

車両の風に対する耐力評価の概説と最新手法



三須 弥生^{*1}

Overview and latest method of resistance evaluation of railway vehicles against crosswinds

Yayoi MISU^{*1}

^{*1} Principal Researcher, Risk Assessment and Safety Technology Unit, Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

In recent years, with the increasing speed and the reducing weight of railway vehicles and the intensification of weather phenomena due to climate change, maintaining and improving the running safety of railcars against crosswinds has become one of the most important issues in the railway sector. This paper presents the fundamental framework of a safety evaluation methodology for railway vehicles when encountering crosswinds, along with an evaluation method for their resistance against strong crosswinds. It also explains the operational control approach implemented by JR East in combination with the resistance evaluation and wind observations. Moreover, it describes a state-of-the-art technique for evaluating the overturning resistance of vehicles in tornado-like vortices.

●**Keywords:** Resistance of vehicles, Wind load, Operation control under crosswinds, Tornado-like vortices, RTRI detailed equation

^{*1}JR東日本研究開発センター リスク評価・安全技術UT マネージャー (安全研究所 上席研究員)

1. 緒言

近年の鉄道の高速度と車両の軽量化、気候変動を背景とした気象現象の激甚化の中で、鉄道車両の横風に対する走行安全性の維持、向上は、鉄道分野における重要な課題の一つとなっている。各国、各地域で研究や規格化がなされているが(三須、2022¹⁾)、特に欧州では多国間プロジェクトの成果を包括的にまとめた規格化が進んでいる(Schulte-Werning et al., 2002²⁾、Gautier, et al., 2003³⁾、TSI, 2008⁴⁾、CEN, 2018⁵⁾)。

日本では1940年代頃までに初期の強風時の列車運転規制のルールとして、いわゆる「強風が吹いたら列車を止める」ことが実施された(今井他、2009⁶⁾)⁶⁾が、当初は経験に基づく規制であり、その合理性や妥当性について科学的な検討はなされていなかった。その後発生した事故を背景に、公益財団法人鉄道総合技術研究所(以下、「鉄道総研」という。)を中心に体系的な転覆耐力評価手法の研究がなされた(日比野他、2004⁷⁾、鈴木他、2003⁸⁾)。その後、鉄道総研でそれまでの車両の転覆耐力評価方法を改良、発展させた総研詳細式(日比野他、2004⁹⁾)⁹⁾が提案されると共に、その総研詳細式と東日本旅客鉄道株式会社(以下、「JR東日本」という。)で研究された車体に働く空気力をより相関高く推定できる風観測方法(日比野他、2011¹⁰⁾、南雲他、2013¹¹⁾)¹⁰⁾を組み合わせた「総研詳細式に基づく風規制手法」¹⁰⁾¹²⁾が開発された。同手法は現在一部線区に導入され、安全性と安定性の向上を実現している。

本稿では鉄道車両の横風に対する走行安全性評価方法の基本的な考え方を確認すると共に、車両の横風に対する耐力評価手法を概説する。次に、JR東日本で導入している「総研詳細式に基づく風規制手法」について述べる。さらに車両の転覆耐力評価手法の最新手法として、竜巻状渦に対する転覆耐力評価方法について紹介すると共に、竜巻状渦においても総研詳細式を用いて耐力評価を行うことで安全側の評価が可能であることを解説する。

2. 鉄道車両の横風に対する走行安全性評価方法の基本的な考え方

鉄道車両の横風に対する走行安全性評価方法を大きな視点からとらえると、図1に示すように「耐力評価」と「外力評価」に分けることができ、列車運行時には耐力が外力を上回る状態を担保する必要がある。「耐力評価」は、「空気力係数の把握」と「車両の転覆限界値の計算」に分かれる。「外力評価」は、沿線に設置した風速計による常時監視（荒木他、2015¹³⁾のほか、線路に沿った強風リスクの評価等（Tielkes, et al., 2008¹⁴⁾、Cleon, et al., 2001¹⁵⁾、Misu et. al., 2018¹⁶⁾）がこれにあたる。JR東日本の在来線の例と照らし合わせると、車両設計時に国枝式（国枝、1972¹⁷⁾）を用いて転覆限界風速を確認することが「耐力評価」であり、橋りょうなどに設置された風速計で風観測を行うことが「外力評価」にあたる。設計時に計算された転覆限界風速を超える強風に車両が遭遇しないように制御する運行ルールが強風時の列車運転規制である。なお、国枝式では車両形状や構造物条件に関係なく空気力係数は1と設定されるため、「空気力係数の把握」は実施しない。

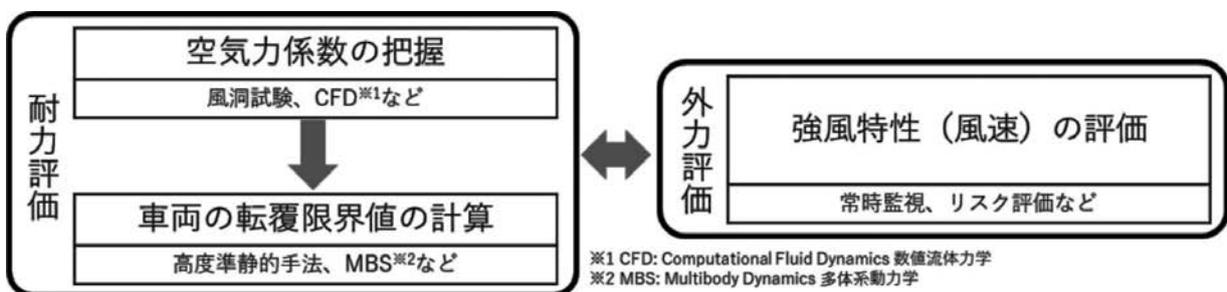


図1 鉄道車両の横風に対する走行安全性評価の基本的な考え方

3. 車両の耐力評価方法

3・1 空気力係数の把握

風が車両に吹き付けた場合、風上側の面が押されるだけでなく、気体圧力や流速が変化することで、周辺全体から空気力を受ける。この空気力を正しく把握するためには、車体形状や周辺構造物を再現した風洞試験等を行う必要がある。空気力の把握で対象とする風は、自然風の風だけでなく、図2に示すように、車両自身が走行することによって発生する風との合成風とされている。この合成風の風速 U と風向角 β を風洞試験等で再現し、車両にかかる空気力を測定する。高速走行では車両の走行による風速 V_T が大きくなるため、合成風の風向角 β を十分に小さくして測定する必要がある（Misu and Doi, 2019¹⁸⁾）。風洞試験では縮尺模型を用い無次元化した空気力係数を測定する。縮尺模型を用いる場合は流体の相似則のパラメータであるレイノルズ数を合わせる事が難しい場合がある。その場合でも速度依存性が無い状態では流体の相似性が確保できることが分かっており（風洞実験法ガイドライン研究委員会編、2008¹⁹⁾）、速度依存性が無い、つまり風洞内の風速を変更させた場合でも測定値が変化しないことを事前に確認して試験を行っている。

1986年12月に発生した山陰線余部橋りょう事故、1994年2月に発生した根室本線特急おおぞら号脱線事故、三陸鉄道南リアス線列車脱線事故の事故調査の結果から、車両に働く空気力は車両形状や地上構造物形状の影響を受けること、空気力係数は車両に対する風向角によって異なること、その特性は先頭車と中間車で異なること等が判明した。これを受けて鉄道総研では、2001年から2004年に実物大高架橋と車両の模型実験を実施し（日比野他、2004⁷⁾）、その実測と良く一致する風洞試験方法として、乱流境界層を生成する試験方法を確立した（鈴木他、2003⁸⁾）。図3に風洞試験の様子を示す。車両と構造物の両方を再現することから、模型の縮尺は1/40や1/60程度と小さくなる。風洞試験では車両模型を停車させて測定するが、実際の車両は走行している。これについて走行する車両模型を使った試験が実施されており、得られる空気力係数が大きく異なることが確認されている（鈴木、2016²⁰⁾、鈴木、2018²¹⁾）。

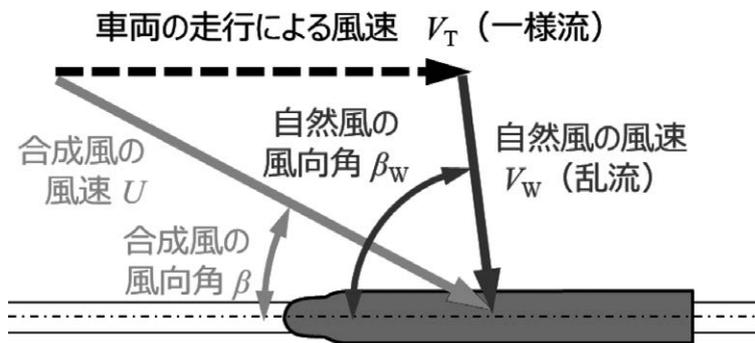


図2 鉄道車両に働く空気力の把握で対象とする風

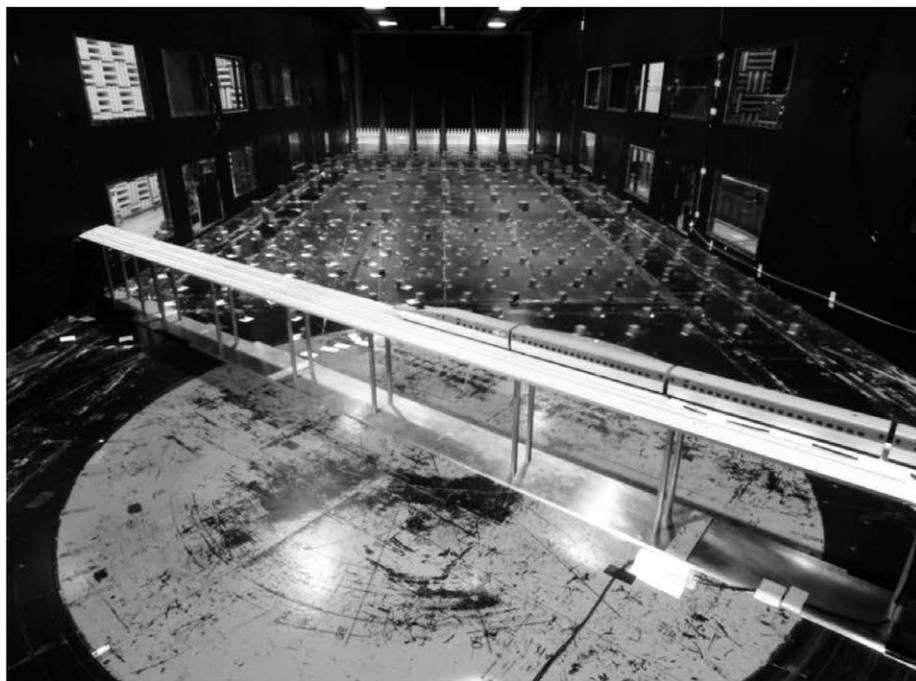


図3 風洞試験の様子(模型縮尺1/40)

3・2 転覆限界風速の計算

車両の横風に対する耐力を評価する場合は、図4に示すようなモーメントを考える。風下側の車輪とレール接触点に対する空気力、超過遠心力等によるモーメント M_A と車両重量によるモーメント M_R のつり合いを考え、風上側の輪重減少率が限度とする値と等しくなる時の自然風の風速を求める。この自然風の風速を日本では転覆限界風速と呼ぶ。

1934年9月の室戸台風で発生した東海道本線瀬田川橋りょうでの列車脱線事故の調査において、日本で初めて転覆限界風速の計算がなされたと言われている。その後研究による改良を経て、1972年に半車両断面静的解析式である国枝式が発表された(国枝、1972¹⁷⁾)。この国枝式は実用を意識し、取扱いが容易になるよう、いくつか仮定を用いている。これらの仮定が前述の余部橋りょう事故以降の研究により見直され、さらに鉄道の高速度化、車両の軽量化等を背景に、国枝式を発展させた総研詳細式が提案された(日比野、石田、2003⁹⁾)。総研詳細式は横風による空気力と曲線通過時の超過遠心力に加え、軌道から発生する左右振動慣性力(左右振動加速度と車体質量の積)の3つの力を考える。この左右振動慣性力の推定に用いる左右振動加速度の仮定値(走行速度に比例し最高速度で 0.98m/s^2)については、実測との比較がなされており、総研詳細式の仮定値が問題ないことが示されている(日比野、金元、2019²²⁾)。総研詳細式では、前述の左右振動加速度や外力に関する最悪条件の重ね合わせにより安全率を見込む(日比野、2010²³⁾)として輪重減少率を1.0とする。これについては信頼性理論を用いた比較においても、欧州の高度準静的手法と比べて総研詳細式の安全性が高いことが明らかとなっている(南雲、石原、2020²⁴⁾)。また欧州で規定されている動的解析と比較しても、総研詳細式は合理的な評価が可能であることが示されている(日比野他、2010²⁵⁾)。

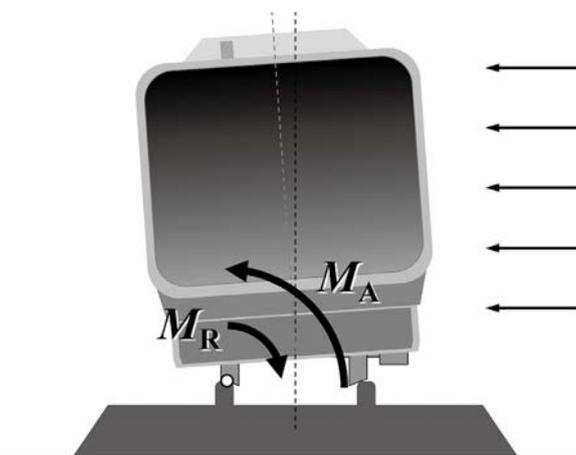


図4 風下側の車輪とレール接触点周りのモーメント
 M_A : 空気力等によるモーメント、 M_R : 車両重量によるモーメント

4. 総研詳細式に基づく風規制手法

JR東日本では、総研詳細式を用いた車両の転覆耐力評価手法と車体に働く空気力をより相関高く推定できる風観測方法を組み合わせた「総研詳細式に基づく風規制手法」を開発した(日比野他、2011¹⁰⁾)。車体に働く空気力をより相関高く推定できる風観測方法とは、5~10m程度の間隔で設置された3基の風速計の瞬間風速値の空間平均を用いる観測手法(以下、「3本平均風速」という。)(日比野他、2011¹⁰⁾)と、これと同程度の性能で強風時の列車運転規制(以下、「運転規制」という。)(南雲他、2013¹¹⁾)であり、JR東日本では総研詳細式を用いた車両の転覆耐力評価手法との組み合わせにおいて用いることとしている。

「総研詳細式に基づく風規制手法」では、構造物や軌道、車両の条件を考慮することにより、線路に沿った転覆限界風速を計算することができる。これにより、強風に対する弱点箇所を把握し適切な対策を実施できる。一方、十分に耐力があると評価できた箇所では、規制風速や走行速度の向上により運行の安定性向上が可能となる。2023年6月現在、表1に示す線区に導入している。

JR東日本の在来線では、表2のような「早め規制」と「一般規制」の観測風速で運転規制を発令する。2006年1月以降、防風柵を設置した区間以外については、「早め規制」を実施していたが、前述の車両の転覆耐力評価手法で十分に耐力があると評価できた運転規制区間(表1の塗りつぶしの規制区間)では、「一般規制」への変更を実施している。図5に越後線3区間の「総研詳細式に基づく風規制手法」導入前後での運転規制発生時間総計の比較を示す(参考文献(栗原他、2013¹²⁾)より再掲)。図中の導入前の値は同期間の風速計のデータを用いて、従来までの風規制手法を仮定した場合の推計を示している。図5から「早め規制」から「一般規制」に変更した2区間については、運転規制発生時間がそれぞれ約87%、約95%減少していることがわかる。「早め規制」のままの1区間についても、風観測に「3本平均風速」を導入した効果により、約42%の運転規制発生時間の減少につなげることが可能となった。なお、その後の「1本3秒平均風速」の提案により風速計の増設を不要とすることができ、コストダウンにつなげている。

なお、運転規制の解除については、一般的に「一定時間」規制値を超える風速が一度も観測されなかった場合に解除している。この「一定時間」を様子見時間と呼んでおり²⁶⁾、JR東日本ではこれを30分間としていた。しかしこの様子見時間を使用した規制方法では、風速の増加・減少傾向を考慮せず、瞬間的に超過するような風により最低30分間運転規制が継続されることから、輸送への影響が課題となっていた。そこで島村らは時系列解析に基づく風速予測手法である「強風警報システム」を開発した(島村他、2005²⁷⁾)。本手法はカルマンフィルタを適用したトレンドモデルによりトレンド風速を推定し、それを用いて3分~36分先までに発生する可能性がある上限風速を予測する。観測風速と予測した上限風速がともに規制風速を下回った場合に規制を解除することができる。これまでの30分間の様子見時間による運転規制と同等の安全性を維持しつつ、過剰な運転規制を防ぐことができる手法である。現在では在来線の運転規制区間全てで導入されている。

表1 「総研詳細式に基づく風規制手法」導入線区 2023年6月現在

線区	区間	導入時期
羽越本線	羽前水沢～羽前大山	2011年12月
	小波渡～羽前水沢	
京葉線	習志野～海浜幕張	2012年3月
	千葉みなと～蘇我	
越後線	越後赤塚～内野	2012年11月
	青山～関屋	2012年12月
	白山～新潟 (防風設備の設置等により2020年1月に早め規制から一般規制に変更)	
大湊線	野辺地～有戸	2013年11月
	有戸～吹越	
	吹越～陸奥横浜	
	有畑～近川	
	赤川～大湊	
信越本線	直江津～黒井	2016年3月
	柿崎～米山	
	米山～笠島	
	青海川～鮭波	
奥羽本線	NG線 和田～289k710m (和田・四ツ小屋間)	2018年11月
	NG線 289k710m (和田・四ツ小屋間)～秋田	
	SG線 和田～秋田	
田沢湖線	NG線 大曲～神宮寺	2019年8月
	SG線 大曲～神宮寺	
田沢湖線	SG線 赤淵～(大地沢(信))～志度内(信)	2020年1月
	SG線 大地沢(信)～(志度内(信))～田沢湖	2019年8月

※NG: Narrow Gauge、SG: Standard Gauge

表2 JR東日本の在来線における強風時の列車運転規制の規制風速

規制風速	早め規制	一般規制
20m/s以上	25km/h徐行	-
25m/s以上	運転中止	25km/h徐行
30m/s以上		運転中止

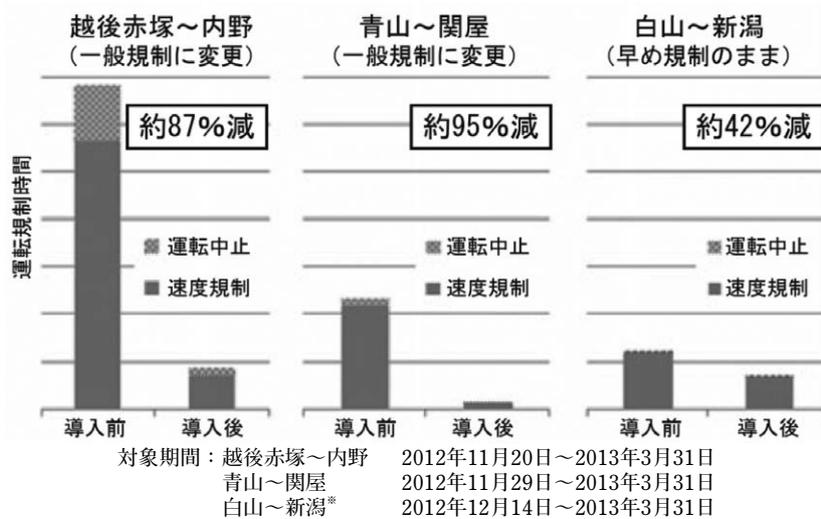


図5 越後線3区間の「総研詳細式に基づく風規制手法」導入前後での強風時の列車運転規制発生時間総計の比較(栗原他、2013)¹²⁾より再掲
 ※白山～新潟については、防風設備の設置等により2020年1月に早め規制から一般規制に変更(表1の通り)

5. 竜巻状渦に対する鉄道車両の転覆耐力評価手法

本章では、車両の転覆耐力評価手法の最新手法として竜巻状渦に対する転覆耐力評価方法について紹介する。JR東日本では、竜巻を対象とした外力評価方法として、ドップラーレーダーを用いた突風に対する運転規制方法を日本海側の一部区間で冬季に実施している（鈴木他、2018²⁸⁾）。同手法では、運転規制を行う風速値である突風基準値を33m/sとしている。これは、羽越本線列車事故の原因とされる突風規模が藤田スケールでF1とされており、そのF1の下限風速が33m/sのためである。これに対し、車両の耐力評価についても、近年力学的な検証が実施されている（南雲、三須、2022²⁹⁾、2023³⁰⁾）。

3章で説明した車両の転覆耐力評価方法は、空間的、時間的に連続する強風、すなわち定常風を仮定している。これに対し突風は、空間的、時間的に変化する風であり、そのような風に遭遇した場合の車両挙動は定常風で評価した車両挙動とは異なると考えられる。空間的、時間的に変化する風に対する鉄道車両の耐力評価については、トンネルの出口で発生する可能性がある急激な風の立上りや竜巻状渦のような旋回性の風に対する車両挙動について、いくつかの研究がなされている（日比野他、2013³¹⁾、Suzuki and Okura, 2016³²⁾、Zhang and Ishihara, 2022³³⁾）。これに対し、JR東日本では、既往研究（Zhang and Ishihara, 2022³³⁾）の動的解析モデルを修正、検証し（図6）、そのモデルを用いて図7に示す竜巻状渦のパラメータを表3に示す「範囲」で変化させ、鉄道車両の動的応答に与える影響を評価した。その結果、竜巻状渦に遭遇した場合に車両の応答が大きくなる条件として、表3に示す「車両の応答が大きくなる条件」を同定した。さらに同定した条件において、動的解析結果と総研詳細式による評価結果を比較した。結果を図8に示す。輪重減少率は定常風よりも竜巻状渦の方が大きくなるものの、総研詳細式を用いることで竜巻状渦に対する車両応答を安全側に評価可能であることが確認できた。詳細については（南雲、三須、2023³⁰⁾）を参照されたい。

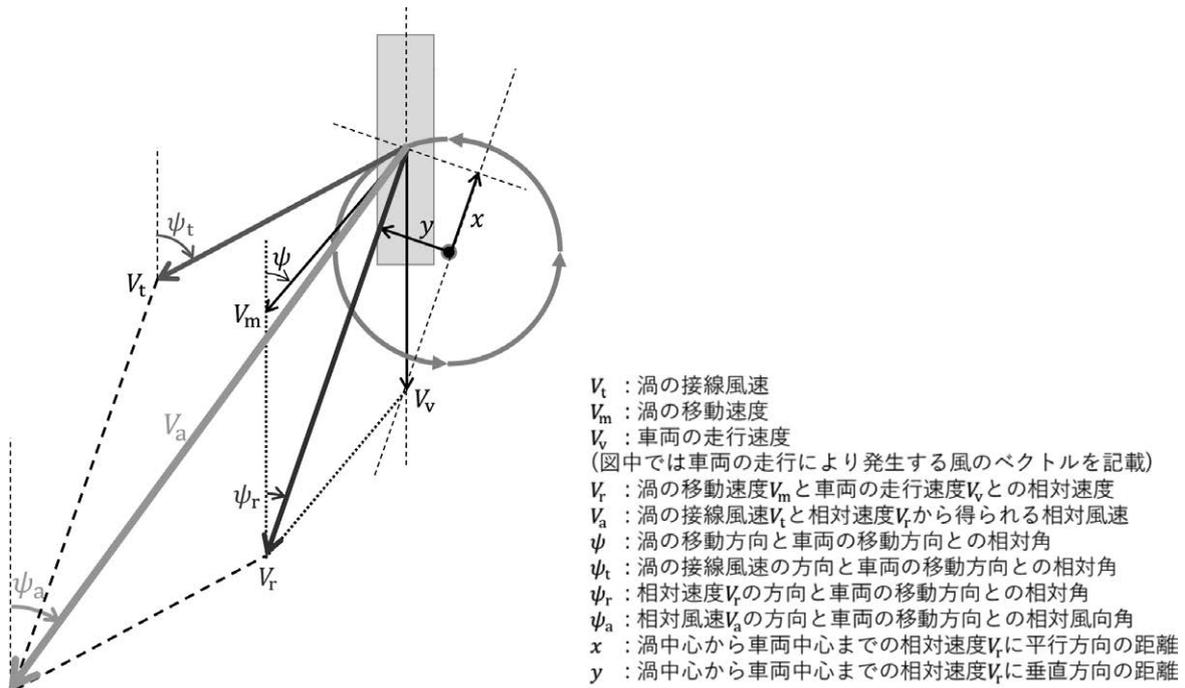


図6 竜巻状渦に遭遇した車両の中心に当たる風向風速

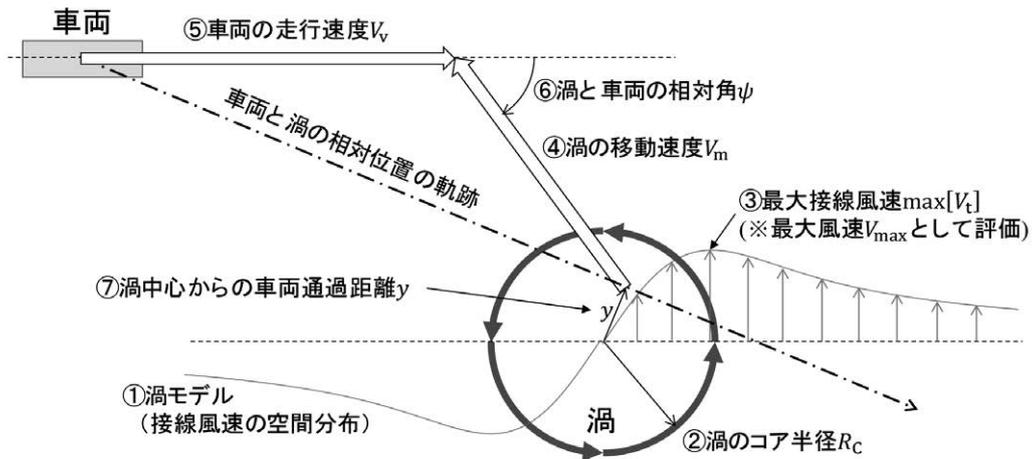


図7 変化させる竜巻状渦のパラメータ

表3 各パラメータの範囲と同定値

項目	範囲	車両の応答が大きくなる条件
渦モデル	Rankine ³⁴⁾ Burgers-Rott ^{35),36)} Sullivan ³⁷⁾	Burgers-Rott
R_c [m]	$10 \leq R_c \leq 100$	30
V_{max} [m/s]	$15 \leq V_{max} \leq 30$	30(DAFへの影響小)
V_m [m/s]	$0 \leq V_m \leq V_{max}$	$0.4V_{max}$
V_v [km/h]	$0 \leq V_v \leq 120$	120
ψ [deg]	$-90 \leq \psi \leq 90$	70
y [m]	$-R_c \leq y \leq R_c$	$0.5R_c$

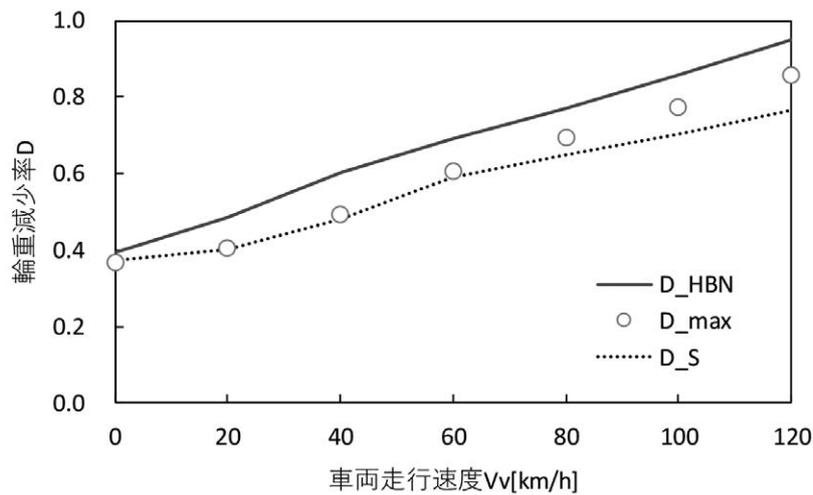


図8 動的解析と総研詳細式の輪重減少率の比較
 D_{HBN} : 総研詳細式で計算される輪重減少率
 D_{max} : 動的解析による最大輪重減少率
 D_S : 定常風による定常輪重減少率

6. 結言

本稿では鉄道車両の横風に対する走行安全性評価方法の基本的な考え方を確認すると共に、車両の横風に対する耐力評価手法を概説し、JR東日本で導入している「総研詳細式に基づく風規制手法」について紹介した。さらに車両の転覆耐力評価手法の最新手法として、竜巻状渦に対する車両の転覆耐力評価方法について解説した。

日本における強風時の列車運転規制は、導入当初は経験に基づく規制であり、その妥当性について科学的な検討がなされていなかった。しかしその後、過去の事故から得られた教訓をもとに、鉄道総研を中心に体系的な耐力評価手法の研究が進み、さらにJR東日本において、合理的な観測方法を組み合わせた規制方法が確立された。この開発の過程では、単に厳しい評価や方法を良しとするのではなく、輸送への影響や実務の簡便性を意識し、その実現性や合理性を高めた方法が開発・導入されてきたと考えている。今後とも関係の方々との協力し、安全性と安定性の向上に寄与する研究とその成果につなげていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 三須弥生, 世界における鉄道車両の横風に対する耐力評価手法. JREA, Vol.65, No.3 (2022), pp.45894-45897.
- 2) Schulte-Werning, Burkhard, The TRANSAERO Project: Joint European Railway Research on Transient Aerodynamics. In: TRANSAERO—A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation. Springer Berlin Heidelberg, (2002), pp.11-24.
- 3) Gautier, P.-E., Strong wind risks in railways: the DEUFRAKO crosswind program. In: Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR 2003) (2003), pp.463-474.
- 4) TSI, HSRST, Commission decision of 21 February 2008 concerning the technical specification for interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system 2008/232, (2008).
- 5) CEN (European Committee for Standardization), Railway applications - Aerodynamics - Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment, EN 14067-6:2018
- 6) 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 (特集 防災技術). 鉄道総研報告= RTRI report: 鉄道総合技術論文誌/鉄道総合技術研究所 監修, Vol.23, No.3 (2009), pp.5-10.
- 7) 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= RTRI report: 鉄道総合技術論文誌/鉄道総合技術研究所 監修, Vol.18, No.9 (2004), pp.11-16.
- 8) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之, 自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法. 鉄道総研報告= RTRI report: 鉄道総合技術論文誌/鉄道総合技術研究所 監修, Vol.17, No.11 (2003), pp.47-52.
- 9) 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= RTRI report: 鉄道総合技術論文誌/鉄道総合技術研究所 監修, Vol.17, No.4 (2003), pp.39-44.
- 10) 日比野有, 三須弥生, 栗原智亮, 強風時の新しい運転規制方法の検討 (Special edition theme 鉄道の安全・安心を高める研究開発). Technical review, JR East, Vol.35 (2011), pp.36-41.
- 11) 南雲洋介, 鈴木博人, 島村誠, 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 (Special edition theme 「究極の安全」への挑戦: 災害に強い鉄道をめざして), Technical review, JR East, Vol.45 (2013), pp.23-28.
- 12) 栗原芳勝, 大山安紀子, 土井賢一. 強風時の新しい運転規制方法の導入 (Special edition theme 「究極の安全」への挑戦: 災害に強い鉄道をめざして), Technical review, JR East, Vol.45 (2013), pp.17-22.
- 13) 荒木啓司, 日比野有, 鈴木実, 列車運行と強風規制. 日本風工学会誌, Vol.40, No.1 (2015), pp.10-16.
- 14) Tielkes, T., Heine, C., Möller, M., Driller, J., A probabilistic approach to safeguard cross wind safety of passenger railway operation in Germany: the new DB guideline Ril 80704. In: World Congress on Railway Research, (2008).
- 15) Cleon, Louis-Marie, Jourdain, Alain. Protection of line LN5 against cross winds. In: In Proceedings of the 5th World Congress on Railway Research, Köln, Germany, (2001).
- 16) Misu, Yayoi, Ishihara, Takeshi. Prediction of frequency distribution of strong crosswind in a control section for train operations by using onsite measurement and numerical simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 174 (2018), pp.69-79.
- 17) 国枝正春, 鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析. 鉄道技術研究報告, No.793 (1972), pp.1-15.
- 18) Misu, Yayoi, Doi Keiichi. Aerodynamic Characteristics of Shinkansen under Crosswind, World Congress on Railway Research (WCRR2019), (2019)
- 19) 風洞実験方ガイドライン研究委員会編, 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック2008年版. 財団法人日本建築センター, (2008)
- 20) 鈴木実, 車両模型走行装置を用いた横風空気力特性風洞試験手法. 鉄道総研報告, Vol.30, No.7(2016), pp.41-46.
- 21) 鈴木実, 横風下の築堤上を走行する車両模型の風洞試験. 日本機械学会2018年度年次大会講演論文集, G0500306, (2018).
- 22) 日比野有, 金元啓幸, 左右振動加速度の実測値を考慮した転覆限界風速評価 (特集 車両技術). 鉄道総研報告= RTRI report: 鉄道総合技術論文誌/鉄道総合技術研究所 監修, Vol.33, No.3 (2019), pp.11-16.
- 23) 日比野有, 横風に対する鉄道車両の走行安全性に関する研究, (2010), PhD Thesis. 新潟大学.
- 24) 南雲洋介, 石原孟, 各種作用力の不確かさを考慮した横風に対する鉄道車両の耐風性能評価. 日本風工学会論文集, Vol.45, No.3 (2020), pp.79-92.
- 25) 日比野有, 金元啓幸, 下村隆行, 谷藤克也, 1 車両シミュレーションモデルによる鉄道車両の横風に対する安全性評価 (機械力学, 計測, 自動制御). 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771 (2010), pp.3066-3076.

- 26) 津原賢治, 強風の特徴からみた運転規制方法の妥当性の検証, 技術の泉, No.39 (2018), pp.9-10
- 27) 鳥村誠, 松沼政明, 強風警報システムの開発と実用化 (Special edition theme 安全のレベルアップをめざして), Technical review, JR East, Vol.13 (2005), pp.36-43.
- 28) 鈴木博人, 藤原忠誠, 櫃間智紀, 楠研一, 猪上華子, ドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制方法の開発と導入 (特集 安全・防災), JREA, Vol.61, No.6 (2018), pp.42281-42284.
- 29) 南雲洋介, 三須弥生: 竜巻状渦に対する鉄道車両の動的応答のパラメータスタディ, 第29回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2022), S6-2-1 (2022).
- 30) 南雲洋介, 三須弥生: 竜巻状渦に対する鉄道車両の転覆耐力評価手法, JREA, Vol.66, No.6 (2023), pp.47054-47059.
- 31) 日比野有, 金元啓幸, 佐久間豊, 急激な風の立ち上がりに対する車両の応答に関する基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12 (2013), pp.23-28.
- 32) Suzuki, M., OKURA, N., Study of aerodynamic forces acting on a train using a tornado simulator, Mechanical Engineering Letters, Vol.2 16-00505, (2016).
- 33) Zhang, D., Ishihara, T., Numerical study of tornado-induced unsteady crosswind response of railway vehicle using multibody dynamic simulations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.222, 104919, (2022).
- 34) Rankine, W. J. M., A Manual of Applied Physics, 10th ed., Charles Griff and Co, (1882).
- 35) Burgers, J. M., A mathematical model illustrating the theory of turbulence, Advances in Applied Mechanics, Vol.1 (1948), pp.171-199.
- 36) Rott, N., On the viscous core of a line vortex, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik, Vol.9, No.5-6 (1958), pp.543-553.
- 37) Sullivan, R. D., A two-cell vortex solution of the Navier-Stokes equations, Journal of the Aerospace Sciences, Vol.26, No.11 (1959), pp.767-768.