

# 防風柵設置による空気力低減量に関する風洞試験結果

野口 雄平\* 鈴木 実\* 乙部 達志\*

## Results of Wind Tunnel Tests on Effect of Reducing Aerodynamic Forces by Wind Fences

Yuhei NOGUCHI Minoru SUZUKI Tatsushi OTOBE

Combining trains (commuter, double-decker and freight trains) and infrastructures (double-track viaduct, single-track bridge and single-track embankment), we systematically conducted wind tunnel tests to investigate the effect of reducing aerodynamic forces by wind fences. Model scale is 1:40, and the airflow is atmospheric boundary layer flow. The specifications of wind fence are as follows: the height from rail level is 2 m, the solidity ratio is 60%, and the distance from center of train is 3 m. In this report, we summarize the results of the aerodynamic force coefficients in the cases with wind fences installed.

キーワード：空気力係数，風洞試験，防風柵，車両形状，線路構造物，風向角

## 1. はじめに

強風に対する安全対策の一つとして、防風柵を鉄道沿線に導入することが効果的である。強風下における車両の走行安全性を評価する指標として、総研詳細式から計算される転覆限界風速<sup>1)</sup>があり、防風柵導入前後の転覆限界風速を計算することにより、防風柵導入の効果を定量的に評価することが可能である。

転覆限界風速の評価にあたり、空気力係数と呼ばれる、風から車両が受ける空気力の無次元量が必要となる。空気力係数は、一般的に縮尺模型を用いた風洞試験によって求められ、過去に実施された風洞試験により、空気力係数は、車両形状や線路構造物の種類、形状によって変化することが知られている<sup>2)</sup>。防風柵がない条件では、5車種7線路構造物を対象とした網羅的な風洞試験が実施され、空気力係数の一覧表が整備されている<sup>2)</sup>。転覆限界風速を評価する線区における車両、線路構造物と類似条件を一覧表から選択することで、防風柵がない場合には、転覆限界風速の概略評価が可能である。一方、防風柵がある場合には、限られた条件で風洞試験が行われているもの<sup>3) 4)</sup>、系統的に実施された試験結果は存在せず、防風柵がある場合の転覆限界風速の概略評価は難しい状況であった。

本研究では、防風柵を設置した際の転覆限界風速の概略評価に資するよう、3車種と線路構造物を組み合わせた系統的な風洞試験を新たに実施した。本稿では風洞試験結果を説明すると共に、標準的な防風柵が設置された条件での空気力係数を、防風柵がない条件に対する比の形で一覧表として示した。

## 2. 風洞試験方法

防風柵の有無を除き、試験方法は基本的には文献2を踏襲した。本章では試験方法の概略を述べる。

### 2.1 風洞設備

風洞試験は、鉄道総研の大型低騒音風洞で行い、測定部は密閉型（高さ3m、幅5m、長さ20m）を使用した。測定部入口から下流16.8mの床面に位置するターンテーブル上に模型を設置した。自然風を模擬するために、ターンテーブル上流側にバリア、スパイア、ラフネスブロックを設置し、乱流境界層を生成した。気流の風速分布を表すべき指数は1/4である。また、模型の縮尺は1/40である。

### 2.2 供試模型

横風下の車両空力特性に対して、車体断面形状、特に屋根形状の影響が大きい。文献2では、車両形状が大きく異なる5車種として、103系（通勤型）、485系（特急型）、コキ50000（貨車）、24系（客車）、285系（二階建て）が対象とされた。本研究では、この中から103系、コキ50000、285系を対象として、空気力係数一覧表の拡張を行った。図1に車体断面形状を、表1に車両諸元を示す。各車両で、先頭・中間（編成中程に存在する）車両の両条件で試験を行った。なお、コキ50000先頭車両に対する試験とは、コンテナの歯抜け（空気力の測定車両に対して進行方向側にコンテナがない条件）を想定した試験であり、103系や285系の先頭車両と同様に、測定車両の進行方向側に他の車両がない状態で試験を実施した。

線路構造物は、単線および複線の橋りょうと単線盛土である。本稿では、文献2の表記に合わせて、単線の無

\* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

表1 車両諸元 (模型寸法, 縮尺 1/40)

模型寸法	103系		285系	
	先頭・中間	先頭・中間	先頭	中間
車体高さ $h$ [m]	0.066	0.072	0.097	0.097
車体側面積 $A_0$ [m <sup>2</sup> ]	0.032	0.034	0.052	0.051
車体長さ $l$ [m]	0.488	0.473	0.531	0.520
RL車体中心高さ $h_2$ [m]	0.059	0.058	0.053	0.053

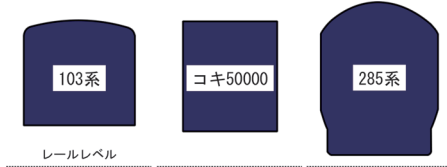


図1 車体断面形状

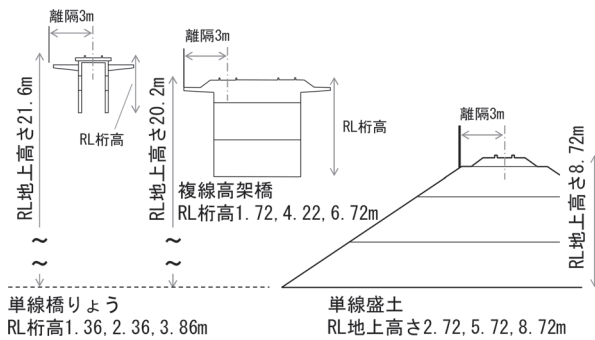


図2 線路構造物模型の形状 (寸法は実物大で記載)

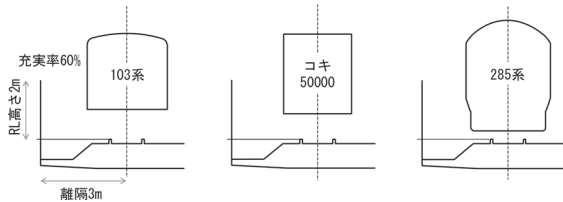


図3 防風柵基本条件

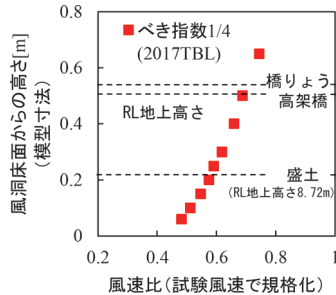


図4 乱流境界層の速度分布 (べき指数 1/4)

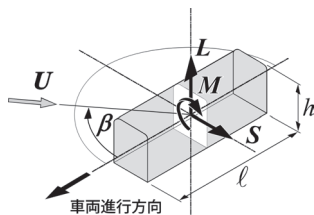


図5 風向角と各分力の向き

道床橋りょうを「単線橋りょう」と、複線の有道床橋りょうを「複線高架橋」と呼称する (図2)。単線盛土のレールレベル (以降RLと記載) から地上までの高さは8.72m (模型寸法 218mm) を基本とし、103系でのみRLから地上までの高さを5.72m、2.72mとした試験も行った。空気力係数に対する影響が大きいRL桁高 (RLから桁底面までの距離) について、単線橋りょうでは1.36, 2.36, 3.86m (模型寸法 34, 59, 96.5mm)、複線高架橋では1.72, 4.22, 6.72m (模型寸法 43, 105.5, 168mm) とした。なお、上記のRL桁高は、文献2における“桁高”では、それぞれ1, 2, 3.5m (単線橋りょう)、1, 3.5, 6m (複線高架橋) に相当する。また、複線高架橋の場合、車両は風上側に位置する。

空気力係数一覧表の拡張にあたり、RLからの高さ2m (模型寸法 50mm) の防風柵模型 (充実率 60%) を、軌道中心からの離隔 3m (模型寸法 75mm) に設置した (図3)。この条件を防風柵基本条件と呼ぶ。また、基本条件以外にも、風向角 90 度 (真横からの風) については、防風柵の高さ、充実率、離隔を変化させた試験も実施した。

### 2.3 空気力の測定

空気力の測定は6分力スティング型天秤 (日章電機 LMC-6522-38・Z80) により行い、線路構造物模型にスティング型天秤を固定し、天秤により測定車両模型を片持ちで支持した。測定車両は密閉型測定部の幅方向中央に位置し、中間車両の場合には、先頭、後尾両方向にダミー車両を、先頭車両の場合には、後尾方向にダミー車両を線路構造物上に設置した。

空気力係数 (横力係数  $C_S$ 、揚力係数  $C_L$ 、ローリングモーメント係数  $C_M$ ) は、6分力天秤で得られた横力、揚力、ローリングモーメントの時間平均値と、制御ピトー管で得られた風速の時間平均値を用いて式 (1) により算出した。

$$\begin{aligned}
 C_S &= S / \{0.5 \rho (R(Z_v) U_0)^2 A_0\} \\
 C_L &= L / \{0.5 \rho (R(Z_v) U_0)^2 A_0\} \\
 C_M &= M / \{0.5 \rho (R(Z_v) U_0)^2 A_0 h\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$S, L, M$  は、それぞれ横力 [N]、揚力 [N]、ローリングモーメント [Nm] の平均値、 $\rho$  は空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $U_0$  は制御ピトー管により得られた風速 [m/s] の平均値 (試験風速)、 $A_0$  は車体側面積 [m<sup>2</sup>]、 $h$  は車体高さ [m] である。なお車体側面積は、車体高さ  $h$  と車体長さ  $l$  の積である。 $R(Z_v)$  は、風洞床面 (地面に相当) からの車体中心高さ  $Z_v$  における風速比であり、図4に示した乱流境界層の風速比のプロットデータを線形補間して求める。即ち、 $R(Z_v) U_0$  は模型が無い状態での車体

中心位置に相当する高さでの風速となり、この風速を基準として空気力係数を算出した。従って、図4から分かるように、風洞床面から車体中心までの高さに応じて  $R(Z_v)U_0$  は異なる。なお、本稿でも文献2に倣い  $U_0=30\text{m/s}$  の結果を示した。図5に風向角  $\beta$  の定義および各分力の正方向を示す。空気力の座標軸は、車体に固定した軸である。また、上記の  $C_S$ 、 $C_L$ 、 $C_M$  に加えて、車両転覆の観点から総合的に評価できる指標として、風下レール周りのローリングモーメント係数  $C_{M\_lee}$  を式(2)により算出した。

$$C_{M\_lee} = C_S h_2 / h + C_L l_c / (2h) + C_M \quad (2)$$

$h_2$  はRL車体中心高さ [m]、 $l_c$  は車輪レール接触点間距離 (=1.12m, 模型寸法 28mm) である。

本稿では、防風柵による空気力係数低減効果を表す指標として空気力係数比(主に  $C_{M\_lee}$  比)を導入した。空気力係数比は、同一条件(車両、線路構造物、風向角)における「防風柵あり」の空気力係数を「防風柵なし」の空気力係数により除した値であり、 $C_{M\_lee}$  比が小さくなるほど防風柵の効果が大きい。

### 3. 風洞試験結果

#### 3.1 防風柵基本条件の結果

本節では、防風柵基本条件(充実率60%, RL高さ

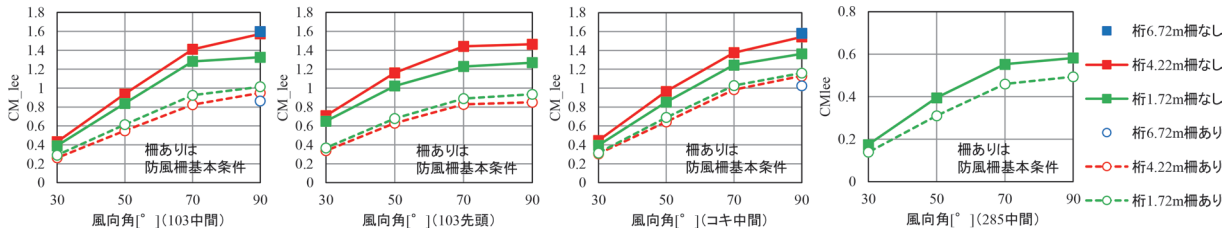


図6 複線高架橋の  $C_{M\_lee}$  (左から 103 系中間車, 103 系先頭車, コキ 50000 中間車, 285 系中間車)

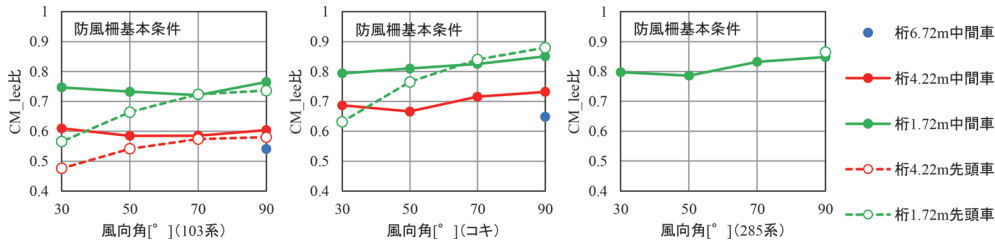


図7 複線高架橋の  $C_{M\_lee}$  比 (左から 103 系, コキ 50000, 285 系)

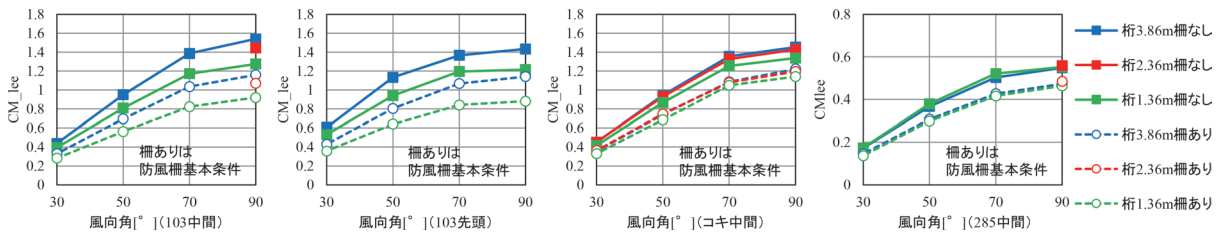


図8 単線橋りよりの  $C_{M\_lee}$  (左から 103 系中間車, 103 系先頭車, コキ 50000 中間車, 285 系中間車)

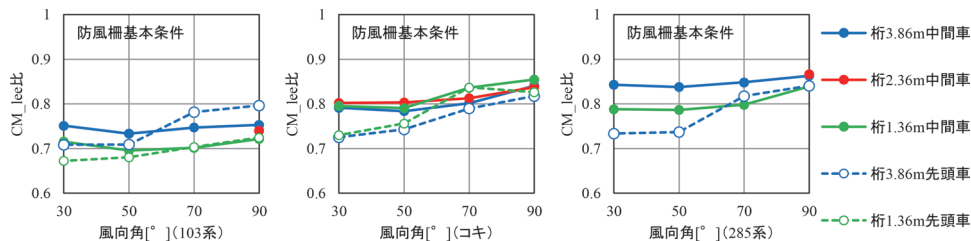


図9 単線橋りよりの  $C_{M\_lee}$  比 (左から 103 系, コキ 50000, 285 系)

2m, 軌道中心からの離隔 3m) の結果を示す。

図 6 に複線高架橋, 103 系中間車両, 103 系先頭車両, コキ 50000 中間車両, 285 系中間車両における「防風柵なし」および「防風柵基本条件」での  $C_{M\_lee}$  を示す。過去に実施した風洞試験<sup>2)</sup>でも得られているように「防風柵なし」では RL 桁高が大きくなると  $C_{M\_lee}$  が増加する。一方, 「防風柵基本条件」では逆に RL 桁高が大きくなると  $C_{M\_lee}$  が減少した。図 7 に複線高架橋, 103 系, コキ 50000, 285 系の  $C_{M\_lee}$  比を示す。上述した理由により,  $C_{M\_lee}$  比は RL 桁高が大きくなると顕著に減少する。また, 先頭車両では中間車両と比べ, 風向角による  $C_{M\_lee}$  比の変化が大きく, 風向角が小さくなるほど  $C_{M\_lee}$  比が減少する。車種間で比較すると,  $C_{M\_lee}$  比は概ね 103 系 < コキ 50000 = 285 系となり, 103 系に対して防風柵の効果が大きい。

図 8 に単線橋りょう, 103 系中間車両, 103 系先頭車両, コキ 50000 中間車両, 285 系中間車両における「防風柵なし」および「防風柵基本条件」での  $C_{M\_lee}$  を示す。単線橋りょうの場合には, 複線高架橋とは異なり, 「防風柵なし」「防風柵基本条件」ともに, RL 桁高が大きくなると  $C_{M\_lee}$  が増加した。図 9 に単線橋りょう, 103 系, コキ 50000, 285 系の  $C_{M\_lee}$  比を示す。 $C_{M\_lee}$  比は RL 桁高が大きくなっても減少せず, RL 桁高によらず同程度か (コキ 50000), RL 桁高が大きい条件で若干増加した (103 系, 285 系)。

図 10 に単線盛土, 103 系, コキ 50000, 285 系の  $C_{M\_lee}$  比を示す。なお, 103 系でのみ盛土高さを変えた試験を行った。図示はしないが, 「防風柵なし」の  $C_{M\_lee}$  は盛土高さによらず同程度であったが, 「防風柵基本条件」では盛土高さ 2.72m の場合に  $C_{M\_lee}$  が若干増加した

ため, 盛土高さ 2.72m では, 盛土高さ 8.72m と比べ  $C_{M\_lee}$  比がやや増加した。また, データは限られているが, 盛土高さ 5.72m と 8.72m では  $C_{M\_lee}$  比は概ね同程度である。なお, 2.3 節で述べたように, 盛土高さが異なる場合には, 空気力係数を算出する際の基準風速  $R(Z_v)U_0$  は異なることに留意されたい。

### 3.2 防風柵基本条件以外の結果

中間車両, 風向角 90 度において防風柵基本条件以外で試験を行った。その結果を図 11 に示す。試験した範囲では, 防風柵の充実率, 高さ, 離隔が増加するほど,  $C_{M\_lee}$  比は減少し, 防風柵の効果は大きくなる。また, その傾向は車両や線路構造物によらず共通である。

### 3.3 防風柵基本条件での空気力係数比一覧表

表 2 に本試験で得られた「防風柵基本条件」での空気力係数比の一覧を示す。表中の黒字の数値は, 本研究で実施した風洞試験により得られた値であり, 「防風柵なし」での空気力係数一覧表<sup>2)</sup>に示された  $C_s, C_L, C_M$  に各々の空気力係数比を乗じることで「防風柵基本条件」での空気力係数が得られる。

表中の青字, 赤字の箇所では風洞試験は実施しておらず, 以下に述べる実験則により, 防風柵基本条件での空気力係数比または空気力係数を推定した箇所である。赤字で示した複線高架橋の場合には, 図 6 に示したように RL 桁高が大きくなるほど, 防風柵基本条件での  $C_{M\_lee}$  は低下する。従って, 推定箇所における RL 桁高より小さい RL 桁高での「空気力係数」(比ではない)を用いれば安全側の評価となることに加え, 空気力係数比を用いるより精度が良い。

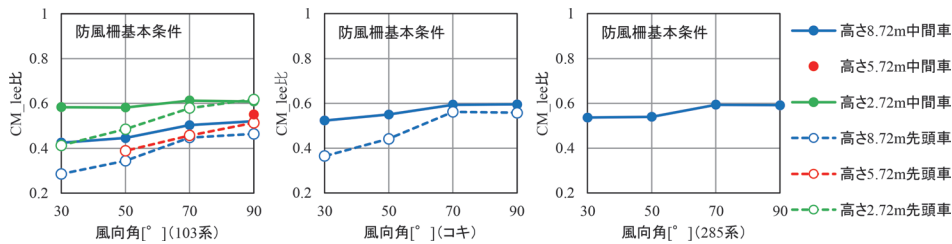


図 10 単線盛土の  $C_{M\_lee}$  比 (左から 103 系, コキ 50000, 285 系)

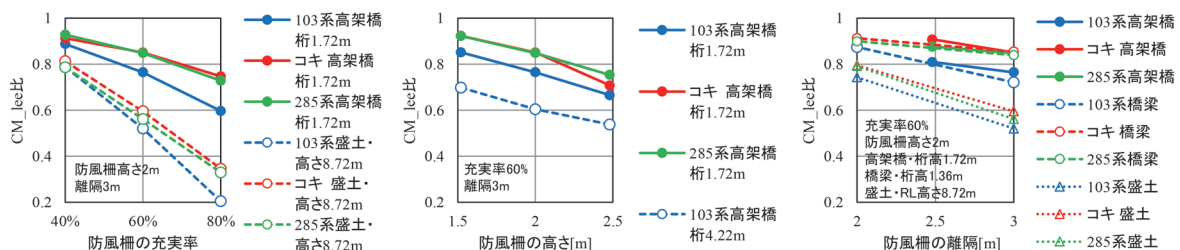


図 11 防風柵基本条件以外での  $C_{M\_lee}$  比 (中間車両, 風向角 90 度, 左から防風柵の充実率変化, 高さ変化, 離隔変化)

表2 空気力係数比 (防風柵基本条件)

線路構造物	RL桁高 or RL地上高さ	風向角 [°]	285系先頭車			CM <sub>lee</sub>	285系中間車			CM <sub>lee</sub>		
			CS比	CL比	CM比	比	CS比	CL比	CM比	比		
単線 橋りょう	1.36m	90	RL桁高3.86mの	0.84	0.77	0.76	0.26	0.84				
		70	CM <sub>lee</sub> 比を適用	0.82	0.72	0.75	0.21	0.80				
		50	〃	0.74	0.70	0.75	0.15	0.79				
	2.36m	90	RL桁高3.86mの	0.84	0.82	0.82	0.53	0.87				
		70	CM <sub>lee</sub> 比を適用	0.82	RL桁高3.86mの	0.85						
		50	〃	0.74	CM <sub>lee</sub> 比を適用	0.84						
	3.86m	90	0.79	0.92	0.65	0.84	0.82	0.91	0.67	0.86		
		70	0.77	0.88	0.62	0.82	0.81	0.88	0.65	0.85		
		50	0.69	0.82	0.52	0.74	0.79	0.83	0.58	0.84		
	複線 高架橋	1.72m	90	0.83	0.78	0.51	0.86	0.83	0.77	0.60	0.85	
			70	コキのCM <sub>lee</sub> 比	0.84	0.81	0.75	0.51	0.83			
			50	を適用	0.77	0.75	0.70	0.43	0.79			
4.22m		90	RL1.72mの空気力係数を適用		RL1.72mの空気力係数を適用							
		70	〃		〃							
		50	〃		〃							
6.72m		90	RL1.72mの空気力係数を適用		RL1.72mの空気力係数を適用							
		70	〃		〃							
		50	〃		〃							
8.72m		90	コキのCM <sub>lee</sub> 比	0.56	0.57	0.61	0.47	0.59				
		70	を適用	0.56	0.57	0.63	0.48	0.59				
		50	〃	0.44	0.52	0.60	0.47	0.54				
単線 盛土	8.72m	90	〃	0.36	0.49	0.58	0.39	0.54				
		70	〃	0.36	0.49	0.58	0.39	0.54				
		50	〃	0.36	0.49	0.58	0.39	0.54				
	線路構造物	RL桁高 or RL地上高さ	風向角 [°]	103系先頭車			CM <sub>lee</sub>	103系中間車			CM <sub>lee</sub>	
				CS比	CL比	CM比	比	CS比	CL比	CM比	比	
		単線 橋りょう	1.36m	90	0.63	0.77	0.22	0.72	0.64	0.78	0.29	0.72
				70	0.62	0.70	0.23	0.70	0.63	0.72	0.28	0.70
				50	0.60	0.68	0.22	0.68	0.60	0.74	0.23	0.70
			2.36m	90	RL桁高3.86mの	0.80	0.67	0.89	0.47	0.74		
				70	CM <sub>lee</sub> 比を適用	0.78	RL桁高3.86mの	0.75				
				50	〃	0.71	CM <sub>lee</sub> 比を適用	0.73				
			3.86m	90	0.72	1.03	0.51	0.80	0.69	0.98	0.57	0.75
70				0.71	0.95	0.49	0.78	0.70	0.84	0.55	0.75	
50				0.66	0.79	0.46	0.71	0.69	0.75	0.50	0.73	
複線 高架橋			1.72m	90	0.65	0.75	0.42	0.71	0.68	0.76	0.44	0.75
	70			0.70	0.77	0.52	0.74	0.71	0.80	0.45	0.76	
	50			0.67	0.73	0.35	0.72	0.67	0.71	0.42	0.72	
	4.22m	90	0.61	0.67	0.31	0.66	0.66	0.75	0.35	0.73		
		70	0.54	0.50	0.32	0.57	0.68	0.70	0.36	0.75		
		50	0.51	0.77	0.32	0.58	0.54	0.85	0.38	0.60		
	6.72m	90	0.50	0.70	0.27	0.57	0.53	0.68	0.34	0.59		
		70	0.49	0.59	0.23	0.54	0.53	0.61	0.29	0.58		
		50	0.43	0.47	0.08	0.48	0.54	0.59	0.23	0.61		
	8.72m	90	RL4.22mの空気力係数を適用		0.47	0.82	0.31	0.54				
		70	〃		RL4.22mの空気力係数を適用							
		50	〃		〃							
単線 盛土	8.72m	90	0.44	0.52	0.35	0.46	0.48	0.67	0.39	0.52		
		70	0.41	0.58	0.32	0.45	0.48	0.58	0.41	0.50		
		50	0.32	0.44	0.26	0.34	0.42	0.48	0.36	0.45		
線路構造物	RL桁高 or RL地上高さ	風向角 [°]	コキ50000先頭車			CM <sub>lee</sub>	コキ50000中間車			CM <sub>lee</sub>		
			CS比	CL比	CM比	比	CS比	CL比	CM比	比		
	単線 橋りょう	1.36m	90	0.74	0.85	0.27	0.83	0.78	0.85	0.32	0.85	
			70	0.75	0.90	0.22	0.84	0.75	0.80	0.20	0.84	
			50	0.65	0.78	-0.08	0.76	0.68	0.77	-0.15	0.79	
		2.36m	90	0.63	0.66	-0.16	0.73	0.68	0.76	-0.43	0.80	
			70	RL桁高1.36mの	0.83	0.78	0.91	0.52	0.84			
			50	CM <sub>lee</sub> 比を適用	0.84	0.75	0.90	0.44	0.81			
		3.86m	90	〃	0.76	0.73	0.79	0.27	0.80			
			70	〃	0.73	0.73	0.76	0.10	0.80			
			50	〃	0.73	0.79	0.27	0.80				
		複線 高架橋	1.72m	90	0.77	1.18	0.63	0.82	0.79	1.12	0.65	0.84
70				0.74	1.16	0.60	0.79	0.76	1.00	0.61	0.80	
50				0.68	0.93	0.45	0.74	0.74	0.82	0.54	0.78	
4.22m	90		0.66	0.80	0.33	0.73	0.74	0.81	0.41	0.79		
	70		0.83	0.81	0.54	0.88	0.81	0.78	0.55	0.85		
	50		0.78	0.82	0.42	0.84	0.78	0.77	0.44	0.83		
6.72m	90		0.69	0.74	0.16	0.77	0.75	0.74	0.20	0.81		
	70		0.58	0.56	0.05	0.63	0.73	0.71	0.04	0.79		
	50		RL1.72mの空気力係数を適用		0.69	0.71	0.46	0.73				
8.72m	90		〃		0.66	0.71	0.39	0.72				
	70		〃		0.61	0.63	0.20	0.67				
	50		〃		0.62	0.63	-0.01	0.69				
単線 盛土	8.72m	90	RL1.72mの空気力係数を適用		0.61	0.61	0.40	0.65				
		70	〃		RL4.22mの空気力係数を適用							
		50	〃		〃							

青字で示した単線橋りょうの場合には、図9に示したようにC<sub>M,lee</sub>比は、RL桁高が大きい条件で若干増加(103系, 285系), ないしRL桁高によらず同程度である(コキ50000)。従って、安全側の評価となるRL桁高のC<sub>M,lee</sub>比を、他のRL桁高にも適用すれば良い。その場合、防風柵基本条件での空気力係数は、防風柵なしでのC<sub>S</sub>, C<sub>L</sub>, C<sub>M</sub>にC<sub>M,lee</sub>比を乗じることで得られる。黒字で示した風洞試験のデータがある箇所では、C<sub>S</sub>, C<sub>L</sub>, C<sub>M</sub>に各々の空気力係数比を乗じたが、青字で示した推定箇所では、三分力で共通のC<sub>M,lee</sub>比を乗じることとした。この理由は、C<sub>L</sub>比やC<sub>M</sub>比に対するRL桁高の影響が大きく、防風柵なしでのC<sub>L</sub>, C<sub>M</sub>に、異なるRL桁高で得られたC<sub>L</sub>比, C<sub>M</sub>比を乗じることは妥当性に欠けると考えたためである。

285系先頭車両に関しては、複線高架橋、単線盛土の場合に風洞試験結果がない。複線高架橋、単線盛土の中間車両条件や単線橋りょうの先頭車両条件で得られたC<sub>M,lee</sub>比がコキ50000と285系で同程度であることから、風洞試験結果がない285系先頭車両条件には、コキ50000で得られたC<sub>M,lee</sub>比を適用することとした。この場合にも上記と同様に、防風柵なしでのC<sub>S</sub>, C<sub>L</sub>, C<sub>M</sub>にC<sub>M,lee</sub>比を乗じることで、防風柵基本条件での空気力係数が得られる。

#### 4. まとめ

本稿では、防風柵が設置された場合の転覆限界風速の概略評価に資するよう、防風柵基本条件(充実率60%, RL高さ2m, 軌道中心からの離隔3m)での空気力係数比の一覧表を示した。また、一覧表において直接の試験結果がない箇所においては、空気力係数の推定方法を示した。

なお、これまで防風柵がある場合の空気力係数を求めるためには、風洞試験を行う他なかったが、別の手法として、数値流体シミュレーションを空気力係数の評価に適用する研究も行っている<sup>5)</sup>。

#### 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) 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
- 3) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 今井俊昭: 強風下での車両に働く空気力と低減対策に関する風洞試験,

- 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.17-22, 2004
- 4) 乙部達志, 鈴木実, 野口雄平: 強風時の車両に対する高欄等による遮風効果, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.5-10, 2017
- 5) Noguchi, Y., Suzuki, M., "Computational Fluid Dynamics Analysis on the Mitigation of the Aerodynamic Force by Wind Fences," Proceedings of World Congress on Railway Research (WCRR) 2022, 2022.