

二重管内の助走区間の熱伝達

村 川 勝 彌

1. 緒 言

流体の速度は管壁付近で急におそくなり、速度のおそい薄層を形成する。このような速度場の境界層を速度境界層と名づけ、管入口から下流側へ次第に速度境界層が発達し、ついには管内全部が境界層になるまでの距離を速度助走区間という。速度助走区間をすぎれば、断面上の速度分布の形は一定して十分発達した流れとなる。

これと同様に物体から流体に熱が流れているときは、物体の表面は温度の高い薄層でおおわれ、これを温度境界層とよび、温度境界層も次第に発達して遂に管内全部が境界層になるに至って断面の温度分布の形は一定し、温度境界層の厚みが断面の半径（二重管では二重すきまの幅）に等しくなるまでの距離を温度助走区間¹⁾という。

工業上、二重管式の熱交換器²⁾が多数使用されているが、その場合には管入口側の速度助走区間、とくに速度助走区間と、それを経過して充分発達した下流の流れとに渡る温度助走区間の熱伝達が重要な問題となるが、これについては未だ研究は行われていないようであるから、入口の形状と自由対流とが熱伝達へ及ぼす影響ならびに、工業上、最も必要な速度助走区間と充分発達した流れとに渡る温度助走区間の熱伝達を、しらべる目的で水について、内管加熱の実験を行った。その実験装置と実験結果とについて述べ、各種実験結果の比較検討を行った。

2. 実験装置と実験結果

先ず記号と計算法とについて述べる。

$$\text{熱伝達率 } \alpha_1 [\text{Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}] = Q_1 / \{F_1 \cdot (T w_{1m} - T_0)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_1 [\text{Kcal/h}] = \text{供給熱量} = 0.86 \times V (\text{ボルト}) \times i (\text{アンペア}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$F_1 [\text{m}^2]$ = 内管側表面の伝熱面積, $T w_{1m} [^\circ\text{C}]$ = 内管表面平均温度, $T_0 [^\circ\text{C}]$ = 水の入口の温度, $T w_{2m} [^\circ\text{C}]$ = 外管表面平均温度

$$\text{ヌツセルト数 } Nu_1 = \alpha_1 \times 2(r_2 - r_1) / \lambda_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$D_2 = 2 \cdot r_2 = \text{外管の内径} [\text{m}], D_1 = 2 \cdot r_1 = \text{内管の外径} [\text{m}], \lambda_1 [\text{Kcal/mh}^\circ\text{C}] = \text{熱伝導率}$$

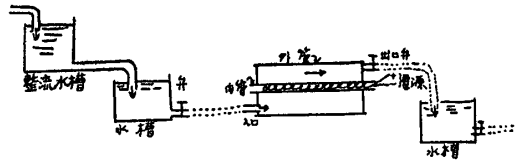
$$\text{レイノルズ数 } Re_1 = \bar{w} \times 2(r_2 - r_1) / \nu_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{w} [\text{cm/s}] = \text{平均流速}, \nu_1 [\text{cm}^2/\text{s}] = \text{動粘性係数}$$

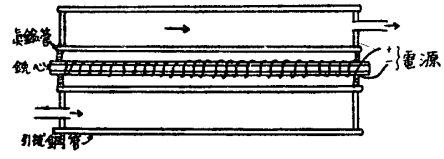
$$\sigma_2 = \bar{w} \cdot 2(r_2 - r_1) / a \cdot 2(r_2 - r_1) / L = 4 / \pi \cdot Gz_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Gz_2 = グレツ数 = $\pi/4 \cdot Re_1 \cdot Pr_1 \cdot 2(r_2 - r_1) / L = \pi/4 \cdot \sigma_2$, $Pr_1 = \nu_1 / a = \text{プラントル数}$, $a = [\text{cm}^2/\text{s}]$ = 温度伝ば率, $L [\text{cm}]$ = 伝熱長さ, ただし λ_1, ν_1, a の値は内管表面平均温度 $T w_{1m} [^\circ\text{C}]$ に相当する値を用い、水に関する M. ten Bosch³⁾ の表から求めた。

第1図に水平型のうちで水の入口と出口とが平行な場合の実験装置の略図を示す。第2図にその実験部分の詳細を示してある。熱源は電源を用い鉄心にアスベストのひもを巻き、その上に、ニクロム線を巻いたものを熱源として真鍮管 ($D_1 = 30\text{mm}$) よりなる内管の中に入れてある。外管 ($D_2 = 70\text{mm}$) は引抜鋼管である。水の入口、出口は径 10mm の小鉄管が使ってあ



第1図 平行型



第2図 実験部分

る。長さ $L=1,800\text{mm}$ ，水入口温度 $T_0=8\sim 16^\circ\text{C}$ ，水出口温度 $=12\sim 39^\circ\text{C}$ ，内管表面平均温度 $T w_{1m}=14\sim 56^\circ\text{C}$ ，外管表面平均温度 $T w_{2m}=9\sim 51^\circ\text{C}$ ；平均流速 $\bar{w}=0.01\sim 0.6\text{cm/s}$ ， $Re_1=10\sim 226$ 。

水の流量はメスフラスコと、ストップウォッチで測定した。

内外管壁温度は 0.2mm エナメル被覆の銅—コンスタンタン熱電対を内管には3箇（上，中，下）を3箇所に計9箇を用い，外管も同様9箇を用いて測定し，熱電対は全部補正してある。実験結果を， Nu_1 と σ_2 で整理して両対数方眼紙に示したものが第3図である。第3図は次の実験式で示される。

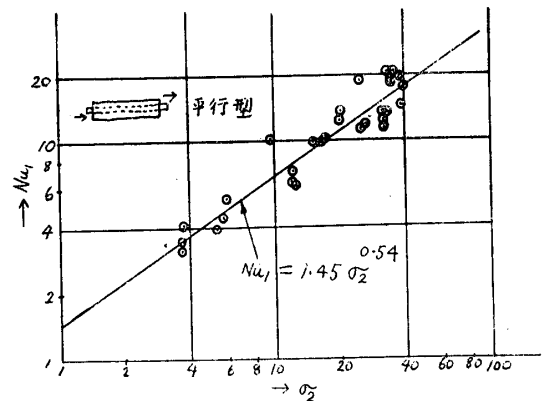
$$Nu_1 = 1.45 \sigma_2^{0.54} \dots \dots \dots (6) \text{ (平行型)}$$

第4図は水平型のうちで直交型を示し，第3図と構造，材質など全く同じであるが，ただ水入口が管の軸に対して直角になっている場合である。

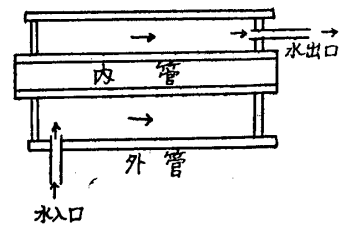
水入口温度 $T_0=8\sim 12^\circ\text{C}$ ，水出口温度 $T_0=13\sim 38^\circ\text{C}$ ，内管表面平均温度 $T w_{1m}=15\sim 50^\circ\text{C}$ ，外管表面平均温度 $T w_{2m}=11\sim 45^\circ\text{C}$ ，平均流速 $\bar{w}=0.02\sim 0.6\text{cm/s}$ ， $Re_1=4\sim 260$ 。

第4図の直交型の実験結果を Nu_1 と σ_2 で整理して両対数方眼紙に示したものが第5図である。第5図は次の実験式で示される。

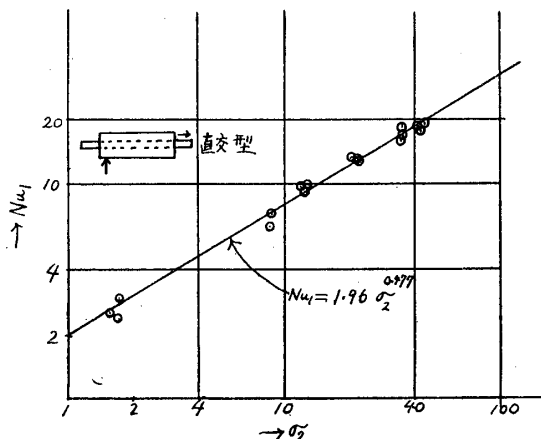
$$Nu_1 = 1.96 \sigma_2^{0.477} \dots \dots \dots (7) \text{ (直交型)}$$



第3図 平行型の熱伝達



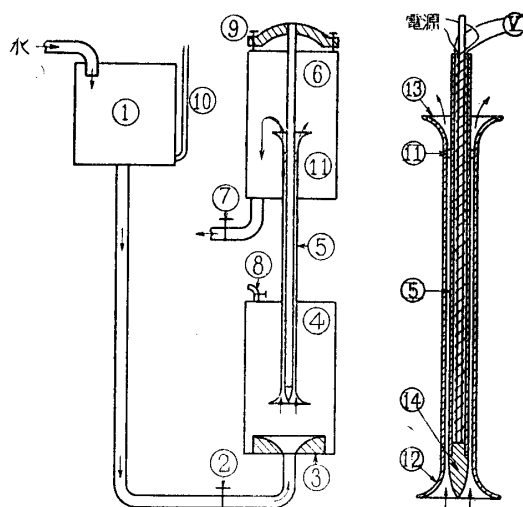
第4図 直交型



第5図 直交型の熱伝達

第6図は垂直型の実験装置を示し，高さは 3m で垂直な同心二重すきまの助走区間を下から上へ流れる水を内管側から加熱する実験を行った。第7図に測定部を示す。第6図の①は整流水槽で一辺にせきを設け水を流下させて水位を一定に保たせ，②は入口弁で実験開始前に閉じて垂直二重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7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④内の空気を外へ出すのに用いられる。⑨は垂直二重管を垂直に保つ管ささえで三点で支持され微細な調整用のねじを切ったボルトが用いてある。⑩は①の水面計である。次に第7図において⑪は内外管を同心にするために内管（銅管）に、しめつけられた薄いスチールバンドで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ための入口ラッパ型案内、⑬は出口側のラッパ型案内で、共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真鍮から流線型に機械仕上げがしてある。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



第6図垂直型（高さ3m） 第7図測定部

（③を出た所），出口温度（⑪を出た所）測定には0.2mm 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出してある。熱電対は内管側に4箇所，外管にも4箇所埋めてある。出口にある⑩で同心に保たれるが，これは出口にあるから測定部には影響しない。測定には水流および温度が定常状態になるまで待ち，水流に振動を与えぬように，また層流を乱さぬように注意した。温度測定用には0.1mm V 目盛の刻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，又，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。

$D_1 = 2 \cdot r_1 = 30\text{mm}$ （銅管）， $D_2 = 2 \cdot r_2 = 55\text{mm}$ （引抜鋼管）， $L = 1,400\text{mm}$ 。

水入口温度 $T_0 = 6 \sim 10^\circ\text{C}$ ，水出口温度 $= 8 \sim 21^\circ\text{C}$ ，平均流速 $\bar{w} = 0.07 \sim 3.2\text{cm/s}$ ， $T_{w_{1m}} = 9 \sim 24^\circ\text{C}$ ， $T_{w_{2m}} = 7 \sim 23^\circ\text{C}$ ， $Re_1 = 18 \sim 766$ 。

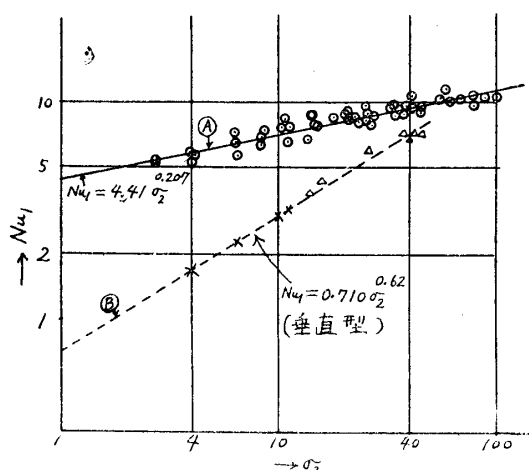
第8図のA線が実験結果で自由対流と層流とが共存するときを表わし

$$Nu_1 = 4.41 \sigma_2^{0.207} \quad \dots\dots\dots (8)$$

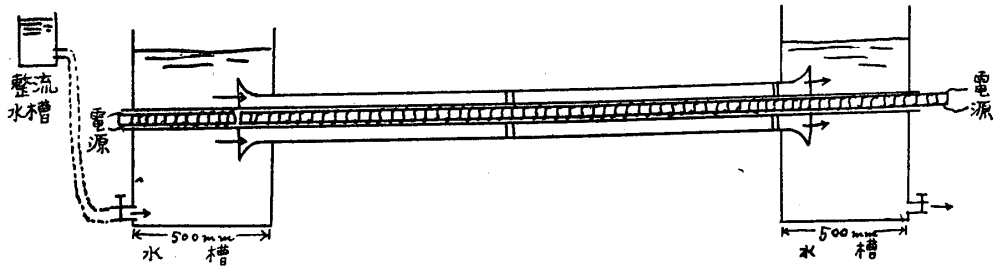
で示される。B線は，自由対流の影響を除く方法⁴⁾によって求めたもので，層流だけの場合を示し

$$Nu_1 = 0.710 \sigma_2^{0.62} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表わされる。



第8図 垂直型の熱伝達



第9図 水平型装置(全長5m)

第9図に水平型の実験装置の略図を示す。これによって、速度助走区間の熱伝達ならびに、速度助走区間と充分発達した流れに渡る温度助走区間の熱伝達の実験を行った。装置の全長は5mで、内管には外径 $D_1=35\text{mm}$ の銅管を、外管には内径 $D_2=55\text{mm}$ の引抜鋼管を用いた。水流を乱さないために入、出口には第6,7図のごとき、ラップ型入口、出口をとりつけた。5mの銅管内にニクロム線を巻いた熱源を入れるので中央部が少したわむので、同心水平に保つために薄いスチールバンドの管支えを、入口と出口との中央部と、出口との2箇所に入れた。管壁温度測定には0.2mmエナメル被覆の銅—コンスタantan熱電対を使用し、管軸に直角な断面内では上、中、下と3箇所を入口から出口側へ800mmおきに5箇所に埋込んだので内外管、合計30箇所を使用し、0.1mmV目盛の刻まれた懸垂型ミリボルトメーターを補正して使用し、冷接点は氷で0°Cに保って一定にしてある。内管内部に入口側から、別のニクロム線を巻いた熱源を入れて、熱が入口側(図では向って左の方向)へ逃げないように等温に保つために、別の電源に連結してスライダックによって調整するために別の電対が2対入れてある。実験用の供給熱量や、流量測定などは、上述の垂直型(第6,7図)のごとくに行った。水入口温度 $T_0=6\sim 14^\circ\text{C}$ 、水出口温度 $=8\sim 38^\circ\text{C}$ 、内管平均温度 $=8\sim 40^\circ\text{C}$ 、外管平均温度 $=7\sim 39^\circ\text{C}$ 、平均流速 $\bar{w}=0.08\sim 3.8\text{cm/s}$ 、 $Re_1=22\sim 620$ 。

第10図に、ラップ型入口を持った速度助走区間の実験結果を示す。Ⓐ線は自由対流と層流とが共存する時で

$$Nu_1 = 1.43 \sigma_2^{0.566} \dots\dots\dots(10)$$

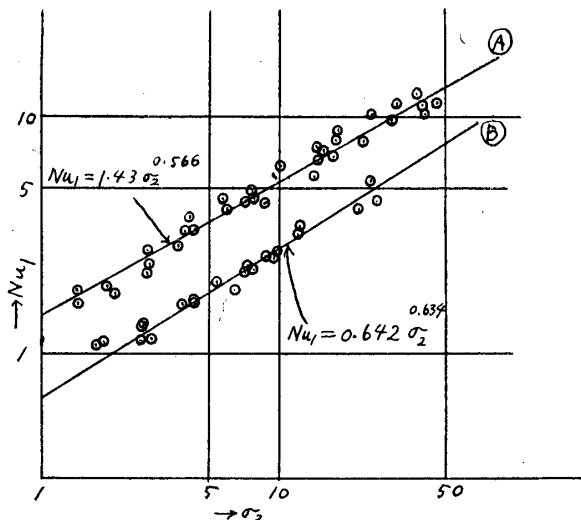
で示され、Ⓑ線は自由対流の影響を除く方法³⁾とニクロム線の巻き方を変えて求めたもので層流だけの場合を示し

$$Nu_1 = 0.642 \sigma_2^{0.634} \dots\dots\dots(11)$$

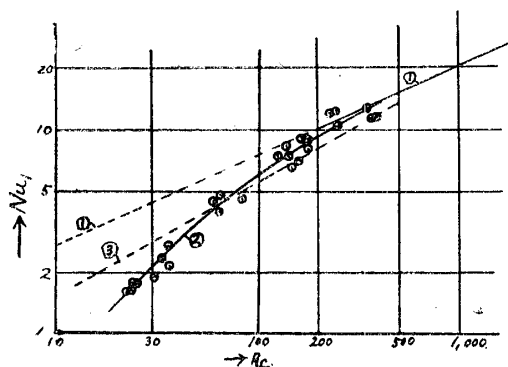
で表わされる。

次に45°方向から水が流入する場合の速度助走区間についてはアメリカのChen, Hawkins, Solbergの実験結果⁶⁾がある。

これはアメリカのPurdue Universityのthe 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⁷⁾に発表されたもので、両対数方眼紙上に第11図で著者の実験値とアメリカの実験値との比較を、実験値をひろって図示してある。アメリカの



第10図 速度助走区間の熱伝達



第11図 アメリカの実験との比較

実験は①の線で示されるが $Re > 200$ の場合であるので Re の小さい方へ点線①のごとく延長して見る。著者の実験値は②の線のごとく $20 < Re_1 < 400$ の場合で実験範囲がちがうので①と②とを直接に比較はできないが大体の傾向は分るようになる。又、②の線は Re が大きくなれば①の線に一致して来る。①の延長した点線と、②の実線とについて $20 < Re < 200$ の範囲で比較すれば①の方が Nu が大きい。これは 45° 方向から水が流入するので、内管壁に直角方向の速度成分が、②

のラップ型入口の場合よりも大きいので熱伝達も良くなるのではないかと考えられる。したがって著者の実験の方が、水平二重管の速度助走区間の熱伝達について、より正確な本来の値をあたえると考えられ、数値計算にも内管温度 Tw_{1m} と入口温度 T_0 とが基準になっているので便利であると思われる。なお②の曲線では表示が複雑になるので $20 < Re < 200$ の範囲では③の直線で代用すれば便利である。著者の実験とアメリカの実験とは実験範囲が異なっているので、正確に、しかも直接に、比較は出来ないが、大体の傾向だけは第11図によって想像できるようなのである。

次に速度助走区間の長さ L は、著者が求めた理論式⁸⁾

$$\frac{L}{r_2 - r_1} = Re \cdot w_0(x=0.5) \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{k_s^2} \dots\dots\dots (12)$$

から求められるが此の速度助走区間の実験においては管の入口から 2,500mm の所(管の全長 5m の中央の所)までを測定して速度助走区間の熱伝達の実験とした。

温度助走区間については速度助走区間の長さよりも更に長くなることが予想され、入手できる管長が 5,000mm であったので管長の全域(入口から出口までの 5m)にわたって測定を行って速度助走区間と、それを経過して充分発達した流れとに渡った温度助走区間の熱伝達を決定した。

次に速度助走区間と、これを経過して充分発達した流れとに渡った温度助走区間の熱伝達の実験は第9図の両水槽間の全域(装置の全長=5m)について行った。第12図の①線は自由対流と層流とが共存する場合

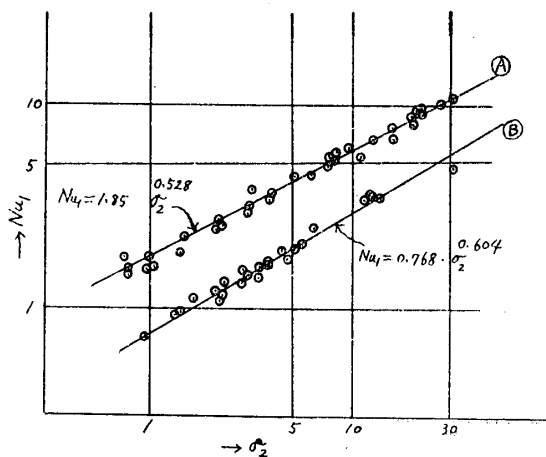
$$Nu_1 = 1.85 \sigma_2^{0.528} \dots\dots\dots (13)$$

で表わされる。第12図の②の線は自由対流の影響を除く方法⁹⁾とニクロム線の巻き方を変えて求めたもので層流だけの場合を示し

$$Nu_1 = 0.768 \sigma_2^{0.604} \dots\dots\dots (14)$$

で表わされる。

工業上、最も必要な速度助走区間と、それを経過して充分発達した流れとに渡る温度助走区間の熱伝達の計算は(13)、(14)によって行われ、これらの式は内管壁温度 Tw_{1m} と入口温度 T_0 とが基準になっているので数値計算に



第12図 温度助走区間の熱伝達

便利である。

3. 結 論

各種の実験結果の比較検討と結論とを次に述べる。各型式において自由対流と層流とが共存する場合を第13図にまとめて示す。

平行型①と直交型②とは、直交型は水の塊が内管壁に突当り、内管壁に直角方向の速度成分も大きく、入口部分は攪拌され、その攪乱効果のためにも、ヌッセルト数 Nu_1 が大となる。

速度助走区間④と温度助走区間⑤（速度助走区間と充分発達した流れに渡る全域。装置の全長=5m）と比較すれば、内管壁温度分布は、出口側すなわち、入口部分（速度助走区間）を經過して充分発達した流れの側で最大値（温度分布の山）を示しているのに対して、水温は入口から出口に直線的に増加しているため内管壁と水との温度差は発達した流の領域内の方が、入口部分よりも大であるから、自由対流の影響が大であって、温度助走区間⑤の方がヌッセルト数 Nu_1 が大きい。

平行型①と温度助走区間⑤とを比べると、 $\sigma_2=6$ の付近で交って、 $\sigma_2<6$ では温度助走区間⑤の方が大となり、 $\sigma_2>6$ では平行型①が大となっている。これは流速が小なるときは、温度助走区間の実験装置は管入口ラップ型のために管入口部分の水が、入口水槽の低温水で冷却され熱伝達は良くなるが、平行型の実験装置では入口側の壁にあけられた小孔（径10mm）より二重管内に水が放出されるから低温水による冷却がなく、したがって $\sigma_2<6$ では温度助走区間の熱伝達が大となる。 $\sigma_2>6$ のときは温度助走区間の装置では、層流状態で出口側へ水が流れ入口水槽の影響が少なくなるのに反し平行型では入口部分で流れが攪拌され攪乱効果のため平行型の方が Nu_1 が大きくなる。

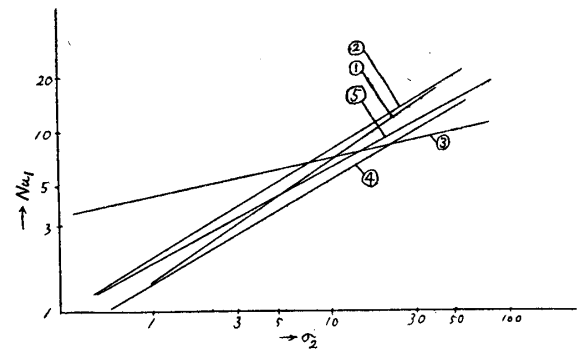
垂直型と水平型とを比べると σ_2 が小さいときは自由対流のため垂直型の方が、管壁に直角方向に水の出入りが大で Nu_1 が大となるが、水平型の方は内管壁にそった層流となって Nu_1 は小さい。逆に σ_2 が大となれば垂直型の方は壁に対して殆ど平行流れで一次元的となるに対し、水平型の方は管壁に直角方向の成分が存在して三次元的流れとなり Nu_1 が大となる。ラップ型入口を持つたものが二重管における固有の(本来の)ヌッセルト数 Nu_1 をあたえるが、アメリカの実験は 45° 方向から流入するので管壁に直角方向の速度成分が大であるからアメリカの実験値の方が大きくなっている。

次に結論として、(1) σ_2 が小なるときは、自由対流を利用して垂直型の方が有利であり、(2) σ_2 が大なるときは強制層流による水平型の方が有利となり、(3) 水平型の中でも、管寄があって内管壁に直角方向に流体が流入する直交型の方が熱伝達は良くなる。

上述の実験式中に含まれている物理常数は内管壁表面温度に相当した値を使用し、無次元数は次式で定義する。

$$Nu_1 = \alpha_1 \times 2(r_2 - r_1) / \lambda_1, \quad Re_1 = \bar{w} \times 2(r_2 - r_1) / \nu_1, \quad Gr_1 = g\beta(r_2 - r_1)^3(Tw_{1m} - Tw_{2m}) / \nu_1^2.$$

この実験では Gr_1 は 10^4 程度であって、完全に一定ではないが、 10^4 に近いものまで共に



第13図 実験結果の比較

図示したため第3図, 第10図, 第12図では実験点が見見かけの上では少し, ばらついているように見える。

以上によって, 入口形状と自由対流とが助走区間の熱伝達に及ぼす影響ならびに, σ_2 の大小によって有利な型式も分った。又, 工業上, 最も必要な速度助走区間と, それを經過して充分発達した流れとに渡る温度助走区間の熱伝達についての研究は従来行われていないようであるが, これについても, 全長 5m の装置で実験を行った。

実験ならびに数値計算においては研井, 林, 宮内, 嶧田, 岡, 山根, 濃明, 梶, 川原, 内山の諸君の御協力をえたことに対して, 感謝の意を表わす。

なお此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。

(昭和31年10月1日, 日本機械学会, 東京秋期講演大会において講演したものである。)

文 献

- 1) 栗野, 葛岡, 伝熱工学 p. 40, 図 2.9, p. 56, p. 57 及び熱機関体系 2, p. 454~p. 456.
- 2) Mechanical Engineering, June 1953, vol. 75, No. 6, p. 472, p. 473 fig. 3.
 Mechanical Engineering, July 1956, vol. 78. No. 7, p. 611, p. 612.
 日本機械学会誌, 59巻, 448号, 昭和31年5月, p. 414.
 Nucleonics, 1954—8, vol. 12, No. 8, p. 8~11.
 Nucleonics, vol. 11, No. 6, June 1953, p. 32, p. 63.
 Nucleonics, vol. 10, No. 1, January 1952, p. 31.
 B. W. K. Bd. 6, Nr. 9. Sept. 1954, p. 371.
 Nuclear Science Abstracts vol. 7. Sep.—Dec. 1953, p. 581.
 原子力工業 vol. 2, No. 7. Jul. 1956, p.12, 15, 16, 19.
 原子力工業 vol. 2, No. 9, Sep. 1956, p. 14, 16, 18.
 原子力工業 vol. 2, No. 10, Oct. 1956, p. 12, 16.
 Mech. Eng. Feb. 1957, vol. 79, No. 2, p. 187.
 Proc. Inst. Mech. Engrs. 1956, vol. 170, No. 10, p. 323, fig. 4, fig. 6, fig. 10.
 Proc. Inst. Mech. Engrs. 1956, vol. 170, No. 8, p. 283, fig. 3.
 原子核工学, 杉本朝雄訳, p. 178, p. 181.
 J. Am. Inst. Chem. Engrs. 1, 501, 1955.
 Mech. Eng., May, 1958, vol., 79, No. 5.
 工業物理学講座(杉本朝雄) p. 25, 第1.6図, 第1.7図
 原子核物理学(上巻) 菊池正士, p. 101.
 Mech, Eng. Jan. 1957, vol. 79, No. 1, p. 96.
 Oak Ridge National Laboratory Report, No. 521, 1950.
 The Review of Scientific Instruments, vol. 28, No. 5, May 1957, p. 376, fig. 2, fig. 3.
 日本機械学会誌, 60巻, 462号, 昭和32年7月号, p. 746, fig. 1, fig. 2.
 Mech. Eng. December 1956, vol. 78, No. 12, p. 1139 (Calder Hall Reactor).
 Mech. Eng. June 1957, p. 564.
 Engineering, vol. 183, No. 4759. May. 24, 1957, p. 666, fig. 7.
 The Chartered Mech. Engr. June 1957, vol. 4, No. 6, p. 291.
 Selected Articles on Nuclear Power reprinted from the Westinghouse Engineer,
 (Reprint 5240) Westinghouse Testing Reactor p. 40, p. 41, fig. 4.
 Ind. & Eng. Chem., July 1957, vol. 49, No. 7, p. 1144.

- 3) ボツシュ, 工業伝熱論 (高橋安人訳), p. 310, 第40表。
- 4) 栗野, 葛岡, 伝熱工学 p. 279, (橘藤雄)
- 5) 4)におなじ。
- 6) Chen, Hawkins, Solberg, Trans. A. S. M. E. 1946, Feb. vol. 68, p. 99~p. 106.
- 7) 6)におなじ。
- 8) 村川勝彌, 日本機械学会論文集, 22巻, 117号, p. 352.
- 9) 4)におなじ。