

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360075

研究課題名（和文） 超高速応答型感圧塗料計測の高精度化・複合化と非定常空力現象解析への展開

研究課題名（英文） Fast responding pressure-sensitive paint: Accuracy improvement, combination with another measurement, and application to unsteady aerodynamics

研究代表者

亀田 正治 (KAMEDA MASA HARU)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70262243

研究成果の概要（和文）：非定常空力現象に適用するための圧力場，速度場計測法を開発した．高速応答型感圧塗料（PSP）による5 kHz，100 Pa以下の変動をとらえる方法を確立した．PSPの時間応答性に対する色素発光寿命の影響を定式化した．PSPと時系列粒子画像流速計（PIV）による同時計測システムを構築した．風洞試験の結果，PIV用シードを流しても，PSP/PIV同時計測が可能であること，および，PIVによる渦度，PSPによる変動圧力の相関も良好であることがわかった．

研究成果の概要（英文）：A novel method for measuring the pressure and velocity fields of unsteady flow around bodies was constructed. The measurement technique using fast responding pressure-sensitive paint (PSP) was improved to detect the pressure fluctuation whose frequency and amplitude are 5 kHz and less than 100 Pa. An analytic solution of the frequency response of the PSP signal was derived in which the effect of luminescence lifetime was considered. A coupled system using this PSP and the time-resolved particle-image velocimetry (PIV) was constructed. Wind-tunnel test of this system indicated that the sheading droplets for PIV hardly disturbed the signal from the PSP. The vorticity obtained by PIV correlated well with the pressure fluctuation measured by PSP.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・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

輸送機器（鉄道，自動車，航空機）の空力騒音，特に，低速流れに置かれた物体からの発生音は，物体表面の圧力変動をとまう二

重極音が支配的とされる．この表面圧力変動をとらえるためには，流れの動圧レベル（100 Pa）以下の精度を持つ計測手段が必要である．また，より本質的な現象の理解には，近傍の

速度場情報に基づく渦度場の時系列データも必要である。

申請者は、科研費等の助成を受けて、これまでに、2種類の超高速応答型感圧塗料(以下PSP)の開発に成功している。いずれも数kHzの変動を1kPaの精度で捉えることが可能である。

しかし、現状の超高速応答型PSPの測定精度は、低速流れの動圧(100Pa)レベルの変動を定量的にとらえるまでにはいたっていない。また、非定常空力現象解析では、物体表面の圧力変動だけでなく、近傍の速度場も重要な計測対象であるが、これらを同時に行う手法は未だ確立されていない。

2. 研究の目的

物体周り非定常気体流れに供する先進的計測システムを構築し、非定常空力現象解析への適用を図る。

まず、申請者が開発を続けている超高速応答型感圧塗料(PSP)計測法をさらに高度化し、5kHz、100Pa(大気圧に対して0.1%)以下の変動をとらえる技術を確認する。

次に、PSPと時系列PIVを共存させる方法を考案し、圧力場と同時に、物体周り速度場についても5kHzのサンプリングレートで1%の変動をとらえる計測システムを構築する。

最後に、構築したシステムを用いて、円柱、翼などのはく離流れや、渦と物体との干渉にともなう空力音響現象を対象として、物体近傍場の詳細な非定常渦度・圧力場変動を計測し、遠方場音場の定量予測の実現可能性を実証する。

3. 研究の方法

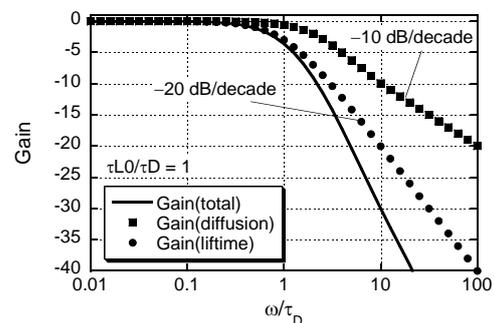
超高速応答型PSP計測の高度化に関しては、変動圧力情報が含まれる発光画像の解析法の検討、温度・湿度感度の補正法の検討、温度同時計測用希土類色素の選定、周波数応答の理論解析を進めた。

PSP/PIV複合計測システムは、PSP計測システムと研究分担者の研究機関(JAXA)が所有する時系列PIVシステムを合わせて構築した。特に、PIV計測に必要なトレーサ粒子の選定およびその粒子がPSP計測に与える影響を評価した。最後に、超音速ノズルおよび低速流中に置かれた円柱周りの流れに対するを対象とした実証試験を行った。

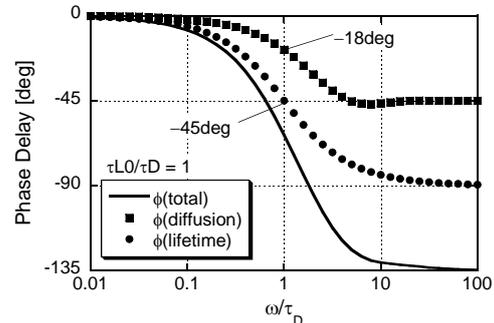
4. 研究成果

まず、申請者が開発を続けている超高速応答型感圧塗料(PSP)計測法をさらに高度化し、5kHz、100Pa(大気圧に対して0.1%)以下の変動をとらえる方法を検討した(Kameda et al., 2012; 亀田・天尾 2011; 吉田ら 2012; 瀬谷ら 2012; 木村ら 2010)。PSP出力の時系列データをFFT解析することにより、100Paをはるかに下回る変動圧力の抽出に成功したことが特筆される(中北 2012)。

次に、超高速応答型感圧塗料(PSP)計測法をさらに高度化することを目指して、新たな感圧塗料用色素の評価(天尾ら 2010)、および、周波数応答に対する色素発光寿命の影響の評価(亀田 2012; 亀田ら 2012)を行った。その結果、新たな感圧塗料色素の候補である希土類(テルビウム)色素[Tb(TFA)₃]phenの発光は温度の影響を受けにくいことを明らかにした。また、色素発光寿命と皮膜への酸素拡散特性をカップルさせた理論式を導出し、色素の発光寿命、ガス拡散によるPSP出力の変化は、ボード線図上では、それぞれの影響の重ね合わせとして表されることや色素の発光寿命が顕著な影響を与えるケースを明らかにした(図1)。



(a) ゲイン線図



(b) 位相線図

図1 PSP周波数応答ボード線図。色素発光寿命(τ_{L0})とPSP皮膜へのガス拡散特性時間 τ_D と等しい場合、PSPの周波数応答は両者の重ね合わせとして表現される。

最後に、PSPと時系列PIVを共存させる方法を考案し、圧力場と同時に、物体周り速度場についても5kHzのサンプリングレートで1%の変動をとらえる計測システムを構築した。ここでは、PSP計測に影響を与えないPIV用トレーサ粒子として、ドライアイスが有望であること(Koikeら 2012; 小池ら 2011)、また、オイルシードであってもPSP計測に支障はないこと(野邑ら 2013)を明らかにした(図4)。

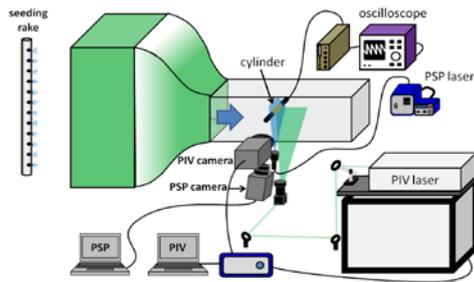


図2 PSP/PIV同時計測システム

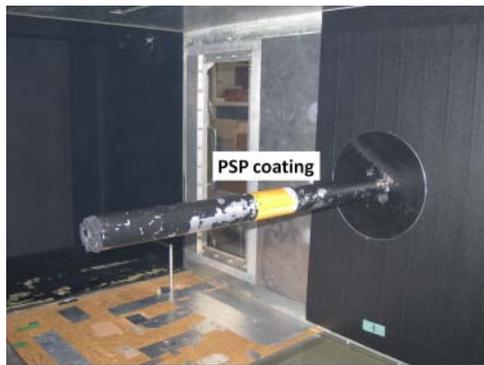


図3 円柱模型

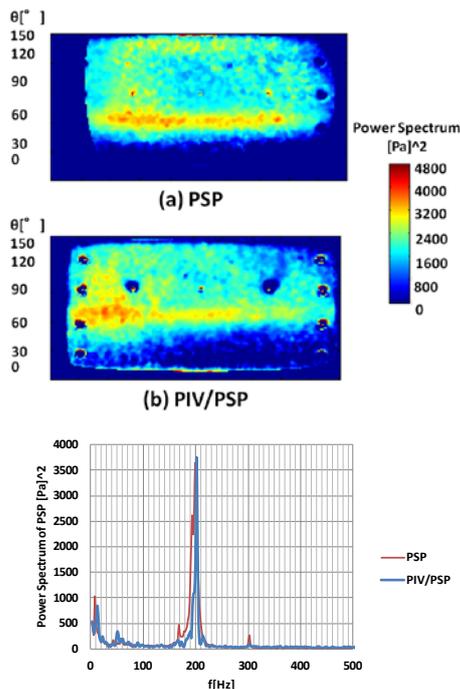


図4 円柱表面圧力変動パワー分布, スペクトル. 風速 20 m/s, 円柱直径 40 mm. (a)PSP 単独計測, (b)PSP/PIV 同時計測. 両者のスペクトルは良く一致している.

本システムによる圧力, 速度場同時計測の実証試験として, 超音速ノズル流れ (Koikeら 2012; 小池ら 2011) と低速流中に置かれた円柱周りの流れ (野邑ら 2013) の計測を行った.

円柱流れ計測では, 図2, 3に示すように, 後流の瞬時速度ベクトル場をPIVで, 円柱表面の変動圧力を陽極酸化アルミPSPでとらえた. その結果, PIV用オイルシードを風洞に導入し, PIV, PSPの同時計測が可能であること, および, PIVによる渦度, PSPによる変動圧力の相関も良好であることを示した(図4).

また, PSPによる非定常圧力場計測の実証試験として, 多翼ファン(田中ら2012; 赤沼ら2011), 超音速インテーク(Miki et al. 2011), 遷音速デルタ翼(Makoshi et al. 2011)の風洞実験を実施し, 有益なデータを得た.

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4件)

- ① 亀田正治, "高速応答型感圧塗料の周波数応答に対する色素発光寿命の影響," 日本機械学会論文集(B編), 査読あり Vol. 78, No. 795, 2012, pp. 1942-1950, doi: 10.1299/kikaib.78.1942.
- ② 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, 査読あり, Vol. 171-172, 2012, pp. 343-349. doi: 10.1016/j.snb.2012.04.049.
- ③ Koike, S., Osawa, J., Nakakita, K., Kato, H., and Kameda, M. "Simultaneous pressure and velocity field measurement of pseudo-shock-wave using PSP and PIV," Proceedings of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 査読あり, 2012, AIAA-2012-1190, DOI: 10.2514/6.2012-1190
- ④ 亀田正治, 天尾豊, "セラミック超微粒子を用いた高速応答型感圧塗料," セラミックス, 査読なし, Vol. 46, No. 7, 2011, pp. 576-581. URL: <http://ci.nii.ac.jp/naid/10030200413>.

[学会発表] (計14件)

- ① 野邑佑二, 瀬谷佑介, 亀田正治, 中北和之, 加藤裕之, 小池俊輔 (2013) "円柱周り非定常流れに対するPIV/PSP複合計測," 第45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, (2013年7月5日, タワーホール船堀, 江戸川区, 東京)(発表予定).

- ② 田中寿典, 渡辺安, 亀田正治 (2012) "航空機エンジンファン騒音に対するインレットディストーションの影響," 日本流体力学会年会 2012 (2012年9月17日, 高知大学朝倉キャンパス, 高知).
- ③ Seya, Y., Nishida, R., Yoshida, M., Kameda, M. and Nakakita, K. (2012) "Frequency response of fast-response pressure sensitive paint with a hydrophobic coating," 3rd Japanese-German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (September 4, 2012, JAXA Chofu Aerospace Center, Chofu, Tokyo, Japan), P-18.
- ④ 瀬谷佑介, 西田梨奈, 亀田正治, 中北和之 (2012) "疎水化処理を施した高速応答型感圧塗料の周波数応答性," 第40回可視化情報シンポジウム (2012年7月24日, 工学院大学, 東京).
- ⑤ 亀田正治, 瀬谷佑介, 吉田匡秀, 中北和之 (2012) "多孔質皮膜感圧塗料の時間応答性," 第44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, (2012年7月6日, 富山国際会議場, 富山).
- ⑥ 吉田匡秀, 亀田正治, 中北和之 (2012) "高速応答型 AA-PSP に対する新しい疎水化処理法," 第44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, (2012年7月6日, 富山国際会議場, 富山).
- ⑦ 中北和之, "FFTを用いた低速非定常PSP計測における流れの位相情報抽出," 第44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 (2012年7月6日, 富山国際会議場, 富山).
- ⑧ Koike, S., Osawa, J., Nakakita, K., Kato, H., and Kameda, M. (2012) "Simultaneous pressure and velocity field measurement of pseudo-shock-wave using PSP and PIV," 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting (Jan 12, 2012, Gaylord Opryland Resort & Convention Center, Nashville, Tennessee, U. S. A.)
- ⑨ 小池俊輔, 大澤淳一, 中北和之, 加藤裕之, 亀田正治 (2011) "PSP と PIV による非定常内部流れの圧力場と速度場の同時計測," 可視化情報学会全国講演会 (2011年9月26日, 富山国際会議場, 富山).
- ⑩ Miki, H., Watanabe, Y. and Kameda, M. (2011) "Aerodynamic performance of a boundary-layer diverter for supersonic propulsion system," 11th Asian Symposium on Visualization (June 8, 2011, Toki Messe, Niigata, Japan).
- ⑪ Makoshi, T, Kashida, T., Kimura, S., Seya, Y. and Kameda, M. (2011) "Visualization of shock-induced vortex breakdown on a delta wing in transonic flow regime," 11th Asian Symposium on Visualization (June 8, 2011, Toki Messe, Niigata, Japan).
- ⑫ 赤沼憲仁, 渡辺安, 亀田正治 (2011) "インレットディストーションがファン騒音に及ぼす影響," 第51回航空原動機宇宙推進講演会 (2011年3月4日, 広島YMCAホール, 広島).
- ⑬ 天尾豊, 田所朱美, 亀田正治 (2010) "イリジウム錯体をベースとした緑色蛍光分子を用いた光学的酸素センシング," 第6回学際領域における分子イメージングフォーラム (2010年11月8日, JAXA 調布航空宇宙センター, 調布).
- ⑭ 木村俊一, 亀田正治, 天尾豊, 中北和之 (2010) "セラミック超微粒子感圧感温複合塗料の特性評価," 第42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, JSASS-2010-2105 (2010年6月25日, 米子コンベンションセンター, 米子).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀田 正治 (KAMEDA MASAHARU)
東京農工大学・大学院工学研究院・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・研究領域リーダー

研究者番号：50358595

(3) 連携研究者

加藤 裕之 (KATO HIROYUKI)
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：80358598