

横風を受けた鉄道車両の挙動解析

(その 3 - 縮尺 1/10 模型を用いた車両応答測定結果)

○ [機] 日比野 有 [機] 金元 啓幸 [機] 佐久間 豊 (鉄道総研)

Analysis of Railway Vehicle Dynamics Affected by Crosswinds

(Part 3- Vehicle Response obtained by Running Tests using a 1/10th Scale Model)

○ Yu Hibino, Hiroyuki Kanemoto, Yutaka Sakuma,

(Railway Technical Research Institute)

In order to analyze the behavior of a railway vehicle that is subjected to crosswind, we conducted running tests using a 1/10th scale model. In the running test, we changed running speeds and wind speeds as a test condition, and measured axle spring loads of the vehicle that was running under crosswind. Consequently, a tendency was seen that the faster the running speed becomes, the larger the unloading ratio of the axle spring becomes. Moreover, regarding the roll displacement of the car body, we confirmed that the measured and calculated results are consistent when the running speed is relatively slow.

キーワード：横風，転覆限界風速，輪重減少率，模型走行試験，走行安全性

Key Words：Crosswind, Critical wind speed of overturning, Wheel unloading ratio, Running test using reduced scale model, Running safety

1. はじめに

横風を受けた車両の挙動を解析するために、台車のばね系等を忠実に再現した縮尺 1/10 の車両模型と横風試験用送風機を製作し、横風下を走行する車両に働く空気力と、その結果生じる車両の挙動について詳細に調べた。これらの試験装置および試験方法の概要については第 1 報で述べた¹⁾。また、車体表面圧力の測定結果については第 2 報で述べた²⁾。本報告では、横風を受けた車両応答の測定結果について報告する。

2. 測定および評価方法

2.1 測定項目

車両の応答に関する測定項目を表 1 に示す。軸ばねに作用する上下方向の力（以下、軸ばね荷重という）については、軸ばね上部と台車枠との間に小型ロードセルを挿入し、模型車内に設置したコンパクトレコーダでデータを収録した。車体姿勢については、慣性運動計測機（ジャイロ）を模型車体の床面中央に設置し、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。走行速度については、送風区間の直前に設置したレーザーセンサーで測定した。

センサーにより車体がレーザーを遮る時間が計測され、車体長さでこの時間を割ることにより走行速度を算出し、パソコン画面に表示させた。

試験車両の編成は 1 両～3 両とし、1 両目または 2 両目を測定車とした。いずれの測定条件においても、走行速度と風速の組み合わせを変えながら試験を行い、走行速度は約 5～30km/h で 6 段階、風速は約 4～11m/s で 4 段階の条件を設定した。また、試験の再現性を確認するために、原則として同一条件で 2～3 回試験を行った。

表 1 測定項目

項目	測定部位	センサー	収録装置
軸ばね荷重	各軸ばね (計 8 輪)	小型ロードセル LMB-A-200N (共和電業)	コンパクト レコーダ EDS-400A (共和電業)
車体姿勢	車体中央 床面 (1 箇所)	慣性運動計測機 AHRS440 (クロスボー)	無線送受信装 置を用いてパ ソコンに収録
走行速度	送風区間 直前	レーザーセンサ LV-H110 他 (キーエンス)	パソコン表示

2.2 評価方法

本試験では、空気力に対する車両の応答を評価する指標として、軸ばね荷重減少率を用いた。これは、左右の軸ばね荷重の平均値からの風上側の軸ばね荷重の差を左右の軸ばね荷重の平均値で割ったものであり、いわゆる輪重減少率と同様の定義式による指標である (式1)。

$$\text{軸ばね荷重減少率} : \frac{\Delta P}{P_0} \equiv \frac{P_0 - P_W}{P_0} \dots (1)$$

ただし、 $P_0 = (P_W + P_L)/2$: 左右の軸ばね荷重の平均、 P_W : 風上側の軸ばね荷重、 P_L : 風下側の軸ばね荷重である。

なお、上式は各軸について各々定義されるものであるが、車両の転覆に対する指標としては、1車両平均の軸ばね荷重減少率を考慮する方が適切であると考えられる。これは、各軸に静止輪重アンバランスがそれぞれ生じている場合でも、1車両平均の輪重減少率を指標とすることにより、アンバランスの付き方に関わらず、風速と輪重減少率(あるいは転覆)との関係を適切に評価できるからである³⁾。1車両平均の軸ばね荷重減少率は、風上側4車輪の軸ばね荷重平均値と風下側4車輪の軸ばね荷重平均値をそれぞれ風上側および風下側の軸ばね荷重として、式(1)から求めることができる。従って、以下において特に断らない限り「軸ばね荷重減少率」とは1車両平均の軸ばね荷重減少率のことを表し、各軸の軸ばね荷重減少率を示す必要がある場合にも「各軸ばね荷重減少率」と表すこととする。

3. 走行試験結果

3.1 送風区間通過時の挙動

3両編成の1両目車両が送風区間を通過する際の車両挙動に関する時系列波形例を、図1～図4に示す。各図とも試験風速は同一の約8.8m/sであるが、走行速度が異なり、図1から順に、4.9km/h、7.4km/h、14.6km/h、23.5km/hである。各図とも、(a)は各軸の軸ばね荷重減少率(進行方向前側から第1軸とする)、(b)は風上側または風下側の軸

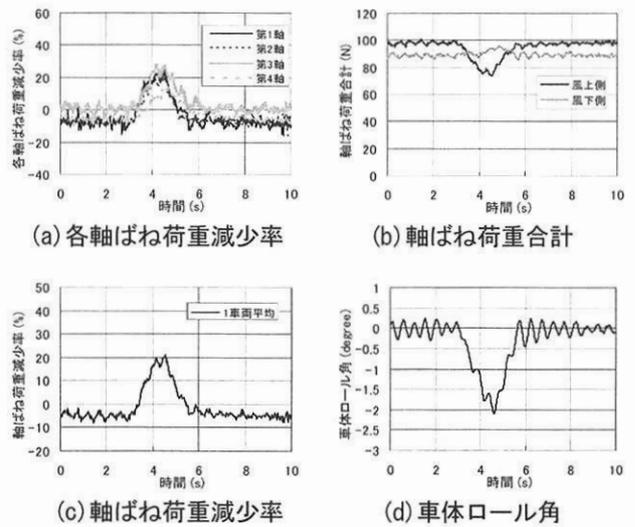


図2 送風区間通過時の車両挙動 (風速約8.8m/s, 走行速度7.4km/h)

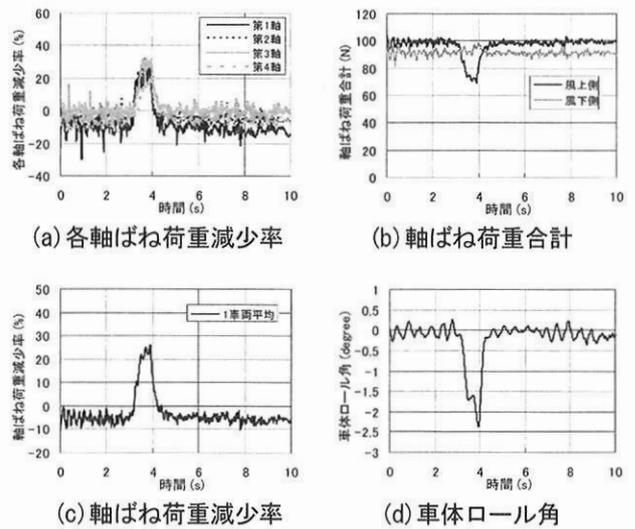


図3 送風区間通過時の車両挙動 (風速約8.8m/s, 走行速度14.6km/h)

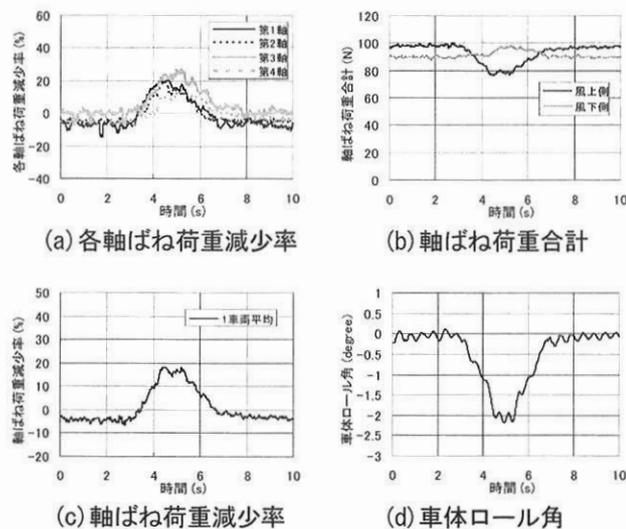


図1 送風区間通過時の車両挙動 (風速約8.8m/s, 走行速度4.9km/h)

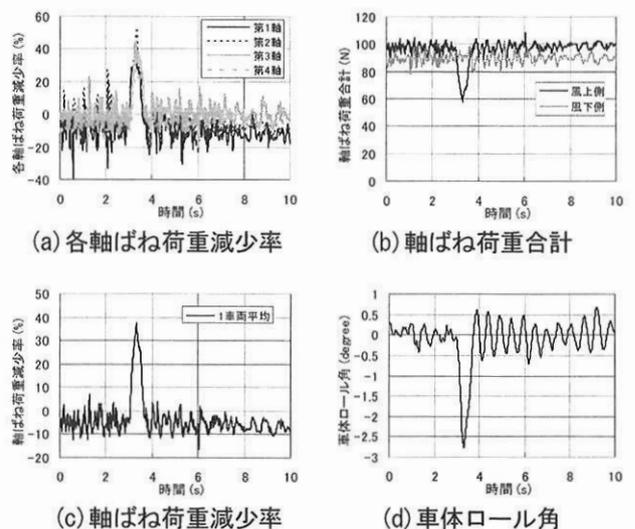


図4 送風区間通過時の車両挙動 (風速約8.8m/s, 走行速度23.5km/h)

ばね荷重合計, (c)は1車両平均の軸ばね荷重減少率, (d)は車体のロール角をそれぞれ示す. なお, これらの走行速度および風速は模型に関する走行速度および風速であり, 以下においても特に断らない限り同様とする. 実車相当に換算する場合には, それぞれ $\sqrt{10}$ 倍 (3.16倍) すればよい.

図1から, 低速走行中に高風速にさらされた車両挙動の様子が分かる. すなわち, 図1(a)から, 送風区間に突入すると, 4軸ともほぼ同時に風上側の軸ばね荷重が減少することが分かる. また, 図1(b)から, 風上側の軸ばね荷重が大きく減少するのに対して, 風下側の軸ばね荷重はほとんど増加しないことが分かる. これは車両に働く揚力の影響によるものと考えられる. また, 図1(c)から, 送風区間を走行中はほぼ一定の割合で軸ばね荷重が減少している(定常状態に近い状態になっている)ことが分かる. 図1(d)の車体ロール角においても同様の傾向が見られる.

さらに図1~図4から, 試験風速が同一でも, 走行速度の増加に伴って, 軸ばね荷重減少率, 車体ロール角(の絶対値)のいずれも増加することが分かる. ただし, 図3~図4のように走行速度が速い場合には, 軸ばね荷重減少率および車体ロール角において, 定常状態になる部分は見られず, 過渡状態(定常状態に至る前の状態)の測定結果であることが推察される.

3.2 走行速度と軸ばね荷重減少率との関係

前記の解析をすべての試番に対して行い, 走行速度と1車両平均の軸ばね荷重減少率最大値との関係を整理した. その結果を試験風速ごとに図5(a)~(d)に示す. いずれの図においても, 走行速度の増加とともに軸ばね荷重減少率が大きくなる傾向が見られた. さらに編成における車両位置条件で詳しく比較すると, 低速で走行する場合には中間車条件の方が, 高速で走行する場合には先頭車条件の方が, 軸ばね荷重減少率がわずかに大きくなる傾向が見られた. これは, 車両に対する風向角と横力係数との関係において, 真横から風が作用するときは中間車の方が横力係数が大きく, 斜め前方から風が作用するときは先頭車の方が大きくなるという過去の風洞試験結果の傾向と概ね一致するものである. また, 2両編成または3両編成の1両目と1両編成の1両目(単車)では, 軸ばね荷重減少率の傾向にほとんど差が無いことが分かった.

次に, 車体姿勢測定時の走行速度とロール角最大値(絶対値としての最大値)との関係を図6(a)~(d)に示す. 同図から, ロール角最大値の傾向は図5と同様であり, 低速走行時は中間車条件の方が, 高速走行時は先頭車条件の方が, 若干大きくなる傾向が見られた.

さらに, 走行時の左右振動が軸ばね荷重減少率に及ぼす影響を確認するため, 送風区間に突入する直前の5秒間の無風区間におけるデータを整理した. 無風区間における走行速度と左右振動加速度最大値との関係を図7に, 走行速度と軸ばね荷重減少率の標準偏差との関係を図8にそれぞれ

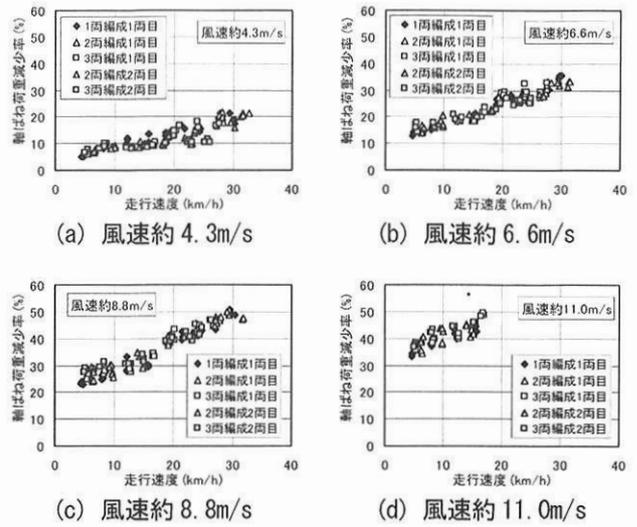


図5 走行速度と軸ばね荷重減少率最大値との関係

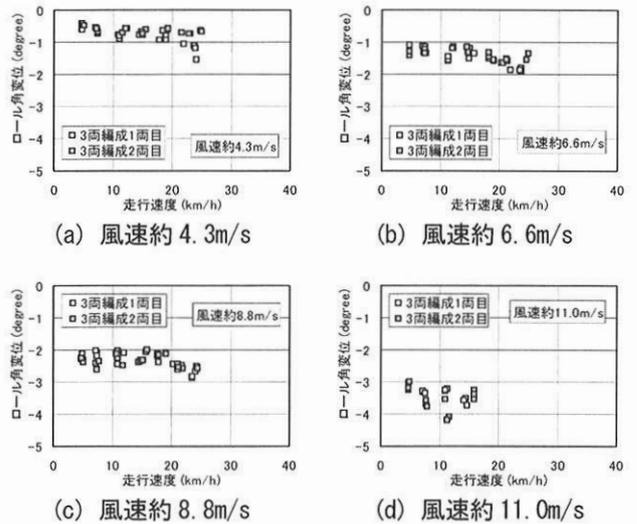


図6 走行速度と車体ロール角最大値との関係

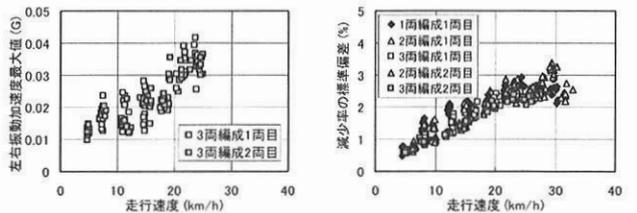


図7 走行速度と左右振動加速度最大値との関係 (無風区間)

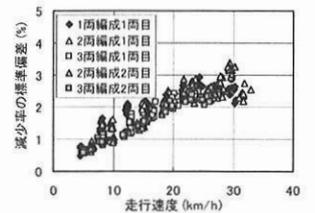


図8 走行速度と軸ばね荷重減少率の標準偏差との関係 (無風区間)

示す. 図7から, 走行速度の増加とともに左右振動加速度が大きくなる傾向が見られ, 1両目と2両目との差はほとんど無いことが分かる. また, 図8から, 軸ばね荷重減少率の標準偏差も走行速度の増加とともに大きくなる傾向が見られ, 走行速度10~20km/hでは2両目の標準偏差が若干小さくなる傾向が見られたものの, それ以外の速度域では車両位置による明確な違いは見られなかった.

3.3 静的解析による計算結果との比較

本節では、現在鉄道総研が用いている静的解析法「詳細計算式」⁴⁾による計算結果と上記の実測結果とを比較する。比較の対象とする指標は輪重（輪重減少率）とするのが望ましいが、実測では直接的に測定できなかったことと、逆に、実測した軸ばね荷重（軸ばね荷重減少率）は詳細計算式では計算できないことから、輪重減少率と相関の高い車体ロール角を用いて両者を比較することとする。なお、計算における風向角・風速条件は、1 車両全体が送風区間に入っている状態を想定し、送風機で発生させた風速と車両の走行速度とから求められる車両に対する相対風向角・相対風速を仮定する。

3.1 節で述べた図 1～図 4 における車体ロール角最大値の実測結果と、各条件における計算結果とを図 9 に示す。なお、詳細計算式で計算される車体ロール角は、横力がストoppa当たりが生じる程度に大きくなると、計算モデルにおける仮定の関係で、計算結果の方が実測結果よりも（ロール角の絶対値として）若干小さくなることが確認されている⁵⁾。従ってこの点を修正した静的解析結果も図 9 に併せて示す。また、実測結果については、図 1～図 4 の各(d)における車体ロール角最大値に加えて、各条件とほぼ同等の条件で行った各々 2 回の試験結果も併せて示す。

図 9 から、走行速度が遅い場合には、実測結果と詳細計算式による計算結果とはほぼ一致することが分かる。また、走行速度が速くなると、実測結果の方が計算結果よりも（絶対値として）大きくなるのが分かる。これは、風の急激な立ち上がりによる車両の動的応答（車両動揺）の影響によるものと考えられる。

3.4 今後の課題

前節で述べた通り、風の立ち上がりがゆっくりである（車両の固有振動の周期と比較して長い時間の意）場合には、静的解析の仮定が成り立つが、風の立ち上がりが急になると、車両の動的応答の影響が無視できなくなる可能性がある。従って、今後は、第 2 報²⁾で述べた空気力の時系列データをもとに車両運動のシミュレーションを行い、実測結果との検証を行うとともに、現在用いられている詳細計算式による計算結果との差を定量的に評価していく予定である。

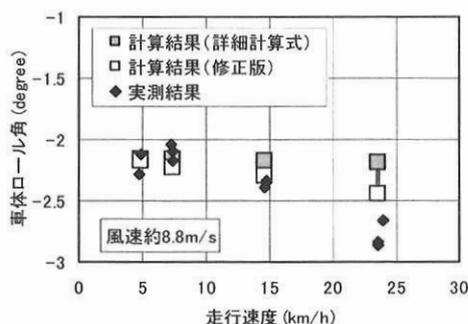


図 9 実測結果と計算結果との比較

4. まとめ

横風を受けた車両の挙動を解析するために、台車のばね系を忠実に再現した縮尺 1/10 の車両模型と横風試験用送風機を製作し、模型走行試験を実施した。試験の結果、模型車両が送風区間に突入すると、4 軸ともほぼ同時に風上側の軸ばね荷重（軸ばねに作用する上下方向の力。輪重に相当する）が減少する様子を確認した。また、1 車両平均の軸ばね荷重減少率を指標として、走行速度と軸ばね荷重減少率最大値との関係を整理したところ、走行速度の増加とともに減少率が大きくなる傾向が見られ、さらに編成における車両位置条件で詳しく比較すると、低速で走行する場合には中間車条件の方が、高速で走行する場合には先頭車条件の方が、軸ばね荷重減少率がわずかに大きくなる傾向が見られた。

また、車体ロール角について、実測結果と計算結果とを比較したところ、走行速度が遅い場合には、実測結果と詳細計算式による計算結果とはほぼ一致することが分かった。また、走行速度が速くなると、実測結果の方が計算結果よりも（絶対値として）大きくなることが分かった。

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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 日比野有, 石田弘明: 鉄道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.
- 5) 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.