

マイクロ熱交換器の進化的多目的最適化

Evolutionary Multi-Objective Optimization for Micro Heat Exchanger

○ 岡部達哉 (本田技術研究所), Markus Olhofer, 金耀初, Bernhard Sendhoff (HRI-EU)

Tatsuya Okabe*, Markus Olhofer**, Yaochu Jin** and Bernhard Sendhoff**

*Honda R&D Co., LTD., 1-1-1 Chuo, Wako-shi, Saitama, 351-0193, Japan

**Honda Research Institute Europe GmbH, Carl-Legien-Strasse 30, 63073 Offenbach/M, Germany

Recently, evolutionary multi-objective optimization (EMOO) has gathered much attention and has reported a lot of success to optimization of real-world problems. In this paper, we applied EMOO to micro heat exchanger (mHEX) optimization. Although mHEX is an important device into the field of micro device and fuel cell, it is seldom to be optimized due to the multidisciplinary phenomenon i.e. heat transfer, fluid dynamics and chemical reaction. We will report the preliminary results on mHEX optimization and discuss the problem of shape representation.

1. 緒論

最近、進化的アルゴリズムの分野において、実問題の多目的最適化の報告が増えている。本論文では、より複雑で困難なマイクロ熱交換器 (mHEX) の多目的最適化に取り組んだ。mHEX の多目的最適化を行うには熱伝導、流体、化学反応 (多原理) などを同時に扱わなければならない為に、非常に最適化が困難である。その為に、単純な単目的最適化を除いて、多目的最適化に使われた事例はほとんどない¹⁾。その mHEX の多目的最適化に取り組んだので、その結果を報告する。また、形状表記に起因する問題もあわせて議論する。

2. 進化的多目的最適化

進化的アルゴリズムは、自然界の進化を模倣することによって最適解を得ようとする方法である。計算の大まかな流れは下記に示すとおりである。

1. 初期個体 (親個体) の生成と評価
2. 交叉、突然変異による子個体の生成と評価
3. 適者生存の原理による次世代親個体の選択
4. 終了条件を満足すれば終了、それ以外は2へ

まず、初期個体群がランダムに作られる。ここで、1つの個体が1つの mHEX の形状を示す。その個体群が流体ソルバー等によって評価され、その値 (例えば圧力損失等) が個体の適合度として個体内に蓄えられる。それらの個体群が親個体となって子個体を作成する。子個体の作成には、交叉や突然変異等が使われる。その後、同様に子個体の適合度が計算される。適者生存の原理によって選択が行われ、選択された個体が次世代の親個体となる。ある終了条件が満たされるまでこれらが繰り返されることによって最適解が得られる。

進化的アルゴリズムは、個体群がベースとなって最適化を行うために、多目的最適化のような複数の解 (パレート解・トレードオフ解) を探すのに非常に適切な最適化手法である。多目的最適化とは、複数の目的 (目的関数) を同時に最適なものにする問題で、一般的にはそれぞれの目的関数が相反するので1つの解だけを得るのではなく、パレート解という複数解を得ることが目的となる。ここでは、進化的多目的最適化手法として、Debらが提案した NSGA-II²⁾ および Jinらが提案した DWA³⁾ を使った。詳細は各論文^{2,3)} を参照されたい。

3. マイクロ熱交換器

多目的最適化に用いたマイクロ熱交換器の概略図を図1に示す。マイクロ熱交換器は、Hot Gas Channel, Cold Gas Channel および Separator と呼ばれる3つの部分からなり、Hot Gas Channel を流れる気体の熱エネルギーを Cold Gas Channel を流れる気体に Separator を通じて交換させるもの

である。本論文では、下記の仮定を用いた。(1) mHEX の水力直径: $100\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ (2) Knudsen 数: 0.001 以下 (3) Transport Processes: 定常 (4) Thermo-Physical Properties: 温度依存 (5) 層流、非圧縮 (6) Thermal Radiation: なし。(7) 流入量一定 (Hot, Cold Gas 共に)

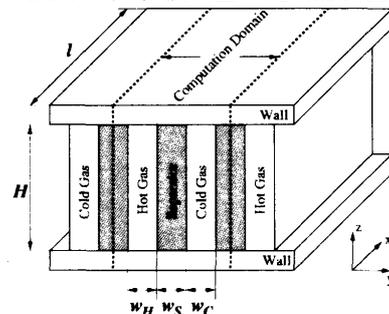


Figure 1. A schematic model of the micro heat exchanger. mHEX 内部における支配方程式は下記の通りである。

$$\text{Continuity: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0. \quad (1)$$

$$\text{Momentum: } \rho v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\text{ここで、} \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \left(\beta - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (3)$$

$$\text{Energy: } \rho v_j \frac{\partial h}{\partial x_i} = v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \phi + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\text{ここで、} \phi = \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中使用した各変数は、 x : Coordinate, h : Heat transfer coefficient, k : Thermal conductivity, v : Velocity, β : Bulk viscosity, g : Acceleration due to gravity, μ : Dynamic viscosity, T : Temperature and p : Pressure である。

実際に mHEX を評価するのに、市販ソルバーである CFDRC 社の CFD-ACE を用いて評価を行った。

4. 最適化環境

4. 1 市販ソルバーと最適化アルゴリズムの結合

市販ソルバーを用いる際に問題となるのが、最適化アルゴリズムとの結合方法である。最適化では多くの個体を評価する為にモデル作成、ソルバーでの評価、適合度計算など自動

的に行う必要がある。そこで、最適化アルゴリズム内に CFD-ACE を制御するコードを作成し、制御することとした¹⁾。

4. 2 設計変数 (形状表記)

NURBS 曲線を用いて、mHEX の形状を表記することとした。5つの制御点を使い Hot Gas Channel 側 Separator 形状を NURBS で表記する。この制御点の座標値が実際に最適化される設計変数である。この形状から、法線方向の厚みを一定として Cold Gas Channel 側 Separator 形状を作成する。各 Channel の断面積は一定として、最終的にソルバーで評価する mHEX モデルが作られる。格子数は常に一定とし、最も格子のひずみが少なくなるように格子を自動的に作成した。

4. 3 目的関数

最適化の目的として、熱交換率最大化および各 Channel の圧力損失最小化とした。2目的最適化とする為に、各 Channel の圧力損失の和を実際の目的関数とした。また、2目的とも最小化問題にするため、熱交換率に (-1) をかけておいた。

4. 4 実行不可能解およびソルバーエラーの取り扱い

最適化アルゴリズムで子個体が作られる際に、物理的にモデルが作成可能であるかどうかは考慮されない。そこで、子個体を評価する前にモデルをチェックし、物理的に作成不可能であった場合、最低の適合度を割り当て、そのような個体に対してソルバーで評価することのないようにした。また、ソルバーの収束状態が極端に悪い個体に関しては、計算を強制的に終了させ、最低の適合度を割り当てるようにした。これらの個体は、選択の過程において淘汰されることとなる。

5. 最適化結果

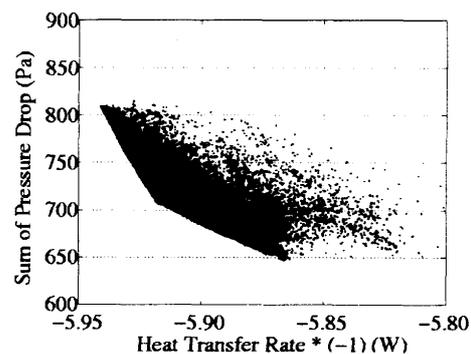
使用した NSGA-II²⁾ および DWA³⁾ のパラメータを表 1 に示す。図 2 に得られた解を示す。Fitness Landscape を見るために、評価をした全ての個体を示してある。図 2 (a) の方が (b) よりも個体が多いが、これは DWA が多くの実行不可能解を作ったことが原因である。NSGA-II と DWA から得られたパレート解を比較すると、DWA の解全てが NSGA-II の解によって支配されていることが分かる。よって、この問題に関しては、NSGA-II の方が DWA より性能が良いことが分かった。

Table1. Parameters in NSGA-II and DWA.

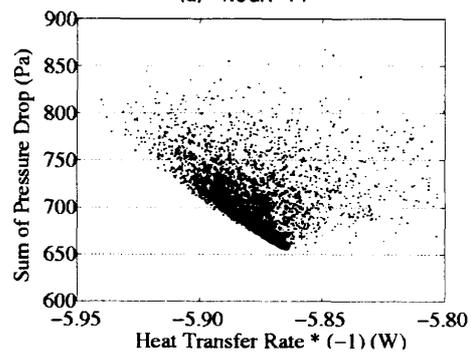
NSGA-II		DWA	
Population size	100	Parents	15
Max. iterations	500	Offspring	100
Coding	Gray	Max. iterations	500
Crossover point	1	Recombination	Used
Crossover rate	0.9	Initial step size	0~0.001
Mutation rate	0.05	Lower bound	Used
Bits / a design parameter	20	Weight change (t:generation)	
		$w_1 = \sin(\pi / 100), w_2 = 1 - w_1$	

6. 議論

図 2 (a) および (b) のパレート解上の形状を調べてみると、1つのアルゴリズムが得たパレート解は、全てが同一の基本形状に基づいたものであった。例えば、1周期や 0.5 周期の正弦曲線がこの基本形状にあたる (図 3 参照)。ここで、前者を mode 2 モデル、後者を mode 1 モデルと呼ぶ。ここで疑問となるのが、なぜ全ての解が同一 mode モデルであったかである。この答えは、選んだ形状表記では mode を変えるのが非常に困難な為にある。Mode 1 モデルに対応する 5 制御点の座標値と mode 2 モデルの座標値を比べると明らかであるが、最適化アルゴリズムが mode を変えるには、全ての座標値を劇的にかつ適切に変更することが必要となる。明らかにこのような変更は最適化アルゴリズムには非常に困難である。このことは、形状表現を適切に選ぶことがいかに重要な

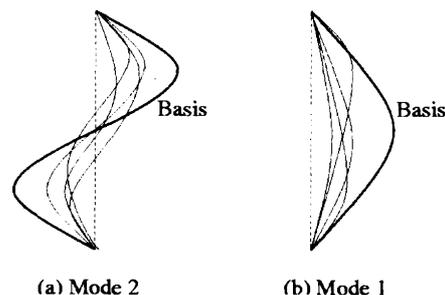


(a) NSGA-II



(b) DWA

Figure 2. Final results by NSGA-II and DWA.



(a) Mode 2 (b) Mode 1

Figure 3. Basis of shapes.

を示すものである。

7. 結論

マイクロ熱交換器の多目的最適化を行った。多目的最適化手法として NSGA-II と DWA を用いた。得られたパレート解を比較すると、NSGA-II の性能の方が DWA の性能よりも良かった。得られた形状は、同一の基本形状に基づいたものであったが、これは NURBS を用いた場合、最適化では mode (図 3 参照) の変更が非常に困難なことに起因し、形状表記に細心の注意を払う必要があることが分かった。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、Prof. Dr. E. Koerner, Dipl. A. Richter, Dr. K. Foli および有馬敏幸氏からご指導を頂いた。この場を借りて謝意を表したい。

引用文献

- (1) Okabe, T. et al.: Comparative Studies on Micro Heat Exchanger Optimisation, *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2003*, 647-654.
- (2) Deb, K. et al.: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithms: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 2002, 182-197.
- (3) Jin, Y. et al.: Adapting Weighted Aggregation for Multiobjective Evolution Strategies, *Proc. Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, 2001, 96-110.