

有機 EL を用いた感圧塗料圧力計測系による平板衝突噴流の解析

About the PSP Pressure Measurement System Using Organic Electroluminescence for the Flow Analysis of Jet Impingement on a Flat Plate

伊藤匡人 (青学大・院) 正 大山聖 (ISAS/JAXA) 正 藤井孝藏 (ISAS/JAXA)

Masato Ito, Aoyama Gakuin University
Akira Oyama, Japan Aerospace Exploration Agency
Kozo Fujii, Japan Aerospace Exploration Agency

Surface Pressure measurements with pressure sensitive paint (PSP) using LED lamps have some drawbacks such as complexity of optical system and illumination inhomogeneities. In this study, organic EL is applied as an external light source to evenly illuminate. The flow field of jets impinging on an inclined flat plate is investigated using the pressure measurement system using organic EL. Although the light system became simple, pressure data by using organic EL doesn't agree with the data obtained with the LED light source. In the present experiments, it became clear that organic EL emission depends on pressure.

Key Words: Pressure Sensitive Paint, Organic Electroluminescence

1. 序論

近年, 感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint : PSP) を用いた表面圧力計測法は, 航空宇宙分野のみならず幅広い工業分野において注目されている⁽¹⁻⁴⁾. 従来, 表面圧力の計測には静圧孔が多く用いられてきたが, 静圧孔を配置した点の情報しか得ることができない, 計測装置が複雑・高価になる, などの問題がある. これに対し, 感圧塗料を用いた圧力計測は, 塗料を塗布した表面全体の圧力データが得られる面計測であるため, 1 回の計測で得られる情報量が従来の静圧孔に比べ格段に多く, 局所的な圧力変化も確実に捉えることができるという利点を持つ. また, 感圧塗料による実験は塗料を塗布するだけなので, 小型な風洞で行う実験など静圧孔の設置が困難な模型に関しても実験をすることができ, その精度に関しても静圧孔など標準的な計測技術に十分達していることが分かっている.

感圧塗料による圧力計測では, 感圧塗料を塗布した模型に対し励起光を当て, 圧力によって発光量が変わる塗料のルミネッセンスを CCD カメラなどで捉えることにより, 表面圧力を計測する. これまでの感圧塗料圧力計測では, 風洞窓外など離れた位置に設置したアークランプやレーザー, LED などを励起光源として利用してきた. しかしながら, これらを用いて模型に励起光を照射する場合, 模型形状によっては表面上に影ができてしまい, 励起光を均一に照射することが困難である. また, 迎角などの実験条件を変化させるたびに均一に照射できるように光源位置を再設定させる必要があり, これが実験時間の大部分を占めることとなる. また, 感圧塗料計測系は静圧孔などが必要ではないため, 実機の計測に向いていると考えられるが, その光源の配置が問題となっている. 本研究では, この問題を解決するために光学系を改良することを考え, 有機 EL を励起光源として使用する新しい感圧塗料計測システムの開発を試みた.

有機 EL (Electroluminescence) は近年開発が進んでいる光源であり, 面光源であることや変形が可能であること, 非常に薄いという特徴を持つ⁽⁵⁾. そのため, LED の設置が困難な実験を行う場合や実機の計測を行なう場合も, 模型や実機の表面自体が光源となる, 又は内側から励起光を照射することで効率的で精度のよい実験が可能となると期待される.

しかしながら, 有機 EL の感圧塗料実験への適用には輝度, 口バラスト性をはじめとし, 確認しなければならない多数の課

題がある. 本研究ではこれまで本研究室行ってきた不足膨張噴流と平板の干渉流れを適用対象として有機 EL の励起光源としての利用による課題の抽出を試みた.

2. 感圧塗料

感圧塗料は, 塗料中に含まれる色素に, 色素の励起波長を持つ励起光が照射された時, 色素から放射される燐光の強さが周囲の酸素濃度によって変化する現象を用いた計測法である. 一般に発光強度と圧力との関係は Stern-Volmer の理論式によって記述されるが, 非線形性を考慮し, 本実験では次に示す較正式を用いた.

$$\frac{I_{P,ref}}{I_P} = A_0(T) + A_1(T) \frac{P}{P_{ref}} + A_2(T) \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで I は発光強度, P は圧力, T は温度, 添え字 ref は無風時の基準状態を表し, A は発光強度比と圧力比の関係を表す係数である. これらの係数は予め較正実験により求めた. 較正実験の詳細については過去の論文⁽⁷⁾を参照されたい. 本実験では感圧塗料として Bath-Phen Ru を使用し, ジクロロメタンを溶媒として, シリカゲル TLC (薄膜クロマトグラフィ) プレートに吸着させた. 励起光を背面から照射するため TLC プレートの基盤は光を透過するプラスチックのものを使用した (プラスチックシート: 0.1mm, シリカゲル層: 0.25mm).

3. 有機 EL

有機 EL は Fig.1 のように発光層 (有機材料) を電極で挟んだ形をしている. 陽極と陰極の 2 つの電極に直流電圧を掛けることで, 電極から有機膜中にホール (正孔: 陽極側), 電子 (陰極側) が送り込まれる. そして, 送り込まれたホールと電子が発光層に到達した後結合すると, 基底状態にあった有機分子の電子が励起される. しかし, この励起状態は不安定なため元の基底状態に降りてくる. このときエネルギーが放出されて現れる光が, 有機 EL の発光となる.

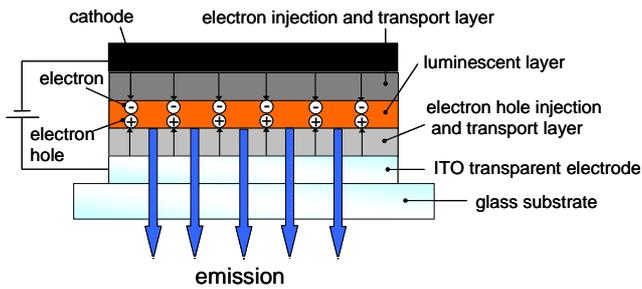


Fig.1 Structure of organic EL

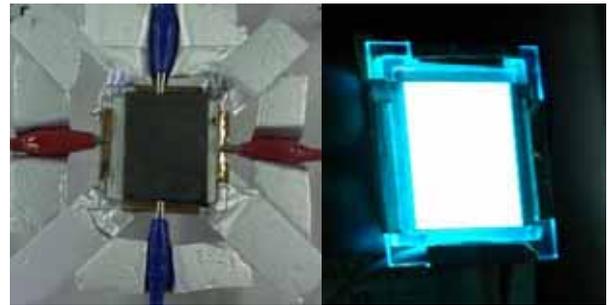


Fig.3 Organic EL

5. 有機ELを用いた感圧塗料計測について

Fig.2の(a)は従来のLEDなど点光源による計測システムを表しており、(b)は本研究で開発した、有機ELを用いて励起光を背面照射する計測システムを表したものである。従来の計測系では、PSPの上面から励起光を照射するので、周辺装置の影ができてしまうなど均一に照射することが困難である。それに対し、有機ELを用いた計測系では背面から照射するため、影ができることなく均一に照射が可能である。また、LEDやレーザーなどの光源の設置が困難な、実験の実験についても計測が可能となる。

感圧塗料の励起波長は450nm中心なので、青色の有機EL（山形大学城戸研究室より提供）を用いた（Fig.3）。有機ELのサイズは26mm*29mmである。発光波長のスペクトルをFig.4に示す。従来の計測システムとの比較のため、LEDを励起光源に用いた実験も行った。LEDは日亜科学工業社製の、発光波長450nm中心（NSPB300A）のものを使用した。

Fig.5に、本実験で使用したTLCプレートを示す。感圧塗料計測は、式(1)に示すように通風時と無風時の輝度比を計測して圧力を求めるので、通風時に起こる模型の移動を正確に見積もり補正することが重要である。Fig.5の外側のマーカー点はLEDによる計測に、内側は有機ELによる計測に使用するマーカー点である。

本研究室では、感圧塗料を用いて、不足膨張噴流と平板の干渉流れの解析を行ってきた⁽⁶⁾。本研究では励起光源によって平板上に光を均一に照射することが困難であった。そこで、有機ELを平板の裏側に貼り付け、背面照射という形で平板上圧力分布を計測し、LED光源と同程度の計測精度が得られるか確認することを目指した。光学系のセッティングに関しては、従来の方法で1時間かかっていたが、有機ELを用いた計測系は数分で設置することができた。

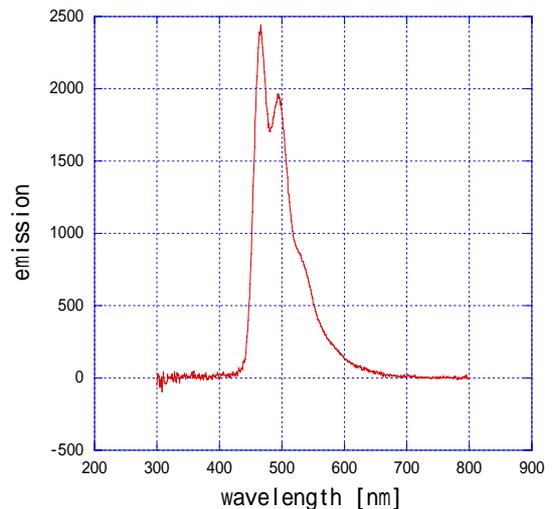


Fig.4 EL emission spectrum

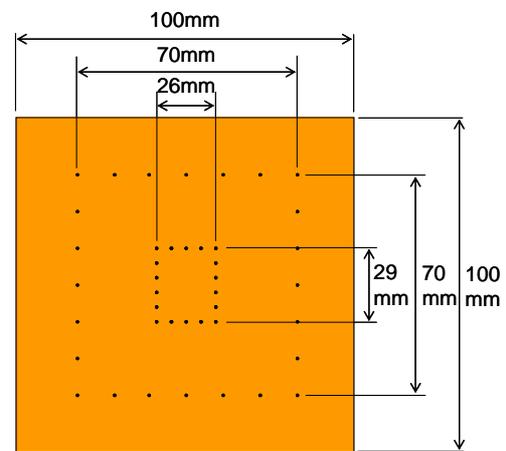


Fig.5 TLC plate

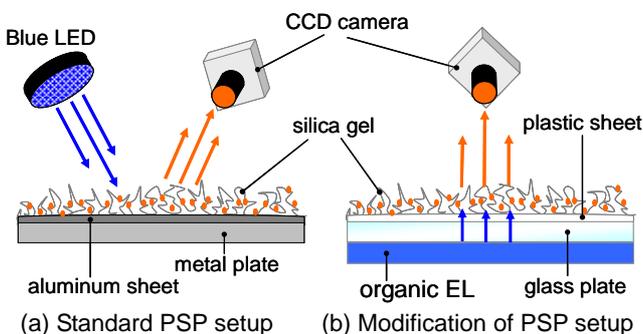


Fig.2 PSP setup

3. 実験装置及び実験条件

実験は JAXA 宇宙科学研究本部の小型吸い込み式風洞で行った。Fig.6にPSP実験装置の模式図を示す。Fig.6に示すように、有機ELと平板、TLCプレートを設置し、平板上のPSPによる発光を鏡で反射させ、側面の観測窓から撮影した。CCDカメラは浜松ホトニクス社製の解像度が1024*1024、分解能12bit（C7300）のものを使用した。ノズルの形状はスロート径 $D=5.00$ mm、出口径 $D_n=7.07$ mm、広がり角 15° の円形コニカルノズルで出口マッハ数は設計マッハ数で2.2のものを用いた。平板角度及び距離はそれぞれ $\theta=30\sim90^\circ$ 、 $L/D_n=1.0\sim7.0$ まで変化させることができる。PSPを吸着させたTLCプレートが水分を吸着しないように、圧搾乾燥空

気を用いた。

発光強度は通風前の基準状態及び通風中でそれぞれ 10 枚撮影した。圧力分布はそれらの画像をピクセル毎に平均し、式(1)に基づく a priori 法によって求めた。実験は、圧力比(ノズル出口静圧/背圧) $Pr=4.5$ 、平板角度 $\theta=60^\circ$ 、ノズル平板距離 $L/Dn=1.0\sim 4.5$ (L :ノズル平板間距離)の条件で行った。

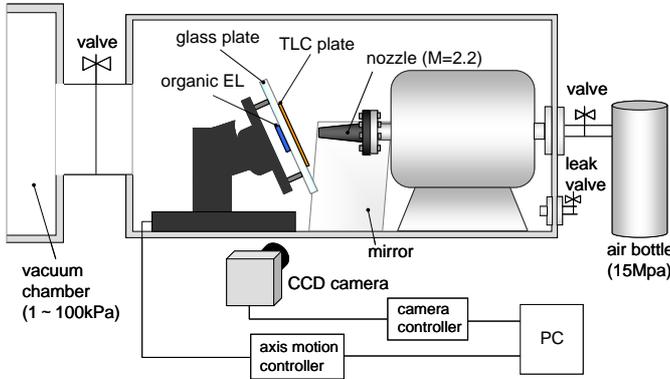


Fig.6 Schematic picture of test section.



Fig.7 Picture of test section

4. 実験結果及び考察

本実験では、山形大学の城戸研究室からいただいた有機 EL の試作品を実験に用いたが、実験装置のセッティング中にショートを起こし、一部発光しない部分が出てしまった。有機 EL の一部が発光しなくなった原因は、有機薄膜中のゴミや薄膜の欠陥である。有機薄膜は非常に薄いため、その部分に小さなゴミがあるとそこから電流がショートして、発熱する。その発熱により有機膜が融解して電極 (Al と ITO) が接触することで電極が破壊され、発光しなくなる。これは印加電極のかけすぎなどの問題ではないので素子の寿命と考えられる。この問題は有機 EL 自体の出来に依存するもので、今後より製品信頼性の高い有機 EL が提供されることを期待したい。

有機 EL による背面照射での実験の結果を以下に示す。

$Pr=4.5$ 、 $\theta=60^\circ$ 、 $L/Dn=4.0$ の条件下で、有機 EL を用いた計測システムにより得られた平板上輝度分布を Fig.8、9 に示す。ここで Pr はノズルの出口静圧と背圧の比、 θ はノズルと平板の角度 ($\theta=90^\circ$ が垂直)、 L/Dn はノズルと平板の間の距離 L とノズルの出口径 Dn の比を表している。左の画像は PSP による平板上輝度分布を示しており、右のグラフの縦軸は PSP での縦線上座標を、横軸はその座標に対する輝度を表している。ただし、平板上からの発光を鏡で反射させて撮影したため圧力分布図は傾いた図になっている。Fig.8 は、

テストセクション内圧力を $P_b=100$ [kPa] として基準画像を、Fig.9 は $P_b=1.24$ [kPa] として通風画像を撮影した結果である。有機 EL は図中のマーカ点で囲まれた領域に設置されており、本来は一樣な分布となるはずだが、Fig.8 の PSP 画像より、PSP からの燐光が均一ではなく、左上に高輝度の領域が存在していることがわかる。

Fig.8、9 のグラフより、低圧になると輝度が低くなるのが分かる。感圧塗料の原理より、圧力を低くすると輝度は高くなるはずである。これは有機 EL 自体の発光の減少が原因であると考えられる。よって、有機 EL は圧力変化に伴って、発光強度が変化するということが本実験よりわかった。

$Pr=4.5$ 、 $\theta=60^\circ$ 、 $L/Dn=2.0$ の条件下で、光源に離れた位置に LED 光源を置いた従来の計測システムでの結果と有機 EL を光源として使用した計測システムでの結果を Fig.10、11 に示す。左の図は PSP による平板上圧力分布、右のグラフの縦軸は平板の中心軸 (PSP 画像での中心線) の座標を表しており、横軸はその座標に対する圧力を表している。Fig.10 より LED を用いた既存の方法による実験では、Jet により発生する Plate shock の影響 (圧力ピーク A) や、upper tail shock の影響 (圧力ピーク B) をとらえていることがわかる。これに対し Fig.11 では高圧領域が左にずれていることがわかる。衝突噴流は左右対称な圧力分布が形成されるはずであり、計測が正しくできていないことになる。Fig.11 に見られる高圧領域が Fig.8、9 における高輝度領域とほぼ同じ位置に見られることから、基準画像の輝度分布の影響が強く現れていることが考えられ、有機 EL 発光の不均一性が原因であると想定される。

Fig.11 の圧力値が全体的に大きく出てしまっているのは、圧力変化による有機 EL の輝度変化が原因であると考えられる。この問題は基準画像を撮影する際、テストセクション内圧力を、通風時と同じにすることで解決できると思われる。基準画像を低圧で撮影した結果については発表当日に行う予定である。

5. 結論

有機 EL を励起光源とした、感圧塗料圧力計測システムを開発し、衝突噴流実験に適用したところ、次のような結果を得た。

- LED を用いて実験を行った場合に比べ、光学系のセッティング時間は短縮できた。
- 今回用いた有機 EL は均一に発光していなかったため、感圧塗料から発する燐光の発光強度にも偏りがあった。その結果、LED を用いる従来の計測システムによる実験結果のような圧力分布が得られなかった。
- 周囲の圧力変化に伴い、有機 EL の輝度が変化することがわかった。圧力を下げると有機 EL の輝度は減少する。この現象が原因で、圧力の減少と共に感圧塗料からの発光も減少することとなった。

本研究で明らかとなったこの問題点に関する解決策は、基準画像を低圧で撮影することである。これにより通風画像との輝度の差をなくすことができると考えられる。また、より信頼性の高い有機 EL を利用することが不可欠であることが明らかになったので、今後更に行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省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)」の元に行われた。

本実験で使用した有機 EL は山形大学城戸研究室より提供していただいた。ここに謝意を表す。

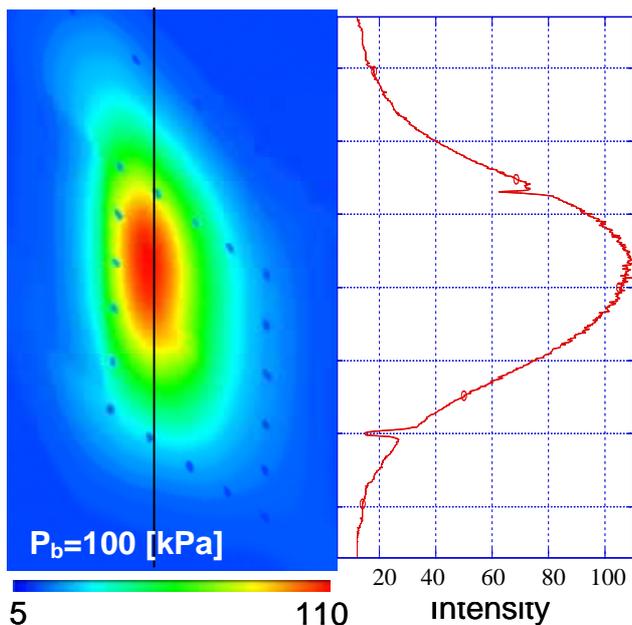


Fig.8 Intensity distribution (reference image)

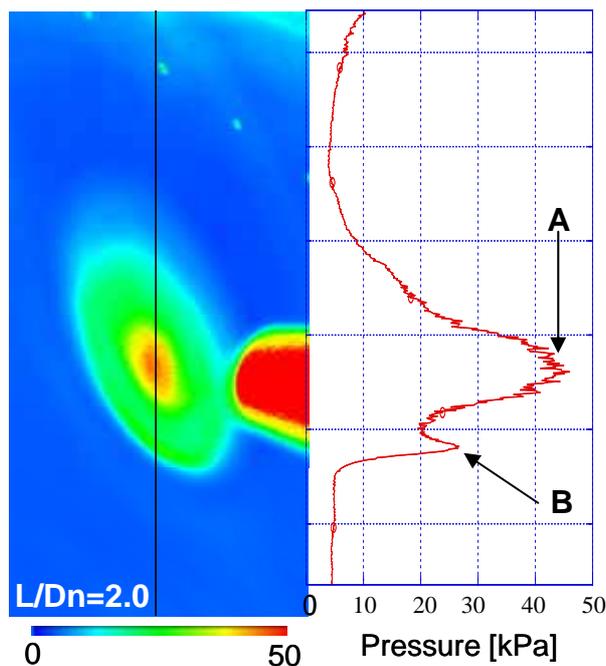


Fig.10 Pressure distribution (LED)

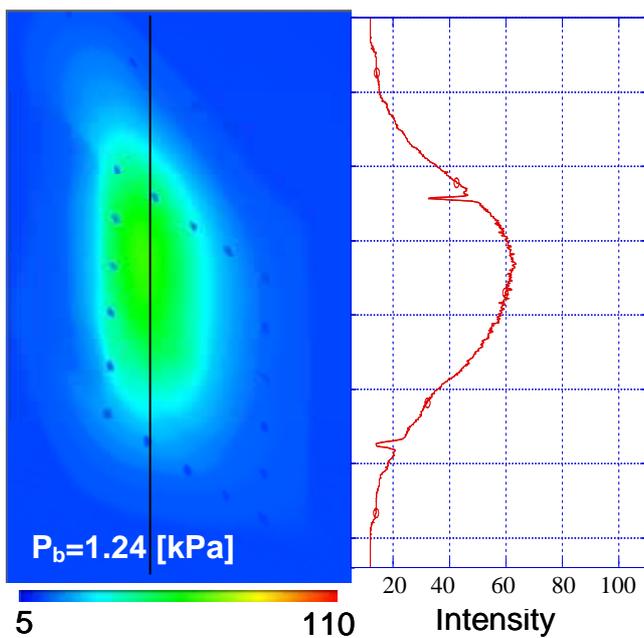


Fig.9 Intensity distribution (wind-on image)

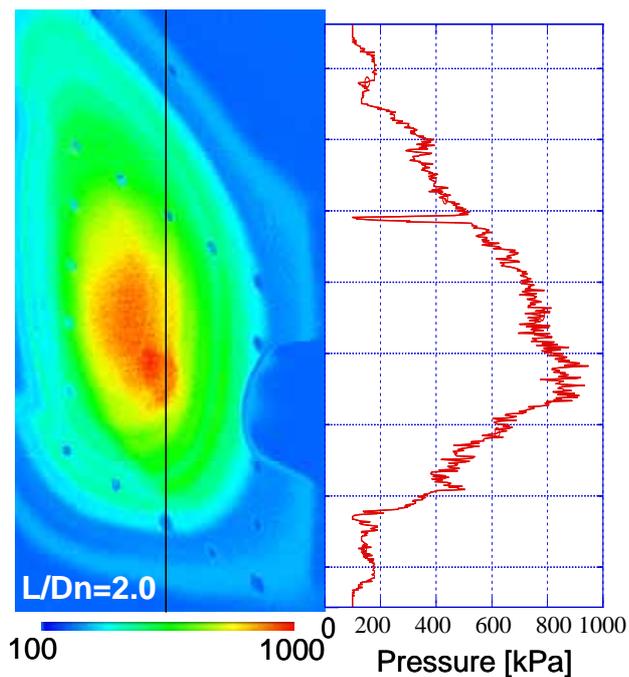


Fig.11 Pressure distribution (Organic EL)

参考文献

- (1)Matsumura, S., et al, "Feasibility of Detecting Streamwise Vortices From Roughness Elements Using Temperature Sensitive Paint in a Mach 4 Ludwig Tube," AIAA Paper 2002-3238, (2002).
- (2)Liu, T., Campbell, B. T., Burns, S. P. and Sullivan, J.P., "Temperature and Pressure Sensitive Paints in Aerodynamics," Applied Mechanics Reviews, Vol. 50, No. 4, pp. 227-246, (1997).
- (3)浅井圭介, "感圧塗料による圧力分布の計測技術", 可視化情報, Vol.18, No.69(1998),pp.97-103.
- (4)Bell,J.H.,Schairer,E.T.,Hand,L.A.,and Mehta,R.D. "Surface

Pressure Measurements Using Luminescent Coatings", Ann.Rev.Fluid Mech.,Vol.33(2001) pp.155-206.

- (5)城戸淳二, 有機ELのすべて, 日本実業出版社, 2003.
- (6)Nakai, Y., Fujimatsu, N. and Fujii, K., "Flow Classification of the Under-Expanded Super Sonic Jet Impinging on a Flat Plate," 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2003, AIAA-2003-3467.
- (7)中井祐輔, 藤松信義, 藤井孝蔵, 服部直三: 感圧・感温塗料を用いた斜め平板衝突噴流の圧力計測, 第33期航空宇宙学会年会 (2002).