

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350491

研究課題名(和文)竜巻による列車事故減災を目指した非定常空気力の解明

研究課題名(英文)Elucidation of unsteady aerodynamic forces aimed at reduction of train accidents by tornadoes

研究代表者

鈴木 昌弘 (Suzuki, Masahiro)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：00376881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：実験、理論モデルおよび数値シミュレーションにより、竜巻に遭遇した列車が受ける空気力を明らかにした。その結果、以下のことが明らかになった。

1) 空気力は、竜巻中の列車位置に応じて変化する。2) 中間車両に加わる空気力は、竜巻の理論モデルを用いてほぼ推定することができる。3) コア半径にかかわらず最大風速が一定と仮定すると、コア半径が列車長の0.8倍の時にヨーイングモーメントが最大になる。4) 走行経路が竜巻中心から逸れると、列車に加わる空気力は急激に減少する。

研究成果の概要(英文)：Aerodynamic forces acting on a train encountering a tornado were studied by an experiment, a theoretical model and a numerical simulation. The results showed as follows. 1) The aerodynamic forces change according to the position of the train in the tornado. 2) The aerodynamic forces acting on intermediate cars can be approximately estimated by using a theoretical model. 3) Assuming that the maximum wind speed is constant irrespective of the core radius, the yawing moment is maximized when the core radius is 0.8 times the train length. 4) When the running route deviates from the tornado center, the aerodynamic forces acting on the train suddenly decrease.

研究分野：鉄道の空気力学

キーワード：鉄道 竜巻 空気力

1. 研究開始当初の背景

日本に鉄道が開業して以来、多くの横風による列車脱線転覆事故が発生している。その横風をもたらした原因としては、台風、発達した低気圧、竜巻等があげられるが、近年の事故のうち数件は竜巻によるものと考えられている。列車が竜巻に遭遇する確率は小さいが、ひとたび事故になれば大きな損害を被ることになる。その最大の事故防止策は、竜巻が発生したら直ちに列車運行を停止することである。しかし、竜巻は強風域が非常に狭く、発生から終息までの時間も短いため、現在の鉄道会社が持つ観測網では、予測や観測は不可能である。ドップラー気象レーダーによる基礎研究が行われているが、実用化されてすべての鉄道路線をカバーするまでには長い年月と莫大なコストが必要となると思われる。さらにたとえ竜巻が予測可能になったとしても、列車は線路上を走行するため、自動車のように進路を変更して竜巻を回避することは難しく、また車輪とレールとの間の摩擦係数が小さいため急に止まることもできない。そのため、少しでも被害を軽減するためには鉄道車両自体の対策法を検討することが重要となる。対策法の検討には、竜巻に遭遇した列車に加わる空気力を推定することが不可欠である。

横風（竜巻ではなく、一方向からの風）により列車に加わる空気力を評価する研究は、これまで数多くの風洞試験や数値シミュレーションにより行われてきている。通常の横風の風洞試験では、風洞内のターンテーブル上に固定した列車模型にある角度（横風の方向と列車進行方向のベクトル和の方向）の気流を作用させて列車の空力特性を評価する。しかし、一方向からの風ではなく竜巻のようなあらゆる方向からの風が列車にあたるような流れ場では、この試験方法は成立しない。竜巻を模擬した流れ場の中で模型列車を走行させながら空気力を測定する必要がある。この実施が困難であったため、竜巻に遭遇した列車が受ける空気力を求める試験は本研究以前には行われてこなかった。数値シミュレーションにおいても、竜巻に遭遇した列車まわりの流れ場を調べた例はなかった。また、理論モデルも構築されていなかった。

2. 研究の目的

竜巻に遭遇した列車まわりの流れ場を再現するための実験方法、数値シミュレーション手法および理論モデルを開発し、竜巻に遭遇した時に列車が受ける空気力を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

模型実験、数値シミュレーションおよび理

論モデルにより列車に加わる空気力を求めた。

(1) 模型実験

竜巻状気流発生装置および模型列車走行装置を開発し、それらを用いて実験を行った（図1）。

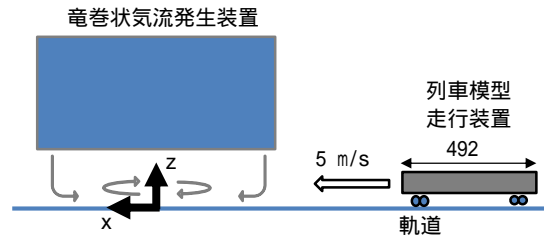


図1 模型実験装置（単位：mm）

竜巻状気流発生装置（図2）は、アイオワ州立大学で開発された装置¹⁾を参考に製作した。2つのダクトから成り立ち、内側のダクト内に設けた送風機で上昇気流をつくり、その気流を上部に斜めに取り付けられたガイド羽根を通して外側のダクト内に導くことでステージ上に旋回流を発生させる。竜巻の構造に影響する重要なパラメータであるスワール比（上昇流の運動量に対する角運動量の比）は、ガイド羽根の角度およびダクト下端からステージまでの距離を変えることで調整できる。

模型列車は40分の1のスケールで、表面に圧力孔が72点設けられ、内部には圧力センサーとデータロガーを内蔵している。測定した圧力値を用いて列車に加わる空気力を算定する。模型列車はゴムの弾性を利用して発射し、内蔵したモーターで自走する。最高速度は5 m/sである。模型列車は3両まで連結可能である。

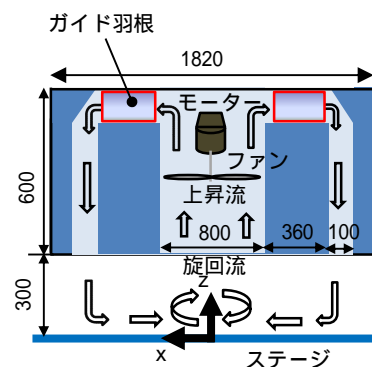


図2 竜巻状気流発生装置（単位：mm）

(2) 数値シミュレーション

圧縮性レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を $k-\epsilon-f$ 乱流モデルを用いて有限体積法により解いた。計算領域は、実験装置の竜巻状気流発生装置とステージに挟まれた領域（図3）とし、実験結果を参考に境界条件を決定した。列車走行は変形スライド

格子法 (deforming and sliding mesh method) を用いて再現した。

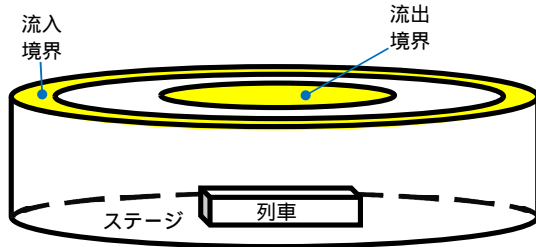


図3 計算領域

(3)理論モデル

竜巻の理論モデルとして広く使われているランキン渦モデルがある。このランキン渦モデルをもとに、竜巻中の列車に加わる空気力を推定するモデルを構築した。

ランキン渦モデルでは、渦を二つの領域に分け、旋回流速 V を以下のようにモデル化している。

$$V(r) = \begin{cases} V_{max} \frac{r}{R}, & r \leq R \\ V_{max} \frac{R}{r}, & r > R \end{cases}$$

ここで V_{max} は最大旋回流速、 R はその時のコア半径、 r は渦中心からの距離である。

これより、渦中心を原点としたときの位置 (x, y) での列車側面に垂直な速度成分 v は、以下ようになる。

$$v(x, y) = \begin{cases} V_{max} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \cos\theta, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq R \\ V_{max} \frac{R}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cos\theta, & \sqrt{x^2 + y^2} > R \end{cases}$$

ここで $\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$ である。

x 軸に平行で、渦中心から y 軸方向に y_0 ずれた軌道を走行する長大編成の中間車両の微小断面に加わる空気力が速度成分 v の二乗に比例すると仮定すると、1 車両に加わる横力と揚力およびヨーイングモーメントは以下のように表される。

$$F_S = \int_{x_c - \frac{L}{2}}^{x_c + \frac{L}{2}} k_S v(x, y_0)^2 h dx$$

$$F_L = \int_{x_c - \frac{L}{2}}^{x_c + \frac{L}{2}} k_L v(x, y_0)^2 w dx$$

$$M_y = \int_{x_c - \frac{L}{2}}^{x_c + \frac{L}{2}} (x - x_c) k_S v(x, y_0)^2 h dx$$

ここで k_S と k_L は比例定数、 L は車両長、 x_c は車両中心である。 h は車両高さ、 w は車両幅である。

4. 研究成果

(1) 竜巻状気流発生装置の性能評価

開発した竜巻状気流発生装置により発生する流れ場を PIV 法 (粒子イメージ流速計測法) により測定した。その結果、実際の竜巻とほぼ同じ流速分布の流れ場が発生していることがわかった (図4)。また、スワール比を大きくすると1セル渦 (全域が上昇流の渦) から2セル渦 (中心部に下降流がある渦) に変化することを確認した。最大旋回流速は 7.6m/s、その時のコア半径は 120 mm であった。

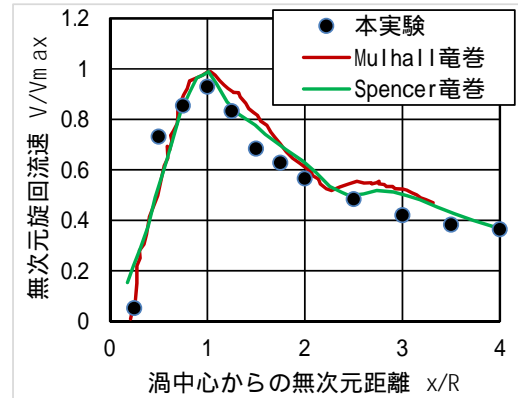


図4 地表近くの水平断面内の流速分布
実際の竜巻の観測結果¹⁾との比較

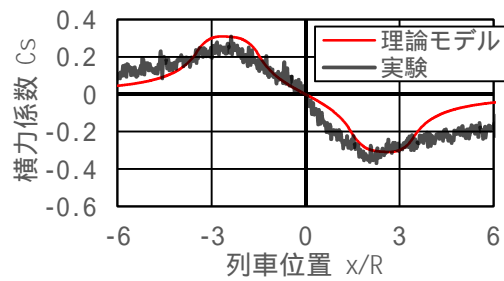
(2) 列車に加わる空気力

列車に加わる空気力が竜巻内での列車位置に応じて時々刻々と変化する様子が実験により捉えられた (図5)。横力は竜巻中心前後でその方向が逆転し、揚力とヨーイングモーメントは竜巻中心付近で最大となることがわかった。中間車の場合、この空気力の時間変化は理論モデルによってもほぼ推定することができることがわかった (図5の赤線)。

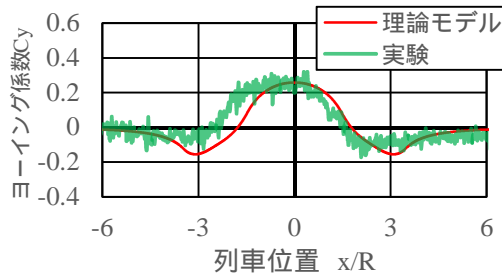
列車の走行経路が竜巻中心からずれた場合、走行経路が竜巻中心から離れるにつれ空気力は急激に減少するが、竜巻中心の左右どちらに走行経路をとるかによりその傾向は異なることが明らかになった。

コア半径にかかわらず最大旋回風速が一定と仮定して、竜巻のコア半径と列車に加わる空気力の大きさの関係を理論モデルにより調べたところ、コア半径が大きくなるに従い、横力と揚力は増大して一定値に近づくが、ヨーイングモーメントはコア半径が車両長の 0.8 倍の時に最大になることがわかった。

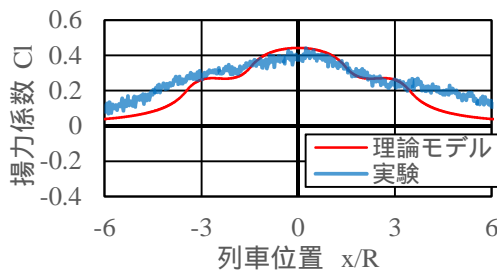
スワール比と空気力の関係、および竜巻の旋回風速と列車速度の比と空気力の関係についても実験的に調べたが、実験を実施した範囲内ではこれらの間に明確な関係はみられなかった。今後、実験装置の改良等により広範囲の実験検証が望まれる。



(a) 横力



(b) 揚力



(c) ヨーイングモーメント
図5 列車に加わる空気力
(竜巻中心を横切る中間車の場合)

(3) 数値シミュレーションによる解析
竜巻中を走行する1両編成の列車まわりの流れ場を数値シミュレーションにより解析した。その結果、列車に加わる空気力を数値シミュレーションによって精度良く推定できることがわかった(図6)。また、流れ場を可視化し、竜巻中の列車周りに複雑な流れ場が形成されている様子が捉えられた(図7)。今後、さらにシミュレーションを行い、列車に加わる空気力と流れ場の関係を明らかにし、対策法の検討に役立てていきたい。

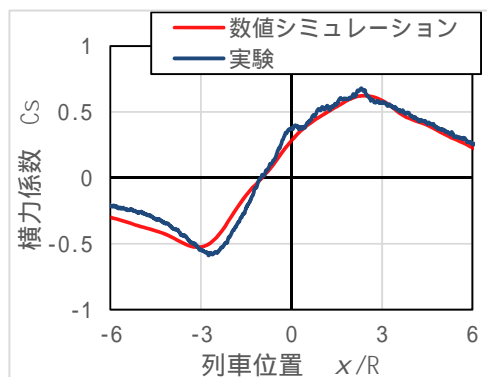


図6 列車に加わる空気力 数値シミュレーションと実験結果の比較(1両編成の場合)

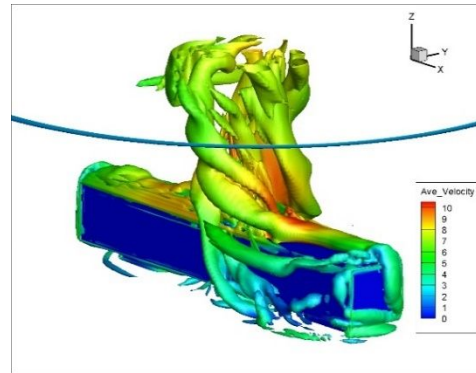


図7 列車周りの流れの可視化例
(第二不変量の等値面)

<引用文献>

- 1 F. L. Hann, et al.: Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering application, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1146-1159, 2008.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

- 1 M. Suzuki and N. Okura: Study of aerodynamic forces acting on a train using a tornado simulator, Mechanical Engineering Letters, Vol. 2, 2016. DOI:10.1299/mel.16-00505 査読有

[学会発表](計5件)

- 1 M. Suzuki: Large eddy simulation of a tornado flow around a train, Abstracts of ERCOFTAC Workshop Direct and Large-Eddy Simulation 11, May 29-31, 2017, Pisa (Italy).
- 2 M. Suzuki: Development of an experimental method to estimate aerodynamic forces acting on a train in a tornado, 11th World Congress on Railway Research, May 29-June 2, 2016, Milan (Italy).
- 3 M. Suzuki: Estimation of the aerodynamic forces acting on a train using a simple tornado model, The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, April 5-8, 2016, Cagliari (Italy).
- 4 M. Suzuki: An experimental investigation of flow around a vehicle passing through a tornado, Experimental Fluid Mechanics 2015, Nov. 17-20, Prague (Czech).
- 5 Y. Nakamura: Study of aerodynamic forces acting on a train using a tornado simulator, First International Conference in Numerical and Experimental Aerodynamics of Road

Vehicles and Trains, June 23-25, 2014,
Bordeaux (France).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 昌弘 (Masahiro, Suzuki)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号 : 00376881

(3)連携研究者

大藏 信之 (Nobuyuki , Okura)
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号 : 70367738