

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)

森山 淳* (東日本旅客鉄道)

日比野 有 金元 啓幸 (鉄道総合技術研究所)

Verification of Railway Vehicle Overturning under Crosswind (Measurement Results of Running Train)

Atsushi Moriyama*, (East Japan Railway Company)

Yu Hibino, Hiroyuki Kanemoto, (Railway Technical Research Institute)

To clarify the overturning possibility of trains exposed to strong cross wind, several experiments were done to study the affect of the wind velocity and wind direction on the axle load changing. 2 sites were selected for the experiments, the one was in the Japan Sea Coast Main Line, and the other was in a main line in the Metropolitan Area's windy point. As the results of the experiments, the authors found that the ratio of wheel unloading caused by the wind could be accurately expressed by the Detailed equation.

キーワード：転覆限界風速，輪重減少率，総研詳細式，国枝式，風向角，空気力係数

(Keywords, Critical wind speed of overturning, Wheel unloading ratio, Detailed equation, Kunieda's equation, Wind direction, Aerodynamic force coefficient)

1. 緒言

鉄道車両の横風に対する転覆限界風速の評価は、1972年に国枝により提唱された評価式⁽¹⁾が基本とされている。これは簡単な計算で比較的良好な実態と合致した結果が得られるため、鉄道車両の設計時、及び強風下での運転規制の検討といった実務作業に現在でも広く用いられている。しかし、近年の強風による鉄道車両の転覆事故⁽²⁾⁽³⁾を解析する過程で、車両に吹く風の向き、及び盛土・橋梁上等といった軌道構造物の形状を考慮することで、より精緻に転覆耐力を評価できることがわかり、こうした知見を盛り込んだ解析式(以下、詳細式と記す)が提唱されている⁽⁴⁾。鉄道のより安全な運行を提供する観点から、この詳細式を実務作業で用いていく準備が進められているが、式で用いる係数の推定及び妥当性の検証に関しては、これまで縮小模型を用いた風洞試験や実物大定置車両等による確認、検証が行なわれている⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾程度であり、実運用に際しては、実際に走行する列車に吹く風と転覆耐力の関係についてのデータを得ておく必要がある。

そこで本研究では、最終的に車両の転覆耐力評価で用いられる車両の輪重減少量を、営業線を実際に走行している列車で風速、風向と同時に測定し、詳細式で得られる理論値と比較してその妥当性を検証する。測定に際しては、季節風による強風が期待できる冬期の日本海側路線で測定を

行なう一方、異なる条件でのデータを充実させる目的で、春期の関東地方での測定も行なった。本報ではこれら一連の測定結果のうち、主に車両の運動学的挙動について得られた知見について報告する。

2. 測定の概要

〈2・1〉羽越本線桂根駅測定 当駅付近は西側の日本海側からの季節風が列車に直接吹きつける環境であり、且つ近年の代表的旅客電車のひとつである701系電車が多く運用されていることから、当箇所のデータは今回測定の主要な解析対象とした。測定機器の配置を図1に、測定状況を図2(a)に示す。

当箇所では、701系電車以外にも、車両の台車間距離が異なる車両が多く走行するため、これらのデータを収集する目的で、輪重ゲージは1台車4車輪分を仮設した。風速風向計は、自然風の空間的分布をより詳細に把握する目的で、10m間隔で3基仮設した。風速風向計の高さは、車両の重心高さに近いレール面上2.5mとした。こうした測定を平成21年12月中旬から平成22年4月上旬まで行なった。

なお当箇所を走行する701系電車の大部分は2両編成であり、秋田方車両は重量が重いMc車、酒田方車両は重量が軽いTc車となっている。また当駅は乗降人員が極端に少ないことから普通列車でも大部分は通過するが、1日7本のみ停車する列車があり、データには2種類の走行速度が含

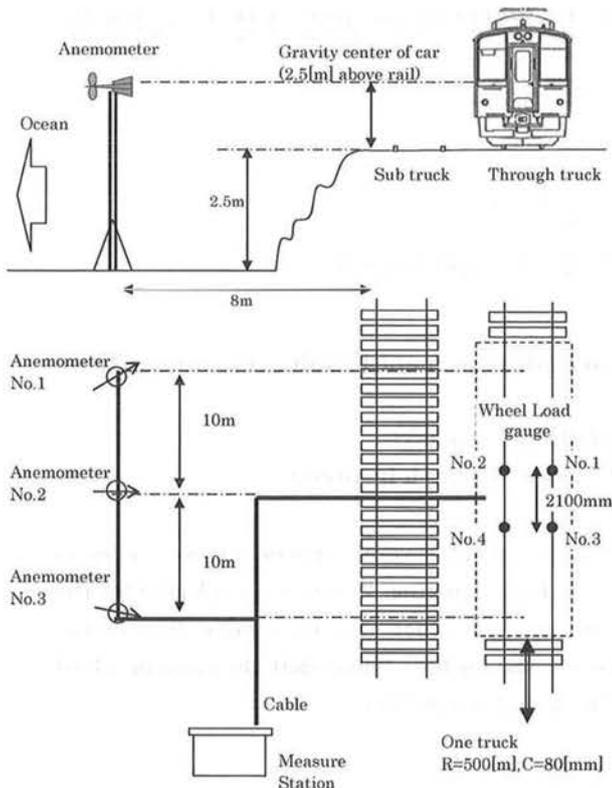


Fig. 1. Measurement setup at Katsurane station.



(a) Katsurane Station



(b) Nakagawa base

Fig. 2. Measurement situation.

まれる。

(2.2) 常磐線那珂川保守基地測定 当保守基地付近は吹きさらしの盛土上にあり、首都圏に近く列車本数が多いことから、データ数の拡充を目的として測定を行なった。測定状況を図 2 (b) に示す。

当箇所では、主な解析対象となる 501 系電車・531 系電車の軸間距離に合わせ、輪重ゲージは 1 両 2 台車 8 車輪分を仮設した。風速風向計は、別目的で現地に仮設されていたものからデータの分配を受け、桂根駅測定と同様の目的で、6.7m 間隔・3 基のデータを使用した。風速風向計の高さは、保守基地の施工基面上 3 m とした。こうした測定を、平成 22 年 2 月下旬から 4 月中旬まで行なった。

3. 測定結果

(3.1) 理論値との比較 桂根駅測定での 701 系下り通過列車の先頭車(Mc)について、観測された風速と輪重減少率の関係を、図 3 に示す。ここで風速は 3 基のうち中央の風速計の値とし、輪重減少率については、現地在曲線軌道であることを考慮し遠心力とカントの影響を修正した。

図中に記した実線、点線は、それぞれ詳細式及び国枝式の理論線を求めたものである。計算にあたり、車両の諸元は 701 系 Mc 車のものを用いた他、列車の走行速度は全データの平均値 (75.0km/h)、車両の振動による振動慣性力は零とした。詳細式の計算では、風向角を全データの平均値 (列車進行方向に対し 78 度) とし、空気力係数は現地の地形形状が比較的類似していることを考慮し文献(8)の値を用いた。

図からも明らかな通り、測定データの風速と輪重減少率の関係は、実線で示される詳細式の傾向に合致しており、同式の妥当性が改めて確認された。データのバラつきは車両の振動によるものと考えられるが、理論式で考慮される振動慣性力の範囲に十分収まっていることを確認した。

なお、風速と輪重減少率の関係が詳細式の傾向に合致することについては、桂根駅測定での 701 系電車以外の車種、及び那珂川基地測定での全車種についても確認した。

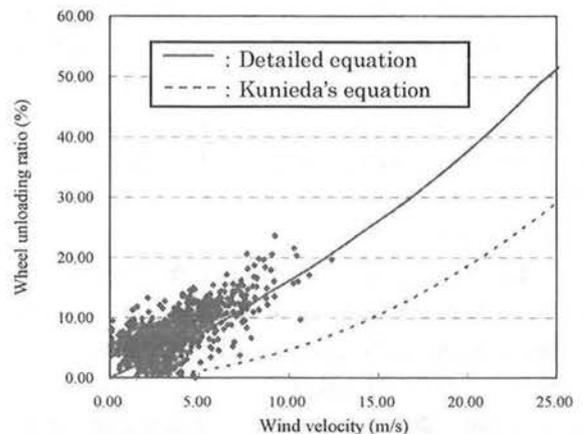


Fig. 3. Relationship between wind velocity and wheel unloading ratio (Katsurane stn.)

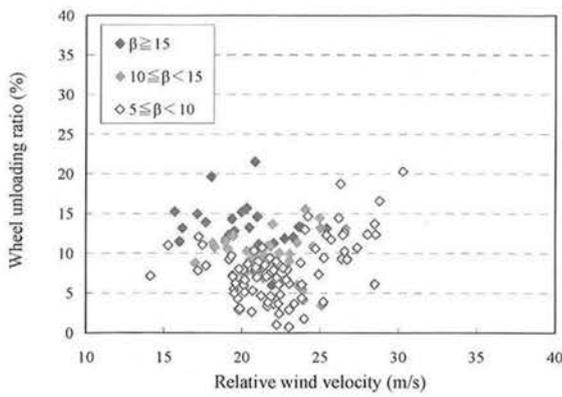


Fig. 4. Relationship between relative wind velocity and wheel unloading ratio.

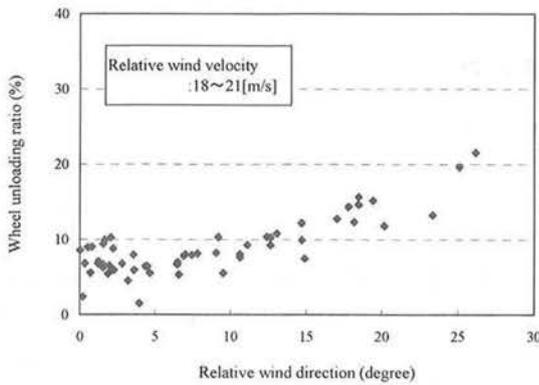


Fig. 5. Relationship between relative wind direction and wheel unloading ratio.

〈3・2〉 相対風向角と輪重減少率の関係 列車が自身の走行で正面から受ける向かい風を、測定した風速、風向とベクトル合成することで相対風速と相対風向角を求め、相対風速と輪重減少率の関係を、相対風向角をパラメータとして整理した結果を図 4 に示す。相対風速とした場合、通過列車は 75[km/h]≒20[m/s]の風を正面から常に受ける一方、平均してほぼ真横の方向から吹く風は高くても風速 15[m/s]程度であったため、今回の現場においては相対風向角は 5 度～30 度程度の浅い範囲となる。図 4 では角度が大きいくほど輪重減少率が大きくなる傾向が示されるが、バラつきが大きく明確でない。

そこで、全データの中から相対風速の平均値(19.58[m/s])に近い相対風速 18～21[m/s]のデータを抽出し、相対風向角と輪重減少率の関係を示したのが図 5 である。図 5 は、大型風洞を用いて風速を一定とした模型実験を行なう際、定置した模型を回転させ、模型にあたる風向を順次変えていく状況を再現したことに相当する。風向角とともに輪重減少率が大きくなる傾向が示される。風洞試験では、風向角が大きくなると空気力係数が大きくなる⁽⁵⁾(=車両がより転覆しやすくなる)という知見が得られており、同様の傾向が実走行列車のデータでも再確認された。

〈3・3〉 車両の静止輪重比の影響 図 3 に示した先頭

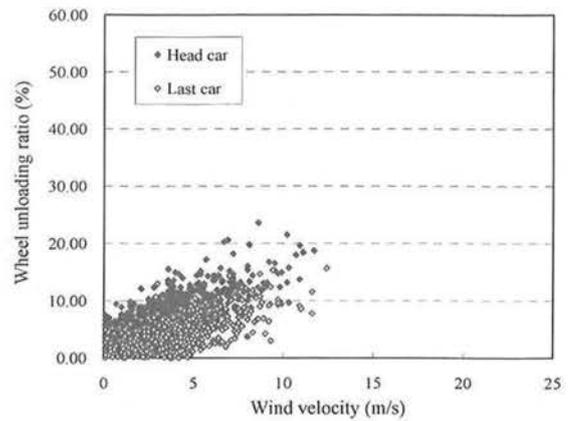


Fig. 6. Comparison between head car and last car.

Table 1. Comparison of static wheel unloading ratio.

Car type	Head car (driving car)	Last car (trailer)
Wheel unloading ratio (%)	+1.12	-3.34

車のデータに加え、2 両目(後尾車)のデータを重ね合わせたものを図 6 に、車両の定期検査時に測定している静止状態での輪重データから、車種毎に輪重減少率の平均値を求めた結果を表 1 にそれぞれ示す。得られたデータは同じ風速に対し、先頭車より 2 両目の方が輪重減少率が小さくなっている(図 6)が、静止状態の輪重減少率も、2 両目はトイレが設置されている等の関係でややマイナス方向に偏っている(表 1)ことが示される。

そこで図 6 のデータについて、車両の運用実績から各列車の車号を特定し、定期検査時輪重データをもとに輪重減少率を修正したものを、図 7 に示す。静止輪重の修正を行なうと、先頭車と 2 両目の差が殆んど現れなくなる。静止輪重と今回測定データに関する同様の傾向は、桂根駅測定その他車種(485 系, 24 系客車), 那珂川基地測定の各車種で

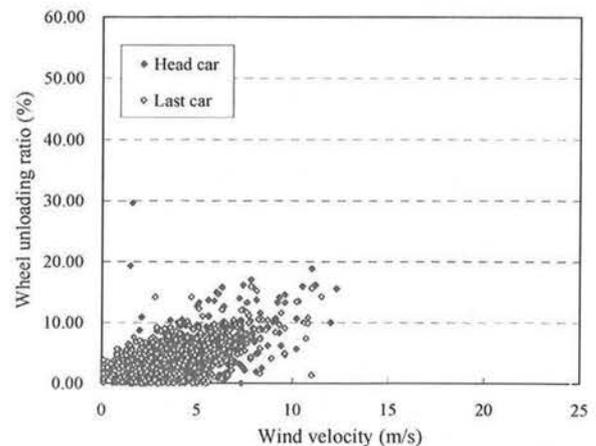


Fig. 7. Comparison between head car and last car (Static wheel unloading ratio modified).

も同様に認められた。

以上から、輪重アンバランスが出やすい車両は、フィールドデータ上にもその傾向が現われ、若干ではあるが転覆耐力にも差があるといえる。

〈3・4〉 先頭車と 2 両目の挙動の違い 中間車両は先頭車の陰となって車体前頭からの風を受けないため、転覆評価式において使用する空気力係数が異なり⁽⁵⁾、一般的に輪重減少率が小さく算出される。一方図 7 の実測データによれば、先頭車と 2 両目のデータの傾向に大きな差異は認められない。ここで両者の車両諸元に着目すると、先頭車は電動車であるのに対し、2 両目は付随車であるため、車両重量が軽い一方、車両重心は高くなっている。

今回の測定条件下(走行速度 75[km/h]、風向角 78 度)における電動車、付随車の転覆限界風速を、それぞれが先頭になった場合及び中間車となった場合で求めた結果を表 2 に示す。例えば先頭となった場合で比較すると、車両諸元上の条件が悪い付随車の方が転覆限界風速が低く算出され、電動車と比較すると、中間より先頭の方が転覆限界風速が低く算出される。図 7 の先頭・電動車と中間・付随車の組み合わせでは、これらの差異がキャンセルされ、転覆限界風速はほぼ同等となる。

図 7 にもこうした傾向が反映され、見かけ上先頭車(◆印)と 2 両目(◇印)のプロットに差異はないが、車体重量をはじめとする車両諸元の影響、及び中間車は先頭車の陰となり転覆耐力が高くなる(輪重減少率が小さくなる)理論上の傾向が、それぞれ寄与しているものと考えられる。

〈3・5〉 車体断面形状による挙動の違い 那珂川基地のデータから、先頭車の重量はほぼ同じだが車体断面形状が異なる E531 系電車(通勤車)と E653 系(特急車)のデータを重ね合わせたプロットを図 8 に示す。ここで、両者は現地での走行速度が大幅に異なるため、本図では列車の正面から当たる走行風と自然風を合成し、相対風速と輪重減少率の関係を示した。定期検査時測定データに基づく静止輪重の修正は、図 7 と同様に行なっている。

走行速度の差を反映し、E531 系が低風速側、E653 系が高風速側にプロットされるが、合成風の相対風向角は、どちらも 0~10 度の範囲でほぼ同等であるため、角度が浅い範囲ではあるが屋根が丸みを帯びた E653 系の方が輪重減少率が小さく、風速に関わらず転覆耐力が大きいことが示される。車体屋根形状は丸い方が空気力係数は小さい(=転覆耐力が大きくなる)ことが風洞試験により確認されており⁽⁶⁾、図 8 のデータはこの傾向を実走行列車のデータにより再確認する形となった。

Table 2. Comparison of Critical wind speed of overturning(m/s).

Driving car		Trailer	
Head car	Last car	Head car	Last car
38.6	45.7	32.8	39.7

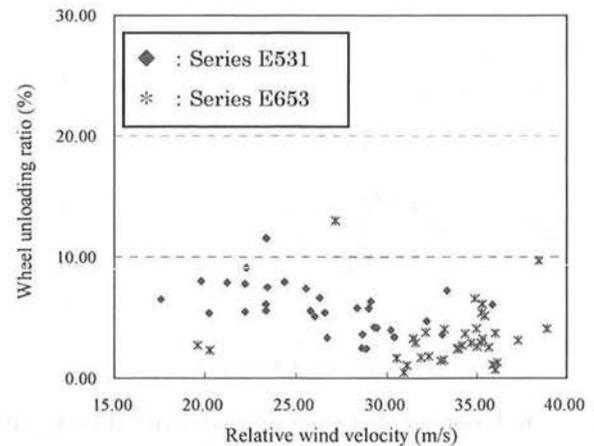


Fig. 8. Comparison about car body shape.

4. まとめ

本研究により、以下の知見を得た。

- (1) 測定データの風速と輪重減少率の関係は詳細式で算出される傾向に合致しており、同式の妥当性が改めて確認された。
- (2) 自身の走行で正面から受ける向かい風を考慮した相対風速、相対風向角と輪重減少率の関係を検証した結果、風洞試験によって得られた風向角と空気力係数の関係に関する知見が、実走行列車のデータでも再確認された。
- (3) 静止状態の輪重にアンバランスがある車両は、若干ではあるが転覆耐力にも差が現われた。
- (4) 先頭車と 2 両目のデータを比較した結果、中間車両は先頭車の陰となって車体前頭からの風を受けないため、車体を受ける空気力が先頭車より小さくなっている傾向を確認した。
- (5) 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い傾向にあることがデータから確認された。

文 献

- (1) 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)
- (2) 鉄道総合技術研究所:「餘部橋梁事故調査報告書」, (1988)
- (3) 笹村庄吾:「三陸鉄道わが社の強風対策」, 運転協会誌, Vol.40, No.471, pp.406-409 (1998)
- (4) 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, Vol.7, No.4, pp.39-44 (2003)
- (5) 種本勝二, 鈴木実, 齊藤寛之, 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)
- (6) 日比野有, 今井俊昭, 種本勝二:「自然風下の実物大模型車両に働く空気力の観測」, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.11-16 (2004)
- (7) 日比野有, 下村隆行, 谷藤克也:「鉄道車両の転覆限界風速に関する静的解析式の検証」, 日本機械学会論文集C編, Vol.75, No.758, pp.2605-2612 (2009)
- (8) 航空鉄道事故調査委員会:「鉄道事故調査報告書(東日本旅客鉄道株式会社羽越線線越駅~北余目駅間列車脱線事故)」, pp.67-74 (2008)