

乱流促進体後方における移動係数と流れの挙動

宮下 尚・高柳 暁

塩見 裕・塚田安明

緒 言

伝熱係数の増進に関する研究は、高温高熱流束下の熱除去、コンパクト熱交換器の設計、工業用水の不足対策などの省エネルギー、省資源において重要視すべき課題である。伝熱性能向上の一方法として簡単に応用できるものに乱流促進体がある。乱流促進体には、伝熱面近傍の境界層を直接攪乱させるもの、主流そのものを攪乱させるもの、および流体に施回を与え流れの分速度を大きくするとともに、遠心力効果あるいは二次流れ効果を利用したものなどがある。

平滑管に対し粗面管は、熱伝達を促進することがすでに知られている。反面圧力損失も増加する。しかし、この圧力損失増加は、移動に要するポンプ動力、伝熱面積の減少等のエネルギー有効利用の立場から、必ずしも熱的性能をそこなうものでないと考えられる。

本研究では、乱流促進体として円柱を用い、これを伝熱面に流れと直角に設置し、促進体後方における伝熱面において各種流体力学的物理量と局所移動係数を、フェリーフェロの酸化還元系電極反応を用いて、物質移動係数を求めアナロジーにより伝熱係数を求める方法を選んだ。上記諸量の分布より、実験的に移動係数の増進機構が解明されるが、流動状態の把握、促進体後方で生じる渦流の挙動などを明らかにするため、アルミ粉トレーサ法による可視化実験を行ない詳細な検討を加えた。

1. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図をFig. 1に示す。

一定温度に保たれた恒温槽①の電解液は、ポンプ②によりヘッドタンク⑩に送られ助走部、テストセクションを経て恒温槽①に戻り循環使用される。液流量はバルブ③、④で調節され、オリフィス流量計⑤により測定される。テストセクションおよび助走部は、肉厚10mmの硬質塩化ビニール製の矩形流路(50×40)でテストセクション上部壁は、乱流促進体設置のためまた⑭に示されるL字形電極トラバース装置設置のため、取りはずし可能な構造になっている。測定部の詳細図をFig. 2に示す。測定部底部にはニッケル陽極(17×450×2)および平均物質移動係数測定用のニッケル陰極(10×450)、さらにその陰極中に局所値測定用の白金点電極が5mm間隔に20個埋めこまれている。

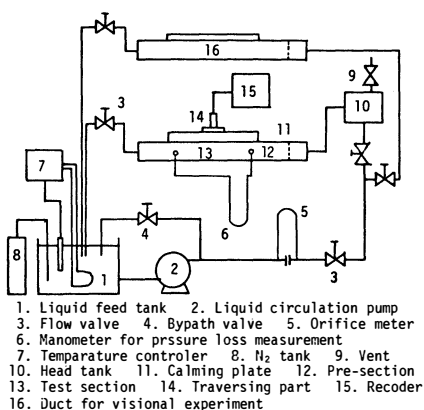


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

電極反応により生じる限界電流測定のための電気回路をFig. 3に示す。限界電流を得るため陰極，陽間に一定電圧0.28Vをかけた。陰極，陽極間を流れる限界電流は，微小なため直流増幅器で増幅し，平均回路を通し得られた平均値より流速を求める。さらに電流の変動値は，直流増幅器を通した後，直流分離器に入れさらに増幅して二乗器を通した後，平均回路を通し得られた変動分の二乗平均値より乱れ強さを求める。本測定では，限界電流が非常に微小であるため外部雑音に特に注意しなければならない。そこで，測定にはすべて太いシールド線を用いシールドをマイナスに短絡させた。

実験は，促進体1本を単独に設置した場合局所移動係数，剪断応力，流速，乱れ強さ分布を促進体の径を3種 ($D_p=3, 5, 7$) と変化させそれらの影響について調べる。また促進体を複数用いた場合，配列ピッチを数種 ($P/D_p=5, 7, 10$) 変化させ，局所物質移動係数への影響を調べ可視化実験の結果と比較，検討する。

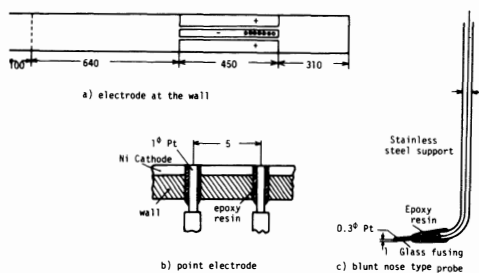


Fig. 2 Details of test section

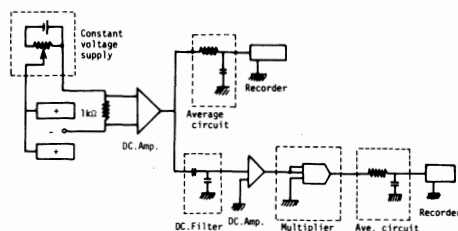
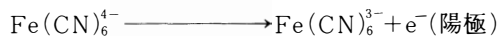
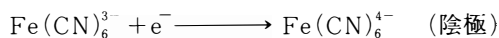


Fig. 3 Electric circuit for measurement of fluctuation

2. 移動物理量の測定

物質移動係数の測定にはTable. 1に示す電解液を使用し，支持電解液として苛性ソーダを用い，次に示すフェリーフェロシアン化イオンの酸化還元系の電極反応を用いる。



拡散律速条件下で得られた限界電流より物質移動係数は式(1)で求められ，壁面剪断応力 τ_w は電極面形状が円形の場合式(2)で算出することができる。

$$k = \frac{i}{neFAC_b} \quad (1)$$

$$\tau_w = 3.5505 \times 10^{-15} \frac{\mu i^3}{D^2 C_b^3 d^5} \quad (2)$$

流速および乱れ強さ分布は，Fig. 2に示すL字形電極プローブを流れ方向に向けると，限界電流 i は律速を支配する流れの速度すなわち平均流速 \bar{u} により異なり，その関係式は次に示す形で表わされる。

$$\bar{i} = \alpha + \beta \sqrt{\bar{u}} \quad (3)$$

ただし， α, β は電解液の組成，電極形状，大きさによって異なる定数であるため，あらかじめ α, β を測定しておかなければならない。また，流れに乱れなどの速度変動がある場合，変動成分 u' は平均速

Experimental Condition.

$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	0.01 mol/l
$\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	0.01 mol/l
NaOH	2 mol/l
Solution Temp.	30 °C
Density	1.0816 g/cm ³
Viscosity	0.0124 poise

Table. 1

度 \bar{u} に比べて小さいとすると、 u' に対する電流変動を i' とすれば次式が成立する。

$$i' = \frac{\beta}{2} \cdot \frac{u'}{\sqrt{\bar{u}}} \tag{4}$$

従って式(3)および式(4)より

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} = 2 \frac{\sqrt{i'^2}}{\bar{i} - \alpha} \tag{5}$$

が成立する。

3. 実験結果および考察

3.1 単一乱流促進体後方における局所移動係数

乱流促進体の径を3種変え Re 数をパラメータとして局所移動係数を求め、それと平滑面での値との比すなわち促進体挿入による移動係数の増加比 Sh/Sh_0 で相関すると Fig. 4 のようになる。移動係数の増加比 Sh/Sh_0 は Re 数により多少差異が生じるが、促進体後方の無次元距離 x/D_p が5~8の位置で最大値が表われることがわかる。その増加比は3前後にもなる。

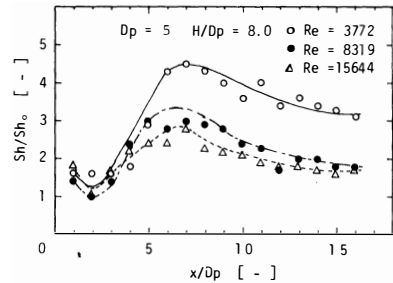


fig.4 local transfer coefficient

この増大の機構としては、はく離境界流れが壁面に付着して境膜を薄くしているか、渦流の生成から壁方向への流れが生じ壁面での乱流強度が大きくなることが考えられる。また Re 数3700の遷移域では他のものより増加比が下流にずれているのは、はく離境界線付近での乱流強度が小さいため、境界線内側での壁方向への変動速度が小さいためと考えられる。

3.2 壁面剪断応力 τ_w

Re 数をパラメータとし、平滑面での値との比 τ/τ_0 で相関した結果が Fig. 5 である。この図において τ/τ_0 が負の値を示しているのは、促進体挿入の結果その後方において渦流が発生し、そのため壁面には逆流が存在することを表わしている。このことは、電極反応の結果のみでは τ の絶対値がわかるだけでその正負はわからないが、Fig. 6 に示される可視化実験の結果を見れば明らかである。

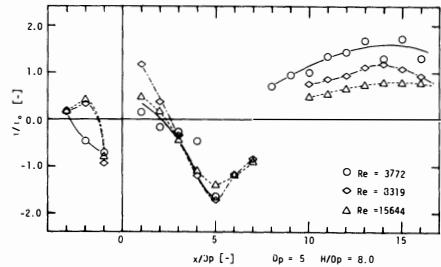
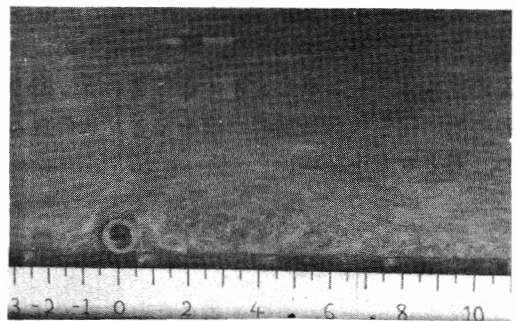


fig.5 shear stress profile



[Fig. 6]

平滑面での値との比で τ/τ_0 は、 $x/D_p = 4 \sim 6$ で極小値を示しこの点で速度勾配が大となり、すなわち境膜が薄くなっていることを表わしている。一方促進体挿入時において、渦流の発生で $\tau=0$ となるよどみ点が $x/D_p = -1.5, 2.5, 6.5 \sim 8.5$ の3ヶ所でみられ、特に $x/D_p = 6.5 \sim 8.5$ は促進体からの離流の壁への付着点となる。

ここでは、付着点がある幅をもった壁方向流れのため変動しているのに、 x/D_p を一点に限定することはできない。

Fig. 6は、 $D_p=22\text{mm}$, $H/D_p=8.18$, $Re=8319$, シャッター速度 = 1/8 の条件で撮影したものである。これによれば、促進体上部においてはく離れた流れが $x/D_p=7$ 付近で壁に付着している。また促進体直後における渦流の大きさも知ることができる。

3.3 乱流強度分布

各促進体に対し、 x/D_p を数種変化させ矩形ダクト中心($z=0$)でL字形プローブ電極を y 方向にトラバースして式(5)により乱れ強さを算出した。Fig. 2に示したL字形電極は、 x 方向の変動速度 u' のみでなく、 v' , w' にも感度をもつ。電極は v' , w' に対して u' ほど感度はないが u' に対してこれらは中心部を除いてかなり小さい量であることを考えると、得られた変動信号の二乗平均 $\overline{i'^2}$ はほぼ $\overline{u'^2} = \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}$ に比例した量を示すと考えられる。従って式(5)より乱れ強さ $\sqrt{\overline{u'^2}}/\overline{u_\infty}$ が求められる。Fig. 7においてダクト中心部 $Y/H=0.5$ と壁面近傍 $Y/H=0.025$ での乱流強度分布を示す。この図において $Y/H=0.5$ ではほとんど乱流強度の変化がみられず、 $Y/H=0.025$ では $x/D_p=5\sim 8$ すなわち、はく離流が付着する点の近傍で乱流強度が最大となり、その後徐々に減少していく。最大値を取る位置から考えるとこの図は、局所移動係数の増加比 Sh/Sh_0 のそれと同様の形を示している。

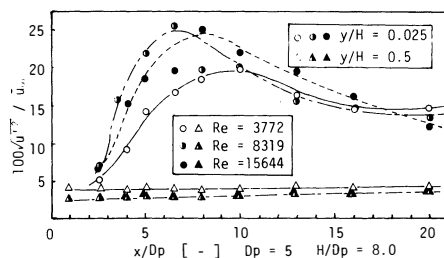


fig.7 turbulent intensity with Reynold's no.

3.4 乱流促進体間の局所移動係数

乱流促進体間の局所移動係数は、そのピッチ、径などの変化によりそれぞれの促進体間の流動状態が変化する。Fig. 8は、電極反応の結果と可視化より明らかとなった流れのフローパターンをそれぞれの P/D_p に対し対応させたものである。

3.4 乱流促進体間の局所移動係数

乱流促進体間の局所移動係数は、そのピッチ、径などの変化によりそれぞれの促進体間の流動状態が変化する。Fig. 8は、電極反応の結果と可視化より明らかとなった流れのフローパターンをそれぞれの P/D_p に対し対応させたものである。

$P/D_p=10$ では、 $x/D_p=5\sim 6$ 付近で付着点を確認され、その付近で垂直方向の流れが大きく、つまり乱流強度が大きく移動係数も大きくなると思われる。ここではピッチの移動係数への影響は表われてこず付着点以後は次の促進体の手前までは次第に境界層が発達していき、促進体を1個単独に設置した場合と同じ傾向を示す。

$P/D_p=7$ では、次の促進体手前に付着点があり、その付近で移動係数の増加比が最大となる。 $P/D_p=5$ では、促進体後方の流れが壁の付着点に達する前に次の促進体があるため、後流の乱流強度が次第に大きくなっていき、時々不安定な渦のため逆流が生じたりするのみで、移動係数の増加比も単調増加の一途をたどり次の促進体手前で最大となる。その増加の度合は、平均して前の二者よりも小さい。

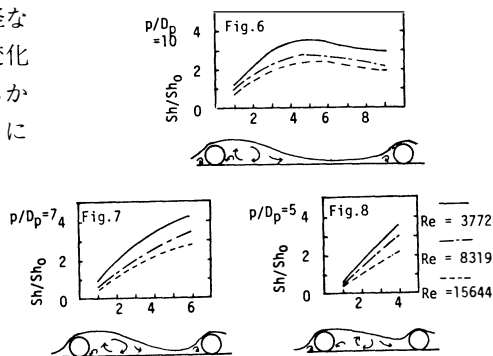


fig.8 local transfer coefficient among promoters

結 言

流路内底面に流れ方向と直角に乱流促進体を置き、境界層を攪乱させることにより、移動係数が増

進する原因を究明することを目的として実験を行なった。

実験は、フェリーフェロの酸化還元系電極反応を用い、物質移動係数を測定し、移動係数の増進の割合を Sh/Sh_0 で表わした。また実験値との相関、検討の一方法としてアルミ粉による可視化実験を行ない、次のような結果を得た。

1. 単一乱流促進体の場合、促進体後方における移動係数の増加比 Sh/Sh_0 は、 $x/D_p=5\sim 8$ で最大値を示しその値は3倍前後であり、 Re 数の増加とともに減少し1に漸近する。
2. 促進体後方における壁面剪断応力の増加比 τ/τ_0 は、 $x/D_p=4\sim 6$ で極小値を示し $x/D_p=6.5\sim 8.5$ で付着点が確認される。そのほか、渦による逆流発生で $x/D_p=-1.5, 2.5$ の2ヶ所によどみ点が存在する。
3. 乱流強度は、はく離境界線付近で大きく $x/D_p=5\sim 8$ で最大値を示し、その後乱流強度は減少し促進体手前の値に近づく。
4. 乱流促進体を複数用いた場合、 $P/D_p=10$ では単独に1個促進体を用いた場合と同じ傾向を示し、 $P/D_p=7$ では付着点が次の促進体のあたりまで来るため、その付近で移動係数が最大を示している。 $P/D_p=5$ では移動係数の増加比は、単調増加の一途をたどる。

以上のことより、移動係数増進の機構として、境膜が薄く乱流強度が大きいところで顕著であり、また境膜が厚くても乱流強度が大きいところではその増進が見られることから、増進は乱流強度による依存度が高いものと考えられる。

使用記号

A ; surface area of mass transfer	[cm ²]
C ; concentration	[g-mole/cm ³]
D ; molecular diffusivity	[cm ² /sec]
D_p ; diameter of turbulence promotor	[cm]
d ; diameter of electrode	[cm]
F ; Faraday constant = 9.652×10^4	[coulm./g-equiv.]
H ; height of duct	[cm]
i ; electrical current	[amp.]
k ; mass transfer coefficient	[cm/sec]
ne ; valence charge of an ion	(-)
p ; pitch of promotors	[cm]
Re ; Reynolds number	(-)
Sh ; Sherwood number	(-)
u ; velocity in x direction	[cm/sec]
v ; velocity in y direction	[cm/sec]
w ; velocity in z direction	[cm/sec]
x ; distance from turbulence promotor	[cm]
α ; experimental constant	(-)
β ; experimental constant	[amp·sec ^{0.5} /cm ^{0.5}]
μ ; viscosity	[g/cm·sec]
τ ; shear stress	[g/cm·sec ²]

〈添字〉

- o ; a smoothed duct
- b ; bulk
- w ; wall
- ∞ ; the center of duct
- ; time smoothed
- ' ; deviation from time smoothed value

参 考 文 献

- 1) C. K. Rao, J. J. C. Picot :
Proc, 4th Int. Heat Transfer conf. Fc4.8 (1970)
- 2) F. J. Edwards & N. Sheriff :
Int. Developments in Heat Transfer conf. ASME part II, 415 (1961)
- 3) 花輪寿一, 岡本芳三 : 第9回日本伝熱シンポジウム講演論文集 P.447 (1972)
- 4) 宮下 尚, 室川清至, 菅田益司 : 化学工学論文集, 2, 200 (1976)
- 5) 森 康夫, 大黒崇弘 : 日本機械学会論文集, 38, 832 (1972)

本論文は、昭和53年10月、第12回化学工学秋季大会（岡山）に於いて発表したものである。

Transfer Coefficients and Flow Behaviour in Back of Turbulence Promotors

Hisashi Miyashita, Akira Takayanagi

Yutaka Shiomi, Yasuaki Tsukada

The purpose of this paper is to study the local transfer coefficients between fluid and wall surface and the flow behaviours in back of turbulence promotors in a rectangular channel and then to discuss the mechanism for the improvement of the transfer coefficients.

The transfer coefficients, the shear stress and the turbulent intensity have been obtained by using the electrochemical method of the redox system under the diffusion control and the flow behaviours have been observed by using the aluminum tracer method.

The results of the transfer coefficients and the shear stresses with turbulence promotors were compared with those without promotors, as Sh/Sh_0 , τ/τ_0 . They were graphically correlated with the diameter, the pitch of the promotor and flow Reynolds number. The turbulence intensities near the wall surface were also correlated with those parameters. These results agreed reasonably with the observation of aluminum tracer method. It was found that the improvement of transfer coefficients in back of the turbulence promotors depends on the turbulent intensity near the wall surface.

(1978年10月30日受理)