3.無光無風による変動性再エネ低出力イベント

大庭 雅道[1*]・野原 大輔[1]・菅野湧貴[1]

[1]一般財団法人電力中央研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

＊ E-mail: *oba-m@criepi.denken.or.jp*

「無光・無風」の期間が数日続く、いわゆる「ダーク・ドルドラムズ（Dark Doldrums）」は、風力発電や太陽光発電などの変動性再生可能エネルギー（VRE）の普及率が高い場合、電力供給が長期間途絶えるリスクにつながる。本研究では、日本を対象としてダーク・ドルドラムズの気候学的・気象学的な発生の特徴とその要因を分析した。その結果、ダーク・ドルドラムズの季節性や発生頻度の高い天候パターンを特定することができた。また、発生数の経年変動は、熱帯インド・西太平洋域の海面水温変動により励起されたテレコネクション（遠隔応答）と関連していることが判明した。

Key Words : *Variable renewable energy, Dark doldrums, Windless-Sunless, Energy transition*

1. はじめに

風力発電や太陽光発電などの変動性再生可能エネルギー（VRE）は、発電時に二酸化炭素を排出しないため、地球温暖化対策に大きく貢献する。一方、「無光・無風」の期間が数日続く、いわゆる「ダーク・ドルドラムズ」は、VREの普及率が高い場合、電力供給が長期間途絶えるリスクにつながる（Matsuo et al. 2020）。わが国においては、現状ダーク・ドルドラムズから問題が生じるほどVREの導入量は多くないものの、2050年カーボンニュートラル達成のための電力の安定供給に向けて、ダーク・ドルドラムズの詳細な発生時期や要因について明らかにする必要がある。そこで、本研究では、日本におけるダーク・ドルドラムズの気候学的・気象学的な発生の特徴とその要因を明らかにする。

2. 解析手法

(1) VRE出力長期再構築データの作成

本研究では、太陽光発電と風力発電がバランス良く導入されている東北電力エリアを対象とした。ダーク・ドルドラムズの気候学的な特徴を把握する目的で、数年分のVREの実測データを数十年分に拡張した。具体的には、アンサンブル学習の一種であるランダムフォレスト（Breiman 2001）を用いて、アメダス気象観測データ（気温・日照時間・風速）を予測変数（入力データ）、実測データを従属変数（出力データ）として推定モデルを構築し、1978～2020年の太陽光・風力発電量をそれぞれ推定した。再構築されたVRE発電量は、観測された発電量の変動と統計的によく一致していた。得られた過去43年間のVRE出力再構築データから、VRE発電量の日平均が定格の10％未満（すなわち、0.1 p.u.未満）である状態が継続した場合をダーク・ドルドラムズと定義し、1日・3日・5日連続イベントをそれぞれDD1・DD3・DD5とした。

(2) 気象場の解析

本研究では気象場とダーク・ドルドラムズとの対応関係の分析に、自己組織化マップ(Self-Organizing Map: SOM, Kohonen, 1982)を用いた。SOMは空間を持った「マップ」の組み合わせで実現される人工ニューラルネットワークの一種である。SOMには、任意次元のマップ上(本研究では二次元マップ)において、パターンを類似度に合わせて分類できるという特徴がある。

通常、SOMは入力層と競合層から成る2層構造のニューラルネットワークを形成しており、入力層の入力ベクトル(分類したいデータ、ここでは気象場の空間分布)を基に反復学習することで、入力ベクトルの分布パターンを分類していく。競合層は参照ベクトルと呼ばれる多次元ベクトルを持つ任意の数のノードで表現されており、学習前の参照ベクトルは乱数で構成されている。入力ベクトルと参照ベクトルの差(ユークリッド距離)を取り、最も差の小さ

い(似ている)ノードを勝者ノードとし、勝者ノードとその近傍のノードが、より入力ベクトルに近づくように反復学習を行っていくことで分類を行っていく。

ここでは、気象場の解析に気象庁全球大気再解析データJRA-55（Kobayashi et al. 2015）の地上風ベクトルを使用した。本データを入力ベクトルとして15×15のトーラス型SOMに適用し、1978～2020年における長期の気象場の分類（225パターンに分類）を得た。

3. ダーク・ドルドラムズの発生傾向

図1は、観測期間と再構築期間における、低出力イベント（ダーク・ドルドラムズ）発生率の季節的変化を示している。太陽光（風力）発電による低出力イベントは、冬（晩春から初秋）に多く見られた。一方、VRE平均では、寒候季（12月から5月）にはダーク・ドルドラムズの発生が少なく、暖候季（6月から11月）には増加する傾向を示した。また、両VREを合わせることで、低出力イベントの頻度は大幅に減少させることが可能であることがわかる。時折、低出力状態が5日以上続くこともあったが（DD5）、太陽光と風力を合わせて考えると、長期にわたるダーク・ドルドラムズは非常に稀である（1～2年に一回あるかないか）。ダーク・ドルドラムズの季節性は、再構築された長期データでより明確である。図2bでは、太陽光発電と風力発電の比率を変えた場合（3：1と1：3、現在の太陽光発電と風力発電の比率は約3.5：1）のダーク・ドルドラムズの発生率も示している。VRE電源の構成比率が変化しても、夏季にダーク・ドルドラムズが発生する傾向は変わらず、風力発電の設備容量が太陽光発電の設備容量を上回るほどより顕著となることが示唆された。

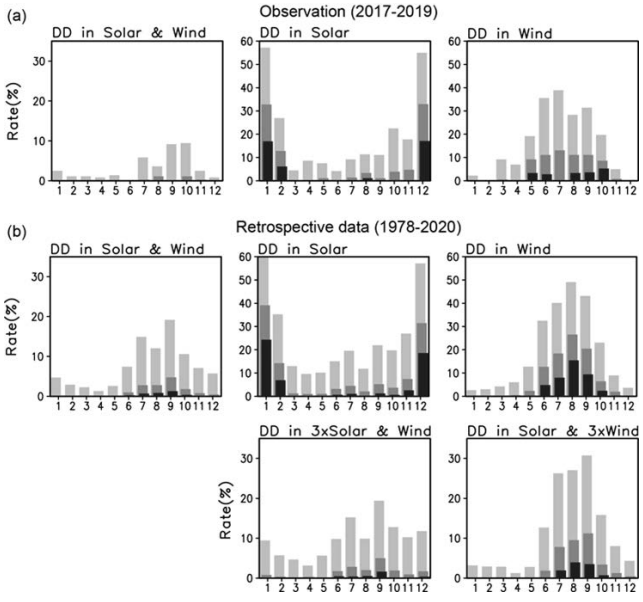


図-1（a）実測データ(2017-2019 年)と(b) VRE 出力再構築データ（1978-2020 年）における東北エリアの各月の低出力イベント（ダーク・ドルドラムズ）の発生率。（左）VRE 出力合計、（中）太陽光発電のみ、（右）風力発電のみの場合、濃淡はそれぞれ継続時間 1・3・5 日。（Ohba et al. 2022 より）

4. ダーク・ドルドラムズの発生要因

実測データで見られた最も強いダーク・ドルドラムズの例を図2に示す。2017年7月23日から25日にかけて、VREの発電量は極端に少なかった。72時間（3日）平均で最大で約0.05puまで低下が見られた。梅雨前線が東北エリアに停滞していたため、期間中連続して雲に覆われ、太陽光発電量が低出力となっていた。また、7月24日と25日は風速が弱く、太陽光と風力どちらも低出力となっていた。

より長期の気象データ（大気再解析）から、ダーク・ドルドラムズの発生要因を探るべく、当該エリアの夏季における地上風ベクトルの空間分布にSOMを適用し、得られた気象場とVRE出力再構築データとの対応関係から、ダーク・ドルドラムの発

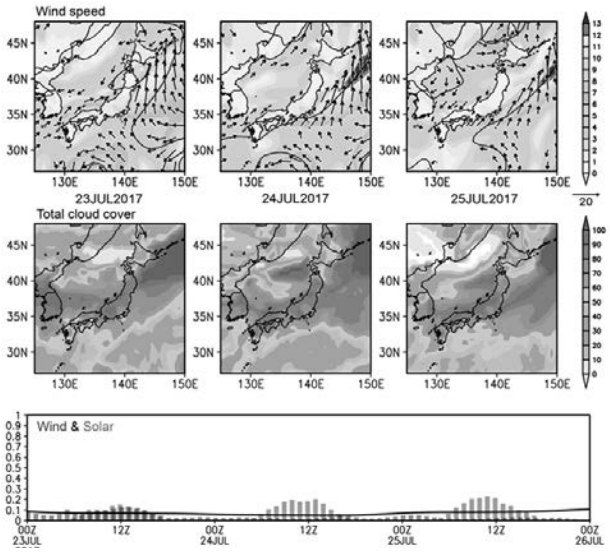


図-2　2017 年 7 月 23 日～25 日発生のダーク・ドルドラムズに伴う気象場と 1 時間ごとの発電量（p.u.）。上段は日平均の風速（m/s；濃淡とベクトル）と海面更正気圧（hPa；等値線）、中段は全雲量（%）、下段は 1 時間ごとの風力・太陽光発電量と 3 日移動平均の両 VRE 平均の設備利用率（黒実線；p.u.）を示す。（Ohba et al. 2022 より）

生頻度が高い4つの支配的な天候パターンを特定した。これをWP1-4とし、図3に関連する地表面温度、全雲量、風速を示す。

WP1は①オホーツク海高気圧の強化に伴うヤマセ型の気象パターンである。この条件では、オホーツク海高気圧が強まることで、日本上の南北の気圧勾配が強化される。寒冷な北東気流が東日本に侵入し、地表面気温を低下させている。太陽光発電設備が相対的に多く設置されている太平洋側は特に雲に覆われるため、出力が低下すると考えられる。WP2は、②低気圧通過後の北風型である。日本の東を通過する低気圧にともなう北風により、ヤマセほどではないものの、低温と曇天がもたらされている。WP3は、③（ヤマセ型と前線型の）複合型だと考えられ、他タイプ間の移行期などに発生していると考えられる。WP4は、④梅雨・秋雨前線型で、この条件下では東日本は停滞性の前線に覆われ、全域が雨雲に覆われて太陽光発電量が低下する。また、前線上低気圧の直下では局所的な風速が弱く、風力発電出力も低下していた。

5. 年々変動とその変動要因

研究対象期間におけるダーク・ドルドラムズの発生頻度には、比較的強い年々変動が見られた（図4a）。そこで、ダーク・ドルドラムズの経年変動の原因をラージスケールの視点から分析した。図4bcは、8月に発生したダーク・ドルドラムズ発生数の経年変動に対する大規模な気候場との相関関係を示している。ダーク・ドルドラムズは熱帯インド洋から西太平洋の海面水温変動の発生と高い相関を示した。さらに、ダーク・ドルドラムズが頻発する（少ない）年は、日本の南西部から日本域への空気塊の侵入が強まり（弱まり）、水蒸気量が増加（減少）しているという特徴が見られた。このような熱帯からの水蒸気供給量の増加（減少）は、前節のWP3やWP4で見られたように、停滞性の前線活動を活発化（減衰）させ、その結果、東日本域に無光無風をもたらすと考えられる。このように、日本におけるダーク・ドルドラムズの年々変動は、東アジアの夏季モンスーンの変動を介して熱帯域の大規模な自然変動現象と関係していると考えられる。

このように、インド洋の海面水温の変動が、フィリピン海（北西太平洋）を経由する東アジアの湿潤・乾燥といった異常気象の発生に与える影響は、これまでの先行研究でも述べられており（Ohba and Ueda 2006）、「インド洋・西太平洋コンデンサー」と呼ばれている（Xie et al. 2016）。この熱帯の気候変動モードにはある程度の予報可能性があると考えられており、日本におけるダーク・ドルドラムズの発生に関しても、中長期的な予測可能性があることが示唆される。今後、１ヶ月・季節予報における予測可能性などに関しても調査を行っていく予定である。

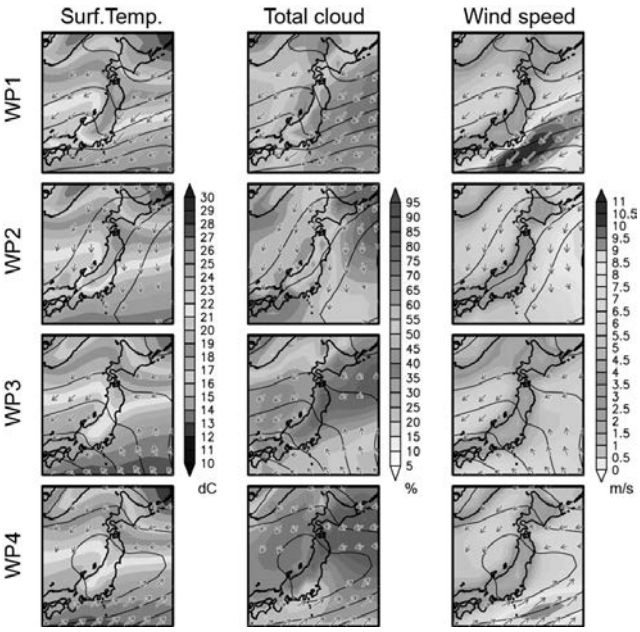


図-3　ダーク･ドルドラムズの発生頻度(条件付き確率)の高い4つの気象場。WP1(ヤマセ型)、WP2(北風型)、WP3(複合型)、WP4(停滞前線型)に対応する海面更正気圧(hPa、等値線)と地上気温(℃;左)、全雲量(%;中央)、地上風速(m/s;右)。(Ohba et al. 2022より)

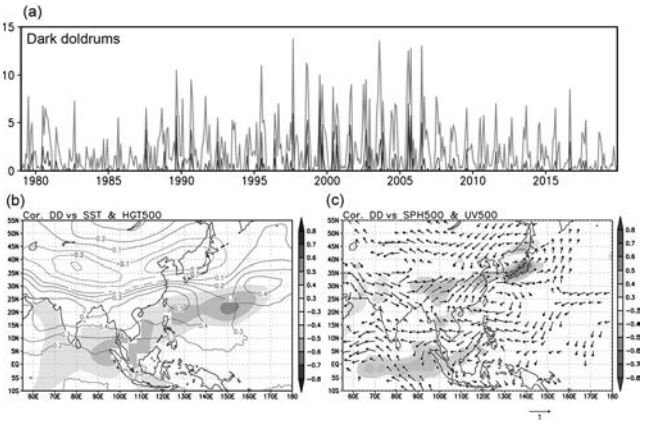


図-4　(a) ダーク･ドルドラムズ(DD1、DD3、DD5)の発生頻度の経年変化(6時間毎/月)。(b) 月平均海面水温(SST;陰影)及び 500hPa ジオポテンシャル高度(等値線)と 8 月の DD1 発生数との相関係数(1978～2020 年)。(c) (b)と同様、ただし、500hPa 比湿(陰影)と水平風(ベクトル)。(Ohba et al. 2022より)

6. まとめ

これまで、VRE発電量に関わる極端現象の予測に関してはランプ現象と呼ばれる短時間（2-6時間）の急速変動に予測に焦点が当てられていた（Ohba et al. 2016; 2018）。一方で、近年、電力供給不足の観点から長期にわたる低出力現象に関しても注目が集まっている（Ohba et al. 2022; 2023）。本研究では、日本を対象にダーク・ドルドラムズの発生に関して、気候・気象の視点から総合的に分析を行い、発生頻度・気象要因・経年変動などの観点からその特性をとりまとめた。当該エリアでは晩夏～初秋で低出力イベントが特に発生率が高い。一方で、風力と太陽光を併せ持つことで、無光・無風それぞれの効果を緩和させる効果も見られた。また、機械学習を用いた気象場の分析から、このエリアでのダーク・ドルドラムズの発生には主に4つの気象場が関連することがわかった。さらに、熱帯インド・西太平洋域の海面水温変動により励起されたテレコネクション（遠隔応答）と関連することで、発生数に大きな経年変動を持つことも判明した。

あらかじめの蓄電池容量確保や燃料調達などの対策を講じる観点からも、今後電力需要なども合わせてできるだけ早期の予測を実施できるようにしていく必要があると考えられる。また将来（近未来）におけるエネルギーの全体最適化の観点から、近未来気候予測データに基づく気候変動影響評価も必要であると思われる（Ohba 2019）。さらに、それぞれの地域性を明らかにするため、需要も合わせて分析を全国大に拡大していく必要がある。これらの点に関して、今後引き続き研究を行って行く予定である。

参考文献

1) Breiman L. Random Forests. Mach Learn 45 (2001) 5–32. Doi: 10.1023/A:1010933404324

2) Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, Ebita A, Moriya M, Onoda H, Onogi K, Kamahori H, Kobayashi C, Endo H, Miyaoka K, Takahashi K. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. J Meteor Soc Japan 93 (2015) 5–48. Doi:10.2151/jmsj.2015-001.

3) Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biol Cybern 43 (1982) 59–69.

4) Matsuo Y, Endo S, Nagatomi Y, Shibata Y, Komiyama R, Fujii Y. Investigating the economics of the power sector under high penetration of variable renewable energies. Appl Energy 267 (2020) 113956. Doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113956

5) Ohba M, Kadokura S, Nohara D. Impacts of synoptic circulation patterns on wind power ramp events in East Japan. Renew Energy 96 (2016) 591–602. Doi: 10.1016/j.renene.2016.05.032

6) Ohba M, Kadokura S, Nohara D. Medium-range probabilistic forecasts of wind power generation and ramps in Japan based on a hybrid ensemble. Atmosphere 9 (2018) 423 Doi: 10.3390/atmos9110423

7) Ohba M, Kanno Y, Bando S. Effects of meteorological and climatological factors on extremely high residual load and possible future changes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 175 (2023) 113188.

8) Ohba M, Kanno Y, Nohara D. Climatology of dark doldrums in Japan, Renewable and Sustainable Energy Reviews 155 (2022) 111927.

9) Ohba M, Ueda H. A role of zonal gradient of SST between the Indian Ocean and the Western Pacific in localized convection around the Philippines. SOLA 2 (2006) 176–179.

10) Ohba M. The Impact of Global Warming on Wind Energy Resources and Ramp Events in Japan. Atmosphere, 10 (2019) 265

11) Xie SP, Kosaka Y, Du Y, Hu K, Chowdary JS, Huang G. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review. Adv Atmos Sci 33 (2016) 411–432. Doi: 10.1007/s00376-015-5192-6