

# 風観測データを活用した鉄道の 強風時安全性評価

谷本 早紀, 荒木 啓司, 福原 隆彰

本稿では風観測データを活用した鉄道の強風時安全性評価の方法を紹介する。この安全性評価の方法は、鉄道車両が走行する区間の強風に対する安全度を定量的に判断するために、風観測データを用いて危険な風速となるような強風の発生確率を求め、安全性評価の指標を算出するものである。風観測データを用いた安全性評価の指標の試算結果から、風速のみを用いた場合のその指標が風速と風向を用いた場合のその指標の約100倍となる例を示す。安全度を定量的に評価することによって、強風対策が必要な区間の優先度を客観的に見積もることが可能になると考えられる。

キーワード：強風に対する安全性評価, 強風発生確率, 風向

## 1. はじめに

鉄道車両の強風による脱線転覆事故を防ぐため、走行中の車両が受ける風を弱めるための防風柵や防風林といった防風施設に代表されるハード対策、および運転規制といったソフト対策が行われている。これらのうちソフト対策である運転規制は、鉄道沿線に設置された規制用風速計の観測値に基づき、強風時には、あらかじめ定められた運転規制区間に鉄道車両を入れない、あるいは運転規制区間内での鉄道車両の走行速度を制限するといった規制を行うものである。

近年の鉄道車両の軽量化や高速化に伴い、従来の強風対策により期待される安全性が確保できるのかを評価する必要が生じてきた。また、規制用風速計や防風柵の新設・増設といった強風対策が必要となる区間が複数あるような場合、強風対策を施す優先度を見積もるためには、対象となる区間のなかで鉄道車両が強風にさらされる危険度を客観的に判断する必要がある。鉄道総研では、これまで強風に対する鉄道の安全性に関して風観測データを用いて定量的に評価する方法を提案し、鉄道車両や運転規制方法といった条件を変えたときに車両の安全性がどのように評価されるのかについて検討してきた[1, 2, 3]。この方法は、強風に対する鉄道車両の耐力と車両の脱線転覆を生じさせる外力から、安全性の指標を確率で表すものである。

本稿では、風観測データの活用例として、鉄道の強風時安全性評価の手法を紹介する。2節でまず鉄道の

強風時の安全性評価に必要な鉄道の耐力と外力の指標について述べ、3節でこれらの指標を用いた安全性評価の方法を紹介する。さらに4節では3節で紹介した安全性評価手法と風観測データ[4]を用いて安全性評価の指標を試算する。

## 2. 安全性評価のための耐力と外力の指標

ここでは、安全性評価に用いる耐力と外力の指標である転覆限界風速と自然風の発生確率について紹介する。

### 2.1 耐力の指標である転覆限界風速

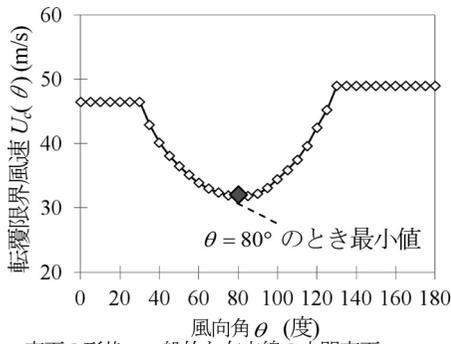
風による力が鉄道車両に作用すると、風上側の車輪にかかる重さ(輪重)が減少する。鉄道総研では、風上側の輪重がゼロとなるような風速を転覆限界風速と呼んでいる[5]。本稿では、走行中の車両が受ける風速が転覆限界風速に至るような状態を「危険な状態」と定義する。転覆限界風速の値が低くなるほど、鉄道車両は小さい風速に対しても「危険な状態」になりやすい。また、転覆限界風速は鉄道車両の形状や走行速度、線路構造物(盛土、橋りょうなど)の形状などのほか、線路に対する風向角 $\theta$ に依存する。なお、風向角 $\theta$ は鉄道車両の進行方向を $0^\circ$ として表すこととする。

風向角 $\theta$ と転覆限界風速 $U_c(\theta)$ の関係を図1に例示する。図1の例では、 $\theta = 80^\circ$ のときに $U_c(\theta)$ が最小となるような分布をしている。本稿では車両の形状や走行速度などについては同一の条件とし、線路に対する風向角 $\theta$ のみを転覆限界風速を決めるときの変数として扱う。

### 2.2 外力の指標である強風発生確率

自然風の風速を $u$ とすると、その発生確率はワイブル分布の確率密度関数 $f(u)$ を用いて式(1)のように

たにもと さき, あらき けいじ, ふくはら たかあき  
公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 気象防災  
〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38



- ・車両の形状：一般的な在来線の間車両
- ・車両の走行速度：100km/h
- ・線路構造物の種類：単線橋りょう（桁高 1m）

図 1 転覆限界風速の風向角特性の例

表すことができる [6].

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

なお、 $c$ 、 $k$  はワイブル係数である。本稿では式 (1) により求まる風速の発生確率を強風発生確率と呼ぶ。

ここで、一例として気象庁アメダス [4] のうち海岸付近の地点 A と内陸部の地点 B の 2 点におけるデータを用いて式 (1) より求めた強風発生確率の例を示す。一般的に風の情報は風速（大きさ）と風向（向き）で表され、アメダスのデータでも風速と風向のデータが得られる。まず風向を区別せずに、強風発生確率を全風向で生じた風速データでひとまとめに考えた場合を示す。10 分間最大瞬間風速の相対出現度数と式 (1) により求めた強風発生確率を図 2 に示す。用いた風速データのそれぞれの総数は地点 A で 184,372、地点 B で 79,541 である。ここで取り挙げた地点 A は海岸付近にあり、それに対して地点 B は内陸部にあることから、地点 A のほうが地点 B よりも強風が吹きやすいと予想される。実際に、図 2 より、地点 A の強風発生確

率の分布の方が地点 B のそれよりなだらかな山型であり、より大きな風速の発生確率が高いといえる。このように 10 分間最大瞬間風速の相対出現度数および強風発生確率も地点ごとに異なる。

ここまでは風向を考慮に入れていなかったが、以下では風向別の強風発生確率について述べる。地点 A および B の 16 方位の風向の発生頻度（以下、風向発生頻度と呼ぶ）は図 3 に示すとおりである。図 3 では 16 方位を北から時計回りに N, NNE, NE, ..., NNW で表している。地点 A は NE および W の方向からの風向発生頻度が高く、地点 B は E および ESE の方向からの風向発生頻度が高い。このように、風向発生頻度の高い風向は地点ごとに異なる。図 2 の強風発生確率の算出に用いた 10 分間最大瞬間風速データを 16 方位の風向ごとに区分して、各風向下で観測された風速データから風向別の強風発生確率を式 (1) より求めた（図 4）。ここで、全風向の強風発生確率の近似式のワイブル係数  $c$ 、 $k$  と区別するため、風向ごとに式 (1) を当てはめた場合に得られるワイブル係数を特に  $c_d$ 、 $k_d$  と表記することとする。

図 2、4 に示した強風発生確率を規定するワイブル係数の値と、図 3 の風向発生頻度  $w(d)$  の値を表 1 に示す。なお、全風向の場合で求めたワイブル係数  $c$ 、 $k$  は表 1 の中の all の列に示す。

地点 A と B の全風向の強風発生確率（図 2）では地点 A のほうが地点 B よりも、より大きな風速値での強風発生確率が高かったが、図 4 では同じ地点でも風向によって強風発生確率は異なっており、図 4 の地点 A において NNE, NE, WSW, W, WNW の風向では、約 30 m/s 以上の強風発生確率が 0.001 であり、ほかの風向での強風発生確率より大きい。これらの風向は、風向発生頻度の高い風向と一致する（図 3 および表 1 の地点 A）。

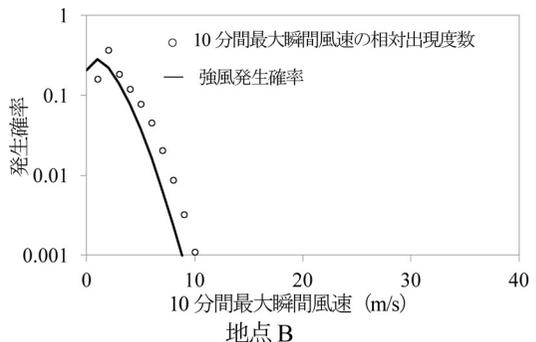
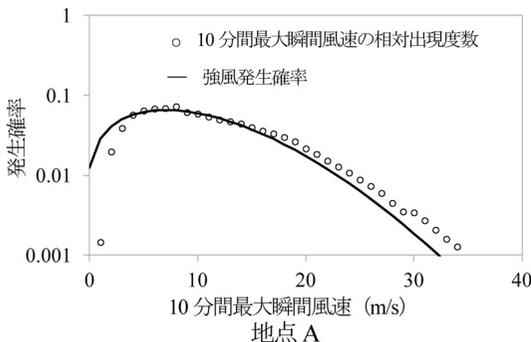
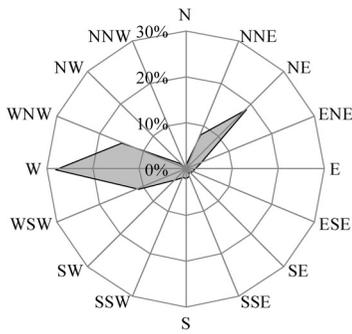
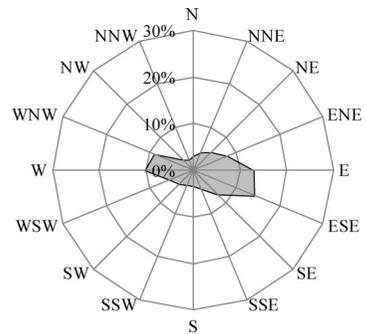


図 2 全風向の 10 分間最大瞬間風速の相対出現度数と強風発生確率分布



地点 A (総データ数 : 184,372)



地点 B (総データ数 : 79,541)

図 3 風向発生頻度分布

同じ地点でも風向によって強風発生確率に違いがあるという結果は、全風向の強風発生確率を用いた場合と風向別の強風発生確率を用いた場合とでは安全性評価の結果が異なることを示唆する。

### 3. 安全性評価の方法

前節では安全性評価に用いる耐力の指標である転覆限界風速と、外力の指標である強風発生確率についてそれぞれ述べた。ここでは、安全性評価のための指標として、走行中の鉄道車両が「危険な状態」となるような転覆限界風速を超える強風に遭遇する確率を求める。

鉄道沿線に設置されている規制用風速計では風速のみが観測されている場合と風速と風向が観測されている場合がある。そこで、ここでは、風速のみを用いた場合と、風速と風向を用いた場合とに分けて安全性評価を考える。

風速のみを用いた場合、安全度の過大評価を防ぐため、風向角別の転覆限界風速の値は最低値を用いる (図 1 の  $\theta = 80^\circ$  での  $U_c(\theta)$ )。また、自然風の強風発生確率は図 2 に示した全風向の強風発生確率を用いることとし、この全風向の強風発生確率の分布に従う風が線路に対して風向角  $\theta = 80^\circ$  となるような風向から常に風が吹いてくるものとする。この風速のみを用いた場合の安全性評価の方法を 3.1 項に示す。

一方、風速と風向を用いた場合は、風向角別の転覆限界風速と風向別の強風発生確率、および各風向の風向発生頻度を用いる。風速と風向を用いた安全性評価の方法を 3.2 項に示す。

#### 3.1 風速のみを用いた場合

風速のみを用いた安全性評価では、前述したように転覆限界風速  $U_c(\theta)$  の最低値 (図 1 における  $\theta = 80^\circ$  のとき) を用いることとし、ここではそれを  $U_c$  と表す。この場合、安全性評価の指標  $P_a$  は風速  $u$  が転覆限界

風速  $U_c$  を超える確率として表すことができる。  $P_a$  は式 (1) を  $U_c$  以上の範囲で積分することにより、式 (2) のように表す。

$$P_a \equiv \int_{U_c}^{\infty} f(u) du = \exp \left[ - \left( \frac{U_c}{c} \right)^k \right] \quad (2)$$

指標  $P_a$  の値は安全度を示す値で、値が大きいほど安全度が低い (危険度が高い) ことを示す。この指標  $P_a$  は  $U_c$  および全風向の強風発生確率を規定するワイブル係数  $c$ 、 $k$  (表 1) を式 (2) に代入することで求まる。

#### 3.2 風速と風向を用いた場合

風速と風向を用いた安全性評価を行う場合の指標には  $P_d$  を用いる。  $P_d$  は、風向ごとに式 (2) と同様に式 (1) を  $U_c(\theta)$  以上の範囲で積分し、そこに風向発生頻度  $w(d)$  を乗じたうえで、16 方位の風向について足し合わせることで求めることができ、式 (3) のように表す。

$$P_d \equiv \sum_{d=1}^{16} \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{U_c(\theta)}{c_d} \right)^{k_d} \right] \times w(d) \right\} \quad (3)$$

ここで  $c_d$ 、 $k_d$  は、風向別のワイブル係数である。また、式 (3) では風向角別の転覆限界風速  $U_c(\theta)$  を用いている。風向角別の転覆限界風速  $U_c(\theta)$  と風向別のワイブル係数  $c_d$ 、 $k_d$ 、風向発生確率  $w(d)$  を式 (3) に代入することで  $P_d$  が求まる。

### 4. 安全性評価の試算例

3 節で示した式 (2) を用いた安全性評価の指標と式 (3) を用いた安全性評価の指標とを下記の仮想区間にあてはめて試算した。ここで示す試算では、転覆限界風速や風速と風向に関する条件をいくつか簡略化した仮想区間を設定する (図 5)。仮想区間は I 駅から II 駅までの片道区間を考える。転覆限界風速の値は図 1 に従うものとし、区間内で変化しないとした。また、仮

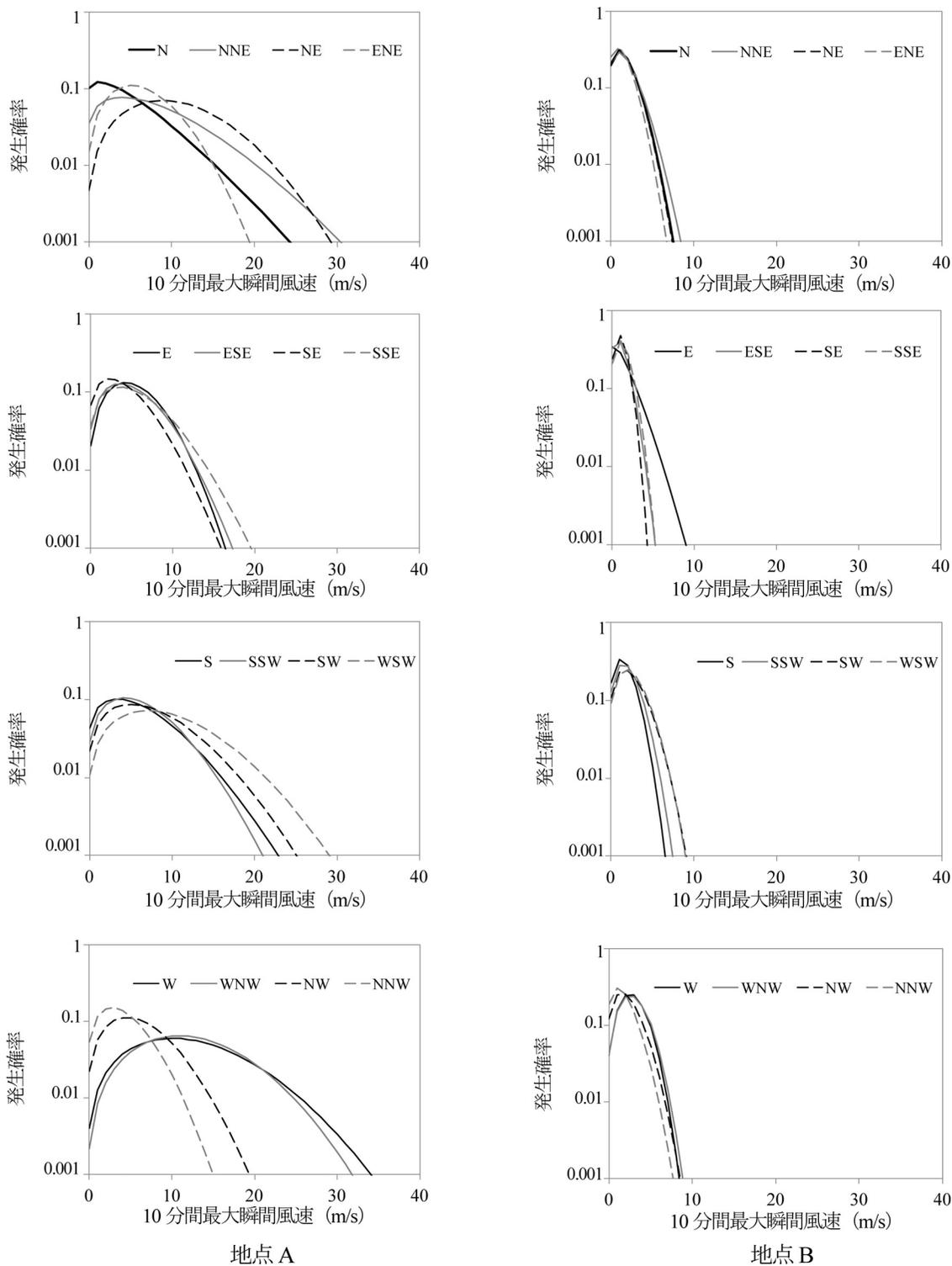


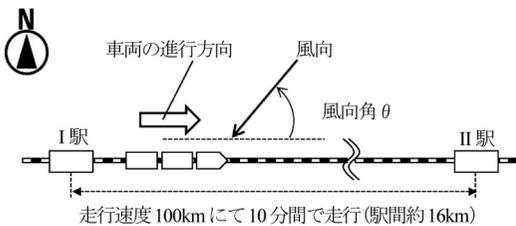
図4 風向別の強風発生確率分布

表1 ワイブル係数  $c_d$ ,  $k_d$  および風向発生頻度  $w(d)$  (全風向の場合のワイブル係数  $c$ ,  $k$  を all の列に記載)

地点 A									
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
$c_d$	6.07	9.63	12.68	7.90	6.66	6.37	5.17	6.82	7.41
$k_d$	1.23	1.47	2.12	2.04	2.05	1.83	1.62	1.71	1.56
$w(d)$	0.01	0.08	0.18	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	all	
$c_d$	7.58	9.07	11.40	14.64	14.64	7.44	5.25	12.13	
$k_d$	1.76	1.73	1.87	2.06	2.28	1.90	1.75	1.76	
$w(d)$	0.02	0.03	0.11	0.28	0.15	0.02	0.01	1.00	

地点 B									
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
$c_d$	2.44	2.51	2.36	2.09	2.03	1.72	1.80	2.05	2.42
$k_d$	1.68	1.56	1.67	1.63	1.25	1.71	2.20	2.03	1.93
$w(d)$	0.03	0.04	0.05	0.08	0.13	0.14	0.07	0.04	0.03
	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	all	
$c_d$	2.78	3.25	3.37	3.78	3.88	3.05	2.54	2.59	
$k_d$	1.94	1.83	1.92	2.40	2.33	1.85	1.72	1.53	
$w(d)$	0.03	0.04	0.05	0.10	0.09	0.03	0.02	1.00	



- ・I 駅→II 駅の片道区間
- ・転覆限界風速の値は同一
- ・駅間の風況は風向別強風発生確率により均一

図5 安全性を評価する仮想区間

想区間での風速および風向は地点 A または B における強風発生確率と風向発生頻度に従うものとし、区間内の空間的な違いは考慮しない。以下では、仮想区間全体に地点 A における風が吹いているとした場合は区間 a、地点 B における風が吹いているとした場合は区間 b とする。

風速のみを用いた安全性評価の指標  $P_a$  を算出する場合、この仮想区間で試算に用いるワイブル係数  $c$ ,  $k$  には、表 1 の all の値を用いた。また、風速と風向を用いた安全性評価の指標  $P_d$  を算出する場合、この仮想区間で試算に用いる風向別のワイブル係数  $c_d$ ,  $k_d$  および風向発生頻度  $w(d)$  には、表 1 の各風向での値を用いた。風向角別の転覆限界風速分布と図 3 の自然風の風向との対応については、例えば、NE 方向から風が吹いているとき、列車の進行方向とのなす角度である風向角は  $\theta = 45^\circ$  であるため、 $\theta = 45^\circ$  のときの

表2 安全性評価の指標の試算結果

	区間 a	区間 b
$P_a$ (風速のみを用いた場合)	$3.89 \times 10^{-3}$	$2.60 \times 10^{-21}$
$P_d$ (風速と風向を用いた場合)	$2.04 \times 10^{-4}$	$3.13 \times 10^{-23}$

転覆限界風速を用いることとした。

表 1 の各パラメータを用いて式 (2) および式 (3) より求めた  $P_a$  および  $P_d$  の値を表 2 に示す。表 2 の値を区間 a および b 同士で比べると、 $P_a$  および  $P_d$  はともに区間 a よりも区間 b のほうが小さい。前述のとおり安全性評価の指標は値が小さいほど安全度が高いことを示すため、強風に対する安全度は区間 b のほうが高いという結果になった。

また、表 2 から区間 a では  $P_a$  が  $P_d$  の約 10 倍、区間 b では  $P_a$  が  $P_d$  の約 100 倍となった。今回の試算例では区間 a においても区間 b においても  $P_a$  のほうが  $P_d$  よりも値が大きいという試算結果になった。ある特定の風向での強風発生確率が大きい場合でも、その風向での風向発生頻度  $w(d)$  の値が小さい、あるいは転覆限界風速  $U_c(\theta)$  の値が大きい場合 (例えば、線路方向にほぼ並行な風向の強風がごくまれに吹く場合)、今回のように  $P_a$  よりも  $P_d$  が小さくなる可能性がある。一方で、ある特定の風向での強風発生確率が全風向の強風発生確率より大きく、その風向発生頻度  $w(d)$  の値が大きく、転覆限界風速  $U_c(\theta)$  の値が小さいとい

た条件がそろえば、 $P_a$  よりも  $P_d$  の値のほうが大きくなる可能性もある。実際に安全性評価を行い強風対策が必要な区間の優先度を見積もる場合には  $P_a$  および  $P_d$  のうち、安全度の過大評価を防ぐため、より安全度が低いほうを選ぶという使い方も考えられる。

今回紹介した安全性評価方法を用いることで統一的な尺度で安全性を評価できるため、転覆限界風速や風速、風向が異なる区間についても、各区間における  $P_a$  や  $P_d$  の値同士を相互に比較することで、安全度が高い区間と低い区間がわかる。その結果から、規制用風速計や防風柵の新設・増設といった強風対策が必要となる区間の優先度を見積もることが可能になると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では鉄道総研での風観測データの活用例として、鉄道の強風時安全性評価の方法を紹介し、気象庁アメダスの風観測データを用いた試算例を示した。今回の試算では、風速のみを用いた場合と風速と風向を用いた場合といった想定する外力の要素の違いによって得られる安全性評価の指標を比べ、風速のみを用いた場合の結果が風速と風向きを用いた場合の結果の約 100 倍となる例を示した。また、今回の試算では、強風発生確率が地点によって異なることを示し、その結果、安

全性評価の指標の試算結果が異なる例も示した。本稿で紹介した方法により、区間同士の安全性評価の指標を比べることで、強風対策が必要な区間の優先度を客観的に見積もることが可能になると考えられる。

今回は風速および風向に関する条件を簡略化して、仮想区間内の風速と風向の空間的な違いは考慮せずに安全性評価の指標の試算を行った。例えば、今回簡略化した条件を安全性評価に取り入れることができれば、さらに現実的な安全性評価を行えると考えられる。今後もより精緻な安全性評価方法の研究・開発にむけて、風観測データの有効活用とより現実的な安全性評価方法の確立を目指していきたい。

## 参考文献

- [1] 福原隆彰, 島村泰介, 今井俊昭, 風速の時間変動を考慮した強風時運転規制の評価法, 鉄道総研報告, **21**(1), 13-18, 2007.
- [2] 今井俊昭, 荒木啓司, 福原隆彰, 谷本早紀, 種本勝二, 日比野有, 規制区間で転覆限界風速を超える強風が発生する確率の評価方法, 鉄道総研報告, **26**(9), 47-52, 2012.
- [3] 福原隆彰, 荒木啓司, 谷本早紀, 強風の発生確率を用いて列車の安全性を評価する, RRR, **70**(4), 8-11, 2013.
- [4] 気象庁, 気象庁 HP, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- [5] 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.
- [6] 白石成人, 松本勝, 白土博通, 安田正順, 日本の風向別風速発生頻度分布特性, 風工学会誌, **22**, 1984.