二重円管内の助走区間の熱伝達（内管加熱）*

村 川 勝 弥**

Heat Transfer of the Entry Length of Pipes with Annular Space

by Katsuhisa MURAKAWA

In the heat exchangers of the type of pipes with annular space, there are many cases of heat transfer of the entry length in which heat exchange begins at the entrance of pipes, and especially this is an important problem in the case of heat transfer of the atomic reactors. The experiments were performed, in which cases water from down to upward through the pipes with annular space was heated from the inner pipe.

1. 緒 言

二重円管型式熱交換器においては、管の入口から直ちに熱交換が始まる助走区間の熱伝達の場合が非常に多く、特に奥行き短い冷却器とか原子炉における熱伝達⁽¹⁾などではたいせつな問題となる。

重水炉では垂直二重円管が用いられ、ソ連の 5000 kW 原子炉の中空棒状ウラン燃料素においては上から中空部を下へ水が流れ次に周囲のグラファイトとの間の二重すきまを上へ上昇して熱伝達が行われているようすである。

垂直二重円管については、未だ実験も見当たらないので、垂直な同心二重円環状すきまを下から上へ流れる水を内管側から加熱する場合の実験を行い結果を無次元数によって表わした。

2. 実 験 装 置

垂直な同心二重円環状すきまの助走区間を下から上へ流れる水の層流を内管側から加熱する実験を行った。実験装置は第 1 図に示してあり、全体の高さが 3 m で筆者が以前に行った層流熱伝達の装置⁽²⁾に似ているが、第 2 図に示す内管の材料ならびに構造が違っている。①は整流水そうで内管に多数の穴をあけた木の板を 4 枚ほど適当な間

第 1 図 実験装置略図

隔をおいて上下に並べ上下の穴が一直線上に来ないように、互い違いに穴があけてある。整流水そうの一

辺に、せきを設け水を流下させて水位を一定に保たせた。②は入口弁で実験開始前に閉じて垂直二重円管内の水柱の振動を止め実験中は全開して水流を乱さぬように注意した。③は水流を乱さぬための下部水そう④の入口、⑤は測定部で第 2 図に詳細を示す。⑥は上部水そう、⑦は出口弁、⑧は空気抜きコックで④に満水するときに④内にたまっていた空気を外部へ出して終りに閉じる。⑨は垂直二重円管を垂直にするための管ささえで 3 点で支持され、微細な調整用のねじを切ったボルトが

第 2 図 測定部 用いてある。

⑩は①の水面計である。次に第 2 図において⑪は内管と外管とを同心にするために内管（銅管）に、しめつけられた薄い はがねベルトで 90°おきに 4 箇所あって内管のささえになっている。⑫は入口において水流を乱さぬようにするための入口ラッパ型案内、⑬は出口側のラッパ型案内で、ともに、鋳物から機械仕上げを行った。⑭は内管の先端部で水流を乱さないように黄銅から流線型に機械仕上げしてある。内管の内部からニクロム線で加熱され、外管の外側はアスベストのひもで保温されている。内外管表面温度および水の入口（③を出た所）、出口温度（⑪を出た所）測定には 0.2 mm エナメル被覆の銅—コンスタンタン熱電対を使用し、線は出口側（上方）へ引出し、管壁に、みぞを切って埋め、測定部には何らの突出部もなくして水流を乱さぬように特に注意した。入口温度測定の熱電対だけは④の下部のフランジの間から左右に線を引き出してある。熱電対は内管側に 4 箇所、外

* 昭和 30 年 11 月 25 日 広島地方講演会において“二重管内の助走区間の熱伝達（第 1 報、垂直二重管における熱実験）”として講演、原稿受付 昭和 31 年 1 月 14 日。

** 正員、山口大学工学部。

管にも 4 箇所埋めてある。出口にある ⑪ で同心に保たれ、これは出口にあるから測定部には影響しない。測定は水流および温度が定常状態になるまで待ち水流に振動をあたえぬように、また、層流を乱さぬように注意した。

温度測定には銅-コンスタンタン線の熱電対を用い、0.1 mmV 目盛の刻まれた懸垂型ミリボルトメータを補正して使用し、冷接点は氷で 0°C にして一定に保った。

供給熱量は電流のボルト、アンペアから求め、⑪ の内側のニクロム線から電圧測定用の別の導線を連結して⑪と⑭との間に供給された熱量を求め、また、⑪より上方への熱移動を防ぐために、ニクロム線は更に⑪よりも上方へ余分に巻いて電圧測定部の軸方向(上下方向)の熱移動を防いで等温に保つようにした。

流量測定は⑦を出た所でメスフラスコと 0.1 秒のストップ・ウォッチとで測定し、流量、したがって平均流速の加減には整流水そう①への入口弁と、出口弁⑦とを用いた。

内管の材料は銅管、外管は引抜鋼管である。

$2r_1$ = 内管(銅管)の外径 = $D_1 = 3.0$ cm,

$2r_2$ = 外管(引抜鋼管)の内径 = $D_2 = 5.5$ cm,

L = 伝熱長さ = 140 cm.

3. 計算法および計算結果

熱伝達率 α_1 [kcal/m²h°C]

$$= Q_1 / \{F_1 \cdot (T_{w1m} - T_0)\} \quad \dots (1)$$

Q_1 = 供給熱量 [kcal/h] = $0.86 \times V$ (ボルト)

$$\times i \text{ (アンペア)} \quad \dots (2)$$

F_1 = 伝熱面積 [m²], T_{w1m} = 内管表面平均温度 °C

= 18~34°C, T_0 = 水の入口温度 °C = 15~18°C,

T_{w2m} = 外管表面平均温度 = 15~32°C,

ヌセルト数 $Nu_1 = \alpha_1 \times 2(r_2 - r_1) / \lambda_1 \quad \dots (3)$

λ_1 = 熱伝導率 [kcal/m h°C],

レイノルズ数 $Re = \bar{w} \times 2(r_2 - r_1) / \nu_1$

$$= 5.0 \sim 1900 \quad \dots (4)$$

$\bar{w}$ = 平均流速 [cm/s] = 0.02~6.0 cm/s,

ν_1 = 動粘性係数 [cm²/s],

$$\sigma_2 = \bar{w} \cdot 2(r_2 - r_1) / a \cdot 2(r_2 - r_1) / L = 4 / \pi \cdot G_{z2} \\ = 0.5 \sim 250 \quad \dots (5)$$

G_{z2} = グレツ数 = $\pi / 4 \cdot R_0 \cdot P_r$

$$\times 2(r_2 - r_1) / L = \pi / 4 \cdot \sigma_2$$

P_r = ν / a = プラントル数

a = 温度伝ば率 [cm²/s]

ただし λ_1 , ν_1 , a は内管表面平均温度 T_{w1m} (°C) に相当する値を用い水に関する M. ten Bosch⁽³⁾ の表から求めた。

次に無次元温度として

$$F = (T - T_0) / (T_{w1m} - T_{w2m}) \quad \dots (6)$$

$$f = (T - T_0) / T_0 \quad \dots (7)$$

とおけば

$$F = f \times T_0 / (T_{w1m} - T_{w2m}) \quad \dots (8)$$

となるので、内管の無次元温度分布を $f_0(z)$ で示せば第 3 図のように

第 3 図 内管温度分布 $f_0(z)$

$$f_0(z) = -0.717 \cdot z^2 + 1.27 \cdot z + 0.0450 \quad \dots (9)$$

外管の無次元温度分布を $f_1(z)$ で示せば第 4 図のように

第 4 図 外管温度分布 $f_1(z)$

$$f_1(z) = 0.0108 \cdot z + 0.246 \quad \dots (10)$$

となる。ただし $z = Z/L$, Z = 円柱座標 (r, Z) を用いたときの軸方向の長さ cm, L = 伝熱長さ = 140 cm.

実験結果を Nu_1 と σ_2 とを用いて最小二乗法によって整理し、両対数方眼紙に図示すれば第 5 図のごとく

$$Nu_1 = 4.99 \times \sigma_2^{0.26} \quad \dots (11)$$

第 5 図 実験結果 ($Nu_1 - \sigma_2$)

となる。これは管の入口から直ちに熱伝達が始まる場合であるが、次に非加熱助走区間を経過して流れが発達した所から熱伝達が始まる場合⁽⁴⁾と比較するために、片対数方眼紙に (11) 式と、非加熱助走区間として 300 mm 取つたときの実験結果⁽⁴⁾

$$Nu_1 = 3.20 \times \sigma_2^{0.30}$$

とを描いて見れば第 6 図および第 7 図のごとく、管の入口から直ちに熱伝達が始まる助走区間の場合の (11) 式の Nu_1 の方が同じ σ_2 に対して大きいことがわかる。すなわち、助走区間の熱伝達の方が十分発達した流れ

第 6 図

第 7 図

の熱伝達よりも大きいことがわかり、非加熱助走区間の影響のあることもわかる。

4. 実験結果の考察

(11) 式は実験結果をヌセルト数 Nu_1 と、 σ_2 すなわちグレッツ数 Gz_2 とで整理してあるが、更に内管直径 D_1 、外管直径 D_2 、伝熱長さ L 、プラントル数 Pr 、粘性係数 η [$\text{kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$]、レイノルズ数 Re 、グラスホフ数 Gr と Nu_1 との関係を求め、これらの無次元数の内に含まれる特性値 (物理定数) はいかなる温度に相当した値を取ればよいのかも検討して見る。

温度の取り方として

(1) 内管表面平均温度 T_{w1m} ($^{\circ}\text{C}$) に相当した物理定数を用いたとき、

(2) η について、入口温度 T_0 ($^{\circ}\text{C}$)、

$T_B = (T_{w1m} + T_m)/2$ に相当した値を用いたとき、

(3) Gr の温度差として

$(T_{w1m} - T_m)$, $(T_{w1m} - T_{w2m})$, $(T_{w1m} - T_0)$

および $(T_{w1m} - T_B)$

を用いた場合について考察して見る。

ただし T_{w2m} ($^{\circ}\text{C}$) = 外管温度、

$T_m = (\text{入口温度} + \text{出口温度})/2 = \text{流体の平均温度}$ 。

次にグラスホフ数 $Gr = g\beta(r_2 - r_1)^3(T_{w1m} - T_{w2m})/\nu^2$ 、プラントル数 $Pr = \nu/a$ 、レイノルズ数 $Re = \bar{w} \times 2(r_2$

$-r_1)/\nu$ 、ヌセルト数 $Nu_1 = \alpha_1 \times 2(r_2 - r_1)/\lambda_1$

において、これらの無次元数の内に含まれる物理定数を、内管壁表面平均温度 T_{w1m} ($^{\circ}\text{C}$) に相当する値を用い、入口温度 T_0 に相当する粘性を η_0 、内管壁表面平均温度 T_{w1m} に相当する粘性を η_{w1} として粘性の項を (η_0/η_{w1}) の形で整理し各無次元数の指数を、水平二重管に関する Chen, Hawking, Solberg の実験⁽⁵⁾ 結果の値を用いて整理すれば第 8 図のごとく

第 8 図

$$Nu_1 = 2.95 Re^{0.28} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta_0/\eta_{w1})^{0.14} \times \{(D_2 - D_1)/L\}^{0.4} \cdot (D_2/D_1)^{0.8} \cdot Gr^{0.05} \dots (12)$$

となる。ただし

$$Gr = g\beta(r_2 - r_1)^3 \cdot (T_{w1m} - T_{w2m})/\nu^2 = (1.3 \sim 5.7) \times 10^4,$$

D_2 = 外管内径, D_1 = 内管外径, L = 伝熱長さ、

β = 体積膨張係数 $1/^{\circ}\text{C}$ 、

Gr の代表的長さとして $(r_2 - r_1)$ を用いればよいことは流体力学の方程式からも理論的にもわかるし⁽⁶⁾、内外管壁の影響もあるはずであるから $(r_2 - r_1)$ を用いる方が妥当である。また Gr の温度差も内外管壁温度差 $(T_{w1m} - T_{w2m})$ を用いる。次に粘性の項 $(\eta_0/\eta_{w1})^{0.14}$ について考えて見るに、従来は流体の平均温度に相当した粘性が用いられているが設計などの場合に不便なことが多いので筆者は熱交換の始まらない入口の温度 T_0 に相当する η_0 と内管表面平均温度 T_{w1m} に相当した η_{w1} とを用いて整理して見た。次に最近、文献をしらべていたら偶然ではあったが、東京大学の橋藤雄教授⁽⁷⁾ が円管の熱伝達について管壁温度 T_{w1m} と入口温度 T_0 とを用いて

$$Nu = 1.53 Gr^{1/3} \cdot (\eta_0/\eta_{w1})^{0.1} \dots (13)$$

を提唱しておられるのを拝見する機会に恵まれたが (η_0/η_{w1}) で整理すれば便利なることを述べておられる。筆者が (12) 式を作った後であったが全く偶然に (13) 式の文献を拝見して、筆者が考えていたように (η_0/η_{w1}) で整理する方が便利なりとがわかった。

次に、 Gr の中の温度差の項として、内管表面温度 T_{w1m} と、流体の平均温度 $T_m = (\text{入口温度} + \text{出口温度})/2$ との差、 $(T_{w1m} - T_m)$ を用いたときの結果は第 9 図のごとく

$$Nu_1 = 2.90 Re^{0.29} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta_0/\eta_{w1})^{0.14} \times \{(D_2 - D_1)/L\}^{0.4} \cdot (D_2/D_1)^{0.8} \cdot Gr^{0.05} \dots (14)$$

第 9 図

となる。(14)式と(12)式とを比較すれば、 Re の係数は2.95と2.90、指数は0.28と0.29であり、また、この実験範囲では $T_{w2m} \doteq T_m \therefore (T_{w1m} - T_{w2m}) \doteq (T_{w1m} - T_m)$ なので、この(14)式は(12)式と実質的にほとんど一致するので実用上、同一と見なしても大差ない。

従来の G_r の定義に従えば(14)式の G_r の温度差として $(T_{w1m} - T_m)$ を用うべきであろうが、しかし内管と外管との影響も考慮に入れて(12)式のように G_r の温度差として $(T_{w1m} - T_{w2m})$ を用いる方が妥当のように思う。またこれは流体力学方程式とエネルギー式とを連立方程式として熱伝達の流体力学において無次元温度として(6)式、すなわち

$$t = (T - T_0) / (T_{w1m} - T_{w2m}) \dots \dots \dots (15)$$

において解いた場合にも $g\beta(r_2 - r_1)^3(T_{w1m} - T_{w2m})/\nu^2$ という項が現われる⁽⁸⁾ので、これを G_r において整理すれば(12)式のようになる。

次に G_r の温度差として $(T_{w1m} - T_B)$ 、 $T_B = (T_{w1m} + T_m)/2$ 、 $T_m = (\text{入口温度} + \text{出口温度})/2$ を用いたときは第10図のごとく

第 10 図

$$Nu_1 = 3.50 Re^{0.25} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta_0/\eta_{w1})^{0.14} \times \{(D_2 - D_1)/L\}^{0.4} \cdot (D_2/D_1)^{0.8} \cdot Gr^{0.05} \dots (16)$$

となる。この(16)式は(12)式、(14)式に比べて大きい値を取ることがわかる。

次に粘性の項に温度 T_B に相当した粘性 η_{TB} を、 G_r の温度差に $(T_{w1m} - T_{w2m})$ を用いて整理して見れば第11図のごとく

$$Nu_1 = 3.10 Re^{0.27} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta_{TB}/\eta_{w1})^{0.14} \times \{(D_2 - D_1)/L\}^{0.4} \cdot (D_2/D_1)^{0.8} \cdot Gr^{0.05} \dots (17)$$

となる。(17)式は(12)式、(14)式に比べて、わず

第 11 図

かに大きい値を取る。

次に粘性の項に同じく温度 T_B に相当した粘性 η_{TB} を、 G_r の温度差に $(T_{w1m} - T_0)$ を用いて整理すれば、第12図のごとく

第 12 図

$$Nu_1 = 2.50 Re^{0.33} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta_{TB}/\eta_{w1})^{0.14} \times \{(D_2 - D_1)/L\}^{0.4} \cdot (D_2/D_1)^{0.8} \cdot Gr^{0.05} \dots (18)$$

となり、(18)式は(12)式、(14)式に比して

$100 < Re < 1000$ の間では良く一致するが $Re < 100$ では少し小さく、 $Re > 1000$ では少し大きくなる。

以上の(12)、(14)、(16)、(17)、(18)式について考察して見れば(16)式が一番離れているが、他の式は(12)式の近くに落ちて来るので(12)式を用いるのが便利であると考えられる。すなわち Re 、 Pr 、 G_r に含まれている物理定数(特性値)は、内管表面温度 T_{w1m} ($^{\circ}\text{C}$)に相当したものを、 G_r の代表的長さとしては $(r_2 - r_1) = (D_2 - D_1)/2$ を、粘性の項は入口温度 T_0 ($^{\circ}\text{C}$)に相当した粘性 η_0 と、内管壁温度 T_{w1m} ($^{\circ}\text{C}$)に相当した粘性 η_{w1} を用いて $(\eta_0/\eta_{w1})^{0.14}$ として、使用するのが便利であることがわかった。無次元数の取り方と、温度に対する物理定数の取り方とを考えて見れば、(12)式において

$$Gr = g\beta(r_2 - r_1)^3(T_{w1m} - T_{w2m})/\nu^2,$$

$$Re = \bar{w} \times 2(r_2 - r_1)/\nu_1, \quad Pr = \nu_1/a_1,$$

$$Nu_1 = \alpha_1 \times 2(r_2 - r_1)/\lambda_1$$

の中に現われる ν_1 、 a_1 、 λ_1 は内管表面温度 T_{w1m} ($^{\circ}\text{C}$)に相当した値を用いる。 Re 、 Nu_1 の代表的長さは $2(r_2 - r_1) = D_2 - D_1$ を用いる。また粘性の項 (η_0/η_{w1}) においては、 η_0 は入口温度 T_0 ($^{\circ}\text{C}$)に相当する η の値を、 η_{w1} は内管壁表面温度 T_{w1m} ($^{\circ}\text{C}$)に相当する η の値を用いる。

直径比 (D_2/D_1) (または半径比 r_2/r_1)および直径と

伝熱長さ L との関係 $(D_2 - D_1)/L$ の指数は水平二重管の場合の Chen, Hawkins, Solberg の実験⁽⁹⁾ の結果を使用した. このアメリカの研究は Purdue University の Purdue Research Foundation によって, これらの研究者の一人の doctoral thesis にもとづいて Trans. A. S. M. E. 誌に発表されたもので十分信頼に足りるものと思われ, 筆者は D_2/D_1 , $(D_2 - D_1)/L$ の指数については, その研究結果を使用した.

5. 結 言

今後の発展を予想される二重円管内の助走区間の熱伝達について垂直な同心二重円環状すきまを下から上へ流れる水を内管側から加熱する実験を行い, 内管側の熱伝達について無次元数を用いて整理した.

$$\text{ヌセルト数 } Nu_1 = \alpha_1 \times 2(r_2 - r_1)/\lambda_1,$$

$$\text{レイノルズ数 } Re = \bar{w} \times 2(r_2 - r_1)/\nu_1,$$

$$\sigma_2 = \bar{w} \cdot 2(r_2 - r_1)/a_1 \cdot 2(r_2 - r_1)/L = 4/\pi \cdot G_{z2},$$

$$\begin{aligned} \text{グレッツ数 } G_{z2} &= \pi/4 \cdot Re \cdot Pr \cdot 2(r_2 - r_1)/L \\ &= \pi/4 \cdot \sigma_2, \end{aligned}$$

$$\text{プラントル数 } Pr = \nu_1/a_1$$

とにおいてこの無次元数の中に含まれている物理定数は内管壁表面温度 T_{w1m} (°C) に相当する値を用い代表的長さに $2(r_2 - r_1) = D_2 - D_1$ を用いて, ヌセルト数 Nu_1 と, σ_2 すなわちグレッツ数 G_{z2} との関係は最小二乗法によって (11) 式および第 5 図で示され次の関係がある.

$$Nu_1 = 4.99 \sigma_2^{0.26}$$

次に非加熱助走区間の存在が熱伝達に及ぼす影響が第 6, 7 図によって示される.

温度の取り方および物理定数の用い方の検討すなわちいかなる温度に相当する物理定数の値を計算に用いればよいかという考察を行い内管側の熱伝達の式として (12) 式

$$\begin{aligned} Nu_1 &= 2.95 Re^{0.28} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\eta_0/\eta_{w1})^{0.14} \\ &\times \{(D_2 - D_1)/L\}^{0.4} \cdot (D_2/D_1)^{0.8} \cdot G_r^{0.05} \end{aligned}$$

なる結果を得た. Nu_1 , Re , Pr , η_{w1} , G_r の中に現われる物理定数の値は内管壁表面平均温度 T_{w1m} (°C) に相当する値を用い, 粘性 η_0 は入口温度 T_0 (°C) に相当する粘性の値をとればよく, Nu_1 は直径比 $(D_2/D_1)^{0.8}$, $\{(D_2 - D_1)/L\}^{0.4}$ に比例し, G_r の温度差としては, 内外

管壁表面平均温度差 $(T_{w1m} - T_{w2m})$ を用いれば良いことがわかった. 内管側から加熱される場合は内管壁温度 T_{w1m} と入口温度 T_0 とによって, 流体平均温度 T_m と外管壁温度 T_{w2m} とが決定されるので, (11) 式や (12) 式の考え方のごとく, 内管壁温度 T_{w1m} と入口温度 T_0 とに相当する物理定数の値を用いることの妥当なことがわかる. これは東大, 橋博士の円管に関する御提案⁽¹⁰⁾ とも一致している. Nu_1 , Re , σ_2 , G_{z2} の代表的長さは内外直径の差 $2(r_2 - r_1) = D_2 - D_1$ を用い, G_r の代表的長さとしては $(r_2 - r_1) = (D_2 - D_1)/2$ を用いればよいことも理論的解析と実験とからわかった. 外管の存在の影響もあるはずであるから $(D_2 - D_1)$ を用いる方が妥当である.

終りにのぞみ, 学会において御懇切な御討論いただいた九州大学, 山県教授ならびに西川助教授に対し, また終始御懇切な御援助と御激励とを賜った, 本学部教授松山英太郎博士に対し, 深甚なる感謝の意を表す. 実験装置製作については機械工場の横山菊一氏の御協力をいただいたことに対し, また実験ならびに数値計算においては, 研井, 林, 宮内, 嶋田, 川原, 内山, 岡, 山根, 濃明, 梶の諸君の御協力を得たことに対して, 感謝の意を表わす. なお, この研究は文部省科学研究費による研究の一部であって心から感謝の意を表わす.

文 献

- (1) *Engineering*, Vol. 180, No. 4673, August 19, 1955, p. 233 および *原子力工業*, Vol. 1, No. 3, Jun., 1955, p. 21 および *Mech. Eng.*, Vol. 77, No. 2, Feb., 1955, p. 124 および 機械学会伝熱に関する講習会前刷 (昭30-5) p. 47, 50 および 原子力に関する講習会前刷 (昭30-10) p. 19.
 - (2) 筆者, 機械学会論文集, 21 卷 112 号 (昭30) p. 898.
 - (3) ボッシュ, 工業伝熱論 (高橋安人訳) p. 310.
 - (4) (2) の p. 899.
 - (5) Chen, Hawkins, Solberg, *Trans. A.S.M.E.*, Vol. 68, Feb. 1946, p. 99~106.
 - (6) (2) の p. 896 および p. 903.
 - (7) 橋, 生産研究, 2 卷 6 号 (1950-6).
 - (8) (6) に同じ.
 - (9) (5) に同じ.
 - (10) (7) に同じ.
- 付記: —*Trans. A.S.M.E.*, Vol. 77, No. 8, Nov. 1955, p. 1265 (円管内の層流助走区間熱伝達の数値解法), p. 1211 (円管内の乱流助走区間の長さの決定の実験).