壁近傍領域のみに電場を印加させる強制対流熱伝達促進と そのメカニズムに関する研究*

矢 部 彰^{*1}, 安 達 雅 樹^{*2}
片 山 隆^{*3}, 成 合 英 樹^{*4}

Augmentation Mechanism of Forced-Convection Heat Transfer by Applying Electric Fields in the Restricted Region near the Wall

Akira YABE, Masaki ADACHI,
Ryu KATAYAMA and Hideki NARIAI

By applying electric fields using the array of wire electrodes installed near the heat transfer wall along the main stream, in the range of low Reynolds number, the heat transfer coefficients of liquid were augmented to the same order as that in turbulent flow, and the pressure drop was increased but still remained on the same order as that in laminar flow. It was clarified that the ratio of Colburn's J factor to the friction factor for evaluating the performance became 4.4 times for $Re=1470$ and 1.9 times for $Re=20000$ with the electric field of 10 kV/cm. Furthermore, by analyzing the power spectrum of the flow velocity and electric current, the peak regions around 1 Hz were found to be increased by applying electric fields, which means the fluctuation of negative ion flow emitted from the cathode, as clarified by the voltage-current characteristics of the electrostatic probe in the higher-potential region.

Key Words: Electrohydrodynamic (EHD) Effect, Pressure Drop, Power Spectrum of Turbulence, Electrostatic Probe, Forced-Convection of Liquid

1. 結 論

省エネルギーを推進するため、熱交換器のコンパクト化、経済性の向上を目的に、さまざまな熱伝達促進法が研究されている。液体の強制対流熱伝達促進においては、熱サイクル機器に付随するオイルクーラのように圧力損失を低く抑える高性能熱交換技術の開発も重要である。そのための方法として著者らは、液体の強制対流熱伝達に対して、伝熱面近傍に流れに平行に電極を設置し、壁近傍領域のみに電場を印加することにより、伝熱面近傍のみに電気流体力学的(Electrohydrodynamical, 略してEHD的)に乱れを発生させ⁽¹⁾⁽²⁾、熱伝達を促進する方法を提案した⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。この方法により、熱伝達率は層流域で20倍以上、また乱流域でも数倍以上増加することを明らかにし、一方摩擦係数は数倍程度の増加に抑えられることを示した。

この結果、低レイノルズ数領域で熱伝達は乱流熱伝達に、圧力損失は層流のオーダーに抑えられるような伝

熱促進法を実現できる可能性を見いだした。また、この熱伝達促進法は、HFCやHCFC等の代替フロン(電気伝導度は $10^{-8} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 程度)にも適用可能であり、応用が期待されている。

本研究では、このEHD的な対流熱伝達促進現象を、広いレイノルズ数範囲で総合的に評価するとともに、この促進現象のメカニズムを解明することを目的に、以下の研究を行った。第1に層流域における1 Paのオーダー以下の圧力損失を測定し、熱伝達に対するコルバーンのJ因子と摩擦係数との比を用いて、熱伝達の促進について総合的な評価を下した。

第2に電場のある状態とない状態それぞれについて、流速と電流のパワースペクトラムを解析し、パワースペクトラムの観点から、電場の効果を検討した。

最後に、パワースペクトラムの変動のメカニズムを基本的に明らかにするために、代替フロンの一つである、HCFC-123の静止液体を用いて、静電プローブの電流・電圧特性を測定し、液体中の電位分布を求め、この現象に重要なイオンの種類が正イオンか負イオンか、またその量はどのくらいか、イオンによる電位分布への影響はどのくらいかという観点から検討し、この現象の発生メカニズムに対するモデルを提案した。

* 原稿受付 平成6年8月12日。

*¹ 正員, 工業技術院機械技術研究所 (〒305 つくば市並木1-2番)。

*² 准員, 筑波大学構造工学系 (〒305 つくば市天王台1-1-1) (現: 船舶技術研究所)。

*³ 准員, 筑波大学構造工学系 [現: 三菱重工業(株)]。

*⁴ 正員, 筑波大学構造工学系。

記 号

 D : 電極間距離 D_{probe} : 陰極と静電プローブとの距離 F : 摩擦係数 $= \Delta p \cdot 2D / (1/2 \cdot \rho U_m^2 \cdot L)$ f : パワースペクトラムの周波数 i : 電流 i_{probe} : プローブ周囲の流体からプローブへ流れる電流 J_h : 熱伝達に対するコルバンの J 因子
 $= Nu / Re \cdot Pr^{1/3}$ L : 圧力測定孔間距離

MAG: パワースペクトラムの振幅

 Re : レイノルズ数 U_m : 平均流速 V : 電圧 V_{probe} : プローブの電位 ρ : 液体の密度 Δp : 圧力損失

2. 実験装置

実験装置は、強制対流ループ装置と静電プローブ測定用装置の二つである。強制対流ループ装置は、熱媒体としてフロンソルブ AE (CFC-123, 96%とエタノール 4%の混合物) を用い、改良した圧力損失測定装置を装備している。静電プローブ測定用装置は、本来熱媒体に使われる代替フロンの一つである HCFC-123 を使用した、静止液体についての装置である。強制対流ループ装置の長方形のダクトの断面は、図 1 で示されているように長さは 1600 mm, 幅は 150 mm, 高

さは 20 mm である。加熱部は長さ 530 mm の部分で、長さの残りは非加熱部になっている。熱伝達率の測定は、上下面に接着した厚さ 30 μm , 幅 135 mm, 長さ 530 mm のステンレスはくを交流通電加熱し、面の裏側に接着した 98 本の C-A 熱電対により、熱流速一定条件で局所熱伝達率を測定した。上壁部・下壁部から 5 mm 離れた地点に、主流に平行に、また幅方向に 20 mm 間隔で計 14 本のステンレス製のワイヤ電極 (直径 0.3 mm, 長さ 662.5 mm) を張ってある。電極間隔を 5 mm にした理由は、電極間の流速分布等を精度よく測定するためであり、この促進現象を最適化するためには電極間隔も一つのパラメータとなる。また、ワイヤ電極のスパン方向間隔は、なるべく少ない本数で二次元場を実現するように決めるのが望ましいが、ここではワイヤ直下、ワイヤ間の中心における流速分布や熱伝達率の違いなどを測定できるように 20 mm とした。作動流体の流速範囲は、 $Re = 1470 \sim 20\,000$ に対応して、平均流速は 1.45~19.7 cm/s である。また、0.3 mm 直径のワイヤを挿入する影響としては、ワイ

図 1 強制対流ループ実験装置(電極配置断面図)

図 2 強制対流ループ実験装置概略図(LDV と圧力損失測定装置)

ヤおよびワイヤ保持部の影響が考えられるが、電場を付与しない場合の熱伝達率が従来の実験式である Dittus-Boelter の式にほぼ等しくなっていることから、大きな影響はないものと考えられる。今回の研究で改良した圧力損失測定装置は、逆 U 字形のマノメータであり、層流域においても 1 Pa 以下の精度で計測できるように改良した。上部に満たした液体は、炭酸カリウム水溶液で比重は 1.514 (20°C) とし、この濃度は下から持ち上がるフロンソルブ AE の比重 1.544 (20°C) との差をできるだけ小さくするようにセットし、気温の変動を考慮に入れて測定した。二相の液体の界面の高さはカセットメータで精度 0.01 mm で測定した。LDV (レーザドップラー流速計) と圧力損失測定装置の概要図は図 2 で示している。流速は Ar イオンレーザを用いた二次元 LDV で測定する。パワースペクトラムはアナライジングレコーダで求める。圧力損失は、レイノルズ数 1470~27 300 の区間で測定し、速度成分と電流のパワースペクトラムはレイノルズ数 1470 と 20 000 それぞれの場合について求めた。パワースペクトラムの測定ポイントは電極間距離の中間地点で壁から 2.5 mm の場所で、ワイヤ電極の真下である。なおこれより壁近傍では光学系の関係で測定できなかった。熱伝達率は文献(8)に示しているように流路幅方向にほぼ一定であり、流速分布や乱れ強さ分布も線電極の近傍を除いては、流路幅方向にあまり変化しないので、熱伝達促進現象の原因を探るため線電極の真下で線電極と伝熱面の中間の位置でのパワースペクトラムを測定した。

一方、静電プローブ装備の静止流体の装置に関しては、主流をなくし、静止状態から生じる液体の挙動を明らかにすることを目的とした。実験装置の概要図を

図 3 静電プローブ測定用実験装置概略図(主流なし)

図 3 で示すが、真ちゅう製の 100 mm 四方の平板電極と直径 0.3 mm のステンレス製のプローブからなっている。プローブは先端から 5 mm を露出し、残りをガラス管で被覆した後、塩化ビニル製の容器内部に取り付けてある。高電圧静電プローブはコロナ放電を伴う気体中の電位分布を測定するために著者らが考案したものと同じ仕様とした⁽⁹⁾。プローブの位置はカセットメータを用いて測定した。プローブの電圧電流特性はプローブ電流から高電圧ケーブルを流れるリーク電流を差し引いて測定した。また、電極間の流れを可視化するために、二次元凸レンズを用いて、厚さ 0.2 mm のレーザシートを作るとともに、導電ガラス製の平板電極も使用し、上側と側面から観察した。なお、流れの可視化時のみに、サブミクロンのモレキュラシーブ粒子を液体に混入した。

3. 圧力損失と熱伝達促進の総合評価

圧力損失と印加電圧の関係を図 4 に示す。層流域において、圧力損失は印加電圧 2~3 kV を境に増加傾向は変化している。これは層流から乱流への遷移を意味しているように思われる。

伝熱促進法を総合評価するために、相対的な評価の要素として、熱伝達率の増加と圧力損失の増加との比を採ることとした。使用した熱伝達率は伝熱面前縁から 220 mm、および 395 mm の位置での流路幅方向の平均値である。この比は、熱伝達に対するコルバーンの J 因子と摩擦係数との比、つまり $J_h/(F/8)$ として整理した。このデータを印加電圧に対してプロットした結果が図 5 である。実験において、 $Re=1470$ の場合は熱伝達率は 23 倍で圧力損失は 5.9 倍、よってそ

図 4 印加電圧と圧力損失

図5 EHD効果による強制対流熱伝達促進についての総合評価

の比である縦軸の値は、電圧零のときの0.42から電圧5kVのときの1.86倍まで4.4倍に増加した。また、 $Re=27\,300$ の場合においても電場を印加しないときに比べ、1.9倍に増加した。なお、図5中には示していないが、 $Re=20\,000$ の場合においても電場を印加しないときに比べて1.9倍に達した。以上のことから、低レイノルズ数領域においては、圧力損失の増加よりも熱伝達の増加のほうが著しいことから、ここで用いた比も増大することが明らかになった。これは、この伝熱促進法が特に層流域において有効であることを示している。

4. EHD場のパワースペクトラム

4.1 変動流速のパワースペクトラム 低レイノルズ数領域でのフレオンソルブAEの流動に関して、主流に平行な速度の変動成分について求めたパワースペクトラムを、 $Re=1\,470$ の場合について図6に示す。これから、電場をかけないときは、層流でのパワースペクトラムに相当するのに対して、5kVの印加電圧をかけると1~20Hzにかけての領域で振幅が増大している。これは、EHD効果により乱れが発生し、乱流のパワースペクトラムに変化したことを示している。

同じく主流に平行な速度成分について、 $Re=20\,000$ におけるパワースペクトラムが図7である。これは乱流領域でのパワースペクトラムにあたり、10~20Hzのコルモゴロフの慣性小領域において振幅が5/3乗の割合で減少している。電場の印加による熱伝達率の増加は $Re=20\,000$ においても生じており、5kVで約2

図6 フレオンソルブAE中の主流に平行な変動速度成分のパワースペクトラム ($Re=1\,470$)

図7 フレオンソルブAE中の主流に平行な変動速度成分のパワースペクトラム ($Re=20\,000$)

倍、8kVで約3倍に達する。この原因を明らかにするため、電場の有無により生じるパワースペクトラムの振幅の差について解析すると、1Hzもしくは数Hzの領域のみにおいて電場の印加によりパワースペクトラムが増大し、粘性の効果が主要になる10~20Hz以上の領域ではほとんど差がないことが明らかになった。この傾向は、 $Re=20\,000$ における主流に垂直な速度の変動成分のパワースペクトラムである図8にも現れている。図8の電場によるパワースペクトラムの変化を見ると、電場の強さを大きくするほど1Hz近傍の領域のみスペクトル強度が増加していることがわか

図 8 フレオンソルブ AE 中の主流に垂直な変動速度成分のパワースペクトラム ($Re=20\,000$)

図 9 変動電流成分のパワースペクトラム

る。この傾向は、流れに平行方向、流れと伝熱面に垂直方向ともに同様に生じ、また再現性も十分であった。

4・2 電流と電圧のパワースペクトラム 電場をかけた場合に、パワースペクトラムが 1 Hz 周辺で増加するメカニズムを明らかにするために、電流と電圧のパワースペクトラムも測定した。印加電圧 5 kV についての電流のパワースペクトラムが図 9 である。これによるとレイノルズ数への依存性はなく、電場をかけないときに比べ、1, 8 Hz とその高調波成分、50, 100 Hz とその高調波成分で 3 kHz 以下の幅広い領域で変動成分が増大した。このうち、50, 100 Hz とその高調波成分は直流電圧 100 Hz の交流から両波整流により作っているために生じているものと思われる。ま

図 10 HCFC-123 液体中の静電プローブの電圧電流特性 ($D=5\text{ mm}$)

た、これと変動流速についてのパワースペクトラムと比べると、電流のパワースペクトラムに現れる 8 Hz とその高調波成分は、変動流速のパワースペクトラムには現れておらず、1 Hz 周辺の周辺数成分の増加のみがこれらの中で一致している。したがって、電流のパワースペクトラムに現れる 1 Hz 近傍の変動が、流速変動を作り出すのに関連していると考えられる。電圧のパワースペクトラムに関しては、電流における特性と同じものが現れたものの、変動の大きさは印加電圧の 0.3% 程度であり、電圧における変動は速度の変動を作り出す要因としては小さすぎると考えられる。

5. 静電プローブ特性と電位分布

静電プローブの電圧・電流特性の二つの典型的な特性を、図 10 に示す。左側の特性曲線は、印加電圧 5 kV において陰極から 0.99 mm 離れた地点で測定したものである。この特性曲線から、電流零に相当する電圧 0.95 kV がこの地点における電位であり、この地点近傍には陽イオンと陰イオンが存在していることがわかる。一方、右側の特性曲線は同じ状況下で陰極から 2.63 mm 離れた地点で測定したものである。この曲線から、この地点における電位は 2.45 kV であり、またこれより低い電圧では電流が流れないことから、この地点近傍には陰イオンのみ存在していることが明らかとなった。このように陰イオンのみが存在すると考えられる領域は、印加電圧 5 kV では陰極からの距離が 2 mm 以上、3 kV では 3 kV 以上の領域である。印加電圧の増大に伴って陰イオンのみの存在する領域が拡大していることから、10 kV 程度の高電圧印加時には、

図 11 HCFC-123 液体中の電位分布 ($D=5$ mm)

電流を運ぶ陰イオンの挙動が重要になることがわかる。また、このような特性は高電界中の導電率の小さい液体では、陰極からの電子放出が陽極での陽イオンの発生より容易に生じ、陰イオンの流れが主要な電流成分となることを意味していると考えられる。

静電プローブの特性から得られた電位分布を図 11 に示す⁽¹⁰⁾。電位分布は高電界印加時ほど、直線状の平等電界に近い分布となっている。また、一様電場からの偏りが印加電圧 1 kV と 5 kV において逆向きとなり異なっている。これは高電圧印加時には、負の電荷のみが観測される領域が広がることから、陰イオンによる空間電荷効果が主要となること、また 1 kV 程度では陽イオンの移動度が電子を含む陰イオンの移動度より相対的に小さくなり、陽イオンの空間電荷効果がより大きく現れるものと考えられる。高電界印加時に陰イオンが主要な役割を果たす傾向はレーザーシート法からも裏付けられる。つまり、1 μm 直径程度のモレキュラシーブ粒子による可視化では、5 kV/cm 以上の電界強さの場合、陰極上に 1 cm 間隔程度で噴流の発生しているのが観察された。噴流は壁から数 mm の距離まで顕著に観測され、陽極側では観測されなかった。このことから、陰極から陰イオンが大量に発生して、それが中性粒子と運動量交換をして、流れを発生させていると思われる。また、高電界印加時に電位分布が平等電界の値とあまり変わらず、イオン電流の変動も大きくなかったことから、陰極から注入される電子により、陰極近傍での電位分布が大きく変化し、電子の注入割合が 1 Hz 程度で変動するという可能性は考えなくてよいと推測できる。

6. EHD 効果による乱流熱伝達促進現象のモデル

電界強度 10 kV/cm における陰イオンのドリフト速度は、陰イオンの液体中での移動度が 0.1 $\text{cm}^2/(\text{kV}\cdot\text{s})$ のオーダーであるので、1 cm/s のオーダーとなり、電極間隔 5 mm をイオンが横断するのに要する時間は、1 s のオーダーとなる。この間に陰極から放出された電子が陰イオンを形成し、電界からクーロン力を受けその運動量を中性粒子に与えつつ、10 cm/s のオーダーである中性粒子の流れと相互作用しながら、陽極まで移動する。1 s のオーダーで一つのイオンが電極間を移動することが 1 Hz のオーダーの乱れを生じさせることと関連しているものと予想される。よって、EHD 効果による乱流熱伝達促進現象のモデルとしては、電流の主要成分である陰極から放出された電子により形成される陰イオンが、クーロン力と中性粒子との相互作用両方の影響を受けつつ、電極間を移動するときに生じる中性粒子の流れの変動成分が、伝熱促進現象を生じさせていると考えられる。このメカニズムでは、電界強度を大きくすると通常の乱流より壁付近での乱れ強さが大きくなること、また壁付近では特に、垂直方向の速度変動が大きくなるような力が働いていることなどが予想され、これらの特徴が、この現象のように熱輸送と運動量輸送の増加の割合が異なる伝熱促進現象を生み出していると考えられる。今後、上記のモデルに基づき、これらの特徴を理論的・定量的に説明することが重要である。

7. 結 論

主流に沿って伝熱面近傍にワイヤ電極を張り、壁近傍領域のみに電場をかけることによる、液单相での強制対流熱伝達の促進現象について、圧力損失、変動流速のパワースペクトラム、静電プローブ特性ならびに電位分布を測定し、以下の結論を得た。

(1) 熱伝達率の増大と圧力損失の増加との比を熱伝達に対するコルバンの J 因子と摩擦係数との比、 $J_h/(F/8)$ でまとめ、この伝熱促進法を総合的に評価すると、電界を 10 kV/cm かけることにより、 $Re=1470$ では 4.4 倍、 $Re=20000$ では 1.9 倍に達した。このことから、この伝熱促進法が、低レイノルズ数の層流領域に対して特に有効であることが明らかになった。

(2) 液体での流速変動のパワースペクトラムの解析により、 $Re=20000$ において 1 Hz 近傍の領域の強度が電場の印加により増大することが明らかになっ

た。

(3) 静電プローブの電圧・電流特性を測定したところ、陰イオンのみが存在する領域があり、印加電圧の増加に伴いこの領域が拡大することが明らかになった。

(4) プローブ特性から得られた電位分布は、高電界印加時ほど一様電場での電位分布に近づいており、空間電荷の影響をあまり受けないことが明らかになった。

(5) EHD 効果による乱流伝熱促進現象のメカニズムとして、陰極から放出された電子により形成される陰イオンがクーロン力と中性粒子の影響を受けつつ、電極間を移動するときに生じる中性粒子の流れの変動成分が伝熱促進現象を生じさせるというモデルを示した。

文 献

- (1) Bernard, M. and Pierre, A., *Phys. Rev. Lett.*, **49**-106 (1982), 723.
- (2) Felici, N. J., *Direct Current*, **2**-4 (1971), 147.
- (3) Fujino, T. and Mori, Y. H., *Flow Visualization*, **VI**, (1978), 643, Hemisphere Publishing Corp.
- (4) Fujino, T., ほか 2 名, *J. Heat Transf.*, **111**-2 (1989), 345.
- (5) Perez, A. T., ほか 4 名, *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*, (1988), 941, Elsevier.
- (6) Yabe, A. and Maki, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **11**-2 (1988), 407.
- (7) Yabe, A., ほか 2 名, *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, **3** (1978), 171.
- (8) Ishiguro, H., ほか 3 名, *Proc. 3rd ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, **3** (1991), 25.
- (9) Yabe, A., ほか 2 名, *AIAA J.* **16**-4 (1978), 340.
- (10) Eldine, M. E., ほか 2 名, *Nature*, **201** (1964), 1309.