

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

横風に関する 試験に活用する

強風時の鉄道車両の走行安全性に直接影響する重要な検討課題の一つに、横風により車両に働く空気力の評価が挙げられ、主に風洞試験で評価されています。鉄道固有の課題に取り組む研究設備として建設された大型低騒音風洞20周年に際して、ここでは、これまで行ってきた横風に関する風洞試験について、主に外部風洞を用いて行っていた風洞技術センター開設以前から振り返るとともに、開設以降に行ってきた風洞試験について、最近の取り組みも交えて紹介します。



鈴木 実
Minoru Suzuki
環境工学研究部
車両空気特性研究室
主任研究員
【専門分野】横風, 実験
流体工学



菊地 勝浩
Katsuhiko Kikuchi
環境工学研究部
車両空気特性研究室
室長
【専門分野】鉄道流れ工学

はじめに

世界初の鉄道用風洞として建設された大型低騒音風洞(以下、米原風洞)は、1996年6月に完成しました。この年の11月に、密閉型測定部を用いた初めての横風に関する風洞試験が行われました。以来、20年間にわたり横風試験は毎年行われています。

横風試験では、強風時に車両に働く空気力評価に必要な空気力係数が求められています。また、強風対策として設置される防風設備などのハード対策を行った際の空気力低減効果の評価にも活用されています。

ここでは、米原風洞の完成以前にまでさかのぼり、横風試験における風洞試験方法、空気力評価方法の変遷や最近の取り組み状況を紹介します。

横風の風洞試験方法

強風時に車両に働く空気力は、車両の形状と線路構造物の形状に依存します。車体に働く空気力と風速を関連づける空気力係数は、車両と線路構造物の模型を組み合わせた風洞試験で求められています。風洞試験では測定部内に車両と線路構造物模型を設置し風を

当て、車両模型一両分に働く空気力を内蔵した天秤^{びん}センサーによって測定しています(図1)。車両に働く空気力のうち、横力、揚力、モーメントを測定します。横力は車体の横方向に働く力で、とくに重要な成分です。揚力は車体を上に持ち上げる方向に働く成分、そしてモーメントは車体の前後方向の軸まわりに車両を転倒させる方向に働く成分です。測定した空気力の各成分は、風速の2乗に比例する形で一般的に表すことができ、それぞれの比例係数は順に、横力係数、揚力係数、モーメント係数と呼ばれ、総称して空気力係数と呼びます。

模型は実物大で行うことが理想ですが、車両長だけ考えても20mを超える模型で風洞試験を行うことは現実的ではありません。風洞試験では、通常、模型の閉塞率(☞参照)は5%以下とすることが望ましいといわれており、閉塞率が大きくなると精度の良い測定ができません。このため、一般的な横風試験では、実物の1/40程度の縮尺模型を使用します。このとき、対象の車両が在来線の場合、模型の長さは500mm程度になります。

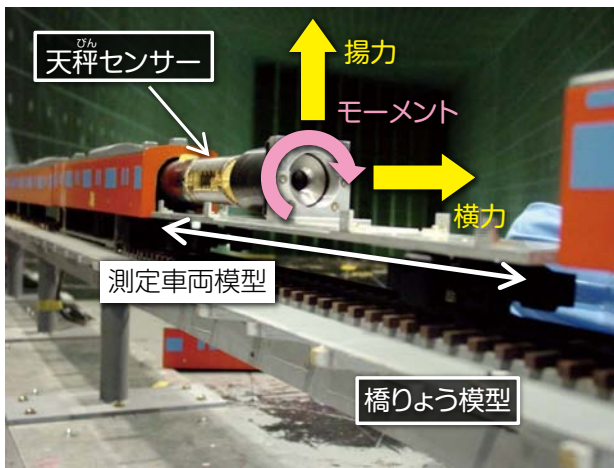


図1 車両模型に内蔵された天秤センサー

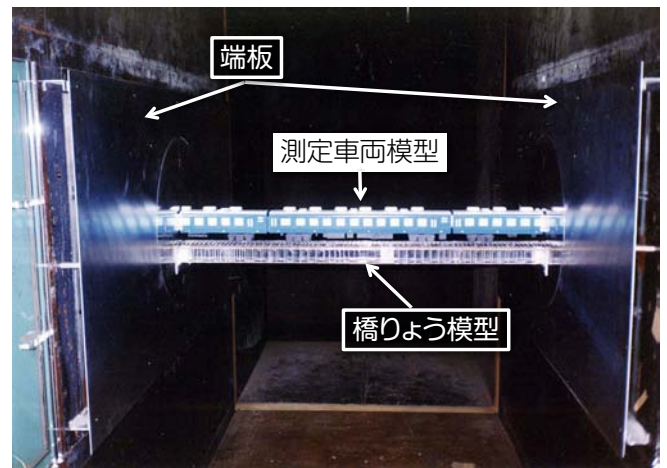


図2 風洞試験の様子

大型低騒音風洞完成以前

○国鉄時代の横風試験

過去の資料によると、鉄道車両の横風の風洞試験は、昭和30年代の高速車両の空力特性に関する研究¹⁾の一環として始められました。東京大学理工学研究所（現在の東京大学先端科学技術研究センター）の3m風洞（直径3mの円形断面）を借用し、縮尺1/40模型を用いて行われました。当初は、地面のない車両のみの試験でしたが、その後の試験では橋りょうなどの線路構造物模型上で空気力の測定を行っています。試験結果から、車両形状や線路構造物形状による空気力の違いが一部指摘されていますが、これらを系統的に扱った風洞試験は行われていません。なお、当時の旧国鉄技術研究所が所有する風洞の大きさは高さ0.8m×幅0.8m×長さ3mの密閉型です。横風試験に関しては、風洞断面積が小さいため、若干大きめの閉塞率の条件下で試験が行われていました。

閉塞率

風洞断面積に対する模型断面積の比。壁面で囲まれた風路内に模型を設置すると、模型による風路の閉塞効果と、模型下流の流れにも見かけの閉塞効果が生じ、風路の有効断面積が減少します。このため、壁面の影響のない条件に比べて、測定される空気力が大きめに評価されることが一般的に認められています。

○JR発足から米原風洞完成以前の横風試験

1986年に発生した余部事故の原因究明と適切な対策の樹立を目的に設置された余部事故調査委員会の活動の一環で行われた風洞試験により、車両に働く空気力は、車両形状はもとより、地上構造物の影響を受けることが明らかとなりました。

これを受けて、鉄道総研では、車両形状と線路構造物形状を分類し、代表的な車両と構造物を組み合わせた風洞試験を行いました。鉄道総研の小型風洞の密閉型測定部は、高さ0.6m×幅0.72m×長さ3.57mで、車両と構造物の模型を組み合わせるためには風洞断面積が小さいため、比較的断面積が大きな、石川島播磨重工業（現在のIHI）の構造物用風洞を借用していました。測定部（密閉型）の断面積は高さ2.5m×幅1.5mで、試験風速は15m/sです。風洞の気流は一様流で、主に中間車両を対象とし、車両に対して真横から風

が吹く場合（風向角90度）の条件で風洞試験を行いました（図2）。この試験では、車両まわりの流れを二次元的とし、模型端部の影響を排除する目的で、両側の側壁方向まで模型を並べ、端部に端板を設けて試験を行っています。

一般的に、航空機用や自動車用の風洞は、試験風速が高いけれども測定部が流れ方向に短く、構造物用の風洞は、測定部が長いけれども試験風速が低く、いずれも一長一短があります。車両に働く空気力は、風速の2乗に比例するため、試験風速が高い方が、より精度の高い測定ができるといえます。

風洞試験の結果、車両の走行安全性を検討するうえで最も重要な横力は、車両の屋根部が角張っているほど、橋りょうの桁の厚さが厚いほど大きくなることが明らかになりました。

○車両に対して吹く風

風はさまざまな方向から吹いてきます。走行している車両に対して吹く風は車両の走行速度と自然風を合成したものとなります。このため、先頭車両あるいは中間車両に対して、斜め前方から吹く風の空気力特性も調べる必要があります。IHIの風洞測定部は90度回転して、高さ1.5m×幅2.5mとしても使用することが可能です。この横

長の断面の特徴をいかして、風向角を変化させた試験を行いました。その結果、中間車両の場合は、風向角90度(真横)で最も横力係数が大きくなること、先頭車両の場合は、車両に対して斜め前方からの風向角で最も横力係数が大きくなることが明らかになりました。

大型低騒音風洞完成以降

○横風試験から見た米原風洞

米原風洞の密閉型測定部は、高さ3m×幅5m×長さ20mの大きさです。風洞風速は最高83m/s(300km/h)ですが、横風試験では通常20~30m/sの風速で試験を行います。IHIの風洞に比べて、測定部の断面積が4倍、風速が2倍になりました。

さきに、より精度の高い測定ができると書きましたが、良いことばかりでなく大変になったこともいろいろあります。横風試験では、側壁方向まで模型を並べる必要があり、模型の全長が長くなります。たとえば、風向角30度の条件では、全長約10mの模型が必要となります。このため、当初は模型の条件変更のための時間が増加してしまいました。

そこで、たとえば、模型部材の強度を上げ、固定するネジの数を少なくすること、あるいは、固定する順番によらず模型を設置できるように、固定ネジの間隔と種類を共通化すること、などといった、効率を考えた模型になるよう改善を進めました。また、組立ネジに木ネジが多く使用されていましたが、部材を壊してしまい反復使用に向きませんので、埋め込みナットを多用するようになりました。これにより、省施工と反復使用が可能となりました。これらの改善は、一朝一夕でできたわけではありません。模型製作会社との打ち合わせ、試作品による検討、など

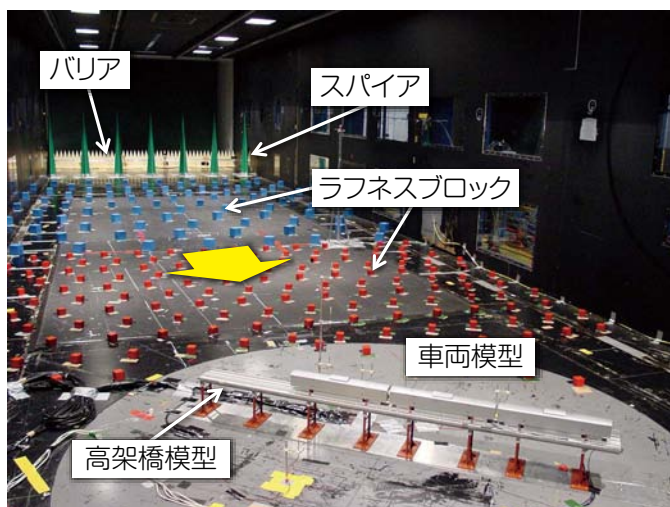


図3 自然風を模擬した風洞試験の様子

の試行錯誤の積み重ねによるものです。また、風速が速くなったため、剛性向上のために模型の固定方法や材料の強度も変更し、一部の模型部材には、木材やアクリルに代えて、アルミニウムやステンレスなどの金属材料も使用するようになりました。

○自然風を模擬した風洞試験法

ここまでの風洞試験では、主に一様流中の風洞試験で空気力を評価してきました。これは、一様流中の物体に働く空気力は、乱れのある自然風中で働く空気力よりも大きくなると考えられてきたからです。しかしながら、横風試験で空気力を精度よく評価するためには、地表付近の気流条件を適切に再現する必要があることが明らかになりました。

そこで、自然風の特徴を考慮した風洞試験方法を構築するため、北海道の強風地で実物大の車両および高架橋模型を建設した現地試験を行いました。実物大試験では、車両まわりの風と車両に働く空気力を約3年間にわたり観測しました。さらにこれにあわせて、自然風を模擬した乱流境界層生成に関する風洞試験方法を開発し²⁾、この気

流条件で実物大試験を可能な限り再現した風洞試験方法を検討し、実物大試験との比較検証を行いました(図3)。

自然風は風速が上空ほど速くなり、さらに乱れが大きい風という特徴があります。この特徴を風洞測定部内に再現するため、過去の研究を参考に、バリア、スパイア、ラフネスブロック(図3参照)を上流側に配置し、試行錯誤により、目標とする気流を生成する配置パターンを決定しました。ラフネスブロックなどは、全て手作業で配置していきますが、今では3時間程度で完了できます。

○空気力係数一覧表

さきに示したように、車両に働く空気力を精度良く評価するためには、車両と線路構造物を組み合わせた条件で空気力を評価する必要があります。しかしながら、車両形状や構造物形状は多種多様で、その全ての組み合わせについて風洞試験を行うことは現実的ではありません。そこで、代表的な車両形状と線路構造物形状を組み合わせ、横風試験を行いこれらの空気力係数を一覧表にまとめました³⁾。これにより、一覧表の中から、検討対象の線区を走行する車両と類似条件を選択すること

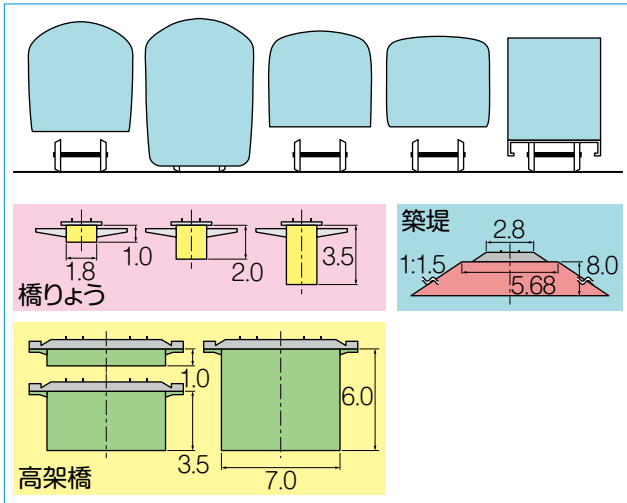


図4 車両形状と線路構造物形状

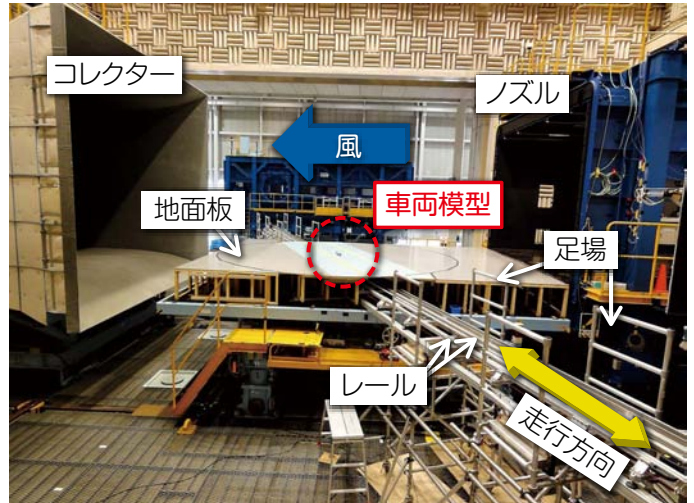


図5 車両模型走行装置を用いた風洞試験の様子

で、空気力係数の概略評価が可能となりました。車両形状は、空気力係数に最も大きな影響を及ぼすと考えられる屋根形状に着目して5種類を、線路構造物形状は、橋りょう（無道床）、高架橋および築堤に分類でき、さらに空気力係数に最も影響の大きい桁の厚さに注目して7種類の形状を選定しました（図4）。風洞試験では、さきに開発した乱流境界層を用いて空気力の評価を行いました。

○走行する車両の状況を風洞試験で再現する

横風により車両に働く空気力を精度良く評価するためには、より実現象に近い状況において空気力を評価することが大切です。ここでは、横風試験に関する最近の取り組みとして、静止車両模型を用いた風洞試験では再現できない車両と地面との相対運動の影響を評価するために開発した、車両模型走行装置⁴⁾を紹介します。

開発した装置（図5）は、陸上競技などの撮影で実績のあるカメラ用の走行装置を応用したもので、約20mの間を最高速度10m/sで走行できます。また、風洞吹出口（ノズル）に対する角度を変更するためのターンテーブルも備えており、風洞風速や車両模型の走行速度をさまざまに変化させることで、車両に対する風の角度を広い範囲に設定することが可能です。風洞試験は、開放型測定部で行います。密閉型測定部の前方胴を高さ3m×幅5mの吹出口として使用し、その下流の支持台車上に地面を模擬する地面板を設け、走行装置が吹出口を横切るように設置しました。

これまでに、走行装置の基本性能の確認と、平地上を走行する角柱形状の車両模型を用いた基礎検討を終えました。今後は、より現実に近い状況を再現する風洞試験方法を検討していきます。

おわりに

横風に関する課題は、鉄道の安全性評価にかかわる重要な項目の一つです。風洞試験は、実車のおかれた環境のなかから抽出された限られた条件のもとで行われていますが、現在においても、最も重要な研究ツールの位置づけであることに変わりありません。引き続き、米原風洞を最大限に活用し、実車のおかれた状況をさらに精緻に再現できるような風洞試験方法の提案や、空気力評価精度の向上を目指した研究を推進していきます。関係者の皆様におかれましては、変わらぬご支援をよろしくお願いいたします。[RRR]

文献

- 1) 長谷川康, 岩崎一夫, 井合滋, 高林盛久, 石野竹治, 福地合一地: 電車模型風洞試験報告(第2報), 鉄道技術中間報告, 7-132, 1956
- 2) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之: 自然風の乱れを考慮した風洞試験, RRR, Vol.60, No.8, pp.4-7, 2003
- 3) 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
- 4) 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

☞ バリア, スパイア, ラフネスブロック

自然風の特性を再現した気流を作るため、風洞床面に設置する凹凸物として一般的に用いられるものです。バリアは、高さ方向の広い範囲に比較的大きな乱れを作り出し、ラフネスブロックは、主に床面付近の乱れを促進させます。また、スパイアは、高さ方向の風速分布形状の制御に用いられます。