256

カセグレン光学系を用いた高空間分解PSP計測

松本 尚之○ (東北大), 池田 裕二 (神戸大)

貴堂 寧正, 坂村 芳孝, 鈴木 立之 (富山県立大)

High Resolution PSP Measurements using Cassegrain Optics.

Masashi MATSUMOTO, Yuji IKEDA,

Yasumasa KIDOH, Yoshitaka SAKAMURA and Tateyuki SUZUKI

ABSTRACT

The objective of the present work is develop the high resolution pointwise pressure-sensitive paint (PSP) measurements system. The Cassegrain optics and diode laser has been used to satisfy this purpose. This measurement system has high spatial and temporal resolution. The present optics can effectively collect the luminescence emitted from the area within 0.1 mm in diameter. The results obtained by the present system have been compared with those by a conventional pressure transducer in time domains, and the agreement between these results is quite good.

Keywords: Pressure Sensitive Paint, Cassegrain Optics, Pointwise Measurement

1. 緒論

近年, 圧力計測の新しい手法として注目されている感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint : PSP) は, ある特殊な色素 (PSP色素) に特定の波長を持つ励起光を照射した際に観測される燐光が, 空気中の酸素との衝突失活により消光する現象を利用している⁽¹⁾⁻⁽³⁾. この計測原理から, PSPにはきわめて応答性の高い非定常センサーとして使用できる可能性があると考えられてきた. 初期のPSPは, PSP色素を酸素透過性の高分子化合物に混合し, 供試体表面に塗布することにより用いられていた. そのため, 空気中の酸素分子が高分子化合物に浸透する時間が必要となり, 応答時間が遅くなっていた. しかし, 近年PSPを非定常計測に用いる事を目的として, 多孔質吸着剤にPSP色素を吸着し直接外気に露出する事で応答時間を短縮する試みがなされている.

これまで, こういった高応答性PSPの応答性を確認するために, 衝撃波管が用いられてきた⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾. 通常衝撃波管を用いてPSPの応答時間を計測する場合数mm四方のPSPサンプルが用いられてきた. このPSPサンプルを衝撃波管の低圧室管端部に添付し, 衝撃波が通過することによって生じるステップ状の圧力変化によるPSPの発光輝度変化を光電増倍管やフォトダイオードを用いて計測する.

この発光輝度変化とKulite等の十分応答性の高い圧力変換器による圧力計測結果と比較する事によって, PSPの応答性を求めてきた.

しかし, こうして求められた発光輝度変化は光学計測系によって生じる時間遅れも含んでいたため, 正確なPSPの応答性とは言い難かった. 特に, 数十 μ sec以下の応答性を有するPSPの場合, 衝撃波がPSPサンプルを通過する時間が問題になると思われた.

そこで, きわめて空間分解能の高い光学系であるカセグレン光学系⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾を用い, 高空間分解PSP計測システムを開発した.

2. 実験装置

2.1 カセグレン光学系

カセグレン光学系はFig.1に示すように, 互いに向き合った凹面鏡と凸面鏡および光ファイバから構成される. 今回使用したカセグレンは, 作業距離WD=300mm, 凹面鏡外径150mm, 凸面鏡外径50mmで, 凹凸面鏡の表面精度は $\lambda/4$ 程度 ($\lambda=309.4\text{nm}$) である. カセグレン光学系はミラー光学系のみで構成されているため, 色収差がなく, 測定面積形状および測定位置に対して波長依存性がない. そのため, 励起光とPSPから放射される信号光を一

Fig.1 Cassegrain optics

Fig.2 Spatial resolution of Cassegrain optics.
(Kojima, J., et al., 1999)

つの光学系で計測することが可能である。これまでの研究において本研究で用いたカセグレン光学系の集光強度分布が求められており、焦点近傍で、集光率ピーク値の $1/e^2$ 倍をしきい値として求めた測定体積は $\phi 0.1 \times 0.8 \text{ mm}$ となっている (Fig.2)。

本研究では7本の光ファイバをバンドルし、中央の光ファイバに励起光を導入した。光源には紫色半導体レーザ (日亜化学製NLHV500A: 発振波長 $405 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) を用いた。周囲の6本の光ファイバはシャープカットフィルタ (シグマ光機製SCF-20C-58Q) を透過し励起光をカッ

トした後、光電増倍管 (PMT: 浜松ホトニクス製R6357) でPSP信号光を計測した。PMTには電流電圧変換と信号の増幅を行うI/Vコンバータが接続されており、増幅後の出力信号は、アナログローパスフィルタによりノイズを減衰できるようになっている。

2.2 衝撃波管

高速で非定常圧力変化を作り出すためには、Fig 3に示す衝撃波管を用いた。実験に用いた衝撃波管は高压部と隔膜、低压部、ダンブタンクから構成されており、低压部の一部に観測部が設けられている。低压部は矩形断面 (高さ $100 \text{ mm} \times$ 幅 30 mm) をしており、隔膜からダンブタンクまでの距離は 4850 mm である。観測部は隔膜から 4695 mm の位置にあり、衝撃波は十分発達し、測定部近辺では、きれいな垂直衝撃波になっていると考えられた。

作動流体としては空気を用い、低压部初期圧を大気圧、初期温度を室温、衝撃波マッハ数を1.2とした。観測部側壁の一方に壁面に凹凸がでないようにPSP塗料層を取り付け、他方の側壁には観測窓を設けた。また、PSPと管軸方向同位置にピエゾ式圧力変換素子 (KISTLER 社製601A) を取り付け、同圧力変換素子による測定圧力を用いて信号光強度と圧力値との較正を行った (Fig.4)。PSP色素には H_2TFPP (meso-tetra(pentafluorophenyl) porphine), 吸着材にはTLCシート (MERIC社製Silica gel 60) を用いた。 H_2TFPP の励起波長は 400 nm 近辺にあり、今回使用した半導体レーザで効率よく励起できる。また、信号光 (燐光) の波長は 654 nm および 704 nm にピークを持ち、光学フィルタで容易に励起光と分離可能であった。 H_2TFPP はテトラヒドロフランに溶かした後TLCシートに吸着した

Fig.3 Shock tunnel

カセグレン光学系を用いた高空間分解PSP計測

Fig.4 Experimental setup

ものを十分乾燥させて使用した。PSPを吸着したTLCシートは10mm×5mmに切断され、測定部に両面テープを用いて添付されたが、この際TLCシートが張り出さないように注意した。添付位置は圧力変換素子と軸方向同位置であり、衝撃波の通過による圧力上昇の影響は圧力変換素子もPSPシートも同時になるように設定した。

観測部には石英ガラス製の観測窓が設けられており、カセグレン光学系は観測部窓側にFig.4に示すように設置された。PSP塗布面に焦点がくるように光学系を設定した後、ごくわずかに焦点位置をずらし、励起光照射位置と信号光集光位置が重なる様にして計測を行った。

PMTおよび圧力変換素子の出力は、デジタルオシロスコープ（横河電機製DL1200E）に取り込まれ、その後パーソナルコンピュータを用いて処理した。

3. 実験結果

本高空間分解PSP計測システムを用いた測定結果をFig.5に示す。衝撃波通過後の急激な圧力上昇に対し、PSP信号は十分追従していることがわかる。また、衝撃波通過後の膨張波や圧縮波などの通過に対してもPSP信号は追従しており、PSPによる計測結果が圧力変換器による計測結果とほぼ一致していることが分かる。

ただし、PSPによる計測結果には、ショットノイズなどの影響で高周波成分のノイズが含まれる。ショットノイズは光量子がPMTで光電変換される際に発生し、そのノ

Fig.5 Time history of Shock wave transition.

(a) gain

(b) delay

Fig.6 Characteristics of the Butterworth filter.

イズの量は光量子個数の平方根にほぼ比例する。そのため、ショットノイズを低減するためには、光量子量を増やす必要がある。しかし、カセグレン光学系を用いた計測システムでは、測定面積が小さいため、光量を増やす事によりショットノイズを低減することが困難であった。そこで、取得データにデジタルローパスフィルタをかけるこ

Fig.7 Time history of Shock wave transition.
(cut off frequency 2kHz)

とにより, ノイズの低減を試みた。使用したフィルタは, 4 次のバターワース形低域原型フィルタであり, その特性をFig.6に示す。遮断周波数は2kHzとした。このフィルタ特性から, このフィルタでは衝撃波の立ち上がりが鈍る事と0.10~0.25msec程度の時間遅れが生じる事が予想される。

カセグレン光学系を用いて計測したPSPによる衝撃波通過時の圧力変化データに遮断周波数2kHzのデジタルフィルタをかけ, ノイズ成分を除去したものをFig.7に示す。PSPにより計測された圧力比はKuliteセンサーを用いた計測された圧力変化に比べ, 全体的に多少の時間遅れがある。これはデジタルローパスフィルタをかけたことによる。しかしながら, 衝撃波通過後に入射する膨張波や圧縮波による圧力変化はよくとらえられており, カセグレン光学系を用いてPSP計測を行うことにより, 高空間分解能で圧力計測ができることが確認された。

4. まとめ

カセグレン光学系を用いたPSP計測システムにより, きわめて高空間分解能を有する計測が可能であることが確認された。また, カセグレンはミラー光学系により構成されており, 色収差の問題がないため, 測定位置を決定する際に必要な光学系の調整がきわめて容易であり, PSP計測の有望なツールになる事が判明した。

5. 謝辞

カセグレン光学系に関しては神戸大学小嶋氏にいろいろご助言をいただいた。また, デジタルフィルタに関しては東京大学寺本氏にいろいろご助言をいただいた。ここに感謝いたします。

参考文献

- (1) 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 Gottingen. DLR-FB 92-24, (1992)
- (2) R.C.Crites, Pressure sensitive paint technique. von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series 1993-05 (1993)
- (3) Matsumoto, M., Kuratani, N., Ikeda, Y., Nakajima, T. and Mitani, T., PSP measurement of a jet injected behind a Backward-Facing step in a supersonic stream., 9th. International Symposium on Flow Visualization, (2000), Paper number 427
- (4) 宮里義昭, 半田太郎, 益田光治, 松尾一泰, 松本尚之, 坂本和之, ショックチューブを用いた感圧塗料の過渡応答に関する実験, 平成9年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (1998), pp.19-22
- (5) Handa, T., Miyazato, Y., Masuda, M., Matsuo, K., Matsumoto, M. and Sakamoto, K., Experimental Investigation on Luminescent Characteristics of Fast responding Pressure sensitive paint. Proceedings of the 2nd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing., (1999) PF087
- (6) 坂村芳孝, 貴堂寧正, 鈴木立之, 松本尚之, 感圧塗料による時間分解圧力計測, 第32回流体力学講演会
- (7) Akamatsu, F., Wakabayashi, T., Tsushima, S., Katsuki, M., Mizutani, Y., Ikeda, Y., Kawahara, N. and Nakajima, T., Development of light-collecting probe with high spatial resolution applicable to randomly fluctuating combustion fields. Meas. Sci. Technol. 10-12(1999), pp.1240-1246
- (8) 小嶋潤, 池田裕二, 中島健, メタン・空気層流予混合火炎の反応帯において高空間分解能計測された自発光スペクトル・自発光強度比OH*/CH*と当量比の相関一, 日本機学会論文集B編66巻647号(2000), pp.1871-1878