

# Evaluation of frequency and area of consecutive low solar resource days of surface solar energy

Takeshi WATANABE<sup>\*1‡</sup>Kazutaka OKA<sup>\*2</sup>Yasuaki HIJIOKA<sup>\*2</sup>

## 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

渡邊 武志<sup>\*1‡</sup>岡 和孝<sup>\*2</sup>脇岡 靖明<sup>\*2</sup>

### Abstract

Ground-level solar energy fluctuates owing to weather variation, which causes variation in power supply from photovoltaic (PV) generation systems. As more PV generation systems are installed, decrease in the solar energy could cause a substantial decrease in energy supply from PV generation systems. This work investigated consecutive days of significantly low surface global horizontal solar irradiance (GHI) focusing on two features: frequency of occurrence and area of simultaneous occurrence. The results showed that longer periods of low surface GHI were associated with smaller areas of simultaneous occurrence. Assuming that a significant case involves consecutive days of significantly low surface GHI occurring simultaneously at more than half of all the stations, the longest significant case was 4 days, occurring once every 2 or 3 years.

**Keywords:** Surface solar irradiance, Ground-based observation, Re-analysis, Renewable energy resource  
キーワード：地表面日射量，地上観測，再解析，再生可能エネルギー資源

### 1. はじめに

地上で得られる太陽光エネルギーは気象状況により変動する。地上での太陽光エネルギーの変動の原因の中で最も影響の大きいものは雲による日射の減衰である。

Matsuo et al.<sup>(1)</sup>は、将来に再生可能エネルギーの導入が進んだ際に、太陽光・風力の発電量が著しく減少する場合、有効な対応がなされなければ電力供給が途絶するリスクを指摘している。Wiel et al.<sup>(2)</sup>は将来気候シナリオデータをもちいて、ヨーロッパでの10年に1度程度の頻度で生じる再生可能エネルギーの低発電量事象、及び同様の頻度で生じる電力に対する高い残余需要事象に関係する気象場についての解析を行っている。同様の観点から、イギリスにおける電力システムへの気象変動の影響が研究されている<sup>(3),(4)</sup>。なお、イギリスでは風力発電が主要な再生可能エネ

ルギーシステムである。これらの先行研究が示すように、気象変動により生じる再生可能エネルギーの低下は、将来の電力システムに重大な影響を与える可能性のある現象であると言える。日本においては、再生可能エネルギーシステムの中でも太陽光発電の導入が進んでいることから<sup>(5)</sup>、地表面日射量の変動に注目をする必要がある。

本研究では、1日から1週間の連続する期間で太陽エネルギー資源が十分には得られない状況に着目する。これらの日を連続低資源量日と呼ぶ。連続低資源量日がどの程度の期間持続するか、また、どの程度の範囲で同時に生じるかについて調べる。Watanabe et al.<sup>(6)</sup>が日本での地表面全天日射量の5日間内の変動の地域特性と季節特性について解析を行っているが、現状ではこのような時間スケールの地表面日射量の変動に関する研究は多くはない。これは、再生可能エネルギーの導入量が少ない場合には他の電源による供給が可能であり、連続低資源量日が重大な影響を与える現象ではなかったためと考えられる。しかし、将来的

\*1 Research Associate, Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan

‡ e-mail: watanabe.takeshi@nies.go.jp

\*2 Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies

Received: April 8, 2021, Accepted: June 23, 2021

\*1 国立研究開発法人国立環境研究所 気候変動適応センター 特別研究員(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

‡ e-mail: watanabe.takeshi@nies.go.jp

\*2 国立研究開発法人国立環境研究所 気候変動適応センター (原稿受付: 2021年4月8日, 受理日: 2021年6月23日)

に予想される再生可能エネルギーの導入量の増加を考えると<sup>7)</sup>、数日から数週間スケールの地表面日射量の変動に関する知見を得るための研究を推進する必要がある。本研究では、全天日射量データを用いて、気象・気候学的観点からの太陽光エネルギー資源量の解析を行う。

本論文の構成は以下の通りである。2章では使用した地上観測および再解析データから得られた全天日射量データについて述べる。3章では連続低資源量日の検出手順について述べる。4章では検出した連続低資源量日についての結果を示すとともに、得られた結果から長期間かつ広域に低資源量日が生じた事例について考察を行う。5章において本研究のまとめを記載する。

## 2. データ

本研究では地上観測および再解析データから得られる2種類の全天日射量データを用いる。図1に、解析対象である気象庁の地上観測所と再解析データのグリッドセルを示す。ひし形は気象庁の地上観測所を表し、黒色のひし形が解析に用いた地上観測所である。灰色の領域は解析対象である再解析データのグリッドセルを表す。連続低資源量日の検出については地上観測データを用いる。連続低資源量日の発生時にどの程度の範囲で同時に生じるかについては再解析データもあわせて解析に用いる。日本全域を対象とした解析をする際に、図1に示すように地上観測データのみでは観測点がない場所の気象情報を得ることができないため、日本全域でデータが得られる再解析データを用いる。

### 2.1 地上観測による全天日射量データ

気象庁の地上観測所で観測された全天日射量（地表面全天日射量）を使用した<sup>8)</sup>。観測は、電気式全天日射計で測定されており、サンプリング間隔は8秒である。本研究では1時間積算全天日射量のデータを使用した。単位はMJ/m<sup>2</sup>である。使用データ期間は2007年から2020年の14年間である。気象現象の年々変動の影響を考慮して10年以上の期間を選定した。図1に示す日本国内の観測所のうち41観測所のデータを解析対象とした。なお、奄美・沖縄および、太平洋域の島しょ部にある観測所は解析から除外した。これらの地域は、亜熱帯気候に属しており、他の地点との気象特性の違いが大きいためを考慮したためである。データ期間中にすべての地点で日射計の交換が行われている<sup>9)</sup>。気象庁により付与されている観測データの品質管理情報より、交換前後でのデータ品質を把握し、機器の交換によるデータの連続性への影響は大きくないことを確認した。

地表面全天日射量は、Clearness index (CI)へ変換して用いる。CIは地表面全天日射量を大気上端日射量で割ったものである。CIへの変換によって、地球の公転と自転による年周期と日内周期を除去でき、また、緯度の違いによる地表面での日射フラックスの強度の違いも除去できる。このため、異なった日の異なった観測地点でのデータを同時に解析するためにCIの利用は有効である。

日平均は、9時から14時までの6点の1時間積算値から計算をした。日平均を計算する期間は2つの事項を考慮して決定した。1つは、太陽高度が20°前後から太陽高度が低くなるにつれ精度の低下が見られると言われており<sup>10)</sup>、太陽高度が低い場合に地上での日射量の測定精度が低下する可能性があることである。もう1つは、観測所の位置の違いによって日出、日没の時刻が異なることである。

### 2.2 再解析データ

National Aeronautics and Space AdministrationのGlobal Modeling and Assimilation Officeより提供をされているThe Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)を用いた<sup>11)</sup>。MERRA-2の特徴の一つは、多種多様な衛星観測の情報を同化していることである。このデータセットのうち、地表面および大気上端での下向き短波放射（全天日射量）データを用いた。データは全球を対象としており、東西0.625°、南北0.5°間隔（日本周辺では概ね50km間隔）の均一なグリッドシステムの各点での値が与えられている。時間間隔は1時間である。地表面全天日射量はCIへ変換し、日平均は地上観測データと同様に9時から14時の6点を平均する。使用データ期間は地上観測と同じである。解析には図1に示される領域でのグリッドセルの値を用いる。

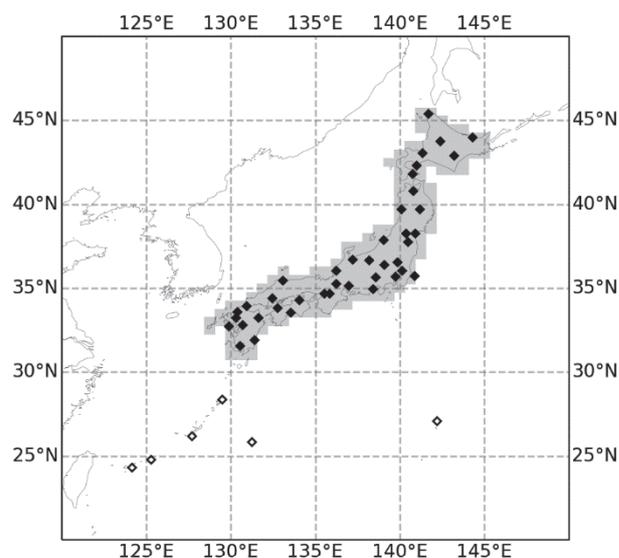


Fig. 1 Ground observation stations and MERRA-2 grid cells used for analyses.

図1 地上観測による全天日射量観測点と解析に用いたMERRA-2のグリッドセルの分布

## 3. 手法

### 3.1 連続低資源量日の検出

解析前にデータの前処理を行った。同一連続日に日平均データに欠損が確認される地点が20%以上であった場合は、その日は解析から除外することとした。すなわち、41地点のうち33地点以上の地点でデータが得られる場合が解析対象日である。表1に各連続日に関する解析期間中の

全連続日の数と上記の基準により解析対象とした連続日の数を示す。

連続低資源量日の検出は観測所ごとに行う。低資源量日は日平均を対象として判断し、日平均 CI が基準より小さい日と定義する。この CI の基準は、地上観測データの CI の 1 日平均値の分布から決定する (図 2)。図 2(a)中の直線によって、0.3 分位数に該当する 1 日平均 CI を示す。本研究では、0.3 分位数に該当する 0.33 を低資源日の基準とする。連続日の期間は 1 日から 7 日までの 1 日刻みの 7 つの場合を考える。連続日期間内のすべての日が低資源日である場合を連続低資源量日とする。各地点で連続低資源量日の検出をした後に、日ごとに同時に連続低資源量日が発生した地点数を集計する。集計した同時に発生した地点数によって連続低資源量日の発生範囲を評価する。

Table 1 The total number of days and days used for analysis according to length of consecutive days

表 1 連続日期間ごとの全連続日の数と解析に用いた連続日の数

Length of consecutive days	Total number of days	Total number of days used for analysis
1	5110	5110
2	5105	5099
3	5100	5087
4	5095	5073
5	5090	5060
6	5085	5050
7	5080	5041

### 3.2 低資源量日における解析領域内の CI の評価

検出された低資源量日における解析領域内の太陽光エネルギー資源量の状態を定量化するために CI の領域平均値を用いる。領域平均値には、地上観測については解析に用いたすべての観測所の平均を用い、MERRA-2 では対象領域内のすべてのグリッドセルの平均を用いる (図 1)。なお、再解析データは数値モデルを用いて作成されるために、用いる際には再現性の確認が不可欠である。そこで、地上観測データの CI の領域平均を参照データとして MERRA-2 の CI の領域平均値の評価も行う。地上観測所の位置は MERRA-2 の解析対象グリッドセルに対して均等に分布をしていないために、MERRA-2 の再現性に誤差がない場合であっても 2 つの領域平均は必ずしも一致しない。

## 4. 結果と考察

### 4.1 連続低資源量日の検出

連続低資源量日の検出結果を表 2 に示す。表 2 の行は連続日の期間を、列は低資源日在同一連続日に同時に生じた地点数を示す。列中の地点数は刻み幅 5 の階級となってい

る。同時に多数地点で連続日が発生する傾向は、連続日の期間が短いほど地点数が大きく、連続日の期間が長くなると地点数は少なくなる。概ね半数の地点である 20 地点以上で生じる場合は、連続日が 4 日までに限られる。期間が 1 日の場合は、ほぼ全地点または全地点に対応する 40~41 の階級が最大地点数であり、15 回検出されている。連続日期間が 4 日の場合は 20~24 の階級が最大地点数で、解析期間中に 5 回検出されている。

連続低資源日が生じる気象状態は、気象の変動性によって生じており、気候状態に変化がなければ今後も経験的に得られる頻度と同程度の頻度で生じると考えることは妥当である。表 2 に基づくと、4 日程度連続して対象地域の概ね半分以上の地点で太陽光エネルギーが十分に利用できない状況は 14 年間に 5 回生じており、ランダムに事象が生じているという前提のもとでは 2 から 3 年に 1 回の頻度で生じると考えられる。これ以外の連続日の期間についても表 2 から発生頻度を見積もることが可能である。しかしながら、広域連続低資源日に関係する現象はより長周期の気象変動、例えば年々変動と関係している可能性があるために、確率的な現象として扱えるかどうかは本研究の結果からは結論を出すことは難しく、より詳しい気象現象の理解が必要である。

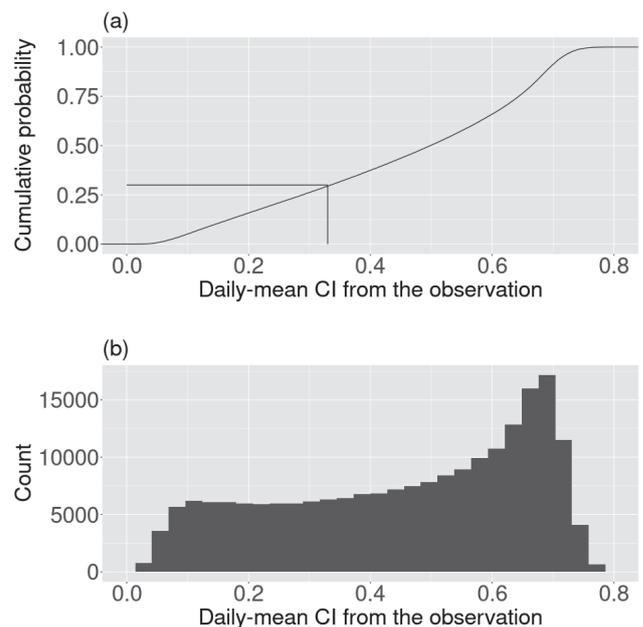


Fig. 2 (a) Empirical cumulative distribution and (b) histogram of daily mean clearness index (CI) calculated from the observation data obtained at all the ground observation stations.

図 2 全観測地点の 1 日平均 CI に関する (a) 経験累積確率分布と (b) 頻度分布

### 4.2 低資源量日における解析領域内の CI の評価

#### 4.2.1 MERRA-2 の領域平均 CI の再現性評価

図3にMERRA-2と地上観測の領域平均CIの比較を示す。図3(b)は2次元ヒストグラムで、データ数によって規格化されている。黒が濃くなるほど階級内にある数が多いことを示す。図3(a)と(c)はMERRA-2と地上観測データに関する1次元のヒストグラムをそれぞれ示す。表3は代表的な精度指標による評価を示す。使用した評価指標は平均誤差ME, 平均絶対誤差MAE, 二乗平均平方誤差RMSE, ピアソンの相関係数, スピアマンの順位相関係数の5つである。MERRA-2は地上観測データに対して明瞭な正の偏差を持っていることが分かる。また、相関係数は比較的強い正の相関である。この評価結果から、2つのデータの値の直接比較は難しいが、各データの(経験)分布に対する分位値(順位値)の間には一致性が強いと言える。MERRA-2の全天日射量の再現性評価はいくつかの先行研究<sup>12-14)</sup>においても行われている。これらの先行研究では、ヨーロッパ、アフリカ、北太平洋、北極圏などの異なった地域において評価を行っている。評価の結果は地域によって異なるが、MERRA-2は正のバイアス誤差を持つ傾向があるように見える。日本域におけるMERRA-2のより詳細な地表面日射量の再現性の評価と誤差の補正手法の検討については今後の研究において行う予定である。また、これらの先行研究では複数の再解析データ間の再現性の比較も行っており、日本域においても同様に取り組む必要があると考えられる。

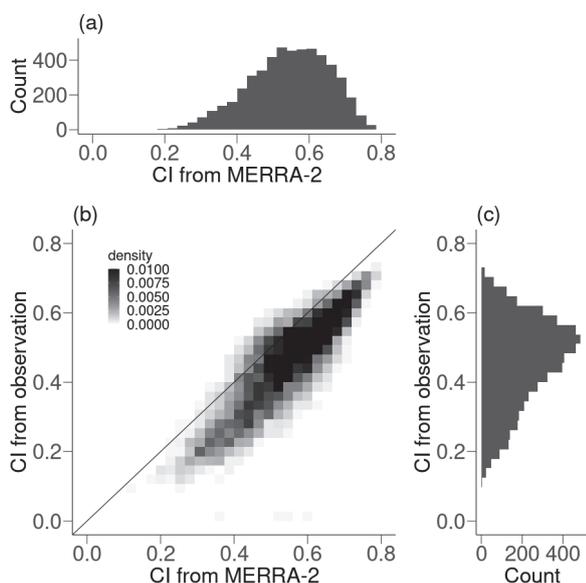


Fig. 3 Comparison of the daily mean CI from MERRA-2 and from observation averaged over the observation area.

図3 MERRA-2と地上観測の領域平均した1日平均CIの比較

#### 4.2.2 顕著な連続低資源量日事例での解析領域内太陽光エネルギー資源量の評価

検出された連続低資源量日から、大規模かつ長期間に連続低資源量日が生じた事例を顕著な本研究での対象事例とする。抽出した顕著な事例を詳しく解析し解析領域内の太陽光エネルギーの状況を確認する。規模の基準を、連続低

資源量日が全地点数の半数以上の地点、すなわち21以上の地点で同時に生じる場合とする。このような条件にあてはまる連続日を本研究では広域連続低資源量日と呼ぶ。広域連続低資源量日は4日以下の連続日で起こっている。表4に広域連続低資源量日の起こった場合の最大地点数であった連続日を連続日の期間ごとに示す。4日連続日では、最大の同時地点数は23地点であり、2つの連続日が検出されている。

この一つである2010年7月11日を初日とする連続日の各日の地点ごとの日平均日射量とMERRA-2を用いた領域全体のCIの分布を図4に示す。図4(a)-(d)は地上観測に関するもの、(e)-(h)はMERRA-2に関するものである。また、4日連続日の各日の領域平均1日CIを表5に示す。表5の括弧内の数字は各データの領域平均1日平均CIの経験分布に対する分位数である。図4において九州から東北にかけて小さい1日平均CIが持続していることが確認できる。MERRA-2のCIにおいても期間中は小さいCIの領域が持続していることが分かる。この4日連続日の気象状態の推移はMERRA-2の結果から確認ができる。この期間中、梅雨前線が日本上空に停滞しており、2つの低気圧が連続して梅雨前線上を西から東に通過した。このような気象状態により、期間中は日本の大部分は雲に覆われ、弱い日射量が持続したと考えられる。観測データでは4日間すべてで領域平均CIは0.3を下回っており期間平均は0.228である。MERRA-2に関しては、すべての日で分位数は0.2以下であり、期間平均は0.388である。もう1つの広域連続低資源量日である2017年10月14日を初日とする連続日の各日のCIの推移を表6示す。この連続日についても期間中に領域内は低いCIが持続していることが確認できる。この事例においては4日連続日の間に九州から関東にかけて前線が停滞し続けたことが広域連続低資源量日の原因であると考えられる。

## 5. まとめ

気象庁の41地上観測所の14年間の地表面全天日射量データを用いて連続低資源量日の検出を行い、連続期間と同時発生地点数を調べた。地上観測データと合わせて再解析データMERRA-2を用いて、広域連続低資源量日の発生時の解析対象領域内の日射量の状態について解析を行った。

連続する低資源量日は、連続日が長くなるにつれ同時発生地点数は小さくなることが分かった。広域連続低資源量日が生じる最長の連続日の期間は4日である。解析領域での平均で評価した場合においても連続日中のCIの低下の持続が確認された。14年間のデータから検出された広域連続低資源量日の発生回数から、発生頻度を見積もることが可能である。

連続低資源量日へ対応するためには、気象・気候分野における研究の推進が必要である。対象とする気象現象は数日より長いスケールの現象に関係していると考えられるた

め、今後以下のような研究テーマに焦点を当てた研究の推進が望まれる。

(1) 地表面日射量の中期（～数週間）予測および季節予測の高精度化とこれらの予測情報の提供のあり方についての検討

(2) 対象となる気象現象が生じる気象・気候学的メカニズムの理解の深化と得られた知見の応用

(3) 将来予測されている温暖化に起因する気候変化により、関係する気象現象の発生頻度および発生時期の変化が生じる可能性についての評価と対応策の提示

Table 2 Total number of consecutive low solar resource days that occurred simultaneously at all the stations in groups of 5.

表 2 各連続日期間の低資源量日が同時に発生した観測所数

Length of consecutive days	Number of stations									Total number of days
	1-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-41	
1	1035	1198	868	565	403	329	256	109	15	4778
2	1928	1044	455	209	102	66	15	2	0	3821
3	1899	534	143	49	23	6	1	0	0	2655
4	1455	224	42	12	5	0	0	0	0	1738
5	1016	76	19	2	0	0	0	0	0	1113
6	667	33	2	0	0	0	0	0	0	702
7	441	12	0	0	0	0	0	0	0	453

Table 3 Evaluations of reproducibility of the mean CI from MERRA-2 averaged over the observation area with ground-based observations as a reference.

表 3 地上観測を参照値として評価した MERRA-2 の領域平均 CI の再現性評価

Average over the observation area		ME	MAE	RMSE	Pearson's correlation coefficient	Spearman's rank coefficient
MERRA-2	Observation					
0.544	0.458	0.086	0.091	0.106	0.870	0.851

Table 4 Dates when consecutive low solar resource days occurred for a maximum number of >20 stations.

表 4 各連続日数における広域連続低資源量日が同時に発生した観測所数が最大となった場合の日付と最大観測所数

Length of consecutive days	Date	Maximum number of stations
1	2008/10/26, 2009/10/2, 2010/3/25, 2012/11/17, 2013/11/10, 2015/6/9, 2015/7/1	41
2	2011/5/28, 2018/7/5	36
3	2018/7/5	32
4	2010/7/11, 2017/10/14	23

Table 5 Daily mean CI averaged over the observation area for each of 4 consecutive days beginning on July 11th, 2010.

表 5 2010 年 7 月 11 日を初日とする 4 日連続日の広域連続低資源量日の各日の領域平均 1 日平均 CI

Data	Daily mean CI averaged over the observation area for each consecutive day				4-day average of the daily mean CI averaged over the area
	1 <sup>st</sup> day	2 <sup>nd</sup> day	3 <sup>rd</sup> day	4 <sup>th</sup> day	
MERRA-2	0.417 (0.134)	0.417 (0.135)	0.380 (0.087)	0.357 (0.062)	0.393
Observation	0.267 (0.094)	0.191 (0.023)	0.247 (0.072)	0.217 (0.042)	0.231

Table 6 Daily mean CI averaged over the observation area for each of 4 consecutive days beginning on October 14th, 2017.

表 6 2017 年 10 月 14 日を初日とする 4 日連続日の広域連続低資源量日の各日の領域平均 1 日平均 CI

Data	Daily mean CI averaged over the observation area for each consecutive day				4-day average of the daily mean CI averaged over the area
	1 <sup>st</sup> day	2 <sup>nd</sup> day	3 <sup>rd</sup> day	4 <sup>th</sup> day	
MERRA-2	0.416 (0.131)	0.342 (0.047)	0.378 (0.085)	0.517 (0.389)	0.413
Observation	0.299 (0.132)	0.197 (0.027)	0.207 (0.034)	0.335 (0.185)	0.260

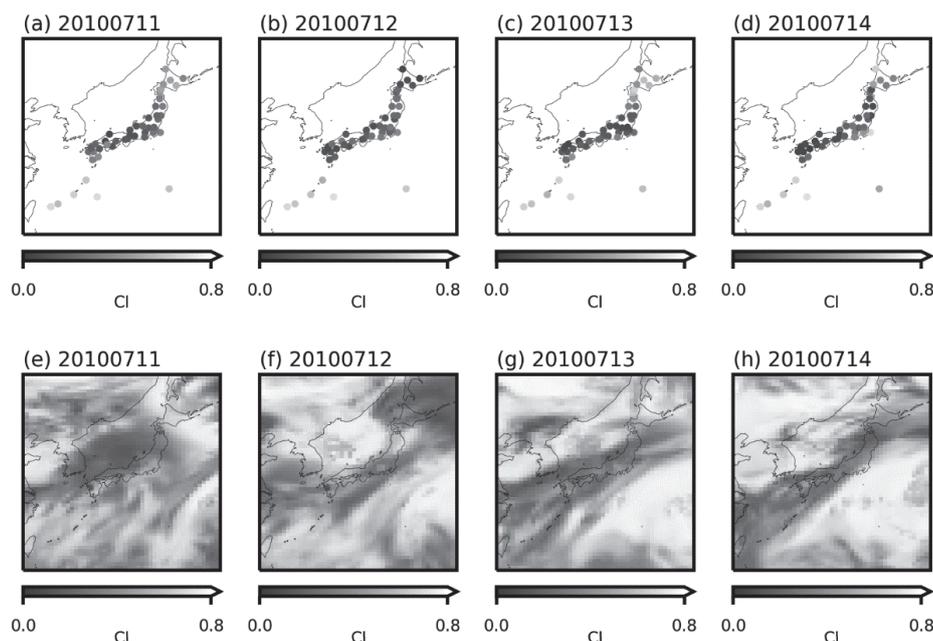


Fig. 4 Daily mean CI for each of 4 consecutive days, beginning on July 11th, 2010.

図4 2010年7月11日を初日とする4日連続日の各日の日平均CI

謝辞

本研究は、国立研究開発法人国立環境研究所「気候変動適応研究プログラム」において行われたものである。

参考文献

1) Y. Matsuo, S. Endo, Y. Nagatomi, Y. Shibata, R. Komiyama, Y. Fujii, Investigating the economics of the power sector under high penetration of variable renewable energies, *Applied Energy*, **267**, 113956 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113956>

2) K. van der Wiel, L. P. Stoop, B. R. H. van Zuijlen, R. Blackport, M. A. van den Broek, F. M. Selen, Meteorological conditions leading to extreme low variable renewable energy production and extreme high energy shortfall, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **111**, 261-275 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.065.13>

3) D.J. Cannon, D.J. Brayshaw, J. Methven, P.J. Coker, D. Lenaghan, Using reanalysis data to quantify extreme wind power generation statistics: A 33 year case study in Great Britain, *Renewable Energy*, **75**, 767-778 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.024>

4) H.C. Bloomfield, D.J. Brayshaw, L.C. Shaffrey, P.J. Coker, H.E. Thornton. The changing sensitivity of power systems to meteorological drivers: a case study of Great Britain. *Environ Res Lett*, **13**, 054028 (2018), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabff9>

5) 資源エネルギー庁, 平成30年度(2018年度)におけるエネルギー需給実績(確報)(accessed Mar. 4<sup>th</sup> 2021), [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/stte\\_030.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_030.pdf)

6) T. Watanabe, K. Oka, Y. Hijioaka, Assessment of characteristics of surface solar irradiance on consecutive days using a self-organizing map

and clustering methods, *Meteorological Applications*, **28**, e1984 (2021), <https://doi.org/10.1002/met.1984>

7) 経済産業省, 長期エネルギー需給見通し(accessed Mar. 4<sup>th</sup> 2021), [https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/pdf/report\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf)

8) 気象庁, 過去の気象データ・ダウンロード (accessed May. 19<sup>th</sup> 2021), <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>

9) H. Ohtake, G. S. Fonseca, J., T. Takashima, T. Oozeki, K. Shimose, Y. Yamada, Regional and seasonal characteristics of global horizontal irradiance forecasts obtained from the Japan Meteorological Agency mesoscale model, *Solar Energy*, **116**, 83-99 (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.020>

10) 気象庁, 気象観測の手引き (accessed May. 19<sup>th</sup> 2021), [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku\\_guide/tebiki.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/tebiki.pdf)

11) R. Gelaro et al., The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *Journal of Climate*, **30** (14), 5419-5454 (2017), <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>

12) A. Boilley, L. Wald, Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface, *Renewable Energy*, **75**, 135-143 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.042>

13) B. J. Zib, X. Dong, B. Xi, A. Kennedy, Evaluation and Intercomparison of Cloud Fraction and Radiative Fluxes in Recent Reanalyses over the Arctic Using BSRN Surface Observations, *Journal of Climate*, **25** (7), 2291-2305, (2012), <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00147.1>

14) L. Schmeisser, L. M. Hinkelman, T. P. Ackerman, Evaluation of radiation and clouds from five reanalysis products in the Northeast Pacific Ocean, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 7238-7253, (2018), <https://doi.org/10.1029/2018JD028805>