

1. 緒言

今回は、三重管式熱交換器を用い、熱伝達機構に関する実験を行った。三重管式熱交換器は、外側の管に高温流体・内側の管に低温流体を流し、低温流体を加熱する装置である。この時、外管の流体から内管壁への対流伝熱・内管壁での伝導伝熱・内管壁から内管の流体への対流伝熱という三種類の伝熱機構が組み合わさっている。

今回の実験では高温流体を水蒸気・低温流体を空気として、空気の流速を変化させて実験を行い、これら三種類の伝熱機構の寄与について分析した。

2. 理論

伝導伝熱

伝導伝熱は、固体内部での伝熱機構であり、今回は内管壁の内部における伝熱機構がこれに当たる。伝導伝熱において、伝熱により伝わる熱量 $Q[W]$ は温度勾配と伝熱面積 $A[m^2]$ に比例し、この時の比例定数が熱伝導率 $\lambda[W/m \cdot K]$ である。式で表すと以下の通りである。

$$dQ = \lambda \left(-\frac{d\theta}{dx} dA \right) \quad (1)$$

式中の $\theta[K]$ は温度を表す。この式はフーリエの法則と呼ばれる。

対流伝熱

対流伝熱は固体と流体の界面における伝熱機構であり、内管壁と空気、蒸気と内管壁の間での伝熱に当たる。強制対流伝熱と自然対流伝熱の二種類があるが、今回は低温・高温それぞれの流体を逆向きに流して強制対流としているため、強制対流伝熱として扱う。

対流伝熱により伝わる熱量 $Q[W]$ は、伝熱面の面積 $A[m^2]$ と温度差 $\Delta\theta[K]$ に比例し、この比例係数 $h[W/m^2 \cdot K]$ が熱伝達係数である。式で表すと以下のようになり、これをニュートンの冷却法則という。

$$Q = hA\Delta\theta \quad (2)$$

熱伝達係数 h と伝熱係数 λ 、代表長さ x をまとめて、以下のヌセルト数 (Nu) という無次元数で表す。

$$Nu = \frac{hx}{\lambda} \quad (3)$$

Nu はレイノルズ数 (Re)、プラントル数 (Pr) から算出され、流動状態によって以下のような実験式が当てはまる。

【層流 ($Re \leq 2100$)】

$$Nu = 1.86 Re^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{wall}} \right) \quad (4)$$

【乱流 ($10000 \leq Re \leq 10000$) :McAdams の式】

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (5)$$

今回の実験では、この二式を用いて Nu を算出し、 Nu から熱伝達係数を求めた。

総括伝熱係数

先述の通り、今回の熱伝達機構は伝導伝熱、対流伝熱を組み合わせたものである。各機構における伝熱量から全体の熱伝達係数を算出することができ、この値を総括伝熱係数 U という。

- 蒸気から内管外壁への対流伝熱

$$q = h_s(T_s - T_{w,s}) \quad (6)$$

- 内管外壁から内管内壁への伝導伝熱

$$q = \frac{\lambda}{\Delta}(T_{w,s} - T_{w,a}) \quad (7)$$

- 内管内壁から空気への対流伝熱

$$q = h_a(T_{w,a} - T_a) \quad (8)$$

総括伝熱係数 U を用いると、

$$q = U(T_s - T_a) \quad (9)$$

これは、模式的に表すと図 1 のようになり、総括伝熱係数 U は以下の式のように表される。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{\Delta}{\lambda} + \frac{1}{h_a} \quad (10)$$

3. 実験方法

■ 実験装置

今回使用した実験装置は以下の模式図で表される。蒸気はボイラによりおよそ $100[^\circ\text{C}]$ に加熱され、三重管のうち外側の二つに送られる。最も外側の管は、外気により蒸気が冷えないようにするためのものである。また、空気流量はバルブにより調節した。空気を流すと、管に装着したオリフィスにより圧力損失が生じ、マノメーターに液柱差が生じる。予め、必要な Re 数における流速 u から適切なオリフィスとその流速で生じる液柱差 ΔH を算出し、その値に合致するように流量を調節した。また、内管壁の素材は銅であった。

また、各装置定数は以下の表の通りである。

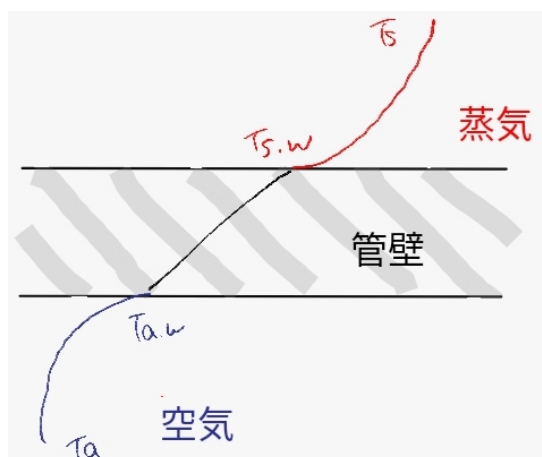


図1 総括伝熱係数

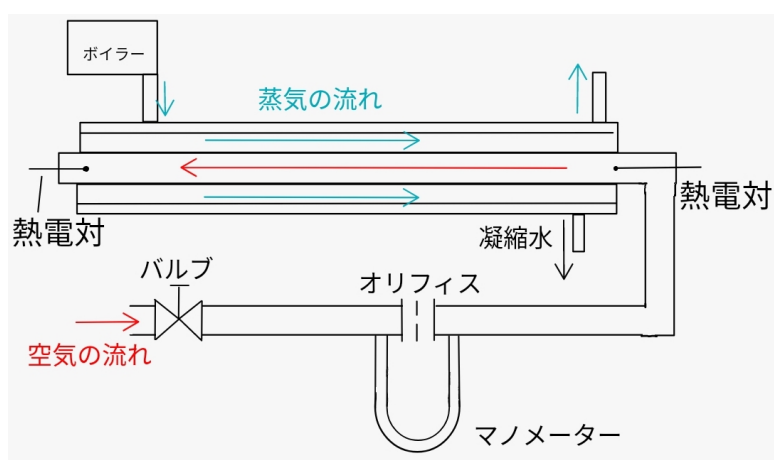


図2 実験装置図

項目	記号	値
管長	l	1.3[m]
内管の外径	d_2	25[mm]
内管の内径	d_1	22[mm]
管壁 (銅) の熱伝導率	λ	$398[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}]$

■実験方法

今回は Re 数を 5000,10000,20000,30000 の 4 条件で実験を行った。この際の実験手順を以下に示す。また、2,3 において実際に操作を行ったのは $\text{Re} = 30000$ のみであり、その他の Re 数におけるデータは他班のものを利用した。

1 流量の選択

各 Re 数における空気の管断面平均流速 $u[\text{m/s}]$, 流量 $V[\text{L/min}]$ を式 (11),(12) から求めた。次に各オリフィスにおける液柱差 $\Delta H[\text{cm}]$ を以下の式 (13) で求め、 ΔH が 5[cm] 以上 20[cm] 以下となるオリフィスを選択した。式における $P[\text{mmHg}]$ は大気圧であり、今回は 760[mmHg] として算出した。また $\theta[\text{K}]$ は流す空気の温度であり、293[K] とした。 α_0 は各オリフィスに固有の定数である。

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (11)$$

$$V = \frac{\pi d^2}{4} u \quad (12)$$

$$\Delta H = \left(\frac{760}{P} \right) \left(\frac{\theta}{273} \right) \alpha_0 V^2 \quad (13)$$

算出に用いた各種定数は以下の表の通りである。

項目	記号	値
P	大気圧	760[mmHg]
θ	流入する空気の温度	293[K]
μ	空気の粘度	$1.86 \times 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$
ρ	空気の密度	$1.18 [\text{kg}/\text{m}^3]$

各 Re 数について、管断面平均流速 $u[\text{m}/\text{s}]$ 、流量 $V[\text{L}/\text{min}]$ 、使用したオリフィス、そのオリフィスにおける液柱差 $\Delta H[\text{cm}]$ を以下の表に示す。

Re	5000	10000	20000	30000
$u[\text{m}/\text{s}]$	3.582	7.165	14.33	21.44
$V[\text{L}/\text{min}]$	1.36×10^{-3}	2.72×10^{-3}	5.45×10^{-3}	8.17×10^{-3}
使用したオリフィス	A3	A4	A5	A5
$\Delta H[\text{cm}]$	11.9	11.3	7.1	15.9

2 凝縮水生成速度測定

実験装置の凝縮水出口に質量既知のビーカーを置き、凝縮水が溜まり始めたタイミングで時間の測定を開始した。ビーカーに凝集水が3分の2ほど溜まったのちに時間の測定を辞め、ビーカーの質量を測った。質量差と時間から凝縮水の生成速度を算出した。この操作を3回行い、誤差の少ない2個のデータの平均値を凝縮速度とした。

3 空気出口温度測定

2と並行して、装置出口の空気の温度を測定した。まず、空気出口側の熱電対を管壁に当たるようにし、その点から1mm内側の点を中心からの距離 $(x) = 11[\text{mm}]$ の点として温度を測定した。その点から熱電対を1[mm]管の中心に向かって動かし、 $x = 10[\text{mm}]$ の点の温度を測定した。このように $x = -1[\text{mm}]$ の点まで13点の温度を測定し、うち $x = -1[\text{mm}]$ を除いた12点のデータを用いて以降の分析を行った。また、出口温度測定開始前後に入口温度を2回測定し、2回の平均を入り口温度とした。

4. 結果

Re = 5000,10000,20000,30000 のそれぞれの凝縮速度の測定結果を以下の表に示す。

Re	5000	10000	20000	30000
凝縮速度 ($\times 10^{-2}$ [g/s])	6.102	9.993	18.19	23.88
入り口温度 (測定開始時)[°C]	24.4	26.3	24.4	21.6
入り口温度 (測定終了時)[°C]	24.8	26.3	24.7	22.3

また、温度分布の測定実験について、各位置での測定結果をいかに示す。(単位：[°C])

管壁からの距離 [mm]	5000	10000	20000	30000
11	98.1	93.6	85.1	75.0
10	94.8	87.6	77.2	71.8
9	84.0	78.8	74.0	69.7
8	80.9	76.6	72.3	67.8
7	78.9	75.4	69.8	66.0
6	77.3	73.8	68.3	64.8
5	76.4	72.6	67.2	63.7
4	75.4	71.8	66.2	63.1
3	74.6	71.2	65.3	62.1
2	74.1	71.0	64.8	61.8
1	73.9	70.7	64.6	61.7
0	73.6	70.9	64.5	61.7

5. 課題

課題 6 をのぞくものについて Re=5000,30000 について分析を行った結果を以下の表に示す。また、課題 6 については四種類の Re 数について分析した。

計算にあたり、3 で示した装置定数に加えて以下の表の定数を用いた。

項目	記号	値	単位
蒸気の温度	V	100	°C
熱伝導率 (水,100 °C)	λ_L	0.682	kW/(m・K)
密度 (水,100 °C)	ρ_L	958.38	kg/m ³
粘度 (水,100 °C)	μ_L	0.2821	Pa・s
水の蒸発潜熱	Δh	2257	kJ/kg
熱伝導率 (空気)	λ	2.72×10^{-4}	kW/(m・K)
粘度 (空気,20 °C)	μ	1.86×10^{-5}	Pa・s
粘度 (空気,20 °C, 壁)	μ_{wall}	2.24×10^{-5}	Pa・s
密度 (空気,20 °C)	ρ	1.20	kg/m ³
比熱 (空気,50 °C)	c_p	1.006	kJ/kg
熱伝導率 (銅)	λ_{Cu}	398	kW/(m・K)
Pr 数 (空気,50 °C)	Pr	0.702	-
重力加速度	g	9.8	m/s ²

課題 1

4 の蒸気凝縮速度 w より、以下の式 (14) で蒸気の失った熱量 Q_s を算出した。この時、蒸気は 100 度の蒸気から 100 °C の液体になったと考え、蒸発潜熱 Δh のみを考慮した。

$$Q_s = w \times \Delta h \quad (14)$$

課題 2

4 で測定した出口温度の分布から出口温度の平均を算出した。温度分布は (15) 式のような $1/n$ 乗則 (Re=5000 で $n=6$, Re=30000 で $n=7$) を仮定し、図 2 の $\frac{ru}{u_{max}} - r$ のグラフ, 図 3 の $\frac{ru\theta}{u_{max}} - r$ グラフを描画した。次に (16) 式の積分を図積分を用いて計算し、平均温度 θ_{2av} を算出した。

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (15)$$

$$\theta_{2av} = \frac{\int r \frac{u}{u_{max}} \theta dr}{\int r \frac{u}{u_{max}} dr} \quad (16)$$

課題 3

入口と出口の空気の温度差から、空気に供給された熱量を (17) 式で算出した。

空気の比熱 c_p [kJ/(kg・K)] は入り口、出口の平均温度における値を利用し、空気の密度 ρ [kg/m³] は 20[°C] における値を用いた。

$$Q = (\theta_{2av} - \theta_1) \times c_p \times \rho u A \quad (17)$$

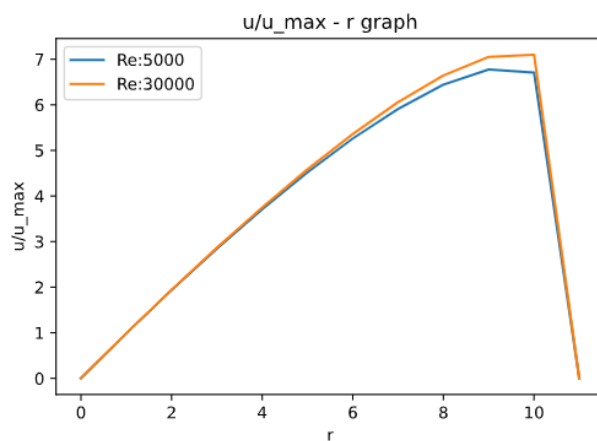


図3 $u/u_{\max} - r$ グラフ

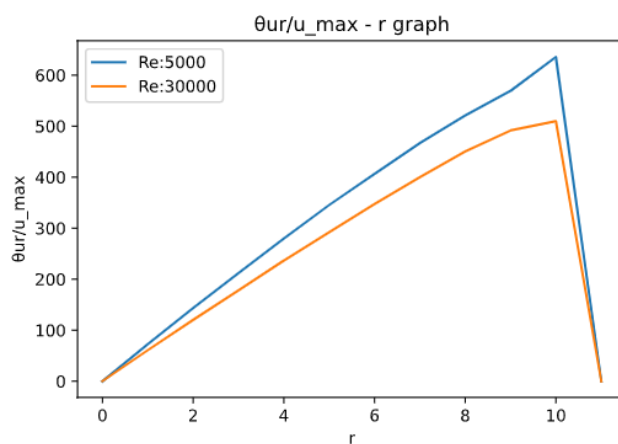


図4 $u_r \theta / u_{\max} - r$ グラフ

課題4

課題1で求めた Q_s , 課題4で求めた Q から熱損失量 Q_1 を求めた。

$$Q_1 = Q_s - Q \quad (18)$$

課題5

今回の熱伝達機構が全て対流伝熱によって行われていると考えると、総括伝熱係数 U_{exp} は (19) 式で表される。今回は外表面基準の値を算出した。

まず、蒸気と空気の温度差を求める必要があるが、入り口と出口で空気の温度が異なるため、この温度差には分布が生じる。そのため、温度差 $\Delta\theta$ として、(20) 式の対数平均温度差を用いた。 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ は図4のように入り口、出口それぞれの蒸気と空気の温度差である。今回は蒸気温度を $100[^\circ\text{C}]$ として対数平均温度を算出した。

$$Q = U_{exp} A \Delta\theta = U_2 A_2 \Delta\theta \quad (19)$$

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2}{\ln(\Delta\theta_1/\Delta\theta_2)} \quad (20)$$

課題 6

2 の (4),(5) 式に基づいて Nu 数を求め、(3) 式で空気の熱伝達係数 h_0 を求めた。結果を表に示す。また、Nu 数と Re 数の関係は以下の両対数グラフのようなものであった。

プロットするにあたり、(4),(5) の式の通り層流域は $Re \leq 2100$, 乱流域は $10000 \leq Re \leq 100000$ として実線で表した。(4) 式は $Re=5000$ まで、(5) 式は $Re=5000$ から $Re=10000$ までの値でも Nu 数を算出したため、これらは点線で表した。

さらに、Nu 数の算出に必要なプラントル数 (Pr 数) は以下の (21) 式で求めた。

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (21)$$

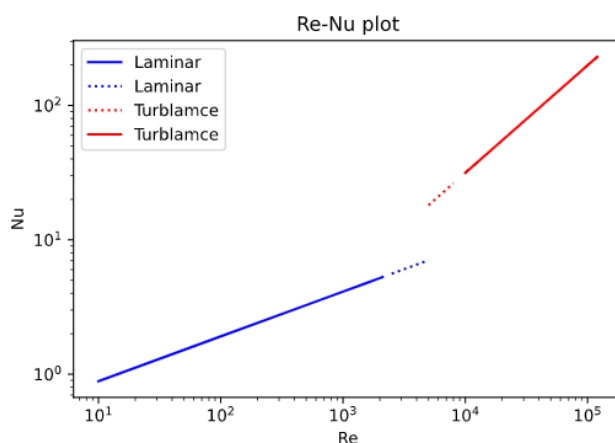


図 5 Re 数, Nu 数両対数グラフ

Re	5000	10000	20000	30000
h_0	8.71×10^{-3}	3.90×10^{-2}	6.78×10^{-3}	9.38×10^{-3}

課題 7

蒸気側熱伝達係数 h_0 を以下の (22) 式で求めた。

$$h_0 = 0.95 \left(\frac{\lambda_L^3 \rho_L^2 g l}{\mu_L w} \right)^{1/3} \quad (22)$$

課題 8

(10) 式の総括伝熱係数は、今回の実験では以下の (23) 式になる。この式を用いて総括伝熱係数の理論値を算出した。

$$\frac{1}{U_{the}} = \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{h_1} + \frac{A_2 \ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda_{Cu}l} + \frac{1}{h_2}$$

第一項は管壁から空気への対流伝熱、第二項は管壁内の伝導伝熱、第三項は蒸気から管壁への対流伝熱である。これらを順に①、②、③とし、それぞれの値を表に示す。また、 $Re = 5000$ については層流として計算したものと、乱流として計算したものの両方のデータを示す。

課題 6 を除く全ての課題について、回答を以下の表に示す。

課題	項目	記号	Re=5000	Re=30000
1	蒸気の失った熱量 [kW]	Q_s	0.138	0.539
2	出口温度 [°C]	θ_{2av}	81.0	66.6
-	入口温度 [°C]	θ_1	24.6	21.95
-	出入温度の平均 [°C]	-	52.8	44.3
3	空気に供給された 熱量 [kW]	Q	0.0845	0.276
4	熱損失量 [kW]	Q_1	0.0532	0.263
-	対数平均温度差 [°C]	$\Delta\theta$	40.9	52.6
5	総括伝熱係数 [$\frac{\text{kW}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$]	U_2	2.02×10^{-2}	5.14×10^{-2}
7	蒸気側熱伝達係数 [$\frac{\text{kW}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$]	h_0	5697	3615

課題	層流/乱流	項目	Re=5000	Re=30000
6	層流	①	130.45	-
6	乱流	①	50.79	12.11
8	-	②	4.01×10^{-6}	-
7	-	③	1.76×10^{-4}	2.77×10^{-6}
8	層流	U_{the}	0.767×10^{-2}	-
8	乱流	U_{the}	1.97×10^{-2}	8.26×10^{-2}
5	-	U_{exp}	2.02×10^{-2}	5.14×10^{-2}

6. 考察

課題 6,7,8 における総括伝熱係数の各項①, ②, ③の計算結果から、この伝熱機構における寄与が最も大きい機構は管壁から空気への対流伝熱であると考えられる。

課題 8, 課題 5 の結果を比較すると、 $Re=5000$ の時は乱流として計算した方が実験値と近い理論値が得られたため、この時の流動状態は乱流であったと推測できる。

また、 $Re = 5000, Re=30000$ それぞれにおいて U_{the}, U_{exp} を比較すると $Re=30000$ の方が U_{the}, U_{exp} の差が大きいことがわかった。これは理論値と実験値を比較した際の熱伝達効率のロス、 Re 数が大きい時の方が大きいということを示している。この理由について、流速が大きい時は完全に熱が伝わる前に空気が管外に放

出されているため、十分に加熱されていないと考える。

7. 結言

今回の実験を通して、対流・伝導伝熱機構について理解を深めることができた。また、データ解析手法も習得することができ、とても有意義な実験であったと思う。

8. 参考文献

化学工学-解説と演習-(改訂第三版) (株) 朝倉書店 (編集) 多田豊 (発行) 2008/3/25

