

## 小論文

## 垂直二重円筒型熱交換システムにおける直流電界の効果

緒方純俊\*, Jen-Shih CHANG\*\*

(1985年2月8日受理)

## Effect of DC Electric Field on Vertical Annulus

## Heat Exchange System

S. OGATA\* and J.-S. CHANG\*\*

(Received February 8, 1985)

Flow and heat transfer enhancement by an imposed DC electric field was studied numerically for a vertical annulus heat exchange system. Under the conditions of Rayleigh number from  $4.16 \times 10^3$  to  $6.5 \times 10^5$  at Prandtl number 5.85, the system showed significantly enhanced circulating fluid flow and heat transfer rate. The enhancement of heat transfer rate is observed to be most pronounced at the top of the annulus.

## 1. 緒 言

伝熱工学における電気流体力学的現象(EHD現象)は約半世紀前に取り上げられ、以来多数の研究報告がみられるようになった。この場合、研究対象は多岐にわたり、相変化を伴わない自然対流伝熱から熱と物質の同時移動現象である凝縮や沸騰など相変化を伴う伝熱まで、境界領域の学問にふさわしい展開をみせている。しかし、これら歴史的に息の長い研究にもかかわらず、圧力損失や流動パターン、伝熱速度に及ぼす電界の影響について一般性を有する定量的知見が得られていないのが実情である。たとえば、ここで取り上げる自然対流伝熱の場合、既往の研究の大半は垂直板あるいは水平板、または内径-外径比の大きい共軸二重円筒などの簡単な構造によるもので、実際の熱交換システムを対象とした研究は少ない<sup>1)</sup>。

自然対流伝熱は系のRayleigh数、Prandtl数、熱交換器の形状や垂直軸からの傾き、電極表面の状態などによって変化する<sup>2)</sup>。これらのパラメータが伝熱速度に及ぼす影響についてはまだ十分解明されていない。

ここでは解析例の少ない垂直二重円筒型熱交換器の自然対流伝熱を取り上げ、計算機実験を行なった結果について述べる。

\* 大分大学工学部海洋生産工学センター (870-11 大分市大字旦野原 700)

Marine Science Laboratory, Faculty of Engineering, Oita University, 700, Dannoharu, Oita, 870-11 Japan

\*\* Department of Engineering Physics, McMaster University, Canada

## 2. 基礎方程式

本解析に必要な基礎式は次のとおりである。

## 1) 質量保存の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

## 2) 運動量収支式(モーメンタムの式)

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{f} \quad (2)$$

## 3) エネルギー収支式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T \quad (3)$$

## 4) ポテンシャルの式(ラプラス)

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (4)$$

ここで  $\mathbf{f}$  は流体に作用する外力の密度を表わす。この場合は浮力  $f_b$  と電気力  $f_e$  が考えられる。Boussinesq 近似を用いれば浮力の項は

$$f_b = -\rho g \beta (T - T_s) \quad (5)$$

となり、電気力は

$$f_e = \rho_e E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \left[ \frac{1}{2} \nabla \cdot E^2 \rho \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad (6)$$

で表わされる。

(1)～(6)式において、 $\rho$  は流体の密度、 $\mathbf{V}$  は速度、 $P$  は圧力、 $\mu$  は粘度、 $T$  は温度、 $C_p$  は比熱、 $k$  は熱伝導度、 $E$  は電界強度、 $\phi$  はポテンシャル、 $\beta$  は膨張係数、 $\rho_e$  は真電荷、 $\epsilon$  は誘電率、 $T_s$  は参照温度、 $g$  は重力の加速度を表わす。

(6)式右辺第1項は流体の単位体積に作用する力である。ここでは導電率の小さい *n*-hexane ( $\sim 10^{-12}$  S/m オーダ) などを作用流体として考える。さらに、後述するように外円筒に高電圧を印加する熱交換システムを考えているので、電極からのイオン放出は無視小、すなわち  $\rho_0 \approx 0$  と仮定する。同様の理由で(3)式右辺からジュール散逸項を除いている。

$\nabla \epsilon$  は次式のように展開される<sup>3)</sup>。

$$\nabla \epsilon = \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial T} \right)_\rho \nabla T + \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \nabla \rho \quad (7)$$

*n*-hexane など液体は非圧縮性であるから  $\nabla \rho$  および  $\partial \epsilon / \partial \rho$  はゼロとみなすことができる。結局(6)式は

$$f_\theta = -\frac{1}{2} E^2 \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial T} \right)_\rho \nabla T \quad (8)$$

計算を簡単にするために次の無次元化を行なう<sup>2)</sup>。

$$v = V/V_s, \quad p = P/\rho V_s^2, \quad \tau = t V_s / R_1,$$

$$\nu^* = R_1 V, \quad \theta = (T_1 - T) / (T_1 - T_0), \quad r = R/R_1,$$

$$R_a = g \beta (T_1 - T_0) R_1^3 / \nu \alpha, \quad Pr = \nu / \alpha, \quad \eta = E/E_1,$$

$$E_1 = R_1^3 (\partial \epsilon / \partial T) \rho (T_1 - T_0) E_1^2 / \nu^2 \rho$$

ただし

$$\alpha = k / \rho C_p, \quad \nu = \mu / \rho, \quad V_s = \alpha / R_1$$

$R_1$  は内円筒の半径、 $E_1$  は内円筒表面の電界、 $T_1$  および  $T_0$  はそれぞれ内円筒と外円筒の表面温度である。これらを(1)～(4)式に適用して

$$\nabla^* v = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial \tau} + v \nabla^* v \\ &= R_a Pr g \nu^* \theta - \nabla^* p + Pr \nabla^{*2} v - E_1 Pr^2 \eta^2 \nabla^* \theta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \nabla^{*2} \theta - v \nabla^* \theta \quad (11)$$

$$\nabla^* \eta = 0 \quad (12)$$

図1に示す熱交換システムの幾何学形状に対して、境界条件を次のとく与える。

内円筒表面 ( $R=R_1$ ) :

$$T = T_1, \quad V = 0, \quad \phi = V_1 = 0 \quad (13)$$

外円筒表面 ( $R=R_0$ ) :

$$T = T_0, \quad V = 0, \quad \phi = V_0 \quad (14)$$

円筒両端 ( $Z'=0, L$ ) :

$$\nabla^2 T = 0, \quad V = 0, \quad \nabla^2 \phi = 0 \quad (15)$$

### 3. 計算方法と結果

用いた計算テクニックは MAC (marker and cell) と呼ばれる explicit 型差分法<sup>4)</sup> で、セル内の変数の配置を図2に示す。計算の収束を保障する条件は

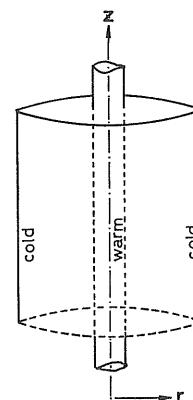


図1 热交換システムの形状

Fig. 1 Schematics of heat exchange system.

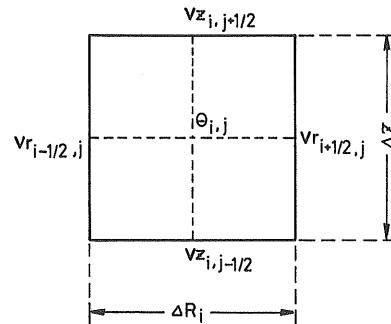


図2 セル中の変数の配置

Fig. 2 Arrangement of variables in a cell.

$$|v_r| \cdot \Delta \tau / \Delta R_1 \leq 1.0$$

$$|v_z| \cdot \Delta \tau / \Delta R_1 \leq 1.0 \quad (16)$$

図3に平均 Nusselt 数  $\bar{Nu}$  の計算結果を示す。ここで、

$$\begin{aligned} \bar{Nu} &= \frac{hL}{k} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_1 dz' \\ &= \int_0^1 \frac{(\partial \theta / \partial r)_{r=1}}{\theta_{av}} dz \end{aligned} \quad (17)$$

$h$  は熱伝達係数、 $L$  は熱交換器の高さ、 $Nu_1$  は局所の Nusselt 数、 $\theta_{av}$  は無次元平均温度である。

図3にみられるように、電気 Rayleigh 数  $E_1 = 0$  (0 電圧) および  $E_1 = 3.9 \times 10^4$  (20 kV) のいずれの場合にも、境界条件が与えられてから  $t \approx 10$  s で  $\bar{Nu}$  は定常値に達する。また電圧無印加のときと比べて 20 kV 印加時の  $\bar{Nu}$  は約 10% 増加し、既往の結果と同程度の熱移動促進効果が認められる<sup>5)</sup>。

図4に垂直高さ  $z$  と  $Nu_1$  との関係を示す。 $Nu_1$  は熱交換器の底部で最大、頂部で最小となる。これは図5

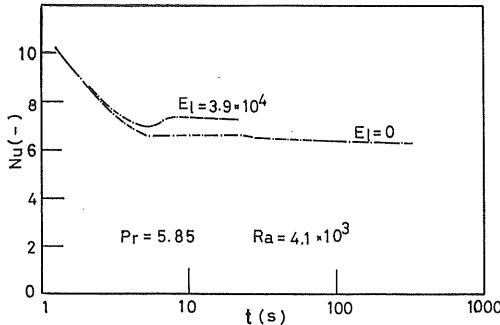


図3 異なった電気 Rayleigh 数に対する平均 Nusselt 数の時間的変化

Fig. 3 Transient behavior of average Nusselt number for various electric Rayleigh numbers.

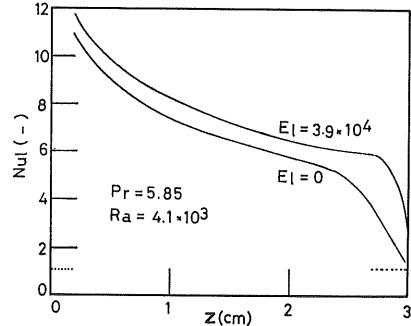
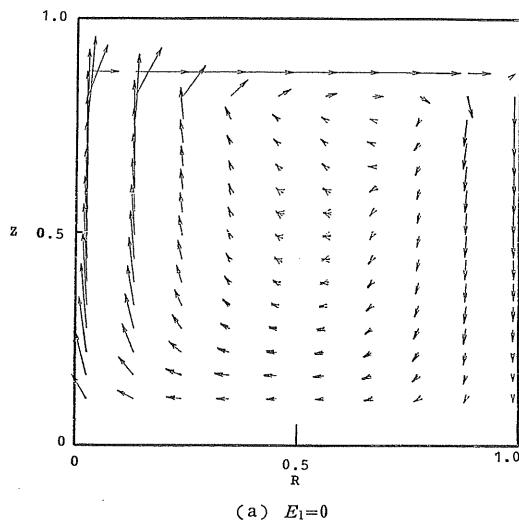
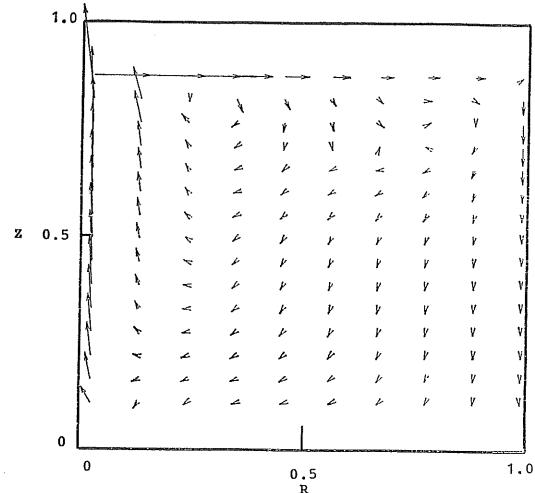


図4 異なった電気 Rayleigh 数に対する局所 Nusselt 数

Fig. 4 Local Nusselt number along the vertical axial positions for various electric Rayleigh numbers.



(a)  $E_1=0$   
 $Pr=5.85, Ra=4.16 \times 10^3, R_o/R_i=5, \Delta T=10^\circ\text{C}$



(b)  $E_1=3.9 \times 10^4$   
図5 垂直二重円筒内の速度分布  
Fig. 5 Velocity vector profiles inside vertical cylindrical annulus.

(a), (b) でみられるように内円筒表面で温められた流体が内筒に沿って上昇し、一方、底部では外筒から内筒に向かう半径方向速度が大きくなることに起因している。このとき、電界は運動量を増加させるので、内筒での温度境界層の厚みは小さくなり、熱速度の増加をもたらす。

図6(a), (b)に系の Rayleigh 数  $Ra$  のみ変化させた場合のフローベクトルを示す。図5(a), (b)でみられたのと同様に、電界が存在する場合のフローパターンは著しく複雑になる。この傾向は  $Ra$  が大きいほど顕著である。

#### 4. 結 言

計算機実験によって垂直二重円筒型熱交換システムにおける Rayleigh 数と電気 Rayleigh 数の効果について検討した。系内の循環流速度は電気 Rayleigh 数の増加によって著しく促進される。またこの効果は Rayleigh 数が大きいほど顕著である。このとき、10% オーダーの伝熱促進効果が認められた。

計算プログラム作製に際して Mr. Ken Brunner (当時 McMaster University 修士学生) の協力を得た。感謝の意を表します。

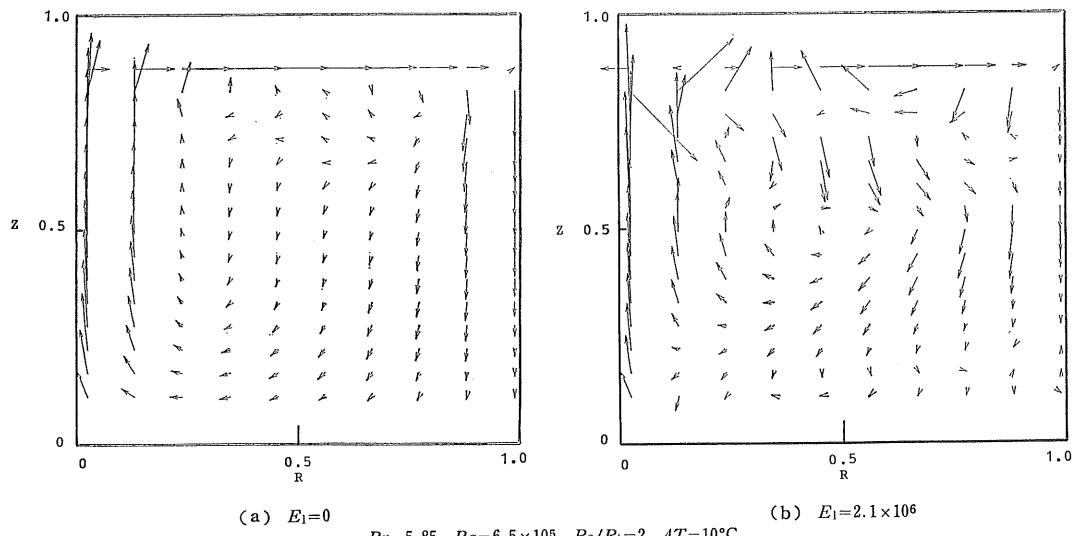


図6 垂直二重円筒内の速度分布

Fig. 6 Velocity vector profiles inside vertical cylindrical annulus.

## 参考文献

- 1) T. Jones : Adv. Heat Trans., 14 (1977) 107
- 2) J.-S. Chang and F. Tran : ASME, 16 (1981) 51
- 3) ランダウ, リフシツ : 電磁気学1, 第2章, 東京図書,

- 東京 (1972)
- 4) A.M.C. Chan and S. Banerjee : J. Heat Trans., 101 (1979) 114
  - 5) R.J. Turnbull : J. Fluid Mech., 49, Part 4 (1971) 693

# 高分子の電気的性質

## 第VII講 高分子の光機能性

渡辺 彰\*

(1985年6月26日受理)

### 1.はじめに

いまや高分子材料は商品学的な知識による選択で使用する状態から脱皮し、種々な機能性材料として付加価値を高められ、ほとんどの材料応用分野で活用されている。とくに高分子材料のもつ強度、弹性などの優れた力学的特性と加工性のよさ、諸物性の制御性の容易さは低コスト性と相まって、応用面での今後の発展は疑う余地がないことであろう。

現代の材料開発研究の進展は目覚ましい状態にある。たとえば20年ほど前に“液晶”がディスプレイ素子として利用できる可能性が示唆されたころには、液晶の動作温度が100°C付近にあり実用化が危ぶまれていた。しかし、短期間のうちに室温液晶が実用化されこの問題は解決した。また、ディスプレイ動作中の通電による液晶の劣化は“TN方式”的開発で解決され、カラー化も実現し今日の液晶全盛時代が到来した。

高分子材料の機能性利用の分野ではまだまだ未開拓のシーズが山積している。しかし、これらが多くの難関を乗り越えて実用化されるにはあまり多くの時間を要しないであろう。

本稿では高分子材料の光機能性について展望することにした。この分野では研究が端緒についたばかりのテーマが多い。しかし、高分子材料がもつる諸機能性の豊富さ、低価格化が可能などとの諸特徴ゆえにこれらの研究は急速に進展することであろう。

高分子光半導体を利用した電子写真技術については本誌でもしばしば詳細な解説がなされているので省略する。

### 2.伝送機能

#### 2.1 プラスチック光ファイバ

“情報化時代”的到来にともない、高い通信容量をもつ通信方式のニーズはますます高まりつつある。しかしながら、現在汎用されている電気通信方式はすでに技術の限界に達し、これ以上に容量を拡張することがむずかしくなってきた。これに対し、光ファイバ通信方式は電気通信方式を凌駕する高い伝送容量をもつ方式ゆえに急速に普及しつつある。光ファイバは通信以外の領域においても、屈曲させること、分割伝送が可能であること、電磁干渉(EMI)を受けにくい特徴をもつため、情報機器、計測器、医療機器にも広く使用されている。

光ファイバの基本原理は1927年に発表されたが<sup>1)</sup>、近年に至るまでは伝送損失が大きいためまったく顧みられなかった。光ファイバを通信に利用するため低損失化が促進された。1970年代でも減衰率が20dB/km以下のものが作れなかつた。しかし、最近赤外域で0.2dB/km程度の減衰率の石英製光ファイバが実現するようになり、光通信が本格的に実用化されることになった。

プラスチック製の光ファイバはガラス製のものと比較して、可撓性に富み、加工性がよく、高開口数で大口径のものが製作しうる、広い範囲にわたって屈折率の分布を制御しうる、可視域の波長で使用できるなどの特徴をもっている。しかしながら減衰率が大きいことが最大の欠点である。その値は最小のものでも20dB/cmに達し、そのためプラスチック光ファイバは目下のところおもに1km以内の短距離通信、ディスプレイ、ライトガイド、センサなどの短い光路のみに使用されている。

図1に全反射型光ファイバの基本構造が示されている。ふつうこの外径は0.1~3mmの範囲に作られている。図中のクラッドにはコアよりも屈折率の大きい材料が使われ、特定の角度(開口角とよばれる) $\theta$ 以下の角度で入射した光は図に示されるようにクラッドとコアの

\* 慶應義塾大学理工学部計測工学科(223 横浜市港北区日吉3-14-1)

Department of Instrumentation Engineering,  
Faculty of Science and Technology, Keio University,  
14-1, Hiyoshi 3-chome, Kohoku-ku, Yokohama, 223 Japan