

ARX モデルを用いた信頼区間付き最大瞬間風速予報手法の開発

東京大学	正会員	○	河原吉秀
東京大学	正会員		山口 敦
東京大学	正会員		三須弥生
東京大学	正会員		石原 孟

1. はじめに

スキー場などのレジャー施設では、強風時に運行のできないゴンドラが唯一の交通手段となっていることがあり、強風時には営業を休止する必要があるため、1日先までの高精度な風速の予報が重要である。

風力発電の分野では、電力系統の運用のために、1日先までの風速および風力発電出力を予測することが必要であり、世界的に多くの研究がなされている。Nielsen[1]はARXモデルを用い、数値気象予報データと現地観測データから1日先までの風力発電出力を予測するモデルを提案し、現在実務に用いられているが、風力発電出力を対象としているため、そのままでは最大瞬間風速の予報に適用できないのに加え、モデルパラメータが風速予報のために最適化されていないという問題点がある。また、予報には必ず誤差を伴うため、信頼区間付きの予報が望ましい。しかし、信頼区間付き最大瞬間風速予報手法は確立されていないのに加え、どの程度の信頼水準を用いるのが適切であるのか明らかにされていない。

そこで本研究ではARXモデルにより風速予報を行う際のモデルパラメータの最適化を実施するとともに、ゴンドラの運行規制に用いる信頼区間付きの最大瞬間風速予報手法を確立し、信頼区間の信頼水準が予報的中率および補足率に与える影響を定量的に評価することを目的とする。

2. 平均風速予報モデルとパラメータの最適化

本研究ではまず、ARXモデルを用いて数値気象予報データと現地観測データに基づき、平均風速を予報するモデルを構築した。

まず、局所風速変換モデル(1)により、気象庁が発表する数値気象予報データの予報風速を局所的な地形と粗度の影響を考慮した風速に変換する。

$$u_{t+k|t}^{\text{local}} = f_u(u_{t+k|t}^{\text{gpv}}, \theta_{t+k|t}^{\text{gpv}}) \quad (1)$$

次に風速補正モデル(2)により数値気象予報データに含まれる位相誤差を、現地観測データで補正することによって低減する。

$$u_{t+k|t}^{\text{pred}} = a_u(k, \theta_{t+k|t}^{\text{gpv}}) u_t^{\text{meas}} + b_u(k, \theta_{t+k|t}^{\text{gpv}}) u_{t+k|t}^{\text{local}} \quad (2)$$

上記の風速変換モデルならびに風速補正モデルを推定するために、本研究では漸化式の形に展開された忘却係数付きノンパラメトリック回帰[1]を用いた。この手法にはいくつかのモデルパラメータが含まれており、これらのパラメータを最適する必要がある。ここでは一例として、初期値の重みを示すパラメータ R_0 の最適化について述べる。

R_0 を小さくすると、関数が早く適切な値に収束するが、予報開始直後においては関数の推定値が不安定になり、予報開始直後の予報誤差が大きくなる。一方、 R_0 を大きくすると、関数の収束速度は遅くなるが、予報開始直後においては関数の推定値が安定していて、予報開始直後の予報誤差は小さい。このようなトレードオフの関係にあるため、 R_0 には最適値が存在すると考えられる。

図1に R_0 の値を、0.01から 10^6 まで変化させて予報を実施した場合に、あるゴンドラ沿線において5ヶ月間の風速の予測誤差(RMSE)がどのように変化するかを示す。 $R_0=100$ 程度の値を用いた場合に予報誤差が最も小さくなっていることがわかり、風速予報に関しては、 $R_0=100$ 程度の値を用いるのが最適であることがわかる。

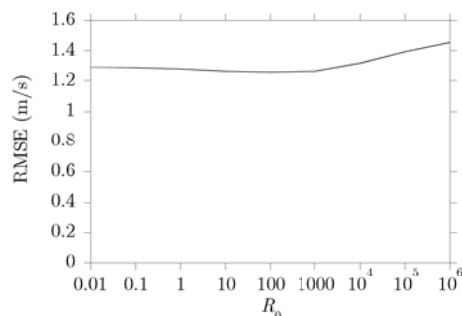


図1 R_0 と予報誤差との関係

3. 最大瞬間風速予報手法の提案

本研究では、時刻 t における k 時間先の最大瞬間風速 $\hat{u}_{t+k|t}$ を平均風速 $u_{t+k|t}$ 、変動風速 $\sigma_{t+k|t}$ およびピークファクタ p により(1)式のようにモデル化した。

$$\hat{u}_{t+k|t}^{\text{pred}} = u_{t+k|t}^{\text{pred}} + p \cdot \sigma_{t+k|t}^{\text{pred}} (u_{t+k|t}^{\text{pred}}, \theta_{t+k|t}^{\text{gpv}}) \quad (3)$$

ピークファクタ p はIshizaki[2]によって提案された(4)式によって求めた。

$$p = \frac{1}{2} \ln \frac{T}{t} \quad (4)$$

ここで、 T は平均風速の平均化時間であり、本研究では30分とした。また t は最大瞬間風速の平均化時間であり、本研究で対象としたサイトでは三杯風速計を用いて風速を計測していることから3秒とした。

変動風速 σ^{pred} は、平均風速と同様に、数値気象予報風速及び風向 $u_{t+k|t}^{\text{gpv}}$ 、 $\theta_{t+k|t}^{\text{gpv}}$ と現地観測風速 u_t^{meas} に基づきARXモデルを用いて予報した。

$$\sigma_{t+k|t}^{\text{local}} = f_{\sigma}(u_{t+k|t}^{\text{pred}}, \theta_{t+k|t}^{\text{pred}}) \quad (5)$$

$$\sigma_{t+k|t}^{\text{pred}} = a_{\sigma}(k, \theta_{t+k|t}^{\text{pred}}) \sigma_t^{\text{meas}} + b_{\sigma}(k, \theta_{t+k|t}^{\text{pred}}) \sigma_{t+k|t}^{\text{local}} \quad (6)$$

これらのモデル関数も、平均風速と同様に f_{σ} , a_{σ} , b_{σ} はノンパラメトリック回帰を用いて推定した。

以上の手法を用いて、ゴンドラ沿線の最大瞬間風速を予報した結果を図2の実線に示す。最大瞬間風速をおおむね予報できていることがわかる。この結果、予報時間別の予報誤差(RMSE)は図3に示す通り、2m/sから3m/s程度となっている。しかしながら、最大瞬間風速を過小評価している点も多い。この問題を解決するためには、信頼区間付予報が必要であり、その詳細については次節で述べる。

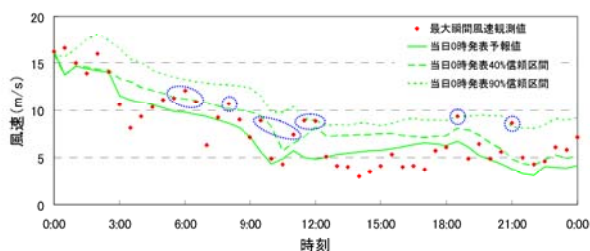


図2 2009年12月25日の最大瞬間風速予報

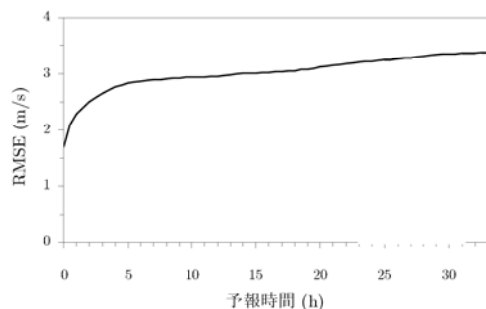


図3 予報時間別最大瞬間風速予報誤差

4. 信頼区間付予測手法の提案

前節で述べた問題点を解決するために、本研究では信頼区間付予報を提案した。信頼区間は予報誤差が正規分布に従うと仮定し、信頼水準 α の信頼区間上限値 $u_{t+k|t}^{\text{pred_qnt}(\alpha)}$ を(7)式によりモデル化した。

$$u_{t+k|t}^{\text{pred_qnt}(\alpha)} = u_{t+k|t}^{\text{pred}} + \beta \cdot \sigma_{\text{err}} \left(u_{t+k|t}^{\text{gpv}}, \theta_{t+k|t}^{\text{gpv}} \right) \quad (7)$$

ここで u^{pred} は予報値であり、 β は正規分布から求まる定数で80%信頼区間の場合は1.28となる。 σ_{err} は過去の予報誤差の標準偏差からノンパラメトリック回帰を用いて求める。

本手法を用いて40%信頼区間上限値及び90%信頼区間上限値を予報したものを図4に重ねて点線に示す。信頼水準が大きい値の信頼区間上限値を使えば、先ほど捕らえられなかった最大瞬間風速のピークを確実に捕らえることができる。しかし、実際の最大瞬間風速を過

大評価するという問題も同時に発生するため、実際の運用では最適な信頼水準を求める必要がある。

最適な信頼水準を求めるために、信頼水準を変化させた場合の強風イベントの的中率及び捕捉率を求めた。的中率とはある強風イベントを予報して実際に予報が当たる確率、捕捉率とは発生した強風イベントに対してそれを予報できていた確率を表す。これらを最大瞬間風速10m/s以上の強風イベントに対して、信頼水準 α ごとに求めた結果を図4に示す。

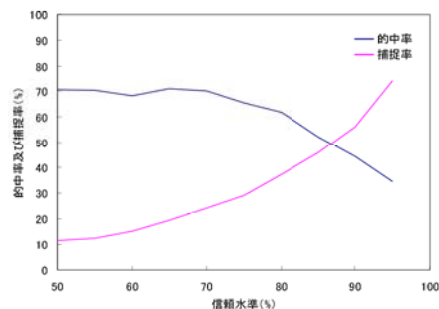


図4 10m/s以上の強風イベントの的中率及び捕捉率

大きな信頼水準の信頼区間上限値ほど捕捉率は大きくなるが、実際には強風が吹かない時も強風を予報してしまうため、的中率は小さくなる。このように的中率と捕捉率を定量的に明らかにしたことより、経済性や安全性など事業者の事情にあった信頼区間上限値を予報値として、鉄道やゴンドラなどの運行判断に利用することを可能にした。

5. 結論

本研究では、信頼区間付きの最大瞬間風速予報モデルを構築し、以下の結論を得た。

- 1) モデルパラメータの最適化を行い、平均風速予報の精度を向上させた。これにより予報誤差が30%低減し、誤差1.3m/s程度で12時間先までの平均風速が予報可能になった。
- 2) 平均風速予報手法を応用して、運行規制に用いるための最大瞬間風速予報手法を確立した。これにより予報誤差3m/s程度で12時間先までの最大瞬間風速が予報可能になった。
- 3) 最大瞬間風速の信頼区間予報手法を提案し、強風イベントの的中率と捕捉率を定量的に評価した。

参考文献

- [1] T. S. Nielsen, "Online Prediction and Control in Nonlinear Stochastic Systems", Department of Mathematical Modeling Technical University of Denmark Ph.D. Thesis No.84, July 2002.
- [2] H. Ishizaki, Wind Profiles, Turbulence Intensities and Gust Factors for Design in Typhoon-prone Regions, *J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.*, 13, 55-66, 1983