

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21120003

研究課題名(和文)ヘテロな動的パターンの相互作用の数理的解明とその生命科学への展開

研究課題名(英文)Modeling and analysis of strong interactions among heterogenous localized patterns and its applications to biological problems

研究代表者

西浦 廉政(NISHIURA, Yasumasa)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号：00131277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円、(間接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：時空間での外的環境の変化に対し、システムがどのようにダイナミックに適応するかを、ヘテロ環境下での空間局在パルスの自発生成、経頭蓋磁気刺激(TMS)に対する脳波の同期・脱同期現象、そして外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移を中心に研究を実施した。パルスの自発生成においては、縮退したバタフライ型2重ホモクリニック点組織中心であることが明らかにされた。TMSによる位相リセット及びその空間伝搬については、多重内部状態を有する集団振動子モデルで説明が可能となった。ループ探索機能やその修復等の柔軟なアトラクター遷移を表現できる数理モデルの提案を行った。

研究成果の概要(英文)：We investigated how the system responds to an environmental change in space and time for the following cases: self-generation of traveling pulses at the defect points in the media, synchronization and de-synchronization of EEG by the stimulus of TMS, and a flexible switching of attractors in response to the environmental change. As for the pulse-generators, it was found that double-homoclinic-loop of butterfly type plays an organizing center from dynamical system point of view. An oscillator network model of FHN type with multiple internal states was presented to explain the above dynamical behaviors of EEG. Also it was shown that such a network model has a spontaneous loop-finding ability and robust against the destruction of such structure.

研究分野：応用数学

科研費の分科・細目：数学・数学一般(含確率論・統計数学)

キーワード：ヘテロ個体 余次元 反応拡散系 大域分岐 特異点 衝突現象

1. 研究開始当初の背景

(1) 空間ヘテロ構造に由来する動的パターンの自発生成の解析

時間的振動パターンが空間ヘテロ構造あるいは化学物質の非一様分布に起因して空間周期構造を誘発する機構は生命の胚発生から化学反応まで極めて広く存在する。それらは情報の生成と伝搬を担っており、さらに非一様性の形状や強さによりそのパターンは多彩である。そのような自発的なパターン生成機構やその制御はパターン相互のコミュニケーションにとって本質的であるが、その数学的解明は未解決問題として残されていた。

(2) 脳波ダイナミクスの数理モデル作成と外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移機構の解明

ヒトの脳内ダイナミクスでは、神経細胞の発火タイミングや脳波リズムの同期・脱同期現象が観察されており、それらは脳機能の制御等に重要な役割をしていると考えられている。

ヒト同士のコミュニケーション時においても大域的な脳波の同期状態が観察される。ヒトのコミュニケーションにおける特徴は、時々刻々と変化する状況に対して適切に対応する必要がある点である。そのため、コミュニケーション時の脳内ダイナミクスを理解するためには、予期せぬ環境変化に対する脳波同期ネットワークの適切制御の仕組みを理解することが必要であると考えられる。

同期状態を力学系として考察する際には、外界の変化は方程式のパラメータ変化や境界条件の変化に対応すると考えられるため、パラメータ変化に対する柔軟なアトラクター遷移の仕組みを理解することが必要になる。

2. 研究の目的

(1) 空間ヘテロ構造に由来する動的パターンの自発生成の解析

コミュニケーションを相互作用による情報の交換ならびにその交換を通しての自分と相手へのフィードバックダイナミクスと捉え、主体としての個(individual)が存在し、豊かな内部ダイナミクスをもつ典型例の一つとして散逸系における粒子解ダイナミクスがある。1次元におけるその典型例がパルスであり、媒質の非一様性に起因するその自発的生成機構の力学系的見地からの解明を行う。非一様性への依存性や生成パルスの分類を統一的に行うために、生成機構の組織中心の同定が極めて重要な課題となる。

(2) 脳波ダイナミクスの数理モデル作成と外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移機構の解明

脳波の位相リセットを再現する数理モデルの作成

脳波ダイナミクスを再現する数理モデルを作成するために、実験的に観察される特徴的なダイナミクスを定性的に再現するモデルを作成することを試みる。

北城らは経頭蓋磁気刺激(TMS)を用いた実験によって、脳波の位相リセット状態が空間伝播することを示した。さらに、開眼・閉眼条件下で実験を行った結果、磁気刺激を加える直前のアルファ帯域の脳波パワーが低いときよりも高いときの方が、位相リセットが起きにくいことを示した。

しかし、神経細胞レベルのダイナミクスで考えると、脳波のパワーが高い状態では神経細胞の活動の同期現象が起きていると考えられるため、TMS印加時の神経細胞群の位相は閉眼時の方が開眼時のそれよりも揃っていることが予想される。そのため、TMSを加えた後に位相リセットが起きにくいという実験結果は直観に反する。このような現象を解明することを目的に、数理モデルの作成とその方程式に関する分岐構造解析を試みた。

外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移機構の解明

外部環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移を実現する上で、外部刺激を脳内に伝える情報の流れと行動後に得られる結果を評価するためのフィードバックの情報の流れの両方が重要であると指摘されている。そこで、フィードフォワードとフィードバックからなるネットワークにおいて、柔軟なアトラクター遷移を実現するためにノードが有すべき非線形性と分岐構造、及びノード間制御ルールを解明することを試みる。この研究を行うことによって、局所的な神経ネットワークの切断や境界条件の変化に対して新たなアトラクターを自発的に発見する数理機構が明らかになり、脳の自律分散的な数理機構の本質を理解できると期待できる。

3. 研究の方法

(1) 空間ヘテロ構造に由来する動的パターンの自発生成の解析

次のような力学系的方法論とホモクリニック軌道追跡数値計算法を主として用いる。

余次元2近傍での縮退ホモクリニック軌道の開折ダイナミクスとその分類。

開折パラメータの選択とそれによるホモクリニック軌道の数値的追跡。

不安定多様体のオリエンタビリティの追跡

ホモクリニック軌道のパラメータに関する大域的追跡は数値計算として、非常に負荷も大きく長時間の探索計算を要する。西浦班で開発された大域軌道追跡計算手法は汎用性も高く、この課題においても大きな役割を果たした。

(2) 脳波ダイナミクスの数理モデル作成と外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移機構の解明

脳波の位相リセットを再現する数理モデルの作成

脳波は多数の神経細胞の集団的な振動現象によって発生すると考えられているため、各神経細胞には FitzHugh-Nagumo (FHN) モデルを採用することでその振動状態を生成し、脳波を FHN モデルの集団活動として表現した。領野間の相互作用を記述する結合関数には非線形性を仮定した。また、TMS の効果は領野内の神経細胞に一様に加わる外力項として表現した (図 1 上)。

数理モデルに対して領野内の集団振動子ダイナミクスの分岐構造を解明し、脳波リセットの空間伝播を再現する。また、TMS 印加後の位相リセット状態の初期値依存性を調べることによって、開眼・閉眼条件下で観察される脳波ダイナミクスの違いが発生する仕組みを解析した。

外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移機構の解明

柔軟なアトラクター遷移を実現する上で困難な点はネットワーク切断など、適切なタイミングで探索モードに切り替える点である。そのようなルールを可能にするようなノード状態間の制御ルールを発見することが中心的な課題となる。

力学系を用いたネットワークでは、通常オンとオフの 2 状態間遷移が研究されているが、2 状態では柔軟なアトラクター遷移を実現することが困難であった。そこで、本研究では 1 つのオン状態と 2 つのオフ状態を定義することにより、ネットワーク切断時の柔軟なループ探索を実現した。ここで、オン状態は集団振動子群の同期状態に対応する。また、オフ状態の 1 つは振動子の脱同期状態、もう 1 つのオフ状態は振幅が小さい状態での位相同期振動状態である。オン状態は他のノードからの興奮性相互作用、前者のオフ状態は他のノードからの相互作用がない状態、後者のオフ状態は他のノードからの抑制性の相互作用を受けた時に実現するようにパラメータを調整する。

4. 研究成果

(1) 空間ヘテロ構造に由来する動的パターンの自発生成の解析

数値シミュレーションによってパルスの発生方法に多様な規則パターンがあることを示した。これらのパターンは、ジャンプ近傍で振動するパルスの運動 (breathing motion) と発射するパルスの運動 (emitted traveling pulse) に着目することで区別する

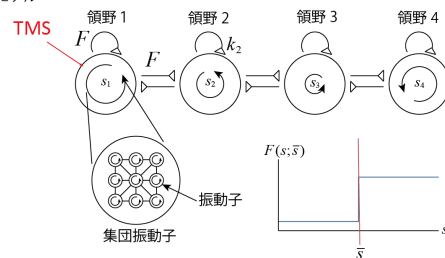
ことができる。これらのパターンの発生機構においては、縮退したパタフライ型 2 重ホモクリニック点が組織中心であることが明らかになった。

(2) 脳波ダイナミクスの数理モデル作成と外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移機構の解明

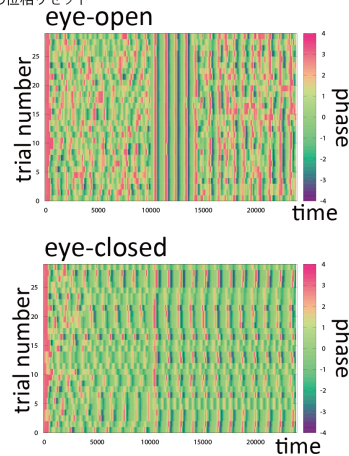
脳波の位相リセットを再現する数理モデルの作成

同期状態の位相リセット状態が空間的に伝播する現象を再現するために、領野間の相互作用関数に階段関数を採用した。同期状態がある閾値を越えたタイミングで領野間の相互作用をオンにすることにより、位相リセット状態を空間的に伝播できることが明らかになった (図 1 中)。また、開眼・閉眼条件下で観察された実験結果を定性的に再現することに成功した。さらに、臨界点近傍において情報伝達効率が最適化されることが示唆された (図 1 下)。

数理モデル



開眼・閉眼時の位相リセット



情報伝達効率の比較

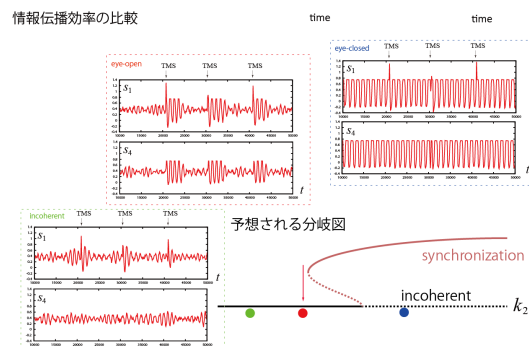


図1 (上) 数理モデルの概略 (中) 数理モデルに外部刺激を加えた時に観察される位相リセット現象 (下) ノードダイナミクスの数値シミュレーションから予想される分岐図と分岐点近傍における特徴的なダイナミクス

外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移機構の解明

ネットワーク内に含まれるループ構造の自動的な探索、及びネットワーク切断時の再探索を可能にする数理モデルを作成することに成功した。

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15件)

M.Yadome, Y.Nishiura, T.Teramoto, Robust pulse generators in an excitable medium with jump-type heterogeneity, SIAM J. Appl. Dyn. Syst., 査読有 (2014) (in press)

K.-I.Ueda, M.Yadome, Y.Nishiura, Multistate network for loop searching system with self-recovery property, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 89, 2014, 022810(1-6)
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.89.022810>

K.-I.Ueda, Three-state network design for robust loop-searching systems, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 87, 2013, 052920(1-5)
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.87.052920>

Y.Nishiura, T.Teramoto, M.Yadome, Heterogeneity-Induced Pulse Generators, Advances in Cognitive Neurodynamics, 査読有, Vol. III, 2013, 371-377
DOI:10.1007/978-94-007-4792-0_50

Zin Arai, Hiroshi Kokubu, Ipei Obayashi, Capturing the Global Behavior of Dynamical Systems with Conley-Morse Graphs, Advances in Cognitive Neurodynamics, 査読有, Vol. III, 2013, 665-672
DOI:10.1007/978-94-007-4792-0_89

K.Nishi, Y.Nishiura, T.Teramoto, Dynamics of two interfaces in a hybrid system with jump-type heterogeneity, Japan J. Indust. Appl. Math, 査読有, Vol. 30, 2013, 351-395

DOI:10.1007/s13160-013-0100-x

K.-I.Ueda, Y.Nishiura, A mathematical mechanism for instabilities in stripe formation on growing domains, Physica D, 査読有, Vol. 241, 2012, 37-59
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physd.2011.09.016>

K.-I.Ueda, S.Takagi, T.Nakagaki, Tactic direction determined by the interaction between oscillatory chemical waves and rheological deformation in an amoeba, Physical Review E, 査読有, Vol. 86, 2012, 011927(1-6)
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.86.011927>

Y.Nishiura, T.Teramoto, X.Yuan, Heterogeneity-induced spot dynamics for a three-component reaction-diffusion system, Communications on Pure and Applied Analysis, 査読有, Vol. 11, 2012, 307-338
DOI:10.3934/cpaa.2012.11.307

Y.Nishiura, T.Teramoto, Collision dynamics in Dissipative Systems, Theoretical and Applied Mechanics, Japan, 査読有, Vol. 59, 2011, 13-25
<http://dx.doi.org/10.11345/nctam.59.13>

K.-I.Ueda, S.Takagi, Y.Nishiura, T.Nakagaki, Mathematical model for contemplative amoeboid locomotion, Physical Review E, 査読有, Vol. 83, 2011, 021916(1-9)
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.83.021916>

P.van Heijster, A.Doelman, T.J.Kaper, Y.Nishiura, K.-I.Ueda, Pinned fronts in heterogeneous media of jump type, Nonlinearity, 査読有, Vol. 24, 2010, 127-157
DOI:10.1088/0951-7715/24/1/007

T.Teramoto, Y.Nishiura, Morphological characterization of the diblock copolymer problem with topological computation, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 査読有, Vol. 27, 2010, 175-190
DOI:10.1007/s13160-010-0014-9

T.Teramoto, K.Suzuki, Y.Nishiura, Rotational motion of traveling spots

in dissipative systems, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 80, 2009, 046208(1-10)
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.80.046208>

SI.Ei, Y.Nishiura, K.-I.Ueda, Pulse dynamics for reaction-diffusion systems in the neighborhood of codimension two singularity, Journal of Math-for-industry, 査読有, Vol. 1, 2009, 91-95
<http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/ja/recordID/15583?hit=1&caller=xc-search>

[学会発表](計 10 件)

西浦 廉政, 時間周期構造から空間周期構造へ, 第 23 回「非線形反応と協同現象」研究会, 2013 年 12 月 17 日, 北海道大学 学術交流会館, 札幌

Y.Nishiura, A computational approach to spontaneous pulse generators in dissipative systems, 2013 Northeastern Asia Symposium on High Performance Computing Methods and Modeling, 2013 年 9 月 23 日, Chengdu, China

Y.Nishiura, Dynamics of dissipative solitons in heterogeneous media and its application to biological problems, International Workshop "From Soft Matter to Protocell", 2013 年 9 月 20 日, Tohoku University, Sendai

Kei-Ichi Ueda, Yasumasa Nishiura, Yoko Yamaguchi, Keiichi Kitajo, Transient dynamics of neural oscillators induced by nonlinear interactions International conference on cognitive neurodynamics 2013, 2013 年 6 月 24 日, Sigtuna, Sweden

Kei-Ichi Ueda, Three-state Node Network for Loop Searching System, IMA Special Workshop Joint US-Japan Conference for Young Researchers on Interactions among Localized Patterns in Dissipative Systems, 2013 年 6 月 13 日, University of Minnesota, Minneapolis, USA

Kei-Ichi Ueda, Loop Searching System with Self-Recovery Property, 2013 年 5 月 20 日, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, USA

Y.Nishiura, A converter from

time-periodicity to spatial-periodicity, Mathematics and Biology: a Roundtrip in the Light of Suns and Stars, 2013 年 4 月 16 日, Lorentz Center, Leiden, the Netherlands

Y.Nishiura, Heterogeneity-induced pulse generators, 2012 International Conference on Modeling, Analysis and Simulation, 2012 年 11 月 8 日, Meiji University, Tokyo

Y.Nishiura, Pulse generators as a converter from time-periodic motion to spatially periodic structure, Dynamical Systems in Studies of Partial Differential Equations, 2012 年 9 月 25 日, University of Minnesota, Minneapolis, USA

Y.Nishiura, Heterogeneity-induced pulse generators, Turing Symposium on Morphogenesis -Mathematical Approaches Sixty Years after Alan Turing-, 2012 年 8 月 29 日, Sendai International Center, Sendai

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西浦 廉政 (NISHIURA, Yasumasa)
東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授
研究者番号: 00131277

(2) 研究分担者

國府 寛司 (KOKUBU, Hiroshi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 50202057

上田 肇一 (UEDA, Keiichi)
富山大学・大学院理工学研究部・准教授
研究者番号: 00378960
(H24 ~ H25)

(3) 連携研究者

荒井 迅 (ARAI, Zin) 北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 80362432

上田 肇一 (UEDA, Keiichi)
富山大学・大学院理工学研究部・准教授
研究者番号: 00378960
(H21 ~ H23)