防風柵形状および柵と車両の離隔の変化が流れ場と車両空力特性に及ぼす影響

松倉 由幸^{*1}, 佐久間 豊^{*1,*2}

Effects of varying the thickness and hole diameter of windbreak fence and the distance between fence and train on flow fields and train aerodynamic characteristics

Yoshiyuki MATSUKURA^{*1} and Yutaka SAKUMA^{*1,*2}^{*1}Tokyo University of Agriculture and Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, Japan^{*2}Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikaricho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

Received: 20 June 2020; Revised: 25 October 2020; Accepted: 8 March 2021

Abstract

To clarify the relationship between the downstream flow field of a windbreak fence and aerodynamic forces acting on a train placed downstream of the windbreak fence, wind tunnel tests with models were conducted. A 1/40-scale windbreak fence model (height $H = 50$ mm, hole diameter $D = 0, 2, 6$, and 10 mm, thickness $T = 0.8, 1.6, 4.0$, and 8.0 mm) and a vehicle model with square cross-section were used. Flow velocity and turbulence intensity were measured by PIV measurement. The pressure distribution around the train model was measured with differential pressure sensors. Effects of varying the thickness and hole diameter of the windbreak fence and the distance between the fence and the train on the flow fields and train aerodynamic characteristics are examined. As a result of the tests, pressure coefficients show that the pressure field on the upstream side of the train varies more considerably than that on the downstream side with varying the distance between the windbreak fence and the train. Hence, the variation of drag force is mainly caused by the change of pressure field on the upstream side of the train. The drag coefficient is minimized when the distance between the windbreak fence and the train is a certain value, which has been also shown in previous studies. In this study, the reason why the drag coefficient is minimized is clarified. Both averaged velocity and drag force acting on the train become lower as the ratio of fence thickness to hole diameter T/D becomes larger. Although T/D of real fences is about 0.1, T/D can be about 1 for wind tunnel tests. Hence, it is recommended that the ratio T/D of the fence model should be less than 1 for wind tunnel tests.

Keywords : Crosswind, Porous element, Windbreak fence, Wind tunnel test, PIV, Pressure measurement

1. 緒 言

過去に強風が原因で鉄道事故が発生している（航空・鉄道事故調査委員会，2008）．その多くは列車が走行中の場合であるが停車中の場合もあり，駅構内にて停車中の貨物列車が強風にあおられ，コンテナ貨車の脱線事故が起こっている．このような強風による鉄道の脱線，転覆事故を契機として，鉄道会社では強風時の減速運転や運行中止といった安全対策を行っている（国枝，1972）．一方で，強風が頻発する地域では，安定した輸送の為，防風柵等による強風対策も行っている．防風柵の設置費用はコストがかかるため，事前にその効果を評価するための風洞試験が多々行われている．

鉄道を対象とした防風柵周りの流れ場を調べた研究として，盛り土上で防風壁の高さ，ひさし長さを変化させた際の架線位置での乱流強度が熱線風速計で測定された（Avila-Sanchez et al., 2010）．柵下流の車両周りの流れ場では，高架橋で2次元模型による壁角度の影響を煙で可視化するとともに圧力計測により車両に働く空気力の変化を調査したものや，数値計算と2次元模型実験により壁高さが空気力係数に及ぼす影響を調べたもの，数値計算により多様な車両形状に対し車両周りの流れ場を求めたものなどがある（Barcala and Meseguer, 2007, Sesma et

No.20-00234 [DOI:10.1299/transjsme.20-00234], J-STAGE Advance Publication date : 16 March, 2021

^{*1} 正員，東京農工大学大学院 工学府（〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16）^{*2} 正員，（公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

E-mail of corresponding author: sakuma.yutaka.70@rtri.or.jp

al., 2013, 三須他, 2016). しかし, これらの先行研究においては, 線路の端に設置された柵から見て 1, 2 線目, すなわち単線, 複線の条件で, 柵の形状の影響が流れ場に及ぼす影響の評価となっている. 車両にかかる力について, 風洞試験により高架線や橋梁などでの柵からの離隔と車両の抗力変化が調べられており, 柵と車両の離隔では 3 線目付近で最も抗力係数が小さくなり, 4 線目以上では逆に抗力が大きくなることが示された(種本, 2012, 乙部他, 2017). 車両が存在しない状態で防風柵下流側の風速分布が調べられている(種本, 2012)ものの, 車両が存在する場合の風速分布, 流れ場と車両周りの圧力分布の関係, 抗力変化のメカニズムなど詳細は不明である.

防風柵を用いた風洞試験において, 実物柵の下流側の流れ場がどの程度再現されるかについて, すなわち, 防風柵の風洞試験の相似則は重要な問題である. 防風・防雪柵を対象として, 現地試験の実物柵と風洞試験の模型柵について風速分布が測定された. その結果, 実物柵と実寸部分模型柵では, 柵下流の風速分布はおおむね一致した(武田他, 1985). 柵下流の風速分布の風洞模型実験の再現性についても調査が行われ, その結果, 柵の充実率と, 柵にかかる抗力係数の一致が, 下流の風速分布に良い一致を与えることが分かった(小峯, 村上, 1981). ところで, 実物の防風柵は形状が折板または平板で, 孔配置が多様であり, 風洞試験において理想的には実物の柵の縮尺模型を製作すべきである. しかし, 実物形状をそのまま縮小すると薄すぎて自立できない, 孔が小さくなりすぎて精度よく再現できないといった問題があり, 実際には充実率を合わせたのみで, 実物を縮尺したものに比べ孔径が大きく, 平板で厚い模型が用いられている. そのため, 柵の形状による減風効果についても調べられてきた. 平板の防風柵では, 充実率を等しくして防風柵の孔径を変化させた際の下流の流れ場変化が実験と数値計算により調べられた(Kim and Lee, 2001, Huang et al., 2012). 孔形状の影響や, 孔径, 板厚, 風向角が流れ場に与える影響も調べられた(Allori et al., 2013, 村塾, 佐久間, 2015). 村塾の研究では, 上述の理由から柵模型を薄くすることは困難であるため, 柵模型を厚くして風洞試験を行い, 厚さによって柵下流の平均風速が変化することなど, 柵の厚さの影響を確認した. また, より実物に近い形状を模した, 折板の模型と, 平板の模型との流れ場の比較も行われた(中野, 佐久間, 2016). しかし, これらは柵単体での下流の流れ場を調査したのみで, これらの変化が風洞試験において車両に働く抗力にどのような影響をもたらすかは依然不明のままである.

そこで本研究では, 停車中のコンテナ車両, または, 車両断面が矩形に近い通勤型(空力的には屋根肩部の曲率半径が小さく上流側屋根肩部から剥離がある)車両について, 竜巻のような偶発的な突風対策としての防風柵効果ではなく, 卓越風向のある定常的な強風対策としての防風柵効果を主な対象として, 風洞試験において, 柵と車両の離隔を, 単線, 複線, 複々線の 3, 4 線目を模擬した 1~4 線とし, 先行研究で示された 3 線目付近で抗力が最小となる原因を調査した. さらに, 防風柵の厚さと孔径を変化させて, それぞれのパラメータ変化が, 柵下流の流れ場, および車両に働く空気力への影響についても調べた. 上記の先行研究では, 防風柵, 車両は共に静止した状態で行われている. 車両走行時は, 地上風に対して防風柵は静止, 車両は相対運動をしているが, この状態を模擬した先行研究は少ない(Dorigatti et al., 2015, 鈴木, 2016). 最近の風洞試験(鈴木, 2016)において, 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, また, 乱流境界層内を走行する 3 次元角柱の横力係数の既往研究はないことが述べられている. このことから, 限定的な先行研究の結果ではあるものの, 本研究の結果は車両の停止時のみならず, 走行時にも適用できる可能性があると考えられる.

第 2 章では試験方法として, 使用した試験装置および計測方法について述べた. 第 3 章では流れ場の可視化結果として, 車両のみ, 柵のみ, 柵と車両を設置し, 柵からの車両の離隔を 1~4 線としたときの結果を述べた. 第 4 章では圧力計測の結果として, 各計測点での圧力係数および算出した抗力, 揚力係数について述べた. 第 5 章では 3, 4 章の結果について考察し, 第 6 章には結言として得られた知見をまとめた. なお本論文は, 過去に発表したシンポジウム講演論文に加筆修正を加えたものである(松倉, 佐久間, 2017).

2. 試験方法

2・1 試験装置

図 1 に本研究で用いた防風柵を示す. 充実率(投影断面積に対する柵実部の占める割合)は 60% で一定, 孔は千鳥配置とし, 孔径 D が 2, 6, 10 mm のものと, 孔のない防風壁(便宜上 $D=0$ mm と表記)で試験を行った. 防風柵の厚さ T は $D=0$ mm のものは $T=0.8$ mm で, それ以外は $T=0.8, 1.6, 4.0, 8.0$ mm とした. いずれも高さ H は 50

mm で実物の防風柵の 1/40 (実物高さが 2 m の時) に相当する。鉄道における防風対策工の考え方を解説した「防風設備の手引き」において、防風柵高さ 2.0 m, 充実率 60% が例示されており (鉄道強風対策協議会, 2006), この手引きをもとに日本全国の鉄道用防風柵の多くが建設されていると考えられることから, 本試験ではこれらの値に固定した。

図 2 に車両模型を示す。コンテナ車両, または車両断面が矩形に近い通勤型 (空力的には屋根肩部の曲率半径が小さく上流側屋根肩部から剥離がある) 車両を模擬した正方形断面で, 代表寸法の縮尺は 1/40 である。車体寸法は幅 70×高さ 70×長さ 500 mm, 床面高さは 20 mm で, 車両中央断面に各面 3 か所ずつ計 12 か所に内径 1 mm の圧力計測孔が開いている。

図 3 に試験装置の全体図を示す。(公財)鉄道総研の小型低騒音風洞の密閉胴 (幅 720×高さ 600×長さ 3570 mm) 内上流側に高さ 100 mm のステージを設置し, その上に防風柵模型, 車両模型を設置して試験を行った。図 4 に示すように, 防風柵の下端部を原点として, 無次元座標 x/H および y/H を定義し, この車両模型を, 防風柵と車両上流側側面との離隔が $0.7H, 2.4H, 4.1H, 5.8H$ となるよう柵下流に設置した。それぞれ, 単線, 複線, 複々線の 3, 4 線目に相当し, 以下 1~4 線と呼称する。風洞内の気流は一様流であり, 試験風速 $U=10\sim20$ m/s の範囲でレイノルズ数依存性がほぼ無いことを確認したため, 試験では基本的に 10 m/s に設定した。レイノルズ数は代表長さを柵高さ $H=50$ mm, 風速 $U=10$ m/s としたとき, $Re=3.3\times10^4$ である。

2・2 PIV 計測

柵および車両周りの流れ場を可視化するために PIV 計測を行った。可視化用レーザに nano L 200-15 PIV (Litron Laser 製), 計測用カメラに pco.2000 (pco.製)を使用しこれらの同調制御に LC880 (LabSmith 製)を用いた。撮影パルス間隔は 80 μ s, 撮影周波数は 7.5 Hz とし, 150 ペアの時間平均結果を解析した。PIV の解析条件は, 検査領域は 32×32 pixel² で 50% オーバーラップ, 相関法は再帰的相関法, 後処理で誤ベクトル除去のための補間を行った。撮影画像の解像度は 2048×2048 pixel² で, そのうち垂直方向 y に $3H$, 主流方向 x に $2\sim8H$ の範囲を解析対象とし

Fig. 1 Windbreak fence.

Fig. 3 Overview of experimental devices.

Fig. 2 Train model: (a) CAD image, (b) geometry of pressure ports, (c) fabricated model.

Fig. 4 Dimensionless coordinates and location of train.

た．撮影した画像の解析には **KoncertoII**（西華デジタルイメージ製）を用いた．

2・3 圧力計測

流れ場に設置した車両にかかる力を評価するため，車両表面の圧力計測を行った．図 2 (b) に示す，車両中央断面に開けられた圧力計測孔に差圧計を接続した．差圧計は 1 INCH-DI-4V-MINI（All Sensors 製）を使用した．背圧は大気圧とするために密閉胴外まで背圧管を延ばした．圧力データ収録のサンプリング周波数は 2 kHz，測定点数は 21000 点とした．

圧力データを用いて，各計測点での圧力係数 C_P を (1) 式から算出した．また，車両にかかる力の無次元量である抗力係数 C_D および揚力係数 C_L について， C_D は流れ方向に相対する車両両側面の， C_L は流れ直交方向に相対する車両上下面のそれぞれの差圧をとり (2) 式により算出した．ここで P_i は各計測点での圧力， S_i は各計測点の中間点を境界とした計測点周りの面積， ρ は空気密度である．

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{0.5\rho U^2} \quad (1)$$

$$C_D, C_L = \frac{\sum P_i S_i}{0.5\rho U^2 \sum S_i} = \frac{\sum C_{P,i} S_i}{\sum S_i} \quad (2)$$

3. 流れ場の可視化結果

3・1 車両のみ試験

図 5 に防風柵なし，車両のみでの流れ場を示した．流れ場は 80 μ s 間隔のパルスにて，7.5 Hz で計測した 150 サンプルの時間平均的流れ場である．ベクトルは長さを一定としており，矢印で流れの向きを，矢印の色で風速の大小を表している．白と黒のコンターで各計測点での乱れ強さを示した．図 5 より，車両の上流側側面に主流が当たり，上流側屋根肩部で主流が大きく剥離した．その剥離せん断層は屋根上で再付着することなく車両下流側まで広がり，車両下流側では大規模な逆流が生じた．

3・2 防風柵のみでの流れ場の比較

図 6 に，車両なし，柵のみ，厚さ $T=0.8$ mm での流れ場を示す．図 6 (a) の防風壁（孔径 $D=0$ mm）では，柵の後流が広い範囲で逆流した．また，孔の開いている図 6 (b)，(c)，(d) と比べ，柵上端で剥離した主流が y/H 正方向により大きく広がった．孔の開いている柵で比べると， $D=2$ mm の図 6 (b) では柵背後の流れ場は一樣なのに対し，孔がより大きくなると ($D=6, 10$ mm) 図 6 (c)，(d) では柵近傍 ($x/H < 1.0$) で不均一となり，孔が大きいほど風速の大きい領域での速度が増加した．これは防風柵の孔を通過した流れが各孔から噴流状に噴き出すためと考えられる．一方， $x/H > 1.0$ では風速の不均一性は低減し一樣な流れ場となっていく．この結果より，防風柵から離れることで，柵下流側の流れ場に及ぼす孔径変化の影響は低下していくことが確認される．

図 7 に，柵のみ，厚さ $T=8.0$ mm での流れ場を示す．図 7 (a) の孔径 $D=2$ mm，(b) の $D=6$ mm では柵近傍の流れ場が (c) と比べて一樣な傾向となることがわかる．また， $x/H > 1.0$ で風速はほぼ 0 に近いものの若干の逆流

Fig. 5 Flow velocity vector profile around train model. The mainstream separates at the roof edge of train.

Fig. 6 Flow velocity vector profile around fence for $T=0.8$ mm: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, and (d) $D=10$ mm. Counter flow downstream of the wall is found for (a). On the other hand, the counter flow downstream of the fence is not found for (b), (c), and (d). The unevenness in flow downstream is larger as the hole diameter of fence is larger.

Fig. 7 Flow velocity vector profile around fence for $T=8.0$ mm: (a) $D=2$ mm, (b) $D=6$ mm, and (c) $D=10$ mm. Flows behind fence of $D=2$ and 6 mm are even and counter flow is found when $x/H > 1.0$ for (a) and (b). On the other hand, uneven flow is found behind fence for (c) $D=10$ mm.

が生じた。一方、孔径の大きい ($D=10$ mm) (c) では、柵近傍の流れ場では不均一となるものの、逆流領域は $x/H > 2.0$ の床面付近を除きほとんど見られない。

図8に、孔径 $D=0, 2, 6, 10$ mm、厚さ $T=0.8, 8.0$ mmの柵条件で、1~4線位置における車両上流側側面（図4）および車体中心位置での x 方向風速 u の分布を示した。図中の実線が $T=0.8$ mm、破線が $T=8.0$ mm（1, 2線位置のみ）での結果を表す。この結果より、黒線で示した防風壁（孔径 $D=0$ mm）では $x/H \leq 6.5$ までの広範囲において、柵下流部に逆流が確認できる。また、1線位置（ $x/H=0.7, 1.4$ ）では孔径 D ごとに異なる流れ場となっているが、一方で2線位置以遠（ $x/H \geq 2.4$ ）では $D=6, 10$ mmの両風速分布にあまり差が見られない。これは、図6で見られた、風速の不均一性の低減によるものと考えられる。一方で、 $D=6, 10$ mmの風速分布は $D=2$ mmの風速分布とは異なり、差が見られる。これは、柵の単位面積当たりの孔の個数が $D=2$ mmと6, 10 mmで異なることが主原因であると考えられる。すなわち、 $D=2$ mmのほうが6, 10 mmよりも柵の単位面積当たりの孔の個数が多いため、柵直後からほぼ均一な流れ場であるのに対し、 $D=6, 10$ mmでは $D=2$ mmと比べて孔径が大きく、かつ、孔がまばらに分布するため、柵から同じ距離離れた位置では、孔からの噴流の影響がより大きいためと考えられる。

図9に、1~4線位置での車両上流側側面位置、車両中心位置における風速の x/H 成分 u の、車両高さ範囲 ($0 < y/H < 2$) の平均風速 u_{ave} と主流 U の比 u_{ave}/U を示した。実線が $T=0.8$ mm、破線が $T=8.0$ mmである。防風壁（ $D=0$ mm）を見ると、2線位置に相当する $x/H > 2.4$ ではほぼ0から負の値となっており、逆流が確認できた。また、それ以外の防風柵では、柵からの離隔が大きくなるにつれ u_{ave}/U は低下した。また、厚さ T の影響を見ると、孔径 D が小さいほど T の増加による u_{ave}/U の減少幅が大きい。

図10に、1~2線位置における車両上流側側面における平均風速と主流の比 u_{ave}/U を示した。図6~図9で見られた結果より柵の孔を通過する流れの圧力損失は、柵の孔形状、すなわち孔径 D および厚さ T に依存すると考えられる。そこで、厚さ T と孔径 D の比 T/D で整理した（村塾、佐久間、2015、中野、佐久間、2016）。図10より全体的な傾向として、 T/D が大きくなるほど平均風速は低下した。 T/D がさらに大きくなると、壁のみの値に徐々に

に漸近していくと考えられる。また、1 線、2 線位置で比較すると 2 線位置の方が総じて値は低くなっており、図 9 と同様の傾向が見られる。

Fig. 8 The distribution of x -direction velocity u . Counter flow downstream of wall is found for $D=0$ mm. Although flows just behind fences are uneven, flows downstream when $x/H > 2.4$, far from 2nd track, are even, especially for $D=6$ and 10 mm and they are almost the same distribution.

Fig. 9 Average velocity u_{ave}/U from $y/H=0$ to $y/H=2$. Average velocity for $D=0$ mm is almost zero or negative when $x/H > 2.4$. Average velocities become lower as the distance becomes larger. When the thickness of fence gets thicker, the average velocities become lower.

Fig. 10 Average velocity u_{ave}/U from $y/H=0$ to $y/H=2$: (a) 1st track and (b) 2nd track. The average velocity becomes lower as the ratio T/D gets larger.

3・3 車両と防風柵の両方がある場合

(1) 1 線位置

図 11 に、厚さ $T=0.8\text{ mm}$ での流れ場を示した。図 11 (a) ~ (d) のいずれでも、柵の上部を超えた主流が車体側面上部に当たった。また、車両の上流側屋根肩部で主流は大きく剥離し車両上部の流れ場は車両のみの図 5 と同様な傾向となった。柵に孔のない図 11 (a) では、柵と車両の間に循環流が生じた。一方、孔のある図 11 (b), (c), (d) では孔の下流位置に対応した部分で風速が大きく、それ以外の部分で小さい傾向となった。

図 12 に、 $T=8.0\text{ mm}$ での流れ場を示した。柵の孔径が同じ図 11 (b) と図 12 (a), 図 11 (c) と図 12 (b), 図 11 (d) と図 12 (c) をそれぞれ比べると、流れ場は定性的に類似している。しかし、特に車両の屋根上部の流れの速度比 u/U は、図 12 の方が 0.2 程度低くなっている。防風柵の厚さが増え、柵の孔における抵抗が増加すると、柵の孔を通過する流れが減少する。そのため主流の一部が下向きに流れたことで、車両の上部での風速が低下したと推定される。

(2) 2 線位置

図 13 に、厚さ $T=0.8\text{ mm}$ の場合の流れ場を示した。孔の大きさに関わらず、いずれの場合も柵上端で剥離した主流は車両の屋根肩部付近に当たり、そのまま屋根に沿うように流下した。そのため、1 線位置の場合と異なり屋根肩部での主流の大きな剥離はみられなかった。図 13 (a) を見ると、図 11 (a) 同様、柵と車両の間には循環流が生じている。一方で図 13 (b), (c), (d) では循環は生じず、孔径が大きくなるにしたがって不均一な流れ場となっている。これは図 6 と同様な傾向にあり、孔位置での噴流の影響と考えられる。

図 14 に、厚さ $T=8.0\text{ mm}$ での流れ場を示した。孔径 $D=2\text{ mm}$ の図 14 (a) と図 13 (b) を比べると、柵の後流はどちらでも一様に流れているが、 $T=8.0\text{ mm}$ の図 14 (a) の方が、風速が小さくなった。 $D=6\text{ mm}$ の図 14 (b) と図 13 (c), $D=10\text{ mm}$ の図 14 (c) と図 13 (d) を比べると、どちらも $T=8.0\text{ mm}$ では循環流を生じた。これらは柵が厚くなったことにより、孔を通過する流れに対する圧力損失が大きくなったためと考えられる。柵に孔のない図 13 (a) では柵と車両の間に循環流が見られたことから、柵の厚さが厚くなると孔の抵抗が増加し、柵を通過する流量が減少することで、柵の見かけ上の性質が孔のないものに近づいたと考えられる。

(3) 3, 4 線位置

図 15 に車両が 3 線位置での流れ場を示した。ハイスピードカメラの画角が原因で、車両部分が x/H 方向に広くなっている。いずれの場合でも柵上端で剥離した主流は車両の屋根肩部付近に当たり、そのまま屋根に沿って流下した。これは 2 線位置の図 13, 14 と同様である。孔の無い図 15 (a) では、1, 2 線位置と同様に循環流を生じた。一方、孔のある図 15 (b), (c), (d) では、車両近傍の流れ場、風速分布に大きな差は見られない。これは図 8 で見られたように、柵からの離隔が増えるにつれ、孔径による流れ場の差が小さくなるためと考えられる。また、図 15 中に白黒で示した乱れ強さについて、柵上端から車両の屋根肩部付近にかけてグレーの領域となっており、乱れ強さが大きいことがわかる。

図 16 に車両が 4 線位置での流れ場を示した。孔の無い図 16 (a) では 1~3 線と同様に、柵と車両の間に循環流が見られるものの、柵で剥離した主流は車両屋根よりも上部を通過した。一方、孔の開いている図 16 (b), (c), (d) では、車両周りの流れ場は 3 線位置 (図 15 (b), (c), (d)) と同様な傾向であるものの、3 線位置に比べ車両上部の主流風速が遅くなっている。図 9 で示されたように、離隔が増えるに従って風速が徐々に遅くなっていくためと考えられる。乱れ強さについて、図 15 の 3 線位置の場合と同様に、柵上端から車両の屋根肩部付近にかけてグレーの領域となっており、乱れ強さが大きいことが分かる。乱れ強さについて図 15 と図 16 とを比較すると、特に (b) $D=2\text{ mm}$, (c) $D=6\text{ mm}$ の場合において、柵上端から車両の屋根肩部付近にかけて乱れ強さの大きいグレーの領域は、図 16 の方が屋根肩部よりもやや下方まで広がる傾向にある。この乱れ強さと風速分布とを合わせて考えると、特に (b) $D=2\text{ mm}$, (c) $D=6\text{ mm}$ の場合において、車両上流側側面が 3 線位置では柵の後流領域内に位置していた一方で、4 線位置に変化すると、柵の後流領域から外れる傾向になると考えられる。

Fig. 11 Flow velocity vector profile around the train on 1st track for $T=0.8$ mm: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, and (d) $D=10$ mm. The mainstream hits the upper side of the train and separates from the edge of the roof.

Fig. 12 Flow velocity vector profile around the train on 1st track for $T=8.0$ mm: (a) $D=2$ mm, (b) $D=6$ mm, and (c) $D=10$ mm. The mainstream hits the upper side of the train and separates from the edge of the roof.

Fig. 13 Flow velocity vector profile around the train on 2nd track for $T=0.8$ mm: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, and (d) $D=10$ mm. The mainstream hits at the edge of roof and does not separate at the edge of the roof. Circulation flow exists in between the wall and the train for (a). Circulation flow does not exist in between the fence and the train for (b), (c), and (d).

Fig. 14 Flow velocity vector profile around the train on 2nd track for $T=8.0$ mm: (a) $D=2$ mm, (b) $D=6$ mm and (c) $D=10$ mm. Circulation flow exists in between the wall and the train for (b) $D=6$ mm and (c) $D=10$ mm.

Fig. 15 Flow velocity vector profile around the train on 3rd track for $T=0.8$ mm: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm and (d) $D=10$ mm. The mainstream hits at the edge of roof and the flow does not separate at the edge of roof. Circulation flow exists in between the wall and the train for (a). The differences between figures (b), (c), and (d) on 3rd track are smaller than those on 2nd track of Fig. 13. This is because the differences of flow downstream of fence become smaller as the distance becomes larger, as shown in Fig. 8.

Fig. 16 Flow velocity vector profile around the train on 4th track for $T=0.8$ mm: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, and (d) $D=10$ mm. They show basically the same tendency of 3rd track, Fig. 15. The upstream side of the train on 3rd track is located in the wake area of the fence, while the upstream side on 4th track deviates slightly from the wake area when it moves from 3rd track to 4th track.

4. 圧力計測結果

4・1 圧力係数

本節では、圧力測定結果を(1)式に代入して求めた圧力係数 C_p を示す。圧力計測点は、図2(b)および図17のように、上流側下部の測定点より時計回りにCH1~CH12とする。3章の流れ場の可視化結果と本節の車両周りの圧力係数とを比較することにより、流れ場が車両周りの圧力係数に及ぼす影響について検討する。

(1) 車両のみ

図17に、車両のみの場合の圧力係数分布を示す。図17より、車両屋根面および下流側側面の圧力孔CH4~9の圧力係数は-0.6程度でほぼ一定となった。この時の流れ場は図5に示すように、車両上流側屋根肩部において主流が剥離しており、CH4~9の圧力孔はこの剥離領域内に位置していることがわかる。

(2) 1線位置

図18に、車両が1線位置での圧力係数分布を示した。図18(a)~(d)で、孔径 D をそれぞれ(a) $D=0$ mm (孔なし)、(b) $D=2$ mm、(c) $D=6$ mm、(d) $D=10$ mmと一定条件とし、柵の厚さ $T=0.8\sim 8.0$ mmを変化させた。図18と車両のみの図17とを比較すると、上流側の圧力孔CH1において1(図17)から0付近(図18)へ変化する傾向にあり、ほかの圧力孔よりも変化が大きいことがわかる。これは、図5および図11の流れ場の比較より、防風柵による主流の遮蔽効果の影響であると考えられる。車両屋根面および下流側側面のCH4~9の圧力係数は柵の孔径、厚さに依らず図17とほぼ同様の値を取った。これは図11からもわかるように、車両のみの流れ場と同様に、車両屋根肩部において主流が大きく剥離して、この剥離領域内に位置しているためと考えられる。また、各孔径における柵の厚さの影響を見ると、特に上流側車両側面のCH2で差が大きく、厚くなるほど圧力係数は小さい。これは柵の厚さの増加により孔を通過する流体の風速が低減した影響と考えられる。

(3) 2線位置

図19に2線位置での圧力係数分布を示した。図19と図18とを比較すると、特にCH2~4の C_p が大きく変化していることが確認できる。図19では、上流側の車両側面の圧力孔CH2~3は孔径 $D=0$ mmでは負の値、ほかの孔径では0に近い値、一方、上流側の車両屋根面CH4ではより大きな負圧となっている。この変化の原因は、図11~図14の流れ場で比較したように、防風柵の遮蔽領域と車両位置との関係が変化した影響である。また、CH4の値は柵の厚さにより変化した。その一方でCH5~9の値は孔径、厚さに依らずほぼ一定となった。2線位置では図13のように車両屋根に沿うように主流が流れている。そのため、CH4では柵の孔での抵抗の大小に応じて車両屋根部の主流風速が変化し、車両屋根部にかかる圧力の値も変化したと考えられる。上流側の車両側面のCH2,3では、柵の厚さが厚いほど圧力係数は小さくなった。これは1線位置の場合と同様に柵の厚さの増加により孔を通過する風速が低減した影響と考えられる。

Fig. 17 Pressure coefficient C_p of the train. The C_p values from CH4 to CH9 are almost the same because these channels of pressure ports are located in the wake as shown in Fig. 5.

(4) 3, 4 線位置

図 20 (a) に 3 線位置での, (b) に 4 線位置での圧力係数分布を示した. 1 線位置 (図 18) および 2 線位置 (図 19) の場合とは異なり, 柵の厚さ $T=0.8$ mm で一定とし, 孔径 $D=0\sim10$ mm と変化させた. 2 線位置 (図 19) と比較すると, CH1 および CH4 で差が見られるものの, 他の圧力孔で同様な傾向となっていることがわかる. 孔径 D の影響について, 3, 4 線位置でも, CH5~9 の値はほぼ一定となる一方で, CH1~4 の値は孔径により異なった. しかし, 孔径の大小に伴う統一的な傾向は見られない.

(5) 1~4 線位置

図 21 に 1~4 線位置での圧力係数分布をまとめて示した. 図 21 は, 柵の厚さ $T=0.8$ mm で一定, 孔径 D は (a) $D=0$ mm (孔なし), (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, (d) $D=10$ mm でそれぞれ一定条件とし, 1 線~4 線位置に変化させた場合を比較した.

車両の抗力に関する車両の両側面の分布を比較する. 車両が 1~4 線位置に変化したときの圧力係数の変化は, 下流側のほうが上流側よりも小さい. これは, 柵と車両の離隔に依らず, 下流側側面は常に車両の後流領域内に位置しているためと考えられる. 1 線位置での柵の孔径変化の影響を見ると, 図 21 (a) の孔なしでは, 車両上流側下部 (CH1) の圧力係数が負であるのに対し, 孔のある (b) ~ (d) では正となっており, 柵の孔を通過した流れが車両下部に当たっていると考えられる. 2~4 線位置では, 車両の下流側 (CH7~9) の圧力係数はほぼ変わらないが, (d) $D=10$ mm では 3 線位置が他の場合よりも 0 に近い値をとった. また, (b) $D=2$ mm の CH2 と (c) $D=6$ mm の CH1 の圧力係数値は, それぞれ 3 線位置で最小となっている. この理由は, 図 15 と図 16 との比較より, 特に (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm の場合において, 車両上流側側面が 3 線位置では柵の後流領域内に位置していた一方で, 4 線位置に変化すると, 柵の後流領域から外れる傾向となり, 流れ場の変化が影響を及ぼしていると考えられる. そのために 3 線位置付近で抗力係数が小さくなったことが考えられる.

主流直交方向の圧力係数についてみると, 孔のない (a) の CH4 の値が, 孔のある (b) ~ (d) の CH4 の値に比べ小さくなった. これは孔がないことで大きな逆流を生じた影響と考えられる. また, (b) ~ (d) では, 圧力

Fig. 18 Pressure coefficient C_p of the train on 1st track: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, and (d) $D=10$ mm. The values from CH4 to CH9 show the same tendency with those of Fig. 17 because the flow field around roof of the train on 1st track is almost the same as that without the fence. C_p changes considerably as the thickness of the fence changes especially on CH2.

Fig. 19 Pressure coefficient C_p of the train on 2nd track: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, and (d) $D=10$ mm. C_p values from CH5 to CH12 are almost the same.

係数値にばらつきはあるものの、1 線位置および 2~4 線位置でそれぞれ同様の傾向を示した。1 線位置では、車両上面の圧力係数は CH4~6 でほぼ一定なのに対し、2~4 線位置では $CH4 < CH5 < CH6$ となり、各々の値は柵と車両の離隔が大きくなるにつれ 0 に近づいた。これは、図 11~図 16 に見られるように、車両と柵の離隔が増えるにつれ車両上流側屋根肩部での y 方向の流速が小さくなるためと考えられる。車両下部 (CH10~12) の圧力係数は離隔が大きくなるにつれ 0 に近づいた。これは、地面と車両の間を流れる流速が減少するためと考えられる。

4・2 抗力係数および揚力係数

本節では、前節までに得られた車両周りの流れ場と、車両に働く抗力および揚力との関係について検討する。車両の抗力係数 C_D および揚力係数 C_L は、4.1 節で示した圧力係数 C_P を (2) 式に代入して求めた。

(1) 車両のみ

図 17 に示した C_P 分布を利用して車両のみの場合の抗力係数 C_D および揚力係数 C_L を計算した。その結果、 C_D は 1.5、 C_L は -0.7 となった。この結果は、本測定では限られた圧力測定点数ではあるものの、角柱と壁面による先行研究と概ね一致した (谷口他, 1983)。

(2) 1 線位置

図 22 に、車両が 1 線位置での抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L を示した。図の横軸に柵の孔径を取り、柵の厚さごとにデータをプロットした。図中のエラーバーは平均値の標準誤差を表す。 C_D は車両のみの 1.5 を 9~25% 下回り、防風柵による低減効果が確認できた。この C_D の低減の主原因は、図 5 および図 11 の流れ場の比較、および図 17 と図 18 の C_P の比較より、防風柵による遮蔽効果によって特に圧力孔 CH1 の C_P が大きく変化した影響であると考えられる。厚さの影響を見ると、厚さ $T=0.8, 1.6$ mm ではあまり差が見られないものの、 $T=8.0$ mm では C_D は標準誤差の範囲外となり抗力係数が低減した。これは柵の厚さが厚くなり、各孔での流れへの抵抗が増大したことにより柵下流側の風速が低減したためと考えられる。また、 $T=0.8, 1.6$ mm では孔径 D が大きくなるにつれ C_D も大きくなる傾向があるものの、 $T=8.0$ mm では $D=10$ mm のとき最も C_D が小さくなった。前者は孔径が大きくなることで柵下流側の風速が増加したためと考えられるが、後者の原因は不明である。 C_L を見ると、いずれの場合でも負の値を取っているが、防風柵の厚さ、孔径による統一的な傾向は見られず、標準誤差の範囲内でほぼ一致した。

Fig. 20 Pressure coefficient C_P of the train on (a) 3rd track and (b) 4th track for $T=0.8$ mm. C_P values are almost the same from CH5 to CH12.

Fig. 21 Pressure coefficient C_P of the train on each track for $T=0.8$ mm: (a) $D=0$ mm, (b) $D=2$ mm, (c) $D=6$ mm, and (d) $D=10$ mm.

先行研究において、柵厚さ T と孔径 D の比 T/D により、柵下流の流れ場が整理されている。そこで図 22 の C_D および C_L の結果を T/D で整理しなおした結果を図 23 に示した。図では点の色が柵の孔径を、点の形が柵の厚さを示す。 C_D を見ると、 T/D が大きくなるにつれ孔の無い防風壁での値に漸近する傾向があることがわかる。 C_L ではばらつきが大きいものの、 C_D と同様に防風壁での値に漸近していくと考えられる。これは、図 10 に示した平均風速 u_{ave}/U の値が T/D が大きくなるにしたがって防風壁の値に漸近していく傾向からも推測される。

(3) 2 線位置

図 24 に、2 線位置での抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L を示した。図の横軸に柵の孔径を取り、柵の厚さごとにデータをプロットした。2 線位置での C_D は、本節 (1) の車両のみの値、および、(2) の 1 線位置の値より小さくなり、車両のみと比べ 60~75% 減となった。これは 2 線位置では、車両はほぼ防風柵の後流の範囲に入り (図 13, 14), その平均風速は 1 線位置よりも小さくなり (図 9), その結果、上流側の車両側面の圧力係数 C_p (CH1~3) が、車両のみ (図 17) および 1 線位置 (図 18) よりも、2 線位置 (図 19) において減少したためと考えられる。 $D=0$ mm では C_D は負の値となった。この理由は、図 13 (a) で見られたように $D=0$ mm では柵下流側で循環流が生じていること、また、図 19 (a) の圧力係数は上流側の車両側面 CH1~3 で負圧となっていることから、柵と車両の間に負圧場が存在するためと考えられる。柵の厚さの影響を見ると、 $T=0.8, 1.6$ mm に比べ 4.0, 8.0 mm では C_D が小さくなった。柵が厚くなることで孔の抵抗が大きくなり、例えば図 13 (b) と図 14 (a) の比較からわかるように柵が厚いほど風速が低減したためと考えられる。これにより、図 19 (b), (c) で顕著のように、柵が厚いほど車両上流側側面 (CH1~3) の圧力係数が負から正の方向へ値が変化することで、 C_D が小さくなったと考えられる。揚力係数を見ると、いずれも正の値を取っているが、統一的な傾向は見られない。

Fig. 22 Aerodynamic coefficients of the train on 1st track: (a) drag coefficient C_D and (b) lift coefficient C_L . C_D values are 9 to 25% lower than those for train only. C_L values are negative.

Fig. 23 Aerodynamic coefficients of the train on 1st track: (a) drag coefficient C_D and (b) lift coefficient C_L . C_D decreases as the ratio T/D increases. C_L varies randomly.

Fig. 24 Aerodynamic coefficients of the train on 2nd track: (a) drag coefficient C_D and (b) lift coefficient C_L . C_D values are 60 to 75% lower than those of train only. C_L values are positive.

Fig. 25 Aerodynamic coefficients of the train on 2nd track: (a) drag coefficient C_D and (b) lift coefficient C_L . C_D values decrease as the ratio T/D increases. C_L shows no trend.

Fig. 26 Aerodynamic coefficients on each track: (a) drag coefficient C_D and (b) lift coefficient C_L . C_D values decrease as the distance between the fence and the train increases. When D is 0 mm, C_D takes negative values from 2nd to 4th track. C_L takes negative values only on 1st track. From 2nd to 4th track, C_L decreases as the distance increases.

図 25 に図 23 と同様に、 C_D , C_L を柵の厚さ T と孔径 D の比 T/D で整理した結果を示した。ばらつきが大きいものの、 T/D が大きくなるにつれ C_D , C_L は共に減少し、防風壁の値に漸近する傾向が見られた。本節 (2) で述べたように、図 10 に示した平均風速 u_{ave}/U の値が T/D が大きくなるにしたがって減少し、防風壁の値に漸近していくことが影響していると考えられる。

また、図 23、図 25 から、 C_D 値は T/D が 0-0.4 の範囲と、1.3 以上の範囲では、エラーバーを考慮しても、傾向が変化していると考えられる。一方、0.4-1.3 の間の C_D 値はばらつきが大きくなっている。これらのことから、 T/D が 0.4 と 1.3 の範囲、すなわち $T/D \sim 1$ 程度を境にして傾向が変化していると考えられる。そのため、防風柵

の効果検討のための風洞試験においては、防風柵模型の T/D が 1 よりなるべく小さい値（本研究結果からは 0.4 程度以下）とする必要があると考えられる。

(4) 1~4 線位置

図 26 に、横軸を柵から車両中心までの無次元距離として 1~4 線位置での抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L の変化を示した。 C_D について、 $D=0$ mm では、2 線位置以遠では抗力係数は負の値を取った。この原因は前述のように、図 13 (a), 15 (a), 16 (a) の柵下流側の流れ場ではいずれも循環流を生じていること、また、図 19 (a), 図 20 の圧力係数は上流側の車両側面 CH1~3 で負圧となっていることから、柵と車両の間に負圧場が存在しているためと考えられる。図 26 (a) より、孔径 $D=2$ mm および 6 mm の防風柵では、3 線位置で C_D は最小値を取ったと考えられる。これは、図 21 より、車両側面の下流側の圧力係数は柵と車両の離隔が大きくなるにつれて 0 に近づくこと、また、上流側のいくつかの圧力係数が $D=2, 6$ mm の場合に 3 線位置で 2, 4 線位置よりも小さい値をとっていることから、それらの圧力係数から求めた抗力係数値も小さくなった。ところで前述のように、本研究の $D=2$ mm 条件に近い先行研究でも 3 線位置付近で C_D が最小となる結果が確認されており、図 26 (a) の結果はそれと同様な傾向となっている（種本, 2012, 乙部他, 2017）。

C_L を見ると、ばらつきはあるものの、1 線位置で負の値で最小値を、そして 2 線位置で最大値ないし 3, 4 線位置とほぼ同じ値をとる傾向にある。一方、孔のある防風柵では 3 線位置より 4 線位置のほうが小さくなる傾向がある。これは、図 15 (b), (c), (d) および図 16 (b), (c), (d) より、車両上部での風速が 3 線位置より 4 線位置で遅くなっているためと考えられる。

5. 考 察

防風柵および車両模型を用いた風洞試験による、PIV および圧力計測結果から、柵と車両の離隔と抗力係数の関係、および、防風柵の厚さと孔径変化が流れ場および抗力係数に与える影響について考察する。本試験条件下において、レイノルズ数は模型試験と現地試験とは模型縮尺程度（約 1/40）異なる。一方、実物と模型ともに防風柵上端部や車両の上流側屋根肩部から流れが大きく剥離して、剥離点はほぼ固定されていると考えられることから、実物と模型のレイノルズ数の依存性は小さいと推定される。このことから、車両の上流側屋根肩部で大きな剥離が伴う車両が防風柵下流側に位置する場合の流れのメカニズムを解明する目的として本研究方法は有効であり、本試験結果を実物の場合に定性的に適用可能であると考えられる。

5・1 防風柵と車両の離隔

車両周りの圧力係数分布の結果より、車両が 1~4 線位置に変化したときの圧力係数の変化は、下流側側面のほうが上流側側面よりも小さいことが確認された。このことから、抗力係数は主に車両上流側側面の圧力分布変化により変化しており、下流側側面の圧力分布変化の影響は相対的に小さいことが示された。これらの圧力分布は柵と車両周りの流れ場により決まることから、柵と車両の間の距離の変化がどのように流れ場に影響を及ぼしているかを調べることで、車両に働く空気力変化のメカニズムを解明することが出来ると考えられる。

PIV 計測より、車両 1 線位置では車両上流側側面の下部は防風柵の後流領域に入っていたものの、上部には主流が直接当たり、屋根肩部で主流が大きく剥離した。2 線位置では、防風柵上端部から剥離したせん断流れが車両屋根付近へ向かい、車両上流側側面の全体が柵の後流領域に入り、1 線位置で見られた車両屋根部での剥離はほとんど見られなかった。3 線位置では 2 線位置と同様に車両上流側側面のほぼ全体が柵の後流領域に入り、また、この条件において、先行研究同様、抗力係数が最も小さくなった（種本, 2012, 乙部他, 2017）。このように 2, 3 線位置では防風柵の後流領域内に車両上流側側面のほぼ全体が位置していたことから、抗力係数も比較的小さい値となった。しかし、4 線位置では車両と防風柵の離隔が大きくなり、特に柵の厚さが $T=0.8$ mm、孔径が $D=2$ mm および $D=6$ mm の条件において、車両上流側側面が柵の後流領域から外れる傾向に変化した。本研究では実施していないが、柵からの車両位置が 4 線位置よりさらに離れていくと、車両上流側側面は柵の後流領域から外れていき、ある距離において、柵の防風効果がほとんど無くなる、すなわち、柵上部を回り込んできた主流が車両側面に当たると考えられる。このように、車両上流側側面と柵の後流域との位置関係が変化することによ

り主に車両上流側側面の圧力分布が変化し、それに伴い、車両に加わる抗力が変化し、その結果、3 線位置で抗力が最小になったと考えられる。先行研究では三分力天秤による空気力計測のみで、3 線位置付近で抗力が最小となる原因は不明であった。本研究における流れ場の可視化および車両表面圧力計測の結果より、この原因が上記のように説明できると考えられる。

5・2 防風柵の形状の影響

防風壁 ($D=0$ mm) の下流には大きな逆流が生じた。柵下流に車両があると、防風壁と車両との間には循環流を生じた。車両表面の圧力計測結果から、2 線より離れると防風壁と車両との間には負圧場が発生していると考えられる。孔のあいた防風柵では、柵の厚さ T と孔径 D の比 T/D が大きくなるに従って、車両にかかる抗力は小さくなる傾向を示した。抗力係数は、1 線、2 線位置ともに、 $T/D < 1$ の範囲では、 T/D の値が大きいほど小さくなった。 $T/D > 1$ では変化量が小さくなり、孔のない防風壁の値へ漸近する傾向であった。

柵のみを対象とした先行研究においても、 T/D が大きくなるに従って柵を通過する流量が低下する傾向は確認されていることから、 T/D が大きくなることで柵を通過し車両上流側側面に当たる流速が減少し、車両の抗力係数も低下したと考えられる (Allori et al., 2013)。実物の T/D が 0.1 程度である一方、風洞試験では 1 程度になる可能性があるため、防風柵効果の評価における風洞試験では、防風柵模型の形状、特に T/D が 1 よりなるべく小さい値 (本研究結果からは 0.4 程度以下) とする必要があると考えられる。

6. 結 言

本研究では、鉄道用防風柵の風洞試験において、柵と車両の離隔を 1~4 線と設定して流れの可視化、車両表面の圧力計測を行い、柵から 3 線位置付近で車両の抗力が最小となる原因を調査した。その際に防風柵の孔径 D 、厚さ T を変化させることで、防風柵模型形状が流れ場および車両に働く空気力に及ぼす影響も調査した。本研究により得られた知見を以下に述べる。

- 1) 防風柵なし、車両のみでは、車両上流側側面の全体に主流が当たり、上流側の車両屋根肩部で主流が大きく剥離した。車両の抗力係数は正、揚力係数は負の値を取った。
- 2) 防風柵あり、車両が 1 線位置では、車両上流側側面の上部に主流が直接当たり、屋根肩部で主流が大きく剥離した。車両上流側側面は、2 線位置から 3 線位置の距離では、柵の後流領域へ入る方向、一方、4 線位置へ距離が離れと、出る方向に変化した。そのため、主に車両上流側側面の圧力分布が変化し、それに伴い、車両に加わる抗力が変化し、抗力係数は 3 線位置で最小となった。この 3 線位置付近で抗力係数が最小となる傾向について、先行研究では不明だったその原因を明らかにした。
- 3) 孔の無い防風壁では、下流に大きな逆流を生じた。防風壁と車両を置いた場合、その間に循環流を生じた。特に 2 線位置以遠では明瞭な循環流が観測され、壁と車両の間に負圧場が生じていると考えられることを示した。
- 4) 防風柵の厚さ T 、孔径 D の比 T/D が大きいほど柵下流の平均風速は低下した。
- 5) 車両の抗力係数は、1 線、2 線位置ともに、防風柵の厚さ T 、孔径 D の比 T/D が大きいほど小さくなった。 $T/D > 1$ ではその変化量が小さくなり、孔のない防風壁の値へ漸近していった。実物の T/D が 0.1 程度である一方、風洞試験では 1 程度になる可能性があるため、防風柵効果の評価における風洞試験では、防風柵の形状、特に T/D が 1 よりなるべく小さい値に設定することが必要と考えられる。

文 献

- 航空・鉄道事故調査委員会, 鉄道事故調査報告書, RA2008-4 (2008), pp.58-62.
- Allori, D., Bartoli, G. and Mannini, C., Wind tunnel tests on macro-porous structural elements: A scaling procedure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 123 (2013), pp. 291-299.
- Avila-Sanchez, S., Lopez-Garcia, O. and Meseguer, J., Influence of embankments with parapets on the cross-wind turbulence intensity at the contact wire of railway overheads, *Joint Rail Conference 2010* (2010).
- Barcala, M. A. and Meseguer, J., An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross wind on a two-dimensional model of a railway vehicle on a bridge, *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Vol. 221, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (2007), pp. 487-494.
- 鉄道強風対策協議会, 防風設備の手引き (2006), p. 7.
- Dorigatti, F., Sterling, M., Baker, C. and Quinn, A., Crosswind effects on the stability of a model passenger train - A comparison of static and moving experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 138 (2015), pp. 36-51.
- Huang, L.-M., Chan, H., C. and Lee, J.-T., A numerical study on flow around nonuniform porous fences, Journal of Applied Mathematics, Vol. 2012 (2012).
- Kim, H.-B. and Lee, S.-J., Hole diameter effect on flow characteristics of wake behind porous fences having the same porosity, Fluid Dynamics Research, Vol. 28 (2001), pp.449-464.
- 小峯裕己, 村上周三, フェンス下流の風速分布の風洞模型実験における再現性について, 昭和 56 年度日本建築学会関東支部研究報告集(1981), pp. 41-44.
- 国枝正春, 鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析, 鉄道技術研究報告, No. 793 (1972).
- 松倉由幸, 佐久間豊, 防風柵の厚さと孔径変化が車両周りの流れ場に及ぼす影響の風洞試験による評価, 第 24 回鉄道技術連合シンポジウム, 発表番号 S9-3 (2017).
- 三須弥生, 大山安紀子, 土井賢一, 新幹線の転覆耐力評価の精度向上に向けた空気力特性の把握, 第 23 回鉄道技術連合シンポジウム, 発表番号 S7-5-4 (2016).
- 村塾一喜, 佐久間豊, 防風柵模型の厚さおよび孔径変化に伴う流れ場変化の PIV 計測, 第 22 回鉄道技術連合シンポジウム, 発表番号 1114 (2015).
- 中野高志, 佐久間豊, 風洞試験による有孔折板を用いた防風柵下流の風速分布測定, 第 23 回鉄道技術連合シンポジウム, 発表番号 S9-4 (2016).
- 乙部達志, 鈴木実, 野口雄平, 強風時の車両に対する高欄等による遮風効果, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 9 (2017), pp.5-10.
- Sesma, I., Larraona, G., S., Vinolas, J., Rivas, A. and Avila-Sanchez, S., A two-dimensional computational parametric analysis of the sheltering effect of fences on a railway vehicle standing on a bridge and experiencing crosswinds, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 229, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (2013), pp.186-200.
- 鈴木実, 車両走行模型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 (2016), pp.41-46.
- 武田勝昭, 安田喜世史, 竹内政夫, 金田安弘, 防風・防雪柵の性能に関する風洞試験, 日本風工学会誌, No. 25 (1985), pp. 15-32.
- 種本勝二, 幅の広い高架橋に設置した防風柵の効果, 第 256 回鉄道総研月例発表会要旨 (2012).
- 谷口清一, 宮越勝美, 堂田誠治, 平面壁と二次元角柱との干渉(迎え各 0 度の場合の流体力), 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 49, No. 447 (1983), pp. 2522-2529.

References

- Aircraft and railway accidents investigation commission, Railway accident investigation report, RA2008-4 (2008), pp.58-62 (in Japanese).
- Allori, D., Bartoli, G. and Mannini, C., Wind tunnel tests on macro-porous structural elements: A scaling procedure, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 123 (2013), pp. 291-299.
- Avila-Sanchez, S., Lopez-Garcia, O. and Meseguer, J., Influence of embankments with parapets on the cross-wind turbulence intensity at the contact wire of railway overheads, Joint Rail Conference 2010 (2010).
- Barcala, M. A. and Meseguer, J., An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross wind on a two-dimensional model of a railway vehicle on a bridge, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 221, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (2007), pp. 487-494.
- Countermeasures Council of Strong Wind for Railway, Windbreak equipment guide (2006), p. 7 (in Japanese).
- Dorigatti, F., Sterling, M., Baker, C. and Quinn, A., Crosswind effects on the stability of a model passenger train - A comparison of static and moving experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 138, pp. 36-51, 2015.
- Huang, L.-M., Chan, H., C. and Lee, J.-T., A Numerical Study on Flow around Nonuniform Porous Fences, Journal of Applied Mathematics, Vol. 2012 (2012).
- Kim, H.-B. and Lee, S.-J., Hole diameter effect on flow characteristics of wake behind porous fences having the same

- porosity, Fluid Dynamics Research, Vol. 28 (2001), pp. 449-464.
- Komine, Y. and Murakami, S., The reproducibility of the wind speed distribution on the fence leeward in wind tunnel test, Proceeding of the architectural research meetings, Kanto Chapter, Architectural Institute of Japan (1981), pp. 41-44 (in Japanese).
- Kunieda, M., Theoretical study on a mechanics of overturn of railway rolling stock, Railway Technical Research Report, No. 793 (1972) (in Japanese).
- Matsukura, Y. and Sakuma, Y., Wind tunnel evaluation of effects of thickness and hole diameters of windbreak fence on the downstream flow field around a train, J-RAIL 2017, No. S9-3 (2017) (in Japanese).
- Misu, Y., Oyama, A. and Doi, K., Accuracy improvement in critical wind speed estimation for sinkansen vehicle overturning at high speed running conditions, J-RAIL 2016, No. S7-5-4 (2016) (in Japanese).
- Murano, K. and Sakuma, Y., Flow field changes due to varying thickness and pore diameter of windbreak fence model using PIV, J-RAIL 2015, No. 1114 (2015) (in Japanese).
- Nakano, T. and Sakuma, Y., Wind velocity distribution measurement behind porous corrugated windbreak fence in wind tunnel, J-RAIL 2016, No. S9-3 (2016) (in Japanese).
- Otobe, T., Suzuki, M. and Noguchi, Y., Wind protection effect by the wall for a vehicle with strong wind, RTRI Report, Vol. 31, No. 9 (2017), pp.5-10 (in Japanese).
- Sesma, I., Larraona, G., S., Vinolas, J., Rivas, A. and Avila-Sanchez, S., A two-dimensional computational parametric analysis of the sheltering effect of fences on a railway vehicle standing on a bridge and experiencing crosswinds, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 229, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (2013), pp. 186-200.
- Suzuki, M., Method of wind tunnel test on aerodynamic characteristics of vehicle under cross wind by using moving model rig, RTRI Report, Vol. 30, No. 7 (2016), pp. 41-46 (in Japanese).
- Takeda, K., Yasuda, K., Takeuchi, Y. and Kaneda, Y., Wind tunnel test on the performance of windbreak and snow fences, Journal of Wind Engineering, No.25 (1985), pp. 15-32 (in Japanese).
- Tanemoto, K., The effect of windbreak fence on wide bridge, The 256th monthly presentation of RTRI (2012) (in Japanese).
- Taniguchi, S., Miyakoshi, K. and Dohda, S., Interference between plane wall and two-dimensional rectangular cylinder (Fluid force when the angle of attack is 0 deg.), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 49, No. 447 (1983), pp. 2522-2529 (in Japanese).