

ヒートシンクの熱流体解析シミュレーション手法の開発

Development of thermal fluid analysis method for heatsink

電子・機械技術部 機械・加工科 坂内駿平 富永隼輔
材料技術部 金属・物性科 工藤弘行

ヒートシンクの設計プロセス効率化のため、コンピューターシミュレーション (CAE) を用いて熱流体解析を実施した。また、ヒートシンクの温度測定実験データと熱流体解析シミュレーションの結果を精度良く一致させるために必要な事項を明らかにした。

Key words: 熱流体、シミュレーション、CAE、ヒートシンク

1. 緒言

電子部品は通電すると発熱し、温度が上昇するため、冷却のためにヒートシンクが用いられることがある。ヒートシンクは電子部品から熱を吸収し、自然空冷、水冷、強制空冷等の方式で外部に放熱する。応募企業では多種多様なヒートシンクを設計・製造しているが、その設計は経験則によるものが多く、熱流体解析シミュレーションを用いて設計プロセスを効率化したいと考えている。

本研究では、設計業務でも活用できる精度の高い熱流体解析シミュレーション手法を開発するため、応募企業で実施したヒートシンクの放熱性能確認実験の結果を基準として、熱流体解析シミュレーションの結果を精度良く一致させるために必要な事項を明らかにした。

2. 実験

2. 1. 放熱性能確認実験

2. 1. 1. 自然空冷ヒートシンク

自然空冷ヒートシンクはフィンを有し、主に温められた空気が上昇することによって生じる自然対流を利用して放熱する。応募企業において、ヒートシンクの放熱性能を確認するため、発熱体を取り付けて消費電力を 10[W] から 50[W] まで変化させて定常状態に達した時の温度を測定した。ヒートシンクの材質はアルミで、最も放熱性能が良くなるよう図 1 のとおり垂直に設置した。実験結果を表 1 に示す。

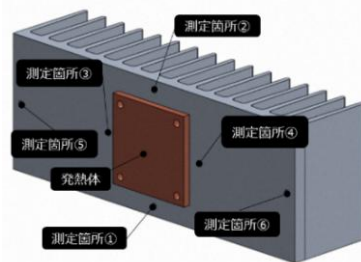


図 1 自然空冷ヒートシンク実験概略図

表 1 自然空冷ヒートシンク実験結果

電力 [W]	室温 [°C]	測定箇所温度 [°C]					
		①	②	③	④	⑤	⑥
10	28.6	38.4	39.3	38.8	38.7	37.3	37.6
20	28.5	47.9	49.0	48.1	47.9	45.6	45.8
30	28.0	56.4	57.7	56.3	56.2	52.8	53.1
40	27.6	64.1	65.4	63.6	63.5	59.1	59.4
50	27.1	72.1	73.6	71.4	71.2	65.9	66.1

2. 1. 2. アルマイト処理ヒートシンク

自然空冷ヒートシンクでは、自然対流による冷却だけでなく、輻射による放熱も重要な要素である。輻射は熱を持った物体が電磁波を放出して放熱するもので、輻射による放熱のしやすさを輻射率と呼ぶ。ヒートシンクでは、表面にアルマイト処理をすることで輻射率を向上させる手法が用いられている。応募企業において、異なる表面処理を施したヒートシンクの放熱性能の差を確認するため、発熱体を取り付けて定常状態に達した時の温度を測定した。発熱体の消費電力量は 10[W] 一定とし、最も放熱性能が良くなるよう図 2 のとおり垂直に設置した。ヒートシンクの材質はアルミで、表面処理なし、切断面以外白アルマイト (YW)、切断面以外黒アルマイト (YB)、全面白アルマイト (WA)、全面黒アルマイト (BA) の 5 パターンで実験した。実験結果を表 2 に示す。

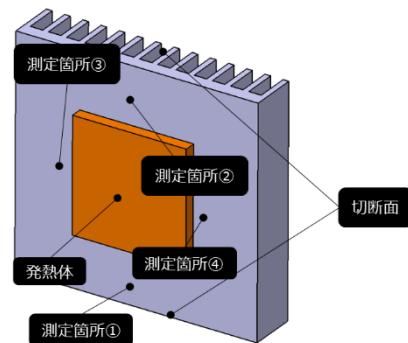


図 2 アルマイト処理ヒートシンク実験概略図

表2 アルマイト処理ヒートシンク実験結果

表面処理	室温	測定箇所温度 [°C]			
	[°C]	①	②	③	④
なし	22.6	47.8	48.9	48.6	48.5
YW	23.4	43.0	44.0	43.7	43.5
YB	23.3	42.7	43.7	43.4	43.3
WA	23.2	42.2	43.2	43.0	42.8
BA	23.1	42.2	43.2	42.9	42.7

2. 1. 3. 水冷ヒートシンク

応募企業の水冷ヒートシンクは、板状のアルミ製筐体に発熱体を取り付け、内部に銅パイプを通して冷却水を循環させる方式である。応募企業において、冷却水の流量の違いによるヒートシンクの放熱性能の差を確認するため、発熱体を2個取り付けて定常状態に達した時の温度を測定した。発熱体の消費電力は1個当たり 128[W]または 256[W]とし、冷却水の流量は 1.5[L/min]または 2.5[L/min]とした。実験の概略図を図3に、実験結果を表3に示す。

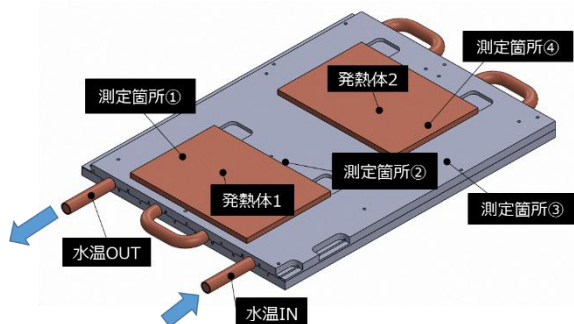


図3 水冷ヒートシンク実験概略図

表3 水冷ヒートシンク実験結果

実験条件	室温 [°C]	測定箇所温度 [°C]					
		水温IN	水温OUT	①	②	③	④
電力256[W] (128×2) 流量1.5[L/min]	24.3	27.5	29.6	31.2	29.9	27.3	31.5
電力256[W] (128×2) 流量2.5[L/min]	24.7	28.8	29.8	29.9	28.8	26.5	30.5
電力512[W] (256×2) 流量1.5[L/min]	26.8	36.1	38.0	39.1	37.0	31.4	39.3
電力512[W] (256×2) 流量2.5[L/min]	25.9	33.0	34.8	36.5	34.1	29.3	36.9

2. 1. 4. 強制空冷ヒートシンク

応募企業の強制空冷ヒートシンクは、アルミ製の格子状の筐体内にファンで送風して冷却する方式である。応募企業において、風速の違いによる放熱性能の差を確認するため、消費電力 500[W]の発熱体を4個取り付け、流速を 2.0[m/s]から 4.5[m/s]まで変化させて定常状態に達した時の温度を測定した。実験の概略図を図4に、実験結果を表4に示す。

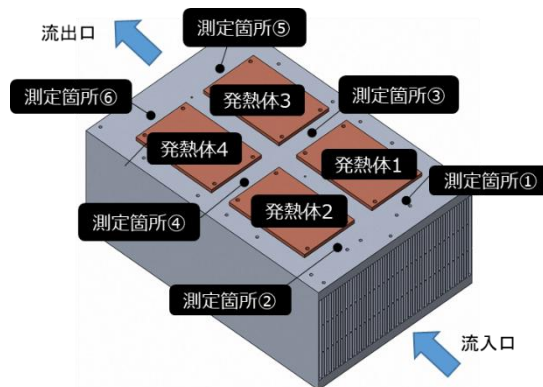


図4 強制空冷ヒートシンク実験概略図

表4 強制空冷ヒートシンク実験結果

風速 [m/s]	室温 [°C]	温度測定箇所 [°C]					
		①	②	③	④	⑤	⑥
4.5	31.1	52.7	53.4	69.0	68.1	66.9	67.4
4.0	31.6	54.1	54.9	71.0	70.0	69.3	69.8
3.5	32.2	55.8	56.7	73.5	72.5	72.2	72.8
3.0	32.8	57.8	58.6	76.6	75.5	76.2	76.5
2.5	33.5	60.2	61.1	80.5	79.4	81.1	81.6
2.0	34.4	64.7	65.4	87.5	86.4	89.7	90.2

2. 2. 熱流体シミュレーション

2. 2. 1. 自然空冷ヒートシンク

最初に、自然対流が層流か乱流かを判定するため、グラスホフ数を算出した。グラスホフ数は以下の式(1)で算出される。

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \dots (1)$$

ここで、gは重力加速度、βは体膨張係数、ΔTは高温のヒートシンクと室温の温度差、Lは代表長さ、νは動粘性係数である。βは温度[K]の逆数で表されるため、20[°C]=293[K]を基準として 1/293≒0.0034とした。グラスホフ数が最も大きくなる状況を想定すると、ΔTが大きいほどグラスホフ数も大きくなるため、ΔTは表1から 45[K]とした。代表長さLは、図5のとおり自然対流の流路となるフィン長さとし、今回解析するヒートシンクはL=0.075[m]である。

νは 1.82e-05 [Pa・s]とし、これらの数値で計算すると、グラスホフ数は 1.91e+06 となる。層流から乱流に遷移する臨界グラスホフ数は概ね 1e+08 ~1e+09 と

されており、今回計算した値は十分小さいことから、層流として解析した。

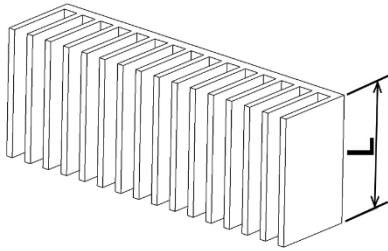


図5 自然空冷ヒートシンクの代表長さ

解析には COMSOL Multi Physics を使用し、ヒートシンクと発熱体、及びそれらを取り囲む流体領域の 3D モデルを作成し、メッシュを切って有限要素法で解析した。解析モデルを図 6 に示す。ヒートシンクと発熱体の材質はアルミとし、流体領域は空気とした。流体領域の外側は室温で一定とし、加熱されて上昇した空気が冷却される設定とした。浮力による自然対流を再現するため、空気の密度は温度によって変化する設定とし、流体領域には $g(\rho_0 - \rho)$ の体積力を設定した。ここで、 ρ_0 は室温の空気密度、 ρ はヒートシンク周辺の加熱された空気の密度である。また、輻射は高温のヒートシンクから室温の空気に放熱する設定とし、輻射率 0.15 をヒートシンクの全面に設定した。解析で使った物性値を表 5 に、解析結果を表 6 に示す。表 1 の実験データと比較すると、全体的に解析結果の方が温度が低い傾向となった。シミュレーション結果の確からしさは、平均絶対誤差で評価した。平均絶対誤差は、表 1 の実測値と表 6 の解析結果の差の絶対値を足し合わせて、データ数で除して平均することで得られ、3.03 となった。また、流速分布を図 7 に示す。ヒートシンクの天面付近で流速が最大になり、その後上方に行くにつれて流速が低くなっている事から、自然対流が再現できていることを確認した。

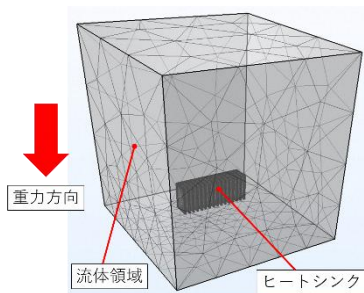


図6 自然空冷ヒートシンクの解析モデル

表5 解析で使った物性値

	空気	アルミ
密度 [kg/m ³]	1.204	2700
熱伝導率 [W/m・K]	0.025	210
定圧熱容量 [J/kg・K]	1006	900
粘性係数 [Pa・s]	1.82e-05	
比気体定数 [J/kg・K]	287	

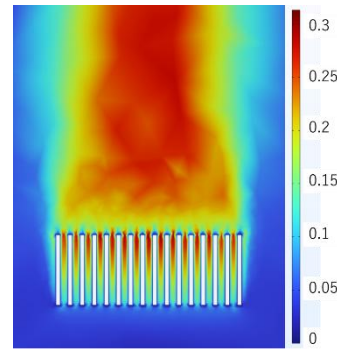


図7 自然対流の流速分布

表6 自然空冷ヒートシンクの解析結果

電力 [W]	室温 [°C]	測定箇所温度 [°C]					
		①	②	③	④	⑤	⑥
10	28.6	37.2	37.2	36.8	36.8	35.7	35.7
20	28.5	45.7	45.7	44.9	44.9	42.7	42.7
30	28.0	53.7	53.7	52.5	52.5	50.2	50.2
40	27.6	61.7	61.7	60.1	60.1	55.8	55.8
50	27.1	69.6	69.6	67.3	67.3	62.2	62.2

ここで、ヒートシンクのフィン周辺の温度分布を図 8 に示す。フィン間の空気温度は室温よりも高くなっていることから、フィン間の雰囲気温度を $(T_H + T_L)/2$ として、図 9 のとおり個別にフィン間面を選択して輻射放熱を設定した。ここで、 T_H はヒートシンク周辺の加熱された空気温度、 T_L は室温である。その他の面の雰囲気温度は室温 T_L として、輻射放熱を設定した。解析結果を表 7 に、温度分布を図 10 に示す。平均絶対誤差は 2.44 となり、解析精度が向上した。

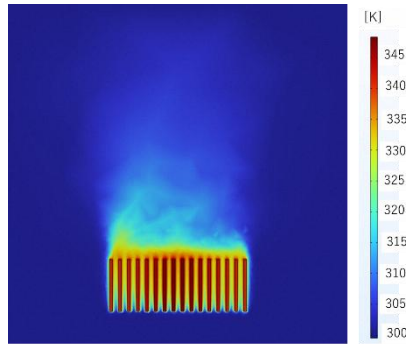


図8 フィン周辺の温度分布

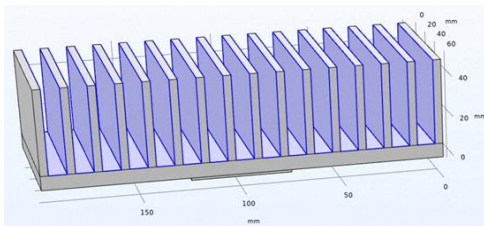


図9 フィン間温度で輻射を設定した面 (紫色の面)

表7 条件変更後の解析結果

電力 [W]	室温 [°C]	測定箇所温度 T[°C]					
		①	②	③	④	⑤	⑥
10	28.6	42.4	42.4	42.0	42.0	41.0	41.0
20	28.5	51.7	51.8	51.1	51.1	48.9	48.9
30	28.0	59.6	59.8	58.6	58.6	55.4	55.4
40	27.6	67.0	67.2	65.6	65.6	61.4	61.4
50	27.1	73.7	74.0	72.2	72.1	66.9	66.9

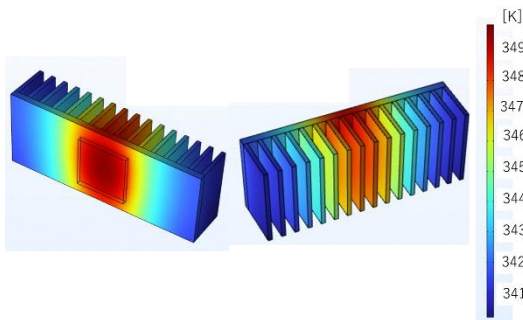


図10 自然空冷ヒートシンクの温度分布

2. 2. 2. アルマイト処理ヒートシンク

最初に、式(1)でグラスホフ数を計算する。 ΔT は表2から25[K]とし、代表長さLはL=0.1[m]とした。その他の数値は3.1と同じ条件で計算すると、グラスホフ数は 2.51×10^6 となったため、層流として解析した。

解析にはCOMSOL Multi Physicsを使用し、2.2.1.と同様の手順で解析した。解析モデルを図11に示す。表面処理なしの輻射率は0.15、白アルマイトの

輻射率は0.75、黒アルマイトの輻射率は0.95とした。解析結果を表8に、温度分布を図12に示す。平均絶対誤差は1.71となり、精度良く解析することができた。

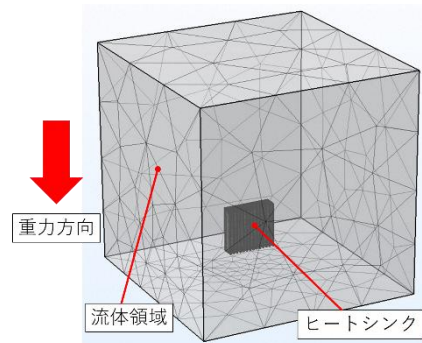


図11 アルマイト処理ヒートシンクの解析モデル

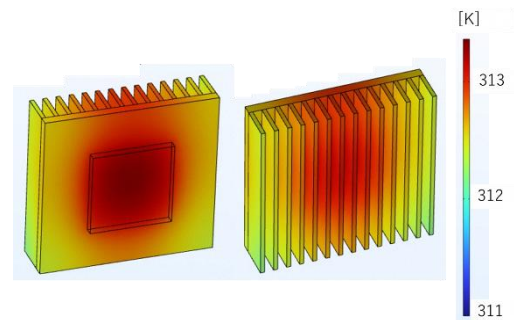


図12 アルマイト処理ヒートシンクの温度分布

表8 アルマイト処理ヒートシンクの解析結果

表面処理	室温	測定箇所温度 [°C]			
	[°C]	①	②	③	④
なし	22.6	49.0	49.2	49.0	49.0
YW	23.4	42.2	42.3	42.2	42.2
YB	23.3	40.5	40.6	40.4	40.4
WA	23.2	41.8	41.9	41.7	41.7
BA	23.1	40.0	40.1	39.9	39.9

2. 2. 3. 水冷ヒートシンク

最初に、パイプ内の水流が層流か乱流かを判定するため、レイノルズ数を算出した。レイノルズ数は以下の式(3)で算出される。

$$Re = \frac{\rho v L}{\nu} \quad \dots (3)$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 ρ は水の密度、 v は流速、 L は代表長さ、 ν は水の動粘性係数である。流速 v は流量をパイプの断面積で除して求められる。レイノルズ数が最大になる状況を想定すると、流量が多いほど流速も速くなるため、流量が2.5[L/min]の場合で算出する。2.5[L/min]=4.16e-05 [m³/s]であり、断面積はパイプ径を8[mm]とすると、 $\pi \times 0.004 \times 0.004 = 5e-05$ [m²]となる。よって、流速 v は0.832[m/s]となる。代表長さ L はパイプの直径8[mm]とした。密度 ρ は995[kg/m³]、動粘性係数 ν は8.01e-04 [Pa・s]とすると、レイノルズ数は4968となり、臨界レイノルズ数2300よりも大きいので、乱流として計算した。

当所ではCOMSOL Multi Physicsの乱流モジュールを所有していないため、解析にはANSYS Fluentを使用した。アルミ製管体、発熱体、銅パイプ及びパイプ内部の流体領域の3Dモデルを作成し、メッシュを切つて有限要素法で解析した。解析モデルを図13に示す。冷却水の流れによる放熱が支配的であり、輻射による放熱は無視できると考え、輻射放熱は設定しない。発熱体の材質はアルミ、流体領域は水とした。解析で使用する物性値を表9に示す。流入口には1.5[L/min]または2.5[L/min]を設定し、流入水温は表3の室温で設定した。また、実物のヒートシンクの銅パイプとアルミ管体の接触面には、電蝕防止用のシリコンペーストが塗布されている。そこで、解析モデルのアルミ管体と銅パイプの接触面に熱伝導率0.21[W/m・K]、厚さ0.03[mm]のシリコンペースト層を設定した。解析結果を表10に、温度分布を図14に示す。表3の実験データと比較すると、全体的に解析結果の方が低い傾向となり、特に流入水温と流出水温の差が大きくなった。平均絶対誤差は2.99であった。



図13 水冷ヒートシンクの解析モデル

表9 水冷ヒートシンクの解析で使用した物性値

	水	アルミ	銅
密度[kg/m ³]	998.2	2719	8978
熱伝導率[W/m・K]	0.6	210	339
定圧熱容量[J/kg・K]	4182	871	381
粘性係数[Pa・s]	1.00e-03		

表10 水冷ヒートシンクの解析結果

解析条件	室温[°C]	測定箇所温度[°C]					
		水温IN	水温OUT	①	②	③	④
電力256[W] (128×2) 流量1.5[L/min]	24.3	24.3	25.2	29.7	28.6	26.7	28.9
電力256[W] (128×2) 流量2.5[L/min]	24.7	24.7	25.1	29.5	28.4	26.7	28.8
電力512[W] (256×2) 流量1.5[L/min]	26.8	26.8	30.1	38.6	35.9	31.7	36.2
電力512[W] (256×2) 流量2.5[L/min]	25.9	25.9	27.6	33.9	31.7	28.6	32.5

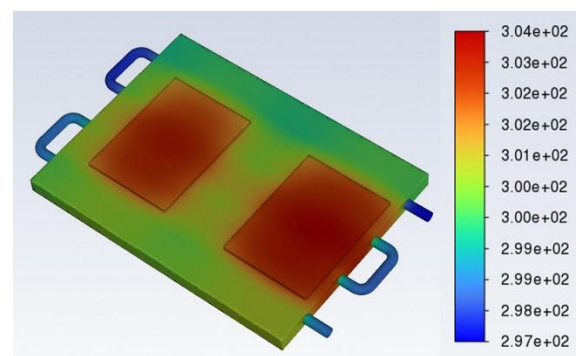


図14 水冷ヒートシンクの温度分布

2. 2. 4. 強制空冷ヒートシンク

格子状のヒートシンク内を流れる空気が層流か乱流かを判定するため、式(3)でレイノルズ数を算出した。レイノルズ数が最大になる状況を想定し、流速が4.5[m/s]の場合で算出する。今回解析するヒートシンクは、図15のとおり大きい流路と小さい流路が格子状に並んだ構造をしており、大きい流路の方が等価直径が大きくなることから、代表長さ L は大きい流路の等価直径とした。今回解析するヒートシンクは $a=97$ [mm]、 $b=3$ [mm]であり、式(2)で計算すると、 $L=5.82e-03$ [m]となる。密度 ρ は 1.16 [kg/m³]、動粘性係数 ν は $1.82e-05$ [Pa・s]とすると、レイノルズ数は1669となり、臨界レイノルズ数2300よりも小さいため、層流として計算した。

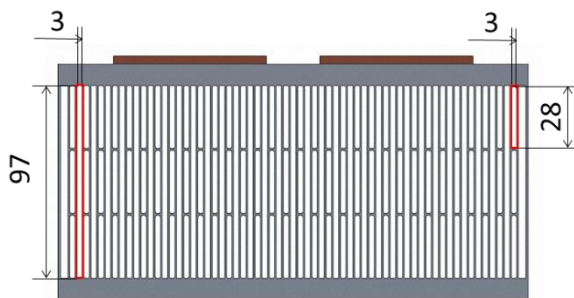


図15 強制空冷ヒートシンクの等価直径

解析にはCOMSOL Multi Physicsを使用した。ヒートシンク、発熱体、ヒートシンク内の流体領域の3Dモデルを作成して解析した。解析モデルを図16に示す。今回の解析では強制対流による放熱が支配的で、輻射放熱による影響は無視できると考え、輻射放熱は設定しない。ヒートシンクと発熱体の材質はアルミとし、流体領域は空気とした。流入口には2[m/s]から4.5[m/s]の流速を設定し、流入温度は表4の室温とした。解析結果を表11に、温度分布を図17に示す。表4の実験データと比較すると、全体的に解析結果の方が高い傾向となり、平均絶対誤差は2.13であった。

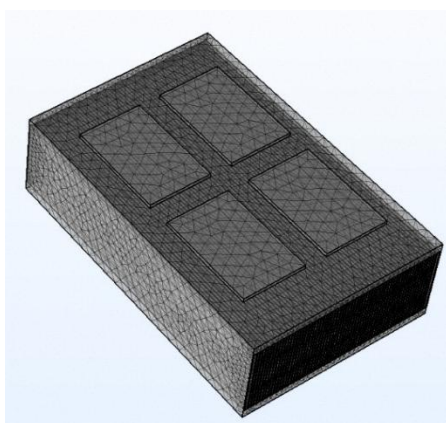


図16 強制空冷ヒートシンクの解析モデル

表11 強制空冷ヒートシンクの解析結果

風速 [m/s]	室温 [°C]	温度測定箇所 [°C]					
		①	②	③	④	⑤	⑥
4.5	31.1	49.7	49.6	65.8	65.8	65.7	65.7
4.0	31.6	51.1	51.1	68.2	68.2	68.7	68.7
3.5	32.2	53.1	53.1	71.3	71.4	72.6	72.7
3.0	32.8	55.5	55.4	75.3	75.4	77.6	77.7
2.5	33.5	58.9	58.8	80.9	81.0	84.6	84.7
2.0	34.4	64.2	64.1	89.5	89.5	95.1	95.1

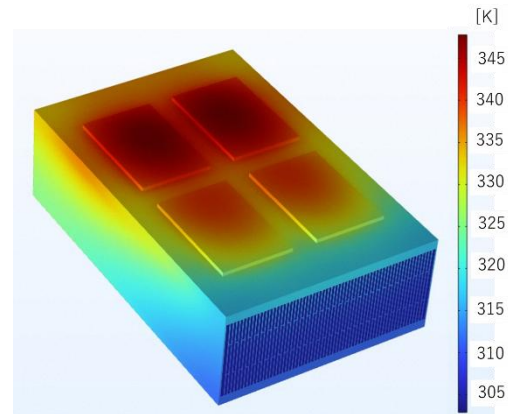


図17 強制空冷ヒートシンクの温度分布

3. 考察

自然空冷ヒートシンクでは、フィン間の雰囲気温度を $(T_H + T_L)/2$ として室温よりも高く設定し、フィン間面を個別に選択して輻射放熱を設定することで、解析精度を向上することができた。これは、フィン温度と雰囲気温度の差が小さくなると、輻射による放熱量が少なくなるためである。従って、温度が高いフィン間面は、温度が低いヒートシンク外周面よりも輻射による放熱量が少なくなっていると考えられる。

水冷ヒートシンクの解析結果は、実験データよりも温度が低くなる傾向となり、特に流入水温と流出水温の差が大きくなった。これは、流入口の水温を室温で一定として解析しており、冷却水の温度上昇を考慮していなかったためであると考えられる。実際の水冷ヒートシンクは冷却水が発熱体を通過する度に温度が上がり、温くなった冷却水が循環して再び発熱体を通過する際に更に温度が上がっていく事を繰り返し、やがて定常状態に到達する。従って、解析する際は流出口と流入口を接続し、冷却水の温度上昇を再現することで、より実験データと解析結果を近づけることができると考えられる。

強制空冷ヒートシンクでは、温度が高くなるほど実験データとの差が大きくなった。今回の解析では輻射放熱を無視しているが、物体の温度が高くなるほど輻射による放熱量が多くなることから、輻射を含めて解析することで解析精度を改善できると考えられる。

4. 結言

各種ヒートシンクの熱流体解析において、精度良く解析するために必要な事項について、以下の知見を得た。

- (1) 自然空冷ではグラスホフ数、水冷や強制空冷であればレイノルズ数を計算し、層流か乱流かを予め判別しておく必要がある。
- (2) 自然空冷では、ヒートシンク周辺に流体領域を設定し、流体領域に $g(\rho_0 - \rho)$ の体積力を設定して浮力による自然対流を再現する必要がある。
- (3) 自然空冷では、ヒートシンクのフィン間温度の上昇による輻射放熱量の減少も無視できないため、フィン間の空気温度上昇を考慮して輻射放熱を設定する必要がある。
- (4) 水冷ヒートシンクは発熱体を通過して温められた冷却水が循環するため、流出口と流入口を接続して解析し、冷却水の温度上昇を再現することで、更に解析精度を向上することができると考えられる。
- (5) 強制空冷ヒートシンクにおいても、ヒートシンクが高温になる場合は輻射放熱の影響が無視できなくなるため、輻射放熱を含めて解析することで解析精度を向上することができると考えられる。