

「脳を創る」  
平成9年度採択研究代表者

合原 一幸

(東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授)

## 「脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装」

### 1. 研究実施の概要

本研究では、脳神経系のカオス性と非同期性に着目して、脳型時空間カオスダイナミクスおよび脳型時空間パルスダイナミクスに関する数理モデルを構築し、脳神経系における動的時空間情報処理機構のモデル化およびその工学的応用可能性に関する理論的解析を行なった。また、これらの数理モデルに基づいて、カオスニューラルネットワークシステムや非同期パルスニューラルネットワークの集積回路化などの実装研究を行なった。さらに、数理モデルと関連した生理実験および神経スパイク列解析方法の提案を行なった。

### 2. 研究実施内容

本研究は、(a)理論研究、(b)実装研究、(c)実験研究の3つのグループから成り、特に(a)および(b)を中心に研究を行なってきた。その研究実施内容は以下の通りである。

#### (a) 理論研究

理論研究に関しては、4-(1)のメンバーを中心にして、同期型および非同期型カオスニューラルネットワーク等の数理モデルを用いて、脳型時空間計算ダイナミクスに関する以下の理論解析を行なった。

#### (1) 脳型時空間カオスダイナミクスの数理解析

本研究では、ヤリイカ巨大軸索のカオス応答特性をヒントにしてモデル化したカオスニューロンモデルから構成された「同期型カオスニューラルネットワーク」モデルを用いて、脳型時空間カオスダイナミクスに立脚した情報処理機能とその力学構造に関して以下のような研究を行なった。

(1-1) 動的連想記憶ネットワークにおける動的連想とその力学構造に関して、以下の結果が得られた：

記憶パターンの部分入力によるカオスダイナミクスの瞬時引き込み特性、不変部分空間の階層構造と補空間方向の安定性およびカオスの遍歴現象との関連、確率共振的な想起ダイナミクスの実現、複数カテゴリーのパターンのカオスダイナミクスによる動的バインディング、

(1 - 2) 組合せ最適化ネットワークにおける動的サーチとその力学構造に関して、以下の結果が得られた：

グロ - バルサ - チ特性を有するストレンジアトラクタの存在を保証するための十分条件の導出とアトラクタ構造の解明、カオスニューロダイナミクスの大規模巡回セールスマン問題 (TSP) や 2 次割り当て問題 (QAP) への応用、カオスアニ - リング法の開発、カオスニューロダイナミクスと 2-opt 法やタブ - サーチ法などのヒューリスティック解法との融合モデルの構築、

(1 - 3) カオスニューロンモデルさらには Amari-Hopfield ニューロンモデル、FitzHugh-Nagumo ニューロンモデルから成るニューラルネットワークの時空間ダイナミクスを分類するとともに、その局所のおよび大域的分岐構造を、詳しく解析した。

(1 - 4) カオスニューラルネットワークを用いて、カオス時系列入力の記号力学的情報を、状態空間でのフラクタル性にコードするメカニズムについて解析を行なうとともに、このようなフラクタル集合を用いたアナログ (実数) 情報コーディングの可能性について検討した。

(2) 脳型時空間パルスダイナミクスの数理解析

本研究では、「非同期カオスニューラルネットワーク」、「パルスプロパゲーションネットワーク」等の非同期パルス結合ニューラルネットワークモデルと「ダイナミカルセルアセンブリ - 仮説」をベースとして、時空間パルスコーディングとそれに基づく情報処理機構に関して以下のような研究を行なった。

(2 - 1) 時空間スパイクコーディングを実現しうるニューロン特性に関して、以下の結果が得られた：

Hodgkin-Huxley ニューロンモデルの簡略化、STDP (Spike Timing Dependent synaptic Plasticity) の数理モデル構築とそのニューロダイナミクスへの効果、

(2 - 2) コインシデンスディテクタ・ニューロンや他のダイナミカルニューロンモデルから成るニューラルネットワークにおける、ニューラルコーディングや情報処理機能とその力学構造に関して、以下の結果が得られた：

双方向機能的結合によるバインディング機能の実現、文脈依存性の動的情報処理機構、多様なパルス列パターンの生成、認識および学習機構、時空間カオス的パルスコーディングのエルゴード的性質、発火率コーディングと時空間パルスコーディングのデュアルコーディングの可能性、時空間パルスに基づく学習機構、

(2 - 3) ダイナミカルニューロンモデルやそのネットワークにおいて、パルス間隔時系列や同期発火の時間間隔時系列に基づいた外界の動的情報構造の

埋め込み(たとえば、アトラクタ再構成)さらには複数記憶の同時想起や上位概念の形成の情報処理機能を実現できることを明らかにした。また、これらの機能における雑音の意義についても解析を行なった。

(3) カオスのダイナミクスの複雑さの数理解析

本研究では、アナログ計算の基礎としてカオスのダイナミクスの複雑さと可能な機能を広い視野に立って特徴づけるため、結合ダフィング方程式のカオス振動、Kolmogorov Complexityを用いた力学系の複雑さ、音声カオス、カオス暗号などのカオス工学に関する広範な数理解析を行なった。

(4) ハイブリッドシステム構成の基礎理論

本研究では、(b)実装研究で開発されている離散時間電子回路ニューロンモデルと連続時間電子回路ニューロンモデルをハイブリッドシステム構成で融合するための基礎理論として、微分 差分 代数方程式システムの安定性と分岐構造を理論的に解析した。

(b) 実装研究

実装研究に関しては、4-(2)のメンバーを中心にして、同期型カオスニューラルネットワークや非同期パルスニューラルネットワークなどの数理モデルに関して、以下のハードウェア化研究を行なった。

(1) 大規模カオスニューラルネットワークシステム

1万個のニューロンと1億個のシナプス結合からなる大規模なカオスコンピュータを構成するためのカオスニューロチップとシナプスチップを製作した。ニューロンは0.5 $\mu$ m CMOS半導体技術で、またシナプスチップは、0.35 $\mu$ m CMOSASIC技術で集積回路化した。さらにチップの試験のためのテストベッドを設計製作し、それにより試作チップを試験し良好な結果を得た。また、ニューロンチップとシナプスチップの回路動作を詳細に記述したネットワークエミュレータを開発し、ネットワークレベルでの制御シーケンスやパラメータ設定範囲の検証を行った。

(2) 高速に最適化問題を解くスイッチトカレント(SI)カオスニューロンシステム  
並列分散処理が可能な多数のアナログカオスニューロン回路で大規模なTSPに対応するため、問題の並列分割手法を提案し、その性質を調べた。

(3) フラクタルコーディング・カオスニューラルネットワーク

(a)理論研究(1-4)に対応するアナログ電子回路を個別電子部品を用いて試作して解析するとともに、その集積回路設計を行なった。

(4) 非同期パルスニューラルネットワーク

活動電位の詳細なタイミングにより処理を行なう非同期パルスニューロンを、連続時間と連続値が扱えるアナログ回路技術で集積回路化した。特に、さ

さまざまなアナログ特性を取り入れたパルスニューロンモデルを、0.5 $\mu$ m CMOS技術で忠実に集積回路化し、プロトタイプチップのテストを行った。

(5) 非線形抵抗回路

非常に小型のカオス的あるいは発振的ニューロン素子を通常のCMOSプロセスで実現するため、容量結合MOSFETを用いた非線形抵抗素子を提案し、集積回路化した。さらに、高周波数でも動作が可能なシミュレーテッドLC発振回路の構成法を提案し、それを集積回路化して実験を行った。

(6) パルス形ハードウェアニューロンモデルの実装と汎用化

IC化可能なパルス形ハードウェアニューロンモデルの開発、IC化可能なバーストニューロンモデルの開発、ハードウェアカオスニューロンモデルの開発等を行った。

(c) 実験研究

実験研究に関しては、4-(3)のメンバーを中心にして、脳型時空間計算モデルの実験的検証およびその結果の数理モデル化へのフィードバックを目的とした、生理実験およびデータ解析を行なった。まず、光計測法を用いて海馬ラットCA1野における時空間興奮パターンを測定し、逆伝播活動電位と入力刺激の一致性や2つの入力刺激の一致性とLTP/LTDの関係を明らかにした。また、実験的に観測された神経スパイク列時空間データを情報理論、入出力系の埋め込み理論、リカレンスプロットなどを用いて解析するための手法を提案するとともに、いくつかのデータ解析を行なった。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

学術論文

W.K.Luk & K.Aihara : "Synchronization and Sensitivity Enhancement of the Hodgkin Huxley Neurons due to Inhibitory Inputs", Biol. Cybern, Vol.82, pp.455-467 (2000) .

H.Nishimura, N.Katada & K.Aihara : "Coherent Response in a Chaotic Neural Network", Neural Processing Letters, Vol.12, No.1, pp.49-58 (2000) .

G.Froyland & K.Aihara : "Rigorous Numerical Estimation of Lyapunov Exponents and Invariant Measures of Iterated Function Systems and Random Matrix Products", International Journal of Bifurcation and Chaos, vol.10 no .1 pp . 103-122 (2000) .

L.Chen & K.Aihara : "Strange Attractors in Chaotic Neural Networks", IEEE Trans. Circuits and Systems- : Fundamental Theory and Applications, vol.47, No.10, pp.1455-1468 (2000) .

M. Hasegawa, T.Ikeguchi & K .Aihara : "Exponential and Chaotic

Neurodynamical Tabu Searches for Quadratic Assignment Problems" Control and Cybernetics, Vol.29, No.3, pp.774-788 ( 2000 )

K.Judd & K.Aihara : "Generation, Recognition and Learning of Recurrent Signals by Pulse Propagation Networks", International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol.10, No.10, pp.2415-2428 ( 2000 )

H.Matsuda, M.Tsukada, T. Aihara, M.Tatsuno & K.Aihara : "Chaotic Stimulus Dependent Long-term Potentiation in the Hippocampal CA 1 Area", Biosystems, Vol.58, pp.273-279 ( 2000 )

長谷川晃朗、小室元政、遠藤哲郎、五十嵐量 : 「 4 個の環状結合PLL系に見られる分岐とカオス」電子情報通信学会論文誌 A Vol.J83-A, No.1, pp.38-46,( 2000 ) .

L.Chen & K.Aihara : "Stability and Bifurcation Analysis of Differential - Difference - Algebraic Equations", IEEE Trans. CAS 1, Vol. 48, No. 3, pp.308-326 ( 2001 ) .

G.Froyland & K.Aihara : "Estimating Statistics of Neuronal Dynamics via Markov Chains", Biol. Cybern, Vol. 84, pp.31-40( 2001 )

#### 解説・著書ほか

荒木修、合原一幸:「再帰的スパイクニューラルネットワークモデルにおけるデュアル情報コーディング」、電子情報通信学会技術研究報告、NC2000-7, pp.49-56 ( 2000 - 5 )

増田直紀、合原一幸 : 「 離散化カオス写像を用いた暗号システム」 Computer Today、No.97 pp.14-20( 2000 - 5 )

合原一幸 : 「コラム - 6 : カオス・ニューロ・複雑系と工学」中島尚正編「工学は何をめざすのか - 東京大学工学部は考える」東京大学出版会、pp.215( 2000 - 6 )

藤井宏 : 「ダイナミカル・セル・アセンブリー再訪 - 過渡的なシンクロニーをめぐって」数理科学、No.444, pp.25-36( 2000 - 6 )

サイエンス・チャンネル[ 先端科学の冒険者たち ]# 21 脳を創る カオス・ニューラル・コンピュータ ( 2000 - 7 )

合原一幸 : 「複雑系システムの解明へ向けて」、『Computer Today』, vol.17,no.5, pp.2-3,( 2000 - 9 )

伊藤秀昭、合原一幸 : 「脳とデータ解析」 Computer Today, vol.17,no.5, pp.24-29, ( 2000 - 9 )

合原一幸:「カオス工学への招待」 規則的不規則が生み出す新しい知と技 東京テクノ・フォーラム21 第5回大阪講演会「生命と情報」( 2000 - 9 )

増田直紀、合原一幸:「現代暗号とマジックプロトコル」(今井秀樹 編著) . 現代暗号への入門 7. 状態離散化カオス写像を用いた暗号システム サイエンス

社 pp.65-75( 2000 - 9 )

T.Ikeguchi, T.Iokibe & K.Aihara : "11 Chaos and Time Series Analysis", In "Soft Computing and Human-Centered Machines"( Eds.Z.Q.Liu&S.Miyamoto ) pp.283-298, Springer, Toky( 2000 )

安達雅春、池口徹、合原一幸 : 7.10 埋め込み、甘利俊一 / 外山敬介編集, 「脳科学大辞典」 pp.769-772, 朝倉書店 ( 2000 )

堀尾喜彦、合原一幸 : 10.5 カオスニューロンチップ、甘利俊一 / 外山敬介編集, 「脳科学大辞典」 pp.904-909, 朝倉書店 ( 2000 )

奈良重俊、黒岩丈介 : 「脳を含む生体のカオス現象とその機能」バイオミメティクスハンドブック ( 長田義仁編 ) 機能応用編・第5章 脳神経系・1節、pp690-699( 2000 )

合原一幸 : 「カオス工学と複雑系」, 早稲田大学シンポジウム「複雑系 : 理論と新技術 人文・社会科学、工学、自然科学の交流」( 2000 )

増田直紀、合原一幸 : 「状態離散化カオス写像の力学系特性」電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-14, pp27-34( 2000 )

ムスティエール・ピエール、合原一幸 : 「1次元確率セルオートマトンのMarkov近似に関する数値解析」電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-41, pp79-86 ( 2000 )

小林知織、林雅也、ガン ドーユン、堀尾喜彦、合原一幸 : 「SC大規模カオスニューロコンピュータの回路エミュレータ」電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-44, pp103-110( 2000 )

山本裕一、山本耕一郎、徳田功、長島知正、合原一幸 : 「母音ゆらぎに関する一考察」電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-41, pp15-20( 2000 )

増田直紀、合原一幸 : 「状態離散化カオス写像のエルゴード性、カオス性、及びフラクタル構造」電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-45, pp39-46( 2000 )

J.K.Ryeu, N.Ichinose, & K.Aihara: "Fractal Neurocoding in a Chaotic Neural Network : " 電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-48, pp13-18( 2000 )

安達雅春、合原一幸 : 「 $\alpha$ 関数状シナプス後電位特性を有するパルスニューロンモデルの決定論的入力パルス系列に対する応答」, 電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-51, pp.27-30( 2000 )

堅田尚郁、西村治彦、合原一幸 : 「ホップフィールド型記憶モデルにおける確率共鳴」, 電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-75, pp45-52( 2000 )

渡辺正峰、合原一幸 : 「文脈依存性と機能的結合」, 電子情報通信学会技術研究報告 ニューロコンピューティング研究会 ( 2000 - 7 )

作村勇一、合原一幸 : 「ランダム入力に対するHHニューロンの発火時刻推定」,

電子情報通信学会技術研究報告 ニューロコンピューティング研究会(2000 - 7 )  
 重田篤史、堀尾喜彦、合原一幸:「アナログ回路化のための巡回セールスマン問題  
 の一分割手法」、電子情報通信学会技術研究報告 NLP2000-77,pp59-64(2000 )  
 松田欣也、天野智紀、堀尾喜彦、合原一幸:「容量結合多入力 MOSFETを用い  
 た非線形抵抗回路の集積回路化とそのLC発振器への応用」、電子情報通信学会総  
 合大会講演論文集、vol. 1, p. 5(2000 )  
 横田猛昭、堀尾喜彦、合原一幸:「非同期パルスニューロンモデルの集積回路化」、  
 電子情報通信学会総合大会講演論文集、vol. 1, p. 15(2000 )  
 天野智紀、松田欣也、堀尾喜彦、合原一幸:「容量結合多入力MOSFETを用いた  
 非線形抵抗回路による等価インダクタンス」、電子情報通信学会総合大会講演論文  
 集、vol. 1, p. 36(2000 )  
 松田欣也、天野智紀、堀尾喜彦、合原一幸:「容量結合多入力 MOSFETを用い  
 たLC発振器」、第13回回路とシステム(軽井沢)ワークショップ論文集、pp. 35-  
 40(2000 )  
 堀尾喜彦:「カオスと集積回路」、第13回回路とシステム(軽井沢)ワークショッ  
 プ論文集、pp. 433-438(2000 )  
 重田篤史、堀尾喜彦、合原一幸:「巡回セールスマン問題の一並列化手法」、日本  
 オペレーションズリサーチ学会秋期研究発表会アブストラクト集、pp. 28-29  
 (2000 )  
 合原一幸編:「カオス時系列解析の基礎と応用」、産業図書(2000 )  
 市瀬夏洋、合原一幸:「カオスのシンボル列に駆動される反復関数系のアトラクタ  
 について」、電子情報通信学会技術研究報告、NLP2000-115, 53-60(2000 )  
 安達雅春、合原一幸:「 $\alpha$ 関数状シナプス後電位特性を有するパルスニューロンモ  
 デルの複数入力系列に対する応答」、電子情報通信学会技術研究報告、NLP2000-  
 124, pp.1-4(2000 )  
 堀尾喜彦:「カオスニューロコンピュータスナップショット」、vol. 17, no. 6, pp. 17-  
 25, サイエンス社(2000 )  
 合原一幸:「カオスから脳を見て、新しいアナログコンピュータをつくる」、理化  
 学研究所 脳科学総合研究センター3周年記念冊子『脳科学が築く21世紀』、p.97  
 (2000 )  
 合原一幸:「カオス脳を創る」、月刊百科12月号、平凡社(2000 )  
 合原一幸:「カオス」をつないで脳を創る、『ジオ・ワールド』12月号、p.46(2000 )  
 小室元政:「大域結合写像におけるカオスの遍歴の発生機構」力学系研究集会  
 (2000 )  
 小室元政:「複雑系の数学的解析(1) GCMにおけるアトラクタの強度と分岐 」

京都大学数理解析研究所 研究集会:力学系理論の新しい展開(代表者 国府寛司)(2000)

小室元政:「カオスの遍歴の発生機構 大域結合写像におけるカオスの遍歴のメカニズム」早稲田大学シンポジウム 複雑系:理論と新技術-人文・社会科学、工学、自然科学の交流-(2000)

津元国親, 吉永哲哉, 川上博:「シナプス伝達により結合した4個のBVPニューロンにみられる分岐現象」電子情報通信学会技術報告、NLP2000-3, pp. 17-24(2000)

津元国親, 吉永哲哉, 川上博:「周期的 $\alpha$ 関数を注入したBVPニューロンにみられる分岐」電子情報通信学会技術報告、NLP2000-106, pp.97-104(2000)

津元国親, 吉永哲哉, 川上博:「周期的 $\alpha$ 関数を印加したBVPニューロンにみられる分岐」平成12年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集、p.7(2000)

辻 繁樹, 上田哲史, 川上博, 合原一幸:「周期外力を印加したニューロン対におけるバースト応答とその分岐」平成12年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集、p. 10(2000)

合原一幸:「カオス学入門」、放送大学教育振興会(2001)

合原一幸:「複雑系とカオス学」、『WEDGE』2001年4月号、pp.44-45(2001)

小室元政:「複雑系の数学的解析(2)-遅延GCMの分岐」力学系研究集会(2001)

川上博, 吉永哲哉, 土居伸二, 寺田和子, 野村泰伸:「生体リズムの動的モデルとその解析:MEと非線形力学系」コロナ社(2001)

津元国親, 吉永哲哉, 川上博:「周期的 $\alpha$ 関数列を印加したHodgkin-Huxley方程式の分岐」平成13年度電子情報通信学会総合大会講演論文集、基礎・境界、p. 67(2001)

重田篤史, 堀尾喜彦, 合原一幸:「並列分割2-opt法にカオスダイナミクスを融合した巡回セールスマン問題の解法」電子情報通信学会技術研究報告、NLP2000-144, pp.31-38(2001)

田中健太郎, 堀尾喜彦, 合原一幸:「カオスダイナミクスを用いた二次割当て問題の解法のアナログ集積回路化に向けた検討」電子情報通信学会技術研究報告、NLP2000-145, pp. 39-44(2001)

小沢弘和, 堀尾喜彦, 合原一幸:「大規模カオスニューロコンピュータのためのシナプス集積回路」電子情報通信学会技術研究報告、NLP2000-146, pp. 45-50(2001)

辻繁樹, 上田哲史, 川上博, 合原一幸:「周期外力を付加したAmari-Hopfieldニューロン対におけるバースト応答の分岐」電子情報通信学会技術研究報告、NLP2000-167, pp. 25-32(2001)

堀尾喜彦, 合原一幸:「大規模カオスニューラルネットワーク」電気学会全国大

会講演論文集vol. 3, pp. 1099-1102( 2001 )