

流れ熱伝導解析ソフトを用いた簡易型熱交換器での 強制対流熱伝達における温度分布解析

加藤泰世

1. はじめに

筆者は、これまで工学での基本的な数値解析を行ってきた^{1)~8)}。これらの解析の目的は、短期大学の教育課程においては微分方程式などの基礎的な科目を取り入れる余裕がなく、経験的に得られる学習が主体となっている感じがあり、詳細な基礎理論については概略としながらも解析を通した演習教材の検討が必要と思われることにある。

既報⁸⁾では、流れ解析ソフトに組み入れられた温度解析の機能を用いて単純な円管モデルや二重円管型熱交換器での温度分布解析を行っているが、そこでは流体と外部との熱伝達は熱流束を与えることによる限定された条件下での解析であった。本報では流れと熱伝導の連成解析ソフトを用いることで、流体と壁面との熱伝導解析を含めた温度分布解析を行った。また、既報⁸⁾では取り上げていなかった粘性係数の温度依存性について、本報では解析条件に取り入れた検討を加えた。

以下、得られた結果について報告する。

2. 二次元軸対象モデルおよび解析条件

本報では、主として図1に模式図を示すような二重円管型熱交換器を想定した二次元軸対称モデルを用いた温度分布解析を行った。図1に示す2つの二重円管型熱交換器は、どちらも内側と外側を流れる流体をそれぞれ「流体A」、「流体B」と表記しており、両者が同じ向きに流れる並流モデルと反対方向に流れる向流モデルの両方で解析を行った。また、本報では「流体A」と「流体B」のどちらも水とし、内側を流れる流体Aは流入口で20℃とし、外側を流れる流体Bは流入口で80℃とした。以下、流体Aを冷水、また流体Bを温水と表記する。

図2は、解析を行った二次元軸対称モデルである。ここで示している部分は流入口と流出口の周辺のみであるが、解析を行った二重円管型熱交換器は直管であり長さ l が0.8mの短管モデルと l が4mの長管モデルで解析を行った。中間壁と外壁の材質は鋼材とした。また、冷水、温水ともに流出口での圧力を0 Paとし、流入口には解析結果で示すような圧力を設定した。表1は解析モデルを構成する水と鋼材の材料特性を示している。

既報⁸⁾では、算生会⁹⁾の流れ解析ソフトに組み入れられた温度解析の機能を用いた解析であっ

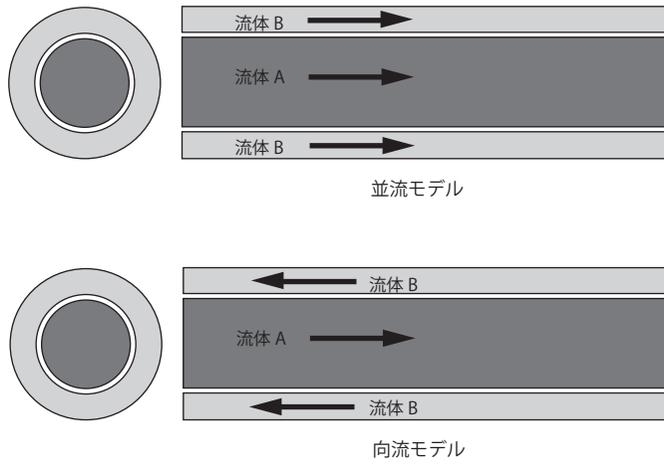


図1 二重円管型熱交換器での並流と向流

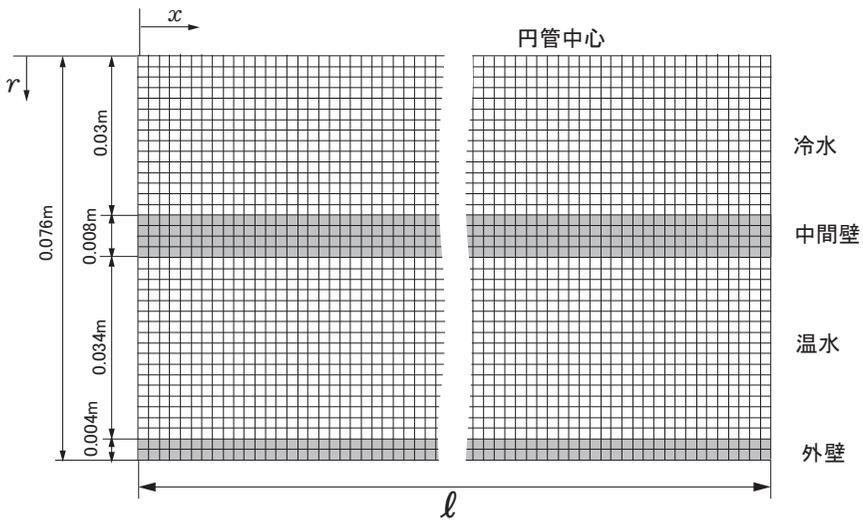


図2 二重円管型熱交換器の二次元解析モデル

表1 解析モデルを構成する水と鋼材の特性

	水	鋼材
密度	1000 kg/m ³	7800 kg/m ³
比熱	4186 J	461 J
熱伝導率	0.5 W/(m · K)	53 W/(m · K)
粘性係数	0.001002 Pa · s (20℃) 0.000362 Pa · s (80℃)	————— —————

加藤泰世：流れ熱伝導解析ソフトを用いた簡易型熱交換器での強制対流熱伝達における温度分布解析

だが、本報では算生会で新たに開発された流れ熱伝導解析ソフトを用いて解析を行った。この流れ熱伝導解析ソフトが開発されるにあたり、粘性係数の温度依存性として粘性係数が温度の二次関数として扱うことができる機能も取り入れられており、粘性係数の温度依存性に関する条件設定も行った。図3は水の粘性係数の温度依存性を示したものであり、同図には下記の式に基づく曲線も合わせて示している。

$$\mu = 2.414 \times 10^{-5} \times 10^{\frac{247.8}{T-140}} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu &= A_2 t^2 + A_1 t + A_0 \\ A_0 &= 0.001669, \quad A_1 = -3.3819 \times 10^{-5}, \quad A_2 = 2.0620 \times 10^{-7} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

図中に示した破線は(1)式の指数関数¹⁰⁾に基づいて描いており、データと良く一致しているが、使用した解析ソフトで扱うことのできる関数は二次関数に限定されているので(2)式に基づく解析を行った。なお、(1)式の T は絶対温度 (K)、(2)式の t は摂氏 (°C) である。

図3には(2)式に基づく粘性係数を実線で示しているが、指数関数の場合に比べてデータと幾分差異が認められ、80°C付近で最小値を取るが、上述のように温水は流入口で80°Cとするため特に問題はないと考えている。また、粘性係数が温度によって変化する場合であっても流入口から流出口までの解析結果が反映される一定値として扱うことのできる平均的な粘性係数について下記のように検討した。

まず、円管内を流れる粘性流体の場合、円管断面全体で流れる流量 $Q (m^3/s)$ は下記のような式で表される¹¹⁾。

$$Q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \frac{\Delta p}{\ell} \quad (3)$$

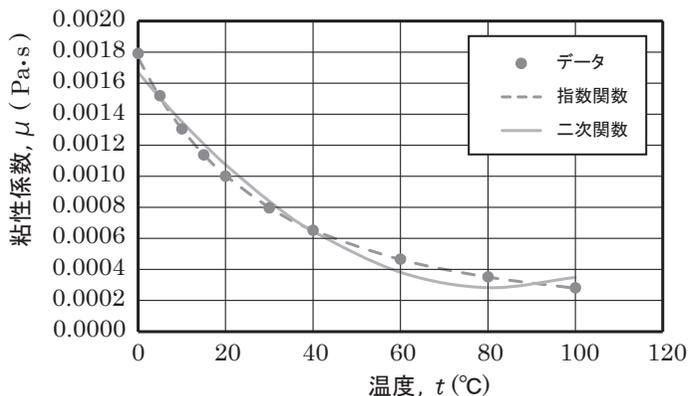


図3 水の粘性係数の温度依存性

式中の r_0 は円管の内壁半径、 μ は粘性係数、 ℓ は円管の長さであり、 Δp は本報での解析モデルの場合は流入口と流出口での圧力差となる。また、流れの管路が円管以外の例として平行平板間の流量は下記のような式で表される¹²⁾。

$$Q = \frac{h^3}{12\mu} \frac{\Delta p}{\ell} \quad (4)$$

式中の h は平行平板の間隔であり、その他の式中の記号の意味は円管の場合と同様である。(4) 式が適用できるのは間隔の比較的小さい場合であり、また (4) 式は移動平板の間を流れる流体に対して導かれた式で平板の移動速度を 0 とした場合である。

さて、(3)、(4) 式はどちらも、下記のような関係式とみなすことができる。

$$Q \cdot \mu \cdot \frac{\ell}{\Delta p} = C \text{ (一定値)} \quad (5)$$

この式で右辺の C (一定値) は、流管の断面形状で決まる値であるので、流路の断面形状、長さ ℓ 、それに流入口と流出口での圧力差が等しければ、管路断面全体で流れる流量 Q (m^3/s) と粘性係数 μ の積は一定の関係にあるといえる。そこで、基準温度での粘性係数 μ_0 が一定で変化しない条件下で管路を流れる流量 Q_0 (m^3/s) が分かっているならば、粘性係数が温度に依存する場合も含めたある条件下での流量 Q_t (m^3/s) を用いることで下記の関係式が成り立つ。

$$Q_0 \cdot \mu_0 = Q_t \cdot \mu_m \quad (6)$$

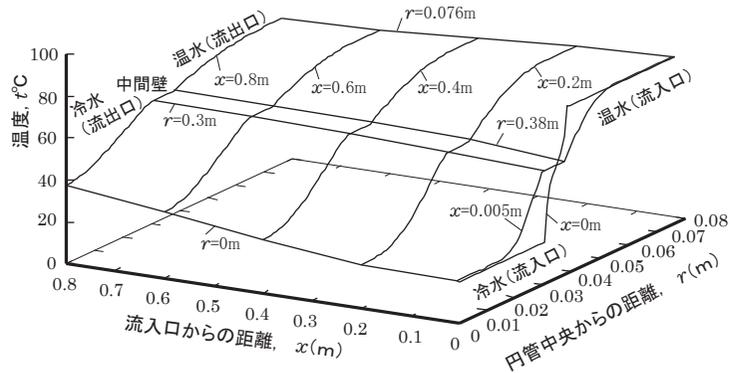
(6) 式にて、 μ_m は流入口から流出口までの粘性係数を一定とみなした値であり、ここでは「平均粘性係数」と称することとする。

以上より、解析を行うにあたり粘性係数の条件設定は下記の 3 通りとした。

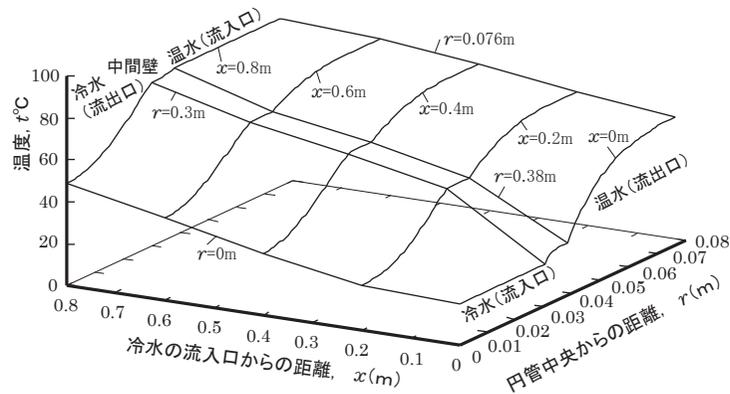
- [1] 流入口で設定した温度での粘性係数 μ_{in} 一定とした場合
- [2] (2) 式に示すような温度の二次関数で表される粘性係数 μ_t
- [3] μ_{in} を (6) 式の基準粘性係数 μ_0 として求まる平均粘性係数 μ_m 一定とした場合

3. 二次元軸対象モデルでの解析結果

図 4 (a)、(b) は、二重円管型熱交換器の流入口から流出口までの温度分布を立体的に示した結果であり、それぞれ並流モデルおよび向流モデルの 1 例である。同図 (a) に示す結果は、短管の並流モデルでの結果であり、温水の流入口での圧力 P_H は 0.0005Pa であり冷水の流入口での圧力 P_L は 0.0015Pa である。粘性係数は (2) 式に示した温度の二次関数としており、温水と冷水の流入口での温度は、それぞれ 80℃ と 20℃ である。図に示すように、解析された温度は、二重



(a) 並流モデル



(b) 向流モデル

図4 解析された二次元軸対象モデルでの温度分布の例

円管型熱交換器の中心からの距離 r と流入口からの距離 x に対応付けて示している。図1に示したように内側に冷水また外側に温水を流すように条件設定しており、その間に中間壁を設けている。流入口では冷水も温水もほぼ設定温度と変わらないが、流入口からの距離 x が大きくなるにつれ冷水と温水の温度が近づく傾向がみられ、中間壁の付近では x が0.005mあたりから冷水と温水の温度がほぼ等しくなっている結果が確認できる。なお、流入口 ($x = 0.000\text{m}$) から $x = 0.005\text{m}$ までは、中間壁付近での温度分布の変化が顕著に現れた結果となったが、この現象については特に取り上げる問題ではないと考えている。また、図4 (b) に示す結果は、短管の向流モデルでの結果であり、温水の流入口で圧力 P_H は0.00025Paであり冷水の流入口での圧力 P_L は0.0015Paである。粘性係数の解析条件としての与え方、冷水と温水の流入口での設定温度は図4 (a) に示す並流の場合と同様であり、内側が冷水で外側が温水である。 x は冷水の流入口からの距離であり、温水の流入口は $x = 0.8\text{m}$ の位置である。冷水、温水ともに流入口

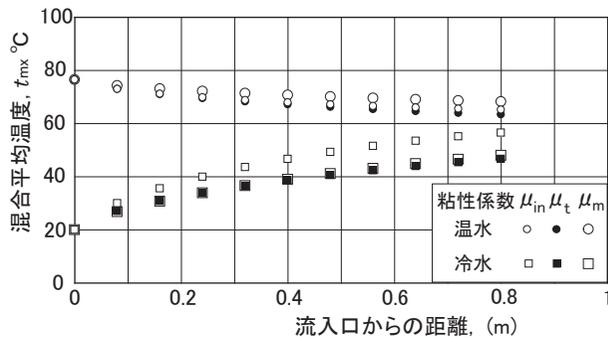
では設定温度にほぼ等しいが、流れに伴う温度分布の変化の様子が確認できる。

次に、冷水の流入口からの距離 x の変化に伴う混合平均温度 t_{mx} について示すことにする。混合平均温度 t_{mx} は、熱伝達が始まる流入口から任意の距離 x の断面での流体を完全に混合させたときの温度を意味している¹³⁾。計算手法の詳細は既報⁸⁾で記しているが、概略を示せば次式より求めることができる。

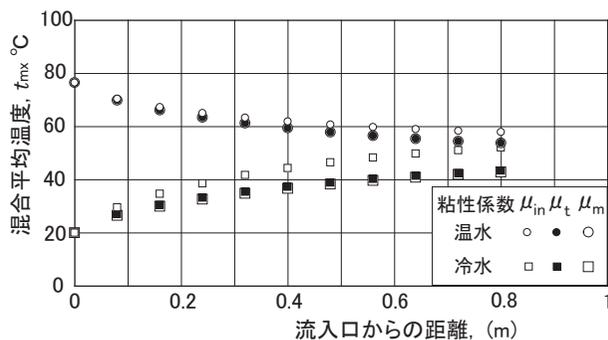
$$c \rho \int u t \Delta A = c \rho u_m t_{mx} A \quad (7)$$

式中右辺の u_m は平均流速、 A は流路の断面積である。ここでは、比熱 c と密度 ρ については一定値とみなしている。また、左辺の u と t は流入口から任意の距離 x の位置にある局所的な流速と温度であり、面積分は流入口から任意の距離 x の断面での u と t の積の総和を意味している。

以下、二重円管型熱交換器での流れに伴う混合平均温度 t_{mx} の解析結果について示す。解析モデルは、図2に示した二重円管型熱交換器であり、短管と長管でそれぞれ並流と向流について



(a) P_H 0.0005Pa P_L 0.0015Pa



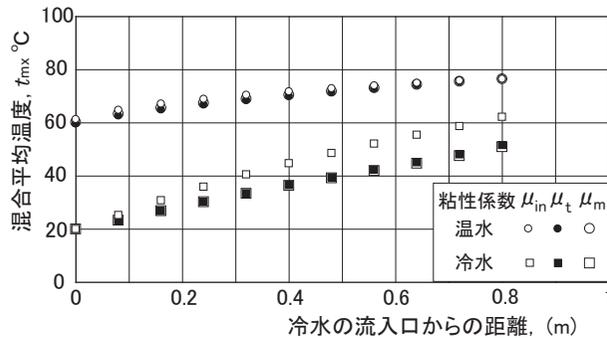
(b) P_H 0.0025Pa P_L 0.0015Pa

図5 短管並流モデルでの混合平均温度

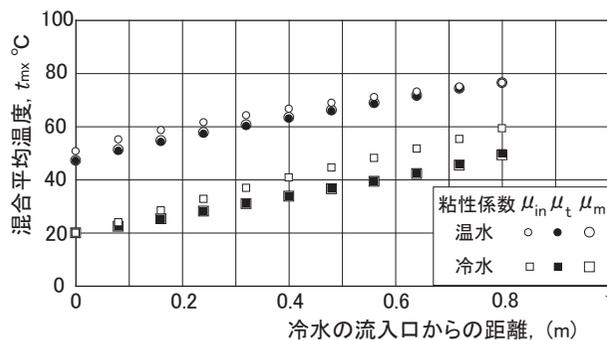
解析を行った。粘性係数は既述のように3通りの設定とした。各図中に示す μ_{in} , μ_t , μ_m は、それぞれ粘性係数の与え方によって算出された混合平均温度 t_{mx} の区別を意味している。

図5に示すのは短管モデルで並流とした場合の結果であり、図6は短管モデルで向流の場合の結果である。図7は長管モデルで並流とした場合の結果であり、図8は長管モデルで向流とした場合の結果である。流入口と流出口での温度設定はすべて同じであるが、流入口での冷水と温水の圧力（それぞれ P_H および P_L と記す）は各図に示してある。

どの結果においても、流入口での混合平均温度は粘性係数の与え方に関わらず設定温度にほぼ等しく、全ての結果において粘性係数の与え方が μ_t の場合と μ_m の場合の解析結果はよく一致している。また、冷水の結果に比べて温水の結果は、全体に粘性係数の条件設定による際立った差異が認められないが、図3に示した結果より粘性係数の温度による影響は比較的溫度の低い範囲で現れることがその理由であると考えられる。しかし、温水についても流入口での圧力が小さく平均流速が遅い場合の結果では、粘性係数の与え方による混合平均温度の有意な差異が認められる結果となった。



(a) $P_H 0.0005\text{Pa}$ $P_L 0.0015\text{Pa}$



(b) $P_H 0.0025\text{Pa}$ $P_L 0.0015\text{Pa}$

図6 短管向流モデルでの混合平均温度

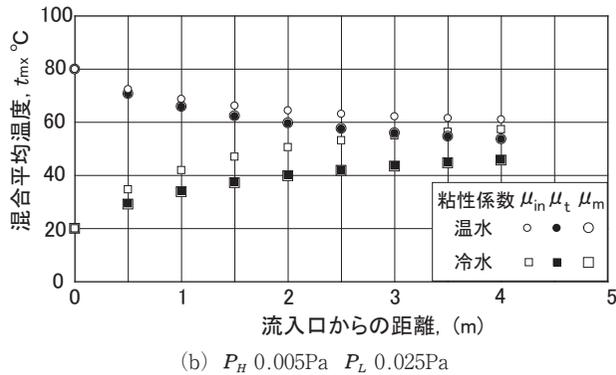
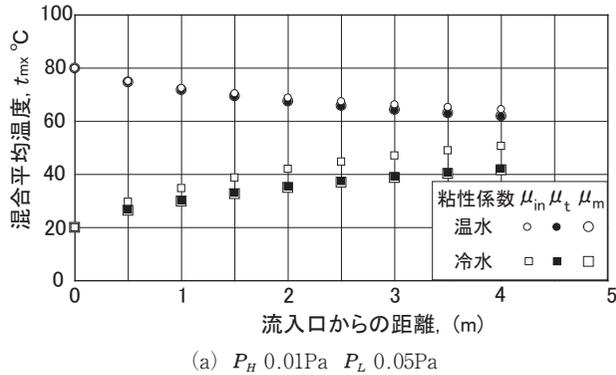


図7 長管並流モデルでの混合平均温度

4. 三次元モデルでの解析結果

図9に示すような三次元モデルでの解析を行った。同図a)は解析を行ったモデルの形状寸法である。温水と冷水は、二次元軸対象モデルの場合と同様に流入口での温度をそれぞれ80°Cおよび20°Cとした。また、温水と冷水の間の壁についても二次元軸対象モデルと同じ鋼材とし、それらの特性は表1に示す通りである。また、このモデルでは冷水は4本の直管を別々に流れるため、解析を行うにあたりそれぞれの冷水の流路を区別する必要がある。同図b)は、冷水の管路を流入側から見たところで冷水流路の番号を示している。

表2は、温水と冷水の各流路での流出口の混合平均温度を示している。表中に示す μ_{in} 、 μ_t 、 μ_m は、混合平均温度を算出するにあたっての粘性係数であり、図5から図8で示した二次元軸対象モデルの場合と同様である。温水の流路は直管のように断面形状が一定ではなく、(6)式の適用性についても検討の必要があると思われるが、流出口での混合平均温度は粘性係数の与え方による際立った差異は認められない。しかし、冷水の場合はどの流路においても粘性係数の与え方を μ_{in} として算出された混合平均温度は、 μ_t および μ_m の場合と比較して有意な差異が認

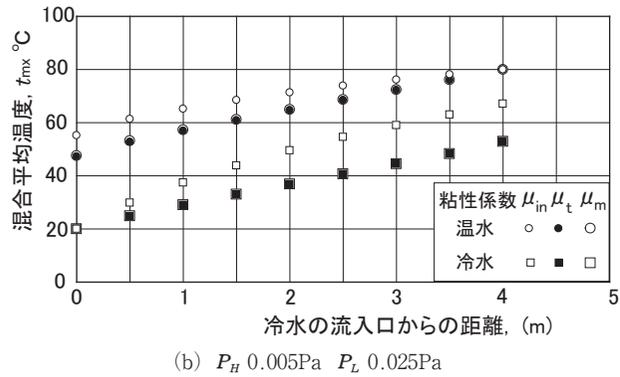
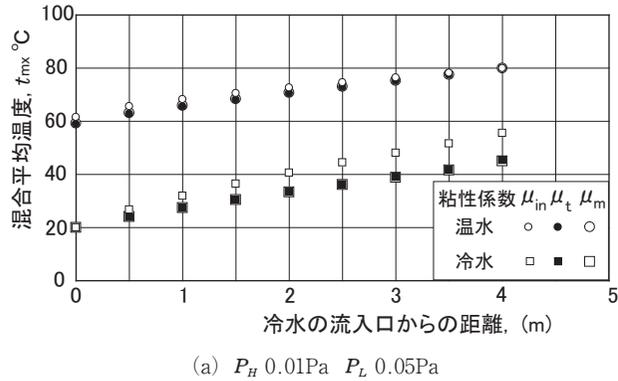
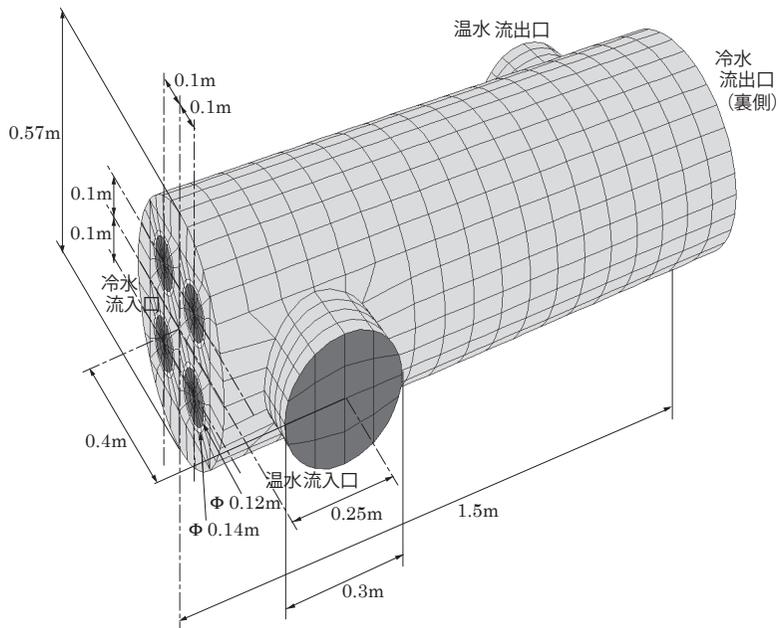


図8 長管向流モデルでの混合平均温度

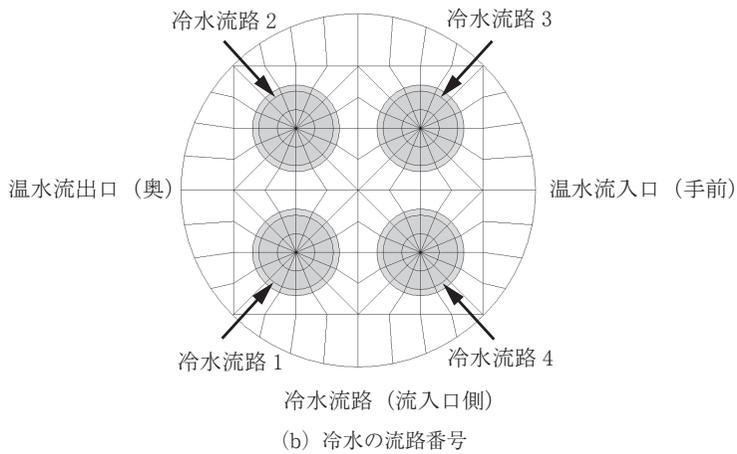
められた。また、二次元軸対象モデルでの解析と同様に平均粘性係数 μ_m を用いた場合の混合平均温度は、 μ_t を用いた場合とほぼ等しい結果となった。それから、冷水流路3, 4は温水の流入口の近くを通過するので、流出口での混合平均温度は冷水流路1, 2での解析結果に比べてやや高くなったことが明らかである。

5. おわりに

本報では、流れ熱伝導解析ソフトを用いて二重管型熱交換器での温度分布解析を行った。流れ解析において水の粘性係数の温度依存性を解析に取り入れてみたが、(6)式に示す平均粘性係数 μ_m を用いることによって、温度の二次関数で表した粘性係数 μ_t を用いた解析結果とほぼ等しい結果を得ることが確認された。本報で記された解析は、特に実用的な想定はなく、短期大学での基礎工学の知識を深めるための教材開発についての検討であるが、微分方程式などの基礎科目の習得がなくても大筋の内容を把握できるところに意義があると考えている。既報^{5), 6)}で示した振動解析は、現在の講義の演習で一部を取り入れており、今後の新たな課題については検討中である。



(a) 解析モデルの形状寸法



(b) 冷水の流路番号

図9 三次元解析を行った熱交換器モデル

表2 三次元解析モデルで解析された各流路の流出口での混合平均温度 (°C)

	μ_{in}	μ_t	μ_m
温水	69.19	69.21	69.24
冷水流路 1	36.81	33.33	33.40
冷水流路 2	36.81	33.37	33.42
冷水流路 3	40.43	35.55	35.23
冷水流路 4	40.43	35.61	35.25

加藤泰世：流れ熱伝導解析ソフトを用いた簡易型熱交換器での強制対流熱伝達における温度分布解析

本報での解析を行うにあたり、算生会代表者黒田英夫様には要望に応じた解析ソフトの改善を行って頂くとともに、解析にあたってのいくつかの有益な助言を頂いた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 加藤泰世, ピストンを想定した円筒型モデルによる熱伝導熱膨張に関する有限要素法解析, 中日本自動車短期大学論叢 (2014)
- 2) 加藤泰世, 円錐コイルバネでの静的荷重下での応力および変形に関する有限要素法解析, 中日本自動車短期大学論叢 (2015)
- 3) 加藤泰世, ボルト締め付け破断試験での実験結果に基づく応力ひずみ解析, 中日本自動車短期大学論叢 (2016)
- 4) 加藤泰世, 流れ解析演習用ソフトを用いた空気力学特性に関する考察, 中日本自動車短期大学論叢 (2017)
- 5) 加藤泰世, 有限要素法による減衰振動の時間応答解析, 中日本自動車短期大学論叢 (2018)
- 6) 加藤泰世, 有限要素法による簡易車両振動モデルを用いた減衰振動の時間応答解析, 中日本自動車短期大学論叢 (2019)
- 7) 加藤泰世, 骨組み構造解析として行ったダンパーの減衰振動特性, 中日本自動車短期大学論叢 (2020)
- 8) 加藤泰世, 円管および簡易型熱交換器における強制対流熱伝達での温度分布解析, 中日本自動車短期大学論叢 (2021)
- 9) 黒田英夫, 基礎からの数値解析, 工学社, (2010)
- 10) Al-Shemmeri, T., Engineering Fluid Mechanics. Bookboon, London, UK, 2012
- 11) 中林功一, 山口健二, 図解によるわかりやすい流体力学, 森北出版, (2015)
- 12) 杉山弘, 他, 流体力学, 森北出版, (2013)
- 13) 吉田駿, 伝熱学の基礎, オーム社, (2019)

