

サーモグラフィを用いた静電冷却場の可視化

坂口 勝次*
井戸 優**††

石岡 泰和**†
南山 龍緒*

Visualization of Electrostatic Cooling Field by Thermography

Katsuji SAKAGUCHI *
Suguru IDO **††

Yasukazu ISHIOKA **†
Tatsuo MINAMIYAMA *

ABSTRACT

The experimental study on the electrostatic cooling was carried out by using a thermography. The DC corona discharge was occurred between a needle and a flat plate electrode under the applied negative high voltage ranged from -7 to -50 kV and the needle-plate gap varied from 15 to 50 mm. The temperature field of the plate electrode was measured by a infrared scanner and the surface temperature distributions of the plate electrode were evaluated and visualized by a thermography system. The local heat transfer coefficients near the stagnation point were enhanced with increasing the applied voltage against the natural convective heat transfer field, while were decreased under the considerably higher voltage.

キーワード：サーモグラフィ，静電冷却，可視化，熱伝達

Keywords : Thermography, Electrostatic Cooling, Visualization, Heat Transfer

1. 緒 言

エネルギーの有効利用の立場から、エネルギー機器の高効率化、省力化および小型化のため、伝熱促進技術、伝熱抑制技術、およびこれらの制御性を含む伝熱制御技術の開発が進展している。

伝熱制御法の中でも、対流熱伝達の制御については、熱抵抗層すなわち温度境界層を何らかの方法で操作する必要があり、その方法は外部からのエネルギーを必要としない受動的(passive)方法、外部エネルギーを必要とする能動的(active)方法および両者を組み合わせた複合的(combined)方法に分けられる。

電場を利用した方法は能動的伝熱制御法のひとつであり、その特長は、消費動力が極めて小さい、装置が簡単、狭い空間や複雑流路などに使用が可能、

局所的効果をもたらすことなどがある。

気体中の電場を利用した伝熱促進法は、コロナ放電を利用し、電気流体力学(Electro-Hydro-Dynamics : EHD)的流れの発生であるイオン風によって物体表面の伝熱性能を向上させる方法が提案されており[1-9]、物体の冷却への応用を目的とした静電冷却法が研究されている[10-12]。

このような放電を伴う空間は、電磁波が強度に発生する環境であり、その特殊環境における熱および物質の移動現象を実験的に解明することは、工学的にも非常に有益である。

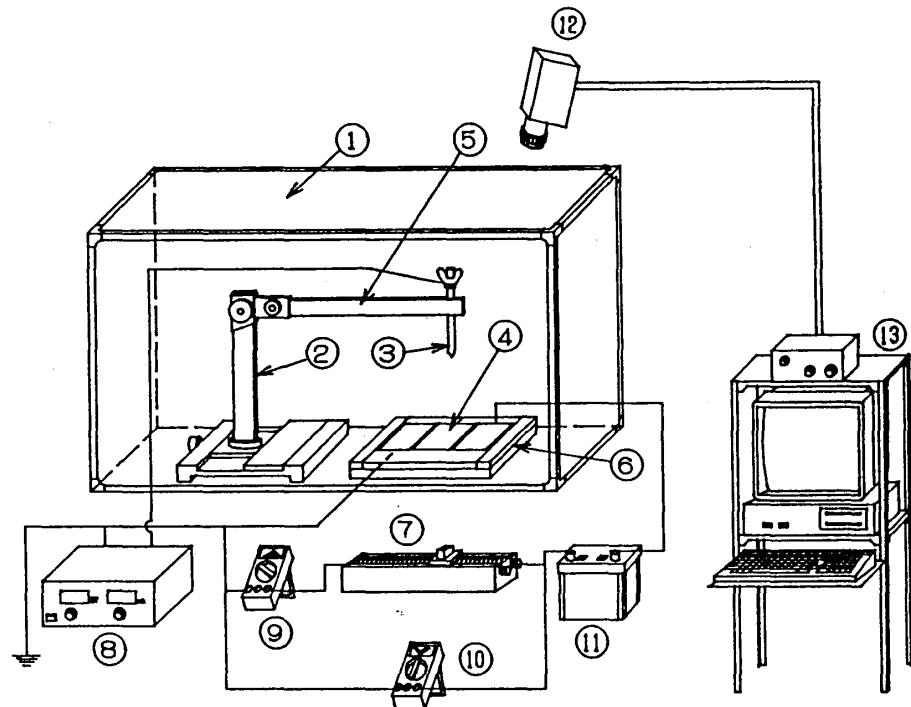
本研究では、静電冷却場における赤外線スキャナを用いたサーモグラフィによる物体表面温度分布の可視化を行い、その熱画像より静電冷却時の物体表面における熱伝達率の算出も試みた。

*機械工学科

**大学院機械工学専攻

†現在 株アイメックス

††現在 株三造試験センター



① Electromagnetic shield case ② Traverse table ③ Needle electrode ④ Plate electrode
 ⑤ Support beam ⑥ Traverse table ⑦ Variable resistor ⑧ DC high voltage power supply
 ⑨ Digital ammeter ⑩ Digital voltmeter ⑪ Battery ⑫ Infrared scanner ⑬ Thermography system

Fig.1 Experimental apparatus

2. 実験装置および方法

2. 1 実験装置

本研究で用いた実験装置の概略図を Fig.1 に示す。平板電極④の中心に垂直な方向に微動装置②によって移動可能な 1 本の黄銅製の針状電極③を配置し、直流高電圧電源⑧（最大電圧 - 60 kV, 最大電流 2 mA）を用いてこの針状 - 平板電極間に高電圧を印加することによって、負コロナ放電を発生させた。ここで、針状電極③の形状は、直径 8 mm, 長さ 120 mm, 先端の頂角は 60° である。

平板電極④は、一辺 300 mm の正方形、厚さ 15 mm のベークライト板に、幅 100 mm, 厚さ 10 μm のニクロム箔を 3 枚貼り付けて直列に接続し、一端を接地した。

静電冷却場における平板電極表面温度分布をサーモグラフィによって可視化するため、ニクロム箔の表面にはほぼ黒体と考えられる黒色塗料を均一に噴霧塗布し、図のような回路を組んだ後、バッテリー⑪を電源としてニクロム箔を通電加熱し、その表面温度を赤外線スキャナ⑫および熱画像システム⑬（AGEMA Infrared Systems 社製 Thermovision 870）によって測定した。ここで、この熱画像システムの仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of thermography system

Infrared detector	SPRITE
Spectral response	2 ~ 5 μm
Measurement range	- 20 ~ 500 °C
Field frequency	25 Hz
Line frequency	2500 Hz
Lines per frame	280 (interlace 4:1)
Resolution	100 elements/line
Sensitivity (NETD)	0.1 °C at 30 °C object temperature
Accuracy	± 2 % or ± 2 °C

平板電極の中心を撮像できるように赤外線スキャナを被写界深度内に収まるようにやや斜め上方に設置した。

ニクロム箔の発熱量は、可変抵抗器⑦を用いて調節し、ニクロム箔に流れる電流および電圧をデジタルマルチメータ⑨および⑩で測定することによって求めた。

ここで、平板電極表面以外の方向への熱の損失を抑えるため、Fig.2 に示すように、平板電極の周囲および裏面を発泡スチロールで断熱し、平板電極裏面には図に示すように配置した素線径 0.1 mm の T 型熱電対による温度測定結果から損失熱量を概算し、

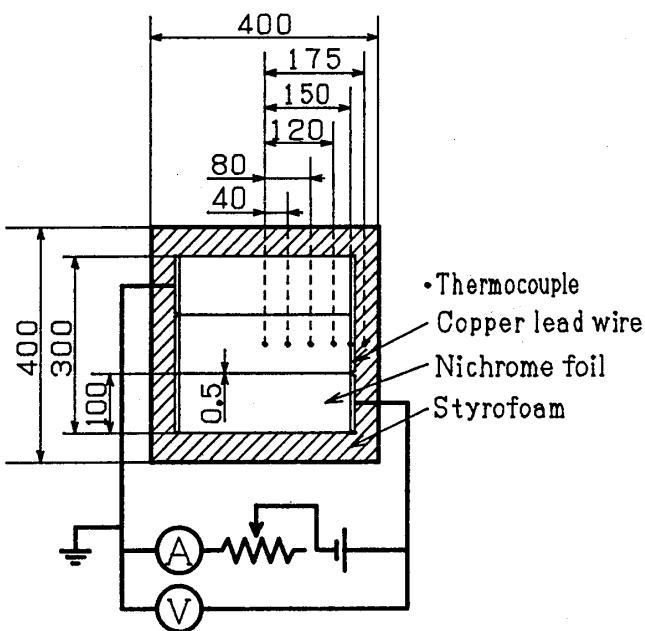


Fig.2 Tested plate electrode

平板電極表面における熱流束を補正した。また、電磁シールドケース①(縦 900 mm × 横 1000 mm × 奥行 800 mm)内の空気温度は、素線径 0.1 mm の T 型熱電対をケース内中心位置に設置して測定した。

したがって、平板電極表面における局所熱伝達率 : $h [W/(m^2 \cdot K)]$ は、次のように表される。

$$h = (q - q') / (T_w - T_o) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 q はニクロム箔の発熱量に基づく熱流束 [W/m^2]、 q' は補正熱流束 [W/m^2]、 T_w は平板電極表面温度 [$^\circ C$]、 T_o は電磁シールドケース内の空気温度 [$^\circ C$] である。

また、平板電極中心の裏面から素線径 0.1 mm の T 型熱電対を挿入し、ニクロム箔裏面にハンダ付けを施し、平板電極表面の中心温度を計測することによって、サーモグラフィによる表面温度計測値を常に校正した。

電磁シールドケースは、塩化ビニールシートに接地した黄銅製の金網を内張りしたもので、ケースの天井の一部に小窓を設けて赤外線スキャナのレンズを挿入し、レンズと小窓の隙間を塞ぎ、外部からの空気の流入および電磁波の外部への漏洩を抑制した。

また、温度計測における電磁波の影響を避けるため、赤外線スキャナと熱画像システム間のケーブルおよび使用したすべての熱電対には、電磁波シールドを施した。

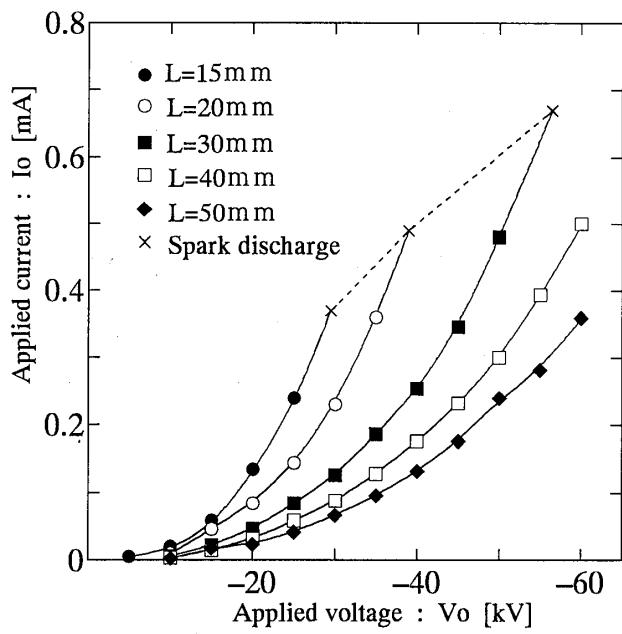


Fig.3 Applied current-voltage relationship

Table 2 Experimental condition

Gap L [mm]	Applied voltage V_o [kV]
15	-7, -10, -15, -20, -25
20	-8, -10, -15, -20, -25, -30
30	-10, -15, -20, -25, -30, -40, -50
40	-10, -15, -20, -25, -30, -40, -50
50	-10, -15, -20, -25, -30, -40, -50

2. 2 実験条件

実験に際して、各電極間隙におけるコロナ放電から火花放電へ移行する印加電圧を調べた。その結果を Fig.3 に示す。

この結果に基づいて、各電極間隙における実験条件を Table 2 に示すように設定した。

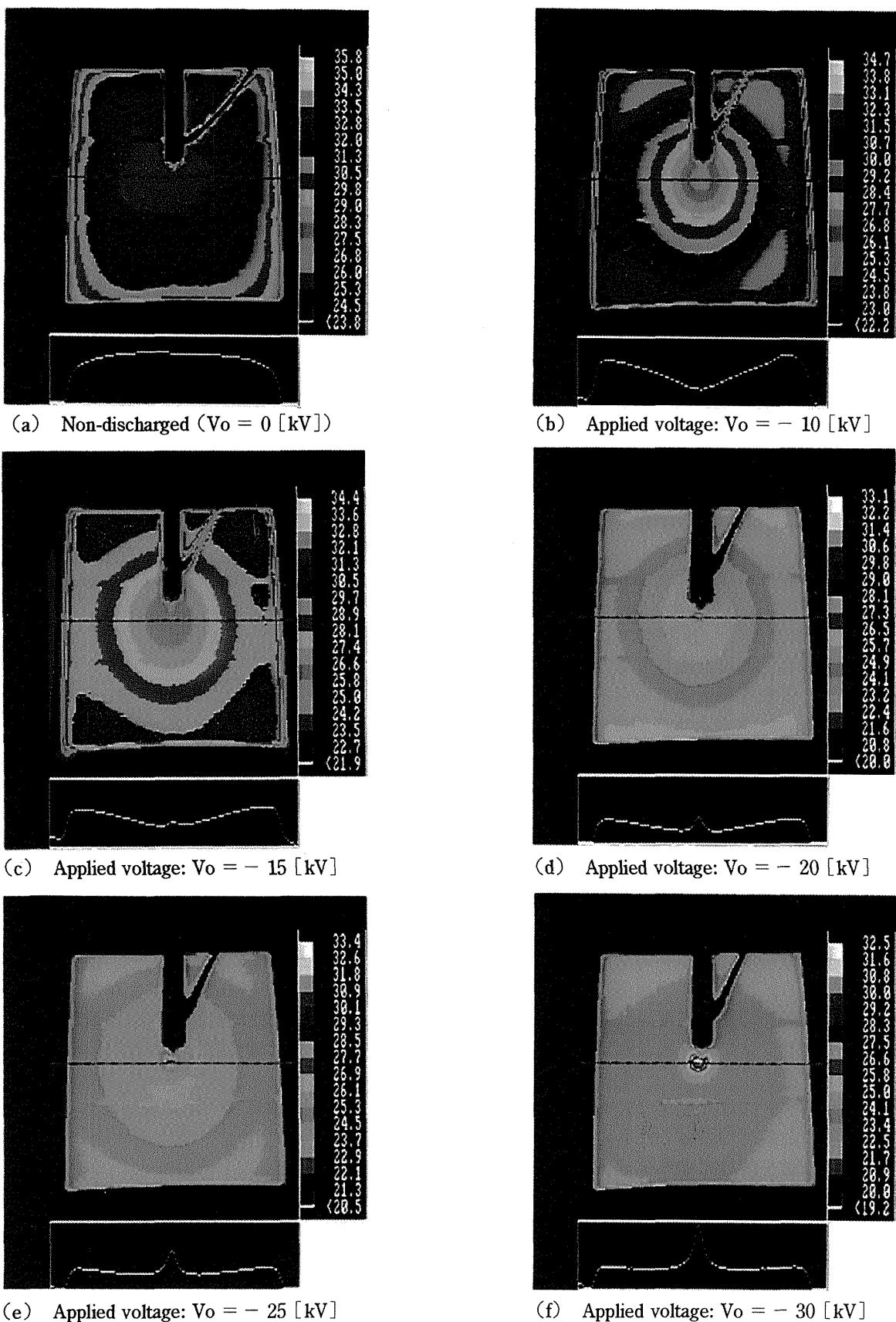
針状電極は、放電によって先端が経時的に鈍化するため、実験条件が変わるたびに新しいものと交換した。また、放電状態はその空間の湿度の影響を受けるため、電磁シールドケース内に除湿剤を設置して湿度を約 50 % ほぼ一定に保った。

3. 実験結果

3. 1 热画像

本実験装置である赤外線スキャナおよび熱画像システムを用いて平板電極表面温度分布を測定し解析した結果の一例を Fig.4 に示す。

熱画像中心上方および右上方にのびている黒い影は、針状電極を支持しているサポートおよび針状電極に接続しているケーブルである。

Fig.4 Thermal images (at needle-plate gap: $L = 20$ [mm])

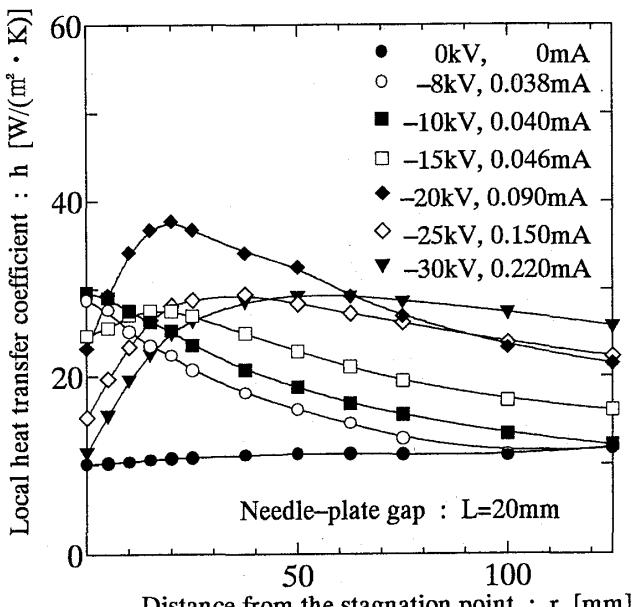


Fig.5 Distributions of local heat transfer coefficient

熱画像の水平方向に 2 本の温度落差を示すラインが現れているが、これはニクロム箔を貼付した際にできた箔の存在しない間隙にあたり、本実験では 0.5 mm 程度であるが、さらに間隙を小さくする必要がある。

熱画像の右側のカラーバンドには対応する温度 [°C] を表示しており、また、熱画像中央の水平ラインはそのラインにおける温度をスキャンしたものであり、その温度分布の結果を熱画像の下にグラフで表示した。

Fig.4(a)は、無放電条件における熱画像である。平板電極面上に貼付されたニクロム箔が均一に加熱されていることがわかる。加熱による平板電極表面の温度上昇によって、一般的に水平加熱平板上の自然対流の伝熱に現れるような、平板電極周りには温度勾配が現れ、平板電極中心付近の表面温度が最も高くなっている。

Fig.4(b)～(f)は、負コロナ放電を用いた静電冷却時の平板電極表面における熱画像である。まず、Fig.4(b)では、コロナ放電によって、針状電極直下、すなわち平板電極中心（以後、よどみ点と呼ぶ）が最も温度が下がり、よどみ点から離れるにしたがって、よどみ点を中心同心円上に温度が上昇している。これは、コロナ放電によって、針状電極を中心発生したイオン風が平板電極に軸対称噴流状に衝突するためである[2]。さらに、Fig.4(c)および(d)のように印加電圧の増加とともに、平板全体の温度が下がる傾向にあるが、よどみ点を中心に、温度が局所的に上昇はじめ、Fig.4(e)および(f)では、印

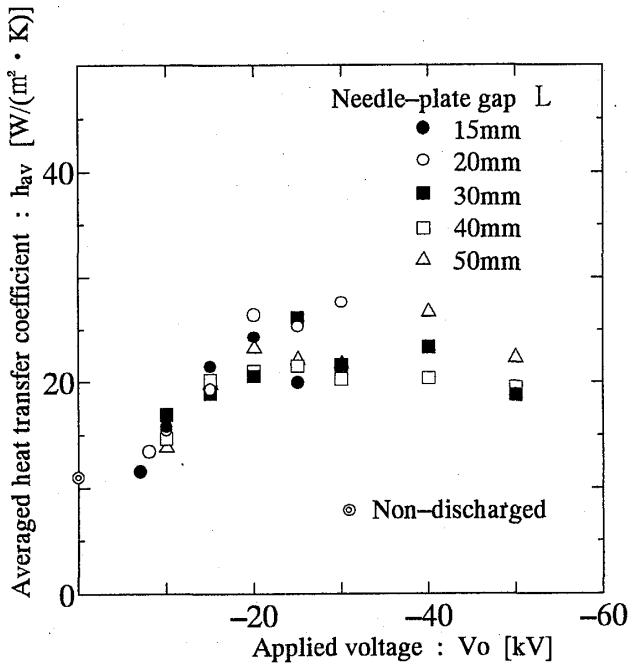


Fig.6 Averaged heat transfer coefficient

加電圧をさらに増加することによって、よどみ点を中心とした温度上昇が顕著になり、また、平板全体の温度も上がる傾向にある。

3. 2 热伝達率分布

Fig.4 のような熱画像から、平板電極面上の局所熱伝達率分布を算出した結果の一例を Fig.5 に示す。

低い印加電圧（電流）では、よどみ点における局所熱伝達率は最も高く、よどみ点から離れるにしたがい急激に減少し、また全体的には印加電圧（電流）の増加とともに熱伝達率が増加するという、これまで知られている熱伝達特性[2,8]を呈しており、空気による衝突噴流を用いた衝突平板面上の熱伝達特性と類似している。しかし、さらに、印加電圧（電流）を増加させると、よどみ点近傍における局所熱伝達率は逆に減少する傾向を示している。

また、測定領域において面積平均した平均熱伝達率： h_{av} は、次のように表される。

$$h_{av} = \frac{1}{A} \int \{h(r) \cdot A(r)\} dr \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 $h(r)$ はよどみ点からの距離 r における局所熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]、 $A(r)$ はよどみ点からの距離 r における幅 dr の円環部分の面積 [m^2]、 A は測定領域の全面積 [m^2] である。

各実験条件において得られた局所熱伝達率分布から、式(2)を数値積分にて求めた平均熱伝達率： h_{av} を Fig.6 に示す。

電極間隙にかかわらず、印加電圧： $V_0 = 20 \sim 30$ [kV]の範囲が、全体的には平均熱伝達率が最もよいことがわかる。これは、熱画像および局所熱伝達率分布の結果から、印加電圧を増加させると、よどみ点を中心とした温度上昇が見られるためである。

4. 結 言

針状-平板電極間に負コロナ放電を起こさせた静電冷却場において、サーモグラフィを用いた平板電極の表面温度分布の可視化を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) サーモグラフィを用いることによって、静電冷却場における物体の表面温度分布を非接触で計測できることが確認でき、特殊環境下における伝熱計測への応用が期待できる。
- (2) 印加電圧の増加に伴って平板電極の表面温度は全体的に下がるが、さらに印加電圧を増加させると、よどみ点を中心には、局所的に温度が上昇する傾向が見られ、静電冷却への応用には注意が必要である。
- (3) 印加電圧の増加に伴って局所熱伝達率は全体的に増加するが、さらに印加電圧を増加させると、よどみ点近傍における局所熱伝達率は逆に減少する傾向を示す。

参考文献

- [1] A. Yabe, Y. Mori, K. Hijikata : EHD Study of the Corona Wind between Wire and Plate Electrodes, *AIAA J.*, **16**, pp.340-345, (1978).
- [2] A.S. Mitchell, L.E. Williams : HEAT TRANSFER BY THE CORONA WIND IMPINGING ON A FLAT SURFACE, *J. Electrostatics*, **5**, PP.309-324, (1978).
- [3] 滝本 昭, 多田幸生, 山田和豊, 林 勇二郎 : コロナ放電を利用した対流伝熱の促進, 日本機械学会論文集(B編), **54**, pp.695-703, (1988).
- [4] 滝本 昭, 多田幸生, 山田和豊, 林 勇二郎 : コロナ放電を利用した対流伝熱の促進(第2報, 放電極の極性および配列の影響), 日本機械学会論文集(B編), **56**, pp.1119-1125, (1990).
- [5] 多田幸生, 滝本 昭, 植田大作, 林 勇二郎 : コロナ放電を利用した対流伝熱の促進(流れと平行なワイヤ電極配置に対する実験), 日本機械学会論文集(B編), **57**, pp.217-222, (1991).
- [6] 多田幸生, 滝本 昭, 植田大作, 林 勇二郎 : コロナ放電を利用した対流伝熱の促進(流れと平行なワイヤ電極配置に対する理論解析), 日本機械学会論文集(B編), **57**, pp.223-228, (1991).
- [7] 石黒 博, 永田真也, 矢部 彰, 成合英樹 : 電気流体力学的(EHD)効果を用いた壁面近傍の流れのかく乱による管内強制対流熱伝達の促進, 日本機械学会論文集(B編), **57**, pp.3896-3903, (1991).
- [8] B.L. Owsenok, J. Seyed-Yagoobi, R.H. Page : Experimental Investigation of Corona Wind Heat Transfer Enhancement With a Heated Horizontal Flat Plate, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **117**, pp.309-315, (1995).
- [9] 坂口勝次, 石岡泰和, 井戸 優, 南山龍緒 : 直流コロナ放電場における対流伝熱に関する実験的研究, 日本機械学会 第74期全国大会講演論文集(Ⅲ), №. 96-15; pp.369-370, (1996-9).
- [10] 貴志浩三, 江田 弘, 涌嶋康夫 : 静電冷却現象, 精密機械, **42**, pp.286-291, (1976).
- [11] 慈道守男, 福沢和慶 : 静電冷却の研究(第1報)-針状電極による電気風-, 機械技術研究所所報, **31**, pp.1-9, (1977).
- [12] 菊池健太郎, 谷口 博 : 静電冷却法に関する研究の現況(1)-イオン風の利用-, 機械の研究, **30**, pp.793-797, (1978).