

共軸二重管の環状部流れにおける内管壁—流体間物質移動

宮 下 尚, 塩 見 裕, 中 村 明 夫

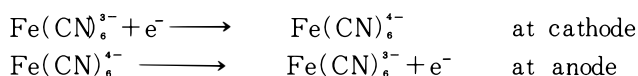
緒 言

近年, 原子炉の炉心を想定した二重管の伝熱に関する研究が混相流の伝熱, 沸騰伝熱を含め活発に行われるようになってきた。二重管の環状部流れにおける伝熱は古くから研究が行われており, 多くの研究者によって相関式が報告されている。しかしそれらの間には, 操作条件によってかなりの相異があり, 統一的な報告はないようである。本研究では, 原子炉の安全性に対する考慮もさることながら, 熱交換器の改良などを目的とした偏心二重管(たわみ二重管)内流れの伝熱を究明する基礎段階として, 同心二重管環状部の内管壁と高シュミット数流体間の物質移動係数を電極反応を用いて測定し, 操作変数(Re 数, Sc 数)および装置変数(管径比)を数種変え相関を行なった。そして従来の熱および物質移動のアナロジーから既往の伝熱実験と比較し検討を加えた。

1. 実験装置および方法

実験装置の概略図をFig. 1に示す。恒温そうで所定温度に保たれた電解液はポンプによって二重管環状部を上昇し, テストセクションを通りオリフィス流量計を経て再び恒温そうに戻る。装置本体は長さ2 m, 内径67.6mm, 51.0mm, 40.0mmの3種類の硬質塩化ビニルパイプの外管と外径21.8mmのニッケルパイプの内管から成っている。テストセクションは底部より1.4mのところに濃度境界層発達助走陰極10 mmと物質移動測定用の長さ10mmのニッケルより成っており, その中に局所値測定用白金陰極1 mmφが埋め込まれている。

実験は Re 数($1.1 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$)を数種, Sc 数(1335~5900)を6種, Do/Di (1.84~3.10)を3種変化させた。物質移動係数の測定にはTable.1に示す電解液を使用し, 支持電解液として水酸化ナトリウムを用いて次に示すフェリ—フェロシアンイオンの酸化還元系電極反応を用いた。



物質移動係数は, 拡散律速の条件下で得られた限界電流より式(1)より算出できる。

$$k = i / (n_e \cdot F \cdot A \cdot C b) \quad (1)$$

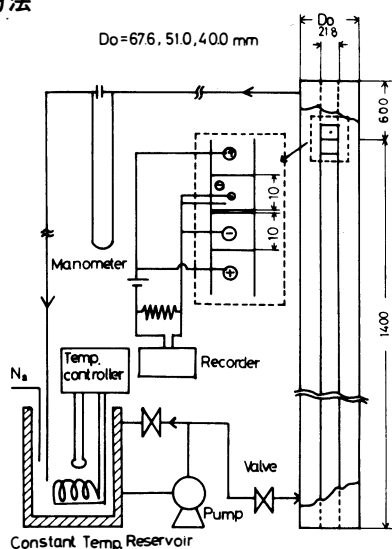


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2. 実験結果および考察

得られた物質移動係数の
まとめとしての相関は、古
典的な次元解析による

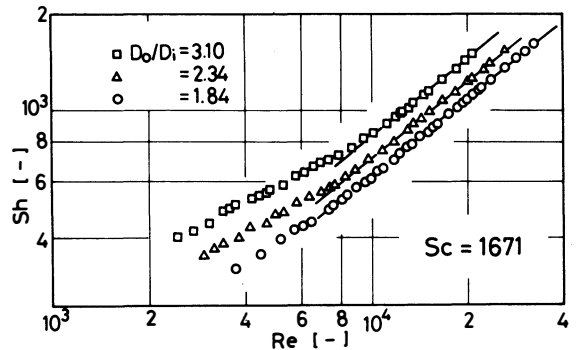
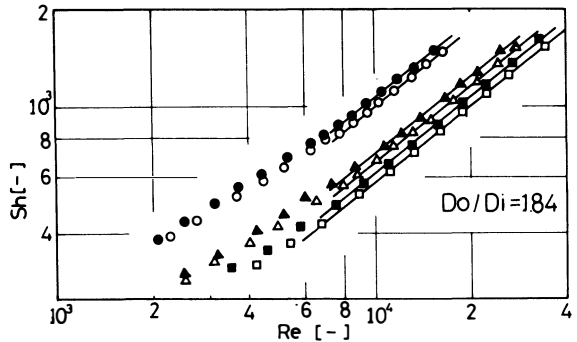
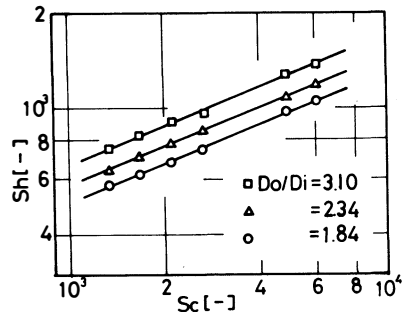
$Sh = \alpha (Re)^a (Pr)^b (Do/Di)^c$
として表わし、アナロジー
から既往の伝熱実験と比較
する。 Re 数による影響を調
べるため Sc 数を一定 (Sc
=1671) として Do/Di をパ
ラメーターに Sh 数を plot

した一例を Fig. 2 に示す。図より物質移動係数
は Do/Di により差異が生じ、 $Re > 8000$ におい
て Re の 0.8 乗に比例することがわかる。 Re 数の
遷移域においては 0.5~0.6 乗に比例し、統一的
な相関が得られなかった。これは L/De が異な
って、各流れが完全に発達していないためと思
われる。次に Sc 数を Table. 1 に示すように 6
種類変化させ、その影響を調べたのが Fig. 3、
4 である。

Fig. 3 は Do/Di を一定 ($Do/Di=1.84$) として、
 Sc 数をパラメーターに Sh 数を plot したもので
あるが、ここでは Sc 数による物質移動係数の差
異が見られる。さらに Sc 数の影響を明確にする
ために、 Re 数を固定し、 Sh vs. Sc を図示し
たのが Fig. 4 である。図は $Re=10000$ の一例
を示したものであるが、一般に Re 数が 8000 以
上の完全乱流では Sh 数は $Sc^{0.4}$ に比例し、 Re
数が 8000 以下では Sc 数の指数は小さくなる傾向に
ある。環状部における乱流伝熱に関する既往の
報告では Pr 数の指数は $1/3$, 0.4, 0.44 と種々報
告されている。今、熱と物質移動のアナロジー
が存在するとすれば、本実験範囲においては Pr
(Sc) 数の 0.4 乗に比例することが確かめられる。
Fig. 5 は Sh 数に対する管径比 Do/Di の影響を
調べたもので、数種の Sc 数に対してもいずれも
(Do/Di) の 0.53 乗に比例することが判り、
Monrad ら、水科らの伝熱実験の結果と一致し
た。以上をまとめると最終的には Fig. 6 のよう
になり $Re > 8000$ では次式が得られた。 $Re <$
8000 では統一的な相関が得られなかったので図

Table. 1 Properties of electrolyte

	K ₄ Fe(CN) ₆ , 0.005M	0.005M	0.005M	0.005M	0.005M	0.005M
	K ₄ Fe(CN) ₆ , 0.005M	0.005M	0.005M	0.005M	0.005M	0.005M
	NaOH 4N	4N	2N	2N	1N	1N
	at 25°C	30°C	25°C	30°C	25°C	30°C
μ	0.0226	0.0205	0.0144	0.0130	0.0113	0.0102
ρ	1.16	1.16	1.075	1.075	1.04	1.04
D	3.262×10^{-9}	3.657	5.120	5.766	6.502	7.349
Sc	5973	4832	2616	2097	1671	1335

Fig. 2 Sh vs. Re with Do/Di Fig. 3 Sh vs. Re with Sc Fig. 4 Sh vs. Sc with Do/Di

中でそのデータは割愛した。

$$Sh = 0.015 (Re)^{0.8} (Sc)^{0.4} (Do/Di)^{0.53} \quad (2)$$

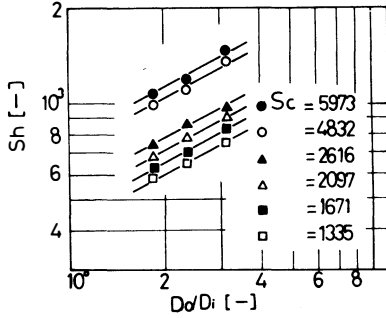


Fig. 5 Sh vs. Do/Di with Sc

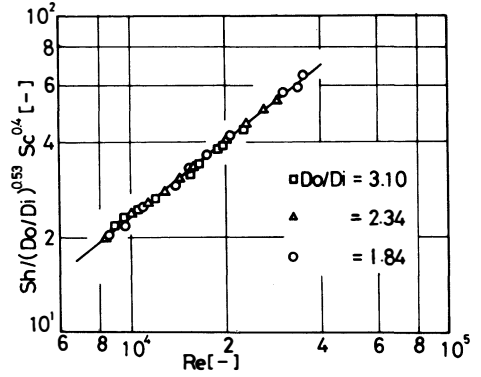


Fig. 6 $Sh/(Do/Di)^{0.53} Sc^{0.4}$ vs. Re

完全乱流域において、熱および物質移動のアナロジーを仮定すると Sh 数の値は Monrad ら、McMillen ら、Wiegand らの各式とほぼ $\pm 25\%$ の範囲で一致して (Fig. 7) おり、特に Monrad らの相関とは (Do/Di) の指数部も 0.53 と同じ結果を得た。これは本実験と同様、高 Pr 数の流体を用いているためと思われる。また同時に、高 Pr (高 Sc) 流体にも熱と物質移動の間のアナロジーが成立しているものと思われる。空気を用いた低 Pr 数流体の多くの相関の中にも操作変数のかかわりからアナロジーの存在が見受けられるが、Mueller らの実験では Sh 数は $Re^{0.5}$ に比例しており、本実験とはかなり異なっているものもある。

これは (Do/Di) が本実験に比べてかなり小さく、また環状部における流れの挙動が異なるためであろうと思われる。

次に (Do/Di) の影響について考察を行なう。既往の文献により代表的な相関を Table. 2 に示す。その整理を行なうと、一般的に次のような J -factor 相関をすることができる。

$$St \cdot \phi(Pr) = K \phi(Di/Do) Re^{-0.2} \quad (3)$$

$$St_s \cdot \phi(Sc) = K \phi(Di/Do) Re^{-0.2} \quad (4)$$

これに基づいて、 Sc 数を固定 ($Sc = 2097$) して $St_s \cdot Re^{0.2}$ vs. (Do/Di) を図示すると、Fig. 8 のようになり本実験の相関は他と比較して傾向もよく一致しており、全体として Wiegand らの値より小さいが、妥当な値が得られているものと思われる。

Wiegand

$$Nu = 0.023 (Do/Di)^{0.45} (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \\ (Di/Do = 0.1 \sim 0.99, \text{AIR})$$

Davis

$$Nu = 0.031 (Do/Di)^{0.15} \left(\frac{Do - Di}{Di} \right)^{0.2} (Re)^{0.8} (Pr)^{1/2} (\mu/\mu_w)^{0.14} \\ (Do/Di = 1.2 \sim 3.0, \text{WATER})$$

Monrad & Pelton

$$Nu = A' (Re)^{0.8} (Pr)^{0.33} \\ A' = 0.023 \left[\frac{2 \ln \frac{Do}{Di} - \left(\frac{Do}{Di} \right)^2 + 1}{\frac{Do}{Di} - \frac{Di}{Do} - 2 \left(\frac{Do}{Di} \right) \ln \left(\frac{Do}{Di} \right)} \right] \\ (Do/Di = 1.65, 2.45, 17 \text{ WATER})$$

McMillen & Larson

$$Nu = 0.038 (Do/Di)^{0.15} (Re)^{0.8} (Pr)^{1/2} (\mu/\mu_w)^{0.14} \\ (Do/Di = 1.245, 1.3, 1.532, 1.97, \text{WATER})$$

CORRELATION

$$J = \left(\frac{h}{C_p G} \right) \phi \left(\frac{C_p \mu}{k} \right) = K \phi(Di, Do) \left(\frac{D' G}{\mu} \right)^{0.2}$$

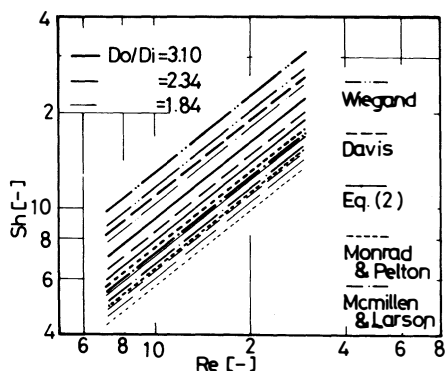
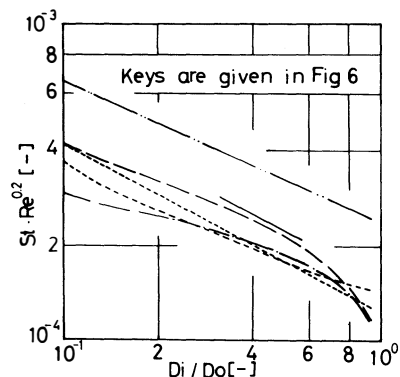


Fig. 7 Comparison with other data

Fig. 8 Correlation on Do/Di

結 言

環状部における内管外壁からの物質移動をフェリ-フェロシアンイオンの酸化還元の電極反応を用いて実験を行ない。次の相関式を得た。

$$Sh = 0.015(Re)^{0.8}(Sc)^{0.4}(Do/Di)^{0.53}$$

適用範囲は Re : 8000~30000, Do/Di : 1.84~3.10, Sc : 1335~5973である。熱および物質移動のアナロジーの仮定から既往の伝熱実験の結果と比較し、本結果は妥当なものであることを確め、今後の偏心(たわみ)二重管の環状部の伝熱の研究に関する基礎的データを得た。

使 用 記 号

Di ; outside diameter of inner tube	diameter	[m]
Do ; inside diameter of outer tube		[m]
K ; constant defined by Eqs. (3), (4)		[-]
Nu ; Nuselt's Number		[-]
Sh ; Sherwood's Number		[-]
St ; Stanton's Number		[-]

参 考 文 献

- 1) McMillen, E. L. and R. E. Larson : Trans. AIChE, **40**, 2, 177(1944)
- 2) Mizushima T. et al. : KAGAKU-KIKAI, **16**, 339(1952)
- 3) Monrad C. C. and J. G. Peiton : Trans. AIChE, **38**, 593(1950)
- 4) Mueller A. C. et al. : Trans. AIChE, **36**, 541(1936)
- 5) Wiegand J. H. : Trans. AIChE, **41**, 147(1945)

本論文は、昭和55年7月16日、化学工学協会北陸大会(富山)に於いて発表したものである。

Mass Transfer Between Inside Wall And Fluid In Annular Flow In Co-axial Double Tube

Hisashi MIYASHITA Yutaka SHIOMI
and Akio NAKAMURA

An experimental investigation was performed to study the mass transfer in an annular, as the first step of the heat transfer in non-coaxial double tube for the purposes of the safety in nuclear reactors and the improvement of heat exchangers.

Mass transfer coefficients between a flowing solution and the inside tube wall in annular were measured using an electrochemical method by mean of the redox reaction of ferricyanide/ferrocyanide couple. The Reynolds number was varied from 1,300 to 40,000 with six kinds of Schmidt number and three kinds of the ratio of inner and outer tube diameters in an experimental condition. The correlation of mass transfer data in annuli was expressed as follows:

$$Sh=0.015(Re)^{0.8}(Sc)^{0.4}(Do/Di)^{0.53}$$

This is reasonably agreed with previous heat transfer correlations by mean of the analogy for heat and mass transfer.

(1980年10月31日受理)