

# 加熱平板の強制対流熱伝達に及ぼすプラズマアクチュエータの影響

荒賀 浩一\* 城代 幸季\*\* 横田 健二\*\* 村田 圭治\*

## Effect of Plasma Actuator on Forced Convection Heat Transfer of Heated Flat Plate

Koichi ARAGA, Koki JODAI, Kenji YOKOTA and Keiji MURATA

As an example of effective energy utilization technology, there is a fluid control technique using the DBD plasma actuator (hereinafter referred to as PA). This study aims to develop a fundamental technology for promoting heat transfer using PA. In this paper, basic experimental results on the heat transfer characteristics of the heated flat plate with the PA placed in flow are reported. The results of the heat transfer experiments under forced convection are as follows. The heat transfer coefficient under PA activation is improved by about 27% as compared with no activation. Therefore, experimental results under forced convection show that the heat transfer enhancement effect by PA is obtained.

*Keyword: Plasma actuator, Fluid control, Heat transfer enhancement, Flow visualization*

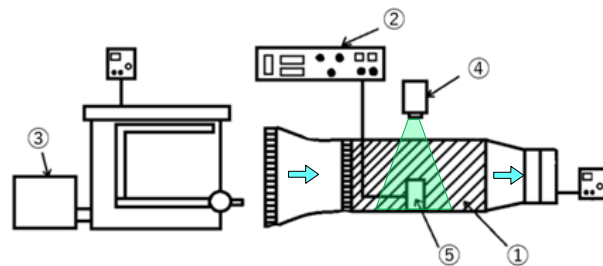
### 1. 緒言

各種流れの制御について省エネルギーの観点から様々な研究が行われている。その一つに誘電体バリア放電(DBD: Dielectric Barrier Discharge)を利用するプラズマアクチュエータ(以下、単に PA と表記)による流体の能動的制御技術がある<sup>(1)</sup>。この PA は単純な構造であり三次元曲面といった複雑な面にも設置できることから、従来の能動的制御装置では難しかった壁面近傍のみに選択的に運動量を付与することができる。これによって、より少ないエネルギーで物体表面等の剥離抑制や表面摩擦抵抗の低減ができるのではないかと、流体力学の分野では活発に研究が行われている。また、PA による境界層制御技術は可動部等が無いことから従来の機械的なデバイスを用いた能動的制御装置に比べて耐久面で優れているとされる。一方、壁面近傍の流体に選択的に運動エネルギーを付与することができる PA は、伝熱分野に関してもポジティブな効果があると考えられる。しかしながら、PA を用いた伝熱制御の研究報告はほとんど認められないものの、その小型さからも CPU 等の小型高密度発熱装置の冷却デバイス等への PA の応用は十分に期待することができる。そこで、本研究では PA を用いた伝熱促進に関する基礎的技術の開発を行うことを最終的な目的とし、その基礎実験として流れの中に置かれた PA を有する加熱平板の流動伝熱特性を調べる実験を行うものとする。本論文では設計・試作した伝熱試験体を用いて、強制対流

下における伝熱実験を行った結果について報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

本実験で使用する実験装置の概略図を図 1 に示す。装置は大きく分けて小型可視化風洞装置および伝熱試験装置から構成されており、吸い込み型可視化風洞①の中央部に伝熱試験装置⑤が設置されている。伝熱試験装置については後述する。可視化風洞上流側には可視化用スモーク発生装置③が設置されており、可視化風洞上面には可視化用グリーンレーザーシート光源④が設置されている。また、可視化撮影には市販の高速度撮影可能なデジタルカメラを用いた。ここで、伝熱試験装置の概略図を図 2 に示す。伝熱試験体は 70×70×30mm のアクリル製ブロックで、150×150×300mm の可視化部風洞中央部に設置した。この試験体は切削加工したアクリルブロックの上面にシリコンラバーヒータ③および熱流束センサ④を埋め込み、最上部に銅板(伝熱面)②を設置した。シリコンラバーヒータへの印可電圧



① Wind tunnel, ② High voltage power supply for PA, ③ Smoke generator for visualization, ④ Laser Sheet Light source, ⑤ Heat transfer surface & PA

\*近畿大学工業高等専門学校  
総合システム工学科 機械システムコース  
\*\*近畿大学工業高等専門学校専攻科  
生産システム工学専攻

Fig.1 Experimental apparatus

はスライドトランス⑥にて変化させた。また、銅板裏面にはシース熱電対を3本設置し、流れ方向に銅板の温度分布を測定するものとした。PAは、銅板の上流側のアクリル面上端部に設置されており①、電極(銅箔)および誘電体(カプトンテープ)から構成される<sup>(2)</sup>。PA用の電源装置には、PSI社製の高圧電源装置⑤(PG1040F)を用いた。

次に伝熱実験の手順について示す。まずスライドトランスを用いた電圧制御によって伝熱試験体内に設置されたシリコンラバーヒータを加熱し、銅板の伝熱面を加熱させる。シリコンラバーヒータの電圧は40V~80V(熱流束:450(W/m<sup>2</sup>)~2000(W/m<sup>2</sup>))とした。その後、銅板温度が一定になったのちに、PA用高圧電源によってPAを作動させた。PAの電源周波数は10.0kHzとし、印加電圧は2.2kV~3.0kV間で変化させた。データ計測は、銅板に加わる熱流束、銅板の表面温度、空気温度を測定し、得られた結果よりそれぞれの条件における熱伝達率を算出した。

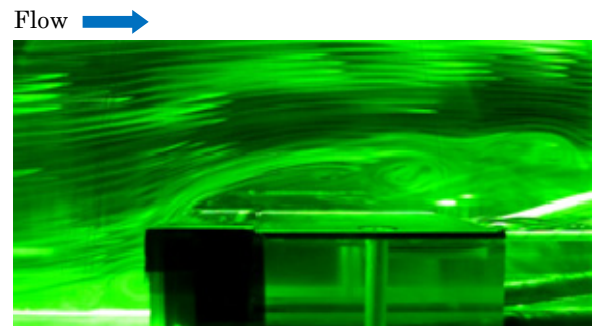
可視化実験は、可視化光源に0.5Wグリーンレーザーシート光を用い、市販の高速度撮影可能なデジタルカメラを用いて可視化撮影を行った。

### 3. 結果および考察

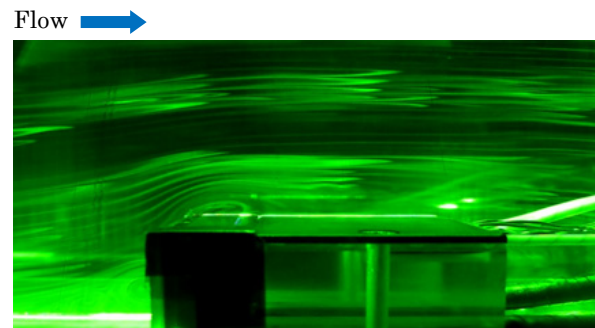
可視化風洞を用いて剥離を伴う流れ場におけるPA付き伝熱試験体周りの流れの様子を可視化撮影した。結果の一例について、PA非作動時における伝熱試験体周りの流れ場を図3(a)に、PA作動時の流れ場を図3(b)に示す。風洞内の平均流速は0.35m/s、PAの印可電圧は3.0kVとした。いずれの図も右側から左側へと流れている。図よりPA非作動時には伝熱試験体の先端部に当たった流れは剥離し、その後、大きな渦が連続的に形成されており、また、壁面近傍において流れの再循環領域が形成されている様子がわかる。一方、PA作動時は、図に示すようにPAの効果によって伝熱試験体先端部で剥離した流れが壁面にPA後方で再付着し、伝熱試験体後方の乱れが軽減されていることがわかる。したがって、この可視化実験の結果より、PAの作動によって壁面近傍の流体へ運動エネルギーが選択的に付

与されている様子がわかり、また、このようなPAの作動状態で伝熱実験を行えば、伝熱面の熱伝達特性が大幅に向上すると考えることができる。

次に、図3のような剥離を伴う流れ場において、加熱平板の強制対流熱伝達率を測定する実験を行った。得られた実験結果の一例として、PA印加電圧3.0kVの場合の平均熱伝達率の変化を図4に示す。なお、熱伝達率算出の際の銅板温度として銅板加熱後およびPA作動後、時間が十分経った後の一定値をデータ評価に用いた。空気温度は各実験時における室温とした。図の横軸は銅板加熱時の熱流束 $q$ を、縦軸は空気と銅板との温度差より算出した熱伝達率 $h$ を表す。また、青色のプロットはPA非作動時の平均熱伝達率を、赤色のプロットはPA作動時の平均熱伝達率を示している。図4より、強制対流下の熱伝達率はPA非作動



(a) No PA activation



(a) Under PA activation

Fig.3 Flow visualization around heat transfer surface

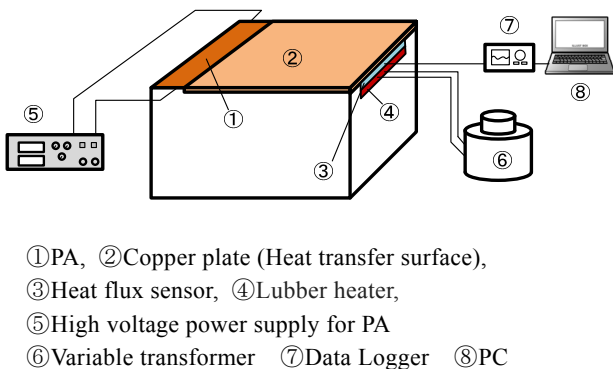


Fig.2 Heat transfer experimental apparatus & PA

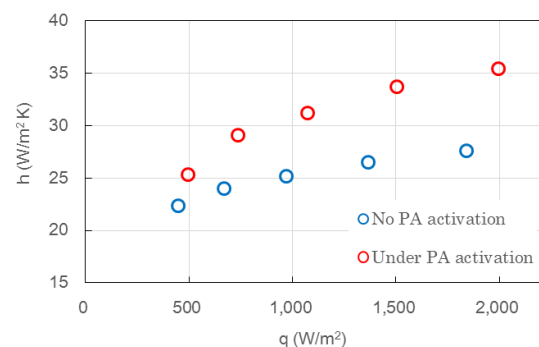


Fig.4 Heat transfer coefficient

時において、 $22.4\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ から  $27.7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ まで熱流束とともに増加していることがわかる。それに対して、PA 作動時は PA 非作動時よりも熱伝達率が高くなっており、熱流束とともに平均熱伝達率が  $25.6\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ から  $35.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ まで増加しているのがわかる。また、得られた結果より PA 作動に伴う平均熱伝達率の増加率、すなわち、PA による伝熱促進率を算出すると、例えば、熱流束が  $1850\text{W}/\text{m}^2$ の場合、およそ 27%となっていることがわかる。すなわち、PA によって伝熱促進効果が得られていることがわかる。

今後は伝熱試験体周りの流れ場を PIV 解析し、PA の流れ場に及ぼす影響を定量的に調べるとともに、PA の形状や作動条件等を変更して伝熱促進効果を向上させる方法について検討を行う予定である。

#### 4. まとめ

プラズマアクチュエータによる伝熱促進技術について、加熱平板の先端部に PA を有する伝熱試験体を試作し、剥離を伴う流れ場においてその加熱平板の強制対流熱伝達率を調べる実験を行った。得られた結果、以下のことが分かった。

(1) PA の作動によって、伝熱試験体先端部において剥離した流れが伝熱面上に再付着することを可視化実験によって確認した。すなわち PA による剥離抑制効果を確認した。

(2) 加熱平板の強制対流熱伝達率を測定した結果、PA に伝熱促進効果があることを確認した。例えば、熱流束  $1850\text{W}/\text{m}^2$ の時に、PA 非作動時に比べておよそ 27%の伝熱促進効果が得られた。

#### 参考文献

(1): 野々村拓, はじめに, 小特集プラズマアクチュエータの動向, プラズマ・核融合学会, Vol.91, No.10(2015), pp. 648-649.

(2): 西田浩之, DBD プラズマアクチュエータの作動原理と基本特性, 小特集プラズマアクチュエータの動向, プラズマ・核融合学会, Vol.91, No.10 (2015), p. 651.