

# 電力系統制御エリアを対象とした風力発電出力予測モデルの適用可能性に関する研究\*

Applicability of Wind Power Prediction Model for Control Area

山口 敦\*\* , 石原 孟\*\* , 小川 豪\*\* , 酒井 和也\*\* , 藤野 陽三\*\*

Atsushi YAMAGUCHI , Takeshi ISHIHARA , Takeshi OGAWA , Kazuya SAKAI , Yozo FUJINO

## 1. 緒言

我が国の平成 22 年度における風力発電導入目標量は、300 万 kW とされている(総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会報告書, 平成 13 年 6 月)。この目標量を達成するために風力発電の導入促進が図られているが、その阻害要因として風の変動に伴う出力変動に起因する電力系統の周波数変動問題がある。本問題を解消するための電力系統安定化対策に係る基盤技術の一つに、気象予測に基づく風力発電出力予測システムの導入があり、風力発電先進地域のデンマークおよびドイツでは、風力発電出力予測技術がすでに実用化され、導入量の拡大並びに系統運用コストの削減に大きく貢献している。

東京大学では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により「気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発」事業を 2005 年度より 3 カ年計画で実施している。本事業において開発する風力発電出力予測システムは、ウィンドファーム(以下、WF と略す)の総発電出力データ、数値気象予報データ、WF 情報(風車情報、地形情報等)を入力データとし、風力発電出力の翌日予測および当日予測を行う。

本研究では、2005 年度に実施した既存の電力系統制御エリア(以下、エリアと略す)を対象とした風力発電出力予測モデルのベンチマークテスト結果を基に、エリアを対象とした風力発電出力予測モデルの特性および問題点を明確にする。

## 2. ベンチマークテストの概要

表 1 にベンチマークテストの概要を示す。ベンチマーク対象モデルは、東京大学が開発した東京大学モデル<sup>[1]</sup>(以下、東大モデルと略す)およびデンマーク工科大学が開発した WPPT モデル<sup>[2]</sup>である。これらモデルの概要については第 3 節で述べる。ベンチマーク対象 WF は、東北地方にある WF から尾根、丘陵、山岳等

の地形特性を考慮して 6 箇所の WF を選択した(図 1)。A および C サイトは尾根、B および E サイトは丘陵、H および I サイトは山岳にそれぞれ位置する。また、6WF の定格出力の合計値(166,500kW)をエリアの定

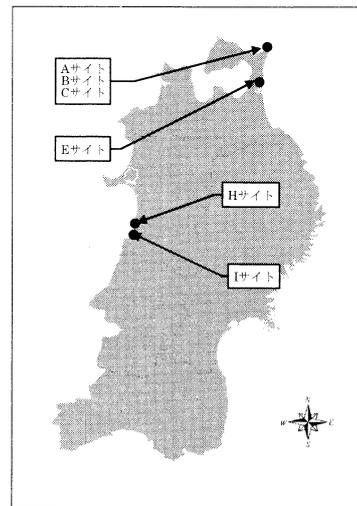


図 1 ベンチマーク対象 WF 位置

表 1 ベンチマークテストの概要

項目	概要
対象モデル	①東大モデル ②WPPT モデル
対象 WF	東北における 6WF(図 1)
対象期間	2005 年 2,4,7,10 月の各 1 ヶ月(データ入手期間: 2005 年 1 月~2005 年 12 月)
風車, WF 情報など	各 WF の重心位置, ハブ高さ, 風車仕様 地形データ(国土地理院 50m 標高データ), 土地利用データ(国土地理院 100m メッシュ基準)
入力データ	気象庁 RSM-GPV データ 各 WF における総発電出力 30 分平均値(データ欠測時は発電出力=0 として推定)
評価データ	6WF の総発電出力 30 分平均値の合計値(データ欠測時は発電出力=0 として推定)
学習	対象期間以外の観測データ
予測値	WF およびエリア総発電出力の 30 分平均値
予測時刻	翌日予測: 毎日午前 6 時 00 分 当日予測: 毎時 00 分および 30 分
予測期間	翌日予測: 翌日 0 時から 24 時までの 24 時間 当日予測: 予測発表時刻から 24 時間先まで

\* 第 28 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\*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

格出力、発電出力の合計値をエリアの発電出力とみなし、これらの合計値に対してベンチマークの評価を行った。ベンチマーク対象期間は、2005年2,4,7,10月であり、翌日予測とは、前日6時に翌日0時から24時までの30分平均発電出力を30分毎に予測し、当日予測とは、毎時00分、30分に24時間先の30分平均発電出力を30分毎に予測するものである。

### 3. ベンチマーク対象予測モデル

本ベンチマークテストで採用した東大モデルは、我が国の複雑な地形に適応可能なメソスケール気象予測モデルの結果を基にエリア発電出力を予測する。また、WPPTモデルはデンマークにおいて現業で利用され、エリア発電出力予測モデルとして実績がある。以下に各モデルの概要を示す。

#### (1) 東大モデル

東大モデルは、まず、過去の風速の予測値とWF総出力の観測値からWFパワーカーブを求める。次に、広域地形、土地利用データを境界条件とし、気象庁RSM予測値を基に、メソスケール気象モデル(RAMS)で水平解像度が1kmの風向・風速をネスティングにより予測する。これらの値を基に(1)式によりWFパワーカーブによる発電出力を予測する。最後に、WFパワーカーブによる発電出力予測値とオンライン観測データを組合せ、(2)式によりWFの総発電出力を補正する。東大モデルの予測フローを図2に示す。

$$P_{t+k}^{pc} = f(u_{t+k}^{pred}) \quad (1)$$

$$P_{t+k}^{pred} = a(k)P_t^{meas} + b(k)P_{t+k}^{pc} \quad (2)$$

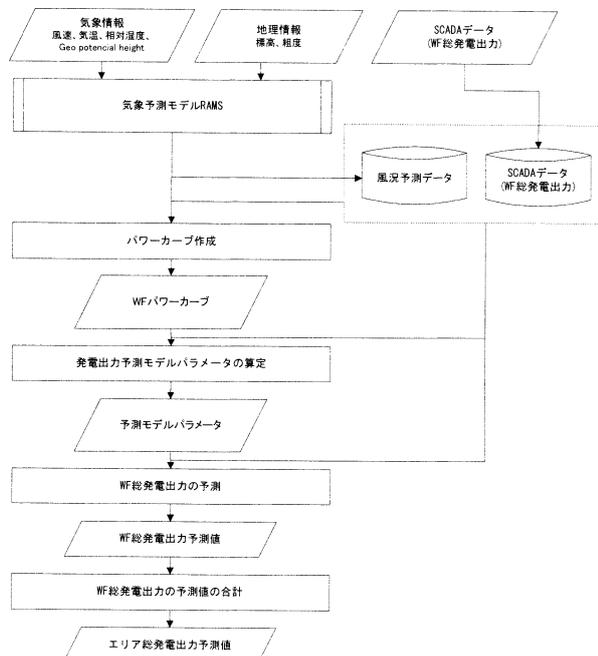


図2 東大モデルの予測フロー

ここで、 $P_{t+k}^{pc}$ は時刻  $t+k$  におけるパワーカーブモデルによる発電出力予測値、 $u_{t+k}^{pred}$ は風速予測値、 $P_{t+k}^{pred}$ は時刻  $t+k$  における発電出力予測値、 $P_t^{meas}$ は時刻  $t$  における発電出力実測値である。なお、 $f(u)$ および  $a(k)$ 、 $b(k)$ は2005年のベンチマーク対象月以外の8ヶ月間における予測値および観測値を用いて最小二乗法により求めた。

#### (2) WPPTモデル

WPPTモデルは1994年にIMM(デンマーク工科大学数理情報モデリング研究所)によって開発された統計的手法および動的適合モデルを用いた予測システムである。本システムでは、まず、数値気象予報データ(風向・風速)および現地観測データ(発電出力)を入力値とし風向別のWFパワーカーブを動的に求め、(3)式によりWFパワーカーブによる発電出力を予測する。そしてWFパワーカーブによる発電出力予測値とオンライン観測データを組合せ、(4)式によりWFの総発電出力を動的に補正する。WPPTモデルの予測フローを図3に示す。

$$P_{t+k}^{pc} = f(u_{t+k|t}^{pred}, \theta_{t+k|t}^{pred}, k) \quad (3)$$

$$P_{t+k}^{ppp} = a(\theta_{t+k|t}^{pred}, k)P_t^{meas} + b(\theta_{t+k|t}^{pred}, k)P_{t+k}^{pc} + c^c(\theta_{t+k|t}^{pred}, k)\cos\frac{2\pi h_{t+k}^{24}}{24} + c^s(\theta_{t+k|t}^{pred}, k)\sin\frac{2\pi h_{t+k}^{24}}{24} \quad (4)$$

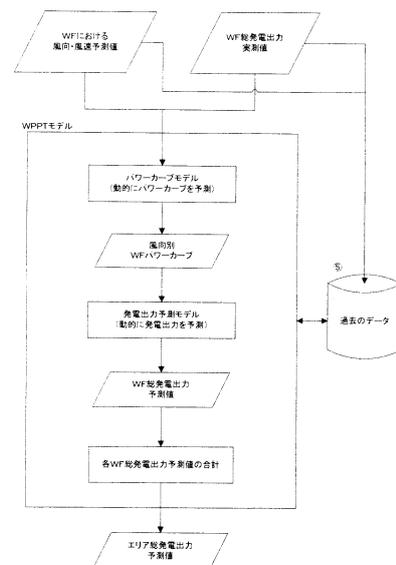


図3 WPPTモデルの予測フロー

ここで、 $P_{t+k}^{pc}$ は時刻  $t+k$  におけるパワーカーブモデルによる発電出力予測値、 $u_{t+k|t}^{pred}$ 、 $\theta_{t+k|t}^{pred}$ はそれぞれ時刻  $t$  における  $k$  時間後の風速予測値、風向予測値、 $P_t^{meas}$ は時刻  $t$  における風力発電出力予測モデルによる発電出

力予測値,  $P_i^{meas}$  は時刻  $t$  における発電出力実測値,  $h_{t+k}^{24}$  は時刻  $t+k$  における時刻である.  $f(u, \theta, k)$  および  $a(\theta, k)$ ,  $b(\theta, k)$ ,  $c^c(\theta, k)$ ,  $c^s(\theta, k)$  は, 逐次最小二乗法により予測時刻以前の予測値と観測値を用いて動的に決定する.

表 2 に各モデルの比較を示す. 東大モデルでは, 気象モデルの水平解像度は 1km であり, 動的適合モデルは適用していない. 一方, WPPT モデルでは気象モデルの水平解像度は 20km であり, 動的適合モデルを適用している. 本研究では, これらのモデルの違いが予測精度に与える影響を明らかにした.

表 2 各モデルの比較

項目	東大モデル	WPPT モデル
当日予測短期補正手法	予測開始時刻 30 分前の実測データを元に補正	
パワーカーブモデル	各 WF の総発電出力と気象予測データから統計処理によりデータベース化	各 WF の総発電出力と気象予測データから動的にパワーカーブモデルを WF 毎に作成
気象モデル水平解像度	1km	20km
動的適合モデル	今回適用せず	適用
学習期間	予測対象期間を除く 2005 年 1 月から 2005 年 12 月までの 8 ヶ月間	2005 年 1 月から予測開始前まで

#### 4. 予測誤差の評価方法

予測誤差の評価は, (5)式および(6)式に示すエリア全体の平均誤差(ME), 平均二乗誤差(RMSE)をエリア全体の定格出力で無次元化した値で行った.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{pred} - P_i^{meas})}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i^{pred} - P_i^{meas})^2}{n}} \quad (6)$$

ここで,  $P_i^{pred}$  は  $i$  番目の予測値,  $P_i^{meas}$  は  $i$  番目の実測値,  $n$  は予測回数である.

また, (7)式で定義する持続モデルの改善率(SS)も評価に用いた.

$$SS = \frac{P_{error} - M_{error}}{P_{error}} \quad (7)$$

ここで,  $P_{error}$  は持続モデルの平均二乗誤差であり,  $M_{error}$  は予測モデル(東大モデルまたは WPPT モデル)の平均二乗誤差である. 持続モデルとは, ある時刻  $t$  における実測値がそのまま継続すると予測するモデルのことであり, その予測値  $P_{t+k}^{persist}$  は(8)式により表される.

$$P_{t+k}^{persist} = P_t^{meas} \quad (8)$$

#### 5. ベンチマークテスト結果

##### (1) 翌日予測

図 4 に 2005 年 2 月における翌日予測の時系列グラフを示す. 2 月 3 日から 11 日にかけては観測値が周期的に変化しており, 両モデルともその変化に応じて予測している. しかし, 観測値の変化に対する追従性は, WPPT モデルより東大モデルの方が高い. 図 5 には翌日予測の予測誤差を示す. 図 5 より, 予測時間の増加と共に予測誤差も増加する傾向があり, 各図より, 翌日予測に関しては, WPPT モデルより東大モデルの方が予測精度が高いことが分かる. これは, 東大モデルの気象モデルの水平解像度が WPPT モデルより高いことによる効果と考えられる.

気象モデルの水平解像度の違いによる予測精度の違いを確認するため, WPPT モデルに用いる気象モデルの水平解像度を東大モデルと同じ 1km に高めて評価を行った. その結果を WPPT(高解像度)として, 図 5 に併記している. WPPT(高解像度)の予測誤差は, WPPT の予測誤差と比較して, 全ての予測時刻において小さくなっており, 気象モデルの高解像度化による効果が現れている.

これらの傾向は他の評価月においても確認することが出来た. 表 3 の評価各月における予測誤差および改善率から, おおむね東大モデルの方が予測精度が高いことが分かる.

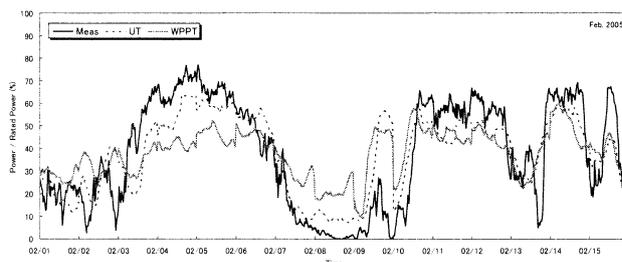


図 4 翌日予測時系列

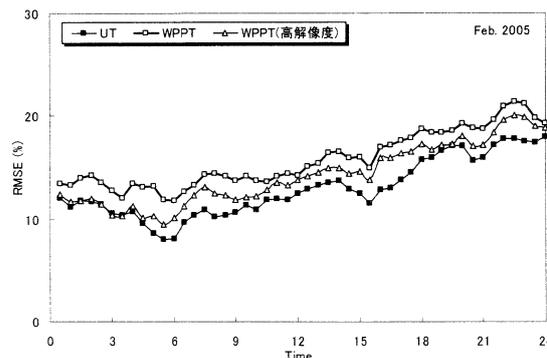


図 5 翌日予測誤差

表 3 予測誤差および改善率(翌日予測平均値)

対象月	ME(%)		RMSE(%)		改善率(%)	
	東大	WPPT	東大	WPPT	東大	WPPT
2005/2	2.55	3.00	12.94	15.76	52.00	41.34
2005/4	5.65	0.03	12.43	10.62	40.76	49.45
2005/7	1.52	-2.46	12.10	13.28	41.24	36.04
2005/10	1.65	-1.62	10.61	13.50	51.23	37.77

(2) 当日予測

図 6 に 2005 年 2 月における当日予測(6 時間先)の時系列グラフを示す. 両モデルとも翌日予測と比較して, 予測精度が高く, モデルの違いによる予測差も小さい, 図 7 に当日予測の予測誤差を示す. 予測時間が 3 時間先程度までは, 予測時間の増加と共に予測誤差が大きく増加し, それ以上の予測時間では, その増加率が小さくなっている. また, 当日予測の数時間程度の短時間予測に関しては, 東大モデルより WPPT モデルの方が予測精度が若干高いことが分かる. これは, WPPT モデルでは, 動的補正手法を用いているためと考えられる.

図 7 には, 翌日予測と同様, WPPT(高解像度)の予測誤差も示している. WPPT(高解像度)の予測誤差は, WPPT と比較して, 6 時間先程度の短時間予測においては, あまり差がないものの, 予測時間の増加とともにその差が顕著となり, 気象モデルの高解像度化による効果は当日予測においても見られた.

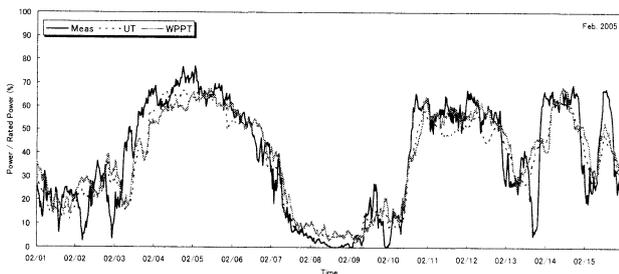


図 6 当日予測時系列(6 時間先)

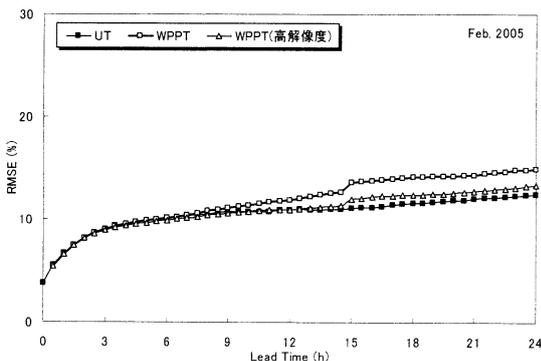


図 7 当日予測誤差

表 4 予測誤差および改善率(当日予測 6 時間先)

対象月	ME(%)		RMSE(%)		改善率(%)	
	東大	WPPT	東大	WPPT	東大	WPPT
2005/2	1.67	2.00	10.06	10.12	35.66	35.27
2005/4	4.05	-0.37	10.21	9.09	23.33	31.72
2005/7	0.61	-0.06	9.06	8.85	23.00	24.62
2005/10	2.28	-0.67	8.61	9.64	37.75	30.30

表 4 に評価各月における当日予測 6 時間先の予測誤差および改善率を示す. 6 時間先の予測誤差では, 両モデルでほとんど差がない.

6. まとめ

本研究には, エリアを対象とした風力発電出力予測モデルのベンチマークテストを実施し, 既存モデルの特性および問題点を明確にした. その結果, 以下の結論が得られた.

- 1) 翌日予測誤差は, WPPT モデルと比較して東大モデルの方が小さいことが明らかとなった. これは, 東大モデルにおける気象モデルの水平解像度が WPPT モデルより高いためと考えられる. このことから, 我が国のような複雑地形において, 翌日予測の精度を高めるためには, 気象モデルの水平解像度を高める必要があることが分かった.
- 2) WPPT モデルの当日短時間予測誤差は, 東大モデルより若干小さいことが明らかとなった. これは, WPPT モデルでは, 動的適合モデルを用いているためと考えられる. このことから, 当日短時間予測の予測精度を高めるためには, 動的適合モデルを用いる必要があることが分かった.

謝 辞

本研究は新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)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] 山口敦, 石原孟, 福本幸成, 気象予測に基づく風力発電出力予測システムの開発と実測による検証, 第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, pp.245-248, 2005

[2] Torben Skov Nielsen, Using Meteorological Forecasts in On-line Predictions of Wind Power, Institute of Mathematical Modelling Technical University of Denmark, 1999