

高クヌッセン数流れ中の表面圧力計測に適した感圧塗料の開発*

森 英 男*¹, 新 美 智 秀*¹
大 島 佑 介*², 平 光 円*³

Development of Pressure Sensitive Paint Suitable to Surface Pressure Measurement in High-Knudsen Number Flows

Hideo MORI*⁴, Tomohide NIIMI,
Yusuke OSHIMA and Madoka HIRAKO*⁴ Department of Micro- and Nano-systems Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

The pressure sensitive paint (PSP) technique has the capability to be applied to high Knudsen number flows, such as low density gas flows, micro-flows, and so on. In this study, to inspect the feasibility of PSP for measurement of pressure on a solid surface in high Knudsen number flows, fundamental properties of three types of PSPs [PdTFPP, PdOEP and PtTFPP bound by poly(TMSP)] are examined especially in the range of pressure below 130 Pa (about 1 Torr). Pressure sensitivity against nitrogen monoxide is also examined for the above PSPs, to develop a technique for the composite measurement of the flow field structure and the surface pressure, using NO-LIF and PSP, respectively. As an application of PSP to low density gas flows, we measure the pressure distribution on a jet-impinging solid surface using PdOEP/poly(TMSP) with very high pressure sensitivity.

Key Words: Pressure Distribution, Rarefied Gas, Optical Measurement, Pressure Sensitive Paint, Two-dimensional Measurement, Nitrogen Monoxide

1. 緒 言

気体流の希薄度を表わす重要な無次元パラメータとしてクヌッセン数 (K_n : Knudsen number) があり, 平均自由行程 λ と流れ場の代表長さ L を用いて $K_n \equiv \lambda/L$ で定義される. 一般に K_n が 0.01 を超えると, 気体流は連続体として近似できず, 原子・分子の流れとして扱わなくてはならない. 高真空を利用する半導体薄膜製造などの平均自由行程が大きい場での製品開発はもちろんのこと, 大気圧下でも代表長さが数十 nm 程度になる MEMS や NEMS (Micro/Nano Electro Mechanical Systems) に代表されるナノ・マイクロデバイス近傍の流れ場も高クヌッセン数流れとなる. 高クヌッセン数流れにおいては, 平均自由行程が大きい場合には分子間衝突数が極端に減少して気体流中に強い非平衡現象が発現し, 代表長さが極端に小さい場合には気体分子は他の気体分子よりも固体表面と数多く衝突するため, 流れ場が固体表面の影響を強く受けることになる.

したがって, このような高クヌッセン数流れを総合的に理解するためには, 流れ場の原子・分子オーダー

での理解と固体表面近傍における原子・分子の挙動を理解する必要がある. しかし, 分子レベルでのシミュレーション手法の発展と比較して, その計測技術は著しく遅れている. 低密度気体流の流れ場構造や温度非平衡現象に関しては, レーザー光と気体分子の相互作用を利用した計測法が提案され, 多くの成果が得られるようになった⁽¹⁾⁽²⁾が, 高クヌッセン数流れにおける固体表面圧力の計測技術はほとんど報告されていない. そこで本研究では, 圧力タップや熱電対などの計測手法が適用できない高クヌッセン数流れ中の表面圧力計測技術として, 発光分子の酸素分子による消光作用を利用した PSP (Pressure Sensitive Paint: 感圧塗料) に注目した.

PSP は, 酸素消光性を持つ発光分子とそれを固体表面に結合させるためのバインダーから構成される. 固体表面上に塗布した PSP 中の発光分子に光を照射して燐光発光させ, これが酸素によって消光される効果を利用して圧力を計測する. PSP による表面圧力の計測技術は, 固体表面上の圧力分布を二次元的に計測可能な手法として開発され, 主に風洞実験における航空機模型の圧力分布計測^{(3)~(5)}などに使われてきた. しかし, 初期に開発された PSP では, 時間応答性が遅いことや低温条件において感度が失われることなどの問題があり, これらの欠点を克服した新しい PSP の開発が

* 原稿受付 2004年3月8日.

¹ 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町).² 名古屋大学大学院工学研究科.³ 学生員, 名古屋大学大学院工学研究科.

E-mail: hmori@mech.nagoya-u.ac.jp

行われてきた。例として、時間応答性が早く、かつ低温環境において使用可能な PSP として、ポリマーを使用せず酸化アルミニウム被膜の表面上に直接発光分子を吸着させた PSP (Anodized Aluminum PSP: AA-PSP) が Asai ら⁽⁶⁾により開発され、さらに Sakaue⁽⁷⁾により製法の改良が行われた。AA-PSP では、発光分子が固体表面上に直接吸着しており、酸素と直接作用するため応答速度が非常に速く、非定常流れにおける圧力計測に非常に有用であることが報告されている⁽⁸⁾。一方、Asai ら⁽⁹⁾は、酸素透過性が非常に高く、かつ低温条件下でも酸素透過性を失わないガラス質ポリマーである poly(TMSP) [poly(1-trimethylsilyl-1-propyne)] をバインダーとして用いた PSP を構成し、低温中における特性調査を行うことで、その有用性を示している。このように、PSP を用いた圧力計測法の適用範囲を広げるための研究が数多く行われてきているが、1 Torr (約 130 Pa) 以下の低圧力域における PSP の適用例は著者ら⁽¹⁰⁾を除いてほとんど報告されていない。

クヌッセン数の大きい低密度気体流中における表面圧力計測に適用可能な PSP を実用化するため、前報⁽¹⁰⁾では、酸化アルミニウム被膜上に発光分子である Bath-Ru [ruthenium II tris(4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline) chloride] を物理吸着させた PSP、および発光分子に PtTFPP [platinum tetrakis(pentafluorophenyl) porphyrin]、バインダーに poly(TMSP) を用いた PSP の低圧力域における特性調査を行い、後者の PSP が低圧力域において非常に高い感度を持つことを明らかにした。

本研究では、低圧力域における PSP のさらなる感度向上を目指し、発光分子として3種類のポルフィリン錯体 (PtTFPP, PdOEP, PdTFPP) を選び、これらの発光分子と poly(TMSP) を組み合わせた PSP の低圧力域 (1 Torr 以下) における圧力感度、発光強度の温度依存性などの基礎特性を調査する。また、PSP はこれまで酸素圧力の計測に用いられてきており、一酸化窒素 (NO) など他の気体に対する圧力計測の報告例はない。本研究では PSP の一酸化窒素に対する感度調査を行うことで、PSP による一酸化窒素の圧力計測を可能とし、NO-LIF (Laser Induced Fluorescence: レーザー誘起蛍光) 法による気体流の可視化手法と PSP による固体表面圧力計測手法を組み合わせた複合計測の実現を目指す。さらに、PSP の高クヌッセン数領域への適用例として、低密度の超音速自由噴流が固体表面に衝突する際の圧力計測を行い、PSP による圧力計測の有用性を示す。

2. 記号

A_n	Stern-Volmer 係数 [-]
I	PSP の発光強度 [a.u.]
N	Stern-Volmer の式の次数 [-] (本研究では $N = 2$)
P	圧力 [Pa]
S_n	一重項電子状態を示す ($n \geq 0$)
T	温度 [K]
T_n	三重項電子状態を示す ($n \geq 1$)
下付き添字	
b	真空チャンバー内における背景条件を示す
ref	参照状態となる既知の状態を示す
s	貯気室内における状態を示す

3. PSP による計測手法

3.1 原理 PSP は固体表面上に塗布した発光分子に光 (主に紫外線) を照射して燐光発光させ、これが酸素によって消光される結果を利用して圧力が計測される。発光強度の強い部分は圧力が低く、弱い部分は圧力が高いことを示す。

一重項基底状態 (S_0) にある発光分子が光を吸収すると一重項励起状態 ($S_n, n \geq 1$) に遷移する。より高い励起状態 ($n > 1$) の発光分子は内部転換により一重項最低励起状態 (S_1) へと移動する。 S_1 状態の分子の一部は系間交差により三重項最低励起状態 (T_1) へと遷移する。 T_1 状態の分子は燐光を発して S_0 状態へ遷移するが、この遷移は電子スピン禁制であり、発光寿命は比較的長い。三重項状態 T_1 に遷移した発光分子に対し、基底状態が三重項である酸素分子が作用すると、発光分子が失活して一重項基底状態 S_0 へ遷移する (三重項-三重項消滅⁽⁵⁾)。消光作用の強さはポリマー中に浸透して発光分子と作用する酸素分子の濃度に依存し、またポリマー中に浸透する酸素濃度は表面の酸素分圧に比例する⁽⁴⁾。

PSP の消光作用は酸素との三重項-三重項消滅によるため、窒素など基底状態が一重項である気体分子は消光作用を起こさない。一方、Engler ら⁽⁵⁾は一酸化窒素などの窒素酸化物が消光作用を持つことを報告しているが、一酸化窒素の基底準位は二重項であり、また奇数個の電子を持つ一酸化窒素の中性分子は三重項状態をとることができない。そのため、一酸化窒素による消光作用は酸素の場合と異なる機構によると考えられるが、その詳細は現在のところ不明である。なお、Jones ら⁽¹¹⁾は、ナフタレン燐光の場合において、一酸化窒素との衝突により三重項励起状態の発光分子が系間交差を経て一重項基底状態へ遷移する確率が増加

し、その結果発光強度が低下する可能性を示唆しており、ポルフィリン錯体の燐光の場合においても、同様の機構による消光作用が起こる可能性がある。これまでPSPを一酸化窒素圧力計測へ適用した例は報告されていないが、PSPにより一酸化窒素圧力の計測が可能となれば、NO-LIFによる気体流の可視化手法とPSPによる固体表面圧力計測との複合計測の実現が期待できる。

3.2 Stern-Volmer の式 固体表面圧力は発光分子の発光強度と圧力の関係式 (Stern-Volmer の関係式) によって求められる⁽⁴⁾。

$$\frac{I_{ref}}{I} = A_0 + A_1 \frac{P}{P_{ref}} \quad (1)$$

ここで I は発光強度、 P は圧力である。 I_{ref} は既知の圧力 P_{ref} における発光強度である。上式より発光強度の逆数は圧力に比例することが分かる。しかし、実際のPSPは非線形性を示すため、実際の適用には非線形性を考慮した以下の経験式を用いる。

$$\frac{I_{ref}}{I} = \sum_{n=0}^N A_n \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^n \quad (2)$$

式(1)および式(2)の A_n は Stern-Volmer 係数であり、校正により求められる。一般的には式(2)において $N=2$ とした二次の多項式が用いられることが多く、本研究でも二次の多項式を用いてPSPの校正を行った。なお、 A_n は温度依存性を持つため、正確な圧力計測を行うには温度による影響の補正を行う必要がある。

3.3 低圧力域に適したPSP 初期に開発されたPSPは、酸素透過性の限界のため、1 Torr程度またはそれ以下の圧力域において、圧力の感度が低下する問題があった。例として、Kavandiら⁽³⁾により開発されたPSPでは、シリコンポリマーであるGP197がバインダーとして用いられたが、GP197の酸素透過性が不十分なため、これらのPSPは1 Torr程度またはそれ以下の圧力域において圧力感度を持たない。この問題を克服するため、前報⁽¹⁰⁾では酸素透過性が非常に高いガラス質ポリマーであるpoly(TMSP)をバインダーとして用いる手法と、酸化アルミニウム被膜に直接発光分子を物理吸着させて発光分子を固体表面に露出させる手法を利用し、両者のPSPの低圧力域における特性調査および比較を行った。その結果、poly(TMSP)をバインダーに用いたPSPが圧力感度が高く、かつStern-Volmerプロットの線形性も良いことから、低圧力域における圧力計測に非常に有用であることを示した。

近年、PdOEP [palladium octaethylporphyrin] などポルフィリンのパラジウム錯体を用いた酸素センサーが開発され、PtOEPなど白金錯体を用いた酸素センサー

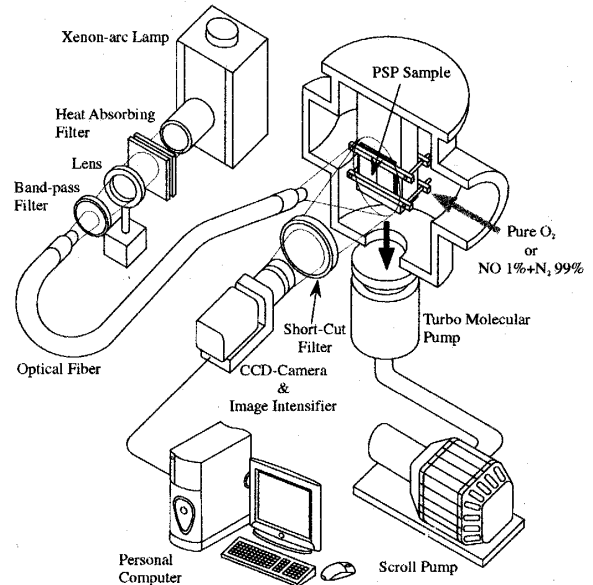


Fig. 1 Experimental apparatus

に比べて高い検出感度を持つことが報告されている⁽¹²⁾。本研究では、低圧力域における圧力計測に適したPSPとして、バインダーにpoly(TMSP)を適用したPSPのさらなる高感度化を目指すため、発光分子には、PdOEP, PdTFPP [palladium tetrakis(pentafluorophenyl) porphyrin], PtTFPPの3種類のポルフィリン錯体を適用し、それらの特性を比較した。

4. 実験装置

本研究で構成した実験装置の概略図を図1に示す。真空チャンバーをスクロールポンプ(アルバック: DVS-631)とターボ分子ポンプ(アルバック: UTM-300)により排気し、試料気体である純酸素を注入することにより圧力を設定した。チャンバー内圧力はメタル電離真空計(アルバック: GI-M2)およびキャパシタンスマンオメーター(アルバック: CCMT-10A)を用いて測定した。なお、PSPの一酸化窒素圧力に対する特性調査を行うため、純酸素の代わりに1% NO + 99% N₂の混合気体または純酸素を系に導入することも可能である。

本研究では、各種PSPを25×50 mmもしくは50×50 mmのアルミニウム片に塗布したものを試料片として用い、これらを真空チャンバー内に設置した。なお、PSPを用いた計測では温度変化が大きな誤差要因となるので、試料片の温度をペルチェ素子と熱電対を用いて制御した。

励起光源であるキセノンショートアークランプ(ウシオ電機: UXL-500SX)の光をレンズで絞り、熱線吸収フィルターとバンドパスフィルター(400±20 nm)に透過させ、光ファイバーを介してチャンバー内に設置

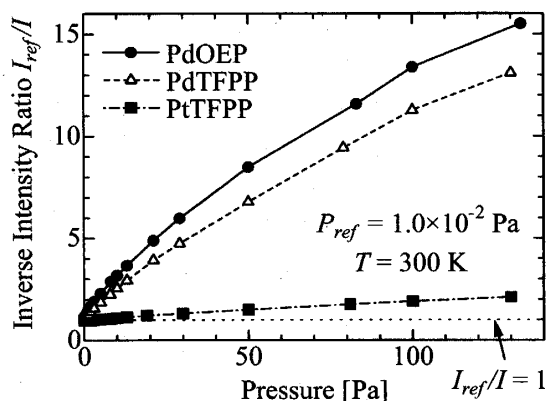


Fig. 2 Stern-Volmer plots of PSP using poly(TMSP) as a binder (low pressure)

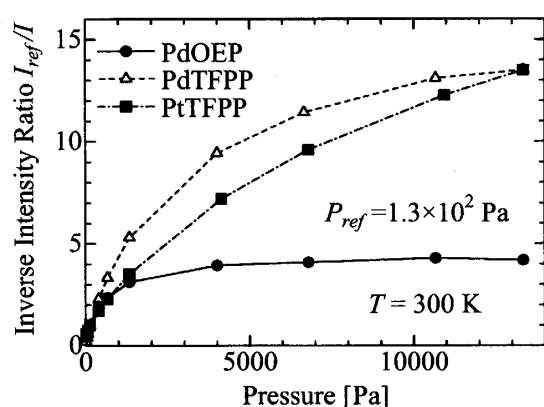


Fig. 3 Stern-Volmer plots of PSP using poly(TMSP) as a binder (high pressure)

した試料片に照射した。試料片からの発光は、入射光を遮断するためのショートカットフィルター (600 nm) を介してイメージインテンシファイヤー (浜松ホトニクス: C4742-95) を取り付けた CCD カメラ (浜松ホトニクス: C7970-01) で撮像し、得られた画像をパーソナルコンピュータに伝送して処理した。

5. 結果および考察

5.1 低圧力域における PSP の適用性 図 2 は poly(TMSP) をバインダーとして用いた PSP の 130 Pa (約 1 Torr) 以下の低圧力域における Stern-Volmer プロットである ($P_{ref} = 1.0 \times 10^{-2}$ Pa)。なお、試料気体には純酸素を用い、PSP を塗布した試料片の温度は 300 K とした。本図より明らかなように、酸素透過性に優れた poly(TMSP) をバインダーとして用いた PSP はいずれも低圧力域において高い圧力感度を有するが、特に PdOEP と PdTFPP を発光分子として用いた PSP は、PtTFPP を用いた PSP に比べて著しく高い圧力感度を有する。一般的に、ポルフィリンの白金錯体およびパラジウム錯体は長い発光寿命を持つため、すなわ

ち三重項励起状態に存在する時間が長いことため酸素消光作用を受けやすいが、特に PdOEP などのパラジウム錯体は白金錯体よりも長い発光寿命を持つ⁽¹²⁾⁽¹³⁾ため酸素消光作用が非常に強く、結果として、これらのパラジウム錯体を発光分子として用いた PSP の圧力感度が非常に高くなったと考えられる。この結果より、130 Pa 以下の圧力域における圧力計測には PdOEP や PdTFPP を発光分子として用いた PSP が非常に有用であることが明らかとなった。

本研究で用いた PSP の 130~13000 Pa の圧力域における Stern-Volmer プロット ($P_{ref} = 130$ Pa) を図 3 に示す。本図より、130 Pa 以上の圧力域において、PdTFPP と PdOEP を用いた PSP の圧力感度が徐々に低下しており、結果として Stern-Volmer プロットに強い非線形性が現れる。特に PdOEP の圧力感度低下は著しく、4000 Pa を超える圧力域において圧力感度が失われている。これは、PdTFPP および PdOEP の酸素消光作用が非常に強いこと、バインダーである poly(TMSP) の酸素透過性が非常に高いこと、130 Pa 以上の圧力域では PdTFPP および PdOEP の消光作用が飽和し、圧力に対する依存性が消失してしまうことに起因する。さらに、130 Pa 以上の圧力域では発光強度自体が非常に低くなるために発光強度測定における S/N が悪化し、圧力計測における誤差も非常に大きくなるという問題点もある。

一方、図 3 に示すように、PtTFPP を発光分子として用いた PSP の圧力感度は 10 kPa の圧力条件下においても失われていない。これは、PtTFPP の消光作用は 10 kPa 程度まで飽和しないためである。また 10 kPa の圧力条件下における PtTFPP の発光強度は十分高く、圧力計測における誤差も低いこと、10 kPa 程度の圧力域までの圧力計測に PtTFPP を用いた PSP を適用することが可能である。

以上の結果より、PdOEP と PdTFPP を発光分子として用いた PSP は 130 Pa 以上の圧力域において発光強度が低く S/N が悪化するが、130 Pa 以下の低圧力域における計測に最適であることが明らかとなった。これに対し、PtTFPP を発光分子として用いた PSP は 130 Pa 以下の低圧力域における感度では比較的劣るが、10 kPa 程度までの圧力範囲で適用が可能であることが分かった。

5.2 一酸化窒素に対する PSP の感度 図 4 は PSP の NO1% + N₂99% の混合気体に対する Stern-Volmer プロットである ($P_{ref} = 130$ Pa)。なお、横軸の圧力は混合気体の総圧である。また、PSP の純窒素に対する Stern-Volmer プロットも併せて示す。図 4 に

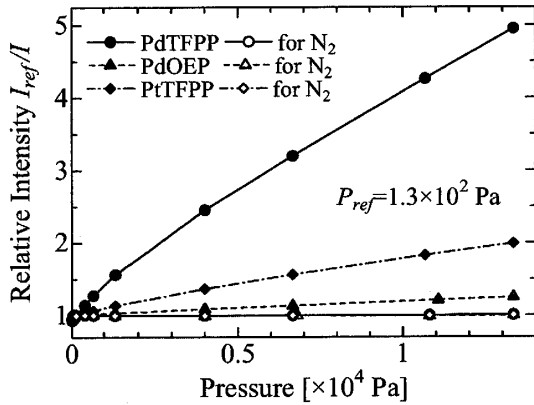
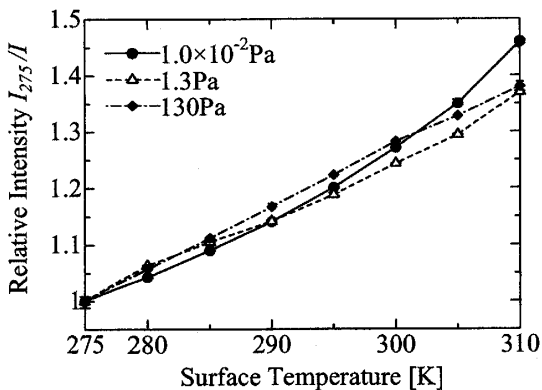
Fig. 4 Stern-Volmer plots for NO1% + N₂99%

Fig. 5 Temperature dependence of luminescence intensity of PdOEP

示すように、本研究で用いた PSP は純窒素により消光されないため、窒素圧力に対する発光強度の変化はない。一方で、NO1% + N₂99%の混合気体の圧力に対しては、本研究で適用した3種類すべてのPSPにおいて発光強度の変化が確認された。これは、PSPが一酸化窒素に対して圧力感度を有することに起因する。特に、PdTFPPを発光分子として用いたPSPは一酸化窒素に対して高い圧力感度を有していることが明らかとなった。また、図4に示す結果より、酸素圧力に対して非常に高い感度を持つPdOEPが一酸化窒素に対しては感度が低く、かつPtTFPPがPdOEPより高い感度を持つことが示された。この実験結果から、一酸化窒素による消光作用は酸素の場合と異なる機構によること、および一酸化窒素による消光作用の強さは中心金属の種類だけでなくポルフィリン環の構造にも影響することが示唆される。

本節で示した結果より、一酸化窒素に対して特に高い感度を持つPdTFPPを発光分子として用いたPSPを適用することで、PSPによる固体表面圧力計測とNO-LIFによる流れ場構造解析の複合計測の実現が期待できる。

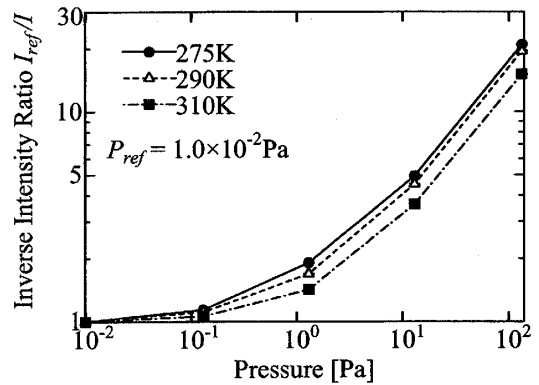


Fig. 6 Temperature dependence of pressure sensitivity of PdOEP

5.3 PSPの感度の温度依存性 PSPの発光強度は圧力だけでなく温度にも依存し、この温度依存性がPSPによる圧力計測に誤差を及ぼす原因となる可能性がある。本研究では、一定の圧力条件下で試料片の温度を変化させ、発光強度の温度依存性を調査した。図5にPdOEPを発光分子として用いたPSPの発光強度の温度特性を示す。図の横軸は試料片の温度であり、縦軸は発光強度 I と温度 275 K における発光強度 I_{275} との比 I_{275}/I である。図より明らかなように、発光強度の温度依存性は比較的大きく、特に微小な圧力変化をとらえる必要のある低圧力域においては発光強度の温度変化が圧力計測に大きな誤差をもたらす可能性がある。

図6に、PdOEPを発光分子として用いたPSPのStern-Volmerプロットの温度依存性を示す。図6より、温度の上昇に伴い圧力感度が減少する傾向があることが明らかとなった。これは、ポリマーであるpoly(TMSP)の酸素透過性が温度により変化することに起因していると考えられる。

以上のように、poly(TMSP)を使用したPSPは温度によって圧力感度が変化するため、固体表面温度が変化する流れ場においてPSPによる圧力計測を行う際には温度補正が必要不可欠となる。

5.4 低密度な超音速自由噴流と衝突する固体表面の圧力分布計測 高クヌッセン数流れ中における圧力分布計測への適用例として、低密度な超音速自由噴流と衝突する固体表面の圧力分布をPSPにより計測した。出口直径 0.5 mm の音速ノズルより真空チャンバー内に純酸素を噴出させて低密度な超音速自由噴流を形成し、ノズル出口から噴流の中心線方向 2 mm の位置に設置した試料片上に噴流を角度 60° で衝突させ、試料片表面に生じる圧力分布を測定した。圧力条件は、貯気室内圧力 $P_s = 1300 \text{ Pa}$ (10 Torr) および 130 Pa (1 Torr) と

Table 1 Stern-Volmer coefficients

	(a) $P_s = 1.3 \times 10^3 \text{ Pa}$	(b) $P_s = 1.3 \times 10^2 \text{ Pa}$
$P_{ref} [\text{Pa}]$	1.3	7.6×10^{-2}
A_0	8.70×10^{-1}	9.96×10^{-1}
A_1	1.25×10^{-1}	8.52×10^{-3}
A_2	-9.40×10^{-4}	-8.03×10^{-6}

し、それぞれの場合においてチャンバー内圧力 P_b が 1.3 Pa および 0.076 Pa となった。PSP の発光分子には高い圧力感度を持つ PdOEP を用い、作動気体には純酸素を用いた。圧力の算出に用いる Stern-Volmer 係数 A_n ($0 \leq n \leq 2$) は、それぞれの圧力条件におけるチャンパー内圧力を参照圧力として (すなわち $P_{ref} = P_b$ として) 導出した。このようにして得られた Stern-Volmer 係数を表 1 に示す。前節で述べたように、固体表面上に温度変化が生じると圧力計測に誤差が生じるので、温度変化による測定誤差の影響を最小限に抑えるため、ペルチエ素子を用いて試料片の温度を 300 K に保った。なお、実際の温度変化の大きさを検証するため、同じ実験条件において、発光分子に $\text{Eu}(\text{TTA})_3$ を用いた感温塗料 (TSP) により試料片表面温度分布を計測した結果、試料片表面全域にわたる温度分布の幅が $\pm 2 \text{ K}$ 以下であった。このため、試料片表面の温度変化による圧力測定誤差の影響は無視できると考えられる。

図 7 は PSP により測定した超音速自由噴流と干渉する固体表面の圧力分布である。(a) は貯気室圧力 $P_s = 1300 \text{ Pa}$, (b) は $P_s = 130 \text{ Pa}$ における結果を示す。図中の斜線で囲まれた領域はノズルの影を示し、図下部のカラーバーに圧力値を示す。なお、圧力の測定値の標準偏差はそれぞれ 0.31 Pa および 0.24 Pa であった。

$P_s = 130 \text{ Pa}$ の条件下では、図 7(b) に示すとおり、噴流衝突位置における最大圧力が 2.5 Pa となるが、このような低い圧力条件下においても PSP を用いることで二次元的圧力分布を計測することが可能であった。さらに $P_s = 1300 \text{ Pa}$ の条件下では図 7(a) に示すように最大圧力は 25 Pa となったが、この場合には PSP の手法により鮮明な圧力分布画像を得ることができた。これらの結果より、PSP を用いた手法が低密度気体流における固体表面圧力の計測に有効であることが示された。なお、 $P_s = 130 \text{ Pa}$ の条件下では、計測した圧力が 0~2.5 Pa と非常に低いために相対的に計測誤差が大きくなり、得られた画像は図 7(b) に示すように不鮮明となったが、さらに高精度かつ高 S/N なカメラの使用および圧力画像の積算などにより発光強度測定 of S/N を上げることで、数 Pa 程度の非常に低い圧力条件下

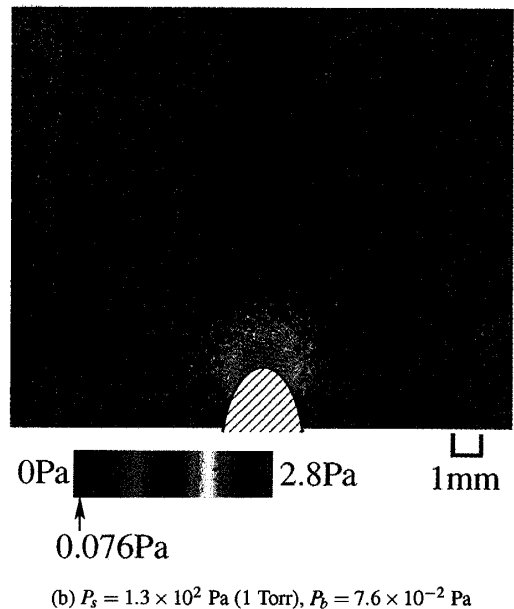
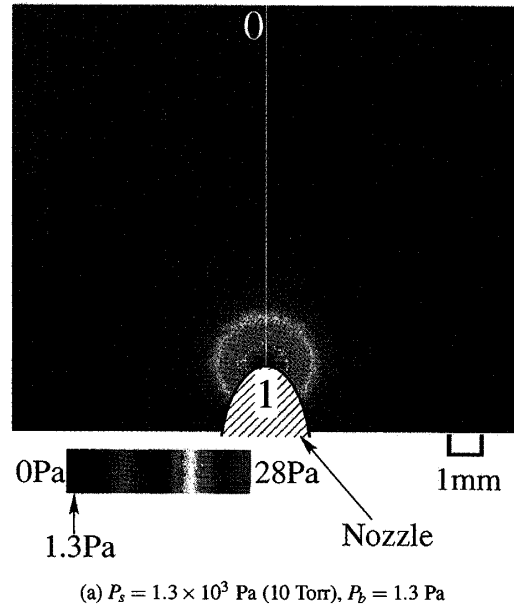


Fig. 7 Two-dimensional pressure distribution of jet-impinging surface measured by PSP

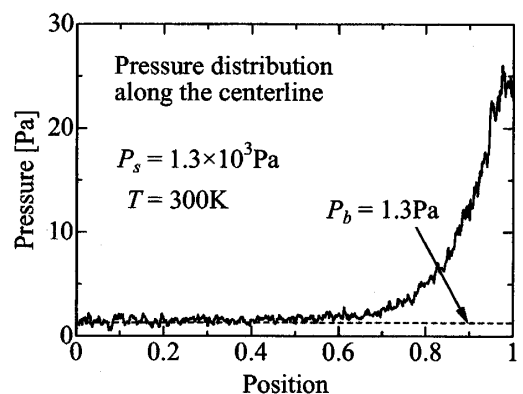


Fig. 8 Pressure distribution along the centerline

においても二次元的圧力分布を精度良く行うことが可能になると思われる。

$P_s = 1300 \text{ Pa}$ の条件において、衝突噴流の中心軸を固体表面に投影した直線 (図 7(a) に示す白線) 上での圧力分布を図 8 に示す。横軸は位置であり、図 7(a) に示す白線の下流側の端を 0、ノズル出口側の端を 1 とした。縦軸は PSP で測定された圧力値である。なお、図中に示す破線はチャンパー内圧力 P_b を示す。図より明らかなように、噴流の衝突位置から十分離れた下流域において、PSP により測定した圧力がチャンパー内圧力と等しくなっていることが分かる。

6. 結 論

本研究では、バインダーとして酸素透過性の非常に高い poly(TMSP) を使用し、かつ発光分子として PtTFPP, PdOEP および PdTFPP を使用した 3 種類の PSP を構成し、これらの PSP の低圧力域における特性調査を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

1. 発光分子に PdOEP および PdTFPP を用いた PSP は 130 Pa 以下の低圧力域において非常に高い圧力感度を有することを明らかにし、低圧力域における圧力計測に最適であることを示した。一方で、130 Pa を超える圧力域では圧力感度が急激に低下し、かつ発光強度も低くなり S/N が悪化することを示した。
2. PtTFPP を発光分子に用いた PSP は 130 Pa 以下の低圧力域における圧力感度は比較的劣るものの、10 kPa 程度までの圧力範囲で適用が可能であることを示した。
3. 本研究で構成した 3 種類の PSP がいずれも一酸化窒素に対する圧力感度を有することを実験的に示した。特に、発光分子として PdTFPP を用いた PSP が一酸化窒素に対して高い圧力感度を有することを明らかにした。これにより、NO-LIF による流れ場構造の可視化と PSP による固体表面圧力の複合計測の実現が期待できる。
4. PSP を適用した固体表面の温度変化は、PSP の発光強度および圧力感度の両方に変化を及ぼすことを明らかにし、定量的な計測を行うためには PSP の温度補正が必要不可欠であることを示した。
5. PdOEP と poly(TMSP) を組み合わせた PSP を用いて超音速自由噴流と干渉する固体表面の圧力計測を行い、25 Pa 以下の低い圧力分布を二次元的に計測することを可能とした。この結果から、この PSP が非常に低圧力の領域における圧力計測に最適であることを示した。

謝 辞

本研究は科学技術振興調整費「機能性分子による熱流体センシング技術の研究開発 (MOSAIC)」, 科学研究費補助金 [基盤研究 (A)(2), 萌芽的研究] および赤崎記念研究奨励事業の援助を受けて実施した。御協力頂いた関係者各位に厚く御礼申し上げる。また、米国 Purdue 大学の John P. Sullivan 教授および Chih-Yung Huang 氏には発光分子に関する有益な助言を頂いた。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 新美智秀, 森英男, 岡部和毅, 政井佑介, 谷口真潮, クラスター型リニアエアロスパイクノズル噴流の可視化と構造解析, 日本航空宇宙学会論文集, **52**, 605, pp. 235–240 (2004).
- (2) 森英男, 新美智秀, 丹羽健二, 秋山勇雄, REMPI による超音速自由分子流における回転温度非平衡現象の解析に関する研究, 機論 (B 編), **69**, 679, pp. 623–629 (2003).
- (3) J. Kavandi, J. Callis, M. Gouterman, G. Khalil, D. Wright, E. Green, D. Burns, and B. McLachlan, *Luminescent barometry in wind tunnels*, Rev. Sci. Instrum., **61**, 11, pp. 3340–3347 (1990).
- (4) T. Liu, B. T. Campbell, S. P. Burns, and J. P. Sullivan, *Temperature- and pressure-sensitive luminescent paints in aerodynamics*, Appl. Mech. Rev., **50**, 4, pp. 227–246 (1997).
- (5) R. H. Engler, K. Hartmann, I. Troyanovski, and A. Vollan, *Description and assessment of a new optical pressure measurement system (OPMS) demonstrated in the high speed wind tunnel of DLR in Göttingen*, DLR-FB 92-4, DLR (1991).
- (6) K. Asai, H. Kanda, C. Cunningham, R. Erausquin, and J. P. Sullivan, *Surface Pressure Measurement in a Cryogenic Wind Tunnel by Using Luminescent Coating*, ICIAF '97 Record, pp. 105–114 (1997).
- (7) H. Sakaue, *Porous pressure sensitive paints for aerodynamic applications*, MS Thesis, School of Material Science and Engineering, Purdue University (1999).
- (8) H. Sakaue, and J. P. Sullivan, *Fast Response Time Characteristics of Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint*, AIAA Paper 2000-0506 (2000).
- (9) K. Asai, Y. Amao, Y. Iijima, I. Okura, and H. Nishide, *Novel Pressure-Sensitive Paint for Cryogenic and Unsteady Wind-Tunnel Testing*, J. of Thermophysics and Heat Transfer, **16**, 1, pp. 109–115 (2002).
- (10) 新美智秀, 吉田昌記, 近藤誠, 大島佑介, 森英男, 江上泰広, 浅井圭介, 西出宏之, PSP の低圧力域における基礎特性に関する研究, 機論 (B 編), **68**, 676, pp. 3360–3368 (2002).
- (11) P. F. Jones, and S. Siegel, *Quenching of Naphthalene Luminescence by Oxygen and Nitric Oxide*, J. Chem. Phys., **54**, 8, pp. 3360–3366 (1971).
- (12) Y. Amao, I. Okura, H. Shinohara, and H. Nishide, *An Optical Sensing Material for Trace Analysis of Oxygen*.

2728

高クヌッセン数流れ中の表面圧力計測に適した感圧塗料の開発

Metalloporphyrin Dispersed in Poly(1-trimethylsilyl-1-propyne) Film, *Polymer Journal*, **34**, 6, pp. 411–417 (2002).

(13) K. Kalyanasundaram, *Photochemistry of polypyridine and porphyrin complexes*, Academic Press (1992).
