

風観測と気流解析を利用した列車運行管理のための強風推定手法に関する研究

A wind prediction for railway operation by onsite measurement and flow simulation

三須 弥生 ¹⁾	山口 敦 ²⁾	石原 孟 ³⁾
Yayoi MISU ¹⁾	Atsushi YAMAGUCHI ²⁾	Takeshi ISHIHARA ³⁾
松沼 政明 ⁴⁾	鈴木 博人 ⁵⁾	島村 誠 ⁶⁾
Masaaki MATSUNUMA ⁴⁾	Hiroto SUZUKI ⁵⁾	Makoto SHIMAMURA ⁶⁾

ABSTRACT

A wind prediction method is investigated for railway operation under strong winds based on onsite measurement and flow simulation. The prediction method can estimate the location and the frequency of the strong wind event. Based on it, a new assessment method for the strong winds in the railway system is also proposed. The proposed method is applied to the estimation of frequency of suspension of railway operation. The proposed method shows agreement with the measurement while conventional methods overestimates or underestimates the frequency. Finally, the effect of wind directions and wind fences are taken into consideration. As a result, the frequency of the train regulation due to strong wind events decreased.

Key Words: Strong Wind, Operational Regulation, Flow Simulation, Wind Fence

1. はじめに

鉄道事業者は強風に対する鉄道の安全性を向上させるため、観測風速などを基にした列車運転規制を行う一方で、列車運行の安定性を維持するために防風柵の設置などの対策を行っている。安全性と安定性を両立する適切な風対策を行うためには、鉄道沿線における風況を精度良く把握する必要がある。これまで日本では限られた数の風速計により沿線風況の把握を行ってきた。この方法では、観測点で発生する強風イベントを確実に捉えることが出来るという利点がある反面、観測点以外で強風が発生した場合にはそれを捉えきれないという課題がある。一方、近年気流解析の分野において、それまで難しかった日本のような急峻な地形における複雑風況を精度良く予測する非線形風況予測モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)¹⁾が開発され、地域気象モデル RAMS²⁾と MASCOT を組み合わせた新しい風況精査手法である力学統計的局所化手法 (DSD : Dynamical Statistical Downscaling) が提案されている³⁾。この手法により風の空間分布および年平均風速が正確に予測できるようになり、風力発電量の予測などで実用化されている

-
- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1) 東日本旅客鉄道株式会社 防災研究所 主席 | (〒331-8513 さいたま市北区日進町 2-479) |
| 2) 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 助教 | (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1) |
| 3) 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 | (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1) |
| 4) 東日本旅客鉄道株式会社 八王子支社 主席 | (〒192-8502 八王子市旭町 1-8) |
| 5) 東日本旅客鉄道株式会社 千葉支社 課長 | (〒260-8551 千葉市中央区新千葉 1-3-24) |
| 6) 東日本旅客鉄道株式会社 防災研究所 所長 | (〒331-8513 さいたま市北区日進町 2-479) |

4). しかし、これらの気流解析では風速の空間分布を求めることができる反面、強風イベントを精度よくとらえることができないという課題がある。そこで本研究では、風観測と気流解析の長所を組み合わせることにより、1 地点の観測値から規制区間内における任意地点の瞬間風速・風向を予測する手法を提案し、それに基づき、規制区間内の任意の地点における風速の時系列変化および風速の出現頻度を定量的に求める。

また、安全かつ安定な列車運行につながる強風対策を策定するためには、その対策を実施した場合の規制時間や規制回数といった列車運行の安定性について評価する必要がある。欧州ではこれまで、規制区間をサブ区間に分割し、そのサブ区間でかかる運転規制頻度を評価する手法が提案されている⁵⁾。しかしこの手法では、サブ区間相互で吹く風の間に相関が無いと仮定しているために運転規制値以上の風の発生を過大に評価する可能性がある。強風の発生を過大に評価した場合、この評価手法で検討した強風対策では過剰な設備投資や頻繁な運転規制につながる恐れがある。一方従来日本では、限られた風速計による観測で規制区間内の風を代表させて評価を行ってきた。この手法は規制区間内の風の完全相関を仮定していることとなり、運転規制頻度を過小に評価する可能性がある。そこで、本研究ではこれらの課題を解決するため、サブ区間の風速の相関を考慮できる評価手法を提案し、実測によりその有効性を評価する。

さらに提案した手法の応用例として、転覆限界風速の風向角による違いを考慮した場合の規制風速の発生確率、および防風柵を設置した場合の低減効果を定量的に評価する。

2. 鉄道沿線の風況予測手法の提案

日本の鉄道における強風に対する運転規制は、限られた数の風速計による観測値で規制するため、観測点以外で強風が発生した場合にはその強風を捉えきれないという課題がある。一方、近年開発されている気流解析では風速の空間分布を求めることができる反面、強風イベントを精度よくとらえることができないという課題がある。そこで本研究では、風観測と気流解析の長所を組み合わせることにより、1 地点の観測値から規制区間内における任意地点の瞬間風速・風向を予測する手法を提案する。本研究で提案した手法の概要を図 1 に示す。まず、メソスケール気象モデルと風況予測モデルによる 1 年間の気流解析の結果を用い、風速予測地点と観測点との間の風速比を風向別に求める。次に観測点における平均風速の観測値と風速比から風速予測地点の平均風速を予測する。また、気流解析結果から求めた風向別の乱れ強度に基づき風向別の突風係数を計算し、風速予測地点の最大瞬間風速を予測する。本節では平均風速および最大瞬間風速の予測の具体的な手法について説明する。

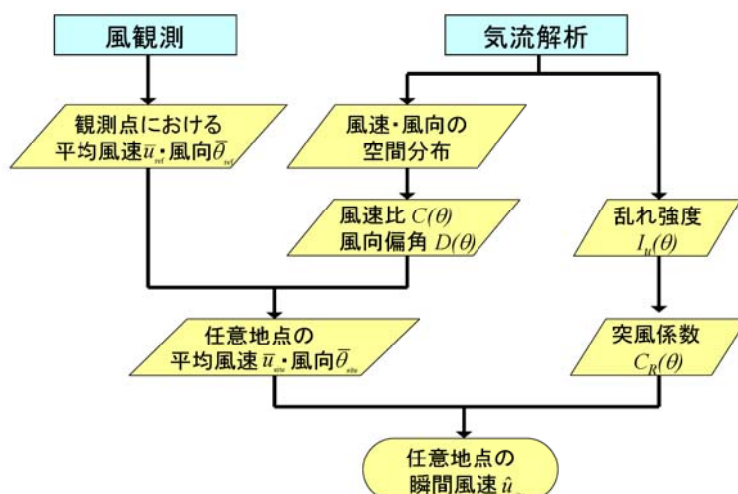


図 1 風観測と気流解析を利用した強風推定のフロー

まず、メソスケール気象モデルと風況予測モデルによる 1 年間の気流解析の結果を用い、風速予測地点と観測点との間の風速比を風向別に求める。次に観測点における平均風速の観測値と風速比から風速予測地点の平均風速を予測する。また、気流解析結果から求めた風向別の乱れ強度に基づき風向別の突風係数を計算し、風速予測地点の最大瞬間風速を予測する。本節では平均風速および最大瞬間風速の予測の具体的な手法について説明する。

2.1. 平均風速・風向の予測

メソスケール気象モデルや風況予測モデルを用いた気流解析により、対象領域内の 1 年間の風速の時系列を求めることができる。風速観測期間の 2004 年 2 月から 2005 年 1 月を対象期間とする。本研究では気流解析により求めた 2 地点間の風速比および風向偏角は風向のみの関数であると仮定し、最小二乗法により風速比を推定した。なお、気流解析はメソスケール気象モデル RAMS²⁾と局所風況予測モデル MASCOT¹⁾を組み合わせることにより行った。

観測地点における風速・風向を $u_{\text{ref}}^{\text{model}}(t)$, $\theta_{\text{ref}}^{\text{model}}(t)$, 予測対象地点における風速・風向を $u_{\text{site}}^{\text{model}}(t)$, $\theta_{\text{site}}^{\text{model}}(t)$

とする．2 点間の風速比 $C(\theta_{\text{ref}}^{\text{model}})$ および風向偏角 $D(\theta_{\text{ref}}^{\text{model}})$ は観測地点でのシミュレーション結果の風向 $\theta_{\text{ref}}^{\text{model}}$ の関数として(1)式および(2)式に示す誤差が最小となるように最小二乗法により求めた．

$$\sum_t \left(u_{\text{ref}}^{\text{model}}(t) \times C(\theta_{\text{ref}}^{\text{model}}) - u_{\text{site}}^{\text{model}}(t) \right)^2 \quad (1)$$

$$\sum_t \left(\theta_{\text{ref}}^{\text{model}}(t) + D(\theta_{\text{ref}}^{\text{model}}) - \theta_{\text{site}}^{\text{model}}(t) \right)^2 \quad (2)$$

以上求めた風速比と風向偏角を用いて，観測地点における 1 分平均風速 $(\bar{u}_{\text{ref}})$ ・風向 $(\bar{\theta}_{\text{ref}})$ を沿線の任意地点の 1 分平均風速 $(\bar{u}_{\text{site}})$ ・風向 $(\bar{\theta}_{\text{site}})$ に(3) 式および(4) 式を用いて変換する．

$$\bar{u}_{\text{site}}(t) = \bar{u}_{\text{ref}}(t) \times C(\bar{\theta}_{\text{ref}}) \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_{\text{site}}(t) = \bar{\theta}_{\text{ref}}(t) + D(\bar{\theta}_{\text{ref}}) \quad (4)$$

2.2. 瞬間風速・風向の予測

鉄道の運転規制には，最大瞬間風速(3 秒平均相当)が用いられる．このため，提案した手法を実際の運転規制に用いるためには 1 分間平均風速から 1 分間最大瞬間風速を推定する必要がある．本研究ではシミュレーションにより求めた乱流エネルギー $k(\theta)$ から Yamaguchi ら⁶⁾によって示された手法に従い (式(5)) 流れ方向の風速の標準偏差 $\sigma_u(\theta)$ を求め，1 分間平均風速との比を取ることで風向別の乱れ強度 $I_u(\theta)$ を算出した．突風係数 $C_R(\theta)$ は乱れ強度 $I_u(\theta)$ を用い，式(6)から計算できる．

$$\sigma_u^2(\bar{\theta}) = 1.2k(\bar{\theta}), \quad I_u(\bar{\theta}) = \sigma_u(\bar{\theta}) / \bar{u} \quad (5)$$

$$C_R(\bar{\theta}) = 1 + k_p I_u(\bar{\theta}) \quad (6)$$

ここで， k_p はピークファクタであり，Ishizaki⁷⁾によって提案された手法に従い，(7)式によって算出した．

$$k_p = \frac{1}{2} \ln \frac{60 \text{ sec}}{3 \text{ sec}} = 1.50 \quad (7)$$

以上求めた突風係数を用い，1 分平均風速・風向から 1 分最大瞬間風速に(8)式により変換した．

$$\hat{u}_{\text{site}}(t) = \bar{u}_{\text{site}}(t) \times C_R(\bar{\theta}_{\text{site}}) \quad (8)$$



図2 東北本線沿線の5地点

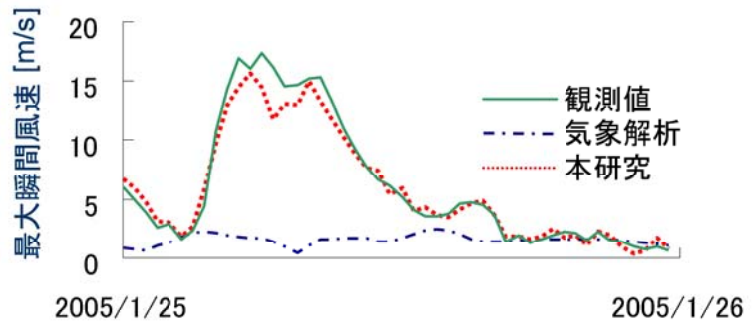


図3 地点2における1分間最大瞬間風速

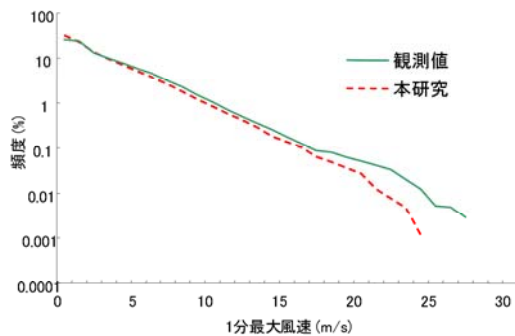


図4 地点2における年間の風速別出現頻度

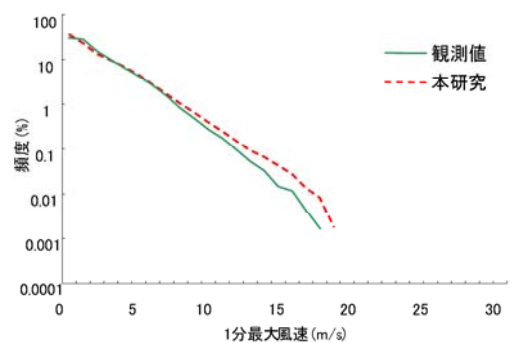


図5 地点5における年間の風速別出現頻度

2.3. 実測による検証

本研究で提案した手法の有効性を、東北本線の藤田・貝田駅間の5地点(図2)における風速の観測値を用いて検証した。ここでは地点3における観測値を用い、前節で説明した手法により気流解析の結果と組み合わせ、地点3以外の4地点における最大瞬間風速を予測し、観測値と比較した。

図3には地点2における予測結果の一例を示す。2005年1月25日に発生した強風イベントは本研究で提案した手法により精度よく再現することができることがわかる。図4と図5には観測地点の中で年平均風速が最も高い地点2と最も低い地点5における年間の風速別出現頻度を示す。高い風速域において観測値と予測値との差が若干見られるものの、従来の気象シミュレーションだけでは予測が難しかった強風イベントを捕らえられていることがわかる。

3. 運転規制に関わる新しい評価手法の提案

本研究では、列車運行の安定性向上に資する強風対策策定のための適切な評価手法を提案する。なおここでは、規制区間をn個のサブ区間に分けて規制を行なう手法について検討する(図6)

3.1. 運転規制風速の評価手法の提案

1点での観測値に基づいて運転規制頻度の評価を行う場合を想定し、規制区間内での1点での観測風速(u^{obs})が規制風速(u^{limit})を超えた場合に規制が行なわれたと仮定する。この手法に基づく年間の運転規制が行われる確率 P^{meas} は

$$P^{\text{meas}} = P(u^{\text{obs}} > u^{\text{limit}}) \quad (8)$$

となる。この手法では規制区間内の風速が観測点で代表できると仮定しているため地形等による局所的な増速を考慮できず、観測点以外で発生する強風イベントを捉えられないという問題点がある。

一方、欧州では各サブ区間相互で吹く風の間には相関がないと仮定し、各サブ区間において風速が規制風速を超えない確率 $P(u_i < u^{\text{limit}})$ の積を1から引くことにより、次式に示すように規制区間における規制風速の発生確率を評価する。

$$P^{\text{no-cor.}} = 1 - \prod_i [1 - P(u_i > u^{\text{limit}})] \quad (9)$$

しかし実際のサブ区間相互で吹く風の間には相関があり、強風が同時に発生することがあるため、この手法は運転規制風速の発生確率を過大評価する恐れがある。

本研究ではこれらの問題を解決するため、各サブ区間の風速のうち、1点でも規制風速 u^{limit} を超えた場合に規制を行うとし、次式により年間の運転規制実施確率を求めた。

$$P^{\text{proposed}} = P(\max(u_i) > u^{\text{limit}}) \quad (10)$$

この手法によりサブ区間相互の相関を考慮していることになり、規制区間内の風速の違いと相関を考慮した運転規制頻度の評価が可能となる。

3.2. 実測による検証

東北本線の藤田・貝田間の5地点(図2)が代表点となるサブ区間からなる仮想的な規制区間を考え、この仮想区間において規制風速を超える確率を前述の3種類の手法を用いて評価した。

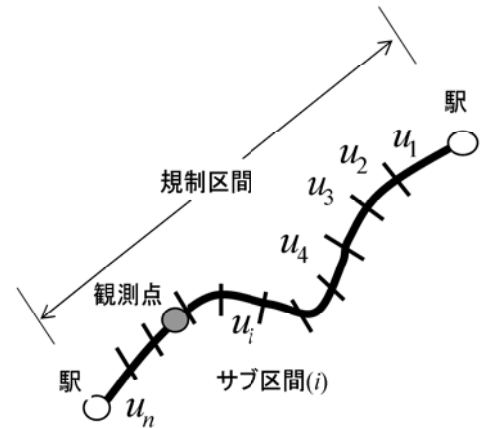


図6 規制区間をサブ区間に分割する手法

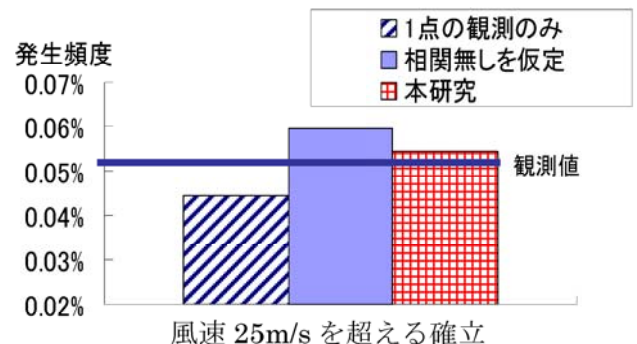


図7 推定手法別の運転規制風速の発生頻度

図7に各手法による、規制風速 25m/s を超過する確率を示す。また、全5点の観測値のうち最大値が規制風速を超える確率を観測値として示した。

1 地点の観測のみによる手法は規制区間内の風速が規制風速を超える確率を過小評価している。これは、観測地点以外の場所で規制風速を超えている場合に規制をかけることができないためであると考えられる。一方、サブ区間相互に吹く風の間に関係が無いと仮定した手法は規制風速を越える確率を過大評価している。これは実際にはサブ区間相互の風速には相関があるため、強風が同時に発生することが多いにも関わらず、サブ区間相互の風速が無相関と仮定しているためである。

3.3. サブ区間の間隔の影響

今回検証した手法の評価精度はサブ区間の間隔に依存すると考えられる。そこでサブ区間の間隔の影響を調べるため、サブ区間の間隔を変えて年間規制風速の発生頻度を評価したものを図8に示す。

本研究の手法ではサブ区間の間隔が 200m 以下ではほとんど値が変化しないことから、今回対象とした急峻な地形変化をとまなう地域においては、サブ区間の大きさを 200m 程度にすればよいことがわかる。また、相関が無いと仮定した手法はサブ区間の間隔が 2km 程度であれば本研究と大きな違いがないことがわかる。これは欧州では地形が比較的平坦なため、サブ区間の大きさを大きくとることができ、相関が無いとする仮定が妥当であることを示している。

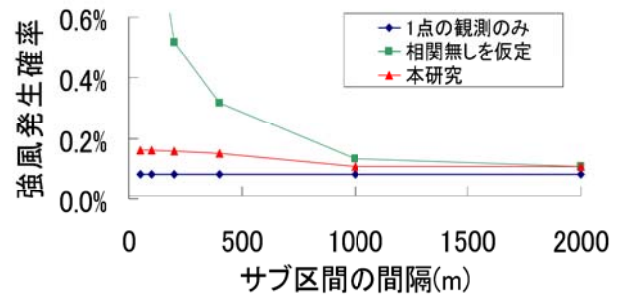


図8 サブ区間の間隔による年間の強風発生頻度

4. 風向及び防風柵の効果

列車の転覆限界風速は列車に対する風向の相対角度によって変化するため、運転規制風速についても風向を考慮することで、列車運行の安定性を向上できると予想される。また防風柵を適切に設置した場合にはさらに列車運行の安定性を向上することができると考えられる。このことを利用した運転規制手法は、特定箇所で試行された事例が報告されているが、限定的な評価にとどまっていた。その為、本研究では風向角による違いを考慮した場合の規制風速の発生確率、および防風柵を設置した場合の低減効果を定量的に評価する。

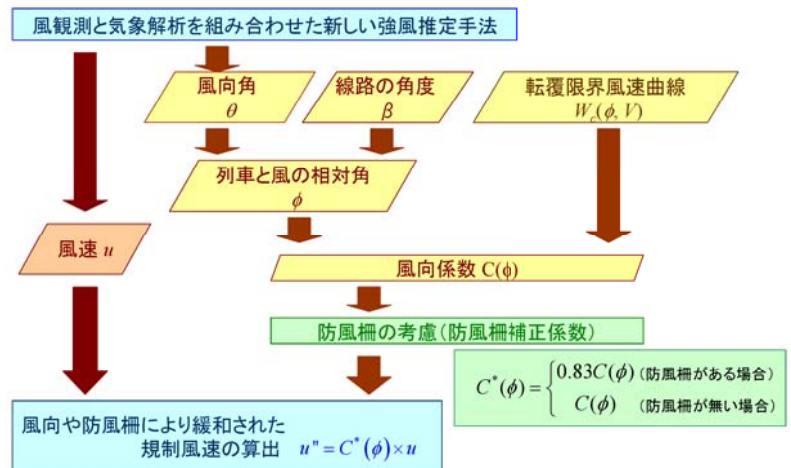


図9 風向と防風柵を考慮した運転規制の評価のフロー

4.1. 評価手法の概要

前述の風観測と気流解析を組み合わせた強風推定手法に対し、転覆限界風速の風向角による違いと防風柵の効果を考慮した場合について、図9に示す評価フローにより定量的に評価する。

風向については列車と風の相対角による転覆限界風速の低減効果を表す風向係数 $C(\phi)$ を用いて考慮する。

$$C(\phi) = \frac{W_c(\phi_{DNGER}, V)}{W_c(\phi, V)} \quad (11)$$

ここで、 $W_c(\phi, T, V)$ は列車と風の相対角 ϕ および列車の速度 V の関数である転覆限界風速曲線である。また ϕ_{DANGER} は最も危険となる列車と風の相対角度である。本研究では列車の速度 V としては 120km/h を用いた。防風柵による低減効果については式(12)に示す防風柵補正係数 $C^*(\phi)$ により評価した。

$$C^*(\phi) = \sqrt{(C_n \sin \phi)^2 + (C_r \cos \phi)^2} \quad (12)$$

ここで C_n は防風柵に直角な風の成分に対する低減率であり 0.83 を用いた。また C_r は防風柵に平行な風の成分に対する低減率であり 1.0 を用いた。以上の風向係数および防風柵補正係数を風況予測結果に乘じることによって、風向及び防風柵を考慮した限界風速を求めた。

4.2. 評価結果

以上の手法を用い、風向を考慮した場合および防風柵を設置した場合に規制区間における運転規制風速の発生確率を求めた。結果を図 10 に示す。運転規制風速の発生頻度が風向を考慮した場合で約 30%，防風柵の効果を考慮した場合でさらに約 20%減少することがわかった。この結果、本研究で提案した強風推定手法に対し風向と防風柵の効果を考慮することで、安全性を保ったまま列車の運転規制風速の発生頻度を少なくし、列車運行の安定性を向上できることを示せた。また防風柵の効果を定量的に考慮可能となったことで、設置場所、長さ、向きを定量的に決定することが可能となった。

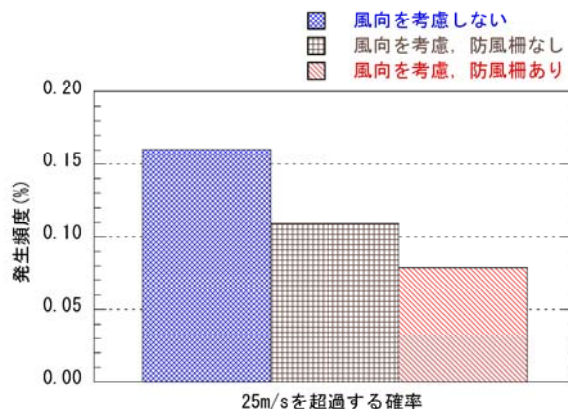


図 10 最大瞬間風速が規制風速 25m/s を超過する確率

5. まとめ

本研究では、風観測と気流解析を組み合わせることにより、鉄道沿線の任意の地点の風速を予測する手法を開発した。その結果、規制区間において強風イベントが発生する場所と頻度の高精度な推定を可能にした。

次に運転規制区間をサブ区間に分割した運転規制について、サブ区間相互の風速の相関を考慮できる運転規制頻度を評価する手法を提案し、実測値との比較により、従来の手法に比べて予測精度が高いことを示した。

最後に風向および防風柵の効果を考慮した年間の運転規制風速の発生確率を評価し、運転規制風速の発生頻度が減少することを明らかにした。

参考文献

- 1) 石原 孟: 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, ながれ, Vol.22 (2003), 387-396
- 2) Pielke et al.: A comprehensive meteorological modelling system – RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., Vol. 49, 69-91, 1992.
- 3) 山口 敦, 石原 孟, 藤野 陽三: 力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証, 土木学会論文集 A Vol.62 No.1, 110-125, 2006
- 4) 石原 孟, 山口 敦: 風況と風力発電出力の予測技術, 日本風工学会誌, Vol.31, No.1(No.106), 2006.1
- 5) L. M. Créon et al.: Les vents traversiers sur la LGV Méditerranée, *Revue Générale des Chemins de Fer*, 2002.
- 6) A. Yamaguchi et al: Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn., vol. 91, 247-264, 2003
- 7) H. Ishizaki: Wind Profiles, Turbulence Intensities and Gust Factors for Design in Typhoon-Prone Regions, J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn., vol. 13, 55-66, 1983