

正 [土] 島村 誠 (JR東日本) ○南雲 洋介 (JR東日本)

## A Statistical Study on the Definition of Wind Speed Applicable for Train Operation Control under High Wind

Makoto SHIMAMURA, East Japan Railway Company. 2-479, Kita-ku, Nisshin-cho, Saitama City  
Yosuke NAGUMO, East Japan Railway Company

This article discusses the optimal time interval over which instantaneous wind speed obtained as crude output of an anemometer is averaged to be applied for wind regulations of train operation under high winds. As the result of simultaneous on-site measurements of wayside wind speeds, it was estimated that the ranges of between 3 sec. and about 1 min. are optimal for the averaging time intervals and that considerable amount of unnecessary wind regulation would be reduced by defining the wind speed based on the above-mentioned averaging time intervals.

*Keywords* : high wind, operation control, averaging time interval

### 1. はじめに

現在、強風時の列車運転規制の判断基準として、一般的には、線路沿線に設置された1台の風速計で測定した瞬間風速が用いられている。一方、気象学や風工学の分野における瞬間風速としては、機器で測定した生の数値ではなく、3秒程度の時間平均をとった風速が用いられるのが普通である。これは、原理的に瞬間的な空気力の作用に着目すべき現象であっても、野外における通常の人間活動や建物等の空間規模を考えると、その影響を1点のみの瞬間風速で評価するのではなく、問題となる空間内の風速変動による効果を適切に表現できる風速評価方法を用いる必要があること、また、経験的にも、機器で観測した生の瞬間風速に比べて3秒程度の平均風速のほうが強風被害との関連性が高いことによる。

一定時間内に出現するピーク値を比較すると、風速計で測った瞬間風速は3秒平均風速に比べて常に大きくなるので、現在の運転規制は安全側ではあるが、不必要な運転規制を多発させやすい点について改良の余地がある。そこで、実際の強風観測および走行列車に働く空気力データにもとづいて運転規制の判断に用いる上で最適な風速の平均時間を探索し、その結果を用いて上記問題を改善する方法を提案する。

### 2. 現行の風速観測仕様

現在、JR東日本の各線区では、指定された強風時運転規制区間毎に1ないし数基の沿線風速計が設置されており、それらの風速計のいずれかの瞬間風速があらかじめ定めた基準値を超過した場合には、運転中止等の運転規制が行われる。各風速計が受け持つ運転規制区間の延長は、おおむね2~10km程度である。(図1)

風速計は運転規制区間内の強風の発生頻度が高いと考えられる地点や、高築堤上や桁高の大きな上路鉸桁の橋りょう上など、強風時に列車が大きな空気力を受けると考えられる箇所を選んで、通常、レール面から3~5m

の高さに設置されている。また、瞬時風速は風杯の回転速度にもとづいて0.5秒ごとに出力される。

### 3. 平均風速から瞬間風速への移行の経緯

古い時代には、風速計の設置されていない停車場では、気象庁風力階級表を使用して目測により風速(平均風速に相当)を求めていたため、規程に定めてある風速は平均風速であるものとして運用され、風速計で計測した瞬間風速も10分間の平均風速に換算して使用していた。これに対して、6名の死者を出した山陰本線余部橋りょう上での列車脱線転落事故(1986年12月28日発生)の原因究明を目的とする「余部事故技術調査委員会」<sup>1)</sup>の検討の過程において、車両の転覆に大きな影響を与えるのは瞬間風速であり、運転規制は平均風速ではなく瞬間風速によって行うべきであるとの決定がなされた。このため、JR東日本では、管内の風速計がすべて瞬時値発信式となっていることを確認した上で、1987年10月から風速計で計測した瞬間風速をそのまま運転規制に用いることとして現在に至っている。

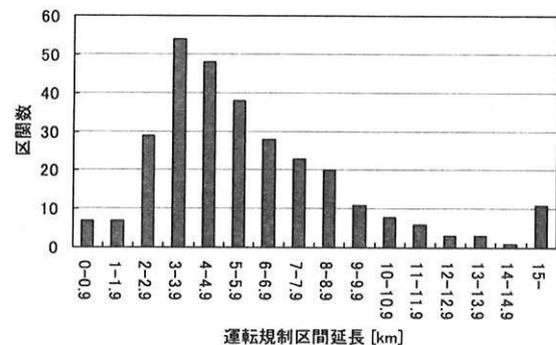


図1 運転規制区間延長の分布

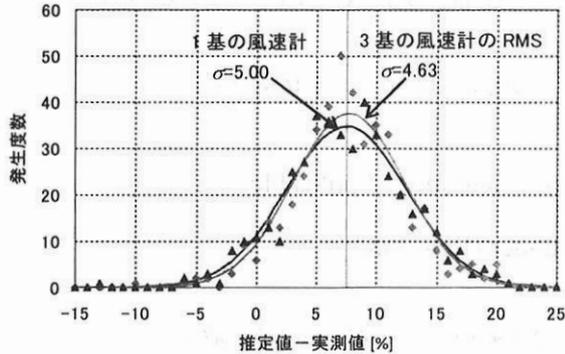


図2 輪重アンバランスの推定値と実測値との差の分布

#### 4. 風速測定の目的と風速の評価方法

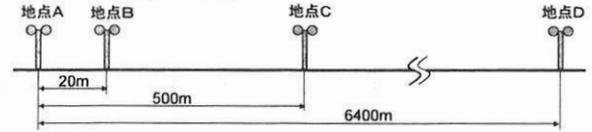
ここで、何のために風速測定を行うのかという問題に立ち返ってみると、次のふたつの目的が挙げられる。

1. 車体に作用する空気力を正しく把握することにより、現在時刻の風速が転覆限界に対して十分に余裕のあるものであることを確認する。
2. 近い将来において危険な風速に達する可能性の有無を判断し、必要な場合には、情報伝達や運転制御に必要な時間的余裕をもって運転規制を発令する。

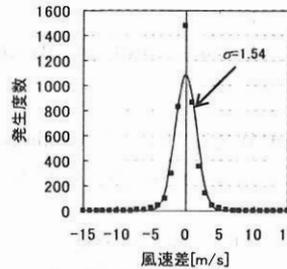
強風による車両転覆は、高々数秒間の風の作用によって起こりうるし、しかも風速が大きいほどその必要作用時間が短くなるので、上記 1. については、車両に作用する刻々の空気力を評価するためには、瞬間値の風速時系列を用いる必要があると考えられる。しかしながら、自然風の瞬間風速は、車両長さ（約 20m）程度の空間範囲内でも大きく変動するため<sup>2)</sup>、1 基の風速計では車両に働く空気力のピークの大きさとタイミングを正しく評価することがむずかしい。この難点を軽減する方法として、車両長さの範囲に複数の風速計を等間隔に配置して同時に測定した瞬間風速の空間的な平均値を評価風速として用いることが有効であると考えられる。実際に、強風時における走行列車の左右輪重アンバランス[%]の実測値と理論式<sup>3)</sup>にもとづく風速からの推定値を比較してみると、1 基のみの風速計の瞬間風速を用いるよりも、3 基の風速計の瞬間風速の RMS（二乗平均平方根）を用いたほうが実測値により近い推定値が得られることが確認できる。（図 2）

また、上記 2. については、運転規制用風速計は、列車の走行位置と異なる地点に固定されているため、風速計の測定風速は個々の列車の位置での風速とは異なるのに加え（図 3）、現在の風速値を将来の風速についての判断を下すために用いるという条件が加わる。つまり、列車運転規制における風速観測は、観測した風速に対応する空気力そのものを問題にしているわけではなく、実質的には、現在のある場所の風速にもとづいて他の場所における将来の風速を予測するために行っていることになる。このような運転規制における風速観測の目的に照らすと、瞬間風速にもとづいて運転規制の判断を行うことには、予測しようとする特性値と無関係な風速変動のランダム成分を拾ってしまうことによる不必要な運転規制を発生させやすいことや、急激な風速の増加傾向に追従できないことによる規制の発令遅れが発生しやすいなどの問題点が指摘できる。

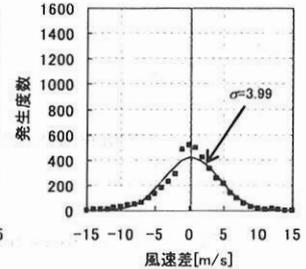
したがって、これに代わる方法として、運転規制区間



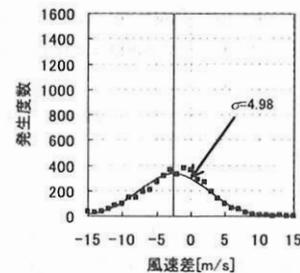
(a) 風速計間距離



(b) 地点 A-B 間 (20m)



(c) 地点 A-C 間 (500m)



(d) 地点 A-D 間 (6400m)

図3 離れて設置された 2 台の風速計で測定された風速差の分布の風速計間距離による違い

の空間スケールや運転規制を発令してから実際に運転制御の操作が完了するまでの時間スケールでの風速変動の関連性に対応した平均化時間を用いた観測風速にもとづいて運転規制を行うほうが、安全性及び運転規制の少なさの両面で有利になる可能性があると考えられる。

#### 5. 運転規制の評価

運転規制のルールのおよさを評価するための指標として、運転規制を発令することによって生じる「費用」と運転規制を発令しないことによって生じる「危害」の 2 要素を考慮することができる。これらの定量的な定義として、ここでは「費用」として運転規制時間数の合計、「危害」として列車の走行中における危険風速への暴露を考慮することにする。

「費用」、「危害」とともに小さい運転規制がよい運転規制であるが、観測風速がある運転規制発令基準風速を超過したら運転規制を発令し、一定時間にわたって運転規制発令基準風速未満の状態が継続したら運転規制を解除するという一般的なルールを仮定すると、「費用」と「危害」は運転規制発令基準風速を媒介変数としてトレードオフの関係にある。したがって、警報しきい値を調節することによって「費用」、「危害」の一方を等しくしたうえで他方の大きさを比較することにより、ふたつの運転規制ルールのおよさを一意的に比較することができる。

以上の考え方にもとづいて、下記の方法により観測データを用いて風速の平均化時間が運転規制のおよさに与える影響を調査し、最適な風速の平均化時間について考察した。

1. 同一運転規制区間内の2地点における風速の同時測定で得られた時間間隔 $\Delta t$ 毎の最大風速の時系列を $V = \{v_1, v_2, \dots\}$ および $W = \{w_1, w_2, \dots\}$ とする。ここで、 $v, w$ の添え字は1期間の長さを $\Delta t$ とする「期間」である。また、 $V$ は風速計が出力する生の瞬間風速、 $W$ は瞬間風速あるいは様々な平均化時間での平均風速とする。
2. 「 $w_k \geq w^*$ なら期間 $k$ において規制発令」、「 $\max(w_{k-p}, w_{k-p+1}, w_{k-p+2}, \dots, w_k) < w^*$ なら期間 $k$ において規制解除」という運転規制ルールを仮定する。ここで、 $w^*$ は運転規制発令基準風速である。
3. 第 $k$ 期における「危害」 $D_k$ を次式で定義する。

$$D_k = \sum_{i=1}^l (\max(v^* - v_{i+k}, 0))^2 \quad (1)$$

ここで、 $l$ は規制区間を通り抜けるのに必要な時間に対応する期間数、 $v^*$ は、「危険風速」とする。危険風速に対する超過風速の二乗を損失の値としているのは、車体にはたらく横風の空気力が風速の二乗に比例することからの類推によるもので、超過風速がわずかであれば大目に見てよく、逆に大きな風速超過に曝される場合にはより厳しいペナルティーを科すべきである、ということ表現したものである。

4. 観測全期間について、運転規制発令時間数合計および運転規制が発令されない期間に対する危害の合計を算出する。
5. 候補とする全ての平均化時間を用いた $W$ について、危害合計が瞬間風による $W$ のそれを超えない最大値となる運転規制発令基準風速 $w^*$ を算出し、そのときの規制時間数合計を求める。
6. 候補とする全ての平均化時間の中で規制時間数合計が最小となるものを最適平均化時間とする。

## 6. 測定環境の詳細

4. および5. 節の調査に用いた輪重および風速の測定環境について述べる。

輪重の測定機器は、レールにひずみゲージを貼り、その上を走行列車が通過した瞬間の荷重を8点同時計測するよう構成されている。(図4) また、輪重測定時に車体に作用する空気力を正しく評価するために、車両長20mの範囲に3基の風向計および風速計を等間隔に配置している。測定箇所は常磐緩行線の金町～松戸間である。

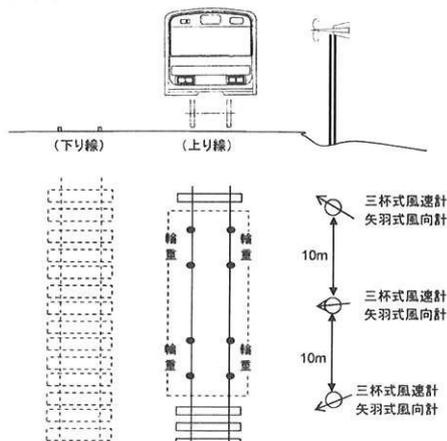


図4 輪重の測定環境 (常磐緩行線金町～松戸間)

風速については、様々な状況を調査できるように、輪重測定箇所も含め複数線区から測定場所を選定している。

(表1) なお、列車の車体に作用する空気力を正しく評価するために、 $V$ の風速は車体長20mの範囲に等間隔に配置した3基の風速計の同時刻における観測値をRMSで平均した空間平均風速を用いた。 $W$ の風速は1基の風速計の出力から計算した時間平均値を基本とし、羽越本線に限っては3基の風速計の空間平均値をさらに時間平均化した値も用いた。3基の風速計の例として、常磐緩行線金町～松戸間のそれを示す。(図5)

## 7. 結果

以下に、いくつかの観測データの計算結果について述べる。5. 節の評価方法にもとづき、条件を $\Delta t=3\text{min}$ 、 $p=0$ 、 $l=1$ 、 $v^*=20\text{m/s}$  または  $15\text{m/s}$  として計算を行った。なお、 $v^*$ に2通りの値を用いているのは、危険風速を下げることで、計算対象とする強風事例を多くするためである。風速 $W$ の平均化時間と運転規制時間の関係の計算結果のプロットと二次多項式による回帰曲線を示す。

(図6) 瞬間風速は0.5秒ごとに出力されることから、図中ではそれを便宜的に平均化時間0.5秒として扱っている。また、瞬間風速により発生する運転規制時間を100%として正規化している。

(a)は、羽越本線小波渡～羽前水沢間の2012年1月4～5日の強風事例である。 $v^*=15\text{m/s}$ として計算し、2～8秒の範囲で運転規制時間が最小になっている。

(b)は、同区間同日時について $V$ と $W$ の風速計を逆にした事例である。 $v^*=15\text{m/s}$ としており、256秒前後が最小となっている。

(c)は、京葉線海浜幕張～蘇我間の2012年4月3～4日の事例である。 $v^*=20\text{m/s}$ としている。回帰曲線は上に凸となっており、計算対象とした平均化時間の上限である

表1 風速の測定場所と風速計間距離

| 線区    | 区間        | 風速計間距離 | 地形      |
|-------|-----------|--------|---------|
| 羽越本線  | 小波渡～羽前水沢  | 493m   | 山間      |
|       | 羽前水沢～羽前大山 | 625m   | 素地      |
| 京葉線   | 二俣新町～海浜幕張 | 5930m  | 高架      |
|       |           | 6016m  | 高架      |
|       | 海浜幕張～蘇我   | 6283m  | 高架      |
|       |           | 6284m  | 高架      |
| 常磐緩行線 | 金町～松戸     | 170m   | 盛土      |
|       |           | 640m   | 盛土、橋りょう |

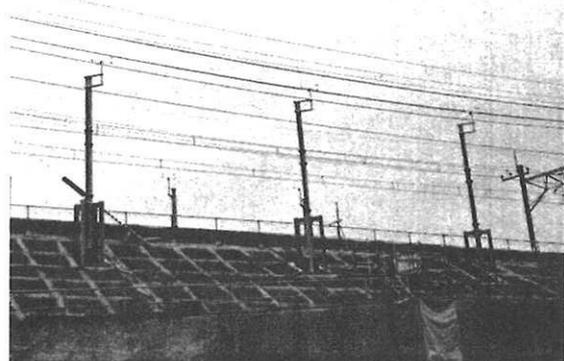
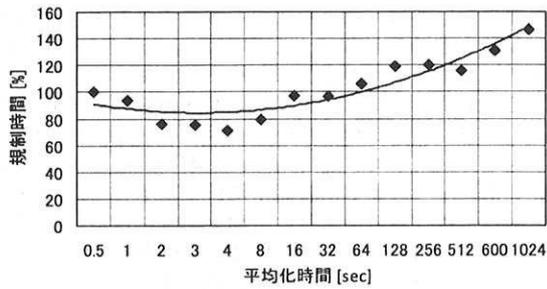
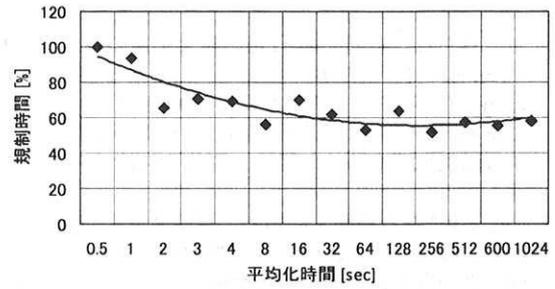


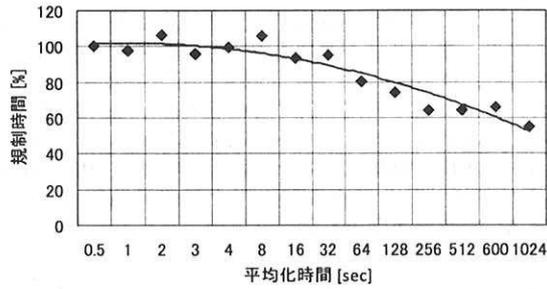
図5 車両長の範囲に等間隔に配置した3基の風速計



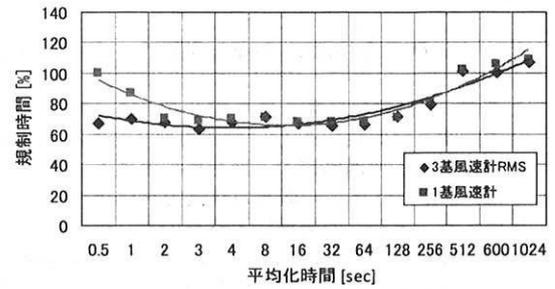
(a) 事例 1



(b) 事例 2



(c) 事例 3



(d) 調査事例全体の平均

図 6 風速の平均化時間と運転規制時間の関係

1024 秒よりさらに長い時間が最適平均化時間となると推察される。

(a)～(c)に示したように運転規制時間を最小化できる平均化時間には事例によりばらつきがある。

(d)は各事例における運転規制時間を全事例で平均化した図である。個々の事例では最適平均化時間を一意に定めることができないが、1 基の風速計による瞬間風速に対する平均化時間については、調査事例全体の平均ではおおむね 3 秒～1 分の範囲で運転規制時間を最小化できることが確認できる。一方、3 基の風速計の瞬間風速の空間平均をとった上でさらに時間平均をとっても運転規制時間を短縮する効果は見られず、上述の 1 基の風速計についての最適平均化時間 3 秒～1 分の範囲では両者にほとんど差がない。つまり、これらの事例の全体では、1 基の風速計の瞬間風速の時系列に対して約 3 秒から 1 分程度の平均化時間を用いて時間平均をとるという操作と 3 基の風速計の瞬間風速の空間平均をとるという操作が、運転規制のよさを改善する効果において等価なものとなっている。

## 8. おわりに

本検討では、現行の強風時運転規制に用いられている瞬間風速の代わりに、適切な平均化時間で平滑化した平均風速を用いることにより、運転規制の安全レベルを低下させることなく運転規制時間を削減できる可能性のあることを示すことができた。線路の周辺環境や風況、運転規制パラメータ等に対する最適平均化時間の依存性については、さらに検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所 余部事故技術調査委員会：余部事故技術調査委員報告書，1988
- 2) 栗原智亮，森島啓行：複数風速計による風観測手法に関する研究，第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム 講演論文集，pp. 25-26，2011
- 3) 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