

陽極酸化皮膜型感圧センサの非定常流への応用

坂上博隆（宇宙航空研究開発機構）

Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint for Unsteady Aerodynamic Applications

Hiroataka Sakaue

Japan Aerospace Exploration Agency

ABSTRACT

A miniature fluidic oscillator was used to demonstrate the capability of measuring oscillating unsteady aerodynamic fields with 6.4 kHz primary frequency. Pressure maps of various phases were captured by anodized aluminum pressure sensitive paint with platinum(II) meso-tetra (pentafluorophenyl) porphine as a luminophore. Main uncertainty source comes from fitting the adsorption control model to calibration points and from the pulse width of illumination. The measurement uncertainty of the pressure was 4.65%.

Key Words: Anodized aluminum pressure sensitive paint, unsteady aerodynamic measurement, miniature fluidic oscillator

1. 序論

陽極酸化皮膜型感圧コーティング（Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint, AA-PSP）は図1に示すようなナノスケールの細孔に機能性分子を付着させた光学的圧力センサである。機能性分子は光源により励起され、その発光信号または寿命は、酸素との酸素消光によって変化する。テストガス中の酸素は酸素分圧として表示でき、それはテストガスの圧力と関係づけることができるので、センサの発光信号変化を計測することにより試験体上の圧力を測定できる。センサからの信号 I と試験体の圧力 P は以下の Adsorption Controlled Model により関係づけられる¹⁾。

$$\frac{I_{ref}}{I} = A + B \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\gamma \quad (1)$$

ここで ref はリファレンスを表し、通常無風状態を用いる。 A 、 B 及び γ は係数である。AA-PSP はアルミ基盤上に電気化学的にコーティングされ、機能性分子である色素はディッピング法により吸着される¹⁾。コーティングされた面が全て圧力センサになるので、センサからの発光信号を画像計測すれば圧力の面分布が測定可能である。

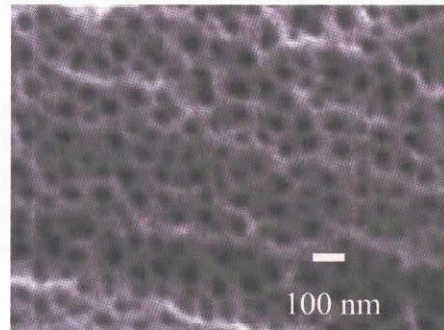


図1 陽極酸化皮膜表面の電子顕微鏡写真。

2. 背景

従来の感圧塗料に対し、AA-PSP はその多孔質の性質を生かして高い応答性を示す²⁾。衝撃波管を用いた応答性試験では、AA-PSP は 1MHz に迫る応答性を示している³⁾。この高い応答性と面分布測定の特性を生かし、本実験では AA-PSP を用いて小型振動子（miniature fluidic oscillator）から発せられる非定常流れの計測を行う。

図2に示す小型振動子は、コアンダ効果を用いて素子内の流れを振動させる⁴⁾。図3に振動子から発せられる流れのシュリーレン画像を示す。ホットフィルムを用いて流れをトリガーし、位相 0° と位相 180° の流れを示している。この図から振動子から発せられるこぎり状の流れを確認できる。振動子から発せられる非定常流れは基本

周期 6.4kHz である。

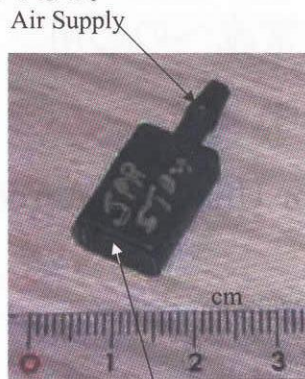


図2 振動子。

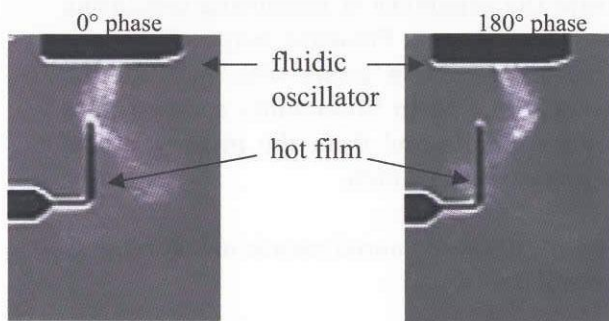


図3 振動子から発せられる流れのシュリーレン画像。

3. 実験

陽極酸化皮膜は坂上の方法³⁾により作成した。皮膜は 13mmx13mm、厚さ 1mm の平面サンプルである。色素は PtTFPP (platinum(II) meso-tetra (pentafluorolphenyl) porphine) を用いた。ディッピング法に用いる溶媒はヘキサデカンを使用した³⁾。

本実験の計測システムを図 4 に示す。振動子に圧縮空気を送り込み、周期的に変化するジェットを形成した。このジェットに対し励起光源を同期させることで AA-PSP の非定常圧力場を計測した。これに遅延時間を変えることで各遅延時間での流れをとらえ、全体として連続画像をとらえた。同期は振動子内部の音を基準にし、マイクログフォンで計測して励起光源をトリガーした。遅延時間はディレイジェネレーターで制御した。励起光源は 410nm の紫 LED を用いた。同期時にパルス幅 2μs のパルス光源を与えて AA-PSP を励起し、AA-PSP からの発光は 600nm ロングパスと 650nm バンドパス光学フィルターを通して 14 ビット CCD カメラで計測した。同期することで流れはフリーズされているので、露光時間はカメラの飽和電荷量をもとに調整した。今回の設定では露光時間 2 秒とした。

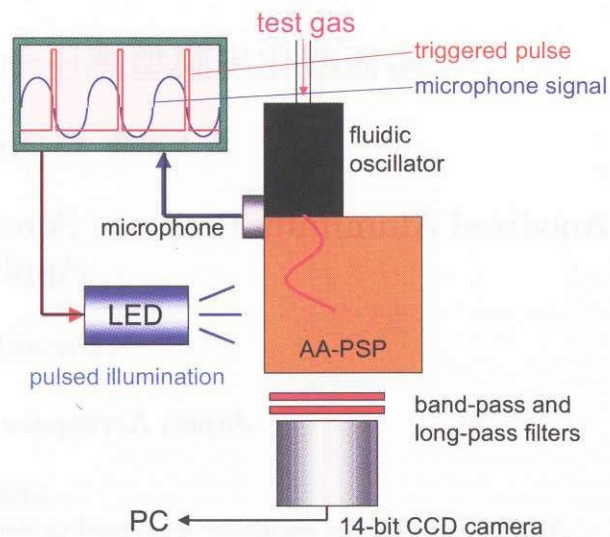


図4 測定システム。

振動子と AA-PSP は図 5 に示すように平行に設置した。AA-PSP 計測比較と較正試験用に、振動子からのジェット下流に圧力孔を開け、半導体圧力センサ (Kulite) を設置した。

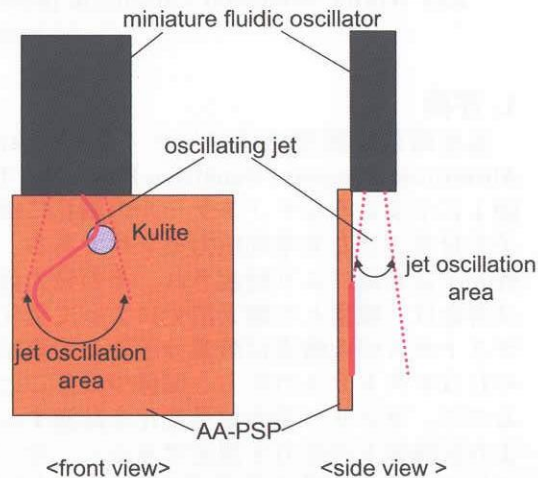


図5 振動子と AA-PSP の設置関係。

4. 結果

較正方法

小型振動子から発せられるジェットが Kulite の直径より小さかったため、Kulite 周りの圧力分布は一様でなかった。そのため従来の圧力孔周りの発光信号と圧力孔の圧力データから in-situ 法による較正を行うことができなかった。改善法として振動子のジェット口を対称軸として、Kulite と対称となる領域での発光信号を用いて較正曲線をフィッティングした (図 6)。この場合 AA-PSP の発光信号と Kulite の値は 180° 位相がずれている関係となる。ref はリファレンスを示し、本実験では大気圧条件下での無風状態を用いた。

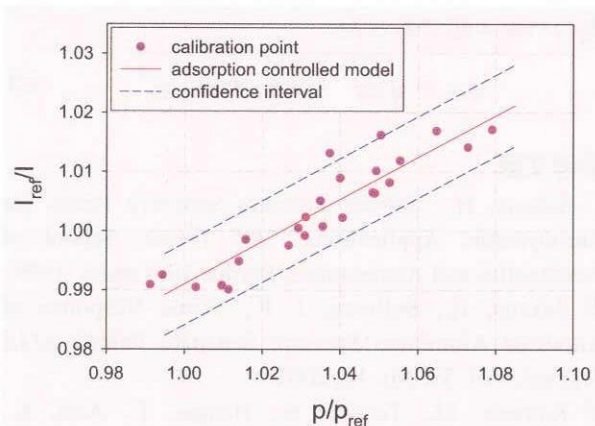


図6 較正試験結果 (in-situ 法)。

非定常圧力場

AA-PSP の発光場 I_{ref}/I は図 6 の較正結果から圧力場 P/P_{ref} に変換した。図 7 に得られた非定常圧力場を示す。模式図に image size で囲われた範囲の結果を示している。ジェットによる AA-PSP 面上の圧力変動を連続画像として遅延時間 $20\mu s$ 間隔でとらえることができた。

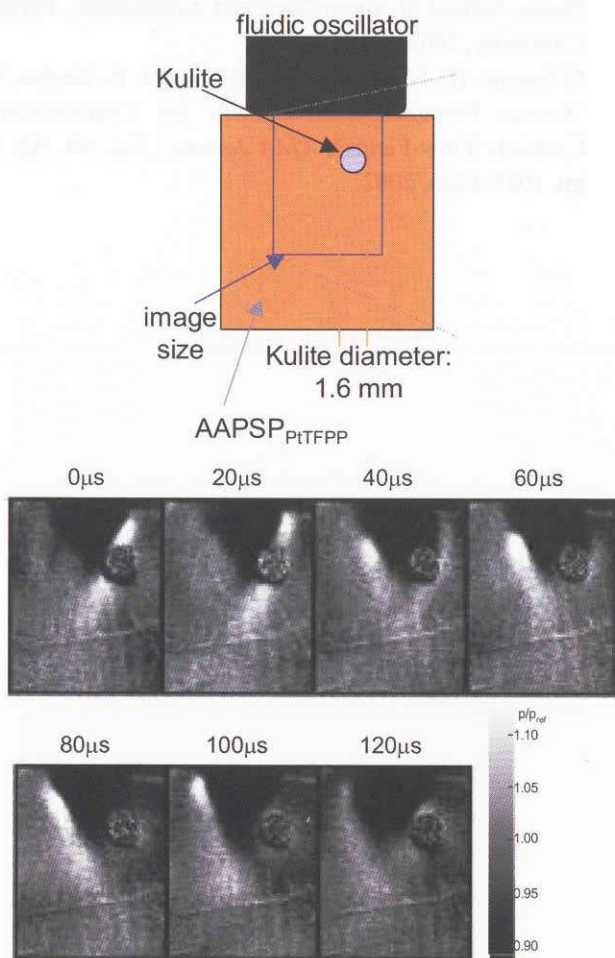


図7 非定常圧力場。

AA-PSP と Kulite の計測結果は良好な一致を示した (図 8)。この図に示した AA-PSP の値は

較正時に用いた領域での圧力計測結果である。本実験で用いた較正法を補正するために、Kulite の結果は 180° 位相をずらせて表示している。

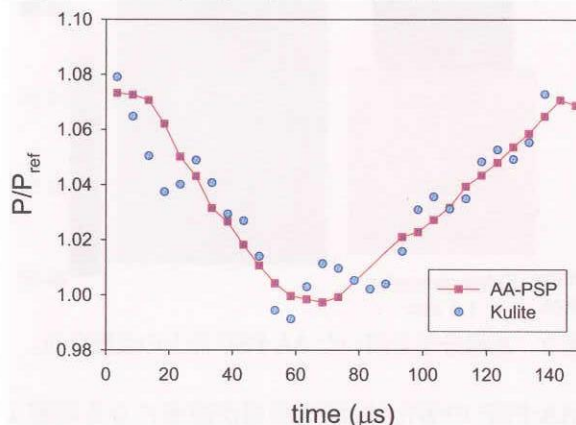


図8 AA-PSP と Kulite 計測結果の比較。

5. 考察

非定常圧力場とシュリーレン画像の比較

本実験では振動子からのジェットを AA-PSP と平行に設置したが、ジェット口は AA-PSP と接してなく、そのためシュリーレン (図 3) で見られたのこぎり状の流れは確認できなかった。動圧が AA-PSP の測定では低すぎるため、ジェット口を AA-PSP に接してのこぎり状の非定常圧力場を確認することはできなかった。圧縮空気の代わりに窒素を用いて AA-PSP 上の酸素分子を取り除き、発光信号を最大にする効果を利用できる。坂上らはこの方法で振動子から発せられるのこぎり状の非定常流れを可視化している⁶⁾。

測定誤差

AA-PSP に対して、本実験の測定誤差要因を表 1 に示す。

表 1 測定誤差要因。

Source	Uncertainty
AA-PSP	温度依存性
AA-PSP	劣化
AA-PSP	較正
励起光	パルス幅

図 9 に感温分子 (rhodamine B) を用いた際の AA-PSP 面上の温度分布を示す。この分布は遅延時間によらず一定であった。温度差は最高で $0.03^\circ C$ と、測定面上は温度の影響をほとんど受けず一定であるといえる。尚、PtTFPP を感圧分子とした AA-PSP の温度依存性は温度の較正試験結果から $-1.4\%/^\circ C$ であった。従って $0.03^\circ C$ の温度変化は 0.042% の発光信号変化を示す。この変化は

圧力の較正結果（図 6）では 0.084%の測定誤差に相当する。

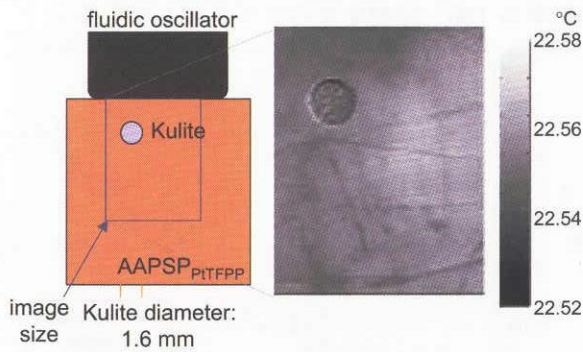


図 9 感温分子を用いた AA-PSP 面上の温度分布。

AA-PSP の劣化は、測定時間が顕著になる時間より短時間で測定を完了したため無視できる（測定は 30 分以内で終了）。

図 6 に較正式 1（adsorption controlled model）をフィッティングした際のエラー幅（標準偏差 2σ ）を較正試験結果と合わせて示した。この幅から、フィッティングによる測定誤差（ w_{fit} ）は 3.86%であった。

本実験ではパルス幅は $2\mu s$ であった。これは基本周期 $6.4kHz$ に対し、1.29%の画像のぶれ（ $\Delta I_{width}/I$ ）を生じる。この値は較正試験結果（図 6）から 2.59%の測定誤差（ w_{width} ）に相当する。

以上の誤差要因をもとに、全測定誤差（ w_{est} ）は二乗平均(2)から 4.65%と算出された。考察された主な測定誤差は較正時のフィッティングと励起

光のパルス幅であった。

$$w_{est} = \sqrt{w_T^2 + w_{fit}^2 + w_{width}^2} \quad (2)$$

参考文献

- 1) Sakaue, H., "Porous Pressure Sensitive Paints for Aerodynamic Applications," *MS Thesis*, School of Aeronautics and Astronautics, Purdue University, 1999.
- 2) Sakaue, H., Sullivan, J. P., "Time Response of Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint", *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 10, 2001.
- 3) Kameda, M., Tezuka, N., Hangai, T., Asai, K., Nakakita, K., Amao, Y., "Adsorptive Pressure-Sensitive Coatings on Porous Anodized Aluminum", *Meas. Sci. Technol.*, (submitted), 2004.
- 4) Raghu, S., Raman, G., "Miniature Fluidic Devices for Flow Control," *Proceedings of Fluids Engineering Division Summer Meeting*, American Society of Mechanical Engineers, 1999.
- 5) Sakaue, H., "Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint for Unsteady Aerodynamic Applications," *PhD Thesis*, School of Aeronautics and Astronautics, Purdue University, 2003.
- 6) Sakaue, H., Gregory, J. W., Sullivan, J. P., Raghu, S., "Porous Pressure-Sensitive Paint for Characterizing Unsteady Flow Fields", *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 6, pp. 1025-1256, 2002.