

車両が横風から受ける力を測る

種本 勝二

環境工学研究部
(車両空力特性研究室 主任研究員)

鈴木 実

同
(同 主任研究員)



たねもと かつじ



すずき みのる

はじめに

強風時の列車の安全な運行や適切な運転規制のためには、横風により車両に働く空気力を精度よく評価することが大切です。そのために、米原の大型低騒音風洞を用いた横風の風洞試験を継続して実施してきました。さらに、車両に働く空気力に対する線路構造物などの影響を明らかにしました。また、現在は、車両に働く空気力に及ぼす走行の影響をさらに精度よく評価するため、走行模型を用いた風洞試験を実施しています。ここでは、最近の大型低騒音風洞で実施している横風に関する試験の概要や研究の成果について紹介します。

強風時の列車の安全を考える

強風時の列車の安全を考える場合、車両が転覆に至る風速を知ることが重要です。これを転覆限界風速と呼びます。転覆限界風速には、車両重量や車体側面積などの車両諸元、車両の空気力学的形状、風の大きさなどの多くのパラメータが影響します。これらの中で他のパラメータと比較して転覆限界風速に大きく影響するのは、風が車両に与える外力です。これを空気力と呼びます。強風による列車の脱線転覆事故を防止し、安全かつ適切な運転規制風速を設定するためには、空気力を精度良く評価することが重要です。そのための有効な手段が、横風を模擬した風洞試験です。

横風を模擬する風洞試験

大型低騒音風洞における横風の風洞試験の方法について、標準的な方法を簡単に説明します。

風洞試験は風洞内に車両などの縮尺模型を置いて風を当てます。横風の風洞試験では幅5m×高3m×長20mの密閉型測定部を使用し、通常は1/40の縮尺模型を用います。車両に当たる風は風洞測定部内の気流の性質によって、一様流と乱流に大別されます。一様流は風の乱れが少ない定常な風であり、車両の基本的な空力特性を明らかにするこ

とができます。特に、線路構造物が地面に近い所にある場合や自然風の乱れの影響を考慮する場合には乱流境界層を用いています。試験風速は主に30m/sとしています。

車両に働く空気力を知る

車両は、橋梁・高架橋・盛土・平地などの線路構造物上を走行します。強風下で車両へ働く空気力は、車両の形状だけではなく、橋梁や盛土などの線路構造物の形状にも大きく影響されます。また、車両に働く空気力は風の向きによっても変化します。これらの影響を把握するために、図1に示すように、様々な線路構造物模型の上に車両模型を固定し、模型全体を回転させて風を当て、模型車両に内蔵した天秤センサーで車両に働く空気力を測定します。

構造物まわりの流れを見る

運転規制を行う上で、風速計の設置位置も重要です。現地に設置されている風速計で風速を観測する場合、風速計の設置位置によっては平均風速が変わったり、変動が大きくなる場合が考えられます。そこで、風洞試験で構造物まわりの風速分布を測定することにより、観測風速の適切な評価を行うことができます。図2に示すように、特に、盛土上では風速と風向が違うことが分かります。また、防風

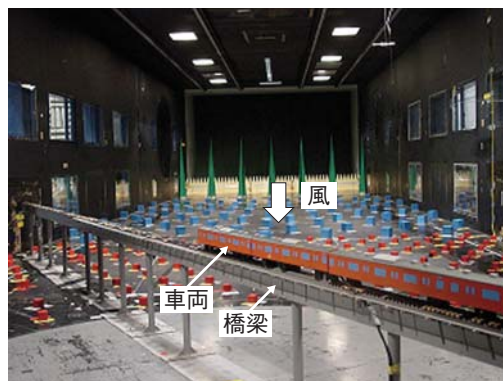


図1 車両に働く空気力測定の様子(乱流境界層の場合)

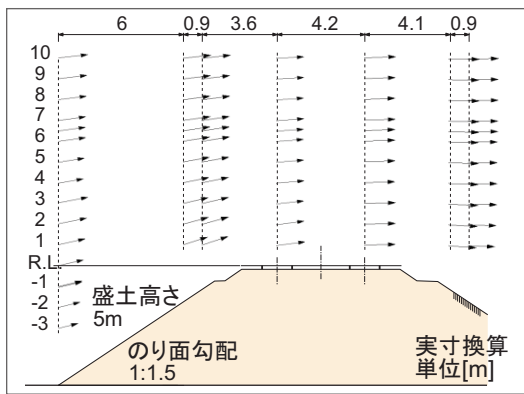


図2 風速分布の例(風洞試験結果)

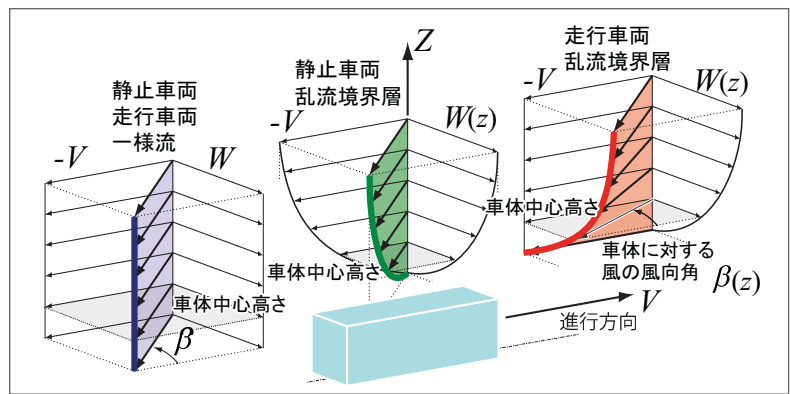


図3 走行車両に対する風速の鉛直分布(真横からの自然風の場合)

柵の前後の風速を測定し、防風柵の減風効果を知ることができます。

走行する車両に吹く風

自然風下を走行する車両を模擬する風洞試験方法について考える場合、色々な影響につ

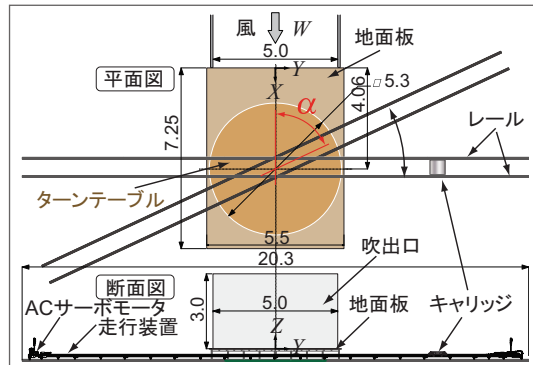


図4 走行装置の配置(単位m)

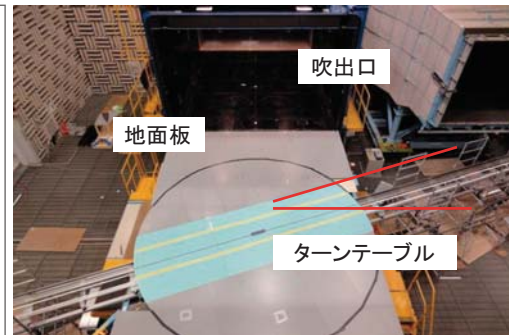


図5 風洞試験の様子(真横から20度回転した状態の例)

いて検討する必要があります。ここでは、自然風と車両の走行速度と地面との関係について説明します。

まずこれらの関係を簡単にするため、図3の左側の関係図に示す車両が平地上の一樣流の中を走行している場合、つまり、地面があり境界層がない一樣流のような状況を想定してみます。全く風が吹いていない中を速度 V で走行する車両には、相対的に正面から V の風 ($-V$) が吹いています。このとき風速 W で風向角 90 度の真横からの自然風が吹いてくると、車両には自然風と車両の走行速度を合成した風速 U で風向角 β の風が当たることになります。この風を走行速度が 0 の静止条件で再現してみると、固定した車両に、風速 U の風を車両に対して角度 β で当てた場合と同じになります。この条件を風洞試験で実現するのは簡単です。

一方、地面近くを走行する現実の状況を考えてみます。図3の中央の関係図に示すように、地面付近で吹く自然風には、上空ほど風速が速くなる風速分布と変動する成分を含んでいるという特徴があります。この自然風に走行に伴う風 ($-V$) が合成されると、図3の右側の関係図のように、上下方向で風速ならびに風向が変化する捻れた境界層になります。この状況を車両が停止した条件で再現するために、図3中央の乱流境界層の風を斜めから当てても、図3右側に示した走行に伴う影響を忠実に再現できません。この例のように、地面の境界層の影響を考慮すると、静止模型と

走行模型では走行に伴う風の条件が異なります。より正確に現象を捉えるためには、車両と地面との相対的な運動の影響を考慮した風洞試験を行う必要があります。

さらに、車両に働く空気力は、車両形状のみならず走行する線路構造物の形状にも依存するので、線路構造物上を走行する車両のまわりの流れは、図3右側の関係図よりもさらに複雑になります。

走行する車両に働く横風を模擬した風洞試験

走行車両模型を用いた風洞試験では、空気力の測定精度や条件設定などに多くの課題があり、実施例が少ないのが現状でした。しかし、空気力の評価精度の向上が求められるようになり、車両模型走行装置を用いた風洞試験の研究を始めました。現在開発を進めている横風風洞試験用の車両模型走行装置の概略と、この装置と基本断面の車体模型を用いた走行する車両まわりの車体表面圧力測定について紹介します。

車両の走行を模擬した風洞試験では、開放型測定部を用いています。図4および図5に示すように、幅 5m × 高さ 3m の吹出口の下流に、地面を模擬する地面板を設け、横風試験用の車両模型走行装置(以下、走行装置)が風洞吹出口を横切るように設置しました。走行装置は全長約 20m の直線レールの装置で、レール間に収めたタイミングベルトをレール端部に設置したACサーボモータで駆動

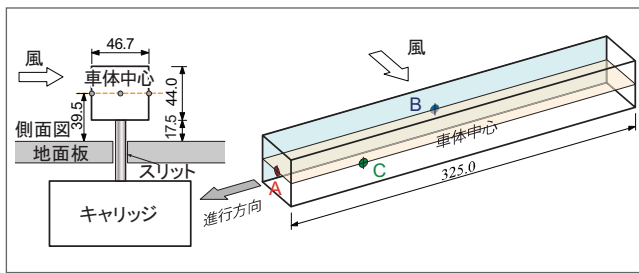


図6 車両模型と圧力測定孔の位置(単位mm)

させ、タイミングベルトに接続したキャリッジを移動させるシステムです。キャリッジに固定した模型は、レール両端側のそれぞれ5mの加減速区間と、吹出口の前を通過する間の約7mの等速区間との、合計17mのストロークで往復走行することが可能です。そして、吹出口を通過する際の車両模型の走行速度 V は、0.01m/s単位で一定速度となるように調整でき、最高10m/sに設定することができます。走行装置の起動・停止、さらに最高速度や加速度などの走行パターンの変更などをパソコンから行なうことができます。また、ACサーボモータのエンコーダ出力でキャリッジの位置と速度を記録することができ、走行パターンを確認することができます。

走行するキャリッジが流れに影響を及ぼすことを避け、地面を模擬するために設置した地面板の上を車両模型が走行できるように、走行装置を地面板の下部に配置し、図6に示すように、車両模型をキャリッジに固定する直径8mmの支柱が通過できるように、地面板に幅15mmのスリットを設けました。

地面板にはターンテーブルが備えられており、風洞風速に対する走行装置の風向角 α を真横の90度から、最大で25度($\alpha = 65$ 度)回転させることができます。風向角 α が65度のとき、車両模型の走行速度 V と風洞風速 W を変えることにより、車体中心高さレベルの位置で考えた場合の車両に対する風向角 β_c が30度～130度の範囲の測定を行なうことが可能です。

走行車両模型が受ける圧力

図6に示すように、走行装置で使用した車両模型は直方体で、一両相当の車両を縮尺1/60で単純化しました。車体の中心位置で水平断面上の模型側面に、車体表面の圧力分布測定用の圧力孔を設けました。最大寸法15mmの小型の圧力センサを車両模型内に設置して圧力を測定し、車両底面から電源および信号ケーブルを引き出し、キャリッジに内蔵したデータロガーで記録しました。このデータロガーは、無線方式の外部トリガにより、サンプリング周波数10kHz、約8秒間、12chのアナログ信号を収録できます。計測系はデータロガーのほか、電源バッテリー、無線受信

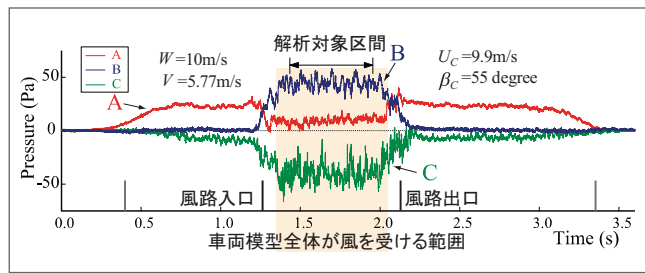


図7 車体表面圧力の時刻歴の例

機などの全てをキャリッジ上とその内部に納め、地上側との縁を切りました。さらに、地上側のレールに取り付けた複数の反射板を、車上側に取り付けたレーザーセンサで読み取り、圧力と同時にこれを記録することにより、車体の表面圧力と、車両位置および走行速度を対応付けられるようにしました。

走行装置の安全性や耐久性を確認した後、走行時の最も基本的な条件である、風洞に対する風向角 α が90度、走行速度 V が0～10m/sの範囲で、車両模型まわりの表面圧力分布を測定しました。

車体表面圧力の時刻歴の例を図7に示します。この例では、車両模型は、走行開始後0.7秒で一定速度となり、1.2秒に風路入口付近を、2.1秒に風路出口付近を走行し、3秒には減速し始めて、3.6秒に停止しました。このときの風洞風速 W は10m/s、走行速度 V は5.77m/sでした。

車両の先頭面中央位置Aの圧力の時刻歴を見てみると、まず走行に伴う進行方向正面($\beta_c = 0$ 度)からの風を受けて、等速走行になるまで上昇しました。そして、風路に突入後に、真横($\alpha = 90$ 度)からの風を受けて風向角 β_c が約55度に変化して圧力は低下しました。車両風上側面中央位置Bの圧力は、風路に突入するまでほぼ0で、風路内突入後に急激に上昇しました。車両風下側面位置Cの圧力は、風路内突入後の1.4秒付近で急激に減じました。この風下側の圧力Cは、先頭部Aあるいは風上側Bに比べて、風路を通過する際の圧力の変動成分が大きいことがわかります。なお、同一条件による複数回の測定や、条件を変えた測定結果について、レーザーセンサの走行位置・速度と圧力の時刻歴を調べ、風路内で車両模型全体が風を受ける範囲よりも内側となる風洞中央部の3mの区間では平均値が安定した状態であることが確認できました。

今後、この平均値が安定する区間のデータと静止車両で風向角を変化させた試験結果を比較して、車両まわりの圧力分布に及ぼす走行の影響を把握する予定です。

風から列車を守る

日本は、冬季の季節風や夏季の台風に加え、地形に起因した局所的な強風地域が各地に存在し、鉄道沿線が強風に

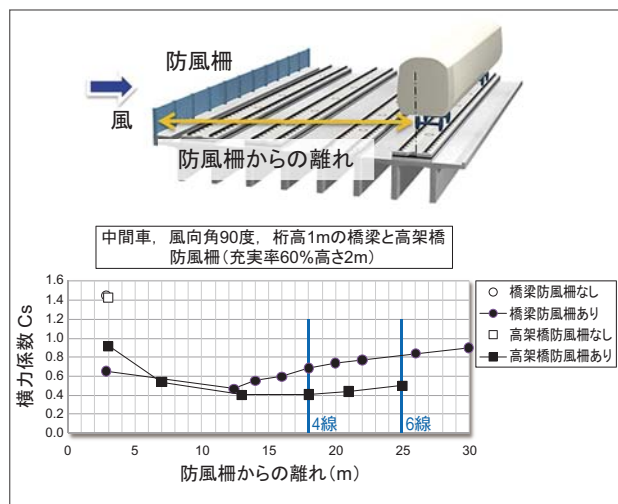


図8 防風柵からの離れと横力係数の関係

曝される機会が多いのが特徴です。風への対策には、防風柵・防風壁などを沿線に設置するハード対策と、列車の速度を制御する徐行や停止といったソフト対策があります。最も現実的なハード対策は防風柵の設置であり、強風地域の27箇所に設置されています。防風柵の設置によって、転覆限界風速を高くして風に対する耐力を向上できること、すなわち、車両に働く空気が低減することを風洞試験により検討することができます。

防風柵の効果と減風域に関する風洞試験

防風柵の設置効果を検証する風洞試験は、強風による列車脱線転覆事故が起こった単線橋梁や単線盛土などの特定の箇所を対象とすることが主でした。しかし、現在では、強風に対する安全性と定時性を確保するため、主要幹線の一般区間に設置する防風柵の検討が行われています。そこで、これまで検討されてこなかった、複々線などの幅が広い高架橋に防風柵を設置した場合の効果を風洞試験で検証しました。この試験では、実物高さ2mで充実率60%の防風柵を高架橋に設置し、防風柵からの離れと車両に働く空気力の関係を求めました。対象車両は通勤型車両の中間車で、橋梁上と高架橋上の2条件を想定しました。車両の転覆に最も大きな影響を及ぼす横力係数と防風柵からの離れの関係を図8に示します。横力係数は6線に相当する離れた位置においても、防風柵がない場合の4割～6割程度に低減していることが分かります。

新しくなった余部橋りょう

次に、最近大型低騒音風洞において強風対策の風洞試験が実施された山陰線の新余部橋りょうの例を紹介します。

余部橋りょうは明治45年に国内最大規模の鋼トレスル橋として日本海の荒波を眼下に見下ろす地点に架橋され

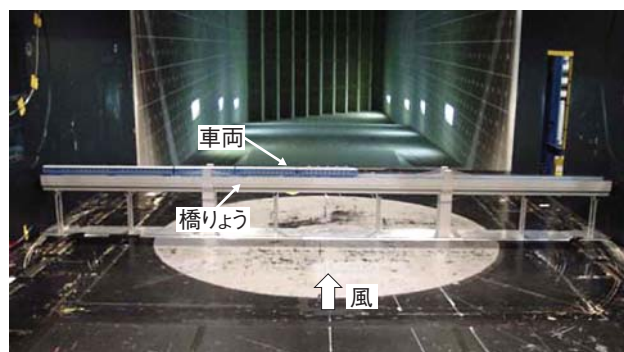


図9 新余部橋りょうの風洞試験の様子



図10 新余部橋りょう (JR西日本山陰線)

ました。この鉄橋は地上から約40mの高さに位置し、海からの風に曝されることもあり、強風により列車運行の安全性と定時性の両立が時に困難となる課題がありました。このため、兵庫県をはじめとした沿線自治体とJR西日本では新橋の設置を計画し、大型低騒音風洞において図9に示す横風風洞試験を実施しました。その結果をもとに防風壁の高さ、転覆限界風速、規制用風速計の設置位置を検討し、平成22年8月12日に新しい余部橋りょう(エクストラードPC橋)が完成しました(図10)。風速計による風監視と橋梁両側のレールレベルからの高さ1.7mの透明板防風壁が列車の安全を守っています。

おわりに

横風による車両の空力特性に対する風洞試験は、自然風の乱れの影響、地表面の境界層の影響と走行速度の影響などを考慮して実施しています。今後は、車両へ働く空気力の小さい車両形状を提案するとともに、安価で低減効果の高い防風柵などの検討を行う予定です。これらにより、強風時の安全かつ適切な運転規制方法に役立てたいと考えています。

最後に、新余部橋りょうの風洞試験に関してご協力いただいたJR西日本福知山工事所の関係各位に感謝の意を表します。[RRR]

文献

- 1) 今井ほか：列車を強風から守る 最前線(6), RRR, Vol.67, No.11, 2010