日本認知科学会　『認知科学』6 巻 1 号, pp. 0-10. 共立出版.

● 特集論文

動的言語観に基づいた 単語間関係のダイナミクス

橋本 敬

Dynamics of structure in relationships among words via communication is studied by a constructive approach. Our study is based on the dynamical view of language, which is that meanings of words are dynamically created through activities of sense-making by individual language users. We simulate "conversation" in which agents having word relation matrices as their internal structure speak and listen to sentences. The sense-making activity is modeled by situating words in a web of relationships among words according to the usage of the words. We observe that agents develop cluster structure in word relationships, which is endowed with both stability and adaptability. It is considered that the cluster structure shares some features with prototype category. The structure changes dynamically by appearing new usages of language. The coexisting commonality and individuality of cluster structure is observed in an ensemble of individuals.

Keywords: Dynamical View of Language (動的言語観), Relationship among Words (単語間関係), Constructive Approach (構成論的アプローチ), Dynamics of Cluster Structure (クラスタ構造のダイナミクス), Individuality and Commonality (個別性と共通性)

1. 序論

1.1 複雑系としての認知活動

複雑系とは，自らの構造および外との関係を変えていくという形で認知的活動を行なう主体の生成・変化・関係のダイナミクスとして対象系を捉えるという視点である (金子・津田, 1997; 金子・池上, 1998)．我々は，複雑系としての認知の問題に取り組むにおいて，認知的主体およびそれが構成する系の示すダイナミクスを理解することこそが大事であると考える．すなわち，内的なダイナミクスを持つ主体が，認知的活動を通して外界や他者と絶えまなく相互作用することにより，認識，知能，言語といった構造がいかに生成され変化していくのかが議論される．また，ある特定の現象について具体的・個別的な取り扱いをするよりも，抽象的で簡単な系を構成し，認知活動による構造の生成・変化の豊かなダイナミクスを理解することを目指す．

複雑系としての知能創発の問題を，記号生成のダイナミクスの中で考えてみよう．それは，

(1) 世界を分節し，情報の取捨選択・分類を行なう
(2) 分節された対象を示す符合 (記号) を作る
(3) 記号を操作することで，それが象徴する対象をヴァーチャルに操作する
(4) 記号とその象徴する対象の間のつながりを広げ，解き放ち，新しい概念をつくり出す

というものである．

(1)～(4) はそれぞれ，カテゴリー化，象徴作用，記号操作能力，言語の働きに対応する．知能は (3) および (4) の段階で創発するものと考えられるが、これらの各段階の間はきっちりと分離できるものではないだろう．たとえば分節の結果としてのカテゴリーの体系は知能や言語が成り立つ基礎となってはいるが，その構造が揺るぎなく強固なものとしてあるとは思えない．カテゴリーの体系は，外界に存在する構造を学習するというものではな

Dynamics of Relationships among Words based on a Dynamical View of Language by Takashi Hashimoto (RIKEN).

く，主体が外界と絶えまなく相互作用を行なって創造するものである．よって，主体的活動により世界との関わり方が変化することで，カテゴリー化のしかたもまた変化し，その変化は，知能，言語の構造へとフィードバックしていく．こうしたレベル間のフィードバックを通して，認知システムの構造は常に動いていくものであり，そのようなダイナミクスを持つモデルを扱っていくことが，複雑系の認知研究として重要な点であろう．

本論では，(4) の活動， 特に言語を使い意味を主体的に生成するという活動に着目し，自分の得た情報をあるやり方で分類するというカテゴリーの構造がいかに変化するかを研究する．

1.2 動的言語観

言語をどのようなものとして理解するかという問題に対して，動的言語観と静的言語観の二つの立場が考えられる．

動的言語観とは，言語を，主体が話し，聞き，読み，書くという創造的活動の過程として現われるものとして見る立場である．この見方において，ことばの意味は，個々の言語使用の状況において言語使用者の主体的な活動により動的に創りだされると考えられる．すなわち，ことばが指し示す対象や社会で流通し絶対的に受け入れなければならない意味や文法，あるいは，ある問いかけにはこう答えるべきといった静的な自己同一的な言語構造があらかじめ存在するとは考えない．

例えばメタファーについて考えてみよう．メタファー的な表現，特に創造的メタファーというものを理解しようとするときに，この表現を既成の言語体系に照らし合わせるならば，これは間違った文で理解不能なものでしかない．しかし，我々は時としてそのような創造的表現を了解することができる．この時、我々はその表現について自分なりに意味を創造しており，我々の内部構造はその意味創造の過程により変化し，我々の世界に対する関係や見方が変わるのである．よって，そういった創造的表現を発する，あるいは了解するということは，既存のものとして考えられる言語システムに穴を穿ち，ありきたりの言語の構造を壊すことができる．これは，メタファーに関してだけあてはまることなのではなく，すべての言語活動においてこのような主体的意味創造を行ない，それによる内部ダイナミクスがあると考える．

すなわち動的言語観は，言語の構造がいかにあるべきかという抽象的な概念を基礎に置くのではなく，言語が実際に使用される際には，いわゆる文法にしたがっていなくても発話の意味が理解できるということを考え，言語の変化そのものを認め，言語とは，それを使用する人にとっての解釈の多様さこそが大事であるとする視点に立つものである． これは， バフチンの言語に対する個人主義的主観論の見方 (Vološinov, 1986) や時枝 (1941) の言語過程説，あるいは，深谷・田中 (1996) の 意味づけ」に対応するものである．例えばバフチンは，個人主義的主観論の見方においては，言語とは 活動そのものであり，個人の発話行為によって実現される絶え間ない創造の過程」として理解されるべきものであるとしている (Vološinov, 1986)．

このような観点に立つということは，必然的に 動的」なものとして言語を見ることとなる．つまり，言語の構造とは，主体が言語を使用し，意味づけ，ものを考えるという活動の結果生成し，変化していく．

これに対し静的な言語観とは，時間的に変化したり具体的な使用の状況で揺らいだりしない構造こそが言語の本質と考える視点である．バフチンはこれを，規範的に同一な言語の形態の，安定し不変なシステムであり，個人の意識はそれを既にできあがったものとして見出し，議論の余地のないもの」として言語を理解する立場として抽象的客観論と呼んでいる．これは， 言語の変化しない自己同一的な構造， 例えば統語構造 (Chomsky, 1957) や辞書的意味目録， 語用論的ルール (Grice, 1975; Sperber& Wilson, 1986) などが， 言語使用者としての主体を離れたものとして存在し，主体が学習し習得すべき制度として言語を見るものである．このようにして主体の消去という理想化の操作の末に構造を記述するだけでは，言語の本質的ダイナミクスを捉えるには至らないであろう．

本論では，複雑系として言語を見るにあたり，動的言語観の立場に立つ．上の創造的メタファーの例において述べたように、ある表現を自分なりに了解する， すなわちその表現の意味を創造するという活動を，深谷・田中 (1996) にならって 意味づけ活動」と呼ぼう。我々は，主体が言語を使用する時に行なう意味づけ活動を言語のダイナミクスの基礎

と考える．ここでは，その活動は，主体が使用したことばをことばの間の関係の中に位置付けるという過程として考える．文の中の一連のことばを他のことばとの関係の中に付置していくことによって，主体の持つ一つの内部モデルとしてのことばの間の関係が変化していく．ある文を受け入れる前と了解した後でことばの間の関係がいかに変化したかということが，主体にとっての意味である．

我々は，いま述べたような動的な言語観に立っているので、ことばとそれが指し示すなにかが静的なつながりを持つとは考えない。よって，ことばの間の関係は，ことばが指し示すものの間の関係を反映しているのではなく，言語の中におけることばの使い方をもとにして作られると考える．すなわち，言語使用者は，あることばをその使い方に応じて他のことばと関係づけることで 意味づけ」を行うと考える．

2. 構成論的アプローチによるモデル化

上で述べた動的言語観に基づいた，言語使用者の内部構造の発展を見るためのモデルを作る．対象とする言語システムを所与のものとしてそれ自体を記述するという方法では， 言語を使用する主体を取り除くものとなってしまう． 我々は， 言語活動を行なう主体を含めた系全体を対象とするために，構成論的アプローチ (Kaneko, & Tsuda, 1994; 金子 ・津田, 1997) を採る． 構成論的アプローチでは，主体の活動自体を含んだ系をひとつの力学系として作ることで，そこに生成される構造とそのダイナミクスとして，系の示し得る可能なシナリオを提示し対象を理解しようとする．

我々のモデルは， 内部構造として単語間の関係 (以後，語間関係と呼ぶ) という知識を持った簡単なエージェントで構成される．このエージェントが文の発話と受理をする 会話」を行なう．意味づけ活動は，エージェントが発話したり受理した文の中で使われた各単語と他の単語との関係を計算し，語間関係を更新していくことで，各単語を関係の網目の中に位置付けるプロセスとしてモデル化される．すなわち，エージェントは会話を通して語間関係を動的に変化させていく．エージェント達は辞書目録や文法のようなものを初めから共有するのではなく，語間関係を計算する一種の推論アルゴリズムだけを共有している．このアルゴリズムは単語間の関係を，一連の会話の中での単語の使い方から導くものである．それを以下で定義する[1)]．

2.1 語間関係を計算するアルゴリズム

語間関係の定義は二つの部分，すなわち，文中における単語の用法の類似度と，一連の会話の中での単語および文の出現頻度の相関からなる．

類似度を計算するアルゴリズムは，基本的には Karov and Edelman (1998) が提出したアルゴリズムを基礎にしている．これは，コーパス中の単語の語義の曖昧性を取り除くための一つの方法として提出されたもので，文中での単語の使われ方から単語間の類似度を計算するというものである．そこでの鍵となる考えは，単語と文の間の相互依存性である．それは，類似した単語は類似した文に現われるが，また，類似した文というのは類似した単語で構成されるものであるという考えである．言い換えるならば，ある語の語間関係はその語が使われている文の間の関係から計算され，文の間の関係はその中で使われている語の間の関係から計算されることになる．

我々は，この類似度に加えて語や文の一連の会話における出現頻度の相関を考慮する．ここでは一連の会話のことを テキスト」と呼ぶ．単語のテキスト中の出現パターンが似ている場合，例えば，あるテキストにおいていくつかの単語は何度も現われるが，他のテキストにおいてはほとんど現われないといったような時，その単語は関連が深いと考えられる．逆に，異なる出現パターンは，単語間の関連が少ないということを意味するであろう．

語間関係は，会話において文を発話したり受理したりすることにより徐々に変化するものと考えているので，文を一つ発話あるいは受理するごとに計算できるようにする．Karov and Edelman (1998) のアルゴリズムは， 文の静的な集合体としてのコーパス中での単語の使用法を考えているが，我々は，会話という動的な文の流れ中での単語の使用法の変遷から，単語間の関係のつくる構造がどのように変化するかということに興味があるために，このような定義を行った．

エージェント間の文のやりとりとしてテキストが続いていく． テキストを t，文を n と表し，図 1の

1) 語間関係の計算アルゴリズムと会話のモデルについては，ここでは概略を述べるにとどめる．細かい点については (Hashimoto, 1998) を参照されたい．

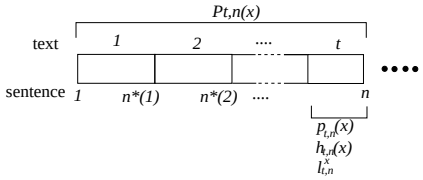


図 1 テキストと文の番号付けの方法，および $P_{t,n}(x)$，$p_{t,n}(x)$，$l^x_{t,n}$ を計算する範囲

ように番号付けする．t 番目のテキストにおける最後の文を $n^*(t)$ で表している．t 番目のテキストの n 番目の文の時点での，二つの単語 w_i と w_j の間の語間関係 $R_{t,n}(w_i, w_j)$ は，単語間の類似度と出現頻度の相関を係数 α^w を用いて線形結合したものとして

$$R_{t,n}(w_i, w_j) = \alpha^w(\text{語間類似度}) + (1-\alpha^w)(\text{語間相関}) \quad (1)$$

と定義する．単語間の類似度と相関の項は，それぞれ，

$$\text{語間類似度} = \frac{\sum_{s \ni w_i} K_{t,n}(s) A_{t,n}(s, w_j)}{\sum_{s \ni w_i} K_{t,n}(s)} \quad (2)$$

$$\text{語間相関} = \frac{1}{2}\left(\frac{D_{t,n}(w_i, w_j)}{\sqrt{N_{t,n}(w_i) N_{t,n}(w_j)}} + 1\right) \quad (3)$$

である．

まず類似度の項について説明する．式 (2) 中の $s \ni w$は文 s が単語 wを含む事を意味する．例えば，二つの文 s_1: “$I\ read\ a\ book$” と s_2: “$I\ read\ a\ magazine$” がある場合，集合 $\{s|s \ni I\}$ は $\{s_1, s_2\}$，$\{s|s \ni book\}$ は $\{s_1\}$ である．また，$A_{t,n}(s, w_j)$ は文の単語に対する親和度で

$$A_{t,n}(s, w) = \frac{\sum_{s' \ni w} K_{t,n}(s') R_{t,n}(s, s')}{\sum_{s' \ni w} K_{t,n}(s')} \quad (4)$$

と定義され，ここで $R_{t,n}(s, s')$ は文の間の関係である．すなわち，二つの語 w_i と w_j の間の類似度は，それらの語が用いられている文の間の関係の重みつき平均をとったものである．

文間関係も語間関係と同様に定義される．

$$R_{t,n}(s_i, s_j) = \alpha^w(\text{文間類似度}) + (1-\alpha^w)(\text{文間相関}) \quad (5)$$

$$\text{文間類似度} = \frac{\sum_{w \in s_i} K_{t,n}(w) A_{t,n}(w, s_j)}{\sum_{w \in s_i} K_{t,n}(w)} \quad (6)$$

$$\text{文間相関} = \frac{1}{2}\left(\frac{D_{t,n}(s_i, s_j)}{\sqrt{N_{t,n}(s_i) N_{t,n}(s_j)}} + 1\right) \quad (7)$$

式 (6) における $A_{t,n}(w, s_j)$ は，単語の文に対する親和度で，

$$A_{t,n}(w, s) = \frac{\sum_{w' \in s} K_{t,n}(w') R_{t,n-1}(w, w')}{\sum_{w' \in s} K_{t,n}(w')} \quad (8)$$

である。 これらの式で，$w \in s$ は単語 wが文 s の中に現われる事を表す．上記 s_1, s_2の例で，集合 $\{w|w \in s_1\}$ は $\{I, read, a, book\}$ となる．よって，文の間の類似度はその文の中に含まれる単語間の関係の重みつき平均ということになる．

類似度と親和度の定義に現われる重み $K_{t,n}(s)$，$K_{t,n}(w)$ は，単語と文の出現確率，および文の長さを考慮するもので，それぞれ $K_{t,n}(s) = P_{t,n}(s)/lg(s)$，$K_{t,n}(w) = 1/P_{t,n}(w)$ とする．ここで，$lg(s)$ は文 s の長さ，すなわちその文に含まれる単語の数を表し，$P_{t,n}(w)$ と $P_{t,n}(s)$ はそれぞれ単語 wと文 s の最初から n 番目までの全ての文における出現確率である． これら重みの部分は以下の事を意味する．ある単語がたくさん使われると類似度，親和度への寄与が少なくなり，逆に文の場合は大きくなる，また，短い文における単語は，長い文中のものより重要である．

次に，テキスト中の単語および文の出現の相関の説明をする．関数 $D_{t,n}$ と $N_{t,n}$ は単語と文に対して対称的に定義されるので， 以下では，記号 x を単語 (w) あるいは文 (s) を表すものとして使う．会話による語間関係のダイナミクスを見るためには，単語間の相関は，ひとまとまりの単語についてではなく文をひとつ発話あるいは受理するごとに更新されるべきなので，ここでは関数 $D_{t,n}$ と $N_{t,n}$ は漸近的に普通の相関係数になるように次のように定義する．

$$D_{t,n}(x_i, x_j) = D_{t-1,n^*(t-1)}(x_i, x_j) + {l^x_{t,n}}^2 (p_{t,n}(x_i) - P_{t,n}(x_i))(p_{t,n}(x_j) - P_{t,n}(x_j)) \quad (9)$$

$$N_{t,n}(x_i) = N_{t-1,n^*(t-1)}(x_i) + {l^x_{t,n}}^2 (p_{t,n}(x_i) - P_{t,n}(x_i))^2 \quad (10)$$

ここで，$p_{t,n}(x)$ は現在のテキスト t における x の出現確率，$l^x_{t,n}$ はテキスト t の x の数で勘定された長さ， すなわち単語あるいは文の総数である．

式 (9) は，ある二つの単語あるいは文の出現パターンが同じであれば正に，異なっていれば負になる．例えば，ある単語 wがこれまではよく使われていたが現在のテキストにおいてはあまり現われないならば，$p(w) - P(w)$ は負になる．別の単語 w'がこれまでのテキストよりも現在のテキストにおける出現頻度が高いのであれば，$p(w') - P(w')$ は正になり，この部分は全体として負の値を持つことになる． このようにして，語間相関の項は，単語間の出現パターンが異なる単語については、語間関係を引き下げる方向に働く．

この類似度の計算アルゴリズムからわかるように，$R_{t,n}$ は $R_{t,n-1}$から計算されるようになっている．つまり単語間の類似度は，前の文の時点での語間関係から計算される。よって，もし単語の出現パターンが変わらないならば，強い関係にある単語は高い類似度を持つようになる傾向にある．例えば，二つの文 s_1: “$I\ read\ a\ book$” と s_2: “$I\ read\ a\ magazine$” で，1 回目の計算では s_1より $read$と $book$，s_2より $read$と $magazine$が関係づけられる．そして次回の計算により，$book$と $magazine$が関係づけられる．これら二つの単語は 1 文中で使われるのではないが，2 文での使い方が似ていることにより，関係が強められる。

2.2 会話のモデル化

次に，語間関係の行列を内部状態として持つエージェント間の会話のモデルを考える．本論では，外界のものごとを参照するという単語の静的な意味への制約をはずし，文をやりとりするという最も単純な行為により，単語間の関係という内部構造の変化をみたい．よって，話者の外には最少限のものとして数個の **TOPIC** があるだけである．そこから 1∼3 個の TOPIC がランダムに選ばれ，会話をするエージェントに示される．提示された TOPIC を **SITUATION**，一連の会話をテキスト（**TEXT**）と呼ぶ．エージェント間の会話は選ばれた TOPIC についての発話から始められる．その後の会話は TOPIC に関するものに限定されないが，なんからの関連性をもったかたちで展開する。ここでは，この関連性を表すために，返答をする時，聞いた文の中の語を焦点語として選び，それを返答文の中で使うようにしている．例えば、 TOPIC として “ペン” が示されたとして、 一方が 「これは青いペンだよ」と言った時，もう一方は 「青い空はきれいだね」という返答をすることができる。

会話の概略は次のようなものである。

会話の手順
0. 二つのエージェント（話し手，聞き手）を選び、SITUATION を提示
[話す]
1. SITUATION から TOPIC を一つ選ぶ
2. 焦点語を選ぶ
　会話の始め :TOPIC の名前 （TOPIC に対して名前をつけていない場合は，文字を組み合わせて名前をつくる）
　発話への返答 :受理した文中の任意の 1 語
3. 焦点語と親和度の高い文を話し手の既知の文から選ぶ
4. 採用した文をある確率で変更して発話
5. 発話文により話し手の語間関係行列を更新
[聞く]
6. 聞き手は、文を受け入れるかどうか決める
7. [受理した場合]. 受理文により聞き手の語間関係を更新
8. 発話に対し返答する （話し手と聞き手の役割を交代して 2. へ）
7'. [受理しなかった場合]. 話し手が別の TOPIC について発話する (1. へ)

受理の条件
発話された文中の単語がすべて既知のものであれば，その文を受け入れる．未知の単語が一つだけの時は，その単語を新たな知識として採り入れ，文を受け入れる．二つ以上未知の単語がある時は受理しない．この条件は，新しい単語に意味づける能力の限界を設定している．

文の変更
単語を一つ付加する，置換する，削除するという 3 種類の方法のどれか一つを適用する．付加および置換のための単語は既知の単語から選ばれるが，その単語に，文字の付加，置換，削除という方法のどれかを施して新しい単語を作る

会話の終了
5 つの文が受理されなかった時，あるいは，両方のエージェントによって受理された文の合計が 100 に成った時点で会話は終了する．その後，新たなエージェント対と SITUATION が次のテキストのために選ばれる．

会話の例は次のようなものである．

```
TEXT: 25 SITUATION: 0 1 2
TOPIC: 2
agent1.name[2]= ea    agent0.name[2]= i
 1: ea-i                0: ea-eii-iii-iuuo-eii
 1: ea-eii-eii-eii      0: ea-i
 1: ea-eii-iii-iuuo-eii 0: iuuo
 1: eoi                 0: i-eoi
 1: i-eoi               0: eoi
 1: i-ei-eoi            0: i-eoi
 1: eoi                 0: i-ei-eoi
 1: i                   0: i-eii
 1: eii-eii-eii         0: eii-eii
 1: eii-eii             0: eii-eii-ii-uuoe
              :
              :
```

この例は一連の会話の中の 25 番目で，提示されている SITUATION は TOPIC 0，1 および 2，会話に参加する二人のエージェント 1,0 が選ばれている．

エージェント 1 は TOPIC 2 を選び、それに対する名前'ea' を用いて文 "ea-i" を発話している．話し手は， ここで発話した文に応じて語間関係行列を更新する．

聞き手は発話された文を受け入れるかどうか決める．この例では，エージェント 0 は文を受け入れ，その文に応じて語間関係を更新している．ここで，両エージェントは聞き手と話し手の役割を交替し，新たな話し手は受理した文に答えるための文をつくる．この例では，焦点語として ea を選び，単語の文に対する親和度の行列 (式 (8)) からその焦点語ともっとも親和度の高い文を採り "ea-eii-iii-iuuo-eii" と答えている．

3. 結果 (1) – エージェント内の構造

まず，2 エージェント間で会話を行ったシミュレーションについて述べる．TOPIC は 9 種類，文字は {a, e, i, o, u} の 5 つとする．発話のために採用した文は 10 回に 1 回の割合で変更される．文の変更は，置換が付加，削除よりも高い確率で起き 1 文が

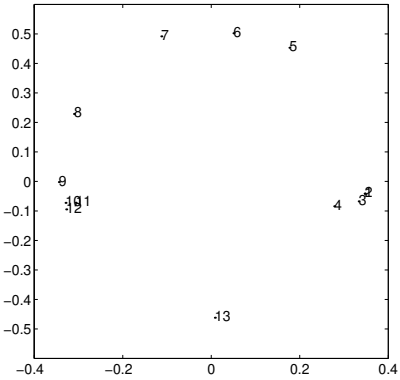


図 2 語間関係行列 $R(w_i, w_j)$ の散布図

長くなり過ぎないようにしている．単語の変更は、3 種類の変更がほぼ同じ確率で起きるようにしている．式 (1)，(5) における類似度と相関の間の重み係数は，$\alpha^w = \alpha^s = 0.4$ である[2]．シミュレーションは，2 エージェントとも単語を一つも知らないという状態から始める．

3.1 単語のクラスタ

一般に，単語は語間関係行列 $R(w_i, w_j)$ 内の総単語数の次元を持った高次元の空間に，$R(w_i, w_j)$ に従って分布している．この高次元空間中の単語の分布の特徴を最もよく反映するように，ある平面に $R(w_i, w_j)$ の値を射影することで[3]，語間関係の構造が見やすくなる．ここでは，この平面の軸を決定するための一つの方法である主座標分析 (Gordon, 1981) を用い，この分析により得られた第 1，および第 2 主座標をそれぞれ X 軸と Y 軸とした図 (散布図という) を作った。 その散布図の例を図 2 に示している． 図中の数字は単語を表しており，右の中程の単語から始まり，この図の中で近い単語が近い数字になるように，反時計周りに番号付けされている．この図は，高次元の空間における単語間の関係を最も良く表すように作られているので，この図中で近い位置にある単語は，強い関係を持っているということができる．

2) 以下で述べるものと同様の結果は，広いパラメータ領域で再現される．しかし，$\alpha^x > 0.9$ では，単語間の関係が強化される方向性が強過ぎるので，すべての単語がほぼ同じ関係を持つようになりやすい。また，文の変更の頻度を高くするとランダムに近い発話となり，単語数が増えていくだけで語間関係の構造はできない．

3) すなわち，元の空間で遠くにあるものは平面中でもできるだけ遠くに，といったように

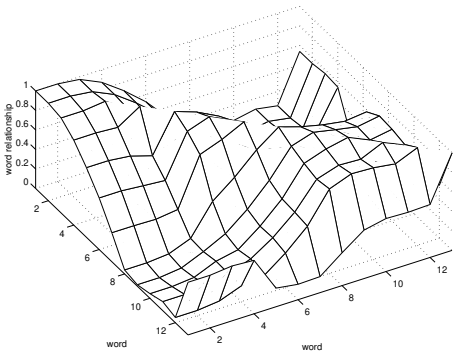


図 3　語間関係 $R(w_i, w_j)$

この図に見られるように，単語は語間関係にもとづいたグループを形成する．この単語のグループをクラスタと呼ぶ．我々のシミュレーションでは，クラスタの形として 2 種類の特徴的なものがみられた．一つは，クラスタ内で単語が比較的狭い領域に分布しているもので， 図 2 での単語の番号でいうと $1 \sim 4$， $9 \sim 12$ の二つである． ここではこれを flat クラスタと呼ぶことにする． なぜなら， 語間関係を図 3のように直接描いたとき， この種のクラスタは平らな頂上を持った形になる． 図 3において， X 軸と Y 軸は図 2のものと対応した語の番号，Z 軸は語間関係 $R(w_i, w_j)$ の値である．もうひとつのクラスタのタイプは， 単語が細長い領域に拡がっているもので， $5 \sim 8$ がこれにあたる． このタイプの場合，図 3に見られるように語間関係がじょじょに変化している． よって， この種のクラスタを gradual クラスタと名付ける．

語間関係がある値よりも大きい場合に，単語はクラスタを形成していると判断するとしよう．我々のシステムで，このような閾値はどのくらいの値となるだろうか．直感的に分かり易いように，語間関係を 1 から引いた値を単語間の距離として，$I - R(w_i, w_j)$　(Iは単位行列) と定義した語間距離行列についてこのクラスタ境界の閾値を見てみよう．図 4は 1 クラスタに含まれる単語数 (クラスタ・サイズ) の割合の平均を，語間距離の閾値の関数として描いたものである。 テキスト $t = 1, 5, 10, 30$ の 4 時点のものと，要素の値をランダムに与えた行列について示している。

$t = 30$ での線を見ると，閾値が 0.6 よりも大きいところではほぼ全ての単語が一つのクラスタだと判断されてしまうが，0.6 から 0.5 のあたりで急激

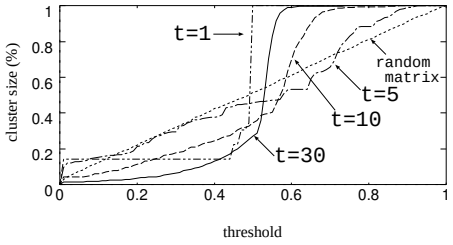


図 4　平均クラスタ ・サイズ

に平均クラスタ ・サイズが小さくなる．さらに，距離の閾値 0.5 から 0 にかけてクラスタ ・サイズは 30% くらいからなだらかにべき的な減少を示している．これは，十分強い関係を持った (短い距離にある) 単語群が存在すること，および，クラスタの端にむけて関係が連続的に弱くなるような単語があることを意味しており，それぞれ flat クラスタと gradual クラスタによりもたらされる効果である．

また，語間関係は初期的なクラスタ構造から，会話が進むにつれて，いったんランダムに近い状態を経て，ふたたび安定的なクラスタ構造を形成するにいたることが分かる．

3.2　語間関係とクラスタ構造のダイナミクス

会話が進むにつれ語間関係がどのように変化するかを見てみよう．図 5に語間関係のダイナミクスの例を示している． これは，上で述べたシミュレーション における， 単語'aa' と他の単語との関係 ($R(\mathrm{aa}, w)$) のテキスト毎の変化を描いたものである．それぞれの線がひとつの単語との関係を表しているが，ある一つの値の近くにある程度留まり，ときどき急に大きく変化するということが繰り返されている．テキスト $t = 21$ で，大きな変化が同時に多くの単語との間の関係において起きている． それ以前に'aa' と強い関係にある ($R(\mathrm{aa}, w)$ の値が高い) いくつかの単語が低い値になり， いくつかの語は'aa' との関係を強めている．

ここで見たダイナミクスは，ある新しい文を発話することによってひき起こされている． その文中では単語がそれまでになかったやりかたで組合せられている．稀な，あるいは，新しい単語の使い方は，その単語と他の単語との間の関係を大きく変えることがわかる．

語間関係が大きく変化するときのクラスタ構造の示すダイナミクスを，散布図における単語の動きと

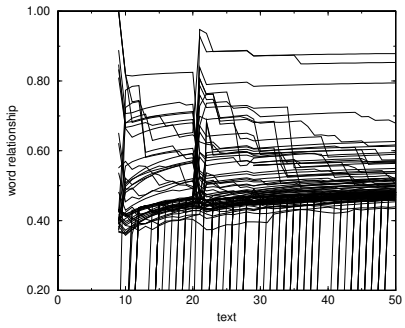


図 5 テキスト毎の語間関係の推移

して見たものが図 6である．この図は，この変化の前後での文の単語に対する親和度の行列 $A(s,w)$ をひとつの行列にまとめて主成分分析 (PCA) したものから得られた散布図である[4]． この図では，一つの単語に対して上記変化の前後における二つの点が打たれているので，対応する点を矢印で結んである．

図 6より， ひとつのクラスタに属する単語はこの変化の前後でまとまってほぼ同じ方向に動いていることがわかる．よって，全体のクラスタ構造は大きくは変わらない．しかし，図中で破線の矢で結ばれている単語は，変化前に属しているクラスタの他の単語とは異なる方向へ動いている． この単語は，図 5にその語間関係が描かれている単語'aa' である． 図 5で見た語間関係の強弱が入れ替わるという変化は，クラスタ構造においてはその単語の属するクラスタが変わるというダイナミクスとして現れることが見てとれる．このように，ある一つの単語の語間関係の大きな変化はクラスタ構造の全体を変化させるわけではない．しかし，この変化は語間関係に徐々に影響していき，また，発話される文にも影響がおよぶ．こうして，クラスタの全体の構造がゆっくりと変化する．

4. 結果 (2)–エージェント間の構造

4.1 エージェント間の距離の定義

会話を通してエージェント達がどの程度共通の内部構造を持つようになり，それがどう変化するかを見るために，まずエージェント間の違いを評価する指標を導入する．

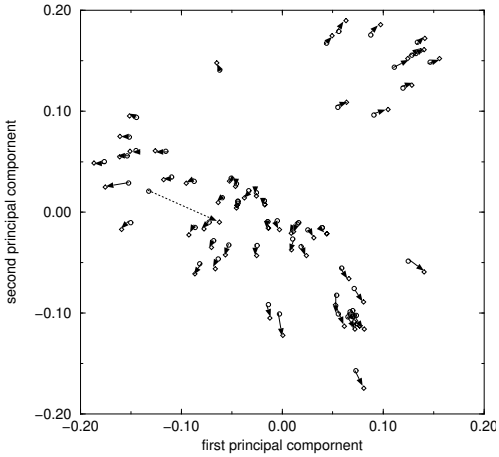


図 6 クラスタ構造のダイナミクス

エージェント間の距離として，ここでは各々の持つ語間関係行列のユークリッド距離を採用する．しかし，各エージェントの知っている単語は一般に異なっているので，比べるエージェント間で語間関係行列が同じ要素を持つように再構成しなければならない．t 番目のテキストの n 番目の文の時点での，エージェント kの知っている単語の集合を $W^k_{t,n}$ ，すべての単語の集合を $W^{\mathrm{ALL}}_{t,n}$ として，この時点でのエージェント kの再構成された語間関係行列を

$$\tilde{R}^k_{t,n}(w_i,w_j \mid \forall w_i,w_j \in W^{\mathrm{ALL}}_{t,n}) = \begin{cases} R^k_{t,n}(w_i,w_j) & \text{if } w_i \in W^k_{t,n} \wedge w_j \in W^k_{t,n} \\ 0 & \text{otherwize} \end{cases} \tag{11}$$

と定義する．この定義は，行列要素の値を，知っている単語についてはもとの語間関係の値 $R^k_{t,n}$に，知らない単語に関しては 0 にするというものである．

この新しい行列を用いて，エージェント kと k'の間の距離は

$$\rho^{k,k'}_{t,n} = \sqrt{\sum_{i,j}(\tilde{R}^{k'}_{t,n}(w_i,w_j) - \tilde{R}^k_{t,n}(w_i,w_j))^2} \tag{12}$$

と定義される．この距離がどのような変化をするのかが興味のある点だが，シミュレーションではエージェントの知る単語の数は時間的に増えていくの

4) 文の単語に対する親和度 $A(s,w)$ は語間関係を計算する途中で使われるもので，語間関係 $R(w_i,w_j)$ と全く同じというわけではないが， $R(w_i,w_j)$ の散布図における単語のクラスタのだいたいの構造は PCA で処理された $A(s,w)$ の散布図においても保たれている．

で，異なる時点での比較のためには各時点での単語あたりの距離を求めなければならない．よって，テキスト t，文 n でのエージェント k と k' 間の単語あたりの距離を

$$\bar{\rho}_{t,n}^{k,k'} = \frac{\rho_{t,n}^{k,k'}}{|\ W_{t,n}^{k} \cup W_{t,n}^{k'}\ |} \qquad (13)$$

とし，これを用いてエージェント間の比較を行なう．ここで，$|\ X\ |$ は集合 X の中の要素数である．系全体での振舞いはエージェント対の数で平均した $\langle \bar{\rho}_{t,n} \rangle = \sum_{\text{all pairs}} \bar{\rho}_{t,n}^{k,k'} / {}_K\mathrm{C}_2$ で見る．ここで，K はエージェントの総数である．

4.2 共有される構造のダイナミクス

ここでは，5 人のエージェントでのシミュレーションの結果を述べる．式 (1) と (5) の結合係数は $\alpha^w = \alpha^s = 0.6$ である．前章と同様に，全エージェントがなにも知識を持たない同じ状態からシミュレーションを始める．一つのテキストでは 2 エージェントのペアがランダムに選ばれて会話を行うが，この会話に参加しない他のエージェントは，会話を行うエージェントのやりとりする文を聞くことはできないとする．

エージェントの間の距離の変化を図 7 にプロットした．破線はそれぞれの対ごと（$\bar{\rho}_{t,n}^{k,k'}$），実線はその平均（$\langle \bar{\rho}_{t,n} \rangle$）である．これを見ると，初めのうちはエージェント間の違いが大きくなるが，すぐに減少に転じている．各エージェントは自分が会話している以外のエージェントの会話を聞くことはできないので，それぞれに独自の会話の経験を積むことになる．それゆえ，初期状態が同じであっても互いに異なる内部状態が発達する．しかし会話を行うエージェント対はほぼ同じ文を聞くことになるので，会話を行った 2 エージェントの間の違いは小さくなる．この違いは最終的には 40% ほどのところへ収束している．これは，エージェントは他のエージェントと共有する部分と共有していない部分の両方を内部構造に持っているということを示している．

エージェントのペアの間で共有される構造がどのように組織化するかをみるために，エージェント対 k と k' の間の，テキスト t，文 n における語間関係行列の差の絶対値を，差行列として次のように定義した．

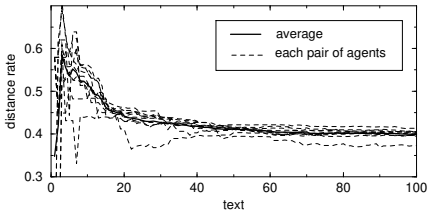


図 7 エージェント間の距離の変化

$$E_{t,n}^{k,k'} = |\tilde{R}_{t,n}^{k} - \tilde{R}_{t,n}^{k'}| \qquad (14)$$

会話の初めのほうでは差行列に構造が見られないが，会話を経るにつれ，共有する部分とそうでない部分が分かれて来る．エージェント間の差が会話とともにどう変化するかは，差行列のなかである閾値よりも大きい値をもつ要素の割合がどのように変化するかで見ることができる．あるエージェント対におけるこの変化を図 8 にプロットした．ここでは閾値を 0.5 として測っている．横軸には，このエージェント対が会話を行なったテキストを順にとっている．これは指数的減少を示し，共有の程度が会話とともに大きくなっているのが見て取れる．

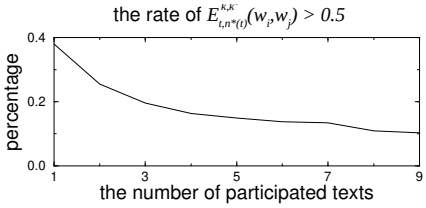


図 8 差行列の会話ごとの推移

あるエージェント対の共通性は会話を通して大きくなるが，このエージェントは他のエージェント達とも会話をするので，それによりこのエージェント間の差というのは再び大きくなりえる．そこであるエージェント対 k と k' の間の差行列のテキストごとの変化を変化行列として，

$$C_{t,n,t',n'}^{k,k'} = E_{t',n'}^{k,k'} - E_{t,n}^{k,k'} \qquad (15)$$

と定義しよう．これは，エージェント間の差の時間微分のようなものである．つまり，この行列の要素

の値が正ならば差は大きくなり，負ならば差は縮まる．図9は，図8に描かれているのと同じエージェント対について，この変化行列の要素が正であるものの割合が，会話とともにどう移り変わるかを見たものである．横軸はこのエージェント対が参加したテキストをとっている．各点は，エージェント対が参加したテキストの最後と次の会話のテキストの最終状態の間の変化である．つまり，あるエージェント対 k, k' がテキスト $T_1, T_2, \cdots$ で会話をした場合，$C^{k,k'}_{0,0,T_1,n^*(T_1)}, C^{k,k'}_{T_1,n^*(T_1),T_2,n^*(T_2)}, \cdots$ の要素の値が正のものの割合がプロットされている．図から分かるように，この量は単調に減少するのではなく，振動するように振舞う．つまり，会話を行なうことにより共通部分が増えるにもかかわらず，非共通部分は単純に小さくなっているのではないことがわかる．

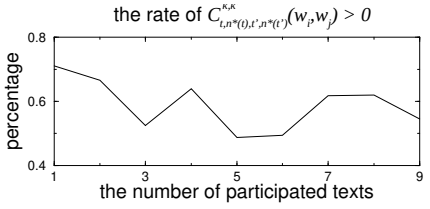


図 9 変化行列の会話ごとの推移

5. 議論

エージェントの内部状態として単語がクラスタを構成するということは，単語がその関係に応じてグループ分けされるていることを表している．このグループ化は各単語間の関係に応じてなされている．すなわち，あるクラスタ内の単語は互いに強い関係にあり，クラスタ外の単語との関係は弱い．ある特徴に応じた要素のグループ分けとは，つまりカテゴリーを作っているということができるだろう．

シミュレーションでは，flat と gradual という2種類のクラスタ構造が組み合わさっている場合が典型的であった．すなわち，いくつかの単語が密な関係を持ち（flat クラスタ部），そこから各単語間の関係が徐々に減少していき（隣接する2単語間はある程度近い）（gradual クラスタ部），別の flat クラスタ部へとつながっている．

単語が新しい用法で使われることによってクラスタ構造が示したダイナミクスから，ここで作られたクラスタ構造が安定性と適応可能性の両方を持つことがわかる．すなわち，全体の構造はドラスティックには変わらないが，新たな使い方の単語の周りで部分的に変化し，その変化が徐々に全体へと波及していく．この性質は認知システムに備わっているべき性質の一つである．あまりに硬直したシステムならば，新しい状況への対応ができない．一方，不安定すぎるならば，構造を作ることができず，自分の得た情報の分節のしかたがぐらつき，一貫した行動が不可能となるであろう．

いくつかの単語が集まったところをクラスタの中心とすると，このクラスタ構造はプロトタイプ・カテゴリー (Taylor, 1995) の示すいくつかの特徴を持っている．すなわち，クラスタの中心的な要素がある，要素間の関係が徐々に変化する，クラスタ間の境界はあいまいである，安定性と適応性の両方を持つ，という性質である．

我々のモデルでは，会話において相互理解に至る事は，そこで使われた単語を会話の相手と同じように位置付けるということになる．つまり，語間関係行列に等しい構造を作るということである．会話とともにエージェント間の共通性が発展することを見たが，全体の構造が等しくなってしまうことはない．それぞれのエージェントはある一つのエージェントとのみ相互作用するのではなく，いくつかのエージェントと会話する．あるエージェントとの会話で，そのエージェントと共有する構造は大きくなるが，他との会話によりまた内部構造は変化する．この結果，エージェント間の関係が常に変化し続ける．

コミュニケーションにおいて，相互理解は大事であるが，より重要なことは，第1章で主張したように解釈の多様性があることである．解釈が開かれていることにより，言語システムは動的なものとなる．共通性と個別性を個々のエージェントのレベルで保つことは，言語の安定性とダイナミクスに繋がるものであり，クラスタ構造の安定性と適応可能性が，共通性と個別性が矛盾無く存在することに役立つのであろう．

本論の会話モデルには，話者の外界の構造が採り入れられていない。しかし，実際の会話は，さまざまな状況や具体的事物に取り囲まれた場で行なわれるものである．シミュレーションを構築するにあたり，このような外界をどのようにつくるかは任意で

あるため，内部の構造やダイナミクスを見る際に，その設定に依存した結果と本来の会話によるものを分けにくくなる．ここでは，今後の研究の基礎をつくるために，外界の変化によって引き起こされるのではない，言語を使用すること自体の本質的ダイナミクスを見るために，できるだけ単純な会話モデルを採用した．例えば，外界の安定性とはある程度独立に内的安定性を得ることを見たが，この安定な構造がどのように外界を反映させるのか，あるいは，エージェントの内部構造の変化や個別性が，外界の変化に対してどのように制限されるか，といった点が研究されなければならない．

6. 結語

言語の動的な見方に基づいた構成論的な手法を提案し，単語間の関係による単語のグループ化の構造が，会話によってどのように変化するかを研究した．本論では，単語の使い方と出現頻度の類似性を考慮して，動的に単語間の関係を更新していくというモデルが，単語のグループ分けというある程度分節された内部構造，安定性と適応可能性，個別性と共有性の発達という，認知システムにとって重要と考えられる性質を示しやすいことを見た．ここで提案したような，認知活動を行なう主体をエージェントとして採り入れた簡単なモデルをつくるという構成論的研究手法により，創発を論ずるために重要である言語や知能の示すダイナミクスの可能性を示すことができる．これは，既存の認知システムに構造を見い出し記述するという手法と相補的なかたちで認知研究を進めるものである．

謝 辞

この研究を進めるにあたり，東京大学の池上高志氏，統計数理研究所の伊庭幸人氏との議論に大いに触発され，データ解析に関する助言などもいただきました．本論文執筆にあたり，Sony Computer Science Laboratory, Paris の Luc Steels 氏に協力していただきました．ここに感謝の意を表します．本研究は，理化学研究所の基礎科学特別研究プログラムの下で行なわれています．

文 献

Chomsky, N. (1957). *Syntactic Structure*. The Hague: Mouton.

深谷 昌宏・田中 茂範 (1996). 『ことばの〈意味づけ論〉』. 東京: 紀伊國屋書店.

Gordon, A. D. (1981). *Classification*. London: Chapman and Hall.

Grice, H. P. (1975). Logic and Conversation. In P. Cole & J. L. Morgan (Eds.), *Syntax and Semantics, Vol. 3: Speech Acts*. 41–58. New York, NY: Academic Press.

Hashimoto, T. (1998). Dynamics of Internal and Global Structure through Linguistic Interactions. in Sichman, Conte and Gilbert (Eds.), *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, 124–139, Berlin: Springer-Verlag,

Kaneko,k., &Tsuda,I., (1994). Constructive complexity and artificial reality: an introduction. *Physica*, **D75**, 1–10.

金子 邦彦・津田 一郎 (1997). 『複雑系のカオス的シナリオ』. 東京: 朝倉書店.

金子 邦彦・池上 高志 (1998). 『複雑系の進化的シナリオ』. 東京: 朝倉書店.

Karov,Y., &Edelman,S. (1998). Similarity-based word sense disambiguation. *Computational Linguistics*, **24**, 41–59.

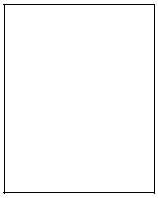
Sperber,D.&Wilson,D. (1986). *Relevance: Communication and Cognition*. Oxford:Blackwell.

Taylor, J. R. (1995). *Linguistic Categorization – Prototypes in Linguistic Theory*. Oxford: Oxford University Press.

時枝 誠記 (1941). 『国語学原論』. 東京: 岩波書店.

Vološinov,V.N. (1986). *Marxism and Philosophy of Language*, Harvard University Press

(1998 年 1 月 1 日受付)
(1998 年 1 月 1 日採録)



橋本 敬 (正会員)

1967 年大阪府に生まれる．1990 年神戸大学理学部物理学科卒業．1996 年東京大学大学院総合文化研究科広域システム専攻修了．学術博士．同年より理化学研究所にて基礎科学特別研究員として勤務．複雑系，進化言語学などの研究に従事．1998 年 11 月から 1999 年 1 月まで，Sony Computer Science Laboratory - Paris 客員研究員．日本物理学会会員．