

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年9月9日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06217

研究課題名(和文) 衛星画像情報を考慮したアンサンブル学習による日射予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of Irradiance Forecasting Method based on Ensemble Learning in consideration of Satellite Image Information

研究代表者

加藤 丈佳 (Kato, Takeyoshi)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：90283465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：気象庁のメソ数値予報モデルGPV(MSM)に基づく日射予測手法に、米国大気研究センター・米国環境予測センターのWRFに基づく日射予測手法を併用する際、夏期においては両者の誤差傾向が異なるようなWRFの各種物理スキームの組み合わせが存在することを明らかにするとともに、機械学習による補正を過度に行わないことで、併用によって予測精度が向上することを明らかにした。他の季節については、それぞれの精度を向上した上で併用することが有効であることを示した。衛星画像の利用については、前者の手法の説明変数として画像情報を利用することで精度向上を確認したが、併用時の効果検証までは至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電の導入は急速に進んでおり、日々の電力需給運用において、その出力予測誤差の影響が顕在化しつつあり、予測精度の向上は急務である。複数の手法の組み合わせによる予測精度の向上については既に適用されているが、本研究では、個々の手法は必ずしも高くないものの、組み合わせた際の予測精度が高くなるように個々の手法を調整できることを明らかにしており、予測精度の向上のための一つの方向性を示すことができたという点で学術的な意義は高い。今回は十分に検討できなかったが、衛星画像情報を組み合わせることで更なる精度向上が期待でき、低炭素社会の構築に向け、太陽光発電の導入拡大に資することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The accuracy improvement of a day-ahead forecast of irradiance by the combination of GPV(MSM) based method and WRF based method was investigated. It is found that can be tuned by a certain combination of physics models related to irradiance can be chosen so that the forecast error of WRF based model tends to be positive while the forecast error of GPV(MSM) based model tends to be negative in Summer season. Besides, the post processing based on machine learning should not be applied to WRF for the improvement of forecast accuracy of combination method. On the other hand, the accuracy of each model should be improved and combined each other for the accuracy improvement in other seasons. Although it is revealed that the forecast accuracy of GPV(MSM) based model can be improved by using satellite imagery, the contribution of satellite imagery to the accuracy improvement of combination method was not investigated.

研究分野：電力工学

キーワード：太陽光発電 出力予測 日射予測 数値気象モデル 衛星画像 機械学習

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

太陽光発電が大量導入された電力システムの安定運用のためには、高精度・高信頼の数十時間先までの出力予測に基づく発電機起動停止計画が不可欠である。大気現象を支配する物理法則に関する方程式を解いて将来の状態を予測する数値気象予報(NWP)モデルは数十時間先までの出力予測に不可欠であるが、現状のNWPモデルは、通常の天気予報での利用や豪雨などの自然災害などの予測を目的として開発されており、太陽光発電出力の一次情報となる日射量の予測に関して最適化されたものではない。そこで、日射量の予測精度向上のため、NWPモデルの後処理として機械学習が組み合わされる。

雲の移動・発生消滅と言う複雑な自然現象を一つの考え方でモデル化することは非常に困難であるため、基礎となるNWPモデルや後処理の機械学習に違いにより、各時刻の予測値については大きく異なる場合がある。そこで、予測精度の更なる向上のためには、考え方が異なる様々なモデルを適切に組み合わせることが有効である。ドイツやスペインの系統運用機関においては、風力発電や太陽光発電に関する複数の出力予測手法をコンペによって採用し、独自の手法によってそれらを組み合わせることで、予測精度の向上を図っている。さらに、他の手法と組み合わせることを前提として個々の予測手法の特性を調整することができれば、更なる予測精度の向上が期待できるが、そのような観点からの検討は十分に行われていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、太陽光発電事業者の翌日発電計画の作成に資する高精度・高信頼の出力予測手法の開発を目的とし、i) 大気現象を支配する物理法則に関する数値気象予報モデルと精度向上のための機械学習を組み合わせることで翌日の日射量の予測手法を複数開発し、ii) 各手法における誤差特性に基づき複数の予測値を融合するアンサンブル学習による予測手法を開発する。さらに、iii) 衛星画像から算定する気象場情報を考慮してアンサンブル学習の精度向上を図る。

### 3. 研究の方法

本研究では、大気現象を支配する物理法則に関するNWPモデルとして、気象庁によるメソスケールモデル(GPV(MSM))および米国大気研究センター等によるThe Weather Research and Forecasting(WRF)を用いる。GPV(MSM)の場合、本研究の開始段階において日射量の予測値は提供されていないため、雲量等の気象要素の予報値を説明変数として日射を予測する機械学習との組み合わせは不可欠である。本研究では、代表者らが先行研究で構築した手法を用いる(以下、GPVモデルと呼ぶ)。GPVモデルでは、上・中・低層の雲量、地上の相対湿度、大気上端の日射量を説明変数とする重回帰式を用いるものであり、過去45日間のデータを用いて重回帰式の係数を毎日更新する。前日午前9時に予測を実施するとし、初期時刻3時のGPV(MSM)を用いた。

一方、WRFについては、各種物理過程に関するモデル(物理スキーム)の組み合わせを任意に変更できることから、日射への影響が大きい雲物理、大気境界層、地表面、短波放射の各スキームの組み合わせを7通り(Case-1~7)想定し、サポートベクター回帰(SVR)を用いて予測値を補正する(以下、WRFモデルと呼ぶ)。WRFモデル単体としての予測精度向上ではなく、GPVモデルと組み合わせた際の予測精度向上に資することを前提として、物理スキームの効果的な組み合わせを模索するとともに、SVRにおける学習データの期間を予測対象日の前々日~X日前まで(X=5~30日)で変化させる。WRF計算領域については、領域1(北緯35.17度、東経136.97度を中心とする1500km四方、水平解像度:25km、時間解像度:120秒)と、その中に領域2(中部エリアを含む605km×455km、水平解像度:5km、時間解像度:24秒)を想定し、双方向ネスティングを用いる。WRFに関する初期値および境界値には、アメリカ海洋大気庁の全球モデル数値予報GFS(初期時刻3時)を用いた。

また、日射予測が大外れした時間帯と全ての時間帯とで各NWPモデルによる湿度等の予報値の差の傾向を比較することで、大外れを予見するための指標の構築を試みる。

さらに、衛星画像情報の利用については、重回帰式を用いるGPVモデルにおける説明変数の一つとして数時間先の雲の状態に関する予測値を用いることとし、その効果的な予測方法を検討する。さらに、電力需給運用において重要な予測の大外れの削減のため、大外れの要因の一つであるランプアップ・ダウンに着目し、これを曇天状態から快晴状態(またはその逆)への状態変化ととらえてシグモイド関数によって表現し、シグモイド関数のパラメータを衛星画像に基づき予測する手法を開発し、その効果を評価する。

### 4. 研究成果

#### 4.1 複数の数値気象予報モデルの併用の効果

予測対象を2016年の名古屋、静岡、長野、富山の各気象官署の日射量1時間値、予測精度の対象時間帯を各日の8時台~15時台の8時間とした。長野気象官署に関する7月21日の予測結果を図1に示す。GPVモデルの予測値は実測値よりも小さいのに対し、WRFモデル(学習なし)の予測値は実測値よりも大きいため、両者を単純平均で併用することによって予測精度は向上する。しかし、WRFモデルで過去25日間のデータを用いた学習を適用すると、WRFモデル単体として精度向上するため、併用の効果は減少する。図2に示すように、7月については同様の理由により、WRFモデル(学習なし)を併用することで精度が改善する日が多いことが確認で

きた。同様の結果は静岡，富山についても得られた。また，1月の名古屋，静岡，長野については，GPVモデルでは負の予測誤差となる日が多いのに対し，WRFモデル（学習なし）では正の予測誤差となる日が多いため，両者を併用することで予測精度が改善する日が多かった。一方，4月や10月については，GPVモデルとWRFモデル（学習なし）の誤差は同様の傾向を示す日が多かったため，WRFモデルの単体として予測精度が向上するように学習期間を長くすることで，併用時の予測精度も向上した。このように，GPVモデルにWRFモデルを併用する際，WRFの物理スキームを適切に選択し，その特徴を生かすことで，予測精度が向上する場合があることが確認できた。

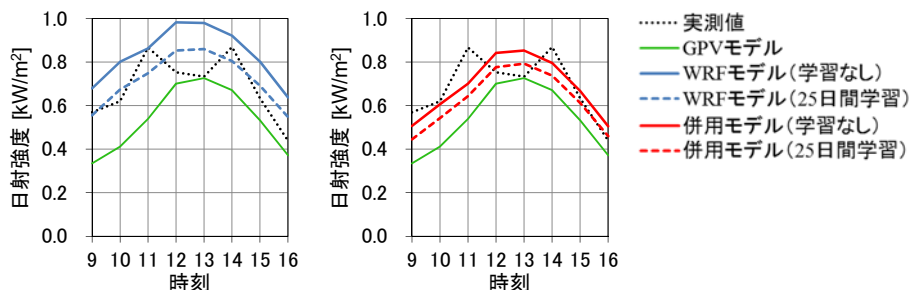


図1 長野気象官署の日射予測結果（7月21日）

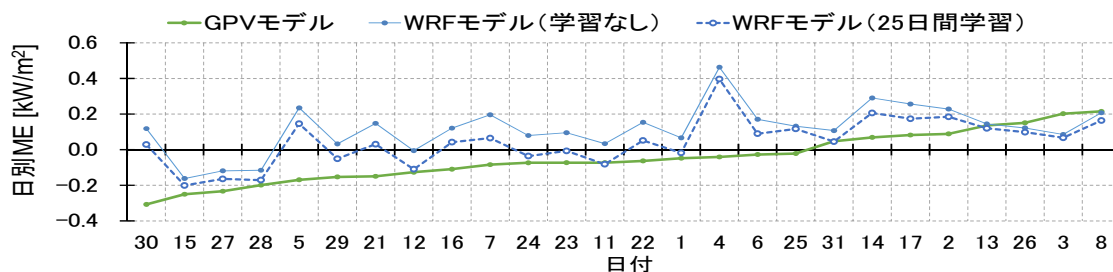


図2 長野気象官署の日射予測の日別平均誤差 ME（7月）

#### 4.2 重回帰式による翌日日射強度の予測手法における衛星画像情報の利用の効果

GPVモデルにおいて，多目的気象衛星MTSAT-2の可視画像から得られる太陽光反射強度を用いる場合，中心波長 $11\mu\text{m}$ と中心波長 $12\mu\text{m}$ の赤外画像の輝度温度差を用いる場合を想定し，初期値6:00のMSM-GPVを用いた当日（対象時間帯は9時～14時）の日射予測精度の向上効果を評価した。

図3に示すように，まず，7:30の画像において選択した小領域（ $125\text{px} \times 125\text{px}$ ）について予測初期時刻におけるGPV(MSM)の風速初期値の空間平均値を算定し，これに基づき小領域の1時間後の移動先を算定し，移動先における1時間後の風速予測値に基づき2時間後の移動先を算定する。これを繰り返して小領域が予測対象エリアに到達するか否かを判別する。その際，バンド14の小領域内の輝度温度の空間平均値と同程度の温度が予測されたMSM-GPVの気圧面における風速を用いた。そして，予測対象エリアに到達した小領域の予測初期時刻の画像を上述の予測手法に用いた。なお，小領域の一部でも予測対象エリアに重なれば到達と判定し，到達面積に応じた加重平均によって予測実施時刻の画像を用いた。予測対象は2013年に中部地域内58地点で観測された水平面全天日射強度（1時間値）の戸建住宅数による加重平均値とした。

予測結果の一例として，年間を通じて月別の平均絶対誤差が最も大きい6月の実測値および予測値の時間変化を図4に示す。同図では各日について12時を中心とする16時間分を表す。6月30日の場合，可視画像を併用することで，予測精度は9時～14時の6時間で平均 $100\text{W/m}^2$ 程度改善された。同様に，赤外画像を併用する場合も予測精度は $75\text{W/m}^2$ 程度改善された。一方，6月2日の場合，可視画像，赤外画像のいずれを用いても予測精度は $10\text{W/m}^2$ 程度しか改善されていない。同日の衛星可視画像の日変化を確認したところ，日本列島東側の雲の移動速度が速く，西側の雲と分離するように見えるため，分離した部分の下に位置する対象エリアの日射がGPVモデルによる予測値よりも大きくなったと考えられるが，上述の雲移動予測モデルではこのような雲の移動は適切に予測できなかったと考えられる。

衛星画像の利用による年間を通じた予測精度の向

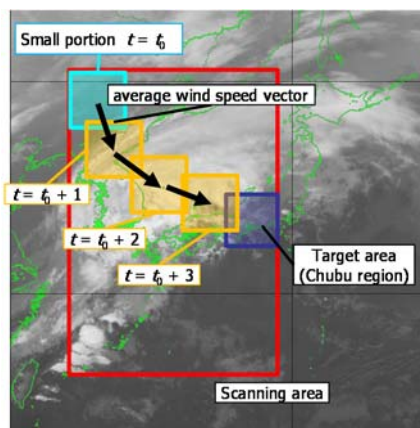


図3 衛星画像情報予測の概念図

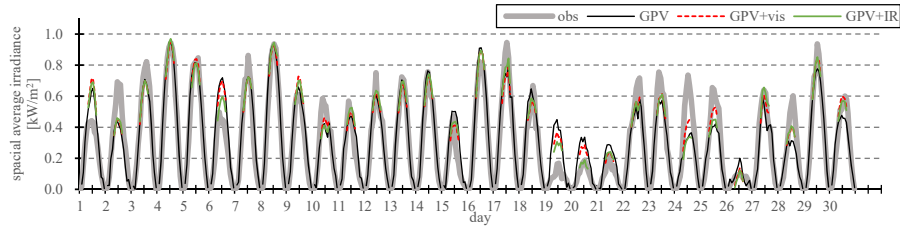


図4 予測結果の一例 (2013年6月1日~30日)

上効果を確認するため、各日について9時~14時までの6時間の予測誤差の積算値を算定し、各月の実測日射量で規格化した月別の平均絶対誤差率 MAE を図5に示す。同図に示すように可視画像、赤外画像ともに数%改善されることが確認できた。ただし、上述のように総観規模の大きな雲域の移動による日射変動については、本手法による予測精度の向上は限定的である。そこで本研究では、当初の計画を一部変更し、次節に示すように、メソスケールの大気場の状態を考慮して画像情報の要否を判断するとともに、利用する場合の方法について検討した。

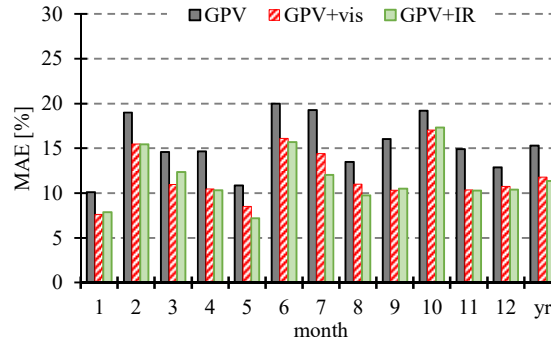


図5 各月の平均絶対誤差

#### 4.3 重回帰式による翌日日射強度の予測手法における衛星画像情報の利用の効果

総観規模の大きな雲域の移動による日射量のランプアップは、曇天時の全天日射量  $I_L(t)$  から晴天時の全天日射  $I_H(t)$  への二値的な変化であることに着目し、全天日射量の予測値  $I_f(t)$  を求める。二値的な変化は(2)式のシグモイド関数を用いてランプアップを次式のように表した。

$$I_f(t) = (1 - \sigma(t))I_L(t) + \sigma(t)I_H(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{t - t_0}{T}\right)} \dots \dots \dots (2)$$

予測開始時刻を8時とし、 $I_L(t)$ は7時半の衛星可視画像(雲域は雲のアルベドを示す)を用いて算出した対象エリアの晴天指数が終日継続すると仮定する。 $I_H(t)$ は予測対象日の直近の快晴日における晴天指数より算出する。 $I_L$ と $I_H$ の比率を変化させる起点となる、ランプアップ開始前の時刻  $t_1$  とランプアップ開始時刻  $t_2$  は後述の雲の移動ベクトルより予測した数時間先の雲アルベドが次の条件1を満たすものを  $t_1$ 、条件2を満たすものを  $t_2$  とする。 $t_1$ と $t_2$ より(3)~(5)式によって  $t_0$ と $T$ を算出し、 $I_L(t_1)$ と $I_H(t_2)$ を(1)式に代入して  $I_f(t)$ を求める。

条件1: 予測した雲アルベドが  $I_L(t)$ の算出に用いたアルベドの0.8~1.0倍である時刻のうち最も早い時刻

条件2: 予測した雲アルベドが  $I_H(t)$ の算出に用いたアルベドの0.8倍未満である時刻のうち最も遅い時刻

$$t_0 = \frac{t_2 A_1 - t_1 A_2}{A_1 - A_2} \dots \dots \dots (3)$$

$$T = \frac{t_2 - t_1}{A_1 - A_2} \dots \dots \dots (4)$$

$$A_1 = \ln \frac{I_H(t_1) - I_{f1}}{I_{f1} - I_L(t_1)} \dots \dots \dots (5)$$

$$A_2 = \ln \frac{I_H(t_2) - I_{f2}}{I_{f2} - I_L(t_2)} \dots \dots \dots (6)$$

$I_f(t_1)$ および $I_f(t_2)$ の算出に必要な雲の移動は、当日の7時から7時半の2つの衛星画像から予測対象エリア付近の雲を抽出して雲の移動ベクトル(風速)を算出する。これと同程度の風速を持つ気圧面のGPVの風速分布にしたがって雲を移動させた。

提案手法を用いて算出した2013年8月6日のランプアップ事例の観測値・予測値の時間変化を図6に示す。同日における  $t_1$ は午前9時、 $t_2$ は午前11時となった。比較として、上述の方法で計算される各時間帯において対象エリアに到達する7時半の衛星画像のみで算出した日射量の予測値  $I_{vis}(t)$ を併記する。図5に示すように、衛星画像のみによる  $I_{vis}(t)$ は、12時頃までの予測



精度は高いが、12 時以降は  $0.4 \text{ kW/m}^2$  程度にとどまっており、ランプアップを適切に予測できていない。これに対し、提案手法では 13 時の予測値は実測値に近く、ランプアップを適切に予測できている。ただし、ランプアップの開始時刻を 1 時間程度早く予測している。また、8 時の  $I_L(t)$  を実測よりも  $50 \text{ W/m}^2$  程度大きく予測しているため、13 時および 14 時の  $I_f(t)$  も実測値よりもそれぞれ  $77 \text{ W/m}^2$  および  $55 \text{ W/m}^2$  程度大きい。このように、ランプアップは曇天状態から快晴状態への変化であることに着目した提案手法では、ランプアップ開始のタイミングについて改善の余地があるものの、急激な日射の上昇を適切に予測できており、ランプアップの予測手法としての有用性が確認できた。

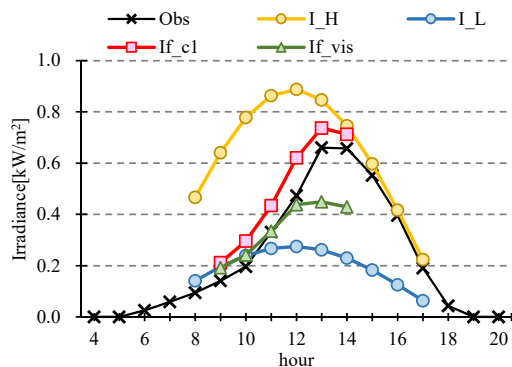


図 6 日射ランプアップの予測結果

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 12 件)

甲斐直登, WRF と MSM-GPV の併用による日射強度予測の高精度化に関する一検討, 成 30 年電気学会全国大会, 2019 年

加藤丈佳, 曇天から快晴への状態変化の関数近似による空間平均日射ランプアップの予測, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2018 年

甲斐直登, 複数の気象予報モデルの併用による日射予測の高精度化 —予測期間の長さが高精度化に与える影響—, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2018 年

Naoto Kai, A Study on Improvement of Irradiance Forecasting Accuracy by Combination of WRF and MSM-GPV, 24th Int. Conf. on Electrical Engineering, 2018

甲斐直登, WRF と MSM-GPV の併用による日射強度予測の高精度化に関する一検討, 平成 30 年電気学会全国大会, 2018 年

甲斐直登, WRF による気象要素予報値を用いた日射予測に関する基礎的検討, 平成 29 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, 2017 年

甲斐直登, WRF における短波放射スキームが日射予測精度に与える影響, 平成 29 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2017 年

甲斐直登, WRF における物理スキームが日射予測精度に与える影響, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2017 年

Naoto Kai, Influence of WRF Radiation Scheme on Precision of Irradiance Forecasting, 27th Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf., 2017

榎本隼也, 数値気象予報モデルに基づく数時間先の空間平均日射予測への衛星画像情報の追加の効果, 平成 29 年電気学会全国大会, 2017 年

Takeyoshi Kato, A Study on Several Hours Ahead Forecasting of Spatial Average Irradiance using NWP model and Satellite Infrared Image, Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2016

榎本隼也, 数値気象予報モデルと衛星赤外画像を利用した空間平均日射強度の数時間先予測に関する一検討, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2016 年

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：真鍋勇介 (H28 年度)

ローマ字氏名：MANABE Yusuke

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：未来材料・システム研究所

職名：寄附研究部門助教

研究者番号：30751143

(2)研究協力者

研究協力者氏名：榎本隼也 (H28 ~ H29 年度)

ローマ字氏名：ENOMOTO Jyunya

研究協力者氏名：甲斐直登 (H28 ~ H30 年度)

ローマ字氏名：KAI Naoto