

デルタ翼小板取り付けによる舟体空力音の低減

○【機】 光用 剛 【機】 池田 充 (公益財団法人鉄道総合技術研究所)

Reduction of Aerodynamic Noise Emitted from Panhead
by Applying Small Plate of Delta Wing Shape

○Takeshi MITSUMOJI Mitsuru IKEDA, (Railway Technical Research Institute)

Reduction of aerodynamic noise emitted from a panhead is a very important subject for environmental preservation and speed-up of Shinkansen trains. In this research, a study on aerodynamic noise reduction method by using interference between Karman vortices and longitudinal vortices was carried out. The wind tunnel test proved that aerodynamic noise can be reduced by applying a small plate of delta wing shape which generates longitudinal vortices.

キーワード：パンタグラフ、舟体、空力騒音、縦渦、デルタ翼

Key Words: Pantograph, Panhead, Aerodynamic Noise, Longitudinal Vortex, Delta Wing

1. はじめに

新幹線の沿線環境負荷低減や高速化にとって、沿線騒音、特に空力音の低減が重要な課題となっている。新幹線車両の構成要素のうち、パンタグラフは主要な空力音源のひとつとなっており、なかでも舟体と呼ばれる架線と摺動する部材(図1)についてはその寄与が大きいことがわかっている¹⁾。

舟体から生じる空力音は、主として舟体背後に生じるカルマン渦に起因するエオルス音と、乱流境界層により生じる広帯域音の複合した音であることが知られている。このうち、前者は卓越した狭帯域音であるため、その発生抑制は重要である。過去の研究²⁾によると、舟体断面形状の平滑化や貫通孔の設置により、カルマン渦の発生を抑制してエオルス音を低減できることが示されている。一方、パンタグラフ舟体については、集電性能の要件から、迎角やすり板摩耗による形状変化に対して揚力特性が過敏でないこと、追従性能の点から舟体質量が小さいこと、また、保守の面からは舟体構造が出来るだけ簡素であることなどが要求される。一般に、これら舟体に求められる要件と空力音を低減する方法とはトレードオフの関係にあり、現状では矩形を基本とした鈍頭形状の舟体が採用されている。

本研究では現状の舟体断面形状を大きく変えることなく、できるだけ簡単な方法で舟体からのエオルス音を低減する手法の検討を行った。筆者らが着目したのは、過去に行った風洞試験³⁾やパンタグラフまわりのCFD解析結果⁴⁾から得られた、舟体と舟支えの流れの干渉に関する以下のような知見である。図2に文献4)で得られたパンタグラフ舟体近傍における渦の様子(負圧の等値面)を示す。図2(a)は現用の舟体と舟支えの組み合わせであり、図2(b)は舟支えのみを改良し、舟体との距離を離れた形状のものである。舟支えを改良した図2(b)については、スパン方向にほぼ一様な構造をもったカルマン渦が舟体背後に生じていることがわかる。一方、現用品である図2(a)では、舟支え近傍においてカルマン渦の構造が崩れている様子がわかる。流れ場を注意深く観察すると、舟支えから生じた縦渦がカルマン渦と干渉して、カルマン渦の構造を崩壊させていることがわかった。したがって、カルマン渦の抑制には縦渦との干渉が有

効であるものと推察される。

以上のことから、本研究では舟体近傍に縦渦生成装置を取り付け、カルマン渦と縦渦との干渉を生じさせてエオルス音を低減する方法について検討した。縦渦を利用する場合、以下ののような利点もある。Powell⁵⁾の理論によると、空力音源の大きさは渦度ベクトルと流速ベクトルの外積の発散に比例する事が知られている。流速ベクトルに近い方向に軸を持つ縦渦を利用できれば、両者の外積はゼロとなるため、理論的には縦渦自体からの空力音発生はない事が予測される。縦渦生成装置としては、構造が単純なデルタ翼に着目した。デルタ翼は流れに対して迎角を生じた際に強い縦渦を誘起することが知られており、縦渦生成装置として機能する事が期待される。そこで、舟体底面に複数のデルタ翼(以下、デルタ翼板)を設置した供試体を用いて、風洞試験により空力音と作用力の評価試験を行った。

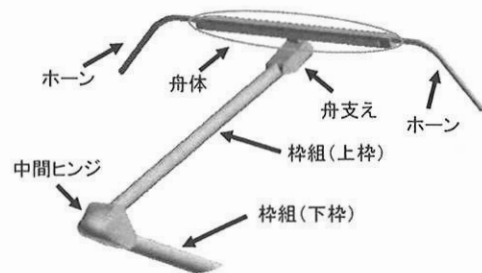


図1 パンタグラフ各部材の名称

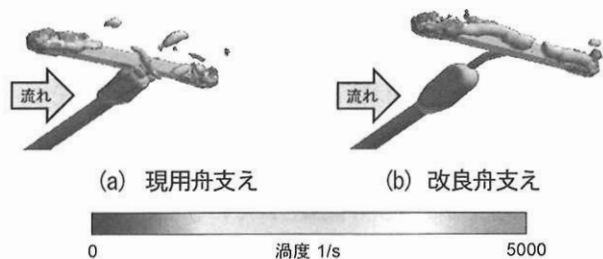


図2 CFD解析による舟体後流の渦の様子

2. 風洞試験概要

風洞試験は(公財)鉄道総合技術研究所の小型低騒音風洞において実施した。供試体として新幹線舟体の断面形状を模擬したスパン長600mmの柱状模型を用いた。開放型計測部(吹出口720mm×600mm、最大風速42m/s)に、流れの二次元性を確保するための端板を設置し、端板間に供試体を設置した。図3に本試験の様子を示す。

空力音測定マイクは供試体側方2m位置に設置した。この位置は舟体から見ると底面側下方2m位置に相当する。上部の端板は音響透過性を有しており、下部端板と同じ高さにマイクを設置することで、供試体からの直達音のみを收音出来るようになっている。また、供試体の上下を三分力計で支持することにより、作用力の測定も同時に実施した。

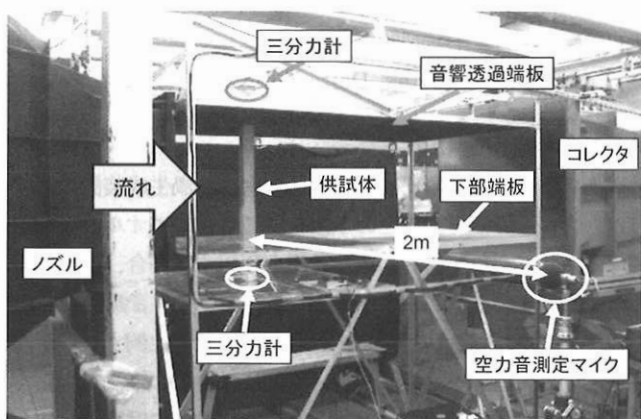


図3 風洞試験の様子

3. デルタ翼板取り付けによる空力音低減効果の確認

はじめに、デルタ翼板の取り付けにより舟体からの空力音がどの程度低減できるかを確認した。試験を実施した供試体条件を図4に示す。図4の上の図は舟体断面図、下の図は舟体底面図であり、灰色部分がデルタ翼板である。Case1はデルタ翼板なしの状態であり、以下、基準条件と呼ぶ。Case2は一边10mmの正三角形のデルタ翼が10mmピッチで並んだ形状、Case3は同じ寸法の正三角形デルタ翼が20mmピッチで並んだ形状である。Case4はデルタ翼との比較のため、一边10mmの正方形の矩形翼を20mmピッチで配置したものである。デルタ翼板の板厚は0.6mmであり、全スパン長にわたって設置した。デルタ翼板の板厚と全スパン長への設置は本章以降の全ての試験においても共通である。

風速40m/sにおける空力音の1/3オクターブバンド分析結果を図5に示す。Case2と基準条件(Case1)を比較すると、エオルス音ピークバンド(100Hzバンド)の低減効果はないが、その周辺の周波数帯については騒音レベルが減少している。その一方、3.15kHz以上の高周波数帯については騒音レベルが増加している。Case3と基準条件(Case1)との比較からは、エオルス音ピークバンドが3.4dB(A)低減されているうえ、その周辺の周波数帯についても騒音レベルが減少していることがわかる。一方、4kHz以上の高周波数帯についてはCase2と同様に騒音レベルが増加している。ここで、Case2とCase3を比較すると、エオルス音ピークバンドおよびその周辺の周波数帯に関しては、

Case3の方が騒音レベル低減量大きい。これはデルタ翼間の間隔をあける事で、デルタ翼から生じた縦渦同士が干渉しあうことなく流下し、カルマン渦との干渉効果が高まったのではないかと推察される。一方、高周波数帯での騒音レベルの増加量は、デルタ翼の少ないCase3の方が小さい。したがって、この広帯域音の原因は主としてデルタ翼から生じた縦渦からの乱れに起因すると考えられる。

最後に、Case3とCase4を比較すると、Case4はエオルス音ピークバンドおよびその周辺の周波数帯において騒音レベルがさらに低減されているが、2.5kHz付近を中心に鋭いピーク音が生じており、オーバーオール値(図5のOA欄)はCase3よりも大きな値となっている。このことから、矩形翼の場合はデルタ翼と同じように、縦渦とカルマン渦との干渉と思われる空力音低減効果はあるものの、翼自体から顕著なピーク音が生じることがわかった。このピーク音は翼前縁から生じた横渦に起因するものと思われる。以上の事から、舟体の空力音低減にはCase3が効果的な形状であることがわかる。

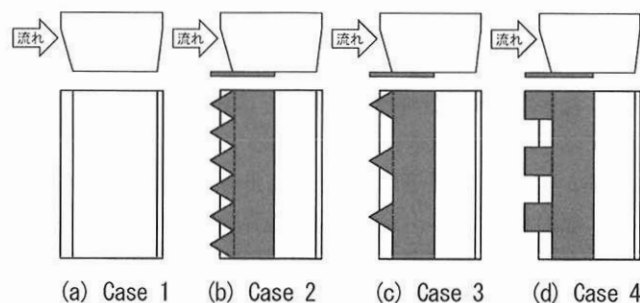


図4 デルタ翼板形状と舟体への取り付け状態(その1)

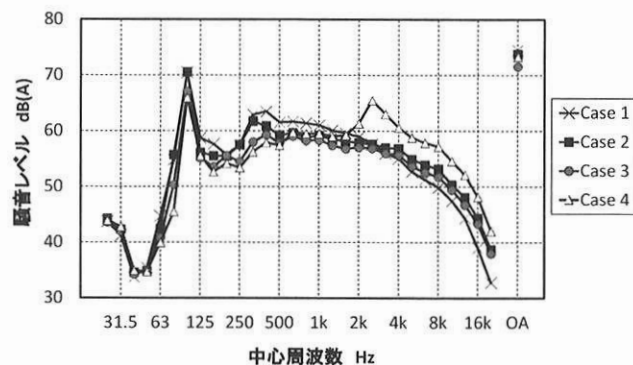


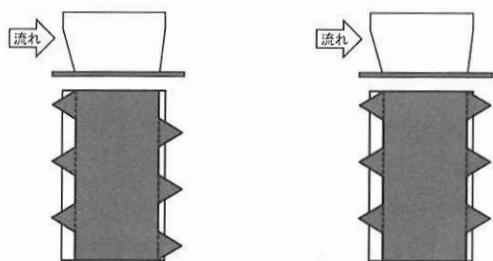
図5 空力音の1/3オクターブバンド分析結果(その1)

4. 双方向走行を想定したデルタ翼板形状

前章ではデルタ翼板を上流側のみに取り付けた場合の空力音特性について調査した。しかし、鉄道車両は双方向走行を行うため、デルタ翼板は下流側にも取り付ける必要がある。そこで、図6に示す形状の空力音特性を調査した。Case5、Case6はCase3のデルタ翼板形状を基に、下流側にもデルタ翼板を取り付けたものであり、流れに対してCase5では前後非対称、Case6では前後対称な形状となっている。

風速40m/sにおける空力音測定結果を基準条件(Case1)、Case3の結果とあわせて図7に示す。なお、3章と本章以降とは試験実施時期が異なるため、基準条件(Case1)とCase3の測

定を改めて実施した結果を示している。図7より、エオルス音のピークバンドレベルはCase6<Case5<Case3の順に小さい。OA値もこの順に小さく、本試験結果からはデルタ翼板を前後対称に配置したCase6の形状が空力音低減効果が大きいことがわかった。下流側デルタ翼板の作用であるが、高周波数帯の広帯域音については影響を与えていないことから、縦渦の強度には影響せずに上流側で発生した縦渦を下流側へと整流し、カルマン渦との干渉作用を促進させる、あるいは剥離せん断層そのものを整流する働きがあるのではないかと推察される。なお、下流側へもデルタ翼板を取り付けた方が大きな空力音低減効果が得られるという特性は、双方向走行を行う鉄道車両にとって望ましい性質といえる。



(a) Case 5 (前後非対称) (b) Case 6 (前後対称)

図6 デルタ翼板形状と舟体への取り付け状態 (その2)

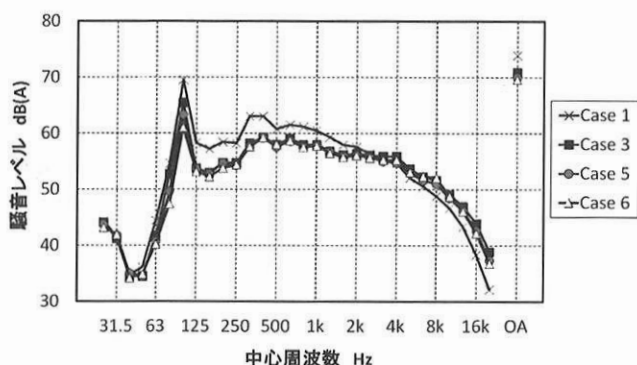


図7 空力音の1/3オクターブバンド分析結果 (その2)

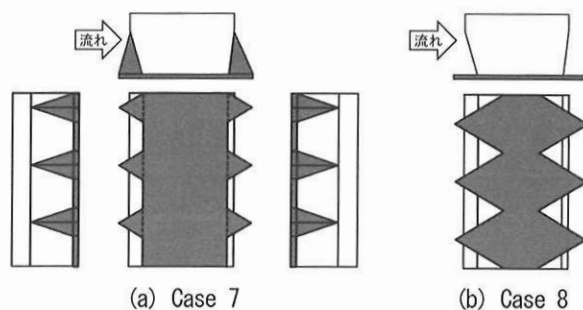
5. 空力音低減効果をさらに得るためのデルタ翼板形状の検討

前章までの議論により、Case6の形状のデルタ翼板が空力音低減効果が大きい事がわかった。本章ではCase6からさらに空力音低減効果を得るための方法として、図8に示す二つの形状を検討した。Case7はCase6の舟体前後面に三角錐状部材を取り付けた形状であり、よどみ点から舟体底面のデルタ翼板に向かって流れを整流することを狙っている。Case8はCase6のデルタ翼間に、一辺10mmの正三角形の切り込みを設けたものである。これは、3章の議論でデルタ翼の間隔が重要な役割を担っている事を参考に、デルタ翼間の形状変更を試みたものである。

風速40m/sにおける空力音測定結果を図9に示す。Case7とCase6を比較すると、Case7はエオルス音ピークバンドレベルが大きく低減している一方、500Hzから2kHzの周波数帯では騒音レベルが増加している。それ以上の高周波数帯については大きな違いはないことから、三角錐の追加によって縦渦の強度は変化していないと考えられる。したがって、三角錐の追加による

スパン方向の舟体断面形状変化によって、スパン方向に構造をもったカルマン渦が発生しにくくなり、エオルス音が低減したのではないかと推察される。なお、500Hzから2kHzの騒音レベルの増加については、三角錐部から生じた空力音であると考えられる。

次に、Case8とCase6、Case7を比較する。Case8についても、Case6と比べてエオルス音ピークバンドレベルが大きく減少しているが、Case7で見られたような500Hzから2kHzの周波数帯での騒音レベルの増加は見られない。一方、縦渦が主たる空力音減であると考えられる2kHz以上の高周波数帯ではCase6に比べて若干の増加がみられる。以上の事から、Case8については、切り込みの追加によって縦渦の強度が増して、大きなエオルス音低減効果が得られたものと推察される。最後に、図9の条件のOA値をグラフにしたものを図10に示す。図より、本試験で最も空力音低減効果が得られた形状はCase8であり、基準条件(Case1)に対して4.9dB(A)騒音レベルが低減している。



(a) Case 7 (b) Case 8

図8 デルタ翼板形状と舟体への取り付け状態 (その3)

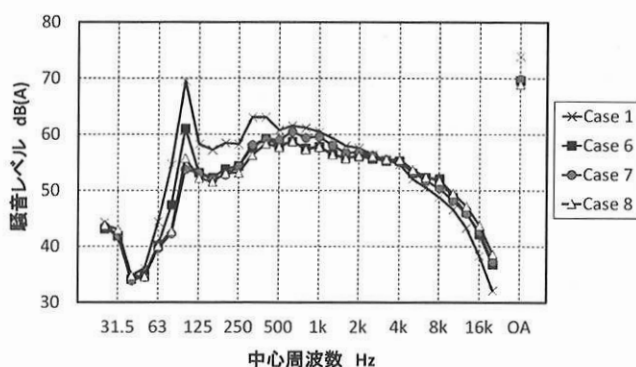


図9 空力音の1/3オクターブバンド分析結果 (その3)

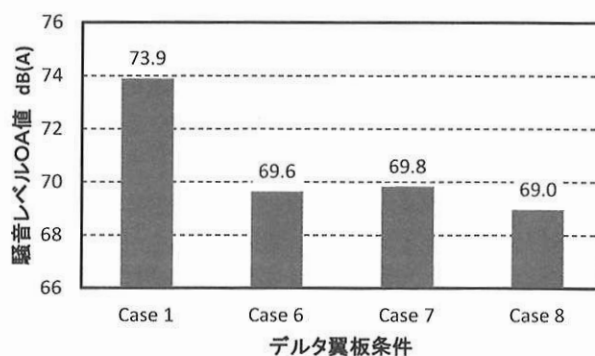


図10 騒音レベルOA値の比較 (風速40m/s)

本試験結果は舟体単体模型の風速40m/sにおける試験結果である。デルタ翼板を実機パンタグラフに適用し、風速80m/s程度の風速で試験した場合の空力音低減効果については別途確認する必要がある。なお、風速80m/s程度の高風速時にはエオルス音のピーク周波数がA特性補正値の大きな高周波数側へと移るため、本試験と同じようにデルタ翼板が機能した場合には、大きな空力音低減効果が得られるものと考えられる。

6. デルタ翼板取り付け時の舟体揚力特性

空力音測定試験において顕著な空力音低減効果が得られたCase6、Case7、Case8について、基準条件 (Case1) との揚力特性の比較を行った。図11に風速40m/sにおける揚力測定結果を示す。図11では横軸に舟体迎角、縦軸に揚力平均値をとりプロットしている。迎角0度の揚力平均値に着目すると、基準条件に比べてデルタ翼板を取り付けた場合のほうが揚力平均値が減少している。これは主としてデルタ翼板から生じた縦渦によって、舟体底面側の静圧が低下したこと、デルタ翼板上面でよどみ圧を生じたことなどが原因であると考えられる。

次に、迎角-3度から+3度までの揚力変化量に着目すると、基準条件が約10N、他の条件が約15Nである。したがって、迎角変化に対する揚力の変化量が若干増加するものの、デルタ翼板取り付けによって揚力の迎角依存性が著しく大きくなることはないと言える。

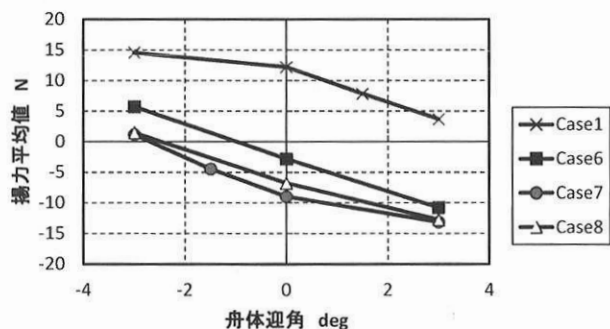
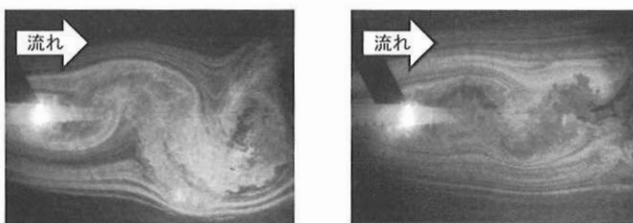


図11 デルタ翼板取り付け時の揚力特性 (風速40m/s)

7. デルタ翼板取り付け時の流れ場の変化

最後に、基準条件 (Case1) と空力音低減効果の大きかったCase8について、舟体後流の流れ場を可視化試験によって確認した。試験風速は可視化用煙が拡散しない程度の風速としたため、風速5m/sである。図12に可視化試験で観測された流れ場の写真を示す。Case8についてはデルタ翼間の切り込み部断面の結果である。図12より、デルタ翼板取り付けにより、舟体後流の剥離領域の幅が狭まっていることがわかる。カルマン渦の流れ方向の一周期分の長さはほぼ変化していないことから、カルマン渦の放出周期は変わらずに、渦の巻き込みが弱まったものと推察される。このことは、エオルス音の周波数が変わらずにピークレベルのみが減少するという空力音測定結果の特徴と符合するものである。



(a) Case1

(b) Case8

図12 流れ場の可視化結果 (風速5m/s)

8. まとめ

本論文では縦渦とカルマン渦とを干渉させて空力音を低減する手法について検討した。縦渦生成装置としてデルタ翼板を舟体底面に取り付けた場合の空力音特性、揚力特性、流れ場の変化について風洞試験による確認を行った。その結果、次のことがわかった。

- (1) デルタ翼板取り付けにより、舟体からのエオルス音およびその周辺の周波数帯の空力音を低減することができる。
- (2) デルタ翼板は前後両側に取り付けた場合に大きな空力音低減効果が得られ、双方向走行を行う鉄道車両にとって望ましい性質を有している。
- (3) デルタ翼板に対して、デルタ翼間に切り込みを設けることで、より大きな空力音低減効果が得られる。
- (4) デルタ翼板取り付けにより、揚力平均値は減少するものの、揚力の迎角依存性が著しく大きくなることはない。
- (5) デルタ翼板取り付けにより、カルマン渦の放出周期は変化せずに、渦の巻き込みが弱まることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 山崎、長倉 ほか：2次元マイクロホンを用いたパンタグラフの音源探査、鉄道総研報告、Vol. 17、No. 11、pp. 1-6、2003. 11
- 2) 吉田、鈴木 ほか：揚力特性および低騒音性を考慮した舟体形状最適化の基礎検討、鉄道総研報告、Vol. 19、No. 9、pp. 23-28、2005. 9
- 3) 池田、小山 ほか：舟体と舟支えの空力干渉緩和によるパンタグラフ空力音の低減、鉄道総研報告、Vol. 20、No. 11、pp. 5-11、2006. 11
- 4) 光用、池田 ほか：数値流体解析による舟体・枠組間の空力干渉の検討、鉄道総研報告、pp. 21-26、2009. 2
- 5) A. Powell: Theory of vortex sound, J. Acoustic. Soc. Am. 36, (1964) 177-195