536.242.023 : 532.542

軸方向流れのある回転二重円管の熱伝達*

橋 藤雄**, 福井資夫***, 三ッ村久雄****

Convective Heat Transfer of the Rotational and Axial
Flow between Two Concentric Cylindersby Fujio TACHIBANA, Sukeo FUKUI,
and Hisao MITSUMURA

This paper considers the convective heat transfer of the flow in the annular gap with axial flow between a rotating inner cylinder and a stationary outer cylinder. The experimental results indicate that the heat flow from the surface of the inner rotating cylinder is the sum of the following two kinds of the heat flow: one by turbulent vortices induced by rotation instead of Taylor vortices and the other by the turbulent axial flow.

For turbulent vortices we have the empirical equation for the overall heat transfer coefficient when without axial flow :

$$\frac{U\delta}{\lambda} = 0.046(T_a^2 P_r)^{1/3}$$

Moreover for the turbulent axial flow we have the empirical equation on the heat transfer coefficient :

$$\frac{\alpha \cdot 2\delta}{\lambda} = 0.015 \left(1 + 2.3 \frac{2\delta}{L} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.45} R_{aa}^{0.3} P_r^{1/3}$$

Here is shown that this correlation of summing up the two heat flows is applicable to the wide region of such mixed flow.

1. 緒 論

内管が回転し外管が静止している同心二重円管の間げき部に軸方向の流れがあり内管表面から熱伝達が行なわれるような例は電動機や発電機のロータあるいは軸受等にみられる。このような流れは複雑なもので研究の数も少なくあまり解析的なものはないが二つの流れがそれぞれ単独で存在する場合には数多くの研究もあり報告も発表されている。

二重管の内側円筒が回転しこの間げき部の流れの安定については有名な Taylor⁽⁹⁾ の研究があり、その熱通過には K. M. Becker & J. Kaye⁽¹⁾ および筆者ら⁽⁸⁾ の実験がある。また回転を伴わない二重管の乱流熱伝達にもかなりの文献がみられるが、二つの流れが重ね合わされた伝熱機構の研究としては 1958 年の C. Gazley⁽⁵⁾ の実験と J. Kaye & E. C. Elgar⁽⁶⁾ の研究があるにすぎない。C. Gazley の実験は静止および回転円

管の両表面が平滑なものほか電動機のスロットを模倣した種々のみぞのあるものを組合わせて実験し、摩擦係数と熱伝達率を求め実験値を整理するのに合成速度を提案している。この合成速度は軸方向の流速と回転表面の周速の半分のベクトル和であり、このような整理を行なうと熱伝達率はその 0.8 乗に比例して増減することを示したが、周速が大きくなり遠心力による二次的な流れの影響が無視しえない領域までも成り立つとは考え難い。また J. Kaye & E. C. Elgar⁽⁶⁾ は熱線風速計でその間げき部の速度分布を測定し流れの写真とともに四つの領域—層流・乱流およびそれぞれにうずの重ね合わされたもの—のあることを明らかにしたが、両円管間の熱通過については実験を行っていないように見うけられるが数値は示されていない。

本研究は先に報告した回転二重円管で軸方向流れのない場合の両円管間の熱通過に関する研究に続いて実用上興味のある軸方向流れの重ね合わされたときの回転する内管表面からの熱伝達について実験を行ない結果を整理して流れの性質に応じて広い範囲に利用できる二三の実験式を導いた。整理の途中で軸方向流れのみの単純な二重管の熱伝達についてはかなり文献があ

* 昭和 35 年 11 月 3 日 第 38 期全国大会講演会において講演，
原稿受付 昭和 38 年 2 月 11 日。

** 正員，東京大学生産技術研究所。

*** 正員，東京芝浦電気会社中央研究所(川崎市東芝町)。

**** 東京芝浦電気会社。

るにもかかわらず、助走区間の影響、二重管の内外管から加熱するかあるいは一方からは冷却するかといった加熱の条件等による影響については従来あまりふれられていないことを知ったので別の実験装置をつくってこの点をも明らかにした。同時に回転二重円管で軸方向の流れがなく回転が速く間げきも大きくなると規則的なテイラーうずが消滅して全く乱れた流れを示すが、この場合の熱通過についても実験し、最終的にはこの回転による放熱量と単純な二重管の軸方向流れによる放熱量の和として二つの流れが重ね合わされた場合の放熱量が示されることを確かめそれぞれの実験式を導いた。

実験に使用した内側の円管の外径は 30mm, 38 mm, 120 mm で間げき幅は 4 mm, 8 mm, 11 mm, 12 mm, 20 mm, 21.35 mm および 53 mm の 7 種類使用した。流体は空気、水およびメタノール、したがって軸方向レイノルズ数は $3.80 \times 10^2 \sim 4.96 \times 10^4$ 回転によるテイラー数は $0 \sim 6 \times 10^5$ の範囲で実験を行なった。

2. 実験装置および方法

実験装置は 4 種類あって、その中の一つは二重管の内外管とも固定で回転せず、他の三つはいずれも内管が回転するが、一つは内管が加熱器を内蔵して外管で冷却され、もう二つは外管が加熱されて内管に冷却水を通してある。

内外管固定の実験装置—[A]は水平に保持された二重管で内管の外径 38 mm, 外管の内径は 60 mm, 80.7 mm の 2 種類ある。内管は銅管の内部に別々にニクロム線の加熱器をいれた六つのセクションに分れ、一つの長さは 70 mm または 80 mm, 各セクションの間にベークライト製の厚さ 4 mm のリングがそう入してあり全長は 484 mm である。外管は 1 本の鋼管で保温は施してなく大気にさらされ、内管と外管の間げきは前後それぞれ 3 点で水平に支持され空気は送風機から長い管および流量測定用のオリフィスを通して間げ

第 1 図 実験装置 [B]

き部に送られ、その流速は $4 \sim 32$ m/s である。測定は前縁から 4 および 5 番めの長さ 70 mm のテストセクションについて行なわれ、表面温度はそれぞれ 3 点—中央および両端—に銅-コンスタンタン熱電対を銅管内側表面にはんだ付けして測定し、両端の熱電対は両隣のセクションのそれぞれこれと対称点の温度と同一にして各セクション間相互に軸方向に熱の出入のないように各加熱器の電気的入力調節するのに用いる。各セクションの放熱量は加熱器の電気入力から計算し、空気温度は入口で 2 点、出口で 2 点熱電対で測定してその平均値をとり、これと各表面温度との差から熱伝達率を求めた。放熱量のうちふく射による分は計算によって差引いた。

内管が回転する実験装置は内管加熱のものと同外管加熱のもの 2 種類がある。内管加熱の実験装置—[B]は第 1 図に示すごとく内管の外径は 120 mm, 試験部の長さ 45 mm でこれと同軸に上流に長さ 190 mm, 下流に長さ 45 mm の同一直径の温度補償用円筒があり、いずれも内部に絶縁されたニクロム線の加熱器をもっている。外管はその外周に冷却水のジャケットが取り付けられてあり、その内径は 128 mm, 136 mm, 144 mm および 160 mm の 4 種類である。試験部表面温度の測定は回転する内管はサーミスタを用い、補償円筒との間の温度差と静止外管の表面温度は熱電対を用いてある。空気温度の測定はそれぞれ出入口で熱電対を用い軸方向平均流速は送風ダクトの途中にもうけたオリフィスによる空気流量より計算した。

外管加熱のものは 2 種あって分割した外管をもつ装置—[C]と一体の外管をもつ装置—[D]とがある。前者は外管を六つのセクションに分けそれぞれ内径は 136 mm, 一つのセクションの長さ 50 mm で外周は十分に保温してある。内管は外径 120 mm のもの一つでこれは中空になっていて冷却水を流す。表面温度の測定は静止外管のみ行ない各セクション 3 箇所中央と両端に銅-コンスタンタン熱電対をはんだ付けしてあり、隣接するセクションの相対する温度を同一に保持する。以上三つの実験はいずれも空気のみについて行なわれたが、軸方向流れがなく規則正しいテイラーうずが消滅し乱れたうずを示すテイラー数の大きい場合の実験は水およびメタノールで行なわれた。

この後者の装置—[D]は外管加熱であるが、単一で長い外管をもち内管外径が著しく小さい間げき幅を大きくしてある。外管の内径は 136 mm, 長さ 250 mm で外側にニクロムの加熱器を巻きつけその外周は十分に保温されている。回転する内管の外径は 30 mm で回転数は $228 \sim 2700$ rpm 中空の内部を冷却水が流れる。

静止外管の表面温度は6点銅-コンスタンタン熱電対を用いて測り, 回転する内管表面は1点のみ熱電対を用いてスリッパリングを通して測定した。その位置は第2図に示す。

このほか内管加熱の装置[B]で実用上の応用を考慮して回転する内管表面に幅 10 mm, 深さ 3 mm, 円周上 16 等分のみぞのある回転子についても実験を行ない, みぞの影響を知るためこの回転筒を大気中で回転し, また回転二重円管の内管としてみぞの底部と山部の平均外径と外管内径との間げきが 3.5 mm, 5.5 mm, 9.5 mm および 20.5 mm の4種類について, 回転数を 44~2 450 rpm と変化して実験を行なった。

3. 実験結果

実験の結果は三つに分けられ, 最初のものは回転のない単純な二重管の軸方向流れによる乱流熱伝達であり, 2 番めのものは軸方向流れはなく内管が回転し外管との間で熱の授受を行ないテイラー数の著しく大きい場合で, 最後のものはこの両者が共存するときの熱伝達である。すなわちこのように二つの流れが重ね合わされたときの流れの性質に関するようすを分けると五つの領域がある。

層流・乱流・層流+テイラーうず・乱れたうずおよび乱流+乱れたうずでこの関係を図に示したものが第3図である。この図についていえば最初の実験結果は領域A(乱流)のものであり, 2 番めのものは横軸上C(乱れたうず)を最後のものは領域B(乱れたうず+乱流)を説明するものと考えられる。

3.1 二重管の乱流熱伝達 まず単純な乱流域Aについては多くの研究があり種々な整理方法が与えられてきた。Carpenterら⁽²⁾は内外径比 1.334 の二重管に水を流して内管を加熱し, その結果が管内流れの Sieder & Tate⁽¹¹⁾ の式より平均して 15 % 低いことを示し, McAdams ら⁽⁷⁾は蒸気について内管を電気抵抗加熱して外側を保温し局所的な熱伝達率を次のように表わしている。

第2図 実験装置[D]および温度測定点

$$\frac{\alpha_2 D_e}{\lambda_f} = 0.0214 \left(1 + 2.3 \frac{D_e}{L} \right) \left(\frac{D_e G}{\mu_f} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)_f^{1/3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

また Davis⁽⁸⁾は多くの研究者の実験を整理して, 内管に対しては

$$\frac{\alpha D_1}{\lambda} = 0.031 \left(\frac{D_1 G}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.15} \quad \dots\dots\dots (2)$$

外管に対しては

$$\frac{\alpha D_e}{\lambda} = 0.025 \left(\frac{D_e G}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\frac{D_2}{D_2 - D_1} \right)^{0.1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

のごとくまとめている。ここで α_x は局所的な熱伝達率 kcal/m²h°C, 添字 x のないものはその平均値, D_e は相当直径でここでは間げき幅を δ m とするとその2倍の 2δ , L は加熱開始点からの距離 m, D_1, D_2 は二重管の内管外径および外管内径 m, G は軸方向の質量流れ kg*/m²h, λ, c_p, μ は物性値でそれぞれ流体の熱伝導率 kcal/m h°C, 比熱 kcal/kg°C, 粘性係数 kg*/m h である。

しかし以上従来の研究はいずれも内管または外管を加熱して片方は保温したものがほとんどであり, 本実験では一方を加熱するとともに他の一方を冷却したときの熱伝達率を求めたが, 測定部が加熱開始点に近く全長が短いため助走距離の影響が予想されたので, 分割した加熱管を用い内外管を加熱するか一方のみ加熱し他方を冷却して各加熱管についての局所的な熱伝達率を求めた。実験は装置[A], [B]および[C]について行なわれ, 間げきは 4 mm, 8 mm, 11 mm, 19 mm および 21.3 mm レイノルズ数が $1.5 \times 10^3 \sim 4.4 \times 10^4$ の範囲にわたり, その結果を第4図と第5図に示す。第4図は横軸にレイノルズ数 $Re = v_a \cdot 2\delta / \nu$, 縦軸にヌセルト数 $Nu = \alpha \cdot 2\delta / \lambda$ を $Pr^{1/3} \{1 + 2.3(2\delta/L)\} (D_2/D_1)^{0.45}$ で除したものをとっている。

J. Kaye と E.C. Elgar⁽⁶⁾ による回転二重円管間の流れの分類に乱れたうずの領域を付加してある

第3図 流れの分類

ここで v_a は軸方向の平均流速 m/s, ν は流体の動粘性係数 m^2/s , Pr はプラントル数である。

実験値はかなりばらついているが、助走距離の影響は McAdams によって与えられた $1+2.3(2\delta/L)$ の項を積の形で加えて整理すると比較的よくまとめられ、外管を加熱して内管を冷却したときの外管表面の熱伝達率とその逆のときの内管の表面熱伝達率との間にはほとんど差はみられない。また第 5 図は一方の壁を加熱し他方を冷却したときと両方加熱したときの熱伝達率の差を示し後者のほうが約 15% 高く、式の形で示すと片側加熱片側冷却：

$$Nu = \frac{\alpha D_e}{\lambda} = 0.015 \left(1 + 2.3 \frac{D_e}{L} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.45} Re_a^{0.8} Pr^{1/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

両側加熱：

$$Nu = \frac{\alpha D_e}{\lambda} = 0.017 \left(1 + 2.3 \frac{D_e}{L} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.45} Re_a^{0.8} Pr^{1/3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。(5) 式は Davis の実験式と比較して約 10% 低めであるが Carpenter らの実験値とはよく一致している。また両壁面加熱と片側加熱の差は平行壁面間の流れについての Seban⁽¹⁰⁾ の計算によると、流体のプラントル数に依存し $Pr=0.7$, $Re=10^5$ として、両側加熱のほうが約 30% 高く、片側から加熱し片側が完全

第 4 図 二重円管の乱流熱伝達

第 5 図 二重管の乱流熱伝達

に熱絶縁されている場合はちょうどその中間の値をとるが、この実験の結果はそれほど大きな差はなく両側加熱の熱伝達率は片側冷却の場合のものより約 15% 高いにすぎない。

3.2 回転二重円管間の乱れたうずによる熱伝達

二重円管の内管が回転し外側円管との間にはさまれる間げきの熱伝達と流れについては既に報告⁽⁸⁾し内外管間の熱通過率を $U \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, 内管の半径を $r \text{ m}$, v_r を周速 m/s とすると次のように表わされることを示した。

$$\frac{U\delta}{\lambda} = 0.21 \left(\frac{v_r^2 \delta^2}{\nu^2} \frac{\delta}{r} Pr \right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで $v_r \delta / \nu \cdot \sqrt{\delta/r}$ の積を一般の呼称に従ってテイラー数 Ta とよぶと、このテイラー数が 10^4 近辺まではほぼ (6) 式の関係が成り立つが、それよりもさらに周速も早く間げきも大きくなると回転の影響はいっそう著しくなって上式で示される熱通過率よりも大きな値を示す。これは領域 C に相当し第 6 図は横軸にテイラー数、縦軸にヌセルト数をプラントル数の $1/3$ 乗で除したものをとって両者の関係を示したもので、実験値は次式によってまとめよく表わされる。実験の行なわれた範囲はテイラー数で $2 \times 10^4 \sim 6 \times 10^5$ である。

$$Nu = \frac{U\delta}{\lambda} = 0.046 (Ta^2 Pr)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

上式は左右両辺に間げき幅 δ がはいっているのを辺々相消去し、その代りに回転円管の直径 D を代入すると次式のようになる。

$$\frac{UD}{\lambda} = c_1 \left(\frac{v_r^2 D^2}{\nu^2} Pr \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

流体を空気として $Pr=0.73$ を代入すると

$$= 0.052 Re_r^{2/3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となって空気中を回転する円筒表面の熱伝達の実験式⁽⁴⁾とその含まれる無次元数の形は同一で、熱通過率 U のかわりに熱伝達率 α を代入すると定数項 c_1 のみが

第 6 図 回転する二重円管間の熱通過 (乱れたうずの場合)

なる。すなわち回転する二重円管の熱通過はテイラー数の大きい場合、外管の影響はなくなり大気中で回転する円筒と同様の乱れたうず流れを示すことを物語っている。

3.3 軸方向流れのある回転二重円管の熱伝達 二重円管の内管が回転ししかもこの間げきに軸方向の流れが重ね合わされ内管の温度が外管のそれよりも高いとき、内管表面から空気への伝熱量は直接空気に放散されて持去られる熱量といったん空気に伝達されて後外側静止管に伝達されるものと二つに分けて考え、全伝熱量はおおのこの熱流が単独に存在するとして計算した伝熱量の和の形で与えられる。実験の結果は第1表にあり計算された伝熱量と実測された伝熱量の関係を第7図に示し、実験結果の整理はテイラー数が71~3415、レイノルズ数が380~4220のものについて行なった。

ここで使用する計算式は

回転による放熱量:

$$q_r = UA(t_r - t_s) \dots\dots\dots (10)$$

$$U\delta/\lambda = 0.046(T_s^2 P_r)^{1/3} \dots\dots\dots (11)$$

第7図 軸方向流れのある回転二重管の放熱量

第1表 実験結果

実験番号	276	277	278	279	280	283	284
間げき mm	4	"	"	"	"	"	"
レイノルズ数	4.01×10^3	"	"	"	3.44×10^3	3.38×10^3	4.22×10^3
テイラー数	71	210	460	600	800	15	15
実測放熱量 q_c kcal/h	14.7	17.4	20.4	26.3	30.9	10.9	15.5
計算放熱量 q_a kcal/h	15.5	16.3	15.6	17.3	16.1	14.2	15.3
q_r "	1.13	2.5	4.1	5.5	6.7	0.4	0.4
q_c "	16.6	18.8	19.7	22.8	22.8	14.6	15.7

実験番号	414	415	416	417	418	419
間げき mm	4	"	"	"	"	"
レイノルズ数	1.09×10^3	1.07×10^3	1.04×10^3	9.58×10^2	9.9×10^2	9.8×10^2
テイラー数	44.4	185	366	263	552	754
実測放熱量 q_c kcal/h	5.5	6.1	10.9	10.0	11.6	12.2
計算放熱量 q_a kcal/h	6.1	5.8	6.0	6.8	5.3	4.55
q_r "	0.90	2.2	3.9	4.0	4.7	5.02
q_c "	7.00	8.0	9.9	10.8	10.0	9.57

実験番号	480	481	482	483	513	516	517
間げき mm	8	"	"	"	"	"	"
レイノルズ数	2.71×10^3	2.8×10^3	2.89×10^3	2.87×10^3	2.66×10^3	1.31×10^3	1.28×10^3
テイラー数	1145	2085	3380	4640	2840	986	945
実測放熱量 q_c kcal/h	13.5	16.2	16.6	16.9	15.0	16.5	16.2
計算放熱量 q_a kcal/h	8.2	5.5	5.3	4.6	4.3	5.9	5.4
q_r "	9.3	8.8	10.0	12.0	8.0	12.9	13.0
q_c "	17.5	14.3	15.3	16.6	12.3	18.8	18.4

実験番号	518	519	520	521	522	526	527
間げき mm	8	"	"	"	"	"	"
レイノルズ数	1.3×10^3	1.36×10^3	1.38×10^3	1.34×10^3	1.28×10^3	4.0×10^2	3.8×10^2
テイラー数	2160	3415	3390	1980	1015	2750	1025
実測放熱量 q_c kcal/h	17.8	19.8	19.9	17.8	14.4	21.1	9.64
計算放熱量 q_a kcal/h	4.4	3.5	3.8	4.3	5.6	2.1	1.7
q_r "	16.0	18.0	17.0	4.7	15.0	19.0	8.9
q_c "	20.4	21.5	20.8	19.0	20.6	21.1	10.6

軸方向流れによる放熱量：

$$q_a = \alpha A(t_r - t_s) \dots\dots\dots (12)$$

$$\alpha D_e / \lambda = 0.015 \left(1 + 2.3 \frac{D_e}{L} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.45} \left(\frac{v_s D_e}{\nu} \right)^{0.8} Pr^{1/3} \dots\dots\dots (13)$$

ここで t_r は回転する内管表面の温度, t_s は静止外管の表面温度, t_s とは軸方向に流れる流体の出入口の算術平均温度である。

全対流放熱量：

$$q_c = q_r + q_a \dots\dots\dots (14)$$

で実測値はかなりばらついているがテイラー数およびレイノルズ数の広い範囲にわたりある程度まとめられ、テイラー数が 10^4 以下でもまたレイノルズ数が 2000 以下でも軸方向流れと回転が共存するときには規則正しいテイラーうずによるものでなく乱れたうずによるものと軸方向流れも層流でなく乱流によって熱移動が支配される。

しかしながら軸方向レイノルズ数がテイラー数に比較して十分大きく回転の影響の小さいとき、すなわち乱流から乱流にうずの重ね合わせさせた領域への遷移点付近まで—第 3 図で領域 A と B の境界近傍—この熱伝達率と合成レイノルズ数の関係が近似的に簡単な形にまとめられる。

合成レイノルズ数とは

$$Re_s = V_s \cdot 2\delta / \nu, \quad V_s = \sqrt{V_r^2 + (1/4)V_r^2}$$

のことで Gazley の提案により外管表面では流体は静止し内管表面では回転体とともに回転し、両円管の間げきが狭く回転による切線速度 V_r の半径方向の分布を直線に近いと考えれば、その平均速度は内管表面の周速 V_r の半分となり、これと軸方向の流れの平均流速 V_s とのベクトル和 V_s で流体が円管の周囲をらせ

第 8 図 軸方向に流れのある回転二重円管の熱伝達

ん形を描いてすすむと考える。したがって 3・1 節で得られた二重管内乱流熱伝達の実験式を用い軸方向レイノルズ数のかわりに合成レイノルズ数を使用して整理できる。

$$\alpha D_e / \lambda = 0.015 \left(\frac{V_s D_e}{\nu} \right)^{0.8} Pr^{1/3} \left(1 + \frac{2.3 D_e}{L} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.45} \dots\dots\dots (15)$$

第 8 図はこの関係を示し、■印は回転によるテイラー数が軸方向レイノルズ数に比して小さく $Re_s < 1.1 Re_s$ のものでこの程度までは (15) 式が成り立つことを示し、これ以上に回転の影響が大きくなれば回転による乱れたうずによるものと軸方向流れによるものと別々に放熱量を求め加えねばならない。

3・4 内管表面に軸方向のみぞのある影響 電動機

あるいは発電機のロータの表面には軸方向等間隔のみぞのあるものが多い。そこで実際上の必要からみぞの効果をj知るためこのような円筒が大気中で回転しているときと二重円管の内管として回転しているときの熱移動について実験を行なった。

大気中でみぞ付円筒が回転しその表面から熱伝達が行なわれているときの放熱量をみぞのおうとつ部も含む全表面積で除し、代表寸法としてみぞの山部と谷部

第 9 図 みぞのある回転面からの熱伝達

第 10 図 みぞのある回転二重円管間の熱通過

の直径の平均値をとったヌセルト数とレイノルズ数の関係はレイノルズ数が $8 \times 10^3 \sim 10^5$ の範囲で従来知られている平滑回転表面の熱伝達の実験式:

$$N_u = 0.073(R_e)^{0.7(4)} \dots\dots\dots (16)$$

とよく一致する。第9図はこの関係を示す。またこのみぞ付管が平滑表面をもった静止外管と同心におかれたときの両円管間の熱通過は、平均間げき δ_m を取ることによって平滑表面の円筒の回転する場合の実験値とほぼ同様に整理しうる。第10図は横軸にテイラー数、縦軸にヌセルト数をプラントル数の1/4乗で除したものをとり実験値を整理したもので、実線は平滑面の実験式である。

ここで伝熱面積としては回転表面の全面積をとり、間げきとしてはみぞ付回転表面の山部と谷部の外管内径との間のそれぞれの間げきを平均したものをとっている。テイラーうずの発生する限界テイラー数は平滑面では41であるが、この場合にはこれよりやや高く80くらいで、テイラー数が200をこえると実験値は平滑面のそれとよく一致する。したがってうずの発生にはみぞはほとんど影響せず、円筒の外径と外管内径との間げきによって支配されている。

4. 結 論

電動機のロータや軸受等のごとく二重円管の内側円管が回転し、この間げきに軸方向の流れの重ね合わされるとき熱移動の問題は実用上興味のある問題であるが、流れの複雑さのため従来解析的な取扱いはほとんど省みられなかった。そこで我々はこのような流れと熱伝達の機構を解明し系統的な整理を行なう目的を

もって模型について実験し、このような流れに五つの様式があり、それによって熱移動の様相も異なることを示した。特にテイラー数およびレイノルズ数の広い範囲にわたって回転表面からの伝熱量は回転によって生じる乱れたうずによる放熱量と軸方向の乱流熱伝達としての伝熱量の和として計算しうることを、すなわち全放熱量:

$$q_c = q_r + q_a$$

回転による放熱量:

$$q_r = UA_r(t_r - t_a)$$

$$U\delta/\lambda = 0.046(T_a^2 P_r)^{1/8}$$

軸流による放熱量:

$$q_a = \alpha A_r(t_r - t_a)$$

$$\alpha D_e/\lambda = 0.015 \left(1 + 2.3 \frac{D_e}{L} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{0.45} \left(\frac{V_a D_e}{\nu} \right)^{0.8} P_r^{1/8}$$

であり、最後に実用上の興味から回転表面に多数の軸方向みぞのある一例についても実験し、みぞの効果を明らかにした。

文 献

- (1) K.M. Becker, & J. Kaye, *Trans. ASME*, Ser. C 84-2 (1962-5), 97.
- (2) F.G. Carpenter et al., *Trans. Amer. Inst. Chem. Engr.*, 42 (1946), 165.
- (3) E.S. Davis, *Trans. ASME*, 65 (1943), 755.
- (4) G.A. Etemad, *Trans. ASME*, 77 (1955-11), 1283.
- (5) C. Gazley Jr., *Trans. ASME*, 80-1 (1958-1), 79.
- (6) J. Kaye & E.C. Elgar, *Trans. ASME*, 80-3 (1958-4), 753.
- (7) W.H. McAdams, et al., *Trans. ASME*, 72 (1950-4), 421.
- (8) 橋・福井, 機械学会論文集, 25-156 (昭34-8), 788.
- (9) G.I. Taylor, *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*, 223 (1923), 289.
- (10) R.A. Seban, *Trans. ASME*, 72 (1950-8), 789.
- (11) E.N. Sieder & G.E. Tate, *I.E.C.*, 42 (1946), 1429.

原子力白書発表(その1)

科学技術庁では37年度の原子力白書を発表した。全部で9章から成っている。

総論で説明している過去1年間の原子力平和利用をめぐる各国の動向はつぎのとおり。

1. 数年来続いた世界的な原子力開発のスローダウンは、1962年(37年)再び生氣を取りもどしはじめ、欧米各国の原子力発電所の建設は昨年度ごろから活発化してきた。

2. この数年間ほとんど新規計画でなかった欧州の原子力発電所計画も、1962年の春にはいって急速に新計画の追加が目立ってきた。

これを数量的にみるため、すでに完成したもの、建設中のもの、建設を計画中のもののすべての段階にある原子力発電所の出力の合計をみると、1958年から

1962年までの3年余りは800万kWから900万kWまで、わずかに100万kWしか増加しなかったものが、1962年4月以降年末までのわずか9箇月の間に900万kWから1160万kWへと260万kWの急増をみた。

3. アメリカではAEC(アメリカ原子力委員会)が昨年大統領に提出した答申に同国原子力開発の将来に明るいみとおしと希望が盛られているが、さらにニューヨークの市中に設ける100万kWの原子力発電所の計画が登場したことは、アメリカの原子力発電の積極化を物語っている。その他の国、たとえばインドやブラジルでも原子力発電所の建設計画が具体化し、原子力開発は世界的に第二期とも呼ぶべき新時代を迎えた。(1407ページへつづく) (服部敏夫)