

# 変動要素を考慮した強風時の車両安全性評価手法

防災技術研究部 気象防災研究室

主任研究員 荒木 啓司

## 1. はじめに

強風による鉄道車両の事故を防ぐために、鉄道事業者によって運転規制や防風柵の設備といった強風対策が実施されている。その一方で、運転規制が頻発し安定輸送が阻害されるという問題が顕在化するなど、安全と安定とを高い次元で両立できる強風対策が求められている。しかしながら、日本では強風時における列車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、現行の強風対策が確保する安全性や、運転規制方法の変更や防風施設の設備によって、安全性がどの程度向上または低下するかを定量的に把握することが困難である。

鉄道総研では、強風に対する列車の安全性を量的に評価する手法を研究している<sup>1)~3)</sup>。この手法は、規制区間内を走行中の車両が転覆限界風速<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、車両形状や線路構造物形状、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 (これ以降、変動要素と記す) として、「車両の左右振動加速度」と「風向」の2つが挙げられる。これまでに提案してきた安全性評価手法<sup>1)2)</sup>では、評価される危険度の過小評価を防ぐ観点から、これらの変動要素が採る値を「最悪の想定値に固定」して転覆限界風速以上の強風発生確率の大小を評価してきた。本発表では、2つの変動要素のうち「風向」に着目し、風向角別の転覆限界風速と風向別の強風発生確率とを組み合わせることで車両の安全性を評価する手法を紹介するとともに、評価の試算例を示す。

## 2. 風向を考慮した強風時の車両安全性評価手法

### 2.1 転覆限界風速 (耐力指標)

先に述べたように、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。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を図 1 に示す。同図によると、風向角が 90 度のときに転覆限界風速が最低 (約 32m/s) となる一方で、風向角が 112.5 度のときは約 36m/s、135 度で約 45m/s、180 度で約 49m/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

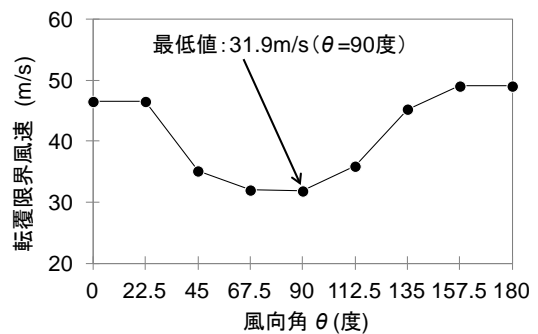


図 1 転覆限界風速の風向角特性の例 (通勤型車両の中間車、走行速度 100km/h)

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強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、規制区間の任意の地点を走行中の車両は「常に転覆限界風速が最低となる風向角からの強風に晒される」という「最悪の想定」に基づいて転覆限界風速の最低値のみを使用している。これに対し本研究では、図1に示した風向角ごとの転覆限界風速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）

既往の安全性評価手法<sup>1)2)</sup>では、安全性評価における外力指標であ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あらゆる風向下で生じた風速を一括して評価してきた。図2は、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、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モデルの例である。

これに対し本研究では、風向（16方位）ごとに10分間最大瞬間風速の出現度数を整理し、各風向での強風発生確率とそれぞれの風向の出現度数を整理して、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と風向出現率を図3に示す。同図によると、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小さいことがわかる。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同程度である一方で、両風向の出現率を比較すると西の方がより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、車両の転覆限界風速が低くなる風向角での強風発生確率の大小および当該の風向の出現率の高低が、安全性評価結果に違いをもたらす可能性を示唆する。

## 2. 3 風向を考慮した強風時の車両安全性評価手法

既往の安全性評価手法<sup>1)2)</sup>では、車両が転覆限界風速を上回る強風に遭遇する確率をその評価指標としている。本研究もこれに倣い、車両の転覆限界風速を上回る強風

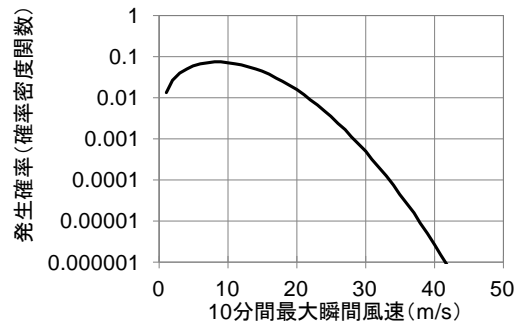
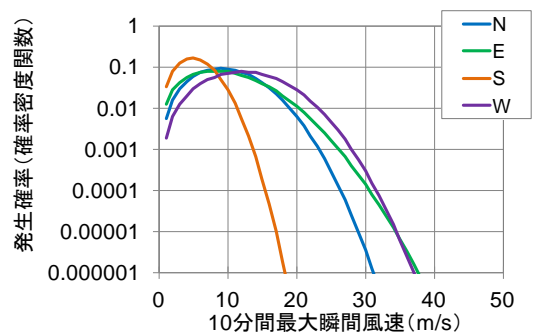
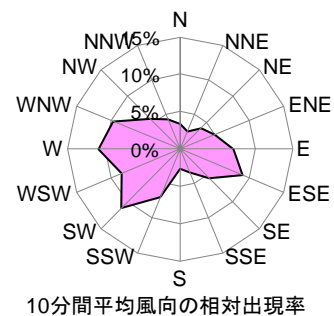


図2 強風発生確率モデルの例（全風向を一括考慮した場合）  
（強風地に位置するアメダスの10分間最大瞬間風速データ（約4年間分、データ数N=186,118）より算出）



(a) 風向別の強風発生確率モデル  
（16方位のうち、東西南北の4方位のみを例示）



(b) 風向出現率

図3 風向別の強風発生確率モデルの例(a)と風向出現率 (b)  
（強風地に位置するアメダスの10分間最大瞬間風速および10分間平均風向データ（約4年間分、データ数N=186,118）より算出）

発生確率  $P_x$  を評価指標とし、この  $P_x$  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。

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。

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

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

ここで、 $c$  および  $k$  はワイブル係数を表す。式 (2) を用いると、瞬間風速  $u$  を上回る風速の発生確率  $P$  は

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

と表すことができる。この式 (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  $c_d$  および  $k_d$  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  $P_x$  を求める式が得られる。

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

ここで、 $\theta$  は風向角を、 $g(d)$  は風向  $d$  の出現率を表す。

### 3. 安全性の評価例

前節で示した式 (4) を用いて、 $P_x$  の評価を試みた。この評価にあたっては、図 4 に示すような単一の線路構造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 で走行する車両を想定するとともに、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 にそれぞれ従うこととした。また、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 3 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  $P_x$  の値は変わってくる。そこで、車両の進行方向を 22.5 度刻みに変化させた計 16 ケースにて  $P_x$  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  $P_y$  も併せて試算した。 $P_y$  は、式 (3) に図 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

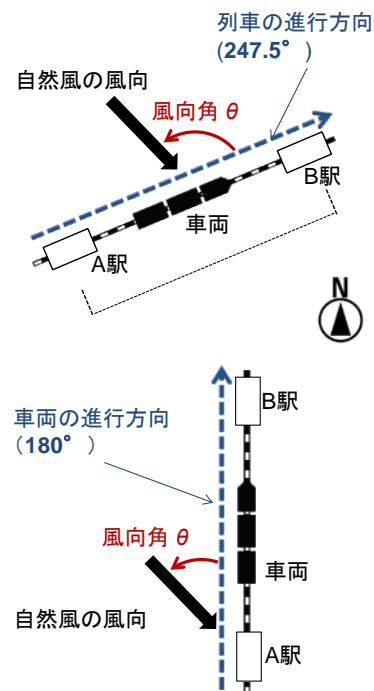


図 4  $P_x$  の試算に用いた仮想駅間の模式図と車両の進行方向の例  
(上図：247.5 度、下図：180 度)

考慮しない場合のワイブル係数 ( $c = 11.72$ 、 $k = 2.05$ ) を代入して求めた。

16 ケースの  $P_x$  および  $P_y$  の評価結果を表 1 に示す。 $P_x$  の値は車両の進行方向の違いによって  $6.2 \times 10^{-6} \sim 8.6 \times 10^{-5}$ 、 $P_y$  の値は  $4.3 \times 10^{-4}$  となり、両者には約 5~70 倍の差異があった。大きな  $P_x$  が評価されたときの車両の進行方向は、135~180 度、315 度、337.5 度とほぼ南北方向を向いており、このときに転覆限界風速が低くなる風向角は東西方向となる。今回の評価では、東西方向の風向出現率が高かったため (図 3)、転覆限界風速が低くなる風向角 (図 1 の例では 45~112.5 度付近) に相当する風向帯での強風発生確率と当該風向の出現率が、 $P_x$  の評価結果に大きく影響したと考えられる。

今回の  $P_x$  および  $P_y$  の評価結果は、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り、各評価値の絶対評価は困難であるものの、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が変わり得ることが明らかとなった。

表 1 仮想駅間を走行する車両に対する  $P_x$  および  $P_y$  の評価結果

車両の進行方向 (度)	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	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	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
$P_x$ ( $\times 10^{-5}$ )	7.1	4.2	2.7	1.6	0.62	2.8	8.6	8.3
$P_y$ ( $\times 10^{-5}$ )	43							

#### 4. まとめ

本研究では、車両の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 2 つの変動要素のうち「風向」に着目して、風向角別の転覆限界風速と風向別の強風発生確率、風向出現率を考慮して車両の安全性を評価する手法を提案した。また、その評価の試算を行い、風向に係る情報を「最悪の想定値に固定」した従来の評価結果との違いを明らかにするとともに、転覆限界風速が低くなる風向角に相当する風向帯での強風発生確率と当該風向の出現率が、安全性の評価結果に大きく影響することを示した。

今回紹介した安全性評価手法は、例えば防風柵を線路の左右どちら側あるいは両側に設置すべきかを検討する場面において、より合理的な判断を支援するツールとして活用できる。今後は、もうひとつの変動要素である「車両の左右振動加速度」も考慮した安全性評価手法の構築を進める予定である。

#### 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