

# 1113 サイドストリームを応用した低騒音風洞の開発

## The development of low-noise wind tunnel with side stream

正 [機] ○渡邊 耕司 (JR 東海)

正 [機] 上田 貴義 (日立製作所)

Koji Watanabe, Central Japan Railway Co.  
Takayoshi Ueda, Hitachi Ltd.

JR Central inaugurated its research complex in Komaki, Aichi pref. in 2002. It has a low-noise wind tunnel to develop low noise high-speed trains. The wind tunnel is designed to achieve less than 79 dB(A) background noise level with newly developed "side stream".

Keyword: wind tunnel, background noise, side stream, high-speed train

### 1. はじめに

新幹線の速度向上にあたっては、速度の 6 乗にしたがって増加する空力騒音の低減が肝要である。また、省エネルギーを実現するためには走行抵抗の低減が必要であるし、高速走行時には車両が揺れるという問題も発生している。特に、最後尾の車両がトンネルを走行する際にいわゆる“尻振り”とよばれる低い周期の振動は乗心地を著しく害している。同様の振動はパンタグラフカバーのついた車両にも見られ、高速走行時の課題のひとつとなっている。

新幹線の空力騒音源のひとつとしてパンタグラフが注目されており、当社においてはシングルアームパンタグラフを開発するなど、従前から低騒音のパンタグラフの開発に欠かせないものとなってきている。当初は空力騒音など、主として騒音低減が課題であったが、最近では従来、あまり考慮されることがなかった高速走行時の空力的振動に伴う乗心地の問題や走行抵抗、集電装置の性能確認など、幅広い分野で風洞実験が必要となってきている。

このたび、当社においてはこれらの鉄道車両の空気学的諸課題を追求するための設備として低騒音風洞（以下、小牧風洞という）を当社小牧研究施設内に建設した。その概要および暗騒音の低減技術について述べる。

### 2. 小牧風洞の概要

#### 2.1 開発の経緯

1992 年に営業運転を開始した「のぞみ」型 300 系新幹線電車の開発以降、高速車両の開発にあたっては風洞実験が欠かせないものとなってきている。

そこで、当社独自の風洞設備を建設し、自由に使える設備として活用しようということから小牧風洞の建設が決定し、昨年 7 月に開業した。

#### 2.2 基本性能

小牧風洞の仕様を table 1 に示す。

当風洞はパンタグラフとしては最大 1/3、車両模型としては最大 1/15 くらいの縮尺のものを実験できるように設計されている。ノズル幅は小ノズルが 1m、大ノズルが 1.15m である。これは、実際のパンタグラフを設置して揚力の測定ができるようにと考えたため、揚力測定時は大ノズルを使用する。また、鉄道車両は自動車等に比べて比較的長いものであるためノズルとコレクタ間の距離は 5m とした。

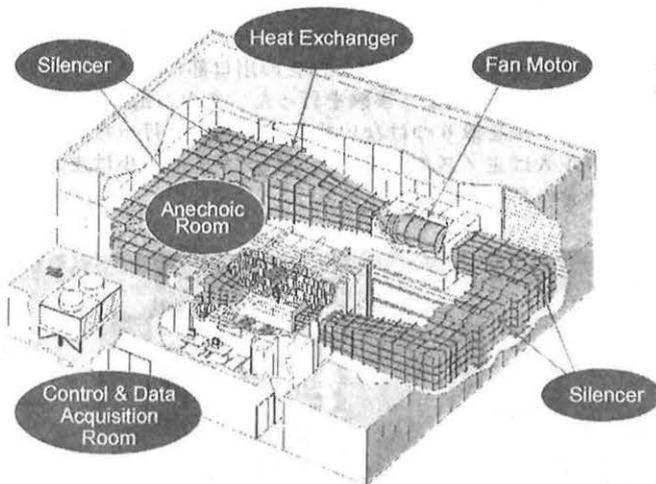


fig.1 internal view of Komaki wind tunnel

table1. specifications of Komaki wind tunnel

項目	仕様
形式	ゲッチング水平単回流式
胴形態	開放胴 / 密閉胴
ノズル幅および高さ	大ノズル 幅 1.15m, 高さ 1.0m 小ノズル 幅 1.15m, 高さ 1.0m
最大風速	大ノズル 300km/h 小ノズル 350km/h / 300km/h
縮流比	1:16 (小ノズル時)
暗騒音レベル	78.1dB(A)
乱れ度	1.0%(at 300km/h)以下
送風機	モータ出力: 800kW 三相交流誘導電動機 ファン直径: 2240mm, 動翼: 12, 静翼: 10 最大回転数: 1200rpm

当風洞は低騒音風洞と言うことから計測部は無響室内に設置した。一方、風路内には4ヶ所サイレンサを設け、風路壁もすべて吸音材で覆うなど、低騒音化のための工夫をしている。当初の要求仕様は標準点で79dB(A)以下であり、この仕様を満たすための設計および実験をくり返し行った。

今回、風洞の暗騒音低減のためサイドストリームを採用した。サイドストリームは風洞ノズルの周囲に主流速の20%程度の風速で強制的に補助流を作るもので、主流の周囲に生ずる渦を低減させ、風洞暗騒音の低減を図ったものである。

### 3. 風洞暗騒音低減技術

#### 3.1 サイドストリームの効果

当然のことながら、低騒音風洞においては、暗騒音の低減が重要である。風洞の暗騒音源としては、次の4つが考えられる。

1. 送風機騒音
2. 風路壁を通過する外部騒音
3. 風路壁の振動、ダクトおよびその他の風洞構造物騒音
4. 流れの乱れによる空力騒音

1から3.についての方策としては分厚い吸音材を使用し、構造部を強化することにより低減することが可能である。しかし、4.の空力騒音については、非常に対策が難しい。そこで、サイドストリーム法を検討することとし、試験を行った。サイドストリームはせん断層内の渦を低減することにより空力騒音の低減を図ることができる。

ノズルから吹き出す流れは、ほぼ7°の拡がりをもって流れる。そのとき、噴流の広がり外縁部と周囲の室内空気との間に空気の摩擦が生じ、気流が乱れて渦が発生する。この渦は速度差が大きくなるほど大きく成長し、それにもない騒音も増大する。また、数値解析の結果、Lighthill-Curleの理論から導かれた音源項  $div(\omega \times u)$  の分布はノズル出口部のせん断層およびコレクタ周辺の壁面に集中していることがわかったので(fig.1)、ノズル出口部の渦発生を低減するとともに、その後の渦の成長を抑えることが重要であると考えた。

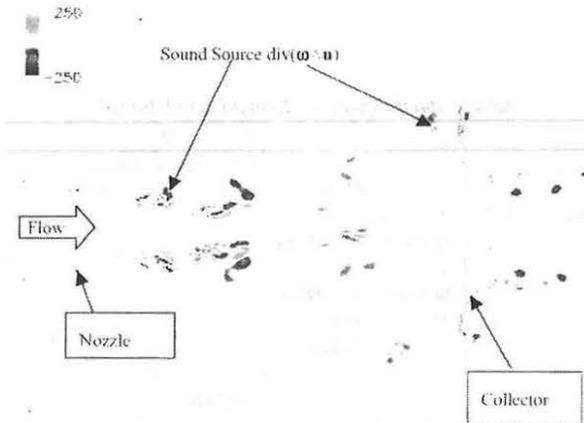


fig.1 distribution of sound source term  $div(\omega \times u)$

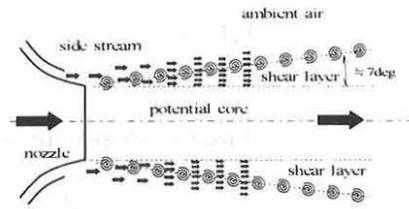


fig.2 the idea of side stream

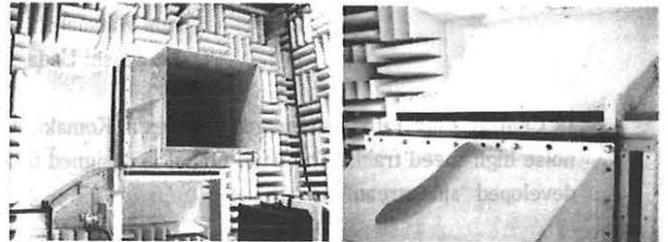


fig.3 main nozzle (small)

fig.4 side stream nozzle

#### 3.2 暗騒音低減予備実験

小牧風洞の設計にあたっては、日立製作所の機械研究所の風洞を使って予備実験を行った。暗騒音低減のための手法として検討したのは次の5つである。

table 2. plan of reducing background noise

No.	空力騒音低減手法	効果
1	ノズル内面に緩衝材取付	△
2	ノズル隅にRをつける	×
3	ノズル先端に広がりをつける	△
4	サイドストリーム	○
5	コレクタに吸音材取付	△

記号 ○：効果大，△：効果小，×効果なし

No.2のノズル隅にRをつけるという考え方はノズル内の隅部に生じる2次流れを小さくしてせん断層を緩和しようと言うものであったが実験で効果が認められなかった。

この結果、サイドストリームによる暗騒音の低減効果は約2~3dB(A)と予測され、その効果が大きいことがわかったので、サイドストリームを採用することとした。

#### 3.3 実機での検証

実験にあたっては、サイドストリームノズル（以下、サイドノズルと略す）と称するサイドストリーム用のノズルを2種類作成し、大きさおよびその出口部の主ノズルとの間隔（図中d）を変えて実験を行った。また、fig.3に示す、サイドノズルを取りつけない状態での実験も行った。サイドノズル大は主ノズル先端まで、サイドノズル小は主ノズルの半分の長さがある。



fig. 5 small nozzle

fig. 6 large nozzle

two types of side stream nozzle for the test

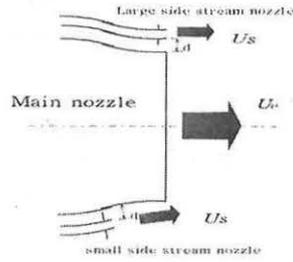
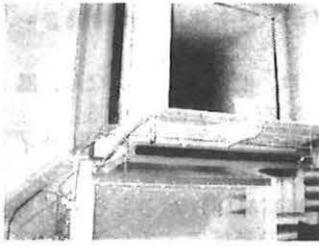


fig.7 the definition of "d" in the results

#### 4. 実験結果

##### 4.1 サイドストリームによる暗騒音低減効果

まず、サイドストリーム風速 ( $U_s$ ) と主風速 ( $U_0$ ) との関係を求めるため、サイドストリーム送風機用インバータの出力周波数を可変させて暗騒音特性を調べた。本実験にあたっては、fig.7 に示すとおり、風洞実験に際しては模型支持台車を風洞内に設置し、その上に模型を置いて種々の測定を行うことが多いので、模型支持台車を風洞内に設置した状況でも実験を行った。マイク設置位置はノズル先端からノズル幅  $D$ 、横方向に  $1.5D$  離れた位置である(fig.9)。

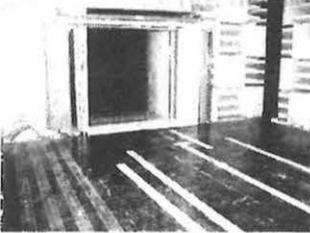


fig.8 back ground noise measurement with model table

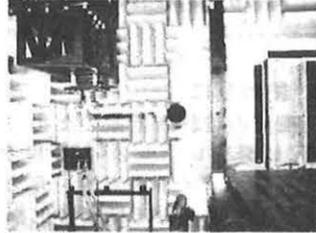


fig.9 microphone

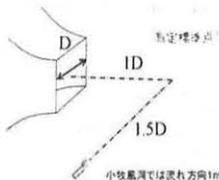


fig.10 microphone position

風洞暗騒音特性を fig.11 および fig.12 に示す。fig.11 が支持台車がない場合で、fig.12 が支持台車を設置した場合である。この場合、主ノズルの周囲 4ヶ所に設置したサイドノズルのうち、下部の1つが支持台車に隠れる格好となり、支持台車下部構造にサイドストリームがあたって暗騒音を発生させることが考えられるので、下部サイドノズルを閉鎖した実験も行った。

主流速  $U_0$  は  $300\text{km/h}$  で、サイド風速  $U_s$  はインバータの出力周波数およびサイドノズルの大きさに依存する。「台車あり、サイドノズル下部閉鎖」の場合はノズル出口面積が減少するので連続の式により風速が増大する。

fig.11 と fig.12 から次のことがわかる。

- ① 予備実験の結果、サイド風速は主流の 20% くらいが最適であると予想されたが、サイドノズルがない場合のみこの予想が当てはまるが、サイドノズルを取りつけた場合はサイド風速が大きいほど暗騒音が低下する。
- ② サイドノズルと主ノズルとの間隔  $d$  が小さいほど暗騒音レベルが小さい。

- ③ 模型支持台車がある場合は下部サイドストリームは閉鎖した方がよい。これは模型支持台車の下部構造に風が当たり、空力騒音を生じているためと考えられる。

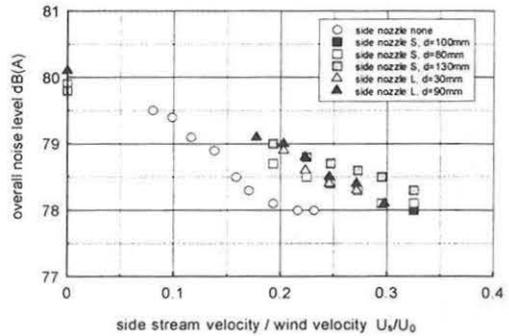


fig.11 overall noise level without model table

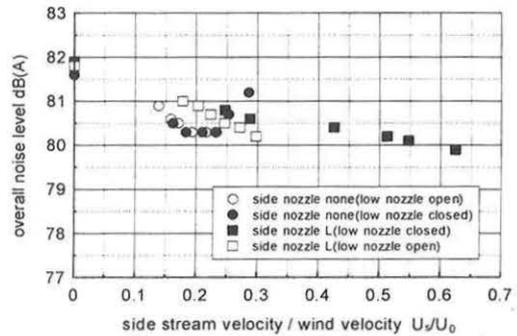


fig.12 overall noise level with model table

- ① および②の理由については、次の通りと考えられる。

サイドノズルを設けない場合、吹き出し口は fig.3 からもわかるとおり、主ノズルから離れており、サイドストリームは主流からある程度離れて流れるものと考えられた。しかし、実測してみるとサイドストリームはほとんど主ノズルに沿って流れており、サイドノズルと主ノズルの間隔  $d$  が実質 0 と見なしてもよいほど主流に近い状態で流れていた (fig.13 case2)。このばあい、主流と交差する距離  $L$  も 0 と考えられる。半面、サイドノズルを設けた場合は主流とある程度離れて流れており、主流と交差する距離  $L$  がノズル先端より離れ、せん断層が発達してしまうと考えられる (fig.13 case1)。逆に、この位置からせん断層を小さくするためにはサイド風速を増大せねばならず、右肩下りのほぼ直線と見なしてよい下がり方となる。

サイド風速を増大させるにはサイド送風機の出力を増大させる必要があり、その場合はサイドストリームによる暗騒音の増大も考えられるので、サイドストリームは主ノズル出口近傍で主流と交差させる方がよいと考えられる。

次に、風洞の暗騒音の速度特性を fig.12 に示す。一般に、風洞暗騒音は速度の 6~7 乗に比例して増大すると言われていたが、本風洞でもほぼ 7 乗に比例して増大していることがわかる。また、サイドストリームの効果により速度乗則も 7.5 乗から 6.9 乗に緩和されていることがわかる。

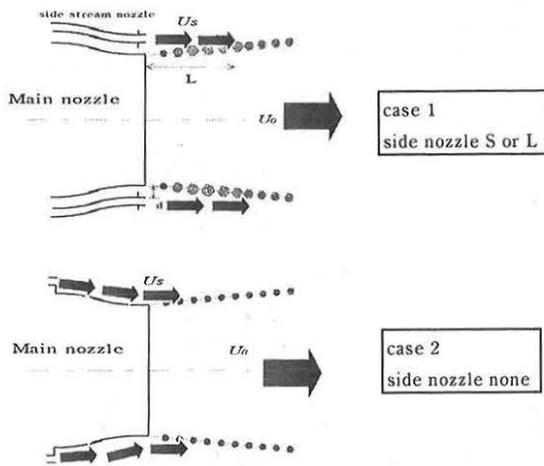


fig. 13 two cases of side stream flow

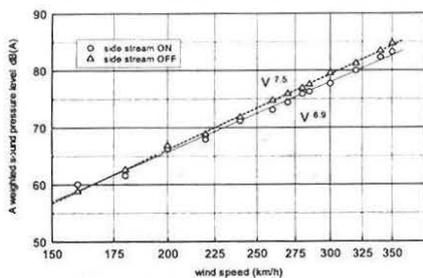


fig. 14 overall noise level and wind velocity

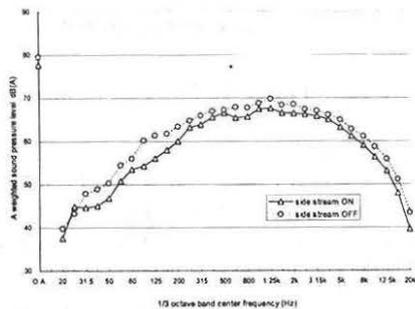


fig. 15 noise spectrum at the wind speed of 300km/h

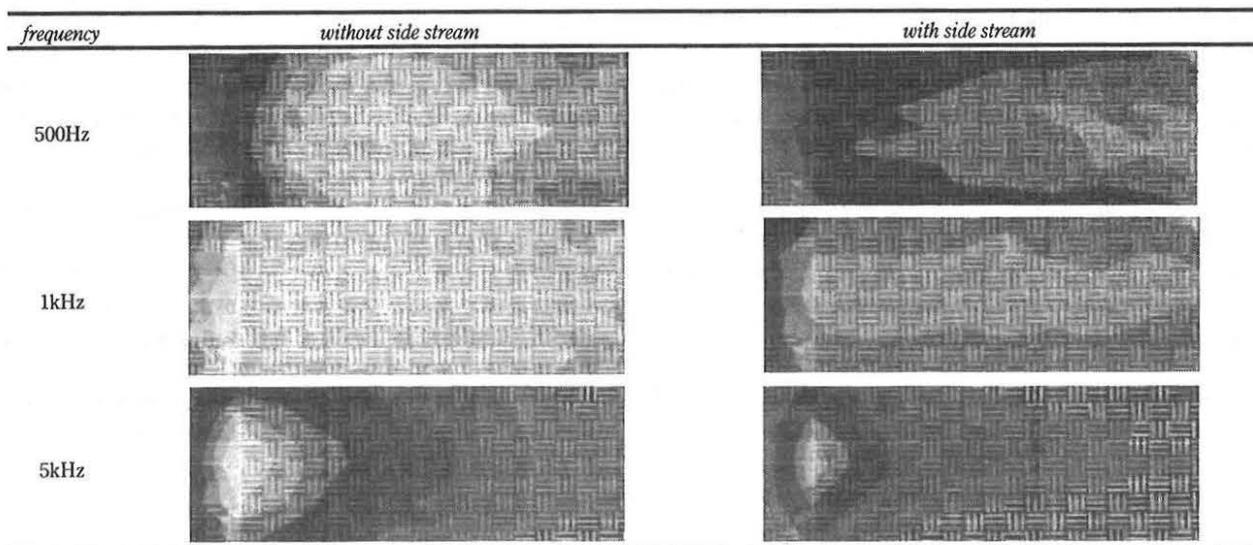


fig. 17 contour map of sound pressure level (each contour shown here is 1dB step)

#### 4.2 音響インテンシティによる暗騒音分布計測

次に、音響インテンシティプローブを使用して暗騒音レベルの分布を調べた。

fig.17にその結果を示す。これは、サイドノズルなし、風速 300km/hでの測定で、等高線の刻みは 1 dBである。

今回、fig.15からもわかるとおり、全帯域にわたってサイドストリームによる効果が認められたが、音響インテンシティによるコンタマップ（音圧等高線図）からもその効果が立証できた。特に、1 kHz以下の帯域でノズル先端部の音圧低減効果が著しいのがわかる。



fig.16 the measurement of sound intensity of background noise

#### 5. 終わりに

風洞の暗騒音低減のためのサイドストリームは有効であり、暗騒音レベル 2~3dB 程度の暗騒音の低減が可能である。

今後、サイド送風機を含めたサイドノズルの最適設計化を行ってさらなる低騒音化を図る。

#### 〔参考文献〕

- 1) Barlow, Rae, Pope "Low-Speed Wind Tunnel Testing" 3rd. ed. John Wiley & Sons, 1999
- 2) Goldstein, 今井訳 "流体音響学", 共立出版, 1992
- 3) 特許公報 特許特 2680207, 1997 (日立製作所)
- 4) Powell "Theory of Vortex Sound", J. Acoustical Society of America, vol. 36, pp.177~195, 1964