

ならし効果を考慮した風力発電容量の地点間最適配分に関する検討

計量分析ユニット 需給分析・予測グループ (兼) 新エネルギーグループ

柴田 善朗

サマリー

1 地点に限れば風力発電や太陽光発電の出力変動性は大きいことは事実であるが、複数地点を重ね合わせると、ならし効果によって全体で見た場合の出力変動は緩和されある程度平準化されるものと考えられる。

本研究では、青森県における 5 地点を対象に、過去 4 年間の毎時間の風速データを、風力発電の稼働パターンに基づき発電出力に変換し、ならし効果の検証を行った。

風力発電設備容量の配分を地点間で最適化することでならし効果は最大化される。今回検証に使用した 5 地点に限れば、2012 年の例では風力発電出力時間変動の標準偏差は $27 \sim 49 \text{ W/m}^2/\text{h}$ であるが、最適化した場合は $19 \text{ W/m}^2/\text{h}$ まで減少する。地点間均等配分した場合と比較すると最適化による追加的な改善効果はあまり大きくないものの、実際の風力発電の建設には地点間配分は検討されていないことから、地域全体で見た場合の負荷変動が改善されていない、若しくは悪化していることもあり得る。したがって、地点間配分を踏まえた風力発電導入計画を行うことが系統対策の一つになる可能性も考えられる。ただし、風力発電出力も電力需要も大きく制御できないという観点から両者を比較すると、最適化後の風力発電出力変動でもまだ大きいレベルにあることがわかる。

また、系統電力に与える影響として風力発電の出力変動にある一定の許容値を設定した場合、1 地点で集中的に風力発電を導入する場合と比較して、5 地点での導入ではならし効果によって導入可能量が 2 倍近く増大する例を確認した。ただし、実際には全ての風力発電所がある地域において風況が最良な地点に集中立地しているわけでも、5 地点のみで分散立地されているわけでもない。したがって、地域及び地点数を拡大しつつ、既存風力発電の導入状況を踏まえた最適化の検討が課題である。また、本研究では地点間の風力発電出力変動の標準偏差の相対関係に基づき分析を行ったが、重要であるのは絶対量であることから、電力需要カーブを踏まえた風力発電設備導入可能容量の分析も課題となる。

はじめに

エネルギーセキュリティや環境性の観点から再生可能エネルギーの導入促進は非常に重要であるが、風力発電や太陽光発電の出力変動性が系統電力に与える影響が懸念されている。1 地点に限れば出力変動性が大きいことは事実であるが、一方、複数地点を重ね合わせると、ならし効果によって、全体で見た場合の出力変動は緩和されある程度平準化されるものと考えられる。

どの程度のならし効果が期待されるかは、地点の組合せや設備容量の選定などによって大きく異なると推察される。また、ある年のみを取り上げて検証したとしてもその年が代表年とは限らず、特異な年もあることから過去に遡った検証も必要である。

そこで本研究では、風力発電を対象として、まず青森県内の任意の地点における過去 4 年間のデータを用いてならし効果を検証する。また、風力発電設備容量を地点間で最適配分することで得られる効果を定量化する。なお、風速ではなく実際の風力発電の発電パターンを踏まえた発電電力量を用いて評価する。

1. 分析対象地点の風況

気象庁の AMeDAS データから、青森県の 5 地点における 2009 年から 2012 年までの毎時の風速及び風向のデータを取得する。地点の選定には、これらのデータが観測されているという条件の他に、可能な限り風力発電ポテンシャルマップ[1]と照らし合わせて、風速条件の比較的良好な地点であること及び地点が分散することに留意した。

1.1 風速データの補正

風速計が設置されている地表からの高さは各地点において異なることから、以下の式[2]によって風力発電の高さの風速を推計する。想定する風力発電の規模はハブの高さ 60m、発電出力 1,000kW 級、直径 60m とする。

$$V = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/n}$$

ここで、 h_0 は観測所における風速計の高さ、 h はここでは 60m、 V_0 は観測風速、 V はここでは高さ 60m における風速、 n は観測所の地表を表す係数である。 n は経験則によって定められた数値で、草原、海岸地方、田園、市街地によって 2~10 の範囲で変化するが、本研究では選定した地点が海岸に近い場合が多いことから、一律 8 を想定した。

1.2 発電電力量の推計

風力発電は全ての風速で稼働するわけではなく、発電し始める風速（カットイン風速）

から発電を停止する風速（カットアウト風速）の範囲においてのみ稼働する。また、カットイン風速とカットアウト風速の間で、ある風速以上になるとブレードのピッチ制御などにより出力を制御することで定格運転を行う（図 1.1）。一般に、カットイン風速は 3~4m/s、定格風速は 12~16m/s、カットアウト風速は 24~25m/s と言われており[2]、カットイン風速は 3m/s、カットアウト風速は 24m/s を想定する。定格風速は下式に基づき直径 60m の風車の定格出力がおおよそ 1,000kW となる 11m/s とする。受風面積あたりの発電出力 ($Pe: W/m^2$) は下式によって計算する。

$$Pe = \eta \frac{1}{2} \rho V^3$$

ここで、 V は風速 (m/s)、 ρ は空気の密度で $1.225kg/m^3$ 、 η は発電効率で 40% を想定する。

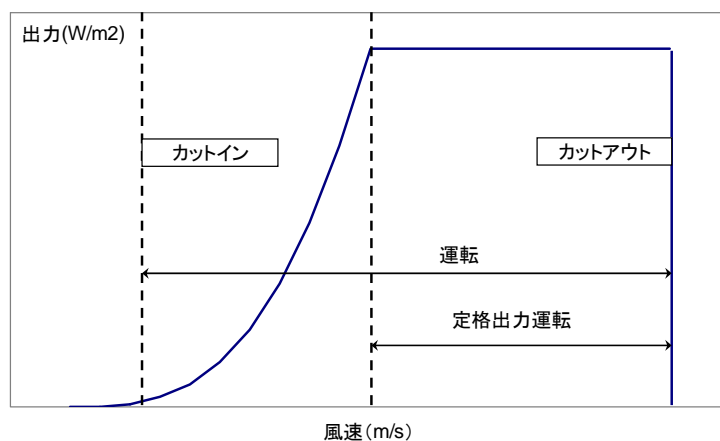


図 1.1 風力発電システムの運転特性

1.3 選定地点の風況

図 1.2 に選定した 5 地点の 2012 年における風速の頻度分布を示す。また、上述の風力発電稼働パターンを踏まえて、風速から推計した受風面積あたりの発電出力（発電出力密度： W/m^2 ）の頻度分布を図 1.3 に示す。受風面積あたりの発電出力は、年間平均で地点 2~5 で $38\sim 56W/m^2$ であるが地点 1 は $17W/m^2$ と小さい。なお、上述の稼働パターンに基づく定格出力は $354W/m^2$ となるが、定格運転は非常に少ない。図 1.4 には発電出力の時間変動の頻度分布を示す。地点 2 と地点 4 の標準偏差は $50W/m^2/h$ 近く、地点 3 と地点 5 が $40W/m^2/h$ 前後であるが、地点 1 は $27W/m^2/h$ と出力変動が小さいことがわかる。図 1.5 に示す方角別平均風力発電出力によると、どの地点においても若干の卓越風は見られるが、風力発電システムは風向に応じてある程度受風面の向きを変えるようになっており、ならし効果の分析には風向を考慮しない。

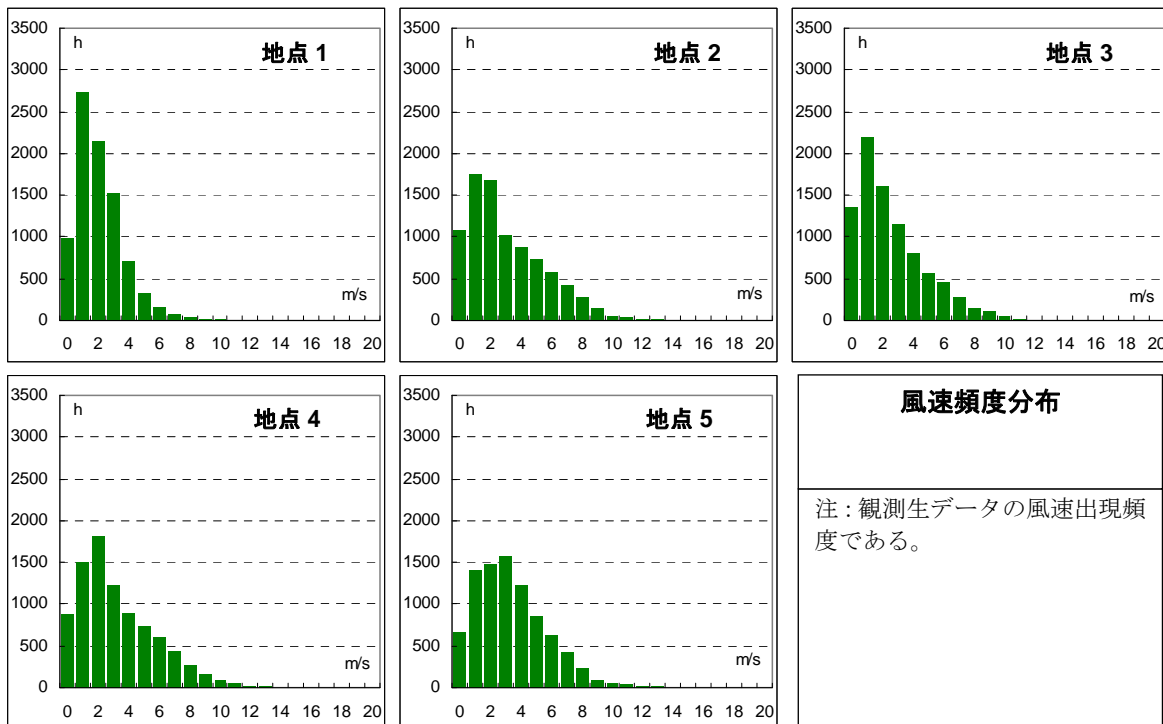


図 1.2 各地点における風速出現頻度 (2012 年)

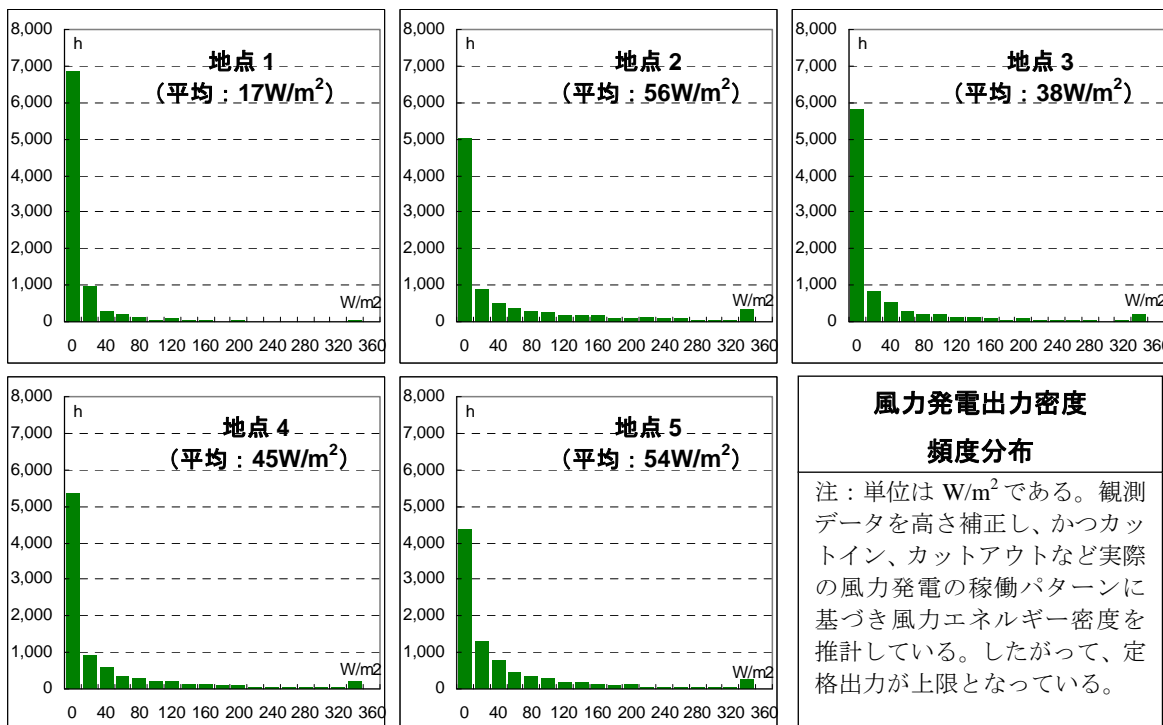


図 1.3 各地点における風力発電出力密度出現頻度 (2012 年)

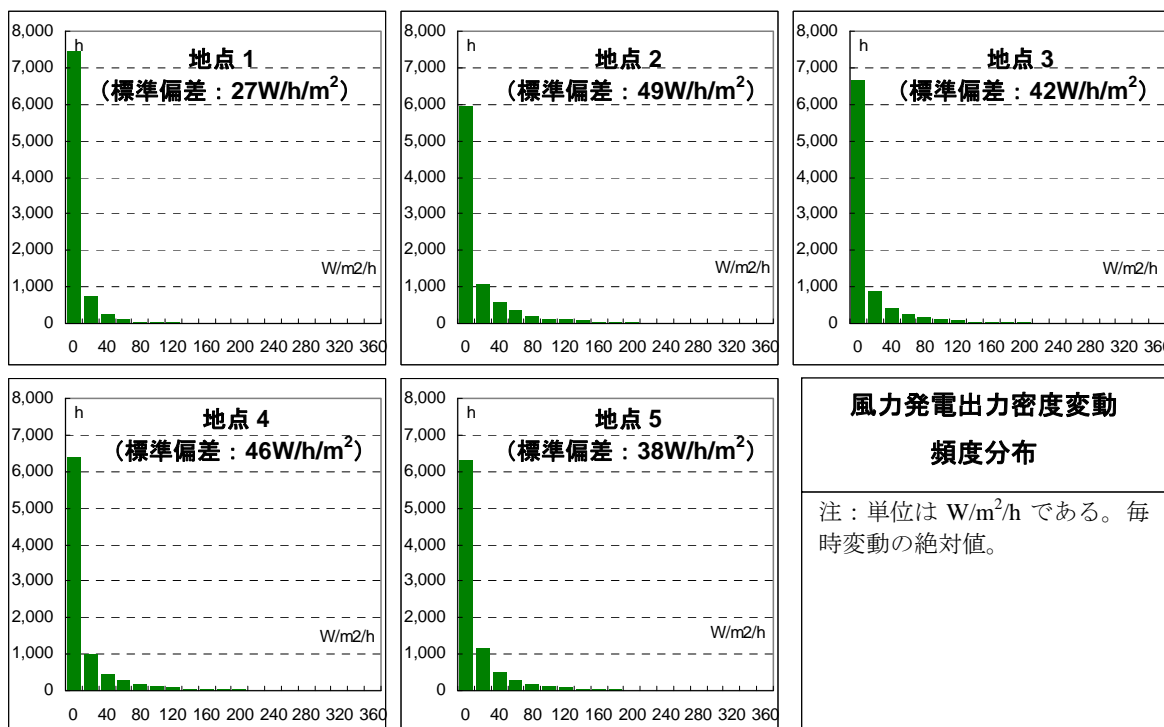


図 1.4 各地点における風力発電出力密度時間変動の出現頻度 (2012 年)

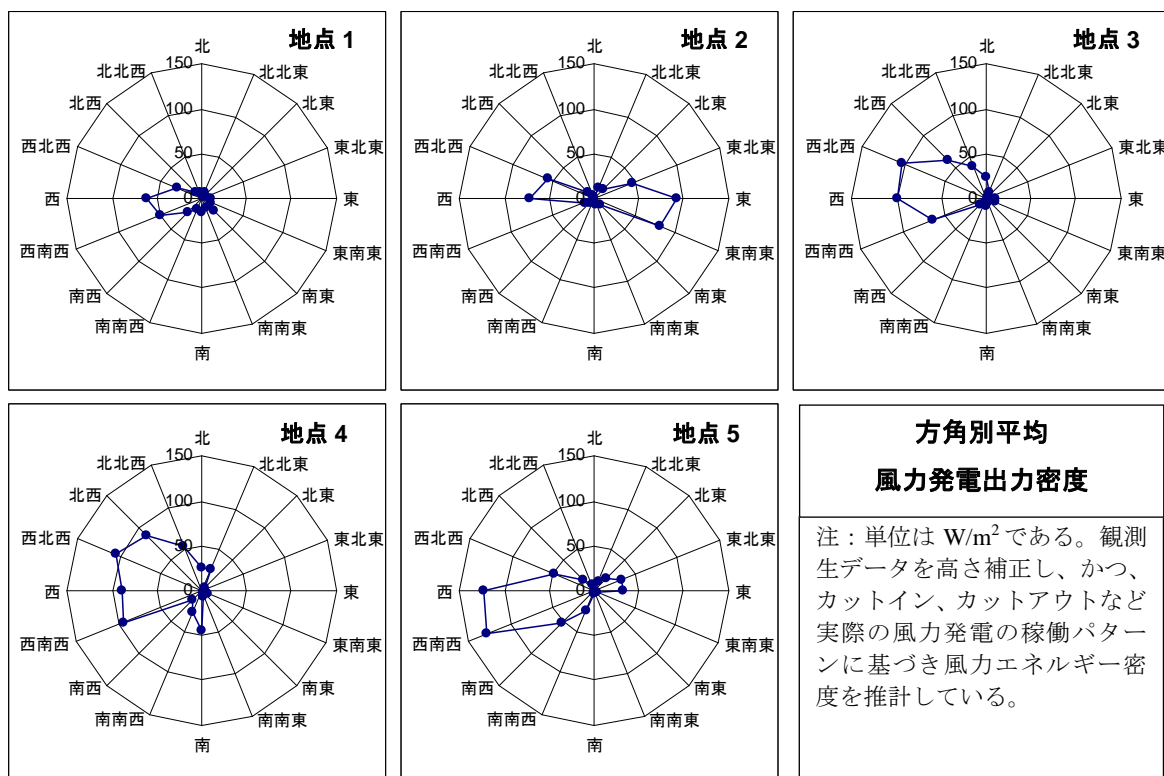


図 1.5 各地点における方角別平均風力発電出力密度 (2012 年)

2. ならし効果の検証

2.1 最適な発電設備容量の配分

ならし効果を得るためには各地点に単純に同量の発電設備を設置する方法が考えられる。また、風力発電は風況調査に基づき個別案件ごとに建設地点が選定されるが、例えば県などある地域において複数の建設候補地ごとにどのように発電設備容量を配分すれば地域全体としての風力発電出力の時間変動を最小化させることができるかを検討することは風力発電導入拡大に向けた一つの示唆を与えるものと考えられる。複数地点間の発電設備容量配分の最適化を以下のように定式化する。

$$\text{最小化 : } \sigma(\dot{s})$$

$$\text{制約条件 : } \sum s_t = S^*$$

$$: 0 \leq a_i \quad (i:1\dots5, \quad t:1\dots8760)$$

ここで、

$\sigma(\dot{s})$: 標本 \dot{s} の標準偏差

$\dot{s} = (s_t - s_{t-1})$: 地域全体での時刻 t における単位時間当たり発電出力変動 ($\text{W/m}^2/\text{h}$)

$s = (s_t)$: 地域全体での時刻 t における発電出力 (W/m^2)

$Pa = s$

$\dot{Pa} = \dot{s}$

$P = (P_{ti})$: 地点 i における時刻 t の単位時間当たり発電出力 (W/m^2)

$\dot{P} = (P_{ti} - P_{t-1,i})$: 地点 i における時刻 t の単位時間当たり発電出力変動 ($\text{W/m}^2/\text{h}$)

$a = (a_i)$: 地点 i に設置する風力発電の受風面積

である。 S^* は地域全体での年間発電電力量 (kWh/m^2) であり、ここでは選定地点の年間発電電力量の平均 (単位受風面積を 5 地点で均等配分した場合 : $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_5$) とする。

表 2.1 に 2009 年から 2012 年における各年の最適化の結果を示す。風況に変化はあるものの、年によって結果に大きな差は見られない。2012 年の例では地点 1~5 は毎時発電出力変動の標準偏差が 27~49 $\text{W/m}^2/\text{h}$ 、年間発電電力量は 151~489 kWh/m^2 と地点によって大きな差がある。地点 1~5 での最適化後は、標準偏差は 19 $\text{W/m}^2/\text{h}$ と大きく改善され最も小さい地点 1 の標準偏差を下回っている。ただし、発電出力を均等配分した場合と比べると若干の改善はあるもののほとんど変化は見られない。図 2.1 に示す最適化後の設備容量シェアも、風況が良く出力変動の標準偏差が小さい地点 5 (図 1.3、1.4 参照) のシェアが最も大きい。他の地域はほぼ均等に配分されている。風況の良好な上位 2 地点である地点 5 と地点 2 で最適化した場合も同様の結果 (表 2.1 参照) が見られる。これは、この 5 地点に限定して言えば発電出力を均等に配分することで既に出力変動の標準偏差がほぼ最小に近づいている可能性もあることから、他地域の観測地点の組合せでの検証も必要である。

表 2.1 各地点の毎時発電出力の標準偏差と年間発電電力量

	地点 1~5 の状況		地点 1~5 で最適化			地点 2 と 5 で最適化		
	σ	S	σ		S 最適化後 =均等配分	σ		S 最適化後 =均等配分
			最適化後	均等配分		最適化後	均等配分	
2009 年	29~51	176~533	19.96	20.36	397	33.83	34.48	521
2010 年	32~51	192~574	19.90	20.52	411	33.14	34.22	548
2011 年	28~53	162~550	19.89	20.62	406	33.17	34.40	539
2012 年	27~49	151~489	18.95	19.35	367	31.45	32.24	480

注：σは毎時発電出力変動の標準偏差（W/m²h）、Sは年間発電電力量（kWh/m²）を指す。

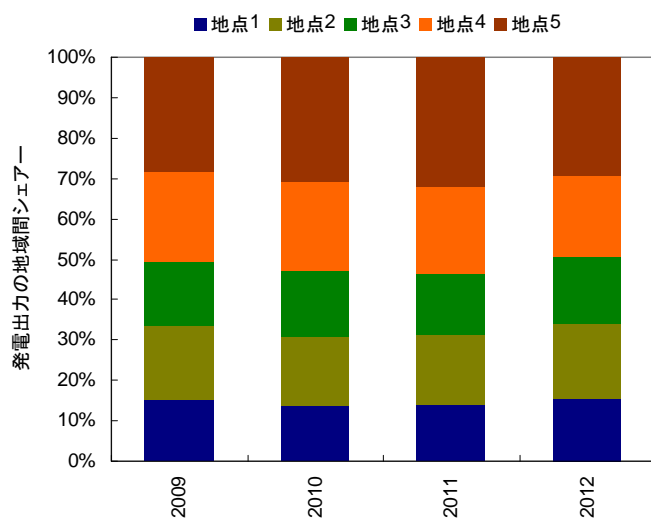


図 2.1 最適化後の地点別発電設備容量構成

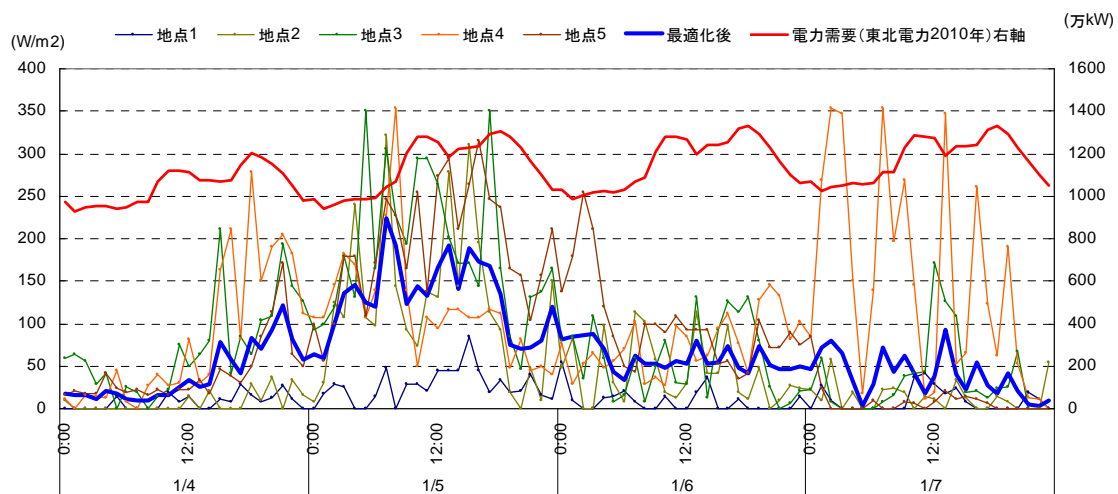


図 2.2 5 地点でののらし効果の例（2012 年 1 月の 4 日間の例）

図 2.2 には 5 地点でのならし効果と電力需要カーブの例[3]を示す。最適化された風力発電の出力変動はかなり平準化されているものの、風力発電出力も電力需要も大きく制御できないという観点から両者を比較すると、最適化後の風力発電出力変動はまだ大きいレベルにあることがわかる。

2.2 ならし効果が与える影響の定量化

現状の電力システムでどこまで風力発電の発電出力変動を技術的に許容できるのかが明らかではないこと、また風力発電のバックアップとしてガス火力発電の稼働や蓄電池の容量などがどの程度必要となるかの議論も一定の結論が得られているわけではない。したがって、ならし効果によるメリットを技術的かつ経済的に評価することは非常に難しい。

そこで、以下では単純に発電出力時間変動の標準偏差にある許容値を与えた場合に、単地点での導入と複数地点への導入で、導入できる風力発電の設備容量や年間発電電力量がどの程度異なるかを見る。つまり、風力発電の出力変動性が電力システムに与える影響を一定に抑え最大となる導入可能量を分析することを意味する。

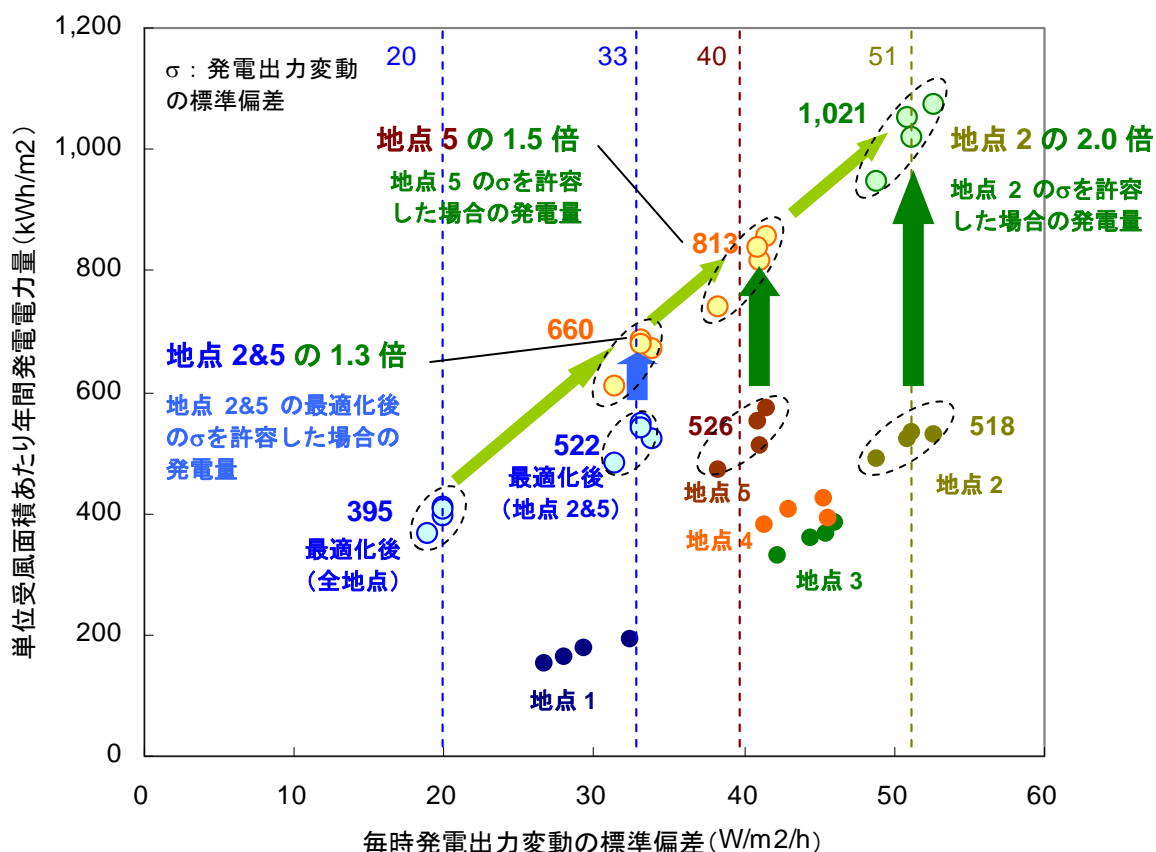


図 2.3 地点組合せによる風力発電許容量の増大 (2009 年～2012 年のデータに基づく分析)

注：各クラスターの 1 つの点は 1 つの年の値であり、数値は各クラスターの平均値である。

図 2.3 には、ならし効果による導入可能風力発電の増加を示す。通常、風力発電は風況が良好な場所から導入される。本研究で選定した地点においては、地点 5 の風況が最も良く、地点 2 が続く。したがって、地点 5 のみに風力発電所を建設する場合は得られる年間発電電力量が最も大きく 526kWh/m^2 になるが、発電出力の時間変動の標準偏差は $40\text{W/m}^2/\text{h}$ である。地点 2 のみの場合は各々 518kWh/m^2 、 $51\text{W/m}^2/\text{h}$ である。一方、全 5 地点の組合せで最適化した場合は、発電電力量は 395 kWh/m^2 と減少するが、標準偏差は $20\text{W/m}^2/\text{h}$ まで緩和される。

ここで、電力系統が地点 5 の風力発電出力時間変動の標準偏差を許容できると仮定すると、全地点で最適化した場合の発電電力量は地点 5 の発電電力量の 1.5 倍の 813 kWh/m^2 となる。また、許容値を地点 2 の標準偏差とすると、発電電力量は地点 2 の発電電力量の 2 倍に相当する $1,021\text{ kWh/m}^2$ まで増加する。

仮に、現状で地点 5 と地点 2 を中心に風力発電の導入が進んでいるとし、この 2 地点での最適化後の出力変動の標準偏差 ($33\text{W/m}^2/\text{h}$) を許容値と想定すると、全地点で最適化した場合では地点 5 と地点 2 の組合せの 522kWh/m^2 の 1.3 倍にあたる 660kWh/m^2 まで導入が可能となる。

3. まとめと今後の課題

本研究では、青森県における 5 地点を対象に毎 1 時間の風速データに基づき、風力発電のならし効果の検証を行った。複数地点を組み合わせることでならし効果が期待されるが、風力発電設備容量の配分を地点間で最適化することでその効果を最大化することができる。今回、検証に使用した 5 地点に限れば、地点間均等配分と比べて最適化による追加的な効果はあまり大きくないものの、実際の風力発電の建設には地点間配分は検討されていないことから、地域全体で見た場合の負荷変動が改善されていない若しくは悪化していることも考えられる。したがって、地点間配分を踏まえた風力発電導入計画を行うことも系統対策の一つになる可能性も考えられる。

また、系統電力に与える影響として風力発電の出力変動にある一定の許容値を設定した場合、1 地点で集中的に風力発電を導入する場合と比較して、5 地点での導入ではならし効果によって導入可能量が 2 倍近く増大する例を確認した。ただし、実際には全ての風力発電所がある地域において風況が最良な地点に集中立地しているわけでも、5 地点のみで分散立地されているわけでもない。したがって、地域及び地点数を拡大しつつ、既存風力発電の導入状況を踏まえた最適化の検討が課題である。また、本研究では地点間の風力発電出力変動の標準偏差の相対的な分析を行ったが、重要であるのは絶対量であることから、電力需要カーブを踏まえた風力発電設備導入可能容量の分析も今後の課題となる。

参考文献

- [1] 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査, 平成 23 年 3 月, 環境省
- [2] 風力発電導入ガイドブック 2008, NEDO
- [3] 東北電力ホームページ

謝辞

非常に膨大な作業量を要する AMeDAS からのデータの取得の効率化を実現していただいた計量分析ユニットの柳澤グループマネージャーにこの場を借りて感謝する。

お問い合わせ : report@tky.ieej.or.jp