

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*

Wind Energy Forecast based on Meteorological Forecast and its Verification by Onsite Measurement

山口敦** 石原孟** 福本幸成***

Atsushi YAMAGUCHI** Takeshi ISHIHARA** and Yukinari FUKUMOTO

1. はじめに

電気系統においては需要と供給の一致が要求されるが、風力発電出力は風に応じて変動するのに加え、出力変動をあらかじめ知ることができないため、電力の需給計画策定や当日のリアルタイムオペレーションにおいて不確実性の一因となっている。風力発電導入先進国であるデンマーク、ドイツなどでは数値気象予報データおよびリアルタイム発電出力観測に基づき風力発電出力の翌日予測および当日予測が行われ¹⁾、翌日の需給計画策定、当日のリアルタイムオペレーションに利用されている。しかし、地形が平坦で安定した偏西風の吹く北部ヨーロッパで開発された手法を地形が複雑で台風などの自然条件が厳しい日本に適用するためには問題が残されている。本研究では、気象庁が提供する数値気象予報と現地観測データからリアルタイムに風力発電出力を予測するシステムを構築し、日本に適用可能な発電出力予報手法を提案するとともに、その精度を検証する。

2. 対象地点の概要

本研究では(株)東京電力の八丈島風力発電所(Enercon 社製 500kW 風車)を対象とした。



図1 八丈島の位置と八丈島風力発電所の位置

図1に示すように八丈島は東京の南約300kmに位置し、秋季には台風がしばしば到来するため、激しい気象変動が発電出力予測の精度に与える影響を評価することができる。また、同発電所は図2に示すように三原山中腹の複雑地形中に建設されているため、複雑地形中での発電出力予測精度の検

証を行うことができると期待される。

3. オンライン観測およびデータ収集システムの概要

リアルタイム発電出力予測を行うためには、気象機関が提供するオンライン数値予報データならびにウィンドファームにおける発電出力の観測データをリアルタイムに収集する必要がある。本研究では前節で述べた八丈島風力発電所を対象に、オンライン観測システムを構築するとともに、八丈島風力発電所で観測されたデータと気象庁が気象業務支援センターを通じて提供する数値気象予報データをリアルタイムに収集するシステムを構築した。

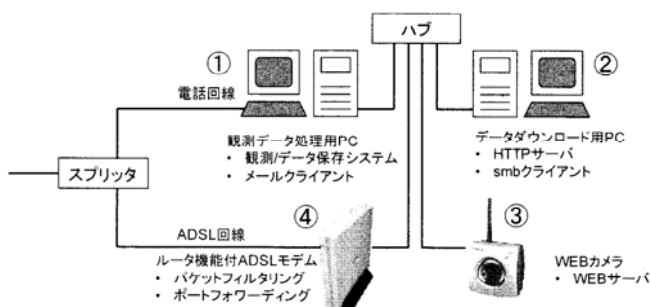


図2 観測システムの概要

図2に観測システムの概要を示す。本システムでは表1に示すデータを観測・収集した。基本情報のナセル風速・方向、発電出力はリアルタイム発電出力予測に用い、付随情報の回転数および出力制限値は後述のパワーカーブモデルの構築に用いた。これらの情報は風車タワー内部の端子から出力されるアナログ信号を、図2に①で示した観測用PCからA/D変換機を通じて取得した。取得したデータは観測システム内に構築したLANに公開され、②で示したデータダウンロード用PCによりwebサーバを通じて外部に配信される。また、ネットワークカメラ③により取得された動画はカメラ内蔵のwebサーバを通じて外部に配信される。LANとインターネットは④のルータ機能付きADSLモデムによりADSL回線を通じて接続されている。外部からの不正アクセスを防止するため、ルータにおいてパケットフィルタリングを実施し、必要なポートへの許されたアドレスからのリクエストのみを各サーバに転送す

* 第27回風力エネルギー利用シンポジウムで発表

東京大学大学院工学系研究科 * (株)東京電力技術開発研究所

る。

オンライン数値気象予報データとしては気象業務支援センターから配信されるデータを用いた。現在日本で利用可能なオンライン気象予報データを表2に示す。MSMデータは現在利用可能な数値予報値の中で最も解像度が高いが、予報時間が17時間と短いため、翌日予測に用いるには不十分である。本研究では、翌日予測には51時間先まで予測値が得られるRSMデータを、当日予測にはより高解像度で高頻度に配信されるMSMデータを用いた。

表1 本観測システムで取得されるデータの一覧

分類	観測項目	データ仕様
基本情報	ナセル風速, ナセル方向, 発電出力	10 分間統計値
付随情報	回転数, 出力制限値	10 分間統計値

表2 日本で利用可能な数値気象予報データ

データ	RSM	MSM
水平・時間解像度	40km・3 時間(気圧面) 20km・1 時間(地表面)	20km・3 時間(気圧面) 10km・1 時間(地表面)
初期値	0900, 2100 (JST) (1 日 2 回)	0300, 0900, 1500, 2100 (JST) (1 日 4 回)
予報時間	51 時間	17 時間
配信時刻	初期値から 6 時間後	初期値から 3 時間後

4. 風力発電出力予測システムの概要

図3に本研究で構築した予報システムを示す。まず、システムの入力値は気象庁提供の数値気象予報データ(GPV データ)と風力発電所における風向・風速・発電出力の実観測データであり、双方のデータともにインターネット(FTP, HTTP)を通じリアルタイムに取得を行う。本システムでは八丈島風力発電所におけるオンライン観測データを HTTP で、数値気象予報データを FTP でそれぞれ取得する。

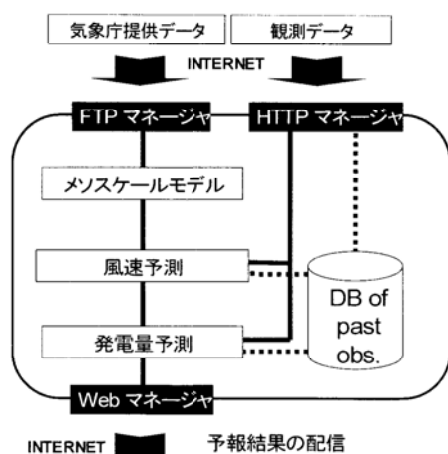


図3 システム概略図

図4に翌日予測を行う場合のシミュレーションスケジュールを示す。まず、RSMデータは日本時間の3時および15時にそれぞれ翌々日の0時および12時までの予報値が入手可能

となる。午前3時に配信されるデータを元に発電出力予測を行うことにより、毎朝6時前に、翌日の需給計画策定に用いる翌日0時から翌々日0時までの風力発電出力を予測することができる。当日予測を行う際には、これに加えて1日4回配信されるMSMデータに基づくシミュレーションと風力発電所におけるリアルタイム観測データを取り込む。また、風速と発電出力との関係であるパワーカーブモデルを構築するために、過去の風速と発電出力の関係をデータベースに保存する。当日・翌日の発電出力の予測値は、web マネージャにより可視化され、web ページとして出力される。

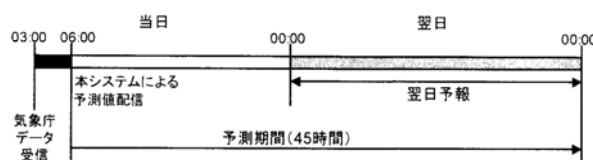


図4 翌日予測のスケジュール

5. 風の予測

5.1 局所地形の影響の評価

ヨーロッパで開発された風力発電予測システムでは、各国の気象予報機関が提供する水平解像度が数十km程度の数値気象予報データを直接風の予測値として用いるものが主流である。これは北部ヨーロッパの風車が多く建設されている地域では地形が比較的平坦であり、数十kmの解像度の気象予報データが風況を精度良く再現できるためである。日本においては地形が複雑であり、風は地形の影響を受けて局所的に大きく変化するが、日本において利用可能な数値気象予報データの最高解像度は表2に示す通り、気象庁RSMモデルの20kmである。このため、局所地形の影響を考慮に入れた高解像度の予報データにダウンスケーリングを行う必要がある。

本研究ではまず、メソスケール気象モデルRAMS (Regional Atmospheric Modeling System)²⁾を用い、3段階にネステイングされたグリッド(図5)により、水平解像度1kmの解像度を持つ予測値にダウンスケーリングを行った。

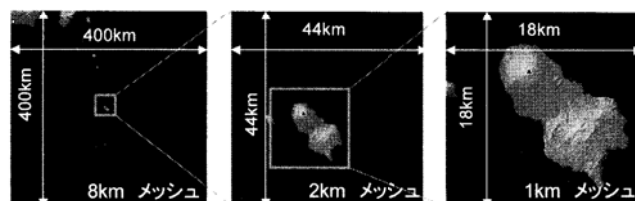


図5 メソスケール気象モデルRAMSの計算グリッド

図6には気象庁提供の水平解像度20kmのRSMデータを風車地点に内挿した予測値とメソスケールモデルRAMSにより水平解像度1kmまでにダウンスケーリングした予測値を観測値と比較したものを示す。11月3日21時から4日21時付近までは風速が徐々に減少しているが、両者ともこの現象を

よく捉え、観測データと同じ傾向が見られる。ところが、観測データによると11月4日21時過ぎに風向が西から北に変化した際に風速が大きく減少しているが、気象庁提供のRSMデータはこの現象を捕らえられていないのに対し、地域気象モデルRAMSによりダウンスケーリングした予測値はこの現象を捉えている。これは風力発電所の北側に位置する三原山による風速の減少の効果を気象庁提供の予報データが予測できないためである。このことから、日本における複雑地形中の発電出力予測のためには水平スケール1km程度にまでダウンスケーリングする必要があることがわかる。

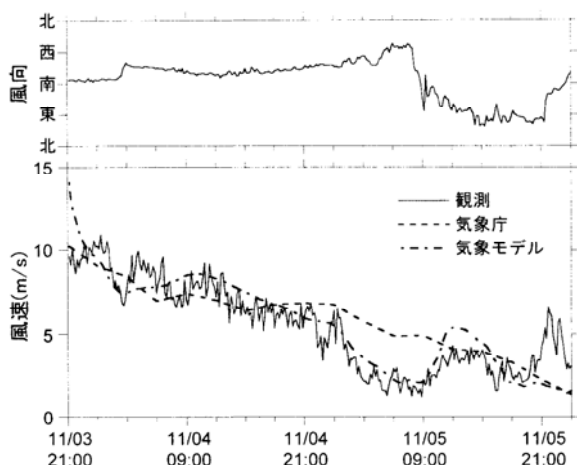


図6 八丈島風力発電所における風向と風速

5.2 風向別変換係数法による高速化

メソスケール気象モデルにより局所地形の影響を評価する手法は、物理現象を時系列に沿って忠実にシミュレーションするため、多大な計算機能力が必要となる。本研究の場合には、気象庁が提供するRSM予報データ51時間分を3段ネスティングにより水平解像度1kmにダウンスケーリングする際に8CPUの並列計算機を用いて2時間程度の時間が必要となり、大きな計算負荷が生じる。本研究では局所地形の影響を風向別にあらかじめ計算し、変換係数を求めることにより、高速に局所地形の影響を予測値に反映させることを試みた。

まず、2004年10月から12月の3ヶ月にわたり、メソスケール気象モデルRAMSによる解析を行い、風車建設地点における風速の時系列を求めた。次に風車設置地点におけるRAMSにより求めた風速と、風車設置地点に最も近い格子点における数値気象予報データの風速との比を風向別に求めた。このようにして求めた風速比は局所的な地形による風向別の増速および減速の効果を表しており、求めた風速比を数値気象予報データの風速に乘じることで局所的な地形効果を考慮できる。従来のメソスケール気象モデルRAMSによるシミュレーションでは、8CPUの並列計算機で2時間程度の計算時間を要したが、本手法ではあらかじめ求めた風速比を風向別に乘じるだけなので、PC1台を用いて数秒で局所地形の効果を考慮することが可能となる。

この考えに基づき、2005年1月における八丈島風力発電所での風速を予測し、平均絶対誤差を従来の手法と比較したのが図7である。全ての予測時間で両者とも予測精度にほとんど差がないことがわかる。また、これらの手法に基づき、発電出力を予測した結果、翌日発電出力予測の平均絶対誤差(Mean Absolute Error)は両者とも、数値気象予報データを直接を用いる場合と比較し、27%から17%に改善された。

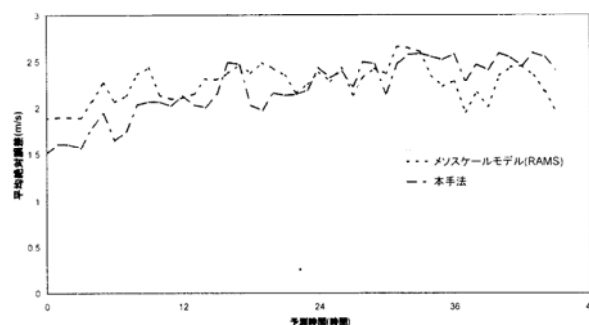


図7 八丈島風力発電所における2005年1月の風速の平均絶対予測誤差

5.3 気象変動の影響

予測誤差の原因を詳しく調べるために10月と11月の日平均風速を図8に示す。翌日予測値は概ね気象現象を的確に予測しているが、10月初期に風速を大幅に過大評価している日がある。これは気象庁提供の予報データが、台風の到来を実際よりも早目に予報したためであり、今後の予測精度の向上には台風到来時期の予報精度の向上が望まれる。

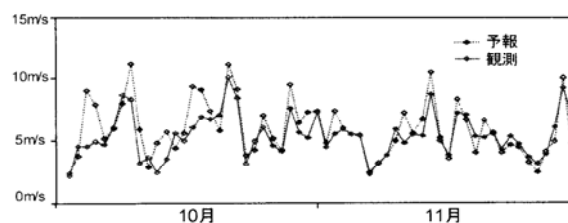


図8 八丈島風力発電所における日平均風速

6. 風力発電発電出力の予測

6.1 風力発電出力の翌日予測

以上述べた翌日の風速の予測結果に基づき、翌日の発電出力を予測する際には予測された風速を発電出力に変換する必要がある。風速と発電出力との関係はパワーカーブと呼ばれ、風車メーカーが提供する数値があるが、実際の風速と出力の関係は風車メーカーが提供するパワーカーブとは異なる。図9は八丈島風力発電所における発電出力と風速との関係である。実際の出力はメーカー提供のパワーカーブを下回っていることがわかる。本研究では過去の発電出力と風速との関係をデータベースとして蓄積し、蓄積されたデータの平均からパワーカーブを求め、予測された風速を発電出力に変換する際に用いた。なお、本研究で対象とした八丈島風力

発電所は系統容量の制約から主に夜間において発電出力の制限を行っている。このため、パワーカーブの構築にあたっては表 1 に示す付随情報を用いて、発電出力制限が実施されていない時期のデータのみを選別して用いた。

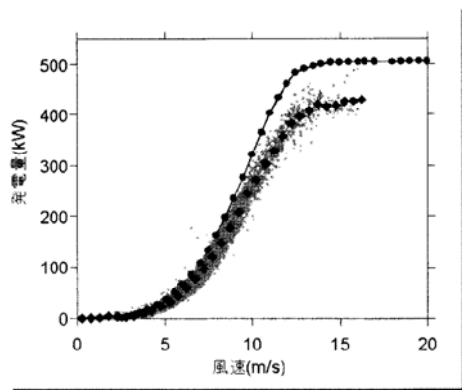


図 9 発電出力と風速との関係

6.2 風力発電出力の当日予測

数値気象予報データに基づき求めた予測値は必ず誤差を伴う。このため、予測時間が短い場合には、気象予測に基づく予測値よりも最新の観測値の方が実際の出力に近い。したがって、現在から 24 時間先の風力発電出力を予測する当日予測の際には、数値気象予報に基づき予測した発電出力とオンラインデータ収集によって得られた最新の発電出力の実測値を組み合わせることが有効である。そこで、本研究では気象モデルによる予測値と、最新の観測データを組み合わせることにより短期予測精度の改善を試みた。図 10 は 11 月 17 日午前 00 時における当日予測を示す。気象モデルによる予測では予測初期に大きな誤差が見られるが、本研究で提案した手法を用い最新の観測値を取り込むことによって短期予測の誤差が減少する。これは、数値気象予報データに基づく予測値は気象現象の時間変化を再現している一方、予測初期においては最新の観測値を予測値とすれば予報誤差はなくなるためである。

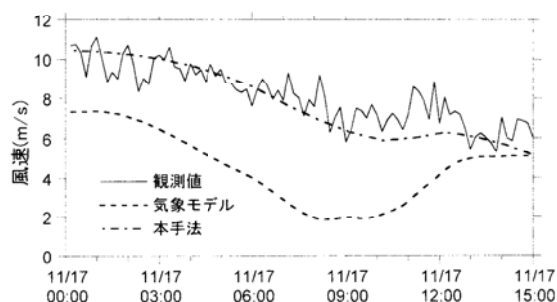


図 10 11 月 17 日 00 時における風速の当日予測

このようにして予測した風速を用い、過去の風速と発電出力との関係から発電出力を求め、予測時からの経過時間(予測時間)別の発電出力平均絶対誤差(Mean Absolute Error)の定格発電出力に対する相対誤差を求め、図 11 に示す。気象モデルによる予測では短期予測の予測誤差も大きいですが、本手法

により短期予測の精度が改善され、例えば 6 時間先予測に関しては予測誤差が 14%から 9%に削減された。

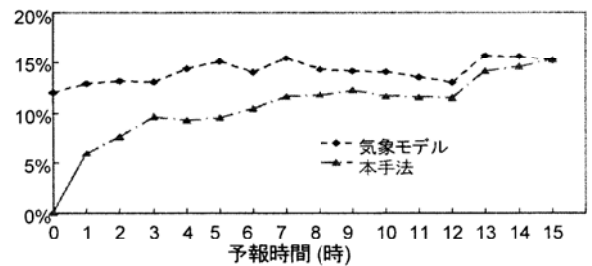


図 11 発電出力の当日予測の予測時間別精度

7. まとめ

本研究では、メソスケール気象モデルと現地観測データを用いた風力発電出力予測システムを構築し、以下の結論を得た。

- 1) 風力発電所における観測データおよび気象庁が提供する数値気象予報データをリアルタイムに取得し、発電出力予測を行い、配信するシステムを構築した。
- 2) メソスケール気象モデルにより局所地形の効果を再現し、気象庁提供の数値気象予報データをそのまま用いる場合と比較し、翌日予測の予測誤差を 27%から 17%に低減した。
- 3) 過去のメソスケール気象シミュレーションの結果から風向別の変換係数を求めることにより、高速に局所地形の効果を考慮する手法を開発した。この結果、予測精度を低下させずに、ダウンスケーリングにかかる時間を 2 時間から数秒に短縮することに成功した。
- 4) 気象庁予報データは台風到来時期を早目に予測する傾向があり、大きな予測誤差を生じる原因となっている。この点を改善することは今後の課題である。
- 5) 現地観測データを用いた新しい当日予測手法を提案し、6 時間先の発電出力の平均絶対予測誤差を 14%から 9%に改善した。

謝辞

本研究にあたり、東京大学大学院修士課程 2 年の Safat Al Deen 氏および東京大学 4 年(研究当時)の甲斐悠資氏に協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Lars Landberg et al., Short-term Prediction – An Overview, *Wind Energy*, vol. 6, pp. 273-280, 2003.
- 2) R. A. Pielke et al., A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol. 49, pp. 69-91, 1992.