

車両模型走行装置を用いた横風空気力特性風洞試験

環境工学研究部 車両空力特性研究室
主任研究員 鈴木 実

1. はじめに

強風時の鉄道車両の走行安全性を検討するために必要となる空気力は主に風洞試験で評価されており、これまで一様流中ならびに乱流境界層中で線路構造物模型上の静止車両模型を用いた風洞試験で行ってきた^{1),2)}。しかしながら可能な限り実現象を捉えて空気力を評価するためには、車両と地面との相対運動を考慮するという課題³⁾が残されている。そこで、鉄道総研では、空気力係数の評価精度向上を目的に、横風風洞試験で車両が走行する状況を再現する(図1)ための車両模型走行装置(以下、走行装置)を新たに開発し、車両に働く空気力に及ぼす走行の影響を評価する風洞試験を行っている⁴⁾。風洞試験では、縮尺1/60相当の車両模型の走行速度、風洞風速や風洞吹出口に対する走行装置の設置角度等を変えて、車両の車体表面圧力分布を測定し、車両に働く空気力の中で車両の転覆に最も大きな影響を持つ横力を評価した。本発表では、その結果について紹介する。

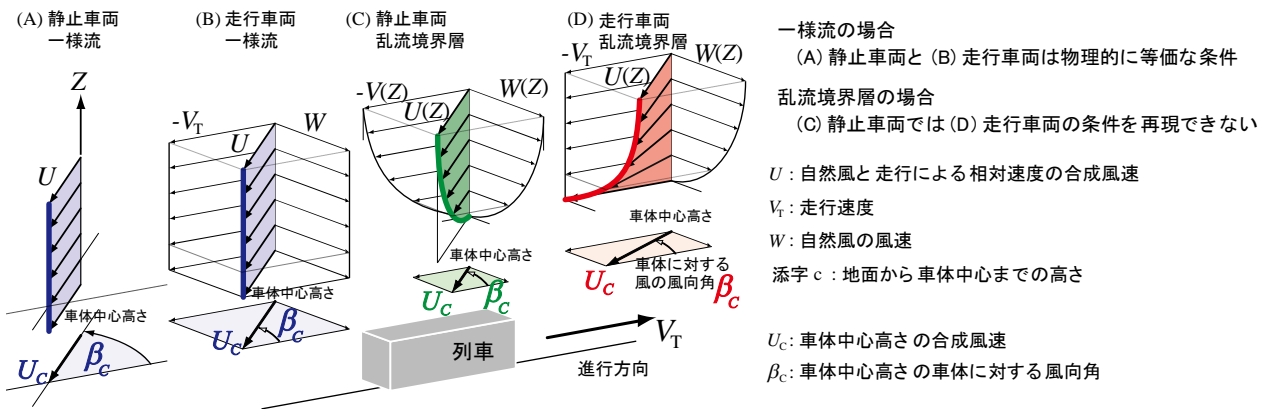


図1 車両に対する風速の鉛直分布

2. 風洞試験方法

2.1. 車両模型走行装置

風洞試験は、鉄道総研の大型低騒音風洞(滋賀県米原市)の開放型測定部で行なった。線路構造物等のない平地上を走行する車両を想定し、幅5m×高さ3mの風洞吹出口下流に地面を模擬する地面板を設け、走行装置が吹出口の4.06m下流を横切るように設置した(図2)。陸上競技の選手を追うカメラ用の装置を風洞試験用に改造した走行装置は、全長が約20mの直線レール(2m単位で分割可能)で、この中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させ、タイミングベルトに接続したキャリッジ(長さ0.6m×幅0.4m、質量約18kgの走行部)を走行させるシステムである。キャリッジは、レール両端側それぞれ5mの加減速区間と、吹出口下流を通過する間の約7mの等速度区間との、合計17mのストロークで往復走行できる。キャリッジの速度や加速度などの走行パターンの設定はパソコンから行い、走行速度 V_T は0.01m/s単位で設定可能で、等速度区間の最高速度は10m/sである。地面板には幅15mmのスリッ

トを設けてあり，車両模型をキャリッジに固定する支柱（ $\phi=8\text{mm}$ ）が通過できる。地面板にはターンテーブルが備えられており，風洞吹出口に対する走行装置の設置角度 α を真横の90度から±25度程度回転でき，風洞風速 W_0 ，設置角度 α ，走行速度 V_T を調整することで，同じ車体中心高さの風向角 β_C の風（車体中心高さの風速 U_C ）の条件が設定できる。

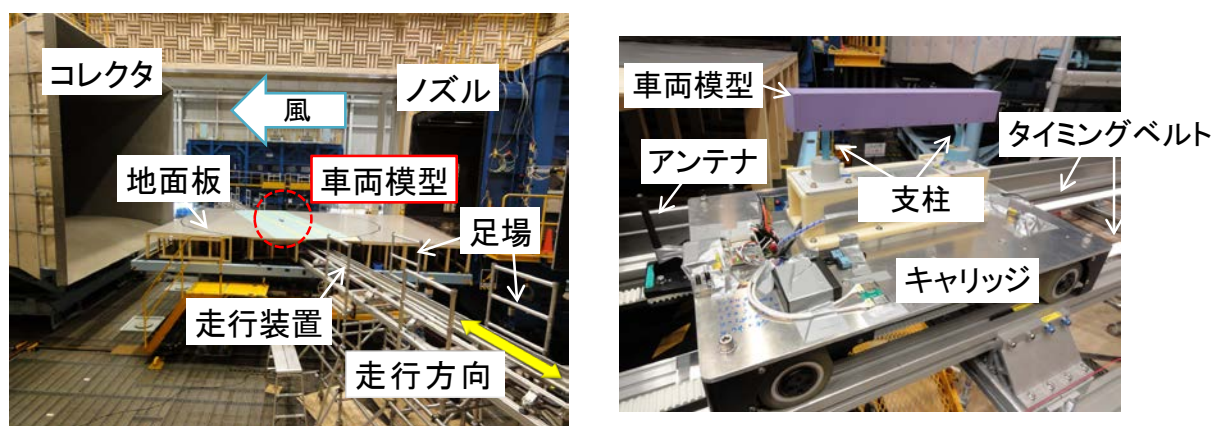


図2 風洞試験の様子（左：全体側面，右：キャリッジと車両模型）

2.2. 車両模型と圧力測定方法

車両模型（図3）は縮尺1/60相当の単純化した直方体（長さ325mm×高さ44mm×幅46.7mm，質量約0.25kg）とし，合成木材を材料として製作した。車体模型表面上の車体中心高さレベル h_C （地面からの高さ39.5mm）の水平断面上に，風上側3点，風下側15点，先頭側と後尾側にそれぞれ1点ずつ，合計20点の圧力孔を設けて圧力分布を測定した。

圧力計とデータロガー（サンプリング周波数10kHz，収録時間約8秒）は小型軽量化のため自作した。圧力測定用の導圧管の長さを極力短くするため圧力センサは車両模型に内蔵し，センサの電源線と信号線は，キャリッジの内部等に設置した電源バッテリーとデータロガーに結線した。これらの計測装置は地上側とは縁が切れており，無線によるトリガ計測が可能である。差圧計の基準圧は，キャリッジ内に固定した魔法瓶内部の圧力とした。模型の位置検知については，キャリッジに取り付けたレーザセンサで地上側に取り付けた複数の反射板を走行時に読み取り，圧力波形と同時にこれを記録することで，車体表面圧力と車両位置ならびに走行速度の対応付けが可能である。圧力測定は，走行開始前の車両が吹出口正面の外（風の当たらない位置）で停止している状態で計測を開始し，1秒程度経過した後に，キャリッジの走行を開始した。計測開始後0.2秒間の停止状態の圧力をゼロ点として差し引いた電圧を，あらかじめ校正作業で求めた圧力校正値に基づき圧力値に変換した。

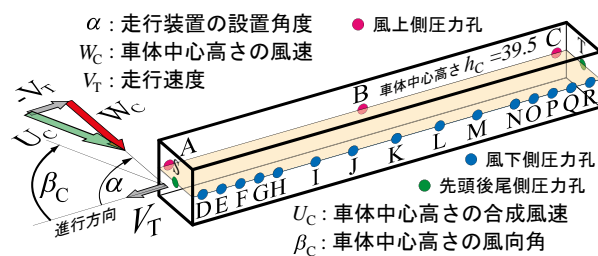


図3 車両模型と圧力測定孔

2.3. 試験条件

風洞風速 W_0 はスリットの上流7.01m，高さ1.5mに設置したピトー管で10m/s～20m/sに設定し，設置角度 $\alpha=90\sim70$ 度の条件で，走行速度 V_T を変化させることで車体中心高さの風向角 β_C を幅広く（31度～130度）設定できる。このとき，地面板のターンテーブル中心上には境界層厚さが約120mmの自然に発達する乱流境界層がある（図4）。ここで，車体中心高さの風速 U_C （風洞風速

の車体中心高さレベルの時間平均風速 W_C と走行による相対速度 $-V_T$ の合成風速) を代表風速, 車体高さ h を代表長さとしたレイノルズ数 Re は 4×10^4 程度である。

3. 風洞試験結果

風洞風速 $W_0=10\text{m/s}$, 車両模型の走行速度 $V_T=5.77\text{m/s}$, 走行装置の設置角度 $\alpha=90$ 度の条件で測定した車体表面圧力波形の時刻歴の例を図5に示す。走行パターンは, 0.7 秒後に一定速度となり, 1.3 秒後に風路入口付近, 2.1 秒後に風路出口付近, そして3 秒後に減速を開始し,

3.6 秒後に停止する条件である。先頭部 **S** の圧力は, 走行に伴う進行方向 $\beta_c=0$ 度からの風を受け等速走行になるまで上昇し, 風路内突入後, 真横からの風を受けて風向角 β_c が 55 度に変化して圧力は低下する。風上側中央 **B** の圧力は, 風路に突入するまではほぼ 0 で, 突入後に急激に上昇する。風下側 **H** の圧力は, 先頭部からの剥離の影響により, 走行開始後, 徐々に負圧が大きくなり, 風路内突入後, 1.4 秒まで急激に圧力は低下する。圧力波形より, 風下側 **H** の圧力は, 先頭部 **S** あるいは風上側 **B** に比べて風路内走行時に変動成分が大きいことがわかる。

測定した圧力は, 風洞吹出口正面端部のせん断層の影響による圧力変動が大きな区間を除き, 時間的に平均した値が安定するとみなせる測定部中央 3m の間を解析範囲として平均圧力を求め, 基準風速を車体中心高さの風速 U_C とした平均圧力係数 (以下, 単に圧力係数) を求めた。さらに, 風向角ごとに求めた各圧力孔位置の風上側および風下側の圧力係数それぞれを直線補間し, 台形公式で積分して横力係数を求めた。

求めた圧力係数の中からここでは, 風洞風速 $W_0=10\text{m/s}$, 車体中心高さの風向角 $\beta_c=39$ 度の結果を示す (図6)。条件はすべて, 異なる走行装置の設置角度 α に対して走行速度 V_T を調整することで設定でき, $V_T=0$ は静止の条件である。圧力分布は, 走行速度 $V_T=10\text{m/s}$ の条件で全体的に正の方向に 0.1 程度オフセットされているものの, 先頭から後尾にかけて分布は良く一致している。また, 静止条件 ($V_T=0\text{m/s}$) と走行条件の3条件を比較すると, 風下側車両後端付近に若干の差異が見られるが, その差の絶対値は 0.14 程度である。また, 同じ点で取得された4条件の圧力係数の最大と最小の差は $0 \sim 0.16$ であった。なお, この時の横力係数の標準偏差は 0.02 , 最大と最

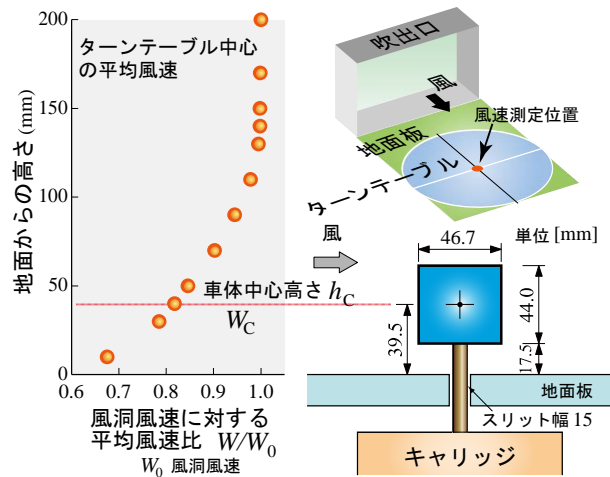


図4 車両模型と風速分布

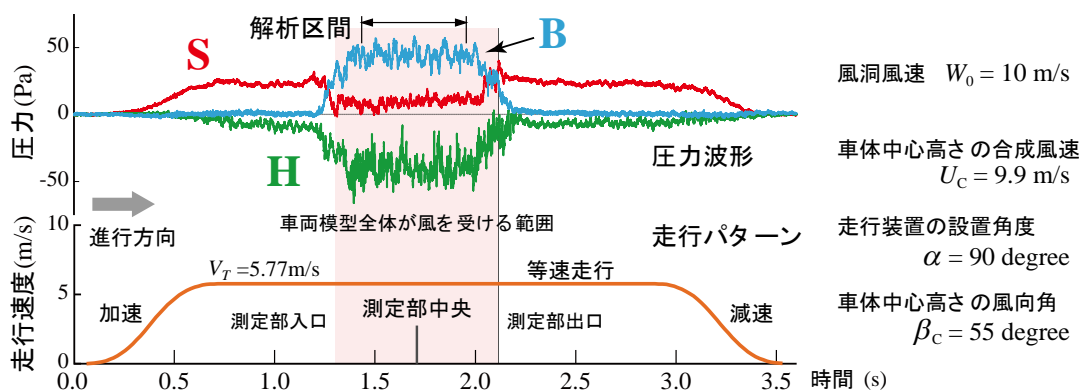


図5 車体表面圧力の時刻歴の例と走行パターン

小の差は0.05であった。

次に、それぞれの圧力孔で取得される圧力係数のばらつきについて検討するため、風洞風速 $W_0=10\text{m/s}$ 、走行速度 $V_T=4.28\text{m/s}$ 、車体中心高さの風向角 $\beta_C=55$ 度の条件で9回測定を行った。その結果、ばらつきを表す一つの指標の標準偏差は0.03~0.04、最大と最小の差は0.07~0.12であった。従って、今回の試験における圧力係数のばらつきの範囲は、概ね±0.1程度にあると言える。なお、この時の横力係数の標準偏差は0.01、最大と最小の差は0.03であった。

最後に、車体中心高さの風向角と圧力係数から算出した横力係数の関係を示す。なお、風洞風速の違いの影響は小さいため、ここでは $W_0=10\sim 20\text{m/s}$ の範囲で行なった全ての結果を示す。走行時の横力係数は風向角 $\beta_C=90$ 度付近を中心に対称で、60度~120度付近では平坦な中間車に近い分布となっている。ここで、一般的な先頭車では、斜め前方からの風向角で横力係数は最大となる傾向がある。停止時の横力係数は31度~90度の間のデータであるが、風向角に対する横力係数の分布は走行時と同様な傾向を示し、全体的によい一致が見られる。

以上により、気流条件が風洞床面に自然に発達する乱流境界層で、線路構造物の無い平地上を走行する角柱形状の車両模型の場合、横力係数に及ぼす走行の影響は小さいことが確認された。

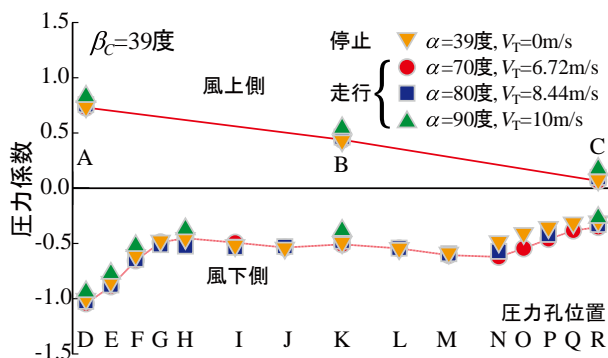


図6 異なる α で同じ β_C となる条件

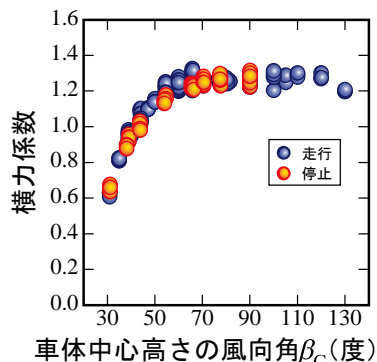


図7 圧力分布から求めた横力係数

4. おわりに

横風試験用の車両模型走行装置と単車の角柱型車両模型を用いて車体表面圧力分布を測定し、車両に働く横力を評価した。現在、今回の基礎的条件の検討からさらに発展させて、気流を乱れの大きい乱流境界層、車両形状を屋根部に丸みのある断面、線路構造物上を走行する場合とするなど、より現実に近い状況を再現するための風洞試験を進めている。

参考文献

- 1) 種本勝二, 鈴木実, 前田達夫: 横風に対する車両の空気力学的特性風洞試験, 鉄道総研報告, Vol. 13, No. 12 (1999), pp.47-52.
- 2) 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 (2013), pp. 47-50.
- 3) Baker, C. J.: Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.24 (1986), pp.227-251.
- 4) 鈴木実, 種本勝二: 横風風洞試験用の鉄道車両模型走行装置, 日本風工学会誌, Vol.36, No.2 (2011), pp.185-186.