

電動化航空機用多段ヒートシンクの 3 次元熱回路網解析を用いた多目的最適化

Multi-Objective Optimization of Multi-Stage Heat Sink of Electric Aircraft by using Three-dimensional Thermal Network Analysis

- 神山 彩夏, 農工大院・工, 〒184-8588 小金井市中町 2-24-16, E-mail: s180108w@st.go.tuat.ac.jp
 村田 章, 農工大院・工, 〒184-8588 小金井市中町 2-24-16
 岩本 薫, 農工大院・工, 〒184-8588 小金井市中町 2-24-16
 山本 昌平, 農工大院・工, 〒184-8588 小金井市中町 2-24-16
 今野 豪人, IHI, 〒235-8501 横浜市磯子区新中原町 1 番地

Ayaka KAMIYAMA, Tokyo University of A. and T., 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588
 Akira MURATA, Tokyo University of A. and T., 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588
 Kaoru IWAMOTO, Tokyo University of A. and T., 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588
 Shohei YAMAMOTO, Tokyo University of A. and T., 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588
 Taketo KONNO, IHI Corporation, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa 235-8501

In electric aircraft, thermal management of heat generation from electric systems is important. Usable cooling air, however, is limited, and it is essential to reduce the air mass flow rate by improving the performance of the cooling devices in the electric aircraft. In this study, for the electric aircraft, thermal management of motor controllers were considered. Design of experiments was conducted to decide initial points of 6 design parameters, and 3 objective functions were calculated by using three-dimensional thermal network analysis. Then, response surface was created about each objective function and multi-objective optimization was performed by using response surfaces for finding the pareto optimal solutions of air-cooling multi-stage heat sink. From the results, combinations of geometric parameters of the heat sink giving higher cooling performance, lower pressure loss and lighter weight were proposed.

1. 緒言

航空機システムの電動化を実現するためには、著しい発熱を生じる電動デバイスの効率的な冷却、その排熱処理といった熱マネジメントが極めて重要な技術課題である⁽¹⁾。本研究では、航空機の電動化のために、モータコントローラ (M/C) の熱マネジメントを目的として、M/C 空冷多段ヒートシンク⁽²⁾⁽³⁾について 3 次元熱回路網解析(Thermal Network Analysis (TNA))を利用した多目的最適化を行い、高冷却性能、低圧損、軽量な形状パラメータを決定した。M/C 空冷多段ヒートシンク的设计変数であるフィン高さ、厚さ、間隔と、フィン数、ヒートシンク段数、入口 Re 数の 6 つについて、実験計画法を用いて設計区間上に初期解析点を定め、熱回路網法を用いて目的関数である M/C 壁面最大温度、圧力損失、総重量の 3 つについて解析を行い、応答曲面を作成し、多目的最適化を行うことで、Pareto 最適解を算出した。

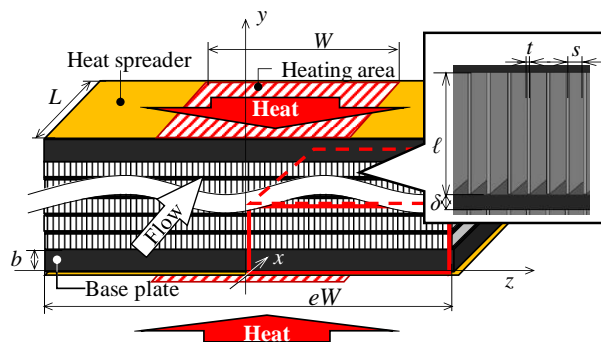


Fig. 1 Schematic of heat sink (five stage case is shown).

2. 解析方法の検証と多目的最適探索方法

Table 1 Range of design parameters.

2.1 熱回路網解析の検証

熱回路網法とは、解析対象を節点で分割し、節点間の熱抵抗を用い、エネルギーのつり合い式を解く方法である。熱回路網解析の妥当性の検証を、有限体積法による解析(CFD)と比較することで行った。ヒートシンクは、伝熱面積拡大による冷却効果を得るために図 1 に示すようにヒートスプレッダーを用いて、 e 倍に拡大し、高さ方向に多段化している。熱回路網解析、CFD とともに、図 1 に示す幅方向長さ eW [m]、空気流路長さ L [m] の M/C 空冷多段ヒートシンクより、対称条件を考慮して、赤で示す立方体区域を取り出して解析領域とした。フィン厚さ $t=0.42$ mm、フィン高さ $l=6.00$ mm、フィン間隔 $s=0.63$ mm、入口 Re 数=5900、フィン数 30、幅方向拡大率 $e=2$ の場合について、ヒートシンク段数 2 段、3 段、5 段の解析を行い、M/C 壁面温度分布と、制約条件である M/C 壁面最大温度についての比較を行った。

Design factors	Min	Max
Fin thickness, t [mm]	0.15	0.40
Fin height, l [kPa]	4.00	8.00
Fin spacing, s [kW]	0.55	1.00
Inlet Re number [-]	800	8000
Number of stages [-]	1	6
Number of fins [-]	130	200

2.2 多目的最適化

表 1 に示す 6 つを設計変数として、段数以外それぞれ 100 分割し体積法。総当たりで解析を行うと解析回数は 6×100^5 回となるが、実験計画法⁽⁴⁾を利用し、サンプル点を設計変数空間上に均一に分布させることでより少ない解析回数で応答の傾向を把握できる。今回のサンプル点は 100 点とした。

実験計画法で定めた 6 つの設計変数の組み合わせ 100 通りを入力とし、表 2 に示す冷却条件下で熱回路網解析を行い、制約条件

Table 2 Operating and constraint conditions of motor controller.

Operating conditions of M/C	Inlet air temperature [°C]	24.0
	Inlet air pressure [kPa]	81.2
	Heat input from motor [kW]	2.5
Constraint conditions of M/C	Maximum air pressure loss [kPa]	15
	Maximum local M/C temperature [°C]	90.0
	Maximum total weight of heat sink [kg]	-

となる M/C 壁面最大温度、圧力損失、重量を算出した。

熱回路網解析の結果を用いてそれぞれの目的関数について応答曲面を作成した。応答曲面法⁽⁵⁾では、設計空間全体における目的関数の分布を単純な代数式として近似できる。本研究では、非線形関数の近似に適する Kriging モデルを応答曲面法として用いた。

各目的関数に対する応答曲面の結果を用いて、遺伝的アルゴリズム(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III (NSGAIII)⁽⁶⁾)を用いて多目的最適化を行い、Pareto 最適解を探索した。100 点の集合を 100,000 世代に渡って更新した。ここで、今回得られた Pareto 最適解の結果の収束性については、値の世代の更新数の履歴より確認済みである。

3. 解析結果

3.1 熱回路網法の検証結果

3 段ヒートシンクに対する熱回路網解析と CFD の M/C 壁面温度の分布結果を図 2 に示す。CFD の結果を赤で、熱回路網解析の結果を青で示すが、M/C 壁面最大温度の差は 1.2°C となった。同様に 2 段、5 段の場合について、差は 1.1°C、0.8°C であり、この差は §3.2 の Pareto 最適解における M/C 壁面最大温度の最大値 90°C から最小値 60°C の範囲である 30°C で規格化して 4% 以内に収まる。

3.2 多目的最適化結果

今回得られた Pareto 最適解を図 3 に示す。各目的関数を軸として 3 次元で示し、各設計変数の値の大小を色の濃淡で(a)-(f)に表した。ただし入口 Re 数は空気質量流量に変更して示した。Pareto 最適解は目的関数の内 2 つの値が同時に小さくなる場合には 3 つ目の目的関数の値が大きくなるというトレードオフの関係を示している。図 3(e)で、空気質量流量の範囲は 0.2~1.2kg/s となっているが、表 1 の設計変数から計算できる空気質量流量の範囲は約 0.01~1.6kg/s である。空気質量流量は少ないと温度の制約条件を超え、多いと圧力損失の制約条件を超えるため、空気質量流量の変動は小さくなっている。伝熱面積に関しては、小さいと温度の制約条件を超え、流路面積も小さくなるため圧力の制約条件も超えるが、重量に関しては制約がないため、広い場合には問題がない。図 3(c), (d)のフィン厚さとフィン数は値の大小が似通ったカラーコンターを示しており、幅方向に伝熱面積を拡大することで M/C 壁面最大温度が低くなっている。ここで、図 3(b)-(e)の圧力損失を 10~15kPa の範囲のみで見ると、フィン厚さ、フィン間隔、空気質量流量をほぼ変えることなく、図 3(d)のフィン数の大小で M/C 壁面最大温度が約 30°C 変動しており、ヒートシンクの幅方向拡大による伝熱面積の増加が、最適解の結果に大きく寄与している。逆に図 3(f)のヒートシンク段数のカラーコンターは、M/C 壁面最大温度と圧力損失に対しては 1~2 段が多く分布しているため、M/C 壁面最大温度と圧力損失への寄与は小さく、重量の大小のみに寄与している。以上の結果より、今回の冷却条件下では、ヒートシンク段数は M/C 壁面最大温度と圧力損失への寄与が小さい。

なお、Pareto 最適解の各目的関数について、応答曲面による推定値と熱回路網法解析による値を比較したところ、Pareto 最適解の各目的関数の範囲で規格化して M/C 壁面最大温度は 12.4%、圧力損失は 0.08%、重量で 1.3% の平均誤差であった。M/C 壁面最大温度の誤差が大きい原因は、他の目的関数と比較して応答曲面上での温度変化が大きいためであり、初期計算点を増やす必要がある。

4. 結論

電動化航空機用 M/C 空冷多段ヒートシンクについて、設計変数であるフィン高さ、厚さ、間隔と、フィン数、ヒートシンク段数、入口 Re 数の 6 つを入力値として、M/C 壁面最大温度、圧力損失、ヒートシンク重量の 3 つの目的関数に対して多目的最適化を行った。M/C 壁面温度分布を CFD と熱回路網法解析の結果で検証を行い、差が小さいことを確認した。また、Pareto 最適解を算出し、設計変数に対する目的関数の応答を示した。今回の冷却条件下では、形状最適化に対して、幅方向拡大の寄与が大きく、段数の寄与は小さい。

参考文献

- (1) 森岡典子, 他 2 名, IHI 技報, Vol.53, No.4 (2013), pp.38-44.
- (2) Murata, A. et al., *Proc. of ASME Turbo Expo*, Seoul, Korea, June13-17, 2016, GT2016-56578(11 pages).

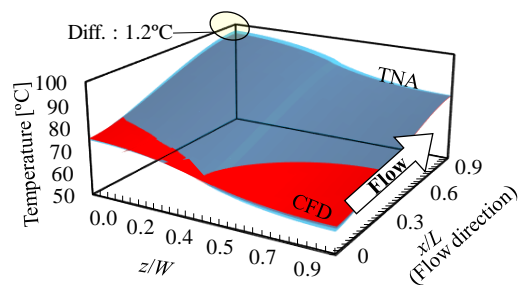


Fig. 2 Temp. distribution of M/C wall temperature of CFD and TNA.

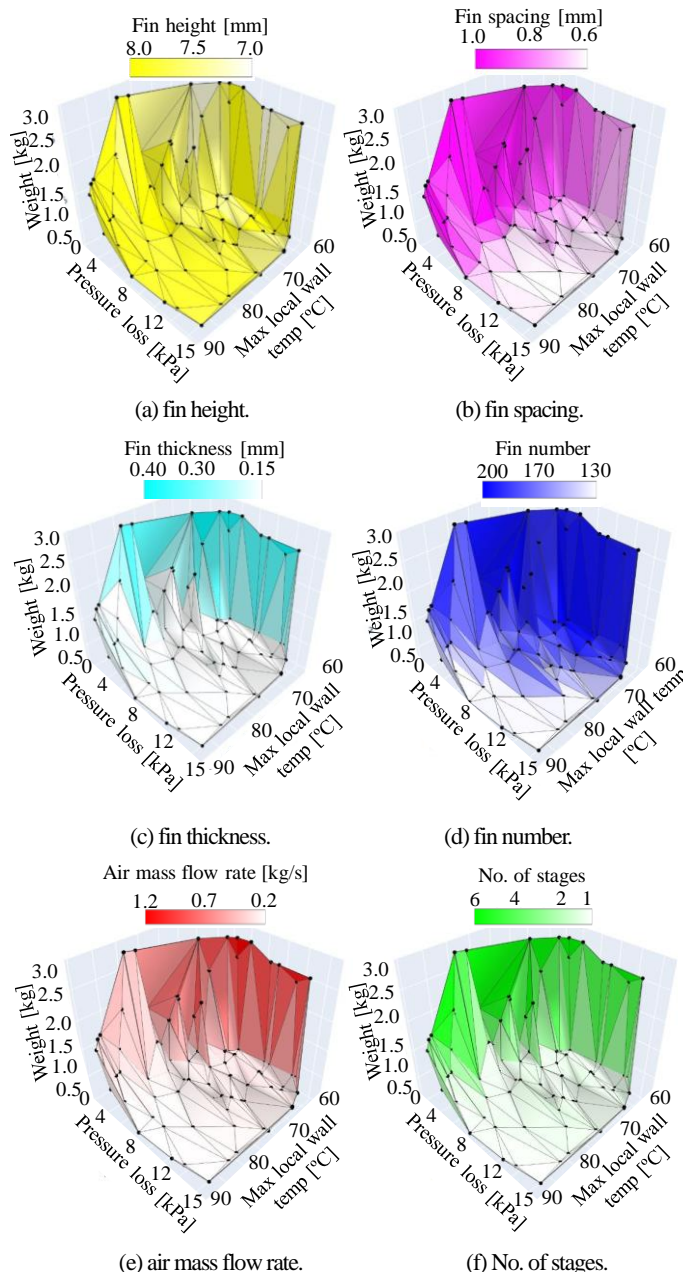


Fig. 3 Pareto optimal solutions.

- (3) Kamiyama, A. et al., *Proc. of Int. Gas Turbine Congress*, Tokyo, Japan, Nov. 17-22, 2019, IGTC-0069(5 pages), accepted.
- (4) Michael Stein, *TECHNOMETRICS*, Vol. 29, No. 2, pp.143-151.
- (5) 下山幸治, 他 2 名, 進化計算学会論文誌, Vol.53, No.3 (2012), pp.173-184.
- (6) You Li, et al., *Int. J. of Aerospace Eng.*, Vol.2018, 8302324, (23pages).