的統語の社会的認知起源仮説

Merge の運動制御起源仮説とは異なる再帰性の起源を提唱する仮説として、意図推論のような社会的認知能力に起源を想定するという向きもある (Stiller & Dunbar, 2007; Dunbar, 2009; Oesch & Dunbar, 2017)。Oesch & Dunbar (2017) は、心の理論における高次の意図推論が言語文の再帰性に深く関係しているという見方から、現代人のもつ意図推論能力と再帰文構成の能力それぞれの依存関係を調査した。実験では、意図推論を含まない再帰文、意図推論を含む再帰文、短期記憶を必要とする再帰的でない文を用いたタスクによって、それぞれのパフォーマンスがどのように影響しあっているかが分析された。結果、5 次までの意図推論能力のパフォーマンスが短期記憶のパフォーマンスと独立して再帰文を構成する能力のパフォーマンスに影響を与えていることがわかった。このことから、5 次までの意図推論は再帰文の構成能力を実行する下地になっていると考えられ、人類進化においても意図推論を足がかりとした再帰性の進化が想定できるという主張がなされている。このような社会性に起源を求める考え方は、人類の集団規模の増大や人間関係のネットワークの複雑化といったヒトに特有の社会現象と相性がよい。進化の連続性を生態学的形質の変化のみに求めるのではなく、ヒトを取り巻く社会的環境との相互作用の側面からも検討を行うという点で、本仮説はより多くの条件を考慮に入れた仮説と言える。

¹⁷ ただ、サブアセンブリ戦略も Sub-Merge も一度結合したユニットを一時的に保存しておかなければならないという点で、ポット戦略や Pot-Merge よりも複雑な操作であり、それが進化プロセスにおける出現順序を決定する可能性は高い。

1.2.5 本研究の立場と仮説の統合

以上に述べた再帰の進化に関する 2 つの仮説に対する、本研究の立場を説明する。妥当な仮説の設定には、それぞれの仮説を比較し可能性の高いものを採用するという方法と、2 つの仮説を統合して新たな仮説を作るという方法があるが、本研究は後者の方法を取ることが望ましいと考える。なぜならば、2 つの仮説で説明されている「再帰」の意味が異なるからである。Oesch & Dunbar (2017) で前提とされている社会的認知起源仮説において、「言語の再帰性」とは文の埋め込み構造のことであり、文よりも細かい語彙項目を再帰的に結合する能力によって生成される対象であると言える。つまり、文の埋め込み構造は、語彙項目の再帰的結合能力によって生成することができるが、その逆は成り立たない。よって、同仮説と運動制御起源仮説との単純に比較は不可能である。反面、運動制御起源仮説が再帰的結合を扱い、社会的認知起源仮説が再帰的結合によって生み出される埋め込み構造を扱っているという点で、両者は言語進化の異なる段階を扱っているという見方をすることができる。

Martins (2012) は、同一の規則の集合を用いて異なる階層的依存関係を表象することで、新奇な階層の構造を生成したり汎化したりすることが可能であることを指摘した。このような階層構造を表象する能力は、行動系列の生成、空間ナビゲーション、社会的ナビゲーション、そして慣例化されたコミュニケーションシステムの創発など複数のドメインに渡って、未知のレベルで類似した構成要素を予期したり、学習を促進したりすることを可能とする。Martins (2012) は、階層構造を表象する能力が、空間的ドメインにおいて視覚と発話双方の能力を補助することを、フラクタル構造を持つ図形を用いた実験によって示した。このことは、言語能力以前に他のドメインで階層構造の表象能力が使われていたことを示唆し、また階層構造を生成する再帰的結合が認知一般で機能することを示している。この知見を用いれば、運動制御起源仮説と社会的認知起源仮説を結び付けることが可能となる。

Merge の運動制御起源仮説に階層構造を表象する能力の進化を加えることで、より精緻かつ妥当な仮説を提示する。図 1.6 に本研究における進化シナリオを示した。この仮説を「再帰的結合の段階的進化仮説」と呼ぶことにする。2 章で詳細に論じるが、本研究では、Martins (2012) が指摘するヒトの認知一般に見られる階層構造の表象能力が、物体操作における再帰的結合を前駆体として進化したという立場を取る。そして、この物体操作の再帰的結合以前に進化していた行動の階層構造の表象能力、すな

わち行動表象の再帰的結合が、物体操作を起点として他の認知ドメインに転用されることで、語彙項目の再帰的結合を含む一般的表象の階層構造生成が可能になったと考える。ここで表象操作は認知ドメイン間を結ぶ **Global Workspace** (Dehaene et al., 1998) の役割をもつ。本仮説において、社会的認知能力である意図推論は一般的な階層構造の表象能力において扱われ、社会的認知起源仮説はこの段階の進化プロセスとして取り込まれる。図中オレンジ色の矢印で示されているのは、各段階で想定できる進化の方向である。この矢印が表す進化が具体的にどのようなものか、その進化にはどういった環境条件が必要なのかを明らかにすることが、妥当な言語能力の進化シナリオを構築する上で重要となる。類似の進化シナリオは藤田 (2012) の仮説を発展させた Fujita (2016) でも提案されており、音楽や行動計画を含む認知一般を介した **Merge** の進化が考えられている。この仮説は、Fujita (2016) の進化シナリオに加えて、物体操作以前に行動の表象操作能力を仮定しているという点で、より具体的な仮説と言える。言い換えれば、Fujita (2016) で想定されている認知一般的なイメージの操作以前に、行動表象という体性感覚的なイメージの操作が存在しており、それが物体操作を介して進化したということになる。

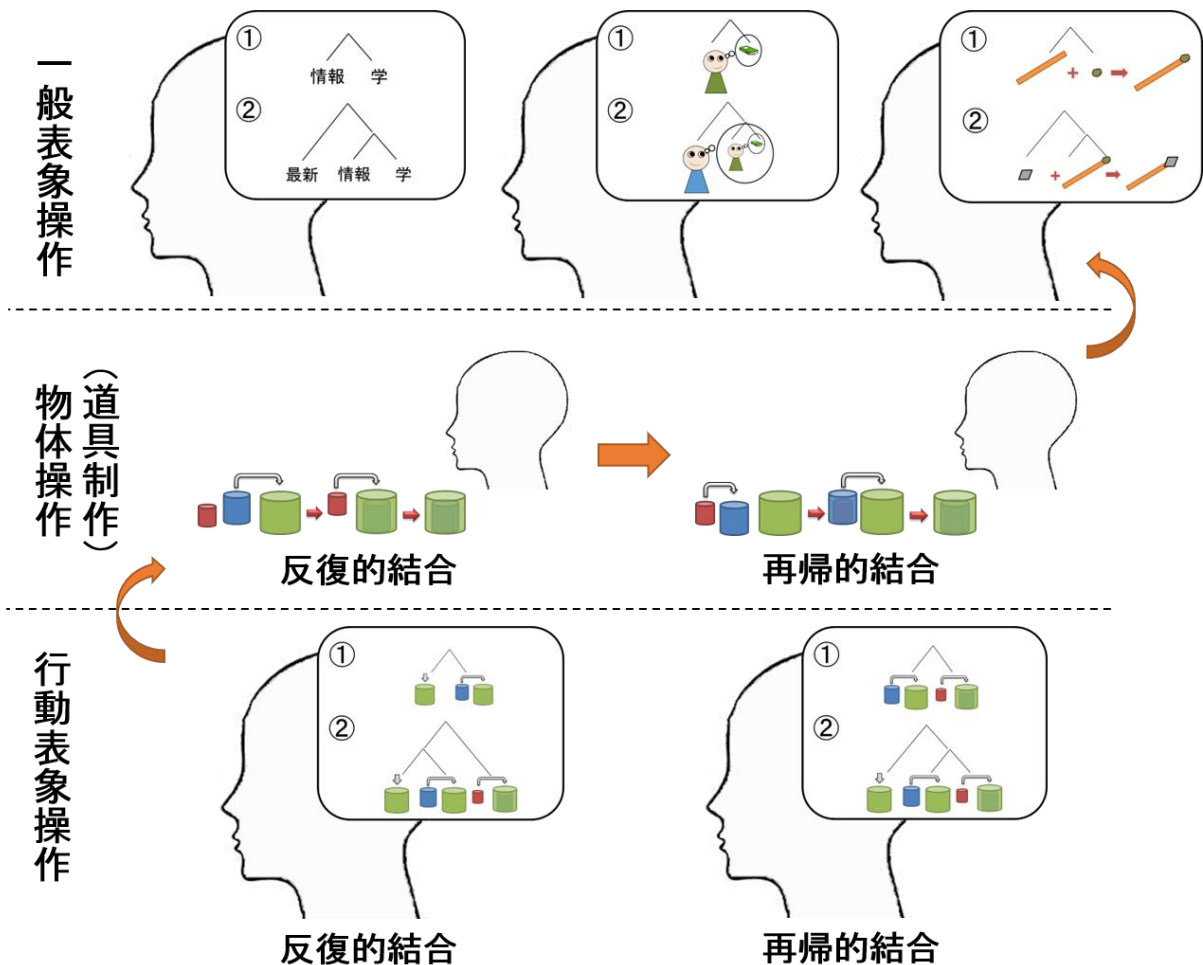


図 1.6 行動表象の操作，物体操作，認知一般の表象操作の段階的進化仮説

1.2.6 本研究で明らかにすること

1.1.4 節で述べたように，本研究の大目的は，再帰的結合能力の適応的機能と進化プロセスを明らかにすることである．これを再帰的結合の段階的進化仮説を踏まえて言い換えることで，本論文の具体的な目的を述べる．

再帰的結合の段階的進化仮説は主体の思考対象を多くするほど説明すべき現象も増え，またそれらの相互作用も複雑化する．そこでまず，最も単純な外部環境の物体操作を考える．サブアセンブリ戦略が非ヒト霊長類において観察される以上，再帰的結合につながる基盤的な認知能力は人類の祖先がチンパンジーと分岐した時点で持っていた可能性がある (Fujita, 2016)．しかし，ヒトのサブアセンブリ戦略はチンパンジーと違ってトレーニングなしで観察されること (Hayashi, 2007) から，ヒトではサ

ブアセンブリ戦略に関わる認知システムが進化的に選択され増進しているとも考えられる。ここで明らかにすべき問題は、どのような環境条件が物体操作における再帰的結合能力を選択しうるのか、ということである。この問いに対して、本論文の二章で関連研究の知見を整理し、三章で物体操作の進化シミュレーションを行う。

次に、行動表象の操作をモデルに導入し、抽象的操作でどのようにして再帰的結合が使われるようになるか、進化と学習のシミュレーションを用いて明らかにする。ここで明らかにすべき問題は、表象レベルの再帰的結合が現実の行動にもたらす利点はなにか、ということである。つまり、三章のシミュレーションでは、再帰的結合能力は物体操作において観察される行動としてのみ定義されるが、四章のシミュレーションではエージェントが内的に有する能力としても定義される。この内的操作能力についても、二章で関連研究の知見を整理する。

最後は統語操作について考えるが、この段階に至ると考慮しなければならない認知ドメインや行動の種類、社会的状況が一举に増え、抽象的なシミュレーションで扱うことが困難になってくる。統語操作における再帰的結合の進化プロセスや適応性は、二章における関連研究の調査と、三章と四章の進化シミュレーションを通して明らかになったことを援用し、五章で議論することとする。

1.3 妥当な仮説形成のための構成的アプローチ

1.3.1 起源と進化の問題への接近法

再帰的結合能力の起源と進化のシナリオを解明する上で取りうる方法を考える。ある形質の起源と進化を知る上で重要となるのは、その形質がどのような祖先型に由来し、またどのような適応性をもって変化してきたかという点である。この問題に取り組む上で、以下に挙げるような困難性がある。

- 語彙項目の再帰的結合はヒトでしか見つかっておらず、他の動物との比較が困難。
- 言語知識や言語能力を担う脳は化石証拠として残らないため、復元が不可能。
- 現代において言語は多角的・一般的機能を持ちあらゆる状況において使用され

るため、他の生物の特徴のように特定の適応環境や機能といったものを想定することが困難.

- 生物進化は一般に長大な時間がかかるため、実証実験が困難.

もちろん、ヒトの近縁種であるチンパンジーなどの霊長類を対象とした比較認知実験や、発声において相似の能力を用いる鳥類との比較認知実験、古人類学・考古学における発掘調査、神経科学における脳機能の解析から得られた知見により推測できることは多い. しかし、連続的な進化のメカニズムを明らかにする上で、これらは断片的な情報である. 言語を進化の産物として理解するには、現実にかきたであろう統語能力発生までの移行段階をなんらかの方法で連続的に再描画し、初期人類と現世人類の間に存在する歴史的欠落を埋める必要がある.

計算機シミュレーションはこうした問題を解決するための一つの糸口となりうる(橋本, 2004). シミュレーションの利点は、実証的観察が困難な現象や、事象の前後関係が重要となる歴史性をもつ現象、社会現象のような、一度起こったあと同一の事象が二度と起こらない一回性をもつ現象について、大きな時間スケールの計算実験を繰り返し行えることにある. この方法自体は事実検証ができるわけではないが、仮説から導いたモデルを実装し動かすことで仮説通りの現象を再現できれば、「どのようにして、ある特定の現象を起こすシステムが発生・進化しうるか」が説明できるようになる. 特定の状況を構成し、様々なパラメータを試すことで、その現象にとって本質的な要素を発見するこの方法を、構成的アプローチ、あるいは構成論的アプローチという(金子, 2003).

1.3.2 全体論的現象としての進化と構成的アプローチ

従来の科学的方法論では、ある現象を理解するのに要素還元的な手法が取られる. 例えば 1.3.1 節で挙げたような、ある認知処理を担う脳部位を特定したり、ある自然現象を構成する要素を定義しそのメカニズムを演繹的に分析したりといった方法である. しかし、個体や集団の活動と環境の変化が相互作用する生物進化のような異なる種類・異なる階層の要素同士が相互作用する系を対象とする場合、そのような要素還元的手法で理解することが困難になる場合が生じる. 要素が相互作用する系では、ある時点で生じた現象が次に起こる複数の現象の原因となったり(原因と結果の一对

多関係), ある時点での系の変化が系自身にフィードバックされたり (原因と結果の不分離性) といったことが起こりうる (橋本, 2002). 相互作用によって引き起こされる現象は, 構成要素に分解することで消失してしまうのである. そうした現象を理解するには, 個々の要素がどのように相互作用して系全体としての性質が形成されているかという全体論的な視点が必要となる.

本研究において, 再帰的結合という形質の起源と進化を説明するために計算機シミュレーションが有効だと主張する理由は, たんに複数の構成要素が複雑に絡み合う現象を扱うからではない. 構成的アプローチは要素間の根本的に分離不可能な関係性を明らかにするための手法 (橋本, 2002) であり, その適用対象となる再帰的結合の進化は, 生態学的環境に対する一方的な最適化に留まらない可能性を有している. これについて詳しくは三章と四章で説明する. 端的に言うと, 再帰的結合が関わる道具製作をはじめとするニッチ構築は, 文化的環境を構築するという点で他の動物によって行われるニッチ構築よりも環境への影響が大きい. ゆえに, 一般的な進化シミュレーションでは無視されたり分離されたりしがちな, エージェントの活動と環境の相互作用が, 分離不可能なまでに強くなる状況が想定される. そして, この環境とエージェントの相互作用こそが, ヒトにおける再帰的結合の進化を促した可能性がある. 本研究のシミュレーションでは, この点を含めて確かめるために, 構成的アプローチを用いる.

1.3.3 アブダクティブな推論を補助する構成的アプローチ

金子 (2003) では, 構成的アプローチが以下の三つに分類される.

- A. 純粹思考実験
- B. 計算機つき思考実験
- C. 実験室における構成実験

このうち, B の計算機つき思考実験は, 論理的な思考のみでは到達しがたい直感を獲得する一つの手段だとされる. 科学的手法に計算機が使われる場合, それは一般に, 厳密に定義されたモデルを用いた大規模計算による解析を意味する. 対して, 計算機つき思考実験に用いられるモデルは解釈の余地を含む作業仮説となり, 計算機は解析

装置ではなく思考の補助装置となる。作業仮説は、計算機によるシミュレーションを様々なパラメータや条件のもと走らせることで、徐々に厳密なものへと近づいていくことになる。それは例えばひらめきを要するようなクイズにおいて、様々な観点から問題を俯瞰し試行錯誤することを通して多様な回答を導き出すことと似ている。そしてそれぞれの回答に、それにふさわしい問題の定義が考えられるように、計算機つき思考実験では計算結果に基づいた作業仮説の精緻化が行われるのである。このような手法は、モデルやその元となる理論がない問題に対して有効性を発揮する(橋本, 2010, 2011)。さらに、現実ではまだ起きていない現象も作業仮説によって定義された可能性の世界では生じうる。本研究では、現象の必要条件を定義して問いに挑むのではなく、十分条件の側から探索することで理論やモデルを形作っていく。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を概説する。

本章に続く第2章では、第3章と第4章のシミュレーションに向けて、物体操作における再帰的結合、および表象操作における再帰的結合の能力を取り扱った関連研究を紹介し、再帰的結合をモデル化するための知識を整理する。第3章では、物体操作のエージェントモデル、および物体の再帰的結合能力の進化シミュレーションの設計について説明し、結果の提示および考察を行う。第4章では、表象操作のエージェントモデル、および表象の再帰的結合能力の進化シミュレーションの設計について説明し、結果の提示および考察を行う。第5章では、3章および4章の考察をもとに、認知一般的な側面、および言語的な側面から再帰的結合能力の進化を議論する。最後に第6章で本論文の結論を述べる。

第2章 再帰的結合の進化シナリオ解明に関わる既存・関連研究の整理

本章では、階層構造と再帰的結合に関連する研究をいくつかの分野に渡って紹介し、それらの知見が本研究におけるシミュレーションにどのように反映されるかを述べる。最初に、第3章の物体操作における再帰的結合の進化シミュレーションに向けて、動物の物体操作能力と、ヒトの道具製作能力に関する研究を整理する。次に、第四章の表象操作における再帰的結合の進化シミュレーションに向けて、表象とその操作に関する概念整理を行い、動物の行動計画能力、およびヒトの計画能力に関する研究を整理する。最後に、第四章で用いる表象操作の計算モデルを、言語を含めた認知一般における再帰的結合の進化へと拡張可能な形で作成するために、言語表象や音楽表象や算術表象などの操作に関わるとされる神経回路について、知見の整理を行う。

2.1 物体操作における再帰的結合

2.1.1 物体操作と再帰的結合

器用な手指をもつヒトは、物体操作を行うことに身体を特化する進化を経てきたと言える。ヒトの手は近縁のチンパンジーの手と比べても違いがはっきりとわかる形状をしており、拇指対向性¹⁸の獲得や指と手首の接続の強化によって摘むや捻るといった細かな動作が可能になっている (Skinner, et al., 2015)。身体と環境の関係を道具の使用や製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手段の変更を可能とするという戦略が、このような進化を

¹⁸ 親指と他の指を向き合わせることができる形質。

実現したのではないだろうか. 1.2 節でも紹介した Greenfield ら (1972) の実験において, 物体操作の再帰的結合であるサブアセンブリ戦略はヒトの発達過程で自発的に出現する. このことは, 他の実験においても追試され, 年齢が上がるに連れてポット戦略に対するサブアセンブリ戦略の頻度が上昇するという結果が得られている (Hayashi, 2007).

2.1.2 ヒト以外の動物における物体の再帰的結合

一章で紹介したように, 物体の再帰的結合は反復的結合, 再帰的結合ともにチンパンジーにおいても見られる. Hayashi (2007) はチンパンジーによるカップの組み合わせ操作をより細かく分析し, 子供のチンパンジーではサブアセンブリ戦略が見られにくい, 訓練を受けた大人のチンパンジーではサブアセンブリ戦略の使用頻度にヒト幼児との差がないことを指摘している. チンパンジーによるサブアセンブリ戦略は, 報酬による強化によってのみ獲得されうるのだろうか, それとも発達過程で自然発生しうるのだろうか. 物体の結合ではないが, 野生のチンパンジーを野外観察した事例 (Sakura & Matsuzawa, 1991; Matsuzawa, 1994; Sugiyama, 1997) では, 木の実割りの行動の際に再帰的な操作が行われることがわかっている. この野外実験では, チンパンジーの遊動域にヤシの実 (Nut) と記録用にマークされた様々な形状の石を用意し, 自然な状態でチンパンジーの道具使用を観察した. カイという名前のチンパンジーは, ヤシの実を叩くのちょうどいい大きさの石 (Hammer) と土台となる石 (Anvil) を選び, さらに土台を安定させる楔になる石 (Wedge) を使ってヤシの実を割った. この関係は図 2.1 のような 3 レベルの階層構造として表現できる (松沢, 2000). この操作では物体の物理的な結合が起こらず, 再帰的結合になっているかどうかはチンパンジーが二つ物体を一つのユニットと捉えているかがわからないため不明である.

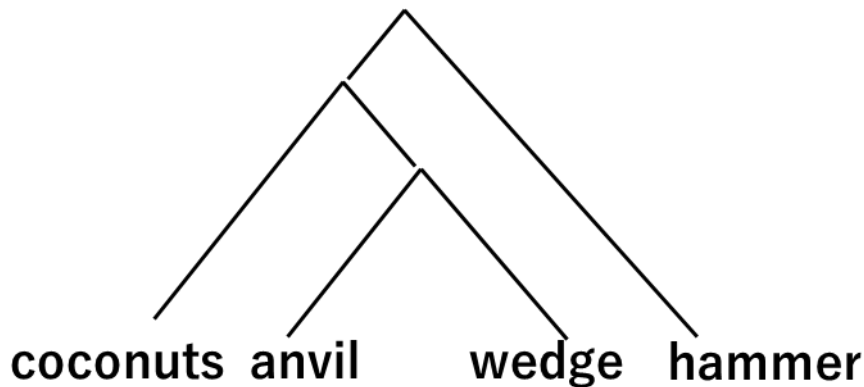


図 2.1 ナッツ割りの階層構造 (松沢, 2000)

次に，物体操作という能力が使われる別の場面として，道具製作を考えてみる．なぜならば，切断する，砕く，高速で走る，飛行するなど，本来は遺伝的にしか獲得しえない機能を，遺伝的変異を介さず合目的的に獲得できるという点で，道具製作は他の物体操作とは異なる特別な行動であるからである．

道具製作には加工型と組立型の二種類が考えられる．加工型の道具製作とは，ある一つの対象に対して変更を加えていくことで，そこに新たな機能を加えたり性能を高めたりする物体操作である．初期人類が行っていた石器製作は，石核から石片を繰り返し剥離させていくという点で，この加工型の道具製作にあたる．動物における代表的な例として，チンパンジーはアリ釣りの道具である茎や木の枝に対して，アリの穴に通せるよう葉や小枝をむしるという加工を行う (Brewer, 1976; J. Goodall, 1963, 1986)．さらに，一部のチンパンジー集団では茎の先を噛んでブラシ状にすることで，アリ釣りの効率を高めるという加工も観察されている (Sanz et al., 2009)．飼育下においてはさらに複雑な道具製作も可能となる．ボノボのカンジは，訓練の結果ではあるが，初期人類と同様に石の剥離による石器製作を行うことができた (Savage-Rumbaugh et al., 2007)．道具を使って道具を作るという入れ子構造を持った道具の二次使用は，チンパンジー以外の動物も可能であることが近年になってわかってきている¹⁹．カラスなどの鳥類においても，道具使用を伴う試行錯誤のなかで，道具の形状を適切に調整し食物の獲得に成功するといった例が観察されている (Weir et al.,

¹⁹ 過去には道具の二次使用はヒトにしかできないと考えられていた．

2002; Weir & Kacelnik, 2006). 自己の目的にそうように物体の形状を調整するという行動は、ヒト以外の動物においても一般に見られるようである。

対して組立型の道具製作とは、複数の物体を組み合わせることで、そこに新たな機能を生み出したり性能を高めたりする物体操作である。組立型の道具製作は、ヒト以外の動物で観察されにくい。これは、物体を結合するための結縛や接着に手先の器用さや高度な技術を必要とするからだと考えられる。また、それぞれ別の機能をもつ複数の要素を組み合わせて新たな機能を実現するという行動には、目的とする機能の実現に必要な部品の機能を考える能力がいるように思われる。ここから、組立型の道具製作を行うことで適応度を上げるという生存戦略が、ヒトにおける再帰的結合の進化を促したのではないかという素朴な予想が立てられる。

2.1.3 人類史における道具製作

現代のヒト社会は、種々の技術やコンポーネントが階層的に組み合わされ構築された、工業製品によって支えられている (Arthur, 2009)。例えば、交通網は自動車や電車やバスを始めとする移動手段からなり、自動車はエンジンやシャーシなどのモジュールからなり、エンジンはピストンやシャフトなどの小部品からなる。現在のところ具体物の再帰的結合を行っていたとされる最も古い証拠²⁰は、約 31 万年前と推定される痕跡が見つかったフリント製の石器²¹であり、これを作ったのは同じ地層から出土した解剖学的に現代人と同一のホモ・サピエンスだと考えられる (Callaway, 2017; Stringer & Galway-Witham, 2017)。それ以前のヒト祖先による道具製作は、石核から石片を剥離し、切りやすく持ちやすい形状へと加工していくことであったが、27 万年ほど前に木の枝を柄とし、天然の接着剤を用いて石器と組み合わせた槍が出現している。ヒト社会に見られる構築物はこの年代を起点として、徐々に構成要素の規模を増大しつつ多様な機能を発達させてきた。

製作物の再帰的結合にどのような利点があるかということについては、既存の文化進化シミュレーションによる分析が存在する (Arthur & Polak, 2006; Arthur, 2009) Arthur & Polak (2006)の研究では、計算機の基本素子である NAND 回路を用いてよ

²⁰ 木製品などは石製品と異なり腐食しやすいため、現在石槍の出土が確認されている年代よりも古くから人類が組み合わせによる道具製作を行っていた可能性もある。

²¹ 木製の柄に取り付けられていたと推測されている。

り複雑な計算を行う装置の探索をシミュレーションしている。NAND 回路は、結線の仕方や二つ以上の組み合わせによって AND や OR, NOT などの基本的な論理演算回路を構成することができ、ゆえにこれらの論理演算を組み合わせで実装可能なあらゆる計算装置を構築することができる。このシミュレーションでは、あらかじめ製作されうる有用な成果物²²をいくつかリストアップしておき、リスト内の成果物の製作が達成されたとき、その成果物を次の製作シミュレーションのコンポーネントとして使用する、という形式で製作物の再帰性がモデル化された。上記のようなモジュール化を許すことで、回路構成を全探索した場合には膨大な計算量が必要になってしまうような複雑な構成²³をもつ計算装置でも、短時間のうちに発見することが可能であった。ここから、製作物の再帰的結合が、有用な構造の探索に対して有利に働くということがわかる。

2.1.4 シミュレーションにおける物体操作と再帰的結合

シミュレーションにおける物体操作は、物体の表現である、ある形状に対応する記号文字（たとえば、A や B）と、その組み合わせである文字列を状態とした、結合操作として定義される。物体同士の結合を前提としているため、加工型の道具製作ではなく組立型の道具製作を抽象化していると言える。2.1.2 節で述べたように、物体の形状を調整するという行動は、ヒト以外の動物においても一般に見られるため、その進化的起源は問わない。ここでは、複数の要素を組み合わせで新たな構成を実現するという行動である、再帰的結合がどのような適応性を持って出現するかを明らかにしたい。

初期人類によって行われていた石槍の製作を例にとり、再帰的結合を計算論的に定義する。石槍は柄となる木材、先端部分となる石製の矢じり、二つを結合するための接着剤²⁴などの材料からなる (Wymer, 1982)。反復的結合は、ある物体に別の一つの物体が繰り返し組み合わされる操作である。石槍の製作において、矢じりの基部を木製の柄の先端に取り付け、接着剤を用いてそれを固定することが反復的結合にあたる。

²² 例えばフリップフロップ回路やアキュムレータ、シフトレジスタなど。

²³ ここでの複雑さとは、NAND 回路の「組み合わせ」と「配線」パターンの種類（すなわち探索空間）の広さがあるなかで、特定の構造を作らなければならないことを指している。

²⁴ 接着剤を作成するという工程はここでは無視するが、それを考慮すれば実際の道具の階層構造はさらに深くなるだろう。

この操作は記号あるいは記号列で表現される状態の有限集合と、結合操作として表現される遷移関数を必要とする。再帰的結合は、一度以上組み合わされた物体をユニットとして別の物体に組み合わせる操作である。石槍の製作において、接着剤を矢じりの基部に予め塗布しておき、これを木製の柄に組み合わせることが再帰的結合にあたる。この操作には、反復的結合で使用した集合と関数に加えて、組み合わせたものを記憶しておくための状態集合と、記銘と想起のための遷移関数が必要となる。三章では以上の点を踏まえた再帰的結合のモデル化を行う。

再帰的結合の適応性の一部は、既に Arthur & Polak (2006) の文化進化シミュレーションで明らかになっている。ただし、この研究で製作物の再帰的結合はリストのなかの有用な構成の利用が強制されることで可能となっているため、再帰的結合の使用が前提とされていると言える。加えて反復的結合と再帰的結合の区別もつけられていなかった。前述したように、再帰的結合は反復的結合よりも多くの計算リソースや操作回数を必要とするため、原理的に生物個体への負荷が高くなるはずである。ゆえに、二つの再帰的結合はそれぞれに（あるいは二段階で）異なる適応性を有していることが予想される。本シミュレーションでは、再帰的結合がどのような生態学的要請によって出現しうるのかを特定し、特に再帰的結合がどのような適応性を持ちうるかを明らかにする。

2.2 表象操作における再帰的結合

2.2.1 表象操作と再帰的結合

再帰的結合の段階的進化仮説において、物体操作に加えて考えなければならないのが表象操作である。「表象 (Representation)」という語は「言語」と同じく、研究分野や研究者ごとに様々な用法で使われる多義語であるため注意がいる。シミュレーションを用いる以上、計算論的な定義が必要となるため、ここではヒトの認知過程を情報処理として扱う認知科学における表象の定義を採用する。認知科学の分野では、主体がなんらかの対象の構造を構成し、それを処理する過程を認知プロセスとして捉える。表象とは、このときこの認知システムのなかに構成された対象に関する情報のことを言う (三宅, 2002)。ヒトの認知システムは、現実世界や可能世界に存在する具体

物，集合，性質，事象といった多くの異なった種類の対象を表象できなければならない (Wilson & Keil, 1999).

認知科学における情報处理的アプローチの側面からは，表象とは認知主体がもつ環境についての一般化・抽象化された内的モデルのことであると説明される (野家, 2002). 情報处理的アプローチにおける内的モデルの表現方法は，表象をデータ構造として扱う計算主義と，並列分散処理におけるノードの活性化状態として扱う接続ニズムに大きく分けられる (Wilson & Keil, 1999; 野家, 2002). 計算主義における表象は，究極的には 0 と 1 からなる記号列であり，表象の操作とはある手続きに基づく記号の処理，すなわち計算ということになる. コネクショニズムにおける表象は，ニューラルネットワーク上の活性化パターンとなり，表象の操作とはそのパターンの写像ということになる.

本論文では認知過程を記号处理的な計算の過程とみなし，表象に対して「記号がなんらかの様式に基づいて配列されたもの」という計算主義的な定義を一貫して用いる. そして表象の操作を，記号列によって表現される内的状態の操作と定義する. 表象操作によって可能になる認知処理には，将来的な状態の予測や，行動計画の作成，あるいは他者の意図など具体物として存在しないものの推論などが考えられる. 表象操作における再帰的結合は，そうした内的状態として記号列を生成する際の操作として想定でき，物体操作と同じ枠組みでモデル化することができる. このときの記号列が表現する情報としては，視覚や聴覚より取得される環境情報，運動や体性感覚より取得される行動情報，あるいは共感能力によって取得される他者の心的状態などがある. Martins (2012) が想定する，表象操作が認知一般に再帰性を提供するという発想は，このような計算主義的アプローチによる表象操作のモデル化を行うことでシミュレートすることが可能となる. 再帰的結合の認知一般モデルについては，詳しくは 2.3 節で説明する.

物体操作と関連づけて論じるため，石器製作を例に，行動情報の内的表現となる記号列における再帰的結合を説明する. 石器製作に関わる行動は，Moore (2011) や Stout (2011) で分析されており，掴む (Grasp)，回す (Rotate)，ハンマーストーンを握る (Hammerstone grip)，叩く (Strike) などの行動要素が特定されている. 行動を表象とした場合，表象の再帰的結合は行動の結合ということになり，行動計画の作成と捉えられる. このとき反復的結合はある行動に別の一つの行動が繰り返し組み合わせ

される操作である。石器の製作において、Grasp や Rotate といった行動を連想した順序で組み合わせていく操作と等しい。再帰的結合は一度以上組み合わされた行動系列をユニットとして別の行動や行動系列と組み合わせる操作である。これは石器製作において、連想された行動系列 {Hammerstone grip, Strike} から一度離れ、別の行動 {Rotate} や行動系列 {Grasp, Rotate} を連想したのち、これに先ほどの行動系列を組み合わせる操作であると言える。より身近な例で言えば、お茶を飲むためにお湯を沸かすことを先に思いついたとき、それを覚えておいてティーバッグとポットを探す、という計画生成にあたる。行動の再帰的結合は必ずしも物体の再帰的結合を伴わない。よって、表象の再帰的結合はヒト以外の動物も行っている可能性がある。

2.2.2 ヒト以外の動物における表象操作と再帰的結合

「記号がなんらかの様式に基づいて配列されたもの」という表象の定義における「記号」は、あくまで計算主義的な立場における操作の単位のことであるため、ヒト以外の動物においても表象の操作を想定することが可能である。物体操作のレベルではヒトと他の動物とで差異があることを 2.1 節で述べたが、表象操作のレベルで差異はあるだろうか。ヒト以外の動物は石槍のような組立型の道具製作を行わないが、加工型の道具製作は行うし、むしろそのための計画を立てることもありえるだろう。

例えば 2.1 節で紹介したチンパンジーのナッツ割りの例で言えば、適切な形状の小石を選んだり、土台を安定させたりする行動は、ヤシの実を割って中身を食べるという目的に対して計画された行動とみなせる。また、将来的な欲求を満たすための道具使用として、ボノボとオランウータンは、将来使う予定の道具を保持しておき、あとで使用するという行動を行うことが実験室実験で確かめられている (Mulcahy & Call, 2006)。実験において、ボノボとオランウータンはいくつかの種類の道具を使って報酬を得る訓練のうけたのち、以下の手順が可能かどうかテストを受けた。

1. テスト部屋で適切な道具を選択する。
2. 道具を持って待機部屋に移動する。
3. しばらく時間が経ってから道具を持ってテスト部屋に移動し、道具を使って報酬を獲得する。

結果は、ボノボもオランウータンも 1 時間以上待機する条件でタスクを成功させることができた。このことから、彼らもヒトと同じように、現在の状態と関係なく時間的

に離れた将来の道具使用を計画し、実行することができると言える。これは、霊長類において表象操作のレベルで再帰的結合が存在する可能性を示唆する。そしてもしそうならば、物体操作の再帰的結合に先んじて表象操作の再帰的結合が進化していた可能性が生じる。

2.2.3 連合主義と表象主義

表象操作の再帰的結合が進化するとき、そこにはどのような利点や適応性が考えられるのだろうか。行動計画の作成における反復的結合は、行動を連想した順序通りに組み合わせるという点では連合主義²⁵ (Associationism) の行動観に近い²⁶。連合主義は、表象と行動、あるいは表象と表象の連合が、あらゆる思考や行動の原理だとする立場である (中村, 2002)。学習は刺激と反応間の連合であるという行動主義により、主に動物実験を通して検証が行われてきた。同じく学習をニューラルネットワークの働きによって説明するコネクショニズムはしばしば連合主義とみなされる²⁷。これに対し、行動計画の作成における再帰的結合は、学習によって連合された表象に操作を加えるという点で、表象主義 (Representationism) の考え方と同一である。表象主義では表象を操作するメタ的な存在²⁸が仮定される。

2.2.4 計算モデルにおける表象操作

第四章のシミュレーションにおいても、物体操作と同じく表象操作は記号列で表現される状態の操作として定義される。ここで、記号は行動表象、記号列は複数の行動が組み合わされた系列と定義される。反復的結合は、記号あるいは記号列で表現される状態の有限集合と、結合操作として表現される遷移関数を必要とする。再帰的結合には、反復的結合で使用した集合と関数に加えて、結合した行動系列を記憶しておくための状態の有限集合と、記銘と想起のための遷移関数が必要となる。これらの行動

²⁵ 連合も連想も訳語は Association であり、英語圏では両者を特に区別しない。日本語では表象間の連合を連想という場合が多い。

²⁶ 表象の操作を行う以上、基本はあくまで表象主義である。

²⁷ ただし、これは誤った解釈である。コネクショニズムが連合主義的に捉えられやすい理由は、その学習のアルゴリズムである教師あり学習や強化学習といった多くの手法が、入出力関係や因果関係の連合を形成することを主な目的としているためと考えられる。

²⁸ これを心と呼ぶ向きもある

計画に対する表象操作は、環境からフィードバックを受けるための行動ありきで有用になるものであるため、2.1 節で説明した物体操作に対して、付加的に実装されることになる。

2.3 認知一般における再帰的結合

2.3.1 ヒトの認知一般に見られる階層構造の生成

本論文の 2.2 節では表象レベルの操作について考えた。再帰的結合の段階的進化仮説の妥当性を考察するために、この 2.3 節では行動の表象操作から認知一般の表象操作への進化的な拡張を再現可能なモデルを考えるために、関連研究の知見をまとめる。そして、第 3 章と第 4 章で明らかになる再帰的結合の適応性を踏まえ、第 5 章で認知一般的な再帰的結合や言語レベルの再帰的結合（すなわち **Merge**）の進化について議論したい。Martins (2012) は表象レベルのルールのセットを考えることが、環境によって既に規定されたものを超えて新たな階層構造を生成することに繋がると説いた。実際に、階層構造は言語表現や行動系列だけでなく、音楽、算術、意図推論、視覚認知、空間的ナビゲーション、社会ナビゲーションなどに広く観察される。それは、音楽においては図 2.2 (A) のような拍子や音素の結合様式 (Koechlin & Jubault, 2006; Asano & Boeckx, 2015) であり、算術においては図 2.2 (B) のような演算の結合順序 (Nakai & Sakai, 2014; Nakai & Okanoya, 2014) であり、意図推論においては図 2.2 (C) のような思考の入れ子 (Oesch & Dunbar, 2017) であり、視覚認知においては図 2.2 (D) のような全体・部分関係 (Martins, 2012) である。そして空間的ナビゲーション、社会的ナビゲーションにおいては、レヴィーウォーク²⁹ (Viswanathan, & Buldyrev, 1996) として知られる階層的な移動と探索のアルゴリズムだと考えられる。

²⁹ Levy Walk あるいは Levy Flight

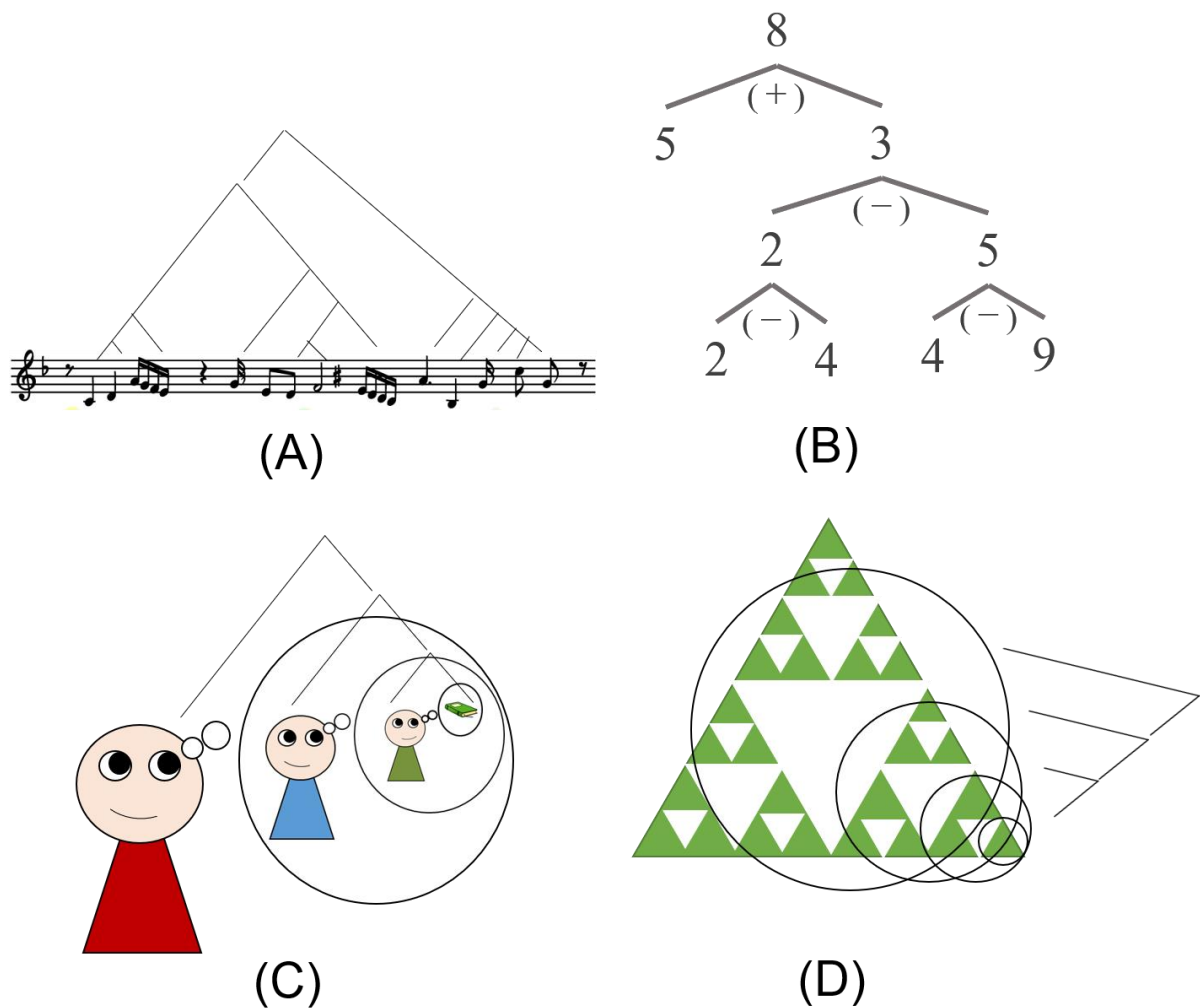


図 2.2 認知一般に見られる階層構造

2.3.2 認知一般における再帰的結合の神経基盤

表象主義において、表象の処理は思考する内容に対して特定性が強いとされ、言語表象と音楽表象と視覚表象は全て異なると考えられている (Boeckx, 2010)。では、ヒトの脳神経系において、そうした様々な種類の表象や階層構造は別々の部位あるいは系統で処理されていることになるのだろうか。学習により習慣化した系列にとどまらない柔軟な系列生成が可能なヒトの脳は、表象の選択・結合・保持という再帰的結合に必要な機能を有していると考えられ、少なくとも運動・行動のレベルについては、これが実証的に示されつつある。

ヒト脳における被殻 (Putamen) と尾状核 (Caudate) からなる背側線条体は、淡

蒼球 (Globus pallidus) と視床 (Thalamus) を介して運動前野 (Premotor cortex) への投射が確認されており, 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, また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 (Substantia nigra pars compacta) や腹側被蓋野 (Ventral tegmental area), 側坐核 (Nucleus accumbens) 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 (Graybiel, 2000; Graybiel, 2005; Melenka et al., 2009). 線条体ニューロンは直接路, 間接路, ハイパー直接路の信号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 (Nambu et al., 2002; Nambu, 2008). そして, 大脳基底核 (Basal ganglia) から視床を経由し大脳皮質に繋がるループ回路が, 行動表象の操作を行うと捉えられている (Graybiel, 2000). これらの回路によって生成される行動系列が学習によって短期的な保持を必要としなくなることで, より長い行動系列を扱うことが可能になっていくと考えられる.

では, 行動系列以外の階層構造は, どのようにして作られるのだろうか. 既に多くの神経学的知見が得られている言語の階層構造生成から見ていく. 一章で述べたように, 言語使用時の階層構造処理では BA44 が中心的役割を担っていると考えられている (Goucha & Friederici, 2015; Zaccarella & Friederici, 2015; Friederici, 2017). 人工文法と呼ばれる記号列を用いた実験では, 反復型³⁰の系列と埋込型³¹の系列の二種を処理させると, 反復型と比べて埋込型の処理時により強く BA44 の一部が活性化することが判明している (Bahlmann et al., 2008; Fitch & Friederici, 2012). ここから, BA44 の一部が系列の短期的な保持を担うのではないかと予想することができる.

言語の階層構造には依存関係 (Dependency) と支配関係 (Dominance) と呼ばれる構造が存在する. 依存関係は階層のレベルを超えた語彙同士の統語的・意味的關係を指し, 支配関係は同一階層内の主述の關係を指す. EEG による N400 の計測結果やいくつかの fMRI 実験から, 意味論的処理を担っていると考えられる BA45 や BA47 がこれらの關係を処理し, BA44 を含む下前頭回 (Inferior frontal gyrus) で統語情報と統合される可能性が示唆されている (Hagoort, 2005).

³⁰ たとえば, A₁B₁A₂B₂ のように, 隣接關係をもつ記号を並べた形式が反復型である.

³¹ たとえば, A₁A₂B₂B₁ のように, 關係する記号の間に別の關係をもつ記号を挟んだ形式が埋込型であり, 階層構造の想定できる系列にあたる.

算術の階層構造生成においては、言語と同様の脳部位が賦活することがわかっており、また言語表現を刺激として与えた直後に同一の階層構造をもつ数式を解かせることで、解答速度が上がるということが実験でわかっている (Sakai, 2005; Nakai & Sakai, 2014; Nakai & Okanoya, 2018)。

以上より作業仮説として、語彙や行動などの表象はドメインごとにそれぞれ異なる意味論的ネットワークを持ち、階層構造の生成に関しては同一の部位で行われていると想定する。

2.3.3 認知一般における再帰的結合の機能的モデルの提案

2.3.2 の知見と仮説をもとに、認知一般における再帰的結合の脳機能モデルを考える。図 2.3 は、階層構造を生成するとされる BA44 に、語彙項目や算術演算子の意味論的处理に関わるとされる左半球の BA45/47 が結合したモデルである。音楽の意味論的处理³²に関しては不明な部分が多いが、左半球と対応する右半球の BA45/47 が働くとは仮定しておく。意図推論や視覚認知などの認知ドメインを含めたモデルを考えるべきであるが、それらの分野は神経学的な知見が不足しているため、ここでは以上の三種にとどめておく。このモデルでは、2.3.2 節の最後で立てた仮説通り、外部から入力された状態に対して、図中薄い赤色で塗られているモジュールにおいてドメインごとの意味論的处理による表象の選択がなされる。そしてその結果が図中薄い緑で塗られている結合処理モジュールへと送られる。結合後の表象に対して次に入力された表象が追加で結合されるか（反復的結合）、それとも結合後に短期記憶で一時的に保持されたのちループ経路を辿って入力側に戻されるか（再帰的結合）が決められる。この短期記憶モジュールが図中濃い緑で塗られている部分であり、階層構造の生成はこのモジュールの働きによって可能となる。

³² 正確には、言語における意味論に対応する音楽の表象関係。

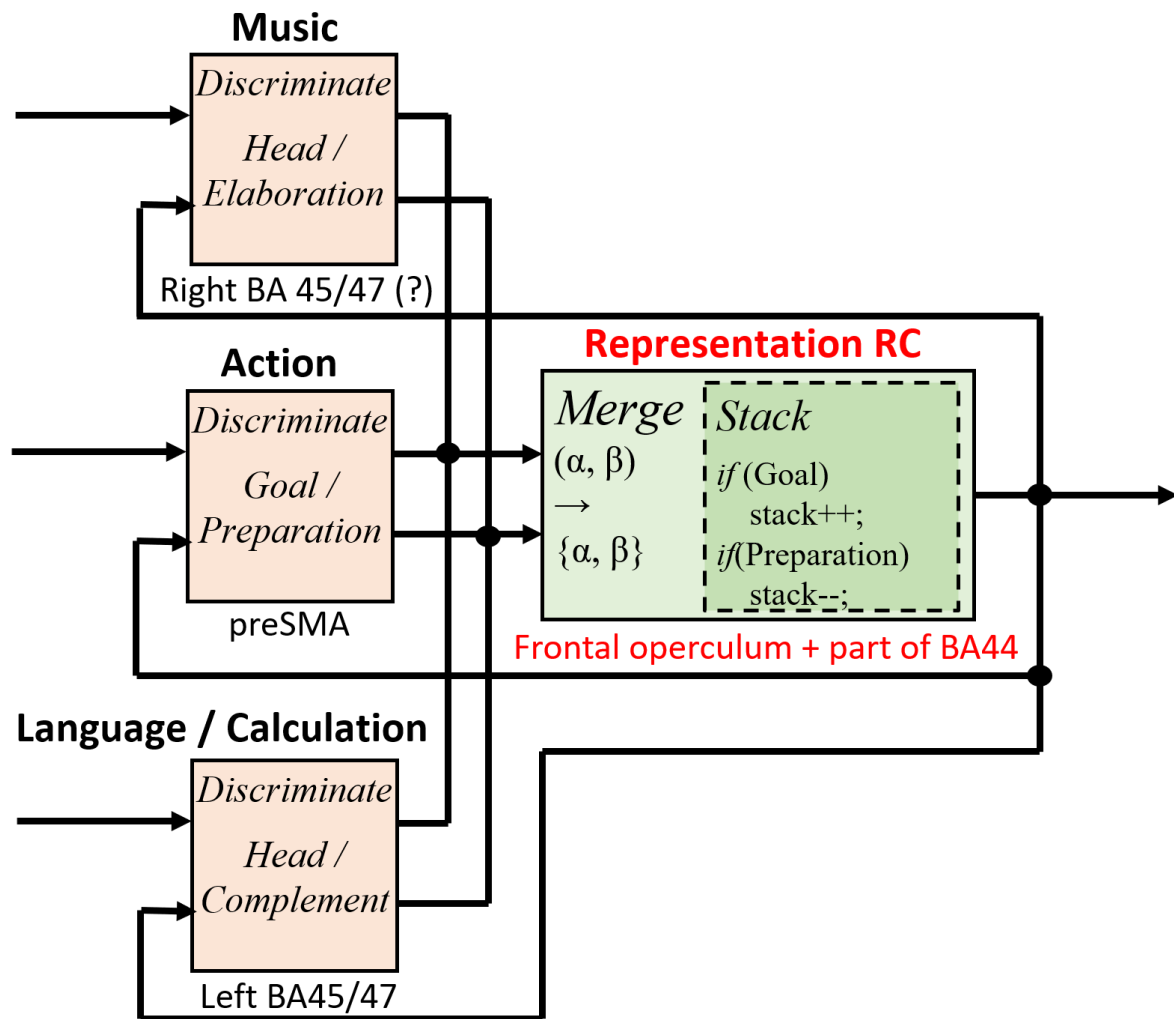


図 2.3 再帰的結合の認知一般モデル

認知一般への再帰的結合能力の進化を考える前に，第四章では，物体操作における表象操作の再帰的結合，すなわち行動計画の進化をシミュレートする．そのために，2.3.3 節で考えた認知一般モデルをダウンサイジングし，行動表象のみを操作するモデルを図 2.4 のように設計した．このモデルは大腦皮質と前補足運動野の機能を反映しており，詳しくは第四章で説明するが，強化学習の一種である Q 学習 (Q-Learning) で学ばれた行動を操作して系列を生成する．Q 学習は線条体の一部の役割をモデル化できているとされる (Samejima et al., 2005)．よって本モデルは全体として，大腦基底核周辺と大腦皮質のループ回路における行動系列生成のメカニズムを抽象化したものと言えるだろう．

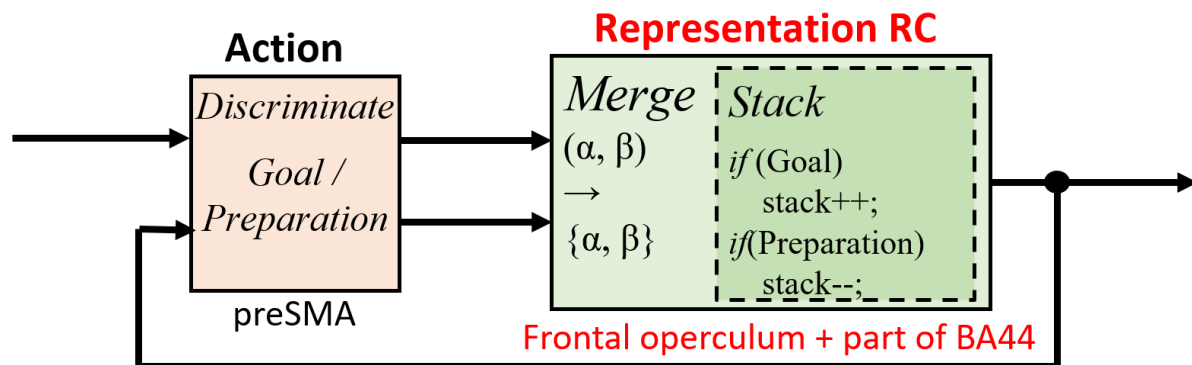


図 2.4 再帰的結合の表象操作モデル

再帰的結合の段階的進化仮説は，この表象操作モデルの認知一般化，およびそれに含まれる統語における語彙表象の再帰的結合，すなわち **Merge** の進化を説明することを目指している．1.2 節の最後で述べたように，**Merge** の進化プロセスや適応性は，三章と四章の進化シミュレーションを通して明らかになったことを援用し，五章で議論することとする．

第3章 物体操作における再帰的結合の進化シミュレーション

行動表象の再帰的結合は、非ヒト霊長類においても観察される (Mulcahy & Call, 2006). この事実は、行動計画レベルの再帰的結合能力がヒト以外の動物の生態においても必要とされることを意味する. しかし、一般に物体操作の再帰的結合であるサブアセンブリ戦略はヒト以外の動物で観察されづらい. サブアセンブリ戦略はどのような生態学的利点をもって、生物の行動に現れうるのだろうか.

本章では、再帰的結合が進化する条件について、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた構成的アプローチによって調べる. 3.1 節では、解の探索手法である GA について紹介し、再帰的結合の進化においてどのような環境条件が予想されるかを洞察する. 3.2 節では二章で抽象化した物体の再帰的結合や進化シミュレーションの具体的な実装について説明する. 3.3 節では、いくつかのパラメータ設定に対するシミュレーション結果を示し、シミュレーションの枠内での結果の考察を提供する. 3.4 節ではシミュレーション結果に対する主に道具製作の側面における議論を行う.

3.1 物体操作の進化シミュレーションの方法と狙い

3.1.1 遺伝的アルゴリズムを用いた再帰的結合の適応性の探索

1 章で述べたように、本研究では進化シミュレーションを用いた構成的アプローチによって仮説の精緻化を行う. ある形質の適応的機能や進化プロセスについて、既知

の事実と矛盾しない仮説を立てる方法の一つに、既知の事実をベースに対象となる形質のモデルを作成し、進化をシミュレートすることが考えられる。進化は以下の三つの基本的要素からなる。

1. 変異：個体が持つ形質に揺らぎがある³³。
2. 選択：形質の揺らぎに応じて生存率が変化する。
3. 遺伝：生存した個体の形質が次の世代へと伝達する。

これらのメカニズムを手続き的な計算モデルへと抽象化したものが遺伝的アルゴリズム (GA) である。GA では、三つの基本要素が次のように構成される (Mitchell, 1996)。

1. 変異：ある遺伝子配列とそれに対応する形質をもった個体の集団を生成する。
2. 選択：適応度関数に従い、各個体の行動結果からその遺伝子の適応度を評価する。
3. 遺伝 (および変更)：各個体の遺伝子を評価値に従って子世代へ保存する。この際、親としての二個体を選び出し、特定の条件で両者の遺伝子を交叉する。子世代の遺伝子は一定確率で突然変異による部分的な変更を受ける。

一般に、GA はある環境や条件下における (準) 最適解を導き出すために使用されるが、本研究では条件となる適応度関数を複数設定してそれぞれ試行することで、再帰的結合が最適解となる環境や条件を特定するという方法を取る。具体的には、再帰的結合操作を行わない集団に再帰的結合操作を行う個体が生まれたとき、この形質が集団の大多数に拡散するパターンを示す適応度関数を探し出す。そして、その適応度関数から再帰的結合の適応性を推定する。

3.1.2 物体操作の再帰的結合の適応性に関する予測

再帰的結合によって実現される再帰性には、Arthur ら (2006) が明らかにした、複雑な構造の製作物を発見する効率を高めるという利点があると考えられる。そのた

³³ 突然変異とは語の用法が異なる

め、本シミュレーションにおいてペアリング戦略のような非再帰的結合と、ポット戦略やサブアセンブリ戦略のような再帰的結合との間の比較は行わない。ここでは、再帰的結合であるサブアセンブリ戦略が、反復的結合であるポット戦略に加えて出現する条件を探索する。再帰的結合の計算論的定義は物体操作でも行動表象の操作でも、語彙表象の操作でも同一である。ゆえに、ここで明らかになる再帰的結合の適応性は、それが適用されるドメインにかかわらない一般的な性質だと言える。

2.1.4 節で述べたように、再帰的結合は反復的結合と比較して、スタックを用いる分操作回数が多くなる。それにもかかわらず、2つの結合方法で作製可能な製作物は同一である。このような条件において、素朴には反復的結合を使うことが低コストであり適切なように思われる。いったいどのような条件を設ければ、コストの障壁を越えて再帰的結合が現れるのだろうか。

一つの候補として考えられるのは、ある複雑な系列を作ることが適応的となる環境である。これは、Arthur & Polak (2006) のシミュレーションと同じ条件で、反復的結合のみを使うよりも再帰的結合を併用したほうがさらに複雑な構造を探索しやすいか否かを確かめるということになる。もう一つの候補は、多様な系列³⁴を作ることが適応的となる環境である。これは現在のヒト社会における膨大な製作物の種類から推論した。ただし、有用な系列がなぜ多様になりうるのかという点は別途説明が必要である。

3.1.3 製作物はどのようにして多様化しうるか

Mesoudi & O'Brian (2008) は仮想的な矢じりを設計して用いるというコンピュータ・ゲームを作成し、GA のアルゴリズムを用いた実験室実験で、道具の多様化を再現した。実験では、被験者は矢じりの長さ、幅、厚み、形状、色などのパラメータを入力する。そして、狩りを行ったという体でこの道具の性能が評価され、何キロカロリー獲得できたかという形で知らされる。何度かの狩猟、つまり矢じりの製作のなかで、被験者は環境に最適な矢じりのデザインを探索する。実験は2つの段階で行われた。最初の段階では、被験者は前の被験者の矢じりのデザインを模倣したのち、個人的な試行錯誤を行う。ここでは被験者が様々なパラメータを操作するため、石器の多

³⁴ ここで「多様」とは、基本的な構成要素の組み合わせパターンによって生態学的適応度を得ることができる構造が複数存在することを指す。

様性は高まっていく．二番目の段階では，名声バイアスをシミュレートするため，セッションの最後のいくつかの狩りで，被験者は他の被験者の狩りの成績と矢じりのデザインを見て複製することが許された．結果として，石器の多様性は低くなり，最適な構造へと収斂した．

このような個人的な試行錯誤は，現在のヒト文化の多様化の一側面を表していると言える．しかし，そうした試行錯誤による多様性は，適応環境に対する合理性という要素によって収束してしまいうる．実際，Mesoudi & O'Brian (2008) 実験で，最も高い適応度を得られた石器の作り方を被験者間で共有するという設定にすると，石器のデザインは収斂した．文化の多様性はこの原因だけでは説明がつかない気もする．適応度のピークが複数あるという状況を原因として考えるのもいいが，それでも多様性はピークの数に縛られることになるだろう．そこで，本研究では有限資源の獲得競争というエージェント間の相互作用を導入する．ある製作物で獲得可能な資源の量に限度を設けることによって，新たな資源を獲得できる製作物の発明が促されることが予想される．Arthur & Polak (2006) のシミュレーション結果を鑑みれば，そのような新奇な製作物の構成が求められる状況で，再帰的結合が進化する可能性は高い．

3.2 物体操作の進化シミュレーションの設計

3.2.1 物体操作モデル

3.2.1.1 物体操作エージェント

今回は，Greenfield(1991)と Wymer(1987)の研究に基づいて，物体の組み合わせ系列の生成を行うモデルを作成した．このモデルにおいて，一連の物体操作はオートマトン理論における状態遷移として表現される．エージェントは「作業台」×「スタック」という 2 箇所の状態を持ち，これらの状態を参照しながら内部規則に従って遷移を行う．エージェントの目的は，物体を組み合わせで適応度の上がる成果物を作ることである．これは道具製作のような有用な製作物の発明・発見を状況として想定している．どのような組み合わせで適応度が上がるかは，3.2.3.3 節で説明する適応度関数によって決まっている．作業台は物体を組み合わせる空間とし，スタックは作業台の状態を一時的に保存しておける空間とする．物体の組み合わせ系列は，これら作業台

とスタックの状態として表現される．以下， A や B のような文字で組み合わせの要素である物体を， AB や ABC といった文字列で組み合わせられた物体を表す．2つ以上のオブジェクトが同時に作業台やスタックに存在することはできない．簡単のため，一度結合された物体を再度二つの物体に分離することはできないものとする．また，要素的な物体の集合には同じ種類の物体がいくつでも存在すると仮定する．したがって， AAB や AAA のような同じ種類の要素を含む製作物を製作することが可能である．

エージェントの行動に対応する遷移関数³⁵は以下の4つ．

- 「Get」：系列の生成に必要な構成要素を手に入れる遷移関数．要素の種類数と同じ数の「Get」関数が存在する．新しい構成要素は「作業台」の系列の末尾に追加される．
- 「Push」：作業台の状態をスタックの状態とする遷移関数．作業台に何も無い場合，関数は実行されない．この関数が実行されたとき，作業台の状態はリセットされる
- 「Pop」：スタックの状態を作業台の操作系列の末尾に追加する関数．この関数が実行されたときスタックの状態はリセットされる
- 「Stop」：作業台の状態を成果物として組み合わせ操作を終了するための関数．厳密には状態遷移関数ではない．スタックが空状態の時しか選択できない．

このほか，エージェントは限られた遷移回数内であれば何度でも系列の生成を行うことができる．従って，スタックを用いることで操作回数が多くなってしまう再帰的結合を用いないほうがより多くの道具を作ることができる．

3.2.1.2 再帰的結合操作のモデル化

ここで，Getのみを繰り返し使用して系列を生成する手続きを「反復的結合」と定義する．対して，PushとPopを使い，一度以上組み合わせた系列を別の物体や系列と組み合わせる手続きを「再帰的結合」と定義する．2.1.4節で定義したように，反復的結合は一箇所の状態と要素の組み合わせを実行する関数によって可能となる．対し

³⁵ ここで、「関数」は計算論的な意味での関数を指す．この関数は参照透過性がない，すなわち数学における関数とは異なり，場合によっては同じ入力に対して同じ出力を返さない．

て、再帰的結合には作業台とスタック、二箇所の状態と両状態を操作する関数が必要となる．二つの再帰的結合の状態遷移の例を図 3.1 に表す．

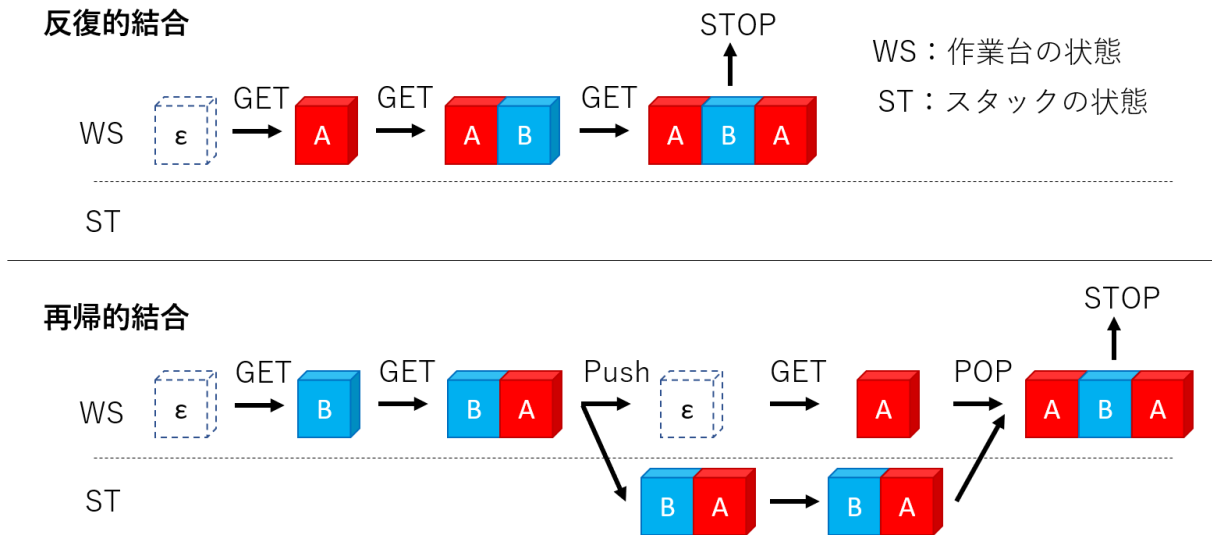


図 3.1 反復的結合と再帰的結合

3.2.2 進化シミュレーションの設計

3.2.2.1 状態遷移表の遺伝子符号化

物体操作の結果である状態遷移は式 (1) のように表現できる．

$$(\text{stack}, \text{workspace}) \xrightarrow{\text{action}} (\text{stack}', \text{workspace}'). \quad (1)$$

図 3.2 に個々のエージェントの行動規則を定義する状態遷移表の一部を示す．エージェントが有する状態遷移規則はバイナリの遺伝子配列に符号化される．ある状態においてある行動が可能な場合は，状態遷移規則の行列に各状態において各行動を選択した際の遷移先が割り振られており，そこに割り当てられた遺伝子は **on**，すなわち遺伝子座の値が"1"になっている．ある状態においてある行動が不可能な場合は，状態遷移規則の行列に"-"が書かれており，そこに割り当てられた遺伝子は **off**，すなわち遺伝子座の値が"0"になっている．ある状態において複数の遺伝子が **on** になっている場合は複数の行動が可能となり，それらのなかから一つの行動が一様の確率で選択される．図からわかるように，全ての種類の系列に対してスタックを使えるようになるには，そのエージェントの遺伝子の **Push** と **Pop** に対応するすべての遺伝子座を **on** に

する必要がある.

Gene = 10111011101110100110...

stack	action					
	workspace	Get A	Get B	Stop	Push	Pop
ε	ε	ε, A	—	ε, ε	ε, ε	ε, ε
	A	—	ε, AB	ε, A	A, ε	—
	B	ε, BA	ε, BB	ε, B	—	ε, B
	AA	—	—	ε, AA	AA, ε	—
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A	ε	A, A	A, B	n/a	n/a	ε, A
	A	A, AA	—	n/a	n/a	—
	B	A, BA	A, BB	n/a	n/a	ε, BA
	AA	A, AAA	A, AAB	n/a	n/a	—

図 3.2 状態遷移規則の遺伝子配列への符号化

図 3.3 は、図 3.2 の状態遷移表に対応する状態遷移の例を示している。図中の青線は反復的結合、赤線は再帰的結合であり、実線はその状態遷移にあたる遺伝子座が on の状態、点線は off の状態を示す。図 3.2 の 2 行 2 列目と 1 列目のように、エージェントの作業台が ε であり、スタックの状態も ε であるとき、エージェントが Get A を実行すると、作業台の状態は A、スタックの状態が ε になる（図 3.3 左下）。さらにエージェントが Pop を実行すると、図 3.2 の 3 行 6 列目に示されているように、ワークスペースが ε 、スタックが A の状態に遷移する。

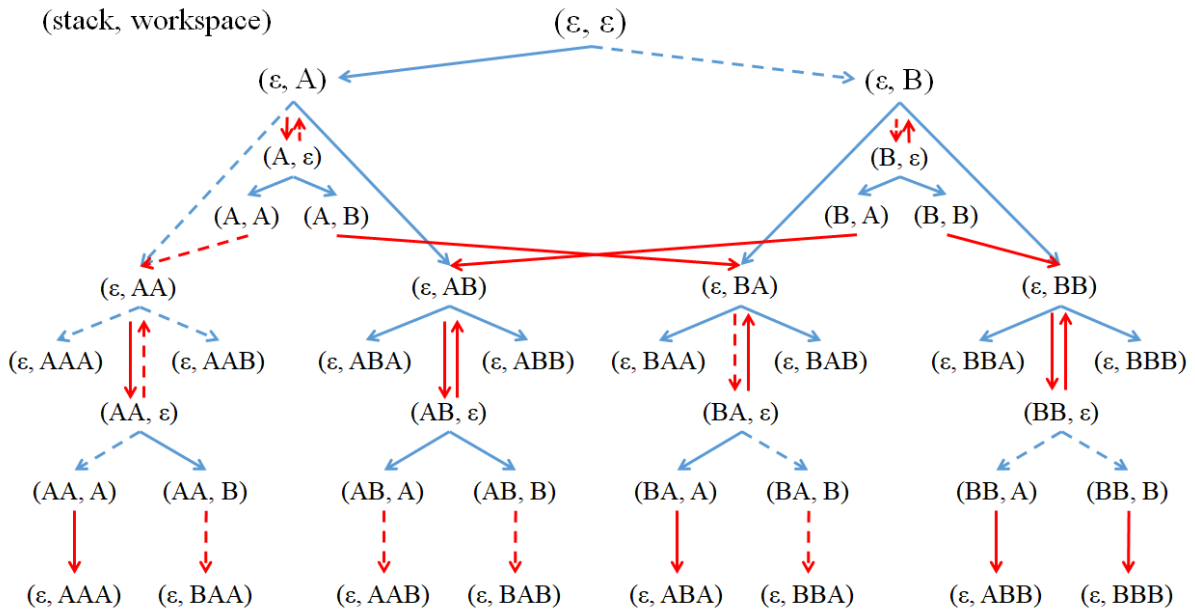


図 3.3 図 3.2 と対応する状態遷移図の一部

3.2.2.2 進化シミュレーションの流れと選択メカニズム

進化シミュレーションは、全てのエージェントにおいて全ての遺伝子座が 0 の状態、すなわち何も行動ができない初期集団からスタートする。各エージェントはその遺伝子にコードされた状態遷移規則に従って製作を行う。各エージェントの適応度は、3.2.2.3 節で定義する適応度関数により、その製作の結果に応じて評価される。世代交代に際しては、親個体 2 つが適応度のランキング上位 10%のなかから無作為に選択され、2 つの遺伝子の一点交差によって次世代の遺伝子 2 つが生成される。この選択と生殖のプロセスは、次世代の数が所定の数に達するまで繰り返される。その後、突然変異として各エージェントの遺伝子に一定確率³⁶でビット反転が生じる。これらは必ずしも生物学的進化のメカニズムとして妥当な実装ではない部分があるが、3 章のシミュレーションの目的は主に再帰的結合の機能を特定することであるため、計算速度を重視した設計を採用する。

³⁶ 今回は各遺伝子座に 0.0001%の確率で固定した。このパラメータは大きすぎたり小さすぎたりしない限りシミュレーションの結果に質的な影響を与えない。組み合わせ要素の種類や組み合わせ長さを増やすと探索空間が広がるぶん遺伝子の長さも伸び、適応の速度に影響する。

3.2.2.3 適応度関数

このシミュレーションでは、再帰的結合が適応した環境の候補として、以下の4つの適応度関数を設定した。

F_I : 任意の製作

$$F_I(t) = \sum_{all x} n_x^i(t), \quad (2)$$

どの製作物を作っても適応度が上がる環境。 x は l までの長さの系列で構成される製作物全てを表し、 $n_x^i(t)$ は製作物 x が t 世代のエージェント i によって製作された回数を表す。この適応度関数は、製作物を自由に作る際に再帰的結合が使用されるという予想に基づいている。

F_{II} : 特定の製作

$$F_{II}(t) = n_x^i(t), \quad (3)$$

特定の製作物を作ると適応度が上がる環境。 x は最も多くの構成要素の種類数 k からなる、最大の構成要素数³⁷ l の製作物一つ、例えば $ABAB$ ($k=2, l=4$ のとき)や $ABCABC$ ($k=3, l=6$ のとき)などを表す。この適応度関数は、Arthur ら(2006)における、複雑な製作物を探索することに再帰的な組み合わせが役に立つという文化進化シミュレーションの結果 (Arthur & Polak, 2006) から予想し、反復的結合に加えて再帰的結合も出現することを期待している。

F_{III} : 可能な限り多様な製作

$$F_{III}(t) = \sum_{all x} \delta(n_x^i(t)), \quad (4)$$
$$\delta(n_x^i(t)) = \begin{cases} 1, & n_x^i(t) \geq 1 \\ 0, & n_x^i(t) = 0 \end{cases}$$

いろいろな製作物を作ることによって適応度が上がる環境。言い換えれば、同じ製作物を繰り返し作っても適応度が上がらない環境。 x が表すものは適応度関数(1)と同じであ

³⁷ すなわち、系列の長さ

る．この適応度関数は，ヒトが製作するものの種類が徐々に多様になってきているという Arthur(2009)の指摘に基づく．より多くのパターンを作らなければならないという条件は，Arthur & Polak (2006) のシミュレーションでは試みられていない．

さらに，これらの適応度関数に対して，製作物の多様化や複雑化が進む理由を付け加えた，より生態学的妥当性の高い適応度関数として以下を設計した．

F_{IV} ：道具製作による有限資源の獲得競争

$$F_{IV}(t) = \sum_{\text{all } x} \frac{n_x^i(t)}{\{\sum_j n_x^j(t)\}^\alpha}, \quad (5)$$

他のエージェントと同じ道具を製作した場合，その製作物で得られる適応度が小さくなる環境． x が表すものは適応度関数 F_I と同じである． α はエージェント間の相互作用の強さ³⁸であり，資源の割引率である．この適応度関数では，エージェントは自身以外のエージェントが作らない製作物を作ることによって他のエージェントよりも大きな適応度を得ることができる．簡単のため，製作物とそれによって得られる資源の間に 1 対 1 の対応関係があると設定する．このとき，同じタイプの製作物を複数作ることは，それをエージェントが作った事実とは関係なく，適応度に寄与しにくくなる．

適応度関数 F_{IV} の挙動の例を図 3.4 に示す． $\alpha=0$ の場合，分母は常に 1 になり，相互作用は存在しないことになる．そのため，あるエージェントが他のエージェントと同じ製作物を作ったとしても得られる適応度が減ることはない． $\alpha=1$ になると，あるエージェントが作った製作物を他のエージェントも作っていた場合，得られる適応度が減る． α が 1 を超えると，たとえあるエージェント一体しかある製作物を作っていないなかったとしても徐々に得られる適応度が減っていく．これは現実における「飽き」のような現象と解釈することができる．

³⁸ ここではある一つの資源を獲得する際の競争の激しさを想定している．

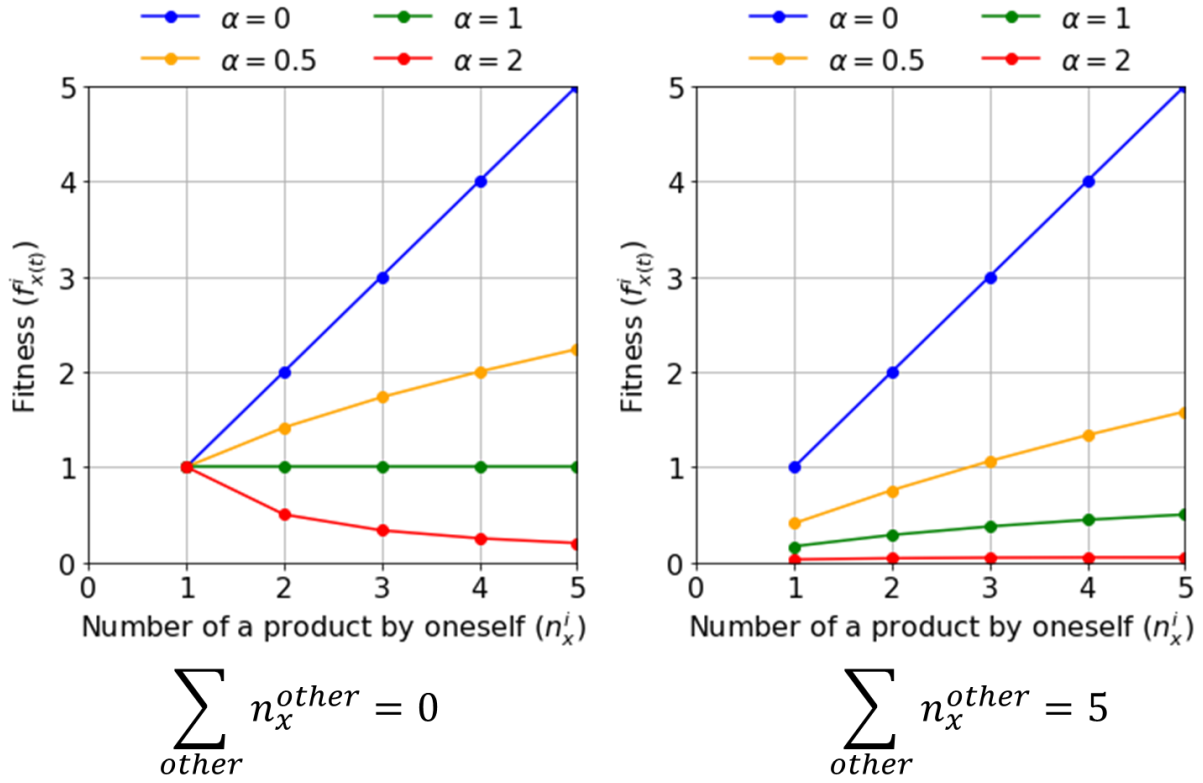


図 3.4 状態遷移規則の遺伝子配列への符号化

3.3 物体操作の進化シミュレーションの結果と分析

3.3.1 シミュレーションの基本設定

このシミュレーションの目的は、物体操作において再帰的結合が進化する環境条件を特定することで、再帰的結合の適応性を明らかにすることである。まず、3.2 節で説明した適応度関数について、いくつかのパラメータでシミュレーションを行った結果を示す。そして特定された再帰的結合の進化する条件をもとに、その進化に影響を及ぼすであろう新たなパラメータを導入して生態学的考察のための材料とする。

この節ではシミュレーションの結果とそのメカニズムについての考察を述べるに留め、その認知的な意味や生態学的な考察は 3.4 節で行う。各シミュレーションの基本的なパラメータは表 3.1 の通り。

表 3.1 物体操作シミュレーションの基本パラメータ

パラメータ名	記号	値
各世代における個体数	-	100
操作回数の上限	-	10,000
構成要素の種類数	k	1~3
最大構成要素数	l	3~6

母集団の大きさは 100，操作回数の上限は 10,000 回に固定されている．操作回数
の上限はあるエージェントが可能な状態遷移の回数を指す．最大構成要素数は作業台
上で組み合わせられる基本要素の数，すなわち製作物に含まれる物体の最大数を指す．
これらのパラメータは小さすぎる場合を除いてシミュレーションの結果に質的な影
響はない．各シミュレーション結果は，各パラメータで 200 回実行され，平均された．

以下，各図中では，単結合³⁹を使用するエージェントを **Pair Comb. Agent**，反復的
結合を使用するエージェントを **Repeat Comb. Agent**，反復的結合に加えて再帰的結
合を使用するエージェントを **Prepare Comb. Agent** と表記する．

3.3.2 F ：任意の製作

図 3.5 に適応度関数 F において再帰的結合を使用するエージェントの割合と適応
度の世代変移を示す．図中オレンジの線が単結合，青の線が反復的結合，赤の線が再
帰的結合を行ったエージェントの割合⁴⁰である．緑の線が適応度の平均値であり，そ
れぞれが 200 試行の平均である．

任意の製作物が適応的となる環境においては，物体の再帰的結合操作自体がほとん
ど現れない．単結合すら行われていないことから，エージェントが最終的に **get** と
stop の 2 操作のみで製作物を作っていることがわかる．これは，様々な種類の製作物
を作るよりも，系列長さ 1 の製作物を繰り返し作るほうが，状態遷移回数の上限に対
して多くの適応度を得られるためと考えられる．各試行の典型は図 3.6 のようになる．

任意の製作において，エージェントは系列長さ 1 の製作物しか作らないため，独立
変数をどう操作しても結果は変わらない．この結果から，結合の必要がない製作物の
みで適応度を得られ，またそれが他の個体との適応度に差を生み出さない状況におい

³⁹ 結合を一度だけ行うこと．

⁴⁰ ここでの割合は，全て集団の全エージェントに対する比率である．

て、再帰的結合は進化しないことがわかる。これはヒト以外の生物で物体の再帰的結合が現れないことの理由の一つだと考えられる。

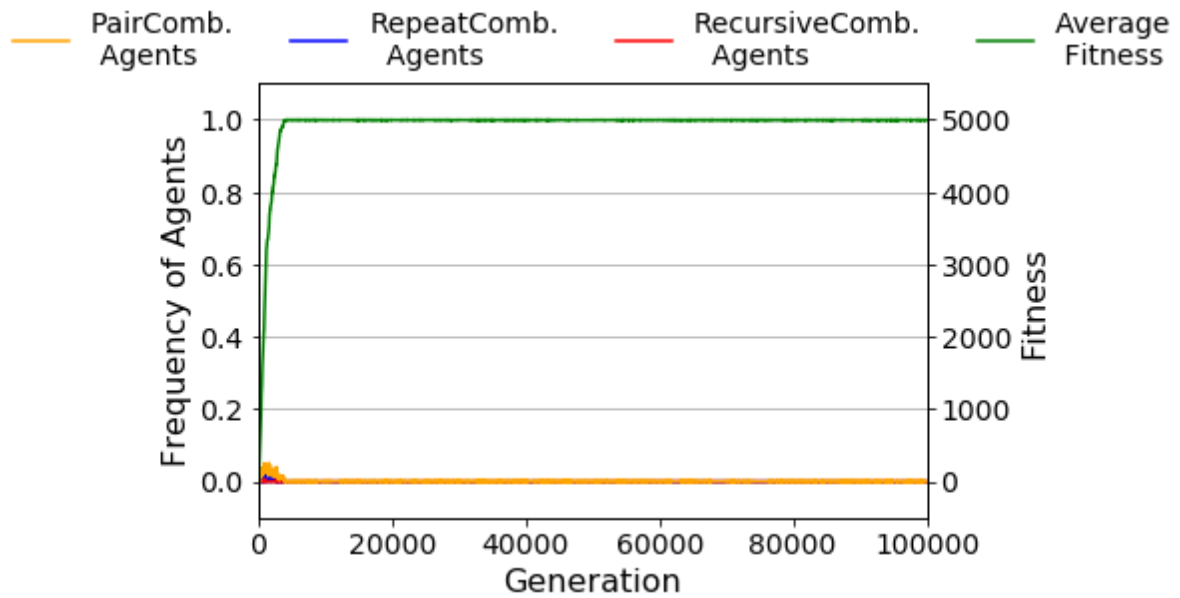


図 3.5 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_1 , 200 試行の平均)

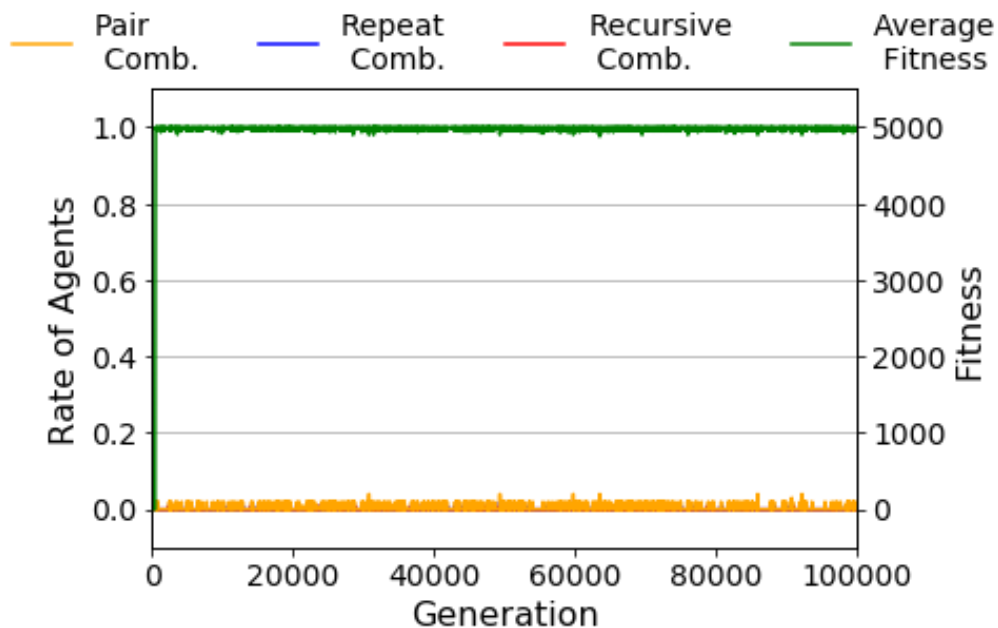


図 3.6 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_I , 1 試行)

3.3.3 F_{II} : 特定の製作

図 3.7 に適応度関数 F_{II} において再帰的結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移を示す。

特定の製作物が適応的となる環境においては反復的結合⁴¹も再帰的結合も出現する。ただし、平均適応度が増加するにつれ、徐々に再帰的結合は使われなくなっていく傾向がある。

⁴¹ 反復的結合は以降のシミュレーション全てで集団全体に拡散し使われる。

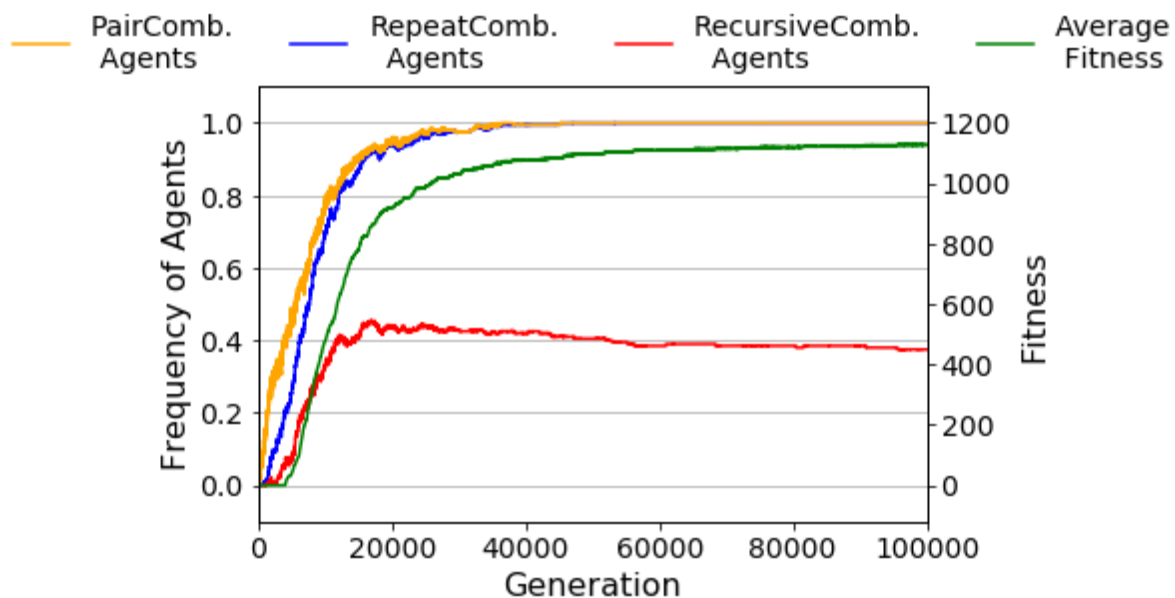


図 3.7 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_{II} , 200 試行の平均)

各試行の典型を図 3.8 に示す．この環境条件において，再帰的結合は序盤に出現する確率が高いが，多くの試行で途中から使われなくなる．再帰的結合が使われなくなる際は適応度が上がるため，特定の製作物を作るうえで再帰的結合は最適解ではないことがわかる．最終的に反復的結合しか使われなくなる理由は，反復的結合のほうが再帰的結合よりも少ない遷移回数で目標物に到達できるためである．

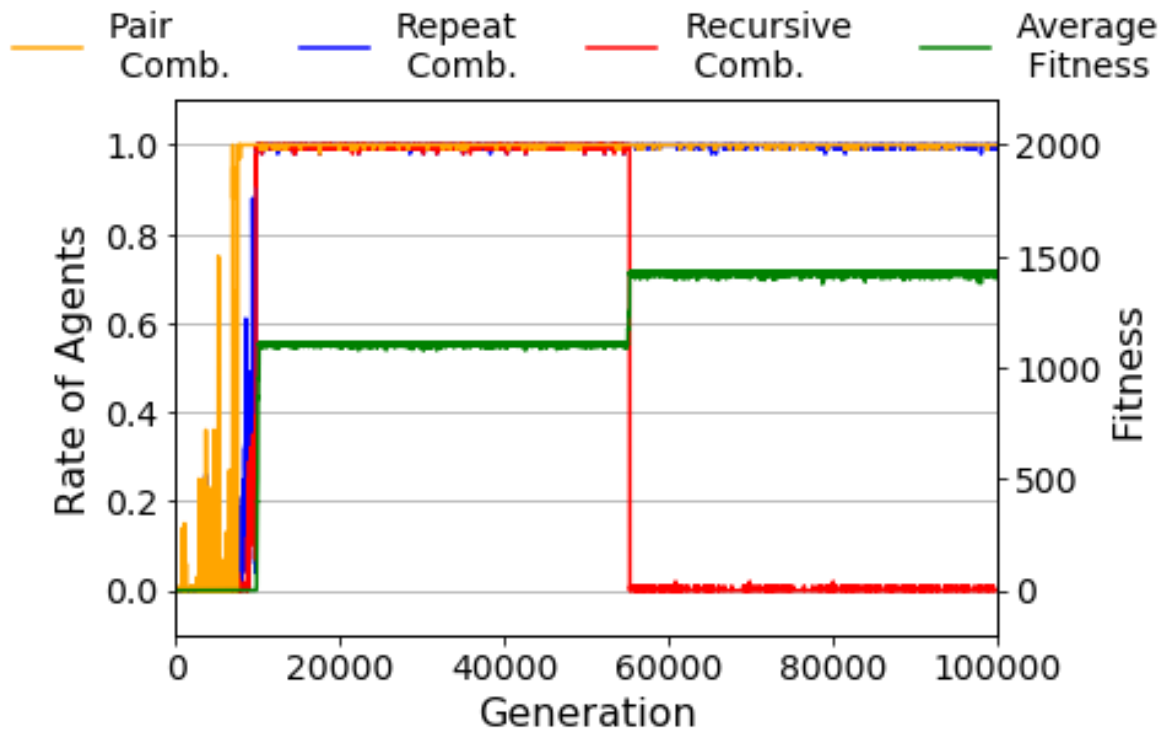


図 3.8 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_{II} , 1 試行)

F_{II} の適応度地形は、山登り的な適応を事実上不可能にし、適応度を獲得するための特定の製作物 x を発明することを困難にする．このとき、スタックを使わない反復的結合による製作物 $ABABAB$ を作る経路は一つしか存在しない．付録 A の図の左上に示すように、スタックを使わない反復的結合は各要素を一文字目から六文字目まで順番に結合しなければならず、各状態遷移を進化的に獲得する確率は遺伝子の総数を考えると非常に低くなる．対照的に、再帰的結合による製作物 $ABABAB$ を作る経路は複数想定でき、各要素を順番通りに結合する必要はない．より正確に言うと、シミュレーションの序盤で再帰的結合を使用するエージェントが出現する理由は、再帰的結合の経路が獲得される確率が、反復的結合よりも高いためと考えられる．例えば構成要素の種類数 $k=2$ 、最大構成要素数 $l=6$ の場合、製作物 $ABABAB$ の再帰的結合による製作経路は 19 通りあるのに対して、スタックを使わない反復的結合による製作経路は 1 通り、スタックを使う反復的結合による製作経路と合わせても 6 通りしかない．より一般的に言うと、再帰的結合の製作経路数は最大構成要素数 l が大きくなるほど

多くなるのに対して、反復的結合の製作経路数は1より多くならない。このことから、再帰的結合の適応性の一つは、製作手法を多様化し製作物の発明確率を高めることだと言える。

図 3.9 は、パラメータである構成要素の種類数 k （縦軸）と最大構成要素数である文字列長さ l （横軸）をパラメータとした場合の、10,000 世代目の再帰的結合を使うエージェントの割合である。要素の種類数が同じとき、ある製作物に至るパスの数はその製作物の構成要素が多いほど多くなる。そのため、複数通りの製作手順が想定できる再帰的結合は反復的結合に比べて経路を形成できる確率が高くなる。要素の構成要素数が同じとき、製作物の種類はその要素の種類数が多いほど多くなる。そのため、複数通りの製作手順が想定できる再帰的結合によって、製作物の探索を効率化することができる⁴²。以上から、組み合わせ空間のサイズが大きくなるほど再帰的結合は特定の製作物を発明しやすくなると言える⁴³。

⁴² 探索空間がどんなに広がっても反復的結合による製作経路は製作物の種類数に等しい。再帰的結合による製作経路は組合せ論的に増えていく。

⁴³ ただし、組み合わせ空間のサイズが大きすぎる場合、エージェントは特定の製作物を 10000 世代目までに発明できず、再帰的結合を使用するエージェントが減ったように見える。

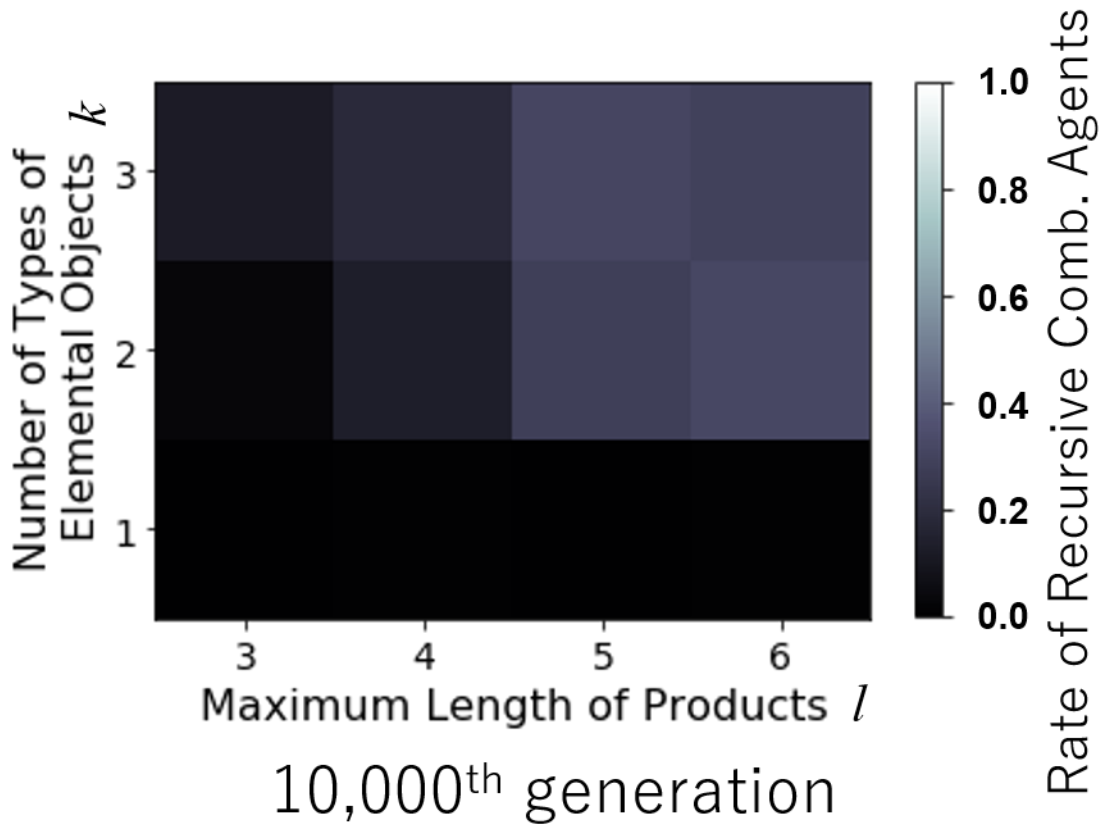


図 3.9 構成要素の種類数と最大構成要素数ごとの再帰的結合を使用するエージェントの割合 (F_{II} , 200 試行の平均, 10,000 世代目)

3.3.4 F_{III} : 可能な限り多様な製作

図 3.10 に適応度関数 F_{III} において再帰的結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移を示す. 可能な限り多様な製作が求められる環境では, 再帰的結合の使用は最適解となり, ほぼ全ての試行で集団全体へと広まる. そして出現した再帰的結合は, 後の世代でも安定して使われ続ける. この図の平均値は, 図 3.11 のような典型的な各試行から算出されている.

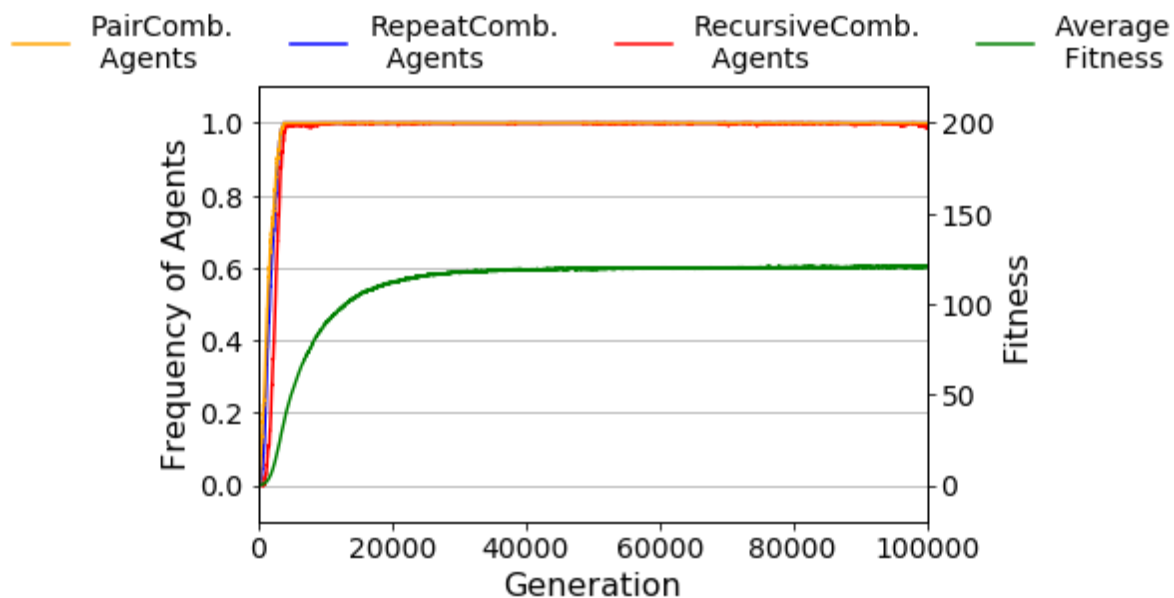


図 3.10 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_{III} , 200 試行の平均)

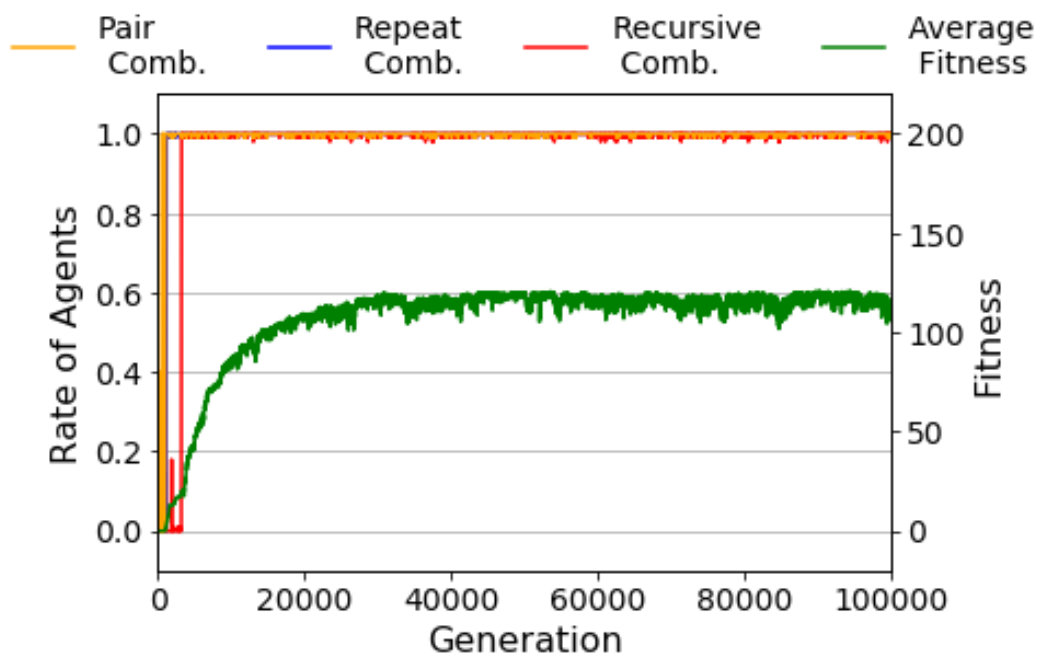


図 3.11 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_{III} , 1 試行)

反復的結合の経路はある製作物の要素列に対して正順の結合のみであるのに対して、再帰的結合は逆順の結合や途中から逆順の結合、途中から正順の結合、正順と逆順が混ざった結合など、様々な経路を許す。この性質により、再帰的結合のほうがある製作物の製作経路から別の製作物の製作経路を派生させる進化が起きやすい。例えば図 3.12 に実線の矢印で示すように、 $ABABAB$ という製作物が適応度を持ち、ある世代のエージェントが既に $BABAB$ という製作物を作れる場合、次世代以降で $ABABAB$ に繋がる 3 つの遺伝子が反転される必要があるが、この変異は反復的結合で一から $ABABAB$ を作る場合よりも必要な遺伝子数が少ない⁴⁴。再帰的結合のもう一つの適応性は、新奇な製作物への変異距離の短縮による製作物の多様化であると言える。今回は GA によって状態遷移規則を制御しているが、これが学習のアルゴリズムであっても、獲得しなければならない遷移規則の数が同じであれば結果は同じになると予想される。

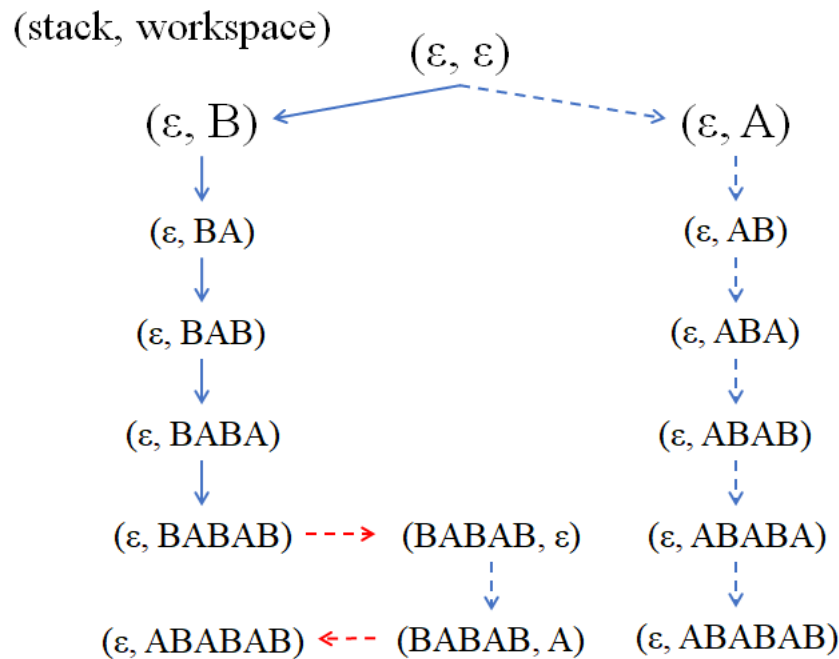


図 3.12 再帰的結合による遷移規則に対応する変異距離の短縮

⁴⁴ もちろんこれは極端な例であり、反復的結合で ABA や $ABAB$ が既に作れる場合はこの限りではないが、このような遺伝子の変異距離を総合的に見たとき、ある製作経路から派生する経路の数は反復的結合よりも再帰的結合のほうが多いため、新たな製作物を作りやすいと言える。

図 3.13 は，適応度関数 F_{III} において 10,000 世代目の再帰的結合を使うエージェントの割合である． F_{II} と同じく， F_{III} でも再帰的結合の製作経路は組合せ空間のサイズに依存し，製作物の最大構成要素数 l が増えると再帰的結合の出現率が増加する．これは事前に獲得した組み合わせの製作物から，その組み合わせを含む製作物へと製作手法を流用できる経路が増えるためである．また，製作物の構成要素の種類数 k が増えても再帰的結合は使われやすくなる．これは製作物の種類の増加に伴い再帰的結合による製作経路も増加するためである．ただし，組み合わせ空間が広くなりすぎると製作経路が形成されにくくなり，再帰的結合を使うエージェントが現れにくくなる⁴⁵．

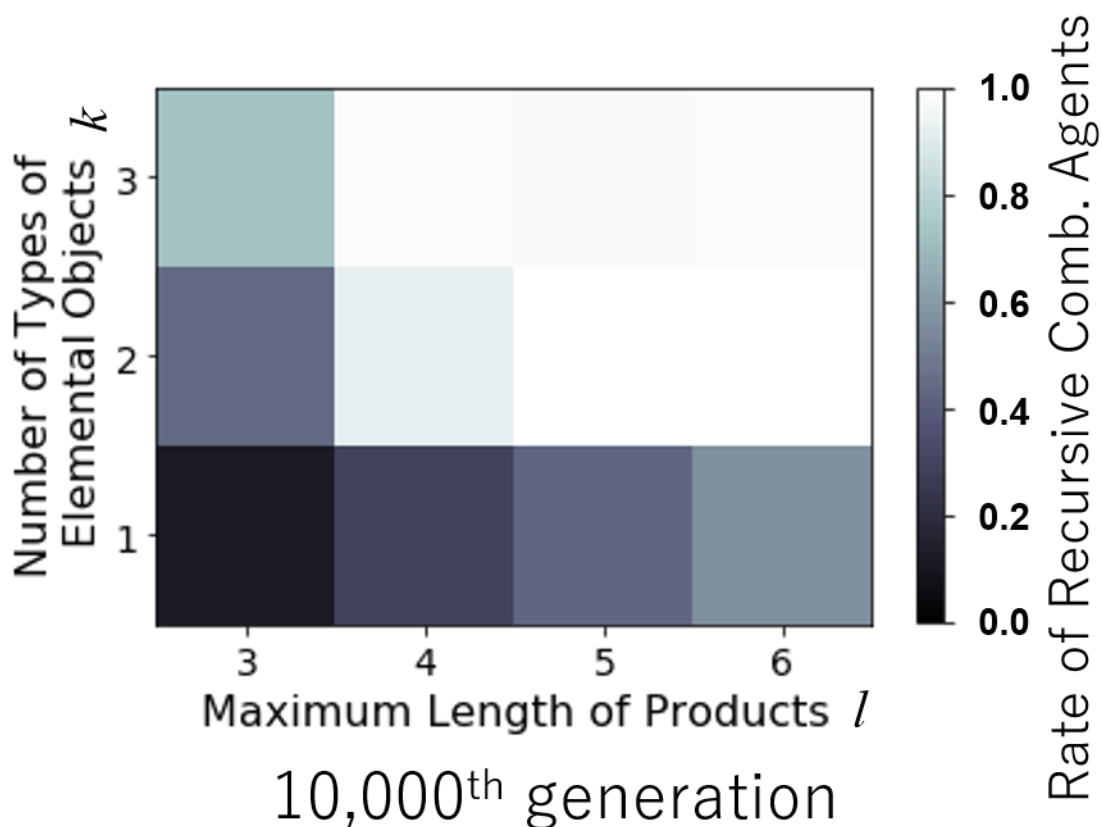


図 3.13 構成要素の種類数と最大構成要素数ごとの再帰的結合を使用するエージェントの割合

⁴⁵ 十分な世代数でシミュレーションするか，突然変異率を上げれば現れる．

(F_{III} , 200 試行の平均, 10,000 世代目)

3.3.5 操作コストと操作の失敗確率の影響

再帰的結合の進化に影響を与えうる要因である「操作コスト」と「結合の失敗率」を新たなパラメータとして導入して検討する．再帰的結合は反復的結合と比べて操作回数が多くなるため，一回の操作のコストが大きくなるほど再帰的結合が進化する確率は低くなるはずである．再帰的結合の進化に対する操作コストの影響を確かめるため，適応度関数 F_{II} と F_{III} を次のように変更した．

$$F'_{II} = \sum_x \frac{n_x^i(t)}{m_x^i(t)^c}, \quad (6)$$

$$F'_{III} = \sum_x \frac{\delta(n_x^i(t))}{m_x^i(t)^c}, \quad (7)$$

エージェントは状態遷移関数である **Get**, **Push**, **Pop** を実行した回数に応じて操作コストを負う．すなわち，ある製作物の製作にかかった操作回数分，その製作物によって得られる適応度が小さくなる．ここでは再帰的結合を使用するエージェントの割合の変化を見やすくするために，製作物の最大構成要素数 l を 5 に設定した⁴⁶．図 3.14 は，それぞれの適応度関数における，再帰的結合を使用するエージェントの割合に対する操作コストの影響を示している．適応度関数 F_{III} では（操作コストの影響が見えない）予想通り，操作コストを増加させると再帰的結合の進化が抑えられた．対して適応度関数 F_{II} では，操作コストの再帰的結合の進化に対する影響は見られなかった．これは， F_{II} や F_{III} の適応度地形がヒルクライム型ではなく離散的であるため，操作コストによる適応度の違いが再帰的結合から反復的結合へのテイクオーバーの可能性に影響を与えにくいためだと考えられる．

⁴⁶ これまでは $l=6$ であった．このパラメータ設定では再帰的結合の適応性が強く，操作コストを $c=5$ まで挙げても再帰的結合を使用するエージェントの割合が下らない．

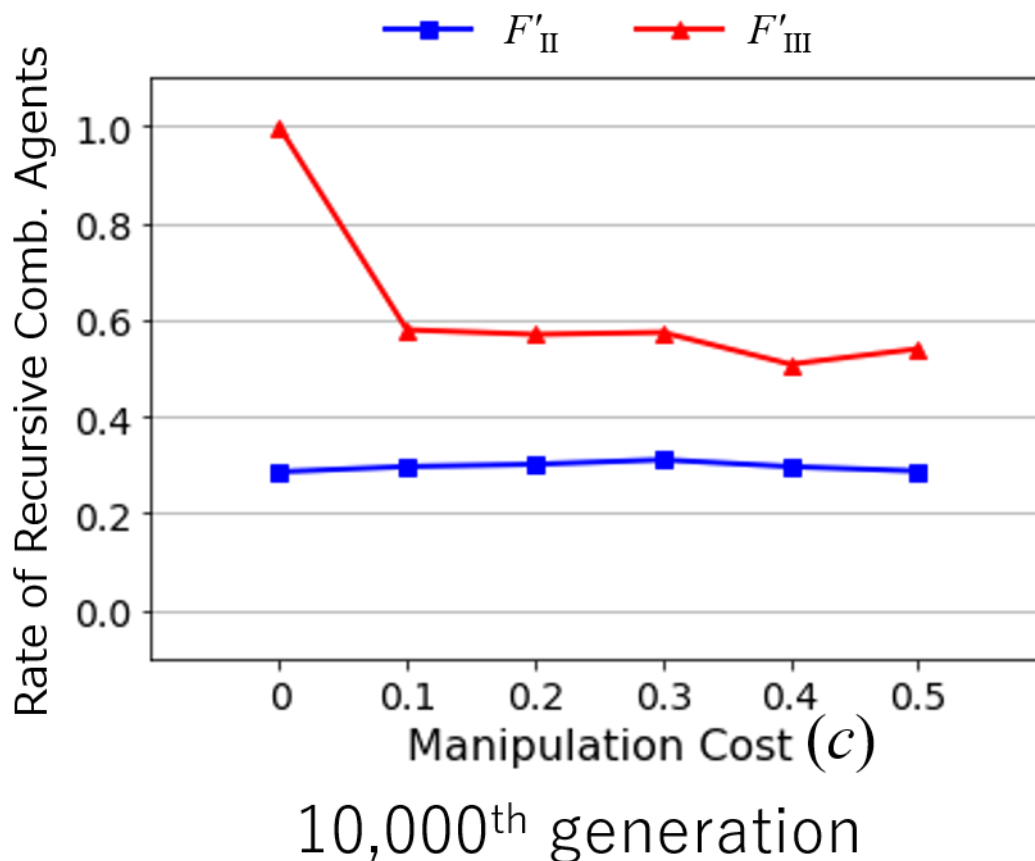


図 3.14 操作コストごとの再帰的結合を使用するエージェントの割合
(200 試行の平均)

一度組み合わせたものを部品として作業を分割するという性質から、物体を組み合わせた際の失敗⁴⁷という事態に対して再帰的結合は有効性を発揮し、操作コストとは反対に、進化する確率が高くなることが予想される。そこで結合の失敗率の概念を導入し、再帰的結合の進化に対する影響を調べた。エージェントはある一定の確率で **Get** または **Pop** 行動による物体の結合に失敗し、作業台の状態が空になる。これはそれまで作っていた製作物が破損したことを意味し、エージェントはまた一から製作物を作らなければならない。適応度関数は F_{II} と F_{III} で、影響が見えるようにするために操作コスト $c=0.2$ を設定し、特に F_{III} において再帰的結合を使用するエージェント

⁴⁷ 例えば、製作物の破損

の出現頻度が低くなるようにした．図 3.15 を見ると，適応度関数 F_{III} において，失敗率の増加に伴い RC の出現確率が徐々に増加することがわかる．適応度関数 F_{II} においては，操作コストを増やしたときと同じく離散的な適応度地形のために再帰的結合への進化が起こりにくいと考えられる．

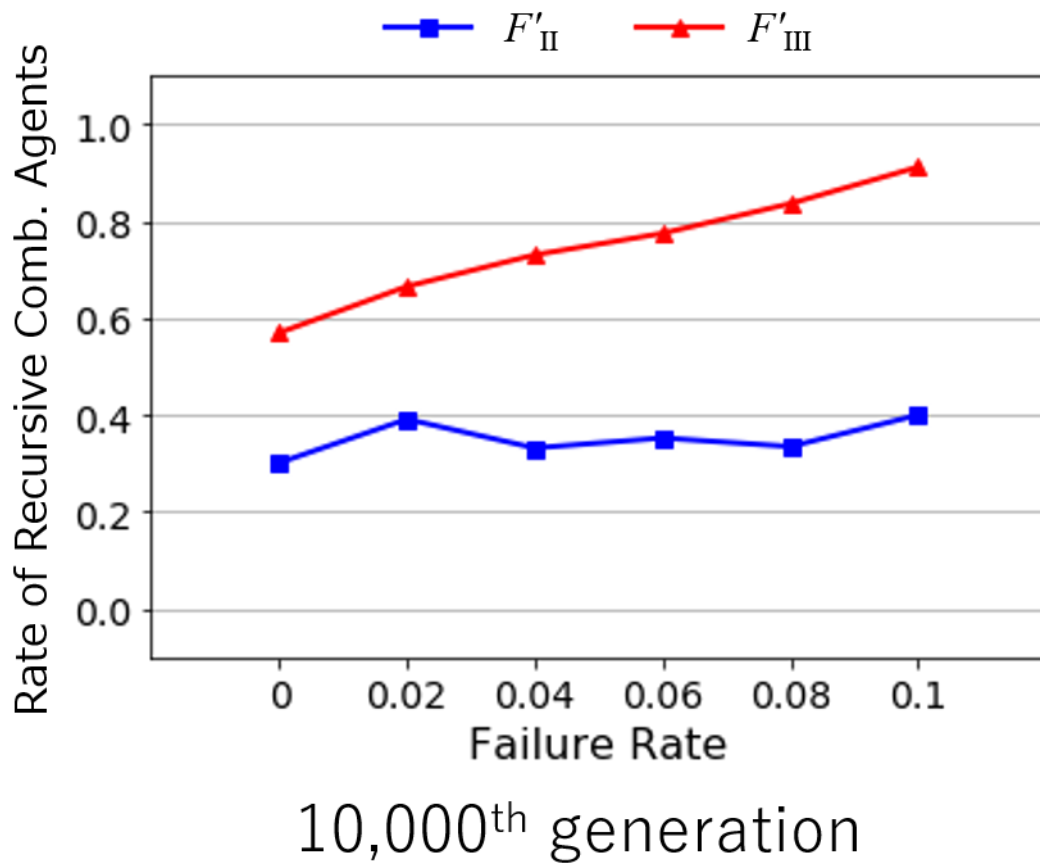


図 3.15 結合失敗率ごとの再帰的結合を使用するエージェントの割合
(200 試行の平均)

3.3.6 F_{IV} : 道具製作による有限資源の獲得競争

最後に，ある製作物で獲得可能な資源の量に限度がある場合，エージェント間に競争が生じ，新たな資源を獲得できる製作物の発明が促される，という予想に基づいた適応度関数における再帰的結合の進化を調べる．図 3.16 に示すように，「有限資源の獲得競争」において，再帰的結合の使用は一つの解となり，ほぼ全ての試行で集団全

体へと広まる。ただし、1 試行の典型例である図 3.17 を見るとわかるように、赤線で示されている再帰的結合を使用するエージェントは出現と消失を繰り返している。再帰的結合を使うことが必ずしも適応的ではないが、状況によっては適応的になりうる環境であるということが伺える。

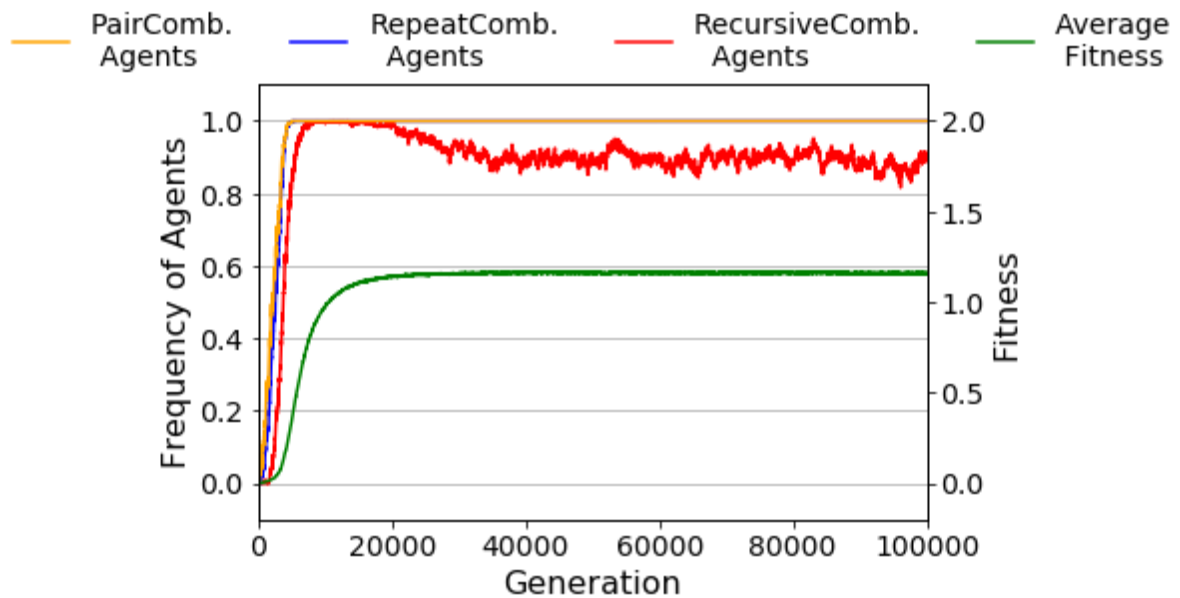


図 3.16 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_{IV} , 200 試行の平均)

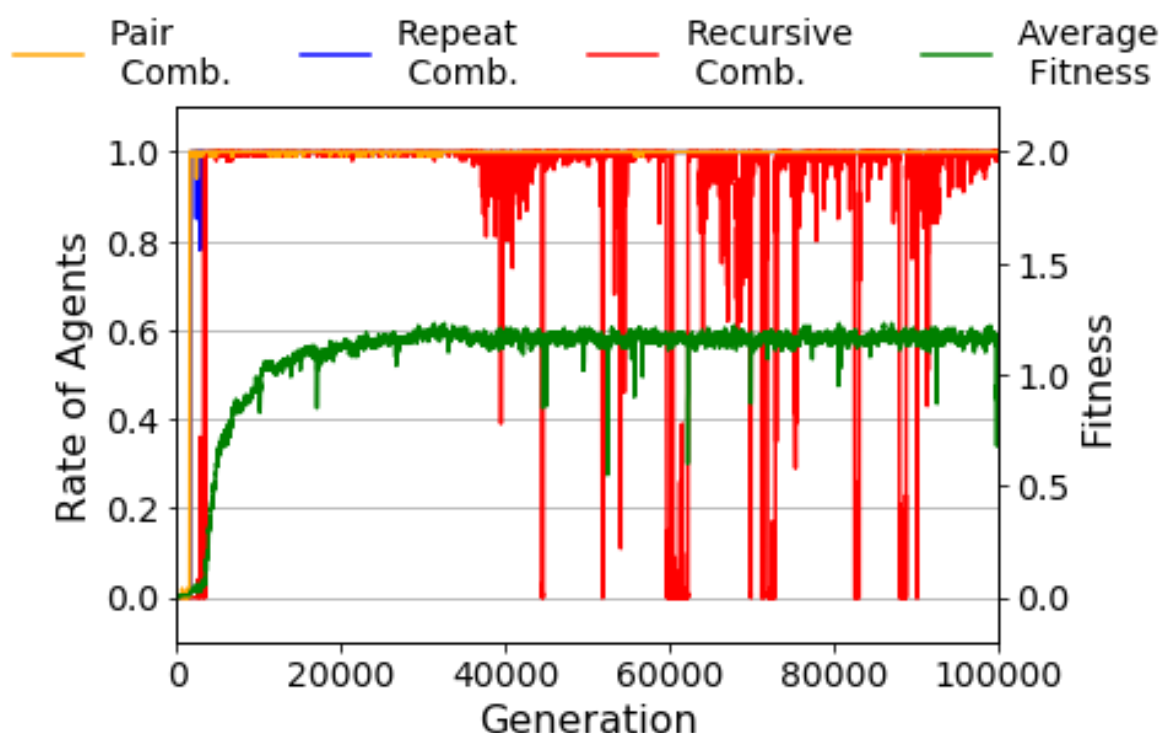


図 3.17 各結合を使用するエージェントの割合と適応度の世代変移
(F_{IV} , 1 試行)

資源獲得競争の強さが再帰的結合の出現にどう影響するかについて、相互作用の強さ α の値を変化させて調べた結果が図 3.18 になる．相互作用の強さを高めていくと、赤線で示された再帰的結合が進化する確率が上がる．これは本来の予想通り、資源の獲得競争によって新たな製作物を作る動因が生じていることを意味しているだろう．また、オレンジ線で示されている単結合や青線で示されている反復的結合は、競争に対する戦略として再帰的結合よりも低い競争率で進化していることから、構造が単純なものから製作物が作られているとわかる．

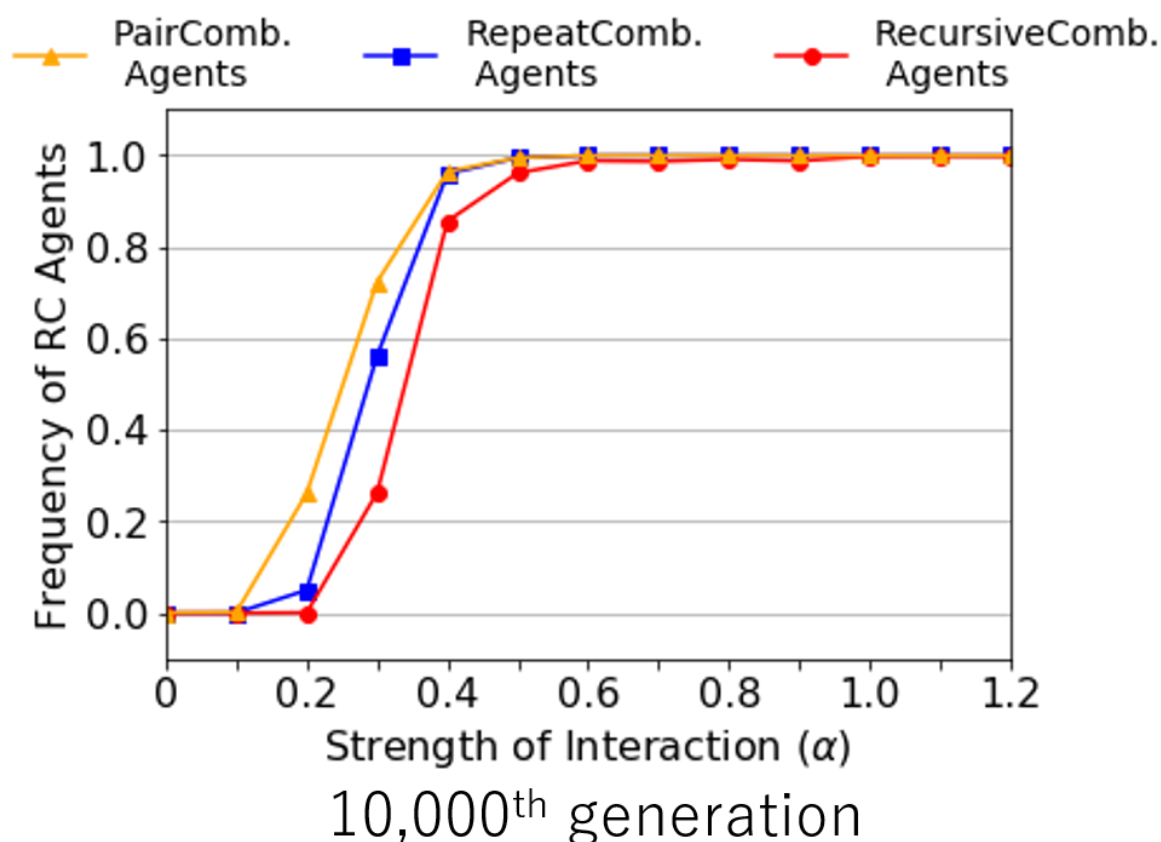


図 3.18 資源獲得競争の強さごとの各結合を使用するエージェントの割合
(F_{IV} , 200 試行の平均. 10,000 世代目)

エージェントが新たな製作物を順次発明している証拠を上げる．図 3.19 はいくつかの相互作用の強さにおける，エージェント一体あたりが作る製作物の種類数の平均である．図(a)は 3000 世代目，図(b)は 10000 世代目の結果を示している．相互作用の強さ α の値が小さいときは，少ない種類の製作物を集中して作ったほうが適応度が高くなるため，多くのエージェントがスペシャリスト的な進化を遂げる．対して相互作用の強さ α が大きいときは，多様な製作物を作ったほうが適応度が高くなるため，多くのエージェントがジェネラリスト的な進化を遂げる．これは，3000 世代目で作られる製作物の種類よりも，10000 世代目で作られる製作物の種類が増えていることがわかる．図 3.20 には再帰的結合を使うエージェントの分布を示す．再帰的結合は多様な製作物を作るジェネラリスト的なエージェントに必要な能力として出現することが

わかる。

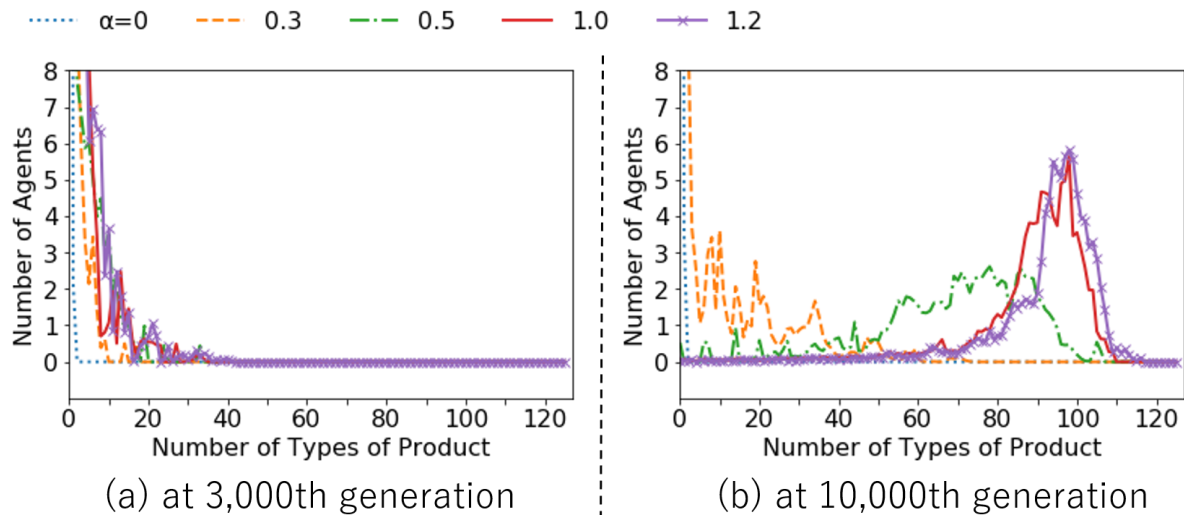


図 3.19 資源獲得競争の強さと、作った製作物の種類数に応じた
全エージェントの分布
(F_{IV} , 200 試行の平均. (a) 3,000 世代目と(b) 10,000 世代目)

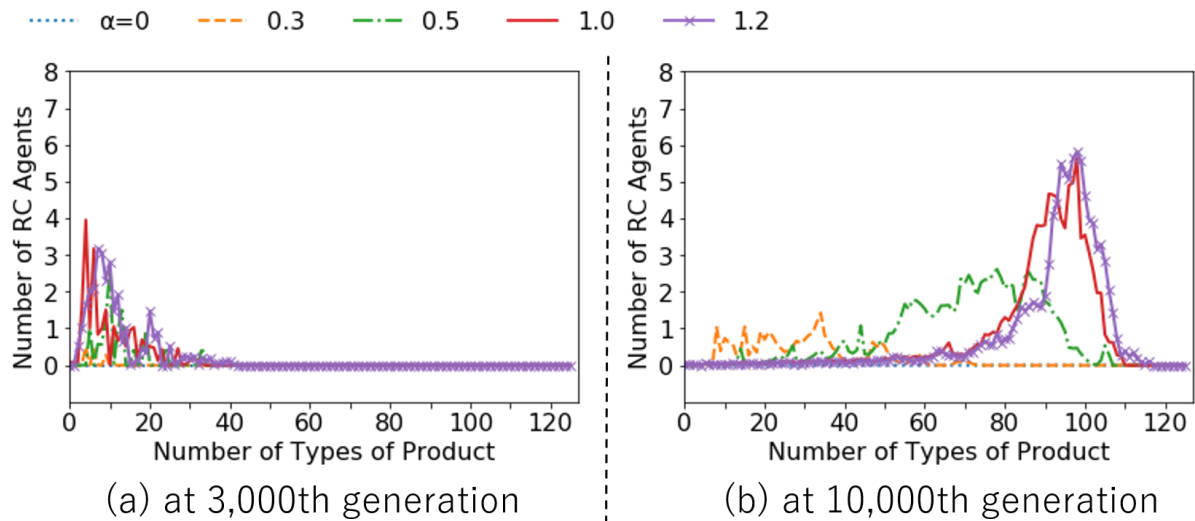


図 3.20 資源獲得競争の強さと、作った製作物の種類数に応じた
再帰的結合エージェントの分布
(F_{IV} , 200 試行の平均. (a) 3,000 世代目と(b) 10,000 世代目)

3.4 物体操作の進化シミュレーションの議論

3.4.1 再帰的結合の適応性：製作経路と製作物の多様化

この節では主に各シミュレーション結果の解釈と人類進化との対応について、道具製作をはじめとする物質文化の観点から議論する⁴⁸。まず、特定の製作が求められる適応度関数 F_{II} と多様な製作が求められる環境 F_{III} のシミュレーション結果から、再帰的結合の適応性と進化可能性について考察する。次に、人類学と考古学の証拠をもとに、人類史における再帰的結合の妥当な進化シナリオを提供する。そして、再帰的結合、特に再帰的結合が概念や文化を多様化させる推進力になりうることを論じる。

F_{II} のシミュレーション結果から、長い結合系列をもつ特定の製作物を作ることが適応的な環境では、Greenfield ら（1972）の行動文法の枠組みにおけるサブアセンブリ戦略に該当する、再帰的結合の能力が進化しうる（シミュレーション結果 3.3.3）。これは、再帰的結合によって想定しうる製作経路が反復的結合よりも多くあり、その状態遷移が進化的に獲得されやすいためである⁴⁹。また、再帰的結合よりも反復的結合のほうが少ない手順、すなわち低コストで特定の製作物を作ることができるため、再帰的結合は一度進化したのちに消失する。このような工程や部品の単純化や画一化は、今日では工学分野に多く見られる。例えば量産型の回路であるモノリシック集積回路は、一つのチップにトランジスタ、ダイオード、抵抗器といった素子を形成・配置し、素子間を金属の蒸着によって配線したのち、小片に切り分ける。こうした工程は全てチップ状の加工操作として行われ、少ない組立工数による安価な製品の生産を可能としている。

F_{III} のシミュレーション結果から、可能な限り多様な製作物を作ることが適応的な環境では、再帰的結合の能力が集団全体に進化・拡散する結果が見られた（シミュレーション結果 3.3.4）。再帰的結合は既存の製作経路を流用することを可能とし、一から新たな製作物を発明しようとする製作者よりも早く新しい製作物を発見することができる。このことから、再帰的結合には製作物を多様化することに対する適応性が

⁴⁸ 科学知識や宗教などの精神文化に関する議論は五章で行う。

⁴⁹ ただし、これは解の探索に遺伝的アルゴリズムを用いているためである可能性もある。探索アルゴリズムとして強化学習を用いた場合はこの限りではないことを 4.1 節で説明する。

あると言える。これを言い換えると、構造が独立した道具同士に適応価があるときよりも、共通の部品を持つ道具同士に適応価があるときのほうが再帰的結合の進化する確率が高くなるということになる。これは、新奇な発明やイノベーションが既存のコンポーネントを流用することによって生まれる、という現象として現実でも観察される (Arther, 2009)。ヒトは初期の石器時代から現在に至るまで、技術や文化を多様化させ、複雑化させてきた。二章で紹介した Arthur & Polak (2006) の研究は、モジュール化された技術の再帰的結合が、膨大な組み合わせ空間を効率的に探索できることを示している。すなわち、組み合わせ空間の効率的な探索を行うことが適応的となる場合、再帰的結合はコストの障壁を越えて進化する。

3.4.2 人類史における物体操作能力の進化：操作コストの低下と製作の失敗率の増大

再帰的結合はスタックを用いるぶん反復的結合に比べて各製作物に対する製作の手順が多くなるため、原理的に製作時のコストによって進化が抑制されうる。操作のコストが高くなれば、再帰的結合よりも低コストに製作物を作ることができる反復的結合が有利になる。それまで一つの製作物として加工していた対象を別の製作物の結合要素に切り替えるという点で、スタック使用時の操作コストは現実の道具製作における技術的ないし経済的負担として仮定できるだろう。また、操作コストをより直接的に二足歩行や手先の器用さを始めとする道具製作に関わる身体形質そのものと捉えることもできる。第二章で説明したように、物体の再帰的結合による道具製作はヒト以外の多くの動物の行動には観察されない。物体の結合は、多くの動物にとってそれで得られる適応度以上のコストがかかってしまうのだと考えられる。ヒトの進化において両手が自由になったことと指先が器用になったことは、物体の再帰的結合におけるエネルギー損失や失敗による傷害リスクなどを低減しただろう。

このような操作能力の進化は段階を経て実現されていることを図 3.21 に示す。ヒトの器用さの萌芽的進化として、約 300 万年前の初期人類 (*Australopithecus Africanus*) の化石から、プレシジョン・グリップと呼ばれる、物体を掴むなどの精密な操作に必要な手指形状の変化が推定されていること (Skinner et al., 2015) が挙げられる。プレシジョン・グリップは、近縁種のチンパンジーや *Australopithecus Afarensis* など他の初期人類では獲得されていない特徴の一つである。この頃的人类は、地球規模の寒冷化

(deMenocal, 2004) を原因とするアフリカ大陸のサバンナ化 (Bobe & Behrensmeier, 2004; deMenocal, 2011) によって資源の窮乏化に追い込まれていたと考えられる。最も古い石器使用の痕跡が見つまっているのもおよそこの時代であり (McPherron et al., 2010), 当時の人類は死んだ動物の骨を石で砕くことで, 栄養豊富な骨髄という他の動物が獲得できない食料にアクセスしていたという説もある (Bunn, 1981; Shipman & Rose, 1983)。反対にチンパンジーの祖先は, 数少ない森に残ることが可能であった⁵⁰ ため, 道具製作を行うことに対してヒトほど適応していないと推測される。

屍肉あさを効率化する手段として本格的に石器製作が始まると, 道具製作に適した繊細な動きが可能な手指を有する個体にさらに選択圧がかかる。142 万年前には, 中指と手首の接続が強化され, より安定した物体操作を行える個体が登場した (Ward et al., 2013)。そして 31 万年前になり, 木と石器を結合した組立型の道具が作られるようになった (Callaway, 2017; Stringer & Galway-Witham, 2017)。石器の作製時にサブゴールを設ける手法が見受けられることから, 物体の再帰的結合であるサブアセンブリ戦略が始まったのがこの時期だとする推定もある (Moore, 2010)。この時期以降に石器の形状および機能の多様化が生じている (Wendorf, et. al, 2001)。

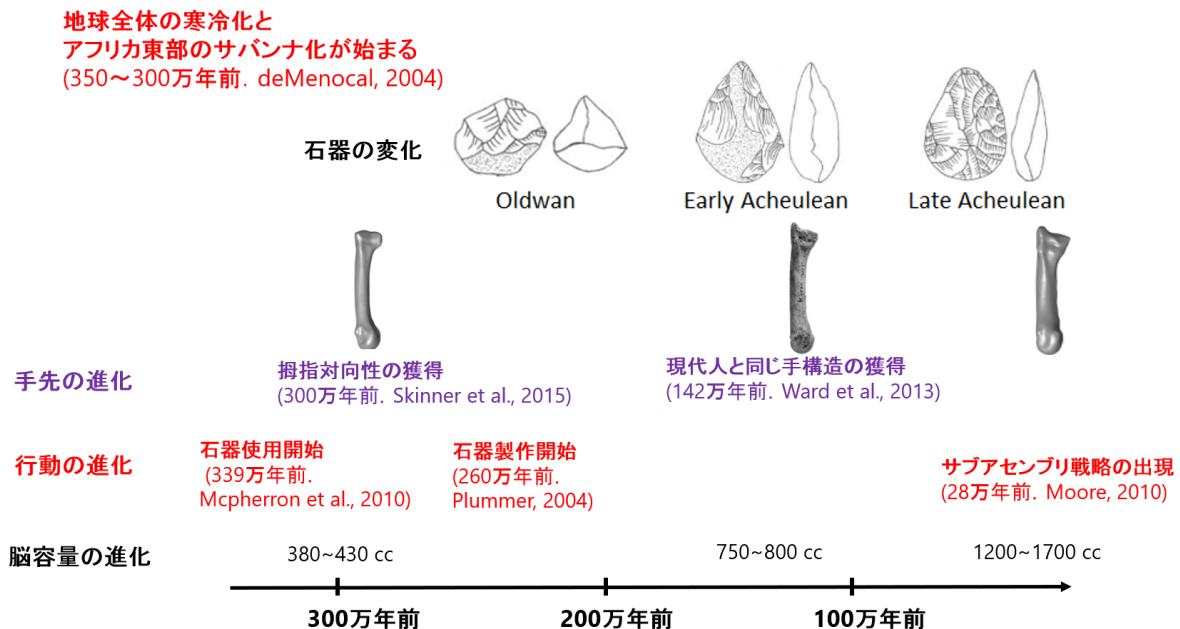


図 3.21 人類の物体操作能力の進化

⁵⁰ チンパンジーの祖先はヒトの祖先との縄張り争いに勝ったために森に残ることができたと考えられる。

物体を結合することによる組立型製作物が登場すれば、再帰的結合の利用はより促進されると考えられる。加工型における石を削る操作は失敗しても修正しやすい。しかし、物体を組み合わせることに失敗すると、コストをかけて手に入れた素材や途中まで組み立てた製作物が最悪失われてしまう。再帰的結合は一つの製作物に対して複数の製作経路を提供することで、結合の失敗への対応を可能とするため、操作の不安定性が高い環境において有効になりうる（シミュレーション結果 3.3.5）。これには、全体を部分に分けて操作することで破損を回避するという効果も含まれる。操作のコストが増加してもこの機能性は有効であり続ける（シミュレーション結果 3.3.5）。そのため、製作物が含む要素の数や種類が多ければ多いほど、再帰的結合はコストの障壁を越えやすくなる。

3.4.3 再帰的結合による物質文化の多様化：道具を用いた資源獲得競争

先に述べたように、石器をはじめとする道具製作行動は 300 万年前から始まったとされており、作られる道具の数は徐々に複雑化、多様化している。初期人類の生息域と当時の生態環境についての研究では、初期人類は資源に乏しい環境で生きていたことが示唆されている（Bobe & Behrensmeyer, 2004; deMenocal, 2011）。根茎類などの咬合力・消化力の必要な食物を摂取する必要があるにもかかわらず、森で暮らしてきたチンパンジーなどの類人猿と比較して、ヒトの顎や歯、胃や腸などの器官は全て小さい（Wrangham, 2009）。これは、身体と生態環境の関係を道具製作によって調整することで、遺伝的進化を介さず生存・生殖資源へアクセスしていたことに起因すると考えられる。石器や火を使用することで、他の動物のような強靱な顎や歯や爪を持たずとも食物を採取し消化することが可能となる。そうして余ったエネルギーを脳に分配することで知能が高くなったという説を唱える研究者もいる（Wrangham, 2009）。余剰エネルギーを生存・生殖に間接的に関わる行動や能力に費やし、一見不要に思える形質の発達を促進するという現象は多くの動物に見られる。代表的な例としては鳴禽の求愛歌（池淵, 2000; Okanoya, 2002）や、孔雀の羽根、鹿の角などである。これらの多くはオス個体の健康状態や強さをメス個体に示すシグナルとして機能していると考えられている（Zahavi, 1975; Zahavi & Zahavi, 1997）。ヒトの場合は、それがより便利で機

能的な道具を開発するための能力に費やされた可能性がある。

道具を介した生態環境への適応，および生態環境を自分の特性に合わせて作り変えるという文化的ニッチ構築は，ヒト以外の動物よりも資源へのアクセスを容易にすると同時に，ヒト種のなかでの資源獲得競争を促進しただろう．既存の製作物を作り使用することによる資源獲得において，集団内の競争が強くなると，新たな製作物を作って他個体の獲得できない資源を得るという戦略の適応性が高まる．新たな製作物を発明する際に，再帰的結合により既存の製作手法を流用することができた個体は，他の個体に先んじることができたと考えられる．再帰的結合は新奇な製作物を効率的に探索，製作する手法として進化した可能性がある。

3.4.4 物体操作の進化シミュレーションにおける結論

本シミュレーションから，再帰的結合が有する適応性として，製作物の探索の効率化と製作のロバストネス向上があるとわかった．再帰的結合操作の出現には，最終的な製作物を構成するコンポーネントの組み合わせ方を先んじて獲得していることが重要となる．反復する構造をもつ製作物が多様に存在するとき，再帰的結合操作は進化しやすい．再帰的結合操作の進化にとって，物体操作や記憶の負荷が低いことと，製作の機会が頻繁にあること，操作の失敗率が高いことが重要な条件となる．再帰的結合操作の生産性についてはプッシュダウン・オートマトンの計算クラスとして既に知られていたが，製作のロバストネス向上については本研究で新たに明らかになったことだと言える。

この結果は，いくつかの異なるモデル⁵¹の実装において再現性があった．もしも遺伝子のオンオフとエージェントの状態遷移が対応関係にない，たとえばスタックの使用を制御する遺伝子のみがあり，状態遷移は一樣確率で定まるモデルであったとしても，遷移にコストや失敗率を設ければ，少なくとも製作経路の多様性促進が適応的な機能として選択され，再帰的結合が進化すると推測される。

再帰的結合操作は道具の製作行動だけでなく，行動の計画にも適用することが可能であり，石器製作のような製作手法の組み合わせを伴う行動において有効に働くこと

⁵¹ 本論文のモデルの他に，「ワークスペース」と「スタック」の他に物体入手後の手に持っている状態「ハンド」を設定したモデルや，スタックの使用を制御する遺伝子を追加したモデルを作製しシミュレーションをおこなった。

が予想される。ただし、その場合は道具と同じく、状況ごとに機能の異なる成果が要求されることが条件となる。

第4章 行動表象操作の進化シミュレーション

3章では物体操作における再帰的結合の進化をシミュレートし、結果として、再帰的結合には「ある製作物を作ることに対して、製作順序の多様化による冗長性をもたらすことで、製作の失敗を抑制すること」および、「新たな製作物を作り出す際に、既存の製作経路の利用を可能にすること」という二つの適応性があることがわかった。

物体の結合以外で、この再帰的結合の利点は発揮されうるだろうか。例えば行動を組み合わせる計画を立てる際に、再帰的結合の使用は「行動を連想する順序の自由度を上げて計画を立てやすく」したり、「既知の行動計画を流用して新たな計画を立てやすく」したりすることに役立つと解釈することができると直感的には思われる。実際、2章で示したように、ヒト以外の動物における計画的な行動でも、再帰的結合の使用を示唆する実験結果や観察結果が得られている（Mulcahy & Call, 2006; Shumaker et al, 2011; 宮田, 2014）。このことから、再帰的結合は物体操作における進化よりも先に、行動の表象を結合して計画を立てるという認知プロセスにおいて現れたという仮説が立てられる。

本章では、行動表象の結合の際に再帰的結合が使われるという作業仮説のもと、物体操作と行動表象操作の学習を行うエージェントの進化シミュレーションを実施する。

4.1 節では、学習の性質から再帰的結合が行動表象の操作において担いする役割を3章のシミュレーション結果を踏まえて考察し、行動計画で再帰的結合が使われるという仮説に批判を加える。4.2 節では抽象化した行動表象の再帰的結合や学習および進化シミュレーションの具体的な実装について説明する。4.3 節では、いくつかの環境条件とパラメータに対するシミュレーション結果を示し、シミュレーションの枠内

での結果の考察を提供する．4.4 節ではシミュレーション結果に対する議論と考察を行う．

4.1 行動表象操作の進化シミュレーションのねらい

4.1.1 学習による環境への適応

3 章では GA を用いてエージェントの行動規則を制御し，再帰的結合が進化する条件を明らかにした．シミュレーション結果 3.3.5 では，エージェントが新たな遺伝子を獲得し，可能な状態遷移を増やすことで新たな製作物の製作が可能になる，という進化の拡張的側面を効率化する手段として，再帰的結合が現れることがわかった．しかし，実際の生物の行動を決定するのは進化のような世代間の可塑性のみではない．ヒトをはじめとする多くの動物は，世代内でも行動を変化させ，それぞれの生態環境へと適応する．個体は，様々な行動を試行し生態環境中を探索するなかで，その遺伝子の保存や増殖を促進／抑制する結果を得られた⁵²とき，ある環境や自己の状態において実行した行動の選好を強化／減衰する．この適応メカニズムを学習と呼ぶ．学習は進化と違い，都度フィードバックを得て行動を変化させ，結果をサンプリングすることで，個体の適応性を高めることができる．世代内で行動を適応的なものへと変化させることができるシステムにとって，再帰的結合はどのような有効性をもちうるだろうか．

可塑性以外にも進化と学習の間には大きな違いがある．進化が遺伝子の変化によって行動の自由度の拡張ないし縮小を可能とする適応メカニズムであるのに対して，学習は一定の入力や出力の自由度を前提とした上で重要なものを強化，あるいは不要なものを減衰し，必要十分な自由度へと縮約していく適応メカニズムである．もし探索空間の全状態をエージェントがあらかじめ探索可能であるならば，エージェントはその空間において最適な行動を学習によって見つけ，無駄な探索をしなくなるだろう．特定の環境に対する適応は，一般的な学習メカニズム，すなわち統計による行動の重

⁵² 促進と抑制の効果を抽出し弁別する能力は種によって様々である．

み付けで十分であると言える。それが十分でなくなった際に、生物種は進化によって形質を変化させることで行動の自由度を調整するという適応プロセスを実行している。多くの生物種はそれで必要十分な適応、すなわち次世代への遺伝子の伝達を行うことができていると考えられる。

3章のシミュレーションにおける行動規則を学習によって制御する場合、どのような製作物も十分な試行回数があれば一度は作製されることになる。可能な限り多様な製作物を作る条件のように、各製作物を一度作ればよいだけであれば、再帰的結合は必要とされない可能性が高い⁵³。もし3章と同じ結果を世代内可塑性において導こうとするなら、エージェントが学習の初期状態として有する行動の自由度を、ある報酬や適応価に対して収束させていくのではなく、拡張していく方向性、すなわちそれまで取れなかった新奇な行動を取れるようになることが必要になると予想される。再帰的結合が必要とされる条件があるとすれば、それは世代内で行動の自由度の拡張していくことが適応度の獲得につながる環境にほかならないだろう。

4.1.2 学習経験に基づく計画

2.2節で論じたように、ある種の動物は環境や自身の現在状態に対して望ましい行動を学習し、それを表象として組み合わせて将来的な行動に使用していると考えられることができる。表象操作という認知プロセスにおいて、再帰的結合は使われうるだろうか。3章のシミュレーション結果から推論するならば、既に学習した行動の表象を結合して新たな行動系列を生成し自由度を拡張するということに対し、再帰的結合が有効になるという仮説が立てられる。しかし、これは逆説的な主張である。なぜならば、既に学習した適応的な行動を別の行動と結合することは、学習時とは異なる非適応的な行動系列になってしまいうるからである。そのようなリスクに対して見合った適応価や報酬を得られる可能性はそれほど高いだろうか。

では、もう一つの再帰的結合の機能である、行動計画を行う際に連想した順序を並べ替え、最適な行動系列を生成できるという仮説はどうか。これは、2章でも例を提示したように、お茶を飲むためにお湯を沸かすことを先に思いついたとき、それを覚えておいてティーバッグとポットを探す、というような状況として捉えられる。しか

⁵³ それどころか、学習すら必要ない可能性が高い。無作為な行動を繰り返しているうちに多様な製作物が作られていくことは容易に想像できる。

し、これもまた逆説的で、ある目的の達成に対して既に学習した行動系列の連想が行われるとすれば、それは学習した状態と行動の対応関係に則る形にしかなりえないのではないだろうか。ゆえに、第三者から見た計画行動は、連合学習された行動と本質的に区別がつかないと言える。ある目的を達成するまで行動系列を生成するという「計画」において、コストがかかる上に適応的な振る舞いを乱す再帰的結合が出る幕はないように思える。

4.1.3 学習経験に基づく思考実験

どのような状況であれば、リスクを生じさせずに表象操作による新奇な行動の生成と実行ができ、かつそれが利益をもたらすだろうか。

ここで、トリの歌に着目する。鳴禽の一種であるジュウシマツのオスのさえずりは、歌要素を組み合わせたチャンクからなる階層構造を有している (Okanoya, 2004)。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とされ、ジュウシマツではこのメスの選好に基づいた性淘汰による進化の方向づけがなされたと考えられている (岡ノ谷, 2010)。ジュウシマツとその近縁であるキンカチョウでは、歌の提示方法を様々試す実験において、歌の新奇性を判断する遺伝子が脳の高次聴覚野に存在し発現しうることがわかっている (Mello et al., 1995; Kato et al., 2012)。ジュウシマツをはじめとする鳴禽類の歌は、幼少期に親や周囲のトリの歌を聴くことによって学習を行う感覚学習期と、自ら歌の練習を行う感覚運動学習期の二段階を経て完成される (Marler, 1991)。感覚学習期において、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いくつかの部位で学習し、感覚運動学習期においてはそれに則る形で階層構造を生成する (総説として、池淵, 2000)。ジュウシマツが置かれている状況は、歌の単位となる要素レベルの遷移規則を学習するだけでなく、その要素をチャンクしたレベルで規則を生成し学習するという点で、またそうした訓練が要素レベルの運動に関する知識を踏まえつつ試行錯誤的に行われるという点で、4.1.3 節の行動計画とは異なる行動表象の結合操作を行っていると言える。実際に感覚運動学習期のトリの脳では、強化学習に基づきさえずりをばらつかせることによる試行錯誤が行われていると考えられている (Ölveczky et al., 2005; Andalman & Fee, 2009)。特定の目的に対する行動系列生成としての計画と区別するために、このような試行錯誤的な行動表象の結合操作を、

本稿では「思考実験 (Speculation)」と呼ぶことにする。

ジュウシマツにおいては、試行錯誤的な発声運動の操作が、新奇性の高い歌の獲得に対して行われ、新奇性の高い歌が生殖の実現という利益をもたらす。ヒトにおいて、このような試行錯誤の思考実験をすることが、新奇性をもたらすということはどのような状況として存在するだろうか。また、そういった新奇性はどのような状況で役に立ちうるのだろうか。

ここで、話を物体操作に戻してみたい。ヒトにおける道具製作という行動もまた、将来的な行動の自由度を高めるための、試行錯誤的な要素の強い行動系列の生成と言える⁵⁴。このような行動表象の操作は、道具使用や道具製作といった自身の自由度を拡張する行動と組み合わせることで、再帰的結合を生ずる可能性がある。初期人類は石器の製作において、部分的なモジュールの作製や複雑な手順の階層的な組み合わせを行っていたことがわかっており、時代を下るにつれてその階層構造がより深く複雑化していったことが、石器の発掘記録や製作手法の再現によってわかっている (Moore 2010, 2011; Stout, 2011)。これらは物体を結合した石器が現れるより以前の時代であり、ヒトの認知プロセスとして行動表象を再帰的に結合する能力が進化的連続性をもって形成されたことを伺わせる。本章では、現在状態によらない行動表象の操作において、新奇な行動系列を生み出すことに再帰的結合が使われるようになるという仮説のもと、再帰的結合を伴う思考実験に基づいて道具製作を行うエージェントの進化シミュレーションを実施する。

4.2 行動表象操作の進化シミュレーションの設計

4.2.1 行動表象操作モデル

4.2.1.1 Q 学習

本シミュレーションでは、強化学習による統計的学習と、行動表象の操作による行動の結合を組み合わせ、後者において再帰的結合が必要とされる環境条件を特定することを目的とする。まず、エージェントのベースとなる強化学習を行うモデルを考え

⁵⁴ 霊長類における道具使用や道具製作の実験は、道具による行動の自由度の拡張を前提としているだろう。

る．強化学習とは，図 4.1 に概略を示したように，ある「環境」中にある「行動知識」を有する学習システムが，その知識に基づいて環境状態とシステム状態に応じた「行動」を決定することで「報酬」を獲得し，行動知識を更新していく学習アルゴリズムである．基本的な学習の手順は以下のようになる（小高, 2017）．

1. 学習システムが環境と自己の状態を判断し，行動知識とその状態に応じて次の行動を決定する．
2. 行動に対し，環境から報酬が与えられる．
3. 報酬に基づいて行動知識を改善する．

これを用いることで，ある環境中において最も高い報酬を得られる行動系列を探索し学習するエージェントを設計する．つまり，3 章において GA により実装されていたエージェントの行動規則を，強化学習によって実装することになる．

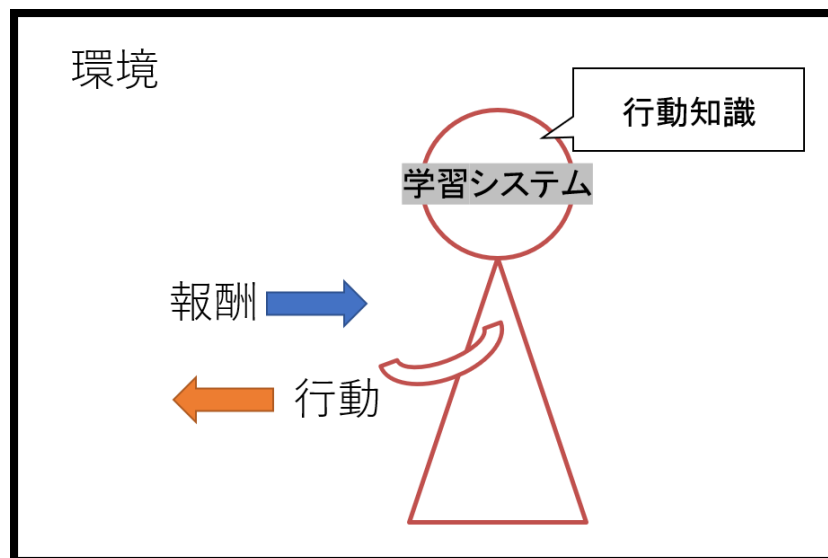


図 4.1 強化学習の枠組み

本シミュレーションでは強化学習の一種として Q 学習を用いる．Q 学習は有限マルコフ決定過程において，全状態をサンプリングできる遷移を無限回試行したとき，最適な評価値に収束することが可能な学習アルゴリズムである（Watkins, 1989）．Q 学習エージェントは，ある状態 s において行動 a をとることの評価値 Q をもち，そ

れは次のように表現される．

$$Q(s, a)$$

各状態における各行動の評価値を記した表を Q テーブルという．このテーブルにおいて適切な Q 値を求めることができれば，各状態において最大の Q 値をもつ行動を選択することで最大の報酬を得る，あるいは最大の報酬に近づくことができる．

Q 値はある行動によって得られる報酬に基づき，次の式(8)によって更新される⁵⁵．

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha(r + \gamma \times \max_{a_{next}} Q(s_{next}, a_{next}) - Q(s, a)) \quad (8)$$

ここで， s は状態， a は状態 s で選択した行動， α は学習係数， r は行動の結果として得られた報酬， γ は次の状態における Q 値の時間割引率である．一つ次の行動の Q 値が現在の Q 値に割り引かれつつ加算されることによって，報酬が得られない行動も評価することができ，現在状態から離れた遷移距離にある報酬に至る行動も学習することができる⁵⁶．

本シミュレーションのエージェントは，三章のシミュレーションと同じく作業台とスタックという二箇所の状態をもち，Get, Push, Pop, そして Stop の 4 つの行動を用いて報酬が割り当てられた製作物を作製する．それぞれの振る舞いは基本的に三章のシミュレーションと変わらない⁵⁷．行動の選択には以下の式(9)で表現されるボルツマン分布を用いたソフトマックス手法を採用した．

$$\pi(s, a) = \frac{\exp(Q(s, a)/T)}{\sum_{p \in A} \exp(Q(s, p)/T)} \quad (9)$$

ここで， π はエージェントの行動知識（方策）， A は状態 s でエージェントが実行可能な行動の集合である．

エージェントは Q 値を更新しながらソフトマックス手法による行動選択を行い，4.2.1.3 節に示す報酬関数に対して最適な行動系列を探索する．

4.2.1.2 行動表象の操作と行動系列の生成

エージェントが試行錯誤を行う場合，現在状態や具体的な行動の経験を参照することなく，自身が実行可能な行動の表象の結合して行動系列を生成し，構成的に環境に

⁵⁵ 実際はこの式のままでは値が発散しうるため，適切な減算処理を行う．

⁵⁶ これは行動の連合を行っていると見える．

⁵⁷ ただし，このシミュレーションではスタックに深さの概念を設け，エージェントの認知能力として GA で制御することとした．詳細は後述する．

対して適応するという形式が考えられる．外部環境での物体操作に加えて，エージェントは行動を表象として操作し思考実験するための内部状態をもつ．この内部状態も，内部作業台と内部スタックという 2 状態として表現され，エージェントは物体操作と同じように行動表象を操作することができる．ただし，行動表象の操作における操作対象は物体ではなく物体操作における行動，すなわち **Get**, **Push**, **Pop**, **Stop** である．エージェントは次の 4 つの操作⁵⁸を行い，行動系列を生成する．

- 「**sImage**」：行動系列の生成に必要な構成要素を手に入れる遷移関数．構成要素は「**Get**」, 「**Push**」, 「**Pop**」, 「**Stop**」の 4 つ．構成要素それぞれに遷移確率が割り当てられており，物体操作における **Get** 関数と等しい機能をもつ．
- 「**sPush**」：内部作業台の状態を内部スタックの状態とする遷移関数．内部作業台に何も無い場合，関数は実行されない．この関数が実行されたとき，内部作業台の状態はリセットされる．
- 「**sPop**」：内部スタックの状態を内部作業台の系列の末尾に追加する関数．この関数が実行されたとき内部スタックの状態はリセットされる．
- 「**sStop**」：内部作業台の状態を成果物として操作を終了する関数．

各操作の選択は物体操作の **Q** テーブルとは別に存在し，行動表象操作における **Q** 値の更新は思考実験による行動系列を実行した際に遷移した外部状態の **Q** 値によって定まる．

図 4.2 に物体操作と行動表象操作の状態遷移表の関係を示す．まず，最も内側のオレンジ色の線で囲われた部分が物体操作における **Q** テーブルであり，線形の物体系列と階層的な物体系列を学習内容に基づいて生成できる．次に，青色の線で囲われた部分および表象操作の **Q** テーブルの右端の **sStop** 列が行動表象操作における **Q** テーブルであり，線形の行動系列を生成することができる．最後に，最も外側の緑色で囲われた部分が表象操作における再帰的結合を実現することで階層的な行動系列を生成できる．それぞれの段階はスタックの有無や表象操作の有無などによって進化的に決定され，最終的な **Q** テーブルまで使用可能になることで，2.3 節で論じた行動表象操作の脳機能的モデルに到達する．

行動表象操作の **Q** テーブルにおける **sImage** 操作は，物体操作のテーブルとは独立

⁵⁸ 各操作の頭文字は **Speculation** の **s** であり，物体操作における遷移関数名と区別するためにつけておく．

にそれぞれの状態遷移を学習する．これは一見意味のない設定に見えるが，試行錯誤を行うエージェントの性質によって，物体操作の Q テーブルによらず行動表象の組み合わせを探索するという意味を持ちうる．

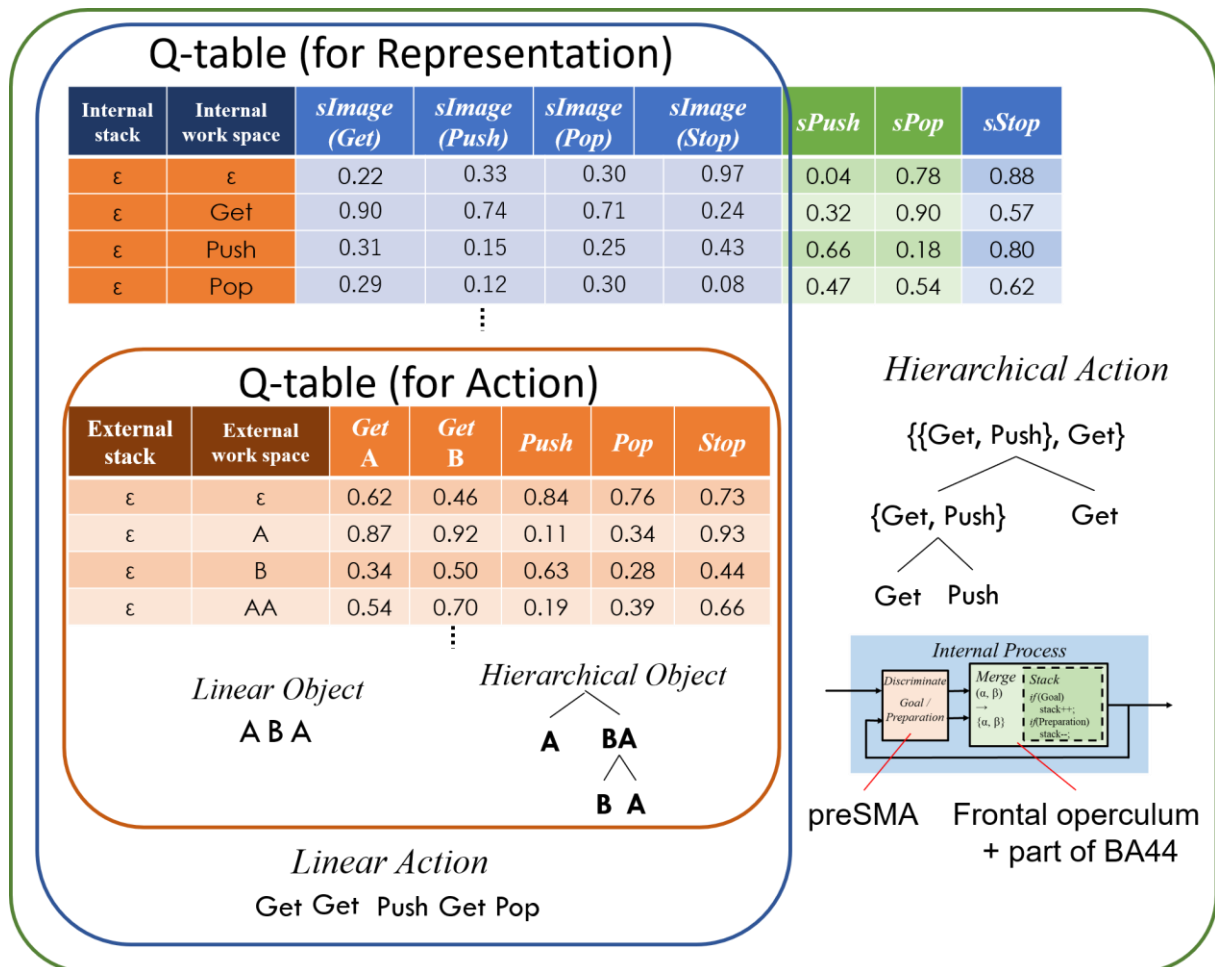


図 4.2 物体操作と行動表象操作の状態遷移表，および想定される脳機能的モデル

エージェントは行動表象の操作によって物体操作の行動系列を生成する⁵⁹．重要な点として，ここでは外部環境の現在状態を参照した将来的な行動の計画ではなく，行動の合間に挟まれる思考実験を実装したい．そのため，行動表象の操作はエージェントの外部状態と無関係に行われることとする．行動表象の操作は遺伝的に決められた

⁵⁹ 行動表象の操作を行う確率は遺伝子によって制御される．

回数を限界として、表象操作の上限回数まで操作するか **sStop** を実行するまで行うことができる。今回、エージェントが生成できる行動系列の長さは 3 とした⁶⁰。操作に際して、エージェントは例えば「**Get, Push, Get**」や「**Push, Pop, Get**」のような行動系列を生成することができる。このとき **Get** によって得られる物体は、行動の実行時に物体操作において学習した傾向に依存して決定される。すなわち、**Get** という抽象的な行動のみが操作可能であり、何を **Get** するかまでは行動表象操作の **Q** テーブルは学習しない。行動表象の操作が終了したあとは、エージェントは生成された行動系列を実行するか否か、遺伝子によって決められた確率で決定する。そして、実行後に到達した状態の、物体操作における **Q** 値が報酬として行動表象操作に対し与えられる。行動表象の操作は製作物を完成させるまで、すなわち物体操作で **Stop** が実行されるまで何度でも実行することができる。ただし、一度終了した行動表象操作における内部状態は維持されない。

4.2.1.3 報酬関数

次に、エージェントが適応する環境として報酬関数を設定する。4.1 節で述べたように、あらかじめ一定の報酬が決められた環境に対して学習するのであれば、再帰的結合は必要とされないだろう。そこで、ここではエージェントの振る舞いによって環境側も変化する、動的な報酬関数を考える。その前に、それら動的な報酬関数に対して比較対象となる静的な報酬関数を設定しておきたい。

R_I : 任意の製作

$$R_I = r_x, \quad (10)$$

3 章における式(2)と同様に、この報酬関数では、どの製作物を作っても一定の報酬を受け取ることができる。そのため報酬関数は定数 r となる。ここで x は l までの長さの系列で構成される製作物全てを表す。

R_{II} : 新奇な製作 (個体)

⁶⁰ 今回は計算量を減らすため、再帰的結合が可能な最低の長さとした。長さを変えても結果に大きな変化は見受けられないため、これは探索する製作物の組合せ空間に対して必要十分であると考えられる。

$$R_{II} = \frac{r_x^i}{\{n_x^i\}^\beta} \quad (11)$$

この報酬関数では，エージェントが同じ製作物を作るたびに報酬が徐々に低下していく． n_x^i はある種類の製作物 x がエージェント i によって生成された回数である． β は報酬の製作回数あたりの割引係数を表す．3 章のシミュレーションで明らかになったように，再帰的結合は新しい製作物を作ることに対して適応的であった．この報酬関数では，学習においても GA による適応と同じことが言えるか否かを確認する．強化学習は通常，報酬を得られる行動を反復することに対して機能的なアルゴリズムであるため，このような新奇性の求められる環境では役に立ちにくいことが予想される．

R_{III} : 新奇な製作（集団）

$$R_{III}(t) = \frac{r_x}{\{\sum_{all\ i(t-1)} n_x^{i(t-1)}\}^\beta} \quad (12)$$

この報酬関数では，前世代で作られた製作物の価値が低くなる． $n_x^{i(t-1)}$ が表すものは 1 世代前のエージェント i が作った製作物 x の個数である． β は報酬の製作回数あたりの割引係数を表す．3 章のシミュレーションでは有限資源の獲得競争を導入することで，各々のエージェントが新奇性を求める環境が構築された．学習という世代内可塑性が存在する場合でも同じ結果がもたらされるかを確認する．エージェントによって次世代の適応度が決定されるという意味で，文化的ニッチ構築の表現であると解釈することも可能である．

4.2.2 進化シミュレーションの設計

4.2.2.1 エージェントの能力の遺伝子符号化

今回もエージェントの能力に対して GA による世代間可塑性を設ける．これはエージェントの再帰的結合の能力を生物学的なものとして定義し，その進化プロセスについて考察を行うためである．今回は以下の表に示す形質をエージェントが生得的にもつ能力とした．エージェントは物体操作作用のスタックと行動表象操作作用のスタックを

もち、これらのスタックがなければ、それぞれで **Push** や **Pop** といった操作を行うことができない。行動表象操作の頻度は、エージェントが行動の選択時にどのくらいの割合で行動表象の操作を行うかを定義し、行動表象系列の実行確率はエージェントがどのくらいの割合で思考実験の内容を実行するかを定義する。行動表象操作の回数上限は一度の行動表象操作でエージェントが **sImage** や **sPush** や **sPop** といった操作を行える上限回数を示す。中央の数字は各形質の発現の強さで、もし物体操作用スタックの遺伝子数が 5 つすべて **on** になれば、スタック深さ 5 まで **Push** できるようになる。右端の値は遺伝子が一つ **on** になるごとの各形質の増加文である。

表 4.1 エージェントの遺伝子

遺伝子の役割	遺伝子座の数	遺伝子座あたりの増分
物体操作用スタック	5	1
行動表象操作用スタック	5	1
行動表象操作の頻度	20	0.05
行動表象系列の実行確率	20	0.05
行動表象操作の回数上限	20	1

4.2.2.2 進化シミュレーションの流れ

進化シミュレーションは、全てのエージェントにおいて全ての遺伝子座が 0 の状態、すなわち何も行動ができない初期集団からスタートする。各エージェントはその遺伝子にコードされた能力のみを用いて物体操作による製作を行う。製作の最中は **Q** 学習による環境への適応が行われる。各エージェントのある世代における適応度は、4.2.1.3 節で定義した報酬関数のもと製作を行って得られた報酬の総和である。例えば報酬関数が R_t であれば適応度関数は以下の式で表現される。

$$F_t(t) = \sum_{allx} \{r_x^i \times n_x^i\}, \quad (13)$$

世代交代に際しては、次世代の半数が適応度に依存してルーレット選択された 2 つの親個体から遺伝子の一点交差によって生まれ、残りの半数は現世代の個体がルーレット選択によって維持される。その後、突然変異として各エージェントの遺伝子に一定確率でビット反転が生じる。

4.3 行動表象操作の進化シミュレーションの結果と分析

4.3.1 シミュレーションの基本設定

このシミュレーションの目的は、学習による環境の適応が可能な生物において、学習とは無関係に系列を生成する能力と、その系列生成における再帰的結合が進化する環境条件を特定することである。再帰的結合の適応的機能は三章で明らかになっているため、ここでは再帰的結合が強化学習による適応を差し置いて必要となる条件を調べる。そのために、4.2 節で説明した報酬関数について、いくつかのパラメータでシミュレーションを行った結果を示す。この節では4つのシミュレーションの結果とそのメカニズムについての考察を述べ、結果の認知的な解釈や生態学・人類学的な考察は4.4 節で行う。各シミュレーションの基本的なパラメータを表4.3に示す。

表 4.2 行動表象操作モデルの基本パラメータ

パラメータ名	値
各世代における個体数	100
行動回数の上限	30,000
構成要素の種類数	2
最大構成要素数	6

母集団の大きさは100に固定されている。各シミュレーション結果は、各パラメータで200回実行され、平均された。各図中では、物体操作の再帰的結合を External RC、行動表象操作の再帰的結合を Internal RC と表記する。

4.3.2 任意の道具製作

任意の道具製作では、報酬の分布を全ての製作物において1とした。図4.3に、行動回数20,000回における再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の変動を示す。図中赤線が物体操作の再帰的結合を用いるエージェントの割合であり、青線が行動表象操作の再帰的結合を用いるエージェントの割合である。紫の線は個体の遺伝子に定義された行動表象操作の使用確率の平均値である。オレンジの線は行動

表象操作後の行動系列の実行確率の平均値である。学習のシミュレーションにおいては任意の製作物を作ることが適応的となる環境でも、再帰的結合が物体操作と行動表象操作ともに現れる。各試行の典型は図 4.4 のようになる。計画を立てないエージェントや再帰的結合を使用しないエージェントのみにならない理由は、世代内で計画を含めた様々な行動を試行して環境に適応していく学習型エージェントの性質によるものだと考えられる。ある試行でエージェントが行っている再帰的結合の平均使用回数を図 4.5 に示す⁶¹。

再帰的結合を使用するには「sImage, sImage, sPush, sImage, sPop」という最低 5 回の操作が必要になるが、それを考慮しても行動回数 30,000 回の 1% にも満たないため、再帰的結合は物体操作でも行動表象操作でも、ともにチャンスレベルで使用されているだけと思われる。

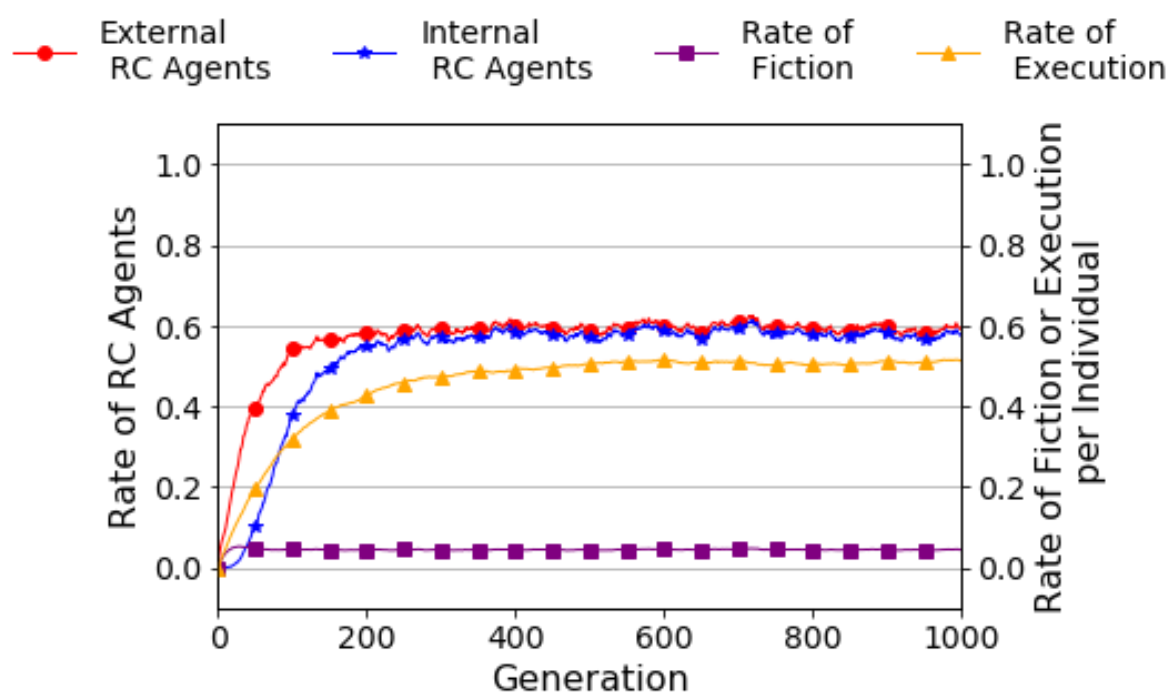


図 4.3 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移 (R_1 , 200 試行の平均)

⁶¹ 任意の道具製作において再帰的結合を使用するエージェントの割合は 100% ではないため、個体によってはこれよりも多くなる場合がある。

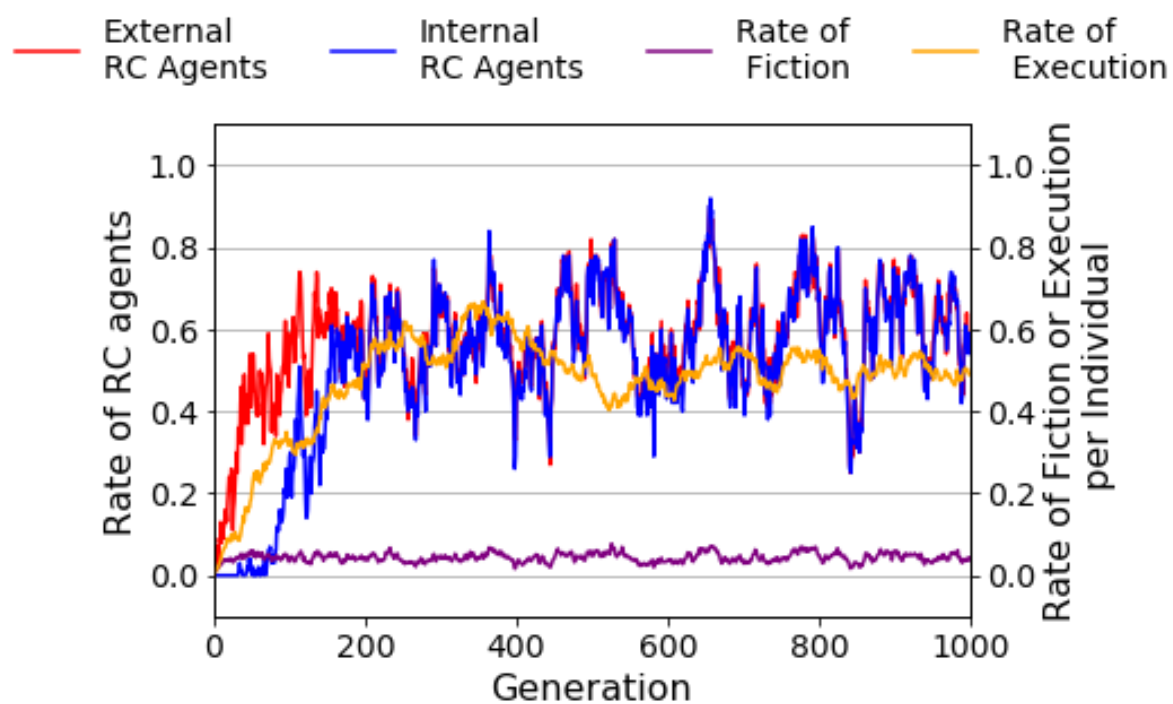


図 4.4 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移
(R_t , 1 試行)

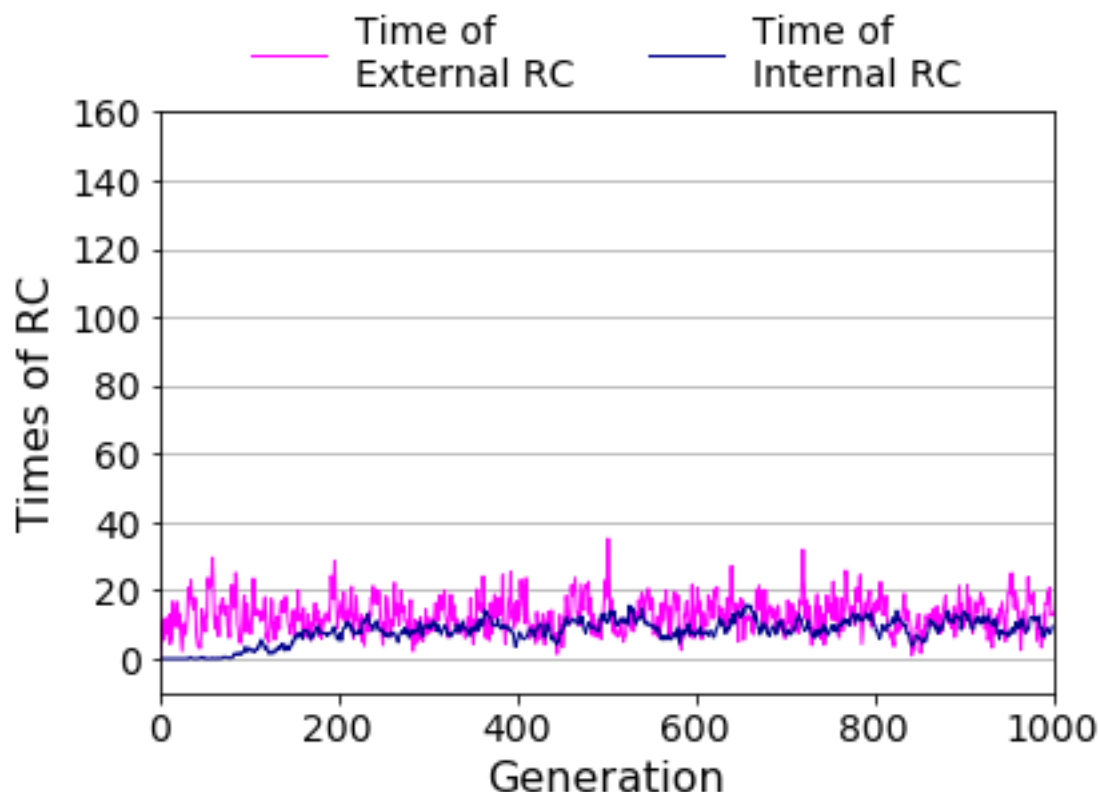


図 4.5 エージェント一個体あたりの再帰的結合の使用回数の世代変移
(R_t , 1 試行)

4.3.3 新奇的道具製作（個人）

再帰的結合の機能として，既存の製作手法を流用することで新たな製作物を発明できるということがわかっている．同じ製作物を作っても前回以上の報酬を得られないという条件の報酬関数 R_{II} で，同様のことが学習のアルゴリズムにおいても言えるかどうかを確かめる．図 4.6 は報酬関数の割引係数 $\beta=3$ のときの再帰的結合を使用するエージェントの世代変化であり，赤と青の破線で示されているのはそれぞれ R_t における物体操作と行動表象操作の再帰的結合を使用するエージェントの割合である．製作物の新奇性が要求されると，物体操作，行動表象操作ともに再帰的結合を使用するエージェントが増加する．図 4.7(a)は報酬の割引係数 β を変化させたときの，1000 世代目の再帰的結合を使用するエージェントの割合である．報酬の割引係数 β が大きくなると，物体操作と行動表象操作の再帰的結合を使用するエージェントの出現率も上がることがわかる．図 4.7(b)は行動表象操作の使用確率（紫の線）と行動表象操作

の使用回数上限（緑の線），行動表象操作後の行動系列の実行確率（オレンジの線）に対する報酬の割引係数 β の影響を示したものである．新奇な製作物の価値が高くなるほど，各エージェントが行動表象操作を行う確率が増加していることがわかる．

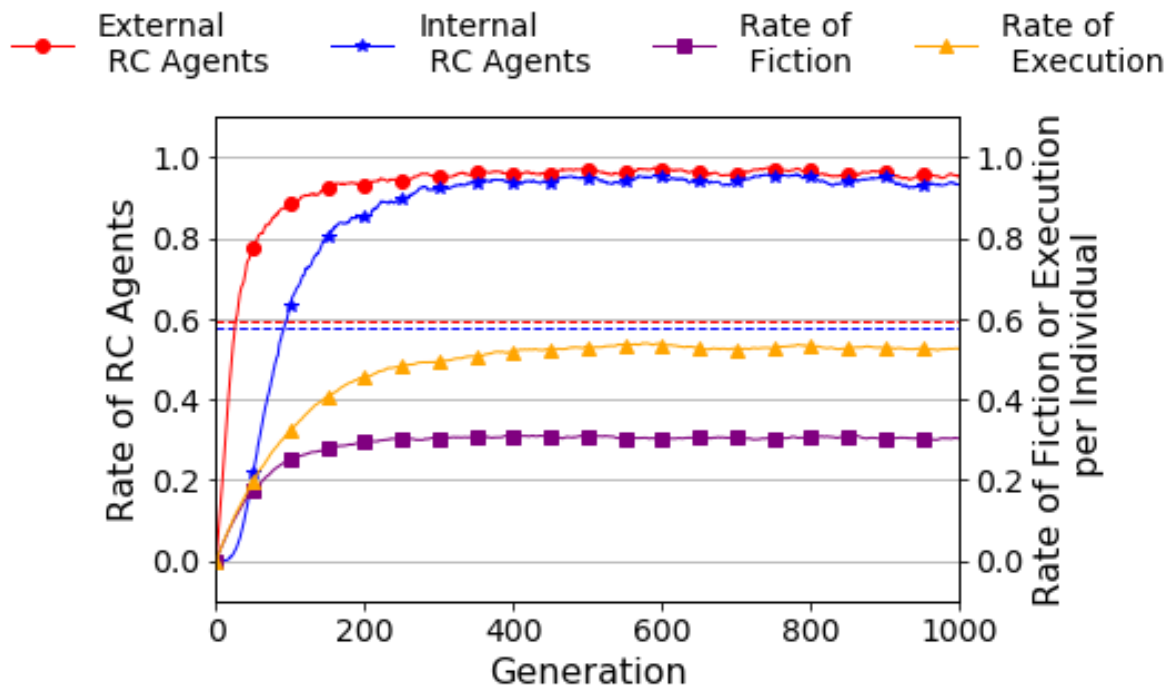


図 4.6 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移 (R_{II} , 200 試行の平均)

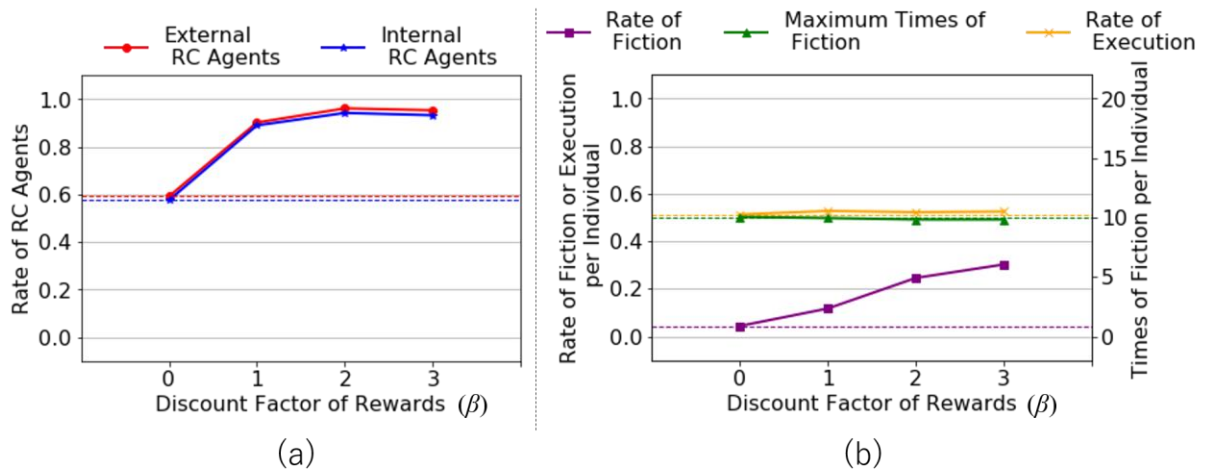


図 4.7 (a) 再帰的結合を使用するエージェントの進化と，
(b) 行動表象の操作確率および操作回数上限に対する，報酬割引の影響
(R_H , 200 試行の平均. 1,000 世代目)

各試行の典型は図 4.8 のようになり，全ての試行において，先に物体操作の再帰的結合現れたのち行動表象の操作において再帰的結合が現れる結果となった．ただし，その理由としては行動表象の操作に必要な行動計画の確率と回数が進化するまでに世代を経る必要があるためだと考えられる．ある試行でエージェントが行っている再帰的結合の平均使用回数を図 4.9 に示す．報酬関数 R_H と比較して物体操作でも行動表象操作でも五倍以上の再帰的結合が使われている．

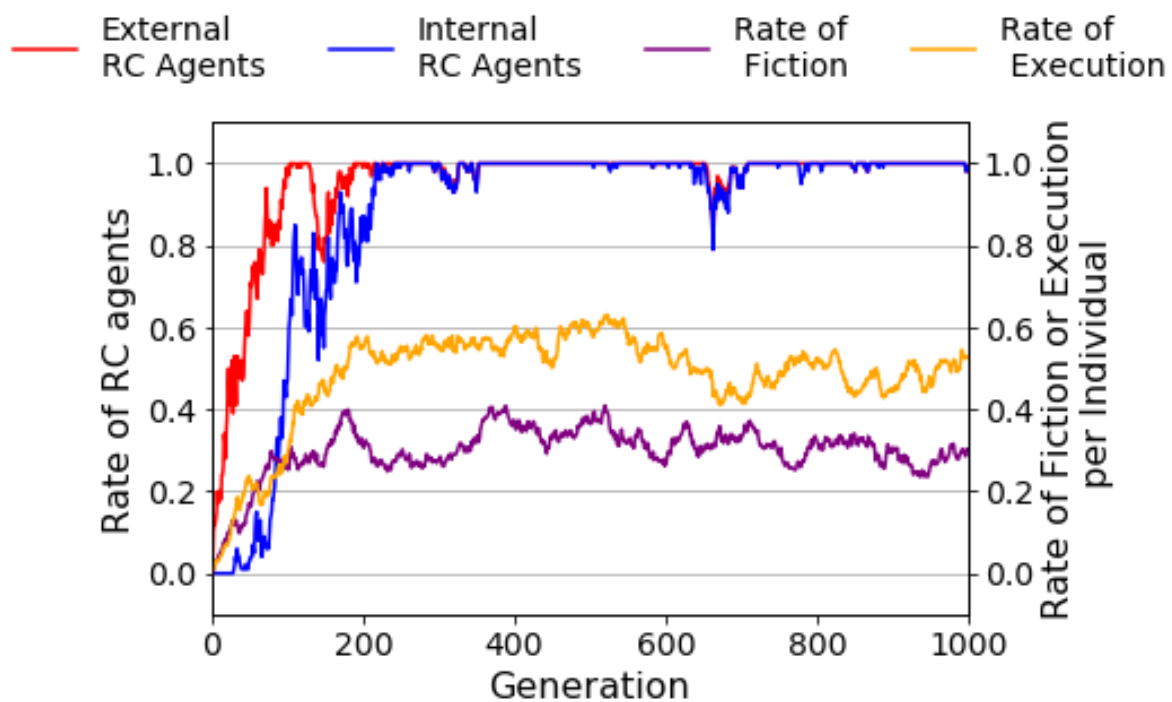


図 4.8 再帰的結合を使用するエージェントの割合と表象操作確率の世代変移
(R_{II} , 1 試行)

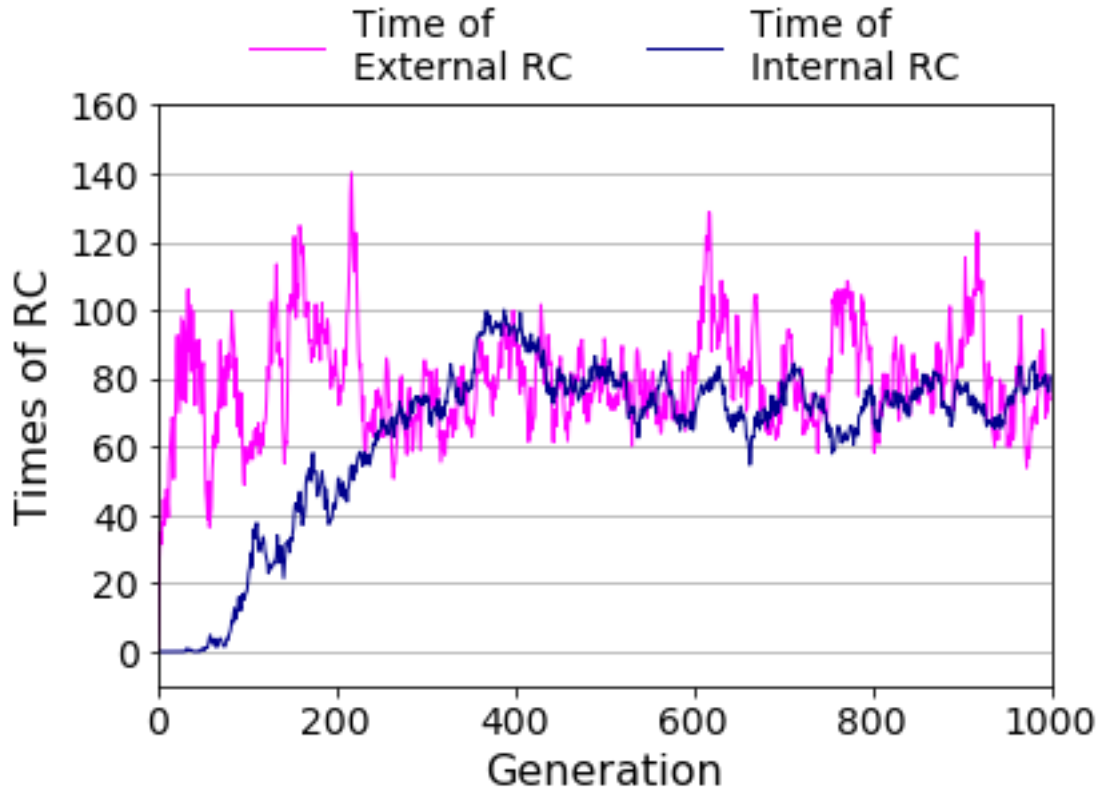


図 4.9 エージェント一個体あたりの再帰的結合の使用回数の世代変移
(R_{II} , 1 試行)

物体操作，行動表象操作ともに再帰的結合が進化する条件を特定できたので，表象操作の回数にコスト c をかけ，双方の進化にどのような影響が出るかを調べる．表象操作に対するコストのかけ方は式(14)で表現される．

$$F_{II}^i(t) = \frac{R_{II}^i(t)}{\{m^i\}^c} \quad (14)$$

ここで m は個体 i が行った表象操作の回数であり，回数が多いほどある世代における報酬が割り引かれることになる．一回の行動表象操作のコストを上げていくと，再帰的結合を使用するエージェントは，行動表象操作でほとんど進化しなくなることが図 4.10(a)からわかる．対して，物体操作における再帰的結合も現象したが，行動表象操作ほどではなかった．図 10(b)を見ると，行動表象操作回数の上限が低下し，行動表象操作の使用確率も減っている．このことから，行動表象の操作を効率的に使うために，再帰的結合を使わない戦略が取られていると考えられる．

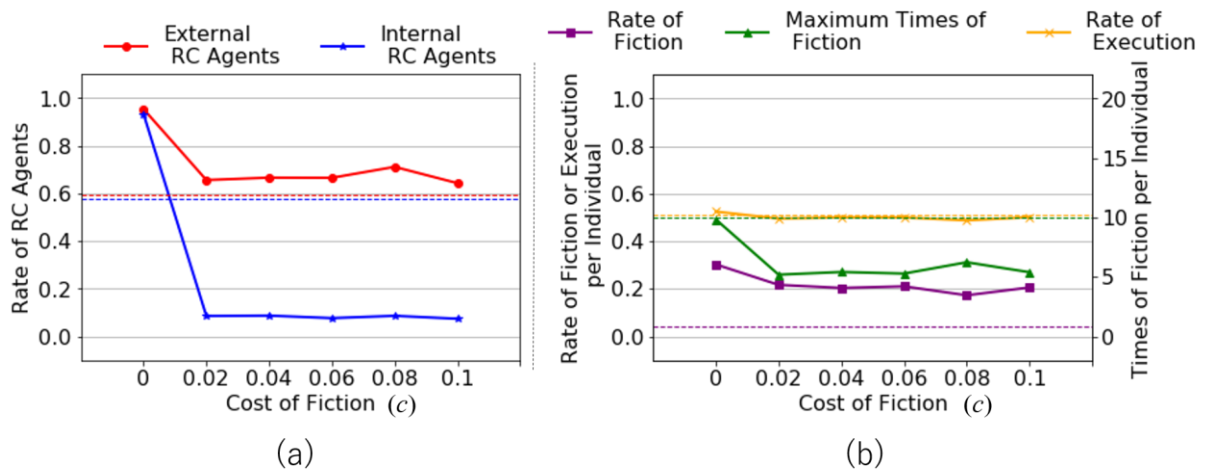


図 4.10 (a) 再帰的結合を使用するエージェントの割合と，
(b) 表象操作確率と使用回数上限に対する，表象操作コストの影響
(R_{II} , 200 試行の平均. 1,000 世代目)

4.3.4 新奇的な道具製作（集団）

製作物や行動に新奇性が求められるという条件が再帰的結合の進化にとって重要なのであれば，そのような状況はどのようにして生じるのかが次なる問題となる．実際，3章のシミュレーションでは有限資源の獲得競争を導入することで再帰的結合が進化する環境が構築された．ここでもそのような文化的ニッチの構築を考えてみる． R_{II} は，前世代で作られた製作物と同じものを作っても高い報酬が得られない条件である．図 4.11 に示すように，再帰的結合を使用するエージェントは予想に反して R_I よりも出現しなかった．それどころか，図 4.11(a)を見るとわかるように，再帰的結合を用いるエージェントは報酬の割引係数を増やすことで， R_{II} とは対照的に減少してしまう．

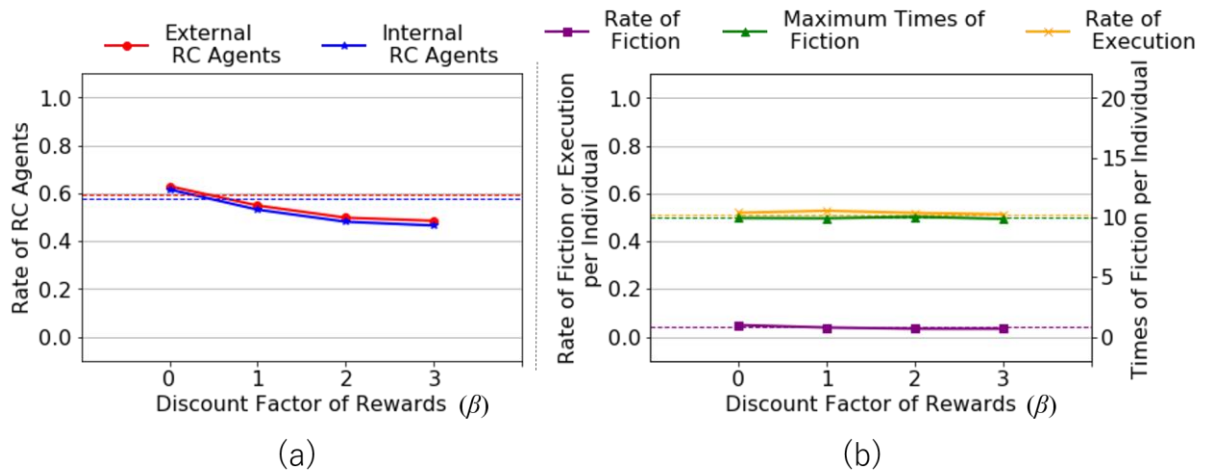


図 4.11 (a) 再帰的結合を使用するエージェントの割合と，
(b) 表象操作確率と使用回数上限に対する，報酬割引の影響
(R_{III} , 200 試行の平均, 1,000 世代目)

これは，前世代のエージェントの振る舞いが現在の適応度地形を形成しているだけで，個々のエージェントはその環境に対して，試行錯誤することなく学習による適応を行えばいいだけであるためだと考えられる．再帰的結合がより使われなくなるのは前世代の製作によって報酬の地形に勾配ができてしまうためで，その状態では強化学習のみで環境に適応したほうが高い報酬を得られる．この結果からは，報酬関数や適応度関数が世代間で変動する，あるいは変動の速度が遅い環境では，再帰的結合が進化しないことが示唆される．もし個々のエージェントに新奇な製作物の製作を促すとなれば，世代間ではなく世代内で競争を行わせる必要があるだろう．

4.4 行動表象操作の進化シミュレーションの考察

4.4.1 行動表象の操作における再帰的結合の適応性

4.3.3 節のシミュレーション結果から，学習においても行動や製作物の新奇性が要求される場合は，物体操作の再帰的結合，行動表象操作の再帰的結合がともに進化することがわかった．この結果から，再帰的結合の進化には報酬関数（ひいては適応度関数）の変動，特に，学習によって形成された行動知識の価値が低下するような変動

が重要であることが推測できる。また、どのようなパラメータ設定や環境においても、思考実験後の行動系列の実行確率はおよそ 0.5 の値に収束した。このことから、思考実験の最適な割合が環境に左右されにくいことと、二回に一回の確率で行動を実行することが最適であることがわかる。

新奇な製作物が必要とされることで、なぜ物体操作のみならず行動表象操作でも再帰的結合が出現するのだろうか。以下にプロセスを示す。

- (1) 物体操作のレベルで製作物の新奇性が要求されることで、3 章のシミュレーションと同じく物体操作の再帰的結合の進化が促進される。
- (2) 物体操作の再帰的結合が必要になると、エージェントが取るべき行動として、Push と Pop が増える。すなわち、探索すべき行動の組み合わせ空間が増大する。
- (3) 広がった空間内を効率的に探索する方法として、行動表象の再帰的結合が出現する。

ただし、広がった空間を一度探索した後は、行動表象の再帰的結合を使う必要はなくなる。有用な行動の組み合わせ⁶²さえ見つけてしまえば、物体操作側で新奇性が求められても、もはやその行動系列を適用すればよいだけである。表象操作にコストを加えた場合に再帰的結合を使用するエージェントが減少するのは、より効率的に行動系列を生成できる反復的結合を使うようになるためと考えられる。

4.4.2 行動表象の操作における再帰的結合の進化プロセス

シミュレーションでは、報酬関数からなる適応度関数の全てで、物体操作の再帰的結合が先に進化し、行動表象操作の再帰的結合は後に進化した。もちろん、このプロセスを直接、人類進化における再帰的結合の進化プロセスに当てはめることはできない。しかし、進化の各段階に必要なと考えられる環境条件や前提となる能力から、それらが構築・形成された順序を予想することはできる。

行動表象操作の再帰的結合は、当然ながら行動表象の操作能力が進化してこない限り進化することはない。しかし、注目すべきは物体操作の再帰的結合も行動表象の操作能力にある程度依存して進化しているという点である。これは、行動表象操作のコ

⁶² 3 つの行動からなる組み合わせであれば、「Get, Get, Get」や「Push, Get, Pop」などの行動系列が有用だろう。

ストを増加させた際の 4.3.3 のシミュレーション結果から明らかである。ここから物体操作の再帰的結合に先駆けて行動表象操作の反復的結合が進化する可能性が示唆される⁶³。

行動表象の操作に反復的結合が使われるようになったのはいつか、という問題は、ヒトの系統的発生、および祖先型と同様の形質をもちうる他の動物との比較によって検討できるだろう。ヒト以外の動物においては、例えば 4.1 節で紹介したように、鳴禽が歌要素とチャンクという異なるレベルでの学習を行っている。チャンクレベルの学習がチャンクレベルであると言える理由は、そこに歌要素となる発声運動の遷移規則とは異なる遷移規則が現れるからである。現在の運動状態とは独立した遷移が行われうるという点で、これは反復的結合による発声運動表象の操作だと言える⁶⁴。運動のレベルで考えれば、このような状態遷移規則の階層的学習は鳴禽以外の動物でも一般的であると考えられる。行動表象の操作、特に反復的結合は、ホモ属の発生よりも以前から存在している可能性がある。

再帰的結合は、(1) 動的な環境や (2) 探索空間が拡張可能な環境で適応的となるため、そうした環境が存在する、あるいは構築される段階が必要だろう。(1) の動的な環境としては、ある生物の活動によって環境中の正負の報酬分布が変更される場合が考えられる。ただし、その変化の速さや大きさは、生物が世代交代によって適応可能な速度を上回っている必要があるだろう。また、シミュレーション結果 4.3.3 からわかるように、行動表象操作における再帰的結合に関しては、行動表象操作のコストが高い場合も進化が起きにくい。これが現実的に意味するのは、自分の将来的な行動決定について、安定して思考実験が行え、それでいてその思考実験による報酬の獲得が可能な環境がなければ、再帰的結合が進化する余地はないということだろう。この条件は(1)と矛盾するため、(1)の環境で行動表象の操作における再帰的結合の進化が起きることは考えづらい。

(2)の探索空間が拡張可能な環境として真っ先に考えられるのは、道具製作とその使用である。道具製作は自由度の拡張が可能な行動として、本論文でこれまでも何度か取り上げてきた。3.4 節でも議論したように、道具製作によって生態環境を自分の

⁶³ 再帰的結合も先に進化するとは、この結果から言うことはできない。

⁶⁴ 感覚運動学習期に外部環境の現在状態（他のトリの有無など）とは関係なく鳴くという点でも、表象操作的である。これについては五章で議論する。

特性に合わせて作り変えることは、ヒトに他の動物の遺伝的進化を上回る環境への適応力をもたらしただろう。そうして構築された環境は、少なくともヒトにとっては安全なものになると考えられ、事実として現代のヒトは自然の脅威が抑えられ、安定して思考実験が行える環境で暮らしている。

以上から行動表象の操作における再帰的結合の進化は、初期人類をスタート地点として、少なくとも次のような条件をクリアしなければならないことがわかる。

- (1) 環境の構築や身体性の延長が可能な形質の獲得
- (2) 低コスト、低リスクで行動表象の操作ができる環境の構築
- (3) 新奇な製作物や行動が求められる環境の形成

環境構築や身体性の延長が可能な形質とは、端的に言えば手のような自由度の高いマニピュレータだろう。ヒトが道具製作を行えるようになったのも、手指の進化によるところが大きい。低コスト、低リスクな環境は、生得的な探索空間を拡張することが可能なこの形質によって構築されうる。興味深いことに、(2)と(3)の条件は循環が可能な構造をしている。すなわち、自由に思考実験できる安全で安定した環境を構築するには、様々な道具や知識を用いなければならず、そうした道具や知識を発想することに対しては思考実験が必要になる。

このようなニワトリとタマゴの関係がどのようにして再帰的結合能力の、ひいては言語能力の進化シナリオに組み込まれうるかという議論は、より広い文脈からの考察が必要になるため 5 章に譲る。

4.4.3 シミュレーションの今後の課題

本シミュレーションの今後の課題は主に二つある。

一つ目に、個体間相互作用のメカニズムを導入しなければならない。世代内で製作物や行動系列の新奇性が要求される環境が形成され、それが再帰的結合の進化に繋がることを確かめる必要がある。

二つ目に、今回は行動表象操作の制御に Q 学習を用いたが、一般に Q 学習は状態空間や探索空間の増加といった自由度の拡張を想定しない。表象操作の探索空間を広げるという再帰的結合の適応性をさらに発揮させるには、状態空間の追加や削除が可

能な学習メカニズムを採用することが望ましいだろう.

第 5 章 議論

3 章および 4 章のシミュレーションの結果と考察を受け，本章ではこれらの結果と考察が，現実におけるどのような現象と関連するか，またその関連性は進化言語学やそれに関係する諸分野にどういった知見，貢献をもたらすのか，本研究が当初の研究目的をどこまで達成できたかを主に議論する．本章の構成としては，まず 5.1 節でシミュレーションで観察された再帰的結合の特性や再帰的結合の進化における前提条件を振り返る．そののち 5.2 節で既存研究・関連研究における知見との整合性について論じ，5.3 節で本研究の当初の目的であった再帰的結合の進化シナリオについて，本研究であきらかになったことを材料に精緻化を行う．最後に，5.4 節で将来的な研究の方向性を考える．

5.1 シミュレーション結果と考察のまとめ

5.1.1 物体操作の進化シミュレーションの結果と考察

本論文の 3 章では，再帰的結合は，以下の二つの適応性を持ちうることがわかった．

- 既に獲得している製作手法の一部を再利用することにより，新たな製作物を発明しやすくする．
- 部分の組み合わせ方を多様化し，操作の失敗を補うルートを確保することで，確実な製作を可能にする．

本研究の新規性は，これらの適応性が要求される環境で，操作コストの障壁を乗り越えて再帰的結合が進化しうることを示したことだと言える．また，再帰的結合の進化を促進する要因として，

- 操作のコストを削減する．

- 失敗率の高い製作を行う.

という二つが有効となることがわかった. 生存するうえで製作物の新奇性, 多様性を要求する環境は, 資源獲得競争によって生じた可能性が考えられる.

3.4.2 節では, 物体操作における身体的な適応形質を操作コストに影響する要素として捉え, 人類史において物体操作コストが徐々に低下してきていることを確認した. そして, 器用な手の進化とともに作製可能な石器の構造が徐々に精密かつ多様になってきているということを示した (図 3.21). こうした変化は, 初期人類が暮らしていたアフリカの大規模な環境変化を起点として引き起こされており, 人類の石器使用・製作の開始と紐付いている. 組立型の道具を製作することが可能になると, 物体同士を組み合わせる上で失敗率が高まるため, 製作全体をモジュールに分けてクリアしていく戦略である再帰的結合が用いられやすくなる.

3.4.3 節では, 道具製作などの文化とヒトの遺伝的形質の共進化について論じた. ヒトの顎や歯や各種消化器官が他の類人猿と比較して貧弱である理由は, 石器や火を使った調理という文化的環境に適応したためであり (Wrangham, 2009), ここからヒトが道具を使うことで生態環境に適応していたことが伺える. 脳というエネルギー消費の大きな器官を発達, 維持できたのは, 調理によって消化に必要なエネルギーを節約できたことが一因と考えられる.

5.1.2 再帰的結合の抽象的な進化シナリオ

本論文の 4 章では, 行動表象操作の再帰的結合が物体操作の強化学習に加えて出現する条件を探った., 表象主義や心理主義が存在を主張する, 主体の学習した表象を操作するメタ的な主体は, これまでその生態学的・進化的な意味がわかっていなかった. 本研究の結果からは, 目の前の状態を離れて表象の操作を行うメタ的な主体が存在することが, 動的な報酬関数に対して妥当な方策を取ったり, 探索空間を拡張して新たな報酬を得たりすることに対して適応性を持つ可能性が示唆される. 3 章のシミュレーション結果と合わせて, 再帰的結合の進化には, 探索空間の拡張可能性が重要であることも確認された.

シミュレーション結果からは, 以下の進化プロセスを特定することができた.

- (1) 何らかの原因によって成果物の新奇性が求められる

- (2) 物体操作のレベルで再帰的結合が適応的となる
- (3) 再帰的結合を行うにあたり，操作の種類が増加する
- (4) 操作の種類が増えたことで行動の組合せ空間が拡張される
- (5) 行動表象操作のレベルで，行動の組合せ空間の探索に再帰的結合を使用することが適応的となる
- (6) 行動表象操作の再帰的結合が進化する

4.4.2 節では，行動表象の反復的結合がヒト以外の動物にも観察されることを論じた．2 章で述べたように，ヒトの近縁であるチンパンジーはもちろんニューカレドニアカラスでも，道具を使って餌を取ることに失敗したのち，試行錯誤で道具を調整して餌の獲得に成功するといった行動が見られる (Weir et al., 2002)．ここから，行動表象の操作自体は，ヒト以外の動物も多くが共通して持っているメカニズムだと予想され，行動表象操作のレベルで反復的結合が可能である状態を進化シナリオの起点として仮定することができるだろう．ただし，実際にヒト以外の動物が行動表象操作の反復的結合を行えるか，あるいは再帰的結合も実行できる可能性などは，今後検証されなければならない．また，初期人類において行動表象操作の再帰的結合が実際にどの段階で生じたかも，検証対象である．これらは 5.4 節でその方法を論じる．

5.2 シミュレーション結果と関連研究の整合性

5.2.1 ヒト以外の生物に再帰的結合が観察されにくい理由

動物の道具使用や道具製作から，再帰的結合による探索空間や自由度の拡張という現象がヒトにおいてどう特異的であるのかを考えたい．ヒト以外の動物でも道具を使うことで探索空間を拡張していると見られる行動は多く存在するが，彼らはなぜヒトのような大規模な文化的ニッチ構築を行わないのだろうか．また，ヒトのように再帰的結合を可能とする脳の変化が起きていないのはなぜなのだろうか．

2 章で述べたように，道具使用を行う動物は多く存在する (Shumaker, 2011)．例えば，木の枝を駆使して指やクチバシの届かない空間にある餌を取るといった行動は，その生物が身体的に有する探索空間の外側を探索しているという点で，探索空間の拡

張と言えるだろう。物体を未加工のまま道具として使用する場合、探索空間はその物体の性質によって可能となる行動のぶんだけ広がる。さらに、道具使用に加えて道具製作を行う動物としては、チンパンジー (Brewer, 1976; Goodall, 1963, 1986; Sanz et al., 2009) やニューカレドニアカラス (Weir et al., 2002; Weir & Kacelnik, 2006) がいる。ボノボのカンジは石を使った石器製作、すなわち二次的道具の使用を訓練によりできるようになった (Savage-Rumbaugh et al., 2007)。道具を加工する行動が生まれ、その形状を変更することができるようになれば、探索空間はその物体が取りうる形状のぶん、さらに広がる。

4章のシミュレーション結果からは、探索空間の拡張が大きいほど行動表象の再帰的結合能力は進化しやすくなると言える。ヒト以外の動物で大規模な文化的ニッチ構築や再帰的結合を可能とする脳機能の変化が起きていないのは、製作可能な道具の種類がブレイクスルーに必要なレベルに達していないためだという仮説が立てられる。石器は、多くの他の素材を加工することに適した性質をもつ。そして道具を作る知識という一段上位のレベルに上がれば、ある行動が特定の道具製作以外の場面でも使えるようになるだろう。ヒトの進化史においては、物体加工に対する石器の万能性が、道具製作の知識を増大させ、行動表象の再帰的結合を適応的にしたという見方を取ることができる。

5.2.2 再帰的結合と探索空間の拡張の一般性

Arthur & Polak (2006) が示しているように、ヒトが作り出す製作物は、別の製作物を作り出す際の道具や部品になる。ゆえに、本来生態環境や身体のような所与のものとして個体の一生のなかで安定しているはずの探索空間は、ヒトにおいて拡張可能な構造を有する不安定なものとなる。再帰的結合とは、このような状況において、学習による行動知識の獲得前でもある程度妥当な行動方策を立てることができる、構成的アプローチの一種なのだと考えられる。再帰的結合のようなヒューリスティクスは、どこまで広く当てはめられるのだろうか。言い換えると、再帰的結合は道具製作以外のどのような行動で進化しうるだろうか。表象操作に階層構造を用いることで、学習を早める、妥当な仮説形成を行うといったことができる点に関しては、Martins(2012)でも主張されている。階層構造は行動以外にも音楽 (Koechlin & Jubault, 2006; Asano & Boeckx, 2015)、算術 (Nakai & Sakai, 2014; Nakai & Okanoya, 2014)、

意図推論 (Oesch & Dunbar, 2017), 視覚認知 (Martins, 2012) において見られるが, これらの認知ドメインで 5.1.2 節で論じたような探索空間の再帰的な拡張, そして再帰的結合操作はありうるだろうか.

まず, 数学的な計算はもっとも再帰的な拡張を考えやすいと言える. ある算法は別の問題を解く際の部分となりえ, またその問題を解くことによって新たな算法が獲得されることもありえる. 一つの算法を獲得するだけで, その用法は際限なく広がるだろう. ただし, そうした計算を行うことの生態学的価値は不明であり, またヒト以外の動物で数え上げが可能な種は見つかっていない (Hauser et al. 2002). このことから計算は, 現実事象や対象を抽象化した形式を操作する手続きとして, 表象操作の再帰的結合が転用され進化したものだという推定がいまのところ妥当である.

音楽は, 既存のフレーズやリズム, 奏法を組み合わせる新たなそれらを作り出すという点で, 組合せ空間の拡張が可能になっている. ただし, 音楽は言語や計算のように系列の抽象化が困難である⁶⁵ため, 組合せ空間の大きさが言語や計算のそれよりも限定される. メスを惹きつけるために鳴き声を使用する動物が存在するという事実 (Okanoya, 2004; Mithen, 2005) からのアナロジーにより, 音楽にも性選択による再帰的結合の進化を想定することもできるが, 鳴禽の性選択におけるシグナルは個々のチャンクが特定の意味内容をもつものになっておらず (Berwick et al., 2011), また個体に多様な鳴き声を発することが求められるわけでもない. 音楽における再帰的結合も計算と同様に, 表象操作の再帰的結合が転用されたものだと考えておくことが妥当に思える.

生態学的な価値を考えるのであれば, 意図推論は再帰的結合の進化シナリオを立てやすい. 協力関係を築く, あるいは政治的状況で優位に立つ上で, 他者の意図を推論することは適応的になりうる. そして意図推論とは, "x thinks y"のような主述関係を生成する表象操作だと想定することができる⁶⁶. こうした関係は再帰的結合を適用することが可能であり, "x thinks y meets z that ..."のように推論の系列を生成する上で, 主部と述部の再帰的結合が有効性を持ちうると考えられる. 意図の再帰的結合

⁶⁵ すなわち, ある長さの系列が表現する内容を, それよりも短い系列や構成要素に置換して表現することが難しい.

⁶⁶ ただしここでの"think"は言語表現としての語彙ではなくエージェント x とエージェントもしくはオブジェクト y の関係性を規定する要素である.

によって他者の意図空間を探索できれば、全く見知らぬ他人に対しても抽象的な結合規則をもとに妥当な意図推論を行うことができるだろう。また、集団が大きくなるほど、推論系列を構成する要素の種類は増加し、集団を構成するエージェントの短期記憶能力が高くなるほど推論系列の長さは長くなる。このような意図推論の空間は、3章の物体操作シミュレーションにおける物体の組合せ空間と同等の構造をもつと言える。すなわち、集団の規模と構成員の認知能力が意図推論の探索空間を決定し、意図推論における再帰的結合能力の進化を左右する。1章で紹介した Dunbar (2009) が唱える再帰性の社会的認知起源説は、集団の大規模化が再帰的な意図推論が統語における再帰性を進化させたという主張である。霊長類が維持できる社会集団の規模は、大脳新皮質の容量と相関関係をもつとされる (Dunbar, 1998)。

再帰的結合は、物体操作と意図推論、どちらのドメインを起源として（あるいは独立して）進化したのだろうか。意図推論においては、他個体が意図する以上の推論を行うことは誤解につながるため、他個体の短期記憶よりも大きな短期記憶をもつことに適応的な価値はないことが予想される。加えて、協力のような利他行動、あるいは他者操作のような行動は、損失以上の報酬が獲得されるまでの比較的長いプロセスを推論、あるいは戦略を生成できる必要がある。チンパンジーで他者の信念理解が観察されにくい (Tomasello & Call, 2003) のは、この二つの相反する条件によって高次の意図推論が成立しにくいことによるものではないかと考えられる。意図推論が自身と他者両方の短期記憶能力を必要とすることに対して、道具製作においては、短期記憶能力は構成要素や手続きの多い複雑な道具の製作に対して有効に働く。すなわち、物体の組合せ空間に散らばる機能的な道具の探索や製作に対して、再帰的結合が連続的に進化することが可能である。現在のところ、物体操作における再帰的結合が意図推論に先んじて進化し、短期記憶能力が増大したことによって高次の意図推論とそのための推論要素の再帰的結合が進化したという進化プロセスが考えられる。

5.3 再帰的結合の進化シナリオ

本研究の目的は、言語の階層構造を生成する再帰的結合能力の適応的機能と進化プロセスを明らかにすることであった。ここまでの議論をもとに、語彙項目の再帰的結

合，すなわち再帰的 Merge がどのようにして進化してきたかについて，以下のような連続的な進化シナリオを提案する．

- (1) およそ 700 万年前，ヒトと類人猿の祖先の共通基盤として，行動表象操作のレベルで反復的結合が可能だった（仮説）
- (2) およそ 300 万年前，地球規模の寒冷化によりアフリカのサバンナ化が始まる（deMenocal, 2004; Bobe & Behrensmeyer, 2004; deMenocal, 2011）
- (3) 森にいられなくなった一部のホモ属において，効率的なスカベンジングや根茎類の掘削を行うための技術として石器使用行動が発生（Bunn, 1981; Shipman & Rose, 1983; Wrangham, 2009; McPherron et al., 2010）
- (4) 道具使用行動に適応する形で手指が進化（Skinner et al., 2015）
- (5) およそ 260 万年前，オルドワン型石器の製作が開始（Plummer, 2004）．顎や歯や消化器官の小ささといったヒトの身体的特徴から，人類が道具を介して環境に適応してきたことは確実と言える（Wrangham, 2009）
- (6) 加工型の道具製作を続けるなかで，手指がさらに進化して物体操作のコストが低下（Ward et al., 2013）（3 章のシミュレーション結果から推測）
- (7) およそ 30 万年前に物体操作の再帰的結合が出現（Moore, 2010）し，組立型の道具製作が可能になる（Callaway, 2017; Stringer & Galway-Witham, 2017）
- (8) 道具の製作と使用による文化的ニッチ構築によって，安全な環境で生活できるようになり，試行錯誤のコストが低下（仮説）
- (9) 行動の種類や行動系列の長さが徐々に増大し，行動表象の組合せ空間の探索・学習を効率化する上で行動表象の再帰的結合が進化（3 章および 4 章のシミュレーション結果から推測）．
- (10) 行動系列に階層構造が生まれたことで，他者の意図推論を行う必要性⁶⁷が生じる（仮説）．このときの推論系列の長さは行動系列の長さに依存して増加（5.1.3 の考察より）
- (11) 文化的ニッチ構築によって集団の規模が増大すると，意図の種類が増える．
（10）とともに意図表象の組合せ空間が増大（5.1.3 の考察より）

⁶⁷ 例えば他者と協力する場合，他者がどのような目的に対して現在の行動を行っているのか，自分に対して送ってくるシグナルの全体的意味はなんなのかを推論しなければならなくなる．

- (12) 増大した意図表象の組合せ空間の探索・学習を効率化する上で、意図表象の再帰的結合が進化（3章のシミュレーション結果を適用）
- (13) 意図推論における階層構造は、主述関係を基本とした構造を取る（Dunbar, 2009）ため、主述関係に付随する様々な素性を持った語彙が生じ、語彙の組合せ空間が増大（仮説）
- (14) 語彙の組合せ空間の探索・学習を効率化する上で、統語の再帰的結合が進化（3章のシミュレーション結果を適用）

(1)は検証しなければならない前提であり、(6)以降の各シナリオにもそれぞれ実証的な証拠が必要となる。ここで提案した再帰的結合の進化シナリオはむしろ暫定的なものであり、シナリオをより妥当なものにするためには検証しなければならない点や不足な部分が多くある。次節 5.4 では、この進化シナリオ、および本論文で用いたモデルについて、検証あるいは反証されるべき箇所を説明し、新たな証拠を得るための実験や分析を提案する。

5.4 再帰的結合能力の進化シナリオ改善に向けた今後の課題

5.4.1 再帰的結合能力の脳機能モデルの改善

4.4 節で議論したように、現行のモデルは行動表象操作の学習に Q 学習を用いており、行動の状態価値空間を拡張していくことができない。状態価値空間を学習すると動的に広げていくことが可能なモデルを作る必要がある。その際は、統語における語彙表象の操作も視野に入れなければならない。状態価値空間を拡張可能なモデルは、あらかじめ出力される結果が決まっていない教師なし学習を導入することによって作製することができる。教師なし学習にはニューラルネットワークを使って実装できるモデルとして、自己組織化写像（SOM）（Kohonen, 1990）を用いる。SOM は、ある入力ベクトルに対する写像系を構成しクラスタリングを行うモデルである。モデルでは $n \times m$ 個のノードが定義され、それぞれに一つの重みベクトルをもち、重みベクトルの成分は入力と同じ次元をもつ。基本的な学習プロセスとして、入力ベクトルに

対して SOM の各重みベクトルの類似度⁶⁸を計算し、最も距離が小さいノードの重みベクトルを変更して入力ベクトルに近づけるということを行う。様々なベクトルを繰り返し入力することで、類似する性質の重みベクトルを有するノードがクラスタを形成し、入力される情報を分類することができるようになる。このモデルを使えば、状態価値空間の拡張を、新しいクラスタ（＝状態価値の写像）の形成によって実現することができるだろう。

Boeckx (2017) は、言語の再帰性は前頭頭頂部と前頭側頭部の神経ネットワークの組み合わせによって実現されると主張している。いずれのネットワークも有限の状態しか持ちえないが、二つの有限状態機械を組み合わせることで、計算可能性を高める効果がある。一方のネットワークが学習する一次元系列の操作に加えて、もう一方のネットワークがその一次元系列を一つのレベルとする階層構造の操作を担うことができるためである。前頭頭頂部の神経ネットワークは、Baars (1988) によって提案されている“グローバルワークスペース”の役割を果たしうる (Dehaene et al., 1998)。グローバルワークスペースは他の認知ドメインのモジュラーネットワークの上位に位置し、系列生成の際のチャンキング装置として機能する。すなわち、このチャンキング装置を統語や音楽や計算や意図推論といったドメインの系列生成装置と統合することによって、それぞれのドメインにおける階層構造の生成を制御することができる。チャンキング装置は 4 章のオートマトンモデルにおける行動表象操作の状態遷移に、系列生成装置は物体操作の状態遷移に対応する。2 章では、再帰的結合の認知一般モデルを物体操作のドメインのみにダウンサイジングすることで 4 章のオートマトンモデルを作製したが、将来的には認知一般における再帰的結合の進化メカニズムを考えるため、複数のドメインの系列生成装置に対して表象操作が可能となりうるモデルの設計を行う。

この認知一般の再帰的結合モデルを用いることで、物体操作からどのようにして再帰的結合が他のドメインに転移し、最終的に統語における再帰的結合が進化したかを確認するシミュレーションを構成することができる。基本的な手続きは 4 章のシミュレーションと同等だが、エージェントは報酬の与えられ方が異なる複数の認知ドメインの系列生成装置を有するものになるだろう。各ドメインにおける再帰的結合の進化

⁶⁸ 多くの場合、ユークリッド距離が使われる。

メカニズムと、ドメイン間の相互作用を観察することで、5.3 節の進化シナリオをより精緻なものにする。

5.4.2 再帰的結合モデルの階層構造分析能力に関する解析

5.4.1 節で論じた再帰的結合モデルの妥当性を確かめるために、階層構造をもちうる各ドメイン（物体操作、音楽、算術、意図推論、統語）の表現に対して各表象の再帰的結合が可能なモデルと不可能なモデル、あるいは系列分析が可能な他のモデル⁶⁹とを比較する。具体的には、大規模コーパスや既存の実験データを用いてモデルに各ドメインの系列を学習させたのち、テストデータを分析させる、あるいは新しく系列を生成させることで各モデルの分類性能や予測精度を算出する。予想として、再帰的結合が可能なモデルは不可能なモデルよりもヒトの生成する各種系列の分類・予測精度が高くなるだろう。他の既存の認知モデルよりも精度が高ければ、ヒトの脳機能を模している本モデルの妥当性が示唆されることになる。

5.4.3 動物における再帰的結合能力の有無に関する行動学的分析

5.3 節の暫定的な進化シナリオは、動物における行動表象操作能力を仮定していた。実際に動物が行動決定の際に表象操作的な情報処理を行っているか、それは反復的結合のみか、再帰的結合も可能なのかということは調べられなければならない。チンパンジーとヒトの物体操作の分析はこれまでも行われてきた（Greenfield et al., 1972; Matsuzawa, 1986; Hayashi, 2007）。Greenfield ら（1972）が提案している行動の文法の枠組みを使えば、物体の組み合わせのレベルにおいては、ある製作物が反復的結合か再帰的結合かを判断することが可能である。しかし、行動表象操作は頭の中の出来事なので、ある行動系列が反復的結合と再帰的結合のどちらによって生成されたものなのか、あるいは連合された行動を再生しているだけなのかを行動だけを見て判断することは難しい。

本研究のシミュレーション結果から、多様な系列を学習することに対して再帰的結合を使用可能なモデルが有効性を発揮することがわかっている。ここから、チンパン

⁶⁹ 例えば Long Short-Term Memory (LSTM) や隠れマルコフモデル (HMM) など。

ジーやヒトの物体操作に関するデータを入力として学習を行わせた際に、その系列群の学習効率や学習後の予測精度に対して最適なモデルは変化することが予測される。チンパンジーの物体操作データを生成するにはどのようなモデルが最も効率がいいのかを確かめることで、チンパンジーの行動にとって必要十分な系列生成装置を特定することができるだろう⁷⁰。一つの重要な点は、ある物体操作に最適化された行動系列を分析するのではなく、ある物体操作を学習する際の効率に焦点を当てた分析を行わなければならない点である。4章のシミュレーション結果を鑑みると、少なくとも行動表象操作における再帰的結合は学習中、あるいは組み合わせの探索中にしか使用されない可能性がある。

5.4.4 人類進化における再帰的結合能力の出現に関する考古学的分析

初期人類の歴史において、どのように再帰的結合能力が進化してきたのかも具体的な分析や考察が必要である。暫定的な進化シナリオでは、約 30 万年前に物体の再帰的結合が生じ、行動表象の再帰的結合も同時期に起こったと仮定したが、これらはあくまで専門家の推測を援用したに過ぎない。石器製作が開始された約 260 万年前から、石器の構造や作製方法は徐々に多くのプロセスを必要とするものへと複雑化してきており、その操作系列データを 5.4.3 の方法で解析すれば、どのクラスの系列生成装置がどの段階で備わっていたかがわかる可能性がある。問題は当時の石器製作技法に関する情報が少ないことだが、石器の形状や出土品、現代でも石器を作り続けている民族の調査などによって、それらの一部は復元・分析されている (Moore, 2010, 2011; Arbib, 2011; Stout, 2011)。これらのデータを用いることで、物体操作や行動表象操作における再帰的結合の必要性が高まった時代を割り出し、シナリオの精緻化を行う。

⁷⁰ ただし、実験室内におけるカップの組み合わせ課題は生態学的妥当性が低いかもしれない。その場合は、非実験状況における身体運動データをモーションキャプチャーで取得し、これを入力とする行動のクラスタリングも含めた分析が必要になる。

第6章 結論

本研究は、ヒトに特異な言語能力として、文の階層構造を生成する能力である再帰的結合がどのようにして進化してきたか、という問題に対し、計算機シミュレーションを用いた構成的アプローチによって接近した。再帰的結合は反復的結合と再帰的結合の二つに分けられ、本研究ではより進化的な機能を考えにくい後者の適応性と進化プロセスを明らかにすることとした。研究を進めていく上で、言語能力における再帰的結合が物体の操作における再帰的結合を前駆体として進化してきたという仮説(藤田, 2012; Fujita, 2016) と、同一の規則によって異なる認知ドメインの階層的依存関係を表象することで学習を促進することができるという主張 (Martins, 2012) を組み合わせ、再帰的結合が具体物の操作から抽象的な操作へと段階的に進化してきたとする仮説を立てた。そして、物体の結合操作において再帰的結合がどのような適応性を持ちうるか、また物体の結合よりも先に存在したであろう行動表象の結合操作において再帰的結合がどのような有効性を発揮するかを GA と Q 学習を用いた進化シミュレーションによって調べた。

本研究の結果として、再帰的結合は (1) 動的な環境、あるいは (2) 探索空間が拡張可能な環境に対して、製作物の多様化と、製作手法の多様化による道具製作の安定化という二つの有効性をもって現れることがわかった。「製作物の多様化」は、新たな製作物を作る際に、既存の製作物の製作手法の一部ないし全部を流用することを可能にすることで発明を促し、「製作手法の多様化」は、一つの製作物を複数の製作手法によって作れるようになることで、製作の失敗に対するロバスト性を高める。再帰的結合は組合せ空間の探索において、進化のアルゴリズムを用いる場合でも、学習のアルゴリズムを用いる場合でも、(1)か(2)の環境条件を最低限満たすことで有効性を発揮

しうる⁷¹.

本研究が明らかにしたことは、再帰的結合という計算が、特定の最適解を得るための手続きの探索・強化を行うメカニズムではなく、自由度を拡張することで最適解を動的に変化させることが可能な系において、新たな解を発見する有効性をもつメカニズムだということである。ヒトにおいては道具製作のような、行動の探索空間を拡張することができる行動形質を進化させたことが、高いコストを必要とする再帰的結合能力が生じた原因であると言える。

ヒトはその進化において、道具製作にはじまる物質文化や科学知識などの精神文化を再帰的に構築することによって、生態系をヒトの適応度を増やす形へと作りかえてきた。このような文化の構築は、安全な生息域と安定した食糧を提供することで、現実から乖離してより多様な物事を思考することを可能にしよう。そしてそのような思考は階層構造に依存した行動系列生成を可能とし、他者の意図を推論する能力を必要とする状況を生じさせたと考えられる。他者の意図を推論するという認知プロセスにおいても、再帰的結合は他者の意図の組合せ空間を効率的に探索する手段として有効になりうる。統語における再帰的結合は、意図推論に対して妥当な仮説を形成することができる能力として進化したという仮説を立てることができる。

⁷¹ 操作にコストを設ける場合はこの限りではない。

謝 辞

本論文は、指導教官である橋本敬教授を筆頭に、研究はもちろん日常の些細なことまで数多の議論にお付き合いくださった研究室および留学先の皆様、本学教職員の方々、学会や論文の査読で貴重なご意見・ご指摘をくださった研究者の方々のお力添えのもと、書き上げることができました。この場を借りて御礼申し上げます。

橋本敬教授には、博士前期課程から合わせて六年もの長期に渡りご指導を賜りました。もともと電気電子工学のことしか知らなかった私が、言語進化という未開拓の魅力的な問題に挑む力を得られたこと、また技術者や工学者ではなく研究者としての知識や技術を身に付けられたことは、ひとえに橋本教授のお力添えによるものです。心より感謝致します。

講師の小林重人さんと元特任助教の金野武司さん、元研究員の真隅暁さんには、研究面でも生活面でも幾度となく相談にのっていただき、ゼミやミーティングの場以外でも多くの助力を請わせていただきました。私の研究者としての情操および規範は、皆様との雑談によって形成されたと言っても過言ではありません。ありがとうございました。

多くの時間を共にした橋本研究室の皆様には、研究に関するアイデアや批判をいただくだけでなく、日常的な事柄についても多くのことを学ばせていただきました。いまでも毎日のように熱い議論に付き合ってくれる赤池敬さん、藤原正幸さん、甲斐靖章さんに感謝いたします。山田広明さん、鳥居拓馬さん、辻野正訓さん、中塚雅也さん、李冠宏さん、田村香織さん、李曉燕さん、下川剛生さん、馬思維さん、楊洋さん、楊碩さん、石上将也さん、王天嬌さん、笠島春行さん、前田聡さん、樽田泰宜さん、Nguyen Thuy Dung さん、岡村亮さん、大西翔太さん、高明君さん、捧文人さん、Milayi Ahemaiti さん、練原昕さん、趙巧さん、張玥さん、成太俊さん、葉竜妹さん、宮城友香さん、植村悠汰さん、野村洋介さん、濱田昇吾さん、覃澍斌さん、短期留学生の劉

非凡さんと劉碩さん、橋本研 OB の佐藤尚さんには、私の思いつきや突拍子もない話を聞いていただき、かつ真剣に議論を交わしていただきました。おかげである程度自分を客観視する能力も身に付き、研究室に入ったばかりのときよりもぶっ飛んだ発言が少なくなりました、たぶん。六年間積み重ねた皆様との議論や日常会話は、私の前頭葉全てに確実に影響を与えています。深く感謝いたします。

橋本研以外の研究室の方にも大変お世話になりました。日高昇平准教授には、ゼミや雑談の場で私の理解が足りていない部分を何度もご指摘いただき、なぜ理解できないのかという深みまで遡って議論していただきましたこと、感謝いたします。周知の通り物事の理解を軽んじる私ではありますが、少なくとも日高准教授の言葉は理解できるよう努力して参ります。日高研究室の鳥居拓馬さん、布山美慕さん、加藤龍彦さん、小林瞭さん、河井翔太郎さん、小山俊太さん、櫻井豊さん、宮本真希さんには、たまに顔を出すゼミに加えていただき、様々な興味に触れることができました。ありがとうございます。

ケルン大学システム音楽学研究科の浅野莉絵さん、Uwe Seifert 教授には、博士後期課程の副テーマ研究および研究留学でお世話になりました。Seifert 教授には体調が悪いなか何度も議論していただきました。ありがとうございました。浅野さんには、真剣な議論だけでなく、本研究の第四章のシミュレーションを行う上で鍵となるアイデアをいくつもいただき、またヒト脳の認知制御に関する知識も伝授していただきました。感謝いたします。共同研究者として、今後ともよろしくお願いいたします。

留学中にビザの申請やアパートの契約、銀行口座の開設といった場面で様々な補助をしていただいた Benedikt Ulrich さんに心から感謝いたします。僕が留学中に平穏な生活を送れたのは、一つには Benedikt さんのおかげです。また Benedikt さんはもちろん、浅野さんと大澤歩美さんのご忠言、ご助力がなければ僕のドイツ留学はシェンゲンビザの期限をもって終わっていたと考えられます。ピンチのときにいつも助けていただき、ありがとうございました。恩返しできないばかりか何度もピンチに陥り、ご迷惑をおかけしました。大澤さんをはじめとする留学先研究室のメンバー、Timo Varelmann さん、Marvin Heimerich さん、Way Sun さんは、ケルンの街を巡って歴史を教えてくれたり、ランチに誘ってくれたり、カーニバルやパーティーに誘ってくれたり大変仲良くしてくださいました。感謝いたします。

池田研究室の尹明睿さん、Fjolla Kaçaniku さん、尹さんのお友達のマテリアルサ

イエンス系の学生の皆様には、プライベートで仲良くしていただき、荒んだ研究生活に潤いと爽風を与えていただきました。ありがとうございました。

一緒に学生の相談にのるなかで仲良くしていただきました、保健センターの佐々木恵准教授をはじめ、なんでも相談員の皆様に感謝いたします。人の相談を受けることに難しさを感じる場面もありましたが、そうした経験を糧にして、以前よりも人の気持ちがわかるようになれました。

授業や TA、また雑談の場面で議論していただいた田中孝治元講師、佐々木康朗講師、井手勇介助教に感謝いたします。先生方の物腰柔らかな雰囲気をお手本として、教育者としても成長していこうと思います。

そして、本論文の最終審査および予備審査におきましては、東京大学総合文化研究科の岡ノ谷一夫教授、北陸先端科学技術大学院大学知識科学系の池田満教授、日高昇平准教授、Dam Hieu Chi 准教授に審査していただき、多くの貴重なご指摘をいただきました。先生方のご助言とご批判により、ここに博士論文を完成させられましたこと、誠に感謝いたします。

本研究は、新学術領域『共創的コミュニケーションのための言語進化学』の支援を受けています。のみならず、領域会議や関連学会で多くの研究者の方々の鋭いご指摘や疑問、アイデアを授かり議論に付き合っていたいただいたおかげで、博士論文として総括することができました。お世話になった全ての方の名前を挙げて深謝したいところですが、謝辞が本文のページ数を超えてしまいそうなので、恐れながらまとめた感謝とさせていただきます。ありがとうございました。

最後に、深慮なく自由奔放でいつまでも安定しない私を精神的にも経済的にも全力で応援してくださり、なによりここまで育ててくださった両親に心の底から感謝いたします。こうして振り返ると、私という存在と私の研究がいまあるのは、両親と祖父母、弟と妹、親戚の方々、大学や高専や中学校、小学校、保育園でお世話になった多くの方々のおかげにほかならないことを改めて実感します。皆様から受け取ったものを次へと繋ぐことが私にできる最大限の恩返しと念頭に置きつつ、これからも全力で自由奔放に生きていくつもりですので、引き続き温かい目で見守ってくださいますよう、よろしくお願いいたします。

参 考 文 献

- Andalman, A. S., & Fee, M. S. (2009). A basal ganglia-forebrain circuit in the songbird biases motor output to avoid vocal errors. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 12518–12523.
- Arbib, M. (2011). From mirror neurons to complex imitation in the evolution of language and tool use. *Annu. Rev. Anthropol.* 40, 257–273.
- Arthur, B., & Polak, W. (2006). The evolution of technology within a simple computer model. *Complexity* 11, 23–31.
- Arthur, B. (2009). *The Nature of Technology: What it Is and How it Evolves*. New York: Simon & Schuster.
- Asano, R., & Boeckx, C. (2015). Syntax in language and music: What is the right level of comparison? *Front. Psychol.* 6, 1–16.
- Baars, J. (1988). *A Cognitive Theory of Consciousness*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Baggio, G., Choma, T., van Lambalgen, M., & Hagoort, P. (2009). Coercion and compositionality. *Journal of Cognitive Neuroscience* 22, 2131–2140.
- Bahlmann, J., Schubotz, R. I., & Friederici, A. D. (2008). Hierarchical artificial grammar processing engages Broca's area. *NeuroImage* 42, 525–534.
- Berwick, R. C., Okanoya, K., Beckers, G. & Bolhuis, J. J., (2011), Song to Syntax: The Linguistics of Birdsong. *Trends in Cognitive Sciences* 15, 113–121.
- Bobe, R., & Behrensmeyer, K. (2004). The expansion of grassland ecosystems in Africa in relation to mammalian evolution and the origin of the genus *Homo*. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 207, 399–420.
- Brown, R. (1973). *A first language: The early stages*. London: George Allen &

Unwin.

- Brewer, S. M. (1976). Chimpanzee rehabilitation. *International Primate Protection League Special Report* December, 1–10.
- Boeckx, C. (2010). *Language in Cognition: Uncovering Mental Structures and the Rules Behind Them*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell. 水光雅則 (訳) (2012) 『言語から認知を探る』, 岩波書店.
- Boeckx, C. (2013). Merge: Biolinguistic considerations. *English Linguistics* 30, 463–484.
- Boeckx, C. (2017). A conjecture about the neural basis of recursion in light of descent with modification. *J. of Neurolinguistics* 43, 193–198.
- Bunn, T. (1981). Archaeological evidence for meat-eating by Plio-Pleistocene hominids from Koobi Fora and Oldvai Gorge. *Nature* 291, 574–577.
- Callaway, E. (7 June 2017). "Oldest Homo sapiens fossil claim rewrites our species' history". *Nature*. Retrieved 11 November 2018.
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. The Hague: Mouton & Co.
- Chomsky, N. (1973). Conditions on Transformations, in Anderson & Kiparsky, A. *Festschrift for Morris Halle*. (eds), New York: Holt, Rinehart & Winston, 232–286.
- Chomsky, N. (1993). A minimalist program for linguistic theory, in Hale, K. & Keyser, S. (eds), *The view from building 20: Essays in linguistics in honor of Sylvain Bromberger*. Cambridge: MIT Press, 1–52.
- Chomsky, N. (1995). Bare Phrase Structure, in Héctor Campos. & Paula Kempchinsky. (eds), *Evolution and Revolution in Linguistic Theory*. Washington DC: Georgetown University Press, 1–15.
- Conway, C. M., & Christiansen, M. H. (2001). Sequential learning in non-human primates. *Trends Cogn. Sci.* 5, 539–546.
- Dehaene, S., Kerszberg, M., & Changeux, J. P. (1998). A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95. 14529–14534.
- Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Hertz-Pannier, L. (2002). Functional

- Neuroimaging of Speech Perception in Infants. *Science* 298, 2013–2015.
- Dehaene-Lambertz, G., Hertz-Pannier, L., Dubois, J., Mériaux, S., Roche, A., Sigman, M., & Dehaene, S. (2002). Functional Neuroimaging of Speech Perception in Infants. *Science* 298, 2013–2015.
- deMenocal, P. B. (2004). African climate change and faunal evolution during the Plio-Pleistocene. *Earth and Planetary Science Letters* 220, 3–24.
- deMenocal, P. B. (2011). Climate and human evolution. *Science* 331, 540–542.
- Dunbar, R. (1998). The social brain hypothesis. *Evolutionary Anthropology* 6, 178–190.
- Dunbar, R. (2009). The social brain hypothesis and its implications for social evolution. *J. Annals of Human Biology* 36, 562–572.
- 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. Cogn. Sci.* 19, 729–743.
- Fitch, W. T., Friederici, A. D. & Hagoot, P. (2012). Pattern perception and computational complexity: introduction to the special issue. *Phil. Trans. R. Soc. B* 367, 1925–1932.
- Fitch, W. T., & Friederici, A. D. (2012). Artificial grammar learning meets formal language theory: an overview. *Phil. Trans. R. Sec. B* 367, 1933–1955.
- Friederici, A. D. (2017). *Language in Our Brain: The Origins of a Uniquely Human Capacity*, Cambridge, The MIT Press.
- Fujita, K. (2009). A prospect for evolutionary adequacy: Merge and the evolution and development of human language. *Biolinguistics* 3, 128–153.
- Fujita, K. (2016). On the parallel evolution of syntax and lexicon: A Merge-only view. *J. Neurolinguistics* 43, 178–192.
- Goodall, J. (1963). Feeding behaviour of wild chimpanzees: A preliminary report. *Symposia of the Zoological Society of London* 10, 39–47.
- Goodall, J. (1986). *The chimpanzees of Gombe: Patterns of behavior*. Cambridge: Belknap Press.
- Goucha, T. & Friederici, A. D. (2015). The language skeleton after dissecting

- meaning: A functional segregation within Broca's Area. *Neuroimage* 114, 194–302.
- Gould, S. & Vrba, E. (1982). Exaptation-A Missing Term in the Science of Form. *Paleobiology* 8, 4–15.
- Graybiel, A. M. (2000). The basal ganglia. *Current Biology* 10, 509–511.
- Graybiel, A. M. (2005). The basal ganglia: learning new tricks and loving it, *Current Opinion in Neurobiology* 15, 638–644.
- Greenfield, P., Nelson K., & Saltzman, E. (1972). The development of rule bound strategies for manipulating seriated cups: A parallel between action and grammar. *Cogn. Psychol.* 3, 291–310.
- Greenfield, P. (1991). Language, tools and brain: The ontogeny and phylogeny of hierarchically organized sequential behavior. *Behav. Brain Sci.* 14, 531–595.
- Hagoort, P. (2005). Broca's complex as the unification space for language, in Cutler, A. (eds), *Twenty-first century psycholinguistics: four cornerstones*. London: Lawrence Erlbaum, 157–172.
- Hauser, M. D., Chomsky, N., & Fitch, W. T. (2002). The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve? *Science* 298, 1568–1579.
- Hayashi, M. (2007). A new notation system of object manipulation in the nesting-cup task for chimpanzees and humans, *Cortex*, 43, 308–318.
- Kirby, S. (2000). Syntax without natural selection: How compositionality emerges from vocabulary in a population of learners, in Knight, C., Studdert-Kennedy, M. & Hurford, J. R. (eds), *The Evolutionary Emergence of Language: Social Function and the Origins of Linguistic Form*. Cambridge: Cambridge University Press, 303–323.
- Kirby, S. (2017). Culture and biology in the origins of linguistic structure. *Psychonomic Bulletin & Review* 24, 118–137.
- Kato, Y., Kato, M., & Okanoya, K. (2012). Sequential information of self-produced song is represented in the auditory areas in male Bengalese finches. *Neuroethology* 23, 488–492.

- Koechlin, E., & Jubault, T. (2006). Broca's area and the hierarchical organization of human behavior. *Neuron* 50, 963–974.
- Kohonen, T. (1990). The Self-Organizing Map. *Proceedings of the IEEE* 78, 1464–1480.
- 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.
- Marler, P. (1991). Song-learning behavior: the interface with neuroethology. *Trend. Neurosci.* 14, 199–206.
- Martins, M. D., (2012). Distinctive signatures of recursion. *Phil. Trans. R. Soc. B* 367, 2055–2064.
- Matsuzawa, T. (1994). Field experiments on use of stone tools by chimpanzees in the wild, in R.W. Wrangham, W. C. McGrew, F.B.M. de Waal, & P. G. Heltne. (eds), *Chimpanzee cultures*, Cambridge: Harvard University Press, 351–370.
- Maynard-Smith, J. & Szathmáry, E. (1995). *The major transitions in evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- McPherron, S.P., Alemseged, Z., Marean, C.W., Wynn, J.G., Reed, D., Geraads, D., et al. (2010). Evidence for stone-tool-assisted consumption of animal tissues before 3.39 million years ago at Dikika, Ethiopia. *Nature* 466, 857–860.
- Mello, C., Nottebohm, F., & Clayton, D. (1995). Repeated exposure to one song leads to a rapid and persistent decline in an immediate early gene's response to that song in zebra finch telencephalon. *Journal of Neuroscience* 15, 6919–6925.
- Mesoudi, A., & O'Brian, M. J. (2008). The cultural transmission of great basin projectile point technology I: An experimental simulation. *American Antiquity* 73, 3–28.
- Mitchell, M. (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MIT Press.
- 伊庭斉志（監訳）（1997）『遺伝的アルゴリズムの方法』，電機大出版局。

- Mithen, S. (2005). *The Singing Neanderthals: The Origin of Music, Language, Mind and Body*. London: Weidenfeld and Nicolson.
- Moore, W. (2010). 'Grammars of action' and stone flaking design space, in A. Nowell & I. Davidson (eds), *Stone Tools and the Evolution of Human Cognition*, Boulder: University Press of Colorado, 13–43.
- Moore, W. (2011). The design space of stone flaking: implications for cognitive evolution. *World Archaeology* 43, 702–715.
- Mulcahy, N. J., & Call, J. (2006). Apes save tools for future use. *Science* 312, 1038–1040.
- Nakai, T., & Sakai, K. I. (2014). Neural Mechanisms Underlying the Computation of Hierarchical Tree Structures in Mathematics. *Plos one* 9, e111439.
- Nakai, T., & Okanoya, K. (2018). Neural evidence of cross-domain structural interaction between language and arithmetic. *Scientific Reports* 8, 58–70.
- Nambu, A., Tokuno, H., & Takada, M. (2002). Functional significance of the cortico-subthalamo-pallidal 'hyperdirect' pathway. *Neuroscience Research* 43, 111–117.
- Nambu, A. (2008). Seven problems on the basal ganglia, *Current Opinion in Neurobiology* 18, 595–604.
- Oesch, N., & Dunbar, R. (2017). The emergence of recursion in human language: Mentalising predicts recursive syntax task performance. *J. Neurolinguistics* 43, 95–106.
- Okanoya, K. (2002). Sexual display as a syntactical vehicle: the evolution of syntax in birdsong and human language through sexual selection, in A. Wray. (eds), *The Transaction to Language*, Oxford: Oxford University Press, 46–63.
- Okanoya, K. (2004), The Bengalese finch: A window on the behavioral neurobiology of birdsong syntax, *Annals of the New York Academy of Sciences* 1016, 724–735.
- Ölveczky, B. P., Andalman, A. S., & Fee, M. S. (2005). Vocal experimentation in the juvenile songbird requires a basal ganglia circuit. *PLoS Biol.* 3, e153.
- Plummer, T. (2004). Flaked stones and old bones: Biological and cultural evolution

- at the dawn of technology. *Yearbook of Physical Anthropology*, 47, 118–164.
- Sakai, K. I. (2005). Language acquisition and brain development. *Science* 403, 815–819.
- Sakura, O., & Matsuzawa, T. (1991). Flexibility of wild chimpanzee nut-cracking behavior using stone hammers and anvils: An experimental analysis. *Ethology* 87, 237–248.
- Samejima, K., Ueda, Y., Doya, K., & Kimura, M. (2005). Representation of Action-Specific Reward Values in the Striatum. *Science* 310, 1338–1340.
- Sanz, C. M., Call, J., & Morgan, D. B. (2009). Design complexity in termite-fishing tools of chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Biology Letters* 5, 293–296.
- Savage-Rumbaugh, E.S., Toth, N., Schick, K., & Washburn, D. A. (2007). Kanzi learns to knop stone tools, in D. A. Washburn. (eds), *Primate perspectives on behavior and cognition*, Washington: American Psychological Association, 279–291.
- Shipman, P., & Rose, J. (1983). Early hominid hunting, butchering and carcass processing behaviors: approaches to the fossil record. *Journal of Anthropological Archaeology* 2, 57–98.
- Shumaker, R.W., Walkup, K. R., & Beck, B. B. (2011). *Animal tool behavior. The use and manufacture of tools by animals*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Skeide, M.A., Brauer, J., & Friederici, A. D. (2014). Syntax gradually segregates from semantics in the developing brain. *Neuroimage* 100, 106–111.
- Skeide, M. A., & Friederici, A. D. (2016). Brain functional and structural predictors of language performance. *Cerebral Cortex* 26, 2127–2139.
- Skinner, M., Stephens, N., Tsegai, Z., Foote, A., Nguyen, H., Gross, T., Pahr, D., Hublin, J. & Kivell, T. (2015). Human-like hand use in *Australopithecus africanus*. *Science* 347, 395–399.
- Steels, L., Kaplan, F., McIntyre, A., & Van Looveren, J. (2002). Crucial factors in the origins of Word-Meaning, in Alison, W. (eds), *The Transition to Language*. Oxford: Oxford University Press.

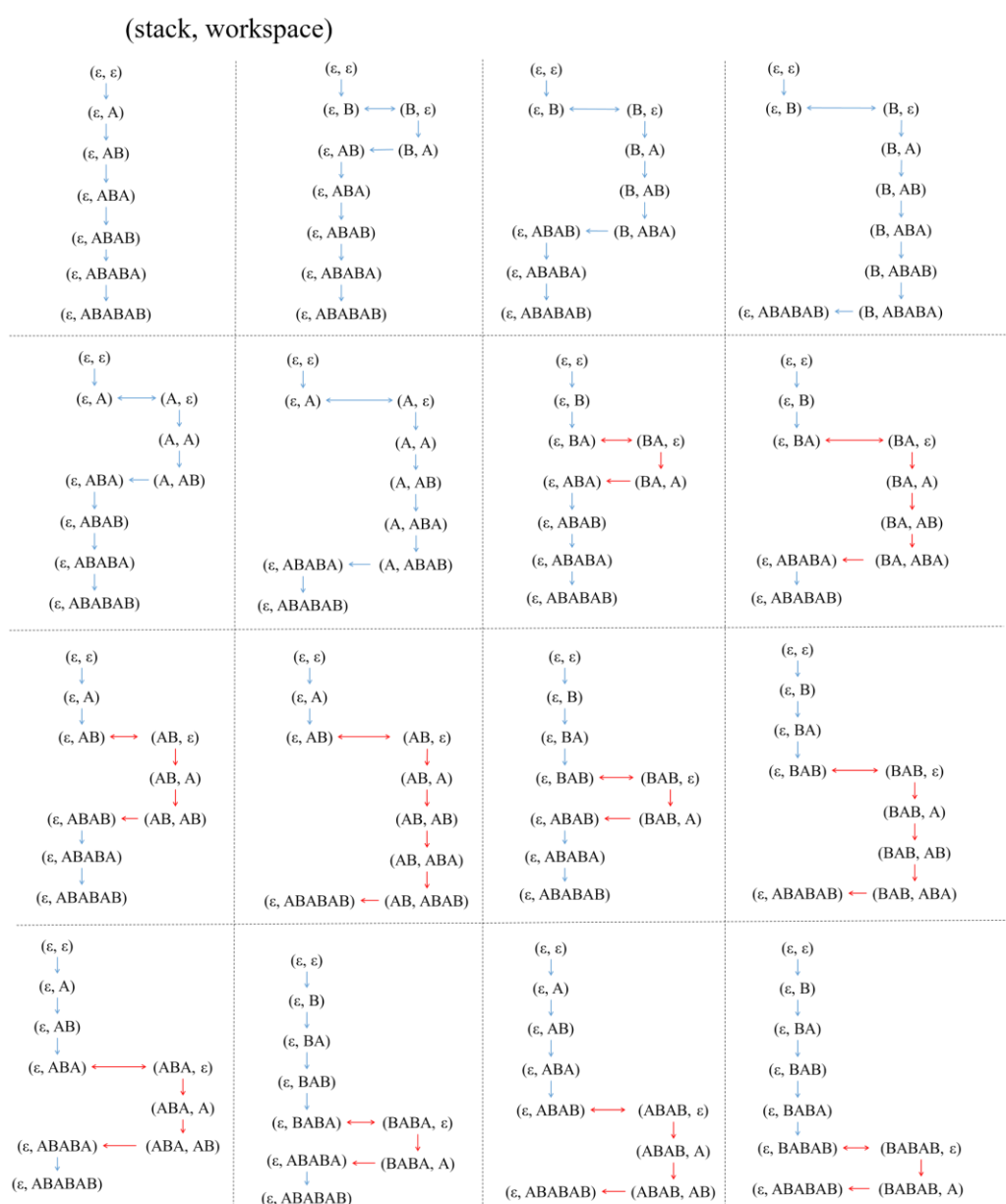
- Stout, D., Toth, N., Schick, K., & Chaminade, T. (2008). Neural correlates of early stone age toolmaking: technology, language and cognition in human evolution. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363, 1939–1949.
- Stout, D. (2011). Stone toolmaking and the evolution of human culture and cognition. *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.* 366, 1050–1059.
- Stringer, C., & Galway-Witham, J. (2017). On the origin of our species. *Nature* 546, 212–214.
- Sugiyama, Y. (1997). Social tradition and the use of tool-composites by wild chimpanzees. *Evolutionary Anthropology* 6, 23–27.
- Stiller, J., & Dunbar, R. (2007). Perspective-taking and memory capacity predict social network size. *Social Networks* 29, 93–104.
- Suzuki, T., Wheatcroft, D. & Griesser, M. (2016). Experimental evidence for compositional syntax in bird calls. *Nature Communications* 7, 10986.
- Tinbergen, N. (1963). On aims and methods of Ethology. *Zeitschrift für Tierpsychologie* 20, 410–433.
- Tomasello, M., & Call, J. (2003). Chimpanzees understand psychological states: The question is which ones and to what extent. *Trends. Cogn. Sci.* 7, 153–156.
- Viswanathan, G. M., & Buldyrev, S. V. (1996). Levy Flight search patterns of wandering albatrosses. *Nature* 381, 413–415.
- Ward, C., Tocheri, M., Plavcan, M., Brown, F., & Manthi, F. (2014). Early pleistocene third metacarpal from Kanya and the evolution of modern human-like hand morphology. *PNAS* 111, 121–124.
- Weir, A. A. S., Chappell, J., & Kacelnik, A. (2002). Shaping of hooks in New Caledonian crows. *Science* 297, 981.
- Weir, A. A. S., & Kacelnik, A. (2007). A New Caledonian crows (*Corvus moneduloides*) creatively re-designs tools by bending or unbending aluminum strips. *Animal Cognition* 9, 317–334.
- Wendorf, F., Schild, R., & Nelson, K. (2001). *Holocene settlement of the Egyptian Sahara: The archaeology of Nebta Playa <1>*. New York: Kluwer

Academic/Plenum Publishers.

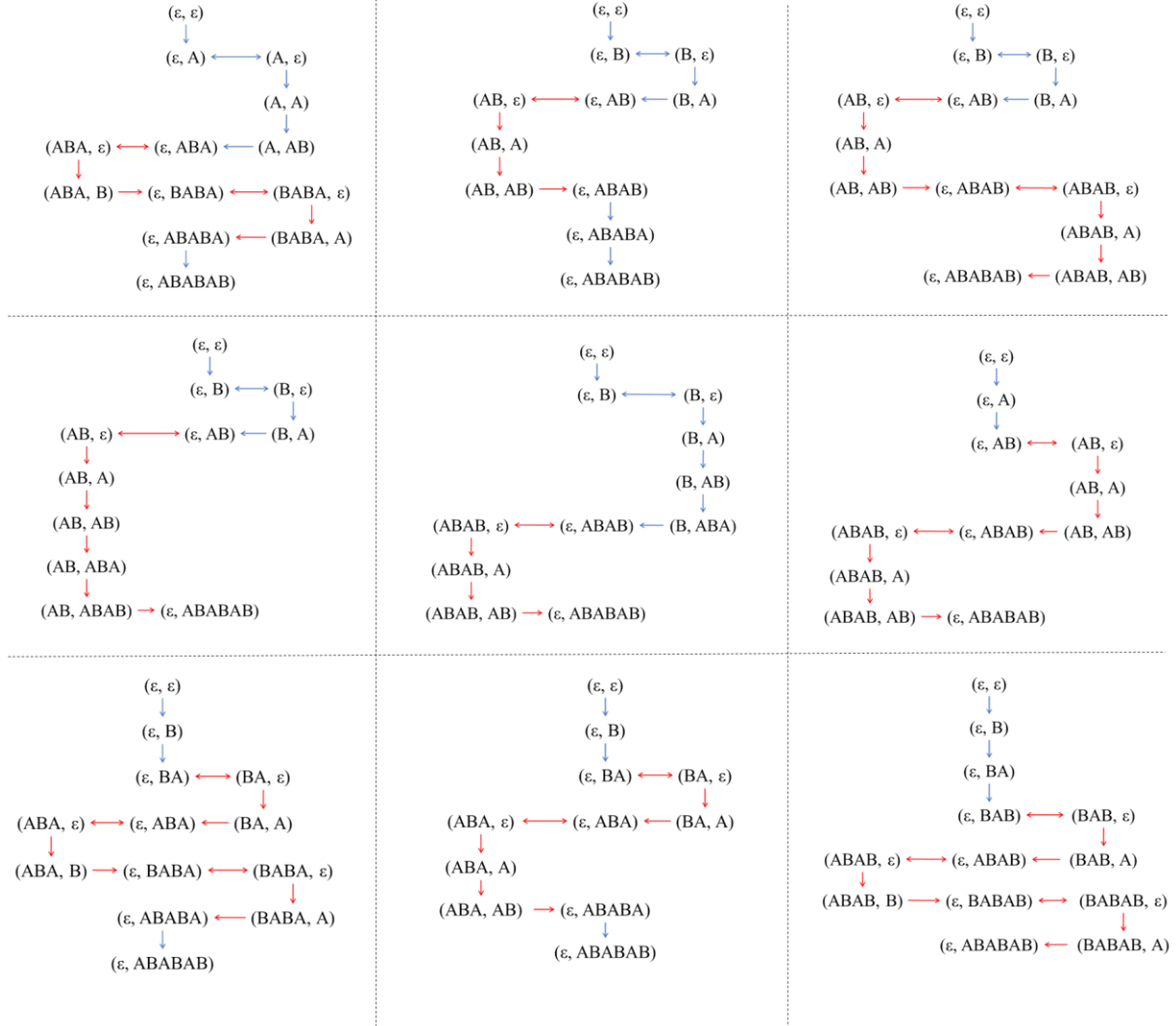
- Wilson, R., & Keil, Frank. (1999). *The MIT Encyclopedia of The Cognitive Sciences*. Cambridge: MIT Press. 中島秀之（監訳）（2012）『MIT 認知科学辞典』，共立出版.
- Wrangham, R. (2009). *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*. Croydon: CPI Group.
- Wymer, J. (1982). *The Palaeolithic Age*. London: Croom Helm.
- Zaccarella, E., & Friederici, A. D. (2015). Merge in the human brain: A sub-region based functional investigation in the left pars opercularis. *Frontiers in Psychology* 6, 1818.
- Zahavi, A. (1975). Mate selection - a selection for a handicap. *Journal of Theoretical Biology* 53, 205–214.
- Zahavi, A. & Zahavi, A. (1997). *The handicap principle: a missing piece of Darwin's puzzle*. Oxford: University Press.
- 池淵万季. (2000). 鳥類高次聴覚野における音声記憶の形成と可塑的变化, *The Japanese Journal of Animal Psychology* 50, 75–86.
- 岡ノ谷一夫. (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.
- 金子邦彦. (2003). 『生命とは何か 複雑系生命論序説』，東大出版会.
- 中村雅之. 「連合主義」, in 日本認知科学会（編）『認知科学』初版. 共立出版, 2002, 857.
- 野家伸也. 「表象」, in 日本認知科学会（編）『認知科学』初版. 共立出版, 2002, 701–702.
- 松沢哲郎. (2000). 『チンパンジーの心』，岩波書店.
- 三宅芳雄. 「表象」, in 日本認知科学会（編）『認知科学』初版. 共立出版, 2002, 701–702.
- 宮田裕光. (2014). *動物の計画能力ー「思考」の進化を探る*, 京都大学学術出版会.
- 橋本敬. 「複雑系」, in 杉山公造, 永田晃也, 下嶋篤（編）『ナレッジサイエンスー知を再編する 64 のキーワード』．紀伊國屋書店, 2002, 126–131.
- 橋本敬. 「構成論的手法」 in 杉山公造, 永田晃也, 下嶋篤（編）『ナレッジサイエン

- スー知を再編する 64 のキーワード』．紀伊國屋書店, 2002, 132–135.
- 橋本敬. (2004). 言語進化とはどのような問題か ～構成論的な立場から. *The 18th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, CD-ROM, 1–8.
- 橋本敬, 稲邑哲也, 柴田智広, 瀬名秀明. (2010). 社会的知能発生学における構成論的シミュレーションの役割と SIGVerse の開発. *ロボット学会誌 ロボティックサイエンス特集号* 28, 39–44.
- 橋本敬. (2011). 進化言語学におけるシミュレーションの特徴と役割 —合成性と文法化のシミュレーションから言語の起源・進化へ—. *KLS31: Proceedings of the Thirty-Fifth Annual Meeting of The Kansai Linguistic Society*, 263–273
- 藤田耕司. 「統語演算能力と言語能力の進化」, in 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』．ひつじ書房, 2012, 55–75.

付録 A 製作物 ABABAB を作ることが可能な状態遷移



(stack, workspace)



本研究に関する発表論文および学会発表

学術雑誌

- [1] Genta Toya & Takashi Hashimoto. (2018). Recursive Combination Has Adaptability in Diversifiability of Production and Material Culture. *Frontiers in Psychology*, Vol. 9, No. 1512, pp. 1-17.

国際学会における発表と予稿

口頭発表

- [2] Genta Toya, Rie Asano & Takashi Hashimoto. "Difference of two recursions, 'hierarchical embedding' and 'self-reference': from view of adaptive functions and implementations", *The Evolution of Language*, pp. 507-509, *EVOLANG XII*, Hotel Filmar, (Toruń), 2018 年 4 月 16-19 日
- [3] Genta Toya & Takashi Hashimoto. "Evolution of recursive combination operation", In C. Knibbe, G. Beslon, D. Parsons, D. Misevic, J. Rouzaud-Cornabas, N. Bredéche, S. Hassas, O. Simonin, & H. Soula (Eds.), *Proceedings of The European Conference on Artificial Life 2017*, pp. 396-403, *The European Conference on Artificial Life 2017*, The LyonTech Campus, 2017 年 9 月 4-8 日
- [4] Genta Toya & Takashi Hashimoto. "Recursive operation ability may evolve for creativity", Creativity and innovation in language evolution at *EVOLANG XI*, Tulane University, 2016 年 3 月 21-24 日

ポスター発表

- [5] Genta Toya, Rie Asano & Takashi Hashimoto. "Neural implementation and evolutionary simulation of building hierarchical structure", *The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society*, Okinawa Institute of Science and Technology, 2018 年 10 月 24-27 日
- [6] Genta Toya, Rie Asano & Takashi Hashimoto. "Building hierarchical structure: Its functional model and evolutionary simulation", *The Emergence and Evolution of Social learning, Communication, Language and Culture in Natural and Artificial Agents in The 2018 Conference on Artificial Life*, National Museum of Emerging Science and Innovation, 2018 年 7 月 23-27 日
- [7] Genta Toya & Takashi Hashimoto. "Poverty of materials makes recursive combination operation evolvable", Proceedings of the 39th Annual Conference of the Cognitive Science Society (p. 3862). *The 39th Annual Conference of The Cognitive Science Society*, Hilton London Metropole, 2017 年 7 月 26-29 日

国内学会・研究会における発表と予稿

口頭発表

- [8] 外谷 弦太, 浅野 莉絵, 橋本 敬. "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", 日本認知科学会第34回大会, OS17-4, 金沢大学角間キャンパス, 2017 年 9 月 13-15 日
- [9] 外谷 弦太 & 橋本 敬. "統語能力の適応的進化は想定可能か: 行動多様性の推進力", 日本進化学会第18回大会, 東京工業大学, 2016 年 8 月 26-28 日

本研究に関する助成

- [1] 認知科学会サマースクール, 旅費補助, 2013.
- [2] 日本学術振興会 科研費 25330434, 旅費補助, 2014, 2015.
- [3] 日本人間行動進化学会, 旅費補助, 2014.
- [4] 北陸先端科学技術大学院大学支援財団, 博士前期課程奨学金, 2015-2016.
- [5] 北陸先端科学技術大学院大学支援財団, 5D プログラム奨学金, 2016.
- [6] 日本学術振興会, 特別研究員奨励費, 2016-2018.
- [7] 日本学術振興会 科研費 JP17H06383, 旅費補助, 2018, 2019.