

転覆限界風速向上を目指した車両開発のための風洞試験

○ [機] 森山 淳 [機] 土井 賢一 堀岡 健司 (JR 東日本)

Wind Tunnel Test for Railway Vehicle Development
to Improve Tolerance against Cross Wind

○Atsushi Moriyama, Ken-ichi Doi, Kenji Horioka (East Japan Railway Company)

For the development of railway vehicle which can enhance critical wind speed of overturning, wind tunnel test was done to measure air force coefficient. Experiment data show that both roof curvature and running board on the roof affect vehicle performance of overturning. Considering realistic design of commuter train, vehicle tolerance against cross wind can be improved by the absence of running board, rather than employing round shape roof, or increasing of vehicle weight.

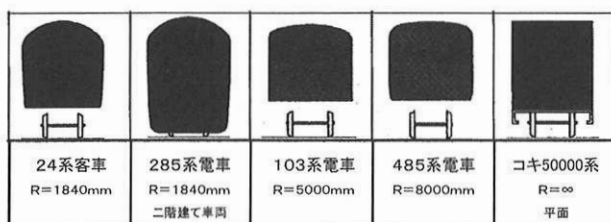
キーワード：転覆限界風速，空気力係数，通勤車両，屋根半径，歩み板，前頭形状，風洞試験

Key Words：Critical Wind Speed of Overturning, Aerodynamic Coefficients, Commuter Train, Roof Curvature, Running Board, Nose Shape of Vehicle, Wind Tunnel Test

1. はじめに

鉄道車両の転覆限界風速向上のためには，一般的に車両重量の増，車体重心の低下といった方策が効果的であるが，時間帯により旅客数が大幅に変動する通勤車両においては，増やせる車両重量は地上設備の制約から限られている．一方，縮小模型を用いた風洞試験結果によれば，車体屋根の曲率半径（以下，屋根半径と記す）が小さい方が空気力係数は小さくなる（＝屋根が丸い方が転覆耐力が大きくなる）傾向が得られている¹⁾他，実際に営業線を走行している列車における輪重と風速，風向の測定結果からも，車体断面形状が異なると風による輪重減少率の挙動に変化が現われ，屋根の丸い形状の方が転覆耐力が高くなる傾向が確認されている²⁾．すなわちこれらの知見から，屋根形状を変更することにより横風に対する安全性の高い車両を実現できる可能性があることが示唆される．

しかし，空気力係数が既知の車体断面形状は図1に示す5種類が基本であり，通勤用車両として客室空間の確保を

図1 空気力係数が既知の車体断面形状¹⁾

考慮した車両設計を行なうに際しては屋根半径5000mmと1840mmの間の空気力係数に関するデータが必要である．また，通勤車両では検修社員の屋根上歩行を考慮し，図2に示すように屋根の肩部をやや突出させた形状としている（以下，この部分を「歩み板」と記す）が，屋根上の微小なパーツではあるものの，これの転覆耐力への影響は不明である．

そこで本研究では，次期通勤車両として想定しうる車体断面形状のうち空気力係数が未知のものについて，模型による風洞試験を実施し，空気力係数を測定した．本報ではこれらの測定結果について述べ，車体断面形状による空気力係数の差異について検討するとともに，転覆耐力を向上しつつ，客室空間の確保や検修社員の作業性を考慮した現実的な車体形状について考察する．

2. 試験条件

2.1 車体断面形状

空気力係数を測定した屋根形状等の条件の組み合わせを表1に示す．

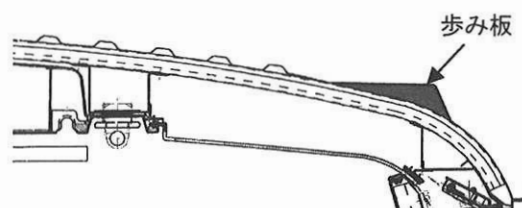


図2 歩み板

表 1 試験条件一覧

屋根半径	屋根肩部形状	地上構造物	備考
3000mm	歩み板あり	築堤 及び 単線橋梁	流線型前頭の試験を実施
	歩み板なし		
4000mm	歩み板あり		
5000mm	歩み板あり		
	歩み板なし		
1840mm	歩み板あり		
	完全丸屋根		

(1) 屋根半径

既存の通勤車両と同じ 5000mm, 空気力係数が既知で最も小さい半径である 1840mm, その中間の値として 3000mm, 4000mm の計 4 種類をとりあげた。

(2) 歩み板

屋根半径 5000mm, 3000mm, 1840mm の場合について, 歩み板の有無による差異を調査した。なお, 1840mm・歩み板なしの条件は, 図 1 の一番左側に示す完全に丸い形状 (24 系客車形状) と同等となるため, 表 1 中では特に「完全丸屋根」と記した。

(3) 地上構造物

地上構造物は, 空気力係数が比較的大きく現われる築堤形状及び単線橋梁の 2 種類とした。単線橋梁については桁高を 1m, 2m, 3.5m の 3 種類とし, 桁高による影響をあわせて評価することとした。

(4) 車両前頭形状

(1)~(3)の組み合わせを先頭車・中間車の 2 条件で行なうこととしたが, 通勤車両として構成可能な範囲で風に対する影響を極力小さくする車体形状の検討として, 屋根半径 3000mm については前頭形状を流線型形状とした試験を行なうこととした。

以上(1)~(4)の組み合わせの試験を効率的に行なうため, 図 3 に示す, 部品の交換によって表 1 の全ての組み合わせを実現することができる車両模型 (縮尺 1/40) を製作した。なお実際の試験では実施時間が限られたため, 得られた数値を参照しながら条件設定を行い, 試験を進めた。

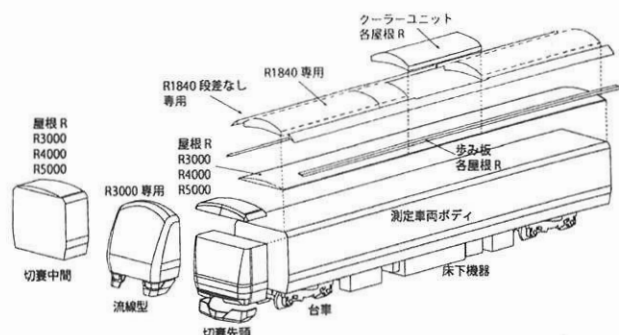


図 3 試験で使用した模型車両概略図

2.2 風洞試験の実施及び空気力係数の導出

風洞試験は, (公財)鉄道総合技術研究所所有の大型低騒音風洞で実施した。これまで得られている空気力係数に関する知見との整合をとるため, 気流は自然風を模擬した乱

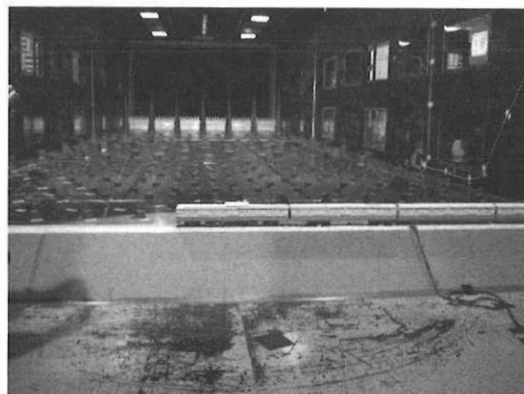


図 4 風洞試験状況

流境界層 (ベキ指数 0.26) を用い, 風向角は 30 度, 50 度, 70 度, 90 度の 4 種類とした。試験状況を図 4 に示す。

試験では, 図 3 の模型車両に内蔵型天秤を取り付け, 横力, 揚力, ローリングモーメントの三分力を測定した。空気力係数は, 天秤で測定される平均空気力を, 風速平均値から求められる平均動圧と車体側面積で除して (モーメント係数の場合は更に代表長さで除して) 求められ, 横力係数 C_s の場合, 天秤で測定される力を S , 空気密度 ρ , 風速 u , 車体側面積 A とすると

$$C_s = S / \left(\frac{1}{2} \rho u^2 A \right) \dots\dots\dots (1)$$

で求められる。

3. 測定結果

以下の本報中では, 車体形状による差が最も大きく現れた例として, 車両は先頭車, 地上構造物形状は築堤形状のデータを用いて比較する。また空気力係数は特記する箇所以外, 横力係数のデータを示す。

3.1 車体断面形状・前頭形状による差

(1) 屋根半径による差 (歩み板がない場合)

歩み板のない場合について, 屋根半径による横力係数の違いを図 5 に示す。屋根半径が小さいほど横力係数は小さく, 屋根半径 3000mm の横力係数は, 5000mm と 1840mm の中間より若干 5000mm の方に寄っていた。

(2) 屋根半径による差 (歩み板がある場合)

歩み板がある場合について, 屋根半径による横力係数の違いを図 6 に示す。屋根半径 1840mm の横力係数は前項と同様に小さいが, 屋根半径 5000mm と 3000mm の横力係数には顕著な差が現れなかった。

(3) 歩み板有無による差

前 2 項の検討結果から, 通勤車両としての客室空間が確保でき構成が容易な屋根半径 5000mm, 3000mm については, 歩み板の有無により横力係数の挙動が大きく異なることがわかった。そこでこれら 2 種類の屋根半径について, 歩み板の有無による差をまとめたのが図 7 である。同じ屋根半径でも歩み板の有無によって横力係数は大きく異なり, 歩み板をなしとする (図 7 中の◆, ▲印) ことで横力係数が小さくなることが示される。

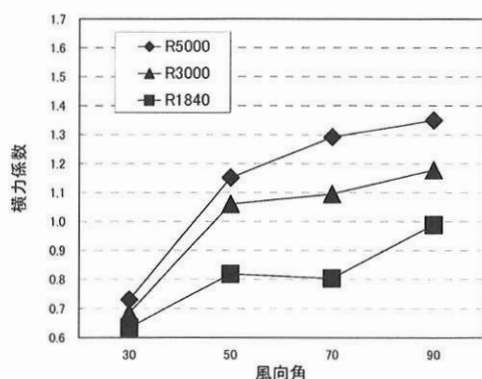


図5 屋根半径による差 (歩み板なし)

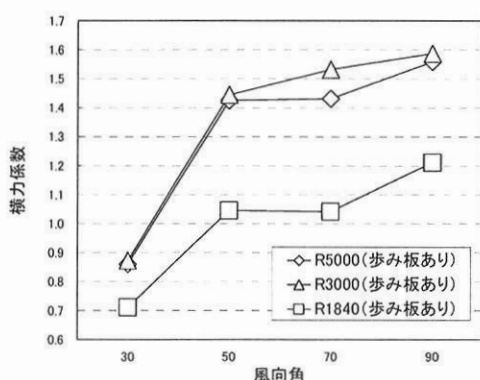


図6 屋根半径による差 (歩み板あり)

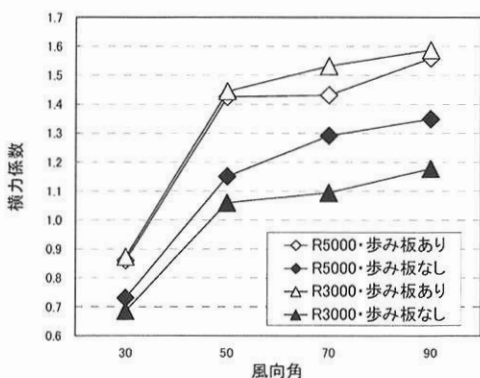


図7 歩み板の有無による差

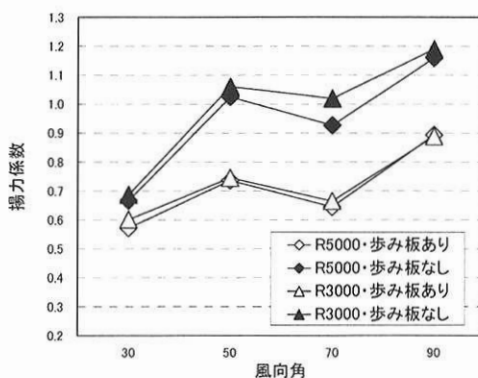


図9 揚力係数測定結果

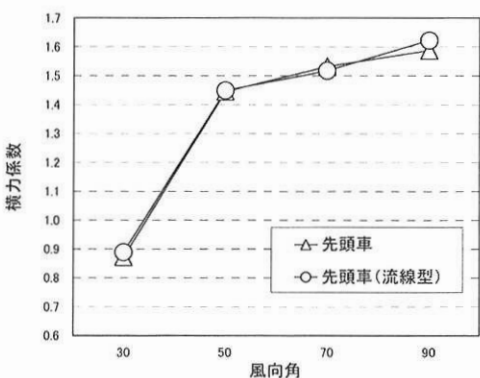


図8 前頭部形状による差

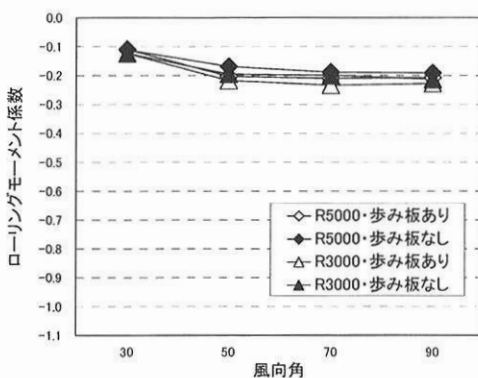


図10 ローリングモーメント係数測定結果

(4) 前頭部形状による差

一方、前頭部を一般の先頭車の形状とした場合と、流線型形状とした場合の比較を図8に示す。ここで、通勤車両として客室部分を極力大きく確保する観点から、流線型形状としては新幹線車両のような極端な形状とはせず、図3中に示されるように既存の形状を基本として前面窓を内側に傾ける程度の形状変更とした。どちらも屋根半径は3000mmとし、歩み板はありの状態で共通の条件とした。前頭部形状を変更しても、全ての角度範囲で横力係数には殆んど差が現れず、この程度の形状変更では転覆耐力向上には寄与しないことがわかった。

3.2 揚力係数・ローリングモーメント係数の傾向

屋根半径が5000mm及び3000mm、歩み板がありとなしの場合について、地上構造物を築堤として揚力係数、ローリングモーメント係数を測定した結果をそれぞれ図9、図10に示す。揚力係数は、図7で示した横力係数と異なり、屋根半径による差はあまりなく、歩み板についてはありの方が空気力係数が小さくなっている。ローリングモーメント係数については、屋根半径や歩み板有無による差異は殆んど現れなかった。

4. 車体断面形状等の諸元の違いによる転覆耐力の比較

4.1 試算条件

前章で得られた空気力係数を用い、車体形状を変更することによる転覆耐力の差異について検討した。取り上げる

車体形状等の諸元は

- ①：屋根半径 5000mm・歩み板あり（既存車の形状）
- ②：屋根半径 5000mm・歩み板なし
- ③：①と同じ車体形状だが車体重量を 5 t 増したもの
- ④：屋根半径 3000mm・歩み板なし
- ⑤：④と同じ屋根形状だが屋根高さを①、②と同等とし、屋根肩部の客室高さを低くした形状
- ⑥：屋根半径 1840mm・歩み板あり
- ⑦：屋根半径 1840mm・完全丸屋根

とした。重量、寸法、台車等に関する各種の諸元は、近年の一般的な通勤車両の先頭車を想定した値を用いたが、④、⑥、⑦の形状においては、現行と同じ客室高さを確保するために屋根高さが高くなることが想定されるため、それを反映した諸元とした。計算に際しては本研究で得られた知見を反映することが可能な、地形形状や車体断面形状の影響を考慮した計算式³⁾を用いた。

4.2 試算結果

前節で示した①～⑦の車両諸元を用い、既存車両の①を基準として転覆耐力の比を計算した例を図 11 に示す。屋根形状を工夫することにより、現行車両よりも転覆耐力が向上することが示される。転覆耐力が最も向上するのは、屋根半径 3000mm で屋根肩部の客室高さを減じた⑤であるが、客室空間が小さくなり、お客さまの快適性及びドア鴨居部に設置される開閉装置や情報表示端末の配置に難が生じる。現行に比べて屋根半径を 3000mm、1840mm と小さくした④、⑥、⑦では、転覆耐力は向上するが、客室高さを確保のために屋根高さを高くする結果、風を受ける車体側面積が増加し、丸屋根化による効果が相殺され、結果として屋根半径を現行と同じ 5000mm として歩み板のみをなくした②の方が転覆耐力が高くなっている。また、①の車体重量のみを増加させた③と比べても②の方が転覆耐力が高く、歩み板をなくすのみで重量を増加させる以上の効果が得られることが示される。

4.3 歩み板の一部分設置の検討

前節の検討より、歩み板がない車両の転覆耐力は向上することが示されたが、検修社員の作業性悪化が懸念される。そこで、屋根上歩行の機会が多いのは空調装置の検修時で

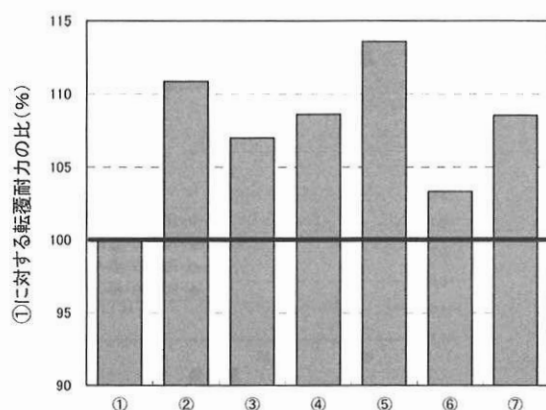


図 11 車両諸元の違いによる転覆耐力の比較



図 12 空調装置近傍のみ歩み板を設置した模型

あることに着目し、空調装置の部分のみに歩み板がある場合(図 12)の空気力係数を、一部条件ではあるが測定した。その結果、歩み板が全くない場合と空調部のみ設置した場合では、空気力係数に殆んど差がないことを確認した。

5. まとめ

次期通勤車両として想定しうる車体断面形状のうち空気力係数が未知のものについて、模型による風洞試験を実施し、空気力係数を測定した。得られたデータの傾向及びデータをを用いた転覆耐力の試算により、以下の知見を得た。

- 車体断面形状を変更することにより、空気力係数は大きく変わる。歩み板の有無で比較すると、歩み板のない方が横力係数が小さくなる。歩み板がない場合は、屋根半径が小さくなると横力係数は小さくなるが、歩み板がある場合、極端な丸屋根形状を除き、屋根半径による横力係数の差は小さい。前頭形状を流線型としても、横力係数への影響は殆んどない。
- 丸屋根化により、通勤車両の転覆耐力は現行諸元のものと比較して向上する。但し、丸屋根化による車体側面積の増または客室空間の減を考慮すると、同じ屋根半径でも歩み板をなくす方が転覆耐力の面からは有利である。この場合、空調部のみ歩み板を設置しても転覆耐力には殆んど影響しない。

謝辞

本研究の実施にあたり、測定条件の検討及び風洞試験での測定、データ解析については(公財)鉄道総合技術研究所の関係各位にご尽力いただいた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 種本勝二, 鈴木実, 斉藤寛之, 今井俊昭: 強風下での車両に働く空気力と低減対策に関する風洞試験, 鉄道総研報告, Vol 18, No.9, pp.17-22, 2004
- 2) 森山 淳, 日比野有, 金元啓幸: フィールドデータに基づく鉄道車両の転覆限界風速に関する検証(走行列車), 第 17 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL)講演論文集, pp.293-296, 2010.
- 3) 日比野有, 石田弘明: 車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol7, No4, pp.39-44, 2003.