

# 横風による輪重・横圧変化が 乗り上がり脱線に及ぼす影響

日比野 有\* 金元 啓幸\* 野崎 圭祐\*

## Influence of Crosswind on Flange Climb Derailment

Yu HIBINO Hiroyuki KANEMOTO Keisuke NOZAKI

When a railway vehicle runs on a sharp curved track, a crosswind from the outside of the curve can cause a decrease in the outer wheel load, which may lead to a flange climb derailment. However, we cannot estimate the influence of crosswinds on flange climbing simply, because the lateral force exerted on the outer wheel flange may also decrease at the same time. Thus, in order to investigate the influence of crosswinds precisely, we have conducted running tests under crosswinds using a 1/10th scale model. As a result, it has been revealed that only very strong winds such as the one nearly equivalent to critical speed wind of overturning can cause flange climbing.

キーワード：横風，乗り上がり脱線，輪重減少率，風洞試験，横風下走行試験

### 1. はじめに

横風が車両の走行安全性に与える影響として、一般的には転覆が問題とされることが多く、これまでの研究でも転覆限界風速の評価精度の向上<sup>例えば1) 2)</sup>などに主眼が置かれてきた。横風による転覆事故は、ひとたび発生すれば大きな被害が予想されることから、転覆に関する研究の重要性は今後も変わらないと考えられる。一方で、乗り上がり脱線に対して横風が影響を及ぼす可能性が考えられる。すなわち曲線外軌側から内軌側に向かって吹く風によって外軌側の輪重が減少し、無風状態よりも脱線係数が大きくなる可能性が考えられる。しかし、このとき同時に外軌側の横圧も減少する可能性があるため、横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を一概に評価することはできず、シミュレーションによる検討例<sup>3)</sup>がある以外に研究された例はほとんど無い。また、実際の事故事例として横風が乗り上がり脱線に影響を及ぼしたとされる報告例も無い。ただし報告例が無いのは、車両に作用した風速を事故時にさかのぼって正確に評価する手段が一般的には無いためであり、横風の影響が無いことを示しているものではないと考えられる。従って、車両の軽量化などにより横風の影響を受けやすくなっている近年の状況を考慮すると、横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を把握しておく必要があると考えられる。

そこで、横風による輪重・横圧の変化が乗り上がり脱線に及ぼす影響を検討するために、縮尺 1/10 の車両模型を用いた横風下走行試験（風洞試験）を実施し、風速、走行速度、車体形状、曲線カントの有無などが脱線現象に及ぼす影響を詳細に調べた。また、横風の影響を受け

た輪重・横圧を簡易的に評価する方法を併せて検討したので、これらの結果について報告する。

### 2. 横風下走行試験（風洞試験）

#### 2.1 試験概要

横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を確認するために、風洞に曲線軌道を設置し、横風下を走行する車両模型の輪重・横圧を測定した。使用した車両模型は、在来線の通勤型車両を模擬した縮尺 1/10 の模型（図 1）であり、空気力に影響を及ぼす車体形状のみならず、台車のばね系や車体の大変位を抑制するストッパも忠実に再現され、外力に対する車体変位および輪重変動が実物と相似になるように設計されているのが特徴である。車体形状・寸法は JR の 103 系通勤型車両をモデルとしており、模型車体の長さは 1.95m である。一方、台車は一般的なボルスタレス台車をモデルとしており、車両諸元も近年の比較的軽量の通勤型車両の値を参考にしている（表 1）。

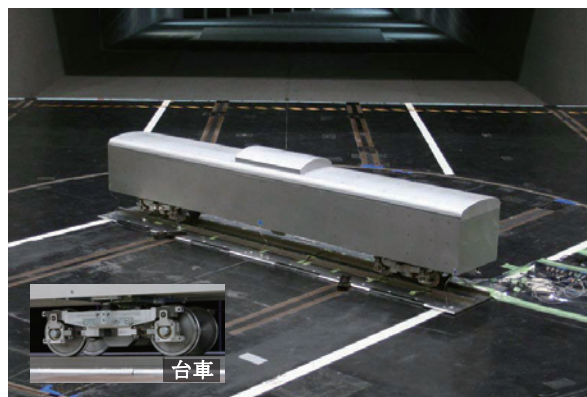


図 1 縮尺 1/10 車両模型

\* 車両構造技術研究部 車両運動研究室

表1 車両模型の主要諸元

項目	値
車体質量 [kg]	14.6
台車質量 [kg]	5.3
車体重心高さ [mm]	214
台車重心高さ [mm]	49
車体中心高さ [mm]	236
車体高さ [mm]	263
車体側面積 [m <sup>2</sup> ]	0.513
軌間 [mm]	106

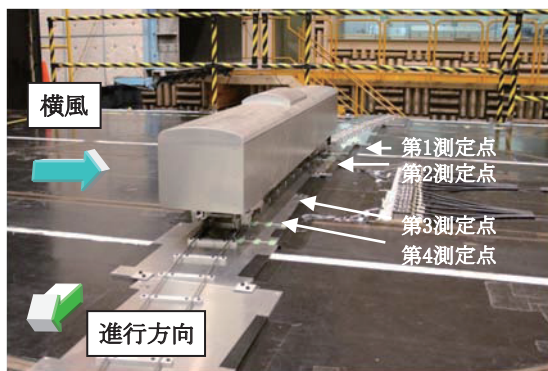
風洞試験は、鉄道総研の大型低騒音風洞（ゲッチングン型水平単帰還方式）の開放型測定部で実施した。試験に使用した風洞気流は、境界層吸い込み装置を動作させた状態で風洞床面に自然に発達する境界層を伴う一様流とした。なお、上述の通り車両模型は空気力と車体変位との関係に原型との相似則が成り立つように設計したため、模型における各ばね定数は原型の1/100倍、質量は1/1000倍となっている。よって、車両に働く重力は原型の1/1000倍となり、模型に作用する空気力も1/1000倍と考えることから、風速は原型の $1/\sqrt{10}$ 倍となる。従って、風洞試験における試験風速を実車相当に換算する場合には、 $\sqrt{10}$ 倍すればよい（例えば、風洞試験における風速10m/sは、実車では約31.6m/sに相当する）。

なお、上記の相似則を考慮して車両模型を設計した関

係上、車輪／レール間に作用する力のうち、クリープ力については同一の相似則が成り立たないと考えられる。従って、横圧要素のうちクリープ力に起因する成分の大きさが実際とは若干異なる可能性があるため、本報告では定量的な議論よりも定性的な傾向の把握を主目的とする。

## 2.2 測定方法および試験条件

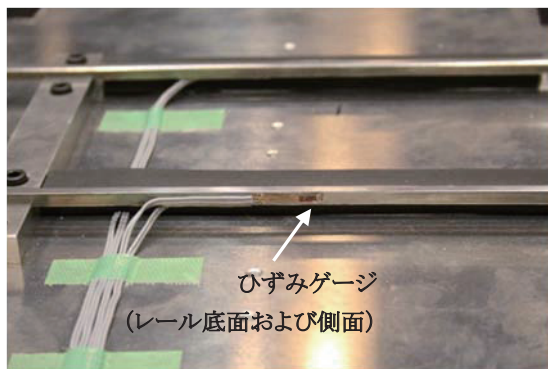
横風下走行試験の様子を図2に示す。風洞床面に設置した厚さ10mmのアルミプレート上に曲線軌道を敷設した。線形は半径10mの円曲線（実車相当半径100m）とし、カントは0mm（カント無し）と10.5mm（実車相当105mm）の2種類とした。なお、ここでのカントとは、軌道面全体を105mmのカントに相当する傾斜角（約5.6度）だけ傾けたものであり、内外軌の高低差で付与する実際のカントとは若干異なる（図2（b））。輪重および横圧は、レールの底面および側面に貼付したひずみゲージにより測定した（図2（c））。輪重・横圧測定箇所は4断面（4軸分＝8車輪分）であり、車両が風洞中心上にあるときの各輪軸の位置とした。以下、風上側に向かって右から順に、第1～第4測定点と呼ぶ。なお、レールはSS400みかき四角棒（5×5mm）を使用し、ゲージコーナー相当部にR1.3mmの面取り加工（R=13mmの実際のレールゲージコーナーに相当）を施してある。また、



(a) カント無し条件



(b) カント設定状況



(c) 輪重・横圧測定点



(d) 車体形状例(通勤型車(肩角))

図2 横風下走行試験の様子

各測定点のまくらぎ中心間隔は210mmである。車両は手押しで初速を与え、測定点を惰行で通過させた。本試験における走行速度の実績は、0.3～1.8m/s程度（実車相当4～20km/h程度）であった。これらの走行速度は、直近の2箇所の測定点を通過した時間とその距離から求めた。

車体形状は次の3種類とした。1種類目は縮尺1/10車両模型のオリジナル形状であり、以下「通勤型車」と呼ぶ。2種類目は、通勤型車の屋根肩に角部を有する部材を付加したものである。これは、屋根肩の歩み板の有無が空気力係数に比較的大きな影響を及ぼすことが報告されていることから<sup>4)</sup>、歩み板を大きめに模擬したものである。以下、便宜上「通勤型車（肩角）」と呼ぶ（図2(d)）。3種類目は、車体形状を角柱形としたものである。これは、これまでの風洞試験結果から横力係数が大きくなる傾向が確認されている屋根が角張った車両を模擬したものである。ここでは車体形状の影響のみを通勤型車と比較するために、車体高さ等の外形寸法を通勤型車と同一としており、車体質量もほぼ同等である。以下「角柱形車」と呼ぶ。

試験風速は、いずれの軌道・車両条件においても無風状態からスタートし、4m/s、8m/sと徐々に風速を増加させた。9m/s以上では、乗り上がりや転覆の有無を確認しながら、試験可能な範囲でより高い風速条件を設定した。

## 2.3 試験結果

### 2.3.1 定置試験結果

横風下走行試験に先立ち、風洞内に車両模型を定置し、風向角を変えながら車体に働く空気力および輪重・横圧の測定を行った。これは、次章で検討する簡易評価式において、本試験条件における空気力係数および横風による空気力が横圧に及ぼす影響を把握する必要があるためである。

空気力測定試験では、台車の代わりに六分力計で車体を支持し、車体に作用する空気力を直接測定した。一方、輪重・横圧測定試験では車両を元の状態に戻し、各車輪直下のレールに貼付したひずみゲージにより、各車輪に

作用する輪重および横圧を測定した。これらの試験結果のうち、通勤型車の例を図3～図5に示す。通勤型車では風速10m/sおよび12m/sで試験を行ったが、両者の空気力係数算出結果にほとんど差が見られなかったため、図3には風速12m/sにおける結果を示す。ここで得られた空気力係数を用いて総研詳細式<sup>1)</sup>で計算した輪重減少率を、風洞試験結果と併せて図4に示す。空気力と輪重をほぼ同一条件で測定した例はこれまでなかったが、今回の測定結果から、実測値と計算値はほぼ一致しており、総研詳細式の妥当性が改めて確認された。一方、輪重・横圧測定試験で得られた各風向角における1輪軸あたりの輪軸横圧を図5にプロットで示す。さらに同図には、空気力測定試験で得られた横力を1輪軸あたりに等分した結果を併せて示す。これらの結果から、車両が受ける横力を各輪軸に等分した大きさにほぼ等しい横圧が作用していることが確認された。

### 2.3.2 走行試験結果

横風下走行試験で得られたデータのうち、先頭軸が第3測定点を通過する際の測定結果について、輪重、横圧、脱線係数（横圧／輪重比）を、それぞれ外軌側、内軌側について整理した。第3測定点を選択した理由は、他の測定点に比較して測定結果のばらつきが小さく、安定した走行状態が確認されたことによる。なお、本試験における走行速度は前述の通り0.3～1.8m/s程度であり、実車相当に換算すると4～20km/h程度であった。半径100m、カント105mmの曲線における均衡速度は35km/hであることから、カント有りの試験条件は、いずれもカント超過に該当する。データの整理結果、いずれのケースにおいても試験風速が増加するにつれて外軌側の輪重が減少するとともに外軌側の横圧も減少する傾向が見られた。結果として外軌側の脱線係数は、試験風速が低いときにはその増加に関わらずほぼ一定の値であったが、試験風速が高い場合には試験条件により変化の様子が異なり、風速が増加しても脱線係数がほとんど変化しないケースと急激に大きくなるケースがあった。一方、内軌側の横圧／輪重比については、いずれのケースにおいても試験条件に関わらず0.3～0.5程度の範囲でほぼ一定

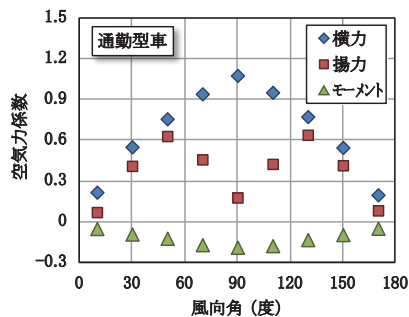


図3 風向角と空気力係数との関係

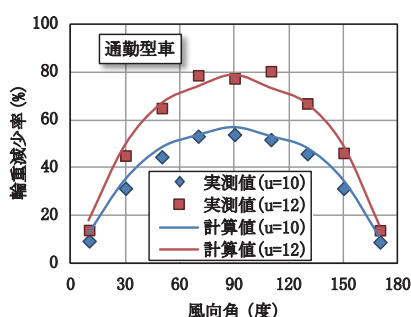


図4 風向角と輪重減少率との関係 (u: 風速 (m/s))

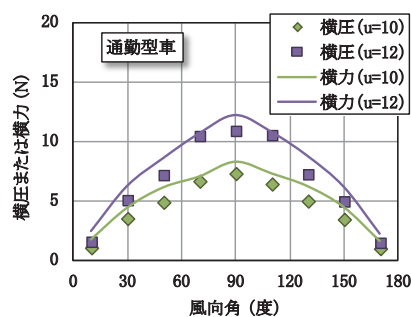


図5 輪軸横圧と横力の比較 (u: 風速 (m/s))

特集：車両技術

の値であった。これらの値は、通常の現車試験において測定される値とほぼ同等であることから、横圧要素のうちクリープ力に起因する成分の大きさが相似則の関係から実際とは若干異なる可能性が考えられたものの、その影響は小さいと考えられる。なお、今回の走行速度条件では、測定された各項目の走行速度依存性は比較的小さかった。

図6に試験風速と乗り上がり発生状況との関係を示す。なお、風洞試験結果（脱線係数）の詳細については、後述の簡易評価式による推定結果と併せて次章（図8）で示す。「通勤型車、カント無し」条件の場合には、試験風速増加に伴う脱線係数の増加は見られなかった。「通勤型車（肩角）、カント無し」条件の場合には、試験風速増加に伴う脱線係数の増加は明確には見られなかったが、試験風速11m/sのデータのばらつきが大きかった。これは、乗り上がりを開始するかしないかの境界付近であった可能性を示していると考えられる。「角柱形車、カント無し」条件の場合には、試験風速10m/s以上で脱線係数の増加が見られた。また試験風速11m/sでは車輪フランジが完全にレール頭頂面に乗り上がり（図7）、直後に脱線したため、試験風速を10.5m/sに下げて各データを改めて取得した。なお、試験風速10m/sおよび10.5m/sの場合でも、外軌側の車輪が上昇を開始し、

車輪踏面とレール頭頂面との間に隙間が生じる様子が散見された。しかし、これらの試験風速では、車輪がレール頭頂面に完全に乗り上がることは無かった。以下では便宜上、車輪が上昇を開始したものの完全には乗り上がらない状態を「車輪上昇」と呼び、レール頭頂面に完全に乗り上がることを「乗り上がり」と呼ぶ。「通勤型車、カント有り」条件では、試験風速9m/s以上で脱線係数の増加が見られた。また、試験風速10.5m/sでは、車輪上昇が見られることがあった。「通勤型車（肩角）、カント有り」条件では、試験風速8m/s以上で脱線係数の増加が見られた。「角柱形車、カント有り」条件では、試験風速8m/s以上で脱線係数の増加が見られた。また、試験風速9m/sでは車輪上昇および乗り上がりが散見された。乗り上がりが発生し、車輪フランジでレール頭頂面を走行しながら測定点を通過したときのデータを、後述の図8(f)に赤丸印のプロットで示す。車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がっているため、横圧はほとんど発生せず、脱線係数もゼロに近い値であることが分かる。

以上の風洞試験の結果をまとめると次のようになる。「通勤型車」および「通勤型車（肩角）」では、今回の試験風速の範囲では乗り上がりは発生しなかった。従って横風による運転抑止規制の発令風速（一般的には25m/s

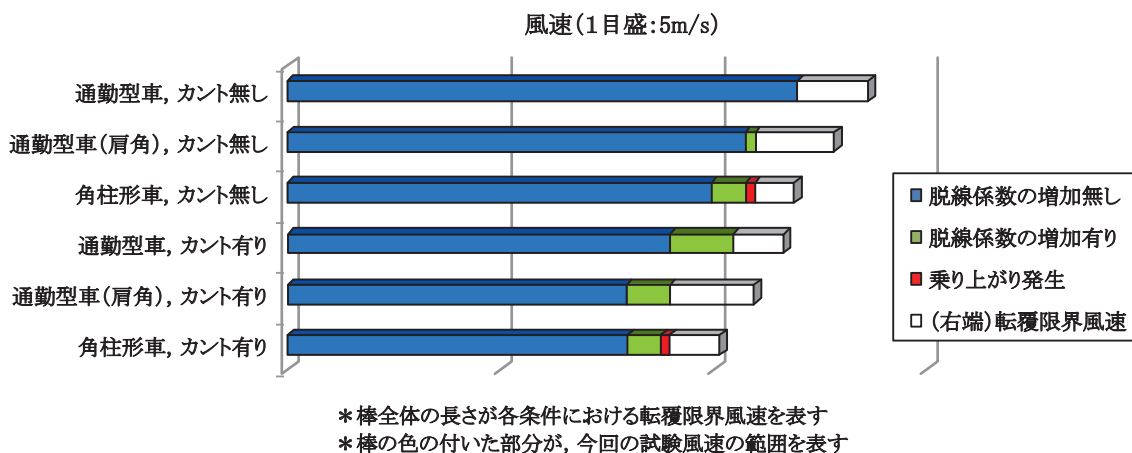


図6 試験風速と乗り上がり発生状況との関係

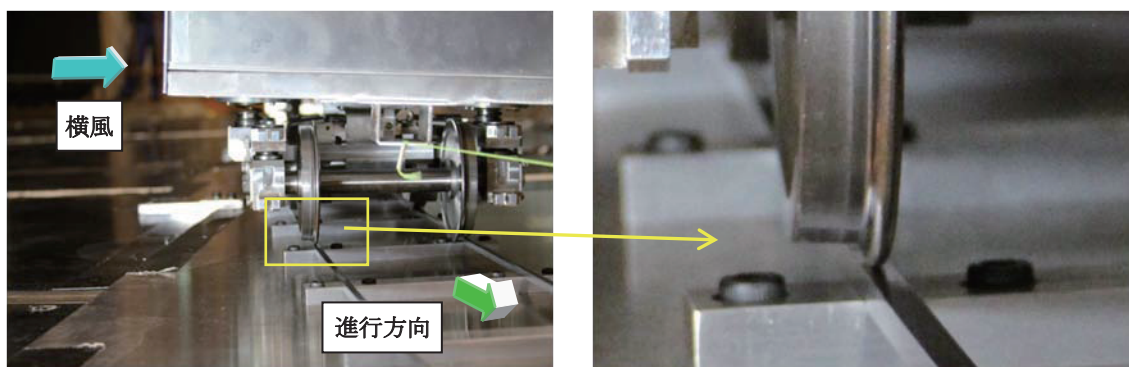


図7 乗り上がりの様子

または 30m/s 程度) 以下では乗り上がりは発生しないと考えられる。「角柱形車」では、カント無しの場合には試験風速 11m/s (実車相当約 35m/s)、カント有りの場合には試験風速 9m/s (実車相当約 28m/s) で乗り上がりが発生するケースが見られた。いずれも乗り上がりが発生する条件は、転覆限界風速に近い風速が作用し、外軌側の輪重減少率が 80% 程度を超えるような状態であった。一方で、横風による脱線係数の増加については、「通勤型車、カント無し」以外のすべての条件で確認された。ただし脱線係数の増加が見られる条件は、最低でも風速 8m/s (実車相当約 25m/s) 以上の風が作用する場合であり、転覆限界風速が高い車両ほど脱線係数の増加が始まる風速も高かった。また、実車相当風速 25m/s 程度未満の風速では、横風が脱線係数に及ぼす影響はほとんど見られなかった。なお、今回の試験は乗り上がり脱線に対して特に厳しい条件を設定した(急曲線、高カント)。通常、このような急曲線では脱線防止ガードが設置されており、逆にこれよりも緩い曲線であれば、外軌側横圧もそれほど大きくなると考えられる。従って、横風による乗り上がり脱線を第一義に考慮した新たな対策の必要性は低く、転覆に対する安全性が確実に担保されていれば、乗り上がり脱線に対する安全性も確保されていると考えられる。

### 3. 簡易評価式の検討

上記の試験結果の整理と併せて、横風下走行時の輪重・横圧を簡易的に推定する方法を検討した。車両の走行安全性を簡易的に評価する方法として、横風による転覆に関しては総研詳細式<sup>1)</sup>、急曲線における乗り上がり脱線に関しては輪重横圧推定式<sup>5)</sup>が挙げられる。そこで本報告では、輪重横圧推定式をベースとし、これに横風による輪重・横圧変化の影響を考慮した評価方法を検討した。文献 5) に示された輪重横圧推定式は次の通りである(添字等の表記は若干修正してある)。

$$\text{外軌側輪重} : P_{out} = \bar{P}_o - \Delta\bar{P} + \Delta P_A \quad (1)$$

$$\text{内軌側輪重} : P_{in} = \bar{P}_i + \Delta\bar{P} - \Delta P_A \quad (2)$$

$$\text{外軌側横圧} : Q_{out} = \bar{Q}_i + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} + \Delta Q_{unsp} \quad (3)$$

$$\text{内軌側横圧} : Q_{in} = \bar{Q}_i = \kappa P_{in} \quad (4)$$

ここで、

$\bar{P}_o$  : 外軌側輪重定常分

$\bar{P}_i$  : 内軌側輪重定常分

$\Delta\bar{P}$  : 軌道の平面性変位による静的輪重増減分

$\Delta P_A$  : 空気ばねのねじれによる輪重増減分

$\bar{Q}_i$  : 内軌側横圧定常分(曲線転向横圧)

$\Delta Q_{AS}$  : 輪軸横圧定常分(遠心力および空気ばねのねじれによる輪軸横圧)

$\Delta Q_{AD}$  : 軌道変位による横圧変動分

$\Delta Q_{unsp}$  : レール継目部での横圧変動分

$\kappa$  : 内軌側横圧輪重比

本検討では、横風が輪重・横圧に及ぼす影響を次のように考える。

- ①横風による輪重変化は、総研詳細式により評価する。
- ②横風による横圧変化は、車両に作用する横力を1輪軸当たり等に等分して外軌側横圧から減じる。

前章で述べたように、横風により内・外軌の輪重は大きく変化する。また、その変化を総研詳細式で適切に評価できることが確認されている。従って、式(1)および式(2)における、輪重定常分については、総研詳細式による評価結果を用いることとした。また、横圧変化については、同じく前章で述べたように、横風により車両が受ける横力を各輪軸に等分した大きさにほぼ等しい横圧が作用していることが確認された。従って、式(3)の外軌側横圧から車体に作用する横力の4分の1に相当する力を減ずることとした。さらに、本検討においては風洞試験の試験条件を考慮して、空気ばねのねじれによる輪重増減、軌道変位による横圧変動、レール継目部での横圧変動は考慮しないと仮定した。

以上の方法により推定した外軌側脱線係数を風洞試験結果と併せて図8に示す。「通勤型車」および「通勤型車(肩角)」のカント無し条件では、内外軌の輪重・横圧および脱線係数のいずれも、実測値と計算値は概ね一致することが分かる。一方、「角柱形車、カント無し」条件では、高風速域における脱線係数の推定誤差が大きく、また、各車両のカント有り条件では、車体形状によらずいずれも推定誤差が大きいことが分かる。ただし、これらの場合においても、脱線係数の増加が始まる風速や、脱線係数の増加の度合いなどの定性的な傾向は概ね妥当に評価できていると考えられる。従って、今回検討した横風下輪重・横圧推定式は、まだ改良の余地は多く残されているが、これらを今後精査することによって有用な手法となる可能性があると考えられる。

### 4. まとめ

横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を確認するために、縮尺 1/10 車両模型を用いた横風下走行試験(風洞試験)を実施した。また、横風が脱線係数に及ぼす影響を簡易的に評価する計算方法を検討した。これらの結果は以下の通りである。

- ①転覆限界風速に近い風が作用し、外軌側の輪重減少率が 80% 程度を超えるような状態で、乗り上がりが発生する場合があることが分かった。
- ②脱線係数の増加が見られる条件は、最低でも実車相当風速 25m/s 程度以上の風が作用する場合であり、転覆限界風速が高い車両ほど脱線係数の増加が始まる風速

※各図とも、プロットが風洞試験結果、点線が簡易評価式による推定結果を示す。

※点線の色は、各試験風速(u[m/s])を表すプロットの色に対応する。

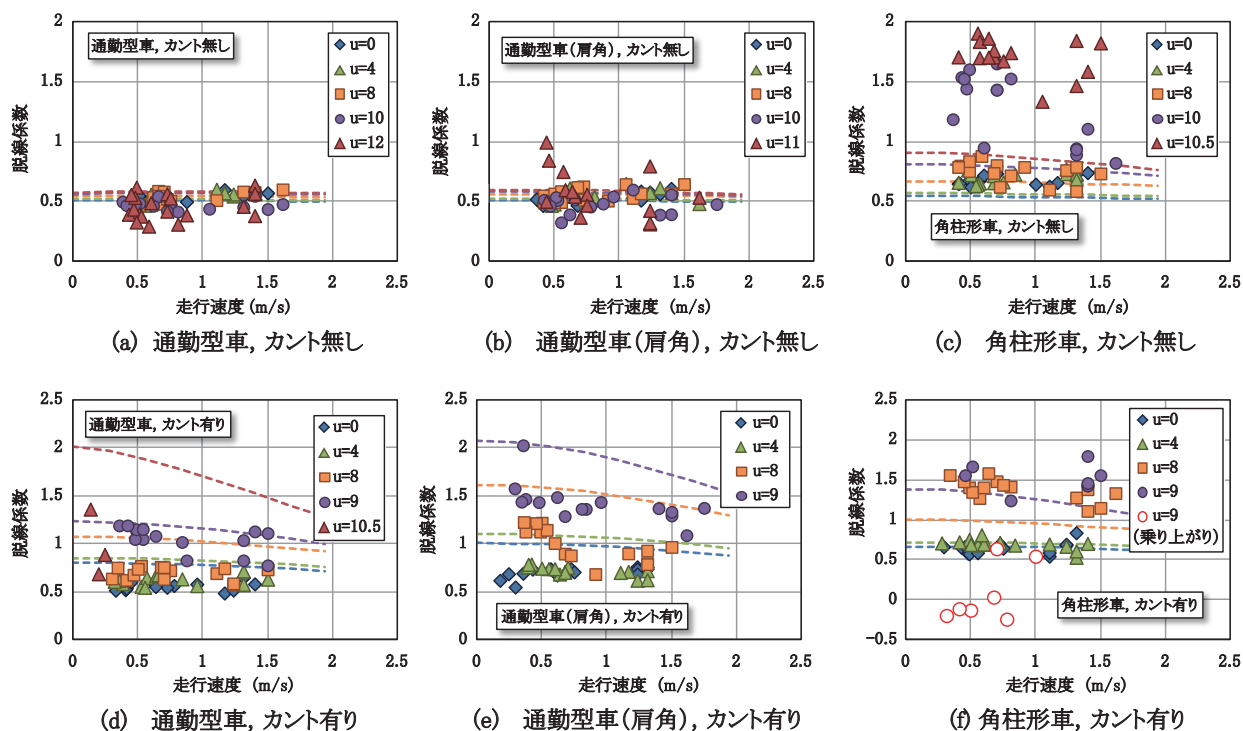


図8 走行速度と外軌側脱線係数との関係

も高かった。逆に、実車相当風速 25m/s 程度未満の風速では、横風が脱線係数に及ぼす影響はほとんど見られなかった。従って、転覆に対する安全性が確実に担保されていれば、乗り上がり脱線に対する安全性も合わせて確保されており、横風による乗り上がり脱線を第一義に考慮した新たな強風対策の必要性は低いと考えられる。

③輪重横圧推定式をベースとして、これに横風による輪重・横圧変化の影響を考慮した輪重・横圧評価方法を検討した。風洞試験結果によりこの手法の妥当性を検証したところ、定性的な傾向は概ね妥当に評価できていると考えられる。ただし、定量的には乖離が大きいケースも見られ、今後これらの原因を精査することによって有用な手法となる可能性があると考えられる。

なお、今回報告した内容は、縮尺 1/10 の車両模型を用いた試験結果であり、相似則の関係から、横圧要素のうちクリープ力に起因する成分の大きさが実際とは若干異なる可能性がある。従って、脱線係数等に関する定量的な議論を行うためには、今後さらに検討を深めていく必要があると考えられる。

文献

- 1) 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.17, No.4, pp.39-44, 2003
- 2) 日比野有ほか: 1 車両シミュレーションモデルによる鉄道車両の横風に対する安全性評価, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.771, pp.3066-3076, 2010
- 3) 島田晃一, 谷藤克也: 低速で曲線を走行する鉄道車両の走行安全性に及ぼす横風の影響, 第 15 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2008), pp.441-444, 2008
- 4) 森山淳ほか: 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, 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2011), pp.373-376, 2011
- 5) 内田雅夫ほか: 輪重横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価, 鉄道総研報告, Vol.15, No.4, pp.15-20, 2001