

新幹線用パンタグラフの開発に 大型低騒音風洞を活かす

池田 充

鉄道力学研究部(集電力学研究室 室長)



いけだ みつる

はじめに

鉄道総研の大型低騒音風洞が完成した1996年は、東海道新幹線に毎時2本の300系のぞみ号が運転されるようになった年です。JR西日本では500系の量産先行車が新製され、JR東日本でもE3系量産先行車による試験が続けられていました(500系、E3系とも営業開始は1997年)。また、今日の新幹線最高速度記録である時速443kmがこの年、JR東海の高速試験車300X(図1)により達成されています。このように、大型低騒音風洞が稼働を開始した時期というのは、旧国鉄の分割民営化後にJR各社が進めてきた新幹線高速化への取り組みが実を結び、大幅な運転時分の短縮が図られた頃でした。

これより15年、300Xにより達成された新幹線の最高速度記録こそ、いまだ更新されていませんが、新幹線各線区における平均走行速度は確実に向上し、国鉄時代とは一線を画した高速運転が実現しています。例えば東海道新幹線では、全列車とも最高速度270km/hで運転されています。その背景には、沿線騒音保全技術の着実な進化があります。鉄道総研の大型低騒音風洞はこの間、常に新幹線の騒音対策に関わる技術開発の一翼を担ってきました。騒音対策自体は多岐にわたりますが、ここではその一つであるパンタグラフの低騒音化について、大型低騒音風洞が果たしてき



図1 新幹線の最高速度記録を持つ300X試験電車(955-1：現在、鉄道総研 風洞技術センターにて保存中)

た役割について簡単にまとめてみたいと思います。

パンタグラフと沿線騒音

はじめに、パンタグラフに起因する騒音について説明しましょう。パンタグラフおよびその周辺機器から発生する騒音を集電系騒音と称しています。新幹線騒音には、この集電系騒音のほかにも、車輪がレール上をころがる(転動する)ことによって発生する転動音、高架橋などの構造物が列車の走行に伴って振動することによって発生する構造物音、パンタグラフを除く車両各部から発生する車両空力音、などがあります。現在、集電系騒音は車両の主要音源の一つとなっています。集電系騒音も複数の要因で発生する音が複合したものですが、なかでも速度向上に際して現在最も問題となっているのはパンタグラフの空力音です。

空力音は、静止空气中を物体が高速で進む際に発生する音です。物体自体が振動していなくても空力音は発生します。この意味で、空力音の発生には空気の自励的なふるまいが深く関わっています。空力音の大きな特徴として、そのエネルギーが速度の6乗に比例して増加するという性質があります。これは、何も対策を行わないで速度270km/hから300km/hへの速度向上を行うと、約2.7dBの空力音増加を招くことを意味します。2.7dBというと大きな差ではないように思われるかもしれませんが、音のエネルギーが2倍になることが3dBの騒音増加に対応します。したがって、270km/hから約30km/hの速度向上を行うと、空力音のエネルギーを2倍弱に増加させることになるのです。空力音以外のメカニズムで発生する騒音は、速度増加に対しこれほど急激なエネルギー増加を伴いません。そのため、高速になればなるほど空力音への対策が重要なのです。

空力音は、空気の非定常な運動により引き起こされます。特に、空気の流れが物体によって乱される場合に、強い空力音が発生します。したがって、空力音の低減には空気が

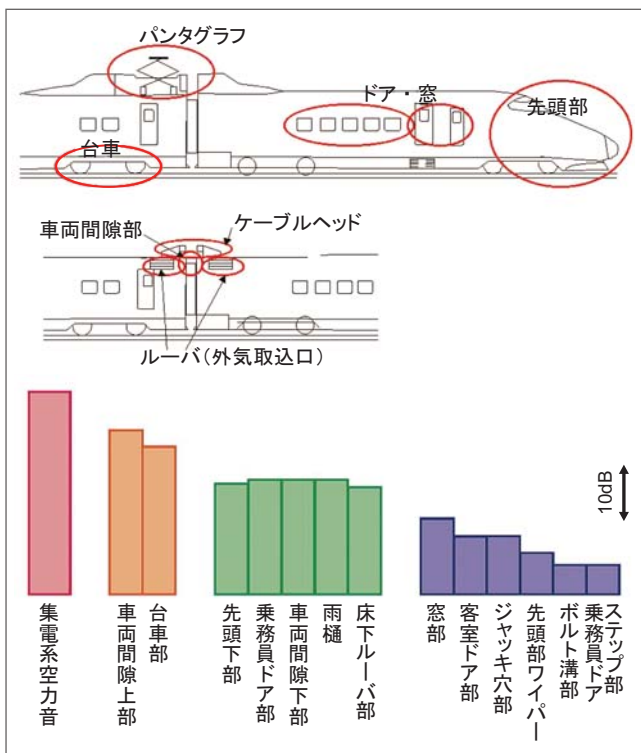


図2 新幹線車両の主な空力音源とその寄与の評価例 (風洞試験による評価, 速度300km/h, 25m点における寄与, レールレベルから2mの高さの防音壁あり)

部材表面に沿って流れるような部材形状の選択が重要です。とはいえ、種々の理由により形状を平滑化できない部位が存在し、こうした部位に空力音の音源が局在します。パンタグラフ、およびその周辺機器は、新幹線車両のなかで目立つ凹凸部の一つです。これは、パンタグラフには25kVの高い電圧が印加されるため、車体との電気的な絶縁をはかる必要があるためです。

図2は、新幹線車両のどの部位がどの程度の空力音を発生しているのかを実験的に求めた例です。これより、パンタグラフおよびその周辺部は、新幹線車両における主要な空力音発生部位の一つであることが理解できると思います。

パンタグラフの空力特性

前章において、パンタグラフの空力音低減には部材形状の選択が重要であると記しました。しかしながら、パンタグラフの部材形状を空力音のことだけ考えて決定することはできません。なぜなら、パンタグラフに関わる空力的な作用として、空気力特性もまた非常に重要だからです。

パンタグラフの基本的な機能は、架線としゅう動することによって、架線から車両へと電気エネルギーを供給することです。このとき、パンタグラフが架線を押し付ける力、すなわち押上力を適正な値に設定することが、良好なしゅう動を維持する上で極めて重要となります。通常、車両が停止しているときの押上力を静押上力、車両が走行してい

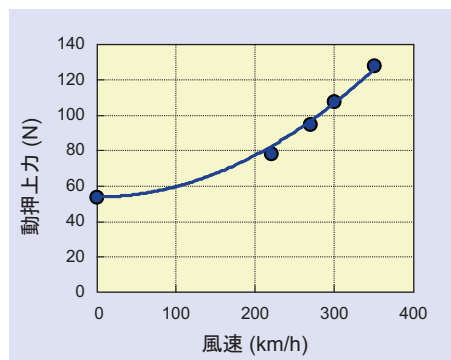


図3 パンタグラフの動押上力特性の例

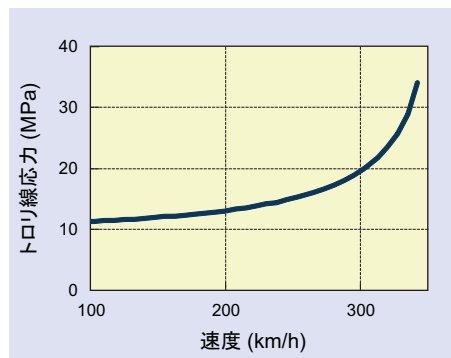


図4 動押上力が54N一定の場合にトロリ線に生じる応力 (ヘビーコンパウンド架線, 応力許容値60MPa)

るときの押上力を動押上力として、両者を区別します。動押上力は、静押上力に空力的な作用による増加分を加算したものですから、押上力を適正な値に設定することは、パンタグラフの空気力特性を適正に設定することにはなりません。

一般に物体に作用する空気力は風速の2乗に比例して増加します。これはパンタグラフについても同様です。そのため、動押上力は図3に示すような速度特性を示す場合が一般的です。しかしながら、パンタグラフの形状選択が適切に行われないと、動押上力が速度とともに減少する特性となることがあります。このような場合、パンタグラフは架線との接触を維持することが難しくなり、簡単に架線から離れるような状況に陥ります。パンタグラフが架線から離れることを離線と称しますが、離線が頻発するとしゅう動材料の損耗やアーク音の発生を誘引するため、このような状況は避けなければなりません。

一方、動押上力が大きくなり過ぎても問題が生じます。図4は接触力が常に静押上力 (54N) と等しい (すなわち動押上力の空力的な増減がない) と仮定して、架線 (トロリ線) に生じる応力を簡単なモデルにより評価した例です。この図より、接触力が一定であってもトロリ線の応力は速度に応じて増加するとがわかると思います。これは、高速になるほど、力の移動速度がトロリ線振動の伝播速度に接近するためです。当然ながら、速度に応じて動押上力が増加す

ると、速度に対するトリ線応力の増加はさらに急峻となります。トリ線の応力が許容値を超えると疲労破断に至るリスクが生じますので、動押上力には上限が必要なおことをご理解頂けると幸いです。

動押上力の適正值は、架線種別、パンタグラフや車両の諸元、走行速度などを勘案して決められますが、その許容範囲はあまり広くありません。一方、パンタグラフの空気力は先ほど述べたように風速の2乗に比例しますが、物体のスケールにも比例します。動押上力を許容範囲から逸脱させないようにパンタグラフの空気力特性を調整する作業は、パンタグラフのスケールを勘案すると非常にシビアな作業です。そのうえ、空力音低減のためにパンタグラフの部材平滑化が進められると、空気力の調整はさらに難しくなるのです。

結局のところ、新幹線用パンタグラフの開発は空力音の低減と適正な空気力特性の付与という、2つの要請を同時に満足させることが重要なポイントとなります。そして、そのツールとして大型低騒音風洞は重要な役割を果たしているのです。

大型低騒音風洞の役割

風洞は、静止した物体のまわりに高速で移動する空気を供給する装置です。これは、静止空气中を物体が高速で移動することと力学的に等価ですから、風洞を使えば高速移動物体に関わる空力現象を定置で再現することができます。先述のように、パンタグラフには高い電圧が課電されていますので、きめの細かい実験を現車で行うことは容易ではありません。また、空気力特性が未確認の状態でパンタグラフをいきなり現車に搭載すると、思いもよらないトラブルを起こしかねません。したがって、高速走行時における空力現象を定置で再現できる風洞は、新幹線用パンタグラフの開発において不可欠な設備となっています。

風洞は、その用途に応じて様々な種類のものが存在します。鉄道総研の大型低騒音風洞の特徴をパンタグラフに関連づけていえば、「実物のパンタグラフの試験を最大風速400km/hまで実施でき、なおかつ空気音と空気力の精度良い評価が可能な風洞」であるといえるでしょう。

大型低騒音風洞の供試体計測部は、2.5m×3m×8mの開放型、および3m×5m×20mの密閉型、の2種類を選択することができます。前者は主として空力音特性の評価に用いられ、その最大風速は400km/hです。一方後者は主に空力特性の評価に用いられ、最大風速は300km/hです。実物のパンタグラフは全幅1.9m、高さ1~2m程度ですから、上記2つの計測部のどちらでも十分対応可能です(図5)。ただし、新幹線用パンタグラフには碍子オオイなど整流用のフェアリング(覆い)と一体で使用されるものが多くあります。この場合、碍子オオイの幅は2面側壁部を含めると約3m、長さは6~8m程度以上の大きさがありますので、試験を開放型計測部で行う場合、実物のパンタグラフと碍子オオイとを組合せた試験を実施することは困難です。そこで通常は、図5に示すようにパンタグラフ単体で試験を行うか、あるいは図6に示すように1/3程度の縮尺模型を用いた試験を行います。また、空力音の評価が不要な場合には、図7に示すように密閉型計測部を用いて実物のパンタグラフと実物の碍子オオイを組み合わせた試験も可能です。ただし、この場合には閉塞率(風洞計測部の断面積に対する供試体前方投影面積の比)がやや大きくなってしまふことに注意が必要です。一般に、閉塞率は5%以下にすることが推奨されています。

以上のように、実物のパンタグラフを用いた試験が可能であるということは、パンタグラフの開発において非常に大きなメリットです。なぜなら、部材形状の細かい相違が空力音や空気力の大きな差異をもたらすことがしばしば起こるからです。実物の形状を精巧に模擬した縮尺模型を作



図5 実物パンタグラフ単体の風洞試験



図6 1/3スケール集電装置模型による風洞試験



図7 実物パンタグラフと実物碍子オオイの組合せ試験

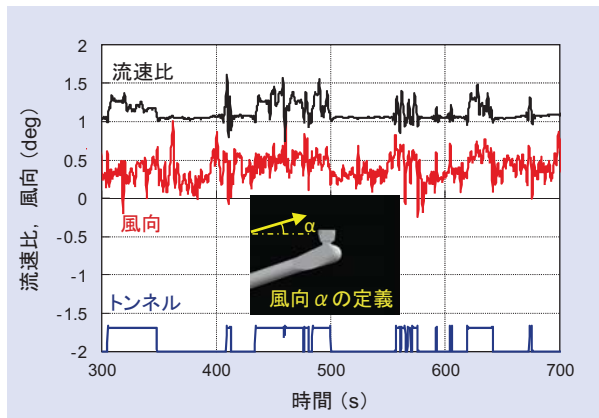


図8 パンタグラフに対する対向風速と風向の測定例 (速度300km/h)

ること自体が難しいですし、仮にできたとしても大抵の場合は実物よりも高い製作コストを要します。

風速に関して言えば、最大風速400km/hという大型低騒音風洞の仕様は、現状の営業最高速度300km/hに対して十分な余裕があるとはいえません。これは、車両屋根上に搭載されたパンタグラフを基準として考えた場合、その周囲の空気の流れ(対向風)の風速は必ずしも列車速度と同じではないためです。特に、車両がトンネル内を走行する場合には、対向風の風速は列車速度よりかなり大きくなります。図8はその測定例を示したものです。トンネルに突入した直後に対向風速が増加している様子が理解できると思います。これは、列車突入によってトンネル内の空気が押しのけられ、その一部が車両側面を通してトンネル坑口から外部へと流出するため、新幹線の場合、平均的にいえば列車速度の1.3倍程度、過渡的にはさらに大きく増速します。そのため、速度300km/hでトンネルに突入するパンタグラフの空力的な挙動を再現するためには、390km/h程度の風速が必要となるのです。もちろん、車両の空気力特性、あるいは空力音特性は、それぞれある一定の速度乗則に従いますので、試験結果を外挿することにより、より高い速度域におけるデータを推定することは可能です。しかし、空気力によってパンタグラフ各部に機械的なたわみが生じ、これによって空力的な特性がある速度で急変する場合がありますので、注意が必要です。

なお、図8にはパンタグラフ近傍における対向風の風向も示されています。明り区間とトンネル区間とは、パンタグラフ近傍の風向が若干変化している様子がわかります。対向風の風向はパンタグラフあるいは碍子オオイの形状に依存しますが、パンタグラフの空気力特性を風洞において正確に再現するためには、こうした条件にも考慮する必要があります。



図9 マイクロホンアレイによる空力音源の可視化

大型低騒音風洞の最大の特徴は、低騒音風洞であるということです。一般的な風洞では、その暗騒音レベルが非常に大きく、供試体の空力音を精度よく評価することはできません。大型低騒音風洞には暗騒音レベルを低減する様々な工夫がなされています。その優れた低騒音性をさらに活かすため、大型低騒音風洞には空力音源を可視化することができる特殊なマイクロホンを備えています。その一つがマイクロホンアレイです。図9に示すように、マイクロホンアレイとは複数のマイクロホンを空間に配置し、各マイクロホンの出力に対しフィルタリング処理を施すことによって音源の強度と位置を同定する装置です。この装置により、空力音の低減が必要な部位を容易に見極めることができますので、効率のよい開発が可能となります。

おわりに

これまでの技術開発により、パンタグラフの空力音はかなり低いレベルに達しています。そのため、これまでと同じ方針で空力音低減を進めても、空力音の大幅低減は難しい状況です。こうした状況では、新しい発想に基づいた低減手法を積極的に試みながら、これを実用的な対策として構築していくことが求められます。そのためにも、空力音の本質をよく理解することが重要であり、風洞試験と平行して数値計算の援用も有効だと考えられます。

今後も鉄道総研が新幹線用パンタグラフの開発に寄与できるよう、研鑽を積み重ねて参りたいと思います。RRR