

# 大量導入時における太陽光，風力発電の出力変動特性

七原 俊也

地球温暖化問題等への対策として太陽光，風力発電は今後増大する見通しであり，これらが電力システムに及ぼす影響に備えるためスマートグリッド技術が期待されている。これらが大量に導入された場合の課題の一つに，電力システムの需給バランスへの影響があるが，この影響を明らかにするには，大量導入時におけるこれら電源の出力変動特性を解明する必要がある。本解説では，実測データをもとに，出力変動を短周期変動と長周期変動とに大別し，その変動特性について分析した結果を述べる。短周期変動については平滑化効果の適切に考慮すること，長周期変動については出力予測等が重要であることを示す。

キーワード：太陽光発電，風力発電，出力変動，平滑化効果，スペクトル解析，コヒーレンス，出力予測

## 1. はじめに

電力システムの将来像として近年「スマートグリッド」が注目されている。スマートグリッドの概念は提唱されている国の電力システムの直面している課題を強く反映しているとともに，関係者の見方により相当の幅があるため，それが何かを明確に述べることは容易ではない。しかし電気技術とIT技術とを融合すること，再生可能エネルギーの大量導入を目指すことは，スマートグリッドすべてに共通して見られる特長である。

このうち再生可能エネルギーについては，太陽光発電，風力発電（以下，太陽光・風力発電と略す）など

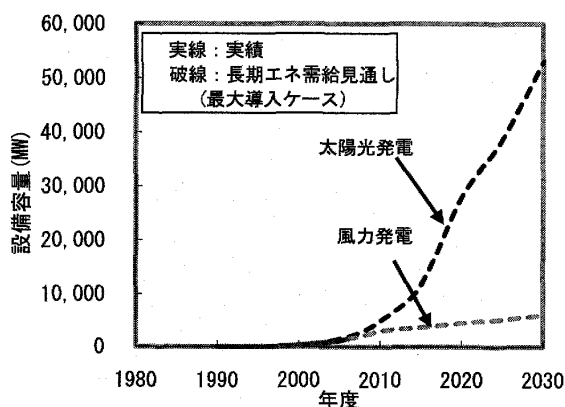


図1 太陽光・風力発電の設備容量の実績と見通し[1][2]

ななはら としや  
財電力中央研究所  
〒201-8511 狛江市岩戸北2-11-1

が地球温暖化問題対策として期待され，図1に示すように，わが国でもこれらの電源容量は急増する見通しとなっている[1][2]。一方，電力システムでは刻一刻，需給バランスを取る必要があるが，太陽光・風力発電は変動の大きい風や日射をエネルギーに変換するため，風や日射の変動に伴いその発電出力は大きく変動する。このため太陽光・風力発電が増えた場合には，需給バランスの維持が困難となることが懸念されている[3]。この影響を的確に把握するには大量導入時における太陽光・風力発電の出力変動特性を明らかとする必要がある。

このため本解説では，太陽光・風力発電の出力変動の特徴についてのこれまでの研究結果について述べる。まず2節では電力システムにおける需給バランス維持の重要性と太陽光・風力発電の出力変動の影響について概説する。次いで3節，4節では出力変動の分析結果を分析手法とともに記す。すなわち3節では数十分間までを対象とした短周期変動について，多数の設備が導入された場合の平滑化効果に重きをおいて述べる。また4節では時間オーダ以上の長周期変動について記す。

## 2. 電力システムの需給バランスと太陽光・風力電源増大の影響

電力システムにおいては，システム内に蓄えうるエネルギーが小さいため，システム全体で電力の発生と消費を同時に行うこと，つまり常に需給バランスを維持することが必須である。このバランスが崩れると，

周波数が変動する。周波数が許容値以上に変動すると、需要家への影響があるとともに、火力発電所が停止するなど系統側への影響も避けられないため、電力システムでは周波数を適正值に維持することが不可欠である。

電力システムでは、様々な時間スケールで需給バランスの維持を図っている。すなわち長期的（10年オーダー）には必要な電源を確保するとともに、翌年等の需給計画を策定している。また短期的には、翌日について需要等の予測をもとに発電機の運用計画を立て、当日は最終的には実績を見ながら制御（需給制御）を行っている。このうち需給制御においては、対象とする変動の周期に応じて、負荷周波数制御や経済負荷配分制御などを組み合わせ、周波数を規定値とするように努めている。

一方、太陽光・風力発電の出力は、日照や風など気象現象に応じて大きく変動するために、正確な予測が困難である。このため太陽光・風力発電が大量に導入された場合には、軽負荷時に供給力が需要を上回ること、周波数調整が困難となることなどが懸念されている[3]<sup>1</sup>。

これら太陽光・風力発電の需給バランスへの影響を把握するには、上述のように需給バランスは電力システム全体で維持する必要があるため、電力システムに連系された太陽光・風力発電の出力の合計値がどのように変動するかを明らかにすることが不可欠である。電力システム側の制御・運用が変動周期を分けて扱っていることを考えると、出力変動についても変動周期を分けて議論することが適当である。一方、気象学では、気象現象の変動周期（時間スケール）と空間的な広がり（空間スケール）に対応関係があることが知られており[4]、変動周期が異なる出力変動は、空間的な広がり異なる気象現象に対応しているとも推定される。

このため本解説では短周期（数十分以下）と長周期（時間オーダー以上）に分けて検討する。なお上記の短周期（数十分以下）は、電力システムの需給制御の観点からは、概ね負荷周波数制御が分担する変動周期にあっている。

### 3. 太陽光・風力発電出力の短周期変動

本節では、電力システムの負荷周波数制御等に影響を及ぼす短周期（数十分以下）の変動について検討する。図2に太陽光発電に対する例を示すように、設備数が増えた場合、それらの合計出力を求めると個々の設備出力に比べ周波数の低い成分が卓越し、周波数の高い成分が小さくなる傾向（平滑化効果）が見られる。このため大量導入時における太陽光・風力発電の合計出力の出力変動特性を明らかにするには、この平滑化効果について解明する必要がある。本解説では下記の確率論的なアプローチにより検討を行った。

#### 3.1 スペクトル解析を用いた平滑化効果のモデル化

本節では平滑化効果分析の準備のため、まず、以下の分析で用いるスペクトル解析法などについて述べる。

(1)  $\sqrt{1/N}$  則：独立な変数の合計値

平滑化効果の最も基本的な状況は下記の  $\sqrt{1/N}$  則が成立する状況である。すなわち  $N$  個の独立な確率変数  $x_i (i=1, N)$  があり、その平均、分散が等しいとすれば、合計値の分散は次のようになる。

$$\sigma_{sum}^2 = N\sigma^2 \quad (1)$$

このため合計値の標準偏差は元の変数の標準偏差の  $\sqrt{N}$  倍となる。

合計値の平均は元の変数の平均  $m$  の  $N$  倍になることを考えると、合計値の標準偏差をその平均で除した値は

$$\frac{\sigma_{sum}}{m_{sum}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sigma}{m} \quad (2)$$

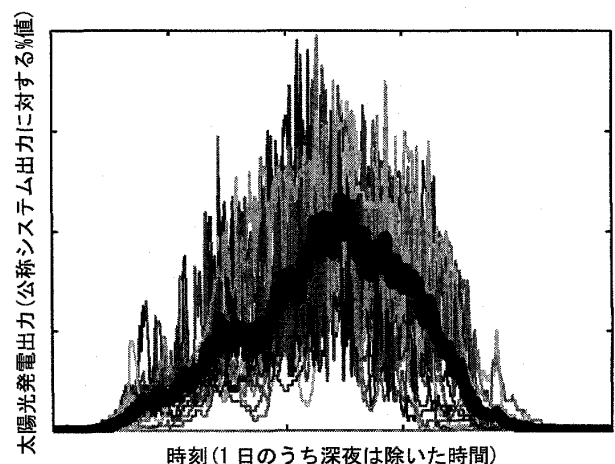


図2 太陽光発電出力の平滑化効果[5]

(注) A地方におけるある日にPV出力。黒線はそれらの合計出力。すべての出力は太陽電池の公称システム出力で規格化している。

<sup>1</sup> 太陽光発電、風力発電の大量導入時には、需給バランス以外にも、配電線電圧変動など様々な問題が予想されるが、それらには本解説では触れない。

となり、元の確率変数の標準偏差と平均の比の $\sqrt{1/N}$ 倍となる ( $\sqrt{1/N}$  則の名前の由来)。

このように変動が独立である場合、設備の数が増えた際に変動の大きさが平均ほどには増えない。これが平滑化効果である<sup>2</sup>。

### (2) 確率過程に対する評価指標の導入

太陽光・風力発電の出力変動の平滑化効果は、変動周波数により異なることが経験的に分かっている。このため上述した確率変数に対する議論を、スペクトル解析法を用い確率過程に拡張する。表1に確率変数と確率過程での指標の対応を示す<sup>3</sup>。

表1のうち特に以下で用いることが多いパワースペクトルとコヒーレンスに若干補足する。まずパワースペクトルについては分散<sup>4</sup>との間に

$$\sigma_i^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{ii}(\omega) d\omega \quad (3)$$

が成り立つため、パワースペクトルは分散を変動周期別に分解したものと解釈できる。一方、コヒーレンスはクロススペクトルおよびパワースペクトルから下式により求める。

$$\gamma_{ij}(\omega) = \frac{|S_{ij}(\omega)|}{\sqrt{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega)}} \quad (4)$$

クロススペクトルを共分散に、パワースペクトルを分散に置き換えれば、上式は相関係数の定義式となることから、コヒーレンスは変動周波数別に見た相関係数と解釈できる。なお表1に示すフェーズ $\varphi_{ij}(\omega)$ は、スペクトル解析では波形を周波数成分別の正弦波に分解しているために現れた指標であり、対象とする2つの波形の平均的な位相差を表している。

### (3) 合計出力のパワースペクトル

電力システムの需給バランスの観点から最終的に知

表1 利用する指標と確率変数に対する指標の対応

利用した確率過程の指標	確率変数
平均 $m_i$ (定常性を仮定)	平均 $m_i$
パワースペクトル $S_{ii}(\omega)$	分散 $\sigma_i^2$
クロススペクトル $S_{ij}(\omega)$	共分散 $\gamma_{ij}$
コヒーレンス $\gamma_{ij}(\omega)$	相関係数 $r_{ij}$
フェーズ $\varphi_{ij}(\omega)$	—

<sup>2</sup> 後述するように確率過程の場合は、相関の大小以外に、位相差があることによる平滑化効果もある。

<sup>3</sup> スペクトル解析法の詳細については文献[6]などを参照されたい。

<sup>4</sup> 分散はラグ0での自己相関関数の値である。

りたいのは、太陽光発電ないしは風力発電の電力システム内における合計出力の変動である。

簡単のため、いますべての電源の出力変動の出力のパワースペクトルは同一で $S(\omega)$ とした場合、 $N$ 箇所の太陽光・風力発電の合計出力のパワースペクトル $S_{sum}(\omega)$ は下式となる。

$$\begin{aligned} S_{sum}(\omega) &= NS(\omega) + \sum_i \sum_{j \neq i} S_{ij}(\omega) \\ &= NS(\omega) + S(\omega) \sum_i \sum_{j \neq i} \gamma_{ij}(\omega) \cos \varphi_{ij}(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

いま簡単のためフェーズ $\varphi_{ij}(\omega)$ を0と仮定する。このとき、上式は

コヒーレンスが0 (すなわち独立) :

$$S_{sum}(\omega) = NS(\omega) \quad (6)$$

コヒーレンスが1 (すなわち連動<sup>5</sup>) :

$$S_{sum}(\omega) = N^2 S(\omega) \quad (7)$$

となる。(5)式によれば、より一般的には、第2項の $\gamma_{ij}(\omega) \cos \varphi_{ij}(\omega)$ が平滑化効果の度合いを表す係数となっていることが分かる。

なおパワースペクトルは元の時系列信号のフーリエ変換の2乗に比例する。このため(6)(7)式によれば、合計出力の時系列信号の角周波数 $\omega$ 成分の振幅は、独立(コヒーレンスが0)な場合には、各風力発電機出力の角周波数 $\omega$ 成分の振幅の $\sqrt{N}$ 倍となっている。これは上述した $\sqrt{1/N}$ 則を周波数領域にまで拡張したものとなっている。

## 3.2 平滑化効果の分析結果の例

### (1) 風力発電

本節では、上記の手法を用い、風速および風力発電出力の実測値の分析を行う。

#### a) 異地点の風速の間のコヒーレンス [7][8]

平坦地形で離隔2 km以内の数地点で風速を実測し<sup>6</sup>、異地点における風速の間のコヒーレンスを求め

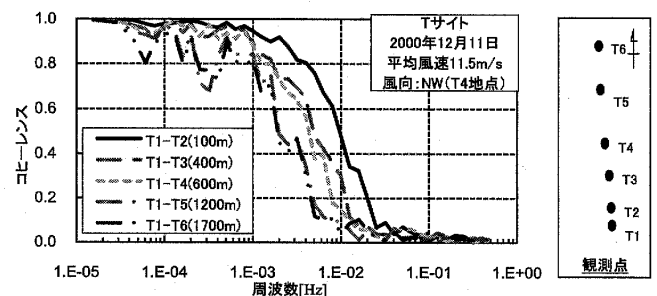


図3 離隔2 km以内での異地点の風速の間のコヒーレンスの例 (平坦地形) [7][8]

<sup>5</sup> コヒーレンスが1の場合を以下では「連動」と呼ぶ。

<sup>6</sup> 実測条件の詳細については文献[7]を参照されたい。

た結果を図3に示す。

同図によれば、いずれの離隔でもコヒーレンスは、高周波数域では0（変動が独立）、低周波数域では1（変動は連動）となっているとともに、離隔が大きいくほど相関が低くなっていることが分かる。具体的には、図3の例では、離隔が2 km 程度以内であれば0.001 Hz（変動周期17分）程度以下では風速の変動は連動と見なせるとともに、離隔が100 m 程度以上であれば0.03 Hz（変動周期30秒）程度以下では風速の変動は独立と見なせることが分かる。なお本解説では割愛したが、異地点の風速の間の相関は地点や日（気象条件）によって異なるとともに、起伏地形より平坦地形の方が高くなる傾向が見られることも分かっている[7]。

#### b) ウィンドファームでの平滑化効果[9]

近年、大多数の風力発電設備はウィンドファームとして集中設置されている。ウィンドファームの単基出力と合計出力のパワースペクトルの例を図4に示す。ウィンドファームの距離スケールは数 km 程度であるため、図3に示した距離スケールと同程度である。

同図によれば、

- ・ 周波数が0.017 Hz 程度以上（周期が1分程度以下）では両者のパワースペクトルの比は風車基数に比例する
- ・ 周波数が0.0017 Hz 程度以下（周期が10分程度以上）では両者のパワースペクトルの比は風車基数の二乗に比例する

ことが分かる。上記の(6)(7)式と対照すると、これは、この場合、各基の出力変動は周期1分以下では独立であり平滑化効果が効くが、周期10分以上では連動し平滑化効果が効かないことを表していることが分かる。

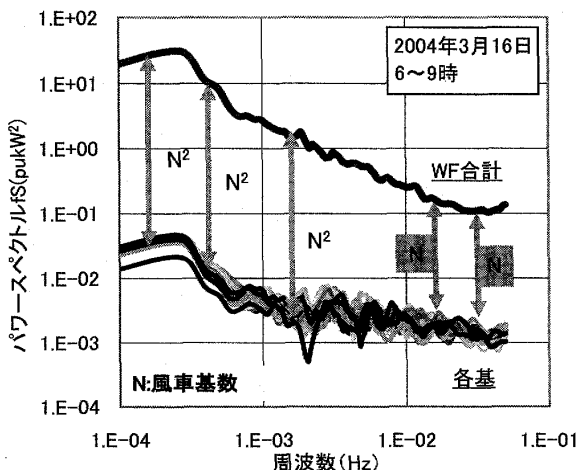


図4 ウィンドファーム出力での平滑化効果の例[9]

る<sup>7</sup>。つまり出力変動の観点からは、ウィンドファームでの平滑化効果は図5に示すようなローパスフィルタとして振る舞う。

#### (2) 太陽光発電

異地点の太陽光発電出力ないしは日射強度の間のコヒーレンスについても、風速と同様に、短周期で相関が低くなるとともに、地点の離隔が大きくなるほど相関の小さくなることが分かっている[10]。

離隔600 m での日射強度の間のコヒーレンスを求めた結果の例[10]を図6に示す。同図によれば、周波

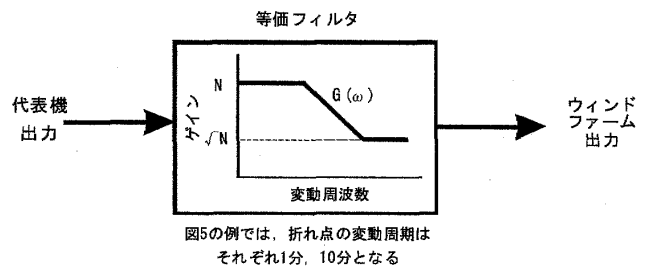


図5 ウィンドファームの平滑化特性を表す等価フィルタ

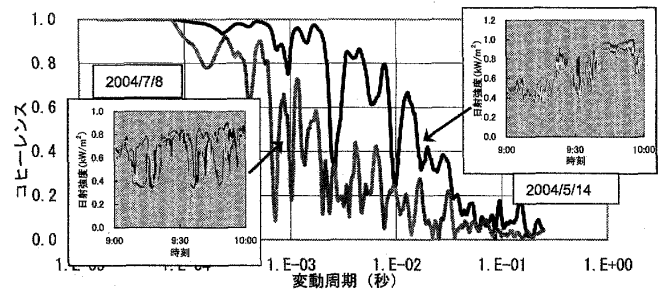


図6 離隔600 mの地点間での日射強度のコヒーレンスの例[10]

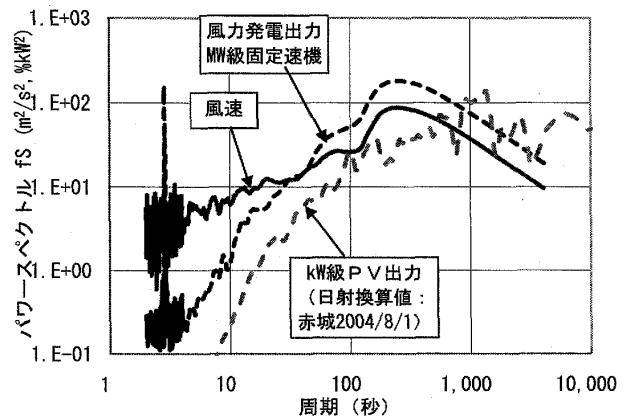


図7 太陽光・風力発電の出力変動のパワースペクトルの例[10]

<sup>7</sup> この事例は比較的ウィンドファーム内の平滑化効果が小さい事例である。

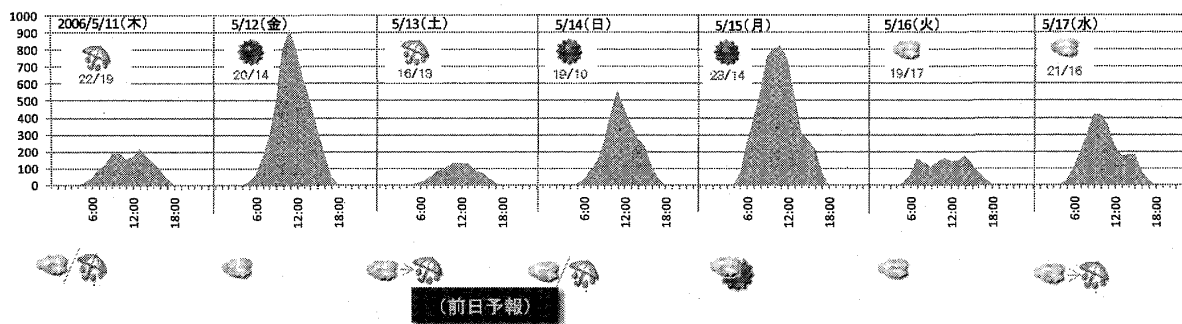


図8 関東地方の日射量観測データに基づく太陽光発電出力の推定結果例  
(注) 地方公共団体および気象台、計26地点での観測に基づく

数 0.001~0.01 Hz で異地点の日射強度間の相関の大きさが変化していることが分かる。これは図3に示した離隔 600 m での風速に対する結果とほぼ同程度である。また図6によれば、日によって相関の大きさにはかなりの違いが見られることが分かる。短周期領域における日射強度の変動は雲に起因するが、図6内の波形図からは、雲の性状(特に空間スケール)が異地点での日射強度に影響を及ぼしている可能性が見取れる。すなわち距離スケールの大きな雲のある場合は、波形にはゆっくりとした変動が大きくなるとともに、異地点の日射強度の相関が大きくなる傾向のあることが推察される。

なお太陽光発電出力と風速、風力発電出力のパワースペクトルの例を図7に示す。太陽光発電、風力発電の大量導入時における変動の大きさは、同図に示す出力変動のスペクトルなどに上述した平滑化効果を加味して評価する必要がある。相関の様相は場所、季節などによって異なるため、一般的な結論を導くことは容易ではないが、変動周期数分以下の変動については太陽光・風力発電ともに平滑化効果がかなり効くことが推察される。

#### 4. 太陽光・風力発電出力の長周期変動

太陽光・風力発電の長周期出力変動(周期時間オーダ以上の変動)については、以下に述べるように、3節に述べた短周期変動に対するものより距離スケールの大きい現象、つまり気象現象への配慮が必要となる。

##### (1) 太陽光発電出力の長周期変動

関東地方26地点(地方公共団体の観測地点および気象台)で観測した日射量(1時間値)をもとに同地方に太陽光発電設備が分散配置された場合の出力を推定した結果例を図8に示す。

同図によれば、出力は太陽の運行に伴い概してベル

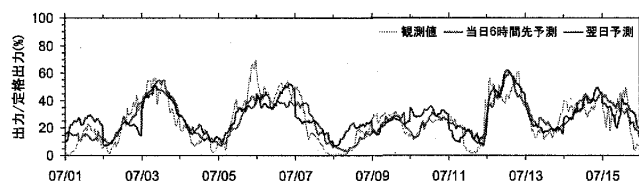


図9 ある地方における風力発電出力の実測値と予測値(7月の15日間) [11]

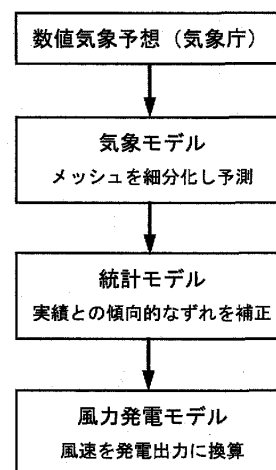


図10 風力発電出力予測モデルの概略の構成

状・正弦波の変動を呈するが、日によっては天候の変化に応じ例えば午後に出力が減少する事例(5月15日)、波形がベル状に比べ尖鋭となる事例(5月12日)なども見られることが分かる。また日による変化に着目すると、晴で出力が大きい日の翌日に、天気が悪く出力が低くなるなど、日単位で大きく変動する事例も多い。

これらの出力変動は天候の変化に起因するため、太陽光発電が大量に導入された場合には気象予報が重要となると考えられる。図8下部には前日における天気予報(東京)を示しているが、同図によれば必ずしも

適切に予報ができていない様子が見て取れる。

## (2) 風力発電出力の長周期変動

ある地方における夏季15日間の風力発電出力の実績と予測の例を図9に示す。同図によれば、風力発電出力は、気象擾乱等の通過に伴い、数日程度の周期で大きく変化していることが分かる。

図9には、図10に示す方法で風力発電出力の予測値結果も示している[11]。図9によれば、変動の大きなトレンドは予測できているものの、詳しく見れば誤差も大きいことも分かる。太陽光・風力発電の導入量が増大する中、このような数値モデルを用いた出力予測については経験蓄積と予測精度向上が重要と考えられる。

## 5. むすび

本解説では、太陽光・風力発電の大量導入時の出力変動特性について述べた。これら電源の導入量は今後増大すると予想されるが、大量導入時の出力変動特性一つをとっても、現時点では不明な点が多い。このため、例えば太陽光発電の出力変動特性については、資源エネルギー庁補助事業「分散型新エネルギー大量導入促進系統安定化事業」で分析がなされつつある。それも含め、今後、実測データとその分析結果を積み上げていく必要がある。また短周期変動、長周期変動ともに気象面からの分析を充実させること、長周期変動については高精度の予測手法を開発すること、さらには出力変動を補償するために蓄電池の利用技術等を開発することなども、今後の課題である。なおこのうち出力予測や蓄電池応用についてはスマートグリッド技術の一環として取り上げられることも多い。

## 参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会, 「長期エネルギー需給見通し」, 平成20年3月.
- [2] 「長期エネルギー需給見通し(再計算)」, 平成21年8月.
- [3] 次世代送配電ネットワーク研究会, 「低炭素社会実現に向けた次世代送配電ネットワークの構築に向けて」, 平成22年4月.
- [4] 小倉義光, 「一般気象学(第2版)」, 東京大学出版会, 1984年5月.
- [5] 資源エネルギー庁電力・ガス事業部, 「新エネルギーの大量導入に伴う影響とその対応策について」, 平成20年9月8日.
- [6] 日野幹雄, 「スペクトル解析」, 朝倉書店, 1977年10月.
- [7] 助電力中央研究所, 「風力発電電力システム安定化等調査」, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成12年度成果報告書, 2000年3月.
- [8] T. Nanahara, et al., "Smoothing Effects of Distributed Wind Turbines—Part. 1: Coherence and smoothing effects at a wind farm," Wind Energy, Vol.7, No.2, pp.61-74, 2004.
- [9] 七原俊也, 「風力発電の出力変動とその電力システムへの影響」, 日本風力エネルギー協会誌, 29巻4号, pp.76-82, 2005年12月.
- [10] 七原俊也, 「太陽光発電の出力変動の平滑化効果—全天日射強度のスペクトル解析」, 電力中央研究所研究報告R05014, 2006年6月.
- [11] 「風力発電電力システム安定化等技術開発—気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発」, 新エネルギー・産業技術総合開発機構受託・電源開発(株)再受託研究報告, 2006年3月.