管内流速と管内面汚れ係数の同時測定に関する理論的考察*

藤井 哲^{*1}, 小山 繁^{*1}, 新里 寛英^{*1}Theoretical Consideration of Simultaneous Measurement
of Flow Rate and Fouling Factor

Tetsu FUJII, Shigeru KOYAMA, and Kan-ei SHINZATO

A method for the simultaneous measurement of flow rate in a tube and fouling factor at the inner surface is proposed based on numerical calculations for turbulent heat transfer from a thick tube wall which is heated from the outer surface. Overall heat transfer characteristics depend on the heated length, flow rate and fouling factor of a given tube. Therefore, by substituting the measured data on temperature, at the outer tube surfaces heated by given heat fluxes for short and long heated sections, into simultaneous equations which are derived in the present paper, the values of flow rate and fouling factor can be obtained. Some examples are presented for a condenser tube of aluminium brass and titanium. The estimated accuracy is about several percent for flow rate and several tens per cent for fouling factor, though these values depend on the accuracy of temperature and heat flux measurements. Methods for improving the accuracy are discussed.

Key Words: Simultaneous Measurement, Flow Rate, Fouling Factor, Numerical Analysis, Turbulent Heat Transfer, Condenser Tube

1. 緒 言

管内流を管外から局所的に加熱する時、加熱量、管壁温度、流体の流量および物性値等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。前報⁽⁵⁾での数値解析によれば、加熱区間の長さや汚れによっても流速に対する熱伝達の特性が異なる。この特性の利用、すなわち一本の管に配置された2種類の長さの区間を加熱することにより、熱交換器の管内の流量と汚れを運転中に同時に測定できる可能性がある。本報はその可能性についての理論的検討である。具体的には復水器管への応用に限定して考察を進めるが、方法には一般性がある。

記 号

A₀, A₁: 式(12)の係数, 表2B₁, B₂: 式(13)の係数, 表3

* 昭和62年8月20日 第65期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年10月20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).

b ₁₀ , b ₁₁ , b ₁₂ , b ₂₀ , b ₂₁ , b ₂₂ :	式(14)の係数, 表3	—
D _i , D _o :	それぞれ管の内径および外径	mm
e _u :	流速の相対誤差 (= (u _{0.1} - u ₀) / u ₀)	—
e _f :	汚れ係数の相対誤差 (= (R _{f0.1} - R _{f0}) / R _{f0})	—
G:	質量流量	kg/s
L:	加熱区間の長さ	m
Nu ₀ :	ヌセルト数(固体壁厚さを無視した場合)	—
n:	式(12)の指数, 表2	—
Q:	加熱量	W
R _f :	汚れ係数 (= δ _f / λ _f)	m ² K/W
R _f :	無次元汚れ係数, 式(4)	—
R _w :	管壁の無次元熱抵抗, 式(3)	—
Re:	レイノルズ数, 式(7)	—
T _f :	加熱部の十分上流の流体温度	℃
T _i :	スライム内面の温度	℃
T _{wo} :	管外面平均温度	℃
T _{wo} [*] :	熱流が一次元とした場合の管外面平均温度	℃
T _{wi} :	管内面平均温度	℃
u:	平均流速	m/s
α ₀ :	熱伝達係数(固体壁厚さを無視した場合) W/(m ² ·K)	—

ΔT_e	: (Two- T_f) の測定誤差	℃
Θ	: 無次元温度差, 式 (6), (8)	—
Θ^*	: 熱流が一次元とした場合の無次元温度差, 式 (2)	—
δ_f	: スライム厚さ	μm
ε_c	: 加熱量 Q の測定誤差	—
λ_f	: スライムの熱伝導率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_r	: 流体の熱伝導率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_w	: 管の熱伝導率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
ν	: 動粘度	m^2/s
ε_c	: 式 (8), 式 (12)	—
ε_f	: 式 (6), 式 (9)	—
ε_f'	: 式 (9), 式 (13)	—
添 字		
c	: 清浄な場合	
f	: スライム付着の場合	
L	: 長い加熱区間 (L-センサ)	
S	: 短い加熱区間 (S-センサ)	
0, cal	: それぞれ真値および計算値	

2. 測定原理

図1に加熱量と管外壁平均温度を測定して管内流量と汚れを同時に測定する方法の物理モデルを示す。乱流速度分布が十分発達した質量流量 G の管内流が、管外から軸対称に長さ L 区間だけ熱量 Q で電氣的に一様加熱される。管壁および流体の熱伝導率 λ_w , λ_r , および流体の物性値は一定値とする。管の材質および寸法、加熱区間および流体の種類は与えられているものとする。汚れ付着層（復水器管内の汚れを想定しているので以後スライムとする）の厚さを δ_f 、熱伝導率を λ_f とするが、実際には汚れ係数 $R_f = \delta_f / \lambda_f$ が測定項目となる。電気絶縁膜は薄く、熱伝導率が小さいので、そこにおける管軸方向の熱流は無視できると仮定する。従って、温度としては管外面平均温度 T_{wo} 、スライム内面平均温度 T_i 、液体の上流の T_f 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、温

度差 ($T_{wo}^* - T_f$) は次式で表される (以下、この場合の温度には * を付して表す)。

$$(T_{wo}^* - T_f)_f = \frac{Q}{\pi D_i L} \left(\frac{D_i}{2\lambda_w} \ln \frac{D_o}{D_i} + \frac{\delta_f}{\lambda_f} + \frac{1}{\alpha_s} \right) \quad (1)$$

ここに α_s は固体壁厚さを無視した場合の対流熱伝達係数であり、温度差には ($T_i - T_f$) がとってある。式 (1) を ($Q / \pi \lambda_r L$) で割って無次元化すると次式となる。

$$\Theta_f^* = \frac{(T_{wo}^* - T_f)_f}{\frac{Q}{\pi \lambda_r L}} = R_w + R_f + \frac{1}{Nu_s} \quad (2)$$

ここに、

$$R_w = \frac{\lambda_r}{2\lambda_w} \ln \frac{D_o}{D_i} \quad (3)$$

$$R_f = \frac{\lambda_r}{D_i} R_f = \frac{\lambda_r}{D_i} \frac{\delta_f}{\lambda_f} \quad (4)$$

$$Nu_s = \frac{\alpha_s D_i}{\lambda_r} \quad (5)$$

実際の場合の無次元温度 Θ_f は、管軸方向への熱流が存在するので、式 (2) のように表せない。しかし、固体壁が小さくなった極限で Θ_f^* になることを考慮して、 Θ_f の形を次のように仮定する。

$$\Theta_f = \frac{(T_{wo} - T_f)_f}{\frac{Q}{\pi \lambda_r L}} = \Theta_f^* - \varepsilon_f (Re, R_f) \quad (6)$$

ここに、

$$Re = \frac{u D_i}{\nu} \quad (7)$$

ε_f は管の材質と寸法、加熱区間の長さ、流体の種類等の影響を含んだものであるが、本報では管の材質と寸法および流体が与えられている場合を考えるので、さしあたり Re , R_f の関数として他の影響は個別に考慮することにする。なお、 Re については、 u についてのみスライム付着による断面積減少の影響を考慮する。

式 (6) は、スライム付着がない清浄管の場合 ($R_f = 0$) には、次のようになる。

$$\Theta_c = \Theta_c^* - \varepsilon_c (Re) = \left(R_w + \frac{1}{Nu_s} \right) - \varepsilon_c (Re) \quad (8)$$

すなわち ε_f は $R_f = 0$ の場合に ε_c となるので、次のように分解できると仮定する。

$$\varepsilon_f (Re, R_f) = \varepsilon_c (Re) + \varepsilon_f' (Re, R_f) \quad (9)$$

Nu_s の Re に関する関数形は前報⁽⁵⁾で得られている。従って、 R_w と R_f を与えると Θ_f^* , Θ_c^* が算出できる (式 (2))。次に前報の数値解の Θ_c から $\varepsilon_c (Re)$ の

図1 物理モデル

表1 計算結果 (水; $T_f = 15^\circ\text{C}$, $\lambda_f = 0.595 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 汚れ層; $\lambda_r = 0.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)(1) アルミニウム黄銅管 ($Do = 25.2 \text{ mm}$, $Di = 22.77 \text{ mm}$, $\lambda_u = 100 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $R_u = 3.017 \times 10^{-4}$)

No	L/Di	δ_f mm	G kg/s	Q W	T_{wo} $^\circ\text{C}$	Θ $\times 10^{-3}$	Re	Nu_u $\times 10^4$	R_f $\times 10^{-3}$	ξ_c, ξ_f $\times 10^{-3}$	ξ_f' Eq. (13) $\times 10^{-3}$	ξ_c, ξ_f Eq. (12), (9) $\times 10^{-3}$
1	0.25	0	0.2032	8.144	17.20	2.874	1.005	201.20	0	2.398	0	2.396
2	"	"	0.4064	"	16.63	2.130	2.008	303.52	"	1.467	"	1.467
3	"	"	0.8128	"	16.19	1.555	4.019	458.34	"	0.929	"	0.928
4	"	50	0.2032	"	17.47	3.227	1.013	202.15	1.633	3.655	1.271	3.654
5	"	"	0.4064	"	16.96	2.561	2.027	305.22	"	2.650	1.192	2.650
6	"	"	0.8128	"	16.58	2.064	4.053	460.64	"	2.041	1.119	2.042
7	"	100	0.2032	"	17.72	3.554	1.023	203.33	3.266	4.932	2.566	4.932
8	"	"	0.4064	"	17.25	2.940	2.044	306.74	"	3.888	2.439	3.888
9	"	"	0.8128	"	16.90	2.482	4.089	463.07	"	3.245	2.328	3.245
10	4	0	0.2032	130.3	22.82	10.217	1.005	95.81	0	0.522	0	0.519
11	"	"	0.4064	"	19.84	6.323	2.008	161.46	"	0.172	"	0.170
12	"	"	0.8128	"	17.94	3.841	4.019	272.45	"	0.131	"	0.131
13	"	50	0.2032	"	23.91	11.641	1.013	96.39	1.633	0.669	0.155	0.664
14	"	"	0.4064	"	20.96	7.787	2.027	162.61	"	0.298	0.130	0.298
15	"	"	0.8128	"	19.09	5.344	4.053	274.19	"	0.238	0.107	0.237
16	"	100	0.2032	"	24.99	13.052	1.023	97.10	3.266	0.814	0.311	0.808
17	"	"	0.4064	"	22.08	9.250	2.044	163.64	"	0.429	0.260	0.427
18	"	"	0.8128	"	20.23	6.833	4.089	276.02	"	0.358	0.227	0.357
19	0.25	0	0.4064	16.29	18.26	2.130	2.008	303.52	0	1.467	0	1.467
20	"	"	0.8128	"	17.39	1.561	4.019	458.34	"	0.922	"	0.928
21	"	25	0.4064	"	18.60	2.352	2.018	304.41	8.166	2.052	0.590	2.052
22	"	"	0.8128	"	17.79	1.823	4.040	459.76	"	1.471	0.548	1.473
23	4	0	0.4064	260.6	24.68	6.324	2.008	161.46	0	0.171	0	0.170
24	"	"	0.8128	"	20.89	3.848	4.019	272.45	"	0.124	"	0.131
25	"	25	0.4064	"	25.80	7.055	2.018	162.07	8.166	0.233	0.065	0.234
26	"	"	0.8128	"	22.04	4.599	4.040	273.53	"	0.175	0.052	0.182
27	0.25	50	0.2032	16.29	19.94	3.227	1.013	202.15	1.633	3.655	1.271	3.654
28	"	"	0.8128	"	18.16	2.064	4.053	460.64	"	2.042	1.119	2.042
29	0.25	50	0.2032	32.58	24.87	3.224	1.013	202.10	1.633	3.658	1.271	3.654

(2) チタン管 ($Do = 25.2 \text{ mm}$, $Di = 24.16 \text{ mm}$, $\lambda_u = 16.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $R_u = 7.555 \times 10^{-4}$)

No	L/Di	δ_f mm	G kg/s	Q W	T_{wo} $^\circ\text{C}$	Θ $\times 10^{-3}$	Re	Nu_u $\times 10^4$	R_f $\times 10^{-3}$	ξ_c, ξ_f $\times 10^{-3}$	ξ_f' Eq. (13) $\times 10^{-3}$	ξ_c, ξ_f Eq. (12), (9) $\times 10^{-3}$
1	0.25	0	0.2032	9.169	19.21	5.184	0.947	194.22	0	0.720	0	0.719
2	"	"	0.4064	"	18.06	3.768	1.893	293.07	"	0.400	"	0.398
3	"	"	0.8128	"	17.23	2.746	3.787	442.44	"	0.270	"	0.270
4	"	50	0.2032	"	20.02	6.181	0.955	195.13	1.540	1.238	0.521	1.235
5	"	"	0.4064	"	18.93	4.839	1.909	294.54	"	0.851	0.454	0.850
6	"	"	0.8128	"	18.14	3.866	3.818	444.58	"	0.678	0.408	0.677
7	"	100	0.2032	"	20.77	7.105	0.963	196.10	3.079	1.829	1.121	1.828
8	"	"	0.4064	"	19.74	5.837	1.925	296.00	"	1.376	0.981	1.374
9	"	"	0.8128	"	18.99	4.913	3.850	446.79	"	1.160	0.890	1.158
10	4	0	0.2032	146.7	24.31	11.464	0.947	91.61	0	0.207	0	0.202
11	"	"	0.4064	"	20.87	7.228	1.893	154.44	"	0.0023	"	0.024
12	"	"	0.8128	"	18.70	4.556	3.787	260.51	"	0.038	"	0.013
13	"	50	0.2032	"	25.51	12.941	0.956	92.16	1.540	0.204	0.008	0.204
14	"	"	0.4064	"	22.08	8.718	1.909	155.42	"	0.011	0.021	0.045
15	"	"	0.8128	"	19.92	6.058	3.818	262.12	"	0.052	0.023	0.036
16	"	100	0.2032	"	26.71	14.419	0.963	92.74	3.079	0.198	0.001	0.192
17	"	"	0.4064	"	23.29	10.208	1.925	156.40	"	0.020	0.011	0.035
18	"	"	0.8128	"	21.14	7.561	3.850	263.77	"	0.065	0.013	0.026
19	0.25	50	0.2032	18.34	25.02	6.169	0.955	195.13	1.540	1.250	0.521	1.235

関数形を求めることができる (式 (8)). さらに数値解 Θ_F と得られた Θ_F^* から ξ_F (式 (6)), ξ_c と ξ_F から ξ_F' の関数形を求めることができる.

加熱区間が長い場合 (L-センサ) と短い場合 (S-センサ) をそれぞれ添字 L および S で表すと, 式 (6), (2) から次式が導かれる.

$$\Theta_{FL} - (R_w + R_F + \frac{1}{Nu_{FL}}) + \xi_{FL} = 0 \quad (10)$$

$$\Theta_{FS} - (R_w + R_F + \frac{1}{Nu_{FS}}) + \xi_{FS} = 0 \quad (11)$$

上式で, T_i と一本の管に設置された 2 種類の加熱区間についてそれぞれの T_{wo} および Q を測定して, Θ_{FL} , Θ_{FS} に代入すると, Re , R_F の連立方程式となり, それを解いて流速と汚れ係数を求めることができる.

3. ξ_c , ξ_F' の関数形の導出

熱伝達の数値解析⁽⁵⁾ はアルミニウム黄銅管 ($Do = 25.2$ mm, $Di = 22.77$ mm, $\lambda_w = 100$ W/(m·K)) およびチタン管 ($Do = 25.2$ mm, $Di = 24.16$ mm, $\lambda_w = 16.6$ W/(m·K)) の加熱長さ $L/D_i = 0.25$ および 4 の場合について行った. スライム ($\lambda_f = 0.8$ W/(m·K)) の厚さは $\delta_f = 0, 50, 100$ μ m ($R_f = 0, 6.25 \times 10^{-5}, 12.5 \times 10^{-5}$ m²K/W), 管内の水 ($T_i = 15^\circ\text{C}$, $\lambda_f = 0.595$ W/(m·K)) の流速範囲は $u = 0.5 \sim 2$ m/s とした. 得られた結果を表 1 に示す.

図 2 (a), (b) は ξ_c と Re の関係を示す. 計算点は次式で最大誤差 0.1% の精度で相関できる.

$$\xi_c = A_0 + A_1 \left(\frac{10}{2nRe} \right)^n \quad (12)$$

図 2 ξ_c と Re の関係

表 2 式 (12) の係数 A_0 , A_1 および指数 n の値

	L/D_i	A_0	A_1	n
Al-Brass	4	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	
	0.25	1.2466	0.33964	30.0
Titanium	4	0.0615	13.713	6.8
	0.25	0.11959	0.06974	37.5
		1.6808	1.9123	12.0

式 (12) の係数 A_0 , A_1 , および指数 n を表 2 に示す.

図 3 (a), (b) は ξ_F' と Re の関係を R_F をパラメータとして示す. 計算点を最小二乗法で 2 次式近似し, その式を用いて計算した ξ_F' と R_F の関係を Re をパラメータとして図 4 (a), (b) に示す. この図から次の関数形

$$\xi_F' = B_1 R_F + B_2 R_F^2 \quad (13)$$

を予想し, B_1, B_2 と Re の関係を求めた結果を図 5 (a), (b) に示す. 図 5 の曲線は次式で近似できる.

図 3 ξ_F' と Re の関係

図 4 ξ_F' と R_F の関係

図 5 式 (14) の係数 B_1 , B_2 と Re の関係

表 3 式 (14) の各係数の値

	L/D_i	B_1			B_2		
		b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{20}	b_{21}	b_{22}
Al-Brass	4	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^3$			
	0.25	1.4586	0.7430	-0.06869	16.547	-3.4380	1.7852
Titanium	4	43.1903	-2.8063	0.03330	2.527	-0.9777	0.8013
	0.25	-33.2417	6.5852	-0.3199	20.513	4.0734	1.9804
		46.1368	-6.7332	0.2770	11.680	-2.1276	1.0532

$$\begin{aligned} B_1 &= b_{10} + b_{11} \ln Re + b_{12} (\ln Re)^2 \\ B_2 &= b_{20} + b_{21} \ln Re + b_{22} (\ln Re)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)の係数を表3に示す。

4. 測定精度の予測

2節で述べた原理に従い、3節で得られた ε_f を用いることにより、流速および汚れ係数を同時に測定することが可能であることを示す。以下に ε_f の近似精度を検討し、さらに外表面平均温度 T_{wo} および加熱量 Q の測定誤差が流速 u および汚れ係数 R_f に及ぼす影響を検討する。

4.1 ε_f の近似の精度 表1に示した G および δ_f より求まる u_a , R_{fa} を真値とし、それに対応する Q および T_{wo} を仮想実験値として式(10), (11)により算出した $u_{o,1}$, $R_{f,1}$ の値を表4に示す。表4のNo.13, 14は ε_f の式を作成する際に用いた加熱量と異なる場合、およびNo.15, 16はL-センサとS-センサを互いに異なる熱流束で加熱した場合の $u_{o,1}$ および $R_{f,1}$ を示す。いずれの場合も $u_{o,1}$ および $R_{f,1}$ の相対誤差 e_u ($= \Delta u / u_a = (u_{o,1} - u_a) / u_a$) および e_R ($= \Delta R_f / R_{fa} = (R_{f,1} - R_{fa}) / R_{fa}$) が約3%以内で一致していることから ε_f の近似の精度が十分高いことがわかる。

4.2 温度および加熱量の測定誤差の影響 表1の数値を真値、測定誤差を含む測定値を $(T_{wo} - T_f) \pm \Delta t_e$ および $Q (1 \pm \varepsilon_Q)$ と仮定して、前項と同様にし

て $u_{o,1}$ と $R_{f,1}$ を求める。そしてそれぞれの e_u および e_R と Δt_e あるいは ε_Q との関係を図6, 図7に示す。図中に付されているLは、L-センサの T_{wo} および Q の測定値に誤差を含み、S-センサの測定値には誤差を含まない場合を表す。Sは逆の場合を表す。

4.2.1 温度測定誤差 Δt_e の影響 図6(a-1), (a-2)にアルミニウム黄銅管, 図6(b-1), (b-2)にチタン管の場合について、 e_u および e_R の Δt_e に対する変化を示す。両センサを同じ熱流束 $q_s = q_L$ で加熱する場合を実線で、異なる熱流束(アルミニウム黄銅管の場合 $q_s = 4q_L$, チタン管の場合 $q_s = 2q_L$)で加熱する場合を破線で表す。

両センサを同一の熱流束で加熱する場合(図6の実線), S-センサの e_u および e_R がL-センサのそれらより大きく、 Δt_e が同じならば、アルミニウム黄銅管の e_u および e_R がチタン管のそれらより大きい。理由はS-センサの $(T_{wo} - T_f)$ がL-センサのそれより小さく、また λw が大きく厚肉のアルミニウム黄銅管の $(T_{wo} - T_f)$ がチタン管のそれよりも小さくなるので、 Δt_e の影響が相対的に大きくなるからである。

両センサを異なる熱流束で加熱する場合(図6の破線), 図6(a-1), (a-2)のアルミニウム黄銅管で、 $q_s = 4q_L$ の場合、 $\Delta t_e = \pm 0.04^\circ\text{C}$ に対して $e_{us} = \pm 0.03$, e_{Rs} は約 ± 0.15 となる($\Delta t_e = 0^\circ\text{C}$ のときの e_R のずれはの近似精度による)。この場合の $(T_{wo} - T_f)$ は両センサでほぼ等しく約 $9 \sim 10^\circ\text{C}$ である。また、

表4 汚れ係数および流速の同時測定の精度

Mat.:Material, A-B:Aluminium-brass, T:Titaniun, $\Delta u = u_{o,1} - u_a$, $\Delta R_f = R_{f,1} - R_{fa}$

No	Mat.	u_a m/s	R_{fa} m ² K/W	Assumed experimental values				Calculated by eqs. (10), (11)		e_u $\frac{\Delta u}{u_a}$	e_R $\frac{\Delta R_f}{R_{fa}}$
				L/Di=4		L/Di=0.25		$u_{o,1}$ m/s	$R_{f,1}$ m ² K/W		
				Q_L W	Two-T _f °C	Q_s W	Two-T _f °C				
				$\times 10^{-5}$							
1	A-B	0.504	6.25	130.3	8.91	8.144	2.47	0.504	6.24	0	-0.002
2		1.008	"	"	5.96	"	1.96	1.006	6.21	-0.002	-0.006
3		2.016	"	"	4.09	"	1.58	2.019	6.26	0.002	0.002
4		0.509	12.5	"	9.99	"	2.72	0.509	12.49	0	-0.001
5		1.017	"	"	7.08	"	2.25	1.016	12.49	-0.001	-0.001
6		2.034	"	"	5.23	"	1.90	2.036	12.51	0.001	0.001
7	T	0.448	6.25	146.7	10.51	9.169	5.02	0.447	6.22	-0.002	-0.006
8		0.895	"	"	7.08	"	3.93	0.882	6.10	-0.015	-0.024
9		1.791	"	"	4.92	"	3.14	1.811	6.33	0.011	0.012
10		0.451	12.5	"	11.71	"	5.77	0.452	12.52	0.002	0.002
11		0.903	"	"	8.29	"	4.74	0.895	12.41	-0.009	-0.007
12		1.805	"	"	6.14	"	3.99	1.866	12.72	0.034	0.018
13	A-B	1.004	3.13	260.1	10.80	16.29	3.60	1.003	3.11	-0.001	-0.005
14		1.985	"	"	7.04	"	2.79	1.985	3.06	0	-0.021
15	A-B	0.504	6.25	130.3	8.91	32.58	9.87	0.500	6.02	-0.008	-0.037
16	T	0.448	6.25	146.7	10.51	18.34	10.02	0.444	6.06	-0.009	-0.031

図6 ΔT_e の e_u および e_R に及ぼす影響 図7 e_Q の e_u および e_R におよぼす影響

図6 (b-1), (b-2) のチタン管で $q_s = 2q_L$ の場合, $\Delta t_e = \pm 0.1^\circ\text{C}$ に対して $e_{uS} = \pm 0.03$, e_{RS} は約 ± 0.1 となる ($\Delta t_e = 0^\circ\text{C}$ のときの e_R のずれはの近似精度による). この場合の $(T_{w0} - T_f)$ は両センサで約 10°C である.

要するに, 管の熱伝導率が小さく薄肉のほうが u および R_f を精度よく測定できる. 温度測定誤差の影響を小さくするためには, S-センサとL-センサの $(T_{w0} - T_f)$ が等しく, かつともに大きくなるようにすればよい. 但し, 管内面温度が過度に上昇すると, スライムの生態を破壊する恐れがあるので注意を要する.

4.2.2 加熱量 Q の測定誤差 e_Q の影響 図7 (a), (b) に e_u および e_R に及ぼす e_Q の影響を示す. e_u , e_R を $e_Q = \pm 0.01$ で比較すると, チタン管の場合 (実線), e_u が約 ± 0.04 , e_R が約 $-0.15 \sim +0.1$ であるが, アルミニウム黄銅管の場合 (一点鎖線), e_u が約 ± 0.07 , e_R が約 ± 0.3 である. 保温材から外部への熱損失量が加熱量に対して1%程度と見積られるので, e_Q をさらに小さくすることが可能である.

5. 結 論

復水器用のアルミニウム黄銅管およびチタン管を例に取り, 管壁の熱伝導を考慮した対流熱伝達の数値解析の結果に基づき, 管内流速と管内面汚れ係数を同時に測定する方法を提案し, 測定精度の検討を行い, 以下の結論を得た.

- (1) 一本の管に短い加熱部 (管内径の1/4倍) と長い加熱部 (管内径の4倍) を配置し, それぞれの加熱量および管外表面平均温度と流体の入口温度との差を測定し, 測定値を式(10)および式(11)に代入して, 流速 u と汚れ係数 R_f を算出する. 計算式は u が $0.5 \sim 2 \text{ m/s}$, R_f が $0 \sim 12.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ の範囲に適用される.
- (2) 温度および加熱量の測定誤差がないと仮定すると, 流速と汚れ係数を約3%以内の誤差で測定できる.
- (3) アルミニウム黄銅管の場合, 温度の測定誤差 $\pm 0.04^\circ\text{C}$ に対して流速の最大誤差は約3%, 汚れ係数の最大誤差は約15%. チタン管の場合, 温度の測定誤差 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に対して, 流速は約3%, 汚れ係数の最大誤差は約10%と見積られる. また, 熱量の測定誤差 $\pm 1\%$ に対して, アルミニウム黄銅管の場合, 流速の最大誤差は約7%, 汚れ係数の最大誤差は約30%, チタン管の場合, 流速は約4%, 汚れ係数の最大誤差は約15%と見積られる. 温度, 熱量ともにかなり高精度の測定が要求されるが実用可能である.

- (4) 精度を高めるためには, 短いセンサと長いセンサの温度上昇をほぼ等しく, かつ, なるべく大きくなるようにすべきである. また, 熱伝導率が低く, 薄肉の管は測定精度が高い. 逆の場合には, 管軸方向の熱伝導を少なくするような工夫が必要である.

本研究は昭和61年度文部省科学研究費(試験研究(1) 61850039)の補助を受けた. また, 数値解析は九州大学大型計算機センター FACOM M-380S により行った.

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) 藤井・小山・新里, 機論, 53-492, B(1987), 2528.