管内面汚れ係数と管内流速の同時測定法の実験的検証*

新里 寛英^{*1}, 藤井 哲^{*1}小山 繁^{*1}, 野世溪 精^{*2}Experimental Verification of a Method for
Simultaneous Measurement
of the Fouling Factor and Water Velocity
inside a Condenser TubeKan-ei SHINZATO, Tetsu FUJII,
Shigeru KOYAMA and Tadashi NOSETANI

The fouling factor and mean water velocity inside a condenser tube, which is artificially fouled, are simultaneously measured by means of local heating from the outside of the tube with two heaters of different lengths. The principle of the measurement is based on heat-transfer characteristics which depend on heater length. A titanium tube of 24.16 mm i.d. and an aluminum brass tube of 22.77mm i.d. are used for the test. The test ranges of water velocity and fouling factor are 0.8-2.5 m/s and $0-2 \times 10^{-4}$ m²K/W, respectively. Prior to the test, dimensionless relations among tube wall temperature at the heated area, mean water velocity and fouling factor along with their dependence on water temperature are derived from the results of numerical calculation of the temperature distribution near the heated area. The maximum errors for water velocity ΔU and fouling factor ΔR in the test are as follows; $\Delta U=2.4\%$ for clean tubes, $\Delta R=0.5 \times 10^{-5}$ m²K/W for given water velocity, and $\Delta R=2 \times 10^{-5}$ m²K/W and $\Delta U=\pm 20\%$ for the simultaneous measurement.

Key Words: Power Plant, Condenser, Simultaneous Measurement, Fouling Factor, Flow Velocity, Condenser Tube

1. 結 言

記 号

管内を流れる流体を管外から局所的に加熱する時、加熱量、管壁の温度上昇、流体の流量および物性値の間には関数関係がある。その関係を利用した非接触型の流量測定法⁽¹⁻³⁾あるいは汚れの検出法⁽⁴⁾の開発研究が行われている。発電プラントにおいても復水器の管内汚れを稼動時にオンラインで監視可能な方法の開発が望まれている⁽⁵⁾。

著者ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は、一本の管の外表面を長さの異なる2つのヒータで加熱することにより、管内面汚れ係数と流速を同時に測定する方法を考案し、局所加熱の場合の熱伝達特性に関する数値解析結果を用いて測定精度を理論的に検討した。本報は、この方法の復水器管への応用の可能性を実証するために行った実験結果の報告である。

A_0, A_1	: 式(10)の係数, 表3	
a_0, a_1, a_2, a_3	: 式(4)の係数, 表1	
b_1, b_2	: 式(5)の係数, 表2	
c_0, c_1, c_2	: 式(14)の係数, 表4	
D_i, D_o	: それぞれ管の内径および外径	m
L	: 加熱区間の長さ	m
Nu	: ヌセルト数, 式(8)	
n	: 式(9), (11)の指数, 式(10)	
P_r	: プラントル数	
Q	: 加熱量	W
R_f	: 汚れ係数 = δ_f / λ_f	m ² K/W
R_{fi}	: 無次元汚れ係数, 式(3)	-
R_{ti}	: 電気絶縁層の無次元熱抵抗, 式(13), 式(14)	-
R_w	: 管壁の無次元熱抵抗, 式(7)	-
Re	: レイノルズ数, 式(2)	-
T_f	: 加熱部の十分上流の流体温度	°C
T_H	: ヒータの温度	°C
T_w	: 管外面平均温度	°C
u	: 平均流速	m/s
Θ	: 温度差 ($T_w - T_f$) の無次元数, 式(1)	-

* 昭和63年6月2日 第25回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成元年5月1日。

^{*1} 正員, 九州大学機能物質科学研究所 (〒816 春日市春日公園6-1)。

^{*2} 正員, 住友軽金属工業(株) (〒455 名古屋市港区千手3-1-12)。

Θ_H	: 温度差 ($T_H - T_f$) の無次元数	-
δ_f	: 管内面汚れの厚さ	m
δ_i	: 電気絶縁層の厚さ	m
λ_f	: 管内面汚れの熱伝導率	W/(m·K)
λ_f	: 流体の熱伝導率	W/(m·K)
λ_w	: 管の熱伝導率	W/(m·K)
ν	: 動粘度	m ² /s

添 字

L	: 長い加熱区間 (L-ヒータ)
S	: 短い加熱区間 (S-ヒータ)
app	: 近似式による値
exp	: 実測値
th	: 数値解
0	: 真値
20	: $T_f = 20^\circ\text{C}$ の値

2. 実験装置および実験方法

図1に試験ループおよび測定システムの概略図を示す。地下水槽の常温水をポンプによってテスト管に通水し、テスト管の外面に貼付けられた短いヒータ (S-ヒータ) と長いヒータ (L-ヒータ) で管を個別に加熱する。流量は浮遊式流量計で監視し、台秤で質量流量を測定する。テスト管はチタニウム管 (外径 $D_o = 25.2\text{mm}$, 内径 $D_i = 24.16\text{mm}$, 熱伝導率 $\lambda_w = 16.6\text{W/mK}$) およびアルミニウム黄銅管 ($D_o = 25.2\text{mm}$, $D_i = 22.77\text{mm}$, $\lambda_w = 100\text{W/mK}$) を用いた。管長は1 mで、加熱部の上流側に速度助走区間を $30D_i$ 以上とり、S-ヒータとL-ヒータを50 mm離して貼付けてある。テスト管の外側は全長にわたり厚さ20 mmの硬質ポリウレタンフォームで断熱してある。

図2にS-ヒータ (加熱長さ $L = 6.2\text{mm}$) と L-ヒータ ($L = 102\text{mm}$) の形状および寸法を示す。これらのヒータは、ポリイミドフィルム (厚さ $87\mu\text{m}$) に接着した厚さ $10\mu\text{m}$ のニッケル箔を図2のパターンでエッチングしたものである。これらのヒータをポリイミドフィルム電気絶縁層を間にはさんでテスト管外面に貼付けた。そのフィルムには厚さ δ_i が $43\mu\text{m}$ の粘着剤付および $7\mu\text{m}$ の粘着剤無しのものを用いた。

加熱には直流電源を用い、加熱量はヒータ両端の電位差と標準抵抗器 ($10\text{m}\Omega$) を用いて測定される電流値とで算出した。加熱量の設定は、ヒータと流体との温度差が所定の値になるように、パーソナルコンピュータでGP-IBインターフェイスを介して電流を制御 (最小制御電流は 20mA) することによって行った。ヒータの温度はあらかじめ検定された電気抵抗-温度特性を用いて測定した。ヒータ温度の測定精度は、温度検定

時の標準白金測温抵抗体 (検定精度 0.003°C) による実測値とヒータの電気抵抗の実測値から温度換算式で換算した温度との比較から、最大 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ であった。流体温度はヒータ上流の管外面に貼付けたT熱電対 (銅-コンスタンタン, 素線径 $100\mu\text{m}$) で測定した。熱電対の冷接点は電子冷却水点装置 (安定度 $\pm 0.01^\circ\text{C}$) に接続した。直流電圧および熱起電力は低熱起電力型自動切換え装置 (接点熱起電力 $0.3\mu\text{V}$ 以下) を介して高精度デジタル電圧計 (分解能 $0.1\mu\text{V}$) を用いて測定し、定常状態の確認はヒータ外面に貼付けたT熱電対の熱起電力を高感度自動平衡型記録計 ($5\mu\text{V/cm}$) を用いて監視することにより行った。

実験は次のように行った。すなわち管内流速を段階的に変化させ、その都度、S-ヒータを用いる場合も、L-ヒータを用いる場合も、ヒータと流体温度との差を (10 ± 0.2) $^\circ\text{C}$ に設定し、熱電対の温度が定常になった時に諸測定を行った。実験範囲は実際の復水器を想定して水温 $12 \sim 28^\circ\text{C}$, 流速 $0.8 \sim 3\text{ m/s}$, 汚れ係数 $0 \sim 2 \times 10^{-4}\text{ m}^2\text{K/W}$ を選んだ。汚れは管内面にエポキシ樹脂系塗料 (熱伝導率 $= 0.68\text{W/mK}$) を一定の厚さでスプレー塗装することによって模擬した。その厚さは重ね塗りを行って変え、断面を顕微鏡で観察して厚さを測定した。平均厚さ δ_f はチタン管の場合、 $25, 60, 90, 140\mu\text{m}$, アルミニウム黄銅管の場合、 $30, 60\mu\text{m}$ であり、厚さの均一度は、例えば $\delta_f = 25\mu\text{m}$ の場合 $-20 \sim +24\%$, $\delta_f = 140\mu\text{m}$ の場合 $\pm 9\%$ であった。

図1 試験ループおよび測定システムの概略図

図2 ヒータの形状および寸法

3. 測定原理および関連の式の導出

3.1 数値解とその近似式

文献(7)と同じ数値解析方法によって、本実験装置および本実験条件についての伝熱特性を算出した。水温が20℃の場合の結果を図3の○印で示す。図3(a)および(b)はそれぞれチタン管およびアルミニウム黄銅管に関するもので、縦軸の Θ 、横軸の Re およびパラメータの無次元汚れ係数 R_f はそれぞれ次式で定義されたものである。

$$\Theta = \frac{T_w - T_f}{\frac{Q}{\pi \lambda_f L}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{u D_i}{\nu} \quad (2)$$

$$R_f = R_f \frac{\lambda_f}{D_i} = \frac{\delta_f}{\lambda_f} \frac{\lambda_f}{D_i} \quad (3)$$

ここに T_w は管外面平均温度、 T_f は加熱部の十分上流の流体温度、 Q は加熱量、 λ_f は流体の熱伝導率、 u は流体の平均速度、 ν は流体の動粘度、 R_f は汚れ係数、 δ_f は汚れ厚さである。添字SおよびLはそれぞれS-ヒータおよびL-ヒータを示す。数値計算の際にヒータと管外面との間の電気絶縁層の厚さを変えてみたが、図中のデータに及ぼす影響はほとんど認められなかった。

図3 Θ および Θ と Re との関係

図3のデータのうち、汚れがない場合の Θ の値を $\Theta(Re, 0)_{th2\theta}$ とし、 Re が $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$ の範囲で次式で近似する。

$$\Theta(Re, 0)_{th2\theta} = a_0 + a_1 Re^{-1} + a_2 Re^{-2} + a_3 Re^{-3} \quad (4)$$

係数 a_0, a_1, a_2, a_3 を表1に示す。近似式(4)の誤差は $\pm 10^{-6}$ 以下である。また、汚れがある場合の Θ を $\Theta(Re, R_f)_{th2\theta}$ とし、それと $\Theta(Re, 0)_{th2\theta}$ との差を R_f が $0 \sim 5 \times 10^{-3}$ の範囲で次式で近似する。

$$\Theta(Re, R_f)_{th2\theta} - \Theta(Re, 0)_{th2\theta} = b_1 R_f + b_2 R_f^2 \quad (5)$$

係数 b_1, b_2 を表2に示す。近似式(5)の誤差はS-ヒータで最大 8×10^{-6} 、L-ヒータで 3×10^{-6} である。以後、近似式で算出される値に添字appを付して表す。

図3(a), (b)に式(4)および式(5)を用いて作成した線図を示す。数値解と線図はよく一致している。

表1 式(4)の係数 a_0, a_1, a_2, a_3

(a) Titanium						
heater	L/Di	a_0	a_1	a_2	a_3	Re range
		$\times 10^{-3}$	$\times 10$	$\times 10^5$	$\times 10^9$	$\times 10^4$
S	0.257	1.4294	6.331	-3.56	1.11	< 2.5
L	4.222	0.5215	18.077	-11.35	4.29	< 2.5
S	0.257	1.0335	9.505	-12.25	9.20	≥ 2.5
L	4.222	1.0887	16.717	-13.50	9.30	≥ 2.5
(b) Aluminum brass						
heater	L/Di	a_0	a_1	a_2	a_3	Re range
		$\times 10^{-3}$	$\times 10$	$\times 10^5$	$\times 10^9$	$\times 10^4$
S	0.272	0.8538	4.035	-2.54	0.82	< 2.5
L	4.480	-0.0157	18.221	-11.92	4.56	< 2.5
S	0.272	0.5562	6.480	-9.37	7.26	≥ 2.5
L	4.480	0.6303	16.514	-13.63	9.43	≥ 2.5

S : S-heater, L : L-heater

表2 式(5)の係数 b_1, b_2

(a) Titanium				
Re	L-heater		S-heater	
	b_1	b_2	b_1	b_2
$\times 10^4$				
1	0.9933	0.581	0.6827	-10.96
2	0.9918	0.121	0.7297	-13.45
3	0.9908	0.074	0.7535	-14.80
4	0.9904	0.018	0.7695	-15.95
5	0.9904	-0.045	0.7800	-16.44
6	0.9905	-0.093	0.7880	-16.83
7	0.9905	-0.122	0.7953	-17.39
8	0.9905	-0.143	0.8012	-17.85
(b) Aluminum Brass				
Re	L-heater		S-heater	
	b_1	b_2	b_1	b_2
$\times 10^4$				
1	0.9148	-1.12	0.2454	-5.28
2	0.9320	-2.14	0.2963	-8.91
3	0.9396	-2.46	0.3287	-11.58
4	0.9461	-3.00	0.3531	-13.82
5	0.9482	-2.90	0.3716	-15.53
6	0.9490	-2.42	0.3877	-17.13
7	0.9533	-3.05	0.4006	-18.43
8	0.9552	-3.34	0.4118	-19.63

3.2 水温の補正

まず、 $\Theta(R_e, 0)$ についての水温の補正を考える。熱流が半径方向に一次元的であると仮定すると、次式が得られる。

$$\Theta(R_e, 0)_{20} = \bar{R}_w + Nu^{-1} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{R}_w$ は管壁の無次元熱抵抗、 Nu^{-1} は管内面と流体との間の無次元熱抵抗であり、それぞれ次式で表される。

$$\bar{R}_w = \frac{\lambda_f}{2\lambda_w} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \quad (7)$$

$$Nu = c R_e^n P_r^n \quad (8)$$

式(6)および(8)より次式が得られる。

$$\frac{\Theta(R_e, 0) - \bar{R}_w}{\Theta(R_e, 0)_{20} - \bar{R}_{w20}} = \left(\frac{P_{r20}}{P_r} \right)^n \quad (9)$$

ここに P_r はプラントル数である。指数 n は無限長加熱の場合の 0.4 のように一定値とはならない。したがって、 $T_f = 10^\circ\text{C}$ および 30°C についての数値解と $T_f = 20^\circ\text{C}$ の数値解を用いて n の値を算出し、それを R_e の関数として次式で近似した。

$$n = A_0 + A_1 R_e \quad (10)$$

係数 A_0 , A_1 を表 3 に示す。 T_f が $10 \sim 30^\circ\text{C}$ の範囲の $\Theta(R_e, 0)_{th}$ は、式(9)の $\Theta(R_e, 0)_{20}$ に近似式(4)の右辺の値 $\Theta(R_e, 0)_{app}$ を用いて、次式で近似できる。

$$\begin{aligned} \Theta(R_e, 0)_{th} \\ \approx \bar{R}_w + \{\Theta(R_e, 0)_{app20} - \bar{R}_{w20}\} \left(\frac{P_{r20}}{P_r} \right)^n \end{aligned} \quad (11)$$

近似式(11)の誤差は $\pm 2 \times 10^{-5}$ である。さらに、汚れがある場合の T_f が $10 \sim 30^\circ\text{C}$ の範囲の $\Theta(R_e, \bar{R}_f)_{th}$ と $\Theta(R_e, 0)_{th}$ との差は近似式(5)の右辺の値を用いて次式で近似できる。

$$\begin{aligned} \Theta(R_e, \bar{R}_f)_{th} - \Theta(R_e, 0)_{th} \\ \approx \{\Theta(R_e, \bar{R}_f) - \Theta(R_e, 0)\}_{app20} \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_{f20}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

表 3 式(10)の指数 n

	S-heater		L-heater	
	A_0	A_1	A_0	A_1
Titanium	0.300	$\times 10^{-7}$	0.265	$\times 10^{-7}$
Al-Brass	0.235	0	0.265	3.8

3.3 測定原理

図 3 (a) において、例えば S-ヒータと L-ヒータの無次元温度差 $\Theta_s = 4.705 \times 10^{-3}$ および $\Theta_L = 6.937 \times 10^{-3}$ に対応して共通な R_e および $\bar{R}_f$ の値として $R_e = 5 \times 10^4$ と $\bar{R}_f = 3 \times 10^{-3}$ が読み取れる。実験では管外面温度、流体温度および加熱量の測定値から Θ_s と Θ_L の数値が求まり、それからそれぞれに共通の R_e と $\bar{R}_f$ を連立的に算出することができるわけである。実際の計算はパーソナルコンピュータを用いて行った。

数値解を実験データとみなし上述の近似式を用いて $\bar{R}_f$ と R_e を求めてみると、 $\bar{R}_f$ の誤差および R_e の相対誤差は最大でそれぞれ 0.12×10^{-3} 程度 (約 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{K/W}$) および $\pm 2.5\%$ 程度であった。アルミニウム黄銅管の場合は $\bar{R}_f$ が 3×10^{-3} 以上で誤差がやや大きい。

4. 実験結果

4.1 電気絶縁層の熱抵抗の検定

清浄管においては、理論と実験とが一致すると仮定する。またヒータと管外面の間の電気絶縁層は非常に薄いので、そこにおける熱流は一次元的とみなすことができる。管内流速を正確に設定し、ヒータの温度 T_H 、流体温度 T_f 、加熱量 Q の測定値を式(1)に代入して (T_w の代わりに T_H を代入) 算出される $\Theta(R_e, 0)_{Hexp}$ と式(4)の右辺の値を水温補正をした式(11)の右辺の値 $\Theta(R_e, 0)_{app}$ との差 $\bar{R}_i$ が電気絶縁層の無次元熱抵抗になる。すなわち、

$$\Theta(R_e, 0)_{Hexp} - \Theta(R_e, 0)_{app} = \bar{R}_i \quad (13)$$

$\Theta(R_e, 0)_{Hexp}$ を算出する際、加熱部外面のヒータで覆われない部分を考慮して、つまり熱流束密度が理論と実験とで一致するように、 Q の値に $(\pi D_o / \text{ヒータ幅 } W)$ をかけて補正する。図 4 (a), (b) はそれぞれチタン管およびアルミニウム黄銅管について得られた $\bar{R}_i$ と R_e との関係を示す。ここに横軸の R_e は重量法で測定した管内流速 u を用いて算出したレイノルズ数である。

(a) チタン管 (b) アルミニウム黄銅管

図 4 ヒータと管外面の間の無次元熱抵抗 $\bar{R}_i$

R_i は R_{e0} に対して若干の変化が見られ、かつ管材質およびヒータ長によって値に差がみられる。また、ポリイミドフィルムを薄くしても粘着剤がない場合には、全体の熱抵抗を減らす効果が表れていない。これらの主な原因はヒータと電気絶縁層およびそれと管外面の間の接触熱抵抗がヒータ取り付け時の表面状態、加圧力の程度によって異なるためと考えられる。これらの相違は固体壁内の二次元熱流に影響を及ぼすことが予想されるが、その程度を定量的に見積ることは現時点ではできない。従って R_i は、ヒータ取り付け後に検定によって決定される値であり、センサごとに R_i を算出し次式で近似する。

$$R_i = c_0 + c_1 R_{e0} + c_2 R_{e0}^2 \quad (14)$$

本実験で用いたセンサについての式(14)の係数 c_0 , c_1 , c_2 を表4に示す。近似式(14)の誤差は約1%である。汚れ係数と流速の同時測定の場合には R_{e0} が未知であるので、測定値の Θ_H から Θ を算出する際の R_i には、まず、検定で得られる R_i の算術平均値を用いる。次に、得られた R_{e0} を式(14)に代入して算出される R_i を用いて Θ_H から Θ を算出し、 R_{e0} および R_i を求める。

4.2 R_i および R_{e0} の測定結果

図5は清浄管の場合の R_{e0} の測定結果を示す。縦軸は測定値 $R_{e,exp}$ であり、横軸は R_{e0} である。○, ●印はチタン管, △, ▲印はアルミニウム黄銅管, 白ぬきのシンボルはS-ヒータ, 黒ぬりのシンボルはL-ヒータによる $R_{e,exp}$ を表す。それぞれのシンボルで表したデータの標準偏差を比較するとアルミニウム黄銅管のS-ヒータで最も大きく2.4%である。

図6(a)および(b)は R_{e0} を既知とした場合の R_i の測定結果であり、それぞれチタン管, アルミニウム黄銅管の場合を示す。白ぬきのシンボルはS-ヒータ, 黒ぬりのシンボルはL-ヒータによる R_i を表す。各汚れ層厚さ

δ_f に対する R_i はほぼ一定値が得られている。それらの算術平均値を図中の横線で示す。汚れ厚さを両管で等しくなるように塗布した場合の結果, すなわちチタン管で $\delta_f = 25 \mu\text{m}$, アルミニウム黄銅管で $\delta_f = 30 \mu\text{m}$ の場合, 図6(a)および(b)の△▲印の平均値は両管でほぼ同値で $R_i = 0.84 \times 10^{-3}$, また同様に両管で $\delta_f = 60 \mu\text{m}$ の場合, □■印の平均値はそれぞれ $R_i = 2.26 \times 10^{-3}$, 2.13×10^{-3} であり, よく一致している。

S-ヒータおよびL-ヒータについて実測された Θ および Θ_H を用いて R_i と R_{e0} を同時に求める場合について, 図7に R_i の結果を, 図8に R_{e0} の結果を示す。いずれも図(a)および(b)はそれぞれチタン管およびアルミニウム黄銅管についての結果である。

図7には R_{e0} を既知とした場合(図6)の R_i の平均値を示す。これらの平均値とデータとを比較すると, 図7(a)のチタン管の場合, $\delta_f = 25$ および $60 \mu\text{m}$ のデータは平均値より高いが, $\delta_f = 90 \mu\text{m}$ および $140 \mu\text{m}$ のデータは平均値とかなりよく一致している。図7(b)のアルミニウム黄銅管の場合, $\delta_f = 30 \mu\text{m}$ のデータは平均値とよく一致しているが, $\delta_f = 60 \mu\text{m}$ のデータは平均値より全体的に小さい。以上を総合すると, R_i の測定誤差は最大 $\pm 0.5 \times 10^{-3}$ 程度($\pm 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 程度)である。

図8において縦軸は $R_{e,exp}$, 横軸は R_{e0} である。誤差はランダムではなく, 汚れによって偏りが見られるが, 全体的に R_{e0} の測定誤差は $\pm 20\%$ 程度である。

5. 結 論

一本の管の外表面を長さの異なる2つのヒータで加熱し, それらの温度上昇の差から汚れ係数と管内流速を同時に測定する場合の測定精度を実験的に検討した。実験は復水器用チタン管とアルミニウム黄銅管を用い, 水温が $10 \sim 30^\circ\text{C}$ で, レイノルズ数が $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$ (約 $0.8 \sim 3 \text{ m/s}$), 無次元汚れ係数が $0 \sim 5 \times 10^{-3}$ (約 $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$)の範囲の模擬汚れを管内面に付着させ

表4 (a)式(13)の係数 c_0 , c_1 , c_2

δ_i μm	Tube	Heater	c_0	c_1	c_2
43	T	S	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-14}$
		L	8.1102	-2.25	2.09
	A	S	9.2596	-1.90	4.98
		L	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-14}$
7	T	S	9.2567	3.60	3.61
		L	6.2118	37.03	-27.6
	A	S	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-14}$
		L	5.8476	-5.01	3.57
	T	S	7.7744	-0.99	-3.95
		L	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-9}$	$\times 10^{-14}$
	A	S	4.6257	0.46	-0.70
		L	8.0408	14.43	-10.67

T: titanium, A: aluminum brass

図5 清浄管における R_{e0} の測定結果

(a) チタン管

(a) チタン管

(b) アルミニウム黄銅管

(b) アルミニウム黄銅管

図6 Re が既知の場合の h_i の測定結果図7 同時測定における h_i の測定結果

(a) チタン管

(b) アルミニウム黄銅管

図8 同時測定における Re の測定結果

て行った。付随的に得られた結果を含めてまとめると次のようになる。

- (1) 数値解析結果に基づき、測定データ処理に必要な近似式の導出法を示した。得られた式は本装置に固有のものであり、水温が10℃～30℃の範囲で適用できる。
- (2) ヒータ取り付け後に検定によってヒータと管外面の間の熱抵抗を決定することができた。
- (3) 流速測定の精度は、汚れがない場合には標準偏差で2.4%以下であり、汚れた場合には相対誤差で±20%程度であった。本方式による流速測定では汚れの影響に注意する必要がある。
- (4) 汚れ係数測定の精度は、流速が既知の場合には無次元汚れ係数の値で最大 0.14×10^{-3} ($0.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$) の誤差であった。汚れ係数と流速の同時測定の場合には無次元汚れ係数の値で約 0.5×10^{-3} ($2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$) の誤差であった。この値は実用可能な精度である。
- (5) 測定精度をさらに向上させるためには、電気絶縁層の熱抵抗を小さくする必要がある。

本研究は 文部省科学研究費(試験研究(1)61850039)の援助を受けた。また、数値解析には九州大学大型計算機センターFACOM N780-20 を用いた。ここに記して謝意を表する。

[文 献]

- (1) 田中・藤井, 九州大学生産科学研究所報告, 第74号 (1983), 115.
- (2) Laub, J. H., Control Eng., 4(1957), 112.
- (3) Hoffmann de Visme, G. F. A. and Singh, H., J. Phys., E, 5(1972), 885.
- (4) Kuzay, T. M. and Bors, D. A., Fouling in Heat Exchange Equipment, ASME HTD-Vol. 35(1984), 89.
- (5) Anson, D., Corliss, J., Vigon, B., and Hillman, R., EPRI CS-4339, Project 2300-2, Proceedings(1985), 3-24.
- (6) 藤井・小山・新里, 機論, 53-492, B(1987), 2528.
- (7) 藤井・小山・新里, 機論, 53-495, B(1987), 3323.