

空力騒音の発生に及ぼす乱流の影響

飯田明由, 森田謙次(工学院大学), 谷田寛行(日立インダストリーズ)

Effect of turbulence on aerodynamic noise generation

Akiyoshi Iida*, Kenji Morita*, and Hiroyuki Tanida**

*Dept. Mech. Eng., Kogakuin University

**Hitachi Industries Ltd

ABSTRACT

In this paper we attempted to develop a low-noise "active turbulence generator (ATG)" for aerodynamic noise measurement in a large scale turbulent flow field. The aerodynamic noise from the developed ATG was only 10 dB larger than that of the conventional wind tunnel. Aerodynamic noise from a rearview mirror was measured to estimate sound generation effect on turbulence intensity. The experimental result showed that the edge tone of the rearview mirror was disappeared in the case of strong turbulent flow field. Aerodynamic noises strongly depend on the turbulence intensity and eddy scale of incoming flow. The turbulence of incoming flow is important parameter to estimate flow around real cars. The active turbulence generator is one of the useful devices to simulate real road simulations in wind tunnels.

Key Words: Aerodynamic noise, Turbulence, Bluff body, Edge-tone

1 序論

自動車や新幹線などの高速車両では、空力騒音低減技術の開発が製品開発における主要課題となっており、風洞実験や数値解析による空力騒音の予測・低減手法の開発が精力的に進められている。

これまでの技術開発により、一様流中におかれた流れから発生する空力騒音についてはかなりのことが明らかになってきた。しかし、実際の工業製品が利用されている環境は風洞実験のように理想的なものではなく、境界条件が時々刻々と変化する場合がある。たとえば、トラックの後ろを走行する乗用車の場合、トラックが作る後流により流れは風洞実験のような一様な流れとは限らない。大気乱流による突風や横風が問題となることも多い。自動車や新幹線の開発においても、ファンやタービンの開発などで問題となるガスト流の影響についても考慮すべき段階になってきたと考えられる。

本研究の目的は、自動車や新幹線など開発において、今後問題となると考えられる乱流中における車両の空力特性、特に空力騒音の測定方法を開発することである。

自動車の開発においては、様々な気象条件や気流条件が考えられるため、風洞中の乱れや渦スケールをコントロールできることが望ましい。風洞中の乱流場をコントロールするのは、動的な乱流発生装置が必要となるが、動的乱流発生装置の場合、乱流発生装置自体の騒音が問題となる可能性がある。そこで本研究では、小型低騒音風洞に乱流発生装置を設置し、その特性を評価するとともに、乱流発生装置によって発生する騒音低減手法について検討を行った。

開発した乱流発生装置を用いてドアミラーから発生する空力騒音と円柱から放射される空力音を測定し、主流の乱れが空力騒音の発生にどのような影響を及ぼすか調べた。

2 乱流発生装置

風洞中に強い乱流場を作る試みは 1970 年代から行われているが、最も成功した手法は蒔田らの開発した動的乱流発生装置⁽¹⁾である。蒔田らの開発した装置は風洞測定部を 15 段から 20 段に分割し、各段に小型の矩形翼を取り付け、この矩形翼をランダムに振動させることにより、風洞中に大規模乱流場を発生させることが可能である。乱流発生装置の振動翼を制御することにより、速度勾配を制御することも可能である。乱れ強度は 20% から 30% にも達し、積分特性距離は通常の格子乱流の 4 倍近い大きさになる。エネルギースペクトルには 2 桁以上の波数に渡って慣性小領域が観察されることも確認されている。

他にも大規模乱流を作る方法として、風洞内に圧力チャンバを備え、チャンバ内の圧力と風洞ダクトのバランスをコントロールすることにより脈動を発生させるもの。多数のファンを使って、流れを制御する方法、格子乱流からジェットを噴出す方法などがある。しかし、自動車用の乱流発生装置として利用する場合、流れの制御のし易さから、振動翼を使った動的乱流発生装置が優れていると考えられる。

動的乱流発生装置の問題点は翼の振動に伴う騒音の発生である。特に、翼から発生する空力騒音は測定対象となる車両モデルやドアミラーからの騒音をマスクしてしまう可能性もある。そこで小

型低騒音風洞用に乱流発生装置を作成し、その騒音特性について調べた。

図 1 に開発した乱流発生装置を示す。低騒音風洞（測定断面 30cm × 30cm）のノズル出口部を 4 段に分割し、矩形翼を取り付け、ステッピングモータで矩形翼を振動させて大規模乱流場を発生させた。蒔田らの装置では矩形翼がダクトを全閉させることも可能だが、本研究では空力騒音を測定するため主流速度が速いことから、ダクトを全閉させないようにするため、矩形翼の間に隙間を設けた。ステッピングモータは 1 チップマイコン（PIC）を使って定常回転やランダム回転などの制御を行った。

図 2 に乱流発生装置を使用した場合の流れ場のエネルギースペクトルを示す。エネルギースペクトル中に慣性小領域が観察されることから大規模な乱流場が形成されていることがわかる。このときの乱流強度は約 20% である。

図 3 は乱流発生装置を使用した場合の風洞暗騒音の測定結果である。図中の暗騒音は乱流発生装置を使用しない場合である。乱流発生装置を設置した場合、暗騒音が 24dB 程度増加する。乱流発生装置の下流にサイレンサを設置し、さらに矩形翼の振動モード（振動角度及び回転速度）を調整した結果、最終的には乱れ強度 10% 以上の大規模乱流場において、騒音レベルを暗騒音に対して 10dB 程度の増加に抑えることができた。なお、流れ場の非一様性は風洞端部をのぞき、ほぼ 1% 以内である。

3 実験結果

円柱に小さな穴を開け、後流に流れを噴出させると空力騒音を抑制できることが知られている。この手法はパンタグラフ騒音の低減に利用されているが、円柱から放射される空力音の低減技術が強い乱れ場において有効かどうか確認するため、円柱と孔付円柱周りの流れの可視化と騒音測定を行った。図 4 に可視化結果を示す。

主流が層流の場合、円柱後流には明確なカルマン渦が観察される。また、間欠孔から噴流が噴出し、後流における渦の巻き上がりが下流に移動していることがわかる。一方、流れが乱流の場合は、円柱と間欠孔付円柱の流れに大きな差が見られなくなる。図 5 に騒音測定結果を示す。流れが層流の場合は、可視化写真の変化に対応してカルマン渦による騒音が抑制されていることがわかる。流れが乱流の場合に注目すべき点は円柱から放射されるカルマン渦によるピーク性騒音はほとんど小さくならないことである。間欠孔による騒音低減効果は層流の時に比べて小さくなる。

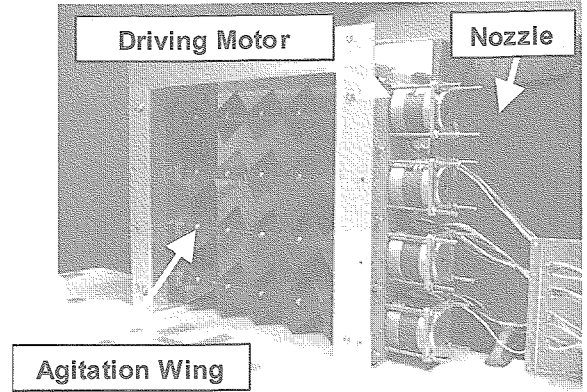


Figure 1. Active turbulence generator for low-noise wind tunnel with small agitator wings and driving motors

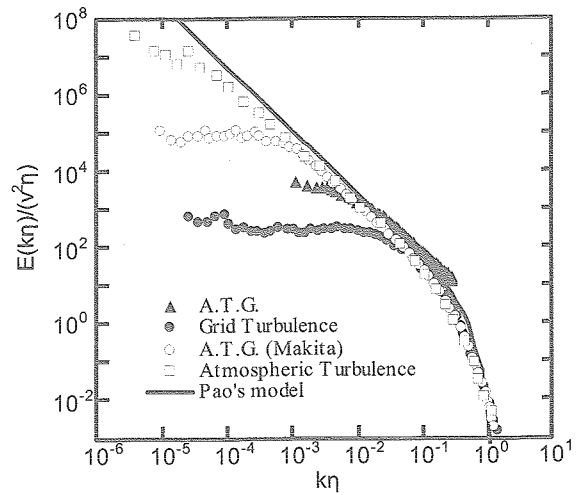


Figure 2. One-dimensional energy spectra of turbulent flow fields

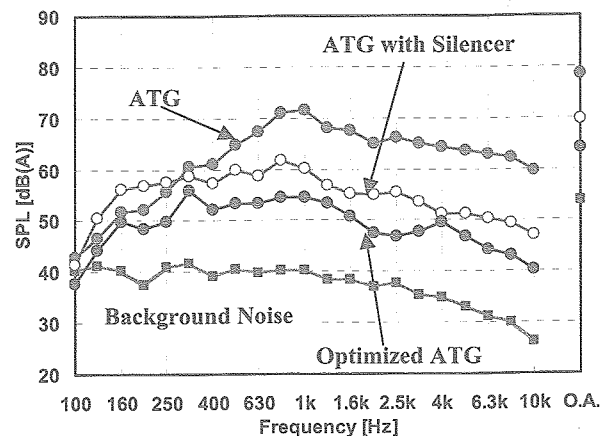
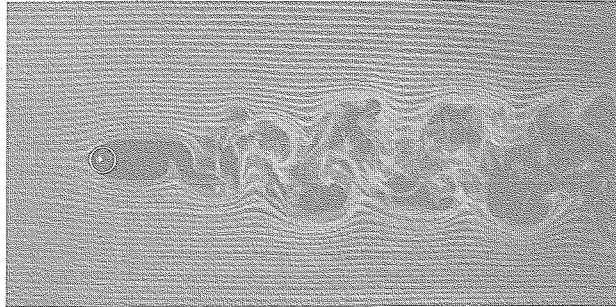
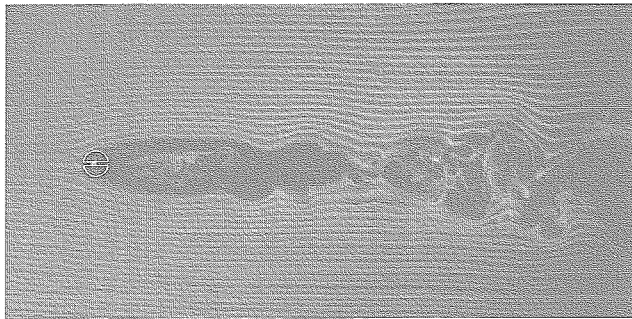


Figure 3. Aerodynamic noise of the active turbulence generator at flow velocity of 30 m/s

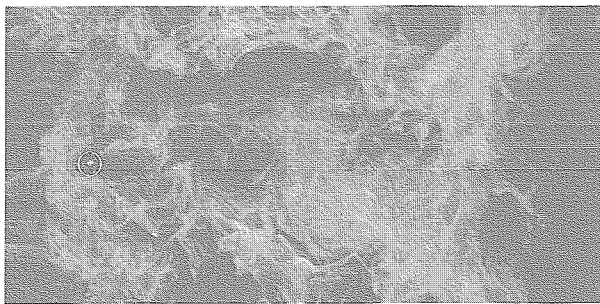
このことから流れが乱流になってもカルマン渦のような大規模渦による騒音の寄与はほとんど影響を受けない。したがって、実際の新幹線の走行において気流の乱れの影響はあまり大きくないと考えられる。また、間欠孔による対策は風洞実験（層流）よりも効果が小さくなる可能性がある。



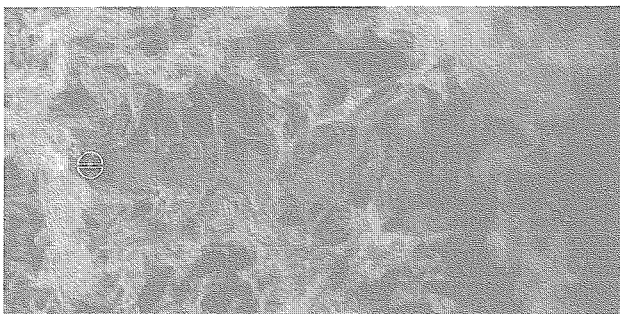
(a) Circular cylinder (Laminar)



(b) Circular cylinder with holes (Laminar)

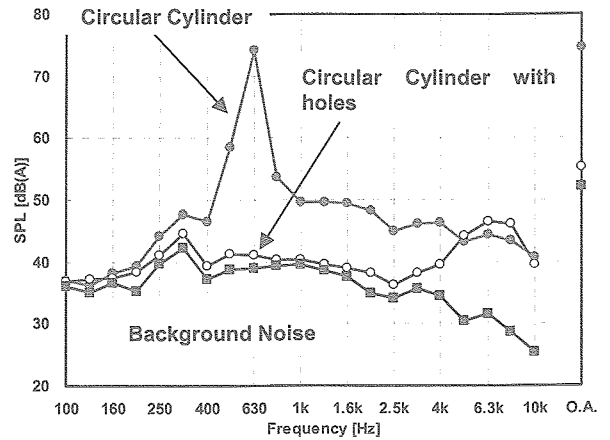


(c) Circular cylinder (Turbulence)

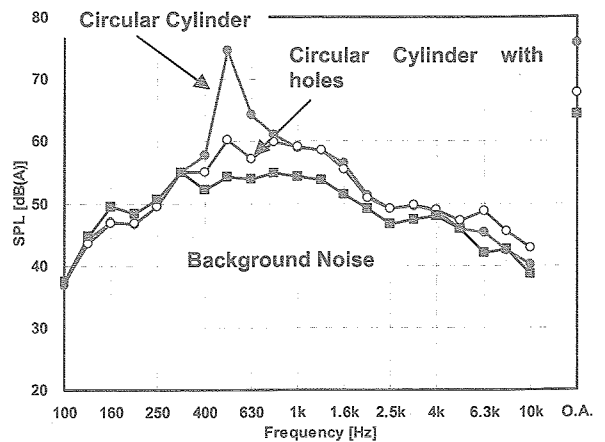


(d) Circular cylinder with holes (Turbulence)

Figure 4 Flow pattern around a circular cylinder ($U_0=1\text{m/s}$)



(a) Laminar flow, $U_0=30\text{m/s}$



(b) Turbulent flow, $U_0=30\text{m/s}$

Figure 5 Aerodynamic noise from a circular cylinder and a circular cylinder with small holes

図6に自動車ドアミラーを模擬した風洞実験模型⁽²⁾を示す。この実験では半円柱の端部に1/4球を取り付けた簡易モデルを使用した。ドアミラーは複数の部品を組み合わせるため、表面に段差ができることが多い。図6に示すようにドアミラーモデル表面に段差を模擬したテープをつけ、実際の流れ場を模擬した。図7に騒音測定結果を示す。段差の設置位置によってピーク性の騒音が出る場合と出ない場合がある。このようなピーク性騒音は異音として問題となることが多い。図8にピーク性の異音と段差の高さの関係を示す。段差の高さがドアミラー表面の境界層厚さの半程度の場合に強い異音が発生することがわかる。これは段差が境界層より薄い場合は、境界層内に正弦波上の外乱が導入され、その外乱がドアミラーの端部と干渉して騒音が発生するものと予想される。境界層が乱流に遷移すると異音が発生しなくなることから、外乱がドアミラー端部までその形

を維持するかどうか異音の発生に関係しているものと考えられる。

図9は乱流発生装置を使って強い乱れ場にドアミラーモデルを設置した際の空力騒音測定結果である。乱れ強度が大きくなると異音の発生が抑制されることがわかる。主流の乱れ強度が大きくなるとドアミラー表面の段差によって作られる正弦波状の渦が破壊され、ドアミラー端部におけるフィードバック音が形成されなくなると考えられる。

実際の自動車の走行中には乱流の影響によって異音が発生する場合と発生しない場合があると考えられることから、乱流発生装置を用いた空力騒音計測により、空力騒音の発生に対する乱流の影響を定量的に調べることが可能である。

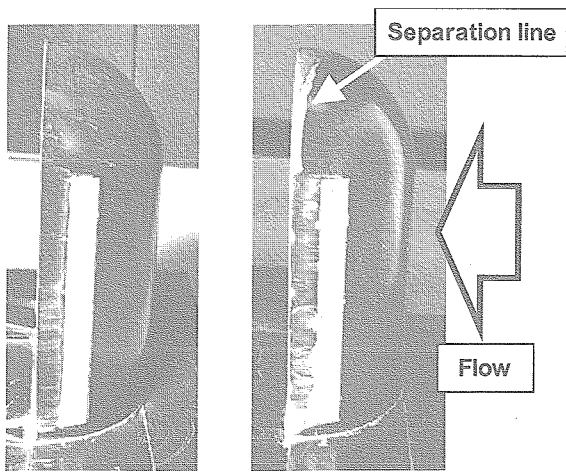


Figure 6. Oil flow images of the flow around a rearview mirror with (left) and without (right) the active turbulence generator ($U_0=30\text{m/s}$)

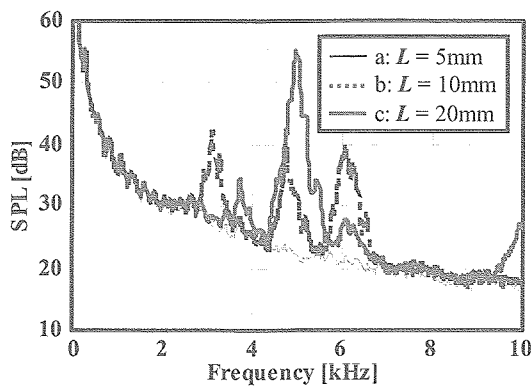


Figure 7 Aerodynamic noise spectra from rearview mirrors with step ($U_0 = 30 \text{ m/s}$)

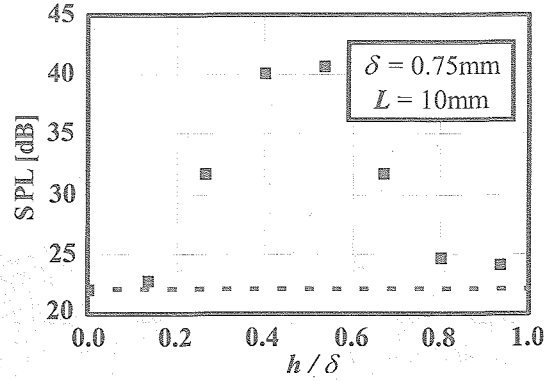


Figure 8 Effects on the noise generation of height of Step ($U_0 = 30 \text{ m/s}$)

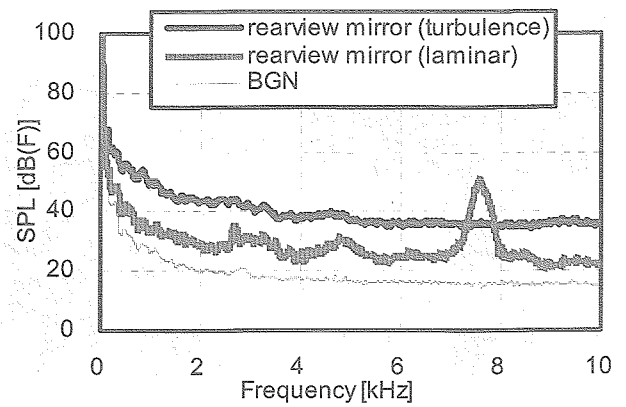


Figure 9. Aerodynamic Noise form a rearview mirror in large scale turbulent flow ($U_0=30\text{m/s}$)

4まとめ

低騒音乱流発生装置を開発し、空力騒音の発生に対する乱流の影響について調べた。カルマン渦のような大規模渦から放射される空力騒音に対しては乱流の影響は小さいが、ドアミラーから放射される異音に対する影響は大きいことがわかった。今後、乱れ強度、渦スケールと空力騒音の関係を明らかにし、自動車の実走行時における空力騒音対策に役立てていきたい。

References

- [1] H. Makita, *Fluid Dyna. Res.* Vol. 8, pp. 53-64 (1991)
- [2] R. Siegert, V. Schwarz, & J. Reichenberger, Numerical Simulation of Aero Acoustic Sound Generated by Generic Bodies Placed on a Plate - Prediction of Radiated Sound Pressure, 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-99-1895.(1999)