

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K17704

研究課題名(和文) 平滑化効果を考慮した将来の風力発電所新設に伴う出力変動量推計手法の開発

研究課題名(英文) Development of Estimation Method of Future Wind Power Output Fluctuations  
Considering Smoothing Effects

研究代表者

池上 貴志 (Ikegami, Takashi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70534460

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日本全国74ヶ所の風力発電所における数秒間隔の発電出力データを用いて、エリア内の複数の風力発電出力の出力変動を合計することによって変動が打ち消しあい、出力変動の割合が減少する平滑化効果の分析を行った。出力変動率を定量化するための様々な手法を適用し、平滑化効果の定量化手法を初めて構築した。地域ごと月ごと変動周期ごとに平滑化効果を定量化し、またその定量化の結果を用いて、風力発電の普及がさらに進んだ将来の出力変動率の推計手法を提案した。これらを用いた電力システムの需給解析を行うことによって再生可能エネルギーの出力変動対策技術の効果を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風力発電の出力変動について、平滑化効果を定量化することによって、普及が進んだ状況における変動を推計できるようになった。また、電力システムの運用に合わせて変動量を定義して用いたため、今後さらに導入が進むことが期待される風力発電を既存の電力システムに組み込む際に必要となる需給調整力を適切に評価することができ、必要となる対策技術の効果を分析できるようになった。

研究成果の概要(英文)：The synthesized output fluctuation of geographically dispersed wind turbines is expected to decrease because positive and negative changes in outputs cancel each other. In order to quantitatively evaluate this "Smoothing Effect", the power output data at intervals of several seconds at 74 wind power plants in Japan. In this study, novel quantitative definitions of the Smoothing Effect of the output fluctuations associated with the frequency controls of power systems were proposed. Using the output fluctuation rate quantified by these definitions for each power system area, the future output fluctuations, which is the future spread of wind power generation, were estimated. By analyzing the supply and demand balancing of electric power system using these estimated fluctuation data, the effects of the renewable energy output fluctuation countermeasure technology were clarified.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：風力発電 再生可能エネルギー 発電出力変動 平滑化効果 電力需給解析

### 1. 研究開始当初の背景

太陽光発電や風力発電などの気象条件によって出力が変動する電源が将来大量に導入されると、需要と供給を一致させる需給運用が困難となることが懸念されている。今後のさらなる再生可能エネルギーの導入を進めるためには、起こり得る出力変動に対する調整力を確保するために、例えば蓄電池の導入などの対策を講じる必要がある。そのため、対策の適切性やコストの定量化を目的とした、再生可能エネルギーの大量導入を想定した電力需給解析が進められている。

この電力需給解析では、電力システムの需給調整制御における時間領域に即し、数十分以上の長い周期の変動に対する経済負荷配分制御 (EDC: Economic load Dispatch Control) 領域の調整力、数十分以内の短い周期の変動に対する負荷周波数制御 (LFC: Load Frequency Control) 領域の調整力、数分以内の微小変動に対するガバナフリー (GF: Governor Free) 領域の調整力を考慮する必要がある。そのため、30分あるいは1時間程度の時間解像度の太陽光発電や風力発電の模擬出力データに加え、各調整領域での出力変動幅が必要である。大量導入された将来の想定には、複数の地点の変動の合成により相殺される出力の平滑化効果が今後の発電所の新設に伴い増加することを考慮した想定が必要である。

風力発電においては、風車の設置される地上数十メートルの風速データで、数秒オーダーの時間刻みのデータが得られる場所が限られている。そのため既に設置されている風車の発電出力データを収集し、そのデータを基に各調整領域での出力変動量を推計する手法を開発することが重要である。

### 2. 研究の目的

(1) 全国 74ヶ所の風力発電所の時間解像度の高い風力発電出力時系列データを用いて、風力発電出力変動量の定量化のための適切な定義を用いて現況の分析を行う。

(2) 複数の風力発電所間の出力変動量の相関関係を明らかにし、それらが平滑化効果に与える影響を基に、風力発電所の導入箇所数、導入容量の増加に伴う出力変動の平滑化効果を定量化する手法を構築する。

(3) 定量化された出力変動量平滑化モデルに基づき、政府の導入シナリオによる今後の風力発電所の導入を考慮した発電出力変動量の推計を行い、それを用いた電力需給解析により、今後の風力発電の円滑な導入に役立つ対策技術の評価を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 数秒オーダーの風力発電出力時系列データを用い、様々な出力変動量の定義を適用して、時間インデックスに対応する出力変動量を算出し、定義による違いを分析する。また、GF領域、LFC領域、EDC領域に出力変動量を分割し、変動量の定量化手法を決定する。

(2) 複数の風力発電所の出力の相関関係や、すべての組み合わせで複数の発電所出力を合成した際の変動量を分析することにより、平滑化効果を定量化する手法を構築する。

(3) 定量化された平滑化効果を考慮して、将来における出力変動量を推計し、電力需給解析に活用し、従来用いられていた変動率一律 5%と設定した場合との結果の違いを比較し、詳細な変動率を定量化できた効果を確認する。

### 4. 研究成果

(1) 東北地域の 303 の風車からなる 20ヶ所の風力発電所、計 442 MW の定格容量の風力発電出力 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) より、2012 年度の 1 年間の 10 秒間隔の発電出力データを用いた現況分析を行い、様々な出力変動量の定義を適用して、出力変動量の定義による差や時間インデックスと変動率の関係性を明らかにした (図 1)。定義 1 は、時間ステップ間の平均出力の差、定義 2 は、時間窓内の最大変動幅、定義 3 は、中心化移動平均との偏差として算出した。

本研究では、複数の時間領域に出力変動量を分割可能な定義 3 を用いて研究を進めることとした。定義 3 を用いて、東北地域の発電出力変動量の現況分析を行った結果が図 2 である。

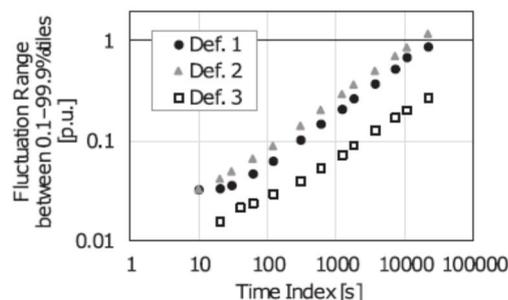


図 1 出力変動量の定義の違いによる時間インデックスと変動量の関係

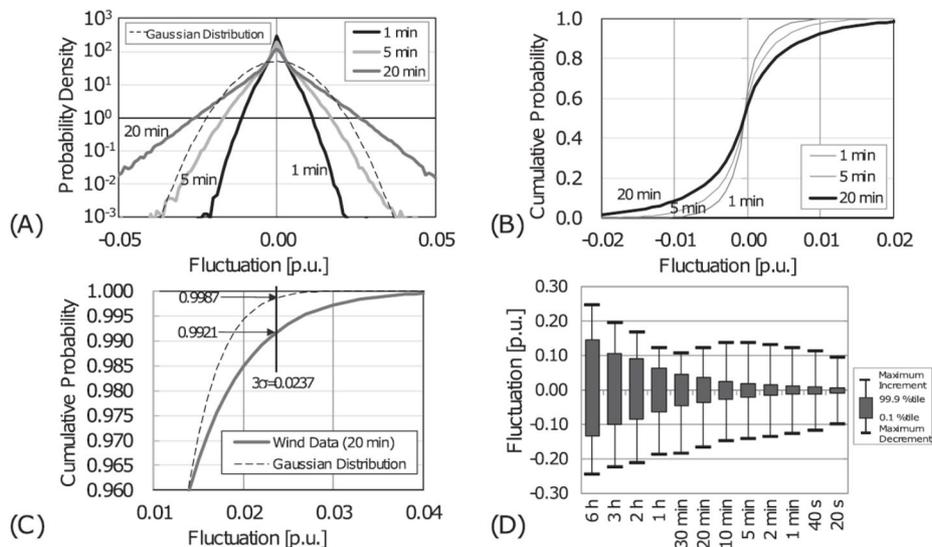


図2 中心化移動平均を用いた変動量の定義による変動率の(A)確率密度分布、(B)累積確率密度関数、(C)累積確率密度関数の拡大図、(D)時間インデックスによる0・0.1・99.9・100パーセンタイル値

中心化移動平均を用いて GF 領域、LFC 領域、EDC 領域の出力変動成分に分割し、月別に 0・0.1・99.9・100 パーセンタイル値の分析を行った。東北地方の結果を図3に示す。11月において最大値・最小値が異なる値を記録しており、その状況を分析した結果、図4のように低気圧の通過による風速の上昇が原因による一部風車の一斉停止が発生していることが分かった。このような稀な状況を電力システムの需給解析において除くため、本研究では0.1、99.9パーセンタイルの活用が有効であると考えた。

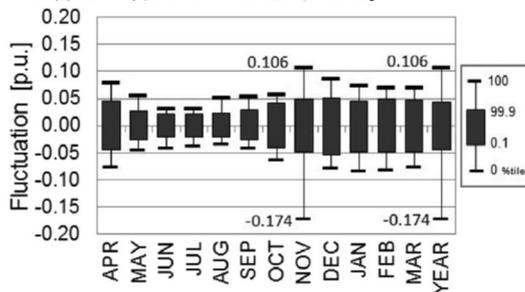


図3 月別と年間のLFC領域の変動率の0・0.1・99.9・100パーセンタイル値

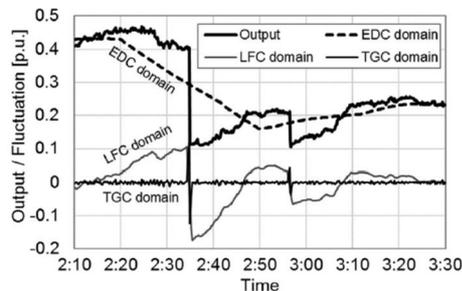


図4 GF領域(TGC)、LFC領域、EDC領域の11月27日2:10~3:30の出力分割結果

(2) 本研究で対象とした、北海道、東北、北陸、中国、四国、および九州電力管内のそれぞれにおいて、複数の風車のすべての組み合わせに対して、風車の合計定格容量と出力変動量の0.1、99.9パーセンタイル値の関係を計算し、その関係性から近似曲線を求めることで、平滑化効果の定量化を行った。図5に東北地域の年間の結果の例を示す。

図5内の式にあるように $y=ax^b$ を用いて近似曲線を求めた。中心極限定理より、完全に無相関であればパラメータ $b$ の部分が-0.5となると考えられ、-0.5より大きくなっている状況が平滑化効果の度合いを表すこととなり、平滑化効果を定量化することができた。GF領域(TGC)、LFC領域、EDC領域と時間領域が長くなるにつれて、風力発電所間の出力の相関が高くなっており、その結果として、平滑化効果も大きくなっていることが確認できる。このような近似曲線により、導入容量が増加した将来における出力変動率を推計することが可能となった。

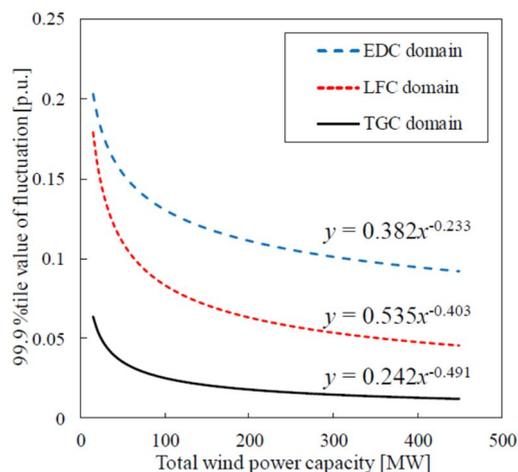


図5 風力発電出力変動量99.9パーセンタイル値の平滑化効果の近似曲線(東北)

(3) 本研究における出力変動量および平滑化効果の定量化手法を用いて、北海道、東北、北陸、中国、四国、および九州地域のそれぞれに対し、月別に GF 領域 (TGC)、LFC 領域、EDC 領域のそれぞれにおける平滑化効果の近似曲線を算出した。北海道、東北地域の LFC 領域の近似曲線のパラメータの月別推計結果を表 1 に示す。本分析により、地域的、季節的な違いにより平滑化効果の程度が異なることも明らかになった。

表 1 月別の平滑化効果近似曲線のパラメータ (左: 北海道地域、右: 東北地域)

月	0.1 パーセンタイル値		99.9 パーセンタイル値		月	0.1 パーセンタイル値		99.9 パーセンタイル値	
	a	b	a	b		a	b	a	b
4	-0.203	-0.181	0.229	-0.191	4	-0.366	-0.333	0.437	-0.359
5	-0.181	-0.272	0.202	-0.278	5	-0.330	-0.399	0.345	-0.401
6	-0.165	-0.318	0.156	-0.298	6	-0.300	-0.416	0.329	-0.433
7	-0.160	-0.256	0.155	-0.241	7	-0.223	-0.375	0.271	-0.407
8	-0.169	-0.256	0.154	-0.212	8	-0.146	-0.307	0.163	-0.305
9	-0.190	-0.310	0.193	-0.278	9	-0.217	-0.330	0.290	-0.363
10	-0.203	-0.116	0.239	-0.183	10	-0.377	-0.349	0.419	-0.360
11	-0.264	-0.146	0.254	-0.137	11	-0.703	-0.424	0.575	-0.392
12	-0.265	-0.179	0.252	-0.168	12	-0.619	-0.384	0.628	-0.406
1	-0.218	-0.144	0.237	-0.171	1	-0.590	-0.396	0.595	-0.411
2	-0.210	-0.154	0.200	-0.148	2	-0.636	-0.406	0.684	-0.427
3	-0.244	-0.155	0.259	-0.154	3	-0.496	-0.373	0.552	-0.399

LFC 領域の地域別、月別の近似曲線より、2030 年の風力発電の導入量想定を用いて、2030 年を想定した出力変動率 (上げ方向 99.9、下げ方向 0.1 パーセンタイル値) の算定結果を図 6 に示す。地域性、季節性を考慮した変動率が明らかとなり、これらを用いた電力需給解析が可能となった。

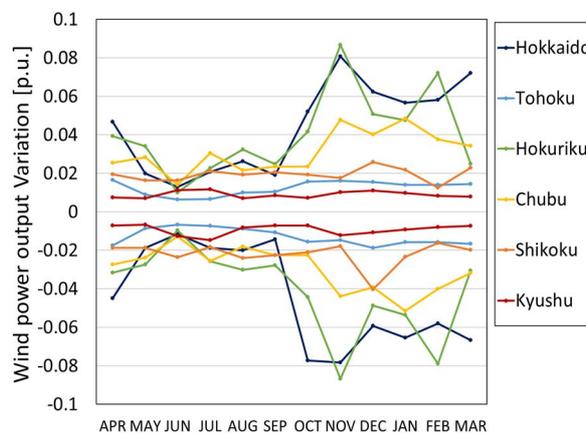


図 6 2030 年の風力発電導入量を想定した各地域の LFC 領域の上げ・下げ方向出力変動率

従来、風力発電出力の LFC 領域の出力変動率は、定格出力の 5%とされることが多かった。従来法を用いた場合と、今回推計した数値を用いた場合とで、電力需給解析を行い、結果を比較した。風力発電出力抑制量の計算結果を図 7 に示す。出力変動に対応する設備を過剰に確保しなくて良かったことにより、風力発電出力の抑制量も全国合計で減少しており、より正確な解析が可能となった。

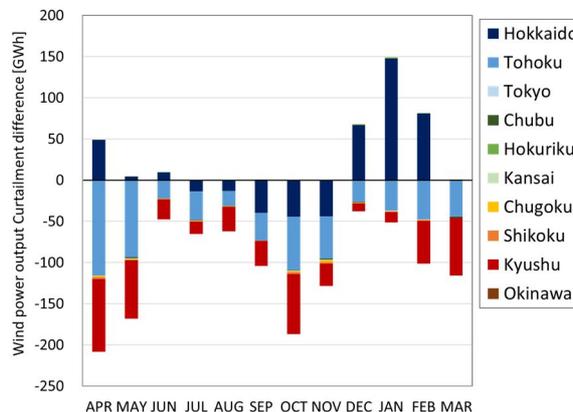


図 7 従来法と比較した月別の風力発電出力抑制量の電力需給解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Suzuki Ikumi, Negishi Shintaro, Ikegami Takashi	4. 巻 140
2. 論文標題 Long-term Transition of the Value of PV and Wind Power Installation based on the Renewable Energy Penetration Scenario	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power and Energy	6. 最初と最後の頁 521 ~ 530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.140.521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takanori Enomoto, Takashi Ikegami, Chiyori T. Urabe, Tetsuo Saitou, Kazuhiko Ogimoto,	4. 巻 7(3)
2. 論文標題 Geographical smoothing effects on wind power output variation in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Smart Grid and Clean Energy	6. 最初と最後の頁 188 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12720/sgce.7.3.188-194	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 -

1. 著者名 Ikegami Takashi, Urabe Chiyori T., Saitou Tetsuo, Ogimoto Kazuhiko	4. 巻 115
2. 論文標題 Numerical definitions of wind power output fluctuations for power system operations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Renewable Energy	6. 最初と最後の頁 6 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.renene.2017.08.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 鈴木郁海、根岸信太郎、池上貴志
2. 発表標題 再エネ普及シナリオに基づく長期的な太陽光・風力発電導入価値変遷の分析
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ikumi Suzuki、Shintaro Negishi、Takashi Ikegami
2. 発表標題 Long-term effects of reducing fuel costs and CO2 emissions by introducing renewable energy systems in Japan
3. 学会等名 6th International Conference on Renewable Energy Technologies (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 好川宗一朗、池上貴志、荻本和彦
2. 発表標題 風力発電出力変動量の地域特性と季節特性を考慮した電力需給解析
3. 学会等名 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Ikegami
2. 発表標題 Quantification of wind power output fluctuations and its geographical smoothing effects for power system operations
3. 学会等名 6th International Conference on Green Energy and Expo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takanori Enomoto、Takashi Ikegami、Chiyori T. Urabe、Tetsuo Saitou、Kazuhiko Ogimoto
2. 発表標題 Geographical smoothing effects on wind power output variations in Japan
3. 学会等名 International Conference on Environment and Renewable Energy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎本孝紀、池上貴志、占部千由、斉藤哲夫、荻本和彦
2. 発表標題 風力発電出力変動量の地域特性および季節特性の分析
3. 学会等名 平成29年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 成澤邦明、池上貴志、占部千由、斉藤哲夫、荻本和彦
2. 発表標題 平滑化効果を考慮した将来の風力発電出力短周期変動量の推計手法
3. 学会等名 平成29年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------