

# 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

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 (鉄道総研)

Countermeasures to Prevent Dewirement Incident of Conventional Railway Pantographs  
Focusing on Lift Force Characteristics Under Crosswind  
Takeshi Mitsumoji\*, Yuki Amano, Takumi Abe, Shigeyuki Kobayashi,  
Tatsushi Isono, Koji Nakade, Yuhei Noguchi, (Railway Technical Research Institute)

Wind-induced dewirement of pantograph occurs only occasionally and leads to transport disorders. It has been considered that this is caused by the lift force increase of the pantograph due to crosswind, but the factors causing the dewirement of pantograph has not been completely understood. In this study, we focused on the increase in lift force of the pantograph due to the crosswind, and analytically clarified the causal relationship with the dewirement incident. In addition, we experimentally confirmed the amount of increase in lift due to crosswinds, clarified the fluid-dynamic causes using numerical simulation, and proposed countermeasures.

キーワード：割り込み事故，パンタグラフ揚力，横風，在来線

(Keywords, dewirement incident, pantograph lift force, crosswind, conventional railway)

## 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。割り込み事故は、図 1 に示すように、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さらに外方へ移動し、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、すなわちパンタグラフ揚力（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、電車線の設計施工標準等において検討がなされており<sup>(1)</sup>、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るものの、その詳細については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を解明し、対策提案を行った。

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、舟体は直流・交直流用パンタグラフで広く用いられている寸法諸元（舟体のレール方向幅 85mm，前後の舟体間隔 250mm）のものとした。

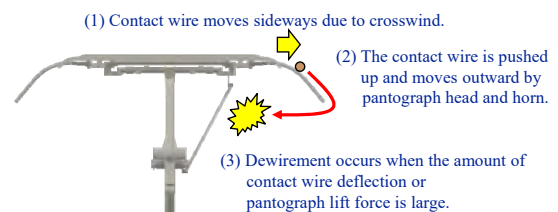


Fig. 1. Overview of dewirement incident.

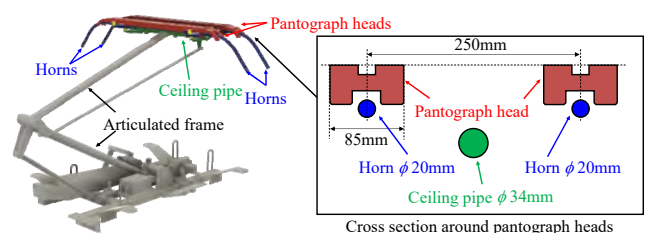


Fig. 2. Pantograph for conventional railway.

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 (限界揚力) の検討については, 設計施工標準等で用いられている静解析<sup>(1)</sup>に基づいて検討を行った。図 3 に静解析のモデル図を示す。本解析では, 舟体を円弧及び直線でモデル化し, 偏位  $x_0$  においてホーンの傾斜部 (傾斜角度  $\alpha$ ) に接触したトロリ線が押し上げられて外方の平衡点  $x$  に移動した場合の力のつりあいを考える。

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

ここで,  $K$  はトロリ線の水平方向のばね定数,  $F_0$  は静押上力,  $F_L$  は揚力を表す。このとき, 平衡点  $x$  が舟体のまくらぎ方向幅の半値  $L$  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。

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

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。なお, ここでは, トロリ線の偏位量  $x_0$  はホーンの傾斜部に位置するとしたが,  $x_0$  が舟体とホーンの円弧状の接続部に位置する場合には, (2)式の値よりも小さい揚力でホーンの直線部分に移行することから, 限界揚力を表す式としては(2)式に含まれることになる。また,  $x_0$  が舟体の直線部分に位置する場合には, 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。

図 4 は一般的な架線・パンタグラフの諸元を用いて(2)式から限界揚力をプロットした図である。本図に対して, 表 1 に示す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の総和 0.626m を  $x_0$  として当てはめた場合の限界揚力を求めると 131N となる。厳密には, トロリ線の偏位量は風速によって変化するため, 限界揚力の値も風速に応じて変更する必要があるものの, 本研究では安全側の評価となるよう, 上記の 131N を限界揚力として次章以降の検討を行った。

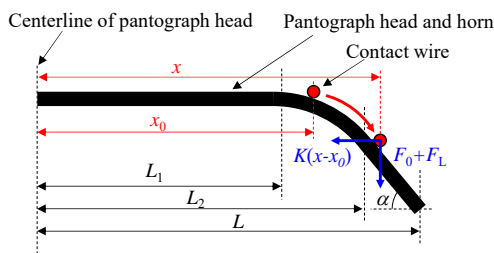


Fig. 3. Overview of static analysis.

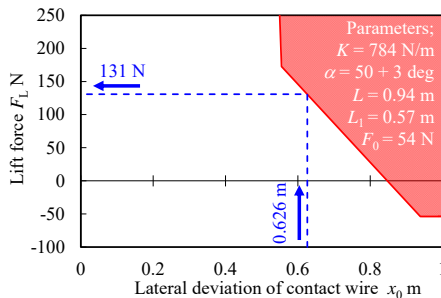


Fig. 4. Limit value of lift force.

Table 1. Lateral deviation of contact wire. (Straight line, wind speed 30 m/s).

No.	Item	Deflection
1	Deflection due to crosswind	261 mm
2	Sway of train	235 mm
3	Deflection of support	100 mm
4	Rotation of cantilever	30 mm
-	Total	626 mm

Parameters of overhead contact line ;

- Catenary wire : St90mm<sup>2</sup>, Tension force 9.8kN
- Contact wire : GT110mm<sup>2</sup>, Tension force 9.8kN
- Support : 50m interval, 200mm stagger

3. 横風を受けた場合の揚力特性

列車が走行中に横風を受けた場合には, 図 5(a)に示すように屋根上のパンタグラフは対向風  $U$  と横風  $V$  の合成風に加えて, 車両肩部において流れが吹き上がることにより, 斜め下方からの吹上流れにさらされることになる。本研究では, 風洞試験においてこの状況を再現したうえで, パンタグラフの揚力測定を行った。具体的にはパンタグラフにロール角  $\phi$  を設定可能な架台を用いて, 床面のターンテーブル上にパンタグラフを設置し, 様々なヨー角・ロール角を設定して揚力測定を実施した。このときの風向角と各風速成分の対応関係については図 5(b)に示すとおりである。風洞試験は鉄道総研の大型低騒音風洞 (開口型測定部, 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  $\phi$  は, 別途実施した様々な地形・車両条件に対する流れのシミュレーション結果から, 盛土高さや高架橋の桁高が大きいほど舟体位置での側方からの吹上角が大きくなる傾向があり, 最大で 35° 程度となることを確認したことから 0° ~ 35° に設定した。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 6(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 0° が反なびき走行, 180° がなびき走行の横風なしの条件にそれぞれ対応している。本図より, 揚力はヨー角 90° 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が大きいこと, および, ヨー角 56° 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 6(b)は代表的なロール角を設定した場合の揚力測定結果から, 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, ロール角が大きいほど揚力も大きくなることを確認できる。特に, ロール角が

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を超過する場合があることがわかる。

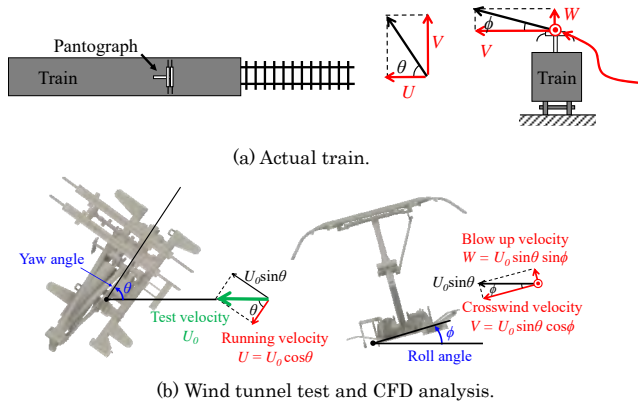
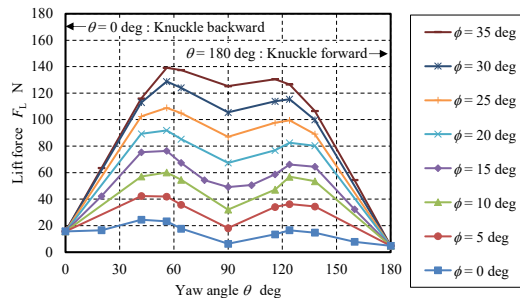
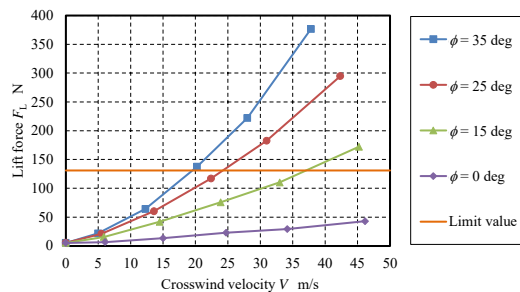


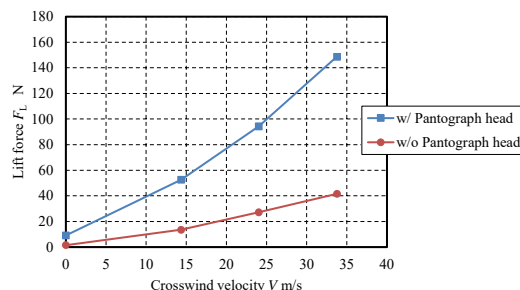
Fig. 5. Definition of flow angle and velocity.



(a) Lift force with respect to yaw angle. ( $U_0 = 30$  m/s)



(b) Lift force with respect to crosswind velocity.  
( $\phi = 15$  deg,  $U = 16.7$  m/s)



(c) Contribution of pantograph head. ( $\phi = 15$  deg,  $U = 16.7$  m/s)

Fig. 6. Lift force measurement result.  
(Wind tunnel test)

また、図 6(c)は反なびき条件、ロール角 15° において舟体およびホーン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る。このほか、本稿には図示しないものの、本研究では舟体の断面形状を単純な矩形に近い形状としたうえで、その断面形状を様々に変更した場合の揚力測定も実施しており、横風を受けた場合の揚力は舟体のレール方向幅が大きいほど大きくなる一方で、同じレール方向幅であれば舟体の断面形状やアスペクト比は揚力特性に大きな影響を与えないことも確認している<sup>(2)</sup>。

#### 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およびその対策検討を行った<sup>(3)(4)</sup>。

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）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 位置の床面中央部にパンタグラフモデルを設置した。計算格子は最小格子間隔 2mm の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 7 に流れのシミュレーション結果を示す。このうち、左図は流線（流速で着色）、渦構造（灰色の等値面）、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下流側の舟体底面において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あることがわかる。一方で、横風がある場合には、吹上流れによって舟体底面において流れが淀むことで圧力上昇が生じること、および、上流側の舟体上面を乗り越えた流れによって斜め下流側に流下する強い斜め渦が発生し、この影響で舟体上面に局所的な圧力低下が生じること、の 2 点の特徴があり、これらが大きな揚力が発生した要因であることが確認できる。

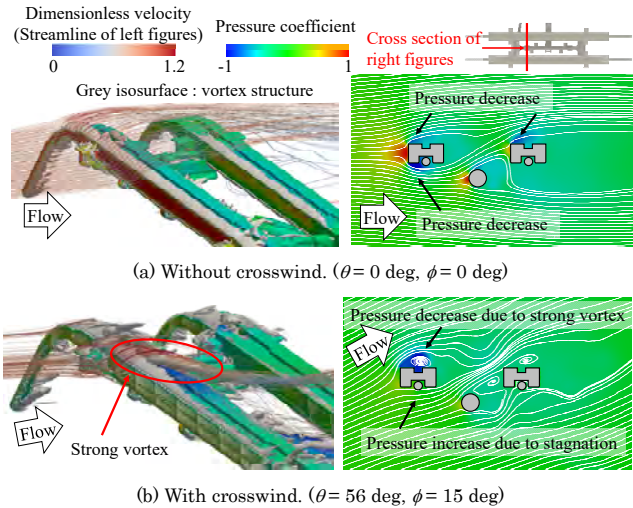


Fig. 7. Flow simulation result. ( $U_0=22.2\text{m/s}$ )

5. 横風による揚力増加抑制策の検討

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 8) を提案し、その効果を確認した。

図 9(a)は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こと、および、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いることが確認でき、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わかる。

これを踏まえ、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 9(b)は代表例として反なびき条件、ロール角  $25^\circ$  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、本稿には図示していないものの、なびき条件および他のロール角条件においても同様の事柄を確認している。なお、この例では風速  $25\text{m/s}$  において限界値を超過している揚力を限界値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。

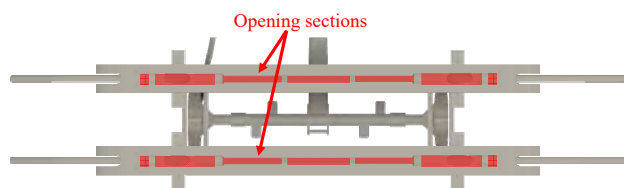
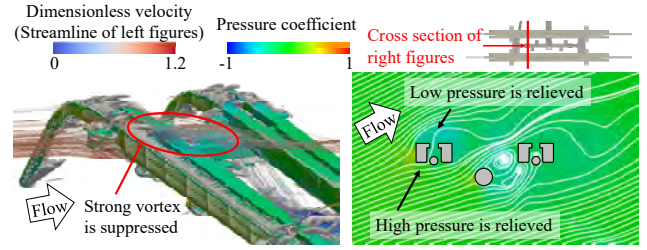
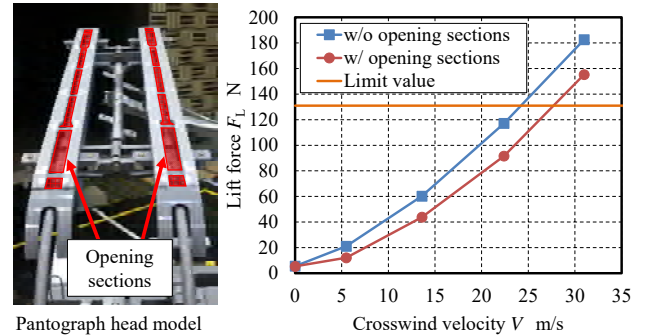


Fig. 8. Overview of opening sections.



(a) Flow simulation result. ( $\theta=56\text{ deg}, \phi=15\text{ deg}, U_0=22.2\text{ m/s}$ )



(b) Wind tunnel test result. ( $\phi=25\text{ deg}, U=16.7\text{ m/s}$ )

Fig. 9. Effect of opening sections.

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の限界値を超過する場合があることを確認した。
- (3) 横風による揚力増加メカニズムを解明した。
- (4) 横風揚力を低減する方策を提案し、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, 1999.10
- (2) 磯野達志, 光用剛, 平川裕雅, 臼田隆之: 「舟体の外形寸法が横風環境下における在来線用パンタグラフの揚力特性に及ぼす影響評価」, 第 28 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2019), 2019
- (3) 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特性に関する数値流体解析」, 第 30 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2021), 2021
- (4) 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舟体揚力増加の抑制手法に関する数値流体解析」, 第 31 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2022), 2022