

動的単語網モデルによるカテゴリーと語彙の発達

橋本 敬

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

hash@jaist.ac.jp

抄録 人間言語の語彙は、なんらかの対象を表象する単語のリストのような単純な構造を持つのではなく、単語間に関係があり全体として構造化されたカテゴリー構造を持つ。本稿では、このようなカテゴリー構造を発展させる能力がなにかという言語進化に関する問いを、計算モデルを用いて考察する。ここではその能力として、記号と対象を結びつける能力と、記号間の関係を推論する能力を仮定する。この能力をモデル化したエージェントを動的単語網モデルを用いて構築する。マルチエージェントの会話のシミュレーションにより、様々な語彙のダイナミクスと語彙構造の組織化を通じて、プロトタイプ的なカテゴリー構造が発達しえることを示す。

Development of category and lexicon using developing word-web model

Takashi Hashimoto

School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract Lexicon of human languages is not mere a list of words representing some objects but has relationships among words and categorically structured as a whole. In this paper, we study a question concerning the evolution of language such that what kind of ability can bring the categorical structure by means of a computational model. We hypothesize the ability is to assign signs to objects and to infer relationships among signs. These abilities are modeled as an agent using dynamic word-web model. Simulating conversation by the agents, we show that they can develop prototypical categorical structure through various dynamics of lexicon and organization of lexical structure.

1 記号システムとしての言語の進化

人間は自然言語を用いてコミュニケーションを行う。我々はどのようにしてこの言語を話すに至ったのかという言語進化の問いについて、近年関心が高まっている。この問いは、言語を可能にする認知的・身体的能力の生物学的進化のプロセスに関するものと、初期の言語から構造化・複雑化して現在の言語に至る文化進化を含めたプロセスに関するものがある。本稿では、以下に述べる記号システムとしての言語の特徴、特に、語彙がカテゴリー構造を持っているという点に着目し、このような構造がどのような認知的能力の下で発展し得るのかを考察する。

人間言語は、記号システム、統語システム、音声システム、文化システムなど、様々な特徴がある。ここで着目する記号システムとしての言語とは、言葉は何かを表すという象徴性、および、ほとんどの

言葉はそれが表す対象と関係のない形態をとるという恣意性を持った記号の体系であることを意味する [1]。

このような人間言語の様々な特徴が、動物のコミュニケーションシステムと、どこが共通し、どこがどう異なるのかを知ることは、言語の進化を考える上で有用である。ここでは、本稿の主題である記号システムについて見てみよう。ヒト以外の動物でも上記のような記号システムとしての性質を持ったコミュニケーションを行う種がいる。例えば、ベルベットモンキーは異なる捕食者を表す3種のアラームコールを発する [2]。これはある叫び声が特定の天敵を表すという象徴性を持つ。さらに、その叫び声と対象の組み合わせは恣意性を持つ。しかし、この記号システムでは、ごく少数の記号しか使われておらず、記号とそれが表す対象は単純な一対一対応をしている。また、ベルベットモンキーが自然状態

で記号を使用する状況は、ほとんどの場合天敵が現れたときだけである。すなわち、この記号システムは「いま、ここ」に強く結びつけられたものである。

それに対し、人間言語では非常に多くの記号が用いられ、その多数の記号は体系的に構造化されている。すなわち、カテゴリー構造を持っている。また、記号の使用は「いま、ここ」からは解放されており、抽象的考えや想像上の事物を象徴し、新たな記号を容易に生成している

計算モデルを用いた語彙発達の研究は Steels による Naming Game[3] などがあるが、多くの場合、語彙は記号とそれが指し示す対象のリストとしてモデル化されている。しかし、上で述べたように、人間言語の語彙はこのような単純な構造ではなく、単語間が様々に関係し、外界の構造を反映しつつ言語独自のカテゴリー構造を持っている。さらに、その構造はある程度安定的でありながら、時間とともに変化するダイナミックなものである。すなわち、安定性と適応可能性を持っている。

本稿では、このような特徴を持つカテゴリー構造が発達しえる条件を、計算モデルを構築しコンピュータシミュレーションを通して調べる。

2 言語進化のモデル化

冒頭で述べたように、言語の進化には、生物進化によって形成される身体的・認知的能力と、文化進化による言語ルールの複雑化のプロセスがある。また、言語使用者は社会における言語ルールを学習し、それに制約されて言語を用いるが、言語を用いることで社会の言語ルールを変化させていくというルールダイナミクスの過程も存在する。このようなダイナミクスは、図2に示す言語進化のダブルループとして特徴づけられる [4]。

数理モデルにより、言語の起源と進化を全体として解明するためには、このダブルループ・ダイナミクスをモデル化しなくてはならない。すなわち、個人間の相互作用を通じた集団レベルのダイナミクスと、集団間の争いなども含めた言語に関する能力の適応度地形が変化するような生物進化のダイナミクスをモデルに組み込む必要がある。だが、そのようなシステムは大がかりとなるため本稿では扱って

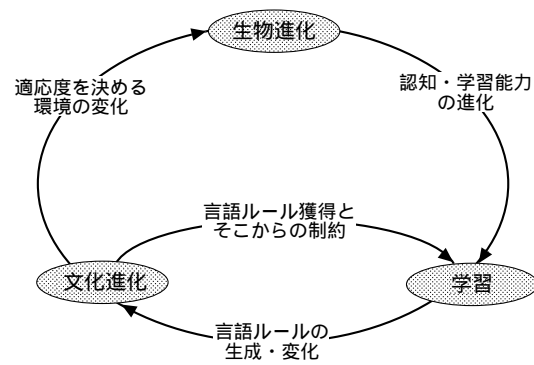


図1: 言語進化のダブルループ・ダイナミクス [4]

ない。ここで扱うのは内側の文化進化と学習のループの部分である。しかし、この内側のループを扱う際にも、どのような認知能力を前提とすれば言語システムが生じ得るかを問うことにより、言語の起源に関わる条件を考察することが可能である。

本稿では、前節での述べたような、安定性と適応可能性を備えた豊かで動的なカテゴリー構造という記号システムが発展する前提として、外界の対象を表す象徴機能を記号に与える能力と、記号間の関係を推論する能力を仮定する。

また、動的に発展し構造を作っていく言語システムを実現するためには、「動的言語観」[5, 6]という観点に立つのが有効だと考える。これは、言語を、意味を生成する活動として理解しようという、主体の意味作用を重要視する立場である。すなわち、記号の意味はそれが指し示す対象ではなく、記号を用いる主体が解釈し生成するものである。

3 動的単語網モデル+「語彙」

本稿で仮定する、記号間の関係を推論する能力を表現する動的言語観に基づいた言語使用者のモデルとして、単語間の関係の網目が会話とともに発展する動的単語網モデル (Developing Word-web model)[5, 6]を採用する。これは、主体の言語知識を単語間の関係で表現する。単語間関係は、会話の中での単語の使われ方に応じて変化する。

単語間関係を計算するアルゴリズムは、1文中の単語の用法の類似度と、複数の文にわたる単語の出現パターンの類似度を考慮し、会話とともに逐次的

に更新されて行く。すなわち、ある文を受け取った時、その文を受け取る直前の単語間関係の状態から計算を行う。出現パターンは一連の会話における単語の出現頻度から計算を行う。

t 番目の会話中の n 番目の文を受理したときの 2 つの単語 w_i と w_j の間の関係 $R^{t,n}(w_i, w_j)$ は、用法類似度と出現類似度を次のように線形結合したもものとして定義する。

$$R^{t,n}(w_i, w_j) = \alpha^w [\text{用法類似度}] + (1 - \alpha^w) [\text{出現類似度}] \quad (1)$$

α^w は結合パラメータである。用法類似度の項は、文中で同時に使われた単語は関係を強めるように働く。第二項は、ある 2 単語の出現パターンがこれまでの会話と現在の会話で同じであれば正に、異なっていれば負になる。これは会話中の単語の出現確率の相関を計算することによって実現している。これらの値は、直前の文の時点での値から計算されるものである。よって、文を連続的に発話・受理していくと、このアルゴリズムを繰り返し適用することになるので、1 つの文中ではなく異なる文中で使われる単語間の関係も変化していく。

本稿では、もう 1 つの能力として外界の対象を表す象徴機能を記号に与える能力を仮定している。これをモデルに組み込むため、単語間関係網に加えて、外界の対象を指し示す「語彙」を導入する。エージェントが持つ単語群中の部分集合はある外界の対象を指し示し、単語 w と対象 o の間に結合度 s_{wo} がある。複数の単語が 1 対象を指している場合、すなわち、同義語がある場合にこの変数が参照される。ある対象を指す言葉を発する際、同義語の中の 1 つが

$$\sigma_{wo} = \frac{1}{\exp[-\beta s_{wo}] + 1} \quad (2)$$

に比例した確率で選ばれる¹。

結合度は単語の使われ方により

$$s_{wo}^{n+1} = s_{wo}^n + \Delta s_{wo} \quad (3)$$

と増減する。エージェントの会話にはトピックとなる対象が指定される。増減のしかたは対象がトピックであるかどうかに応じて次のように分類される。

¹ σ_{wo} は結合度 s_{wo} の値域を 0 ~ 1 に変換したものである。

- トピックになっている対象 t を指し示す語 w が使われた場合、

$$\Delta s_{wt} = u^{\text{TU}} \quad (4)$$

- トピックである同じ対象 t を指す、使われなかった語 w'

$$\Delta s_{w't} = -u^{\text{TN}} \quad (5)$$

- トピック以外の対象 o を指す語 w

$$\Delta s_{wo} = u^{\text{OU}} \quad (6)$$

- トピック以外の同じ対象 o を指す、使われなかった語 w'

$$\Delta s_{w'o} = -u^{\text{ON}} \quad (7)$$

増減のパラメータは $u^{\text{TU}} > u^{\text{TN}} > 0$ 、 $u^{\text{OU}} > u^{\text{ON}} > 0$ に設定する。

単語間関係と語彙を言語知識として持つエージェント間の「会話」を、単純に「文 (= 単語の連なり) のやりとり」としてモデル化する。単語は記号列である。集団からランダムに選ばれた 2 エージェントが、提示されたトピックをきっかけとして文の発話・受理を繰り返す。聴取者は、聞いた文中に知らない単語が 1 つ以下であれば、その文を受理する。文を発した際と、受理した際に単語間関係を更新する。

4 シミュレーション結果

初期状態として単語に関してなにも知識を持たないエージェント集団において、単語間関係と語彙が会話を通じてどのように変化するかを、コンピュータシミュレーションを用いて調べた。ここでは、外界の対象の間にはなんら関係を設定しない。エージェント数は 5、対象の種類は 10 とした。単語間関係の結合パラメータを $\alpha^w = 0.5$ 、結合度の初期値を $s_{wo} = -5000$ 、 σ_{wo} に変換する関数のパラメータを $\beta = 0.001$ 、結合度変化の単位をそれぞれ $u^{\text{TU}} = 50$ 、 $u^{\text{TN}} = 10$ 、 $u^{\text{OU}} = 10$ 、 $u^{\text{ON}} = 1$ とした。

4.1 結合度のダイナミクス

エージェント達は初期にはなにも単語を知らないが、会話が進むに連れて対象に対し様々な単語を割り当てていく。その単語と対象の結合度には、様々なダイナミクスが見られる(図2)。

図2(a)は共有語彙の形成を表す。この図では、各エージェントがもつ単語 e と対象 J との結合度がどのように変化するかを重ね描きしている。対象 J に対して単語 e がエージェント1と4により使われ始めた後、他のエージェントもじょじょにその単語を対象 J に対して用いるようになる。最終的には集団全体でひとつの対象に同じ語を割り当てるようになる。

図2(b)のように、ある程度強くなった対象と語との結合が衰退し、その語が使われなくなる場合も見られる。この図には、各エージェントがもつ単語 ioo と対象 J との結合度の変化を描いている。

また、あるエージェントがひとつの対象に複数の語を割り当て、そのどれもが同じ確率で用いられるようになる場合もある(図2(c))。すなわち、同義語の発生である。この図はこれまでの二つの図(a)(b)と異なり、1人のエージェントが持つ複数の語と1つの対象 A との結合度の変化を描いている。一方、図には示していないが1つの語が複数の対象を指し示す多義語が発生する例も観察される。

図2(d)は語彙の交替過程を表す。この図は、あるエージェントが対象 J に割り当てている2つの単語の強度変化を示している。ある対象に対し一旦強くなった単語 i との結合度が、他の単語 oie が使われるにつれて、小さくなっていくことが起きる。

4.2 クラスタの形成と変化

次に、語間関係を分析する。図3はある1人のエージェントの語間関係を主成分分析し第1、第2主成分を軸に取って描いた散布図である。各点が1単語を表す。この図では、ある時点と、その後文を1つ受理した後の語間関係を描いている。そして、2時点の対応する単語を矢印で結んでいる。

この図からわかるように単語はクラスタを形成する。このクラスタ構造の典型的な形態は、たくさんの単語が集まっている部分があり、別のクラスタの

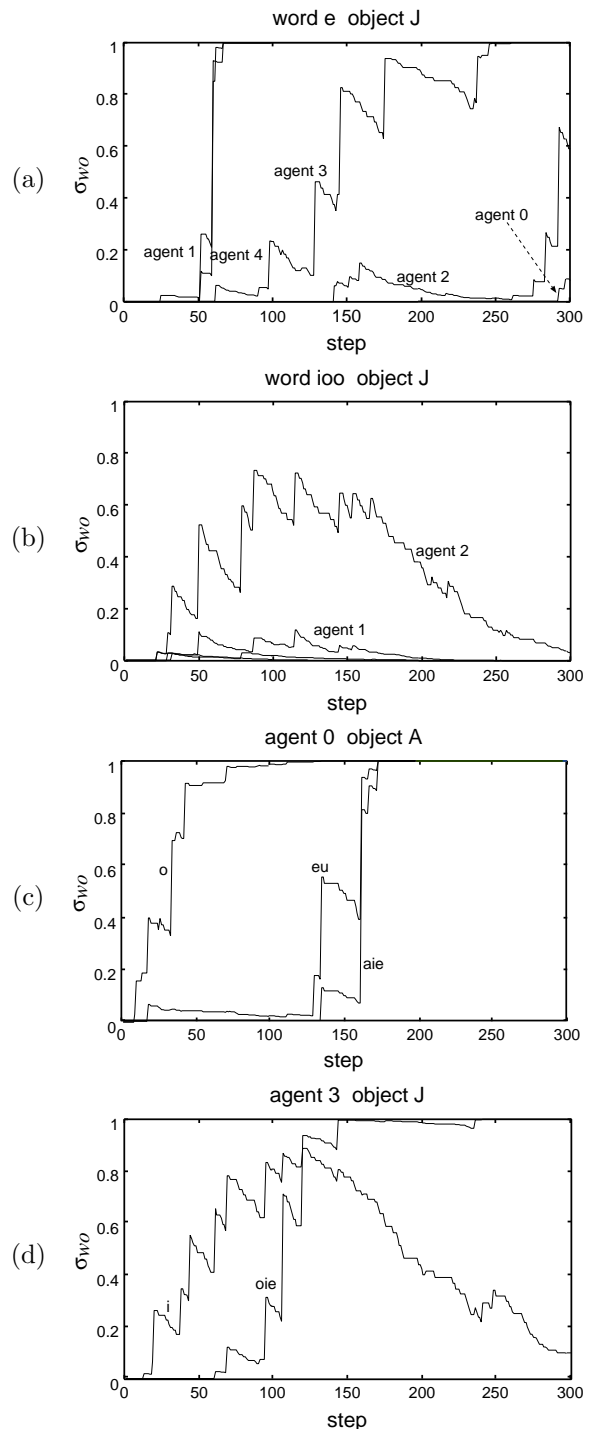


図2: 単語と対象の結合度の変化:横軸は時間、縦軸は結合度 σ_{woo} 。(a) 共有語彙の形成、(b) 語彙の衰退、(c) 多義語の成立、(d) 語彙の交替

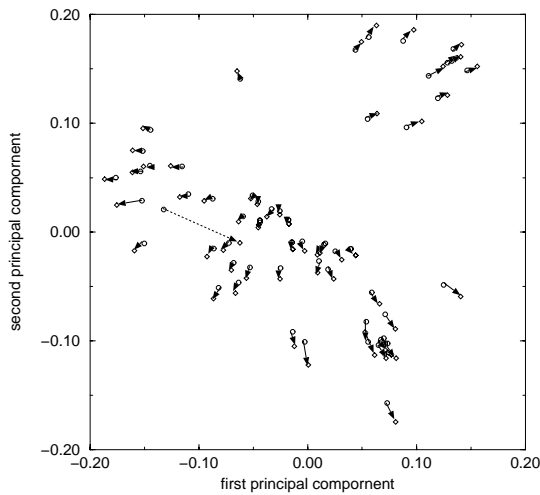


図 3: クラスタ構造とその変化 (単語間関係を主成分分析した散布図)

凝集部分といくつかの単語を経て連なるというものである。クラスタ間をつなぐ単語群は、ある二つは関係が強いが、全ての単語間が強い関係にあるわけではない。

1つのクラスタに属している単語は1文を受理した後で、ほぼ同じ方向へ変化している。よって、全体のクラスタ構造は大きくは変化していない。すなわち、全体的な安定性を持っていることがわかる。しかし、ある1単語だけが、クラスタ内の他の単語と異なる方向へ移動している。この変化は、図中に破線の矢印で示されている。この単語はこの時受理した文中では、それまでと異なる使い方がされていることがわかっている。異なる使い方とは、それまでいっしょに使われていた単語ではなく、これまではいっしょに使われることがなかった単語とともに1つの文を作っているということである。このように新しい単語の用法は、属するクラスタが変わるという形で、クラスタ構造を局所的に変化させる効果を持つ。すなわち、ここで形成されたクラスタ構造は局所的な適応可能性を持つとすることができる。

このようなクラスタ構造の特徴はプロトタイプ的カテゴリー構造 [7] と共通している。日常的なカテゴリーは、典型的な要素 (プロトタイプ) と非典型的な要素 (周辺) があり、複数のカテゴリーがゆるやかにつながり、その境界はリジッドに決まってい

ないという、プロトタイプ・カテゴリーだと考えられている。

4.3 語彙とクラスタ構造

語間関係のクラスタ構造が、対象を指す単語とどのような関係にあるかを見よう。図 4(a) はあるエージェントの語間関係に、単語が指す対象 (図では A ~ J で表示) を書き込んだものである。本稿のシミュレーションでは、外界の対象にあらかじめ決まった構造を導入していない。にもかかわらず、主体内ではある構造をもったクラスタに分類されていることがわかる。

図 4(b) は (a) と同じエージェントのしばらく後の内部状態である。(a) と比べると、図の左側にある単語群の構造 (相互の位置関係) はあまり変化していないが、右側の単語群の構造は大きく変化している。図 4(c) は (a)(b) とは異なるエージェントであるが、左側の単語群の構造は図 4(a)(b) の主体と比較的と共通している。すなわち、共有される語彙構造ほど会話を通じて構造が保存され、共有されない語彙構造は変化しやすいことを表している。

5 おわりに

動的単語間関係網モデルに語彙を導入したマルチエージェントシステムにより、会話を通じてプロトタイプ的な構造を持ったカテゴリー構造が発達することを見た。カテゴリー構造発展の際に、同義語・多義語の形成や語彙交替、クラスタ構造、外界の対象の自己組織化、といった個体のレベルのダイナミクス、および、共有語彙の成立や語彙の衰退、共有される語彙構造ほど保存されやすく、共有されない語彙構造は変わりやすいという、集団のレベルのダイナミクスが生じる。本稿では、このような多様なダイナミクスを持つカテゴリー構造が、単語とそれが指す対象を結びつける認知能力、および、単語間の関係を単語の用法に基づいて計算できる認知能力があれば獲得可能であることを示した。

ここで依拠した動的言語観では、言葉の意味がコミュニケーションの場で言語使用者によって作られるという過程を重視する。すなわち、言葉の意味は固定的ではなく拡張可能である。このような拡張可

能性が、言葉の使い方に基づいて行われることが、プロトタイプ的カテゴリー構造を発達させる要となっているのであろう。さらに、この意味の拡張可能性は、言葉の品詞を拡張することもできるのである。文法化というプロセスにつながる。文法化とは、ある単語の意味が転用され、単語が語彙の意味を失って文法機能だけを持つようになることである。よって、統語構造の複雑化にも、動的言語観で主張されるような意味の拡張可能性が働いている可能性は大きい。

参考文献

- [1] Saussure, F.D., *Course in General Linguistics*, Philosophical Library, New York, (1959)
- [2] Seyfarth, R.M., Cheney, D.L., Marler, P.: Vervet Monkey Alarm Calls: Semantic Communication in a Free-range Primate, *Animal Behaviour*, **28** (1980) 1070-1094.
- [3] Steels, L: The Synthetic Modeling of Language Origins, *Evolution of Communication*, **1**(1) (1997) 1-34.
- [4] 橋本敬: 言語進化とはどのような問題か? ~ 構成論的な立場から, 第 18 回人工知能学会全国大会講演論文集, (2004).
- [5] Hashimoto, T: Dynamics of Internal and Global Structure through Linguistic Interactions, In: Sichman, J. et al. (Eds.) *Multi-agent systems and Agent-Based Simulation*, Springer (1998), pp.124-139.
- [6] 橋本敬: 動的言語観に基づいた単語間関係のダイナミクス, *認知科学*, **6**(1) (1999) 55-65
- [7] Taylor, J.R., *Linguistic Categorization - Prototypes in Linguistic Theory*, Oxford University Press, Oxford, (1995)

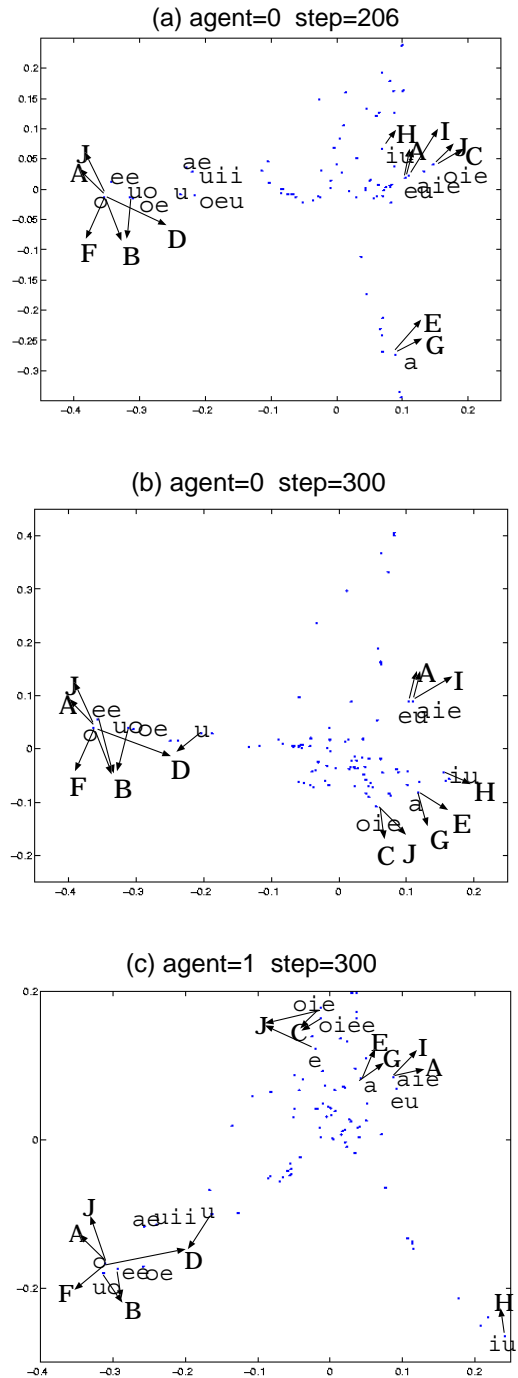


図 4: 語彙構造。単語間関係を主成分分析した散布図の各点(単語)に、対象を指すものを記入している。