

複雑系数理モデル学で“読み解く”電力システム

東京大学 生産技術研究所 教授 合原 一幸

脳、遺伝子ネットワーク、社会における感染症の流行、通信ネットワーク、交通網、経済システムなど、現在の科学技術の最重要課題の多くは、広義の複雑系として理解することができる⁽¹⁾。

複雑系の基本構造を図1に示す。一般に複雑系は、多数の多様な構成要素から成り(マイクロレベル)、これらの構成要素が複雑なネットワーク構造を介して相互作用することによって(メゾレベル)、全体的な振る舞いが創発する(マクロレベル)。さらに、多くの複雑系では、このように創発した全体的な振る舞いが、各構成要素や相互作用へ階層的フィードバックによって影響を与える。このマクロレベルからマイクロレベル、メゾレベルへのリカレントな影響が、複雑系の動的な挙動を生み出す元となる。

複雑系の典型例は、我々の脳である⁽²⁾。ヒト脳は、約1,000億個の神経細胞(ニューロン)が主な構成要素である。これら多数の神経細胞がニューラルネットワークを構成して相互作用し、その結果として我々の意識が創発する。そして、この意識のあり方、さらにはそれに基づく注意機構などによって、各神経細胞やそれらの間の相互作用が影響を受け、この繰り返しで我々の思考が発展して、しばしば創造性をも生み出すことになる。

筆者らは、様々な複雑系を数学的に解析し応用するための科学技術の方法論である「複雑系数理モデル学」を、科学技術振興機構・ERATO 合原複雑系数理モデルプロジェクトおよび内閣府/日本学術振興会・最先端研究開発

支援プログラム (FIRST)「複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用」プロジェクトを通じて構築してきた^{(1),(3)}。複雑系数理モデル学を支える理論的プラットフォームを図2に示す。この理論的プラットフォームは3つの柱、すなわち(1)複雑系のダイナミクスを解析して制御する複雑系制御理論、(2)複雑系のネットワーク構造を解析して最適化する複雑ネットワーク理論、そして、(3)複雑系から観測されるビッグデータを解析して予測する非線形データ解析理論から構成される。

本稿は、複雑系としての電力システムをこの複雑系数理モデル学の観点から解析する可能性を、電力システムの周波数変動という具体例を題材にして論じたものである。

背景

複雑系は一般に、動的に変動するシステムである。このことを、経済システムを例にして見てみよう。

経済の基本的概念である需要と供給の関係を図3(a)に示す。需要特性と供給特性の交点が均衡点である。この均衡点の均衡価格より価格が上がれば、供給は増えて需要は減るので価格は下がり、逆に均衡価格より価格が下がれば、供給は減り需要は増えるので価格は上がる、すなわち均衡価格を保つように経済システムは機能する、と初歩的には説明される。

ところが、実際の経済システムでは、この均衡価格が安定に保たれることはあまりなく、一般に価格は不規則

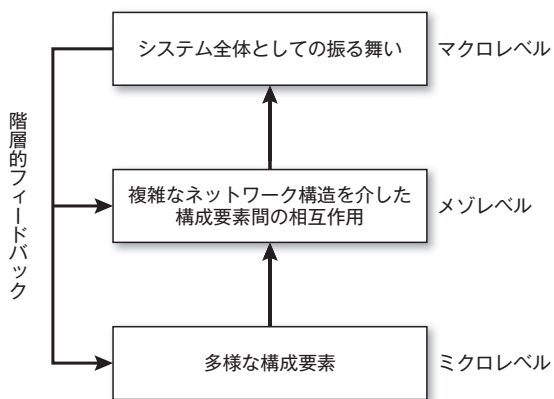


図1 複雑系の基本構造

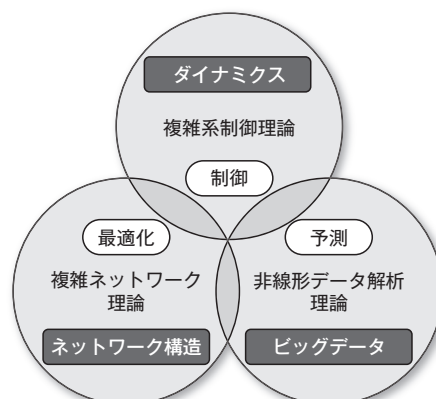


図2 複雑系数理モデル学の理論的プラットフォーム

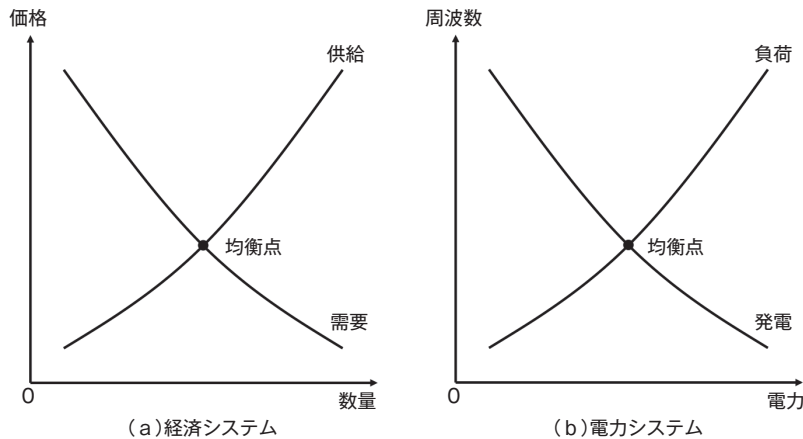


図3 (a) 経済システムにおける需要と供給の関係と (b) 電力システムにおける発電と負荷の関係

に変動する⁽⁴⁾。

ここでもう1つの重要な論点は、この変動の特性である。通常不規則な変動やゆらぎを解析する場合、正規(ガウス)分布を仮定することが多い。学力の偏差値の元にもなっている最も標準的な確率分布である。経済システムを対象にした金融工学においても、従来はこの正規分布を仮定することが普通だった。

しかしながら、実際の経済システムの変動は、この正規分布とは大きく異なり、正規分布ではほとんど生じ得ないような大きな変動が高い確率で見られる^{(4)、(5)}。この事実最初に気がついたのは、フラクタルの発見者でもあるB. B. マンデルブロであった⁽⁵⁾。

この例のように多くの複雑系は、非正規分布のゆらぎを伴う動的なシステムである。そして、電力システムも経済システムとよく似た動的性質を有している。このことを次に見てみよう。

ゆらぐ電力システム

電力システムは「同時同量」で動作すると言われるので、定常的な安定性を連想する。その基本特性を図3(b)に示す。発電量特性と負荷特性の交点の均衡点の標準周波数が、東日本では50Hz、西日本では60Hzということになる。そして、図3(b)の静特性⁽⁶⁾に従えば、電力システムの周波数がこれらの標準周波数より高くなると、負荷の消費電力は増えて発電量は減るので周波数は下がり、逆に周波数が標準周波数より低くなると、消費電力は減って発電量は増加するため周波数は上がる、すなわち標準周波数は安定に保たれるように思われる。

しかしながら実際には、経済システムと同様で、この

標準周波数が定常的に安定化されるわけではない。確かに、電力システムに供給される発電量と送電ロスも含めた負荷の消費電力は常に等しいが、実際の電力システムにおいては負荷が小刻みに変化するため、発電機群への機械的入力エネルギーと発電機群の電気的出力エネルギー(これが電力システムに供給される発電機出力(=消費電力)に対応する)は等しくない。そして、この発電機への入力エネルギーが出力エネルギーより大きければ周波数は上がり、小さければ周波数は下がる^{(6)~(8)}。そ

の結果、経済システムの価格と同様に、電力システムの周波数は標準周波数の回りでゆらぐことになる。

電力システムの周波数変動特性

そこで、最近蓄積されつつある電力システムの周波数変動に関するビッグデータを活用して、北アメリカ、ドイツ、フランス、イギリス、フィンランド、マヨルカ島(スペイン)、および日本の電力システムで実際に観測された周波数時間変動の統計的特性を解析した⁽⁹⁾。

ドイツで計測された周波数変動の時系列データの例を図4に示す⁽¹⁰⁾。周波数は、標準周波数である50Hzに近い値を安定に保っているものの、決して一定ではなく、この例では電力取引間隔に対応する比較的大きな変動も顕著に見られることが分かる。

このように電力システムは、需要の変動や電力取引などの影響を受けて、その周波数が標準周波数の回りで変動し続ける動的なシステムなのである。さらに、風力発電と太陽光発電は各々、長期予測不能な風況変化や雲の動きなどに影響されて発電量自体も不規則に変動するため、近年の風力発電や太陽光発電の増加に伴い、周波数変動特性の理解がより一層大切な研究課題になってきているのである。

図5に標準周波数が50Hzの電力システムの周波数変動確率分布の模式図を示す。実際の様々な電力システムから計測された周波数変動のビッグデータ解析で得られた確率分布は、通常想定される正規分布とは大きく異なり、正規分布では生じ得ないような大きな変動(ヘビータール)と分布の非対称性を有する非正規分布であった^{(9)、(10)}。さらに、マヨルカ島のような小さな電力シス

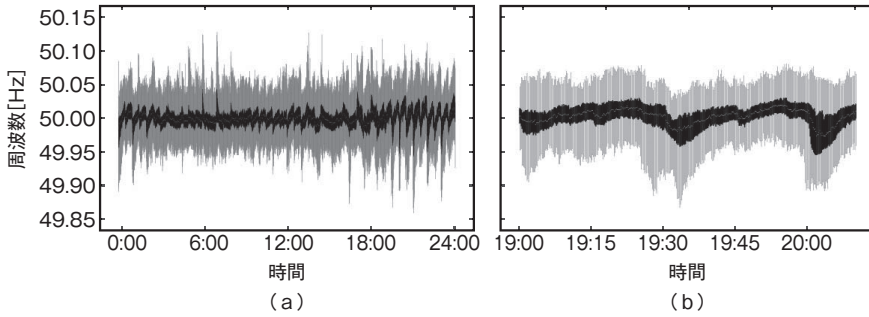


図4 周波数変動の時系列データの例^{(9), (10)}
 黒色は25～75%の変動幅、灰色は最小値～最大値の変動幅を各々表す。また、(b)は(a)の一部を拡大したもの

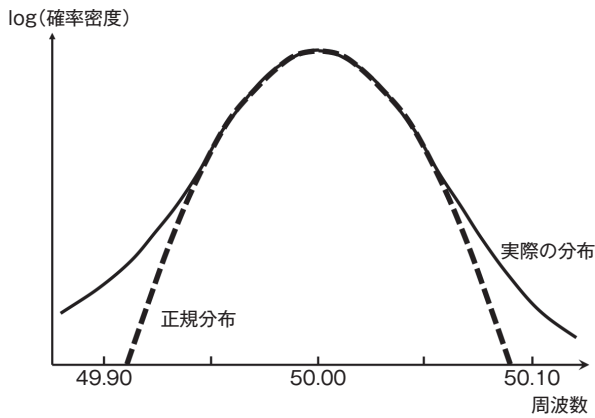


図5 標準周波数が50Hzの電力システムの周波数変動確率分布の模式図

テムはヨーロッパ大陸のような大きな電力システムより大きな周波数変動を、また風力発電量と太陽光発電量の割合の増加はより大きな周波数変動を生み出すことも、この実ビッグデータ解析結果から実証的に明らかとなった^{(9), (10)}。

電力システムの周波数変動特性の数理モデリング

電力システムの周波数変動に関するビッグデータ解析で予想外の非正規分布が得られたので、次にこの分布を表現する数理モデリングを行った⁽⁹⁾。

複雑系としての電力システムは、様々な発電機や負荷などの構成要素から成り、これらが送配電ネットワークを介して相互作用する。その結果として、電力システムのマクロ変数としての周波数が決まり、その周波数の値が各構成要素の動作や相互作用への階層的フィードバックによって影響を与える。

同期発電機のダイナミクスを、いわゆる動揺方程式 (the swing equation)⁽⁷⁾ で表現したうえで、電力システ

ムの周波数に関するマクロレベルの挙動を導出することにより、電力システムの周波数変動は次式で近似的に記述されることが示される⁽⁹⁾。

$$\frac{d}{dt}f = -\gamma f + \varepsilon \xi(t). \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 f は周波数、 γ は実効的減衰定数、 ε はノイズ振幅、 $\xi(t)$ は確率的ノイズを表す。

(1)式は、確率的ノイズ入力 $\xi(t)$ で駆動される一次系として出力周波数 f が決まることを表している。

ここで入力 $\xi(t)$ が独立な正規(ガウス)分布に従うノイズであれば、周波数 f の分布も正規分布となるため、実際のデータ特性の非正規分布性を説明できない。

そこで、数理モデル化の1つの可能性は、ノイズ自体が非正規分布に従うとするものである。実際風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーは非正規分布の特性を持つことが知られている。特に有望な分布は、実データが示したヘビーテールと非対称性の両方の特性を持つレビー安定分布である。このレビー安定分布は、3つのパラメータ、すなわちヘビーテールを決める安定性パラメータ α 、非対称性を決める歪度パラメータ β 、および正規分布の標準偏差に対応するゆらぎの大きさを決めるスケールパラメータ σ を持っている⁽⁹⁾。

(1)式の確率的ノイズ $\xi(t)$ がレビー安定分布に従えば、周波数の変動の確率分布もレビー安定分布になり、かつ α と β の値は不変で、 σ のみ下記のように変化することになる⁽⁹⁾。

$$\sigma_{\text{OUT}} = \frac{\sigma_{\text{in}}}{(\gamma \alpha)^{1/\alpha}}. \quad (2)$$

ここで、 σ_{in} と σ_{OUT} は、各々、確率的ノイズ ξ と周波数 f の確率分布のスケールパラメータである。

(2)式より、入力 ξ の σ である σ_{in} が大きくなる、すなわちゆらぎが大きくなる(例えば、再生可能エネルギーの割合が増える)と周波数ゆらぎも大きくなること、そして、それを補償するためには、例えば γ を大きくすればよいことなどが分かる。

実データの特性を説明するもう1つの可能性は、(1)式において入力は正規ノイズであるが、パラメータである γ や ε が、時間帯や天気などによる需要や再生可能エ

エネルギー発電量の変化などに依存して長い時間スケール T (ここで、 $T \gg \tau = 1/\gamma$) で変動する、すなわち γ や ε が時間的にゆっくり変動する時変パラメータと考えることである。このことにより、様々な時間スケールのガウス分布の重ね合わせ (superposition) を生じて、非正規分布特性が創発する⁽⁹⁾。複数の正規分布変動が統計的に重ね合わされるため、superstatistics と呼ばれ、様々な複雑系で広く見られる性質である。

今後の課題

本稿では、電力システムが持つ複雑系としての性質を、周波数変動特性を例にして説明した。(2)式が示唆するように、再生可能エネルギーの増加は周波数変動を増大させることになるが、他方で今後我が国においても再生可能エネルギーの割合を増加させることは喫緊の重要課題である。ここで述べたような研究により、周波数変動特性の数理モデル化が進めば、それを用いて再生可能エネルギーを大量に導入することを目指して、その結果生じる周波数変動の増大を抑えるには、どのような制御や連系が必要になるか、再生エネルギーの割合が増えた場合に、我が国の電力システムを安定性や最適性を考慮しながらどのように運用すればよいのか、などの問題がより深く議論できるようになる。

さらに、複雑系数理モデル学の電力システムへの応用として、今後重要になるとと思われるテーマに予測技術がある。需要予測、さらには再生可能エネルギー予測や等価需要 (= 需要 - 変動電源)⁽¹¹⁾ など、電力システムの様々な予測に应用可能な数理的手法が開発されている^{(12)~(16)}。これらの予測手法は、人工知能 (AI)⁽¹⁷⁾ の電力システムへの応用を考えるうえで、1つの中核技術になるものと思われる。

再生可能エネルギーは気象の影響を鋭敏に受けるが、E. ローレンツの気象のカオスの研究は、カオスの源流の1つであり、カオスの持つ「バタフライ効果」(初期値鋭敏依存性)の語源にもなったものである^{(18), (19)}。この意味で再生可能エネルギー予測は、カオスの非線形動力学や短期予測可能性^{(19), (20)}から学ぶ点が多いように思われる。

なお、本稿執筆にあたり、横山明彦東京大学教授、ならびに東京大学生産技術研究所の研究顧問である秋田調電力中央研究所専務理事にご議論いただいた。また、本稿の周波数変動特性の解析は、B. Schäfer 博士、M. Timme 博士 (ドレスデン工科大学)、C. Beck 博士 (ロン

ドン大学クイン・メアリーカレッジ)、D. Witthaut 博士 (ユーリヒ総合研究機構)との共同研究によるものである⁽⁹⁾。

参考文献

- (1) 合原一幸：暮らしを変える驚きの数理工学，ウェッジ，2015
- (2) 合原一幸，神崎亮平編：理工学系からの脳科学入門，東京大学出版社，2008
- (3) K. Aihara, J. Imura, T. Ueta (Eds.) : Analysis and Control of Complex Dynamical Systems : Robust Bifurcation, Dynamic Attractors, and Network Complexity, Springer, Japan, 2015
- (4) 高安秀樹：経済物理学の発見，光文社新書，2004
- (5) ベノワ・B・マンデルブロ，リチャード・L・ハドソン (監訳：高安秀樹)：禁断の市場 フラクタルでみるリスクとリターン，東洋経済新報社，2008
- (6) 関根泰次：電力系統工学，電気書院，1976
- (7) 加藤政一，田岡久雄：電力システム工学の基礎，数理工学社，2011
- (8) 横山明彦，太田宏次 監修：電力系統安定化システム工学，オーム社，2014
- (9) B. Schäfer, C. Beck, K. Aihara, D. Witthaut, M. Timme : Non-Gaussian Power Grid Frequency Fluctuations Characterized by Lévy-stable Laws and Superstatistics, Nature Energy, Vol.3, No.2, pp.119-126, 2018
- (10) プレスリリース：日米欧の電力網の周波数変動を国際協力で解析：再生可能エネルギーや電力取引量の増大に備えるための数理モデルも構築，東京大学生産技術研究所，2018 <http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/2830/>
- (11) 安田陽：日本の知らない風力発電の実力，オーム社，2013
- (12) C. Cheong Took, G. Strbac, K. Aihara, D.P. Mandic : Quaternion-valued Short-term Joint Forecasting of Three-dimensional Wind and Atmospheric Parameters, Renewable Energy, Vol.36, No.6, pp.1754-1760, 2011
- (13) H. Ma, T. Zhou, K. Aihara, L. Chen : Predicting Time Series from Short-term High-Dimensional Data, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol.24, No.12, pp.1430033-1-19, 2014
- (14) Y. Hirata, T. Takeuchi, S. Horai, H. Suzuki, K. Aihara : Parsimonious Description for Predicting High-dimensional Dynamics, Scientific Reports, Vol.5, Article No.15736, pp.1-6, 2015
- (15) R. Liu, P. Chen, K. Aihara, L. Chen : Identifying Early-warning Signals of Critical Transitions with Strong Noise by Dynamical Network Markers, Scientific Reports, Vol.5, Article No.17501, pp.1-13, 2015
- (16) Y. Hirata, K. Aihara : Improving Time Series Prediction of Solar Irradiance after Sunrise : Comparison among Three Methods for Time Series Prediction, Solar Energy, Vol.149, pp.294-301, 2017
- (17) 合原一幸：人工知能はこうして創られる，ウェッジ，2017
- (18) E.N. Lorenz : Deterministic Nonperiodic Flow, Journal of Atmospheric Sciences, Vol.20, pp.130-141, 1963
- (19) 合原一幸：カオス学入門，放送大学教育振興会，2001
- (20) 合原一幸：カオス時系列解析の基礎と応用，産業図書，2000