

# 電力系統制御エリアを対象とした信頼区間付き 風力発電出力予測に関する研究\*

Wind Power Prediction with Confidence Intervals for Control Area

石原 孟\*\* Takeshi ISHIHARA      山口 敦\*\* Atsushi YAMAGUCHI      小川 豪\*\*\* Takeshi OGAWA      酒井和也\*\*\* Kazuya SAKAI      藤野陽三\*\*\* Yozo FUJINO

## 1. 緒言

電力系統の運用のために電力系統制御エリアにおける風力発電出力予測が過去に研究されてきた<sup>1)</sup>。しかしながら、予測は必ず誤差が伴うため、精度の高い予測を実施するとともに、予測の信頼性についても定量的に評価する必要がある。そこで本研究ではまず、電力系統制御エリアにおいて、信頼区間付き風力発電出力予測手法を提案するとともに、信頼区間付き予測の評価を行う。

## 2. 信頼区間付き予測

### 2.1 信頼区間付き予測手法の概要

信頼区間付き予測とは、予測の不確かさを定量的に推定する手法の一つであり、ある信頼水準の確率で真値が信頼区間の上限値と下限値の間に含まれることを表わす。図 1 に信頼区間の概念図を示す。この場合、信頼水準は 68.3%であり、68.3%の確率で真値が信頼区間の上限値と下限値の間に含まれることとなる。

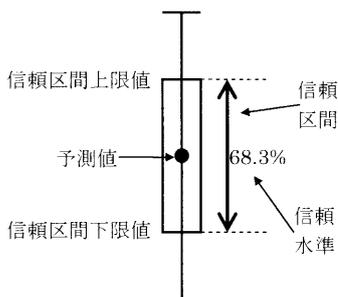


図 1 信頼区間および信頼水準の概念

本研究では、発電出力の予測誤差が正規分布に従うと仮定し、過去の予測誤差の標準偏差から信頼区間付き予測を行う。例えば、過去の予測誤差の標準偏差を  $\sigma$  とすると、信頼水準が 68.3%の信頼区間の上限値および下限値はそれぞれ予測値  $\pm \sigma$  となり、信頼水準が 50%の信頼区間は予測値  $\pm 0.647\sigma$  の範囲となる。

### 2.2 予測誤差の標準偏差

本研究では、まず東北エリア内の 9 ウィンドファーム(図 2)の発電出力の合計値を対象として 2006 年 1 月から 12 月の 1 年間における予測誤差の標準偏差を下

記の 2 通りの手法により求めた。

- (1) 予測時間別：予測誤差の標準偏差を予測時間のみの関数として求める。
- (2) 予測時間・予測風速別：予測誤差の標準偏差を予測時間およびエリア代表風速の予測値の関数として求める。

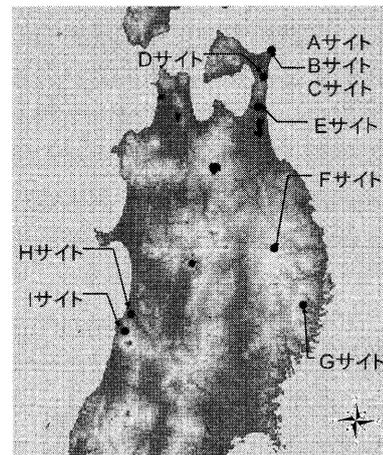


図 2 研究対象ウィンドファームの位置

なお、エリア代表風速とは各ウィンドファームの重心における風速予測値の 9 ウィンドファームにおける算術平均である。また、予測誤差の標準偏差  $\sigma$  は(1)式で定義される。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon})^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = P_t^{pred} - P_t^{meas} \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{t=1}^n \varepsilon_t a \quad (3)$$

ここで、 $P_t^{pred}$  は時刻  $t$  における発電出力の予測値、 $P_t^{meas}$  は時刻  $t$  における発電出力の観測値である。図 3 にこのようにして求めた 6 時間先予測の予測誤差の標準偏差を示す。鎖線が予測時間別標準偏差、実践が予測時間・予測風速別の標準偏差である。6 時間先予測について示しているため、予測時間別標準偏差は常に同じ値をとっているのに対し、予測時間・予測風速別標準偏差は予測風速によって異なった値を示し、風速が小さい時には予測誤差は小さく、風速が高くなるにつれ予測誤差が大きくなるのがわかる。

\* 第 29 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演  
\*\* 会員, \*\*\* 非会員 東京大学大学院工学系研究科  
〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16

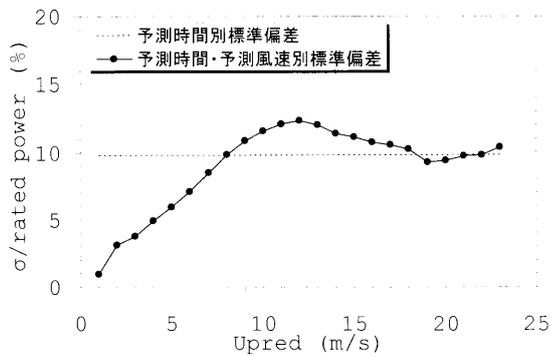
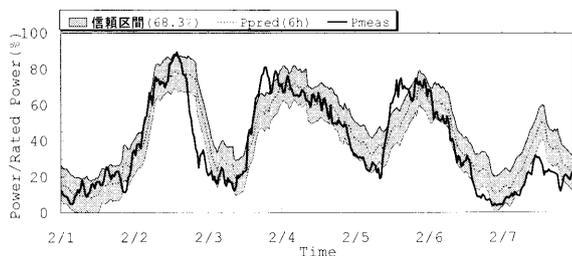


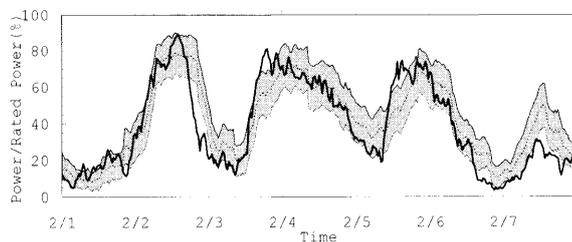
図3 予測風速別の予測誤差の標準偏差  
(当日6時間先予測, 2006年)

### 2.3 信頼区間付き予測結果

本研究では, 予測誤差の分布は経年的に変化しないと仮定し, 2.2 で 2 種類の手法により得られた予測誤差の標準偏差を用いて信頼区間付き予測を行った. なお, 予測時間別標準偏差を用いて求めた信頼区間を予測時間別信頼区間, 予測時間・予測風速別標準偏差を用いて求めた信頼区間を予測時間・予測風速別信頼区間と呼ぶ.



(a) 予測時間別信頼区間



(b) 予測時間・予測風速別信頼区間

図4 エリアにおける信頼区間付き予測結果  
(信頼水準=68.3%, 当日6時間先予測, 2006年2月)

図4に各手法による2006年2月において, 6時間先予測について68.3%信頼区間付き予測を観測値とともに示す。(a)が予測時間別信頼区間, (b)が予測時間・予測風速別信頼区間である. 信頼区間の幅は両手法で大きく異なるが, (b)では予測風速に応じた信頼区間となっているため, 低風速時において信頼区間の幅

が狭くなっており, 状況に応じた信頼区間が求められているのが分かる.

### 3. 信頼区間の評価

本章では2章で行った信頼区間付き予測について従来提案されている評価指標を用いた評価を行うとともにその評価手法の持つ意味について考察する.

#### 3.1 評価指標

信頼区間の評価指標として Pinson et al.<sup>2)</sup>によって「信頼性(reliability)」「シャープネス(sharpness)」「分解能(resolution)」の3種類の指標が提案されている. ここではこれらの指標を説明し, 2.3で行った2種類の信頼区間を評価する.

##### (a) 信頼性

信頼区間の評価指標で最も基本的なものである. 理想的な信頼区間であれば, (4)式で定義される観測値が信頼区間に入る確率  $\hat{a}_k^{(\beta)}$  は信頼水準  $\beta$  に等しい.

$$\hat{a}_k^{(\beta)} = \frac{n_{k,1}^{(\beta)}}{n_{k,0}^{(\beta)} + n_{k,1}^{(\beta)}} \quad (4)$$

ここで,  $n_{k,1}^{(\beta)}$  は  $k$  時間予測において, 信頼水準  $\beta$  の信頼区間に入った観測値の数,  $n_{k,0}^{(\beta)}$  は外れた観測値の数を表す.

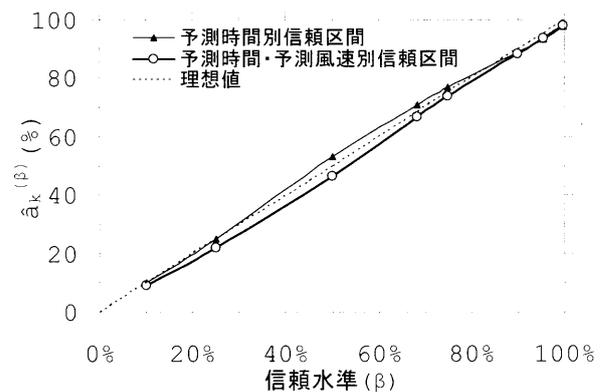


図5 信頼性ダイアグラム(当日6時間先予測, 2006年)

全ての信頼水準について, 信頼水準  $\beta$  と実際の観測値が信頼区間に含まれる確率  $\hat{a}_k^{(\beta)}$  が一致するとき, 信頼区間は理想的な信頼性を持つ. 信頼性は通常, 横軸に信頼水準  $\beta$ , 観測値が信頼区間に含まれる確率  $\hat{a}_k^{(\beta)}$  をプロットした図(信頼性ダイアグラム)で評価する.  $\hat{a}_k^{(\beta)}$  の値が  $\beta$  に近いほど, 信頼性の高い信頼区間付き予測を行っていると言える. 信頼性ダイアグラムから信頼区間の幅が過大評価傾向にあるか過小評価傾向にあるかがわかる.

図5に2006年における両手法の当日6時間先予測

の信頼性ダイヤグラムを示す。両手法とも、ほぼ理想的な信頼性を持つと言え、手法間に大きな差は見られない。

### (b) シャープネス

同じ信頼性を持つ信頼区間であれば、信頼区間の幅が狭い方がよい信頼区間付き予測であると言える。このための指標として、シャープネスが定義されている。シャープネスは信頼区間の幅(interval)の平均値により評価される。

$$\bar{\delta}_k^{(\beta)} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \delta_{t,k}^{(\beta)} \quad (5)$$

ここで、 $\delta_{t,k}^{(\beta)}$  は、時刻  $t$  における  $k$  時間先予測の信頼区間の幅である。

図 6 に 2006 年における当日 6 時間先予測の信頼区間の幅の平均値を信頼水準別に示したもの(シャープネスダイヤグラム)を示す。両手法間に大きな差は見られず、両手法で求めた信頼区間の幅はほぼ同程度であることが定量的にわかる。

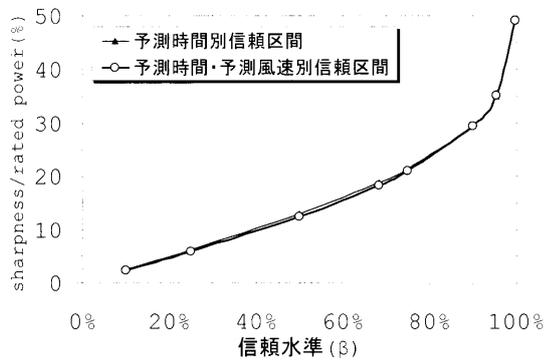


図 6 シャープネスダイヤグラム  
(当日 6 時間先予測, 2006 年)

### (c) 分解能

予測時間別信頼区間、予測時間・予測風速別信頼区間ともに信頼性、シャープネスはほぼ同程度であった。両手法の違いは 2.3 で議論したように、状況に応じて、幅の異なる信頼区間を提供できるかにある。このことを定量的に評価する尺度として、分解能が提案されている。同じ信頼性およびシャープネスを持つ信頼区間であれば、信頼区間の幅がより変動する信頼区間の方が、状況に応じた信頼区間を提供していると考えられるため、分解能は信頼区間の幅の標準偏差で評価される。

$$\sigma_k^{(\beta)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\delta_{t,k}^{(\beta)} - \bar{\delta}_k^{(\beta)})^2} \quad (6)$$

信頼性およびシャープネスが同程度であれば、この

値が大きいほど、状況に応じた信頼区間と言える。

図 7 に 2006 年における当日 6 時間先予測の信頼区間の標準偏差を信頼水準別に示したもの(分解能ダイヤグラム)を示す。すべての信頼水準において予測時間・予測風速別信頼区間の方が予測時間別信頼区間より大きな値となっている。これは予測風速別に異なった信頼区間の幅を推定しているためであり、予測時間・予測風速別信頼区間の方が、予測時間別信頼区間より状況に応じた信頼区間を提供していると言える。

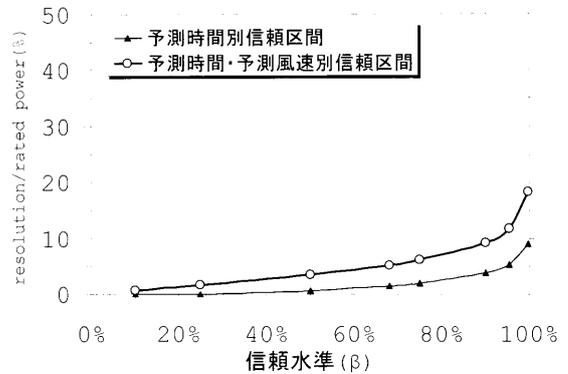


図 7 分解能ダイヤグラム(当日 6 時間先予測, 2006 年)

### 3.2 信頼区間に関する考察

前項で述べた 3 種類の評価指標だけでは、実用面から見たときの信頼区間の明確な優位性を示すことが難しい。そこで、観測値が信頼区間から逸脱した場合の逸脱の大きさを指標とした信頼区間の考察を行った。

観測値が信頼区間の上限値から逸脱したときの観測値と信頼区間の上限値の差を  $d_1$ 、観測値が信頼区間の下限値から逸脱したときの観測値と信頼区間の下限値の差を  $d_2$  とする。 $d_1$  は常に正の値をとり、 $d_2$  は常に負の値となる。 $d_1$  および  $d_2$  の定義を次式に、そのイメージを図 8 に示す。

$$d_1 = P_n^{meas} - P_n^{upper} \quad (7)$$

$$d_2 = P_n^{meas} - P_n^{lower} \quad (8)$$

ここで、 $P_n^{meas}$  は観測値が信頼区間から逸脱した場合の観測値、 $P_n^{upper}$  は信頼区間の上限値、 $P_n^{lower}$  は信頼区間の下限値である。

本研究では  $d_1$  および  $d_2$  の平均値を信頼区間付き予測の評価指標として用いた。信頼区間からの逸脱が小さい程、よい信頼区間付き予測であると考えられ、実用面からわかりやすい指標であると考えられる。なお、信頼区間としては 68.3% 信頼区間を用いた。

本研究で提案した 2 種類の信頼区間付き予測手法について 2006 年における  $d_1$  および  $d_2$  の分布を図 9 に示す。図 9 のグラフにおいて右半分が  $d_1$ 、左半分が  $d_2$  に対応する。表 1 に  $d_1$  および  $d_2$  の平均値を示す。

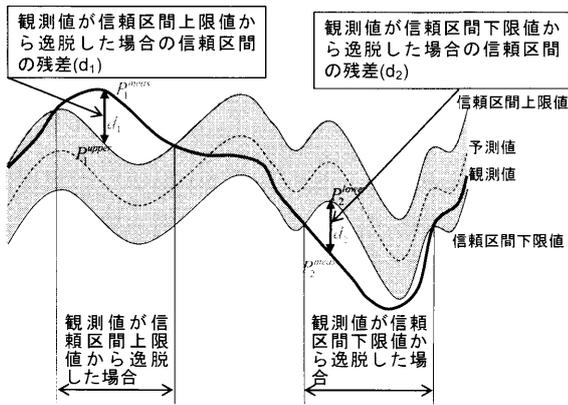


図8 信頼区間の残差の説明

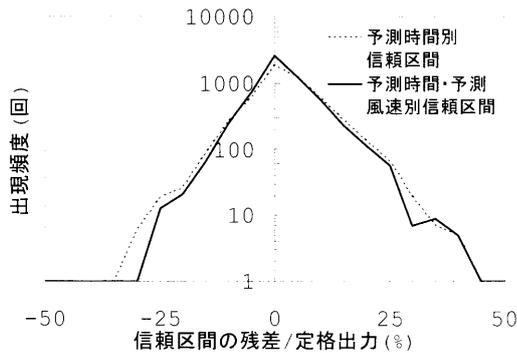


図9 信頼区間からの逸脱時における信頼区間の残差分布(信頼水準=68.3%, 当日6時間先予測, 2006年)

表1 エリアにおける信頼区間の評価結果

(信頼水準=68.3%, 当日6時間先予測, 2006年1月~12月)

評価指標	k 別 <sup>*1</sup>	uk 別 <sup>*2</sup>
信頼性( $\hat{a}_k^{(\beta)}$ )	70.69	66.58
シャープネス( $\bar{\delta}_k^{(\beta)} / \text{rated power}[\%]$ )	18.85	18.31
分解能( $\sigma_k^{(\beta)} / \text{rated power}[\%]$ )	1.55	5.27
観測値-信頼区間上限値( $d_1$ ) 平均 <sup>*</sup> [%]	6.49	6.08
観測値-信頼区間下限値( $d_2$ ) 平均 <sup>*</sup> [%]	-4.83	-4.10

\*1 k 別: 予測時間別信頼区間

\*2 uk 別: 予測時間・予測風速別信頼区間

図9および表1より, 予測時間別の信頼区間に比べ, 予測時間別・予測風速別の信頼区間の方が,  $d_1$  の平均値,  $d_2$  の平均値とも小さくなっており, 分解能が高い信頼区間付き予測の方が, 信頼区間からの逸脱も小さい。これは, 図9からわかるように, 信頼区間からの逸脱が大きい予測の頻度が低下したためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では, 電力系統制御エリアにおける信頼区間付き風力発電出力予測について, 予測時間別発電出力予測誤差の標準偏差に基づく手法および予測時間・予

測風速別予測誤差の標準偏差に基づく手法を提案した。また, これら2種類の信頼区間について従来提案されてきた手法による評価を実施するとともに, 観測値が信頼区間から逸脱した場合の逸脱の大きさを指標とした信頼区間の評価を実施した。その結果, 以下の結論を得た。

- 1) 予測時間・予測風速別信頼区間と予測時間別信頼区間とを比較した場合, 信頼性及びシャープネスは同程度であるが, 分解能は前者の方が高く, 状況に応じた信頼区間となることが明らかになった。
- 2) 分解能が高い予測時間・予測風速別信頼区間付き予測は, 信頼区間から逸脱する大きさも小さいことが明らかになった。

#### 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO 技術開発機構)の委託事業である「風力発電電力系統安定化等技術開発—気象予測システム—気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発」の研究の一環として実施したものである。

#### 文献

- 1) 石原孟, 山口敦, 小川豪, 酒井和也, 藤野陽三, 電力系統制御エリアを対象とした新しい風力発電出力予測モデルの開発, 第28回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.180-183, 2006.
- 2) P. Pinson, G. Kariniotakis, H. A. Nielsen, T. S. Nielsen, and H. Madsen. Properties of Quantile and Interval Forecasts of Wind Generation and their Evaluation. Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition, Athens, 2006.