

風洞低騒音化技術

西村 正治*

Quieting Techniques for Wind Tunnel

Masaharu Nishimura

1. はじめに

近年、自動車、鉄道車両、航空機などの高速の乗り物では空力騒音の低減が大きな課題であり、その開発には、単に空力性能を計測するだけでなく、空力発生音を正確に計測できる風洞暗騒音の低い音響風洞を用いるのが一般的になってきている。また、このような大型風洞では消費動力低減の観点から回流型が採用され、騒音計測を容易に行うため、無響室内に開放された計測洞を有するのが一般的である。

風洞の主な騒音源は送風機であるが、これは風路の吸音や消音ガイドベーンなどの適切な消音器を設置することにより、測定洞でほぼ問題とならない程度まで容易に低減できる。問題は、吹き出しノズル、コレクタ等、測定洞廻りで発生する空力騒音の低減である。これには消音手段が適用できず、発生メカニズムを考慮した発生音自体の低減が必要である。

著者らは、古くは鉄道総合技術研究所殿の大型低騒音風洞の開発に携わり⁽¹⁾、近年は自動車用風洞の開発に携わってきた⁽²⁾。本稿では、それらの経験を踏まえて、まず風洞低騒音化技術を整理する。

開放洞を持つ回流風洞では、場合によっては、ノズル・コレクタ間のエッジトーンと風路の音響共鳴との連成に起因する低周波脈動を代表とする、各種低周波変動が発生する。続いてこれらの発生要因とその対策方法について整理する⁽³⁾。

最後に、そのような脈動の発生の心配もなく、大きな無響室も必要のない新しい音響風洞として、音響トラフ及び空力音響トラフを有した風洞の可能性について紹介する。これは開放洞を持たないため、送風機の動力も十分小さく抑えることが可能である⁽⁴⁾。

以上、本稿の内容は、工藤敏文氏の鳥取大学における博士論文⁽⁵⁾やいくつかの公表論文^{(1)~(6)}をベースにまとめたものであり、詳しくはそれらを参照いただきたい。

2. 風洞内空力発生音源とその低減技術

2.1 全周開放型音響風洞

音響風洞には、一般の汎用風洞や航空機用風洞などに用いられる、無響室内に全周を開放した計測洞を持つ全周開放風洞と、自動車用風洞などに用いられる、半無響室内に3/4周を開放した3/4周開放風洞とがある。まず、全周開放風洞の代表例として鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞の低騒音化技術を紹介する。

(1) 風洞概要と暗騒音性能

風洞の平面図を Fig.1 に、主要目を Table 1 に示す。空力騒音の試験は開放洞で行われる。送風機での発生音は、吸込側、吐出側に備えた消音器と風路の吸音によって、測定部に影響しないように十分消音されている。そこで、測定部に寄与する主な騒音源としては、ノズル吹き出し部及びコレクタ部から発生する空力騒音である⁽⁶⁾。その主要な発生源を Fig.2 に示す。つまり、ノズル部では境界層の乱れや、吹き出し部の渦放出などの渦の加速度運動が誘起する圧力変動が主な音源となり、コレクタ部では、噴流の乱れた混合域の渦がコレクタに衝突して発生する圧力変動が主な音源である。また流速が速くなってくると、噴流の混合域自体から発生する四極子音も重要になってくる。

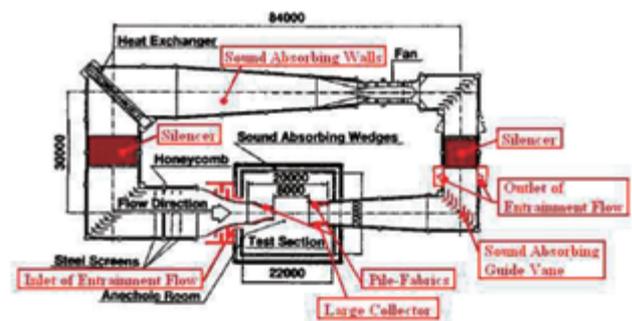


Fig.1 Typical acoustic wind tunnel (RTRI)⁽⁶⁾.

Table 1 Dimensions and main feature (RTRI)⁽⁶⁾.

measuring section type	open	closed
measuring area width×height	3.0m(w) ×2.5m(h)	5.0m(w) ×3.0m(h)
measuring area length	8.0m	20.0m
anechoic room dimensions	22m×20m ×13m	----
maximum velocity	400kw/h	300kw/h
background noise level	75dB(A) at 300km/h	----

* 鳥取大学大学院工学研究科

(〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101,

E-mail :mnishimura@mech.tottori-u.ac.jp)

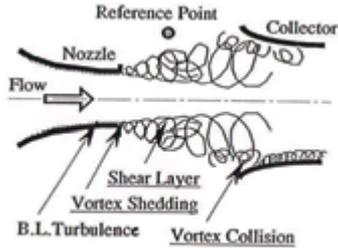


Fig. 2 Aerodynamic noise sources at nozzle and collector.

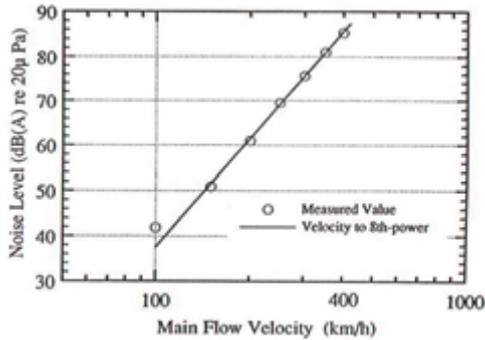


Fig. 3 Background noise level at the reference point.

本風洞の特徴は、吹き出しノズル内面及びコレクタ部内面に柔毛状の素材を張り付けて上記発生音を低減した点、及び伴流吸込み量調節機構を設け、上記発生音の低減及び脈動防止を実現した点である。

図3は開放胴基準点(吹き出しノズル中央から1D下流, 1.5D側方; Dはノズル口径)における騒音レベルと流速の関係を示す。200km/hを超えると騒音レベルがほぼ流速の8乗則に比例して増加しており、吹き出しノズル・コレクタ部で発生する双極子音は十分低く抑えられ、噴流混合部の四極子音が目立ってきていることを示している。

(2) 柔毛壁による低騒音化

吹き出しノズル部からの発生音の原因は、境界層やせん断層内の渦の加速度運動による吹き出し口端付近の圧力変動と考えられるが、境界層を厚くしたり境界層の速度分布を変えて、せん断層での最大速度勾配を穏やかにすることにより発生音を低減できることが分かってきた。そこで種々のアイデアを試みた結果、ノズル内面に柔毛材を張り付けた柔毛壁とすることで、二次的な発生音無に境界層を厚く、且つ穏やかな速度プロファイルにできることが分かった。1/6スケールモデルの吹き出しノズルのみの試験で得られた結果に基づいて実機での効果を予測した結果を Fig.4 に示す。数百 Hz 以上で2~3dB の低減効果が得られていることが分かる。

一方、コレクタ部での発生音は、乱れた噴流がコレクタにあたって発生するバサバサ音である。Fig.5 は1/6スケールモデルでコレクタ部に柔毛壁を適用した結果に基づいて実機での効果を予測した結果である。図から発生音がドラスティックに低減していることが分かる。これは、衝突してくる渦が柔毛材によりいわゆるソフトラン

ディングし、大きな圧力変動を発生しないためと推察される。

強い渦が固体壁に接近すると、逆符号の渦度が壁近傍に生まれ巻き上がり、両者は干渉する。柔毛壁は、音波の発生源と考えられるこのような渦度の生成及び渦と壁面との干渉を抑制し、圧力変動を緩和して発生音の低減に寄与すると洞察される。柔毛壁に沿う乱流境界層の壁近傍では、渦度変動の強さが滑面流の20%以下に抑制されることが報告されている⁽⁷⁾。またその後の研究で、柔毛は流れに抵抗を与える作用があり、充填率は1~3%程度が最適で、柔毛でなくても多孔材でも同様の効果があることが確認されている⁽⁸⁾。

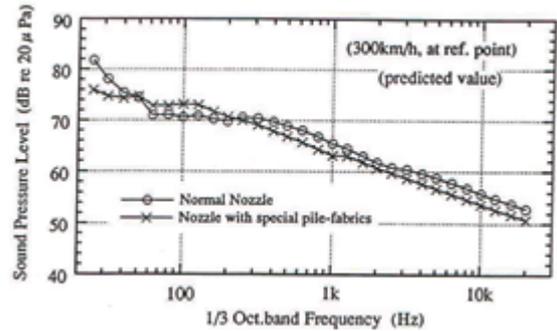


Fig.4 Noise reducing effect of pile-fabrics on the nozzle.

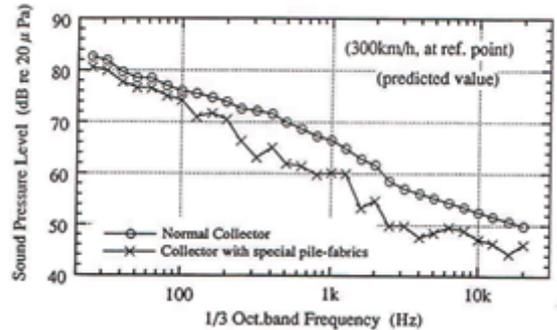


Fig.5 Noise reducing effect of pile-fabrics on the collector.

(3) 伴流吸込み量調節による低騒音化

測定部の噴流は周囲の空気を連行し、コレクタ部で跳ね返して大きな音を発生させる。そこでコレクタ部の流れを少しでもスムーズにするため、その伴流の一部を吸い込むデザインとした。そのため拡散胴下流にブリーザを設け、吹き出しノズルの無響室貫通部の周囲に伴流吸込み用の消音通路を設けた。この場合、伴流はノズル外壁に沿って流入してくるため、噴流混合層の流速勾配の緩和にも役立っていると考えられる。Fig.6 は1/6スケールモデルで確認された伴流吸込み率と騒音の関係を、実機周波数に換算して示している。ここで伴流吸込み率 β は理論伴流に対する吸いこんだ伴流の比率を示している。この場合は $\beta=0.6$ 程度が最適となっているが、適正值はノズルやコレクタの寸法比などで異なると予想される。

また、伴流を吸い込むことによりコレクタ部での流れ

の跳ね返りが無くなるため、開放風洞で良く問題となる脈動の防止にも有効である。ただし、伴流吸込みは必要送風機動力の増大につながるので注意が必要である。

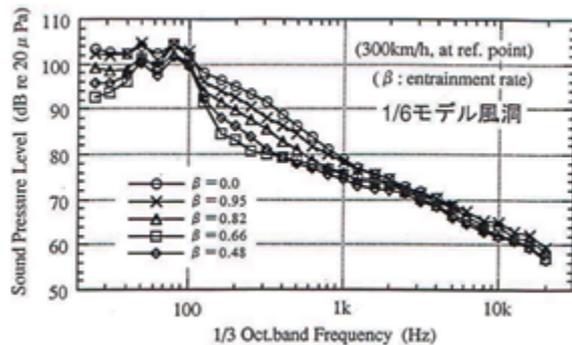


Fig.6 Noise reducing effect of the entrainment flow.

2.2 3/4 周開放型音響風洞

自動車用の音響風洞は、一般に計測胴が半無響室に設置されており、吹き出しノズル下面が実車や模型を設置するフロアにつながる 3/4 周開放型の風洞である。ここでは 1/10 スケールモデルを用いて、各部形状の空力発生音に及ぼす影響を調べた結果を紹介する⁽²⁾。

空力発生音は渦がその根源であることから Re 数に強く依存し、音場との関係は $Mach$ 数に依存する。更に流速により、単極子音源(発生音響パワーが流速の 4 乗に比例)、双極子音源(同 6 乗に比例)、四極子音源(同 8 乗に比例)の大きさが異なり、厳密な模型試験が非常に難しい。ここでは、 Re 数がすべて乱流域にある条件の範囲で渦の発生条件は相似と考え、スケールモデルを用いた実流速条件での試験を行った。従って、実機の予測はスケール比だけの周波数換算を行えば良い。

(1) ノズル・コレクタ部での発生音

前述の鉄道総合技術研究所の風洞では低騒音を最優先とし、コレクタ断面寸法を大きくして噴流の衝突を極力避けるとともに、伴流吸込みによる流れの整流を試みた。しかし、これはノズルでの圧力損失を増加し、送風機の必要動力の増加につながった。そこで、コレクタ寸法と伴流吸込み量の適正化を検討した。

Fig.7 に模型試験の模式図と写真を示す。模型は 1/10 スケールモデルで、ノズル幅 700mm、ノズル高さ 450mm 測定室長さ 1500mm、コレクタには半径 50mm の半円形のベルマウスと 450mm の直ダクトが設置されている。騒音計側位置は、ノズル吹き出し口より 450mm 下流、風路中心より 500mm 側方、地面より 125mm 上方である。まず、ノズル単独、ノズル+地面の試験を行い、ノズル 3/4 周からの発生音および地面部分での発生音の寄与を求めた。続いてコレクタおよびディフューザを設置し、コレクタ口径、伴流吸込み率と発生音の関係を調べた。なお、伴流吸込み率は、Fig.7 のディフューザ出口に設置した金網の圧力損失を変化させることにより調整した。また、図では半無響室を設置していないモデルとなっているが、半無響室を設置しても結果に変化がないことは

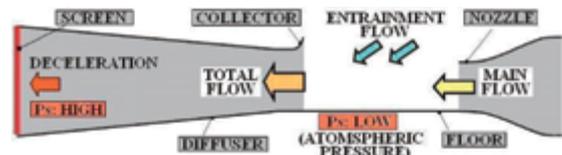
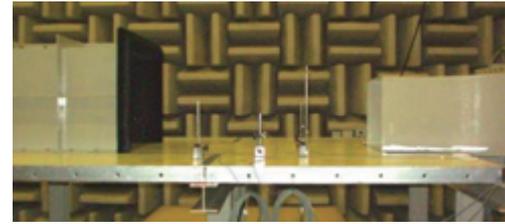


Fig.7 Schematic drawing and a photo of an experimental model of 3/4 open-jet wind tunnel.

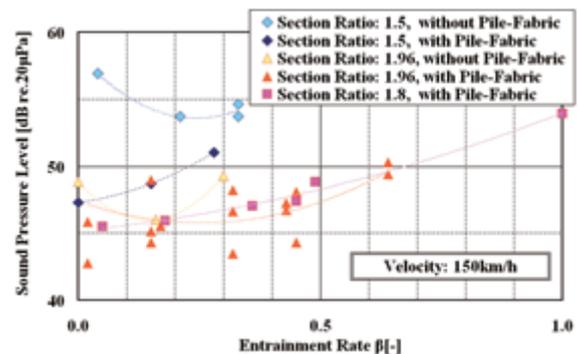


Fig.8 Comparison of estimated SPL of aerodynamic noise around a collector (1/3 octave band SPL at 1kHz).

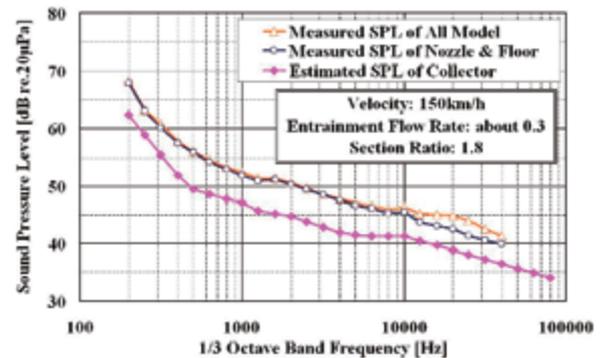


Fig.9 Measured and estimated sound spectra from nozzle-collector system.

確認済みである。

Fig.8 にノズル・コレクタの面積比を 1.5 と 1.96 に変化させた場合(柔毛材有、無)の伴流吸込み率とコレクタ周りの空力発生音の関係を、代表として 1kHz の 1/3 オクターブバンドレベルで比較している。コレクタ径が小さい場合(コレクタ面積比 1.5)には、柔毛材がないときはコレクタでの発生音が大きく、柔毛材によって空力発生音を大幅に低減できていることがわかる。この傾向は、コレクタ径が大きくなると少なくなるが、コレクタ面積比が 1.96 においても概ね 2~3dB の低減効果がみられる。また、コレクタ径が大きいほど、コレクタ周りの空力発生音は低減する傾向がある。しかし、コレクタ

径の増加に伴って測定室の圧損も増加するため、風洞全体に対する圧損影響も踏まえ、ここではコレクタ面積比 1.8 を採用した。コレクタ面積比が大きい場合には、伴流吸い込み率 β が 0.3 以下でコレクタでの空力発生音が概ね一定となる傾向がある。しかし、伴流吸い込み率が低い場合にはコレクタ周りで逆流が生じやすく、測定室内の静圧分布などの空力性能への影響も踏まえて、 $\beta=0.3$ を採用した。本条件でのノズル・コレクタ部での空力発生音と各部寄与を Fig.9 に示す。コレクタ発生音が十分抑えられていることがわかる。

(2) 境界層吸い込み装置発生音

境界層吸い込み装置は計測胴での大きな騒音源となる。別途設置した送風機で境界層を吸い込むサクシオン型と、主流の動圧を利用して境界層を外部に放出するスクープ型が考えられるが、ここでは比較的発生音が小さいと予想されるスクープ型について検討した。実験したスクープ形状と試験結果を Fig.10 に示す。なお、本モデルの 99%境界層厚さは 12mm であり、吸い込みダクトの高さは 10mm としている。スクープの先端形状、厚みに合わせて、地面板の高さを調節している。すべての形状において、主流速 150km/h 時吸い込み流量 0.3m³/s であった。図からスクープの先端形状は楕円形状が望ましく、厚みに応じて周波数特性が異なることがわかる。実機で問題となる 1kHz (模型で 10kHz) 付近に注目して、厚さ 12mm を採用した。なお、Fig.10 のスペクトルには、ノズル 3/4 周の発生音寄与も含まれている。よってその分を差し引いたスペクトルを地面板・境界層吸い込み装置の発生音とした。

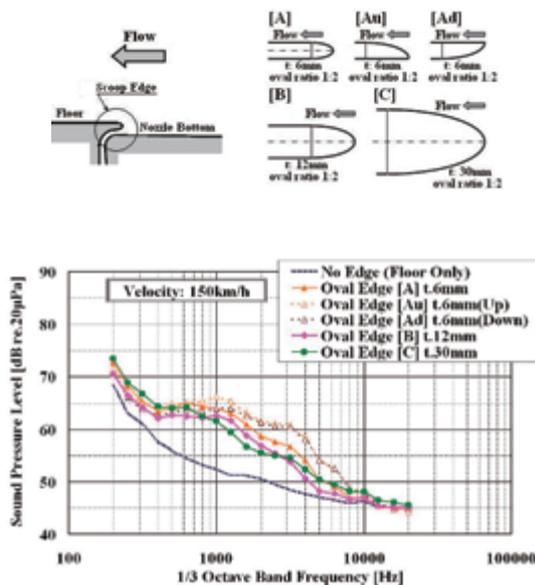


Fig.10 Comparison of sound spectra radiated from boundary layer controller.

(3) 風洞暗騒音の予測

以上の結果を踏まえ、実機での測定室内での風洞暗騒音 (A 特性補正スペクトル) とそれに対する各部の寄与

を Fig.11 にまとめる。ノズル吹き出し口とコレクタでの空力発生音の寄与はほぼ同等で、コレクタの部の低騒音化が功を奏しているといえる。また、数百 Hz 領域では境界層吸い込み装置の発生音の影響が大きいことがわかる。ただしオーバーオールへの寄与は 3dB アップと比較的小さく抑えることができている。

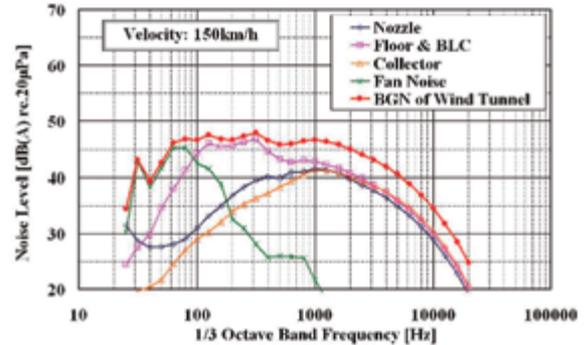


Fig.11 Predicted background noise spectra showing each contribution for 3/4 open-jet wind tunnel.

3. 風洞の低周波変動とその低減技術

上記音響風洞のように開放胴を持つ回流風洞では、測定部での静圧変動やダクトの音響共鳴に起因する流れの低周波脈動が発生することが知られている。ここでは Fig.12 に示す自動車用風洞の 1/10 スケールモデルを想定した模型風洞を用いて調査した結果を紹介する⁽³⁾。模型風洞の仕様は Table 2 に示すとおりである。



Fig.12 Top view of the model wind tunnel.

Table2 Specification of the model wind.

Item	Specifications
Wind Tunnel Type	3/4 Open Jet
Total Duct Length	26m
Size of Nozzle Exit	Width: 700mm, Height: 450mm
Length of Measuring Section	Nozzle Exit to Collector Inlet: 1500mm
Size of Anechoic Room	Width: 2100m, Height: 1180mm

計測胴の中央 (ノズル吹き出し口下流 450mm, 高さ 150mm) での静圧変動 (主流動圧に対する比で表示) の主流側に対する変化の様子を Fig.13 に、代表的な風速におけるスペクトルを Fig.14 に示す。特定の風速で静圧変動が大きくなっているが、これは、ノズル・コレクタ部で発生する渦とダクトの音響共鳴が連成した自励現象に

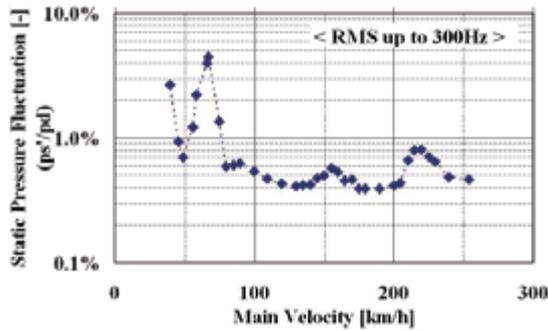


Fig.13 Static pressure fluctuation v.s. wind speed.

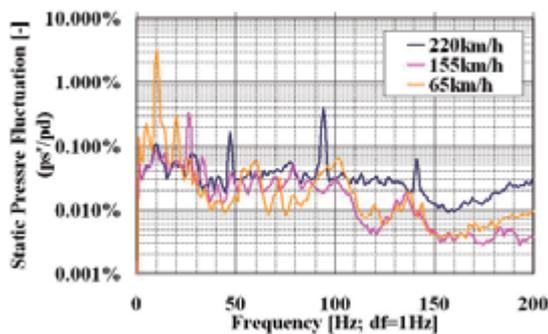


Fig.14 Static pressure fluctuation spectra at some particular wind speed.

よる脈動によるもので、スペクトルピークに対応する(音響共鳴成分). 5Hz以下のランダム成分は、測定胴の場所によるレベルの変化は少なく、風路各所で発生したランダム変動が波動として伝播してきたものと考えられる(ゆらぎ成分). また、300Hz以下のランダム成分は測定胴内で分布を持ち、測定胴の後方、側方に近づくにつれて大きくなる. 測定胴内は全て流速が均一な噴流のポテンシャルコア内にあり、せん断層や混合層とは直接接触していない. よって上記変動成分は、せん断層や混合層の擾乱がエバネッセントウェーブとして伝播してきたものと考えられる(せん断層・混合層成分). これらの変動は風洞を用いた空力性能の計測に悪影響を与えることが懸念されるので、総称して風洞の低周波変動と呼ぶこととする.

ゆらぎ成分の低減には、風路内の乱れの低減が重要であり、伴流吸い込み、コレクタ部への柔毛材の設置も効果的である. 音響共鳴成分の低減には吸い込んだ伴流の開放口設置位置をチューニングし、測定胴での音響インピーダンスを低くする対策が効果的である. 本実験ではFig.15に示す2か所の開口を設置することによりうまく対策することができた. コレクタへ柔毛材を設置し、伴流吸い込み率 $\beta=0.3$ とし、伴流開放口を1か所(A)、2か所(B)とした場合の対策効果をFigs.16, 17に示す. ほぼ脈動が治まっているのがわかる. なお、せん断層・混合成分については本質的なものであり、開放胴を使用する以上避けられない.

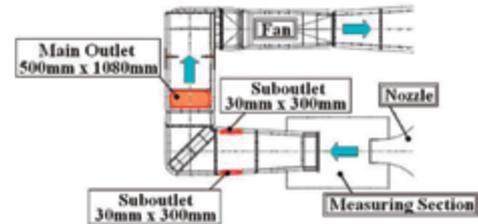


Fig.15 Diagram of acoustic opening positions used to control acoustic resonance components.

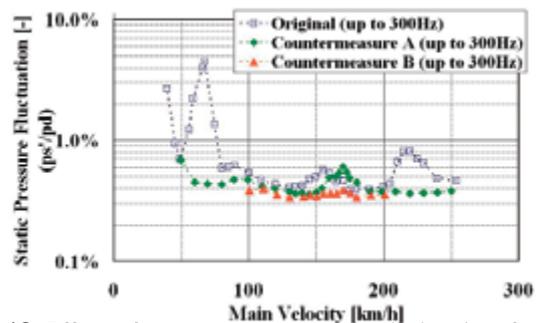


Fig.16 Effect of countermeasures on reducing low-frequency fluctuations as a function of wind speed.

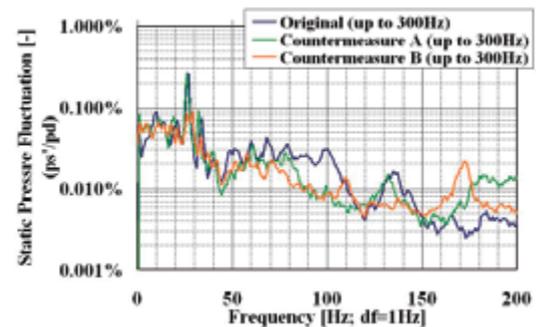


Fig.17 Comparison of fluctuation spectra with and without countermeasures at 160km/h.

4. 音響トラフと空力音響トラフ

4.1 音響トラフ

音響風洞は一般に開放胴と無響室を有しているため、圧力損失が大きく、かつ大きなスペースが必要である. また、ノズルやコレクタでの空力発生音が風洞暗騒音の主な原因となるとともに、低周波変動にも注意する必要がある.

これらの問題を解決する方法の一つとして、密閉胴の壁面を音響透過壁で構成し、その外に内部を吸音した音響計測箱を設置した音響トラフの利用が提唱されている⁽⁴⁾. ここでは実車風洞の1/10スケールモデルをイメージし、高さ500mm、幅500mm、長さ1000mmの計測胴の壁を、音響透過壁(表面に毛足長さ10mmの柔毛材素材を張った多孔板(厚さ2mm、孔径6mm、開口率50%))で構成した密閉胴を制作した. 内部に1/10スケールの自動車模型を設置し、音響透過壁有無の条件で発生音を計

測した結果を Fig.18 に示す。試験は無響室の中で実施したので、ここでは音響計測箱を用いずに音響透過壁透過音を計測している。なお、計測対象周波数は 2kHz（実機換算 200Hz）以上としている。音響透過壁を用いて計測した結果は、半開放型風洞で計測した結果と類似しており、風洞暗騒音に対して十分な S/N 比で計測できることがわかる。

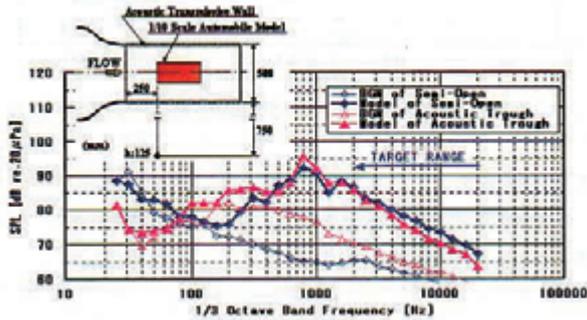


Fig.18 Sound spectra measured through the acoustic transparent wall.

4.2 空力音響トラフ

密閉胴で空力性能を同時に計測する場合、模型のブロッキングが問題となり、あまり大きな供試体を用いることができない。空力風洞では高ブロッキングの供試体の試験を可能にするため、スロットドウォールが用いられるのにヒントを得て、スロットドウォールと音響トラフを組み合わせた空力音響トラフを試作し、その可能性を調べた。空力音響トラフの概念図を Fig.19 に示す。

上述の音響トラフの試験装置の音響透過壁の代わりに、床面を除く 3 面に流れと平行に $\phi 8\text{mm}$ の SUS 製パイプを 11mm ピッチで配置したパイプ壁（開口率 30%）を設置した。計測胴の長さは 1200mm で、最下流にはパイプ壁を通過する流量を調節するために上面および両側面にフラップを設けた。パイプ壁の背後は深さ 60mm の箱型（トラフ）とし、パイプ壁の対面には厚さ 100mm のウレタン吸音材を設け、その表面はトラフ内の気流による擦過音を抑制するため柔毛状素材を張り付けた。

本風洞に設置したブロッキング 20% の模型の静圧分布は、密閉胴に設置したブロッキング 5% の相似模型の静圧分布とほぼ等しく、正しい空力性能が計測されていることが確認された。

1/10 スケールの自動車模型に対する発生音計測結果を Fig.20 に示す。空力音響トラフのパイプ壁による二次発生音は開放型風洞と比べて 10kHz 以下で約 5dB 高い値となるが、自動車模型の空力発生音に対しては全周波数帯域で約 10dB の S/N が確保できることが確認できた。なお、開放型風洞での計測値とレベル、スペクトル形状が異なっているが、これが流れパターンの変化に起因するものなのか、音響特性の差によるものなのか今後検討が必要である。

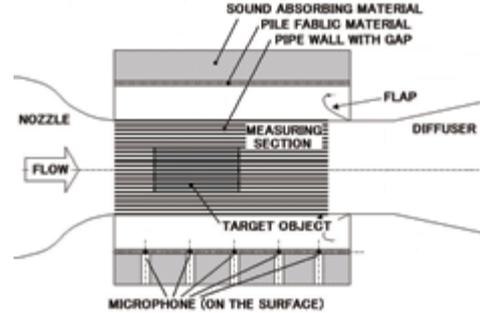


Fig.19 Schematic drawing of an aero-acoustic trough.

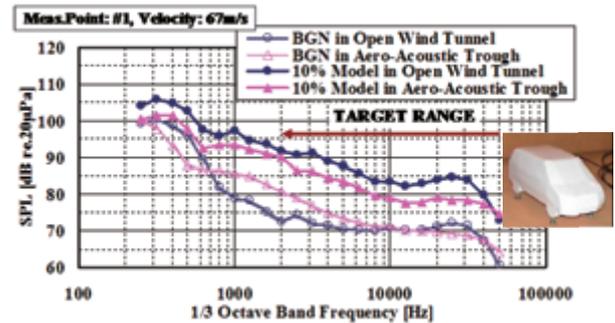


Fig.20 Sound spectra measured in the aero-acoustic trough.

5. まとめ

風洞低騒音化技術、低周波変動低減技術として、適切な伴流吸い込みとその開放位置の最適化の重要性、および柔毛状素材の貼り付け効果について解説した。また今後の空力音響風洞として、音響トラフ、空力音響トラフの活用の有用性を示した。これらについては今後さらに研究が進むことを期待したい。

参考文献

- 1) Nishimura, M., Kudo, T., Nakagawa, K., Maruoka, A., Zenda, Y. and Nishioka, M.: Development of quieting techniques for wind tunnel, Proc. of internoise97 (1997) pp.379-382.
- 2) Kudo, T., Maeda, K. and Nishimura, M.: Techniques of reducing aerodynamic noises in 3/4 open-jet wind tunnels, Journal of Environment and Engineering, Vol.4, No.2 (2009) pp.276-288.
- 3) Kudo, T, Komatsu, Y., Maeda, K. and Nishimura, M.: Techniques for reducing low-frequency fluctuations in aeroacoustic wind tunnels, Journal of Environment and Engineering, Vol.4, No.2 (2009) pp.289-301.
- 4) 工藤敏文, 田中守, 山口勉, 西村正治: 風洞用音響計測トラフの開発, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集 (VII), No.03-1 2434 (2003) pp.311-312.
- 5) 工藤敏文: 風洞の低騒音化技術に関する研究, 鳥取大学博士論文 (2009) .
- 6) 西村正治, 工藤敏文, 中川敬三, 丸岡昭, 善田康雄, 西岡通男: 大型低騒音風洞の開発, 日本機械学会第 74 期全国大会講演論文集 (III), No.96-15 (1996) pp.725-726.
- 7) 西岡通男, 平井誠: 柔毛壁乱流境界層について, 第 28 回乱流シンポジウム講演論文集, (1996) pp.117-118.
- 8) Nishimura, M. and Goto, T.: Aerodynamic noise reduction by pile fabrics, Fluid Dyn. Res. Vol.42 (2010) 015003 (17pp).