

急激な風の立ち上がりに対する車両の応答に関する 基礎検討

日比野 有* 金元 啓幸* 佐久間 豊**

Dynamic Response of a Moving Vehicle to a Sudden Gust of Wind

Yu HIBINO Hiroyuki KANEMOTO Yutaka SAKUMA

In order to analyze the behavior of a railway vehicle that is subjected to a sudden gust of wind, we have conducted wind tunnel tests and running tests using a 1/10th scale train model. Moreover, using a full-vehicle simulation program that we have developed in order to analyze the behavior of railway vehicles under crosswinds, we have examined the effects of the rapid changes of wind force on overturning or wheel unloading ratios. As a result, it has been revealed that a sudden increase in wind force in less than 3 seconds can affect vehicle dynamic response considerably.

キーワード：横風，転覆限界風速，輪重減少率，風洞試験，模型試験，車両運動シミュレーション

1. はじめに

近年、竜巻などの突風による被害が日本でも目立つようになってきた。例えば、2005年12月に羽越線で発生した特急いなほ号の脱線事故の原因は「局地的な突風」とされており¹⁾、また2006年9月に日豊線で発生した特急にちりん号の脱線事故の原因は「竜巻による突風」とされている²⁾。さらに、2006年11月に北海道佐呂間町で、また2012年5月に茨城県つくば市などで竜巻災害が発生し、鉄道被害こそ無かったものの人命が失われるなどの甚大な被害が生じている。

鉄道車両の横風に対する走行安全性評価手法として、鉄道総研では主として、外力の静的なつり合いから風速と輪重減少率との関係を求める静的解析法（総研詳細式³⁾）を用いている。これは、通常の横風に対する安全性を評価する手法としては概ね妥当であることが、実車を用いた検証試験などによって確認されている⁴⁾。しかし、突風に対する車両の応答は、突風そのものの特性（風速の空間分布や時間変化）を含め、ほとんど未解明である。

そこで本報告では、突風に類する風の急激な立ち上がりの例として、車両がトンネル出口等から退出した直後に強風にさらされる状況を想定し、縮尺1/10の車両模型を用いた横風下走行試験およびシミュレーションによるパラメータスタディを行い、空気力の立ち上がり特性と車両挙動との関係を検討したので報告する。

2. 縮尺 1/10 車両模型

2.1 模型の特徴

本報告で用いた縮尺1/10車両模型の外観を図1に示す。この模型は、空気力に影響を及ぼす車両形状のみならず、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、外力に対する車体の変位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⁵⁾。車体形状・寸法は103系通勤型車両をモデルとしており、模型車体の長さは約2m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、車両諸元も近年の標準的な通勤型車両の値を参考にしている。2.2節で述べる相似則に従った車両模型の主要諸元は表1に示す通りである。



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

** 環境工学研究部 車両空力特性研究室

特集：車両技術

表1 車両模型の主要諸元

項目	値
車体質量 [kg]	14.64
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 ²]	0.513
軌間 [mm]	106

2.2 相似則（換算倍率）

本研究では、空気力に対する車両の応答変位（実際には、その結果発生する輪重変動）を解析することを目的としている。従って、まず、空気力に影響を及ぼす形状に関する相似則を考慮し、車両模型の外形は103系通勤型車両と幾何学的に相似な形状とした。次に、力学的な相似則については、物理量として、①ばね力、②重力、③慣性力、④空気力に着目し、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倍率を検討した。具体的には、ばね力と重力との関係から、模型のばね定数を原型の1/100倍、質量を原型の1/1000倍とした。結果として、模型における時間は原型の $1/\sqrt{10}$ 倍、すなわち0.316倍となり、車両模型のばね系による固有振動数は原型の1/0.316倍、すなわち3.16倍になる。このため、模型走行試験時の横風の変動周波数、あるいは風の立ち上がりの時間について、実車相当に換算して考察する場合には、試験時の周波数を0.316倍、あるいは立ち上がり時間を3.16倍すればよい。また、模型における空気力も原型の1/1000倍と考えることから、風速は原型の $1/\sqrt{10}$ 倍、すなわち0.316倍となる。従って、模型走行試験時の風速（転覆限界風速）を、実車相当に換算して考察する場合には、試験時の風速を3.16倍すればよい。

3. 風洞試験

3.1 風洞試験概要

横風下走行試験に先立ち、車両模型の基本的な空気力特性を把握するために、風洞試験を実施し、風速・風向角に対する輪重を測定した。風洞試験は、鉄道総研の大型低騒音風洞（ゲッチンゲ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（厚さ約150mm）を伴う一様流である。地上構造物は設置せず、風洞床面に厚さ8mmのプレートを敷き、プレート上に設置されたレール上に車両模型を定置した。また、各車輪が接する箇所のレールを長さ30mmで分割し、そのレール下部に設置した小型ロードセルにより各輪重を測定した。

3.2 風洞試験結果

風洞試験では、各風向角について、試験風速9m/sおよび11m/sの条件で各車輪の輪重を測定した。なお、風向角とは車両に風が作用する様子を上から見たときの風と線路とがなす角度のことで、車両前方から吹いてくる風の風向角を0°、車両真横から吹いてくる風の風向角を90°とする。2両編成1両目の条件における風向角と1車両平均の輪重減少率との関係を図2に示す。

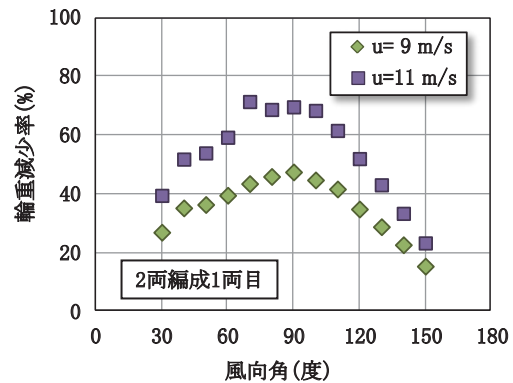


図2 風向角と輪重減少率との関係

3.3 輪重減少率から推定した空気力係数

図2から、各風向角における空気力係数を推定する。ここで、空気力係数とは風速の2乗と空気力との関係を表す比例定数であり、ここでは車両の転覆に大きな影響を及ぼす横力、揚力、ローリングモーメントに関する空気力係数を推定する。各空気力は、車体中心（幾何学的な中心）を原点とする座標系において図3のように定義される。

まず、各風向角における輪重合計から揚力を推定し、揚力係数を算出した。その上で輪重減少率が図2の結果に合うように横力係数を推定した。その際、風圧中心高さを決める要素となるローリングモーメント係数については、鉄道総研が過去に北海道の強風地で実施した「実物大車両模型試験」⁶⁾を模擬した風洞試験結果を準用した。このようにして求めた各空気力係数の推定結果については、後述の横風下走行試験結果と併せて4.2節で述べる。

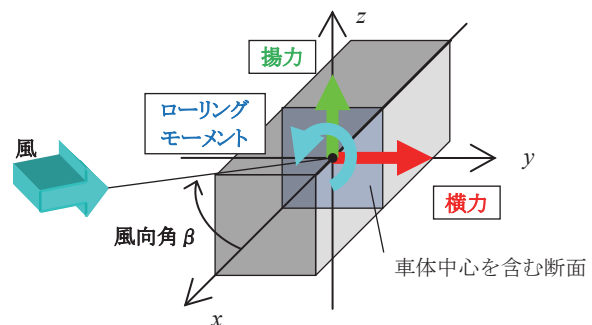


図3 空気力を定義する座標系

4. 横風下走行試験

4.1 横風下走行試験概要⁵⁾

走行する車両が横風に遭遇した際の空気力の変動や車両の挙動を調べるために、前述の縮尺 1/10 車両模型を用いた横風下走行試験を行った⁵⁾。走行試験は、JR 東日本総合研修センター内に仮設された模型走行装置を使用して行った。横風下走行試験の様子を図 4 に示す。本試験装置は、延長約 100m の走行路とその脇に設置された送風機から構成され、長さ 3m (車両模型 1.5 両分) の吹き出し口から車両模型に風を当てる構造となっており、無風区間を走行してきた車両は、先頭部から強風区間に順次突入する。従って、本試験の横風条件は、トンネル出口付近で強風が吹いており、その出口から車両が退出する際に強風にさらされる状況を模擬している。試験における走行速度は約 5 ~ 30km/h (実車相当約 15 ~ 95kmh) で、試験風速は約 4 ~ 11m/s (実車相当約 12 ~ 35m/s) であるが、以下の解析においては主に風速約 8.8m/s (実車相当約 28m/s) の試験結果を用いる。

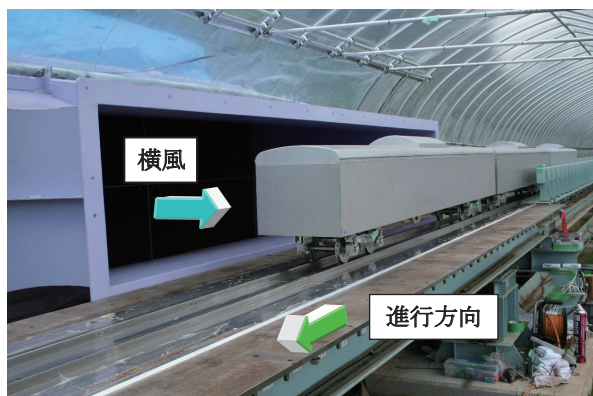


図 4 横風下走行試験

4.2 車体表面圧力から推定した空気力係数⁷⁾

空気力は、車体表面圧力の測定結果⁷⁾から推定した(以下、「実測空気力」という)。車体表面圧力は、車体表面に設けられた 95 点の圧力測定孔に圧力計 (All Sensors 社 11NCH-D1-4V-MINI) を設置し、車両模型内に設置したデータロガーにサンプリング周波数 1kHz で収録した。

各実測空気力は、各点で測定された車体表面圧力にその点が代表する面積を乗じ、それらを 1 車両全体にわたって和をとることにより求めた。また、各空気力係数は、各空気力を動圧 ($1/2\rho u^2$) および車体側面積 (モーメント係数の場合にはさらに車体高さ) で除することにより求めた。なお、動圧を求める際の風速 u は、実際に車両に作用する風速ではなく、送風区間において想定される平均的な相対風速 (一定値) とした。従って、以下で示す空気力係数の時系列波形例は、正確には空気力

係数が変化する様子を表しているのではなく、車両に働く空気力の変化を表していることに相当する。横力係数 C_y 、揚力係数 C_z 、ローリングモーメント係数 C_{mx} の時系列波形例を図 5 に示す。なお、同図において、ローリングモーメント係数の符号は、図 3 に示した右手系の直交座標系の定義に従っているため、これまで鉄道総研が報告してきたローリングモーメント係数 (車両が横風による転覆時に回転する向きをプラスと定義してきた) とは符号が逆になっていることに注意が必要である。本報告においては、5 章におけるシミュレーションで使用する空気力の座標系が、右手系の直交座標系の定義に従っているため、以降で述べる空気力係数についても、すべて右手系の直交座標系の定義に従う。

上記と同様の解析を各走行速度条件について行い、横力係数の最大値を各試験条件における相対風向角についてプロットしたものを図 6 に示す。また、3.3 節で述べた風洞試験結果も図 6 に併せて示す。同図から、模型走行試験における車体表面圧力から推定された横力係数は、風洞で模型を定置し、風向角のみを走行時の条件と同等にした試験において輪重減少率から推定された横力係数よりも 1.5 倍程度大きい結果となった。これは、空気力係数の推定方法が異なることによるものと考えられるが、本報告では、風の急激な立ち上がりに対する車両の挙動を検討することが主目的であるので、この差の原因についてはここでは考察せず、シミュレーションにおける適切な入力条件 (空気力データ) とするための合理的な補正方法を 5 章で検討する。ただし、空気力は車両の挙動を決定する重要な要素であるので、同図に示した

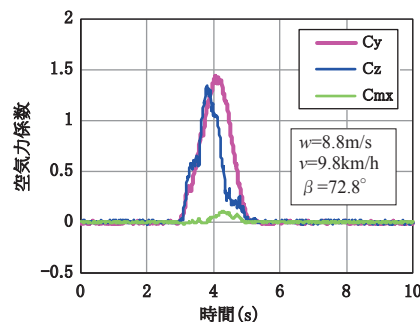


図 5 空気力係数の時系列波形例

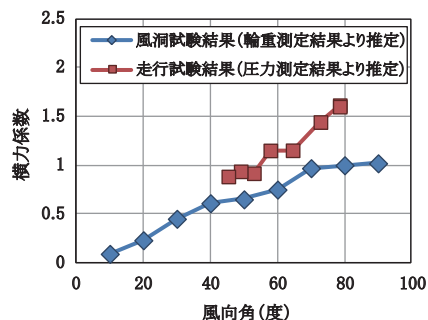


図 6 横力係数推定結果

特集：車両技術

差の原因については、空気力評価の問題として、別途引き続き検討する必要がある。

4.3 車体ロール角測定結果

車体ロール角は、前節で述べた圧力測定車両とは別の車両模型を用いて測定した。しかし、車両模型の構造や諸元は同一であり、また走行速度や風速などの試験条件は、圧力測定試験時と同等となるように設定した。車体ロール角は模型車体の床面中央に設置した慣性運動計測機器（クロスボー社 AHR5440）により測定し、無線送受信装置を用いてノートパソコンにデータを収録した。各試験条件における車体ロール角の最大値（座標の取り方から車体ロール角はマイナスの値を取るため、数値としては最小値）を求め、走行速度に対して整理したが、その結果については後述のシミュレーション結果と併せて5.1節で述べる。

5. シミュレーションによる車両挙動の検討

5.1 入力空気力の考え方

本章では、横風に対する車両の応答を解析するために開発されたシミュレーション⁸⁾を用いて、風の急激な立ち上がりに対する車両の挙動を検討する。まず本節では、シミュレーションに入力する空気力の考え方を検討する。4.2節で述べたように空気力の推定精度が現状では低いと考えられるため、実測空気力を補正することによって車両挙動を概ね再現できるような方法を検討する。また、任意の空気力変動に対する車両挙動解析を可能にするため、実測空気力の特性を簡易的に模擬する方法を検討する。さらに次節では、本節で検討する模擬空気力を用いたパラメータスタディを行い、空気力の立ち上がり特性と車両挙動との関係を検討する。

図7に、横風下走行試験における車両挙動の実測結果とシミュレーション結果の時系列波形例を示す。なお、実測結果とシミュレーション結果を比較する車両挙動の指標は、輪重（輪重減少率）とするのが望ましいが、模型走行試験では輪重を直接的に測定できないことから、輪重減少率と比較的相関の高い車体ロール角を指標とする。また、シミュレーションに入力する空気力は①実測空気力、②補正空気力、③模擬空気力とする。これらの空気力の考え方は次の通りである。

①実測空気力

4.2節で述べた実測空気力（圧力測定結果に面積を乗じて推定した空気力）をそのままシミュレーションの入力条件とする。実測空気力の例として、図5に示した空気力係数から算出した空気力を入力条件としたシミュレーション結果が図7中の①である。同図から、シミュレーションによる車体ロール角は、実測結果よりも大き

く変化していることが分かる。

②補正空気力

前記①の結果は、図6で示したように模型走行試験結果から推定された横力係数が大きいことが原因であると考えられることから、模型走行試験で得られた横力係数の最大値が、風洞試験で該当する風向角条件において得られた横力係数と等しくなるように、空気力係数の補正を試みる。

図5における横力係数の最大値は1.44であった。一方、当該試験条件と同じ風向角（72.8°）における風洞試験結果は、図6から0.98である。そこでこれらの比である0.98/1.44を補正係数として、これを図5の各空気力係数に乗じた上で空気力を算出したものを「補正空気力」とする。図7中の②から、補正空気力を入力したシミュレーションによる車体ロール角は、時系列的な細かい動きは実測値と異なるものの、最大値は概ね合っていることが分かる。

③模擬空気力

任意の風の立ち上がりに対する車両の挙動を検討するために、入力空気力を簡易的に模擬する方法を検討する。前章で述べた横風下走行試験における空気力の立ち上がりを簡易的に表現するモデルとして、正弦波の2乗の1/4周期分を仮定する（以下、便宜上「正弦空気力」という）。すなわち、車両の前頭部が送風区間に突入してから車両全体が完全に送風区間に入りきるまでの時間をかけて空気力が正弦波的に立ち上がるモデルであり、立ち上がり前後の空気力変化を滑らかにするために、式(1)に示す正弦波の2乗を波形として仮定する。

$$F = F_{\max} \sin^2 \left[2\pi \frac{t}{4L/(v/3.6)} \right] \quad (1)$$

ただし、 F_{\max} [N] は補正空気力の最大値、 L [m] は車体長さ、 v [km/h] は走行速度である。

式(1)で L を車体の実際の長さとして仮定した正弦空気力波形を横力の実測波形と比較すると、いずれの走行速度においても実測結果の方が立ち上がり時間が長いことが分かった。また、両者の立ち上がり時間の差に、走

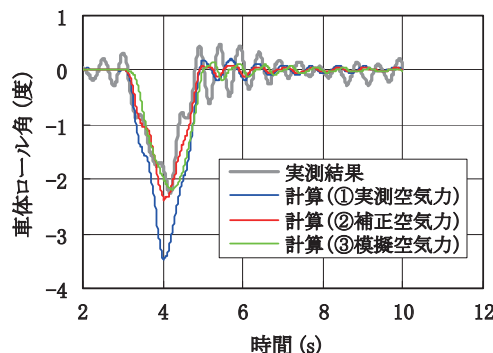


図7 車体ロール角の時系列波形例の比較

行速度を乗じて長さ相当に換算すると、この換算長さは走行速度が速くなると長くなることが分かった。そこで、この時間差に相当する換算長さを車体長さに加算することによって車体長さを補正し、立ち上がり時間を求めることとする。実測結果から、走行速度と時間差相当換算長さとの関係を1次式で近似すると、補正後の車体長さ L' は走行速度 v の関数として次式で表される。

$$L' = L + 0.025v + 1.0 \quad (2)$$

補正車体長さ L' を式(1)の L と置き換えることにより求めた空気力を「模擬空気力」とする。図7中の③より、模擬空気力によるシミュレーション結果は、実測結果および補正空気力によるシミュレーション結果と概ね同等であった。

他の試験条件についても補正空気力および模擬空気力を入力条件として同様にシミュレーションを行い、走行速度と車体ロール角の最大値との関係として整理したものを、4.3節で述べた横風下走行試験結果と併せて図8に示す。同図から、いずれの条件においても補正空気力および模擬空気力によるシミュレーション結果と実測結果は概ね一致することが分かった。ただし、空気力の最大値や立ち上がり時間における補正については、今回の試験結果から経験的・統計的に求めたものであり、理論的な根拠から導出したものではない。この点については、空気力評価の問題として今後さらに検討する必要がある。

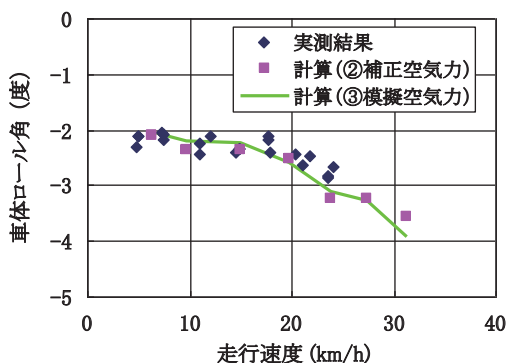


図8 車体ロール角の最大値の比較

5.2 模擬空気力によるパラメータスタディ

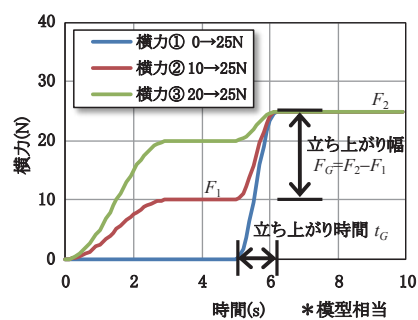
本節では、模擬空気力によるパラメータスタディを行い、横力の立ち上がり特性が車両挙動に及ぼす影響を検討する。図8から分かるように、走行速度が速くなると車体ロール角が大きくなり、転覆に対してより厳しい状況になっていると考えられる。そこで、横力の立ち上がり時間 t_G と立ち上がり幅 F_G が転覆に及ぼす影響を検討するために、図9に示すような波形を考える。これは、これまで述べてきた横風下走行試験やトンネル出口退出時に強風にさらされる状況を想定しており、式(1)をベ-

スに正弦波形状の立ち上がりを考慮している。また、横力の立ち上がり時間や立ち上がり幅の影響を検討するため、横力の最大値 F_2 は固定値とし、図5に示した試験風速 8.8m/s、模型走行速度 9.8km/h での横風下走行試験条件における横力の最大値 (5.1節②で述べた補正空気力係数を用いて計算した場合に 26.2N) を参考に、本検討では 25N とする。これは実車に換算すると、風速 27.8m/s のもと速度 31km/h で走行する車両に 25kN の横力が作用する場合に相当する。また、立ち上がり直前の車両の過渡的応答が本検討に及ぼす影響を可能な限り小さくするため、立ち上がり直前に車両に作用する横力 F_1 は $t=0$ から 3秒間かけてゆっくり増加するものとする。その後 $t=5$ 秒から時間 t_G の間に、横力が F_1 から最大値 F_2 まで、立ち上がり幅 F_G で立ち上がりとし、このときの車両挙動を解析する。具体的には、 F_1 を 0, 10, 20N とし、 t_G は、走行速度 3.2~37km/h に対応する 0.38~3.4秒とする。なお、これらは模型車両走行試験に対応する数値であり、実車相当に換算すると F_1 は 0, 10, 20kN、 t_G は走行速度 10~117km/h に対応する 1.2~10.8秒となる。

図10に走行速度と輪重減少率最大値との関係を、図11に図10の横軸を立ち上がり時間に換算した図を、それぞれ示す。以降の記述では、車両挙動の指標として輪重減少率を用い、走行速度や時間スケールも実車相当とする。図11の横軸(立ち上がり時間)については、図10等との比較の便を考慮して、右へ行くほど立ち上がり時間が短くなるように表示する。なお、静的解析式(総研詳細式)により横力 25kN に対する輪重減少率を計算すると、左右振動加速度が $0m/s^2$ のとき約 40% である。

両図から、走行速度が速くなるほど、すなわち立ち上がり時間が短くなるほど輪重減少率の最大値が大きくなることが分かる。また、横力の最大値が等しい場合でも、立ち上がり幅が大きいほど、輪重減少率の最大値が大きくなることが分かる。また、走行速度が 40km/h 程度よりも遅い場合には、すなわち横力の立ち上がり時間が 3秒程度よりも長い場合には、静的解析結果との差は小さいことが分かる。

以上の検討結果から、例えば近年の一般的な通勤型車両の場合には、横力の立ち上がり時間が 3秒程度よりも緩やかであれば、静的解析でも転覆に対する安全性を概ね適切に評価できることが明らかになった。また、横力が急激に立ち上がる場合(トンネル出口退出時などで急激に強風にさらされる場合など)には、仮に横力の最大値が同じである場合でも、横力の立ち上がり幅が小さければ輪重減少率の最大値も小さくなることが明らかになった。すなわち、急激に強風にさらされるような箇所においては、一定延長区間に防風柵などを敷設し、横力の立ち上がりを段階的に抑制することにより、最終的に



(図中の説明は、横力②の場合を示す)

図9 横力波形例

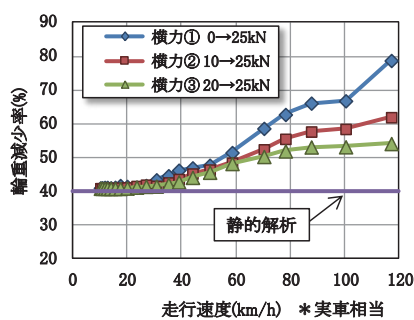


図10 走行速度と輪重減少率との関係

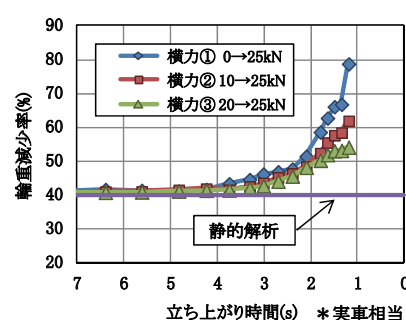


図11 立ち上がり時間と輪重減少率との関係

さらされる横力の最大値が同一であっても輪重変動を抑えられる可能性があることが明らかになった。

6. まとめ

風の急激な立ち上がりに対する車両の挙動を調べるために、縮尺模型を用いた横風下走行試験およびシミュレーションによるパラメータスタディを行った。横力の立ち上がり特性と車両挙動との関係を検討した結果は次の通りである。

- (1) 縮尺模型を用いた横風下走行試験により、車両に働く空気力の時間変動を明らかにした。また、その結果を、定置模型を用いた風洞試験結果により補正することによって、車両の挙動を概ね適切に評価できることを明らかにした。
- (2) 風の急激な立ち上がりを模擬する空気力波形として、空気力の最大値を定置模型による風洞試験結果から評価し、立ち上がり波形を正弦波の2乗で近似し、車体長さが見かけ上長くなったとみなす「補正長さ」を用いて立ち上がり時間を求めた波形を仮定することにより、車両の挙動を概ね適切に評価できることを明らかにした。
- (3) 横力の立ち上がり時間が短くなるほど、輪重減少率の最大値が大きくなり、横力の最大値が等しい場合でも、横力の立ち上がり幅が大きいほど、輪重減少率の最大値が大きくなることが明らかになった。
- (4) 近年の一般的な通勤型車両に25kN程度の横力（風速25～30m/s程度に相当）が作用する場合には、横力の立ち上がり時間が3秒程度よりも緩やかであれば、静的解析でも転覆に対する安全性を概ね適切に評価できることが明らかになった。
- (5) 横力の立ち上がり時間が3秒程度よりも短い場合には、防風柵などを敷設し、横力の立ち上がりを段階的に抑制することにより、輪重変動を抑えられる可能性があることが明らかになった。

謝辞

横風下模型走行試験に関して、JR 東日本研究開発センター安全研究所および JR 東日本総合研修センターの関係者の皆様には多大なるご理解とご協力を賜りました。ここに改めて深謝の意を表します。

文献

- 1) 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 羽越線砂越駅～北余目駅間 列車脱線事故），2008
- 2) 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書（九州旅客鉄道株式会社 日豊線南延岡駅構内 列車脱線事故），2008
- 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，Vol.17, No.4, pp.39-44, 2003
- 4) 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
- 5) 日比野有，金元啓幸，佐久間豊：横風を受けた鉄道車両の挙動解析（その1—縮尺1/10模型を用いた横風下走行試験概要），第18回 鉄道技術・政策連合シンポジウム J-RAIL2011, pp.361-364, 2011
- 6) 日比野有，今井俊昭，種本勝二：自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測，鉄道総研報告，Vol.18, No.9, pp.11-16, 2004
- 7) 佐久間豊，日比野有，金元啓幸：横風を受けた鉄道車両の挙動解析（その2—縮尺1/10模型を用いた車体表面圧力変動測定結果），第18回 鉄道技術・政策連合シンポジウム J-RAIL2011, pp.365-368, 2011
- 8) 日比野有，金元啓幸，下村隆行，谷藤克也：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