

# 1 研究内容

脳の特定位の損傷が、ヒトの認知機能の選択的障害を引き起こし得るといった様々な事例は、脳の各部位特有の神経回路様式、それらの間の結合様式 および 神経生理学的特性といったものが、認知機能の諸相において、どのような役割をいかにして演じるのかという問題を提起してきました。

「対象とする脳部位の性質を神経回路網のレベルで抽象し、その可能な機能をダイナミクスを言語として記述することを通して、ヒトの認知構造を構成的に理解したい・する」というのが、私の研究の動機およびテーマです。

## ● エピソード記憶生成を理解する為の海馬モデル

特に記憶と脳の関係に関して、海馬と呼ばれる脳の領域の損傷がエピソード記憶生成を選択的に障害することが知られています。エピソード記憶とは、時間的に特定される出来事、および複数の出来事の時間的・空間的關係についての記憶のことをいいます。言い換えると、“いつ”・“どこで”という問いが可能な記憶です。

我々は、解剖学および神経生理学的知見を基に、中隔核からの入力を伴う CA3⇒CA1 結合モデルを構成し、そのダイナミクスの解析を通してエピソード記憶形成において海馬が担う機能について検討しています。

ここで、CA3 および CA1 は、それぞれが興奮性細胞と抑制性細胞からなる神経回路網を形成する海馬の部分領域であり、前者から後者に一方向的な興奮性細胞間の結合が存在します。また、中隔核は環境探索中のラットの海馬で観察される  $\theta$  リズム (4-12Hz) の局所場電位振動の主要な生成源と考えられている辺縁系部位であり、この部位からの海馬への入力は、CA3, CA1 の抑制性細胞から同じ興奮性細胞への抑制性入力を阻害します (脱抑制)。

## ● 大自由度力学系の結合系

我々の海馬モデルは、一定時間毎の周期的なパラメータの切り替えを伴う二つの異なる性質を有する大自由度力学系の斜積と見ることができます。モデルの構成および解析には、力学系からの知見を用いることができます。一方、海馬が担う機能という観点からは、大自由度力学系 (の結合系) に対する発見的方法を提供してくれます。この点に関しては現在、連続空間上の力学系と離散空間上の力学系の切り替え系に関する考察に結びついています。

## ● モデル研究から得られているシナリオ

エピソード記憶形成の全体像を語り得るには不十分ですが、これまでの研究から以下のようなシナリオを得ました。

海馬の主な入出力先である内嗅領皮質は、すべての感覚情報 (視覚, 聴覚, 嗅覚, 体性感覚等) の入力を受け取っている。このことから、海馬へ入力されている情報は各種の感覚情報がある程度統合されたものであると考えられる。このような個々の出来事の表象を、複数の記憶パターンとして CA3 の興奮性相互結合の結合荷重に Hebb 学習により表現される。  $\theta$  波存在下において、中隔核からの入力により海馬において脱抑制期と非脱抑制期が交互に繰り返されている。 CA3 では、脱抑制期において記憶パターン又は局所安定点に収束し (想起過程)、非脱抑制期においては、状態空間中をさまよう (遷移過程)。これにより、脱抑制期・非脱抑制期の繰り返しは、記憶パターン間の遍歴を引き起こす ((単純な) エピソードの生成)。一方、中隔核入力による脱抑制効果は、CA1 が大域縮小的になるような条件を誘導し、脱抑制期・非脱抑制期の繰り返しは、脱抑制期毎に受け取る CA3 入力からなる入力系列の有限履歴構造が、CA1 において離散的かつ自己相似的な空間構造の中に階層的に表現される (単純なエピソード群のカテゴリー化)。

我々は、このような CA3 入力系列の CA1 状態集合によるコーディングを、海馬におけるコントロールコーディングと呼んでいます。

## ● 現実の脳においてコントロールコーディングは存在するか? (実証実験)

2年前から玉川大学の塚田研究室と共同で、ラットの海馬を用いたコントロールコーディングの電気生理学的な

実証実験 (in vitro) を行っています。私は主に実験法の提案, 実験データの解析に関わっています。

## 2 2007 年度研究活動報告

上記共同実験の結果報告の第一弾として, 神経生理学的側面に重心をおいた内容の論文を発表しました (Fukushima et al.(2007)). また, 力学系的観点から実験データを解析することにより, 少なくともある条件下では, CA1 細胞が縮小的ダイナミクスに従うことを明らかにしました。この結果の一部は, 国際学会 (ICCN'07) で発表しました。現在この内容に関する論文を準備中です。

## 3 発表論文リスト

- I. Tsuda, Y. Yamaguti, S. Kuroda, Y. Fukushima and M. Tsukada, “A mathematical model for the hippocampus: towards the understanding of episodic memory and imagination”, Progress of Theoretical Physics (to appear)
- Y. Fukushima, M. Tsukada, I. Tsuda, Y. Yamaguti, and S. Kuroda, “Spatial clustering property and its self-similarity in membrane potential of hippocampal CA1 pyramidal neurons for a spatio-temporal input sequence”, Cognitive Neurodynamics, 1 (2007) 305-316
- 黒田茂, “海馬モデルにおける有限パスダイナミクスについて”, 物性研究 83 No.1 (2004) 142-149
- I. Tsuda, and S. Kuroda, “A Complex Systems Approach to an Interpretation of Dynamic Brain Activity II: Does Cantor coding provide a dynamic model for the formation of episodic memory?”, Lect.Notes in Computer Science, vol.3146, pp.129-139 (Springer-Verlag, 2004)
- I. Tsuda, and S. Kuroda, “Cantor coding in the hippocampus”, Japan J. Indust. Appl. Math. 18 (2001) 249-258

## 4 口頭発表リスト

- S. Kuroda, Y. Yamaguti, Y. Fukushima, M. Tsukada, and I. Tsuda, “Cantor Coding for Spatio-Temporal Patterns”, Multi-Institutional International Symposium on “創” [sou], 北海道大学創成科学研究棟サイエンスプラザ, 2008 年 1 月 28-29 日 (ポスター発表)
- 黒田茂, 山口裕, 津田一郎, “海馬 CA1 のコントロールコーディングの数理モデルと実証実験”, 「統合脳」班会議, 一ツ橋学術総合センター, 2007 年 12 月 22-24 日 (ポスター発表)
- S. Kuroda, Y. Yamaguti, Y. Fukushima, M. Tsukada, and I. Tsuda, “Iterated Function Systems in Hippocampal CA1 Neurons”, The 1st International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN), November 17-21, 2007.
- 山口裕, 黒田茂, 津田一郎 “海馬 CA1 のコントロールコーディングの数理モデルと実証実験”, 「統合脳」班会議, 北海道厚生年金会館, 2007 年 8 月 21-23 日 (ポスター発表)
- S. Kuroda, “On a type of condition to discriminate spatiotemporal patterns in locally connected neural network”, 10th Tamagawa-Riken Dynamic Brain Forum, 長野県白馬町, 2007 年 3 月 5-9 日 (ポスター発表)
- 山口裕, 津田一郎, 黒田茂, “海馬 CA1 のコントロールコーディングの数理モデルと実証実験”, 「統合脳」班会議, 一ツ橋学術総合センター, 2006 年 12 月 17-19 日 (ポスター発表)
- Y.Yamaguchi, S.Kuroda, and I.Tsuda, “A Mathematical Model for the hippocampus - Toward the understanding of episodic memory” , Multi-Institutional International Symposium on “命” [mei], 北

北海道大学学術交流会館, 2006 年 12 月 5-7 日 (ポスター発表)

- ・ 黒田茂, "海馬モデルにおける有限パスタダイナミクス", 動的システムの情報論 3 「記憶と履歴」, 統計数理研究所, 2003 年 11 月 28 - 30 日
- ・ 黒田茂, 津田一郎, "海馬におけるコントロールコーディング: エピソード記憶形成の理解に向けて", 日本物理学会 第 57 回年次大会 2002 年 3 月 (ポスター発表),
- ・ 黒田茂, 津田一郎, "海馬におけるコントロールコーディング", 2002 年度 日本生物物理学会北海道支部例会, 北海道大学電子科学研究所, 2002 年 2 月 22 日
- ・ 黒田茂, 津田一郎, "海馬におけるコントロールコーディング: エピソード記憶形成の理解に向けて" 「先端脳」合同班会議, 砂防会館, 2001 年 12 月 19 日-20 日 (ポスター発表),
- ・ 黒田茂, 津田一郎, "結合 rotor モデルの遍歴現象", 第 7 回複雑系札幌シンポジウム「複雑系と不定性」, 北海道大学理学部数学教室, 1999 年 3 月 3 日-6 日