

離散・連続相互作用系による 動的コミュニケーションのシミュレーション分析

Simulation Analysis of Dynamic Communication between Discrete-Continuous Coupled Systems

鳥居 拓馬*¹
Torii, Takuma

橋本 敬*¹
Hashimoto, Takashi

*¹北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

Symbolic communication involves both generation and sharing of novel expressions and meanings. In this study, we try to understand the mechanism of the generation and sharing by introducing a computational model of communicative agent, which is a hybrid system of a discrete symbolic system and a continuous sense-making system. They are implemented by a rewriting rule system and a fully-connected neural network, respectively. We explored a mechanism of the generation caused by the sense-making system in this paper. It is shown that bifurcation (structural change of dynamics) occurring in the neural network as dynamical system is the mechanism of generation. When the neural network shows chaotic behavior after the bifurcation, the generations can occur. We discuss that the structural change by bifurcation and the trajectory instability in chaotic system represent the nature of sense-making and the dynamism of symbolic communication.

1. 序論

私たちは日常的なコミュニケーションの中で、新しい言葉に出会ったり、その言葉に誘発されて新しい意味を創出することがある。コミュニケーションは、意味共有だけでなく、新しい表現や意味が生成される動的プロセスと捉えることができる。

記号 (= 何かを表すもの) を媒体とするコミュニケーション (記号コミュニケーション) は主体間で表現 (言葉) をやりとりする中で各主体が表現を独自に意味づけるプロセスと見なせる。ここで、意味づけは、深谷・田中によると、「状況において状況を把握し次の行動を思念する内的営み」である。記号コミュニケーションでは相互理解 (意味共有) が困難であることがよく問題とされる。伝えたい意味 (感情や欲求など) を表現 (言葉) として十分に表出できないこと (表現・意味間の質的違い) が要因のひとつである。しかし、別の視点から観ると、各主体が表現を主観的に意味づけることで、新しい意味を生成する可能性を孕んでいる。

コミュニケーションにおける意味づけの側面はいくつかの分野では研究されてきたが [Gumperz 82], シミュレーション研究では共有が中心であり [Steels & McIntyre 99, Gong *et al.* 05, Marocco & Nolfi 07], 生成的側面を扱う研究は少ない。

本研究は生成と共有が繰り返し起こる動的コミュニケーションの理解を目的とし、この複雑な現象を理解するために、本稿ではモデル構成と計算機シミュレーションを用いる。本研究では「表現・意味間の質的違い」を「離散・連続間の質的違い」として抽象化し、記号コミュニケーションする主体を書き換えルールシステム (= 離散) とニューラルネット (= 連続) の結合システムとして実装し、主体間の表現のやりとり (= コミュニケーション) をシミュレーション分析している。これまでの研究で離散システムにおける生成メカニズムがわかっている [Torii & Hashimoto in press]. 本稿では連続システムにおける生成メカニズムを明らかにし、このメカニズムと「意味づけ」の関係を議論する。

2. モデル

図 1 は主体 (p と q) 間の記号コミュニケーションをモデル化したものである。主体は記号システム S と意味づけシステム N からなる。記号システム S は発話*¹(表現) e と表象*² r に対応づける書き換えルールシステムである。他方、意味づけシステム N は全結合ニューラルネットであり、動的に意味 m を創出させる。ここで、 e と r は 4 種類の文字からなる長さ 4 以下の文字列として表され、また m は N のダイナミクスにより表される。

コミュニケーションは主体間の発話 e のやりとりである。まず、聞き手は話し手の発話 e^A を受理し、その発話 e^A に対応した表象 r^A を作り出す (この変換を受理 A と呼ぶ)。次に、主体はその表象 r^A を意味づけして意味 m^S を創出し、そして、返答内容にあたる別の表象 r^D を作り出す (意味づけ S)。最後に、この表象 r^D から発話 e^D を導出し返答する (導出 D)。本稿では上記の変換 (A, S, D) を 1 ターンとし、2 体の主体が交互にターンをとる、その変換の連鎖を記号コミュニケーションとみなす。このうち、受理 A ・導出 D は記号システム S が、意味づけ S は意味づけシステム N が担う。記号システム S のルールセットによっては受理 A ・導出 D で書き換えに失敗することがある。受理 A に失敗したときは、話し手が r^D を教示する。導出 D に失敗したときは、ランダムに文字列 (長さ 4 以下で可変) を作る。

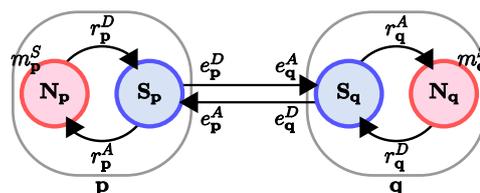


図 1: 記号コミュニケーションのモデル

連絡先: *¹北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科, 923-1292 石川県能美市旭台 1-1, Tel: 0761-51-1756, E-mail: {tak.torii, hash}@jaist.ac.jp.

*¹ 本稿では記号コミュニケーションのひとつである人間の会話を事例に説明する。そこで、表現を「発話」と置きかえている。

*² 本稿において、表象は内面化された外界の事物、概念などに相当する内的記号のこと。対して、表現 (発話) は外的記号といえる。

2.1 記号システム S

ルール $k/r \leftrightarrow e$ はラベル k により分類され、文字列で表される表現 e と同じく文字列で表される表象 r を対応づける。また左辺・右辺にラベルつき変数をもつことができ、変数にはそれと同じラベルをもつルールのみを代入できる。ルールは、文字列間の差異や共通部分を切り出して変数で置換するという操作 (詳細は [Kirby 02, Torii & Hashimoto in press]) により汎化学習される。受理 A ・導出 D は変数の書き換えにより、入力 (e^A/r^D) に対応した出力 (r^A/e^D) を「導出」する。

2.2 意味づけシステム N

入出力 (表象 r^A/r^D に相当する文字列) には Winner-take-all 方式*3 を採る。このため、4 種類の文字にあわせて、入力 $\times 4$ 、出力 $\times 4$ のニューロンを用意し、また、隠れニューロン $\times 6$ とした。ニューロンの活動電位 y_i は式 1 に従い更新される。ここで、 $w_{ij} [-6, 6]$ は結合強度、 $z_i [0, 1]$ は発火率、 $I_i \{0, 1\}$ は入力である。また発火率 z_i は式 2 で計算される。

$$y_i^{t+1} = \sum_j w_{ji} z_j^t + I_i^t \quad (1)$$

$$z_j = \frac{1}{1 + e^{-y_j}} \quad (2)$$

また結合強度 w_{ij} は式 3 に従い、文字列を単位としてバッチ更新される。ここで、 $\eta_{ij} [-0.13, 0.13]$ は学習率、 $\theta_{ij} [0, 1]$ は閾値である。式 3 は Hebb 学習の一種である。

$$\Delta w_{ij} = \eta_{ij} (z_i - \theta_{ij}) z_j \quad (3)$$

3. 結果

1000 ターンを 1 回のシミュレーション (会話と呼ぶ) として、これを異なる初期値で計 90 回おこなった。本稿では新しい発話 e^D が多様に出現した会話 (生成的) のみを採りあげる。

図 2 は、生成が多くみられる会話において、新しい発話 e^D と新しい表象 r^D (導出 D の入力と出力) の出現数の時間変化である。図中、丸印 (Generated) は主体の能力のみによる (ランダムでない) 生成である。この図から、新しい表象 r^D の生成とともに新しい発話 e^D が生成されていることがわかる。新しい発話 e^D は、汎化学習により生成可能な発話 e^D の空間が広がり、そのあと導出 D の過程において、新しい組み合わせでルールが適用されることで生成されることが明らかにされている [Hashimoto *et al.* 09]。このモデルでも同じメカニズムで新しい発話が生成されうる [Torii & Hashimoto in press]。

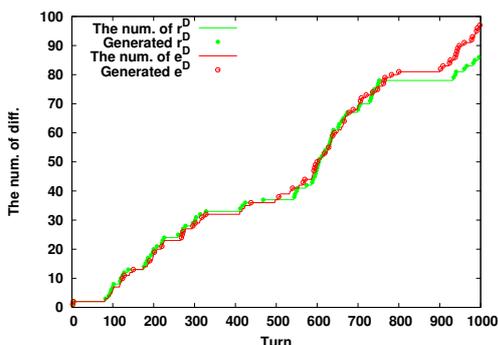


図 2: 発話 e^D と表象 r^D の種類数の時間変化 (q のみ表示)。

*3 出力ニューロン群をビット列とみなして、出力を記号化する方式。各ニューロンを各ビットに対応づける。出力が最大のニューロンを '1'、他を '0' とする。

図 2 の後半では、新しい表現や表象はターン [580, 670] 付近でとくに出現し、そのあとターン 800 付近まで出現する。導出 D の入力 (r^D) を生成するのは意味づけシステム N である。そこで、この前後の意味づけシステム N のダイナミクス (出力ニューロンのみ表示) をみると (図 3)、図 2 において表象 r^D が多く生成されているターン [580, 670] 前後やターン 710, 750 付近でダイナミクスが大きく変化している*4。

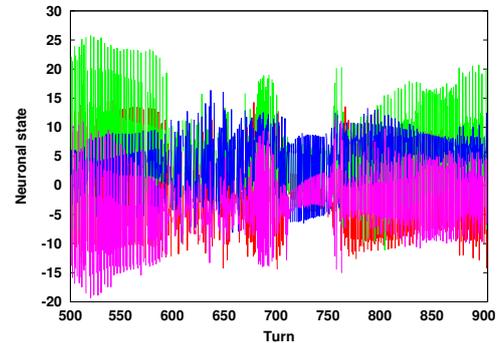


図 3: 出力ニューロンのダイナミクス (q のみ表示)。

図 4 は全結合ニューラルネットのとりうるアトラクタの時間変化である*5。ターン 580 付近で N のパラメータが変化して分岐が起こり、そのあとのターン [580, 670] 付近では、N はカオス的に振る舞っている*6。また N_q 内のニューロンのダイナミクス間の 100 ターン分ごとの相関を計算したものを図 5 に示した。図 5 から N_q の各ニューロンは互いに強い正相関・逆相関をもつことがわかる。新しい表象 r^D が多く生成されているターン [580, 670] 付近では、正相関・逆相関が全体で入れ替わるような振る舞いを示している。一方で、他方の主体 p の N_p では q のようなダイナミクスの変化はみられず、また N_p の各ニューロンはあまり相関をもたなかった。

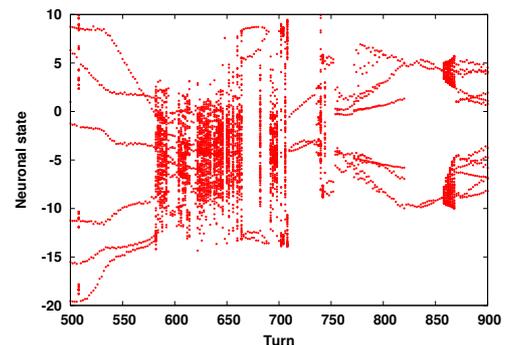


図 4: ニューロン (N_q 中) のとりうるアトラクタの時間変化。

4. 議論

図 5 に示された強い相関は意味づけシステム N 内部に何らかの構造が形成されていることを示している。ダイナミクスに構造が形成され内部に強い相関がうまると、Hebb 学習が促

*4 ターン [580, 670] や [710, 750] では複数のダイナミクスが近接するように変化している。Winner-take-all 方式ではこのようにダイナミクスが近接するときに異なる記号 (ビット列) が生成されやすい。

*5 各ターンの N を、パラメータ (w, η, θ) を固定したまま十分に長い時間仮想的に更新し、そのあとの 500 ステップをプロットした。

*6 カオス判定の指標である Lyapunov 指数を計算して確認した。

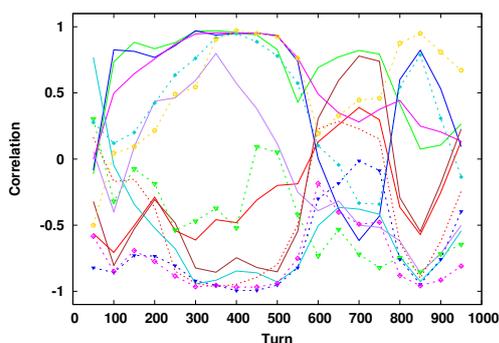


図 5: N_q 内ニューロン間の相関 (主体 q 内).

進されパラメータがより変化しやすくなる。このパラメータ変化により分岐が誘発され、ダイナミクスの構造を変化させる (時として新しい構造を形成させる)。すなわち、構造を形成することが構造変化を生み出すように作用する。外部からの入力 (情報) を受けて内部に構造を形成し、構造の形成が新しい構造を誘発するという性質は「意味づけ」の特性を示しているといえるだろう。本稿のモデルでは、分岐のあと N がカオス的性質をもつとき、とくに新しい表象 r^D が生成されやすい。カオスは初期条件の微細なズレが時間の経過とともに拡大していくという性質 (軌道不安定性) をもつ。ある時点における意味づけの微細なズレがのちに拡大されるという性質は、記号コミュニケーションにおける相互理解の難しさ、誤解が誤解を生むなどの現象と対応づけられるだろう。これらの性質は意味が離散ではなく連続で表されることで観察されたといえる。

本稿は意味づけシステム N における生成メカニズムを中心に展開してきたが、一方で、共有については言及してこなかった。最後に、今後の課題とあわせてこの点に触れておこう。このモデルでも、語彙の共有 (記号システム S_p, S_q がともに受理・導出可能な発話・表象の獲得) は確認されている。一方で、意味^{*7} m の共有はその定義が難しい。図 6 は、意味 m の共有を主体間のダイナミクスの同期と考え、主体 p のあるニューロンと主体 q のすべてのニューロンのダイナミクス間の相関であるが、ほとんど相関がない。すなわち、同期という定義では、意味 m は共有されてるとはいえない。これは記号システム S という離散変換を介した間接的相互作用であることが原因と考えられるが、これは記号コミュニケーションの性質である。今後は、このような性質を踏まえて意味 m の共有を定義し、生成と共有が相利共生する記号コミュニケーションのダイナミクスを捉えていく必要があるだろう。

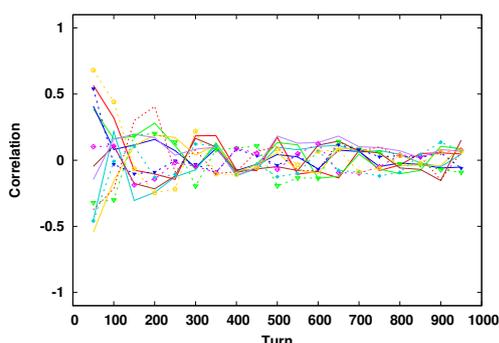


図 6: N_p のあるニューロンと N_q の全ニューロン間の相関。

5. 結論

主体を離散記号処理システムと連続意味づけシステムの結合システムとしてモデル化し、記号コミュニケーションの生成的側面に着目したシミュレーション分析をおこなった。本稿では意味づけシステム (全結合ニューラルネット) による生成メカニズムを明らかにした。具体的には、ニューラルネットの構造化と、それによって起こる学習 (= パラメータ変化) により「分岐」が生じ、ダイナミクスが変化するとき (とくにカオス的になるときに) 生成が起こりうる。分岐やカオスという性質は、「意味づけ」を考慮にいれた記号コミュニケーションのダイナミクスを数理的に理解するためのひとつの切り口となるだろう。

参考文献

- [Gong et al. 05] Gong, T., Minett, J.W., Ke, J., Holland, J.H., and Wang, W.S.-Y.: Coevolution of lexicon and syntax from a simulation perspective. *Complexity*, Vol.10, No.6, pp.50-62, (2005).
- [Gumperz 82] Gumperz, J.J.: Discourse Strategies – Studies in Interactional Sociolinguistics 1, *Cambridge University Press*, (1982).
- [Hashimoto et al. 09] Hashimoto, T., Nakatsuka, M., and Konno, T.: Linguistic analogy for creativity and origin of language, submitted to *The Evolution of Language, the 8th International Conference*, (2009).
- [Kirby 02] Kirby, S.: Learning, bottlenecks and the evolution of recursive syntax. In Ted Briscoe, editor, *Linguistic Evolution through Language Acquisition: Formal and Computational Models*, Chapter 6, pp.173-204, *Cambridge University Press*, (2002).
- [Marocco & Nolfi 07] Marocco, D. and Nolfi, S.: Emergence of Communication in Embodied Agents Evolved for the Ability to Solve a Collective Navigation Problem. *Connection Science Press*, Vol.19, No.1, pp.53-74, (2007).
- [Steels & McIntyre 99] Steels, L. and McIntyre, A.: Spatially Distributed Naming Games. *Advances in Complex Systems*, Vol.1, No.4, pp.301-323, (1999).
- [Torii & Hashimoto in press] Torii, T. and Hashimoto, T.: Modeling Generation and Sharing of Novel Expressions and Meanings in Symbolic Communication. *Int. J. Bio-Inspired Computation*, (in press).
- [深谷 & 田中 96] 深谷昌弘・田中茂範: コトバの意味づけ論 – 日常言語の生の営み, 紀伊国屋書店, (1996).

*7 本稿では意味づけシステム N のダイナミクスと定義した。