

ひまわり 8号・9号の衛星画像に基づく 日射量予測・解析システムの開発

Development of a solar irradiance estimate and forecasting system using Himawari -8 and 9

橋本 篤*

1. はじめに

2050 年までのカーボンニュートラルの実現には、太陽光発電（以後、PV）、風力、水力、地熱、バイオマス発電などの再生可能エネルギー（以後、再エネ）や原子力発電などの脱炭素技術の活用が必要となる。再エネの主たる電源の一つである PV の発電出力の変動は、太陽高度や日々の天気（日射量）の変化に依存する。また、積雪や火山灰が PV パネルを覆った場合には発電出力が低下、もしくは発電できなくなる。これらの特徴により、電力を安定に供給する上で支障をきたす場合がある。

PV の出力変動対策として、PV 出力予測の導入とその高精度化が議論されている¹⁻²⁾。PV 出力予測は、数値予報モデルによる前々日・前日予測が主流であったが、近年、現況から当日予測を対象とした数時間先予測の活用の試みがなされている。2022 年度からは当日に PV をオンラインで制御する経済的出力制御（オンライン代理制御）が開始されるな

ど、当日予測の重要性は増している。

電力中央研究所（以後、当所）では、PV の大量導入下での電力系統の安定化に寄与するため、気象庁の静止気象衛星であるひまわり 8号・9号の衛星画像に基づいて日射量の現況の推定と 10 分間隔で最大 6 時間先までを予測可能な日射量予測・解析システム（Solar Radiation Forecasting and Analysis System: SoRaFAS）を開発している³⁻⁷⁾。

図 1 に、SoRaFAS を用いてひまわり 8号・9号の衛星画像から日射量を推定・予測するイメージを示す。図の左から、静止気象衛星ひまわり、衛星画像（可視画像）、衛星画像に基づく空間解像度 1km の日射量推定結果の分布図、および 12 時を予測開始時刻とする地点での 6 時間先までの予測結果の時系列（右上）と当日の 10 分間隔の予測結果の時系列の履歴（右下）を示す。

本稿では、2 章で衛星画像予測に用いるひまわり 8号・9号の概要、3 章と 4 章で SoRaFAS に用いる日射量推定手法と予測手法の概要、5 章で衛星画像

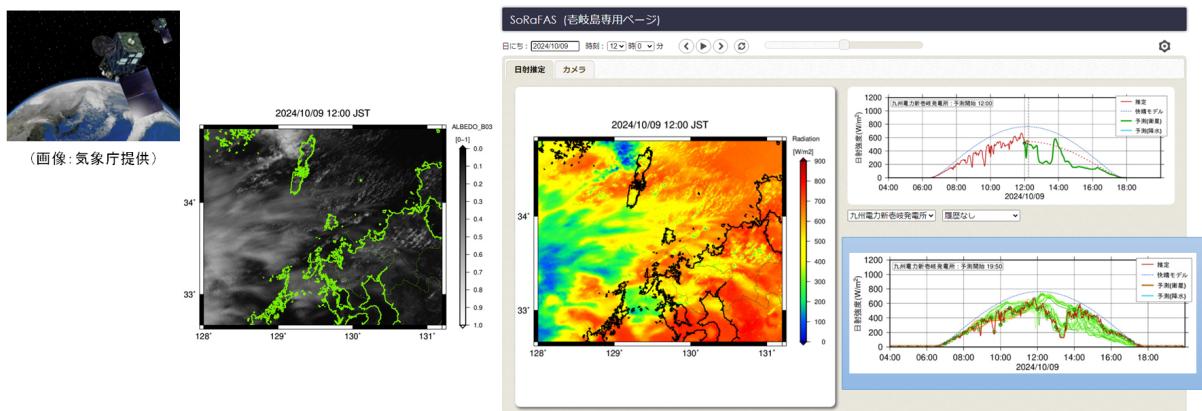


図 1 日射量予測・解析システム SoRaFAS を用いて日射量を推定・予測するイメージ

* 一般財団法人 電力中央研究所

表 1 ひまわり 7 号とひまわり 8 号・9 号の比較

| | 衛星直下点における空間解像度 | 観測バンド数 | 観測時間間隔 |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------|--------|
| ひまわり7号 (全球・半球) | 可視1km、赤外4km | 5バンド (可視1、赤外4) | 30分 |
| ひまわり8号・9号 (日本域) | 可視0.5~1.0km、 近赤外・赤外1~2km | 16バンド (可視3、近赤外3、赤外10) | 2.5分 |

と数値予報モデルを組み合わせたブレンド手法について述べ、6章で今後の展開について述べる。

2. ひまわり 8 号・9 号の気象衛星画像

SoRaFAS の日射量の推定・予測計算には、気象庁の静止気象衛星であるひまわり 8 号・9 号の衛星画像を用いる⁸⁾。ひまわり 8 号は、それまでの静止気象衛星であるひまわり 7 号に替わり、2015 年 7 月から正式に観測運用を開始した。ひまわり 9 号は、2022 年 12 月からひまわり 8 号に替わり、観測運用を開始した。ひまわり 8 号と 9 号は 2029 年までの運用が予定されている。

表 1 に、ひまわり 7 号と 8 号・9 号の日本域における空間解像度、観測バンド数、観測時間間隔の比較を示す。表より、ひまわり 8 号・9 号は、観測機能が大幅に向上していることが確認できる。このため、気象予測・防災分野だけでなく、PV 予測を含め、様々な分野で活用されている。PV 予測分野での普及には、観測時間間隔の 30 分から 2.5 分への変更が大きく寄与したと考えている。

図 2 に、日本海上に日本海寒帯気団収束帯 (Japan-sea Polar airmass Convergence Zone: JPCZ) 発生時の可視画像の雲分布の例を示す。図より、日本の北側と南側で分けて画像を取得していることが確認できる。

天気は基本的に西から東に移動する。このため、衛星画像を用いた予測では、沖縄の離島などの西側の境界付近で計算領域を設定した場合、観測をしていない欠測領域が含まれる場合がある。SoRaFAS ではこの領域に、同時刻の数値予報モデルの日射量の予測結果を代入することで対応している。次期静止気象衛星であるひまわり 10 号では観測領域の拡大が計画されている。

3. 日射量推定手法

当所で開発している日射量推定手法は、2.5 分間隔の衛星画像から空間解像度 1km で 1 分間隔の日射量分布を算出する。以下に、日射量推定手法の概要とその評価例を示す。

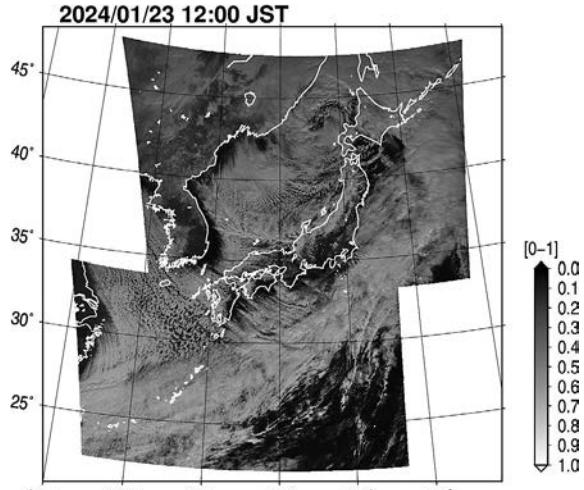


図 2 ひまわりの衛星画像 (日本域、可視 B03) による雲分布の例 (2024 年 1 月 23 日)

3.1 日射量推定手法の概要

日射量推定手法は、ひまわり 8 号・9 号の可視画像 (観測バンド: B03) と二種類の赤外画像 (B13, B15) を組み合わせて用いる点に特徴がある。これにより、雲アルベド (反射率) だけではなく、雲の厚み (種類) までを考慮して日射量を推定できる。

式 (1) に、全天日射量 S (W/m^2) の推定式を示す。推定式は Dedieu et al. の提案式⁹⁾を基本とし、快晴時の大気の補正係数 α 、雲の種類を考慮するための補正係数 β 、大気路程を考慮した補正係数 γ で構成されている。

$$S = \alpha \times \beta \times \gamma \times \frac{(1-A)}{(1-A_s)} \times S_0 \quad (1)$$

ここで、 S_0 は大気上端の水平な単位面積に入射する日射量 (W/m^2) であり、日時と緯度・経度から求まる。 A は大気路程を考慮した雲アルベド、 A_s は地表面アルベドであり、設定した学習期間 (対象日の前 30 日間) における各時刻の雲アルベド A の最低値を A_s として用いる。 α は快晴時の大気の補正係数である。快晴時の大気の補正係数 α だけでも日射量を推定可能であるが、雲アルベドが同じであっても雲の種類によって地上での日射量が異なる場合がある。このため、雲の種類を判別できるように 2 種類の赤外画像 (観測バンド: B13, B15) を組み合わせることで雲の種類を考慮する補正係数 β を追加している。 γ は大気路程 (太陽光が通過する大気層の厚さ) を考慮した補正係数である。

補正係数 α と β は、設定した学習期間 (対象日の

前 30 日) の気象官署での日射量の観測値と衛星画像データを用いて日々算出する。

3.2 日射量推定手法の評価

日射量推定手法を関東エリアに適用し、2024 年 4 月の 1 か月間の推定計算を行い、時系列の再現性と予測誤差を評価する。

3.2.1 計算条件

図 3 に、SoRaFAS の計算領域を示す。日射量の推定計算に用いる補正係数の作成には、計算領域内に位置する気象庁の気象官署（宇都宮、前橋、甲府、館野、銚子、東京）の観測値を用いる。推定手法の誤差評価には、当所の我孫子地区（千葉県我孫子市）と赤城試験センター（群馬県前橋市）の観測値、および気象官署の観測値を用いる。

評価期間は 2021 年 4 月とし、1 日毎に学習期間を変更した補正係数を用いて日射量推定計算を実施した。推定誤差は、天頂角 85 度未満の条件で、日射量の前 10 分平均値を用い、平均誤差 (ME)、平均絶対誤差 (MAE)、二乗平均平方根誤差 (RMSE)、相関係数について評価した。ME は、推定値と観測値の差の平均である。

3.2.2 時系列評価

図 4 に、当所の赤城地区で、厚い雲に覆われた曇天時と快晴で午後に日射量の激しい変動傾向が見られた 2021 年 4 月 29 日と 30 日における観測値と推定値の日射量の 1 分値の時系列の比較を示す。

図より、推定値は観測値と比較して、4 月 30 日の午後に見られた激しい変動傾向を再現できていないものの、29 日の曇天時や 30 日の午前から正午頃

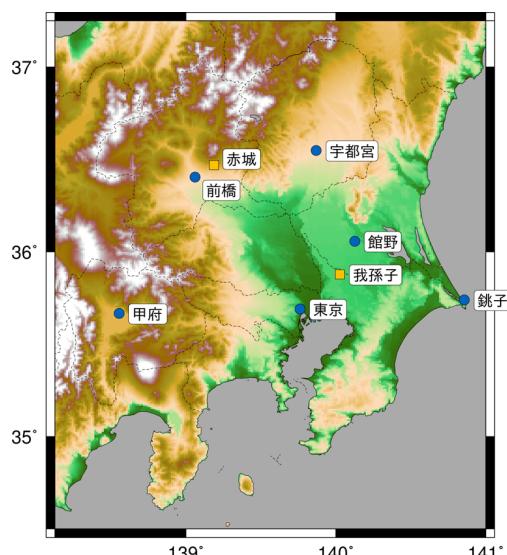


図 3 関東エリアを対象とした計算領域と計算領域内で日射量を観測している気象庁の気象官署と当所の我孫子地区と赤城試験センターの位置図

の快晴時、および、平均的な変動傾向を良好に再現することが確認できる。

3.2.3 誤差評価

表 2 に、当所我孫子地区と赤城試験センターと計算領域内の気象官署における日射量の前 10 分平均値の BIAS, MAE, RMSE, 相関係数の比較を示す。

BIAS の各地点の平均は -8.5W/m^2 (最小 $-28.7 \sim$ 最大 1.8W/m^2)、MAE は 52.1W/m^2 ($43.7 \sim 69.2 \text{W/m}^2$)、RMSE は 77.3W/m^2 ($63.0 \sim 99.9 \text{W/m}^2$)、相関係数は 0.97 (0.96 \sim 0.98) である。図 4 より、4 月の快晴時の日射量が $1,000.0 \text{W/m}^2$ 程度であることを考慮すると、当所の観測サイトと学習に用いた気象官署で同程度の計算精度を有することが確認できる。

4. 日射量予測手法

当所で開発している日射量予測手法は、過去と現在の衛星画像の雲分布に基づいて雲域の移動速度ベクトルを求め、ベクトルに基づいて移動させた衛星画像を日射量に変換することで 6 時間先までの日射量分布を予測する。

SoRaFAS には、3 種類の雲域の移動速度ベクトルを求める手法がある。ここでは、それらの変遷を含めた日射量予測手法の概要を示す。それぞれの手法の詳細は、参考文献に具体的に述べているので参照されたい。

4.1 日射量予測手法の概要 (第 1 世代)

第 1 世代の予測手法³⁾を説明するために、九州

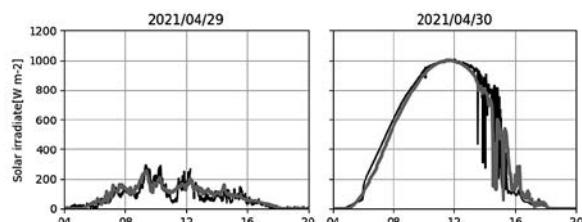


図 4 赤城試験センターにおける日射量の観測値 (黒実線) と推定値 (灰実線) の時系列の比較

表 2 SoRaFAS の推定値の誤差評価
(日射量前 10 分平均値、2021 年 4 月)

| | ME(W/m^2) | MAE(W/m^2) | RMSE(W/m^2) | 相関係数 |
|-----|----------------------|-----------------------|------------------------|------|
| 我孫子 | -14.6 | 53.9 | 77.5 | 0.97 |
| 赤城 | -28.7 | 69.2 | 99.9 | 0.96 |
| 宇都宮 | -4.1 | 50.7 | 74.4 | 0.97 |
| 前橋 | 0.3 | 53.2 | 86.0 | 0.96 |
| 甲府 | -6.5 | 51.1 | 72.7 | 0.97 |
| 館野 | -6.2 | 49.2 | 78.5 | 0.97 |
| 銚子 | -10.1 | 45.5 | 63.0 | 0.98 |
| 東京 | 1.8 | 43.7 | 66.2 | 0.98 |

エリアを対象とした計算領域を図5に示す。

雲域の移動予測では、過去（第1画像（D01））と現在（第2画像（D02））の2時刻の画像データをもとに、2つの画像の類似度の高い部分を対応付ける相互関関数¹⁰⁾を用いることで経度と緯度方向の雲域の移動速度ベクトルを算出し、この移動速度ベクトルを基に第1画像（D01）を移動させる。移動速度ベクトルの算出に用いる衛星画像には、地形の影響を受けない水蒸気画像（観測バンド：B08）を用いる。移流計算には、時・空間的な位相のずれによる誤差の低減を目的として、拡散的な傾向を示す風上差分法を用いる。これは、第2世代も同様である。

次に、移動速度ベクトルの算出では、小さなスケールの直近の雲の動きと大きなスケールの総観的な雲の動きを予測するために、2種類の移動速度ベクトルをそれぞれ算出し、組み合わせて用いている。直近の雲の動き（uv1）は1時間前と現在時刻、総観的な雲の動き（uv2）は3時間前と現在時刻の衛星画像を用いて計算する。計算では、予測開始から1時間はuv1を用い、予測開始1時間から3時間はuv1とuv2を組合せ、3時間以降はuv2を用いて雲の移動速度を用いることで、異なる時間・空間スケールでの雲の動きを予測する。

第1世代の予測では、過去画像が予測期間中一定で持続すると仮定した持続モデルを追加し、それについて3時間前から予測開始時刻までの再現計算を事前に実施し、再現精度が高かった手法を予測計算に選択した。当所では、この仕組みを品質チェック手法と呼んでいる。例えば、関東平野において、日本の南海上に位置する低気圧からの暖湿な大気の流れに伴って継続的に雲域が流入する時などにおいて

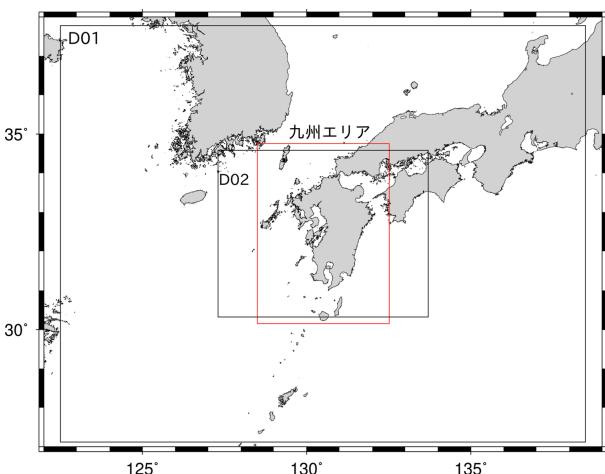


図5 予測計算の計算領域
(D01: 第1画像, D02: 第2画像, 九州エリア: 表示領域)

て、持続モデルが高い精度を示して予測計算に採用された事例などがあることを確認している。

4.2 日射量予測手法の概要（第2世代）

第2世代の予測手法⁵⁾の概要を説明するために、壱岐島エリアを対象とした計算領域を図6に示す。

雲域の移動予測では、狭領域のS01と広領域のS02の2種類の検査領域を設定し、相互関関数を用いることで移動速度ベクトルを算出し、この移動速度ベクトルを基に第1画像（D01）を移動させる。ここで、探索範囲は検査領域の2倍とする。移動速度ベクトルの算出に用いる衛星画像には、上・中層雲だけでなく、下層雲の解析も可能な水蒸気画像（観測バンド：B08）と赤外画像（観測バンド：B13）の差分画像を用いる。これは、第3世代も同様である。

次に、移動速度ベクトルの算出では、狭領域S01で算出された移動速度ベクトルをuv1（u1, v1）、広領域S02で算出された移動速度ベクトルをuv2（u2, v2）とし、予測開始から60分先まではuv1に変位項uv'を付加したuv1 + uv'を用いる。180分先以降はuv2を用いる。60分先から180分先までは、uv1とuv2を組み合わせたuv12を用いる（式(2)）。式には、180分先まで移動させた雲域とuv2のみで180分先まで移動させた雲域が同じとなるように変位項uv'を付加している（式(4)）。

$$uv12 = (1 - \alpha(t)) \times uv1 + \alpha(t) \times uv2 + uv' \quad (2)$$

$$\alpha(t) = (t - 60)/120 \quad (t = 60 \sim 80) \quad (3)$$

$$uv' = 120 \times (uv2 - uv1)/180 \quad (4)$$

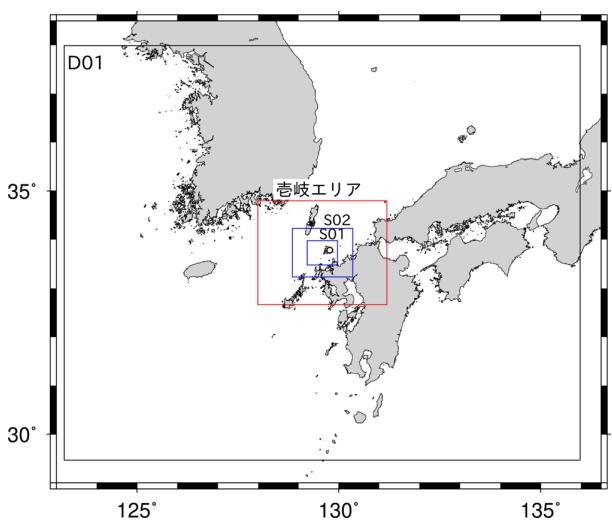


図6 予測計算の計算領域
(D01: 第1画像, S01: 検査領域, S02: 検査領域, 壱岐エリア: 表示領域)

ここで, t は経過時間 (分) である. 移動速度ベクトルの計算は, 現在時刻と 10 分前の画像データを基に算出する. 移動速度ベクトルの計算は 5 分間隔で行い, 予測開始時刻の前 30 分間から予測開始時刻までに算出された 5 分間隔の移動速度ベクトルを平均して用いる.

4.3 日射量予測手法の概要 (第 3 世代)

第 3 世代の予測手法⁷⁾の概要を説明するために, 壱岐島エリアを対象とした計算領域を図 7 に示す.

第 3 世代では, よりローカルな雲域の移動を予測するために, 領域を細かく分割して算出したベクトル分布に基づいて第 1 画像 (D01) 内の雲域の移動を予測する.

具体的には, 領域 D01 を東西・南北方向に 30 格子間隔 (約 30km) で分割し, 分割した格子点を中心 40 格子 (約 40km) を検査領域, その 2 倍を探索領域に設定し, 各検査領域について相互関関数を用いて移動速度ベクトルを算出する.

雲域の移動速度ベクトルは, 予測計算開始時に得られた最新時刻の画像とその 10 分前の画像を用いる. 雲域の移動計算は, 計算の安定性と高解像度化を考慮して, 雲の拡散性を風上差分よりも抑えた TVD (Total Variation Diminishing) 法を用いる.

最後に, 移流計算の時間間隔 (CFL 条件) を適切に設定すれば, 第 1 世代と第 2 世代で用いる 1 次の風上差分でも計算可能なことを確認している. このため, 計算環境・利用用途に応じて TVD 法と 1 次の風上差分を使い分けている.

4.4 雲域の移動予測手法について

第 1 世代の雲域の移動予測手法は, 6 時間先までの相関的な雲域の移動を予測するために, 直近の雲の動き (uv1) は 1 時間前と現在時刻, 総観的な雲

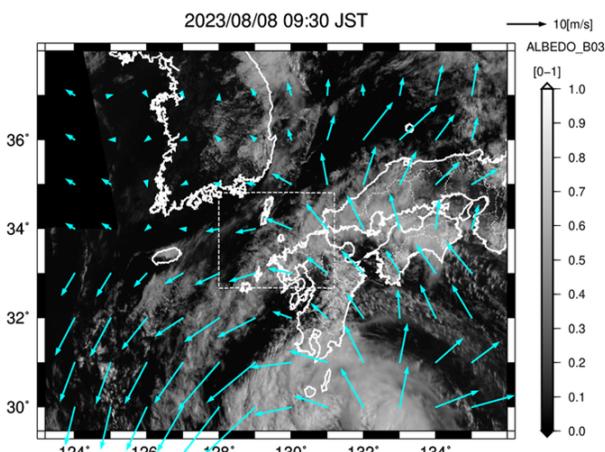


図 7 衛星画像と移動速度ベクトルの比較
(図中の白枠の点線は壱岐エリアの表示領域)

の動き (uv2) は 3 時間前と現在時刻の水蒸気画像を用いて算出している. 本手法は, 総観的な雲域の移動を精度高く予測できる一方で, 特に 3 時間前と現在の画像で雲域の移動を適切に予測できず, 雲域の移動を大きく外す場合があった.

第 2 世代と第 3 世代は, 5 章で述べるブレンド手法の利用を前提に, 第 1 世代と比較して検査領域と探査領域を狭く, 比較する画像の時間間隔を短く設定している. 加えて, 相互関に用いる画像を水蒸気画像から水蒸気画像と赤外画像の差分画像に変更することで, 大外しを低減している.

第 3 世代は, 第 2 世代と比較し, 予測開始から 3 時間先までの比較であるが, 計算領域の中心だけでなく, その周辺でも精度高く日射量を予測できることを確認している. 但し, 第 2 世代に対して計算負荷は増大している.

5. 衛星画像予測と数値予報モデルのブレンド手法

衛星画像のみを用いた日射量予測では, 日の出前からの予測や数時間先以降の予測 (雲の発生・消滅) に課題を有している. この対策として, 衛星画像による予測に数値予報モデル (Numerical Weather Prediction : NWP) による予測を併用することで精度よく予測する仕組みを構築している⁵⁾. 衛星画像予測と数値予報モデルのブレンド式を式(5)に示す.

$$SF_{blend}(t) = SoRaFAS(t) \times (1 - z(t)) + NWP(t) \times z(t) \quad (5)$$

ここで, t は経過時間 (0 ~ 360 分), z はブレンド比の経過時間 t に関する関数 (0 ~ 1) である.

曲線の傾き, 変化点, 数値予報モデルの重みを変更した約 3 万通りのブレンド曲線の候補を作成し, 蓄積・整理された気象官署での観測値と SoRaFAS と NWP の予測結果を用い, 予測開始時刻毎に最適なブレンド曲線を日々選定する. 参照として, 図 8

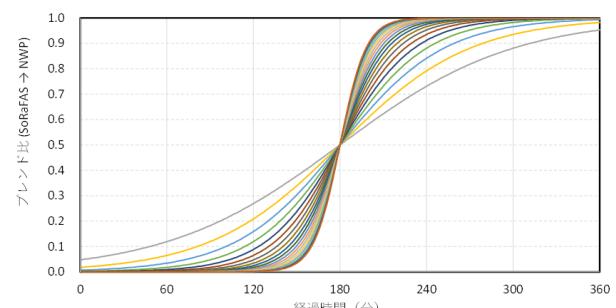


図 8 衛星画像予測と数値予報モデルに用いるブレンド曲線の例 (傾き変化, 変化点, 重み固定)

に、SoRaFAS と NWP の組み合わせに用いるブレンド曲線の例を示す。

ブレンド予測を用いることで、SoRaFAS が不得意とする日の出前予測の条件や衛星画像予測から数値予報モデルに有効時間が重なる時間帯において計算精度が向上することを確認している。

6. おわりに

本解説では、当日の日射量の現況把握と数時間先の予測を目的とした気象庁のひまわり 8 号・9 号の衛星画像に基づく日射量予測・解析システム SoRaFAS の概要について説明した。

今後の展開として、日射量推定・予測手法の改良を継続するとともに、SoRaFAS の日射量推定・予測に PV 出力推定手法と組み合わせることで⁷⁾、電力系統の安定化に寄与する予定である。加えて、SoRaFAS と全天カメラを有する複合地上センサとの連携を進めることで、よりローカルな太陽光発電設備での予測精度の向上を図る予定である¹¹⁾。

参考文献：

- 1) 大竹 秀明, 野原 大輔, 中島 孝:「再生可能エネルギーの気象学」, 気象研究ノート, 第 247 号 (2023)
- 2) 由本 勝久, 総論: 電力系統の需給運用と再生可能エネルギーの出力予測, 電気学会誌, 143 卷, 5 号, pp.256-258 (2023)
- 3) 橋本 篤, 宇佐美 章, 小林 広武:「ひまわり 8 号を用いた日射量推定・予測システムの開発－九州エリアにおける 1 年間の精度評価－」, 電力中央研究所報告, N18003 (2019)
- 4) 橋本 篤:「衛星画像を用いた高精度な日射量推定・予測システムの開発」, 電気評論, Vol. 105 (6), pp. 55-60 (2020)
- 5) 橋本 篤, 由本 勝久:「衛星画像予測と数値気象モデルを組み合わせた短時間先日射量予測手法の開発」, 電気学会論文誌 B, Vol.143, No.2, pp.86-96 (2023)
- 6) 橋本 篤, 「衛星画像を用いた短時間先&ローカルエリア日射量予測手法の開発」, 電気学会誌, 143 卷, 5 号, pp.263-266 (2023)
- 7) 橋本 篤, 宇佐美 章:「離島を対象とした日射量予測・解析システム SoRaFAS の改良と PV 出力推定手法の導入」, 電力中央研究所報告 (2025)
- 8) 岡本 幸三, 別所 康太郎, 吉崎 徳人, 村田 英彦, 「静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号とその利用」, 気象研究ノート, 第 238 号 (2018)
- 9) G. Dedieu, P. Y. Deschamps, Y. H. Kerr : Satellite Estimation of Solar Irradiance at the Surface of the Earth and of Surface Albedo Using a Physical Model Applied to Meteosat Data, Journal of Applied Meteorology, Vol. 26, pp.79-87, 1987.
- 10) 一般社団法人 可視化情報学会:「PIV ハンドブック」, 森北出版株式会社, pp. 63-103 (2002)
- 11) 橋本 篤, 小渕 浩希, 花田 行弥, 根本 和哉, 山崎 将也, 稲村 直樹:「衛星と天球画像に基づく日射量・PV 出力予測 -衛星と天球画像を組み合わせた日射量予測技術開発の取り組み-」, 令和 7 年電気学会全国大会 (2025)

謝辞：

衛星画像を用いた日射量推定・予測の計算の実行、結果の図化、および、日射量予測・解析システム SoRaFAS の開発に関して、株式会社 電力計算センターの田口富貴子氏、寺本尚史氏、宮田かおり氏、丹羽亮介氏、山崎健一氏にご尽力頂きました。ここに記して謝意を表します。

著者略歴



橋本 篤 (ハシモト アツシ)
(正員) 2005 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程環境エネルギーシステム専攻卒業。2006 年 4 月 (財) 電力中央研究所に入所。現在、(一財) 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部気象・流体科学研究部門に所属。主として、自然エネルギー発電の予測や電力設備のハザード予測・評価などに関する研究に従事。博士 (工学)。