

2C04 導電性ポリマを用いた感温塗料の開発と評価

○伊神 翼, 永井大樹（東北大学）

Development of Temperature-Sensitive Paint with Conductive Polymer

Tsubasa Ikami and Hiroki Nagai (Tohoku University)

Key Words: Flow Visualization, Flow Measurements

Abstract

This study aims to develop a conductive polymer temperature-sensitive paint (TSP). The TSP layer functions as an optical temperature sensor and an electric heater at the same time. In the temperature calibration test, the proposed TSP had a temperature sensitivity of $-2.9\%/K$. Moreover, in the heating test, the surface temperature increased because of the heat input to the conductive polymer. These results indicate the applicability of the proposed TSP to wind tunnel experiments.

1. 緒論

感温塗料（Temperature-Sensitive Paint, TSP）は色素分子の温度消光を用いた、温度に基づく流体計測技術である。TSPを塗装した風洞模型を加熱すると、気流と模型表面との間に温度差が生じ、熱交換が促される。ここで、熱交換量は流れ場の表面熱伝達率によって決まる。流れ場の表面熱伝達と表面摩擦には相似則の関係があり、表面摩擦が強いほど熱伝達率が大きい。したがって、流れ場中の局所的な熱伝達率の違いによって形成される温度分布をTSPで計測することで、流れ場の状態を可視化できる。

これまでに、TSP計測における模型表面の加熱手法として、赤外線ヒータを用いた外部加熱や、温水の循環を用いた内部加熱が用いられてきた。その中でも、模型表面で発熱する方法として、模型とTSP層との間にカーボンナノチューブ（Carbon NanoTube, CNT）薄膜を設置し、電気的なヒータとして用いたcntTSP[1]がある。ただし、cntTSPは通常のTSPと異なり、CNT層、スクリーン層、TSP層の3層構造であり、膜厚が厚くなる。例えば、Kleinら[1]が開発したcntTSPは3層の合計で約 $110\mu\text{m}$ 、著者ら[2]の場合では約 $60\mu\text{m}$ である。通常のTSPが数 μm 程度[3]であるのに対してcntTSPの塗膜は厚く、塗装による模型形状変化の影響が大きくなる。また、塗膜の熱容量が増加するため、時間応答性が悪化する。

本研究では、TSP層自身が発熱することで、模型表面で発熱する点は保持しつつ、塗膜の薄膜化させた新型TSPを提案する。そのために、TSP層のポリマとして導電性ポリマを用いることでヒータ機能を付与した新型TSPを開発した。さらに、その温度センサとしての温度感度、およびヒータとしての加熱性能を調査し、風洞での流れ場計測への適用可能性を評価した。

2. 実験手法

まず、導電性ポリマTSPの調合を説明する。TSPの色素には、Tris(1,10-phenanthroline) ruthenium(II) chloride (Ru-phen) (Sigma-Aldrich)、溶媒にはエタノールを使用した。導電性ポリマには、poly(3,4-ethylenedioxythiophene) / poly(4-styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) のコロイド水分散液 (Sigma-Aldrich) を用いた。

導電性ポリマTSPは、2種類の試験片に塗装した。図1に塗装した試験片を示す。1つ目は、温度較正実験用であり、40 mm四方のアルミ板である。もう1つは、加熱実験用であり、45 mm四方のアクリル板である。この試験片の両端には幅5 mmの銅テープを取り付けた。これら2つの試験片に対して、白色ペイント（MH12006, Hols）を塗装した後、エタノールを用いてPDOT:PSS水分散液を体積基準で3倍に希釈し、希釈液6.0 mLを塗装した。PDOT:PSSが乾燥した後、Ru-phenのエタノール溶液を32 mg : 4.0 mLの割合で作製し塗装した。

温度較正では、大気圧下で温度を $5 - 50^\circ\text{C}$ の範囲で変更した。較正装置の詳細は著者らの先行研究[4]にある。また、表面粗さ測定器（HANDYSURF+35, 東京精密）を用いて膜厚を測定した。

加熱試験は、加熱実験用試験片を地面に対して垂直に固定して実施した。CMOSカメラ（Orca-flash4, 浜松ホトニクス）に単焦点レンズ（Nikkor 50 mm f/1.4, Nikon, f値1.4）および光学フィルタ（575 nm CWL, 50 mm Dia. Hard Coated OD4.0 50 nm Bandpass Filter, Edmund Optics）を取り付け、TSPの発光を取得した。励起光源には青色LED（IL-106B LED, HARDsoft Microprocessor Systems）1台を使用した。青色LEDにも光学フィルタ（SC0451, 朝日分光およびHAF-50 S-30 H, シグマ光機）を取り付けた。撮影速度は6.67 fps,

露光時間は150 msとした。計測には、強度法を用いた。まず基準状態である室温で発光強度を約19 s間取得した。次に、直流安定化電源を用いて試験片の電極に電圧を印加し、温度が上昇する過程を約19 s間取得した。印加電圧は、 500 W/m^2 となるように設定した。基準状態と加熱中の発光強度比から、較正試験結果を用いて温度を算出した。

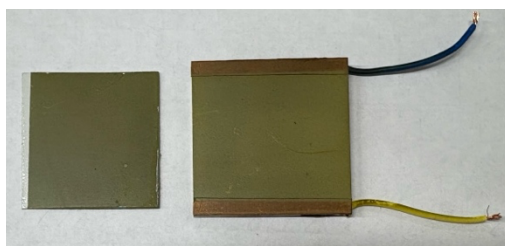


図1 導電性ポリマTSPを塗装した試験片（左：温度較正実験用，右：加熱実験用）。

3. 結果と考察

表面粗さ測定器で計測した温度較正用試験片の膜厚は、 $5.5 \pm 2.7 \mu\text{m}$ であった。これは、従来のcntTSPの3層の合計よりも薄く、通常のTSPと同程度の膜厚である。次に、温度較正曲線を図2に示す。発光強度は 20°C での値で規格化した。15 - 25°C の室温付近では、良好な線形性を示し、 20°C での温度感度は $-2.9\%/K$ であった。この温度感度は、Ru-phenとポリアクリル酸を用いた従来のTSP[4]と同程度である。

次に、図3に加熱実験における温度分布を示す。加熱開始から(a) 6 - 7 s, (b) 12 - 13 s, (c) 18 - 19 sにおける平均温度分布である。なお、電極間で測定した試験片の電気抵抗は 70.5Ω であった。図3より、時間の経過とともに温度が上昇していく様子わかる。また、下側の電極付近には、局所的に温度上昇が大きい点が見られた。これは、銅テープとPEDOT:PSS塗膜との接触不良によって生じたと考えられ、電極と塗膜との接続について改良が必要である。

4. 結論

導電性ポリマを用いたTSPを開発し、風洞実験に向けた適用可能性を評価した。まず、作製した塗膜の膜厚は、cntTSPと比べて薄く、塗装による模型形状変更の抑制や時間応答性の向上が期待できる。また、温度較正曲線からは、風洞実験で用いられてきた従来のTSPと同程度の温度感度を有することがわかった。加熱試験からは、電圧の印加によって模型表面温度が上昇することが確かめられ、ヒータとしての機能を有することが検証された。講演では、開発した導電性ポリマTSPを用いた低速風洞実験での流れ場可視化の結果も議論する。

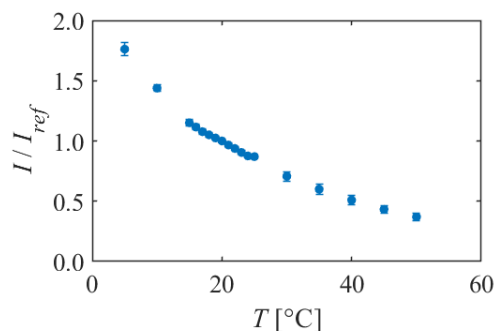


図2 温度較正曲線。

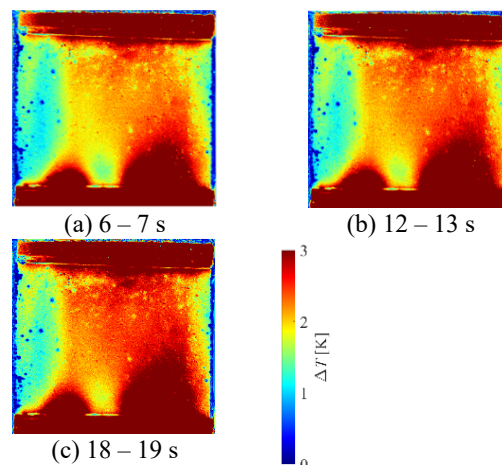


図3 加熱実験中の温度分布。上下に電極。

謝辞

本実験で使用したTSP較正装置は、東北大学流体科学研究所先進流体実験研究センター低乱風洞施設の共用設備である。また、本研究はJSPS科研費JP24K17201の助成を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] Klein, C., Henne, U., Sachs, W., Beifuss, U., Ondrus, V., Bruse, M., Lesjak, R. and Löhr, M. "Application of Nano-Tubes for the Detection of Boundary Layer Transition," AIAA SciTech Forum, MD, USA, 2014.
- [2] Ikami, T., Konishi, Y. and Nagai, H. "Evaluation of the Frequency Characteristics of cntTSP Measurement for Unsteady Low-Speed Flow," *Measurement Science and Technology*, 34, 065301, 2023.
- [3] Nagai, H., Ohmi, S. and Asai, K. "Effect of Temperature-Sensitive-Paint Thickness on Global Heat Transfer Measurement in Hypersonic Flow," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 22, 3, 2008.
- [4] Ikami, T., Fujita, K. and Nagai, H. "Influence of Formulation on Characteristics of Ruthenium-Based Temperature-Sensitive Paints," *sensors*, 22, 901, 2022.