

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06113

研究課題名(和文) 統計的学習法とベイズ推定の協調による短期電力需要予測システム開発

研究課題名(英文) Development of Short-term Electric Load Forecasting System Based on Statistical Learning Method and Bayesian Estimation

研究代表者

八野 知博 (HACHINO, Tomohiro)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：50284906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、統計的学習法とベイズ推定に基づく短期電力需要予測システムを構築した。本予測システムの特徴は、各時間先の電力需要予測値のみならず、予測値の信頼性の情報も得られる点である。予測モデルであるガウシアンプロセスモデルの学習に、粒子群最適化法やカッコウ探索アルゴリズム等を適用することも提案した。九州地区を対象とした短期電力需要予測のシミュレーションを行い、精度の良い電力需要予測値とその信頼性の情報が得られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research presents a method of short-term electric load forecasting based on the statistical learning method and Bayesian estimation. The proposed forecasting system can yield not only the predicted electric load demands but also their confidence measures. The Gaussian process models are trained by the particle swarm optimization, cuckoo search, and so forth. The results of electric load forecasting for Kyushu district are shown to demonstrate the effectiveness of this forecasting system.

研究分野：システム制御工学

キーワード：計測工学 制御工学 システム工学

### 1. 研究開始当初の背景

現在、全国的に電力需要が逼迫しており、電力使用の抑制が呼びかけられている。また、地球温暖化問題を背景として、循環型社会の実現が喫緊の課題となっており、太陽光発電をはじめとする分散型電源の導入が推し進められている。このような状況の中で、環境と経済性の観点から発電燃料の使用を抑制しつつ、電力を安定的に供給するためには、電力需要の高精度な予測が極めて重要である。従来の短期電力需要予測の研究には、ニューラルネットワークモデルに基づく手法やGMDHモデルに基づく手法などがある。これらの手法は、過去の電力需要実績値や気象データなどの情報を、モデルに含まれるパラメータへ変換しているという意味で、パラメトリックな予測法に分類できる。これらのパラメトリックな予測法では、予測モデルの記述に多数のパラメータを必要とするため、予測精度が必ずしも十分ではなかった。また、電力需要予測値のみを与えるものであり、その信頼度については何ら情報を提供していなかった。よって、現状で入手可能な電力需要実績値や気象データなどをもとに、電力需要予測値のみならず、その信頼度をも与えることのできる高精度な予測システムの開発が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究は、統計的学習法とベイズ推定の協調による高精度な電力需要予測システムの構築を目的としている。具体的には、まず過去の電力需要実績値や気温などの気象データを入力、過去の多段先電力需要実績値を出力として、予測モデルであるガウシアンプロセスモデル(文献①)等の統計的学習を行い、予測器を構築する。この学習では、電力需要値の分布を規定するパラメータの決定問題が、線形最適化と非線形最適化の問題に分離することに着目し、最小二乗法と遺伝的アルゴリズム、粒子群最適化、カコウ探索アルゴリズム(文献②)などのメタヒューリスティクスとのハイブリッド化によって決定することが効果的であることを示す。その後、学習済みの電力需要予測器に基づき、新たな直近の電力需要実績値と気象データ等を入力として、ベイズ推定の枠組みで、短期電力需要予測値およびその信頼度を得る予測システムを構築する。以上により、最大の電力需要を想定した電力供給計画の策定が可能となり、電力の安定的かつ効率的な運用に資することを目的としている。

### 3. 研究の方法

学習用データに対する対数周辺尤度を評価とし、メタヒューリスティクス(遺伝的アルゴリズム、粒子群最適化手法、カコウ探索アルゴリズムなど)とのハイブリッド化による、予測モデルの事前分布の決定手法を開発する。予測モデルとしてガウシアンプロセス

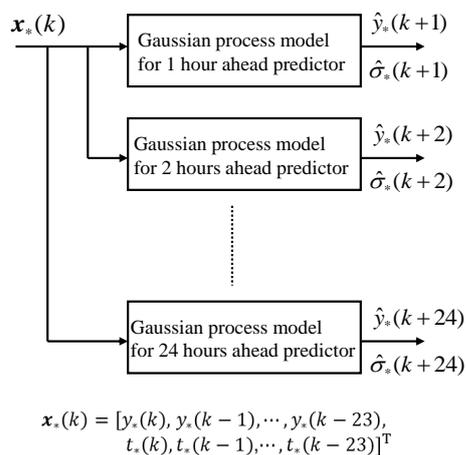


図1 電力需要予測システムの構造

モデルを適用する。次に開発した予測手法をMATLABにより計算機上で実現し、シミュレーションによりその予測精度や信頼度の妥当性を詳しく検証する。同時に、九州地区など比較的広範囲のエリアの電力需要実績値を収集する。また、気温、気圧、天候、降雨量などの種々の気象データを収集し、電力需要に大きく影響を与える種別の選定を行う。開発したガウシアンプロセスモデル等の統計的学習法に基づき、電力需要実績値と気象データを用いてガウシアン事前分布を学習する。次にベイズ推定に基づき、電力需要予測を実行する。ここでは、まず過去の電力需要実績値及び気象情報値等を入力とし、1時間毎の短期電力需要予測を行う。電力需要実績値と気象データ等に基づき、これまでに開発してきた電力需要予測システムを用いて24時間先までの電力需要を予め予測し、事後に入手した電力需要実績値と比較して、予測値の精度及び信頼度の妥当性を詳細に検討する。また、電力需要は平日と休日とではその傾向が大きく異なることから、平日と休日とで別個の予測システムを構築することで、予測精度の向上を図る。

### 4. 研究成果

#### (1) 問題設定

予測対象地区を九州地区とする。予測システムの入力は、電力需要に影響を及ぼすと考えられる過去の電力需要実績値と過去の気温等の気象データとする。出力は将来の電力需要予測値である。本研究では、次の多段先予測に対する確率分布を構築し、

$$y(k+j) | \mathbf{x}(k) \sim N(\hat{y}(k+j), \hat{\sigma}^2(k+j)) \quad (1)$$

$$(j = 1, 2, \dots, 24)$$

ガウシアンプロセスの枠組みで、24時間先までの1時間毎の電力需要予測を(1)式の分布に基づき実行する。ここで、 $y(k)$  は  $k$  時刻における電力需要、 $\mathbf{x}(k)$  は  $k$  時刻以前の電力需要実績値と気温から構成される入力ベクトルである。

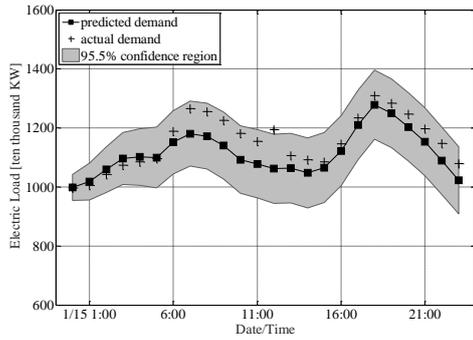


図2 電力需要予測結果 (2016年1月)

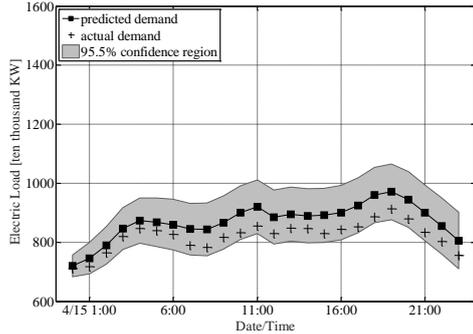


図3 電力需要予測結果 (2016年4月)

通常この種の予測問題では一段先予測器による予測値を予測システムの入力側にフィードバックする繰り返し型予測の形が取られるが、本研究では予測誤差の累積を避けるために図1に示すような予測器を段毎に作成する直接型の予測システムを構築する。

### (2) ガウシヤンプロセス事前モデル

過去の電力需要実績値および気温と将来の電力需要の関係をガウシヤンプロセスモデルで記述する。ガウシヤンプロセスモデルは、関数値が多変量正規分布に従うと捉えたモデルであり、平均関数と共分散関数で完全に記述できるモデルである。本研究では、平均関数を過去の電力需要実績値と気温の線形結合で表し、共分散関数はガウシヤンカーネルを使用した。具体的には、

$$\mathbf{w}_j \sim N(\mathbf{m}_j(\mathbf{X}), K_j(\mathbf{X}, \mathbf{X})) \quad (2)$$

のガウシヤンプロセス事前モデルとなる。ここで、 $\mathbf{m}_j(\mathbf{X})$  は平均関数ベクトル、 $K_j(\mathbf{X}, \mathbf{X})$  は共分散行列を表す。

### (3) ガウシヤンプロセス事前モデルの学習

ガウシヤンプロセス事前モデルには平均関数と共分散関数に関する未知パラメータを含んでいるため、これらを最適に決定する必要がある。本研究では、過去の電力需要実績値および気温と実際の電力需要に対する負の対数周辺尤度最小化に基づいてこれらのパラメータを決定した。この最小化問題は線形最適化と非線形最適化に分離することが可能であることから、線形最小二乗法とメタヒューリ

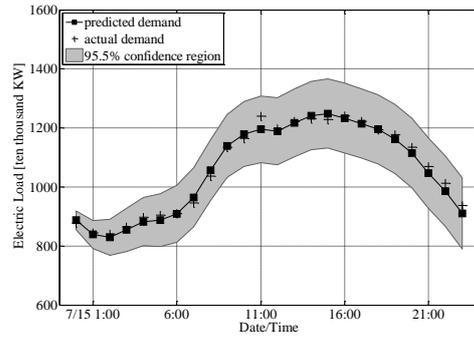


図4 電力需要予測結果 (2016年7月)

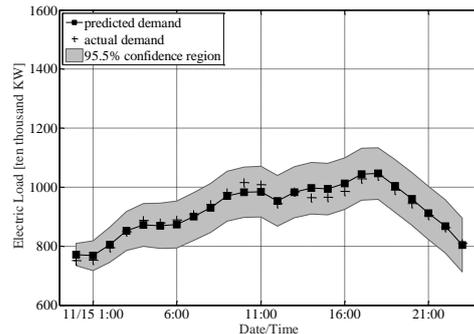


図5 電力需要予測結果 (2016年11月)

スティクス (遺伝的アルゴリズム、粒子群最適化、カッコウ探索アルゴリズムなど) とのハイブリッド最適化を提案した。

### (4) ガウシヤンプロセス事後分布による電力需要予測

新たな過去の電力需要実績値と気温に対応する24時間先までの電力需要予測値とその信頼領域に関する情報を、ベイズ推定に基づきガウシヤン事後分布から求める。具体的には、

$$\begin{aligned} y_*(k+j) | \mathbf{X}, \mathbf{w}_j, \mathbf{x}_* \\ \sim N(\hat{y}_*(k+j), \hat{\sigma}_*^2(k+j)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$(j = 1, 2, \dots, 24)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \hat{y}_*(k+j) &= m_j(\mathbf{x}_*) \\ &\quad + \boldsymbol{\Sigma}_j(\mathbf{x}_*, \mathbf{X}) \mathbf{K}_j^{-1}(\mathbf{w}_j \\ &\quad \quad - m_j(\mathbf{X})) \\ \hat{\sigma}_*^2(k+j) &= s_j(\mathbf{x}_*, \mathbf{x}_*) \\ &\quad - \boldsymbol{\Sigma}_j(\mathbf{x}_*, \mathbf{X}) \mathbf{K}_j^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_j(\mathbf{X}, \mathbf{x}_*) \\ &\quad \quad + \sigma_{j[best]}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

で求まる。 $\hat{y}_*(k+j)$  は電力需要予測値、 $\hat{\sigma}_*^2(k+j)$  は電力需要予測値の予測分散であり、予測値の信頼性の情報として用いられる。

### (5) 短期電力需要予測シミュレーション

九州地区を対象に短期電力需要予測シミュレーションを行った。九州電力(株)が公開している電気予報から需要実績値を、気象庁が公開しているHPから福岡市の気温データを入手し、学習用データとして使用した。なお、学習用データは電力需要実績値と気温ともに2015年のものを使用した。学習用の入出力デ

ータは 649 個使用した。なお、本シミュレーションでは、ガウシヤンプロセス事前モデルの学習に、巢のサイズ 30 個、卵発見確率 0.125、繰り返し回数 50 としたカッコウ探索アルゴリズムを使用している。2016 年を対象として 24 時間先までの短期電力需要予測を行った。4 シーズンの代表として、1 月、4 月、7 月、11 月の電力需要予測結果を図 2～5 に示す。図中で■は電力需要予測値を、+ は電力需要実績値を、灰色部は  $2\sigma$  (95.5%) 信頼領域を示す。1 月の予測値は実績値と異なる部分が見られるものの、4 月、7 月、11 月では予測値が実績値と近く、精度良く電力需要予測が行われていることが確認できる。また、電力需要実績値がほぼ信頼領域内に収まっており、提案法によって得られた信頼領域は妥当であることが確認できる。従来のパラメトリックな予測法では得ることが困難であった予測値の信頼領域に関する情報も本予測システムで得られることが明らかになった。この予測値の信頼領域の情報を活用すれば、事実上

$$\hat{y}_{max}(k+j) = \hat{y}_s(k+j) + 2\hat{\sigma}_s(k+j)$$

を最大の電力需要予測値とみなし、最大の電力需要を想定した電力供給計画の策定が可能となる。

次に平日と休日とでは電力需要の傾向が大きく異なることに着目し、平日の電力需要を予測する際は平日のみの学習用データを用いて予測システムを構築し、休日の電力需要を予測する際は休日のみの学習用データを用いて予測システムを構築することを検討した。その結果、従来の平日と休日の区別をつけなかった際の予測誤差率 (平均絶対値誤差率) は、平日を予測対象とした場合で 4.55%、休日を予測対象とした場合で 5.60%であったのに対し、平日と休日の区別をつけた際の予測誤差率は平日を予測対象とした場合で 4.53%、休日を予測対象とした場合で 3.32%であり、特に休日を対象とした場合に予測誤差率が低減し、予測精度の向上が見られることを確認した。

さらに、過去 1 年の学習用データを用いるよりも、過去複数年の学習用データを用いて予測システムを構築する方が、予測精度が向上することも確認している。

#### (6) 今後の展望

システム予測論的立場から構築した予測システムで電力需要予測を自動化し、この予測結果に基づいて電力供給計画の策定が行えるようにすることが本研究の最終目的である。気温以外の気象情報を考慮した予測システムの構築や、学習過程で他の最適化アルゴリズムを適用することによる予測精度の改善が今後の検討課題である。また、近年太陽光発電等の自然エネルギー導入により電力需要の傾向が大きく変化しているため、予測システムの学習過程で過去の電力需要実績値をどのように効果的に用いるかさらに検討が必要である。

#### <引用文献>

- ① C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams:

Gaussian Processes for Machine Learning, MIT Press (2006)

- ② X. S. Yang and S. Deb: Cuckoo Search via Levy Flights, Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, pp.210-214 (2009)

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Tomohiro Hachino, Yoshihiro Okuya: Gaussian Process Model-based Short-term Electric Load Forecasting Using Cuckoo Search, International Journal of Power Systems, Vol. 3, pp. 27-32, 2018, 査読有  
<https://www.iasaras.org/iasaras/journals/ijps>

[学会発表] (計 5 件)

- ① 奥屋 貴宏、八野 知博: ガウシヤンプロセスモデルを用いた九州地区の電力需要予測、第 36 回計測自動制御学会九州支部学術講演会、2017 年
- ② 宮崎 貴志、八野 知博: PSO 調整型ガウシヤンプロセスモデルを用いた九州地区の短期電力需要予測、平成 29 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会、2017 年
- ③ 竹下 淳平、八野 知博: ガウシヤンプロセスモデルを用いた短期電力需要予測、第 35 回計測自動制御学会九州支部学術講演会、2016 年
- ④ 奥屋 貴宏、八野 知博: CS 調整型ガウシヤンプロセスモデルによる九州地区の電力需要予測、平成 28 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会、2016 年
- ⑤ 竹下 淳平、久木園 裕子、八野 知博: ガウシヤンプロセスモデルを用いた九州地区の短期電力需要予測、平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会、2015 年

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

八野 知博 (HACHINO, Tomohiro)  
鹿児島大学・理工学域工学系・教授  
研究者番号: 50284906