

論文の内容の要旨

論文題目 Deterministic Analysis on Electrical Systems with Thresholds
(和訳 閾値を持つ電気的システムの決定論的解析)

氏 名 鈴木 秀 幸

本論文の目的は、事象系列の決定論的側面を解析することである。

従来、事象系列の研究においては、事象系列を確率過程のひとつ（点過程）とみなして系列の確率的な側面に注目することが多かった。しかしながら、たとえば基本的に決定論的であるような物理現象から生起する事象の系列は、決定論的な力学系から生成されているとみなしたほうが系列の理解につながると考えられる。特にカオス的な力学系から生成された事象系列は、一見確率的なものとの区別することができないが、その本質的な理解のためには、決定論的な側面に注目する必要がある。

そこで本論文では、従来あまり注目されることのなかった、事象系列の決定論的側面について考える。

実際には、決定論的側面より確率的側面のほうが重要であるような事象系列も数多くあり、また多くの系列においてはどちらも重要であろう。決定論的側面や確率的側面が系列の理解に重要かどうかは、系列を生み出す源の性質に依存しており、決定論的側面と確率的側面は相補的なものであると考えられる。

連続時間の力学系から決定論的に事象が生起するということは、状態空間の中に事象の生起を引き起こす状態の集合があるということである。多くの場合には、この集合は状態空間の中のポアンカレ切断面を定めているだろう。たとえば、なんらかの物理現象においては、ある物理量がある閾値を越えたときに事象が生起することが多い。この場合にも、その物理量が閾値に等しいというポアンカレ切断面を定めることになる。

本論文が扱うのは、このように、あるポアンカレ切断面の定められた力学系で、状態がその断面を横切る瞬間に事象を生起するようなものである。このような力学系において、生成される事象系列と力学系との関係を調べることができれば、事象系列の理解につながる。この関係を調べる一般的な方法として、スパイク間隔列による力学系の再構成（埋め込み）という手法を用いた。

本論文では、特に神経スパイク列と部分放電時刻の列を対象として調べた。どちらも閾値を持つ電氣的システムから生成される事象系列である。

神経スパイク列の解析は、神経系における情報コーディングの問題と密接な関係を持っている。神経スパイク列の解析によって、なんらかの情報を取り出すことができれば、それは神経系においてスパイク列に表現されている情報の復号に対応するからである。

ある力学系から観測された時系列が神経細胞に刺激として与えられているとき、その神経細胞のスパイク列から元の力学系の構造を知ることを考える。神経細胞が integrate-and-fire モデルである場合にはスパイク間隔列によって力学系を再構成できることが保証されている。本論文では、leaky integrator を用い、leak が再構成に与える影響を調べた。

また、ユークリッド距離とは異なる距離を適用して、力学系における特徴量の一つである相関次元を計算する方法を提案した。

さらに、以上の結果をふまえ、コオロギの気流感覚細胞を用いて実験を行った。実験では、ある力学系から観測された時系列を気流の形に変換して感覚細胞の刺激として与え、感覚細胞の出すスパイク列を観測した。得られたスパイクの間隔列から力学系の再構成を行ない、スパイク列に決定論的性質が保存されていることを示した。

部分放電現象は高電圧システムにおける絶縁の劣化などに関連しており、その現象の解析は絶縁の劣化診断などにおいて非常に重要である。放電時刻の列や、各放電の大きさなどを測定することが可能で、従来の解析においては、確率的側面に注目し、各種統計量を用いて解析が行なわれている。

部分放電現象は物理現象であり、ある程度確率的なふるまいも示すものの、基本的には等価回路モデルと呼ばれる決定論的なモデルで説明することができる。

従来の研究においては、等価回路に基づく様々なモデルが提案されているが、基本となる等価回路モデルの決定論的性質に関しては研究がなされず、もっぱらその確率的な性質の研究が行なわれている。もちろん、それは確率的な性質が応用において重要であるからなのだが、もっとも基本となる決定論的モデルの性質を調べることは、そこから発展したモデルを理解し、特徴付けるためにも不可欠であると考えられる。そこで、本論文では等価回路モデルの理論的な研究を行った。等価回路モデルは単純であるがゆえに、より複雑なモデルでは無理なことも解析的に調べることができる。

その結果、等価回路モデルは、ある円周上の傾き 1 の不連続な区分線形写像に帰着できることを示した。また、単位時間あたりの平均放電回数を印加電圧の関数とみたとき、それは悪魔の階段状の性質を示すことを明らかにした。

これは、部分放電の分野においては、いままで知られていなかった新しい結果である。力学系の

分野から見ると傾き 1 の写像というのは非常に特殊である。しかしながら、これは実在する物理現象のモデルであり、そこから新しい種類の悪魔の階段などの現象が見つかったことは、非常に新しく興味深い結果である。

以上のように、本論文では、神経細胞のふるまいと部分放電現象から生まれる二種類の事象系列を通して、どちらにおいても決定論的観点が、確率的な観点からだけではわからない、事象系列の新しい理解を提供することを示した。