

車両用熱交換器における最適形状探索手法に関する検討

島本 憲夫

A study on search method of optimal solution of shape condition for vehicle heat exchanger

Norio SHIMAMOTO

Abstract

The performance of a radiator used as a heat exchanger of an automobile is evaluated by the amount of heat radiation and the pressure loss of the passing cooling air. These depend on the thickness of the heat exchanger housing, the cooling tube spacing, the shape of the cooling fins and the number of pitches. In this paper, we try to search the optimal combination of dimensions and shape for the best performance of heat exchanger by using the optimal solution search algorithm using the measured data obtained in the wind tunnel experiments.

Keywords : heat exchanger, radiator, pressure loss, fin pitch, tube pitch, Genetic Algorithms, optimal geometry condition

1. 緒言

1.1 研究の背景

自動車などの車両エンジンの冷却では、車両の走行中に前面から取り込まれた空気が熱交換器の表面を流れて通過することで、熱交換器の中を流れる高温となった循環液体を冷却する方式が多用されている。熱交換器は、循環液体が流れる管路と、その管路表面に設置されたフィンによって構成されている。この管路の配列方法や、設置されたフィンの個数や形状などによって、放熱量の大きさと、熱交換器を通過する空気の流れやすさ(圧力損失の大きさ)が異なってくるため、これらが熱交換器性能を評価するための指標となる。

これまで実施してきた継続研究の中では、管路配置やフィン形状などの仕様条件が異なる熱交換器について、風洞実験装置を用いて擬似的な熱交換の環境をつくり、循環液体と空冷用空気の温度や圧力、風速などのデータの測定を行い、熱交換器の放熱量と空気側の圧力損失を算定して、熱交換性能の実験的な分析を行ってきた。この性能測定実験を通して、熱交換器の性能を左右する二つの要件が最適となるような、熱交換器を構成する形状条件を見つけ出すことを目指している。これまでの結果として、文献(1)にて、放熱量と圧力損失はべき乗関数の相関関係にあることを示した。また文献(2)では、管体の厚さ、チューブ(管路)の間隔、フィンのピッチなどの幾何学的な寸法から圧力損失を算定する近似式を導出した。

1.2 本研究の目的

車両用熱交換器の性能特性は、熱交換器からの放熱量と熱交換器を通過する空気の圧力損失によって示されるが、これらは、熱交換器の管体の厚さ、配管の配置、フィンの個数や形状といった条件の組み合わせによって影響を受

ける。従って、これらの条件がどのような組み合わせを取れば、高い熱交換性能を発揮できるかを調べることは、熱交換器を設計する上での有益な情報となる。

本研究では、これまでの継続研究で得られた知見を用いて、熱交換器が高い性能特性を示すようにするための、形状寸法の最適な組み合わせを探索する手法について検討する。組み合わせ最適解を探索する手法として、本稿では遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms : 以降ではGAと呼ぶ)の適用を試みる。GAは、解く問題に関係するパラメタを文字列として表現し、その配列パターンを変化させながら、目標とする評価値を最適にするパラメタの組み合わせを探索する確率的な最適化手法の一つである。GAによる手法では、考慮すべきパラメタの追加や削除は、問題の記述に使用する文字列の追加と削除によって容易に行うことが可能である。今後行っていく検討の中で、熱交換器の最適性能を評価するために新たなパラメタを追加する必要が生じて、GAによる手法であれば柔軟に対応できるメリットがある。

本稿では、車両用熱交換器としてラジエータを対象とし、高い性能特性を実現するための形状寸法の最適な組み合わせ解の探索法について、GAを適用した実装方法を提案し、その実現可能性についての検討を報告する。

1.3 本稿で用いる主な記号

(記号)

Q : 放熱量 [kW] (換算放熱量も同じ)

Δp : 空気側圧力損失 [Pa]

U : 空気の風速 [m/s]

ρ : 空気の密度 [kg/m^3]

μ : 空気の粘性係数 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

CL : コア厚(熱交換器の厚さ) [m], [mm]

TP : チューブピッチ(冷却用管の間の幅) [m], [mm]

FP : フィンピッチ [m], [mm]

- FS* : フィンの折り返し形状のタイプ (3種類)
R : 半丸型 (Round type)
S : 四角型 (Square type)
T : 三角型 (Triangle type)
LP : ルーバピッチ [*m*], [*mm*]
 θ : ルーバ角 [*deg*]
L θ : ルーバ迎長 [*m*], [*mm*] (= $LP \times \tan\theta$)
D_H : 等価直径 [*m*], [*mm*]
 λ : 管摩擦係数 [-]

本稿で用いる記号は、文献(1)および文献(2)と対応するようにしている。

2. 最適解探索手法

2.1 GAによる最適解探索の概要

GAを適用した最適解探索の方法についての概要と手順について説明する。

[GAによる最適解探索の手順]

①文字列によるコーディング(GA Coding)

解に寄与するパラメタを一つの文字列として記述する。この文字列を*N*個作成して、それを1つの世代とする。探索を開始する前の初期段階では、各文字列の配列パターンはランダムに設定する。

②新しい配列パターンを持った文字列の生成

次の方法によって、新たな配列パターンをもった文字列を生成する。

(i)交叉(Cross Over)

*N*個の文字列の中から確率的に2個の文字列を選択する。選択された2個の文字列について、互いに文字列の一部の入れ替えを行って新たな配列パターンを持った文字列を2個生成する。この交叉は同一世代で所定の回数だけ実施する。

(ii)突然変異(Mutation)

*N*個の文字列の中から確率的に1個の文字列を選択する。その文字列の中の一部の文字を確率的に他の文字に書き換える。この変異は同一世代で所定の回数だけ実行する。

③文字列の評価(Estimation)

最適にしたい量を評価関数(本問題では、放熱量と圧力損失の関係式)として定式化する。各文字列に記載されたパラメタを用いて、定義した評価関数の値を計算し、その値をその文字列に対する評価値とする。一つの世代の中で、全ての文字列の評価値を計算する。

④淘汰(Selection)

一つの世代の各文字列には評価値がつけられている。この評価値に基づいて順序付けを行う。その中で、評価値の高い文字列を複数個複製し、評価値の低い文字列を削除していく。文字列の複製と削除は、世代の文字列の個数であ

る*N*を保つようにする。この操作により、次の世代では高い評価値を持った文字列が数多く残ることになる。

⑤世代交代

操作②から操作④を所定の回数(世代数)だけ繰り返し、最終的に残った世代の中で、最も評価値の高い文字列を解として採用する。

2.2 GAによる最適解探索の手法の実装

(1) GAコーディング

GAでは、関係するパラメタを文字列の形で記述する。本問題の文字列のパラメタとしては、現状、*CL*, *TP*, *FP*, *FS*, *LP*, *L θ* , *U* が考えられる。パラメタの番号を*i*で識別することとして、GAの文字列は、この識別番号の順番に記述して文字列を構成する。識別番号*i*のパラメタが取り得る値の候補数を*NC_i*とする。パラメタが取り得る値の候補の番号を*j*で表す。各パラメタの設定例を表2.2.1に示す。但し、長さのパラメタについては、*mm*単位で表記している。

表2.2.1 パラメタの設定例

<i>i</i>	パラメタ	候補値	候補数 <i>NC_i</i>
1	<i>CL(j)</i>	10~60 1.0刻み	51
2	<i>TP(j)</i>	6~10 0.1刻み	41
3	<i>FP(j)</i>	2~10 0.2刻み	41
4	<i>FS(j)</i>	1(=R), 2(=S), 3(=T)	3
5	<i>LP(j)</i>	1.0	1
6	<i>Lθ(j)</i>	0.24	1
7	<i>U(j)</i>	1~10 1刻み	11

例えば、*i*=1は*CL*(コア厚)を表し、*NC₁*=51で、*CL(j)*: *j*=1~51の候補があり、*CL*(1)=10, *CL*(2)=11, *CL*(3)=12, ..., *CL*(51)=60 のようになる。以下、各パラメタについて同様である。

GAの文字列は、各パラメタの何番目の候補値かを示す番号(候補番号*j*の値)を、*i*=1から7までについて順番に列記したものとす。従って、この場合の文字列長さは7である。文字列を次のGENEとして表すと、

$$\text{GENE}=\{1\sim 51, 1\sim 41, 1\sim 41, 1\sim 3, 1, 1, 1\sim 11\}$$

例えば、文字列GENE={30, 20, 10, 1, 1, 1, 5}は、*CL*=29.0[mm], *TP*=7.9[mm], *FP*=5.8[mm], *FS*=R(半丸型), *LP*=1.0[mm], *L θ* =0.24[mm], *U*=5[m/s]を表すことになる。

初期世代として、配列パターン(各パラメタの候補番号)をランダムに設定した文字列GENEを*N*個つくり、以降、交叉・変異のGA操作により新たな配列のパターンを持った文字列GENEを生成していく。

(2) 評価関数

ラジエータの性能を示す指標は、放熱量 Q と圧力損失 Δp であり、放熱量が大きく、かつ、圧力損失が小さい方が良い。従って、最適なパラメタの組み合わせ解の探索では、放熱量と圧力損失の双方の要求を満たすように評価関数を定式化する必要がある。

これまでの継続研究を通して、ラジエータの性能測定実験で得られた測定データの分析から、放熱量 Q と圧力損失 Δp の関係が、 $Q \propto \Delta p^{0.44}$ であることを文献(1)にて報告した。また文献(2)では、ラジエータを通過する空気の圧力損失について、ダルシーワイスバッハの式に基づく管路流れの圧力損失とみなすことで、 CL 、 TP 、 FP などの形状寸法を用いた圧力損失の近似式を導出した。本問題での評価関数を定式化するにあたり、これらの結果を利用する。

① 圧力損失の算定

ラジエータでは、チューブ表面に設置されたフィンの隙間を空気が通過することになる。文献(2)では、このフィンの隙間の流れを、管摩擦を伴う非円形断面の管路流れの圧力損失の問題としてダルシーワイスバッハの式に基づき近似式を導出した。

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{CL}{D_H} \cdot \frac{\rho U^2}{2} \tag{2.2.1}$$

管摩擦係数 λ は、

$$\lambda = 2K \cdot \left(\frac{TP}{FP}\right)^\beta \cdot \left(\frac{\rho \cdot U \cdot D_H}{\mu}\right)^{\beta-2} \tag{2.2.2}$$

であり、測定データから算定した、 $K=1.90$ と $\beta=1.53$ を代入すると、管摩擦係数の近似式は次のように得られる。

$$\lambda = 3.80 \cdot \{Re(D_H)\}^{-0.47} \cdot \left(\frac{TP}{FP}\right)^{1.53} \tag{2.2.3}$$

性能測定実験で使用した実験用サンプルのラジエータでは、フィンの折り返し形状として、「半丸型」、「四角型」、「三角型」の三つのタイプがあり、各形状で流路の断面形状が異なる。それぞれの等価直径 D_H は次の計算式による。

(i) 半丸型

$$D_H = \frac{2 \cdot FP \cdot TP}{\pi w + FP + 2\sqrt{(TP-w)^2 + (FP/2-w)^2}} \tag{2.2.4}$$

$(0 \leq w \leq FP/2)$

この式で、 $w=0$ では三角形となる。半丸の場合は、 $w=FP/4$ とする。

(ii) 四角型

$$D_H = \frac{2 \cdot FP \cdot TP}{FP + 2\sqrt{TP^2 + (FP/2 - b)^2}} \tag{2.2.5}$$

$(0 \leq b \leq FP/2)$

これらの関係式を用いて、文字列GENEで指定される CL, TP, FP, U の各値から、圧力損失 Δp を計算する。

② 放熱量的見積もり

放熱量と圧力損失との関係は、文献(1)より次の関係がある。

$$Q \propto \Delta p^{0.44} \tag{2.2.6}$$

これにより、前項で算出した圧力損失 Δp により放熱量 Q の大きさを見積もる。

③ 評価関数

本問題の評価関数は、放熱量 Q に比例し、かつ、圧力損失 Δp に反比例するように定式化する。評価関数 E として次式のもの考える。

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{Q_{max}}\right) + B \cdot \left(\frac{\Delta p_{max}}{\Delta p}\right) \tag{2.2.7}$$

ここで A と B は定数であり、 Q_{max} および Δp_{max} は性能測定の実験で得られた値から次のように決める。測定実験の中で圧力損失の最大値は $\Delta p_{max}=827.6[Pa]$ であった。式(2.2.6)の関係から、 $Q_{max} \propto \Delta p_{max}^{0.44}$ であるから、

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{max}}\right)^{0.44} \tag{2.2.8}$$

として評価する。定数については $A=B=1$ としておく。一つの文字列に対してこの評価関数 E の値を計算し、その値が、その文字列の評価値となる。

(3) GA操作による淘汰

N 個の文字列GENEで構成された一つの世代の中で、交叉や突然変異による操作に基づき、新しい配列パターンを持った文字列を生成していく。その実施例を図2.2.1と図2.2.2に示す。

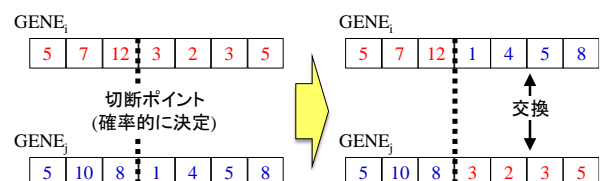


図2.2.1. 交叉の実施例

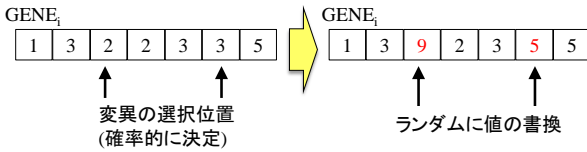


図2.2.2. 突然変異の実施例

新しく生成された文字列を含め、全ての文字列について評価値を計算し、その中で高い評価値を持つ文字列が多く残るように淘汰していく。文字列の複製と削除の個数を決定するルールとして、最も代表的なものにルーレットホイール方式がある。この方式を適用した淘汰は次のように行う。ある世代の中の文字列GENEが評価値 E_m だとする。次の世代にこの文字列GENEが複製できる個数 n_m は、次式で算定する。

$$n_m = N \times \frac{E_m}{\sum_{k=1}^N E_k} \tag{2.2.9}$$

この複製と削除の操作により次の世代を構成する。このような世代交代を所定回数だけ実施した後、最終世代の中で、最も評価値の高い文字列が示すパラメタの組み合わせを最終的な解（最適解）とする。

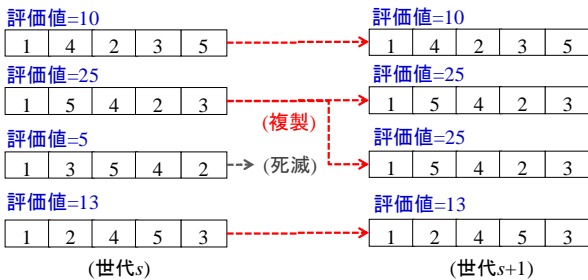


図2.2.3. 淘汰の実施例

3. 予備実験（最適解探索のシミュレーション）

前項で示したGAを適用した最適なパラメタの組み合わせ解の探索法の実現可能性を検証するために、予備実験として計算機シミュレーションを実施した。シミュレーションの主な条件は次のとおりである。

- 1世代での個体数：50
- 世代交代数：100
- 淘汰のルール：ルーレットホイール方式
- 交叉選択確率：0.5
- 突然変異発生確率：0.05

冷却空気の流速 $U=1.0[m/s]$ の条件とし、また圧力損失を計

算するために必要となる空気の物性値として、 $\rho=1.205[kg/m^3]$ 、 $\mu=1.822 \times 10^{-5}[Pa \cdot s]$ の値を用いた。

図3.1は、世代交代が進展する過程の中で、各世代での評価関数 E の最大値の推移を示したものである。このシミュレーションでは、 $CL=10.0[mm]$ 、 $TP=6.0[mm]$ 、 $FP=10.0[mm]$ という結果が得られた。計算結果についての検証は今後の課題である。

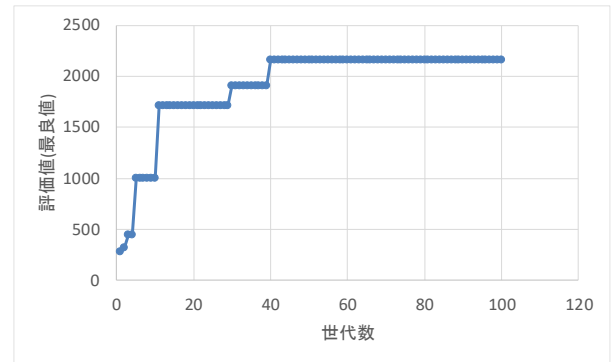


図3.1. シミュレーション例（評価値の変遷）

4. 結言

熱交換器の各形状寸法は、熱交換器の性能特性を左右するパラメタである。性能特性を最適にする形状寸法の組み合わせを求めるために、GAを適用した探索の実装方法を提案し、予備実験段階であるが、その実現可能性について示した。今後は、GA手法での個体数、世代交代数、交叉や変異の発生確率などのGA自体の評価を行うとともに、実際のラジエータ設計での提案手法の有効性について検討を行っていく必要がある。本稿では、コア厚やフィンピッチなどの代表的な形状寸法に限定したが、他にも性能に関わるものとして、フィン表面に設けられたルーバの影響についても考慮する必要がある。今後の課題とする。

謝辞

本稿で使用した熱交換器の各寸法などの形状条件や実験データに基づく結果は、大和ラヂエーター工業株式会社との共同研究の中で得られたものです。本共同研究の関係メンバーであります、大和ラヂエーター工業株式会社 中村正樹氏、永見昌之氏、橋本知明氏、榎 辰明氏、九州工業大学 徳田君代氏、清水文雄氏、島根県産業技術センター 福田健一氏、小笠原 聡氏に感謝いたします。北九州工業高等専門学校において本研究の立ち上げ時から実施に携わって頂いた 塚本 寛氏(前学校長)、中山博愛氏、小清水孝夫氏、中村繁樹氏、在学時に卒業研究および特別研究にて測定実験に携わって頂いた、榮田祐樹氏(現在 TOTO株式会社勤務)と前田一輝氏(現在 住友精密工業株式会社勤務)に感謝いたします。

参考文献

- (1) 島本憲夫, ”車両用熱交換器の性能評価実験”, 北九州工業高等専門学校研究報告, 第51号, pp.1-6, 2018.
- (2) 島本憲夫, ”車両用熱交換器の性能評価における圧力損失の近似”, 北九州工業高等専門学校研究報告, 第52号, pp.1-7, 2019.
- (3) 柴田裕樹, ”ラジエータおよびオイルクーラの性能向上に関する実験的研究”, 平成27年度特別研究論文, 2016.
- (4) 前田一輝, ”熱交換器の高付加価値に関する研究”, 平成28年度特別研究論文, 2017.
- (5) 日本機械学会編, ”伝熱工学資料 改訂第5版”, 日本機械学会, 2005.
- (6) D. E. Goldberg, ” Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning”, Adison Wesley Publishing Company, 1989.

(2019年11月5日 受理)