

1507 風の急激な立ち上がりに対する車両の挙動

正 [機] ○日比野 有 (鉄道総研)

正 [機] 金元 啓幸 (鉄道総研)

A Study on Vehicle Response to Sudden Gusts of Wind

Yu HIBINO, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Hirofumi KANEMOTO, Railway Technical Research Institute

In order to analyze the behavior of a railway vehicle that is subjected to sudden gusts of wind, we conducted wind tunnel tests and running tests using a 1/10th scale model. The feature of this model is that we chose its spring constants considering the law of similarity between external forces and the resultant displacement of the car body. Using this model, we examined aerodynamic forces that acted on the surface of the vehicle and the behavior of the model in detail. Moreover, using the full-vehicle simulation program that we have developed in order to analyze the behavior of a railway vehicle under crosswind, we examined the effects of the rapid changes of wind forces on overturning or wheel unloading ratio.

Keywords : crosswind, vehicle dynamics, wheel unloading ratio, critical wind speed of overturning

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、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。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¹⁾)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²⁾。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。

そこで本研究では、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、横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

横風下走行試験で用いる縮尺1/10の車両模型は、在来線の通勤型車両をモデルとしており、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³⁾。なお、車体形状・寸法は103系通勤型車両をモデルとし、台車は一般的なボルスタレス台車をモデルとしている。

2.2 相似則(換算倍率)

横風下走行試験では、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、鉄道総研が所有する大型低騒音風洞(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(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のプレート敷き、プレート上に設置されたレール上に車両を定置した。また、各車輪直下のレールを長さ30mmで切り取り、その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1に示す。

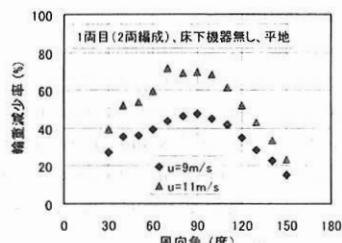


Fig.1 風向角と輪重減少率との関係

3.3 空気力係数の推定

図1から、各風向角における空気力係数を推定する。まず、各風向角における輪重合計から揚力を推定し、揚力係数を算出する。その上で輪重減少率が図1の結果に合うように横力係数を推定する。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、今回の輪重測定結果からだけでは推定できないので、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」⁴⁾を模擬した風洞試験結果を補正して準用することとした。このようにして推定した空気力係数を、後述の横風下走行試験結果と併せて図4に示す。

4. 横風下走行試験

4.1 横風下走行試験概要³⁾

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。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2に示す。図2から分かるように、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 15~95km/h) 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。

4.2 空気力推定結果⁵⁾

空気力は、車体表面圧力の測定結果から推定した（以下、「実測空気力」という）。車体表面圧力は、車体表面

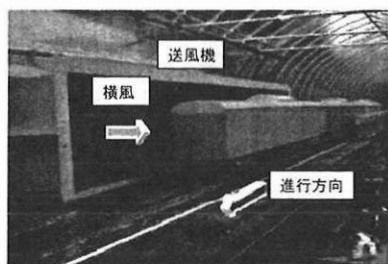


Fig.2 横風下走行試験

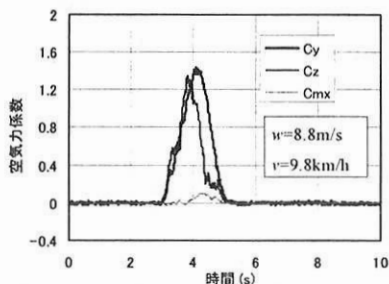


Fig.3 空気力係数の時系列波形例

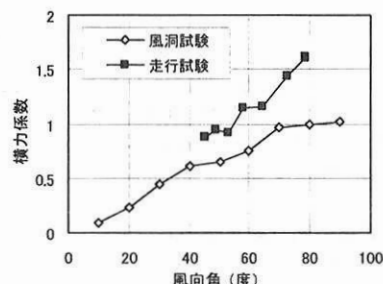


Fig.4 風向角と横力係数との関係

に設けられた 95 点の圧力測定孔に圧力計 (All Sensors 社 I1NCH-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車両全体に渡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、送風区間における想定相対風速 (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、空気力の変化を無次元化して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3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、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の取り方が、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4に示す。また、3.3節で述べた風洞試験結果も図4に併せて示す。図4から、模型走行試験結果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結果から推定された横力係数よりも 1.5 倍程度大きくなるのが分かる。ただし、この差の原因については特定することができず、今後の検討課題である。すなわち、風洞試験における空気力は、直接測定したものではなく、輪重の測定結果から推定したものである。従って、今後、空気力を直接測定して空気力係数を求める必要がある。また、模型走行試験においては、空気力を算出する際の代表面積の取り方によって1車両に渡って加算された空気力の値が変わってくる。また1つの代表面積の中でも圧力分布があり、空気力を算出する際に誤差が生じる可能性がある。これらについても、今後、データを再検証する必要がある。また、今回の試験のように急激に風が立ち上がる場合には、空気力の非定常性 (オーバーシュート) が現れる可能性がある。これについても、今後検討する必要がある。

4.3 車体ロール角測定結果

前節で述べた圧力測定試験とほぼ同等の条件において車体ロール角を測定した。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 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変位の最大値（座標の取り方から車体ロール角はマイナスの値を取るの、数値としては最小値）を求め、走行速度に対してプロットしたものを、後述のシミュレーション結果と併せて図6に示す。

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、シミュレーション⁶⁾により、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5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およびシミュレーション結果は次の通りである。

①実測空気力

4.2節で述べた実測空気力（圧力測定結果から推定した空気力）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3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を図5に示す。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位していることが分かる。

②補正空気力

前記①の結果は、図4で示したように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3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4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3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5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、最大変位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変動のモデ

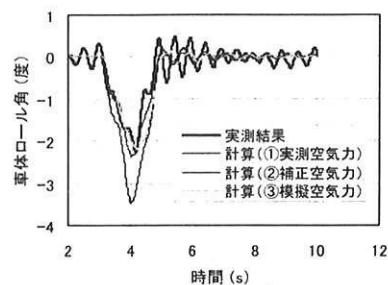


Fig.5 車体ロール角の時系列波形例

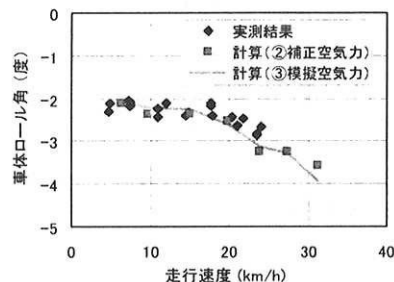


Fig.6 走行速度と車体ロール角との関係

ルとして、最も単純化された立ち上がり波形は正弦波の2乗の1/4周期形状である（式(1)）。

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

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

しかし、横力の実測結果と式(1)で求めた横力の模擬波形を比較すると、実測結果の方が立ち上がりが遅いことが分かった。また、両者の立ち上がり時間の差に、走行速度を乗じて長さ相当に換算すると、走行速度が速くなると時間差に相当する長さが長くなることが分かった。そこで、時間差に相当する長さを車体長さに加算することによって補正し、立ち上がり時間を求めることとする。実測結果から、補正後の車体長さ L' は次式で表される。

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

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5より、模擬空気力によるシミュレーション結果は、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変位の最大値との関係として整理したものを図6に示す。同図から、いずれの条件においても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統計的に求めたものであり、現象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、今後さらに検討する必要がある。

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6から分かるように、走行速度が速くなると車体ロール角変位が大きくなり、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

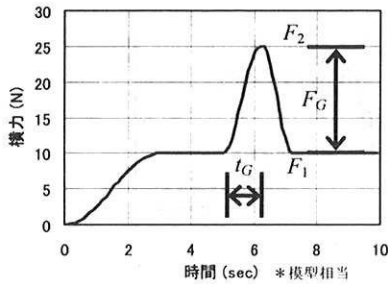


Fig.7 横力波形例

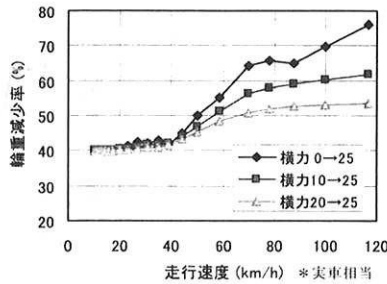


Fig.8 走行速度と輪重減少率との関係

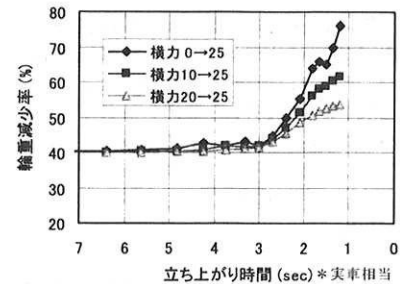


Fig.9 立ち上がり時間と輪重減少率との関係

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7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いるが、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 はすべて同一であると仮定する。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 (最大値は全ケース同一値とする) まで F_G 立ち上がるとし、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、 F_2 を 25N とする。また、 t_G は、走行速度 3.2~37km/h に対応する 0.38~3.4sec 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, F_2 は 25kN, t_G は走行速度 10~117km/h に対応する 1.2~10.8sec となる。

図8に走行速度と輪重減少率最大値との関係を、図9に図8の横軸を立ち上がり時間に換算した図を、それぞれ示す。なお、ここ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。また、図9の横軸(立ち上がり時間)については、図8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 (実車相当) 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がほとんど無いことが分かる。

以上の検討結果から、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示唆された。

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) 風の急激な立ち上がりを模擬する空気力波形として、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、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することにより、車両の挙動を概ね適切に評価できる。
- (2) 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は大きくなる。また、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は大きくなる。
- (3) 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。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。

参考文献

- 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, 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中(C編), Vol.75, No.758, pp.2605-2612, 2009
- 3) 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, 2011
- 4) 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
- 5) 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, 2011
- 6) 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中(C編), Vol.76, No.771, pp.3066-3076, 2010