

熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法の構築

村田 顕彦*1 戸塚 陸美*2

Development of an Optimal Design Method Using Response Surface Methodology for Thermal Fluid Analysis

Akihiko Murata and Mutsumi Totsuka

近年、製品の省エネルギー化や高性能化に伴う、熱流体解析を活用した最適設計に対するニーズが高まっている。一方、3次元の複雑形状を対象とする熱流体解析は1回あたりの計算負荷が大きく、さらに、設計変数が多い最適設計では解析回数も増大するため計算コストが課題となる。そこで本研究では、熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法を構築した。具体的には、ふく射空調パネルを対象として寄与度分析による設計変数の絞り込みを行い、応答曲面モデルを比較・選定したうえで、遺伝的アルゴリズム（MOGA-II）による多目的最適化を実施した。その結果、熱交換量の低下を4 %に抑えつつ、吸熱部体積を34 %低減できる有望形状を得た。また、計算時間は約160時間から約70時間に短縮され、本手法の有効性が確認できた。

1 はじめに

近年の、省エネルギー化や製品高性能化への要求の高まりにより、県内企業から熱流体解析を活用した製品設計の高度化が求められている。特に、熱交換性能の向上や小型化など、複数の要求を同時に満たすために熱流体解析を活用した最適設計の重要性が高まっている。

一方、3次元の複雑形状を対象とする熱流体解析は1回あたりの計算負荷が大きく、さらに、設計変数が多い最適設計では多数の解析が必要となるため、計算コストの増大が課題となる。このため、解析精度を維持しつつ解析回数を削減できる効率的な最適設計手法が求められている。

そこで本研究では、熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法を構築した。具体的には、ふく射空調パネルを対象として、寄与度分析による設計変数の削減及び応答曲面モデルの比較・選定を行ったうえで、遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化を実施した。

2 研究方法

2-1 解析対象及び解析条件

解析対象に一部形状を簡略化したふく射空調パネルを用いた。解析モデルを図1に示す。本モデルは、複数の単一ユニットを並列配置した構造を有する。各単

一ユニットは、外枠等からなる構造部と、吸熱部で構成される。吸熱部は、中心に冷却水が流れる水管部と、

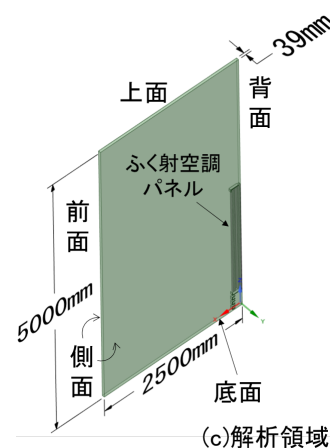
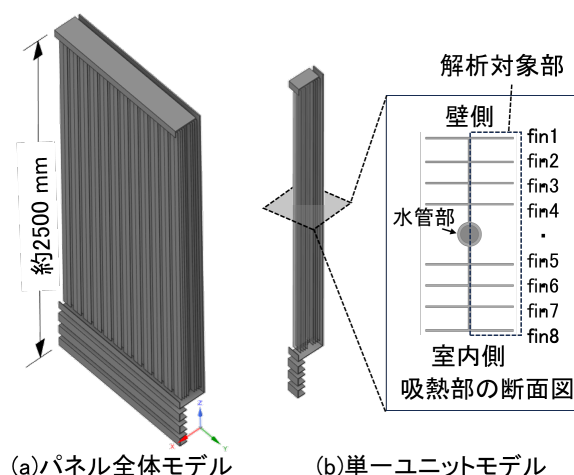


図1 ふく射空調パネル解析モデル

*1 機械電子研究所

*2 (株)エース・ウォーター

その前後に配置された板状部及びフィンから構成される。本研究では、解析負荷低減のため単一ユニットの半分を用い、その周囲の空気を含めて解析領域を設定した（図1(c)）。境界条件として、側面（単一ユニットの中心面及び隣接する単一ユニットとの中央面）には対称境界条件を適用し、前面及び上面は開放境界とした。また、背面、底面及び水管部内面は静止壁として熱伝達境界条件を設定した。主な解析条件を表1に示す。

本研究では、各フィンの長さを独立した設計変数とした。初期状態では全8枚のフィンに対応して8個の設計変数を設定し、後述する寄与度分析により最適化対象とする設計変数の絞り込みを行った。目的関数は、熱交換量の最大化及び吸熱部体積の最小化の2つとし、多目的最適化を実施した。

表1 主な解析条件

乱流モデル		SST k- ω
ふく射モデル		Surface to Surface
境界条件	前面, 上面	開放境界 (ゲージ圧0 Pa, 外部温度27 °C)
	側面	対称境界
	背面	熱伝達係数0.021 W/(m ² ・K), 外部温度27 °C
	底面	熱伝達係数0.022 W/(m ² ・K), 外部温度27 °C
	水管部 内面	熱伝達係数5000 W/(m ² ・K), 冷却水温度10 °C

2-2 最適設計手法

最適設計フローを図2に示す。初期状態は設計変数が8個と多く、解析コスト増大が懸念されたため、64ケースの熱流体解析結果を用いた寄与度分析を実施した。寄与度分析には平滑化スプライン分散分析（略語：SS-ANOVA）を用いた。次に、応答曲面の構築に用いるサンプリング手法に均等ラテン超方格法を採用した。サンプリング点は、各設計変数の最小値及び最大値を用いた多元配置による32点、均等ラテン超方格法による133点、及び応答曲面検証用の10点の合計175点とした。得られたサンプリング点に対して熱流体解析を実施し、応答曲面を構築した。応答曲面モデルには

複数手法を適用し、精度評価により最適なモデルを選定した。その後、多目的遺伝的アルゴリズム（Multi-Objective Genetic Algorithm（略語：MOGA））¹⁾ の考え方に基づくMOGA-IIを用いて多目的最適化を実施した。

熱流体解析にはANSYS Fluent 2022 R1、最適化にはmodeFRONTIER 2024 R2を用いた。両者を連携させて自動解析及び最適化を実施した。計算には、Intel Xeon W-2255 @ 3.70 GHz、メモリ64 GBを搭載する解析用ワークステーションを用いた。



図2 応答曲面法を用いた最適設計フロー

3 結果と考察

3-1 寄与度分析結果

初期状態では、単一ユニット内の8枚のフィン長さを、独立した設計変数として設定した。設計変数が多い場合は最適化に必要な解析回数が増加し、計算コスト増大の要因となるため、寄与度分析による設計変数削減を実施した。64ケースの熱流体解析結果を用いたSS-ANOVAによる寄与度分析を行い、各設計変数の熱交換量に対する寄与度を評価した結果を図3に示す。体積については各フィン長さが同等に影響するため、熱交換量に対する寄与度に着目し、累積寄与度が8割以上となるよう設計変数を選定した。その結果、fin4～8を最適化対象に採用し、寄与度の低い壁側のfin1～3を削減対象とした。これにより、設計変数は8個から5個に削減され、以降の応答曲面構築及び多目的最適化における解析コストを低減できた。

3-2 応答曲面モデルの精度評価

熱交換量及び吸熱部体積について、それぞれ12種の応答曲面モデルを用いて予測モデルを構築し、検証用サンプリング点により精度評価を行った。主要な結果を表2に示す。評価指標には平均相対誤差及び決定係数を用いた。その結果、熱交換量では異方性クリギング（略語：AKR）、SS-ANOVA、動径基底関数（略語：RBF）の順に高い精度を示し、吸熱部体積ではSS-ANOVA、多項式特異値分解法（略語：SVD）、ステップワイズ回帰（略語：STEP）の順に高い精度を示した。最も高い予測精度を示した熱交換量のAKR及び吸熱部体積のSS-ANOVAを以降の多目的最適化に採用した。

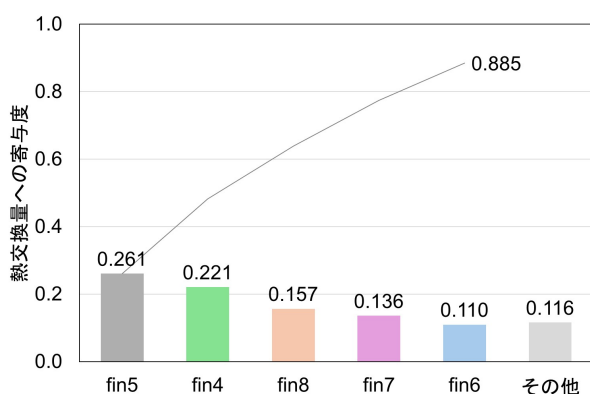


図3 熱交換量に対する各設計変数の寄与度分析結果

表2 主要応答曲面モデルの精度比較結果

(a) 熱交換量

モデル	平均相対誤差	決定係数
AKR	0.0117	0.964
SS-ANOVA	0.0120	0.960
RBF	0.0172	0.908

(b) 吸熱部体積

モデル	平均相対誤差	決定係数
SS-ANOVA	9.27×10^{-8}	1
SVD	1.37×10^{-7}	1
STEP	1.39×10^{-7}	1

3-3 多目的最適化結果

3-2で選定した応答曲面モデルを用いて、遺伝的アルゴリズムMOGA-IIによる多目的最適化を実施した。パレート最適解分布を図4に示す。最適化の結果、熱交換量と吸熱部体積の間にトレードオフの関係が確認

され、体積を削減するほど熱交換量が低下する傾向が示された。また、現行設計点に対して、体積と熱交換量の異なる複数のパレート最適解が得られた。なお、今回の検討条件において、応答曲面法を適用しない場合は約400ケースの熱流体解析が必要であるのに対し、本手法では応答曲面構築及び検証のための解析を含めて175ケースに削減できた。これにより、解析時間は約160時間から約70時間に短縮できた。得られたパレート最適解から熱交換量が最大となるものを選定し、熱流体解析による再計算を実施した。現行形状と最適形状の断面比較を図5に、性能比較結果を表3に示す。その結果、熱交換量は約4%低下したものの、吸熱部体積を約34%低減できることを確認した。最適形状では寄与度が低かったfin1～3を0としたうえで、fin4～6は長さが維持され、fin7はほぼ0、fin8は中程度の長さとなった。特に、水管部に近いfin4～6の長さが維持される傾向を確認できた。一方で、最も外側のfin8は、水管部から離れているものの、ふく射の影響が大きいため一定の長さが維持されたものと考えられる。

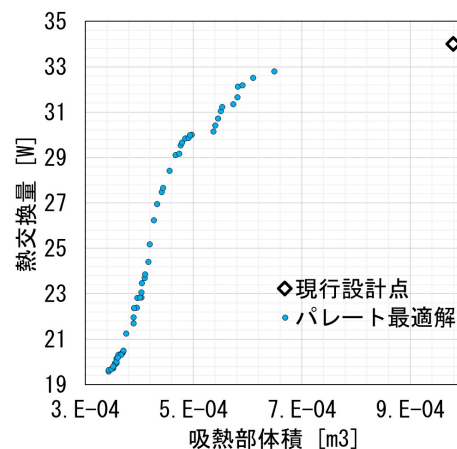
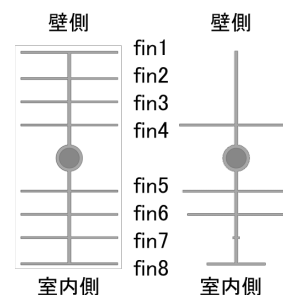


図4 パレート最適解分布



(a)現行形状 (b)最適形状

図5 現行形状と最適形状の断面比較

表3 現行形状と最適形状の性能比較

	現行形状	最適形状	変化率
熱交換量 [W]	34.02	32.67	-4 %
吸熱部体積 [m ³]	9.79×10^{-4}	6.49×10^{-4}	-34 %

4 まとめ

本研究では、熱流体解析における応答曲面法を用いた最適設計手法を構築した。ふく射空調パネルを対象として、寄与度分析により設計変数を8個から5個に削減するとともに、応答曲面モデルの比較・選定を行い、熱交換量にはAKRを、吸熱部体積にはSS-ANOVAを採用した。さらに、遺伝的アルゴリズム（MOGA-II）を用いた多目的最適化を実施し、熱交換量と吸熱部体積のパレート最適解分布を取得した。その結果、熱交換量の低下を約4に抑えつつ、吸熱部体積を約34 %低減できる有望形状を得た。加えて、本形状の適用により製品全体として約21 %の重量低減が見込まれることが分かった。また、応答曲面法を活用することで、解析時間は約160時間から約70時間に短縮できることを確認した。今後は、本研究で構築した最適設計手法を他の製品設計課題にも適用し、技術支援への活用を図っていきたい。

5 参考文献

- 1) Carlos M. Fonseca, Peter J. Fleming: Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, pp. 416-423 (1993)