



論文



風観測と数値流体解析を利用した運転規制区間内の強風発生頻度の予測

Prediction of Strong Gust Frequency in a Control Section for Train Operations Based on Onsite Measurement and CFD

三須弥生^{*1} 石原 孟^{*2}

Yayoi MISU, Takeshi ISHIHARA

SUMMARY

In this study, a prediction method for strong gust based on onsite measurement and CFD was used which can take the effect of complex terrain into account. Predicted maximum gust shows good agreement with measurement. In addition, a time series based method for the prediction of the strong gust frequency in a control section was proposed. Predicted strong gust frequency agrees well with the measurement, while the conventional methods underestimate or overestimate the frequency. Finally, the proposed method was applied to the regulation of train operation, considering train speed, wind direction, and wind fences. The frequency of the regulation of the train operation at a 6km test section decreases from 0.16% to 0.14% when the train speed is reduced and decreases to 0.11% when the wind direction is considered, and further decreases to 0.08% when the wind fence is installed.

key words: strong gust frequency, Onsite measurement, CFD, Control section, Regulation of the train operation,

1. はじめに

鉄道では車両が横風を受けて転覆するという事故が過去にいくつか発生しており、その度に強風発生時の運転規制ルールが見直されてきた¹⁾。餘部で発生した風による列車転覆転落事故²⁾の際、最大瞬間風速が列車の転覆に大きく影響したとして、その後、最大瞬間風速による運転規制の実施が求められるようになった。一般的に強風発生時の運転規制ルールは、連続する線路上にあらかじめ設定した数 km の運転規制区間と規制風速からなる。鉄道車両の力学的解析から、列車は減速することにより転覆耐力が向上することが分かっているため^{3), 4)}、運転規制区間内の観測風速値あるいは予測風速値が規制風速値を

超えた場合に、速やかに列車の走行速度を減速させる、あるいは停車させるといった運転規制を実施する。また、安定した輸送を確保するための強風対策として、風向別の運転規制^{5), 6), 7)}などのソフト対策や、防風柵の設置^{8), 9), 10)}などのハード対策が実施されている。これらの強風対策を最も効果的に実施するためには、それぞれの強風対策を導入した場合の運転規制区間の強風遭遇頻度を予測し、対策の効果を定量的に評価することが不可欠である。

強風発生頻度を予測する手法としてはこれまでに二つの方法が用いられている。一つ目の方法は、運転規制区間内の 1 地点での風観測記録により強風発生頻度を予測する手法である。この手法では、風観測のみで強風発生

*1 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター 防災研究所 主席

Assistant Manager, Disaster Prevention Research Lab., R&D Center of JR East Group, East Japan Railway Company

*2 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授

Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo

(原稿受理年月日: 2011 年 8 月 8 日, 採用決定: 2011 年 12 月 12 日)

頻度を予測できるという利点がある一方で、風速計設置箇所等で常に最大風速が観測できると仮定しているため、風速計設置箇所以外で強風が発生する場合には、その発生頻度を過小評価するという欠点がある。二つ目の方法は、運転規制区間をいくつかのサブ区間に分割し、運転規制区間内の1地点での風観測と数値流体解析を組み合わせることにより、運転規制区間全体の風況を予測し、強風発生頻度を予測する手法である^{11), 12)}。この方法では、風速計が設置されていない箇所の風を考慮できるが、サブ区間相互の風を独立と仮定して運転規制区間内に発生する強風発生頻度を予測しているため、実際、同一の強風イベントを重複してカウントする可能性がある。

そこで、本研究では、まず、風観測と数値流体解析を組み合わせた最大瞬間風速予測手法の定式化を行い、運転規制区間内の1地点での風観測記録から線路沿線の任意地点における最大瞬間風速を予測すると共に、実測との比較によりその予測精度を検証する。次にサブ区間内の風の相関を考慮した強風発生頻度予測手法を提案し、実測によりその予測精度を検証すると共に、既往の予測手法の問題点を明らかにする。最後に本研究で提案した強風発生頻度予測手法を用いて、徐行、風向を考慮した運転規制および防風柵設置による強風対策の効果を定量的に評価する。

2. 鉄道沿線の強風予測

本研究では風観測と数値流体解析を組み合わせた手法により、鉄道沿線における任意地点の最大瞬間風速と風向を予測する。図1には、最大瞬間風速と風向の予測手法の概要を示す。まず、数値流体解析により観測地点と予測対象地点での風速比および風向偏角を風向別に求める。次に、風観測から得られた平均風速、風向の時系列データに対し、求めた風速比と風向偏角を乗算および加算することにより、予測対象地点での平均風速と風向の時系列データを求める。最後に、数値流体解析の結果から得られる予測対象地点での風向別乱流強度から求めたガストファクターと予測対象地点で得られた平均風速と風向から予測対象地点での最大瞬間風速と風向を求める。

本章では、まず観測地点と予測対象地点での風速比と風向偏角および観測地点での平均風速と風向から予測対象地点での最大瞬間風速と風向を予測する手法の定式化を行う。次に、数値流体解析により風速比と風向偏角を求める手法を示し、観測された強風事例により、風速比と風向偏角の予測精度を検証する。最後に、定式化した最大瞬間風速と風向の予測手法を用いて、線路沿線の任

意地点における時系列最大瞬間風速と風向および瞬間風速階級別発生頻度を予測し、実測との比較によりその有効性を検証する。

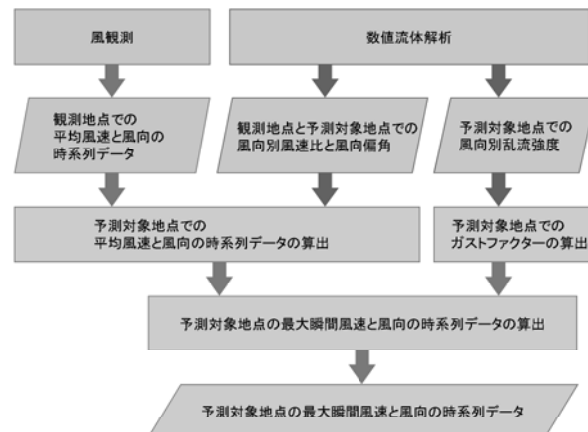


図1 風観測と数値流体解析を利用した強風予測手法の概要

(Prediction method for strong gust based on the onsite measurement and CFD)

2.1. 最大瞬間風速と風向の予測手法の定式化

最大瞬間風速と風向を予測するために、まず観測地点と予測対象地点との風速比 S_{pr} および風向偏角 D_{pr} を求める。次に観測された平均風速 u_r と風向 θ_r に対して、求められた風速比と風向偏角をそれぞれ乗算および加算することにより、予測対象地点の平均風速 u_p と風向 θ_p を式(1)、式(2)より求める。

$$u_p = u_r \times S_{pr} \quad (1)$$

$$\theta_p = \theta_r + D_{pr} \quad (2)$$

ここで、添え字 p は予測対象地点、 r は観測地点、 pr は予測対象地点と観測地点との関係を示す。

次に、最大瞬間風速 $\hat{u}_p$ は、平均風速 u_p に突風率 G_p を乗じ、式(3)により求める。最大瞬間風速の風向は付録1に示すように平均風向から求め、式(4)により近似した。

$$\hat{u}_p = u_p \times G_p = u_r \times S_{pr} \times G_p \quad (3)$$

$$\hat{\theta}_p \cong \theta_p \quad (4)$$

突風率 G_p は平均風向に対応する乱流強度 I_p ¹³⁾ およびピークファクタ k_p から式(5)により求め、さらにピークファクタ k_p は Ishizaki¹⁴⁾により提案された(6)式により算出した。

$$G_p = 1 + k_p I_p \quad (5)$$

$$k_p = \frac{1}{2} \ln \frac{T}{t} \quad (6)$$

ここで、 T は評価時間、 t は平均化時間を示す。本研究では、評価時間 T は60秒（付録2）、平均化時間 t は3秒を用いた。

2.2. 数値流体解析による風速比と風向偏角の推定

本研究では、数値流体解析^{15), 16)}を用いて解析対象領域内の気流予測を行った。基礎方程式としては、以下に示す連続の式と運動量保存の式を用いる。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (8)$$

ここで、 $\bar{u}_i$ と u'_i は物理空間での x_i 方向の速度成分の平均値と変動値を表わし、 ρ は流体の密度、 $\bar{p}$ は平均圧力、 μ は粘性係数である。レイノルズ応力は線形渦粘性型モデルにより近似し、次式により表わす。

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

本解析では標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。乱流エネルギー k 及び乱流エネルギーの散逸率 ε は、以下の輸送方程式を解くことにより求める。

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ & - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 μ_t は乱流粘性係数であり、次式から求める。

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

式中の定数は標準 $k-\varepsilon$ モデルの値を用い、 $C_\mu = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ とした。

本研究では、図 2 に示す東北本線の桑折駅と貝田駅間を解析対象区間とし、図 3 に示す計算領域を設定した。当該箇所では地点 1 から地点 5 の 5 箇所において 2004 年 2 月から 2005 年 1 月の 1 年間にわたり風観測が実施された。ここでは観測地点 3 を中心としてそれぞれ一辺の長さが 7,000m 四方の正方形を解析対象領域、それに外接する円を内接させる正方形領域を全体の解析領域とした。さらに、上流側の地形の影響を考慮するために、解析領域の上流側に解析領域と同等の付加領域を設定し、それらの周囲に緩衝領域を設定した¹⁵⁾。またネスト領域を設定し、予測対象地点近くの計算格子間隔を細かくすることにより計算精度の向上を図った。表 1 に計算格子と解析条件を示す。

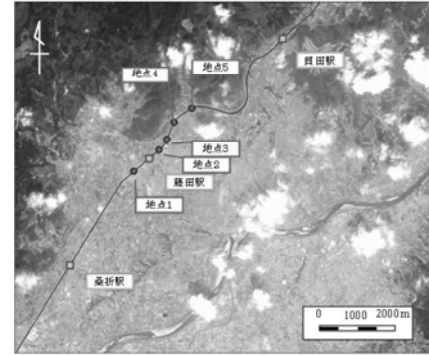


図2 東北本線の桑折駅と貝田駅間の風観測地点
(Measurement sites between Kori and Kaida Stations on Tohoku line)

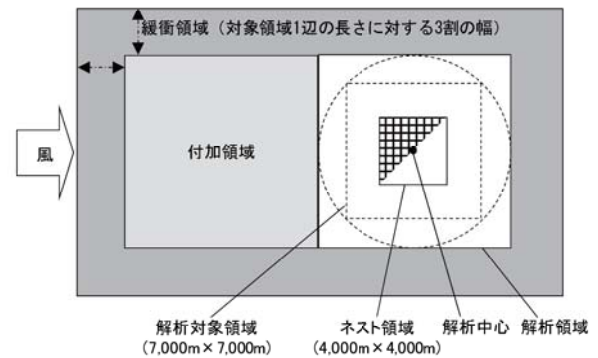


図3 計算領域と境界条件
(Computational domain and boundary conditions)

表1 計算格子と解析領域

(Grid system and computational domain)

項 目			設 定 値
解析中心座標 (日本測地系)			N37° 52' 51.5" E140° 32' 55.0"
解析風向			32 方位 (11.25 度ピッチ)
土地利用 (地表面粗度)			国土地理院発行： 1/10 細分区分画土地利用 (100m メッシュ)
メイン領域	範囲	水平方向 X×Y×Z	7,000m×7,000m×1,500m
	格子間隔	水平方向 X, Y	40m-200m
		鉛直方向 Z	最小格子領域 4,000m×4,000m
	ストレッチ ングレシオ	水平方向 X, Y, Z	5m
			1.1 倍
	格子数 (X×Y×Z)		228×178×41 (=1,663,944)
ネスト領域	標高		国土地理院発行： 数値地図 (50m)
	範囲	水平方向 X×Y×Z	4,000m×4,000m×1,500m
	格子間隔	水平方向 X, Y	20m
		鉛直方向 Z	5m
	ストレッチ ングレシオ	水平方向 X, Y	1.0 倍
		鉛直方向 Z	1.1 倍
	格子数 (X×Y×Z)		202×202×41 (=1,672,964)
	標高		北海道地図株式会社： GISMAP Terrain (10m)

図4と図5には、ネスト領域内の計算格子と標高コンターの分布を示す。図5から、東北本線の南東に平地、北西に山地が広がっていることがわかる。とくに東北本線の線路に隣接する地点4と5は半島状に突き出た山地の東側に位置しているために、西風の場合に地形の影響により風速が減少すると推測される。一方、地点1の周辺は平坦であるが東北自動車道の高架橋や防雪棚の影響で西風の場合に風速が減少する可能性がある。地点2と3は突き出た地形の南側に位置し、西風の場合に風速の増大が予想される。

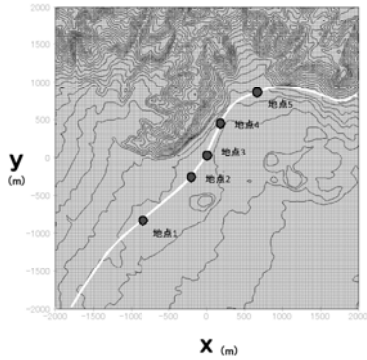


図4 ネスト領域内の計算格子
(Grid in the nesting domain)

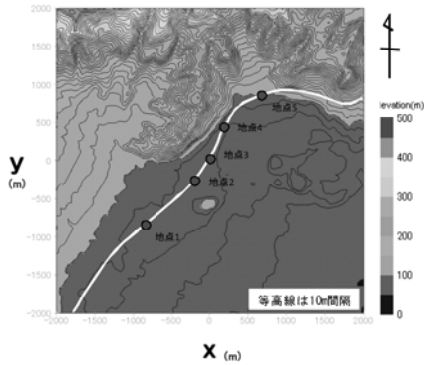


図5 ネスト領域内の標高コンター
(Elevation contour of the terrain in the nesting domain)

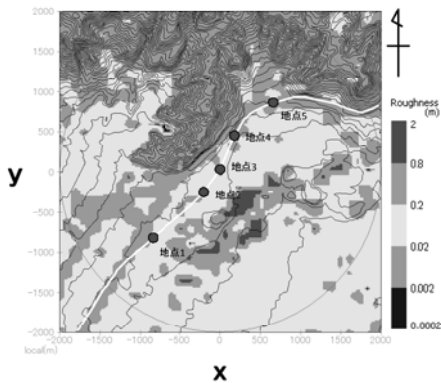


図6 ネスト領域内の地表面粗度長の分布
(Surface roughness in the nesting domain)

図6にはネスト領域内の地表面粗度長の分布を示す。この図から標高の高い山地の粗度長が高い。また南西にかけて、粗度長の高い2本の直線が見られるが、これは東北自動車道と東北新幹線の高架橋によるものである。

図7には、西北西、西、西南西の風が吹いた時の数値流体解析の結果を示す。いずれの風向も当該箇所を卓越する風向である。解析では上空風速は10m/sとした。図7から、対象地域の南側ではいずれのケースにおいても地形が平坦なため、風が上空風向から風向を変えずに東側の平地部に流れ込んでいるが、風向が西北西から西南西になるに従い、地点2と3での風速が高くなっているのが分かる。これは北西に位置する半島状の山地を回り込む流れの増速によるものであり、一方山地の背後に位置する地点4と5はいずれのケースにおいても、山地の後流の影響を受け風速が減少していることが分かる。また地点1では東北自動車道の高架橋や防雪棚の影響で風速が減少している。

数値流体解析から予測対象地点と観測地点間の風速比および風向偏角を算出するために、観測地点での風向が θ_r であるときの予測対象地点と観測地点との風速比 S_{pr} および風向偏角 D_{pr} は式(1)と式(2)の関係から次のように表わす。

$$S_{pr} = u_p / u_r \quad (13)$$

$$D_{pr} = \theta_p - \theta_r \quad (14)$$

ここで、 u_p, θ_p はそれぞれ数値流体解析から求めた予測対象地点での風速、風向であり、以下のように線形補間により求める。

$$u_p = u_{p,i} + a(u_{p,i} - u_{p,i+1}) \quad (15)$$

$$\theta_p = \theta_{p,i} + a(\theta_{p,i} - \theta_{p,i+1}) \quad (16)$$

また、 $u_{p,i}, u_{p,i+1}$ および $\theta_{p,i}, \theta_{p,i+1}$ は、数値流体解析で与える流入風向セクター*i*および*i+1*に対して予測対象地点において求められた風速および風向を表す。流入風向セクター*i*は未知であり、式(17)のように観測地点での風向により判断した。

$$\theta_r \in (\theta_{r,i}, \theta_{r,i+1}) \quad (17)$$

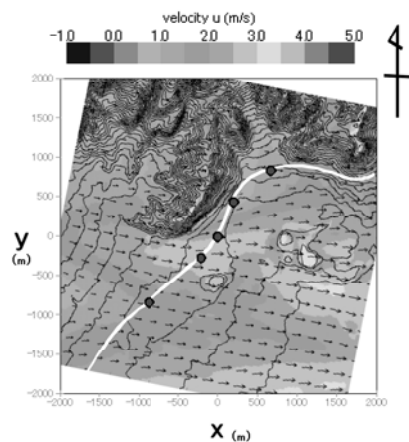
ここで、 $\theta_{r,i}$ および $\theta_{r,i+1}$ は流入風向セクター*i*および*i+1*に対して数値流体解析により求められた観測地点での風向である。

一方、比例係数*a*は、地点によらず一定と仮定し、次のように観測地点での風向により算出する。

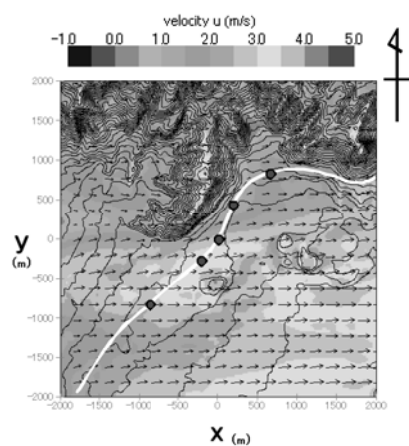
$$a = \frac{\theta_r - \theta_{r,i}}{\theta_{r,i+1} - \theta_{r,i}} \quad (18)$$

流入風向セクター*i*と比例係数*a*が分かれば、予測対象

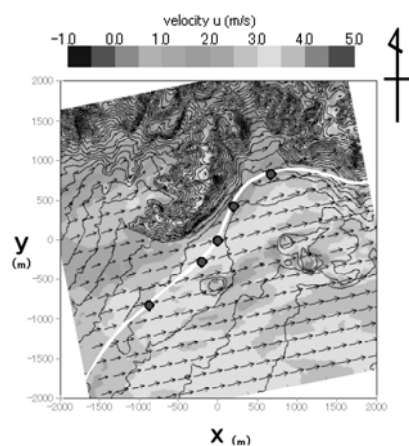
地点と観測地点との風速比 S_{pr} および風向偏角 D_{pr} を求めることができる。図8と図9には観測期間中に発生した強風の上位4事例について地点3に対して求めた風速比および風向偏角を示す。



(a) 西北西風

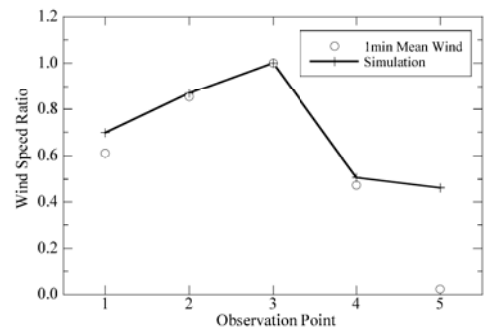


(b) 西風

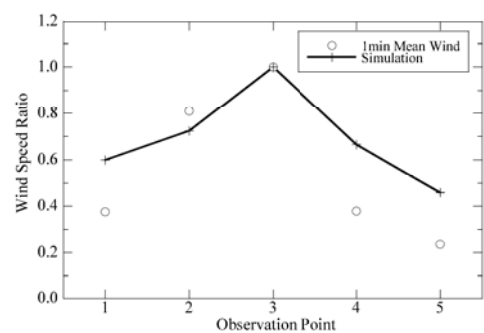


(c) 西南西風

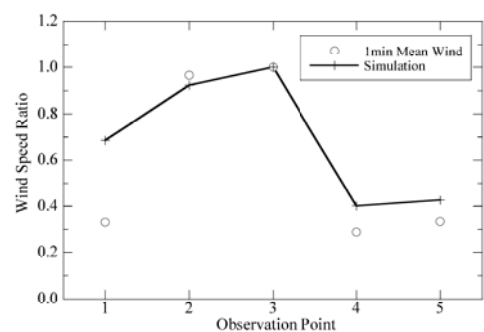
図7 代表的な風向における数値流体解析の結果
(Numerical results in typical wind directions)



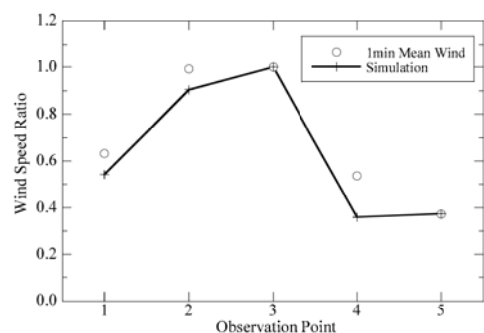
(a) 事例1 2004年12月17日6時54分



(b) 事例2 2004年11月27日9時15分

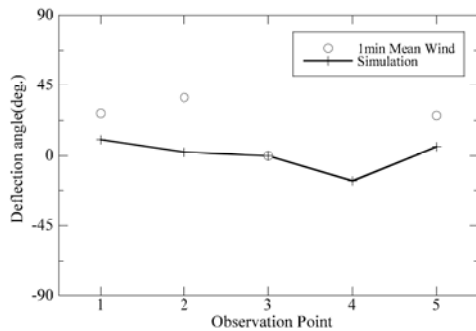


(c) 事例3 2004年4月21日0時50分

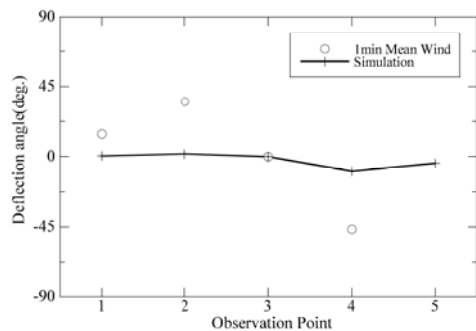


(d) 事例4 2004年2月23日20時25分

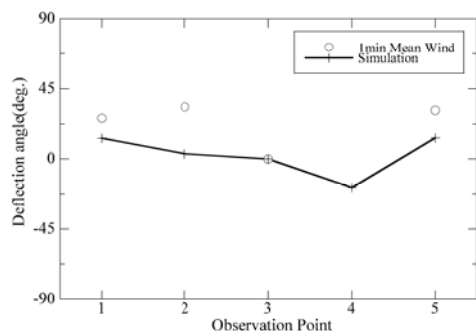
図8 風速比の予測値と観測値の比較
(Comparison of simulated and observed wind speed ratios)



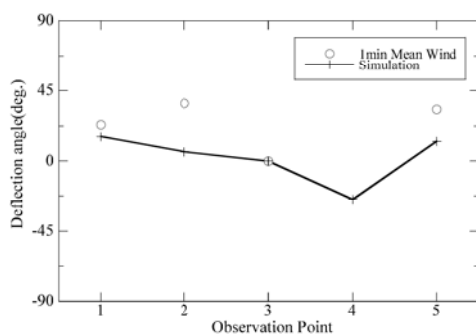
(a) 事例1 2004年12月17日6時54分



(b) 事例2 2004年11月27日9時15分



(c) 事例3 2004年4月21日0時50分



(d) 事例4 2004年2月23日20時25分

図9 風向偏角の予測値と観測値の比較

(Comparison of simulated and observed changes in wind direction)

図8から、地点1、地点4、地点5での風速比が小さく、地点2の風速比は地点3の風向によってその値が変化している。いずれの地点においても予測値は観測値と概ね一致していることが分かる。もう少し詳細に見ると、事例1（最大瞬間風速は31.9m/s、風向は西南西）では地点5の予測値が実測に比べて過大評価されていることが分かる。これは、北西側の山地の影響による風速の著しい減少がシミュレーションで十分に捉えきれていないことが原因と考えられる。ただし、運転規制発令は強風を対象としているため、低風速の予測誤差による影響は小さいと考えられる。一方、事例2（最大瞬間風速は31.1m/s、風向は南西）では風速比の分布はとらえられているが、地点1、地点4、地点5の風速比は若干過大評価されている。これらの地点の風速比はいずれも0.4を下回り、運転規制風速に対して十分低速であると考えられる。事例3（最大瞬間風速31.1m/s、風向は西）では、地点1の風速比を若干過大評価しているが、他の地点での風速比を精度よく再現しており、特に運転規制の対象となる高風速で風速比を良く捉えていることが分かる。事例4（最大瞬間風速29.9m/s、風向は西）では、地点4の風速比を若干過小評価しているが、他の地点では風速比を精度よく予測していることが分かる。

図9から、風向偏角の予測では、いずれの事例も地点1、地点2および事例2以外の地点5では、観測値を概ね再現しているが、地点4および地点5の事例2では、予測値は観測値と180°程度の差が生じている場合がある。なお、 $\pm 90^\circ$ を超えたデータについては表示されていない。付図1から地点4および事例2の地点5の風向は、山背後の剥離により、他の地点の風向と180°の差が生じており、数値流体解析ではこの剥離を再現できていないためと考えられる。ただし、前述のように、対象の地点の風速が大きく減少しているため、今回対象とする強風予測に与える影響はないと考えられる。

2.3. 最大瞬間風速予測手法の実測による検証

2.2節と同様に東北本線の桑折駅と貝田駅間における5つの風観測地点のうち、地点3を運転規制区間における観測地点と仮定し、その他の観測地点における最大瞬間風速の時系列データと風速階級別年間発生頻度を予測し、実際の観測値と比較した。最大瞬間風速を予測する際には、評価時間は60秒、平均化時間は3秒とした。

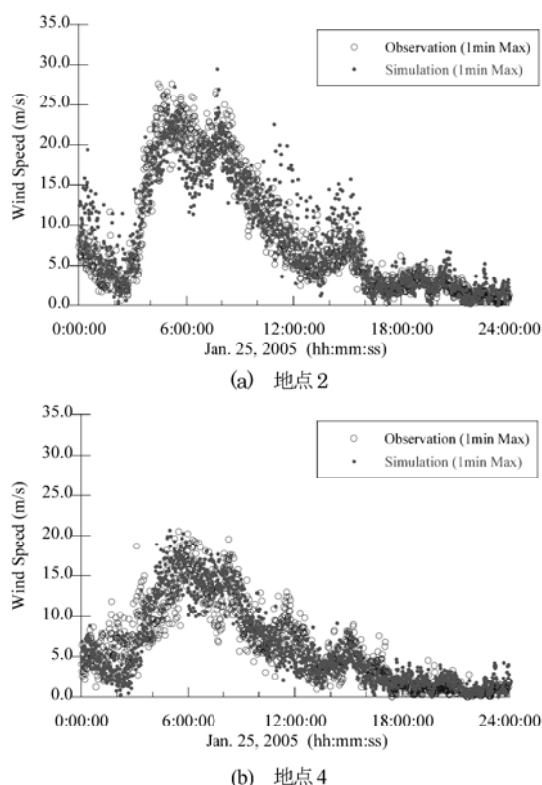


図 10 最大瞬間風速の予測値と観測値の比較
(Comparison of simulated and observed maximum gust)

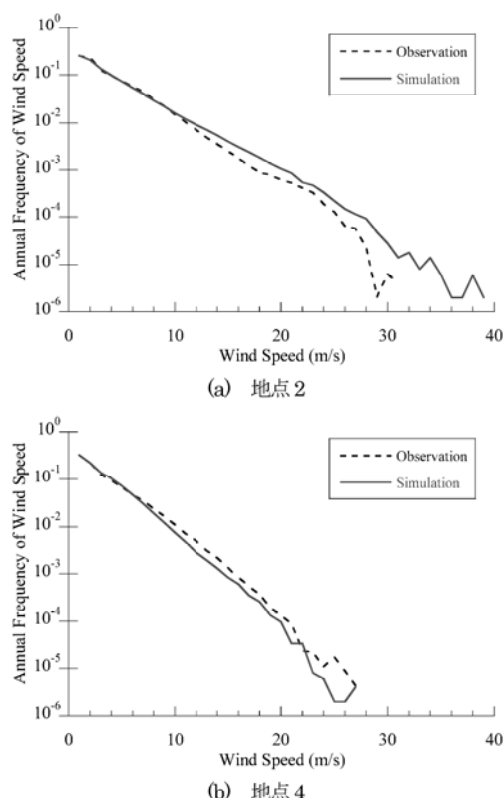


図 11 最大瞬間風速階級別年間発生頻度の予測値と観測値の比較
(Comparison of simulated and observed annual frequency of one minute maximum gust)

図 10 には 2005 年 1 月 25 日に発生した強風イベントにおける地点 2 および地点 4 での 1 分間最大瞬間風速の時系列データの予測値と観測値との比較を示す。最大瞬間風速の不確実性によるばらつきがあるものの、急激な風速変化を精度良く予測していることがわかる。図 11 には観測地点 3 から予測された地点 2 および地点 4 での風速階級別年間発生頻度を示す。発生頻度の極めて少ない風速階級を除いて、各風速階級において観測値と予測値がよく一致していることが分かる。これらの結果から本研究の手法により強風イベントおよび強風の年間発生頻度を精度良く予測できることがわかる。

3. 運転規制区間内の強風発生頻度予測手法の提案

1 地点での強風発生頻度の予測と異なり、運転規制区間の強風発生頻度を予測する場合には運転規制区間内の全ての地点での強風を知る必要がある。

日本では多くの場合、運転規制区間内の 1 箇所に設置された風速計での観測値が運転規制区間内の風速を代表できるとして運転規制を実施しているが、この方法では 1 地点の風観測データから運転規制区間の強風発生頻度を求めることができる反面、観測地点で常に運転規制区間内の最大瞬間風速を観測できると仮定しているため、風速計が適切に設置されていない場合には、風速計が設置されていない箇所での強風を見逃す可能性がある。一方、欧州では、運転規制区間をいくつかのサブ区間に分割し、それぞれのサブ区間を代表する最大瞬間風速を観測風速と数値流体解析から求めた風速比と風向偏角により予測したのち、サブ区間内の最大瞬間風速の間に相関がないと仮定し、運転規制区間の強風発生頻度を求める手法が提案されている¹¹⁾¹²⁾。この手法では、運転規制区間内の全てのサブ区間における最大瞬間風速を考慮できるが、サブ区間の長さが短い場合には、実際に相関がある最大瞬間風速を重複して評価する可能性がある。

本研究では、運転規制区間内の各地点における最大瞬間風速の相関を考慮した強風発生頻度予測手法を提案するとともに、実測の結果と比較することにより、本提案手法の有効性および従来手法の問題点を明らかにする。

3.1. 運転規制区間内の強風発生頻度予測手法の定式化

本研究では、まず、図 12 に示すように運転規制区間をいくつかのサブ区間に分割し、各サブ区間の代表点（中心点）の最大瞬間風速の時系列データを求め、式(19)により運転規制区間の強風発生頻度を算出する方法を提案する。

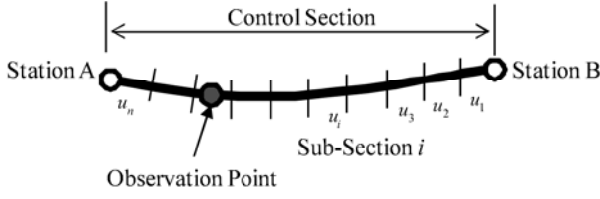


図12 運転規制区間とサブ区間の定義
(Definition of sub-sections and control section)

$$P_{nk} = P\left(\max_{i=1, \dots, n}(\hat{u}_i) > u^{\text{limit}}\right) \quad (19)$$

ここで、 $\hat{u}_i$ はサブ区間 i の代表点における最大瞬間風速、 u^{limit} は運転規制風速である。 P_{nk} は運転規制区間 k を n 個のサブ区間に分割した場合の強風発生頻度を示す。この手法では、運転規制区間内の全てのサブ区間における最大瞬間風速のいずれかが規制風速を超えた場合の強風発生頻度を評価しており、サブ区間における最大瞬間風速の相関を厳密に考慮していることが分かる。本手法では運転規制区間内の全ての最大瞬間風速の時系列データを保存する必要があるため、時系列解析に基づく手法 (Time Series Analysis Based Method) と呼ぶことができる。

次に、従来用いられてきた強風発生頻度の予測手法について定式化する。1 つ目は運転規制区間内の一箇所での観測風速を運転規制区間内の風速として代表させる手法である。この手法では、運転規制区間内での最大瞬間風速が完全相関であると仮定している。この手法を使用した場合の運転規制区間の強風発生頻度は以下の式により求めることができる。

$$P_{nk} = P(\hat{u}_r > u^{\text{limit}}) = P_r \quad (20)$$

ここで、 $\hat{u}_r$ は観測された最大瞬間風速、 P_r は観測地点での強風発生頻度である。この手法では、運転規制区間における瞬間風速の最大値が常に観測地点で計測される場合に、一箇所の観測値から運転規制区間内の強風発生頻度を予測できるというメリットがあるが、複雑地形の影響を受けるような運転規制区間では観測地点以外で強風が発生する可能性があり、強風発生頻度を過小評価する可能性がある。

2 つ目は欧州で用いられている方法である。サブ区間内の最大瞬間風速を観測風速と数値流体解析から求めた風速比と風向偏角により予測し、サブ区間の最大瞬間風速は相互に独立であると仮定することにより、運転規制区間内の強風発生頻度を式(21)から求める。

$$P_{nk} = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i] \quad (21)$$

ここで、サブ区間 i 内の強風発生頻度 P_i は式(22)により算出している。

$$P_i = P(\hat{u}_i > u^{\text{limit}}) = P(u_r \times S_{ir} \times G_i > u^{\text{limit}}) \quad (22)$$

ここで、 S_{ir} は観測地点とサブ区間 i の代表点との風速比、 G_i はサブ区間 i の代表点での突風率を示す。

この手法では、時系列データを保存することなく統計解析のみで強風発生頻度が予測できるというメリットがあるが、サブ区間相互に吹く風の相関を無視したことにより、運転規制区間内の強風発生頻度を過大に評価する可能性がある。このように、従来用いられてきた手法のいずれも時系列データを保持することなく、統計データのみを利用するため、統計解析に基づく手法 (Probabilistic Analysis Based Method) と呼ぶことができる。

3.2. 強風発生頻度予測手法の実測による検証

本研究では、提案手法の予測精度を検証するため、図13に示す東北本線・藤田駅周辺の5地点で2004年2月から2005年1月の1年間に実施した風観測を基に、各観測地点が代表点となるサブ区間からなる総延長約3kmの仮想的な運転規制区間において、前述の3つの手法により強風発生頻度を評価した。ここで、5つの観測地点のうち地点3を観測地点、その他の地点を予測対象地点とした。

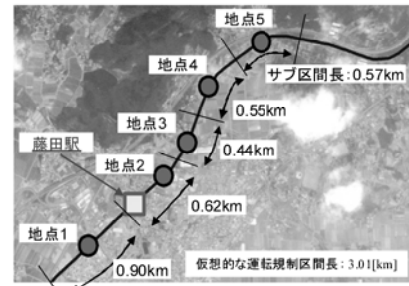


図13 仮想運転規制区間とサブ区間の設定
(Description of a virtual control section and sub-sections)

図14には各予測手法により求めた風速25m/sを超える頻度を示す。図中の観測値は5地点の観測値から直接求めた強風発生頻度を示す。本研究で提案した時系列解析手法により求めた強風発生頻度は、観測値と良く一致する。一方、1地点の観測風速で運転規制区間の風速を代表させる手法では、運転規制区間内の風速が25m/sを超える頻度が過小評価されている。これは、観測地点以外の場所で発生した強風を見逃したためである。またサブ区間内の最大瞬間風速が独立であると仮定した手法では、25m/sを超える頻度が過大評価されている。これは実際に

は存在するサブ区間内の風速の相関を無視しているため、強風を重複して評価したためである。

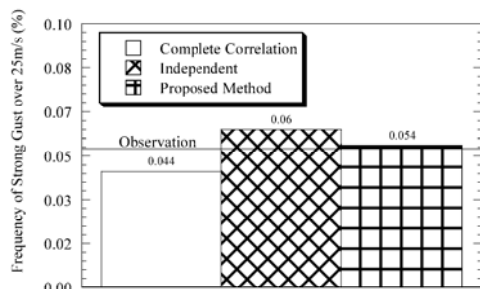


図 14 風速 25m/s 超過頻度の予測値と観測値との比較
(Comparison of simulated and observed occurrence of strong gust over 25m/s)

3.3. 強風発生頻度予測精度のサブ区間長の影響

提案手法による運転規制区間内の強風発生頻度の予測精度は、サブ区間長を短くするほど向上するが、計算時間が長くなる。本研究ではサブ区間長が運転規制区間内の強風発生頻度に与える影響を調べると共に、サブ区間長を系統的に変化させ、サブ区間長に依存しない強風発生頻度の推定手法を提案する。

図 15 には東北本線の藤田駅を中心とする約 6km の仮想的な運転規制区間を 50m から 1000m までのサブ区間長で分割した場合の予測結果を示す。図中には、従来手法による予測結果も併せて示した。本研究で提案した手法を用いる場合には、サブ区間長が 200m 以下ではほぼ一定の値を示し、強風発生頻度のサブ区間長への依存性がなくなることが分かる。一方、運転規制区間内の風速を 1 地点での観測風速で代表させる場合には、強風発生頻度が過小評価されている。また、サブ区間の最大瞬間風速が独立していると仮定した場合には、サブ区間長が短くなるにつれて強風発生頻度は極端に大きくなる。日本のように地形が急峻な場合にはサブ区間長を短くする必要があるため、欧州で用いられた予測手法は適用できないことがわかる。

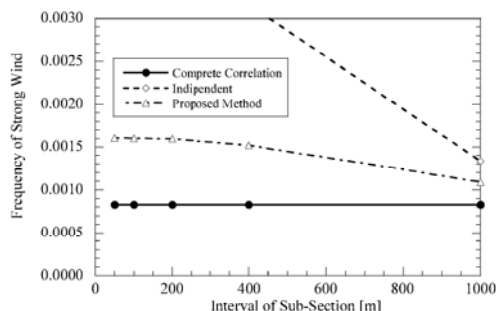


図 15 強風発生頻度のサブ区間長による変化
(Variation of occurrence of strong gust with the interval of sub-section)

表 2 推定式の係数の一覧

(List of coefficients in equation 23)

	サブ区間長	
	100,200,400	200,400,1000
C_1	-4.74E-15	-3.04E-09
C_2	3.93E+00	1.75E+00
C_3	1.60E-03	1.63E-03

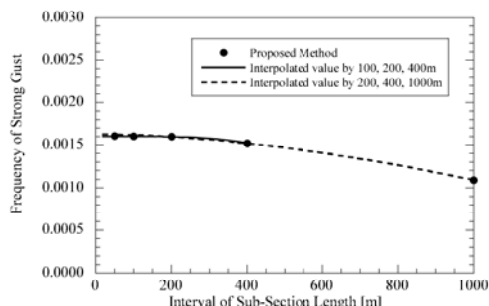


図 16 強風発生頻度の推定値と予測値との比較
(Comparison of estimated and simulated occurrence of strong gust)

表 3 各種強風発生頻度予測手法の予測誤差

(Prediction errors by conventional and proposed methods)

サブ区間長 [m]	完全相関	無相関	相関考慮
50m	-49.14%	1088.48%	-1.47%
100m		522.52%	-1.66%
200m		217.55%	-1.96%
400m		94.17%	-6.63%
1000m		-18.16%	-32.94%

サブ区間長に依存しない強風発生頻度を求めるため、本研究では、強風発生頻度はサブ区間長 r の関数として式(23)により表わした。

$$P_{nk} = C_1 r^{C_2} + C_3 \quad (23)$$

式中のパラメータ C_1 , C_2 , C_3 は異なるサブ区間長から求めた強風発生頻度により同定した。サブ区間長に依存しない強風発生頻度は、サブ区間長 r が 0m のときの値であり、 C_3 となる。

表 2 にはサブ区間長が 100m, 200m, 400m および 200m, 400m, 1000m のときの強風発生頻度から同定した各係数の値を示す。 C_3 の推定結果はそれぞれ 1.60×10^{-3} と 1.63×10^{-3} であり、その差は小さく、式(23)の有効性が示された。図 16 には、異なるサブ区間長の組合せにより得られた推定式と強風発生頻度の予測値との比較を示す。図 16 から、推定式は強風発生頻度のサブ区間長による変化をよく表していることが分かる。

表 3 には三つの手法により求めた強風発生頻度の予測誤差を示す。運転規制区間内の風観測値のみを用いる場合、予測誤差は、-49.14%であり、強風発生頻度が過小評価されていることが分かる。一方、サブ区間の最大瞬間

風速が独立であると仮定した場合には、サブ区間長が短くなるにつれて、予測誤差が急激に大きくなることがわかる。本研究で提案した手法ではサブ区間長を 200m 以下にした場合の予測誤差の絶対値は 2.00%以下であり、今回の対象地域では、サブ区間長を 200m 程度まで解像することにより、強風発生頻度を精度よく求めることができることがわかる。

4. 強風対策効果の評価

本章では、強風遭遇頻度の予測手法を定式化し、列車速度、風向を考慮した運転規制および防風柵設置による強風対策の効果を定量的に評価する。

4.1. 強風遭遇頻度の評価

規制風速は列車が横風を受けて転覆する場合の最小の風速（転覆限界風速）に対し安全率を考慮した風速として設定される。日比野⁴⁾により提案された転覆限界風速の算出方法を付録 3 に示す。この算出手法では、自然風だけでなく車両の走行速度も考慮した相対速度を用い鉄道車両の力学的解析により求めることから、走行速度を減速することにより転覆限界風速を向上させることができる。そのため、規制風速以上の風が観測あるいは予測された場合には、列車を減速あるいは停車させる対策が実施されている。

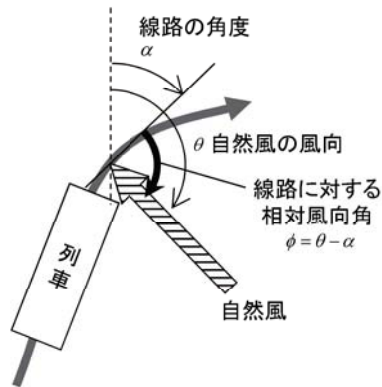


図 17 線路に対する相対風向角の定義
(Definition of relative wind direction for railway)

転覆限界風速は図 17 に示すように列車に対する風の相対風向角 ϕ の関数として定義される。しかし風向計が設置されていない場合には、常に最悪の風向から風が吹いていると仮定して、最も低い転覆限界風速を基に運転規制風速を設定しなければならないため、強風発生頻度を過大に評価してしまう。したがって風向を考慮した運転規制を実施することにより、鉄道輸送の安定性を向上さ

せることができる。

また、防風柵を設置することにより、鉄道車両が受ける空気力を減少することができるため、転覆限界風速を向上することができ、高い頻度で強風が吹く箇所においては、防風柵を設置することにより鉄道輸送の安定性を向上させることができる。

上述の強風対策の費用対効果を評価するために、本研究では列車速度、風向、防風柵の効果を考慮した強風遭遇頻度の評価手法を定式化した。強風遭遇頻度は次式により求めることができる。

$$P_{nk} = P \left[\max_{i=1, \dots, n} \{ \hat{u}_i(t) \times \gamma(V, \phi, C_a) \} > u^{\text{limit}} \right] \quad (24)$$

ここで、 u^{limit} は規制風速を表す。また、 $\gamma(V, \phi, C_a)$ は列車速度、風向、防風柵などの強風対策に応じた最大瞬間風速の補正係数を示し、転覆限界風速により求める。

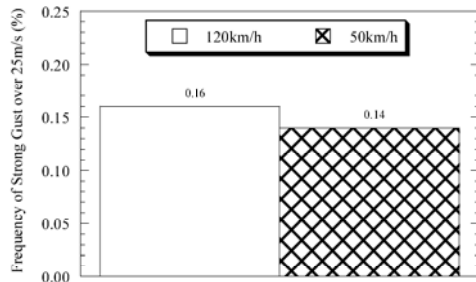
$$\gamma(V, \phi, C_a) = \frac{U_c(V_c, \phi_c, C_{ac})}{U_c(V, \phi, C_a)} \quad (25)$$

ここで、転覆限界風速 $U_c(V, \phi, C_a)$ は列車速度 V 、列車走行方向と風向の線路に対する相対風向角 ϕ および列車に作用する空気力係数 C_a の関数であり、 V_c 、 ϕ_c 、 C_{ac} はそれぞれ転覆限界風速が最も低い時の列車速度、列車走行方向と風向の相対風向角および空気力係数を表す。

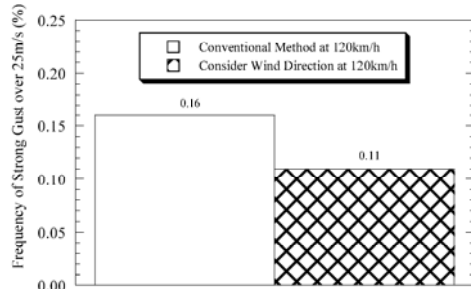
風向および列車の減速を考慮しない場合、 ϕ は ϕ_c で、 γ は 1 となる。運行規制区間の最大瞬間風速が規制風速を超える場合に、強風に遭遇するとして頻度を求める。一方、風向を考慮する場合には γ は風向 ϕ_c 以外の場合に 1 より小さくなり、運行規制区間内の最大瞬間風速が低減され、強風遭遇頻度が小さくなる。同様に列車が徐行した場合や防風柵を設置した場合には γ の値は 1 より小さく、強風遭遇頻度も減少する。ただし、安全上の観点から γ の下限値を設定する必要がある。たとえば、設備等の安全性から許容できる風速 U_a がある場合には $U_c(V_c, \phi_c, C_{ac})/U_a$ が下限値となる。

4.2. 強風対策効果の評価

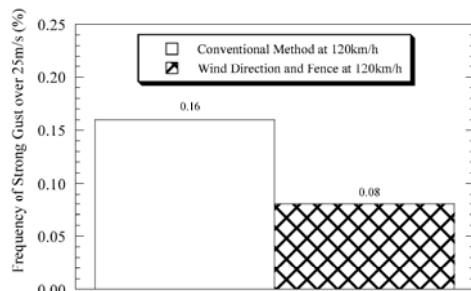
強風対策の効果を定量的に評価するために、3.3 節で用いた運転規制区間(約 6km)を対象にサブ区間を 200m とし提案の評価手法を適用し、風向を考慮せずに列車速度を減速した場合、風向を考慮した場合、防風柵を設置した場合の運転規制区間における 25m/s を超える年間の強風遭遇頻度を求めた。25m/s を超える年間の強風遭遇頻度は 25m/s で運転規制を実施した場合の運転規制頻度と等価である。



(a) 走行速度



(b) 風向考慮の有無（走行速度 120km/h）



(c) 防風柵設置の有無（走行速度 120km/h）

図 18 列車速度，風向考慮，防風柵設置による強風遭遇頻度の変化
(Encounter frequency of strong gust considering train speed, wind direction, and wind fences)

図 18 には列車速度，風向考慮，防風柵設置による強風遭遇頻度の変化を示す。図 18(a)から，列車走行速度を 120km/h から 50km/h に減速した場合には，強風遭遇頻度は 0.16% から 0.14% に減少することが分かる。これは 120km/h から 50km/h に減速することにより，転覆限界風速が上昇し，それを超える強風の頻度が減少するためである。また図 18(b)から，列車走行速度が 120km/h のときに風向を考慮した場合の強風遭遇頻度は考慮しない場合の 0.16% から 0.11% に減少することが分かる。これは，120km/h 走行時の最も低い転覆限界風速に対して，風向を考慮することにより， ϕ_c 以外の風向における転覆限界風速が上昇し，強風遭遇頻度が減少するためである。図 18(c)から，走行速度 120km/h のときに風向を考慮し，さらに防風柵を設置した場合の強風遭遇頻度は 0.08% となり，対策を実施しない場合の 0.16% より大きく減少する

ことが分かる。防風柵を設置することにより転覆限界風速が上昇し，その分強風遭遇頻度を抑えることができるためである。このように，本研究で提案した強風遭遇頻度予測手法により，強風対策を実施した場合の効果を定量的に評価することが可能であることが分かった。

5. まとめ

列車運行の安全性と安定性を向上するためには，運転規制区間内の強風発生頻度を適切に予測する必要がある。本研究では，風観測と数値流体解析を組み合わせた強風予測手法を定式化すると共に，運転規制区間のサブ区間で吹く強風イベントを予測した。次に，それぞれのサブ区間相互の風の相関を適切に考慮した強風発生頻度予測手法を提案し，その有効性を現地観測により検証した。その結論を以下に示す。

- (1) 観測地点と予測対象地点の風速比と風向偏角および観測地点での平均風速と風向から予測対象地点での最大瞬間風速を予測する手法の定式化を行い，風観測と数値流体解析を組み合わせた最大瞬間風速予測手法を示した。得られた手法を用いて，線路沿線の任意地点における時系列最大瞬間風速と風向を予測し，実測結果と比較し，精度よく予測できることを示した。
- (2) 運転規制区間内のサブ区間相互の風の相関を考慮した強風発生頻度予測手法を提案し，実測と比較することにより提案手法により強風発生頻度を精度よく予測できることがわかった。一方，運転規制区間内の風速を完全相関または独立であると仮定した既往の手法では，強風発生頻度が過小評価または過大評価される可能性があることを示した。
- (3) サブ区間長を系統的に変化させた強風発生頻度予測結果を用いたサブ区間長に依存しない強風発生頻度の推定手法を提案し，仮想的な運転規制区間において検証した。その結果，対象とした区間では 200m 程度とした場合の結果が 50m 程度とした場合と同等であることが確認でき，解析時間を短縮する可能性を示した。
- (4) 提案した強風遭遇頻度予測手法を用いて，列車速度，風向を考慮した運転規制手法および防風柵の設置による強風対策の効果を調べた。その結果，対象とした運転規制区間では，列車速度を 120km/h から 50km/h に減速することにより強風遭遇頻度が 0.16%

から 0.14%に減少することができることが分かった。
また、風向を考慮した運転規制を実施することにより、0.16%から 0.11%に減少し、さらに防風柵を設置することにより 0.08%に減少することがわかった。

なお、本研究成果の一部は 2008 年第 20 回風工学シンポジウムにて発表したが、最大瞬間風速予測手法の定式化、サブ区間長に依存しない強風発生頻度予測手法の提案、列車の徐行による強風対策の効果の検証を追加し、論文の内容および考察の充実を図った。

また、本研究の目的は、輸送安定性の向上であるため、運転規制に適用する際には、予測誤差を考慮した信頼区間を決定し、安全性を担保する必要がある。これについては、別の論文において述べる予定である。

付録 1 最大瞬間風速の風向と平均風向との関係

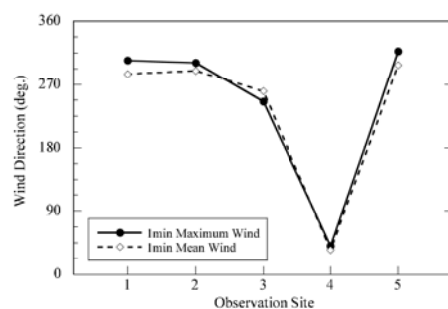
最大瞬間風速の風向と平均風向との関係を明らかにするために、本研究で対象とする東北本線の藤田駅前後の 5 地点における 2004 年 2 月から 2005 年 1 月の 1 年間に観測された強風事例について、1 分間平均風向および 1 分間最大瞬間風速の風向を比較した (付図 1)。その結果、いずれの事例も最大瞬間風速の風向と 1 分平均風向はほぼ同じであり、最大瞬間風速の風向を予測する際には、平均風向を用いてよいことが分かる。

付録 2 1 分間平均風速比と 30 分平均風速比の比較

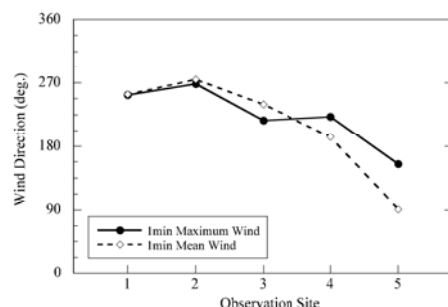
風工学の分野では平均風速の評価時間を 10 分から 1 時間として用いることが一般的であるが、本研究では列車に対する強風遭遇頻度の推定に必要な 1 分間を評価時間として平均風速を予測する必要がある。そこで、評価時間の影響を調べるため、本研究で対象とする東北本線の藤田駅前後の 5 地点における 2004 年 2 月から 2005 年 1 月の 1 年間に観測された強風事例について、1 分間平均風速と 30 分平均風速から求めた風速比を比較した (付図 2)。その結果、風速比の分布に若干のばらつきはあるものの、いずれの事例においても 1 分間平均風速と 30 分平均風速はほぼ同じ分布を示していることが分かった。したがって、数値流体解析より求められる風速比を評価時間 1 分の平均風速に対しても適用できると考えられる。

付録 3 転覆限界風速の算出

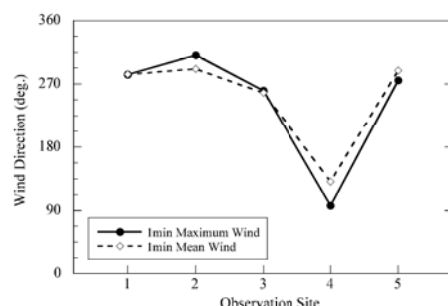
本研究では強風に対する車両の転覆耐力を転覆限界風速として以下に示す方法により求める。具体的には、列



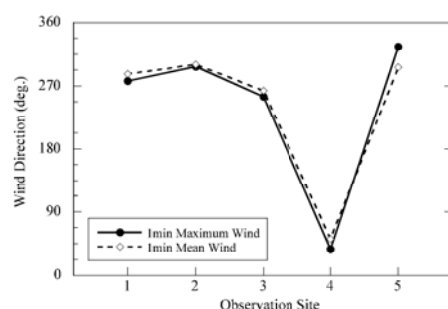
(a) 事例 1 2004 年 12 月 17 日 6 時 54 分



(b) 事例 2 2004 年 11 月 27 日 9 時 15 分



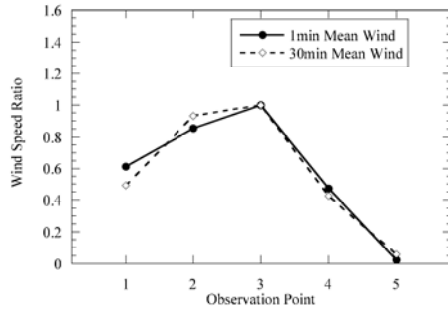
(c) 事例 3 2004 年 4 月 21 日 0 時 50 分



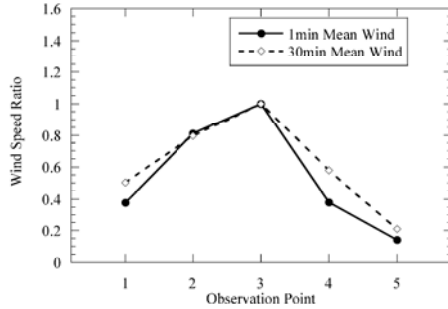
(d) 事例 4 2004 年 2 月 23 日 20 時 25 分

付図 1 強風時の瞬間風向と平均風向との比較
(Comparison of instantaneous and mean wind directions for the strong gust events)

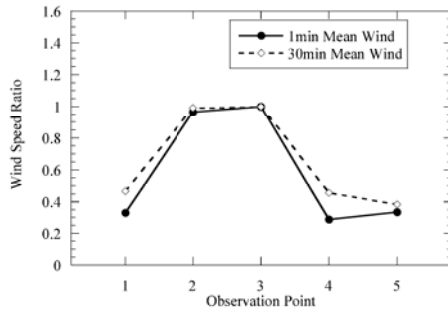
車が横風を受けた場合、横風による外力により車体に左右変位と回転変位が発生する。風速が増加するとそれらの変位が増加し、風上側の車輪とレールの接触点にかかる重量が減少する。この車輪とレールの接触点にかかる重量を輪重と呼ぶ。風速がさらに増加し、車体変位が車



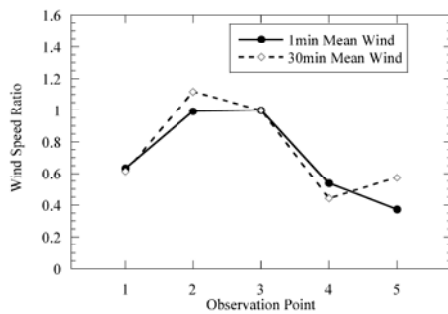
(a) 事例1 2004年12月17日6時54分



(b) 事例2 2004年11月27日9時15分



(c) 事例3 2004年4月21日0時50分



(d) 事例4 2004年2月23日20時25分

付図2 強風時の1分と30分平均風速の風速比の比較
(Comparison of 1 and 30 minute mean wind speed ratios for strong gust events)

両構造の限界に達し、風上側の輪重が0となった場合に車体は転覆を開始すると考えられる。その場合の風速を転覆限界風速と呼び、転覆限界風速については、日比野ら⁴⁾により車両の構造力学と車両の走行状態および周辺構造物の影響を考慮した静的解析法が提案されている。

日比野らによる静的解析法では、車両の転覆への影響が大きい外力として、車体と台車にかかる重力、横風による空気力、曲線通過時の超過遠心力、車体の左右振動慣性力を考慮する。曲線を走行している車両に曲線内側から横風が吹き付けている状態(付図3-1)において、風下側の車輪とレールの接触点におけるモーメントのつりあいの式は次式に表される。

$$P_L G = m_B g \left(\frac{G}{2} - y_B \right) + m_T g \frac{G}{2} - F_L \left(\frac{G}{2} - y_B + e \phi_B \right) - h_{BC} F_S - h_{GB} m_B \alpha_u - h_{GT} m_T \alpha_u - h_{GB} m_B \alpha_y \quad (\text{付3-1})$$

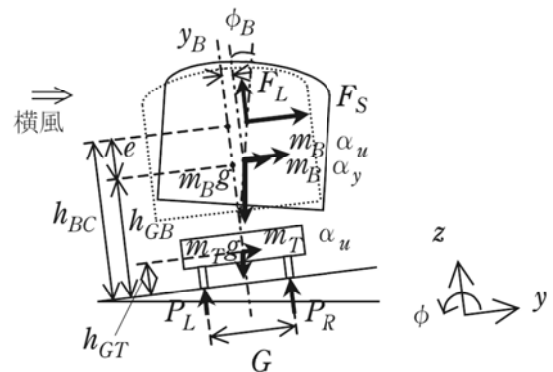
ただし、風による横力 F_S 、風による揚力 F_L 、および風圧中心高さ h_{BC} は、以下の式で表わされる。

$$F_S = \frac{1}{2} C_S \rho U_R^2 S_A \quad (\text{付3-2})$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U_R^2 S_A \quad (\text{付3-3})$$

$$h_{BC} = h_{B1} + \frac{C_{MR}}{C_S} h_{B2} \quad (\text{付3-4})$$

ここで、 P_L は左車輪(風上側)の輪重、 G は車輪レール接触点間距離、 m_B は車体質量、 m_T は台車質量、 g は重力加速度、 y_B は車体重心の左右変位、 ϕ_B は車体まわりのロール変位、 e は車体重心と風圧中心距離、 h_{GB} は車体重心高さ、 h_{GT} は台車重心高さ、 h_{B1} は車体中心高さ、 h_{B2} は車体高さを示す。また C_S は横力係数、 C_L は揚力係数、 C_{MR} はローリングモーメント係数、 ρ は空気密度、 U_R は走行車両に働く相対風速、 S_A は車体側面積を表す。



付図3-1 横風を受けた場合に車両に働く力⁴⁾
(Forces acting on a train with cross wind)

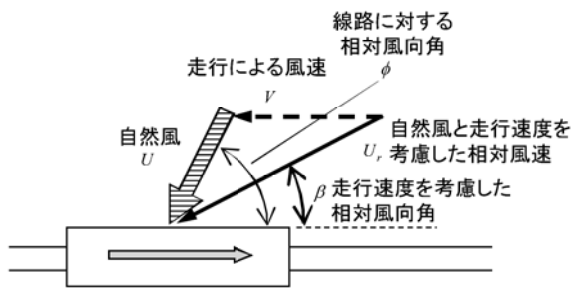
式(付3-1)の右辺第1項、第2項は車体と台車に働く重力によるモーメント、第3項、第4項は空気力によるモーメントを示す。 α_u は超過遠心加速度、 α_y は左右振動加速度、第5項、第6項は超過遠心力によるモーメント、

第7項は左右振動慣性力によるモーメントを示す。

式(付3-1)で $P_L = 0$ のとき、すなわち風上側の輪重が0となる場合の風速が転覆限界風速となる。計算に必要な横力係数 C_S 、揚力係数 C_L 、ローリングモーメント係数 C_{MR} は車両および周辺構造物(橋梁、高架橋、盛土、防風柵)の縮尺模型を使用した風洞試験により風向別に求める。日比野らの静的解析法では、車両が走行することにより発生する相対風速を考慮する(図付3-2)。すなわち、式(付3-2)、(付3-3)における風速 U_R は風洞試験で再現する自然風 U と車両の走行速度からなる相対風速であり、横力係数 C_S 、揚力係数 C_L 、ローリングモーメント係数 C_{MR} は自然風と車両の走行速度からなる相対風速の相対風向角 β から求められる。走行速度を考慮した相対風速 U_R は自然風速 U と走行による相対風速 V から以下の式で表すことができる。

$$U_R^2 = (U \sin \phi)^2 + (V + U \cos \phi)^2 \quad (\text{付3-5})$$

ここで、 ϕ は線路に対する相対風向である。



図付3-2 走行を考慮した相対風向角
(Definition of relative wind direction considering train speed)

謝辞：本研究にあたり、東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻山口敦助教から多大なるご協力およびご助言を頂いた。また東京大学工学部社会基盤学科4年生鈴木景氏(研究時)に協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤井昌孝, 藤井俊茂, 村石尚, 「強風時の運転規制の歴史」, 鉄道総研報告 Vol.9, No.3, pp.43-48 (1995)
- 2) 餘部事故技術調査委員会, 餘部事故技術調査委員会報告書 (1988)
- 3) 国枝正春, 「鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析」, 鉄道技術研究報告, (2), pp.1-15 (1972)
- 4) 日比野有, 石田弘明, 車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, 17(4), 39-44 (2003)

- 5) 藤井俊茂, 「強風時の列車脱線転覆事故防止に関する研究と対策の現状」, JREA, Vol.41, No.6, pp.9-12 (1998)
- 6) 松田洋一, 進藤州弘, 藤井俊茂, 「高盛土及び高橋梁区間の風向を考慮した強風対策 -根室本線-」, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 35, pp.928-930 (1997)
- 7) Imai, T., Fujii, T., Tanemoto, K., Shimamura, T., Maeda, T., Ishida, H., Hibino, Y., "New train regulation method based on wind direction and velocity of natural wind against strong winds", J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn., Vol. 90, pp.1601-1610 (2002)
- 8) 種本勝二, 鈴木実, 斉藤寛之, 今井俊明, 「風洞実験による防風対策の評価」, Railway Research Review, 62(2), pp.10-13 (2005)
- 9) 種本勝二, 鈴木実, 斉藤寛之, 「横風に対する車両の空気力学的特性風洞試験」, Railway Research Review, 63(8), pp.28-31 (2006)
- 10) 東日本旅客鉄道株式会社, 風規制による輸送障害対策について, http://www.jreast.co.jp/press/2006_2/20061102.pdf (2006)
- 11) Matschke, G., Tielkes, T., Deeg, P., Schulte-Werning, B., "Effects of Strong Cross Winds on High-Speed Trains – a Risk Assessment Approach", PSAM 5 - Int. Conf. of Probabilistic Safety Assessment and Management, Osaka, Japan (2000)
- 12) Cl  on, L. M., Parrot, M., Tran-ha, S., "Les vents traversiers sur la LGV M  diterran  e", Revue G  n  rale des Chemins de Fer, pp.71-88 (2002)
- 13) Yamaguchi, Y., Ishihara, T., Fujino, Y., "Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan", J. of Wind Eng. Indus. Aerodyn. Vol.91, pp.247-264(2003)
- 14) Ishizaki, H., "Wind Profiles, Turbulence Intensities and Gust Factors for Design in Typhoon-Prone Regions", J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn., vol. 13, pp.55-66 (1983)
- 15) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 「複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証」, 土木学会論文集, No.731, I-63, pp.195-211 (2003)
- 16) 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, pp.387-396 (2003)