

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540390

研究課題名（和文）結合興奮素子系の自己組織的 スパイクパターン形成と機能

研究課題名（英文）Function and Self-organized Spike Pattern in Coupled Excitable System

研究代表者 柳田 達雄 (TATSUO YANAGITA)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号：80242262

研究成果の概要：

- 興奮性ダイナミクスは自然界で幅広く観察される振る舞いである。特に、神経系における電気刺激の伝達や心筋収縮などの生物機能の重要な役割を担う性質である。特にリエントラント波は心筋細動の起源の一つであると考えられている。本研究では興奮場結合系で自発形成されるパルス・ダイナミクスの数値解析を徹底的に行い、その分岐構造を解明した。具体的には一次元 FitzHugh-Nagumo 方程式を側方結合したモデルにより数値実験・分岐解析を行い、リエントラント波の生成起源がパルス同期解のサドル分岐に起因している事を明らかにし、大域分岐図を求めた。これらの研究は“*Bifurcation analysis of solitary pulse, synchronized pulses and reentrant waves in laterally coupled excitable fibers*”, Physical Review E, 78, p. 05628-056039 (2008)等に学術雑誌に掲載された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎 (4304)

キーワード：興奮素子・自己組織化・パターン形成・反応拡散系

## 1. 研究開始当初の背景

興奮性ダイナミクスは自然界で幅広く観察される振る舞いである。特に、神経系における電気刺激の伝達や心筋収縮などの生物機能の重要な役割を担う性質である。興奮性ダイナミクスには、不応期・静止期・興奮期という特徴的な状態が存在する。このような状態を離散化した McCulloch-Pitts モデルか

ら神経活動を連続変数である発火周波数で記述する発火頻度モデルと様々なレベルでの記述が行われている。

一方、単一神経細胞では周期的外部刺激に対して、引き込み現象やカオスなどの多様な応答を示すことが実験的に知られている。このような複雑な応答はアナログ的非線形力学によって生み出されているため、極度に簡略化した数理モデルにない性質である。本研

究は、引き込みやカオスなどの力学特性をもつ興奮素子の結合系に現れる自発的なダイナミクスと応答特性の解明を目指した。特に、興奮性反応拡散場が側方結合した系に見られるパルス・ダイナミクスの解析を行う。心室細動や神経軸索束に見られる異常な発火現象の数理的な基礎付けを与えると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究は、極度に簡略化した数理モデルでは現れないアナログ的性質の解析を行った。具体的には、興奮場結合モデルの数値実験および分岐解析を行った。興奮場結合モデルは心筋モデル・神経モデルとして用いられているが、大自由度非線形力学系であるため、理論・数値解析ともに十分に行われていないのが現状である。特に、興奮場が側方的に結合した系に見られるパルス・ダイナミクスは非常に複雑であり、心室細動や神経軸索束における異常な発火現象に関連する振る舞いを示す。本研究では興奮性力学が持つアナログ的性質を維持しつつ比較的簡便な数理モデルを用いて、これらのパルス・ダイナミクスを解析し、その数理的基礎付けを与える。

## 3. 研究の方法

### 興奮場間の結合モデル

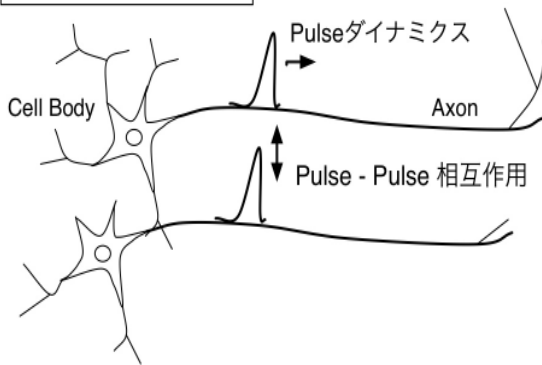


図1. 側方結合している興奮性反応拡散場モデル. FitzHugh-Nagumo 方程式を用いる

### 側方結合興奮場モデルの構成

空間自由度をもつ興奮場（反応拡散場）では電気刺激はパルスとなり伝播する。興奮場にパルスが複数存在する場合には、それらの相互作用により多様なパターンダイナミクスを示すことが我々の研究により明らかにされ (T. Yanagita et. al, Prog. of Theor. Phys., 161(2006), T. Yanagita, et. al Phys. Rev. E, 71(2005), T. Yanagita et. al, SIAM

J. Appl. Dyn. Sys. 4(2005)) パルス間の相互作用が興奮結合系で重要な役割を担うと予想される。本研究での対象となる数理モデルを構成する。研究が進んでいる一次元 FitzHugh-Nagumo 方程式を基礎モデルとして、それを拡散的に側方結合させた数理モデルを用いた (図1)。それぞれの場は安定にパルスが伝播するが、それらが側方結合しているためお互い相互作用し多様なパルス・ダイナミクスが創成される。

### 数値実験・大域分岐構造解析

徹底的に数値解析し、そこに現れるパルス・ダイナミクスの洗い出しを行った。

また、そこに見られる多様なパルス・ダイナミクスの大域分岐構造解析ソフト AUTO を用いて、それらの起源を明らかにした。この系は大自由度であるために大域分岐構造の解析は困難であるが、当科学研究費により購入した計算機器によりそれが可能となった。

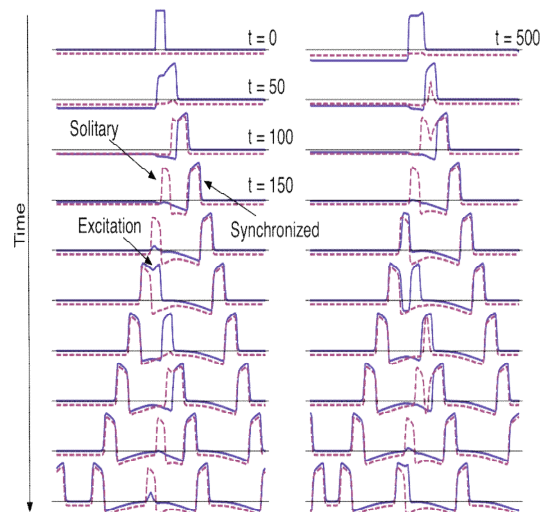


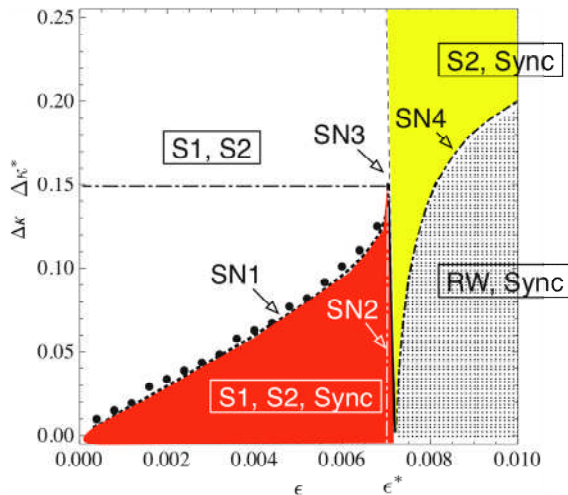
図2. 側方結合により一方を伝播する興奮性パルスが他の場を刺激して新しいパルスを生成させる。このパルスがさらに他の場を刺激して新しいパルスが生まれ出されリエントラント波を構成する。

## 4. 研究成果

一次元 FitzHugh-Nagumo 方程式を側方結合したモデルにより数値実験により、側方結合が無い FitzHugh-Nagumo 方程式であればパルスは衝突により対消滅するが、側方結合によりソリトンのようにパルス同士がすり抜ける解、同期解、追い抜き解、リエントラント波、ドリフト・リエントラント波 (図2) など多様な解が存在する事を明らかにした。

これらの多様な解の起源を明らかにするため大域分岐構造を調べ、リエントラント波

の生成起源がパルス同期解のサドル分岐に



起因 している事  
を示した。また、大域分岐図により多くのパ

図3. 大域分岐構造図. S1, S2 はそれぞれ孤立進行パルス解, Sync は同期解, RW はリエントラント波の安定存在領域を表すそれらの解境界はサドル・ノード分岐する。

ルス解が興奮性ダイナミクス特有のサドル・ノード分岐が生成の起源である事を解明した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

1. Tatsuo Yanagita and Yukito Iba, "Exploration of Order in Chaos using the Replica Exchange Monte Carlo method", *Journal of Statistical Mechanics*, 2, p.02043-02058 (2009) (査読有り)
2. Tatsuo Yanagita, Hiromichi Suetani and Kazuyuki Aihara, "Bifurcation analysis of solitary pulse, synchronized pulses and reentrant waves in laterally coupled excitable fibers", *Physical Review E*, 78, p. 05628-056039 (2008) (査読有り)
3. Hiromichi Suetani, Tatsuo Yanagita and Kazuyuki Aihara, "Pulse Dynamics in Coupled Excitable Fibers: Soliton-like Collision, Recombination, and Overtaking", *International Journal of Bifurcations and Chaos*, 18, p.

2289-2308 (2008) (査読有り)

4. Tatsuo Yanagita and Tamotsu Onozaki, "Dynamics of a Market with Heterogeneous Learning Agents", *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 3, p.107-118 (2008) (査読有り)
5. Tatsuo Yanagita, "Input-output relation of FitzHugh-Nagumo elements arranged in a trifurcated structure", *Physical Review E*, 76, 56215-56228 (2007) (査読有り)
6. Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, Co-evolution of phases and connection strengths in a network of phase oscillators, *Physical Review Letters*, vol.102, Issue 3, 034101 (2009) (査読有り)
7. Takuma Tanaka and Toshio Aoyagi, Optimal weighted networks of phase oscillators for synchronization, *Physical Review E*, vol. 78, Issue .4, 046210 (2008) (査読有り)
8. Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, Synchrony-induced switching behavior of spike-pattern attractors created by spike-timing dependent plasticity, *Neural Computation*, Vol. 19, No. 10: 2720-2738 (2007). (査読有り)
9. Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, Synchrony-induced attractor transition in cortical neural networks organized by spike-timing dependent plasticity. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol 19, No. 4, 409-415 (2007). (査読有り)

[学会発表] (計 13 件)

1. 青木高明、青柳富誌生, ネットワークの結合変化と振動子ダイナミクスの相互作用が示す自発構造形成, 日本物理学会第64回年次大会, 池袋, (2009/03/30)
2. T. Yanagita, "Design of Functional Oscillatory Networks with Replica Exchange Monte Carlo", *Interfacial dynamics on the boundaries of physics, chemistry, biology and mathematics*, Sapporo (2008/11/20)
3. 田中 琢真, 青柳富誌生, 振動子の同期を最適化する複雑ネットワークの重み構造, 第66回形の科学シンポジウム, 京都大学, (2008/10/31), 口頭
4. 青木高明, 青柳富誌生, 結合変化を伴う位相振動子系におけるネットワーク構造の自発形成と解析, 日本物理学会2008年秋季大会, 盛岡, (2008/09/22)

5. 伊賀志朗、吉井義裕、伊庭幸人、青柳富誌生、引き込みを最適化する位相振動子ネットワークの多様性 – 拡張アンサンブル法によるアプローチ、日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手、(2008/09/22)
  6. T. Yanagita and A. Mikhailov: "Evolutionary Design of Robust Oscillatory Networks", Pattern Formation in Biological Networks, Max-Planck Institute, Germany (2008/09/19)
  7. Takaaki Aoki, and Toshio Aoyagi, A coevolving network of phase oscillators? – Typical three types of collective behaviors-, Dynamics Days Asia Pacific 5 (DDAP5) The 5th International Conference on Nonlinear Science, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, (2008/09/11)
  8. T. Yanagita and Y. Iba : "Extended Ensemble Monte Carlo for Designing Dynamical Systems", Dynamics Days Europe 2008 , Delft University of Technology , Holland (2008/08/27)
  9. T. Yanagita, Y. Iba: "Analysis of Chaotic Dynamical System by Extended Monte Carlo Method", SigmaPhi2008 Statistical Physics (2008/07/20) Chania, Greece
  10. T. Yanagita, H. Suetani, and K. Aihara: "Pulse Dynamics in a Coupled Excitable Media", Nonlinear Dynamics and Chaos: Advances and Perspectives (2007/09/22) Aberdeen, UK
  11. T. Yanagita and T. Onozaki: " A Model of Market Share Dynamics with Boundedly Rational Agents", The Fifth International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (2007/08/29) Waseda Univ., Tokyo
  12. T. Yanagita and T. Onozaki: "Dynamics of a Market with Heterogeneous Learning Agents", ESHIA (2007/06/20) George Mason Univ., Washington DC, USA
  13. T. Onozaki and T. Yanagita: Regional " Business Cycle Synchronization through Expectations " , ESHIA (2007/06/20) George Mason Univ., Washington DC, USA
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
柳田 達雄 (YANAGITA TATSUO)  
北海道大学・電子科学研究所・助教  
研究者番号：80242262
  - (2) 研究分担者  
青柳 富誌生 (AOYAGI TOSHIO)  
京都大学・情報科学研究科・講師  
研究者番号：90252486
  - (3) 連携研究者  
なし