

Title	統語能力の進化の研究・前駆体編 ~ 回帰的物体操作の進化シミュレーション ~
Author(s)	外谷, 弦太
Citation	
Issue Date	2015-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/13577">http://hdl.handle.net/10119/13577</a>
Rights	
Description	Supervisor: 橋本 敬, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

統語能力の進化の研究・前駆体編  
～回帰的物体操作の進化シミュレーション～

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

1350026 外谷 弦太

審査委員： 橋本 敬 教授（主査）

吉田 武稔 教授

梅本 勝博 教授

池田 満 教授

2015年2月

# 目次

第1章	はじめに .....	1
1.1	研究背景 .....	1
1.1.1	人類と言語の進化 .....	1
1.1.2	階層構造生成の能力 .....	2
1.1.3	言語進化に関する研究の成果と残された問題 .....	3
1.2	研究の目的と手法 .....	5
1.2.1	研究目的 .....	5
1.2.2	Merge の運動制御起源説 .....	5
1.3	本論文の構成 .....	6
第2章	関連分野と本研究の位置づけ .....	7
2.1	本研究における言語能力とその進化の定義 .....	7
2.2	回帰的な物体操作を前駆体とした 統語能力の進化 .....	9
2.2.1	適応的進化の三分類 .....	9
2.2.2	行動文法と統語能力の前適応的進化の仮説 .....	9
2.3	計算機シミュレーションによる 構成論的アプローチ .....	12
2.3.1	進化現象の構成論的アプローチ .....	12
2.3.2	組み合わせ最適化問題を解決する方法としての遺伝的アルゴリズム .....	13
2.3.3	生物進化のアナロジーとしての遺伝的アルゴリズム .....	13
第3章	モデル .....	15
3.1	物体操作モデルの設計 .....	15
3.1.1	物体操作モデルの構成 .....	15
3.1.2	物体操作モデルにおける行動文法の定義 .....	16
3.2	進化シミュレーションの設計 .....	18
3.2.1	状態遷移表の符号化 .....	18

3.2.2	シミュレーションプロセス .....	19
第4章	物体操作の進化シミュレーション .....	21
4.1	個体間相互作用無しモデルの実験設定 .....	21
4.1.1	適応度関数の設定 .....	21
4.1.2	パラメータの設定 .....	22
4.2	結果と考察 .....	23
4.2.1	実験1：サブアセンブリ戦略が有効な適応度関数 .....	23
4.2.1.1	分析 1.1：サブアセンブリ戦略が進化する適応度関数 .....	23
4.2.1.2	分析 1.2：作製される道具の変化.....	26
4.2.1.3	分析 1.4：遺伝子型の変化 .....	28
4.2.1.4	$F_{II}$ におけるサブアセンブリ戦略の適応性.....	32
4.2.2	実験2：物体操作の進化順序 .....	34
4.2.2.1	多様な道具を作るときのサブアセンブリ戦略の進化メカニズム.....	34
4.2.2.2	特定の道具を作るときのサブアセンブリ戦略の進化メカニズム .....	35
4.2.3	実験3：適応度分布の影響.....	37
4.2.3.1	道具の種類数による結果への影響 .....	37
4.2.3.2	道具の構造による結果への影響.....	39
4.2.4	実験4：サブアセンブリ戦略出現の身体的条件.....	41
4.2.4.1	操作コスト，および操作回数上限の影響.....	41
4.3	実験1～4のまとめと残された問題 .....	42
4.3.1	サブアセンブリ戦略の適応性と進化メカニズム .....	42
4.3.2	サブアセンブリ戦略の使用プロセスと進化プロセス .....	43
4.3.3	操作コストと操作回数上限の影響 .....	43
4.3.4	シミュレーションの問題点，解決すべき点 .....	44
4.4	個体間相互作用モデルの実験設定.....	44
4.4.1	個体間相互作用としての有限資源の獲得競争の導入.....	44
4.4.2	パラメータ .....	45
4.5	結果と考察 .....	45
4.5.1	個体間相互作用モデルのシミュレーション .....	45
4.5.2	作製される道具の変化 .....	46

4.5.3	資源獲得競争で有効な適応性と進化.....	47
第5章	議論.....	48
5.1	サブアセンブリ戦略の適応性と進化メカニズム.....	48
5.2	サブアセンブリ戦略が適応的となる 身体的・認知的条件および環境の成立.....	50
5.2.1	サブアセンブリ戦略が適応的となる身体的・認知的条件.....	50
5.2.2	サブアセンブリ戦略が適応的となる生態学的環境.....	51
5.2.3	サブアセンブリ戦略の進化シナリオ.....	52
5.3	残された課題, および今後の研究計画.....	53
5.3.1	現行モデルの課題.....	53
5.3.1.1	モデルの妥当性.....	53
5.3.1.2	世代間相互作用の導入.....	54
5.3.1.3	個体数変動の導入.....	54
5.3.1.4	社会的・文化的要素の導入.....	55
5.3.2	物体操作の実験室実験.....	55
5.3.3	統語能力の進化シナリオの解明.....	56
5.3.3.1	物体操作から表象操作への回帰的操作能力の転移.....	56
5.3.3.2	表象操作から統語操作への回帰的操作能力の転移.....	58
5.3.4	全体の包括的研究.....	58
第6章	結論.....	59
6.1	本論文のまとめ.....	59
6.2	結論.....	62
6.3	残された課題.....	63

# 目次

図 1.1	言語の階層構造.....	3
図 2.1	行動文法における三つの戦略.....	10
図 2.2	物体操作を前駆体とした統語操作の進化 (藤田, 2012) .....	11
図 3.1	ポット戦略による状態遷移.....	17
図 3.2	サブアセンブリ戦略による状態遷移.....	17
図 3.3	状態遷移表の符号化 (一部) .....	19
図 3.4	GA の計算処理の流れ.....	20
図 4.1	各適応度関数におけるサブアセンブリ戦略使用個体数の変化 .....	23
図 4.2(a)	およそ単調に増加.....	24
図 4.3	サブアセンブリ戦略使用個体数と使用可能個体数の違い .....	28
図 4.4	図 4.2(a)における遺伝子の個体数変動と SAS 使用可能個体数の変動 .....	29
図 4.5	図 4.2(b) において SAS が使用された道具と .....	30
図 4.6	図 4.2(b)における遺伝子と SAS の使われる道具の個体数変動 .....	30
図 4.7	図 4.2(c)における遺伝子の個体数変動と SAS 使用可能個体数の変化.....	31
図 4.8	LS を push する遺伝子をもつエージェントの系図 .....	31
図 4.9	図 4.2(d)において SAS が使用された道具と SAS 使用可能個体数の変化 .....	32
図 4.10	$F_{it}$ におけるサブアセンブリ戦略の出現.....	33
図 4.11	LMS が作製可能なエージェントの進化における道具の出現順序.....	35
図 4.12	エージェントの道具製作経路 .....	36
図 4.13	サブアセンブリ戦略使用個体数の変化 (道具の種類数による違い) .....	39
図 4.14	サブアセンブリ使用個体数の変化 (道具の構造による違い) .....	40
図 4.15	操作回数および操作コストとサブアセンブリ戦略の関係 .....	42
図 4.16	相互作用の強さとサブアセンブリ戦略使用個体数の関係 .....	46
図 5.1	中手骨の進化と物体操作および脳容量の関係 .....	51

図 5.2 物体操作から統語操作までの進化段階 .....57

# 表 目 次

表 4.1	単純な物体操作モデルの基準パラメータ .....	23
表 4.2	サブアセンブリ戦略が出現するまでに作製される道具 .....	27
表 4.3	$F_{III\_B}$ : 最初に L の物体をもつ三つ組の道具の適応度が 0 で他は 1 .....	38
表 4.4	最初に L と M の物体をもつ三つ組の道具の適応度が 0 で他は 1 .....	38
表 4.5	互いに共通の構造をもつ SLM, MSL, LMS の適応度のみが 1 .....	39
表 4.6	互いに独立した構造を持つ SSS, MMM, LLL の適応度のみが 1 .....	40
表 4.7	操作コストと操作回数上限に関するシミュレーションのパラメータ .....	42
表 4.8	個体間相互作用シミュレーションのパラメータ .....	45
表 4.9	相互作用の強さと作製される道具数の平均 (5000 世代目) .....	47



# 第1章 はじめに

本研究は、言語において意味と表現を、階層構造を介して組み合わせるといった人間固有の能力が、どのような生態的環境に対する適応性をもって、どのようなプロセスを経て進化してきたかという問題について、理論言語学の分野から提案されている仮説に基づき、計算機シミュレーションを用いた構成論的手法により検討を行うものである。

本章ではまず研究背景として、

- ・ 本研究の主題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

という点について述べる。そして、本研究がその問題に対して取る仮説と手法、明らかにする点を説明する。最後に本論文の構成を示す。

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 人類と言語の進化

人間は、知識の創造、共有、活用を行う際に、自身で思考をするなかで、あるいは他者との相互作用をするなかで、言語を道具として用いている。人間の自然言語には他の生物がコミュニケーションに用いる信号にはない特徴がいくつか存在しており、それらが人間の知的活動の多くを支えている。そのため、言語は人間が社会的生活を営む、あるいは社会そのものを構築していくうえで重要な能力として、言語学をはじめ、哲学、心理学、文化人類学、社会学などの人文社会系分野、生物学、自然人類学、

情報科学，認知科学，人工知能，計算機科学などの理工系分野で研究されている（橋本, 2014）. 多様な知見の統合を試みている学際領域は他にも数多く存在するが，言語という概念を中心に学際的な研究を行うことは，人文社会系と理工学系という，子カテゴリーとして多くの学問分野を内包する二大領域の統合に繋がるという点で有意義であると言える. そのことから近年、人間の言語についての理解を深めるための新たなアプローチとして，進化言語学（Evolutionary Linguistics）という研究分野の構築が進みつつある. 進化言語学が問題とするのは言語の起源と進化である. 言語という概念の変化を生物学的な意味での進化と同様の枠組みで捉えることは，直感的には受け入れがたい. しかし，言語や言語を可能にする能力をヒトという生物の形質と見れば，その認知的・身体的特徴がどのように進化してきたかを生物学的議論の俎上へのせることは可能である（橋本, 2004）. 人類がどのようにして言語を扱えるようになったのかという問題は，古くはダーウィンも「種の起源」のなかで進化論が説明すべき問いとして取り上げており，以来さまざまな学説が唱えられてきた（Darwin, 1859）.

本研究の主題は，ヒト言語の特筆すべき性質の一つである，階層構造を介して意味と形式を接続する，という統語能力の進化シナリオに関するものである. これは言語の起源にあたる問題であり，したがって本研究では言語能力の生物進化を問うことになる.

### 1.1.2 階層構造生成の能力

一言に言語の能力と言っても，言語は様々な認知能力が複雑に組み合わさって成立している. 当然，本研究のなかでその全ての起源を問うことはできないため，本論文では，ヒトの言語が有しており，かつ他の動物のコミュニケーションには見られない特徴に焦点を絞ることにする.

人間は，自然界に存在する生物の中で唯一，階層構造を有する音声信号を用いて思考やコミュニケーションを行う. 同じ次元の音声信号である動物の鳴き声とヒト言語には，意味のレベルで大きな違いが存在する. 動物の鳴き声が音という表現形式とそれが指す意味とで一对一の関係をもつのに対し，人の音声言語は図 1.1 に示すように，音の構造の中に意味が階層的かつ回帰的に構成されているという一对多の関係をもちうる. 例えば，「Child book club」という文は，「[Child book] club」という意味で捉えることもできれば，「Child [book club]」という意味で捉えることも可能であ

る。これは理論言語学において「構造依存性」と呼ばれる性質であり、ヒトの言語が線形記号配列として扱われていないことの証拠である (Fujita, 2008)。

理論言語学では、言語表現の階層構造生成は「Merge」と呼ばれるヒト固有の統語操作によって説明される。Merge は二つの語彙項目を結びつけて一つの表現を作り出す操作であり、それによってできた表現を再び語彙項目として別の語彙項目と結びつけることで、いくらでも多様で複雑な表現を作り出すことが可能となる。これを回帰的な Merge といい、言語の階層構造はこの Merge の回帰的な適用によって生まれると考えられている (Chomsky, 1993; 藤田, 2012)。こうした理論的な言語能力の描像には異論も多々あるが、それらは本研究の立場とともに二章で詳しく説明する。ただ少なくとも、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、という手法が階層構造として最も単純な形である二分木構造を作る上で最低限必要な操作だということは、数学的に自明な事実である。

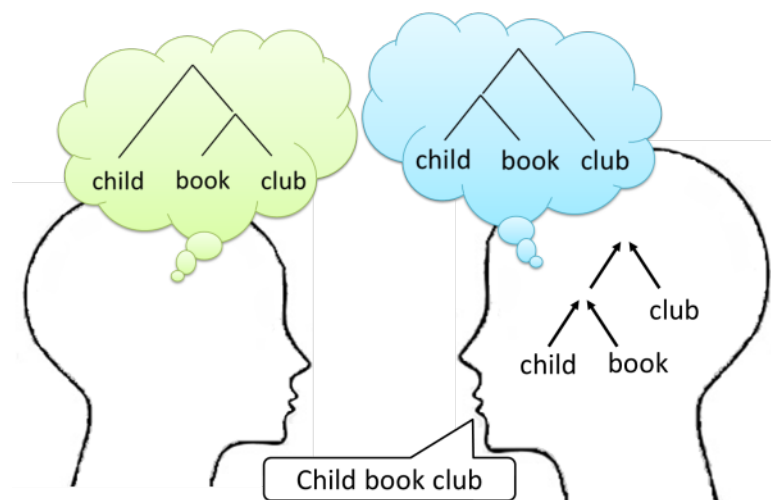


図 1.1 言語の階層構造

### 1.1.3 言語進化に関する研究の成果と残された問題

言語の生物学的進化を問う際に、具体的にどのような問いに答えるべきなのかを定義しておく。言語を生物学的形質の一つと考える以上、この問いはおのずと進化生物学や動物行動学といった分野のフレームワークで定義されなければならないことになる。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 (メカニズム) : その行動が引き起こされている生理学的要因は何か.
- 発達要因 (個体発生) : その行動は, 個体の一生の間にどのような発達を経て完成されるのか.
- 究極要因 (適応) : 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よって進化したのか.
- 系統進化要因 (進化的歴史) : その行動は, その動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.

本研究が対象とするのはこのうち後者の2つ, すなわち, 階層構造を生成するという能力が遺伝子を保存・増殖させる上でどのような環境に対する適応的機能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, 継続してきたのか, という問いである.

進化言語学は言語の起源と進化を明らかにすることを目標としている. 言語の起源と言った場合, 多くは言語を扱う能力の生物進化を指し, 言語の進化と言った場合, 多くは言語使用上の文法規則や表現の発生・変化を指す. そしてこれまでに, Bicherton (1990) によるクレオール言語の研究や, Steels (1996) や Kirby (2002) による人工言語の世代間学習モデルなどで, 言語の文法や表現形式がどのようにして変化していくかという文化的な進化に関する重要な知見が数多く積み重ねられてきた. しかし一方で, 文法を扱うための基盤となる階層構造生成の能力がどのようなプロセスで, どのような生態的環境に対する適応形質として発生したのかという生物進化に関する謎については, いくつかの仮説が提示されている段階にある (二章で詳述する). その理由として,

- 言語の特徴である階層構造生成の能力はヒトに固有であるため, 他の動物との比較が困難.
- 言語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人間社会のあらゆる場面において使用されているため, 特定の適応環境や機能といったものを定めることが困難.
- 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.

といった障害があることが挙げられる.

むしろ, ヒトの近縁種であるチンパンジーなどの類人猿との比較認知実験や比較遺

伝学, 音声コミュニケーションを用いる鳥類との比較, 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などから得られている知見は数多い. しかし, 言語能力の進化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. 言語を進化という自然現象の産物として理解し, 生物学をはじめとする自然科学と結びつけるには, 現実には起こらなであろう言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することで, 原始人類と現世人類の間に存在するミッシング・リンクを埋める必要がある.

## 1.2 研究の目的と手法

### 1.2.1 研究目的

本研究の目的は, 階層構造を介して意味と形式を接続する, という回帰的操作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. そのために以下で述べる物体の回帰的操作を統語の回帰的操作の前駆体とする仮説を採用し, 回帰的操作の適応性について計算機シミュレーションを用いた検討を行う. これにより, 回帰的な物体操作と回帰的な統語操作の進化的連続性を明らかにし, 仮説に対して計算論的な実現可能性に関する知見を提供する. より具体的には, 物体操作を行う個体をモデル化したエージェントの進化シミュレーションによって, 回帰的な物体操作が出現し集団内に拡散する条件を明らかにすることが本論文の目的である.

### 1.2.2 Merge の運動制御起源説

1.1.2 節で述べた回帰的な統語操作に類似した形式は, 物体操作のような行動においても確認されている. 幼児の系列的物体操作の発達に関する研究から見出された「行動文法」は, 一連の行動を単純な行動規則のセットによって記述する体系である. 第2章で詳述するが, 行動文法は, 一つの物体を操作して静止している物体に組み合わせる操作をペアリング戦略, 複数の物体を操作して静止している物体に反復的操作をポット戦略, 一度組み合わせたユニットを別の物体と組み合わせる回帰的操作をサブアセンブリ戦略と定義する. 被験者である幼児に三つのカップを組み合わせるといふ簡単な物体操作を行わせたとき, 生後 36 ヶ月児から回帰的物体操作であるサブア

センプリ戦略が使用され、回帰的な統語との並行的な発達が観察された (Greenfield, Nelson & Saltman, 1972). また、自然状態のチンパンジーではこのサブアセンプリ戦略が観察されないことがわかっている (Greenfield, 1991).

こうした事実から、回帰的な物体操作を前駆体とした統語能力の進化についての仮説が立てられている (藤田, 2012). それは、物体操作において階層構造を生成する回帰的操作が初期人類において進化し、それが記号の操作に転用された結果、意味と音を階層構造でつなぐ現生人類の統語能力が生まれたとする説である.

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を概説する. 本章に続く第 2 章では言語進化を取り扱った関連研究について述べる. ここでは主に、言語進化研究の具体的な目的と意義、関連研究によって明らかになったことと残された問題、そして本研究を行う上で採用する仮説の詳細と本研究がどのような貢献を考えているかについて説明する. 第 3 章では本シミュレーションおよびモデルの設計とそこで用いた枠組みについて解説し、第 4 章でその結果と考察を提示する. 第 5 章では 4 章の結果と実際の人類進化や関連研究の知見を結びつけて論じ、第 6 章で本論文の結論とそれを踏まえた今後の研究計画について展望を行う.

## 第2章 関連分野と本研究の位置づけ

本章では、本研究の位置づけをより明確にするため、関連分野における研究と問題を挙げ、先行研究で明らかにされていない点を整理する。同時に本研究で扱う回帰的操作能力の進化が言語進化のどのような問題を明らかにするものなのかを述べ、本研究におけるいくつかの前提や想定する仮説について説明する。

### 2.1 本研究における言語能力とその進化の定義

N. Chomsky によって提唱された生成文法理論は、ヒトに特異な生物的形質として「言語機能」と呼ばれる器官を措定し、その「Universal Grammar (以下 UG)」と呼ばれる初期状態が「パラメータ」と呼ばれる外部刺激によって異なった安定状態に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, 1957)。例えば「Colorless green ideas sleep furiously.」という文からは、ことばが意味的には容認できなくとも文法的には妥当と判断されることが伺える。この立場における言語能力は、文法と意味が切り離された自律的なモジュールであると考えられている。生成文法がこうした仮説を立てたのは、人が用いる言語の構造にいくつかの規則性が発見されたこと、および、幼少期に与えられる言語刺激が、ある言語体系のうちに存在する表現の規模に対して極端に少ない子供でも言語を扱えるようになるのはなぜか、という疑問（いわゆる「プラトンの問題」）に対して推論を重ねた結果である。

近年になって生成文法はミニマリスト・プログラムと呼ばれる UG 理論の極小化に取り組んでいる (Chomsky, 1995)。ミニマリスト・プログラムでは言語能力を図 1 のようなモデルに基づいて捉える（注意として、この抽象的なモデルはストラテジーとして考案されたものであり、実際の脳神経基盤のモデルだと主張されているわけでは

ない)。このモデルでは言語機能の下位部門として、言語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。図中赤で示す語彙部門と UG にあたる統語演算部門は自律的な認知システムとされるが、その動機づけは図中青で示す言語の運用システムによって行われるものとされる。

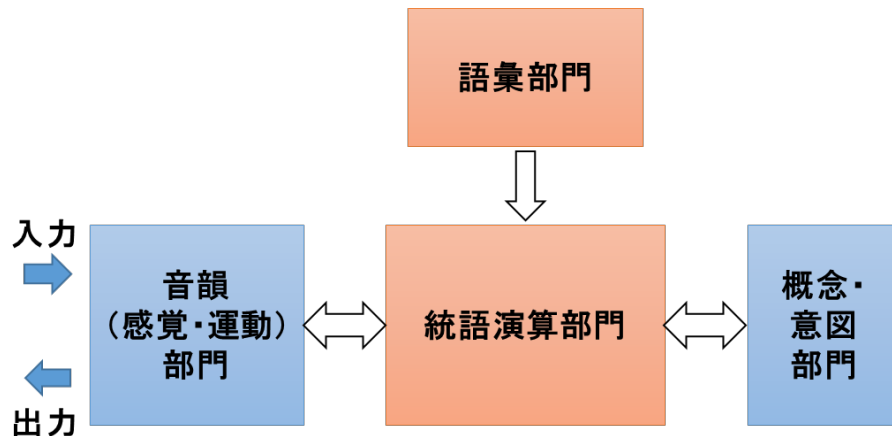


図 2.1 言語機能の極小モデル

1 章で説明した Merge も、言語を産出するための装置として最低限必要なものは何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（藤田，）。素句構造とは、語彙部門から選び出した個々の語彙項目同士を組み合わせることによって、選ばれた語彙の特性に従った句構造が導出されることを保証する仕組みのことである。このときの語彙項目同士を組み合わせる操作が「Merge」と呼ばれる。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。

例) Merge(the, boy) → {the, boy}

例は the を構成する統語素性によって駆動された、自律的で無意識的なレベルの統合過程であり、言語使用者が意図的に行える操作ではない。Merge が回帰的に適用されることによって、人はいくらでも長い言語表現を作り出すことができる。

このように心的器官として言語能力を定義すると、言語進化の定義は必然的にこの言語器官という形質の進化ということになる。Hauser らは言語能力を発声能力や聴覚なども含む場合を広義的言語能力（FLB）、言語において階層構造を回帰的に作り出す統語能力を狭義的言語能力（NLB）とし、後者について問うことが言語進化の間



題であるとしている (Hauser et al., 2002). 本研究においても作業仮説としてこれを採用し, 階層構造を生成して意味と音をつなげる回帰的統語がどのような適応性をもって進化してきたのか, それはどのようなプロセスを経て進化したのかを明らかにすることを最終目標とする.

## 2.2 回帰的な物体操作を前駆体とした統語能力の進化

### 2.2.1 適応的進化の三分類

ある形質がいかにして進化したかを説明する仮説には主に三つがあり, それを回帰的統語能力の場合に言い換えると次のようになる (Gould & Vrba, 1982; 池内, 2010).

A) 自然選択適応仮説…コミュニケーションや思考に対する回帰的統語能力の適応性が漸進的な進化を促した.

B) スパンドレル仮説…脳容量増大の副産物として回帰的統語能力が創発した.

C) 前適応仮説…ある機能を持っていた形質 (前駆体) が回帰的統語能力の機能を兼ねるようになった.

自然選択適応仮説 (A) だけでは, ヒト以外の社会性動物が回帰的な統語操作によるコミュニケーションを行わないことの説明が難しい. また, 漸進進化による説明は, 例えば鳥のくちばしの形状に関して説明できても, なぜくちばしが存在するのかという形質の起源の問題を説明することに適していない. そしてスパンドレル仮説 (B) は脳容量増大の副産物がなぜ統語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. よって, 統語能力の進化に必然性を持った説明を与えるには, 統語能力に何らかの前駆体が存在したとする, C の前適応仮説がふさわしいと考えられる (池内, 2010). 前適応の例としては, 鳥の羽が体温維持から飛行に使われるようになったことや, 蜂の産卵管が毒針として攻撃や防衛に使われるようになったことが挙げられる.

### 2.2.2 行動文法と統語能力の前適応的進化の仮説

ではどのような前駆体が妥当だろうか. 人の認知発達実験から見出された「行動文

法」(Action Grammar)におけるサブアセンブリ戦略は、前駆体の候補とされている。行動文法とは、物体の系列的操作などの行動を、細部を捨象することで統語構造のように表現したものである。統語のように単純かつ規則的な表現にすることで、異なる行動の分類・比較・分析が可能になる。大中小3つのカップの組み合わせを例としたとき、行動文法は次の三つに分類される(図2.3)。

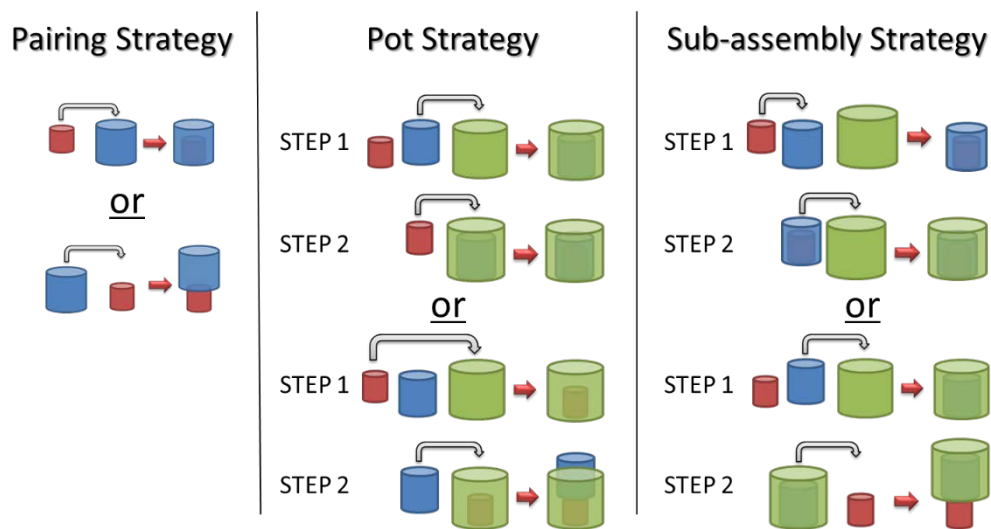


図 2.1 行動文法における三つの戦略

- ペアリング戦略:一つのカップを操作し、静止しているカップと組み合わせる。基本の操作。
- ポット戦略:複数のカップを操作し、静止しているカップと組み合わせる。反復的操作。
- サブアセンブリ戦略:カップを組み合わせたユニットを操作し、別のカップと組み合わせる。回帰的操作。

大中小の三つのカップを組み合わせる一つの構造物を作る、というヒト幼児とチンパンジーを対象とした比較認知実験では、チンパンジーは同じ容器に対して繰り返し他の容器を入れる(あるいは乗せる)ことで三つ組の構造物を作った。すなわちポット戦略だけを行った。これに対してヒト幼児は一度容器として使ったカップを部品として別のカップに入れるという回帰的な操作によって構造物を作る(サブアセンブリ戦略)という違いが見られた。この結果からは、言語に直接関係のない物体の操作においても、回帰性という点でヒト固有の認知能力が存在することが推定される。

(Greenfield, 1991).

また、行動文法が最初に見出されたヒト幼児 8 名を対象とした実験では、生後 20 ヶ月から 32 ヶ月までの幼児は 8 名中 1 名しかサブアセンブリ戦略を行わなかったが、生後 36 ヶ月からは 8 名中 3 名がサブアセンブリ戦略を行うようになり、それと並行して接続詞を用いた二語文以上の言語文を発話するようになった (Greenfield et al., 1972).

他にも外傷性失語症の患者は系列的な物体操作に支障をきたすことが報告されており (Grossman, 1980), 物体操作と言語能力との神経基盤上の関係も伺うことができる。また、人の行動における埋め込み構造は、日常的な言語的記述の階層性よりもはるかに深いことから、構文に先んじて行動が複雑化しているという指摘もある。

こうした研究結果をもとに、「回帰的な物体操作を前駆体として統語能力が進化した(図 2.4)」という仮説が立てられている (藤田, 2012; Maynard Smith & Szathmáry, 1995). 図 2.4 における Pot-Merge は Core Merge の非回帰的な反復適用である。Sub-Merge はサブアセンブリ方式による Merge の回帰的適用を指している。

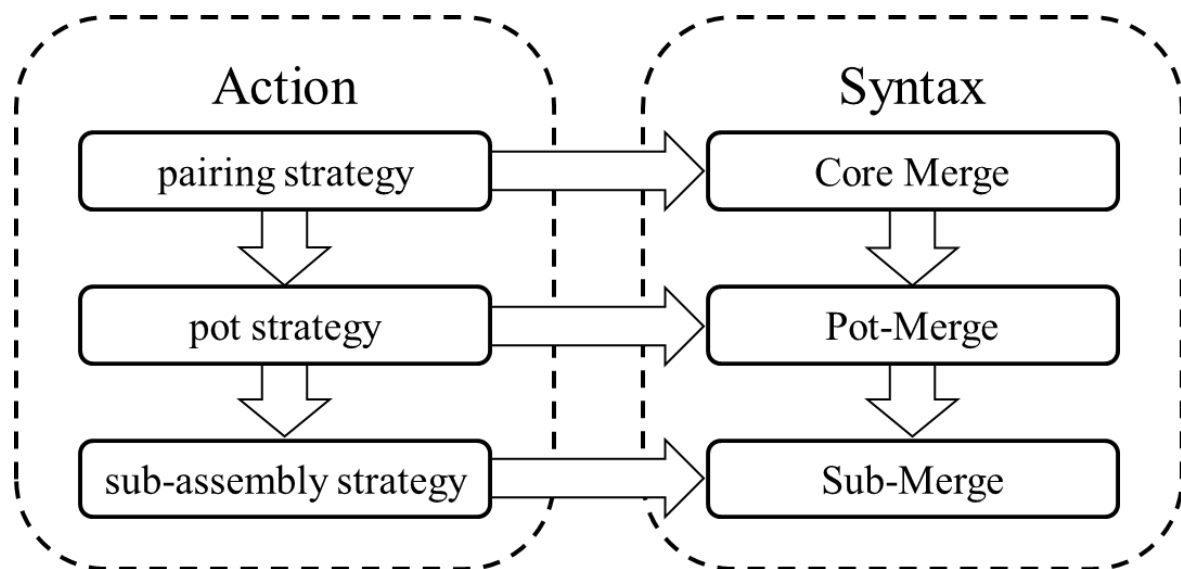


図 2.2 物体操作を前駆体とした統語操作の進化 (藤田, 2012)

旧石器時代の石器の作り方を推測・分析した研究によれば、サブアセンブリ戦略に該当する石器作製法が、27 万年前以降に出現したことが推定されている (Moore, 2010). これは回帰的統語能力の出現時期と考えられている 7 万~6 万年前 (池内,

2010) に大きく先行しており，このことからサブアセンブリ戦略の出現そのものは回帰的な統語能力よりもかなり早い時期に起きた可能性が高い。

物体への回帰的な Merge の適用操作を前駆体とした統語能力の進化仮説に関して，回帰的物体操作がどのような環境に対する有効性を発揮することにより出現したのか，物体操作から統語操作への転用はどのような進化プロセスを経たのかといった問題については不明な点が多い。また，物体操作のような行動と文法構造における階層性という類似点は多くの比較認知研究で示されているが，自然界における種々の階層構造のメタファーに過ぎないという批判もある (Moro, 2014)。本研究の最終目的は，統語能力の進化について，その適応性と進化プロセスを明らかにすることであるが，本論文ではそのためにまず，統語能力の前駆体と考えられる回帰的物体操作（サブアセンブリ戦略）の進化について，その生態学的意味やプロセスを明らかにすることを目的とする。

## 2.3 計算機シミュレーションによる 構成論的アプローチ

### 2.3.1 進化現象の構成論的アプローチ

物体操作と統語の関係について，先に挙げた比較認知実験や考古学調査などの研究方法は一定の成果を挙げているが，生物進化を扱う上で不向きな部分もある。人間とサルを対象とした比較認知実験の場合，進化という大きな時間スケール上の点と点を比較しなければならず，進化プロセスやメカニズムの説明を与えることが難しい。また考古学的な発掘調査は結果を出すまでに時間がかかる上に，脳や言語は化石にならないことから証拠の種類も限られてくる。

これらの問題の一部は計算機シミュレーションで解決可能である (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きた現象と同一のものが二度と起き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機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。

### 2.3.2 組み合わせ最適化問題を解決する方法としての遺伝的アルゴリズム

自然環境に適応して進化する生物のダイナミクスを模倣することで解を導く進化的計算の一つに、「遺伝的アルゴリズム (GA)」がある。GA は、実際の生物進化に見られる種の保存戦略および適応価探索のメカニズムを、組み合わせ最適化問題において準最適解を発見するアルゴリズムに見立てたものである (小林, 2008)。

組み合わせ最適化問題とは、複数の物を組み合わせる際に、ある制約条件の下で最適な組み合わせを選び出す問題のことを言う。そのような問題として、「ある街の家々をセールスマンが巡回するとき、どのような順路をたどれば最も短い距離で仕事を終わることができるか」という例が考えられる。巡回しなければならない家を  $n$  とすると、考えられる順路の数は  $(n-1)!/2$  個となる。家の数が少ない場合は、全ての順路をしらみつぶしに調べることで最適解を得ることができるが、家の数が多いと順路の数は  $n$  の階乗に比例して増加するため、全ての組み合わせを試すのにかかる時間も  $n$  の階乗に比例して増加してしまう。

本モデルにおける探索空間はエージェントの行動パターンであるが、これには手の状態数×作業台の状態数×スタックの状態数に、各状態でどの行動が取れるかということまで織り込まれるため、探索すべきパターン数は 2 の 4149 乗という膨大な大きさを持つことになる。

しかし、このような問題でも GA を用いれば準最適解を比較的短時間で見つけ出すことができる。GA によって時間短縮が行われる理由は、それが全ての組み合わせを網羅的に計算するのではなく、短時間で探索できる順路を選択し、選択した順路の組み合わせやわずかに変更した順路とこれまでに見つけた最適な順路を比較するという方法を繰り返して解を導出するからである。

### 2.3.3 生物進化のアナロジーとしての遺伝的アルゴリズム

GA は進化的システムの微量分析的シミュレーションとしても利用される (Mitchell, 1996)。その試みは、生涯を通じた学習がどのように種の進化に影響を与

えるか、性選択の進化的効果は何か、与えられた生態系における異種間の相対的な密度は何か、観察されたシステムの中で進化と適応はどのように行われるかといった疑問に解答することを目指すものである。

本研究における「進化シミュレーション」の水準は現実の生物進化の水準と必ずしも同一とは言えないが、ある仕組みとその発展可能性をセットとして有するモデルが、特定の環境においてどのように進化するかをテストすることは、その元となったシステムの適応性や進化プロセスがもつ一般性、普遍性を見出すことに繋がる。もしシミュレーションが抽象化の影響を受けて仮説と異なる結果を導出するのであっても、どのようなモデル化を行うと対象としていた現象が観察されなくなるのか、という結果を得ることができる。それを元にモデルをより現実へと近づけてテストし、結果から再び修正を行う。これを繰り返すことでモデルの精緻化および妥当性の考察を行うことが可能となる。

## 第3章 モデル

本章では物体操作のモデル化と進化シミュレーションの構築のために必要な理論と方法について基礎的な知識を説明するとともに、本研究で物体操作の進化を模倣する上で用いたモデルと、シミュレーションの設計について詳細を述べる。

### 3.1 物体操作モデルの設計

#### 3.1.1 物体操作モデルの構成

まず、物体の組み合わせ操作を行うエージェントをスタック付きオートマトンとしてモデル化する。オートマトンとは計算理論や人工知能の分野において用いられる、記号操作によって計算処理を行うモデルのことであり、本研究では物体操作を行うエージェントの動作を可能な限り単純化するためにこれを用いる。このモデル化の妥当性に関しては5章で議論を行う。

エージェントには、物体を持つための手が一つ、物体を一時保存するスタックが一つある。物体の組み合わせは一つの作業台で行われる。エージェントの行動は手・スタック・作業台という三ヶ所の状態によって次の六種類から選択される。

- **input** : ランダムに物体を手にする。
- **return** : 手の物体を捨てる。
- **merge** : 手の物体を作業台の物体と組み合わせる（作業台が空の場合は作業台に置く）。一度組み合わせた物体は一つの物体として扱われ、元の二物体には戻せない。
- **stop** : 作業台上の物体を完成品とする。
- **push** : スタックに作業台上の物体を保存する（ただしスタックに入れられる物

体は一つのみである.)).

- **pop** : スタックから物体を取り出して作業台上の物体と組み合わせる.

どんな状態でどの行動を取れるかは、個体ごとに定められた状態遷移規則により決まる. ある状態で複数の行動選択が可能な場合は、その中からランダムに行動選択される.

このシミュレーションでは、三種類の物体 **S, M, L** を用いて最大三つまでの物体を組み合わせた道具を作ることがエージェントの目的となっている (以下, 組み合わせられた物体を「**LM**」「**LMS**」のように表現する). 道具の製作には同じ種類の物体を何度も使うことができ、**SSL** や **MMM** といった道具を作ることも可能である.

状態の数は三つ組の道具を作るのに必要な分, すなわち手の状態が 4 ( $\epsilon$ , **S, M, L**), スタックの状態が 13 ( $\epsilon$ , **S, M, L, SS, SM, SL, \dots, LM, LL**), 作業台の状態が 40 ( $\epsilon$ , **S, M, L, SS, SM, SL, \dots, LLM, LLL**) あり, それぞれに **input, return, merge, push, pop** の各遷移規則が当てはめられている (作業台に関しては **SSS** 以降の状態では **input, return, merge** のみ, **SSSS** 以降の状態では **return** のみとした. これはスタックに入れられる物体の種類を制限しなければ, 作業台の状態が際限なく大きくなってしまうためである). 唯一 **stop** は手とスタックに何も無い状態でのみ選択することができ, **stop** が選択されたときを一つの道具の完成とする. **stop** 操作自体は道具が三つ組でない場合も可能である. このため **stop** に関する状態と遷移規則の数は三つ組までの全ての道具と空状態を足し合わせた 121 ( $\epsilon$ , **S, M, L, SS, SM, SL, \dots, LLM, LLLL**) になる.

操作開始から **stop** が選択されるまでが一つの道具を作製する工程である. 道具が一つ完成したら次の道具製作に取りかかる. 一体のエージェントの 1 世代における操作回数には上限が設定されており, その上限値までであればいくつでも道具を作ることができる.

### 3.1.2 物体操作モデルにおける行動文法の定義

本モデルにおいて, 行動文法における二つの戦略は以下のように表現される.

- **ポット戦略** : **input** した物体を **merge** で組み合わせる, もしくは **return** で戻すという行動を繰り返し, 最終的に三つ組の道具を完成させる方法. スタックは必要としない.



- サブアセンブリ戦略: ポット戦略の行動に加え, 一度組み合わせた物体 (MS や MM など) を **push** によりスタックへ保存し, **pop** で作業台上の別の物体と組み合わせて三つ組の道具を完成させる. (スタックを使っても **pop** する物体が二つ組でなく, かつ作業台上の物体と組み合わせられなければサブアセンブリ戦略ではない.)

両戦略の例として道具 LMS を最短の操作回数で作った際の状態遷移図を図 3.1 および図 3.2 に示す. 図中の丸で囲まれた文字はエージェントが手に何を持っているかを表し, 丸の上下の赤字波括弧は作業台上の物体を表す. 矢印は状態遷移の方向であり, スタックを使用していないときを青, スタックを使用しているときを緑で表している. 矢印の上の黒字は遷移を行った際の行動とスタックの状態変化 (変化前/変化後) である.  $\epsilon$  は空文字 (その場所に何も無いこと),  $\$$  はスタックの底を表わす.

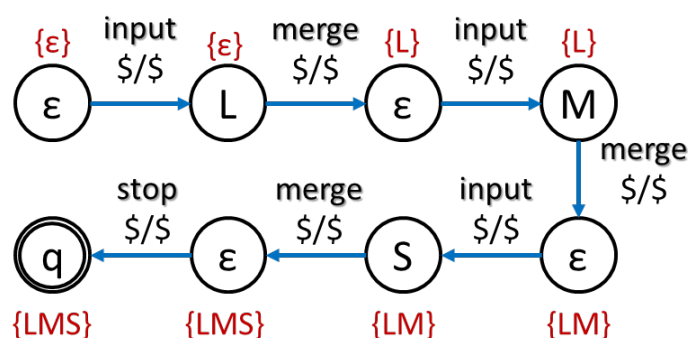


図 3.1 ポット戦略による状態遷移

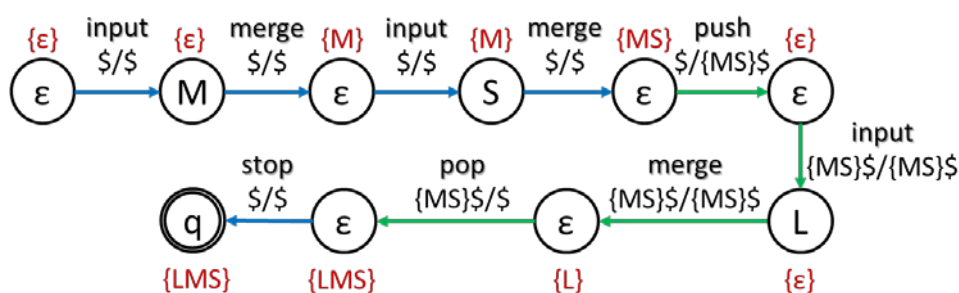


図 3.2 サブアセンブリ戦略による状態遷移

三つ組の道具を作る上では, ポット戦略を使っても, サブアセンブリ戦略を使っても, 作製可能な道具の種類は変わらない. サブアセンブリ戦略はスタックを用いる分, ポット戦略よりも操作回数が多くなる.

## 3.2 進化シミュレーションの設計

### 3.2.1 状態遷移表の符号化

行動文法の生物進化を，遺伝的アルゴリズムを用いてモデル化する．オートマトンの状態遷移規則を遺伝子型とし，ある遷移が可能か否かを 1 と 0 のバイナリ列で表現する．二つ組の物体までの状態（手の状態  $4 \times$  作業台の状態  $13 \times$  スタックの状態  $13 = 676$ ）と三つ組の状態（手の状態  $4 \times$  作業台の状態  $27 = 108$ ）と四つ組の状態（手の状態  $4 \times$  作業台の状態  $81 = 324$ ）全てに遷移規則を当てはめバイナリ列に符号化した結果，遺伝子長は  $4149$ （「input」「return」「merge」「push」「pop」の  $5$  行動  $\times 676$  + 「input」「return」「merge」の  $3$  行動  $\times 108$  + 「return」の  $1$  行動  $\times 324$  + 「stop」  $\times 121$ ）となった（stop は四つ組までの物体が作業台にあるときのみ選択可能なため  $3^4 + 3^3 + 3^2 + 3^1 + 3^0 = 121$ ）．評価はエージェントが作製した道具に対して設定された適応度関数により行われる．詳しくは次章で説明する．世代交代は次世代用の遺伝子プールを用意し，次の世代の設定個体数を満たすまでルーレット選択による親二体の選択と一点交叉による子二体の生成を繰り返す．突然変異は各遺伝子座に一定確率でビット反転を行うこととする．

このシミュレーションの目的は，ポット戦略のみを使用する集団からサブアセンブリ戦略も使用する集団への生物進化が，どのような条件下で起こるかを確かめることである．したがって，初期個体群はサブアセンブリ戦略を使う個体が存在しないよう，「push」および「pop」を使えない集団とし，個体ごとランダムに決定する．

stack	work bench	action					
		hand	input	return	merge	push	pop
\$	ε	ε	\$, {ε}, S	\$, {ε}, ε	\$, {ε}, ε	-	-
			\$, {ε}, M	\$, {ε}, ε	\$, {ε}, ε	-	-
			\$, {ε}, L	\$, {ε}, ε	\$, {ε}, ε	-	-
		S	\$, {ε}, S	\$, {ε}, ε	\$, {S}, ε	\$, {ε}, S	\$, {ε}, S
M	\$, {ε}, M	\$, {ε}, ε	\$, {M}, ε	\$, {ε}, M	\$, {ε}, M		
L	\$, {ε}, L	\$, {ε}, ε	\$, {L}, ε	\$, {ε}, L	\$, {ε}, L		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

遺伝子配列 = 1110011111...

図 3.3 状態遷移表の符号化 (一部)

### 3.2.2 シミュレーションプロセス

2章で述べたように、本シミュレーションにおける生物進化のモデルには遺伝的アルゴリズムを用いる。設計は主に小林 (2008) を参考に行った。シミュレーション全体の流れは図 3.4 のようになる。各ブロックの中身については以下で説明する通りである。

- 初期集団の生成：1 世代目の全個体のゲノム（総遺伝情報＝全遺伝子配列）を初期個体群生成専用のゲノムに従って生成する。この時点では各個体のゲノムにバリエーションはなく、どの個体もポット戦略の使用に必要な input, return, merge の遺伝子しか ON になっていない状態である。この初期ゲノムも収束する解候補の一つであり、生態的環境（適応度関数）やパラメータによってはほとんど変化がない場合もありうる。
- 個体の評価：個体の評価において各エージェントはまず、制限された操作回数の中で道具製作を行う。製作された道具は適応度関数（4章で詳述）に従って評価され、各個体の適応度が決定する。工学応用の分野ではこの処理ブロックにおいて終了条件を設けることがあるが、これは生物進化のシミュレーションであるため、パラメータである世代の上限に達した時点でシミュレーションを終了することとする。
- 個体の選択：各個体の適応度を基に、次世代個体の親となるペアを N 個体分、重複を許して選択する。ここでは選択方式として、適応度に比例して選択確率

が大きくなるルーレット選択方式を設定した。個体数  $n$ ，ある個体  $i$  の適応度を  $F_i$  とすると，ある個体  $i$  が選択される確率  $P_i$  は次式で表される。

- 交叉：現世代個体の遺伝子を配合することによって次世代個体を発生させる。ここでは交叉方式として，最も単純な一点交叉を選んだ。一点交叉では選択された個体ペアの遺伝子配列を無作為な一点を選択し，その点以降の遺伝子配列を交換することで互いの遺伝子が交わった次世代個体2つを生成する。
- 突然変異：交叉で生成された次世代個体の遺伝子の特定部分を一定の確率で反転する。この確率は突然変異率（Mutation rate）というパラメータの一つである。現実の生物進化における突然変異は遺伝子の転写ミスによって起こる。突然変異率が高いほど遺伝子のバリエーションが多くなる。
- 世代交代：現世代個体の遺伝子プールに次世代個体を上書きする。ある世代の個体が次の世代に残ることはない。

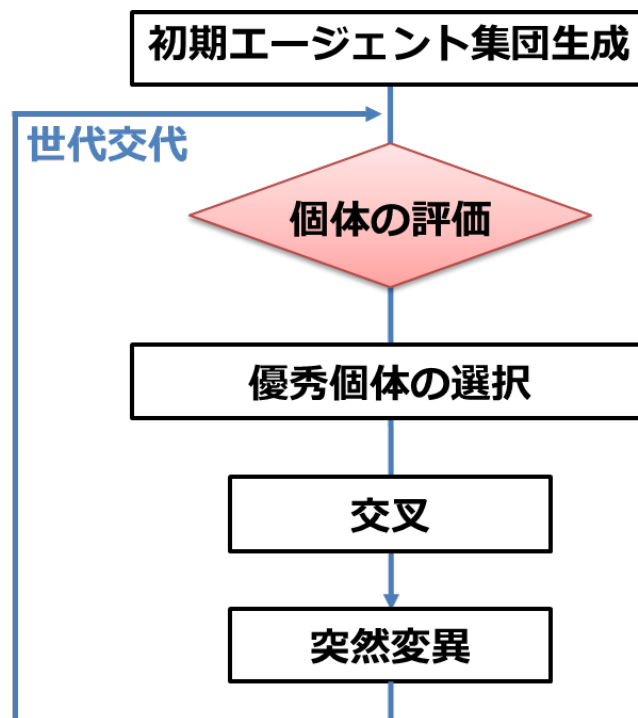


図 3.4 GA の計算処理の流れ

## 第4章 物体操作の進化シミュレーション

本章では、前章にて定式化した物体操作モデルを用いた進化シミュレーションの結果を示す。実験ではまず、サブアセンブリ戦略の適応性にあたりをつけるため、遺伝的アルゴリズムによる交叉以外はエージェント同士で相互作用する要素をもたない適応度の定義を用いて進化シミュレーションを行い、得られた結果を分析した。その考察を基にして、適応度空間を介して個体間で相互作用するモデル（以下、個体間相互作用モデル）を作製・実行し、それぞれについて分析を行った。

### 4.1 個体間相互作用無しモデルの実験設定

#### 4.1.1 適応度関数の設定

本研究では遺伝的アルゴリズムを解探索の手段ではなく、「サブアセンブリ戦略が使用されるようになる」という解に対する問題（＝適応度関数）を特定する手段として活用するということは前章でも述べた。適応度関数とは、生存や生殖といった遺伝子の保存に対して個体のどのような行動が評価されるかを定式化したものである。したがって、ある適応度関数を設定した際にサブアセンブリ戦略を使用するエージェントが、サブアセンブリ戦略を使用しないエージェントよりも多くなるのであれば、その適応度関数が表現する環境においてサブアセンブリ戦略が適応性を持っていると結論づけることができる。

まず、どのような道具製作が評価されるかという問いのもと、適応度関数として以下の三種類を設定した。 $x$ は三つ組までの作製可能な道具を表し、 $n_x^i(t)$ は $t$ 世代目のエージェント $i$ が道具 $x$ を作った回数を表す。

I：任意の道具製作

$$F_I(t) = \sum_{allx} n_x^i(t)$$

三つ組までの任意の道具を多く作る上でサブアセンブリ戦略が有効だったという予想に基づく。

II：特定の複雑な構造をもつ道具製作

$$F_{II}(t) = n_{LMS}^i(t)$$

複雑な構造を持った道具を作るうえで、サブアセンブリ戦略が有効だったという予想に基づく。ここでは3つの異なる物体を必要とするLMSを複雑な構造の道具として設定した。

III：多様な道具製作

$$F_{III}(t) = \sum_{allx} \delta(n_x^i(t)),$$

$$\delta(n_x^i(t)) = \begin{cases} 1, & n_x^i(t) \geq 1 \\ 0, & n_x^i(t) = 0 \end{cases}$$

できるだけ多くの種類の道具を作製する上でサブアセンブリ戦略が有効だったという予想に基づく。

これらの適応度関数では、一回の道具製作にかかる操作回数は適応度に直接は関わらない。しかし、操作回数には上限が設定されており、製作した道具の数が適応度に反映されるため、一回の道具製作にかかる操作回数が多いと適応度が小さくなる。よって、素朴に推測すればスタックを使用するぶん操作回数の多くなってしまいうサブアセンブリ戦略は、ポット戦略に比べて使われにくいと考えられる。

#### 4.1.2 パラメータの設定

シミュレーションの基準的なパラメータの設定値を表4.1に示す。この値はベースライン条件であり、あとで言及する適応度関数 $F_{III}$ において、最終世代に到達した際にサブアセンブリ戦略が全体の約八割で使用されるようになるよう設定した。これは

パラメータやモデルに変更を加えた際に，それによる出現数の増加や減少をわかりやすくするためである．

表 4.1 単純な物体操作モデルの基準パラメータ

各世代における個体数	200
世代数	5000
突然変異率	0.001
操作回数の上限	1000

## 4.2 結果と考察

### 4.2.1 実験 1：サブアセンブリ戦略が有効な適応度関数

#### 4.2.1.1 分析 1.1：サブアセンブリ戦略が進化する適応度関数

前節で定義した三種類の適応度関数において，サブアセンブリ戦略を使用する個体数の変化を，シミュレーションの試行回数 200 回で平均したものを図 4.1 に示す．図は横軸がエージェントの世代，縦軸がサブアセンブリ戦略を使用するエージェントの数を表す．この図からはサブアセンブリ戦略を使用する個体の数が， $F_I$ （任意の道具製作）では一切増加せず， $F_{II}$ （特定の複雑な道具製作）ではわずかに増加し， $F_{III}$ （多様な道具製作）では世代を経るごとにほぼ単調に増加していくことがわかる．

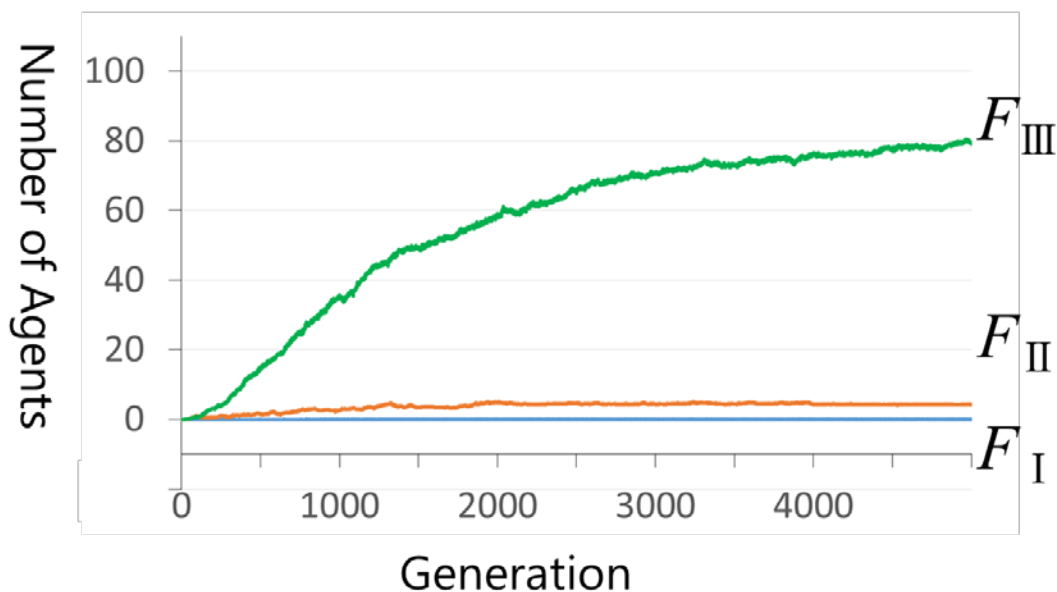


図 4.1 各適応度関数におけるサブアセンブリ戦略使用個体数の変化

次に、適応度関数  $F_{III}$  の個々の試行におけるサブアセンブリ戦略の個体数変化をいくつか図 4.2 に示す。図は横軸が世代、縦軸がサブアセンブリ戦略を使用している個体の数である。変化の平均値を算出した図 4.1 ではサブアセンブリ戦略を使用する個体数は漸進的に増加しているように見えるが、個々のシミュレーションにおいては漸進的に増加する場合もあれば、突然出現しすぐに全個体が使用するようになるという変化を見せる場合もある。図 4.2 から図はごく一部であり、乱数の初期値が異なるだけでこの他にも多様な出現パターンが存在する。以降の小節では、どのようなメカニズムがこうした変化を作り出しているのか、それらに共通する一般的な性質とは何かを、作りだされる道具や遺伝子の変化から詳しく分析していく。

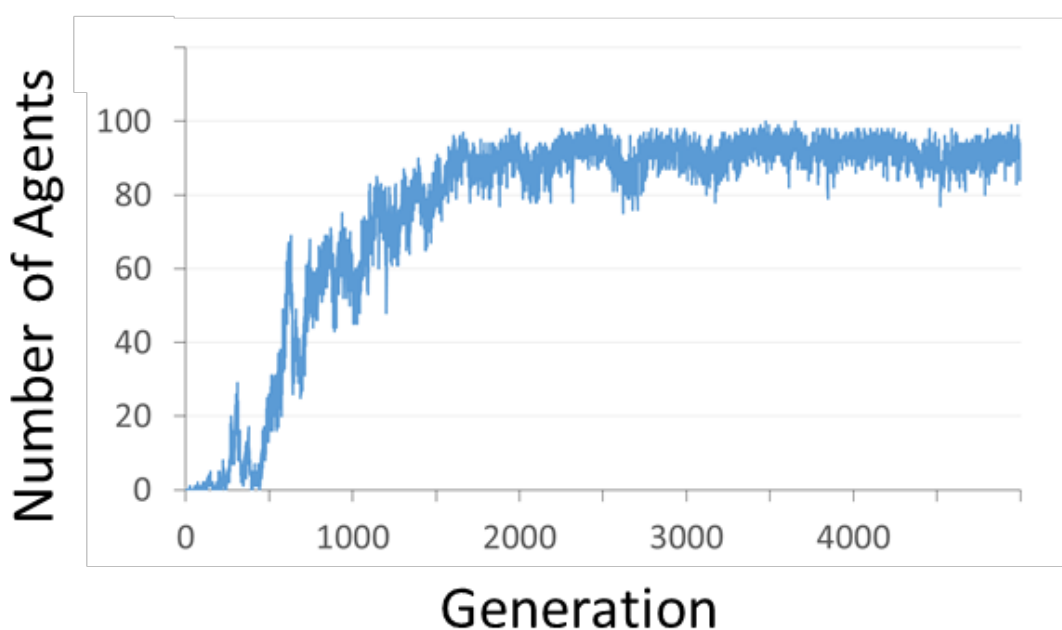


図 4.2(a) およそ単調に増加



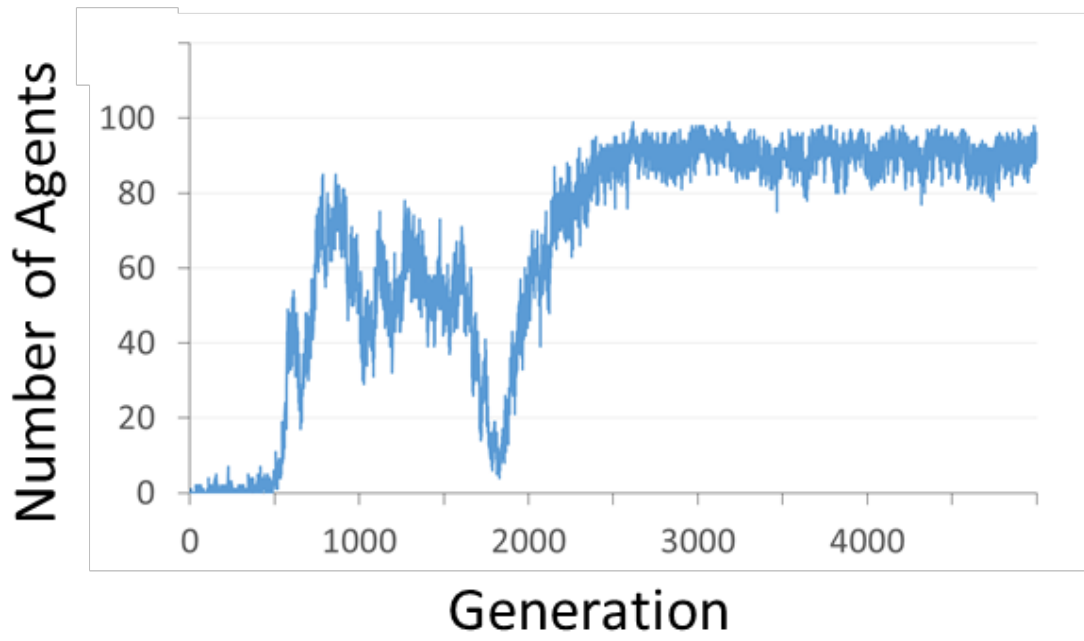


図 4.2 (b) 一度減少して増加

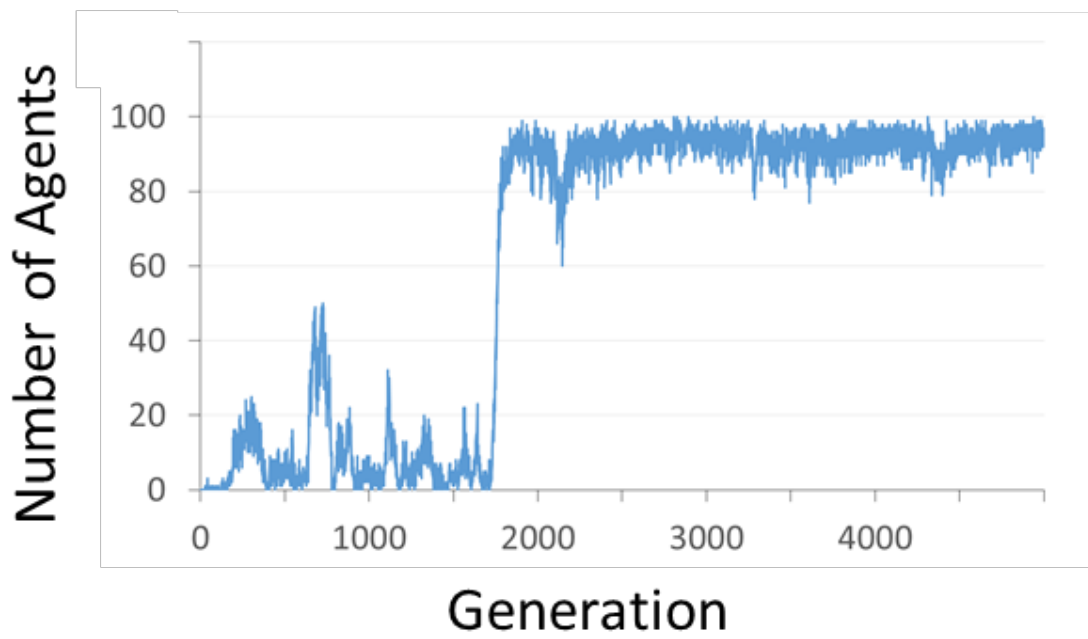


図 4.2 (c) 急激に増加

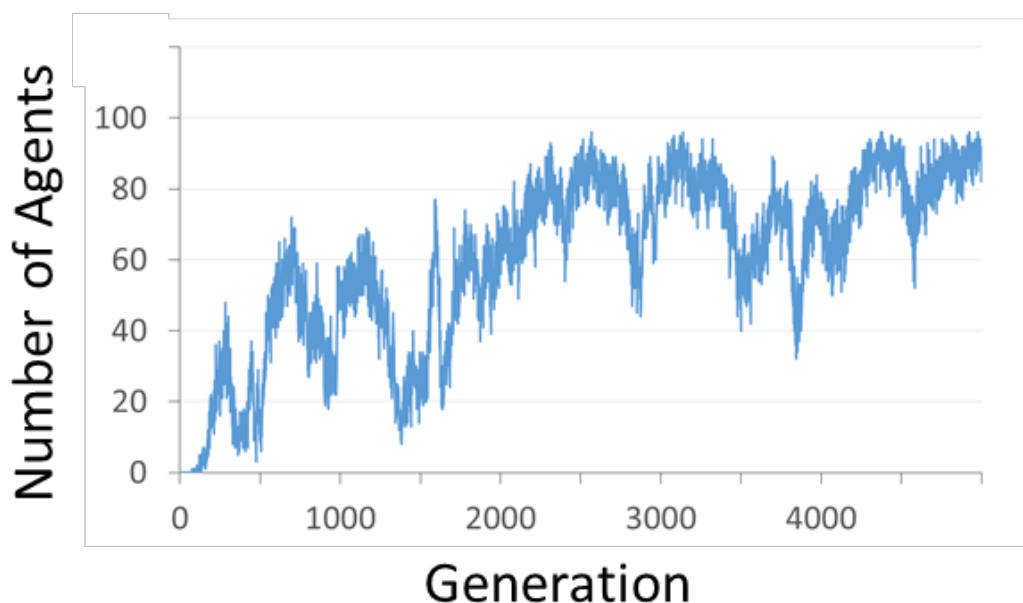


図 4.2 (d) 徐々に増加

図 4.2  $F_{III}$  のいくつかの試行における  
サブアセンブリ戦略を使用する個体数の変化

#### 4.2.1.2 分析 1.2 : 作製される道具の変化

この小節では、図 4.2 で例示したサブアセンブリ戦略使用個体数変化の各例について、それぞれの道具の作られ方とサブアセンブリ戦略の使われ方の違いから規則性を見出し、後に続く遺伝子解析への手掛かりとする。各シミュレーションにおいて作製される道具を表 4.2 に示す。表 4.2 における SAS はサブアセンブリ戦略の略記、POT はポット戦略の略記であり、以降名称の長さが表記の妨げになる場合はこれを用いる。注意点として、表 4.2 における POT の表記は、その道具がポット戦略とサブアセンブリ戦略両方で作られる場合にどちらが使用されるかを区別するためのものであり、特に断りがない限り三つ組の道具はポット戦略で作られている。

表 4.2 サブアセンブリ戦略が出現するまでに作製される道具

(a) およそ単調に増加

作製が始まる世代	作製される道具
1~100	L, M, MS, LL, LS, LM, ML, MLL, LML, MLS, MLM, LSM
100~200	MM
500~600	SLM(SAS)
1200~1300	SML(SAS)

(b) 一度減少して増加

作製が始まる世代	作製される道具
1~100	L, M, ML, LL, LM, LS, S, LSS, SM, MS, LSM, LLM, LLS
200~300	LML(POT), LMM, MM, SML
400~500	LLL, SMS, LML(SAS)
1900~2000	LML(POT), LSM(SAS)

(c) 急激に増加

作製が始まる世代	作製される道具
1~100	M, S, L, LM, LLS, LMS, LML, LMM, LLL, LLM, LL, SL
100~200	LMS
1000~1100	SM
1700~1800	SLS(SAS), MLS(SAS)

(d) 徐々に増加

作製が始まる世代	作製される道具
1~100	M, ML, MM, MLS, MLM, MLL(POT), MSM, MSL, L, LM, MS, LL, LLL
500~600	MLL(SAS)
800~1300	LMM, MM, MMM, MMS, SMM, LML, MML, LLS
1400~1600	MML, LLS, SLL(SAS)

このモデルにおいてサブアセンブリ戦略は、二つ組の物体をスタックから取り出して一つの物体に併合する操作のことであるが、表 4.2(a)でサブアセンブリ戦略が使われている道具 SLM と SML に注目すると、その二つ組の部分である LM と ML

をもつ道具 LML および MLL・MLS・MLL が既に作られていることがわかる。ここから、ポット戦略で道具を作る際の途中段階（例えば LML の LM, MLL・MLS・MLM の ML）を部品として保存し、サブアセンブリ戦略によって SLM や SML を作っているのではないかと予想できる。サブアセンブリ戦略は一般にこの形式で使用される。

#### 4.2.1.3 分析 1.4 : 遺伝子型の変化

ここまでサブアセンブリ戦略がどのように使用されるかのプロセスを見てきたが、それは使用可能になるという意味（進化のプロセス）とは異なる問題である。例えば図 4.2(a)では図 4.3 に示すように、サブアセンブリ戦略を使用した個体と使用可能な個体とは数が異なる。ここで使用可能かどうかは、生成されたエージェントに 50000 回の物体操作テストを行わせ、サブアセンブリ戦略が使われたかどうかで判断している。本小節では、前小節で見られたサブアセンブリ戦略の性質から関係する遺伝子を特定し、サブアセンブリ戦略を使用するエージェントの進化のプロセスとメカニズムについて明らかにする。

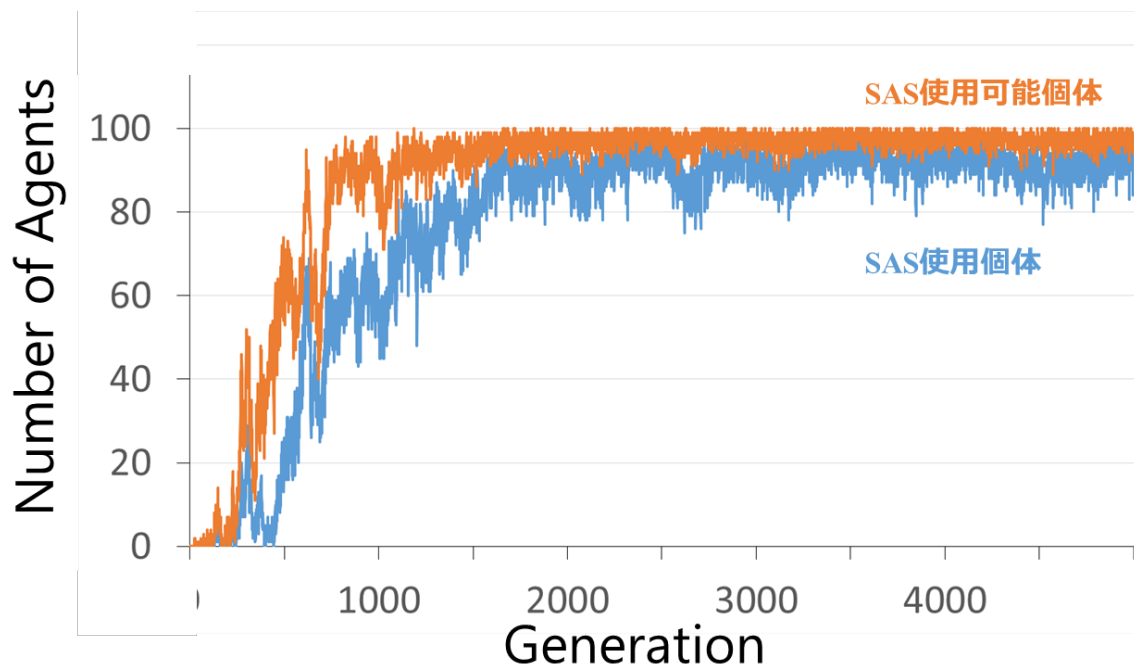


図 4.3 サブアセンブリ戦略使用個体数と使用可能個体数の違い

図 4.4 は図 4.2(a)におけるサブアセンブリ戦略を使用可能な個体数の変化と、サブアセンブリ戦略の使用に関わる遺伝子をもつ個体数の変化を表したものである。表 4.2 に示したように、この試行では 500 世代目付近から道具 SLM がサブアセンブリ戦略で作られるようになるが、それと同時に「手に S があるとき作業台の物体 LM を push する」遺伝子をもつ個体が増加する。この遺伝子の切り替わりがサブアセンブリ戦略の起点になっていると考えられる。その後 1200 世代目付近で「手が空のとき作業台の物体 ML を push する」遺伝子が生じ、道具 SLM がサブアセンブリ戦略で作られるようになったと考えられる。

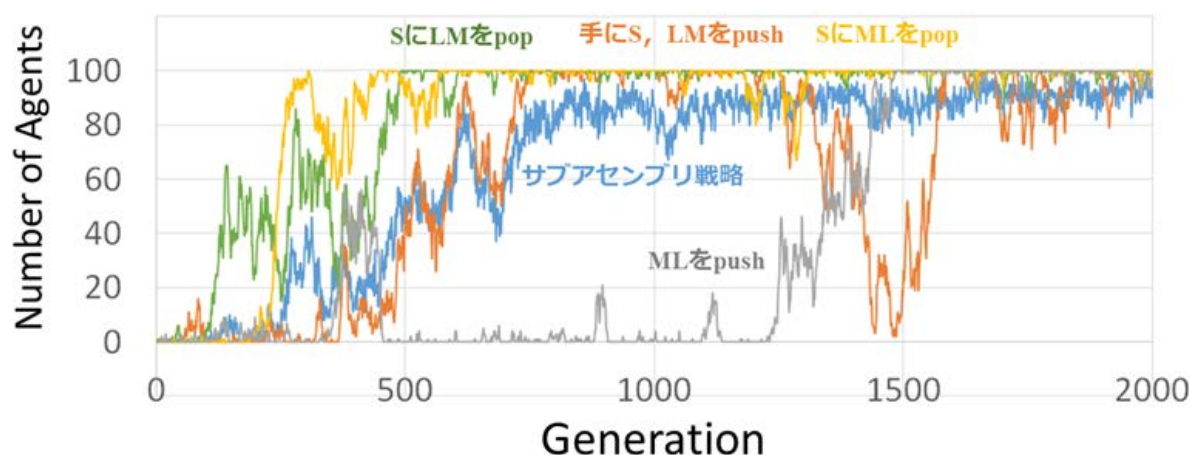


図 4.4 図 4.2(a)における遺伝子の個体数変動と SAS 使用可能個体数の変動

図 4.5 は図 4.2(b)において SAS が使用された道具と SAS 使用可能個体数の変化を表す。途中でサブアセンブリ戦略を使用する道具が切り替わっていることがわかる。図 4.6 を見ると、手に L、作業台に LLM があるとき input を行う個体の増加とともにサブアセンブリ戦略を使用する個体は減少している。今回四つ組の道具を作って得られる適応度は 0 であるため、この行動の遺伝子は適応度に関してなんの貢献もしない。よって、この遺伝子をもつ個体がサブアセンブリ戦略を使って LLM を作っていた個体よりも適応度が高くなったため、LLM を作る個体は減少したと考えられる。

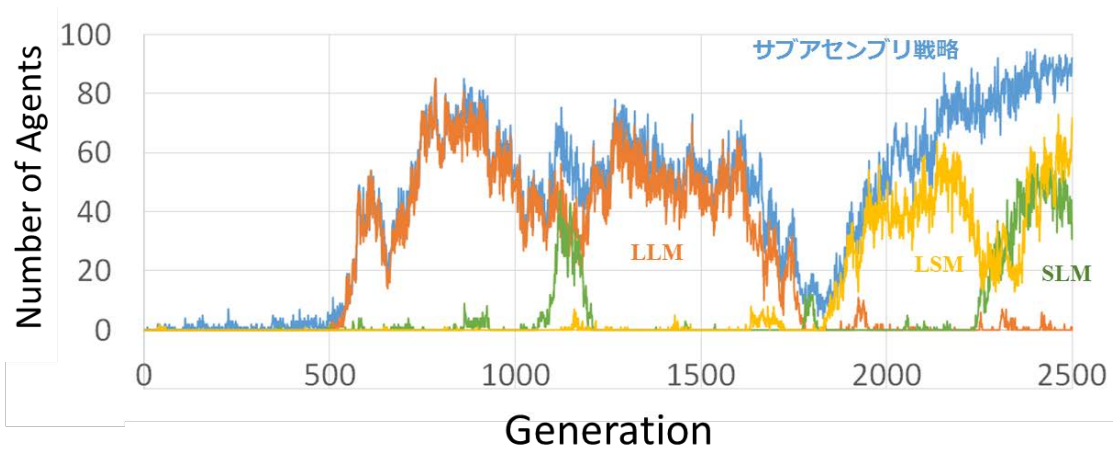


図 4.5 図 4.2(b) において SAS が使用された道具と SAS 使用可能個体数の変動

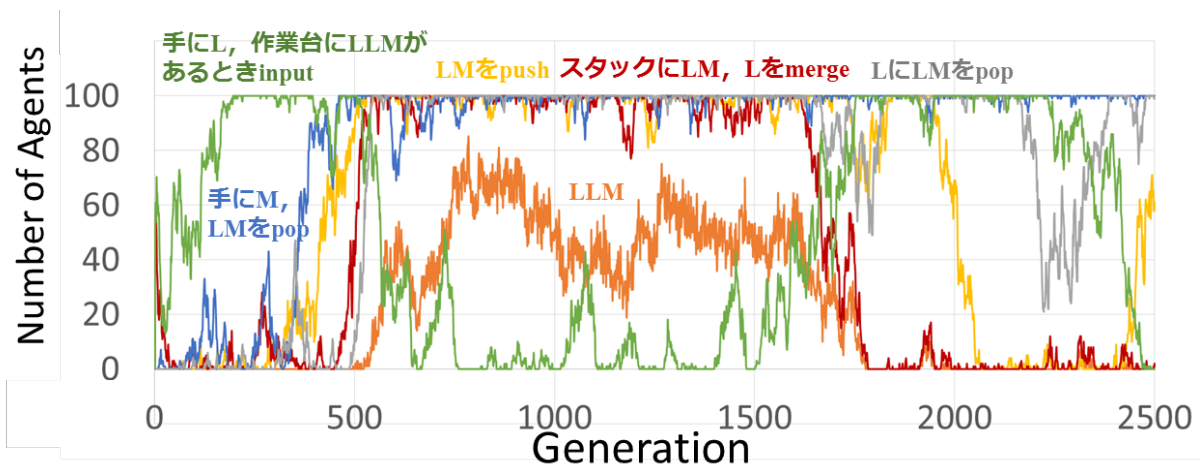


図 4.6 図 4.2(b)における遺伝子と SAS の使われる道具の個体数変動

図 4.7 には図 4.2(c)における遺伝子の個体数変動と SAS 使用可能個体数の変動を示す。サブアセンブリ戦略が急激に上昇した(c)では、LS を push する遺伝子が機能する以前に、作業台上の S に LS を pop する遺伝子と、作業台上の M に LS を pop する遺伝子が機能していることがわかる。これによりサブアセンブリ戦略が二つの道具で同時に可能になり、適応度が他個体より急激に大きくなったためサブアセンブリ戦略を使える個体が進化したと考えられる。その証拠に、LS を push する遺伝子が集団中に増殖していく様子を図 4.8 に示す。縦軸は個体の適応度であり、横軸

は世代である.

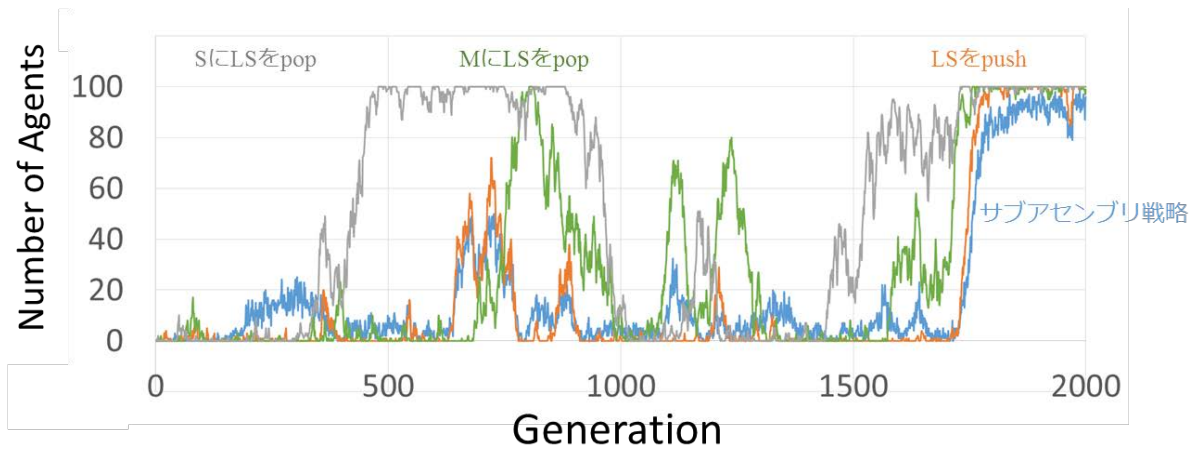


図 4.7 図 4.2(c)における遺伝子の個体数変動と SAS 使用可能個体数の変化

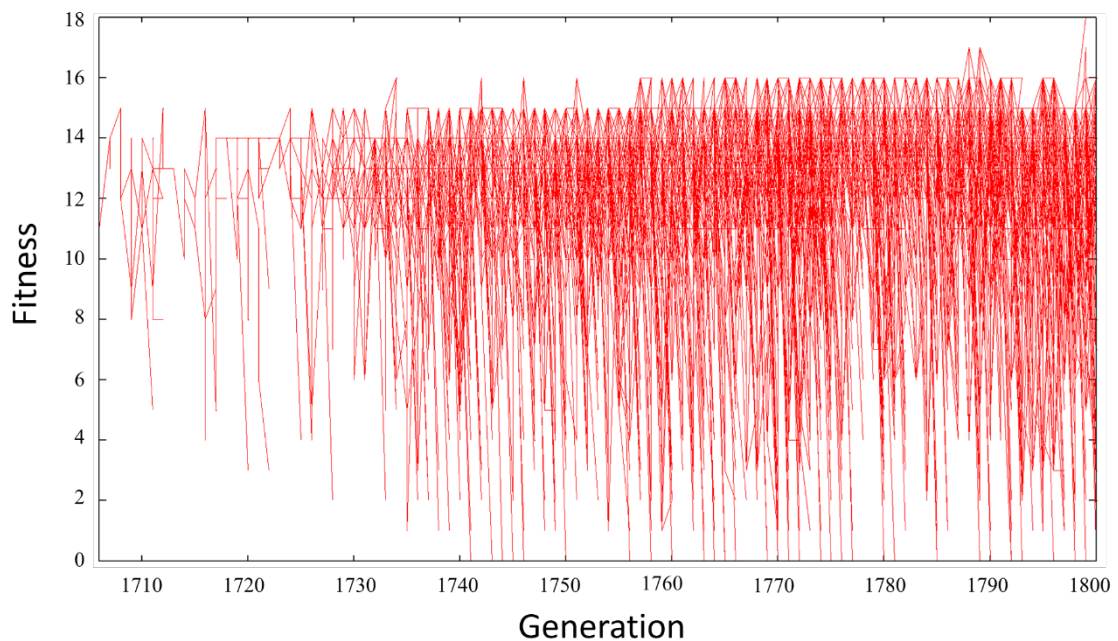


図 4.8 LS を push する遺伝子をもつエージェントの系図

図 4.9 は図 4.2(d)の SAS が使用された道具と SAS 使用可能個体数の変化を表すが、ここでサブアセンブリ戦略が使用可能な個体はいくつもの種類の道具において現れては消えるという変化を繰り返す。関係する遺伝子の数が多く、また個体数が振幅するメカニズムは図 4.2 (b)で見られたものが複数あるというだけなので、遺伝

子の個体数変動は省略する.

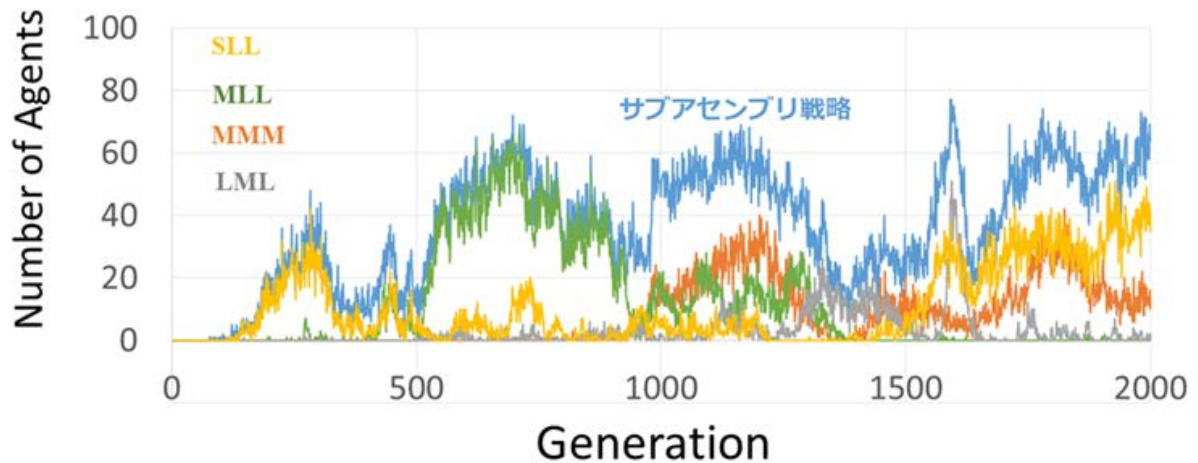


図 4.9 図 4.2(d)において SAS が使用された道具と SAS 使用可能個体数の変化

これらに共通する進化プロセスは、二つ組の物体をスタックから取り出す行動 (pop) に関わる遺伝子が先に出現したのち、その二つ組をスタックへ入れる行動 (push) に関わる遺伝子が出現するという進化経路を辿るということである。このプロセスは他の試行においても同様であった。理由として、push 行動を行う遺伝子が先に機能してしまうと、スタックから物体を取り出すことができなくなるということが考えられる。スタックに物体が入ったままでは stop ができないため、pop と対応のついていない push を使うエージェントは操作が手詰まり状態に陥ってしまう可能性があり、生き残りにくいことが推測される。pop 行動を行う遺伝子はたとえ push より先に獲得されたとしてもエージェントになんのデメリットも与えない。

このメカニズムの例外として、ある遷移状態に至る行動の遺伝子をエージェントが持っていない場合、その状態から先の行動を決定する遺伝子は中立的になる、という仕組みが考えられる。この場合、ある行動の遺伝子が機能するようになった結果、中立進化によって偶然形成されていたサブアセンブリ戦略の操作パターンが有効になることがありえる。

#### 4.2.1.4 $F_{II}$ におけるサブアセンブリ戦略の適応性

これまで適応度関数  $F_{III}$  におけるサブアセンブリ戦略の出現を見てきて、その適応



性はどうかやたら多様な道具製作を行うことにあると考えて良さそうである。しかし、適応度関数  $F_{II}$  では特定の道具を作ることにサブアセンブリ戦略が使われる、という予想に反する結果が出ている。ここから、サブアセンブリ戦略には「多くの種類の道具を作る」ということとは別の適応性が存在すると考えられる。

シミュレーション結果を見てみると、 $F_{II}$  でサブアセンブリ戦略が出現するパターンは、数世代で集団に拡散して安定するパターン（図 4.10(a)）と、一度出現するが数世代で使用されなくなるパターン（図 4.10(b)）の二つに分類することができる。

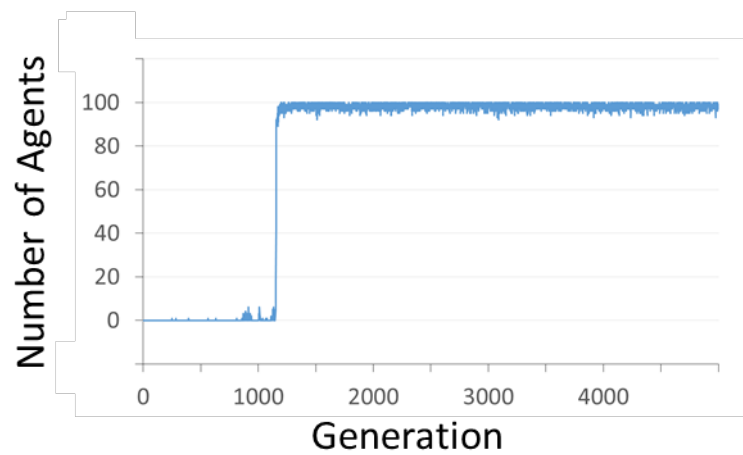


図 4.10 (a) 安定するパターン

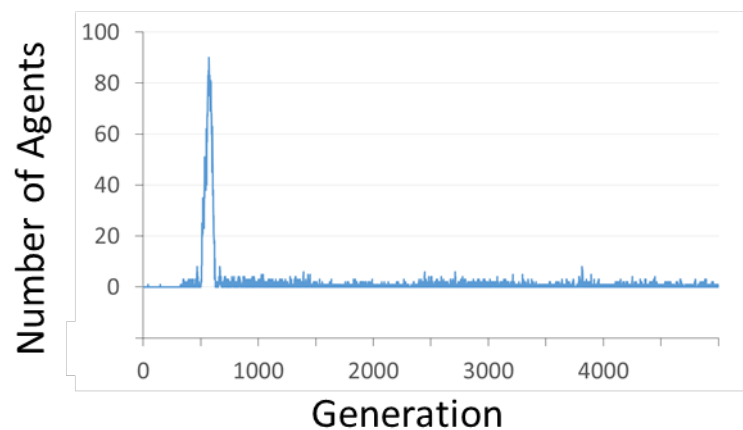


図 4.10 (b) 消失するパターン

図 4.10  $F_{II}$  におけるサブアセンブリ戦略の出現

使用されなくなるパターンは、ポット戦略のみで LMS を作るエージェントのほうが、サブアセンブリ戦略とポット戦略の併用で LMS を作るエージェントよりも高い適応度を得ることで起きている。素朴に考えれば、操作回数の少ないポット戦略を使うほうが一回の製作で消費する操作回数を短縮することができ、それだけ多くの道具 LMS を作るができるようになる。しかし、安定するパターンではサブアセンブリ戦略からポット戦略への切り替わりは起こらない。なぜサブアセンブリ戦略は使用され続けるのか、次節で説明を試みる。

## 4.2.2 実験 2：物体操作の進化順序

### 4.2.2.1 多様な道具を作るときのサブアセンブリ戦略の進化メカニズム

実験 1 では多様な道具製作が評価される環境を設定した際に、既存の道具の部品を用いてサブアセンブリ戦略が行われることがわかった。この結果の原因として、エージェントの操作パターンは遺伝子の構造に依存するため、ある道具 X を作れるようになった時点での遺伝子配列と、より近い構造をもつ遺伝子配列ほど形成されやすいという予想が立てられた。例えば、ポット戦略で道具 LMS を作るエージェントを進化させた場合、作製手順が途中まで同じ道具 LML や LMM が次に作られやすく、同じ論理でサブアセンブリ戦略を使って SLM や MLM を作る操作パターンも、ポット戦略で SLM や MLM を作る操作パターンが形成されるより早いはずである。

これを確かめるため、初期集団として道具 LMS を最短経路 (input → merge → input → merge → input → merge → stop の 7 操作) で作製できる個体を 100 個体用意しておき、進化シミュレーションを行った。図 4.11 は 300 世代までに作製される道具の数を 1000 回の試行で平均したものであり、図中の LLM, MLM, SLM はサブアセンブリ戦略によって作られた道具である。LMS と製作パターンが最も近い LMM と LML が出現した後、100 世代目あたりから L で始まる道具がポット戦略で作られるようになり、また LM を部品とする LLM や MLM がサブアセンブリ戦略によって作られるようになる。LLM, MLM, SLM の順に出現しやすいのは、LMS をポット戦略で作る際の操作手順として、最初の input と return の繰り返しで L が選ばれやすく、次の input で M、最後に S となっていることに起因すると推測される。

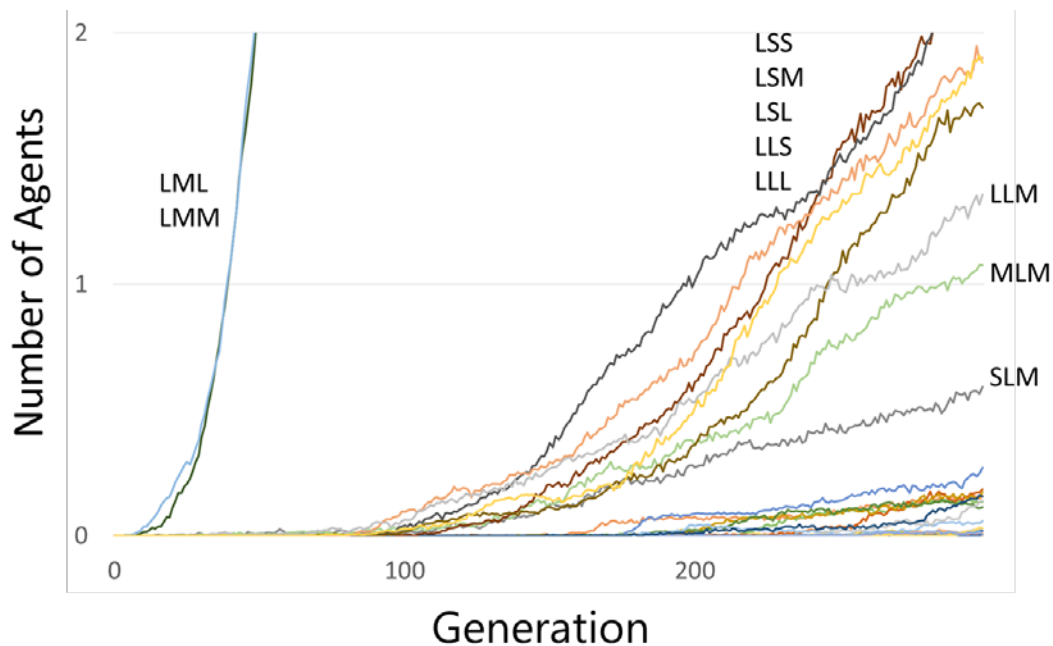


図 4.11 LMS が作製可能なエージェントの進化における道具の出現順序

むしろ、実験 1 の進化シミュレーションで、ある道具を作れるようになった際の遺伝子が最短経路であることはまずありえないため、LMS が作れたからといってこの順番通りに作製パターンが形成されるとは限らないが、サブアセンブリ戦略が多様な道具製作において使用されやすいのは、既存の操作パターンを流用して新しい道具を作れるようになるという現象がまったく新規な操作パターンを発見するよりも早く起こりうるから、と推測できる。

#### 4.2.2.2 特定の道具を作るときのサブアセンブリ戦略の進化メカニズム

簡略化した道具製作経路を図示して説明する。図 4.12 はエージェントが道具製作を行う際の、作業台の状態と全ての道具への到達経路を書いたものである。実線部分は input + merge による遷移、点線部分は push + input + merge + pop による遷移であり、赤い点線はサブアセンブリ戦略を示す。

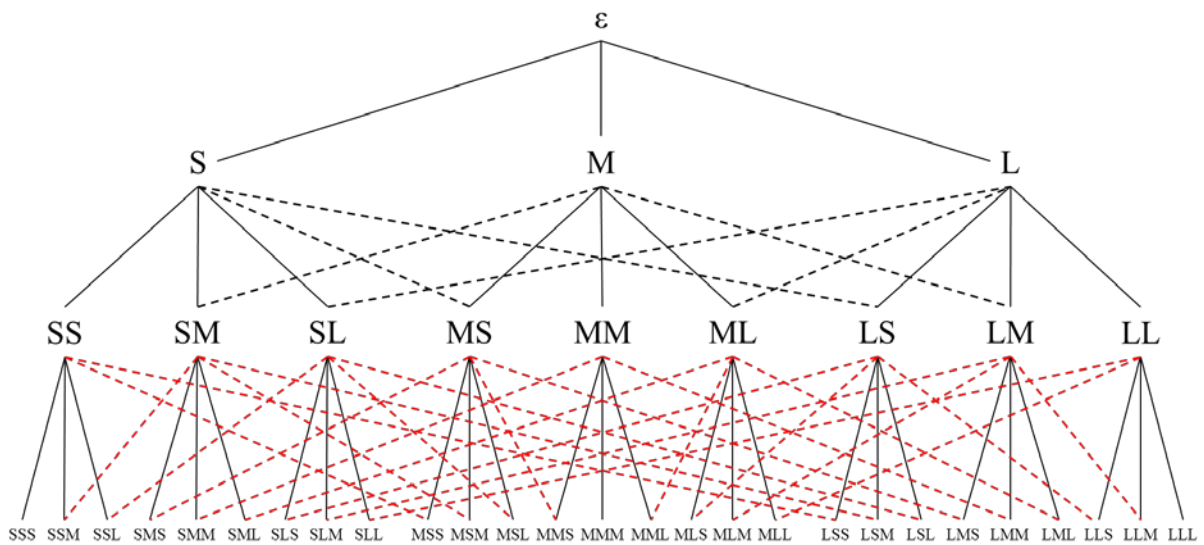


図 4.12 エージェントの道具製作経路

まず実線部分に注目する．ポット戦略のみしか使えない場合，LMS を作製する際に最初の input で遷移すべき手の状態は L である．もしもここで M や S が来てしまうと，return によって手の状態を戻す必要がある．さらにもし merge を行って作業台の状態を S や M にしてしまったら，stop 行動をとるか手詰まりになるかで初期状態に戻らない限り，LMS を作ることは不可能になる．しかしスタックを使用できる場合，最初に手の状態が S になってしまったとしても一度 push でスタックに保存し，作業台の上で LM を作って pop 行動をとる，あるいは作業台が M のときに pop し，再び push でスタックに保存して作業台が L になったら pop するという方法で LMS を作る事ができる．後者はサブアセンブリ戦略であり，このことからポット戦略とサブアセンブリ戦略を併用するエージェントは，複数の道具製作経路を持つことで操作の不確実性（本モデルでは input によって必要な物体が手に入らなかった時にあたる）による失敗が起こりにくくなるため，結果的にポット戦略のみを用いる場合と同等の適応度を得ることができているのだと考えられる．今回は三つ組の物体までしか試していないが，道具の製作工程が複雑になるほど可能な製作経路が多くなるので，操作の不確実性もそれだけ大きくなり，サブアセンブリ戦略の有効性が高まる．

ただし，この有効性が発揮されるのは操作に不確実性と不可逆性を伴う場合，もしくは手や作業台を元の状態に戻すのに時間やコストがかかる場合であると考えられ

る。本モデルではどの道具を手にとれるかが不確実であるモデルになっているが、手にとる道具をより分けられる環境探索能力が高い場合は不確実性を下げることができる。また、今回のモデルでは `merge` という操作が不可逆過程であり、物体を `merge` 前の状態に戻すことはできないものとしているが、もし物体を分割する操作ができるのであれば可逆的となる。ただしその場合も、余計に操作回数を費やしてしまうことから、時間やエネルギーの面でなんらかの不可逆性は必ず存在することになる。

適応度関数  $F_{III}$  でも、多くの試行においてサブアセンブリ戦略は使用され続けた。ポット戦略よりも操作回数が多いはずのサブアセンブリ戦略が、ポット戦略に置き換えられない理由として、この「特定の道具を作る上で失敗しにくい操作パターンとしてサブアセンブリ戦略が形成される」ということが考えられる。

## 4.2.3 実験 3：適応度分布の影響

### 4.2.3.1 道具の種類数による結果への影響

道具を多様に作ることがサブアセンブリ戦略の使用と進化につながっていることはわかったが、道具の種類数とサブアセンブリ戦略の使われやすさとの関係はどのようなになっているのか、適応度関数  $F_{III}$  の適応度分布を変えて調べることにする。 $F_{III}$  では全ての道具において、それを作製した際に得られる適応度を 1 としたが、ここではある物体からなる道具の数を適応度分布によって表現し、いくつかの道具の適応度を 0 にしたときサブアセンブリ戦略の出現頻度がどのように変化するか調べた。適応度が 0 であるということは、その構造が道具ではないということを意味する。

道具の出現プロセスに見られるように、ある道具の作りやすさは他にどんな構造の道具があるかに依存するため、種類数を減らすといっても適応度分布をランダムに変えると単純に比較ができない。それぞれの製作経路が独立している「L から始まる三つ組の道具」、「M から始まる三つ組の道具」、「S から始まる道具」という 3 つのカテゴリーを作り、一物体の道具と二つ組の道具に加えてこのカテゴリーがいくつあるかで比較を行った。比較する適応度分布は次のようになる。

- $F_{III\_B}$  : 最初に L の物体をもつ三つ組の道具の適応度が 0 で他は 1
- $F_{III\_C}$  : 最初に L と M の物体をもつ三つ組の道具の適応度が 0 で他は 1

表 4.3  $F_{III\_B}$  : 最初に L の物体をもつ三つ組の道具の適応度が 0 で他は 1

道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度
S	1	LM	1	SLL	1	LSS	0
M	1	LL	1	MSS	1	LSM	0
L	1	SSS	1	MSM	1	LSL	0
SS	1	SSM	1	MSL	1	LMS	0
SM	1	SSL	1	MMS	1	LMM	0
SL	1	SMS	1	MMM	1	LML	0
MS	1	SMM	1	MML	1	LLS	0
MM	1	SML	1	MLS	1	LLM	0
ML	1	SLS	1	MLM	1	LLL	0
LS	1	SLM	1	MLL	1		

表 4.4 最初に L と M の物体をもつ三つ組の道具の適応度が 0 で他は 1

道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度
S	1	LM	1	SLL	1	LSS	0
M	1	LL	1	MSS	0	LSM	0
L	1	SSS	1	MSM	0	LSL	0
SS	1	SSM	1	MSL	0	LMS	0
SM	1	SSL	1	MMS	0	LMM	0
SL	1	SMS	1	MMM	0	LML	0
MS	1	SMM	1	MML	0	LLS	0
MM	1	SML	1	MLS	0	LLM	0
ML	1	SLS	1	MLM	0	LLL	0
LS	1	SLM	1	MLL	0		

シミュレーション結果は図 4.13 に示す。適応度分布  $F_{III\_B}$  では  $F_{III}$  よりもサブアセンブリ戦略の出現頻度がわずかに減少し、 $F_{III\_C}$  ではさらに減少した。減少率に開きがあるため、サブアセンブリ戦略は種類数よりも共通する部品の数に影響を受けると予想される。

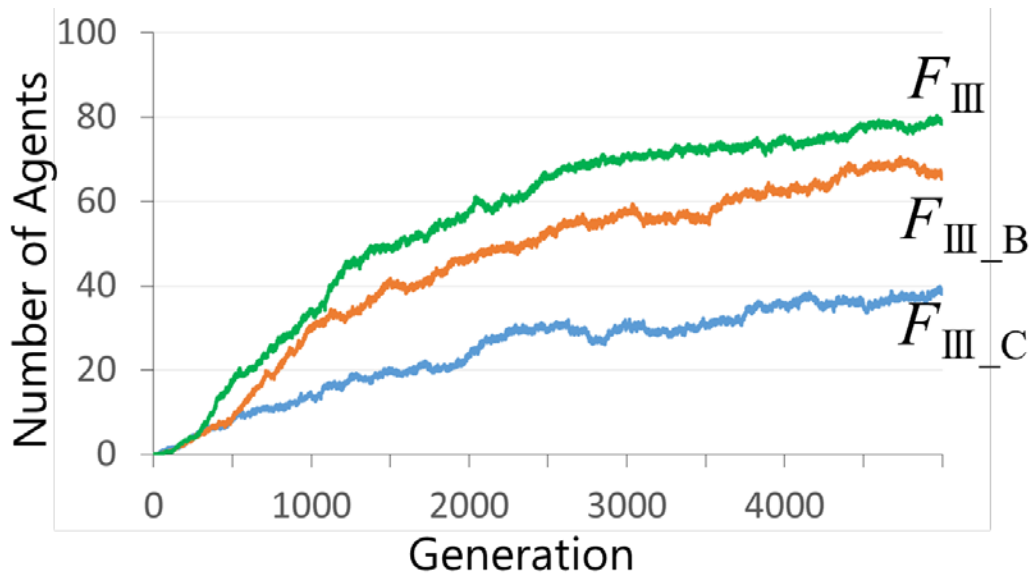


図 4.13 サブアセンブリ戦略使用個体数の変化 (道具の種類数による違い)

#### 4.2.3.2 道具の構造による結果への影響

実験 1 のサブアセンブリ戦略の出現プロセス, および道具の種類数によるサブアセンブリ戦略使用個体数の違いのシミュレーションからは, 道具に共通部分が存在することが重要だということが示唆される. そこで適応度分布として「 $F_{III\_CO}$ : 互いに共通の構造をもつ SLM, MSL, LMS の適応度のみが 1」「 $F_{III\_IN}$ : 互いに独立した構造を持つ SSS, MMM, LLL の適応度のみが 1」という適応度分布を設定し,  $F_{III}$  と比較した (表 4.5, 表 4.6, 図 4.14).

表 4.5 互いに共通の構造をもつ SLM, MSL, LMS の適応度のみが 1

道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度
S	0	LM	0	SLL	0	LSS	0
M	0	LL	0	MSS	0	LSM	0
L	0	SSS	0	MSM	0	LSL	0
SS	0	SSM	0	MSL	1	LMS	1
SM	0	SSL	0	MMS	0	LMM	0
SL	0	SMS	0	MMM	0	LML	0
MS	0	SMM	0	MML	0	LLS	0
MM	0	SML	1	MLS	0	LLM	0
ML	0	SLS	0	MLM	0	LLL	0
LS	0	SLM	0	MLL	0		

表 4.6 互いに独立した構造を持つ SSS, MMM, LLL の適応度のみが 1

道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度	道具	適応度
S	0	LM	0	SLL	0	LSS	0
M	0	LL	0	MSS	0	LSM	0
L	0	SSS	1	MSM	0	LSL	0
SS	0	SSM	0	MSL	0	LMS	0
SM	0	SSL	0	MMS	0	LMM	0
SL	0	SMS	0	MMM	1	LML	0
MS	0	SMM	0	MML	0	LLS	0
MM	0	SML	0	MLS	0	LLM	0
ML	0	SLS	0	MLM	0	LLL	1
LS	0	SLM	0	MLL	0		

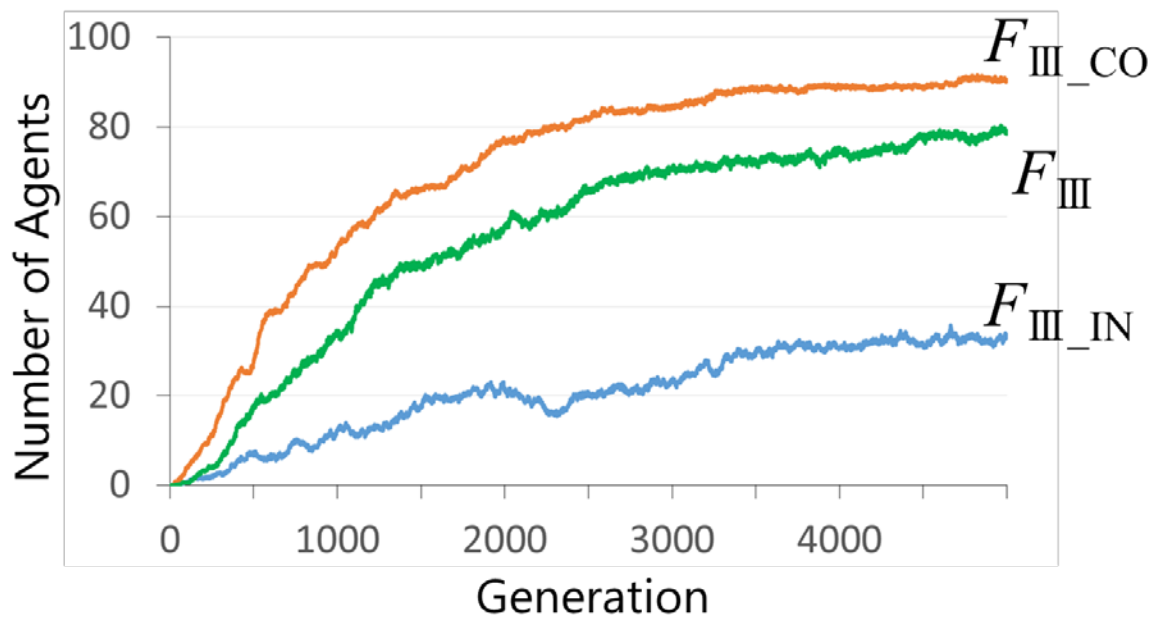


図 4.14 サブアセンブリ使用個体数の変化 (道具の構造による違い)

互いに共通な部分を持つ適応度分布  $F_{III\_CO}$  は  $F_{III}$  よりもサブアセンブリ戦略の使用頻度が高かった。反対に、互いに独立した構造を持つ適応度分布  $F_{III\_IN}$  はサブアセンブリ戦略の出現頻度が低くなった。この結果から、「道具が共通部分をもつことがサブアセンブリ戦略の有効性を高める」というサブアセンブリ戦略の出現プロセスについての予想が強化される。



## 4.2.4 実験 4：サブアセンブリ戦略出現の身体的条件

### 4.2.4.1 操作コスト，および操作回数上限の影響

ここまでは物体操作モデルの基本的な振る舞いを明らかにするために物理的・生理学的制約のない理想的な環境を想定してシミュレーションを行ってきた。しかし，いままでのモデルは統語のような記号操作との区別がついておらず，物体操作のモデルとして結果を考えることができていない。物理的な制約や生理的な制約が存在することはサブアセンブリ戦略の使用されやすさにどのような影響を与えるか，サブアセンブリ戦略が出現する前提となる身体的・認知的能力とは何かを考える必要がある。そこで，適応度関数  $F_{III}$  を次のように修正した。

$$F'_{III} = \sum_x \frac{\delta(n_x^i(t))}{m_x^i(t)^c},$$
$$\delta(n(x)) = \begin{cases} 1, & n(x) \geq 1 \\ 0, & n(x) = 0 \end{cases}$$

ここで  $m_x^i(t)$  はある世代  $t$  でエージェント  $i$  がある道具  $x$  を最初に作製した際にかかった操作回数を表し， $c$  は操作にかかるコストを表す。  $c$  を増加させると，一回の道具製作に多くの操作回数を費やしてしまう個体の適応度は低く見積もられる。シミュレーションのパラメータを表 4.7 に示す。今回は操作コスト  $c$  を 0, 1, 2 と変え，また同じく操作に関わるパラメータである操作回数上限（あるエージェントが一世代のうちに操作できる回数）を 100, 300, 500, 700, 1000 と変えた。図 4.15 の縦軸が 5000 世代目のサブアセンブリ戦略使用個体の数，横軸が操作回数上限であり，各プロットのエラーバーは標準誤差である。結果として，操作コストが低くなるとサブアセンブリ戦略が使用されやすくなった。さらに，操作回数上限を増やすことでもサブアセンブリ戦略が出現しやすくなった。ただし，操作回数上限を一定値まで上げるとサブアセンブリ戦略を使用する個体数は飽和する。

表 4.7 操作コストと操作回数上限に関するシミュレーションのパラメータ

各世代における個体数	200
世代数	5000
突然変異率	0.001
操作回数の上限	100, 300, 500, 700, 1000
操作コスト	0, 1, 2

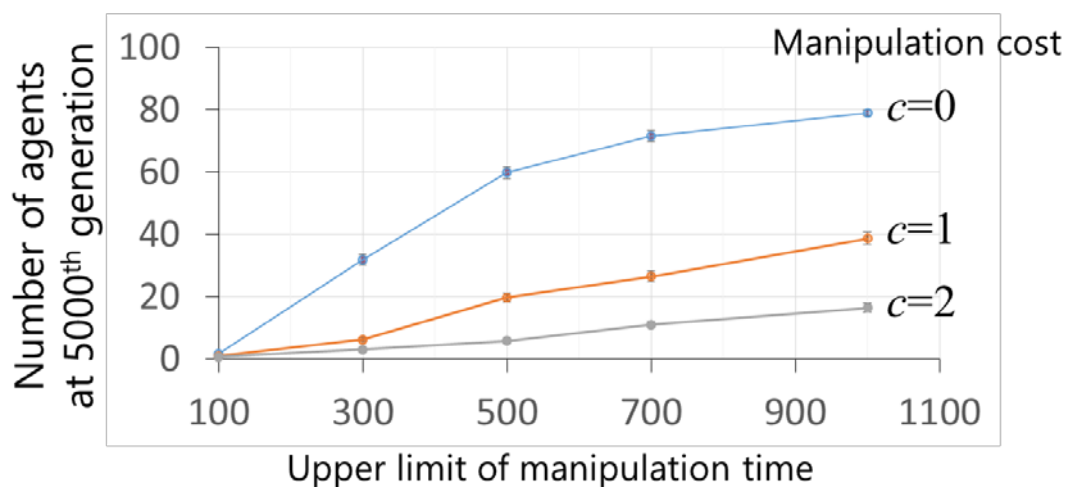


図 4.15 操作回数および操作コストとサブアセンブリ戦略の関係

## 4.3 実験 1~4 のまとめと残された問題

### 4.3.1 サブアセンブリ戦略の適応性と進化メカニズム

実験 1 および 2 の結果から、サブアセンブリ戦略の適応性は、

- できるだけ多くの種類の道具を作ること
- 不確実性・不可逆性に抗して操作ミスを少なくすること

という少なくとも二つがあると判明した。以後、仮に前者を新しい道具を作り出すことに関わる適応的機能として「成果の多様性促進」、後者を操作順序への依存を緩和する適応的機能として「手段の多様性促進」と呼ぶことにする。FIIIのように、より多様な道具を作製すると評価される場合は、新しい道具をより早く作れるようになる個体が生き残るため、既存のパターンを流用するサブアセンブリ戦略の持つ生産性が有

効になると言える。FIIのように、特定の道具が必要な場合は、より多くの製作経路によって道具製作の成功率を上げられるサブアセンブリ戦略による冗長性が発揮されやすくなる。

実験3では、適応度を得られる道具が多くあるほどサブアセンブリ戦略は出現しやすくなること、および共通部分を持つ道具が複数あることでもサブアセンブリ戦略は出現しやすくなることがわかった。これは道具に共通部分が存在することが、操作パターンの流用を可能にしているためと考えられる。

### 4.3.2 サブアセンブリ戦略の使用プロセスと進化プロセス

サブアセンブリ戦略の使用は以下のプロセスを通る。

- ① ポット戦略を用いて三つ組の道具が作られる。
- ② 作製可能な道具の途中 (MLS であれば ML まで完成した時点) から分岐する形でスタックに二つ組の物体が push される。
- ③ 保存した物体が pop され、サブアセンブリが行われる

一方、サブアセンブリ戦略の進化は、以下のプロセスによって成立する。

- ① ポット戦略を用いて三つ組の道具が作れるようになる。
- ② 作られた道具の途中部分 (MLS であれば ML の部分) をスタックから取り出し、作業台上の物体と組み合わせる行動 (pop) の遺伝子が on になる。
- ③ 作業台上の物体を保存する行動 (push) の遺伝子が on になることでサブアセンブリ戦略が出現する。

出現プロセスと進化プロセスとは、push と pop というスタック操作の順序関係が逆になっている。push によって物体をスタックに入れることが pop よりも先にできてしまった場合、そのスタック状態で手詰まりになってしまうためである。

### 4.3.3 操作コストと操作回数上限の影響

実験4では実際の物体操作にモデルを近づけるため、道具製作にかかる操作回数が多いほど適応度が低くなる「操作コスト」の概念を導入し、サブアセンブリ戦略の使用頻度がどのように変化するかを確かめた。結果、操作コストが小さいほどサブアセ

ンブリ戦略は使用されやすくなることがわかった。これはサブアセンブリ戦略で道具を作るとポット戦略で道具を作る場合に比べて操作回数が多くなってしまったためと考えられる。操作コストをある程度大きくすると三つ組の道具自体をほとんど作らなくなる。操作回数の上限を変えた場合は、上限を上げるとサブアセンブリ戦略が使用されやすくなった。

#### 4.3.4 シミュレーションの問題点、解決すべき点

このシミュレーションではサブアセンブリ戦略が「特定の複雑な道具を作ることが生存・生殖に寄与する環境」および「多様な道具を作ることが生存・生殖に寄与する環境」で有効な戦略となることがわかった。しかし、手段の多様性促進と成果の多様性促進が評価される環境がどのようにして作られうるかという問題は依然として残っている。適応度関数  $F_{II}$  や  $F_{III}$  で定義した「特定の道具をいくつ作製しても評価される」や「あるエージェントが一度製作した道具は、そのエージェントが以後何度作っても評価されない」という条件はサブアセンブリ戦略の適応性を見つめるために本研究で設定した恣意的なものである。サブアセンブリ戦略の進化における本質的な意味に迫るためには、人類進化や考古学の知見に基づく、より具体的な生態学的意味の議論が必要になってくる。

### 4.4 個体間相互作用モデルの実験設定

#### 4.4.1 個体間相互作用としての有限資源の獲得競争の導入

前節における考察より、サブアセンブリ戦略を出現させる環境がどのように出来上がるかを明らかにするためのシミュレーションを考える。人類が暮らす環境において、ただ特定の道具を作れば生き残れるという場面は少なかったはずである。例えば、同じ道具だけを作り、それを使って採れる食糧だけを採り続けていたら、その資源を採り尽くしてしまったり、同じくその道具を作れる他個体との競合が起きたりといった弊害があっただろう。そういった個体間の相互作用について、ここまでのシミュレーションでは一切考慮されていない。もしそうした要素があれば、他個体と同じ道具を作ることは生存上不利になり、より多くの種類の道具で他者とは異なる資源を得よう

とする行動が生じるはずである。

そこで、シミュレーションに個体間の相互作用を導入する。今回は相互作用の一つとして、有限資源の獲得競争を想定した。これにより適応度関数  $F_{IV}$  は次のようになる。

$$F^i(t) = \sum_{allx} \frac{n_x^i(t)}{\{\sum_i n_x^i(t)\}^\alpha}$$

$F^i(t)$  は  $t$  世代目エージェント  $i$  が道具  $x$  を作った際の適応度である。エージェントがある道具  $x$  を  $n$  個作ったとき、全エージェントが作った道具  $x$  の数で割ったものが適応度として評価される。 $\alpha$  は個体間の相互作用の強さを表す。相互作用を強くすると分母が大きくなるため、他個体と同じ道具を作ることが不利になる。

#### 4.4.2 パラメータ

シミュレーションのパラメータ設定を表 4.10 に示す。ここでは相互作用の強さを操作してサブアセンブリ戦略を使用する個体数の変化や、作られる道具の変化を観察する。

表 4.8 個体間相互作用シミュレーションのパラメータ

各世代における個体数	200
世代数	5000
突然変異率	0.001
操作回数の上限	1000
操作コスト	0
個体間相互作用	0.4, 0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0

### 4.5 結果と考察

#### 4.5.1 個体間相互作用モデルのシミュレーション

適応度関数  $F_{IV}$  においてエージェントを進化させた結果、相互作用を強くすることで  $\alpha = 1.0$  まではサブアセンブリ戦略を使用する個体が増加した (図 4.18)。これは相互作用が強まることで他のエージェントが作った道具を作っても適応度を得られなくなり、結果的に多様な道具を作ったほうが適応的になるという環境が現れるというメカニズムが働いたと考えられる。さらに、 $\alpha = 1.0$  以上になると他者が作ったも

のを作っても適応度が得られないことに加えて、自分の道具製作に関しても一つ以上の道具を作ることが適応度を下げってしまうという関数になる。このため、本来は同じ道具を安定して作ることに寄与する手段の多様性促進が仇になってしまい、サブアセンブリ戦略の出現数が減少したと予想される。

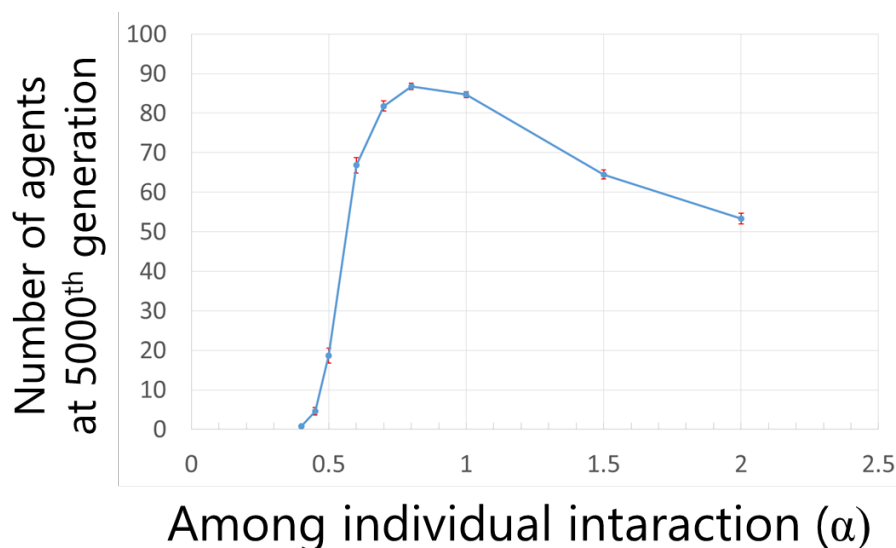


図 4.16 相互作用の強さとサブアセンブリ戦略使用個体数の関係

#### 4.5.2 作製される道具の変化

相互作用の強さと、5000 世代目で作製される道具数の平均値の関係を組み合わせの長さごとにおいて表 4.11 に示す。カッコ内は各組み合わせ長さの道具が作られた総数（一物体の道具であれば×3、二つ組であれば×9、三つ組であれば×27）である。相互作用が 0 に近いと、どの道具を作っても適応度が得られるのでエージェントは最も操作回数の短い一物体の道具しか作らなくなる。三つ組の道具を作ることがないため、サブアセンブリ戦略を使用する個体は 0 になる。相互作用を大きくしていくと、全エージェントによる適応度への影響が強くなっていき、多くの個体で作れる道具は適応度が低くなるため、より作製が難しい道具を作るようになっていく。相互作用が 1.0 を超えると、今度は自分の道具製作回数に関しても一つ以上同じ物体を作ると適応度が下がるという制約が入ってくるため、多くの道具を作らなくなる。

表 4.9 相互作用の強さと作製される道具数の平均 (5000 世代目)

( ) 内は各組み合わせ長さの道具の総製作数

相互作用の強さ $\alpha$	一物体の道具数	二つ組の道具数	三つ組の道具数
0.3	10633 (31899)	0 (0)	0 (0)
0.5	6627 (19881)	431 (3879)	23 (621)
0.6	4147 (12441)	452 (4068)	53 (1431)
0.7	2584 (8052)	370 (3330)	66 (1782)
0.8	1703 (5109)	300 (2700)	64 (1728)
1.0	1056 (3168)	171 (1539)	39 (1053)
2.0	320 (960)	33 (297)	5 (135)

### 4.5.3 資源獲得競争で有効な適応性と進化

適応度関数  $F_{IV}$  には、ある道具によって得られる資源の量が有限であるとき他個体と同じ道具を作ってしまうと、その道具を使って得られる適応価を奪い合うことになってしまい、生存しにくくなるという含意がなされている。多様に道具を作れる個体のほうが生存しやすくなるため、この環境においてもサブアセンブリ戦略の「成果の多様性促進」が機能すると考えられる。

加えて、 $F_{IV}$  では他個体よりも多くその道具を作ってより多くの適応価を得るといふ戦略も可能となっている。これによりサブアセンブリ戦略の「手段の多様性促進」も同時に有効になり、シミュレーションにおいてサブアセンブリ戦略を使用する個体数の平均が適応度関数  $F_{III}$  よりも増加したと考えられる。

## 第5章 議論

前章における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、まずシミュレーションで観察されたサブアセンブリ戦略や物体操作の特性などを振り返り、その後それらの結果と言語学や認知科学といった既存研究・関連研究における知見との整合性について論じる。次に、このサブアセンブリ戦略の進化における前提条件としてシミュレーションで確かめられた身体的・認知的制約の影響や、個体間相互作用モデルによる多様な道具製作環境の形成などを議論の素地とし、人類進化や考古学的な見地から仮説シナリオの精緻化を行う。最後に残された課題とその解決方法について述べる。

### 5.1 サブアセンブリ戦略の適応性と進化メカニズム

回帰的な物体操作であるサブアセンブリ戦略を前駆体とした統語能力の進化仮説について、本研究は第一にサブアセンブリ戦略の適応性と進化メカニズムを明らかにすることを目的としていた。本モデルのシミュレーションによって明らかになったサブアセンブリ戦略の適応性は以下の二つである。

- 成果の多様性促進：新しい道具を早く作る。
- 手段の多様性促進：操作の不確実性や不可逆性による失敗確率を下げる。

それぞれの適応性によるサブアセンブリ戦略の進化メカニズムは以下のようなも



のだと考えられる。

- 成果の多様性促進：新しい道具を作ることが生存に適応的になるとき、既存の行動パターンと遺伝子配列の類似性が高い行動パターンを獲得する個体ほど他の個体よりも早く高い適応度を獲得でき、遺伝子を残しやすくなる。既存の製作工程との類似性が高いサブアセンブリ戦略は、他の多くのポット戦略による道具製作よりも早くたどり着ける行動パターンであるため進化する。言い換えれば、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サブアセンブリ戦略の使用頻度が高くなる。ここから、既存の行動パターンを組み合わせることができる道具の種類が多ければ多いほど、サブアセンブリ戦略の成果の多様性促進が有効性を持つようになると言える。
- 手段の多様性促進：特定の道具を作ることが適応的になるとき、一つの道具に対して複数の製作経路を持つことで、結果が不確実な操作や不可逆な操作に対する回避策を提供する。これにより、より多くの製作経路をもつ個体ほど安定した道具の製作が可能となるため、サブアセンブリ戦略を使用する個体が進化する。ここから、作製に多くの種類の物体が必要であったり、長い作業工程が必要であったりする場合は、道具製作における操作の不確実性や不可逆性といった障害が増長され、サブアセンブリ戦略による手段の多様性促進が有効性を持つようになると言える。

第3章で述べたように、遺伝子によって行動が定義されているモデルを、実際の生物進化に直接当てはめることはできない。しかし、行動を決定する因子という意味で遺伝子を既存知識と捉えれば、サブアセンブリ戦略における成果の多様性促進のメカニズムは、既存知識の一部から類推を行う能力、そして新しい知識を生み出すための部品として既存知識の一部を抜き出す能力を必要とすると考えられる。言語において類推を行う能力のことを「メトニミー」、分節化を行う能力のことを「カテゴリー化」と呼び、言語を使用する上で重要な認知能力とされている（大堀, 2002）が、本シミュレーション結果は、言語以前の回帰的な物体操作において、これらの能力の原型が出来上がっていた可能性を示唆する。

一方、言語には文法の構造が、文の何番目にどういった単語がこなければならない、

というような順序を指定する形になっていない「構造依存性」という性質が存在する。手段の多様性促進は、順序に依存しない行動パターンを提供するという部分でこの性質の基盤になっていると考えられ、物体操作が統語操作の前駆体であるという仮説をサポートする結果と言える。

成果の多様性促進と手段の多様性促進は回帰的な関係を持つ。つまり、ある成果 A は別の成果 B を得られる手段となり、その別の成果 B はさらに別の成果 C を得られる手段になるという関係が成立する。このような成果と手段の二面性は、ある道具の製作が決まった順序でしか行われぬポット戦略には現れない、回帰的な操作に特有の性質である。言語表現は、この成果と手段の二面性に類似した性質を有している。例えば、ある語彙項目 A は別の語彙項目 B の説明・表現に使うことができ、その語彙項目 B はさらに別の語彙項目 C の説明・表現に使用できる。研究背景にて、言語と行動の階層性は単なるメタファーではないかという批判があることを述べたが、本研究における結果より、行動と言語における階層性は回帰的操作によって成果（語彙項目）と手段（表現・説明）の多様性促進がなされた結果、形成されたものだということが示唆される。

## 5.2 サブアセンブリ戦略が適応的となる 身体的・認知的条件および環境の成立

### 5.2.1 サブアセンブリ戦略が適応的となる身体的・認知的条件

本研究における第二の目的は、サブアセンブリ戦略の進化プロセスと、この戦略が適応的となる生態学的環境条件及び身体的・認知的条件を明らかにすることであった。

実験 4 において操作コストという概念を導入し、操作に関わるパラメータとして操作回数上限とともにサブアセンブリ戦略の使用頻度に与える影響を確かめたところ、サブアセンブリ戦略は操作コストを低くした時と操作回数上限を増やした時に出現しやすくなった。操作コストは物体操作のしやすさ、操作回数上限は物体操作の機会を表現したものである。

物体操作に関わる機能である「手先の器用さ」はサブアセンブリ戦略や道具製作に先立って進化してきていることが考古学的研究によって示唆されている。物体操作に

おける重要な進化的イベントを時系列で並べると図 5.1 のようになる。

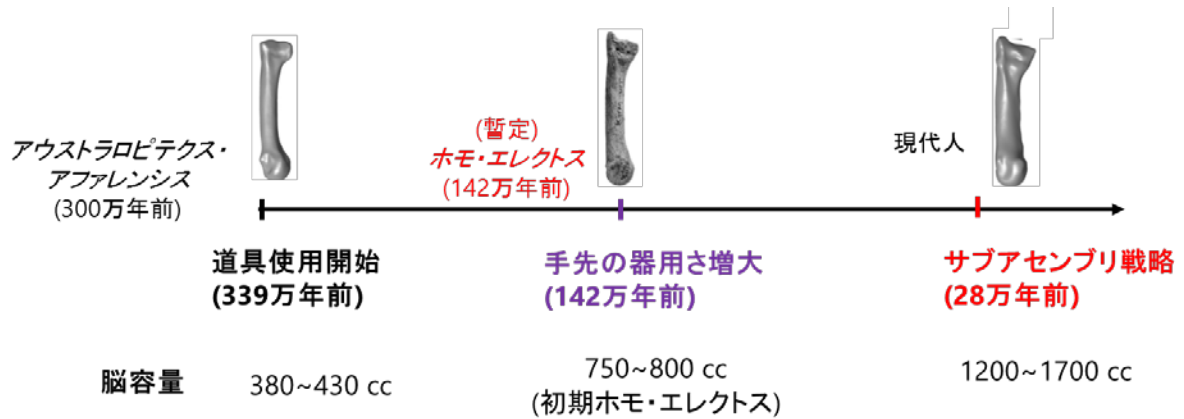


図 5.1 中手骨の進化と物体操作および脳容量の関係

最初の道具使用は 339 万年前に起きており (McPherron et al., 2010), しばらくあとの約 300 万年前に物体把握の上で重要となる拇指対向性を示す化石が見つかっている (Skinner et al., 2015). その後, 最初の道具製作が 260 万年前に始まり (Plummer, 2004), それからしばらくして指と手首との接続強化による安定化を示す 142 万年前の化石が発見されている (Ward, 2013). サブアセンブリ戦略の出現は 28 万年前とされており (Moore, 2010), ここまでの間に手先の器用さの増大や記憶の想起・記録能力といった身体的・認知的能力の増大があったと考えられる. これらの知見は, 操作コストの低下や物体操作 (あるいは道具製作) 機会の増加という面から見て本シミュレーション結果と整合性を持つ.

また, 物体操作コストとは別に, 記憶コストの概念を導入しシミュレーションを行ったところ, 物体操作コストよりも記憶コストを小さくした際にサブアセンブリ戦略の使用頻度の増加が見られた. この結果から, 記憶内容を操作することができるようになると, サブアセンブリ戦略がより使われやすくなるということがわかる. 複数のスタックを使って操作ができれば, 記号操作や脳内での物体操作のような計画的能力を持つことができそうである.

## 5.2.2 サブアセンブリ戦略が適応的となる生態学的環境

既存の行動パターンを利用した成果の多様性促進と, 行動パターンが冗長化される

ことによる手段の多様性促進がサブアセンブリ戦略の適応性であるという結果に対し、これらの適応性が発揮される環境はどのようにして成立するのかという問題を明らかにするため、個体間相互作用を有するモデルによるシミュレーションを行った。

成果の多様性促進において、「新しい道具を作る」の意味は複数想定することができる。例えば「他者と異なる道具を作る」「自分が今まで作った道具と異なる道具を作る」「これまで一度も作られたことのない道具を作る」などである。このシミュレーションでは有限資源の獲得競争という現実には起きている現象に注目し、ある世代の道具製作で得られる適応度をその世代で製作された道具の数で決定されるものとした。したがって、このシミュレーションにおける「新しい」の意味は「他者が作っていない」ということに相当する。

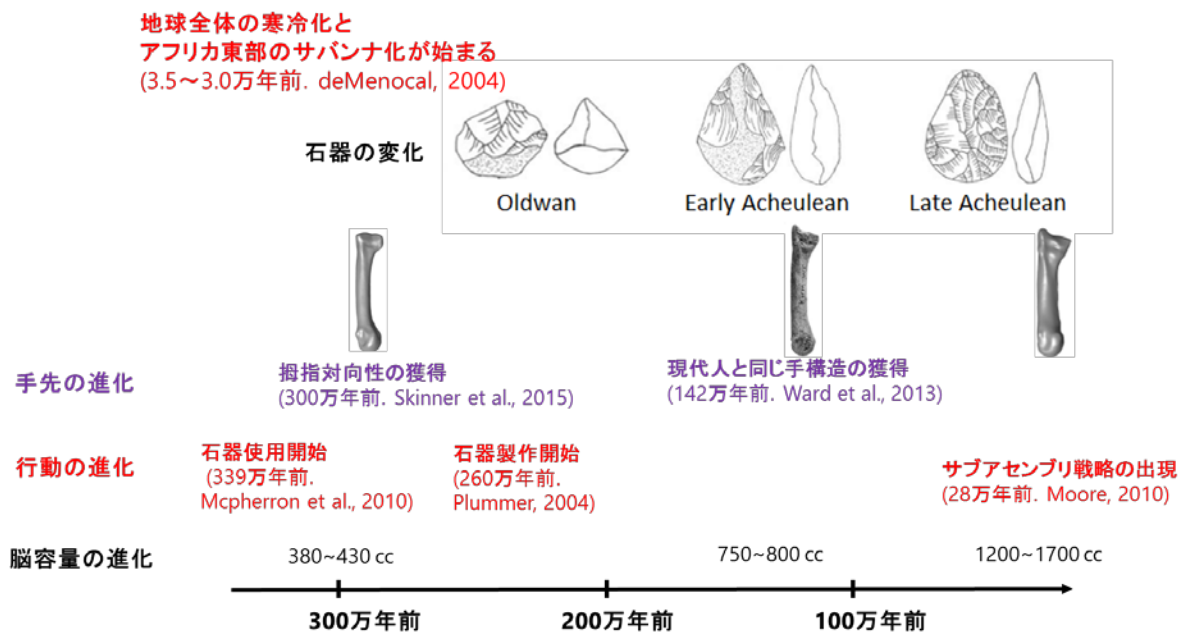
シミュレーション結果として、他者と資源を奪い合うことにならない新しい道具の製作パターンを発見する手段としてサブアセンブリ戦略が現れた。サブアセンブリ戦略は個体同士の相互作用を一定値まで強くすると使われやすくなり、弱くすると使われにくくなった。このモデルでは、個体間の相互作用を強めることは適応価を奪い合う競争が激しくなることを意味し、この場合は別の新しい適応価を見つけることが生存率に寄与する。そのため、この環境では新しい道具を作ることに適応性をもつサブアセンブリ戦略を使える個体が生き残りやすい。

### 5.2.3 サブアセンブリ戦略の進化シナリオ

これまでの議論を総合し、関連研究の知見を元にサブアセンブリ戦略の進化シナリオを立ててみる（図 5.2）。

- ① まず、初期人類における生態環境の変化として、300～200 万年前に地球規模の寒冷化が進み、アフリカではこの影響が乾燥化と季節変動の強化として現れたとされている（deMenocal, 2004）。
- ② これにより食糧の豊富な環境を失った初期人類は、サバンナで暮らす中で肉食獣が残した死体の骨を石で割り、骨髄を摂取するという食性を獲得している（Bunn, 1981; Shipman & Rose, 1983）。人類はその進化の初期段階において日常的に物体操作を行う環境に身をおくこととなった。
- ③ 石を使った打撃がうまい個体の遺伝子が生き残り、拇指対向性などの物体操作能力を獲得した（Skinner et al., 2015）。

- ④ 屍肉あさを効率化できる手段として石器製作が始まった (Plummer, 2004).
- ⑤ 道具製作に適した繊細な動きが可能な手を有する個体に選択圧がかかり, 指と手首の接続が強化され, 安定した操作を行える個体が登場した (Ward, 2013).
- ⑥ 想起と記銘の能力が出現し記号操作が可能となった.
- ⑦ 石器製作においてサブアセンブリ戦略が可能となった (Moore, 2010).



## 5.3 残された課題, および今後の研究計画

### 5.3.1 現行モデルの課題

#### 5.3.1.1 モデルの妥当性

本研究は統語能力に関する進化の仮説の妥当性を明らかにすることを最終目標としているが, それとは別にモデルの妥当性を高める必要がある. シミュレーション研究において観察された現象が, モデル固有でない普遍的性質によるものなのかという点は, 仮説から想定できるモデルの形式をいくつも試してみることによって担保されるものである.

本研究における物体操作のモデルには, いくつもの要素を追加, あるいは削除した

バリエーションを想定できる．例えば本モデルでは `merge` という操作を不可逆過程としているが，組み合わせた物体を分割する操作を導入して可逆過程とすることもできれば，扱う物体の種類や作製可能な道具の長さを変える，スタック操作ではなく作業台を二つとするなども考えられる．遺伝子の構造に関して，研究を進める中で二回ほど操作の定義を増やす機会があったが，それにもかかわらず結果に大きな変化は起こらなかった．これは，本シミュレーションの結果に一定の普遍性があることを示している．こうした物体操作の定義や要素を変えて試すことで，何がモデルスペシフィックで何がユニバーサルなのか，ということを確認していかなければならない．

### 5.3.1.2 世代間相互作用の導入

今回は個体間相互作用の影響を明らかにするに留まったが，世代間にも相互作用を導入して「新しい道具を作る」の意味を「過去に一度も作られたことがないものを作る」という形に変更することも考えられる．この場合，適応度関数は以下のように書ける．

$$F^i(t) = \sum_{allx} \frac{n_x^i(t)}{\{\sum_{t'=1}^t \gamma^{t-t'} \sum_i n_x^i(t')\}^\alpha}$$

ここで  $\gamma$  は過去の世代に作られた道具の影響をどれだけ受けるかという時間割引率を表し， $\gamma = 1$  で過去の影響を全て同じ重みで受けることになる．これは資源の自然回復がないという状況である．この  $\gamma$  をパラメータとして操作したとき，サブアセンブリ戦略の使用されやすさがどのように変わるかを確かめる．

資源の獲得は単に同じ世代の個体間だけではなく，過去や未来の世代に対しても影響を及ぼすという生態学的妥当性を加味した適応度関数といえる．

### 5.3.1.3 個体数変動の導入

現行のシミュレーションは全て，物体操作を行うエージェントの数を固定したうえで行っている．しかし，実際の自然環境では，資源の増減はそれを採集する生物の個体数が増減することによって調整される．被食者と捕食者の数は，この作用によって調整されるため，新しい適応値を探索するという必要性は生じなくなっており，これが人間以外の動物でサブアセンブリ戦略が観察されない理由の一つだと予想できる．そこでこの個体数変動の概念を導入し，サブアセンブリ戦略が使用されにくくなる，

もしくは、使用されなくなるかどうかを確認する必要がある。もしこの現象が再現できたなら、次にヒトはなぜその環境の中でサブアセンブリ戦略を使用できるようになったのかという問題に取りかかることができる。

#### 5.3.1.4 社会的・文化的要素の導入

個体数変動によって資源の消費と供給のバランスが保たれうる環境において、サブアセンブリ戦略はどのようにして進化するのか。

現行のモデルにおいて、エージェントは集団で扱われてはいるが、個々の操作は独立しており、サブアセンブリ戦略による適応度の獲得に、社会的協力や文化的な操作方法の伝達・蓄積といった概念は入れられていない。もしも個体同士が協力して適応度の探索を行うことができるようになれば、そこに個体間や世代間の資源獲得競争は生まれにくくなり、集団全体として新たな適応度の探索を行うという行動が生じると予想される。これによりサブアセンブリ戦略の使用が促されたというのが、本研究が提示する新たな仮説である。仲間との協力でより多様な道具や知識を創ることは、集団全体の維持や規模の増大につながり、規模の増大はさらなる知識の多様性促進とそれによる手段の多様性促進につながる。言語は、知識の多様性と有用性を回帰的な操作により拡張していく、というヒトの性質の延長上に存在すると考えることができる。言語の適応性については、それがコミュニケーションにあると考える主に認知言語学の立場と、思考にあると考える主に生成文法の立場があるが、これらの論争を止揚しうる考えとして「共創(Co-creation)」が提案されている(橋本, 2014)。共創とは、既知の概念や知識を共有し、個々人の経験に基づいて分解と再結合を行うことで新たな概念や知識を創り出すことを言う。

この考えに基づき、物体操作のシミュレーションに文化的・社会的要素を導入してサブアセンブリ戦略の進化を確かめることは、言語の起源・進化を検討する上で有効であろう。

### 5.3.2 物体操作の実験室実験

本研究ではシミュレーションによる構成論的手法を用いて回帰的物体操作の研究を行っているが、計算機実験はあくまで現実現象の模倣や近似ができる可能性をもったアプローチであり、たとえ仮説に基づいたモデルから現実と類似した現象が観察さ

れたとしても仮説を検証したことにはならない。仮説の妥当性について言及するには、本研究で判明した回帰的物体操作の有効性である「成果の多様性促進」と「手段の多様性促進」が、現実においても観察されるかを実験室実験によって検証する必要がある。その方法として、ポット戦略を用いて道具製作を行う被験者と、サブアセンブリ戦略を用いて道具製作を行う被験者を用意し、双方の道具製作における知識形成がどのように行われるかを比較するという実験が考えられる。本シミュレーションから結果を予想するならば、ポット戦略を使用する被験者の知識は製作物ごと独立したものになり、サブアセンブリ戦略を使用する被験者の知識は製作物同士のそれが部品や道具の関係を持ったものとして構成されていくと推測できる。

他に、サブアセンブリ戦略の進化プロセスを分析することで推測された、物体操作における対称性バイアスの作用について、この認知機能をなんらかの形で制限し、前述の実験を行うとどうなるか、というバリエーションが考えられる。この場合、対称性バイアスを働かせられる被験者はサブアセンブリ戦略が可能になり、働かせられない被験者は不可能になるという結果が予想される。

### 5.3.3 統語能力の進化シナリオの解明

第 1 章および第 2 章で述べたように、本研究の最終目的は統語能力の進化について、その適応性と進化メカニズムを明らかにすることである。物体操作の進化について明らかにしたのち、どのように研究を進めていくのかをここでは述べる。

#### 5.3.3.1 物体操作から表象操作への回帰的操作能力の転移

4 章の実験 4 において、スタックの使用に要するコストが低いことがサブアセンブリ戦略の使われやすさを増大させることがわかった。これはスタック内を使用して物体の操作を行ったほうが操作の失敗確率を下げたり、現実では不可逆な操作を可逆的な操作として扱ったりといったことができるようになるためと考えられる。スタックという装置は当初、現実における記憶能力にあたるものとして想定していたが、シミュレーションを行う中で、スタックの使用には物体の記銘と想起を同時に（あるいは記銘よりも想起を先に）行う能力が必要であることが判明した。もしこの記銘と想起の同時獲得が物体操作におけるサブアセンブリ戦略の有効性をより高めるものならば、サブアセンブリ戦略の進化と並行して、表象操作という脳内リハーサル、計画、



予測の能力が、統語のような記号を扱う能力よりも前の段階としてあったはずである。そこで、物体操作から回帰的統語操作へ至るパスの間に、表象操作という非物理的かつ非言語的な操作を導入できる。本研究で前提としていた藤田の仮説にこの過程を加えると図 5.3 のようになる。

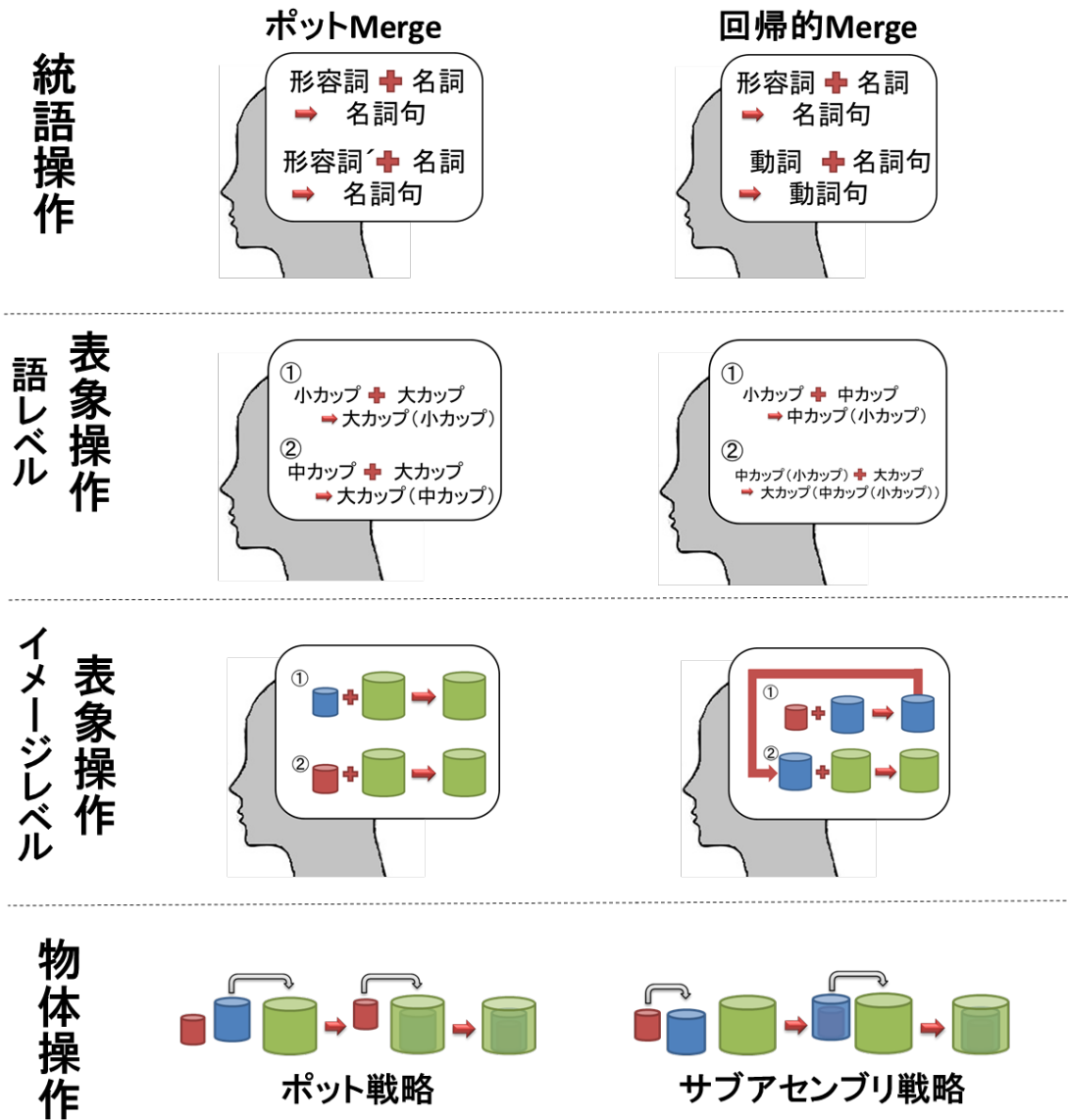


図 5.2 物体操作から統語操作までの進化段階

物体操作の進化シミュレーションに関してひと通り課題を達成できたあとは、物体操作の表象能力への転移（図 5.3，下段から中段への進化）に関する分析を行おうと

考えている。このシミュレーションでは、表象の記銘と想起、運動と表象の脳領域の関係性、仮想的運動時の脳活動等に関する知見から、表象操作という概念をエージェントの内部関数として定義・モデル化する。そして物体操作モデルと統合し、表象操作によるが可能・不可能なエージェントの二種類を作製したのち、転移の環境条件を特定する。特定した環境内で表象操作が不可能なエージェントを進化させた際に、物体操作の表象化がどのような段階を経て成立するか、そのときエージェントの内部構造はどう変化するかなどを観察し、転移プロセスとメカニズムを解析する。サブアセンブリ戦略は記銘と想起ができてはじめて可能であるため、表象操作の発生自体はサブアセンブリ戦略の出現よりも先のイベント・条件として位置づけられることが現時点で予想される。

#### 5.3.3.2 表象操作から統語操作への回帰的操作能力の転移

次に、表象操作の統語能力への転移（図 5.3, 中段から上段への進化）に関する分析を行う。回帰的でない統語操作はヒト以外の動物（鳥類など）も可能である。ここでは統語能力の発生ではなく「階層構造を作り出す能力がどのように統語操作へ転移するか」を扱う。言語産出時の脳活動、現代語の構造等に関する知見から、統語操作という概念をエージェントの内部関数として定義・モデル化する。これを表象操作が可能な物体操作モデルと統合し、回帰的 Merge が可能・不可能なエージェントの二種類を作製したのち、転移の環境条件を特定する。予想として、サブアセンブリ戦略の使用によって作られた環境において、効率的な情報伝達的手段として記号操作によるコミュニケーションが生まれ、語彙項目の多様性や表現の多様性を増大させていったのではないかと考えている。

#### 5.3.4 全体の包括的研究

物体操作から統語操作までの進化を統合し、統語能力の進化を前駆体のレベルから説明する包括的な進化シナリオを明らかにする。エージェントの活動による環境変化や環境からエージェントの能力へのフィードバック、文化的・社会的資源の蓄積といった要素を取り入れ、全体的かつ連続的な統語能力の進化を解析可能なシミュレーションを構成する。最後に、シミュレーションの結果と関連研究の知見とを統合し、統語能力の適応性と進化メカニズムを明らかにする。

## 第6章 結論

### 6.1 本論文のまとめ

本研究では、回帰的な物体操作（サブアセンブリ戦略）が回帰的な統語操作（回帰的 Merge）の前駆体であるとする仮説を採用し、物体操作を行うエージェントの進化シミュレーションを構成して、回帰的操作の適応性とそれが進化する環境の生態学的意味、出現プロセスおよび進化メカニズムを調べた。

実験および分析における狙いとその結果および考察を以下に示す。

1. サブアセンブリ戦略の適応性にあたりをつけるため、適応度関数の候補を定め、シミュレーションを行った。結果、回帰的操作は、より多様な道具を作り出すことが適応的となる環境、および特定の道具を作り出すことが適応的となる環境において進化した。
2. サブアセンブリ戦略の適応性と進化メカニズムを具体的に調べるため、多様な道具製作が適応的となる環境で、初期集団として最初から三つ組の道具をポット戦略で作れるエージェントを進化させた。結果、既存の道具製作パターンを流用する個体がより早く他個体よりも適応度を高めることができ、サブアセンブリ戦略はこれを利用した成果の多様性促進という適応性によって出現することがわかった。また、特定の道具製作が適応的となる環境で、初期集団として最初から三つ組の道具をサブアセンブリ戦略で作れるエージェントを進化させた。結果、複数の道具製作パターンを有することが操作の不確実性や不可逆性といった要素による失敗に対し有効性を持っていることがわかった。
3. サブアセンブリ戦略の進化プロセスを明らかにするため、サブアセンブリ戦略の出現プロセスを分析した。その結果、一般に以下のようなプロセスが観察さ

れた。

- ① ポット戦略を用いて三つ組の道具が作られる。
  - ② 既存の道具の最初の部分（MLM であれば ML の部分）をスタックに保存するという行動が生じる。
  - ③ 保存された部品を作業台上の物体と組み合わせる行動が生じることでサブアセンブリ戦略が出現する。
4. サブアセンブリ戦略が使用可能になる際の進化プロセスを分析したところ、push の遺伝子は pop の遺伝子が機能するよりもあとに機能するようになることが多いとわかった。事前に pop がなければ push によって入れた物体をスタックから取り出せなくなり、操作の手詰まりを誘発してしまうからだと考えられる。
  5. モデルを現実の物体操作環境により近づけたとき、サブアセンブリ戦略の出現にどのような影響が出るか確かめるため、「操作コスト」という概念を導入し、パラメータとして操作コストと操作回数の上限を変えてシミュレーションを行った。結果、操作コストが小さいことや操作時間が長いことはサブアセンブリ戦略の使用個体数を増大させることがわかった。
  6. 統語操作の進化に対する布石として、スタックの操作コストを記憶コストと定義し、物体の操作コストに比べて少なくすると、これを多く設定したときよりもサブアセンブリ戦略を使用する個体の数が増えた。
  7. 3 の結果から、共通部分をもつことがどれほどサブアセンブリ戦略の進化に影響するかを明らかにするため、道具の構造が共通部分をもたない適応度分布と、道具の構造が互いの共通部分になっている適応度分布を設定し、シミュレーションを行って比較した。結果、互いに共通部分をもつ適応度分布は共通部分をもたない適応度分布に対して、サブアセンブリ戦略が約二倍の個体数で出現した。
  8. サブアセンブリ戦略のより具体的な生態学的意味を明らかにするため、1 で求められた適応度関数と 6 で判明した進化のメカニズムより、「他者と異なる道具を作り出すことが適応的となる環境」を想定し、エージェントを進化させた。結果、サブアセンブリ戦略の有効性が発揮された。

以上の結果を議論して示唆されたことは次の通りである。

- サブアセンブリ戦略は、三つ組の道具を作る上で、ポット戦略と比較してより多くの操作回数が必要となるため、任意の道具をより多く作るほど適応的となる環境では進化が起こりにくい。対して、複数の道具を作ることが適応的となる環境では、全く新しい道具製作の行動パターンが形成されるよりも、既存の道具製作パターンからそれと異なる道具製作パターンが形成されるほう早いため、サブアセンブリ戦略が進化しやすくなる。この性質によりサブアセンブリ戦略は、他個体の作っていない道具を他個体よりも早く作製することが生存や生殖に寄与する環境において「成果の多様性促進」という有効性を発揮する。
- サブアセンブリ戦略は特定の道具を作ることが適応的になるとき、一つの道具に対して複数の製作経路を持つことで、結果が不確実な操作や不可逆な操作に対する回避策を提供する。これにより、より多くの製作経路をもつ個体ほど安定した道具の製作が可能となるため、サブアセンブリ戦略を使用する個体が進化する。作製に多くの種類の物体が必要であったり、長い作業工程が必要であったりする場合は、道具製作における操作の不確実性や不可逆性といった障害が増長され、サブアセンブリ戦略による「手段の多様性促進が」有効性を持つようになる。
- より競争相手のいない適応価、あるいは新しい適応価を見つけなければならぬ、という環境は、初期人類が直面した、アフリカ大陸におけるサバンナ化による食糧不足と整合的である。
- 操作コストの低下や操作回数の増加によってサブアセンブリ戦略の使用個体数が増えるというシミュレーション結果は、物体操作に関わる機能である「手先の器用さ」が人類史において道具製作やサブアセンブリ戦略に先立って進化してきた事実と整合的である。食料不足を解決するために、初期人類は栄養源として動物の死骸から骨髄を摂取するという採食行動を行っていた証拠が多くある。ここから、石を用いて骨を割るという行動を行う上で物体のコントロールがうまい個体ほど生き残った結果、種全体として物体操作能力が向上するに至ったと考えることができる。
- 記憶コストを操作コストよりも低くするとサブアセンブリ戦略の使用個体数が増加した。これは脳内における記号操作や表象操作が可能となることがサブア

センプリ戦略の使用しやすさを増大させるとわかった。

- 個体間相互作用モデルのシミュレーションでは、他個体と資源を奪い合うことにならない新しい道具の製作パターンを発見する手段としてサブアセンプリ戦略が現れた。
- 一連の進化プロセスを時系列で並べると、
  - ① アフリカのサバンナ化による食料不足（300 万年前頃）
  - ② 道具使用の始まり（339 万年前）
  - ③ 拇指対向性の発生（300 万年前）
  - ④ 道具製作の始まり（260 万年前）
  - ⑤ 指と手首の接続強化による操作の安定化（142 万年前）
  - ⑥ サブアセンプリ戦略の出現（28 万年前）となる。この知見を、物体操作コストの低下や物体操作機会の増大だと捉えると、サブアセンプリ戦略出現の基盤となる条件が徐々に整っていったというシナリオを推察することができる。

## 6.2 結論

回帰的な統語操作能力の前駆体と考えられる回帰的な物体操作能力は、新しい適応価を他者よりも早く見つけることが生存に繋がる環境において、成果物の多様性を促進する有効性を発揮する。また、特定の適応価を得る際、手段を多様化することによって適応価の獲得を安定させるという効果も発揮する。シミュレーション結果と考古学的知見より、このサブアセンプリ戦略の進化プロセスを想定すると以下のようなことになる。

森林地帯の減少と資源不足によって、新しい適応価を他者よりも早く見つけられる個体が生き残りやすくなる環境が形成された。また屍肉あさりという形で物体操作が日常化して手先が器用に進化し、反復的な道具製作が行えるようになった。これにより道具製作が開始され、道具製作を繰り返す中でさらに手先の器用な個体が生き残りやすくなった結果、操作コストの軽減や道具製作機会の増加が起き、記憶の想起と記憶という認知能力を獲得したことによってサブアセンプリ戦略が出現した。

## 6.3 残された課題

統語能力の進化について、明らかにしなければならない問題は次のとおりである。

- 本モデルは物体操作を抽象化した一例に過ぎない。シミュレーションの妥当性に関して評価するためには物体操作に関して別の定式化・モデル化を行い、本モデル固有の結果と普遍性の高い結果とを区別する必要がある。
- このシミュレーションにおける個体間相互作用は適応度空間という環境を介した相互作用である。実際的人类進化には他者の行動の模倣や教示行動といった社会的・文化的要素が存在しているため、そうしたエージェント同士の直接的な相互作用がサブアセンブリ戦略の進化に対しどのような影響を与えるか明らかにする必要がある。
- シミュレーションはあくまでも現実の模倣であり、研究者のスペキュレーションを促すためのものであって事実検証が可能な手段ではない。仮説の妥当性を明らかにするためには、現実の環境で物体操作や道具製作に関する実験室実験を行い、本研究で観察されたサブアセンブリ戦略の有効性が現実でも観察されるかを検証する必要がある。
- ここまで統語能力の前駆体として物体操作の進化に関する実験を行ってきたが、前駆体の進化を問うているからにはまだシナリオの序章を扱ったにすぎない。本研究の最終目的は、言語において階層構造を生成するという統語能力の適応性と進化プロセスを明らかにすることである。そのためには統語操作の基盤となっている認知能力に関する仮説を立て、物体操作から統語操作までの進化を繋げるための実験を行わなければならない。

## 謝 辞

本論文は、指導教官である橋本敬教授を始め、研究はもちろん日常的なことまで多く議論・ご指導して下さった研究室の皆様、そして JAIST の教職員の方々や学生の方々、多くの皆様のお力添えのもと、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とともに、私はこれからまだ JAIST に身をおく予定ですので、一層のご鞭撻、ご協力のほどよろしくお願い致します。

何よりもまず、サバティカルという本来であれば配属を断られて当然な時期にやってきた私を暖かく迎え入れてくださり、遠く離れたパリの地に行かれてからも、まるですぐ隣で一緒に研究してくださっているかのような親身かつ熱烈なご指導をしていただいた橋本敬教授に、心より感謝致します。最近は一人で研究をしても橋本教授の言葉が頭のなかに響きわたるようになってきました。なにかとご心配おかけし、また世話ばかりかけてしまう私ですが、博士課程にいても何卒よろしくお願い致します。

多くの時間を共にした研究室の皆様には、ことあるごとに相談にのっていただき、研究に対する姿勢はもちろん、普段の話し合いの中でも多くのことを学ばせていただきました。小林重人助教と金野武司特任助教には、橋本教授がご不在のなか、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大変厚いサポートをしていただきました。ありがとうございます。先輩の真隅暁さん、山田広明さん、李冠宏さん、田村香織さんにはほぼ毎日と言っていいほど頻繁に、私の突拍子もない話を聞いていただき、かつ真剣に議論していただきました。思いつくだけ話して自分を顧みない厄介な性格を前に苦勞することも数知れずあったと思います。もっと自分を客観視できるよう精進していきますので、これからもお付き合いよろしくお願いします。また、昨年度お世話になりました先輩の鳥居拓馬さん、辻野正訓さん、下川剛生さん、馬思維さん、楊洋さん、楊碩さんにも深く感謝いたしま



す。一年という短い間でしたが、先輩たちとの議論や楽しい会話からは多くの知識を得ました。同期の石上将也くん、王天嬌さん、後輩の笠島春行くんにはともに切磋琢磨する仲間として、研究生活を盛り上げていただきました。物理的な意味で、石上くんと笠島くんがいなければこの論文は受理されていなかったと思います。今のままで支えられっぱなしになってしまうので、どれだけ力になれるかわかりませんが、なんでも相談してください。

北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科の日高昇平助教には、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い部分まで遡って議論していただきましたこと、深く感謝いたします。徐々に改善して参りますので、これからも鍛えてくださいますようよろしくお願いします。

北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科の水本正晴准教授には、副テーマ研究に関して熱心にご指導していただきました。副テーマ研究で培われた哲学的態度や知識、アイデアは、本研究の考察や議論を進める上で重要な糧となりました。ありがとうございました。今後ともよろしくお願いします。

論文最終審査および中間審査におきましては、北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科の吉田武稔教授、梅本勝博教授、池田満教授、HUYNH Van Nam 准教授に審査していただき、貴重なご意見・ご指摘を数多くいただきました。先生方のご助力により、ここに修士論文を完成させられましたこと、厚く感謝いたします。

いまの私があるのは、私の人生を全力で支援して下さり、なによりここまで育ててくださった両親と祖父母、いつも兄のくだらない話に付き合ってくれた弟と妹、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です。心より感謝いたしますとともに、今はまだ社会のななに役立つともしれない私ですが、どんな形でも恩返し、社会貢献ができるよう自分を磨いていきますので、これからも温かい目で見守ってくださいますよう、よろしくお願いします。

## 参 考 文 献

- Bunn, T. (1981) Archaeological evidence for meat-eating by Plio-Pleistocene hominids from Koobi Fora and Oldvai Gorge. *Nature*, vol. 291, pp. 574-577.
- Chomsky, N. (1957) *Syntactic structures*. Mouton & Co, The Hague, pp. 26-33.
- 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*, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 1-52.
- Chomsky, N. (1995) Bare Phrase Structure. in Hector and Paula Kempchinsky (eds.), *Evolution and Revolution in Linguistic, Theory*. Washington DC: Georgetown University Press, pp. 1-15.
- deMenocal, P. (2004) African climate change and faunal evolution during the Plio-Pleistocene. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 220, pp. 3-24.
- Fujita, K. (2007) Descent with modification -Generative grammar and the universality / diversity of human language-. *Viva Oringo*, vol. 35, pp. 136-147.
- Gould, S. & Vrba, E. (1982) Exaptation-A Missing Term in the Science of Form. *Paleobiology*, vol. 8, no. 1, pp. 4-15.
- Greenfield, P., Nelson K. & Saltzman, E. (1972) The development of rule bound strategies for manipulating seriated cups: A parallel between action and grammar. *Cognitive psychology*, vol. 3, pp. 291-310.
- Greenfield, P. (1991) Language, tools and brain: The ontogeny and phylogeny of hierarchically. *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 14, no. 4, pp. 531-595.
- Grossman, M. (1980) A central processor for hierarchically structured material: *Evidence from broca's aphasia*. *Neuropsychologia*, vol. 18, no. 3, pp. 299-

308.

- Hauser, M. Chomsky, N. & Fitch, W. (2002) The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve? *Science* vol. 298, no. 22, pp. 1568-1579
- Markman, E. (1989) Categorization and naming in children: Problems of induction. MIT Press.
- Maynard, Smith. & J, Szathmáry E (1995) The major transitions in evolution. Oxford University Press, Oxford.
- Mcpherron, S., Alemseged, Z., Marean, C., Reed, D., Garaads, D., Bobe, R. & Béarat, H. (2010) Evidence for stone-tool-assisted consumption of animal tissues before 3.39 million years ago at Dikika, Ethiopia. *Nature*, vol. 466, pp. 857-860.
- Mitchell, M. (1996) *An introduction to genetic algorithms*. MIT Press, Cambridge, MA. 伊庭齊志 (監訳) (1997) 「遺伝的アルゴリズムの方法」, 電機大出版局.
- Moore, W. (2010) 'Grammars of action' and stone flaking design space. A. Nowell and I. Davidson (eds), *Stone Tools and the Evolution of Human Cognition*, University Press of Colorado, pp. 13-43.
- Moro, A. (2014) On the similarity between syntax and actions. *Trends in Cognitive Sciences* vol. 18, no. 3, pp. 109-110.
- Plummer, T. (2004) Flaked stones and old bones: Biological and cultural evolution at the dawn of technology. *Yearbook of Physical Anthropology*, vol. 47, pp. 118-164.
- Shipman, P. & Rose, J. (1983) Early hominid hunting, butchering and carcass processing behaviors: approaches to the fossil record. *Journal of Anthropological Archaeology*, vol. 2, pp. 57-98.
- 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* vol. 347, issue. 6220, pp. 395-399.
- Tinbergen, N. (1963) On aims and methods of Ethology, *Zeitschrift fur Tierpsychologie*, vol. 20, pp. 410-433.
- 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*, vol. 111, no. 1, pp. 121-124.

池内正幸 (2010) 「ひとのことばの起源と進化」, 開拓社.

岡田浩之 (2011) 文部科学省科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 研究成果報告書 (平成 20 年度～平成 22 年度) .

小林一郎 (2008) 「人工知能の基礎」, サイエンス社.

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, pp. 1-8.

橋本敬 (2014) 「言語とコミュニケーションの創発に対する複雑系アプローチとはなにか」, 計測と制御, vol. 53, no. 9, pp. 789-793.

藤田耕司, 岡ノ谷一夫. (2012) 「進化言語学の構築を目指して」, 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, pp. 1-11.

藤田耕司 (2012) 「統語演算能力と言語能力の進化」, 藤田耕司, 岡ノ谷一夫編『進化言語学の構築—新しい人間科学を目指して』ひつじ書房, pp. 55-75.

## 発表論文

- [1] 外谷 弦太, 橋本 敬 (2014) 「言語能力前駆体とされるサブアセンブリ戦略の進化モデル」, *知識共創*, vol. 4, pp. V8-1.
- [2] 外谷 弦太, 橋本 敬 (2014) 「回帰的物体操作の進化シミュレーション」, *計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 講演論文集*, CD-ROM, pp. 391-395.
- [3] Toya, G. & Hashimoto, H. (2015) Computational study on evolution and adaptability of recursive operations. *The twentieth international symposium on Artificial Life and Robotics*, CD-ROM, pp. 68-73.