

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

鈴木 実*

Method of Wind Tunnel Test on Aerodynamic Characteristics of Vehicle under Cross Wind by using Moving Model Rig

Minoru SUZUKI

In order to evaluate a running safety of railway vehicles under strong winds, wind tunnel tests were executed under the approximately actual conditions in consideration of the influence of the velocity profile of a ground boundary layer and the effect of vehicle motion relative to the ground using a newly developed moving model rig. The model vehicle with 1/60th scale moves along a 20 m linear guide rail placed in front of a wind tunnel nozzle. The model vehicle runs at speeds of up to 10 m/s and the wind velocity is between 10 m/s to 20 m/s. We successfully measured steady surface pressures on the running vehicle surface and evaluated running effects on characteristics of aerodynamic forces acting on the vehicle model under cross winds within the boundary layer developed on the level ground along the floor of the test section.

キーワード：風洞試験，模型走行装置，横風，車体表面圧力，平地

1. はじめに

強風時の鉄道車両の走行安全性を検討するうえで考慮すべき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) 4)}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，車両が走行する状況を再現する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横風風洞試験を行っている⁵⁾。この風洞試験では，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。

本稿では，その結果について報告する。

2. 横風に対する風洞試験方法

強風時に走行する車両の状況を風洞内で再現する方法を検討するため，まず，地面の影響を考慮しない一様流の場合を考える。

図 1 (B) に示すように，一様流 W が吹いている中で速度 V_T で走行する車両に対して吹く風は，風速の大きさが U_C ，車両に対する風向角が β_C となる。この状態を静止模型の風洞試験で再現するため，図 1 (A) に示す

ように，静止車両に対して風速の大きさが U_C で，風向角が β_C となるように設定すれば，静止模型と走行模型は物理的に等価な条件といえる。

一方，地面境界層の影響を考慮する場合は，一様流とは状況が異なる。自然風には地面からの高さ Z に応じた風速分布があるため，静止車両に対して自然風を模擬した風の乱流境界層で風洞試験を行うと，静止車両に対して吹く風の分布は，図 1 (C) に示すように，風速の大きさが $U(Z)$ で風向角が β_C となる。これは，図 1 (D) に示す走行車両に対して吹く風の分布 ($U(Z)$ および $\beta(Z)$) とは異なり，物理的に等価な条件とはいえない。実際に車両に対して吹く風 (図 1 (D)) は，走行に伴う風 $-V_T$ と自然風 $W(Z)$ が合成された風で，鉛直方向で風速・風向が変化するねじれた境界層になっている。このため，より正確に現象をとらえ空気力を評価するためには，車両と地面との相対的な運動の影響を考慮する必要がある。ここで，車両に対して吹く風がねじれた境界層になる場合，上述したように地面からの高さにより風速と風向角が異なるため，本稿では地面からの高さとして車体中心高さを基準に，この高さレベルの風速 W_C と走行速度 V_T から合成される風速 U_C と風向角 β_C で整理する。

走行の影響をより厳密に考慮して風洞試験を行なうためには，風洞内に固定した橋梁などの線路構造物に対して自然風（自然風を模擬した乱流境界層）が吹く状態で，構造物上を走行する車両模型の空気力を評価すれば良いことになるが，鉄道車両の走行模型を用いた風洞試験^{3) 4)}には，空気力の測定精度や条件設定に多くの課題があり，これまで実施例が少ないのが現状である。こうした状況のなか，より精度の高い空気力の評価が求められる

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

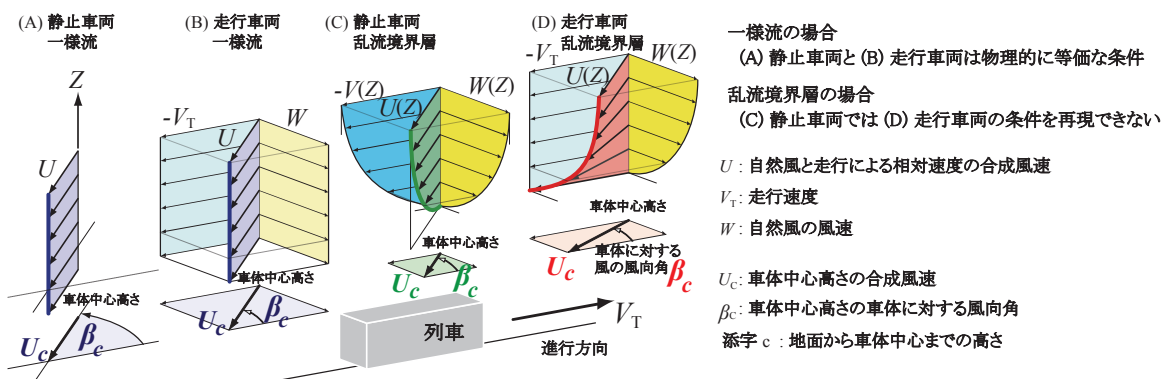


図1 車両に対する風速の鉛直分布

るようになり、鉄道総研では、米原風洞用に車両模型走行装置を開発し、走行車両模型を用いた風洞試験方法の研究に取り組んでいる。

3. 試験方法

3.1 車両模型走行装置

風洞試験は、開放型測定部で行った。図2、図3に示すように、幅5m×高さ3mの風洞吹出口(ノズル)下流に、地面を模擬する地面板を設け、 $X=4.06m$ の位置に走行装置が吹出口を横切るように設置した。走行装置は全長約20mのリニアガイドレールで、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し、タイミングベルトに接続したキャリッジ(車両模型を固定する走行部)を移動させるシステムである。キャリッジの寸法は長さ600mm×幅400mmで、質量は約18kgである。なお、開発した走行装置は、陸上競技あるいはスピードスケート等の撮影で実績のあるカメラ用の走行装置を、米原風洞用の車両模型走行装置

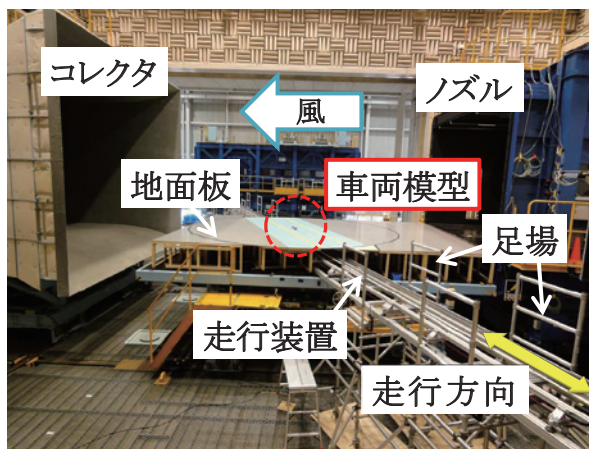


図2 風洞試験の様子

として改造した組立式(2m単位で分割可能)の装置である。

キャリッジに固定した車両模型は、レール両端側それぞれに5mの加減速区間と、吹出口の前方を通過する間に約7mの等速度区間の、合計17mのストロークで往

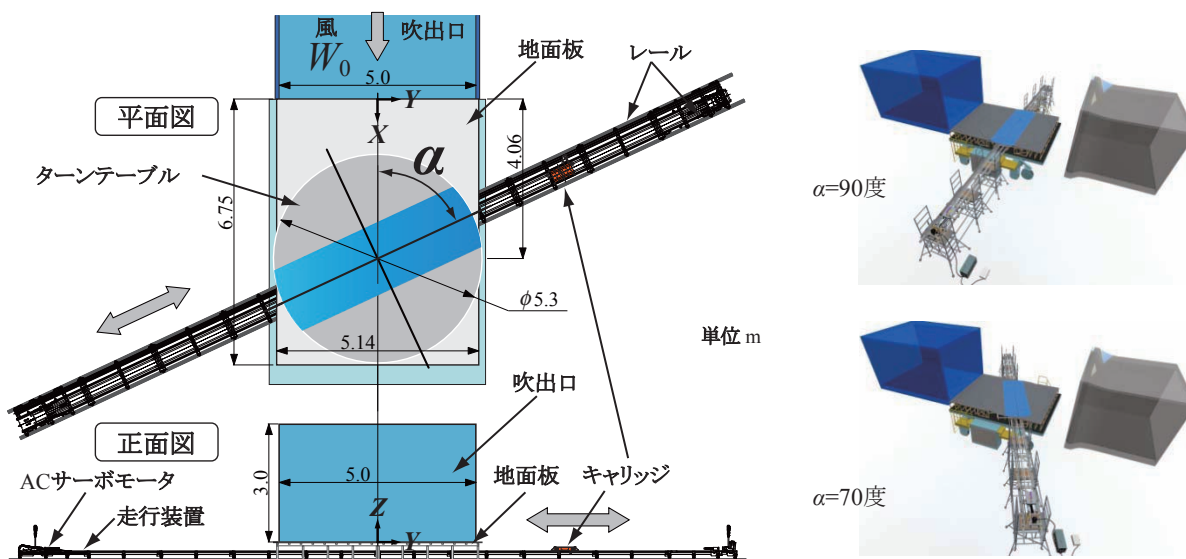


図3 横風試験用車両模型走行装置

復走行できる。

走行装置の起動・停止、さらに速度や加速度などの走行パターンのパラメータの設定などはパソコンから行う。車両模型の走行速度 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。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る。なお、走行パターンは様々に変更でき、キャリッジの走行開始位置や、走行後の停止位置を任意に設定することも可能である。この機能により、走行速度が遅い場合には測定部の近傍から走行を開始する、あるいは、任意の速度でターンテーブルの中央位置で停止するなどといった設定が可能となる。

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風向角 α を真横の 90 度から、最大 25 度程度、左右双方向に回転することができる（図 3 参照）。上述したように、走行装置は一定速度で走行できる区間が 7m 以上確保できるため、最も角度をつけた場合であっても、キャリッジは風洞吹出口の正面に入る前に一定速度で走行する状態が確保できる。

地面を模擬するために設置した地面板上を車両模型が走行する際に、走行するキャリッジの流れへの影響を避けるため、走行装置を地面板より下に配置し、車両模型をキャリッジに支柱で固定した。支柱 ($\phi 8\text{mm}$) が通過できるように、地面板には 15mm のスリットを設けている（後述する図 5 参照）。なお、走行装置および地面板の設置組立に約 2 日、解体撤去に約 1 日の作業時間を要する。

3.2 車両模型および圧力測定装置

図 4 に示すように、使用した車両模型は直方体（長さ 325mm × 高さ 44.0mm × 幅 46.7mm）で、一両相当の車両を縮尺 1/60 で単純化した模型である。材質は、一般的なモデル製作に用いられている軽量の合成木材（サンモジュール）を用いており、質量は約 0.25kg である。車体中心高さにおいて車体模型表面上に、A から T の合計 20 点の圧力孔を設けて、車両まわりの圧力分布を測定した。

圧力計および収録装置は、小型・軽量とするため自作

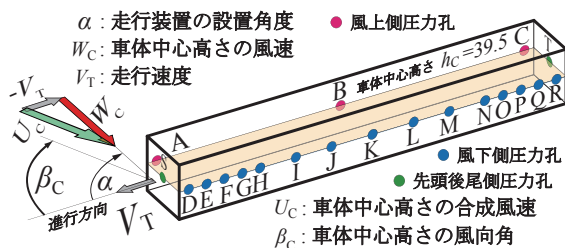


図 4 車両模型と圧力測定孔

した。圧力センサの信号線および電源線や、圧力測定用の導圧管の長さを可能な限り短くするため、圧力センサは車両模型内に、電源バッテリーやデータロガーはキャリッジの天板上あるいは内部に配置した。

圧力計センサ部は最大寸法が約 15mm と小型で、温度保証付きのアンプ内蔵のシリコン微差圧センサ (ALL-SENSORS 社製 1INCH-D1-4V-MINI: 圧力レンジ $\pm 1 \text{ in H}_2\text{O} = \pm 254\text{Pa}$) を使用した。すべての圧力センサを車両模型内に設置した。センサの電源および信号ケーブルは車両底面から車外に引き出し、キャリッジに内蔵したデータロガーで記録した。

加減速時や吹出口正面への突入時および退出時などの変動による影響を極力排除するため、信号ケーブルと同様に車外に引き出した導圧チューブを介して、キャリッジ内に固定した魔法瓶内を差圧計の基準圧とした。測定開始直前の停止中に、魔法瓶の電磁弁を開放して魔法瓶内圧力のドリフト分をキャンセルした。

データロガーは、サンプリング周波数 10kHz で約 8 秒間の収録ができ、無線方式の外部トリガにより地上側と独立して計測が可能である。なお、車両模型とキャリッジに配置した計測機器の総質量は約 3kg である。

さらに、地上側のレールに取り付けた複数の反射板位置を、車上側に取り付けたレーザセンサで読み取り、圧力と同時にこれを記録することにより、車体表面圧力と、車両位置および走行速度の対応付けが可能である。

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圧力計測を開始し、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。

3.3 試験条件

風洞風速 W_0 は、 $X = -2.95\text{m}$ (スリットから上流 7.01m)、風洞床面高さ $Z = 1.5\text{m}$ の位置に設置したピトー管で 10 ~ 20m/s に設定し、風洞吹出口に対する走行装置の風向角 α を 90 ~ 70 度、走行速度 V_T を 0 ~ 10m/s の範囲で調整することで、車体中心高さレベルの車両に対する風向角 β_c を幅広く (31 ~ 130 度) 設定できる。地上側の条件は、可能な限り単純な形状とするため、構造物だけでなくバラストやレールなども無い平板としている。ここで、車体中心高さレベルの車両に対する風速 U_c (車体中心高さの平均風速 W_c と走行による相対速度 $-V_T$ から合成される風速) を代表風速に、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。

走行時との比較のため行う静止時の試験では、走行装置のレール部分を地面板と切り離し、ターンテーブル中心に車両模型を設置した状態で、ターンテーブルを回転

して風洞吹出口に対する走行装置の風向角 α を変更して圧力分布の測定を行った。圧力センサは同じものを使用した。試験の効率を考慮して収録にナショナルインストルメンツ社製の A/D 変換器 NI9229 と PC を使用した。

4. 風洞試験結果

4.1 風速分布

今回の試験では、境界層厚さや、乱れ強さといった流れの性質を特に制御せずに行った。しかし、風洞吹出口の上流に備わる境界層吸込装置を稼働させた場合であっても、吸込装置からスリットまでの距離は 6m 程度あり、地面板上には自然に境界層が発達する。また、開放型の測定部を用いた試験のため XZ 断面内の風速が、位置 Y により異なることが予想されたので、ピトー管を用いた風速測定を行った。測定位置はターンテーブル中心 Y=0m と、中心から離れた Y=1.7m と、さらに中心から離れた Y=2.2m である。なお、風洞吹出口端は Y=2.5m である。

図 5 に示す風速測定の結果から、Y=0m と 1.7m の鉛直方向の平均風速分布は乱流境界層であることが認められ、ほぼ同じ風速分布であり、風洞風速 W_0 に対する車体中心高さレベルの平均風速 W_c の比は 0.81 程度、乱流境界層の厚さは 0.12m 程度であった。一方の、Y=2.2m の風速分布は大きく異なっている。これは、風洞吹出口端などによる、せん断流の影響によるものと考えられる。なお、試験風速 $W_0=20\text{m/s}$ までの範囲で同様な風速分布であることを確認した。

4.2 圧力測定の結果

4.2.1 車体表面圧力の時刻歴と走行パターン

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の時刻歴の例を図 6 に示す。走行パターンは、約 0.7 秒後に一定速度となり、約 1.3 秒後に風路入口付近、2.1 秒後に風路出口付近、そして約 3 秒後に減速を開始し、

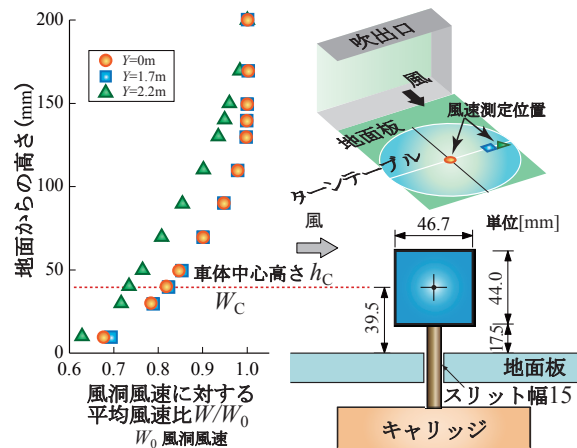


図 5 車両模型と風速分布

約 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のため走行を開始すると徐々に負圧となっていく。風路に突入し 1.4 秒までは急激に圧力が減じる。風下側の圧力は、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。

図 6 からわかるように、吹出口正面の端部付近ではせん断層の影響により圧力変動が大きい。これよりさらに内側の風洞中央部 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た。そこで、この区間を解析対象区間とし、平均圧力から、車体中心高さレベルの車両に対する風速 U_c を代表風速として無次元化した平均圧力係数 (以下、単に圧力係数) を求めた。さらに、高さ方向における圧力は一定と仮定し、風向角ごとに求めた各圧力孔位置の風上側 3 点 (A ~ C) および風下側 15 点 (D ~ R) の圧力係数を直線補間し、台形公式で積分して横力係数を求めた。

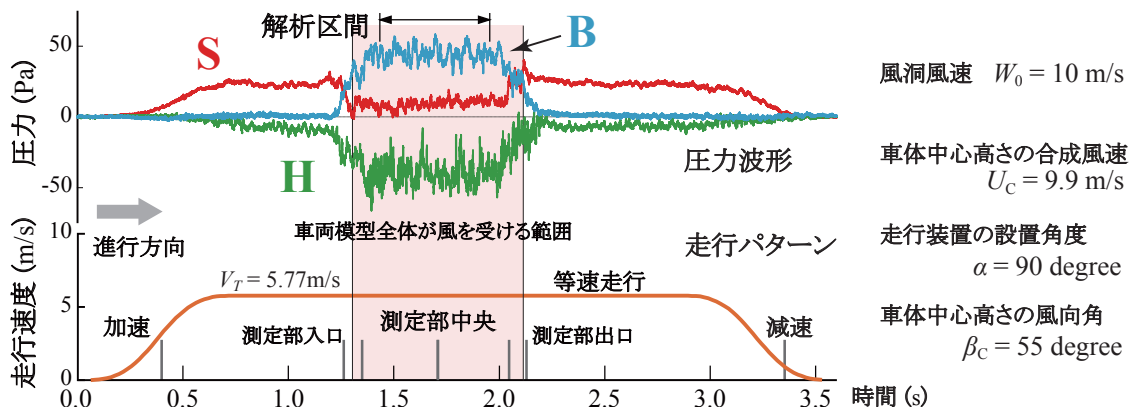


図 6 車体表面圧力の時刻歴の例と走行パターン

4.2.2 走行車両と静止車両の圧力分布の比較

求めた圧力係数の中から、車体中心高さの風向角が $\beta_c=31$ 度、55 度、90 度の場合の分布を図 7 に示す。風洞風速 $W_0=10\text{m/s}$ 、走行時の走行装置の設置角度は $\alpha=71$ 度で走行速度はそれぞれ $V_T=10\text{m/s}$ 、 2.75m/s 、 -2.7m/s である。

風上側についてみると、より浅い風向角の $\beta_c=31$ 度(図 7 上段)の方が圧力係数の絶対値は小さく、 $\beta_c=55$ 度(図 7 中段)の A 点、 $\beta_c=90$ 度(図 7 下段)の B 点の圧力係数はよどみ点に近い値である。そして、風向角が $\beta_c=31$ 度と 55 度の場合、後尾側ほど圧力係数が小さくなる。

風下側についてみると、 $\beta_c=31$ 度と 55 度では、先頭側と後尾側の絶対値には大きな違いは無いが分布は若干異なった。 $\beta_c=31$ 度の場合、先頭側 D から中間部 H にかけての変化が大きく、H 点付近から後尾にかけて平坦となった。一方、 $\beta_c=55$ 度の場合、後尾に向かって徐々に減少する分布となった。風向角 $\beta_c=90$ 度の場合、車体中央位置 K 点を中心としてほぼ対称な分布を示した。

走行と静止の条件で比較すると、 $\beta_c=31$ 度、55 度ともに全体的な傾向は同じと言えるが、 $\beta_c=31$ 度の場合、中

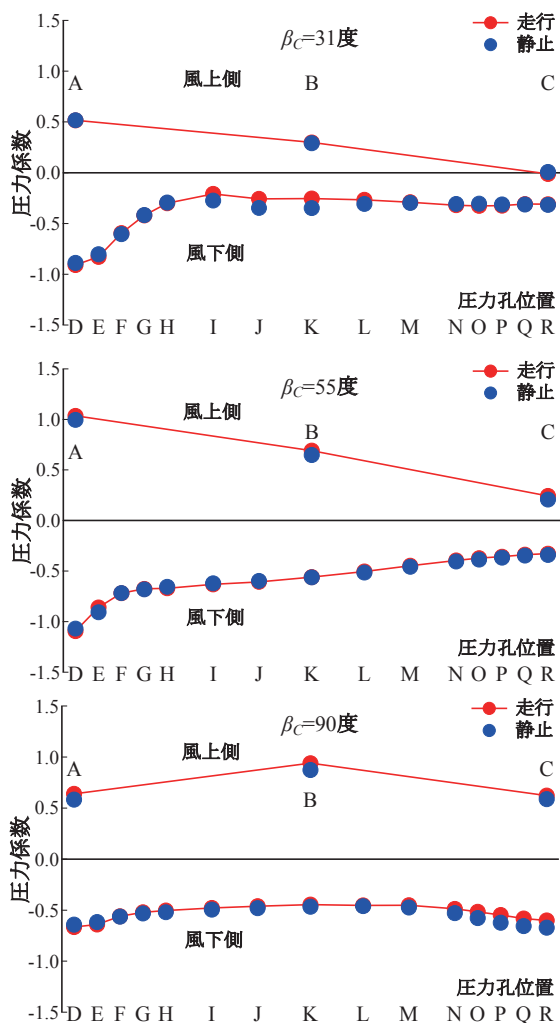


図 7 車体中心高さの圧力係数分布

間部に差異が見られ、その差の絶対値は 0.09 程度である。一方、 $\beta_c=55$ 度の場合に最も大きな差異が生じたのは E 点であるが、その差の絶対値は 0.05 程度と小さかった。 $\beta_c=90$ 度の風上側では、全体的に走行に比べて静止の方が負の方向にオフセットしているが、その差の絶対値は最大 0.07 程度であった。

他の風向角についても同様に走行と静止の圧力分布を比較した結果、風向角によらず圧力分布は同じ傾向を示しており、各圧力測定孔の圧力係数は最大 0.1 程度の差異が生じていた。

4.2.3 異なる α で同じ β_c となる条件

車両に対する風の風向角は、車両の走行速度のみならず、自然風(風洞風速)の線路に対する風向角にも依存する。ここでは、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る、同じ車体中心高さの風向角 β_c となる条件で圧力分布を比較する。風洞風速 $W_0=10\text{m/s}$ 、車体中心高さの風向角 $\beta_c=39$ 度の場合の結果を図 8 に示す。

圧力分布は、走行速度 $V_T=10\text{m/s}$ の条件では全体的に正の方向に 0.1 程度オフセットしているものの、先頭から後尾にかけて、その傾向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 ~ 0.16 であった。なお、この時、後述する方法で求めた横力係数の標準偏差は 0.02、最大と最小の差は 0.05 であった。

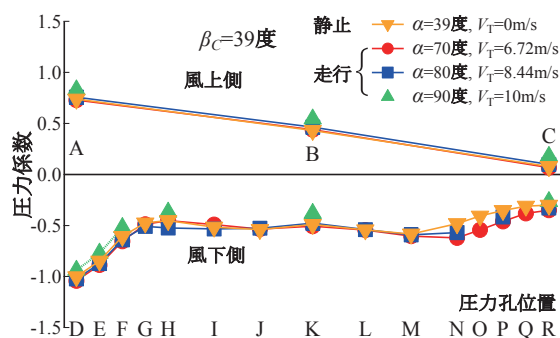


図 8 異なる α で同じ β_c となる条件

4.2.4 繰り返し計測によるばらつき

圧力係数のデータのばらつきを検討するため、同一条件で繰り返し測定を行った。検討に用いる条件は、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 $\beta_c=55$ 度で、連続した 3 回の収録を 3 セット(合計 9 回)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 であり、圧力孔による明瞭なばらつきは見られなかった。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。

4.3 横力係数

図9に、車体中心高さレベルの風向角 β_c 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、 $\beta_c=60\sim 120$ 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が最大となる傾向がある。静止時の横力係数は $\beta_c=31\sim 90$ 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の傾向を示し、全体的によい一致が見られた。

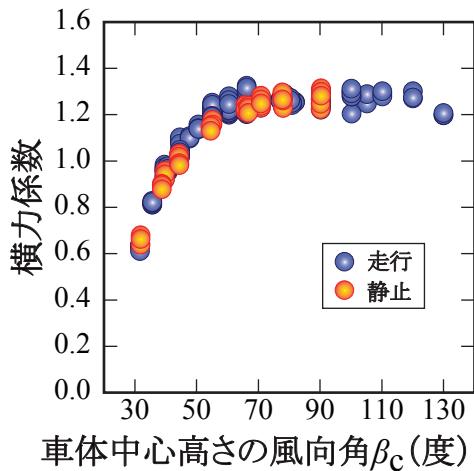


図9 圧力分布から求めた横力係数

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板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。ただし、筆者の知る限り今回取得した乱流境界層内を走行する三次元角柱の横力係数の既往研究はなく、他研究と比較できない。平板上に置かれた二次元角柱を対象とした研究ではあるが、床下高さや車体高さおよび境界層厚さの関係により空気力が大きく変化する可能性があるという報告⁶⁾もあるため、横力係数などの定量的な精度の評価は今後の課題である。

5. 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、乱れの大きい乱流境界層を持つ気流、屋根部に丸みのある断面の車両形状、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した風洞試験を進めている。

これまでは主に風洞試験により空気力を評価してきたが、空気力の評価精度の向上への要求が今まで以上に期待されており、現象に対する詳細な知見が求められてきている。一方、近年の計算機性能の向上と計算方法の発展により、研究ツールとしての数値シミュレーションの有効性が高まっており、今回取り上げることができなかった数値シミュレーションの横風問題への適用⁷⁾も進められている。今後は、風洞試験だけでなく数値シミュレーションの結果と比較しながら、研究を進めていく予定である。

文献

- 1) Suzuki, M., Tanemoto, K., Maeda, T., "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.91, pp. 209-218, 2003.
- 2) 種本 勝二, 鈴木 実, 齋藤 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
- 3) Baker, C.J., "Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.24, pp. 227-251, 1986.
- 4) Bocciaolone, M., Cheli, F., Corradi, R., Muggiasca, S., and Tomasini, G., "Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp. 584-610, 2008.
- 5) 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 (No.127), pp. 185-186, 2011
- 6) 谷口 清一, 宮越 勝美, 堂田 誠治: 「平面壁と二次元柱との干渉」, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.49, No.447, pp. 2522-2529, 1983
- 7) 中出 孝次, 鈴木 昌弘, 「横風を受ける走行列車周りの流れの数値シミュレーション」, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, Vol.87, pp. 599-600, 2009