

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

阿部 巧* 中出 孝次* 光用 剛**

Numerical Flow Simulation of Mechanism of Increase and Method for Suppressing Increase in Lift Force of Pantograph Head of Conventional Line Pantograph under Crosswind

Takumi ABE Koji NAKADE Takeshi MITSUMOJI

We numerically investigated the aerodynamic characteristics of a conventional line pantograph in a crosswind by using large-eddy simulations (LESs). Although previous experimental study revealed that the lift force increases significantly under crosswind conditions, the mechanism of the phenomenon has not been clarified. Therefore, the flow fields around the pantograph head were carefully investigated by LESs. It was found that there are two main mechanisms: one is a stationary large-scale vortex generated on the upper surface of the pantograph head, and the other is a pressure increment on the lower surface of the pantograph head. In addition, LESs were conducted using modified pantograph head shapes to investigate methods for reducing the lift force of the pantograph head taking account of the mechanisms above. As a result, maximum lift reduction rate reaches approximately 60%, indicating that effective lift force reduction method was proposed.

キーワード：数値シミュレーション、在来線パンタグラフ、揚力特性、空力特性、横風、LES

1. はじめに

走行中のパンタグラフの揚力の適正化は安定した電力供給のために重要である。在来線パンタグラフの揚力の適正值は車両や架線の諸条件に依存するため、明確な基準値等はないものの、過去の研究¹⁾では営業運転で問題なく使用されている各種パンタグラフの揚力特性が調査され、揚力の値が走行速度 100km/h において数 N～30N 程度であることが報告されている。在来線は新幹線よりも走行速度が低く、通常走行時のパンタグラフの揚力が問題となることは少ない。一方で、強風時には横風により揚力が増加する場合があります。横風環境下を想定した在来線パンタグラフの揚力特性の調査が行われてきた。一般に車両が横風を受けた場合には、車両側面の肩部からの跳ね上げによりパンタグラフは真横からだけでなく上下方向の流れにもさらされるため、跳ね上げの角度に着目し、パンタグラフ近傍の流れ場が調査された。このような様々な条件の横風を想定し、近年導入が進む在来線用シングルアームパンタグラフの揚力特性が実験的に調査され^{2) 3)}、揚力が増加する横風の風速や風向に関する知見が得られた。また、著者らの近年の研究⁴⁾では、強風時の揚力増加と架線への割り込み事故に関連して、割り込みが生じ得る揚力の限界値が示されており、揚力増加を抑制する手法が望まれる。

揚力特性について多くの知見が得られつつある一方で、横風により揚力が増加するメカニズムを解析した研究は見られず、揚力増加の抑制手法の検討もなされていない。そこで、本研究では数値解析手法の LES (Large-eddy simulation) を用いて、横風により揚力が増加する流れにおける揚力増加メカニズムの解明および揚力増加の抑制手法の検討・評価を行った。一般的にパンタグラフ揚力とは空気力による押上力の変化のことを指し、これは枠組等のリンク機構の影響を含むものである。本研究ではパンタグラフに固定した座標系において、空気力により生じる鉛直上向きの力を揚力と定義したうえで、パンタグラフの揚力に対して寄与が大きい舟体に着目し、舟体表面の圧力分布を積分して得た揚力を議論する。

2. 数値解析手法

2.1 計算モデル

計算対象は、鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞を用いた風洞実験³⁾で使用された一般的な在来線用シングルアーム型パンタグラフの実機形状モデルである。また、揚力増加抑制手法の検討のため、実機形状モデルを基本形状とし、舟体形状を変更した 3 種類の形状を用意した。計算領域および座標系は図 1 に示す通りで、計算領域は全計算ケースで同一とした。

計算で用いた実機形状モデルを図 2 に示す。本研究は舟体揚力特性と舟体周りの流れ場が主な対象であるため、

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

** 鉄道力学研究部 集電力学研究室

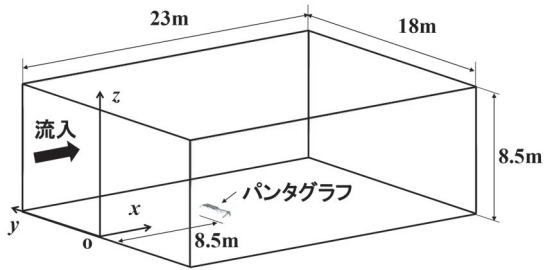


図1 計算空間

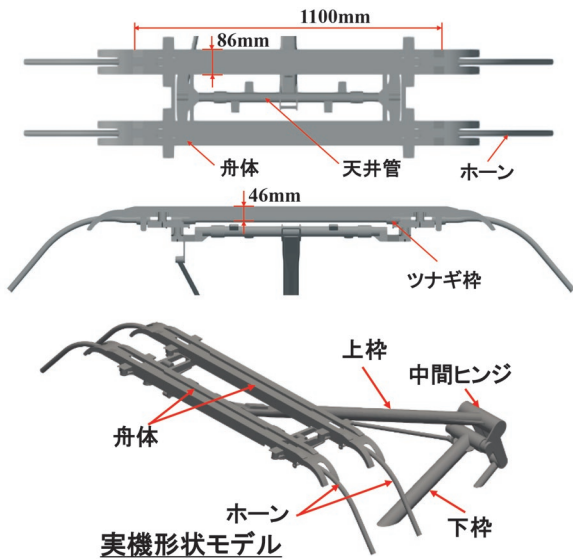


図2 パンタグラフモデル

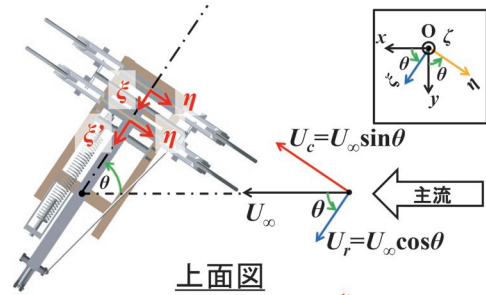
下枠の一部と上枠，ホーンと舟体を計算対象とした。計算格子は，舟体近傍に最小格子幅 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2\text{mm}$ の等間隔格子を分布させ，モデルから離れるほど格子間隔が広がる直交不等間隔格子とした。計算格子数は，横風なしで約10億点，横風ありで約12億点である。

2.2 座標系と計算条件

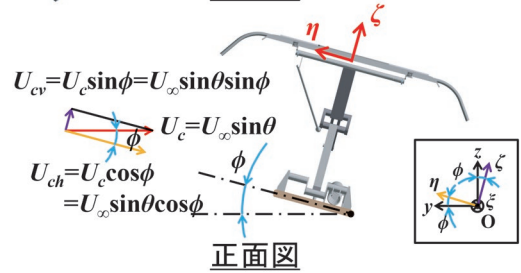
主流流速は80km/hに固定した。主流流速と実機形状モデルの舟体高さ(0.046m)に基づくレイノルズ数は約 6.8×10^4 である。以下，特に注記しない限り，無次元化した物理量に関しては，代表速度 $U_\infty = 80\text{km/h}$ と代表長さ $L = 1\text{m}$ で無次元化した値とする。

パンタグラフ下部からの跳ね上げを有する横風を再現するため，流入風を固定して計算空間内でモデルを回転させた。物体に固定した座標系は，回転がない場合にはxyzそれぞれに対し $\xi\eta\zeta$ の方向が対応するように定義した。 $\xi\eta\zeta$ の原点は上流側の舟体下面の中心位置とし，下流側の舟体下面の中心位置には $\xi\eta\zeta$ の原点を設定した(上流と下流の舟体で $\xi\eta\zeta$ の原点が異なる)。

図3にパンタグラフのヨー角 θ ，ロール角 ϕ および主流流速 U_∞ の関係を示す。ヨー角 θ は走行車両に対する



上面図



正面図

図3 速度と座標系の関係



図4 舟体の断面形状

風向角を表現するため横風角と呼び，ロール角 ϕ は横風の跳ね上げを表現するため跳ね上げ角と呼ぶ。また，走行時に列車が正面から受ける風速を走行速度 U_r とし，跳ね上げを含めた横風の風速を横風速度 U_c とする。計算条件の決定方法の詳細は文献5に示すが，揚力が極大となる風向の条件として，横風角 $\theta = 56^\circ$ ，跳ね上げ角 $\phi = 15^\circ$ ，中間ヒンジが下流側となる反なびき条件にて計算を実施した。計算は全ケースで主流流速 $U_\infty = 80\text{km/h}$ (横風ありの場合の $U_r = 45\text{km/h}$ 相当)とし，揚力を比較する際は走行速度を $U_r = 60\text{km/h}$ に固定し，揚力を換算した。

計算は，実機形状モデル(以下，「実機」)において横風あり・なしの両条件を実施した(3.1節，3.2節では単に横風あり，横風なしと呼称)。また，舟体形状を変更した3形状を用意した。図4に舟体の断面形状を示し，図5に形状変更の方法と形状変更範囲を示す。断面形状は上流側舟体のみを示したが，走行方向の違いによるパンタグラフ形状の非対称性をなくすために，上流側と下流側舟体の形状は前後対称とした。「切り欠き」は舟体下部を斜めに切り欠いており，その η 方向の範囲は図中に示す突起部(ばね受け板)間の領域($-0.335\text{m} \leq \eta \leq 0.335\text{m}$)である。「開口」は舟体の上部に複数の開口部を設けており，舟体上部の一対のすり板間の領域($-0.55\text{m} \leq \eta \leq 0.55\text{m}$)を開口とした。「併用型」は「開口」に対して切り欠きを設けた形状である。ここで，「開

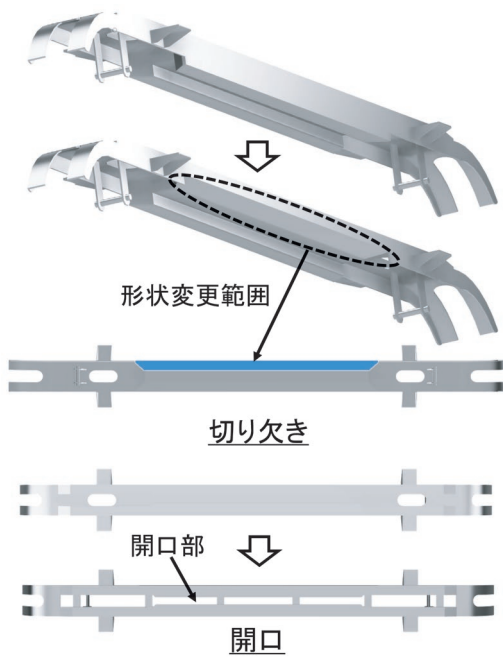


図5 舟体形状の変更方法

口」と「併用型」の舟体は風洞実験⁴⁾で用いた模型の構造に合わせて中空とした。ただし、検討段階ではさらに多くの形状について数値解析を実施しており、ここでは揚力低減効果が比較的大きかったものを選定した。

2.3 数値計算の概要

非圧縮性流体のLESの基礎式に対して、差分法による離散化を施した。サブグリッドスケールモデルには、コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル⁶⁾を用いた。空間の離散化は二次精度の中心差分法⁷⁾を、時間進行は三次精度のアダムス・バッシュフォース法を用いた。圧力のポアソン方程式の解法は、計算領域全体の平均圧力値を基準圧力としてヤコビ法を用いた。境界条件は、 x_{\min} (流入面) で速度を1に固定、 x_{\max} (流出面) で対流流出条件、パンタグラフ表面を速度ゼロのすべりなし境界条件、遠方境界面 ($y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$) をすべり境界条件とした。モデルの形状の表現は、直交格子法のボックス型手法とした。

本計算は、一様流を初期値とし、流れ場が統計的に定常状態になるまで時間進行を行った。無次元の時間刻み間隔を $\Delta t=0.0002$ とした。圧力係数等の統計量は、無次元時間で $T=10\sim 30$ の計算結果を平均して算出した。

3. 解析結果と考察

3.1 風洞実験と計算結果の比較

数値計算結果の妥当性を検証するため、風洞実験を実施し、舟体表面の圧力係数分布を比較した結果、両者の結果は概ね一致することを確認した。詳細は文献5を参

表1 舟体揚力の実験と計算の比較

Case name	主流 [km/h]	Lift 1 [N] (上流側舟体)	Lift 2 [N] (下流側舟体)	Lift 1 + Lift 2 [N]
横風なし (実験)	60	—	—	2.53
横風あり (実験)	108	—	—	41.0
横風なし (計算)	60	0.280	1.28	1.56
横風あり (計算)	108	31.3	12.1	43.5

照されたい。

3.2 横風による舟体揚力増加メカニズム

3.2.1 横風による舟体揚力の変化

横風による舟体揚力の増加について調査する。物体に作用する空気力を検討する際、主流流速を一定とすることが多いが、ここでは一定の速度で走行する条件の舟体揚力の横風による変化を検討するため、走行方向の流速を $U_f=60\text{km/h}$ で統一した。計算は主流流速 $U_\infty=80\text{km/h}$ であるが、上記の条件を再現するには、横風がある条件では $U_\infty=108\text{km/h}$ とする必要がある。本研究が対象とする速度域 ($U_\infty=60\sim 180\text{km/h}$ 程度) の実験での無次元揚力は、流速によらず概ね等しいため、流れ場のレイノルズ数依存性は小さいと考えられ、揚力は流速の2乗に比例すると仮定して、以下の式(1)、(2)に示す換算揚力を算出した。

$$L_{A_u60} = (60 / 80)^2 \times L_{A_u80} \quad (1)$$

$$L_{B_u108} = (108 / 80)^2 \times L_{B_u80} \quad (2)$$

ここで、下付き添え字 A, B はそれぞれ横風なし、横風ありを示し、u の後の数字は U_∞ の値を示す。

表1に横風あり・なしの2ケースについて、式(1)と式(2)から算出した前後2本の舟体の揚力を、実験結果とともに示す。ここで、実験結果の2本の舟体揚力の合計値 (Lift 1 + Lift 2, 以下、合計揚力) は、舟体を含むパンタグラフ全体の揚力の測定結果から、2本の舟体を取り除いた状態のパンタグラフの揚力を減じて算出し、2本の舟体が受ける空気力による揚力を模擬した値である。一方で、数値計算では、物体に作用する空気力 (舟体表面圧力の積分値) から揚力を算出した。上述の様に、実験と数値計算は異なる方法で舟体に作用する空気力による揚力を算出したが、表1の合計揚力は実験と数値計算で良好に一致する。表1から、横風により実験と計算ともに合計揚力が40N程度増加する。また、計算結果から、横風による上流側舟体の揚力 (Lift 1) の増加量が下流側舟体の揚力 (Lift 2) よりも大きく、横風ありの合計揚力の3/4程度を占める。以降では、2本の舟体で揚力の増加量に差が生じた原因を考察する。

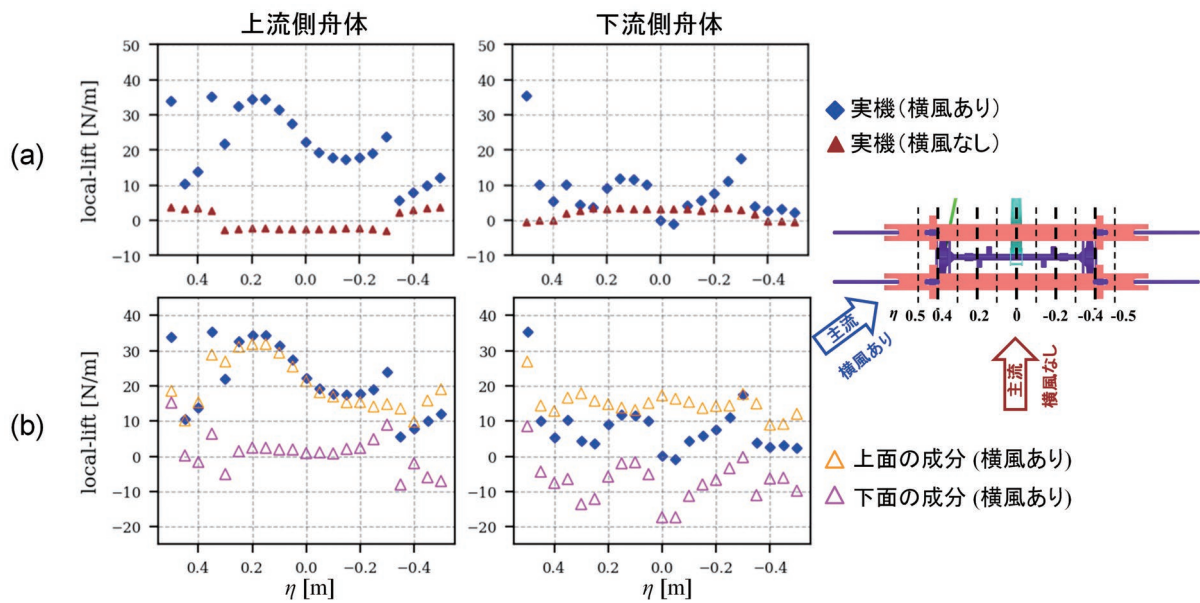


図6 局所揚力分布 (横風あり・なしの比較)

図6 (a) は横風あり・なしの場合について、上流側と下流側舟体それぞれのスパン方向（レールと直交する方向）の局所揚力分布を示す。局所揚力は各 η 断面における舟体周りの圧力係数 C_p の分布を η 方向単位幅で積分して求めた。左右の図はそれぞれ上流・下流側の舟体であり、 η 軸左側が横風の上流である。横風なしの場合、局所揚力はスパン方向にほぼ一様だが、横風ありの場合には全体的に揚力が高く、局所的なピークを持つ分布となる。特に、2本の舟体の η 正方向の端部付近や、上流側舟体の $\eta=0.2\text{m}$ 付近で局所的に顕著な揚力増加が見られる。

横風ありの場合の舟体揚力について、揚力の上下面の内訳を明確にするため、図6 (b) に上下面の局所揚力分布を分けて示す。ただし、上面の揚力は上面圧力と基準圧との差分の積分値とし、下面も同様である。まず、上流側舟体について、上面の揚力分布は $\eta = 0.2\text{m}$ 付近にピークがあるが、下面の揚力分布の変化は小さい。その結果、上面の揚力の影響が強くと表れ、舟体上面に重要な空力的な現象があると示唆される。次に、下流側舟体については、上流側で見られた $\eta = 0.2\text{m}$ 付近の上面の局所揚力のピークが消失し、下面の揚力が局所的に小さくなる。両者は揚力減少に寄与し、揚力は上流側よりも減少する。2本の舟体で揚力に差が生じた原因は、舟体同士の流れの干渉や主流に対する部材の位置関係の違い等が考えられる。

3.2.2 流れ場の比較

横風ありの時間平均流れ場を図7に示す。灰色の面はQ値（速度勾配テンソルの第二不変量）の等値面を示し、流線は流速の大きさで、パンタグラフ表面は C_p の値で色付けした。俯瞰図から、上流側舟体の前面に衝突

した流れが上側へ剥離し、舟体上面へと巻き込まれながら下流へと移流し、定常的な渦管が生じる。上面図から、この渦管近くの舟体上面に強い負圧領域が広がり、表1中のLift1の顕著な増加に寄与する。

時間平均流れ場の η 断面（舟支えと上枠の間の断面）内の流れを図8、図9に示す。横風なしでは、上流側舟体前面に流れが衝突し、上面と下面それぞれで剥離が生じる。上下面の剥離による負圧がバランスし、横風なしでは舟体揚力がわずかに正となる。横風ありでは、図7の渦管が上流側舟体上面付近に見られ、強い負圧が生じている。

また、横風なしとは異なり、流れが舟体の下側から作用するため、下面では剥離-再付着が生じず、低圧部が見られない。このように、渦管による舟体上面の負圧の

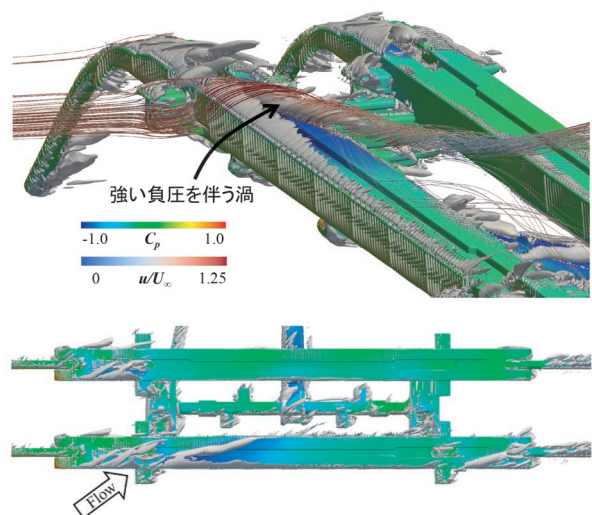


図7 舟体上面の流れ

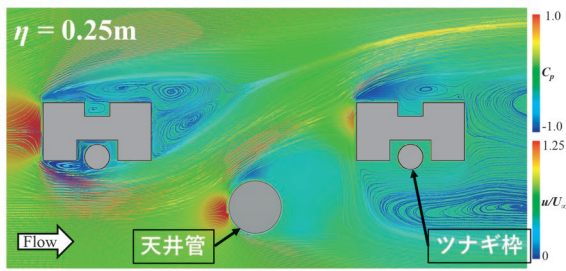


図8 断面内の流れ（横風なし）

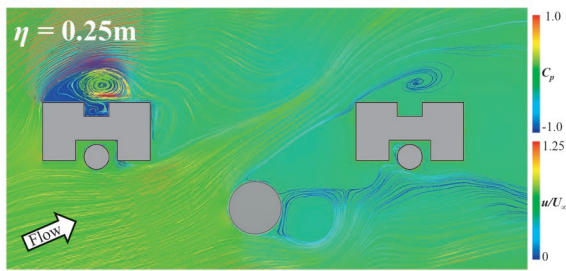


図9 断面内の流れ（横風あり）

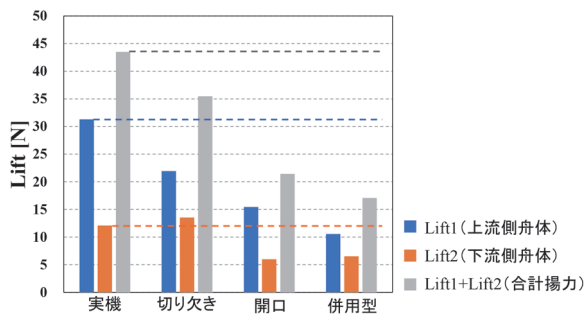


図10 舟体揚力の変化

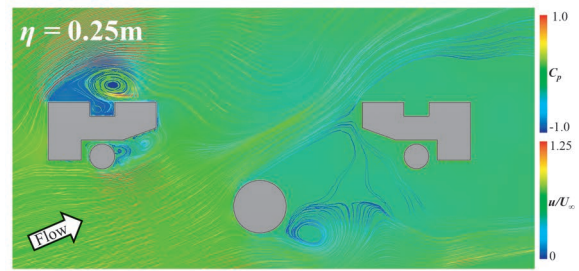
増加と、跳ね上げ風による舟体下面の負圧部の消失（圧力上昇）により、上流側舟体の揚力が顕著に増加したと考えられる。下流側の舟体も同様に、上面の局所的な強い負圧部と下面の圧力上昇が揚力の増加に寄与すると考えられる。

3.3 舟体揚力増加の抑制手法

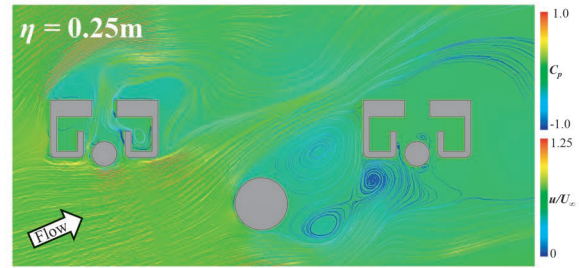
3.3.1 舟体形状の変更による揚力増加の抑制効果

前節では横風により舟体揚力が増加する現象を調査した。本節では、前節の流体現象を踏まえ、舟体揚力の増加を抑制する舟体形状を検討し、その効果を評価した。検討する舟体形状は図5に示す3形状（切り欠き、開口、併用型）であり、舟体揚力は換算式(2)を用いて列車の走行速度が60km/hの場合で比較した。

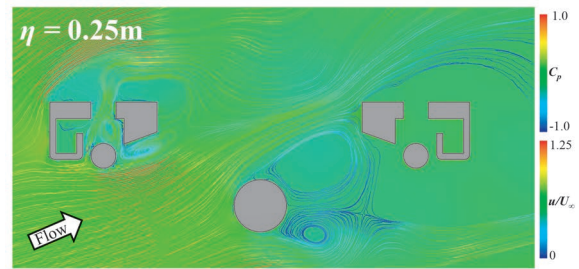
図10に「実機」と3形状で得られた舟体の揚力を示す。揚力は上流側舟体と下流側舟体で分けて示し、2本の舟体の合計揚力も示した。まず、舟体下面を切り欠いた「切り欠き」では、上流側舟体の揚力が顕著に低下し、



(a) 切り欠き



(b) 開口



(c) 併用型

図11 3形状の断面内の流れ

合計揚力は「実機」よりも18.5%減少した。次に、舟体の上下面に開口部を設けた「開口」では、上流側舟体の揚力減少率が「切り欠き」より高いうえ、下流側舟体の揚力も顕著に減少した。その結果、「実機」と比べて合計揚力は50.7%減少し、「切り欠き」よりも顕著な揚力増加抑制効果が得られた。また、「切り欠き」と「開口」の両方の特徴を有する「併用型」では、「開口」よりも上流側舟体の揚力がさらに減少し、合計揚力の減少率は60.8%に達し、最大の効果が得られた。ここで「開口」において、開口部による舟体上向き（ ζ 方向）投影面積の減少率は約18%であるが、舟体合計揚力の減少率は50.7%であり、舟体の受圧面積の減少分よりも高い効果が得られた。これは、「開口」による揚力減少は、受圧面積の減少のみならず、流れ場の変化によることを示唆する。

3.3.2 流れ場の比較

図11に3形状の η 断面内の流れを示す。図9の「実機」と比較すると、「切り欠き」では上流側舟体下面と天井管の間の流路が拡大し、下面の圧力上昇が緩和される他、円柱形のツナギ柱の後流に低圧部が生じ、揚力低下に寄与する。また下面の流れの変化を受けて上面の渦

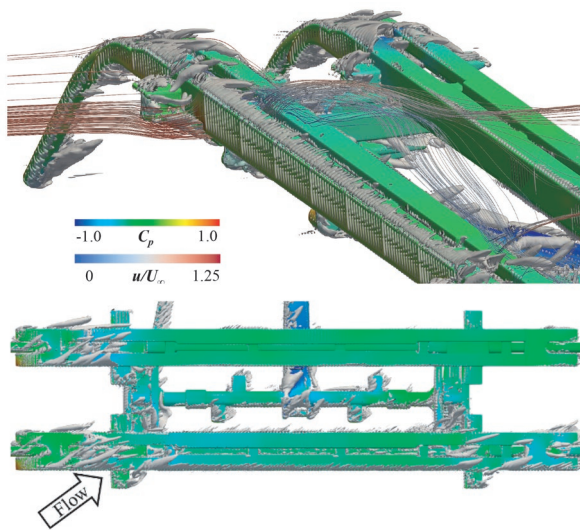


図 12 舟体上面の流れ（開口）

管が弱まっており、負圧が弱まる。この上下面の流れの変化により、上流側舟体揚力が減少したと考えられる。

「開口」では、舟体を上下に貫通する開口部を通過する流れにより上流側舟体上面の渦が消滅し、強い負圧の領域が消失した（詳細は図 12 を参照）。ここで、切り欠きによるツナギ後流の低圧部と、開口による上面の負圧の消失は異なる流体现象であり、「併用型」では両者の効果が同時に得られるため、舟体揚力増加抑制効果が最大となったと考えられる。

図 12 に「開口」の舟体周りの時間平均流れ場を示す。図 7 の「実機」と比較すると、開口部において下面から上面へ通り抜ける流線が見られる。この開口部を通過する流れが、上面の負圧を伴う渦管と干渉することで渦管がほぼ消失しており、舟体上面の負圧が弱まる。この流れの干渉は舟体スパン方向両端付近の開口部においても見られ、「実機」で見られた舟体上面の渦管が至る所で弱まっている。これが、「開口」において揚力が顕著に減少した主な流体的な現象であると考えられる。

3.4 風洞実験による計算結果の検討

前節で検討した舟体形状を変更した際の数値計算結果については、別途実験を実施した。「開口」については、計算モデルと実験供試体の形状は同一の形状とし、計算と実験の合計揚力は良好に一致した（実験の詳細は文献 5 を参照）。また、「切り欠き」と「併用型」については、計算モデルと実験供試体の形状に差異があるが、類似形状にて同様の揚力が得られることを確認している⁵⁾。したがって、計算結果は舟体揚力の増減を適切に再現しており、本研究で検討した内容の有用性が示された。

4. まとめ

本研究では、横風環境下で走行中の在来線パンタグラフを対象として LES を用いた数値解析を行い、横風により舟体揚力が増加する要因を明らかにするとともに、舟体形状を変更した場合の揚力増加の抑制効果を評価した。本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 横風環境下では、上流側の舟体揚力が前後 2 本の舟体の合計揚力のうち 3/4 程度と大部分を占める。
- (2) 横風環境下の舟体揚力は、舟体上面の負圧を伴う渦と、下面に衝突する流れによる圧力上昇により増加する。上面の渦は舟体前縁で剥離した流れが舟体上面に巻き込まれることで生成され、周囲に強い負圧の領域を生じるため揚力増加に寄与する。下面の流れは、横風が無い場合の剥離-再付着流れに伴う負圧が、下側からの流れを受けて消失し、圧力が上昇するため揚力増加に寄与する。
- (3) 舟体形状を変更し、揚力増加抑制効果を調査した。「切り欠き」と「開口」、「併用型」の全てにおいて、形状変更前と比較して揚力が減少し、減少率はそれぞれ 18.5%、50.7%、60.8% であった。
- (4) 「切り欠き」は、上流側の舟体下面から下流側の舟体上面にかけて流路を拡大し、下面に負圧を生じることに加え、上面の負圧を伴う渦を弱めることで揚力減少効果を得る。「開口」は、開口部による受圧面積の減少に加え、開口部を通る流れが舟体上面の渦と干渉し、負圧を弱めることで高い揚力減少効果を得る。両者は流体现象が異なるため、併用することで最も高い揚力増加抑制効果が得られる。

文 献

- 1) 網干光雄, 清水政利, 吉行秀春: 在来線パンタグラフの空力特性, 鉄道総研報告, Vol.6, No.9, pp.25-32, 1992
- 2) 小林樹幸, 光用剛, 白田隆之, 山下義隆, 常本瑞樹, 清野智明, 安達一徳: 横風が作用する在来線パンタグラフの揚力特性, 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018), No.18, DOI:10.1299/jsmetd.2018.27.1307, 2018
- 3) 磯野達志, 光用剛, 平川裕雅, 白田隆之: 舟体の外形寸法が横風環境下における在来線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), No.19, DOI: 10.1299/jsmetd.2019.28.1102, 2019
- 4) 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

- 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抑制手法に関する数値流体解析, 日本機械学会論文集, Vol.89, No.926, DOI: 10.1299/transjsme.23-00121, 2023
- 6) Kobayashi, H., "The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow," *Physics of Fluids*, Vol.17, pp. 045104-1-12, DOI: 10.1063/1.1874212, 2005
- 7) 梶島岳夫: 不等間隔格子に適合する対流項の差分法, 日本機械学会論文集B編, Vol.65, No.633, pp.1607-1612, 1999