JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	複数エージェントのコミュニケーションによる共通言語の組織化
Author(s)	小野，哲雄
Citation	
Issue Date	1997-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/849
Rights	
Description	情報科学研究科，博士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

博 士 論 文

複数エージェントのコミュニケーションによる共通言語の組織化

指導教官　國藤 進 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

小野 哲雄

1997 年 5 月 9 日

Copyright © 1997 by Tetsuo Ono

要 旨

本論文では，**複数エージェントのコミュニケーションによる共通言語の組織化**について述べる．本研究の目的は，自然言語の大域的な変化の過程をシミュレートし，そのメカニズムを解明することである．さらにそこから，計算論的言語獲得のモデルへの知見を得ることである．この目的を実現するため，本研究では，マルチエージェントによる 3 つのモデルを提案する．

まず，本論文では，**文法理論を制約として用いたエージェント群による共通文法の組織化**に関する研究について述べる．この研究では，言語学における研究成果である GPSG の文法理論を用いたモデルを提案した．本モデルでは，文法獲得のレベルの異なる，大人エージェントと子供エージェントによるコミュニティを仮定し，これらのエージェントがコミュニケーションを行なうことにより，共通言語が組織化される過程について調べた．計算機実験の結果，子供と大人がともに文法を改編し，共通言語を形成していく過程をシミュレートできた．さらに，自然言語の特徴の 1 つである，融通性を実現することができた．

次に，**推論機能を有するエージェント群による共通文法の組織化**に関する研究を行なった．この研究では，エージェントにアブダクションとインダクションという 2 つの推論機構を統合した機能を持たせ，それらのエージェント同士のコミュニケーションにより共通文法が組織化される過程について調べた．計算機実験の結果，2 つの推論機構を統合することによる有効性，および，非同時性に基づくコミュニティにおいて共通文法の頑健性が示された．さらに，多数のコミュニティを結合した実験により，共通文法の融合と分化の過程が示された．これらの結果から，本モデルにより，適応性と頑健性という自然言語の持つ 2 つの特徴を実現できることが示された．

最後に，**共通言語の組織化と語彙の変化**に関するモデルを提案した．本モデルでは，類似に基づく語彙獲得の方法を採用した．この方法は，単語の類似性と文脈の類似性の尺度を用いて，語彙の意味を相対的に定義するものである．本モデルにより，意味を直接扱うことなく，言語が融合・分化する過程における語彙の変化を説明できることを示した．

目 次

1 序 論 **2**

1.1 研究の背景と目的 2

1.2 本論文の構成 4

2 自然言語研究と共通言語の組織化 **7**

2.1 自然言語研究における問題点 8

2.2 言語変化理論 9

2.3 ピジン・クレオール研究 10

2.4 人工生命における言語の進化に関する研究 15

2.5 共通言語の組織化 17

2.6 まとめ 19

3 文法理論を制約として用いたエージェント群による共通言語の組織化 **20**

3.1 共通言語 20

3.2 文法獲得のモデル 21

3.2.1 エージェントとコミュニケーション 22

3.2.2 文法のフレームワーク 23

3.2.3 学習方法 25

3.3 実験 32

3.3.1 実験 1： 大人が多い条件 32

3.3.2 実験 2： 子供と大人が同数の条件 33

3.3.3 その他の実験 34

3.4 実験結果の考察 35

3.5 まとめ 40

4 推論機能を有するエージェント群による共通文法の組織化 41

4.1 エージェント 42

4.1.1 エージェントの有する推論機能 42

4.1.2 文法 43

4.1.3 アブダクション 44

4.1.4 インダクション 46

4.2 コミュニケーション 48

4.2.1 コミュニケーションとエネルギー計算 48

4.2.2 時間とエネルギー量に依存した推論機構の切り替え 50

4.2.3 コミュニティと世代交代 52

4.3 実験 53

4.3.1 実験 1： 2 つの推論機構の統合 54

4.3.2 実験 2： 共通文法の発展と推論機構 56

4.3.3 実験 3： 共通文法の頑健性 61

4.3.4 実験 4： 共通文法の融合と分化 63

4.3.5 その他の実験 65

4.4 実験結果の考察 67

4.5 まとめ 69

5 共通言語の組織化と語彙の変化 71

5.1 言語変化における語彙の重要性 71

5.2 語彙獲得のモデル 72

5.2.1 語彙獲得の定義 72

5.2.2 類似に基づく語彙獲得の方法 73

5.3 エージェント 77

5.3.1 エージェントとコミュニケーション 77

5.3.2 コミュニケーションと語彙の獲得 79

5.4 モデルの動作 80

5.4.1 語彙の融合と分化 80

5.4.2 本モデルの特徴 81
5.4.3 語彙と文法を統合したモデル 82
5.5 まとめ 83

6 考 察 **84**
6.1 関連研究との比較・検討 84
6.1.1 自然言語研究における問題点に対する考察 84
6.1.2 ピジン・クレオール研究に対する考察 85
6.1.3 人工生命研究に対する考察 86
6.1.4 本研究の意義 87
6.2 本研究の問題点と今後の課題 88
6.2.1 認知科学的妥当性 88
6.2.2 モデルの工学的応用 89

7 結 論 **91**

謝辞 **94**

参考文献 **95**

発表論文リスト **100**

図 目 次

2.1 ピジン化・クレオール化のプロセス [16] 14

3.1 エージェント間のコミュニケーション 22
3.2 フィーチャーを含むシンボルの表現 24
3.3 ヘッドフィーチャーの継承（HFC）と制御一致原理（CAP） 29
3.4 フィーチャー間の条件付き確率の計算 29
3.5 実験 1 – 大人が多い場合のフィーチャー獲得数の推移 33
3.6 実験 2 – 子供と大人が同数の場合のフィーチャー獲得数の推移 34
3.7 パラメータの変化とフィーチャー獲得数の推移（実験 1 の条件） 36

4.1 本研究における自然言語に対する理解 42
4.2 インダクションによる文法規則の生成 48
4.3 時間とエネルギー量に依存した推論比率の変化 53
4.4 エージェントの生成・消滅サイクル 53
4.5 実験 1 – アブダクション条件におけるエネルギー量の推移 56
4.6 実験 1 – インダクション条件におけるエネルギー量の推移 57
4.7 実験 1 – 統合条件におけるエネルギー量の推移 58
4.8 実験 1 – 3 つの条件のコミュニケーション成立確率の推移 59
4.9 実験 2 – エージェントが生成する文の平均語数の推移 60
4.10 実験 2 – エージェントが生成する文の長さごとの出現比率 61
4.11 実験 2 – 共通文法の発展と推論機構の使用比率 62
4.12 実験 3 – 同時性条件におけるコミュニケーション成立確率の推移 64
4.13 実験 3 – 非同時性条件におけるコミュニケーション成立確率の推移 65
4.14 実験 4 – 多数のコミュニティの結合による共通文法の融合と分化 66

5.1　語と文の類似度の反復計算 74
5.2　異なる言語の接触による語彙の変化のモデル 81

表 目 次

2.1 クレオール諸語における動詞の活用の類似性（非状態語）[4] 12
2.2 子供の言語，クレオール言語，英語における発話例の比較 [4] 13

3.1 子どもエージェントの文法 G_C 26
3.2 大人エージェントの文法 G_A 26
3.3 ルール併合の過程の具体例 31

4.1 エージェントの持つ 3 種類の文法 45
4.2 実験 1 – エージェントの獲得した文法（統合条件） 70

第 1 章

序 論

1.1　研究の背景と目的

自然言語に関する研究はこれまで，さまざまな分野で重要な部分を占めてきた．それは言語が人間にとって特別な意味を持つからである．つまり，言語は他の生物に類例を見ないほど高度で豊かな記号的構造を持つこと（特殊性），および，言語処理過程は学習・思考・知覚などを統合することによって成立している（一般性）ことによる [41]．しかし，これまでの言語研究では，個人の持つ言語を等しいものと仮定し，その言語を時間軸上の一点において捉えようという，等質性と共時態を重視した研究が特にさかんに行なわれてきた．確かにこれらの研究により，多くの成果は得られたが，それにより捨象されてきた部分も大きい．つまり，個人の持つ言語の差異や，言語の時間による変化に十分な注意が払われてこなかった．本研究では，このような言語の非等質性，通時的な側面に焦点を当てていく．

本研究では，自然言語とはあるコミュニティにおいて，その構成員たちによって共有されるコミュニケーションの作法（プロトコル）であると捉える．このコミュニケーションが成立するためには，個々の構成員が生成しうる文が，他の大多数の構成員によって認識されればよいことを意味し，またほとんどの文が互いに理解可能であれば言語は共有されているということができる．このように，自然言語は統計現象であり，その文法は形式言語のような規制ではない．

以上のように自然言語の文法は，人間の文の生成力を規制するものではないため，人間は新しい言い回しや外来語，造語などを従来の言語に寛容に取り込むことができる．この

ことはまた，言語が時代を追って変化してきたことを説明することになる．すなわちゲルマン祖語がドイツ語・オランダ語・英語などに分化（bifurcation）[44, 31] したり，ピジンやクレオールなど接触の結果融合（fusion）[4, 33, 34] したりすることも，この言語の可変性から説明することができる．しかしながら，これと相反する性質として，言語は外乱の影響を受けながらもそのコミュニティの構成員によってその伝達機能を保持し続けている．すなわち，自然言語は新しい環境への適応性（adaptability）と頑健性（robustness）を合わせ持っている．

自然言語におけるこれらの特徴は，コミュニティの構成員間のコミュニケーションによってのみ創発するものである．たとえば，いま一人の人間がある新しいコミュニティに属することになった場合，言語を共有する必要上，その構成員は他の構成員たちとのコミュニケーションを通じて，自分の文法を改編し，再構築する必要がある．この個々人が再構築する過程において，コミュニティにおける共通文法も変化していく．なぜなら，個々人もコミュニティを構成する要素であり，その要素が他の要素と相互に作用しながら変化していくのであるから，全体の文法も変化することになる．さらに，その他の構成員も，コミュニケーションの成立を維持するため，変化した文法を習得しようと試みる．したがって，自然言語は，構成員間の局所的な相互作用（コミュニケーション）が大域的な構造（共通言語）を形成し，また逆に，大域的な構造（共通言語）が構成員の所有する言語に影響を与えるという，異なる階層間の双方向フィードバックを持つことが本質的な特徴であると考えられる．

本研究の目的の第 1 は，疑似的な自然言語の文法を設定することにより，人工的に言語の変化の過程をシミュレートし，そのメカニズムを明らかにすることである．すなわち，異なる言語を接触させることにより，それらの言語が分化・融合するという変化の過程（適応性）と，同時に生成力における機能の維持（頑健性）を「人工」自然言語およびその文法において実験的に検証することである．ここで，上記のような局所的な相互作用と大域的な構造の間のフィードバックを実現するため，各エージェントが独立に推論・発話・理解を行なうマルチエージェント・モデルを用いる．マルチエージェント・モデルとは，自己改編できる能力を持ったエージェント間の協調により，動的な環境に適応できるシステムを構築できる枠組である．本稿では，このシステムを構築する過程を，コミュニティにおける共通言語の形成過程とみなす．

また，言語学の分野において，Bickerton は，ピジンなどの接触言語の発生過程，および，

それらが母語化するクレオール化の過程を調査した上で，世界中に散在するクレオール諸語には多くの類似点がみられると指摘した [4, 5]．さらに，クレオール諸語にみられる類似点は，獲得過程にある子どもの言語にも同様にみられるとし，その認知的な普遍性を指摘している [5]．つまり，Bickerton は，共通言語の形成・発展の過程の観察を通して，人間の認知機構のモデルを提案している．

本研究の目的の第 2 は，大域的な言語の変化の過程をシュミレートすることを通して，個々のエージェントに対する言語獲得のモデルについて考察することである．つまり，自律的なエージェントを設計する上での，計算に基づく言語獲得のモデルを提案することである．自律的なエージェントを考えるとき，どのような環境に置かれても，その環境に適応しながら言語を獲得する必要がある．この意味からも，言語の適応性と頑健性について調査・実験を行なう本研究から得られる知見は大きいことが考えられる．

以上の 2 つの目的を実現するため，本稿では，マルチエージェントによる 3 つのモデルを提案する．さらに，これらのモデルに基づくシステムを構築し，計算機実験を行なうことで，モデルの妥当性について考察する．

1.2 本論文の構成

本論文の構成および各章の関係は，以下のとおりである．まず，第 2章では，従来の言語研究を概観した上で，本研究の立場を明らかにする．次に，第 3章と第 4章では，言語の文法に重点を置いたマルチエージェント・モデルを提案する．具体的には，第 3章では文法理論を制約として用いたエージェントのモデル，第 4章では推論機能を持つエージェントのモデルを提案する．言い換えると，第 3章のモデルは言語の特殊性に重点を置いており，第 4章のモデルは一般的な学習機構に重点を置いている．また，第 3章は同一言語における習得レベルの異なるエージェント間の相互作用，第 4章は異なる言語を持つエージェント間の相互作用とみなすことができる．第 5章では，言語の語彙を対象としたモデルを提案する．このモデルと，第 4章で提案した文法のモデルを統合することにより，エージェントはより自然言語に近いレベルの言語を扱うことが可能になると考える．さらに，第 6章では，本稿で提案したモデルについての考察を行ない，第 7章では，本稿の結論について述べる．以下に，各章の概要を簡潔に述べる．

まず，第 2章 **自然言語研究と共通言語の組織化**では，これまでの言語研究を概観し，本稿における立場を明らかにする．従来の言語研究では共時態における研究が主流であり，個々

人の文法の差異や，時間軸に沿った通時的な言語変化については重要視されてこなかった．これらの要因を取り上げない研究では，言語が動的に変化するという特徴や，統計的な性質を明らかにすることができない．これらの問題点を踏まえ，この章では，言語の非等質性や通時的な側面を重視した研究である，言語変化理論とピジン・クレオール研究の方法論と研究成果について説明する．さらに，近年，積極的に研究が進められている人工生命における言語の進化に関する研究について説明し，その問題点を指摘する．そして，これらの研究を背景に，本研究の立場を明らかにする．

次に，第3章 **文法理論を制約として用いたエージェント群による共通言語の組織化**では，言語学における研究成果である GPSG（Generalized Phrase Structure Grammar）の文法理論を用いたマルチエージェント・モデルを提案する．このモデルでは，GPSG におけるフィーチャー構造を十分に獲得している大人エージェントと，獲得の不十分な子供エージェントを仮定し，これらのエージェントがコミュニケーションを行なうことにより，共通言語が組織化される過程をモデル化する．さらに，このモデルに基づく計算機実験を行ない，モデルの妥当性について考察する．

第4章 **推論機能を有するエージェント群による共通文法の組織化**では，エージェントの推論機能と共通文法の組織化との関係について調べる．ここで提案するモデルでは，エージェントはアブダクションとインダクションという2つの推論機構を統合した機能を持つこととする．このエージェント同士がコミュニケーションを行なうことにより，共通文法が組織化される過程，および，それが融合・分化していく過程，共通文法とコミュニティの構成方法との関係などについて，計算機実験により調べる．

第5章 **共通言語の組織化と語彙の変化**では，言語が融合・分化する過程での語彙（words）の変化を対象とする．これまでの章における研究では，共通「文法」の組織化が中心的な課題であった．しかし，言語の変化を扱う上で，当然，語彙の問題を避けて通ることはできない．語彙を扱う場合は，その意味を扱わなければならず，それに関わる状況依存性や曖昧性の問題を解消しなくてはならない．本章では，類似に基づく（similarity-based）語彙獲得の方法を用いることで，その意味を直接的に扱うことなく，語彙の変化の過程をモデル化する．本章では，このモデルを用いて，エージェントが状況に応じて語彙を獲得していく過程，および，言語が融合・分化する過程での大域的な語彙の変化の過程について説明する．

第6章では，本稿で述べた計算機実験の結果を踏まえ，本研究の方法論や位置付けに関

する考察を行なう．特に，第 2章で取り上げた従来の研究の問題点について，本研究の立場から解答を試みる．また，本研究の結果からは言及できない問題については，今後の研究課題として述べる．最後に，第 7章では，本論文の結論について述べる．

第 2 章

自然言語研究と共通言語の組織化

自然言語に関する研究は，人間の認知に関する研究の重要な部分を占めてきた．この理由は，言語の特殊性と一般性に求めることができる（第 1.1 節参照）．つまり，言語が人間という種に固有のものであり，また，すべての認知活動に深く関わっているため，言語獲得・使用のメカニズムを明らかにすることは，これまで繰り返し問われてきた人間の認知の基本的な問題に答えることを意味する．

しかし，自然言語は，このような特殊性と一般性という一見相反する性質を持つがゆえに，それに対する研究を難しくしている．つまり，人間の脳内における自然言語の獲得・使用の過程はいまだ直接観察できない以上，研究者の立場により意見が分かれ，異なる理論やモデルが構築されることになる．言語の特殊性を強調する立場としては，言語学における Chomsky の生成文法理論 [8, 9, 10] があり，逆に言語の特殊性をそれほど重視しないのが，人工知能や自然言語処理，神経科学からの言語へのアプローチである．生成文法理論の立場では，人間に固有の生得的な言語知識として「普遍文法」を仮定し，子供の言語獲得が一般的な学習メカニズムに基づく可能性を否定する．これに対して，人工知能や自然言語処理では，言語の形式的体系性を重視する Chomsky 流の立場より，言語の特殊性に依存せず，言語以外のさまざまな種類の情報の相互作用を計算論的に捉える一般的なメカニズムの解明を指向する．

そこで，本章では，これまでの自然言語に関する研究を概観し，その問題点のいくつかを示す．さらに，これらの問題点に対する新たなアプローチとして，これまで重要視されてこなかった個人の持つ言語の差異や，言語の時間による変化を対象とした研究，すなわち言語変化理論やピジン・クレオール研究，および，近年積極的に研究が行なわれている

人工生命（Artificial Life）の分野における共通言語の進化に関する研究を概観する．最後に，これらの研究と本稿の立場との関係について述べる．

2.1 自然言語研究における問題点

自然言語に関する研究は，言語学，心理学，哲学，人工知能などの各分野で活発に研究が行なわれているが，本質的な問題はまだ解決されていない．その問題とは，言語使用の創造的な側面（creative aspect of language use），および，文法獲得に関するプラトンの問題（Plato's problem）である [10]．つまり，前者は，人間がひとたび母語の文法を獲得してしまえば，必要に応じていくらでも新しい文を産出したり，理解したりすることが可能であるという現象である．また，後者は，人間に獲得可能な文法には経験のみ，あるいは，経験と一般的な知識獲得機構を想定しただけでは説明できない属性が含まれているにもかかわらず，文法獲得が可能なのはなぜかという問題である．

この文法獲得の問題は，計算機科学においても興味深い問題であり，形式学習理論として研究されてきた [30]．この研究から得られた知見は，形式言語のチョムスキー階層に属する言語はすべて，ある一定の基準のもとでは「否定証拠」がなければ学習が不可能であるというものである．ここでの否定証拠とは，獲得されるべき言語においてどの単語列が文ではないかという情報のことである．この研究の結果は，形式的な学習の狭い範囲に適用されるべきもので，人間の言語獲得に単純に敷衍することはできないが，この結果の理論的解釈は言語獲得の問題に広く適用できる．一方，心理学における調査・実験では，言語獲得時において，母親から子供には十分な否定的証拠は与えられていないという報告がある [13, 14]．このような言語獲得における問題を解決するためには，学習者に何らかの生得的な機構を仮定する必要があるだろう．

一般に，言語獲得のモデルでは，言語機能生得説 [8] に立つにしろ，一般的な学習機構に基づくとする立場 [1] をとるにしろ，大人の持つ個別言語の知識を子どもがどのように獲得するか，という問題に注目する．ここでは，ある言語コミュニティにおいて獲得すべき規範となる「大人の文法（言語）」が存在することが前提となり，それと等質の文法を獲得することが子供の目標となる．このように，20 世紀後半の言語学は，等質的な言語コミュニティを前提として発展してきたものであり [43]，また，心理学や人工知能など他の分野においても同様のことがいえる [3, 17, 48]．その結果，現在特に共時態における言語研究には，格段の進歩がみられるが，そのために捨象されてしまったものも少なくない．つま

り，コミュニティの構成員間の文法の差異や，時間軸に沿った通時的な言語変化などが扱われていない．このため，統計現象であり，動的に変化するという自然言語の重要な特徴を，これらのモデルでは表現することができない．このことがまた，言語獲得・使用のメカニズムの解明を妨げる 1 つの要因になっているのではないだろうか．

本章の以降の節では，これまで重要視されてこなかったコミュニティの構成員間の文法の差異や，時間軸に沿った通時的な言語変化に焦点を当てた研究として，言語変化理論，ピジン・クレオール研究，および，人工生命における言語の進化に関する研究の概要について述べる．

2.2 言語変化理論

等質性，共時態を重視してきた言語学に対して，Labov らが提唱した言語変化理論では，言語使用におけるスピーチコミュニティ，および，個人の言語における非等質性と，通時的な側面が考察の中心となっている [23]．言語変化というのは，言語が少しずつ姿を変えていく過程であり，その途中ではバリエーション（変異）という様相を呈する．言語変化理論が目指す，共時態だけでなく通時態をも射程におさめた言語モデルでは，バリエーションの存在を認め，その体系，構造を解明していかなければならない．歴史言語学のような時間的な変化を対象とした研究では，資料面での制約が大きく，またその動的な力が失われているため，詳細な調査が困難な場合が多い．しかし，共時態におけるバリエーションを分析することによって，言語変化についてあらかじめ構築したモデルを実際に観察されたデータを用いて検証することができる．さらに，このモデルを用いることで，歴史的な変化についても分析する手がかりを得ることができると Labov らは主張している．

言語変化理論では，主に音声・音韻レベルのバリエーションについて研究がなされてきた．Labov のニューヨークにおける調査 [22] は，その代表的なものである．ニューヨークは人口の流入，移動が激しいため，方言借用，自由変異などにより，音声レベルにおいて無秩序状態にあると指摘されていた．しかし，彼は，言語変項という概念を導入し，ニューヨーク英語のバリエーションの体系を鮮やかに示した．たとえば，‘going’ や ‘hunting’ などにみられる -ing の発音の，社会階層や発話状況における違い（スタイル）を明確に示し，低い階層に属する人々ほど，スタイル差の幅が大きく，[in] を多用していることが明らかとなった．さらに，フィラデルフィアで行なわれた調査では，語末の t/d の消失は文法的な影響によるものと音韻的な影響によるものの 2 種類に分けられることが明らかとなった．

また，日比谷は，東京語において，以前は鼻音であった語中の「ガ」(「東」,「以外」など）が，語頭の「ガ」(「学校」「柄」など）などと同様に，破裂音化していく過程をフィールドワークの結果から示した [42]．同様の研究は，イギリス，カナダ，オーストリアなどにおいても行なわれ，社会的・文化的要因も含めた分析が行なわれている．

さらに，言語変化理論では，通時変化研究と共時変化研究の統合を目指した結果，一定の成果をおさめることに成功した．それは，前述の -ing についてである．それまで，この -ing の [in] 化は，単に語末によくみられる弱化現象の 1 つであると解釈されていた．しかし，以下の仮説に基づき調査した結果，その歴史的妥当性も示されたのである．

仮説 （1） > （2） > （3） の順に，[in] となりやすい

（1） 進行形の -ing，分詞の -ing

（2） 動名詞の -ing

（3） 名詞の -ing （ceiling，morning）

ここで，-ing の歴史を追うと，現代英語では be + ing で進行形を作るが，古英語では，be に現在分詞の接辞 -ende > -inde を付けて作った（この語末音は落され [in] と発音されていた）．この歴史的事実と現代の調査結果を比較すると，1450 年にイギリス・スコットランドにおいて，この -inde を使っていた地域では，現在でも圧倒的に [in] と発音する率が高いことがわかった．つまり，15 世紀に動詞性の強い [in] （-inde）を保持していた地域は，現代でも [in] 率が高く，また，現代の英語でも，動詞性が強ければ [in] になりやすい，というように上記の仮説が支持されたのである．

これらの研究成果から，言語変化理論は，通時変化研究と共時変化研究の統合に成功しているといえる．しかし，この理論においても，研究の中心は音声の詳細な分析であるため，その結果から音韻以外の言語や文法変化のモデルを構築することはいまだ難しい．

2.3 ピジン・クレオール研究

言語学者の 1 人である Bickerton は，ピジン・クレオール研究という全く異なる分野から言語獲得過程の仮説を提案している [4]．ここで，ピジン（pidgin）とは，共通言語を持たない 2 つ以上の集団が，一定期間以上，しばしば特定の目的を持って交渉する際に形成される接触言語（contact language）である．ピジンは，その特徴として，いずれの集団の

母語でもなく，文法的・語彙的な簡略化が著しく，使用される場面，用途が限定されている．一方，クレオール（creole）は，典型的にはピジンが母語化したものであり，語彙および文法構造の完成度は高く，音声面でも通常の自然言語と変わらない複雑度と体系性を備えている．

図 2.1に，ピジン化（pidginization），および，クレオール化（creolization）のプロセスを示す．まず，複数の言語が接触することにより，コミュニケーションの必要性から，ある一定の集団にだけ通じる言葉（jargon）が生まれ，それが簡単な体系を持つようになり限定ピジン（limited pidgin）となる．この限定ピジンは，何世代かの継承を経て，安定ピジン（stable pidgin），拡張ピジン（extended pidgin）へと変化する．この過程のそれぞれのレベルから，1 世代のうちに，豊富な語彙を持ち，文法的に体系の整ったクレオールへと発達していく場合がある．これを急進クレオール（radical creole）とよぶ．限定ピジンの形成初期には，上層言語（superstratum language）の影響を受けたピジンが使われる．クレオール化した後に，上層言語の影響が強くなると，語彙・文法ともにほぼ上層言語と同一の言語へ移行していく．この過程を脱クレオール化（decreolization）とよび，ハワイ・クレオール，マカオ・クレオールにおいてこの過程が進行している [44]．このクレオールから上層言語に移行途上の言語は，ポスト・クレオール連続体（post-creole continuum）とよばれる [34]．

Bickerton は，ハワイ・クレオールにおけるこれらの過程を調査した結果，急進クレオールには，それらが地理的に離れているにもかかわらず，同じような特徴があることを発見した．さらに，世界中に散在するクレオール諸語にも多くの類似点があることを見い出した [4]．それらの類似点は，以下のものである．

1. 単数，複数，中立数の区別が存在する
2. 語形変化が少ないか，ほとんどしない
3. 助動詞のはたらきをし，前時制（anterior tense），非現実法（irrealis modality），非瞬間相（progressive aspect）を表現する 3 つの不変化詞を持つ
4. 1 つの文の中に 2 つ以上の標識があるときは，それらの標識の順序が厳密に決まっている（前： 時制の不変化詞 < 法の不変化詞 < 相の不変化詞 ：後）

表 2.1に，具体的な例を示す．動詞の活用は，表面的な語彙の差があるにもかかわらず，クレオール諸語のすべてにわたって，動詞の形式に対応した類似性を持っている．さらに，ク

表 2.1: クレオール諸語における動詞の活用の類似性（非状態語）[4]

No.	動詞の形式	ハワイ・クレオール語	ハイチ・クレオール語	スラナン語
(1)	基礎形式	HE WALK	LI MACHE	A WAKA
(2)	前時制	HE BIN WALK	LI TE MACHE	A BEN WAKA
(3)	非現実法	HE GO WALK	LAV(A) MACHE	A SA WAKA
(4)	非瞬間相	HE STAY WALK	L'AP MACHE	A E WAKA
(5)	前時制＋非現実法	HE BIN GO WALK	LI T'AV(A) MACHE	A BEN SA WAKA
(6)	前時制＋非瞬間相	HE BIN STAY WALK	LI T'AP MACHE	A BEN E WAKA
(7)	非現実法＋非瞬間相	HE GO STAY WALK	L'AV AP MACHE	A SA E WAKA
(8)	前時制＋非現実法＋非瞬間相	HE BIN GO STAY WALK	LI T'AV AP MACHE	A BEN SA E WAKA

レオール諸語の体系は，英語や他の諸言語に見られる体系とは大きく異なっている．具体的に，表2.1のそれぞれ文に対応する英語は,（1） He walked,（2） He had walked,（3） He will/would walked,（4） He is/was walking,（5） He would have walked,（6） He was/had been walking,（7）He will/would be walking,（8） He would have been walking である．すべてのクレオール諸語では，前時制不変化詞は非現実法不変化詞の前に，非現実法不変化詞は非瞬間相不変化詞の前に置かれている．しかし，英語にはこの規則性は見られない．したがって，クレオール諸語の間には，上層言語としての英語などの影響を受けていないにもかかわらず，基本的な構造に類似性があるといえる．

さらに，クレオール諸語の類似点は，獲得過程にある子供が話す言語の特徴とも一致する部分がある．それらは，以下のものである．

1. 語形変化しない動詞を用いる
2. 疑問文において，助動詞と主語を倒置しない
3. 状態（state）と非状態（process）を区別する

表2.2に，子供の言語，クレオール諸語，英語における具体的な発話例を示す．表2.2の子供の言語とクレオール言語では,

- 語形変化しない動詞を用いる（2）（4）
  および，動詞の使用における機能語の欠落（3）（8）
- 疑問文において，助動詞と主語を倒置しない（1）
  および，助動詞の欠落（6）（7）（9）

表 2.2: 子供の言語，クレオール言語，英語における発話例の比較 [4]

No.	子どもの言語	英語系クレオール	英語
(1)	Where I can put it?	Where I can put om? (H)	Where can I put it?
(2)	Daddy throw the nother rock.	Daddy t'row one neda rock'tone. (J)	Daddy throws another rock.
(3)	I go full Angela bucket.	I go full Angela bucket. (G)	I shall fill up Angela's bucket.
(4)	Lookit a boy play ball.	Luku one boy a play ball. (J)	Look at a boy playing ball.
(5)	Nobody don't like me.	Nobody no like me. (G)	Nobody likes me.
(6)	I no like do that.	I no like do that. (H)	I don't like to do that.
(7)	Johnny big more than me.	Johnny big more than me. (J)	Johnny is bigger than I.
(8)	Let Daddy get pen write it.	Make Daddy get pen write am. (G)	Let Daddy get a pen and write it.
(9)	I more better than Johnny.	I more better than Johnny. (H)	I am better than Johnny.

(H): Hawaii, (J): Jamaica, (G): Guyana

- 誤った二重否定の使用（5）

などの類似点がある．また，状態と非状態の区別とは，たとえば，“love” や “like”，“want” などの状態動詞には “-ing” を付けることができず，ゆえに，非瞬間相を形成できないことである．子どもは早期にこの規則を獲得することができる．

Bickerton は，クレオール諸語間，および，クレオール諸語と子供の言語に，このような類似点があるのは，子どもが獲得すべき十分なモデルを与えられないとき，彼が「バイオプログラム」（bioprogram）とよぶ生得的な統語構造が現れるためであるとしている．バイオプログラム理論は，Chomsky の生成文法理論と相反するものではなく，それを補完するものであるとされるが,「普遍文法」のような概念とは直接的には一致しないとしている．

Bickerton は，その相違点を以下のように説明する．Chomsky が主張する普遍文法とは神経学的に実現された何らかの計算装置であり，これが，子供が利用できるいくつもの文法モデルを作り出す．そして，子供は，その利用できるいくつもの文法モデルから，自分が生まれ落ちた言語の文法に合うものを 1 つ「選択」しなければならないということになる．しかし，クレオール諸語より得られた証拠から，最初の言語習得はこれとはいくぶん異質な生得的装置によって成立していることが明らかとなった．この装置は，子供に対して，利用できるモデルをいくつか作り出すのではなく，単一の，かなり明確な文法モデルを提供するのである．つまり，バイオプログラムは，すべての言語に必然的に共有されるひとまとまりの範疇や規則，構造を構成するものではなく，言語の体系は統一体で，早く出

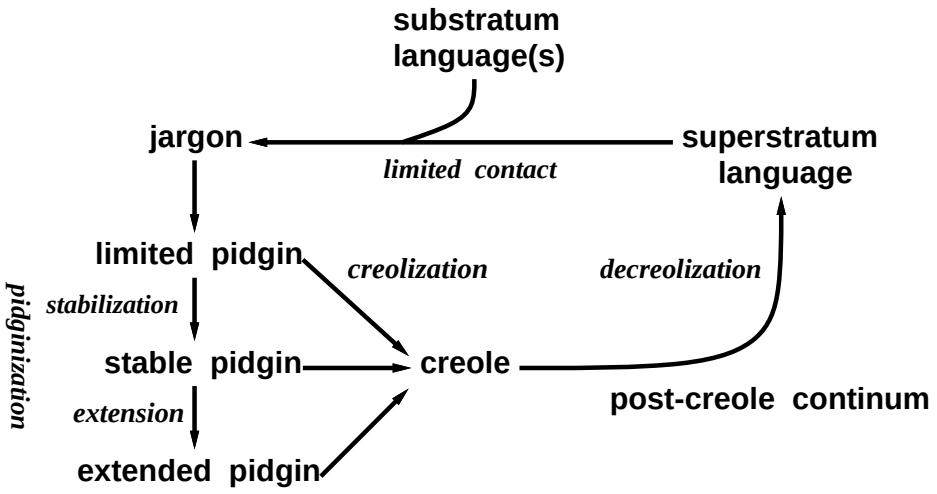

図 2.1: ピジン化・クレオール化のプロセス [16]

来た部分は変化して，後に出来る部分に順応していくものである．したがって，クレオール諸語や子供の言語に類似性があるのは，この生得的に備わった文法モデルが抑制されずに現れるからである．このような主張は，生成文法による過程反対説によって退けられてきたものであると Bickerton は述べている．

以上のような Bickerton の主張は，当然，議論のあるところである．彼の考えに基づけば，これまで長年，暗黙のうちに受け入れられてきた「世界の諸言語のうちどれ 1 つとして，子供が習得するのに，他の言語よりやさしいとか難しいとかいうものはない」という考えに疑問を投げかけるからである．つまり，クレオール諸語に似ている言語は，子供にとって習得しやすいということになる．Bickerton は，現存する言語がすべて同じ発達段階にあるという信念こそ変えなければならないとしている．しかし，ここでは，言語学上の議論よりも，彼のとった方法論が言語に新しい視点をもたらしたことに注目すべきである．つまり，これまで言語学において重要視されてこなかった個々人間の文法の差異や，時間軸に沿った通時的な言語変化に焦点を当て，さらにそこから，言語獲得における生得的普遍性の仮説を提案したことである．このような方法論は，等質性，共時態を重視してきた従来の言語学に対して，新たな視点を与える可能性がある．

2.4 人工生命における言語の進化に関する研究

以上見てきた言語変化理論や，ピジン・クレオール研究からの言語獲得・使用に関する研究成果やモデルの提案は，コミュニティにおける自然言語の変化，および，人間の認知モデルの研究に対して，興味深い方法論を提示する．それは，非等質性・通時態という視点から言語を捉えようというアプローチである．本節では，これらの研究と背景や動機をともにし，人工的な環境において言語の起源や進化を計算機上のシミュレーションにより明らかにしようとした研究を概観する．

人工環境において，言語（もしくは共通の通信規約）をエージェント間に構築しようという研究は，生物の進化論的な興味から行なわれてきた．このように，計算機内に人工的な生命形態を進化的に実現しようというアプローチは,「人工生命」研究とよばれている [24]．この研究分野において，Koza は，彼の提唱する GP（Genetic Programming）のパラダイムの有効性を示すため,「人工蟻」（Artificial Ant）問題 [18] を用いたシミュレーション実験を行なった [21]．人工蟻問題とは，限定された平面に巣と食物，フェロモン，複数の人工蟻からなる環境を設定し，フェロモンを用いたコミュニケーションにより，協調して食物を収集するコロニーを遺伝的に組織化させる問題であり，進化的な計算を行なう際のテストベッドとなるものである．Koza はシミュレーションにより，GP の手法がニューラルネットワークや GA（Genetic Algorithms）の手法よりも効果的に人工蟻のコロニーを遺伝的に組織化することを示した．

Werner と Dyer は，人工生物の集団内で配偶相手を効率よく獲得するため，共通の通信規約を遺伝的に自己組織化させることを試みた [35]．彼らの手法は，ニューラルネットワークと GA を組み合わせたものであるが，シミュレーションの結果，人工生物のオスとメスの間に，いくつかの適切なシグナルを作る能力と，そのおのおののシグナルに対して適切な動作をする能力の共進化がみられた．さらに，このシミュレーション結果から,「方言」と解釈できるシグナルの使用や,「二カ国語話者」とみることができる人工生物も発生した．

有田らは，相互結合ネットワークによる連想記憶装置を持つ仮想生物を，平面上に多数生息させ，近隣の仮想生物との間で会話を繰り返すことにより，遺伝的な世代交代を通して通信を進化させるモデルを提案している [39]．この仮想生物は，認識した事物から属性を抽出し名前を付けることが可能である．さらに，このモデルによって,「言語」の発展や「方言」形成などの現象も検討可能であるとし，この研究から自己組織化メカニズムの原理に関する知見を得ようとしている．

しかし，このような低水準の言語（シグナル）から，人間の自然言語のような高水準の言語へ遺伝的に進化させることは，現段階では困難であろう．なぜなら，内部表象を持たない単純な生物に，自然言語のような文法のカテゴリーや格システムを進化させることは難しいと思われるからである．たとえば，統語カテゴリー（動詞，名詞句など）を獲得する場合，いくつかの文や単語から，その属性を抽象化して妥当なカテゴリーを得る必要がある．また，自然言語の文を構成する場合，その表層的な表現のもととなる深層格システムを構築する必要がある．つまり，動詞を中心にして，誰が（行為者格），何を（対象格），どうしたか（結果格）などの情報を特定する必要がある．これらのカテゴリー化，および，格システムの構築には，高度な内部表象が不可欠であると考える．

また，内部表象を持つ場合でも，実際の体を持たない人工生物が，これまで人工知能の分野で解決できなかった問題に解答を与えることができるのか現段階では不明である．さらに，上記のシミュレーションによる「進化」の結果も，実験の設定からの予測の範囲内であると考える．実際の人間の自然言語の進化には，脳の進化，発声器官の発達，人間の道具の使用，他の動物と系統上乖離した条件などが複雑に絡み合っている．したがって，これらの過程を明らかにするためには，脳科学，古生神経学，考古学，文化人類学などからの幅広い考察が必要である．

そこで，Hashimoto と Ikegami は，より高水準の言語をモデル化することを目的に，記号文法システムを進化させる研究を行なった [15]．この研究では，エージェント間のコミュニケーション・ゲームを通して，共語集団（同じ語を発話・理解しあうエージェント集団）の形成，モジュール型進化（1 つの新しいルールをモジュール的に使うことで，多くの新しい文を発話・理解できるようになる発展過程），アルゴリズム的進化（文法内にループを持つことで，再帰的な書き換えが可能となり，原理的に無限個の語を発することができる発展過程）が出現している．これにより，当初はチョムスキー階層の正規文法しか持たないエージェントが，文脈自由のクラスの文法を持つようになったとしている．しかし，この研究もエージェントの扱う語は人工的なものであり，自然言語を対象としたものとはいえない．

これらの研究において問題となるのが，エージェントの用いる言語と環境（外界）との対応づけであろう．言語が複雑なのは，単に環境が複雑であることが反映されたものである，という主張もみられる．MacLennan は，簡単なルールを持ったエージェント同士が，コミュニケーションすることにより，限定された環境における物の指し示しが創発し，同

意語の発生もみられたとした [26]．そして，環境の複雑さが物の指し示しに影響を与えているとしている．また，Werner と Dyer は，言語の多様性はエージェントのいる環境の空間的な不均質性によるとしている [35]．

しかし，言語は高度に自律的なシステムであるがゆえに，それ自身で多様性を生みだし，進化することも可能であると考えることができる [16]．この可能性は，いくつかの計算機実験によっても示されている．たとえば，Lindgren の進化ゲーム [25]，Tierra world に関する研究 [32]，テープとマシンの共進化 [16] などである．したがって，言語表現は単なる環境にある物の指し示しではなくても，複雑な語，文法が現れるものであり，お互いの思考を伝達し合うことにより，複雑化・多様化していると考えることもできる．

2.5 共通言語の組織化

前節までに述べた自然言語研究の問題点，および，言語変化理論，ピジン・クレオール研究，人工生命における言語の進化に関する研究の成果を踏まえ，本節では本研究の立場について述べる．

本研究における「共通言語の組織化」とは，知的な機能を持ったエージェント間のコミュニケーションにより，コミュニティにおいて自然言語に近いレベルの言語が融合・分化する過程をシミュレートしようというものである．本研究のポイントをまとめると以下のようになる．

言語の非等質性と通時態 言語変化理論が指摘するように，人間の言語獲得・使用のメカニズムには，等質性，共時態を重視してきたこれまでの言語研究だけでは解決できない問題がある．このため，本研究では，言語の非等質性と通時態に焦点を当てたアプローチを試みる．ここでの非等質性とはモデルを構成するエージェントのコミュニケーション能力（文法，学習，推論能力など）の差異を意味し，通時態とはシミュレーションにおける時間軸に沿った言語変化を意味する．

自然言語に近いレベルの言語 人工生命における言語の進化に関する研究では，シグナルの交換程度の低レベルの言語が対象となっていた．しかし，このレベルの言語から人間の自然言語へ進化させることは，現段階では難しい．本研究では，より自然言語に近いレベルの言語を対象とした，言語の融合・分化の過程に注目する．また，言語は高

度に自律的なシステムであるがゆえに，それ自身で多様性や複雑性を生み出すことが可能であるとの立場から，物の指し示しは対象としない．

知的なエージェント 自然言語に近いレベルの言語を対象とするとき，それを用いてコミュニケーションを行なうエージェントには，学習・推論などの知的な機能が要請される．本研究では，エージェントがこれらの機能をあらかじめ有するものと仮定し，モデルの構築およびシミュレーション実験を行なう．

以上述べたような特徴を実現するため，本研究では，マルチエージェント・モデルを採用する．マルチエージェント・モデルとは，複数の自律的なエージェントが，あるタスクを実行するため，相互に作用しながら協調してはたらくことを意味する．つまり，マルチエージェント・モデルとは，自己改編できる能力を持ったエージェント間の協調により，動的な環境に適応できるシステムを構築できる枠組である．本研究では，このシステムを構築する過程を，コミュニティにおける共通言語の形成過程とみなし，自然言語の動的な性質の実現を目指す．また，エージェントは自分の文法を改編する能力を持つものとし，その変化に応じて，自分の発話・理解する言語も変わるものとする．このような枠組を用いることで，本研究の目的とするような自然言語の特徴を実現できるモデルを構築することが可能となる．

本研究は，以下の分野への貢献を意図するものである．まず，自然言語に近いレベルの言語の，大域的な変化（融合・分化）のモデルを構築し，シミュレーション実験を行なうという手法は，これまで実際の発話データの解析が中心であった言語変化理論やピジン・クレオール研究に対して，新たな方法論を提示する．さらに，シミュレーション結果は，これらの分野におけるモデル構築に際して，有益な情報を提供すると考える．

次に，エージェントの内部メカニズムが，計算論的言語獲得のモデルとなると考えることができる．つまり，ある機能を仮定したエージェント同士のコミュニケーションにより，自然言語現象と類似した大域的な挙動が見られた場合，当初仮定したエージェントの機能と人間の認知的な機能を比較することが可能となる．当然，エージェントの内部モデルがそのまま人間の認知モデルであるという主張はできないが，入力と出力のレベルにおいて等価なシミュレーションであるということができる．

最後に，将来的な工学的応用については，大規模文法ベースの維持，機械翻訳，プロトコルの異なるネットワーク間を結合するエージェントとしての応用も考えられる．これらの点については，第6章において議論する．

2.6 まとめ

本章では，第 2.1節において，これまでの自然言語研究の問題点について述べた．その主な問題点とは，言語研究が等質性，共時態を重視してきたために，捨象されてきた部分が大きいというものであった．次に，第 2.2節において，これまで軽視されがちであった，言語の非等質性，通時態を対象する言語変化理論について述べた．この研究により，通時変化研究と共時変化研究の統合がなされつつあるが，対象はまだ音韻の分析に留まっている．第 2.3節では，Bickerton の研究を中心に，言語を通時的，大域的な側面から扱ったピジン・クレオール研究と，そこから導かれる言語獲得モデルについて述べた．さらに，第 2.4節では，人工生命における言語の進化に関する研究を概観した．これらの研究からは興味深い結果も得られているが，研究の対象が低水準の言語（シグナル）となっている．

最後に，第 2.5節において，本研究の立場について述べた．本研究の目的は，自然言語の大域的な変化の過程をシミュレーションすることにより，そのメカニズムを明らかにすることである．このシミュレーション実験を行なうにあたって，本研究では，より人間のコミュニティに近い枠組を持つマルチエージェント・モデルを用いる．このモデルにおけるエージェントは，文法的な枠組や推論能力などより知的な機能を持つと仮定する．また，言語の起源については対象とせず，言語の融合と分化の過程における語法（usage）の変化に注目する．これらの問題設定は，現段階では，低い能力しか持たないエージェントや単純な構造の言語から，人間に近いレベルの言語へ計算機上で進化させることは難しいと考えるからである．また，同様の理由により，言語と環境にある物との指し示しの問題も扱わない．これらの前提のもとに，第 3章では文法理論の制約を用いたモデル，第 4章では推論機能に関するモデル，第 5章では語彙の変化に関するモデルの提案，および，それに基づく計算機実験を行なう．これらの章の関係は，第 3章が同一言語における習得レベルの異なるエージェント間の相互作用のモデルの提案，第 4章が異なる言語を持つエージェント間の相互作用のモデルの提案であるとみなすことができる．また，第 4章の推論のモデルと第 5章の語彙のモデルは，これらを統合することにより，より自然言語に近いレベルの言語を扱うことができることを示すものである．

第 3 章

文法理論を制約として用いたエージェント群による共通言語の組織化

エージェント間に自然言語に近いレベルの共通言語を構築させるには，すでに得られている文法理論の仮定と制約を用いるのが妥当であろう．本章では，エージェントが GPSG（Generalized Phrase Structure Grammar）[12] に基づく文法の枠組を持つと仮定したマルチエージェント・モデルを提案する．本モデルでは，各エージェントの持つ文法に個体差を持たせ，それらのエージェント間のコミュニケーションによる共通言語の組織化の過程について調べる．具体的には，文法の獲得がまだ不十分な子供エージェントと，すでに文法を獲得している大人エージェントにより構成されるコミュニティを想定する．このコミュニティにおいて，子供エージェントは，大人エージェントの模倣や，試行錯誤を通して，文法を洗練していく．また，大人エージェントも，子供エージェントの発話を解析するため，自らの文法を緩めていく．このような過程を通して，各エージェントは，コミュニティにおける共通言語を獲得していくものとする．本章では，このモデルを計算機上に実現し，共通言語の形成過程をシミュレートできることを示す.

3.1 共通言語

本節では，本稿で用いる**共通言語**を定義する．いま，あるエージェントが持つ文法を G_i とする．ここで，各エージェントは，添字 i により識別される．文法 G_iが生成および受理できる文の集合を，言語 $\mathcal{L}(G_i)$ とする．n エージェントにより構成されるコミュニティの

言語 $\mathcal{L}_G$は，それぞれの言語 $\mathcal{L}(G_i)$ $(1 \leq i \leq n)$ の和集合として，以下のように定義される．

$$\mathcal{L}_G = \mathcal{L}(G_1) \cup \mathcal{L}(G_2) \cup \ldots \cup \mathcal{L}(G_n) = \bigcup_{1 \leq i \leq n} \mathcal{L}(G_i).$$

われわれは，このコミュニティにおける**共通言語** $\mathcal{L}_C$を，ある一定の閾値以上の発生頻度を持つ文の集合として定義する．$\mathcal{L}_C$と $\mathcal{L}_G$の関係は，以下のように定義される．

$$\mathcal{L}_C \subset \mathcal{L}_G$$

この共通言語 $\mathcal{L}_C$の定義は，多数のエージェントがその要素の文を認識できたかどうかを考慮せず，単にその文がコミュニティの中で多く出現したかどうかを指標としている．つまり，特定のエージェントが，頻繁にある文を発話したとすると，それが共通言語に加えられることになる．これは粗い定義のようであるが，マルチエージェント環境を考えるとき，妥当なものとなる．なぜなら，$\mathcal{L}_C = \mathcal{L}_G$となることは理想であるが，あるエージェントからは他のエージェントが生成可能な文を知ることはできないため，各エージェントはコミュニティで発話されるすべての文の集合 $\mathcal{L}_G$を認識することは不可能であり，ゆえに，この $\mathcal{L}_G$から共通言語としての文を選択することも不可能である．したがって，各エージェントは，自分が解析した範囲内において高頻度で使われた文を共通言語の要素であると近似的に判断し，学習を行なうことになる．この学習では，エージェントの持つ文法 G_iを構成する各ルールに重みを持たせ，これを変化させることで，エージェントは頻度情報を獲得していく．

このコミュニティにおいて，共通言語が形成される過程は以下のようになる．まず，各エージェントは，自らの言語 $\mathcal{L}(G_i)$ を共通言語 $\mathcal{L}_C$へ近付けるために，自らの文法 G_iを改編する．これは，各エージェントによる言語獲得の過程である．共通言語 $\mathcal{L}_C$もそれに応じて改編される．なぜなら，$\mathcal{L}_C$の要素である $\mathcal{L}(G_i)$ が変化するからである．これは，マルチエージェントによる共通言語獲得の過程である．以下の節では，この過程を実現するためのマルチエージェント・モデルを提案する．

3.2 文法獲得のモデル

本節では，文法獲得のモデルを提案する．ここでは，エージェントの形式化，エージェント間のコミュニケーション，文法の枠組，学習方法について述べる．

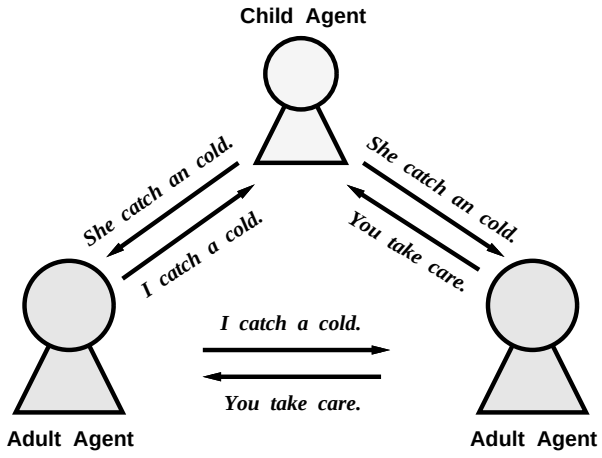

図 3.1: エージェント間のコミュニケーション

3.2.1 エージェントとコミュニケーション

本章で提案するモデルは，子供エージェントと大人エージェントにより構成される（図 3.1）．子供と大人のエージェントは，それぞれの持つ文法が異なるため，文の生成能力が異なる．しかし，学習メカニズムは同じものを持つ．子供エージェントの初期文法 G_C は，まだ獲得が不十分であり，コミュニティにおいて文法的に不適格な文も生成してしまう．一方，大人エージェントの文法 G_A は，初めから十分に獲得されており，コミュニティにおいて文法的に適格な文を生成する．これらのエージェントは，このコミュニティにおいて，他のエージェントとの多数の文の交換を通して，自らの初期文法を改編しながら，共通言語 L_C の獲得を試みる．

このコミュニケーションにおける処理の概要は以下のとおりである．

1. 各エージェントは，ランダムに発話する．
2. その発話された文を，すべてのエージェントが聞く．
3. すべてのエージェントは，その文を構文解析する．
4. すべてのエージェントは，学習 1（ルールの重みの割り当て）を行なう．
5. ある文法ルールに対して，解析に使われた回数が閾値を越えたら，学習 2（ルールの洗練）を行なう．

6. 1 に戻る．

エージェントは，コミュニケーションの手段として簡単な英語を用いる．エージェントが発話するとき，大人はランダムな文を生成し，子供は模倣した文を生成する．つまり，大人は単語と文法ルールをランダムに選びながら，文法的に適格な文を生成する．一方，子供は，直前に他のエージェントの発話の解析に使用したルールをそのまま，単語だけランダムに入れ換えて発話する．

ルールの重みの割り当て，および，ルールの洗練という 2 つの学習メカニズムについては，第 3.2.3節において述べる．

3.2.2 文法のフレームワーク

本節では，各エージェントが持つ文法のフレームワークについて述べる．文法とは，本質的に生成できる言語のクラスを特定できればよいのであるから，どのような表現方法も可能であるが，本稿ではきわめてオーソドックスに，文法には句構造を仮定する．この仮定をオーソドックスと述べた理由は，歴史的にも Chomsky 以下，言語学上の多くの観察からその表現の妥当性が言及されているという事実と，さらに句構造文法が文脈自由文法で表現できるという計算上の実用性による．

さて，本章での目的は,「粗く表現された句構造文法」（子供エージェントの持つ文法）を「洗練された句構造文法」（大人エージェントの持つ文法）に発展させることである．粗いルールから洗練されたルールを導くということを実装するために，本章では粗いルールの各カテゴリー中にはフィーチャーが内在していると考え，その値を固定することを洗練とよぶことにする．カテゴリー中にフィーチャーを仮定したということは，すなわち，文法のフレームワークとして GPSG（Generalized Phrase Structure Grammar）[12] を仮定したことを意味する．フィーチャー・システムを採用するとなると，文法の洗練の過程においてはフィーチャーの共起関係を調べる必要があり，この過程で「親ー子」間（ルールの左辺と右辺）で共有されるフィーチャー,「子」間（ルールの右辺）で共有されるフィーチャーを同定する必要がある．この親子間のフィーチャーの共起は GPSG の枠組内で，ヘッドフィーチャーの継承（Head Feature Convention; HFC）という概念で実装できる．また,

句構造とは，ある文が複数の句に分解され，各々の句がさらに下位の句に分解され，最終的には語にまで分解されるという文内の木構造を指す．

ひとつの句に相当するノードが，その下位の句（ノード）に分解されるというルールからなる文法．Context Free Grammar（CFG）．

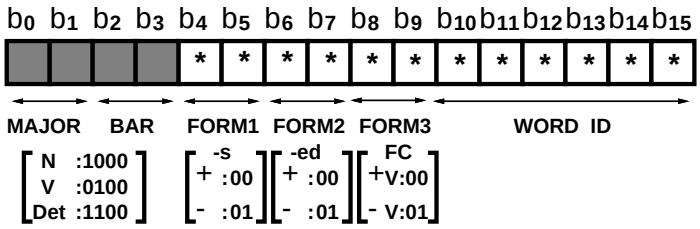

図 3.2: フィーチャーを含むシンボルの表現

子間のフィーチャーの共起は，GPSG のコントロール，すなわち制御一致原理（Control Agreement Principle; CAP）という概念で実装できる．

エージェントが持つ文法の各ルールは， 優先順位を与えるための重みを持つ（表 3.1, 3.2）．これらのルールにおけるシンボルはビット列により表現する（図 3.2）．これらのビット列は，以下に述べる 5 つのフィーチャーと単語識別番号（WORD-ID）を表す．ここで，‘+’ はそのフィーチャーが適用できることを，‘–’ はそのフィーチャーが適用できないことを示す．

- MAJOR： 原始フィーチャー．
  b_0： 名詞類（[+N]： 1，[–N]： 0）．
  b_1： 動詞類（[+V]： 1，[–V]： 0）．
- BAR： バーレベル．
  b_2, b_3： バーレベルの種類（0： 00, 1： 01, 2： 10, 3： 11）．
- FORM： 語の形態．
  - FORM 1： 語尾 1．
    b_4, b_5： *-s*（+： 00, –： 01）．
  - FORM 2： 語尾 2．
    b_4, b_5： *-ed*（+： 00, –： 01）．

本稿で述べた GPSG の枠組とは， カテゴリーのフィーチャー束化と，それにともなう HFC および CAP の原則を指し，[12] の中に現れる GPSG の他の概念，たとえば ID ルールと LP ルールやモンタギュー風の意味論などは本稿では用いない．

– FORM 3： 語頭.

b_4, b_5： 母音（+： 00, –： 01）.

たとえば，名詞 “dogs” は，原始フィーチャーが [+N] と [–V] であり，バーレベルが 0，語尾が “-s”，語頭は母音ではないという特徴を持つ．したがって，この名詞 “dogs” は，本モデルでは ‘1000000101’ というビット列で表現される（ここでは，WORD-ID は省略している）.

MAJOR と BAR のフィーチャー（b_0-b_3）は *known-bits* とよばれ，FORM1，FORM2，FORM3 のフィーチャー（b_4-b_9）は *unknown-bits* とよばれる．*known-bit* は共有ビットであり，子供と大人の双方が理解可能である．一方，*unknown-bit* は大人のみが理解可能であり，子供はまだ理解できない．子供の学習の目的は，これらの *unknown-bits* の値を発見し，同定することである．

表 3.1，3.2に，本モデルにおける文法の具体例を示す．表 3.1は，子供の文法 G_C である．この文法 G_C では，すべてのシンボル（カテゴリー）のフィーチャー（$b_4 - b_{10}$）が，どんなビットでも適合するワイルドカード ‘*’ により構成されている．このため，子供エージェントの文法は,「一般化」されているという特徴を持つ． 表 3.2は，大人の文法 G_A である．この文法 G_A では，いくつかのシンボルが，‘[F]’ で表される，すでに決定されたフィーチャーを含んでいる．このため，大人エージェントの文法は,「特殊化」されているという特徴を持つ．通常，特殊化されているルールは，一般化されているルールより大きな重みを持つ．このため，発話もしくは解析時に，複数のルールが適用可能ならば，基本的に特殊化されているルールが使われる．したがって，大人エージェントは文法的に適格な文を生成し，それらの文を正しく解析できる．本モデルでは，エージェントはアクティブ・チャートパーサー [36] により文を解析する．

3.2.3 学習方法

本モデルでは，文法獲得のために 2 つの学習方法を採用する．1 つは「ルールの洗練」であり，もう 1 つは「ルールの重みの割り当て」である．2 つの学習方法は複雑な機構ではないが，これらを用いることにより，頑健なシステムを構築することが可能であることを第 3.3章の実験により示す.

表 3.1: 子どもエージェントの文法 G_C

No.	rule	weight
1	S* → NP* VP*	w_1
2	NP* → Det* N*	w_2
3	NP* → N*	w_3
4	VP* → V* NP*	w_4
5	VP* → V*	w_5

表 3.2: 大人エージェントの文法 G_A

No.	rule	weight
1	S* → NP* VP*	w_1
2	NP* → Det* N*	w_2
3	NP* → N*	w_3
4	VP* → V* NP*	w_4
5	VP* → V*	w_5
6	S[F] → NP[F] VP[F]	w_6
7	NP[F] → Det[F] N[F]	w_7
8	NP[F] → N[F]	w_8

ルールの洗練

ルールの洗練は，あるコミュニティにおける発話文の集合 $\mathcal{L}_G$から，妥当なフィーチャーを発見するための方法である．この方法の手続きを以下に示す.

1. **解析木の入力：** 解析木 $\mathcal{T} = \{R_i | 1 \leq i \leq n\}$ を入力，
   ここで，R_iは解析に使われた例示化されたルール，n はそのルールの数.

2. **条件付き確率の計算：** ルール R_iにおけるフィーチャー間の条件付き確率 $p(F_k|F_j)$ を，GPSG における制御一致原理（CAP）を用いて計算，

$$p(F_k|F_j) = \frac{p(F_j \cap F_k)}{p(F_j)},$$

   ここで，F_jと F_kは R_iにおけるフィーチャー，i と jはパラメータ（$j = 1\ to\ 5$ に対応して $k = j + 1\ to\ 6$）.

3. **新しいルールの生成：** $p(F_k|F_j)$ がある閾値θを上回ったとき，フィーチャー F_jと F_kの値を含んだ新しいルールを生成する.

以上の学習過程を，例文 “dogs come.” を用いることにより説明する．ここでは説明を簡潔にするため，ルール ‘NP → N’ と ‘VP → V’，および，WORD-ID を省略する.

1. 例文： “dogs come.”

2. 辞書参照：
   dogs: 1010000101,
   come: 0101010101.

3. 文法ルール： S* → NP* VP*.

4. ルールのビット表現：
   0110****** → **1010******** **0101********.

5. 例示化されたルール（解析後のルール）：
   0110010101 → **1010**000101 **0101**010101.

例示化とは，文法ルールのカテゴリー中のフィーチャーに，実際の自然言語文に合わせて値を与えることである.

6. 条件付き確率：

   $p(F_1|F_4),\ p(F_2|F_4),\ p(F_1|F_2) > \theta$.

7. ルール生成：

   01101**** → **1010**0001** **0101**01****.

エージェントが “dogs come.” という発話文を受け取ると，まずそれに対して構文解析を試みる．エージェントは，子供と大人のエージェントが共有する辞書を参照し，構文解析のために適切なルールを選択する．ここでは，‘S* → NP* VP*’ が適用される．エージェントは，この適用により，ルール中の各フィーチャーに値が割り当てられた（例示化された）ルールを得る．ルールの左辺のフィーチャーは，GPSG におけるヘッドフィーチャーの継承（HFC）によって値が割り当てられる．HFC は，左辺のフィーチャーはそのルールの右辺のヘッドのフィーチャーの値を継承することを意味する（図 3.3）．このルールでは，VP がヘッドとなるため，S のフィーチャーは VP のそれを継承する．次に，エージェントは，フィーチャー間の条件付き確率を計算する．この計算では，GPSG における制御一致原理（CAP）を用いる．CAP は，どの語がどの語を制御するかを決定する（図 3.3）．NP は VP を制御するので，エージェントはその制御と逆方向の条件付き確率 $p(F_{NP_k}|F_{VP_j})$ を計算する（図 3.4）．本モデルにおいて，CAP の逆方向の計算を行なう理由は，これによりフィーチャーの値を同定するための，正確な条件付き確率を計算できるからである．たとえば，名詞は冠詞を制御するため，語頭が母音ではない単数名詞は，冠詞として ‘a’ か ‘the’ をとるが，どちらをとるかは一意に決まらない．しかし，その制御を逆方向から見ると，冠詞 ‘a’ の次には，語頭が母音ではない単数名詞がくることが一意に定まるため，フィーチャーの値の同定が容易になる．この条件付き確率の計算の結果，3 つの確率の値が閾値θを上回るため，3 つのフィーチャーに値が割り当てられ（F_1 = ‘00’，F_2 = ‘01’，F_4 = ‘01’），新しいルールが生成される．このルールは，名詞が複数形（語尾に$-s$ がつく）ならば動詞の語尾には$-s$ がつかないことを表現している．

ここで示したように，この学習の目的は，語の形態についてのフィーチャー間の関係の規則性を発見することである．本モデルでは，主に子供エージェントが，フィーチャーの発見と値の同定を通して，自分の持つ文法ルールを「一般化」された形から「特殊化」された形へ精緻化することが期待される．

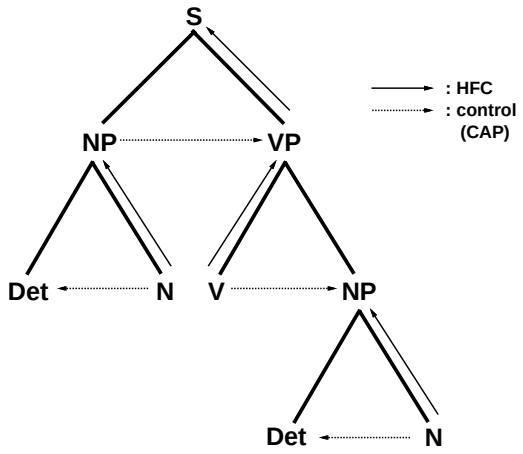

図 3.3: ヘッドフィーチャーの継承（HFC）と制御一致原理（CAP）

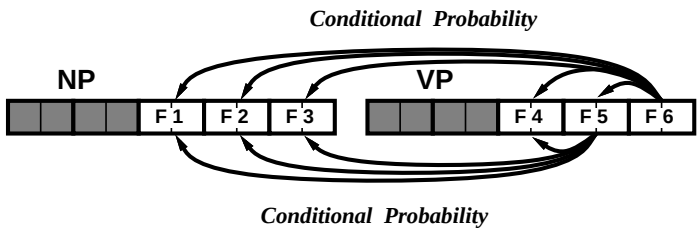

図 3.4: フィーチャー間の条件付き確率の計算

ルールの重みの割り当て

ルールの重みの割り当ては，あるコミュニティにおいて使われる共通言語 $\mathcal{L}_C$ に対して，ルールを適応させるための方法である．ルールの重みは，以下の 3 つの条件のときに変化する．

- 構文解析終了時
- ルール生成時
- ルール併合時

構文解析終了時： エージェントが発話文を完全に解析できたとき，その解析に使われたすべてのルールの重みには，得点 p が加算される．ここで，得点 p とは，その解析で使われたルールの数である．

解析過程において，いくつかの適用可能なルールが競合したときは，最も大きな重みを持ったルールが選ばれ，適用される．本モデルにおいて，ルール中の '1' と '0' のビット数，つまり，ルールの特殊性は，ルールの競合において考慮しない．なぜなら，それらの特殊化されたルールは，ルールの生成時に競合する他のルールよりも大きな重みを得ているからである．

この方法において，より長い文を解析するために使われたルールは，より高い得点を得る．言い換えると，エージェントが解析もしくは生成する文が長くなるほど，エージェントはそのコミュニティの共通言語を学習することになる．

ルール生成時： 新しいルールがルールの洗練の過程により生成されると，そのルールには，派生前のルールの重み q よりも大きな重み $q + r$ が与えられる．ここで，r は正の定数である．

この方法は複雑な機構ではないが，これが異なる環境で頑健性を実現できることを，第 3.3節における実験で示す．

ルール併合時： この処理は，異なる重みを持った同一のルールが生成されたときに実行される．この場合，それらのルールは一つのルールに併合され，その重みは併合前の各ルールの重みの総和となる．

表 3.3: ルール併合の過程の具体例

time	rule no.	rule	weight
T_1	R_0	NP → Det* N*	w_0
T_2	R_1	NP → Det[a] N[sg]	w_1
	R_0	NP → Det* N*;	w_0
T_3	R_2	NP → Det[the] N[pl];	w_2
	R_0	NP → Det* N*;	w_0
	R_1	NP → Det[a] N[sg];	w_1
T_4	R_2	NP → Det[the] N[pl];	w_2
	R_3	NP → Det[a] N[sg];	w_3
	R_0	NP → Det* N*;	w_0
	R_1	NP → Det[a] N[sg];	w_1
T_5	R_4	NP → Det[a] N[sg];	$w_4 \Leftarrow w_3 + w_1$
	R_2	NP → Det[the] N[pl];	w_2
	R_0	NP → Det* N*;	w_0

表3.3に，この処理の具体例を示す．いま，時間T_1において，名詞句1“ ‘a’ + singular noun (sg)” が頻繁に使われると，新しいルール（R_1）が，T_2にR_0から生成される．このとき，重みは$w_1 > w_0$である．次に，名詞句2“ ‘the’ + plural noun (pl)” が繰り返し使われると，R_0がその度に使われ，それにともないw_0が増加する．時間T_3では，R_2がR_0から生成され，このときの重みは$w_2 > w_0 > w_1$となる．その後，名詞句1が再び使われると，R_0が適用される．時間T_4では，R_3がR_0から生成され，このときの重みは$w_2 > w_3 > w_0 > w_1$となる．ここで，同一のルールR_1，R_3が存在することになるため，2つのルールはR_4に併合される．このときの重みは，$w_4 > w_2 > w_0$である．

ここで，名詞句1に適用されるルールが，R_1ではないことに注意．

3.3 実験

本節では，本モデルを計算機上に実現し，実験した結果を示す．実験は，子供エージェントの数を変えることにより，2 つの条件で行なった．

3.3.1 実験 1： 大人が多い条件

実験 1 は，大人が 3 エージェントいる環境に，子供を 1 エージェントのみ入れる条件で行なった．この実験 1 は，10 回のシュミレーションからなり，それぞれのシミュレーションは 2000 タイムステップ実行された．ここで，1 タイムステップは，すべてのエージェントが 1 回発話したとき完了する．パラメータは，条件付き確率の閾値$\theta = 0.7$，新しいルールの重みに加えられる定数 $r = 100$ とした．

図 3.5に，10 回のシミュレーションの結果の平均を示す．この図では，子供エージェントの獲得したフィーチャー数を細い実線で，大人エージェントの獲得したフィーチャー数を太い実線で示す．子供は，タイムステップ $t = 250$ あたりまで急激にフィーチャーを獲得し，$t = 250$ から $t = 700$ ではゆるやかに獲得を続けた．$t = 700$ 以降は，そのフィーチャー数を維持し，$t = 2000$ でほぼ大人と同じフィーチャー数となった．これに対して，大人のフィーチャー数は，全タイムステップを通して変化がなかった．しかし，そのルールの重みはわずかに変化していた．

すべてのエージェントに共通するフィーチャーの数を，図 3.5に破線で示す．このフィーチャー数は，子供の獲得したフィーチャー数と同様の推移を示した．シミュレーション終了時点で，これらのフィーチャーが割り当てられたルール数は 6 であった．これらのルールは，その時に発話されたすべての文の 71%を生成，もしくは，解析していた．

この実験の結果から，子供は，大人が持っていたのとほぼ同数のフィーチャーを獲得していた．しかし，子供と大人では，獲得したフィーチャーにいくらかの違いが見られた．この理由は，本モデルが，語の形態についての特徴のみから，その関連の規則性を見つけようとしているからである．しかしながら，すべてのエージェントは，シミュレーションの終了時点で 6 ルールを共有し，それらのルールで発話文全体の 71%を生成もしくは解析していた．われわれはこのとき，そのコミュニティにおいて，共通言語が形成されたと考える．

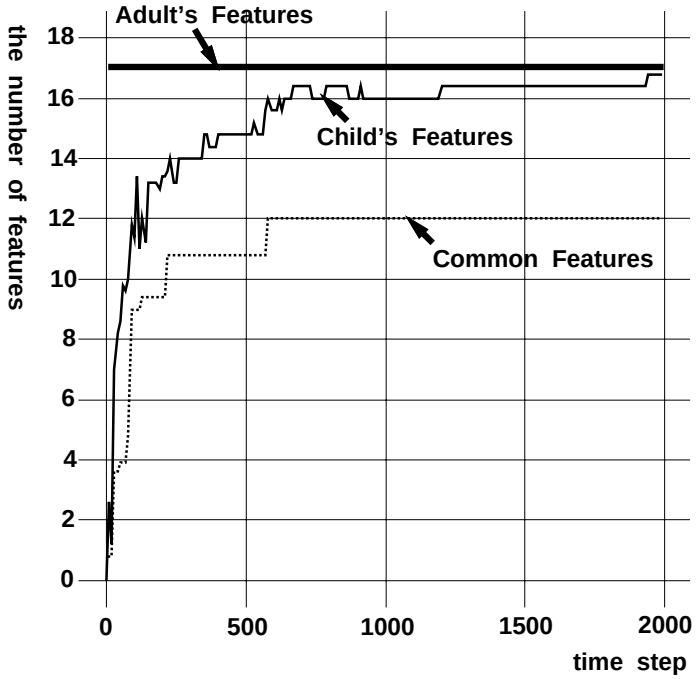

図 3.5: 実験 1 – 大人が多い場合のフィーチャー獲得数の推移

3.3.2 実験 2： 子供と大人が同数の条件

実験 2 は，大人と子供のエージェントが同数（それぞれ 3 エージェント）いる条件で行なった．その他の実験条件は，実験 1 と同様である．

図 3.6に，10 回のシミュレーションの結果の平均を示す．この図においても，子供エージェントの獲得したフィーチャー数を細い実線で，大人エージェントの獲得したフィーチャー数を太い実線で示す．子供は，$t = 300$ あたりまでにすばやくフィーチャーを獲得した．これに対して，大人は，そのフィーチャー数を全く変化させなかった．$t = 300$ 以降は，子供はそのフィーチャー数を維持していたが，一方，大人は徐々にフィーチャーを獲得し始めた．そして最終的には，$t = 1000$ を過ぎたあたりで，双方の線がほぼ並行になった．

すべてのエージェントに共通するフィーチャーの数を，図 3.6に破線で示す．このフィーチャー数は，子供のフィーチャーの獲得過程よりもゆっくりと増え始め，$t = 1300$ 以降は一定の値を維持していた．シミュレーション終了時点で，これらのフィーチャーが割り当てられたルール数は 3 であった．これらのルールは，その時に発話されたすべての文の 70 パーセントを生成，もしくは，解析していた．

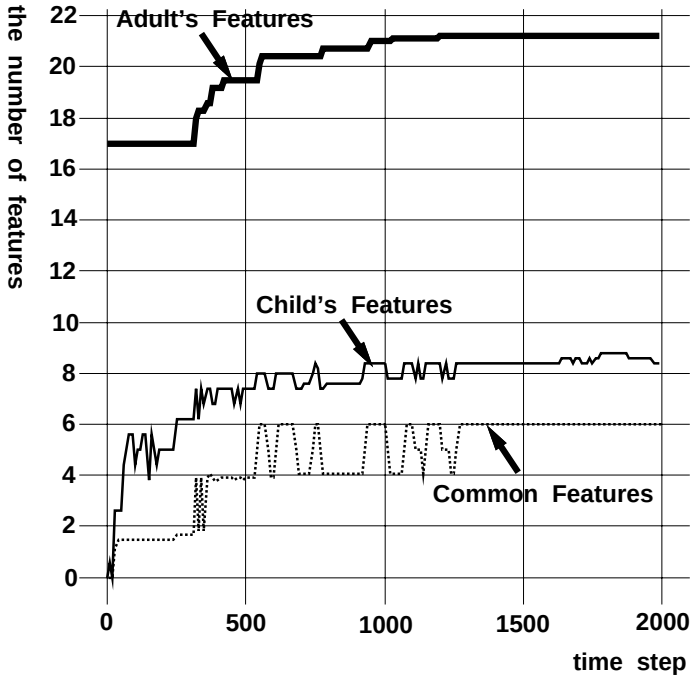

図 3.6: 実験 2 – 子供と大人が同数の場合のフィーチャー獲得数の推移

この実験の結果から，子供と大人が獲得したフィーチャー数はそれぞれ，平均で 8 と 4 であった．子供が獲得したフィーチャー数は，実験 1 で獲得したフィーチャー数のほんの半分でしかないため，子供は大人の初期の文法に対して不適格な文をより多く発話した．大人が獲得したフィーチャーは，子供と同様に非文法的な文を発話させる原因となった．言い換えると，大人は子供の発話を解析するため，自分の文法をやや緩めたと考えられる．われわれは，これをそのコミュニティにおける共通言語の形成過程とみなす．

さらに，この結果は，自己改編する能力をもつエージェント間のコミュニケーションにより，文法がコミュニティの中で動的に変化したことを意味する．これは，本モデルが，マルチエージェント・モデルのもつ重要な特徴の一つである融通性を実現していることを意味しており，これを示すことが本稿の目的の一つであった．

3.3.3 その他の実験

実験 1，2 では，閾値のパラメータとして$\theta = 0.7$ を用いた．このパラメータθは，エージェントが新しいルールを生成する際の，フィーチャー間の条件付き確率のための閾値で

ある．つまり，あるフィーチャーの組の条件付き確率がこの閾値を上回ったとき，エージェントは新しいルールを生成する．

図3.7に，実験1の条件に基づき，パラメータとフィーチャーの獲得数との関係を調べた実験結果を示す．この実験では，パラメータは$\theta = 0.5, 0.7, 0.9$ の3つの値を設定し，それぞれに対して，子供が獲得するフィーチャー数の推移を調べた．実験結果は，閾値が最も低い場合（$\theta = 0.5$）では$t = 300$ 前後でフィーチャー数18を獲得し，それ以降は変化がなかった．初期状態において，大人に設定したフィーチャー数は17であるため，それを上回るフィーチャーを獲得していることになる．これは閾値の値が低いため，大人とは異なるルールも生成していることによる．$\theta = 0.7$ では，$t = 700$ 前後まではフィーチャー数10を獲得しているが，$t = 700$ 以降は$\theta = 0.5$ と同様にフィーチャー数18となり，それ以降は変化がなかった．これら2つのパラメータの条件において，その値の差が，フィーチャー数が18になるまでの時間の差となっている．最後に，閾値が最も高い場合（$\theta = 0.9$）は，$t = 400$ から$t = 1200$ にかけてフィーチャー数を上下させている．これは，子供自身の発話によるノイズも入り，確率が安定しないためである．$t = 1200$ 以降は，8以上のフィーチャー数を保持している．

これらの結果から，パラメータθの値を変えることにより，フィーチャーの獲得数がこれに対応して変化することが観察される．パラメータの値を低く設定すると，フィーチャーの獲得は早くなるが，コミュニティの共通文法に適応しないルールも生成してしまう．逆に，このパラメータを高く設定すると，フィーチャーの獲得が遅くなる．このパラメータを環境に応じて，エージェントが自律的に設定するメカニズムが必要となるであろうが，現段階では困難な問題であるため，本章のモデルでは，$\theta = 0.7$ と設定し，実験を行なった．

3.4 実験結果の考察

本節では，本章で提案した文法理論の制約を用いたマルチエージェント・モデルについて，実験結果を踏まえ，考察を行なう．

文法理論（GPSG）を仮定する必要性

まず，本モデルのエージェントに，なぜGPSGに基づく文法を仮定する必要があったのかについて考察を行なう．第2.4節で述べたとおり，原始的な言語レベルしか持たない人工

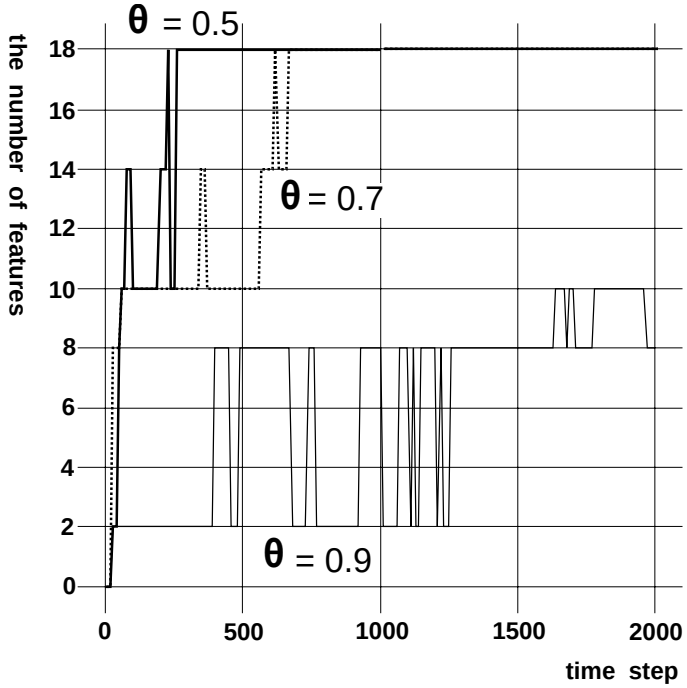

図 3.7: パラメータの変化とフィーチャー獲得数の推移（実験 1 の条件）

的な生物群に，遺伝的な進化のみを用いて，人間のような言語を組織化させることは現段階では困難であると考える．一般的に，人間の言語獲得過程を解明することはいまだに困難であり，したがって，その言語獲得過程をモデル化するためには，いくつかの仮定と制約を用いる必要がある．確かに本モデルにおいても人工生命研究と同様に，モデルの表現を簡潔にするため，シンボルやルールの表現にビット列を用いている．しかし，本稿で問題にしているのは，このような表現のレベルではなく，言語の本質的な「構造」に関するものである．つまり，第 2.4節で述べたように，文法の統語カテゴリーを獲得する際の属性の抽象化や，誰が（行為者格），何を（対象格），どうしたか（結果格）などの情報を特定するための深層格システムの構築を，人工生物の進化により実現するのは難しいということである．

理論言語学において，Chomsky は，言語獲得の過程を，GB（Government and Binding）理論におけるパラメータ固定（parameter-setting）の過程とみなし，詳細に論じている [9]．この理論では，言語知識の大枠は生得的に与えられており，言語獲得というのは，適切なパラメータの値を設定することで発現するというものである．この点では，文法の獲得を

カテゴリー中のフィーチャーの発見と値の同定であるとした本研究と共通する部分がある．しかし，この理論では,「計算」という観点が考慮されておらず，人間の言語獲得のモデルとして不十分である [40]．このため，本モデルでは GPSG を採用した．この仮定を用いることにより，自然言語の獲得過程の計算モデルを構築することが容易となった．なぜなら，GPSG は，変形規則のない文脈自由文法によって表現されており，さらに，CAP や HFC を含むフィーチャーシステムは，1 つのルール内，および，解析木のルール間におけるカテゴリーの関係を簡潔に記述できるからである．文法理論をエージェントに仮定するという本研究の立場は，言語獲得の研究としても妥当なものであると考える．

共通言語の定義の妥当性

次に，本章における共通言語の定義（第 3.1節参照）について考察を行なう．本章では，共通言語を，多数のエージェントがある文を認識できたかどうかを直接には考慮せず，単にその文がコミュニティの中で多く出現したかどうかを指標として用いている．これは，コミュニティで発話されるすべての文を認識することはできないエージェントにとって，自分の解析した範囲内において高頻度で使われた文から，近似的に共通言語を推定することを意味する．

本モデルでは，各エージェントが，自分の解析した文からある閾値を上回る確率で生起したフィーチャーの組を取り出し，それに基づく文法ルールを生成している．そして，第 3.3.3節では，この閾値の変化とフィーチャーの獲得数の推移の関係について調べた．この実験の結果，閾値が低いとき（$\theta = 0.5$）はすばやくフィーチャーを獲得し，閾値が高いとき（$\theta = 0.9$）はその獲得はゆっくりとしたものとなっている．つまり，閾値が低いときは，生起する頻度の低いフィーチャーの組であっても，それを共通文法を構成するルールであると推定し，そのルールを生成してしまう．逆に，閾値が高いときは，確実に生起するフィーチャーの組のみを取り出し，ルールを生成している．

この閾値の設定の仕方により，いくつかの問題が生じる．たとえば，閾値を低い値に設定した場合，各エージェントが多くのルールを生成するため，すべてのエージェントが生成・受理する文の和集合である $\mathcal{L}_G$が大きくなる．これに対応して，その集合から一定以上の発生頻度の文を取り出した集合である共通言語 $\mathcal{L}_C$は，小さくなってしまう．つまり，各エージェントが共有する文法ルールの数が少なくなり，コミュニケーションの成立する確率が低くなると考えられる．逆に，閾値を高い値に設定した場合，その時点で文法の獲得

が不十分なエージェントは，その後共通文法を獲得することが難しい．なぜなら，発話文の集合の中に，そのエージェント自身が発話した不適格な文が含まれると，高い閾値を越えて共起するフィーチャーを発見するのは困難だからである．したがって，コミュニティにおいて，共通文法を獲得する最も効率的な方法は，この閾値を状況に応じて動的に変化させながらフィーチャーを獲得することであろう．しかし，本モデルではこの閾値を動的に変更する機構を用いず，いくつかのシミュレーション結果から$\theta = 0.7$ に設定した．この結果，実験 1 では子供が大人の文法を獲得していく過程，および，実験 2 では子供と大人がともに文法を改編しながら共通文法を形成していく過程を実現することができた．これらのことから，本章の共通言語の定義に基づくモデルは，その閾値を変えることで，さまざまな自然言語現象をシミュレートすることが可能である．したがって，この共通言語の定義は妥当なものであると考える．

本モデルの評価と問題点

最後に，本章で提案したモデルの評価とその問題点について述べる．

まず，本章の研究の寄与した点について，自然言語現象のシミュレーション，および，言語獲得のモデルという観点から述べる．本章で述べた実験結果は，言語の獲得レベルの異なるエージェントが相互作用することで，コミュニティ内に共通言語が形成される過程を示していた．そして，自然言語の重要な特徴の 1 つである，融通性を実現することができた．したがって，本モデルは，自然言語現象のある側面をシミュレートできていたということができる．また，本モデルは，新たな立場からの言語獲得のモデルとみることもできる．言語獲得のモデルについては，これまでにも多くの研究がなされてきたが [3, 17, 48]，これらの研究は，言語獲得を個々のエージェント内部の学習と捉えてきた．しかし，近年，環境との相互作用の重要性が指摘されているように [38]，言語獲得においても，あるエージェントが能動的にそのコミュニティに関わることで，それまでの共通言語を変化させながら，自分も学習していくという視点は重要であると考える．この点で，本モデルは，新たな立場からの言語獲得のモデルとみなすことができる．

しかし，本モデルにはいくつかの問題点がある．第 1 に，文法理論を制約として用いたために，いくつかの人工的な設定が必要となったことである．たとえば，本モデルでは，文法獲得時の計算を容易にするため，各語をビット列で表現し，GPSG のフィーチャーシステムの一部を採用した．それらは，ヘッドフィーチャーの継承（HFC）や制御一致原理

（CAP）であった．さらに，どんな値でも適合するフィーチャーとして，ワイルドカード‘*’を仮定している．これらの人工的な仮定を用いたのは，もとより，GPSG という文法理論自体が，自然言語を「説明」するための理論であり，その「動作」原理を示すものではないからである．したがって，GPSG に基づく言語獲得のモデルを考えるときには，動作原理として何らかの人工的な設定が必要となる．

第 2 に，本モデルは，共通言語が形成される過程を示すことができたが，それが分化する過程などの説明はできなかった．これは，あらかじめ文法理論をエージェントの制約として用いたことにより，エージェントの発話・学習・理解の能力が制限され，コミュニティにおける共通言語にも分化などの動的な変化が見られなかったと考えられる．具体的には，全エージェントの共有しているものが語彙だけではなく，カテゴリーも共有することになっているため，学習が単なる属性の固定となっている．さらに，GPSG におけるヘッドフィーチャーの継承と制御一致原理を用いたことにより，計算の面では利益を得たが，それも言語の変化を一定の枠内に押えるはたらきともなっている．このように，言語特有の制約をあらかじめ与えたモデルによるシミュレーションでは，第 2.1節で述べたプラトン問題が指摘する文法獲得のメカニズムの解明は難しい．また，本モデルでは，1 言語のみを対象としているため，ピジン・クレオール研究への寄与も難しい．

以上の問題点を解消し，さらに自然言語現象に近いシミュレーションを行なうためには，モデルの設計において次のような方向性が必要となる．まず，細かな文法的な仮定を捨象し，一般的な認知能力に重きをおいたエージェント・モデルを構築する必要がある．なぜなら，言語獲得を可能にする制約を用いて言語獲得のモデルを構築することは循環論法となる可能性があり，また，上記のように動的な言語の変化の可能性を制限するものとなると考える．

次に，コミュニティにおける各エージェントの発話・学習・理解能力の非等質性をさらに重視すべきである．本モデルは，言語学においてこれまで重視されてこなかった，言語の非等質性と通時態に焦点を当てることを意図したものである．しかし，本モデルのエージェントの非等質な能力は，文法の獲得レベルだけであり，その他の学習能力や語彙数などは等質であった．このことが共通言語の分化などの動的な変化が見られなかった一因であると考える．本稿では，第 4章において，これらの問題点を考慮したマルチエージェント・モデルの提案を行なう．

3.5 まとめ

本章では，文法理論を制約として用いたエージェント群による共通言語の組織化について述べた．本章で提案したマルチエージェント・モデルは，子供エージェントと大人エージェントから構成され，各エージェントは GPSG に基づく文法と，2 つの学習方法を持つものであった．子供は，大人の発話した文を模倣しながら，自分の文法を改編し，洗練していく．大人もまた，子供の発話を解析するために，自分の文法を緩める．このような過程を通して，各エージェントは，コミュニティにおける共通言語を獲得していく．本研究では，このモデルに基づくマルチエージェント・システムを計算機上に実現し，それを用いた実験を行なった．実験の結果は，本システムが共通言語の形成過程をシミュレートしていることを示していた．さらに，本システムは，自然言語とマルチエージェント・モデルの重要な特徴の 1 つである，融通性を実現することができた．

しかし，本モデルでは，文法理論をエージェントの制約として用いたことによるデメリットもあった．たとえば，エージェントの発話・学習・理解の能力が制限され，それゆえにコミュニティにおける共通言語の分化のような動的な変化が見られなかった．この理由としては，エージェントに仮定した文法的な制約が強過ぎたこと，および，各エージェントの能力に十分な非等質性を実現できなかったことが上げられる．したがって，本研究の結果と比較対照するため，細かな文法的な仮定を捨象し，一般的な認知能力に重きをおいた，非等質なエージェント集団のモデルを構築する必要があると考える．

第 4 章

推論機能を有するエージェント群による共通文法の組織化

エージェントが環境に適応しながら共通文法を獲得していくためには，自分が獲得すべき文法規則を推論する能力が必要となる．本章では，エージェントがアブダクションとインダクションという 2 つの推論機構を統合した機能を持つと仮定したマルチエージェント・モデルを提案する．

第 2章で述べたとおり，自然言語には可変性があり，分化と融合を繰り返しながら変化している．しかしこれに対して，自然言語は，外乱の影響を受けながらもそのコミュニティの構成員によってその伝達機能は保持され続けている．すなわち，自然言語は新しい環境への適応性（adaptability）と頑健性（robustness）を合わせ持っている．本章の目的は，疑似的な自然言語の文法を設定し，その文法が環境に依存して可変であるようにしかけることによって，人工的に文法の変化の過程をシミュレートすることである．すなわち，異なる言語の文法を接触させることにより，それらの文法が分化・融合するという変化の過程（適応性）と，同時に生成力における機能の維持（頑健性） とを「人工」自然言語の文法において実験的に検証することとする．また，第 2.5節で述べたとおり，本モデルでは，言語の起源については対象とせず，自然言語の融合と分化の過程における語法（usage）の変化に注目する（図 4.1）．つまり，コミュニティの構成員が相互に作用しながら共通言語を形成していく過程において，その言語を進化するものとみなさず，いくつかの語法の中から共通の語法を組織化していくものとみなす．

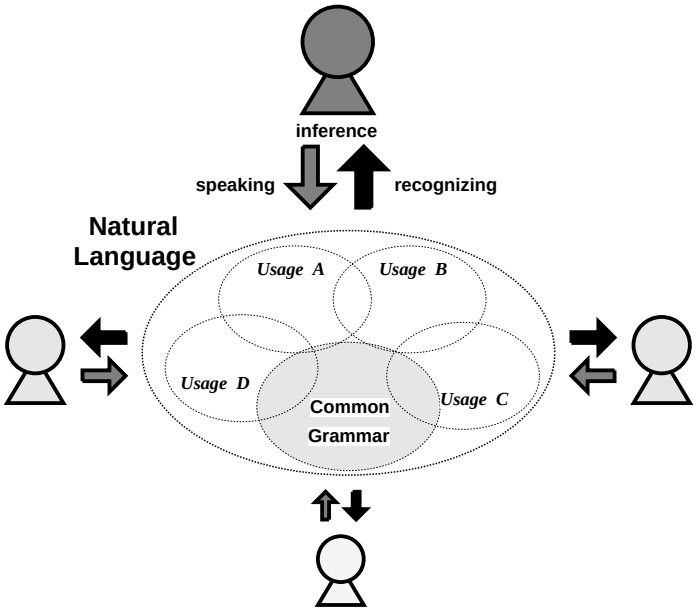

図 4.1: 本研究における自然言語に対する理解

4.1 エージェント

本節では，エージェントのモデルを提案する．ここでは，エージェントの有する推論機能，文法の枠組について述べる．

4.1.1 エージェントの有する推論機能

エージェントがあるコミュニティにおいて，他のエージェントとコミュニケーションを成立させる必要から共通文法を獲得するには，お互いの発話から共通の語法を推論していく能力が必要となる．一般に推論は，一般的性質から個の性質を論じる演繹的な論理推論と，個の性質から一般性を論じる帰納的推論が基礎になる．人間が生得的に普遍文法を有する [9] と仮定するなら，その普遍文法の姿を明示した上で，その一般的性質から個別の文法を形成するまでの過程で演繹的な推論を用いることも可能であろう． しかしながら，本実験の枠内において普遍文法まで恣意的に仮設し，そこから何かしら演繹的な推論まで持ち込むのは明らかに言語学的根拠の乏しい行き過ぎた設定である．普遍文法がメタ文法として形式的に明示されうるかどうか，されうるとしたらどのようなものになるかは言語学からの成果を待つこととし，本章では主に推論の帰納的な部分に注目する．特に帰納的に

論理規則を生成する際，その前段階として論理規則を試行錯誤的に生成するフェーズをアブダクションと呼び，獲得した例を基に一般規則を発見する本来の意味での帰納的推論をインダクションと呼ぶことにする．以下，エージェントの推論と理解に際し，以下の仮定を設ける．

仮定 1 エージェントはアブダクションおよびインダクションの機能を有する．

□

仮定 1 は，エージェントが言語を習得するときは，初期段階においては試行錯誤的なアブダクションを行ない，次第に獲得した例を基にしたインダクションに切り替えていくと考えることができることによる．この切り替えの妥当性は第 4.3節の実験で検証する．

4.1.2 文法

エージェントの推論機能に呼応して，その推論で作り出される文法について考察する．

仮定 2 エージェントの有する文法規則は文脈自由文法の形態をとる． □

仮定 2 は，現在自然言語の文法理論の多くが句構造を基にした文脈自由文法を基礎にしていることによる．また文法の形態に応じて，その終端記号である語についても本システムでの設定をしておく必要がある．

仮定 3 語彙は異なる文法規則を有するエージェント間においても共有されているものとする． □

仮定 3 は，例えば異なる文法規則というところを外国語として捉えると，仮定として人工的に過ぎるという見方もあろう．しかしながら，現実のコミュニケーションにおいては，単語の意味は他のモーダル（ボディランゲージや指し示しなど）を用いることである程度伝達可能であるし，各エージェントが高速な辞書を保持していると考えることも可能である．実際，言語間で語彙が異なるという問題は文法が異なるという問題とは独立であり，本章が扱うのは後者の文法の共通化であるとし，このような仮定を行なう．なお，語彙の融合と分化については，第 5章において述べる．

インダクションはコーパスからの文法発見 [7, 46, 29] として現在活発に研究されている分野であり，論理学一般の用語である帰納推論と区別するためにこのように表記する．

最後の仮定として，相互理解ということに関する本稿での立場を考察する．エージェント間で互いの言語が理解されたことを主張するためには，各エージェントの持っていた意志と目的達成のための語用論的考察，すなわちスピーチ・アクト全体の考察が本来必要である．しかし，意味の表示や意志・目的の表現を十全に準備することは不可能であるし，仮定 3 に準拠して文法の共通化を目標とするなら，その枠内で最低限コミュニケーションが成立するということを定義することも意義があろう．本章では，第 3章と同様に，以下の立場をとる．

仮定 4 エージェントの発話は他のエージェントの持つ文法規則により構文解析できたとき，理解されたとする． □

本モデルのエージェントが初期状態において持つ文法は自然言語のそれを模して，S を文に相当するトップカテゴリーとし，NP, VP, Advなど，日常言語から容易に類推可能なカテゴリー名を用いる．さらに，語順に関する制約も，現存する自然言語を模倣して SVO 型，SOV 型，VSO 型を設定する．表 4.1は各エージェントが最初に持つ文法の例である．実際これらは英語や日本語などの自然言語のサブセットを文脈自由文法で表示したものである．各エージェントからは他のエージェントが持っている文法セットを直接見ることはできず，それによって生成される文を交換するのみである．この過程において，エージェントは他のエージェントの発話を理解できるように新しいカテゴリー・新しい文法規則を推論し，それを自分の文法セットに追加する．

エージェントが持つことのできる文法規則の最大数は，パラメータとして設定される．この最大数を越えて文法規則を獲得しようとしたときは，それまで最も使用頻度が小さかった規則が不要な規則として棄てられ，新たなルールが追加されるものとする．

4.1.3 アブダクション

エージェントが他のエージェントから発せられた文を理解する上で，その根拠となる文例を十分に持たないとき，試行錯誤的に文法規則を生成する推論がアブダクション [19] である．ここで目標となるのは，エージェントが現在所有する文脈自由の文法規則を書き換えて，新たな文脈自由規則を生成することである．この推論は試行錯誤的とは言え，全くランダムではなく，ある統合性制約（integrity constraint）を与える必要がある．いまエージェント内の既存の文法のセットをΓ，その文法では解析できないでいる文をΦ，新たに追

表 4.1: エージェントの持つ 3 種類の文法

SVO 型文法	SOV 型文法	VSO 型文法
$S \rightarrow NP1 \;\; VP$	$S \rightarrow NP1 \;\; VP$	$S \rightarrow VP \;\; NP1$
$NP1 \rightarrow Det \;\; N$	$NP1 \rightarrow N \;\; P$	$NP1 \rightarrow Det \;\; N$
$NP1 \rightarrow Det \;\; NP2$	$NP1 \rightarrow NP2 \;\; P$	$NP1 \rightarrow Det \;\; NP2$
$NP2 \rightarrow Adj \;\; N$	$NP2 \rightarrow Adj \;\; N$	$NP2 \rightarrow Adj \;\; N$
$VP \rightarrow V \;\; NP1$	$VP \rightarrow NP1 \;\; V$	$VP \rightarrow V \;\; NP1$
$VP \rightarrow V \;\; Adv$	$VP \rightarrow Adv \;\; V$	$VP \rightarrow Adv \;\; V$
$VP \rightarrow V$	$VP \rightarrow V$	$VP \rightarrow V$

加した文法規則群をΔとすると，

$$\Gamma \nvdash \Phi,$$

$$\Gamma \cup \Delta \vdash \Phi.$$

アブダクションにおいては，この$\Gamma \cup \Delta$が統合性制約 I と無矛盾であることが要請される．このことは，逆に言えば，適切なΔを作り出すよう I を固定する必要がある．

一般に，新しい文法規則をアブダクティヴに生成するとしたら，その時点で保有する文法規則を次のメタ規則によって書き換えることが考えられる．

- 文法規則の右辺の中からあるカテゴリーを削除する
- 文法規則の右辺の中にあるカテゴリーを付加する
- 文法規則の右辺の中にあるカテゴリーの順序を交換する

しかしながら，この書き換えで生成される規則群の多くはランダムに過ぎ，このまま統合性制約として用いると不適切な規則を過多に作り出すことになる．本モデルではこの書き換えにもう少し強い制約を加え，削除・付加できるカテゴリーをカテゴリー文法のスラッシュ（'/' および '\'）の表記を用いて次のように制限する．さらに，左辺と右辺のカテゴ

本稿では, 削除・付加できるカテゴリーの型を限定し，順序を規定する意図だけでカテゴリー文法の表記を導入した．ここで提示したメタ規則は，カテゴリーの型変換によって文法規則を改編する Lambek Calculus [27] などの体系とは無関係である．

リーは，等価であることが要請される．ここで，X, Y, Zは任意のカテゴリーである．

$$
\begin{aligned}
I_1 &: \ X \ \rightarrow \ Y/Y \ Y \ \ \Rightarrow \ X \ \rightarrow \ Y \\
I_2 &: \ X \ \rightarrow \ Y \ \ \Rightarrow \ X \ \rightarrow \ Y/Y \ Y \\
I_3 &: \ X \ \rightarrow \ Y/Z \ Z \ \ \Rightarrow \ X \ \rightarrow \ Z \ Z\backslash Y
\end{aligned}
$$

I_1およびI_2は，Adj（NP/NP）やAdv（VP/VP）のように句を修飾する語のみを削除・付加する書き換えである．I_3はカテゴリーの順序の交換である．本モデルにおける統合性制約IはI_1，I_2，I_3からなるメタ規則のセットとする．文法Gに対してこのIを適用してできる新たな文法セットを$I(G)$とすると，

$$G \cup \Delta \models I(G)$$

であるとき，Δは統合性制約Iを満たすものとする．

なお，1語文のときのみ，以下の付加の書き換えを許すものとする．

$$
\begin{aligned}
I_2' &: \ s \ \rightarrow \ n \ \ \Rightarrow \ s \ \rightarrow \ v \ n \\
I_2'' &: \ s \ \rightarrow \ v \ \ \Rightarrow \ s \ \rightarrow \ n \ v
\end{aligned}
$$

4.1.4 インダクション

エージェントが他のエージェントから発せられた文を理解する上で，その根拠となる多くの文例をすでに持つとき，それらの文例から帰納的に文法規則を生成する推論がインダクションである．本章では，この推論を実現するためのメカニズムとして，コーパスからの文法獲得で用いられる手法 [46] を採用する．

コーパスからの文法獲得とは，タグ付きの膨大な数の文例から，文法規則を抽出しようというものである．本章で用いる手法は，以下の仮定に基づいている．ここで，環境とは，あるカテゴリー列の前後に位置するカテゴリーのことをいう．

- カテゴリー列の独立性： 文法規則の右辺に現れるカテゴリー列は，環境から独立して高い頻度で現れる
- カテゴリー列の類似性： 同じ非終端記号から直接導かれるカテゴリー列は，類似した環境を持つ

これらの仮定に基づき，文法規則を抽出する手法を以下に述べる．

カテゴリー列の独立性： カテゴリー列$\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4$において，$\alpha_2\alpha_3$の独立性が高ければ，このカテゴリーの並びを文法規則の右辺とすることができる．ここでは，独立性の尺度として，以下の値を用いる．

左右エントロピー： カテゴリー列の左右に位置するカテゴリー群の多様性は，その条件付確率のエントロピーを用いて以下の式により計算する．このエントロピーが大きいほど，そのカテゴリー列の独立性は高いとみなす．

左条件付確率 $p_l(i) = P(\alpha_i \cdot \alpha \mid \alpha)$ のとき，

$$\begin{aligned} &\text{左エントロピー } H_l(\alpha) \\ &\quad = -\sum_k p_l(k)\ log_2\ p_l(k). \end{aligned} \tag{4.1}$$

右条件付確率 $p_r(i) = P(\alpha \cdot \alpha_i \mid \alpha)$ のとき，

$$\begin{aligned} &\text{右エントロピー } H_r(\alpha) \\ &\quad = -\sum_k p_r(k)\ log_2\ p_r(k). \end{aligned} \tag{4.2}$$

左右デリミタ確率： カテゴリー列の左が文頭，もしくは，カテゴリー列の右が文末のときは，そのカテゴリー列の独立性は高いとみなす．

実際にカテゴリー列を抽出する際には，これらの尺度に閾値を設け，その値との大小関係により独立であるかどうかを決定した．また，統計的に信頼できる値を得るため，出現頻度にも閾値を設けた．これらの閾値の設定値は第4.3節で述べる．

カテゴリー列の類似性： カテゴリー列$\alpha_1\alpha_2$と$\alpha_3\alpha_4$の左右の環境が類似しているならば，これらのカテゴリー列の文法規則の左辺は，同じ非終端記号であると考えられる．ここでは，類似性の尺度として，左右の1カテゴリーの出現確率をベクトルとみなし，現在エージェントが保持する文法規則の非終端記号とベクトルの距離が最も小さいものを文法規則の左辺とすることにした．

インダクションによる推論では，以上の処理を繰り返すことにより，新しい文法規則を生成していく．図4.2に，具体的な例を用いて処理の過程を説明する．いま，図4.2の A に示したようないくつかの文例があったとする．ここで，$Adj\ N$ というカテゴリーの並びは高い頻度で現れ，また，その左右にはさまざまなカテゴリーが現れる．この観察と上記の定

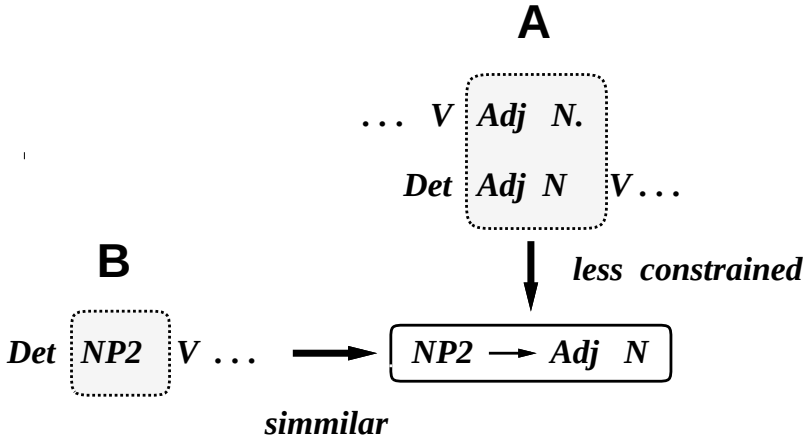

図 4.2: インダクションによる文法規則の生成

義から $Adj\ N$ の独立性が高いことになり，文法規則の右辺とすることができる．次に，この $Adj\ N$ の左には Det が，右には V が現れているが，これは B に示した $NP2$ の環境と類似していることになる．したがって，$NP2$ を文法規則の左辺とすることができる．以上の結果から，インダクションにより，新しい文法規則 $NP2 \rightarrow Adj\ \ N$ を生成することができる．

4.2 コミュニケーション

本節では，エージェント間のコミュニケーションのモデルを提案する．ここでは，コミュニケーションの手順，コミュニケーション能力の指標としてのエネルギーの概念，推論機構の切り替え方法，および，コミュニティの構成方法について述べる．

4.2.1 コミュニケーションとエネルギー計算

本モデルでは，エージェントの推論・発話・理解能力の指標として，**エネルギー**という量を用いる．エネルギーという語は労力という意味で用いたものであり，物理的概念ではない．後述するように，この労力は文の長さに比例して決まる量である．これはエージェントの文の認知過程における時間的長さが，その文の長さに依存するという直観による．本モデルにおけるエージェント間のコミュニケーションは，以下の手順で行なわれる．

1. **発話：** 1 タイムステップに全エージェントが，そのエネルギー量に比例した回数の発話を順番に行なう．この発話は，各エージェントが持つ文法規則をランダムに適用して生成される．

2. **理解：** その発話を全エージェントが理解（構文解析）しようと試みる．

3. **推論：** 他のエージェントの発話を理解するため，そのエージェントが持つエネルギー量，寿命，および，他のエージェントのエネルギー量に応じて推論機構を切り替えながら，新しい文法規則を推論する．

4. **エネルギーの計算：** 各エージェントの発話および理解によるエネルギーの獲得，および，エネルギーの時間減衰の計算を行なう．

この設定においては，エージェントが順番に発話することや全エージェントが理解に努めるということは本質ではない．本来任意のエージェントが他の任意のエージェントにランダムに話しかけられるよう設定することが理想であるが，本実験においても十分長い時間をとればこの本来の意図と同等の効果を実現できるため，実験の便宜上このように設定した．

次に，エージェントのエネルギー計算は，以下のように行なう．まず，コミュニケーションにおいて増減するエネルギーの値は，以下のように定義される．ここで，$\mathcal{A}$ はこのコミュニティにおけるエージェントのインデックスの集合，$|\mathcal{A}|$ はコミュニティ内のエージェント数，$|w_{ij}(\tau)|$ $(i, j \in \mathcal{A})$ は第 i エージェントから第 j エージェントへ時刻 τ に発話された文の長さである．

理解する（recognizing）：

$$R_{ij}(\tau) = \begin{cases} |w_{ji}(\tau)|, & i \text{ は } j \text{ の発話を} \\ & \text{理解できた.} \\ -|w_{ji}(\tau)|, & i \text{ は } j \text{ の発話を} \\ & \text{理解できなかった.} \end{cases} \tag{4.3}$$

理解される（being recognized）：

$$B_{ij}(\tau) = \begin{cases} |w_{ij}(\tau)|, & i \text{ の発話は } j \text{ に} \\ & \text{理解された.} \\ 0, & i \text{ の発話は } j \text{ に} \\ & \text{理解されなかった.} \end{cases} \tag{4.4}$$

「理解する」においては理解できなかったことに対して明確なマイナス点を与えるのに対して,「理解される」においてはある発話が相手のエージェントに理解されなかったときでもそのエネルギー量を変化させない．この理由は，試行錯誤による発話を許すためである．未知の文法を獲得するとき，もしくは，新たな文法を創造するとき，試行錯誤による発話は不可欠である．この値は，そのような発話を許容することを意味する．

第 i エージェントの時刻 t におけるエネルギー量 $\mathcal{E}_i(t)$ は，他のエージェントとのメッセージ交換を通してエネルギー収支がない限り，時間を追って指数関数的に減少するものとする．これは他のエージェントとの積極的な交信がない限り，言語の運用能力は衰えていくことを仮定したものである．すなわち，p_tを時間減衰のパラメータとして,

$$\frac{\mathcal{E}_i(t)}{\mathcal{E}_i(t-1)} \approx p_t \quad (0 < p_t < 1).$$

この式に単位時間あたりのエネルギー収支を加算すると,

$$\mathcal{E}_i(t) = (\text{エネルギー収支}) + p_t \mathcal{E}_i(t-1).$$

ここで，上記（4.3）（4.4）によるエージェント毎のエネルギー収支を挿入すると，エネルギー量は次のように定義される．p_r，p_bは発話を理解した，もしくは，理解されたときのエネルギー増減に関わるパラメータとする.

$$\mathcal{E}_i(t) = p_r \frac{1}{|\mathcal{A}|} \sum_{j \in \mathcal{A}} \sum_{\tau \in [t-1,t]} R_{ij}(\tau) + p_b \frac{1}{|\mathcal{A}|} \sum_{j \in \mathcal{A}} \sum_{\tau \in [t-1,t]} B_{ij}(\tau) + p_t \mathcal{E}_i(t-1). \tag{4.5}$$

すなわち，エージェントの時刻 t におけるエネルギー量は，時間 $t-1$ から t に他のエージェントとのコミュニケーションにより得られたエネルギー量と，1 タイムステップ前のエネルギー量を時間減衰させた値の和により表される．

さらに，第 i エージェントの時間 $t-1$ から t における，エネルギー量に応じた発話回数 $n_i(t)$ は，以下のように定義される．ここで，p_nは発話率を設定するパラメータである．この式により，エージェントは，エネルギー量が少ない場合でも，1 タイムステップに 1 度は発話を行なう.

$$n_i(t) = \begin{cases} 1, & p_n \mathcal{E}_i(t-1) < 1 \text{ のとき} \\ \lfloor p_n \mathcal{E}_i(t-1) \rfloor, & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{4.6}$$

4.2.2 時間とエネルギー量に依存した推論機構の切り替え

エージェントは，一定の時間間隔 T_m ごとに，エネルギー量に応じた推論を行なう．この推論の能力は，新しく生成される文法規則の数によって定義される．第 i エージェントが

時刻 t に生成する文法規則の数 $m_i(t)$ は，以下の式により計算される．ここで，p_mは新しい文法規則の生成率を設定するパラメータである．これにより，エージェントは，エネルギー量が少ない場合でも 1 つの文法規則は生成する．

$$m_i(t) = \begin{cases} 1, & p_m \mathcal{E}_i(t-1) < 1 \text{ のとき} \\ \lfloor p_m \mathcal{E}_i(t-1) \rfloor, & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{4.7}$$

この生成される文法規則数 $m_i(t)$ は，以下の使用比率により，アブダクションとインダクションの 2 つの推論機構に振り分けられて，推論が実行される．アブダクションとインダクションの使用比率は，時間とエージェントのエネルギー量に依存しており，以下の式により計算される．ここで，$q_i(t)$ は第 i エージェントが時刻 t にアブダクションを行なう比率である．したがって，インダクションを行なう比率は，$1 - q_i(t)$ となる．この使用比率と生成される文法規則数 $m_i(t)$ の積により，各推論機構が生成する文法規則数が決まる（小数点以下は四捨五入）．ここで，初期値は，$q_i(0) = 1.0$ である．

$$q_i(t) = \begin{cases} p_t q_i(t-1), & r_i(t-1) \geq p_t \text{ のとき} \\ q_i(t-1)/r_i(t-1), & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{4.8}$$

$$r_i(t-1) = \mathcal{E}_i(t-1)/(\frac{1}{|\mathcal{A}|} \textstyle\sum_{j \in A} \mathcal{E}_j(t-1)) \tag{4.9}$$

式（4.9）では，第 i エージェントのエネルギー量と，コミュニティ内のすべてのエージェントのエネルギー量の平均との比をとっている．その比を式（4.8）に用いることで，コミュニティ内の状況に応じた推論機構の切り替えを実現している．つまり，第 i エージェントのエネルギー量が平均よりも低いときは，アブダクションを行なう比率 $q_i(t)$ の減衰がゆるやかになり，アブダクションを多く行なうことになる（図 4.3）．逆に，第 i エージェントのエネルギー量が平均よりも高いときは，インダクションを行なう比率が高くなる．

このエネルギー量に依存した切り替えは，エージェントがコミュニテイ内の発話を理解する割合と，2 つの推論機構の性質の違いに基づきモデル化している．つまり，コミュニティ内の発話の理解度が高いときは，そのエージェントのエネルギー量が高くなり，それに応じて発話回数も多くなる．この発話回数の増加は，エージェント自身が記憶している文例の増加を意味すると同時に，インダクションを行なう根拠が増えていることを意味する．ゆえに，エネルギー量に依存した切り替えは，2 つの推論機構の性質の違いを活かしながら，それらを統合しているといえる．

また，時間に依存した切り替えも同様に，2 つの推論機構の性質の違いに基づきモデル化している．つまり，エージェントが生成された当初は，記憶している文例も少ないため，ある制約を持ったアブダクションを行なうが，時間とともに記憶している文例が増えるにしたがい，インダクションに切り替えていく．この意味で，時間に依存した切り替えも，2 つの推論機構の性質の違いを活かすことを意図したものである．

4.2.3 コミュニティと世代交代

本モデルにおけるコミュニティの構成は，以下のとおりである．まず，エージェントは寿命を持ち，その寿命が尽きたとき，文法セットとエネルギーをそのまま自分の子どもに継承する．エネルギーの量により，子孫の数を増やすなどの処理は行なわない．この理由は，本モデルがエージェントの推論機能と共通文法の組織化の関係に注目しているためである．つまり，遺伝的アルゴリズムの手法のように，エネルギー量の高いエージェントの子孫を増やしていくという方法を用いると，確実に同じ文法を持ったエージェントが増えると予想されるが，それでは推論とコミュニケーションにより文法を獲得するという本モデルの目的が不明確になると考える．ここで行う世代交代の意味は，アブダクション機能が衰えインダクションのみを行うようになったエージェントに対して，それが蓄えた文例を空にし，再びアブダクションが活発なエージェントに仕立て直すことである．この処理は，親が子供に自分の持つ文例をすべて渡すことは不可能であるため，子供に文法の教育を行なうことであるとみなすことができる．さらに子供は，コミュニケーションを通して，その文法を改編しながら環境に適応しようと試みる．

図 4.4に，本モデルにおけるエージェントの生成・消滅のサイクルを示す．本モデルでは，このサイクルに**同時性**と**非同時性**という条件を設けた．同時性とは，全エージェントの生成・消滅，および文法の継承が同時に起こることであり，非同時性とは，これらが時間をずらして起こることを意味する．まず，非同時性の条件を設定した理由は，通常の人間のコミュニティが非同時性に基づくライフサイクルにより形成されているので，この特徴を反映させたモデル化を行なうためである．また，同時性の条件を設定した理由は，言語学の研究で観察されるように，ピジンしか獲得していない子どもが集まるという特殊な状況では，言語が飛躍的に変化し，クレオールのような言語が発達するという観察 [4] から，非同時性条件との比較実験を行なうためである．

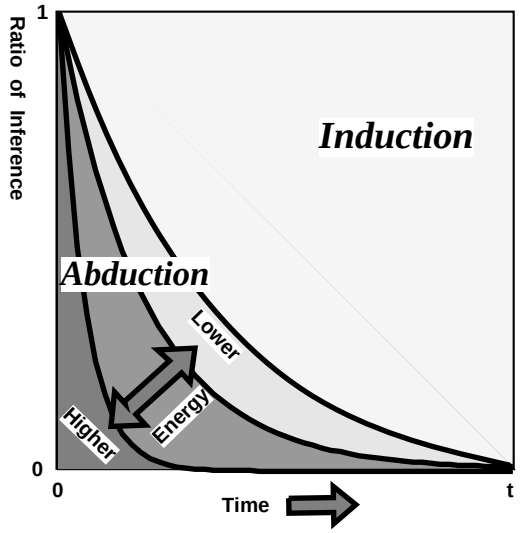

図 4.3: 時間とエネルギー量に依存した推論比率の変化

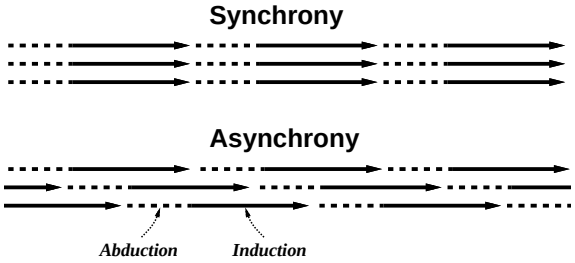

図 4.4: エージェントの生成・消滅サイクル

4.3 実験

本実験では，まず，実験 1 において，アブダクションとインダクションという推論機構と共通文法の形成過程の関係を調べる．次に，実験 2 において，共通文法の発展と推論機構の関係を調べる．そして，実験 3 において，コミュニティの構成方法と共通文法の形成過程の関係を調べる．最後に，実験 4 において，異なる共通文法を持った複数のコミュニティが相互に作用するときの共通文法の変化の過程について調べる．

実験条件は，以下のように設定した．まず，エネルギー量の計算式のパラメータは，$p_r = 3.0, p_b = 3.0, p_t = 0.9$ とした．その他のパラメータは，実行時間 $T = 3100$，エージェント

の初期エネルギー量 $\mathcal{E}_x(0) = 200$，エージェントの寿命 $L = 50$，エージェントが持つことのできる文法規則の最大数 $G = 15$ とした．さらに，インダクションで用いるものとして，出現頻度の閾値 $f_{min} = 50$，左右エントロピーの閾値 $H_{min} = 1.2$，左右デリミタの条件付確率の閾値 $Pd_{min} = 0.3$ とした．また，発話率 $p_n = 0.1$，文法規則生成率 $p_m = 0.1$，推論の時間間隔 $T_m = 10$ とした．

4.3.1 実験 1： 2 つの推論機構の統合

本実験の目的は，アブダクション，インダクションというそれぞれの推論機構と，両者を統合した推論機構とが，共通文法の形成過程にどのような影響を与えるかを調べることである．

本実験では，以下の 3 つの条件を設定した．

- アブダクション条件： アブダクション機能のみを持ったエージェントによりコミュニティを構成
- インダクション条件： インダクション機能のみを持ったエージェントによりコミュニティを構成
- 統合条件： アブダクションとインダクションを統合した機能を持ったエージェントによりコミュニティを構成

これらの条件に基づき，SVO 型文法を持った 10 エージェント（$agt0, agt2, \cdots, agt18$）と，SOV 型文法を持った 10 エージェント（$agt1, agt3, \cdots, agt19$）から構成されるコミュニティにおいて実験を行なった．なお，コミュニティは，同時性条件により構成した．

図 4.5，4.6，4.7に，アブダクション条件，インダクション条件，統合条件における 20 エージェントのエネルギー量の推移を示す．図 4.5より，アブダクション条件では，実験開始直後からエネルギー量の高いエージェント群と低いエージェント群に分かれるが，その後は両群のエージェントともエネルギー量は不安定のまま推移している．また，図 4.6より，インダクション条件では，各エージェントはタイムステップ $t = 50$ 過ぎにエネルギー量が安定した状態になり，その後もそのまま推移し，全く変化しない．これに対して，図 4.7より，統合条件では，$t = 70$ において，$agt13$ と $agt19$ のエネルギー量が高くなり，$t = 1300$

エネルギー量は，エージェントの推論・発話・理解能力の指標であり，同じエネルギー量を持つことが直接同じ文法セットを持つことを意味するわけではない．

あたりまで増加を続ける．さらに，$t = 1300$ 以降は，他のエージェントのエネルギー量も増加し，コミュニティ全体のエネルギー量が増加している．この過程で，$agt0$ はアブダクションにより，他のエージェントが理解できない文を生成する文法規則を作ってしまったため，エネルギー量を低下させるが，その後インダクションにより共通の文法規則を獲得し，同レベルのエネルギー量に回復している．

図 4.8に，3 つの条件におけるコミュニケーションが成立した確率（成立確率）の推移を 50 タイムステップごとの平均により示す．図 4.8より，実験開始直後は，統合条件の成立確率は 70%程度で，インダクション条件より低い値を示すが，$t = 1000$ 以降からその確率が上昇し，$t = 1400$ 過ぎからインダクション条件の値を上回り，その後も 80%以上の成立確率を維持している．この成立確率の推移は，図 4.7の統合条件のエネルギー量の推移と同様の結果を示している．

次に，表 4.2に，統合条件において，各エージェントが獲得した文法を示す．これらの文法規則が獲得された過程について説明する．まず，$t = 10$ に $agt13$ と $agt19$ が，文法規則 $R-5$ をアブダクションにより，$R-3$ をインダクションにより獲得した．さらに，$t = 30$ に $R-14$ をアブダクションにより獲得した．これらの規則は，SVO 型文法を持っているエージェントが発話する文の多くを理解可能にする規則であるため，両エージェントは，SVO 型文法と SOV 型文法の双方のエージェントとコミュニケーションが可能となる．このため，両エージェントのエネルギー量は増加していく．

さらに，両エージェントは早期に，$R-7$ をアブダクションにより獲得していたため，両エージェントの発話数の増加とともに，他のエージェントがこの規則をインダクションにより獲得したため，コミュニティ内に広がっていき，最終的に全エージェントがこの規則を獲得している．さらにその後も，$R-2$，$R-4$ などの文法規則を他のエージェントとともにアブダクションにより作りながら，最終的に全エージェントが多くの文法規則を共有するようになっている．これに対して，インダクション条件では，SVO 型文法のエージェントは表 4.2における文法規則 $R-3$ と $R-8$ のみを，SOV 型文法のエージェントは $R-3$ と $R-14$ のみを $t = 100$ までに獲得し，その後は全く変化していない．なお，これらの文法の獲得過程において，エージェントの持つことができる文法規則の最大数 G を越えて獲得しようとした場合は，これまでの使用頻度の最も少ない規則が消去され，新しい規則が追加されている．

この実験結果の重要な点は，アブダクションとインダクションを統合することでコミュ

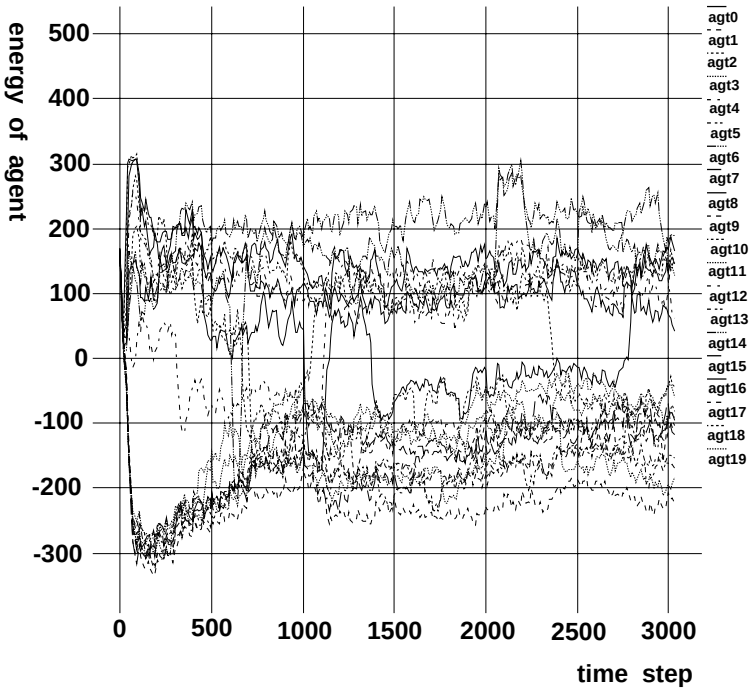

図 4.5: 実験 1 – アブダクション条件におけるエネルギー量の推移

ニケーション成立確率が上昇したことと，この統合条件のエージェント群がコミュニティにおける文法規則を常に変化させながら，共通文法を作っていることである．つまり，お互いの文法を獲得するというだけではなく，自分の文法も変えながら新しい共通文法を作り出しているのである．そして，これは，機能の異なる 2 つの推論機構がそれぞれの特徴を活かした形で統合された結果である．

4.3.2 実験 2： 共通文法の発展と推論機構

本実験の目的は，簡単な文法しか持たないエージェント（単純エージェント）が共通文法を発展させていく過程において，推論機構がどのような働きをしているかを明らかにすることである．

本実験では，以下の 2 つの条件を設定した．

- 単一条件： 単純エージェントのみによりコミュニティを構成
- 混合条件： 単純エージェントと，発達した文法体系を持つエージェント（複雑エー

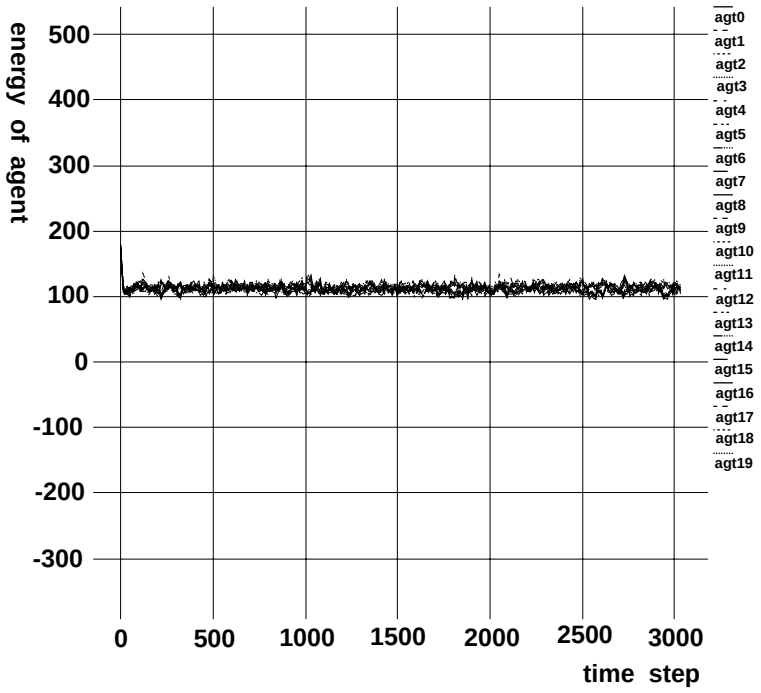

図 4.6: 実験 1 – インダクション条件におけるエネルギー量の推移

ジェント）によりコミュニティを構成

両条件とも，コミュニティは20 エージェントから構成されており，混合条件では単純，複雑エージェントがそれぞれ10 エージェントずつから構成されている．さらに，これらのコミュニティは同時性条件に基づき構成されている．ここで，単純エージェントは以下のような 2 つの文法規則のみを持つものとし，複雑エージェントはSVO 型文法（表 4.1参照）を持つものとする．

$$S \rightarrow N$$

$$S \rightarrow V$$

図 4.9に，単一条件，混合条件における共通文法の発達過程を，各エージェントの生成する文に含まれる語数の平均（平均語数）の推移により示す．図 4.9より，単一条件における単純エージェントは，1 語文しか生成できない初期状態から次第に語数を増加させている．また，混合条件における単純エージェントも，ほぼ同様に平均語数を増加させている．$t = 3000$ には，両条件の単純エージェントとも平均 2 語文を発話するようになる．混合条

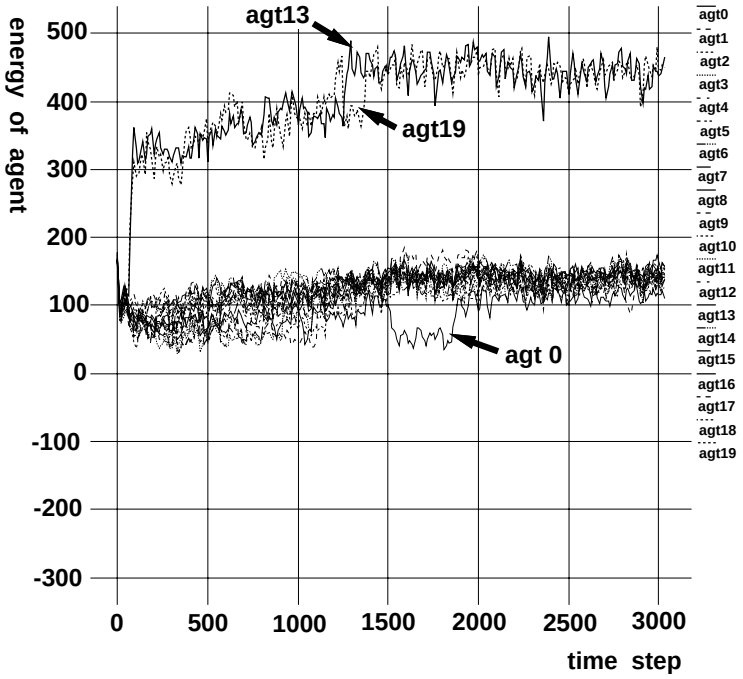

図 4.7: 実験 1 – 統合条件におけるエネルギー量の推移

件の複雑エージェントは，実験の開始から終了まで平均語数 2.4 程度の文を発話し，大きな変化はない．

しかし，図 4.9に示したように，各エージェントの平均語数はあまり大きな値になってはいない．この理由を調べるため，図 4.10 に，$t = 3000$ から $t = 3050$ における，発話文の長さごとの出現比率を示す．図 4.10より，単純エージェントも最長 5 語文を発話しているが，圧倒的に 1〜3 語文の比率が大きく，90%以上の比率となっている．エージェントの文法および発話を実験開始からたどると，長い文を生成できる文法を獲得し実際に発話を行なっているが，他のエージェントに理解されることが少ないため，これらの文法規則が淘汰され，短い文が多く発話されるようになっている．さらに，複雑エージェントも，単純エージェントに理解されるために短い文の比率が多くなっている．

図 4.9，4.10より，注目すべき点は，2 つの条件の単純エージェントの平均語数の推移，および，発話文の長さごとの出現比率が，ほぼ同じような傾向を示していることである．つまり，単純エージェント同士のみのコミュニケーションにより形成された共通文法と，複雑エージェントと単純エージェントのコミュニケーションにより形成された共通文法が，文

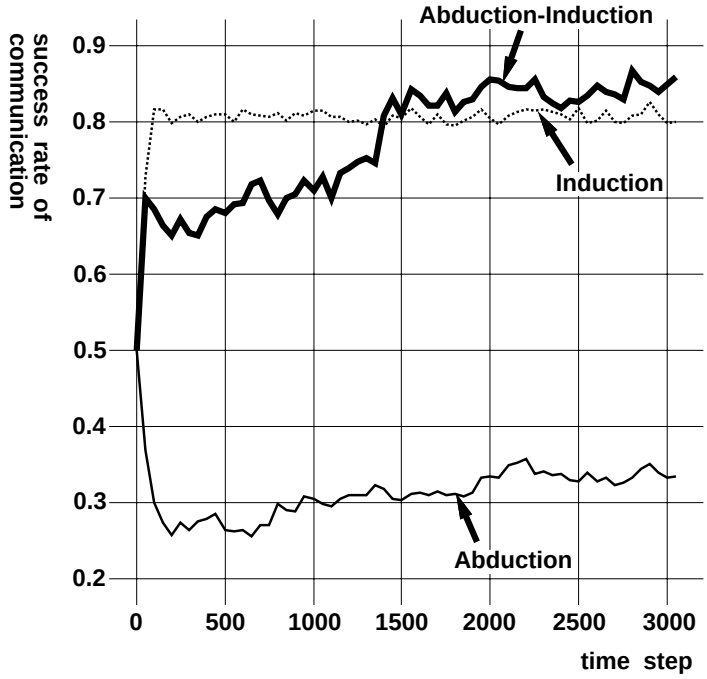

図 4.8: 実験 1 – 3 つの条件のコミュニケーション成立確率の推移

生成能力という意味でほぼ同等となっているということである．

ここで，図 4.11に，各エージェントの持つ文法規則が，アブダクションとインダクションのどちらの推論機構により獲得されたものかを，その比率の推移により示す．図 4.11より，単一条件の単純エージェントは，実験開始から $t = 100$ 前後までは，アブダクションとインダクションの比率が拮抗しているが，$t = 500$ 以降はアブダクションによる獲得が 80%を上回っている．一方，混合条件の単純エージェントは，実験開始直後はインダクションによる獲得が上回るが，その後はアブダクションによる獲得が 68%前後で推移している．つまり，条件の異なる単純エージェントはほぼ同様の文法（文生成能力）を獲得したが，その過程は異なっているといえる．これは，単一条件では，文法規則の獲得に際して，その規範となる文法が存在しないため，各エージェントがアブダクションにより試行錯誤しながら共通文法を形成していかなければならなかった．しかし，混合条件では，その規範となる文法を複雑エージェントが持っているため，単純エージェントはその発話例からインダクションにより文法規則を獲得することが可能であった．また，複雑エージェントも，実験開始直後は，自分たちの持っていない文法を生成する必要性があったため，アブダクショ

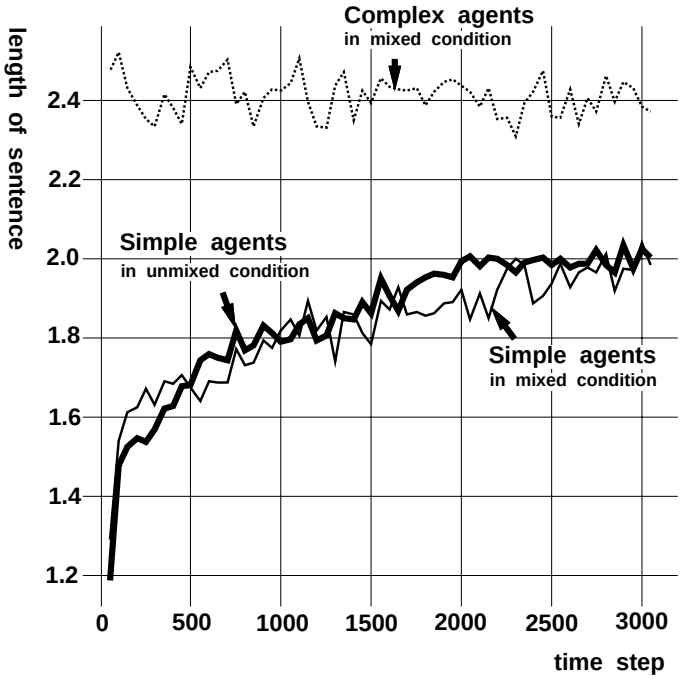

図 4.9: 実験 2 – エージェントが生成する文の平均語数の推移

ンによる獲得が行なわれている．

本実験結果は，ピジンがクレオール化する過程と対応させて考えることができる．つまり，本実験における単純エージェント同士がコミュニケーションを行ないながら複雑な共通文法を形成していく過程は，単純な文法しか持たないピジンが何世代かを経て文法体系の整ったクレオールとなっていく過程とみなすことができる．

実際のクレオール化の過程では，ピジン語話者の子供たちが文法の複雑化に重要なはたらきを示すが，本実験ではそのはたらきをアブダクションによる推論が行なっている．また，混合条件における単純エージェントが複雑エージェントの文法を規範にしながら文法を発達させていく過程は，ピジンが上層言語に移行していく脱クレオール化の過程とみることができる．しかし，図 4.10に示したように，単純エージェントは，さらに文法を複雑化し，複雑エージェントと同様の文法を獲得するまでには至っていない．この理由は，1〜2 語文の発話が他のエージェントに容易に理解されることから，単純エージェントはこれらの発話文をコミュニケーションに使っているためであると考えられる．

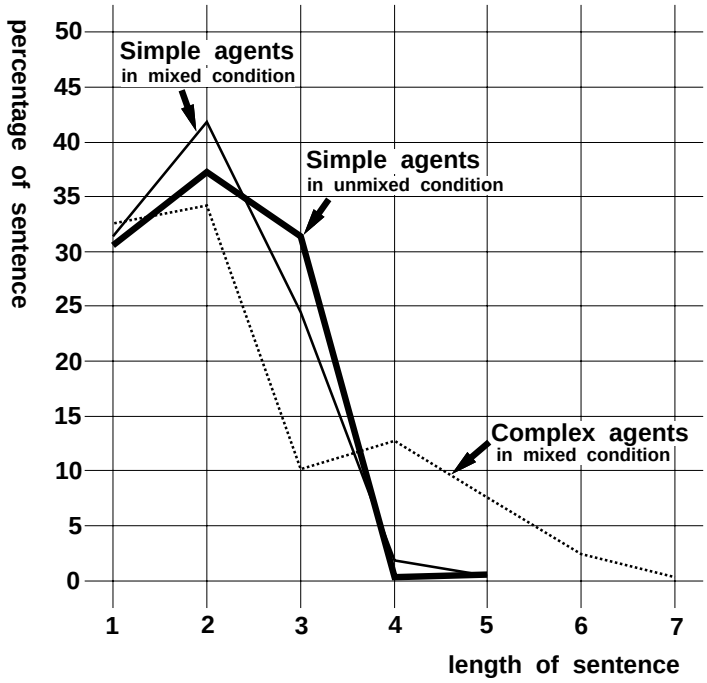

図 4.10: 実験 2 – エージェントが生成する文の長さごとの出現比率

4.3.3 実験 3： 共通文法の頑健性

本実験の目的は，同時性と非同時性というコミュニティの構成方法が，共通文法の形成過程にどのような影響を与えるかを調べることである．

本実験では，同時性条件と非同時性条件の 2 つを設定し，それぞれについて以下の 4 つの場合に分けて調べた．非同時性条件において，エージェントが生成される時間差は 5 とした．また，コミュニティは SVO 型文法を持った 10 エージェントにより構成されるものとし，そのコミュニティに SOV 型文法を持った 5 エージェントが侵入するものとした．なお，エージェントは，アブダクションとインダクションの 2 つの推論機構を統合した機能を持つものとした．

- 場合 0（C-0）： エージェントが侵入しない
- 場合 1（C-1）： $t = 500$ に，5 エージェントが同時に侵入する
- 場合 2（C-2）： $t = 540$ に，5 エージェントが同時に侵入する

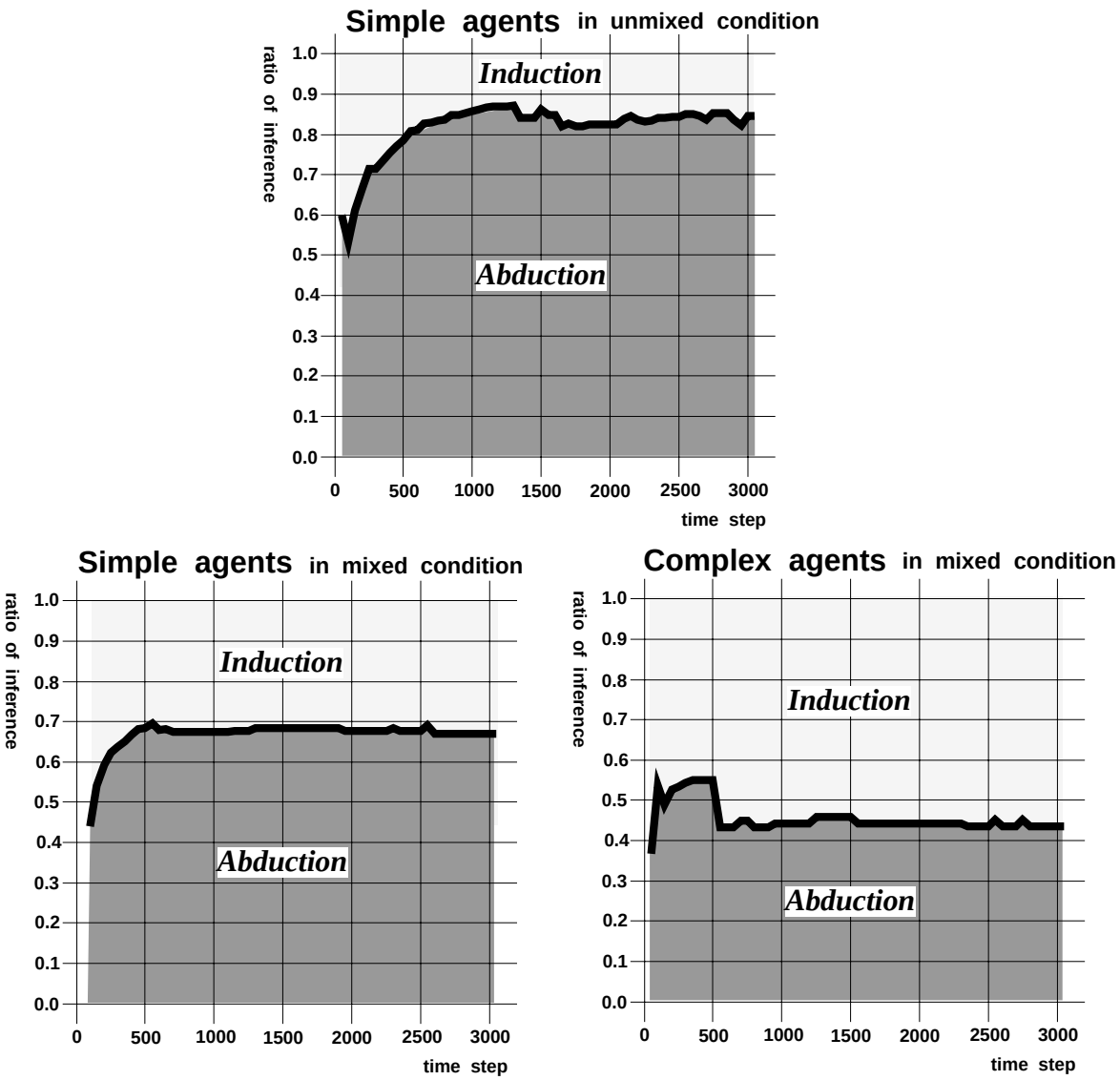

図 4.11: 実験 2 – 共通文法の発展と推論機構の使用比率

- 場合 3（C-3）：$t = 500, 520, 540, 560, 580$ のそれぞれに，1 エージェントずつが侵入する

ここで，侵入時間 $t = 500$ と $t = 540$ の違いは，同時性条件におけるエージェントの生成直後と消滅直前に侵入させることを目的としている．

図 4.12，4.13に，2 つの条件ごとにコミュニケーションの成立確率の推移を示す．図 4.12と図 4.13を比較すると，図 4.12の値の変動が大きく，図 4.13の値の変動が小さいことが観察される．それぞれの場合別に標準偏差を計算すると，すべての場合において同時性条件（図 4.12）の方が非同時性条件（図 4.13）より大きな値を示した（C-0：$6.1 > 4.0$，C-1：$6.4 > 3.8$，C-2：$6.8 > 3.8$，C-3：$7.4 > 4.2$）．また，$t = 2000$ から $t = 3000$ の間の C-1，C-2，C-3 の成立確率の平均を計算すると，両条件とも 81%と等しい値を示した．しかし，C-0 の成立確率は終始，図 4.13の非同時性条件が上回っていた．

各条件の文法の変化を調べると，同時性条件では，すべてのエージェントが同期して文法を変化させることが，成立確率の変動を大きくしている原因となっている．特に，C-0 では，他の文法を持ったエージェントが侵入せず，かつ，各エージェントがわずかずつ文法を変化させるため，インダクションにより文法の変化を抽出することができず，共通文法の形成を妨げている．これに対して，非同時性条件では，常に推論機構の使用比率の異なるエージェントがコミュニティに存在するため，さまざまな場合のエージェントの侵入に対しても，安定した成立確率を示している．

4.3.4 実験 4： 共通文法の融合と分化

本実験の目的は，多数のコミュニティの相互作用により，共通文法がどのように変化していくかを調べることである．

図 4.14に示すように，本実験では以下の 3 つの群を設定した．

- 群 A： SVO 型文法を持つエージェントにより構成されるコミュニティ1〜4 からなる
- 群 B： SOV 型文法を持つエージェントにより構成されるコミュニティ5〜8 からなる
- 群 C：VSO 型文法を持つエージェントにより構成されるコミュニティ9〜12 からなる

各コミュニティは 5 エージェントから構成されており，3 つの群全体では 60 エージェントから構成されている．各エージェントは，同じ群に属するエージェントとコミュニケーショ

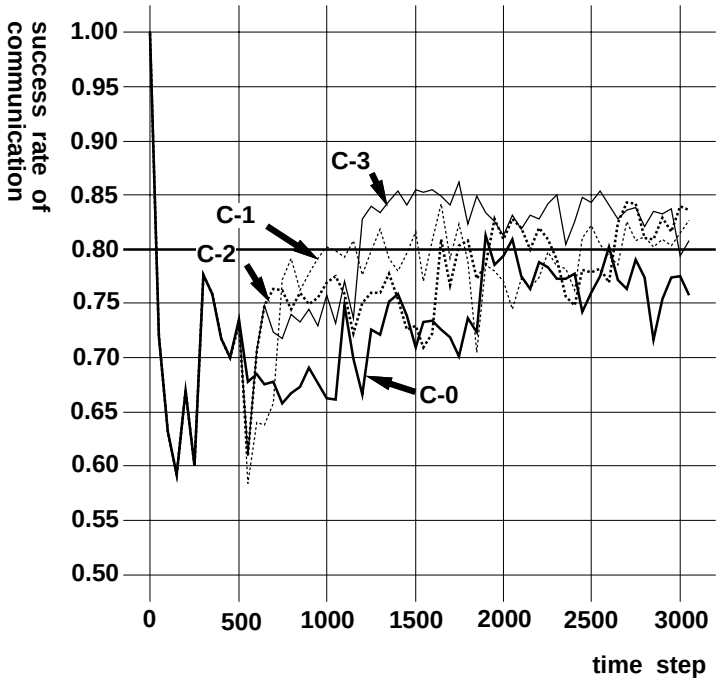

図 4.12: 実験 3 – 同時性条件におけるコミュニケーション成立確率の推移

ンを行なう．さらに，3，7，11 のコミュニティに属するエージェントは，群は異なるが互いにコミュニケーションを行なう．しかし，第 4.2.2節で定義したように，エージェントの推論機構の切り替えは，自分の属するコミュニティ内の平均エネルギー量のみに応じて決定される．

図 4.14に，実験結果の概要を示す．まず，$t = 100$ には，コミュニティ3 と 11 に属するエージェントが，他の群のエージェントとも相互に作用した結果，自分のコミュニティでは通用する文法を獲得したため，コミュニケーション成立確率が 80%を上回った．しかし，他のコミュニティのエージェントは，これらの発話に対応できず，その成立確率を下げている．また，群 B では，コミュニティ7 が文法の獲得に失敗し，代りにコミュニティ8 が成立確率を高めている．次に，$t = 300$ になると，先のコミュニティ3 と 11 の文法を他のエージェントも獲得し，群内の成立確率，および，群間の成立確率がしだいに高まった．特に，群 B では，その群の中での成立確率が 81%となり，ほぼ全エージェントが共通文法を獲得している．さらに，$t = 500$ では，コミュニティ12 を除いて，全コミュニティの成立確率が 80%を上回っている．しかし，3 つの群間の成立確率は，63%〜70%であるため，3 つの

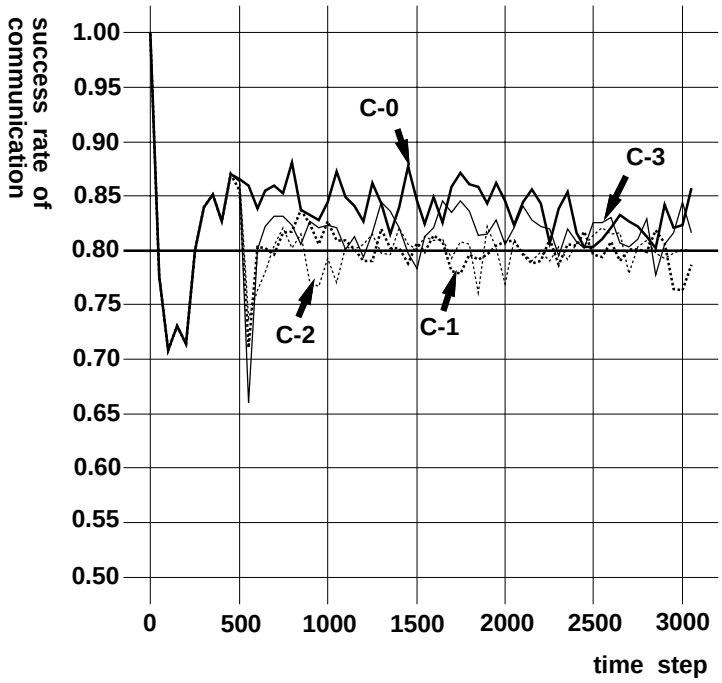

図 4.13: 実験 3 – 非同時性条件におけるコミュニケーション成立確率の推移

群が同じ文法を持っているとはいえない．3 つの群が共通文法の形成へ向かうと思われたが，$t = 1000$ 前後に，コミュニティ5 内において，アブダクションにより異なる文法規則を持つエージェントが多くなり，群 B 内の成立確率を 73%に低下させた．この後，実験終了（$t = 3100$）時点では，群 B 内の，コミュニティ5 と他のコミュニティとの成立確率は 68〜76%であったが，コミュニティ5 内部の成立確率は 80% を上回っていた．これは，コミュニティ5 において，自然言語における方言（dialect）に対応する共通文法が形成されていたといえる．

4.3.5 その他の実験

本章の実験では，エネルギー量の計算式のパラメータは $p_r = 3.0, p_b = 3.0, p_t = 0.9$ とした．これらのパラメータはそれぞれ，発話を理解する，発話が理解される，および，時間減衰の際のエネルギー増減に関わるパラメータである．これらのパラメータを変化させることで，いくつかの実験を行なった．それらの実験結果に基づき，パラメータの定性的な挙動について以下に述べる．

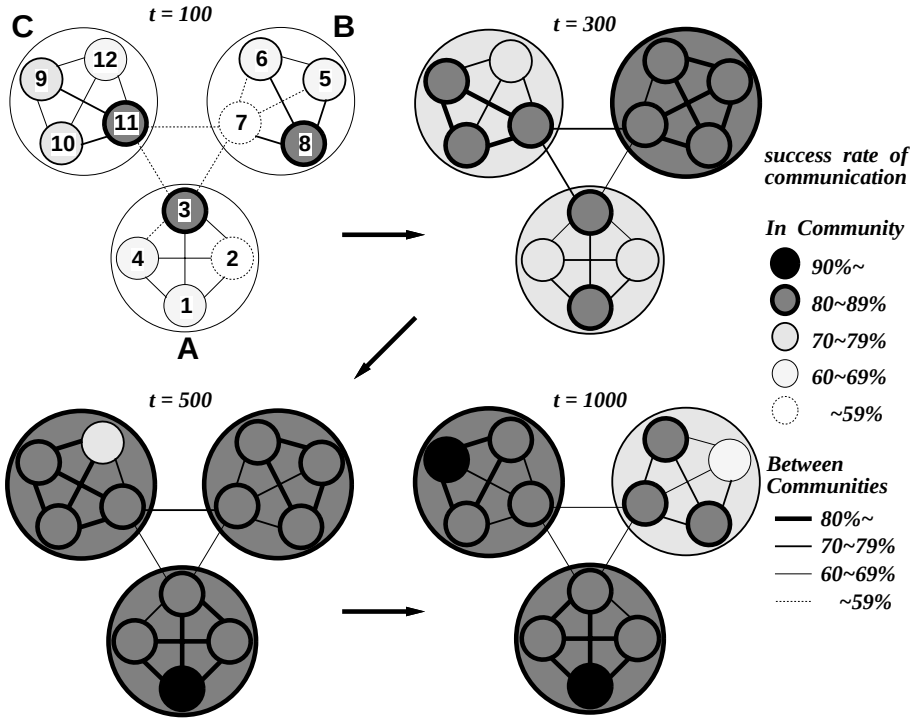

図 4.14: 実験 4 – 多数のコミュニティの結合による共通文法の融合と分化

「理解する」に関するパラメータ（p_r）実験は，$p_r = 1.0, 2.0, 3.0$ の 3 つの値を設定して行なった．このパラメータの値を大きくすると（$p_r = 3.0$），共通文法の獲得の有無に敏感に反応し，エージェントのエネルギー量が増減する．これは，定義（4.3）に示したとおり，他のエージェントの発話を理解できたかできなかったかにより，正負の値を与えていることによる．

「理解される」に関するパラメータ（p_b）実験は，$p_b = 1.0, 2.0, 3.0$ の 3 つの値を設定して行なった．このパラメータの値を変化させることにより，エージェントのエネルギー量の変化は上記の p_r と同様の傾向を示した．しかし，共通文法の獲得の有無に対して，p_r ほど敏感には反応しなかった．これは，定義（4.4）に示したように，自分の発話が理解されなかったとき値を減少させていないことによる．

時間減衰に関するパラメータ（p_t）実験は，$p_t = 0.85, 0.90, 0.95$ の 3 つの値を設定して行なった．このパラメータを大きくすると（$p_t = 0.95$）共通文法が形成されやすくなり，小さくすると（$p_t = 0.85$）形成されにくくなる傾向が観察された．これは，パラ

メータを大きくするとエネルギー量の時間減衰が少なくなるため，発話回数，生成される文法規則数が多くなり，共通文法が形成されやすくなるためである．パラメータを小さくした場合は，これと逆のことがいえる．

実験の結果,「理解する」と「理解される」のパラメータ間には，定性的な挙動に関して同様の傾向がみられた．これは，エージェントの発話・理解の過程において，同じ文法セットを用いているためである．つまり，他のエージェントとのコミュニケーションにおいて,「理解する」ことが可能な文法セットを持ったエージェントは,「理解される」ことも可能だからである．しかし,「理解される」における非対称な定義（4.4）は，共通文法に適応性を与えていると考えられる．つまり，アブダクションによる新たな文法規則の生成，および，それに基づく新たな発話を許容することで，共通文法にバリエーションを与え，外乱や環境の変化に対応できる共通文法を形成しているといえる．

4.4 実験結果の考察

本節では，本章で提案した推論機能を有するマルチエージェント・モデルについて，実験結果を踏まえ，考察を行なう．

まず，実験 1 では，アブダクションとインダクションを統合した推論機構をエージェントに持たせることにより，一方の推論機構では実現できない高いコミュニケーションの成立確率を実現することができた．ここで，さらに重要な点は，この実験のエージェント群が常にコミュニティの文法を変化させながら，共通文法を形成していることである．つまり，あるエージェントがわずかでも有利な文法規則を持つと，コミュニケーションによりそのエネルギー量が増加する．エネルギー量の増加したエージェントは，それに比例して発話回数が多くなる．このため，他のエージェントは，インダクションにより有利な文法規則の抽出を試みる．さらに，エネルギー量の増加したエージェントも推論を行ない，他のエージェントの発話から文法規則を抽出しようとする．しかし，エネルギー量の増加したエージェントが常に有利なわけではなく，他のエージェントの理解できない発話を引き起こす文法規則を生成した場合は，急激にエネルギー量を減少させる．このように，アブダクションとインダクションという性質の異なる 2 つの推論機構を統合した結果，エージェントの適応性が発現され，共通文法が組織化される過程を模倣することができる．また，このような構成要素間の局所的な相互作用（エージェント間のコミュニケーション）が大域

的な構造（共通文法）を形成し，また逆に，大域的な構造（共通文法）が構成要素（エージェント）に影響を与えるというフィードバックは，自然言語の本質的な特徴であると考えられる．

次に，実験 2 では，単純な文法しか持たないエージェントが共通文法を形成していく過程で，推論機構がどのようなはたらきをしているかについて実験を行なった．実験結果は，コミュニティ内に規範となる文法をすでに持つエージェントがいる場合もいない場合も同様の共通文法を形成していた．しかし，その過程で使用された推論機構の比率は異なり，規範となる文法を持つエージェントがいない場合では，それがいる場合より，アブダクションにより文法規則を獲得する比率が高くなっていた．本実験結果は，ピジンがクレオール化する過程と対応させて考えることができる．ピジンがクレオール化するときに重要な役割を果たすのは，言語獲得過程にある子供たちである [5]．つまり，子供が獲得すべき十分なモデルを与えられないとき，彼らが持つ生得的な統語構造が現れ，複雑な文法体系を構築していくとされる．本モデルで仮定したアブダクションの機能は，この生得的な統語構造とみなすことができる．また，子供が獲得すべき十分なモデル（たとえば上層言語）を与えられたときは，本モデルにおけるインダクションの役割が大きくなる．したがって，本モデルでは，エージェントがその置かれた環境に対応して，推論機構を自分で選択しながら，共通文法を形成しているということができる．

実験 3 では，同時性と非同時性というコミュニティの構成方法の違いと共通文法の関係について実験を行ない，非同時性に基づくコミュニティが異なる文法を持つエージェントのさまざまな侵入に対して，頑健であることが示された．これは，自然言語を持つどんなコミュニティであっても，同時性のみに基づく集団はないように，適応性と頑健性を必要とする共通文法にとっては必然的な構成方法であると考える．つまり，不必要な文法規則も生成するが，時として新しい有用な文法規則を提供するアブダクションと，安定した推論を行なうがそれを生成するのに時間を必要とするインダクションのそれぞれを行なうエージェントが，時間に関係なく常に混在することが適応性と頑健性を実現していると考える．

最後に，実験 4 では，異なる文法を持った 3 つの群（12 コミュニティ，60 エージェント）におけるコミュニケーションから，共通文法の融合と分化の過程を示した．実験 1，3 でみたように，アブダクションのような推論機能は，環境変動へ対応するために必要である．つまり，個々のエージェントがさまざまな文法規則のバリエーションを持つことで，コミュニティにおける適応性を実現している．しかし，このことがまた，方言の発生や共通

文法の分化を生むことになっている．したがって，適応性はコミュニティにとって，環境変動があっても共通言語を維持していくという利益をもたらすかわりに，あるときは，その共通言語を分化へと導くという不利益をもたらす危険性を持っている．以上のことから，自然言語が常に融合と分化を繰り返しながら変化しているのは，その変化が必然性を持っているからであると考えることができる．

本章で提案したモデルおよび実験結果と，第2章で提起された問題との詳細な議論は，第6章において行なう．

4.5 まとめ

本章では，推論機能を有するエージェント群による共通文法の組織化のモデルを提案した．さらに，このモデルに基づくシステムを計算機上に実現して，アブダクション，インダクションという推論機構と共通文法の関係，共通文法の発展と推論機構の関係，同時性・非同時性というコミュニティの構成方法と共通文法の関係，および，共通文法の融合と分化の過程について調べるため，計算機実験を行なった．実験結果から，2 つの推論機構を統合することによる有効性，および，非同時性に基づくコミュニティにおいて共通文法の頑健性が示された．さらに，多数のコミュニティを結合した実験により，共通文法の融合と分化の過程が示された．

しかし，本章では，対象を文法のみとしたため，エージェントの持つ語彙に関してはモデル化していない．言語の変化を研究する上で，語彙は重要な位置を占めているため，文法の組織化とともに，語彙も含めた共通「言語」の組織化について考えていく必要がある．

表 4.2: 実験 1 – エージェントの獲得した文法（統合条件）

No.	文法規則	SVO 型エージェントの番号	SOV 型エージェントの番号
$R-1$	$S \rightarrow NP1 \quad VP$	全エージェント（*）	全エージェント（*）
$R-2$	$S \rightarrow VP \quad NP1$	全エージェント	全エージェント
$R-3$	$S \rightarrow N \quad V$	全エージェント	全エージェント
$R-4$	$S \rightarrow V \quad N$	4,6,8,10,12,14,16,18	7,13,15,17,19
$R-5$	$NP1 \rightarrow Det \quad N$	全エージェント（*）	全エージェント
$R-6$	$NP1 \rightarrow N \quad Det$	16	
$R-7$	$NP1 \rightarrow N$	全エージェント	全エージェント
$R-8$	$NP1 \rightarrow N \quad P$	全エージェント	1,3,5,7,9,11,13,17,19 （*）
$R-9$	$NP1 \rightarrow P \quad N$	2,8,10,18	11
$R-10$	$NP1 \rightarrow Det \quad NP2$	6 （*）	
$R-11$	$NP1 \rightarrow NP2 \quad P$		全エージェント（*）
$R-12$	$NP2 \rightarrow Adj \quad N$	全エージェント（*）	全エージェント（*）
$R-13$	$NP2 \rightarrow N$		1,5,15
$R-14$	$VP \rightarrow V \quad Adv$	全エージェント（*）	全エージェント
$R-15$	$VP \rightarrow Adv \quad V$	全エージェント	全エージェント（*）
$R-16$	$VP \rightarrow NP1 \quad V$	0,2,8,12,14,18	全エージェント（*）
$R-17$	$VP \rightarrow V \quad NP1$	2,4,6,8,10,12,14,16,18 （*）	
$R-18$	$VP \rightarrow V$	全エージェント（*）	全エージェント（*）

（*） 初期状態において与えられていた文法規則.

第 5 章

共通言語の組織化と語彙の変化

これまでの章における研究では，共通「文法」の組織化が中心的な課題であった．本章では，言語が融合・分化する過程での語彙（words）の変化を対象とする．

言語の変化を扱う上で，当然，語彙の問題を避けて通ることはできない．しかし，語彙を扱う場合は，その意味を扱わなければならず，それに関わる状況依存性や曖昧性の問題を解消しなくてはならない．本章では，類似に基づく（similarity-based）語彙獲得の方法を用いることで，その意味を直接的に扱うことなく，語彙の変化の過程をモデル化する．本章では，このモデルを用いて，エージェントが状況に応じて語彙を獲得していく過程，および，言語が融合・分化する過程での大域的な語彙の変化の過程について説明する．

5.1 言語変化における語彙の重要性

前章までの研究では，さまざまな仮定を用いることにより，語彙の問題を明確には扱ってこなかった．それらの仮定とは，語彙を共有している，もしくは，高速に変換可能な辞書を持っているなどというものであった．このような仮定をした理由には，語彙を扱うことの難しさも含まれている．その難しさとは，語彙には指し示しの問題も含めて意味を扱わなければならないこと，さらに，語彙は状況や文脈に応じて解釈・使用されているということである．これらの問題をすべて解決することは，現時点では困難であろう．

しかし，言語の変化を研究対象とした場合，語彙の問題を避けて通ることはできない．なぜなら，方言では，文法の変異よりも語彙の変異の方が大きいという観察がある．また，環境が変化したとき，人間はその環境に適応するため語彙を変化させると考えるのは当然

であろう．さらに，初期のピジンにみられるように，異なる言語を持つ人たちがコミュニケーションを行なう場合，単語を無秩序に並べるだけでも，ある程度の意志伝達は可能である．このように，言語の変化の過程では，語彙は重要な役割を果たしている．したがって，本章では，言語が融合・分化する過程における，語彙の変化をシミュレートするモデルを提案する．

5.2 語彙獲得のモデル

本節では，語彙獲得のモデルを提案する．エージェントが語彙を獲得する際のポイントは，その「意味」をどのように扱うかである．本稿では，第2.5節で述べたとおり，物の指し示しは対象としないため，直接的に「意味」を扱うことはできない．このため，本モデルでは，類似に基づく方法により，語彙の「意味」的な側面を扱う．

5.2.1 語彙獲得の定義

語彙獲得のモデルを提案するためには,「語彙獲得」を定義する必要がある．一般に，人間が語彙を獲得するとは，ある語を文法的にも，意味的にも正しく使用できるようになることである．本章では，この「文法的」,「意味的」に正しい使用を以下のように定義する．

- 文法的に正しい使用： コミュニティの大部分のエージェントが構文解析できるように使うこと
- 意味的に正しい使用： コミュニティの大部分のエージェントにとって，適切と思われる文脈で用いること

前者は明らかであるため，後者について例を用いて説明する．ある語の意味は，当然，コミュニティによって異なるわけであるが，ここでは，標準的な英語を想定する．この「適切な文脈」とは，“I eat a banana.” のような文であり,「適切ではない文脈」とは，“I eat a book.” のような文である．つまり，意味を考慮した場合，“eat” と “book” は通常，このような使われ方をしない．このような「適切な文脈」の形式的な定義は，第5.2.2節において述べる．

以上のように，本章では，文法（語法）的にも，意味的にもそのコミュニティの大部分のエージェントによって「正しい」とされる文を発話したとき，その文で用いた語彙は発

話したエージェントによって獲得されているものとする．

5.2.2 類似に基づく語彙獲得の方法

類似に基づく獲得方法（similarity-based method）では，語の類似性と文脈の類似性を利用して，新たな語を獲得する．Karov らは,「類似した文脈に現れる語は類似しており，類似した語を含んでいる文脈は類似している」という循環的な定義から，語義の曖昧性の解消に関する研究を行なっている [20]．本モデルの方法は，この方法を語彙獲得に利用するものである．

Karov らは，上記の循環的な定義をアルゴリズムとして形式化し，それを繰り返し実行することにより，このプロセスが収束することを示した．具体的には，多義語 drug（narcotic（麻薬）/medicine（薬））の語義を決める際に，その前後の文章に war や trafficking などの単語があれば，narcotic（麻薬）の語義を選択する．なぜなら，2 つの単語は，drug の文脈において，drug trafficking，the war on drugs として使われるという特徴があるからである．また，この drug の文脈において，war と trafficking は類似しているといえる．この類似は，シソーラスのような一般的な意味での類似ではなく，ある文脈においてのみ決定されるものである．一般に，古典的な語の共起関係を用いる手法では，特定の語が共起する確率は低いため，大量のデータを必要とする．しかし，この手法では，語と文の類似度を用いることと，処理の繰り返しを行なうことで，語の関係が「家系図」のように広がっていくため，少ないデータでも類似度を決定することができる．

類似度計算のアルゴリズム

以下に，本モデルで用いるアルゴリズムを示す．いま，語の類似度行列を $M^{(w)}$ とし，その行と列は語の集合 W に含まれるすべての語に対応する．行列の要素を $M^{(w)}(i,j)$，$(0 < M^{w}(i,j) < 1)$ とするとき，この要素は，語 i が語 j に対して文脈的に類似している度合を示している．同様に，文の類似度行列を $M^{(s)}$ とし，その行と列は文の集合 S に含まれるすべての文に対応する．

類似度を計算するために，初期値として，語の類似度のみ設定する．この初期値は，各語はそれ自身との類似度を 1 とし，それ以外の語との類似度は 0 とする．この初期状態から，以下の計算を繰り返す（図 5.1）．

1. 語の類似度行列 $M^{(w)}$ を用いて，文の類似度行列 $M^{(s)}$ を更新する

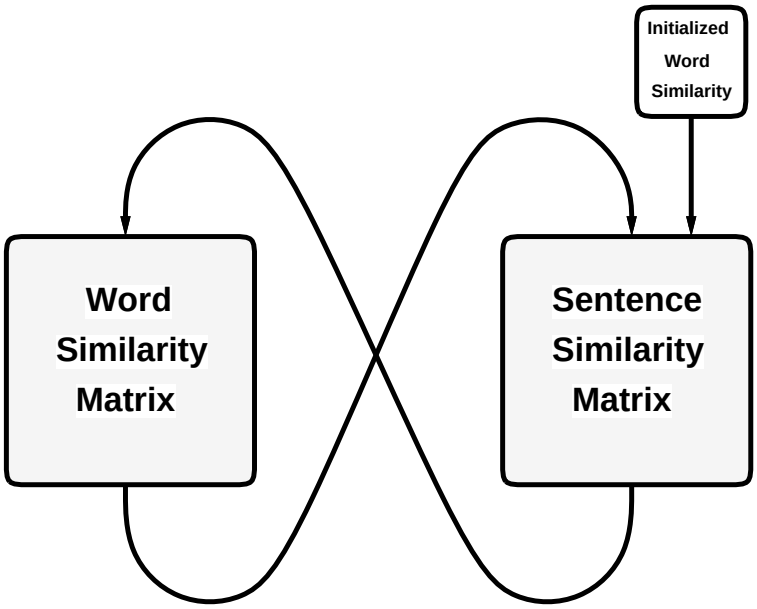

図 5.1: 語と文の類似度の反復計算

2. 文の類似度行列 $M^{(s)}$ を用いて，語の類似度行列 $M^{(w)}$ を更新する

この処理は，類似度の変化が十分小さな値になるまで繰り返される．また，この処理は収束することが証明されている [20].

類似係数の形式化

この類似度の更新処理アルゴリズムには，語と文の関係も含まれている．この関係を表す類似係数（affinity value）は，語 W と，文 S を構成する語との文脈的関係を反映して，0 から 1 までの値をとる．ある語はすべての文に対して，ある類似係数を持つ．語 W が文 S に含まれていれば，W の S に対する類似係数は 1 となり，まったく関係がなければ 0 になる．W が S を構成する語と文脈的に類似していれば，0 から 1 までの値をとる．同様に，ある文はすべての単語に対して，ある類似係数を持つ.

この類似係数 aff を以下のように定義する．ここで，ある語がある文を構成していることを $\mathcal{W} \in \mathcal{S}$ とする．またこのとき，文がその語を含んでいることを $\mathcal{S} \ni \mathcal{W}$ とする．n は繰り返しの回数である.

$$aff_n(\mathcal{W}, \mathcal{S}) \quad = \quad \max_{\mathcal{W}_i \in \mathcal{S}} sim_n(\mathcal{W}, \mathcal{W}_i) \tag{5.1}$$

$$aff_n(\mathcal{S},\mathcal{W}) \quad = \quad \max_{\mathcal{S}_j \ni \mathcal{W}} sim_n(\mathcal{S},\mathcal{S}_j) \tag{5.2}$$

この類似係数は対称的とはならない．つまり，$aff(\mathcal{S},\mathcal{W}) \neq aff(\mathcal{W},\mathcal{S})$ である．なぜなら，語 W が文 S 中の 1 つの単語と類似しているとしても，その語は S の中では重要な語ではないかもしれない．この場合，$aff(\mathcal{W},\mathcal{S})$ が高くなる．なぜなら，W は S の中の語と類似しているからである．逆に，$aff(\mathcal{S},\mathcal{W})$ は低くなる．なぜなら，S は W の語法の代表的な例ではないからである．

類似度の形式化

次に，$\mathcal{W}_2$ に対する $\mathcal{W}_1$ の類似度（similarity）を定義する．ここでは，$\mathcal{W}_2$ を含む文に対する $\mathcal{W}_1$ を含む文の類似係数（aff）の平均になるようにする．文 $\mathcal{S}_2$ に対する文 $\mathcal{S}_1$ の類似度も定義する．ここでは，$\mathcal{S}_2$ に含まれる語に対する $\mathcal{S}_1$ に含まれる語の類似係数の重み付き平均とする．ここで，重みの総和は 1 である．

$$sim_{n+1}(\mathcal{S}_1,\mathcal{S}_2) \quad = \quad \sum_{\mathcal{W}\in\mathcal{S}_1} weight(\mathcal{W},\mathcal{S}_1)\cdot aff_n(\mathcal{W},\mathcal{S}_2) \tag{5.3}$$

$$sim_{n+1}(\mathcal{W}_1,\mathcal{W}_2) \quad = \quad \sum_{\mathcal{S}\ni\mathcal{W}_1} weight(\mathcal{S},\mathcal{W}_1)\cdot aff_n(\mathcal{S},\mathcal{W}_2) \tag{5.4}$$

反復計算の重要性

上記の類似度の形式化に基づき，反復計算を実行すると，類似度は以下のように変化する．初期状態では，同一の語だけ類似しているとする．つまり，$\mathcal{W}\in\mathcal{S}$ のとき，類似係数 $aff(\mathcal{W},\mathcal{S})=1$ であり，それ以外のときは，類似係数は 0 である．したがって，最初の反復後の $\mathcal{S}_1$ と $\mathcal{S}_2$ の類似度は，$\mathcal{S}_2$ に現れる $\mathcal{S}_1$ の語の数に依存する（正規化した $weight$ を用いるので，$\mathcal{S}_1$ の長さにも依存する）．その後の繰り返しでは，語は文の，文は語の類似度に反映される．

この反復は，連続的な「家系図」の関係としてとらえることもできる．コンテクストを共有する語は直接の親戚,（類似した共起パターンを持つ）隣接した語を共有する場合は 1 親等の親戚である．これら 2 つの親族関係は古典的な共起関係でも捉えることができる．しかし，このアルゴリズムによる反復では，第 2 反復でさらに 2 親等の関係へと導く．そして，関係のレベルは徐々に 0 と 1 の間のある実数値に収束していく．

類似度計算の具体例

以下の 3 つの具体的な例文を用いて，本手法と共起関係を用いた古典的手法との比較を行なう．

s1: eat banana

s2: taste banana

s3: eat apple

共起関係を用いた古典的手法では，taste と apple の類似度は 0 となる．なぜなら，これら 2 つの語の文脈は，共有する部分がないからである．しかし，本手法では，ある類似度を得る．その過程について説明する．

1. **初期状態：** すべての単語は，それ自身に対してのみ類似度 1 を持つ．
2. **第 1 反復：**
   - **文の類似度：** eat banana と eat apple の類似度が 0.5 となる（eat を共有しているため）．また， eat banana と taste banana も類似度が 0.5 となる（banana を共有しているため）．
   - **語の類似度：** banana と apple の類似度が増加する（共通の語法で用いられるため）．taste と eat の類似度も増加する．しかし，taste と apple の類似度はまだ増加しない．
3. **第 2 反復：** taste banana と eat apple の類似度が増加する．なぜなら，前回の反復で，taste と eat，banana と apple の類似度が増加したからである．いま，taste と apple の類似度が増加する．なぜなら，taste 文（taste banana）と apple 文（eat apple）の類似度が増加したからである．しかしまだ，banana は taste より apple に類似している．なぜなら，banana と apple の類似度は，第 2 反復でさらに増すからである．

この単純な例では，類似度は上記のような推移性を示した．より複雑な状況では，この推移性がゆっくりと広がることになる．

類似度計算アルゴリズムの最も大事な性質は，収束することと，直接的に意味を与えることなく，文脈からその語や文の関係を定義できることである．さらに，語と文の類似性は非対象であることなどが特徴となる．

類似度に基づくクラスタリング

本モデルでは，これまでの処理で求められた文の類似度を用いて，クラスタリングを行なう．クラスタリングは以下の手順で行なう．

1. ノードに文，アークに文と文の類似度が対応するグラフを生成する
2. ある閾値以下の値を持つアークを消去する
3. グラフの連結性を調べ，連結成分に分割する

この結果分割された部分グラフがクラスタに対応し，それぞれのノードが要素に対応する．このクラスタリングにより得られたクラスタを C とする．新たな文 $\mathcal{S}_{new}$ とクラスタ C との類似度は，以下のように定義される．

$$aff(\mathcal{W}, C) = \max_{\mathcal{S} \in C} aff(\mathcal{W}, \mathcal{S}) \tag{5.5}$$

$$= \max_{\mathcal{S} \ni C} \max_{\mathcal{W}_i \in \mathcal{S}} sim(\mathcal{W}, \mathcal{W}_i) \tag{5.6}$$

$$sim(\mathcal{S}_{new}, C_k) = \sum_{\mathcal{W} \in \mathcal{S}_{new}} weight(\mathcal{W}, \mathcal{S}_{new}) \cdot aff(\mathcal{W}, C_k) \tag{5.7}$$

5.3 エージェント

本節では，前節の語彙獲得のモデルを用いたエージェントのモデルを提案する．本モデルは，第 4章で提案した文法獲得のモデルと統合することを意図して構築されている．

5.3.1 エージェントとコミュニケーション

本モデルにおけるエージェントは，自分の語彙識別の能力を示す指標である類似度の閾値 $\Theta_i(t)$ をコミュニケーションによって時間とともに変化させる．エージェント間のコミュニケーションは，以下の手順で行なう．

0．発話： あるエージェントが，自分の類似度の閾値以上の語を用いて発話する．この文を S とする．

1．理解： その発話を次のエージェントが意味的に理解しようと試みる．発話された文の類似度 $sim(S, C_k)$ が，そのエージェントの閾値以上であれば理解できたとする．

2．発話 ：

2-1 1 で理解できたエージェントは，その文で用いられた語と，類似度が閾値以上の語を用いて発話する．

2-2 1 で理解できなかったエージェントは，類似度が閾値以上の語をランダムに用いて発話する．

3．計算： n 回の発話が終ったとき，全エージェントは類似度計算とクラスタリングを行なう．このとき，ある閾値以下の語は捨てられる．1 へ戻る．

エージェントの類似度の閾値の計算は，以下のように行なう．ここで，$\mathcal{A}$ はこのコミュニティにおけるエージェントのインデックスの集合，$S_{ij}(\tau)$ $(i, j \in \mathcal{A})$ は第 i エージェントから第 jエージェントへ時刻 τに発話された文であり，$|S_{ij}(\tau)|$ はその長さ（語数）である．

いま，第 i エージェントが第 jエージェントに対して発話したとする．このとき，第 i エージェントは，その発話した文における語と語の間の類似度の平均 $U_{ij}(\tau)$ を計算する．$sim_i(W_k, W_l)$ は，第 i エージェントの持つ行列における語 W_kと W_lの類似度である．同様に，その発話を聞いた第 jエージェントも類似度の平均 $L_{ij}(\tau)$ を計算する．

発話（Utterance）

$$U_{ij}(\tau) = \frac{1}{|S_{ij}(\tau)|} \sum_{W_k \in S_{ij}(\tau)} \sum_{W_l \in S_{ij}(\tau), k \neq l} sim_i(W_k, W_l) \tag{5.8}$$

聴取（Listening）

$$L_{ij}(\tau) = \frac{1}{|S_{ij}(\tau)|} \sum_{W_k \in S_{ij}(\tau)} \sum_{W_l \in S_{ij}(\tau), k \neq l} sim_j(W_k, W_l) \tag{5.9}$$

発話を理解した場合，理解された場合の閾値の増減は，これらの $U_{ij}(\tau), L_{ij}(\tau)$ を用いて，以下のように定義される．

理解する（recognizing）

$$R_{ij}(\tau) = \begin{cases} 1 - L_{ji}(\tau), & i \text{ は } j \text{の発話を理解できた.} \\ L_{ji}(\tau), & i \text{ は } j \text{の発話を理解できなかった.} \end{cases} \tag{5.10}$$

理解される（being recognized）

$$B_{ij}(\tau) = \begin{cases} 1 - U_{ij}(\tau), & i \text{ の発話は } j \text{に理解された.} \\ U_{ij}(\tau), & i \text{ の発話は } j \text{に理解されなかった.} \end{cases} \tag{5.11}$$

以上の定義より，類似度の低い語からなる文を理解したときの閾値の上昇は大きく，理解できなかったときの閾値の低下は小さい．しかし，類似度の高い語からなる文を理解したときは閾値の上昇は小さいが，理解できなかったときの閾値の低下は大きい．これは,「理解される」においても同様である．つまり，あまり使われていない語の並びを発話した場合は理解されない危険が大きいが，理解されたときの利益は大きい．逆に，よく使われている語の並びを発話した場合は理解される確率が高いが，理解されなかった場合の不利益は大きいことを意味する．

第 i エージェントの類似度の閾値の関数 $\Theta_i(t)$ は，以下のように定義される．ここで，p_r, p_bは，発話を理解した，もしくは，理解されたときの閾値の上昇・低下に関わるパラメータであり，p_tは時間減衰のパラメータである．

$$\Theta_i(t) = p_r \frac{1}{|\mathcal{A}|} \sum_{j \in \mathcal{A}} \sum_{\tau \in [t-1,t]} R_{ij}(\tau) + p_b \frac{1}{|\mathcal{A}|} \sum_{j \in \mathcal{A}} \sum_{\tau \in [t-1,t]} B_{ij}(\tau) + p_t \Theta_i(t-1). \tag{5.12}$$

式（5.12）は，第4章で提案したエネルギー量の漸化式（式（4.5））と同様の定義を行なっている．つまり，閾値の関数は，他のエージェントとのコミュニケーションがない限り，時間を追って指数関数的に減少する関数となっている．これは，文法のモデルと語彙のモデルの統合を意図しているためである（詳細は，第5.4.3節で述べる）．

5.3.2 コミュニケーションと語彙の獲得

式（5.12）により求められた時刻 t における類似度の閾値$\Theta_i(t)$ は，クラスタリングの際の閾値にも対応する．つまり，言語の異なるエージェントと接した場合，コミュニケーションが成立せず，その閾値は低下する．これに対応して，クラスタリングの閾値が下がり，これまで持っていなかった語彙を獲得しやすくなる．新しい語彙を獲得し，それをコミュニケーションに用いることで，閾値を大きく上昇させることが可能となり，徐々に確実なコミュニケーションが可能となっていく．このプロセスを本モデルでは，語彙獲得の過程とみなす．

本モデルの手法のように,「意味」を直接的に扱わないのでは，語彙を獲得してもコミュニケーションには役に立たないと考えるかもしれない．しかし，Karov らの研究 [20] でも，機械可読式の辞書を併用することで，これらの類似度から語義の曖昧性を解消している．本モデルにおいても，今後，他のモーダルからの入力を統合処理することにより，本来の「意味」を表現することは可能であると考える．

5.4 モデルの動作

本節では，具体的な環境を設定し，本モデルの動作について説明する．さらに，本モデルの特徴，文法獲得のモデルとの統合の可能性について述べる．

5.4.1 語彙の融合と分化

図5.2に，具体的な環境を示す．この環境では，2つのコミュニティ群G_j, G_eを仮定する．群G_jでは日本語のサブセットの言語が使われ，群G_eでは英語のサブセットの言語が使われる．各群はそれぞれ4コミュニティにより構成されており（$G_j = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}, G_e = \{C_5, C_6, C_7, C_8\}$），各コミュニティは5エージェントにより構成されているとする．各コミュニティのエージェントは，それぞれの言語の文のサンプルからなるトレーニング集合により，語と語，文と文の類似度行列をすでに持つものとする．また，両コミュニティ群の間には，数個のオブジェクトを用意し，最小限の指し示し，ボディランゲージによるコミュニケーションを可能にしている（つまり，数語の対訳表を持つことを意味する）．

これらのエージェントが，同じ群に属するエージェントとコミュニケーションを行なう．コミュニティC_3とC_7のみが，異なるコミュニティ群ともコミュニケーションを行なうことができる．コミュニケーションの開始当初は，各群ともトレーニング集合による語と文の類似度行列を持っているため，多くのコミュニケーションが成立し，それぞれのエージェントが持つ類似度の閾値も高くなる．しかし，異なる群と接しているコミュニティC_3とC_7のエージェントは，互いにコミュニケーションが成立せず，語彙の識別能力（類似度の閾値）を下げることになる．この結果，両コミュニティのエージェントは，他の語彙を獲得することが可能となり，互いの語彙を少しずつ共有するようになる．そして，徐々にコミュニケーションを確立していく．この過程は，ピジン化などでみられる語彙の融合過程とみることができる．その後，コミュニティC_3とC_7のエージェントは，自分の属する群内のコミュニティのエージェントともコミュニケーションを続ける．ここで，コミュニティC_3とC_7のエージェントは，新たに獲得した語彙を使用するため，他のコミュニティのエージェントはそれを理解できず，類似度の閾値を下げる．このため，新たに獲得した語彙は，コミュニティ群内に広がっていく．しかし，その語彙が，当初獲得したままのカテゴリーに属しているとは限らず，その「意味」も変化していく．この現象は,「和製英語」などにみられる，語彙の借用と考えることができる．これらの語彙の変化は，各コミュニティに

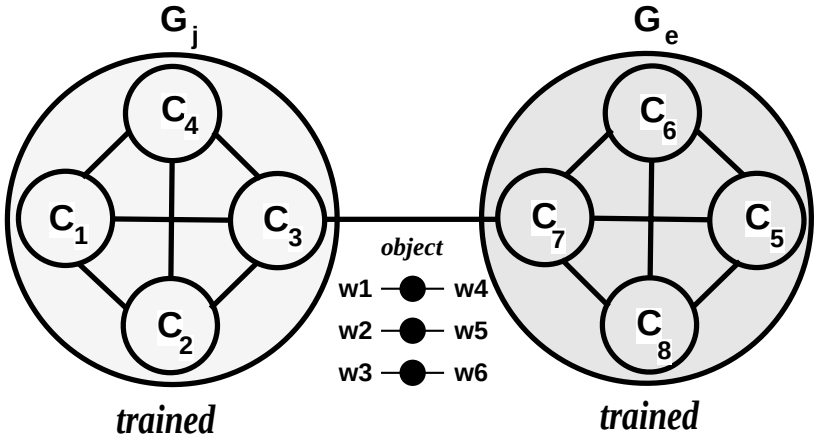

図 5.2: 異なる言語の接触による語彙の変化のモデル

おいて不均質に起こるため，あるコミュニティにだけ通用する「意味」が生じる可能性がある．これは語彙の分化のプロセスであり，方言の発生と考えることができる．

5.4.2 本モデルの特徴

本モデルでは，言語が融合・分化する過程での語彙の変化を対象としてきた．語彙を扱う場合，当然，その意味を扱わなければならないが，計算機上でのモデルを考える場合，さまざまな困難が生じる．そこで，本モデルでは，類似に基づく語彙獲得の方法により，語と語，文と文の類似度を循環的な定義から決定し，意味を直接扱う困難さを回避した．

このような背景を持つ本モデルの特徴について述べる．本モデルにおいて説明可能な現象として，言語変化にともなう語彙の通時的変化の過程を上げることができる．つまり，異なる言語が接する状況で，ピジンのような言語融合や語彙の借用が起こり，さらに世代を経て共通の語彙が形成される過程である．さらに，本モデルでは，環境の変化に応じた，地域ごとの語彙の分布，変化の過程をシミュレートすることも可能である．つまり，時間とともに語彙や語義が変化する過程，および，語彙が分化して方言などが発生することも説明可能であると考える．

また，人間の認知的な側面から考えても，文脈に応じた動的な語彙の獲得は妥当なものであると考える．通常，語彙は状況に依存して用いられ，文脈に依存して意味が決まる．コミュニケーションにおいて未知語がでてきても，多くの場合，その文脈から推定すること

は可能である．その意味でも，このような方法で「意味」を扱うことも妥当であろう．

しかし，異言語間のコミュニケーションを考える場合，最低限の指し示し，もしくはボディランゲージを仮定しなければ，コミュニケーションおよび概念の共有は不可能であろう．つまり，自分の持つ語が，他の言語のどの語に対応するか，何らかの援用が必要となる．このため，本モデルでは，いくつかのオブジェクト（つまり，数語の対訳表）のみを仮定することにした．この語を通して，異なる言語に属する語の「意味」をつぎつぎと獲得していくことが可能となる．

本研究では自然言語を，大域的な構造（共通言語）と局所的な相互作用（コミュニケーション）の双方向のフィードバックにより成立しているものと捉えてきた．本章のモデルでは，さらに，語彙の意味を「類似した文脈に現れる語は類似しており，また，類似した語を含んでいる文脈は類似している」という循環的な定義で捉えた．この定義も，上位構造と下位構造の双方向のフィードバックにより成立しているものといえる．自然言語のような複雑であり，自己言及的でもある系は，このようなアプローチで捉えることが有効であると考える．

5.4.3 語彙と文法を統合したモデル

本章で提案したモデルは，言語が融合・分化する過程での語彙の変化を対象としてきた．このモデルの形式化は，第4章で提案した文法の組織化のモデルとの親和性を考慮してなされてきた．つまり，2つのモデルを統合することにより，より人間の言語行為に近いシミュレーションを行なうことが可能であると考える．

文法の組織化のモデルにおいて，コミュニケーション能力の指標であったエネルギーは，語彙の変化のモデルにおける類似度に対応する．2つの指標は，エージェントが置かれた状況に柔軟に対応し，適応性と頑健性を与えるものである．コミュニケーションが成立しない，不確実な状況においては，アブダクションの推論と類似度の閾値の低下が言語の変化の幅を広げてくれる．また，コミュニケーションが確実に成功する状況においては，インダクションの推論と類似度の閾値の上昇が安定した利益をエージェントに与えてくれる．つまり，2つの動的に変化する指標を用いたエージェントは，予測不可能な状況においても柔軟に言語獲得・使用を遂行することができると考える．

このような語彙と文法を統合したモデルは，本研究の目的の1つである，自律的なエージェントの言語獲得モデルとなりえる．つまり，あるコミュニティにおいて，そこでどの

ような言語が話されているか予測がつかない状況でも，自律的なエージェントは自分でその状況に柔軟に対応することが要請される．そして，そのコミュニティの言語が変化すれば，自分の言語もそれに応じて変えていかなければならない．このようなモデルは，言語を不変のものとして捉え，設計されてきた従来の言語獲得のモデルでは対応することのできないものである．さらに，本モデルでは扱うことができなかった本来の語彙の「意味」は，視覚や聴覚，触覚などの感覚器官のモーダルと統合することにより，将来的に解決できる部分が多いと考える．

5.5 まとめ

本章では，類似に基づく語彙獲得の方法を用いて，語彙の変化の過程のモデル化を行なった．本モデルの目的は，ピジン・クレオールなどで顕著にみられる，語彙の通時的な変化の過程をシミュレーションできるモデルを提案すること，および，その過程を通じて，エージェントの語彙獲得の過程のモデルを提案することであった．

提案したモデルの特徴は，語彙の意味を直接的に扱うことなく，単語の類似性と文脈の類似性の尺度を用いて，語彙の意味を相対的に定義しようというものであった．この類似性に基づく語彙獲得の方法は,「類似した文脈に現れる語は類似しており，また，類似した語を含んでいる文脈は類似している」という循環的な定義からなる．この循環的な定義をアルゴリズムとして形式化し，それを反復実行することにより，語と語および文と文の間の類似度を計算するものである．

本モデルにより，語彙融合や語彙分化などの大域的な語彙の変化を説明することができる．さらに，本モデルは，エージェントの，文脈に基づく語彙獲得のモデルとみることもできる．つまり，人間の語彙獲得過程においても，未知語の意味は文脈から推定することができ，また，多くの語は文脈の中で意味を持つ．本モデルはこのように，語彙の大域的な変化の過程を説明するモデルであるとともに，エージェント個体の語彙獲得のモデルとみなすことができる．このようなモデルは，第 4章で提案した文法のモデルと統合することにより，より状況に対して柔軟な計算論的言語獲得のモデルとなりえると考える．

第 6 章

考 察

本章では，これまで述べてきた本研究の結果を踏まえ，第 2章で提起した問題を中心に考察を行なう.

6.1 関連研究との比較・検討

本研究の目的は，知的な機能を持ったエージェント間のコミュニケーションにより，コミュニティにおいて自然言語に近いレベルの言語が融合・分化する過程をシミュレートしようというものであった．さらに，この大域的な言語変化の過程のシミュレーションを通して，個々のエージェントに対する言語獲得のモデルについて考察することも目的であった．第 2.5節で述べたように，本稿で提案したモデルのポイントは，次の 3 つであった.

言語の非等質性と通時態を重視 自然言語研究の問題点を考慮

自然言語に近いレベルの言語を対象 人工生命における言語の進化に関する研究との相違点

知的なエージェントを仮定 高次の言語を対象とするため，学習・推論などの機能を仮定

これらの観点から，本研究と関連研究の比較・検討を行ない，本研究の意義を明らかにする.

6.1.1 自然言語研究における問題点に対する考察

本稿では，第 2.1節において，これまでの自然言語研究の問題点として，言語の等質性と共時態のみを重視した研究が多かったという点を上げた．そこで，本研究では，言語の非等質性と通時態に焦点を当てたモデルを構築し，シミュレーション実験を行なった.

まず，第3章において，文法理論を制約として用いたマルチエージェント・モデルを提案した．しかし，このモデルでは，各エージェントの発話・学習・理解能力が等質であったため，自然言語現象に見られる動的な変化を十分に説明することはできなかった．これに対して，第4章において提案したモデルは，エージェントにアブダクションとインダクションという異なる推論機構を統合した機能を仮定し，発話・推論・理解能力を非等質にすることで，コミュニティにおける共通文法の融合と分化という現象をシミュレートすることができた．さらに，このシミュレーションにおける共通文法は常に変化しながらも，各エージェント同士はコミュニケーションを成立させ続けていた．これらの挙動は自然言語現象として観察されるものであるため，本モデルの設定は妥当であったと考えることができる．

言語獲得はこれまで，規範となるモデルがあり，そのモデルを獲得することであるという考え方が中心的であった．しかし，自然言語は，コミュニティの構成員の発話から統計的に決定されるものである以上，そのような規範となる一定のモデルを仮定するのではなく，各構成員がアブダクティブに行なう発話によっても変化しうる，動的なモデルとして考えるべきであろう．したがって，このモデルに基づく共通言語は，さまざまな言語レベルの構成員の相互作用によって動的に変化しながらも，構成員間のコミュニケーションの成立は維持されるものとなる．つまり，言語獲得の過程にある構成員も，その言語の変化に関わっていると考えるべきである．

このような視点から自然言語を見るとき，これまで解決が困難であった言語使用の創造的な側面や，文法獲得のプラトンの問題に示唆を与えることができるのではないだろうか．たとえば，人間は文法獲得において，それをすべて経験により獲得するのではなく，生得的な能力に基づきいくつかの仮説モデルを生成する．そして，コミュニケーションを通して，そのモデルを変形させながら共通文法を獲得しているという仮説も考えられる．このような視点は，普遍文法のような概念よりも，Bickertonが主張するバイオプログラムに近いものである．

6.1.2 ピジン・クレオール研究に対する考察

本稿では，第2.3節において，言語の非等質性と通時態を重視した研究として，ピジン・クレオール研究を取り上げた．第4章で行なった実験の結果は，自然言語現象として報告されてきた，ピジンなどの接触言語の発生過程，および，それらが母語化するクレオール化の過程との対応を考えることができる．

具体的には，第 4.3.2節の共通文法の発展と推論機構に関する実験では，単一条件において，簡単な文法しか持たないエージェントがコミュニケーションにより複雑な文法を獲得していく過程を示している．これは，ピジンがクレオール化する過程と対応させて考えることができる．さらに，混合条件において，コミュニティ内に規範となる文法を持つエージェントがいるとき，その文法から帰納的に文法を獲得していく過程も示している．これは，ピジンがクレオールを経て，上層言語に移行していく脱クレオール化の過程と対応させることができる．このように，本モデルは，ピジン・クレオール現象のいくつかを説明することができる．

Bickerton は，多くのピジン・クレオール現象を調査した上で，世界中に散在するクレオール諸語には多くの類似点がみられると指摘し，これは，子どもが獲得すべき十分なモデルを与えられないとき，彼が「バイオプログラム」（bioprogram）とよぶ生得的な統語構造が現れるためであるとしている [4]．さらに，クレオール諸語にみられる類似点は，獲得過程にある子どもの言語にも同様にみられるとし，その普遍性を指摘している．

本稿の第 4章のモデルでは，この議論とは逆に，推論能力をエージェントが生得的に持つ機能と仮定し，計算機実験を行なった結果，ピジン・クレオール現象のいくつかの過程を模擬的に実現することができた．このことから，人間は，本モデルで定義したアブダクションおよびインダクションと同様の推論能力を持っており，言語を獲得・使用する際に，これらの推論能力を利用している可能性があると考えることができる．これは，自然言語の大域的な変化の過程のシミュレーションを通して，そのメカニズムを明らかにし，さらに自律的なエージェントの言語獲得モデルについて考察しようという本研究の目的に合致するものである．

6.1.3 人工生命研究に対する考察

本研究の立場は，第 2.4節で述べた人工生命研究で仮定されるようなプリミティブな機能のみを持ったエージェントではなく，より知的な機能を持ったエージェントを用いて，言語の融合・分化の過程をシミュレーションしようというものである．この理由は，現段階ではプリミティブな機能のみを持ったエージェントによって自然言語のような高度に複雑な構造を，進化により獲得させるのは難しいと考えるからである．さらに今後，自然言語を用いた工学的応用を可能にするため，知的なエージェントを仮定することにした．

知的な機能を持ったエージェントを仮定することにより，そのエージェントの内部機構

を計算論的言語獲得のモデルとみることができる．つまり，本稿のアプローチは，提案したモデルにより大域的な言語変化の過程をシミュレートできたならば，そのときの個々のエージェントの内部機構を言語獲得のモデルとみなそうというものである．この観点から第4章のモデルを見たとき，その実験結果は自然言語の持つ適応性や頑健性という特徴，および，自然言語現象としての融合・分化の過程を実現しているため，エージェントの内部機構を計算論的言語獲得のモデルとみなすこともできると考える．さらに，各エージェントの獲得過程も，動的に変化する環境に適応するものとなっており，人間の言語獲得過程と同様の機能を有していると考える．したがって，本モデルは，言語の変化という大域的な立場からの言語獲得モデルの提案とみなすこともできる．

6.1.4 本研究の意義

本研究と関連研究の比較・検討を踏まえ，本研究の意義について述べる．

本稿では，これまで重視されてこなかった言語の非等質性と通時態に焦点を当てたモデルを構築し，シミュレーション実験を行なった．その結果，ピジン・クレオール現象をはじめ，これまで観察されてきたいくつかの自然言語現象を説明することができた．さらに，このことから，個々のエージェントの内部モデルを言語獲得のモデルとして提案することも可能となった．以上の議論から，本研究の目的であった，自然言語の大域的な変化の過程をシミュレートしそのメカニズムを解明すること，および，そこから計算論的言語獲得のモデルへの知見を得ることは実現されたと考える．

さらに，本研究の意義は，自然言語研究に新たなアプローチを取り入れたことであると考える．これまでの言語理論・言語獲得においては，いつの時点においても，普遍的な文法能力の存在や，獲得すべき言語の不変性を仮定してきた．言語を獲得しようとする者は，変化することのない獲得すべきモデルが与えられるという前提があった．しかし，これらの視点からは，言語がなぜ変化するのか，という問題に答えることはできなかった．

異なる分野ではあるが，この種の問題に明解な解釈与えたのは，Axelrod[2] や Frank[11] の研究である．Axelrod は，人間はなぜ協調するのだろうか，という問題に解釈を与えた．人間の集団では，裏切った方が有利であると思われる状況であっても，協調関係が出現する．彼は，この問題をゲーム理論を取り入れた進化生物学的な観点から解明を試み，コンピュータシミュレーションを行なった．その結果，相手が裏切らない限り，こちらも決して裏切らないという「シッペ返し戦略」が最も高い適応度を示すことがわかった．このよ

うな互恵主義的協調関係は，人間の行動原理を説明するモデルとなりうる．

また，Frank は，なぜ人間には感情が存在するのか，という問題に解釈を与えた．彼は，合理的には解決不可能なコミットメント問題において，感情はその問題を「合理的」に解くことができることを進化論的な観点から示した．つまり，怒りや罪悪感の感情ゆえに自己利益に反する行動をとってしまう人が，長い時間間隔で見ると，大きな利益をあげる可能性があることから，感情の合理性を示した．

これら 2 つの研究は，進化論的な視点を持ち込まない限り，解決できない問題である．つまり，時間とともに変化するというダイナミクスが，これらの明解な解答を与えたということができる．したがって，人間のコミュニケーションの手段である言語についても，なぜ言語が変化するのかという問題は，通時的な側面から考える必要がある．また，これを検証する手段として，計算機上のシミュレーションは重要な方法であると考えられる．本研究は，このような自然言語に対する新しいアプローチを提案するものと見ることができる．

6.2 本研究の問題点と今後の課題

本節では，本研究の問題点として，本モデルの認知科学的妥当性について議論する．さらに，今後の課題として，本モデルの工学的応用の可能性について議論する．

6.2.1 認知科学的妥当性

本稿で提案したモデルは，自然言語研究の新たなアプローチとして意義があるものと考える．言語（文法）獲得のモデルについては，これまでも多くの研究がなされてきたが [3, 17, 48]，これらの研究は，言語獲得を個々のエージェント内部の学習と捉えてきた．しかし，近年，環境との相互作用の重要性が指摘されているように [38]，言語獲得においても，あるエージェントが能動的にそのコミュニティに関わることで，それまでの共通言語を変化させながら，自分も学習していくという視点は重要であると考える．この点で，本研究は，認知的な研究としての意味も持つ．

しかしながら，本モデルは人間の用いる自然言語を計算機実験という俎上に載せるため，いくつかの箇所で人工的な設定を行い，認知過程の重要な問題を先送りにしたまま簡略化を行っている．たとえば，エージェント間でコミュニケートができたということをどう定義するか，個々のエージェント内で理解できたということをどう定義するか，文の理解に

かかる認知的な労力をどう定義するか，などと言った問題である．これらの本質的な問題を避けたまま，本稿で提案したような単純化したモデルだけで，自然言語のような複雑な現象のメカニズムを説明することは不可能である．今後は，これらの人工的設定に対してもより根拠のある（認知科学的に説明可能な）モデルに改善していくことと，それが良いモデルであることを主張するために実際の言語データからの統計的検証を常に考えていく必要がある．

6.2.2 モデルの工学的応用

本稿で提案したモデルは，他分野への直接的な応用を意図したものではない．しかし今後，工学的応用として，以下のような可能性を持つと考える．

大規模文法ベースの維持

本稿で述べてきたように，自然言語は時間とともに常に変化している．自然言語処理などにおいて実際の言語を処理する際，その言語の文法ベースを用意しておく必要がある．しかし，この文法ベースは大規模なものとならざるをえず，更新や維持管理には大変な手間が必要となる．このため，この処理を自動化することは工学的に有益である．この大規模文法ベースの維持に，本章で提案したモデルは活用可能であると考える．第 4章で述べた実験結果も，コミュニティの共通文法が外乱に対して頑健であることが示されており，この有効性を支持するものである．

機械翻訳

自然言語処理において，機械翻訳は重要なテーマであるが，いまなお解決できない問題も多い．特に，翻訳処理において，適当な訳語を選択することは，文脈や意味が関係してくるため，困難な問題の 1 つである．本章で提案したモデルは，言語の融合・分化に関するものであるが，その過程を詳細に分析することにより，機械翻訳に寄与できる点もあると考える．つまり，本章の語彙変化のモデルで用いた類似に基づく手法は，本来，文脈に適した単語の意味を機械可読辞書から選択するための手法である．したがって，機械翻訳における訳語選択にも有効であると考える．

ネットワークエージェント

コンピュータのネットワーク間で，プロトコルの異なる場合，その通信にさまざまな問題が生じる場合がある．これをネットワークエージェントにより，自動的に処理してくれることは，ユーザにかかる負荷を減少させるという意味で有益である．本モデルは，この問題にも応用可能であると考える．

以上の工学的応用は，さらに解決しなければならない問題も多いため，将来的な課題である．しかし，本研究の意義を，このような工学的応用として捉えることも重要であろう．

第 7 章

結 論

本論文では，複数エージェントのコミュニケーションによる共通言語の組織化について述べた．

まず，第 2章 **自然言語研究と共通言語の組織化**では，これまでの言語研究を概観し，本稿における立場を明らかにした．従来の言語研究では共時態における研究が主流であり，コミュニティの構成員間の文法の差異や，時間軸に沿った通時的な言語変化などは重要視されてこなかった．これらの要因を取り上げない言語研究では，言語が動的に変化するという特徴や，その統計的な性質を明らかにすることはできない．このような問題意識から，言語変化理論とピジン・クレオール研究の方法論と研究成果を示した．言語変化理論では，言語使用におけるスピーチコミュニティ，および，個人の言語の非等質性が考察の対象となっている．つまり，言語変化の過程におけるバリエーション（変異）の存在を認め，通時態をも射程におさめた言語モデルにより，その体系，構造を解明することを目標とする．一方，ピジン・クレオール研究では，言語の融合と分化を大域的な視点から捉えようとするものである．さらに，Bickerton は，ハワイ・クレオールに関する研究から，クレオール諸語の類似性を見い出し，それらの類似性は獲得過程にある子どもの言語の特徴とも一致する部分が多いとして，言語獲得の生得的な統語構造である「バイオプログラム」の存在を主張する．これらの研究と背景をともにし，共通言語の進化の過程をシミュレーションにより明らかにしようとした研究が，Koza，Werner と Dyer，および Hashimoto と Ikegami の研究であった．しかし，これらの研究で設定したような低水準の言語から，人間の自然言語のような高水準の言語へ遺伝的に進化させることは，現段階では困難であると考える．

これらの研究を踏まえ，本研究の立場について述べた．本研究の目的は，自然言語の大

域的な変化の過程をシミュレートすることを通して，そのメカニズムを明らかにしようというものであった．さらに，そこで得られた知見から，自律的なエージェントの言語獲得のモデルを構築しようというものであった．この目的を実現するため，本研究のモデルでは，より人間のコミュニティに近い枠組を持つマルチエージェント・モデルを用いることとした．

次に，第3章 **文法理論を制約として用いたエージェント群による共通言語の組織化**では，言語学における研究成果である GPSG（Generalized Phrase Structure Grammar）の文法理論を用いたマルチエージェント・モデルを提案した．本モデルでは，文法獲得のレベルの異なる，大人エージェントと子供エージェントによるコミュニティを仮定した．つまり，GPSG におけるフィチャー構造を十分に獲得している大人エージェントと，獲得の不十分な子供エージェントを仮定し，これらのエージェントがコミュニケーションを行なうことにより，共通文法が組織化される過程について述べた．実験の結果，子供エージェントと大人エージェントがともに文法を改編し，共通文法を形成していく過程をシミュレートできた．さらに，自然言語の特徴の 1 つである，融通性を実現することができた．しかし，本モデルでは，文法理論をエージェントの制約として用いたため，エージェントの発話・学習・理解の能力が制限され，それゆえにコミュニティにおける共通言語にも分化のような動的な変化が見られなかった．したがって，本研究と比較対照するためにも，細かな文法的な仮定を捨象し，一般的な認知能力に重きをおいたエージェント・モデルを考える必要がある．

第 4章 **推論機能を有するエージェント群による共通文法の組織化**では，エージェントの推論機能と共通文法の組織化との関係について調べた．具体的には，自然言語の適応性と頑健性を実現するため，エージェントにアブダクションとインダクションという 2 つの推論機構を統合した機能を持たせ，そのエージェント同士のコミュニケーションにより共通文法が組織化される過程について調べた．実験の結果，2 つの推論機構を統合することによる有効性，および，非同時性に基づくコミュニティにおいて共通文法の頑健性が示された．さらに，多数のコミュニティを結合した実験により，共通文法の融合と分化の過程が示された．これらの実験結果は，いくつかの点で，自然言語現象の特徴を実現したものとなった．これらの実験結果から，自然言語の変化は，それが持つ適応性ゆえに不可避のものであると考えることができる．つまり，自然言語の適応性は，その言語を有するコミュニティに対して利益をもたらすとともに，言語が分化しコミュニケーションが成り立たな

くなるという不利益をももたらすことになる．

さらに，第5章 **共通言語の組織化と語彙の変化**では，言語が融合・分化する過程での語彙の変化を対象としたモデルを提案した．これまでの章における研究では，共通「文法」の組織化が中心的な課題であった．しかし，言語の変化を扱う上で，当然，語彙の問題を避けて通ることはできない．語彙を扱う場合は，その意味を扱わなければならず，それに関わる状況依存性や曖昧性の問題を解消しなくてはならない．そこで，本章では，類似に基づく語彙獲得の方法を用いることで，その意味を直接的に扱うことなく，語彙の変化の過程をモデル化した．本章では，このモデルを用いて，エージェントが状況に応じて語彙を獲得していく過程，および，言語が融合・分化する過程での大域的な語彙の変化の過程について，ある具体的な状況を仮定して，説明を行なった．さらに，第4 章の文法のモデルと統合することにより，より人間の言語行為を模擬するようなモデルを構築することが可能であることを示した．

最後に，第6章において，これまで述べてきた本研究の結果を踏まえ，第2章で提起した問題を中心に議論を行い，本研究の意義を明確にした．さらに，本研究の問題点として，本モデルの認知科学的妥当性について議論を行なった．また，本研究の工学的応用の可能性として，いくつかの例を上げ議論を行なった．

謝辞

本研究を行なう上でご指導，ご助言をいただきました北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科國藤進教授，東条敏助教授，佐藤理史助教授に深く感謝いたします．

國藤教授には，研究を進める上での姿勢や，研究方法についてご助言，激励をいただきました．東条助教授には，本論文の内容の中心である，共通言語の組織化について，ご指導および議論をしていただきました．また，佐藤助教授には，研究者としての基本的な考え方についてご教示いただき，さらに，感情の計算モデルに関する研究についてご指導いただきました．

ここに深い感謝の意を表します．

参考文献

[1] Anderson, J.R.: *The Architecture of Cognition*, Harvard University Press (1983).

[2] Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books (1984).

[3] Anderson, J.R.: Induction of augmented transition networks, *Cognitive Science*, Vol.1, pp.125-157 (1977).

[4] Bickerton, D. *Roots of Language*. Karoma, Ann Arbor (1981).

[5] Bickerton, D. Creole languages and the bioprogram. In *Linguistic Theory: Extensions and Implications*, F.J. Newmeyer, Ed., vol.2. Cambridge University Press, Cambridge, MA, pp.268-284 (1988).

[6] Brill, E. and Marcus, M.: Automatically acquiring phrase structure using distributional Analysis, *Proceedings of the DARPA Speech and Natural Language Workshop*, pp.155-159, Morgan Kaufmann (1992).

[7] Brill, E.: Automatic grammar induction and parsing free text: A Transformation-based approach, *Proc. 31st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp.259–265 (1993).

[8] Chomsky, N.: *Reflections on Language*, Pantheon Book (1975).

[9] Chomsky, N.: Principles and parameters in syntactic theory, N.Hornstein and D.Lightfoot (Eds.), *Explanation in Linguistics*, pp.32-75, Longman (1981).

[10] Chomsky, N.: *Knowledge of Language: Its Nature, Origin, and Use*, Praeger (1986).

[11] Frank, R.H.: *Passions within Reason – The Strategic Role of The Emotions*, W.W.Norton & Company (1988).

[12] Gazdar, G., Klein, E., Pullum, G.K. and Sag, I.A.: *Generalized Phrase Structure Grammar*, Harvard University Press (1985).

[13] Gordon, P.: Learnability and feedback: A commentary of bohannon and stanowicz. *Developmental Psychology* (1989).

[14] Grimshaw, J. and Pinker, S.: Positive and negative evidence in language acquisition. *Behavioral and Brain Science.* (1989).

[15] Hashimoto, T. and Ikegami, T.: Evolution of symbolic grammar systems, *Third European Conference on Artificial Life*, pp.812-823, Springer, 1995.

[16] Hashimoto, T.: *Evolution of Code and Communication in Dynamical Networks*, Doctoral dissertation, University of Tokyo (1996).

[17] Hill, J.C.: A model of language acquisition in the two-year-old, *Cog. Brain Theory*, Vol.6, No.3 (1983), pp.287-317.

[18] Jefferson, D., Collins, R., Cooper, C., Dyer, M., Flowers, M., Korf, R., Taylor, C., and Wang, A.: Evolution as a theme in artificial life: The genesys/tracker system, in C.G. Langton et al. (Eds.), *Artificial Life II*, pp.549-578, Addison-Wesley, 1991.

[19] Kakas, A.C. and Mancarella, P.: Generalized stable models: a semantics for abduction. In *Proceedings of 9th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI '90*, pp.385–391 (1990).

[20] Karov, Y. and Edelman, S.: Similarity-based word sense disambiguation. Weizmann Institute of Science, *CS-TR 96-05* (1996).

[21] Koza, J.R.: Genetic evolution and co-evolution of computer programs, in C.G. Langton et al. (Eds.), *Artificial Life II*, pp.603-629, Addison-Wesley, 1991.

[22] Labov, W.: *Social Stratification of English in New York City*, Center for Applied Linguistics.

[23] Labov, W.: Field methods of the project on linguistic change & variation, in J. Baugh & J. Sherzer (Eds.), *Language in use*, pp.28–53, Prentice Hall (1991).

[24] Langton, C.G. (Ed.): *Artificial Life*, Addison-Wesley (1989).

[25] Lindgren, K.: Evolutionary phenomena in simple dynamics. In C.G. Langton et al. (Eds.), *Artificial Life II*, pp.295–312, Addison-Wesley (1991).

[26] MacLennan, B.: Synthetic ethology : an approach to the study of communication. In C.G. Langton et al. (Eds.), *Artificial Life II*, pp.631-658, Addison-Wesley (1991).

[27] Oehrle, R.T., Bach, E. and Wheeler, D.: *Categorial Grammars and Natural Language Structures*, D.Reidel Publishing Company (1988).

[28] Ono, T., Tojo, S. and Sato, S.: Common language acquisition by multi-Agents, *International Computer Symposium (ICS'96), Proceedings on Artificial Intelligence*, pp.218–223, (1996).

[29] Pereira, F. and Schabes, Y.: Inside-outside reestimation from partially bracketed corpora, *Proc. 30th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp.128–135 (1992).

[30] Pinker, S.: Language acquisition, In M.I. Posners (Ed.), In *Foundations of Cognitive Science*, MIT Press (1989).

[31] Pinker, S.: *The Language Instinct*, HarperPerennial (1994).

[32] Ray, T.S.: Evolution, complexity, entropy and artificial reality. *Physica 75D*, pp.239–263 (1994).

[33] Romaine, S.: The evolution of linguistic complexity in pidgin and creole languages, In *The Evolution of Human Languages*, J.A. Hawkins and M. Gell-mann, Eds., Vol.11 of *Santa Fe Institute studies in the science of complexity*, pp.213–238, Addison-Wesley, Redwood City (1992).

[34] Todd, L.: *Pidgins and Creoles*, Routledge & Kegan Paul, 1974.

[35] Werner, G.M. and Dyer, M.G.: Evolution of communication in artificial organisms, in C.G. Langton et al. (Eds.), *Artificial Life II*, pp.659-687, Addison-Wesley, 1991.

[36] Winograd, T.: *Language as a cognitive process*, Addison-Wesley, 1983.

[37] The XTAG Research Group: A lexicalized tree adjoining grammar for English, *IRCS Report 95-03*, University of Pennsylvania (1995).

[38] 安西 祐一郎・石崎 俊・大津由起雄・波多野誼余夫・溝口文雄 (編): 認知科学ハンドブック, (第 1 編 相互作用, pp.11-77), 共立出版 (1992).

[39] 有田 隆也，海野 敬一，川口 喜三男：自己組織系集団による通信の進化の試み，情報処理学会論文誌，Vol.36，No.4，pp.859-867（1995）.

[40] 郡司 隆男: 生成文法と計算, (往住 彰文 著, 心の計算理論, pp.139-161), 東京大学出版会, 1991.

[41] 橋田 浩一，大津 由起雄，田窪 行則，杉下 守弘:岩波講座 認知科学 7，岩波書店（1995）.

[42] 日比谷 潤子： 通時的側面からみたガ行子音の破裂音化，慶応義塾大学言語文化研究所紀要，21，pp.205–212（1989）.

[43] 日比谷 潤子： 第 2 章 音韻バリエーション，安西 祐一郎・石崎 俊・大津由起雄・波多野誼余夫・溝口文雄（編），認知科学ハンドブック，第 VII 編 言語，pp.325–333，共立出版 （1992）.

[44] 亀井 孝・河野 六郎・千野 栄一: 言語学大辞典 – 世界言語編, 三省堂 (1996).

[45] 北村 美穂子・松本 裕治: 対訳コーパスを利用した翻訳規則の自動獲得, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.6 (1996), pp.1030-1040.

[46] 森 信介，長尾 眞：タグ付きコーパスからの統語規則の獲得，情報処理学会論文誌，Vol.37，No.9，pp.1688–1696 (1996).

[47] 長尾 眞，佐藤 理史，黒橋 禎夫，角田 達彦：自然言語処理，岩波書店（1996）.

[48] 錦見 美貴子・中島 秀之・松原 仁: 一般学習機構を用いた言語獲得の計算機モデル, 認知科学の発展, Vol.5, pp.143-185, 講談社, 1992.

[49] 小野 哲雄・東条 敏: マルチエージェント・モデルによる文法の獲得, マルチエージェントと協調計算研究会 (日本ソフトウェア科学会) 発表資料, 1995.

[50] 東条 敏: 自然言語処理入門, 近代科学社, 1988.

発表論文リスト

[1] 小野哲雄，東条敏（1997）：推論機能を有するエージェント群による共通文法の組織化,『人工知能学会誌』,（投稿中）.

[2] 小野哲雄，佐藤理史（1995）：免疫システムのメカニズムを用いた感情の計算モデル,『認知科学』，Vol.2，No.3，pp.48-65.

[3] Tetsuo Ono, Satoshi Tojo & Satoshi Sato (1996): Common Language Acquisition by Multi-Agents, *International Computer Symposium (ICS'96), Proceedings on Artificial Intelligence*, pp.218–223.

[4] 小野哲雄，東条敏，佐藤理史（1996）：マルチエージェント・モデルによる文法の獲得，認知科学会，第 13 回大会論文集，pp.52-53.

[5] 小野哲雄，東条敏（1995）：マルチエージェント・モデルによる文法の獲得，ソフトウェア科学会，第 5 回マルチエージェントと協調計算ワークショップ（MACC'95）.

[6] 小野哲雄，佐藤理史（1994）：免疫システムに基づく感情の計算モデル，情報処理学会，第 49 回全国大会論文集（2），pp.309-310.

[7] 小野哲雄，佐藤理史（1994）：免疫システムに基づく感情の計算モデル–「こころ」と「からだ」の「自己」と「非自己」–，認知科学会，第 11 回大会論文集，pp.178-179.

[8] 小野哲雄，佐藤理史（1993）：機械感情の実現に向けて – 免疫システムと交流分析に基づく計算モデル –，認知科学会，学習と対話研究分科会，SIGLAL93-2，pp.21-30.

[9] Tetsuo Ono, Satoshi Tojo & Satoshi Sato (1996): Common Language Acquisition by Multi-Agents, *JAIST Research Report*, IS-RR-96-0022I.