



日本におけるDunkelflaute (数日間再エネ低出力)の発生リスク

2025/08/07

電力中央研究所

サステナブルシステム研究本部

気象・流体科学研究部門

上席研究員 大庭雅道

- ✓ **Ohba, M.**, Y. Kanno, S. Bando, 2023: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 175, 113188.
doi:10.1016/j.rser.2023.113188.
- ✓ **Ohba, M.**, Y. Kanno, and D. Nohara, 2022: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 155, 111927.
doi:10.1016/j.rser.2021.111927.



自己紹介: 大庭 雅道 (おおば まさみち)

電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部
気象・流体科学研究部門 上席研究員

- ✓ 出身大学: 筑波大学 生命環境科学研究科 (地球環境科学)
- ✓ 2009年4月電中研入所

研究分野

- 気候学・気象学 (気候変動・異常気象)
- **エネルギー気象学** (変動性再生可能エネルギーの予測・分析)

研究の展開先

- 水力等の電力設備・システムへの気候変動影響評価
- 変動性再生可能エネルギーの解析：長期低出力事象・出力急速変動など

学会活動

気象学会；土木学会；海洋学会；雪氷学会 など

※ IPCC※報告書への貢献 (13件の論文引用 (うち主著11件))

※ **IEA Electricity 2025 報告書**への論文引用・紹介

※気候変動に関する政府間パネル：気候変動に関する最新の科学的知見に関する評価報告書を提供している政府間機構

目次

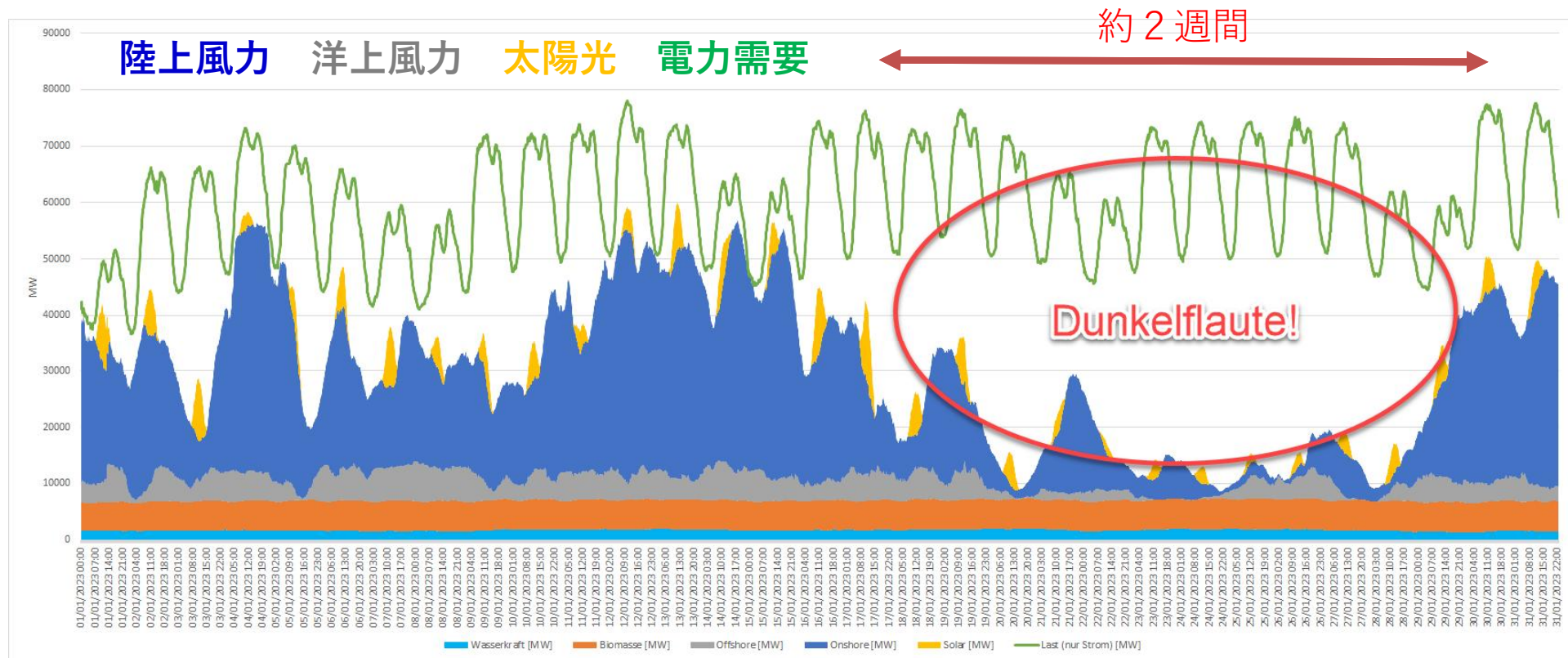
✓ Dunkelflaute（ドゥンケルフラウテ）とは何か

✓ 日本におけるDunkelflauteの定量的分析

✓ 電力需給とDunkelflaute

✓ Dunkelflaute（ドゥンケルフラウテ）とは何か

- 曇天無風に伴い数日間再エネが低出力となる気象条件（[Dunkelflaute](#)）
- 欧州では変動性再生可能エネルギー（VRE）導入拡大に伴い、市場価格の一時的高騰といった社会経済的影響が顕在化



ドイツの2023年1月の再エネ発電と需要の時間変化

出典：Fraunhofer ISE

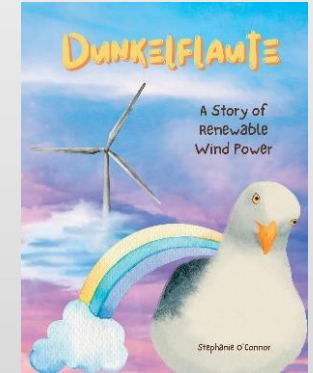
- ✓ 欧州系統運用者ネットワーク（ENTSO-E）の調査※では、欧州諸国において
 - ⇒年に2～4回発生、6～10日間続く可能性
 - ⇒最悪ケースでは数TWh規模のVRE出力不足が発生する可能性

用語の整理

1. Dunkelflaute（ドゥンケルフラウテ：ドイツ語、英語でDark Doldrums）

曇天（無光）無風：日射（雨・曇天）も風もほとんどない気象条件で、太陽光発電や風力発電がほとんどまたは全く行われない状態

▶ 欧州で広く使用されている用語



2. VRE drought（変動性再生可能エネルギー干ばつ）

VRE出力が非常に低い期間：要因は無風のみなどのほか、着氷雪などによる設備の凍結なども含める（曇天無風に限らないで利用できる）

▶ VREが十分に発電できない期間の課題を強調した言い方

▶ 米国・豪州などで使用されている用語

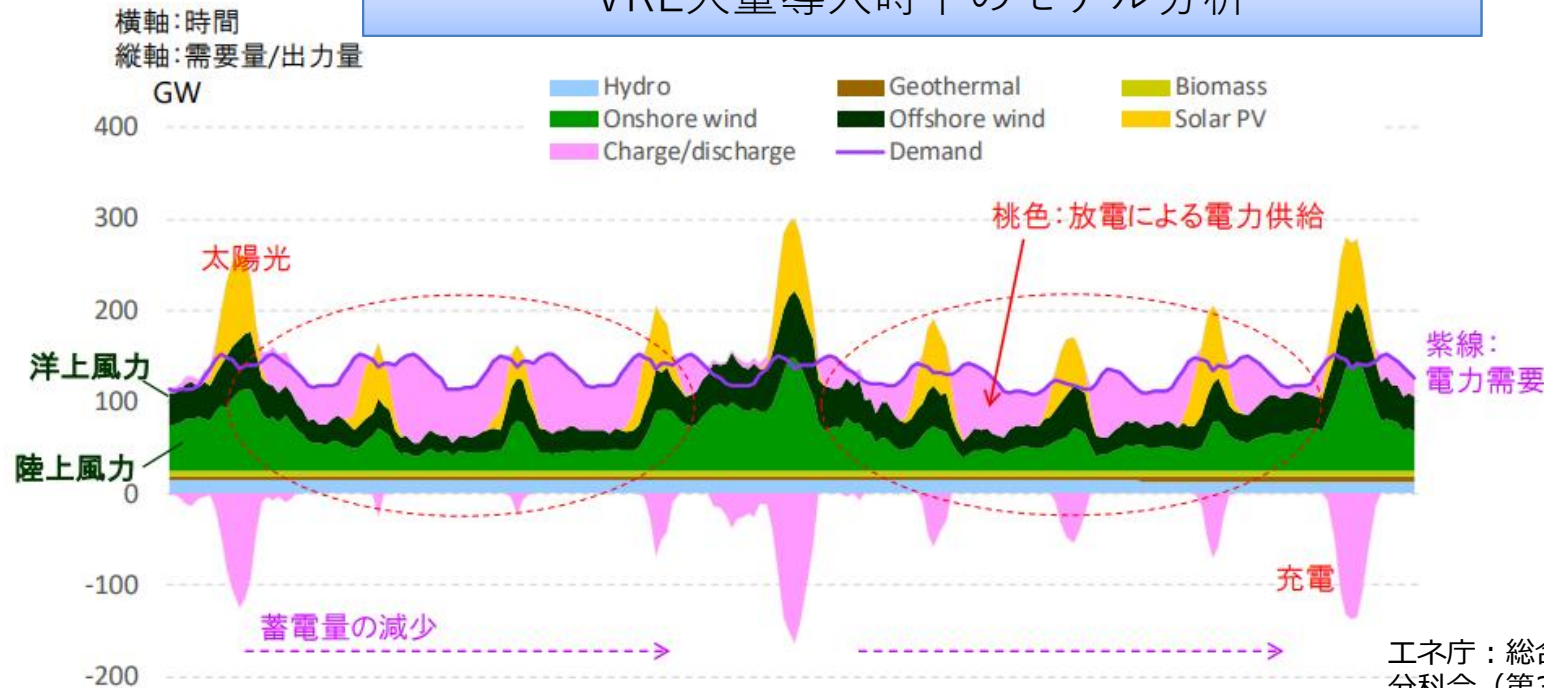
3. Energy drought（エネルギー干ばつ）

水力なども含めて自然要因（例えば渇水）やエネルギー供給チェーンの混乱によって、エネルギー資源の利用可能性が大幅に減少する期間

▶ VRE以外も含めて、エネルギー供給が長期間不足する状況を指す

Dunkelflauteの影響

VRE大量導入時下のモデル分析



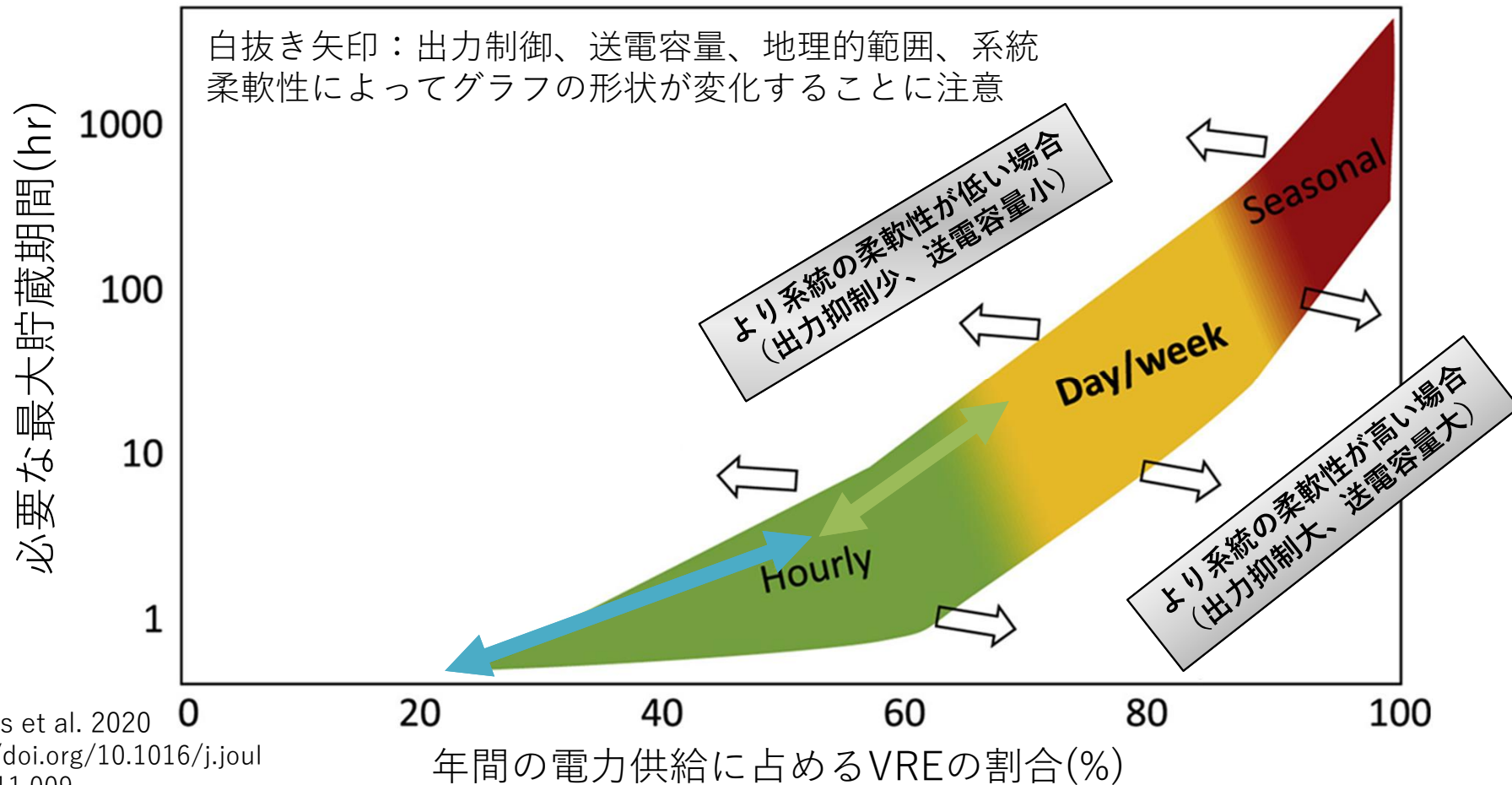
エネ庁：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第34回会合）エネ経研資料より※

✓ 日本においても発生：1年のうち1度か2度、風力・太陽光の発電量が小さくなる時期が存在（Matsuo et al. 2020）

- ✓ カーボンニュートラル達成に向け火力の設備量を大幅に低減すると、将来的に電力不足になるリスクが上昇（特に需要の高い寒波時や梅雨など）
 - 消費電力抑制、バックアップ電源の確保に加え、**膨大かつ長期のエネルギー貯蔵が必要になる可能性**がある

VREの供給割合と必要最大貯蔵期間

需要を満たすために必要な最大貯蔵期間と再エネの供給割合との関係※



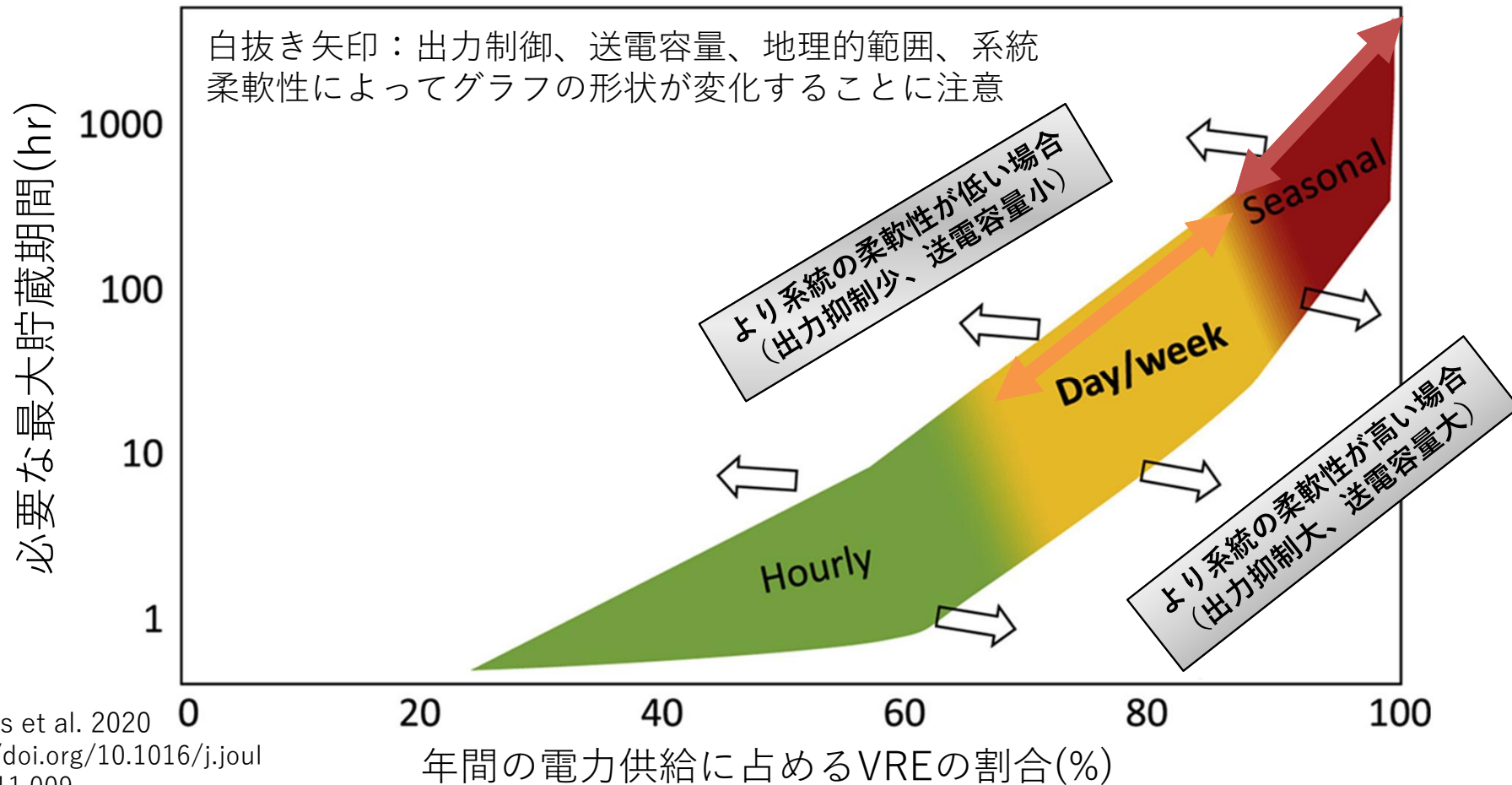
Albertus et al. 2020
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.11.009>

✓ 太陽光と風力の発電構成が最適化された地域では、**VREの占める割合が20%から50%であれば、貯蔵容量は比較的少ない**

✓ 年間の電力供給の**50%から80%**をVREで賄う場合、地域によっては**10時間程度の貯蔵期間**で可能

VREの供給割合と必要最大貯蔵期間

需要を満たすために必要な最大貯蔵期間と再エネの供給割合との関係※



Albertus et al. 2020
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.11.009>

✓ 年間の電力供給の**70%から90%**をVREで賄うためには、10時間から**数百時間程度の貯蔵期間**が必要となる可能性がある

✓ **100%に近づく**と、電力安定供給の必要性から、貯蔵期間は**季節や年を越える範囲**に及ぶ可能性

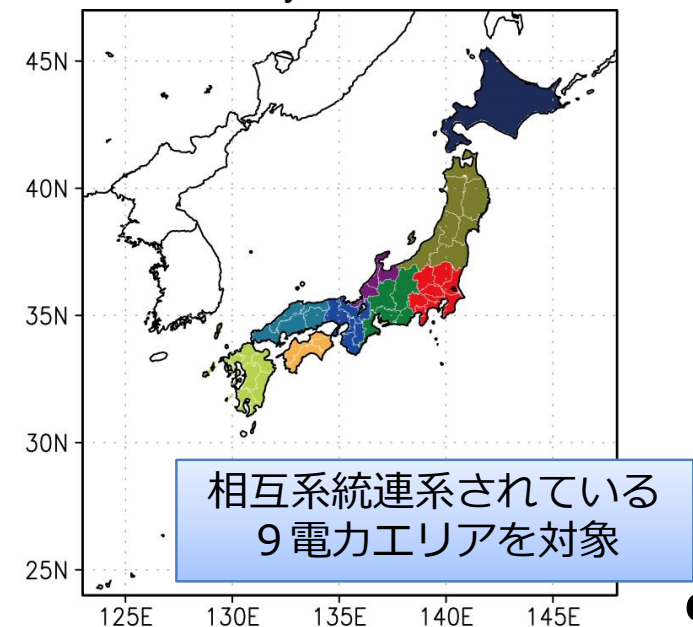
✓ 日本におけるDunkelflauteの定量的分析

- ✓ 電力の時間的移动を可能にする**長期エネルギー貯蔵システム (LDES)** は、**エネルギーセキュリティに貢献**
- ✓ 一方で、**必要最大貯蔵期間を考慮したLDESの計画・構築**にあたっては、**Dunkelflauteの発生リスクを十分に考慮する必要がある**
- ✓ 日本における**Dunkelflauteの発生条件やその特徴については未解明**な点が多く、現状の把握および要因分析が必要

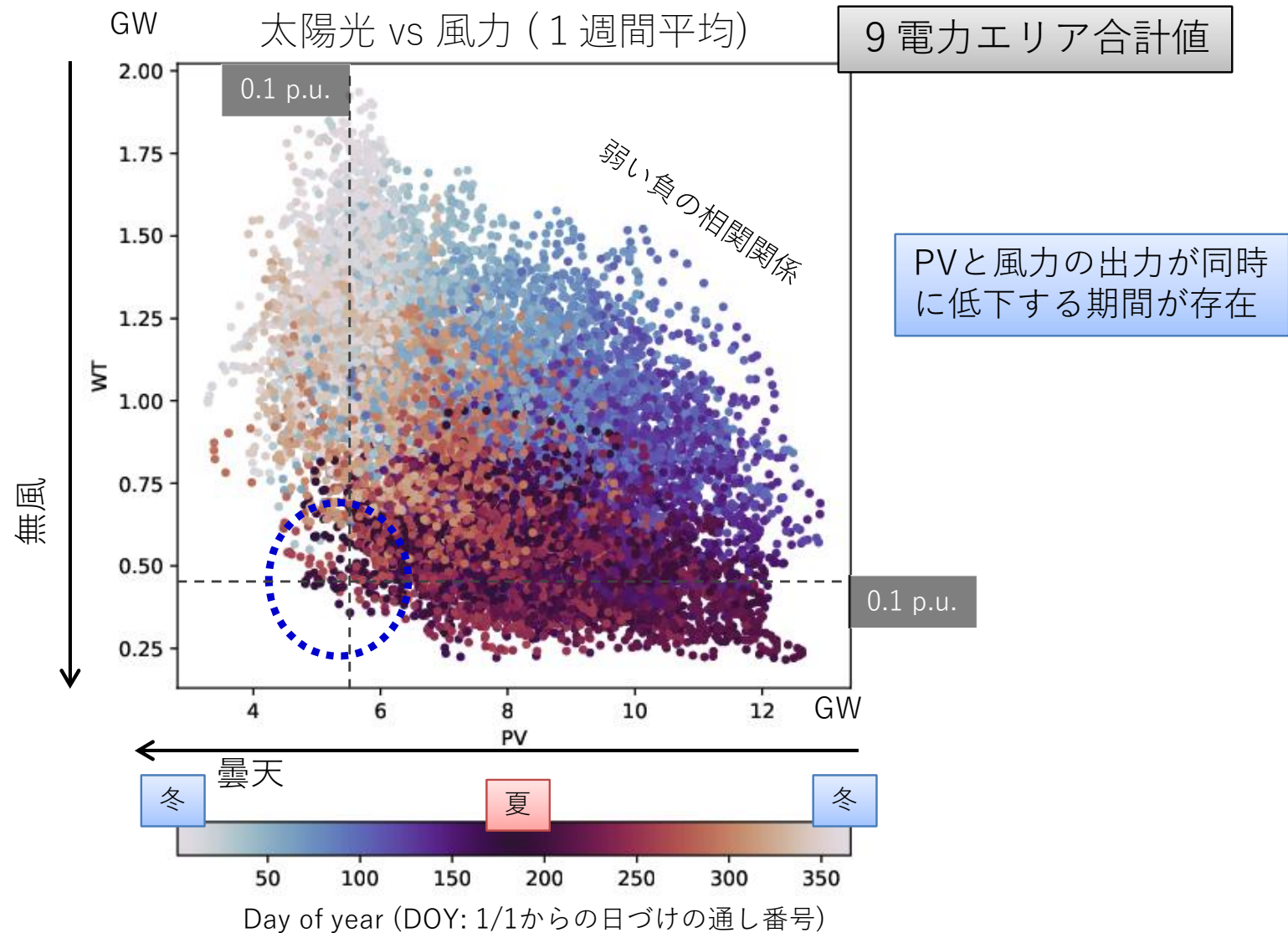
- ✓ 過去40年の気象観測データ（気象庁アメダス）を用いて、電力需要とVRE発電量を長期に推定（近年の電力需要/VRE発電量を元にして遡及的に再構築）

➤ Dunkelflauteの発生を定量的に評価

Area of study



太陽光発電量と風力発電量の関係性



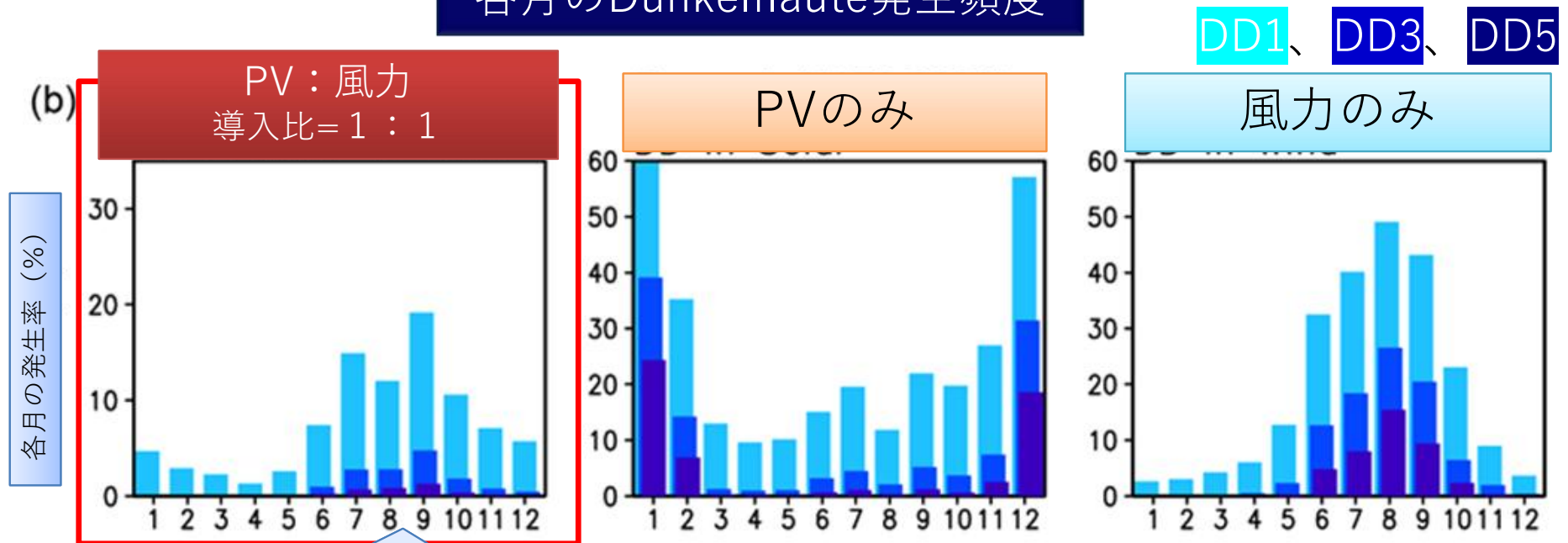
✓ 長期的な “Dunkelflaute” は、日本では夏～秋季に多い

Dunkelflaute発生頻度

日平均VRE出力が1日、3日、5日連続して**0.1 p.u.(定格出力の10%)以下**
 ⇒ **DD1=1日、DD3=3日、DD5 =5日** (Duration of Dunkelflaute)

東北エリア

各月のDunkelflaute発生頻度



東北エリアでは夏～秋で低出力イベントが発生

- ✓ 3日連続だと1ヶ月に1回程度
- ✓ 5日連続だと1年に1回弱程度

PVと風力の両方を考慮→低出力イベントは大幅減

Dunkelflaute発生頻度

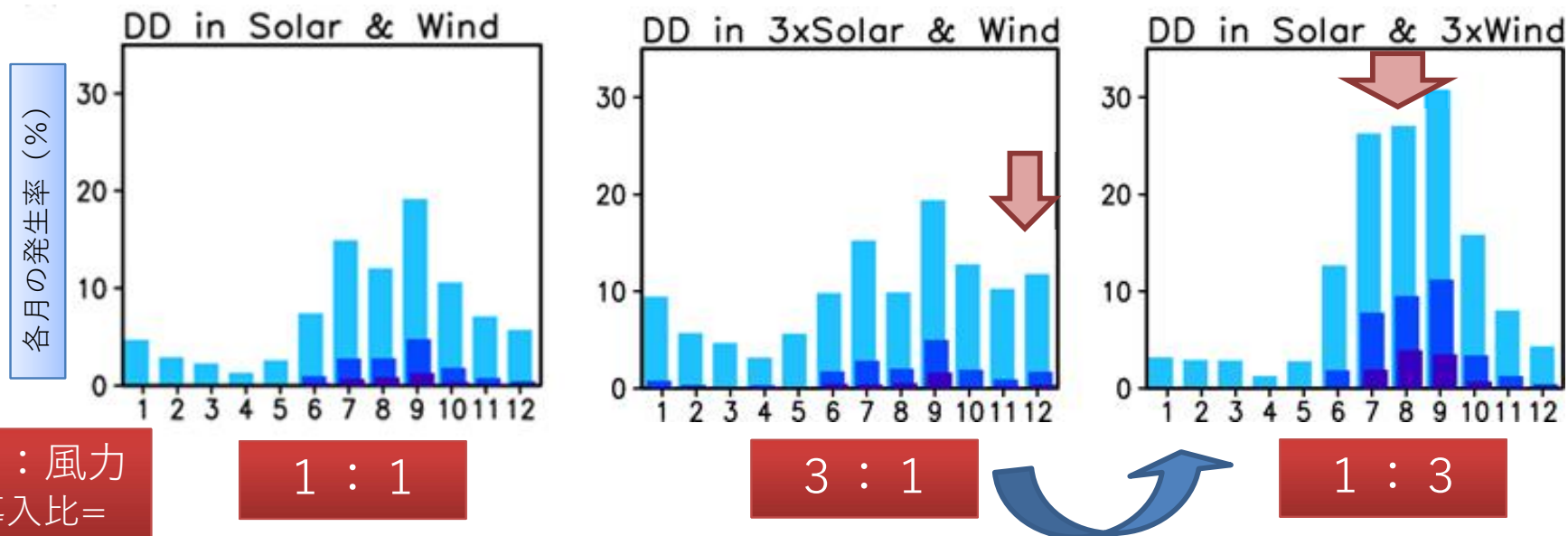
日平均VRE出力が1日、3日、5日連続して**0.1 p.u.(定格出力の10%)**以下
 ⇒ **DD1=1日、DD3=3日、DD5 =5日** (Duration of Dunkelflaute)

PV・風力導入量に偏りがある場合
 ※現状はPV：風力≒ 3 : 1

東北エリア

各月のDunkelflaute発生頻度

DD1、DD3、DD5



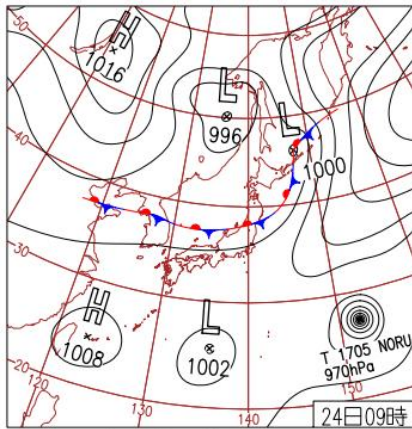
7～9月でのDunkelflauteの発生は導入量の割合が変化しても顕著
 風力の導入量増加により、より季節差が拡大、発生数も増大する

実測で見られたDunkelflauteの例

地上風速・風ベクトル・海面更正気圧

2017年7月23日 0時～7月25日24時

三日移動平均が実測値で最小
となったケースを例示

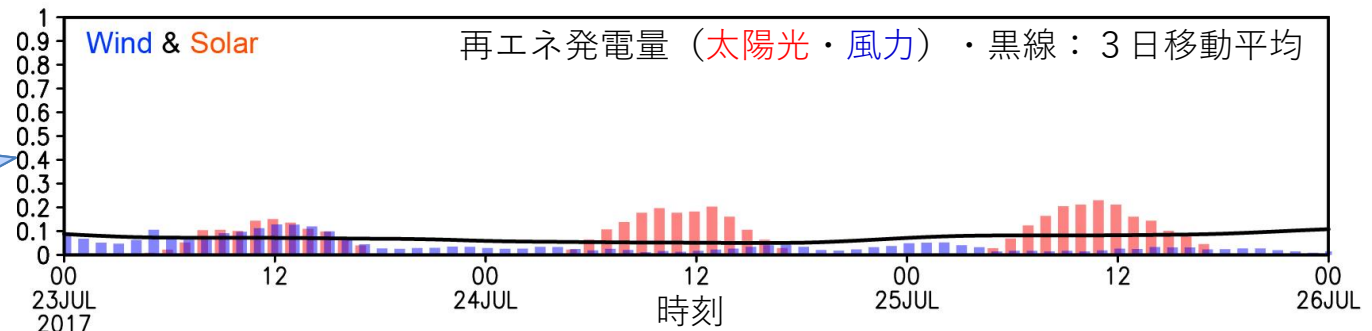
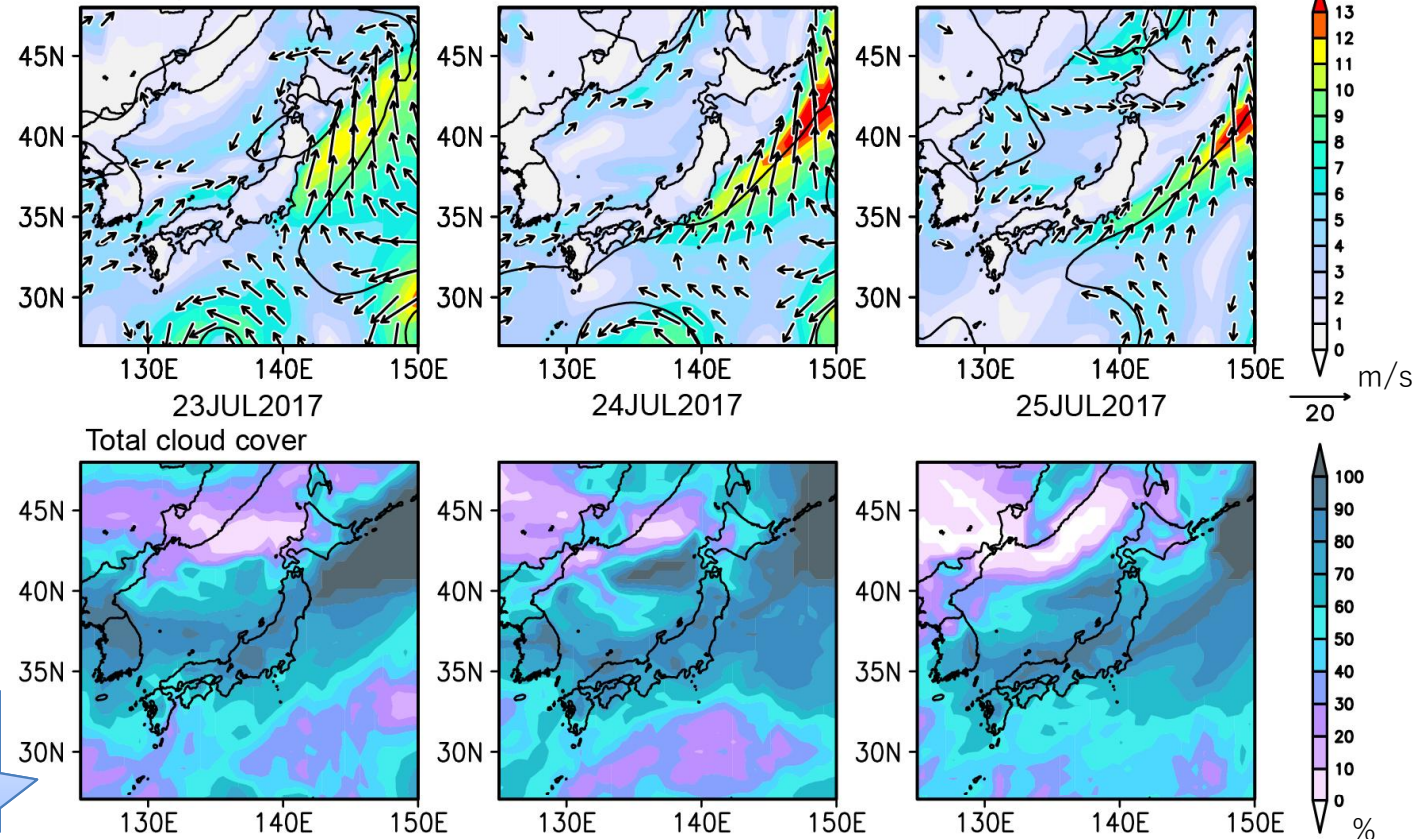


気象庁天気図

日本域が梅雨前線に覆われる

長期に出力が低下
(72時間平均で0.05pu)

雲量



前線が長期に停滞する際は注意が必要

Dunkelflauteの発生条件

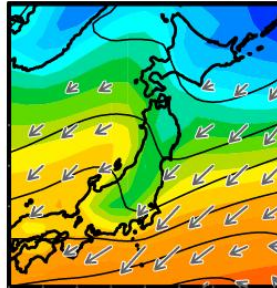
発生確率の高い気象
条件を抽出

北東気流型
(やませ型)

WP1

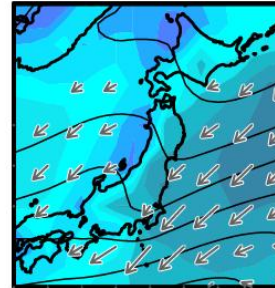
地上気温

Surf. Temp.



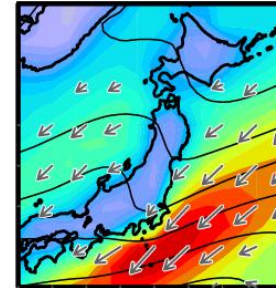
雲量

Total cloud



地上風速

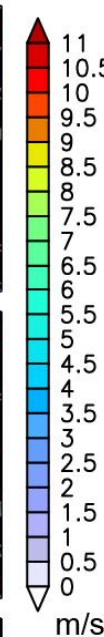
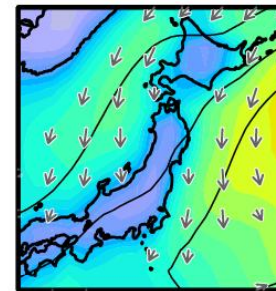
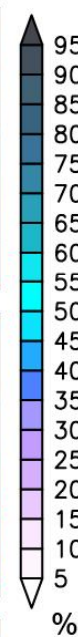
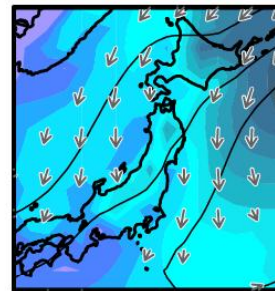
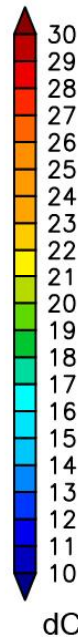
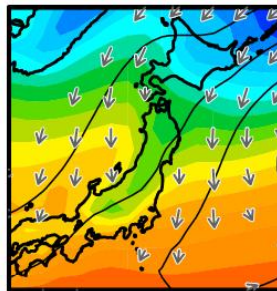
Wind speed



オホーツク海高気圧張り出し
やませによる北風により
太平洋側：天候不順
日本海側：風速弱

北風型

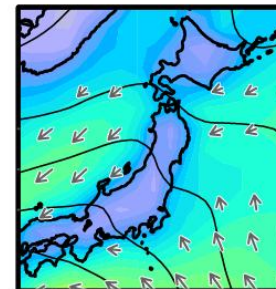
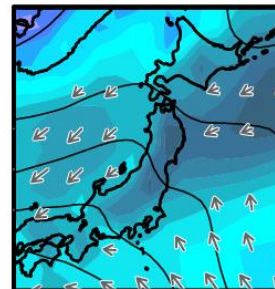
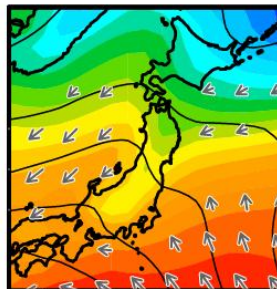
WP2



東側に低気圧通過
北風による天候不順
長続きしない

前線型
(やませ
複合型)

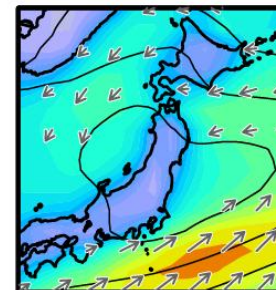
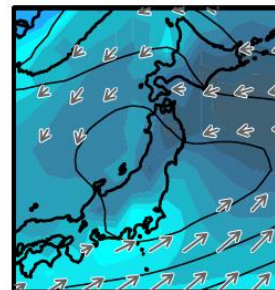
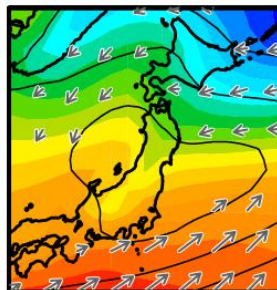
WP3



北高型→霧様
南東側に高圧場
やませの上に前線

前線型
(低気圧)

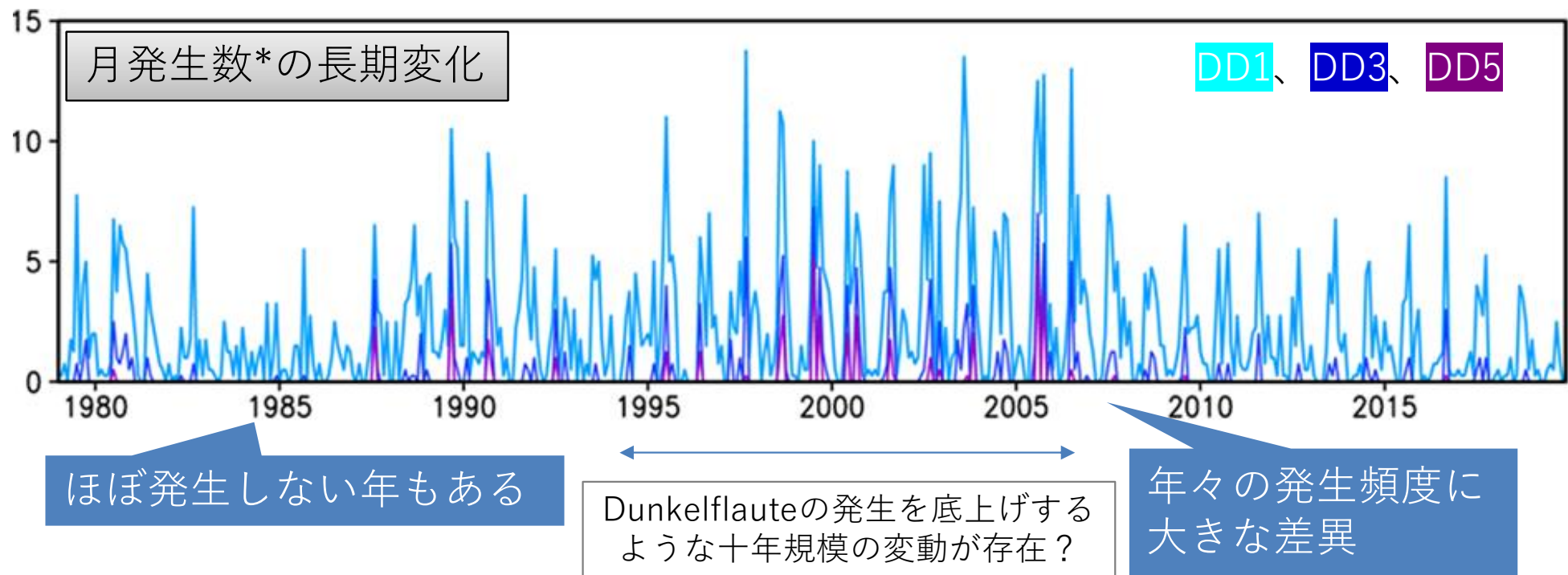
WP4



停滞前線（梅雨・秋雨）が
東北エリアに停滞
▶広範に曇天無風

前線上の低気圧が活発化

Dunkelflauteの年々変動



Dunkelflauteの発生数と強度に大きな年々変動

- 年によって必要なバックアップ容量に大きな差異
 - ▶ 設備の必要量を過剰に見積もるとコスト高になるおそれ（逆に、過少に見積もると需給逼迫や電力市場価格高騰を招きかねない）
- Dunkelflauteが長期化・頻発する年は、スポット価格の異常な高騰や需給調整コストの増大が発生する可能性
 - ▶ 産業分野における長期生産計画に大きな不透明性

各月のDunkelflaute発生頻度：全国 (他電力エリアで見た場合)

電力中央研究所

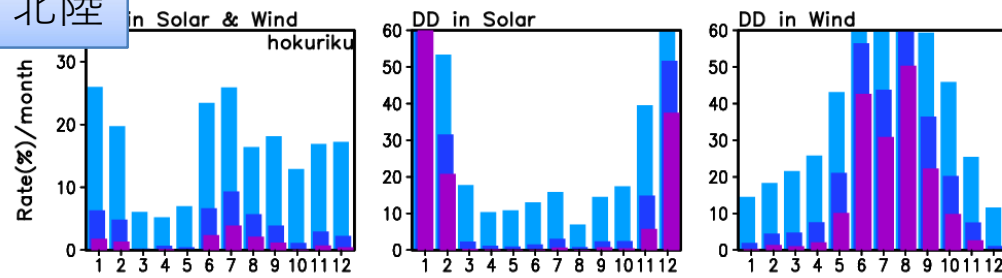
PV：風力
導入比= 1 : 1

PVのみ

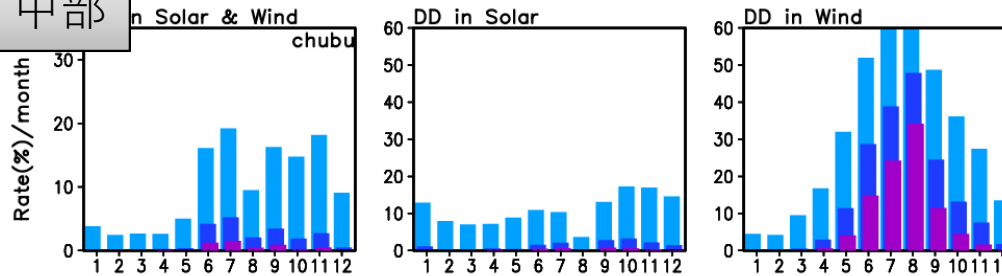
風力のみ

DD1、DD3、DD5

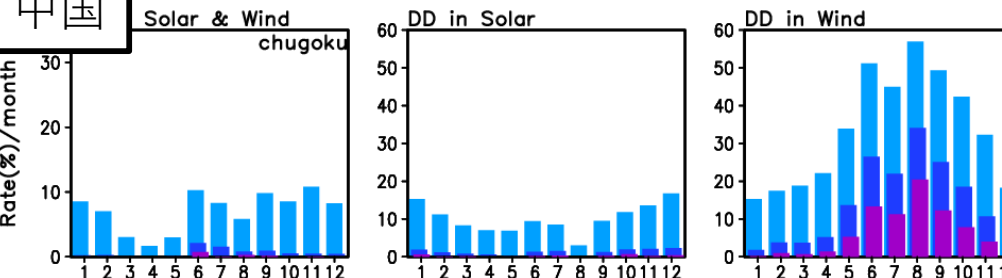
北陸



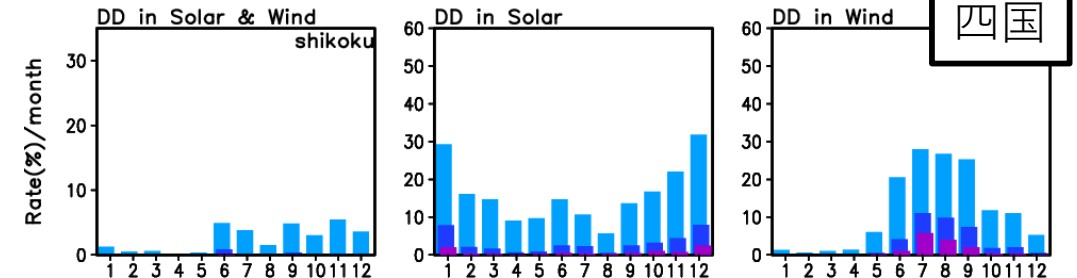
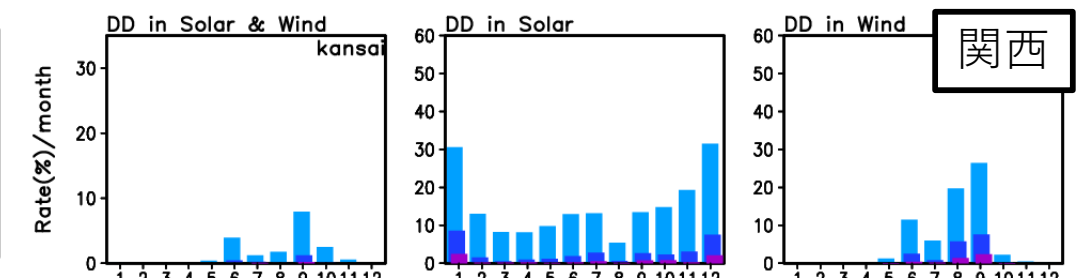
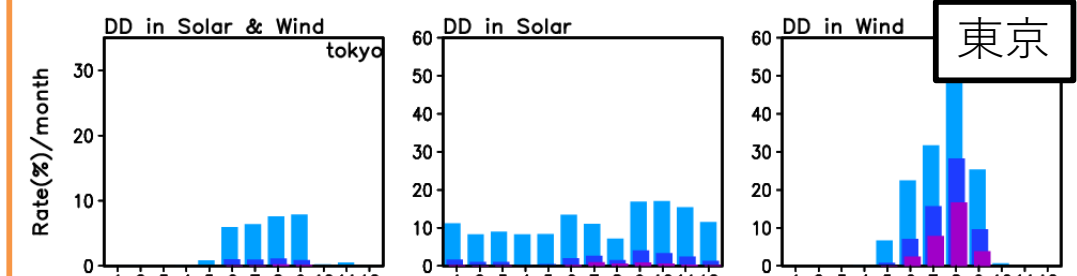
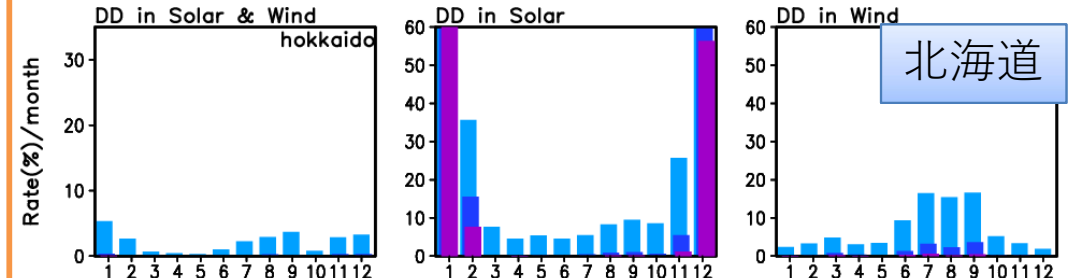
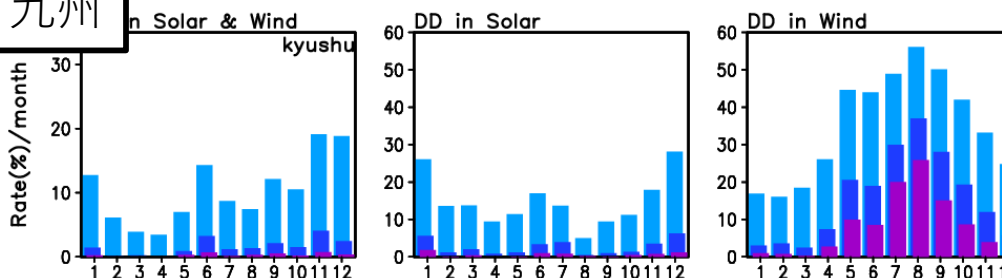
中部



中国



九州



全国で地域差：北陸・中部で発生率が高い

押さえておきたいポイント

✓ 日本におけるDunkelflauteの定量的分析

- 日本においても**曇天無風**により**一週間弱程度のVRE低出力期間**が発生し得る計算結果が得られた
- ただし、PV・風力の導入比により、Dunkelflauteの頻度・強度は変化（貯蔵設備設計の最適性と関係か）
- 極端な事象を捉えるには数十年のデータが必要（1～数年間のデータからの解析では不十分）

※Dunkelflaute事象の定義に依存することに注意が必要

✓ 電力需給とDunkelflaute

- ✓ Dunkelflaute期間中は太陽光・風力の出力が低下し、電力需要とVREの差（残余需要）が一時的に増加する
- ✓ 残余需要の変動が大きいほど、調整力やバックアップ電源（火力・揚水・蓄エネなど）の必要性が増す

▶ 残余需要（需要－VRE）に着目し、Dunkelflauteとの関係を探る

Dunkelflauteが残余需要に及ぼす影響の検討例

ここでは、**全国大の合計値で試算**（エリア間連系線の容量無限大、蓄電池などは考慮せず）

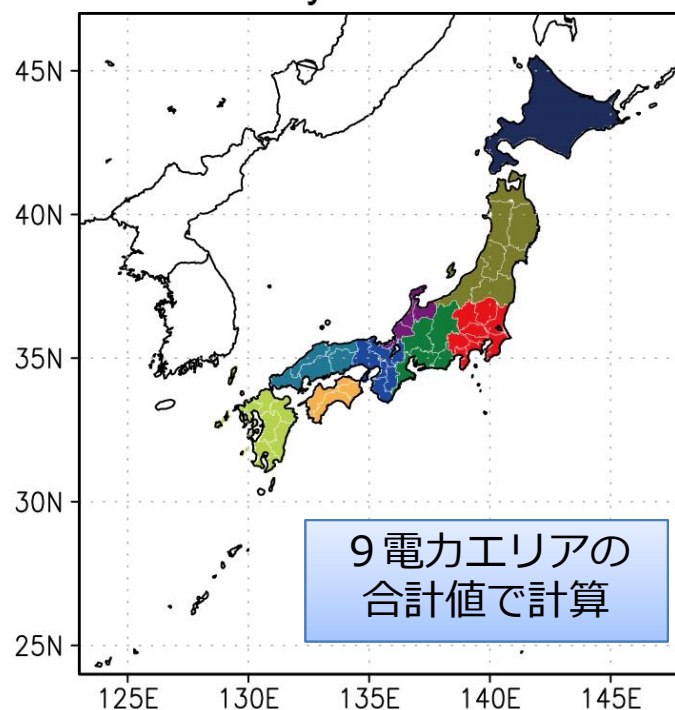
✓ 残余需要：電力需要からVREを引いた残差（簡易需給逼迫リスク）

⇒ **残余需要が一時的に高まる期間に注目して調査**

➤ いくつかのVRE導入シナリオに対して残余需要を簡易的に試算
（ただし気象条件は過去、洋上風力の風況や立地条件による地域差は考慮しない）

Bando他参考

Area of study



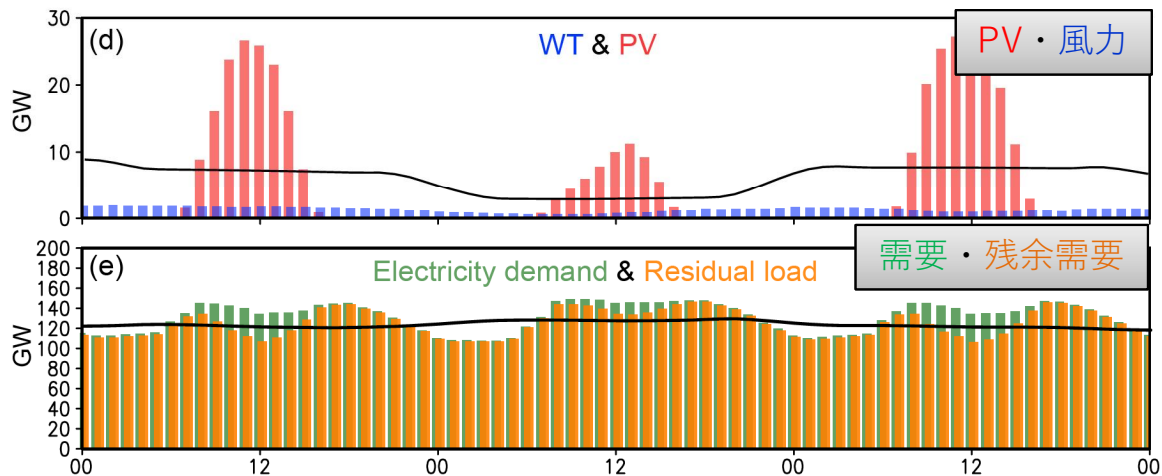
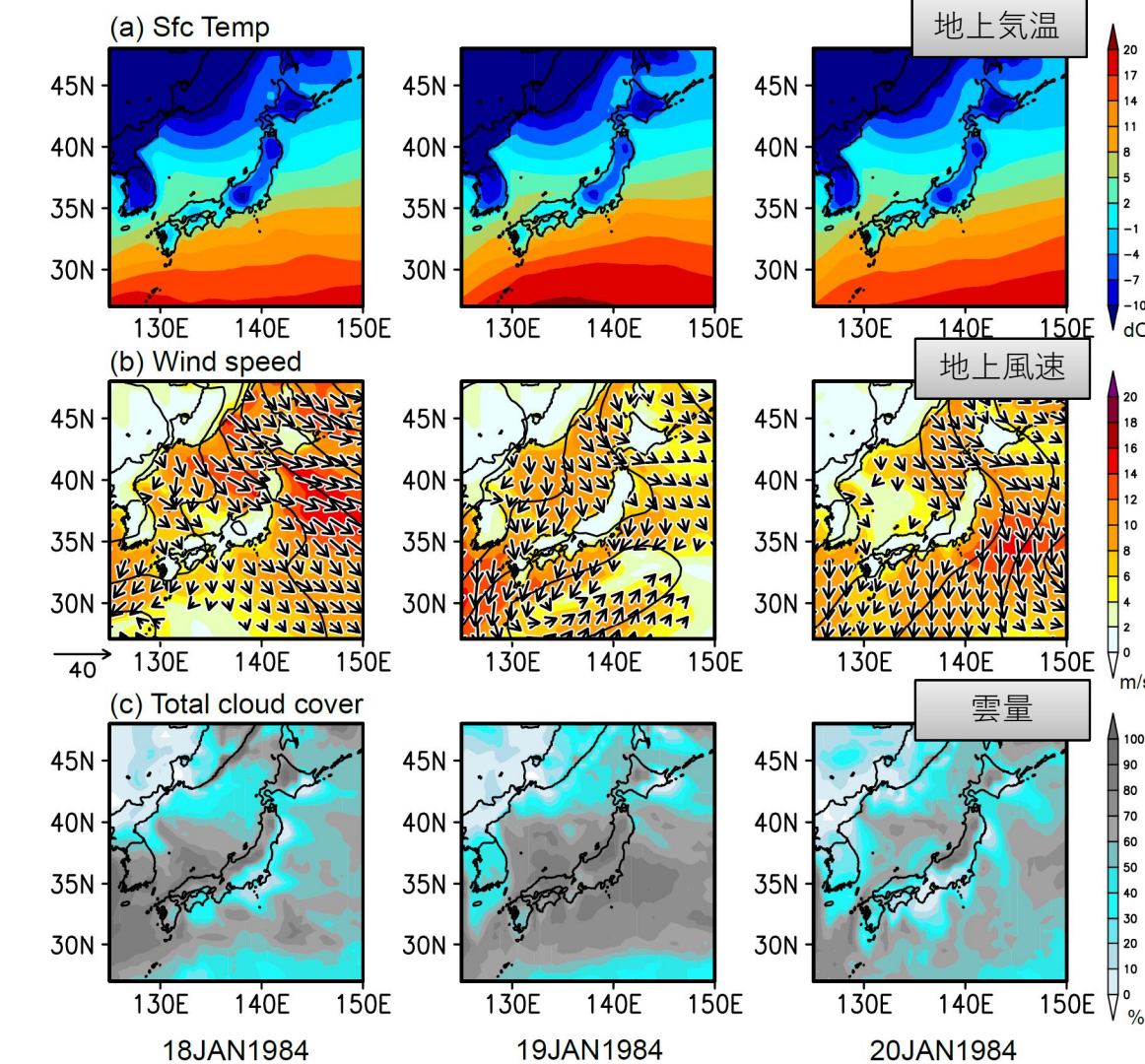
年	残余需要 (略称)	現状からの 導入倍率
現在 (FY2019末)	RL (Residual load)	— —
2030 政府目標	RL30 需要想定は現在※	太陽光2倍 風力7倍
2040 A 線形増加	RL40A 需要想定は現在※	太陽光3倍 風力14倍
2040 B 政府第二目標	RL40B 需要想定は現在※	太陽光2.5倍 風力21倍

※将来の人口減少と個人の需要増加により、日本全体での電力需要は第一近似で相殺される傾向(Sakamoto et al. 2019)
現状では、地球温暖化にともなう気候変化は考慮なし

残余需要が一時的に 高くなった事例 【2019年VRE導入量の場合】

1984年冬季（五九豪雪）

- ✓ 過去最大級の寒波
- ✓ 強い寒気と豪雪⇒需要高↑
- ✓ 一時的に南岸低気圧が通過
▶曇天・無風⇒VRE↓



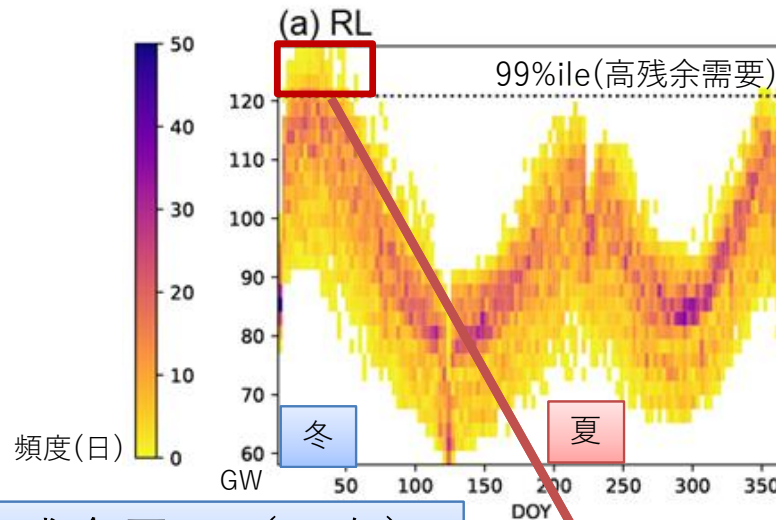
※黒実線：25時間移動平均

残余需要が高まる期間

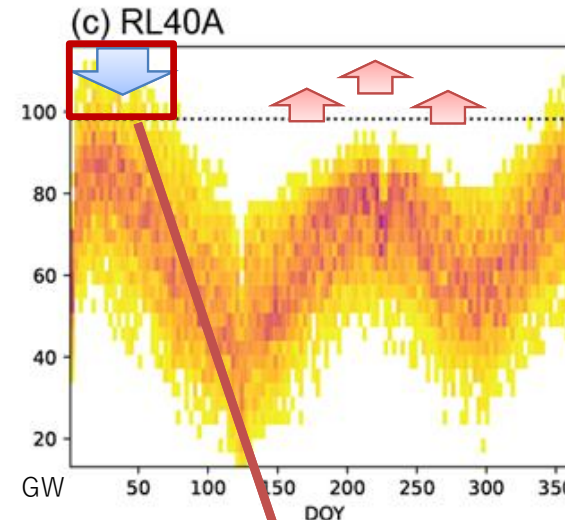
➤ 現在は寒波が主要因
(9電力エリア合計値の場合)

VRE導入にともなう残余需要の変化

日平均残余需要の季節変化：2次元ヒストグラム（9電力エリア合計値）



残余需要（現在）



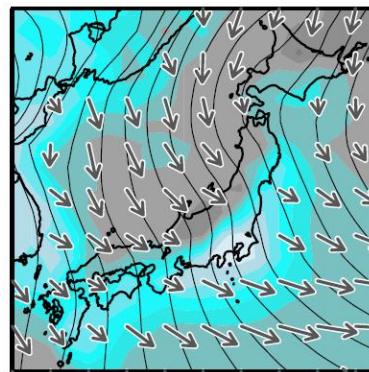
風力導入量増加
でピーク
冬季↓：夏季↑
変動性増加

残余需要
2040年-A
太陽光3倍、風力14倍

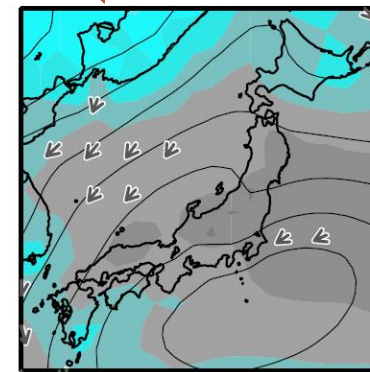
2019年のVRE導入量と、2040年想定量で高残余需要の日の気象条件を比較

⇒VRE導入量の違いにより、高残余需要となる気象条件が異なった

雲量・水平風 2019



2040



西高東低型 ⇒ 南岸低気圧型へ移行

高残余需要となる気象条件の変化（冬季）

現在高残余需要⇒[西高東低型]
寒冷/晴天(太平洋側)/強風(日本海側)

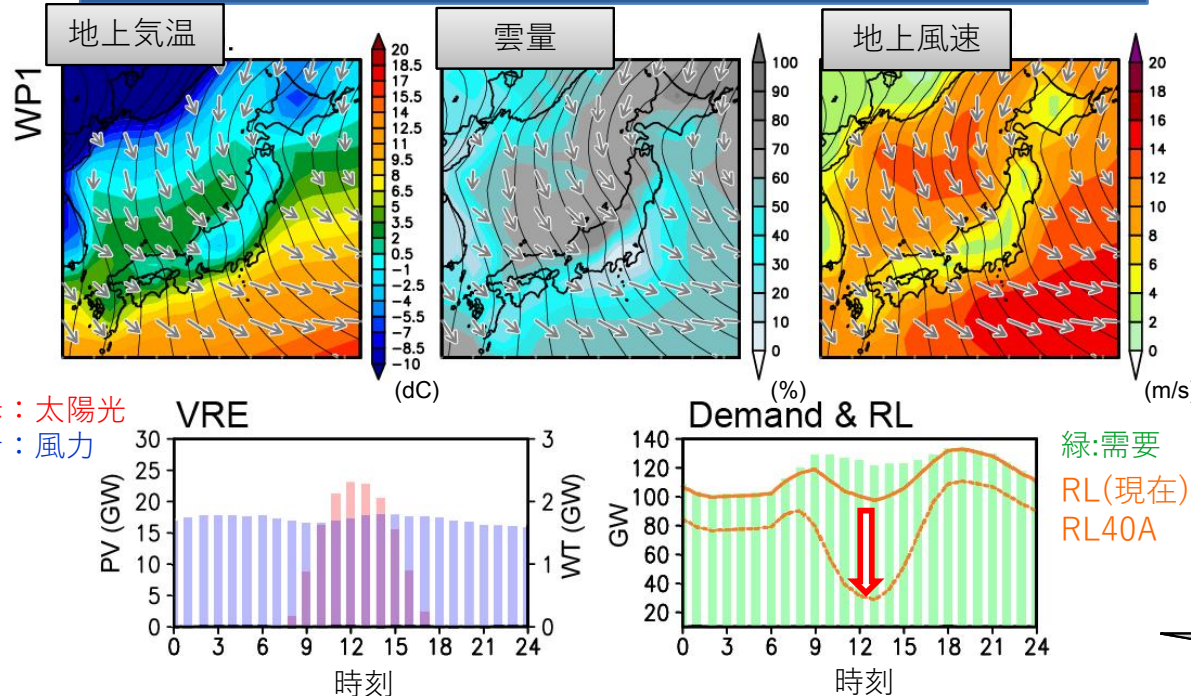
【2019年VRE導入量】

✓ 寒冷⇒**高需要**

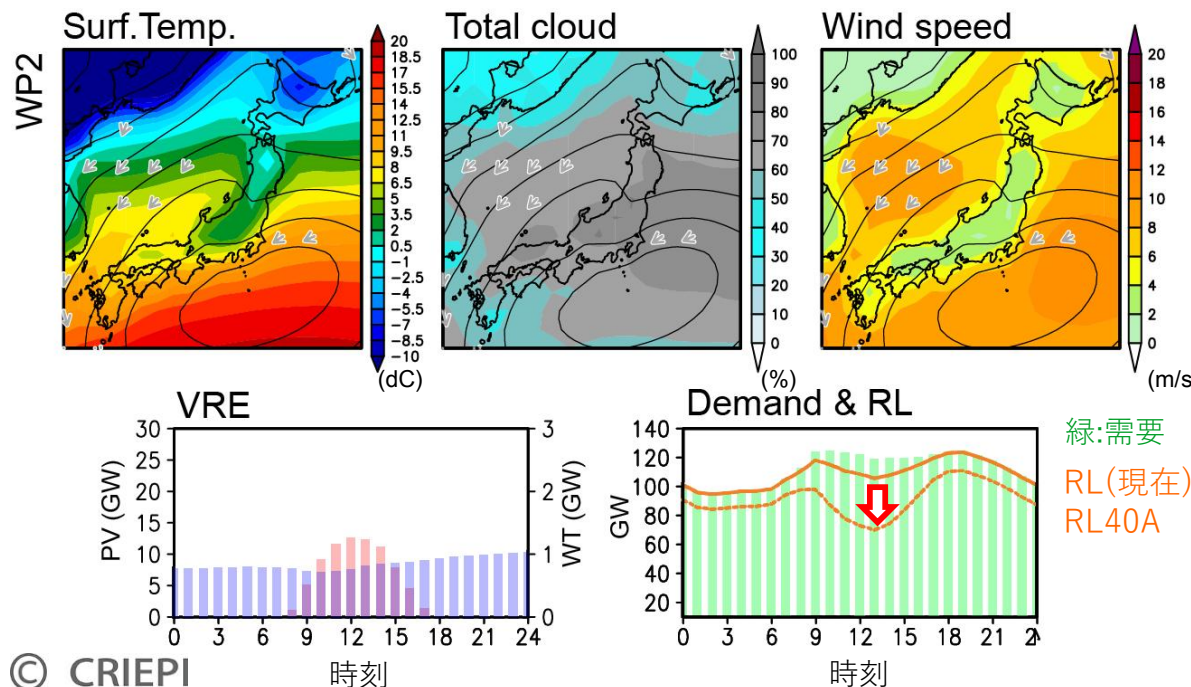
【2040年VRE想定量】

✓ 晴天強風⇒**VRE出力大**

VRE導入量増加で**残余需要大幅低下**
強いダックカーブ（日変動性大）



高残余需要
の条件変化



将来高残余需要(2040A条件下)

⇒[南岸低気圧型]

太平洋側の高需要地域で降雪

寒冷かつ曇天無風

【2019年VRE導入量】

✓ 曇天無風⇒**VRE出力小**

【2040年VRE想定量】

✓ VRE導入量増加でも影響小

残余需要は高いまま（低下小）

弱いダックカーブ（日変動性小）

押さえておきたいポイント

✓ 電力需給とDunkelflaute

- PVや風力の導入量・導入比、需要の変化などで、高残余需要となる**気象条件は将来変化する可能性**も想定され、継続発生期間（日数）や予測精度などに影響を与えることが考えられる

まとめ

- Dunkelflauteの発生状況について長期再構築データを用いた分析結果を紹介
- 東北エリアの例：曇天無風を同時に満たす気象条件（北風流入と停滞前線）
- **日本では、Dunkelflauteは夏季、高残余需要は冬季に発生する傾向**
- ただし、日本の各エリアで大きな差異（地域性）が存在
- VRE導入量が増加することで、**残余需要の日々の変動性は増幅**され、気象条件が需給に与える影響も変化する可能性がある

- ✓ 将来のVRE導入量・比率・分布が電力需給へ与える影響は未解明
 - **現実的な電力構成シナリオを反映した需給の変動性評価が必要**
- ✓ 再エネ主力電源下の世の中では、気象の影響が大きくなる
 - 将来の**需給における課題の抽出やその解決策の検討が必要**

気象起因の電力需給変動と対応技術の課題

- ✓ Dunkelflauteの発生頻度や期間を含めた将来的な需給リスクを把握し、LDESの必要量を定量的に評価
- ✓ 将来気候予測データに基づき、電力需給への気候変動の影響を考慮
- ✓ 中長期気象予報に基づいて、Dunkelflauteの予測可能性を評価するとともに、LDESや需要応答の活用を最適化する手法の開発
- ✓ Dunkelflauteの影響緩和の観点から、VREの地理的分散の評価や最適配置を行うための技術開発

