

水平スパイラルフィン管の自由対流熱伝達 (第2報)

(昭和45年5月27日 原稿受理)

機械工学教室 宮 部 喜 代 二
 機械工学教室 勝 原 哲 治
 機械工学大学院 松 尾 栄 人

Free Convective Heat Transfer for Horizontal Spiral Finned Tube.

Kiyoji MIYABE
 Tetsuji KATSUHARA
 and Eito MATSUO

The data and correlations for horizontal spiral finned tubes with free convective heat transfer have been examined. The data obtained in spindle oil bath, and the correlation have been showed following:

$N_{ue} = 0.58(G_{re} \cdot Pr_m)^{1/4}$; $Pr_m = 30 \sim 150$,
 and for spindle oil

$$\alpha = (14.6 + 0.18 t_m)(\Delta t / D_e)^{1/4} \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}, \quad t_m, \Delta t: ^\circ\text{C}, \quad D_e = D_f + D_0: m.$$

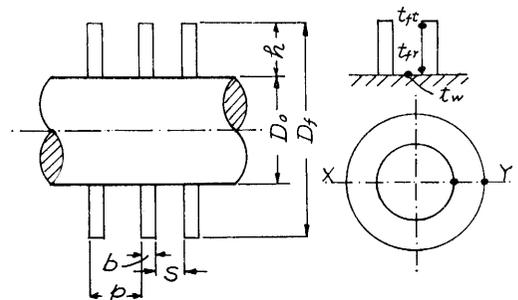
1. は し が き

表題に関して、筆者らは既に第1報の一部としてスピンドル油槽中での実験結果を報告した¹⁾。今回は同一流体を用い、さらに種々のフィン管寸法に対する実験結果と、前報のスピンドル油槽中での結果とを合わせて、新たな整理方法を試みたものの報告である。新たな整理方法としては、伝熱面代表温度として従来通りの基管表面温度 t_w を用い、代表寸法としてフィン外径 D_f と基管外径 D_0 の和 D_e を用いる。また物性値としては、 t_w と流体温度 t_∞ との算術平均温度 t_m に対する値を用いる。 D_e を代表寸法として用いるのは、垂直平行円板に対し基管径の影響を考慮するとき導かれる値であるからである。また、整理式をかたんなる形式とすることも本報告の目的の一つである。

2. 記 号

D_f : フィン外径, D_0 : 基管外径, $D_e = D_f + D_0$,

p : フィンピッチ, s : フィン隙間, b : フィン厚さ, A : 全表面伝熱面積, q : 単位面積当り熱負荷, t_w : 基管表面温度, t_∞ : 流体の温度, α : 後述式で定義される熱伝達係数, t_{fr} : フィン根元温度, t_{fi} : フィン先端温度, $N_{us} = \alpha s / \lambda_m$, $N_{ue} = \alpha D_e / \lambda_m$, $G_{rs} = g \beta_m \Delta t s^3 / \nu_m^2$, $G_{re} = g \beta_m \Delta t D_e^3 / \nu_m^2$, $Pr_m = c_{pm} \mu_m / \lambda_m$, λ , μ , ν および c_p : それぞれ流体の熱伝導率, 粘性係数, 動粘性係数および定圧比熱, g : 重力の加速度, β : 流体の体膨脹係数, $\Delta t = t_w -$

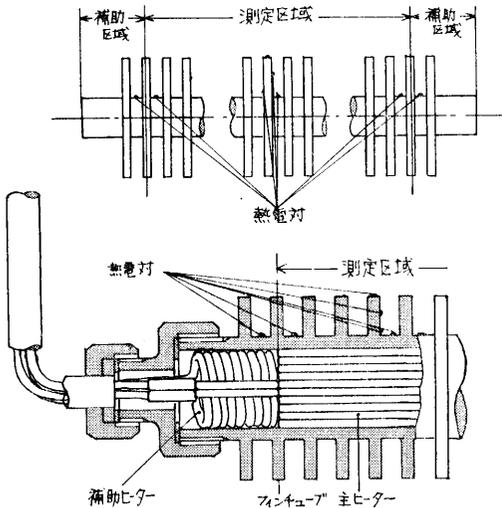


第1図 フィン管寸法記号その他

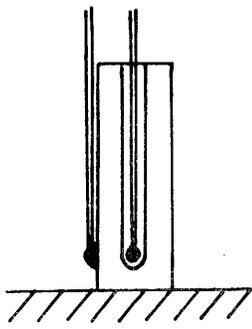
$t_{\infty}, t_m = (t_w + t_{\infty})/2$, 添字 m は t_m における値を示す。(第1図参照)

3. 実験装置, 測定方法その他

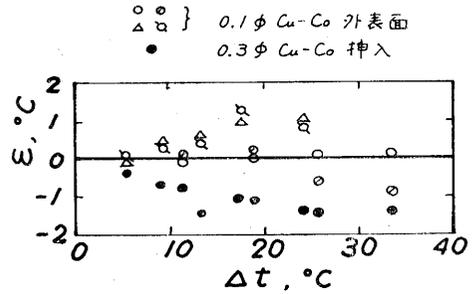
実験装置および測定方法は第1報とほとんど同様である。すなわち, フィン管用ヒータの略図は第2図に示すごとく, 主および補助ヒータよりなる。主ヒータの等熱負荷を実現せしめるため, フィン管両端部に補助ヒータを設定し, 電圧調整器で調節する。温度測定点は, 主ヒータ部分の管表面で5点, フィン部分, 補助区域をふくめ合計11点に対して, 0.1 mm 径 C_u-C_o 素線熱電対を用いた。 t_w, t_{fp}, t_{ft} 温度測定点は, 第1図(c)に示す $X-Y$ 水平位置の点が平均的温度値を示すことを予めの測定により知りえたので, 全実験点の整理考察には, この位置の温度測定値を採用



第2図 フィン管用ヒータ, 熱電対



第3図 熱電対設定説明図



第4図 各種設定方法を用いた温度測定例

した。

また, 第3図に示すように, フィンの半径方向に1 mm 径の孔を明け, 表面温度測定点と同位置に熱電対を挿入固定し, 内外測定温度の比較を行った。その結果の一例を第4図に示す。同図では, 挿入した0.1 mm 径素線熱電対を基準にして, 他の方法の測定点と比較してある。同図からわかるように, 外表面測定温度と挿入点温度との相異は1°C程度であるから, 本実験の精度としては, 外表面測定点による方法でも一応満足できると考える。

実験に用いたフィン管材は軟鋼材で, その主要寸法を第1表に示す。実験範囲は $q \cong 500 \sim 5000$ kcal/m²h, $\Delta t \cong 10 \sim 50^\circ\text{C}$ である。

4. 実験結果

4.1. 熱伝達係数

熱伝達係数 α としては, 次式で与えられる値を用いる。

$$\alpha = q/\Delta t \tag{1}$$

理想的な熱伝達係数の値としては, 基管部およびフィン部の温度, さらにこれらの部分における熱負荷分布などを考慮した平均熱伝達係数を用いるべきであるが, これらの分布傾向が未だ不明確であるのと, かんたんな表示式による整理を一応の目的とする本報告では, (1) 式の α を用いることとする。

4.2. 無次元整理

坪内ら²⁾ は, 空気流体を用いた実験結果を, $Nus \sim \frac{5}{D_f} Grs \cdot Pr$ の形の整理式で示している。その誘導過程を, 以下かんたんに述べる。

平行平板間の発達した流れに対し, Elenbaas³⁾

第1表 フィン管主要寸法

	D_f	D_o	p	s	h	b	A m ² /m	D_f+D_o	D_o/D_f
C-3	54.3	34.1	6.2	5.4	10.1	0.8	0.566	88.4	0.628
4	54.3	34.1	14.7	13.9	10.1	0.8	0.301	88.4	0.628
5	65.2	34.0	11.6	10.6	15.6	1.0	0.534	99.2	0.524
6	65.2	34.0	14.8	14.0	15.6	0.8	0.440	99.2	0.524
7	64.4	34.0	15.8	15.0	15.2	0.8	0.406	98.4	0.528
8	65.5	34.1	20.0	19.0	15.7	1.0	0.358	99.6	0.521
9	63.9	34.1	10.5	8.7	14.9	1.8	0.561	98.0	0.534
10	63.9	34.1	11.5	9.8	14.9	1.7	0.520	98.0	0.534
11	64.0	34.0	15.6	14.0	15.0	1.6	0.413	98.0	0.532
12	63.6	34.2	19.6	18.0	14.7	1.6	0.343	97.8	0.538
13	64.1	34.1	21.0	19.3	15.0	1.7	0.335	98.2	0.534
14	66.0	34.0	8.8	5.9	16.0	2.9	0.711	100.0	0.514
15	66.4	34.0	15.8	12.9	16.2	2.9	0.448	100.4	0.510
16	66.5	34.1	20.1	17.2	16.2	2.9	0.377	100.6	0.512
17	70.3	34.1	10.3	9.1	18.1	1.2	0.695	104.4	0.485
18	70.3	34.1	15.5	14.4	18.1	1.1	0.497	104.4	0.485
19	69.9	34.1	15.7	14.4	17.9	1.3	0.489	104.0	0.487
20	69.8	34.2	19.3	18.1	17.8	1.2	0.415	104.0	0.490
21	69.6	34.0	16.5	13.7	17.8	2.8	0.477	103.6	0.488
22	70.7	34.1	20.7	18.1	18.3	2.6	0.412	104.8	0.482
D-1	72.5	48.7	9.3	8.3	11.9	1.0	0.651	121.2	0.675
2	72.6	48.8	15.9	14.9	11.9	1.0	0.464	121.4	0.675
3	72.0	48.8	19.5	18.5	11.6	1.0	0.382	120.8	0.675
4	84.7	48.4	15.4	13.0	18.2	2.4	0.663	133.1	0.570
5	85.1	48.6	19.9	17.6	18.3	2.4	0.551	133.7	0.570
6	92.9	48.5	11.8	10.4	22.2	1.4	1.00	141.7	0.502
7	97.0	48.7	15.3	14.0	24.4	1.4	0.825	146.7	0.502
8	96.2	48.8	19.0	17.7	23.7	1.3	0.731	145.0	0.502

(Aを除き単位は mm)

はつぎの式を示している。(H: 平板高さ)

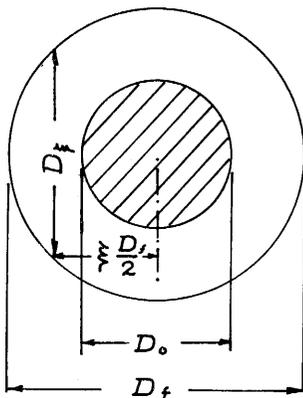
$$Nus = \frac{1}{24} \frac{s}{H} Grs \cdot Pr \quad (2)$$

平行円板に対しては、 $D_{f\xi} = D_f \sqrt{1-\xi^2}$ とおき、 $r = \xi(D_f/2)$ の位置で、(2) 式同様の次式が成立するとする(第5図参照)。

$$\frac{\bar{\alpha}_\xi s}{\lambda} = \frac{1}{24} \frac{s}{D_{f\xi}} (Gr_s \cdot Pr) \quad (3)$$

(3) 式の $\bar{\alpha}_\xi$ を円板全面につき積分し、その平均値を $\bar{\alpha}_{\xi m}$ とすると、

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{\xi m} &= \frac{8}{\pi D_f^2} \int_0^{D_f/2} \bar{\alpha}_\xi \cdot D_{f\xi} dr \\ &= \frac{1}{6} \frac{\lambda}{\pi D_f} (Gr_{rs} \cdot Pr) \quad (4) \end{aligned}$$



第5図

$$\therefore N_{us} = \frac{\bar{\alpha}_{\xi m} \cdot s}{\lambda} = \frac{1}{6\pi} \frac{s}{D_f} (G_{rs} \cdot P_r) \quad (5)$$

(5) 式を基本形とし、フィン管の一般整理式は次式で示される。

$$N_{us} = \frac{1}{6\pi} R_a^* [1 - e^{-(C/R_a^*)^m}] \quad (6)$$

$$R_a^* = \frac{S}{D_f} (G_{rs} \cdot P_r)$$

c, m : 定数

ところで、以上の論議は、第5図斜線部分すなわち基管部分が伝熱に寄与しないことについて考慮されていない。

いま、基管部分について考慮するとすれば、(4) 式における積分範囲は $(D_0/2)$ から $(D_f/2)$ までとなり、次式がえられる。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{\xi m} &= \frac{8}{\pi(D_f^2 - D_0^2)} \int_{D_0/2}^{D_f/2} \alpha_{\xi} D_{\xi} dr \\ &= \frac{1}{6\pi} \frac{\lambda}{(D_f + D_0)} (G_{rs} \cdot P_r) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\therefore N_{us} = \frac{1}{6\pi} \frac{s}{(D_f + D_0)} (G_{rs} \cdot P_r) \quad (8)$$

したがって、一般にフィン管は $D_0 > 0$ であるから、基本形式として (8) 式から出発すべきであろう。

本報告では s/D_f の代りに $s/(D_f + D_0)$ を用いて整理を行ない、第6図および第7図の傾向をえた。

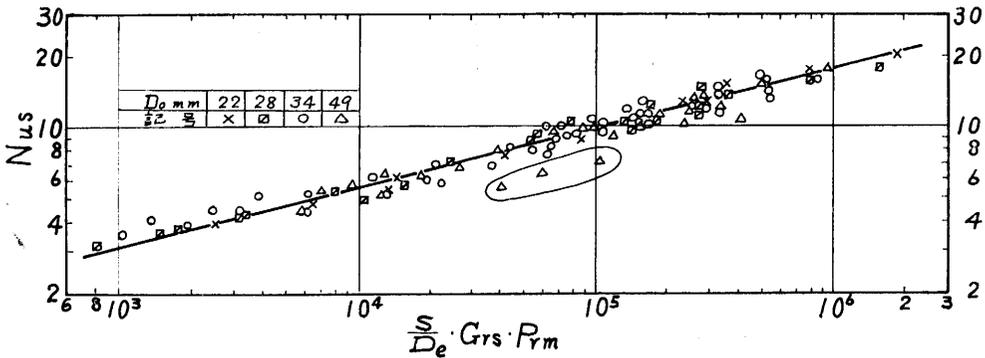
ところで、垂直平板の高さ H と垂直円板の径 D_f との間には、つぎの等価関係が知られている。(自由対流熱伝達において)

$$H = \frac{\pi}{4} D_f \quad (9)$$

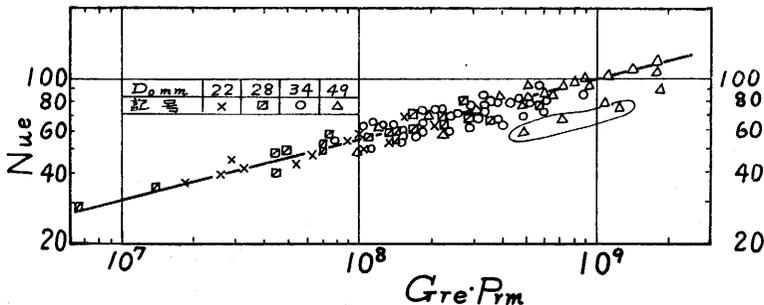
また、同様に、水平円柱 D_0 と H との間関係は (10) 式として知られている。

$$H = \frac{\pi}{2} D_0 \quad (10)$$

フィン管においては、上述の基管部 D_0 を考慮した結果から、一般に H と $(D_f + D_0 = D_e)$ との



第6図 $Nus \sim \frac{S}{D_e} Grs Prm$



第7図 $Nue \sim Gre Prm$

間の等価関係が次式のようになる。

$$H = \frac{\pi}{4} (D_f + D_0) = \frac{\pi}{4} D_e \quad (11)$$

(11) 式において $D_0=0$ とすれば (9) 式の関係が成立し、 $D_f=D_0$ となれば、フィン管のフィン部がなくなり水平円柱となり (10) 式の関係を示すことになる。すなわち (11) 式はフィン管に関する一般的な等価高さを示す式である。

第 6 図の傾向からわかるように、本実験の範囲では大凡次式で表示できる。

$$Nus = C \left(\frac{S}{D_e} Grs \cdot Prm \right)^{1/4} \quad (12)$$

上式の形で表現しうることは、隙間 S の影響がないことを意味し、第 7 図のように、かんたんな表示整理を行ないえて、大略 $\pm 10\%$ 以内の精度で次式をうる。

$$Nue = 0.58 (Gre \cdot Prm)^{1/4} \quad (13)$$

$$Prm \cong 30 \sim 150$$

筆者らは、第 1 報¹⁾において、代表寸法を D_f としして次の整理式を示した。

$$Nuf = 1.14 (Gr_f \cdot Pr_m)^{1/5} \quad (14)$$

$$Nuf = \alpha D_f / \lambda_m, \quad Gr_f = g \beta \Delta t D_f^3 / \nu_m^2$$

前報の線図においては $Nus \sim \frac{S}{D_f} (Gr_s \cdot Pr_m)$ および $Nuf \sim Gr_f \cdot Pr_m$ いずれも $1/5$ の勾配を示している。これに反して、今回の報告で D_e を代表寸法にとるとき $1/4$ の勾配となることは、層流自由対流熱伝達において $1/4$ 勾配となるべきことより、本報告のまとめかたの方がより合理的と考えるべきであろうし、前述のように、 D_e が等価高さとしての物理的な意味ももっている。

ところで、坪内ら²⁾の空気流体に対する実験結果に対し、 D_e を用いて試算整理を試みた結果、 D_e のみでは一本の線にまとまるとは言いがたい傾向にあるが、より改善されることは確かである。しかし、さらに他の無次元項を導入整理すべき必要性は残っていると考えられるが、本実験に用いたフィン管では、フィン部分と基管部分との熱抵抗などによるバラツキがあるとみられ、今後に残された検討を要する問題がある。

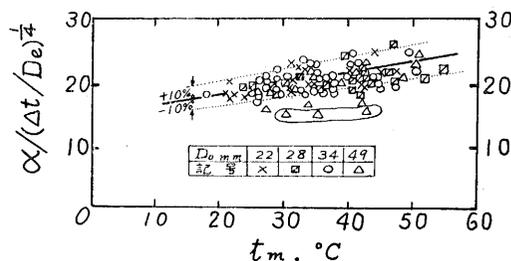
4.3. スピンドル油に対する簡略式

(13) 式を α について整理すると次式をうる。

$$\alpha = f(t_m) (\Delta t / D_e)^{1/4} \quad (15)$$

$f(t_m)$ は (13) 式中の物性値を t_m に関する実験式としておきかえたものである。

$$\alpha / (\Delta t / D_e)^{1/4} = f(t_m) \quad (16)$$



第 8 図 $\alpha / (\Delta t / D_e)^{1/4} \sim t_w$

(15) 式を (16) 式のように書き直すと、その左辺は実験値より計算でき、 t_m に対する傾向を知りうる。第 8 図は実験値よりえた (16) 式左辺の値と t_m に対しプロットしたものである。同図より $t_m=20 \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲に対し大凡 $\pm 10\%$ 以内の精度で $f(t_m)$ の実験式として次式をうる。

$$f(t_m) = 14.6 + 0.18 t_m \quad (17)$$

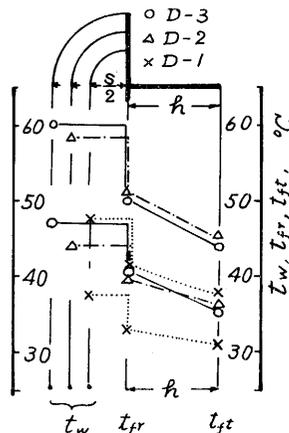
$$\therefore \alpha = (14.6 + 0.18 t_m) (\Delta t / D_e)^{1/4} \text{kcal/m}^2 \text{h}^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$t_m, \Delta t: ^\circ\text{C}, \quad D_e: \text{m}$$

第 8 図中の実線は (17) 式よりの算出値を示し、(13) 式にスピンドル油の物性値を代入してえられる値ときわめて良く一致する。

4.4. t_w, t_{fr}, t_{ft} の傾向

基管表面温度 t_w 、フィン根元温度 t_{fr} 、フィン先



第 9 図 フィン各部温度測定例

端温度 t_{ft} の測定例を第 9 図に示す。隙間 S における基管部の表面温度も同様とは考えられないが、その分布測定を行っていないので、一応 $t_w = \text{一定}$ として示してある。本実験に用いたフィン管では、基管部とフィン部との間に熱抵抗があり、それによって生じる温度差があるはずであるが、その値が $(t_w - t_{fr})$ であるとみることに問題が残る。今後更に測定検討を試みたいと考えている。

4.5. フィン管表面状態と伝熱への影響

第 6, 7, 8 図中△印を実線で囲んだ実験点のフィン管は、第 1 表の D-2 で、基管表面状態が黒皮のままのものである。他のフィン管は一応 $\phi 300$ 程度の紙やすりで磨いてあるが、伝熱特性の相異は表面状態によるものであろう（汚れ係数に相当する因子と考える）。したがって、実験点のバラツキは、フィンと基管部との間の熱抵抗および、上記表面状態に原因するものが大きいと考えている。

4.6. スピンドル油の物性値

使用したスピンドル油の物性値としては、次の実験式を用いた。比重および粘性係数は実測値に基づいて作成し、熱伝導率および等圧比熱はメーカの資料によった。

$$\text{比重 } \gamma \text{ kg/m}^3 = 899.5 - 0.63t$$

$$\text{粘性係数 } \mu \text{ kg/sm} = (1.20e^{-0.0211t} + 2.16e^{-0.0737t}) \times 10^{-2}$$

$$\text{熱伝導率 } \lambda \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} = 0.113$$

$$\text{等圧比熱 } C_p \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 0.418 + 8.6 \times 10^{-4}t$$

$t = 20 \sim 60^\circ\text{C}$ 適用

5. む す び

実用に供されている巻付けスパイラルフィン管について、スピンドル油槽中における水平自由対流熱伝達の実験を行ない、前報の結果とともに整理した内容について報告した。整理にあたっては、簡略でかつ物理的な意味をもつ表示式をうることを目的とし、次の実験整理式およびスピンドル油に対する簡略式をえた。実験値に対し大凡士 10% の精度である。

$$N_{uc} = 0.58(G_{rc} \cdot P_{rm})^{1/4} \quad (P_{rm} \cong 30 \sim 150)$$

$$\alpha = (14.6 + 0.18t_m)(\Delta t/D_e)^{1/4} \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$t_m, \Delta t: ^\circ\text{C}, D_e: m \quad (t_m = 20 \sim 60^\circ\text{C})$$

実験点のバラツキは、フィンと基管との間の熱抵抗および表面状態によるものと考えられる。

なお、これらの点に関しては、一体のフィン管によってさらに詳細な実験検討を要する問題が残されており、実験研究を続けて行く所存である。

終りに当り、実験試料を提供して頂いた、三喬工産滝口慎市氏に厚く謝意を表したい。また、実験に協力して頂いた本学原田孝二君ならびに当時の本学学生中村通紀（現 チッソ エンヂニアリング）、山川喜一郎（現三洋電機）

両君にも感謝する。

文 献

- 1) 宮部, 勝原: 九州工業大学研究報告 (工学) 20号 (昭45)
- 2) 坪内, 増田: 東北大学高速研報告, 第24巻 237号, 244号 (昭43/44)
- 3) W. Elenbaas: Physica, Vol. 9 (1942), 1-28.