

数値解析手法を用いた鉄道沿線における 強風箇所の抽出方法

荒木 啓司* 福原 隆彰*
島村 泰介** 今井 俊昭*

A Method to Detect Strong Wind Sections Along Railway Lines
by Using Numerical Simulations

Keiji ARAKI Takaaki FUKUHARA
Taisuke SHIMAMURA Toshiaki IMAI

Anemometers are arranged in the operation sections of railway lines to prevent overturning accidents of trains by strong winds. Safety against strong winds in the operation sections can be improved by setting up anemometers in the locations where wind velocities frequently exceed the critical wind speed of overturning. Therefore, we need to estimate expected value of occurring wind velocities along railway lines for optimal anemometer arrangements. This paper introduces a method to estimate expected value of occurring wind velocities near the surface of the ground by using numerical simulations and topographical factor analysis.

キーワード：強風箇所，数値シミュレーション，地形因子解析，再現期待値

1. はじめに

強風による列車の脱線転覆事故を未然に防ぐために、鉄道沿線に規制用風速計が配置され、これらの風速計が強風を検知した場合に、列車の運転を抑止する、あるいは走行速度を制限するといった運転規制が発令される。

ある規制区間において、列車の転覆限界風速以上の風速が出現する頻度の最も高い箇所に規制用風速計を設置すれば、区間全体で強風に対する安全が確保されると考えられる。そこで、規制用風速計の設置箇所の検討のためには、鉄道沿線における風速の N 年再現期待値(N は数～数十年の適当な期間)を算出する必要がある。

本稿では、風速の再現期待値の算出に際して、鉄道で従来用いられてきた地形因子(地形の特徴を表す量)解析¹⁾と、風力発電用風車の建設や計画に伴い近年発達してきた数値解析(数値シミュレーション)技術^{2~4)}とを組み合わせ、地表付近の風速の再現期待値を算出し、この結果と、線路構造物に応じた転覆限界風速とを合わせて鉄道沿線の強風箇所を抽出する方法について述べる。

2. 強風箇所抽出方法の概要

強風による鉄道車両の脱線転覆現象は、長い評価時間の平均風速ではなく、短時間の風速がある値を上回った時に生じるものと考えられている。そこで、本研究では鉄道沿線の最大瞬間風速の再現期待値を算出し、この値と鉄道沿線で様々な値となる転覆限界風速とを合わせて評価することで、鉄道沿線の風に対する警戒箇所を抽出することを目的とした。しかし、最大瞬間風速の再現期待値を数値シミュレーションで直接求めることは困難なため、平均風速の再現期待値と突風率(平均風速に対する最大瞬間風速の比)とを別々に求め、両者から最大瞬間風速の再現期待値を求めることとした。本研究における鉄道沿線の強風箇所抽出フローを図1に示す。

以下に、このフローに沿って抽出までの方法を紹介する。

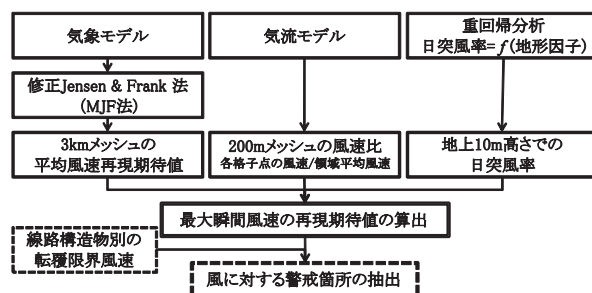


図1 鉄道沿線の強風箇所抽出フロー

* 防災技術研究部(気象防災)

** 研究開発推進室

特集：防災技術

3. 気象モデルを用いた平均風速の再現期待値の算出

3.1 気象モデル

3.1.1 気象モデルの概要

気象の数値シミュレーションとは、対象領域を経度方向、緯度方向、高さ方向の3次元格子に区切り、各格子点における気象要素（温度、湿度、風向風速など気象に関する物理量）を初期条件・境界条件として与えた上で、気象要素のその後の変化をコンピュータで数値的に計算することである。今回使用した気象モデルは、(株)CRCソリューションズ（現 伊藤忠テクノソリューションズ(株)）のLOCALSで、地形や降水過程の再現方法が、日本付近の気象に合わせた仕様となっている²⁾。大領域の計算では、おおまかな風速場を求めることに焦点をあてたので、基本方程式系は、鉛直方向の運動が水平方向の運動に比べ充分小さいと仮定した静力学完全圧縮方程式系を用いた。地形は国土地理院発行の50mメッシュ数値標高データを元に、3kmメッシュで再現した。

本研究では京阪神地域ならびに九州地域を大領域のモデル地域として、各地域内にある気象官署の風観測データから過去20年間の強風日を1年あたり上位15位まで、合計300日を抽出し、この気象モデルを用いて強風日ごとに地上高さ10m相当の格子点における風速の日最大値を求めた。気象モデルで求められる風速は、平均的な風速であるため、この風速値を当該格子点における各事例での平均風速の最大値とした。

3.1.2 初期条件と境界条件

気象モデルの初期条件・境界条件には、米国の環境予測センター（NCEP）と大気研究センター（NCAR）が作成した再解析データを使用した。NCEP/NCARの再解析データの格子点間隔は約250kmと粗いが、①計算機で扱いやすい格子点値になっていること、②世界各国の気象研究者に利用されており信頼性が高いこと、③地球全体のデータがあること、が利点として挙げられる。

3.1.3 計算方法

第一段階として、NCEP/NCAR再解析データを初期条件・境界条件とした20kmメッシュのシミュレーションを実施し、第二段階として20kmメッシュのシミュレーション結果を初期値・境界値とした3kmメッシュのシミュレーションを実施した。気象モデルでの時間ステップは、クーラン条件を満足するよう、第一段階（20kmメッシュ）では60秒、第二段階（3kmメッシュ）では10秒とした。各強風事例について、前日21時から翌日0時までの27時間分の計算を実施し、24時間の最大値を日最大風速とした。

3.2 再現期待値の計算方法

今回、再現期待値の計算には、最新の建築物荷重指針⁵⁾で用いられている修正Jensen & Frank法⁶⁾⁷⁾（以下、MJF法と呼ぶ）を使用した。従来、鉄道で用いられてきた再現期待値算出方法（例えばGumbel法）では、年間第1位のみを使っていたが、MJF法ではその年における第2位以下の風速記録も抽出し極値分布を評価する。従って、短い統計年数でも評価の対象となるデータ数が多くなるので、長い統計年数で年間第1位の値のみを使って得られた再現期待値と同等な精度の結果が得られる。

3.3 気象モデルによる風速再現期待値の計算結果

気象モデルにより求めた地上高さ10mでの平均風速の50年再現期待値の分布を、京阪神地域を例に図2に示す。

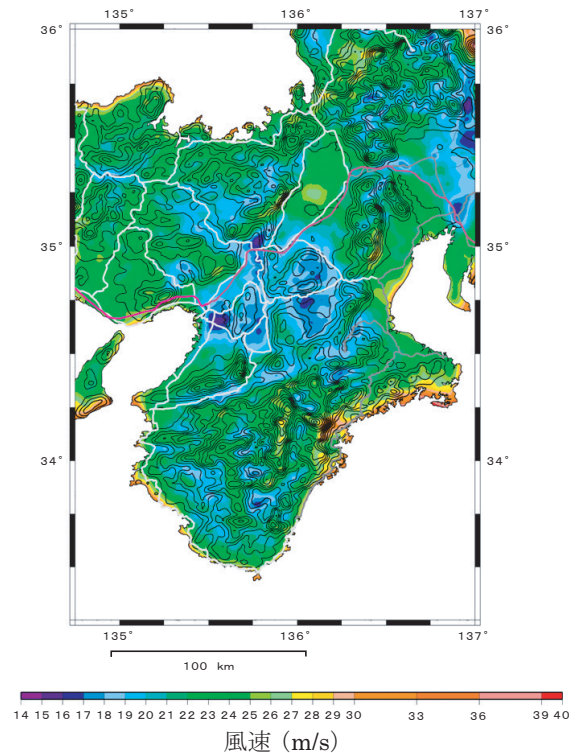


図2 気象モデルで求めた地上高さ10mでの平均風速の50年再現期待値分布（京阪神地域の例）

4. 気流モデルを用いた風速分布解析

4.1 気流モデル

4.1.1 気流モデルの概要

風速は、大気の状態だけではなく地形の影響も受ける。そこで、数百m規模の小地形が気流に及ぼす影響を調べるために、気流モデルを用いて平均風速の分布を求めた。

気流の数値シミュレーションとは、計算の対象領域を3次元格子に区切り、各格子点における風向・風速と圧力を流体力学に基づいて数値的に計算することである。

なお、気流モデルでは湿度、降水、放射などは再現さ

れない。今回使用した気流モデルは、九州大学応用力学研究所が開発した RIAM-COMPACT の中立成層版³⁾で、①計算条件を設定する際のユーザー側の自由度が大きいこと、②複雑な地形上の非定常で複雑な気流を計算するため、LES (Large Eddy Simulation) と呼ばれる乱流モデルを採用していること、③ネストグリッド³⁾を用いることにより、広域から注目する局所域まで多段階で効率良く計算することが可能であること、が特徴として挙げられる。

4.1.2 格子点配置

風速分布を詳細に求めるため、3km 四方・格子点間隔 200m の解析領域を設定し、これより上流側の地形の及ぼす影響を解析領域に反映させることによりその境界条件とするため、解析領域の外側に約 25km 四方の領域を設けた。外側の領域の格子点間隔は、200m から約 900m まで外側ほど徐々に大きくなるようなネストグリッドを設け、これらを合わせて計算領域とした。一方、計算領域の高さは、計算領域内の最小標高地点と最大標高地点との差の大きさの 4 倍以上となるように、2000m、4000m、6000m のいずれかを計算領域毎に選択した。また、地形が風速に及ぼす影響は風向によって異なるので、北、北東、東、南東、南、南西、西、北西の 8 方位についてそれぞれシミュレーションを実施した。今回の気流モデルでは、初期条件を格子点配置の水平座標軸に平行な風で与える仕様となっているため、北、東、南、西の 4 方位（以下、直角風と呼ぶ）と、北東、南東、南西、北西の 4 方位（以下、斜め風と呼ぶ）とで、解析領域内の格子点が重なるように格子点を配置した。その結果、格子点数は直角風の場合では 51 × 51 × 41（主流方向 × 主流直角方向 × 高さ方向）、斜め風の場合では 81 × 81 × 41 となった。

4.1.3 計算方法

初期条件は、計算領域内の最大標高と同じ高さでの風速を 15m/s（流入条件の風速と呼ぶ）とし、鉛直分布は地表面に近づくほど風速が徐々に小さくなるようにべき乗則（べき指数=1/4）で与えた。この風速分布が計算領域の全域に与えられた状態から計算を開始した。

シミュレーションの時間ステップは 0.05 秒とした。8 方位全ての計算において、気流が定常状態になった後の 5 万～6 万ステップまでの主流方向成分の平均風速（メッシュ平均風速と呼ぶ）を用いて、解析領域内における地上高さ 10m 相当の位置での風速比を以下の方法で求めた。

風向 θ (=北、北東…、北西) で地上高さ 10m 相当の格子点 (a,b) におけるメッシュ平均風速を $\bar{U}(a,b,\theta)$ とする。また、当該メッシュを含む 3km 四方の解析領域内の $\bar{U}(a,b,\theta)$ の空間平均値を $\bar{U}_{area}(\theta)$ とする。格子点 (a,b) における風速比 $R_{200m}(\theta)$ は、次式より求めた。

$$R_{200m}(a,b,\theta) = \bar{U}(a,b,\theta) / \bar{U}_{area}(\theta) \quad (1)$$

4.2 風速分布の算出結果

気流モデルを用いて求めた地上高さ 10m での風速比の分布について、西風の計算結果を図 3 に例示する。

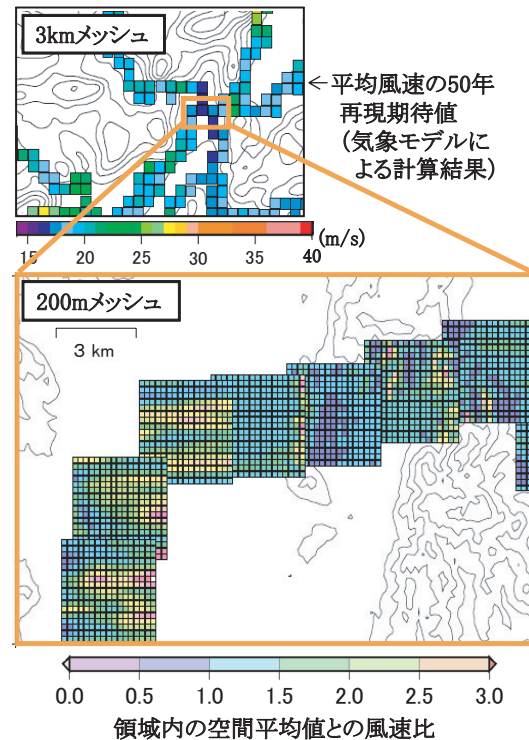


図3 気流モデルで求めた風速分布の例
(上図は図2の計算結果のうち、一部の領域を图示)

5. 地形因子を用いた突風率の推定

本章では、西日本をモデル地域として、気象官署における風向別の日突風率を目的変数、地形の特徴を表す各種地形因子を説明変数とした重回帰分析により、地形因子から日突風率を風向別に求める方法について述べる。

5.1 日突風率

日本の気象官署では、0時から24時までに観測された 10 分間平均風速の最大値（日最大風速と呼ぶ）と瞬間風速の最大値（日最大瞬間風速と呼ぶ）を発表している⁹⁾。ただし、日最大風速と日最大瞬間風速が同じ 10 分間に観測されるとは限らない。ここでは、日最大瞬間風速を日最大風速で除したものを日突風率と定義し、 G_{day} で表すことにする。3章で求めた平均風速の N 年再現期待値とは、「 N 年間に一度生じうる日最大風速の大きさ」と解釈することができるので、平均風速の N 年再現期待値に日突風率 G_{day} を乗じれば、日最大瞬間風速の N 年再現期待値を推定することができるものと考えられる。

特集：防災技術

5.2 解析に用いたデータ

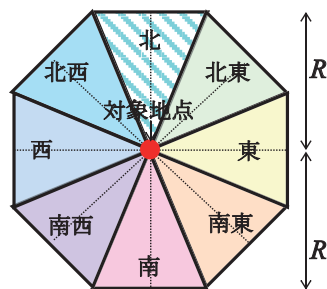
西日本の気象官署のうち26箇所について、現地調査あるいは地形図、文献による調査を行い、周辺地形の情報を得た。気象官署ごとに風速観測値に影響を及ぼす建物や樹木などが存在しない風向を確認し、これらの風向で10m/s以上の日最大風速が観測された日における日最大風速と日最大瞬間風速データを解析に用いた。今回の解析で用いたデータ期間は、1989年4月1日から2005年12月31日までの16年8ヶ月間とした。

5.3 風向別の日突風率

前節で示した条件を満たす日最大風速と日最大瞬間風速から、日突風率を算出した。算出された日突風率は日最大風速の風向で8風向(例えば、真北を中心に左右22.5度ずつを北とし、以下北東～北西も同じ)に分類した。一方、気象官署では風向を16風向で分類(例えば真北を中心に左右11.25度ずつを北とする)しているの、建築物荷重指針⁵⁾の方法に従い、16風向の北北西、北、北北東の3つの風向に含まれるデータ全てを8風向の北であると読み替え、以下、北東～北西も同様の読み替えを行った。算出した日突風率を風向別に平均し、これを日突風率の標準値と考えることとしたうえで、これらを重回帰分析の目的変数とした。

5.4 風向別の地形因子

地形因子とは、地形の特徴を表す量で、標高の格子点データをもとに算出される。従来の地形因子解析では、方位を考慮せず、対象地点(ここでは気象官署がこれにあたる)を中心とする半径 R km 以内または R km 四方の領域内で地形因子を算出していた^{1) 10)}。しかし、突風率は対象地点の風上側に位置する地形の影響が大きいものと考えられるため、風向を考慮しない地形因子に加えて風向別の地形因子を導入し、日突風率を推定する際に重回帰分析の説明変数として用いた。また、地表面の状況を表す量として用いられる粗度長、突風率への影響が大きい風速計設置箇所の地上高さ(風速計の高さ)をそれぞれ重回帰分析の説明変数として加えた。前述のように風向は8風向に分けているため、地形因子は風向を考慮しないものと8風向のものを合わせて、地点毎に9個求められる。ただし、風速計の高さは風向に関係なく同一である。図4に、風向別地形因子を求めるために用いる領域(以下、因子算出領域と呼ぶ)を示す。



$R=1\text{km}, 3\text{km}, 5\text{km}, 10\text{km}$
図4 因子算出領域(太線)

る距離 R を地形の影響を考慮する距離の指標とし、 $R=1, 3, 5, 10\text{km}$ の4通りについて、各地形因子を計算した。また、風向を考慮しない地形因子は、図4で示した二等辺三角形の領域8つを全て合わせた八角形の領域で算出した。

標高に基づく地形因子(起伏度、開放度、陸度)の算出には、国土地理院の50mメッシュ数値標高データを用いた。また、粗度長の算出には、国土交通省が公開している100mメッシュ土地利用データを用いた。解析に用いた地形因子を以下に示す。

(1) 起伏度

起伏度は、図4に示す因子算出領域内の各点の標準偏差とした。当該領域内の方位 θ にある格子点 (a, b) の標高を $h(a, b)$ 、当該領域内の平均標高を \bar{h} とする。風向 θ (=北, 北東..., 北西, 全方位) の起伏度 $D(\theta, R)$ は、(2)式で表される。

$$D(\theta, R) = \frac{1}{M} \sqrt{\sum (h(a, b) - \bar{h})^2} \quad (2)$$

ここで、 M は因子算出領域内の格子点の数である。

(2) 開放度

開放度は、対象地点の標高に ΔH (単位 m) を加えた位置に水平面を想定し、その水平面より低い格子点数の因子算出領域内の格子点数に対する割合とする。ここでは、 ΔH は $-200, -100, 0, +100, +200\text{m}$ の5通りとした。風向 θ (=北, 北東..., 北西, 全方位) の開放度 $OP(\theta, \Delta H, R)$ は、(3)式で表される。

$$OP(\theta, \Delta H, R) = \frac{((\text{方位}\theta\text{の対象地点の標高}+\Delta H)\text{より標高の低い格子点数})}{M} \quad (3)$$

(3) 陸度

50mメッシュ数値標高データを用いて、因子算出領域内の全格子点数に対する陸地(標高0以上)の割合を陸度とする。風向 θ の陸度 $Gr(\theta, R)$ は(4)式で表される。

$$Gr(\theta, R) = \frac{\text{陸地の格子点数}}{M} \quad (4)$$

(4) 粗度長

粗度長とは地表面の粗密の状態を表す量で、風速の鉛直分布が(5)式で表される対数則に従うとした場合に風速が0となる高さである。

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (5)$$

ここで、 U は高さ z における平均風速、 u_* は摩擦速度、 k はカルマン定数、 z_0 が粗度長を表す。

今回、粗度長は前述の土地利用データに基づいて計算した。土地利用データでは、地表面の状態が表1に示す11種類に分類され、これに塩谷の文献⁸⁾や欧州での研究事例¹¹⁾を参考として、それぞれの土地利用分類に粗度長の大きさを割り当てた。割り当てられた粗度長の大きさを因子算出領域内で平均して、これを因子算出領域

表1 土地利用データによる地表面の状態の分類と対応する粗度長の大きさ

土地利用データによる地表面の状態	粗度長の大きさ (m)
田	0.1
その他の農用地	0.1
森林	1
荒地	0.25
建物用地	2
幹線交通用地	1
その他用地	0.25
河川および湖沼	0.0005
海浜	0.01
海水域	0.0005
ゴルフ場	0.5

の粗度長 z_0 とした。

(5) 風速計の高さ

各気象官署の風速計の地上高さを z を用い、 z で表す。

5.5 日突風率の推定式

西日本の26箇所の気象官署を対象として、風向別の日突風率を目的変数とし、前節で示した(1)～(4)の地形因子と(5)風速計高さを説明変数にした重回帰分析を行った。まず、日突風率と各説明変数との相関係数と、説明変数相互の相関係数とを求めた。説明変数相互の相関係数が0.6以上となった場合には、日突風率との相関の小さい方を説明変数から除外し、残った説明変数を用いて重回帰分析を行った。その結果、風向 θ (=北, 北東..., 北西) の日突風率 $G_{day}(\theta)$ の推定式として、次式を得た。

$$G_{day}(\theta) = 0.44 \cdot \frac{1}{\ln(z/z_0)} - 0.009 \cdot z - 0.68 \cdot OP(ALL, 200, 10) + 0.27 \cdot Gr(\theta, 3) + 2.34 \quad (6)$$

ここで、ALLは全風向を、 θ は日突風率を求めようとする風向を表す。

西日本の26箇所の気象官署で観測された風速から求めた日突風率と、(6)式を用いて推定した日突風率との相関係数は0.67となった。

6. 鉄道沿線における風速の再現期待値

気象モデルで求めた平均風速の再現期待値、気流モデルで求めた風向別の風速比、地形因子解析で求めた日突風率の三つを用いて、鉄道沿線における最大瞬間風速の再現期待値を求める方法について以下に述べる。ここでは、再現期間を50年として説明する。

気象モデルで求めた「地上高さ10m相当の平均風速の50年再現期待値(3kmメッシュ)」のうち、検討対象の線区上で着目している地点に最も近い格子点の値を \bar{U}_{50y} で表すことにする。この \bar{U}_{50y} に気流モデルで計算した風向別の風速比を乗じることで、200mメッシュで平均風速の再現期待値の分布が求まる。風向 θ における風速比を $R_{200m}(\theta)$ とすると、 \bar{U}_{50y} と同じ風速が風向 θ で生じた場合の平均風速の再現期待値 $\bar{U}_{50y, 200m}(\theta)$ は、次のように書ける。

$$\bar{U}_{50y, 200m}(\theta) = \bar{U}_{50y} \cdot R_{200m}(\theta) \quad (7)$$

$\bar{U}_{50y, 200m}(\theta)$ に、100m間隔で算出した地上高さ10m((6式の $z=10m$) での風向別の日突風率 $G_{day}(\theta)$ を乗じれば、地上高さ10mでの風向別の最大瞬間風速の再現期待値を100m間隔で求めることができる。なお、地上高さを10mとした理由は、気象官署など既存の気象観測施設での代表的な風速計設置高さが10mであるため、これらの風速データとの照合を可能とするためである。

次に、各風向から等しく強風が吹くことはないので、風向別の重み付けをする。対象地点の風向の重み付けの係数は、対象地点から最も近い気象モデルの格子点において、3章で計算した強風日300事例のうち、事例毎の最大風速が風向 θ で生じた頻度を格子点毎に求め、これを事例の総数で除した値とした。風向 θ の重み付け係数を $D_r(\theta)$ で表すこととする。

以上、(7)式に日突風率、風向の重み付け係数を考慮すると、ある地点の地上高さ10mでの最大瞬間風速の50年再現期待値 \tilde{U}_{50y} は次式となる。

$$\tilde{U}_{50y} = \sum_{\theta} \bar{U}_{50y, 200m}(\theta) \cdot G_{day}(\theta) \cdot D_r(\theta) \quad (8)$$

7. モデル線区における規制用風速計の配置の考え方

前章までに示した方法を用いて鉄道沿線の強風箇所を抽出した結果の活用例の一つとして、規制用風速計の配置検討方法を以下に示す。

規制区間における風速計の配置に際しては、強風頻度だけでなく線路構造物の種類によって異なる転覆限界風速をも考慮する必要がある。そこで、線路構造物、規制用風速計、規制区間および駅が図5のように配置されている仮想的なモデル線区(延長20km)について、風速計の設置箇所と規制区間の妥当性を検証する。

このモデル線区では、平地の地上10m高さでの転覆限界風速が40m/sである車両を想定し、4種類の線路構造物(橋りょう, 高架橋, 盛土, トンネル)および平地での車両の転覆限界風速を図6のように仮定する。また、年最大瞬間風速が転覆限界風速 uc 以上となる再現期間 T

特集：防災技術

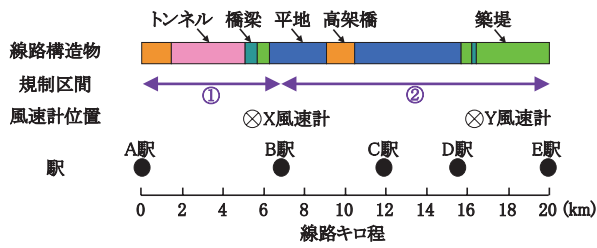


図5 モデル線区における線路構造物，規制区間，規制用風速計および駅の配置

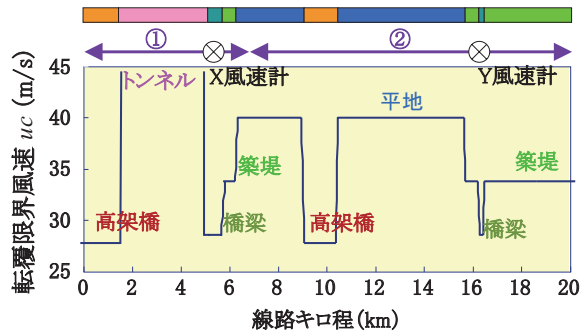


図6 モデル線区で仮定した線路構造物別の転覆限界風速 u_c

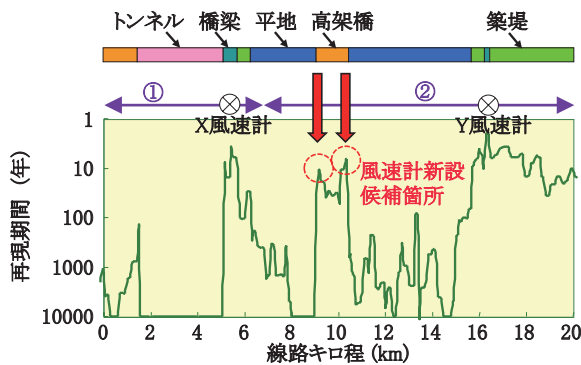


図7 地上10mの高さにおける年最大瞬間風速が転覆限界風速 u_c 以上となる再現期間 T_{uc}

(以下、 T_{uc} と記す) を図7に示す。

図7より、モデル線区において、X風速計は T_{uc} が比較的小さい箇所に設置されていることから、設置箇所として妥当であると判断される。また、規制区間① (A駅～B駅) では、 T_{uc} が小さい箇所はX風速計付近のみであることから、規制区間としての妥当性も高いと考えられる。

一方、図中のY風速計は、 T_{uc} が比較的小さい箇所に設置されているが、9km付近と11km付近にも同様に T_{uc} が小さい箇所がある (図7の赤矢印部)。また、15km付近を境にしてA駅方とE駅方とで再現期間 T_{uc} の傾向が大きく異なっている。そのため、規制区間② (B駅～E駅) のうち、B駅から15km付近までの区間では、Y風速計で観測されるものとは異なる風況になる可能性がある。このような場合には、規制区間②の設定と風速計の設置箇所には再検討の余地があり、Y風速計の他に、図

7に赤矢印で示した9km付近と11km付近の T_{uc} の小さい方または両方に風速計を設置する必要があるといえる。

8. おわりに

本稿では、鉄道沿線の最大瞬間風速の再現期待値を100m間隔で求める方法とともに、線路構造物による車両の転覆限界風速の違いを考慮した風速計配置の考え方を示した。これらの成果は、規制用風速計の設置箇所の検討や規制区間設定の際の客観的な根拠の一つとして使用できると考える。

数値解析を取り入れて地上10m高さにおける最大瞬間風速を扱う手法は少なく、類似の検討事例はほとんどない。また、今回計算した風速の「再現期待値」の検証も容易ではない。今後は、本成果の検証に資する風向風速データを継続して蓄積するとともに、新しいシミュレーションモデルやデータ同化手法の採用、最近公開されたより細密な再解析データの利用、気流モデル計算ならびに地形因子解析における風向の細分化などを通じて、本手法の精緻化を図っていきたい。

文献

- 1) 電車線路風害対策委員会：風－暴風と電車線路－，社団法人鉄道電化協会，1961
- 2) 谷川亮一：LOCALSによる風況シミュレーションモデルの開発と風況評価，ながれ，Vol.22，No.5，pp.405-415，2003
- 3) 内田孝紀，大屋祐二：風況シミュレータRIAM-COMPACTの開発－風況精査とリアルタイムシミュレーション－，ながれ，Vol.22，No.5，pp.417-428，2003
- 4) 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，No.5，pp.387-396，2003
- 5) 社団法人日本建築学会：建築物荷重指針・同解説 (2004)，丸善，2004
- 6) Cook,N.J.：Improving the Gumbel analysis by using M-th highest extremes, Wind and Structures, Vol.1, No.1, pp.25-48, 1998.
- 7) 大竹和夫，田村幸雄：風向別地表粗度区分の評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.119-120，2002
- 8) 塩谷正雄：強風の性質，開発社，1979
- 9) 気象庁：地上気象観測指針，日本気象協会，1993
- 10) 富永哲男，今井俊昭，藤井俊茂，島村泰介：運転規制用風速計の配置検討に用いる周辺地形の影響評価，第56回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.644-645，2001
- 11) DB and SNCF：Common DEUFRAKO Research on Cross Wind Effects on High Speed Railway Operation 2001-2004，2005.