

二次元軸対象モデルを用いた簡易型熱交換器での フィンの冷却効果に関する温度分布解析

加藤泰世

1. はじめに

筆者はこれまで流れと熱伝導解析ソフトを用いて各種簡易型熱交換器での温度分布解析を行ってきた^{1)~4)}。こうした解析は、熱交換器を設計するにあたり重要と思われるが、筆者が行ってきた解析^{1)~11)}は学生を対象とした解析演習のための教材を構築することである。短期大学の教育課程では、工学系の基礎科目を履修するための十分な余裕がなく、また本学においては基礎工学の実験設備を拡充することも難しく思われるため、ここで示すような解析を演習教材としての活用を試みてきた。

しかしながら、既報^{1)~4)}に示したような三次元解析は、膨大な計算時間を要する場合があります、またモデルの作成も長時間を要するため、本報は二次元軸対象モデルとして扱うことのできる簡易型熱交換器での温度分布解析を主として示すこととした。また既報⁴⁾で述べたような冷却フィンの効果についても検討を加えた。

以下、得られた結果について報告する。

2. 解析を行った二次元軸対象モデルおよび解析条件

図1に示すのは解析を行った二重円管型熱交換器を模式的に示した図である。この図は冷却フィンを設けたモデルであるが、冷却フィンを設けない場合についても解析を行っている。図に示す円管中心を中心軸とした二次元軸対象モデルである。内側を温水が流れ、中間壁で隔たられた反対側には冷風を送るように流れの圧力を設定した。図に示すように温水と冷風の流れは同じ向きである。実際には、外壁を設けない外気による冷却効果についても関心が持たれるところで

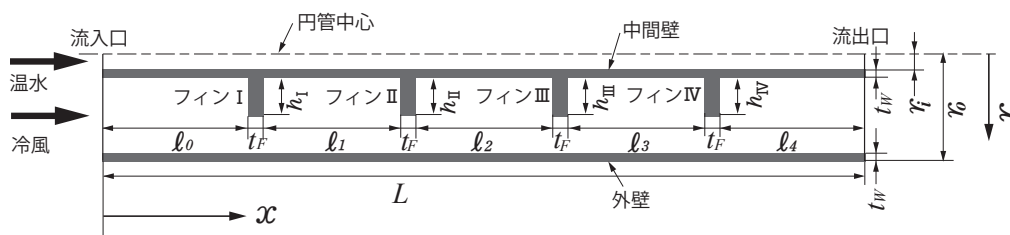


図1 二次元軸対象モデルとして扱う二重円管型熱交換器

あるが、解析に用いた算生会¹²⁾のソフトは強制対流熱伝達に対応しているため、既報^{1)~4)}で扱った解析モデルと同様な二重円管型熱交換器とした。図に示すように流路方向の長さを L 、外壁の外側までの半径を r_o 。また温水の流れる流路の内側までの半径を r_i とし、中間壁と外壁の厚さはどちらも t_w とした。また、冷却フィンを取り付ける場合は4枚としたモデルで解析を行っているが、それらの大きさや取付位置についても、図中に示すような記号で表している。なお、冷却フィンについては一部で破損を想定した解析も行っているため、破損したフィンが明記できるように流入口からフィンⅠ、フィンⅡ、フィンⅢ、フィンⅣのように表しているが、軸対象モデルのためフィンの破損は同心円状に同じ形状になった場合としての限定された破損状態を扱った解析である。それから、温度分布の解析結果を表示するにあたり、流入口から流出口への位置を x とし、また円管中心から外壁へ向けての動径方向の位置を r として示している。

表1a)、表1b) および表1c) は、図1に L や t_w など示したモデル各部の寸法である。表1a) に示すは、全てのモデルにて同じ寸法とした L 、 r_o 、 r_i 、 t_w である。また、表1b) は冷

表1 二次元軸対象モデルとして扱う二重円管型熱交換器の各部の寸法

a) 全モデルの共通寸法

流路方向の長さ L (m)	外壁外側半径 r_o (m)	温水流路の内側半径 r_i (m)	中間壁と外壁の厚さ t_w (m)
2	0.28	0.04	0.02

b) 冷却フィンの形状および取付位置の寸法

解析モデル	冷却フィンの動径方向の長さ h (m)	冷却フィンの厚さ t_f (m)	l_o (m)	l_1, l_2, l_3 (m)	l_4 (m)
モデル B ($h20t_f20$)	0.02	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h40t_f20$)	0.04	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h60t_f20$)	0.06	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h100t_f20$)	0.10	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h140t_f20$)	0.14	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h100t_f40$)	0.10	0.04	0.38	0.36	0.38
モデル B ($h100t_f80$)	0.10	0.08	0.36	0.32	0.36

c) 冷却フィンの破損を想定した解析モデルでの寸法

解析モデル	破損フィン	破損フィンの動径方向の長さ h' (m)	破損していない他のフィンの動径方向の長さ h (m)	冷却フィンの厚さ t_f (m)	l_o (m)	l_1, l_2, l_3 (m)	l_4 (m)
モデル B ($h100t_f20$ Ⅰ)	フィンⅠ	0.02	0.10	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h100t_f20$ Ⅱ)	フィンⅡ	0.02	0.10	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h100t_f20$ Ⅲ)	フィンⅢ	0.02	0.10	0.02	0.4	0.38	0.38
モデル B ($h100t_f20$ Ⅳ)	フィンⅣ	0.02	0.10	0.02	0.4	0.38	0.38

加藤泰世：二次元軸対象モデルを用いた簡易型熱交換器でのフィンの冷却効果に関する温度分布解析

却フィンを設けたモデルについて冷却フィンの寸法や取付位置を示しており、寸法はモデルごとに異なる数値である。表 1 b) 中の h や t_f は図 1 に示した通りであり、またモデル名の () 内は h と t_f の寸法を mm の単位で表している。また、表 1 c) はフィンの破損を想定したモデルについての寸法であり、表 1 b) と異なるのは破損したフィンと破損していない他のフィンとで表 1 b) での h の表記を区別した点である。なお、図 1 においてはフィン II からフィン IV までの h を h_I , h_{II} のように表記されているが、フィン I が破損した場合は図 1 の h_I が表 1 c) の h' を意味し、また図 1 の h_{II} , h_{III} , h_{IV} が表 1 c) の h を意味している。

図 2.a) に示すのは、冷却フィンを設けないモデル A である。本報で示す解析モデルは温水が流れる内側の流路ですべて要素分割を細かくしているのので、中間壁付近の拡大表示を同図 b) に示している。図 2 b) は外壁部分の濃淡に変化を付け分かりやすく示している。また、図 3 は冷却フィンを設けた解析モデルの 1 例であり、表 1 b) 中の「モデル B($h100t_f20$)」である。冷却フィンは中間壁と繋がった一体であるが、フィンの部分が分かりやすくなるように濃淡に変化を与えて示している。

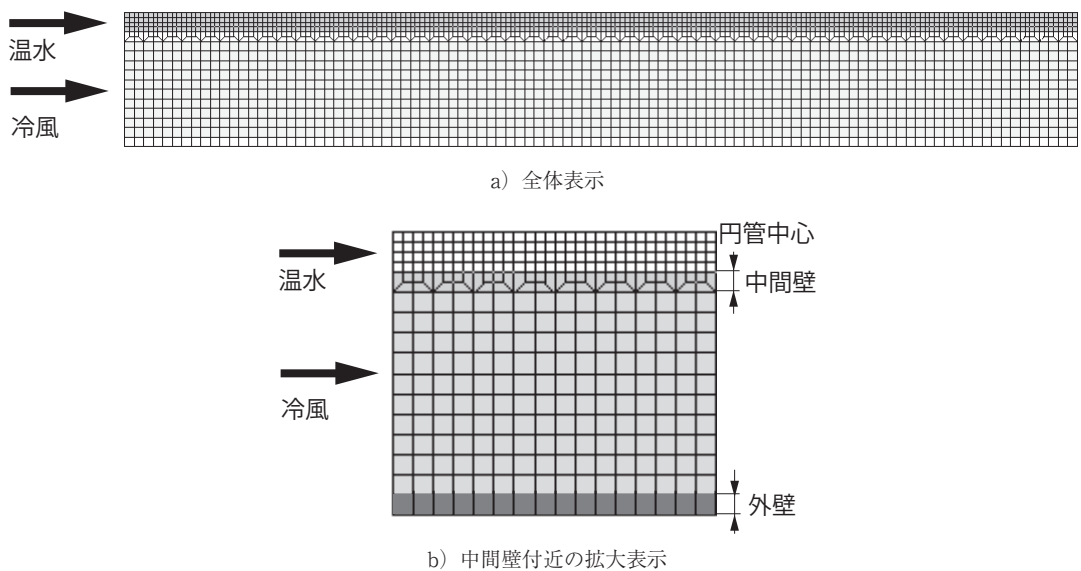


図 2 冷却フィンを設けない解析モデル「モデル A」

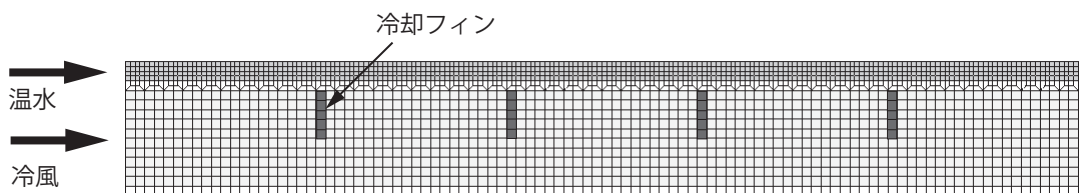


図 3 冷却フィンを設けた解析モデルの例「モデル B($h100t_f20$)」

表2 解析モデルを構成する材料の特性

	水	空気	鋼材
密度	1000 kg/m ³	1.247 kg/m ³	7800 kg/m ³
比熱	4186 J	1007 J	480 J
熱伝導率	0.5 W/(m・K)	0.0241 W/(m・K)	47 W/(m・K)
粘性係数	0.001002 Pa・s	0.00001808 Pa・s	—————

表3 圧力・温度の条件設定

	圧力条件		温度条件
	流入口	流出口	流入口
温水	0.002Pa	0 Pa	80℃
冷風	0.075Pa	0 Pa	10℃

表2. に示すのは、解析モデルの材料特性である。また、解析を行った温度と温水の条件設定は表3に示す通りである。

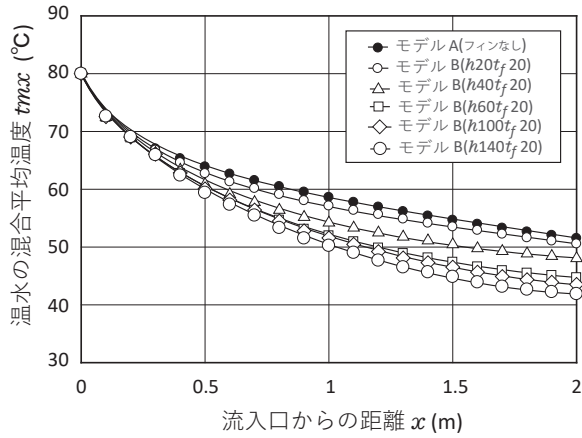
3. 二次元軸対象モデルの解析結果

図2, 図3に示したような二重円管型熱交換器の解析モデルにて表2, 表3示した設定条件下にて流れと熱伝導の連成解析を行った。図4 a), 図4 b) に示すのは、温水が流入口から流出口へ流れる間の混合平均温度 t_{mx} ¹³⁾ の変化であり, 図4 a) は冷却フィンの動径方向の長さ h を0.02 mから0.14mまで変化させた場合の結果である。冷却フィンの厚さ t_f は全て0.02mであり、フィンをしていないモデルの結果も合わせて示している。また、図4 b) に示す結果は冷却フィンの厚さ t_f を0.04mと0.08mとした場合であり冷却フィンの動径方向の長さ h はどちらも0.10mとしている。図4 a), 図4 b) に示す結果は冷却フィンを設けていないモデルの結果も合わせて示しており、またこれら両図に示す結果は、すべてフィンに破損のない場合としての解析モデルであるので、図1に示すフィンIからフィンIVまでの寸法は同じであり、 h_I から h_{IV} は同一寸法である。

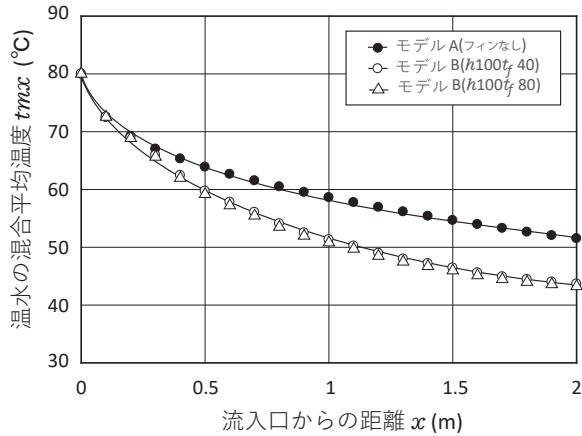
また、混合平均温度 t_{mx} ¹³⁾ は、熱伝達が始まる流入口から任意の距離 x の断面での流体を完全に混合させたときの温度を意味しており、次式より求めることができるが、計算手法の詳細は既報¹⁾で記す通りである。

$$c \rho \int u t \Delta A = c \rho u_m t_{mx} A \quad (1)$$

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。



a) 冷却フィンの動径方向の高さの影響

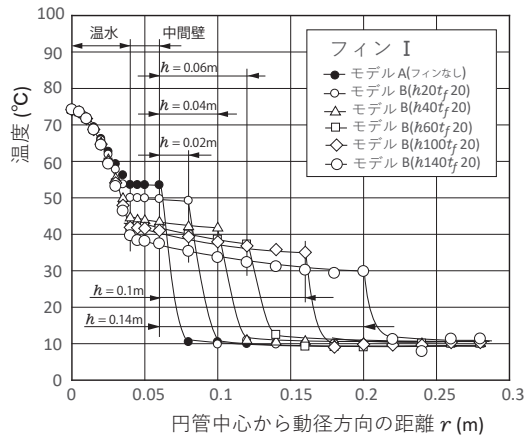


b) 冷却フィンの厚さの影響

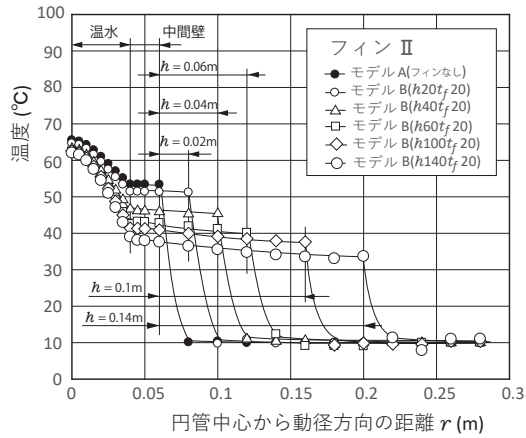
図4 温水の混合平均温度

図4 a), 図4 b) に示す結果より, フィンによる顕著な冷却効果が認められる。特に, 図4 a) に示す動径方向の長さ h を変化させた場合の混合平均温度 $t_{mx}^{13)}$ は x が 0.3m 以上のところで h に依存する傾向が現れるが, 図4 b) に示すフィンの厚さ t_f の影響は, t_f が 0.04m と 0.08m の場合でそれほど変わりがない。しかし, t_f が 0.04m と 0.08m の場合での流出口での混合平均温度 $t_{mx}^{13)}$ は, 43.67°C および 43.24°C であり数値上ではフィンの厚さ t_f に冷却効果が依存しているといえる。

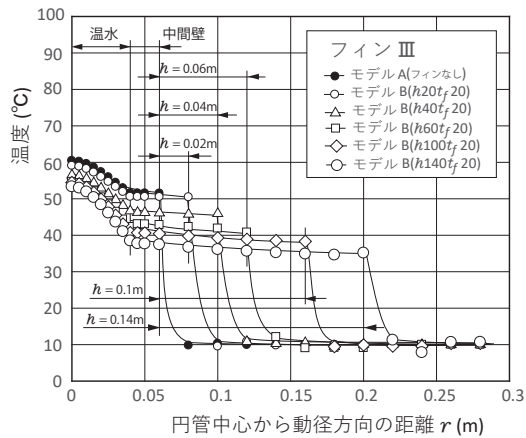
次に, 図5 a), 図5 b) の各図に示すのは, 解析された冷却フィンの板厚中央の位置での温度分布であり, 流入口から各冷却フィンの板厚中央までの x の位置において温水と冷風の温度解析結果も合わせて示すことができるように, 円管中心から外壁へ向けての動径方向の位置 r に対して解析された温度の結果を示している。また, これらの温度分布は図1 に示したフィン I か



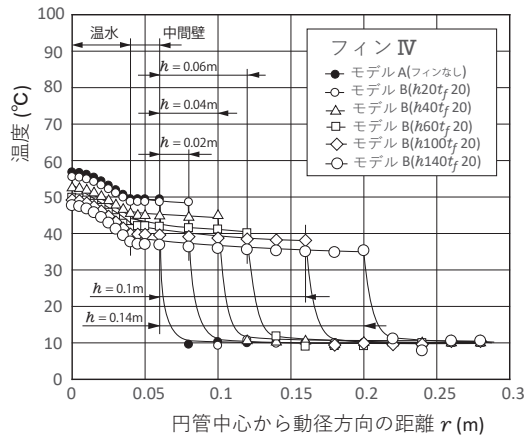
a I) 冷却フィン I の動径方向の高さの影響



a II) 冷却フィン II の動径方向の高さの影響



a III) 冷却フィン III の動径方向の高さの影響



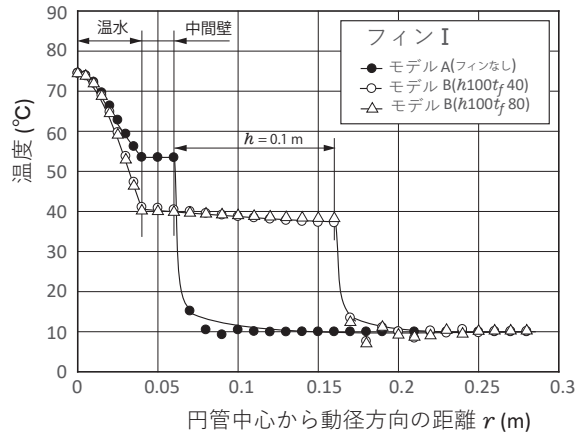
a IV) 冷却フィンIVの動径方向の高さの影響

図5 冷却フィンの板厚中央での温度分布

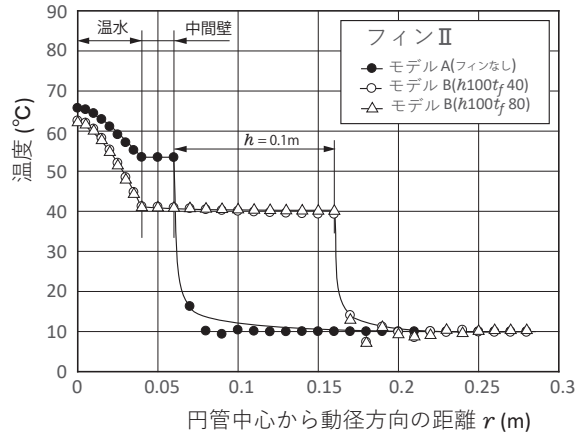
らフィンIVについての結果であり、図5 a) I, 図5 a) IIのように図名を表記している。図5 b)についても同様である。図5 a) に示すのは、冷却フィンの厚さ t_f を0.02m一定とし冷却フィンの動径方向の長さ h を0.02mから0.14mまで変化させた場合の結果であり、また図5 b) に示すのは冷却フィンの動径方向の長さ h を0.10m一定とし冷却フィンの厚さ t_f を0.04mと0.08mとした場合の結果である。すなわち、図5 a), 図5 b) の各図に示すフィンの形状寸法が及ぼす冷却効果については、それぞれ図4 a), 図4 b) に示した結果に対応している。

図5 a) の各図に示す結果より、冷却フィンの厚さ t_f を変化させた場合は、温水の円管中心から動径方向での温度分布はフィンによる冷却効果が顕著に現れているといえる。こうしたフィンによる冷却効果は温水に対してのみでなく、中間壁やフィン内部の温度分布にも影響を与えているといえる。また、図5 b) の各図に示す冷却フィンの動径方向の長さ h を一定とし冷却フィンの厚さ t_f を0.04mと0.08mとした場合については、図4 b) に示した結果のように t_f の影響がそれほど反映されていない結果となった。

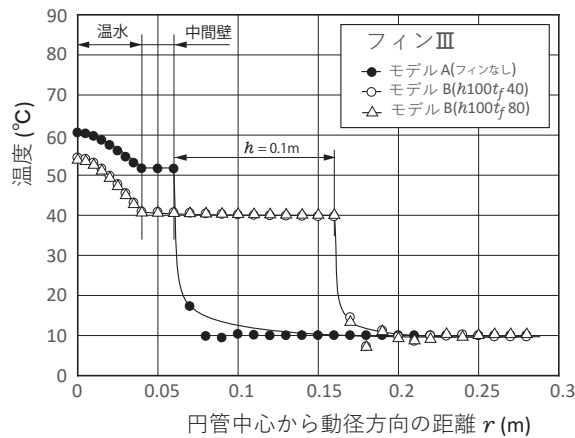
それから、本報においても既報⁴⁾で示したようなフィンの破損を想定したモデルでの温度分布解析を行った。表1 c) に示すようにフィンIのみ動径方向の高さを他のフィンより小さい h' としたモデルが「モデル B($h100t_f20$ I)」で同様にフィンIIからフィンIVまでフィンの動径方向の高さを h' としたモデルにて温度分布解析を行った。温度分布解析結果は、破損したフィンのないモデル「モデル B($h100t_f20$)」の結果も合わせて図6に示しているが、流入口に最も近いフィンIが破損した場合は、破損したフィンの付近で温度分布に変化が表れているが、その他のフィンが破損した場合については、破損したフィンがない場合と際立った差異は認められない結果となった。



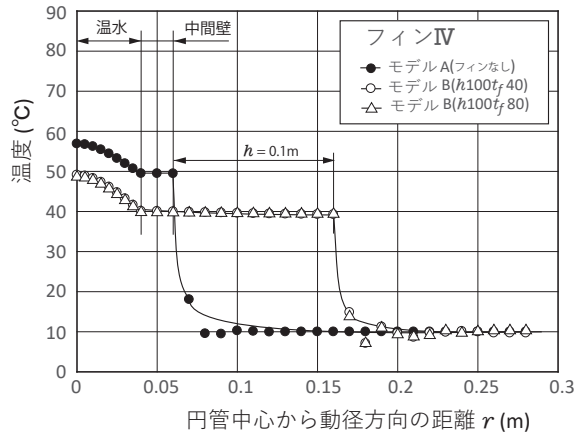
b I) 冷却フィン I の厚さの影響



b II) 冷却フィン II の厚さの影響



b III) 冷却フィン III の厚さの影響



b IV) 冷却フィンIVの厚さの影響

図5 冷却フィンの板厚中央での温度分布

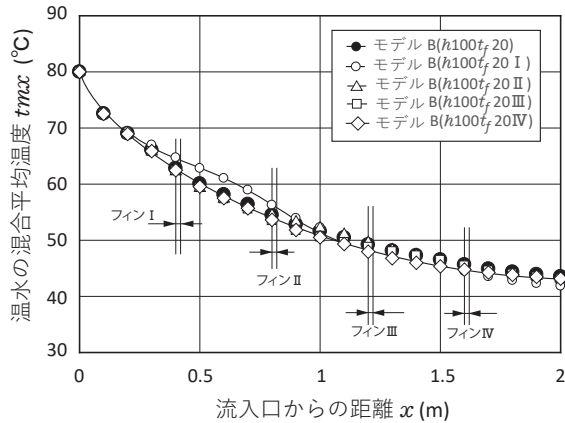


図6 破損したフィンを想定したモデルの温水の混合平均温度

4. 三次元モデルでの解析結果

図4 a) に示した解析結果について同様な三次元モデルを作成し、表2、表3に示した材料特性と解析条件にて温度分布解析を行った。同図に示した結果は、フィンの厚を一定の場合に動径方向の長さ h の変化が混合平均温度 $t_{m,x}$ ¹³⁾ に及ぼす影響である。図7は、一例として示した三次元モデルであり、先に示した二次元軸対象モデル「モデル B ($h100t_f, 20$)」を円管中心の周りで回転させてできた三次元モデルである。この図は二次元軸対象モデルを示した図3と同様に冷却フィンの部分は濃淡に変化を付けて示している。図8は三次元モデルで得られた結果であるが、図4 a) に示した結果とほぼ同様な結果が得られることが確認され、モデルの作成が比較的容易

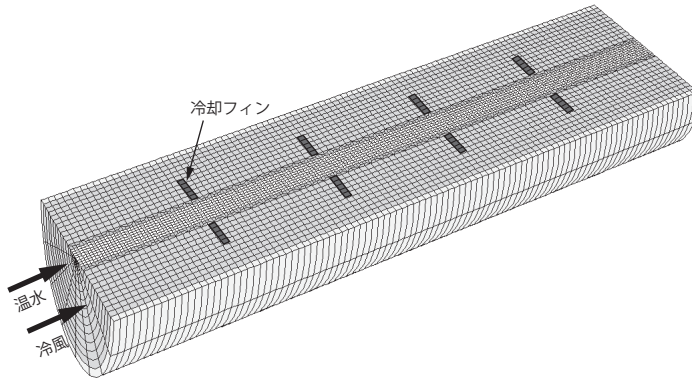


図7 冷却フィンを設けた三次元解析モデルの例「モデル B($h100t_f20$)」

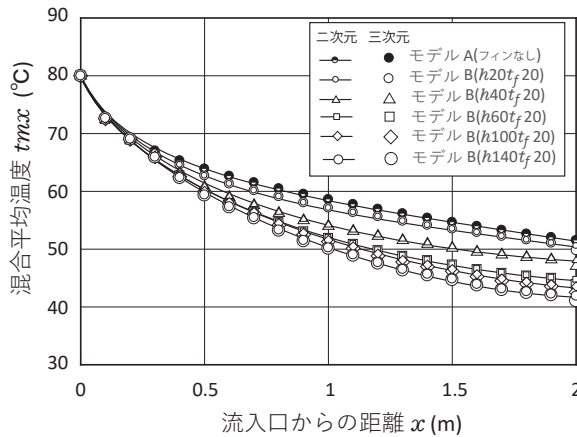
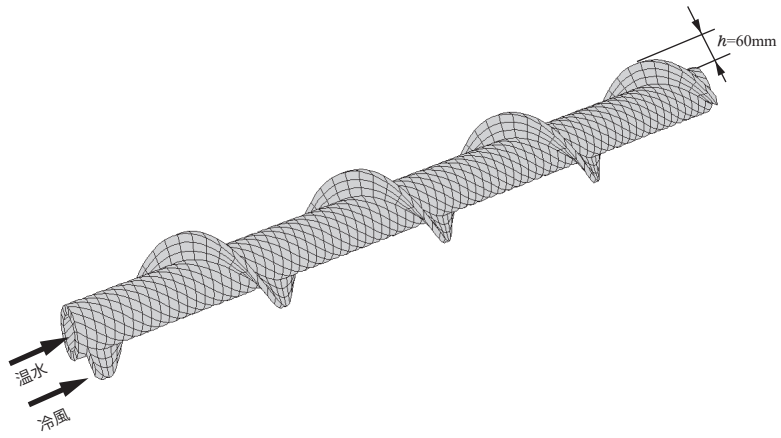


図8 三次元解析モデルで得られた温水の混合平均温度

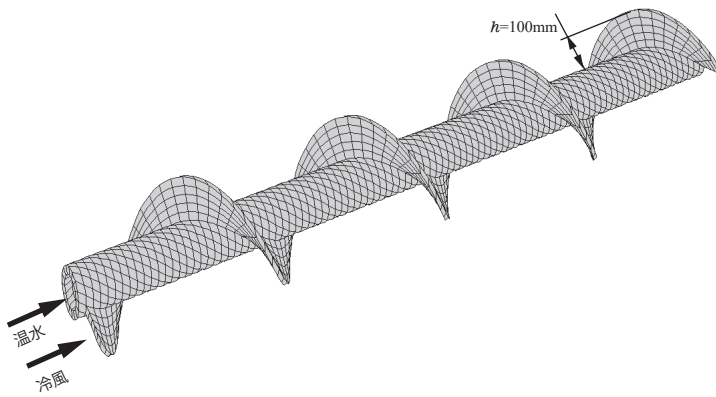
でありまた三次元モデルの比べ計算時間短時間となるも二次元軸対象モデルで十分な結果を得ることができるといえる。

また、本報で使用した算生会¹²⁾の三次元モデルを作成するソフトでは断面モデルから柱状モデルを作成する際に断面の中心軸に対してねじれ角を指定することができるので、フィン螺旋状にしたモデルでの解析を行った。図9 a), 図9 b) および図9 c) はこのようなフィンを螺旋状にしたモデルであるが、これらの図では中間壁とフィンのみを示している。これらのモデルの違いはフィンの動径方向の長さ h であり、表2、表3に示した材料特性と解析条件にて温度分布解析を行った。表4は図9の各図に示したモデルで解析された流出口での平均温度である。フィンを螺旋状にしたモデルについても流出口での温度はフィンの動径方向の長さ依存する結果が確認された。

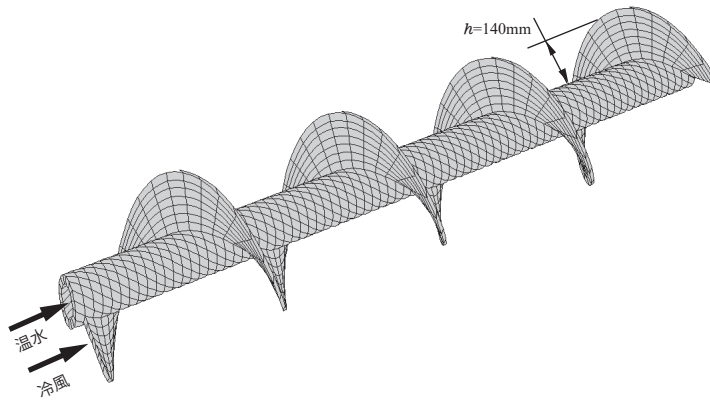
加藤泰世：二次元軸対象モデルを用いた簡易型熱交換器でのフィンの冷却効果に関する温度分布解析



a) $h60$



b) $h100$



c) $h140$

図9 フィンを螺旋状にした三次元解析モデル

表4 フィンを螺旋状にした三次元解析モデルでの流出口の平均温度

h (mm)	60	100	140
流出口での平均温度 (°C)	39.3	37.72	35.39

5. お わ り に

本報では、既報^{1)~4)}と同様に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。今回はモデルの作成や計算に比較的時間を要することのない二次元軸対象モデル主に扱いフィンの冷却効果についていくつかのモデルにて温度分布解析を行った。二重円管型熱交換器においてフィンの動径方向の長さは、顕著な冷却効果が反映された結果となったが、フィンの厚さの違いは今回の結果にはそれほど際立った効果が認められなかった。また、二次元軸対象モデルでは扱うことのできる対象に限られるが、既報⁴⁾と同様に破損したフィンの温度分布に与える影響を調べる解析も行った。

また、二次元軸対象モデルに対応する三次元モデルでの解析もいくつか行うことで、二次元軸対象モデルでの解析であっても充分であることを確認した。

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) 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, 中日本自動車短期大学論叢 (2023)
- 4) 加藤泰世, 熱交換器の冷却効果に及ぼす冷却フィンの破損及び変形の影響, 中日本自動車短期大学論叢 (2024)
- 5) 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)
- 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, 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, 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 (2016)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) 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)
- 12) 黒田英夫, 基礎からの数値解析, 工学社, (2010)
- 13) 吉田駿, 伝熱学の基礎, オーム社, (2019)