

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760134

研究課題名（和文） ターボ機械内部流れ場の感圧・感温塗料によるイメージング解析

研究課題名（英文） Imaging Analysis of Turbomachinery Internal Flows Using Pressure and Temperature Sensitive Paints

研究代表者

森 英男 (MORI HIDEO)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70362275

研究成果の概要（和文）：

非接触でイメージング計測が可能な感圧塗料(PSP)による圧力計測法を、低圧力の産業用および民生用ターボ機械の流れ場解析へ適用可能とするため、PSPと感温塗料(TSP)の重ね塗りによる圧力と温度の複合計測を行い、PSPの温度感度を補正することで圧力計測の高精度化を実現する手法を検証した。その結果、本研究で構築した重ね塗りPSP/TSPを用いて、0.4℃の温度差を持つ平板に衝突する低速の噴流が形成する800Paの圧力分布を定量的に計測することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a dual-layer pressure sensitive paint (PSP) / temperature sensitive paint (TSP) for measurement of low-speed flows with low gauge pressure. Because PSP and TSP enable non-intrusive imaging measurement, application of the technique to measurement of internal flows related to turbomachinery for industrial and home use is strongly desired. However, problems of PSP related to low pressure sensitivity in low gauge pressure and measurement error caused by non-uniform temperature distribution must be solved for application of PSP in low gauge pressure conditions. Dual-layer PSP/TSP enables the temperature compensation of the PSP component by using temperature distribution measured by the TSP component. In this study, small pressure difference as 800Pa on a flat plate with non-uniform temperature distribution with the difference of 0.4 deg C interacting with a low-speed jet can be visualized quantitatively by using the dual-layer PSP/TSP.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：実験流体力学，流体計測

科研費の分科・細目：機械工学，流体工学

キーワード：感圧塗料，感温塗料，ターボ機械

1. 研究開始当初の背景

送風機や圧縮機，タービン等の各種ターボ

機械の開発に関する技術は国内外において多大なる発展を遂げてきたが，ターボ機械内

部における複雑流動場の現象についてはいまだ学術的に未知な点が多い。このような複雑流動場の現象の解析では、数値計算による解析 (CFD) と実験による解析 (EFD) のいずれか片方では不十分であり、両者を複合させた解析を実施することが、複雑流動場の現象を正しく解明するために必要不可欠となる。しかし、ターボ機械内部流れ場の実験的解析は、既存のセンサーデバイスによる計測が本質的に点計測であるため流れ場の三次元計測が非常に困難なことや、動翼などの駆動部を含むターボ機械内部へのセンサー類の設置などが困難なことなど、ターボ機械内部における計測の困難さにより、数値計算による解析に比べて非常に遅れているのが現状であり、実験的解析を推し進めることが、ターボ機械関連技術のさらなる革新を目指すために急務となっている。

光学的手法を応用したイメージング計測技術は、圧力や温度、流速などの物理量を画像として撮像することが可能であり、連続的な物理量分布が得られること、また非接触な手法であるため、回転翼列などの可動部を含む流れ場への適用が比較的容易なことなどの利点を持つため、これらの計測技術の流体力学分野における適用が大いに期待されている。中でも、感圧塗料 (PSP) および感温塗料 (TSP) は、固体表面上の連続的な圧力および温度分布を比較的安価な計測システムにより得られる利点を持つため、米国や欧州、日本など世界各国で PSP および TSP の開発および改良が精力的に進められたことで、近年急速にその適用範囲を広げつつある。PSP の開発当初は風洞実験における航空機模型の表面圧力、温度計測など、圧力や温度の変動が大きい航空宇宙分野における高速流れ場を対象とした研究・開発への適用が主であったところ、近年では PSP の圧力感度向上により、より低速な流れ場への適用が可能になりつつある。さらなる圧力感度の向上による、鉄道列車や自動車の風洞実験への適用も期待されているが、動圧が 1kPa 以下となる約 40m/s 以下の低速流れ場への適用については緒に就いたばかりである。ターボ機械を対象とした計測への適用においては、遷音速領域で作動するターボ圧縮機の翼の空力特性を風洞内で解析した研究例が報告されているが、より低流量・低圧力域で作動するターボ機械を対象とした研究や、ターボ機械の駆動状態における内部流れ場の計測に関する研究については報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では、従来の計測技術の適用が困難であったターボ機械内部流れ場の計測へ光学計測手法である PSP および TSP を適用し、ターボ機械内部における複雑流動場の現

象解明を目的とした実験的解析を実現することを目的とする。

PSP および TSP による計測手法は固体表面上の連続的な圧力および温度分布を画像として得ることができ、かつ非接触な手法であるので駆動部を含む系への適用が容易である利点を持つ。一方で、現状の PSP では、圧力感度と温度感度を併せ持つことや、PSP が絶対圧センサーであるために大気圧域におけるゲージ圧計測では感度の面で不利であることから、ゲージ圧の低い低速流れ場における PSP の適用が進んでいない問題がある。そのため、PSP による計測手法を低速流れ場解析へ適用するためには、PSP の感度向上とともに、低速流れ場において相対的に影響が大きくなる温度感度を適切に補正する手法が要求される。さらに、風洞実験を想定した低速流れ場解析への PSP の適用では、一般的には圧力孔を併用して PSP の較正を行う *in situ* 較正法を用いることで、低ゲージ圧領域における圧力感度および精度の向上が図られているが、ターボ機械の動翼面上の圧力計測では、圧力孔が不要な *a priori* 較正法の方が適している。そこで本研究では、*a priori* 較正法を用いることを前提に低ゲージ圧領域における PSP の圧力感度および精度の向上を図るため、PSP の組成に改良を加えるとともに、PSP と TSP の複合により PSP の温度感度を補正し、圧力感度の向上を図る。また、PSP および TSP をターボ機械の計測へ適用するために必要な入射光の導入方法や光学機器およびカメラの配置、駆動する動翼表面の撮像方法を検討する。そのうえで、PSP および TSP を用いて、低速流れ場と相互作用する固体壁面の圧力および温度計測を実施し、産業用および民生用ターボ機械の内部流れ場解析における本技術の適用の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

PSP と TSP の複合により PSP の温度感度を補正し、圧力感度の向上を図る方法として、左右対称な風洞模型の左右それぞれに PSP と TSP を塗り分ける方法や、PSP と TSP を混合する手法などがこれまで考案されてきたが、左右に塗り分ける方法では、模型および流れ場の両方が左右対称でないと適用が

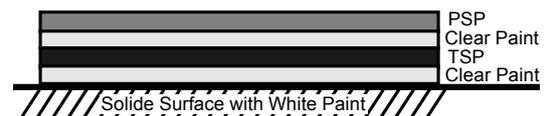


図1 重ね塗り PSP/TSP の構造図

できないこと、また PSP と TSP の混合では、双方の発光分子が互いに干渉して発光強度や圧力および温度感度の低下がみられるな

どの問題点があることが分かっている。そこで本研究では、PSPとTSPを直接混合せず、下層にTSPを塗布し、その上層にPSPを重ね塗りする手法を適用することで、これらの問題を解決する。図1に重ね塗りPSP/TSPの模式図を示す。PSPおよびTSPのスクリーン層となる白色ベースコート層の上にクリアカラー層を塗布し、その上にTSPを塗布する。さらにTSP層とPSP層の接触を避けるためにTSP層の上にクリアカラー層を塗布し、最上層にPSP層を塗布する。

重ね塗りPSP/TSPでは、PSPとTSPを直接混合させないため、両者の発光分子同士の干渉の影響が比較的少ないが、光学フィルターによるPSP層およびTSP層の発光の分離が不十分であったり、一方の発光を他方が光吸収することなどの理由により、発光強度や感度低下が生じる可能性がある。そこで、PSPおよびTSPの発光分子およびバインダーの最適な組み合わせを検討したうえで、重ね塗りPSP/TSPのサンプルを作成し、圧力および温度感度をそれぞれ単層PSPおよび単層TSPと比較する。

さらに、重ね塗りPSP/TSPによる計測手法の低速流れ場解析への適用について妥当性を検証するため、実際のプロペラファン翼面上への適用において想定される、0.3°C程度の温度差を持つ平板と衝突する噴流により形成された圧力分布を重ね塗りPSP/TSPにより計測し、温度感度補正による圧力計測精度向上の評価を行う。

4. 研究成果

本研究では、低速流れ場へ適用可能な重ね塗りPSP/TSPを構築するため、大気圧付近の低ゲージ圧領域において圧力感度が高い

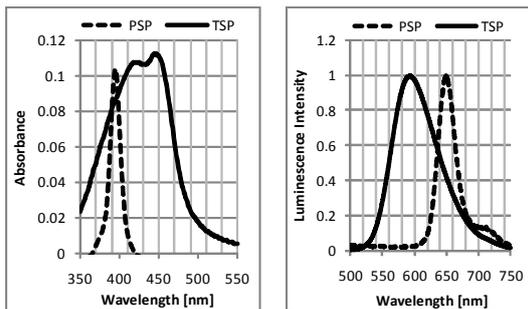


図2 重ね塗りPSP/TSPの光吸収（左図）および発光（右図）スペクトル

PSPおよび常温付近で温度感度が高いTSPを選定する必要がある。さらに重ね塗りPSP/TSPでは、前述の通り一方の発光を他方が光吸収することや、両者の発光のスペクトルに重なりが生じることにより、発光強度や感度低下が生じる可能性があるため、両者の発光分子の光吸収および発光スペクトル

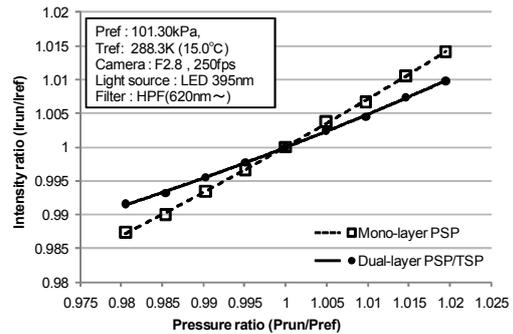


図3 重ね塗りPSP/TSPおよび単体PSPの圧力感度

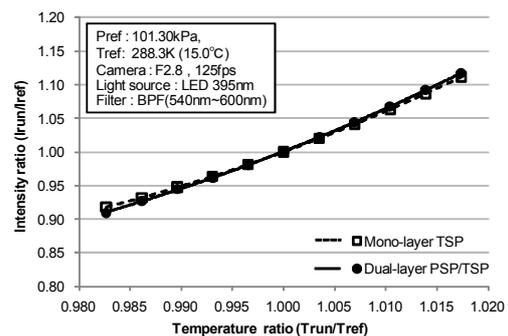


図4 重ね塗りPSP/TSPおよび単体TSPの温度感度

に重なりが見られないことが望ましい。本研究では、PSPの発光分子として酸素消光作用の高いPtTFPPを、バインダーに酸素透過性が高いガラス質ポリマーであるpoly(TMSP)を用い、またTSPの発光分子として温度感度の高いRu-phenを選定した。Ru-phenは水などの極性分子に可溶のため、TSPのバインダーには水溶性のポリビニルアルコールを用いた。

図2に重ね塗りPSP/TSPで用いられる両者の発光分子の光吸収スペクトルおよび発光スペクトルを示す。本図に示すように、両者の発光分子はともに波長395nmの光を吸収するので、以下の実験において、重ね塗りPSP/TSPの励起光には中心波長395nmの発光ダイオードアレイを用いる。また、両者の発光スペクトルには重なりが見られるが、その影響は小さい。また、光吸収スペクトルと発光スペクトルとの間にも大きな重なりはみられなかった。

以上の結果から、PSPの発光を撮像する際には、透過波長620nmのロングパスフィルターを用い、TSPの発光撮像には透過波長560nm-600nmのバンドパスフィルターを用いた。本手法により撮像した重ね塗りPSP/TSPの圧力感度を、単体PSPと比較した結果を図3に、重ね塗りPSP/TSPの温度感度を単体TSPと比較した結果を図4に示す。透過波長620nmのロングパスフィルタ

一を用いて PSP 成分の発光を撮像する際、圧力感度を持たない TSP 成分の発光を完全に遮断できないため、重ね塗り PSP/TSP の圧力感度は単体の PSP に比べて圧力感度が若干低下するが、その影響は非常に小さいことを示した。その一方で、TSP の発光撮像に透過波長 560nm-600nm のバンドパスフィルターを用いることで、PSP 成分の発光はほぼ遮断できるため、重ね塗り PSP/TSP の温度感度は単体の TSP とほぼ同一であり、温度感度の影響はないことを明らかにした。

重ね塗り PSP/TSP を用いて、0.4°C の温度差を持つ平板翼面上において、低速の衝突噴流が形成する 1kPa 以下の圧力分布の計測を行った。図 5 に得られた圧力分布図を示し、図 6 には、図 5 の破線部の圧力分布を圧力孔による計測結果と比較したグラフを示す。図 6 に示すように、圧力孔により測定した両端の圧力差は 800Pa となったが、PSP の温度補正を行わない場合に得られた両端の圧力差は約 3kPa であり、圧力孔による測定結果と一致しない。一方、PSP の温度補正を行った場合、得られた両端の圧力差が 800Pa となり、圧力孔による測定結果と定量的な一致を示した。この結果から、重ね塗り PSP/TSP を用いることで、不均一な温度分布を持つ平板上でゲージ圧の低い圧力分布を精度良く計測できることを明らかにした。

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 2 件)

- ① 森英男, 吉本俊純, 文吉周, 井上雄策, ターボ機械への適用へ向けた重ね塗り PSP/TSP の低速度流れ場における特性調査, 可視化情報学会誌, 査読無, Vol. 30, Suppl. 1, 2010, 185-188.
- ② 文吉周, 森英男, 吉本俊純, 井上雄策, 案部雄一郎, 重ね塗り感圧・感温塗料を用いた低速流れ場における圧力・温度分布の可視化, 可視化情報学会誌, 査読無, Vol. 30, Suppl. 2, 2010, 323-324.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 吉本俊純, 森英男, 内田和徳, 田上博明, 感圧塗料を用いた低速流れ場における計測技術の開発, 日本機械学会第 87 期流体力学部門講演会, 2009 年 11 月 7 日, 名古屋工業大学
- ② Hideo Mori, Toshizumi Yoshimoto, Kil-Ju Moon, Yusaku Inoue, A Priori Calibration of Pressure Sensitive Paint for Low-speed Flows, The 14th International Symposium on Flow Visualization, 2010 年 6 月 23 日, Daegu, Korea
- ③ 森英男, PSP/TSP の低圧力域および低速流れ

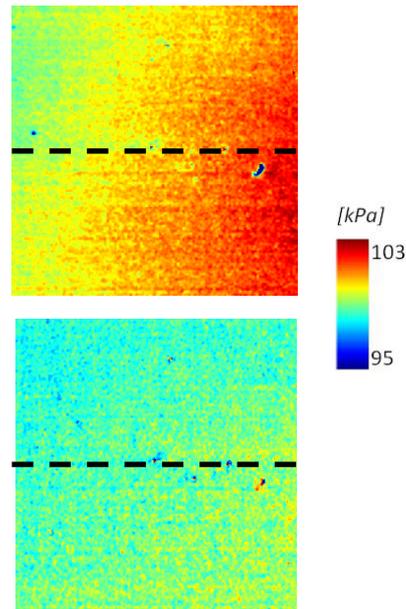


図 5 重ね塗り PSP/TSP により測定した平板上の圧力分布 (上図: 温度補正なし, 下図: 温度補正あり)

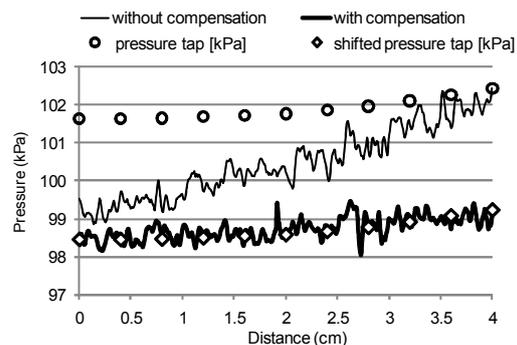


図 6 重ね塗り PSP/TSP により測定した平板中心線上の圧力分布

場への適用, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 8 日, 名古屋工業大学

- ④ 文吉周, 森英男, 吉本俊純, 井上雄策, 重ね塗り感圧・感温塗料を用いた低速流れ場における圧力・温度計測技術, 日本機械学会第 88 期流体力学部門講演会, 2010 年 10 月 30 日, 山形大学米沢キャンパス
- ⑤ 文吉周, 案部雄一郎, 川幡宏亮, 森英男, 重ね塗り感圧・感温塗料を用いた低速流れ場の圧力計測の実用化検証, 日本機械学会九州支部総会講演会, 2011 年 3 月 17 日, 九州大学伊都キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 英男 (MORI HIDEO)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 70362275