

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

加藤泰世

1. はじめに

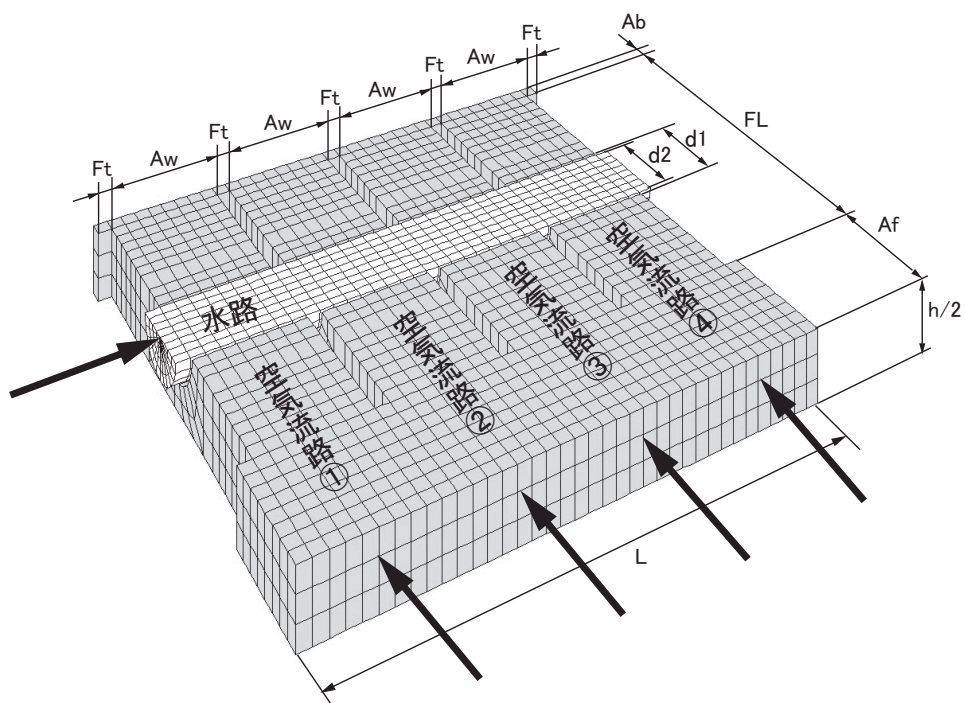
筆者は、これまでに簡易型二重管式熱交換器を取り上げ、強制対流熱伝達での温度分布解析を行ってきた^{1)~3)}。そこでは温水と冷水を同方向に流す並流また温水と冷水を逆方向に流す向流の場合について水の粘性係数に温度依存性を取り入れた解析を行った²⁾。また、前報³⁾では温水と冷水の間の流管に欠陥を設けたモデルを取り上げ、欠陥部の温度分布に及ぼす影響について検討を行った。

本報は、温水が流れる流管に冷却フィンを設け、空冷による流水の温度分布解析を行った結果を示したものである。ここでは、冷却フィンが破損した場合また隣接する2枚のフィンが冷却のための空気の流路を閉ざすように変形したモデルも作成し、こうしたモデルでの解析を行うことで熱交換器の冷却効果に及ぼす影響について解析結果に基づく検討を行った。これらの冷却フィンの破損や変形は現実的な問題としても重要であると思われるが、本報に示す解析の目的は、学習教材の開発を主たる目的としている。短期大学での教育課程においては、熱交換器を取り上げるための基礎となる伝熱工学、また数値解析で必要となる微分方程式などは、教育課程に取り入れる十分な余裕がなく、簡易的なモデルの作成や解析条件の設定で比較的短時間で行うことのできる数値解析を行うことで、経験的な現象の解説に留まることなく諸因子が種々の現象に及ぼす影響についての理解を深めることにつながるものと期待される。

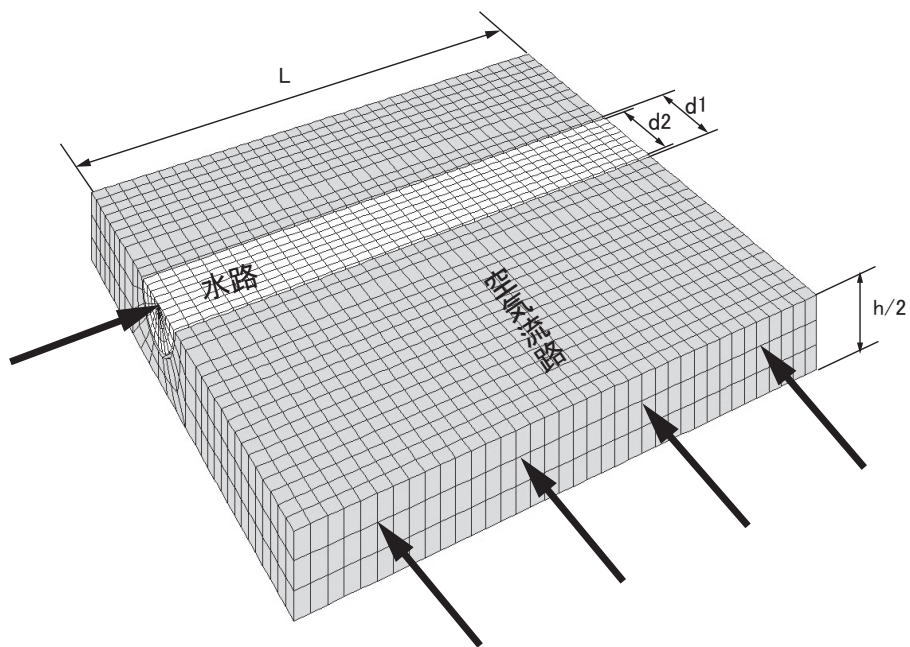
また、本報は筆者がこれまで報告してきた基本的な解析を通じて現象の理解を深めさせる教育手法^{1)~10)}の続報であり、以下本報の解析結果について報告する。

2. 解析を行った簡易型熱交換器モデル

解析を行ったのは空冷によって円管内を流れる温水を冷却する簡易型熱交換器であり、温水の流れに対して垂直な向きに空気が流れるように圧力条件を設定した。図1 a) は温水を流す円管に冷却フィンを設けたモデル A であり、また図1 b) は冷却フィンを設けないモデル B ある。これらの両図はモデルの内部が分かるように2分割した下側の図である。冷却フィンを設けたモデル A では5枚のフィンによって空気の流路が①から④に分かれて円管の外側を通過する。表1は、図1の両図に示した解析モデルの各部の寸法である。また、冷却フィンを設けていない図1 b)



a) モデル A



b) モデル B

図1 解析モデル

表1 解析モデルの各部の寸法（簡易型熱交換器）

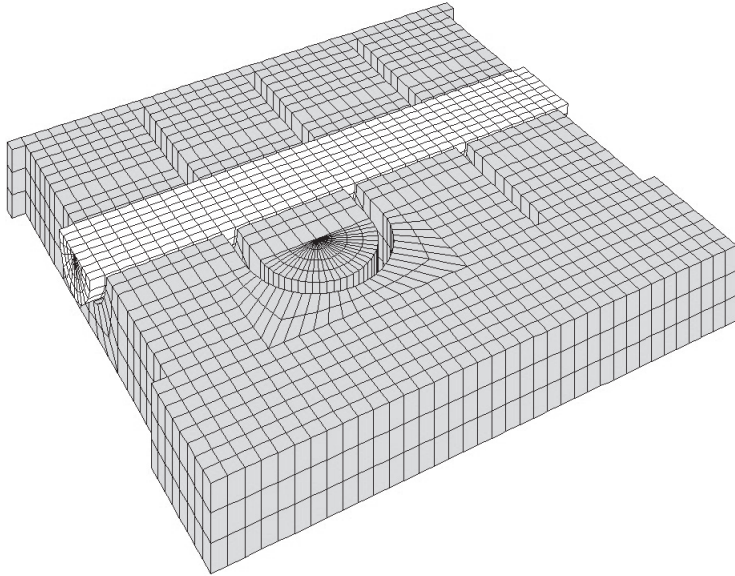
d1	水管の外径	0.00375m
d2	水管の内径	0.0034375m
L	水管の長さ	0.023125m
FL	冷却フィンの長さ	0.0155m
Ft	冷却フィンの厚さ	0.000625m
h	冷却フィンの高さ	0.006m
Af	流入口の手前側の空気要素の長さ	0.005m
Ab	流出口の奥側の空気要素の長さ	0.000625m
Aw	空気流路の幅	0.005m

に示すモデルは、フィンが完全に破損した場合を検討するために解析モデルに含めることとした。

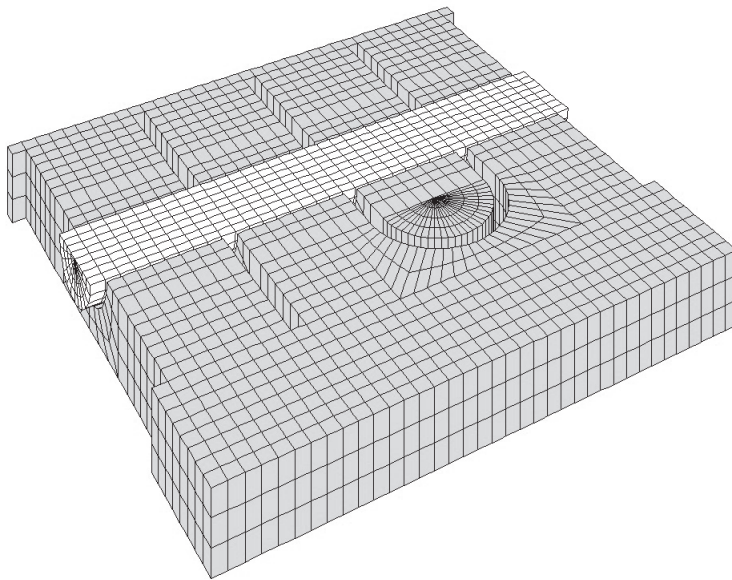
また、冷却フィンが薄型の場合は接触等によって変形が生じやすい場合も有り得ると思われる。そこで、こうしたフィンの変形によって空気の流れが閉ざされたことによる冷却効果の変化を調べるため、図2 a), b), c) および d) に示すようなモデルによる解析も行った。これらの図につても、図1 a), b) に示した両図と同様にモデルの内部が分かるように2分割した下側を示している。モデル C_{1a} およびモデル C_{2a} は、それぞれ図1 a) に示したモデル A での空気流路②および③にて空気の流入側を閉ざしたモデルである。空気流路を閉ざした部分は空気流路の両側のフィンを半円状に作成した。また、モデル C_{1b} およびモデル C_{2b} はモデル A での空気流路②および③にて空気の流出側を閉ざしたモデルである。これらの図1、図2 に示した全てのモデルは、空気と水の流体要素のみを示したものであるが、図3の各図はこうした流体要素を除いた鋼材要素のみを示している。同図 a) は図1 a) に示したモデル A、また同図 b), c), d), e) はそれぞれ図2 a), b), c), d) に示したモデル C_{1a}, C_{2a}, C_{1b}, C_{2b} である。なお、冷却フィンを設けていないモデル B については円管部分のみが鋼材要素であるので図3での表示は省略している。また図2の各図に示したモデルの寸法は、空気の流路を閉ざした部分の他は図1の両図に示したモデルと同じである。

3. 簡易型熱交換器モデルで得られた温度分布の解析結果

先に示した解析モデルの作成および温度分布等の解析は、それぞれ既報^{1)~10)}と同様の算生会¹¹⁾の「立体モデル作成ソフト」および「3次元流れと熱伝導解析ソフト」にて行った。これまでに示した強制対流熱伝達の解析は、温度の初期値の異なる温水と冷水によるものであり、水の粘性係数に温度依存性を考慮した解析も行ってきたが、今回は水と空気による熱伝達であり、使用した解析ソフトは非圧縮性流体を対象としているため空気については密度の圧力依存性を解析条件に取り入れることはできないこともあり、水と空気それぞれから熱交換器の壁材としての鋼材についてそれぞれ表2に示すような物性値とし、温度や圧力の依存性は取り入れることなく一定値として解析を行った。水の流入口での圧力は0.002Paとし、空気の入り口での圧力は0.4Paと

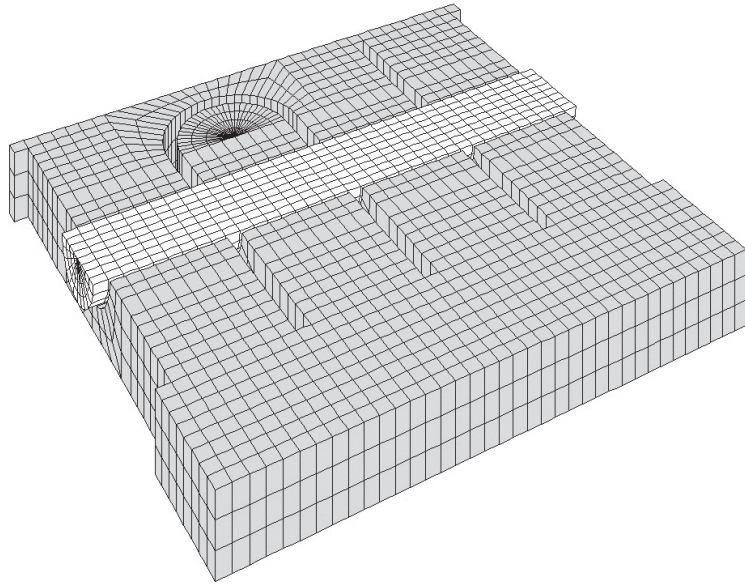


a) モデル C_{1a}

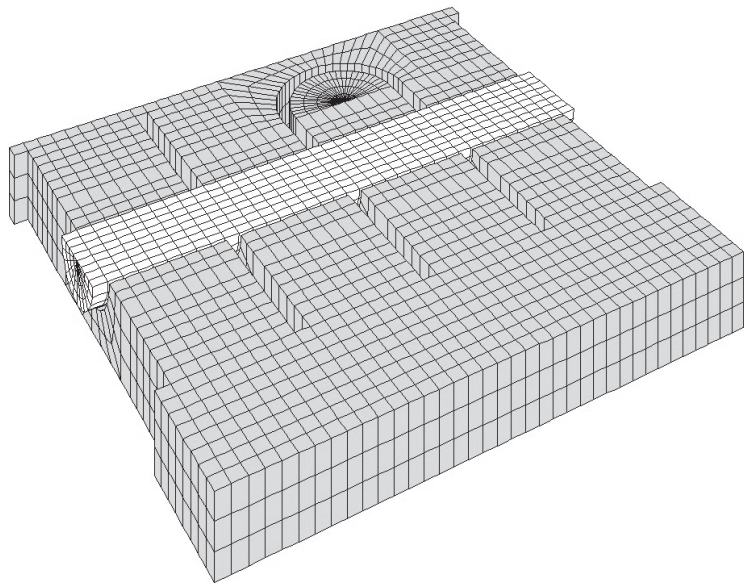


b) モデル C_{2a}

図2 空気の流路を閉ざした解析モデル (その1)

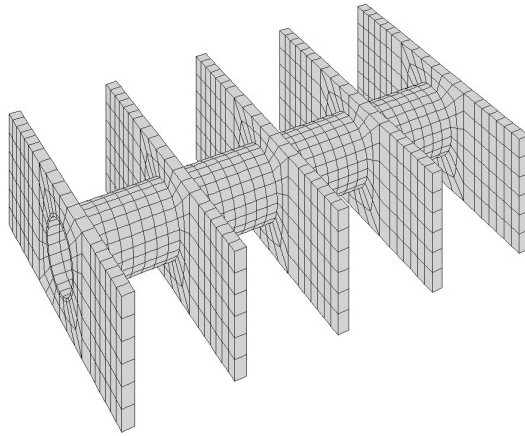


c) モデル C₁b

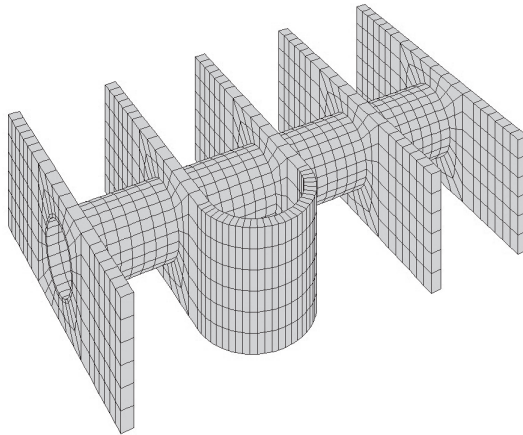


d) モデル C₂b

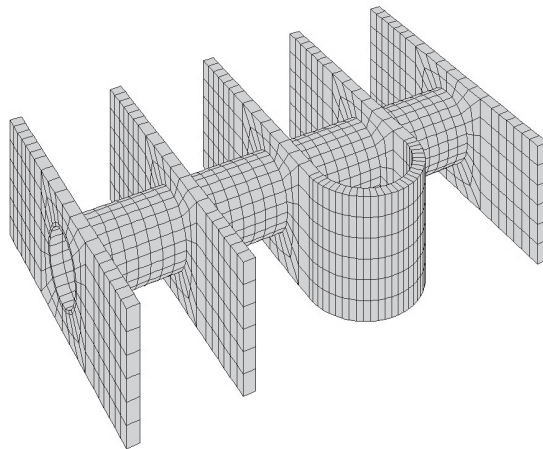
図2 空気の流路を閉ざした解析モデル（その2）



a) モデル A

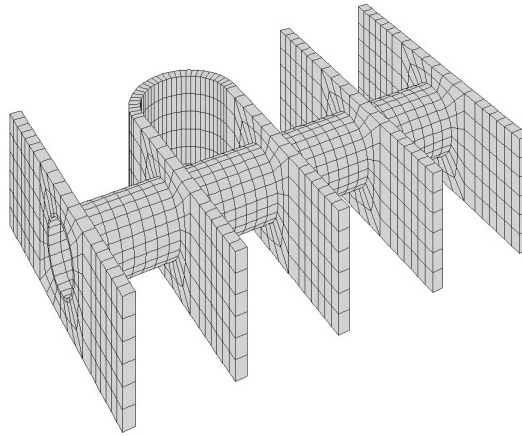


b) モデル C₁a

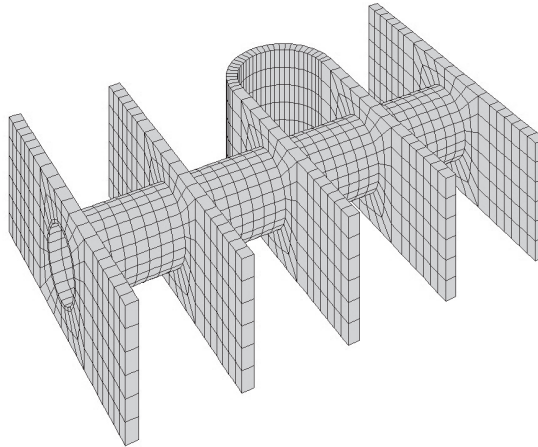


c) モデル C₂a

図3 解析モデルの鋼材要素のみの表示 (その1)



d) モデル C₁b

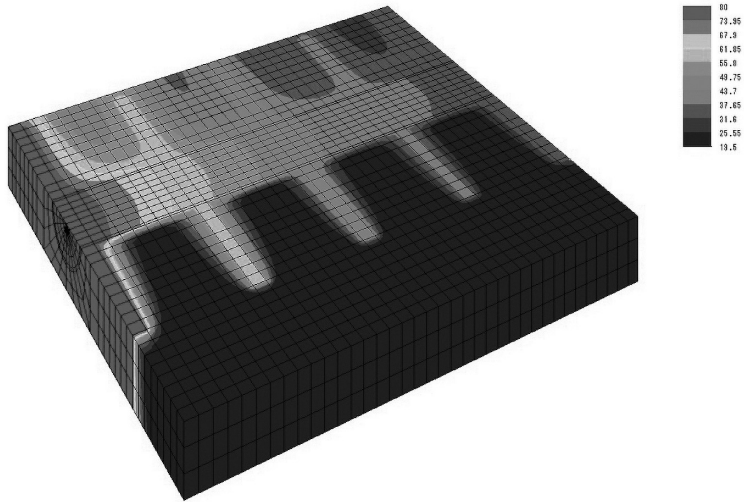


e) モデル C₂b

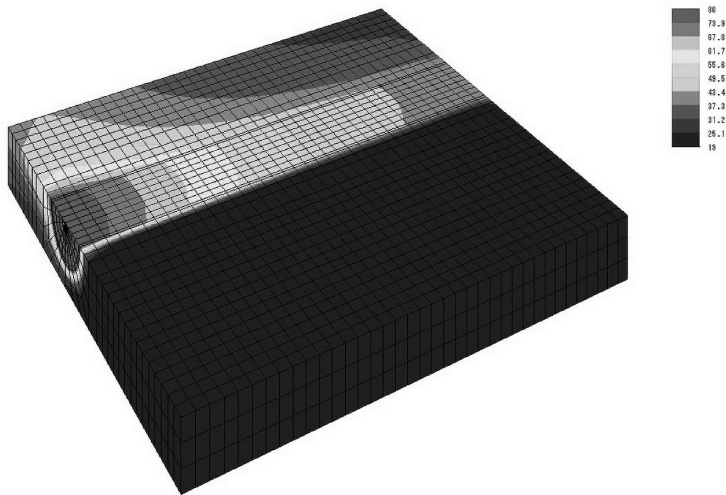
図3 解析モデルの鋼材要素のみの表示（その2）

表2 解析モデルの物性値

	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kg・℃)	熱伝導率 (W/m ² ・℃)	粘性係数 (Pa・s)
水	1000	4186	0.5	0.001002
空気	1.247	1007	0.0241	0.00001808
鋼材	7800	461	53	

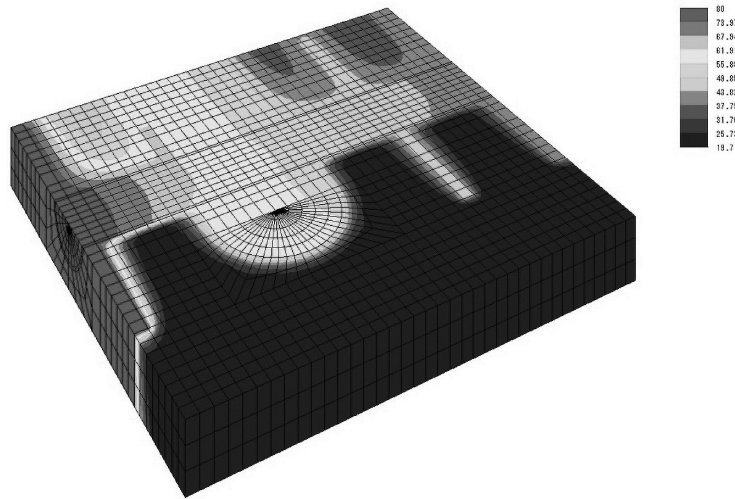


a) モデル A

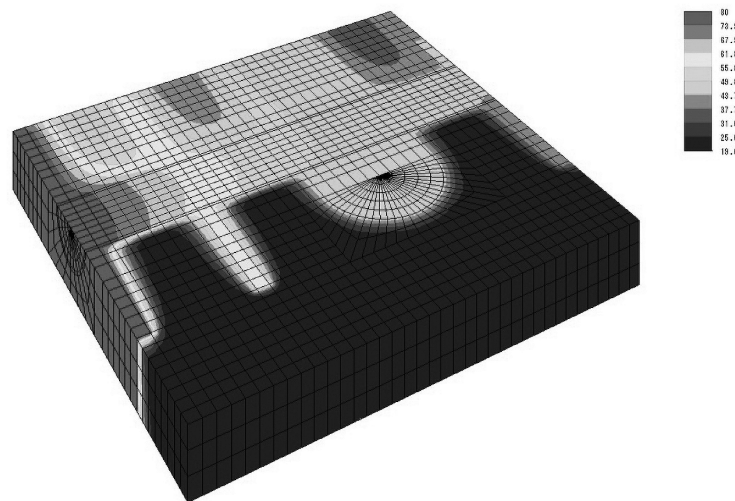


b) モデル B

図4 円管内の温度分布 (その1)

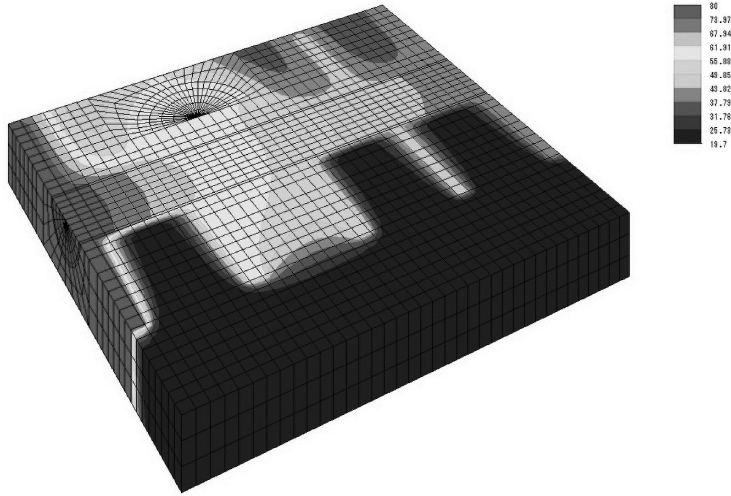


c) モデル C₁a

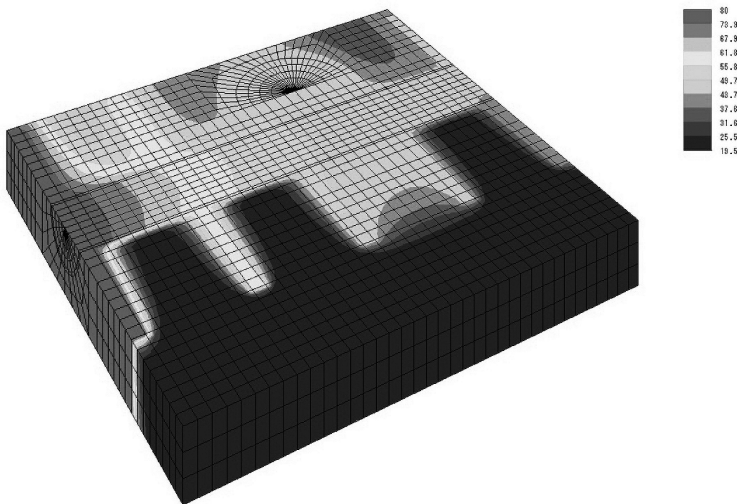


d) モデル C₂a

図4 円管内の温度分布 (その2)



e) モデル C₁b



f) モデル C₂b

図4 円管内の温度分布 (その3)

した。また、流出口では水も空気も 0 Pa としており、流入口での水の温度は80℃とし空気の入り口での温度は20℃とした。

図4の各図に示すのは、それぞれ図1 a), b), 図2 a), b), c) および d) に示したモデルを用いて得られた温度分布である。表3に示すのは、各モデルでの水の流入口と流出口での平均温度である。この平均温度は「3次元流れと熱伝導解析ソフト」で算出された結果であり、次に述べる混合平均温度^{2), 3), 12)}とは算出方法が異なる。図5は、水の流入口から流出口までの流れに伴う混合平均温度の変化であり、既報^{2), 3)}で示した手法で算出している。横軸は水路の流入口の位置を基準とした流入口から流出口にかけての距離であり、縦軸は混合平均温度である。

以上の結果より、冷却フィンを設けたモデル A と冷却フィンを設けないモデル B の結果を比較すれば、冷却フィンが破損することがあれば円管内を流れる温水の冷却効果の差異が顕著に現れるといえる。また、冷却フィンの変形により空気の流路が閉ざされた場合としてのモデル C_{1a}, モデル C_{2a} モデル C_{1b} およびモデル C_{2b} の結果についても、空気の流路が閉ざされてい

表3 円管の流入口と流出口での平均温度

	流入口 (°C)	流出口 (°C)
モデル A	80.00	36.82
モデル B	80.00	42.11
モデル C _{1a}	80.00	42.66
モデル C _{2a}	80.00	43.94
モデル C _{1b}	80.00	42.69
モデル C _{2b}	80.00	43.91

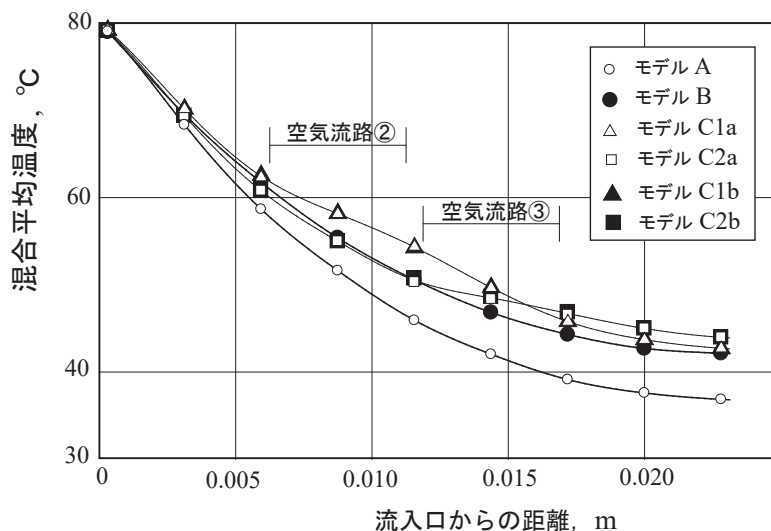


図5 円管内の混合平均温度分布

ないモデル A の結果と比較すれば、冷却効果の顕著な差異が認められる。空気流路②を閉ざしたモデル（モデル C₁a とモデル C₁b）と空気流路③を閉ざしたモデル（モデル C₂a とモデル C₂b）では水路の流入側から流出側にかけての温度分布に違いが認められるが、同じ空気流路を閉ざす場合に流入側を閉ざした場合と流出側を閉ざした場合の際立った差異は認められない。また、今回の解析結果においては、モデル B の他は流出側での水温が比較的近い値となっているが、冷却条件による数値的な一般的な傾向については、さらに詳細な検討が必要であると思われる。

4. ラジエーターの温度分布解析

図 6 a), b) に示すようなラジエーターモデルにて温度分布解析を行った。図 6 a) に示すのはモデルの全体図であり、また同図 b) は流体要素を除いた鋼材要素のみを示している。縦に流れる水路（水路①から水路④）に冷却フィンが設けられ手前から奥に向けて空気が流れるように解析条件を設定した。図 6 a), b) に示すように水路①から水路④の縦 4 列で水路は構成されており、どの水路も外側および内側は、それぞれ 0.03m × 0.02m および 0.025m × 0.015m である。また、空気流路は 3 × 10 列で構成されており、各空気流路の内側は 0.05m × 0.0125m で、空気流路を仕切るフィンの厚さは 0.0025m である。またモデル全体を示した図 6 a) に示すようにラジエーターの流入側の手前 0.06m また流出側の外側 0.03m に空気の要素を設けている。したがって、図 6 a), b) 中の L, h, b, Af, Ab はそれぞれ下記のとおりである。

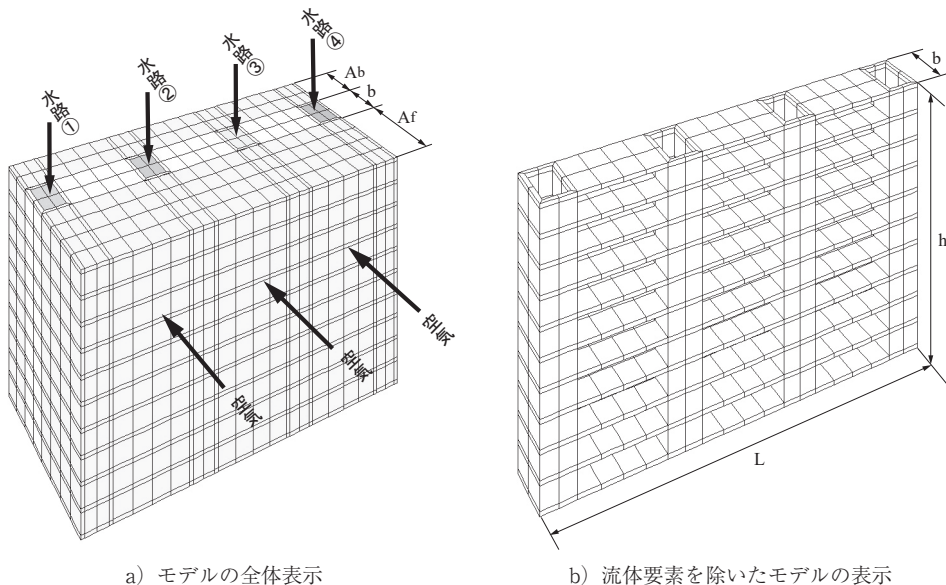
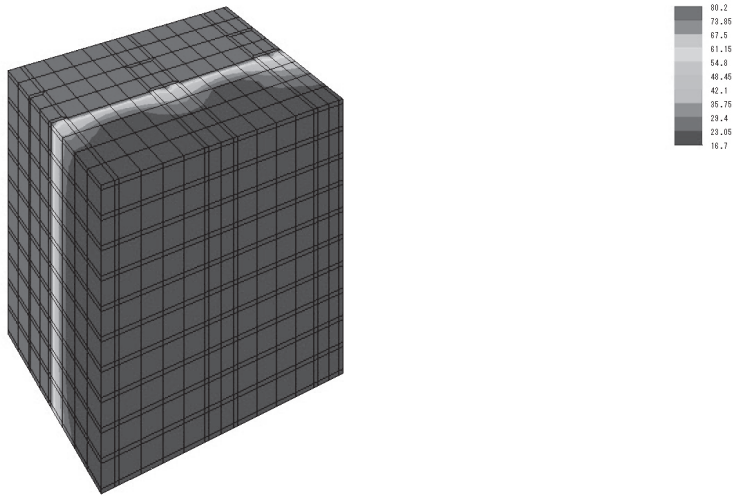


図 6 ラジエーター解析モデル

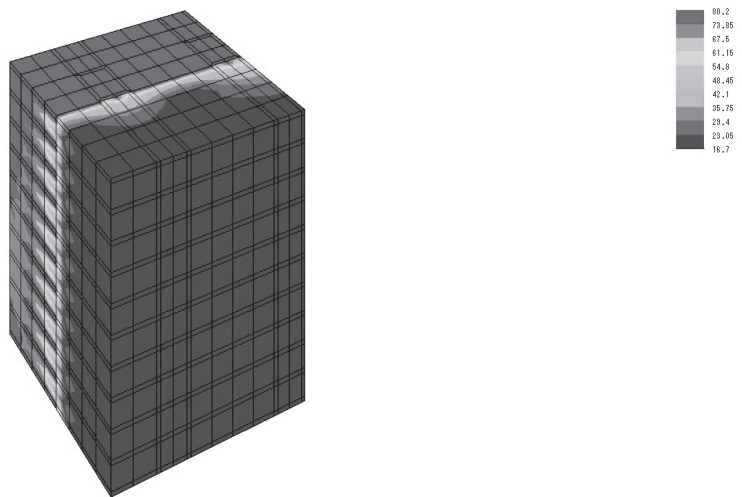
加藤泰世：熱交換器の冷却効果に及ぼす冷却フィンの破損及び変形の影響

$$\begin{cases} L=0.05 \times 3 + 0.02 \times 4 = 0.23\text{m} \\ h=0.0125 \times 10 + 0.0025 \times 11 = 0.1525\text{m} \\ b=0.03\text{m} \quad A_f=0.06\text{m} \quad A_b=0.03\text{m} \end{cases}$$

水の流入口での圧力は0.075Paとし、空気の入り口での圧力は0.008Paとした。また、流出口では水も空気も0Paとしており、流入口での水の温度は80℃とし空気の入り口での温度は20℃とした。



a) 水路の断面表示 (水路②)



b) 空気流路の断面表示

図7 ラジエーター解析モデルでの温度分布

表4 各水路の流入口と流出口での平均温度

	流入口 (°C)	流出口 (°C)
水路①	80.00	79.72
水路②	80.00	79.56
水路③	80.00	79.56
水路④	80.00	79.72

解析で得られた温度分布は図7に示すとおりである。図7a)は水路②の内部での温度分布が分かるように、また同図b)は空気温度分布が分かるように分割して示している。

表4は、解析に用いた「3次元流れと熱伝導解析ソフト」で算出された水路①から水路④の流入口と流出口での平均温度である。どの水路についても流入口と流出口での温度差は1°Cに満たない範囲であるが、図6a), b)に示した解析モデルは実用的なラジエーターの部分的なモデルであり、水路を縦に長くして空気流路の冷却フィンを増やすことで、さらに実用的な解析結果が得られるものと思われる。

5. お わ り に

本報は、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について調べるために行った、空冷によって円管内を流れる温水を冷却するモデルを用いた温度分布解析の結果である。円管に冷却フィンを設けることによる冷却効果の向上が確認され、また冷却フィンの変形によって空気流路が閉ざされることで冷却効果が低減されることも確認された。ただし、実際の熱交換器にける温度分布の数値的な評価については、さらに詳細な検討が必要であると思われる。

また、ラジエーターでの温度分布を調べるための解析モデルを作成することで、空冷による温水の冷却効果が確認された。

本報での解析モデルの作成に関して森本一彦 元本学教授(現非常勤)より有益な助言を頂いた。記して謝意を表す。

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, 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)

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

- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 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) 吉田駿, 伝熱学の基礎, オーム社, (2019)

