

在来線パンタグラフの横風揚力特性に基づいた 割り込み事故防止策

光用 剛* 天野 佑基* 阿部 巧**
小林 樹幸* 中出 孝次** 野口 雄平***

Countermeasures to Prevent Dewirement Incident of Conventional Railway Pantographs
Based on Lift Force Characteristics Under Crosswind

Takeshi MITSUMOJI Yuki AMANO Takumi ABE
Shigeyuki KOBAYASHI Koji NAKADE Yuhei NOGUCHI

Wind-induced pantograph dewirement, which occurs only occasionally, causes transport disruption. It has been considered that the increase in pantograph lift force due to crosswinds results in the dewirement, but the mechanism by which the dewirement occurs is not completely understood. In this study, we focused on the increase in pantograph lift force due to crosswinds, and analytically identified the causal relationship between the dewirement incident and the lift force increase. We then experimentally confirmed the amount of the lift force increase when pantographs are exposed to crosswinds. In addition, we used numerical simulations to identify the fluid-dynamic causes of the lift force increase and proposed countermeasures to prevent the lift force increase.

キーワード：割り込み事故，パンタグラフ揚力，横風，在来線

1. はじめに

輸送障害につながる架線・パンタグラフ事故のなかで、発生頻度は多くは無いものの、強風時に割り込み事故が発生する場合がある。図1に示すように、割り込み事故は強風で側方に孕んだトロリ線がパンタグラフの舟体に接触して押し上げられることで外方へ移動し、ホーンの先端部を超えた際に発生する。そのため、割り込み事故はトロリ線の孕み量が大きい場合や、架線とパンタグラフとの接触力が大きい場合、すなわちパンタグラフ揚力（ここでは、空気力によって生じる押上力の増分のことであり、以下、単に揚力と記す）が大きい場合に発生し得ることがわかっている。割り込み事故防止については、電車線の設計・施工時に静解析に基づいた検討がなされており¹⁾、強風時に作用する揚力が静押上力と同程度の値であると仮定したうえで、割り込みが発生し得る電車線の左右偏位の限界値を算出し、強風時においてもトロリ線偏位がその限界値を超過しないように施工されている。しかしながら、それでもなお、稀に割り込み事故が発生する要因として横風による揚力増加が考えられているものの、その詳細についてはこれまで十分には解明さ

れていなかった。そこで、本研究では、横風による揚力増加に着目した割り込み事故防止策を提案することを目的として、はじめに、横風によるパンタグラフの揚力増加と割り込み事故との因果関係を定量的に明らかにしたうえで、横風による揚力増加量の把握およびその流体力学的なメカニズムの解明を行い、対策法を提案した²⁾。

本研究では、図2に示す一般的な在来線用シングルアーム型パンタグラフを対象とした。ここで、舟体の寸法諸元については、線区や車両形式によって様々なバリエーションが存在するため、国内の鉄道事業者において使用されている舟体の寸法諸元の調査結果（アンケート結果³⁾）を参考に選定した。図3は上記の調査結果を基に、各鉄道事業者で使用されている舟体のレール方向幅および前後の舟体間隔をプロットしたものである。本図より、舟体の寸法諸元は走行線区のみ電方式によって大別され、集電電流が小さい交流用パンタグラフでは舟体の



図1 割り込み事故の概要

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室
** 鉄道力学研究部 計算力学研究室
*** 環境工学研究部 車両空力特性研究室

レール方向幅および前後の舟体のレール方向間隔がともに狭く、集電電流が大きい直流・交直流用パンタグラフではこれらの幅・間隔がともに広い特徴があることがわかる。また、それぞれの分類の中での詳細な寸法諸元には様々なバリエーションが存在することも確認できる。本研究では、舟体のレール方向幅が広いものほど大きな揚力が作用する可能性があることを考慮し、舟体のレール方向幅が広い直流・交直流用の舟体のなかで、代表的かつ最も多くの鉄道事業者で使用されている寸法である、舟体のレール方向幅 85mm、前後の舟体間隔 250mm のものを代表例として研究対象に選定した (図 2)。

2. 割り込みが発生し得る揚力の限界値

割り込みが発生し得る揚力の限界値 (以下、限界揚力) の検討については、電車線の設計・施工時の検討で広く用いられている静解析¹⁾に基づいて検討を行った。図 4 に静解析のモデル図を示す。本解析では、舟体・ホーンを直線および円弧でモデル化し、偏位 x_0 (ただし、 x_0 は舟体の水平部分よりも外方の $L_1 < x_0 < L$ にあるとする) においてホーンに接触したトロリ線が押し上げられて外方の平衡点 x (ただし、 x はホーンの傾斜部分 $L_2 < x < L$ にあるとする) に移動した場合の力のつりあい式を考える。

$$K(x - x_0) \cos \alpha = (F_0 + F_L) \sin \alpha \quad (1)$$

ここで、 K はトロリ線の水平方向のばね定数、 F_0 はパンタグラフの静押上力、 F_L は揚力を表す。このとき、

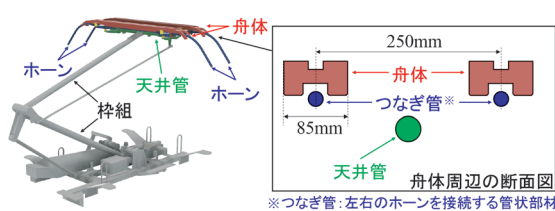


図 2 本研究で対象とした在来線用パンタグラフ

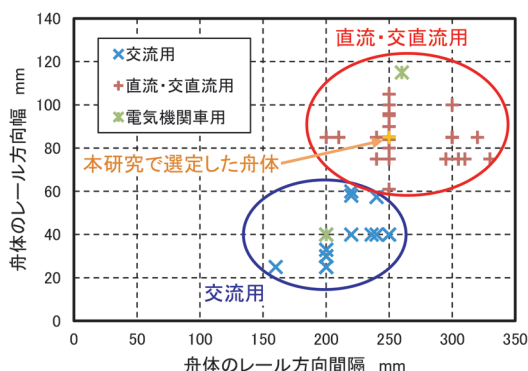


図 3 国内で使用されている舟体の寸法諸元

平衡点 x がホーン先端部 (舟体中心からの距離 L) を超えた場合に割り込みが発生することから、割り込みが発生し得る条件を示す不等式として次式が導かれる。

$$F_L > K(L - x_0) / \tan \alpha - F_0 \quad (2)$$

この式は、任意の偏位量 x_0 に対する限界揚力 F_L を与える式とみなすことができるほか、式 (2) を x_0 について解くことで任意の揚力 F_L に対する限界偏位量 x_0 を与える式としても使用することができる。なお、トロリ線が舟体の水平部分と接触する場合 ($0 < x_0 < L_1$) には、理論上は割り込みが発生しないため、限界揚力は無限に大きな値となる。また、ホーンの内弧部分 (図 4 の $L_1 \sim L_2$ の領域) については、傾斜部分よりもトロリ線が外方に移動し難いため、割り込みの発生条件を検討する際は、円弧部分を傾斜部分に置き換えて検討を行うことで安全側の評価となると考えられる。

図 5 は一般的な架線・パンタグラフの諸元を用いて式 (2) から限界揚力をプロットした図である。ここで、架線のばね定数 K は径間長 S (50m) と張力 T (9.8kN) によって表される径間中央での最小値 $K = 4T/S$ を用いた。また、ホーンの傾斜角度 α は幾何学的な傾斜角度 50° に加えて、ホーンやつなぎ枠を含む舟体全体がばね機構によってロール方向に最大 3° 程度傾斜すること¹⁾ を参考に $\alpha = 53^\circ$ としたうえで、 3° 傾斜した舟体の水平部分 ($0 < x_0 < L_1$) からトロリ線が外方に移動して割り込みに至る場合も考慮して図を補正している。本図は任意の偏

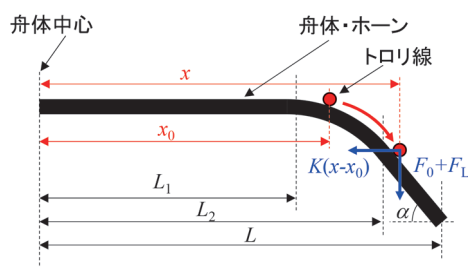


図 4 静解析のモデル図

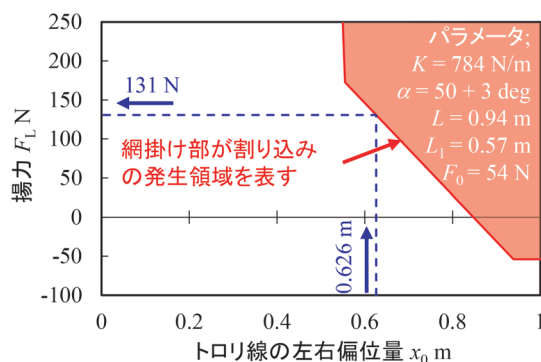


図 5 割り込みが発生し得る偏位量と揚力の関係

位置に対する限界揚力や任意の揚力に対する限界偏位量を表しており、架線側・パンタグラフ側の両面から割り込みが発生し得る限界値を把握することが可能である。本研究では、一般的な架線構成の直線区間を想定し、運転規制風速の上限値である風速30m/sにおけるトロリ線偏位量(表1)の総和0.626mを x_0 として図5に設定した場合の揚力131Nを限界揚力として設定し、次章以降の検討を行った。

3. 横風を受けた場合の揚力特性

3.1 車両屋根上の風向・風速の検討

列車が走行中に横風を受けた場合には、屋根上のパンタグラフは図6に示すように対向風 U と横風 V の合成風に加えて、車両により流れが吹き上げられることによって生じる斜め下方からの吹上流れにさらされることになる。そのため、走行中に横風を受けた場合のパンタグラフの揚力特性(以下、横風揚力特性)を検討するうえで、ヨー方向の風向角 θ に加えて、側方からの吹上角 ϕ (以下、横吹上角)もまた重要なパラメータとなる。そこで、本研究では、過去に実施された流れの数値シミュレーション⁴⁾によって得られた流れ場を解析し、代表的な線路構造物形状および車両形状の組み合わせにおけるパンタグラフ近傍の風向・風速の検討を行った。

流れのシミュレーションの線路構造物形状を表2に、車両形状を表3に示す。このシミュレーションは、Ansys社製Fluent ver. 17.1を用いて、縮尺1/40、風速約30m/sの乱流流入下の風洞試験を再現したものであり、基礎方程式としてレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式(RANS)に $k\omega$ -SST乱流モデルを適用したものを使用した。線路構造物形状(表2)のうち「橋りょう(薄)」と「盛土(低)」は一般的な形状として、「橋りょう(厚)」と「盛土(高)」はやや極端な形状としてそれぞれ選定したものである。また、車両形状(表3)については、車両の屋根部や肩部の曲率半径が異なる代表的な3車種を選定している。シミュレーションで得られたパンタグラフの舟体位置(R.L.5100mm)近傍の横吹上角および無次元風速(舟体位置の風速を流入風速で除して無次元化したもの)を図7に示す。図7(a)を俯瞰すると、盛土高さや橋りょうの桁高が高い線路構造物形状ほど、横吹上角が大きくなる傾向があることがわかる。また、同じ線路構造物形状であれば、ヨー角が大きいかほど横吹上角が大きくなる場合が多いことも確認できる。車両形状の影響に関しては、車種Bにおいて他の車両形状よりも横吹上角がやや小さい傾向があるものの、肩部の曲率半径などの諸元に応じた明確な傾向があるわけではなく、車両形状による横吹上角の差異は線路構造物形状やヨー角の組み合わせによって異なることがわかる。これらの結果を総合すると、車両屋根上の横吹上角は一般的な線路構造物形状の場合でおよそ 10° ~ 25° の範囲を、極端な線路構造物形状を含めた場合でも最大で 35° 程度を見込んでおけばよいことがわかる。次に、図7(b)より無次元風速を参照すると、大まかな傾向としては、ヨー角が大きくなるほど無次元風速が大きくなることや、車両形状による差異はほとんど見られないことがわかる。また、線路構造物形状に関しては、盛土よりも橋りょうの方が無次元風速が大きくなる傾向があり、それらのなかでは盛土高さや橋りょうの桁高が高い条件ほど無次元風速が大きくなることも確認できる。なお、無次元風速の値はおよそ0.8~1.6程度の値であり、舟体位置においても極端に流れが減速していることはなく、むしろ増速傾向になる場合もあることがわかる。

表1 トロリ線の偏位量(直線区間, 風速30m/s)

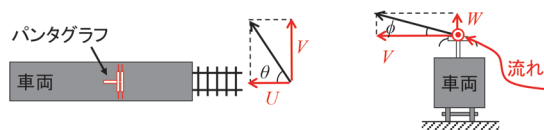
No.	項目	偏位量
1	風圧偏位	261 mm
2	車両動揺	235 mm
3	支持物のたわみ	100 mm
4	可動ブラケットの回転	30 mm
-	合計	626 mm

架線条件:

ちょう架線 : 線種 St90mm², 張力 9.8kN

トロリ線 : 線種 GT110mm², 張力 9.8kN

支持点偏位 : 200mm, 各柱振止, 1 径間半サイクル



(a) 上面図

(b) 側面図

図6 車両周りの流れの模式図

表2 流れのシミュレーションの線路構造物形状

呼称	軌道	線路構造物形状の概要
盛土(高)	単線	盛土高さ8m
盛土(低)	単線	盛土高さ2m
橋りょう(厚)	複線	橋りょう, R.L.桁高*6.72m
橋りょう(薄)	複線	橋りょう, R.L.桁高*1.72m

※R.L.桁高: 桁下面からレール上面までの高さ

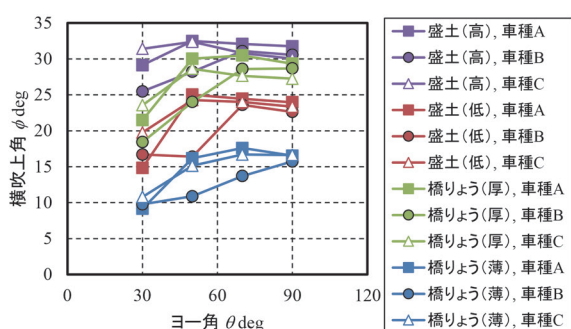
表3 流れのシミュレーションの車両形状

呼称	屋根部 曲率半径	肩部 曲率半径
車種A	5000 mm	250 mm
車種B	5000 mm	350 mm
車種C	8000 mm	1000 mm

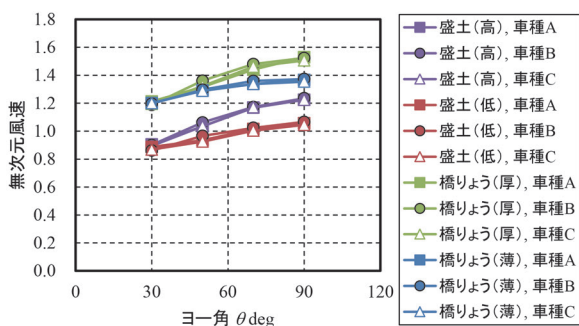
以上の結果から、本研究では一般的な線路構造物形状における無次元風速値0.8~1.2を参考に、車両屋根上の風速は流入風速と同等（無次元風速1）として以降の検討を行うこととした。なお、増速が見込まれる線路構造物形状の場合には、その増速率に応じて風洞試験結果等の風速を読み替えることで検討を行うことが可能である。

3.2 風洞試験による横風揚力特性の把握

本研究では、風洞試験においてパンタグラフが斜め下方からの吹上流れにさらされる状態を再現したうえで、パンタグラフの揚力測定を行った。具体的にはパンタグ



(a) 横吹上角



(b) 無次元風速

図7 流れのシミュレーションにより得られた車両屋根上の風向・風速

(R.L.5100mm 位置, 1/40 縮尺, 30m/s (乱流流入))

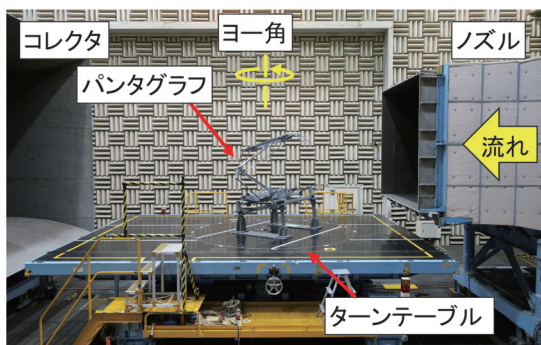


図8 風洞試験の実施状況

ラフにロール角 ϕ を設定可能な架台を用いて、床面のターンテーブル上に実機パンタグラフを設置し、様々なヨー角 θ ・ロール角 ϕ を設定して揚力測定を実施した。図8に風洞試験の実施状況を、図9に各風速の定義を示す。風洞試験は鉄道総研の大型低騒音風洞（開放型測定部、吹出口寸法 2.5m × 3m）において実施し、試験風速 U_0 は 16.7m/s~50m/s (60km/h~180km/h) とした。ロール角 ϕ は、前節の検討結果に基づき $0^\circ \sim 35^\circ$ の範囲で設定した。また、揚力測定はパンタグラフの台枠に設置したロードセルと舟体周辺を直径 1mm のワイヤで接続し、無風時に対する送風時のワイヤ張力の増分を検出することにより実施した。

図10(a)は試験風速を 30m/s (108km/h) とした場合の揚力測定結果であり、ヨー角 $\theta = 0^\circ$ が横風なしの反なびき走行、 180° が横風なしのなびき走行にそれぞれ対応している。本図より、揚力はヨー角 $\theta = 90^\circ$ に対して非対称な分布となっており、なびき方向よりも反なびき方向の方が揚力大きいこと、および、ヨー角 $\theta = 56^\circ$ および 124° 近傍において揚力が極大値をとることがわかる。

図10(b)は代表的なロール角 ϕ を設定した場合の揚力測定結果から、揚力が大きくなる反なびき条件において走行速度を 16.7m/s (60km/h) に固定した場合のデータを抽出し、横風風速に対して揚力をプロットした図である。本図より、横風が無い場合には揚力は 5N 程度と小さい値である一方で、横風を受けた場合には揚力が顕著に増加し、ロール角 ϕ が大きいほど揚力も大きくなることが確認できる。特に、ロール角 ϕ が 25° 以上の場合には、運転規制風速の 30m/s 以下の横風風速においても限界揚力 131N を超過する場合があることがわかる。

また、図10(c)は反なびき条件、ロール角 $\phi = 15^\circ$ において舟体（ホーン・つなぎ枠を含む）の有無により揚力特性を比較した図である。本図から、横風を受けた場合の揚力の約7割が舟体によって生じていることが確認でき、舟体が横風による揚力増加の主要因となっていることがわかる。

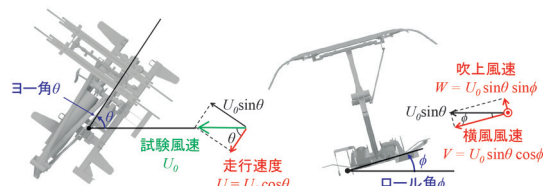
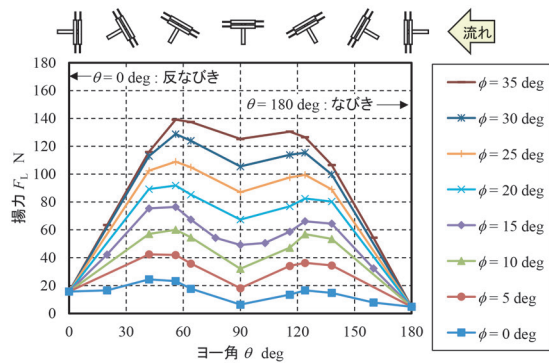
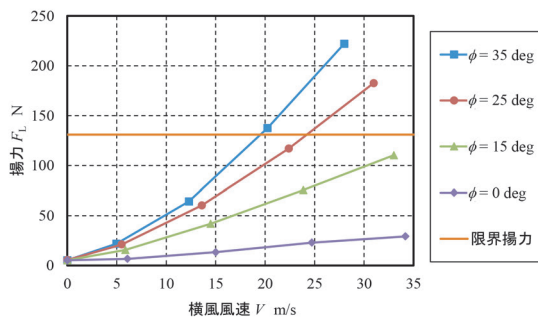


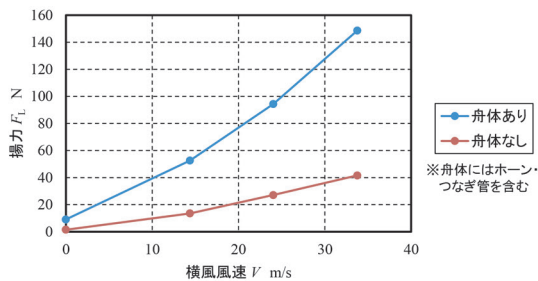
図9 各風速の定義



(a) ヨー角に対する揚力特性
(試験風速 $U_0=30\text{m/s}$)



(b) 横風風速に対する揚力特性
(走行速度 60km/h)



(c) 舟体（ホーン・つなぎ管含む）の影響
(走行速度 60km/h , ロール角 $\phi=15\text{deg}$)

図 10 風洞試験による揚力測定結果

4. 横風による揚力増加要因の解明

風洞試験の結果から、横風により揚力が大きく増加すること、また、横風による揚力増加は主として舟体の影響で生じていることを確認した。この結果を踏まえ、流れの数値シミュレーションにより、横風による揚力増加要因の解明を行った⁵⁾。

流れの数値シミュレーションは、鉄道総研で開発した直交格子法に基づく非圧縮流れの LES を行う流体解析コード（空気流シミュレータ⁶⁾）を用いて実施した。解析対象はパンタグラフの碍子取付面高さより上部に位置する下枠・上枠・舟体部分とし、縦 23m × 横 18m × 高さ 8.5m の流体領域内部に、流入境界から 8.5m 位置の床面

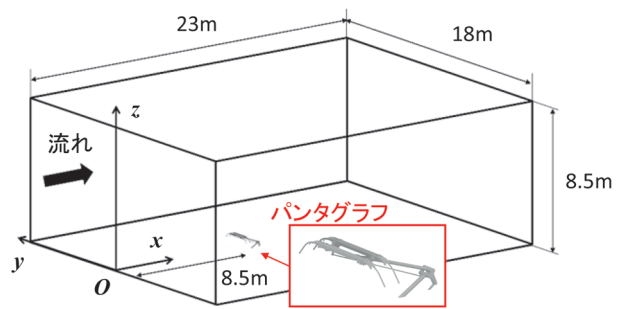
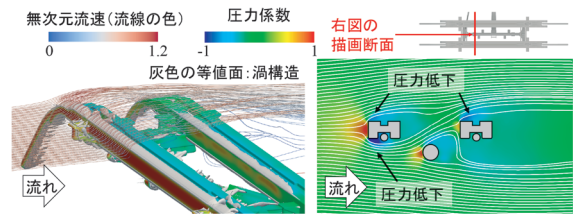
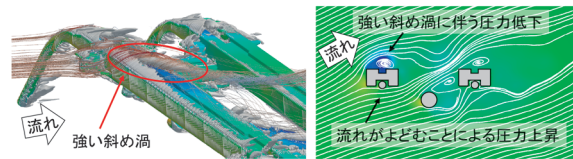


図 11 流れのシミュレーションの解析領域



(a) 横風なし
(ヨー角 $\theta=0\text{deg}$, ロール角 $\phi=0\text{deg}$)

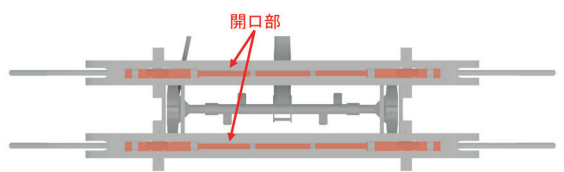


(b) 横風あり
(ヨー角 $\theta=56\text{deg}$, ロール角 $\phi=15\text{deg}$)

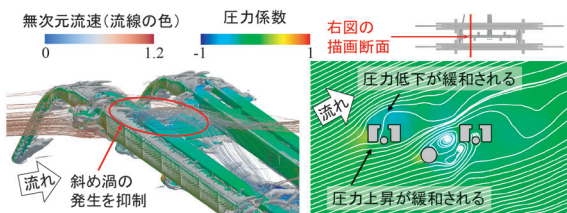
図 12 流れのシミュレーション結果
($U_0=80\text{km/h}$, 時間平均流れ場)

中央部にパンタグラフモデルを設置した（図 11）。計算格子は舟体周辺で最小格子間隔が 2mm となるような不等間隔直交格子を生成し、格子点数は 10 億～ 12 億点とした。計算条件は、横風なしと横風ありの 2 条件とし、横風なしについては反なびき走行（ロール角 0° , ヨー角 0° ）を、横風ありについては、ロール角 15° の反なびき走行時に揚力が極大値となるヨー角 56° を設定した。どちらの条件についても流入流速は 22.2m/s (80km/h) とした。

図 12 に流れのシミュレーションにより得られた時間平均流れ場を示す。このうち、左図は流線（流速で着色）、渦構造（ Q 値の等値面を灰色で描画）、物体表面の圧力を三次元的に描画し、流れ場を俯瞰して示したものである。また、右図は舟体中心からまくらぎ方向（風上側）に 250mm 偏位した位置の断面における流線および圧力分布を表している。これらの図より、横風が無い場合（図 12 (a)）には、上流側の舟体によって上下に流れが分流して流下し、上流・下流側の舟体上面および上流側の舟体底面においてそれぞれ圧力低下が生じており、これらの寄与が相殺することで大きな揚力が発生しない状況で

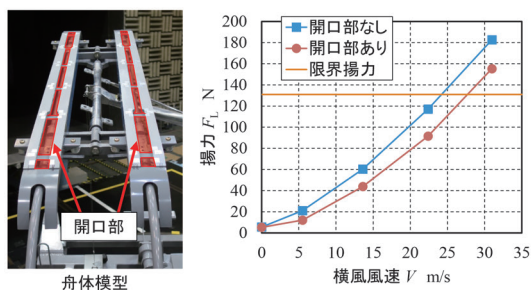


(a) 対策の概要



(b) 流れのシミュレーション結果

(ヨ一角 $\theta=56\text{deg}$, ロール角 $\phi=15\text{deg}$, $U_0=80\text{km/h}$)



(c) 風洞試験による揚力測定結果

(走行速度 60km/h , ロール角 $\phi=25\text{deg}$)

図 13 横風による揚力増加抑制策とその効果

あることがわかる。一方で、横風がある場合（図 12 (b)）には、吹上流れによって舟体底面において流れがよどむことで圧力が上昇していることに加えて、上流側の舟体上面を乗り越えた流れによって斜め方向に流下する強い渦（以下、斜め渦）が発生し、この影響で舟体上面に局所的な圧力低下が生じており、これら 2つの要因が複合することで揚力増加が生じたことが確認できる。

5. 横風による揚力増加抑制策の検討

前章の検討結果を踏まえ、横風による舟体の揚力増加を抑制する方法として、舟体底面側の圧力上昇の緩和および舟体上面側での斜め渦の発生抑制を目的として、舟体の前後のすり板間に隙間部を設ける対策（図 13 (a)）を提案し、その効果を確認した^{2) 5)}。

図 13 (b) は図 12 と同一の風向角における流れのシミュレーション結果であり、隙間部を設けることで舟体底面側から上面側へと貫通する流れが生じ、これにより舟体底面側の圧力上昇が緩和されるとともに、舟体上面側における強い斜め渦の発生が抑制され、局所的な圧力低下が緩和されており、横風を受けた場合の揚力増加を

抑制する効果が期待できることが確認できる。

この結果を踏まえ、風洞試験において隙間部を設けた実物大舟体模型を用いて揚力特性の確認を行った。図 13 (c) は代表例として反なびき条件、ロール角 25° における風洞試験結果を示している。本図より、本対策を適用することで、横風を受けない通常走行時の揚力には影響を及ぼすことなく、横風を受けた場合の揚力を低減可能であることが確認でき、特にこの例では風速 25m/s において揚力を限界揚力以下に低減できることがわかる。

以上より、すり板間に隙間を設ける対策により、通常走行時の揚力特性に影響を与えることなく横風を受けた場合の揚力を効果的に低減することができ、割り込み事故の防止策として有効な対策となり得ることを確認した。

6. まとめ

本研究では、横風による揚力増加に着目した割り込み事故防止策を提案することを目的として、はじめに、横風によるパンタグラフの揚力増加と割り込み事故との因果関係を定量的に明らかにしたうえで、横風による揚力増加量の把握およびその流体力学的なメカニズムを解明し、対策提案を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 割り込みが発生し得る揚力と偏位量の関係を図示することで、揚力の限界値の考え方を整理した。
- (2) パンタグラフが横風を受けた場合の揚力特性を把握し、横風の風速や側方からの吹上角によっては揚力が大幅に増加する場合があることを確認した。
- (3) 横風による揚力増加は、舟体底面側で流れがよどむことによる圧力上昇に加え、舟体上面側に発生する強い斜め渦による圧力低下によって生じることを解明した。
- (4) 横風揚力の低減策として、舟体の前後のすり板間に隙間部を設ける対策を提案し、その有効性を確認した。

本研究で得られた成果に基づき、実用化に向けた詳細検討を行うことが今後の課題である。

文献

- 1) 鉄道技術者のための電気概論 電車線路シリーズ 5 支持物 [1] (第五版), 日本鉄道電気技術協会, 1999
- 2) 光用剛, 天野佑基, 阿部巧, 小林樹幸, 磯野達志, 中出孝次, 野口雄平: 在来線パンタグラフの横風揚力特性に着目した割り込み事故防止策, 第 29 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2022), 2022
- 3) 電気学会 最近の集電技術動向に関する調査専門委員会: 最近の集電技術動向に関する調査報告, 電気学会技術報告, 第 984 号, pp.55-141, 2004

- 4) 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
- 5) 阿部巧, 中出孝次, 光用剛: 横風を受ける在来線パンタグラフ

- の揚力増加メカニズムと対策に関する数値解析, 鉄道総研報告, Vol.38, No.3, pp.9-15, 2024
- 6) 中出孝次, 光用剛: 複雑形状に対応した空気流・空力音シミュレーション, RRR, Vol.72, No.12, pp.22-25, 2015