

ダーク・ドルドラムズ：無光無風による VRE 低出力イベントの気候解析

Dark Doldrums: Climatological Analysis of Extreme Low VRE Production Associated with Lightless and Windless Events

大庭雅道* 菅野湧貴* 野原大輔*

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. 2020⁴⁾。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. VRE 出力遡及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 2001¹⁾）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（図1）。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出力遡及再構築データから、VRE発電量の日平均が定格の10%未満（す

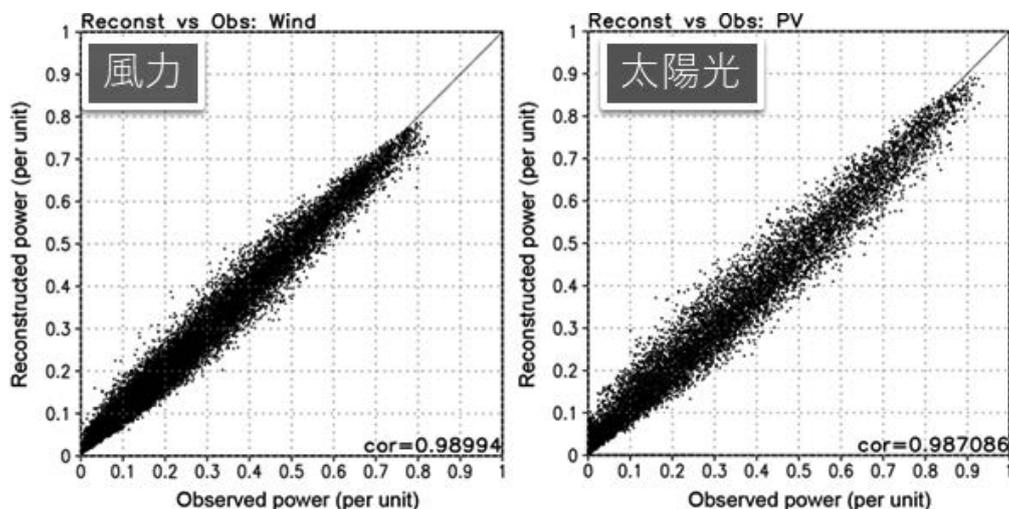


図1 東北エリアでの風力・太陽光発電量（p.u.）の実測値と遡及再構築値との散布図。（Ohba et al. 2021より）

* 電力中央研究所

なわち, 0.1pu 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.

図2は, 観測期間と遡及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)発生率の季節的变化を示している. 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2(b)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.

3. 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3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自己

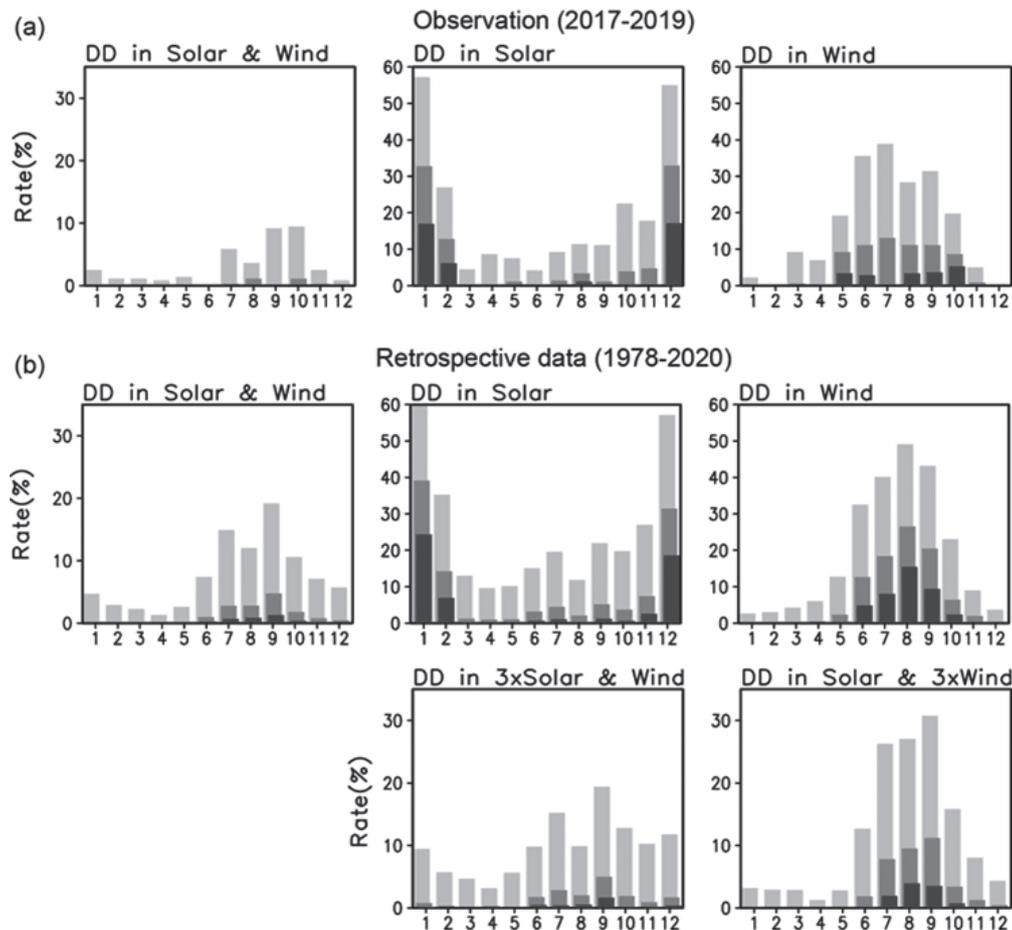


図2 (a) 実測データ(2017-2019年)と(b) VRE出力遡及再構築データ(1978-2020年)における東北エリアの各月の低出力イベント(ダーク・ドルドラムズ)の発生率. (左) VRE出力合計, (中) 太陽光発電のみ, (右) 風力発電のみの場合, 濃淡はそれぞれ継続時間1・3・5日. (Ohba et al. 2021より)

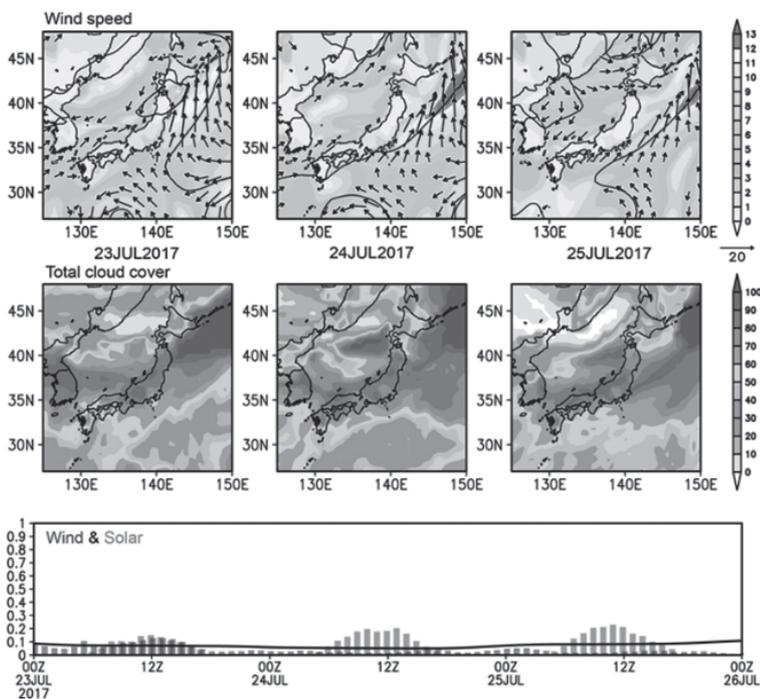


図3 2017年7月23日～25日発生 of ダーク・ドルドラムズに伴う気象場と1時間ごとの発電量 (p.u.)。上段は日平均の風速 (m/s; 濃淡とベクトル) と海面更正気圧 (hPa; 等値線), 中段は全雲量 (%), 下段は1時間ごとの風力・太陽光発電量と3日移動平均の両 VRE 平均の設備利用率 (黒実線; p.u.) を示す。(Ohba et al. 2021 より)

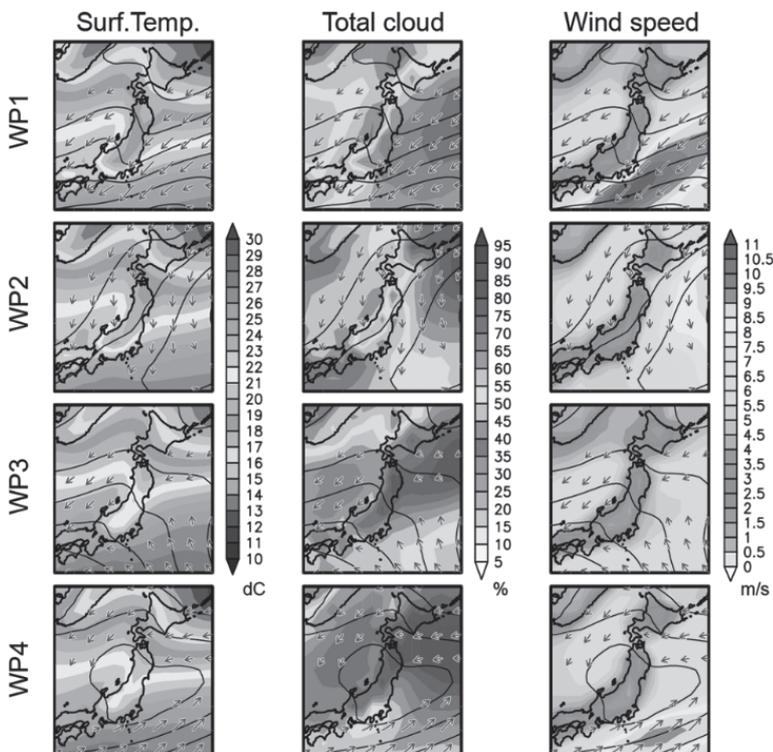


図4 ダーク・ドルドラムズの発生頻度 (条件付き確率) の高い4つの気象場。WP1 (ヤマセ型), WP2 (北風型), WP3 (複合型), WP4 (停滞前線型) に対応する海面更正気圧 (hPa, 等値線) と地上気温 (°C; 左), 全雲量 (%; 中央), 地上風速 (m/s; 右)。(Ohba et al. 2021 より)

組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM, Kohonen 1982)³⁾ を適用し, 1978～2020年における長期の気象場の分類を得た。解析には気象庁全球大気再解析データ JRA-55 (Kobayashi et al. 2015)²⁾ を使用した。トラス型 SOM を用いて, 東北周辺域の気象場を 15 × 15 の 225 パターンに分類した。得られた気象場と VRE 出力適及再構築データとの対応関係から, ダーク・ドルドラムの発生頻度が高い4つの支配的な天候パターンが特定された。これを WP1-4 とし, 図4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。

4. 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5 (a))。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5 (b) (c) は, 8月に発生したダーク・ドルドラムズ発生数の

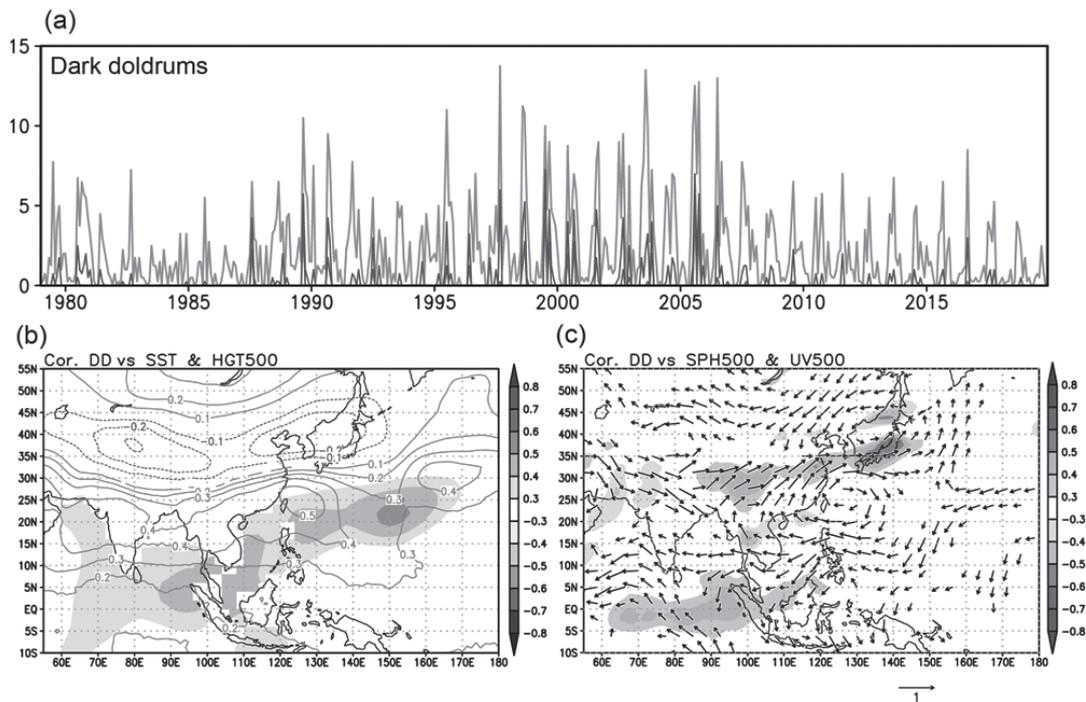


図5 (a) ダーク・ドルドラムズ (DD1, DD3, DD5) の発生頻度の経年変化 (6時間毎/月). (b) 月平均海面水温 (SST: 陰影) 及び 500hPa ジオポテンシャル高度 (等値線) と 8月の DD1 発生数との相関係数 (1978 ~ 2020 年). (c) (b) と同様, ただし, 500hPa 比湿 (陰影) と水平風 (ベクトル). (Ohba et al. 2021 より).

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。

より具体的には、熱帯インド洋域の海面水温上昇時（インド洋全域昇温：Ohba and Ueda 2005⁸⁾）は対流活動が活発化し、平年に比べて上昇気流が強化される。これに呼応して、フィリピン北東部の北西太平洋（フィリピン海）では下降気流が強まり、太平洋高気圧が南西方向に伸長する。これは、フィリピン海上の高気圧性循環偏差として認識される（図5 (b) (c)）。この高気圧性循環偏差の西側では、南風が強まり、熱帯・亜熱帯域からの暖かく湿った空気の北向きの輸送が平年よりも強化されることにな

る。この暖湿空気は、西からの気流に加わることで、日本南西部から日本列島に大量の水蒸気を輸送している（図5 (c)）。以上のことから、熱帯インド洋・西太平洋域の海面水温の上昇は、水蒸気を供給するという熱力学的な影響と、日本に水蒸気を供給しやすい大規模な大気循環を形成するという力学的な影響の両方の効果があると考えられる。この2つの効果により、熱帯から日本を含む東アジアへの水蒸気の輸送が促進され、対流活動を活発化させることでダーク・ドルドラムズの発生頻度が増加すると考えられる。

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 2006⁹⁾）、「インド洋・西太平洋コンデンサー」と呼ばれている（Xie et al. 2016¹¹⁾）。このような熱帯の気候変動モードにはある程度の子報可能性があると考えられているため、日本におけるダーク・ドルドラムズの発生に関しても、中長期的な予報可能性があることが示唆される。今後、季節内から季節予報における予報可能性などについても調査を行っていく予定である。

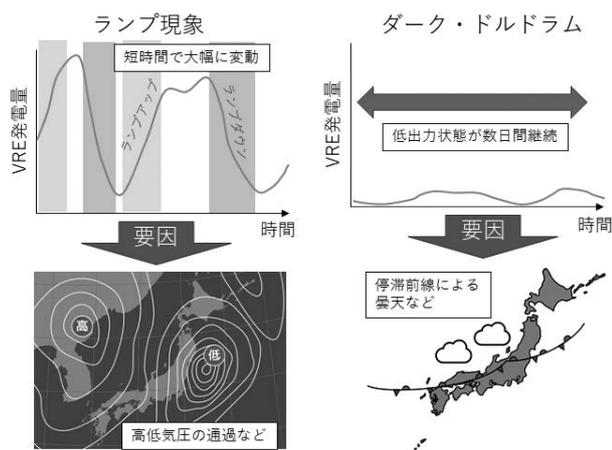


図6 VREに関連した極端現象の模式図

5. 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）⁵⁻⁶。一方で、ごく近年、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（van der Wiel et al. 2019¹²、Matsuo 2020⁴、Ohba et al. 2021⁷、渡邊ほか 2021¹³）。図6にVRE関わるこの2つの極端現象の模式図を示す。

本研究では、東北エリアを対象にダーク・ドルドラムの発生に関して、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、（ダーク・ドルドラムの発生を抑制することで）系統安定化に貢献する効果も見られた。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明らかになった。

あらかじめ火力発電の燃料を調達する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）¹⁰。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, Ebata 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, Nohara D. Climatology of Dark Doldrums in East Japan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2021) *in press*.
- 8) Ohba M, Ueda H. Basin-wide warming in the equatorial Indian Ocean associated with El Nino. *SOLA* **1** (2005) 89-92.
- 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
- 12) van der Wiel K, Stoop LP, van Zuijlen BRH, Blackport R, van den Broek MA, Selten FM. Meteorological conditions leading to extreme low variable renewable energy production and extreme high energy shortfall. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **111** (2019) 261–275.
- 13) 渡邊武志, 岡和孝, 肱岡靖明. 連続する太陽光エネルギー低資源量日の発生頻度と同時発生範囲の評価 **47** (2021) 71-76.

著者略歴



大庭雅道 (オオバ マサミチ)
 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 主任研究員
 2007年9月 筑波大学大学院 生命環境科学研究科博士後期課程退学. 同年10月 筑波大学陸域環境研究センター 準研究員 (文部科学技官). 2009年4月より現職. 専門分野は, 気候学, 気候ハザード, 大気海洋結合モデル, 再生可能エネルギー. 博士 (理学).



菅野湧貴 (カンノ ユウキ)
 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 主任研究員
 2018年3月東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了. 2018年4月日本学術振興会特別研究員 PD として名古屋大学海洋学研究室で大気波動研究に従事. 2020年4月より現職. 主に太陽光や風力発電出力の予測手法の開発を担当. 博士 (理学).



野原大輔 (ノハラ ダイスケ)
 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 上席研究員
 2002年4月筑波大学地球科学研究科博士課程単位取得退学. 同年5月筑波大学陸域環境研究センター 準研究員 (文部科学技官). 2004年4月科学技術振興機構 CREST 研究員として気象庁気象研究所にて地球温暖化研究に従事. 2006年4月韓国釜山に設立された APEC Climate Center にて季節予報に携わる. 2008年4月より現職. 主に, 太陽光や風力出力予測手法の開発を担当. 博士 (理学). 気象予報士.