

# 強風時の風向を考慮した車両の安全性評価手法

荒木 啓司\* 谷本 早紀\* 福原 隆彰\*

**A Method for Evaluating the Safety of a Railway Vehicle  
under Strong Winds in Consideration of Wind Directions**

Keiji ARAKI Saki TANIMOTO Takaaki FUKUHARA

We propose using the probabilities of strong wind occurrence according to wind directions for evaluating the safety of a train under strong winds. The probabilities  $P_x$  of the occurrence of strong winds exceeding the critical wind speeds for overturning were estimated for a train in a virtual railway section by using Weibull coefficients  $c_d$  and  $k_d$  according to 16 wind directions calculated on the basis of wind data observed at a windy AMeDAS station.  $P_x$  values were found to be variable from  $6.2 \times 10^{-6}$  to  $8.6 \times 10^{-5}$  depending on the angle between the traveling direction of the train and each wind direction. These values of  $P_x$  range from 1.4% to 20% of the value of  $P$ , which was calculated by excluding strong wind occurrence according to wind directions.

キーワード：安全性評価，転覆限界風速，強風発生確率，風向別ワイブル係数

## 1. はじめに

強風による鉄道車両の事故を防ぐために、鉄道事業者は強風時の運転規制の実施や防風柵の整備といった強風対策を実施している。一方で、強風時の運転規制が頻発する線区では安定輸送が阻害されるという問題が生じており、安全の確保と安定した輸送とを高い次元で両立できる強風対策が求められている。これに応えるには、現行の強風対策により確保される安全性に対して運転規制方法の変更や防風施設の整備によって安全性がどの程度向上するかを定量的に把握することが必要となる。しかしながら、日本では強風時における車両の安全性を定量的に評価する手法が確立し十分に普及しているとは言い難く、強風対策により得られる車両の安全性を定量的かつ統一的に把握することが困難な状況にある。

鉄道総研では、強風に対する車両の安全性を量的に評価する手法について研究している<sup>1) 2) 3)</sup>。この手法は、規制区間内を走行中の車両がその転覆限界風速<sup>4)</sup> (耐力)を上回る強風 (外力) に遭遇する確率を指標として強風時の車両の安全性を評価するものである。

車両の転覆限界風速は、車両の形状や線路構造物の形状、風向角 (車両の進行方向と自然風の風向とのなす角度) など、様々な要素によってとり得る値が異なる<sup>4)</sup>。これら転覆限界風速の算出に供する要素のうち、転覆限界風速の高低を左右するものの、時間的に不規則な変動をするためその値を確定的に定めがたい要素のひとつに

「風向角」がある。これまでに提案してきた安全性評価手法<sup>1) 2)</sup>では、危険側に評価することを防ぐ観点から、「規制区間を走行中の車両が晒される強風は、常に転覆限界風速が最も低い風向角からのみ生じる」という想定 (以降、この想定を「最悪の想定」と称する) に基づいて、当該車両の転覆限界風速を上回る強風発生確率の大小を評価してきた。しかしながら、規制区間を走行中の車両が晒される強風は、実際には様々な風向角の下で生じ得る。そのため、例えば転覆限界風速が高い風向角に相当する風向からの強風発生頻度が高い場合には、既往の安全性評価では実際の強風発生状況を十分反映した結果が得られるとは言い難いこともある。

そこで、著者らは鉄道沿線での強風発生状況をより反映して車両の安全性を評価できる手法を確立する研究の一環として、風向角別に得られる転覆限界風速と風向別の強風発生確率とを組み合わせて車両の安全性を評価できるように、既往の安全性評価手法を改良した。本稿ではこの改良した手法について報告するとともに、評価の試算例を示す。

## 2. 既往の安全性評価手法の改良

### 2.1 転覆限界風速 (耐力指標)

総研詳細式<sup>4)</sup>によって評価される車両の転覆限界風速は、車両形状や線路構造物の形状、風向角など様々な要素によってとり得る値が異なる。ここで、単線橋梁 (桁高 1m) からなる直線区間を 100km/h で走行する通勤型車両 (中間車) を例にとり、風向角以外の転覆限界風速

\* 防災技術研究部 気象防災研究室

特集：防災技術

の算出に供する要素を一般的な値に固定した場合における転覆限界風速の風向角特性の例を図1に示す。総研詳細式は、例えば5度刻みの風向角ごとに転覆限界風速を評価することが可能であるが、本研究では図1に示したように22.5度刻みの値に簡略化したものを使用する。これは、転覆限界風速の風向角の刻みと次節で述べる風向別の強風発生確率を求める際に用いる風向の刻み(0度から360度までを22.5度刻みの16方位)とを等しくすることで、風向角別の転覆限界風速と風向別の強風発生確率との比較を行いやすくするためである。

図1によると、風向角が90度のときに転覆限界風速が最低(31.9m/s)となる一方で、風向角が112.5度のときは35.9m/s、135度で45.3m/sとなるなど、風向角によって転覆限界風速は大きく異なることがわかる。しかしながら、現状では規制区間の任意の地点を走行中の車両がどの風向角の下でどの程度の大きさの瞬間風速に晒されているかを確定的に予測することが困難であるため、既往の安全性評価手法<sup>1) 2)</sup>では先に述べた「最悪の想定」に基づいて風向角別に得られる転覆限界風速の最低値(図1では風向角90度の31.9m/s)のみを使用している。

これに対し本研究では、図1に示した22.5度刻みの風向角別の転覆限界風速の全ての値を車両の安全性を評価する際の耐力指標として用いることとした。

2.2 強風発生確率(外力指標)

瞬間風速  $u$  の発生確率はワイブル分布に従うことが知られており<sup>5)</sup>、その確率密度関数  $f(u)$  および累積分布関数  $F(u)$  はそれぞれ式(1)および式(2)で表される。

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

$$F(u) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

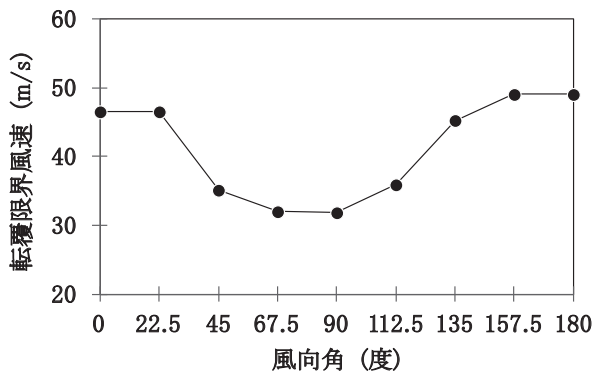


図1 転覆限界風速の風向角特性の例  
(通勤型車両の中間車、走行速度100km/h)

ここで、 $c$  および  $k$  はワイブル係数を表す。

既往の安全性評価手法<sup>1) 2)</sup>では、式(1)や式(2)で表される強風発生確率の取扱いについても、先に述べた「最悪の想定」に基づいて強風時の風向を考慮せずにあらゆる風向下で生じた風速を一括して評価してきた。この一例として、国内の強風地に位置するアメダスで観測された10分間最大瞬間風速の記録(約4年間分、データ数  $N=186,118$ )を用いて風向を考慮せずにワイブル分布を適用して求めた強風発生確率分布の例( $c=11.72$ ,  $k=2.05$ )を図2に示す。

これに対し本研究では、風向ごと(0度から360度までを22.5度刻みの16方位)に10分間最大瞬間風速の出現度数を整理し、風向ごとの強風発生確率と各風向の出現率とを求め、これらを車両の安全性を評価する際の外力指標として用いることとした。図2と同じアメダス、同じ期間の10分間最大瞬間風速および10分間平均風向データを用いて求めた風向別強風発生確率分布と風向出現率分布をそれぞれ図3と図4に、また風向別のワイブル係数  $c_d$  および  $k_d$  の一覧を表1に示す。なお、図4に示した風向出現率分布については、10分間平均風向データを用いた出現率分布と10分間最大瞬間風速の起時の風向データを用いたそれとを比較した結果、両者に大きな違いがなかったため本稿では10分間平均風向データを用いた出現率分布を例示した。図3をみると、東西南北の4つの風向のうち、南の風向での強風発生確率が他の3つの風向でのそれに比較して顕著に低いことがわかる。例えば、10分間最大瞬間風速20m/sの発生確率は、南では  $4.0 \times 10^{-8}$  であるのに対し南以外の3つの風向では  $6.4 \times 10^{-3}$  (北) ~  $2.7 \times 10^{-2}$  (西) と、 $10^5$  倍以上の違いがある。また、東と西の風向での強風発生確率分布はほぼ似た曲線である一方で、両風向の出現率(図4、表1)を比較すると東(出現率0.07)よりも西(出現率0.11)の風向出現が卓越していることがわかる。

このように、強風発生確率は風向によって異なり、また各風向の出現率も異なる。このことは、車両の転覆限

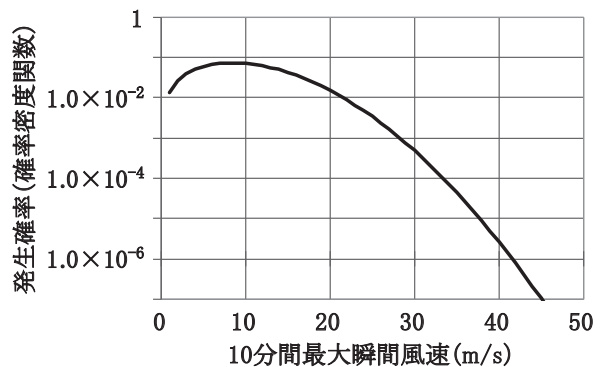


図2 強風発生確率分布の例(風向考慮なし)  
(強風地に位置するアメダスの10分間最大瞬間風速データ(約4年間分、データ数  $N=186,118$ )より算出)

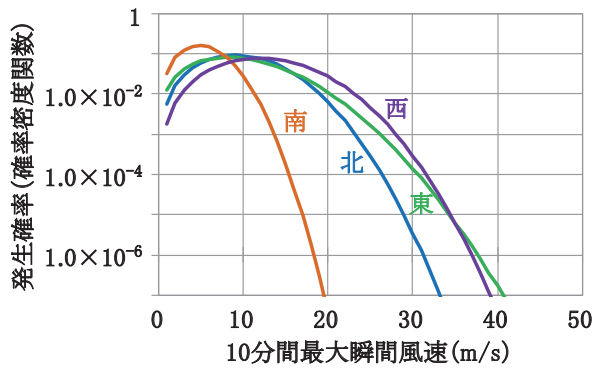


図3 風向別の強風発生確率分布の例

(図2と同アメダスの同期間における10分間最大瞬間風速データと10分間平均風向データより算出, 16方位のうち東西南北の4方位分のみを例示)

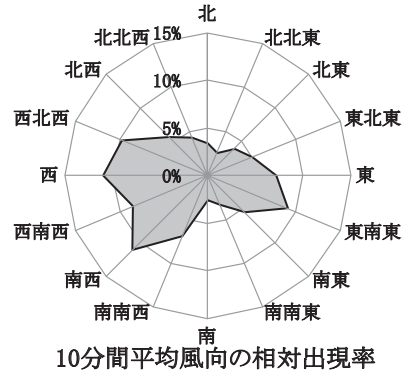


図4 風向出現率分布の例

(図2と同アメダスの同期間の10分間平均風向データより算出)

表1 風向別のワイブル係数  $c_d$  および  $k_d$  の例

(図2と同アメダスの同期間における10分間最大瞬間風速データと10分間平均風向データより算出)

風向	$d$	北 (0度)	北北東 (22.5度)	北東 (45度)	東北東 (67.5度)	東 (90度)	東南東 (112.5度)	南東 (135度)	南南東 (157.5度)
風向別 ワイブル係数	$c_d$	11.07	9.42	11.08	11.48	11.07	10.39	7.33	5.73
	$k_d$	2.54	2.31	1.94	1.92	2.13	2.34	2.48	3.34
風向出現率	$g(d)$	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.05	0.03
風向	$d$	南 (180度)	南南西 (202.5度)	南西 (225度)	西南西 (247.5度)	西 (270度)	西北西 (292.5度)	北西 (315度)	北北西 (337.5度)
風向別ワイブル係数	$c_d$	6.00	8.69	12.74	13.43	14.24	14.99	13.47	13.32
	$k_d$	2.39	1.85	2.30	2.70	2.75	3.00	2.49	2.38
風向出現率	$g(d)$	0.03	0.07	0.11	0.08	0.11	0.10	0.06	0.04
風向を考慮しない場合		$c = 11.72, k = 2.05$							

界風速が低くなる風向角での強風発生確率の高低および当該の風向の出現率の高低が、安全性の評価結果に違いをもたらす可能性を示唆している。

### 2.3 転覆限界風速を上回る強風の発生確率

既往の安全性評価手法<sup>1) 2)</sup>では、車両の転覆限界風速や運転規制風速を上回る強風の発生確率と列車密度とを掛け合わせることでその安全性を評価している。風向角別の転覆限界風速の最低値  $U_{c,min}$  を上回る風速の発生確率  $P$  は、式(2)を用いて式(3)のように表すことができる。

$$P = 1 - F(U_{c,min}) = \exp\left[-\left(\frac{U_{c,min}}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

本研究もこれに倣い、車両の転覆限界風速を上回る強風発生確率  $P$  を評価指標とし、この  $P$  の算出において風向角別の転覆限界風速、風向別の強風発生確率および風向出現率を考慮することとした。具体的には、式(3)に風向角別の転覆限界風速  $U_c(\theta)$ 、風向別(16方位別)に求めたワイブル係数  $c_d$  および  $k_d$ 、各風向の出現率  $g(d)$

を導入することにより、風向を考慮した転覆限界風速を上回る風速の発生確率  $P_x$  を式(4)のように整理した。

$$P_x = \sum_{d=1}^{16} \left[ \exp\left\{-\left(\frac{U_c(\theta)}{c_d}\right)^{k_d}\right\} \times g(d) \right] \quad (4)$$

ここで、 $\theta$  と  $d$  はそれぞれ風向角と風向(16方位)を表す。なお、風向角  $\theta$  は車両の進行方向(線路方位)を0度とするのに対し、風向  $d$  は北を0度としているため式(4)を用いて実際に  $P_x$  を計算する際には、風向角  $\theta$  を北を基準とした風向角に変換する、あるいは風向  $d$  を車両の進行方向を基準とした風向に変換する必要がある。

## 3. 強風時の風向を考慮した $P_x$ の試算

### 3.1 安全性評価の試算条件の設定

前節で示した式(4)を用いて、 $P_x$  の試算を行った。この試算にあたっては、図5に示すような単一の線路構造物で構成される直線約16kmの仮想的な駅間およびこの駅間を100km/hで走行する通勤型車両を想定した。また、

特集：防災技術

風向角別の転覆限界風速は図1に、風向別の強風発生確率および風向出現率は図3、図4および表1にそれぞれ従うものとした。一方、車両の転覆限界風速は風向角 $\theta$ 、すなわち車両の進行方向と自然風の風向とのなす角度によって異なることから、図4に示した風向出現率に対して車両の進行方向がどのような角度を採るかによって $P_x$ の値は変わりうる。そこで、車両が北から南に向かう場合を0度として、22.5度刻みに変化させた計16ケースの進行方向を設定して $P_x$ を求めた。さらに、既往の安全性評価手法で採用してきた「最悪の想定」に基づいた転覆限界風速を上回る風速の発生確率 $P$ も併せて試算した。 $P$ は、図1に示した風向角別の転覆限界風速の最低値(31.9m/s,  $\theta = 90$ 度)、図2に示した風向を考慮しない場合のワイブル係数( $c = 11.72, k = 2.05$ )を式(3)に代入して求めた。

3.2 安全性評価の試算結果と考察

16ケースの $P_x$ および $P$ の試算結果を表2に示す。 $P_x$ の値は車両の進行方向の違いによって $6.2 \times 10^{-6} \sim 8.6 \times 10^{-5}$ 、一方の $P$ の値は $43 \times 10^{-5}$ となり、両者には約5~70倍の差異があった。また、16ケースの $P_x$ どうしを比較すると、車両の進行方向の違いによっても最大で約14倍の違いがあった。

ここで、今回の試算結果に基づいて、 $P_x$ が大きくなる耐力および外力の要件について考察する。 $P_x$ は転覆限界風速を上回る強風の発生確率であることから、転覆限

界風速が低いほど $P_x$ の値は大きくなりやすいと考えられる。しかしながら、転覆限界風速が低くとも、それを上回る強風の発生確率が高くなければ必ずしも $P_x$ が大きく見積もられるとは限らない。すなわち、転覆限界風速が低くなる風向角に相当する風向での強風発生確率の高低および当該の風向の出現率の高低が $P_x$ の大小に影響を及ぼすと考えられる。そこで、表2に示した16ケースの $P_x$ の試算結果のうち上位4位までの試算ケースを例にとり、転覆限界風速が低くなる風向角に相当する風向での強風発生確率および当該の風向の出現率を調べることにする。なお、以下では風向角別の転覆限界風速(図1)のうち、転覆限界風速が40m/s未滿となる風向角(45度~112.5度)を転覆限界風速が低い風向角と仮定する。

試算された $P_x$ の上位4ケースに対して、45度~112.5度の風向角(転覆限界風速40m/s未滿の風向角)に相当する風向の出現率を表3に整理する。また、最大の $P_x$ ( $8.6 \times 10^{-5}$ )が算出されたケース(車両の進行方向が315度のケース)を例にとり、45度~112.5度の風向角と風向出現率との関係を図6に示す。 $P_x$ の上位4位が算出されたときの車両の進行方向は、157.5度、180度、315度、337.5度と概ね南北方向を向いており、このときに45度~112.5度の風向角に相当する風向は東西方向が中心となる。 $P_x$ の上位4位までの各ケース相互に違いはあるものの、45度~112.5度の風向角に相当する風向出現率の合計は0.48~0.62であり(表3)、全風向の出現率に占める割合は概ね50%以上と高かった。

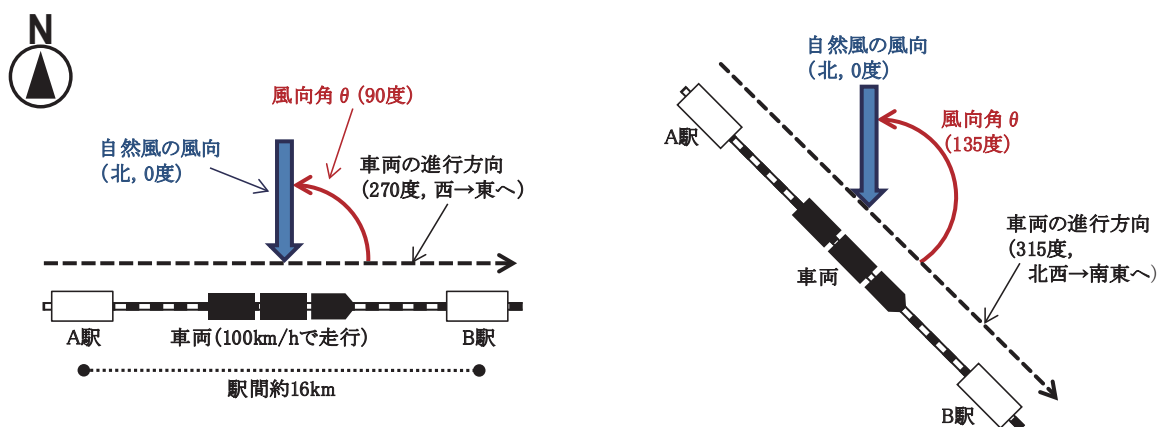


図5  $P_x$ の試算に用いた仮想的な駅間状況と車両の進行方向の違いによる風向角の違いの例  
(自然風の風向を北(0度)とした場合)

表2 仮想的な駅間を走行する車両に対する $P_x$ および $P$ の試算結果

車両の進行方向(度)	0.0	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5
$P_x$ ( $\times 10^{-5}$ )	4.0	2.0	2.1	2.7	2.2	3.4	5.5	7.6
車両の進行方向(度)	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5
$P_x$ ( $\times 10^{-5}$ )	7.1	4.2	2.7	1.6	0.62	2.8	8.6	8.3
$P$ ( $\times 10^{-5}$ )	43							

次に、45度～112.5度の風向角に相当する風向（表3）における強風発生確率に着目する。図7に、 $P_x$ の試算に用いた風向（16方位）別の強風発生確率を示す。なお、同図は図3で示した4方位（東西南北）を含む16方位全ての風向別強風発生確率を表したものである。図7より、風向によって強風発生確率が大きく異なることがわかる。ここで一例として30m/s以上の強風発生確率が $1.0 \times 10^{-4}$ 以上（30m/s以上の10分間最大瞬間風速がおおよそ2カ月に1回観測される確率であり、国内では有数の強風地に相当する）となる風向を抽出すると北東～東、南西～北北西となり、これらの風向は45度～112.5度の風向角に相当する風向（表3）と概ね整合していた。

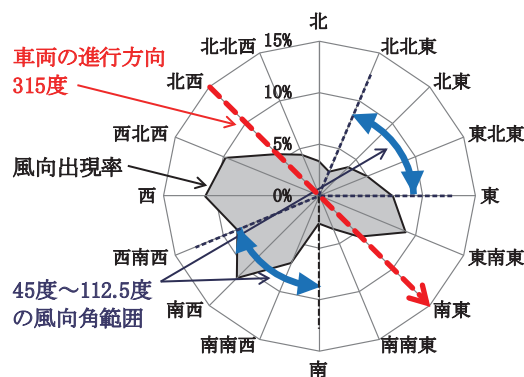


図6 45～112.5度の風向角と風向出現率との関係(車両の進行方向が315度の例)

表3  $P_x$ の上位4ケースにおける45度～112.5度の風向角に相当する風向の出現率

$P_x (\times 10^{-5})$	8.6 (第一位)		8.3 (第二位)		7.6 (第三位)		7.1 (第四位)	
車両の進行方向(度)	315 (北西→南東)		337.5 (北北西→南南東)		157.5 (南南東→北北西)		180 (南→北)	
45度～112.5度の風向角 $\theta$ に相当する風向 $d$ とその出現率 $g(d)$	北北東	0.03	北東	0.04	北北東	0.03	北東	0.04
	北東	0.04	東北東	0.05	北東	0.04	東北東	0.05
	東北東	0.05	東	0.07	東北東	0.05	東	0.07
	東	0.07	東南東	0.09	東	0.07	東南東	0.09
	南	0.03	南南西	0.07	南西	0.11	西南西	0.08
	南南西	0.07	南西	0.11	西南西	0.08	西	0.11
	南西	0.11	西南西	0.08	西	0.11	西北西	0.10
	西南西	0.08	西	0.11	西北西	0.08	北西	0.06
合計	0.48		0.62		0.57		0.60	

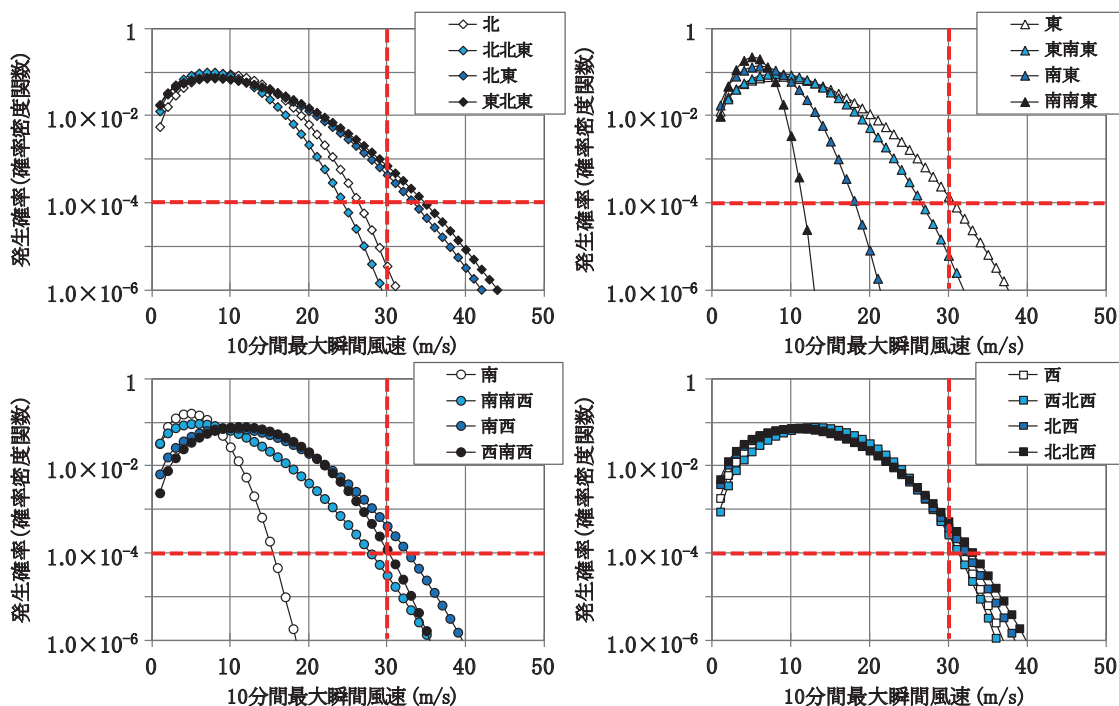


図7  $P_x$ の試算に用いた16方位ごとの強風発生確率 (図3で示した4方位を含む16方位を全て表示)

## 特集：防災技術

以上より、転覆限界風速が小さい風向角に相当する風向の出現率が高く、かつ当該の風向での強風発生確率も高いときに大きな $P_x$ が算出されることを確認した。今回の試算例では、転覆限界風速が40m/s未満となる45度～112.5度の風向角に相当する風向は北北東～東南東、南～北西であり、これら風向の出現率が全風向のそれに占める割合は概ね50%以上であった。さらにこれらの風向は、30m/s以上の強風発生確率が $1.0 \times 10^{-4}$ 以上となる風向と概ね整合していた。

今回の $P_x$ および $P$ の試算は、様々な条件を簡略化した仮想的な駅間を走行する車両を対象としたものである。また、本試算と同じ仮想的な駅間を走行する車両を対象としても、風向角別の転覆限界風速曲線(図1)や風向別の強風発生確率と風向出現率(図3、図4および表1)が異なれば算出される $P_x$ や $P$ の値も変わり得る。よって、本試算で得られた各評価値の絶対評価は困難ではあるものの、風向の考慮の有無や卓越風向と車両の進行方向とのなす角度によって安全性の評価結果は変わり得るといことが量的に示された。

## 4. まとめ

本稿では、鉄道沿線での強風発生状況を反映して車両の安全性をより合理的に評価できる手法を確立する研究の一環として、風向角別に得られる転覆限界風速と風向別の強風発生確率とを組み合わせた車両の安全性評価手法を構築し、評価の試算を行った。以下にその結果をまとめる。

- (1) 既往の安全性評価手法の基礎となる転覆限界風速を上回る風速の発生確率を算出する式に、風向角別の転覆限界風速、風向別(16方位別)のワイブル係数( $c_d$ および $k_d$ )および各風向の出現率を導入して、風向を考慮した転覆限界風速を上回る風速の発生確率 $P_x$ を求める式を得た。
- (2) 単一の線路構造物で構成される仮想的な駅間を100km/hで走行する通勤型車両を想定し、風向角別の転覆限界風速と強風地に位置するアメダスで観測された10分間最大瞬間風速および10分間平均風向データから求めた風向別のワイブル係数と風向出

現率を用いて $P_x$ の試算を行った。その結果、風向を考慮しない場合に比較して約5～70倍の $P_x$ の差異が認められた。また、風向を考慮した場合でも、 $P_x$ は車両の進行方向の違いによって最大で約14倍異なった。

- (3) 転覆限界風速が小さい風向角に相当する風向の出現率が高く、かつ当該の風向での強風発生確率も高いときに大きな $P_x$ が算出されることを確認した。

## 5. おわりに

本稿で述べた評価手法の特徴は、強風下を走行する車両の安全性を耐力指標、外力指標ともに風向角(風向)を考慮して評価できる点にある。例えば強風時に卓越する風向が複数ある区間や曲線部が多く存在する規制区間等で防風柵を設備する際、本手法を用いて防風柵の有無やその設置ケースごとに $P_x$ を評価して防風柵の効果を見積もることで、より合理的な防風柵の設置に係る検討に資することができると考える。今後は、本手法に運転規制の考え方を導入するなどして、より実用的な評価ツールとすべく改良を重ねていく予定である。

## 文献

- 1) 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, Vol.26, No.9, pp.45-52, 2012
- 2) 今井俊昭, 荒木啓司, 福原隆彰: 規制区間で列車が強風に遭遇する確率の評価方法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, pp.5-10, 2009
- 3) 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, Vol.21, No.1, pp.13-18, 2007
- 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, Vol.17, No.4, pp.39-44, 2003
- 5) 白石成人, 松本勝, 白土博通, 安田清純: 日本の風向別風速発生頻度分布特性—Weibullパラメータの同定—, 日本風工学会誌, No.22, pp.13-38, 1984