

列車運転規制に用いる風速の評価方法に関する統計的検討



南雲 洋介*



鈴木 博人*



島村 誠**

強風時における列車の走行安全性を確保するため、風速が基準値に達した場合には速度規制や運転中止などの運転規制が行われている。風速をより適正に評価する方法として、3本の風速計で観測された瞬時値の同時刻における空間平均値を用いる方法が一部区間で先行導入されている。一方、気象学や風工学の分野においては、1本の風速計で観測された瞬時値の数秒程度の時間平均を取る方法が国際的にも一般的である。運転規制にもこの方法が適用できれば、国際標準に準拠するという意義に加え、設置コストやメンテナンスコストの低減も期待できる。本研究では、3本の風速計で観測される空間平均風速と同程度の性能を有する1本の風速計の時間平均風速について解析し、その時間平均は3秒であるという結果が得られた。

●キーワード：運転規制、強風、時間平均、空気力、風速、国際標準

1. はじめに

強風時の列車運転規制の基本的な考え方は、風により車体にはたらく「空気力」と、車両が転覆に対して耐えることのできる「転覆耐力」を比較し、転覆耐力が空気力を上回る状態で走行することを担保することである。運転規制の発令判断を適切に行うためには、車体にはたらく空気力のピーク値を適切に捉えることが重要である。しかし、営業車両にはたらく空気力を実測することは技術的に難しい。そのため、現実には風速値から空気力を推定する方法が採られており、強風時の列車運転規制は風速値にもとづいて発令される。

2005年12月25日に発生した羽越本線列車事故以降、東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR東日本）では強風対策の一環として、暫定的に規制発令の基準となる風速値を引き下げている。しかし、これは技術的根拠にもとづく対策ではない。そこで、空気力と転覆耐力の両方を精緻に評価する「強風時の新しい運転規制方法」¹⁾を開発し、実用化した。この方法では、車体にはたらく空気力は車体長20mの範囲に等間隔で3本設置した風速計で観測された瞬時値の同時刻における空間平均値（以下、3本空間平均風速とする）から推定し、転覆耐力は総研詳細式²⁾により計算する。

しかし、3本空間平均風速を用いる方法は、気象学や風工学における一般的な方法とは異なっている。世界気象機関などでは、建築物や交通機関等への影響を推定する指標として数秒程度で平均した風速が最も対応が良いとしており、国際的には評価風速に1本の風速計で観測された瞬時値の数秒程度の時間平均風速を用いるのが一般的である^{3), 4), 5)}。運転規制にもこの方法が適用できれば、国際標準に準拠するという意義に加え、設置コストやメンテナンスコストの低減も期待できる。

本研究では、3本空間平均風速の置き換え手法として、1本の風速計で観測された瞬時値の時間平均値（以下、1本時間平均風速とする）を用いる方法を検討する。運転規制の判断に用いるうえで妥当な風速の平均時間を探索し、実際の運転規制に適用する方法を提案する。

2. 強風時の列車運転規制方法

2.1 現行の風観測仕様

JR東日本の各線区では、指定された運転規制区間ごとに1ないし数箇所に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予測値または瞬時値があらかじめ定めた基準値を超過した場合に、運転中止などの運転規制が行われる（表1）。各風速計が受け持つ運転規制区間長は、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

表1 列車運転規制の基準値

風速	20m/s	25m/s	30m/s
早め規制	25km/h規制	運転中止	
一般規制	—	25km/h規制	運転中止

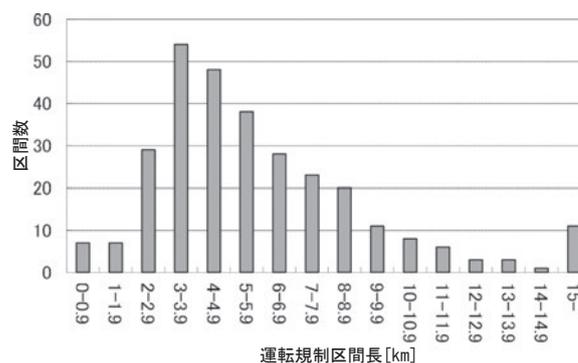


図1 JR東日本の運転規制区間長

えられる箇所や、盛土や桁高の大きな橋りょう上など、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に設置されている。風速計の設置高さは、レール面から5mの高さが標準である。風速は、風杯型風速計の風杯回転速度にもとづいて0.5秒ごとに出力される。

2.2 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分間の時間平均風速に換算して使用していた。これに対して、1986年12月28日に発生した山陰本線余部橋りょう上での列車脱線転落事故の原因究明を目的とする「余部事故技術調査委員会」の検討の過程⁶⁾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。これに伴い、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うえで、1987年10月から風速計で計測した瞬時値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。

2.3 強風時の新しい運転規制方法とその課題

2005年12月25日に発生した羽越本線列車事故を契機に、JR東日本では強風対策として全線区の暫定的な早め規制化、風速計の増設、防風柵の設置、強風警報システム⁷⁾の全線導入などの強風対策を実施してきた。これらのうち早め規制化については、安全性の向上には寄与するものの、技術的根拠の乏しい暫定対策である。そのため、技術的根拠にもとづく運転規制ルールとして、新しい運転規制方法を開発した。この方法は、風により車体にはたらく空気力と、車両が転覆に対して耐えることのできる転覆耐力を精緻に評価することを目的としており、前者については3本空間平均風速（図2）を、後者については総研詳細式を用いた評価を行う。この方法は、現在、羽越本線、京葉線、越後線の3線区7区間（表2）に先行導入されている。

3本空間平均風速は適切な風速評価方法ではあるものの、気象学や風工学の分野で一般的な1本時間平均風速を用い

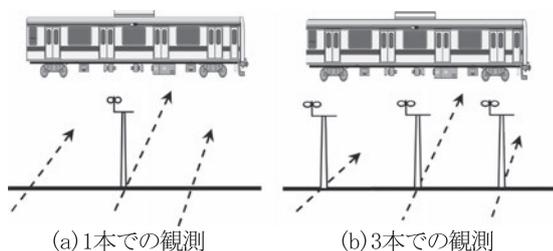


図2 風観測方法

表2 新しい運転規制方法の導入区間

線区	区間
羽越本線	小波渡～羽前水沢
	羽前水沢～羽前大山
京葉線	新習志野～海浜幕張
	千葉みなと～蘇我
越後線	越後赤塚～内野
	青山～関屋
	白山～新潟

る方法とは異なっており、また1ヶ所につき風速計が3基必要になることから、改善の余地があるといえる。そこで、次章からは列車運転規制に用いる1本時間平均風速の妥当な平均時間を、実験データを用いて統計的に検討する。なお、総研詳細式を用いた転覆耐力評価方法の現状と課題については、本号掲載の特集論文「強風時の新しい運転規制方法の導入」を参照されたい。

3. 妥当な平均時間の解析

解析にあたっては、公益財団法人鉄道総合技術研究所より、同研究所が北海道島牧村において2001年12月から2004年3月にかけて実施した実物大車両模型による空気力・風向風速測定試験⁸⁾のデータの提供を受けた。実験では車両模型にはたらく空気力を実測することができることから、実測空気力と3本空間平均風速および1本n秒平均風速（平均時間n秒は複数通り設定）から推定した空気力を比較することで、実測との対応が良い時間平均風速を検討した。

3.1 解析に用いたデータ

解析に用いた測定項目は、風向、風速、大気圧、気温、空気力（横力）で、サンプリング周波数は10Hzである。図3、図4に測定環境を示す。日本海に面した平地に単線高架橋



図3 測定環境（写真）

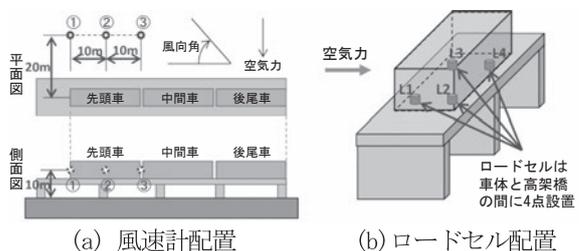


図4 測定環境（模式図）

と実物大車両の模型を主風向に対して直行するように配置している(図3(a))。プロペラ風向風速計で風向と風速を、ロードセル^{*注)}で空気力を測定する(図3(b))。風向風速計は、先頭車両から線路直角方向に20mの離れに、高さ10m、離隔10mで3本設置されている(図4(a))。ロードセルは、高架橋と車体の間に4点設置されている(図4(b))。ロードセルによる測定値の線路直角方向の水平方向成分を空気力とする。

*注) 荷重を電気抵抗の変化としてひずみ計で計測し、重さに変換する装置

3.2 空気力の求め方

実測空気力 F_M は、ロードセル $L1\sim L4$ の同時刻における測定値 $F_{L1}\sim F_{L4}$ の合計値として計算する。

$$F_M = F_{L1} + F_{L2} + F_{L3} + F_{L4} \quad (1)$$

推定空気力 F_E は次式により計算する

$$F_E = \frac{1}{2} \rho u^2 A C_s \quad (2)$$

ここで、 ρ : 空気密度、 u : 評価風速、 A : 車体側面積、 C_s : 空気力係数である。

空気密度 ρ は次式により計算する⁹⁾。

$$\rho = \frac{1.293}{1 + 0.00367t} \cdot \frac{H}{760} \quad (3)$$

ここで、 t : 気温[°C]、 H : 大気圧[torr]である。

評価風速 u は次のとおり定義する。

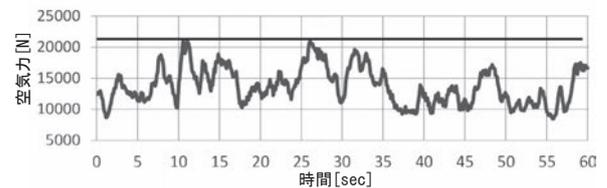
- ・1本瞬間風速: 風速計の応答性能を考慮して、風速計②(図4(a))で観測された現時刻までの過去0.5秒間の瞬時値(10Hz)の算術平均
- ・1本時間(n秒)平均風速: 風速計②で観測された現時刻までの過去n秒間の瞬間風速の算術平均
- ・3本空間平均風速: 風速計①②③で観測された同時刻における瞬間風速(0.5秒平均風速)の二乗平均平方根(RMS)

車体側面積は $A=51.3[\text{m}^2]$ で、空気力係数 C_s は公益財団法人鉄道総合技術研究所が実験から求めた値を風向角ごとに使用した。 C_s は、90度よりも若干小さい風向角で最大になり、その風向角より大きい値または小さい値では単調に減少する。

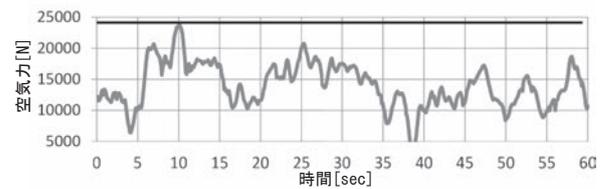
3.3 評価時間の設定

空気力波形の一例を図5に示す。図5(a)はロードセルによる実測値、図5(b)、(c)、(d)、(e)はそれぞれ1本瞬間風速、

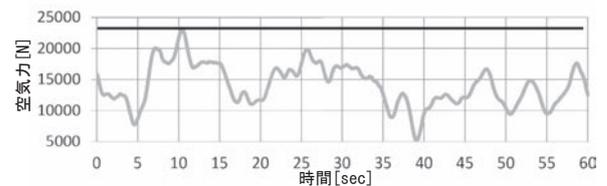
1本1秒平均風速、1本3秒平均風速、3本空間平均風速からの推定値である。平均時間を長くすると波形が緩慢になる傾向がある。また、時々刻々の空気力を比較すると、いずれの推定空気力も実測空気力と一致しない。しかし、実際の運転規制は予測風速を用いて強風が発生する前に規制を発令するのが前提であることや、規制が発令されてから列車のオペレーションに反映されるまでに時間遅れがあることなどを考慮すると、問題となるのはその時々ではなく、ある評価時間内における最大値を適切に再現できているかどうかである。そのため、本報では鉄道における評価時間に関する知見¹⁰⁾を参考に、評価時間を60秒に設定し、評価時間内の最大値を比較することにする。図5の中で、60秒間の最大値を横線で示す。



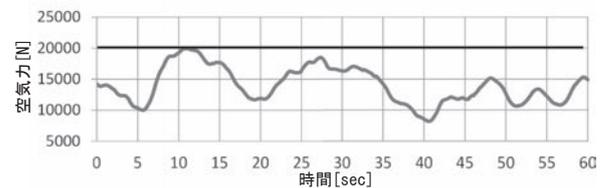
(a) ロードセルで実測した空気力



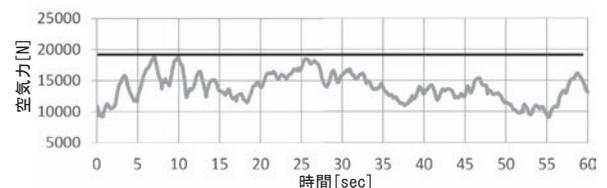
(b) 1本瞬間風速から推定した空気力



(c) 1本1秒平均風速から推定した空気力



(d) 1本3秒平均風速から推定した空気力



(e) 3本空間平均風速から推定した空気力

図5 空気力波形の一例

3.4 空気力の最大値の評価

図6に、評価時間内における空気力の最大値の比較を示す。分母をロードセルで測定した実測空気力の最大値、分子を風速から推定した空気力の最大値とし、その比 r の頻度分布を示す。実測のプロットがほぼ正規分布に従うことを確認し、正規分布曲線で近似を行っている。平均値が最も1に近い1本3秒平均風速は1本3秒平均風速であり、1本3秒平均風速と3本空間平均風速の平均値の1への近さおよび平均値からのばらつきは同程度である。1本瞬間風速、1本1秒平均風速および1本2秒平均風速は平均が1より大きくなり、1本4秒平均風速は1より小さくなる。これらから、実測空気力の最大値を推定するのに妥当なのは1本3秒平均風速であり、3本空間平均風速とも同程度の性能であることが分かった。

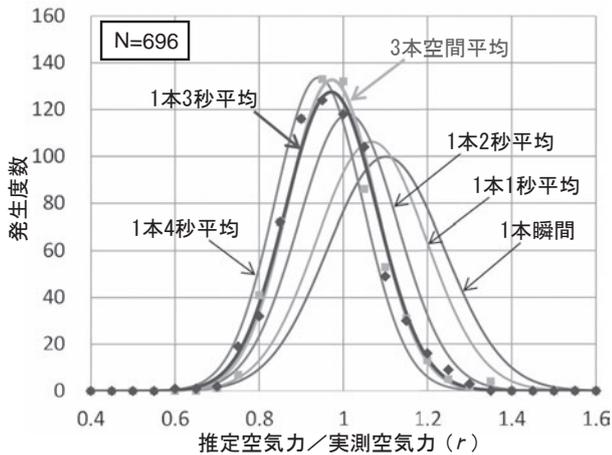


図6 実測空気力と推定空気力の最大値の比
(記号■◆は $r \pm 0.025$ の発生度数)

3.5 安全性と安定性の評価

3.5.1 評価方法

列車運行に際しては、必要な安全性を確保したうえで、できる限り運行を安定的に行うことが重要である。そこで、前節よりも実態に近い評価方法として、安全性と安定性の両面からの評価を行う。

安全性を「損失関数 L_1 」、安定性を「超過時間 T_1 」として次のとおり定量化する。ここで、 F_M :実測空気力、 F_D :空気力の評価しきい値、 F_E :推定空気力である。なお、 F_D は風速20m/s(JR東日本が早め規制で速度規制を行う風速値)の風から車体が受ける空気力として設定する。

損失関数 L_1

$F_M \geq F_D$ かつ $F_E < F_D$ の時刻について

$$L_1 = \sum (F_M - F_D)^2 \quad (4)$$

超過時間 T_1

$F_E \geq F_D$ となった時間の総和

図7に損失関数 L_1 と超過時間 T_1 の計上方法のイメージを示す。 F_M が F_D を超過したタイミングを①から⑤で示している。①から③までは F_E が F_D を超えているために捕捉とし、損失関数は計上しない。④および⑤は F_E が F_D を下回っているため見逃しとし、 F_M と F_D の差の2乗を損失関数として計上する。2乗としたのは小さな見逃しは目に見て、大きな見逃しには大きな罰則を与えることを表現するためである。この定義式は、強風警報システム開発時の検討方法⁷⁾を踏襲している。

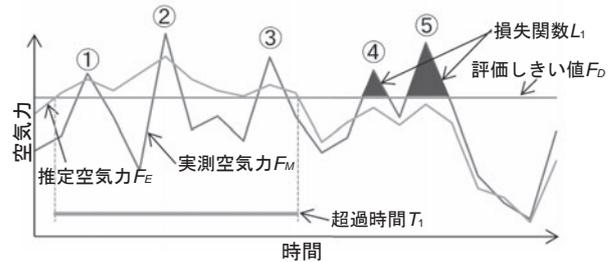


図7 損失関数と超過時間のイメージ

3.5.2 評価結果

図8に平均時間の違いによる安全性と安定性の関係を示す。ここで、損失関数 L_1 と超過時間 T_1 は、3本空間平均風速で生じる値に対する百分率で表すこととし、それぞれ損失関数比、超過時間比として示している。

$$\text{損失関数比} = \frac{\text{1本n秒平均風速で生じる損失関数}}{\text{3本空間平均風速で生じる損失関数}} \times 100$$

$$\text{超過時間比} = \frac{\text{1本n秒平均風速で生じる超過時間}}{\text{3本空間平均風速で生じる超過時間}} \times 100$$

平均時間を大きくすると損失関数比は増加し、超過時間比は減少する。両者が100%より若干小さくなる条件は3秒平均である。本評価では、3本空間平均風速と同程度の性能となるのは1本3秒平均風速という結果となった。

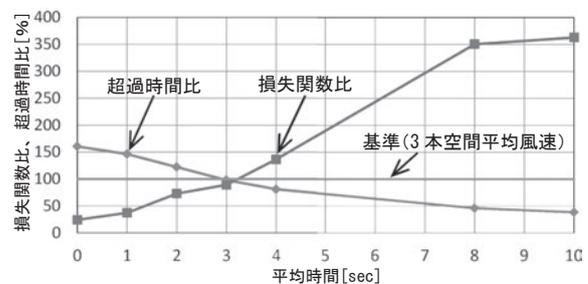


図8 平均時間の違いによる安全性と安定性

3.6 妥当な平均時間

3.4節および3.5節のどちらの検討からも、3本空間平均風速と同程度の性能となるのは1本3秒平均風速という結果が得られた。そのため、列車運転規制に1本3秒平均風速を適用するのは妥当と考える。なお、3秒という平均時間は、世界気

象機関や気象庁における瞬間風速と一致する。

4. 妥当な風速予測パラメータの解析

前章では、列車運転規制に用いる妥当な評価風速は1本3秒平均風速という結果を得た。本章では、1本3秒平均風速を実際の列車運転規制に適用する際の、強風警報システムの妥当な風速予測パラメータを解析する。

4.1 強風警報システムの概要

強風警報システムは、時系列解析により数分から数十分先の将来風速の最大値を予測するシステムである。予測の簡単な流れは次のとおりである。

- (1) 2Hzサンプリングの風速データを3分間の最大値を抽出した3分刻みのデータにする。
- (2) 3分間最大の観測値に対してトレンド値を求め、予測先時間におけるトレンド値を予測する(図9)。

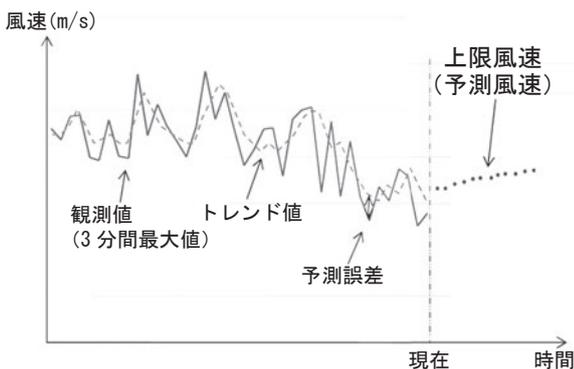


図9 強風警報システムの概要

- (3) 過去50点(2時間30分)の観測値とトレンド値の差を予測誤差とし、予測誤差の標準偏差 σ を求める。
- (4) 予測したトレンド値に $\mu\sigma$ を加えた値を上限風速として出力する(図10)。ここで、 μ を風速予測パラメータと呼ぶことにする。本システム導入時の検討により、現行は $\mu=0.9$ に固定されている。

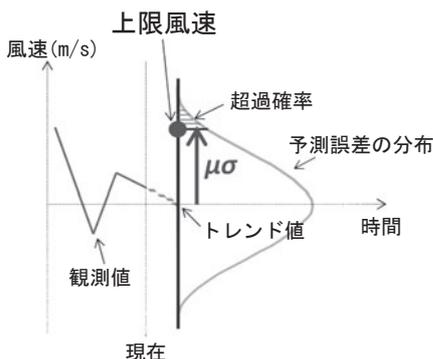


図10 上限風速の算出方法

本解析では、1本3秒平均風速を導入する際に適正となる予測パラメータ μ を検討する。

4.2 風速予測パラメータの評価

4.2.1 評価方法

強風警報システム導入時と同様に、損失関数 L_2 と超過時間 T_2 による評価を行う。それぞれ次のとおり定量化する。ここで、 u_E : 予測風速、 u_D : 規制風速(20m/s)、 u_M : 実測風速である。

損失関数 L_2

現在時刻(0期)において $u_E < u_D$ かつ予測先時間(p期)内に $u_M \geq u_D$ となった時刻について、

$$L_2 = \sum (u_M - u_D)^2 \quad (5)$$

超過時間 T_2

$u_E \geq u_D$ となった時間の総和

図11に損失関数の計上方法のイメージを示す。現在時刻(0期)において u_E が u_D を下回っているにも関わらず、予測先時間(p期)内に u_M が u_D を超過したら、予測を外したとして損失関数を計上する。

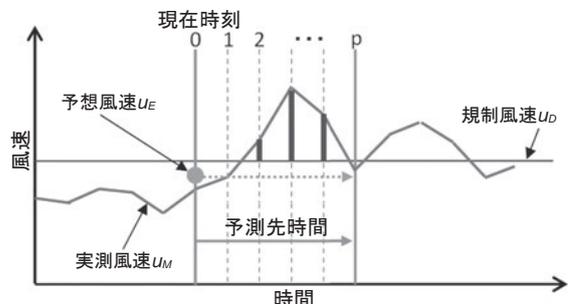


図11 損失関数のイメージ

4.2.2 解析に用いたデータ

解析には、新しい運転規制方法の先行導入線区である羽越本線、京葉線の2線区4区間およびフィールド試験を実施した常磐緩行線の1区間で観測された風速データを用いた(表3、図12)。また、2011年12月から2012年11月に観測された48強風事例を用いた。

表3 風速データの観測地点

線区	区間	風速計箇所数	地形
羽越本線	小波渡～羽前水沢	2	山間
	羽前水沢～羽前大山	2	素地
京葉線	新習志野～海浜幕張	1	高架
	千葉みなと～蘇我	1	高架
常磐緩行線	金町～松戸	1	盛土



(a)羽越本線 (b)京葉線

図12 3本の風速計

4.2.3 評価結果

図13に風速予測パラメータ μ を0.05刻みで変化させたときの損失関数 L_2 と超過時間 T_2 の変化を示す。3.5.2項と同様に、3本空間平均風速 ($\mu=0.9$) で生じる値に対する百分率で表すこととし、それぞれ損失関数比、超過時間比として示している。

$$\text{損失関数比} = \frac{\text{1本3秒平均風速で生じる損失関数}}{\text{3本空間平均風速で生じる損失関数}} \times 100$$

$$\text{超過時間比} = \frac{\text{1本3秒平均風速で生じる超過時間}}{\text{3本空間平均風速で生じる超過時間}} \times 100$$

損失関数比と超過時間比が同時に100%を下回る μ はなく、前者については μ が1.20以上、後者については μ が1.15以下で100%を下回る。安全性を優先して $\mu=1.2$ とした場合、超過時間比は105%程度と微増するものの、3本空間平均風速と同程度の性能となることが分かった。

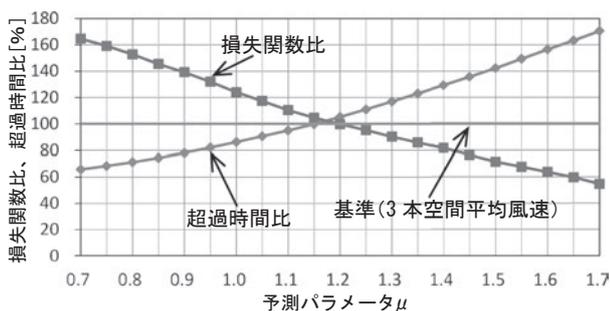


図13 風速予測パラメータの検討

5. おわりに

本研究では、列車運転規制に用いるのに妥当な風速の平均時間を探索し、以下の結果を得た。

- (1) 空気力の最大値の評価から、3本空間平均風速と同程度の性能を有するのは1本3秒平均風速である。
- (2) 安全性と安定性の両面の評価から、3本空間平均風速と同程度の性能を有するのは1本3秒平均風速である。
- (3) 安全性と安定性の両面の評価から、3本空間平均風速 ($\mu=0.9$) と同程度の性能を有する1本3秒平均風速の予測パラメータは $\mu=1.2$ である。

以上より、1本3秒平均風速および風速予測パラメータ $\mu=1.2$ を用いることで、3本空間平均風速と同程度の性能で運転規制ができるものとする。今後は3本空間平均風速の置き換え手法として、1本3秒平均風速を総研詳細式と組み合わせて導入していく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、公益財団法人鉄道総合技術研究所より試験データおよび写真を提供いただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日比野有、三須弥生、栗原智亮、森山淳、島村誠：強風時の新しい運転規制方法の検討、JR East Technical Review, No.35, pp.36-41, 2011
- 2) 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, 2003.4
- 3) World Meteorological Organization; Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No.8, 2008 edition, Updated in 2010
- 4) 気象業務支援センター、気象庁 (監修)：気象年鑑2008年版、気象業務支援センター、p.32, 2008.7
- 5) 大熊武司、神田順、田村幸雄：建築物の耐風設計、鹿島出版会、p.14, 1996.3
- 6) 余部事故技術調査委員会：余部事故技術調査委員会報告書、財団法人鉄道総合技術研究所、1988.2
- 7) 島村誠、松沼政明：強風警報システムの開発と実用化、JR East Technical Review, No.13, pp.36-43, 2005
- 8) 日比野有、今井俊昭、種本勝二：自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測、鉄道総研報告、Vol.18, No.9, pp.11-16, 2004.9
- 9) 国立天文台：平成25年理科年表、丸善、p.386, 2012.11
- 10) 三須弥生、石原孟：風観測と数値流体解析を利用した運転規制区間内の強風発生頻度の予測、日本風工学会論文集、Vol.37, No.1, pp.11-24, 2012.1