

# 航空気象報データの異目的活用による太陽光発電量予測精度向上

村上太一郎<sup>†</sup> 渡辺 隆史<sup>†</sup> 江原 結風<sup>††</sup> 富井 尚志<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 横浜国立大学大学院環境情報学府情報環境専攻 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

<sup>††</sup> 横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

<sup>†††</sup> 横浜国立大学大学院環境情報研究院 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

E-mail: †{murakami-taichiro-ng,watanabe-takashi-rz,ehara-yuna-dh}@ynu.jp, ††tommy@ynu.ac.jp

**あらまし** 本研究では専門の目的に特化したデータを別の目的に活用すること（データの異目的活用）に着目し、有用性を示す。この異目的として、スマートグリッドの実現可能性を定量的に評価することを目指す。その手段として、再生可能エネルギーの有効活用や外部電源から供給される電力に対する負荷平準化のシミュレーションを行う。電力の負荷平準化を行うためには事前に再生可能エネルギーの発電量を予測する必要がある。太陽光発電に着目すると、その発電量は雲の動向に大きく左右される。ところで、雲の量、高さ、形の属性を含む専門の目的に特化したデータとして航空気象報が存在する。本稿では、負荷平準化の達成に必要な太陽光発電の発電量予測において、航空気象報における雲に関するデータを異目的活用してデータ分析を行う。

**キーワード** データの異目的活用、再生可能エネルギー、負荷平準化、スマートグリッド、VGI: Vehicle-Grid Integration

## 1 はじめに

センサ技術やストレージ技術の発達により、実世界の膨大かつ多様なデータを取得・蓄積することが可能となった [1]。中でもスマートフォンなどのスマートデバイスや IoT (Internet of Things) の普及により、ヒトの生活に関する記録である「ライフログ」が容易に利用できるようになった。また、地方公共団体がオープンデータに関する取り組みを進めたことで、気象データなどの場所固有の様々なデータが利用できるようになった。このような状況下で経済産業省は、リアルデータを利活用するためのプラットフォーム構築の重要性を述べている。しかし、ライフログやオープンデータは多量で多様であるという性質から扱いが難しく、管理方法や応用先が模索されている。

一方、近年のエネルギー問題として、温室効果ガスの 1 つである CO<sub>2</sub> 排出を抑えつつ、効率的にエネルギーを利用していくことが求められている [2] [3]。この問題の対策の一つに、化石燃料由来の電力消費を抑えるために再生可能エネルギーを導入することが挙げられる。ところが、再生可能エネルギーは気象や季節に依存することから不安定のため、需要電力を発電電力に一致させること（エネルギーマッチング）が難しい。また、再生可能エネルギーの導入が進むと、発電電力の不安定性により実質需要電力に急激な変動を引き起こしてしまうダックカーブ現象という問題が生じることが懸念される [4] (図 1)。一般的に電力系統は電力需要が多い時に効率が高くなるように構築されるため、再生可能エネルギーの導入が電力系統の効率を低下させてしまう可能性がある。以上より、再生可能エネルギーを有効活用しつつ、実質需要電力の変動を縮小させること（負荷平準化）が求められる (図 2)。

消費しきれずに余ってしまった発電電力（発電余剰電力）を

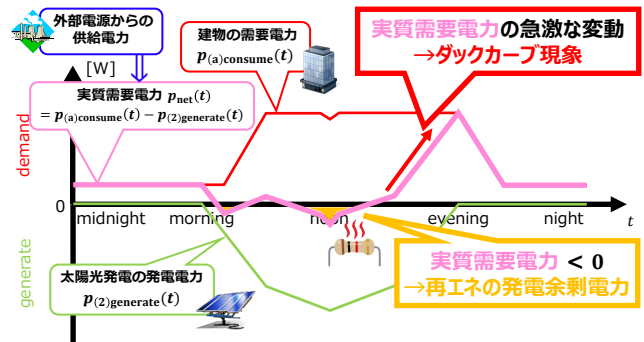


図 1 発電余剰電力とダックカーブ現象

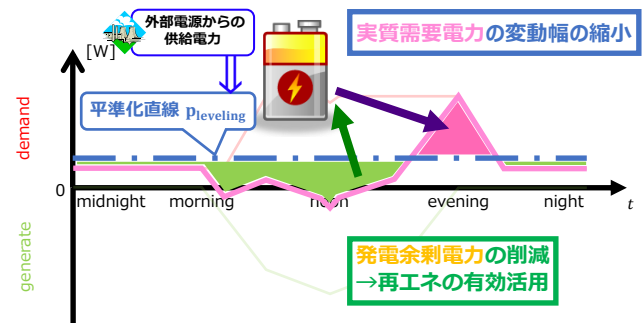


図 2 電力の負荷平準化

バッテリーに充電し、発電の少ない時間帯に給電することで、不安定な再生可能エネルギーを有効利用できると考えられる。また、今後の普及が期待される電気自動車 (EV: Electric Vehicle) を移動するバッテリーとして活用することが期待される [5]。バッテリーを搭載した EV は走行時にエネルギーを運ぶこと（エネルギーの空間移動）ができ、非走行時に電力系統との間で電力の融通を行うこと（VGI: Vehicle-Grid Integration）が

できる。しかし、EVは個別に使用状態が異なるため、適切な充電を行うことが難しい。以上より、再生可能エネルギーとEVバッテリーを組み合わせた負荷平準化に関して、現実的なデータに基づいて実現可能性の評価を行うことが大きな課題である。

以上の課題に対して我々は、エネルギー利用に関する場所固有のデータを用いたデータマネジメントにより、場所ごとの負荷平準化を目指す。そこで、未来のスマートグリッド環境として、次の3つのことを想定する。一つ目に、オフィスビル群や工場などの地域電力網（マイクログリッド）ごとに再生可能エネルギーの発電設備を設置し、その発電電力をその場所で消費する（電力の地産地消）。これは、再生可能エネルギーの発電電力は近隣で同期することから、発電余剰電力を売電することが難しいためである。二つ目に、再生可能エネルギーだけで不足する電力は、マイクログリッド外部の大規模発電所から送電網を通して供給される。三つ目に、EVバッテリーを活用して負荷平準化を行う。実質需要電力の基準となるレベルを決め、基準より需要電力が少ない時間帯に充電、多い時間帯に給電する（電力の時間移動）。本研究では、以上の想定環境において、再生可能エネルギーの有効活用と負荷平準化が同時に達成できることを示す。先行研究では、オフィス1部屋と仮想の再生可能エネルギー発電設備およびバッテリープールから構成される電力網の最小単位（ナノセル）においてバッテリー充電シミュレーションを行い、EV1台程度のバッテリー容量でオフィス1部屋の負荷平準化ができることを示した[6]。また、ライフログを用いた週及的シミュレーションの結果、EVバッテリーの損耗が許容できる程度で、再生可能エネルギーの発電余剰電力と実質需要電力の変動幅を同時に減らせることを示した[7]。

電力の負荷平準化を行うためには、負荷平準化直線を事前に決める必要がある。そのためには再生可能エネルギーの発電量予測が必要である。ここで太陽光発電に着目すると、太陽光発電の発電量は天候、特に雲の状態によって大きく左右される。そこで、太陽光発電の発電量予測を行うためには雲の情報が有効だと考えられる。しかし、一般に公表される気象情報には、太陽光発電の発電量予測にとって十分な雲の情報が含まれていない。一方で、航空の世界で日常的に使用されている航空気象報には、雲の量、高さ、形といった雲に関する詳細な情報が含まれている。このように、「専門の目的に特化し、限定的に使用されている」データには、一般的に知られていない有用な情報が含まれていることがある。そこで本研究では、そのようなデータを本来とは異なる目的に用いること（データの異目的活用）に着目する。本稿では、負荷平準化の達成に必要な太陽光発電の発電量予測において、航空気象報における雲に関するデータを異目的活用してデータ分析を行う。

## 2 関連研究

再生可能エネルギーと蓄電池を組み合わせたスマートグリッドに関する研究は現在盛んに行われている。Sintovら[9]は、スマートグリッドに行動科学の知見を導入し、スマートグリッド

の導入の促進や、運用の効率化を図った。Simmら[10]は再生可能エネルギーの発電電力と需要電力を同期させることを目的に、ユーザの電力消費意識を改善させるシステムを提案し、電力系統が独立した島で実証実験を行った。日本国内の研究に目を向けると、馬場ら[11]は家庭内のIoT化された電化製品を中央制御することで発電電力量を有効活用する手法を提案し、発電余剰電力量を約10.4%緩和可能であることをシミュレーションから示した。横浜市・豊田市・けいはんな・北九州市の4都市[12]では、産官学が一体となってスマートシティに関する評価実験を行った。また岡山県立大学[13]では、電力変換を極力減らした「スマートPV & EVシステム」を提案し、EVを使用したことによるCO<sub>2</sub>の削減効果をシミュレーションで確認した。

様々なエネルギー貯蔵システムが存在する中、省エネルギー実現の媒体としてEVが注目されている。EVは空間的、時間的に移動するバッテリーとしての役割を持つ。そして、非走行時にバッテリーに充電した電力をグリッドに提供することができる。V2Gの導入効果の検討としてKemptonら[14]は、V2Gをアメリカの電力市場に投入した際にどの程度の効果と利益が得られるのかの検証を行った。Jansenら[15]は複数のEV群を1つの仮想的な発電所としてみなすEV-VPPを提案し、V2Gを投入した際にV2Gが果たす役割について論じた。これらを根拠としてV2G技術を活用した様々な研究が行われている。Brushら[16]は、社会的に電力削減要求の高いピーク時間に、15家庭分の実車EVを用いてピークシフトをした時の経済効果のシミュレーションを行い、月平均\$13.58の電気代が節約可能であることを示した。Itoら[17]は、家庭内消費電力の予測に基づくEVの充放電計画の提案を行い、スマートグリッドを模した環境を構築し実験を行った。Kikusatoら[18]は、家庭のコストの最小化を目的に、PVの出力抑制を考慮に入れたEVの充電計画を提案し、実データによるシミュレーションを行った。Lamら[19]はEVを用いることで地方の大規模な風力発電所の余剰電力を都市部へ電力移動させる手法を提案し、シミュレーションから実現可能であることを示した。Huangら[20]は、風力発電の発電電力をEVに充電するロバストなスケジューリングアルゴリズムを提案し、実データによるシミュレーションを行った。このように、スマートグリッドにおけるEVを用いたV2Gは多く研究されているものの、実車のEVを用いた実験による評価を含む研究はされていない。

電力系統の安定化や、高いエネルギー効率の維持のためには負荷平準化は重要な課題である。Hongら[21]は、電力の負荷平準化を目的に、グリッド内の電化製品の使用時間の計画を立てるシミュレーションを行った。Xuら[22]は、異なるタイプの建物を組み合わせてエネルギーの負荷平準化を達成するためのシミュレーションが行えるシステムを提案した。Karfopoulosら[23]は、個々のEVが充電の料金の最小化を行うことで、負荷平準化が達成されることをシミュレーションにより示した。



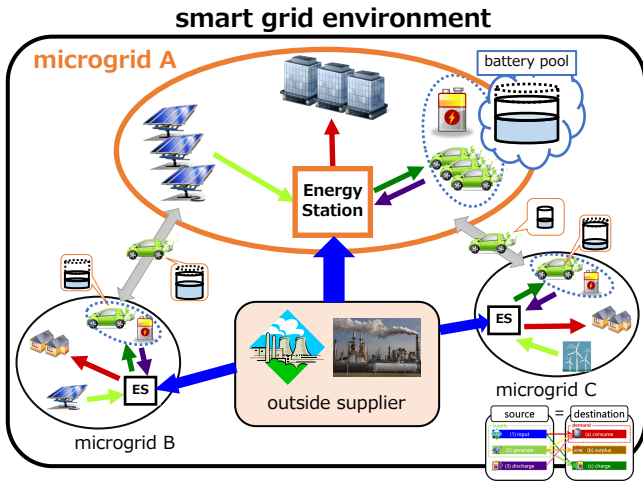


図 6 想定するスマートグリッド環境

### 3.3 TAF で通報される雲の情報

TAF の通報形式を図 5 [24] に示す。TAF で通報される雲の情報は雲量と雲底の高さの 2 種類である。この情報は「 $N_s N_s N_s h_s h_s$ 」(図 3 の赤枠内)で報じられる。雲の情報は METAR と同様に報じられる。なお、TAF はおおむね 6 時間間隔で通報される。すなわち METAR とは異なり、TAF は前日時点の予報として用いられるものである。

## 4 航空気象報の異目的活用のためのモデル

### 4.1 想定環境

本研究のスマートグリッド環境として、次の 3 つのことを想定する(図 6)。1 つ目に、オフィスビル群や工場などの小規模な地域電力網(マイクログリッド)ごとに再生可能エネルギーの発電設備を設置し、その発電電力を地産地消する。これは、再生可能エネルギーの発電電力は近隣地域で同期することから、発電余剰電力を売買することが難しいためである。2 つ目に、再生可能エネルギーだけで不足する電力(実質需要電力)は、マイクログリッド外部の大規模発電所から送電網を通じて供給される。本研究では、マイクログリッド外部から供給される電力の変動を抑えること(外部電力の負荷平準化)を目指す。3 つ目に、マイクログリッド内の充給電設備にプラグする EV バッテリー群を活用して負荷平準化を行う(図 7)。外部電力と再生可能エネルギーの発電電力の和を「暫定供給電力」とすると、暫定供給電力が需要電力よりも多い時間は EV バッテリー群に充電を行うことで需要電力を、目標である外部電力の平準化直線の電力量まで押し上げることができる。一方で、暫定供給電力が需要電力より少ない時間ではバッテリー群から給電を行うことで必要な外部電力量を平準化直線のラインまで削減することができる。

### 4.2 再生可能エネルギー発電量予測の必要性

想定環境において、電力の負荷平準化を達成するためには、事前に外部電力の平準化直線を日ごとで決定する必要がある。平準化直線を定めるためには再生可能エネルギーの発電量を事

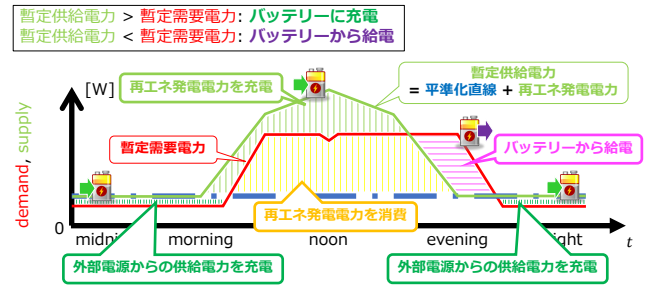


図 7 再生可能エネルギーと EV バッテリーを活用する負荷平準化

前に知る必要がある。本稿では再生可能エネルギーのうち、太陽光発電に着目する。太陽光発電は太陽光が当たらないと発電することが出来ないため、天候特に雲の動きに発電量が大きく左右される。すなわち、本研究は雲の状態(雲の量、高さ、形)の情報をを用いることによって、太陽光発電量予測の精度を向上させることができるかどうかについて明らかにする。この時、2 つのアイデアがある。本稿では主として(1)のアイデアに基づいた精度向上方法を検討する。

- (1) 前日時点の天気予報による発電量予測に対して、TAF を用いた場合の発電量予測の方が精度を向上させることができるかどうか
- (2) 当日時点の天気予報による発電量予測に対して、METAR を用いた場合の発電量予測の方が精度向上できるか

### 4.3 航空気象報を活用するための ER モデルを用いたモデル化

本節では、航空気象報のデータを検索・活用するために、本研究の目的に特化したデータベース設計を行う。太陽光発電の発電量予測に航空気象報を活用するためのデータモデルとして、想定する環境のインスタンス付き ER 図(インスタンス図)を図 8 に示す。まず、「発電設備」(Generator)の「1 時間ごとの発電量」(Generate per Hour)は「日付」(Date)と「時刻」(Time)と「発電設備」のリリースンシップで表される。この「1 時間ごとの発電量」を「日付」で集約すると(Group by)、1 日単位における「発電設備」の発電量の波形である「1 日ごとの発電グラフ」(Generate Graph per Day)が導出できる。「METAR」(Hourly METAR Reported)は「日付」、「時刻」、「空港」(Airport)のリリースンシップで表される。この「METAR」に含まれている雲の情報は「雲の量」(METAR Cloud Cover)、「雲の高さ」(Cloud Height)、「雲の形」(Cloud Shape)の 3 種類がある。「雲の量」、「雲の高さ」、「雲の形」の 3 つの値の組み合わせで決まるリリースンシップを「METAR で示される雲層の状態」(METAR Cloud Layer State)として表す。「METAR で示される雲層の状態」は 1 つの「METAR」に対して 1~3 個存在するため、「METAR」と「METAR で示される雲層の状態」の関係は 1 対 1...3 の関係となる。「TAF」(Daily TAF Reported)は「日付」、「空港」のリリースンシップで表される。「TAF」に含まれている雲の情報は「雲の量」(TAF Cloud

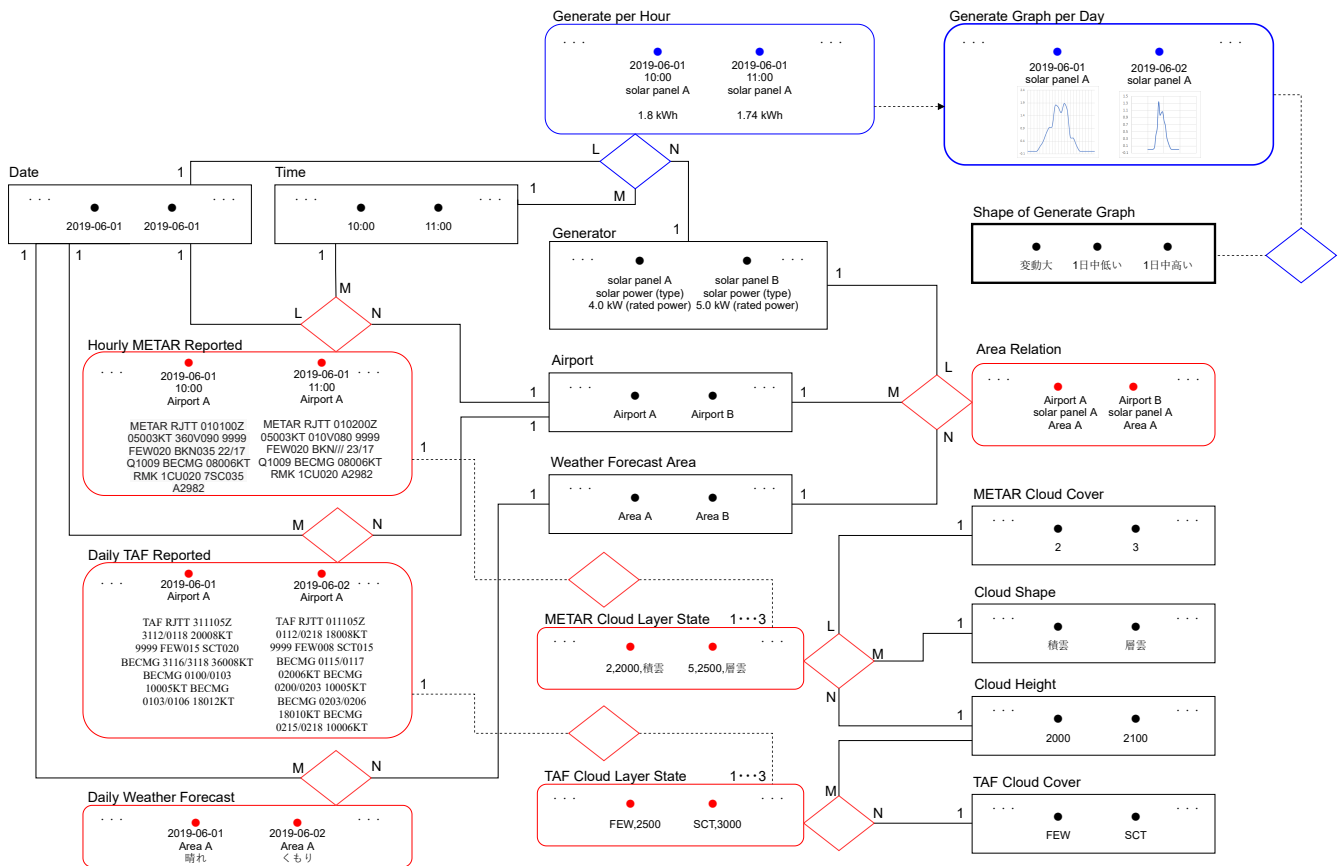


図 8 太陽光発電と雲に関するインスタンス図

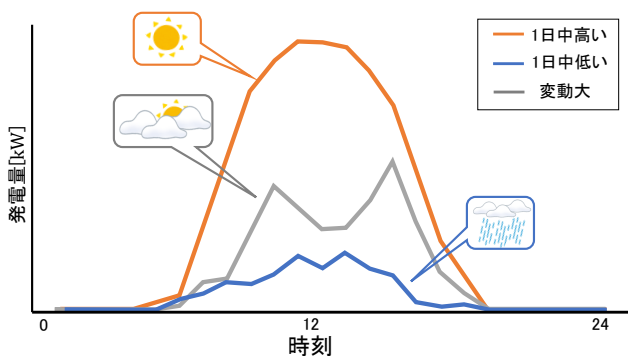


図 9 発電グラフの概形

Cover),「雲の高さ」の2種類がある。ここで, METARとTAFで示される「雲の量」は異なるため, METAR Cloud CoverとTAF Cloud Coverに分けた。「雲の量」,「雲の高さ」の2つの値の組み合わせで決まるリレーションシップを「TAFで示される雲層の状態」(TAF Cloud Layer State)として表す。「TAFで示される雲層の状態」は1つの「TAF」に対して1~3個存在するため,「TAF」と「TAFで示される雲層の状態」の関係は1対1...3の関係となる。「天気予報」(Daily Weather Forecast)は「日付」,「天気予報対象地域」(Weather Forecast Area)のリレーションで表される。また「METAR」や「TAF」,「天気予報」がどの「発電設備」に対して有効か,つまり「空港」と「天気予報対象地域」と「発電設備」の関係はこの3つのリレーションシップ「位置関係」(Area Relation)とする。

#### 4.4 モデルを用いた発電量と雲の関係

前節でモデル化したデータを集約し, 太陽光発電量と雲の関係を明らかにする。「1日ごとの発電グラフ」について「1日中高い」,「1日中低い」,「変動大」の3種類で分類を行った(図9)。まず,「1日中高い」と分類する日は発電グラフの波形が綺麗な山になる時である(図9の橙色の波形)。これは1日中晴れていて, 雲の影響が少ない日を想定している。次に,「1日中低い」と分類する日は発電量が1日を通して低い時である(図9の青色の波形)。これは1日中雨が降っていたり, 全天が厚い雲に覆われていたりする日を想定している。最後に,「変動大」と分類する日は発電量が安定しない時である(図9の灰色の波形)。これは雲が出ている日を想定している。

### 5 発電量予測の評価方法とベースライン

本章では, 太陽光発電量予測の評価方法とベースラインとなる予測方法, その精度について説明する。

#### 5.1 発電量予測の評価方法

4.1節で述べたように, 本研究の最終的な目標は「外部電源供給から見たときの負荷平準化」にある。負荷平準化を行うためには, 前日の時点で評価対象当日の負荷平準化直線(図2における Load Leveling Line [W])を決定する必要がある。負荷平準化直線を正しく設定できるとその1日の中で供給過多電

表 3 発電量予測に用いる変数

変数	単位	説明
$E_d$	[kWh/m <sup>2</sup> ]	日付 $d$ における単位面積当たりの発電量誤差
$P_d$	[kWh/m <sup>2</sup> ]	日付 $d$ における単位面積当たりの予測用発電量
$T_d$	[kWh/m <sup>2</sup> ]	日付 $d$ における単位面積当たりの実測時発電量

力量 [kWh] と需要過多電力量 [kWh] がおよそバランスする<sup>2</sup>。このとき、電力供給源のひとつである太陽光発電の発電量が負荷平準化直線の設定に影響する。従って、前日の時点で太陽光発電量が正しく予測できていないと、適切な負荷平準化直線を設定できない。本稿では太陽光発電量予測の精度向上を目指し、精度向上の評価として、単位面積当たりの予測発電量と実測発電量の誤差を用いる。そこで発電量予測と実測発電量の誤差を  $E_d = P_d - T_d$  と定義する。式中の変数を表 3 に示す。

また、本稿での発電量予測の評価方法として以下の 2 つの項目を設ける。

$$(1) \text{ 二乗平均平方根誤差 (RMSE)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{d=1}^n (E_d)^2}$$

$$(2) \text{ 平均誤差} = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n (E_d)$$

## 5.2 発電量予測のベースライン

本節では、前日時点での太陽光発電量予測の方法について説明する。なお、本研究の主題は「予測精度向上」であるため、本節で述べるのは評価の基準 (ベースライン) となる素朴な方法である。

### 発電電力量予測ベースライン手法

1 日の予測発電電力量は天気予報と月ごとの 1 日最大発電量 (月別日積算最大発電量) から算出する。月別日積算最大発電量は実験協力者宅で取得したデータから月と時間毎に最大発電量を求め、これらの 1 日で積算した値とする。この最大発電量の積算値に対しておよそ何%発電するかを“最大発電量に対する発電割合”を乗じることで予測発電量を求めるものとする。ベースライン手法では気象庁から取得した府県天気予報の原文を「晴れ」、「くもり」、「雨」の 3 種類に分類を行い、分類した天気から最大発電量に対する発電割合を決定し、予測発電量を算出した。発電割合は天気予報が「晴れ」の日は最大発電量の 80% とし、同様に天気予報が「雨」の日及び「くもり」の日は、最大発電量の 10%、50% とそれぞれ決定した。

### 予測発電量の算出

晴れ：予測発電量 [kWh/day] = 月別日積算最大発電量 [kWh/day] × 0.8

くもり：予測発電量 [kWh/day] = 月別日積算最大発電量 [kWh/day] × 0.5

雨：予測発電量 [kWh/day] = 月別日積算最大発電量 [kWh/day] × 0.1

2：加えて、適正な量のバッテリーを用いることによって供給過多時間帯から需要過多時間帯へ電力エネルギーを移動させることが、本研究全体としての達成目標である。このことについては、我々の研究 [6], [7] で述べられている。

表 4 ベースライン手法における使用データ

データの種類	詳細
天気予報	気象庁が発表する神奈川県東部の府県天気予報
実測発電電力	実験協力者の自宅の屋根に設置された太陽光パネル発電データ

表 5 ベースライン手法における予測精度

評価方法	評価値
RMSE	0.217
MEAN	-0.126

## 5.3 ベースラインでの発電量予測精度

5.2 節で述べた方法に基づいて作成した、ベースライン手法による「単位面積当たりの予測発電量と実績発電量の誤差」を 5.1 節で述べた評価方法で評価した結果を表 5 に示す。表 5 を作成するにあたって、2020-06-01~2020-12-23 の期間でデータ欠損日を除いた 70 日のデータを用いた。使用データの詳細を表 4 に示す。また、単位面積当たりの予測発電量と実測発電量の散布図を図 10 に示す。橙色が晴れ、灰色がくもり、青色が雨の日のプロットである。このベースライン手法における誤差が航空気象報を活用することで精度向上することを目指す。

## 6 航空気象報を用いた精度向上

### 6.1 航空気象報を用いた精度向上のアイデア

5.3 節の結果より、次の仮説を設定する。

仮説 1 天気予報が「晴れ」や TAF で雲の量が「FEW」の時は最大発電量付近で予測発電量と実測発電量が一致する。

仮説 2 天気予報が「雨」や TAF で雲の量が「OVC」の時は最小発電量付近で予測発電量と実測発電量が一致する。

仮説 3-1 天気予報が「くもり」の時は実測発電量の変動が大きく、予測発電量と一致しにくい。

仮説 3-2 航空気象報に特定の雲が示されるときに、特に実測発電量の変動が大きい。

仮説 3-3 天気予報と航空気象報を組み合わせると、前日時点で実測発電量の変動の大きい雲の発生を予想できる。

### 6.2 航空気象報を用いた予測方法

本節では、前日時点での太陽光発電量予測の方法について説明する。

#### 発電電力量予測提案手法

1 日の予測発電電力量は天気予報と TAF に含まれる雲のデータ (雲の量, 高さ), 月別日積算最大発電量から算出する。仮説を次の 3 ケースに分類することで発電量を予測する。

ケース 1 仮説 1 に基づき、最大発電量付近の発電量となる。

ケース 2 仮説 3-1, 3-2 に基づき、発電量の変動が大きい。

ケース3 仮説2に基づき、発電量最小発電量付近の発電量となる。

それぞれのケースに対応する指標として発電グラフのパターンを定義する。発電パターンとは4.4節に示した3種類の「1日中高い」、「1日中低い」、「変動大」である。

分類した3ケースのうち、ケース1に発電パターンの「1日中高い」が対応し、ケース2に「変動大」、ケース3に「1日中低い」が対応する。この中から最も発電量予測が困難とされるケース2「変動大」を正しく切り分けることでケース1, 3について予測精度が向上することを目指す。

予測方法はベースライン手法と同様に月別日積算最大発電量に対して最大発電量に対する発電割合を乗じることで予測発電量を求めるものとする。算出に必要な発電割合の決定手順を以下に示す。

1. 府県天気予報を大まかな天気3種類に分類する。ベースライン手法と同様に「晴れ」、「くもり」、「雨」の3種類に分類を行った。
2. 雲の高さを大まかに高さ3種類に分類する。
3. 分類した天気、雲の高さ、雲の量から発電パターンが一意に決まるテーブルを作成し、天気の種類、雲の高さの分類、雲の量に対応する発電パターンをカウントし、最も数が多かったパターンをその組のパターンとして発電パターンを決定する。
4. 発電パターンから発電割合を決定する。発電パターンそれぞれの発電割合は「1日中高い」日が最大発電量の80%とし、同様に「1日中低い」日及び「変動大」の日は、最大発電量の10%、50%とした。
5. 発電割合から予測発電量を算出する。

1日中高い：予測発電量  $[kWh/day] =$  月別日積算最大発電量  $[kWh/day] \times 0.8$

1日中低い：予測発電量  $[kWh/day] =$  月別日積算最大発電量  $[kWh/day] \times 0.1$

変動大：予測発電量  $[kWh/day] =$  月別日積算最大発電量  $[kWh/day] \times 0.5$

2019-06-01~2020-05-31の期間でデータ欠損日を除いた135日のデータをモデル作成に用いた。また、2020-06-01~2020-12-23の期間でデータ欠損日を除いた70日のデータを評価用に用いた。使用データの詳細を表7に示す。

## 7 精度評価

6.2節で述べた方法によって作成した提案手法のケース1とケース3において、「単位面積あたりの予測発電量と実績発電量の誤差」について5.1節で述べた評価方法で評価した結果を表6に示す。ベースライン手法と提案手法によって生成された予

表6 提案手法における予測精度

評価方法	評価値
ケース1 RMSE	0.160
ケース1 MEAN	0.099
ケース3 RMSE	0.028
ケース3 MEAN	-0.025

表7 提案手法における使用データ

データの種類	詳細
天気予報	気象庁が発表する神奈川県東部の府県天気予報
TAF	羽田空港のTAF
実測発電電力	実験協力者の自宅の屋根に設置された太陽光パネル発電データ

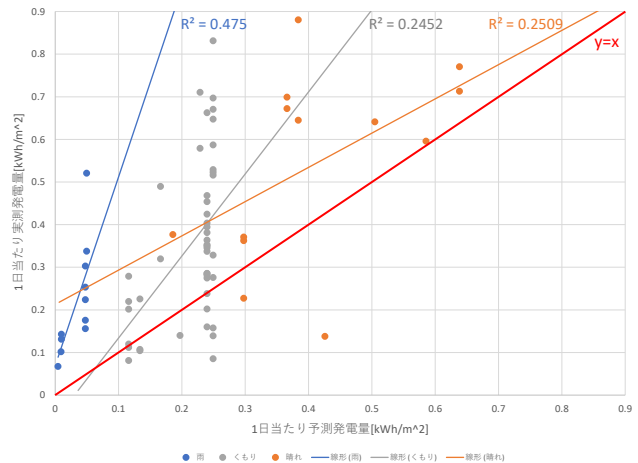


図10 ベースライン手法における予測発電量と実測発電量の比較

測発電量と実測の発電量データの散布図を図10、図11に示す。それぞれ横軸が1日当たりの予測発電量  $[kWh/m^2]$ 、縦軸が1日当たりの実測発電量  $[kWh/m^2]$  であり、 $y=x$  上に点が乗るとき、予測した発電量が正しいことを表す。

提案手法のケース1、ケース3における誤差はベースライン手法における誤差に比べて小さくなっていることから、提案手法のケース1、ケース3において太陽光発電量予測精度が向上したことが明らかになった。また、航空気象報による雲の情報を加えたことで、予測の難しいケース2の切り分けをより正確に行うことができることを示した。

ここで、予測の難しいケース2である「変動大」について、当日通報されるMETARを用いて予測発電量を補正することを考察する。METARには3で示した通り、TAFでは通報されない雲の形が通報される。雲は形によって大きく特徴が異なり、例えば積雲は小さい雲の塊がまばらに発生するため、太陽光を丁度隠すタイミングでは発電量が大きく減少し、そうでないときは最大発電量近くの発電量になると考えられる。一方で、層雲は広い範囲に広がる雲のため、発電量が低く安定すると考えられる。このように雲の形ごとの特徴を分析することで、より詳細な発電割合の決定に寄与すると考え、今後の課題とする。

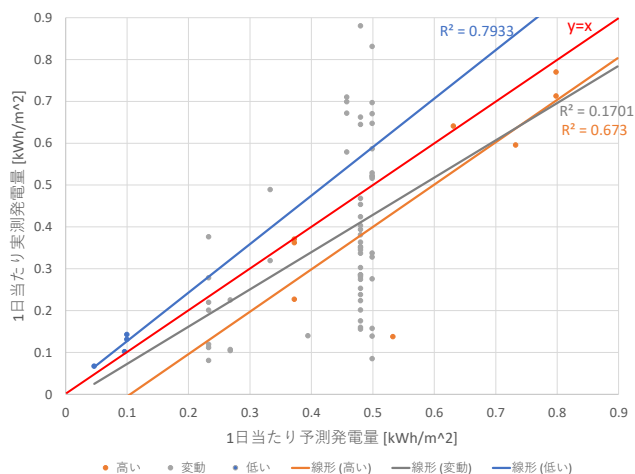


図 11 提案手法における予測発電量と実測発電量の比較

## 8 まとめと今後の課題

本稿では、専門の目的に特化したデータを別の目的に使用するという、データの異目的活用に着目し、航空気象報という航空の世界でのみ使用されている限定的なデータを、電力の負荷平準化のための太陽光発電量予測という別の目的に活用した。太陽光発電量予測に航空気象報を活用することで、雲の属性と発電量の関係を明らかにし、予測精度が向上したことを示した。今後の課題として、TAF では予測が困難な発電量の変動が大きい「変動大」の日は平準化日当日の METAR を用いた当日補正によって精度が向上することを示す。

**謝辞** 本研究の一部は JSPS 科研費（課題番号 18K11750）、および、横浜国立大学大学院環境情報研究院共同研究推進プログラム、ならびに横浜国立大学学長戦略経費の支援による。

## 文 献

- [1] 総務省. 令和元年版 情報通信白書. <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/pdf/index.html>. Last accessed: 21 May 2020.
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁. 平成 30 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2019). <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf>. Last accessed: 21 May 2020.
- [3] 合田忠弘, 諸住哲ほか. スマートグリッド教科書. インプレスジャパン, 初版, 2011.
- [4] 三菱総合研究所, 環境省. 平成 27 年度低炭素社会の実現に向けた中長期的再生可能エネルギー導入拡大方策検討調査委託業務報告書. [https://www.env.go.jp/earth/report/h29-02/h27\\_all.pdf](https://www.env.go.jp/earth/report/h29-02/h27_all.pdf). Last accessed: 8 January 2020.
- [5] Kang Miao Tan, Vigna K Ramachandaramurthy, and Jia Ying Yong. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 720–732, 2016.
- [6] 渡辺隆史, 深野巧也, 小池風樹, 石田卓也, 飯田惇子, 本藤祐樹, 富井尚志. エネルギーライフログ DB を活用した負荷平準化のための局所的エネルギーバランスに関するデータマネジメント. *I6-1*, pp. 1–8, 2020.

- [7] 飯田惇子, 渡辺隆史, 富井尚志. 再生可能エネルギーと EV バッテリーを活用した負荷平準化の実現可能性に関する適時的データ分析. *I-A-07*, pp. 1–6, 2020.
- [8] 環境省, “環境省 再エネ加速化・最大化促進プログラム 2018 年版”, <https://www.env.go.jp/earth/program.pdf> (2020/01/08 アクセス)
- [9] Nicole D Sintov, P Wesley Schultz, “Unlocking the potential of smart grid technologies with behavioral science”, *Front Psychol*, 2015;6:410.
- [10] W. Simm, M. A. Ferrario, A. Friday, P. Newman, S. Forshaw, M. Hazas, A. Dix, “Tiree Energy Pulse: Exploring Renewable Energy Forecasts on the Edge of the Grid”, *Proc. of the 33rd Annual ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems*, pp.1965–1974, 2015.
- [11] 馬場博幸, 斉藤哲夫, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦, 宇田川佑介, 天津孝之, 増田浩, “IoT 化する家電機器を活用したデマンドレスポンスによる自動変動電源の余剰発電抑制緩和策”, *電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌)*, Vol.137, No.2, pp.326–332, 2017.
- [12] 池田伸太郎, 大岡龍三, “日本国内におけるスマートシティ・スマートコミュニティ実証事業の最新動向”, *生産研究*, Vol.66, No.1, pp.69–77, 2014.
- [13] 中川二彦, 満本祐太, “PV と EV を用いた双方向エネルギーシステムの評価”, *日本エネルギー学会誌*, Vol.93, No.8, pp.716–724, 2014.
- [14] W. Kempton, J. Tomic, “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”, *Journal of Power Sources*, Vol.144, Issue.1, pp.268–279, 2005.
- [15] B. Jansen, C. Binding, O. Sundstrom, D. Gantenbein, “Architecture and Communication of an Electric Vehicle Virtual Power Plant”, *IEEE Int’l Conf. Smart Grid Communications*, pp.149–154, 2010.
- [16] A. J. B. Brush, J. Krumm, S. Gupta, S. Patel, “EVHome-Shifter: Evaluating Intelligent Techniques for Using Electrical Vehicle Batteries to Shift When Homes Draw Energy from the grid”, *ACM Int’l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.1077–1088, 2015.
- [17] Akira Ito, Akihiko Kawashima, Tatsuya Suzuki, Shinkichi Inagaki, Takuma Yamaguchi, and Zhuomin Zhou, “Model Predictive Charging Control of In-Vehicle Batteries for Home Energy Management Based on Vehicle State Prediction”, *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, VOL.26, NO.1, pp.51–64, JANUARY 2018.
- [18] Hiroshi Kikusato, Kohei Mori, Shinya Yoshizawa, et al. Electric vehicle charge–discharge management for utilization of photovoltaic by coordination between home and grid energy management systems. *IEEE Transactions on Smart-Grid*, Vol. 10, No. 3, pp. 3186–3197, 2018.
- [19] A. Y.S.Lam, Ka-Cheong Leung, Victor O.K. Li, “An Electric-Vehicle-based Supplementary Power Delivery System”, *IEEE Int’l Conf SmartGridComm*, pp.307–312, 2015.
- [20] Huang Qilong, Qing-Shan Jia, Xiaohong Guan, “Robust Scheduling of EV Charging Load With Uncertain Wind Power Integration”, *IEEE Transactions on Smart Grid* Vol.9 No.2 pp.1043–154, 2018.
- [21] Yuan Hong, Shengbin Wang, Ziyue Huang, “Efficient Energy Consumption Scheduling: Towards Effective Load Leveling”, *Energies* 2017, 10(1), 105, 2017.
- [22] Lei Xu, Meishun Lin, Zhizhong Huang, “Community load leveling for energy configuration optimization: Methodology and a case study”, *Sustainable Cities and Society*, Volume35, pp.94–106, 2017.
- [23] Karfopoulos, Evangelos L and Hatzigiorgiou, Nikos D, “Distributed coordination of electric vehicles providing V2G services”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), pp.329–338, 2015.
- [24] 気象庁, “航空気象通報式 第 3 版”, 1993.