EHD 効果を用いた微細発熱面からの伝熱促進*

土方邦夫^{*1}, 金子博一^{*2}, 小川邦康^{*2}

Microscale Heat Transfer Enhancement Utilizing EHD Effects

Kunio HIJIKATA, Hirokazu KANEKO and Kuniyasu OGAWA

The augmentation of direct heat removal from small-scale heating elements by an electrohydrodynamically (EHD)-induced flow was experimentally investigated. The shape of electrodes, polarity, electric field strength and electric conductivity of a working fluid were systematically changed to clarify the heat transfer mechanism. By applying electric field, the increase of the heat transfer coefficient of FC-72 (CFC) for a 25 mm² heating element was enhanced 1.8 times at maximum compared to those with no electric field. For a 0.25 mm² heating element, it remained at 1.2 times. However, the heat transfer coefficient for the 0.25 mm² heating element is about 15 times greater compared with that for 25 mm² due to the fin effect of the substrate. By using a mixture of R113 and ethanol, the heat transfer coefficient was increased about 10 times at maximum compared to those with no electric field, which was proportional to the power consumption.

Key Words: Heat Transfer Enhancement, Forced Convection, Microscale, Electro-hydrodynamics, Electric Field

1. 緒言

コンピュータに代表される電子機器のさらなる高性能化を目指して集積回路素子の超高集積化が進み、それに伴う発熱密度の増加に対応した効果的な冷却法の開発が急務となっている⁽¹⁾。しかし、このような微小かつ高発熱密度の領域に従来のような巨視的な強制対流を適用して発熱素子の温度上昇を抑えるという方法には限界があり⁽²⁾、ジャンクションの直接冷却など新しい冷却法の研究も必要である。そこで著者らは、このLSIジャンクションのような微細発熱源近傍のみを局所的に攪はんして、除熱するという観点に立ち、その伝熱特性を定量的に調べるために実験的研究を行った。局所的な攪はん法としては、絶縁媒体に電圧を印加することによって発生する対流現象(EHD対流)を用いた。EHD対流伝熱は流れを発生させるた

めに必要な装置が電極と高電圧発生装置のみで、印加電圧を変化させることにより伝熱性能を制御でき、さらに電極形状の工夫により複雑な形の発熱源においても局所的な冷却が可能であるという利点がある⁽³⁾。

矢部ら⁽⁴⁾はリング型電極と平板電極を対抗配置することによって、平板電極の反対方向に吹き出すEHD液体ジェット現象を見出し、冷媒としてR113とC₂H₅OHの混合液を用いた場合に約100倍の伝熱促進効果があったと報告している。その内容からは流れの発生にリング型電極が不可欠であるように推測されるが、明確な結論が得られている訳ではない。現在まで液体中でのEHD現象の発生機構が完全には明らかになっていない⁽⁵⁾ことから、電極形状を変化させ、対流発生機構を解明することも有意義と考えられる。そこで本研究では微細発熱面からの伝熱特性を明らかにすると共に、リング型電極での伝熱特性と鈍頭状のワイヤー電極を用いた場合とを比較することにより電極形状がEHD対流の生成領域に与える影響を調べた。

本研究では、ガラス基板上に蒸着された5×5、2×2、0.5×0.5mmの3種類の金属薄膜を通電加熱して微細発熱面とし、電極形状のほかに電極の極

* 平成5年5月28日 第30回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成5年9月20日.

^{*1} 正員, 東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1).

^{*2} 東京工業大学大学院.

性、電界の強さおよび冷媒の電気伝導率が EHD 対流による伝熱促進効果に及ぼす影響を調べた。

また、この EHD 現象による対流発生機構は、作動流体が気体の場合には電荷移動によるコロナ風として解明されているが、液体の場合にはまだ十分に明らかにされておらず、ここでは本研究で得られた結果から考察される EHD 対流発生機構についても言及する。

主な記号

- C_E : エタノール濃度 wt %
 D : 電極間距離 mm
 E : 電界強さ $(= \Phi/D)$ kV/mm
 Gr_L : グラフホフ数
 h_m : 平均熱伝達率 kW/m²K
 I : 電流 μ A
 L : 発熱面の一辺の長さ mm
 Pr : プラントル数
 q_m : 平均熱流束 kW/m²
 R : 発熱面の電気抵抗値 Ω
 W : 消費電力 mW
 λ : 冷媒の熱伝導率 W/mK
 ϕ : 印加電圧 kV

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は微細発熱面、EHD 対流を発生させるための電極、電極間に高電界を印加するための高電圧発生装置および電流・電圧を計測するための測定器から構成されている。

微細発熱面は、厚さ 1 mm のガラス基板上に蒸着した金属薄膜でできており、通電によって加熱される。また、微細発熱面は電気的に接地されている。本研究

では、EHD 対流による伝熱促進効果が微細発熱面の場合に及ぼす影響を調べるために、発熱面寸法 L として主に 5×5 、 2×2 、 0.5×0.5 mm の 3 種類を用いた。

発熱面の平均温度は電気抵抗値の温度依存性を用いて、予め校正された温度と抵抗値の関係から一義的に求められる。この関係は実験を行なった温度範囲でよい直線性を示し、容易に抵抗値から発熱面の平均温度を求めることができる。また、リード線は発熱面よりも膜を厚く蒸着して電気抵抗値を小さくしてあるが、基板上的温度分布によって生ずるリード線での抵抗値分布の影響のために、発熱面のみの電気抵抗値を正確に測定することは困難である。そこで、各発熱面について 2 組のリード線を設け、1 組のリード線は通電加熱用の電流を、もう 1 組は発熱面の両端の電圧を個々に測定することにより発熱面のみの電気抵抗値 R を正確に求めることができるように工夫されている。

電極は冷媒に満たされた容器内で微細発熱面と対抗した位置にあり、電極を移動させることによって電極間距離 D を任意に調節できる。また、電極には正または負の高電圧が印加される。本研究では、電極形状、すなわち電位分布が伝熱促進に与える影響を明らかにするためにリング型（外形 3 mm、内径 2 mm）とワイヤー型（線径 0.5 mm、先端部は鈍頭状）の 2 種類の銅電極を用いた。ワイヤー型電極はその先端部に生ずる高電界領域の効果を、リング型電極はジェット流発生効果を明らかにする目的で使用した。

冷媒としては電気的に安定であり、低電気伝導率の FC-72 と、エタノール濃度によって電気伝導率を調節できる R113 と C_2H_5OH の混合液の 2 種類を用いた。

図 1 実験装置

EHD対流による除熱促進の様子を捉えるため、定常状態において発熱面の抵抗値変化から求められる発熱面の平均温度計測と、赤外線放射温度計を用いた発熱面の温度分布測定を行なった。赤外線放射温度計の場合、冷媒を通して発熱面を観測することは困難なため基板を通して背面から発熱面を観察した。

3. 実験結果および考察

実験結果は全て以下のような手順で求められる平均熱伝達率 h_m を用いて整理した。例として、図2に発熱面寸法 $L = 5 \text{ mm}$ における発熱面の電気抵抗値 R と、通電加熱量を発熱面面積 L^2 で除した平均熱流束 q_m の関係を示す。これから平均熱流束と抵抗値の関係は電極への印加電圧 ϕ によらずほぼ直線的であることが分かる。この傾向は電極形状、発熱面寸法、冷媒によらず、また自然対流の効果が顕著と思われる実験条件下でも変わらなかった。このような直線性を示す主因は後述するように微細発熱面の伝熱では基板内の熱伝導効果が支配的であることによるとと思われる。そこで、最小二乗法を用いて求められる勾配から平均熱伝達率 h_m を求めた。

冷媒としてFC-72と、R113とC₂H₅OHの混合液の2種類を用いたが、傾向が大きく異なるため先にFC-72の場合を、後で混合液の場合と両者の比較を示し、さらに、これらの結果から考察されるEHD現象による対流発生機構について考察する。また、断らない限り電極間距離 D は 0.3 mm での結果である。

3.1 FC-72 図3は電極に高電圧を印加しない場合、すなわちEHD対流を発生させていない時の発熱面寸法 L と平均熱伝達率 h_m の関係で、発熱面が上向き、下向きの場合の両方の測定結果を示してある。また、図中の破線はFishendenら⁽⁶⁾によって示された大寸法全面加熱水平平板の実験式において、代表長さを発熱面寸法 L としたときに求められる値である。実験式を以下に示す。

発熱面が下向きの場合

$$h_m = \frac{0.27 \lambda (Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}}}{L} \quad (3 \times 10^5 < Gr_L Pr < 3 \times 10^{10}) \quad (1)$$

発熱面が上向きの場合

$$h_m = \frac{0.54 \lambda (Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}}}{L} \quad (10^5 < Gr_L Pr < 2 \times 10^7) \quad (2)$$

図2 発熱面の電気抵抗値と平均熱流束

図3 電圧非印加時の発熱面寸法と平均熱伝達率

ただし、発熱面寸法 L が 2 mm 以下の場合については実験式の適用範囲よりも小さな $Gr Pr$ 値であったが、参考のために図示した。

実線で示した本実験値は従来の大寸法全面加熱水平平板の実験式とは全く異なった傾向を示すが、発熱面寸法の増加に従って、それらに接近していくように見える。発熱面寸法が大きい場合には、浮力による対流の影響が顕著に現れるため式(1)および(2)と同様に上向き面の熱伝達率は下向き面のそれより大きく、約1.6倍の差を生ずるが、発熱面寸法が小さくなるにつれて両者共に急激に増加し、その差はなくなる。この実験結果は、従来の実験式と傾向が異なり、微細発熱面からの伝熱現象では、発熱面寸法の減少と共に対流の影響が減少し、伝熱機構が対流支配から基板内の熱伝導支配に移行することを示している。発熱面寸法が小さくなるにしたがい、平均熱伝達率が飛躍

的に増大するのは（例えば、発熱面寸法が5 mmから0.5 mmに減少すると平均熱伝達率は約1.5倍にも増加する）、破線で示される従来の実験式との比較から発熱面が蒸着されているガラス基板のフィン効果によるものと考えられる。それゆえ発熱面寸法が基板に比べて小さい場合には、基板材質としてガラスよりも熱伝導率の大きい単結晶Siなどを用いることにより、さらに平均熱伝達率を大きくすることも可能である。

このような基板の熱伝導支配下でのEHD対流による伝熱促進効果を明らかにするために電極への印加電圧 ϕ と無次元平均熱伝達率の関係を発熱面寸法 L をパラメータとして図4に示す。(a)は発熱面が下向きの場合、(b)は発熱面が上向きの場合であり、共にリング型電極を用いている。なお、熱伝達の促進効果を電圧を印加しない場合($\phi=0$)の値 h_{m0} で無次元化することにより示してある。また、実験を行なった印加電圧の範囲内では両者共に電極間を流れる電流は検出できない程微弱であった。発熱面寸法 L が5 mmのときの実験値を比較すると、上向きの場合は自然対流による除熱効果の影響が現れ、EHD対流による伝熱促進効果は約1.2倍と小さいが、下向きの場合にはこのEHD対流効果がより顕著に現れるために、約1.8倍に達している。また、上向き、下向き共に発熱面寸法が小さくなるに従って対流伝熱の効果が弱くなり、フィン効果による基板内の熱伝導支配となるためEHD対流による伝熱促進効果は小さくなり、 $L=0.1$ mmでのそれはたかだか10%である。

一方、電極形状が平均熱伝達率に与える影響を明らかにするためにEHD対流効果がより顕著に現れる下向き発熱面の場合での電極形状と平均熱伝達率 h_m の関係を図5に示す。(a)は発熱面寸法 $L=5$ mm、(b)は0.5 mmの場合である。 $L=5$ mmの場合では、リング型がワイヤー型に比べて除熱効果が大きく、一方、0.5 mmの場合には両者はほぼ等しくなっている。小寸法発熱面の場合には伝熱促進効果が電極形状によらず、寸法が大きくなるにつれてリング型の方が促進効果が大きくなることから電極形状は対流の生じる領域に大きな影響を及ぼすが、生じる流れの強さにはそれほど大きな影響を及ぼさないことが分かる。このことは、図6に示す赤外線放射温度計で測定した発熱面の温度分布からも理解される。図6の色調の相違により示された温度分布を見ると、リング型電極が発熱面の全体を除熱しているのに対し、ワイヤー型では発熱面中心付近のみが冷却されている。従って、 $L=5$ mmの発熱面をワイヤー型で冷却した場合、冷

(a) 発熱面が下向きの場合

(b) 発熱面が上向きの場合

図4 印加電圧と伝熱促進率

(a) $L=5$ mmの場合 (b) $L=0.5$ mmの場合

図5 電極形状と平均熱伝達率

図6 $L = 5 \text{ mm}$ 時の発熱面温度分布

却領域がリング型に比べて狭いために、発熱面全領域で平均された伝熱促進効果はリング型に比べて小さくなるが、発熱面寸法が対流の生成領域とほぼ同程度となる $L = 0.5 \text{ mm}$ の場合にはその差は少なくなると考えられる。このことは、EHD対流により除熱をする場合、伝熱促進領域の大きさにより最適な電極形状および寸法があることを示唆している。

電極の極性が平均熱伝達率に及ぼす影響を明らかにするために、一例として発熱面寸法 $L = 5 \text{ mm}$ 、リング型電極の場合に電極の極性による平均熱伝達率 h_m の相違を印加電圧 ϕ に対して図7に示す。この結果のみならず、すべての実験条件下で電極の極性による相違は見られなかった。

一方、同一印加電圧に対しても電極間距離 D を変化させることにより大きな伝熱促進効果を与えることができることも考えられる。そこで、平均熱伝達率 h_m を電極間のみかけ上の電界 E (印加電圧 ϕ を電極間距離 D で除した値) に対して示したものが図8である。(a) はリング型、(b) はワイヤー型の場合である。両者共に、電極間距離 D が 0.1 mm の場合を除いて平均熱伝達率が電界にほぼ比例しており、FC-72の場合は、EHD現象によって生ずる対流の強さは電界によって定まると考えられる。電極間距離 D が非常に狭い 0.1 mm の場合のみ、平均熱伝達率の増加が低く押えられているが、これは発生した対流が加速はされるが、電極間距離が短すぎるために平衡に達する前に発熱面と衝突してしまうことによると考えられる。

3.2 R113と $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ の混合液 低電気伝導率 ($2.2 \times 10^{-11} \text{ [1/\Omega m]}$) のR113に高電気伝導率 ($1.35 \times 10^{-7} \text{ [1/\Omega m]}$) の $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ を数%混合させた液体は、エタノール濃度によって電気伝導率が

図7 電極の極性と平均熱伝達率

図8 電極間のみかけ上の電界と平均熱伝達率

大きく変化する。このような媒体中でのリング型電極の電流-電圧特性を図9に示す。ただし、発熱面寸法 $L = 5 \text{ mm}$ の場合である。実験を行なった印加電圧の範囲内において、電流 I はほぼ印加電圧 ϕ に比例し、その勾配 (電気伝導率) はエタノール濃度 C_E の増加と共に増加する。このときの印加電圧 ϕ に対する平均

図9 電流－電圧特性

図11 電極の極性と平均熱伝達率

図10 エタノール濃度と平均熱伝達率

図12 消費電力と平均熱伝達率

熱伝達率 h_m の変化の様子を図10に示す。図中の破線はFC-72の場合であり、電流がほとんど流れない純粋なR113の場合と等しい結果となる。エタノール濃度 C_E の増加にともない、平均熱伝達率は飛躍的に増加し、その増加率は、純粋なR113と比較して C_E が2.5%のときに最大約5倍に達し、電圧非印加時 ($\Phi = 0$) との比較では約10倍となる。電圧非印加時の平均熱伝達率がエタノール濃度に関係であることから、この伝熱促進効果は冷媒の熱物性値の変化による影響ではなく、エタノール濃度、すなわち電気伝導率の増加と共に増加するEHD対流によってもたらされていると考えられる。

この場合の電極の極性による影響を示したものが図11であり、エタノール濃度 C_E は3%である。この結果はリング電極の極性が負の時に、より高い伝熱促

進効果があることを示しているが、正の場合にも同オーダーの促進効果があることから、高電界領域の電極近傍では負イオンだけでなく、電極の極性によっては正イオンも生成されている可能性がある。この極性による伝熱特性の変化はFC-72の場合とは異なっており、この場合の伝熱促進現象はイオン流により誘起される流れによって生じていることを示している。したがって、イオンの移動度を一定と考えれば、伝熱促進に最も支配的な因子は消費電力であると考えられる。そこで、電極間に流れる電流の消費電力 W と平均熱伝達率 h_m の関係をリング電極が負の場合に示したものが図12である。この関係がほぼ直線的であるということは、平均熱伝達率が移動するイオン（電流）により誘起される流れによって決定されることを示唆している。

3. 3 EHD対流の発生機構の検討 図9に示したように混合液の電流-電圧特性はエタノール濃度に大きく影響され、純粋なR113やFC-72の場合には測定できないほどの微弱電流しか流れなかった。電流は荷電粒子密度、移動度および電界に比例することから、混合液での移動度がエタノール濃度によらずほぼ一定であると仮定すれば、電界が等しい時、混合液中のイオン密度は高く、逆に純粋なR113やFC-72の場合にはほとんど存在しないと考えられる。

また、図11に示したように混合液の場合には電極の極性により平均熱伝達率が変化するが、FC-72の場合には電流も検出できず、極性による平均熱伝達率の変化も見られない。このことから高電気伝導率の混合液の場合には、主にイオンの移動により対流が生成されたと考えられる。

また、低電気伝導率のFC-72や純R113の場合には、主に誘電率の変化を駆動力とする対流が生成されたと考えられる。この誘電率の変化は平板電極でもあり発熱面でもある微細発熱面近傍の冷媒の温度勾配によって生じていると考えられる。

4. 結 言

EHD対流により冷却される基板上の微細発熱面からの伝熱特性について実験的研究を行ない、以下の結論を得た。

(1) 発熱面寸法が小さくなるに従い、基板のフィン

効果により発熱面寸法 $L = 0.5 \text{ mm}$ 時の平均熱伝達率は $L = 5 \text{ mm}$ 時のそれに比べ、1.5倍程度増加する。

(2) FC-72の場合、電極間に電圧を印加しても電流は検出できず、伝熱促進効果は極性によらず発熱面寸法が大きい程大きい。また、この効果は主に電極間のみかけ上の電界により定まる。

(3) FC-72の場合、電極形状の相違により冷却される発熱面の領域の大きさが異なる。この伝熱促進効果は媒体中の誘電率の変化により生じる。

(4) R113と $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ の混合液の場合、EHD対流による伝熱促進効果は電気伝導率とともに増加し、FC-72のそれに比べて最大約5倍に達する。また、その促進効果はイオン流により誘起される対流によって生じ、消費電力にはほぼ比例する。

文 献

- (1) 中山, 機論, 52-476, B (1986), 1439
- (2) 長崎・ほか3名, 機論, 58-551, B (1992), 2234
- (3) Yabe, A., *ASME/JSME Thermal Engineering Proceedings*, 3 (1991), 16
- (4) Yabe, A. and Maki, H., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31-2, p.407 (1988)
- (5) 芳賀・ほか2名, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1993-5), 979
- (6) M. Fishenden and O. A. Saunders : *Introduction to Heat Transfer*, p.180 (1950), Clarendon Press.