欠陥を含む二重円管式熱交換器での温度分布解析

加藤泰世

はじめに

筆者は、既報^{1),2)}にて簡易型熱交換器での温度分布解析を行った。そこでは、主として二重円 管型熱交換器を取り上げ、温水と冷水を同方向に流す並流および温水と冷水を逆方向に流す向流 の両者について粘性係数の温度依存性を考慮した場合も含めた温度分布解析も行った²⁾。ところ で、こうした熱交換器においては長期間の使用に伴う流管壁の腐食による欠陥などの問題点も指 摘されており³⁾、本報では流管壁にこうした欠陥部を有する二重円管式熱交換器での温度分布解 析の結果について記すこととした。強制対流型熱交換器での実用的な問題として、流管壁の欠陥 を早期に検出する一つの手法を確立することは意義のある成果として期待されるが、ここでは単 純な二重円管式熱交換器をより複雑化した解析モデルとすることで、熱伝導解析としての有意義 な学習教材の作成を主たる目的としている。短期大学においては微分方程式などの基礎的な科目 を教育課程に取り入れることが難しく、本報は筆者がこれまで報告してきた基本的な解析を通じ て現象の理解を深めさせる教育手法^{1,2,4)~10}の続報であり、以下その内容について報告する。

解析を行った二重円管式熱交換器モデル

本報では、既報^{1),2),4)~100}と同様に算生会¹¹¹のソフトを用いて解析を行った。解析モデルの作 成はSolidDataを用いており、また流れ熱伝導解析はFlowTherm 3Dを用いている。図1.a)、 b),c)の各図に示すのは、解析を行った二重円管式熱交換器である。図1.a)に示す *x-y-z* 系座標系のように流れの方向となる長手方向を *x*、円管の中心から奥に向かう方向と鉛直上方 に向かう方向をそれぞれ *y*,*z*とするが、*y-z*平面については *r-* θ系の極座標としての表記も 行っている。図1.のどの図においても *z*座標が0となる円管の中心軸を通る断面で2分割し て示している。図1.b)は流管壁に欠陥部のないモデルであり、内側が温水流路であり、外側 の冷水流路とは流管壁で仕切られている。また、冷水流路の外側にも流管壁は設けている。図1. c)は温水流路と冷水流路の間の流管壁に欠陥部を設けたモデルである。欠陥部は1か所であり その位置は図中に示す通りである。図2の各図は図1.c)に示す解析モデルの一部であり欠陥 部付近の部分モデルである。図2の各図は温水部と冷水部の一部を含めているが、温水部と冷水 部が接続する流管壁の欠陥部では要素を細かく分割する必要があり、またその一方で周囲で細分

21



(c) 欠陥部のあるモデル

図1. 二重円管型熱交換器の解析モデル

割の必要のない要素と節点が共有できるように部分モデルを作成する必要がある。図 a) は「隠 面処理あり」とした表示であり、また同図 b) は同図 a) に示したモデルの中央を4分割した部 分を示している。また,同図 c) は同図 a) に示したモデルを「隠面処理なし」とした表示であり、 同図 d) は部分モデルの流管壁のみを示している。なお欠陥部の形状は長方形であり、その大き



図2. 二重円管型熱交換器での温水と冷水の接続部付近の部分モデル(a),(b),(c)



(d) 部分モデルの流管壁

図2. 二重円管型熱交換器での温水と冷水の接続部付近の部分モデル(d)

さは最小となる流管壁の内側で0.05m×0.0187mである。以下,図2に示した欠陥部周辺の部 分モデルの作成手順について説明する。

図3. a) に示すのは、作成する部分モデルの流管壁内側の温水部である。算生会ソフト SolidDataでは要素を細分化するための「要素の追加」という操作があり、この操作によって同 図の手前側の面に細分割を行ったのが同図 b) である。これを図2. b) に示したような作成す る部分モデルの4分割の一つとなるように修正するため、まず同図に示す2つの要素を削除する



と同図 c)となる。そして, 図中に示す・を付けた節点の座標を手動入力で修正することで同図 d) に示すようにすることができる。このとき, 座標を修正した要素については中間節点も手動入力 で修正する必要がある。

冷水部についても同様の操作で流管壁側の面に細分割を行えば、同図 d) のような部分モデル を同様に作成することができる。また、流管壁の欠陥部については、同図 e) のように同図 d) と同型モデルにて奥側の要素を削除し、節点座標の手動入力により同図 f) に示すような部分モ デルにすることができる。

こうして作成された図3.d),図3.f)のような部分モデルを合成し、上下方向(z方向) と流れの方向(x方向)に反転させたモデルを合成すれば、温水側と冷水側の接続部の要素を 細分化したモデルを作成することができる。また、さらに接続部の六面体要素をさらに細分化す るために同様の操作を繰り返して作成したのが図2.の各図に示したような欠陥部周辺の部分モ デルである。

二重円環式熱交換器での温度分布解析結果

ここまで温水、冷水と記したように、解析を行った流体は高温側・低温側ともに既報^{1).2)}と同様に水とした。これは、異種流体を扱った場合には混合による影響を考慮する必要があるからである。また、流管壁についても既報^{1).2)}と同様に鋼材とした。これらの特性は表1に記す通りである。圧力条件は、温水の流入口は0.0015Paとし、冷水の流入口は0.001Pa, 0.002Pa, 0.005Paの3通りとした。また温水・冷水ともに流出口での圧力は0Paとした。温度条件は、温水と冷水の流入口での温度を、それぞれ80℃および20℃とした。これらの条件で温水と冷水が同方向に流れる並流および逆方向に流れる向流の場合について解析を行った。温水は全ての場合において図2.b)にてx = 0mの位置を流入口とし、冷水は並流の場合の流入口はx = 0mまた向流の場合の流入口はx = 0mの位置とした。水の粘性係数は(1)式に示すような絶対温度Tをパラメーターとする指数関数として与えられるが¹²⁾、ここで使用した算生会ソフトでは粘性係数が温度のみに依存する場合は、温度の二次関数として粘性係数を扱うことが可能である。そこで、既報²⁾と同様に(2)式に示すように係数を与えた。

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

	水	鋼材
密度	1000 kg/m³	7800 kg/m³
比熱	4186 J	461 J
熱伝導率	$0.5 \text{ W/(m \cdot K)}$	53 W/(m · K)

表1. 解析モデルを構成する水と鋼材の特性

 $\mu = \mathbf{A}_{2} t^{2} + \mathbf{A}_{1} t + \mathbf{A}_{0}$ $\mathbf{A}_{0} = 0.001669, \qquad \mathbf{A}_{1} = -3.3819 \times 10^{-5}, \qquad \mathbf{A}_{2} = 2.0620 \times 10^{7}$ (2)

なお,(2)式中のtは摂氏温度である。ところで,既報²⁾では粘性係数の与え方として温度 依存性を取り入れた場合のみでなく,粘性係数の温度依存性を考えず平均的な一定値を与えた場 合として,粘性係数を流入口での温度に基づく値で一定とした解析結果も示している。しかし, 本報で扱う解析モデルは温水と冷水が接続する欠陥部を含んでいるので,流入口での温度を単純 に基準温度のように扱うことはできない。この点に関して最適な手法の検討は今後も行うべきと 考えているが,今回は温水と冷水の流入口の温度をそれぞれ流入側と流出側の温度とみなした対 数平均温度¹³⁾を基準温度として扱うこととした。また,既報²⁾では,下記の(3)式に基づく平 均粘性係数μ_mを用いた解析結果も示している。

$$\boldsymbol{Q}_{0} \cdot \boldsymbol{\mu}_{0} = \boldsymbol{Q}_{t} \cdot \boldsymbol{\mu}_{m} \qquad (3)$$

(3) 式にて μ_0 は基準温度が一定で変化しない条件下での粘性係数であり、 $Q_0(m^3/s)$ はその条件下で管路を流れる流量である。また、 $Q_t(m^3/s)$ は粘性係数が温度に依存する場合の流量である。

本報では、下記の3通りの手法による粘性係数にて解析を行った。

[1] 温水と冷水の流入口での温度に基づく対数平均温度での粘性係数µ_{lmt}一定とした場合。

2に示すような温度の二次関数で表される粘性係数µt

[3] μ_{lmt} を (3) 式の基準粘性係数 μ_0 とした時の平均粘性係数 μ_m 一定とした場合。

図4.の各図は、解析で得られた温度分布結果の一例であり、粘性係数は上記[2]の手法に よる結果である。温水の流入口での圧力は全て0.0015Paであるので、冷水の流入口での圧力が 0.001Paの場合は温水と冷水が接続する欠陥部にて温水が冷水側に流れ、また冷水の流入口での 圧力が0.002Paの場合は冷水が温水側に流れる様子が認められる。

こうした結果より,流入口からの距離 x の位置での混合平均温度 t_{mx} について示す。混合平 均温度 t_{mx} は,熱伝達が開始され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おり,(4)式により算出することができるが,詳細は既報¹⁾で示した 通りである。

$$c \rho \int u t \Delta A = c \rho u_m t_{mx} A \qquad (4)$$

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



加藤泰世:欠陥を含む二重円管式熱交換器での温度分布解析



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。

図4. に示したような解析結果より,各圧力条件での並流と向流の場合について流入口から流 出口にわたって x = 0.1m ごとの y-z 平面での混合平均温度を算出した。既報^{1),2)} では二次元軸 対象解析での結果に基づき混合平均温度を求めているので,今回も同様の手法にて算出した。す なわち,図1.a) に示したように y-z 平面でのr- θ 座標系にてrが一定となる各節点座標で θ が0度から360度までの温度解析結果の平均値を,x = 0.1m ごとに求めれば既報^{1),2)} と同様に 二次元軸対象モデルの場合と同様に流入口(並流の場合 x = 0.0m 向流の場合 x = 0.9m) から 流出口(並流の場合 x = 0.9m 向流の場合 x = 0.0m) までの混合平均温度の変化を求めること ができる。この場合,温水と冷水の接続部付近では温度解析結果の θ 依存性が考えられるが,こ こでは θ 依存性を考えない平均値としている。図5.の各図に示すのは、こうして得られた混合 平均温度の解析結果である。記述の通り水の粘性係数を3通りの手法で行っているが,水の温度 依存性に基づく手法[2]と温水と冷水の流入口での温度より求められる対数平均温度に基づく 手法[1] では幾分差異が認められ、数値的には大差ではないものの基準温度の設定については 更なる検討が必要と考えている。また、欠陥部としての接続部では、流入口での圧力が高い方か ら低い方に流れが生ずるので、こうした現象に伴う混合平均温度の変化が認められる。

こうした,欠陥部としての接続部での温度変化について,下記の式で得られる算出結果との比 較を行った。

$$c Q_{H}(t_{H} - t_{m}) = c Q_{HL}(t_{m} - t_{L}), P_{H} < P_{L}$$

$$c Q_{HL}(t_{H} - t_{m}) = c Q_{L}(t_{m} - t_{L}), P_{H} > P_{L}$$

$$(5)$$

上式にて、 t_H および t_L はそれぞれ接続部にて温水と冷水が混合される前の温度であり、 t_m は両者が混合された後の温度である。また Q_H および Q_L は温水と冷水の混合される前の流量 (m^3/s) である。それから、 Q_{HL} は接続部を通過した流量 (m^3/s) であり、温水と冷水の流入口での圧力 P_H 、 P_L の大小関係が $P_H < P_L$ のときは冷水が温水に流れ込み、また $P_H > P_L$ のときは温水が冷水に流れ込むため2式を使い分ける。(5)式でのcは水の比熱であるが、ここでは一定値として扱うことにする。また、(5)式での流量 Q_H 、 Q_L は下記の(6)式より求めることができる。

$$Q = \int u \Delta A \qquad (6)$$

式中の Qが流量 (m^3/s) で, Q_H と Q_L に適用することができ, また他の記号については(4)



図5. 解析された温度分布結果に基づく混合平均温度(a),(b),(c)



加藤泰世:欠陥を含む二重円管式熱交換器での温度分布解析

図5. 解析された温度分布結果に基づく混合平均温度(d), (e), (f)

式と同様である。流入口から流出口までx = 0.1mごとの断面で求めた流量の一例を図6.に示す。 粘性係数は温度依存性を考慮した[2]の手法による μ tである。温水も冷水も欠陥部としての 接続部の前後で変化するが、その他ではほとんど変化は認められない。また、式(5)において 接続部を通過した流量 $Q_{\mu L}$ については、図6. での欠陥部前後の流量の差を用いている。

図7.の各図は、欠陥部としての接続部にて(6)式で得られる温水と冷水が混合された時の 温度 t_m を、混合平均温度の解析結果に合わせて示している。ここでの粘性係数は温度依存性を 考慮した[2]の手法による μ tである。幾分差異は認められるものの(6)式によって算出さ れた結果は温度分布解析結果の傾向をほぼ反映しているといえる。また、これらの各図には粘性 係数の与え方、および流入口での圧力・温度が等しい条件とした図1.b)に示した欠陥部のな い二重円環式熱交換器での結果も合わせて示している。一部の条件下を除き流れが欠陥部を通過 した後では欠陥部のあるモデルでの解析結果とない場合の解析結果の違いは顕著であるが、流れ が欠陥部に至らない範囲においても幾分差異は認められる結果となった。

おわりに

本報は、流れと熱伝導解析ソフトを用いて流管壁に欠陥を含む二重円環式熱交換器での温度分 布解析を行った。欠陥のないモデルで温度分布解析を行った既報²⁾においては、流入口での温度 に基づく粘性係数を用いた解析も行ったが、本報ではこうした基準となる粘性係数の扱いについ て検討課題が残った。しかし、水の粘性係数で温度依存性を取り入れた解析も行っており、粘性 係数の与え方による温度分布解析の結果を比較した場合に数値的には特に大きな問題はなかった と思われる。流管壁の欠陥を通過したことによる温度変化を単純な計算式で得られた結果と比較 したところ、解析結果とほぼ良い対応が確認された。本報での結果も基礎的な学習課題としての







図7. 欠陥のあるモデルとないモデルでの混合平均温度の比較(a),(b),(c)





図7. 欠陥のあるモデルとないモデルでの混合平均温度の比較(d),(e),(f)

検討を行っていく予定である。

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,解析にあたってのいくつかの有 益な助言を頂いた。期して謝意を表する。

参考文献

- 1)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)
- 2)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,中日本自動車短期大学論叢(2022)
- 3) 吉田邦夫, 吉田英生, 熱交換器ハンドブック, 財団法人省エネルギーセンター (2005)
- 4)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)
- 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,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)
- 7)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(2015)
- 8)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)
- 9)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)
- 10) 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)
- 11) 黒田英夫, 基礎からの数値解析, 工学社, (2010)
- 12) Al-Shemmeri, T., Engineering Fluid Mechanics. Bookboon, London, UK, 2012
- 13) 吉田駿, 伝熱学の基礎, オーム社, (2019)