

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360083
 研究課題名（和文） 超高速応答型感圧塗料による微小変動圧力場計測法の確立
 研究課題名（英文） Measurement of small-amplitude pressure fluctuation
 by a fast-responding pressure-sensitive paint
 研究代表者
 亀田 正治（KAMEDA MASAHARU）
 東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授
 研究者番号：70262243

研究成果の概要（和文）：物体表面の圧力を測るための感圧塗料（PSP）に関して、本研究では、微小振幅の圧力変動を計測するための高速応答型 PSP、及び、それを用いた計測法の技術開発を進めた。その結果、任意の材質、形状の物体に「塗れる」高速応答型 PSP の開発に成功し、また、感温塗料との併用による温度、圧力の同時計測にも成功した。さらに、高速風洞による実証試験から、本 PSP を用いることで、物体表面における数 kHz の圧力変動を 1 kPa 程度の精度でとらえられることが分かった。

研究成果の概要（英文）： A novel fast-responding pressure-sensitive paint (PSP) was developed to measure unsteady small-amplitude pressure fluctuation. This PSP was applied on arbitrary surfaces via spray coating. A bi-lunimonophre paint was also developed to measure pressure and temperature simultaneously. We evaluated the measurement uncertainty of these paints by high-speed wind tunnel testing. This test reveals that the pressure with a few kHz fluctuations was successfully measured within 1 kPa uncertainty.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2008 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：流体工学，航空宇宙工学，計測工学

1. 研究開始当初の背景

環境適合性が求められる輸送機器（高速鉄道，自動車）の騒音（空力騒音）は，物体表面での流れのはく離にともなう微小圧力変動がもとで生じる．この圧力変動を精密に捉えるためには，流れの動圧レベル（100 Pa）

の計測手段が必要である．また，空力音源は物体表面近傍の広い範囲で存在しており，変動圧力画像計測法の確立が望まれている．

感圧塗料（PSP）は発光色素のルミネッセンス強度，寿命と圧力（酸素濃度）との相関を利用する分子センサの一種である．励起光

源と受光用カメラ、という比較的簡便な装置を用いることで、分子レベルから航空機レベルまでの幅広いスケールに対して、サブマイクロ秒オーダーの時間分解能で圧力計測が可能という、魅力的な潜在能力を有する。

しかし、PSP 計測技術はいまだ発展途上であり、潜在能力は完全に引き出されていない。特に、非定常圧力、さらに、低速 ($O(10 \text{ m/s})$) 流中に置かれた物体周り圧力など、流体力学分野の主要な実験対象への計測法は未だ確立されていない。

2. 研究の目的

微小圧力変動の空間分布を計測するための PSP 技術開発を進める。陸上輸送機器の主要速度域である $O(10 \text{ m/s})$ の変動圧画像計測法を確立し、風洞実験のコスト低減、詳細な数値予測のための基礎データの提供を実現することを目的とする。PSP 計測技術を、物体周りの空力騒音源探索技術のツールに供することを最終的な目標とする。

流れの動圧レベル (100 Pa) の計測を実現するために、

- (1) 任意の材質、形状の物体に「塗れる」高速応答型感圧塗料
- (2) 変動圧力、温度同時計測法の開発を進めていく。開発した PSP 計測法に基づき、
- (3) 風洞中に置かれた物体周りの微小非定常圧力場計測を行う。

3. 研究の方法

- (1) 任意の材質、形状の物体に「塗れる」高速応答型感圧塗料の開発

感圧塗料の高速応答化は、塗料膜の気体透過性を高めることで実現される。塗料膜の気体透過性を高めるには、多孔質化が有効である。本研究では、新しい多孔質性皮膜材料として、セラミック超微粒子を溶媒に分散させたスラリー（シーアイ化成製）を用いる。PSP 用色素をスラリーに溶解させ、物体表面にスプレーを用いて塗布、乾燥させることで、PSP 用色素が吸着された微粒子を任意の表面に付着させた。圧力、温度を独立、かつ、精密に制御できる容器、および、衝撃波管を用いて、本セラミック超微粒子 PSP の圧力、温度感度、および、ステップ圧力上昇に対する応答時間を測定した。つぎに、電子顕微鏡観察や吸収、発光スペクトル分析により、塗装後の PSP 膜の性質を明らかにした。

- (2) 変動圧力場、温度場同時計測法の開発

セラミック超微粒子 PSP は、従来の高速応答型 PSP に比べて、圧力感度、時間応答性は同等、スプレーによる塗装が可能、という優れた特性を有する。しかし、発光強度に対する温度依存性が非常に大きい、という問題が

ある。そこで、PSP の下地として、TSP を含むポリマー層を用いて、温度測定も同時に行える高速応答性 PSP/TSP を開発した。PSP、TSP それぞれの性能を損なわず、重ね塗りができる材料の組み合わせを見出した。圧力/温度依存性評価試験、時間応答性試験、スペクトル分析を行い、PSP 用色素と TSP 用色素が混在することによる影響を明らかにした。

- (3) 風洞実験による実証試験

本研究グループが開発し、すでに実績を挙げているもう一つの非定常 PSP 「陽極酸化アルミニウム皮膜 PSP (AA-PSP)」、および、セラミック超微粒子 PSP・TSP 重ね塗りによる圧力・温度同時計測システムを用いて、以下の実証実験を行った。

遷音速デルタ翼

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ・宇宙科学研究本部 (ISAS) が所有する遷音速風洞を用いて、デルタ翼表面の非定常衝撃波 (数 10 -数 100 Hz) を調べた。

超音速ダクトにおける擬似衝撃波

JAXA 研究開発本部に設置した吸い込み式風洞を用いて、ダクト内に生じる擬似衝撃波の振動現象をとらえた。透明流路による圧力分布の定量計測、シュリーレン画像との同期取得による複合計測を実施した。

4. 研究成果

- (1) 任意の材質、形状の物体に「塗れる」高速応答型感圧塗料の開発

直径 20 nm のシリカ超微粒子/トルエンスラリー（シーアイ化成製）に感圧色素（ポリフィリンなど）を溶解させ、スプレー塗装により塗料膜を形成する（特願 2008-189605）ことに成功した。塗装した試料の SEM 写真を図 1 に示す。空隙のある気体透過性の高い構造をしていることがわかる。

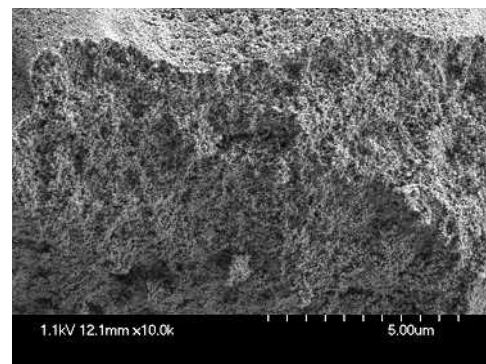


図 1 セラミック超微粒子 PSP の構造

本 PSP は、任意形状の物体に塗布可能という大なる利点を有する。本 PSP の圧力、温度依存性を調べた結果を図 2 に、ステップ圧力上昇に対する時間応答曲線を図 3 に示す。

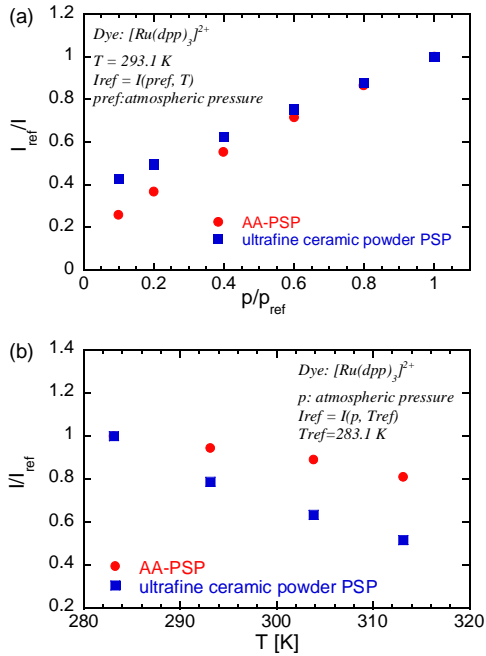


図2 高速応答型PSPの(a)圧力、(b)温度依存性

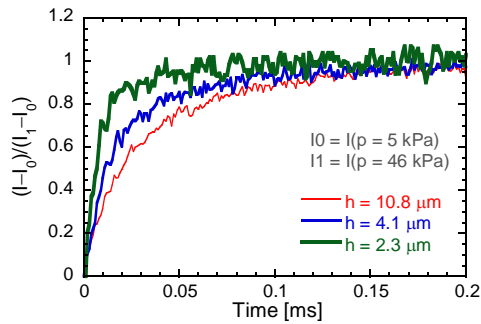


図3 セラミック超微粒子PSPのステップ圧力時間応答性

PSP色素には、他の実験でも良く用いられるバソフェルテニウムを用いた。申請者が開発したもう一つの超高速応答型PSP (AA-PSP) に比べると、やや圧力感度(図2(a)の傾き)が小さく、温度感度が大きい(1で1%程度の発光強度変化が生じる)ことが分かる。また、図3より、塗料膜の厚さが4 μm程度であれば、立ち上がり時間は0.1 ms以内に収まることが分かる。

(2) 変動圧力場、温度場同時計測法の開発

前項の通り、セラミック超微粒子PSPは、比較的溫度感度が大きい。そこで、溫度補償の手段として、PSP層の下地に溫度を測定するための感温塗料(TSP)層を加える感圧・感温複合塗料(Bi-PSP)を開発した。ここでは、代表的な感圧色素であるPtTFPP(発光波長655 nm)の発光と干渉しない感温色素(クマリンC307, 発光波長450 nm)を組み合わせるBi-PSPを作成し、前項と同様に、圧力、溫度感度、ステップ圧力に対する時間応答を

調べた。その結果、PSP、TSP単体に比べて、圧力、溫度感度は変わらず、時間応答性も変わらない、という結果が得られた。ただし、重ね塗りにともない、下層(TSP層)の発光強度が約1/7に低下し、また、そもそもクマリンの溫度感度(0.3%/)が小さいため溫度の測定精度は0.1にいたらない、ということが分かった。

(3) 風洞実験による実証試験
遷音速デルタ翼

図4に計測装置のセットアップとマッハ数0.9における翼表面圧力の時間変化を示す。図より、翼中心軸付近の高圧(赤色)領域が時間とともに変動していることが分かる。また、翼面に同時に設けた小型半導体圧力センサ出力との比較から、本PSPは数kHzの変動を1kPaの精度でとらえられる、ということが分かった。

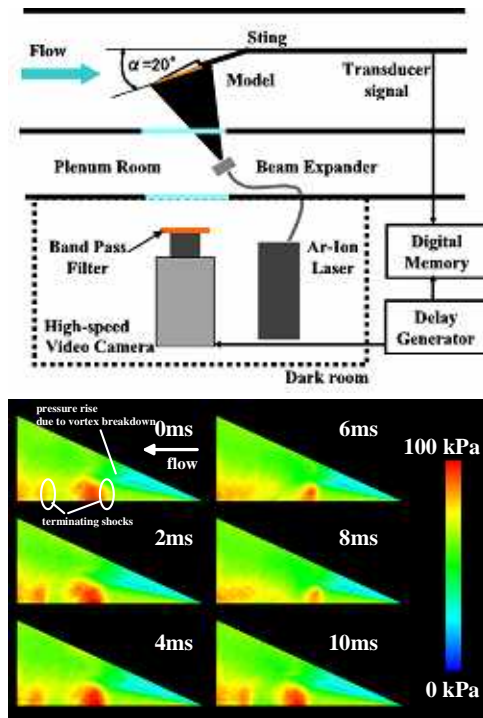


図4 風洞実験セットアップとM = 0.9における翼表面圧力分布の時間変化

超音速ダクトにおける擬似衝撃波

図5に実験セットアップを示す。真空タンクに設計マッハ数M=2の超音速ノズルを取り付け、ノズル内の流れをPSP、シュリーレン法によって可視化した。ノズルは、上流よりラバルノズル、計測部、手動開閉式の弁部からなり、計測部流路は80×80 mmの正方形断面であり、500 mmの長さを持つ。計測部には、底面部にPSPコーティングが施してあり、両側壁にはシュリーレン計測とPSP発光の計測のためアクリル窓を設けてある。P S

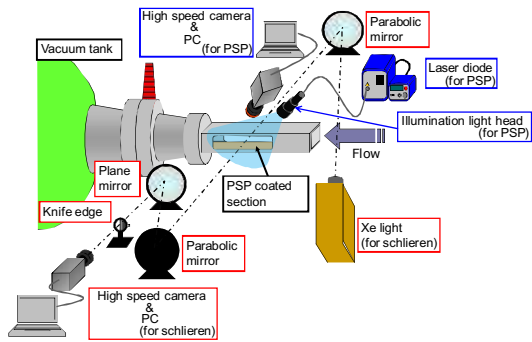


図5 ダクト内擬似衝撃波計測実験

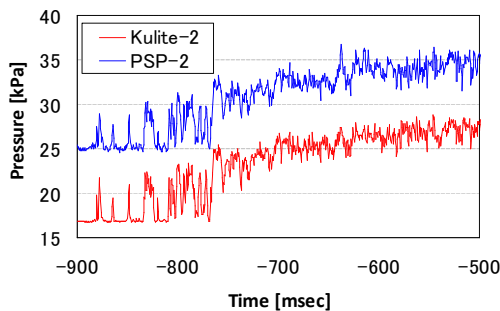


図6 PSP (青) と半導体圧力センサ (赤) による圧力変動計測結果の比較

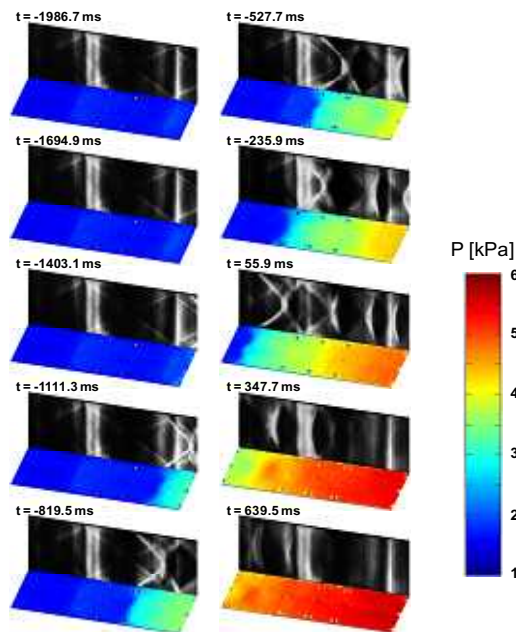


図7 PSP (カラー), シュリーレン (白黒) 同時計測による擬似衝撃波の時間変化

Pデータとの比較用にPSPコーティング面に半導体圧力センサ(Kulite社, XCQ-093-25A)を3点配置した。

半導体圧力センサによる計測とセンサ位置周辺でのPSP計測圧力との比較結果を図6に示す。圧力変動については、PSPと非定常圧力センサによる計測がよく対応している

が、絶対値が数kPa異なることが分かる。絶対値が異なるのは、セラミック超微粒子PSPに吸着した水分が通風中に脱離することによって発光強度が変わることが理由である。このような傾向は、他のAA-PSPでも見られ、その影響を考慮したPSP発光データのポスト処理が必要である。

シュリーレン計測・PSP計測より得られた画像を処理したものを図7に示す。図は時間方向に順に左上から下へ進み、次に右の列へと配置されている。この図において、気流は紙面左から右へと流れている。PSP計測では分からない流路内部の衝撃波の挙動や、境界層により判別困難な後続衝撃波の位置がシュリーレン法から分かった。両計測を併せて行うことで、流路内に発生した衝撃波形状の三次元的な形状把握に役立つ計測を行うことができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Amao, Y. and Okura, I., Optical oxygen sensor devices using metalloporphyrins, Journal of Porphyrins and Phthalocyanines, 13 (2010), 1111-1122, 査読有。
- ② Osawa, J., Nakakita, K. and Kameda, M., Unsteady PSP application to an internal flow with oscillating shock wave, Proceedings of 2009 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Engineering (2009), 444-449, 査読有。
- ③ Nakakita, K. and Arizono, H., Visualization of unsteady pressure behavior of transonic flutter using pressure-sensitive paint measurement, AIAA Paper 2009-3847 (2009), 査読有。
- ④ Kameda, M., Seki, H., Makoshi, T., Amao, Y. and Nakakita, K., Unsteady measurement of a transonic delta wing flow using a novel PSP, AIAA Paper 2008-6418 (2008), 査読有。
- ⑤ Gregory, J., Asai, K., Kameda, M., Liu, T. and Sullivan, J.P., A review of pressure-sensitive paint for high speed and unsteady aerodynamics, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 222(2) (2008), 249-290, 査読有。
- ⑥ Nakakita, K., Osawa, J., Hori, N., and Kameda, M., Unsteady pressure-sensitive paint measurement for oscillating shock wave in

supersonic nozzle, AIAA Paper 2008-6580 (2008), 査読有.
Araki, N., Amao, Y., Funabiki, T., Kamitakahara, M., Ohtsuki, C., Mitsuo, K., Asai, K., Obata, M., and Yano, S., "Optical oxygen-sensing properties of porphyrin derivatives anchored on ordered porous aluminum oxide plates", Photochemical Photobiological Science 6(7) (2007), 794-803, 査読有.
Nakakita, K., Unsteady Pressure Distribution Measurement around 2D-Cylinders Using Pressure-Sensitive Paint, AIAA Paper 2007-3819 (2007), 査読有.

[学会発表](計10件)

Osawa, J., Nakakita, K. and Kameda, M., Unsteady PSP application to an internal flow with oscillating shock wave, 2009 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Engineering, 2009年11月5日, 長良川国際会議場, 岐阜.

竹田敏広・亀田正治・中北和之・天尾豊, セラミック超微粒子を用いた高速応答型感圧感温複合塗料, 第41回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2009年6月19日, JAXA調布, 東京.

大澤淳一・中北和之・亀田正治, シュリーレン法・PSP同時計測による内部流光学計測, 第41回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2009年6月19日, JAXA調布, 東京.
馬越太郎, 関仁志, 竹田敏広, 亀田正治, 中北和之, 超微粒子PSPを用いた遷音速デルタ翼面非定常圧力計測, 平成20年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2008年12月5日, 宇宙科学研究本部, 相模原.

大澤淳一, 堀信明, 中北和之, 亀田正治, 内部流における非定常衝撃波のPSP計測, 第46回飛行機シンポジウム, 2008年10月22日, 大田区プラザ, 東京.

Kameda, M., Seki, H., Makoshi, T., Amao, Y. and Nakakita, K., Unsteady measurement of a transonic delta wing flow using a novel PSP, AIAA 26th Applied Aerodynamics Conference, 2008年8月18日, Hawaii Convention Center, ホノルル.

Nakakita, K., Osawa, J., Hori, N., and Kameda, M., Unsteady pressure-sensitive paint measurement for oscillating shock wave in supersonic nozzle, AIAA 26th Applied

Aerodynamics Conference, 2008年8月18日, Hawaii Convention Center, ホノルル.

馬越太郎, 関仁志, 亀田正治, 中北和之, 遷音速デルタ翼面非定常圧力のPSP計測, 第40回流体力学講演会, 2008年6月13日, 東北大学, 仙台.

馬越太郎, 関仁志, 堀信明, 亀田正治, 中北和之, 疎水性AA-PSPを用いた遷音速デルタ翼流れの圧力計測, 平成19年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2007年12月17日, 宇宙科学研究本部, 相模原.
竹澤哲也, 坂上博隆, 亀田正治, 関仁志, 中北和之, 陽極酸化アルミPSPの性能改善, 第39回流体力学講演会, 2007年6月14日, JAXA調布, 東京.

[図書](計1件)

亀田正治, 浅井圭介, "第9章 第1節 3. 感圧塗料(PSP)・感温塗料(TSP)," 非侵襲・可視化技術ハンドブック(小川誠二, 上野照剛監修, NTS, 東京, 2007), pp. 871-881(分担執筆)

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 感圧塗料、ならびに物体および物体の表面圧力の測定方法

発明者: 亀田正治, 天尾豊, 中北和之

権利者: 東京農工大学, 大分大学, 宇宙航空研究開発機構

種類: 特許

番号: 特願2008-189605

出願年月日: 2008年7月23日

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀田 正治 (KAMEDA MASAHARU)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授

研究者番号: 70262243

(2) 研究分担者

天尾 豊 (AMAO YUTAKA)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号: 80300961

中北 和之 (NAKAKITA KAZUYUKI)

宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・主任研究員

研究者番号: 50358595