

# 片切片盛地形上の鉄道車両に関する横風風洞試験結果

乙部 達志\* 鈴木 実\*

Wind Tunnel Test Results of Railway Vehicles under Cross Winds in Half-bank Half-cut Line Sections

Tatsushi OTOBE Minoru SUZUKI

The evaluation of the running safety of railway vehicles in high cross winds is carried out using an aerodynamic coefficient obtained from wind-tunnel tests. In a previous study, wind tunnel tests were carried out on commuter-type vehicles in a half-bank half-cut section, to obtain aerodynamic coefficients. However, studies have not been carried out on the influence of different vehicle shapes on the aerodynamic coefficients. Therefore, wind tunnel tests were carried out on double-decker-type vehicles and freight-type vehicles as a follow-up to the previous study.

キーワード：風洞試験，片切片盛，二階建て，貨物，空気力係数

## 1. はじめに

これまで鉄道総研では、強風に対する鉄道車両の安全性を高い精度で評価するため、風洞試験により空気力係数を求めてきた。文献1には、既往の研究で得られた5車種と7種類の線路構造物に対する空気力係数の一覧を掲載している。また、文献1の5車種と類似形状車両の空気力係数の推定に関する研究としては文献2がある。また、盛土高さが異なる場合の空気力係数への影響も研究しているが、海岸地形によくみられる海岸側が盛土、内陸側が切取（片切片盛と呼ぶ）のような7線路構造物とは形状が大きく異なる場合の空気力係数の推定は困難である。片切片盛地形に対するこれまでの風洞試験結果は文献3、4にまとめられているが、通勤型車両を対象としている。

片切片盛地形上の車両の空気力係数は、車両で剥離した流れと切取高さの関係に大きく影響を受けると考えられるため、車両形状（車両高さや車両屋根部の形状）が異なると文献3、4で得られた傾向と異なる可能性がある。そこで、本報告では文献4の続報として、片切片盛地形上の二階建て型車両および貨物型車両に対して実施した風洞試験結果を報告する。

## 2. 風洞試験方法

### 2.1 風洞設備

風洞試験は、鉄道総研所有の大型低騒音風洞密閉型測定部で実施した。測定部の大きさは幅5m、高さ3m、長さ20mで、測定部上流端より16.8m下流の床面にターンテーブル（中心）が設置されている。このターン

テーブル上に模型を設置し、空気力を測定する。また、自然風を模擬するために、ターンテーブルの上流側にバリア、スパイア、ラフネスブロックを設置し、乱流境界層（べき指数0.26）を生成する<sup>5)</sup>。座標系は、密閉型測定部上流端の床面の幅方向中心を原点とし、主流方向をX、幅方向をY、鉛直上方向をZとする右手系の直交座標系である。密閉型測定部を図1に示す。

風洞試験状況を図2に示す。また、風洞風速を制御するピトー管を  $X=11,800\text{mm}$ ,  $Y=1,504\text{mm}$ ,  $Z=1,800\text{mm}$

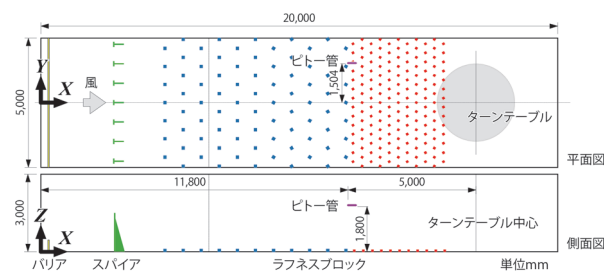


図1 密閉型測定部内の乱流境界層生成装置の配置（べき指数0.26）

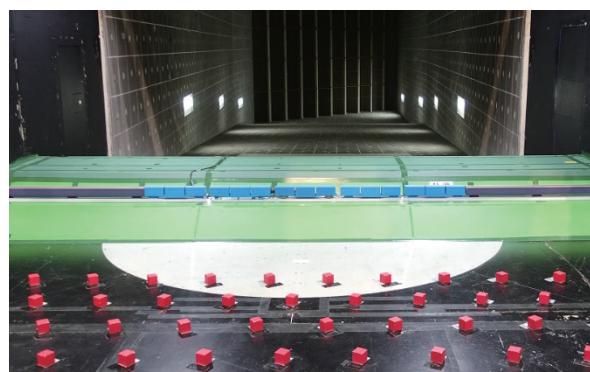


図2 風洞試験状況（上流側から望む）

\* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

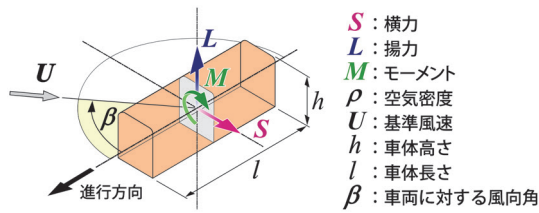


図3 車両模型に働く空気力

の位置に設置し、このピトー管による風速指示値を試験風速  $U_0$  と呼ぶ。試験風速は 30m/s である。

## 2.2 空気力の評価方法

強風に対する安全性評価に必要な空気力は、横力  $S$ 、揚力  $L$ 、ローリングモーメント  $M$  (以下、モーメントと呼ぶ) であり、それぞれの正の方向を図3に示す。空気力の座標軸は車体に固定した軸 (車体軸) であり、風洞試験においてターンテーブルを回転して風向角  $\beta$  を変化させた際には、座標軸も車体とともに変化する。

空気力係数 (横力係数  $C_S$ 、揚力係数  $C_L$ 、モーメント係数  $C_M$ ) を算出する際に用いた車両模型の諸元を表1に示す。空気力係数は、平均空気力を平均動圧と車体高さ  $h \times$  車体長さ  $l$  で表す車体側面積  $A$  (投影面積ではない) で除した値、モーメント係数については代表長さとして車体高さ  $h$  で更に除した値であり、式(1)から式(3)で算出した。平均空気力は、サンプリング周波数 100Hz、収録時間 42 秒のデータから求められた値である。また、平均動圧は、空気力係数算出の基準位置  $Z_V$  における、模型がない条件での風速の時間平均値  $U_{BL}(Z_V)$  を用いて算出された値である (図4)。モーメント中心は車体高さの 1/2 (車体中心) にあり、モーメント係数は風上側から風下側に転倒する向きが正である。

$$C_S = \frac{S}{\frac{1}{2}\rho(U_{BL}(Z_V))^2 A} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho(U_{BL}(Z_V))^2 A} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho(U_{BL}(Z_V))^2 Ah} \quad (3)$$

空気力係数の内、転覆に最も影響の大きいものは横力係数であるが、揚力係数とモーメント係数の影響も加味し、転覆に関して総合的に評価できる指標である風下レール周りのモーメント係数  $C_{M\_lee}$  は、

$$C_{M\_lee} = \frac{C_S h_V}{h} + \frac{C_L l_R}{2h} + C_M \quad (4)$$

で求められる。式(4)中の  $l_R$  (車輪とレールの接触点間

表1 空気力係数の算出に用いた値 (模型寸法)

項目	記号	単位	車両模型	
			二階建て型	貨物型
代表長さ (車体高さ)	$h$	[m]	0.0973	0.0723
代表面積 (車体高さ×車体長さ)	$A$	[m <sup>2</sup> ]	0.0506	0.0342
R.L.車体中心高さ	$h_V$	[m]	0.0531	0.0578
片切片盛の地上R.L.高さ (風洞床面からR.L.までの距離)	$Z_{RL}$	[m]	0.2180	0.2180
地上からの車体中心高さ (風洞床面から車体中心までの距離)	$Z_V$	[m]	0.2711	0.2758
在来線軌道における車輪とレールの接触点間距離	$l_R$	[m]	0.0280	0.0280

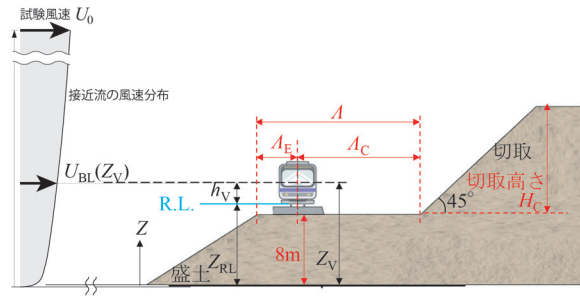


図4 乱流境界層分布と車両、片切片盛の関係

距離)、 $h$  (車体高さ) および  $h_V$  (R.L. 車体中心高さ) は表1に示す通りである。

## 2.3 風洞試験模型

風洞試験に用いた片切片盛模型は、文献4で用いた模型と同じであり、縮尺は 1/40 である。地形の断面形状は、図4に示すような形状であり、図中に風洞試験のパラメータを示す (以降、図中の 8m も含め、赤字で示した盛土および片切片盛に関する寸法は実物大で示す)。盛土部分はのり面勾配 1 : 1.5 (33.7 度)、高さ 8m に固定、切取部分は切取傾斜角 45 度に固定しており、風洞試験のパラメータは、切取高さ  $H_C$ 、切取端 (のり尻) と軌道中心の距離  $A_C$ 、盛土端 (のり肩) と軌道中心の距離  $A_E$ 、盛土端 (のり肩) と切取端 (のり尻) の距離  $A (= A_E + A_C)$  である。添え字の C は Cutting (切取)、E は Embankment (盛土) の頭文字である。なお、切取高さ  $H_C$  が高くなると密閉型測定部に対する閉塞率が大きくなる。今回の試験で  $H_C$  が最も高い条件 (10m) の時の閉塞率は 15% である。

風洞試験に用いた車両模型 (図5) は、二階建て型車両と貨物型車両である。二階建て型車両、貨物型車両として、それぞれ文献6で用いた 285 系とコキ 50000 を用いた。風洞試験条件を表2に示す。

風洞試験は、中間車の条件で実施し、風向角は 90 度のみで実施した。測定車の左右隣 2 両ずつ (測定車と合わせて計 5 両) は測定車と同一断面形状の車両模型、それ以外の (ダミー) 車両模型は文献4で使用した通勤型 (R5000 車両) の断面形状であり、風洞側壁まで模型を延長して試験を実施した (図2)。

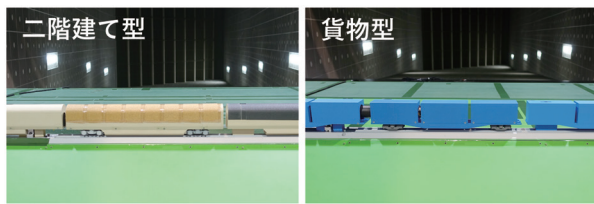


図5 車両模型

表2 風洞試験条件

$H_C$	$A=6m$		$A=10m$		$A=20m$	
	$A_E$		$A_E$		$A_E$	
	2.84m	2.84m	6.84m	2.84m	16.84m	
1m	●■	-	-	-	-	-
2m	●	-	-	●	●	-
3m	●■	-	-	-	-	-
4m	●■	-	-	-	-	-
5m	●■	●■	●■	●■	●■	●■
6m	●	-	-	-	-	-
7m	●■	●■	●■	●■	●■	●■
8m	-	-	-	-	-	-
9m	-	-	-	-	-	-
10m	●■	-	-	-	-	●■

凡例

●: 二階建て型、中間車、風向角90度

■: 貨物型、中間車、風向角90度

### 3. 風洞試験結果

本章では、風洞試験結果の中から、車両の転覆に対して影響の大きい横力係数  $C_S$  および風下レール周りのモーメント係数  $C_{M\_lee}$  に関して述べる。

片切片盛上の車両と単線盛土上の車両の各条件における空気力係数を比較するため、単線盛土上の車両に対する風洞試験も実施した。「片切片盛上の車両の各風洞試験条件に対して得られた空気力係数」を「単線盛土（高さ8m）上の同じ車両・風向角条件に対して得られた空気力係数」で除した空気力係数比（ $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比）

$$C_S \text{ 比} = \frac{\text{片切片盛上の車両の } C_S}{\text{単線盛土上の車両の } C_S} \quad (5)$$

$$C_{M\_lee} \text{ 比} = \frac{\text{片切片盛上の車両の } C_{M\_lee}}{\text{単線盛土上の車両の } C_{M\_lee}} \quad (6)$$

を考える。 $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比が1よりも大きければ、単線盛土上の車両の  $C_S$ 、 $C_{M\_lee}$  よりも大きい。

#### 3.1 単線盛土上の車両の空気力係数

片切片盛上の車両に対する風洞試験結果を述べる前に単線盛土上の二階建て型車両と貨物型車両の空気力係数を図6に示す。

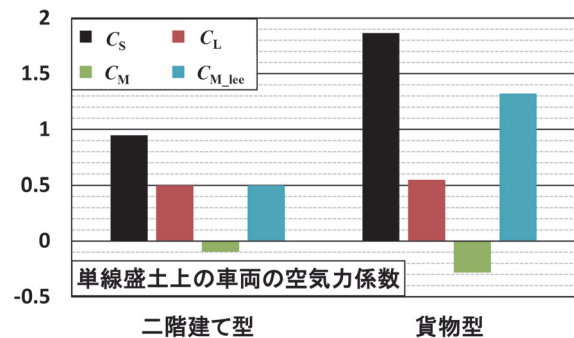


図6 単線盛土上の車両の空気力係数（風向角90°）

#### 3.2 切取高さ $H_C$ と $C_S$ 比、 $C_{M\_lee}$ 比

のり肩とのり尻の距離  $A$  およびのり肩と軌道中心の距離  $A_E$  を固定した条件下で、切取高さ  $H_C$  が変化した場合の  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比に対する影響について述べる。

図7、8に切取高さ  $H_C$  と  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比の関係を示す。車両種別によらず、切取高さ  $H_C$  が1mから3~5m程度に増加した時には  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は概ね増加か変化なし、切取高さ  $H_C$  が3~5m程度から10mに増加した時には  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は減少傾向となっている。

#### 3.3 のり肩から軌道中心の距離 $A_E$ と $C_S$ 比、 $C_{M\_lee}$ 比

のり肩とのり尻の距離  $A$  および切取高さ  $H_C$  を固定した条件下で、のり肩と軌道中心の距離  $A_E$  が変化した場合の  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比に対する影響について述べる。

図7、8において  $H_C$  を固定した条件で●と▲、●と■を比べると、全ての  $H_C$  で●および●が大きい。従って、のり肩と軌道中心の距離  $A_E$  が増加した時には  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は減少することが分かる。

#### 3.4 のり肩からのり尻の距離 $A$ と $C_S$ 比、 $C_{M\_lee}$ 比

切取高さ  $H_C$  およびのり肩と軌道中心の距離  $A_E$  を固定した条件下で、のり肩とのり尻の距離  $A$  が変化した場合の  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比に対する影響について述べる。

図7、8において  $H_C$  を固定した条件で●と●と●を比べると、全ての  $H_C$  で●が大きい。従って、のり肩とのり尻の距離  $A$  が増加した時には  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は減少することが分かる。

#### 3.5 $C_S$ 比、 $C_{M\_lee}$ 比が最大となる条件

図7、8から  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比が最大となる条件は、二階建て型で  $(H_C, A, A_E) = (4m, 6m, 2.84m)$ 、貨物型で  $(H_C, A, A_E) = (5m, 6m, 2.84m)$  であることが分かる。しかしながら、二階建て型および貨物型の両方で、 $(H_C, A, A_E) = (3m, 6m, 2.84m)$ 、 $(4m, 6m, 2.84m)$ 、 $(5m, 6m, 2.84m)$  における  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比の差は0.02以下である。そのため、 $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比

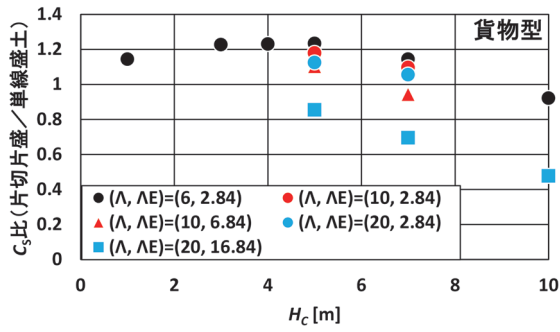
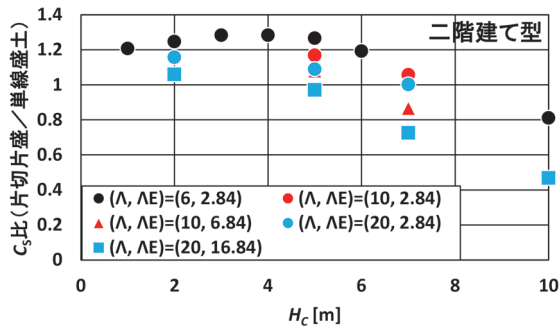


図7 切取高さ  $H_C$  と  $C_S$  比（風向角  $90^\circ$ ）の関係

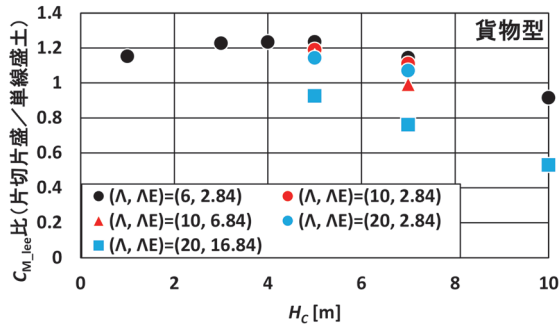
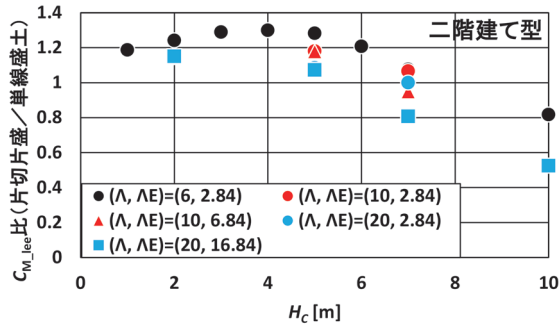


図8 切取高さ  $H_C$  と  $C_{M\_lee}$  比（風向角  $90^\circ$ ）の関係

が最大となる  $H_C$  の条件は、3～5m と言っても差し支えない。

また、本報告では中間車の風向角  $90^\circ$  の条件のみ扱っているが、通勤型に関しては文献4で先頭車および中間車、風向角  $90\sim 30^\circ$  の条件を扱っている。文献4の表2で、通勤型の場合  $C_S$  比が最大となる  $H_C$  の条件

は3、4mと示されている。また、文献4における  $C_{M\_lee}$  比が最大となる  $H_C$  の条件も  $C_S$  比が最大となる  $H_C$  の条件と同じ3、4mであった。

以上より、これまで実施した風洞試験の範囲（表2および文献2の表2）においては、車両形状（車両高さや車両屋根部の形状）によらず  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比を最大とする  $H_C$  の条件は3～5mであった。

#### 4. まとめ

本報告では、片切片盛地形上の二階建て型（中間車）、貨物型（中間車）に対して、切取高さ  $H_C$ 、のり肩と軌道中心の距離  $A_E$ 、のり肩とりのり尻の距離  $A$  をパラメータとして（風向角  $90^\circ$  のみの）風洞試験により空気力係数を求めた。風洞試験により得られた空気力係数を「単線盛土（高さ8m）上の同じ車両・風向角条件に対して得られた空気力係数」で除した空気力係数比（ $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比）によって整理した結果、二階建て型（中間車）、貨物型（中間車）に対して、以下の（1）～（5）のことが分かった。

- (1)  $A$ 、 $A_E$  が一定の条件では、 $H_C$  が1mから3～5m程度に増加した時、 $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は概ね増加か変化なし、 $H_C$  が3～5m程度から10mに増加した時、 $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は減少傾向となった。
- (2)  $A$ 、 $H_C$  が一定の条件では、 $A_E$  が増加した時、 $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は減少した。
- (3)  $H_C$ 、 $A_E$  が一定の条件では、 $A$  が増加した時、 $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比は減少した。
- (4) 単線盛土上の車両の  $C_S$ 、 $C_{M\_lee}$  よりも片切片盛土上の車両の  $C_S$ 、 $C_{M\_lee}$  の方が大きくなる（ $H_C$ 、 $A$ 、 $A_E$ ）の条件が存在することが分かった。
- (5)  $H_C$  が4m辺り（3～5m）で  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比が最大となった。

また、3章の最後にも述べたが、これまで実施した風洞試験の範囲（表2および文献2の表2）においては、車両形状（車両高さや車両屋根部の形状）によらず  $C_S$  比、 $C_{M\_lee}$  比を最大とする  $H_C$  の条件は3～5mであった。

#### 文献

- 1) 種本勝二、鈴木実、斎藤寛之、井門敦志：在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果、鉄道総研報告、Vol.27、No.1、pp.47-50、2013
- 2) 乙部達志、鈴木実、野口雄平、金元啓幸、中出孝次、中野宏章：空気力係数算出方法の違いによる転覆限界風速の差異、鉄道総研報告、Vol.37、No.1、pp.37-43、2023
- 3) 井澤信明、鈴木実、大山安紀子、鈴木貞治、三須弥生：海岸地形上の鉄道車両に作用する空気力の検討、日本機械学

- 会 2015 年度年次大会, G0500703, 2015
- 4) 乙部達志, 立松知紘, 井澤信明, 鈴木実, 野口雄平: 片切片盛地形上の鉄道車両に作用する空気力の評価, 鉄道総研報告, Vol.32, No.11, pp.5-10, 2018
- 5) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之, 今井俊昭: 自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.47-52, 2003
- 6) 野口雄平, 鈴木実, 乙部達志: 防風柵設置による空気力低減量に関する風洞試験結果, 鉄道総研報告, Vol.36, No.9, pp.55-60, 2022