

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18426

研究課題名（和文）気象予報信頼性の気候背景場への依存性の解明

研究課題名（英文）Dependency of uncertainty in weather forecasts on background climate variations

研究代表者

大庭 雅道（Ohba, Masamichi）

一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員

研究者番号：40466660

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：高解像度大規模気候予測アンサンブルデータを用いて、日本に域における風力発電量の将来の変化について調べた。+4度温暖化実験の計算結果を分析した結果、数%程度の風力発電量の低下傾向が見られた。特に夏から秋にかけて全域で減少傾向、冬から春にかけては日本の北で増加、南で減少する傾向が見られた。気象パターン分類により気象場の発生数を分析したところ、この変化は前者では擾乱成分の発生数が、後者では気候背景場の変化が主要因となっていることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の主力電源を担う日本域の風力発電量に関して温暖化の影響評価を詳細に行った初めての研究である。TCFD等エネルギーインフラに対する気候レジリエンスの観点から社会的関心と研究ニーズが急上昇しているテーマであり、社会的に影響が大きい。また、将来変化の要因を温暖化の力学的な効果と熱力学的な効果に分離する手法を構築するという面で学術的にも意義深い。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the impact of global warming on Japanese wind energy resources and their short-term variations using the large ensemble d4PDF dataset, which consists of dynamically downscaled historical and +4K future climate projections. The +4K warming future climate projections showed significant changes in wind energy resources that varied both regionally and seasonally. The projected annual production decreased by about 5% over Japan in response to climate change. The relationship to synoptic weather was investigated using self-organizing maps, whereby weather patterns (WPs) over the region in the present and future +4K climate were classified for a two-dimensional lattice. Future probabilistic projections of WPs under the global warming scenario showed both increases and decreases in the frequency of different WPs, with corresponding advantages and disadvantages for wind power generation with regard to future changes in capacity factors in Japan.

研究分野：気候学

キーワード：気候変動 予測 風力 再生可能エネルギー 地球温暖化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

風力発電などの再生可能エネルギーは、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電源である。今後数十年で再生可能エネルギーの供給を爆発的に増やす必要性が高まりつつある中、風力は最も急速に成長している再生可能エネルギー技術の 1 つとなっている。世界の累積風力発電容量は 2019 年末までに最大 600 GW に達し、現在世界の電力の最大 5-6% が風力発電によって生産されている。日本においても、2012 年に開始された再生可能エネルギー固定価格買取制度の導入以降、これらの電源は急速に導入されてきた (Mizuno, 2014)。風力発電は現在、日本のエネルギー生産の比較的小さな割合しか占めていないが (2018 年 12 月末時点での全国の電力系統に連系された風力発電の設備容量は約 3.6 GW)、今後数十年で大幅に増加すると考えられる。2030 年度までに、日本風力発電協会は、日本で陸上および洋上風力発電から約 36 GW の電力生産を導入することを目指しており、将来的にはさらに増加する見込みである。

このような中、風力発電が逆に気候変動から影響を受ける可能性も指摘されはじめている。これは、気候背景場と総観規模擾乱の変化を通じて、気候学的な風の時空間特性が変化するためである (Pryor et al. 2010)。風力発電量は風速の 3 乗に比例するため、そのわずかな変化が発電出力 (とその発電コスト) に大きく影響を与える。実際、気候モデルによる温暖化予測の結果を用いて、地球/地域規模での将来における風力資源を予測した研究も近年増えている (e.g., Hdidouan and Stafell 2017; Karnauskas et al. 2017)。気候モデルに基づく将来の気候予測の結果では、全球規模で風速が不均一に変化することを示しており (Karnauskas et al. 2017)、一部の地域では風力エネルギー資源量 (賦存量) が大幅に増加または減少することが見込まれている (Brayshaw et al. 2011)。これらの先行研究では、主に風速 (または密度) の変化と、パワーカーブを使用した発電出力の推定に焦点を当て、気候変動が風力資源に与える影響について議論している。CMIP5 マルチ気候モデルの結果に基づく将来における風力資源量の分析結果では、発電量は温暖化により北半球中緯度で低下する傾向と考えられ、その中でも日本は世界で最も減少する地域の一つであると予測されている (Karnauskas et al. 2017)。

### 2. 研究の目的

このような背景から、本研究では、最新の大規模な気候アンサンブルデータを用いて、気候変動が日本の風力資源分布に与える影響を評価した。さらに、その要因分析のために、機械学習を使用して気候変動が日本の総観規模の気象パターン (WP) と局所規模の風速との関係に与える影響を分析した。地球温暖化が風力資源に与える影響の評価とその要因の分析は、気候科学と電力工学の間の境界を越えた学際的な研究としても意義深いと考えられる。

また、風速の変動に起因する短期間の風力発電出力の急激かつ大幅な増加や減少は、風力ランブ現象として知られており、風力発電の主要な問題の 1 つである (Marquis et al. 2011; Ohba et al. 2016; Ohba et al. 2018)。これらは、電力供給の負荷生成バランスに影響を与える。日本の地理的/気候学的に特徴からも、冬季の東日本を中心に頻繁に発生している。風力ランブイベントは送電網の安定性を低下させるため、他の電源とバランスをとる必要がある。そのため、ランブ発生数の将来の変化も電力系統安定化の面から大きな懸念事項である (Ohba et al. 2016, 2018)。

### 3. 研究の方法

これまでの先行研究から、気象モデルや大気再解析データの地上風速を使用することで、比較的正確に風力発電量の予測や資源量の推定を行えることが知られている (e.g., Drew et al. 2015; Cannon et al. 2015)。日本における風力資源と設備利用率の推定にも、気象モデルを使用した手法が採用されている (Shimada et al. 2015)。ただし、モデルの地上 10 m 風速をタービンのハブの高さまで外挿する必要がある。境界層内の風速は、摩擦により 100~150 m までの高度に直接比例する。次式のようにべき乗則を用いて高さ 80 m (ハブの高さは通常 60~100 m) の風速を推定した。

$$v(z) = v(z_0) \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$

ここで、 $v(z)$ は高さ  $z$  での風速であり、 $\alpha$  はベキ指数（安定度や土地被覆により異なる）。 $v(z_0)$ には、毎時の地上 10 m 風速を使用し、 $\alpha$  は先行研究と同様とした（Hdidouan and Stafell 2017; Karnauskas et al. 2017）。さらに、得られた  $v(z)$ にウインドファーム型のパワーカーブ（図 1）を使用することで毎時の風力発電量を推定した。年間/季節の設備利用率（capacity factor; p.u.）は、それぞれの理論最大定格出力で除して得た。

資源量の将来変化の推定には、d4PDF（database for Policy Decision making for Future climate change：地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）による現在気候（20 世紀後半過去実験）・将来気候（4 上昇）条件を想定とした気候シミュレーションの結果を使用した。d4PDF は文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム等の国内プロジェクトを中心として作成された全球・領域気候モデルによる温暖化予測計算である（Mizuta et al. 2017）。全球平均気温が産業革命以前から +4 昇温した未来の気候状態状態での長期の計算データとなっている。なお、気候が少しずつ上昇していく温暖化シナリオではなく、気候の年々変動を考慮しつつも +4 条件に固定されている。また、d4PDF は、水平解像度約 60km の気象庁気象研究所の全球大気モデルを用いた全球モデル実験と、水平解像度約 20km で日本域をカバーする気象研究所の領域気候モデルを用いた領域モデル実験によって構成されている。領域モデル実験は、全球モデル実験結果の側面境界を用いて、60km 解像度から 20km 解像度への力学的ダウンスケーリングを行っている。ここでは 40 メンバーの歴史再現実験（1951–2010 年）と 60 メンバーの +4 昇温実験（2051–2110 年）から抽出した一時間ごとの地上 10m 風速（20km メッシュ）を使用した。

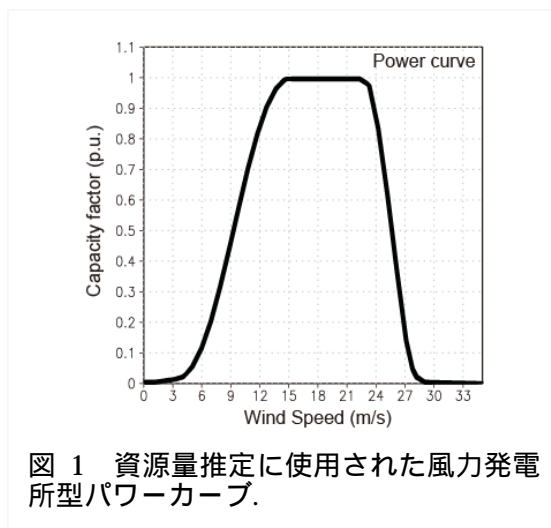


図 1 資源量推定に使用された風力発電所型パワーカーブ。

#### 4. 研究成果

d4PDF の過去実験の結果にパワーカーブ（図 1）を当てることによって、年間の風力発電賦存量（風力資源）を推定した結果を図 2 に示す。0.5 p.u. を超える高い風力資源は特に排他的経済水域（EEZ）の北東部に集中している。d4PDF で再現された風力資源の主な特徴は、JRA55 再解析の 5km ダウンスケーリング（DSJRA55; Kayaba et al. 2016）からの推定値と概ね一致したが（省略）海岸線から沖合（陸上）に沿った風力発電量は小さい（大きい）傾向を示した。風力資源の過小評価は中部日本の山岳地域でも見られた。これらの違いは主に d4PDF の解像度（20 km）に起因していると考えられる。

日本周辺の風力資源の将来変化（図 2）は、西南日本と日本南沖合（EEZ の南部）で顕著に減少する傾向を示した。このような傾向は、CMIP5 に基づく先行研究と一致している（Karnauskas et al. 2017）。陸上では西日本の太平洋側と中部日本の日本海側でより顕著であった（ただし、既存の陸上風力発電所は日本の北東部に位置している）。

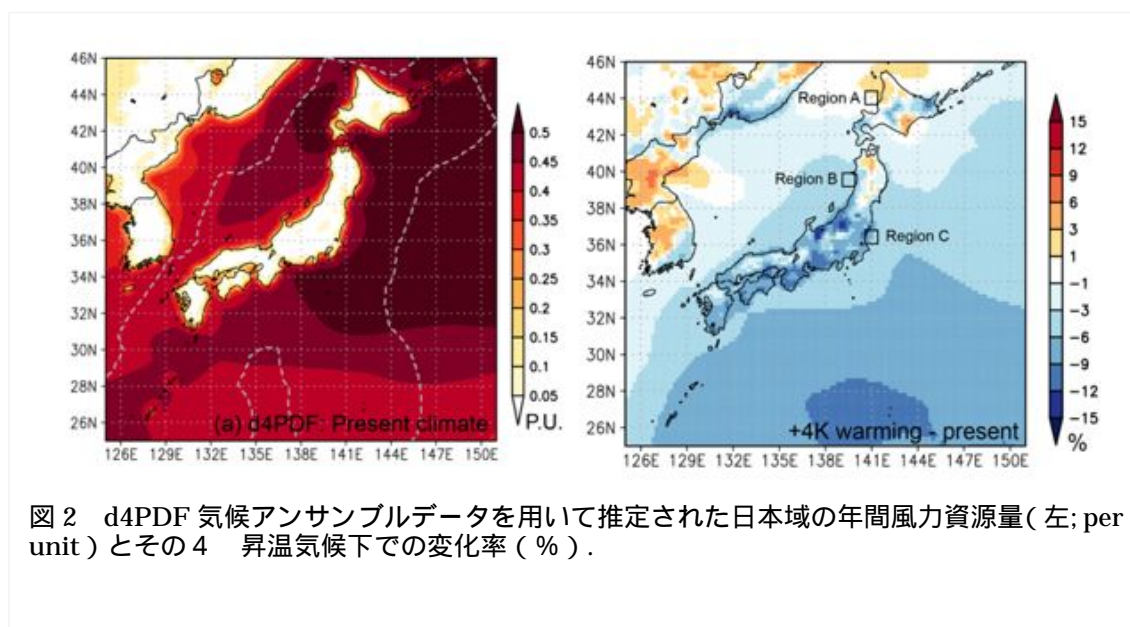


図 2 d4PDF 気候アンサンブルデータを用いて推定された日本域の年間風力資源量（左; per unit）とその 4 昇温気候下での変化率（%）。



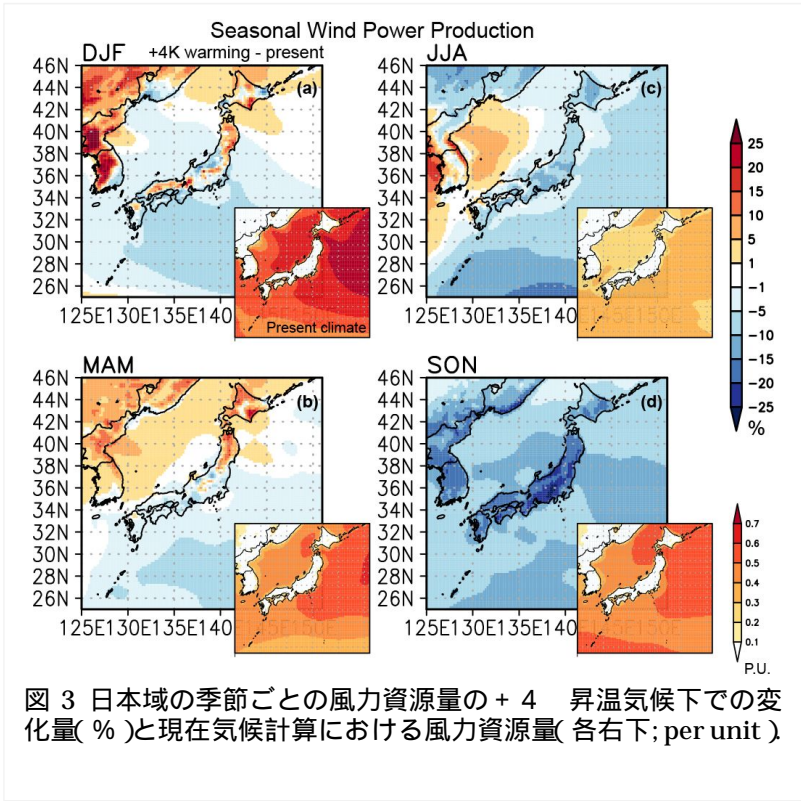


図 3 日本域の季節ごとの風力資源量の +4 昇温気候下での変化量 (%) と現在気候計算における風力資源量(各右下; per unit)

季節別の変化を図 3 に示す。現在気候における設備利用率は冬のモンスーンにともない北西風が強くなる北半球の冬季に最大になる。一方、夏から秋にかけては小さい。将来の変化は季節によって異なり、冬から春にかけては、風力資源はわずかに増加すると予測されている(特に北日本で)。一方、夏から秋にかけて(そもそもの設備利用率が低いものは、日本のほとんどの地域で減少する傾向を示している。

また、+4 昇温実験ではランブダウン発生数が大幅に減少する結果を示した。この変化は、西日本や東日本の陸上で顕著で、最大で-15%に達し、ランブ頻度が大きく変化する可能性を示唆している。この、地球温暖化による

風力ランブへの影響は、秋に最も大きかった。

日々の気象場の変化は発電量やランブの変化に直結する。資源量の変化をもたらす要因を分析するために、気象場の発生数の将来変化を調べた。ここでは気象場のおおまかな分類を行うために、ニューラルネットワークの一種である自己組織化マップ (Self-organizing maps; SOM, Kohonen 1982) を使用して、気象場のクラスタリングを実施した上で、将来気候におけるその増減の比較を行った。ここでは総観気象場を表す変数として系統規模での風力発電量との一致性が高い海面更正気圧の領域平均からの差 (Ohba et al. 2016) を使用した。図 4 に将来気候計算の冬季において特に増減の激しかった気象場と各々に対応する設備利用率を示す。増減の顕著な気象場において全体的に設備利用率が高い。東日本から北日本を西風が覆うような南高北低型の気圧配置の発生数増加が顕著で、設備利用率偏差の南北コントラストが見られる (WP1)。一方、西高東低型の気圧配置は減少し (WP3,4)、日本の南端まで寒気の吹き出しが達するような機会は減少している。西高東低型から南高北低型へのシフトが風力資源量変化の南北コントラストの要因になっていると考えられる。

さらに理解を深めるために、風力資源の将来の変化の影響を力学的寄与と熱力学的寄与に分離

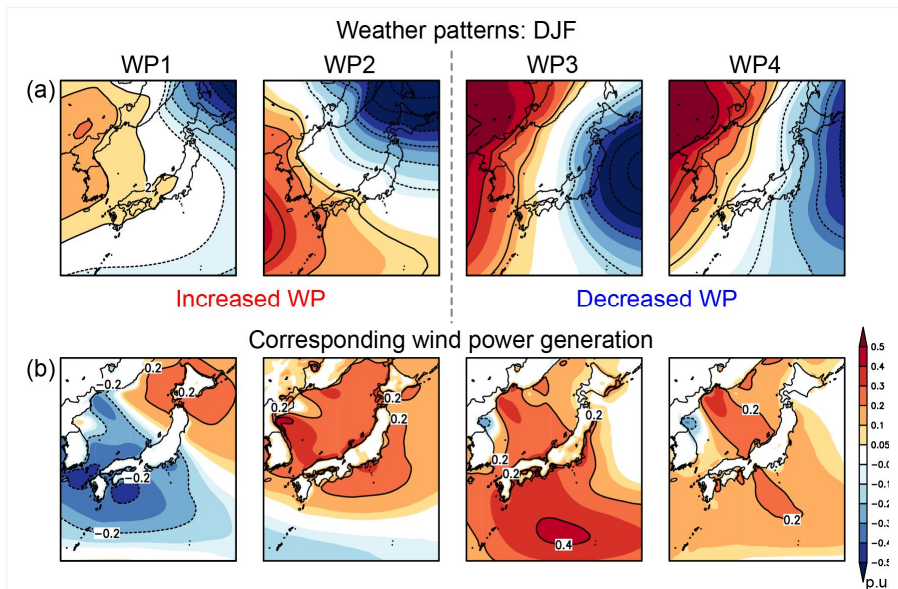


図 4 昇温計算において発生数の増加 (WP1、WP2)・減少 (WP3、WP4) の著しい気象場 (海面更正気圧) とそれぞれに対応した風力発電量偏差 (設備利用率; p.u.)

することを試みた。資源量の将来変化は、気象場の発生数の変化以外からも影響を受ける可能性がある。将来変化の根底にある物理的メカニズムを、力学 (大気循環の変化) と熱力学 (垂直温度プロファイル、海氷、積雪被覆などの特性の変化) の効果に関して確認した。ここでは SOM を使用して、風力発電の変更のためにこれらのコンポーネントを分離す

る。 将来気候と現在気候との間の潜在的な変化は、気象場のクラスタリングから、以下のよう  
にそれぞれの効果を近似的に表すことができる。

$$\Delta WE = WE^{Fc} - WE^{Pc} \cong \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n E_i^{Fc} f_i^{Fc} - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n E_i^{Pc} f_i^{Pc} \cong \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n E_i^{FcPc} (f_i^{Fc} - f_i^{Pc}) + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (E_i^{Fc} - E_i^{Pc}) f_i^{Pc}$$

ここで、i は SOM のノード番号（ここでは  $n = 400$ ）、上付き文字 Pc (Fc) は現在気候（将来気候）、FcPc は現在と将来の気候間の平均値、E は各ノードの気象レジームに対応する風力発電出力の空間分布の平均値、f は各ノードの気象レジームの発生頻度、T は時間である。最初の項は気象レジームの発生数変化の影響を表し、2 番目の項は同じの下での風力発電の温暖化の影響を示している。前者は気候変動の影響の力学的な効果とみなされ、後者は熱力学的変化とみなされる。このような気候変動影響の力学・熱力学的効果の分離は、大気循環場アナログ法 (Deser et al. 2016) として知られている。

力学的効果と熱力学的効果の寄与を分離した結果を図 5 に示す。

冬季において、風力資源の南北非対称の変化（北での強化と南での弱体化）は主に力学的効果から生じているが、陸上での変化は熱力学的寄与から生じている。前者は寒気の吹き出し方向の弱体化、後者は将来の気候における雪の深さの減少に関係している可能性がある。実際に領域モデルの将来の積雪深の消失域 (Ohba and Kawase 2020) とかなり良く一致する。積雪の消失により上空の鉛直温度プロファイルの変化を介して鉛直運動量のエントレインメントが増加し、風速の強化をもたらしていると考えられる。一方、秋では、特に日本の南部で、熱力学的効果が風力発電量の低下に貢献している。また、力学的効果の寄与が大きくなる。

温暖化にともなう循環場の変化により、世界の風力資源量は（多少なりの）影響を受けている。先行研究では、その中でも日本域の資源量は最も影響を受ける地域の一つであると考えられ、温暖化により風力資源量が低下することが見込まれている (Karnauskas et al. 2017)。d4PDF を用いた領域気候計算の結果からも全国大では資源量の低下が見られたものの、東日本域（現状風力の導入量の最も多い）での資源量の低下は西日本域に比べると少ないという結果を示した。風力資源量の減少が見込まれる一方で、気候変動により太陽光発電量 (Shiogama et al. 2020) や電力需要 (Takane et al. 2019) の増加や水力資源の減少 (大庭他 2019) も見込まれており、系統安定性などの面から、今後システム全体の影響を統合的に評価 (Perera et al. 2020) しておくことが今後の我が国のエネルギー供給システムの気候レジリエンスを高めることに繋がると考えられる。

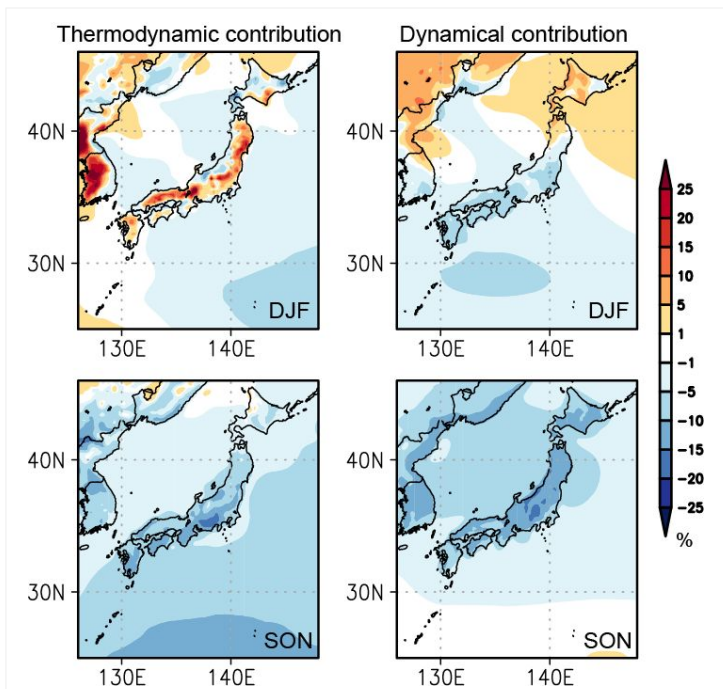


図 5 循環場アナログ法から推定された冬季（上）と秋季（下）における風力発電量の将来変化に対する熱力学寄与（左）と力学的寄与（右）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masamichi Ohba	4. 巻 10
2. 論文標題 The Impact of Global Warming on Wind Energy Resources and Ramp Events in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.3390/atmos10050265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Masamichi Ohba
2. 発表標題 Climate change impact on the wind energy resources in Japan corresponding with weather pattern changes
3. 学会等名 EMS Annual Meeting 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大庭雅道, 渡邊 武志, 野原大輔, 門倉真二
2. 発表標題 風力発電量変動の中長期確率予測手法の開発
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masamichi Ohba
2. 発表標題 Medium-range probabilistic forecast of wind power ramps based on the hybrid multi-model-analog ensemble using self-organizing maps
3. 学会等名 Offshore wind energy 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masamichi Ohba
2. 発表標題 The impact of climate change on wind energy resources in Japan
3. 学会等名 EGU 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masamichi Ohba
2. 発表標題 Overview of “wind power” and “wind ramp” climate in Japan
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大庭雅道
2. 発表標題 CMIP6における火山噴火強制に対するENSOの応答
3. 学会等名 海洋学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Michael J. McPhaden (Editor), Agus Santoso (Editor), Wenju Cai (Editor), McGregor, S., M. Khodri, N. Maher, M. Ohba, F. S. R. Pausata, S. Stevenson 他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 528
3. 書名 El Nino Southern Oscillation in a Changing Climate	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----