

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築
のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」
研究課題「再生可能エネルギーの大量導入を考慮
した電力システムの複雑ネットワーク動力学モデル
構築とその最適化理論の創成」

研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者:鈴木秀幸
(東京大学 大学院情報理工学系
研究科／生産技術研究所 准教授)

§ 1 研究実施の概要

(1)実施概要

再生可能エネルギーが大量導入される様々な状況の下で、電力システムの挙動を理解・解析・最適化するためには、電力システムの数理モデルが必要となる。本研究では、電力システムの定性的・定量的モデルの橋渡しが可能な複雑ネットワーク動力学モデルを構築し、その分散協調的ダイナミクスの理論的解明とネットワーク最適化を実現することを目指し、以下の3項目について研究を進めた。

1. 結合振動子系と複雑ネットワーク理論に基づく数理モデル構築と解析

電力工学で用いられる詳細な数理モデルは理論解析に適さない一方で、統計・非線形物理学における数理モデルは実現象からの乖離が大きい。本研究項目では、実現象をより良く理解でき、かつ深い数理解析が可能な定性的数理モデルの構築を目指して研究を進めた。まず、東日本送電網の構造を考慮した電力系統の定性的数理モデルを構築した。この分散協調的ダイナミクスに関して、電力の安定供給のために必要な周波数同期が達成される条件を数理的解析によって求めるなど、ネットワーク構造と安定性との関係を解析した。また、既存研究で用いられていた安定性の条件を見直し、より現実的な条件を考慮することにより、既存の指標では発見できなかった電力系統の潜在的な脆弱性を見出した。さらに、再生可能エネルギーの出力変動を考慮したモデルを構築して、変動に対するロバスト性とネットワーク構造との関係を解析した。

2. ネットワーク最適化理論の応用

電力システムの複雑化や再生可能エネルギーの大量導入による不確実性の増大が進むことにより、電力システムにおいて数理最適化の技術は今後より重要になると考えられる。本研究項目ではネットワーク最適化を中心とした数理最適化の基礎理論をベースとして「最適化に基づく電力システム運用」と「最適化による電力システム解析」の2つの側面から研究に取り組んだ。電力システム運用に関しては、研究項目3の日射量・電力需要の時系列予測を組み合わせて、予測に不確実性が存在する状況下で需給バランスを保つ発電機の起動停止計画問題を整数線形計画問題として定式化し、実データを用いてその挙動を解析した。また、システム解析の研究としては、電力グリッドのサイバー攻撃に対する脆弱性に関してネットワーク最適化理論に基づく新しい解析手法を開発した。

3. 自然エネルギー短期予測理論の構築

本研究項目では、再生可能エネルギー発電量の短期予測手法を開発することを目的として研究を進めた。まず、日射量の多変量時系列データに対して、非負行列分解を適用することで時空間構造を解析した。この解析結果に基づき、大規模な多変量時系列データに対し、実時間で将来の発電量時系列を短期予測する手法を提案した。また、予測値の信頼区間を同時に与える手法を開発した。さらに重心座標を用いた予測手法を高次元ダイナミクスに適用できるように改良した手法を開発した。また、研究項目1で開発したモデル上で、ならし効果を考慮した再生可能エネルギー大量導入時のロバスト性の解析を行った。

以上のように、研究項目1と2を研究項目3を軸に融合することにより、再生可能エネルギーの大量導入を考慮した電力系統の数理モデルの構築・解析と、最適化・予測手法の構築・解析を行った。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. Motoki Nagata, Naoya Fujiwara, Gouhei Tanaka, Hideyuki Suzuki, Eiichi Kohda, Kazuyuki Aihara: Node-wise robustness against fluctuations of power consumption in power grids, *European Physical Journal Special Topics*, Vol. 223, pp. 2549-2559, 2014.

概要:再生可能エネルギー大量導入時に電力グリッドの安定性・頑健性を確保することは重要な課題である。本研究では、非線形物理・統計物理の分野において坂口らによって提案された電力グリッドの数理モデル上で、再生可能エネルギーの出力変動に対する電力グリッドの頑健性と、ネットワーク構造を特徴づける各種指標との関係を明らかにした。

2. Yutaro Yamaguchi, Anna Ogawa, Akiko Takeda, Satoru Iwata: Cyber security analysis of power networks by hypergraph cut algorithms, *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2014)*, pp. 830-835, 2014.

概要:電力グリッドの情報化による高度化が進むと、サイバーセキュリティの問題が同時に重要性を増してくる。本研究では、システムの状態を誤認させることを目的としたサイバー攻撃に関して、攻撃に対する脆弱性の指標を求める問題が、ネットワーク構造の一般化であるハイパーグラフに対する最小カットを求める問題に帰着できることを示した。また、これを用いて既存手法と比べて効率的に厳密解を得る手法を提案した。(大森チーム 武田朗子氏らとの共同研究の成果)

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. Yoshito Hirata, Taiji Yamada, Jun Takahashi, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki: Online multi-step prediction for wind speeds and solar irradiation: evaluation of prediction errors, *Renewable Energy*, Vol. 67, pp. 35-39, 2014.

概要:再生可能エネルギー大量導入時に電力システムを効率的・安定的に運用するためには、再生可能エネルギー発電量の予測が重要である。本研究では、非線形時系列解析分野における既存の汎用オンライン予測手法をベースに、再生可能エネルギーに適した手法として、複数時点での予測値を同時に与え、さらに信頼区間を与えるオンライン予測手法を構築し、風速や日射量に適用してその有効性を示した。

§3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 研究代表者グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
鈴木 秀幸	東京大学大学院 情報理工学系研究科/ 生産技術研究所	准教授	H24.10～
平田 祥人	東京大学 生産技術研究所	特任准教授	H24.10～
田中 剛平	同上	特任准教授	H24.10～H25.3
合原 一幸	同上	教授	H26.4～
岩田 寛	東京大学大学院 情報理工学系研究科	教授	H24.10～
加藤 政一	東京電機大学工学部	教授	H24.10～
増田 直紀	University of Bristol Department of Engineering Mathematics	Senior Lecturer	H24.10～
永野 清仁	公立ほこだて未来大学 システム情報科学部	准教授	H25.4～
藤原 直哉	東京大学空間情報科学 研究センター	助教	H26.4～
西川 功	東京大学 生産技術研究所	特任助教	H25.4～H26.3
王 冰	同上	特任研究員	H26.4～
寶来 俊介	同上	特任研究員	H26.8～
永田 基樹	東京大学大学院 情報理工学系研究科	D1	H26.1～
山口 勇太郎	同上	D2	H26.8～

研究項目

- ・結合振動子系と複雑ネットワーク理論に基づく数理モデル構築と解析
- ・ネットワーク最適化理論の応用
- ・自然エネルギー短期予測理論の構築

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・ CREST 領域内の井村 FS、岩船 FS、日高 FS において連携して調査・研究を行った。
- ・ ドイツの Potsdam Institute for Climate Impact Research で 2013 年 10 月に開催された国際ワークショップ(REPOWGEE: Workshop on Resilient Power Grids and Extreme Events)にチームの主要メンバーが参加して講演したほか、その後もチームのメンバーが参画して日独共同で European Physical Journal Special Topics 誌に特集号 Resilient Power Grids and Extreme Events を企画し、2014 年 10 月に出版された。

§ 4 研究実施内容及び成果

4.1 研究代表者グループ(東京大学)

再生可能エネルギーが大量導入される様々な状況の下で、電力システムの挙動を理解・解析・最適化するためには、電力システムの数理モデルが必要となる。本研究では、電力システムの定性的・定量的モデルの橋渡しが可能な複雑ネットワーク動力学モデルを構築し、その分散協調的ダイナミクスの理論的解明とネットワーク最適化を実現することを目指し、以下の(1)～(3)の3項目について研究を進めた。

(1) 結合振動子系と複雑ネットワーク理論に基づく数理モデル構築と解析

電力工学で用いられる詳細な数理モデルは理論解析に適さない一方で、統計・非線形物理学における数理モデルは実現象からの乖離が大きい。本研究項目では、実現象をより良く理解でき、かつ深い数理解析が可能な定性的数理モデルの構築を目指して研究を進めた。

A. 数理モデル研究の調査・検討

まず、既存の電力系統の数理モデル研究に関する調査を行った。統計・非線形物理学分野における既存の定性的な電力ネットワーク動力学モデルの調査を行い、数理解析が可能な範囲でどこまで現実的な要素を取り入れることができるかを検討した。電力需給の変動や、断線の影響、現実的な電力フローが考慮されていないなど、現実の電力システムのモデルとして不十分な点を洗い出した。また、電気学会が公表している電力系統標準モデルを調査した。それらは区分線形性を有する高次元システムで記述されるため、そのままではシステムダイナミクスの理論的解析が困難であることを確認した。さらに、Mathworks 社の SymPowerSystems を用いて、電力システム内に見られる典型的な部分網(パーツ)を調査した。シミュレーションだけでなく深い理論的解析を行うためには、詳細な動揺方程式を縮約することが必要であることが分かった。

B. 東日本送電網における周波数安定性解析

太陽光・風力などの再生可能エネルギー大量導入は発電量の出力変動による電力システムの不安定化をもたらすため、電力の安定供給の確保は以前にも増して重要な課題となっている。本研究では、ネットワーク構造と電力システムの安定性との関係を調べるため、まず東京電力、東北電力の年次レポートを参照して、それぞれの管轄内の送電網の接続性、すなわち発電所と変電所の接続関係に関する情報を調べた。その結果、47 の発電所、120 の変電所、67 の分岐点から成る、合計 234 ノードの東日本送電網のネットワーク構造を同定した(図 1)。

この東日本送電網において、電力の安定供給の問題を考えるため、周波数同期の解析を行った。統計・非線形物理学分野の多くの先行研究に従い、発電所および変電所の電圧変化を記述するモデルとして、電圧の位相のみを考慮した動揺方程式(位相モデル)を用いた。したがって、全体のモデルは結合位相振動子モデルで与えられる。これは、周波数同期が達成されているとき、発電所と変電所の位相差は一定となり、流れる電力は一定となることと、そのときの振幅は発電所と変電所で同じであるという考え方に基づく。送電線の送電容量を一定と仮定し、周波数同期が達成されるのに必要な最小の結合強度(送電容量)の閾値を数値計算によって求めた。

また、周波数同期の安定性解析および重要な送電線の特定を行った。ある送電線を 1 本取り除いた時に、結合強度の閾値がどれだけ増加するかを調べることにより、その送電線の影響の大きさを測った。前述の結合強度閾値の最小値が大きいほど、同期は起こりにくい。したがって、取り除いたときにこの閾値が大きくなるリンクほど、周波数同期を成立させる上で重要な送電線に対応すると言える。この解析により、東日本送電網を用いたモデル上で重要な送電線を同定した(永田ら, 生産研究, 2013)。

C. 電力安定需給に関する新しい数理的指標の提案

統計・非線形物理学分野の先行研究では、周波数同期の成立条件を用いて電力の安定供給のための指標を提案している。しかし、ノード間の周波数同期は、電力の安定供給を行うための必要条件であるが十分条件ではない。結合強度が周波数同期成立の閾値を超えていても、閾値に近い場合、ノード間の位相差は非常に大きくなる。発電所・変電所における電位の位相差が大きいと、電圧降下が発生したときに周波数同期が達成されないことがよく知られている。したがって、現実的には、周波数同期だけでなく、ノード間位相差が小さくなる条件も考慮した電力安定需給の指標を作る必要があると考えられる。そこで、これらの両方の条件を加味した安定性の指標を提案し、東日本送電網および単純な位相モデルを用いて安定性解析を行った。その結果、先行研究の周波数同期条件に基づいて同定された重要な送電線と、提案した安定供給条件に基づいて同定された重要な送電線は、必ずしも一致しないことが分かった。したがって、これまでの指標に基づく数理モデル解析では発見できなかった電力システムの潜在的な脆弱性が明らかとなった(Nagata et al., Proc. NOLTA, 2013)。

D. 電力需給変動を考慮した数理モデルの構築

以上の研究は、発電所と変電所における電圧変化の記述に同じモデルを用いて、電力の安定供給条件や送電線故障に対する耐性解析を行ってきた。しかし、実際には発電所と変電所(負荷)では、挙動が異なる。そこで、Sakaguchiら(JPSJ, 2012)によって提案された、発電所と変電所のダイナミクスを別々に扱う数理モデルを用いて、より現実的な数理モデルの構築を行った。このモデルでは、電圧の位相だけでなく振幅を考慮し、系統のアドミタンスを取り入れている。また、負荷の有効電力と無効電力を区別できるため、それぞれに対する制御の効果を調べることが可能である。

再生可能エネルギーが導入されたときに懸念されているのが、その出力変動や電力需要変動の影響である。そこで、負荷における有効電力の変動に対する系統のロバスト性を、前述の数理モデルを用いて解析した。太陽光発電等による需給差の変動を想定して、注目する一つの負荷ノードにおいて、有効電力が上限値まで時間とともに増加(変動)すると仮定した。有効電力の上限値がある閾値を超えると系統の安定性が失われるが、その閾値を電力系統のロバスト性に関する負荷ノードの指標として用いた。東日本送電網(図1)上のモデルで、この指標を計算したところ、負荷ノードにおける電力変動の影響は不均一であることが分かった。複雑ネットワーク等の分野で提案されている各種のネットワークポロジータンク量との関係を調べたところ、最も相関が高かったのは発電所からのネットワーク上での距離であった(Nagata et al., Eur. Phys. J. Spec. Top., 2014; Nagata et al., NetSci, 2014; Nagata et al., SMSEC, 2014)。また、このモデルをベースとして、研究項目3において再生可能エネルギーの出力変動や電力需要の変動による影響の解析を行った。

E. ネットワーク変動に対する基礎理論の構築

将来的に電力系統において種々の変動が生じた場合に適用可能なネットワーク解析の基礎理論の構築を進めた。ネットワーク構造が周期的に時間変化するテンポラルネットワークにおける系の動力学を明らかにするため、フロケ理論を用いた新たな解析の枠組を提案した。日照時間や電力需要など電力網の安定性に大きな影響を及ぼす因子の多くは周期的に時間変動するため、この枠組をスマートグリッドの解析に役立てることが出来ると考えられる。この成果は現在学術論文誌に投稿中である。今後はこの枠組みの拡張を目指すとともに、研究項目3における自然エネルギーの時系列解析との融合研究など、現実の電力網への応用が課題であると考えている。

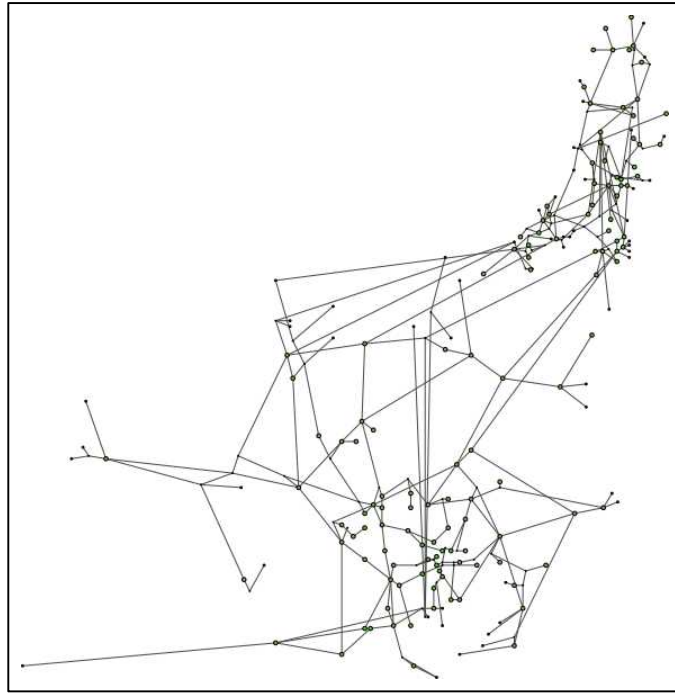


図1. 東日本送電網のネットワーク構造

(2) ネットワーク最適化理論の応用

電力システムの複雑化や再生可能エネルギーの大量導入による不確実性の増大が進むことにより、電力システムにおいて数理最適化の技術は今後より重要になると考えられる。本研究項目では、ネットワーク最適化を中心とした数理最適化の基礎理論をベースとして、「最適化に基づく電力システム運用」と「最適化による電力システム解析」の2つの側面から研究に取り組んだ。

A. 電力システムの最適化モデルの検討

電力システムに対する最適化アルゴリズム設計と最適化理論構築のために、「モデルの実用性・妥当性」と「計算複雑度などに基づいた理論的な扱いやすさ」の両方を兼ね備えるような電力システムの数理モデルについて検討を行った。高度な最適化技術として、ネットワーク上の「流れ」の最適化を扱うネットワークフロー最適化やその一般化に対応する離散凸最適化理論、加えて行列の疎性を利用した最適化などがある。これらの最適化技術と、再生可能エネルギーの有する「不確実性」をモデル化するための手段である確率計画法の技術やオンライン最適化の枠組みを組み合わせた最適化モデルについて調査・検討を行った。その中で、電力システムおよび最適化の両分野の研究者の研究交流の場として、2013年3月28日に「電力システムと最適化」ワークショップを開催した。

結果として、数理最適化技術を電力システムの領域で役立てる方向性が大まかに二通りあると考え、その後の研究において参考とした。一つ目は、近年発達が著しい数理最適化ソフトウェアの活用である。線形計画(LP)と整数計画(IP)を一般化した混合整数計画問題(MIP)は非常に記述力の高い最適化問題であり、現在はソフトウェアによりそれなりに大きい規模の問題は実時間で解くことが可能となっている。ソフトウェアをうまく活用することは問題解決のための重要な手段となる。そしてもう一つの方向性は、高度な離散最適化技術に基づいたアルゴリズム設計である。

複雑化する電力系統ネットワークを解析する技術として、単なるネットワーク最適化技術のみでは十分ではない。ネットワークを一般化したハイパーグラフや、異なる一般化である離散凸最適化の技術を利用することで、より精密なネットワーク解析が可能となることを見込まれる。

B. サイバーセキュリティに関する効率的アルゴリズム

電力グリッドの情報化による高度化が進むと、サイバーセキュリティの問題が同時に重要性を増してくる。そのため、サイバーセキュリティの観点から電力ネットワークの脆弱性を評価することは重要な課題となる。外部からの虚偽情報によりシステムの状態を誤認させることを目的としたサイバー攻撃に対する電力ネットワークの脆弱性評価に関して、CREST 大森チーム 武田朗子氏（東京大学）らとの共同研究を行った。本研究では、脆弱性の指標を求める問題が、ネットワーク構造の一般化であるハイパーグラフに対する最小カットを求める問題に帰着できることを示した。また、これを用いることにより、既存手法と比べて効率的に厳密解を得られることを示した。この研究成果については国際会議において報告を行った（Yamaguchi et al., SmartGridComm, 2014）。

C. 蓄電池の最適充電ダイナミクス

近年、電気自動車やプラグインハイブリッド自動車などが増えて電力グリッドに接続されるようになってきたほか、再生可能エネルギーの出力変動を抑える一つ的手段としても電力グリッドにおける蓄電池の役割は重要になりつつある。蓄電池の導入は電力システム運用の柔軟性をもたす一方で、大量の蓄電池が協調せずに動作すれば電力グリッドの不安定性は増大してしまう。そのため、グリッド内の蓄電池を協調して動作させることが重要である。本研究では、電力グリッドのシステム上の制約や、蓄電池の故障や自動車の移動などによる制約の下で、蓄電池を最適に集中制御するアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは、機械学習の分野でハーディングと呼ばれるアルゴリズムの拡張であり、蓄電池の充電の目標値に収束するダイナミクスを持つことを示し、学術論文誌に発表した（Suzuki, Eur. Phys. J. Spec. Top., 2014）。

D. 時系列予測に基づく発電計画の最適化

研究項目3で開発された時系列予測手法（Hirata et al., Renew. Energy, 2014）を用いて、電力需要に関して予測を行った（Hirata et al., World Renewable Energy Congress, 2014）。その結果、電力需要に関しても同様の時系列予測によって、信頼区間付きの予測が可能であることが分かったので、電力需要の時系列予測と、日射量の時系列予測を組み合わせ、予測にある程度の不確実性が存在する状況下でも、需要と供給がバランスするような火力発電の起動停止計画問題を整数線形計画問題として定式化し、実際に起動停止計画問題を解いた。その結果、97%程度の確率で、需給バランスを保つことができた（図2）。この起動停止計画問題は、整数線形計画問題であるのでソルバーを用いて厳密に解を求めることができた。さらにソルバーを活用して求解に必要な時間を短縮することが今後の課題であると考えている。

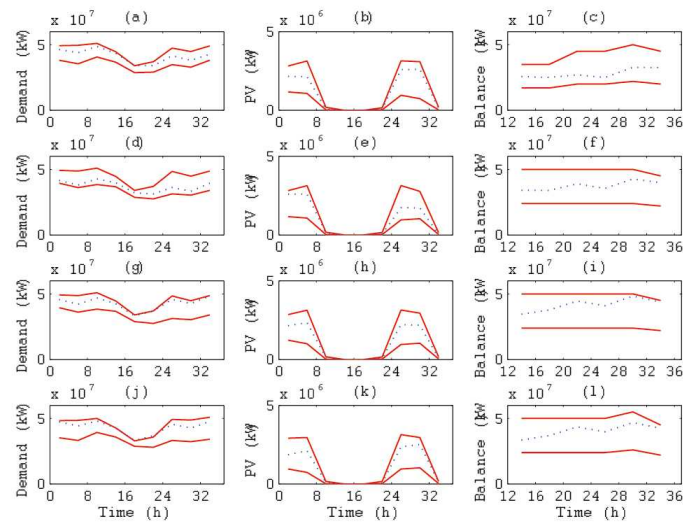


図2. 東京電力管内の電力需要の予測(左の列)、太陽光発電量の予測(中央の列)、需給バランス(右の列)。電力需要と太陽光発電量の予測では、赤線が信頼区間、黒の点線が実測値を表す。需給バランスでは、黒の点線が実際の需要、赤線が供給の幅を表す。同じ行のグラフがそれぞれ同じ日の予測と需給のバランスに対応する。

(3) 自然エネルギー短期予測理論の構築

再生可能エネルギー大量導入時の電力システムを効率的・安定的に運用するためには、その発電量の予測が重要である。本研究項目では、再生可能エネルギーの短期予測手法を開発することを目的として、以下の研究を行った。

A. 太陽光発電量等の時空間的性質の解析

太陽光発電量などの非負多変量時系列データの時空間構造を特徴づける解析手法を提案した。発電量は非負の量であるため、非負性を考慮に入れてデータを解析する必要がある。そのため、本手法では非負行列分解(Non-Negative Matrix Factorization)を用いた。太陽光発電量の多変量時系列データに対して非負行列分解を用いて二つの非負行列の積に分解することで、空間的な解釈が可能な成分と時間的な変化を伴う成分に分解することができる。本手法では、与えられた実データに対して最適な成分数を決定するために赤池情報量規準を用いた。さらに、有向結合の検定の手法(Hirata and Aihara, Phys. Rev. E, 2010 等)を用いて、分解された各成分の時間的な変化が持つ依存関係を検定することにより、有向グラフの形で提示できる解析手法を構築した。

また、この提案手法を日射量の時空間データに適用した解析例を発表した(平田ら, 電気学会全国大会, 2013; Hirata et al., Proc. NOLTA, 2013)。解析結果において、各非負成分は空間的にそれぞれ 1 つのピークを持つ傾向があり、これは各地域の日射量として解釈できる。また、各成分間には複雑な依存関係があることを示唆する結果を得た。この結果は、太陽光発電量の時間変化の時系列予測を行う際に、高次元の空間分布を活用して時系列予測を行うことが効果的であることを示唆している。

B. 大規模多変量リアルタイム短期時系列予測手法の開発

上記の示唆に基づき、大規模多変量時系列データ、特に日射量のデータに対するリアルタイムマルチステップ短期予測手法を提案した(Hirata et al., Renew. Energy, 2014)。これは、既存手法(Hirata et al., Phys. Lett. A, 2012)を多変量時系列データに拡張して、実時間で複数ステップ先の予測を同時に出力し、その予測の信頼区間に関する情報も付与する手法である。また、多変量時系列データに対して距離を定義する際には、通常ユークリッド距離が使われてきているが、 p が 1 よりも小さいような p -ノルムを用いて、高次元の時系列データでも精度良く将来を予測できるように、時系列予測手法をさらに拡張した(Hirata et al., Eur. Phys. J. Spec. Top., 2014)。検証には、気象台の日射量データを用いた。その結果、ユークリッド距離($p=2$)を用いるよりも、 $p=0.5$ の p -ノルムを用いる方が、平均予測誤差が小さいという点、また 96%信頼区間が真の値を含む確率の変動が小さいという点で、優れていることが分かった。また、このような p -ノルムが、少数の成分の大きな違いよりも大多数の成分の類似度を強調する理由について説明を与えた。

C. 重心座標を拡張して実現した予測手法の改良

時系列予測のさらなる精度改善のために、低次元の時系列データの長い期間の挙動の予測に効果的であった重心座標による予測手法(Mees, Int. J. Bifurcat. Chaos, 1991)を線形計画を用いて高次元の時系列データに適用できるように拡張した。この拡張では、高次元の時系列データの数理モデル化に対しても少数のパラメータで対応できる。つまり、高次元の時系列データを記述するためにはより多くのパラメータが必要であるという、非線形時系列解析分野に現れる「次元の呪い」を解決するものになっている。また、局所的な近似精度を付加的な計算量無しに陽に評価できるという長所も兼ね備えている。数理モデルの近似精度を coupled map lattice や気象の簡易モデルである Lorenz'96 I モデルを使って評価した。その結果、従来良く用いられている動径基底関数よりも良い予測精度を示すことが分かった。また、実際に日射量の予測を行い、予測精度の評価を行った(図3)。この成果は現在学術論文誌に投稿中である。

D. 再生可能エネルギー導入時の電力ネットワークのロバスト性解析

本研究項目で解析してきた再生可能エネルギー発電量データを用いて、研究項目1で開発された電力システムモデルの挙動解析を行った。日射量の時系列データと風速の時系列データを用いて、再生可能エネルギー発電の空間的に広がりによって生じる「ならし効果」に関する評価を行った。その結果、10分という短時間では「ならし効果」が拡散現象と同程度に効いているが、6時間以上の長時間になると「ならし効果」がほとんど効かなくなることを示した。この結果を利用して、再生可能エネルギーの出力を、関連のあるノイズとして数理モデルの中に取り込み、電力システムのロバスト性に関する評価を行った。その結果、ノイズの相関が高いほど、システムが不安定になりやすいことを示した。

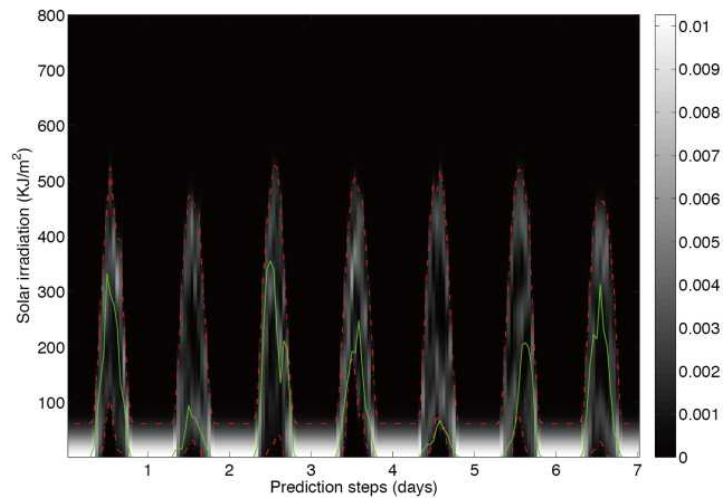


図 3. 重心座標を用いた日射量の分布予測の例(館野, 2012 年 3 月 1~7 日)。背景のグレースケールが予測分布を示す。緑の実線は実測値、赤の一点鎖線は 95%信頼区間を示す。

以上のように、研究項目 1 と 2 を研究項目 3 を軸に融合することにより、再生可能エネルギーの大量導入を考慮した電力システムの数理モデルの構築・解析と、最適化・予測手法の構築・解析を行った。

また、本研究の当初計画に直接的には含まれていないものの、電力市場の数理モデルは今後ますます重要性が増す研究テーマであると考えられる。そのため、再生可能エネルギー大量導入時の電力市場の挙動と価格決定方式との関係について、マルチエージェントシミュレーションによる解析を行った (Takahashi et al., ISIMM, 2013; 高橋ら, 生産研究, 2014)。また、ランプ現象、突風、市場価格等の急激な変化に対する予兆検知に適用可能な予測手法に関する研究を行った (Oya et al., New J. Phys., 2014)。

§5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 8件)

1. Yoshito Hirata, Taiji Yamada, Jun Takahashi, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki: Online multi-step prediction for wind speeds and solar irradiation: evaluation of prediction errors, *Renewable Energy*, Vol. 67, pp. 35-39, 2014.
2. Yoshito Hirata, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki: Predicting multivariate time series in real time with confidence intervals: Applications to renewable energy, *European Physical Journal Special Topics*, Vol. 223, pp. 2451-2460, 2014.
3. Motoki Nagata, Naoya Fujiwara, Gouhei Tanaka, Hideyuki Suzuki, Eiichi Kohda, Kazuyuki Aihara: Node-wise robustness against fluctuations of power consumption in power grids, *European Physical Journal Special Topics*, Vol. 223, pp. 2549-2559, 2014.
4. Hideyuki Suzuki: Dynamics of load balancing with constraints, *European Physical Journal Special Topics*, Vol. 223, pp. 2631-2635, 2014.
5. Yutaro Yamaguchi, Anna Ogawa, Akiko Takeda, Satoru Iwata: Cyber security analysis of power networks by hypergraph cut algorithms, *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2014)*, pp. 830-835, 2014.
6. Shunsuke Oya, Kazuyuki Aihara, Yoshito Hirata: Forecasting abrupt changes in foreign exchange markets: method using dynamical network marker, *New Journal of Physics*, Vol. 16, 115015, 2014.
7. Yoshito Hirata, Masanori Shiro, Nozomu Takahashi, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki, Paloma Mas: Approximating high-dimensional dynamics by barycentric coordinates with linear programming, *Chaos*, Vol. 25, 013114, 2015.
8. Naoya Fujiwara: An approximation for dynamical processes on periodic temporal networks, *Nonlinear Theory and Its Applications*, *IEICE*, Vol. 6, 2015 (to appear).

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 永田基樹, 西川功, 藤原直哉, 田中剛平, 鈴木秀幸, 合原一幸: 位相モデルを用いた東日本送電網における周波数同期の解析, *生産研究*, Vol. 65, No. 3, pp. 295-299, 2013.
2. 鈴木秀幸: ネットワークダイナミクスによる数理モデリングとエネルギーマネジメント, *シミュレーション*, Vol. 32, No. 3, pp. 193-198, 2013.
3. 高橋優斗, 鈴木秀幸, 合原一幸: 再生可能エネルギーを考慮した電力市場の価格決定方式の解析, *生産研究*, Vol. 66, No. 3, pp. 309-313, 2014.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 1件、国際会議 3件)

1. 鈴木秀幸: 非線形数理モデルからとらえる社会と地球～感染症・電力システム・交通流のネットワークダイナミクス, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会(PRMU), 千葉, 2013年10月3日.
2. Hideyuki Suzuki: Network dynamics and electric power systems: Toward large-scale integration of renewable energy, *Workshop on Resilient Power Grids and Extreme Events*, Potsdam (Germany), 2013年10月7日.
3. Yoshito Hirata: Online multi-step time series prediction for renewable energy: evaluation of prediction errors, *Workshop on Resilient Power Grids and Extreme Events*, Potsdam (Germany), 2013年10月7日.
4. *Yoshito Hirata, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki: Time series prediction of renewable energy: what we can and what we should do next, *World Renewable*

Energy Congress, Surrey (UK), 2014 年 8 月 5 日.

② 口頭発表 (国内会議 5件、国際会議 5件)

1. 平田祥人, 荻本和彦, 合原一幸, 鈴木秀幸: 太陽光発電量の空間分布の非負分解, 平成 25 年電気学会全国大会, 名古屋, 2013 年 3 月 21 日.
2. Yoshito Hirata, Taiji Yamada, Jun Takahashi, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki: Online multi-step prediction for wind speeds: evaluations of prediction errors, World Renewable Energy Congress Australia 2013, Perth (Australia), 2013 年 7 月 17 日.
3. 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸: 日照のマルチステップリアルタイム時空間予測, 平成 25 年度電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27 日.
4. Yoshito Hirata, Kazuhiko Ogimoto, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki: Complex dynamics of photovoltaic outputs, 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), Santa Fe (USA), 2013 年 9 月 9 日.
5. Motoki Nagata, Isao Nishikawa, Naoya Fujiwara, Gouhei Tanaka, Hideyuki Suzuki, Kazuyuki Aihara: Phase-model analysis of supply stability in power grid of Eastern Japan, 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), Santa Fe (USA), 2013 年 9 月 9 日.
6. Hideyuki Suzuki: Complex network approach to modeling electric power systems: Toward large-scale integration of renewable energy, SICE Annual Conference 2013, Nagoya (Japan), 2013 年 9 月 16 日.
7. 平田祥人, 加藤政一, 合原一幸, 鈴木秀幸: 再生可能エネルギー出力の時系列予測とそれを利用した制御・最適化技術の要請, 電気学会新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会, 東京, 2013 年 11 月 22 日.
8. 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸: 信頼区間付きのマルチステップリアルタイム時系列予測:再生可能エネルギーでの応用を目指して, 第1回SICE制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014 年 3 月 6 日.
9. Yoshito Hirata, Kazuyuki Aihara, Hideyuki Suzuki: Time series prediction for electric power systems: confidence and credibility, 577 WE-Heraeus-Seminar on Health, Energy & Extreme Events in a Changing Climate, Bad Honnef (Germany), 2014 年 12 月 8 日.
10. 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸: 再生可能エネルギー出力予測:予測が大きく外れる時, 平成 26 年度電気学会全国大会, 東京, 2015 年 3 月 24 日.

③ ポスター発表 (国内会議 0件、国際会議 3件)

1. Yuto Takahashi, Hideyuki Suzuki, Kazuyuki Aihara: Analysis of electricity market auctions with introduction of renewable power plants, The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling (ISIMM), Tokyo (Japan), 2013 年 11 月 14 日.
2. Motoki Nagata, Naoya Fujiwara, Gouhei Tanaka, Hideyuki Suzuki, Eiichi Kohda, Kazuyuki Aihara: Relation between robustness and topology in power grids, International School and Conference on Network Science (NetSci) 2014, California (USA), Poster no. 96, 2014 年 6 月 5 日.
3. Motoki Nagata, Naoya Fujiwara, Gouhei Tanaka, Hideyuki Suzuki, Eiichi Kohda, Kazuyuki Aihara: Effect of path length on robustness in power grids, Social Modeling and Simulations + Econophysics Colloquium (SMSEC) 2014, Kobe (Japan), Poster no. 4pPS9, 2014 年 11 月 5 日.

(4)知財出願

①国内出願 (0 件)

②海外出願 (0 件)

③その他の知的財産権
該当なし

(5)受賞・報道等

①受賞

- Yuto Takahashi, Hideyuki Suzuki, Kazuyuki Aihara
ISIMM 2013 Best Poster Award Silver Prize
(The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling)
2013 年 11 月 14 日

②マスコミ(新聞・TV等)報道
該当なし

③その他
該当なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- NEDO 電力系統出力変動対応技術研究開発事業の研究課題「発電予測・制御高度化／予測技術系統運用シミュレーション」(H26～H30)に参画し、これまで培ってきた時系列予測技術を応用して、より実用を指向した研究を実施中である。

②社会還元的な展開活動

直接該当するものはないが、基本的に基礎的研究を実施してきたので、社会還元は論文発表や学会発表を通して行ってきたと考えている。

§ 7 研究期間中の活動

主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2013年 2月25日	第44回 カフェ・デ・サイエンス「社会ネットワークと複雑現象の数理」	東京都 目黒区	約40人	武田計測先端知財団主催の公開講座の講師
2013年 3月28日	「電力システムと最適化」ワークショップ	東京大学	約70人	電力システムと最適化両分野の研究交流を目的としたワークショップを主催
2012年 10/1,12/5 2013年 5/16,7/10, 9/19,11/25, 12/20 2014年 2/24,4/22, 7/8,10/30	チーム内ミーティング (非公開)	東京大学	約10人	情報交換、打合せ

§8 最後に

全体として、当初想定していたような形での成果が得られただけでなく、想定を超える成果も得られ、当初の目標を十分に達成することができたと考えている。また、数理モデル・数理手法を専門とするチームでありながら、数理・物理系だけでなく、電力・エネルギー系のジャーナルや会議でも一連の成果を発表できたことは非常に有意義であった。これは、本 CREST 領域において異分野連携・融合が積極的に推奨されていたことが一つの背景としてあり、この領域に参加して研究を実施することで研究の幅を広げることができたと考えている。一方で、2年半という短い研究期間ではあったものの、領域内では数理モデル・数理手法を専門とする独特なチームとして参加していたことから、より想定外の結果や新しい考え方も生み出すような柔軟なプロジェクト運営ができるとより良かったのではないかと感じている。

研究代表者個人としては、本研究を入口として、電力システムはこれまで以上に重要な研究テーマとして位置付けられるようになった。これは、本 CREST 領域が数理研究に一つの重点を置いて運営され、異分野からの参画をエンカレッジして頂いていたことによるところが大きい。本研究の実施により生まれた多様な研究者とのつながりを活かして、今後も電力システム分野において研究を進め貢献していきたいと考えている。