

# 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

南雲 洋介 三須 弥生\* (東日本旅客鉄道株式会社)

Parametric study of tornado-like vortices on the dynamic response of a railway vehicle

Yosuke Nagumo, Yayoi Misu\*, (East Japan Railway Company)

In this study, the effects of parameters of tornado-like vortices on the dynamic response of a rail vehicle are evaluated by multi-body dynamics. Firstly, a dynamic analysis model is constructed based on previous studies and modified wind distribution around the vortices. Secondly, the dynamic responses are evaluated by changing the parameters of the vortices, and the conditions that increase the responses are identified. Finally, the results of dynamic analysis under the identified conditions are compared with that of quasi-static analysis by RTRI's detailed equation which is used to assess the vehicle response to a steady wind. As a result, it is found that the RTRI's detailed equation can conservatively and safely estimate the vehicle responses due to the tornado-like vortices, although the responses due to the tornado-like vortices are larger than that due to the steady winds.

キーワード：突風，横風，転覆限界風速，マルチボディダイナミクス，総研詳細式

(Gust, crosswind, critical wind speed of overturning, multi-body dynamics, RTRI's detailed equation)

## 1. はじめに

日本では、竜巻等の突風が原因とされる列車の転覆事故が過去に複数発生している。その一つである 2005 年の羽越本線での事故<sup>(1)</sup>を受けて、突風に対して列車運行の安全性を確保するために、鈴木ら<sup>(2)</sup>は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を開発、導入した。この方法では、上空にある竜巻状渦をドップラーレーダーで探知、追跡することでその最大風速と進路を予測し、最大風速が基準値以上となる渦が線路に到達することが予測される区間を運転中止にする。この方法により、竜巻状渦による風外力を把握することが可能である。一方、竜巻状渦に対する鉄道車両の耐力評価については、力学的な解析が行われておらず検討の余地が残されている。

定常風に対する車両応答評価において、日本では日比野・石田<sup>(3)</sup>により提案された準静的解析モデルである総研詳細式が広く用いられている。定常風と竜巻状渦の違いの一つとして、急激な風の立ち上がりが挙げられる。日比野ら<sup>(4)</sup>により、急激に立ち上がる風が車両に作用すると、同じ風速でも定常風に比べて車両応答が大きくなる可能性が指摘されている。そのため、竜巻状渦が車両応答に与える影響を評価するためには、竜巻状渦の特性を考慮した動的解析モデルが必要である。Zhang and Ishihara<sup>(5)</sup>は、マルチボディダイナミクスにより竜巻状渦に対する車両の動的応答を予測する解析モデルを提案した。しかし、このモデルでは、竜巻状渦の進行方向に沿って渦の接線風が分布する風速場が仮定

されている。実際には、渦まわりの風速場は渦の進行方向と接線風の風向風速に応じて複雑に変化する。そのため、竜巻状渦と車両が遭遇するあらゆる状況を網羅するには、渦と車両の相対位置や相対運動を任意に設定できるように風速場のモデルを修正し、渦のパラメータを変数とした体系的なパラメータスタディを行う必要がある。さらに、その知見を鉄道事業の実務に活用するためには、竜巻状渦の車両応答への動的効果を包含できる簡易なモデルが求められる。

そこで本研究では、竜巻に対する車両の転覆耐力評価手法の実用につなげるため、マルチボディダイナミクスにより竜巻状渦のパラメータが鉄道車両の動的応答に与える影響を評価する。最初に、既往研究<sup>(6)</sup>に基づき動的解析モデルを構築し、さらに渦まわりの風速場のモデルを修正する。次に、渦のパラメータを変化させて車両応答を評価し、応答が大きくなる条件を同定する。最後に、同定した条件における動的解析結果を総研詳細式<sup>(3)</sup>による準静的解析結果と比較する。

## 2. 解析モデルの構築

〈2・1〉 風速モデル 本節では、本研究で用いる風速場のモデルを提案する。既往モデル<sup>(6)</sup>は渦の進行方向に沿って渦の接線風が分布している状況を仮定しているため、渦の移動方向と接線風の風向が異なる状況や、渦と車両の相対位置が異なる状況を表現できない。そこで、これらを表現できるように既往モデルを修正する。図 1 に、車両が渦に遭遇したときの車両中心に当たる風向風速を示す。図中の

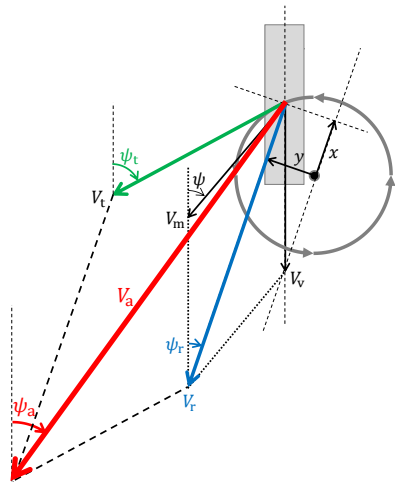


図 1 渦に遭遇した車両の中心に当たる風向風速

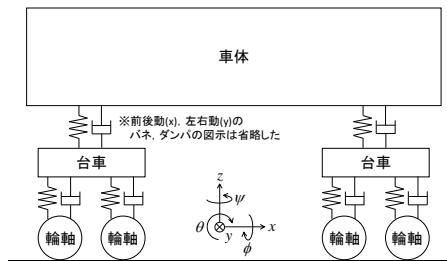


図 2 1 車両モデルのイメージ

記号で、 $V_t$ は渦の接線風速、 $V_m$ は渦の移動速度、 $V_v$ は車両の走行速度(図 1 には車両の走行により発生する風のベクトルを示す)、 $V_r$ は渦の移動速度 $V_m$ と車両の走行速度 $V_v$ との相対速度、 $V_a$ は渦の接線風速 $V_t$ と相対速度 $V_r$ から得られる相対風速、 $\psi$ は渦の移動方向と車両の移動方向との相対角、 $\psi_t$ は渦の接線風速の方向と車両の移動方向との相対角、 $\psi_r$ は相対速度 $V_r$ の方向と車両の移動方向との相対角、 $\psi_a$ は相対風速 $V_a$ の方向と車両の移動方向との相対風向角、 $x$ は渦中心から車両中心までの相対速度 $V_r$ に平行方向の距離、 $y$ は渦中心から車両中心までの相対速度 $V_r$ に垂直方向の距離である。

相対風速 $V_a$ と相対風向角 $\psi_a$ は、それぞれ式(1)と式(2)で表される。

$$V_a = \sqrt{(V_r \sin \psi_r + V_t \sin \psi_t)^2 + (V_r \cos \psi_r + V_t \cos \psi_t)^2} \quad (1)$$

$$\psi_a = \arctan \frac{V_r \sin \psi_r + V_t \sin \psi_t}{V_r \cos \psi_r + V_t \cos \psi_t} \quad (2)$$

相対速度 $V_r$ 、相対角 $\psi_r$ 、 $\psi_t$ は、それぞれ式(3)、式(4)、式(5)で求める。

$$V_r = \sqrt{(V_m \sin \psi)^2 + (V_m \cos \psi + V_v)^2} \quad (3)$$

$$\psi_r = \arctan \frac{V_m \sin \psi}{V_m \cos \psi + V_v} \quad (4)$$

$$\psi_t = \arctan \frac{x}{y} + \psi_r \quad (5)$$

上記のように風速場を定式化することで、渦と車両の相対位置や相対運動を任意に設定することが可能になる。

〈2・2〉 空気力モデル 車両に作用する空気力は、既往研究<sup>5)</sup>に基づき計算する。前節で導出した風向風速から車両

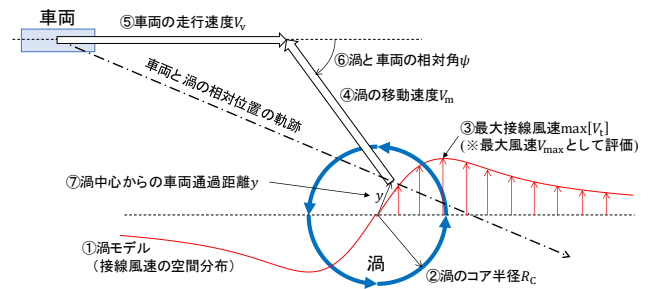


図 3 パラメータスタディで考慮する項目

の微小部位に当たる空気力を計算し、それを車体面積で数値積分することにより、車両全体に作用する空気力を計算する。また、空気力の時系列変化は風速の時系列変化に遅れなく追従するものと仮定する。空気力は、横力 $F_S$ 、揚力 $F_L$ 、車体中心まわりのローリングモーメント $M_R$ を考慮し、それぞれ式(6)、式(7)、式(8)で求める。

$$F_S(t) = \frac{1}{2} \rho H \int_{-2/L}^{2/L} V_a^2(x, t) \cdot C_S(\psi_a(x, t)) dx \quad (6)$$

$$F_L(t) = \frac{1}{2} \rho H \int_{-2/L}^{2/L} V_a^2(x, t) \cdot C_L(\psi_a(x, t)) dx \quad (7)$$

$$M_R(t) = \frac{1}{2} \rho H^2 \int_{-2/L}^{2/L} V_a^2(x, t) \cdot C_M(\psi_a(x, t)) dx \quad (8)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度、 $H$ は車体高さ、 $L$ は車体長さ、 $C_S$ は横力係数、 $C_L$ は揚力係数、 $C_M$ は車体中心まわりのローリングモーメント係数である。

〈2・3〉 車両モデル 既往研究<sup>5)</sup>に基づき、マルチボダイナミクスによる車両モデルを構築する。使用するプログラムは、商用ソフトウェア Simpack2017 である。車両を 1 車体、2 台車、4 輪軸の 7 要素として考慮し、各要素 6 自由度、合計 42 自由度の 1 車両モデルとして構築する(図 2)。車両モデルで考慮するパラメータは、総研詳細式<sup>3)</sup>に合わせる。車両の各要素は、ばねとダンパで接続する。

### 3. パラメータスタディ

〈3・1〉 評価指標と評価条件 前章で構築した解析モデルを用いてパラメータスタディを行い、車両応答が大きくなる条件を同定する。車両応答の評価指標は、最大輪重減少率 $D_{max}$ と動的増幅率DAF(Dynamic Amplification Factor)とする。最大輪重減少率 $D_{max}$ は、竜巻状渦による輪重減少率の時系列変化の最大値を取ったものであり、式(9)で表される。

$$D_{max} = 1 - \min[P_w] / P_0 \quad (9)$$

ここで、 $\min[P_w]$ は風上側輪重 $P_w$ の最小値、 $P_0$ は静止輪重である。 $D_{max}$ が大きいほど車両応答が大きいことを表す。動的増幅率DAFは、竜巻状渦による最大輪重減少率を定常風による定常輪重減少率で除した値であり、式(10)で表される。

$$DAF = D_{max} / D_S \quad (10)$$

ここで、 $D_S$ は定常風による定常輪重減少率である。DAFが大きいほど竜巻状渦による車両応答への動的増幅効果が大きいことを表す。

評価条件として、車両は通勤型電車の先頭車、地上構造物

は素地を想定する。素地の空気力係数は、種本ら<sup>(6)</sup>の風洞実験結果と森山ら<sup>(7)</sup>の空気力係数の補正方法から導出した値を用いる。変化させる渦のパラメータは、図 3 に示す 7 項目とする。実際には、渦の最大接線風速 $\max[V_t]$ については、渦の最大風速 $V_{\max}(= \max[V_t] + V_m)$ をパラメータとして変化させる。また、渦の移動速度 $V_m$ については、最大風速 $V_{\max}$ に占める移動速度 $V_m$ の割合をパラメータとする。これは、鈴木ら<sup>(2)</sup>の運転規制方法における判断指標が最大風速 $V_{\max}$  であ

表 1 各パラメータの範囲、基本値および同定値

項目	範囲	基本値	同定値
渦モデル	Rankine <sup>(6)</sup> Burgers-Rott <sup>(9),(10)</sup> Sullivan <sup>(11)</sup>	Burgers-Rott	Burgers-Rott
$R_c$ [m]	$10 \leq R_c \leq 100$	20, 40, 80	30
$V_{\max}$ [m/s]	$15 \leq V_{\max} \leq 30$	30	30 (DAFへの影響小)
$V_m$ [m/s]	$0 \leq V_m \leq V_{\max}$	$0.5V_{\max}$	$0.4V_{\max}$
$V_c$ [km/h]	$0 \leq V_c \leq 120$	120	120
$\psi$ [deg]	$-90 \leq \psi \leq 90$	90	70
$y$ [m]	$-R_c \leq y \leq R_c$	0	$0.5R_c$

るためである。表 1 には、各パラメータの範囲と基本値を示す。パラメータスタディにおいては、変化させるパラメータ以外は基本値を用いることとする。同表にあわせて示した同定値については次節で述べる。

〈3・2〉 パラメータスタディ結果 各パラメータが車両応答へ与える影響を図 4～図 10 に示す。紙面の都合上、個々

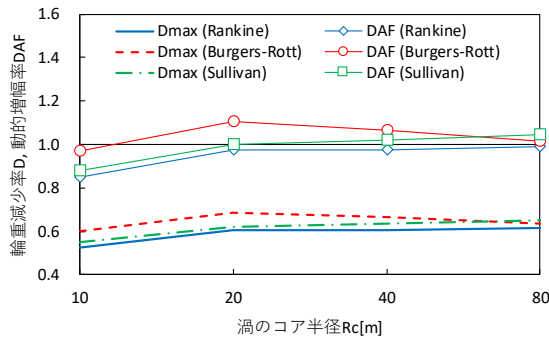


図 4 渦モデルが車両応答に与える影響

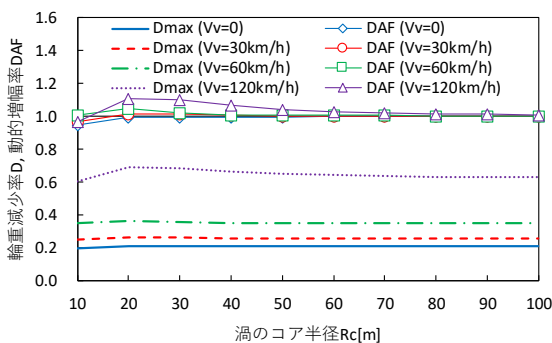


図 5 渦のコア半径が車両応答に与える影響

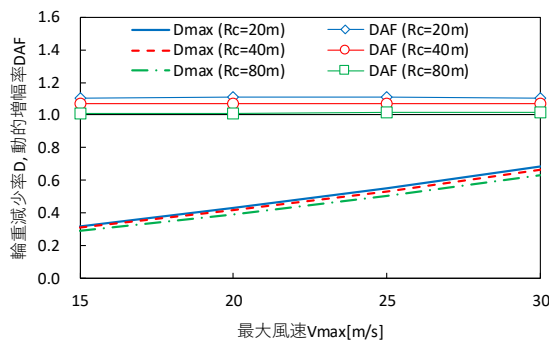


図 6 最大風速が車両応答に与える影響

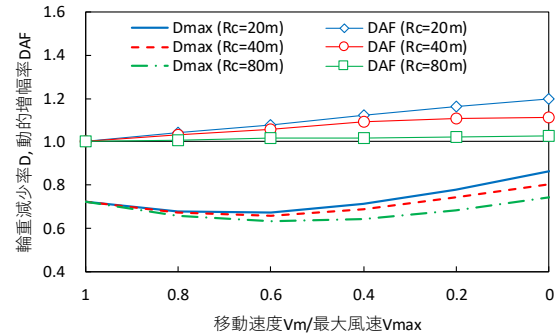


図 7 渦の移動速度が車両応答に与える影響

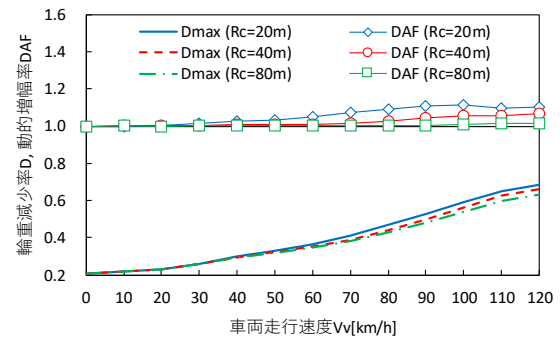


図 8 車両走行速度が車両応答に与える影響

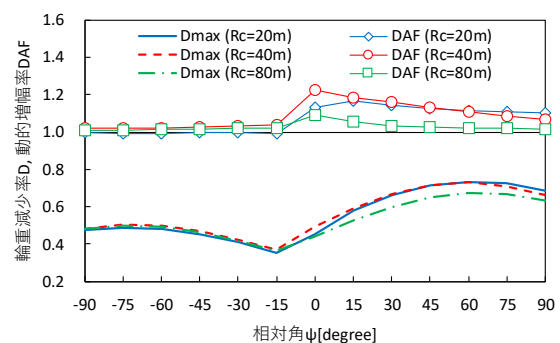


図 9 渦と車両の相対角が車両応答に与える影響

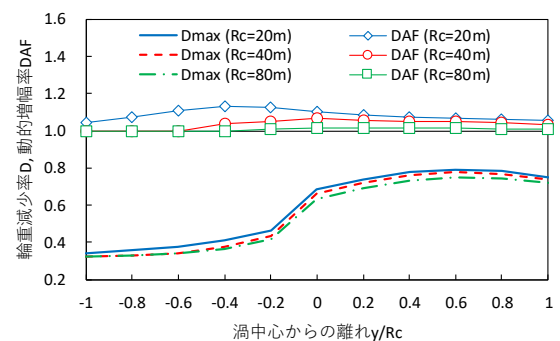


図 10 渦中心からの車両通過距離が車両応答に与える影響

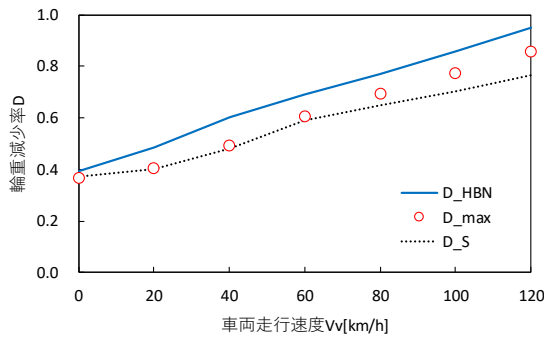


図 11 動的解析と総研詳細式の輪重減少率の比較

の結果の説明は省略するが、いずれも車両応答が大きくなる条件として  $D_{\max}$  が最大となる値を同定する。特記事項として、最大風速  $V_{\max}$  が  $D_{\max}$  の大きさに直結するのは自明であるため、ここでは DAF に着目して風速値による影響が小さいことを確認した。また、移動速度  $V_m$  は  $V_{\max}$  に占める割合が小さいほど車両応答が大きくなるが、静止している竜巻は現実的ではないため、冬季竜巻の観測結果に基づき最大風速の 0.4 倍の値を見込むこととした。パラメータスタディにより同定した車両応答が大きくなる条件を、表 1 にあわせて示す。なお、図 4～図 10 では対象とするパラメータ以外の値を固定して評価を行ったが、実際にはパラメータ同士で相互作用を持つものもある。そのため、表 1 には、さらに細かいパラメータ調整を行った同定値を示している。

#### 4. 総研詳細式による車両応答の評価

〈4・1〉 輪重減少率の比較 前章までで説明した動的解析を行うことで、竜巻状渦による動的効果も含めた車両応答の評価が可能である。一方、鉄道事業の実務として車両応答や転覆限界風速を評価する場合には、竜巻状渦の影響を包含した簡易なモデルを用いることが望ましい。本節では、前節で同定した条件における動的解析結果と総研詳細式による準静的解析結果を比較することで、竜巻状渦に対する車両応答評価への総研詳細式の適用性を検証する。

図 11 には、動的解析による最大輪重減少率  $D_{\max}$  を、総研詳細式で計算される輪重減少率  $D_{\text{HBN}}$  と比較した結果を示す。最初に、最大輪重減少率  $D_{\max}$  を定常風による定常輪重減少率  $D_S$  と比較すると、走行速度が小さい条件では同程度の値であるが、走行速度の増加とともに  $D_{\max}$  が相対的に大きくなる。これは、走行速度が大きい方が、動的増幅率 DAF が大きくなるためである。総研詳細式で計算された輪重減少率  $D_{\text{HBN}}$  と最大輪重減少率  $D_{\max}$  を比較すると、いずれの走行速度においても  $D_{\text{HBN}}$  の方が大きいことがわかる。これは、総研詳細式では車体の左右振動加速度の最大値を見込んだ慣性力を考慮しており、車両応答が平均値より大きめに評価されるためである。これによる効果で、竜巻状渦による車両応答の動的増幅効果を包含できることがわかる。

以上より、輪重減少率は定常風よりも竜巻状気流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気流に対する車両応答を安全側に評価可能であるといえる。

〈4・2〉 基準値の検証 最後に、鈴木ら<sup>(2)</sup>の運転規制方法の基準値を検証する。この方法では、文献<sup>(1)</sup>の事故原因とされる突風の藤田スケール(F1)に基づき、運転規制を行う最大風速の基準値を 33m/s としている。文献<sup>(1)</sup>に基づく事故の気象条件や車両条件において、総研詳細式で計算される転覆限界風速は 34m/s であり、基準値よりも大きい。したがって、鈴木ら<sup>(2)</sup>の方法における現行の基準値は、文献<sup>(1)</sup>の事故の再発防止の観点からは妥当であるといえる。

#### 5. おわりに

本研究では、マルチボディダイナミクスにより竜巻状渦のパラメータが鉄道車両の動的応答に与える影響を評価した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 既往研究に基づき動的解析モデルを構築し、さらに渦まわりの風速場のモデルを修正した。これにより、渦と車両の相対位置や相対運動を任意に設定して、竜巻状渦に対する車両応答評価を行うことを可能にした。
- (2) 渦のパラメータを変化させて、車両応答の評価を行った。これにより、竜巻状渦のパラメータが車両応答へ与える傾向と感度を明らかにするとともに、車両応答が大きくなる条件を同定した。
- (3) 同定した条件における動的解析結果を総研詳細式による準静的解析結果と比較した。その結果、竜巻状渦による車両応答は定常風に比べて大きいものの、総研詳細式により安全側の評価が可能であることを明らかにした。

#### 文 献

- (1) 航空・鉄道事故調査委員会：「鉄道事故調査報告書（東日本旅客鉄道株式会社 羽越線砂越駅～北余目駅間 列車脱線事故）」(2008)
- (2) 鈴木博人・藤原忠誠・樫間智紀・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」, JREA, Vol.61, No.6, pp.42281-42284 (2018)
- (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)
- (4) 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, pp.23-28 (2013)
- (5) Zhang, D. and 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)
- (6) 種本勝二・鈴木実・斎藤寛之・井門敦志：「在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果」, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.47-50 (2013)
- (7) 森山淳・堀岡健司・土井賢一：「車両転覆限界風速算出装置及び車両転覆限界風速算出方法」, 特許公報(B2), 5888931 (2016)
- (8) Rankine, W. J. M.: “A Manual of Applied Physics, 10th ed.”, Charles Griff and Co (1882)
- (9) Burgers, J. M.: “A mathematical model illustrating the theory of turbulence”, Advances in Applied Mechanics, Vol.1, pp.171-199 (1948)
- (10) Rott, N.: “On the viscous core of a line vortex”, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik, Vol.9, No.5-6, pp.543-553 (1958)
- (11) Sullivan, R. D.: “A two-cell vortex solution of the Navier-Stokes equations”, Journal of the Aerospace Sciences, Vol.26, No.11, pp.767-768 (1959)