感圧塗料による短時間現象の画像計測*

中北 和之**, 亀田 正治***

Image Measurements of Instantaneous Aerodynamic Phenomena Using the Fast-Response Pressure-Sensitive Coating

Kazuyuki NAKAKITA and Masaharu KAMEDA

1. はじめに

感圧塗料を用いた計測では、二次元の圧力分布をいちどきに取得することが可能である。その空間解像度の高さは、従来の圧力孔を用いた計測とは比べものにならない。測定精度についてはいまだ通常の圧力センサにやや及ばない。しかし、流れが複雑であっても、また、流れ場の変化をともしなう模型姿勢の変化を行ったとしても、十分な空間解像度で圧力場を計測できることは、感圧塗料計測最大の利点であると言える。

一方、非定常現象や過渡応答など時間的な変動をともしなう流れ場についても、空間的な圧力分布を得られれば大変有益である。しかし、ごく最近まで、感圧塗料は、このような時間変化をともしなう流れに適用されることは少なかった。

感圧塗料の多くは、定常的な圧力分布を得るために開発されてきた。一般の風洞試験では、模型周りの平均的な圧力分布を知ることが主要目的だからである。しかし、定常流れ計測のために用いられる感圧塗料は、一般に時間応答性が1秒オーダーと極端に悪く、非定常現象の計測にはまったく適用できない。

並行して、非定常現象や短時間現象に適用可能な高速時間応答性を有する感圧塗料の開発も進められており、風洞試験での使用例も散見される^{1)~3)}。ところが、これらの塗料の多くは、付着強度、経時安定性、定量性などの問題を抱えていた。

これに対して、最近、浅井、Sakaue ら^{4),5)}が低温風洞用感圧塗料として開発した、陽極酸化アルミニウム吸着型感圧コーティングが、高速応答型感圧コーティング(以下、高速PSPと記す)としても優れた特性を持ち、かつ、前述の問題を克服可能であることがわかってきた。

この高速PSPを用いて短時間現象の計測を行った研究がいくつか報告されている。計測結果の他に、その時間応答性や定量性の評価も行われている。感圧色素としては、バソフェナンスロリン・ルテニウム [Ru

(ph₂phen)₃]²⁺が用いられている。

本報では、高速PSPの概略、短時間現象計測での計測システム、計測手順、計測結果の処理法について述べる。つぎに、(1)30 ms程度の試験時間を持つ衝撃風洞試験⁶⁾、(2)μsオーダーの非定常現象である衝撃波管試験⁷⁾の2つの試験について、試験結果およびそれに基づく高速PSPの時間応答性や定量性に関する評価結果を紹介する。

2. 高速応答型感圧コーティング

感圧塗料の圧力感度は、酸素分子と色素とのクエンチングによって色素からの発光が減少することによって得られる。色素と酸素の量子的反応時間は通常数10 μs以下であり、極めて短い。一方、ステップ的な圧力変化を与えられた際、酸素分子が色素に到達するまでの時間は、色素の固着法に依存し、かつ、その時間は量子的反応時間に比べて長い。従って、感圧塗料の時間応答性は、色素の固着法に支配される。

Fig. 1は、異なる2種類の感圧塗料の時間応答性を圧力センサ出力と比較した結果である⁸⁾。(a)が圧力センサ、(b)が色素をシリコンポリマー(GP 197)に分散させて固着した通常の感圧塗料、(c)が本稿で扱う高速PSP、それぞれの時間応答である。(b)、(c)では、感圧塗料からの発光強度がそのまま示されている。Stern-Volmer式より、圧力は発光強度の逆数に比例する。したがって、圧力の上昇によって、発光強度は減少する。

Fig. 1(b)より、GP 197を用いたコーティングでは圧力のステップ変化に追従するのに秒オーダーの時間を要する。ポリマーを用いた感圧塗料では、ポリマー層に浸透する酸素によってクエンチングが行われる。ポリマー層への酸素の浸透が極めて遅いため、Fig. 1(b)のような結果となる。

これに対して、Fig. 1(c)の高速PSPは、圧力センサ出力とはほぼ同様の傾向を示している。この結果から、高速PSPは少なくとも1 ms以下の時間応答性を有することが分かる。なお、Sakaue らは、衝撃波管を用いて高速PSPの時間応答性を評価しており、ステップ圧力変化への時間応答性は30–100 μsであると報告している⁹⁾。

* 原稿受付 2001 年 7 月 2 日

** 航空宇宙技術研究所 風洞技術開発センター

*** 正会員 東京農工大学 工学部

Fig. 1 Time response of pressure-sensitive paints⁸⁾.
 (a) Output of the reference pressure transducer,
 (b) Pressure-sensitive paint of GP197 binder, (c) Fast-response pressure-sensitive coating.

Fig. 2 Surface of the anodized aluminum⁵⁾.

Fig. 2に陽極酸化アルミ表面の電子顕微鏡写真を示す。表面には数 10 nm の細孔が多数分散している。色素はこの表面および細孔側壁に直接吸着していると考えられている。このような porous media では、ポリマー中に比べて酸素の浸透は十分早く、その結果、これを用いた高速 PSP が高速応答性を有するものと考えられる。

3. 画像計測手法

3.1 光学系及び計測装置

短時間現象の画像計測であっても、計測光学系は露光時間が短いことを除けば定常流れの画像計測の場合と基本的には同じである。

3.1.1 衝撃風洞試験の計測系

Fig. 3(a)は衝撃風洞試験で用いられた計測光学系である。現象は短時間であるが定常的であり、定常計測と同じ光学系が使用できる。励起光源は 300 W 高安定連続キセノンランプ（浜松ホトニクス C 4338）である。励起光は石英ライトガイドで計測用光学台上に伝送される。この先には $[\text{Ru}(\text{ph}_2\text{phen})_3]^{2+}$ の吸収スペクトルに合わせて $460 \pm 50 \text{ nm}$ を透過する光学フィルタを取り付けた励起光ヘッドがあり、集光用レンズを介して模型に照射される。励起光ヘッドにはメカニカルシャッターが取り付けられており、励起光の照射時間を制御する。この開閉時間は 2.5 ms である。高速 PSP からの発光の計測には冷却 CCD カメラ（浜松ホトニクス C 4880-10）が用いられた。有効画素数は 1000×1018 ピクセルで、A/D コンバータは 14 bit の分解能を有する。ショットノイズと読み出しノイズの低減を図るため 2×2 ピクセルを結合して 1 ピクセルとするスーパーピクセルが用いられた。CCD カメラには $[\text{Ru}(\text{ph}_2\text{phen})_3]^{2+}$ の発光だけを計測し、励起光や迷光を除去するため $650 \pm 50 \text{ nm}$ を透過する光学フィルタが取り付けられている。

衝撃風洞の気流持続時間は約 30 ms あるため露光時間は 23 ms に設定された。衝撃風洞での計測圧力は低圧なため酸素による消光が少なく、高速 PSP からの発光は比較的大きい。この程度の露光時間であればイメージンテンシファイア（以下、I. I.）を用いなくとも CCD カメラへの入射光量として十分なダイナミックレンジを確保することができる。

3.1.2 衝撃波管試験の計測系

Fig. 3(b)は衝撃波管試験における計測光学系である。流れは非定常であり、現象を静止画として捕らえるには極めて短い露光時間が必要とされる。ここでは、衝撃風洞試験と異なる部分についてのみ言及する。

励起光源はキセノンフラッシュランプ（浜松ホトニクス C 6096）であり、計測部上流の圧力センサをトリガとして単発光させる。発光時間中（FWHM = 約 $3.5 \mu\text{s}$ ）の光量は連続キセノンランプより遙かに大きいため、 μs オーダーの極短時間現象の計測に適する。ダイクロイックミラーは計測部の円柱によって影を作らないために用いられている。

移動する衝撃波の作り出す現象を計測するため、露光時間を十分短く設定する必要がある。衝撃波速度 610 m/s に対して、露光時間は計測光量と衝撃波がその間に進行する距離とのトレードオフで $10 \mu\text{s}$ が選ばれた。このような短い露光時間を実現するための電子シャッターと、

Fig. 3 Optical system for the pressure-sensitive paint measurement.
(a) Shock tunnel test, (b) Shock tube test.

計測光量が小さいことによる増幅の必要性の両面から I. I. (浜松ホトニクス C 6245 MOD) が用いられている。

3.2 風洞試験データ取得シーケンス

風洞試験における圧力分布画像を得るためには、高速 PSP の較正 (次節参照) を行い、風洞試験を実施する。風洞試験時には、通風前にダーク画像と既知圧力下での参照画像を取得しなければならない。紹介する 2 つの試験では、ダーク画像、参照画像とも 5 枚あるいは 10 枚ずつ取得している。時間的に変化がない場合には、ショットノイズなどの影響を低減するために多数枚画像の積算を行うことが望ましい。

短時間現象の風洞試験画像を取得するためには感圧塗料計測系を現象に同期させるためのトリガが不可欠となる。衝撃風洞試験では、気流中のピトー圧出力を、衝撃波管試験では計測部上流の圧力センサ出力をそれぞれトリガソースとしている。ディレイ装置と組み合わせて CCD カメラの露光やフラッシュランプの励起、メカニカルシャッターの開閉や I. I. による電子シャッターの ON/OFF が行われる。この場合、計測系の要素に含まれる時間遅れに注意しなければならない。

高速 PSP の特性曲線、ダーク画像、参照画像、風洞試験画像から定量的な圧力分布画像を算出する。その際には、画像位置合わせ、ノイズ除去のための空間フィルタ処理など定常計測と同じ処理手順によって圧力分布算出が行われる。

Fig. 4 An example of PSP calibration data and their fitting curve.

感圧塗料の精度向上で最も問題となるのが圧力特性の温度依存性である。しかし、短時間現象では気流総温が高くても曝される時間が短く、さらに高速 PSP ではアルミを材料として用いているため、試験中の温度変化は小さく、ほとんどの場合無視できる。

3.3 感圧塗料較正手法

感圧塗料を用いて定量的な圧力を算出するためには発光量と圧力の関係を得る較正が必要である。

衝撃風洞や衝撃波管による試験では測定部の圧力が可変できる構造となっている。このため、較正は試験に用いる模型を直接用いて行うことができる。この方法では別途較正装置などで圧力特性を取得する場合に比べ、較正用サンプルと模型の特性差の他、機器や光学系の特性差などの誤差要因を除去できる。

計測部を較正圧力に設定し、ダーク画像、圧力画像を取得する。これを設定した圧力点数分繰り返して、較正データを取得する。

得られた較正データから特性曲線が算出される。陽極酸化アルミをベースとした高速 PSP では、個体により圧力感度に違いが生じる。さらには、同一の模型上であっても圧力感度の分布がある。このため、模型全体で 1 つの特性曲線を用いるのではなく、局所局所で特性曲線を算出する必要がある。風洞試験画像を圧力に変換する際にも場所毎の特性曲線を用いて処理を行う。圧力特性を算出する単位としては、計算時間の増加、個々のピクセルに重畳しているノイズによる影響などを考慮する必要がある。ここでは 10×10 ピクセルが単位とされており、最小二乗法を用いて 3 次式にフィッティングし、特性曲線が決定される。Fig. 4 は較正データと較正曲線の例である。

較正手法については、衝撃風洞試験、衝撃波管試験とも同じ方法が用いられている。

4. 短時間現象への適用

4.1 衝撃風洞試験

極超音速流れにおいても種々の干渉流れなど複雑流れの計測に対して圧力孔の点の集合ではなく、面で現象を

捕らえたいとの要求がある。気流総温の高い極超音速流れでは感圧塗料特性の温度依存性が大きな問題となるが、持続時間の短い衝撃風洞を用いれば温度上昇が小さくなるため計測精度低下を避けることができる。従来のポリマーを用いた感圧塗料では衝撃風洞での計測は不可能であったが、高速 PSP を用いることにより、このような短時間風洞においても 2 次元圧力分布が計測可能となった。

用いた風洞は航技研 0.44 m 極超音速衝撃風洞であり、この長持続時間モードを用いた。試験条件は気流持続時間約 30 ms、風洞静圧約 3.4 MPa、総温約 1180 K、気

Fig. 5 Test models.

(a) Expansion corner model, (b) Compression corner model.

Fig. 6 Pressure distribution on the expansion corner model. Angle of attack=40deg. Upper: result of the pressure-sensitive coating. Lower: Schlieren photograph.

流マッハ数 10.4、ピトー圧約 8000 Pa である。供試模型としては、膨張コーナー模型と圧縮コーナー模型の 2 種類の基本形状模型を用いた。それぞれの模型の概要を Fig. 5 に示す。両模型とも高速 PSP の定量性評価のために各平板に 3 点ずつ、計 6 点の圧力センサが装着されている。

4.1.1 膨張コーナー模型

Fig. 6 に圧力分布画像と流れのシュリーレン写真を示す。迎角は 40° である。高速 PSP によって、理論で予想されるように 2 つの平板で圧力が異なり、それぞれの上ではほぼ均一な圧力であることが計測されている。模型両端からの特性線より外側の部分では流れの 2 次元性が失われ、圧力が低下していることも確認できる。

Fig. 7 は圧力センサとの比較である。高速 PSP データは圧力センサと対称な位置 (Fig. 5 の PSP Evaluation Line) で流れと垂直方向に ± 15 Pixel のデータを平均したものである。高速 PSP データは圧力センサデータと良く一致しており、精度良く圧力を計測できていることが分かる。

これら膨張コーナー模型のデータより高速 PSP の定量性検討がなされた。圧力センサが正しいと仮定して高速 PSP データの精度を調べたのが Fig. 8 である。この結果、圧力センサと高速 PSP の差の標準偏差は 162 Pa

Fig. 7 Comparison of pressure profiles obtained by pressure-sensitive coating with those by pressure transducers.

Fig. 8 Quantitative evaluation of the pressure-sensitive coating.

($\sigma/P_{02}=0.02$) であった。高速 PSP は圧力分布の可視化だけでなく、定量的にも十分な精度で極超音速流れの計測に使えること分かる。

4.1.2 圧縮コーナー模型

高速 PSP が複雑な構造を持つ流れ場においても十分な空間分解能を持つことを確認するため、圧縮コーナー模型を用いた試験が行われた。Fig. 9 に迎角 10° における圧力分布画像を示す。Fig. 10 は圧縮コーナー模型における高速 PSP と圧力センサの比較である。

圧縮コーナー模型上の流れは、境界層の剥離/再付着、それにともなう剥離/再付着衝撃波、衝撃波-衝撃波干渉などを含む複雑な流れとなる。衝撃波-衝撃波干渉にともなう大きな圧力や、模型先端での流れの剥離などが観測されている。また、模型中心部分では直線的な2次元流れとなっているが、模型両側では高压領域が上流側にシフトしていることも分かる。

Fig. 10 の圧力センサとの比較では、圧縮コーナー模型のような複雑流れ場においても、高速 PSP データは圧力センサと良く一致することが確認できている。

4.2 衝撃波管試験

さらに短い現象への適用性の評価として、衝撃波管を用いて移動する衝撃波が形成する現象の計測を紹介する。試験には航技研 0.44 m 極超音速衝撃風洞の衝撃波管部分が用いられた。初期衝撃波管設定圧力は高压管 500

kPa, 低压管 5 kPa である。

Fig. 3(b)に示すように衝撃波管壁の一部が円柱の取り付けられた供試模型となっている。この表面に高速 PSP がコーティングされており、衝撃波管内を伝播する衝撃波とそれに続く流れが円柱周りに作り出す非定常流れ場が計測される。衝撃波速度 610 m/s, 露光時間 $10\ \mu\text{s}$ であるため、露光時間中に衝撃波は 6 mm 移動する。CCD カメラ性能の制約上、計測は連続的に行えず、一連の衝撃波管試験に対してディレイ時間を変えることによって異なった時間の現象が計測された。

Fig. 11 に試験結果を示す。それぞれの画像は露光タイミングを $5\ \mu\text{s}$ ずつ変えることによって得られた。衝撃波に続く流れのマッハ数はおよそ 1.02, 静圧は約 18 kPa である。衝撃波の進行、円柱前方に徐々に高压領域が形成されていく過程などが計測できている。最終的には円柱周りに衝撃層が成立し、膨張波による低压領域や、後流の様子なども分かる。計測画像には高速 PSP の応答時間 (数 $10\ \mu\text{s}$) と CCD カメラの露光時間 $10\ \mu\text{s}$ の影響が含まれていることを忘れてはならない。

露光時間が短く I.L. によって光増幅を行ったため、計測画像はノイズによる影響が見られ、衝撃風洞試験より画像の鮮明さは劣る。しかし、今後、大出力フラッシュランプやパルスレーザを用いることで計測光量の増大は可能であり、性能向上の可能性がある。この衝撃波管を用いた試験より、高速 PSP は $10\ \mu\text{s}$ オーダーの非定常現象を計測可能な能力を持つことが分かる。

5. まとめ

高速PSPの短時間現象計測への適用について紹介した。

30 ms の気流持続時間を持つ衝撃風洞では、マッハ 10 気流中に置かれたくさび形模型表面の圧力分布計測が行われた。その結果、剥離や衝撃波干渉をともしう流れが鮮明な圧力分布画像として捕らえられた。高速 PSP による圧力計測結果を圧力センサ出力と比較したところ、その標準偏差は 162 Pa であった。このことは、10 ms 程度の持続時間があれば、高速 PSP を用いて十分定量

Fig. 9 Pressure distribution on the compression corner model. Angle of attack= 10° . Upper: result of the pressure-sensitive coating. Lower: Schlieren photograph.

Fig. 10 Comparison of pressure profiles obtained by pressure-sensitive coating with those by pressure transducers.

Fig. 11 Sequential images of pressure distribution around a cylinder exposed to a traveling shock wave. Images are captured at 5 μ s intervals.

的に圧力計測を行えることを示している。

衝撃波管を用いて、衝撃波の通過にともなって変化する円柱周りの圧力場計測も行われた。圧力場は μ sオーダーで変化するため、I.I.を用いて10 μ sの露光時間で画像取得が行われた。その結果、円柱周りに形成される衝撃層や膨張領域の発達過程をとらえることができています。

以上のことから、本研究で用いた高速PSPは、短時間現象計測を行うために有効であることが示されている。

短時間現象の中でも非定常現象などに対しては、時間的に連続かつ詳細に流れの振る舞いを画像計測できることが望ましい。しかし、定量計測に適する科学計測用CCDカメラのフレームレートは高々数10 Hzであり、短時間現象の連続計測は不可能に近い。一方、1 kHz以上のフレームレートを持つ高速度CCDカメラは量的に問題がある。現状のこのような制限の中での短時間現象の計測手法としては、試験毎にトリガタイミングをずらして現象の進行を計測したり⁷⁾、周期的な現象であればトリガ信号からの位相を変えて計測する方法^{10), 11)}が用いられている。本稿で紹介した結果は全て、1回の実験につき1枚の画像を取得したものである。高速PSPの性能を十分活用することができるような、連続的に定量的な非定常計測可能な高速高精度CCDカメラの登場に期待したい。

謝 辞

本稿中の衝撃波管試験は東京農工大学の手塚宣和君(現三菱重工業)が行ったものであり、ここに謝意を表す。また、本研究の一部は、科学技術庁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)」により行われた。

参考文献

- 1) Baron, A. E., Danielson, J. D. S., et al.: Submillisecond Response of Times of Oxygen-Quenching Luminescent Coatings, Rev. Sci. Instrum., Vol. 64, No. 12 (1993) pp. 3394-3402.
- 2) Mosharov, V., Radchenko, V., Fonov, S.: Luminescent Pressure Sensors in Aerodynamic Experiments, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI) (1997) pp. 74-77.
- 3) Hubner, J. P., Carroll, B. F., Schanze, K. S., et al.: Temperature and Pressure-Sensitive Paint Measurements in Short-Duration Hypersonic Flow, AIAA 99-0388 (1999).
- 4) Asai, K., Kanda, H., et al.: Surface Pressure Measurement in a cryogenic wind tunnel by using luminescent coating, ICI-ASF '97 Record (1997) pp. 105-114.
- 5) Sakaue, H., Sullivan, J. P., et al.: Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint in a Cryogenic Wind Tunnel, ISA Proceedings of the 45th International Instrum. Sym. (1999) pp. 345-354.
- 6) Nakakita, K., Yamazaki, T., Asai, K., et al.: Pressure Sensitive Paint measurement in a Hypersonic Shock Tunnel, AIAA-2000-2523 (2000).
- 7) 手塚宣和: 非定常計測のための高速応答型感圧コーティング, 東京農工大学修士学位論文 (2001).
- 8) Asai, K., Amao, Y., Iijima, Y., et al.: Novel Pressure-Sensitive Paint for Cryogenic and Unsteady Wind Tunnel, AIAA-2000-2527 (2000).
- 9) Sakaue, H., Sullivan, J. P.: Fast Response Time Characteristics of Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint, AIAA 2000-0506 (2000).
- 10) Sakaue, H., Gregory, J. W., Sullivan, J. P., et al.: Porous Pressure Sensitive Paint for Unsteady Flow Fields, AIAA 2001-0554 (2001).
- 11) Fonov, S., Mosharov, V., Radchenko, V., et al.: Application of the PSP for Investigation of the Oscillating Pressure Fields, AIAA 98-2503 (1998).

(a) 膨張コーナー模型, 迎角 40°

(b) 圧縮コーナー模型, 迎角 10°

(c) 圧縮コーナー模型, 迎角 20°

(d) 圧縮コーナー模型, 迎角 30°

口絵 4 感圧塗料による極超音速流れの模型上面圧力分布計測画面とシュリーレン写真

(航空宇宙技術研究所 中北 和之, 東京農工大学 亀田 正治)

(本文 225~226 頁参照)

口絵5 感圧塗料による円柱と入射衝撃波干渉流れの圧力分布画像
それぞれの画像の計測間隔は $5\mu\text{s}$

(航空宇宙技術研究所 中北 和之, 東京農工大学 亀田 正治)
(本文 227 頁参照)

口絵6 低温風洞におけるデルタ翼前縁はくり渦の感圧塗料による可視化
(マッハ数 0.75, 気流温度 100 K, 酸素濃度 997 ppm)

(航空宇宙技術研究所 江上 泰広, 飯島 由美, 浅井 圭介)
(本文 234 頁参照)