

熱膜センサによる自動車ドアミラー周りに 形成される空力音源の計測

佐々木壮一*・坂本祐輔**

Measurement of Aerodynamic Noise Source around an Automobile Door Mirror by Hot-film Sensor

by

Soichi SASAKI*, Yusuke SAKAMOTO**

In order to apply the hot-film sensor for the analysis of the aerodynamic noise source, we measured the noise source around an automobile door mirror. CAA (Computational Aeroacoustics) was used for the comparison on the quantitative noise source. We clarified that the one of the features of the aerodynamic noise generated from the actual automobile door mirror by the wind tunnel test was the low frequency noise. The low frequency noise sources in the CAA were formed by the perturbation of the long wave length formed at the tip side of the door mirror. The friction velocity measured by the hot-film probe in the low frequency domain indicated the same tendency to the CAA analysis.

Key words: *Automobile Door Mirror, Aerodynamic Noise, Computational Fluid Dynamics*

1. はじめに

高速走行向けの自動車の車体は空気抵抗を低減させるために流線型の形状に設計されるが、自動車のドアミラーは車体から突き出して取り付けられる。これが車体周りの流れを乱し、空力騒音を発生させる原因となる。ドアミラーは運転席近くに設置されていることもあり、この空力騒音は運転者が不快に感じる主要な因子となる。このため、このドアミラー騒音を低減させることは、自動車の品質を保証するための一つの課題となっている。完成車の品質管理を目的とした空力騒音の試験はテストコースで測定される。しかし、テストコースでの騒音試験は、ロードノイズや機械振動騒音などが重畳されるため、ドアミラーが原因となって発生する騒音のみを抽出することができない。このため、自動車の走行状態における空力騒音の解析には風洞試験が有効とされている。また、実車の品質管理では、テストコースの走行試験における空力音源の簡易計測技術の確立も求められている。

山田ら⁽¹⁾は、高感度小型圧力センサを独自に開発し、その空力実験などで活用範囲を広めている。農沢ら⁽²⁾は、薄膜のサーフェスマイクロホンをサイドウィンドウに張り付けて、表面の圧力変動を計測している。このように、空力音源の計測にはいくつかの方法があり、これらの計測技術は自動車の開発段階で利用される。しかし、これらの計測方法は製造段階の品質管理で必要とされる実車の簡易計測には不向きである。汎用流体計測技術の一つである熱膜センサは、そのセンサの冷抵抗の変化により壁面近傍の流れの変動量を計測するものである。その計測原理は熱線流速計と同じであることから、壁面せん断力を計測する技術として注目されていた⁽³⁾。フィルム型の熱膜センサは任意の位置に容易に貼り付けることができ、その計測技術も確立されている。しかし、この熱膜センサが空力音源の解析に応用された先行研究は少なく、その定性的な計測技術の有効性についても不明な点が多い。

そこで本研究では、このフィルム型の熱膜センサに

平成29年6月19日受理

* システム科学部門 (System Science Division)

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

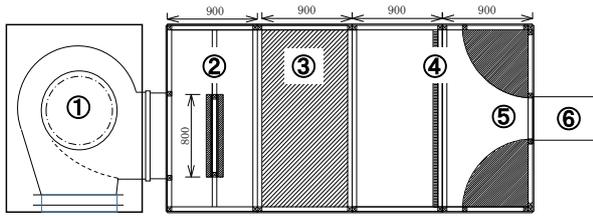


Fig 1 Wind tunnel

Table 1 Specifications of the blower

Type	K1D8J-212
Rotation Speed	1760 rpm
Motor	18.5 kw
Voltage	200 V

よる空力音源の簡易計測技術の確立を目的として、自動車ドアミラーから発生する空力音源の解析を試みた。実車モデルの風洞試験と数値シミュレーションとの結果を比較しながら、熱膜センサによる空力音源の計測に関する有効性とその課題について議論をする。

2. 実験装置および測定方法

Fig. 1は吐き出し風洞の概略図を示したものである。ブローア①の仕様が Table 1 に整理されている。風洞試験の暗騒音を低減させるために、ブローアの周りが吸音材が内張されたコンクリートパネルで覆われている。ブローアから放出された空気は、フレキシブルダクトを通り、チャンバーへ放出される。チャンバーの寸法は縦1800mm,横1800mm,全長3600mmである。チャンバー内部では、流れは入口から310mm下流にあるパンチングメタル②(開孔率11.2%)に衝突する。チャンバーの内側には厚さ50mmの吸音用グラスウールが取り付けられている。チャンバー内のファン騒音は、三層の吸音材のスリットからなるサイレンサー③によって吸音される。ハニカム④で整流された流れはノズル⑤(面積比20:1)で増速される。1辺400mmの正方形ダクト⑥から放出される主流風速はインバータによりブローアの電源周波数を変化させることにより制御される。

Fig.2は実車に搭載されたドアミラーの風洞試験における流れと騒音の測定方法を示したものである。ドアミラーの幅と高さは280mm×200mmであり、実車のドアミラー全体に一樣風速を与えることができる。定格試験速度である時速120kmにおける主流の速度変動は1.0%未満である。騒音の測定では、精密騒音計(小野測器, LA-4350)がドアミラーから水平方向1.0mの

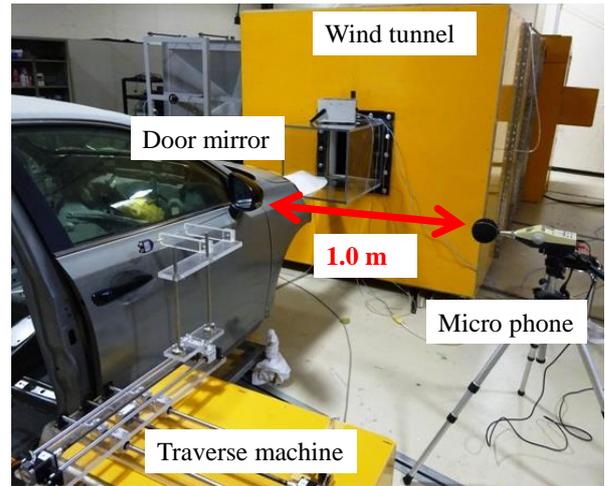
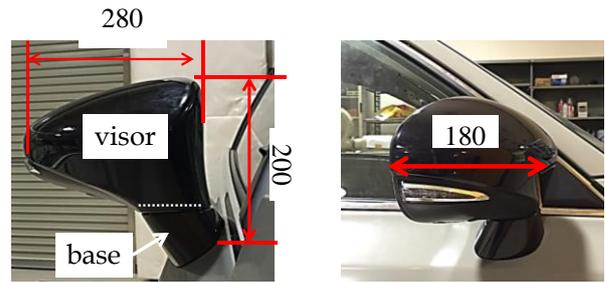


Fig. 2 Measurement method of the noise and flow field in the wind tunnel test

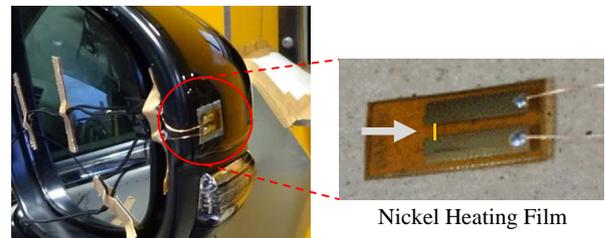


Fig. 3 Hot-film sensor

位置に設置されている。流れ場はX形熱線プローブ(カノマックス, 0252R-T5)をトラバース装置で移動させながら測定される。流れ場の座標は、主流方向がx、主流に対して垂直方向がy、高さ方向がzと定義されている。流れ場の測定面範囲はx軸方向が400mm, y軸方向が340mmである。

Fig.3には、摩擦速度を測定するために用いられるフィルム型の熱膜センサ(DANTECH, 55R47)が示されている。熱膜センサは薄膜上の導体の冷抵抗の変化から摩擦速度を計測するものである。空力音源の強さはこの摩擦速度の速度変動によって測定される。式(1)は摩擦速度の定義を示したものである。

$$u_0^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1)$$

ここで τ_0 は壁面せん断応力, ρ は空気の密度である. 壁面せん断応力は, 式(2)の指数則に従うと仮定した.

$$C_f = 0.074 \text{Re}^{-1/5} \quad (2)$$

このとき

$$C_f = \frac{2\tau_0}{\rho U^2}$$

ここで, U は風洞の主流風速である. 主流風速と摩擦速度の関係を検定するときには, ダクトの1辺の長さをレイノルズ数の代表寸法に設定した.

自動車ドアミラー周り全体の流れの数値シミュレーションには, SCRYU/Tetra V13 が用いられている. この流れ場全体を解析するための要素数はおよそ 830 万である. ドアミラー近傍の最小格子幅は $110\mu\text{m}$ である. 約 4000 回の定常流れの計算によって初期条件の流れ場を発達させ, $5.4 \times 10^{-5} \text{sec}$ の時間間隔で 4096 回, 非定常の流れ場を計算した. 数値解析による空力音解析 (Computational Aeroacoustics. 以下, CAA) には, ACTRAN が用いられている. 音響解析用のメッシュの要素数は 1,400 万要素である. 自動車周りの空間中の乱流渦に起因する空力音と固体表面上の圧力変動から車室内へ伝播する音場も解析されている.

3. 結果および考察

Fig. 4 には, 風洞試験で測定された実車ドアミラー騒音のスペクトル分布が比較されている. 破線が風洞の暗騒音であり, 細い実線がドアミラーなしの車体から発生する騒音である. また, 太い実線はドアミラーが取り付けられた場合のものである. 主流の風速は時速 120km である. 150Hz 近傍の騒音は風洞のファン騒音であり, 300Hz の騒音はその高調波の騒音である. 500Hz 近傍の騒音はウィンカーライト段差部分で発生する騒音, 700Hz 近傍の騒音はドアノブの凹凸によって発生する騒音である. 1000Hz 未満の空力騒音がドアミラー無のものよりも広い周波数の帯域で大きくなっている. この低周波の広帯域騒音が実車のドアミラーから発生する空力騒音の一つの特徴である.

Fig. 5 はドアミラー中央断面の実測値の後流の分布を示したものである. 主流風速は 120km/h である. Fig. (a) が速度分布であり, Fig. (b) が速度変動の分布である. 主流は紙面に向かって左から右に流れる. 速度はパイザーの先端側と車体側で高速になる. ドアミラーの背

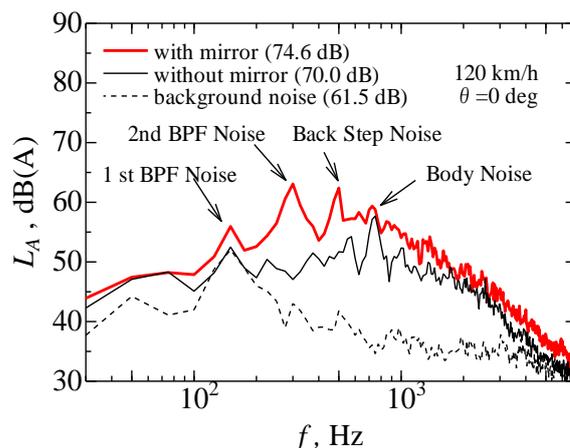
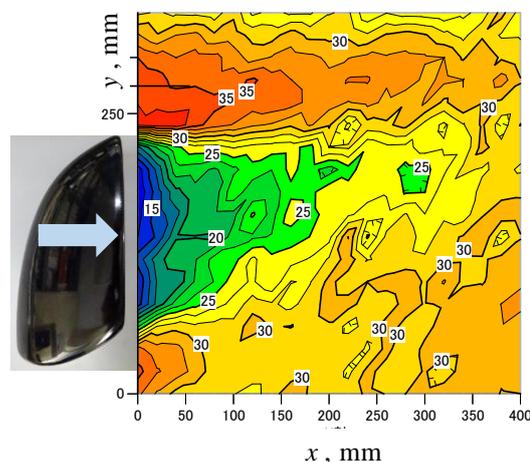
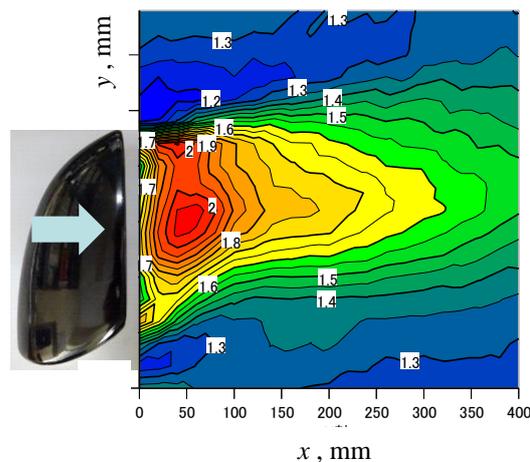


Fig. 4 Comparison of the noise spectra generated from the automobile door mirror ($V = 120 \text{ km / h}$)



(a) Velocity distribution



(b) Velocity fluctuation distribution

Fig. 5 Flow regime in the wake of the door mirror

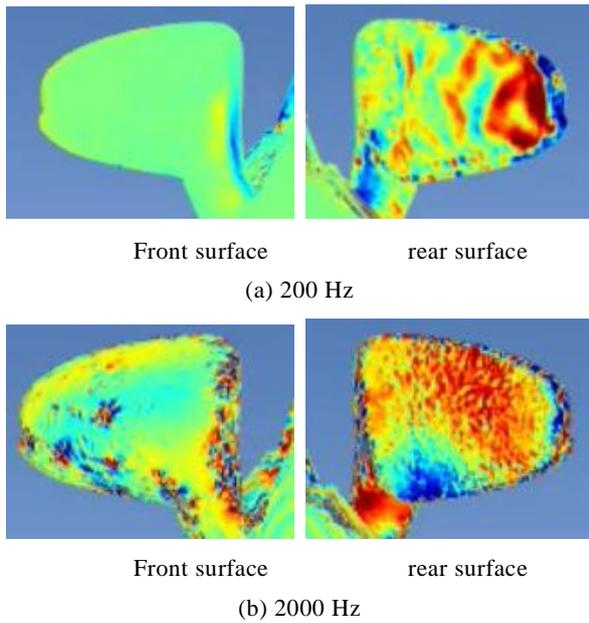


Fig. 6 Distribution the noise sources around the door mirror by the computational aeroacoustics

後には低速のよどんだ流れの領域が形成されている。Fig. (b)の速度変動は、この鏡面の中央とバイザー先端側で大きくなることわかる。

Fig. 6はCAAによって解析されたドアミラー表面上の瞬時の空力音源の分布を示したものである。Fig. (a)が200Hzの周波数でフィルタリングされた低周波の空力音源であり、Fig.(b)が2000Hzでフィルタリングされた高周波の空力音源である。200Hzの空力音源はバイザー先端側で強くなる。これはバイザー先端で巻き上がる波長の長い渦の変動によるものであると考えられる。一方、高周波の空力音源についてはバイザー周辺と鏡面全体に形成されることがわかる。

Fig. 7では、CAAによって解析された異なる測定位置における空力音源の強さのスペクトル分布が比較されている。太い実線がバイザー先端側のスペクトル分布であり、細い実線が車体側のものである。スペクトル解析の結果から、バイザー先端側で低周波の空力音源が車体側よりも強くなることわかる。CFDの計算条件では、2000Hzの周期(=0.001 sec)がおおよそ9回で計算されるように設定されている。最小格子幅は約 $y^+ = 20$ (110 μm)であり、時間間隔はこの最小格子幅でクーラン数が約1.0となるように設定されている。CAAにおける解析の上限周波数が2000Hz近傍であることか、これよりも高周波域のCAAによる解析結果については議論できない。

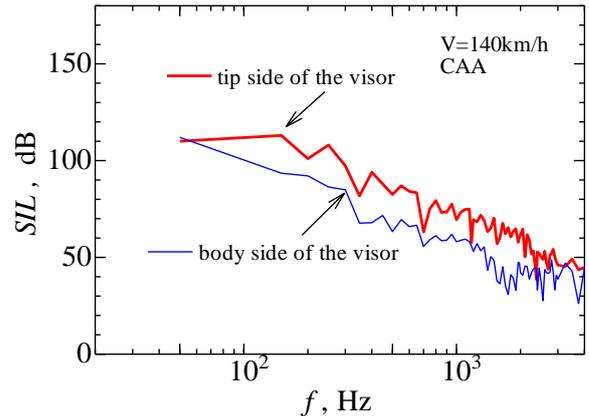
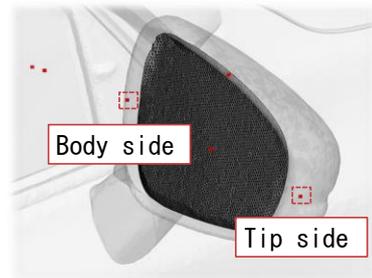
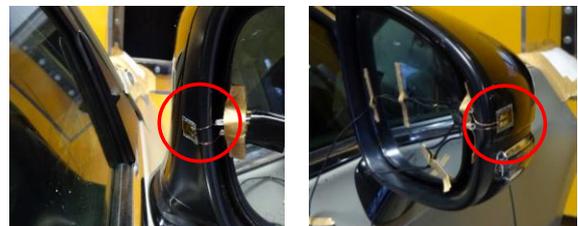


Fig. 7 Spectral distribution of the friction velocity in the tip side and the body side on the visor analyzed by the computational aeroacoustics



(a) body side (b) tip side

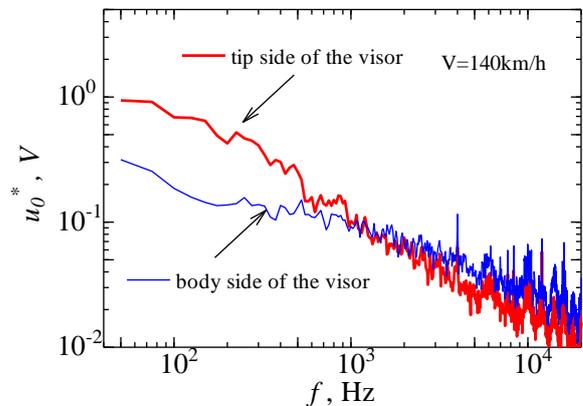


Fig. 8 Spectral distribution of the friction velocity in the tip side and the body side on the visor measured by the hot-film probe

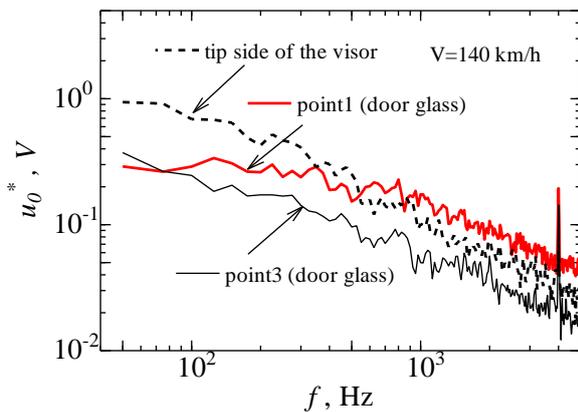
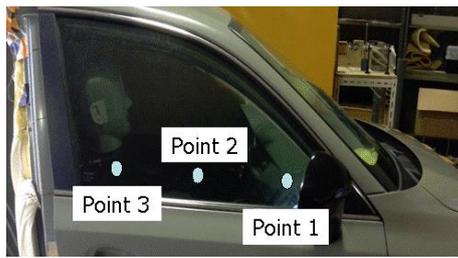


Fig. 9 Comparison on the spectral distribution of the friction velocity in the different measurement position on the door glass

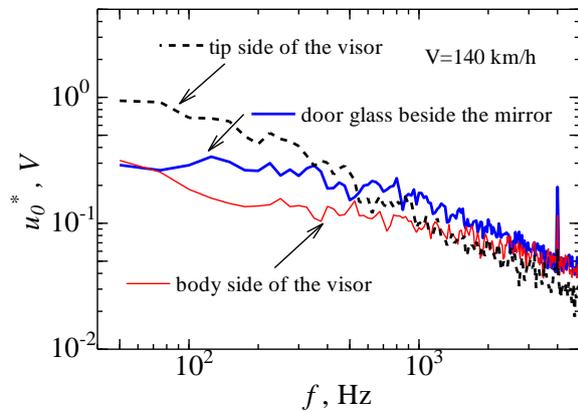
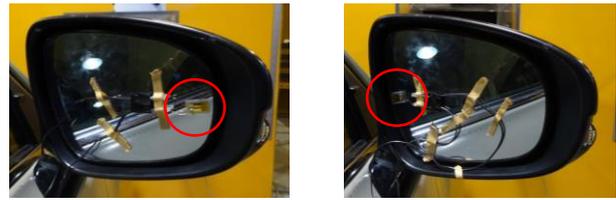


Fig. 10 Comparison on spectral distribution of the friction velocity on the door glass and the visor

Fig. 8 は、熱膜センサで測定された摩擦速度のスペクトル分布をバイザーの先端側と車体側と比較したものである。主流風速は時速 140km/h に設定されている。低周波の帯域では、ドアミラー先端側の速度変動が大きくなる。この関係は CAA の解析結果と同様の傾向となる。2000Hz 以上の高周波の帯域における二つの測定位置での速度変動量は同程度であることがわかる。また、約 5000Hz 以上で発生する離散的な信号は、熱膜センサー自身の厚みによる段差で発生する微少な乱



(a) tip side (b) body side

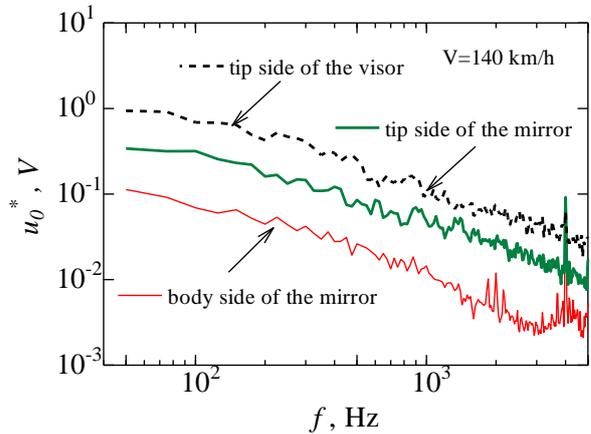


Fig. 11 Comparison of the spectral distributions of the friction velocity in the different position on the mirror surface

流渦によるノイズであると考えられる。

Fig. 9 には、ドアミラー近傍 (point 1) と運転席近く (point3) で採取されたドアガラス上の速度変動を比較したものである。速度変動量を相対的に比較するために、図中には本実験で確認された範囲で最も強い速度変動のバイザー先端側のスペクトル分布が破線で示されている。ドアミラー近傍のドアガラス上の空力音源は、下流側の音源よりも大きくなる。しかし、低周波の領域では、ドアガラス上の空力音源はバイザー先端側の空力音源よりも小さい。Fig. 10 には、ドアガラスと車体側のバイザーにおける速度変動が比較されている。ドアガラス側の速度変動は広い周波数の帯域にわたってバイザー側の変動よりも大きくなる。これは、高周波の空力音源がドアガラス上に形成されることを示すものである。Fig. 11 はドアミラーの鏡面における摩擦速度の変動量を比較したものである。ドアミラー先端側の鏡面の速度変動は車体側よりも大きくなるが、その変動はバイザー先端側のものよりも小さい。鏡面近傍の流れ場には淀んだ流れ場が形成されるために、その速度変動量が小さくなると考えられる。

4. おわりに

熱膜センサによる空力音源の簡易計測技術の確立を

目的として、自動車ドアミラーから発生する空力音源の解析を試みた。実車の風洞試験と CAA との結果を比較しながら、以下のことを明らかにした。

- (1) 実車に搭載されたドアミラーの風洞試験から、低周波の広帯域騒音が実車のドアミラーから発生する空力騒音の一つの特徴であることを示した。
- (2) 実車ドアミラーから発生する低周波の空力騒音は、ドアミラー先端で形成される変動によって発生することを熱膜センサの計測によって明らかにした。
- (3) CAA によって解析された低周波域の空力音源の性質は、熱膜センサで計測された実験値と同様の傾向を示した。
- (4) 以上の結果から、熱膜センサによる解析では低周波の空力音源の発生位置を同定することが可能で

ある。一方、ドアミラーのような複雑物体周りの絶対的な空力音源の強さを汎用の熱膜センサで計測することは困難である。

参考文献

- (1) 山田 昌弘, 高感度小型圧力センサの開発, 日本機械学会年次大会講演論文集, (2004), pp. 239-240.
- (2) 農沢隆秀, 李 曄, 笠木 直彦, 中村 貴樹, 自動車における空力騒音の音源構造について, 日本機械学会論文集(B編), 75-758(2009), pp. 1989-1995.
- (3) 吉野 崇, 鈴木 雄二, 笠木 伸英, 上運天 昭司, マイクロ熱膜せん断応力センサの熱的最適設計, 日本機械学会論文集(B編), 70-689(2004), pp. 38-45.