

# 列車が運転規制区間を走行中に強風に遭遇する確率の評価方法

防災技術研究部 気象防災  
研究室長 今井俊昭

## 1 はじめに

鉄道沿線における強風発生確率は、強風に対する列車の安全性を評価するに際して重要な要素である。車両や線路構造物の形状が横風で生じる空気力に関して多少有利な形状であったとしても、転覆限界風速値を頻繁に上回る区間では強風対策や監視が必要である。本発表では、鉄道沿線における観測事例を基に強風の発生頻度を評価する方法を紹介する。なお、検討に際して用いた風のデータは、風速計の配置や取付け高さ等の観測方法が適切であり、転覆限界風速を定義した基準位置の風速が正しく観測されているものとする。

## 2. 強風発生頻度の定量化方法

### 2.1 強風出現度数の数え方

強風に対する列車の安全性に関して重要な値は、列車が運行されているその時その場で生じている風速である。また、地上施設が被災する場合と異なり、区間を進行中の列車は各地点を通過するその瞬間にその地点で転覆限界風速に達する風速が生じなければ転覆することはないとされている。そこで、強風の発生確率を算出するために、数分間の代表時間を設定し、最大瞬間風速でその数分間の風の強さを表すことにする(図1)。

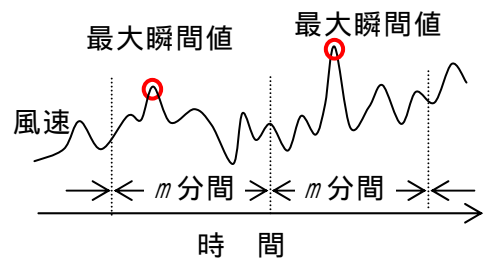


図1 風速の標本化

### 2.2 列車の安全性評価のための時間と空間のスケール

列車の運転はひとたび規制がかかると最短でも15分間あるいは30分間以上は規制が継続されることになっている。ある規制区間で総規制時間を推定するには、 $n$ 分間を様子見時間(規制の最小継続時間)としている線区であれば、 $n$ 分間最大瞬間風速の相対出現度数(観測度数÷期間全度数)が総規制時間を算出するための指標となる。

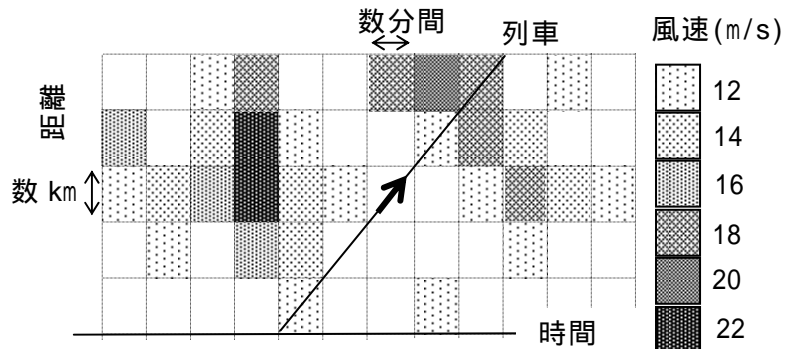


図2 風速を評価する空間単位

また、 $m$ 分間で規制区間を通過する場合には、その $m$ 分間に起きる強風が問題となるので、 $m=3$ とすると3分間最大瞬間風速の相対出現度数が安全の指標として重要となる。図2に示したような数分間と数kmというスケールは、アメダス観測網、あるいは天気予報のための数値解析モデルの格子間隔よりも一段階細かく、この時間・空間スケールで確定的な気象予測は不可能である。

## 3. 強風に関するリスクを評価するために算定するいくつかの確率

### 3.1 強風発生確率

風観測を行い風速の階級別出現度数を調べて、十分に長い観測期間で得られた相対出現度数は確率値とみなすことができ、強風に関するリスク評価のための基礎資料とすることができる。 $n$ 分間最大瞬間風速の度数分布は、式(1)で示すワイブル分布による近似を用いて強風発生確率とし

て定式化されることが多い。ここで  $c$  は平均的な風の強さを、 $k$  は極値の現れやすさを表すパラメータである。 $c$  と  $k$  ともに観測地に固有な値で、時間長さ  $n$  のとり方によって異なる値となる。15年間の風観測データから得られた30分間最大瞬間風速の相対出現度数とワイブル分布で近似した相対出現度数分布を図3に示す。図3では、約150万個(5分刻み)の相対出現度数分布とワイブル分布で近似した相対出現度数分布を示した<sup>1)2)</sup>。

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

風速 25m/s で規制し、30分間の様子見時間で解除するルールの場合、任意の時刻が運転規制中である確率は、30分間最大瞬間風速が 25m/s 以上となる確率と等しい。図3の分布関数に当てはめると 25m/s 以上となる30分の年当たり度数は 31 となる。従って、年当たりの運転規制時間の期待値は約 16 時間(31 度数 × 30 分間)となる。同様に、日最大瞬間風速が 25m/s 以上となる確率を求めておけば、それは年当たり運転規制発令日数の期待値を示すことになる。さらに、任意の3分間に 25m/s 以上の瞬間風速が少なくとも一瞬現れる確率は3分間最大瞬間風速が 25m/s 以上となる確率に等しく、列車がある区間を通過するのに3分間を要する場合、区間を通過中にどこかの地点で 25m/s 以上の風速が生じる確率と同じである。

**3.2 風速が短時間に増大する確率**

ある  $m$  分間の風速を  $u_f$  とすると、 $u_f$  はその直前の風速  $u_p$  に対して従属性がある。 $u_f$  の生じる確率は、その直前の風速  $u_p$  を条件とする確率として長期間の観測結果を基に関係づけられる。観測結果を基にして風速増加量 (任意時刻で直後  $m$  分間の最大瞬間風速から直前  $n$  分間の最大瞬間風速を引いた値) の相対度数分布を調べたところ、風速増加量の度数は指数分布で近似できた<sup>2),3)</sup>。

風速増加量の出現確率  $P_s(\delta)$  を近似する関数を式(2)に示す。観測点Aでの観測値と指数関数で近似した風速増加量の相対出現度数分布を図4に示す。

$$P_s(\delta) = a \cdot \exp(-b\delta) \dots\dots\dots(2)$$

風速増加量がある値  $x$  以上となる確率  $P_c$  は、式(2)を  $\delta$  について  $x$  から無限大まで積分することにより式(3)として得られる。なお、任意の時刻の直前数分間の最大瞬間風速が  $u_0$  のとき、その直後数分間の最大瞬間風速が危険な風速  $Uc$  以上となる確率は、風速増加量が  $Uc - u_0$  以上となる確率と言い換えることができ、式(3)の  $x$  を  $Uc - u_0$  と置き換えることで得られる。

$$P_c = \frac{a}{b} \cdot \exp(-b \cdot x) \dots\dots\dots(3)$$

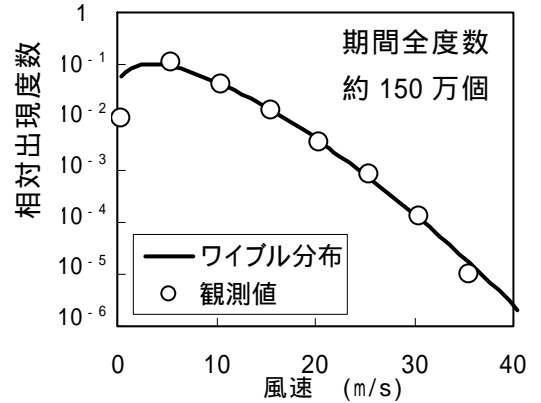
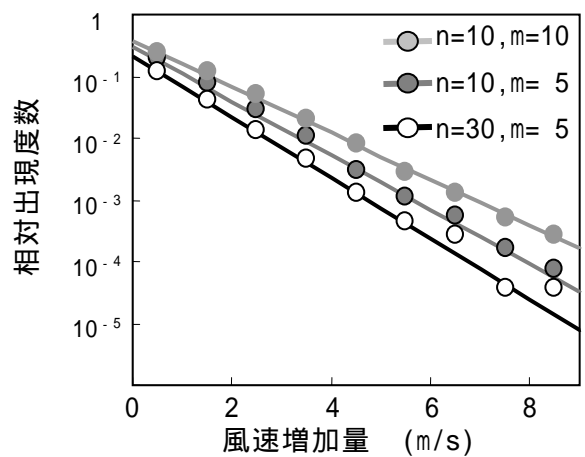


図3 30分間最大瞬間風速の相対出現度数分布



(丸印：観測結果，実線：指数関数近似曲線)

図4 風速増加量の相対出現度数分布

### 3.3 列車が危険な強風に遭遇する確率

転覆限界風速は、車両に働く力の静的なつり合いの関係から、風上側輪重がゼロとなる空気力を風洞試験で得た空気力係数で風速に換算して推定される<sup>4)</sup>。以下では列車にとって危険な風速を転覆限界風速とし、検討区間につき最高速と徐行で各々1つの値が求められているとする。

#### (1) 運転密度と遭遇確率

危険な風速を決定する要因が同じ条件であれば、危険な強風に遭遇する列車本数の期待値は運転本数密度に比例するものとする。 $m$ 分間で区間を通過する列車がその区間で強風に遭遇する確率は、 $m$ 分間最大瞬間風速の発生確率から年当たりの強風出現度数の期待値を求め、その区間に存在する列車本数の期待値を乗じて(本/年)の単位で表す。複線の風上と風下で危険な風速の値が同一であれば上下線の運転本数密度を使い、風上側の危険風速が風下側と異なる場合には、風上側と風下側でそれぞれ危険な風速に達する確率を求め、これに片側本数密度を乗じて、上下線で遭遇期待本数を足し合わせて遭遇確率を求める。

#### (2) 運転規制を行わない場合

運転規制が行われない時に列車が危険な強風に遭遇する確率は、いわば無作為の確率である。標準的な速度で規制区間を $m$ 分間かけて通過する場合、 $m$ 分間最大瞬間風速がある値 $U_c$ 以上となる確率に規制区間に存在する列車の期待本数を乗じると、 $U_c$ 以上の強風に遭遇する列車の期待本数となる。

比較的強風地で得られた5分間最大瞬間風速のワイルド係数( $c=7.01, k=1.54$ )を用いた上で、危険な風速の値として $U_c=30\text{m/s}$ を例にとると、 $U_c$ 以上の最大瞬間風速となる年当たりの5分間の度数は、 $0.00084 \times 365 \times 24 \times 60 \div 5 = 88$ 度数となる。通過所要時分が5分間の区間Aで、20本/日の列車運転密度の場合、任意の時刻に区間Aを走行中の列車の期待本数は $20 \div (24 \times 60 \div 5) = 0.069$ 本である。これを $U_c$ 以上となる度数にかけると、運転規制を行わない場合に $U_c$ 以上の強風に遭遇する年当たりの列車本数の期待値は6.1本となる。なお、この試算では延長5kmの区間Aが一様な風況で、かつ危険な風速の値も走行速度だけに依存して一様であると仮定している。

#### (3) 運転規制を行う場合

運転規制を行なう場合は無作為の確率ではなく、直前の $n$ 分間最大瞬間風速がある値 $u_0$ をとった時にその後の $m$ 分間最大瞬間風速が $U_c$ を超過する確率を考える。規制発令風速に達しなかった $n$ 分間の直後 $m$ 分間に危険な強風が生じたとすれば、 $n$ 分間の最後の瞬間が運行可能という条件で、直後 $m$ 分間の最大瞬間風速が危険な風速まで増加する事象があったことになり、直前風速が規制値以下であったという条件の下での直後の風速の発生確率は条件付き確率となる。区間Aが前節と同じ風況にあるとした上で、区間内の1点における観測値に基づき表1に示すルールで規制され、通過所要時分が表2となる状況を想定する。このルールに従う場合、直前15分間の最大瞬間風速 $u_p$ が20m/s未満であれば、列車は5分間をかけて最高速で走行し、その時の危険な風速は30m/sである。そこで15分間最大瞬間風速が $u_p$ のとき、直後の5分間最大瞬間風速が $u_p$ を上回って30m/s以上となる確率に $u_p$ の発生確率を

表1 想定する運転規制ルール

規制	規制発令風速	様子見時間
徐行	20m/s	$n=15$ 分間
抑止	25m/s	$n=15$ 分間

表2 想定する運行条件と危険な風速

制限速度	通過所要時分	$U_c$
最高速	$m=5$ 分間	30m/s
徐行	$m=10$ 分間	38m/s

乗じて、 $u_p$ について0から20m/sまで積分すると、規制が解除されている時間帯の強風発生確率となる。次に徐行時の危険な風速である38m/s以上となる確率を $m=10$ 分間の風速増加量で求め、 $u_p$ について20m/sから25m/sまで積分すると徐行発令時間帯の強風発生確率となる。これらを足して20本/日の運転本数密度を想定すると、年当たりの強風遭遇列車本数の期待値は0.0004本と

算出される。表 1, 表 2 のケースにおける強風発生確率  $P$  を式 (4) に、一般形を式 (5) に示す。ここで、 $U_r$  ( $U_s$ ) は徐行 (抑止) 発令風速、 $Uc1$  ( $Uc2$ ) は最高速時 (徐行時) の危険な風速、 $n$  は様子見時間、 $m1$  ( $m2$ ) は最高速時 (徐行時) の通過所要時分である。

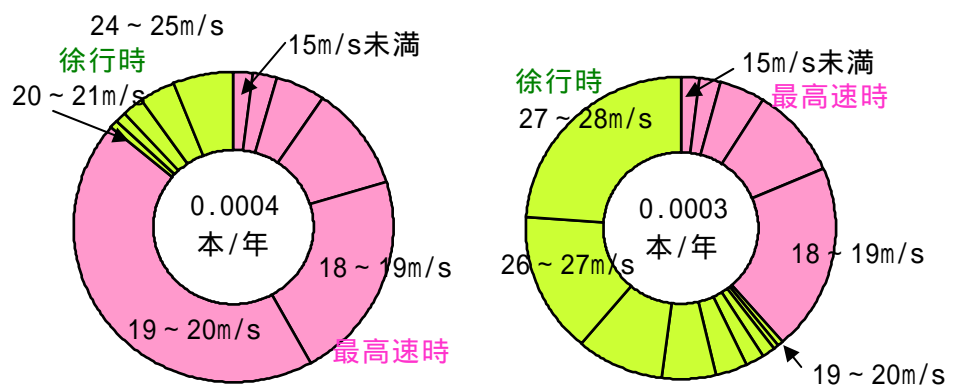
$$P = \int_0^{20} P_W(x) \cdot P_{S,n=15,m=5}(30-x) dx + \int_{20}^{25} P_W(x) \cdot P_{S,n=15,m=10}(38-x) dx \dots \dots \dots (4)$$

$$P = \int_0^{U_r} P_W(x) \cdot P_{S,n,m1}(Uc1-x) dx + \int_{U_r}^{U_s} P_W(x) \cdot P_{S,n,m2}(Uc2-x) dx \dots \dots \dots (5)$$

#### 4. 強風に遭遇する確率を指標とした安全性の検討

ある線区における危険な風速  $Uc$  が解明されていれば、式 (5) の定数を規制速度、速度規制発令風速、抑止風速、様子見時間等のパラメータに変えて、規制ルールを変更した場合の安全性の違いを量的に評価することができる。表 1 と表 2 に示す条件でパラメータスタディを行ったところ、徐行時の遭遇確率は小さく、最高速時の遭遇確率が大半を占めることが分かった。危険な風速が徐行時と最高速時で 8m/s の差に対して、発令風速では 5m/s の差であるこのケースでは、最高速時と徐行時の遭遇確率に大きな偏りが見られる (図 5 の (a))。そこで、同じ条件で発令風速を変えて試算したところ、徐行発令風速を 19m/s に下げれば抑止発令風速を 28m/s に向上させても強風遭遇確率は増大しない

ことが分かった (図 5 の (b))。この例のように、規制区間の危険な風速以上となる強風発生確率を調べ、輸送影響を減じかつ安全性が向上するように運転規制ルールを改良できる可能性がある。



(a) 20m/s 徐行, 25m/s 抑止 (b) 19m/s 徐行, 28m/s 抑止

試算条件：走行条件は表 2、様子見時間 15 分間

図 5 強風に遭遇する列車の期待本数

#### 5. おわりに

今回の強風遭遇確率の検討では、風速計が適切

に管理されていて、規制区間全体の風速に対する代表性が高い状態を前提とした。風速計が強風箇所に配置されていない場合や、風速計が近接構造物の影響を受ける領域に取り付けられているために、観測される風速に空間的な代表性に乏しい場合には、遭遇確率が規制を行わない状態の遭遇確率に近づくことになり、危険度が増大する。今後は風監視方法が十分ではない場合に列車が強風に遭遇する確率を検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 白石成人他：日本の風向別風速発生頻度分布特性，風工学会誌，No.22，1984
- 2) 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
- 3) 今井俊昭，島村泰介，藤井俊茂：自然風風速の変動特性を考慮した実況風速の評価，鉄道総研報告，Vol.17，No.8, pp.25-30，2003
- 4) 日比野有：横風による車両転覆に関する条件、RRR, 2003.8