

東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授

合原 一幸

「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

本研究は、ニューロンの興奮ダイナミクスのカオス性と非同期活動電位パルス群の時空間ダイナミクスに特に着目して、脳における非線形時空間ダイナミカル情報処理機構に関する数理モデルを構築・解析するとともに、その基本モデルをアナログ電子回路、非同期電子回路を用いて実装する基礎技術を開発したものである。そして、このような研究によって、現在のデジタルコンピュータとは大きく異なる発想に基づいた、新しい脳型情報処理システムの構成理論とそのハードウェア化のための基盤技術を確立することを目的とした。

20世紀後半に著しく発展した情報・通信技術は、今日の高度情報化社会を実現した。そして、この情報化社会を根底で支えているのがコンピュータである。現在世の中に存在するほとんどすべてのコンピュータは、いわゆるデジタルコンピュータである。デジタルコンピュータが約50年という短期間でこれ程までに成長した背景には、チューリングマシンという確固たる基本原理の存在とデジタル集積回路実装技術の急速な進歩がある。

ところが、近年このデジタルコンピュータの性能向上の限界が次第に明らかになってきた。その一つは、現行のハードウェア、すなわち同期式システム構成に起因する問題である。今日のデジタルVLSIシステムは、ほとんどすべて同期式である。ところが、この同期式システムの著しい高速化と高集積化は、逆にこの方式に固有な配線遅延と電力消費の問題点を顕在化させ、同期式システムに基づくデジタルコンピュータの性能限界が、はっきりと現実の視界に入ってきたのである。

また、もう一つの基本的問題が、カオスダイナミクスの理解の深まりとともにクローズアップされてきた。カオスの複雑さの種は、バルヌーイシフト写像やテント写像によって端的に示されたように、初期値の実数が持つ複雑さそのものにある。ところが、ほとんどすべての実数は、チューリングマシンの枠組みでは原理的に計算不可能である。さらに、多くのカオス力学系では、擬軌道追跡性が保証できないため、この意味でもデジタルコンピュータによる数値計算は、困難な壁にはばまれているのである。この二重の意味でカオスは、チューリングマシン、そしてチューリングマシンの原理に基づく今日のデジタルコンピュータの計算能力の深刻な限界を明示した。

本研究は、脳の非線形時空間ダイナミクスに学んだ工学的情報処理システムを全く新しい発想で構築することによって、上述したデジタルコンピュータの限界を打破し、21世紀の高度情報化社会を支える新しいコンピューティングシステムへの道を模索したものである。

この目的を実現するための重要なヒントは、脳におけるカオスのアナログ実装と非同期コンピューティングである。合原と松本元らがヤリイカ巨大軸索を用いた電気生理実験で明らかにしたように、脳の基本構成要素であるニューロンの興奮膜は、その非線形アナログ特性それ自体に基づいてカオスを生成するカオス的なアナログデバイスである。このようなアナログ素子によって生成されるカオスは、あくまでも熱雑音つきのカオスであるが、

デジタル実装とは本質的に異なるカオス実装技術を示している。すなわち、ハードウェア自体のダイナミクスとして、直接カオスを実装する技術である。もう一つの重要なポイントは、実際の脳のニューラルネットワークにおける活動電位パルスの時空間系列としての非同期性である。この側面に関しても、コインシデンスディテクタ特性やクラス I 特性（入力の増大に伴ないホモクリニック分岐等を介して発火率が 0Hz から増大する特性）を有する大脳皮質ニューロンやそれらの結合系に関する動的細胞集成体（ダイナミカルセルアセンブリー） 仮説などの最近の脳神経科学の成果は、従来のデジタル同期システムの壁を越えるフレキシブルな非同期コンピューティングに関する多くの示唆に富んでいる。

本研究の特徴は、(1)理論面では、カオス、フラクタル、複雑系そして動的細胞集成体仮説の観点から、脳の非線形時空間ダイナミクスに基づく動的時空間計算原理を、数理モデルを用いた構成論的解析によって解明したこと、そして、(2)実装面では、アナログ電子回路技術および非同期電子回路技術に基づいて、(1)で得られた理論モデルの具体的なハードウェア実装の基礎技術を開発したことである。すなわち本研究は、ニューロンのアナログカオス性と非同期性を糸口として、脳における非線形時空間ダイナミクスによって実現される情報処理原理を理論的に解明し、その原理に基づく工学的情報処理システムを実際に製作したものである。

本研究では、3つのサブグループ、すなわち(1) 脳の動的時空間計算モデルの理論研究サブグループ、(2) 脳の動的時空間計算モデルの実装研究サブグループ、および(3) 脳の動的時空間計算モデルの実験研究サブグループにより具体的に研究を実施した。特に、(1)と(2)のサブグループが本研究の中心である。

サブグループ毎の主要な研究成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 理論研究においては、まずはじめに、同期型カオスニューラルネットワークモデルの時空間ダイナミクスと動的連想記憶、組み合わせ最適化、フラクタルコーディングなどの情報処理能力との関係を数理モデルを構築して理論的に明らかにした。また、非同期型カオスニューラルネットワークモデルやパルスプロパゲーションネットワークモデルを用いて、活動電位パルス群の時空間構造を考慮したニューラルネットワークにおける、双方向機能的結合によるバインディング機構やダイナミカルセルアセンブリーの創発機構、さらには時空間情報コーディング機構などを理論的に解明した。さらに、これらの研究成果の応用技術を広く探索するために、カオス暗号、音声カオス、カオス制御など、カオス工学との関連で多様な応用研究を行なった。また、脳における学習・自己組織化過程や概日リズム生成機構の分子システマ的理解を視野に入れて、遺伝子・タンパク質ネットワークの時空間ダイナミカルモデルおよび人工的遺伝子・タンパク質ネットワーク設計理論を提案した。
- (2) 実装研究では、脳の動的時空間計算モデルを実装する様々な基礎技術を開発した。まずはじめに、カオスニューロコンピュータ構築用 IC チップセットを実数値演算が可能なアナログ集積回路により実装した。さらにこのチップセットによる大規模カオスニュー

ロコンピュータアーキテクチャを提案するとともに、それに基づいたシステムを実装して、その有用性を確認した。また、TSP や QAP の 最適化問題を高速に解くカオスニューロシステムを専用 IC とともに開発し、その有効性を示した。さらに、カオスニューロン IC を フラクタルコーディングネットワークに応用し、フラクタルコーディングを実装する技術を確立した。次に、活動電位パルスの時空間構造により情報処理を行うニューロンモデルを提案し、これを 連続時間アナログ回路で集積回路化した。一方、フローティングゲート MOSFET を用いた 特性可変非線形抵抗回路を提案し、その応用回路として電圧制御発振回路やカオス発生回路を集積回路化した。

(3) 実験研究では、脳の動的時空間計算モデルの理論解析から示唆される情報コーディングや情報処理メカニズムを実験的に検証するためのいくつかの データ解析手法を提案するとともに、光計測法などを用いた 生理実験およびデータ解析を行なった。特に、時系列刺激として“ゆらぎ”のないリミットサイクル刺激である周期的時系列刺激、“ゆらぎ”のあるマルコフ連鎖時系列刺激、およびカオス時系列刺激の LTP/LTD 誘起の関係を比較することにより、海馬 CA1においてカオス時系列刺激の系列相関特性に依存した LTP を 実験的に観測した。

以上の、脳の動的時空間計算に関する理論的、実装的、および実験的研究により、脳のアナログカオス性と非同期性に着目した新しい発想に基づく 脳型時空間情報処理システムの構成理論とそのハードウェア化のための基盤技術を開拓するとともに、関連する脳科学、非線形科学、およびゲノム科学についての成果が得られた。

(1) クラス I 皮質ニューロンや大脳皮質に豊富に存在する Gap Junctions などの生理学・解剖学の最新の知見を考慮した脳の時空間コーディング機構および時空間情報処理機構の数理モデル化とその実験的検証、(2) カオスニューロチップを応用したフラクタルコーディング、組合せ最適化、動的連想記憶などの実用システムの開発、(3) 遺伝子やタンパク質間相互作用の確率的ゆらぎを考慮した遺伝子・タンパク質ネットワーク理論の拡張とその具体的生命システムへの応用、などが今後の重要な研究課題である。

2. 研究構想

本研究は、前節で述べたように、ニューロンの興奮ダイナミクスのカオス性と非同期時空間活動電位パルス群の時空間ダイナミクスに特に着目して、脳における非線形時空間ダイナミカル情報処理機構に関する数理モデルを構築・解析するとともに、そのモデルをアナログ電子回路技術や非同期電子回路技術を用いて実装することにより、新しい発想に基づく脳型時空間情報処理システムの構成理論とそのハードウェア化のための基盤技術を確立することを目的とした。本研究により、50 年前に生み出された電子式デジタルコンピュータが今日の情報化社会を支えているように、50 年後の高度情報化社会を支えるような柔軟で新しい工学情報処理システム開発の糸口を、脳の非線形時空間ダイナミクスをヒント

にしてつかみたいというのが、本研究の根底にある大きな目標である。

前節で詳しく述べたように、本研究は、脳の非線形時空間ダイナミクスに学んだ工学的情報処理システムを全く新しい発想で構築することによって、現行のハードウェアシステムの同期性やカオスのカオスの計算困難性といった今日のデジタルコンピュータの限界を打破し、21世紀の高度情報化社会を支える新しいコンピューティングシステムへの道を模索したものである。その際、特に着目したのが、脳におけるカオスのアナログ実現と非同期コンピューティングであった。これらの構想は、合原と松本らによるヤリイカ巨大軸索を用いた神経膜のカオスダイナミクスに関する電気生理実験解析および神経方程式の数値解析、藤井や合原らによって提案されたコインシデンスディテクタとしての皮質ニューロンやそれらの結合系に関する動的細胞集成体（ダイナミカルセルアセンブリー）仮説がベースとなっている。

本研究では、脳の動的時空間計算の理論モデル構築とそのハードウェア実装を実現するために、その基礎となる非線形脳神経科学および非線形電子工学の様々な問題に関して、それまでに世界をリードする研究成果を挙げていた実績のある研究者を結集して研究チームを構成した。その際、本研究の重要な基礎となった研究成果は以下のものである。

(1) 理論研究

合原らは、カオスダイナミクスを有する単純なニューロンモデルから構成されたニューラルネットワークモデルであるカオスニューラルネットワーク (CNN)を定式化し、安達らとともにその動的連想記憶能力や組み合わせ最適化能力などを明らかにした。藤井、合原、塚田らは、動的細胞集成体仮説を提示し、コインシデンスディテクタから成るニューラルネットワークにおける多様なダイナミカル情報処理原理を明らかにした。

(2) 実装研究

堀尾らは、スイッチト・キャパシタ回路やスイッチト・カレント回路を用いたカオスニューラルネットワーク実装技術を開発し、またカオスニューロン集積回路を実際に試作した。

(3) 実験研究

塚田らは、ラットの海馬に関して、オプティカルレコーディング解析を行ない、時空間ダイナミクス特性を明らかにした。

本研究の実施体制およびサブグループ毎の役割分担は、以下のようにまとめられる。

研究の実施体制

理論研究グループ

東大・工 合原一幸 他

: 脳型動的時空間計算の基本数理モデルの構築とその応用

京産大・工 藤井 宏 他

: 意識下知覚を切り口にした脳内情報統合機構と脳内ダイナミクスの研究

徳島大・工 川上 博 他

: 多数個ニューロン結合系の分岐解析

岡山大・工 奈良重俊 他

: 神経回路網におけるカオスの神経発火の時空間同期現象

帝京科学大・理工 小室元政

: CNN のダイナミクス

実装研究グループ

東京電機大学・工 堀尾喜彦 他

: 大規模カオスニューラルネットワークシステムの構築および非同期パルスニューラルネットワークの VLSI 化

日本大学・理工 関根好文 他

: パルス形ハードウェアカオスニューロンモデルを用いたニューラルネットワークの実装

実験研究グループ

玉川大学・工 塚田 稔 他

: 海馬神経回路の非線形ダイナミクスと時空間学習則

各主要研究課題の具体的内容は、以下の通りである。

(1) 脳の動的時空間計算モデルの理論研究

- CNN などのカオスネットワーク数理モデルを駆使して、脳型時空間カオスダイナミクス に関して、構成論的解析を行なう。特に、カオスネットワーク上の非線形時空間動力学現象と脳の情報処理機能との関連を解明するとともに、工学的に重要な機能を実現するネットワーク構成理論を明らかにする。
- Judd と合原らにより提案されたパルスプロパゲーションネットワーク、非同期 CNN (ACNN) などの非同期ネットワーク数理モデルを駆使して、動的細胞集積体仮説に基づく情報処理原理に関して、構成論的解析を行なう。特に、川人らによる双方向性理論に基づくバインディング問題の動的解決、さらには時空間パルスコーディング機構などに関して数理的解析を行なう。

(2) 脳の動的時空間計算モデルの実装研究

- 課題(1)で構築した数理モデルを、電子回路によって実装する。この目的のために、特にカオスダイナミクスのアナログ集積回路実装技術、非同期時空間パルス集積回路実装技術を開発する。
- 現実の工学システムへの応用の観点から、本研究で開発した脳型情報処理システムと既存のデジタルコンピュータを融合したハイブリッドシステム構成について、基礎的検討を行なう。

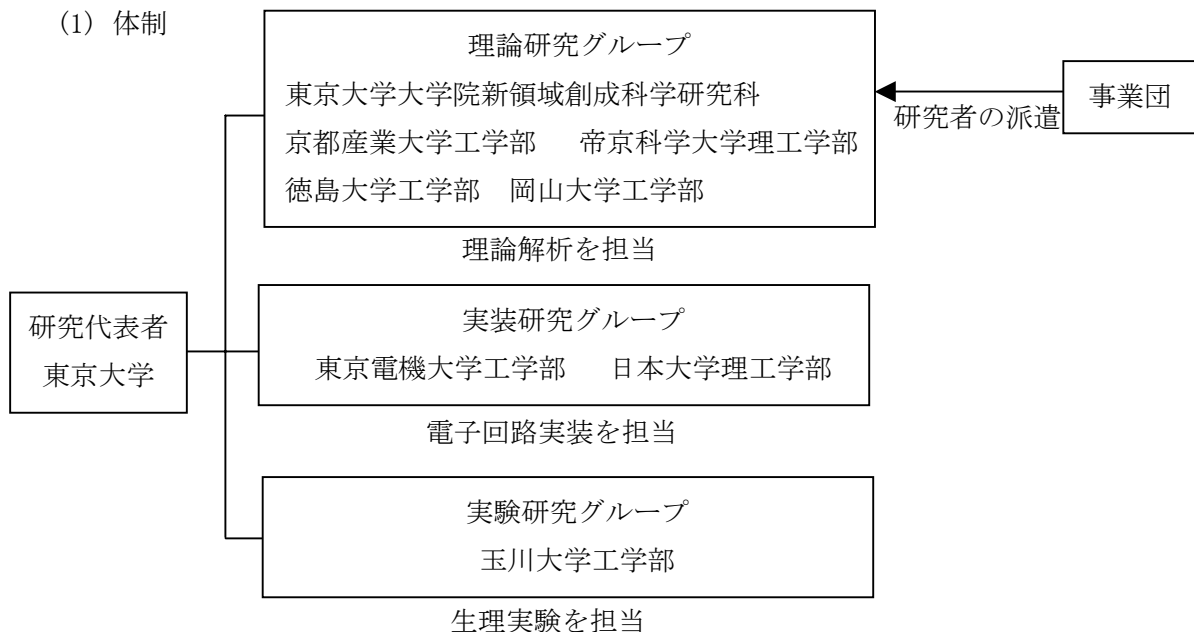
(3) 脳の動的時空間計算モデルの実験研究

・本研究は「脳を創る」という立場から、数理モデルの構築とそのハードウェア実装が主要課題であるが、脳は実在するシステムであるため、その理論モデルは実験的に検証されなければならない。本研究ではこのような観点から、上述の理論解析結果に基づいて実験を計画し、従来の電気生理実験のみならず、最先端の時空間計測手法であるオプティカルレコーディングなどを駆使して理論モデルの実験的検証を行なう。そして、さらにはこの実験結果を理論モデルの改良のためにフィードバックする。これらの過程を繰り返すことにより、脳の高次機能を記述する時空間ダイナミカルモデルを完成させる。

以上の研究計画に従って、本研究では、脳のアナログカオス性と非同期性に着目した新しい発想に基づく脳型時空間情報処理システムの構成理論とそのハードウェア化のための基盤技術を開拓した。さらに、5年間の研究の進展に伴ない、新たに脳の時空間計算におけるノイズの役割 (特に、確率共振、コヒーレンス共振、ノイズインデューズドオーダー、ノイズによるデュアルコーディングの実現)、カオス工学の応用研究 (カオス暗号、音声のカオス性、カオス共振のディレイド・フィードバック制御など)、さらにはポストゲノムシークエンス研究の中で今後急速に重要性を増すことが予想される遺伝子・タンパク質ネットワークの数理モデルに関する、脳の時空間ダイナミクスの数理モデリングおよび脳の時空間計測データの解析手法の開発によって得られた知見をベースにした研究 (転写因子タンパク質を介した遺伝子とタンパク質の相互作用および転写・翻訳過程の時間遅れを考慮に入れた遺伝子・タンパク質ネットワークの数理モデルを構築とその関数解析・分岐解析、人工遺伝子・タンパク質ネットワークの設計法、遺伝子発現・非発現の時空間データからの遺伝子・タンパク質ネットワークの構成) などの研究目標を設定して実施した。

3. 研究実施体制

(1) 体制



4. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

| 年月日 | 名称 | 場所 | 参加人数 | 概要 |
|------------------------------|------------------------------------|------|--------|---|
| H12. 11. 13 ~ H12. 11. 14 | Crest Meeting 2000 (研究の現状報告と展望) | 東京大学 | 25 名 | 神経回路網における非線形ダイナミクスに関する共同研究のため |
| H13. 3. 8 | 研究チーム主催シンポジウム | 東京大学 | 32 名 | 時間遅れを含む非線形ダイナミクスに関する討論 |
| H13. 7. 5 ~ H13. 7. 7 | Dynamical Brain 討論会 | 東京大学 | 5 名 | 脳の動的情報処理機構、特に情報コード機構に関して、集中討論を行なった。 |
| H13. 9. 3 | 視覚の動的情報処理に関するワークショップ | 東京大学 | 約 30 名 | カエルの視覚系の同期発火のマルチコーディングとそのデータ解析について、立花政夫教授（東大）の講演および集中討論を行なった。 |
| H13. 10. 25 | Dynamical Brain 討論会 | 東京大学 | 約 20 名 | Prof. W.J. Freeman (Univ. California) の「脳機能における情報と意味」の講演および関連トピックスに関して集中討論を行なった。 |
| H13. 11. 2 | Dynamical Brain 討論会 | 東京大学 | 約 20 名 | Prof. H. Robinson (Univ. Cambridge) と Prof. Ogorzalek (Univ. Mining & Metallurgy) による講演および非線形ダイナミクスと情報処理に関して、集中討論を行なった。 |
| H13. 12. 2 ~ H13. 12. 4 | Dynamical Brain 討論会 | 東京大学 | 5 名 | 脳の動的情報処理機構、特に意識の創発のメカニズムに関して、集中討論を行なった。 |
| H14. 3. 18 ~ H14. 3. 20 | 抑制性介在細胞系の動力学に関する研究会 | 東京大学 | 約 20 名 | 抑制性介在細胞群が Gap Junctions で結合した系の時空間パターンについて、藤井 宏 教授（京産大）の講演および集中討論を行なった。 |
| H14. 9. 24 ~ H14. 9. 25 | Crest Meeting | 東京大学 | 約 40 名 | 5 年間の本プロジェクトの成果を発表し、討論を行なった。 |

5. 主な研究成果

(1) 学術論文発表 (国内 22 件、海外 49 件)

1. T. Kobayashi, L. Chen and K. Aihara: "Modeling Genetic Switches with Positive Feedback Loops," *J. Theor. Biol.* (in press).
2. K. Aihara and J.K. Ryeu: "Chaotic Neurons and Analog Computation," *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5) (in press).
3. I. Tokuda, T. Yanai, T. Nagashima and K. Aihara: "Reconstruction of Chaotic Dynamics via Stochastic Resonance Neural Networks and its Application to Speech," *Artificial Life and Robotics* (in press).
4. Y. Sakumura and K. Aihara: "Stochastic Resonance and Coincidence Detection in Single Neurons," *Neural Processing Letters* (in press).
5. H. Takahashi and K. Aihara: "Asymptotic Evaluation of Kolmogorov Complexity of Pulse Sequences Generated by a Single Neuron Model," *J. Complex Systems* (in press).
6. K. Tsumoto, T. Yoshinaga, K. Aihara and H. Kawakami: "Bifurcations in Synaptically Coupled Hodgkin-Huxley Neurons with a Periodic Input," *Int. J. of Bifurcation and Chaos* (in press).
7. N. Masuda and K. Aihara: "Duality of Rate Coding and Temporal Coding in Multilayered Feedforward Networks," *Neural Computation*, 15, 103-125 (2003).
8. K. Mitsubori and K. Aihara: "Delayed-feedback Control of Chaotic Roll Motion of a Flooded Ship in Waves," *Proc. Roy. Soc. London*, 458(2027), 2801-2813 (2002).
9. R. Nanba, M. Hasegawa, T. Nisita and K. Aihara: "Optimization Using Chaotic Neural Networks and Its Application to Lighting Design," *Control and Cybernetics*, 31(2), 249-269 (2002).
10. N. Masuda and K. Aihara: "Dynamical Characteristics of Discretized Chaotic Permutations", *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 12(10), 2087-2103 (2002).
11. L. Chen and K. Aihara: "A Model of Periodic Oscillations for Generic Regulatory Systems," *IEEE Trans. CAS-I*, 49(10), 1429-1436 (2002).
12. K. Aihara and I. Tokuda: "Possible Neural Coding with Inter-Event Intervals of Synchronous Firing," *Phys. Rev. E*, 66, 026212-1-5 (2002).
13. K. Aihara: "Chaos Engineering and its Application to Parallel Distributed Processing with Chaotic Neural Networks," *Proceedings of the IEEE*, 90(5), 919-930 (2002).
14. N. Masuda and K. Aihara: "Cryptosystems with Discretized Chaotic Maps," *IEEE Trans. CAS-I*, 49(1), 28-40 (2002).
15. J. Matsuoka, Y. Sekine, K. Saeki, and K. Aihara: "Analog Hardware Implementation of a Mathematical Model of an Asynchronous Chaotic Neuron," *IEICE Trans. Fund.*, E85-A(2), 389-394 (2002).
16. 寶来俊介、山田泰司、合原一幸: 「同方向性リカレンスプロットによる決定論性解析」、電気学会論文誌 C, 122-C(1), 141-147 (2002)。
17. 佐伯勝敏、関根好文、合原一幸: 「エンハンスメント型 MOSFET を用いたパルス形バーストニューロンモデル」、電子情報通信学会論文誌 C, J85-C(3), 174-180 (2002)。
18. Z. Wang and K. Aihara: "A Fuzzy-Like Phenomenon in Chaotic Autoassociative Memory," *IEICE Trans. Fund.*, E85-A(3), 714-722 (2002).
19. T. Iwamoto, Y. Jimbo, and K. Aihara: "Extracting Temporal Firing Patterns of Neurons from Noisy Data," *IEICE Trans. Fund.*, E85-A(4), 892-902 (2002).

20. K. Tsumoto, T. Yoshinaga and H. Kawakami: "Bifurcations of Synchronized Responses in Synaptically Coupled Bonhoffer-van der Pol neurons," *Phys. Rev. E*, 65(3), 036230-1-9, (2002).
21. L. Chen and K. Aihara: "Stability of Genetic Regulatory Networks with Time Delay," *IEEE Trans. CAS- I*, 49(5), 602-608 (2002).
22. N. Masuda and K. Aihara: "Spatiotemporal Spike Encoding of a Continuous External Signal," *Neural Computation*, 14, 1599-1628 (2002).
23. N. Masuda and K. Aihara: "Bridging Rate Coding and Temporal Spike Coding by Effect of Noise," *Phys. Rev. Lett.*, 88(24), 248101-1-4 (2002).
24. M. Hasegawa, T. Ikeguchi and K. Aihara: "A Novel Chaotic Search for Quadratic Assignment Problems," *European Journal of Operational Research*, 139, 543-556 (2002).
25. M. Hasegawa, T. Ikeguchi and K. Aihara: "Solving Large Scale Traveling Salesman Problems by Chaotic Neurodynamics," *Neural Networks*, 15, 271-283 (2002).
26. Y. Shinohara, T. Kanamaru, H. Suzuki, T. Horita and K. Aihara: "Array-enhanced Coherence Resonance and Forced Dynamics in Coupled FitzHugh-Nagumo Neurons with Noise," *Phys. Rev. E*, 65, 051906-1-7 (2002).
27. 渡辺秀典、渡辺正峰、合原一幸、近藤駿介:「連続時間型連想記憶モデルにおける STDP による記憶の貯蔵構造変化」、電子情報通信学会論文誌 D- II、J85-D- II (3), 504-513 (2002)。
28. G.Froyland and K.Aihara: "Estimating Statistics of Neuronal Dynamics via Markov Chains," *Biol. Cybern.*, 84, 31-40 (2001).
29. 井坂晃宏、山田泰司、高橋 純、合原一幸:「高次パルス間隔を用いた重畳パルス時系列の解析」、電子情報通信学会論文誌 A, J84-A(3), 309-320 (2001)。
30. L. Chen and K. Aihara: "Stability and Bifurcation Analysis of Differential-Difference-Algebraic Equations," *IEEE Trans. CAS-I*, 48(3), 308-326 (2001).
31. M. Watanabe, K. Nakanishi and K. Aihara: "Solving the Binding Problem of the Brain with Bi-directional Functional Connectivity," *Neural Networks*, 14, 395-406 (2001).
32. M. Komuro and K. Aihara: "Hierarchical Structure among Invariant Subspaces of Chaotic Neural Networks," *Jpn. J. of Ind. and Appl. Math.*, 18(2), 335-357 (2001).
33. J. Kuroiwa, S. Nara and K. Aihara: "Response Properties of a Single Chaotic Neuron to Stochastic Inputs," *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 11(5) (2001), 1447-1460 (2001).
34. N. Ichinose and K. Aihara: "Detection of Mutual Determinism between a Pair of Spike Trains," *Biol. Cybern.*, 85, 327-333 (2001).
35. O. Araki and K. Aihara: "Dual Information Representation with Stable Firing Rates and Chaotic Spatiotemporal Spike Patterns in a Neural Network Model," *Neural Computation*, 13(12), 2799-2822 (2001).
36. N. Masuda and K. Aihara: "Synchronization of Pulse-coupled Excitable Neurons," *Phys. Rev. E*, 64, 051906-1-13 (2001).
37. J.K. Ryeu, K. Aihara and I. Tsuda: "Fractal Encoding in a Chaotic Neural Network," *Phys. Rev. E*, 64, 046202-1-6 (2001).
38. H. Kitajima, T. Yoshinaga, K. Aihara and H. Kawakami: "Chaotic Bursts and and Bifurcation in Chaotic Neural Networks with Ring Structure," *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 11(6), 1631-1643 (2001).
39. 関根好文、隅山正巳、佐伯勝敏、合原一幸:「エンハンスメント型 MOSFET による Λ 型

- ニューロンモデル」、電子情報通信学会論文誌 C, J84-C(10), 988-994 (2001)。
40. I. Tokuda, T. Miyano and K. Aihara: "Surrogate Analysis for Detecting Nonlinear Dynamics in Normal Vowels," *Journal of the Acoustical Society of America*, 110(6), 3207-3217 (2001).
 41. K. Tsumoto, T. Yoshinaga and H. Kawakami: "Bifurcations in Synaptically Coupled BVP Neurons," *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 11(4), 1053-1064 (2001).
 42. T. Yoshinaga and H. Kawakami: "Chaotic Wandering and Bifurcations in Coupled Chaotic Neurons," *J. of Nonlinear Analysis-Theory, Methods and Applications*, 47(8), 5357-5365 (2001).
 43. T. Miyano, S. Kimoto, H. Shibuta, K. Nakashima, Y. Ikenaga and K. Aihara: "Time Series Analysis and Prediction on Complex Dynamical Behavior Observed in a Blast Furnace," *Physica D*, 135, 305-330 (2000).
 44. H. Suzuki, K. Aihara, J. Murakami and T. Shimozawa: "Analysis of Neural Spike Trains with Interspike Interval Reconstruction," *Biol. Cybern.*, 82, 305-311 (2000).
 45. 佐伯勝敏、関根好文、合原一幸：「パルス型ハードウェアバーストニューロンモデル」、電子情報通信学会和文論文誌分冊 C-II, J83-C(3), 213-219 (2000)。
 46. 染谷和孝、藤田篤史、関根好文、合原一幸：「軸索のカオス伝達特性」、電子情報通信学会和文論文誌分冊 D-II, J83-D-II(3), 1015-1023 (2000)。
 47. W.K. Luk and K. Aihara: "Synchronization and Sensitivity Enhancement of the Hodgkin-Huxley Neurons due to Inhibitory Inputs," *Biol. Cybern.*, 82, 455-467 (2000).
 48. K. Judd and K. Aihara: "Generation, Recognition and Learning of Recurrent Signals by Pulse Propagation Networks," *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 10(10), 2415-2428 (2000).
 49. H. Nishimura, N. Katada and K. Aihara: "Coherent Response in a Chaotic Neural Network," *Neural Processing Letters*, 12(1), 49-58 (2000).
 50. S. Murashige, T. Yamada and K. Aihara: "Nonlinear Analyses of Roll Motion of a Flooded Ship in Waves," *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 358, 1793-1812 (2000).
 51. G. Froyland and K. Aihara: "Rigorous Numerical Estimation of Lyapunov Exponents and Invariant Measures of Iterated Function Systems and Random Matrix Products," *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 10(1), 103-122 (2000).
 52. M. Hasegawa, T. Ikeguchi and K. Aihara: "Exponential and Chaotic Neurodynamical Tabu Searches for Quadratic Assignment Problems," *Control and Cybernetics*, 29(3), 774-788 (2000).
 53. T. Miyano, A. Nagami, I. Tokuda and K. Aihara: "Detecting Nonlinear Determinism in Voiced Sounds of Japanese Vowel /a/," *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 10(8), 1973-1979 (2000).
 54. L. Chen and K. Aihara: "Strange Attractors in Chaotic Neural Networks," *IEEE Trans. CAS- I*, 47(10), 1455-1468 (2000).
 55. H. Matsuda, M. Tsukada, T. Aihara, M. Tatsuno and K. Aihara: "Chaotic Stimulus Dependent Long-term Potentiation in the Hippocampal CA1 Area," *Biosys.*, 58, 273-279 (2000).
 56. M. Watanabe, Y. Takahashi and K. Aihara: "Associative Memory Model with Temporal Coding and Active Dendrite," *Biosys.*, 58, 259-263 (2000).
 57. L. Chen and K. Aihara: "Global Searching Ability of Chaotic Neural Networks," *IEEE Trans. CAS- I*, 46(8), 974-993 (1999).
 58. 小北英輝、横山 聡、稲葉 寿、合原一幸：「C型慢性ウイルス性肝炎の数理モデル」、電子情報通信学会論文誌、J82-A(3), 365-374 (1999)。

59. 山田泰司、合原一幸:「リカレンスプロットと2点間距離分布による非定常時系列解析」、電子情報通信学会論文誌、*J82-A(7)*, 1016-1028 (1999)。
60. 増田直紀、合原一幸:「有限状態パイコネ変換を用いたカオス暗号」、電子情報通信学会論文誌、*J82-A(7)*, 1038-1046 (1999)。
61. R. Herrera, K. Suyama, Y. Horio and K. Aihara: “IC Implementation of a Switched-Current Chaotic Neuron,” *IEICE Trans. Fund.*, E82-A(9), 1776-1782 (1999).
62. Y. Horio, K. Watarai and K. Aihara: “Nonlinear Resistor Circuits Using Capacitively Coupled Multi-Input MOSFETs,” *IEICE Trans. Fund.*, E82-A(9), 1926-1936 (1999).
63. 増田直紀、合原一幸:「ウェーブレット係数列を用いたカオス時系列の予測」、電子情報通信学会論文誌 A, *J82-A(11)*, 1710-1718 (1999)。
64. 染谷和孝、藤田篤史、関根好文、合原一幸:「軸索のハードウェアモデル」、電子情報通信学会論文誌 C-II, *J82-C-II(12)*, 655-661 (1999)。
65. 平田祥人、下川英敏、合原一幸:「1次元写像のエントロピー関数と情報源符号化」、電子情報通信学会論文誌 A, *J82-A(12)*, 1780-1792 (1999)。
66. M. Adachi and K. Aihara: “An Analysis of Instantaneous Stability of an Associative Chaotic Neural Network,” *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 9(11), 2157-2163 (1999).
67. 寶来俊介、山田泰司、高橋 純、合原一幸、森川良行、小谷 誠:「新生児呼吸時系列における定常性解析」、日本ファジィ学会誌、11(5), 848-854 (1999)。
68. 高橋 純、増田尚美、山田泰司、合原一幸:「Gumowski と Mira の写像の過渡的振舞い」、電子情報通信学会論文誌 A, *J82-A(10)*, 1664-1667 (1999)。
69. K. Sakai and K. Aihara: “Bifurcation Structure of Vibrations in an Agricultural Tractor-Bibrating Subsoiler System,” *Int. J. Bifurc. and Chaos*, 9(10), 2091-2098 (1999).
70. M. Hanagata, Y. Horio and K. Aihara: “Asynchronous Pulse Neural Network Model for VLSI Implementation,” *IEICE Trans. Fund.*, E81-A(9), 1853-1859 (1998).
71. I. Tokuda, K. Aihara and T. Nagashima: “Adaptive Annealing for Chaotic Optimization,” *Phys. Rev. E*, 58(4), 5157-5160 (1998).

(2) 特許出願 (国内 7件、海外 2件)

①国内

1. 特許番号: 特許第 3007327 号
 発明者 : 堀尾喜彦、渡来賢一、合原一幸
 発明名称: 「容量結合多入力 MOSFET を用いた非線形抵抗回路」
 出願人 : 科学技術振興事業団
 登録日 : 1999 年 11 月 26 日
2. 特許出願番号: 特願平 10-068517 号
 発明者 : 堀尾喜彦、渡来賢一
 発明名称: 「連続パルス遅延機能を有する軸策回路」
 出願人 : 科学技術振興事業団
 出願日 : 1998 年 3 月 18 日

3. 特許出願番号：特願平 10-068518 号
発明者：堀尾喜彦、佐藤笑美子
発明名称：「スペクトル拡散通信システムにおけるカオスを用いた拡散系列の生成法」
出願人：科学技術振興事業団
出願日：1998年3月18日
4. 特許出願番号：特願平 10-347716 号
発明者：高橋勇人、合原一幸
発明名称：「データ圧縮量の推定方法及びその装置」
出願人：科学技術振興事業団
出願日：1998年12月8日
5. 特許出願番号：特願平 11-154458 号
発明者：増田直紀、合原一幸
発明名称：「ウェーブレット係数列を用いた時系列予測方法及びその装置」
出願人：科学技術振興事業団
出願日：1999年6月2日
6. 出願番号：特願 2001-245561 号
発明者：市瀬夏洋、合原一幸、田中広明
発明名称：「連続時間スイッチングネットワーク構成方法」
出願人：科学技術振興事業団
出願日：2001年8月13日
7. 出願番号：特願平 2002-014989 号
発明者：堀尾喜彦、藤原徹哉、合原一幸
発明名称：「フローティングゲート MOSFET を用いた非線形抵抗回路」
出願人：科学技術振興事業団
出願日：2002年1月14日

②海外

1. 出願番号：第 PCT/JP99/04357 号 (USA)
発明者：Yoshihiko Horio, Kenichi Watarai, and Kazuyuki Aihara
発明名称：「Nonlinear resistor circuit using capacitively-coupled multi input MOSFET」
出願人：科学技術振興事業団
出願日：2000年4月20日
2. 出願番号：第 PCT/JP00/03545 号 (Canada, USA, EU)
発明者：Naoki Masuda, and Kazuyuki Aihara
発明名称：「Time-series prediction method and apparatus utilizing wavelet coefficient series」
出願人：科学技術振興事業団

出願日 : 2000年6月1日

(3) 新聞報道等

①受賞

1. H. Fujii, H. Ito, K. Aihara, N. Ichinose, & M. Tsukada: "Dynamical Cell Assembly Hypothesis - Theoretical Possibility of Spatio-temporal Coding in the Cortex", 日本神経回路学会平成9年度論文賞 (1999.11).
2. K. Saeki, Y. Sekine, and K. Aihara: "Pulse-type Hardware Neuron Model for Future IC Design Based on the Modified BVP Equations", 平成10年度電気学会電子・情報・システム部門研究会優秀論文発表賞.
3. 合原一幸: 「決定論的カオスの工学的研究について」、東京テクノ・フォーラム 21、ゴールドメダル賞 (2000.4).

②新聞報道

1. 合原一幸: 読売新聞 2000年4月28日「東京テクノフォーラム 21・ゴールドメダル賞受賞」
2. 合原一幸: 読売新聞(夕刊) 2000年5月11日「東京テクノフォーラム 21・ゴールドメダル賞受賞」
3. 合原一幸: 読売新聞 2000年9月25日「脳型カオスコンピュータ」
4. 合原一幸: 日本経済新聞 2001年1月1日「東大講演会 Lux Sophiae」
5. 合原一幸: 日経産業新聞 2001年6月29日(1面)「脳型カオスコンピュータ開発」
6. 合原一幸: 日経産業新聞 2002年1月24日「カオスで人工脳」
7. 合原一幸: 週刊 医学界新聞 2002年2月4日「脳とこころ-21世紀の課題」
8. 合原一幸: 科学新聞 2002年4月12日「カオスニューラルネットワーク: アナログ素子を用いて構築」
9. 合原一幸: 読売新聞 2002年8月20日「森羅万象解き明かす、単純計算の繰り返し、複雑な自然現象生む」

③その他

1. 合原一幸: 放送大学講義 2001年~現在「カオス学入門」
2. 合原一幸: サイエンス・チャンネル 2000年7月14日「脳を創る-カオス・ニューラルコンピュータ」
3. 合原一幸: 「環境ホルモン」 2002年1月5日 NHK 教育テレビ「サイエンスアイ」
4. 合原一幸: 「1たす1が2でない世界」、NHK 教育テレビ「視点・論点」、2002年7月26日、29日
5. 合原一幸: 「カオス: 不規則を生み出す規則」、NHK 教育テレビ「視点・論点」、2002年10月25日、28日

(4) その他特記事項

- ・ 国際新技術フェア 2002「大規模汎用カオスニューロコンピュータ」2002年9月25日~27日