

平成22年 6月 7日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18686011

研究課題名（和文） 部分放電診断に関する数理的研究

研究課題名（英文） Mathematical Study on Partial-Discharge Diagnosis

研究代表者

鈴木 秀幸（SUZUKI HIDEYUKI）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：60334257

研究成果の概要（和文）：部分放電データは長期的には非定常であるため、非定常な時系列に対する非線形時系列解析手法であるリカレンスプロットの応用が有用である。本研究では、部分放電解析・診断への応用のため、部分放電の状態の変化を外力およびパラメータ値の変化と捉え、リカレンスプロットを用いた外力推定手法および変化点検出手法を提案した。また、多様な分野における現象やシステムと部分放電現象との数理的構造の類似性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：For analysis and diagnosis of long-term nonstationary partial-discharge data, recurrence plots are considered to be useful. In this study, regarding state changes in partial-discharge sites as changes of driving forces and parameters, we proposed algorithms for reconstruction of driving forces and detection of change points using recurrence plots. Further, we revealed similarities in mathematical structures of partial-discharge phenomena and other phenomena and systems in various research fields.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2007年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野： 数理工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎 工学基礎

キーワード： 部分放電、カオス、フラクタル、高電圧工学、不連続写像、非線形時系列解析、リカレンスプロット、ハイブリッドシステム

## 1. 研究開始当初の背景

高電圧システムなどの絶縁体中に空隙が

あると、その空隙中で局所的に絶縁破壊（放電）が生じることがある。このような局所的な放電を部分放電という。部分放電は、高電

圧システムにエネルギーの損失をもたらしたり、空隙を拡大させることによって絶縁を徐々に劣化させたりするなど、好ましくない現象であるため、その解析・診断は、高電圧システムの運用において実用上重要である。部分放電の診断とは、各放電の起きる位相角や放電の大きさなどの計測可能な量から、部分放電の起きている箇所に関する局所的な情報を推測し、部分放電の種類を同定することである。しかし、実際の部分放電現象から測定されるデータのふるまいは非常に複雑であり、そこから部分放電が起きている箇所に関する局所的な情報を得ることは容易ではない。

研究代表者は、この複雑なふるまいについて、部分放電の数理モデルを用いて研究を進めてきた。部分放電のもっとも基本的なモデルは 50 年以上も前に提案された、コンデンサーモデルと呼ばれるモデルである。研究代表者は、部分放電の診断に関して数理的な研究を行うためには、その基盤となる部分放電モデルを数理的に理解することが重要であるという考えのもと、コンデンサーモデルの数理的性質を調べたところ、そのふるまいが二重回転写像という単純な力学系に帰着できること、そして、この写像が非常に複雑なふるまいを示すことを初めて発見した。このもっとも基本的なモデルでさえ、このような数理的な性質が調べられてこなかったことから、部分放電の数理的な解析はまったく未開拓の分野であることがわかる。そこで、部分放電のダイナミクスに関する数理的理解を基盤に、部分放電診断に関する数理的研究を進めることが重要であるという着想に至った。

## 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究は、実際に測定される部分放電データの複雑なふるまいを数理的な立場から理解し、その数理的理解を基盤として既存の解析・診断手法を数理的に解析し、さらに新しい診断手法を構築することを目的とする。また、多様な分野において部分放電と関連する数理的構造を持つ現象を調べ、普遍的な現象を探究することも目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、部分放電の複雑な挙動が、決定論的な数理モデルの非線形ダイナミクスによって説明されるという結果を基盤に、非線形時系列解析手法を応用することにより研究を行う。部分放電の解析・診断への応用を考える際には、既存の非線形時系列解析手法は不十分であるため、新しい手法を開発

する必要がある。方法の詳細は研究成果(1)および(2)を参照のこと。

(2) 数理工学の立場から本研究を進めるため、部分放電現象と関連する数理的構造を持つ現象を調査し、普遍的な現象を探究する。方法の詳細は研究成果(3)および(4)を参照のこと。

## 4. 研究成果

### (1) リカレンスプロットによる外力推定

部分放電データは長期的には非定常であるため、非定常な時系列に対する非線形時系列解析手法であるリカレンスプロットが有用である。本研究では、部分放電解析・診断への応用のため、部分放電の状態の変化を外力の変化と捉え、リカレンスプロットを用いた外力推定手法を提案した。

外力の働いている力学系から観測された時系列のリカレンスプロットは、外力のリカレンスプロットの近似となることが知られている。特に Casdagli (1997)は、外力の変化が遅いときに、この性質を利用して、観測時系列のリカレンスプロットを外力のリカレンスプロットとみなして、外力を再構成できることを指摘した。しかしながら、ノイズの存在する状況で、外力を再構成する具体的な方法は与えられていなかった。

本研究では、リカレンスプロットの再構成の問題が、リカレンスプロットの点を可能な限り連結するように並べ替えることと同値であることに着目して、連結の度合いを目的関数として、組合せ最適化問題として定式化することにより、具体的に外力を再構成する手法を提案した。また、埋め込み次元が1であるときに、ある条件の下で連結性と再構成が同値であることを示し、連結になるような並べ替えが必ず可能であり、再構成が保証されることを証明した(図1)。

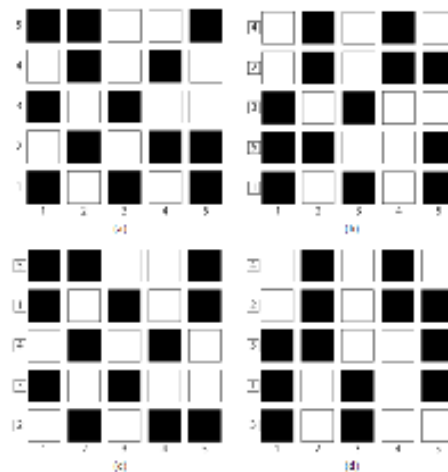


図1：連結性と外力再構成の例

しかし、実際にこの再構成手法をそのまま外力推定に応用することはできない。なぜなら、観測時系列のリカレンスプロットは、外力のリカレンスプロットの近似に過ぎず、実際には多くの点が欠けているからである。そこで、本研究では、外力がそれほど速く変化しないことを仮定の下で外力推定を行う方法として、二つの手法を提案した。一つは、目的関数に連結の度合いだけでなく、外力の変化の速さの項を追加する方法である。もう一つは、リカレンスプロットの対角線の周囲に点を追加する方法である。

実際に、これらの手法を用いて外力の推定を行い、外力の概形をほぼ再構成できることを数値的に示した。また、この手法にはいくつかのパラメータがあるが、解析結果はパラメータの選択に大きく依存しないことを示した。しかし、最適なパラメータを決定する手法は今後の課題である。この手法は一般の時系列に応用が可能なものであり、広い応用が期待される。

## (2) リカレンスプロットによる変化点検出

前述のように、部分放電データは長期的には非定常であるため、非定常な時系列に対する非線形時系列解析手法であるリカレンスプロットが有用である。本研究では、部分放電解析・診断への応用のため、部分放電の状態の変化をパラメータ値の不連続の変化と捉え、リカレンスプロットを用いた変化点検出手法を提案した。

本研究は、力学系のパラメータの変化を、力学系から観測された時系列から検出することを目的とする。そのため、時系列からリカレンスプロットを構築し、このリカレンスプロットをネットワークとして捉える。すなわち、時系列の各時刻を頂点とし、リカレンスプロットに打たれた点に対応する頂点間に辺を持つネットワークを考える。こうすることにより、変化点検出の問題は、グラフ分割の問題として定式化される。

しかし、このままでは時系列の細かい変動を変化点として検出してしまい、パラメータの変化を正しく検出することはできない。そのため、外力推定の場合と同様に、隣接する時刻間は同じパラメータにあることが多いという仮定を置く。この仮定はリカレンスプロットにおいては、対角線の周辺に点を追加することに対応する。このように定式化した上で、グラフ分割の手法であるスペクトラルクラスタリングを適用することにより、変化点検出が可能となる。

実際に、この手法を用いて力学系の変化点検出を行った結果、多少のノイズの下でも、正しくパラメータ変化を検出できることを示した(図2)。この手法は、一般の時系列に応用が可能なものであり、広い応用が期待

される。現在、MEG データ解析に応用する研究を進めている。

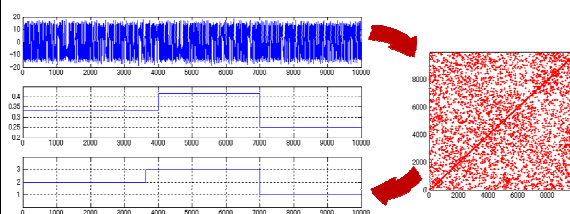


図2：リカレンスプロットによる変化点検出

## (3) 制御における二重回転写像

本研究は、数理工学を基盤としており、同じような数理的構造を持つ数理モデルを広く探究することも目的としている。特に、部分放電のコンデンサーモデルが二重回転写像に帰着できることから、二重回転写像の現れるシステムを考えることは重要である。

本研究では、ハイブリッド制御の分野において、ある単純なオン・オフ制御系において、サンプル値制御を考えたときのシステムの振る舞いが二重回転写像に帰着できることを示した。

例として、一定の流量で水が流れ出て行くタンクを考える(図3)。このタンクには一定の流量で水を流し込むことが可能であり、バルブの開閉によって制御できるものとする。このバルブを開くと一定の速さで水位が上昇し、バルブを閉じると一定の速さで水位が下降するものとする。この水位をほぼ一定の値に保つため、バルブを制御することを考える。目標の水位の上下に不感帯を設け、水位が不感帯より高くなればバルブを閉じ、水位が不感帯より低くなればバルブを開く。このとき、水位は周期的に変化する。ここで、サンプル値制御を考える。すなわち、一定の時間間隔で水位を測定し、それに基づいてバルブを制御することを考える。このとき、水位の変化は周期的ではない。水位の変化は二重回転写像に帰着することができる。その結果、水位はフラクタル的なアトラクタの上を動くほか、バルブが連続して開いている平均時間を不感帯の関数として考えると悪魔の階段状になるなど、不連続性に起因する非線形ダイナミクスを有している。

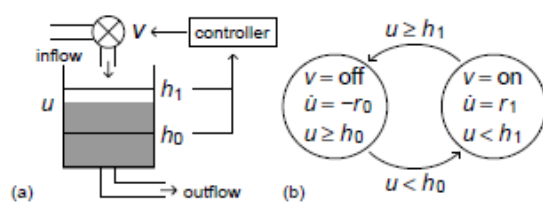


図3：タンク水位の制御モデル

ハイブリッド制御系においてカオス的な挙動が見られることは知られているが、本研究で調べたシステムは厳密にはカオス的ではないにもかかわらず不連続性に起因する非線形ダイナミクスを有しているという点で新しいものである。今後、より広いハイブリッド制御系の非線形ダイナミクスを調査する予定である。

#### (4) 不連続性を持つ数理モデル

前述のように、本研究は、数理工学を基盤としており、同じような数理的構造を持つ数理モデルを広く探究することも目的としている。部分放電のコンデンサーモデルが二重回転写像に帰着できるが、これは区間力学系としては Interval Translation Mappings (ITM) というクラスに属し、さらに一般化すれば区分等長変換 (Piecewise Isometries) というクラスに属している。

制御においては前述のように二重回転写像の現れるシステムを考えたほか、神経細胞のモデルである南雲・佐藤モデルも現れることを示した。また、タンクの数を増やす一般化を行うことにより、区分等長変換が現れることも示した。このシステムは、経済物理分野で提案されているカオス的な市場モデルにおいて離散時間ダイナミクスを考えると対応している。さらに、信号処理分野における  $\Sigma \Delta$  変調は、画像処理分野におけるハーフトーン処理アルゴリズムの一つである誤差拡散法と基本的には同じものであるが、いずれも回転写像によって理解することができる。これは、機械学習分野において近年提案された herding system の 1 次元の場合と対応している。これらのシステムでヒステリシスを考えることは二重回転写像を生み出すほか、2 次元以上の herding system は、タンクの数を増やす一般化と同様に、区分等長変換が現れる。

二重回転写像をはじめとして、これらの区分等長変換は、フラクタル的なアトラクタを持つ。これらのシステムにおいて、誤差の拡大は純粹に不連続性によってのみしか起きないため、不連続性に基づく複雑さを理解するためには最適なシステムと考えることができる。よって、今後これらの区分等長変換のダイナミクスに関して、より詳細な研究を続ける予定である。

#### 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 2 件)

- ① Masaaki Tanio, Yoshito Hirata, Hideyuki Suzuki, “Reconstruction of

driving forces through recurrence plots”, Physics Letters A 373, 2009, 2031–2040. (査読有)

- ② Hideyuki Suzuki, Kazuyuki Aihara, “Universality of mathematical modeling: a comment on Surprising dynamics from a simple model”, Mathematics Magazine 81, 2008, 291–294. (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Koji Iwayama, Kohske Takahashi, Katsumi Watanabe, Yoshito Hirata, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki, “Synchronized brain activity changes related to perceptual alternations”, International Symposium on Artificial Life and Robotics, Oita, Japan, February 6, 2010.
- ② 岩山幸治, 高橋康介, 渡邊克巳, 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸, 「知覚交代に伴う脳活動の変化」, 脳と心のメカニズム冬のワークショップ, 北海道, 2010 年 1 月 12 日.
- ③ 岩山幸治, 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸, 「リカレンスプロットを用いた変化点検出手法の提案」, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 鹿児島, 2009 年 11 月 11 日.
- ④ 岩山幸治, 高橋康介, 渡邊克巳, 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸, “Detection of brain activity changes related to perceptual alternations”, 脳と心のメカニズム夏のワークショップ, 北海道, 2009 年 8 月 9 日.
- ⑤ 鈴木秀幸, 「部分放電現象と不連続写像」, 工学における非線形性, 福岡, 2006 年 4 月 3 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 秀幸 (SUZUKI HIDEYUKI)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号：60334257