

強風発生確率を用いた車両の安全性評価手法の開発

防災技術研究部 気象防災研究室

副主任研究員 福原 隆彰

1. はじめに

鉄道における強風時の運転規制（運転抑止・速度規制）は、沿線に設置されている運転規制用の風速計により測定された瞬間風速値があらかじめ定められた値（規制風速）を超えた場合に発令される。また、運転規制の解除については風速値があらかじめ定められた値未満となる状態が一定時間以上継続した場合となる。

近年、より軽量な車両の導入や高速化に伴い、これまでと同じ運転規制方法で安全性が確保できるのかを評価する必要性が生じてきた。また、強風による災害を防ぐための運転規制については安全性の数値目標がないため、運転規制方法の変更を検討する場合には、変更後の運転規制方法における安全性が変更前のそれと比較して同等かそれ以上となることを確認することが多い。

また、運転抑止を行う前段として速度規制を設けた場合には、速度規制時には車両の転覆限界風速は向上するものの、規制区間を走行する所要時間が増えるため、速度規制を行うことで安全性がより向上するのか、または低下するのかを確認することが必要となる。さらに、強風時の風向が線路と平行方向に近いのか、それとも線路直角方向に近いのかということも、安全性に違いをもたらすため、これを考慮することも必要となる。

筆者らは、強風に対する列車の安全性を量的に評価する手法を検討してきた。その際に外力となる風を規定するために、ある風速の発生確率と風速の時間変化量を考慮した強風発生確率という指標を考えた。これまでの研究で、観測結果から得られる短時間の風速の変化量の相対出現度数分布は指数関数で近似でき、その度数分布の形状は気象条件や周辺の地形条件にほとんど依存しないことを示した¹⁾。また、数分間の最大瞬間風速の出現確率はワイブル分布で近似ができること²⁾を用いて、強風の発生確率を算出した³⁾。

本発表では、強風発生確率を用いて車両の安全性を量的に評価する方法について概要を述べるとともに、仮想線区を対象とした安全性評価事例を述べる。

2. 強風発生確率の算出

今回、車両が危険な状態にあることの定義を、「列車が規制区間に進入することができる場合において瞬間風速値が転覆限界風速以上となる」こととした。これは、列車が規制区間内に存在することができる場合、すなわち、運転抑止が発令されていない条件（条件 1）と、規制区間内に進入してから通過するまでの間に瞬間風速が転覆限界風速以上となる条件（条件 2）の 2 つを同時に満たす必要がある。図 1 に車両が危険な状態にあることの判定フローを示す。

一般的な運転規制方法より、列車が規制区間に進入しようとしている時刻を t_0 、運転規制の様子見時間を n とした場合、時刻 t_0 での瞬間風速が運転抑止風速 U_s 未満であっても、 U_s 未満の瞬間風速が様子見時間 n 以上継続していなければ、前に発令された運転規制が解除されていない状態となる。このため、条件 1 は「定められた時間（時刻 t_0-n から t_0 の間）での最大瞬間風速が運転抑止風速 U_s 未満である」条件といいかえることができる。また、規制区間の通過所要時間を m

とした場合、「規制区内に進入してから通過するまでの間（時刻 t_0 から t_0+m の間）に瞬間風速が転覆限界風速以上となる」場合でも、時刻 t_0 で運転抑止が発令されていれば（条件 1 が No）、時刻 t_0 には規制区間に列車は進入できないことから、危険な状態とはならない。このことから、条件 1 を考慮して、条件 2 は「通過所要時間 m の間に運転抑止風速未満の風速値から転覆限界風速以上となる、風速の急激な増加が発生する」条件といいかえることができる。

図 1 のフローで危険となる状態が発生する確率を強風発生確率 P_x とよび、この値によって安全性を評価する。この確率 P_x は転覆限界風速以上の風速となる確率であることから、0 に近い方がより安全であることとなる。条件 1 の確率（最大瞬間風速の出現確率）および条件 2 の確率（短時間で風速の急激な増加（風速増加量）の発生する確率）の推定式を観測結果からそれぞれ作成し、これらを組み合わせさせて強風発生確率 P_x を計算した。これによりある規制区間で強風に対する、ある転覆限界風速をもつ 1 本の列車の安全性を得られた P_x の大小で評価することができる。

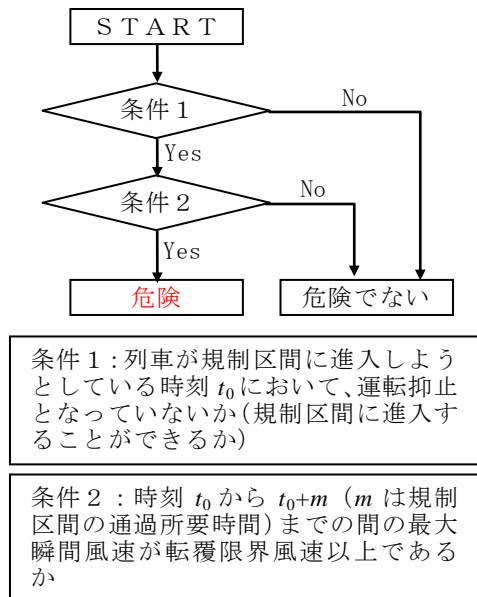


図 1 危険な状態の判断フロー

3. 強風発生確率の評価例

強風発生確率 P_x を計算するときのパラメータは上述の条件 1, 2 の確率の推定式を定める値、運転規制の発令風速 U_s 、車両の転覆限界風速 U_c 、運転規制の様子見時間 n 、当該区間の通過所要時間 m に集約される。これらのパラメータを対象線区における値とすることで、安全性の評価を量的に行うことができる。

以下では、安全性の評価例として、車両の転覆限界風速や運転規制方法が異なる場合、規制区間を走行する速度が異なる場合、風向を考慮した場合の 3 例を示す。なお、条件 1, 2 の確率の推定式を定めるパラメータ（自然風の性質）は国内の強風地で得られた風向風速データより与えた。

表 1 検討したケースの条件
(車両の転覆限界風速, 規制風速が異なる場合)

		ケース I (基準)	ケース II	ケース III
n	分	15	15	15
m	分	4	4	4
U_s	m/s	25	25	30
U_c	m/s	35	33	40

(1) 車両の転覆限界風速、運転規制風速が異なる場合の安全性評価例

車両の変更により転覆限界風速が変わる場合、運転規制方法が変更となる場合には、規制区間を通過する所要時間が変わらなかったとしても強風発生確率 P_x の値は異なることになる。そのため、これらの値が変わることで安全性が向上するのか、または悪化するのかを評価する必要がある。運転抑止風速 U_s を 25m/s、運転規制の様子見時間 n を 15 分間、規制区間の通過所要時分 m を 4 分間、車両の転覆限界風速 U_c が 35m/s（ケース I）である

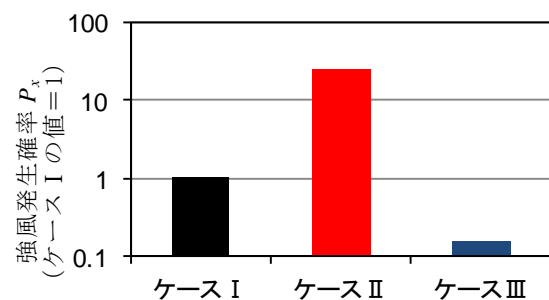


図 2 車両の転覆限界風速、運転規制風速が異なる場合の強風発生確率 P_x の値

場合を基準とし、車両の転覆限界風速 U_c が 33m/s と低い場合（ケースⅡ），車両の転覆限界風速 U_c が 40m/s で、運転抑止風速 U_s を 30m/s とそれぞれ 5m/s 高い場合（ケースⅢ）における安全性を比較した結果を示す。各ケースの条件は表 1 に示したものとした。今回はケースⅠの強風発生確率 P_x を基準とした各ケースの強風発生確率の大小を比較するため、ケースⅠにおける強風発生確率 P_x を 1 としたときの値を用いる。比較した結果を図 2 に示す。図 2 で、値が 1 より大きいケースⅡでは、強風発生確率 P_x がより高く、より危険であることを示し、逆に値が 1 より小さいケースⅢでは、ケースⅠより安全であることを示している。従って、この評価事例では転覆限界風速の増加分だけ規制風速を向上させた場合でも、安全性が保たれることがわかる。

（2）走行速度が異なる場合の安全性評価例

規制区間によっては、運転規制方法として運転抑止の前に速度規制を設ける場合がある。車両の転覆限界風速 U_c は走行速度が低いほど大きくなる。しかしながらその一方で規制区間の通過所要時間 m は長くなる（強風に曝される時間が長くなる）ことで、規制区間を抜けるまでの時間でより強い風が吹く可能性が大きくなる。そのため、強風時に速度規制を設けたときに、転覆限界風速が高くなる効果の大きいのか、強風に曝される時間が長くなることによる影響の大きいのかを評価する必要が生じる。適切な評価を行うことで、より安全となる走行速度 V を定めることが可能となる。（1）のケースⅠにおける走行速度 V を 90km/h とし、走行速度を 120km/h、（ケースⅣ）、60km/h（ケースⅤ）とした場合の安全性を比較した例を示す。このときの規制区間の通過所要時間 m はケースⅣで 3分、ケースⅤで 6分となる。各ケースの条件は表 2 に示したものとした。この条件下で強風発生確率 P_x を計算した結果を図 3 に示す。この評価例では、ケースⅤのほうがより小さな確率 P_x となるため、強風に曝される時間がケースⅠより長くなったとしても、規制区間を走行する速度を落として転覆限界風速を上げた方がより安全性が高くなることがわかる。

表 2 検討したケースの条件
（車両の走行速度が異なる場合）

		ケースⅠ	ケースⅣ	ケースⅤ
V	km/h	90	120	60
n	分	15	15	15
m	分	4	3	6
U_s	m/s	25	25	25
U_c	m/s	35	33	37

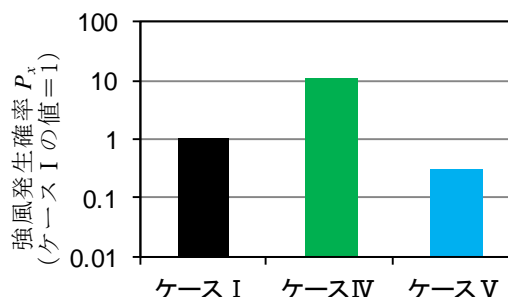


図 3 車両の走行速度が異なる場合の強風発生確率 P_x の値

（3）風向を考慮した場合の評価例

車両の転覆限界風速は風向により異なることが分かっており⁴⁾、風向が線路と平行となる場合には高く、線路と直角となる場合は低い。ここまで示した強風発生確率は、鉄道の運転規制には風向を取得できない三杯式風速計も用いられていることを考慮し、風向情報がない場合のことを考えて、転覆限界風速を最も厳しい風向における値として固定して評価した。しかしながら、実際の強風の風向は必ずしも転覆限界風速が最も低くなる

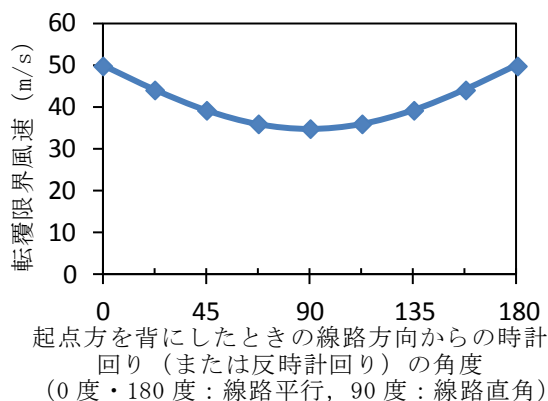


図 4 想定した風向別の転覆限界風速

風向と一致するとは限らないため、実際の強風発生確率 P_x はこれより低いことが予想される。

ここでは、風向別の転覆限界風速 U_c が図 4（線路直角方向の風向のときに 35m/s，線路平行方向の風向のときに 50m/s）となるような車両を想定し、風向が 16 方位から等しい割合で発生する場合（ケース VI）と、風向が線路と平行な方向のみである場合（ケース VII）を想定し、風向を考慮せず、転覆限界風速 U_c を図 4 での最も低い値である 35m/s で固定した場合（ケース I と同じ）の安全性を比較した。このときの強風発生確率 P_x を計算した結果を図 5 に示す。各ケースの条件は表 3 に示したものとした。図 5 より、風向を考慮しない場合（ケース I）の強風発生確率 P_x を 1 とすると、ケース VI，ケース VII とともに強風発生確率 P_x が 1 より小さくなっていることがわかるが、その割合を量的に評価することが可能となる。

4. おわりに

現在の一般的な運転規制方法に準じた場合における強風に対する車両の安全性を量的に評価する方法として、風速の出現確率ならびに短時間での風速変化量の出現確率から、運転規制に従った場合に列車の転覆限界風速以上の風が発生する確率（強風発生確率）を求めた。この確率について車両の転覆限界風速や運転規制方法が異なる場合、車両の走行速度が異なる場合、風向を考慮した場合における車両の安全性の違いを示すことで、より安全な強風対策を検討することができるようになる。

今回の報告では簡略化のために風速の時間変動のみを考慮した。また、ある転覆限界風速をもつ 1 本の列車に対する安全性の評価例であり、転覆限界風速が異なる列車が混在する場合や運転規制区間に同時に複数の列車が存在する場合は考慮していない。これらを考慮し、強風に対する列車の安全性をさらに現実的な条件の下で評価することが今後の課題である。また、土砂災害など、他の気象災害と同一の指標で安全性を評価できるようにすることも今後の課題である。

文献

- 1) 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
- 2) 島村泰介，福原隆彰，今井俊昭：風速の時間変動に及ぼす気象条件と周辺地形の影響，鉄道総研報告，Vol. 19，No. 10，pp. 45－50，2005
- 3) 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
- 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

表 3 検討したケースの条件
(風向を変えた場合)

		ケース I	ケース VI	ケース VII
風向		U_c が最小の風向	16 方位から均等	線路平行方向のみ
n	分	15	15	15
m	分	4	4	4
U_s	m/s	25	25	25
U_c	m/s	図 5 に従う		

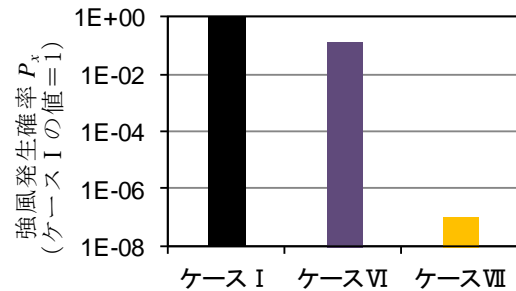


図 5 風向を考慮した場合の強風発生確率 P_x の値