

新幹線高速試験電車 FASTECH360における 沿線環境対策



栗田 健*



水島 文夫*

当社では360km/hを目標速度として新幹線高速化のための研究を行っている。その中で新幹線高速試験電車FASTECH360を開発し、2005年6月から2009年6月まで約5年間走行試験を実施した。FASTECH360は沿線騒音、トンネル微気圧波などの沿線環境に配慮し、新たな低騒音化技術としては、新型低騒音パンタグラフ、パンタグラフ遮音板、車体下部吸音パネル、全周平滑ホクなどを装備し、トンネル微気圧波対策としては、先頭部長さを16mとした2種類の先頭形状を有する。走行試験開始後もスパイラルアレイマイクロホンによる車両音源分布測定結果などをもとに改良を重ね、騒音性能としては、FASTECH360ZとFASTECH360Sの併結走行では、現行のE3系とE2系の併結運転時に比べて4~5dBの騒音低減が実現でき、目標とする360km/hには届かなかったものの、現行営業車275km/h走行時の騒音レベルと同等となる速度（現状非悪化速度）は330km/h程度となった。トンネル微気圧波性能については、FASTECH360Sの2種類の先頭形状の比較の結果、アローラインの方がストリームラインよりもトンネル微気圧波が小さいことを確認した。またFASTECH360S（アローライン、先頭部長さ16m）とFASTECH360Z（先頭部長さ13m）のトンネル微気圧波性能がほぼ同等であることを確認した。

●キーワード：新幹線、騒音、マイクロホンアレイ、パンタグラフ、空力音

1. はじめに

新幹線の高速化における大きな課題の一つは騒音・トンネル微気圧波などの抑制である。当社では、目標速度を360km/hとして高速試験車2編成（FASTECH360S（新幹線専用車、8両編成）およびFASTECH360Z（新幹線・在来線直通車、6両編成））を開発し、2005年6月から2009年6月まで（FASTECH360Zは2006年4月から2008年9月まで）東北新幹線（仙台～北上間）を中心に約5年間にわたり走行試験を行った。本稿ではFASTECH360（FASTECH360S、FASTECH360Zの総称）における騒音対策およびトンネル微気圧波対策について、走行試験結果を含めて述べる。

2. 騒音の抑制

2.1 営業車両による360km/h走行試験

騒音の低減目標レベルを確認するために、FASTECH360の走行試験に先立って、上越新幹線（浦佐～新潟間）で現行営業車両（E2系1000番代）を用いた360km/h試験走行を実施した。新幹線走行時の騒音源は、図1に示すように、その発生源別に集電系音（架線・パンタグラフ系から発生する音）、先頭部空力音、車両上部空力音（車間部などの空力音）、車両下部音（転動音、台車周りの空力音

など）、構造物音（高架構造物からの振動放射音）の5つに分類することができる。この分類にしたがって、E2系1000番代の275km/hおよび360km/h走行時の測定データと低速（160km/h）走行時の測定データを用いて、長倉¹⁾および北川²⁾の新幹線騒音の音源解析法の考え方にに基づき、25m騒音の音源分離解析を行った。その結果を図2に示す。図2から、E2系1000番代が275km/hから360km/hへ速度向上した場合には、全体騒音が6dB以上増加し、特に集電系音、次いで車両下部音の寄与が大きくなるのがわかる。したがって、360km/h運転のためには大幅な集電系音低減と車両下部音低減が必須であり、トータル6dB以上の低減が必要であることが確認できた。



図1 新幹線走行時の騒音源

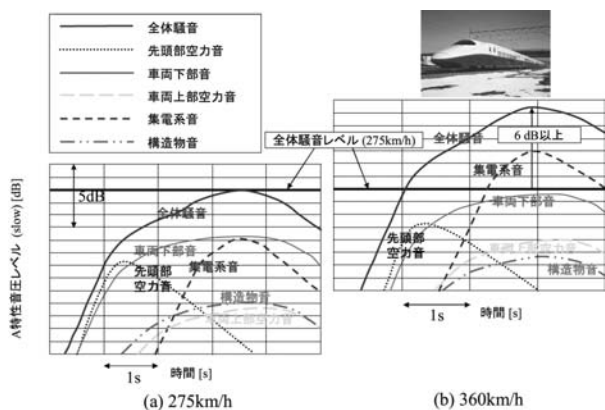


図2 25m騒音の音源解析結果 (E2系1000番代)

2.2 FASTECH360 における騒音対策概要

本節では FASTECH360S を例に、特に E2 系 1000 番代において全体騒音への寄与の大きい集電系音対策および車両下部音対策を中心に、騒音対策の概要について述べる。なお FASTECH360Z についても FASTECH360S とほぼ同様の対策をとっているが、在来線車両限界内に収めるためにパンタグラフ遮音板を可動式にするなどの変更を加えている。

2.2.1 集電系音

FASTECH360S では、PS207 型パンタグラフ (図 3、E2 系 1000 番代搭載パンタグラフ) の改良型である「くの字」主枠型パンタグラフ (図 4 (a)) と、さらに中間ヒンジをなくした一本主枠型パンタグラフ (図 4 (b)) の 2 種類のパンタグラフ^{3) 4)} を搭載している。これらは PS207 型パンタグラフで最も強い音源となっていた台枠風防カバー間の主枠のつけ根付近の形状を改良し、低騒音化を実現したパンタグラフである。

またパンタグラフは 1 編成あたり 2 基搭載しているが、そのうち 1 基を折りたたんでパンタグラフ遮音板で遮音している。これにより受音点から折りたたんだパンタグラフを見通せなくなることによる回折減衰効果が得られるため、さらに集電系音低減が可能となる。当初搭載したパンタグラフ遮音板は、平板よりも大きな回折減衰効果を得ることをねらって、Z 形の断面形状 (図 5) とした^{3) 5)}。

従来は 1 編成あたり 2 基のパンタグラフ (併結走行時は合計 4 基) で集電し、離線によるアークの発生を抑えていた

(編成内の 2 基のパンタグラフは高压母線で引き通されているが、併結走行時の編成間は引き通されていない)。しかし FASTECH360 では 1 編成 1 パンタグラフ集電走行 (図 6、走行方向に対して編成後方側となるパンタグラフを使用) を前提としているため、従来の PS207 よりも集電性能を大幅に向上させ、離線を極力抑える必要がある。そのため、多分割すり板³⁾ (図 7) を新規開発した。10 分割した主すり板をシリコンゴム板上に配置することで、すり板間を柔軟に結合し、可動質量を低減することにより架線への追従性を高めていることが特徴である。これにより高張力架線との組合せで良好な集電性能が得られ、1 編成 1 パンタグラフ集電による集電系音低減が可能となった。



図3 PS207型パンタグラフ



(a) 「くの字」主枠型 (b) 一本主枠型

図4 新型低騒音パンタグラフ



図5 Z形パンタグラフ遮音板

2.2.2 車両下部音

PS207 型パンタグラフと低騒音碍子を採用している E2 系では集電系音が低減した結果、防音壁に隠れている車両下部音の寄与が相対的に大きくなってきていることから、全体騒

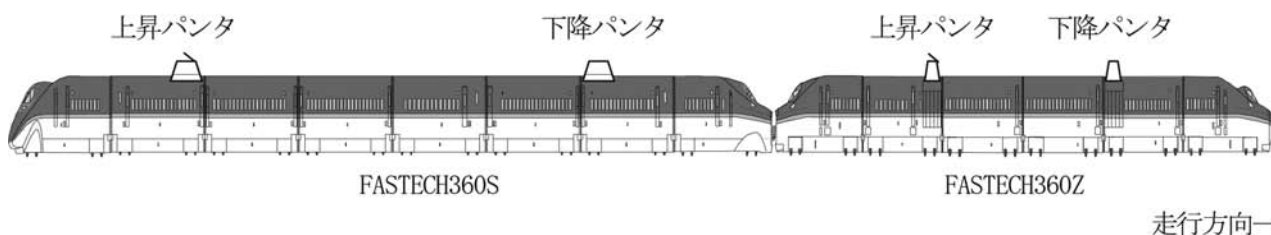


図6 使用パンタグラフ (FASTECH360Z・FASTECH360S 下り併結走行時)

音を低減するためには下部音の対策も重要な要素となる。

FASTECH360Sでは床下機器下面高さまでの台車側面カバーを装備し、さらに車両・防音壁間の多重反射過程において下部音を低減させるために、台車側面カバーを含めた車体側スカートおよび床下フサギ板などの車体下部に吸音パネル¹⁾を適用した(図8)。

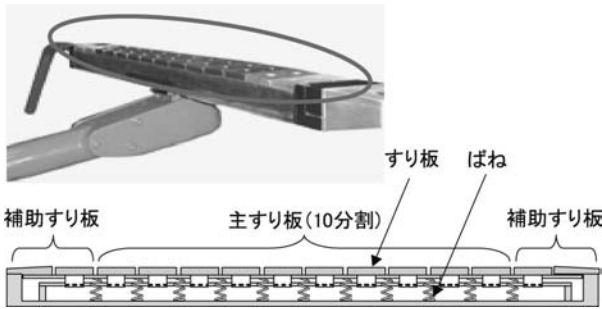


図7 多分割すり板の構造



(a) 車体側スカート (b) 床下フサギ板
図8 車体下部吸音

2.2.3 先頭部空力音

先頭台車部、乗務員ドア手すり部、スノーブラウからの空力騒音が主体であり、これらの対策として台車側面カバー、乗務員ドア手すり部の平滑化、スノーブラウカバー(図9)などを採用している。

2.2.4 車両上部空力音

車間部については全周平滑ホロ(図10)を装備し、その他の側引戸、窓などについても車体外板と平滑になるようにし

ている。



図9 スノーブラウカバー



図10 全周平滑ホロ

2.3 走行試験開始後の騒音低減の取組み

2.3.1 音源の特定および対策の検討

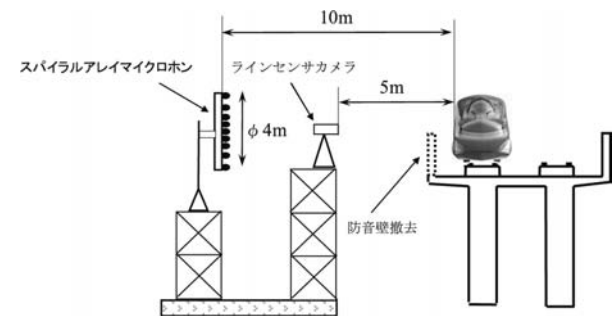


図11 スパイラルアレイマイクロホンによる測定

FASTECH360Sのスパイラルアレイマイクロホン⁶⁾による測定概要図および測定結果を図11、図12に示す。図12(a)は走行試験初期の測定結果である。パンタグラフ遮音板後端から大きな音が発生していることがわかる。また一部の車輪、全周ホロからの発生音も大きい。そこでこれらの音源対策について検討を行った。

パンタグラフ遮音板の音源については、特に後端からの空力音は流れのはく離により生ずる渦によるものと考えられ、遮音板の高さ方向の渦の相関長さを短くするため、ボルテックスジェネレータ(かまぼこ形の微小突起物)を付加する対策(図13)および過去のE2系1000番代の走行試験⁷⁾で実績の

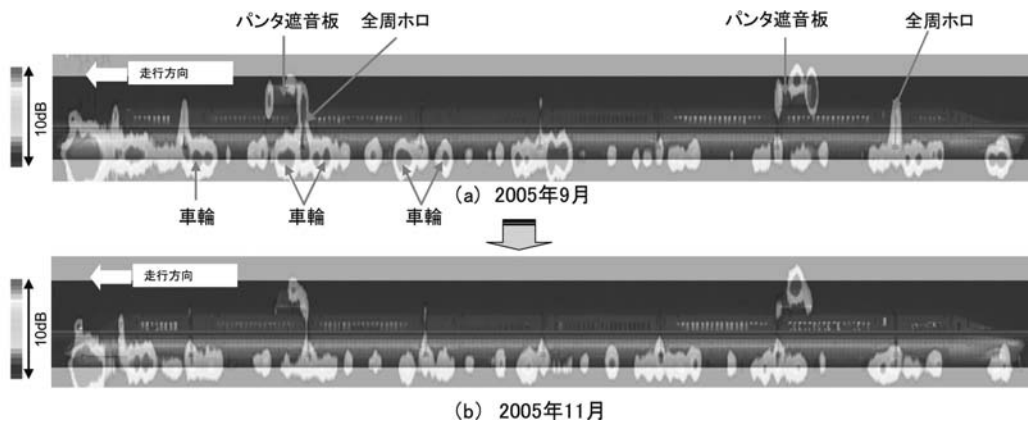


図12 FASTECH360Sの車両音源分布測定結果(速度約340km/h、測定のため防音壁撤去)

ある、遮音板前後端を側面からみて45度傾斜とした平板形断面のパンタグラフ遮音板（図14、平板形パンタグラフ遮音板（45度タイプ））について順に走行試験を実施した。その結果、図12（b）に示すとおり平板形パンタグラフ遮音板（45度タイプ）を使用した場合の方が良い結果が得られ、遮音板から発生する音を大幅に低減できることがわかった。



図13 Z形パンタグラフ遮音板へのボルテックスジェネレータ付加



図14 平板形パンタグラフ遮音板（45度タイプ）

車輪（走行方向に向かって前方の車輪）からの発生音については、車輪側面のブレーキディスク裏面の冷却フィンの通風路を塞ぐ走行試験を行い、図12（b）のように他の車輪並みに低減できたことから、冷却フィンの空力音が原因であることがわかった。また全周ホロについては、ホロ板間の隙間に空気が流れ込むと大きな音が発生することがわかり、隙間を塞ぐことにより、図12（b）のように低減可能であることがわかった。

2.3.2 25m 騒音

図15、図16にそれぞれ25m騒音測定概要図および無指向性マイクロホン（動特性 SLOW）による測定結果を示す。図16からFASTECH360S（単独走行時）は、2.3.1項に述べた対策を行うことにより、2005年11月時点で現行営業車275km/h走行時の騒音レベルと同等となる速度（現状非悪化速度）を320km/h程度にまで改善できる見通しを得ることができた。

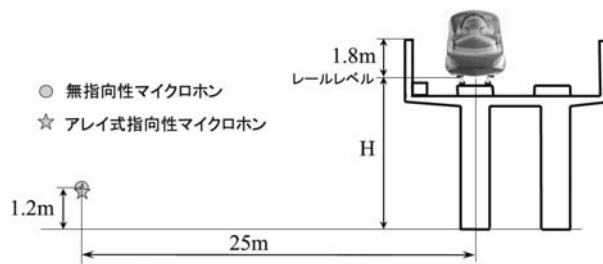
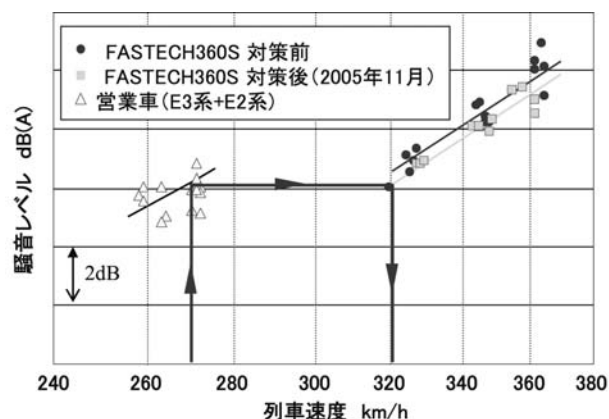
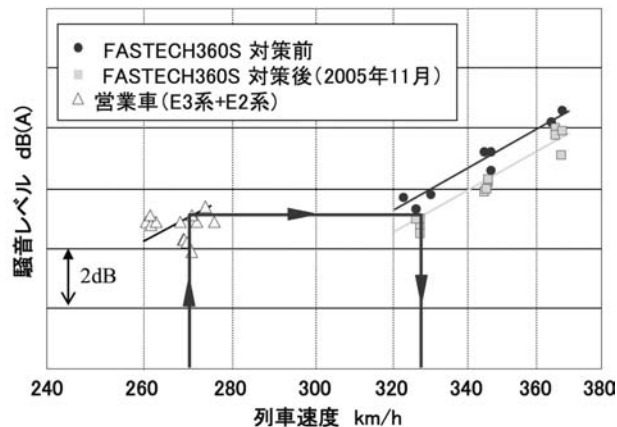


図15 25m騒音測定（東北新幹線374k300付近（H=9.0m）および387k750付近（H=9.4m））



(a) 25m騒音（東北新幹線374k300付近）



(b) 25m騒音（東北新幹線387k750付近）

図16 25m騒音測定結果（2005年11月時点）

2.3.3 車両の改良その他

2.3.1項の対策の検討結果をふまえ、FASTECH360Sの各騒音対策の改良を行った。パンタグラフ遮音板については、2006年3月に1/10模型風洞試験を行い、2006年7月～9月には遮音板自身の空力音がさらに小さい平板形パンタグラフ遮音板（30度タイプ）（図17）に変更した。さらに2006年8月にはパンタグラフは2基とも低騒音性に優れる一本主棒型パンタグラフに統一した。また2006年5月から9月にかけて、車輪側面のブレーキディスク裏面の冷却フィン形状の改良（図18、ディスク内周側にリブをつけて、フィン内部への空気の流入を減らした）、全周ホロの改良（図19、3枚の

ホロ板のうち中央の板をゴムに変え、両端の2枚のホロ板をゴムでつなぎ、空気の流れを解消した)を実施した。



図17 平板形パンタグラフ遮音板 (30度タイプ)



図18 改良ブレーキディスク



図19 改良全周平滑ホロ

2006年4月に走行試験を開始したFASTECH360Zにおいても、可動式パンタグラフ遮音板の前後端部を直角から30度傾斜に形状変更(図20)するなど、FASTECH360Sと同様の改良を行った。

また図16(a)と(b)を比較すると、(b)では対策効果が1dB程度なのに対し(a)では0.5dB程度であった。374k300付近における車両対策の効果が比較的小さいことから、構造物音の影響によるものと推定し、その低減のため、374k300付近には、2006年7月に前後100m(計200m)区間にわたり、低ばね定数軌道パッド(図21、静的ばね定数は通常の軌道パッドの半分の30MN/m)への交換を行った。



図20 可動式パンタグラフ遮音板 (FASTECH360Z)

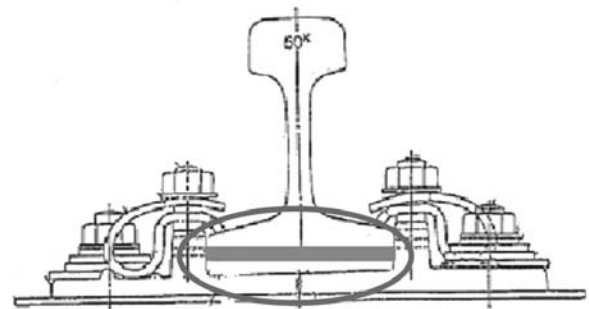


図21 軌道パッド断面図

2.4 FASTECH360の騒音性能

アレイ式指向性マイクロホン(時定数35ms)によるパンタグラフピーク音およびパンタグラフのない車間部のピーク音(東北新幹線387k750付近)(2006年8月~11月測定)を図22および図23に示す。また無指向性マイクロホン(動特性SLOW)による測定結果(東北新幹線374k300付近および387k750付近)(2006年8月~11月測定)を図24に示す。図22から、新型低騒音パンタグラフと平板形パンタグラフ遮音板(30度タイプ)を組み合わせさせたFASTECH360のパンタグラフピーク音はE2系に比べて2dB以上、E3系との比較では5dB以上低減していることがわかる。また下降パンタグラフについてはパンタグラフ遮音板に隠れる部分が増える効果により、集電パンタグラフよりもピーク音レベルが小さくなることが確認できた。

図23からFASTECH360の車間ピーク音はE2系に比べて1~2dB、E3系との比較では4dB程度低減していることがわかる。これは全周平滑ホロ、車体下部吸音などによる騒音低減効果であり、特に当社管内の新幹線はスラブ軌道であるため車体下部吸音の効果が大きかったものと考えられる。

図24から25m騒音については、2.3.3項に述べた車両改良により、FASTECH360ZとFASTECH360Sの併結走行では、現行のE3系とE2系の併結運転時に比べて4~5dBの騒音低減が実現できた。目標とする360km/hには届かなかったものの、現状非悪化速度は330km/h程度、

FASTECH360S 単独走行では 340 km/h 程度となった。この差は FASTECH360Z は在来線車両限界内に収める必要があることから、FASTECH360S に比べて各騒音対策の効果が小さいためである。

また、図 16 と図 24 を比較すると、374k300 付近の方は低ばね定数軌道パッドを入れたことにより構造物音が低減し、387k750 付近よりもむしろ良い結果となっている。このことから FASTECH360 の騒音性能を考えると、構造物音の全体騒音への寄与は無視できないレベルにあるといえる。

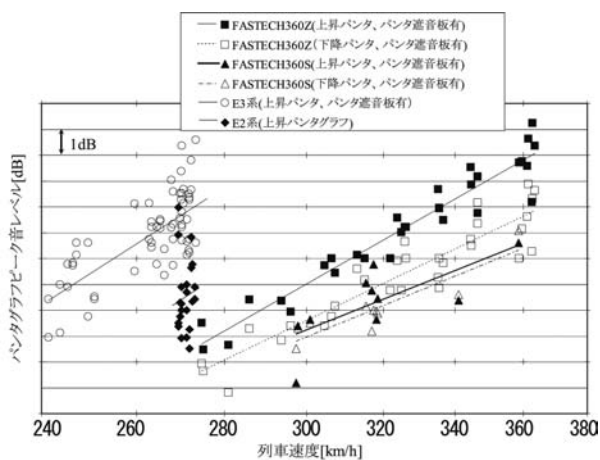


図22 パンタグラフピーク音

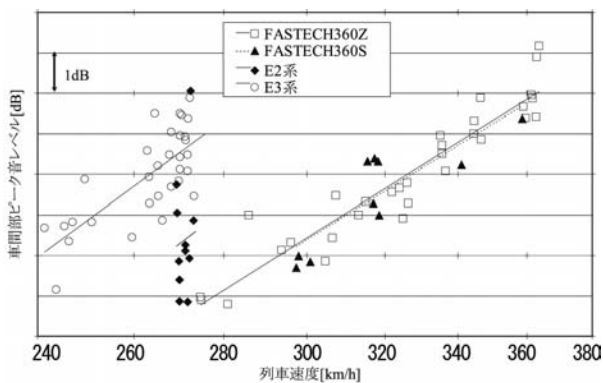
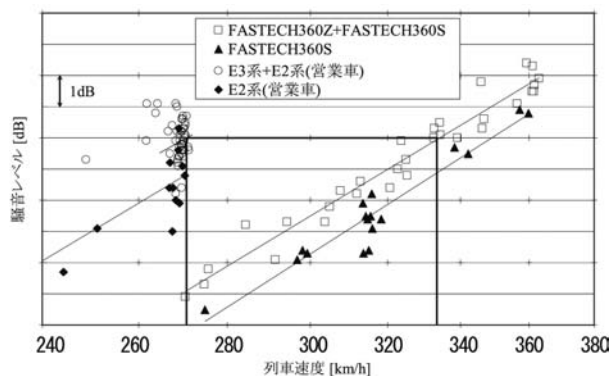


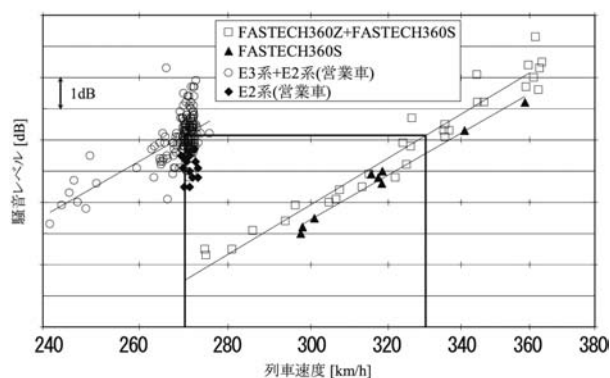
図23 車間ピーク音

2.5 FASTECH360S の音源分離結果

2.1 節と同様、長倉¹⁾ および北川²⁾ の新幹線騒音の音源解析法の考え方にに基づき、FASTECH360S の 360km/h 走行時の 25m 騒音測定結果について音源分離を行った結果を図 25 に示す。図 25 の (a) と (b) との比較から、E2 系 1000 番代 360km/h 走行時に比べて全体騒音については 4dB 強低減している、また全体騒音に対する音源別寄与度をみると、集電系音の寄与は約 7dB、車両下部音の寄与は約 1dB 低減していることがわかる。



(a) 25m騒音 (東北新幹線374k300付近)



(b) 25m騒音 (東北新幹線387k750付近)

図24 25m騒音 (2006年8月~11月測定)

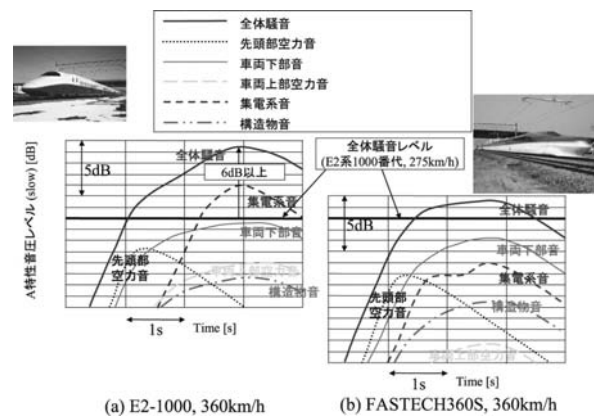


図25 25m騒音の音源解析結果 (E2系1000番代 360km/hおよびFASTECH360S 360km/h)

2.6 パンタグラフの集電性能

2.2.1 項に述べたとおり、パンタグラフについては従来 2 パンタグラフ走行していたが、FASTECH360 では 1 パンタグラフ走行 (FASTECH360S と FASTECH360Z の併結運転時にはそれぞれの編成内で 1 パンタグラフ使用、図 6) となるため、これまで以上の高品質の集電性能が求められる。FASTECH360S の離線率測定結果 (図 26) から 2 種類の低騒音パンタグラフのいずれにおいても平均離線率は 1% 以下であり、非常に良好な集電性能を有することがわかった。ま

た併結運転時には単独走行時に比べて離線率が2～3%程度にまで悪化するが、問題ないレベルであった。ただし、併結運転時には使用パンタグラフの間隔によっては離線率がさらに悪化した場合もあったことから、営業車両設計においては併結運転時のパンタグラフ間隔にも留意する必要があることがわかった。

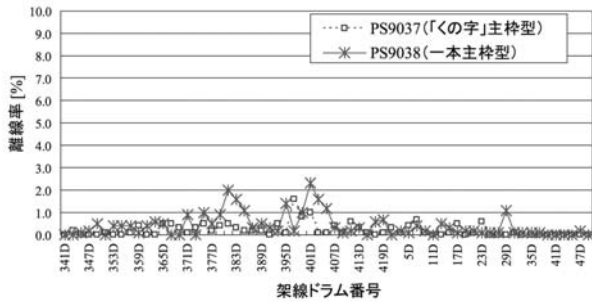


図26 新型低騒音パンタグラフの離線率 (360km/h)

2.7 2章のまとめ

- (1) FASTECH360ZとFASTECH360Sの併結運転時の騒音レベルが現行営業車275km/h走行時の騒音レベルと同等となる速度(現状非悪化速度)は330km/h程度、FASTECH360S単独走行では340km/h程度となった。
- (2) 新型低騒音パンタグラフと平板形パンタグラフ遮音板(30度タイプ)との組み合わせで、パンタグラフピーク音はE2系に比べて2dB以上、E3系との比較では5dB以上低減させることができた。
- (3) 全周平滑ホロ、車体下部吸音などにより車間ピーク音をE2系に比べて1～2dB、E3系との比較では4dB程度低減させることができた。
- (4) FASTECH360Sの360km/h走行時の全体騒音に対する音源別寄与度については、E2系1000番代360km/h走行時と比べて、集電系音は約7dB、車両下部音は約1dB低減したと推定される。
- (5) パンタグラフの集電性能については、おおむね良好であった。ただし、営業車両設計においては併結運転時のパンタグラフ間隔に留意する必要がある。

系最適開口部パターン)の付いたトンネルに対して先頭部の断面積変化の最適化を行った結果をもとに設計したストリームライン(図27(a))である。もう一つは緩衝工のないトンネルに対して求めた最適化断面積変化をもとに設計したアローライン(図27(b))である。FASTECH360Sについてはこの2種類の先頭形状を製作し、比較試験を行うこととした。またFASTECH360Zの先頭形状についてはアローライン形状をベースに先頭部長さが異なる(13mおよび16m)2種類の先頭形状とした。FASTECH360SとFASTECH360Zの先頭部断面積変化およびシミュレーションにより得られた最適断面積変化を図28に示す。各車それぞれ最終的な形状は、特高压分割併合装置、スノープラウ、台車、運転席などの寸法制約により、シミュレーションにより得られた断面積変化と若干異なるラインとなり、在来線車両断面の制約を受けるFASTECH360Zの方が乖離は大きい。



(a) 1号車(ストリームライン)



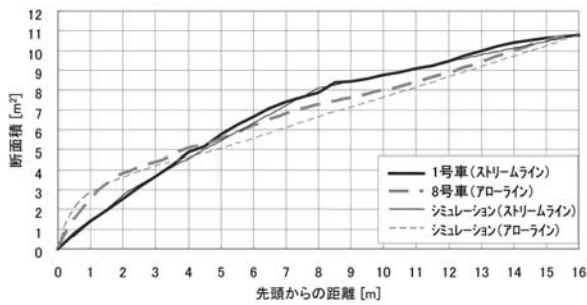
(b) 8号車(アローライン)

図27 「FASTECH360S」の先頭形状

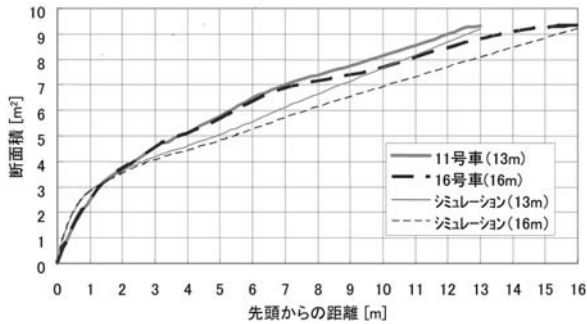
3. トンネル微気圧波の抑制

3.1 先頭形状

トンネル微気圧波を抑制するため、FASTECH360Sでは先頭部長さを16mまで延伸するとともに、シミュレーションにより断面積変化の最適化を図り、2種類の先頭形状を開発した。一つは17m緩衝工(JR東日本の新幹線区間で最も多く設置されている緩衝工タイプ、緩衝工側面の開口部はE2



(a) FASTECH360Sの先頭部断面積変化



(b) FASTECH360Zの先頭部断面積変化

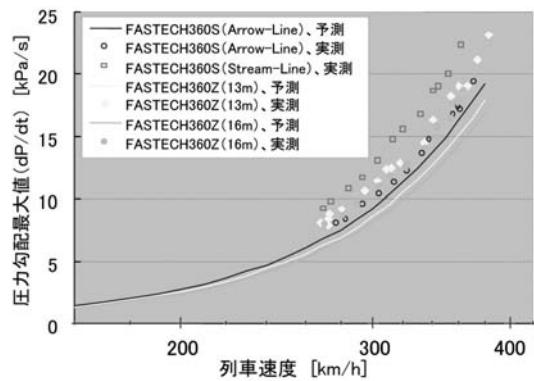
図28 FASTECH360SおよびFASTECH360Zの先頭部の断面積変化 (最終形状およびシミュレーション結果)

3.2 走行試験

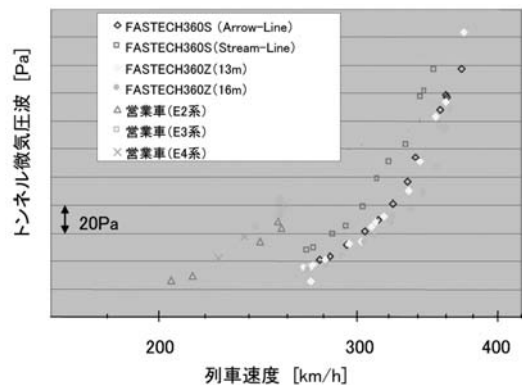
走行試験に先立ち、第一有壁トンネル、第二有壁トンネル、一関トンネルの各トンネル東京方の坑口にそれぞれ10m、15m、25mの緩衝工長さになるように緩衝工の新設または延伸を実施し、緩衝工のない大又トンネルを含め緩衝工の長さについては0m、10m、15m、25mの4条件について測定できるようにした。FASTECH360S、FASTECH360Zともに走行試験期間中に方向転換を行い、各2種類の先頭形状のトンネル微気圧波性能を比較した。結果は緩衝工長さの条件が異なってもほぼ同じ傾向を示したので、以下に緩衝工なしの場合と緩衝工25mの場合を例に測定結果について述べる。

(1) 緩衝工なしの場合

図29にトンネル入口(トンネル坑口から約80m入った位置)における圧力勾配最大値(一般にこの値が小さいほどトンネル微気圧波が小さい)および、トンネル微気圧波(トンネル出口から20m離れた位置)の測定結果を示す。図29より、FASTECH360Z(先頭部長さ16m)のトンネル微気圧波性能が最も良く、FASTECH360Z(先頭部長さ13m)とFASTECH360S(アローライン、先頭部長さ16m)が同等、FASTECH360S(ストリームライン、先頭部長さ16m)が劣る結果となった。FASTECH360Sの2種類の先頭形状の比較においては、アローラインの方がストリームラインよりもトンネル微気圧波が小さい。緩衝工のない場合には、アローラインとストリームラインの性能差(トンネル微気圧波が同等となる突入速度の差)は10~20km/h程度である。



(a) トンネル入口圧力勾配最大値

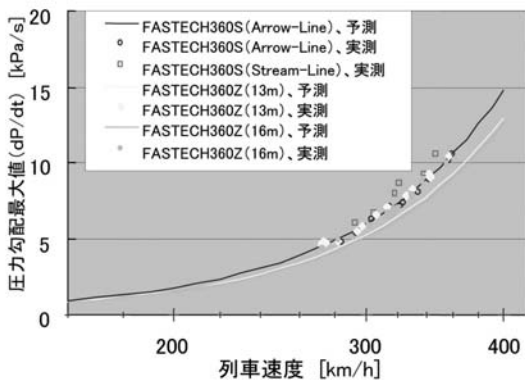


(b) トンネル微気圧波

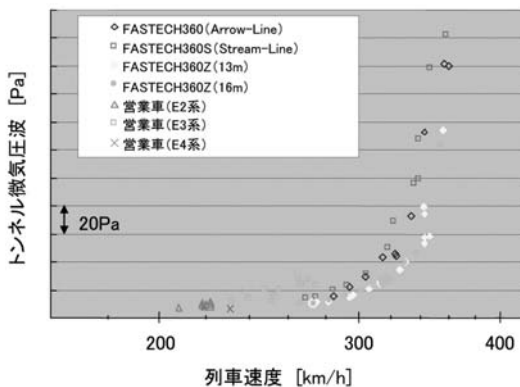
図29 測定結果(緩衝工なしの場合)

(2) 緩衝工25mの場合

図30に緩衝工25mの場合のトンネル入口(トンネル本坑口から約80m入った位置)における圧力勾配最大値および、トンネル微気圧波(トンネル出口側の緩衝工出口から20m離れた位置)の測定結果を示す。ただし、緩衝工開口部はそれぞれの先頭形状に対して最適になるように調整して走行試験を実施している。この図より、緩衝工25mの場合には、圧力勾配最大値はFASTECH360Z(先頭部長さ16m)、FASTECH360Z(先頭部長さ13m)、FASTECH360S(アローライン、先頭部長さ16m)の3つがほぼ同じで、FASTECH360S(ストリームライン、先頭部長さ16m)が劣る結果となった。FASTECH360Sの2種類の先頭形状の比較においては、緩衝工のない場合と同様、アローラインの方がストリームラインよりもトンネル微気圧波が小さいが、緩衝工のない場合と比べてアローラインとストリームラインの性能差はわずかである。



(a) トンネル入口圧力勾配最大値



(b) トンネル微気圧波

図30 測定結果 (緩衝工25mの場合)

(3) 地上設備改良の必要性

図31に緩衝工のないトンネルにおけるトンネル微気圧波の測定結果の一部を示す。このように高速化のためには地上設備の改良 (緩衝工の新設・延伸など)も不可欠であることがわかる。

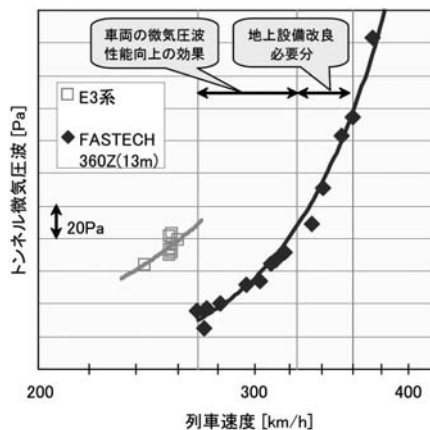


図31 トンネル微気圧波測定結果例 (緩衝工なし)

3.3 3章のまとめ

先頭形状の違いによるトンネル微気圧波性能についてまとめると以下のとおりである。

(1) FASTECH360S の 2 種類の先頭形状の比較において

は、アローラインの方がストリームラインよりもトンネル微気圧波が小さい。緩衝工のない場合には、アローラインとストリームラインの性能差 (トンネル微気圧波が同等となる突入速度の差)は 10 ~ 20km/h 程度である。ただし、トンネル緩衝工のあるトンネルでの差はわずかである。

(2) FASTECH360S (アローライン、先頭部長さ16m) と FASTECH360Z (先頭部長さ13m) のトンネル微気圧波性能は同等である。

(3) 高速化のためには、車両対策だけではなく地上設備の改良 (緩衝工の新設・延伸など) も必要である。

4. おわりに

これまでの FASTECH360 の開発および走行試験を通じて得られた成果は、新型新幹線車両 E5 系および E6 系に反映され、最高速度 320km/h の営業運転を行う予定である。具体的には、低騒音パンタグラフ、パンタグラフ遮音板、車体下部吸音 (側スカート部のみ)、全周ホロなどが新型新幹線車両 E5 系および E6 系の騒音対策に反映される。またトンネル微気圧波低減のための先頭形状については、E5 系の先頭形状 (先頭部長さ 15m) はアローラインタイプになり、E6 系の先頭形状 (先頭部長さ 13m) は FASTECH360Z (先頭部長さ 13m) がベースになっている。

これまでの 360km/h をめざした開発により、一定の成果は得られたものの、目標を達成するまでには至っていない。さらなる新幹線沿線の環境対策のために、引き続き努力していきたい。

参考文献

- 1) 長倉 清, 新幹線騒音の音源解析法, 鉄道総研報告, Vol.10, No.2, pp29~34, 1996.2
- 2) T. Kitagawa, K. Nagakura, Aerodynamic Noise Generated by Shinkansen Cars, Journal of Sound and Vibration, Vol.231, No.3, pp913~924, 2000.3
- 3) A.Ido, T.Kurita, Y.Wakabayashi, M.Hara, H.Shiraishi, M.Horiuchi, Development of Technologies for Minimizing Environmental Impacts, Proceedings of 7th World Congress on Railway Research [CD-ROM], 2006.6
- 4) 原 正明, 栗田 健, 堀内雅彦, 佐藤仁志, 四釜敏男, 低騒音パンタグラフの開発 (空力騒音の低減), 日本機械学会第14回交通・物流部門大会講演論文集, No.05-52, pp.103~104, 2005.12
- 5) 若林雄介, 栗田 健, 堀内雅彦, 藤本卓也, 藤田啓晴, シミュレーションおよび、模型実験によるパンタグラフ遮音板形状の検討, 第11回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2004) 講演論文集, pp.331~332, 2004.12
- 6) Y.Takano, K.Sasaki, T.Satoh, K.Murata, H.Mae, J.Gotoh, Development of Visualization System for High-Speed Noise Sources with a Microphone Array and a Visual Sensor, Proceedings of Inter-Noise2003, N930, 2003.8
- 7) 佐藤寿一, 村田 香, 佐々木浩一, E2系1000番代走行試験時の沿線騒音低減対策について, 第9回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2002) 講演論文集, pp.469~472, 2002.12