

エピソード記憶と推論からみた脳の数理：カオスの遍歴の役割

津田一郎

北海道大学 電子科学研究所

1. 概要

エピソード記憶と推論に関する脳の数理モデルを作り、いくつかのことを予言してきたが、最近その一部が実証された。講演では、エピソード記憶を理解するための海馬の数理モデルとその結果、及び推論の理論を紹介し、その実証実験についても説明する。また、モデルの骨格をなす数学的概念についても適宜解説を加える。

2. エピソード記憶の脳内機構

エピソード記憶形成が如何に行われるかを理解するために、海馬のニューラルネットをモデル化し、そのダイナミックスを調べた。その結果、モデル CA 3 では事象記憶の列が生成され、各事象記憶間を連結する軌道はカオス軌道であり、カオスの遍歴が生じることが分かった。また、モデル CA 1 ではモデル CA 3 で生成された時系列情報がモデル CA 1 のニューロンの膜電位に生じるカントル集合にコードされ得ることが分かった。これが生物学的に意味のあるコーディングかどうかを調べる目的で、CA 1 ニューロンを神経生理学的な Pinsky-Rinzel の 2-コンパートメントモデルでモデル化し、ランダム時系列入力に対する CA 1 ニューロンネットワークの活動度を調べた。その結果、約 50msec—150msec 間隔のランダムパルス入力において、時系列の履歴が膜電位空間にカントル集合（フラクタルパタンの一種）として表現されることがわかった。また、その生成規則であるアフィン変換を一次元写像の形で抜き出すことができた。玉川大学脳科学研究所の塚田稔研究室との共同研究として、ラット海馬スライスでのカントルコーディングの有無を調べる実験を行なった。さまざまな入力時系列に対して、CA 1 の膜電位に入力時系列を表現する階層的なパターンが現れることが分かった。また、この階層パターンの生成規則を時系列解析で求めたところ、理論モデルが予測する複数のアフィン変換が得られた。これらの実験結果は、ラット海馬がカントルコーディングを行なっている可能性を強く示唆する結果である。

3. サルの推論に伴う脳活動

サル(ニホンザル)を使った思考・推論実験を玉川大学脳科学研究所と共同で行っている。12 年前から共同実験のための議論を開始し、現在のサルに対して 3 年間実験を繰り返し、ようやく最初の結果が得られた。タスクは 2 回の連続する連想にもとづくカテゴリー形成とそのメンバーの推論を行うように工夫された。行動実験においてサルは推移、反射を駆使した推

論を行えるという結果を得た。さらに、対応するニューロン活動が前頭前野外側部から得られ、少なくとも 3 種類の区別されるニューロンが見つかった。また、これらのニューロン活動はかなり動的であり、非線形ダイナミクスで記述可能かもしれない。

4. カオスの遍歴

上の二つの話題のうち少なくとも海馬の活動はカオスの遍歴のような遷移ダイナミクスがその基礎を支えているように見える。その意味で、神経細胞のネットワークでこのような遍歴現象がどのような条件で現れるかを調べることは興味深い。脳神経系におけるカオスの遍歴の雛形モデルを得る目的で I 型ニューロンのギャップジャンクション結合系に着目した。

I 型ニューロンの備えるべき十分条件を明らかにし、それを数学的に表現し、得られたサブクラスを I* 型と呼んだ。この条件をみたす数学モデルを構築し、 μ モデルと呼んだ。これは二変数常微分方程式で与えられ、ホップ分岐とともにサドル・ノード分岐を起こす。 μ モデルは適当な座標変換でヒンドマーシュ・ローズモデルと等価になることが分かっている。これは、II 型のホジキン・ハックスレーモデルの縮約版であるフィッツヒュー・南雲モデルと同様に、I 型のカノーモデルの縮約版であり、その意味でフィッツヒュー・南雲モデルと対応する。I 型は、サブクリティカル・ホップ分岐を典型的に引き起こす。この分岐の違いがそれぞれの結合系における動的挙動に大きな違いをもたらす。 μ モデルのギャップジャンクション結合系は同期・非同期の不規則遷移を典型的に示す。

参考文献

1. I. Tsuda, 'Toward an interpretation of dynamic neural activity in terms of chaotic dynamical systems', Behavioral and Brain Sciences 24(5) (2001)793-847.
2. I. Tsuda, Hypotheses on the functional roles of chaotic transitory dynamics, CHAOS 19, 015113-1 - 015113-10 (2009).
3. X. Pan, K. Sawa, I. Tsuda, M. Tsukada and M. Sakagami, Reward prediction based on stimulus categorization in primate lateral prefrontal cortex. Nature Neuroscience 11,703-712 (2008). published online 25 May 2008; doi:10.1038/nn.2128.
4. Y. Fukushima, M. Tsukada, I. Tsuda, Y. Yamaguti and S. Kuroda, Spatial clustering property and its self-similarity in membrane potentials of hippocampal CA1 pyramidal neurons for a spatio-temporal input sequence. Cogn. Neurodyn. (2007)1: 305-316.