

太陽光・風力発電を適切に増やしていく

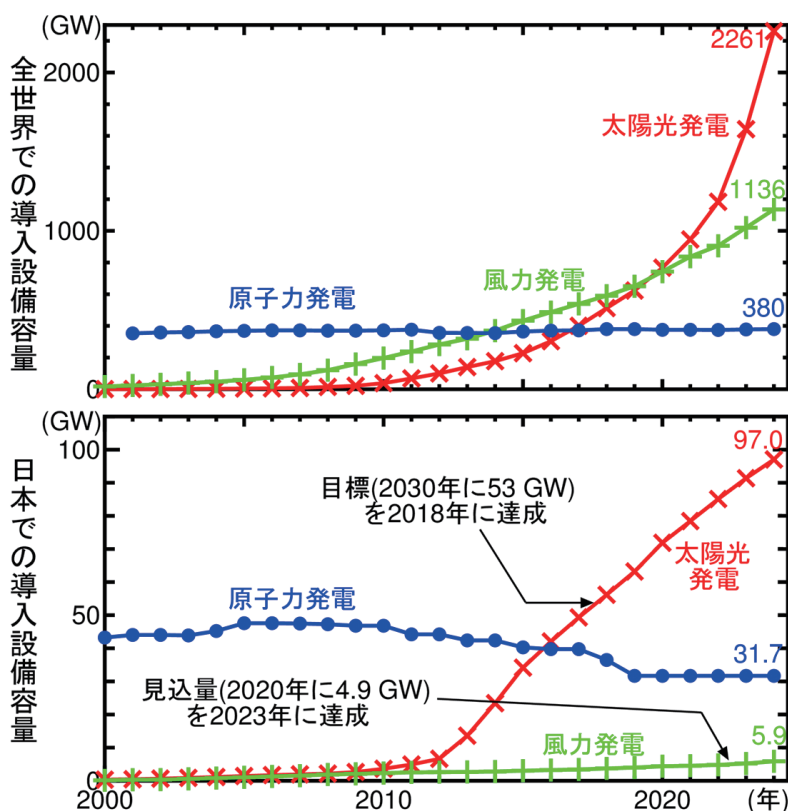
東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科 准教授 | こんどう じゅんじ 近藤 潤次

1. 太陽光・風力発電の導入状況

普段、私たちはコンセントに電化製品のプラグを挿して、電気エネルギーを利用しています。この電気エネルギーは、電力系統に繋がっている多数の発電設備で生成されたものです。現在日本では、電気エネルギーの6割以上を火力発電が供給しています。火力発電は発電時に、輸入が必要な石油・石炭・天然ガスといった化石燃料を燃焼して二酸化炭素を排出するので、エネルギーセキュリティ、資源の有限性、および地球温暖化の点で問題があります。一方で太陽光発電や風力発電は発電時に化石燃料を用いず、国内で得られて枯渇しない日射や風のエネルギーを利用するという利

点があります。そのため、太陽光・風力発電の導入拡大が世界的に進んでいます。

日本及び全世界に導入されている太陽光発電と風力発電、および比較対象として原子力発電の設備容量を【図1】に示します（風力と太陽光は累積値、原子力は運転可能な設備のみ）。全世界では、風力発電の方が太陽光発電よりも経済性が優れていたために先に導入が進みましたが、その後太陽光発電の導入が急激に増え、2020年に風力発電を越えました。また、両者共に総容量は原子力発電の数倍であり、重要な主力電源になっていることが分かります。一方、日本では、太陽光発電は全世界の傾向と同様に順調に増加し、2008年に政府が掲げた「2030年に53GW」という政府目標は2018年時点で達成され、その後も伸び続けて



【図1】 全世界および日本における太陽光発電・風力発電・原子力発電の設備容量の推移 (IEA-PVPS, GWEC, IAEA, WNAの公表値より)

	中国	米国	インド	ドイツ	日本
太陽光	1048.5	225.0	124.6	100.4	97.0
風力	520.6	154.3	48.2	72.8	5.9
比	0.50	0.69	0.39	0.72	0.06

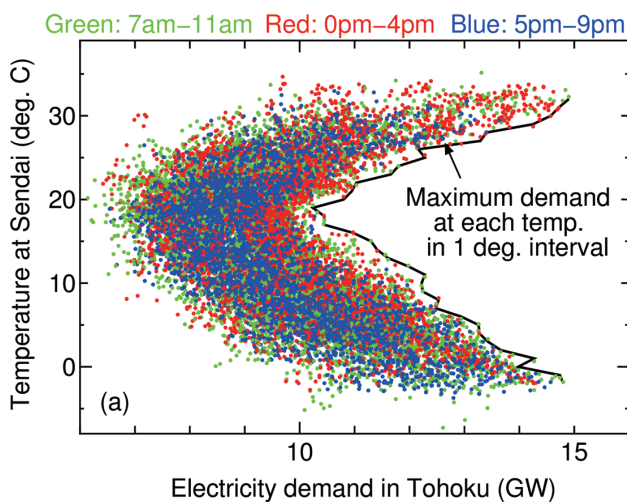
【表 1】 2024 年における各国の太陽光・風力発電の導入設備容量 (単位: GW) とそれらの比 (IEA-PVPS, GWEC の公表値より)

います。しかしながら、風力発電の伸びが低調で、「2020 年に 4.9 GW」という導入見込量には 2023 年にやっと到達しました。【表 1】は太陽光発電の導入設備容量が多い上位 5 か国における、太陽光・風力発電の導入設備容量とそれらの比を表しています。太陽光発電に対する風力発電の設備容量比は、上位 4 力国では 4 割~7 割程度ですが、第 5 位の日本では 6 %という他国と比べて低い値になっています。

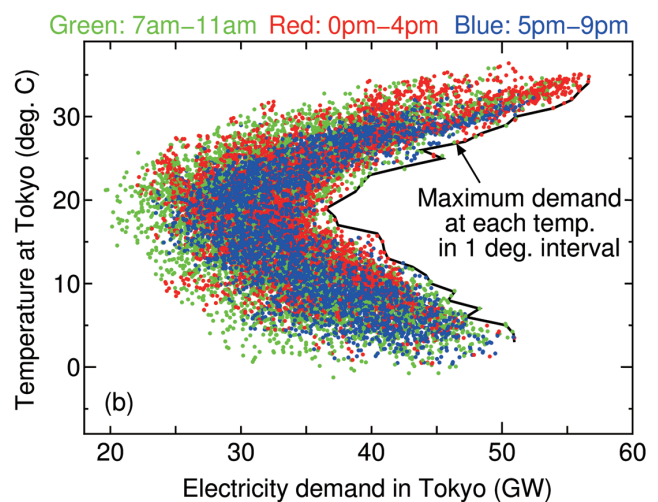
2. 電力系統と電力需要

電気を生成する発電設備、電気を送る送電設備、電気を需要家に配る配電設備などを含めた電力システム全体を、電力系統と呼びます。電力系統では総発電電力と総消費電力をリアルタイムで一致させないと、周波数が基準値 (東日本 50 Hz, 西日本 60 Hz) からずれる特性があります。このずれが大きくなると発電設備を運転継続できなくなり、大停電に至る危険があります。

まず、総消費電力の特徴について考えます。【図 2】



(a) 東北電力エリア



(b) 東京電力エリア

【図 2】 2019~2021 年における各電力エリアでの総消費電力と中核都市の気温の関係¹⁾

は、東北電力エリアでの総消費電力と仙台の気温の関係、および東京電力エリアでの総消費電力と東京の気温の関係を表す散布図です。各エリアの総消費電力のデータは各電力会社の web サイトに掲載された 1 時間毎の値を用いました。仙台と東京は各エリアの中核都市であることから選定しました。もちろん電力需要は気温だけで決まるわけではなく、産業活動が活発な平日の日中に大きくなるといった特徴があるため、分散しています。なお【図 2】には、1°C 毎の最大値を結んだ線も示しており、若干の凸凹はありますが、東北でも東京でも 19°C 付近での総消費電力が最も低い「くの字」形になっています。この理由は、19°C 付近の気温は人間にとって過ごしやすく冷房・暖房需要が少ないが、これより気温が高ければ高い程冷房需要が高くなり、低ければ低い程暖房需要が高くなる、と説明できます。給湯・冷蔵需要も同様と考えられます。また、高温時の高需要はほとんど赤色や緑色の点、すなわち日中の時間帯に生じていますが、低温時の高需要は青色の点、すなわち夕方 5 時から夜の時間帯にも多く生じていることが分かります。

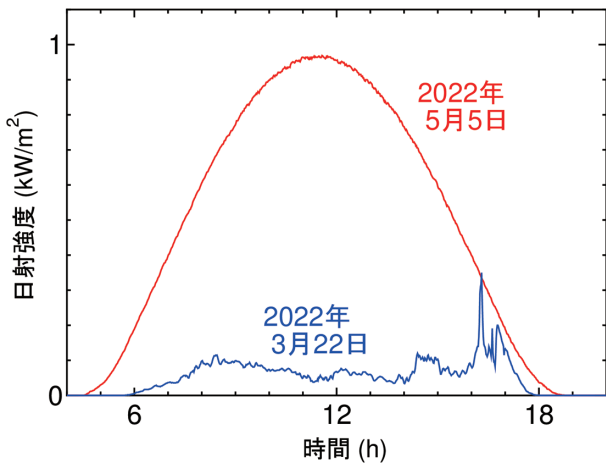
3. 太陽光発電の発電出力

【図 3】は仙台管区気象台で計測された日射強度の時間変化の例です。2022 年 5 月 5 日は快晴で、日射強度は朝 4 時半過ぎの日の出以降に上昇し、11 時半頃の南中時刻に約 1 kW/m² に達し、その後は 18 時

半頃の日の入りまで徐々に低下していきました。太陽電池モジュールでこの日射のパワーを電力に変換しますが、変換効率は約0.2程度ですので、面積1m²の

太陽電池モジュールからは最大で200W程度の電力が得られます。また大雑把に言えば、その発電電力は日射強度に比例します。一方で2022年3月22日は曇りで、昼頃には降雪も観測されましたが、南中時刻の日射強度は0.05kW/m²未満でした。このような日は、太陽光発電はほとんど発電できません。以上のように、太陽光発電の発電出力は時間帯および天候によって大幅に変わります。

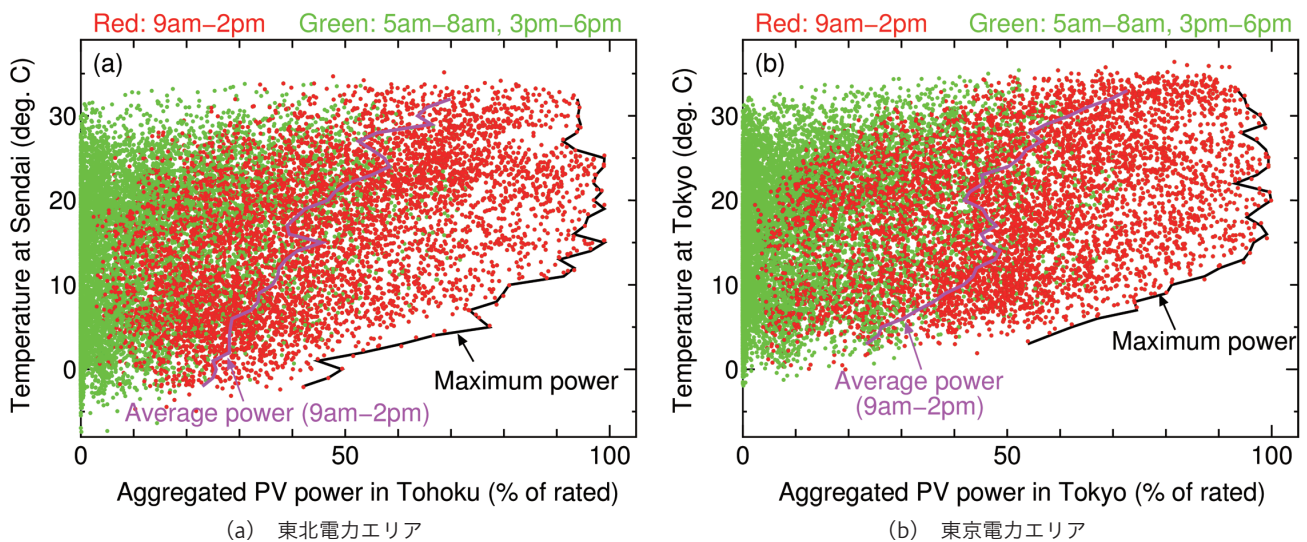
ここで、東北電力エリアでの太陽光発電の総発電電力と仙台の気温の関係、および東京電力エリアでの太陽光発電の総発電電力と東京の気温の関係を解析します。総発電電力のデータを得るのは困難なので、**【図4】**に青丸または青星印で示した気象庁の地上気象観測地点で計測された日射強度データの1時間毎の平均値を用いて、各地点に同容量のメガソーラーが



【図3】 仙台で観測された日射強度の時間変化の例



【図4】 日射強度と風速の観測地点¹⁾



【図5】 2019～2021年における各電力エリアでの太陽光発電の推算総発電電力と中核都市の気温の関係¹⁾

設置されていると仮定して推算しました。解析結果を【図5】に示します。

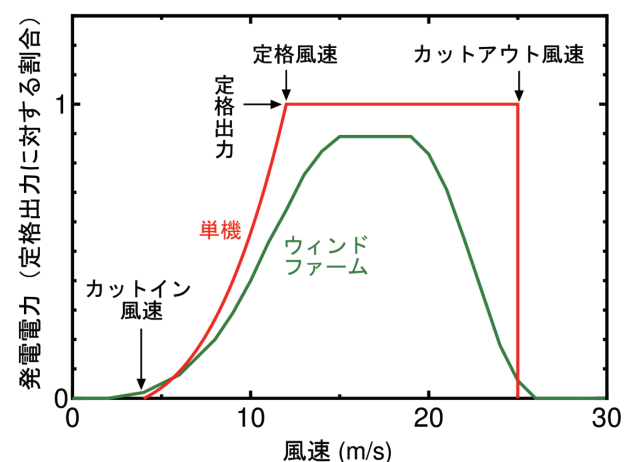
【図5】において横軸の総発電出力は定格出力（最大出力）の総和に対する割合で表しています。太陽高度が高く高出力が期待できる時間帯である9時～14時のデータは赤色で示しているが、その時間帯でも【図3】のように天候によって発電出力は大幅に変わるので、分散しています。なお【図5】には、9時～14時のデータに関して1℃毎の平均値と最大値をそれぞれ結んだ線も示しており、凸凹はありますが、東北でも東京でも平均値は気温の低下と共に低下しており、最大値も約15℃以下では気温と共に低下し氷点下では定格の半分以上の発電電力になることはまずないと言えます。

【図3】と【図5】を合わせて考えると、一般的に天気が良くて日射強度が高い時は気温が高いため、夏季の高温時の高電力需要期には太陽光発電は供給力としてある程度期待できます。しかし、天気が悪くて日射強度が低い時は気温も低いので、冬季の低温時の高電力需要期には太陽光発電は供給力としてあまり期待できません。2022年3月22日に東日本において電力需給ひっ迫警報が発令されました。この要因は、6日前の地震により複数の火力発電が停止したこともあります。季節外れの寒波による電力需要の急増です。当日正午の気温は仙台で0.5℃、東京で1.9℃であり、この気温の時は太陽光発電での高出力が望めないことが【図5】から分かりますし、少なくとも

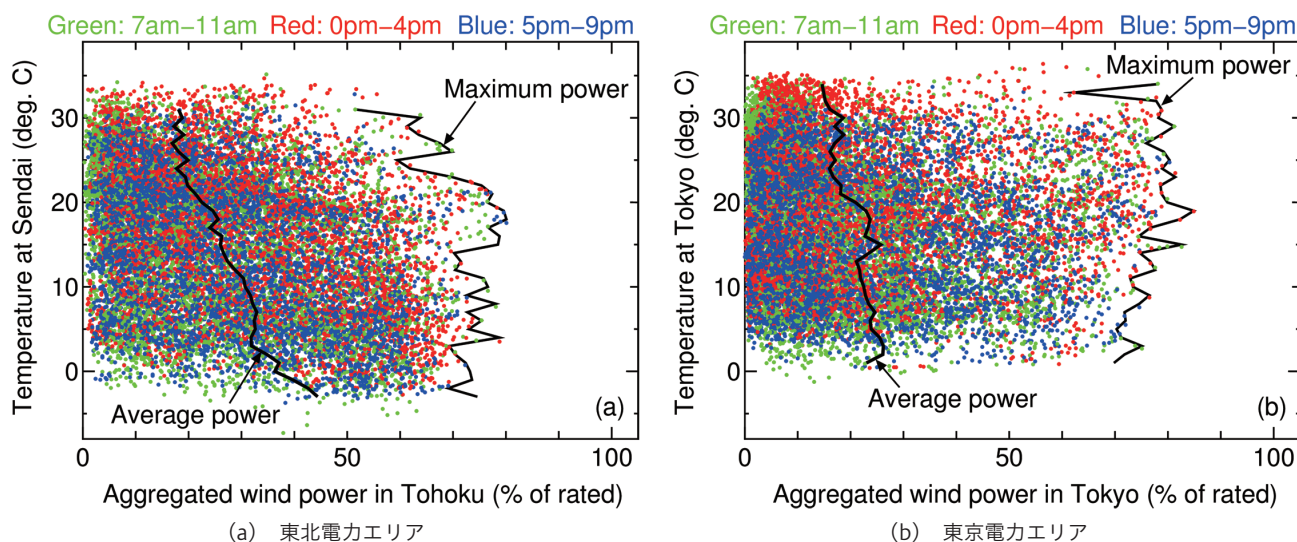
仙台の日射強度は【図3】のように非常に低く、太陽光発電の発電電力は低いものでした。このことから、「再エネはいざという時に役に立たない」という主張される方もおられましたが、気温が低い時はだいたい天気も悪いので発電出力が低くなるのは太陽光発電の特性であり、当然のことなのです。

4. 風力発電の発電出力

風力発電の風速と発電電力の関係（パワーカーブ）を【図6】に示します。まず赤色の線で示した風車単機についてです。単位体積当たりの空気が持つ運動エネルギーは風速の2乗に比例し、風車の受風面（ブレードが回転して風を受ける面積）を単位時間あたりに通過する空気の体積は風速に比例するので、風が持つパ



【図6】 風力発電の風速と発電電力の関係



【図7】 2019～2021年における各電力エリアでの風力発電の推算総発電電力と中核都市の気温の関係¹⁾

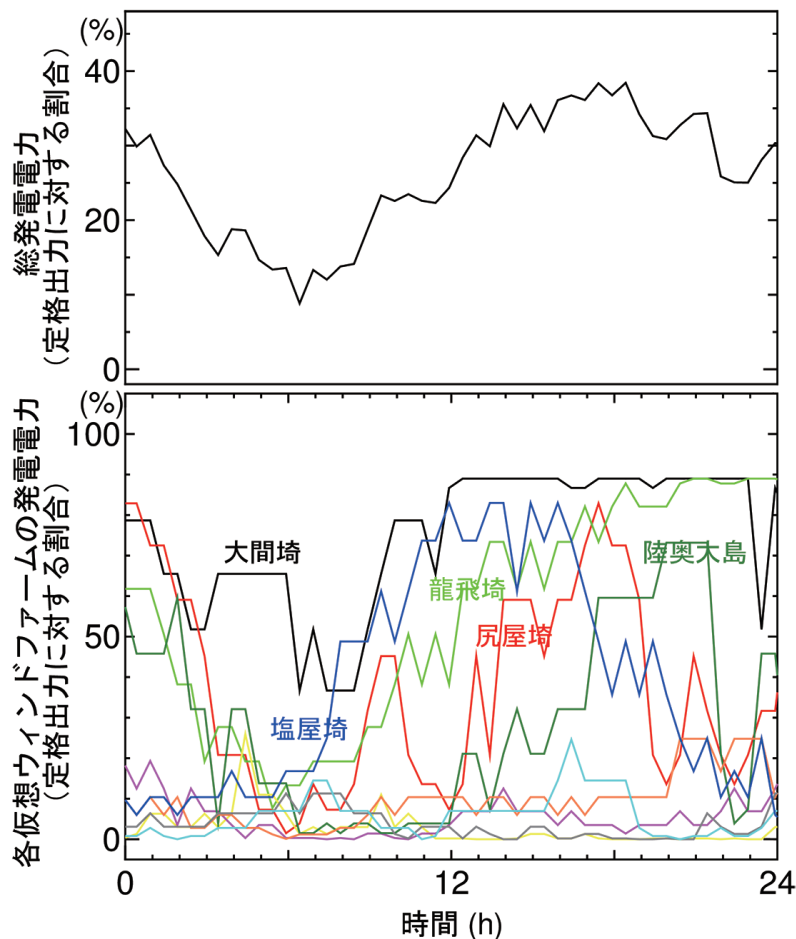
ワームは風速の3乗に比例します。カットイン風速（通常4 m/s程度）より低い風速では発電をしません、それ以上の風速では定格出力に達する定格風速（通常12 m/s程度）まで変換効率0.4程度で風のパワーを電力に変換するので、風速が早い程、出力が高くなります。定格風速以上では、ブレードの角度を変えて風のパワーの一部を逃がすことで定格出力を維持します。台風時のようなカットアウト風速（通常25 m/s程度）を超える強風では風車を停止します。

多数基の発電用風車が設置されたウィンドファーム（風力発電所）のパワーカーブとしては、下流の風車の風速は上流の風車の影響で低下すること、地形の影響で各風車が受ける風速は異なること、故障やメンテナンスのため一部の風車は停止していることなどを考慮して、例えば【図6】の緑色の線のカーブが提案されています²⁾。ここで、東北電力エリアでの風力発電の総発電電力と仙台の気温の関係、および東京電力エリアでの風力発電の総発電電力と東京の気温の関係を解析します。総発電電力のデータを得るのは困難なので、【図4】に赤丸で示した灯台で計測された10分平均風速データをハブ（ブレードの回転中心）高さに換算して、各地点に同容量のウィンドファームが設置されていると仮定して【図6】のウィンドファームのパワーカーブで変換しました。なお、【図4】の緑丸の灯台での風速データも解析しましたが、ハブ高さでの年平均風速が5.5 m/s未満であったため、ウィンドファームの設置想定地点から外しました。解析結果を【図7】

に示します。

【図7】において横軸の総発電出力は定格出力（最大出力）の総和に対する割合で表しています。時間帯によって色分けしていますが、どの時間帯のデータも分散しています。なお【図7】には、1℃毎の平均値と最大値をそれぞれ結んだ線も示しています。東北電力エリアでは明らかに平均値が気温の低下と共に上昇しています。最大値は約20℃未満では明確な特徴が見えませんが、約20℃以上では気温の上昇と共に低下しています。これは冬の季節風が強いためです。【図3(a)】と【図5(a)】を合わせて考えると、一般的に夏季の天気が良くて気温が高い時はあまり風が強くないことが多いので、高温時の高電力需要期には東北電力エリアの風力発電は供給力としてあまり期待できません。しかし、冬季の天気が悪く気温も低い時は風が強ことが多いので、低温時の高電力需要期には風力発電は供給力として期待できる場合が多いです。東京電力エリアについても、平均値は気温が低い方が発電電力が高い傾向が見られます（なぜか最大値は若干逆ですね）。

2022年3月22日の10地点の仮想ウィンドファームの発電電力およびそれらの総発電電力の時間変化を【図8】に示します。風力発電は同じ東北内でも地点間で発電出力にかなりのばらつきが生じるのが特徴的です。全10地点のうち、相応の発電出力が得られた5地点のデータは地点名を記しています。4地点が青森県北部ですが、1地点は福島県です。総発電出力



【図8】 2022年3月22日の東北電力エリアでの風力発電電力の推算値

に関しては、10%から40%の間で変動しています。この解析では東北の全風力発電の年間の設備利用率(平均発電電力)が20%台後半である¹⁾ことを考えると、この日の総発電電力は平均程度であったと言えます。

5. まとめ

太陽光・風力発電は、発電時に化石燃料を用いず、日射や風が持つエネルギーを利用して発電できるという利点があり、その導入量は世界的に増加しています。一方で、発電出力が気象状況によって変動するという問題があります。発電電力と消費電力を常に一致させなければならない電力システムにおいて、発電電力が勝手に変動してしまうこれらの発電設備の特性は、厄介な問題です。電力システム内には揚水発電という蓄電設備があり、電力の需要と供給の差を充放電により埋め合わせていますが、すでに稼働率がかなり高くなっています。電池電力貯蔵装置を大量に導入するという対策も

ありますが、まだまだ高価格です。よって、この需要と供給の差の問題をなるべく軽減するように導入を進めていくべきです。

電力需要は夏季の高温時と冬季の低温時に増加する傾向があります。夏季の高温時は日中の晴天であることが多く、その場合は太陽光発電が供給力として十分期待できます。冬季の低温時は風が強いことが多く、その場合は風力発電が供給力として機能します。以上を考えると、太陽光発電と風力発電をバランスよく導入していくことが適切です。現状の日本は、太陽光発電の導入は順調ですが、風力発電の導入が諸外国と比べて遅れています。特に冬の電力需要が大きい北海道や東北では、風力発電の比率を上げるべきでしょう。

参考文献

- 1) J. Kondoh, "Validity of wind power for heavy winter demand in eastern Japan power systems", *Frontiers in Energy Research*, Vol. 11, 1185961, pp. 1-12, 2023 (DOI: 10.3389/fenrg.2023.1185961)
- 2) J. R. McLean, "Equivalent wind power curves", *TradeWind technical report*, WP2.6, 2008