

新幹線車両側面の窓および引戸の凹部による空気抵抗

佐久間 豊* 井門 敦志**
渡邊 耕司*** 立松 知紘#

Aerodynamic Drag of Windows and Doors on the Sides of Shinkansen Trains

Yutaka SAKUMA Atsushi IDO
Koji WATANABE Tomohiro TATEMATSU

The aerodynamic drag of windows and a door on the sides of Shinkansen trains was measured in a large-scale wind tunnel to evaluate the contribution ratio of the aerodynamic drag of windows and doors to the total aerodynamic drag of an intermediate vehicle. Mock-ups of a door and three windows with different sizes and shapes were used. The edge shapes of the window-frames were also varied. It is shown that the aerodynamic drag of windows decreases as the size becomes smaller and the edges become smoother. The aerodynamic drag of an intermediate vehicle can be reduced by 2.6 percent if the edges of all the windows and doors are flattened.

キーワード：空気抵抗，風洞，新幹線，窓，引戸

1. はじめに

新幹線車両は高速域においては走行抵抗の大部分を空気抵抗が占めるために、高速車両の走行エネルギー低減のためには空気抵抗低減対策が重要である。車両の空気抵抗低減対策として、台車部や車両連結部の凹凸部の平滑化に関する研究が行われてきた^{1) 2)}。また最近の新幹線車両では、騒音低減対策のための台車側面カバーや車両連結部幌などが設置され³⁾、結果的に車両の空気抵抗低減対策にもなっていると考えられる。このように最近の新幹線車両では平滑化が大幅に進んでおり、さらなる空気抵抗低減のためには、これまではあまり着目されてこなかった車両表面の細かな凹凸が空気抵抗に及ぼす影響を評価する必要があると考えられる。そこで本研究では、車両表面の細かな凹凸のうち、車両側面の窓および引戸の凹部に着目した。

台車部や車両連結部の凹凸部などと比較すると、窓や引戸の凹部の段差は小さく空気抵抗も小さいものの、凹部の数が多いために凹部全体の空気抵抗は無視できない大きさになっている可能性がある。しかし、窓および引戸の凹部による空気抵抗の定量的評価は、その試験方法にも工夫が必要であることから、ほとんど行われていない。そこで本研究では、新幹線車両側面の窓および引戸

の凹部が車両の空気抵抗に与える影響を評価するため、実物大の部分模型を用いて風洞試験による空気抵抗測定を行った。そして、窓および引戸の空気抵抗の測定結果を、中間車両の空気抵抗を基準とする割合として評価した。

空気抵抗低減すなわち走行エネルギー低減の観点からは、窓や引戸の凹部の段差を設計段階から無くして（ブラグドアなどにより）平滑化することが推奨される。そのように平滑化された車両もあるものの、段差解消のために製造コストやメンテナンスコストが増加するため、また、凹部全体を平滑化した場合の空気抵抗低減効果が不明なため、平滑化されていない車種も多い。本研究では、鉄道事業者が車両の新造や改造時に窓および引戸の凹部による段差を無くして平滑化した構造とするかどうかについての、また、段差がある窓形状を採用する場合には空気抵抗がより低減する窓形状やその設置方法についての指針を示すことを目的とした。

2. 風洞試験

2.1 風洞

試験には鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞の開放型測定部（幅 5m × 高さ 3m の平行ノズル）を使用した。図 1 に風洞試験の概略を示す。主流風速は模型強度等を考慮し 180km/h (50m/s) に設定した。現車周りの流れは列車先頭から境界層が発達し、中間車の車両側面では乱流境界層の風速分布となっている。そこで、現車の車両側面の風速分布⁴⁾ になるべく近づけた状態で測定するため、バリアを平行ノズル内の上流側の床面に設置

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

** 研究開発推進部 風洞技術センター

*** 鉄道国際規格センター

環境工学研究部 車両空力特性研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

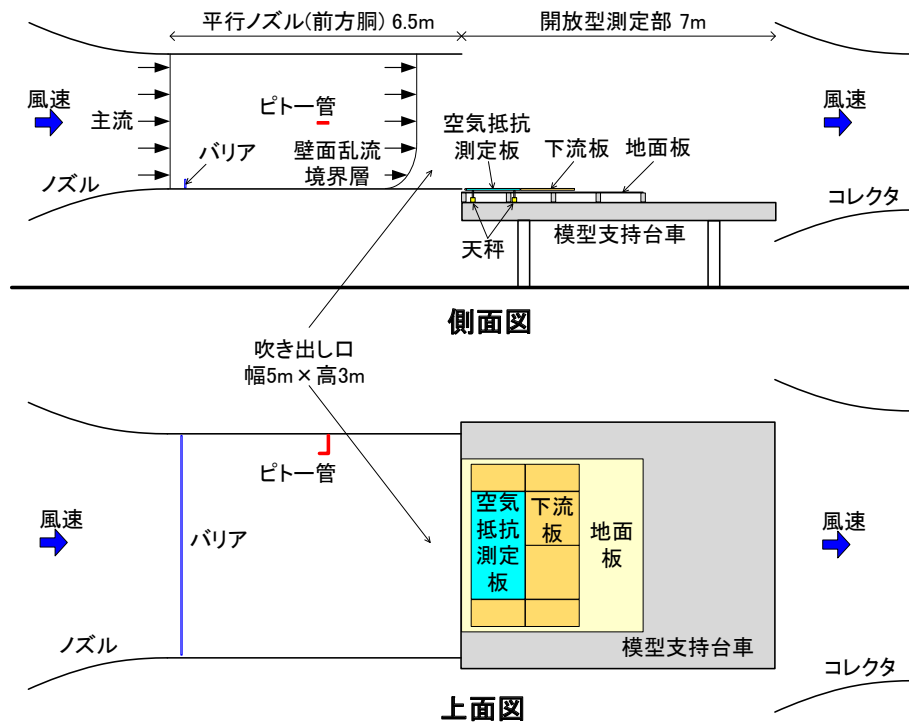


図1 風洞試験概略

し、主流の床面付近の流れを乱した(図1, 図2)。バリアは、高さ200mm、歯数48個、歯1個の幅99.6mmで厚さ3.2mmのアルミ製である。

2.2 空気抵抗測定装置

模型支持台車上に、窓および引戸の空気抵抗を測定するための空気抵抗測定装置を設置した(図2)。空気抵抗測定装置は、空気抵抗測定板、下流板、地面板、天秤から構成される。

下流板および地面板は、空気抵抗測定板周りの流れの乱れを出来るだけ少なくするために設置した。空気抵抗測定板(以下、測定板)の下流側および側面側の端部は、流れに対して垂直な面になっており、流れの乱れにより面の圧力場が変化し、測定板の空気抵抗に影響を及ぼす可能性がある。その影響を低減するため、測定板と同じ厚みのある下流板を、測定板の下流側および側面側に、僅かに隙間(1~2mm)をあけて設置して、主流が測定板の垂直な面に流れ込みにくい構造とした。図1の側面図に示すように、地面板の下で模型支持台車上に天秤(日章電機社製: LMC-1541-100N)を6台設置し、各天秤から上方に支柱を伸ばして空気抵抗測定板を下から保持した。地面板には孔を明け、支柱が地面板と接触しないようにした。天秤からの出力信号は、1回の測定につき、サンプリング周波数2kHz×10秒間=20,000個のデータを3セット収録し、その平均値から空気抵抗を求めた。後述する各模型条件につき3回ないし4回の測定を行った。

空気抵抗測定板の構成について説明する。図2に示すように、測定板の中央部分は取替可能な構造であり、その部分を実物大模型の窓、引戸、平板へと順次交換し、測定板全体の空気抵抗を測定した。平板(平滑化された車両側面に相当)から、凹形状の窓または引戸に変更すると、測定板全体の空気抵抗が増加する。ここでは、この増加分を窓および引戸の凹部による空気抵抗として評価した。

測定板は縦置と、90度回転した方向の横置の二つの方向で設置可能な構造とした(図2)。横置条件において、窓1個および2個の場合について測定を行い、窓が複数(2個)並んだときの空気抵抗が、1個の結果の複数倍(2倍)になっているか検討および確認を行った。

2.3 模型条件

図3に窓および窓枠段差部の形状を示す。今後のさらなる高速化における窓サイズの縮小が空気抵抗へ及ぼす影響を評価するため、現行の営業車で採用されている現行タイプ(窓A)よりも小さい2種類の飛行機タイプ(窓B)、A4用紙とほぼ同じ大きさのA4大タイプ(窓C)の実物大模型も製作した。窓枠段差部の形状は、現行タイプの45度に加えて、90度および円弧も試験した。以上のように、窓の大きさ3種類、窓枠段差形状3種類について、中間車両の空気抵抗に及ぼす影響を評価した。なお窓の設置個数の空気抵抗への影響を確認するための横置の試験では、窓枠段差形状90度のみで比較した。これは45度より90度の方が大きな空気抵抗値となるこ

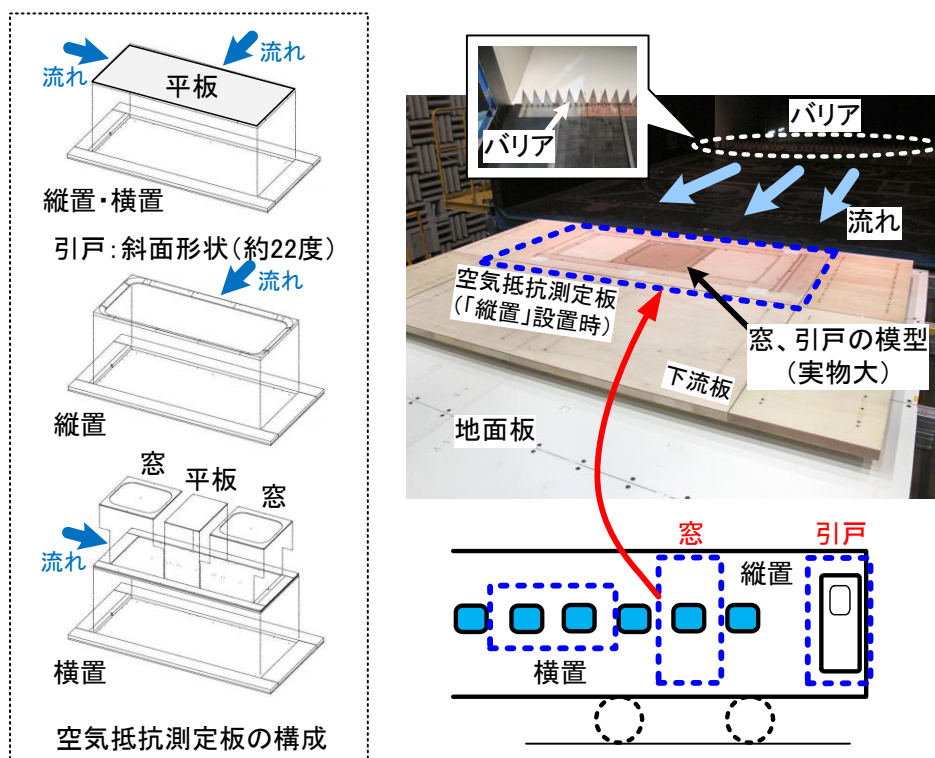


図2 空気抵抗測定装置および空気抵抗測定板の構成

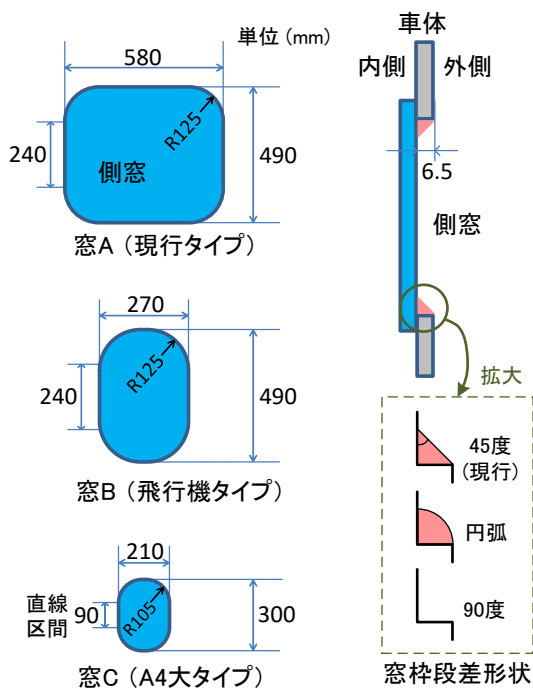


図3 窓および窓枠段差部の形状

とから、信号対雑音比 (S/N 比) を改善してデータの不確かさを小さくするためである。

引戸は現行の営業車で採用されている形状の1種類で、サイズは高さ1850×幅730×深さ35mm、その段差部は斜面形状(約22度)である(図2)。

2.4 風洞試験で得られた空気抵抗測定値と空気抵抗増加率の関係

先行研究にて推定された200系新幹線車両の空気抵抗係数を用いて、現行タイプの新幹線の間接車(車両連結部に上部幌、台車側面にフルスカートを設置)1両の空気抵抗係数が0.10と推定されている¹⁾。また新幹線車両の空気抵抗は、先頭・後尾部とそれ以外の中間部に分けて考えることができ、空気抵抗の大部分は中間部が占め、先頭部・後尾部は小さいことが分かっている¹⁾。そこで本研究では、上記の空気抵抗0.10を基準として、窓および引戸の凹部(1個あたり)の空気抵抗の割合(増加率)として空気抵抗測定値を評価した。以下に、窓および引戸の空気抵抗測定値からどのようにして空気抵抗増加率へ換算するかを具体例を、中間車1両およびN両の場合について示す。

以下では下記のような数値を仮定する(列車速度200km/h時)。なおこれは例であるため、次章の測定結果とは必ずしも一致しない場合があることに留意されたい。

- ・風洞試験で得られた窓1個の空気抵抗: ΔD_w [N] (例 0.4N)
 - ・風洞試験で得られた引戸1個の空気抵抗: ΔD_d [N] (例 9.5N)
 - ・先行研究¹⁾より推定された新幹線中間車1両の空気抵抗: D_{Acar} [N] (例 2,000N)
- 平滑な中間車1両に窓1個または引戸1個があること

特集：空気力学・騒音

により増加する空気抵抗増加率は、それぞれ次式となる。

$$\text{窓 1 個の場合} : \frac{\Delta D_w}{D_{Acar}} = \frac{0.4N}{2,000N} = 0.0002 = 0.02\%$$

$$\text{引戸 1 個の場合} : \frac{\Delta D_d}{D_{Acar}} = \frac{9.5N}{2,000N} = 0.00475 = 0.48\%$$

同様に、中間車 N 両に窓 m 個、引戸 n 個があることにより増加する空気抵抗増加率は次式となる。

$$\frac{m \times \Delta D_w + n \times \Delta D_d}{N \times D_{Acar}} \quad (1)$$

なお、窓 2 個を流れ方向に並べた測定も実施し、3.1 節に示すように窓 1 個の結果を 2 倍した値が窓 2 個の値とほぼ同じとなることを確認していることから、窓が流れ方向に n 個並んだときの空気抵抗は、式 (1) のように窓 1 個設置の結果を n 倍しても問題ないと考えられる。

2.5 平均風速分布

前述のように、現車の車両側面の風速分布を模擬するため、バリアを設置してノズル床面付近の流れを乱流化した。空気抵抗測定前に、空気抵抗測定板（平板）上の風速分布の測定を行い、現車試験の風速分布との比較および換算を行った（図 4）。これには現車試験データとして、新幹線車両の先頭から 3 両目および 14 両目の車両側面の窓位置における平均風速分布を利用した⁴⁾。まず現車試験および風洞試験で得られた風速分布 u を、列車走行速度 ($U=222 \sim 333\text{km/h}$) および主流風速 ($U=180\text{km/h}$) でそれぞれ除して無次元風速分布 u/U を求めた（図 4(a)）。図 4(a) に示すように両分布は比較的良く一致することが確認される。次に、この無次元風速分布に任意の列車速度を掛けると、その列車速度における現車の風速分布が得られることから、車両側面近傍の風洞試験の風速分布 ($U=180\text{km/h}$ 時) に特に適合するように現車試験の列車速度を探索した。その結果、図 4(b) に示すように 200km/h で比較的良く一致することが確認された。このことから今回の風洞試験 (180km/h (50m/s) に設定) の平均風速分布は、現車試験における列車速度 200km/h (55.6m/s) 走行時に相当すると見なした。なお次章の空気抵抗増加率の結果は、列車速度 200km/h 走行時よりも高速の場合でも成り立つことに留意されたい。

3. 結果

本章では、風洞試験結果について述べる。まず、測定板が横置の場合で、窓が 1 個または複数 (2 個) 並んだときの空気抵抗について比較する。次に、測定板が縦置の場合で、引戸と現行タイプの窓の空気抵抗について、また、窓の大きさおよび窓枠段差形状が空気抵抗に及ぼす影響についてそれぞれ比較する。

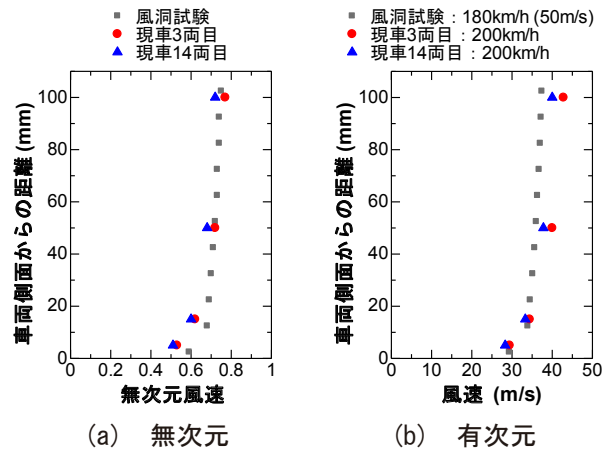


図 4 風速分布の比較

3.1 窓が 1 個または 2 個並んだときの比較

窓が複数 (2 個) 並んだときの空気抵抗が、1 個の結果を複数倍して良いかどうかを検討した。ところで、窓 2 個の場合、図 2 に示すように、窓を空気抵抗測定板の上流側と下流側の位置にそれぞれ 1 個ずつ合計 2 個設置する。一方、窓 1 個の場合、窓の設置位置は、測定板の上流側、下流側、および、その中間位置の 3 パターンの設置位置が考えられる。そこで、窓 1 個の場合では 3 パターンの設置位置で空気抵抗を測定し、窓の設置位置が空気抵抗に及ぼす影響も併せて確認した。

図 5 に測定結果を示す。図中の縦軸は、前章で述べた中間車 1 両の空気抵抗を基準とした場合の窓および引戸の凹部 (1 個あたり) による空気抵抗増加率である。また図 5 以降、図中のエラーバーは平均値の標準誤差 (= 不偏標準偏差 / (測定回数)^{0.5}) を表す。図 5 より平均値はそれぞれ、窓 1 個の条件 (上流, 中間, 下流のうち 1 カ所に設置) は $0.025 \sim 0.032\%$ 、窓 2 個の条件 (上流, 下流の 2 カ所に設置) は 0.065% である。窓 1 個の条件において、上流, 中間, 下流の各設置位置でややばらつきはあるものの、平均値の検定を実施したところ、ほぼ同等であることが示された。このことから、窓 1 個を上流, 中間, 下流のどの位置に設置してもほぼ同じ結果となることが確認された。また、窓 1 個と窓 2 個の結果を比較すると、窓 1 個の結果を 2 倍した値は窓 2 個の値よりもやや小さい傾向にあるものの、エラーバーを考慮するとほぼ同じ大きさと考えられる。以上の結果より、本試験条件において、窓が複数並んだときの合計の空気抵抗は、1 個の結果を複数倍した大きさとみなして良いと考えられる。

3.2 引戸と窓 (現行タイプ) との比較

図 6 に、引戸および現行タイプの窓形状である窓 A (45 度) の空気抵抗増加率の比較結果を示す。1 個あたりの

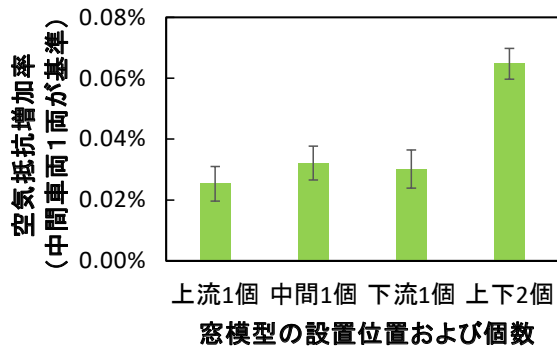


図5 窓が1個または2個、および、窓の設置位置の比較（横置、窓枠90度）

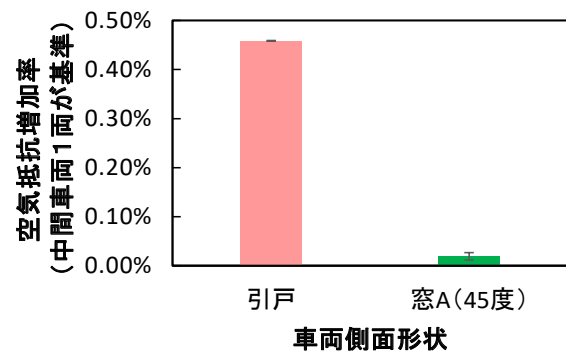


図6 引戸と窓（現行タイプ）との比較（縦置）

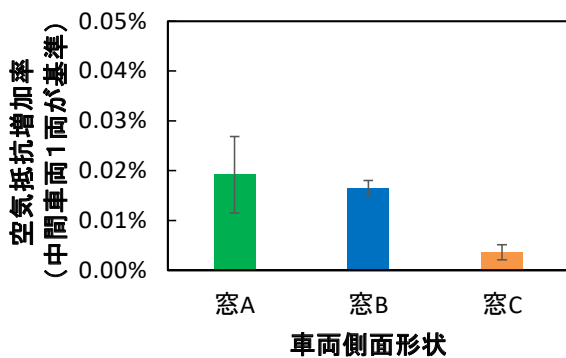


図7 窓の大きさの比較（縦置、窓枠45度）

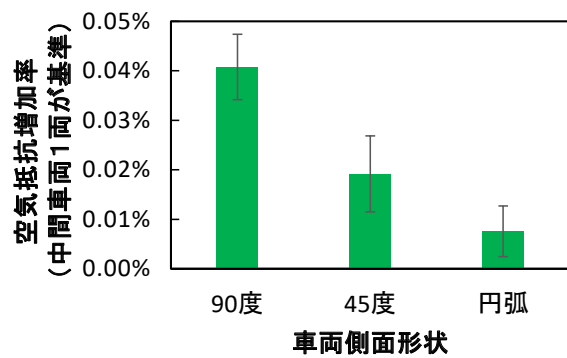


図8 窓枠段差形状の比較（縦置、窓A）

平均値は引戸 0.458%，窓 0.019 ± 0.008%（標準誤差）となっており、引戸は窓と比べて一桁大きく、20倍余りの大きさとなっている。ところで新幹線車両において、中間車1両の片側面の窓数は車種や号車により異なるものの最大20個程度であることから、窓A（45度）による空気抵抗の合計が引戸1個分にはほぼ相当すると見なすことが出来る。

3.3 窓の大きさが空気抵抗に及ぼす影響

図7に、窓A、窓B、窓Cの3条件における空気抵抗増加率の比較結果を示す。窓枠段差形状はすべて現行タイプの45度の場合である。図7より平均値はそれぞれ窓Aで0.019%，窓Bで0.017%，窓Cで0.004%となっており、窓の大きさが小さくなるにつれて空気抵抗が減少することが分かる。窓Aを基準（1.0）とすると、窓Bで約0.9倍（ $\div 0.017/0.019$ ）、窓Cで約0.2倍（ $\div 0.004/0.019$ ）となっている。なお図中には示していないが、窓枠段差形状90度の場合でも窓の大きさが小さくなるにつれて空気抵抗が減少しており、窓Bで約0.8倍（ $\div 0.033/0.041$ ）、窓Cで約0.4倍（ $\div 0.016/0.041$ ）となった。

以上の結果より、窓枠段差形状45度および90度の各条件でばらつきはあるものの、窓Aを基準（1.0）とすると、窓Bで0.8-0.9倍、窓Cで0.2-0.4倍の結果となり、

窓Bと比較して窓Cのほうが空気抵抗は顕著に減少することが示された。

3.4 窓枠段差形状が空気抵抗に及ぼす影響

図8に、窓Aにおいて窓枠段差形状が90度、45度、円弧の3条件における空気抵抗増加率の比較結果を示す。平均値はそれぞれ90度で0.041%，45度で0.019%，円弧で0.008%となっており、段差部（特に車体外側表面との接続部）がなだらかになるにつれて空気抵抗が減少することが分かる。現行タイプの45度を基準とすると、90度で約2.1倍（ $\div 0.041/0.019$ ）、円弧で約0.4倍（ $\div 0.008/0.019$ ）となる。なお図中には示していないが窓Bおよび窓Cの場合も、窓枠形状90度と45度の2条件でそれぞれ比較しており、45度から90度に変化させると、窓Bでは約2倍（ $\div 0.033/0.017$ ）、窓Cでは約4.4倍（ $\div 0.015/0.004$ ）となった。

4. 考察

前章で得られた結果より、中間車1両あたりの空気抵抗低減効果の試算例について、また、各窓の空気抵抗低減効果の流れ場からの考察を行う。

特集：空気力学・騒音

4.1 中間車1両あたりの空気抵抗低減効果の試算例

図6より、空気抵抗増加率の平均値は、引戸は0.458%、現行の営業車で採用されている窓A(45度)は0.019%と、引戸は窓と比べて20倍余りの大きさとなった。前述のように、新幹線車両において車種や号車により異なるものの、中間車1両の片側面の窓数は最大20個程度である。そこで、ここでは中間車1両全体(両側面)で引戸4個、窓40個の場合の空気抵抗を評価する。引戸4個では $0.458\% \times 4 \text{個} = 1.83\%$ 、窓40個では $0.019\% \times 40 \text{個} = 0.76\%$ より、合計で $1.83\% + 0.76\% = 2.59\%$ となる。このことから、窓および引戸の凹部の段差を解消して平らな車両側面とすれば、中間車1両あたりの空気抵抗を約2.6%低減可能と考えられる。平滑化が進み、大きな空気抵抗の低減が困難になりつつある新幹線車両では、引戸と窓の凹部の段差解消による平滑化は、空気抵抗低減対策の検討課題になりうると考えられる。

4.2 各窓の空気抵抗低減効果の流れ場からの考察

窓の大きさを変化させた結果より、空気抵抗増加率の比は、窓Aを基準として窓Bで0.8-0.9倍、窓Cで0.2-0.4倍と、特に窓Cで大幅に減少した。この結果の差異について流れ場の観点から考察する。さらに、今後の車両新造時、段差がある窓形状を採用する場合に、空気抵抗がより低減する窓形状やその設置方法について検討する。

物体により流れの向きが変化すると、その物体には流体による力が働く⁵⁾。窓の凹部の段差周りの流れを考えると、窓枠の上下(レール方向)部分は主流方向と平行であることから流れの向きを変える効果は小さく、一方、窓枠の左右(鉛直方向)部分は主流方向と直交することから流れの向きを変える効果は大きいと考えられる。

窓Aと窓Bについて、高さ比は1.0倍、幅の比は0.47倍(=270mm/580mm)、一方、窓Aと窓Cについて、高さ比は0.61倍(=300mm/490mm)、幅の比は0.36倍(=210mm/580mm)である。特に、図3に示すように、窓Aと窓Cについて窓枠の左右(鉛直方向)部分の直線部長さ(高さ)比は0.38倍(=90mm/240mm)であり、高さ比0.61倍よりもさらに小さい。すなわち窓Cにおいて、流れの向きを変える効果が最も大きいと考えられるこの直線部長さ(高さ)が0.38倍と小さくなっていることが、窓Cの空気抵抗が大幅に減少した主要因と推定される。

以上の各窓の空気抵抗低減効果の流れ場からの考察より、窓枠に段差がある窓について、窓の幅よりも高さを小さくするほうが、窓に働く力が減少すると考えられる。

このことから例えば、同じ面積で縦横比の異なる矩形の窓を配置する場合、窓の高さが小さくなるように設置することが推奨される。

5. おわりに

新幹線車両側面の窓および引戸の空気抵抗を評価するため、実物大の部分模型を用いて風洞試験による空気抵抗測定を行った。その結果、窓の大きさが小さくなるにつれて、また、窓枠の段差形状がなだらかになるにつれて空気抵抗が減少することが確認された。また、現行タイプの引戸および窓を比べると引戸の方が一桁大きく、20倍余りの大きさとなっていることが分かった。本試験条件下において、中間車1両(両側面)で引戸4個、窓40個の場合の空気抵抗を評価した場合、窓および引戸の凹部の段差を全て解消して車両側面を平滑化すれば、中間車1両あたりの空気抵抗を約2.6%低減可能と考えられる。窓枠に段差がある窓について、同じ面積で縦横比の異なる矩形の窓を配置する場合、窓の高さが小さくなるように設置することが空気抵抗低減の観点から推奨される。

謝辞

風洞試験実施にあたり、窓および引戸の形状データをご提供いただいた東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター 先端鉄道システム開発センターの関係各位に感謝の意を表します。

文献

- 1) 井門敦志, 岩崎誠: 新幹線車両の空気抵抗低減の研究, 鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, No.21, 2014
- 2) Peters, J. L., "Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential," *Int. J. of Vehicle Design, Special Publications*, SP3, pp.308-341, 1983.
- 3) 栗田健: E5系・E6系の騒音低減技術の開発, 鉄道車両工業, No.467, pp.56-59, 2013
- 4) 佐久間豊, 鈴木昌弘, 井門敦志, 梶山博司: 新幹線車両周りの流速・圧力の車上および地上測定, 鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, No.15, 2008
- 5) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, pp.57-79, 1992