

トポロジー最適化を活用したヒートシンクの熱流体設計に関する研究

大内 崇史*¹ 村田 顕彦*¹ 山本 圭一朗*¹

Study on Thermal-Fluid Design of Heat Sink Using Topology Optimization

Takafumi Ouchi, Akihiko Murata and Keiichiro Yamamoto

熱流体機器における伝熱促進や、配管流路の圧力損失低減をはじめとする熱流体設計に、トポロジー最適化技術を活用する研究が進み、活用事例もみられるようになってきた。本研究では、熱移動と流体挙動の両者に関連する水冷及び空冷のヒートシンクを対象にしたトポロジー最適化を行い、取得した最適化形状それぞれに対する造形試作を行った。また、水冷ヒートシンクについては、製造の観点で図面化可能な矩形フィン等を等間隔にダイヤ配置する場合のフィン寸法及び配置の寸法最適化を行い、トポロジー最適化による形状と比較検証した。その結果、本研究で得たトポロジー最適化形状と同等以上の性能を有する寸法形状が得られた。

1 はじめに

工業製品や生産設備などにおいては、配管などの流路における圧力損失低減または流量増大、熱流体機器における伝熱促進または断熱性向上、並びに温度や流量の均一化などを目的として、数値流体力学¹⁾ (Computational Fluid Dynamics, 以下「CFD」という) を活用した熱流体設計を行うことが一般的になってきた。また、設計の最適化工程においては、構造強度設計で広まったトポロジー最適化²⁾ 技術が流体問題にも応用されるようになり (以下、当技術を単に「流体トポロジー最適化³⁾」という)、特に近年では、当研究所が保有するCFDソフトウェアであるSTREAM (ソフトウェアクレイドル製) のような商用CFDソフトウェアに流体トポロジー最適化の機能が搭載されるようになってきている。

流体トポロジー最適化は、圧力損失の最小化や熱交換量の最大化などの目的関数をあらかじめ設定し、これに対する設計領域内の流路の形状及び形態 (トポロジー) を、数理的な最適化アルゴリズムによって導き出す技術である。当技術を各種流体デバイスの設計に活用することで、大幅な性能向上につながることが期待されている⁴⁾。一方で、得られる流路形状は複雑であり、3Dプリンタなどによる造形が前提となる。このような最適形状について、福岡県内企業に対する聞き取りでは、図面化が可能な形状に設計最適化したいというニーズもあった。そこで、本研究では、流体トポ

ロジー最適化のモデルケースとして、熱移動と流体挙動の両現象が関与するヒートシンクを対象に、空冷と水冷の場合について、それぞれSTREAMを用いたトポロジー最適化形状を得るプロセスを検証し、3Dプリンタによる造形試作を行った。加えて、水冷ヒートシンクについて、トポロジー最適化形状に着想を得て、図面化が可能で工業上合理的な形状にフィン等を寸法最適化し、トポロジー最適化形状と比較検証した。

2 研究方法

2-1 水冷ヒートシンクのトポロジー最適化

水冷ヒートシンクのトポロジー最適化では、図1に示す一辺20 mm、厚さ1 mmのヒータと、その上面に設けた高さ1 mmの水冷流路からなる冷却機構を対象とした。水冷流路は、入口面及び出口面の幅が4 mmであり、半径10 mmの円弧でヒータ幅20 mmまで拡大・縮小する形状で、流路上面は断熱壁面とした。ヒートシンクの

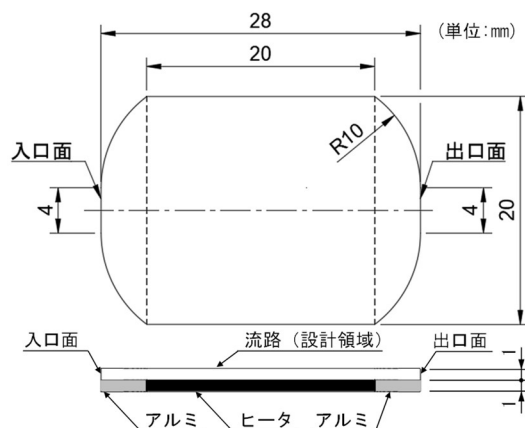


図1 解析対象の水冷ヒートシンク

*1 機械電子研究所

設計領域は、出入口の拡大・縮小部を含む水流路全体とした。流れ方向に左右対称の構造であることから、解析負荷を低減するために、1/2のみを解析対象とし、ヒータ面方向を一边0.1 mmの正方形で分割し、高さ方向には厚さ1 mmで分割して、ヒータ及び流路を対象として面方向に二次元の解析を行った。流路を満たす流体は非圧縮性の水で、流れは層流とし、物性値は20℃の定物性とした。水を入口面から20℃、0.05 m/sで流入させ、出口面に全圧0 Paの等圧面を設定して流出する設定とした。1/2領域のヒータ発熱量は80 Wとした。ヒートシンク設計領域内における流体領域の体積割合の上限値を80%とし、設計領域全域が流体の場合に比べて圧力損失が10倍、20倍、40倍、100倍以内の4条件を制約条件として、それぞれの制約条件におけるヒータの平均温度最小化を目的関数として最適化を行った。なお、トポロジー最適化により生成される固体領域の熱伝導率は、純アルミニウムを想定した237 W/(m・K)とした。また、水は100℃を超過しても、20℃の物性値で液相のまま温度上昇することとした。

2-2 水冷ヒートシンクの寸法最適化

水冷ヒートシンクの寸法最適化については、図面化が可能かつ工業上合理的な形状として、矩形フィンを等間隔にダイヤ配置した場合について最適化を行った。フィン幅及びフィン間隔は、トポロジー最適化により得られた固体領域の輪郭数、及び固体領域の体積割合をもとに求めた。これを基準にして、フィン幅及び間隔を変えて解析を行い、解析結果から得られるヒータ平均温度及び圧力損失についてmodeFRONTIER (ESTECO製)によって応答曲面を作成した。この応答曲面を用いて、フィン幅及び間隔の条件を増やして最適解を探索し、ヒータ平均温度の最小化及び圧力損失の最小化に対するパレート最適解を得て、トポロジー最適化の場合と性能を比較した。

2-3 空冷ヒートシンクのトポロジー最適化

空冷ヒートシンクのトポロジー最適化では、図2に示す一边10 mm、厚さ2 mmのヒータ上面に密着設置することとし、一边10 mm、高さ5 mmの直方体をヒートシンクの設計領域とした。ヒートシンク周辺の解析空間は、ヒートシンク設計領域を水平方向の中心にして、一边14 mm、ヒータ上面から高さ7 mmの直方体領域とした。空間を満たす流体は非圧縮性の空気、生じる

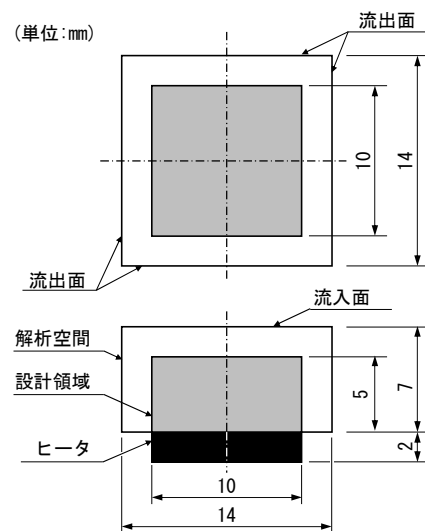


図2 解析対象の空冷ヒートシンク

流れは層流とし、空気の物性値は20℃の定物性とした。空気は解析空間の上面から20℃、0.5 m/sでヒータ方向に流入させ、解析空間の全側面に全圧0 Paの等圧面を設定して流出させた。なお、計算負荷低減のため、ヒータを含む解析領域を水平両軸方向の各中心断面で分割し、分割面に対称境界条件を与えて解析領域の1/4を対象とした。領域は一边が0.1 mmの立方格子に等分割して三次元解析を行った。1/4領域のヒータ発熱量は0.1 Wとした。ヒートシンク設計領域における流体域の体積割合の上限値を75%とし、ヒータ平均温度の最小化を目的関数とした。トポロジー最適化により生成される固体領域の熱伝導率は、アルミニウム合金を想定した130 W/(m・K)とした。なお、空冷ヒートシンクの寸法最適化については、今後の課題とした。

3 結果と考察

3-1 水冷ヒートシンクのトポロジー最適化

水冷ヒートシンクのトポロジー最適化において、圧力損失10倍以内を制約条件とした計算過程における流路形状を図3に示す。なお、流路表面の色は流体温度を示している。また、最終ステップの最適化形状を面方向に2.5倍、高さ方向に10倍拡大して金属積層造形装置(ニコン製lasermeister 100A)により出力したSUS316造形品写真を併せて示す。トポロジー最適化の計算が進むにつれて、流路形状が変化し、それに伴って温度の低下がみられた。また、圧力損失の制約条件を10倍、20倍、40倍、100倍以内としたトポロジー最適化によって得た、圧力損失とヒータ平均温度の関係

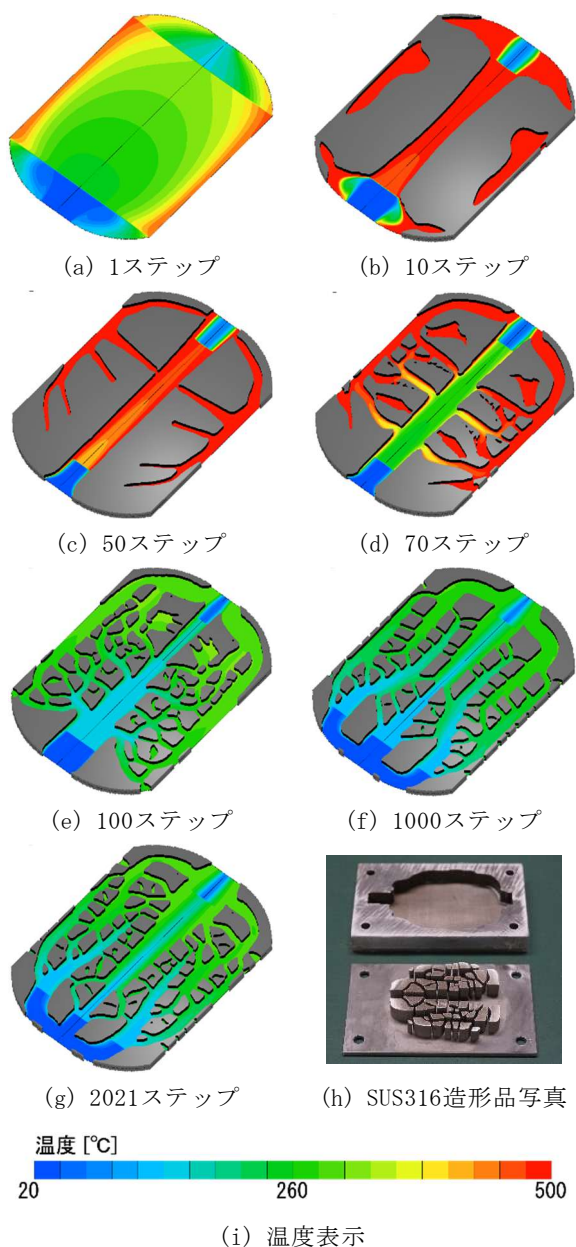


図3 水冷ヒートシンクの計算過程

を図4に示す。なお、各条件において得られた流路形状は吹き出しで示している。許容する圧力損失を大きくすることで流路が細くなり、ヒータ平均温度は低下するが、今回の解析条件の場合では、170 °C付近が温度低下の限界値とみられる。

3-2 水冷ヒートシンクの寸法最適化

図3(g)に示すトポロジー最適化形状から得られた固体領域の輪郭数及び固体体積割合をもとに、矩形フィン等を等間隔にダイヤ配置した場合のフィン幅 l 及び間隔 g を設計変数の基準とした。この基準値でのフィン形状を図5に示す。これを基準に、フィン幅を0.6 mmから2 mmまで0.2 mm刻み、間隔を0.2 mmから2 mmまで0.2 mm刻みとした80ケースの熱流体解析を行い、それ

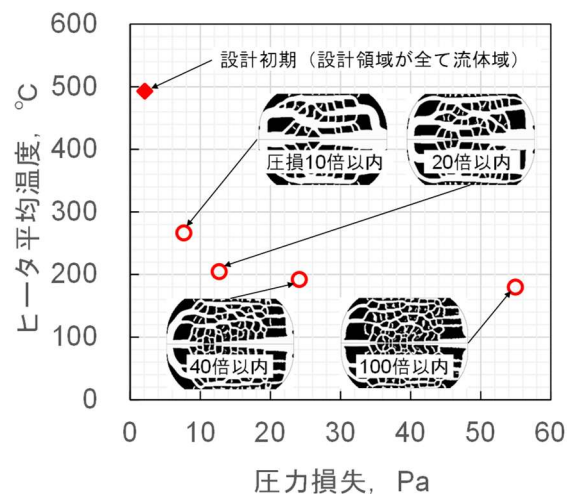


図4 水冷ヒートシンクのトポロジー最適解

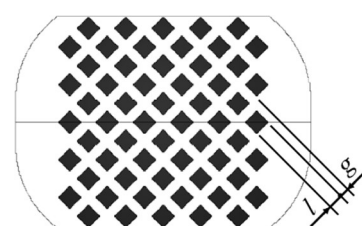


図5 水冷ヒートシンクの設計変数

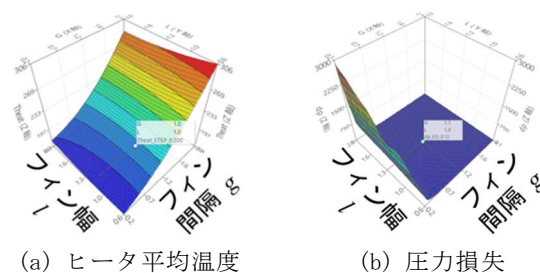


図6 水冷ヒートシンクの応答曲面

ぞれのヒータ平均温度及び圧力損失を得た。これらの結果のうち、64条件の結果を教師データ、残りの16条件の結果を検証用データとする応答曲面を作成した結果を図6に示す。なお、ヒータ平均温度はステップワイズ回帰、圧力損失は進化的デザインがそれぞれ検証用データを良好に再現できたため、選定した。

これらの応答曲面を用いて、フィン幅と間隔を2000ケースに増やして最適解を探索し、得られたヒータ平均温度及び圧力損失の関係を「最適解探索」として図7に示す。なお、応答曲面による最適解探索のうち、ヒータ平均温度最小化及び圧力損失最小化に対するパレート最適解を「パレート最適解」として図示した。また、熱流体解析を行って直接得たヒータ平均温度及び圧力損失は「教師データ」として図示している。

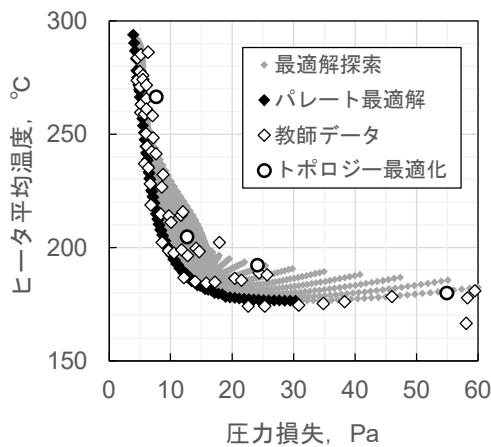


図7 水冷ヒートシンクの最適化結果

応答曲面により得たパレート最適解と、トポロジー最適化による解を比較すると、トポロジー最適化による解はヒータ平均温度の最小化及び圧力損失の最小化の観点では性能が低くなった。トポロジー最適化で得られる解は、一般に大域的最適解ではなく、局所最適解である⁴⁾。今後、トポロジー最適化のパラメータ及び初期条件等の設定内容を追求することにより、更に優れた解が得られると考えているため、これについては今後も検討を継続する。

3-3 空冷ヒートシンクのトポロジー最適化

空冷ヒートシンクのトポロジー最適化について計算過程におけるフィン形状の推移を図8に示す。なお、計算過程の形状は、内部形状を見やすくするために、半分領域のみを表示し、形状表面の色は温度を示している。また、最終ステップの最適化形状を6倍拡大して、材料押出式3Dプリンタ（Bambu Lab製 P1S）により出力したPLA樹脂造形品写真を図8に併せて示す。計算が開始して10ステップ程度で、設計領域側面に沿う壁状の形状が生成された。その後、ヒータ中央部から三次元的に樹枝状の構造体が生成され、計算が進むごとに表面積の拡大とフィン効率の維持を満足する最適解を探索する過程がうかがえた。三次元におけるトポロジー最適化形状に対する性能評価及び寸法最適化については、今後取り組んでいく予定である。

4 まとめ

本研究では、水冷及び空冷のヒートシンクを対象にしたトポロジー最適化を行い、それぞれの最適化形状を造形試作した。また、水冷ヒートシンクについては、製造の観点から、矩形フィンを等間隔にダイヤ配置し

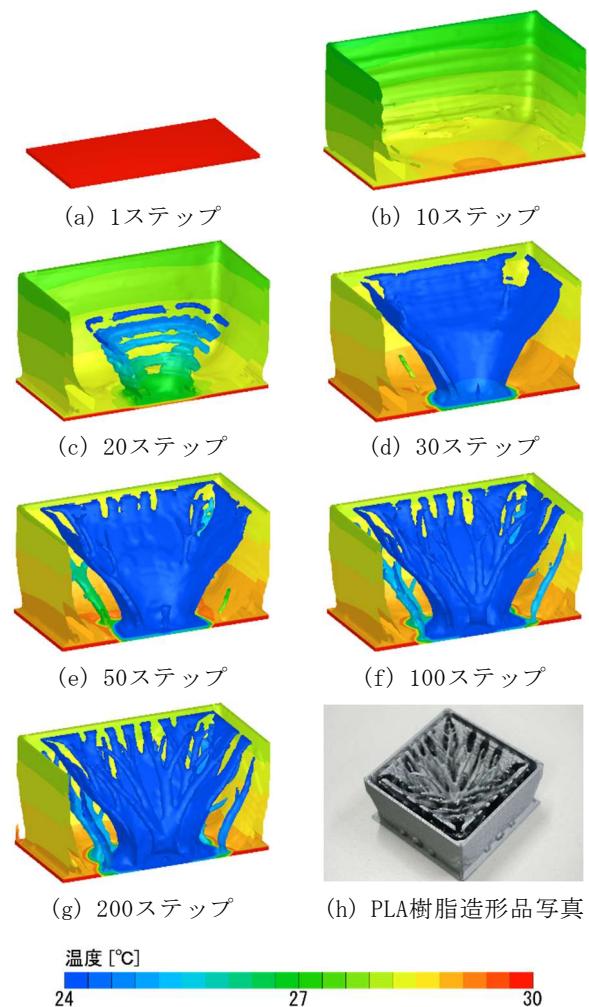


図8 空冷ヒートシンク形状の推移

たフィンの寸法最適化を行い、本研究で得たトポロジー最適化による形状の性能を上回る最適形状が得られた。今後は、トポロジー最適化形状のパラメータ及び初期条件の設定等による優れた最適解の追求、三次元におけるトポロジー最適化形状に対する性能評価及び寸法最適化に取り組んでいく予定である。

5 参考文献

- 1) H. K. Versteeg, W. Malalasekera (松下洋介ほか3名共訳)：数値流体力学（第2版），pp. 1-7，森北出版(2011)
- 2) 近藤 継男ほか2名：トポロジー最適化の基礎，pp. 1-22，コロナ社(2024)
- 3) 矢地 謙太郎：精密工学会誌，86巻(6号)，pp. 400-404(2020)
- 4) 矢地 謙太郎ほか3名：日本機械学会第26回設計工学・システム部門講演会，2016.26巻，ID:2310(2016)