

Title	再分析と類推に着目した文法化のモデル構築
Author(s)	中塚, 雅也
Citation	
Issue Date	2006-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/587
Rights	
Description	Supervisor: 橋本 敬, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

再分析と類推に着目した
文法化のモデル構築

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識システム基礎学専攻

中塚 雅也

2006 年 3 月

修 士 論 文

再分析と類推に着目した 文法化のモデル構築

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識システム基礎学専攻

450052 中塚 雅也

指導教員 橋本 敬 助教授

審査委員	橋本 敬	助教授 (主査)
	中森 義輝	教授
	下嶋 篤	助教授
	林 幸雄	助教授

提出年月: 2006 年 2 月

概 要

本研究は、文法化を言語進化の枠組みから捉え、文法化の背後にある認知メカニズムを明らかにすることを目的として、構成的モデルを用いた検討を行った。

文法化とは、名詞や動詞などの具体的な内容を表す語（内容語）が、助動詞や接続詞などの文法的な機能を担う語や要素（機能語）に変化していく言語変化現象である。文法化を起こす認知メカニズムを明らかにするためには、構成的モデルを用いた検討が有効である。本研究は、モデル化に当たって、認知言語学において Hopper and Traugott (2003) が述べている再分析と類推に着目した。特に、これらの再分析と類推を認知能力と捉え再定義した。同時に、Kirby (2002) の合成性のモデルを認知能力の観点から分析した。その結果、再分析と類推の認知能力が Kirby モデルの学習機構に前提とされていることがわかった。

この分析に基づいて、本研究では Kirby モデルの拡張として文法化のモデルを構築した。その拡張とは、Kirby モデルに機能語の意味として時制を設定することと、Kirby モデルにおいては等質であった意味空間に認知主体の意味理解の傾向を設計することである。

具体的には、文法化のうち、‘go’を意味する形式が‘future’の意味を表す形式へと変化する文法化について検討した。このような文法化について、認知主体の意味理解の構造を次のように設計した。

1. 変化元の意味‘go’が指し示す意味領域が、他の形式が指し示す意味領域と重なりをもつ。
2. 文の意味に‘go’の意味が含まれる文は、未来の文（意味に‘future’を含む文）であることが多い。

1により、‘go’を意味する形式が、他の意味へと変化しやすくなることを確認した。また、2により、‘go’を意味する形式が、‘future’の意味へと変化しやすくなることを確認した。

この結果に基づき、本研究は人間の言語に見られるような方向性をもった文法化が起こるための十分条件だと強く推定される条件として、以下を主張する。

1. 認知主体が、状況や形式から類似点を見出せる能力をもつこと
2. 認知主体が、1に基づき自ら文の区切りを推論できる能力をもつこと
3. 認知主体が、自ら発見した新しい形式をほかの知識に対しても拡大適用できる能力をもつこと
4. 変化元の内容語の形式が、多くの他の意味を表す形式と、意味領域の重なりをもつこと

5. 変化元の内容語が指し示す意味が、変化先の機能語の意味を含んだ文脈でよく出現すること

また、本研究で観察された型の文法化は、以下のような過程を経て起こることが明らかとなった。

1. 変化元の内容語に同義語が存在する。
2. その同義語が、変化元の内容語が担っていた役割を果たすようになる。
3. 変化元の内容語は、元来の意味を表す必要がなくなる。
4. 世代を経て、変化元の内容語の役割が変化したり、意味を喪失したりする。
5. 世代を経て、意味を喪失した語が変化先の機能語的な意味に変化する。

この結果に基づき、本研究は、同じ役割を持つ語が複数存在することにより一方が元来の役割を果たす必要がなくなり、意味を喪失し新しい機能的な意味をもつようになる、という過程を経て起こる種類の文法化が存在する可能性を主張する。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的、立脚点および手法	3
1.3	本論文の構成	4
第2章	関連研究と本研究の位置づけ	6
2.1	言語学における文法化	6
2.1.1	文法化の定義	6
2.1.2	文法化の経路の例	8
2.1.3	文法化の背後にある人間の認知的能力への言及	9
2.1.3.1	認知言語学における文法化	9
2.1.3.2	語用論的推論と文法化	10
2.2	再分析と類推	11
2.2.1	変化現象としての再分析と類推	11
2.2.2	認知能力としての再分析と類推	13
2.3	言語進化研究における文法化	14
2.3.1	言語進化と言語変化	15
2.3.2	言語進化研究としての文法化研究	16
第3章	文法化のモデルを構築するための定義と考察	17
3.1	Kirby モデル	17
3.1.1	言語の合成性	17
3.1.2	意味と文法の定義	18
3.1.2.1	意味	18
3.1.2.2	文法：確定節文法	20
3.1.2.3	文	20
3.1.2.4	意味と文の結合	20
3.1.2.5	ルールの意味と種類	21
3.1.3	学習：chunk、merge、replace	21
3.1.3.1	chunk	22
3.1.3.2	merge	23
3.1.3.3	replace	24

3.1.4	知識伝達の枠組み：繰り返し学習モデル	25
3.1.5	Kirby (2002) が示したことの解釈	27
3.2	なぜ Kirby モデルが文法化のモデルとして利用できるのか	29
3.2.1	chunk が前提とする認知能力	29
3.2.2	merge が前提とする認知能力	30
3.2.2.1	言語学的類推による表現力の増加に関する重要な注意	32
3.2.3	replace が前提とする認知能力	32
3.2.4	chunk、merge、replace の認知能力的な関係	34
3.2.5	Kirby モデルが文法化のモデルとして作用するとする根拠	35
第 4 章	予備実験	36
4.1	実験設定	36
4.2	結果	38
4.3	考察	42
4.3.1	観察された意味変化現象と文法化との関係	42
4.3.2	文法化のモデルとしての Kirby モデルに足りないものは何か	43
4.3.3	語彙範疇を越えた意味変化が起こるプロセス	44
4.3.3.1	役割変化のプロセス	45
4.3.3.2	意味喪失のプロセス	46
4.3.3.3	意味獲得のプロセス	48
4.3.3.4	語彙範疇を越えた意味変化現象のプロセスのまとめ	49
4.3.4	文法化に向けて	50
4.3.4.1	本研究のモデルが表現することのできる文法化の型	51
4.3.4.2	文法化実験に向けたモデルの変更	51
第 5 章	文法化実験	53
5.1	文法化モデルの定義	53
5.1.1	時制要素	53
5.1.2	意味要素間の関係	54
5.1.2.1	意味の取り違い	55
5.1.2.2	意味の共起頻度	56
5.1.2.3	意味の貸し借り	56
5.2	実験設定	57
5.2.1	共通の設定	57
5.2.2	文法化を含む意味変化の経路の数え方	59
5.3	結果	61
5.3.1	各試行間の変化経路数の特徴	61
5.3.2	実験 1：意味要素間の関係が全くない実験の結果	62
5.3.3	実験 2：学習エージェントが replace をしない実験の結果	65

5.3.4	実験 3：意味の取り違えが設定された実験の結果	67
5.3.5	実験 4：意味の共起頻度が設定された実験の結果	69
5.3.6	実験 5：意味の貸し借りが設定された実験の結果	72
5.3.7	実験 6：共起頻度および意味の貸し借りが設定された実験の結果 . . .	75
第 6 章	議論	78
6.1	有効な意味空間の設計	78
6.1.1	それぞれの意味空間設計のモデル内での役割	78
6.1.2	意味の貸し借り	81
6.2	意味の取り違えがなぜ有効でなかったのか	82
6.3	学習における replace の重要性	83
6.4	意味が完全に共有されることによる意味空間設計への制限	86
6.5	文法推論アルゴリズムと再分析と類推の能力	87
6.6	メタファー・メトニミーと再分析・類推の関連	88
6.6.1	Hopper and Traugott (2003) のメタファー的推論とメトニミー的推論	89
6.6.2	本研究における再分析と言語学的類推の能力を導く認知的類推 . . .	91
6.6.3	本研究の意味空間設計とメタファー・メトニミー	91
6.6.4	認知能力から文法化現象を導く過程について本研究が明らかにした こと	93
6.7	言語進化現象としての文法化	93
6.7.1	言語学的類推による文法カテゴリーの統合	94
6.7.1.1	merge による文法カテゴリーの統合	94
6.7.1.2	replace による文法カテゴリーの統合	96
6.7.2	「見たことも聞いたこともない」ことを表現できる言語	97
第 7 章	結論	99
7.1	結論	99
7.2	さらなる課題	101
	謝辞	103
	参考文献	104
	付 録 A 学習の順序による学習経路の変化	107
	付 録 B 予備実験における合成性と文法の収束	109
B.1	最も合成性が進んだ文法	109
B.2	本研究の予備実験における文法の時系列	111
B.3	Kirby (2002) による実験の結果との相違と意味変化現象との関係	117

付 録 C ノンパラメトリック検定	119
C.1 rank の和を用いた分布に依らない検定の原理	119
C.2 具体的な検定の手順	120
付 録 D Chomsky 階層と文脈自由文法	124
D.1 形式文法と Chomsky 階層	124
D.2 文脈自由文法と DCG	125

目 次

2.1	助動詞 be going to の発展の形式	12
3.1	意味【 <i>like(john, mary)</i> 】のための文《abc》を生成できる文法の例	21
3.2	1 型の chunk 操作の具体例	23
3.3	2 型の chunk 操作の具体例	23
3.4	ILM の概念図	26
3.5	(Kirby, 2002) で観察される合成性	28
5.1	行動要素の指示領域に基づいた差異の概念図 (例)	57
5.2	変化経路のカウントの例	59
5.3	連続した変化経路のカウントの例	60
5.4	ある二つの試行における変化経路数の分布	61
5.5	(実験 1) 変化経路の総数	62
5.6	(実験 1) 単語型ルールの総数	63
5.7	(実験 1) 正規化した変化経路数	64
5.8	(実験 1) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化	64
5.9	(実験 2) 変化経路と単語型ルールの総数	66
5.10	(実験 3) 変化経路と単語型ルールの総数	68
5.11	(実験 4) 変化経路と単語型ルールの総数	70
5.12	(実験 4) 正規化した変化経路数	71
5.13	(実験 4) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化	71
5.14	(実験 5) 変化経路と単語型ルールの総数	73
5.15	(実験 5) 正規化した変化経路数	74
5.16	(実験 5) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化	74
5.17	(実験 6) 変化経路と単語型ルールの総数	76
5.18	(実験 6) 正規化した変化経路数	77
5.19	(実験 6) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化	77
6.1	意味変化総数の比較	79
6.2	go から機能語になる意味変化経路の各実験設定間の比較	80
6.3	各オペレーションの回数	84
6.4	replace のない実験における各オペレーションの回数	85

6.5	文法化の背後にある認知能力と本研究が対象とした範囲（概念図）	94
A.1	学習の検索順序による内訳の変化	108
A.2	学習の検索順序による学習の相関	108
B.1	予備実験における文法の時系列 1	111
B.2	予備実験における文法の時系列 2	112
B.3	予備実験における文法の時系列 3	113
B.4	予備実験における文法の時系列 4	114
B.5	予備実験における文法の時系列 5	115
B.6	予備実験における文法の時系列 6	115
B.7	予備実験における文法の時系列 7	116
C.1	それぞれの rank の和を実現する rank の組の数	122

表 目 次

2.1	典型的な文法化の変化	8
3.1	意味要素設定の例	18
3.2	chunk、merge、replace が前提としている認知能力	34
4.1	予備実験における意味要素設定	36
4.2	4 世代目の発話後の知識 (単語型ルール)	38
4.3	7 世代目の学習後の知識	39
4.4	16 世代目の学習後の知識	40
4.5	19 世代目の学習後の知識 (単語型ルール)	41
4.6	355 世代目 (収束時) の学習後の知識	41
4.7	第 6 世代のエージェント (親) の発話とそれに用いた知識	45
4.8	第 15 世代のエージェント (親) の発話とそれに用いた知識	47
4.9	第 18 世代のエージェント (親) の発話とそれに用いた知識	49
4.10	観測される意味変化の種類	51
5.1	実験条件	58
5.2	文法化実験における意味要素設定	58
6.1	有効な意味設計とその役割	81
B.1	最も合成性が進んだ文法 $(G_{c0} , \varepsilon) = (11, 100)$ の一般形	109
B.2	作用主名詞と被作用主名詞を含む安定的な文法 $(G_{c1} , \varepsilon) = (17, 100)$ の一般形	110
B.3	最大の表現度を有した最小の文法 $(G_0 , \varepsilon) = (10, 100)$ の具体例	112
B.4	安定状態でみられる文法 G_1	116

第1章 はじめに

本研究は、文法化を言語進化の枠組みから捉え、文法化の背後にある認知メカニズムに迫るため構成的手法に基づいた検討を行うものである。

本章では、研究の背景として、文法化という言語変化現象を従来の研究がどう扱っているのか、なぜ本研究が文法化を扱うのかについて述べる。その上で、本研究がどのような立場に立脚し、どのような手法で、文法化の何を明らかにしようとするのかを明確にする。最後に、本論文の構成を示す。

1.1 研究の背景

言語の変化現象として、文法化 (grammaticalization) と呼ばれる現象がある。文法化とは、名詞や動詞などの具体的な内容を表す語 (内容語と呼ばれる) が、助動詞や接続詞などの文法的な機能を担う語や要素 (機能語と呼ばれる) に変化していくこと、あるいはその変化過程のことをいう (Heine, 2005)。

文法化は言語学の対象として盛んに研究されている。その理由は、文法化という現象が、どのようにして文法的形式や構造が現れ、どのようにして言語が形作られていくのかを知る手がかりとして興味深いからである。また、語彙が厳密に範疇に分離しにくいものであること、言語の形式と意味とが分けがたいものであることを示す証拠として、認知言語学の対象として注目されていることも理由である。

文法化には非常に重要な特徴がある。それは、時代や地理的關係や語族の關係などに関わらず、世界中のあらゆる場所のあらゆる時代において、同じような変化経路が確認されていることである。このことから、文法化は、人間に共通の認知傾向と言語現象とが密接に関わっていることを示すものと捉えられている。

言語学における文法化研究の流れは、大きく分けて三種類ある。第一の研究の流れは、文法化の重要な特徴である同じような変化経路を収集することを目的とした言語類型論的な研究である。このような研究では、さまざまな地域で用いられている現在の語から拾い出し、現存する世界中の歴史的な文献から時代を追って変化経路を追う。第二の研究の流れとして、そのように収集した文法化の証拠から、共通の法則性を見出す研究がある。そのような研究の大きな成果として、文法化の一方向性仮説がある。文法化の一方向性仮説とは、文法化の変化を時間に沿って見たとき、いったん文法化が始まると、その後の変化の方向には強い制限があるということである (Hopper and Traugott, 2003)。すなわち変化が逆流することはほとんどなく、言語はある決まった道筋に沿って変化していく。

最後に、三番目に挙げられるのが、文法化の変化方向に対する制限はどこから来るのかを考える流れである。

この第三の流れの疑問に対しては、認知言語学の立場からいくつかの仮説が提唱されている。それらの仮説は、文法化が同じ方向へ変化しやすいという特徴を文法化が持つのは、文法化という言語現象の背後に人間に共通な意味理解の方法や認知の傾向があるからではないか、ということを述べている。例えば、多くの認知言語学の研究者は、文法化の変化の方向性が言語および言語以外の認知行動の変化とよく似ていると指摘している。また、文法化によく見られる具体的な意味を喪失する過程（漂白と呼ばれる）には、話し手と聞き手の間で意味を推論する語用論的推論（2.1.3.2 節）が関わっているといわれており、その推論の傾向は文法化の変化の傾向とよく合致することが指摘されている（2.1.3 節）。これらの議論¹により、文法化に一方向性が見られるのはこの推論の傾向が実際の言語の変化の傾向として表出するためであろうとする考えが一般的である。さらに Hopper and Traugott (2003) は、メタファー（比喻）に加え、文法化およびその重要なメカニズムである再分析²が、概念と概念との間のメトニミー（換喩）を基盤として起こると主張している（6.6.1 節）。

以上のように、いくつかの証拠から、推論能力や比喻能力などに類する人間の認知的な能力が文法化の背後にあることが強く推定され、仮説として主張されている。しかし、これらの仮説を実際に検証することは難しい。なぜなら、実験を行うことができないからである。

どのような条件があれば文法化が起こるのかは、条件を変えて実験することによって確認できる。しかし、文法化にどのような認知メカニズムが効いているのかを、認知能力を限定した人間集団を作って確かめるなどということはできない。つまり原理的に操作的実験が困難である。また、文法化のような言語の変化が起きるには、一般に比較的長い時間を要することも実験が難しい理由となる。かつて話されていた言語の記録をさかのぼることも、文献に残っている時代までという制限がある。しかも、それで得られるのは表面に現れた記録に過ぎず、認知メカニズムについてはやはり推定の域を脱しない。また、条件を変えて何度も言語の歴史を繰り返し、その変化を観察することはできない。さらに、文法化が起こらない条件を確認することも不可能である。これらの実験不可能性は、文法化が歴史性及び一回性を持つ現象であることからくるものである。

しかし、そのような困難を越えてでも、文法化の背後にある認知メカニズムを知ることが重要である。なぜなら、人間の用いる言語が、その起源における単純なものから現在用いられているような体系を持った言語へと複雑化する言語進化の過程³に、文法化が寄与している可能性が高いからである。すなわち進化言語学の立場から見ると、文法化とはど

¹詳細は 2.1 節で紹介する。

²Hopper and Traugott (2003) のいう（あるいは言語学者が文法化及びそれに類する言語変化一般に言及する際に使う）「再分析」の意味については 2.2 節で詳述する。

³人間の言語がその起源において、現在の言語より単純なものであったとする証拠はもちろん存在しない。しかし本研究は、進化言語学の立場から、人間の言語が複雑化して現在の形になったとする仮説に立脚する。その詳細については 2.3 節参照。

のように言語に新たな範疇が生まれ言語がより複雑な形式と機能を有していくのかを知る重要な手がかりである。また、文法化の一方向性は、言語がその起源においてどのような性質を備えていることを要求されるかを考える上で、多くの示唆を与える (Heine and Kuteva, 2002a; Hurford, 2003)。すなわち、進化言語学としての文法化研究により、言語の起源とそこからの進化に関しての考察が大きく前進するものと期待されている。そのような意味で、進化言語学の立場からも文法化研究の重要性が指摘されている (2.3 節)。

文法化が言語の進化の一因になっているとするならば、文法化を引き起こす認知メカニズムを明らかにすることは、言語の進化の一部を説明する認知メカニズムに言及することになる。進化言語学の立場から文法化を研究する意義はそこにある。逆に言えば、文法化を引き起こす認知メカニズムに言及できなければ文法化研究の進化言語学的な意義は薄いと言える。

本研究は、言語の進化という文脈で文法化を捉える。従って、文法化の背後にある認知メカニズムについて言及することを目指す。しかし前述したように、文法化が起こる認知メカニズムについては、仮説はあるがそれを実験によって確かめることが困難であるという事情がある。そこで本研究では、計算機によって構成的に文法化実験を行うために、文法化のモデル化を行うものである。

1.2 研究の目的、立脚点および手法

本節では、前節 1.1 で述べた文法化研究の背景を踏まえ、本研究がどのような立場に立脚し、どのようなアプローチにより、文法化の何を明らかにすることを目指しているのかについて明確にする。

研究の目的を示す。本研究は言語進化の立場から文法化を捉え、文法化を起こす認知メカニズムを明らかにすることを目的とする。文法化を起こす認知メカニズムについて知るには、構成的手法に基づいた文法化シミュレーションを行うことが有効である。本研究は、構成的な実験と解析を通じて、以下を目指すものである。

1. 文法化を起こすと考えられる認知主体および知識伝達のモデルを構築する。
2. どのような条件で文法化が起こるのかを明らかにする。
3. どのような過程で文法化が起こるのかを明らかにする。

以上の目的を達するために、本研究は具体的には次のような立場に立脚する。文法化のメカニズムとしては、Hopper and Traugott (2003) の再分析と類推 (2.2 節) に依拠する。これらのメカニズムを認知メカニズムと捉えて実装する (2.2.2 節)。知識伝達のモデルとしては、繰り返し学習モデル (3.1.4 節) の枠組みを用いる。繰り返し学習モデルを用いた言語進化のモデルである Kirby (2002) の合成性モデル (3.1 節) をベースに文法化のモデルを構築する。

以下では、本研究の文法化へのアプローチである構成的手法について述べる。構成的手法の一般論について述べる。構成的手法とは、対象としている現象から本質的と思える部分を取り出してシステムを構成し、それを動かすことによって現象の起こる論理を明らかにしようとするアプローチを言う(橋本, 2002)。一般的には計算機シミュレーションやロボットのシステムに実装することで動かす方法が採られる。構成的手法は、相互作用が本質的な変化要因であるために多くの変数の時間的な作用を観察する必要がある現象や、歴史性・一回性があるために実験を繰り返すことが困難な現象の理論を構築するのに有効である。なぜなら、システムの初期状態・変化要因の設計・パラメータの設定などをさまざまに変えて、どのような条件でどのような変化過程を経てどのような結果にいたるかを調べることができるからである。

上述したように、本研究は文法化の起こる過程および条件を明らかにすることを目的のひとつとしている(目的 2,3)。構成的手法を用いることにより、どのような条件で文法化が起こるのか、どのような過程で文法化が起こるのかを調べることができる。また、そのような文法化へのアプローチを可能にするために、文法化から本質的と思える部分を取り出して、文法化を表現できるシステムを構成することそのものも目的のひとつとしている(目的 1)。

ただし、本研究で提示された条件によって、本研究がモデル化できたタイプの一部の文法化の変化を起こすことができる可能性があるけれども、文法化が起こるには提示された条件が必要不可欠であることを示すことはできない。すなわち、本研究が構成的手法によって示そうと試みる「文法化の起こる条件」とは、一部のタイプの文法化が起きる十分条件に過ぎない。これは構成的手法による研究が必然的に孕む限界である。文法化が起こるのに必要な条件、あるいは文法化を規定できるような必要十分条件がどのあたりに存在するのかを探求するためには、今後行われる多くの別の構成的手法による文法化研究群によって、十分条件の範囲が狭まり、かつそれらの研究が示そうとする文法化の型の範囲が広がっていくことが必要である。本研究もその一部となることを目指すものである。

上述のように、構成的手法による研究には必然的な限界があるため、構成的モデルを用いた研究では一般に、対象を一度にすべてモデル化しようとはせず、対象のサブシステムのモデル化を行いそれを統合するというプロセスをとることが多い。すなわち、構成的手法による研究群によって対象の一部がそれぞれモデル化され、それらが統合された研究プログラムによって対象の全体が少しずつ明らかになっていき、理解できるようになっていく。しかし、文法化のモデル化については、その重要性が指摘されていながら実際には未だなされていない。本研究は、文法化を理解するためのそのような研究プログラムの端緒を開くものである。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を概説する。本章に続いて、第2章では文法化を取り扱った関連研究について述べる。ここでは主に、認知言語学からの文法化への言及と、進化的言語学からの文法

化への言及についてそれぞれ述べ、その中での本研究の位置づけを明確にする。またこの中で、本研究が着眼点とする再分析と類推の説明と定義を行う。続いて第3章では、本研究が文法化の構成的なモデルのベースとする Kirby (2002) の合成性のモデルについて詳述する。本研究のモデルの詳細のほとんどはこの第3章での定義に従う。続く第4章では、Kirby (2002) のモデルを用いた予備実験を行う。また予備実験結果を踏まえた考察を行い、文法化のモデルへの拡張を行う。第5章では拡張されたモデルを用いた文法化実験を定義し、その実験結果を示す。第6章では、第4章の予備実験の結果および第5章の文法化実験の結果を踏まえた議論を行い、第7章に結論を置く。

本研究に用いる文法化のモデルは、Kirby (2002) のモデルの拡張である。そのため、本研究に用いるモデルの詳細を把握するためには、第3章において示す Kirby (2002) のモデルの詳細を参照した上で、その拡張部分について第5章を参照していただきたい。

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

前章では文法化研究の背景と文法化研究全体に対しての本研究の立場を述べた。それらは以下のようにまとめられる。

- 文法化は主に認知言語学の対象として研究されており、文法化の背後には人間に共通な認知メカニズムがあると主張されている。
- 文法化は言語変化現象である。しかし、その認知メカニズムを明らかにすることは言語進化の立場からも重要である。
- 本研究は文法化を言語進化の立場から捉える。認知言語学で述べられている文法化の機構（再分析と類推）を用い、言語進化研究の枠組みでシミュレーションする。

これを受けて本章では、本研究の位置づけをさらに明確にするために各分野における文法化に関する先行研究を紹介する。同時にそれらの本研究における捉え方について言及し、文法化やそのメカニズムに関する定義を行う。最初に、歴史言語学や認知言語学において文法化が現象としてどう捉えられてきたかを述べ、本研究における現象としての文法化の定義を行う。また特に認知言語学において、文法化の起こる機構や人間の認知メカニズムについての仮説に言及している文法化研究を紹介する。続いて本研究が文法化の機構として採用する Hopper and Traugott (2003) の再分析と類推を説明する。その上でこれらの機構の本研究における採用の仕方について述べる。最後に、進化言語学から文法化にどう言及されているかを紹介する。

2.1 言語学における文法化

2.1.1 文法化の定義

本研究は構成的モデルを用いた文法化研究である。従って、モデル上で扱われる言語に何らかの言語現象が現れたとき、それを文法化だと判定する必要がある。すなわち、本研究における文法化は、一般的な定義に基づきつつ、本研究において判定可能な程度に限定的に定義される必要がある。本節ではこの定義を行う。

一般的な文法化の定義について確認する。“grammaticalization” という術語を作った Antoine Meillet (1912, *L'évolution des formes grammaticales.*) の定義では、文法化は「文法的特徴をもとの自立語に付け加えること」である(訳: Hopper and Traugott (2003))。

ただし、文法化という現象は、実際に起こっている言語変化現象である。従って、文法化という術語が指し示す内容は研究の時代や研究者によって異なる場合がある。以下では、現在言われている文法化という術語の主たる意味を示す。そして、それに基づき、限定的に本研究における現象としての文法化の定義を示す。

語彙の内容と機能について述べる。語彙（複数の語彙の組み合わせ、または接頭語や接尾語などの語彙の一部を含めた形態素を含む）は、その語彙の指し示す内容と、その語彙が文において果たす文法的な機能とをもつ。語彙によっては、ほとんど具体的な内容を持たず文法的な機能のみを果たす語が存在する。例えば英語における定冠詞の *the* などは、具体的な内容は指し示していない。定冠詞・不定冠詞は、それが係る語に対して以前に言及されたものなのか、初出のもの、あるいは一般的なものなのかを区別するために存在する。これが冠詞の文法的機能である。

Heine (2005) によると、文法化とは、内容的な語が機能的に、機能的な語がさらに機能的に変化していく現象、またはその過程を指す。上で例に挙げた定冠詞 *the* は、指示代名詞 *that* から変化したものと言われている。*that* は代名詞であるからその指し示す具体的な内容を持っている。従って *that* が *the* へと変化する例は文法化であるといえる。

語彙の指し示す内容がよりはっきりしている、例えば動詞・名詞、形容詞などは内容語と呼ばれる。これに対し、語彙の指し示す内容が希薄で文法的な機能のために存在する、例えば助動詞・前置詞・冠詞・助詞などは機能語と呼ばれる。従って現在においては、文法化とは内容語が機能語になっていく現象だと理解されている。ただし、内容語と機能語という言葉の指し示す内容もまた完全に定まっているわけではない。多くの場合に、語彙範疇は境界がはっきりしているとは考えにくく、重なりをもつことが多いからである。内容語と機能語の区分は、一般的には「開かれた」内容語と「閉じられた」機能語として理解されている（秋元他, 2004）。「開かれた／閉じられた」というのは、その語彙範疇に含まれる語の数が「限定されない（多い、増える）／限定的（少ない、めったに増えない）」という意味で使われている。例えば日本語の助動詞は「せる／させる（使役）、れる／られる（受身・可能など）、ようだ（推定など）、そうだ（様態・伝聞）」など十数種類だとされており、このような語はめったなことでは増えたり減ったりしない。機能語は、そのグループから出たり、新たにそのグループへ参加するメンバーがいらないという意味で、閉じられている。一方で名詞や動詞はその指し示す内容に応じていくらかでも考えることができる。すなわち開かれている。内容語・機能語という分類をそれらが指す意味で区分するとはっきりしない場合もあるが、このような「開かれた／閉じられた」という差異は実際に存在するだろうと理解されている。

これらの一般的な定義を限定して用い、本研究における文法化を以下のように定義する。

定義 1（本研究における）現象としての文法化

単語が語彙範疇を越えて内容語から機能語へ変化すること

定義 2 内容語

動詞や名詞など、具体的な動作や対象を指し示す単語

定義 3 機能語

助動詞や前置詞など、様態や時制を表現するのに用いられる単語

一般的な文法化の定義において、日本語の「文法化」という訳語は日本語に訳する際の制約から、“grammaticalization”の“gramatical”のニュアンスが弱くなっている。文法化は文法(grammar)の発生に関する多くの示唆を与えはするけれども、文法化の一般的な定義はgrammarとは直接は関係ない点に注意すべきである。文法化とはgrammaticalization、すなわち「文法的になる変化」である。

2.1.2 文法化の経路の例

文献(Heine and Kuteva, 2002b)に収集されている¹ように、文法化にはどの言語においても同じような内容語が同じような機能語へと変化するという経路が多く発見されている。例えば、Bybee (2003)は、表 2.1 のような文法化の典型例があるとまとめている。

表 2.1: 典型的な文法化の変化

	元来的内容語が示す意味	変化した機能語またはその機能
1	指示詞	定冠詞
2	数字“1”	不定冠詞
3	欲求 / 行く	未来時制
4	知る / 能力を持つ	可能と許可の助動詞
5	終わる / 最後	完了時制
6	体の各部位	各前置詞

表 2.1 を見る上では以下のことに注意すべきである。Hopper and Traugott (2003)によると、文法化においてはいつ始まりどこで完了するかを述べることはできない。言えることは、いったん始まったら方向に強い制限を持ちながら徐々に変化していくということだけである。従って必ずしも現在進行中の文法化がすでに完了し機能語へと変化して(しきって)いるわけではない。また、元来的の意味が必ずしも消滅するとは限らない。すなわち現在は辞書的には多義語として扱われている語で、元来的の意味と文法化によって新たに得た機能とが両方共存していることもあり得る。

このことに注意して、表 2.1 に基づくいくつかの例を挙げる。例えば動詞の will は元は欲求や意志を表す動詞(内容語)であったけれども、現在においては、未来の助動詞としての役割が主である。このような欲求を表す語は英語以外の多くの言語でもその欲求や

¹この文献は、多くの言語学者がそれぞれ挙げてきたさまざまな言語の文法化の例を集め、source-target ごとに分類してまとめている。逆に言えば、文法化の変化経路には分類が可能なある共通性があるということである。

意志という意味を弱めつつ未来の時制を表す語に変化する（表 2.1 3）。表 2.1 6 の体の各部位 → 各前置詞というのは、例えば「頭」が「前方」や「上方」など、「背中」や「足」が「後方」などを表す副詞や助動詞へと主に変化していくことを示している。Heine et al. (1991) は、これら文法化の起点となりやすい語は人間の肉体そのものや基本動作や欲求を表すものであり、文化に依拠しない人間に基本的な事柄であるとしている。

日本語の文法化の例をいくつか挙げる。事実上前置詞や後置詞としてはたらく「～について」や「～において」は、元来は「付く」「置く」などの基本動詞から機能語化した例だといえる（辻, 2002）。また「～するとき、…」といった使い方をする「とき」は、名詞の「時間（time）」を指す名詞「とき」が、「経時（temporal）」すなわちいわゆる“while”の意味として流通している（Heine and Kuteva, 2002b: p298）。また逆接の接続詞「ところが」は、「場所」を表す最も基本的な名詞である「ところ」が場所という具体的な意味を失って接続詞化したものであろう。表 2.1 に沿った例としては、現在では「～したあと」のように空間や時間を表す助辞としてはたらく「あと」がある（表 2.1 6）。日野（2001）によると、万葉集（9 世紀初頭）で「足跡」の意味で使われる「あと」に、源氏物語（11 世紀初頭）では空間的な後方を表す例が出現し、隆信集（12 世紀末）において時間的な後方を表す例がみられるようになる。

Bybee (2003) は、文法化がこのような人間の基本的な事柄から起こりやすいのは、それらの語が繰り返し使われやすいからであるとしている。繰り返し利用されることにより、語用論的推論（2.1.3.2）の効果で文法化が起こるとする考え方が一般的である。次節ではそれらも含めて、文法化の背後に人間の認知的能力があるとする主張を見る。

2.1.3 文法化の背後にある人間の認知的能力への言及

2.1.3.1 認知言語学における文法化

文法化は伝統的には歴史言語学の対象に区分される（辻, 2002）が、現在は、認知言語学の研究者が積極的に文法化に取り組んでいる。認知言語学では、文法化の背後に人間の認知的能力があると捉えている。このように認知言語学で採り上げられるようになった背景のひとつには、文法化という現象が存在するという事実が「言語は人間の認知機能の一つとして扱うべき対象である」とする認知言語学が採る言語へのアプローチの妥当性を（しばしば生成文法理論への反論として）よく補強するものであるということがあろう。確かに文法化は、認知言語学において主張される言語のカテゴリーの連続性や、言語形式と意味との不可分性などをよく裏付けているように見える。

文法化が人間の認知的能力の傾向を反映した言語変化である証拠のひとつとして、文法化の過程に見られる変化が文法化以外の言語変化や、言語以外の認知的な行動の変化に見られる特徴によく似ていることが挙げられている。例えば Haiman (1994) は、文法化の過程にあるよく見られる具体的な意味を喪失していく（漂白される）過程は、儀式化の過程とよく似ていることを指摘している。Bybee (2003) はこれを受けて、文法化の起点となりやすい人間の基本的な事柄を表す語彙は、繰り返し用いられることにより、（人間の

行動全般がそうであるように²⁾ 自動化され簡略化されやすくなるとしている。繰り返しの文法化への効果には、以下に示す語用論的推論が関わっていると考えられている。

2.1.3.2 語用論的推論と文法化

会話においては、話し手が述べる発話が常に完全とは限らない。すなわち話し手は、聞き手にとってその意味が誤解なく完全に一意に理解できるように話すことができるとは限らないし、話し手の真意が字句通りの意味ではない場合もよくある。従って聞き手は常に、意識的にせよ無意識的にせよ、話し手がなぜそのような話を述べているのかを推論しながら聞くことになる。そのため、同じような状況にいつも述べられる言い回しは、元来の意味より、その状況を表す記号として認識されるようになり、言葉が意味を失いやすくなる。2.1.2 節で示したように、Bybee (2003) はこの「漂白」と呼ばれる過程を文法化の文脈において重要視している。

あるいは、同じような含意のある状況に繰り返し使われると、推論によりその含意が強化される。Hopper and Traugott (2003) は、含意が強化され顕在化する過程を重要視している。例えば *be going to* が「行く」の進行形から近未来を表す助動詞として扱われるようになる文法化について考える。Hopper and Traugott (2003) は、*to* 以下の不定詞節が目的の意味を表し、この目的の意味を含んで（進行形の）「行く」の意味が繰り返し使われたことにより、（目的とは近未来に果たすべきものであるという意味で）目的が含意する近未来の意味が、本来そのような意味はもたないはずの *be going to* の形式に宿った、としている。これが含意が強化され意味が顕在化する過程である³⁾。そして、Hopper and Traugott (2003) は、Bybee (2003) の言う意味での漂白はこの意味の顕在化の後に起こるとし、文法化の過程での繰り返しによる語用論的推論の効果は、まず意味の顕在化を引き起こし、そのことにより漂白が導かれると主張している。さらに Traugott (1989) は、繰り返しにおいて語用論的に行われている推論を具体的に調査し、弱くなる意味は空間の動きや位置などの外界の状況を述べたより具体的な（すなわち語彙項目的な）意味であり、強化される意味は意図、評価、知覚、認識などの内部状況を説明する（機能的な）意味である場合がほとんどであると指摘している。

Bybee (2003) の主張と Hopper and Traugott (2003) の主張とは、繰り返しにより導かれるとする過程が少し異なるが、いずれにせよこれらは語用論的推論が文法化の過程に重要な役割を果たすことを主張している。

さらに Hopper and Traugott (2003) は、推論をメタファー的推論とメトニミー的推論とに分け、これらにより、再分析と類推（2.2.1 節）という文法化のメカニズムが起こると主張している⁴⁾。次節ではこの再分析と類推について説明する。

²⁾ 文献 (Bybee, 2003) では、料理の手順や楽器の演奏などが例として挙げられている。

³⁾ Hopper and Traugott (2003) はこの過程を「意味化 (semanticization)」と呼び、メトニミー（隣接性に基づく比喻）の能力と関係して重要であるとしている。その詳細については 6.6.1 節で述べる。

⁴⁾ Hopper and Traugott (2003) の言うメタファー的推論とメトニミー的推論の詳細は、認知能力による再分析と類推の説明に関して重要な議論である。従って、本研究における認知能力としての再分析と類推の定義を行い、その文法化への寄与についての実験データが得られた後、6.6.1 節で説明する。

2.2 再分析と類推

本研究では、文法化の機構として再分析 (reanalysis) と類推 (analogy) を用いる。再分析と類推は、文献 (Hopper and Traugott, 2003) において、文法化に必須の変化現象として述べられている。しかし本研究では、再分析と類推を認知的観点から捉えなおし、これらを認知能力として定義する。

本節ではまず Hopper and Traugott (2003) において述べられている再分析と類推による文法化とはどういうことかを実際の例に基づき述べる。次に本研究が再分析と類推に対して採る立場について述べる。

2.2.1 変化現象としての再分析と類推

Hopper and Traugott (2003) は、再分析は聞き手が話し手の意図していた形とは違った形で言語の構造を理解することにより起こるものだとしている。また再分析が表面上の形式が直接変化せずに起こる内部的な変化であることを強調している。すなわち Hopper らは、表面には現れない内部的な文や単語の区切りの変化を再分析と呼んでいる。再分析をハンバーガー (hamburger) の例で説明する。「(都市の) ハンブルグ (Hamburg) から来た食べ物」という意味で hamburger と呼ばれた食べ物が、「ハム (ham) + burger」と受け取られてしまい、のちにハムの部分をチーズ (cheese) やビーフ (beef) に置き換えた言葉 (チーズバーガー、ビーフバーガー) が流通する、という例が文献 (Hopper and Traugott, 2003) 中に挙げられている (Hopper and Traugott, 2003) 3.3 節 p.50)。ここで hamburger が「ハム (ham) + burger」と受け取られることは、元来の意味とは違った構造化であり、内部的な切れ目の変化である。これが再分析である。

一方類推とは、Hopper and Traugott (2003) によると、ある限定された範囲で適用されていた規則が拡大して適用されることである。また Hopper and Traugott (2003) は、類推は変化を実際に表面化させると述べている。例えば前述の hamburger の例では、「チーズバーガー」や「ビーフバーガー」という言葉が生まれるところが類推に当たる。内部的に hamburger が「ハム (ham) + burger」と受け取られたということ (再分析) は、内的な変化であり、表面からは確認できない。実際にその変化が表面化するのは、新たに生まれたその構造に、既存の「チーズ (cheese)」や「ビーフ (beef)」という単語を適用することにより「チーズバーガー」などの言葉が生まれることで初めて確認される。この新たに生まれた構造に既存の単語を当てはめているところが、規則の拡大適用、すなわち類推の例である。

Hopper and Traugott (2003) のまとめによると、再分析は意味や形態の「深層の構造」を変化させ規則の変化をもたらし、類推は規則の言語体系への拡散を促し「表層の構造」を変化させる。文法化においては第一に再分析、次に類推を重要なメカニズムとして挙げている。

その上で彼らは、文法化が再分析と類推の繰り返し適用により起こることを、be going to の例を用いて説明している。Hopper and Traugott (2003) において再分析、類推と呼ば

れている現象がどのようなものであるかを理解するために、以下で be going to の例を説明する。

				Syntagmatic axis Mechanism: reanalysis
StageI	be	going	[to visit Bill]	
	PROG	Vdir	[Purp. clause]	
StageII	[be going to]	visit Bill		
(by reanalysis)	TNS	Vact		
StageIII	[be going to]	like Bill		
(by analogy)	TNS	V		
StageIV	[gonna] like/visit	Bill		
(by reanalysis)				
				Paradigmatic axis Mechanism: analogy

図 2.1: 助動詞 be going to の発展の形式: (Hopper and Traugott, 2003) p69 より引用。PROG とは進行形、Purp.clause とは目的節、Vdir とは方向性の動詞、Vact とは動作性の動詞、V は動詞、TNS は時制を意味する。

図 2.1 は、“go” という内容語を含んだ be going to という形式が、近未来を表す助動詞としてはたらくように発展していく過程で何が起きているのかを、再分析と類推によって説明しているものである。第一段階として挙げられているのは、元来の意味である。この文は（方向を表す）動詞 [go] の進行形としての [be going] と、目的を表す（いわゆる to 不定詞節）[to visit Bill] からなっている。すなわち「Bill に会うために行っているところだ」という意味である⁵。ここから再分析によって第二段階に移る。第二段階では、[be going to] が時制を表し、[visit Bill] が（行為を表す）動詞だと内部的な解釈が変化している。この段階で「Bill に会うだろう（会うつもりだ）」という意味になる。これが再分析である。ここで注意すべきことが二点ある。第一に、再分析が起こるときには内部的な「文の区切り」が変化している点である。第一段階では不定詞節 [to visit Bill] に含まれていた to は、第二段階では [be going to] のグループに入っている。第二に、この切れ目を無視して全体の文章の表面上を観察したときに、第一段階と第二段階とではまったく同

⁵図 2.1 で下段に PROG、Vdir、Purp. とあるのは、進行形で表されている「進行中」の文脈で、「方向」を表す動詞 [go] があり、「目的」の節と結びつくことによる推論が、第二段階に進むための動力源になっていることを Hopper and Traugott (2003) が主張しているものである。詳細は 6.6.1 節参照。

じ [be going to visit Bill] という文字列（音列）であるという点である。すなわち再分析とは内部的な変化であり、この変化を言語に表出させるには類推による第三段階を待たなければならない。第三段階においては、[be going to] の後に続く動詞に一般の動詞 [like] が来ている。これは、表面上には見えていない第二段階の再分析の変化を経なければありえなかったことである。第一段階のままで [like] が続くと「ビルを好きになるために行っているところだ」というおかしな意味になる。すなわち、第二段階において再分析で [be going to] が時制を指し示す句だと考えることができている、元来の go の意味が弱まっているからこそ、未来を表したい表現の動詞一般がこの言い回しに用いられると判断され、初めて [like] のためにこの表現が使われるようになる。これが類推である。ここで注意すべきことは、類推の効果が、実際の言語に表面化する点である。すなわち類推とは、再分析によって生まれた新たな解釈を、ほかの表現にまで拡大適用する変化である。

Hopper and Traugott (2003) は、このような再分析と類推という二つの変化がなければ文法化は起こらない、と主張している。

2.2.2 認知能力としての再分析と類推

Hopper and Traugott (2003) は前節で述べた再分析と類推を、言語現象または変化事象として扱っている。そして Hopper and Traugott (2003) はそこからさらに、その再分析と類推を引き起こすような認知能力についての考察を進めている⁶。しかし本研究は、再分析と類推をさらに深層のレベルから説明しようと試みるのではなく、これら再分析と類推という現象を起こすことができること自体を、認知能力とみなして定義することを考える。その上で、認知能力としての定義された再分析と類推を文法化を起こす認知メカニズムとして採用する。これにより、本研究の文法化の構成的なモデル上で、再分析と類推を表現することが可能になる。

再分析や類推を行うことができるということは、どのような能力だといえるだろうか。変化現象としての再分析や類推に基づいて考え、認知能力としての再分析および類推を定義する。

変化現象としての再分析は、文の切れ目が変わることによる内的な構造の変化である。そして Hopper and Traugott (2003) のいうように、聞き手が話し手の意図していた形とは違った形で文の構造を理解することにより起こるものである。すなわち再分析を起こすには、表面化している言語の構造を（他から与えられるのではなく）何らかの自らの基準⁷によって決めることのできる能力が必要である。以上のことから、再分析を認知能力

⁶ここで Hopper and Traugott (2003) が導いている、再分析と類推のさらに深層にある認知的能力とは、彼らがメタファー的推論、メトニミー的推論と呼んでいるものである。これらの詳細と本研究との関連については 6.6 節参照。

⁷この基準にあたるものが、Hopper and Traugott (2003) の主張では「メトニミー的推論」と彼らが呼ぶタイプの推論に当たるのだらうと思われる。本研究においてはこの基準は、本節で定義する認知的類推（定義 6）に基づいた一種の推論である。Hopper and Traugott (2003) の述べている「メトニミー的推論」の内容は構成的に扱うには個別的で複雑である。そこで本研究のモデル構築の段階では、認知的類推に基づいた本研究の「言語の構造を決める基準」が、Hopper and Traugott (2003) のいう種類の推論に当たって

として定義4のように定義する。

定義4（認知能力としての）再分析

自らの基準によって文の区切りを決定し、文の構造を把握することができる能力

変化現象としての類推は、限定的に用いられていたある文法規則の適用範囲が広がることである。これを認知能力として定義すると、認知能力としての類推とは

「文法規則をそれまで適用されていなかった形式にまで拡大適用できる能力」

だといえる。ただし、これには前提が必要である。類推を行う際には、新たにその規則を適用すべき形式を、それまで適用していなかった形式の中から何らかの基準に従って選別しなければならない。そのためには、状況や形式からの類推によって何らかの共通点を見出す能力があり、その共通点に従って規則の適用範囲を拡大することができなければならない。この類推能力は再分析を行う際にも必要で、文の構造を自ら決定する根拠を与える。この再分析や類推の前提となる類推を上記の類推と区別して認知的類推と定義する。これに伴い、これまでの意味での類推を言語学的類推と呼んで区別する⁸。

定義5（認知能力としての）言語学的類推

文法規則をそれまで適用されていなかった形式に拡大適用できる能力

定義6 認知的類推

状況や形式から類似性を見出す能力

以下、再分析、言語学的類推、認知的類推とは定義4～6に従って認知能力のことを意味する⁹。そして本研究は、これらの能力を持つ認知主体をエージェントとしてモデル化する（3章）。

2.3 言語進化研究における文法化

本研究は、文法化の背後にある認知メカニズムに迫ることで、言語進化に必要な認知能力に関する言及が可能となるとする立場を採る。本節において、その根拠を示す。

まず、進化言語学からの文法化への言及を採り上げる。進化言語学においては、文法化を起こす認知メカニズムの解明の必要性が最近特に指摘されている。ただし、文法化は言語変化現象であるため、文法化を起こす認知メカニズムと言語進化に必要な認知能力とを直接同一視することはできない。そこで次に、どのような根拠をもって本研究が言語進化の研究となりうるのかを論証する。

いるかについては問わない（これに伴い、本研究は再分析と類推を認知能力とみなす立場をとっている）。ただし、それらの推論にどの程度の重なりがあるのかについては、6.6節で考察する。

⁸以下、区別のない「類推」という語は「認知的類推および言語学的類推」という意味で使用する。

⁹明らかにそうとわかる場合を除いて、変化現象としての再分析を特に指す場合は「再分析現象」、変化現象としての言語学的類推を特に指す場合は「類推現象」という語を用いる。

2.3.1 言語進化と言語変化

進化言語学が明らかにしようとする対象は、言語の起源と進化である。

言語の起源の問題とは、言語がない状態からある状態への変化がいかにして起こったのかという問題である。この問題は、言語を扱う能力そのものが生物学的にどのように進化してきたかという文脈に位置づけられる。言語の進化の問題とは、人間が扱う言語が発生してから、いかにして言語が複雑化したかという問題である。現在私たちが用いている言語は、非常に豊かな構造、語彙、用法を持っている。しかし人間が言語を得た段階ですでに言語がそのような複雑な構造を持っていたとは考えにくい。進化言語学はこの前提に立って、どのように言語が複雑化・構造化してきたのかを問う。言語の進化とはこの複雑化の過程を指す。

人間が扱う言語が発生段階において現在よりも単純なものであったとする直接の証拠は存在し得ない。しかしこの進化言語学の前提は、動物行動学、人類学、比較認知科学などからある程度根拠付けられる。文法化に見られる一方向性もまた、この前提をよく根拠付けるように思える。文法化の一方向性を考慮すると、言語はその発生段階において様態や時制など抽象的な概念を表す機能語を持たず、動詞や名詞などの内容語から構成されていたと想像することができる (Hurford, 2003)。また文法化の変化過程は、言語の進化の過程を考える上で多くの示唆を与えることは間違いない。これらの点から、言語進化研究として文法化を研究する必要性が最近指摘されている。Hurford (2003) は実際に、文法化の方向性から考えて発生段階の言語を推定している。その上で、ILM などの枠組みを用いた構成的な文法化のシミュレーションが、記述的な文法化研究と融合することが、文法化研究と言語進化研究の双方にとって重要だと述べている。

ただし、言語の変化と進化はよく区別しなければならない。文法化は言語変化現象であり、言語進化のタイムスケールから考えてあまりにも早すぎる変化である。Tomasello (2003) はこの点を指摘し、一方向性の起点に内容語があるからといって、言語が発生時において内容語のみを持っていたことが直接的にサポートされるわけではないため、文法化において見られる過程によって言語が進化したと直接結論付けるのは早計だと言っている。

Newmeyer (2003) はこれらの問題に触れたうえで、たとえそうだとした場合のサイクルの出発点にはなんらかの変化材料となる言語が存在するはずであり、文法化で観測される変化から、その材料が動詞や名詞などの文法範疇しか持たない言語であったと考えるのが自然であると述べている。

これらの議論は、文法化そのものの過程と言語進化の過程とが一致するかどうかという議論であるといえる。文法化が言語変化現象である以上、両者が一致するとは言えないのは明らかである。ただし、文法化そのものの過程と言語進化の過程とが一致しなくても、上述の Newmeyer (2003) の指摘の通り、文法化の過程を知るとは言語進化の過程を知ることになりうる。この点については、言語進化と文法化との関係は文法化がどういう現象かを明確にすることではっきりする。次節では、文法化そのものの過程と言語進化の過

程とが一致せずとも、言語進化研究としての文法化研究がありうるとする本研究の主張を論証する。

2.3.2 言語進化研究としての文法化研究

本研究は、以下のような考察に基づき、文法化を起こす認知メカニズムを探ることが、言語進化を引き起こす認知メカニズムのひとつを知ることと重なりをもつと主張する。

前章、本章を通じて見てきたように、文法化によってそれまでになかった新しい文法ルールが生まれる。そしてその指し示す内容は、より具体的なものから抽象的な概念へと変化する。文法化そのものの過程と言語進化の過程とが一致しなかったとしても、文法化による新しい文法ルールの創発が言語の複雑化すなわち進化に寄与することは、強く推定できる。

以上はすなわち、言語が複雑化するメカニズムのひとつに文法化があるという、強く推定し得る仮説である。言語進化の過程と文法化の過程とが一致しなかったとしても、この仮説を受け入れれば、文法化の認知メカニズムを知ることが言語進化を引き起こす認知メカニズムのひとつを知ることと同値になり得る。本研究はこの仮説に立脚する。

ただし、仮にこの仮説を認めなくとも、言語進化研究としての文法化研究が存在し得ることを示すことは可能である。もし、言語進化の過程と文法化の過程とが一致せず、さらに（考えにくい仮定ではあるが）言語進化のメカニズムのひとつに文法化という現象が寄与していなかったとしても、言語進化に必要な認知能力が生物進化により獲得されていれば、（より具体的な内容語が抽象的な概念を表す機能語へ変化する新しいルールの創発という）プロセスとしては言語進化に非常に近いと考えられる言語変化現象である文法化に、その獲得した認知メカニズムがただのひとつも利用されないということはまず考えられない。つまり、あらゆる面から考えて、文法化を引き起こすことを可能にする認知メカニズムの解明は、言語進化に必要な認知メカニズムの解明と多分に重なりをもつと本研究は考える。

以上を踏まえると、本研究が立場として表明している言語進化の文脈からの文法化研究は、次のようにまとめられる。言語を扱う能力が生物学的に進化してきたと考えると、初期の言語からの言語進化を起こすのに必要な認知能力がその生物学的に獲得された言語能力に含められる必要がある。そしてそれは、言語変化である文法化を引き起こすことを可能にする認知メカニズムとかなりの部分で共通するものである。すなわち、生物進化によって前提とされなければならない、言語進化に必要な認知メカニズムとは何かを探るために、文法化を起こす認知メカニズムを明らかにする必要がある。

以上の議論から、明らかに、言語進化としての文法化研究には、文法化を起こす「認知メカニズム」の探求が必須である。この理由から、本研究は、1.2節で述べたように、文法化を起こす認知メカニズムへ迫ることを目的としている。そして、そのために最適と考えられる構成的手法に基づき、文法化のモデルの構築を行うものである。

第3章 文法化のモデルを構築するための定義と考察

前章では、Hopper and Traugott (2003) が述べている再分析と類推について説明した。また、本研究はそれらを認知能力と捉えることを述べ、定義を行った。その理由は、再分析と類推を認知能力と捉えることでそれらの認知能力を持ったエージェントモデルを構築することが可能になるからである。そして前章で述べた通り、構成的なモデルによって、進化言語学の立場から文法化を起こす認知メカニズムに迫ることができるからである。

これを受けて本章では、文法化のモデルを構築するために必要な定義と議論を行う。本研究は、文法化のモデルを構築するにあたって Kirby (2002) の合成性モデル（以下、Kirby モデル）をベースにする。そこでまず、文献 (Kirby, 2002) に述べられている Kirby モデルとはどのようなものなのか詳説する。Kirby モデルの設計のほとんどは本研究における文法化のモデルと共通であるため、Kirby モデルの説明と同時にモデルの詳細の定義を行う。

Kirby モデルはもともと文法化のモデルとして構築されたものではない。そこで次に、Kirby モデルがどのように再分析と類推を表現しており、なぜ文法化のモデルとして利用できると思われるのかについて検討する。

3.1 Kirby モデル

ここでは Kirby モデルの詳細について説明する。本節で説明されている、モデルが扱う意味や文法および学習に関する定義と、知識伝達の枠組みについては、本研究における文法化モデルと共通である¹。

3.1.1 言語の合成性

Kirby (2002) が目的としたことは、言語に合成性 (compositionality) が生まれるメカニズムを明らかにすることである。言語の合成性とは、文や単語が全体として意味する内

¹ここで説明するモデルの詳細は、文献 (Kirby, 2002) から読み取ることのできる情報から本研究が再現し構築したものである。そのため、大枠においては Kirby モデルと同一であるが、細部まで完全に同一であることは保証できない。実際に、本研究が再構成したモデルを用いた同一設定の実験（予備実験。4章参照）において Kirby (2002) の結果を完全に再現することはできなかった。結果について (Kirby, 2002) と異なる点については付録 B に詳述している。

容がその構成要素や並び方と関係して構成されるという性質である。例えば、英語の動詞は一般に、それらの原形のうしろに-ed をつけることで過去の意味になる。すなわち、単語全体の意味が、その構成要素が示す意味の組み合わせによって作られている。これは単語の合成性である。また一般に、文全体の意味は文の構成要素である単語の意味から構成されている。これは文の合成性である。Kirby (2002) はこの文の合成性を扱っている。

合成性は人間が扱うような組織的な言語に特徴的な性質である。Kirby (2002) は、どのような条件があれば自己組織的に合成性が生まれるのか、そのメカニズムを探ることを目的として、構成的な計算機シミュレーションを行った。そして、言語による知識の垂直伝達を通して、文全体がひとつの意味対象を表示する全体論的な言語から、部分的な意味を指し示す単語を組み合わせる文全体の意味を表す合成性のある言語が生じるメカニズムを調べた。

以下では、実際の計算モデルの詳細について定義し、説明を行う。

3.1.2 意味と文法の定義

Kirby モデルで扱われている意味と文法についての詳細な定義を行う。

3.1.2.1 意味

意味を作る要素となる n 個の行動 P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) と m 個の対象 X_j ($j = 1, 2, \dots, m$) とが、あらかじめ世界に設定されている。例えば $(n, m) = (5, 5)$ の場合、表 3.1 のような具体的な設定が考えられる。

表 3.1: 意味要素設定の例

i	行動要素 P_i	j	対象要素 X_j
1	<i>like</i>	1	<i>john</i>
2	<i>hate</i>	2	<i>mary</i>
3	<i>admire</i>	3	<i>gavin</i>
4	<i>detest</i>	4	<i>heather</i>
5	<i>love</i>	5	<i>pete</i>

これらの世界に設定された一つ一つの行動や対象のことを意味要素 E_i と定義する。行動を表す意味要素を行動要素 P_i 、対象を表す意味要素を対象要素 X_i と定義する。意味は一般に、式 (3.1) のように意味要素を用いた一階述語論理の原子文の形式で書かれる。

$$E_i(E_j, E_k) \quad (3.1)$$

ただし、式 (3.1) のように表記した場合、述語 (E_i) には行動要素しか用いることができない。また、引数 (E_j や E_k) には対象要素しか用いることができない。従って実際には

$$P_i(X_j, X_k) \quad (j \neq k) \quad (3.2)$$

という形で書かれる。式 (3.2) は X_j が X_k に P_i という行動を行う、という意味になる。

例えば表 3.1 のように意味要素が設定されていた場合、(3.3) 式のような意味を考えることができる。

$$like(john, mary) \quad (3.3)$$

これは「*john* が *mary* を *like* する」という意味である。

意味要素が単独で意味になる場合もある。例えば式 (3.3) のような意味を考えることができる。

$$like \quad (3.4)$$

これは、*like* という「意味」である。

式 (3.2) において、 X_j 、 X_k 、 P_i をそれぞれ作用主、被作用主、作用とよぶことがある。例えば式 (3.3) において、*john* は作用主、*mary* は被作用主、*like* は作用である。

ある意味要素設定の下で、具体的な意味要素を用いて式 (3.2) の形で書くことが可能な意味の総数を意味空間の大きさと定義する。例えば表 3.1 の設定の下では、意味空間の大きさは 100 である²。

任意の意味要素を取り得る変数を意味変数 x_i と定義する³。意味変数は式 (3.2) の述語や引数に用いることができる。また単独で意味になることもできる。例えば意味【*like(x, mary)*】⁴ は、「(任意の意味変数が指し示す内容) が *mary* を *like* する」という意味である。意味要素 E_i という表記は一般に、意味変数を含まない意味要素を指す。意味変数を含む意味要素を指す場合は e_i で表記する。

意味要素または意味変数が式 (3.2) のような形で結びついて構成されている意味について、以下次のように表現する場合がある。述語や引数に意味変数が使われていない場合その意味は全体論的であるといい、意味変数が使われている場合その意味は合成的であるという。合成的な意味に含まれる意味変数の数をそのルールの合成度 c と定義する。例えば意味【*like(x, mary)*】は合成度 $c = 1$ の合成的な意味である。

² $5 \times 5 \times 4 = 100$ 。式 (3.2) において $j \neq k$ であることに注意。この条件は、作用主と被作用主が同一となる、いわゆる再帰用法によって表されるような意味を排除していることに相当する。

³ 最も一般的には意味変数は x_i と表記し、 i は 1, 2, 3 (または 4) である。意味の一階述語形式の述語にあるのか、どの引数にあるのかによって i が定まる。しかし、簡便にはその意味で p, x, y, z を用いることがある。この場合、述語にある意味変数を p 、第一引数にある意味変数を x 、第二引数にある意味変数を y で表す。 z は文法化モデル (5 章:5.1 節) において時制論理記号の意味変数に使われる。時制を含めた意味の表示については 5.1.1 節参照。

⁴ 以下、語の「意味」と「形式」とをはっきりと区別すべき場面が数多くある。そのため、表記上、特に一つの意味や形式のまとまりを表すときなど、意味は【 】、形式は《 》で囲う場合がある。これらの記号が煩雑になるため省略する場合もあるが、その場合でも意味は例えば *like* のように斜体の文字で表し、形式 (終端記号列) は例えば *like* のように斜体の文字を使わない (ただし、非終端記号はこの限りではない)。従って、意味と形式とは表記によって区別される。この表記の原則は本論文の全てに適用される。

3.1.2.2 文法：確定節文法

Kirby モデルで扱う文法は、確定節文法 (definite clause grammar, 以下 DCG) である。DCG は文脈自由文法 (付録 D) の拡張である。文脈自由文法の各ルールは、左辺に非終端記号 N をひとつ持つ。DCG の各ルールは式 (3.5) のように、この左辺の非終端記号に条件 c を付加することができる。

$$N/c \rightarrow V^* \quad (3.5)$$

この条件 c は左辺の N を右辺の記号列 V^* (集合 $\{N \cup T\}$ の元からなる空を含む記号列) へと導出するための条件であり、条件 c を満たした場合に限り、このルールを導出に使うことができる。

これらの導出ルールの全体を知識としての文法とする。

3.1.2.3 文

ある DCG が任意の終端記号 T からなる空でない列 T^+ を導出したとき、 T^+ を DCG が表現した文とする。エージェントは自身が知識として持つ DCG によって文を生成する。この文がエージェントの発話音列であるとみなす。

3.1.2.4 意味と文の結合

前述したように、DCG の各ルールは、左辺の非終端記号がその非終端記号の導出条件式をもっている。この条件式は一階述語論理の形式で書かれる。そして意味を表す一階述語とこの条件式が合致した場合にのみ、そのルールを利用した導出が可能であるとする。これにより、DCG によって特定の意味を表す文が生成できる。

具体的な例を挙げる。【*like(john, mary)*】という特定の意味を表す文を生成できる DCG には、例えば図 3.1 に示す文法 G_0 や G_1 がある (S は開始記号である)。これらの文法はどちらも、意味【*like(john, mary)*】のために文《abc》を生成する。

図 3.1 を用いて、意味変数を用いたルールの解釈と、意味と非終端記号に付加された導出条件との合致判定について説明する。 G_1 は、「(任意の意味要素が指し示す内容) が *mary* を *like* する」という条件を満たす意味ならばどのような意味であっても、非終端記号 N を含む記号列《a N c》に導出することができるルール r_1 を持っている。しかし、その導出記号列に残る非終端記号 N を終端記号列に導出するルールとして、意味【*john*】のための終端記号列《b》を導出する r_2 しか持っていない。そのため、 G_1 は G_0 と同じく意味【*like(john, mary)*】のための文《abc》しか生成することはできない。

以下では次のような表現をとる場合がある。文法またはその一部のルールセット R に関して、そのルールセットに含まれているルール数を R の大きさと定義し $|R|$ と書く。例えば図 3.1 の文法 G_0 の大きさ $|G_0| = 1$ 、文法 G_1 の大きさ $|G_1| = 2$ である。ある文法また

⁵ G_1 に見られる x は意味変数である。

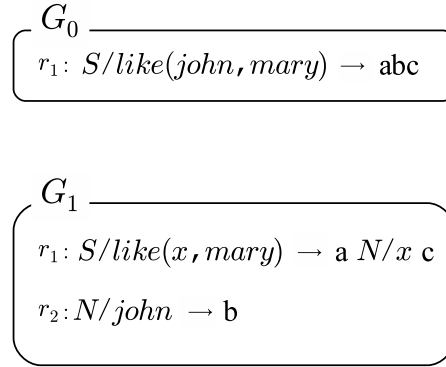


図 3.1: 意味【 $like(john, mary)$ 】のための文《 abc 》を生成できる文法の例⁵

はその一部のルールセット R に関して、 R が最終的に生成できる文の全ての集合を R の言語といい、 $L(R)$ で表す。例えば図 3.1 の文法 G_0 と文法 G_1 について、 $L(G_0) = L(G_1)$ である。このことを、「 G_0 と G_1 の表現力は等しい」という場合がある。

3.1.2.5 ルールの意味と種類

それぞれのルールが左辺の非終端記号にもつ導出条件式が、そのルールが適用できる場合の意味を表すことになることから、ルールの導出条件式のことを指して、そのルールの意味とよぶ場合がある。

以下、次のような表現を用いることがある。ルールの意味が単独の意味要素から構成されている場合、そのルールを単語型ルールという。ルールの意味が全体論的である場合、そのルールを全体論的なルールという。ルールの意味が合成的である場合、そのルールを合成的なルールという。ルールの意味の合成度を、そのルールの合成度という。例えば、図 3.1 の G_1 の r_2 は単語型ルール、 G_0 の r_1 は全体論的なルール、 G_1 の r_1 は合成度 1 の合成的なルールである。

単語型ルールおよび全体論的なルールの右辺は必ず、空でない終端記号列 T^+ だけから成る。合成的なルールの右辺は必ず、合成度に等しい数の非終端記号 N をもつ。

3.1.3 学習：chunk、merge、replace

学習エージェントは、自分の知識を学習によって変化させることができる。この学習は具体的には chunk、merge、replace⁶ という三つのオペレーションで表現されるルールの

⁶chunk および merge は Kirby (2002) によって命名されている。しかし replace は Kirby (2002) においては名前の与えられていない（けれども実装はされている）オペレーションに本研究が命名したものである。replace は学習の中核をなす重要なオペレーションであることが判明している。6.3 節参照。

一般化である。

3.1.3.1 chunk

二つの単語型でないルール $r_1 : S/e_{10}(e_{11}, e_{12}) \rightarrow V_1$ 、 $r_2 : S/e_{20}(e_{21}, e_{22}) \rightarrow V_2$ を考える。これらのルールの意味が、それを構成している意味要素 e_{ij} (意味変数を含む) ひとつに関してのみ異なるとき、これらのルールの導出記号列 V_1, V_2 が一箇所に関してのみ異なるならば、 $\{r_1, r_2\}$ を削除し、表現力が等しい新しいルールセットを加える。この操作を chunk という。導出記号列 V_1, V_2 の異なる一箇所とは、連続した終端記号列またはただ一つの非終端記号でなければならない。この記号列の種類により、新たに加えるルールセットの構成が以下のように変わる。この違いにより chunk を 1 型と 2 型に分類する。

《1 型の chunk》 導出記号列 V_1, V_2 の異なる一箇所が、どちらも連続した空でない終端記号列 T^+_{d1}, T^+_{d2} である場合。もとのルールセット $\{r_1, r_2\}$ は例えば式 (3.6) のようにかける。下線部が異なる箇所である。

$$\begin{cases} r_1 : S/e_0(e_1, \underline{e_2}) \rightarrow V^*_1 \underline{T^+_{d1}} V^*_2 \\ r_2 : S/e_0(e_1, \underline{e_3}) \rightarrow V^*_1 \underline{T^+_{d2}} V^*_2 \end{cases} \quad (3.6)$$

ただし、 V^*_1 と V^*_2 は同時には空になることはできない。

この場合、 r_1 や r_2 より合成度の高い新たなルール r_3 を含む、式 (3.7) のルールセットを新たに加える。

$$\begin{cases} r_3 : S/e_0(e_1, x_2) \rightarrow V^*_1 N/x_2 V^*_2 \\ r_4 : N/e_2 \rightarrow T^+_{d1} \\ r_5 : N/e_3 \rightarrow T^+_{d2} \end{cases} \quad (3.7)$$

そして文法から $\{r_1, r_2\}$ が削除される。

1 型の chunk の具体的な例を図 3.2 に挙げる。二つのルール r_1, r_2 の意味は作用主のみが違い、導出される終端記号列は《jr》と《ot》という一箇所の連続した終端記号列のみである。従って 1 型の chunk を施すことができ、より合成度の高いルール r_3 を含むセット $\{r_3, r_4, r_5\}$ になる。

《2 型の chunk》 導出記号列 V_1, V_2 の異なる一箇所が、どちらか一方のルールについてただ一つの非終端記号である場合。 V_1, V_2 のうち、 V_1 の異なる箇所が非終端記号 N_{d1} であり、 V_2 の異なる箇所は空でない終端記号列 T^+_{d2} であるとする。すると $\{r_1, r_2\}$ は例えば式 (3.8) のようにかける。下線部が異なる箇所である。

$$\begin{cases} r_1 : S/e_0(e_1, x_2) \rightarrow V^*_1 \underline{N_{d1}/x_2} T^*_{d2} \\ r_2 : S/e_0(e_1, \underline{E_2}) \rightarrow V^*_1 \underline{T^+_{d2}} T^*_{d2} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{array}{l}
\left\{ \begin{array}{l} r_1 : S/\text{eat}(\text{tiger}, \text{sausages}) \longrightarrow \text{jr}t \\ r_2 : S/\text{eat}(\text{john}, \text{sausages}) \longrightarrow \text{ot}t \end{array} \right. \\
\downarrow \text{type1 chunk} \\
\left\{ \begin{array}{l} r_3 : S/\text{eat}(x, \text{sausages}) \longrightarrow N/x t \\ r_4 : N/\text{tiger} \longrightarrow \text{jr} \\ r_5 : N/\text{john} \longrightarrow \text{ot} \end{array} \right.
\end{array}$$

図 3.2: 1 型の chunk 操作の具体例

この場合、 r_2 を削除し、式 (3.9) のルール r_3 を新たに加える。

$$r_3 : N_{d1}/E_2 \rightarrow T^+_{d2} \quad (3.9)$$

2 型の chunk の具体的な例を図 3.3 に挙げる。二つのルール r_1, r_2 の意味は作用主のみが違い、導出される終端記号列も一箇所のみが違う。違う部分は r_1 については非終端記号《N》であり、 r_2 については《ot》という連続した終端記号列である。従って 2 型の chunk を施すことができ、 r_2 が削除され r_3 が新たに加えられる。

$$\begin{array}{l}
\left\{ \begin{array}{l} r_1 : S/\text{eat}(x, \text{sausages}) \longrightarrow N/x t \\ r_2 : S/\text{eat}(\text{john}, \text{sausages}) \longrightarrow \text{ot}t \end{array} \right. \\
\downarrow \text{type2 chunk} \\
\left\{ \begin{array}{l} r_1 : S/\text{eat}(x, \text{sausages}) \longrightarrow N/x t \\ r_3 : N/\text{john} \longrightarrow \text{ot} \end{array} \right.
\end{array}$$

図 3.3: 2 型の chunk 操作の具体例

chunk 前の文法の言語を L 、chunk 後の文法の言語を L' とすると、1 型においても 2 型においても $L = L'$ である。

3.1.3.2 merge

左辺の非終端記号が N_1 、導出記号列が V_1 であるルール r_1 と、左辺の非終端記号が N_2 、導出記号列が V_2 であるルール r_2 とを考える。 r_1 と r_2 の意味が一致し、 V_1 と V_2 一致する

ならば、文法のすべてのルールの両辺について N_1 と N_2 を同一の非終端記号に書き換える。この操作を merge という。

例えば式 (3.10) のような二つの単語型ルールがあった場合、これらのルールだけでなく文法中のすべてのルールに対して、 $N_1 = N_2$ とする。 r_1 と r_2 は全く同一となるので一つ削除する。

$$\begin{cases} r_1 : N_1/E_1 \rightarrow T^+ \\ r_2 : N_2/E_1 \rightarrow T^+ \end{cases} \quad (3.10)$$

merge の具体例を挙げる。例えば式 (3.11) のような文法 G_m を考える。

$$G_m \quad \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : \underline{N/john} \rightarrow ot \\ r_4 : S/read(x, book) \rightarrow sw \ M/x \text{ e} \\ r_5 : \underline{M/john} \rightarrow ot \\ r_6 : M/mary \rightarrow kw \end{cases} \quad (3.11)$$

G_m 中の merge できるルールは r_3, r_5 (下線) である。これらは左辺の非終端記号以外は全て同じである。従って merge が施され、 G_m 中のすべての M が N で書き直されて式 (3.12) で示す G_m' となる。

$$G_m' \quad \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : \underline{N/john} \rightarrow ot \\ r_4' : S/read(x, book) \rightarrow sw \ N/x \text{ e} \\ r_6' : N/mary \rightarrow kw \end{cases} \quad (3.12)$$

このとき、例えば G_m' において生成可能な、意味【 $eat(mary, sausages)$ 】のための文《kwt》は G_m においては生成できない文である。この例のように、一般に merge 前の文法の言語を L 、merge 後の文法の言語を L' とすると、 $L \subseteq L'$ である。

3.1.3.3 replace

ある単語型でないルール r_1 と単語型ルール r_2 を考える。 r_2 の意味が意味要素として r_1 の意味に含まれており、 r_2 が導出する終端記号列 $T^+_{r_2}$ が r_1 が導出する記号列 $V^+_{r_1}$ に含まれているならば、 r_1 を削除し、 r_1 より合成度の高いルール r_3 を加える。この操作を replace という。

$\{r_1, r_2\}$ は例えば式 (3.13) のように書ける。

$$\begin{cases} r_1 : S/e_0(E_1, e_2) \rightarrow V^*_{-1} T^+_{-1} V^*_{-2} \\ r_2 : N_1/E_1 \rightarrow T^+_{-1} \end{cases} \quad (3.13)$$

このとき r_1 を削除し r_3 を加える。

$$r_3 : S/e_0(x_1, e_2) \rightarrow V^*_{-1} N_1/x_1 V^*_{-2} \quad (3.14)$$

replace の具体例を挙げる。例えば式 (3.15) で示すルールセットをもつ文法 G_r を考える。

$$G_r \quad \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/mary \rightarrow kw \\ r_3 : N/john \rightarrow \underline{ot} \\ r_4 : S/read(\underline{john}, book) \rightarrow sw\underline{ote} \end{cases} \quad (3.15)$$

G_r 中の replace を起こすルールは単語型ルール r_3 と単語型でないルール r_4 である。なぜなら、 r_3 の意味が意味要素として r_4 の意味に含まれており、 r_3 が導出する終端記号列《ot》が、 r_4 が導出する記号列《swote》に含まれているからである（下線部）。

replace の結果、 r_4 が r_4' となり、文法 G_r は式 (3.16) で示す文法 G_r' となる。

$$G_r' \quad \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/mary \rightarrow kw \\ r_3 : N/john \rightarrow ot \\ r_4' : S/read(x, book) \rightarrow sw N/x e \end{cases} \quad (3.16)$$

このとき、例えば G_r' が生成できる、意味【 $read(mary, book)$ 】のための文《swkwe》は、 G_r においては生成できない文である。このように、一般に replace 前の文法の言語を L 、replace 後の文法の言語を L' とすると、 $L \subseteq L'$ である。

3.1.4 知識伝達の枠組み：繰り返し学習モデル

エージェント間の知識伝達は、繰り返し学習モデル (iterated learning model、以下 ILM) に基づいて行われる。

一般的な ILM の概要について述べる。ILM は、発話エージェントが大人、学習エージェントが子供であると考えた、言語による知識の垂直伝達をモデル化したものである（図 3.4）。学習エージェントは発話エージェント⁷からの発話を入力とし、自らの学習機構に

⁷この発話エージェントは前世代において学習エージェントであったエージェントである。

よって言語知識を獲得する。そして次世代では発話エージェントとなり、獲得した言語知識に基づいた発話を新しく生まれた学習エージェントに対して行う。これを繰り返すことによって言語知識の時間発展を観察することができる。

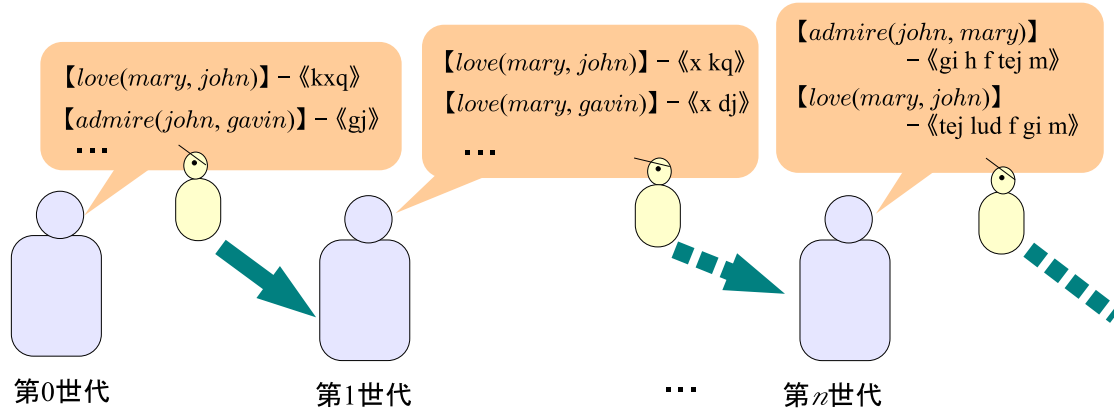


図 3.4: ILM の概念図: ILM においては、発話エージェント（大人）が学習エージェント（子供）に向けて決められた数だけ発話をする。学習エージェントはその発話が行われた状況と発話文を入力にして、学習によって自分の知識（DCG）を形成していく。決められた発話数が終わると、発話エージェントは削除され、学習エージェントは発話エージェントとなる。この繰り返しによって知識の垂直伝達をモデル化したものが ILM である。

Kirby モデルにおける ILM の世代間の知識伝達の詳細について説明する。学習エージェントが入力とできるのは、発話とその発話が指し示す意味だけ⁸である。これは、発話を音として聞き取ることができ、その発話を聞いたときの状況が理解できることに相当する。具体的には次の手順に従う。

1. 発話エージェントに、発話すべき意味 m が与えられる。
2. 発話エージェントは自らの DCG によって、その意味を表現する文 s を生成する。
3. 学習エージェントは m と s の組を入力とすることで、これを直接表現できる知識を得る。すなわち具体的には、 $S/m \rightarrow s$ というルールが学習エージェントの言語知識⁹に追加される。

学習エージェントはこれ以降、学習（3.1.3 節）によって言語知識を変えていく。

Kirby モデルにおける ILM のその他の詳細を説明する。

- 最初の発話エージェントは学習エージェントであった時代を経験していないため、何の言語知識も持たない。

⁸知識が直接受け渡されることはない、という意味である。

⁹モデルにおいては、言語知識とは知識としての DCG のことを指す。

- どの世代においても、学習エージェントはまったく言語知識を持たずに生まれてくる。
- 発話エージェントは学習機能を持たない。よって言語知識は変化しない。ただし、発話時に発話しなければならない意味を表す文を生成できない場合に限り、適当な発話が行えるように知識を作って加える。このプロセスを *invention* と定義する。
- 発話エージェントが与えられた意味に対して複数の文を生成できる場合、その中からある基準により選択する。この基準を発話選択の基準とよぶ。一般に発話選択の基準はランダムである。

invention について説明する。発話エージェントが与えられた意味 $m = [E_1(E_2, E_3)]$ を表す文を生成できる言語知識を持たなかった場合、発話エージェントは適当な文を作ることができるよう、ランダムな終端記号列 T^+_{rnd} からなるただひとつの新たなルール r を作り、自分の知識に加える。

$$r : N/E_i \rightarrow T^+_{rnd} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.17)$$

このとき加えられるルールは一個だけである。この条件下で、単語型ルールを優先して作ろうとする。新たな単語型ルールを一個加えるだけでは与えられた意味を生成することができるようにならない場合は、単語型ルールではなく、開始記号から意味 m のために T^+_{rnd} を導出する全体論的なルールを作る。

$$r : S/m \rightarrow T^+_{rnd} \quad (3.18)$$

従って *invention* を 1 回行うことにより、必ず話者エージェントは与えられた意味 m のための文を生成できるようになる。なお、*invention* によって生まれた知識は、それ以降の文の生成に使うことができる。

発話エージェントは *invention* によって知識を増やすことはできる。しかし、すでに学習時代に見出した知識の構造を利用するものではあるが、新たな知識の構造化は起こらない。従って、*invention* は学習とは区別される。

3.1.5 Kirby (2002) が示したことの解釈

Kirby モデルの結果について概略を述べる。Kirby (2002) はエージェントが意味空間内の全ての意味に対して、*invention* せずに発話できる意味の割合を、その知識が実際に文を表現できる度合いとして、表現度¹⁰ ε とした。そして、 ε と、エージェントがもつ DCG の大きさ $|G|$ 、すなわち話者の内部知識の大きさとの二つのパラメータによる空間上を言語がどのように変化するかを調べた。その結果が図 3.5 である。

¹⁰表現度 $\varepsilon = \frac{\text{invention せずに言える意味の数 } N_d}{\text{意味空間の大きさ } V_m} \times 100[\%]$

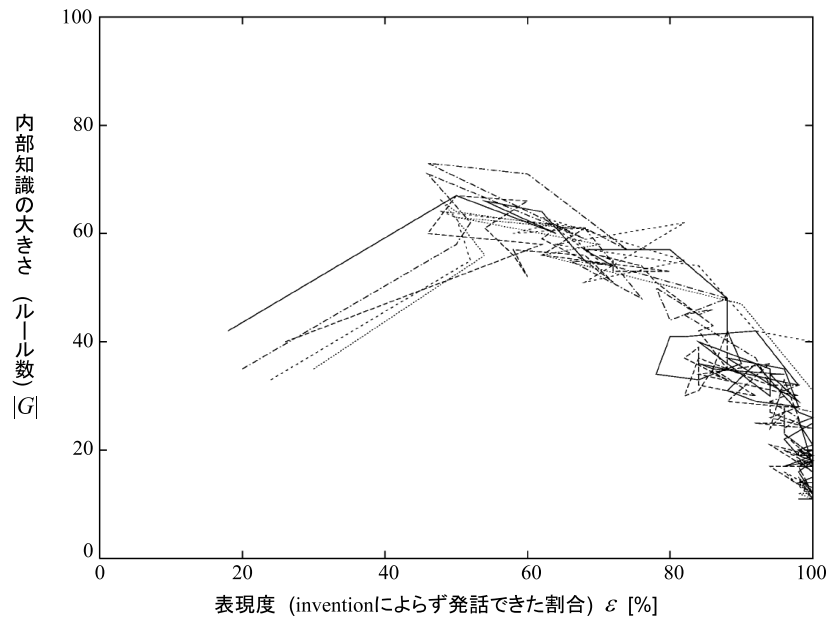


図 3.5: (Kirby, 2002) で観察される合成性: (Kirby, 2002) p.186 より引用

図 3.5 によると、文法の大きさと表現度とがどちらも非常に小さい状態から、あるところまではどちらも増大していく。その後、表現度はさらに増大するのに対し文法の大きさは減少するという変化が見られる。

前半の過程は、意味と文が一对一に対応する全体論的なルール増えることにより表現力が上がる過程である。後半の過程は、合成的なルールの割合が増えることで、表現力を維持または増大しながらより小さい文法へと進化していく過程である。すなわち言語に合成性が現れたと言える。

この合成性はどこから出てきたと考えられるだろうか¹¹。Kirby モデルの意味は一階述語論理の形式で【 $P_i(X_j, X_k)$ 】のように書かれている。全体論的な意味はこれで一つの意味を指すとみなしてはいる。しかし、ここにはすでに「意味の構造」が潜んでいる¹²。それは、

【作用主】が【被作用主】に【作用】する

という構造である。学習と ILM という垂直伝達のシステムによって、この「世界の意味」

¹¹ここで示すのは本研究の解釈である。自然淘汰などの選択圧を一切用いずに学習機構のみで合成性が導かれるのは、情報の変換システムとしての学習機構がボトルネックとしてはたらくからであるとする Kirby の主張の詳細は文献 (Kirby, 2002) 参照。本研究の解釈がこの Kirby の主張と相反するということではない。

¹²Kirby モデルには、文については最初から構造が設定されているということはなく、各記号の境界以上の大きさの切れ目はまったく存在しない。これに対して意味ももともとは切れてはいない。しかし(やや不正確な表現になるけれども)「切るならばここで切れる」という「切り取り線」が最初から書いてあるようなものだといえる。

に存在する構造がしだいに扱う言語に写し取られて、言語がより合成的になった、と本研究は考える¹³。

意味に構造があるということは、世界にそもそもそういう構造が存在するというよりも、「人間がそのように意味を構造的に捉えることができる」ということだと解釈できる。すなわち、Kirby (2002) は、merge、chunk、replace で表現されるような一般化能力を有した人間が、意味を構造的に捉えることができれば、その構造は使用する言語にも現れるということを示している。本研究は Kirby (2002) が示したことを以上のように解釈する。以上は、本研究が Kirby モデルをベースに文法化のモデルを構築する根拠のひとつとなる重要な解釈である。

3.2 なぜ Kirby モデルが文法化のモデルとして利用できるのか

以上に述べてきた通り、Kirby モデルは合成性のモデルである。しかし本研究は Kirby モデルが文法化のモデルとしても有効であることを主張し、これに立脚する。

Kirby モデルが文法化のモデルのベースになりうる理由を簡単に述べると、Kirby モデルにおいて仮定されている学習能力が 2.2.2 節で述べた認知能力としての再分析と類推を表現していると考えからである。これを示すには、Kirby モデルにおける学習能力をエージェントが持つことが、認知的な観点から見てどのような前提を認知主体としてのエージェントに与えたことになるのかを考察する必要がある。すなわち具体的には chunk、merge、replace というオペレーションが実現している能力を、認知的な観点から検討することが必要である。

3.2.1 chunk が前提とする認知能力

3.1.3 節で一般的に定義した chunk の具体例を考える。文法 G_c 中に式 (3.19) で示す二つのルール r_1, r_2 からなるルールセットがある場合、これらのルールセットは chunk によって式 (3.20) で示すルールセット $\{r_3, r_4, r_5\}$ になる。

$$\begin{cases} r_1 : S/eat(tiger, sausages) \rightarrow \text{jrt} \\ r_2 : S/eat(john, sausages) \rightarrow \text{ott} \end{cases} \quad (3.19)$$

$\Downarrow$ chunk

$$\begin{cases} r_3 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_4 : N/tiger \rightarrow \text{jr} \\ r_5 : N/john \rightarrow \text{ot} \end{cases} \quad (3.20)$$

¹³意味に構造があるからといって、それが言語に写し取られるということは必ずしも自明とは言えない。

まず、式 (3.19) の解釈を考える。学習エージェントが式 (3.19) を知識にもつということは、学習エージェントが次の二つの状況とそのとき得た知識を覚えていると解釈できる。

[状況の記憶と知識 1] 「虎がソーセージを食べる」という状況に遭遇してその状況を《jrt》という発話で表すことを知った。

[状況の記憶と知識 2] 「ジョンがソーセージを食べる」という状況に遭遇してその状況を《ott》という発話で表すことを知った。

次に、この知識をもとに式 (3.20) で表現されている知識を得ることができる、ということの解釈を考える。この過程で学習エージェントが行っていることは、次の 3 点だといえる。

[1. 状況の類似性の認識] 二つの場面は、「ソーセージを食べる」という状況は一緒である。「誰がソーセージを食べているのか」つまり動作主体¹⁴が違うだけである。

[2. 発話の類似性の認識] 二つの発話には《○○t》という共通の形式がある。

[3. 推論による文の中の新しい単語列と表現形式の発見] 上記 1,2 より、《jr》が（ソーセージを食べる）虎を指していて、《ot》が（ソーセージを食べる）ジョンを指すのだろう。そして「○○（何者か）がソーセージを食べる」という状況は《○○t》という表現形式で言えるのだろう。

上記 1 および 2 で chunk が前提としているとわかるのは、状況の類似性と発話の形式の類似性を認識できる能力である。この能力は、定義 6 (2.2.2 節) の認知的類推に当たる。

上記 3 で chunk が前提としているとわかるのは、自らの認識に基づいて文の区切りを推論し文の構造を把握することができる能力である。この能力は、定義 4 (2.2.2 節) の再分析に当たる。

以上の検討により、chunk は認知的類推および再分析に当たる認知能力を前提にしていることが示された。

3.2.2 merge が前提とする認知能力

3.1.3 節で一般的に定義した merge の具体例を考える。式 (3.21) で示すルールセットをもつ文法 G_m を考える¹⁵

¹⁴ モデルにおける意味要素の「作用主」に相当する。

¹⁵ $r_1 \sim r_3$ は、上の chunk の例 (3.2.1 節) で示した chunk 後のルールセットと同一である。従って $r_4 \sim r_6$ についても、 $r_1 \sim r_3$ が生まれたのと同様の過程で「“ジョン” や “メアリー” が “本を読んでいる”」状況から得た知識をもとにした学習で生まれたものと想定することができる。ここに示したのはあくまで一例である。しかしここでの merge の具体例はそのような学習の途上で起こっていることだと想定すると理解しやすい。

$$G_m \left\{ \begin{array}{l} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : \underline{N/john \rightarrow ot} \\ r_4 : S/read(x, book) \rightarrow sw \text{ } M/x \text{ e} \\ r_5 : \underline{M/john \rightarrow ot} \\ r_6 : M/mary \rightarrow kw \end{array} \right. \quad (3.21)$$

G_m には操作的に merge の定義 (3.1.3 節) に合致した二つのルール r_3, r_5 (下線) がある。従って merge が施される。その結果 G_m 中のすべての M が N で書き直されて式 (3.22) で示す G_m' となる。

$$G_m' \left\{ \begin{array}{l} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : N/john \rightarrow ot \\ r_4' : S/read(x, book) \rightarrow sw \text{ } N/x \text{ e} \\ r_6' : N/mary \rightarrow kw \end{array} \right. \quad (3.22)$$

merge を施せるということがどのような認知能力を前提としているのかをこの例に沿って考える。まず merge の定義に合致していることに気づくために、認知的類推が必要であることは明らかである。次に merge を施したことによって、merge を施す前の知識と比べてどのように変わったかを考える。chunk について 3.2.1 節で考えたように、merge が起こる前に $r_1 \sim r_3$ を持っていることの意味は

1. 「○○ (何者か) がソーセージを食べる」という状況は《○○ t》という表現形式で言えるということに気づいていて、

2. 虎《jr》とジョン《ot》については1の表現形式で言うことができると知っている。

ということであった。しかし、merge が起こったことによって r_6 が r_6' になり、

3. メアリー《kw》についても1の表現形式で言うことができる。

という新たな知識が追加されたことになる。すなわち r_1 の適用範囲がそれまで r_1 を適用されていなかった対象にまで拡大されていることになる。これは定義5 (2.2.2 節) の言語学的類推である。

すなわち、merge は認知的類推と言語学的類推を前提としていることが示された。

3.2.2.1 言語学的類推による表現力の増加に関する重要な注意

ここで、本例によって示された merge が前提とする言語学的類推と文法の表現力について、非常に重要な注意を行う。

本例において、 r_1 と同じく r_4 に関して考えても言語学的類推により適用範囲が広がっていることがわかる。すなわち merge によって、 r_4 に【*tiger*】の意味のための音列《jr》を適用してもよいということになった(r_4')。ここで、虎《jr》を r_4' に適用すると【*read(tiger, book)*】という意味のための《swjre》という少し不自然な表現が生まれる点にも注意したい。もちろん「虎が本を読む」という表現が不自然という感覚は私たちの自然言語の常識から来るものなので、違う言語であれば当然あってもいい表現である。しかし、merge される前には r_4 は私たちの自然言語の常識からも自然な表現しか生み出さなかった点に注意すべきである。すなわち、merge 以前になかった表現が生まれることで、merge 以前の感覚からではおかしい表現を生み出す可能性があるということである。これは 2.2.1 節で示した、再分析現象が起こる前には不自然であった表現を可能にする類推現象の効果に相当すると考えられる。しかもこれは全く何の根拠もなく文法形式に適当に単語を当てはめたわけではなく、「虎が本を読む」という表現が生み出されるまでに行われた推論は認知的類推に基づく根拠をもった推論であり、推論自体は比較的自然的なものである。

merge や replace を適用すると、それらの適用前に比べて表現力が増加する（または等しい）ことを既に述べている（3.1.3.2 節、3.1.3.3 節）。従って、merge や replace によって適用前には不可能であった表現が生まれる。そして何らかの意味で「不自然」な表現が生まれることがある。merge でこのような変化が起こりうることは、「二つのカテゴリー N と M との間¹⁶に、1 つのルールについてでも重なりがあればその二つのカテゴリーを同じカテゴリーだとみなしてしまう」という、merge がもつ汎化の度合いに起因すると考えられる。

これがどこまで自然な推論といえるのか、これはどのような認知能力から来ているのか、この現象は何を意味しているのかなどについて、本件には言語進化の観点からの非常に重要な議論点が含まれている。従って、6.7 節でさらに議論する。

3.2.3 replace が前提とする認知能力

3.1.3 節で一般的に定義した replace の具体例を考える。式 (3.23) で示すルールセットをもつ文法 G_r を考える¹⁷。

¹⁶形式文法において、非終端記号 N_a から導出される終端記号列の集合は、特定のまとまりを持つグループ（カテゴリー） C_a に対応すると考えることが可能である。以下ではこの C_a を指して「カテゴリー N_a 」という表現をする場合がある。

¹⁷ G_r の $r_1 \sim r_3$ は、上述の chunk の例（3.2.1 節）で示した chunk 後のルールセットと同一である。従って文法 G_r のような状況が生まれるには、例えばこの chunk 直後の発話エージェント（親）の発言が「ジョンが本を読んでいる」状況に対する《swort》であったと考えるとわかりやすい。

$$G_r \quad \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : N/\underline{john} \rightarrow \underline{ot} \\ r_4 : S/read(\underline{john}, book) \rightarrow sw\underline{ote} \end{cases} \quad (3.23)$$

G_r には操作的に replace の定義に合致した二つのルール r_3, r_4 がある（下線部が共通部分である）。従って replace が施される¹⁸。その結果、 r_4 が r_4' となり式 (3.24) で示す文法 G_r' となる。

$$G_r' \quad \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : N/john \rightarrow ot \\ r_4' : S/read(x, book) \rightarrow sw N/x \text{ e} \end{cases} \quad (3.24)$$

replace を行うにはどういう能力が前提とされるかを例に沿って考える。replace 前の知識は

1. 「○○（何者か）がソーセージを食べる」という状況は《○○ t》という表現形式で言える。（ r_1 ）
2. ジョン《ot》について、1の形式で言えることを知っている。（ r_3 ）
3. 「ジョンが本を読む」ことを《swote》ということを知っている。（ r_4 ）

である。replace を起こすには、ここから推論によって以下の二つのことに気づかなければならない。

4. 《ot》は1の形式で「ジョン」を指すのだから、3の《ot》も「ジョン」を表しているのだろう。
5. ということは、《ot》以外の部分が「○○（何者か）が本を読む」ことを表すのだろう。すなわち、「○○（何者か）が本を読む」という意味は《sw ○○ e》という形式で表せるのだろう。（ r_4' ）

¹⁸ただし、例えばもしこれら以前に「メアリーが本を読んでいる」状況に出会っていてルール $r : S/read(mary, book) \rightarrow swkwe$ を得ていたとすると、3.2.2 節で示した merge 前の文法 G_m 中の $r_4 \sim r_6$ を導く chunk が起こる可能性もあるし、ここで示す replace が起こる可能性もある。chunk をした場合はその次には 3.2.2 節で示した merge が起こるが、replace をするとこの merge は起こり得ない。このように、場合によっては複数のオペレーションが可能な状況が起こり得るし、その場合にどのオペレーションを行うかによってその後の学習状況が変化し得る。オペレーションの選択の仕方とその影響については付録 A 参照。

上記 4 が認知的類推を前提としていることは明らかである。さらに、上記 1 の「○○（何者か）がソーセージを食べる」という表現形式でしか使えない「ジョン - 《ot》」というルールを、「○○が本を読む」という形式でも使えることにしている。これは限定的な形式でしか使えないルールを別の形式でも使えるように拡大しており、言語学的類推である。そして、上記 4→5 への推論は、これら認知的類推と言語学的類推に基づいた新たな文の構造の発見であるから、再分析である。

以上の検討により、replace は認知的類推、言語学的類推および再分析に当たる認知能力を前提にしていることが示された。

3.2.4 chunk、merge、replace の認知能力的な関係

以上のように、chunk、merge、replace のオペレーションで表現されている Kirby モデルの学習機構は、再分析と類推の各認知能力を仮定していることが示された。これらをまとめたのが表 3.2 である。

表 3.2: chunk、merge、replace が前提としている認知能力

オペレーション	前提としている認知能力
chunk	認知的類推 再分析
merge	認知的類推 言語学的類推
replace	認知的類推 言語学的類推 再分析

それぞれのオペレーションが前提とする認知能力は表 3.2 に示すように複数ある。逆にいうと、再分析や類推といったそれぞれの認知能力は、複数のオペレーションによって実現されているということであり、どのオペレーションが類推、どのオペレーションが再分析と切り分けることはできない。従って、これらのオペレーションが前提とする認知能力の間の関係について検討する。

認知的類推はすべてのオペレーションの前提となっている。これは、学習における推論は全て、認知的類推による類似性の発見から始まることによる。そこで、認知的類推によって類似性が発見されたあとの推論に限定して考えると、chunk が再分析、merge が言語学的類推を前提としており、replace はその両方を前提としていることがわかる。

学習の過程を具体的に考えると、最初に chunk が起こらなければ、ほかの二つのオペレーションを行うことは不可能である¹⁹。これは、類推現象が新しい規則を言語形式全体へ拡散させ変化を表面化させる現象であり、類推現象の前にはまず内的な変化である再分析現象が起こっていなければならない、とする Hopper and Traugott (2003) が指摘してい

¹⁹厳密には、一部のタイプの merge（開始記号から始まる全く同じルールを削除する、というタイプの merge）だけが、chunk が一度も行われなくても行える唯一のオペレーションである。定義（3.1.3.2 節）参照。

る現象に相当するものと考えることができる。これに関連して、chunk と replace の再分析能力の違いにも注意したい。chunk が前提とする再分析が（認知的類推のみに基づく）区切り方の全く新しい発見であるのに対して、replace が前提とする再分析は、他の（もともとは chunk による）再分析によって発見された形式の適用範囲を言語学的類推によって拡大することによる再分析である。その意味で replace の再分析は、chunk が起こす再分析現象の言語学的類推による拡散という意味合いが強い²⁰。これらは再分析の定義（2.2.2 節、定義 4）に含まれる、文の区切りを決める「基準」の見出し方の差異だといえる。

3.2.5 Kirby モデルが文法化のモデルとして作用するとする根拠

以上本節で検討したこと、および Kirby モデルの解釈（3.1.5 節）から、本研究が Kirby モデルが文法化のモデルとして作用すると主張する根拠をまとめる。

第一の根拠は、Kirby モデルが chunk、merge、replace による学習能力をエージェントに与えていることが、再分析と類推を認知主体に与えたことに相当するからである。再分析と類推の認知能力によって文法化を表現することが可能であるならば、Kirby モデルが文法化を表現することが可能であることが期待できる。

第二の根拠は、本研究の Kirby モデルの解釈に由来する（3.1.5 節）。すなわち、

merge、chunk、replace で表現されるような一般化能力を有した人間が、
意味を構造的に捉えることができるならば、その構造は使用する言語にも現れる

ということを示唆した、Kirby モデルの実績がある。これに、前節での merge、chunk、replace が前提とする認知能力に関する検討を加味すると、Kirby モデルは既に

再分析と類推の認知能力を有した人間が、
意味を構造的に捉えることができるならば、その構造は使用する言語にも現れる

ということを示唆している、と言い換えられる。Hopper and Traugott (2003) がいうように、再分析現象と類推現象が文法化のメカニズムとしてはたらいっているならば、Kirby モデルが示唆する「再分析と類推により人間の意味理解の構造が現れた言語」現象とはすなわち、かなりの部分で文法化と重なりうる現象であると期待される。と同時に、人間の意味の理解の仕方が言語現象として現れたものが文法化だとするならば、Kirby モデルによって文法化を表現するためには、認知能力としての再分析と類推だけではなく、人間の意味理解の構造を意味空間²¹ の設計によって表現する必要があることも示唆される。

²⁰ この replace による再分析現象の拡散効果は非常に高く、chunk によって始まった再分析現象を言語全体へ急速に分布させるのは主に replace の効果であることがわかっている。実験によって示されるこれらのオペレーションの効果および影響力の関係については 6 章で議論する。

²¹ ある特定の表現の意味構造が、意味構造を決定できる様々な要素を状態変数とした相空間上の一点または領域で表されると考えたとき、その空間を意味空間とよんでいる。最も一般的には、意味空間には人間の概念構造の潜在的可能性をすべて表現できるような要素が様々な形状で存在していることになる (辻, 2002)。Kirby モデル上では、例えば意味表示の方法、意味要素の数や行動要素と対象要素の割合、意味要素同士の関係など、意味に関わる定義を変えることで意味空間が設計できることになる。

第4章 予備実験

前章で述べた通り、本研究では Kirby モデルをベースに文法化実験を行う。3.2 節で述べたように、Kirby モデルには文法化のメカニズムとされている再分析と類推が表現されているから、文法化を引き起こすことができる可能性が高い。

従って、文法化実験に先立って Kirby モデルによる意味変化現象を確認するための予備実験を行った。予備実験の目的は、文法化に類する言語変化現象が Kirby モデルにおいて表現されるかを確認し、Kirby モデルの何をどう改良すれば文法化のモデルへと近づくかを考察するための知見を得ることである。本章ではこの予備実験について議論する。まず、本予備実験の実験設定を述べる。次に実験結果として、観察された意味変化現象を説明する。最後に、この予備実験結果について考察し、Kirby モデルを文法化のモデルとして扱うには何を追加する必要があるか議論する。

4.1 実験設定

予備実験の意味設定を述べる。意味要素の設定を表 4.1 に示す¹。表 4.1 の通り、意味要素の個数は行動要素、対象要素ともに 5 である。従って、意味空間の大きさは $5 \times 5 \times 4 = 100$ となる。

表 4.1: 予備実験における意味要素設定

i	行動要素 P_i	j	対象要素 X_j
1	<i>like</i>	1	<i>john</i>
2	<i>hate</i>	2	<i>mary</i>
3	<i>admire</i>	3	<i>gavin</i>
4	<i>detest</i>	4	<i>heather</i>
5	<i>love</i>	5	<i>pete</i>

予備実験における ILM および学習の設定を述べる。発話エージェントが複数の可能な発話を導出した場合の発話選択の基準は、ランダムである。学習エージェントは、発

¹本予備実験は、参照論文 (Kirby, 2002) の 3 章 1 節 (pp.184-189) において行われている有限の意味空間を使用した実験 (Degree0-meanings を用いた実験) と同様の設定で行った。

話エージェントからの発話をひとつ受け取るたびに、可能な限り学習を行う²。学習エージェントが、可能なすべての学習を終了したのち、発話エージェントが次の発話を行う。すなわち、学習は一回の発話ごとに漸次的に行われる。これを発話回数である 50 回繰り返す。50 回の発話を終えた発話エージェントは削除され、次の世代へ移る。この世代では前世代の学習エージェントが新たな発話エージェントとなり、新たに何の知識ももたない学習エージェントが追加され、同じ発話と学習を繰り返す。これを 500 世代まで行った。

発話回数の 50 回とは、意味空間の大きさの半分である。すなわち、学習エージェントは発話エージェントから意味空間のすべてを表す発話を聞くことは不可能である。従って意味空間のすべてを表現できる知識を得るには、学習によって知識を一般化する必要がある。

エージェントがもつ知識（文法）の特徴を表す指標として、以下のものを用いる。

- $|G|$: 文法の大きさ
- ε : 表現度
- $|c_0|$: 全体論的なルールの数
- $|c_i|$: 合成度 i のルールの数
- $|w|$: 単語型ルールの数

²ただし chunk, merge, replace の適用順序によって行える学習の内訳が変化することがわかっている。その内容と影響の詳細は付録 A 参照。

4.2 結果

Kirby (2002) が示した収束状態³ とよく似た⁴状態へ文法が収束していく中で、かつて別の単語のために使われていた終端文字列が、収束した状態ではあるカテゴリー全体に分布するという現象が観察された。

これは、かつてある意味で流通していた単語が、後の世代には別の意味の単語として流通することになることに相当する。すなわちこの現象は文法化につながる意味変化現象である。この意味変化の足取りを示す。

表 4.2: 4 世代目の発話後の知識 (単語型ルール)

Generation4-p ⁵ ($ G , \varepsilon, c_0 , c_1 , c_2 , c_3 , w $) = (55[47], 100[68], 12, 11, 6, 0, 26)			
$r_1 : N_1/john \rightarrow ix$	$r_{14} : N_7/gavin \rightarrow h$		
$r_2 : N_2/john \rightarrow l$	$r_{15} : N_1/gavin \rightarrow qx$		
$r_3 : N_3/john \rightarrow s$	$r_{16} : N_5/heather \rightarrow od$		
$r_4 : N_4/john \rightarrow i$	$r_{17} : N_2/heather \rightarrow u$		
$r_5 : N_4/mary \rightarrow y$	$r_{18} : N_3/heather \rightarrow hg$		
$r_6 : N_1/mary \rightarrow ln$	$r_{19} : N_6/heather \rightarrow g$		
$r_7 : N_2/mary \rightarrow xa$	$r_{20} : N_1/heather \rightarrow lc$		
$r_8 : N_3/mary \rightarrow tsp$	$r_{21} : N_7/heather \rightarrow itm$		
$r_9 : N_5/mary \rightarrow qdc$	$r_{22} : N_5/pete \rightarrow f$		
$r_{10} : N_3/gavin \rightarrow z$	$r_{23} : N_4/pete \rightarrow j$		
$r_{11} : N_5/gavin \rightarrow x$	$r_{24} : N_2/pete \rightarrow q$		
$r_{12} : N_6/gavin \rightarrow gf$	$r_{25} : N_6/pete \rightarrow he$		
$r_{13} : N_2/gavin \rightarrow lfm$	$r_{26} : N_3/pete \rightarrow ptm$		

表 4.2 は、4 世代目のエージェントの invention 後の知識の一部である (単語型ルールのみ挙げてある)。このときに、後の世代で意味変化を起こす《ptm》という終端文字列が生まれた。 r_{26} が、意味【pete】のための《ptm》を導く単語型ルールである。【pete】の意味を表す《ptm》という「単語」が生まれたことに相当する。

³Kirby (2002) が示した収束状態は、(文法の大きさ $|G|$, 表現度 ε) = (11, 100) である。3.1.5 節参照。

⁴完全に同一ではない。付録 B 参照。

⁵世代の後に付く “p”、“c” はそれぞれ発話エージェント (親) の会話後、学習エージェント (子) の学習後のルールであることを示している。すなわち “p” が付く場合は invention によるルールを含む。その後続く ($|G|, \varepsilon, |c_0|, |c_1|, |c_2|, |c_3|, |w|$) は、その世代における文法全体の概要である。表 4.2 のように文法の一部のみを示す場合があるので、ここに文法全体の概要を示した。invention 後の文法を表示するときは、[] で invention 前の数値を示した。以下の表においても同様である。

表 4.3: 7 世代目の学習後の知識

Generation7-c ($ G , \varepsilon, c_0 , c_1 , c_2 , c_3 , w $) = (38, 90, 1, 8, 6, 0, 23)			
全体論的なルール		$r_{18} : N_6/john$	$\rightarrow ai$
$r_1 : S/admire(john, heather)$	$\rightarrow h$	$r_{19} : N_3/john$	$\rightarrow py$
合成度 1 のルール		$r_{20} : N_1/john$	$\rightarrow l$
$r_2 : S/like(x, mary)$	$\rightarrow xm N_1/x n$	$r_{21} : N_5/john$	$\rightarrow s$
$r_3 : S/admire(mary, y)$	$\rightarrow N_1/y \underline{dcvptm}$	$r_{22} : N_2/john$	$\rightarrow i$
$r_4 : S/hate(mary, y)$	$\rightarrow N_2/y al$	$r_{23} : N_6/gavin$	$\rightarrow yx$
$r_5 : S/hate(mary, y)$	$\rightarrow N_2/y xog$	$r_{24} : N_1/gavin$	$\rightarrow lfm$
$r_6 : S/hate(mary, y)$	$\rightarrow N_2/y a$	$r_{25} : N_2/gavin$	$\rightarrow x$
$r_7 : S/detest(x, mary)$	$\rightarrow y N_1/x dcq$	$r_{26} : N_5/gavin$	$\rightarrow z$
$r_8 : S/detest(mary, y)$	$\rightarrow v N_2/y rx$	$r_{27} : N_6/heather$	$\rightarrow itm$
$r_9 : S/admire(mary, y)$	$\rightarrow m N_2/y$	$r_{28} : N_2/heather$	$\rightarrow od$
合成度 2 のルール		$r_{29} : N_1/heather$	$\rightarrow u$
$r_{10} : S/hate(x, y)$	$\rightarrow N_3/x N_1/y$	$r_{30} : N_1/mary$	$\rightarrow xa$
$r_{11} : S/p(heather, y)$	$\rightarrow N_4/p N_5/y$	$r_{31} : N_6/mary$	$\rightarrow ay$
$r_{12} : S/detest(x, y)$	$\rightarrow N_6/y N_1/x$	$r_{32} : N_6/mary$	$\rightarrow yqdc$
$r_{13} : S/like(x, y)$	$\rightarrow N_1/y N_2/x s$	$r_{33} : N_5/mary$	$\rightarrow tsp$
$r_{14} : S/love(x, y)$	$\rightarrow N_5/y N_1/x k$	$r_{34} : N_3/pete$	$\rightarrow ku$
$r_{15} : S/admire(x, y)$	$\rightarrow N_2/x v N_5/y$	$r_{35} : N_1/pete$	$\rightarrow q$
単語型ルール		$r_{36} : N_2/pete$	$\rightarrow g$
$r_{16} : N_4/like$	$\rightarrow lod$	$r_{37} : N_2/pete$	$\rightarrow f$
$r_{17} : N_4/admire$	$\rightarrow odv$	$r_{38} : N_5/pete$	$\rightarrow \underline{ptm}$

表 4.3 は、第 7 世代の学習エージェントの学習後の全知識である。第 7 世代は、《ptm》という終端文字列が生まれたときの意味である【pete】の意味以外の意味を得た最初の世代である。 r_{38} に【pete】-《ptm》の単語型ルールも残っているが、同時に r_3 に「メアリーが何者かを称賛する」という（【pete】が意味要素として含まれない）意味の一部のために《ptm》が使われている。すなわちこのエージェントは、【pete】の意味である単語《ptm》が【pete】の意味以外でも使えることを知識として知っている。

表 4.4: 16 世代目の学習後の知識

Generation16-p ($ G , \varepsilon, c_0 , c_1 , c_2 , c_3 , w $) = (39, 100, 0, 0, 9, 7, 23)			
<u>合成度 2 のルール</u>		$r_{19} : N_1/john$	s
$r_1 : S/hate(x, y) \rightarrow g N_2/x N_3/y q$		$r_{20} : N_3/john \rightarrow ug$	
$r_2 : S/love(x, y) \rightarrow N_1/y N_2/x k$		$r_{21} : N_2/mary \rightarrow xa$	
$r_3 : S/like(x, y) \rightarrow N_2/y N_3/x s$		$r_{22} : N_1/mary \rightarrow tsp$	
$r_4 : S/like(x, y) \rightarrow N_2/y i N_1/x$		$r_{23} : N_3/mary \rightarrow dkx$	
$r_5 : S/like(x, y) \rightarrow N_2/x \text{ptmhs} N_2/y gz$		$r_{24} : N_6/mary \rightarrow dkugkv$	
$r_6 : S/like(x, y) \rightarrow l N_1/y \text{hptm} N_2/x gz$		$r_{25} : N_4/hate \rightarrow gq$	
$r_7 : S/like(x, y) \rightarrow N_2/y \text{ptmhs} N_2/x gz$		$r_{26} : N_4/detest \rightarrow y$	
$r_8 : S/p(gavin, y) \rightarrow N_4/p N_5/y$		$r_{27} : N_4/admire \rightarrow dgb$	
$r_9 : S/p(x, john) \rightarrow N_4/p N_6/x$		$r_{28} : N_2/heather \rightarrow qshz$	
<u>合成度 3 のルール</u>		$r_{29} : N_1/heather \rightarrow n$	
$r_{10} : S/p(x, y) \rightarrow N_4/p N_2/x g N_2/y \text{zhptm}$		$r_{30} : N_3/heather \rightarrow od$	
$r_{11} : S/p(x, y) \rightarrow N_4/p N_2/y g N_2/x \text{ptmhz}$		$r_{31} : N_5/heather \rightarrow kvqzhn$	
$r_{12} : S/p(x, y) \rightarrow N_4/p kvg N_2/x \text{ptmh} N_1/y$		$r_{32} : N_2/heather \rightarrow u$	
$r_{13} : S/p(x, y) \rightarrow N_4/p kvgq N_1/x h N_1/y$		$r_{33} : N_2/gavin \rightarrow kv$	
$r_{14} : S/p(x, y) \rightarrow N_4/p N_2/y gq N_1/x hz$		$r_{34} : N_3/gavin \rightarrow x$	
$r_{15} : S/p(x, y) \rightarrow N_4/p N_3/x N_2/y$		$r_{35} : N_1/gavin \rightarrow z$	
$r_{16} : S/p(x, y) \rightarrow N_4/p N_2/x gqzh N_1/y$		$r_{36} : N_3/pete \rightarrow f$	
<u>単語型ルール</u>		$r_{37} : N_1/pete \rightarrow \text{ptm}$	
$r_{17} : N_5/john \rightarrow lgqzhz$		$r_{38} : N_6/pete \rightarrow fl$	
$r_{18} : N_2/john \rightarrow l$		$r_{39} : N_2/pete \rightarrow a$	

表 4.4 は、16 世代目の学習エージェントの学習後の全知識である。第 16 世代は、《ptm》が最高合成度である合成度 3 のルールに現れた最初の世代である。「誰かが誰かに何かをする」という意味を表す最高合成度のルールに使われている終端記号は、特定の意味を成さない文のフレームを形成している。すなわち r_{10} 、 r_{11} 、 r_{12} といった合成度 3 のルールに《ptm》が使われているということは、このエージェントは《ptm》が意味を成さない場合もあるという知識を持っていることになる。引き続き r_{37} に【pete】-《ptm》の単語型ルールも存続している。 r_5 、 r_6 、 r_7 といった、【pete】を意味要素に含まない「誰かが誰かを好きである」という意味のための合成度 2 のルールにも《ptm》が使われている。

表 4.5: 19 世代目の学習後の知識（単語型ルール）

Generation19-c		(G , ε, c ₀ , c ₁ , c ₂ , c ₃ , w) = (43, 98, 1, 2, 15, 10, 15)					
r ₁ :	N ₁ /admires	→	dgb	r ₉ :	N ₃ /gavin	→	kv
r ₂ :	N ₁ /detests	→	y	r ₁₀ :	N ₂ /heather	→	n
r ₃ :	N ₁ /hates	→	gq	r ₁₁ :	N ₅ /heather	→	xagqshzptmhz
r ₄ :	N ₂ /john	→	s	r ₁₂ :	N ₄ /heather	→	kvshzptmhptm
r ₅ :	N ₃ /john	→	l	r ₁₃ :	N ₃ /heather	→	qshz
r ₆ :	N ₃ /mary	→	xa	r ₁₄ :	N ₅ /pete	→	fxa
r ₇ :	N ₂ /mary	→	tsp	r ₁₅ :	N ₃ /pete	→	q
r ₈ :	N ₄ /gavin	→	qzhz				

表 4.5 は、19 世代目の学習後の知識の一部である（単語型ルールだけ挙げてある）。第 19 世代は、初めて終端記号列《ptm》が【pete】以外の単語型ルールに使われた世代である。 r_{11} および r_{12} に、【heather】のための単語の一部として《ptm》が使われている。また、《ptm》が【pete】を示すという知識は、既に存在しない。

表 4.6: 355 世代目（収束時）の学習後の知識

Generation355		$(G , \varepsilon, c_0 , c_1 , c_2 , c_3 , w) = (12, 100, 0, 0, 0, 2, 10)$						
r_1 :	$S/p(x, y)$	$\rightarrow$	g	N_1/x	N_1/y	N_2/p		
r_2 :	$S/p(x, y)$	$\rightarrow$	g	N_1/y	N_1/x	N_2/p		
r_3 :	$N_1/john$	$\rightarrow$	l		r_8 :	$N_2/like$	$\rightarrow$	tw
r_4 :	$N_1/mary$	$\rightarrow$	xa		r_9 :	$N_2/hate$	$\rightarrow$	gqzhptm
r_5 :	$N_1/gavin$	$\rightarrow$	kv		r_{10} :	$N_2/admire$	$\rightarrow$	dgbptmhz
r_6 :	$N_1/heather$	$\rightarrow$	shzq		r_{11} :	$N_2/detest$	$\rightarrow$	yptm
r_7 :	$N_1/pete$	$\rightarrow$	tu		r_{12} :	$N_2/love$	$\rightarrow$	zhptmktt

収束時である 355 世代目のエージェントの全知識を表 4.6 に示す。最高合成度まで合成性が進んだよく似たルール r_1 、 r_2 があり、あとは全て単語型ルールとなっている。この状態は Kirby (2002) が示した収束状態とよく似ており、文法の大きさ $|G| = 12$ 、表現度 $\varepsilon = 100$ である文法に収束している。単独の対象要素を意味にもつ名詞的なカテゴリー（以下、名詞） N_1 を表す単語型ルールと、単独の行動要素を意味にもつ動詞的なカテゴリー（以下、動詞） N_2 を表す単語型ルールに分かれている。終端記号列《ptm》は、*like* 以外の全ての動詞に見られ、外部から観察する限りにおいては動詞標識のように分布している。

4.3 考察

本節では、予備実験により観測された意味変化現象をもとに、この現象と文法化との関係について考察する。また、この現象が起こる詳細なプロセスを調べる。それらを踏まえて、本研究が目指す文法化の型を明らかにし、文法化実験に向けてモデルをどう変更するかを述べる。

4.3.1 観測された意味変化現象と文法化との関係

観測された現象についてまとめる。早い世代において意味【*pete*】のための単語を示す終端記号列として生まれた《ptm》が、後の世代において別の意味を持つようになり、最終的には動詞に広く分布するようになった。これは、ある対象を指し示す名詞が、モデルの学習機構に含められた再分析と類推によって意味変化を起こし、動詞として使われるようになったとみなすことができる。すなわち、再分析と類推による意味変化現象である。

モデルにおいて、対象要素を指し示す単語型ルールの終端記号列が、行動要素を指し示す単語型ルールの終端記号列へと変化することは、名詞が動詞へ変化すると解釈できる⁶。すなわち、この単語《ptm》の意味変化現象は、名詞の、語彙範疇を越えた動詞への意味変化とみなせる。

定義1(2.1.1節)に従うと、文法化は単語が語彙範疇を越えて内容語から機能語へと変換することであるから、文法化は、本予備実験で示された単語《ptm》の意味変化のような語彙範疇を越えた意味変化の一種であるとみなすことができる。

従って、本予備実験によって、Kirby モデルが文法化を一部に含むような語彙範疇を越えた単語の意味変化を表現できるということが示されたといえる。

モデルで示された意味変化現象は、「再分析や類推に基づいて起こる、文法化ではない(内容語から機能語への変化ではない)意味変化現象」である。以下では、現実においてこのモデルで示された現象に対応するものがありうるかどうかを考える。現象としての「語彙の変化」には様々な種類があり、その中には変化元も変化先も同じ語彙範疇に属するものもあるだろう。また、内容語から内容語への変化も当然起こりうる。そして、それらの変化もまた、再分析や類推という能力に基づいた文法化と共通のメカニズムによっても起こりうるはずである。例えば2.2.1節でも紹介した Hopper and Traugott (2003) が挙げている hambarger (ハンバーガー) の変化の例を再び考察してみる。ハンブルグから来た食べ物 “hambarg-er” が ham - barger と再分析され、類推によって “cheese-barger” などという呼び方が生まれる例は、Hopper and Traugott (2003) のように再分析と類推をメカニズムとして持っている言語変化現象である。この例では、hambarger という名詞は機能語へとは変化せず、相変わらず意味変化後も名詞のままである。このように、再分析と類推による意味変化現象は文法化以外にも現実に存在する。そのような変化のうちで

⁶以下、この意味で単語型ルールの終端記号列を指して単語、単独の対象要素を指し示す単語型ルールの終端記号列を指して名詞、単独の行動要素を指し示す単語型ルールの終端記号列を指して動詞とよぶことがある。

名詞から動詞へと変化した例に対応するのが予備実験により確認された《ptm》の意味変化であり、内容語から機能語へ変化した例があれば、文法化に該当すると考えられる。

4.3.2 文法化のモデルとしての Kirby モデルに足りないものは何か

4.3.1 節での検討を受けて、本節では、内容語から機能語への変化（すなわち文法化）を表現するには、Kirby モデルに何を追加する必要があるかについて検討する。検討に当たっては、Hopper and Traugott (2003) が挙げている前述の hambarger の例を用いる。すなわち、hambarger の例において見られる再分析現象と類推現象に基づいた意味変化が、名詞から名詞への意味変化であるのはなぜか考える⁷。

もともとの “hambarger” は、実際のハンバーガー全体を意味している。だが、ハンバーガーの意味には実は分節性があり、

【上のパン】【間に挟まれたパティ】【下のパン】

という構造に分かれていると、人間は合成的に理解することができる。これは、Kirby モデルにおいて、人間が世界を

【作用主】が【被作用主】に【作用】する

と構造的に理解できると仮定したことに対応している (3.1.5 節)。そして、人々の知識には「ハム (ham)」という単語は既に存在しているとする。すると、次のような認知的類推に基づく推論が成り立つ。

1. この【ハンバーガーという食べ物】が中に挟んでいるのは【ハム】のようである⁸。
2. ということは、《hambarger》の《ham》の部分が挟んでいる中身を表しており、その他の【上下のパンで挟んだ食べ物】のことを《○○-barger》という形式でいえるのであろう。

以上の推論により得た、意味【上下のパンで挟んだ食べ物】のための《○○-barger》という新しい形式の獲得は、再分析である。そして、例えば人々の知識に「【牛肉】は《beef》と言える」という単語型ルールに相当する知識が既に存在したとすると、この《○○-barger》という新しい形式は（言語学的類推によって）適用範囲を広げられ、

【牛肉を上下のパンで挟んだ食べ物】のための《beef-barger》

という新しい表現を生み出すはずである。この推論の過程や結果は、Kirby モデルにおけ

⁷以下の議論には、もともと Kirby (2002) が探求した言語の合成性（をもたらず意味の合成的な理解）と、再分析や類推との関係についての示唆が含まれる。

⁸もちろん、多くの場合パティは厳密には、原義通りの豚のもも肉や、それに類する燻製肉料理としての【ハム】ではない。これをハムと思いつく点にも、人間の意味の類型化などが前提になっているが、その能力はここで示している限りでの意味変化プロセスの本質には関係ないと思われる。【ハム】の意味のための単語《ham》が流通していることだけが前提条件である。

る replace の過程とその結果に酷似している。「再分析および類推の能力を持った人間が、構造化して世界を理解していると、その構造は言語に現れ言語が合成的になる」という Kirby (2002) がモデルにおいて示した結果は、以上のように現実と対応付けられる。

さて、それではハンバーガーの例ではなぜ名詞から名詞への変化しか起こらなかったのだろうか。それは明らかに、ハンバーガーの意味の構造

【上のパン】【間に挟まれたパティ】【下のパン】

を形成しているそれぞれの要素が、全て具体的なパンやパティという対象を指し示す名詞のみから構成されているからである。一方、モデルにおける予備実験において見られた《ptm》の変化は、名詞から動詞への変化であった。ハンバーガーの例との対比で考えると、その理由はモデルが意味構造

【作用主】が【被作用主】に【作用】する

の中に、【作用】という行動要素を指し示す動詞に当たる意味を持っているからであろう。すなわち、Kirby モデルにおいては、1. 名詞から名詞への変化、2. 動詞から動詞への変化、3. 名詞から動詞への変化、4. 動詞から名詞への変化、の4種類の意味変化が確認できるはずである。従って、Kirby モデルにおいて人間の意味理解の構造、具体的には意味の表現方法をうまく設計すれば、内容語から機能語への語彙範疇を超えた意味変化現象、すなわち文法化に相当する現象を表現できる可能性は非常に高い。

以上のように、予備実験の結果は、Kirby モデルをベースに意味空間を変更することで、文法化を表現できる可能性が非常に高いとした 3.2.5 節での考察を強く裏付けた。具体的にモデルにどのような変更が必要かは 4.3.4.2 節で考察する。

4.3.3 語彙範疇を越えた意味変化が起こるプロセス

本予備実験によって示された語彙範疇を越えた意味変化が、モデル内においてどのようなプロセスで起こっているのかについて調査する。調査すべき点は次の三点である。

1. 7 世代のエージェント (表 4.3) が学習中にどのような経緯で表中の r_3 、すなわち【pete】を意味要素として含まない意味に対する終端記号列《ptm》を含むルールを得たのか。(役割変化のプロセス)
2. 16 世代のエージェント (表 4.4) が学習中にどのような経緯で終端記号列《ptm》を無意味記号列に含む最高合成度のルールを得たのか。(意味喪失のプロセス)
3. 19 世代のエージェント (表 4.5) が学習中にどのような経緯で【heather】のための《ptm》を含む単語型ルールを得たのか。(意味獲得のプロセス)

4.3.3.1 役割変化のプロセス

第7世代のエージェントにおいて、表4.3中の r_3 すなわち

$$S/admire(mary, y) \rightarrow N_{c1}/y \text{ dev ptm} \quad (4.1)$$

という【pete】を意味要素として含まない《ptm》を含む知識を獲得する学習プロセスの詳細を述べる。以下で説明するプロセスの目的は式(4.1)を導くことである。

式(4.2)は、第7世代のエージェント（以下、子供）に発話を提供する話者である第6世代のエージェント（以下、親）の知識の一部であるルールセット R_{prt} を示している。式(4.1)は、 R_{prt} が生成できる発話により獲得できる。親の知識にある《ptm》という記号列で表すことのできる意味は、【pete】だけである(r_{p7})。一方で、このプロセスが起こるためには親の知識に1. 【pete】を表す $pete \rightarrow ptm$ 以外のルールを持っていること（同義語の存在： R_{prt} には $r_{p4} : N_{p2}/pete \rightarrow q$ が存在する）が前提として課せられる。また、【pete】の導出の際に利用される別のルール（単語型でなくてもかまわない）の一部にその同義語が持つ終端記号列が利用されていること（多義性の存在： R_{prt} には $r_{p4} : N_{p2}/pete \rightarrow q$ の“q”が $r_{p6} : N_{p3}/mary \rightarrow q \text{ bc}$ に使われている。そしてこの r_{p6} が導出時に利用される。すなわち“q”が多義的になっている）が必要である。

$$R_{prt} \left\{ \begin{array}{ll} r_{p1} : S/detest(x, y) & \rightarrow N_{p1}/y \ N_{p2}/x \\ r_{p2} : N_{p1}/john & \rightarrow ai \\ r_{p3} : N_{p2}/gavin & \rightarrow lfm \\ r_{p4} : N_{p2}/pete & \rightarrow q \\ r_{p5} : S/admire(x, y) & \rightarrow N_{p3}/x \vee N_{p4}/y \\ r_{p6} : N_{p3}/mary & \rightarrow q \text{ bc} \\ r_{p7} : N_{p4}/pete & \rightarrow ptm \end{array} \right. \quad (4.2)$$

ここで、意味【 $detest(gavin, john)$ 】、【 $detest(pete, john)$ 】、【 $admire(mary, pete)$ 】のために R_{prt} が生成できる文 s_1, s_2, s_3 ($\{s_1, s_2, s_3\} \subset L(R_{prt})$)を考えると、表4.7のようになる。

表 4.7: 第6世代のエージェント（親）の発話とそれに用いた知識

意味	発話 ⁹	発話に用いた知識
【 $detest(gavin, john)$ 】	《ai lfm》	r_{p1}, r_{p2}, r_{p3}
【 $detest(pete, john)$ 】	《ai q》	r_{p1}, r_{p2}, r_{p4}
【 $admire(mary, pete)$ 】	《qdc v ptm》	r_{p5}, r_{p6}, r_{p7}

⁹ここでは、導出が分かりやすいように導出の切れ目を空白で区切ってある。本節の以下の表も同じである。

ここでは、導出の例として、意味【 $detest(gavin, john)$ 】のための終端記号列《ailfm》の導出を示す。この導出には式 (4.2) の r_{p1}, r_{p2}, r_{p3} を利用する。 r_{p1} は、意味【 $detest(x, y)$ 】のために開始記号 S から記号列《 $N_{p1}N_{p2}$ 》を導出する。 r_{p2} は、意味【 $john$ 】のために非終端記号 N_{p1} から記号列《ai》を導出する。従って、これらにより意味【 $detest(x, john)$ 】のための記号列《ai N_{p2} 》が導出される。次に、 r_{p3} は、意味【 $bavin$ 】のために非終端記号 N_{p2} から記号列《lfm》を導出する。従って、最終的に意味【 $detest(gavin, john)$ 】のための終端記号列《ailfm》が導出される。以下の導出も同様である。

表 4.7 で示した発話を聞いた子供は式 (4.3) のような全体論的なルールを作る。

$$R_{cld} \begin{cases} r_{c1} : S/detest(gavin, john) & \rightarrow \text{ailfm} \\ r_{c2} : S/detest(\text{pete}, john) & \rightarrow \text{aiq} \\ r_{c3} : S/admire(mary, \text{pete}) & \rightarrow \text{qdcv ptm} \end{cases} \quad (4.3)$$

次に、子供の学習を考える。式 (4.3) の r_{c1} と r_{c2} との 1 型の chunk により、

$$r_{c4} : N_{c1}/\text{pete} \rightarrow q \quad (4.4)$$

を得る。これは、親も有していた知識である（式 (4.2) のルール r_{p4} ）。次にこの r_{c4} と r_{c3} との replace により、

$$r_{c1} : S/admire(mary, y) \rightarrow N_{c1}/y \text{ dcv ptm} \quad (4.5)$$

を得る。これが目的の式 (4.1) である。こうして意味【 pete 】を含まない意味のために終端記号列《ptm》を用いてもよいという知識が生まれる。(4.1) は「メアリーが○○（誰か）を称賛する」という意味を表現する形式《○○dcvptm》の一部として《ptm》が使えろという知識であり、元来の【 pete 】を表す単語という役割は同義語に任せるようになることを意味する。その意味でこの変化を役割変化と呼んでいる。

4.3.3.2 意味喪失のプロセス

第 16 世代のエージェントにおいて、最高合成度のルールの無意味記号列へ終端記号列《ptm》が移動する詳細を述べる。代表として表 4.4 中の r_{11} すなわち

$$S/p(x, y) \rightarrow N_{c2}/p \ N_{c1}/y \ g \ N_{c1}/x \ \text{ptm} \ \text{hz} \quad (4.6)$$

という知識を獲得するまでの学習プロセスを述べる。以下で説明するプロセスの目的は式 (4.6) を導くことである。

式 (4.7) は、第 16 世代のエージェント（以下、子供）に発話を提供する話者である第 15 世代のエージェント（以下、親）の知識の一部であるルールセット R_{prt} を示している。式 (4.6) は、 R_{prt} が生成できる発話により獲得できる。式 (4.7) からわかるように、この意味を喪失するプロセス以前には必ずしも前 4.3.3.1 節で導いた《ptm》の役割変化は前提とはされていないことが分かっている。

$$R_{prt} \left\{ \begin{array}{ll} r_{p1} : S/p(x, y) & \rightarrow N_{p1}/p \ N_{p3}/y \ gq \ N_{p2}/xhz \\ r_{p2} : N_{p1}/admire & \rightarrow dgb \\ r_{p3} : N_{p1}/detest & \rightarrow y \\ r_{p4} : N_{p2}/pete & \rightarrow ptm \\ r_{p5} : N_{p2}/gavin & \rightarrow z \\ r_{p6} : N_{p3}/mary & \rightarrow xa \\ r_{p7} : N_{p3}/pete & \rightarrow q \end{array} \right. \quad (4.7)$$

ここで、意味【 $detest(gavin, pete)$ 】、【 $detest(gavin, mary)$ 】、【 $admire(gavin, mary)$ 】、【 $admire(pete, mary)$ 】のために R_{par} が生成できる文 s_1, s_2, s_3, s_4 ($\{s_1, s_2, s_3, s_4\} \subset L(R_{par})$) を考えると、表 4.8 のようになる。

表 4.8: 第 15 世代のエージェント（親）の発話とそれに用いた知識

意味	発話 ¹⁰	発話に用いた知識
【 $detest(gavin, pete)$ 】	《y q gq z hz》	$r_{p1}, r_{p3}, r_{p5}, r_{p7}$
【 $detest(gavin, mary)$ 】	《y xa gq z hz》	$r_{p1}, r_{p3}, r_{p5}, r_{p6}$
【 $admire(gavin, mary)$ 】	《dgb xa gq z hz》	$r_{p1}, r_{p2}, r_{p5}, r_{p6}$
【 $admire(pete, mary)$ 】	《dgb xa gq ptm hz》	$r_{p1}, r_{p2}, r_{p4}, r_{p6}$

表 4.8 で示した発話を聞いた子供は式 (4.8) のような全体論的なルールを作る。

$$R_{cld} \left\{ \begin{array}{ll} r_{c1} : S/detest(gavin, pete) & \rightarrow yqgqzhz \\ r_{c2} : S/detest(gavin, mary) & \rightarrow yxagqzhz \\ r_{c3} : S/admire(gavin, mary) & \rightarrow dgbxagqzhz \\ r_{c4} : S/admire(pete, mary) & \rightarrow dgbxagq ptm hz \end{array} \right. \quad (4.8)$$

この全体論的なルール群からの子供の学習を考える。式 (4.8) の r_{c1} と r_{c2} との 1 型の chunk により、

$$\begin{array}{ll} r_{c5} : S/detest(gavin, y) & \rightarrow y \ N_{c1}/y \ gqzhz \\ r_{c6} : N_{c1}/pete & \rightarrow q \\ r_{c7} : N_{c1}/mary & \rightarrow xa \end{array} \quad (4.9)$$

を得る。 r_{c6} は、親も有していた知識である（式 (4.7) のルール r_{p7} ）。次に r_{c6} と r_{c3} との replace により、

$$r_{c8} : S/admire(gavin, y) \rightarrow dgb \ N_{c1}/y \ gqzhz \quad (4.10)$$

を得る。次にこの r_{c8} と r_{c5} との 1 型の chunk により、

$$r_{c9} : N_{c2}/admire \rightarrow dgb \quad (4.11)$$

を得る。この r_{c9} もまた、親も有していた知識である（式 (4.7) のルール r_{p2} ）。次に r_{c6} と r_{c4} との replace により、

$$r_{c10} : S/admire(x, mary) \rightarrow \text{dgbxag } N_{c1}/x \text{ ptm hz} \quad (4.12)$$

を得る。さらに、 r_{c7} と r_{c10} との replace により、

$$r_{c11} : S/admire(x, y) \rightarrow \text{dgb } N_{c1} \text{ g } N_{c1}/x \text{ ptm hz} \quad (4.13)$$

ができ、 r_{c9} と r_{c11} との replace により、

$$r_{c12} : S/p(x, y) \rightarrow N_{c2} N_{c1} \text{ g } N_{c1}/x \text{ ptm hz} \quad (4.14)$$

が生まれる。これが目的の式 (4.6) である。こうして終端記号列《ptm》は、最高合成度の合成的なルールの無意味音列、すなわち意味を持たない文のフレームに用いることができる、という知識が獲得される。従って、この知識を得る変化を意味喪失と呼んでいる。

4.3.3.3 意味獲得のプロセス

第 19 世代のエージェントにおいて、【pete】とは別の意味の単語型ルールへ《ptm》が移動する詳細を述べる。代表として表 4.5 中の r_{11} すなわち

$$N_{01}/heather \rightarrow \text{xagqshz ptm hz} \quad (4.15)$$

という知識を獲得するまでの学習プロセスを述べる。以下で説明するプロセスの目的は式 (4.15) を導くことである。

式 (4.16) は、第 19 世代のエージェント（以下、子供）に発話を提供する話者である第 18 世代のエージェント（以下、親）の知識の一部であるルールセット R_{prt} を示している。式 (4.15) は、 R_{prt} が生成できる発話により獲得できる。このプロセス以前に親の知識に前提とされているのは、前 4.3.3.2 節で導いた、意味を持たない《ptm》が存在するという知識（式 (4.16) の r_{p2} ）である¹¹。

$$R_{prt} \left\{ \begin{array}{ll} r_{p1} : S/p(x, y) & \rightarrow N_{p1}/p \ N_{p3}/x \ N_{p2}/y \\ r_{p2} : S/p(x, y) & \rightarrow N_{p1}/p \ N_{p2}/y \ N_{p2}/x \text{ ptm hz} \\ r_{p3} : N_{p1}/admire & \rightarrow \text{dgb} \\ r_{p4} : N_{p2}/mary & \rightarrow \text{xa} \\ r_{p5} : N_{p3}/pete & \rightarrow \text{f} \\ r_{p6} : N_{p2}/heather & \rightarrow \text{qshz} \end{array} \right. \quad (4.16)$$

ここで、意味【admire(pete, mary)】、【admire(heather, mary)】のために R_{prt} が生成できる文 s_1, s_2 ($\{s_1, s_2\} \subset L(R_{prt})$) を考えると、表 4.9 のようになる。

¹¹ 常にそうであるかは厳密には断言はできない。4.3.3.1 節で導いた《ptm》の意味変化があれば、意味を失わずに直接別の単語に変化することが理論的には可能であると思われる。ただし、実験においては確認されていない。

表 4.9: 第 18 世代のエージェント（親）の発話とそれに用いた知識

意味	発話	発話に用いた知識
【 <i>admire(pete, mary)</i> 】	《dgb f xa》	$r_{p1}, r_{p3}, r_{p4}, r_{p5}$
【 <i>admire(heather, mary)</i> 】	《dgb xa g qshz ptm hz》	$r_{p2}, r_{p3}, r_{p4}, r_{p6}$

表 4.9 で示した発話を聞いた子供は式 (4.17) のような全体論的なルールを作る。

$$R_{cld} \begin{cases} r_{c1} : S/admire(pete, mary) & \rightarrow \text{dgbfxa} \\ r_{c2} : S/admire(heather, mary) & \rightarrow \text{dgbxagqshz } \text{ptm} \text{ hz} \end{cases} \quad (4.17)$$

次に、子供の学習を考える。式 (4.17) の 2 つの式からの 1 型の chunk により、

$$r_{c3} : N_{01}/heather \rightarrow \text{xagqshz } \text{ptm} \text{ hz} \quad (4.18)$$

が得られる。これが式 (4.15) である。

こうして終端記号列《**ptm**》は【*heather*】を表す単語の一部であるという知識が獲得される。これは《ptm》が役割の変化や意味の喪失を経て別の単語を表すようになったとみなすことができる。

4.3.3.4 語彙範疇を越えた意味変化現象のプロセスのまとめ

前節のプロセスで《ptm》はまだ語彙範疇を越えていない（名詞から名詞への変化）が、最終的には同様のプロセスを経て語彙範疇を越えて（名詞から動詞への変化）変化する（4.3.1 節）。これまで見てきた《ptm》の例をもとに、単語の意味が語彙範疇を越えて変わるプロセスをまとめる。

4.3.3.1 節で見た役割の変化と 4.3.3.2 節で見た意味の喪失の過程にはどちらも、もとの意味である【*pete*】を意味する単語に《ptm》だけでなく

$$r_{syn} : N/pete \rightarrow q \quad (4.19)$$

のような別の単語が親の知識に前提とされている。これは、役割の変化や意味の喪失には、親の知識に同義語が存在することが必要であることを意味している。さらに、その式 (4.19) で示される同義語に用いられている終端記号列の一部（ここでは“q”）が多義性を有している（導出時に使う他のルールの一部に使われており、【*pete*】以外の意味から“q”が発話文に現れる）必要がある。そして、4.3.3.3 節で見た新しい意味の獲得には、この役割の変化または意味の喪失が、親の世代までに起こっていることが前提となっている。すなわち、同義語の存在がこの意味変化現象の前提となっている。

これまで見てきた《ptm》の例によると、役割の変化や意味の喪失は、親が同じ意味を表す二つの単語型ルールをもっていて、子がそのうち一方を先に単語型ルールとして知識

に加えている状態で起こっている。また、この二つの変化は前提条件および変化プロセスが複雑である。一方、新しい意味の獲得は、それまでに単語が意味を失っていると、比較的容易に行われる¹²。これらの変化のプロセスをまとめると、次のようになる。

1. 変化する語に同義語が存在し、その同義語が多義的 親が同じ意味【 E_i 】を表す二つの単語型ルール $r: E_i \rightarrow T^+_a$ 、 $r_{syn}: E_i \rightarrow T^+_b$ をもっている。かつ、親が T^+_b を（発話時に用いる）別のルールの導出記号列の一部としてもっている。
2. 同義語を学習済み 子供が r_{syn} のルールを知識に加えている¹³。

上記の状態で、

3. 両方の単語が使われた発話 親が意味に E_i を含んだ文を r を使って発話したとき、その発話に $\langle T^+_a \rangle$ と $\langle T^+_b \rangle$ の両方が含まれている。

ということが起こると

4. 変化する語がその役割を失う 子供は $\langle T^+_b \rangle$ が E_i という意味だと解釈する。そのため、 $\langle T^+_a \rangle$ は E_i を意味する必要がなくなる（役割変化）。世代を経てやがて意味を失う場合もある（意味の喪失）。
5. 他の意味への変化 もともとの役割を失った語は別の意味に変化する。意味を失っている場合は容易に他の意味に変化する。

上記 1 は、その前の世代で使われている言語体系への条件である。2 はその世代の学習者への条件である。3 は実際のコミュニケーションで起こるべき場面であり、その結果 4 を導き、5 という現象が観察される。

Kirby モデルで表現できるのは、このようなプロセスを経る意味変化だと考えられる。

4.3.4 文法化に向けて

Kirby モデルで表現できる意味変化現象の型が明らかになったので、この「範疇を越えた意味変化現象」と文法化との関係に関する 4.3.1 節および 4.3.2 節での検討を基に、Kirby モデルを文法化モデルにするために必要な検討を行い、モデルの変更点を挙げる。

¹²4.3.3.3 節でみたときは、親の代で無意味記号列に $\langle \text{ptm} \rangle$ が移動していさえすれば、親の発話に（そのルールを使った発話をするということ以外に）特に前提条件はなく、学習も chunk 一回で新たな意味を得た。

¹³子供はこの役割の変化または意味の喪失の知識を得る時点で、 r_{syn} だけを知っている場合が普通であるが、理論的には r を知っていはいけいわけではない。知っていたとしても解釈に使うのはどちらか一方だからである。どちらを使うかは学習の順序に依存する問題である。また、学習終了時には多くの場合 r, r_{syn} 両方の知識を得ている。これらの知識が共存しなくなるのは $\langle T^+_a \rangle$ が意味を失ってしばらく世代を経た後である。

4.3.4.1 本研究のモデルが表現することのできる文法化の型

Kirby モデルが表現できるのは、4.3.3.4 節で示したタイプの文法化である。すなわち、

変化する語に対して同義語が存在し、同義語のほうが原義の語として流通するため、変化する語は原義の意味ではたらしきをする必要がなくなり、意味を喪失するなどの変化を経て他の語として流通するようになる。

という型を基本にして起こる文法化である。文法化にはこのような型に基づいて起こる例が存在すると思われる。

4.3.4.2 文法化実験に向けたモデルの変更

Kirby モデルを変更して文法化モデルとするには、意味空間の設計を行わなければならない。4.3.2 節で検討したように、意味空間の設計に必ず必要なのは、機能語に相当する様態や時制などを表す意味要素を含めることである。

意味要素として対象要素、行動要素に加え、例えば時制を表す要素（以下、時制要素）を加えたとする。対象要素を指し示す単語型ルールは名詞に、行動要素を指し示す単語型ルールは動詞に、時制要素を指し示す単語型ルールは助動詞に相当すると考えられる。このとき、予備実験結果から想定される意味変化現象は、表 4.10 に示した 9 種類が考えられる。

表 4.10: 観測される意味変化の種類

変化先 変化元	名詞	動詞	助動詞
名詞	範疇内変化	範疇間変化	文法化
動詞	範疇間変化	範疇内変化	文法化
助動詞	脱文法化	脱文法化	範疇内変化

以下では、表 4.10 に示した通り、語彙範疇を越えない意味変化、語彙範疇を越える意味変化、機能語への語彙範疇を越える意味変化、機能語からの語彙範疇を越える意味変化を、それぞれ範疇内変化、範疇間変化¹⁴、文法化、脱文法化とよぶ。表 4.10 に示したように、時制要素を加えることにより文法化を表現することは可能である。

¹⁴ここに示した定義では、脱文法化と文法化は範疇間変化の一種でありこれに含まれる。ただし不明瞭になる恐れがない限り、以下で範疇間変化という語を用いるときは、脱文法化および文法化を除く語彙範疇を越える意味変化のことを指す。脱文法化および文法化を含む場合はそれを明記する。

しかし、意味空間の設計は、それだけでは不十分である。時制要素を加えることにより文法化に相当する変化は確認できるだろうが、それはモデルの構造に従った、方向性を持たない同等な変化である。実際の文法化においては、2章までで様々な角度から議論したように、例えば“be going to”が未来の意味になったり、“back”が過去の意味になったりするようなことが見られる。これは人間の意味理解の上で「go（行く）がfuture（未来）の意味に変化する」「back（背中）が後方、またはpast（過去）の意味に変化する」という、特定の意味と意味とが関係しあっていることによるものである。本研究では、その意味理解の構造が言語に表出することで文法化が起こる、という仮定の下に文法化のモデルを立てている。従って、この意味理解の構造をモデル内の意味に設計しなければならない。

現状では、Kirby モデル内においては各対象要素は独立であるので、例えば対象要素の *pete* と *mary* の間には何の区別もない。行動要素の *like* と *hate* は意味に貼られたラベルとしては反意であるが、実際には反対の意味であるというモデル化はされていない。*like* と *admire* との関係と、*like* と *hate* の関係は全く同等である。すなわち、意味空間が均質である。ここに、特定の語の結びつきを表現し、各意味要素間の関係を設計したとき、Kirby モデルはその意味理解の構造を反映した言語変化を表現できる可能性がある。具体的には、意味要素間で何らかの差異を設定する、意味要素同士の関係に基づいた学習の傾向を含める、などの方法を採用。詳細は5.1節で説明する。

本章で議論した、Kirby モデルを文法化のモデルとして利用するのに必要な主な修正点は以下の通りである。

- 意味要素に時制要素のような機能語範疇に含まれる意味要素を加える。
- 特定の意味要素と意味要素との間に差異を設け、均質な意味空間を、意味要素同士の関係が設計された意味空間へと変更する。

第5章 文法化実験

前章では、予備実験として Kirby モデルによる再分析と類推に基づいた意味変化現象の実験を行い、下記の結果と考察を得た。

- 名詞から動詞への語彙範疇を越えた意味変化現象を確認した。
- その意味変化現象が起こるプロセスを調査し、本モデルにおいて表現可能な文法化の型が多義的な同義語を引き金にして起こる型の文法化であることを明らかにした。
- 文法化のモデルを立てる上で必要な Kirby モデルの拡張は、機能語を表す意味要素の導入と、意味空間の設計であることが分かった。

本章では、これを受けて、Kirby モデルの拡張として文法化のモデルを打ち立て、実験を行い、その結果を示す。まず、前章で議論したモデルの修正を行い、それに伴う詳細を定義する。次に文法化実験の設定を述べ、最後に実験の結果を示す。

5.1 文法化モデルの定義

予備実験の結果から明らかになった、Kirby モデルに必要な修正点（4.3.4.2 節）は以下の通りである。

1. 意味要素に時制要素を加える。
2. 特定の意味要素と意味要素との間に差異を設ける。
3. 意味要素同士の関係に基づいた学習を行う。

本節ではこれらの点について修正を加え、文法化モデルの詳細を定義する。

5.1.1 時制要素

意味要素に、対象要素、行動要素に加え時制要素 F_i を定義する。時制要素は具体的には $F_1 = past$ 、 $F_2 = present$ 、 $F_3 = future$ の三つである。

時制要素は、他の意味要素と同じく単体で一つの意味になることができる。例えば

$$future \quad (5.1)$$

は、単独で未来という「意味」である。

式 (5.1) のように単体で用いられる以外に、意味要素を使った一般的な意味は、式 (5.2) のように行動要素と対象要素により作られる一階述語言語の原子文 A を用いた、単純な時間論理に則った形式¹ で書かれる。

$$[F_i]A \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5.2)$$

式 (5.2) は「 F_i において A である」という意味になる。

ただし、 A は実際は式 (3.2) で示した形で書き表されるので (3.1.2.1 節)、実際の式においては行動要素 P_j 、対象要素 X_k 、 X_l を用いて、

$$[F_i]P_j(X_k, X_l) \quad (k \neq l) \quad (5.3)$$

という形式で書かれる。式 (5.3) は、 F_i の時点において X_k が X_l に P_j という行動を行う、という意味になる。

例えば後述する表 5.2 のような設定の下では

$$[past]like(john, mary) \quad (5.4)$$

という意味の表示例が考えられる。式 (5.4) は「 $past$ において $john$ が $mary$ を $like$ する」すなわち「ジョンは以前メアリーを好きだった」の意味になる。

時制要素が導入される以前の意味空間の大きさを V_{m1} とし、 V_{m1} と同じ行動要素と対象要素に三つの時制要素を導入したときの意味空間の大きさを V_{m2} とすると、明らかに $V_{m1} < V_{m2}$ である。前者の意味空間は後者の意味空間の中の、限定された特殊²な空間である。

時制要素が導入されたことによる意味表示の変更は以上である。その他の、意味変数の取り扱い、文法、文に関する定義は全て 3.1.2 節での定義に従う。以下の文法化実験においては、本節で述べた設定は全実験に適用される。

5.1.2 意味要素間の関係

ここでは、意味要素間の関係の設計について述べる。意味要素間には概念的な繋がりのある意味とない意味を設定することができる。すなわち特定の意味要素にとって、他の意味要素との関係は平等ではないとすることができる。本研究の文法化モデルにおいては、この意味要素間の繋がりを 1. 意味の取り違い、2. 意味の共起頻度、3. 意味の貸し借りの三通りの方法で表現する。

意味の取り違いは、学習エージェントが学習において行う。意味の共起頻度は世界に設定され、発話エージェントの発話の傾向を変化させる。意味の貸し借りは、発話エージェントが発話の導出時に行う。

なお、これらの意味空間の諸設定の適用・非適用は、実験条件によって選択できる。

¹一般的な時間論理の表記を本モデルの設定に合わせた形で表現する。一般的な時間論理の表記では、 $[P]A$ で「過去において A である」、 A で「現在において A である」、 $[F]A$ で「未来において A である」を意味する。これらを本モデルでは、文の前の $[]$ に時制要素を書くことで表現する。

²時制要素を $[present]$ に限定した場合。

5.1.2.1 意味の取り換え

特定の意味要素の組み合わせにおいて、学習時に意味を取り換える。

「 E_t で E_o を E_d に取り換える」とは、意味を構成する意味要素に E_t と E_o が含まれている場合、 E_o を E_d だと思って学習することである。意味を取り換えるのは学習においてのみであり、知識としては E_o がそのまま残る。

例えば「 go で $present$ と $future$ を取り換える」とは、 go が含まれる文脈で $present$ があれば、この $present$ を $future$ に置き換えて学習を進める、というものである。この場合の学習プロセスの具体例を以下に示す。知識に、あるルール

$$r_1 : S/[present] go(mary, john) \rightarrow abcd \quad (5.5)$$

が存在するとする。このとき、 r_1 には go および $present$ が意味要素として含まれている。従って意味を取り換え、 r_1 を次の式 (5.6) で示す r_1' と思って学習する。

$$r_1' : S/[future] go(mary, john) \rightarrow abcd \quad (5.6)$$

例えば知識に以下のように上記 r_1 とともに r_2 があるとする。

$$R \begin{cases} r_1 : S/[present] go(mary, john) \rightarrow abcd \\ r_2 : S/[future] like(mary, john) \rightarrow abef \end{cases} \quad (5.7)$$

このとき、この二つのルールによって chunk は起こらない。なぜなら、意味要素が二箇所異なっているために、chunk の定義 (3.1.3.1 節) に合致しないからである。しかし「 go で $present$ と $future$ を取り換える」ときは、 r_1 を式 (5.6) で示した r_1' と思って学習するので、学習時にルールセット R を次のような R' だと思い込む。

$$R' \begin{cases} r_1' : S/[future] go(mary, john) \rightarrow abcd \\ r_2 : S/[future] like(mary, john) \rightarrow abef \end{cases} \quad (5.8)$$

これは chunk 条件に当てはまるので、chunk される。ただし、chunk 後のルールは以下の通りである。

$$R'' \begin{cases} r_3 : S/[present] p(mary, john) \rightarrow ab \ N_1/p \\ r_4 : S/[future] p(mary, john) \rightarrow ab \ N_1/p \\ r_5 : N_1/go \rightarrow cd \\ r_6 : N_1/like \rightarrow ef \end{cases} \quad (5.9)$$

すなわち、本来の chunk では全く同じ知識となるためにどちらかが削除されるはずの r_3 と r_4 が、違う知識であるために両方とも文法に残る。これは、学習の瞬間には意味を取り換えるけれども、知識としてはきちんと区別できていることに相当する。

この意味の取り換えの設定は、現実において、「行く」という意味が未来を強く想起させる、という仮定をモデル化したものである。すなわち「行く」という意味が出てくると、文全体が現在の意味であっても、未来の意味かのように思い込んでしまい、その思い込みに基づいて学習を進めてしまうとどうなるのかを実験において調査しようという意図をもって行った設定である。

5.1.2.2 意味の共起頻度

意味の共起頻度が設定された場合、親が話さなければならない意味がランダムに設定されず、ある分布をもって与えられる。

「 E_i に対する E_j の共起頻度」とは、意味 m が意味要素 E_i を含むときに、その意味を構成するのに E_j もまた含める割合（百分率）を指す。例えば、*go* に対する *future* の共起頻度を 80% で設定すると、親が話さなければならない意味が *go* を含んでいる場合には、そのうちの 80% が *future* を含んだ意味となるように意味が選ばれる。すなわち、親が話さなければならない意味が

$$[E_3]_{go}(E_1, E_2) \quad (5.10)$$

の形で表されるときには、80% の確率で $E_3 = \textit{future}$ である。

この設定は、「行く」という意味は未来の文脈でよく現れる、ということをモデル化したものである。

5.1.2.3 意味の貸し借り

図 5.1 に示すように、意味要素に概念的な繋がりのある意味要素と繋がりのない意味要素を設定する。その上で、繋がりのある意味要素間では、意味を貸し借りできる。具体的には、単語型ルールをその意味の代わりに使うことができる。

図 5.1 に示した例では、行動要素の *go* と *walk*、*go* と *run* には意味の重なりがあると考えている。これに対して、*like* と *beat* はどの意味要素とも重なりを持たない。これは、「行く」という意味が指し示す内容と「走る」や「歩く」が指し示す内容には、（場面によっては）重なりがある場合もある、という意味空間を設定したことに相当する。

意味の貸し借りができる場合、単語型ルールを貸し借りすることができる。例えば、*go* に *walk* の単語型ルールを貸す、ということは、*go* の意味のために *walk* のための単語型ルールの終端記号列を用いてもよい、ということである。これは、例えば現実の世界で、「行く」の意味を表すのに《walk》という発話で代用してもよい、などと言ったことに相当する。

さらに、この意味の重なりには方向性がある。例えば、*go* は *walk* や *run* から単語型ルールを借りることができるけれども、*walk* や *run* は *go* から単語型ルールを借りることができない、などと設定される。これは、単語によって意味の一般性に差があるとみなしていることに相当する。

意味の貸し借りが起こる場合、本来その意味を表す単語型ルールによっても発話でき、借りた単語ルールによっても発話できる場合に、あえて借りた単語ルールを使用する割合（百分率）を、以下では、借りたルールの優先利用率ということがある。

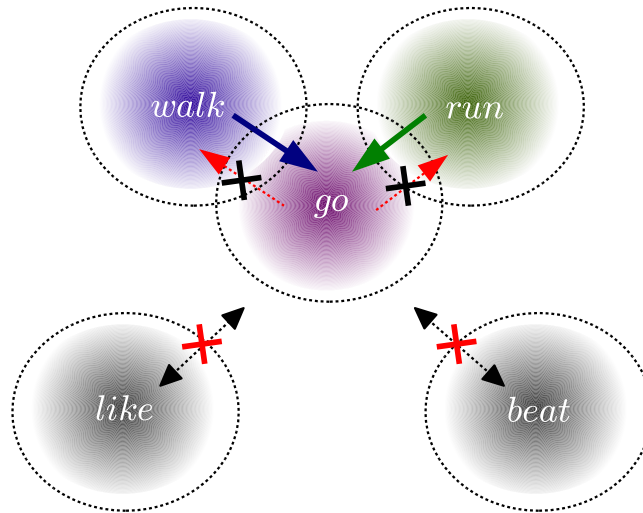


図 5.1: 行動要素の指示領域に基づいた差異の例: 行動要素をそれぞれ独立したものとせず、ある要素とある要素は関係があると考え。この例では、*go* と *walk*、*go* と *run* には、その意味の周辺において重なりがあると考え。それに基づいてこれらの語の間では意味の「貸し借り」ができるようにした。貸し借りが可能であることを図では矢印で表示した。また、行動要素の中には、そのような関係がなく意味を貸し借りできない語（本例では *like* や *beat*）も設定する。これにより、これまで同等であった行動要素間に差異を設ける。

5.2 実験設定

文法化実験においては、意味空間の設定を変化させた複数の実験を行った。行った実験条件のパターンは、表 5.1 の通りである。

意味の取り違えが設定された実験では、【*go*】で【*present*】を【*future*】と取り違える。この設定は、【*go*】が意味の中にあると現在の意味でも未来の意味とってしまう、ということに相当する。共起頻度が設定された実験では、*go* に対して *future* の共起頻度を 80% に設定する。意味の貸し借りが設定された実験では、*go* が *run* および *walk* の単語型ルールを借りることができる。この場合の借りたルールの優先利用率は 50% である。

各実験はランダムシードを変えて 100 試行を行った。

5.2.1 共通の設定

文法化実験に共通の意味設定を述べる。意味要素の設定を表 5.2 に示す。意味空間の大きさは 300^4 である。

表 5.1: 実験条件

実験	学習	意味要素間の関係		
		取り違い	共起頻度	貸し借り
実験 1	完全	なし		
実験 2	replace なし	なし		
実験 3	完全	あり	なし	なし
実験 4	完全	なし	あり	なし
実験 5	完全	なし	なし	あり
実験 6	完全	なし	あり	あり

表 5.2: 文法化実験における意味要素設定

i	行動要素 P_i	j	対象要素 X_j	k	時制要素 F_k
1	<i>go</i> ³	1	<i>john</i>	1	<i>past</i>
2	<i>run</i>	2	<i>mary</i>	2	<i>present</i>
3	<i>walk</i>	3	<i>gavin</i>	3	<i>future</i>
4	<i>like</i>	4	<i>heather</i>		
5	<i>beat</i>	5	<i>pete</i>		

ILM と学習の設定を述べる。発話エージェントが複数の可能な発話文を導出した場合の発話選択の基準は、合成度の高いルールによる導出を優先する⁵。学習エージェントは、発話エージェントからの発話をひとつ受け取るたびに、可能な限り学習を行う。replace を行わない設定である実験 2 においては、merge および chunk について、行える限り行う。学習エージェントが可能なすべての学習を終了したのち、発話エージェントが次の発話を行う。すなわち、学習は一回の発話ごとに漸次的に行われる。これを発話回数である 150 回⁶繰り返す。150 回の発話を終えた発話エージェントは削除され、次の世代へ移る。この世代では前世代の学習エージェントが新たな発話エージェントとなり、新たに何の知識ももたない学習エージェントが追加され、同じ発話と学習を繰り返す。これを 250 世代⁷ ま

³自然言語の英単語としての *go* は、一般には自動詞であり目的語をとらない(‘Mary goes john.’で「mary が john (のところへ会いに) 行く」という意味にはならない)。しかしここでは *go* という意味要素が指し示すのは *go to* の意味だと解釈してほしい。*run, walk* についても同様である。

⁴ $5 \times 5 \times 4 \times 3 = 300$.

⁵この変更は、意味空間が大きくなったことに伴う文法の収束の遅延に対応している。文法があまりにも収束せず激しく変化すると、意味変化現象が保たれなくなるため、ある程度収束するように発話選択の基準を合成度優先にした。

⁶意味空間の大きさが 300 となったことに伴い、発話数が意味空間の半分である 150 回に(予備実験の設定から)変更された。

⁷世代数を予備実験から変更した理由は、意味空間が広がり、発話数が増加したこと、および文法化の経

で行った。

5.2.2 文法化を含む意味変化の経路の数え方

ここでは、モデル内で定義した文法化を含む意味変化の経路を、具体的にどのような条件で判定して数えているのかを示す。

ある単語型ルールに見られた終端記号列が、ほかの意味のための単語型ルールになったとき、意味の変化元 (origin) を M_{ori} 、変化先 (destination) を M_{dest} とすると、 $M_{ori} \rightarrow M_{dest}$ という変化経路が一本カウントされる。以下では、この変化経路を導出の記号 $\rightarrow$ と区別して、記号 $\xrightarrow{p}$ を用いて $\{M_{ori} \xrightarrow{p} M_{dest}\}$ と表記する。この場合、途中に単語型ルールを挟んでいない限り、途中の経路は問わない。すなわち、経路の途中に無意味音列をはさんでいても、また合成的な単語型でないルールをはさんでいてもよい。図 5.2 に例を示す。

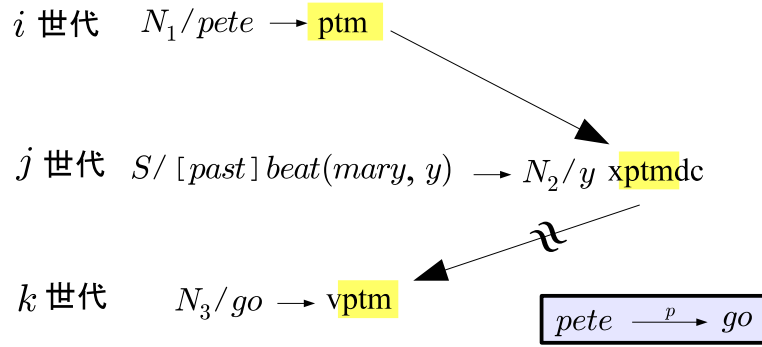


図 5.2: 変化経路のカウントの例： 図の矢印は、ある終端記号列が別の意味のための終端記号列へと変化する経路を示す。 $\sim$ で途中を省略された矢印は、途中に単語型ルールを挟んでいない複数の変化経路をまとめたものである。図の例では、 i 世代から j 世代までは単語型ルールから単語型でないルールへの変化であるので、変化経路としては完結していない。 j 世代から k 世代へは $\sim$ で省略された矢印なので、間に単語型ルールを挟んでいない。 k 世代で初めて単語型ルールへと変化したので、図に示した全体として $\{pete \xrightarrow{p} go\}$ の変化経路である。図の右下に最終的にカウントされる変化経路を示した。他の図でも同様である。

例えば図 5.2 の $\rightarrow$ で示している経路を取った場合、変化元 $M_{ori} = pete$ 、変化先 $M_{dest} = go$ の変化経路 $\{pete \xrightarrow{p} go\}$ が一本カウントされる。 j 世代から k 世代の間も、単語型ルール以外であればどこへ移動していてもよい。

図 5.3 は、連続した変化経路がどうカウントされるかを説明したものである。まず、 i 世代から j 世代にいたる経路 P_1 は、図 5.2 と同様に $\{pete \xrightarrow{p} go\}$ の変化経路としてカウントされる。次に、 P_2 の変化先は $\langle ptm \rangle$ を含んでいないが、一定個数以上の連続した終端記号列 $\langle xpt \rangle$ の移動とみなされ $\{go \xrightarrow{p} walk\}$ の変化経路としてカウントされる。次に P_3 は

路を検索する必要があることなどによる計算時間との兼ね合いである。

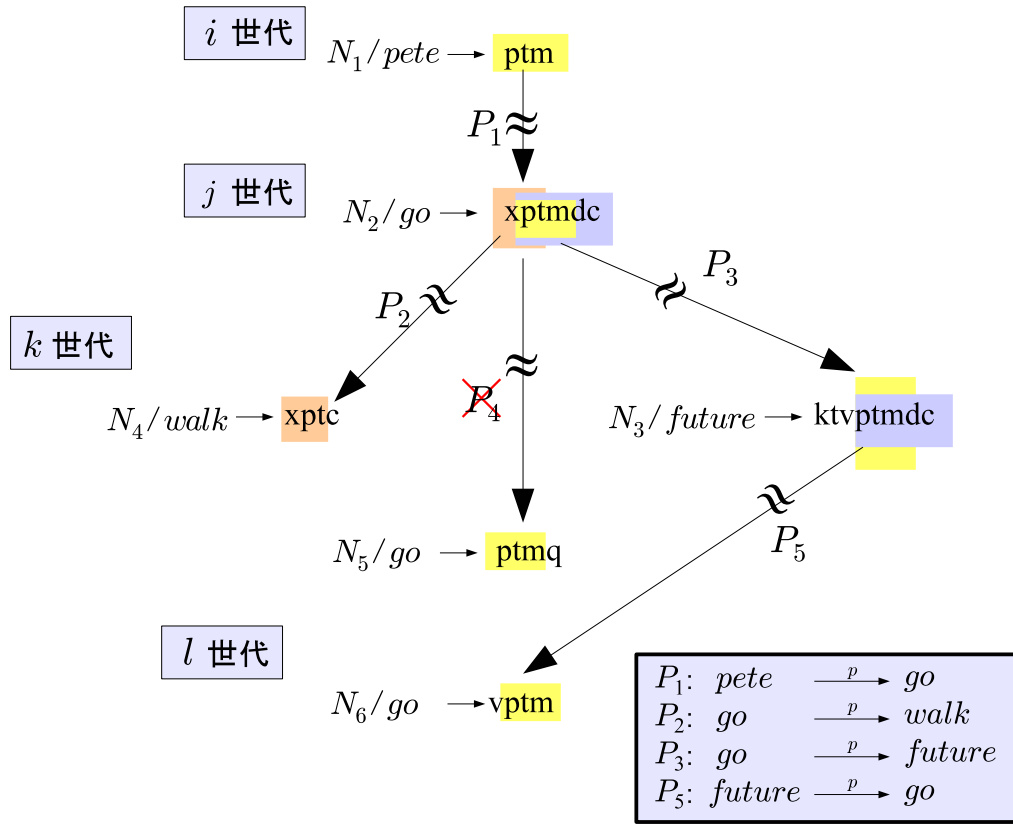


図 5.3: 連続した変化経路のカウントの例

《ptm》の移動であるが、 $[go \xrightarrow{p} future]$ としてカウントされ、 P_1 から P_3 への連続した経路はそれぞれ別の経路と見なされる。従って、単語型ルール $N_3/future \rightarrow ktvptmdc$ に含まれる《ptm》が i 世代の【pete】のための単語型ルールから来ていたとしても、 $[pete \xrightarrow{p} future]$ としてはカウントされず、前に数えた $[pete \xrightarrow{p} go]$ の続きの $[go \xrightarrow{p} future]$ が一本カウントされるだけである。 P_4 は間に単語型ルールを挟んでいなかったとしても、【go】のための単語型ルールから【go】のための単語型ルールであるので、意味変化していないとして変化経路にカウントされない。最後に、ここまでの例から分かるように、 P_5 は $[future \xrightarrow{p} go]$ の変化経路としてカウントされる。

全てのルールおよび終端記号はタグ付けされており、全ての終端記号列はその記号列が生み出された親ルールを一意に特定できる。従って全ての終端記号は、祖先をたどることにより何世代目のどのルールからどのような経路を経てその単語型ルールへと流れ着いたのかを追うことができるようになっている。

これらの変化経路について、表 4.10(4章)で示した定義に従って、範疇内変化、範疇間変化、文法化、脱文法化に分類する。例えば変化経路 $[go \xrightarrow{p} future]$ は文法化である。

意味変化経路は全部で 156 通り⁸ある。

以下の実験では、意味変化を検索する対象となる終端記号列は 3 個以上の連続した終端記号列に限った⁹。

5.3 結果

5.3.1 各試行間の変化経路数の特徴

図 5.4 は、特定のランダムシードで行った二つの試行について、156 通りの変化経路がそれぞれ何本カウントされたかの分布を示したものである。例として実験 1 のデータを挙げた。他の実験も同じ傾向を示す。

図 5.4 から分かるように、どの変化経路が多く見られるかの分布は各試行ごとに異なって

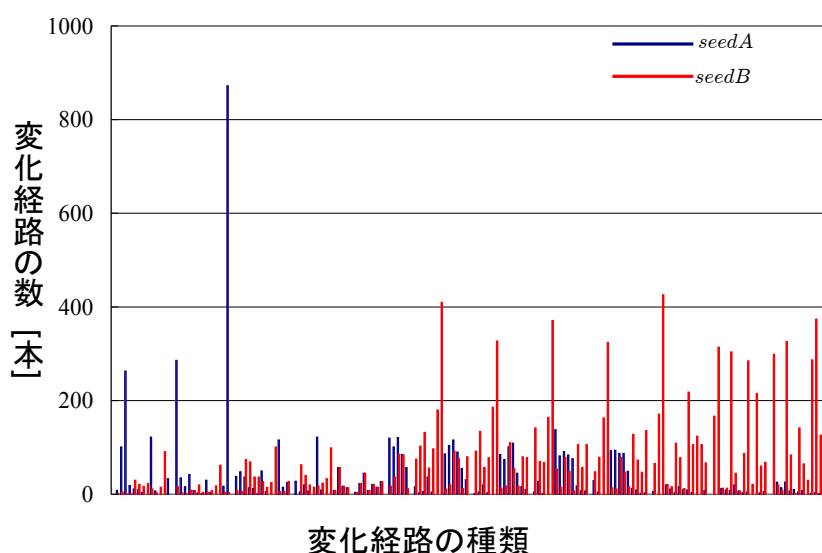


図 5.4: ある二つの試行における変化経路数の分布

いる。例えば、図 5.4 の試行 A では一部に大きなピークがあるが、その変化経路は試行 B においてはピークにならないといったことがわかる。

これは、ある意味変化現象が起きると、その意味変化から派生した型の意味変化が大量に生まれるという現象が起こりやすくなるためで、その結果その試行全体がひとつの意味変化からの派生型で占められるということがしばしば起こるからである。このように各々

⁸意味要素の数 $13 \times (13 - 1) = 156$ 。

⁹2 個の長さ以下の記号列は変化経路がつながっていても数多く確認される可能性が高いからである。

のシードでの試行では、変化経路が特定の意味に偏るため、以下では100試行の合計経路数について議論する。

5.3.2 実験1：意味要素間の関係が全くない実験の結果

意味要素間に関係を設定しない実験の結果を示す。この実験はすなわち、予備実験に時制要素を導入した実験である。

変化経路の総数を図5.5に示す。

横軸は変化経路の変化先の意味、縦軸は変化経路の数を示す。図5.5において、変化経路

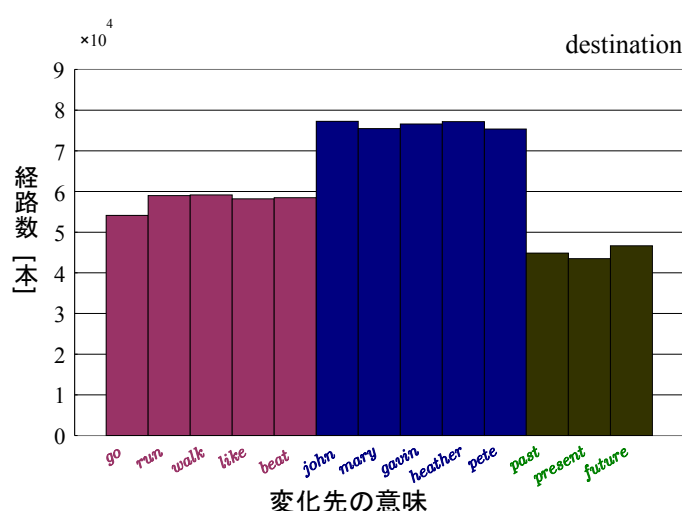


図 5.5: 変化経路の総数

〔動詞または名詞 $\xrightarrow{p}$ 機能語〕が確認された。従って、意味空間に時制要素を導入したことによって、文法化に当たる変化経路が表現できたことになる。図5.5に見られるように、意味に設定がない状態でも、変化経路数の分布について語彙範疇ごとに構造化した分布がみられる。

図5.6は、単語型ルール数の総数である。図5.5と図5.6とを比較して分かるように、単語型ルール数が同じ構造を持っている。動詞、名詞、助動詞¹⁰のそれぞれの語彙範疇内では有意差¹¹がなく、語彙範疇間には有意差があることが分かった。従って、語彙範疇ご

¹⁰対象要素を指し示す単語型ルールは名詞、行動要素を指し示す単語型ルールは動詞に対応すると考えたように、以下では時制要素を指し示す単語型ルールを助動詞と呼ぶことがある。助動詞は機能語に含まれるため、時制要素を指し示す単語型ルールを機能語と呼ぶ場合もある。

¹¹一般に変化経路の数の分布は正規分布に従わない。以下では、正規性が棄却されることを確認したうえで、検定には母集団の分布型を前提にしないノンパラメトリック検定を用いる。特に断りのない場合、2つの変数間の有意確率に言及している場合は Wilcoxon 検定、複数の変数間の有意確率に言及している場合は Kruskal-Wallis 検定の有意確率である。これらの検定の原理については付録 C 参照。

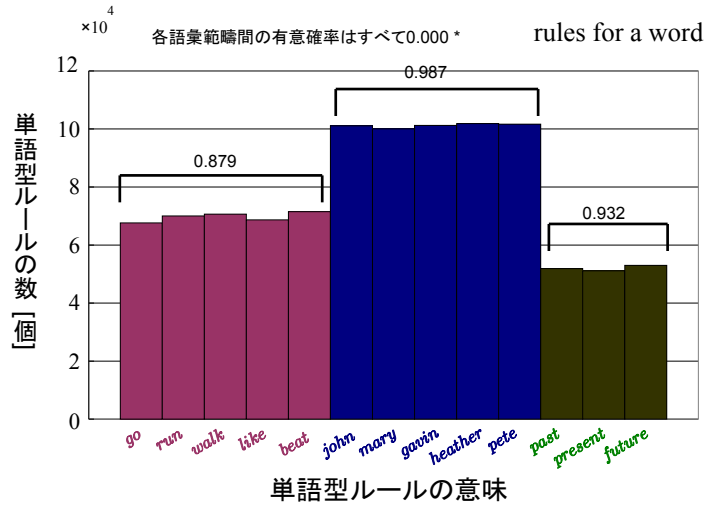


図 5.6: 単語型ルールの総数

との変化経路数の違いは、モデルが内包する意味表示 $[M_i]P_j(X_k, X_l)$ における述語、項、時制表示に基づく構造だと考えられる。特に、対象要素はこの意味表示内で二回使われること、時制要素は全部で3種類であるが他の要素は5種類あること、などの構造に起因した分布であると考えられる。

単語型ルールが多く存在すると、それだけ意味変化経路の変化元または変化先になる数も多くなるはずである。従って、経路数を変化先のルール数で正規化したものが図 5.7 である。

前節で述べたように、本研究では【go】と【future】に関して意味空間に構造を入れる実験を行う。そのような意味空間を入れる前の、【go】と【future】の間の変化経路を図 5.8 に示す。図 5.8 の a) は変化元 $M_{org} = \text{【go】}$ からの各単語への意味変化を、それぞれの変化先のルール数で正規化したもの、b) は逆に変化先 $M_{dest} = \text{【future】}$ への各単語からの意味変化を、それぞれの変化元のルール数で正規化したものである。

図 5.8 の a) と b) のどちらにおいても、前述したモデルの構造に基づくと思われる語彙範疇間の差はあるが、同じ語彙範疇内の単語間には差がない。例えば $M_{ori} = \text{【go】}$ からの三つの機能語への変化経路は互いに差がないことがわかった。

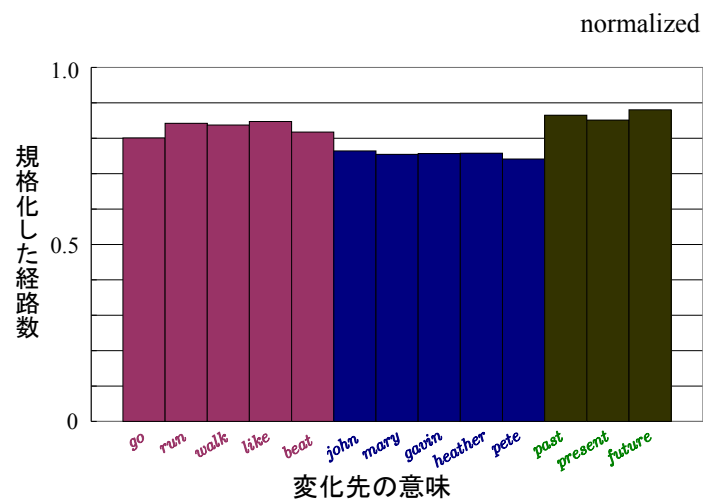


図 5.7: 正規化した変化経路数（変化先のルール数で正規化）

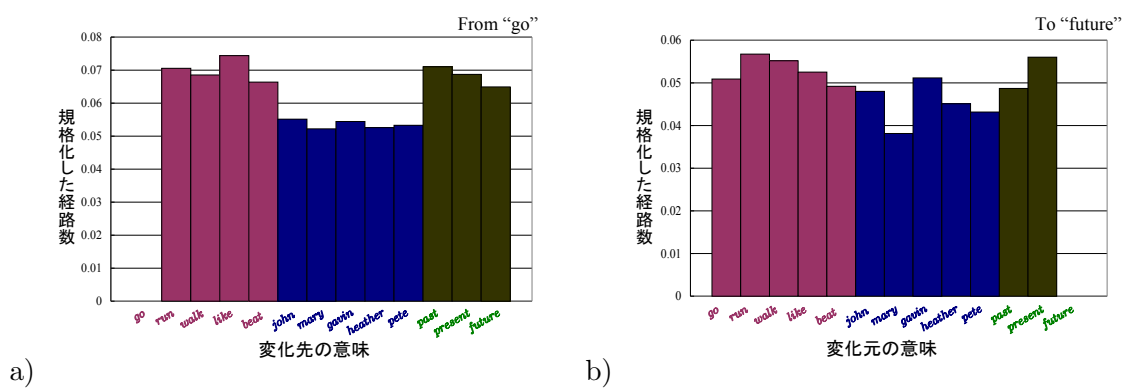


図 5.8: a) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と b) $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化

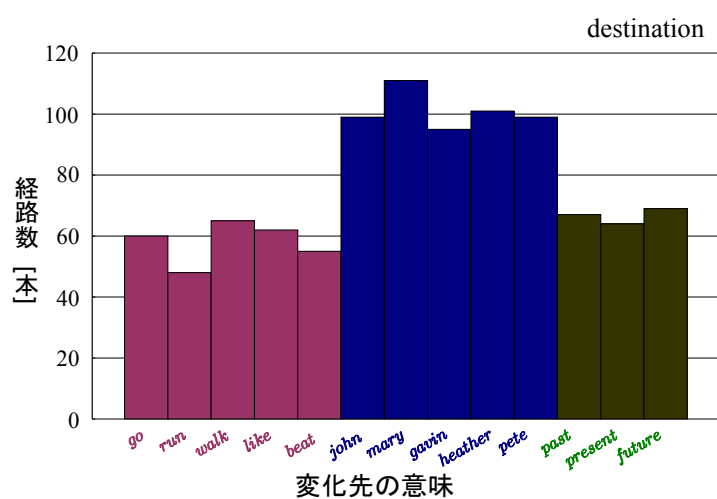
5.3.3 実験2：学習エージェントがreplaceをしない実験の結果

次に、学習エージェントがreplaceをしない実験2の結果を示す。実験2においては、学習エージェントがreplaceをしないこと以外はすべて実験1と同じ設定である。

図5.9は、意味変化経路の総数 a) と単語型ルールの総数 b) を示したものである。

図5.9a)を、実験1の結果である図5.5と比べると、分布の形はよく似ているが、縦軸の絶対数が大きく違っていることに注意されたい。すなわち、学習においてreplaceを行わないと、1試行あたり数本の意味変化経路しか観察されない（ほかの実験の設定との比較は後述。6.1節、図6.1）。しかもこの意味変化経路の大幅な減少は、単語型ルールの数の減少によってもたらされたものとはいえない。なぜなら、図5.9のb)によると、意味変化経路が学習が完全である実験1と比較して全くオーダーの違う数であるのに対して単語型ルールの総数の減少は半分程度にとどまっている。従って図5.9は、学習にreplaceがない場合に、単語型ルールが意味変化に使用される可能性が大幅に減っていることを示している。

a)



b)

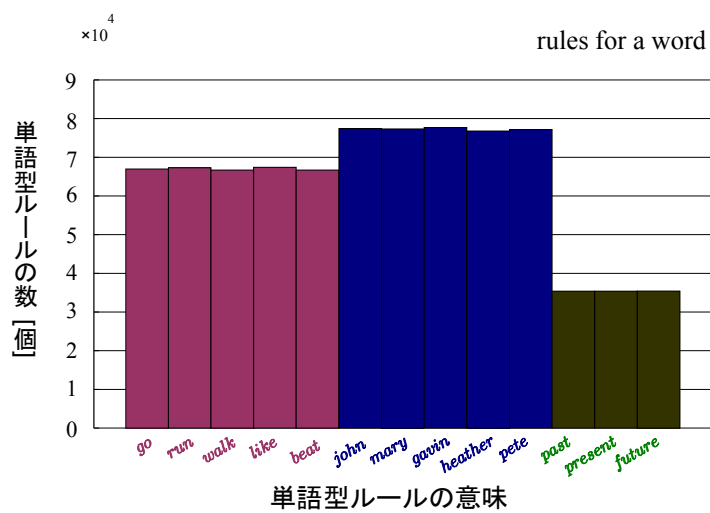


図 5.9: a) 変化経路の総数と b) 単語型ルールの総数

5.3.4 実験3：意味の取り違えが設定された実験の結果

次に、意味の取り違えが設定された実験3の結果を示す。実験3においては、学習エージェントは学習時に【go】で【present】と【future】を取り違える。5.1.2.1節で説明したように、「【go】で【present】と【future】を取り違える」とは、【go】と【present】が意味と一緒に現れた場合に、【present】を【future】だと勘違いして学習することである。実験3においては、この意味の取り違えが設定されている以外は、すべて実験1と同じ設定である。

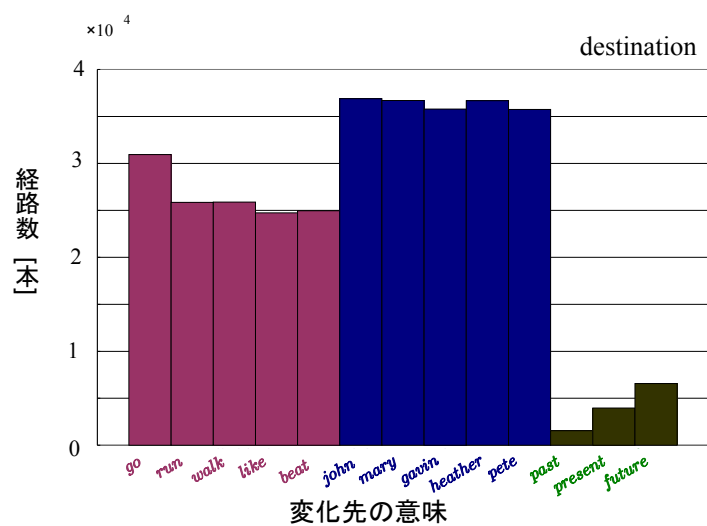
図5.10は、【go】で【present】と【future】を取り違える設定による実験3における、意味変化経路の総数 a) と単語型ルールの数 b) である。

図5.10a) から、すべての意味変化経路の総数が、実験1に比べて $\frac{1}{3}$ 程度に抑えられていることが分かる。その中でもさらに、文法化を含む機能語への意味変化経路の数が他の語への意味変化経路と比較して非常に少ないことがわかる。意味空間の構造に何の設定もされていない実験1(図5.5)がモデルが内包する構造だけを反映したものだとしてこれを基準にして考えると、ここで設定された意味の取り違えによって、すべての意味変化が大幅に減少し、とくに機能語への変化は強く抑制されたことを示す。他の実験との意味変化総数の比較は、6.1節において行う。

また、実験1においては有意差のなかった同種の語彙範疇において、意味の取り違えに関係した語への意味変化が増加している。例えば【go】への変化数は、動詞内においてほかの動詞の変化数より多い。また、【future】への変化数は、【past】【present】への変化数と比して多い。

図5.10b)はこのときの単語型ルールの数である。図5.10b)の縦軸のオーダーが実験1の図5.5に比べて2オーダーほど減っている。すなわち意味の取り違えによってすべての意味変化が大幅に減少した原因、その中でも意味の取り違えによって機能語への変化が強く抑制された原因は、単語型ルール数の減少、ならびに、その中でも特に機能語の減少にあることが分かる。また、【future】への意味変化数が【past】への意味変化数に比して多くなる原因は、単語型ルール数の差によるものであることが示唆される。一方で【go】への意味変化数が他の動詞に比して多い原因は、単語型ルール数の差によるものではないことが考えられる。すなわち、意味を取り違えるときにその存在が条件とされている【go】が、単語型ルール数の絶対数は変わらないにも関わらず、他の動詞と比べて意味変化の変化先になりやすくなっていることが示される。

a)



b)

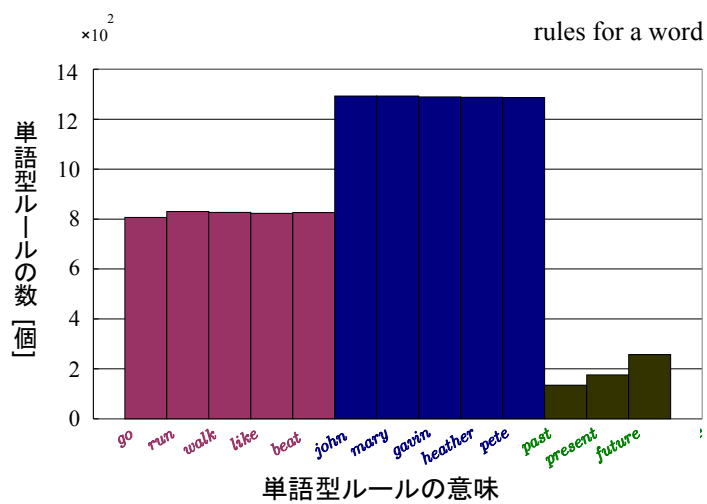


図 5.10: a) 変化経路の総数と b) 単語型ルールの総数

5.3.5 実験4：意味の共起頻度が設定された実験の結果

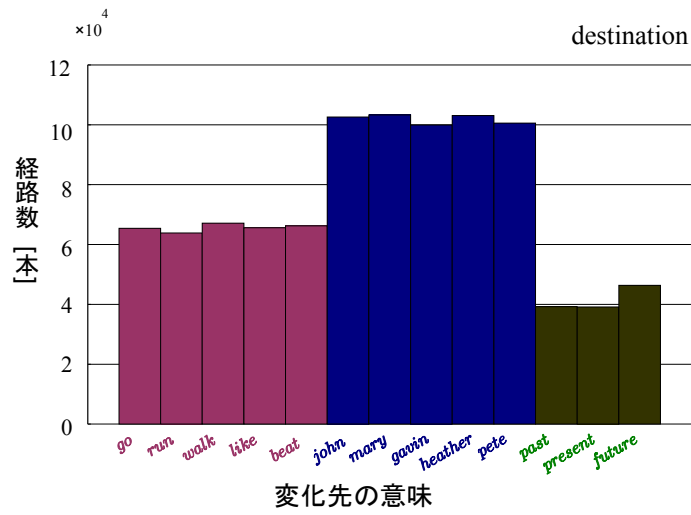
次に、【go】に対する【future】の共起頻度を80%で設定した実験4の結果を示す。実験4においては、意味に【go】を含む場合、80%の確率で【future】も含んでいる。この共起頻度が設定されている以外は、すべて実験1と同じ設定である。

図5.11に示したのは、意味変化経路 a) および単語型ルールの総数 b) である。

変化経路については、機能語のなかで【future】への変化がやや増加している。一方で単語型ルールはあまり増加しないため、単語型ルールの数で正規化しても【future】への変化の増加は確認できる。経路数を変化先の単語型ルール数で正規化したものが図5.12である。

図5.13は、【go】から各単語型ルールへの変化を変化先のルール数で正規化したもの a) と、【future】への各単語型ルールからの変化を変化元のルール数で正規化したもの b) である。a)において、 $[go \xrightarrow{p} future]$ の変化経路の数が、 $[go \xrightarrow{p} past]$ や $[go \xrightarrow{p} present]$ の数に比べて多くなっていることが分かる。b)において、 $[go \xrightarrow{p} future]$ の変化経路の数が、他の動詞からの変化経路に比して多いかどうかははっきりしない。

a)



b)

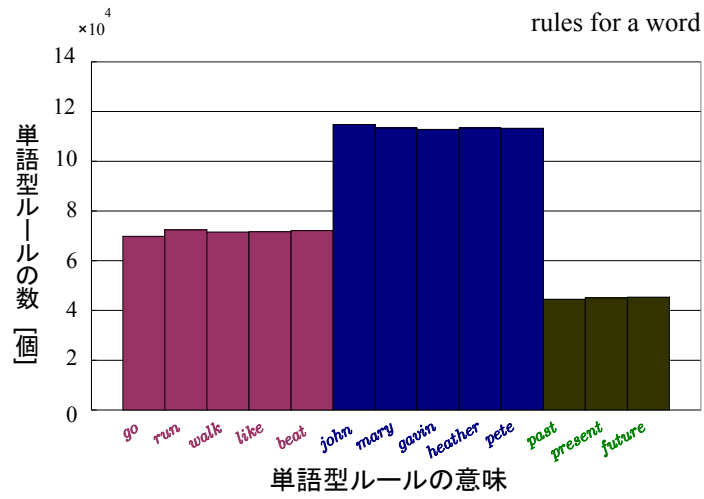


図 5.11: a) 変化経路の総数と b) 単語型ルールの総数

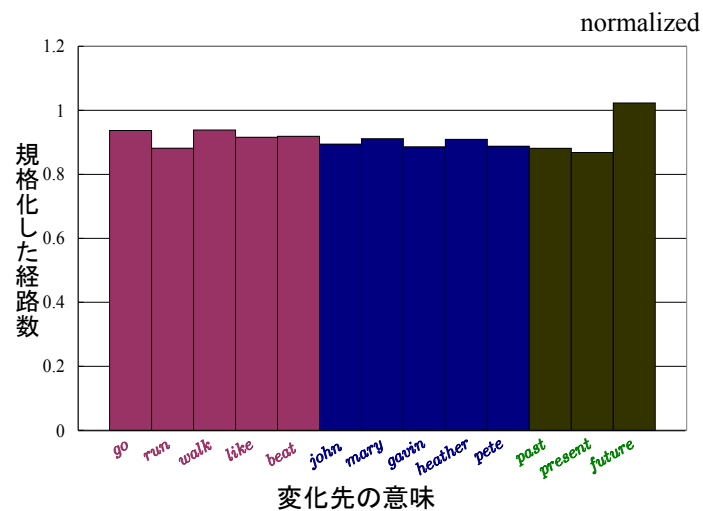
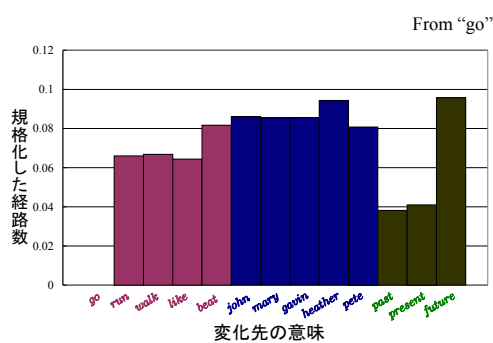
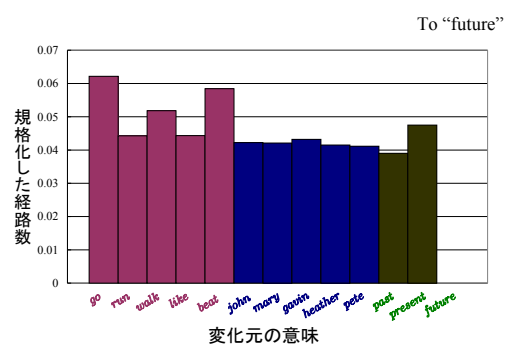


図 5.12: 正規化した変化経路数 (変化先のルール数で正規化)



a)



b)

図 5.13: a) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と b) $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化

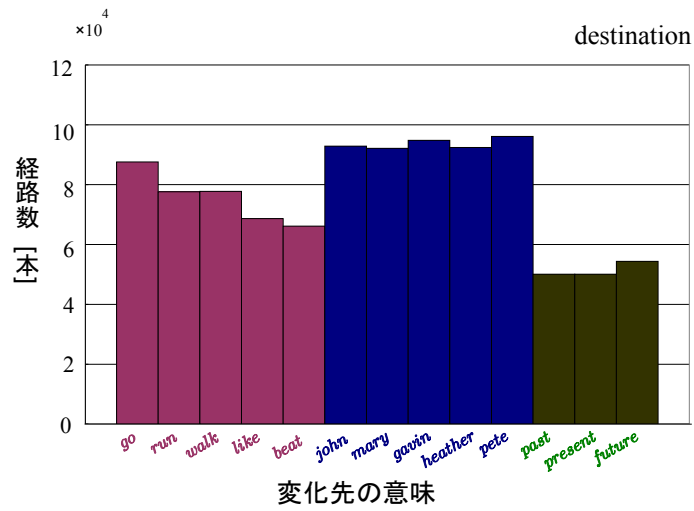
5.3.6 実験5：意味の貸し借りが設定された実験の結果

次に、【go】に【walk】と【run】が単語型ルールを貸すことができる設定による実験5の結果を示す。実験5においては、この意味の貸し借りが設定されている以外は、すべて実験1と同じ設定である。

図5.14は、実験5における意味変化経路 a)、および、単語型ルールの総数 b) である。図5.14の a) と b) を比較すると、他から単語型ルールを借りることができる【go】の意味の単語型ルールが増加し、それに伴って【go】への変化経路も増加していることが分かる。また、単語を貸す側である【run】および【walk】の意味の単語型ルールも増加するため、これらを変化先とする変化経路も増加している。一方で、【future】の意味への変化経路もやや増加しているが、【future】の意味の単語型ルールは増加していない。従って、【future】への変化経路が増加したのは、単純に単語型ルールが増えたためではない可能性がある。従って、単語型ルールの数で正規化しても【future】への変化の増加は確認できる。経路数を変化先の単語型ルール数で正規化したものが図5.15である。

図5.16は、【go】を変化元とした各意味への変化経路数を変化先のルール数で正規化したもの a) と、各意味から【future】を変化先とした変化経路数を変化元のルール数で正規化したもの b) を示したものである。図5.16a) では、変化経路 $[go \xrightarrow{p} future]$ が他の機能語への変化に比べて増加していることが見てとれる。また、単語型ルールを貸し出した単語への変化経路 $[go \xrightarrow{p} run]$ と $[go \xrightarrow{p} walk]$ がほかの意味への変化に比べて明確に増加している。一方で、図5.16b) では、【future】を変化先とした変化には、【go】を変化元とする変化が目立って増加していることは確認できない。

a)



b)

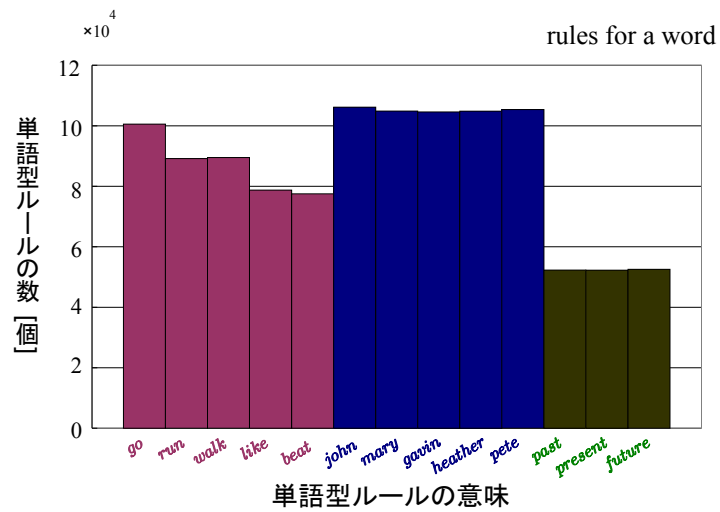


図 5.14: a) 変化経路の総数と b) 単語型ルールの総数

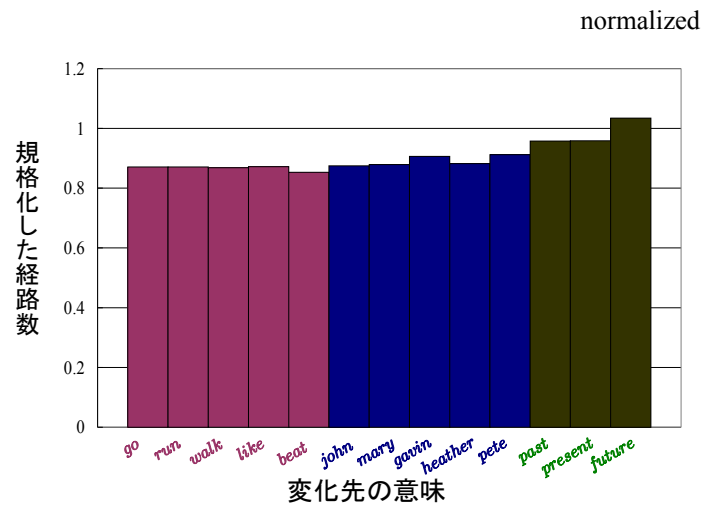
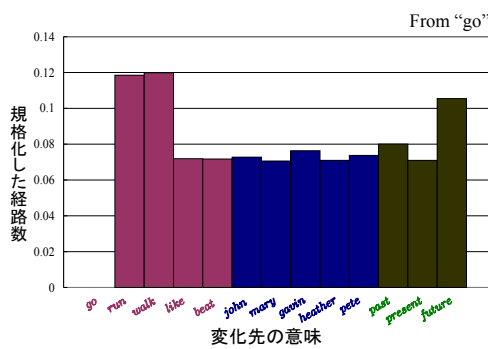
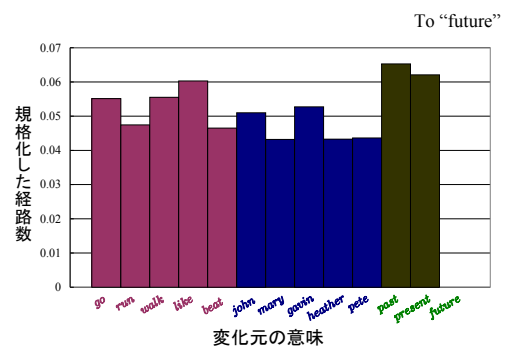


図 5.15: 正規化した変化経路数 (変化先のルール数で正規化)



a)



b)

図 5.16: a) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と b) $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化

5.3.7 実験6：共起頻度および意味の貸し借りが設定された実験の結果

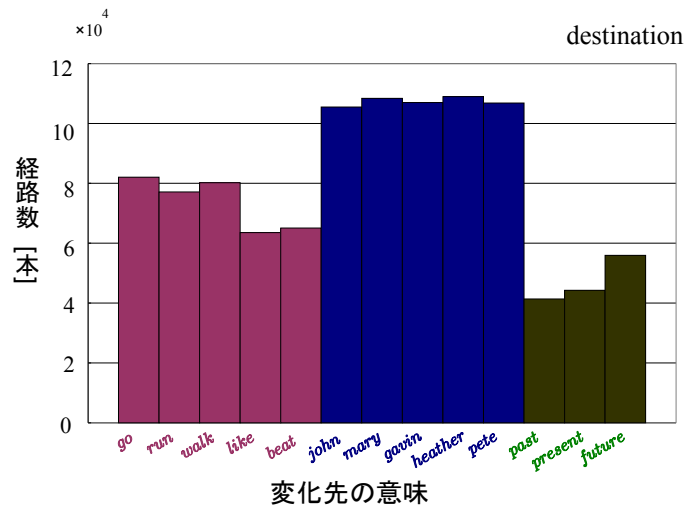
図5.17は、【go】に対する【future】の共起頻度を80%で設定し、かつ【go】に【walk】と【run】が単語型ルールを貸すことができる設定による実験6における意味変化経路a)および単語型ルールの総数b)である。すなわち実験6は、実験4と実験5の両方の条件を備えている。

図5.17のa)とb)を比較すると、他から単語型ルールを借りることができる【go】の意味の単語型ルールが増加し、それに伴って【go】への変化経路も増加していることが分かる。また、単語を貸す側である【run】および【walk】の意味の単語型ルールも増加するため、これらを変化先とする変化経路も増加している。これらは実験5における特徴と同じである。【future】の意味への変化経路は図5.14a)と比しても明らかに他の機能語に比べて増加し、かつ【future】の意味の単語型ルールの数は他の機能語とあまり変わらない。これは他の機能語と比べて明確に【future】への変化経路が増加したことを示す。経路数を変化先の単語型ルール数で正規化したものが図5.18である。他の意味への経路と比較して、【future】への意味変化が多いことが確認できる。

5.19に示すのは、【go】を変化元とした各意味への変化経路数を変化先のルール数で正規化したものa)と、各意味から【future】を変化先とした変化経路数を変化元のルール数で正規化したものb)である。

変化経路〔 $go \xrightarrow{p} future$ 〕が他の機能語への変化に比べて増加している(5.19a)。また、単語型ルールを貸し出した単語への変化経路〔 $go \xrightarrow{p} run$ 〕と〔 $go \xrightarrow{p} walk$ 〕がほかの意味への変化に比べて明確に増加している。これは実験5の結果と同じ傾向である。また、【future】を変化先とした変化(5.19b)には、【go】を変化元とする変化が他の意味を変化元とする変化に比して明らかに多い。これは実験5では明確に確認できなかったことである。

a)



b)

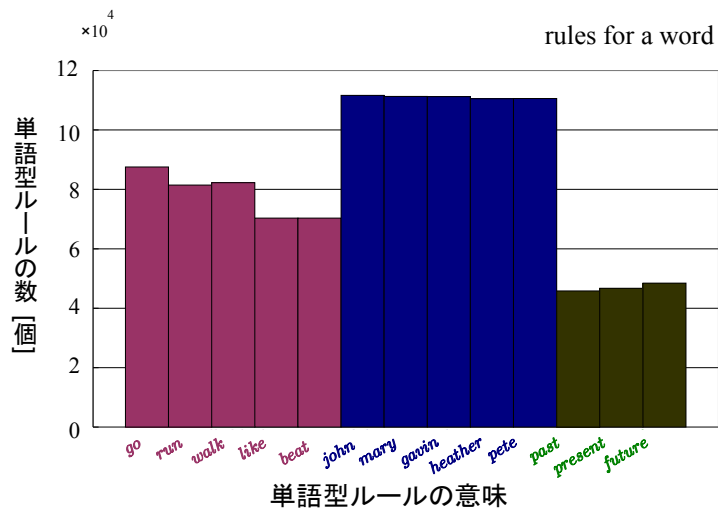


図 5.17: a) 変化経路の総数と b) 単語型ルールの総数

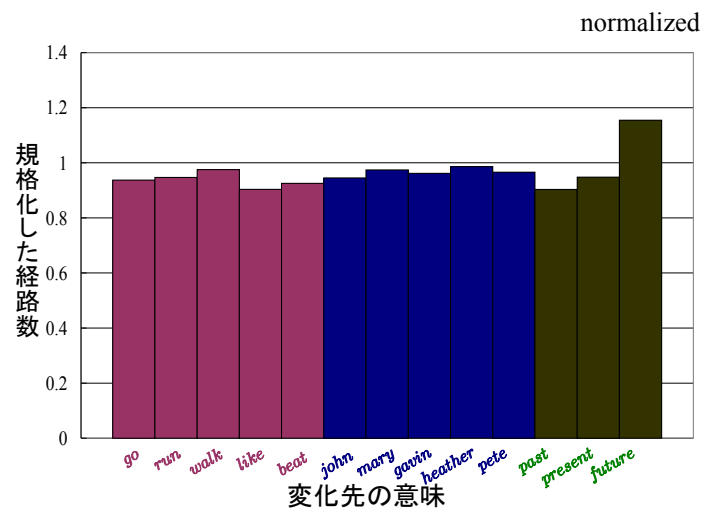
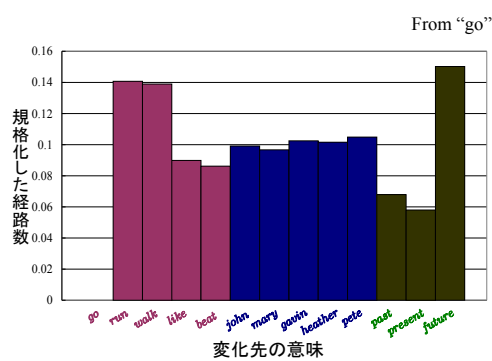
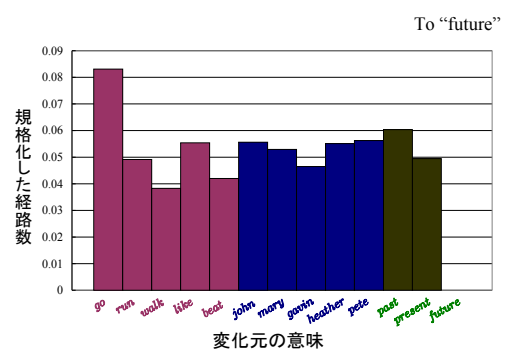


図 5.18: 正規化した変化経路数 (変化先のルール数で正規化)



a)



b)

図 5.19: a) $M_{org} = \text{【go】}$ からの意味変化と b) $M_{dest} = \text{【future】}$ への意味変化

第6章 議論

本章では、4章および5章の実験結果から導かれる諸点について議論を行い、本研究の文法化シミュレーションの結果が、実際の文法化について何を述べているのかについて明らかにする。

まず、5章で述べた実験結果を文法化のための意味空間設計方法の観点から考察する。そして意味の貸し借り（5.1.2.3節）の設定が意味変化の増大を促し、その増大した意味変化が意味の共起頻度（5.1.2.2節）の設定によって特定の要素間の変化の増大を導くことを主張する。一方で、意味の取り違い（5.1.2.1節）の設定は有効ではないことが示された。そこで次に、その理由を考察する。続いて、学習に *replace* がないと文法化を含めた意味変化がほとんど起こらないことが示されたことから、*replace* が主として担う言語学的類推が文法化に対して重要であることを主張する。最後に、本研究のシミュレーション結果から、Kirby モデルの発展としての本研究のモデルが文法化のモデルとしてどのような特徴を持っているのかについて考察し、本モデルが持つ制限について明らかにする。その上で、本研究が文法化をどこまで説明できるのか、さらに何を説明する必要があるのかを複数の観点から議論する。

6.1 有効な意味空間の設計

文法化実験においては、Kirby モデルをもとにした文法化モデルの設計として、意味空間を意味の取り違い（実験3）、共起頻度（実験4）、貸し借り（実験5）の3通りの方法で設計した。これらは、とくに【*go*】の意味を表す終端記号列が機能語である【*future*】の意味を表す機能語へと変化していくために必要だと考えられる意味空間の設計であった（5.1.2節）。この目的のために、どのような意味空間の設計が有効であったと結論付けられるかを検討し、その意味するところを議論する。

6.1.1 それぞれの意味空間設計のモデル内での役割

文法化実験において、各実験設定により得られた変化経路の総数を図6.1に示す。縦軸に意味変化の経路の数を表している。図6.1より実験2（*replace* をしない）においては意味変化がほとんど起こらなくなることが分かる。この結果は文法化を含めた意味変化現象を引き起こす再分析と類推の実現に、学習における *replace* が大変重要であることを示唆している。従って、この結果については節を改めて議論する（6.3節）。

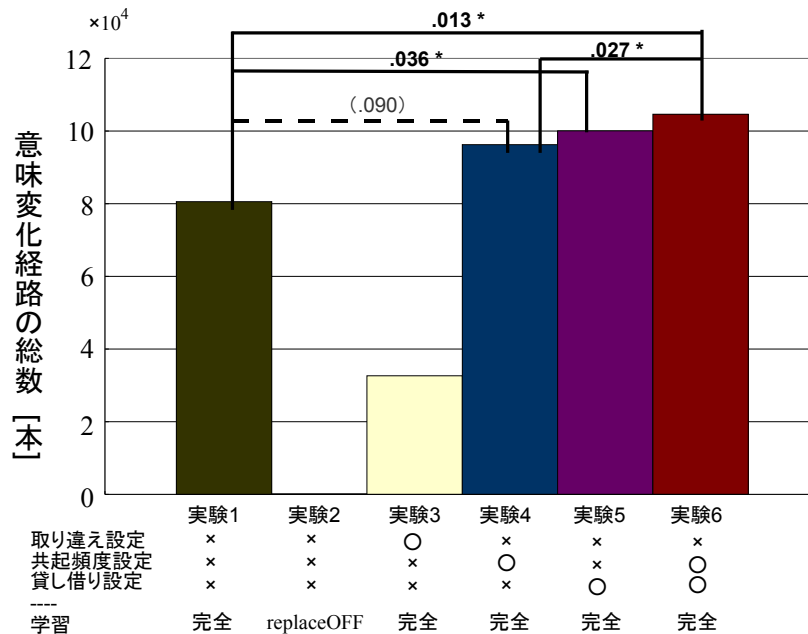


図 6.1: 意味変化総数の比較 : 図の下部に、各実験の意味空間の設定と学習の設定を示した。また、図の上部の数値は、各実験間の Wilcoxon 検定による有意確率であり、有意水準 $\alpha = 0.05$ で有意差が認められる場合 * で示した。また有意差が認められる実験間を実線で、認められない実験間は破線で結んだ。

また、実験 3 (意味の取り違いをする) においても、意味変化経路の総数がかなり減少する。この原因については 6.2 節で議論する。

図 6.1 によると、意味空間の設計として、共起頻度と意味の貸し借りが有効であったと考えられる。以下ではこれらの実験の結果に基づいて議論する。実験 1 (意味空間の設計なし), 実験 4 (意味の共起頻度), 5 (意味の貸し借り), 6 (意味の共起頻度 + 意味の貸し借り) との間で意味変化の総数について有意水準 .050 として検定を行った結果有意差が認められたのは、実験 1 と実験 5 (有意確率 .036), 実験 1 と実験 6 (有意確率 .013), 実験 4 と実験 6 (有意確率 .027) であった。すなわち何も設計しない状態との明確な差が認められたのが

- 意味の貸し借りのみ
- 意味の共起頻度 + 意味の貸し借り

の二つである。従って、これらの意味空間の設計は意味変化を増大させることに関して有効であるといえる。また、実験 4 と 6 に差があることは、意味の共起頻度だけではなく、それに意味の貸し借りを加えることが有効であることを示している。

次に、各実験において *go* から機能語になる意味変化の経路の数がどう変化したかを図 6.2 に示す。縦軸に意味変化経路の総数を表している。まず、意味空間の設定のない実験 1

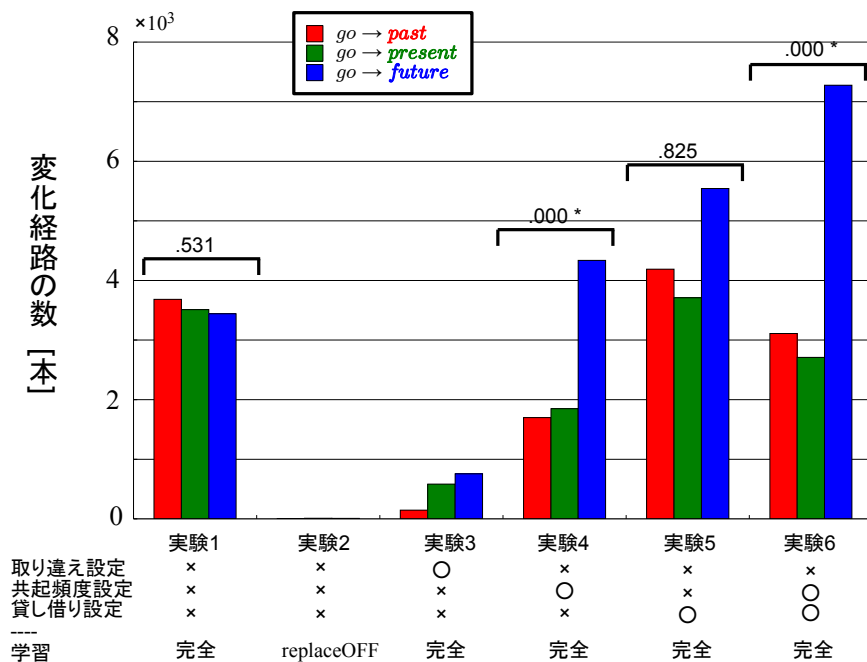


図 6.2: *go* から機能語になる意味変化経路の各実験設定間の比較 : 図の下部に、各実験の意味空間の設定と学習の設定を示した。また、図の上部の数値は、各実験間における *go* から各機能語になる意味変化の経路の間の 3 群間 Kruskal-Wallis 検定による有意確率であり、有意水準 $\alpha = 0.05$ で有意差が認められる場合 * を付した。

では、変化経路 $\{go \xrightarrow{p} past\}$, $\{go \xrightarrow{p} present\}$, $\{go \xrightarrow{p} future\}$ の三者間の Kruskal-Wallis 検定による有意な差がない (有意確率 .531)。次に、意味空間を設定することで、実験 4 (意味の共起頻度のみ)、実験 6 (意味の共起頻度 + 意味の貸し借り) においてはこの三者間に有意な差が認められた (有意確率 .000)。ただし実験 5 (意味の貸し借りのみ) においては、この三者間に有意な差が認められなかった。すなわち、何も設計しない状態との明確な差が認められたのが

- 意味の共起頻度のみ
- 意味の共起頻度 + 意味の貸し借り

の二つである。従って、これらの意味空間の設計は $\{go \xrightarrow{p} future\}$ の変化経路の増大に有効であることが示された。

以上のことから、意味の共起頻度と意味の貸し借りという意味設計は、表 6.1 にまとめられるような違った種類の役割をもつと考えられる。

従って、本モデルで有効な意味空間設計として、意味の貸し借りを設定することで意味変化現象を活発にし、意味の共起頻度を上げることで特定の要素間 (ここでは【*go*】と【*future*】) の経路を増やすという方法が考えられる。狙った変化経路 $\{go \xrightarrow{p} future\}$ の

表 6.1: 有効な意味設計とその役割

意味設計	意味変化の増大	特定の要素間の変化の増大
意味の共起頻度	有効とは認められない	有効
意味の貸し借り	有効	有効とは認められない

増大に最も効果的だったのが、両方の作用が含まれた実験 6 であったことがこれを裏付ける。

6.1.2 意味の貸し借り

意味の共起頻度が高いという設定は、現実において【*go*】と【*future*】の意味がよく一緒に使われるということの意味する。この意味は理解しやすい。しかし、「意味の貸し借り」が現実において何を意味しているのかを理解するには議論が必要である。本節では、本モデルで設定した「意味の貸し借り」が現実において何を意味しているのかを考える。

そのためには先に、なぜ意味の貸し借りが本モデルにおいて意味変化を増大させるのかを考察する必要がある。本モデルでは、【*go*】が【*walk*】や【*run*】と意味的な重なりがあると考え、【*walk*】や【*run*】のための言語形式に【*go*】の意味を与えることができる、という意味で「意味の貸し借り」といった。操作的には導出時に【*go*】の意味を別の言葉、すなわち本来【*go*】を意味しない単語で表現することができるということであった。

本来【*run*】を意味する言葉が【*go*】の意味でも使用出来るということは、【*run*】を意味する単語が多義的になるということである。モデルにおいては、これが多義性¹を生み出し、多義的になった語からの意味変化を増大させる。と同時に、本来【*go*】を意味する単語から見れば、本来別の意味を表す単語が【*go*】の意味に利用できるということは、【*go*】の意味を表すほかの単語があるということであり、同義語が存在することに等しい。実際、モデルにおいてそのような親からの発話を聞く子供にとってみれば、同義語としてしか理解できないはずである。ILM において世代を経ると、これは完全な同義語として扱われるであろう。従って「同義語が存在し」「その同義語が多義的である」ことによって、役割変化のプロセス（4.3.3.1 節）の開始条件が調い、意味変化が増えと考えられる。

このことが現実においてどういうことに相当するのかを考える。「意味の貸し借り」は、そもそも「単語が指し示す意味領域に重なりがある」ことを仮定した（5.1.2.3 節、図 5.1）。現実において、自然言語の語彙が指し示す領域は、他の語彙の指し示す領域と重なりをもつと考えるのは自然なことである。そして、他の語との重なり「広い」言葉、すなわち多くの語と指示領域の重なりを持つ語ほど、同じ意味を表せる単語が多く（モデル内ではこれは同義語の増加として表出する）、またその語の形式が示す意味が多い（多義的である）

¹本モデルでの意味変化現象には同義語の存在とともにその同義語の多義性が必要であった。4.3.3.4 節参照。

と考えられる。本研究に用いたモデルでは、そのような言葉が意味変化を起こしやすい、すなわち変化元（モデルにおける【go】のための単語）となりやすい。ほかの意味と意味領域を共有しない設定になっている【like】や【beat】に比べて、意味領域に重なりのある【go】からの意味変化が多く観察されるという本実験の結果は、以上のように解釈できる。単語型ルールを他から借りることができる【go】ほどでないにしろ、単語型ルールを他に貸し出す側に設定された【run】や【walk】からの意味変化も【like】や【beat】より多く観察されたことも、これを裏付ける。

このことは、文法化の変化の起点（source²）にある語は、その意味領域を表す語の中でもっとも一般的である、すなわち「色」のついていない語であるとする諸説と合致する。例えば Bybee (2003) は、文法化の候補となる語は、例えば動作を表す動詞なら “go” や “come”、状態を表す動詞なら “be” や “have”、行為を表す動詞であれば “do” など、その意味領域の中でもっとも一般化した言葉であり、『saunter（散歩する）』『waddle（よたよた歩く）』『run（走る）』などは文法化しない、と述べている。ここで Bybee (2003) が挙げている “go” や “come” などは、本研究のモデル内の意味の貸し借りが設定された【go】と同じく、他の語との意味概念の重なりが広く、文脈において多義的に使用されやすい語だと考えられる。

以上の検討から、次のような解釈が可能である。本研究における実験6の設定による結果は、他の語との意味概念の重なりが広い語を起点とした意味変化が多くなり、その文脈でよく一緒に使われる意味へと変化するという文法化の特徴を表現したものである。

6.2 意味の取り違えがなぜ有効でなかったのか

学習の瞬間に意味を取り違える設定による文法化実験（実験3）において、この設定を行うと意味変化が強く抑制されるという結果が得られた（図 5.10a）。本節ではその理由を考え、本モデルにおける意味空間の設定に関する制限の一部を明らかにする。

【go】によって【present】を【future】と取り違える設定は、意味に【go】があるときは、【present】を【future】と思って学習する、ということであった。これは、【go】と【future】との間に強い結びつきがあり、【go】が【future】を強く想起させるという人間の意味理解の仕方を仮定して導入した設定である。

しかし本モデルにおいては、この設定は、端的に言えば【present】と【future】との区別が付けられないエージェントができてしまうという結果を招いたと考えられる。それは、学習後の知識を見ると分かる。

5.1.2.1 節で示したように、以下のルールセット R は、この意味の取り違えの設定下で

²本研究のモデル内の変化元（origin）に対応するものだと考えられる。一般に、文法化の一方向的な変化の起点になるような意味や概念を指す術語として source、文法化の変化方向の先にある意味や概念を指す術語として target が使われる。本研究では本章まで、モデル内の現象と現実の現象との直接的な混同や誤解を注意深く避けるため、モデル内における意味変化経路には「変化元（origin）-変化先（destination）」という用語を用いてきた。

は、chunk されて R' になる。

$$R \quad \begin{cases} r_1 : S/[present]go(mary, john) \rightarrow abcd \\ r_2 : S/[future]like(mary, john) \rightarrow abef \end{cases} \quad (6.1)$$

↓ 意味の取り違い設定下での chunk

$$R' \quad \begin{cases} r_3 : S/[present]p(mary, john) \rightarrow ab \ N_1/p \\ r_4 : S/[future]p(mary, john) \rightarrow ab \ N_1/p \\ r_5 : N_1/go \rightarrow cd \\ r_6 : N_1/like \rightarrow ef \end{cases} \quad (6.2)$$

このときの r_3 と r_4 は、本来の chunk では全く同じ知識となるために削除できるが、ここでは違う知識として残る。この二つのルールは、時制要素が違うだけの全く同じ意味を、全く同じ記号列へと導出するルールである。つまり、知識の上で【*present*】と【*future*】の区別が付いていない、これらを混同したエージェントが生まれるということになる。このような混乱した知識を持つ親からの発話を聞く子供もまた、学習の過程で混乱する。【*present*】と【*future*】の部分の意味だけが違う同じ文がたくさん生まれるため、正しく【*present*】や【*future*】の意味のための単語型ルールを獲得できない。

5.3.4 節で見たように、意味の取り違いによって意味変化現象が大幅に減少するのは、単語型ルールの大幅な減少に起因していた。しかも、その中でも特に機能語に当たる単語型ルールが減少していた。その結果から考えると、混乱した知識を持った親の発話からでは正しく【*present*】や【*future*】の意味のための単語型ルールを獲得できないことが、意味を取り違える設定によって大幅に意味変化が抑制された原因であろう。

この例のように、Kirby モデル、あるいはその発展としての文法化モデルにおいては、意味空間の設計の仕方に強い制限があり、モデルの特性をよく考えて設計する必要がある。これらのモデルの制限については、6.4 節でさらに議論する。

6.3 学習における replace の重要性

学習において replace を行わない実験（実験 2）によって、replace を行わないと、文法化はもとより意味変化自体がほとんど確認できないことが示された（図 5.9a）。この結果は、文法化またはそれを含む意味変化に replace が重要な役割を果たしていることを示唆する。replace がもたらす効果については 3.2.3 節で確認しているので、本節では学習の中で merge, chunk, replace が実際どのくらい行われたを量的に調べ、replace がもたらす効果と考え合わせて replace の重要性について議論する。

図 6.3 は、実験 1 のある試行について、通常の学習における各オペレーション回数を時系列で示したものである。縦軸はオペレーション回数の積算、横軸は世代である。それぞれのオペレーションの回数に注目すると、図 6.3 から分かるように、一般化の数としては replace が圧倒的に多い。ここでは代表例を示しているが、replace を行わない設定である実験 2 以外の各実験設定や各試行（シード）間で、傾向は変わらない。

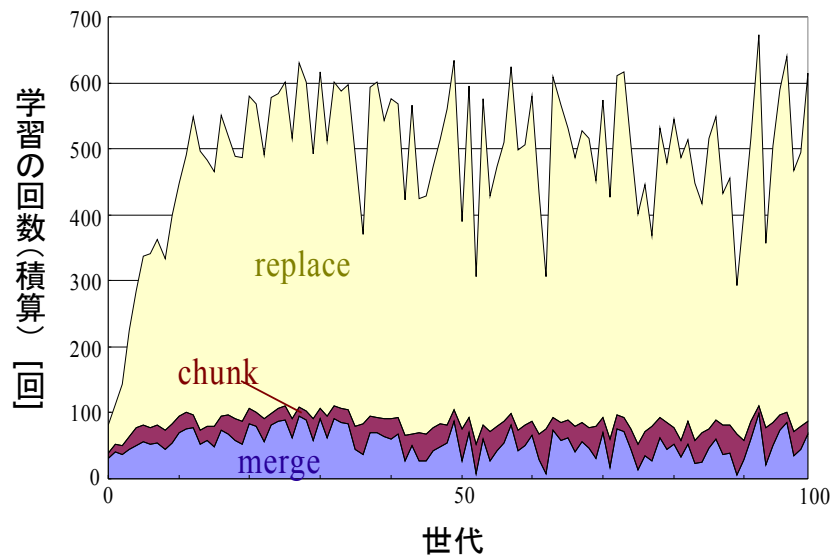


図 6.3: 各オペレーションの回数

一方、図 6.4 は replace を行わない実験 2 のある試行について、各オペレーション回数を時系列で示したものである。縦軸はオペレーションの回数の積算であり、横軸は世代を表している。特に図 6.3 と比較すべきは、回数の絶対的な値である。3.2 節で分析したように、各オペレーションが前提としている文法化を含む意味変化に必要な認知能力（再分析、認知的類推、言語学的類推）のうち、認知的類推以外は各オペレーションが分担していた。chunk が実現している能力は再分析で、merge が実現しているのは言語学的類推である。そして replace はこの両方を実現する。したがって、replace がなくなることにより、chunk や merge がそれを補うことも考えられないわけではない。しかし図 6.3 と図 6.4 とを比較すると、replace がなくなることによって chunk や merge が学習を補うことはなく、むしろ chunk と merge を合わせた学習の回数自体が減少していることが示されている。

この学習回数の減少と単語型ルールとの関連を考える。まず、再分析能力を担っている chunk と replace を比較する。chunk は新しい形式を発見したときに単語型ルールを生み出すのに対し、replace は chunk の発見した形式の拡散による再分析であり、新たに単語型ルールを生み出さない。次に、replace がなくなることの影響を考える。もし、replace を行わない場合においても、chunk や merge の回数が同じであれば、単語型ルール数は変わらないはずである。5.3.3 節で示したように、replace がなくなることによって意味変化は全く見られなくなるというほど減少したのに対して、単語型ルール数は半分程度の減少にとどまっていたのはこのためである。一回の replace によって新たな単語型ルールが変化しないにもかかわらず、replace を行わないことによって単語型ルール数

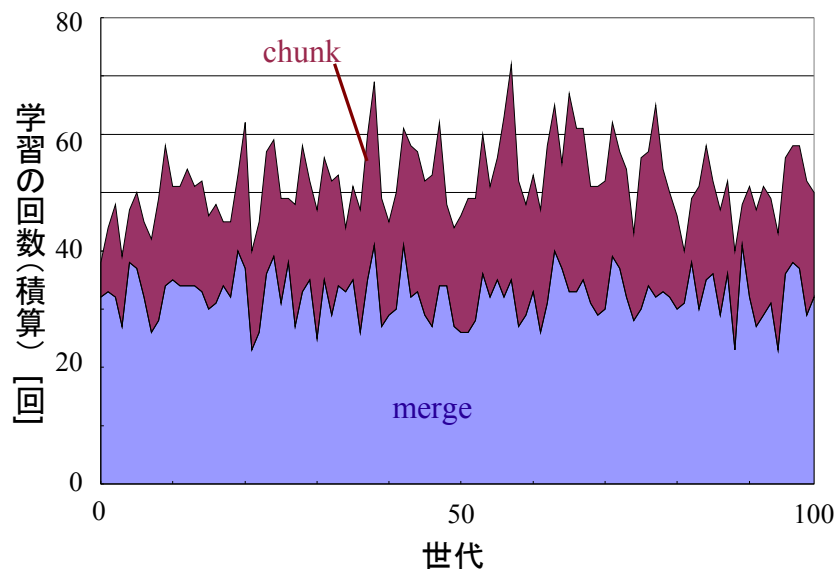


図 6.4: replace のない実験における各オペレーションの回数

が半分程度減少したことについては、replace を行わないことが chunk や merge の学習状況へ影響を与え、これらの回数が減少したことを示す。

以上のことを考えると、学習の過程として次のようなことが分かる。replace のみが可能な状況（merge や chunk はすでに施せるだけ施した状況）が何度も生まれ、replace を行うことでそれが引き金になって、さらなる merge や chunk が可能な状況が生まれる。そのような学習状況がよく起こる。

このことは、ある知識を他の自分の知識に適用し（replace）、そこからさらなる新しい知識を見つけ出す（chunk）というサイクルがあることを示す。replace が学習の中で支配的であるのは、既に存在する知識を他の知識へ拡大適用するという能力（すなわち言語学的類推）が、学習に非常に重要であることを示している³。

以上のことを踏まえ、文法化を含めた意味変化について考える。replace が主に、chunk で発見した新たな知識の言語学的類推による拡散を担っていたことを考えると、この学習の過程は、言語学的類推によってあらたに再分析可能な状況が生まれ、そこで生まれた新たな知識がまた言語学的類推により拡大する、というサイクルがあることになる。これは、Hopper and Traugott (2003) が、再分析と類推の繰り返し適用によって文法化が起こると述べたことに対応していると考えられる。replace がなくなり言語学的類推の能力が

³なお、言語学的類推が学習に重要であるという本節で得られた知見を、言語進化の文脈から分析すると、言語学的類推と言語進化との関係についてさらに重要な知見が得られる。本件については 6.7 節で議論する。

極端に制限されると、あるひとつの知識の発見を、自分の知識体系全体へ拡散する効果がなくなり、たとえ再分析ができたとしてもその知識が広がらない。従って使う言語の意味変化が起こらなくなる。本研究は、以上のような再帰的に起きる学習プロセスによる知識の構造化が、文法化が起きるために重要であることを提示したものと解釈できる。

6.4 意味が完全に共有されることによる意味空間設計への制限

文法化が、人間の意味理解の仕方の傾向が言語に表出した現象であると考えられる以上、文法化の構成的なモデルを考えるときには、常に意味空間の設計が重要である。本研究は文法化の構成的な研究プログラムの端緒を開くことを標榜している。従って本節では、本研究により明らかになった、Kirby モデルの発展としての文法化モデルで意味空間を設計する際の制限について述べる。

4.3.3.4 節にまとめたように、本研究で確認された意味変化現象は、多義性をもつ同義語の存在から起こった。このことは、同義語の存在が引き金になって起こるタイプの文法化が現実存在する可能性を示唆する。すなわち、同義語が多く存在するため、それに元来の役割を任せ、意味が薄れて他の意味を獲得するというプロセスを経て起こる文法化が現実存在する可能性がある。意味が薄れて他の意味を獲得する過程については、文法化に見られる漂白の過程として、特に Bybee (2003) などが指摘している (2.1.3 節)。また、文法化の過程には、何らかの意味で多義的となることによるあいまいさが伴うこともよく指摘されている (Hopper and Traugott, 2003 4 章)。しかし、意味を失うまでの過程に同義語の存在が重要な意味をもつ場合があるかどうかを明らかにするには、そのような観点で文法化現象を眺める必要がある。本研究は、一部の文法化には、同義語の存在が重要な役割を演じている可能性を示唆したといえる。これに基づいて、本研究は、同義語 (広く解釈すれば「同じ役割を担うほかの言葉」) の存在が、文法化の過程において変化元の語が意味を失うまでの過程に与える影響を、実際の文法化の例に対して調査する必要性を主張する。

一方で、本モデルが表現できるのがこの同義語派生型の文法化であることは、Kirby モデルの発展による本モデルの意味設計の困難さの一端を示している。文法化を含む意味変化現象が起こるには、どのような形であれどこかで何らかの「意味があいまいになる表現」が必要であると考えられる。そしてその意味を解釈するときに、解釈の違いから別の意味をもつ。多かれ少なかれそのようなあいまい性は文法化の経路のどこかで見られるものと考えられる。そのように考えた場合、Kirby モデルでこのあいまい性を表現するのは非常に困難であると考えられる。なぜなら、Kirby モデルでは意味とその意味を表す具体的な発話が話し手と聞き手の双方に同時に与えられるため、聞き手は意味を「取り違える」ことはそもそもありえないからである。もし、意味がそのまま発話と一緒に与えられる、すなわち意味が話し手と聞き手の間で完全に共有される Kirby モデルで「誤解」が起こりうるとしたら、それは

- 発話の中のある部分が複数の意味を表すために、その部分がどの意味を表すのかがわからない場合（多義性の存在）
- 同じ意味を表す形式が複数あるために、どちらがその意味なのかがわからない場合（同義語の存在）

のどちらかに因るしかないだろう。従って本研究の文法化モデルでは、多義性のある同義語の存在が引き金になって起こるタイプの文法化しか表現できなかった、という可能性が考えられる。

このように、Kirby モデルの意味空間の設計の困難さは、意味と発話の両方を同時に完全に受け渡せるモデルになっていることによるところが大きい。したがって今後、様々なタイプの文法化について構成的に論じるうえでは、この意味と発話の受け渡しの形式を変え、もっと自由な意味空間の設計を可能とする必要がある⁴。話し手と聞き手がそれぞれ意味を推論し、人によって意味を誤解したり勘違いしたりすることにより、多義的な同義語の存在に基づくものでない言語のあいまいさを表現することで、他のタイプの文法化についても構成的に議論することが可能となると考えられる。

6.5 文法推論アルゴリズムと再分析と類推の能力

本研究が Kirby モデルの発展として文法化のモデルを構築できたのは、以下の二つの方法に基づいたからである。

1. 認知言語学で言語現象として説明されている再分析と類推を、認知能力として定義しなおした（2.2.2 節）
2. 合成性を扱った Kirby モデルの学習オペレーションを分析し、これらのオペレーションが再分析と類推の能力を前提としていることを明らかにした（3.2 節）

つまり、Kirby モデルのオペレーションによって再分析と類推の能力が実現されているから、Kirby モデルで文法化が表現できるだろうとする分析が可能となったのは、本研究が再分析と類推を認知能力として定義しなおしたからである。言い換えると、実際に現象として現れている再分析現象と類推現象を、それらを引き起こすような能力として内部的な（すなわち頭の中での）操作に置き換え、実際に観察できる現象としての文法化と区別したことにより、文法化の計算機モデルを構築することが可能となったといえる。このような考え方は、文法化に対して構成的なモデルを立てようとして初めて生まれるもの

⁴この Kirby モデルがもつ性質についての問題は、一般に、文法化の文脈ではなく、シンボル・グラウンディングの問題として指摘されている。実際、Vogt (2005a,b) は、エージェント自身が発話の意味を見出すシンボル・グラウンディングを考慮した ILM により、合成性の発展について論じている。見方を変えれば、本研究はシンボル・グラウンディングの問題が解決した後のことを取り扱っていると考えられる。すなわち、たとえシンボル・グラウンディングの問題を考慮しなかったとしても、ある種の文法化は起こりうることを本研究が示したともいえる。

である。従って、再分析と類推を認知能力と捉える考え方はこれまであまり採られてこなかった。

一方で、Kirby が目的としたのは、文法化などの意味変化現象をモデル化することではなかった。従って、Kirby (2002) がその学習に chunk, merge, replace の機構を採用したのは、それらのオペレーションの認知能力との関係に特に着目したからではなく、一般的な機械学習の文法推論⁵に用いられているアルゴリズムのひとつを採用したものだと思われる。

これらのことを考え合わせると、本研究が Kirby モデルを対象に行ったのと同様の分析を、別の一般的な機械学習の文法推論に用いられているアルゴリズムに行うことにより、それらのアルゴリズムにも認知能力として捉えなおした再分析と類推を実現するものが存在することを示せるかもしれない。実際、生成する文の例からそれらを表現する文法を導くためには、複数の文から何らかの共通点を見出し、それに基づいてそれらの文を包含するようなより一般的な特性を探り当てる必要がある。このことから、少なくとも認知的類推に当たる能力は前提とされていることが推測できる。また、言語学的類推や再分析に当たる能力の一部も表現されている可能性が高い。

今後、本研究が Kirby モデルを対象に行ったのと同様の分析を、別の一般的な機械学習の文法推論に用いられているアルゴリズムに行うことは、認知能力としての再分析と類推の実現の仕方の差異が、意味変化現象にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることになる。また、本研究の結果のどこまでがモデル依存であるのかを明らかにするためにも重要である⁶ (7.2 節)。

6.6 メタファー・メトニミーと再分析・類推の関連

本研究では、再分析と類推を認知能力と捉えた。そして、その再分析と類推の認知能力を持った認知主体が特定の意味理解の傾向をもっていることにより、その意味理解の傾向に基づいた文法化やその他の意味変化が現象として観察されることを示した。

一方で、Hopper and Traugott (2003) は、再分析と類推を言語現象として扱ったまま、その再分析現象と類推現象が起こる根拠をさらに深層の認知能力のレベルから説明しようと試みている。それがメタファー的推論とメトニミー的推論である。

本研究が再分析と類推を認知能力として再定義したのは、文法化の構成的なモデルを構築するためである。つまり、Hopper and Traugott (2003) のメタファー的推論とメトニミー的推論の能力を実装し、再分析現象と類推現象を導き、構成的に文法化現象について

⁵一般に形式文法において、未知の文法 G が生成する言語 $L(G)$ の部分集合や、 G が生成できない言語の集合が与えられたとき、もとの文法 G を機械的に推定することを文法推論という。Kirby モデルや本研究が用いている ILM による知識伝達と子供の学習は、親からの発話を頼りに子供が自分の内部にそれらの発話を表現できる文法を構築するという意味で、文法推論の一種である。文法推論は、自然言語においては主に子供の第一言語獲得の問題と関係して重要であり、文と非文の混じった現実の言語を手がかりにその自然言語を表現できる文法を獲得する問題に対応する。

⁶またこのことは、本研究のモデルによる実験と Kirby (2002) が実装したモデルによる実験の結果における相違点に関して、重要な問題を含んでいる。付録 B の B.3 節を参照のこと。

議論することは、個別的であり複雑である⁷と判断した。従って再分析と類推を認知能力として定義した。そしてこれに伴い、本研究における（再分析や言語学的類推の認知能力を実現する）認知的類推に基づく推論が、Hopper and Traugott (2003) のいう再分析現象や類推現象を導く推論に当たるのかどうかについては不問としてこれまで議論してきた。

しかし、文法化を起こす認知能力として、本研究が明らかにした範囲と、今後検討すべき範囲を明らかにするためには、この両者の関係を明確にすることが重要である。本研究の再分析と類推の認知能力は chunk, merge, replace のオペレーションにより実現されていた。chunk は再分析、merge は言語学的類推、replace はそれらの両方を前提としていた。この再分析と言語学的類推は、すべて認知的類推による共通点の発見からの推論によって始まった。すなわち、本研究の再分析と言語学的類推とは、認知的類推に基づく推論によって実現されている能力であるといえる。それに対し Hopper and Traugott (2003) は、再分析現象と類推現象がメタファー的推論とメトニミー的推論によって実現されていると言っている。よって、Hopper and Traugott (2003) がメタファー的推論・メトニミー的推論と呼んでいるものと、本研究が認知主体に仮定した、再分析と言語学的類推の認知能力を実現する認知的類推に基づく推論との間に、どの程度重なりがあるかを考察すべきである。

本節では、最初に Hopper and Traugott (2003) のメタファー的推論とメトニミー的推論とを概説する。次に、メタファー的推論・メトニミー的推論と能力としての再分析・言語学的類推・認知的類推とを比較する。最後に、それらの検討を踏まえ、本研究が文法化とその背後にある認知能力との間のどのような過程を示したことになるのか、今後どのようなことが示されるべきなのかを明確にする。

6.6.1 Hopper and Traugott (2003) のメタファー的推論とメトニミー的推論

Hopper and Traugott (2003) は、推論にはメタファー的なものとメトニミー的なものとが存在すると述べており、メタファー的な推論は類推現象を導き、メトニミー的な推論は再分析現象を導くと述べている。

Hopper and Traugott (2003) が述べている「メタファー的な推論が類推現象を導く」という意味は比較的理解しやすい。この意味を簡単に述べる。メタファー的な推論は、複数の意味領域を、あるひとつの形式で表すという効果を持っている。あるよく似た側面をもつ二つの異なる意味領域、すなわち類似性をもつ概念があるとする。それらの間の類似性は多くの人間が共通に感じられる類似性だとする。すると、その類似性を根拠に、違う意味領域を表すものに対してひとつの形式を用いて表現しても、会話の中でコミュニケーションが可能である。そして、それは習慣の中で定着し、双方の概念を表すためにひとつの形式で表現できるようになる。これは類推現象である。

⁷個別的で複雑であるとは、メタファー的推論とメトニミー的推論の発揮の仕方を、個々の文法化の現象に特有の形で設計しなければならず複雑になると推測されたという意味である。

一方の「メトニミー的な推論が再分析を導く」とする Hopper and Traugott (2003) の言及の意味を理解するには、Hopper and Traugott (2003) のいう再分析の過程についての詳しい説明が必要である。以下ではこの意味を be going to の例を用いて説明する。

メトニミー（換喩）とは隣接性に基づく比喩である。従って、メトニミー的な推論とは、隣接性に基づく推論である。Hopper and Traugott (2003) は、“be going to visit Bill.” が「Bill に会うために行っているところだ」から「Bill に会おうだろう」に変化するの、ただ単に“go”の動作の概念がメタファー的に空間へ拡張されるからではないとしている。Hopper and Traugott (2003) はそのような推論よりもむしろ、実際の文脈での意味領域の隣接が重要だと述べている。すなわち、実際の文脈で“to visit Bill”に含まれる目的の意味が“go”の動作の概念と同時に起こることから、目的の持つ近未来的な意味が“be going to”の形式の方へ移り、“be going to”の形式が単独で意味を持ち始め⁸、“be going to”が核となる意味をもって独立したものとみなされる過程を重要視している。“be going to”が独立したものとみなされるとは、すなわち文の中での区切りが変化していることに相当するため、これは再分析現象である。

つまり、「行っているところである」とときには何らかの目的をもっていることが多いということ、言い換えると（進行形の）“go”の表す意味領域が、目的という意味領域と頻繁に同じ文の中に現れることこそが重要なのである。さらに、目的という意味領域は近未来の意味領域と（目的は近未来に果たすべきものであるという意味で）概念的に隣接している。このような同じ一つの文において二つの意味が繰り返し起こると、実際のコミュニケーションにおいてはこれらの意味が移動する場合がある。すなわち、“be going to”という形式はメトニミー的な作用によって、その形式が本来表すべき「～するために行っている」という意味領域と（一つの文の上で時間的⁹に）近接している「目的」という意味領域を表すことができるようになる。そして、「目的」という意味領域は（意味概念的に）「近未来」の意味と隣接している。従って、メトニミー的作用によって“be going to”という形式が近未来を表すことができるようになる。このプロセスを経て意味が“be going to”という形式に移動すると、その形式が独立したものとして再分析される。Hopper and Traugott (2003) の述べているメトニミー的な推論によって導かれる再分析とは以上のようなものである。

⁸Hopper and Traugott (2003) はこれを意味化（semanticization）と呼んでいる。

⁹ここでは便宜上「時間的」という表現を採った。これは文脈上での連続的な時間の連なりのように感じられる。つまり連続的に流れる会話の中で、会話に参加するもの（話し手、聞き手双方）が「行く」という意味概念を想起するような会話を行ったのと時間的に前後して「目的（あるいは近未来）」を想起するような会話が繰り返られる、ということである。しかし、本例においては、go の進行形と to 不定詞に導かれる目的節は「一つの文」上で起こっており、会話に参加するものが「行く」という意味概念を想起するのと「目的（あるいは近未来）」を想起するのとは「同時」かもしれないし、いわゆる「時間」的な前後とは別のクラスに属する隣接関係かもしれない。例えば、一つの文の中で行われるということが、二つの時間的に連続した文の中で行われることと、隣接関係としての階層が本質的に異なるものであるのかもしれない。ただしそれはここではよく分からない。従って、ここでは便宜上、上述のような意味での隣接関係も含めて、時間的な（または時系列的な）近接、という表現にしている。

6.6.2 本研究における再分析と言語学的類推の能力を導く認知的類推

本節では、前節で示した Hopper and Traugott (2003) の言説を踏まえ、本研究が認知主体に仮定した再分析と言語学的類推の能力を実現する、認知的類推に基づく推論について議論する。

まず、Hopper and Traugott (2003) のいう類推現象を導くメタファー的推論と、本研究の言語学的類推の能力を導く認知的類推に基づく推論とを比較する。2.2.2 節で行った認知能力の定義を再確認する。認知的類推とは、状況や形式から類似性を見出す能力である(定義6)。言語学的類推とは、文法規則をそれまで適用されていなかった形式に拡大適用できる能力である(定義5)。このとき、新たに拡大適用できる形式は、認知的類推によって見出した類似性に基づいた推論によって決定される。従って、言語学的類推は認知的類推に基づく推論によって導かれると言える。前節で示した Hopper and Traugott (2003) のいう類推現象を導くメタファー的推論とは、共通の類似性を根拠に、違う意味領域を表す複数のものに対してひとつの形式を用いることであった。すなわち、Hopper and Traugott (2003) のいう類推現象を導くメタファー的推論と、本研究の言語学的類推を実現する認知的類推に基づく推論とは、ほぼ同じ認知能力だといえる。また、以上の検討から、認知的類推による推論とはメタファー的な推論の一種だと考えることができる。

次に、Hopper and Traugott (2003) のいう再分析現象を導くメトニミー的推論と、本研究の認知的類推に基づく推論としての再分析能力とを比較する。2.2.2 節で行った認知能力の定義を再確認する。認知能力としての再分析とは、自らの基準によって文の区切りを決定し、文の構造を把握することができる能力である(定義4)。このとき、文の区切りを決定する基準は、認知的類推によって見出した類似性に基づいた推論によって決定される。従って、再分析は認知的類推に基づく推論によって導かれると言える。前節で示した Hopper and Traugott (2003) のいう再分析現象を導くメトニミー的推論とは、意味概念的、あるいは時系列的に隣接した複数の意味領域の間で、意味が移動することによりある形式が新たな意味を帯びて区切られることであった。つまり、本研究で用いた再分析を実現する認知的類推に基づく推論において、再分析を適用する基準の見出し方は Hopper and Traugott (2003) のいう再分析現象を導くメトニミー的推論と異なるものであるといえる。前述したように、認知的類推による推論とはメタファー的な推論の一種であった。従って、本研究における再分析の能力は、メトニミー的な推論ではなく、メタファー的な推論によって実現される能力だといえる。

6.6.3 本研究の意味空間設計とメタファー・メトニミー

前節における考察により、次のことが明らかとなった。すなわち、本研究における言語学的類推と再分析とは、両方とも認知的類推によって実現している。認知的類推はメタファーの能力の一種である。従って、本研究が認知主体に仮定した能力は全てメタファーの能力を基盤としたものである。

では Hopper and Traugott (2003) のいうメトニミー的な推論にあたるものが、本研究においてどこに表現されているのだろうか。本節ではこの問題について考察し、本研究の意味空間設計とメタファー・メトニミーの能力との関係を考える。

本研究において、Hopper and Traugott (2003) のいうメトニミー的な推論による再分析に最も近いものを実現しているのは、意味空間設計の意味の共起頻度の設定（5.1.2.2 節）であると考えられる。意味の共起頻度の設定を再確認する。本研究で実際に行った意味の共起頻度の設定とは、*go* の意味が含まれる意味は、*future* の意味も含んでいることが多い、という設定である。注意したいのは、本研究が設計した意味の共起頻度は、形式の共起頻度、すなわち特定の形式が特定の形式とよく一緒に出てくるということではなく、意味のレベルでの共起頻度である点である¹⁰。つまり、本研究の共起頻度の設定は、「行く」という概念と「未来」という概念が、時間的¹¹に隣接関係を持っているということの意味する。これは、6.6.1 節で説明した Hopper and Traugott (2003) の意味での再分析を導くメトニミー的な類推に近い。本研究の再分析の能力はメタファーの能力で実現していたが、意味の共起頻度の設定によりその再分析にメトニミー的な作用が加わり、Hopper and Traugott (2003) のいうメトニミー的な推論によって起こる再分析現象に近い現象が実現したと考えられる。表 6.1（6.1 節）にまとめたように、*go* が *future* へ変化するという特定の意味から特定の意味への文法化の増加を担っていたのは、意味の共起頻度であったことがこれを裏付ける。

以下では、意味の共起頻度とともに意味変化の増大に効果的であるとされた意味の貸し借りの設定（5.1.2.3 節）について、メタファー・メトニミーの観点から検討する。本研究で行った意味の貸し借りの設定は、具体的には話者が *go* の意味を含んだ意味を表す文を導出する際に、本来 *go* を意味する単語型ルールだけでなく、*walk* や *run* を意味する単語型ルールを用いてもよいという設定であった。*walk* や *run* のための形式を *go* のためにも用いてよいということは、ある単語型ルールでしか用いることができなかった規則を、別の単語型ルールへ拡大適用することである。すなわち、意味の貸し借りの設定は、実は単語型ルールのレベルでの言語学的類推の能力を前提していることになる。言語学的類推はメタファーの能力に拠っていた。このメタファーによる意味の貸し借りの設定については、次のように分析できる。すなわち、*go* と *walk* との間、*go* と *run* との間に意味領域の重なりがあるという設定は、これらの意味概念によく似た側面、すなわち類似点が存在

¹⁰ もちろん、意味レベルでの共起頻度が増加することで、それに付随して、ある特定の形式同士の共起が他の形式との共起に比べて増加する可能性はある。しかしこれは自明ではない。*go* の意味を含む文は *future* の意味も含むという設定自体は、あくまで意味の側の共起への設定である。

¹¹ モデル内においては、「時間的」という表現は連続性を持った時間の前後という意味ではなくなる。共起頻度の設定とは同じ一つの文のなかで「行く」と「未来」が共起するのであって、前後の別の発話に「行く」と「未来」との特別な関係が設計されているわけではないからである。一方で Hopper and Traugott (2003) の意味での「行く」と「目的（近未来）」との隣接関係が、同じ文で行われるということが重要なのか、連続的な時間の中で前後するので十分なのかについては、前述の通りよくわからない。しかし、この点をクリアにしなくても、共起頻度の設定と Hopper and Traugott (2003) の意味でのメトニミー的な推論を導く隣接関係とが、ある程度似通ったものであることは推測できる。本研究の範囲では、この推測ができれば十分であるとし、時間的な隣接関係に関する考察は以上に止めておく。

するという仮定を置いたことになる。そしてその類似点を根拠に言語学的類推の能力を発揮して、ある単語型ルールでしか用いることができなかった規則が別の単語型ルールへ拡大適用される。以上の検討によって、意味の貸し借りの設定がメタファーの能力を前提にしていることが示された。

6.6.4 認知能力から文法化現象を導く過程について本研究が明らかにしたこと

前節までの議論をまとめると、本研究が認知主体へ仮定した認知能力および意味空間設計と、メタファーやメトニミーの能力との間の関係は次のようになる。

メタファーの能力によるもの 認知的類推、言語学的類推、再分析、意味の貸し借り

メトニミーの能力によるもの 意味の共起頻度

ただし、メタファーやメトニミーに相当する認知能力一般から、言語現象としての文法化が観察できるまでの過程について、本研究によって明らかになったわけではない。本研究は、メタファーやメトニミーに相当する認知能力から導かれるであろうと考えられる一種の認知能力、すなわち認知的類推・言語学的類推・再分析の認知能力と意味空間の設計とを実装し、そこから文法化が観察できるまでの過程を構成的に検討したものである。メタファーやメトニミーの能力一般から、認知主体がどうやって認知能力としての再分析や類推の能力を獲得するのか、メタファーやメトニミーの能力一般によって、認知主体がどのような意味空間を獲得していくのか（どのように意味の捉え方を構造化していくのか）については、今後明らかにされるべき課題である。

以上をまとめて、文法化の背後にあるとされる認知能力から実際の現象としての文法化を導くまでの過程という大きな研究対象全体に対して、本研究が取り組んだ範囲を概念的に示すと図 6.5 のようになる。本研究が、図 6.5 に示した過程全体の一部に関して一つの見解を示したことで、今後取り組まなければならない問題の範囲が少し狭まったと考える。

6.7 言語進化現象としての文法化

最後に、本研究によって明らかにされた文法化とその背後にある認知能力との関係について、言語進化の立場から何がいえるのかを議論する。文法化を起こす認知能力と本研究が認知主体に仮定した認知能力について、特に merge や replace が前提としている言語学的類推に見られるカテゴリーの統合について考察する。そして、言語学的類推が表現する知識や概念の類型化が言語の複雑化へと与える影響について考察する。

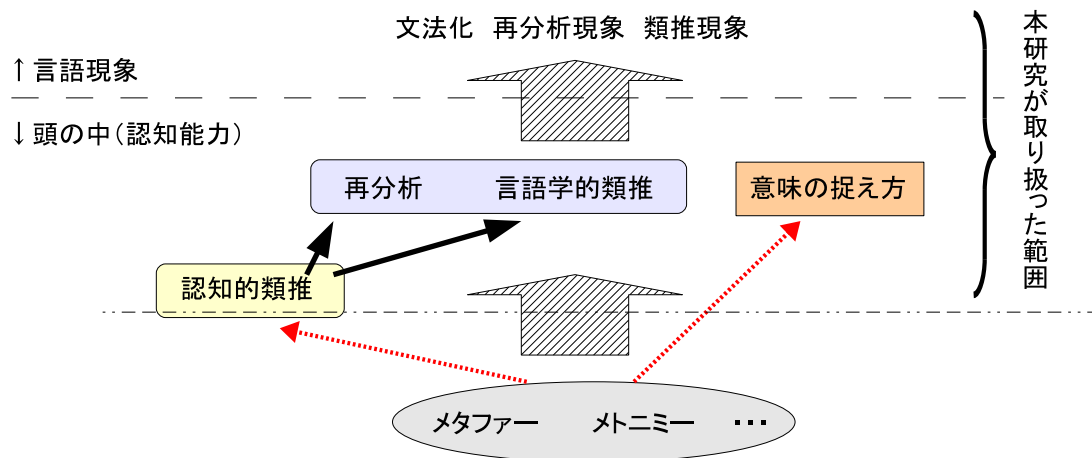


図 6.5: 文法化の背後にある認知能力と本研究が対象とした範囲（概念図）：認知的類推は、再分析や言語学的類推を導く（黒の細い矢印）ものであり、これらよりも深層にある能力だと考えられる。本研究は、認知能力としての再分析と類推を得た後のことを扱っていると言える（上の大きな矢印）。本研究で取り扱った範囲についてさらに明らかになったのち、次のステップとして、認知能力としての再分析と類推よりもさらに深層にあると考えられるメタファーやメトニミーから、認知能力としての再分析と類推を実現する過程（赤の破線矢印、全体としては下の大きな矢印）の解明に取り組むことが考えられる。

6.7.1 言語学的類推による文法カテゴリーの統合

言語学的類推により、文法規則はそれまで適用されなかった形式にまで効力をもつようになる。その拡大適用の根拠はメタファー的能力の一つである認知的類推により見出した類似性である。言語学的類推は、二つの知識や概念に一つの観点からみた類似性が存在すると（別の観点からみれば違いが存在するのにも関わらず）メタファーによってこれらを同じ種類のものだと分類するという、概念の類型化の一種である。モデルにおいて、この概念の類型化は文法カテゴリーの統合として表現されている。

言語学的類推は merge および replace によって実現していた（3.2.4 節）。従って以下では、merge と replace においてどのように文法カテゴリーが統合されているのかについて説明する。

6.7.1.1 merge による文法カテゴリーの統合

merge における文法カテゴリーの統合について、式 (6.3) で表す G_m が、式 (6.4) で表す G_m' へと merge によって変化する例を用いて述べる。ここで用いる例は 3.2.2 節で用いた例と同じものである。

$$G_m \left\{ \begin{array}{l} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : \underline{N/john \rightarrow ot} \\ r_4 : S/read(x, book) \rightarrow sw \text{ } M/x \text{ e} \\ r_5 : \underline{M/john \rightarrow ot} \\ r_6 : M/mary \rightarrow kw \end{array} \right. \quad (6.3)$$

↓ merge

$$G_m' \left\{ \begin{array}{l} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : N/john \rightarrow ot \\ r_4' : S/read(x, book) \rightarrow sw \text{ } N/x \text{ e} \\ r_6' : N/mary \rightarrow kw \end{array} \right. \quad (6.4)$$

この merge の結果、カテゴリー M はカテゴリー N と同じものだみなされる。その根拠は、どちらのカテゴリーにも同じ【*john*】のための《*ot*》という形式を導くルールがあるからである。これが、認知的類推に基づいた言語学的類推であることは既に 3.2.2 節で述べた。ここでは、 N と M のカテゴリーの統合が何を意味するかに焦点を当てて merge の過程を詳細に検討する。

そもそも merge が起こる前、 G_m においてカテゴリー N は「ソーセージを食べる作用主」を包含するようなカテゴリーであった。また、カテゴリー M は「本を読む作用主」を包含するようなカテゴリーであった。ここからの merge の過程を詳細に述べると以下のようになる。

1. (現象) カテゴリー N 「ソーセージを食べる作用主」としての【*john*】は、《*ot*》という形式で表現できる。
2. (現象) カテゴリー M 「本を読む作用主」としての【*john*】は、《*ot*》という形式で表現できる。
3. (推論 1) N と M の共通性の把握 1,2 より、「ソーセージを食べる【*john*】」と「本を読む【*john*】」とは同じものであることが分かった¹²。

¹²この推論をそのまま現実には当てはめてしまうと、「ソーセージを食べる」【*john*】と「本を読む」【*john*】とが同じ【*john*】であると気づくのは、これらが同じ形式をもつこと、すなわち例えば同じ《*john*》と呼ばれていることに気づいたからだということになる。それらが同じ音で呼ばれているからという理由によって初めて「ソーセージを食べる」【*john*】と「本を読む」【*john*】とが同じ人物を指していると感じくというのは、現実の人間の認知過程と対応しているとは考えにくい。従ってこの merge における推論は、現実においてはやや不自然であると言わざるを得ない。ただしここでは、二つのカテゴリーの統合のきっかけが実際にこのような方法によると主張するものではない。どのような共通点であれ、何らかの一部の共通点をもとに（他には違う部分があるにもかかわらず）二つのカテゴリーの全てを同じカテゴリーに分類してしまう点だけを議論する。

4. (推論2) N と M とを統合 3 より「ソーセージを食べる作用主」を表すカテゴリー N と「本を読む作用主」を表すカテゴリー M とは実は同じカテゴリーであったの
だろうと推論する。

5. (結果) 統合の結果 「ソーセージを食べる【*mary*】」と「本を読む【*mary*】」とに
ついても、これらを同じものだとしなしたことになる。

この推論において特に重要な点は、「ソーセージを食べる作用主」というカテゴリーと、
「本を読む作用主」というカテゴリーを、ただ一つ【*john*】についての共通ルールを含ん
でいたというだけですべて一緒にしてしまう点である。つまり、形式に共通点のあった
【*john*】だけでなく、merge 前には区別されていた「本を読む【*mary*】」と「ソーセージを
食べる【*mary*】」とについても区別しなくてよくなる。merge 後のカテゴリー N は「ソー
セージを食べるか本を読む作用主」を表すカテゴリーとなっている¹³。そしてさらに重要
なことは、この統合によって、認知主体はメアリーがソーセージを食べた場面を見たこと
も、そのときの発話を聞いたこともないのに、【*eat(mary, sausages)*】という意味を表現
するために《kwt》と発話できる知識を得ているということである。

以上が、merge の言語学的類推による文法カテゴリーの統合である。

6.7.1.2 replace による文法カテゴリーの統合

replace における文法カテゴリーの統合について、式 (6.5) で表す G_r が、式 (6.6) で表す
 G_r' へと replace によって変化する例を用いて述べる。ここで用いる例は 3.2.3 節で用いた
例と同じものである。

$$G_r \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : N/\textcolor{red}{john} \rightarrow \textcolor{blue}{ot} \\ r_4 : S/read(\textcolor{red}{john}, book) \rightarrow sw\textcolor{blue}{ote} \end{cases} \quad (6.5)$$

$\Downarrow$ replace

$$G_r' \begin{cases} r_1 : S/eat(x, sausages) \rightarrow N/x \text{ t} \\ r_2 : N/tiger \rightarrow jr \\ r_3 : N/john \rightarrow ot \\ r_4' : S/read(x, book) \rightarrow sw N/x \text{ e} \end{cases} \quad (6.6)$$

非終端記号 N が表すのは、replace 前には「ソーセージを食べる作用主」を包含するよ
うなカテゴリーである。この replace には、非終端記号は N しか存在しないため、この過
程が二つのカテゴリーの統合であるとはすぐには分からない。replace におけるカテゴリー

¹³このようなカテゴリーの統合がさらに進めば、特定の状況に依らない「作用主」という全ての名詞が取り
込まれるカテゴリーが生まれるであろう。そして最終的にはすべての対象要素を含んだ「名詞」というカ
テゴリーにまで発展することは既に見てきた。予備実験 (4 章) や付録 B 参照。

の統合が分かりにくい理由は、新たなカテゴリーの生成と同時に、既存のカテゴリー N との統合が行われているからである。一度、 r_4 が r_4' となるときに、新たな非終端記号が生まれている。この非終端記号は表面化しないが、ここでは仮にこれを M とする。replace においては、 M が N であるということが瞬時に決められている。ここにカテゴリーの統合が隠れている。 M は本来、「本を読む作用主」というカテゴリーであるはずである。なぜ、新たに発見した階層構造を表すカテゴリー M が「ソーセージを食べる作用主」というカテゴリー N だと決定できたのか。その根拠は、【*john*】のための《ot》という形式がどちらのカテゴリーにも含まれているからである。すなわち、同じルールがひとつあるというだけで、本来違う二つのカテゴリー全体を統合している。これは前節で merge について考えたときと同じく、言語学的類推に基づく文法カテゴリーの統合である。

6.7.2 「見たことも聞いたこともない」ことを表現できる言語

前節において、言語学的類推が共通点に基づいたカテゴリーの統合を行っていることが示された。6.6 節での議論と合わせると、これは人間のメタファーの能力に基づいた概念の類型化の一種だとみなせる。ただ一つの共通点をもとに、ある範囲にある全てを同じものに分類するということは、ある意味で「過度な」類型化といえる。この場合の「過度な」とは、論理的には有り得ない、厳密には正しくない、という意味である。しかし、そもそもメタファーの能力とはそのような意味での過度な類型化が含まれる能力である¹⁴。論理的には有り得ない、厳密には正しくないメタファーによる類型化によって、当初有り得なかった表現をもつ言語へと変化する。すなわちその状況を見たことがなく、その状況を表す発話も聞いたことがない意味を表現することが可能となる。本モデルにおける言語学的類推は、このようなメタファーによる人間の過度な類型化をうまくモデル化しているといえる¹⁵。

見たことも聞いたこともないはずの表現を可能にするということは、言語の進化の文脈では「今、ここ」から解放された言語の獲得に繋がる。進化言語学では、動物のコミュニケーションシステムと比較したときの人間の言語の特徴として「今、ここ」から解放されている点が指摘されている(橋本, 2004)。すなわち、動物のコミュニケーションシステムが危険の告知や求愛など、そのときその場所でそのコミュニケーションに参加している主体がおかれている状況に強く結びついているのに対して、人間の言語は、そのときの状況や経験にある状況の描写だけではなく、抽象的な考えや想像上の事物を表現することがで

¹⁴ 一般的な比喩(暗喩)の表現は、ほとんどが論理的には正しくない表現である。

¹⁵ とはいえ、前節で見たモデル内における merge や replace のカテゴリー統合は、「過度」すぎるのではないかと思うかもしれない。その疑問は「過度さ」の量的な影響についての疑問だといえる。本研究においては replace を行わない実験(5章、実験2)によってこの過度な類型化が「ある」か「ほとんどない」かの二つの場合については述べることができるが、「過度さ」をパラメータにするようなモデルを組み立てない限り量的な関係は述べられない。そのようなモデル化は今後の課題のひとつとなる。本節では、言語学的類推が極端に制限されると意味変化がほとんど起こらなくなったという結果から十分に議論可能である事柄についてのみ議論する。

きるという意味で「今、ここ」から解放されている¹⁶。

見たことも聞いたこともないはずの表現が可能になると、状況としては有り得ないが言語知識の上では表現が可能な意味が生まれる。有り得ない状況を表現可能とする知識の適用によって、人間は、認識可能な意味空間をそれまで出会ったことがない範囲にまで拡大するかもしれない。すなわち知識の拡大適用が統語上の表現の進化を促し、その統語上の表現の進化が認識の進化をもたらしたとする仮説を考えることができる。これは仮説に過ぎないが、少なくとも、人間に特有な言語の特性が人間に特有だと考えられるメタファーの能力から導かれる言語学的類推（すなわち既存の知識を自分の知識全体へ拡大して適用する能力）によって獲得されたという可能性については、本研究において十分に示唆されるものである。

一種のメタファーの能力が実現する言語学的類推が表現している、過度な類型化によって、言語が当初有り得なかった表現力を持つという例は、既に 3.2.2.1 節で述べている¹⁷。そして同節で、この能力が Hopper and Traugott (2003) のいう「再分析現象が起こる前には不自然であった表現を可能にする類推現象の効果」(2.2.1 節)に相当することを述べている。さらに本節の議論で、この能力が「今、ここ」から解放されているという、人間に特有な言語の特性を獲得する過程を導く可能性を示した。そして本研究は、実験(5章、実験2)によって、言語学的類推が極端に制限されると、文法化を含めた意味変化がほとんど起こらなくなることを確認している(6.3 節)。以上のことを考え合わせると、次のようなことが言える。

人間は、メタファーの認知能力によって、一部の知識を自らの知識全体に拡大適用できる能力(言語学的類推)を持つ。この能力によって、論理的には正しくない表現を生み出すことができる。その結果、「見たことも聞いたこともない」ことを表現できるようになる。それによって、言語の進化において「今、ここ」から解放された言語を獲得できると考えられる。一方で、言語学的類推の能力がないと、文法化が起こらない。従って、本研究が明らかにした文法化を起こすための認知能力の一部は、言語の進化に必要な認知能力の一部と一致すると言える。すなわち本研究は、文法化を起こす認知能力と言語進化を起こす認知能力とが、その一部に重なりをもつ可能性を示唆したと解釈できる。そして本研究は、その重なる認知能力とはメタファーによって実現する言語学的類推、すなわち自分の知識の一部を他の知識にまで拡大適用する能力であると考ええる。

¹⁶ 本研究がベースとして用いた Kirby モデルは、本来 Kirby (2002) が合成性を探求するために用いた言語進化モデルである。本研究の実験設定(4.1 節、5.2 節)は Kirby (2002) の設定と同様に、一人の学習エージェントは一生のうちで意味空間の全てに出会うことは決してない。にもかかわらず意味空間の全てを表す文法を持つようになるということは「見たことも聞いたこともない」表現が可能になっているということである。Kirby (2002) はその認知的な根拠がどこにあるのかについては論じていないが、本研究が認知的観点から分析したことでそれが明らかとなり、さらにその認知的根拠が文法化を起こす認知メカニズムと共通である可能性が示されたといえる。

¹⁷ 3.2.2.1 節の例は、「ソーセージを食べる作用主」と「本を読む作用主」とが同じものと分類されたことで、【虎が本を読む】という、その状況を見たことも、その状況を表す発話を聞いたこともないはずの意味を表現する知識が生まれる例である。

第7章 結論

7.1 結論

本研究では、内容語が機能語になる言語変化である文法化について、その認知メカニズムについて構成的モデルを用いて考察してきた。

文法化を起こすメカニズムとして Hopper and Traugott (2003) の再分析と類推 (2.2 節) に着目した。特に、これらの再分析と類推を認知能力と考えて再構成した (2.2.2 節)。再分析の能力とは、自らの基準によって文の区切りを決定し、文の構造を把握することができる能力であるとした (定義 4)。類推の能力は、認知的類推と言語学的類推に分けて考え、認知的類推とは状況や形式から類似性を見出す能力であるとした (定義 6)。また、言語学的類推とは文法規則をそれまで適用されていなかった形式に拡大適用できる能力であるとした (定義 5)。

モデルには Kirby (2002) の合成性のモデル (3.1 節) を発展させて用いた。Kirby モデルには chunk、merge、replace の 3 種類の一般化で表現されている学習機構がある。Kirby モデルにおいて用いられているこれらの学習と、文法化の背後にあると考えられる認知能力としての再分析と類推との関係を認知的な観点から詳細に検討した結果、次のことが分かった。

1. すべての学習は認知的類推の能力を前提にしている。
2. 1 に加えて、chunk は再分析の能力を前提にしている。
3. 1 に加えて、merge は言語学的類推の能力を前提にしている。
4. 1 に加えて、replace は再分析および言語学的類推の能力を前提としている。

この検討に基づき、Kirby モデルを用いた実験において語彙範疇を越えた意味変化現象が表現できることを確認したうえで、Kirby モデルに機能語の意味を設定した。この実験において、内容語からの機能語への変化、すなわち文法化に相当する変化を確認した。

このことから、再分析と類推の能力、つまり

- 状況や形式から類似点を見出せる能力
- それに基づき自ら文の区切りを推論できる能力
- 自ら発見した新しい形式をほかの知識に対しても拡大適用できる能力

があると文法化が表現できることが分かった。

しかし、これらの認知能力を設定しただけでは、モデルで表現される内容語から機能語への変化の傾向には、人間の言語に見られるような方向性がみられない。人間の言語に見られる文法化の方向性は、人間の意味理解の仕方が反映されたものだと考えられる。従って、人間の言語に見られるような方向性をもった文法化を表現するには、意味空間の設計が重要である。そこで、認知主体の意味理解の構造を次のように設計した。

1. ‘go’ という形式が指し示す意味領域が、‘walk’ や ‘run’ が指し示す意味領域と重なりをもつ。
2. 文の意味の中に *go* の意味があるときは、‘present’ の意味を ‘future’ の意味だとして取り違えることがある。
3. 文の意味の中に *go* の意味がある文は、未来の文である（*future* の意味も含んでいる）ことが多い。

1 と 3 は意味変化を増大させ、2 は意味変化を制限した。特に 1 により、‘go’ という形式が、他の意味を表す語へと変化しやすくなることを確認した。また、3 により、‘go’ という形式が *future* の意味へと変化しやすくなることを確認した。

これらのことから、以下に挙げる 5 つが、人間の言語に見られるような方向性をもった文法化が起こるための十分条件であると強く示唆される。

1. 認知主体が、状況や形式から類似点を見出せる能力をもつこと
2. 認知主体が、それに基づき自ら文の区切りを推論できる能力をもつこと
3. 認知主体が、自ら発見した新しい形式をほかの知識に対しても拡大適用できる能力をもつこと
4. 変化元の内容語の形式が、多くの他の意味を表す形式と、意味領域の重なりをもつこと
5. 変化元の内容語が指し示す意味が、変化先の機能語の意味を含んだ文脈でよく出現すること

本研究で観察された型の文法化は、以下のような過程を経て起こる。

1. 変化元の内容語に同義語が存在する。
2. その同義語が、変化元の内容語が担っていた役割を果たすようになる。
3. 変化元の内容語は、元来の意味を表す必要がなくなる。
4. 世代を経て、変化元の内容語の役割が変化したり、意味を喪失したりする。

5. 世代を経て、意味を喪失した語が変化先の機能語的な意味に変化する。

この過程が示唆するのは、ある種の文法化には同義語の存在が効いている可能性があるということである。語彙の役割の交代によって意味の漂白が促進され、文法化を起こすのに十分な認知能力と意味の構造的な理解とがあいまってある種の文法化が起こる、という可能性を考えることができる。

7.2 さらに課題

文法化の計算機モデルを構築するという観点から、Kirby モデルには再分析と類推の認知能力が表現されており、文法化の表現が可能であることが示されたことは非常に価値のあることである。文法化の計算機モデルとして、本研究がさらに課題とする点は大きく分けて二つある。一つは一意性のより確かな保証の追求、もう一つは本研究が示した文法化のモデルにおける意味の取り扱いの改善である。

一意性のより確かな保証の追求について述べる。本研究が示したモデルが表現した意味変化経路は、意味空間に何も設定していない状態、すなわち意味が等質である状態でも既に分布を持っていた。本研究で示したやり方で意味空間を設計すると、その分布を越えて有意な意味変化が確認できたことから、最初からモデルに存在する分布が本研究が示した結果を損なうものではないが、この先、さらに意味空間の設計を変えて多くの型の文法化の特徴を見ようとするとき、どこまでがモデル依存なのかを解明する必要がある。このためには、Kirby モデルの特性をよく調べるほかに、一般的な文法推論で用いられている機械学習を導入した複数の学習アルゴリズムによるオペレーションについて、その挙動を確認することが必要である。

意味の取り扱いの改善について述べる。本研究が Kirby モデルの発展として提示したモデルは、話し手の発話の意味を完全に聞き手が理解できる設計になっている。従って、文法化に重要だと考えられている意味があいまいであることからくる推論や誤解を表現することに強い制限をもつ。従って、モデルで表現できる文法化の型が限られる。構成的な研究群によって様々な型の文法化の全貌に迫るには、様々な型の意味のあいまい性を表現するために、多くの意味空間の設計を自由に行えることが望ましい。従って、文法化の文脈ではこれまで用いられていない、例えば多数の状況間の比較により意味を理解するモデルや、シンボル・グラウンディングの問題を考慮したモデルについて、本研究が Kirby モデルに対して行ったように、再分析と類推の認知能力という観点から見直し、文法化との関連を考察しモデルに取り入れていかなければならない。

ただし本研究は、たとえシンボル・グラウンディングの問題が解決されていたとしても、同義語の存在と意味の理解の仕方があいまって起こるある種の文法化が存在する可能性を示した。しかし、言語学の記述的な文法化研究で文法化経路を調べる際に、同義語の存在という観点はこれまではあまり採られてこなかった。言語学における記述的な文法化研究に対して、本研究が提供するものは、文法化経路の調査に対する多義的な同義語の存在

(あるいはもう少し広く捉えると、同じ役割を担っている語の存在)という新たな視点である。

そのような言語学における研究により、本研究の示した文法化の起こるプロセスがたとえ一部であれ補強されるならば、文法化への構成的なアプローチが有効であることが示される。それはさらなる構成的な文法化研究を促し、記述的な文法化研究への新たな視点を供給しつつあるであろう。構成的文法化研究と記述的文法化研究のそのような好循環こそが、本研究が文法化の理解のために必要だと提示する、さらなる課題である。

謝辞

本研究を遂行するに当たって、指導教員という立場からのご指導、ご意見、そのほか研究生活においての数多くの示唆を与えてくださった北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科の橋本敬助教授に対しまして深く感謝の意を表します。また、指導教員としてだけではなく、研究者として橋本先生が現在も拓いておられるフィールドが存在したからこそ、本研究がありえたものと心から思っています。

北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科の中森義輝教授、林幸雄助教授、同志社大学文化情報学部の下嶋篤助教授には、本論文を審査していただき、本研究の今後に繋がる貴重なご意見の数々を賜りました。心より御礼申し上げます。

北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科の東条敏教授には、言語を計算機に乗せる手法、というテーマに関してご教示いただきました。本研究にも用いられているプログラムやアルゴリズムに関係する統一的な理解、形式文法に関する概念的な理解は、東条教授からのご指導の中で形成されました。また、情報科学という目で見たと本研究に対する示唆に富むご助言の数々を賜りましたことに、深く感謝申し上げます。

金沢大学文学部の宮下博幸助教授には、言語学研究者の立場からの貴重な御意見を賜りました。言語学の研究者でなければ理解しづらい、言語学からの文法化に対する考え方や、言語学における文法化研究の現状を理解する機会を与えてくださったことに心より感謝申し上げます。

複雑系解析論講座の山内肇氏との議論では、モデルの細部に渡るアイディアと、進化言語学の立場からの文法化の捉え方についての重要な示唆をいただきました。また、言語進化や ILM という着想がもつ深い意味について、ご教示いただきました。本研究が進化言語学の文脈で何を提示できたことになるのか、山内氏からのご指導によって私もおぼろげながら理解しつつあります。本当にありがとうございました。

本研究は、複雑系解析論講座の皆様との議論によって成り立っています。特に、小林重人氏、竹石卓弘氏、藤澤隆介氏には、研究上の大きな問題においても小さな問題においても、数多く議論していただきました。Kirby モデルに機能語を含めたことにより、意味空間が3倍に広がった途端に計算不能に陥った私の拙いプログラムは、竹石氏が考案した chunk アルゴリズムの導入によって高速化を図り、復活いたしました。他にも、ノンパラメトリック検定の方法、replace の命名など本研究の具体的内容のほとんどは、皆様との議論に負っています。

沖縄科学技術大学院大学神経計算ユニットの佐藤尚氏や、理化学研究所脳科学総合研究センターの並川淳氏には、特に貴重な議論の機会をいただきました。文法化のモデル化の

アイデアがなかなか浮かばず、Kirby モデルが使えるかもしれないけどどうだろう、と漠然と考えていたときに、並川氏がそのアイデアを後押ししてくださらなかったら、本研究はそもそも始まっていなかったと思われます。

さらに、本当に永い永い学生生活の間、全く自由に勉学をさせていただき、様々な形で援助いただきました両親に感謝いたします。

最後に、全ての方々の御名前を挙げることはできませんが、多くの先生方、先輩方や友人との議論および公私に渡る支えによって本研究は成立いたしました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- Bybee, Joan (2003) “Cognitive processes in grammaticalization.”, in M. Tomasello ed. *The New Psychology of Language*, Vol. 2, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Chomsky, Noam (1959) “On certain formal properties of grammars”, in *Information and Control*, Vol. 2, pp. 137–167.
- Haiman, John (1994) “Ritualization and the Development of Language”, in Wm. Pagliuca ed. *Perspectives on Grammaticalization*, Amsterdam: John Benjamins, pp. 3–28.
- Hájek, Jaroslav (1969) *A Course in Nonparametric Statistics*: Holden-day, Inc. 訳書：丘本正, 宮本良雄, 古後楠徳訳 (1974), ノンパラメトリック統計学, 日科技連出版社.
- Heine, Bernd and Tania Kuteva (2002a) “Evolution of Grammatical Forms.”, in Alison Wray ed. *The Transition to Language.*, Oxford: Oxford University Press.
- (2002b) *World Lexicon Of Grammaticalization*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Heine, Brend, Ulrike Claudi, and Frederike Hünemeyer (1991) “From cognition to grammar: evidence from African languages.”, in Elizabeth Traugott and Bernd Heine eds. *Approaches to Grammaticalization*, Vol. 1, Amsterdam: John Benjamins, pp. 149–187.
- Heine, Bernd (2005) “Grammaticalization”, in Philipp Strazny ed. *Encyclopedia of linguistics*: Taylor & Francis Books, Inc.
- Hopper, P. J. and E. C. Traugott (2003) *Grammaticalization*, Cambridge: Cambridge University Press, 2nd edition.
- Hurford, James R. (2003) “The Language Mosaic and its Evolution”, in Morten H. Christiansen and Simon Kirby eds. *Language Evolution*, Oxford: Oxford University Press, pp. 38–57.
- Kirby, S. (2002) “Learning, bottlenecks and the evolution of recursive syntax.”, in Ted Briscoe ed. *Linguistic Evolution through Language Acquisition*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 173–203.

- Newmeyer, Frederic J. (2003) “What Can the Field of Linguistics Tell Us About the Origins of Language?”, in Morten H. Christiansen and Simon Kirby eds. *Language Evolution*, Oxford: Oxford University Press, pp. 58–76.
- Tomasello, Michael (2003) “On the Different Origins of Symbols and Grammar”, in Morten H. Christiansen and Simon Kirby eds. *Language Evolution*, Oxford: Oxford University Press, pp. 94–110.
- Traugott, E. C. (1989) “On the rise of epistemic meanings in English: An example of subjectification in semantic change”, *Language*, Vol. 65, pp. 31–55.
- Vogt, Paul (2005a) “The emergence of compositional structures in perceptually grounded language games.”, *Artificial Intelligence*, Vol. 167(1-2), pp. 206–242.
- (2005b) “On the acquisition and evolution of compositional languages: Sparse input and the productive creativity of children.”, *Adaptive Behavior*, Vol. 13(4), pp. 325–346.
- 秋元実治・尾形こづえ・遠藤光暁・近藤泰弘・E. C. Traugott (2004) 『コーパスに基づく言語研究 文法化を中心に』, ひつじ書房.
- 竹内啓・藤野和建 (1992) 『自然科学の統計学』, 基礎統計学 III, 東京大学出版会・東京大学教養学部統計学教室 (編), 第 7 章.
- 辻幸夫 (編) (2002) 『認知言語学キーワード事典』, 研究社.
- 東条敏 (1988) 『自然言語処理入門』, 第 19 巻, コンピュータサイエンス大学講座, 近代科学社.
- 橋本敬 (2002) 「構成論的手法」, 杉山公造・永田晃也・下嶋篤 (編) 『ナレッジサイエンス - 知を再編する 64 のキーワード』, 紀伊国屋書店, 132–135 頁.
- (2004) 「言語進化とはどのような問題か? ~ 構成論的な立場から」. 18th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence (JSAI).
- 日野資成 (2001) 『形式語の研究 文法化の理論と応用』, 九州大学出版会.

付 録 A 学習の順序による学習経路の変化

学習の順序によって、学習がどのように変化するかについて述べる。

話者エージェント（以下話者）からの発話を聞いた後、学習エージェント（以下学習者）は学習を行う。話者は決められた数の発話を行い（予備実験においては 50 回、文法化実験においては 150 回）、学習者はこのうちの発話を一回聞くたびに学習を行う。話者が次の発話を行うのは、学習者の学習が終了してからである。

chunk、merge、replace の学習オペレーションは、特に設定しない限り、一回の発話に対して学習者の文法ルールのすべてが、どのオペレーションの条件にも合致しなくなるまで完全に行う。

ただし、条件に合致するかどうかの判定には検索順序¹がある。例えば replace に合致するかを全文法ルールに渡って探していて、合致することが判定されたらその時点で replace を開始する。したがって、本文中（3.2.3 節）でも指摘したように、その replace を行う前には可能であった chunk が、replace を行うことで不可能になる、といったことも起こりうる。

その時点で可能な学習オペレーションを検索する順序による、学習回数の内訳の変化を図 A.1 に示す。

図 A.1 に示したように、基本的に最初に検索する学習が起こりやすくなる。一回の学習を行ったら、次にどの学習の検索を行うかをランダムで決める設定にすると、平均値に近づく。

また、chunk-merge-replace の順で検索する設定で実験を行うと、merge と chunk に強い逆相関が現れる場合が多い（図 A.2）。このことから、次に行える学習を検索する順序に応じて、学習の構造が変化することがわかる。次にどの学習の検索を行うかをランダムで決める設定にすると、このような相関は確認されなくなる。

従って、本研究においては、一度学習したら次に検索を始めるオペレーションをランダムで決める設定にしている。

¹ここで述べているのは、学習の検索順序であって、学習の順序そのものではないことに注意。例えば replace-merge-chunk の検索順の場合は、replace を先に行ってから merge を行って … というわけではない。まず replace を施せるルールがあるかを検索し、ないと分かれば merge を施せるルールがあるかを検索する、という意味である。学習者はどの種類の学習でも、学習を一回行ったら、また最初から学習ができるかを検索する。

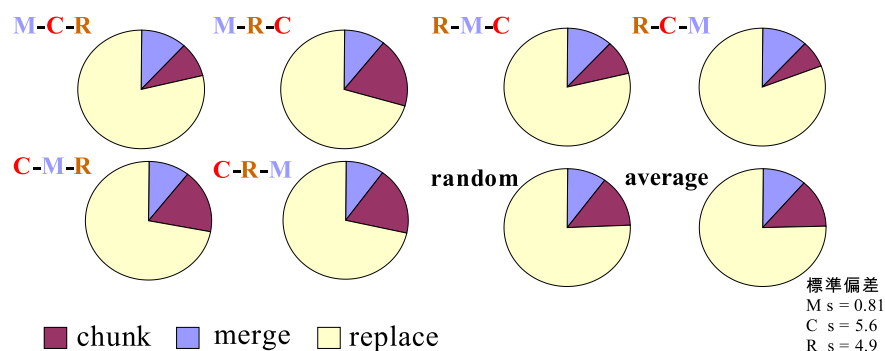


図 A.1: 学習の検索順序による内訳の変化: 各グラフの上部に検索順序を示す。C,M,R はそれぞれ chunk,merge,replace の各オペレーションを示す。average はこれらの平均であり、random は一回の学習を行うたびに次にどの学習を行うかを random で決定する場合である。

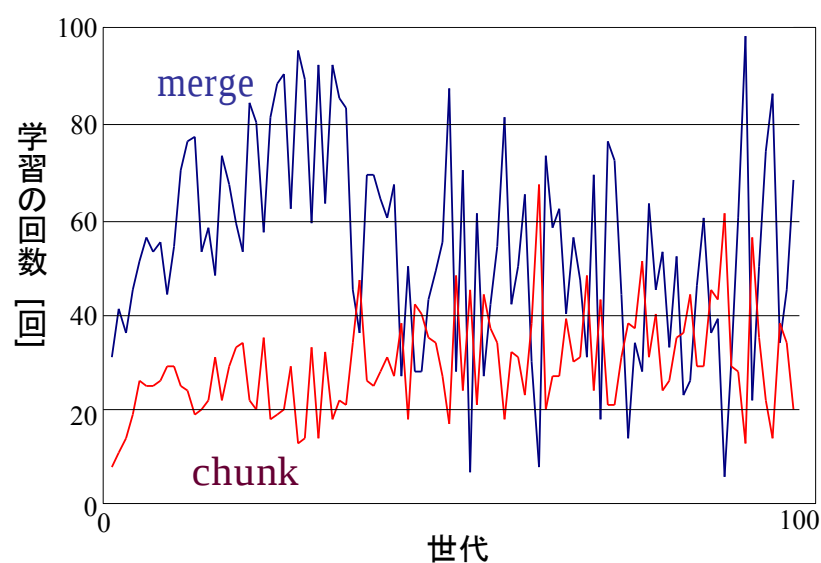


図 A.2: 学習の検索順序による学習の相関: 図に示した例では、相関係数は-0.87。場合によってはこのような相関がでないこともあるが、学習の検索順序を固定していると、多くの場合に chunk 回数が多(少)い世代で merge 回数が少(多)いという関係が維持される。次にどの学習の検索を行うかをランダムで決める設定にすると、この相関は消える。

付 録 B 予備実験における合成性と文法の収束

予備実験（4章）の実験設定は Kirby (2002) の実験設定と同様である。よってここでは、本モデルによる Kirby (2002) の実験結果の再現性について言及する。本モデルにおいては結果について Kirby (2002) の実験を再現することはできなかった。まず、どう違うのかを示す。次に、この違いが意味変化現象へ与える影響について考察する。

B.1 最も合成性が進んだ文法

予備実験では、意味は表 4.1 にある語を用いた（時制要素のない）一階述語形式であるので、完全な表現度 $\varepsilon = 100$ を有しかつ最も合成性が進んだ文法は、表 B.1 に示すような大きさ 11 の文法 G_{c0} である。

表 B.1: 最も合成性が進んだ文法 $(|G_{c0}|, \varepsilon) = (11, 100)$ の一般形

G_{c0} $(G_{c0} , \varepsilon) = (11, 100)$	
$r_1: S/p(x, y) \rightarrow T^*_1 N_2/y T^*_2 N_1/p T^*_3 N_2/x T^*_4$	
$r_2: N_1/like \rightarrow T^+_1$	$r_7: N_2/john \rightarrow T^+_6$
$r_3: N_1/hate \rightarrow T^+_2$	$r_8: N_2/mary \rightarrow T^+_7$
$r_4: N_1/admire \rightarrow T^+_3$	$r_9: N_2/gavin \rightarrow T^+_8$
$r_5: N_1/detest \rightarrow T^+_4$	$r_{10}: N_2/heather \rightarrow T^+_9$
$r_6: N_1/love \rightarrow T^+_5$	$r_{11}: N_2/pete \rightarrow T^+_{10}$

(記号)¹ S : 開始記号 N_n : 非終端記号 T^+_n : 空でない終端記号列 T^*_n : 終端記号

Kirby (2002) の実験においては、ほぼすべてのシードによる実験において図 3.5（3.1.5 節）のような過程を経て、表 B.1 の G_{c0} のような、合成度 3 のルール 1 つと単語型ルール 10 個とからなる $(|G|, \varepsilon) = (11, 100)$ の文法に収束すると述べられている。また、Kirby (2002)

¹これらの記号は以下の表においても同様である。

は、表 B.1 のような完全に合成的な文法に至る前に、例えば表 B.2 のような $(|G_{c1}|, \varepsilon) = (17, 100)$ の文法 G_{c1} が安定的に存在すると述べている²。

表 B.2: 作用主名詞と被作用主名詞を含む安定的な文法 $(|G_{c1}|, \varepsilon) = (17, 100)$ の一般形

$G_{c1} \quad (G_{c1} , \varepsilon) = (17, 100)$				
$r_1 : S/p(x, y) \rightarrow T^*_1 N_3/y T^*_2 N_1/p T^*_3 N_2/x T^*_4$				
$r_2 : S/p(x, y) \rightarrow T^*_1 N_2/y T^*_2 N_3/x T^*_3 N_1/p T^*_4$				
$r_3 : N_1/like \rightarrow T^+_1$	$r_8 : N_2/john \rightarrow T^+_6$	$r_{13} : N_3/john \rightarrow T^+_{11}$		
$r_4 : N_1/hate \rightarrow T^+_2$	$r_9 : N_2/mary \rightarrow T^+_7$	$r_{14} : N_3/mary \rightarrow T^+_{12}$		
$r_5 : N_1/admire \rightarrow T^+_3$	$r_{10} : N_2/gavin \rightarrow T^+_8$	$r_{15} : N_3/gavin \rightarrow T^+_{13}$		
$r_6 : N_1/detest \rightarrow T^+_4$	$r_{11} : N_2/heather \rightarrow T^+_9$	$r_{16} : N_3/heather \rightarrow T^+_{14}$		
$r_7 : N_1/love \rightarrow T^+_5$	$r_{12} : N_2/pete \rightarrow T^+_{10}$	$r_{17} : N_3/pete \rightarrow T^+_{15}$		

文法 G_{c1} では、名詞が、主語的な役割をする作用主名詞と目的語的な役割をする被作用主名詞に区別されており、それに合わせて合成度 3 のルールにも、いわゆる OVS の語順をもつ形式と OSV の語順を持つ形式とが混在している。Kirby (2002) の実験では、ほとんどのシードにおいて百世代前後で G_{c1} のような文法に収束し、これが数千世代にわたって安定的に存在し、数千世代後に突然、表 B.1 に示した最も合成的な文法 G_{c0} へと収束すると述べられている。

対して、本予備実験においては、最終的には G_{c0} のような $(|G|, \varepsilon) = (11, 100)$ の最も合成的な文法に近づく場合が多いが、次の点において大きな相違が見られる。

1. 収束状態が、シードによっていくつかの型に分かれる。
2. 収束時に細かい振動が見られることが多い。
3. 収束するまでの過程には、シードによって様々な変遷の型が見られる。
4. Kirby (2002) が示した G_{c1} のような状態が、安定的に存在しない。
5. 一度ある程度文法が安定しても、再び乱れるケースが見られる。シードによっては、予備実験で行った世代数ではもちろん、数万世代を経ても収束に至らない場合がある。

次節では本研究において見られた収束までの文法の時系列の型を示す。

²実際に (Kirby, 2002) にある例では、表 B.2 中の r_{16} に当たる *heather* のための片方のルールが欠けており、 $(|G|, \varepsilon) = (16, 100)$ の文法が示されている。しかしこの欠損は本質的なものではないと考えられる。

B.2 本研究の予備実験における文法の時系列

本研究の予備実験で最もよく見られる型の収束までの文法の時系列の例を図 B.1 示す。

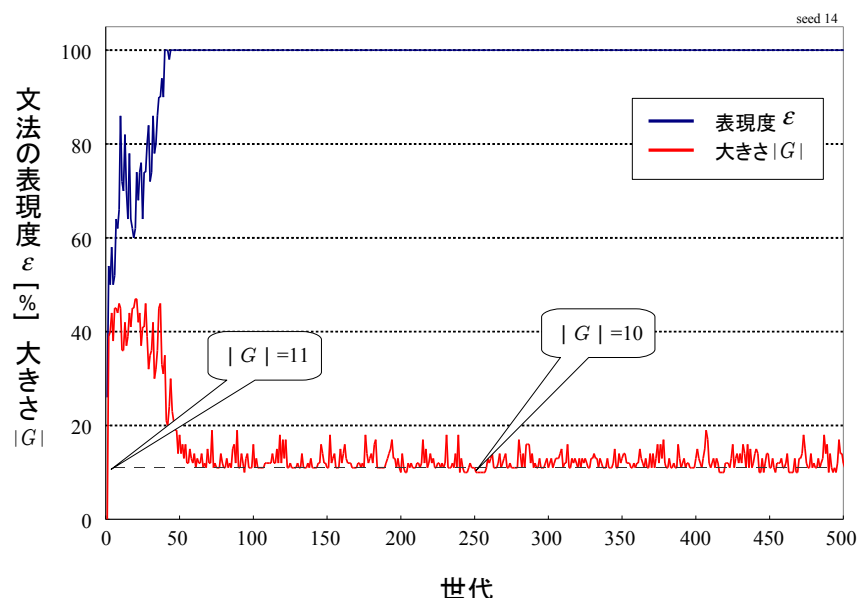


図 B.1: 予備実験における文法の時系列 1 : 多くのシードで収束時の文法の大きさ $|G|$ に細かい振動が見られる。この $|G|$ の振動はある下限を基準にした、上への振動である。従って、図に示したように、周期的に戻ってくる下限を収束時の文法とみなした。この収束時の文法の大きさは $|G| = 11$ であり、中身を確認すると G_{c0} と同様であることが分かっている。ただし、ごくまれにこの基準よりも小さい方向へも振動し、 $|G| = 10$ になるときがあるため、これを図に示した。

Kirby (2002) の実験と異なる点について、本研究の文法の収束の特徴は、多くの場合に図 B.1 で示したように収束時の文法の大きさに細かい振動が見られることである。この振動は多くの場合にある下限を基準にした上への振動である。図に示したように、この基準となる下限が $|G| = 11$ であり、 G_{c0} と同様の内容を持っている。ただし、ごくまれにこの基準よりも小さな $|G| = 10$ の方向への振動が見られる。しかもこの場合も表現度は $\varepsilon = 100$ のままである。このような文法がどのような内容を持っているかを調べると、表 B.3 のようなものであった。

すなわちこのような文法は、動詞が残る合成度 2 のルール 5 つと、名詞の単語型ルール 5 つからなり、名詞のみを単語として合成的に利用することにより、最小の大きさ $|G_0| = 10$ で表現度 $\varepsilon = 100$ を実現している³。

³理論的に考え得る、 $\varepsilon = 100$ を実現する文法の最小の構成であると思われる。

表 B.3: 最大の表現度を有した最小の文法 $(|G_0|, \varepsilon) = (10, 100)$ の具体例

$G_0 \quad (G_0 , \varepsilon) = (10, 100)$			
$r_1: S/like(x, y) \rightarrow$	$iktih \ N_1/y \ u \ N_1/x \ es$	$r_6: N_2/john \rightarrow$	$yvyxt$
$r_2: S/hate(x, y) \rightarrow$	$q \ N_1/y \ N_1/x \ kdx$	$r_7: N_2/mary \rightarrow$	$sjcy$
$r_3: S/admire(x, y) \rightarrow$	$N_1/x \ uqcfs \ N_1/y \ hcytv$	$r_8: N_2/gavin \rightarrow$	d
$r_4: S/detest(x, y) \rightarrow$	$m \ N_1/x \ naswczx \ N_1/y \ d$	$r_9: N_2/heather \rightarrow$	$ftjuk$
$r_5: S/love(x, y) \rightarrow$	$N_1/y \ m \ N_1/x \ n$	$r_{10}: N_2/pete \rightarrow$	g

最初に述べたように、本研究の予備実験における収束点は $(|G|, \varepsilon) = (11, 100)$ であることが多いが、まれに $(|G|, \varepsilon) = (10, 100)$ であることもあり、そのときの文法は表 B.3 の G_0 と同様の型である。また、いつも収束点が振動するとも限らない。そのような例を図 B.2、図 B.3 に示す。図 B.3 は、最も合成的な文法 G_{c0} へ振動せずに収束した場合であり、Kirby (2002) による実験の収束状態に最も近い型だといえる。

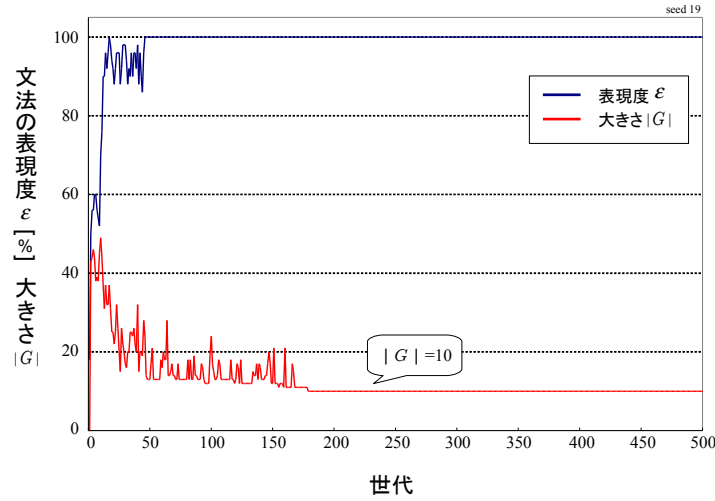


図 B.2: 予備実験における文法の時系列 2：振動せずに一状態に収束した型。 $|G| = 10$ であり、その内容は G_0 と同様である。

その他の型の収束状態としては、 $|G| = 12$ の場合がある。実際の予備実験で確認された表 4.6 (4.2 節) の収束時の文法はこの型である。すなわち、表 B.1 で示した最も合成的な文法 G_{c0} に、語順の異なる合成度 3 のルールが 1 つ追加された内容をもつ⁴。このよう

⁴理論的には、追加される合成度 3 の合成的なルールは何本でも有り得るが、実験においては収束時には 1 つの追加であることがほとんどである。

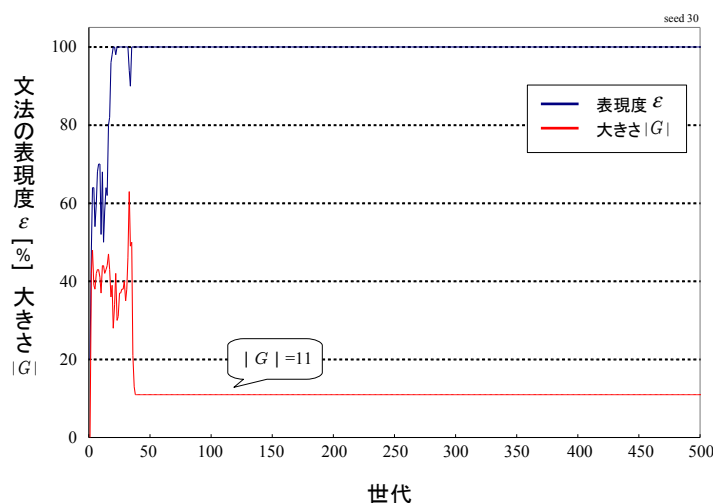


図 B.3: 予備実験における文法の時系列 3 : 振動せずに一状態に収束した型。 $|G| = 11$ であり、その内容は G_{c0} と同様である。

な型の収束までの文法の時系列を図 B.4 に示す。ただし、時系列の特徴が分かるように、予備実験における ILM の世代数を超えて実験し、1000 世代までの時系列を示した。予備実験に用いた 100 のシードによる実験で、この型で振動せずに収束する例は確認されていない。

次に、収束に至らない型について述べる。図 B.5 は、予備実験の世代数の範囲でどのような状態へも収束の気配がないため、1000 世代まで実験してその動向を追ったあるシードの文法の時系列である。図 B.5 のような場合でも、450 世代前後を境に様相が変化していることがわかる。すなわち、450 世代以前はどのような文法へも定まっていなかったが、450 世代を超えたあたりから、文法の大きさがじわじわと減少する傾向を見せている。図から、この様相の変化は明らかに、450 世代あたりで表現度 $\varepsilon = 100$ の文法にたどり着いたことにより引き起こされていると推測できる。また、これらの傾向から、図 B.5 のような収束に至らない型の文法も、一度表現度 $\varepsilon = 100$ の文法にたどり着いたら、あとは世代数の問題でいずれは収束するだろうことが推測できる。

次に、一度ある安定状態に留まったのち、再び状態が乱れるような変遷を辿る型について述べる。図 B.6 は、一度 $(|G|, \varepsilon) = (15, 100)$ の文法に留まったのちに、再び乱れた例である。ただし、1000 世代までの時系列を示している。このときの安定状態の $(|G|, \varepsilon) = (15, 100)$ の文法は、表 B.4 のような内容を持っていることが分かった。すなわちこれは、Kirby (2002) が安定的に存在すると述べている、名詞が作用主名詞と被作用主名詞とに分かれた表 B.2 に示した G_{c1} に近い。つまり本研究の予備実験においても、シードによっては G_{c1} に近い形の文法がある程度安定する場合があることが確認された。

最後に、一度ある程度安定な状態に留まったのち再び乱れ、別の安定状態に収束した例

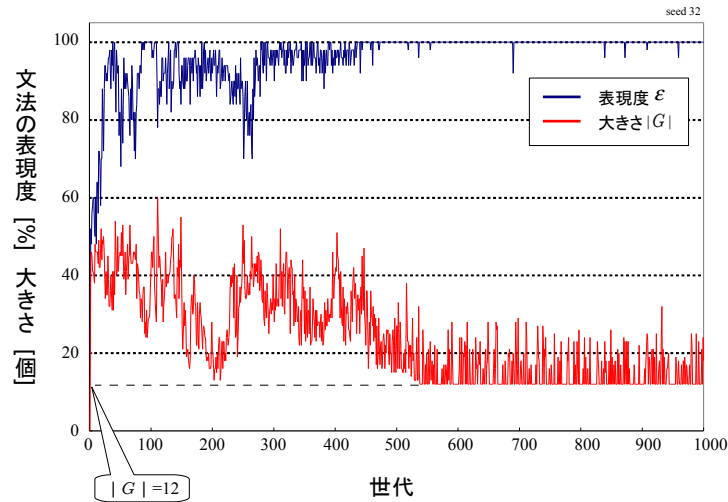


図 B.4: 予備実験における文法の時系列 4 : $|G| = 12$ への収束の型。このタイプは、収束時に G_{c0} と同様なルールセットに、語順の違う合成度 3 のルールを追加した内容を持っている。

を図 B.7 に示す。このときの途中の安定状態 ($(|G|, \varepsilon) = (17, 100)$) は、やや合成性が低いものの表 B.2 に示した G_{c1} に近い内容を持っている。そして最終的には最も合成的な文法 G_{c0} と同様の内容をもつ状態 ($(|G|, \varepsilon) = (11, 100)$) に収束する。すなわち図 B.7 に示した変遷が、Kirby (2002) の実験と状態の変遷としては最も近い。ただし、最初に述べたように、もっとも多く見られる型は図 B.1 に示したような型であり、図 B.7 のように途中で名詞が二種類に分かれた安定状態がある程度であっても確認できるのは、ごく稀である。さらに、途中で完全な 1 つの状態で安定となった Kirby (2002) の実験とは違い、本研究の予備実験で見られるのは多くの場合に、振動を繰り返しながらの複数の状態の変遷である。

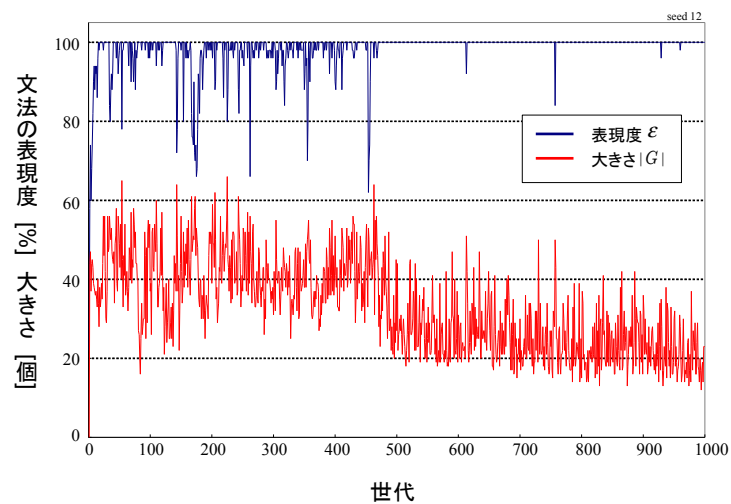


図 B.5: 予備実験における文法の時系列 5 : 収束に至らない型。

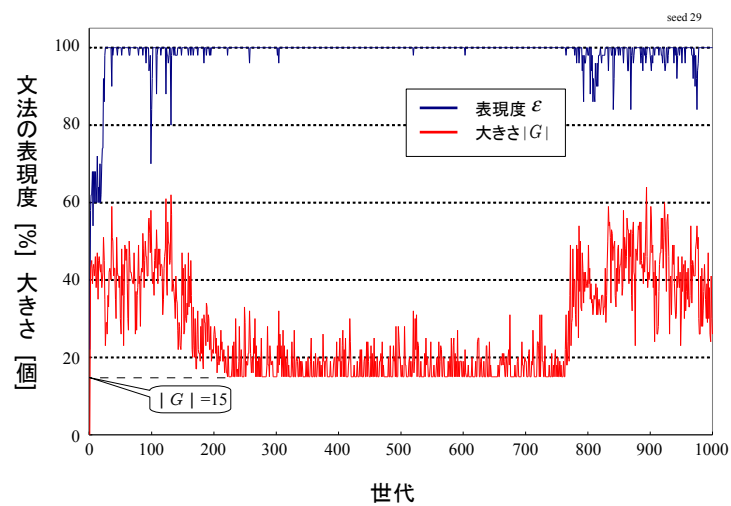


図 B.6: 予備実験における文法の時系列 6 : 一度安定状態 ($(|G|, \varepsilon) = (15, 100)$) に留まったのち、再び乱れる型。

表 B.4: 安定状態でみられる文法 G_1

$G_1 \quad (G_1 , \varepsilon) = (15, 100)$	
$r_1 : S/p(x, y) \rightarrow N_1/p \ N_2/y \text{ ko } N_3/x$	
$r_2 : S/p(x, y) \rightarrow N_1/p \text{ k } N_2/x \text{ o } N_3/y$	
$r_3 : N_1/like \rightarrow \text{vqqyb}$	$r_8 : N_2/mary \rightarrow \text{qoiy}$
$r_4 : N_1/hate \rightarrow \text{dgwdh}$	$r_9 : N_2/gavin \rightarrow \text{efdua}$
$r_5 : N_1/admire \rightarrow \text{o}$	$r_{10} : N_2/heather \rightarrow \text{gcqvd}$
$r_6 : N_1/detest \rightarrow \text{cpzle}$	$r_{11} : N_2/pete \rightarrow \text{ntxo}$
$r_7 : N_1/love \rightarrow \text{lq}$	$r_{12} : N_3/john \rightarrow \text{zpwj}$
	$r_{13} : N_3/mary \rightarrow \text{oglprxoo}$
	$r_{14} : N_3/gavin \rightarrow \text{khasnhbh}$
	$r_{15} : N_3/heather \rightarrow \text{ttaxgp}$

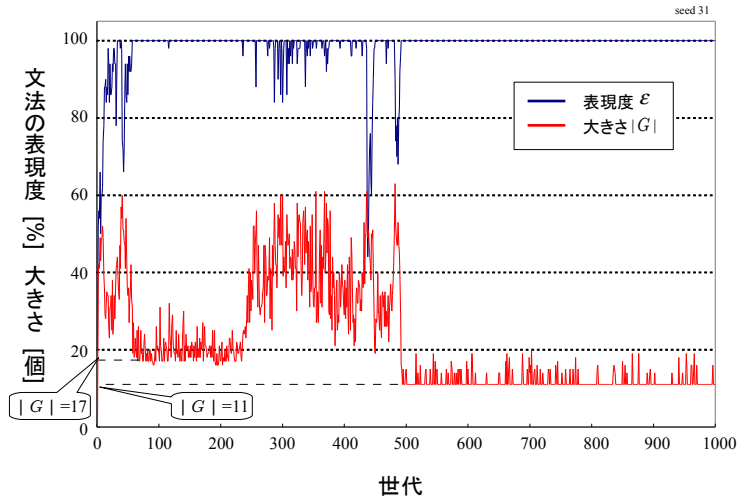


図 B.7: 予備実験における文法の時系列 7 : 一度安定状態 $(|G|, \varepsilon) = (17, 100)$ に留まったのち、再び乱れ、最も合成的な文法 $(|G|, \varepsilon) = (11, 100)$ に収束する型。

B.3 Kirby (2002) による実験の結果との相違と意味変化現象との関係

前節で示した結果をまとめると、本研究の予備実験でみられる文法の変遷と収束について、次のように考えることができる。収束の状態は、Kirby (2002) の実験と同じ最も合成的な文法 $(|G|, \varepsilon) = (11, 100)$ か、または意味空間のすべてを表現できる最小の文法である $(|G|, \varepsilon) = (10, 100)$ か、または最も合成的な文法に、互いによく似た合成度 3 のルールが何種類か追加された文法 $(|G|, \varepsilon) = (11 + \alpha, 100)$ の三つの収束状態がある。このとき、文法の大きさについては細かい振動をしていることが多い。なかなか収束しない場合でも、一度表現度 $\varepsilon = 100$ の文法を得ると徐々に収束に向かうこと、および一度上記三つの収束状態以外の安定状態に入っても、しばらくすると再び乱れることから、様々な変遷を経るが最終的には上述の三つの収束状態のどれかに至ると考えられる。

Kirby (2002) の実験との相違点は、収束状態が上述の 3 つあること、収束時に細かい振動をしていることが多いこと、収束状態までの変遷に様々なパターンがあることである。

これらの相違点と、意味変化現象との関係について考察する。おそらく、Kirby (2002) の実験を忠実に再現できたとすると、意味変化現象は起こらないか、あるいは起こりにくくなると考える。なぜなら、意味変化が起こるためには、文法がある程度変化し続けることが必要だからである。あるひとつの安定状態で、ある意味のために流通していた形式が、文法が再び乱れて別の安定状態で違う意味に変化する、ということが考えられる。あるいは微細な振動のなかで、ある一つの形式が、二つの別の意味のための言葉となる状態を行ったり来たりしている可能性も考えられる。もし、早い世代に 1 つの文法に収束し、かつ振動もしなくなるならば、それ以上意味変化は起こらなくなるはずである。本研究において見られた意味変化は、文法の状態が Kirby (2002) のものより多くありうることや、安定状態でも微細に振動することにより起こりうることだといえる。

本文中で検討したように、Kirby モデルには再分析と類推の認知能力が仮定された学習機構が存在している (3.2 節)。にもかかわらず、Kirby の実験結果が完全に再現されると、意味変化はおそらく制限されると推定される。ということは、Kirby (2002) が実際に実装している学習アルゴリズムは、再分析と類推の認知能力を実現している一方で、結果的に意味変化を制限するように作用する (本研究では再現できなかった) 何かが含まれているということになる。

本文中でも繰り返したように、Kirby (2002) が目的としたことは、文法化などの意味変化現象をモデル化することではない。従って、Kirby (2002) がその学習に chunk, merge, replace の機構を採用したのは、それらのオペレーションの認知能力との関係に特に着目したからではなく、一般的な機械学習の文法推論に用いられているアルゴリズムのひとつを採用したものだと思われる。従って「Kirby (2002) のモデルには存在し、本研究では再現できなかった、再分析と類推の効果を制限するように作用する何か」がいったい何であるのかを明らかにするための発展的な解決として考えられるのは、6.5 節や 7.2 節で言及したように、一般的な機械学習の文法推論に対して本研究が Kirby モデルに対して行ったような認

知的な観点からの検討を加え、どの部分がどの程度再分析や類推に近い認知能力を実現しているのかを明らかにしていくことである。

付 録 C ノンパラメトリック検定

本研究では、検定にノンパラメトリック検定を用いた。ノンパラメトリック検定は、母集団の分布の形に仮定を置かない検定方法である (Hájek, 1969)。ここでは、母集団の分布の形を仮定せずに仮説を検定できる原理について述べる。本研究で 2 群の間に用いた検定は Wilcoxon 検定、3 群以上の間に用いた検定は Kruskal-Wallis 検定である。以下では Wilcoxon 検定について述べるが、Kruskal-Wallis 検定も同じことを k 個の標本に対して行っており、原理は同様である。

C.1 rank の和を用いた分布に依らない検定の原理

標本 1 : $X_1, X_2, \dots, X_n$ と標本 2 : $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ の二つの標本を考える。標本 1 はそれぞれ確率密度 f_1 に従い、標本 2 はそれぞれ確率密度 f_2 に従うとする。これらを一緒にして小さいものから並べ、1 から $n + m$ までの rank をつける¹。このときに標本 1 の $X_1, X_2, \dots, X_n$ に与えられた rank がそれぞれ $R_1, R_2, \dots, R_n$ だったとする。ここで、 $X_1, X_2, \dots, X_n, Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ がすべて同一の確率密度に従うと仮定する (全てが同じ分布の母集団からの標本であると仮定する)。すなわち

$$H_0 : f_1 = f_2 \quad (\text{C.1})$$

を帰無仮説 H_0 として設定する。すると、 $R_1, R_2, \dots, R_n$ は、1 から $n + m$ までの数のうちから、どのような n 個の数でも等しい確率 P で取るはずである。すなわち H_0 のもとでは、

$$P = \frac{1}{(n + m)(n + m - 1)(n + m - 2) \cdots (m + 1)} \quad (\text{C.2})$$

となる。ここで、検定統計量として標本 1 がそれぞれ取る rank の和

$$W = \sum_{i=1}^n R_i \quad (\text{C.3})$$

を考える。このとき、 H_0 のもとで W がある値 w になる確率 $P(w)$ は、 $W = w$ となるような rank の順列が何通りあるかを数えて、その数を式 (C.2) に掛ければ計算可能である。このとき、 f_1 や f_2 の分布の形状は $P(w)$ に影響しないことが明らかである。

¹ここでは 1 から順に線形な rank を単純に与える。一方で、この rank のつけ方になんらかの重みをつける場合もある (このような値はスコアと呼ばれる)。後述する具体例を参照。

対立仮説のもとで、例えばもし標本 1 : $X_1, X_2, \dots, X_n$ が標本 2 : $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ に対して相対的に大きい方にずれていた場合は、その分だけ W が大きくなりやすいことが W の定義、すなわち式 (C.3) より明らかである。また逆に標本 1 が標本 2 に対して相対的に小さいほうにずれていた場合は、 W が小さくなりやすいことが明らかである。そのため、 W がある値 c_1 以下である（ある限界値 c_1 を越えて下にずれている）か、またはある値 c_2 以上である（ある限界値 c_2 を越えて上にずれている）ような確率

$$P(W \leq c_1) + P(W \geq c_2) \quad (\text{C.4})$$

が好きな確率 α となるように c_1, c_2 を定め、 $W \leq c_1$ または $W \geq c_2$ となる W である場合に帰無仮説 H_0 を棄却するとすれば、これは有意水準 α における検定となる。これが順位和検定と呼ばれる 2 標本間におけるノンパラメトリックな検定の原理である。Wilcoxon 検定、Mann-Whitney 検定と呼ばれる検定は、この順位和検定と等価である。

$n + m$ が十分に大きい場合、 H_0 のもとで W は以下に示す平均 $E(W)$ 、分散 $Var(W)$ の正規分布に従うことが証明されている²。

$$E(W) = \frac{1}{2}n(n + m + 1) \quad (\text{C.5})$$

$$Var(W) = \frac{1}{12}nm(n + m + 1) \quad (\text{C.6})$$

従って、標本数が大きい場合は

$$\left| W - \frac{n(n + m + 1)}{2} \right| \geq z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{nm(n + m + 1)}{12}} \quad (\text{C.7})$$

であるときに H_0 を棄却すればよい。

C.2 具体的な検定の手順

前節で述べた手順を具体例によって示す。例えば

標本 1 : $X_1 = 3.3, X_2 = 1.2, X_3 = 2.5, X_4 = 5.6$ と

標本 2 : $Y_1 = 0.8, Y_2 = 2.2, Y_3 = 1.8, Y_4 = 6.2, Y_5 = 3.6$

とについて考える。これらを小さいものから順に並べ、rank をつけると、

1 : 0.8, 2 : 1.2, 3 : 1.8, 4 : 2.2, 5 : 2.5, 6 : 3.3, 7 : 3.6, 8 : 5.6, 9 : 6.2

となる。すなわち、標本 1 については

$$X_1 = 3.3 \rightarrow R_1 = 6,$$

$$X_2 = 1.2 \rightarrow R_2 = 2,$$

²証明自体はここでは省略する。ただし、この分布は要するに、rank の和 W がある値 w になるような rank の順列の数の分布なのだから、標本数が多ければ正規分布するであろうこと、および平均と分散を見積もることが可能であろうことは直観的に理解できる。後述する具体例を参照のこと。

$$X_3 = 2.5 \rightarrow R_3 = 5,$$

$$X_4 = 5.6 \rightarrow R_4 = 8$$

である。この rank を見ると、標本 1 と 2 は適度に混じり合っており、標本 1 と 2 にはあまりずれがなさそうであることが分かる。順位和検定はこれを 2 標本間のずれの指標に使っていると理解すればよい³。

すなわち、もし仮説 H_0 が成立していれば、 $R_1 = 1, R_2 = 2, R_3 = 3, R_4 = 4$ であったかもしれないし、 $R_1 = 1, R_2 = 3, R_3 = 2, R_4 = 4$ であったかもしれない。これらの可能性は 9 つの rank から 4 つを並べる順列、すなわち ${}_9P_4 = 9 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 6 = 3024$ 通り考えられる。 H_0 のもとでは、そのような rank のパターンがそれぞれ等しい確率 P で起こりえたはずであるから、その確率 P は

$$P = \frac{1}{{}_9P_4} = \frac{1}{3024} \quad (\text{C.8})$$

である。そのなかで今回は $W = \sum_{i=1}^4 R_i = 21$ となる、 $R_1 = 6, R_2 = 2, R_3 = 5, R_4 = 8$ というパターンが起こった。 $W = 21$ になるような rank のパターンは、本例で起こった $R_1 = 6, R_2 = 2, R_3 = 5, R_4 = 8$ を含めた 2, 5, 6, 8 の組み合わせの並べ替えだけで $4! = 24$ 通りある。そして他にも例えば 1, 5, 7, 8 の組み合わせの並べ替えで 24 通り、3, 4, 5, 9 の組み合わせの並べ替えで 24 通りなどと考えることができ、合計 264 通りあることが数えられる。従って、 $W = 21$ となるのは、

$$\frac{264}{9 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 6} = \frac{11}{126} \quad (\text{C.9})$$

の確率で起こる、かなり起こりやすいことであるといえる。従って帰無仮説 H_0 は棄却できず、標本 1 と標本 2 の間にはずれが認められないと結論付けられる（具体的手順は後述する）。

これに対して、例えば $R_1 = 1, R_2 = 2, R_3 = 3, R_4 = 4$ になった場合を考えてみよう。 $R_1 = 1, R_2 = 2, R_3 = 3, R_4 = 4$ となる場合とは、標本 1 の全ての値が標本 2 のいずれの値よりも小さかったという状況である。従って、標本 1 は標本 2 に対して低くずれているという結果がでると考えられる。実際、この場合は $W = \sum_{i=1}^4 R_i = 10$ である。 $W = 10$ になるような rank のパターンは、 $R_1 = 1, R_2 = 2, R_3 = 3, R_4 = 4$ を含めた 1, 2, 3, 4 の組

³なお、このときに、例えば rank4 と rank5 の 2.2 と 2.5 とには差が 0.3 しかないのに、rank7 と rank8 の 3.6 と 5.6 とには 2.0 もの差がある。にもかかわらず線形なスコアの与え方をする場合、これらは同等の差であるとみなされることになる。本研究では扱わないが、この差を拾うためにはスコアに重みを付けることが考えられる。ノンパラメトリック検定は分布によらず利用できるが、あらかじめある程度分布に関する情報が分かっているときはその情報を反映した適切なスコアを設定できる（例えば、一般に分布の裾が広がっているほど、スコアの増加を遅くするとよいことが分かっている（Hájek, 1969））。逆に言えば、単純な線形の rank 付けをすることで、検定から分布の情報が落ちていとも考えられる。ただし、ノンパラメトリック検定においてどのような場合にどの程度検定の効率が変化するかはよく調べられており、多くの場合にかかなりの効率を保つ（すなわち多くの分布型の検定に対してロバストである）とされている。

み合わせの並べ替え、つまり $4! = 24$ 通りしかない。すなわち、 $W = 10$ となる確率は

$$\frac{24}{9 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 6} = \frac{1}{126} \quad (\text{C.10})$$

という小さな値になる。従ってこの場合は、 H_0 を認めると 1% 以下⁴ の確率でしか起こり得ないことが起こったと考え、帰無仮説 H_0 が棄却される。ノンパラメトリックな検定は、おおむねこのような原理で、分布によらない検定を実現している。

本具体例における標本 1 のような、4 つの値をもつ標本の rank の和 $W = w$ の最小値は明らかに、rank が 1, 2, 3, 4 の組み合わせを使った順列である場合で、 $w_{\min} = 10$ である。また同最大値は明らかに、rank が 6, 7, 8, 9 の組み合わせを使った順列である場合で、 $w_{\max} = 30$ である。図 C.1 は、 $w_{\min} \leq w \leq w_{\max}$ となる w を取るような順列が何通りありうるかを数え上げたものである。ただし縦軸は、それぞれの $W = w$ となるパターン数を、全てのパターンの数 3024 で割ることにより、確率分布として表示している（式 (C.8) 参照）。直観的に分かるように、例えば、 $W = w_{\min}$ を実現するような rank の順列は、1, 2, 3, 4 の組を入れ替えた 24 通りしかない。最大値も同様である。そして、 W がちょうど中央である 20 を取るときに最もパターン数が多くなる。

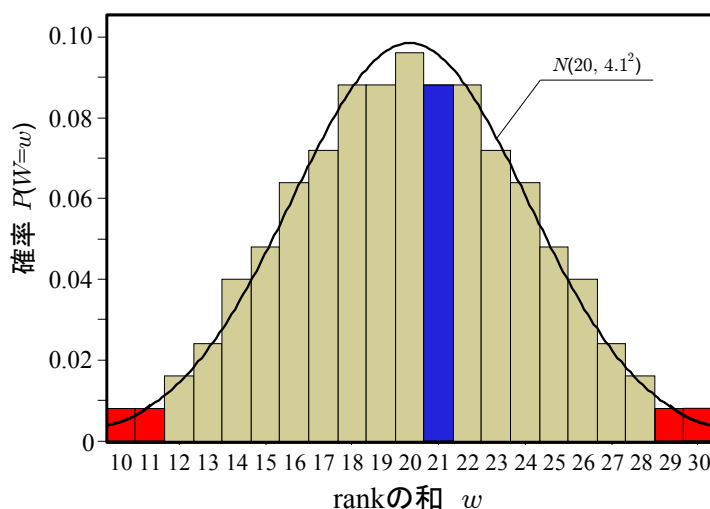


図 C.1: それぞれの rank の和を実現する rank の組の数: 図中の青は本具体例の標本 1、すなわち $W = 21$ の場合である。また図中の赤は、有意水準 $\alpha = 0.05$ で検定を行ったときに棄却域となる部分、すなわち上下それぞれの累積の確率が 0.025 以下となる条件に該当する部分である。図の曲線は、式 (C.5), (C.6) で計算した平均と分散をもつ正規分布曲線である。

有意水準 $\alpha = 0.05$ で検定を行う場合は、 $-\infty$ からの確率の累積が 2.5% を越えるまで

⁴厳密にいうと、 $W = 10$ であることは、上下（両側）合わせて 2% 程度の水準で棄却できることになる。

の $W \leq 11$ の範囲（下側）か、 $+\infty$ からの確率の累積が 2.5% を越えるまでの $29 \leq W$ の範囲（上側）が棄却域となる（図の赤の範囲）。本例の標本 1 の場合には、 $R_1 = 6$, $R_2 = 2$, $R_3 = 5$, $R_4 = 8$ であり、 $W = 21$ （図の青）であるから、この棄却域に入らない。従って、仮説 H_0 は棄却できない。最初に確認したように、標本 1 と標本 2 は適度に混じり合っており、あまりずれがなさそうであることが、このようにして検定されたことになる。

今回は実際にパターンを数え上げ、確率分布を求め、それにより棄却域を明らかにした。しかし一般的な手順としては、本例のように $n + m = 9$ とあまり標本が大きい場合には数表が用意されており、数表によって rank の和 W が上下 2.5% の数値の外側にあることを確認できれば、有意水準 $\alpha = 0.05$ で H_0 が棄却できる。数表には、 $n + m = 9$ の場合は下側 2.5% の値は 11、上側 2.5% の値は 29 と表記⁵されている（先ほど実際に数え上げた確率分布から求めた棄却域と一致する）。従って、 $11 < (W = 26) < 29$ であるため、 H_0 は棄却できない。すなわち本例の標本 1 と 2 の間に差は認められないことになる。

本研究でこの検定の対象となる標本は、多くの場合 100 シードの単語型ルール数や意味変化経路の数の総計であるため、非常に数が多い。よって、数表ではなく、式 (C.7) に立脚することになる。一方で、本具体例は式 (C.7) に立脚するには標本が小さいが、試みに式 (C.5), (C.6) を用いて計算した平均 $\frac{1}{2}4(4+5+1) = 20$ 、分散 $\frac{1}{12}4 \cdot 5(4+5+1) \cong 16.7$ をもつ正規分布 $N(20, 4.1^2)$ を図 C.1 の上に描いてみた。この図から、さらに標本数が大きくなると、確率分布は式 (C.5), (C.6) で示される平均と分散をもつ正規分布により近づいていくであろうことが分かる。

⁵ここでは（竹内・藤野, 1992）p221 の表 7.2 に拠った。

付 録 D Chomsky 階層と文脈自由文法

本研究のモデルで用いている DCG は、形式文法における文脈自由文法 (Context Free Grammar, CFG) の拡張である (3.1.2.2 節)。本章では形式文法における Chomsky 階層と文脈自由文法に関する一般論を述べる。

D.1 形式文法と Chomsky 階層

文字列変換規則の集まりで形式的な文法の定義を行ったのは Chomsky (1959) である。形式文法 (または 0 型文法) とは、次の 4 つの要素により定義される $G = (V_N, V_T, P, S)$ を指す。

- 非終端記号 N の有限の集合 V_N
- 終端記号 T の有限の集合 V_T (V_N とは共通の元を持たない)
- 生成規則 ($\alpha \rightarrow \beta$ ただし $\alpha \in V^+, \beta \in V^*, V = V_N \cup V_T$) の有限の集合 P
- 開始記号 S ($S \in V_N$)

文法 $G = (V_N, V_T, P, S)$ が生成する言語 $L(G)$ は、開始記号 S に対して P の規則を、非終端記号がなくなるまで適用して得られる空を含む終端記号列 T^+ の全ての記号列の集合で定義される。

Chomsky (1959) は、形式文法が、生成する形式言語のクラスに応じて以下の 4 つの階層に分けられることを示した。これを Chomsky 階層という。なお、以下では T や T に添字の付いた記号は、終端記号の集合 V_T の要素を表す。また N や N に添字のついた記号は、非終端記号の集合 V_N の要素を表す。また、 $\alpha, \beta, \gamma \in V$ である。

type0 0 型文法。 前述の生成文法の定義以外に何の制限も与えない。従って、文脈依存文法と違い、終端記号・非終端記号に関わらず記号を「削除」することが可能である。

(例) $T_0 N_0 N_1 \rightarrow T_0 N_1$

type1 文脈依存文法。 生成規則の左辺に現れたものは必ず右辺にも現れなければならない。言い換えると、右辺が左辺より短いことが禁止されている。

(生成規則) $\alpha N \gamma \rightarrow \alpha \beta \gamma$

(例) $N_0 N_1 N_2 \rightarrow N_1 N_0 N_2$

type2 文脈自由文法。生成規則の左辺にはただ一つの非終端記号が現れる。

(生成規則) $N \rightarrow \gamma$

(例) $N_0 \rightarrow T_0 N_1 T_1$

type3 正規文法。生成規則の左辺にただ一つの非終端記号をもち、右辺には一つの非終端記号と一つの終端記号、またはひとつの終端記号のみが現れる。

(例) $N_0 \rightarrow T_0 N_1$

正規文法によって生成される正規言語は全て文脈自由文法によって生成される文脈自由言語に含まれる。また同様に文脈自由言語は全て文脈依存文法が生成する文脈依存言語に含まれ、文脈依存言語は全て 0 型文法が生成する言語に含まれる。したがって例えば文脈自由言語ではない文脈依存言語や、正規言語ではない文脈自由言語を考えることができる。

D.2 文脈自由文法と DCG

文脈自由文法は、その表現力と人間の書きやすさ・読みやすさによって、計算機上で標準的に扱われている。自然言語を文脈自由文法で表現するには様々な困難があるが、計算可能性と表現力の問題から、文脈自由文法の拡張により自然言語らしい言語を近似的に計算機上で扱おうとする試みがされている (東条, 1988)。本研究で用いた DCG もそのひとつである。

DCG という用語は、狭義には Prolog におけるマクロ記述を指す。すなわち、文脈自由文法の非終端記号を述語とみなし、その引数として Prolog のプログラムを記述することができるようにしたものという。また、右辺の任意の場所に述語を付加することができる。これらの場所に記述する Prolog のプログラムとして、例えば性 (男性名詞が主語に来ているか、など) や数の一致 (単数が複数か、など) などの情報を付加することにより、特定の条件を満たす文でなければ生成できないように制限を加えることができる。このように DCG では、単なる文脈自由文法の枠内では書けない情報を加え、より自然言語に近い言語が扱えるように拡張されている。

Kirby (2002) は、ある特定のプログラム言語 (Prolog) のマクロ記述を指す DCG という用語を、「非終端記号への条件付加により導出に制限を与えることのできる文脈自由文法の拡張」という意味合いで、広義に用いていると思われる。Kirby モデルは、この DCG が文脈自由文法に付加する条件を、扱う言語を自然言語に近づけるためというより、モデル内における意味と形式とを結びつけるために利用している (3.1.2.4 節)。