

氏 名 竹田 恒

学位(専攻分野) 博士(統計科学)

学位記番号 総研大甲第 1876 号

学位授与の日付 平成28年9月28日

学位授与の要件 複合科学研究科 統計科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Electricity Load Forecasting: Ensemble Approach

論文審査委員 主 査 准教授 上野 玄太  
教授 田村 義保  
教授 中野 純司  
准教授 佐藤 整尚 東京大学  
シニアプロダクトマネージャー 若浦 雅嗣  
応用アール・エム・エス株式会社

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

学位申請論文「Electricity Load Forecasting: Ensemble Approach (アンサンブル手法を用いた電力需要予測)」は本文 7 章と Appendix を合わせて 108 頁からなり、英語で執筆されている。電力の需要予測とその構造分析のための統計的モデルの開発を目的とした研究論文である。ここで構造分析とは、電力需要の変動をさまざまな成分（トレンド成分、週周期成分、日周期成分、気象状況成分、太陽光発電効果成分など）に分離し、個々の成分の寄与を調べることをいう。また、本研究は、電力会社における電力需要予測業務での利用を想定したものである。

東日本大震災発生後、国内の原子力発電所は安全確認のために一斉に停止し、それにより、今まで経験のないほど電力需給が逼迫した。また、このことが引き金となり国民の多くが節電を意識するようになり、LED 照明のような節電家電が急速に普及した。政府は、環境にやさしい電源を確保するために、再生可能エネルギー発電設備の投資を促す補助金を支給した。この結果、太陽光発電設備が急速に普及した。このようなことは、電力需要にさまざまな時間スケールで影響を与えはじめている。電力会社では、安定供給や過不足ない設備投資を行うために、電力需要の変化を適切にモニタリングし分析する必要がある。また、限られた電源供給力で安定供給を行う上で重要な揚水発電の運用計画の更なる精緻化も必要となる。

2012 年より、国内電力会社は余剰太陽光発電電力を一定期間、予め決められた価格で購入する義務を負っている。中でも太陽光発電設備は他の再生可能エネルギー発電設備に比べて急速に普及し、電力系統に大きな影響を与えている。このため、太陽光発電電力のリアルタイムの予測が不可欠となっているが、予測で利用できる情報が、検針値などの月間値に限られている問題もあり、その情報を有効に利用できない物理モデルに基づく予測では大きな系統誤差バイアスが発生し、需要予測の精度低下を招いている。

第 1 章では、電力会社でなぜ電力需要変動の構造分析が必要になったか、その歴史的背景についてふれている。また、最近の需要予測業務で発生している問題点について述べている。

第 2 章では、太陽光発電電力を含む電力需要の予測に利用可能なデータについて説明している。使用する主なデータは、毎時の関東の 9 地点の気象観測データ、電力供給力合計（電力需要）、および、毎月の太陽発電電力購入量である。

第 3 章では、電力需要予測、太陽光発電電力予測、および、アンサンブル型データ同化手法に関する最新技術についての文献調査をした結果をまとめている。

第 4 章では、状態空間モデル、アンサンブルフィルタ手法、及び、精度評価尺度について理論的な説明をしている。また、仮想的な真のモデルと提案モデルを使用したシミュレーションを実施し、アンサンブルカルマンフィルタ、粒子フィルタなど複数のアンサンブルフィルタ手法の性能比較を行い、アンサンブル平方根フィルタの優位性を示している。

第 5 章と第 6 章が本論である。第 5 章では、電力需要の状態空間モデルを提案している。電力需要の観測データに対し、標準的な季節調整法で用いられる成分（トレンド成分、週周期成分、日周期成分、休日効果成分、自己回帰成分）に加え、冷暖房効果成分、太陽光発電効果成分、気象状況成分（日射、湿度、風）を用いてモデル化を行っている。これらの成分のうち、独自性のもっとも強い太陽光発電量成分に関しては、月次で得られる太陽

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

光発電電力購入量データから、毎時の太陽光発電量を推定する状態空間モデルを別途提案し、第 6 章で章を改めて詳述している。

これらの成分を統合し構成した電力需要モデルに対して、アンサンブル平方根フィルタを用いて状態推定を行っている。その結果、気象効果を除いた長期の需要予測など、従来のモデルでは不可能であった高度な分析が可能となった。構造分析の例として、長期需要想定に必要な季節調整、1~3 年分の供給計画に必要な年平均値的自負荷曲線、冷暖房度目に代わる指標などへの応用について述べている。

さらに、残差に対し改めて気象変数および曜日・休日等を説明変数とした回帰モデルを適用し、Lasso 型正則化項のもとで推定を行っている。これは、上述の電力需要モデルでは需要構造分析が可能になった一方で、予測精度の面では、従来のブラックボックスタイプのモデルに劣るという欠点を解消するためのアプローチである。この残差分析によって、実務レベルの予測精度を確保し、同時に、モデル選択の観点から今後の電力需要モデルの改善箇所を明確にする方法を示している。また、太陽光発電電力購入量の状態空間モデルによっては、従来の物理ベースのモデルと比較して、系統誤差を大きく減少させることに成功している。

最終章は、本研究の要旨と結論にあてられている。提案手法を適用すれば、現行の最新技術を用いた手法の予測性能を有意に凌ぐ結果が得られることを実証したと述べている。

なお、第 5 章の内容はエネルギー工学分野の国際誌 Energy 104 巻 184-198 頁(2016 年)に掲載済みである。

(別紙様式 3)  
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨  
Summary of the results of the doctoral thesis screening

学術的な意義として、初めてアンサンブル手法に基づく電力需要構造のモデル化の方法論を示したことを挙げるができる。アンサンブル手法を用いることで、冷暖房効果など非線形項を含む、多数の成分からなる状態空間モデルの推定が可能となった。また、残差への回帰モデルの適用により、予測精度の向上に加え、将来的なモデル改良の手がかりを示していることも評価できる。経済的な観点からは、近年の太陽光発電設備の急速な普及によりもたらされる需要予測の精度悪化の問題を解決することに貢献し、これにより、火力発電機の起動・停止コストの節約や供給計画値と実績値の差が大きい場合に支払うインバランス料金の低減が可能になるといった意義があることも評価できる。需要予測と構造分析機能を併せ持つ、将来有望な技術の一つとなることが期待できる。

総合研究大学院大学複合科学研究科における課程博士及び修士の学位の学位授与に係る論文審査等の手続き等に関する規程第 10 条に基づいて、口述による試験を実施した。口述による試験を実施した結果、出願者はその博士論文を中心としてそれに関連がある専門分野、その基礎となる分野及び英語の能力について博士（統計科学）の学位の授与に十分な学識を有するものと判断し、合格と判定した。