

令和 2 年 9 月 11 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06430

研究課題名(和文) 準周期振動と部分同期現象について

研究課題名(英文) quasiperiodic oscillations and its partial synchronizations

研究代表者

遠藤 哲郎 (Endo, Tetsuro)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：60247145

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年、3-トーラスの部分同期現象：アーノルド共鳴ウェブが注目を集めている。従来の研究においては、この現象の観察には膨大な計算時間と十分な精度が要求されることから、写像のアーノルド共鳴ウェブのみが解析されていた。しかしながら、現実問題を記述する力学系は連続系であるにも拘わらず、連続時間力学系のアーノルド共鳴ウェブは求められていなかった。

本研究では、ヒステリシス発振器の結合系によって表される区分定数回路を提案した。区分定数回路は極めて簡単な発振器でこの回路を用いることにより自律系、非自律系のアーノルド共鳴ウェブを観察し、さらに解析結果の妥当性を回路実験によって確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2-トーラスを発生するシステムには、Arnol'd tonguesと呼ばれる極めて複雑な同期領域が発生することが知られており、これらの同期引き込みはコンピュータのクロック同期など様々な工学系において利用されている。

3-トーラスを発生するシステムにおいてはArnol'd resonance websと呼ばれる蜘蛛の巣状のArnol'd tonguesより更に複雑な2-トーラス部分同期引き込み領域が発生することが知られている。Arnol'd resonance websは、新しい同期の性質を用いた新しい通信方式等に応用できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Recently, it is clarified that complex entrainment bifurcation structures called Arnol'd resonance webs occur in three-dimensional torus generating systems. However, since numerous calculations and exact precision are necessary, Arnol'd resonance webs have been derived only for discrete dynamical systems.

In order to observe Arnol'd resonance webs in real physical circuit, we propose piecewise-constant circuits that comprise hysteresis oscillators. Using autonomous and non-autonomous piecewise-constant oscillators, we observe Arnol'd resonance webs numerically. Furthermore, the theoretical results observed in numerical experiments are verified experimentally.

研究分野：非線形力学回路の解析

キーワード：非線形回路 アーノルド共鳴ウェブ 3-トーラス 区分定数回路

1. 研究開始当初の背景

準周期振動は自然科学、工学系において見られる普遍的な現象である。近年 3 次以上の周波数からなる準周期振動の複雑な同期引き込み領域に注目が集まっている。3 次以上の準周期振動は Arnol'd 共鳴 web (ARW) と呼ばれる複雑な部分同期引き込み領域を呈する。しかしながら、従来の研究においては、ARW は膨大な数値計算コストがかかることから、離散力学系のものを対象に研究が行われていた。実物理系を記述するのは連続力学系であるにも拘わらず、連続力学系の ARW は明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、区分数回路を用いることにより連続時間力学系の ARW の観察を試みる。区分数回路は区分数線形回路よりも遙かに単純化された回路である。さらに、ARW を回路実験による観察を試みる。

3. 研究の方法

- (1) 区分数回路をブレッドボード基盤上において実現し、オシロスコープによって、ARW 部分同期引き込み領域を観察する。
- (2) 準周期振動の解析は通常リアプノフ解析によって行われる。本研究では区分数回路のリアプノフ指数を一般化した手法を提案し計算する。

4. 研究成果

図 1 に 3 次元トーラス (3 つの非共鳴な周波数を有する準周期振動) を示す。3 次元トーラスを発生する区分数回路としては、3 つのヒステリシス発振器からなる区分数回路、2 つのヒステリシス発振器と方形波外力からなる区分数回路が最も単純なモデルとして考えられるが、ここでは後者の発振器を示す。

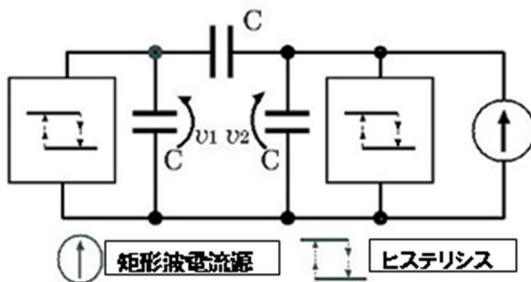


図 1. 3 次元トーラスを発生する区分数回路

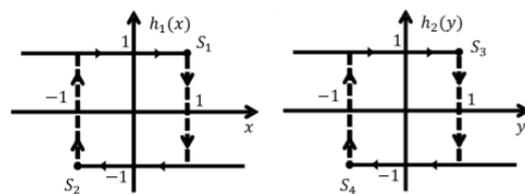


図 2. ヒステリシスの電圧電流特性

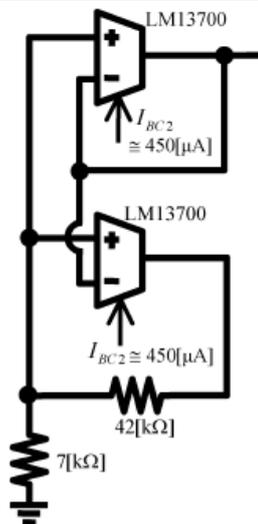


図 2 において、ヒステリシスによって示される発振器は理想的なヒステリシス発振器を表す。正規化を行うと、この区分数発振器の回路方程式は次式によって記述される。

$$\begin{aligned} dx/dz &= a_{11}h_1(x) + a_{12}h_2(y) + B_1 \text{sgn}(\sin z) \\ dy/dz &= a_{21}h_1(x) + a_{22}h_2(y) + B_2 \text{sgn}(\sin z) \\ dz/dz &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

ここにおいて、 z は時刻であり、 h_1, h_2 は図 2 において示されるような、ヒステリシスである。 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, B_1, B_2$ は回路素子によって定まる定数である。自律系はただ単に $B_1 = B_2 = 0$ と置けば良いだけである。このように区分数回路においては自律系、非自律系共に同様な手法を用いて解析が可能である。

ヒステリシスは図 3 の回路によって実現できる。ただし、LM13700 はトランスコンダクタンスアンプである。

図 3 . ヒステリシスの
実現回路

$\mathbf{X}=(x,y,z)^t$ と置くと、式(1)の解は次のように書ける。t はベクトルの転置を表す。

$$\mathbf{X}=\mathbf{X}_0+\mathbf{a}_i(z-z_0) \quad (2)$$

\mathbf{a}_i は定数ベクトルであり、例えば、 $x=y=z=1$ の時は

$$\mathbf{a}_i=(a_{i1}+a_{i2}+B_1, a_{21}+a_{22}+B_2, 1)^t$$

である。次に 3 次の法線ベクトルを \mathbf{n} とすると、境界条件は次のように書ける。

$$\mathbf{n}\mathbf{X}=\mathbf{D} \quad (3)$$

例えば、 $x=1$ に到達する場合は $\mathbf{n}=(1\ 0\ 0)$, $\mathbf{D}=1$ と書ける。t= $\mathbf{n} / \|\mathbf{n}\|$ の場合は $\mathbf{n}=(0\ 0\ 1)$, $\mathbf{D}=\mathbf{n} / \|\mathbf{n}\|$ と書ける。(3)を(2)に代入すると

$$\mathbf{n}(\mathbf{X}_0+\mathbf{a}_i(z-z_0))=\mathbf{D} \quad (4)$$

これを解くと、

$$z_1=z_0(\mathbf{D}-\mathbf{n}\mathbf{X}_0)/\mathbf{n}\mathbf{a}_i \quad (5)$$

となり、解が $z=z_1$ において次の境界を打つ点は、

$$\mathbf{X}_1=(\mathbf{I}-\mathbf{a}_i\mathbf{n}/\mathbf{n}\mathbf{a}_i)\mathbf{X}_0+\mathbf{D}\mathbf{a}_i/\mathbf{n}\mathbf{a}_i \quad (6)$$

よって、ヤコビアン行列 \mathbf{A} は

$$\mathbf{A}=\mathbf{I}-\mathbf{a}_i\mathbf{n}/\mathbf{n}\mathbf{a}_i \quad (7)$$

このように、区分定数発振器からはヤコビアン行列を式(7)のように陽に導出することが出来た。

この陽に導出されたヤコビアン行列を用いれば、図 1 または式(1)によって表される連続時間力学系のリアプノフ指数は離散力学系のそれとほぼ同等の計算量と精度で計算することが出来る。リアプノフ指数を求めるアルゴリズムとしては Shimada と Nagashima が提案したアルゴリズム(Prog. Theor. Phys. 1979)を用いる。

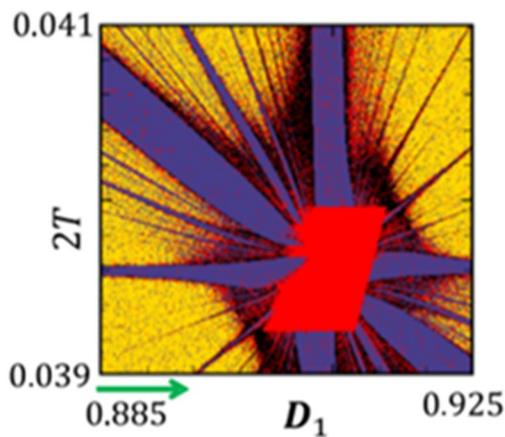


図 4 . リアプノフ解析によって得られたリアプノフダイアグラム

図 4 は、図 1 の回路から得られたリアプノフダイアグラムである。パラメータ $2T$ は $2T=2 / \dots$ 、 $D_1=a_{12}=I_1/I_2$ であり、ここに I_1 および I_2 はヒステリシス電流源の波高値である。 $a_{11}=101$, $a_{12}=1.1$, $a_{22}=102.01$ に選んだ。

同図において、黄色によって染められた領域は 3 - トーラスが発生する領域、青色は 2 - トーラス部分同期引き込み領域、赤は周期解の発生する領域である。このように、3 - トーラスの発生領域内部に 2 - トーラス部分同期引き込み領域が蜘蛛の巣状に広がる構造はアーノルド共鳴ウェブ(Arnol'd resonance webs:ARW)と呼ばれ、これまで計算量と精度の問題から離散時間力学系を対象として議論されてきた。連続時間力学系からこのような詳細なリアプノフダイアグラムが得られたのは、区分定数回路という著しく単純な力学回路を用いたためである。筆者等の知る限り、連続時間力学系からこのような詳細な ARW の導出された例は初めてである。

最後に、回路実験結果について述べる。3 - トーラスと 3 - トーラス発生領域内部に発生する 2 - トーラス部分同期引き込み領域を回路実験によって観察する。図 5(a)が周期解、図 5(b)が 2 - トーラス部分同期引き込み領域において観察されるアトラクタ、図 5(c)が 3 - トーラスである

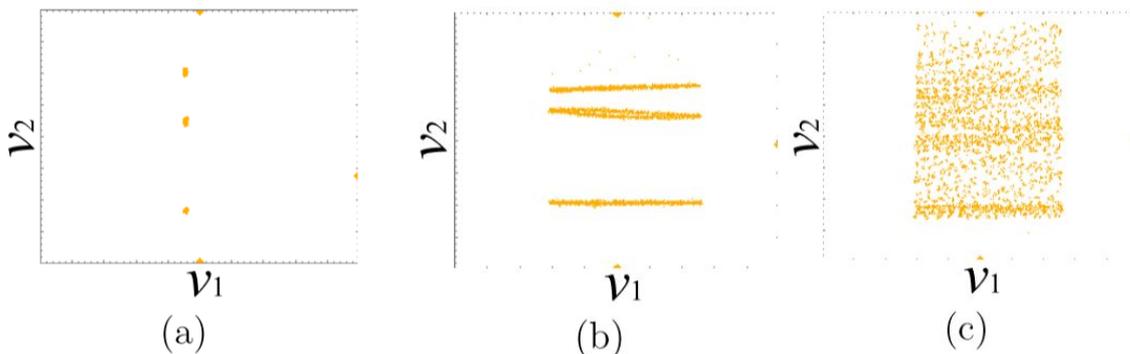


図 5. 回路実験で観察されたポアンカレセクション上のアトラクタ、(a)周期解、(b)2 - トーラス、(c)3 - トーラス

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Naohiko Inaba and Takuji Kousaka	4. 巻 401
2. 論文標題 Nested mixed-mode oscillations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica D	6. 最初と最後の頁 132152-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 15.Tri Quoc Truong, Tadashi Tsubone, Munehisa Sekikawa, and Naohiko Inaba	4. 巻 401
2. 論文標題 Border-collision bifurcations and Arnol'd tongues in two coupled piecewise-constant oscillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica D	6. 最初と最後の頁 132148-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuta Nagata, Naohiko Inaba, Munehisa Sekikawa, Tetsuro Endo, Ken'ichi Fujimoto, and Tetsuya Yoshinaga	4. 巻 2018
2. 論文標題 Remarkable similarities of two pairs of stable and saddle canards in a van der Pol oscillator under extremely weak periodic perturbation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013A02-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/ptx172	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuji Kousaka, Hiroyuki Asahara, and Naohiko Inaba	4. 巻 2018
2. 論文標題 Stick-slip chaos in a mechanical oscillator with dry friction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033A01-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/pty016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naohiko Inaba, Hidetaka Ito, Kuniyasu Shimizu, and Hiroomi Hikawa	4. 巻 2018
2. 論文標題 Complete mixed-mode oscillation synchronization in weakly coupled nonautonomous Bonhoeffer-van der Pol oscillators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063A01-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/pty065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroaki Takahashi, Takuji Kousaka, Hiroyuki Asahara, Nataliya Stankevich, and Naohiko Inaba	4. 巻 2018
2. 論文標題 Mixed-mode oscillation-incrementing bifurcations and a devil's staircase from a nonautonomous, constrained Bonhoeffer-van der Pol oscillator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 103A02-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/pty099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuniyasu Shimizu and Naohiko Inaba	4. 巻 2018
2. 論文標題 Experimental and numerical observation of successive mixed-mode oscillation-incrementing bifurcations in the extended Bonhoeffer-van der Pol oscillator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Bifurcations and Chaos	6. 最初と最後の頁 1830047-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1142/S0218127418300471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tri Quoc Truong, Tadashi Tsubone, Munehisa Sekikawa, Naohiko Inaba, and Tetsuro Endo	4. 巻 2017
2. 論文標題 Arnol'd resonance webs and Chenciner bubbles from a three-dimensional piecewise-constant hysteresis oscillator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053A04-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tri Quoc Truong, Tadashi Tsubone, Kuniyasu Shimizu, and Naohiko Inaba	4. 巻 E100A
2. 論文標題 Experimental study of mixed-mode oscillations in a four-segment piecewise linear Bonhoeffer--van der Pol oscillator under weak periodic perturbation -Successive and nonsuccessive MMO-incrementing bifurcations-	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Trans. IEICE, fundamentals	6. 最初と最後の頁 1522-1531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E100.A.1522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuji Kousaka, Yutsuki Ogura, Kuniyasu Shimizu, Hiroyuki Asahara, and Naohiko Inaba	4. 巻 353-354
2. 論文標題 Analysis of mixed-mode oscillation-incrementing bifurcations generated in a nonautonomous constraint Bonhoeffer-van der Pol oscillator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physica D	6. 最初と最後の頁 48-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2017.05.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Nagata, Naohiko Inaba, Munehisa Sekikawa, Tetsuro Endo, Ken'ichi Fujimoto, and Tetsuya Yoshinaga	4. 巻 2018
2. 論文標題 Remarkable similarities of two pairs of stable and saddle canards in a van der Pol oscillator under extremely weak periodic perturbation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013A02-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx172	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takuji Kousaka, Hiroyuki Asahara, and Naohiko Inaba	4. 巻 2018
2. 論文標題 Stick-slip chaos in a mechanical oscillator with dry friction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033A01-1--11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kyohei Kamiyama, Tetsuro Endo, Isao Imai, and Motomasa Komuro	4. 巻 26
2. 論文標題 Electronic circuit experiments and SPICE simulation of double covering bifurcation of 2-torus quasi-periodic flow in phase-locked loop circuit	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of Bifurcation and Chaos	6. 最初と最後の頁 1630017-1--12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218127416300172	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Motomasa Komuro, Kyohei Kamiyama, Tetsuro Endo, and Kazuyuki Aihara	4. 巻 26
2. 論文標題 Quasi-periodic bifurcations of higher-dimensional tori	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of Bifurcation and Chaos	6. 最初と最後の頁 1630016-1--40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218127416300160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tri Quoc Truong, Tadashi Tsubone, Munehisa Sekikawa, and Naohiko Inaba	4. 巻 341
2. 論文標題 Complicated quasiperiodic oscillations and chaos from driven piecewise-constant circuit: Chenciner bubbles do not necessarily occur via simple phase-locking	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physica D	6. 最初と最後の頁 1--9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2016.09.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 14. 稲葉直彦, 小野弓絵, 鎌田弘之, チューン・クオック・チー, 坪根正, 関川宗久, 遠藤哲郎
2. 発表標題 区分定数回路の結合系に見られる準周期振動
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuhiko Ogawa, Naohiko Inaba, Tetsuro Endo, and Kuniyasu Shimizu
2. 発表標題 Demonstration of various synchronized and asynchronized mixed- mode oscillations from a two coupled driven Bonhoeffer-van der Pol Oscillator
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Application (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroaki Takahashi, Hiroyuki Asahara, Takuji Kousaka, and Naohiko Inaba
2. 発表標題 Emergence of the Devil's staircase in the forced BVP oscillator with a diode
3. 学会等名 Chaos (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naohiko Inaba and Tetsuro Endo
2. 発表標題 Mixed-Mode Oscillations and Mixed- Mode Oscillation-Incrementing Bifurcations in an Extended BVP Oscillator
3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池上知毅, 関川宗久, スタンケヴィチ・ナタリア, 稲葉直彦, 遠藤哲郎
2. 発表標題 2 重巻きネイマルク・サッカー分岐と2 つの2 トーラスの共存 part 3
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋宏彰, 麻原寛之, 高坂拓司, 稲葉直彦
2. 発表標題 ダイオードを含む強制BVP 発振器にみられる悪魔の階段について
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲葉直彦, 高坂拓司, 遠藤哲郎
2. 発表標題 入れ子のMMOs
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲葉直彦, 高坂拓司, 遠藤哲郎
2. 発表標題 入れ子のMMOs Part II
3. 学会等名 電子情報通信学会回路とシステム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsuhiko Ogawa, Naohiko Inaba, Kuniyasu Shimizu, Hidetaka Ito, Hiroomi Hikawa, and Tetsuro Endo
2. 発表標題 Synchronizaton of mixed-mode oscillations from a two coupled driven Bonhoeffer-van der Pol Oscillator
3. 学会等名 Int. Symp. NOLTA 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小川勝弘, 稲葉直彦, 伊藤秀隆, 肥川宏臣, 清水邦康, 遠藤哲郎
2. 発表標題 強制 BVP発振器の結合系に見られる完全同期とMMO加算現象について
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永田裕太, 稲葉直彦, 関川宗久, 遠藤哲郎
2. 発表標題 微小周期外乱下における 二対の安定および不安定なあひる解の形状の酷似について-その3
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池上知毅, 関川宗久, スタンケヴィチ・ナタリア, 稲葉直彦, 遠藤哲郎
2. 発表標題 2重巻きネイマルク・サッカー分岐と2つの2トーラスの共存 part 3
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuro Endo
2. 発表標題 Classification of quasi-periodic bifurcations of 2- and higher-dimensional tori using Lyapunov bundles and its demonstration via a practical electronic circuit
3. 学会等名 Conference on Nonlinear Systems & Dynamics 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tri Quoc Truong, Tadashi Tsubone, Naohiko Inaba, and Tetsuro Endo
2. 発表標題 Chaos near the Chenciner bubbles from a piecewise-constant system
3. 学会等名 Int. Symposium on Nonlinear Theory and its Application 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kyohei Kamiyama, Motomasa Komuro, Tetsuro Endo, and Kazuyuki Aihara
2. 発表標題 Lyapunov bundle on 0-dimensional section torus and bifurcation of quasi-periodic solution
3. 学会等名 Int. Symposium on Nonlinear Theory and its Application 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 チューン クオック チー, 坪根正, 稲葉直彦
2. 発表標題 ある区分定数系に見られる カオスと Chenciner bubbles
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 チューン クオック チー, 坪根正, 関川宗久, 稲葉直彦, 遠藤哲郎
2. 発表標題 3次元区分定数発振器に見られるArnol'd resonance webとChenciner bubblesについて
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高坂 拓司 (Kousaka Takuji) (80320034)	中京大学・工学部・教授 (33908)	
研究分担者	稲葉 直彦 (Inaba Naohiko) (90213123)	明治大学・研究・知財戦略機構(生田)・研究推進員(客員 研究員) (32682)	