

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)

○ [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 1- Outline of Running Tests under Crosswinds 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. 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. In this report, we describe the outline of the reduced scale vehicle model and the running gear.

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

近年の鉄道車両における軽量化・高速化の傾向は、横風に対する安全性においては不利な条件となっている。そのため、横風下における車両の走行安全性を精度良く評価することは重要な課題である。

横風に対する鉄道車両の走行安全性を評価する指標の一つに「輪重減少率」あるいは「転覆限界風速」がある。転覆限界風速は、風上側の輪重がゼロ、すなわち輪重減少率が 100% となるときの空気力に対応する風速として定義され、日本では「国枝式」¹⁾と呼ばれる静的解析式、あるいはそれをベースとして近年の研究成果を反映させた「詳細計算式」²⁾により、輪重減少率あるいは転覆限界風速を評価することが多い。また、鉄道総研における最近の研究では、前記の解析式（両者とも半車両断面モデルによる静的解析式）を半車両断面動的解析式³⁾さらには 1 車両動的解析式⁴⁾に拡張し、それまで考慮されてこなかった横風の変動周波数やヨーイングモーメント、車両の静止輪重アンバランスなどが転覆（輪重減少率）に及ぼす影響を明らかにしてきた^{4), 5)}。

しかし、入力条件である空気力の詳細については未解明

の部分が残されており、特に車両が走行している状態で横風が作用する場合の空気力の変動（車体表面における圧力分布の時間変化）および車両挙動については、これまでほとんど明らかにされていない。

そこで、本研究では、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。本報告では第 1 報として、これらの試験装置および試験方法の概要について述べる。また第 2 報⁶⁾および第 3 報⁷⁾では、車体表面圧力の測定結果および車両挙動の測定結果について、それぞれ報告する。

2. 車両模型の概要

2.1 模型の特徴

本試験で用いる車両模型は、在来線の通勤車両をモデルとした縮尺 1/10 の模型である（図 1）。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当たりも忠実に再現し、外力に対する車体の変位が実物と相似になるように、ばね定数を設定した（後述）。車体外形は 103 系通勤車両をモデルとした「実物大車両模型」と同形とした。ここで、実物大車両模型と

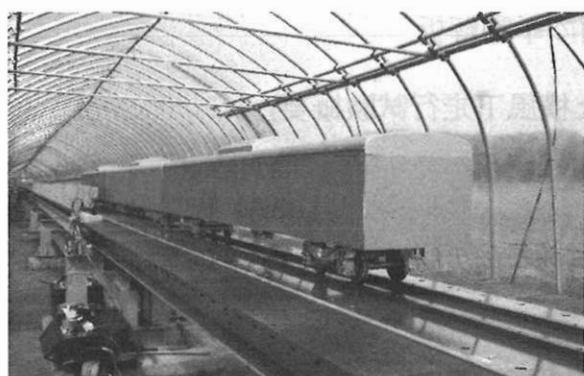


図 1 縮尺 1/10 車両模型

図 2 実物大車両模型⁸⁾

表 1 縮尺 1/10 模型の主要諸元

項目	単位	値
車体質量	kg	14.64
台車質量	kg	5.30
車体重心高さ (～レール上面)	m	0.214
台車重心高さ (～レール上面)	m	0.05*
車体中心高さ (～レール上面)	m	0.236
車体高さ	m	0.263
車体側面積	m ²	0.513
車輪/レール接触点間距離	m	0.112

*台車重心高さは推定値

は、鉄道総研が 2001 年から 2004 年にかけて北海道島牧村で実施した「自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測」⁸⁾で使用した模型のことである(図 2)。文献 8)に関する一連の研究では、実物大模型によるフィールド試験に加えて、同形の縮尺 1/40 模型による風洞試験も行っており、空気力に関するデータが豊富にある。これらの空気力データが使用可能である点も考慮して、今回の縮尺 1/10 模型の外形として、上記の実物大車両模型を選定した。

2.2 相似則 (換算倍率)

本試験では、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、車両模型の外形は実物大車両模型と幾何学的に相似な形状として縮尺を 1/10 倍とした。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 倍にすればよい。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 倍にすればよい。

2.3 模型諸元

本車両模型は在来線通勤型車両を想定して設計した。車体外形については、先述の通り 103 系車両をモデルとしたが、台車については、近年のボルスタレス台車をモデルとした。また、車両質量についても近年の軽量ステンレス車両をモデルとした。具体的には、1 車両の質量が約 25 ton の通勤車両を想定し、1 車両の模型質量をその 1/1000 倍である約 25kg (車体質量約 15kg、1 台車質量約 5kg) とした。また、軸ばね、まくらばね定数は、一般的なボルスタレス台車の諸元値を想定し、その 1/100 倍に近い値のコイルばねを選定した。横風による輪重減少率または転覆限界風速の計算に関係する車両諸元を表 1 に示す。なお、今回の車体外形のモデルとなった 103 系車両は、近年の一般的な通勤車両とは形状が若干異なる(例えば、先頭車の前頭部形状や車体側面の裾絞り等)。しかし、これらの形状の違いが空気力係数に及ぼす影響は小さいことが、風洞試験で明らかにされている。従って、本車両模型による横風下走行試験結果は、近年の通勤車両に対しても適用可能であると考えられる。

3. 横風下走行試験の概要

3.1 試験設備の概要

模型車両走行試験は、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。模型走行装置の概略図および関連する写真を図 3～図 5 に示す。走行路の延長は約 125m で、加速区間、試験区間、減速区間の延長がそれぞれ約 50m、5m、70m である。模型車両の加速方法は、ゴム紐牽引加速台車によるフック牽引方式であり、加速台車から伸びたフックを模型車両の牽引バーに予め掛けておき、ゴム紐の弾性を利用して加速台車を牽引することにより、模型車両を加速する。加速台車は加速区間の終端付近でブレーキがかかることにより停止し、模型車両はフックから離れて、惰性で走行しながら試験区間に突入する。減速区間には、軌間内側に減速装置(ブラシ)が設置されており、ブラシが車輪背面を摺動する際の摩擦力により模型車両を減速させる。模型車両の走行速度は、ゴム紐

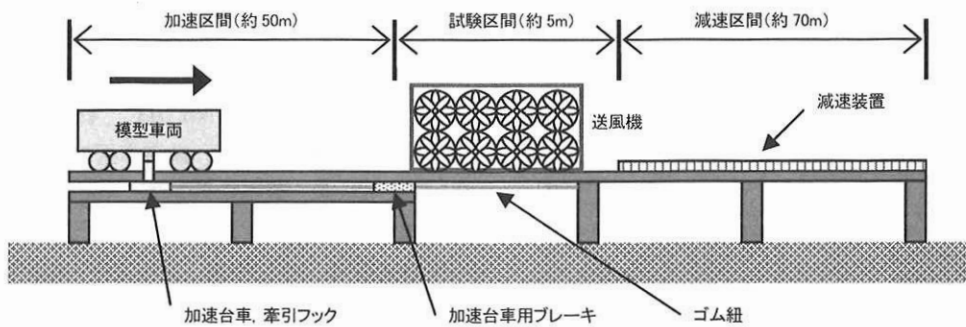


図 3 模型走行装置概略図

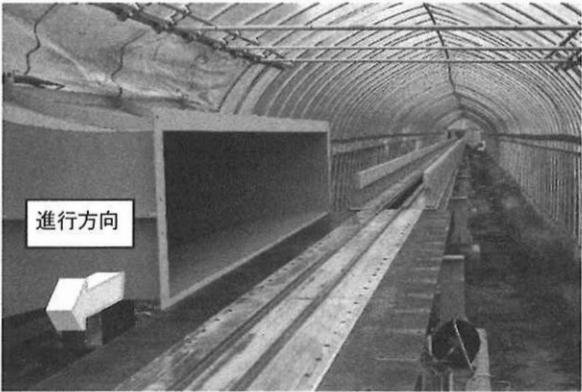


図 4 走行路（試験区間）

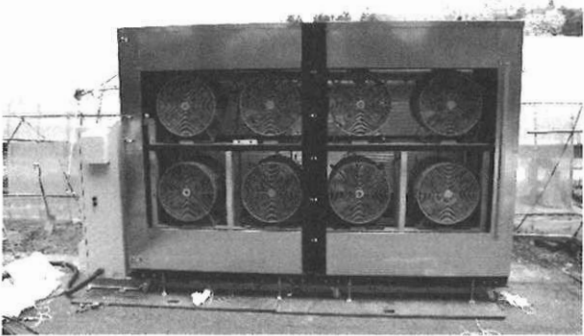


図 5 送風機（背面から見た写真）

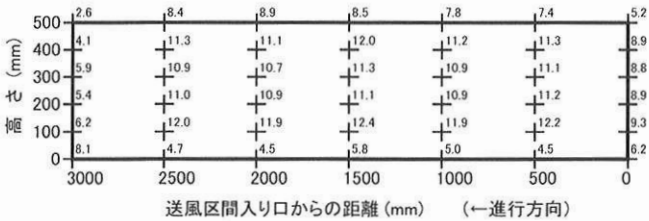


図 6 軌間中心における風速分布

（風下側から見た図、設定周波数 50Hz）

表 2 各設定周波数における平均風速

設定周波数	平均風速
20 Hz	4.3 m/s
30 Hz	6.6 m/s
40 Hz	8.8 m/s
50 Hz	11.0 m/s

の引っ張り長さを変えることにより調整し、今回の試験における走行速度は約 5～30km/h（実車相当約 15～95kmh）であった。一方、横風を吹かせる送風機は試験区間の走行路脇に設置した。出力 3.7kW の送風機 8 台を架台に 4 台ずつ 2 段で設置し、整流装置・縮流装置を経て幅 3,000mm × 高さ 500mm の吹き出し口から模型に風を当てる構造になっており、吹き出し口から軌間中心までの距離は 385mm である。風速は、インバータ制御で送風機のモーターの回転数をコントロールすることにより調整し、今回の試験における風速は、平均約 4～11m/s（実車相当約 12～35m/s）であった。軌間中心位置における風速分布の例を図 6 に示す。また、試験時の設定周波数と平均風速を表 2 に示す。

3.2 測定項目および測定方法

横風下走行試験では、走行速度・風速および編成における車両位置（先頭位置あるいは中間位置）等に関する条件を変えたときの、車体表面の圧力分布および輪重変動を把握することを主目的とした。ただし、輪重を直接測定することは困難であるので、軸ばねに作用する上下方向の力（以下、軸ばね荷重という）を測定した。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。測定項目を後述の試験日程等とともに表 3 に示す。軸ばね荷重については、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、慣性運動計測機器（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。車体表面圧力については、車体の側面・屋根・妻面・床面にそれぞれ圧力測定孔を開け、密閉容器内圧力との差圧を測定した。測定孔は全部で 171 点開けた。同時に収録できる測定孔は 95 点であり、着目すべき空気力に応じて測定点の組み合わせを変更可能とした。地点検知については、車体前頭部の床面に設置した光電センサーにより、送風区間の入口と出口に設置した反射板を検知した。検知信号は途中で分岐し、圧力測定用ロガーと軸ばね荷重測定用のコンパクトレコーダに同時に収録し、送風区間突入の確認指標とするとともに、各収録装置におけるデータの同時性の目印とした。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

表 3 試験日程および試験条件

試験日	試験編成	測定車両	測定項目	走行速度 (km/h)	風速 (m/s)
5月10日	1両	1両目	車体表面圧力	7.5~19.7	6~11(一部6~8)
5月11日	2両	1両目	車体表面圧力、軸ばね荷重	6.2~30.7	6~11(一部6~8)
5月12日	2両	1両目	車体表面圧力、軸ばね荷重	6.3~31.1	6~11(一部6~8)
	3両	2両目	車体表面圧力、軸ばね荷重	4.9~8.0	6~11
5月13日	3両	2両目	車体表面圧力、軸ばね荷重	12.6~26.9	6~11(一部6~8)
5月16日	1両	1両目	軸ばね荷重	4.5~24.4	4~11(一部4~8)
5月17日	1両	1両目	軸ばね荷重	24.0~30.4	4~8
	2両	1両目	軸ばね荷重	6.2~31.9	4~11(一部4~8)
5月18日	2両	1両目	軸ばね荷重	27.7~32.8	4~6
	3両	1両目	軸ばね荷重	5.6~20.4	4~11(一部4~8)
5月19日	3両	1両目	軸ばね荷重	20.8~26.7	4~8
	3両	2両目	軸ばね荷重	4.9~24.8	4~11(一部4~8)
5月20日	2両	2両目	軸ばね荷重	6.2~29.7	4~11(一部4~8)
5月23日	2両	1両目	車体姿勢、軸ばね荷重	6.7~27.4	4~11(一部4~8)
5月24日	3両	1両目	車体姿勢、軸ばね荷重	4.7~24.0	4~11(一部4~8)
5月25日	3両	2両目	車体姿勢、軸ばね荷重	4.7~25.0	4~11(一部4~8)

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。なお、車体表面圧力測定および車両挙動測定の詳細については、第2報および第3報で、それぞれ述べる。

3.3 試験条件

試験条件(測定項目)は大きく3つに分けられる。1つ目は車体表面圧力分布と軸ばね荷重変動の同時測定であり、2011年5月10日~13日にかけて行われた(ただし、5/10は車体表面圧力のみ測定)。2つ目は車両条件・走行条件のバリエーションを可能な限り多く設定した軸ばね荷重測定試験であり、5月16日~20日にかけて行われた。3つ目はジャイロによる車体姿勢と軸ばね荷重の同時測定であり5月23日~25日にかけて行われた。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。試験日程および試験条件の概要を表3に示す。

4. まとめ

横風を受けた車両の挙動を解析するために、縮尺1/10の車両模型と横風試験用送風機を製作した。車両模型は、空気力に影響を及ぼす車体形状のみならず、外力に対する車体変位も実物と相似になるようにばね定数等を設定した。この模型を用いて、平均風速約4~11m/s、走行速度約5~30km/hの条件で、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。なお、車体表面圧力の測定結果および車両挙動の測定結果については、第2報および第3報で、それぞれ報告する。

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) 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) 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.
- 3) 日比野有、金元啓幸、下村隆行、谷藤克也：横風を受けた鉄道車両の挙動に関する動的解析モデルの構築および検証、日本機械学会論文集(C編)、Vol.76, No.766, pp.1396-1405、2010.
- 4) 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.
- 5) 日比野有、金元啓幸、下村隆行：横風の変動周波数が車両の動的挙動に及ぼす影響、鉄道総研報告、Vol.23, No.11, pp.7-12、2009.
- 6) 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.
- 7) 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3—縮尺1/10模型を用いた車両応答測定結果)、第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム J-RAIL2011、2011.
- 8) 日比野有、今井俊昭、種本勝二：自然風下の実物大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.