

第90回

風洞試験による横風下の車両の空気力評価法

はじめに

日本では1872年の鉄道開業以来、風が原因による列車の脱線・転覆事故が約50件発生しています。昨今の鉄道車両の軽量化や高速化により、今なお強風時の列車の安全・安定輸送は重要な課題となっています。

強風時の列車運行の安全性評価において、基礎となる指標が転覆限界風速です。転覆限界風速は、強風時において風上側の輪重がゼロとなる可能性が生じる風速のことで、横風による空気力、左右振動慣性力、遠心力(曲線区間)、重力が車両に作用すると考え、各々の力によるモーメントの静的なつり合いを解くことで、算出されます¹⁾。したがって、転覆限界風速の算出に当

たっては、風速と横風による空気力との関係を知ること、すなわち、空気力を評価することが重要となります。ここでは国内外における風洞試験による横風下の車両に加わる空気力の評価方法について説明します。なお、転覆限界風速の評価法に関する変遷は文献²で紹介されていますので、興味のある方はそちらを参照してください。

横風下を走行する車両が受ける風

空気力評価法を説明する前に、横風下を走行する車両が受ける風について示します(図1)。横風下を走行する車両が受ける風は、自然風と車両走行とのベクトル和となります。したがって、仮に自然風の風速および風向角 α が一定の場合でも、車両走行速度によって車両に対する風速および風向角 β は変化します。

図2に線路直交方向から風が吹く状況($\alpha=90$ 度)での車両から見た風の平均風速(地上高さ10mの値により規格化)、乱れ強さ(風速変動の標準偏差を、その高さにおける平均風速で規格化し

た値)、風向角の高さ方向分布を示します。田園地帯の風を想定し、地上高さ10mで風速20m/s(72km/h)としました。車両が静止している場合(走行速度0km/h)には車両から見た風は自然風そのものなので、地表面に近いほど平均風速は低下します。走行速度が上がるにつれて、車両から見た平均風速の高さ方向の変化は小さくなり、走行速度が200km/hを超えると車両から見た風はほぼ一様な分布となります。

次に乱れ強さですが、走行速度が上がるにつれて小さくなります。これは、風速変動の標準偏差は走行速度によらず一定であるのに対し、車両から見た風の平均風速は走行速度が上がるにつれて大きくなるためです。

続いて、車両から見た風の風向角 β は、走行速度が上がるにつれて小さくなります。最高速度が100km/h程度の在来線車両ではおおむね30度以上、走行速度が200km/hを超える高速鉄道車両では逆に30度以下となります。このように、車両から見た風の性質および風向角は走行速度によって大きく

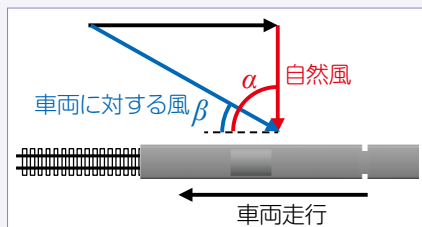


図1 車両に対する相対風

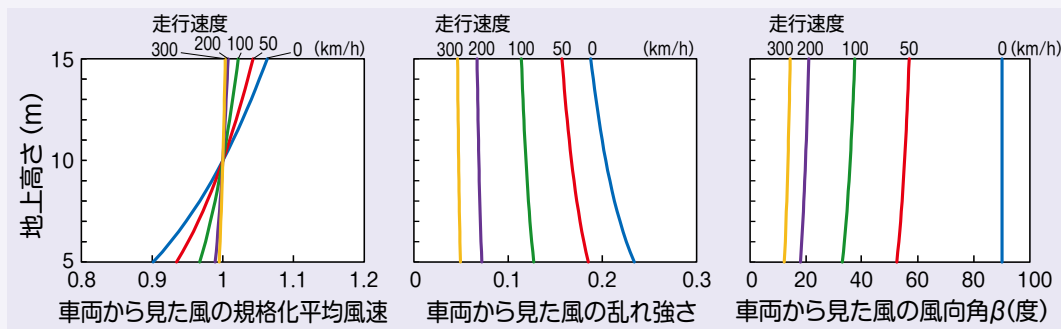


図2 車両から見た風の性質および風向角



図3 三木忠直氏³⁾

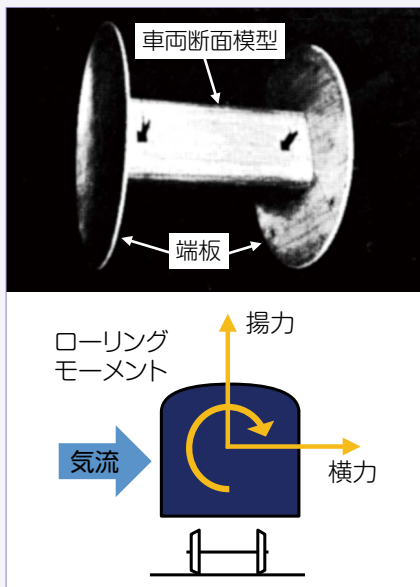


図4 車両断面模型と空気力三分力

異なり、同じ風況のもとで走行する場合でも、在来線車両か高速鉄道車両かによって状況は大きく変わります。

国内における風洞試験の変遷

横風下で受ける空気力と風速との関係は、空気力係数(空気力を車両に対する風速、空気密度、車両の投影面積などで規格化した値)として整理されます。空気力係数を求めるためには、車両に作用する空気力とともに風速を測定する必要がありますが、実物の車両を使った試験では測定が困難であるため、風洞(人工的に流れを発生させる施設)の中に、車両の縮尺模型を設置して測定することが一般的です。以下では、国内で実施された空気力係数を評価する風洞試験の変遷について紹介します。

国内において、横風下での空気力係数を測定するための初期の風洞試験は、1950年代に新幹線車両の開発者である旧国鉄技術研究所(以下、鉄道技研)の三木忠直³⁾(図3)らによって実施されました。この風洞試験は、東海道新幹線の車両開発の一環として行われ、空気力学の世界的権威である東京大学の谷一郎教授の指導のもと、谷研究室が所有する直径3mの風洞(通称3m風洞)にて行われました。風洞試験の主目的は新幹線車両の空気抵抗

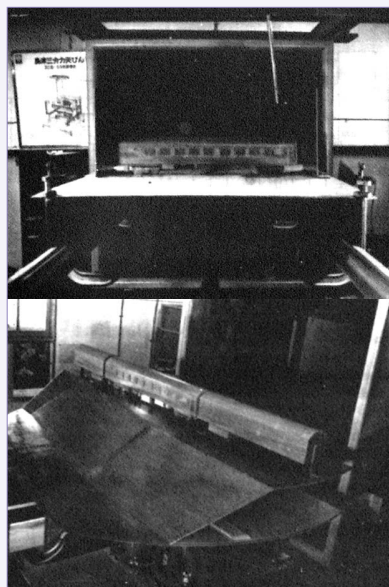


図5 平地および築堤上の客車模型

の測定でしたが、当時、新幹線車両の横風に対する安全性が検討課題の一つとしてあげられており、横風から新幹線車両が受ける空気力を評価する試験も実施されました⁴⁾。縮尺1/10相当の車両断面模型の両端に二次元的な流れを確保するための板を設置した供試体を風洞内にワイヤーで吊り、真横から風を受けた際の横力、揚力、ローリングモーメントの三分力を測定し、空気力係数を求めています(図4)。

その後、在来線において曲線通過速度の向上が計画されるようになり、曲線通過時に横風を受けた際の走行安全性が重要な問題として取り上げられ、1972年に鉄道技研の国枝春春により転覆限界風速の理論解析式(国枝式)が発表されました⁵⁾。国枝式では、車両の空気力学的要素をかなり簡易に扱ったうえで、転覆限界風速を求めます。これに対し、鉄道技研の福地合一らは、国枝式では簡易に扱われた空気力学的要素を精緻に評価したうえで、転覆限界風速を算出するために、軽量客車の縮尺1/30模型を用いて、空気力係数を求めています⁶⁾。風洞試験は、鉄道技研津田沼土木実験所にあった0.8m×0.8mの吹出し口をもつ風洞の開放型測定部で行われました(図5)。三木らが行った試験と比べて現実の状況に近いレイアウトとなっており、車

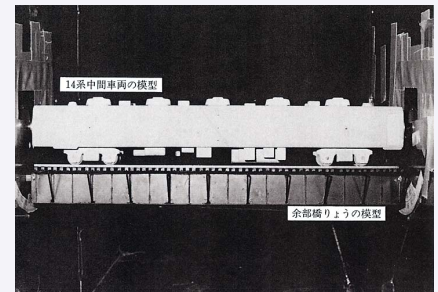


図6 余部橋りょう上の車両模型

両模型は台車や床下機器を備え、平地や築堤模型上に置かれています。

1986年に発生した山陰線余部橋りょうでの事故の原因究明の過程では、橋りょうと車両を組み合わせた事故現場を模擬した風洞試験が実施され(図6)、車両に加わる空気力は橋りょうの存在により大きく変化することがわかりました⁷⁾。これにより、空気力係数は車両形状のみならず、地上構造物の形状にも強く依存することが明らかとなり、以降、地上構造物と車両を組み合わせた風洞試験により空気力係数を求めることの重要性が国内で強く認識されました。

また、1994年の同じ日に発生した根室本線および三陸鉄道南リアス線における事故の原因調査のために実施された風洞試験では、風向角による空気力係数の変化が、先頭車両と中間車両で大きく異なる結果となり、風洞試験において先頭車両と中間車両を区別すること、真横(風向角90度)以外の風向角についても空気力係数を測定することの重要性が国内で認識されました。

これまで述べてきたように、空気力係数は縮尺模型を用いた風洞試験により求められます。しかしながら、流れの力学的相似性を表すレイノルズ数が現実と模型試験では異なるため、風洞試験で得られた空気力係数が、そのまま現車の空気力係数として用いることができるか曖昧でした。この課題に対して、北海道の強風地に実物大の車両模型三両および高架橋模型を設置し、2001年より約2年半の長期に渡り、実物大模型周辺の風速および車両に加わる空気力を測定するという世界でも類を見ない大規模な試験が行われま

した。また実物大模型試験と並行して、この試験を再現する縮尺1/40の模型を用いた風洞試験が、鉄道総研の大型低騒音風洞の密閉型測定部（幅5m、高さ3m）で実施されました（図7）。その結果、風洞試験において風洞気流をスパイアやラフネスブロックにより自然風を模擬した気流（大気乱流境界層）とした場合には、実物大模型試験と縮尺模型を用いた風洞試験で空気力係数が良好に一致することが確認されました⁸⁾。これら一連の研究により、近年実施される風洞試験では、大気乱流境界層を模擬した気流下で縮尺1/40の模型を使用し、地上構造物と車両を組み合わせ、幅広い範囲の風向角で先頭車両および中間車両の空気力係数を大型低騒音風洞において測定しています。

海外における空気力評価

前述のように日本では、1950年代に新幹線車両開発の一環として横風下の車両に加わる空気力評価がなされました。一方、海外においては、1970年代のイギリスにおいて横風下の車両に関する空気力学の研究が本格化しました。当時のイギリスでは、既設線での高速

走行を目指したAdvanced Passenger Train (APT) の開発が行われており、その開発の過程で多くの研究が実施されました。高速走行においては横風下の風向角が小さくなりますが（図1）、この場合には先頭車両に作用する横力が、その他の車両と比べて増大することが研究の初期段階で明らかとなりました。このため、APTの風洞試験はおもに先頭車両に対して実施されています。ユニークな試験（図8）も実施されており、縮尺1/5の車両模型を屋外で自動車により推進させ、自然風下で作用する空気力を測定し、静止車両模型を用いた風洞試験から得られた空気力係数との比較が行われました⁹⁾。

その後1990年代に、ドイツでは軽量の先頭車両を有するICE2、ICE3が導入されることを契機に、フランスでは強風地帯を通るTGV地中海線の開業にあたって、横風下の車両に関する研究が集中的に実施され、両国においてそれぞれ、横風下の車両の安全性評価手法が定められました。その後、ヨーロッパ全体での高速鉄道車両のインターオペラビリティ（相互乗り入れ）の推進にとともに、Technical Specification for Interoperability（相

互乗り入れのための技術仕様）が制定され、横風下の安全性評価手法についてもヨーロッパ全体で統一する必要性が生じてきました。そのような状況の中、ドイツ国鉄（DB）、フランス国鉄（SNCF）、シーメンス、フランス建築科学技術センターの間で2001年から2004年に渡り研究プロジェクトが実施され、統一的な安全性評価手法の構築に向けた研究がなされました¹⁰⁾。その後、DB、SNCF、ボンバルディア、イタリアのRFI（鉄道路線の保有、管理会社）、イギリスのRSSB（鉄道安全標準化機構）の間で2005年から2008年に渡り、さらなる研究プロジェクトが実施されました¹¹⁾。

これらのプロジェクトを経て、現在では横風下の車両の空気力係数を評価する手法がEN規格（EN 14067-6）において定められています。EN規格においても、日本と同様に縮尺模型を用いた風洞試験により空気力係数を求めますが、相違点も存在します。まず風洞気流ですが、国内では前述のように大気乱流境界層を模擬した気流を用いるのに対して、EN規格では乱れが小さく、速度勾配のない一様流を用います。これは、EN規格で主な評価対象としている高速鉄道車両では、図1に示したように

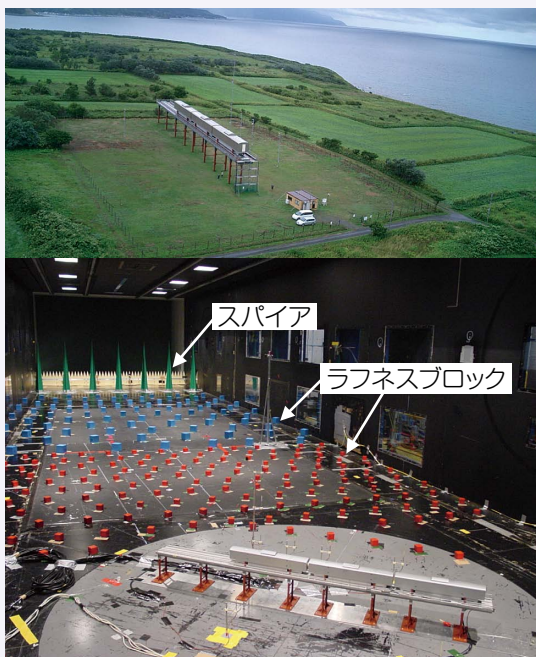


図7 実物大模型試験と風洞試験

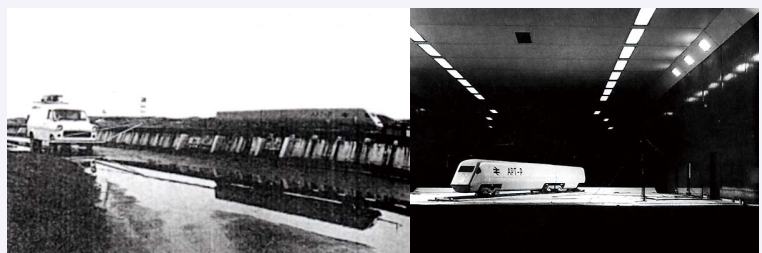


図8 縮尺1/5 APT 模型に対する屋外試験および風洞試験⁹⁾

Republished with permission of ASME, from The Effect of Cross-Winds on Trains, R.K.Cooper, Journal of Fluids Engineering, Vol.103, Issue 1, pp.170-178, 1981, <https://doi.org/10.1115/1.3240768>; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.



図9 単線軌道上のICE 3 模型¹²⁾

Reprinted from Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.98, Issues 6-7, Martin Schober, Marco Weise, Alexander Orellano, Peter Deeg, Wolfgang Wetzel, Wind tunnel investigation of an ICE 3 endcar on three standard ground scenarios, pp.345-352, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.12.004>, with permission from Elsevier.

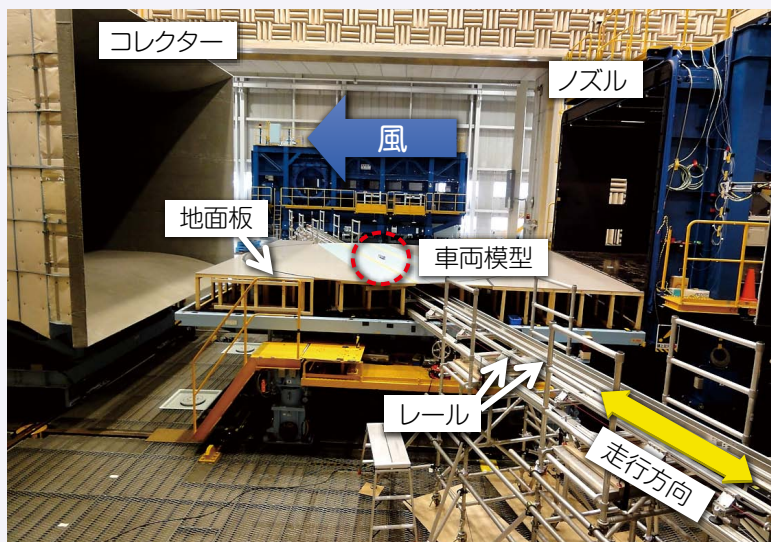


図10 大型低騒音風洞における車両模型走行装置

車両から見た風は一樣流の性質に近くなることや、試験方法が簡素で、異なる風洞でも同様の条件で試験が可能であるためです。しかしながら、レイノルズ数依存性がより顕著に現れるため、日本で通常実施している試験と比べて高いレイノルズ数での試験が求められており、日本と比べて欧州では数倍大きな車両模型を用います。また、EN規格では図9に示すように車両模型を実物大高さ1mの単線軌道模型上に設置して測定を行い¹²⁾、単線軌道上での相対比較により車両の安全性評価がなされ、地上構造物が空気力係数に及ぼす影響はあまり重要視されていません。

空気力評価における走行影響

これまで述べてきたように、横風下の車両に加わる空気力は国内外問わず静止した縮尺模型を用いた風洞試験により評価しています。しかしながら風洞試験においては、車両と地上構造物がともに静止しているがゆえに、横風下を走行する現実の車両とは状況が異なります。静止車両模型を用いた風洞試験に対して、横風下で車両模型を走行させ、走行する車両模型に加わる空気力を測定すれば、より現実に近い状況での測定となります。このような試験により、空気力係数に対して走行が及ぼす影響を調べる試みは以前からな

されています¹³⁾。以前の試験では車両模型に加わる空気力を直接測定する方式を取っていたため、走行にともなう外乱の影響が大きく、精度の高い測定は困難でした。一方、近年では小型の圧力センサーが容易に入手可能となり、多数の圧力センサーを搭載した車両模型を走行させ、車両表面の圧力分布を得ることで空気力の測定が行われており、以前の方式に比べて走行による外乱の影響が少ない試験が可能となっています。最近では、この方式により空気力係数評価における走行の影響を解明する研究が行われており^{14) 15)}、日本では大型低騒音風洞に車両模型が走行可能な装置を設置して(図10)、イギリスでは車両模型を高速で射出可能な装置の走行路の傍らにファンを設置して、横風下を走行する車両模型に加わる空気力の測定が行われています。

今後の展望

転覆限界風速の評価に際して、空気力係数の評価は非常に重要であるため、長年に渡り、さまざまな風洞試験が実施されてきました。今後も風洞試験の重要性は変わらず高いと考えられます。一方で、近年は計算機性能の飛躍的な向上にともない、空気力学の分野においても数値シミュレーションが盛んに活用されており、鉄道総研でも数値シ

ミュレーションを用いた空気力係数の評価を試みています¹⁶⁾。風洞試験を一気に数値シミュレーションで置き換えることは未だ難しい状況ですが、今後は空気力係数の評価においても、風洞試験と数値シミュレーションを適材適所で使い分け、効率的な空気力係数の評価が可能となる方策を探っていくことになるのではないかと考えています。

(野口雄平/環境工学研究部
車両空力特性研究室)

文献

- 1) 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
- 2) 日比野有: 横風に対する車両の転覆限界風速評価法, RRR, Vol. 76, No. 4, pp. 32-35, 2019
- 3) 小野田滋: 鉄道人物伝 車両構造の改良に取り組む 三木忠直, RRR, Vol. 74, No. 10, pp. 38-39, 2017
- 4) 鉄道技術研究所監修: 高速鉄道の研究, 研友社, 1967
- 5) 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
- 6) 福地合一, 林田千秋, 西沢生一, 土屋杵: 横風による列車転倒の静力学的検討, 鉄道技術研究報告, No. 854, 1973
- 7) 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, 1988
- 8) 鈴木実, 種本勝二: 横風に対する車両の空力特性に関する実物大試験と風洞試験, 第14回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL 2007), pp. 231-234, 2007
- 9) R.K.Cooper: The Effect of Cross-Winds on Trains, ASME J. Fluids Eng., Vol. 103, pp. 170-178, 1981
- 10) P.-E.Gautier et al.: Strong wind risks in railways: the DEUFRAKO crosswind program, Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR 2003), pp. 463-474, 2003
- 11) E.Masson, L.Hoefener: Aerodynamics in the Open Air (AOA) European Project: WP2 Crosswind issues-Summary report, RSSB, 2008
- 12) M.Schober et al.: Wind tunnel investigation of an ICE 3 endcar on three standard ground scenarios, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 98, pp. 345-352, 2010
- 13) C.J.Baker: Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 24, pp. 227-251, 1986
- 14) 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, pp. 41-46, 2016
- 15) F.Dorigatti et al.: Crosswind effects on the stability of a model passenger train-A comparison of static and moving experiments, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 138, pp. 36-51, 2015
- 16) 野口雄平, 中出孝次: 横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 9, pp. 11-16, 2017