

CFD 解析を用いたパンタグラフ周り流れ場の能動的制御に関する検討

岸下 裕亮* (東京農工大院)

美濃部 貴幸 (東京農工大学)

池田 充 (鉄道総合技術研究所)

鈴木 昌弘 (鉄道総合技術研究所, 東京農工大学)

CFD analysis for active flow control around pantograph panhead

Hiroaki Kishige*, Takayuki Minobe, (Tokyo University of Agriculture and Technology)

Mitsuru Ikeda, Masahiro Suzuki, (Railway Technical Research Institute)

As the maximum speed of Shinkansen increases, it becomes more important to resolve aerodynamic and aeroacoustic problems relating to pantographs. Hence, methods using an active flow control technique have been proposed to improve aerodynamic and aeroacoustic characteristics. In this study, we tried to control the flow around a pantograph by a synthetic jet. Numerical and experimental tests results indicate that pressure fluctuation of the flow reduced by the jet blowing.

キーワード：流れ場の能動的制御，パンタグラフ，舟体，空力音，圧力振動

(Keywords: Active flow control, Pantograph, Panhead, Aeroacoustics, pressure vibration)

1. 緒言

1.1 目的

今日，新幹線の最高営業速度が 300km/h に達していることから分かるように，鉄道車両の高速化が急速に進みつつある。しかし，更なる速度向上を実現するためには技術的・環境的な面から解決すべき問題が存在する。

鉄道車両の多くは，車両屋根上に設置されたパンタグラフと呼ばれる集電装置によって，架線から電気を車両内に取り込むことで動力源を得ている。パンタグラフの一例を図 1 に示す。舟体形状はパンタグラフの性能に大きな影響を与えるが，以下の 2 つの満足すべき要求が存在する。1 つ目は，パンタグラフから発生する空力音を低減させることであり，2 つ目はパンタグラフに作用する揚力変動を抑えることである。前者は，沿線環境保全の観点から定められた厳しい環境基準に適合するために，パンタグラフから発生する空力音をある一定の騒音レベル内に抑えるという要求である。舟体はパンタグラフの主たる空力音源の一つであるため，舟体を流線型に近い形状にすることが空力音低減には有利とされる。後者は，安定した集電性能を維持するために，パンタグラフに作用する揚力をできるだけ一定にという要求である。なぜなら，揚力変動が大きいと架線からパンタグラフが離線する可能性が高まるからである⁽¹⁾。こちらは，舟体を鈍頭形状にすることが有利とされる。従って，この両者を同時に満たすことは容易ではない。現在実用化されている舟体は，どちらかと言えば鈍頭形状に近い形状である。

空力騒音は，流れの乱れに起因する圧力変動や応力の加速度運動によって発生するものである。現行の鈍頭形状の

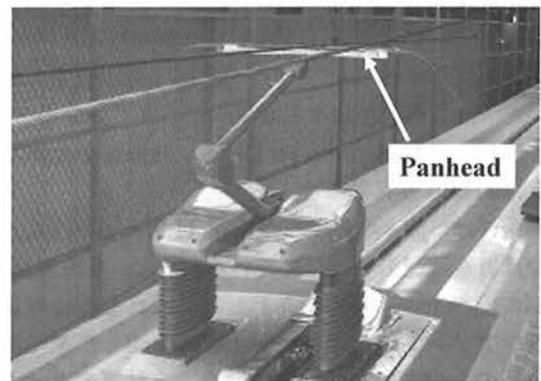


Fig.1 Outlook of a pantograph

舟体の場合は，舟体から流れが剥離して剥離せん断層が不安定になり，カルマン渦に代表される非定常渦が生成されて空力音が発生する。

空力音低減には，一般的に流れの剥離を抑制する必要がある。しかし，剥離を抑制すると揚力が迎角変化に対して敏感となるため，安定した揚力特性を維持することは難しくなる。しかし最近では，流れの微細構造や特性が次第に解き明かされ，空力騒音の発生メカニズムが明らかになってきた。そこで，流れを制御して空力騒音の発生を低減しようとする研究が盛んに行われるようになってきた⁽²⁾。

そこで，パンタグラフの表面で流れの能動的制御を行い，舟体後方に発生する剥離せん断層を安定化させ，揚力変動，圧力変動を抑えることにより，効率的に空力音低減を実現する手法について検討した。過去の研究においてパンタグラフからの噴流吹出しを用いて空力特性の改善が可能であることが確認されている⁽³⁾。本研究ではパンタグラフ舟体周りの流れについて，シンセティックジェット⁽⁴⁾などによる能

動制御を行い、より効率的な空力音低減を実現することを目指す。

1.2 シンセティックジェット

シンセティックジェットとは吹き出しと吸い込みの動作の組み合わせにより質量流量をゼロとしたジェットのことであり、単純吹き出しや単純吸い込みに比べ効果的に擾乱を与えることができる。また、外部から流体を供給する必要が無いため、装置が簡略化されるという利点もある。

2. CFD 解析

現用パンタグラフにシンセティックジェットを適用することにより、流れ場の能動的制御による空力音低減が実現可能であるか確認するため、CFD 解析による検討を行った。なお、CFD 解析対象はパンタグラフの下枠以上とし、シンセティックジェットの有無それぞれの場合について解析を行った。

2.1 CFD 解析の概要

今回の CFD 解析は汎用解析ソルバー FLUENT6.2.36 を使用して実施している。乱流モデルは LES モデルとし、Realizable $k-\epsilon$ モデルで得た定常計算の結果を初期値として、LES モデルによる非圧縮非定常計算を行った。ただし、初期値として与えた $k-\epsilon$ モデルの解は十分に収束したものをを用いた。計算格子を図 2 に示す。パンタグラフモデルは、舟体、上枠、下枠で構成されており、計算格子全体での格子点数は約 660 万点である。

境界条件は、流入境界で一様流速 $41.7[m/s]$ を与え、流出境界では散逸流速を 0 と与えている。また、左右側面及び、上下面の境界条件は対称境界とした。流れ場の物理量のデータサンプリングは、流れ場が十分に発達したタイムステップ以降のものに対して行っている。本計算のタイムステップは、 $1.0 \times 10^{-4}[s]$ であり、データサンプリング数は 500 ステップである。

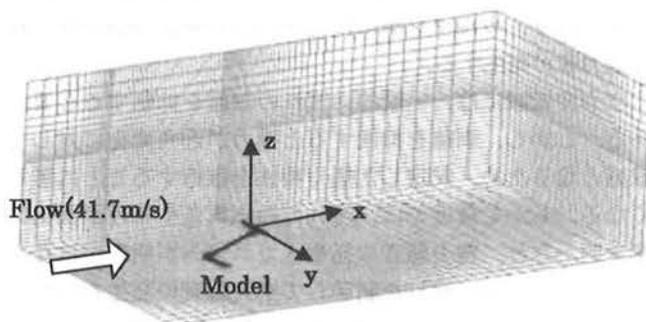


Fig.2 Computational domain

2.2 現用パンタグラフの CFD 解析と実験結果との比較

現用パンタグラフの CFD 計算結果を図 3 に示す。結果は、舟体上端から鉛直方向下方へ $0.07m$ 移動した位置における $x-y$ 断面での平均流速分布図を示している。

計算結果を検証するために、風洞実験を行った。PIV による流速測定を行い、計算結果との比較を行った。実験結

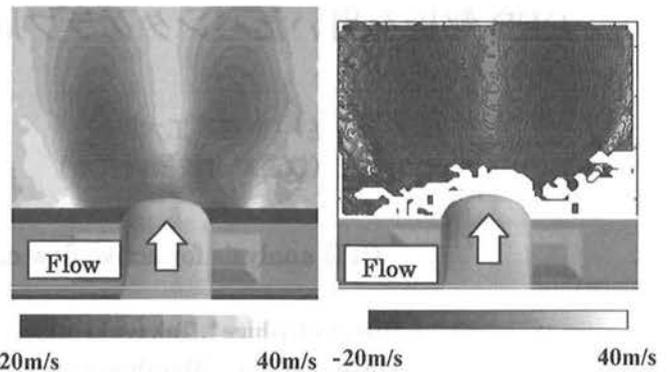


Fig.3 X-direction velocity magnitude (CFD)

Fig.4 X-direction velocity magnitude (PIV)

果を図 4 に示す。これは、CFD と同じく舟体上端から鉛直方向下方へ $0.07m$ 移動した位置での $x-y$ 断面での平均流速分布図を示している。

CFD による計算結果と実験結果の比較を図 5 に示す。これは、 $x = 0.1$ 及び 0.15 (舟体中心から下流側に $0.1m$ 及び $0.15m$)、 $z = -0.07$ (舟体上端から下に $0.07m$)位置での y 方向に対する主流方向流速分布の比較を示している。

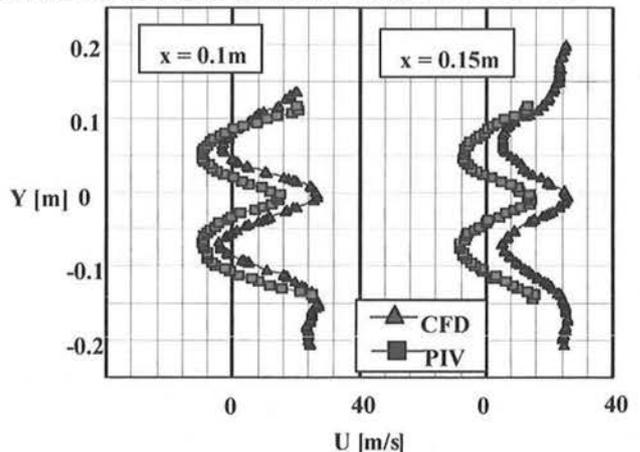


Fig.5 Comparison of velocity magnitude

計算結果は実験値とおおむね合致しており、今回の CFD 解析の結果は十分に信頼性のあるものであると言える。なお、若干の差が見られるのは数値拡散が原因として考えられる。

2.3 シンセティックジェットを適用した場合の CFD 解析

現用パンタグラフの舟体にシンセティックジェットを適用して流れ場制御を行った場合の効果を実験により検討した。

現用舟体の、(1)上部、(2)前縁上部、(3)前縁下部、(4)下部の境界条件を変更した箇所を設け、シンセティックジェットの噴出帯を配置し、それぞれの位置からシンセティックジェットを噴出した効果の比較を行った。それぞれの噴出位置は図 6 に示す。シンセティックジェットの噴出帯は約 $4mm$ の幅を持ち、スパン方向には中心からまくらぎ方向に左右約 $0.45m$ の長さで設置した。噴出方向は各面に垂直な方向とし、最大振幅 $10m/s$ の \sin 波を、速度流入境界条件として与えた。 \sin 波の周波数は $1000Hz$ を用いた。

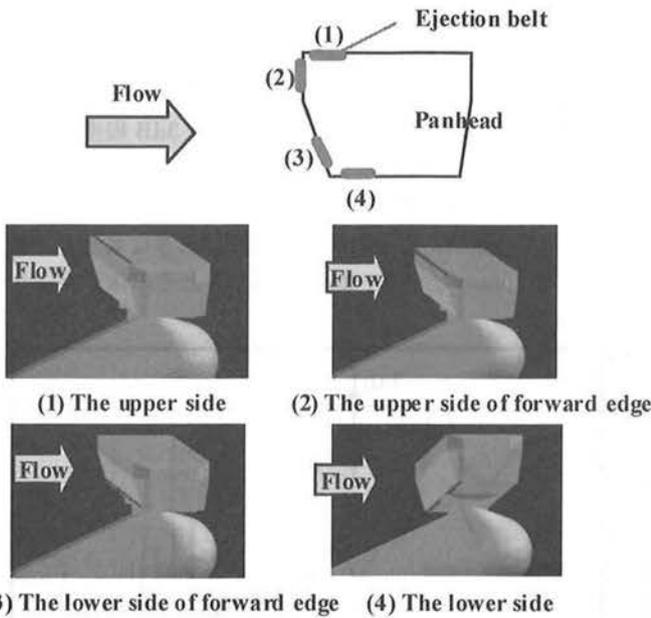


Fig.6 Location of boundary conditions using synthetic jet

2.4 シンセティックジェットを適用した場合の CFD 解析結果

CFD 解析結果を図 7~ 図 8 に示す。図 7 は舟体中心からスパン方向に 300mm 離れた x-z 断面においての、流速の RMS を表している。また、 $C_p = -1.0$ 一定の等値面で表現した渦構造を図 8 に示す。なお、舟体中心から 300mm 離れた位置で評価しているのは、流れ場への舟支えの影響を極力排除して評価したためである。

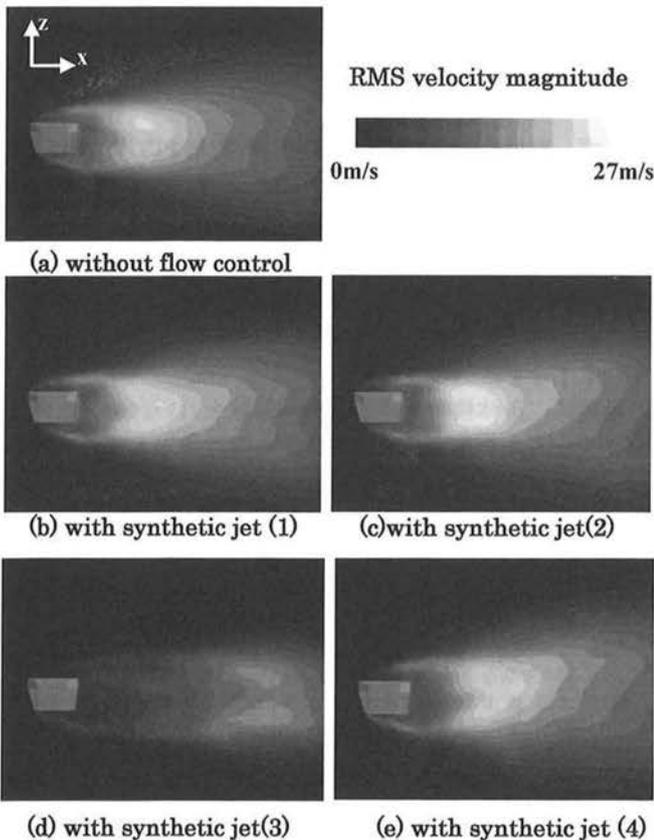


Fig.7 Comparison of rms velocity magnitude

これらの結果より、(3)の噴出帯よりシンセティックジェットを出力した場合、流速の RMS の最大値が小さくなっていることが分かる。また、その RMS が最大となる位置は流れ場制御なしの場合より舟体から遠ざかっていることから、空力音低減に大きな効果があると考えられる。渦構造についても、流れ場制御なしの場合に比べ、渦の崩壊が進んでいることが分かる。よって(3)の噴出帯よりシンセティックジェットを出力すれば空力音低減にかなり効果的であると考えられる。

(1), (2), (4)の噴出帯よりシンセティックジェットを出力した場合は、(3)の場合より効果が小さい。それでも、流速の RMS 値の最大値は制御なしの場合と比べると小さくなっている。また、流速の最大変動点は流れ場制御なしの場合より舟体近傍から若干遠ざかっている。しかしながら、その効果はいずれも微小であり、カルマン渦を大幅に低減するまでには至っていない。また、渦構造についても、流れ場制御なしの場合に比べて少しの差異のみが認められた。

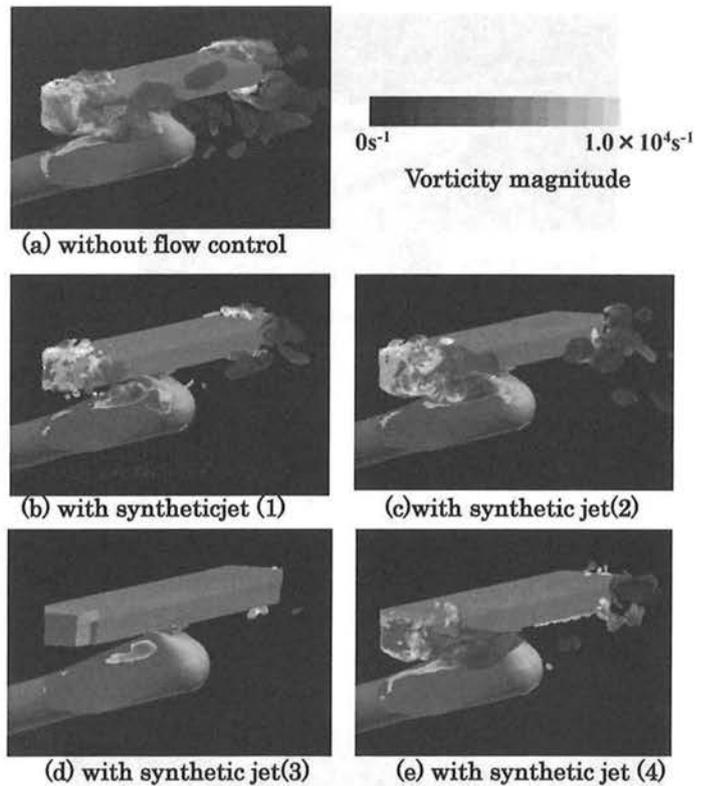


Fig.8 Isosurface of pressure coefficient ($C_p = -1.0$)

3. 現用舟体模型を用いた風洞試験

前章に述べた通り、CFD 解析によりシンセティックジェットを用いた流れ場制御の効果について確認出来た。そこで、実際にシンセティックジェットアクチュエータを試作し、舟体模型に搭載して風洞試験を行った。

3.1 シンセティックジェット搭載舟体模型

舟体模型に搭載するシンセティックジェットアクチュエ

ータを試作した。駆動力にはスピーカユニットを用いた。アクチュエータの概観図を図 9 に示す。

このシンセティックジェットアクチュエータを図 10 のように舟体模型内部に搭載し、舟体前面の噴出口よりシンセティックジェットを出力した。ただし、模型の構造上、模型中央部分にはシンセティックジェットを搭載できなかったため、噴出口未搭載部分にはエオルス音低減用の凹凸を設け、中央部から発生するカルマン渦の影響を緩和している⁽⁵⁾。

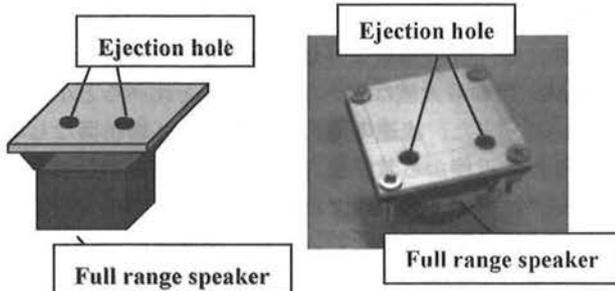


Fig.9 Synthetic jet actuator

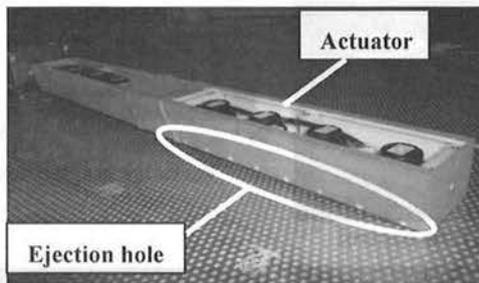


Fig.10 Panhead model

3.2 騒音測定試験

製作したシンセティックジェット搭載舟体模型の空力音特性について、精密騒音計で測定した。なお、シンセティックジェットは 300Hz で駆動させた。この周波数は CFD と異なるが、これは作成したアクチュエータが 1000Hz にて大きな流量を出力できないためである。図 11 に実験装置の外観図を示す。実験は(財)鉄道総合技術研究所所有の小型低騒音風洞にて、50km/h、100km/h、150km/h の各風速で行った。マイク 1 及びマイク 2 の精密騒音計で空力音を測定した。

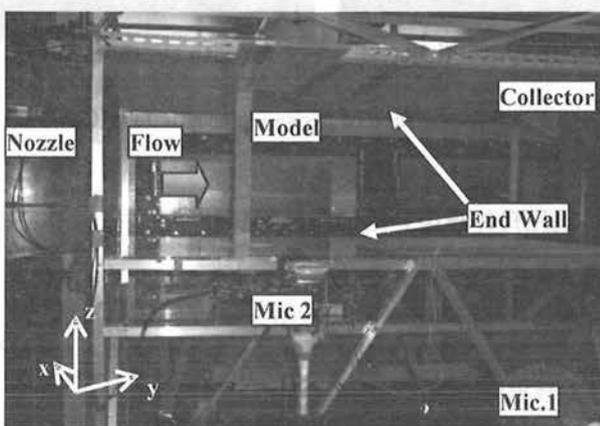


Fig.11 Experiment apparatus

3.3 騒音測定試験結果

図 12 に、風速 100km/h における空力音測定結果を示す。これより、シンセティックジェットを駆動させることによって 70Hz 付近に見られるエオルス音が 3dB 程度低減することを確認した。これにより、シンセティックジェットを用いた流れ場制御の有効性を確認できた。

しかし、300Hz 以上の周波数域では大きなピークが見られる。これはスピーカからの出力音とその倍音が主な原因である。

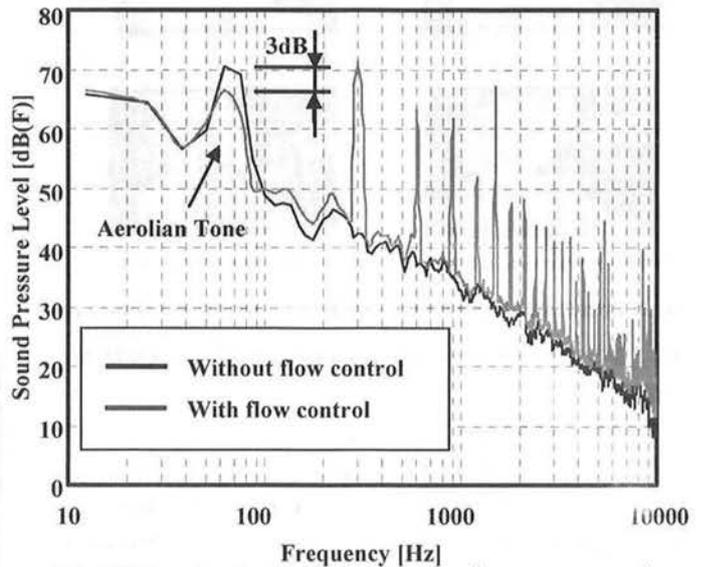


Fig.12 Result of noise measurement (Mic 2, 100km/h)

4. 結論

本研究ではシンセティックジェットを用いた流れ場の能動的制御をパンタグラフ舟体に適用して空力音低減を試みた。

まず、現用舟体の CFD を行い、結果を PIV の試験結果と比較した。結果、両者はよく一致しており、CFD の精度について実証することが出来た。

続いて、舟体へのシンセティックジェットの適用の効果を CFD 解析により検証し、シンセティックジェットの適用によって舟体後流領域流速 RMS 値が減少し、渦の強度が弱くなることを確認した。

最後に、舟体模型を用いた風洞試験を行い、シンセティックジェットの適用により舟体から発生するエオルス音のピーク値が減少することを確認した。

文 献

- (1) 中村嘉宏, "実験的アプローチに基づく空力特性最適化のための形状可変風洞模型に関する研究", 東京農工大学修士論文, 2008
- (2) 西村正治, "フローコントロールによる空力発生音低減技術", 日本流体力学会ながれ 20, 221-230, 2001
- (3) 池田 他 2 名, "噴流吹出しによるパンタグラフ揚力制御の基礎検討", Dynamics & Design Conference, 2004
- (4) 小河原 他 3 名, "スピーカ型シンセティックジェットによる浮き上がり火災の能動制御", 日本機械学会論文集. C 編 72(715), 901-908, 2006
- (5) 藤田 他 1 名, "二次元角柱・円柱から放出されるエオルス音の断面変化による制御", 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2001