九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ポリマー型感圧塗料を用いた低周波数低振幅の非定常圧力変動計測

森，英男
九州大学大学院工学研究院機械工学部門

前田，恭平
九州大学大学院工学府機械工学専攻

KAWABATA, Hiroaki
九州大学大学院工学府機械工学専攻

古川，雅人
九州大学大学院工学研究院機械工学部門

他

https://hdl.handle.net/2324/4110739

出版情報：日本機械学会論文集. 81 (826), pp.15-00058-, 2015. 日本機械学会
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

ポリマー型感圧塗料を用いた低周波数低振幅の非定常圧力変動計測

森 英男 *1, 前田 恭平 *2, 川幡 宏亮 *2, 古川 雅人 *3, 秋吉 雅夫 *4, 文 吉周 *2

Low-frequency and low-amplitude unsteady pressure measurement using polymer-type pressure sensitive paint

Hideo MORI*1, Kyohei MAEDA*2, Hiroaki KAWABATA*2, Masato FURUKAWA*3, Masao AKIYOSHI*4 and Kil-Ju MOON*2

*1,*2,*3 Department of Mechanical Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan
*4 Mitsubishi Electric Corporation, 840 Chiyoda, Himeji-shi, Hyogo 670-8677, Japan

Received 28 January 2015

Abstract

Pressure sensitive paint (PSP) using poly(TMSP) as a polymer binder has high pressure sensitivity for low gauge pressure conditions observed in low-speed flows, which is important for research and development in mechanical engineering fields. Although the response time of poly(TMSP)-based PSP is of the order of milliseconds, which is slower than fast-response porous-type PSP, it may be useful for the measurement of nonstationary pressure distribution with low pressure amplitude as high as 100 Pa, if the frequency is not higher than the order of 100 Hz. In this study, we have investigated the nonstationary response of poly(TMSP)-based PSP, to evaluate the feasibility of the polymer-based PSP as a measurement tool for nonstationary low-speed flows. We have applied the poly(TMSP)-based PSP to measurement of nonstationary pressure distribution around a circular cylinder in low-speed flow, and compared the amplitude spectra of PSP and that of pressure probe, both of which are obtained by FFT analysis. As a result, it is clarified that the poly(TMSP)-based PSP can detect nonstationary pressure of 90 Hz with the amplitude of 70 Pa. For higher frequency the sensitivity of the poly(TMSP)-based PSP decreases, but the nonstationary pressure of 850 Hz with the amplitude of 310 Pa can be detected. Furthermore we have visualized the distribution of the integrated intensity of the PSP amplitude spectrum around the peak, to visualize the area with large pressure fluctuation on the cylinder.

Key words : Pressure sensitive paint, Low-speed flows, Unsteady pressure distribution

1. 緒　　言

人の住環境で使用される民生用機械は高効率化とともに騒音低減が求められる．騒音源のうち空力騒音は，流れ場の非定常な圧力変動に起因するため，民生用流体機械の低騒音化を実現するためには非定常流動場の解析が必要不可欠である．近年，コンピュータの発達により大規模計算が可能となったため，数値計算による複雑流動場の非定常現象解析は進展してきたが，実験による非定常現象解析は，機械内部の複雑な構造や可動部が存在するためセンサー類の設置が困難なことなどの要因により非常に遅れているのが現状である．そこで近年，非接触かつ連続的な圧力分布を取得できる特徴を持つ感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint: PSP) (Liu and Sullivan, 2005) を，

No.15-00058 [DOI:10.1299/transjsme.15-00058], J-STAGE Advance Publication date : 22 May, 2015
*1 正員，九州大学大学院工学研究院　機械工学部門 (〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)
*2 九州大学大学院工学府　機械工学専攻
*3 正員，フェロー，九州大学大学院工学研究院　機械工学部門
*4 三菱電機（株）　(〒 670-8677 兵庫県姫路市千代田町 840)
E-mail of corresponding author: hide-m@mech.kyushu-u.ac.jp

民生用機械における非定常圧力計測へ適用することが期待されている．

一般的な PSP は，測定対象の表面上に色素を付着させるためのバインダーとしてポリマーを利用しているため，ポリマー中における酸素分子の拡散速度が PSP の時間応答性を支配し，その結果として，PSP の時間応答性はミリ秒〜秒オーダーに制限されてきた．一方で，薄層クロマトグラフィ(TLC) 用シリカゲルプレートや陽極酸化アルミニウムなどの多孔質表面をバインダーとして利用することで，時間応答性を大幅に向上させる高速応答型感圧コーティング技術 (浅井，1998, Sakaue, et al., 2002, 亀田他，2003) が開発され，非定常流れ場の圧力変動計測へ PSP を適用する試みが進められている．例として，Sakamura, et al.(2005) は，TLC 用シリカゲルプレートをバインダーとした PSP を衝撃波管内に適用し，衝撃波の伝播に伴うステップ状の圧力応答に対する本 PSP の追従性を検証している．また，中北 (2011) は，比較的低速な流れ場における圧力変動に対する PSP の特性を評価するため，陽極酸化アルミニウム被膜をベースとした PSP (AA-PSP) を二次元 NACA0012 翼面上に適用し，翼後縁付近における周波数 920 Hz かつ 150 Pa p-p 程度の圧力変動を可視化計測している．ただし，TLC 用シリカゲルプレートは機械強度が低い欠点を有し，一方で陽極酸化被膜は機械強度が高いものの，適用対象物の材質がアルミニウム合金またはチタン合金に限定される欠点を有している．また，AA-PSP の発光色素として一般的に用いられるルテニウム錯体類は，温度の影響を受けやすいため，温度が不均一な場における計測精度に課題がある．そこで，多孔質粒子を含むポリマーをバインダーとして利用することで，ポリマー型 PSP と同等の機械強度を有し，かつ塗料としての塗布が可能なため材質の制限を有さない高速応答型 PSP である PC-PSP も開発された (Sakaue, et al., 2002, Yorita, et al., 2010)．しかしながら，これらの多孔質 PSP は低ゲージ圧領域における感度がポリマー型 PSP に比べて低く，民生用流体機械で見られる低速流れ場を対象とした計測には向いていない．近年，Kameda, et al. (2012) により，バインダーとして SiO_2 のナノ微粒子を用い，バインダーをスラリー状として対象物へ塗布する高速応答 PSP が開発された．当 PSP は，ポリマー型 PSP 同様にスプレーを用いた塗布が可能で，かつ低ゲージ圧領域においてポリマー PSP と同等の高い圧力感度を有するため，機械工学における非定常圧力変動の計測に向けた適用が期待されている．その一方で，温度感度が比較的高いことが課題点として指摘されているうえ，ナノ微粒子をバインダーとして用いるため透明性が低く，重ね塗り PSP/TSP (Moon, et al., 2011) による感温塗料 (Temperature-Sensitive Paint: TSP) との複合法の適用が難しいため，不均一な温度場への適用に際しては，圧力計測の定量性向上を目的とした温度補正法の確立が課題点となっている．一方，ポリマー PSP において，酸素透過性の高いガラス質ポリマーであるポリ [1-(トリメチルシリル)-1-プロピン] (poly(TMSP)) (仲川，1995) を使用した PSP は，ms オーダーの比較的早い時間応答性を有し (Asai, et al., 2002)，さらに 100 Pa 以下の微小な圧力に対する感度を有することや，多孔質 PSP に比べて温度依存性が低く，かつ重ね塗り PSP/TSP の併用による温度補正が容易な利点を有するため，100 Hz オーダーの比較的低い周波数の圧力変動を検知するための有用なツールとなる可能性を有している．しかしながら，poly(TMSP) ベースの PSP に関する過去の研究は，静的な圧力感度の検証や定常計測への適用にほぼ限定されており，非定常圧力変動に対する特性としては，前述の通りおおむね ms オーダーの時間応答性を有することが指摘されているが，100 Pa 以下の微小な非定常圧力変動の計測への適用可能性は検証されていない．

本研究では，低ゲージ圧領域における感度の点で有利であり，かつ重ね塗り PSP/TSP との複合による温度補正法の適用が可能なポリマー型 PSP について，低速流れ場における非定常圧力変動の計測への適用可能性を検証するため，円柱模型周りにおけるカルマン渦列がもたらす圧力変動を対象としてポリマー型 PSP を適用し，1 kHz 以下の低周波数領域における圧力変動の検出限界を明らかにする．

2. 感圧・感温塗料

PSP は，ポルフィリンなどの分子が発する蛍光や燐光が酸素分子との相互作用により消光する原理を利用した計測手法である．これらの発光分子を酸素透過性の高いポリマーとともに有機溶媒に溶解させ，塗料として固体表面に塗布することで，表面上の圧力計測手法として利用することができる．PSP の発光強度と圧力の関係は，次式の Stern-Volmer の関係式で与えられる (Liu and Sullivan, 2005).

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

ここで，I は発光強度，P は圧力，I_{ref} は既知の参照圧力 P_{ref} における発光強度である．係数 A_n は Stern-Volmer 係数であり，較正試験により求められる．実際の PSP の適用では，しばしば高次の補正項を加えた式が較正に用い

られるが，本研究では，振幅が数 100 Pa オーダーの比較的小さな非定常圧力変動を測定対象としているため，高次の項による補正を行っていない．

なお，PSP の発光は，無放射失活作用として分子間衝突に起因する衝突失活 (熱失活) を受けるため，発光強度は圧力依存性に加えて絶対温度 T に対する依存性を有する．この温度依存性は，PSP を用いた圧力計測において誤差をもたらす要因となる．PSP の発光強度と温度との関係は，Arrhenius の関係式で与えられる (Liu and Sullivan, 2005) が，実際の適用では，多項式などで近似する手法がしばしば用いられる．本研究では，風洞試験時と較正試験時で温度条件が異なる影響を補正するため，式 (1) の圧力較正式に温度の項を加えた以下の較正式を適用する．

$$\frac{I_{ref}}{I} = B_1 + B_2\frac{P}{P_{ref}} + B_3\frac{T}{T_{ref}} + B_4\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)\left(\frac{T}{T_{ref}}\right) + B_5\left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^2 \tag{2}$$

なお，T_{ref} は較正試験実施時における既知の参照温度であり，係数 B_n は較正試験により求められる．

PSP の較正法としては，事前に較正試験を行う a priori 法と，測定対象の模型表面に設置された圧力孔を利用して風洞試験と同時に較正を行う in situ 法がある．後者の in situ 法は，較正試験時と風洞試験時の温度差など両者の系の違いにより生じる系統誤差を減らすことができる利点がある．しかし測定対象の表面に圧力孔やプローブの設置が困難な場合は適用不可能なことや，測定対象面に不均一な温度分布が存在する場合，圧力と温度の両方に対して in situ 較正を行うのは現実的ではない．本研究では，a priori 較正法を適用する．

ポリマー型 PSP において，発光分子の消光過程に比べてポリマー層内の酸素分子の拡散過程が遅いため，PSP の時間応答性は酸素分子の拡散により律速される．酸素浸透速度はポリマーの種類および膜厚に依存し，応答時間 τ はポリマー層の膜厚の 2 乗に比例する (Winslow, et al., 2001, 亀田他，2003, Liu and Sullivan, 2005).

$$\tau \propto L^2/D \tag{3}$$

ここで，L はポリマー層の膜厚，D はポリマー層中における酸素の拡散係数である．そのため，PSP の薄膜化により時間応答性を高めることが可能である．

3. 実　験　手　法

3·1　PSP の構成

前述の通り，非定常計測では一般的に多孔質 PSP が用いられることが多いが，本研究では低速流れ場への適用を目的としているため，100 Pa オーダーの低ゲージ圧計測に適したポリマー PSP を用いる．式 (3) の通り，ポリマー PSP では応答時間が膜厚 L の 2 乗に比例するため，応答速度を高めるには，PSP 中のポリマーバインダーの量を減らし，膜厚を小さくする必要がある．

本研究で使用する PSP は，発光分子に白金ポルフィリン錯体の一種である PtTFPP を，バインダーに酸素透過性の高いガラス質ポリマーである poly(TMSP) を使用する．本研究では，低速流れ場で生じる低ゲージ圧計測を実施することから，大気圧までの広い圧力範囲で高い酸素圧力感度を持ち，かつ温度依存性や劣化の影響が比較的小さい PSP を用いている．なお，PSP を塗布する際の下地処理として，対象表面を市販の白色ペイントで塗装することにより，白色ペイント層が PSP への照射光および PSP 自体の発光に対するスクリーンとして作用するため，PSP の発光強度を高めることができる．さらに，白色顔料を含むスクリーン層と PSP 層が直接接触しないように，スクリーン層の上層に市販のクリアカラーを塗布し，クリアカラー層の上に PSP を塗布する．なお，過去の Moon, et al.(2011) による研究で用いた PSP と比較してバインダー濃度を 4 分の 1 にすることで，PSP の薄膜化を試みる．PSP の調合における発光分子 PtTFPP，ポリマー poly(TMSP) およびトルエン溶媒の分量を表 1 に示す．本表で示した分量は，後述の 40 mm 角の較正試験用試料に対する 1 回分の塗布量を示している．なお本表では，比較のため Moon, et al. (2011) の用いた定常計測向け PSP の調合分量を併せて掲載している．

3·2　実験装置

本研究で使用した風洞試験装置の模式図を図 1 に示す．試験風洞は断面が 1 辺 200 mm の正方形であり，1320 mm の助走区間および 600 mm の試験部を有する．試験部の中央に高さ 200 mm の円柱模型を配置し，風洞内で通風を行うと，模型まわりに生じるカルマン渦列により模型表面に周期的な圧力変動が生じる．円柱模型は底面直径の異

Table 1　Preparation of PSP for 16cm^2 area

	reference (Moon, et al. 2011)	for nonstationary measurement in this study
PtTFPP	0.4mg	0.4mg
poly(TMSP)	16mg	4mg
toluene	8ml	8ml

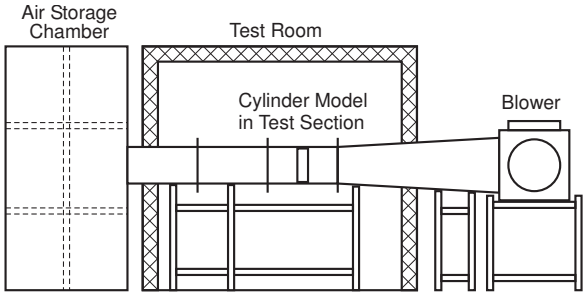


Fig. 1　Wind Tunnel

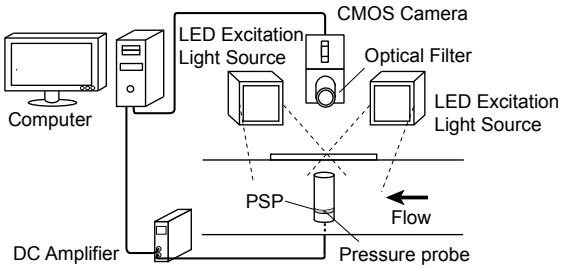


Fig. 2　Experimental Setup in the Wind Tunnel

なる 4 種類を用意し，直径はそれぞれ 66 mm, 46 mm, 33 mm および 16 mm である．風洞入口は 3 m×1.5 m×1.5 m の貯気室に接続されており，エアーフィルター (金井重要工業 IJ180R) を取り付けた 3 m×1.5 m の吸気口 2 面を介して外気を取り入れる．一方，風洞出口にはインバータ制御のブロワ (三菱電機 BG-45KTA$_3$) 2 基を直列に配置し，ブロワによる吸い込み式にて風洞内の通風を行う．風洞入口より下流 340 mm の位置に，流路内の流速測定のためピトー管を配置している．

風洞試験装置の試験部における装置類の配置を図 2 に示す．PSP による計測結果との比較のため，円柱模型の表面上に圧力孔を設け，半導体圧力センサー (Kulite® XTL-140M-5G) を設置し，円柱表面上の非定常圧力変動を測定する．半導体圧力センサーの出力を DC アンプ (TEAC SA-570ST) により増幅し，A/D 変換器 (マイクロサイエンス ADM-681aPCI) を介してパーソナルコンピュータに取り込み，記録を行う．圧力孔の位置は，直径 66 mm および 46 mm の円柱ではスパン方向中心上に設けているが，直径 33 mm および 16 mm の円柱では，圧力孔設置加工の都合上，風洞の下壁面より高さ 50 mm に設けている．また 4·2 節で述べる時間平均圧力分布の計測時を除き，周方向の角度位置を模型の上流側よどみ点より 90° としている．なお PSP の撮像時は，圧力孔の向きを PSP の撮像領域の裏側としているが，風洞の事前試験により，流れ場の対称性に問題ないことを確認している．また本研究で対象とする 1 kHz 以下の圧力変動に対する動的特性に影響を与えないよう，圧力孔の内積および深さを小さく取っている．圧力孔は内径 1 mm，深さ 7.25 mm であり，また圧力センサ受圧面に接した受圧室は内径 3.5 mm，深さ 1.8 mm の円筒形としており，圧力孔の固有周波数は 4.1 kHz である (日本機械学会編，1985)．あわせて，通風時および無風時における円柱面上の温度を測定するため，円柱面上のカメラ撮像領域の裏側に白金測温抵抗体プローブを設置する．なお本研究では，半導体圧力センサーの出力を PSP の較正に用いる in situ 較正法は適用しない．

円柱模型表面上における PSP の塗布領域は，円柱模型表面上の下壁面部より高さ 50 mm の位置を中心とした幅 25 mm の帯形状とし，周方向に 1 周分塗布している．なお風洞運転時には，停止時と比較して，円柱位置のわずかな変位が生じるため，位置ずれの補正を目的としたアフィン変換を適用する．

励起光の光源として，広い面積を単色光で照射可能な LED 光源 2 基 (浜松ホトニクス LEDH576-395 および LEDA1024-395) を利用する．照射光の波長は 395 nm である．試料の発光イメージの撮像にはハイスピードカメラ (フォトロン FASTCAM SA1.1，階調度 12 bit，空間解像度 1024×1024 ピクセル) を用い，短波長の照射光の散乱成分を除去して長波長の発光のみを撮像するため，シャープカットフィルター (透過限界波長 600 nm) をカメラレンズに設置する．撮影された映像の空間解像度は，カメラと被写体である円柱との距離にも依存し，径 66 mm および 46 mm の円柱に対しては 1 mm あたり 10 ピクセル，径 33 mm および 16 mm の円柱に対しては 1 mm あたり 12 ピクセルとした．

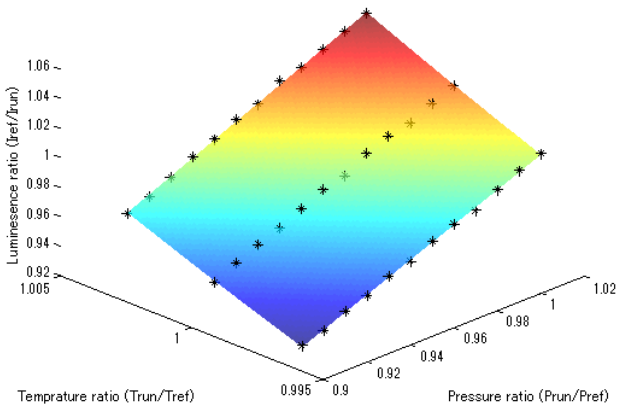


Fig. 3　Calibration Surface of the PSP

式 (1) に示す通り，PSP による圧力計測では，既知の圧力条件 P_{ref} における参照発光強度 I_{ref} の画像 (以下，参照画像) を必要とする．一般的には，風洞の通風停止時において撮像した PSP の発光強度分布が参照画像として用いられる．PSP の温度依存性による誤差の影響を小さくするため，本研究では，それぞれの通風試験の実施直後に一旦通風を停止し，停止直後に参照画像を撮像する．

3·3　較正試験

PSP の較正試験は，40 mm 角のアルミニウム板の面上に塗布した PSP の試料を，アクリル製の較正チャンバー内に配置して実施する．較正用試料への PSP の塗布量は，円柱模型上への塗布面積に対する比率を等しくする．較正チャンバー内の圧力は 50 mL のシリンジにより −9 kPa–+2 kPa の範囲内にて調節可能であり，圧力変換器 (キーエンス AP-C35) によりモニターしている．なお較正用の試料は面積が比較的小さく，大型かつ高出力の光源による照射は試料の温度上昇を引き起こす恐れがあるため，較正実験における試料の励起用には，小型の LED 光源 (浜松ホトニクス LEDH294-395，波長 395 nm) を用いる．

表 1 に示した非定常計測向けの調合量で作成した PSP を対象とした較正試験を行い，得られた PSP の較正曲面を図 3 に示す．式 (2) における係数はそれぞれ $B_1 = 80.14$, $B_2 = -6.88$, $B_3 = -159.35$, $B_4 = 7.51$, $B_5 = 79.58$ となった．

4.　結果および考察

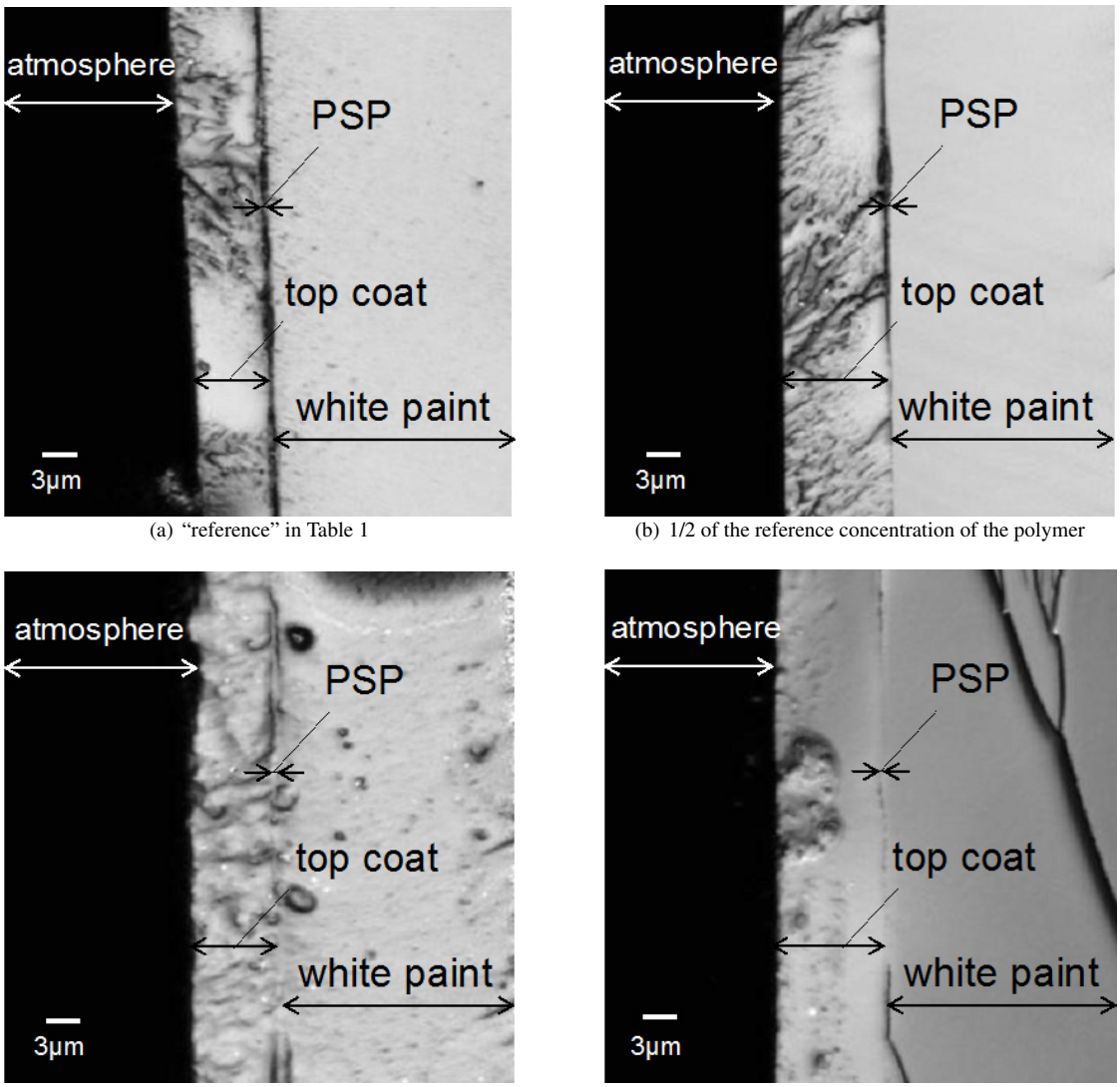
4·1　PSP の薄膜化

ポリマー型 PSP において，前述の通り応答時間はポリマー層の膜厚の 2 乗に比例するため，PSP の薄膜化により時間応答性を高めることが可能と考えられるが，一方で，薄膜化による発光強度および圧力感度の悪化など，基礎特性の違いを検証しなければならない．

表 1 に示したとおり，過去の研究 (Moon, et al. 2011) では，PSP の塗布領域 40 mm×40 mm に対してポリマー 16 mg を使用していたが，このポリマー量を「基準量」として，ポリマー量を基準量の 1/2 倍，1/4 倍，1/8 倍とした PSP を調合し，これらの PSP を塗布した際の膜厚を測定した．

膜厚計測には，九州大学 中央分析センター保有のレーザー顕微鏡 (島津製作所 OLS4000) を用いた．試料の断面をレーザー顕微鏡で撮影した画像を図 4 に示す． なお，レーザー顕微鏡による試料断面の観察において，PSP 層の可視性を高めるため，本節で用いる PSP 試料に限り，PSP 層の上面にクリアカラーを上塗りしている (図 4 の top coat)． 基準量を塗布した試料の場合で膜厚が 1.5 μm であり，より塗布量の少ない試料では膜厚が 1 μm 以下となるが，これらの膜厚は光学顕微鏡の分解能の限界値と同程度のオーダーである．さらに，エアブラシにより塗布した PSP の塗りむらにより膜厚に大きな幅があるため，ポリマー量の低減による PSP の薄膜化を定量的に示すことはできなかった．しかし，図 4 より，PSP 中のポリマーの量を減らすことで，定性的に PSP の膜厚を小さくすることが可能であることを示した．

前掲の図 3 に示した較正曲面は，ポリマー量を基準量の 1/4 倍とした PSP の圧力感度であるが，ポリマー量を



(a) “reference” in Table 1

(b) 1/2 of the reference concentration of the polymer

(c) 1/4 of the reference concentration of the polymer

(d) 1/8 of the reference concentration of the polymer

Fig. 4 Thickness of the PSP layers measured by a laser microscope. For the “reference” concentration of the polymer, the thickness of the PSP layer is approximately 1.5 μm. On the other hand, the thickness of the layer with lower concentration of the polymer is lower than 1 μm.

基準量および 1/2 倍，1/4 倍，1/8 倍とした場合において，圧力感度はほぼ同等であった．なお次節以降では，定常計測および非定常計測の双方において，表 1 において示した通り，ポリマー量を基準量の 1/4 倍とした PSP を用いる．

4·2 PSP による円柱表面上の時間平均圧力分布計測

本研究で用いるポリマー型 PSP の圧力計測感度および精度を検証するため，円柱周りに生じる時間平均圧力の周方向分布を PSP により測定した．直径 66 mm の円柱に対し，ピトー管で測定した流路中心部の流速 37 m/s の条件で通風を行った際に生じる，円柱中心部の圧力の時間平均値に対する圧力係数の周方向分布のグラフを図 5 に示す．図の横軸は円柱の上流側よどみ点からの角度位置を，縦軸は圧力係数を示す．また，PSP により得られた圧力値の妥当性検証のため，円柱上に設けた圧力孔において圧力の測定を行った．本図には，圧力孔で測定した時間平均圧力に対する圧力係数の分布をあわせて示す．圧力孔による圧力分布の測定は，円柱の回転により圧力孔の位置を変えながら行ったため，PSP との同時計測ではないが，位置 97.5° および 142.5° の 2 箇所のみ，PSP との同時計測を行っている．この同時計測のデータに対しては，128 回分の取得データの時間平均値を青の菱形で，標準偏差の範囲をエラーバーで図 5 中に示している．

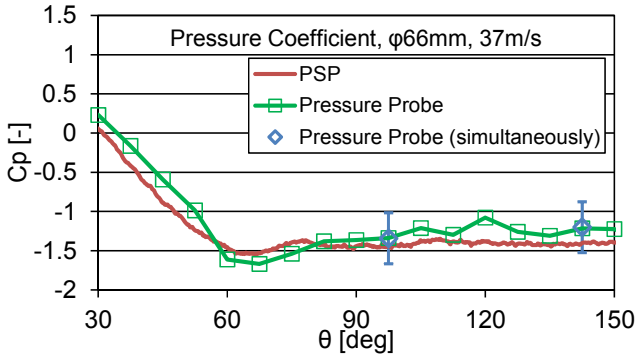


Fig. 5　Time-averaged pressure distribution along the center of the cylinder (ϕ66 mm) measured by the PSP. The flow velocity measured by a pitot tube was 37m/s. The obtained pressure fits well with that measured by pressure tap. In this figure, the range of the angle is $30° < \theta < 150°$, because the error at the edge ($\theta < 30°$ and $\theta > 150°$) of the PSP images was significant.

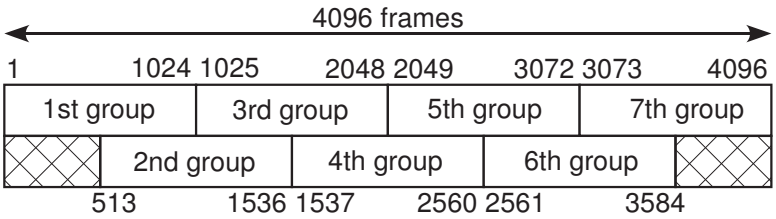


Fig. 6　Subframes for FFT analysis

図 5 に示す通り，PSP により得られた時間平均圧力分布は，圧力孔で測定した圧力に概ね一致する結果となった．なお本図では，図の横軸の範囲を 30°–150° としているが，これは，円柱前方よどみ点近傍（$\theta < 30°$) および後方よどみ点近傍（$\theta > 150°$) において計測結果に誤差が大きく現れ，定量的な圧力分布が得られなかったためである．その要因として，円柱前方および後方のよどみ点近傍では，LED 光源による光照射およびカメラによる撮像の際に円柱側面の曲率の影響を大きく受けることや，円柱のよどみ点近傍は撮影画像におけるエッジ部分として現れるため，風洞運転時に生じる円柱位置の変位の影響が大きく，前述のアフィン変換による補正が不十分となったことで，式 (2) の左辺となる無風時と通風時の PSP の発光強度値を導出する際の誤差が大きくなっていることが挙げられる．本研究では，剥離点近傍の流れ場に着目するため，円柱前方よどみ点より角度 90° の位置を正面とするようカメラを配置したが，円柱全周の圧力分布の測定が必要な場合は，複数台のカメラの利用に加え，複数台の LED 光源の配置を最適化し，円柱全周の照射光強度を均一にし，計測誤差の影響を低減させる工夫が必要となる．

4·3　PSP の時間応答性

円柱模型の直径および主流速度を適切に設定することにより，誘起されるカルマン渦列による圧力変動の周波数を任意の値に設定することが可能である．本研究で用いるポリマー型 PSP の時間応答性は，減衰が −3 dB 以内に抑えられる周波数の上限が 100 Hz のオーダーであり，また圧力変動の検出が可能な周波数の上限は 1 kHz より小さいと予想されるので，900 Hz 程度を上限とするよう，流速および円柱模型の直径について条件を設定した．本研究における実験条件の一覧を表 2 に示す．各列の項目は順に，円柱模型の直径，ピトー管で測定した流路中心部の流速，ピトー管流速に基づくレイノルズ数，ストローハル数を 0.2 としてピトー管流速より見積もったカルマン渦列の周波数，および半導体センサにより実測した圧力変動の実効値である．なお 3·2 節で述べたとおり，ピトー管は円柱模型より上流かつ風洞入口付近に設置しているため，円柱模型周りにおける局所的な流速とは異なる．

直径 33 mm, 46 mm および 66 mm の円柱を用いた実験では，カメラの撮影速度は 1000 fps としたが，直径 16 mm の円柱を用いた実験では，圧力変動の周波数が 500 Hz を超える実験条件を含むため，撮影速度を 2000 fps とした．撮影枚数は 1 条件あたり 4096 枚とし，うち 1024 枚分を 1 組としてそれぞれ高速フーリエ変換 (FFT) 処理を行い，非定常圧力変動の振幅スペクトルを取得した．512 枚毎のオフセットを取ることで，1024 枚分の撮影画像を 7 組

Table 2　Conditions for experiments

Cylinder diameter	Flow speed (pitot tube) [m/s]	Reynolds number	Frequency [Hz] (estimated)	Pressure Fluctuation (measured) [Pa]
ϕ66mm	18.4	7.8×10^4	55.7	67.8
	45.4	1.9×10^5	138	98.9
	51.7	2.2×10^5	157	118
ϕ46mm	19.9	5.8×10^4	86.5	66.3
	24.9	7.2×10^4	108	95.8
	31.0	9.0×10^4	135	131
ϕ33mm	31.7	6.8×10^4	192	122
	48.7	1.0×10^5	295	244
	66.1	1.4×10^5	401	382
ϕ16mm	64.7	6.7×10^4	809	310

得られるので (図 6)，それぞれの組に対して得られたスペクトル 7 組分の平均を求めた．同一の流速条件に対して 5 回分の実験を行い，前述の手順で得られた 5 回分のスペクトルに対してアンサンブル平均を求めた．

なお，得られるスペクトルデータには，LED 光源の電源に起因する照射光強度の周期的変動が原因と思われる，120 Hz の強いピークが現れるなど，実験系に起因する系統誤差が現れる．このピークを含む系統誤差は無風時の撮影画像に対する振幅スペクトルにも含まれるため，無風時において取得した撮影画像に対する振幅スペクトルを求め，各通風条件において得られたスペクトルに対し，無風時のスペクトルを減算することで，スペクトルに含まれる系統誤差を補正した．一方，比較対象とした半導体圧力センサのスペクトルにはホワイトノイズ的なオフセットがみられるが，このオフセットは無風時のスペクトルに含まれないため，PSP のスペクトルと同様のオフセット補正の手法は適用できなかった．

円柱模型の上流側よどみ点より 90° の位置における，PSP による圧力分布画像を対象とした FFT により得られた圧力変動の振幅スペクトルを図 7 に示す．図の横軸は圧力変動の周波数であり，縦軸は FFT により得られた振幅スペクトルの強度値を示している．なお本図には，半導体圧力センサにより得られた圧力変動の振幅スペクトルをあわせて示している． PSP 結果の FFT 処理において，周方向に 1 ピクセル，円柱長手方向に 200 ピクセルの領域上で平均化を行った圧力値を用いている．また，図 7(a) など，一部のスペクトルにおいて，PSP と半導体圧力センサのピーク周波数が最大 3 Hz のズレが生じている．ピーク周波数に誤差が生じた理由として，撮影速度 1000 fps ないし 2000 fps の画像に対し，1024 枚の画像を 1 セットとして FFT 処理を行ったため，周波数の刻み幅が 0.977 Hz ないし 1.95 Hz となっており，撮影画像間の PSP の圧力値に生じた誤差の影響が現れたためであると考えられる．

図 7(a) に示すように，円柱直径 66 mm かつピトー管流速 18.4 m/s の条件下では，半導体圧力センサの結果には 70 Hz にピークが現れるが，PSP による計測結果においても，同じく 70 Hz にピークが観測され，さらに振幅スペクトルの強度は圧力センサと PSP でほぼ等しい．一方，ピトー管流速を 45.4 m/s とすると (図 7(b))，圧力センサおよび PSP とも，170 Hz 付近にピークが現れているが，PSP の振幅スペクトルの強度は圧力センサより若干低くなっている．さらに DC〜100 Hz の低周波数領域において，振幅スペクトルの強度が高い領域が現れている．この領域では，周波数に対して単調減少する連続スペクトルとなっている．流速 51.7 m/s の条件下では (図 7(c))，圧力センサおよび PSP とも，カルマン渦列の放出に伴うと予想される 185 Hz 付近のピークのほか，前述の DC〜100 Hz の低周波数領域で周波数に対して単調減少する連続スペクトルに加え，54 Hz におけるピークが現れている．ピトー管流速 45.4 m/s および 51.7 m/s の条件下では，ピトー管流速に基づくレイノルズ数が 2×10^5 以上となるが，円柱模型設置部では，流路の閉塞率が高くなり，円柱模型周りの局所的な流速はさらに大きくなるため，レイノルズ数はさらに高くなることが予想される．この場合，円柱周りの境界層の遷移が起こり，これによりカルマン渦列以外の非定常圧力変動が生じていることが想定される．なお，以上の実験結果においては，半導体圧力センサのサンプリング周波数および PSP 画像撮影のフレームレートを 1000 Hz としているため，500 Hz 以上の高周波数の圧力変動によるエイリアシングが生じている可能性も考えられるが，前述の 54 Hz のピークは PSP によ

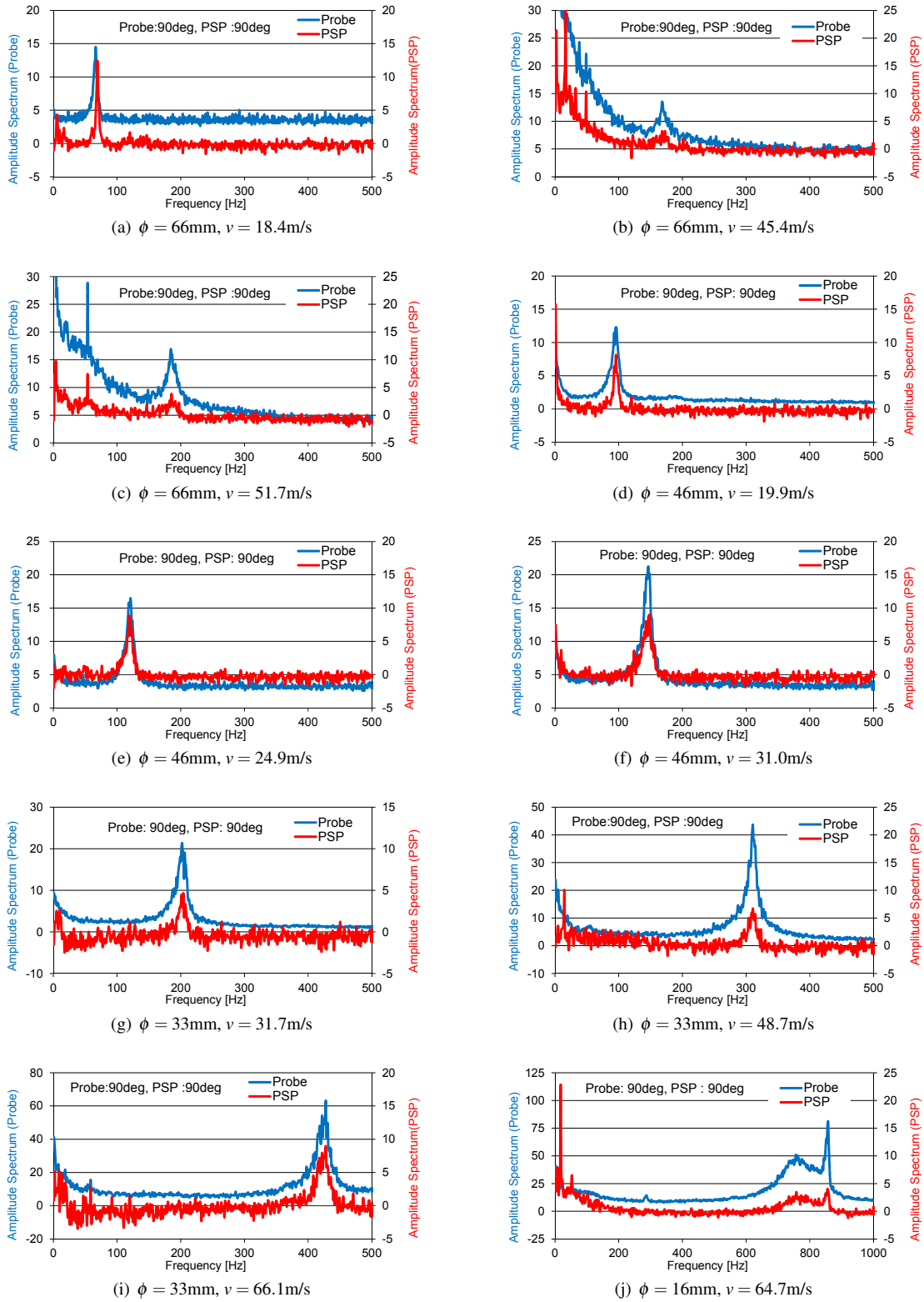


Fig. 7 Amplitude spectra of nonstationary pressure obtained by PSP ($\theta = 90°$). If the flow velocity is low and the diameter of the cylinder model is large, the peak frequency of the pressure fluctuation is low. In this case, the intensity of the spectrum for PSP is equal to that for the fast-response pressure transducer. On the other hand, if the peak frequency of the pressure fluctuation is 100 Hz or higher, the intensity of the spectrum for PSP is lower than that for the pressure transducer.

る計測結果においても同等の強度で現れており，一方で後述の通り，エイリアシングの原因となる 500 Hz 以上の高周波数の圧力変動に対して PSP の感度は低くなっているので，54 Hz のピークがエイリアシングによるもので

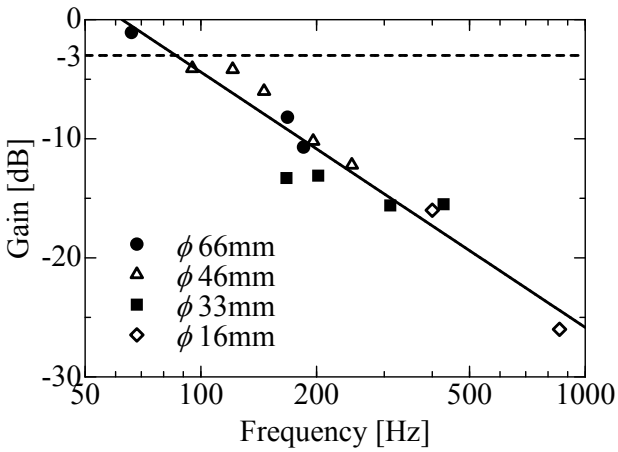


Fig. 8　Gain of the polymer-type PSP. The gain of the PSP decreases logarithmically for the increase of the frequency. The gain shows −3 dB for the pressure fluctuation of 90 Hz.

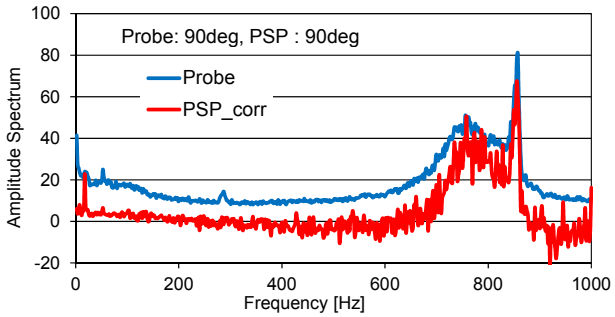


Fig. 9　Amplitude spectra of nonstationary pressure obtained by PSP ($\theta = 90°$, $\phi = 16$mm, $v = 64.7$m/s) corrected by using the gain shown in Fig. 8. The corrected spectrum for PSP is similar to the spectrum for the fast-response pressure transducer for the frequency range from 700 Hz to 860 Hz, which includes the two peak for both the spectra. The small difference of the intensity seems to be due to the low SN ratio of the PSP for the fast pressure fluctuation.

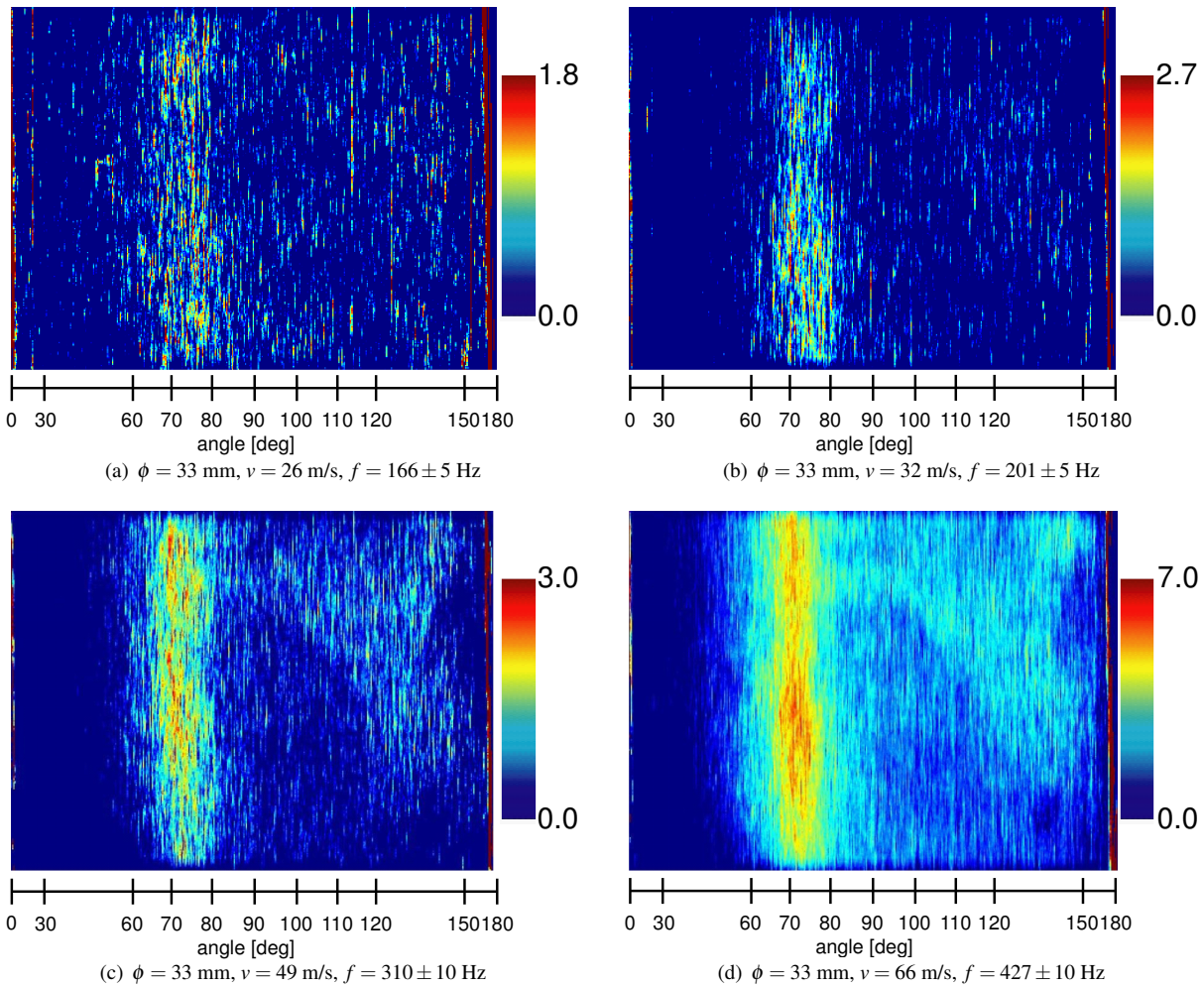
ある可能性は低いと考えられる．

円柱直径 46 mm かつピトー管流速 19.9 m/s の条件下では (図 7(d))，半導体圧力センサおよび PSP による計測結果の双方において 95 Hz にピークが現れており，振幅スペクトルの強度は圧力センサと PSP でほぼ等しい．一方，ピトー管流速を 24.9 m/s とすると (図 7(e))，圧力センサと PSP ともに 120 Hz 付近に振幅スペクトルのピークが現れるが，PSP の振幅スペクトルの強度は圧力センサより若干低くなっている．さらに，ピトー管流速を 31.0 m/s とした場合 (図 7(f))，145 Hz 付近に現れる PSP の振幅スペクトルのピーク強度は同じ周波数における圧力センサのピーク強度よりさらに低くなっている．これらの結果より，100 Hz を超える周期的圧力変動に対し，PSP の圧力感度が徐々に低下していることが推察される．

直径 33 mm の円柱に対しては，図 7(g)–(i) に示すとおり，どのピトー管流速条件下においても，半導体圧力センサで得られる振幅スペクトルのピーク位置に PSP の振幅スペクトルのピークが得られている．流速条件が大きくなるにつれて，半導体圧力センサに対する振幅スペクトルのピーク強度は大きくなる一方で，PSP に対する振幅スペクトルのピーク強度は若干大きくなるものの，圧力センサほど顕著に大きくはならず，圧力センサに対する PSP の振幅スペクトルのピーク強度の比率は小さくなっている．これは，PSP の時間応答性の制限により，対象とする圧力変動周波数の上昇に伴い，PSP の圧力感度が低下しているためであると考えられる．

直径 16 mm の円柱を用いた場合，図 7(j) に示すように，ピトー管流速 65 m/s の条件において，半導体圧力センサの示す圧力変動のスペクトルが周波数 850 Hz にピークを有しているが，PSP のスペクトル分布において，同様に周波数 850 Hz にピークが得られている．なお，圧力センサおよび PSP の双方のスペクトルにおいて，850 Hz よりも低い周波数領域に，強度が低くかつ幅広のピークが現れている．

図 8 に，半導体圧力センサの振幅スペクトル強度を基準として，PSP の振幅スペクトル強度のゲインをプロット



(a) $\phi = 33$ mm, $v = 26$ m/s, $f = 166 \pm 5$ Hz

(b) $\phi = 33$ mm, $v = 32$ m/s, $f = 201 \pm 5$ Hz

(c) $\phi = 33$ mm, $v = 49$ m/s, $f = 310 \pm 10$ Hz

(d) $\phi = 33$ mm, $v = 66$ m/s, $f = 427 \pm 10$ Hz

Fig. 10 Intensity distribution of amplitude spectra of PSP on the cylinder surfaces. For every case, the position with high intensity of the pressure fluctuation exists for the angle of 70°–80°. This is consistent with the separation of laminar boundary layer at the angle of 81°.

した図を示す．本図では，半導体圧力センサおよび PSP の振幅スペクトルに対し，それぞれピーク周波数 ±5 Hz (直径 16 mm の円柱を用いた実験ではピーク周波数 ±10 Hz) の範囲における積算値をとり，両者を比較することで振幅スペクトル強度のゲインを求めている．なお，前述の半導体圧力センサのオフセットについては，ピークの存在しない高周波数領域でスペクトルのホワイトノイズ成分の強度平均値を減算することで補正している． 本図より，ゲインが −3 dB となる周波数は 90 Hz 程度であり，また 90 Hz を超える圧力変動に対しては，対数関数的に PSP の感度低下が生じることが示されている．

図 8 で求めたゲインを用いて，図 7(j) に示した PSP の振幅スペクトルの強度値補正を行った結果を図 9 に示す．高い周波数領域では，PSP の応答性が低いため，S/N の悪化が生じている一方で，円柱直径 16 mm かつ流速 64.7 m/s の条件では，得られる振幅スペクトルのピーク周波数が 850 Hz と比較的高いため，強度値の補正後も PSP のピーク強度と半導体圧力センサのピーク強度に若干の差異がみられている．また，S/N の悪化にともない，高い周波数領域において，スペクトルにおけるノイズ成分が強調される結果となっている．一方，本図において，850 Hz より低い周波数領域に見られる幅広のピークは PSP でも確認できている．表 2 に示した通り，本図の実験条件において，半導体圧力センサで実測した圧力変動の実効値は 310 Pa であるが，本研究で用いたポリマーベース PSP の圧力感度が高いため，310 Pa 程度の圧力変動であれば，poly(TMSP) をポリマーとして使用した PSP により，周波数 850 Hz の周期的な圧力変動を定性的に検出することが可能である．

前述のスペクトル解析で得られたピーク周波数を中心として，流速 26 m/s および 32 m/s の条件 (ピーク周波数はそれぞれ 166 Hz および 201 Hz) では ±5 Hz，流速 49 m/s および 66 m/s の条件 (ピーク周波数はそれぞれ 310 Hz

および 427 Hz) では ±10 Hz の周波数範囲で抽出した振幅スペクトル強度の分布を図 10 に示す．図において，横軸の目盛は円柱の上流側よどみ点からの角度位置を示す．本図では，PSP 結果の FFT 処理において，4×4 ピクセルの範囲で平均化を行った圧力値を用いている．また，図のカラーバーは振幅スペクトル強度値を示す．なお，直径 33mm の円柱に対する PSP の振幅スペクトルでは，ピーク周波数近傍を除く領域はホワイトノイズ成分が卓越しているため，本図では前述の周波数範囲でフィルタリングを行った結果を示している． いずれの場合も，上流側よどみ点より 70° ～ 80° の領域において，振幅スペクトルが強く現れている．図に示したいずれの実験条件においても，円柱直径を代表長さとしたレイノルズ数は 1.4×10^5 以下であり，円柱周りの境界層は層流であると考えられるので，境界層の剥離位置は 81° 付近と考えられるが，前述の振幅スペクトル強度が高い領域は剥離位置の手前にあたり，円柱周りのカルマン渦列の放出に伴う非定常圧力変動が強く現れている．

5. 結　　言

本研究では，低ゲージ圧領域における感度の点で有利なポリマー型 PSP について，低速流れ場における非定常圧力変動の計測への適用可能性および限界を明らかにするため，円柱模型周りにおけるカルマン渦列がもたらす圧力変動を対象として，poly(TMSP) をポリマーバインダーとして用いた PSP を適用し，1 kHz 以下の圧力変動に対する応答性を検証した．その結果，本研究で構築した poly(TMSP) ベースの PSP は 90 Hz の周波数応答を有することが明らかとなった．また本研究で構築した実験系を用いて，90 Hz 以下の低周波数領域において，70 Pa 程度の微小圧力変動を捉えることができた．一方，90 Hz を超える周波数の圧力変動に対しては，PSP の圧力感度の低下が見られるものの，850 Hz の圧力変動に対して，振幅 310 Pa の圧力変動を定性的に捉えることができた．なお本研究では濃度階調度 12 bit のカメラを用いているが，圧力変動の検出限界は PSP の特性に加えてカメラの濃度階調度および輝度値撮影の S/N にも依存するため，より濃度階調度の高く，かつ高い輝度値で撮影が可能なカメラを用いることにより，より小さな圧力変動を捉えることが可能になると考えられる．

謝　　辞

PSP の膜厚計測には，九州大学中央分析センター所有のレーザー顕微鏡を利用した．ここに深く御礼申し上げる．

文　　献

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. 97-104.

Asai, K., Amao, Y. and Iijima Y., Novel pressure-sensitive paint for cryogenic and unsteady wind-tunnel testing, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 16, No. 1 (2002), pp. 109-115.

亀田正治, 浅井圭介, 中北和之，高速応答型感圧コーティング，ながれ，Vol. 22 (2003), pp. 299-307.

Kameda, M., Seki, H., Makoshi, T., Amao, Y. and Nakakita, K., A fast-response pressure sensor based on a dye-adsorbed silica nanoparticle film, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 171-172 (2012), pp. 343-349.

Liu, T. and Sullivan, J. P., Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer (2005).

Moon, K. J., Mori, H., Ambe, Y. and Kawabata, H., Development of dual-layer PSP/TSP system for pressure and temperature measurements in low-speed flow field, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-11020 (2011).

仲川 勤，ポリ [1-(トリメチルシリル)-1-プロピン] 膜の気体透過性，膜 (MEMBRANE)，Vol. 20, No. 3 (1995), pp. 156-168.

中北和之，低速流れでの非定常 PSP による圧力変動の画像計測技術，ながれ，Vol. 30 (2011), pp. 489-500.

Sakamura, Y., Matsumoto, M. and Suzuki, T., High frame-rate imaging of surface pressure distribution using a porous pressure-sensitive paint, Measurement Science and Technology, Vol. 16 (2005), pp. 759-765.

Sakaue, H., Gregory, J. W., Sullivan, J. P. and Raghu, S., Porous pressure-sensitive paint for characterizing unsteady flowfields, AIAA Journal, Vol. 40, No. 6 (2002), pp. 1094-1098.

日本機械学会編，流体計測法 (1985)，pp.57-62.

Winslow, N. A., Carroll, B. F. and Kurdila, A. J., Model development and analysis of the dynamics of pressure-sensitive paints, AIAA Journal, Vol. 39, No. 4 (2001), pp. 660-666.

Yorita, D., Numata, D., Nagai, H. and Asai, K., Measuring unsteady low-speed flow phenomena by using a time-series analysis of pressure-sensitive paint images, Proceedings of 14th International Symposium on Flow Visualization, ISFV14-9E-1 (2010).

References

Asai, K., Surface pressure measurement using pressure-sensitive paint, Journal of the Visualization Society of Japan, Vol. 18, No. 69 (1998), pp. 97-104 (in Japanese).

Asai, K., Amao, Y. and Iijima Y., Novel pressure-sensitive paint for cryogenic and unsteady wind-tunnel testing, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 16, No. 1 (2002), pp. 109-115.

Kameda, M., Asai, K. and Nakakita, K., Fast-responding pressure-sensitive luminescent coatings, Nagare, Vol. 22 (2003), pp. 299-307 (in Japanese).

Kameda, M., Seki, H., Makoshi, T., Amao, Y. and Nakakita, K., A fast-response pressure sensor based on a dye-adsorbed silica nanoparticle film, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 171-172 (2012), pp. 343-349.

Liu, T. and Sullivan, J. P., Pressure and Temperature Sensitive Paints, Springer (2005).

Moon, K. J., Mori, H., Ambe, Y. and Kawabata, H., Development of dual-layer PSP/TSP system for pressure and temperature measurements in low-speed flow field, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-11020 (2011).

Nakagawa, T., Gas permeability of poly [1-(trimethylsilyl)-1-propyne] membrane, MEMBRANE, Vol. 20, No. 3 (1995), pp. 156-168 (in Japanese).

Nakakita, K., Pressure fluctuation imaging using unsteady PSP in low-speed flow, Nagare, Vol. 30 (2011), pp. 489-500 (in Japanese).

Sakamura, Y., Matsumoto, M. and Suzuki, T., High frame-rate imaging of surface pressure distribution using a porous pressure-sensitive paint, Measurement Science and Technology, Vol. 16 (2005), pp. 759-765.

Sakaue, H., Gregory, J. W., Sullivan, J. P. and Raghu, S., Porous pressure-sensitive paint for characterizing unsteady flowfields, AIAA Journal, Vol. 40, No. 6 (2002), pp. 1094-1098.

The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Measurement methods for fluids (1985), pp.57-62 (in Japanese).

Winslow, N. A., Carroll, B. F. and Kurdila, A. J., Model development and analysis of the dynamics of pressure-sensitive paints, AIAA Journal, Vol. 39, No. 4 (2001), pp. 660-666.

Yorita, D., Numata, D., Nagai, H. and Asai, K., Measuring unsteady low-speed flow phenomena by using a time-series analysis of pressure-sensitive paint images, Proceedings of 14th International Symposium on Flow Visualization, ISFV14-9E-1 (2010).