

空気力推定のための実物車両を用いた走行時車体周辺圧力分布の測定

三須 弥生* 島村 誠 (東日本旅客鉄道株式会社)

Measurement of pressure distributions on actual running train surfaces
for the estimation of wind forces due to a crosswind

Yayoi Misu*, Makoto Shimamura, (East Japan Railway Company)

For the estimation of wind forces on a train due to a crosswind, a wind tunnel test with a standstill scaled model is usually conducted, however the actual train car runs on structures. In order to examine the difference between the standing train in the wind tunnel tests and the running train in the field, pressure distributions of surfaces of an actual running train were measured in this study. As a result, the drag forces can be estimated by the difference of the pressure distributions between on the windward and the leeward surfaces, and on the roof and under the floor surfaces.

キーワード：鉄道車両、風洞試験、抗力、圧力分布、走行試験

(Keywords, train car, wind tunnel test, drag force, pressure distribution, running test)

1. はじめに

強風を受けた場合の鉄道車両に働く風力は実際の車両で測定することが難しいため、通常縮尺模型を使用した風洞試験が実施されている⁽¹⁾⁽²⁾。縮尺模型による風洞試験手法は、建築、航空、自動車の分野で多く活用されている。建築の分野では、地上と設置した建造物あるいは建物群を数百分の1のスケールで模擬し、大気乱流境界層を再現して実験を行っている⁽³⁾。航空の分野では、一様流を使用して、機体が飛行している状態を再現している⁽⁴⁾。これに対して自動車や鉄道では、動かない地上構造物上に車両が走行するという、建築や航空の分野では見られない特徴を持つ。このうち比較的車両の小さな自動車については、相対的に動かない地面の影響を Moving belt を使って考慮し、その上を実物車両が走行する風洞実験法なども提案されている⁽⁵⁾。しかし鉄道では、20m を超える車体が複数両連結して高速で走行するといった特殊な条件であり、特に横風を受ける場合について、実物による試験や走行した模型による実験は難しい。よって鉄道では、静止模型による風洞試験結果を基に、車両が走行していると仮定して自然風と走行による相対風をベクトル合成することにより風耐力を計算する手法が行われている⁽⁶⁾。この風耐力推定に用いる空気力係数を求める風洞試験については、停車した実物大車両模型による屋外での長期の観測結果を基に、車体にかかる風力を再現できることを確認した風洞試験手法が用いられている⁽⁷⁾。この手法では、模型の縮尺の影響を考慮できる反面、走

行状態を再現できていない可能性がある。一方欧州では、乱流境界層による風洞試験を行なった場合、再現性が得られないとして一様流による風洞試験が実施されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これは高速での走行を想定した場合に、より一様流の影響が大きいているためと考えられる。このように日本の手法では、停止あるいは低速状態を再現しており、欧州の手法では、高速走行を仮定していることになる。しかし一般的な在来線では、最高速度が 100km/h 前後であり、どちらの手法も適切に再現できていない可能性がある。よって、日本の在来線における中速域の走行状態に適用できる風洞試験方法を検討する必要がある。

そこで本研究では、走行車両に働く風力を分析する基礎データとして、209 系多目的実験車 MUE・Train4 号車を用い、走行中の相対風速と車体面圧力分布を測定し、無風時と風を受けた場合の圧力分布の比較およびその圧力値の分析から、車体が受ける風による風力を推定した。

2. 観測方法

2.1. 車両での風圧風速測定方法

今回の実験では実物車両に圧力測定装置および風速計を設置して、走行中の車体周辺の圧力分布および風速値を測定した。車両は 209 系多目的実験車 MUE・Train⁽¹⁰⁾の 4 号車を使用した。MUE・Train 外形および 4 号車の測定機器設置位置を図 1、図 2 に示す。



図 1 MUE-Train

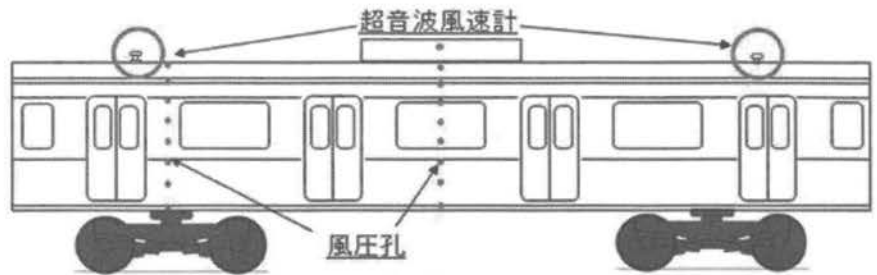


図 2 MUE-Train4 号車の計測機器等設置位置

表 1 風圧孔設置箇所および設置数

設置箇所 断面位置	側面 (片面)	両面 合計	屋根 上	床下	計
車体中心	(9)	18	11	9	38
台車上部	(8)	16	11	—	27
合計					65

2.1.1. 車体表面風圧測定方法

車体表面圧力測定では、車体中心と 5 号車寄りの台車上部の 2 断面の車体面に、風圧測定用に直径 5mm の孔 (以後風圧孔) を約 200~300mm の間隔で 65 個設置した。2 断面それぞれの設置箇所と設置数を表 1 に、風圧孔の設置状況を図 3 に示す。設置した風圧孔の車内側にチューブを取り付け、微差圧計 (定格容量 $\pm 2.5\text{kPa}$) を接続して参照空気タンク内の圧力と車体表面圧との差を測定した。

2.1.2. 車両での相対風速等測定・記録方法

走行中の相対風速を測定するため、屋根上の 4 か所 (台車上部の各側面寄り車両限界内) に二次元超音波風速計を設置した (図 4)。超音波風速計のサンプリング周期は 4Hz、出力インターバルおよび記録インターバルはそれぞれ 1Hz とした。この他、走行速度を速度発電機信号より取得するとともに、列車のすれ違いやトンネルなどへの侵入については、時刻とすれ違い列車名や構造物名をログとして観測員が記録した。

2.2. 線路沿線での風速測定方法

走行車両で測定した車体表面風圧、相対風速がどのような風によって発生したかを明らかにするため、線路近傍の定置に超音波風速計を設置し、沿線の風速を測定した。設置箇所は、周辺に風を遮る建物がほとんど無く、線路がほぼ南北に直線であることなどから、東北本線・東鷺宮・栗橋間の 1 箇所 (営業キロ程 53k315m 付近) を選定した (図 5)。この箇所の線路は前後合わせて約 1.5km に渡りほぼ直線であり、100km/h 前後で走行した場合でも、20 秒以上は同等の風環境で車両が走行しているとみなすことが出来る。この箇所に二次元超音波風速計 (サンプリング周期、記録インターバル各 4Hz) 3 台を線路から約 7.4m 離れた場所に、鉛直高さをレールレベルから 1.7m、2.8m、3.8m と変えて設



図 3 風圧孔設置状況



図 4 超音波風速計設置状況



図 5 定置風速計設置箇所



図 6 定置風速計設置の様子

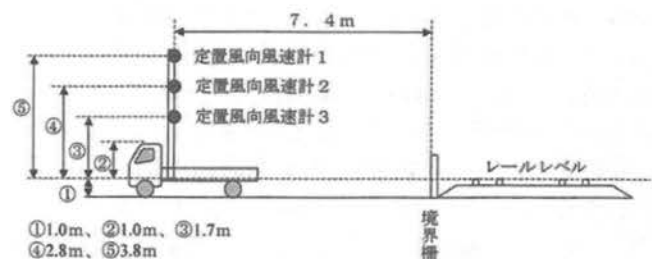


図 7 風速計の設置高さとトラックおよび線路との位置関係

置した。測定では速やかな設置、撤去が求められたため、トラックの荷台に仮設する方法とした。風速計設置の様子を図 6 に、風速計の設置高さとトラックおよび線路との位置関係を図 7 に示す。

3. 観測結果および抗力、揚力の推定

MUE-Train4 号車を利用した風圧風速測定は 2009 年 10 月より東北本線での走行試験を中心に 12 日間実施した。そ

の観測結果のうち、10日間については、定置風速計において車両に対して直角方向にほぼ無風であった。残りの2日間については車両に対し直角方向に4m/sを超える風速を観測することができた。そこで、車両直角方向に無風時および車体直角方向に風速が発生した場合の相対風速および車体面風圧分布をそれぞれ分析した。

3.1. 無風時の相対風速・車体面風圧測定結果

無風状態で車両が走行した場合の車体周辺気流の挙動を把握するため、定置風速計の測定で車両直角方向の風速が1m/s以下の値となった2009年11月27日の東北本線・大宮・宇都宮間の走行データについて分析を行った。

はじめに屋根上に取り付けた超音波風速計による相対風速測定結果と走行スピードとを比較した。大宮駅発車(9:40)後の屋根上設置の超音波風速計4台による1秒間平均風速値と車両の走行スピード(秒速)の1秒間平均値の測定結果を図8に示す。走行スピードの波形に対し、超音波風速計で測定した相対風速はより細かく変動した値が観測されている。また、加速時を除き走行スピードに比べ屋根上の相対風速のほうが2割～4割程度低い風速を測定している。この傾向は無風か微風状態で車両が走行したほとんどの場合で観測された。これは車両の屋根上に乱流境界層が形成され、その中の減速した乱流を風速計により測定しているた

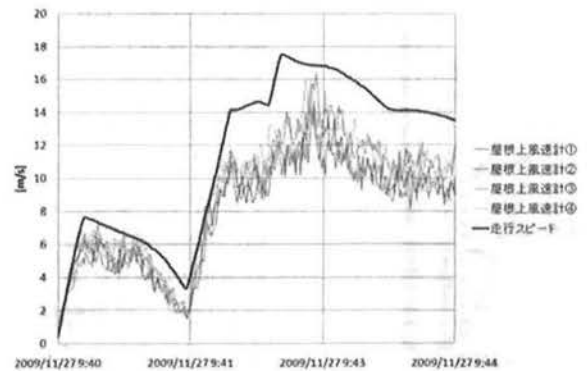
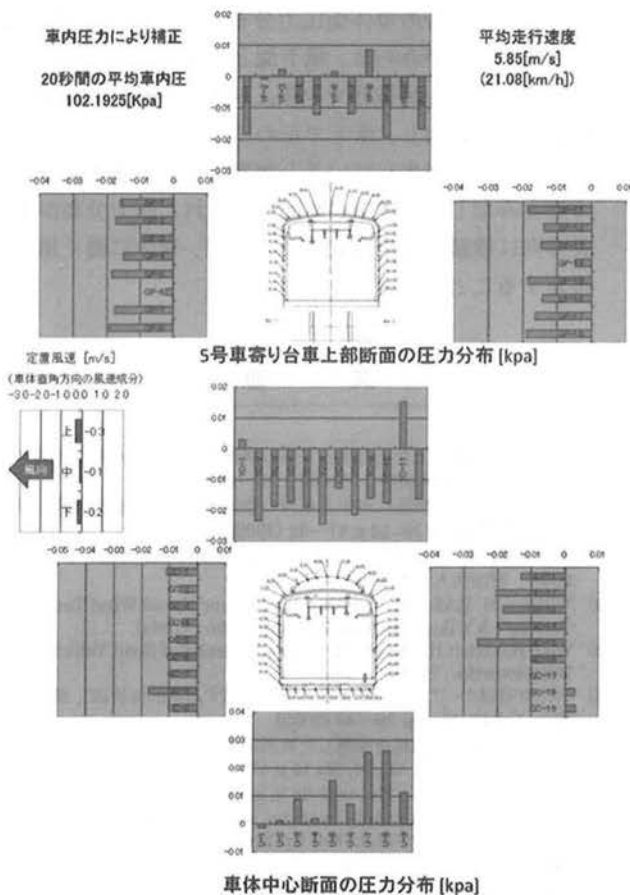


図8 相対風速および走行速度 (m/s)

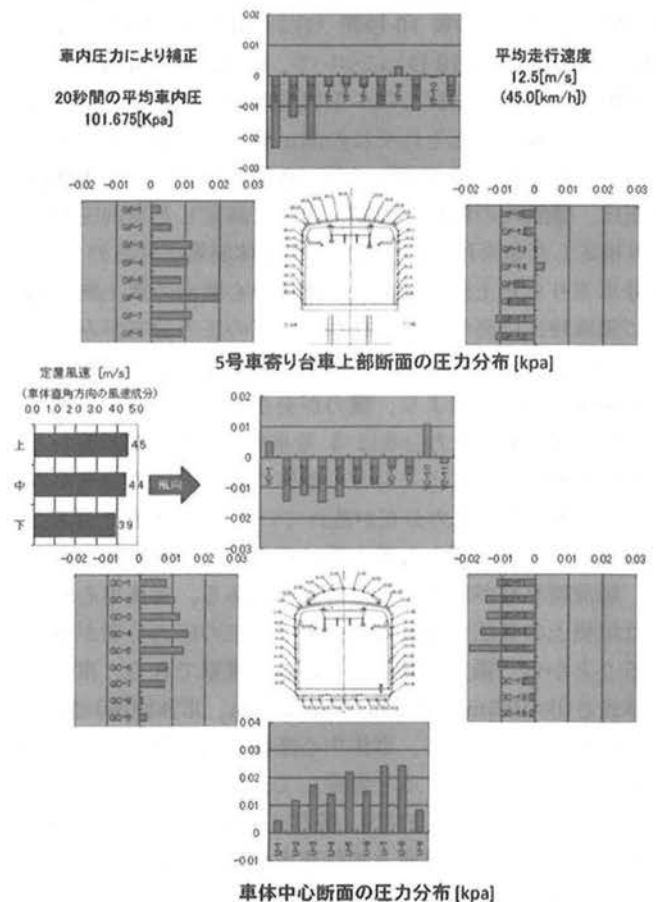
めと推測される。

次に無風に近い状態での車体面風圧分布を分析した。11月27日のデータのうち、大宮駅発宇都宮行の下り走行(1号車が先頭)で、東鷲宮・栗橋間に設置した定置風速計脇を通過した前後10秒間(合計20秒間:10時09分20秒～10時09分39秒)の平均車体面風圧分布および定置風速計で観測したそれぞれの測定高さにおける車体直角方向の平均風速(20秒間)を図9に示す。ここで車体面風圧は、同時に測定した車内圧力により補正した値を用いた。車体面風圧分布のうち、5号車寄り台車上部断面の側面および車体中心断面の側面と屋根上(エアコン上部面)のほとんどの部分で負圧となっている。これは走行により発生した車両に



2009年11月27日 宇都宮行下り走行 10時09分20秒～10時09分39秒

図9 平均車体面風圧分布 (無風時)



2009年12月7日 宇都宮行下り走行 10時10分00秒～10時10分19秒

図10 平均車体面圧力分布 (風速発生時)

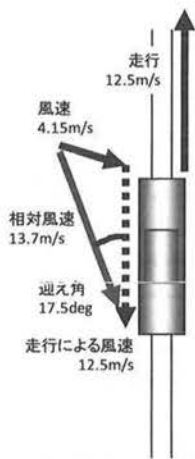


図 11 風速と走行速度
および相対速度の関係

た床下機器によって気流が遮られているためと推定される。屋根上と床下の発生圧力差により揚力の発生が推定できる。

3.2. 風速が発生した場合の車体面風圧測定結果

車体直角方向に風速が発生した 12 月 7 日の東北本線・大宮・宇都宮間の走行データのうち、大宮駅発宇都宮行の下り走行（1 号車が先頭）で、東鷲宮・栗橋間に設置した定置風速計脇を通過した前後 10 秒間（合計 20 秒間：10 時 10 分 00 秒～10 時 19 分 19 秒）について、車体面風圧分布および定置風速について分析した。平均車体面風圧分布および定置風速計で観測したそれぞれの測定高さにおける車体直角方向の平均風速（20 秒間）を図 10 に示す。ここで車体面風圧は、無風時の解析と同様、同時に測定した車内圧力により補正した値を用いた。得られた車体面風圧分布のうち、5 号車寄り台車上部断面および車体中心断面の風上側の側面に無風時には発生していなかった正の圧力分布がみられる。両断面の風下側は負圧の分布が発生しており、西からの風を受けることにより、横力が発生していることが推察できる。屋根上の圧力分布は 5 号車寄り台車上部断面および車体中心断面共にほとんどの部位で負圧の圧力分布がみられる。無風時に圧力分布が乱れていた 5 号車寄り台車上部断面についても横から風を受けることにより風向が変わり、層流境界層が形成された可能性がある。車体中心断面では屋根上の負圧分布に対し、床下で正の圧力分布がみられることから、揚力が発生していると推察できる。車体を車体長さ(l)=19.5m、車体高さ(h)=2.63m、車体幅(w)=2.8m のほぼ長方形とみなし、車体中心断面で得られた圧力分布が車体長方向に連続すると仮定して、風によって生じる力を推定すると、横力は 973N、揚力は 1185N と計算できる。一方、測定時の平均風速と走行速度およびそれによって発生する相対速度のベクトルの関係は図 11 のように示すことができ、これらの関係より、相対風速 13.7m/s が列車に対し 17.5deg の迎え角で発生していたことが分かる。得られ

沿った気流により、圧力の低下が発生しているためと考えられる。これに対し、5 号車寄り台車上部断面の屋根上では圧力分布が乱れていることがわかる。これは測定部に対し走行方向の前方にあるエアコンによって剥離流が発生し、その乱れた流れの圧力を測定しているためと推定される。また、車体中心断面の床下では、正圧が測定されている。これは走行方向の前方に設置され

た相対風速および当日の気温（11.4℃）から得られる空気密度（ 1.24kg/m^3 ）を用いて空気力係数を求めると、横力係数、揚力係数はそれぞれ $C_s=0.16$ 、 $C_l=0.20$ と求められる。

4. まとめ

本研究では走行車両に働く風力を分析する基礎データとして、209 系多目的実験車 MUE-Train4 号車を使って走行中の相対風速および車体面圧力分布を測定し、無風時と風を受けた場合の圧力分布の比較およびその圧力値の分析から、以下のことが明らかとなった。

1. 屋根上に取り付けた超音波風速計による相対風速測定結果と走行スピードとを比較した結果、走行スピードの波形に対し、相対風速はより細かく変動し、また加速時を除き 2 割～4 割程度低い風速を示した。これは車両の屋根上に乱流境界層が形成され、その中の減速した乱流を風速計により測定しているためと推測される。
2. 無風時の車体面風圧分布では、5 号車寄り台車上部断面の側面および車体中心断面の側面と屋根上（エアコン上部面）のほとんどの部分で負圧となっている。これは走行により発生した車両に沿った気流により圧力の低下が発生しているためと考えられる。また、車体中心断面の屋根上と床下では、それぞれ負圧と正圧が測定されており、圧力差により揚力の発生が推定できる。
3. 風を受けた場合の車体面圧力分布では、風上側の側面に正の圧力分布がみられ、風下側との圧力差から横力が発生していることが推察できる。車体中心断面では屋根上の負圧分布に対し、床下で正の圧力分布がみられることから、揚力が発生していると推察できる。車体をほぼ長方形とみなし、車体中心断面で得られた圧力分布が車体長方向に連続すると仮定することで、車体に働く風力を推定することができた。

文 献

- (1) 前田達夫：“築堤上を走行する車両の横風に対する空力特性に関する風洞試験”，日本風工学会，No.68 p.85～89 (1996)
- (2) 種本勝二ほか：“横風に対する車両の空気力学的特性風洞実験”，鉄道総研報告，Vol.13，No.12 p.47～52 (1999)
- (3) 風洞実験法ガイドライン研究委員会編：“建築物風洞実験ガイドブック 2008”，財団法人日本建築センター(2008)
- (4) William H. RAE, JR. and Alan Pore：“Low-Speed Wind Tunnel Testing”，A Wiley-Interscience Publication，(1984)
- (5) Wolf-Heinrich Hucho et. Al.：“Aerodynamics of Road Vehicles”，Butterworths，(1987)
- (6) 日比野有ほか：“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 p.39～44 (2003)
- (7) 鈴木実ほか：“自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法”，鉄道総研報告，Vol.17，No.11 p.47～52 (2003)
- (8) Cléon L. M., et. Al., “Sécurité de la circulation des trains a grande vitesse vis-  -vis des vents latéraux: la programme DEUFRAKO”, Juillet-aout, pp.5～19, (2004) (In French)
- (9) The European Railway Agency: “Technical Specification of Interoperability, 4.2.6.3 Crosswind, Annex G: Effects of Crosswinds”
- (10) 東日本旅客鉄道株式会社：“在来線用試験電車 MUE-Train (ミュートレイン)について”，プレス発表 (2008)