

## 自動車ドアミラーの後流構造と空力騒音に関する研究

佐々木壮一\*・山内勝也\*\*・尾道雄太\*\*\*

山下信哉\*\*\*\*・竹下 賢\*\*\*\*

Study on Wake Structure and Aerodynamic  
Noise of an Automobile Door Mirror

by

Soichi SASAKI\*, Katsuya YAMAUCHI\*\*, Yuta ONOMICHI\*\*\*  
Shinya YAMASHITA\*\*\*\* and Masaru TAKESHITA\*\*\*\*

A driver feels discrepancy between the actual measured aerodynamic noise generated from an automobile door mirror and own impression. In order to clarify the mechanism of the gap on the sense of the noise, we estimated quantitatively the influence of assembly quality of the door mirror on the aerodynamic noise in the wind tunnel experiment. The aerodynamic noise of the door mirror is analyzed based on Curle's equation using the characteristics of the wake structure. The clearance between the panel of the body and base of the door mirror affects the noise level in the high frequency domain, whereas the clearance between the base and visor influences the noise level in the low frequency domain. We analyzed the mechanism of the aerodynamic noise as the noise level becomes large due to the increase of the wake width when the clearance between the base and visor is increased.

**Key words:** *Vortex, Aerodynamic Noise, Wake, Velocity Distribution*

## 1. はじめに

自動車の車室内騒音を音源によって分類すると、エンジン、動力伝達機構、タイヤやサスペンションなどの機械振動と、車両各部の流れのはく離や空調機器から発生する空力騒音に分類することができる。特に、高級車では、これらの機械騒音について低減されてきていることに加え、今後、ハイブリッドカーや電気自動車が普及するとこれらの機械振動はさらに低減されることが予想される。従って、今後は空力騒音の対策

が自動車の静粛化において重要な課題となる。飯田ら<sup>(1)</sup>は、ドアミラーを模擬した風洞実験用モデルの表面に段差を設置し、ドアミラーから発生する空力的な異音と段差の関係について実験的な検討を行った。農沢ら<sup>(2)</sup>は、自動車のサイドウィンド周りから発生する空力騒音を対象として、実験及び数値シミュレーションにより流れ場及び音場の解析を行い、フロントピラー及びドアミラーのはく離渦による空力騒音の発生メカニズムを明らかにした。加藤ら<sup>(3)</sup>は、Slimon ら<sup>(4)</sup>によつ

---

平成27年1月23日受理

\* システム科学部門 (System Science Division)

\*\* 電気・情報科学部門 (Electrical Engineering and Computer Science Division)

\*\*\* 総合工学専攻 (Department of Advanced Engineering)

\*\*\*\* トヨタ自動車九州品質保証部 (Quality Control Department, TOYOTA MOTOR KYUSHU, INC.)

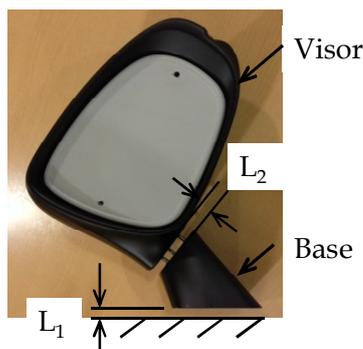


Fig. 1 Door mirror model of an automobile

Table 1 Summary on the quality control specifications and the experimental condition of the clearance

	Q.C. Spec.	Clearance
L1, mm	2.0	0, 2, 4, 6
L2, mm	0.8	0, 0.8, 2, 4

て提案された計算方法を実際のドアミラー形状に応用し、ドアミラーから発生する近距離場の風切り音の様子を観察している。このように、従来の研究では、空力騒音に関する個別の発生メカニズムを理解するための実験的研究、あるいは数値シミュレーションなどが試みられている。しかし、自動車ドアミラーから発生する実測値の空力騒音と運転者が感じる印象との間には乖離があり、その原因の究明が現実的な課題となっている。本研究では、ドアミラーから発生する空力騒音と運転者の官能との乖離に関する研究の第一歩として、主に、ドアミラーの取り付け精度が空力騒音に及ぼす影響を風洞実験で評価した。

## 2. 実験装置および測定方法

図1は風洞実験のためのドアミラーの模型を示したものである。この模型は実車のドアミラーを模して製作されたものである。この模型の寸法比は実機の5/6であり、ドアパネルからミラー先端までの高さは215mmである。ドアミラーはベース部分とバイザー部分で作られている。それらは互いにネジで締結され、間隙幅を任意に変化させることができる。これらの間隙幅の実験条件が表1に整理されている。実車のベースとバイザー、およびベースと車体の間には適切な間隙の管理寸法(Q.C. Spec.)が規定されている。この実験では、ドアパネルとベースの間隙幅L1、およびベースとバイザーの間隙幅L2が空力騒音に及ぼす影響について調査する。

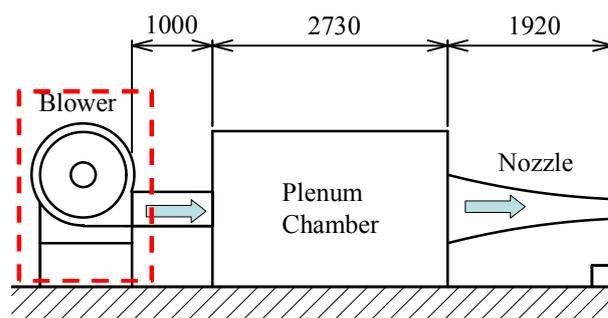


Fig. 2 Open channel wind tunnel

Table 2 Specifications of the wind tunnel

Nozzle	230×230mm
Rotation speed	1750 rpm
Output	15kW
Flow rate	150m <sup>3</sup> /min
Total pressure	240mmAq

図2は吹き出し風洞の概略図を示したものである。その主要諸元が表2に整理されている。送風機からの暗騒音を低減させるために、プロアの周りを防音壁で覆い、その内側には吸音効果のある厚さ50mmのグラスウールが取り付けられている。この防音壁には約20dBの防音効果があった。図3には、風洞実験における騒音の測定方法が示されている。ドアミラーはノズル出口から350mm下流側に取り付けられる。騒音は1/2インチマイクロフォンが取り付けられた精密騒音計(小野測器, LA-4350)によって測定される。マイクはテストベンチに取り付けられたドアミラーから鉛直方向1.0mの位置に取り付けられる。マイクによって測定された騒音の信号はFFTアナライザ(小野測器, CF5210)によって周波数分析される。時速144kmの試験における暗騒音レベルは64.9dBであり、その騒音レベルはドアミラーから発生する空力騒音よりも約8dB小さいことを予備実験で確認している。図4はドアミラー後流の測定面を示したものである。主流方向をX、水平方向をY、鉛直方向をZと定義した。X軸方向の測定範囲は、ドアミラー10mm後方を基準とした位置から140mmの範囲であり、Y軸方向の測定範囲は200mmである。Z軸方向の測定位置は、70mm、110mmおよび210mmの3断面である。測定点の間隔は、X軸方向Y軸方向ともに10mmである。その速度と速度変動は熱線プローブをトラバース装置で移動させながら熱線流速計によって測定される。

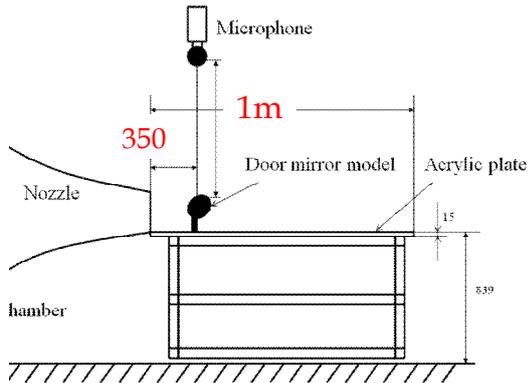


Fig. 3 Measurement method for the noise

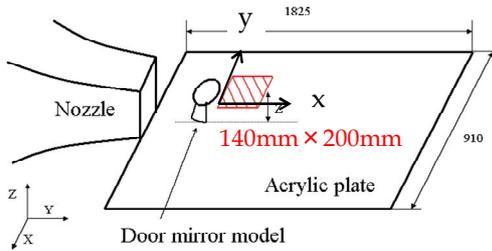


Fig. 4 Measurement method of the flow regime on the wake of the door mirror

### 3. 渦構造に基づく空力騒音の解析

図5は円柱後流の渦構造と空力音源の関係を示した概念図である。Curle<sup>(5)</sup>はLighthill<sup>(6)</sup>の音響波動方程式の解に固体壁の影響を取り入れて、壁面寸法が音の波長よりも十分短い場合は、式(1)が成立することを示した。

$$p = \frac{1}{4\pi a_0} \frac{r_i}{r^2} \frac{\partial F_i}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 $a_0$ は音速、 $r$ は音源から観測点までの距離、 $F$ は固体表面に作用する揚力、 $i$ は方向ベクトルの識別子である。この右辺の揚力が正弦波の変動をする場合、その微分は式(2)となる。

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = \omega \overline{C_L}, \therefore C_L(t) = \frac{F \sin(\omega t + \phi)}{\rho U^2 / 2} \quad (2)$$

式(2)の揚力変動の角周波数がストロハル数 $S_t$ の関係によって与えられると、その周波数は式(3)になる。

$$\omega = \frac{2\pi S_t U}{D} \quad (3)$$

このとき、揚力の微分は式(4)となる。

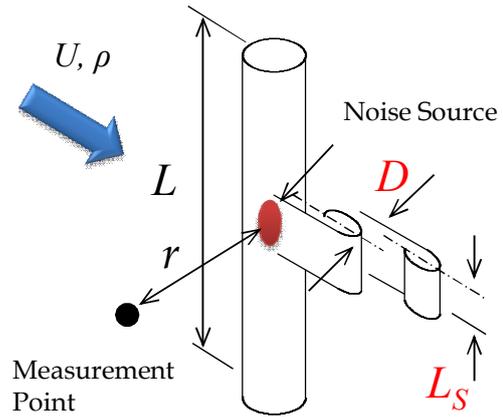


Fig. 5 Schematic view of the wake vortices and the aerodynamic noise source on the cylinder

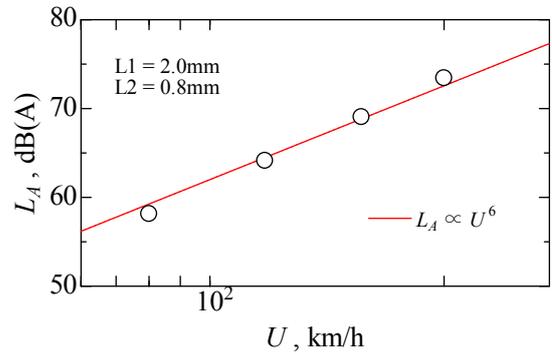


Fig. 6 Relationship between the mainstream velocity and the overall noise level

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \rho \pi U^3 S_t L C_L \quad (4)$$

従って、音圧の二乗平均値は式(5)となる。

$$\overline{p^2} = \frac{\rho^2 U^6 S_t^2 L^2 \overline{C_L^2}}{16 a_0^2 r^2} \quad (5)$$

しかし、実際には揚力変動はスパン方向に完全に同位相ではなく、ある相関長  $L_c$  にわたってのみ同位相である。そこで円柱上に長さ $L_c$ の互いに無相関な音源が  $(L/L_c)$  個存在すると仮定する。ここで $L_c = \alpha D$  とすれば、式(5)は式(6)として与えられる。

$$\overline{p^2} \propto \frac{\rho^2 U^6 S_t^2 L \alpha \overline{C_L^2} D}{16 a_0^2 r^2} \quad (6)$$

ここで、 $D$ は二次元の後流の幅である(図5参照)。

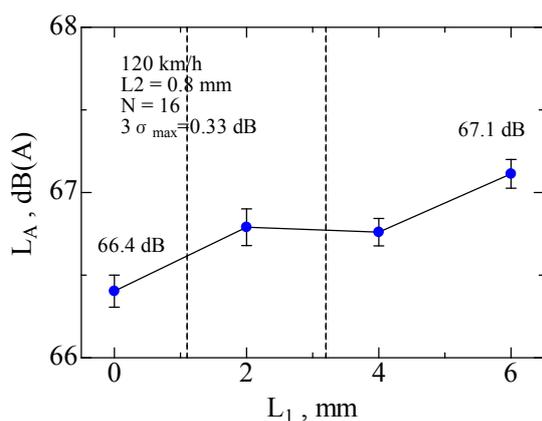


Fig. 7 Noise characteristics on the clearance between the door panel and the base

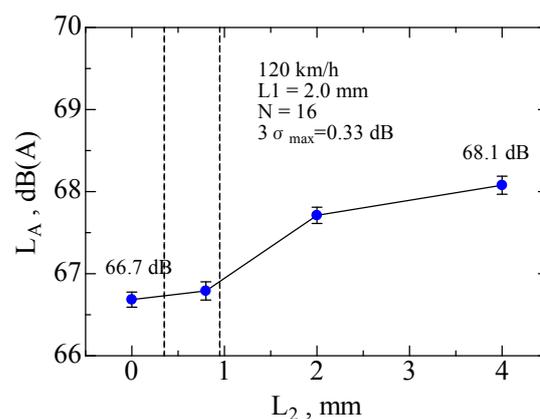


Fig. 9 Noise characteristics on the clearance between the base and the visor

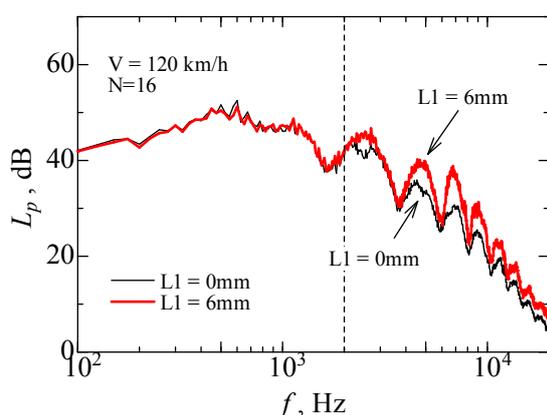


Fig. 8 Comparison on the spectral distribution of the noise level in the difference of L1

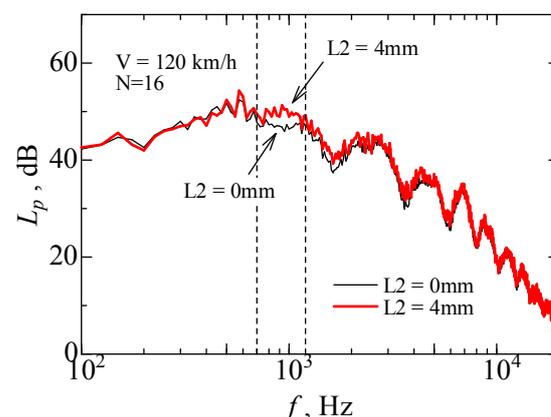


Fig. 10 Comparison on the spectral distribution of the noise level in the difference of L2

## 4. 結果および考察

### 4.1 ドアミラー空力音の騒音特性

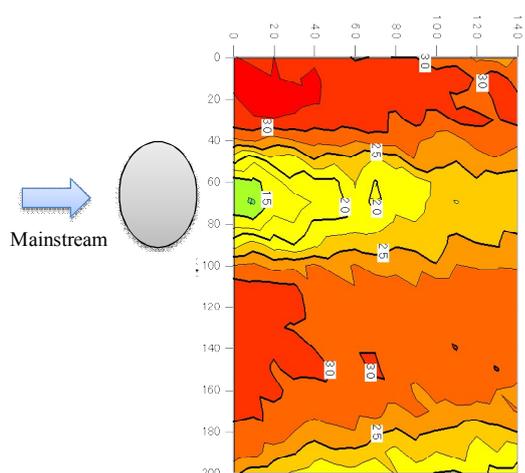
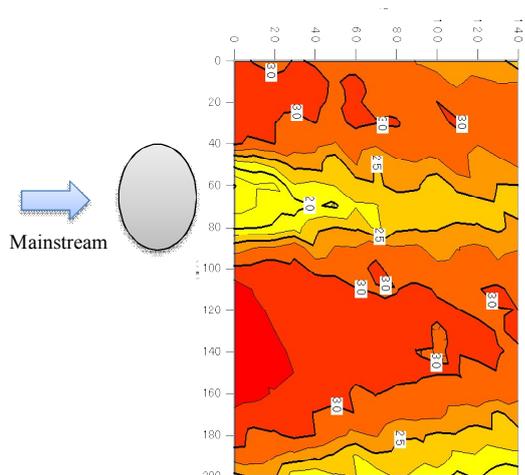
図6には、風洞の主流風速と全帯域騒音レベルの関係が示されている。式(6)によれば、固体表面から発生する空力騒音は主流速度の6乗に比例することがわかる。ドアミラー騒音の音圧は主流速度のおよそ6乗に比例し、その騒音特性は固体表面から発生する空力騒音の特性に近い傾向を示す。このドアミラーから発生する空力騒音にはその主流速度に応じた相似性があると考え、以下の解析では、代表風速120km/hの空力騒音を解析する。

図7は隙間L1が騒音レベルに及ぼす影響を評価したものである。このとき、L2は0.8mmに固定されている。騒音レベルは測定母集団N=16の平均値である。

騒音レベルはL1 = 0mmのときに最小であり、L1 = 6mmのときに最大となる。両者の差は1.7dBである。測定データの標準偏差は $3\sigma = 0.33\text{dB}$ であった。図8は、L1 = 0mmとL1 = 6mmの騒音のスペクトル分布を比較したものである。ドアミラーから発生する空力騒音は2000Hz以上の領域で差が生じている。

図9は隙間L2が騒音レベルに及ぼす影響を評価したものである。このとき、L1は2mmに固定されている。騒音レベルの最小値はL2 = 0mmであり、その最大値はL2 = 4mmのときである。両者の差は1.4dBであった。その標準偏差は $3\sigma = 0.33\text{dB}$ となった。図10ではこれら二つの空力騒音のスペクトルが比較されている。L2 = 4mmの空力騒音が周波数700Hzから1200Hzの帯域でL2 = 0mmよりも大きくなっている。以上の結果から、ドアパネルとベースの隙間を変化さ

## 自動車ドアミラーの後流構造と空力騒音に関する研究

(a)  $L2 = 0\text{mm}$ (b)  $L2 = 4\text{mm}$ Fig. 11 Velocity distribution in the wake of the door mirror ( $Z=70\text{mm}$ ,  $V=120\text{km/h}$ )

せると高周波側の騒音に影響を及ぼし、ベースとバイザー間の隙間を変化させると低周波側の騒音に影響を及ぼすことがわかった。

#### 4.2 渦構造に基づく空力騒音の解析

この節では、特に、ベースとバイザーの間隙幅  $L2$  が後流の渦構造に及ぼす影響について解析する。図 11 は後流の速度分布を比較したものである。鉛直方向の高さは  $z=70\text{mm}$  である。以下の説明では、全て、図(a)が  $L2=0\text{mm}$  の速度分布であり、図(b)が  $L2=4\text{mm}$  である。 $Z=70\text{mm}$  は、ベースとバイザー隙間  $L2$  の後方に相当する。 $L2=0\text{mm}$  の場合、上流側の主流は後流へ通過しないので、 $L=14\text{mm}$  の後流よりも減速される。

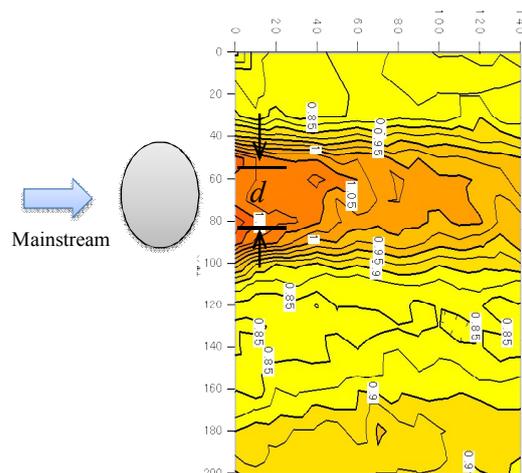
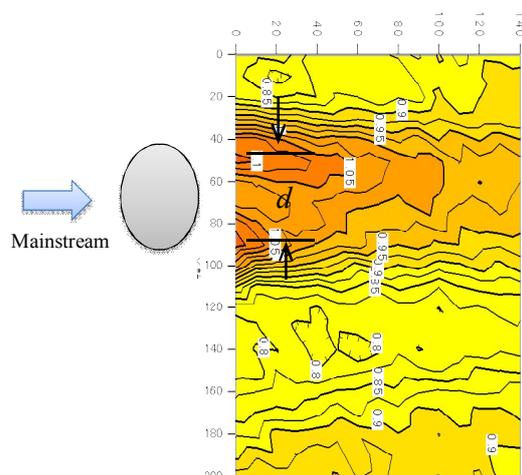
(a)  $L2 = 0\text{mm}$ (b)  $L2 = 4\text{mm}$ Fig. 12 Velocity fluctuation distribution in the wake of the door mirror ( $Z=70\text{mm}$ ,  $V=120\text{km/h}$ )

図 12 はドアミラー後流の速度変動の分布を比較したものである。ドアミラーの後流には二つの島状の速度変動の領域が形成されている。 $L2=4\text{mm}$  の取り付け条件における速度変動の最大値の間隔は、 $L2=0\text{mm}$  のものよりも広がっている。これは、 $L2=4\text{mm}$  のドアミラー後流に形成されるせん断層の速度勾配が緩やかになることによると考えられる。渦放出周波数が後流の幅とストロハル数の関係によって見積もられると、その周波数は  $L2=0\text{mm}$  のとき約  $200\text{Hz}$  であり、 $L2=4\text{mm}$  のとき  $170\text{Hz}$  近傍となる。

図 13 は式(6)によって評価された音圧レベルの傾向を示したものである。 $z=70\text{mm}$  の位置では、 $L2$  が  $0\text{mm}$  から  $4\text{mm}$  に変化すると、その音圧レベルが  $2.8\text{dB}$  増加

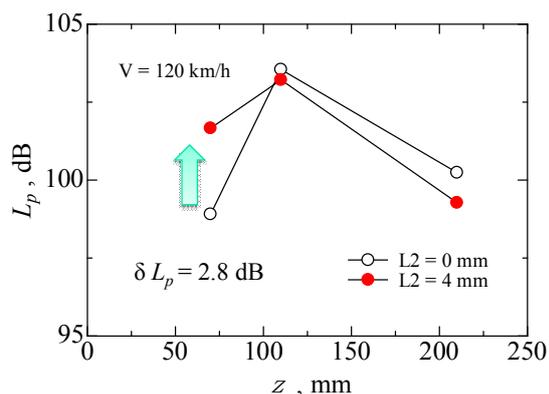


Fig. 13 Comparison on the predicted noise level in each span position

した。その他の位置では、 $L_2$  が 0mm から 4mm に変化すると、その音圧レベルは減少した。以上のことから、ドアミラーのベースとバイザーの間隙幅を増加させると、その騒音レベルは後流の幅の拡大によって上昇すると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、ドアミラーから発生する空力騒音と運転者の官能との乖離に関する研究の第一歩として、主に、ドアミラーの取り付け精度が空力騒音に及ぼす影響を風洞実験で評価した。ドアパネルとベースの間隙

幅を変化させると高周波域の空力騒音に影響を及ぼし、ベースとバイザーの間隙を変化させると低周波域の騒音に影響を及ぼすことがわかった。ドアミラーのベースとバイザーの間隙幅を増加させると、その騒音レベルは後流の幅の拡大によって増加することを示した。

## 参考文献

- (1) 飯田明由, 他 6 名, ドアミラーから放射される空力・音響フィードバック音の発生条件, 日本機械学会論文集 (B 編), 73(732), pp.1637-1646, 2007
- (2) 農沢隆秀, 他 3 名, 自動車のフロントピラー及びドアミラーにおける空力騒音の発生メカニズムについて, 日本機械学会論文集 (B 編), 75(758), pp. 1996-2002, 2009
- (3) 加藤由博, 他 2 名, 自動車のドアミラーから発生する空力音の計算, 72(722), pp. 2402-2409 2006
- (4) Slimon, S., A., et al., Journal of Computational Physics, Vol. 159, pp. 377-406, 2000
- (5) N. Curle, The Influence of the Solid Boundary Upon Aerodynamic Sound, Proc. Roy. Soc. London, A231, pp.505-514, 1955
- (6) M. J. Lighthill, On sound generation aerodynamically (I. General theory), Proc. Royal Soc. London, A211, pp.564-587, 1951