

## 領域分割型 MOGA による自動車エンジン排気マニホールド設計システム

金崎 雅博, 大林 茂 (東北大流体研), 中橋 和博(東北大工)

本研究では自動車エンジンのサイクル中で排気側の流れに注目し, 有害物質の除去を行う触媒反応の能力とエンジンの出力を増大させることを考える. 有害物質を取り除くための触媒が排気管の出口付近に取り付けられているが, 高温下の方がより触媒の効果があがるため, 排気は触媒までより高い温度を保つ必要がある. また, エンジンの出力を高めるためには, 排気は燃焼室から排気管にかけてスムーズに流れる必要がある. これらのことは実験から相反する諸元であることが予想されている. 以上のことから, 本研究では以前から開発を続けている自動的な自動車エンジン排気マニホールド設計システムに領域分割型多目的遺伝的アルゴリズム(DRMOGA)を適用し, 探索効率の向上を図った. この設計システムを用いて, 管の分岐位置, 径とその流路に沿った変化といった実際の設計に必要なパラメータを多く組み込んで, 有害物質除去能力とエンジン出力の最大化を目的とした排気マニホールドの形状最適化を行い, 両目的について良好な改善を見ることができた. また, 従来の MOGA を利用した設計システムによる最適化結果との比較も行い, DRMOGA を利用した設計が解の多様性において優れていることを確認した.

## Exhaust Manifold Design System for a Car Engine Using Divided Range MOGA

Masahiro Kanazaki (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

Shigeru Obayashi (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

Kazuhiro Nakahashi (Dept. of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku University)

**Abstract.** Multiobjective design optimization system of exhaust manifold shapes for a car engine has been developed using Divided Range Multiobjective Genetic Algorithm (DRMOGA) to obtain more engine power as well as to achieve less environmental impact. Although the present design problem was highly nonlinear, the exhaust manifold was successfully designed to improve both objectives. The comparison of the results obtained by MOGA and DRMOGA was performed and DRMOGA was confirmed to find better solutions than MOGA.

*Key words: Exhaust System, Multiobjective Optimization, DRMOGA*

## 1. はじめに

近年のユーザーニーズの多様化に伴い, 様々な設計要求を考慮した自動車エンジンの開発が必要になってきた. 市場へのアピールにはエンジンの高出力化が有効であるが, 環境問題が広く認知されつつある現在では, 環境への適合性も重要視されてきている. しかし, 実際にこうしたニーズを満たすような設計には多くの相反する目的が含まれており, また, 自動車エンジンの吸気から排気までの流れは複雑な非定常流であるため, これらの設計要求を満たしながらの効率的な製品開発をより困難なものとしている.

こうしたことを受け, 設計の効率化と新たな設計指針の把握を目的として多目的遺伝的アルゴリズム (Multiobjective Genetic Algorithms, MOGA) を用いた最適設計システムが開発され, 有害物質除去能力とエンジン出力の両方に影響を与えることが知られている排気マニホールドの形状最適化が試みられた[1, 2]. この最適化では, コンパクトなエンジン向けの形状(図 1(a))を初期形状とした形状最適化が行われ, 環境適合性の高い形状を得ることができた. しかしながら, 出力については顕著な上昇を見ることができなかった. この原因として, 初期形状が一般車への搭載を前提とされたもので, もともと高出力化が難しかったこと, 単純化のために

管の径を一定にしたことなどが考えられる。

そこで本研究では、出力が設計上重視される、高出力エンジン向けの形状(図 1(b))を初期形状とした多目的最適化を行う。高出力化のためには、排気干渉に影響を与える分岐形態の最適化が重要である。さらに、管の径とその分岐位置ごとの変化も重要なパラメータであることが知られており、それらも設計パラメータとして取り扱うことで、より実際の設計で要求される形状パラメータを盛り込んだ最適設計を行う。また、新たに探索性能の優れた領域分割型多目的 GA(DRMOGA)[3]を設計システムに採用し、大域的な探索性能の向上を図り、従来の MOGA との結果について比較を行う。



(a) (b)  
Fig. 1 The exhaust manifold shape.

## 2. 最適化手法

本研究では、最適化目標としてエンジン出力の指標となる高回転運転時の燃焼室への新気充填効率の最大化と、環境適合性の指標となる有害物質除去能力を示す低回転運転時の排気マニホールド出口(触媒入り口)での排気温度最大化を取り上げ、排気マニホールドの形状の多目的最適化を行う。

多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)を用いた従来までの最適設計システム[1, 2]の探索効率をさらに高めるため、新たに領域分割型 MOGA(DRMOGA)[3]を採用することとした。

DRMOGA の特徴は、GA における個体群(母集団)をある目的関数に従ってソートして分割し、その分割された子集団ごとに従来の MOGA の操作を行う点である(図 2)。数世代ごとに再度、ソートの対象とする目的関数を変更して子集団の再編成が行われ、その新たな子集団の中で再び MOGA の操作を行う。

この手法の優れている点は、それぞれの子集団に含まれる個体同士が目的関数空間にお

いて近傍にあり、まったくかけ離れた個体同士の交叉が防がれ、効率的かつ大域的に解を探索できることである。さらに、子集団の再編成により、解の多様性を維持することができ、局所解に陥ることを防ぐことができる点も大きな利点である。これらの特徴は本研究で扱うような実用問題に対して効果的であることが期待される。

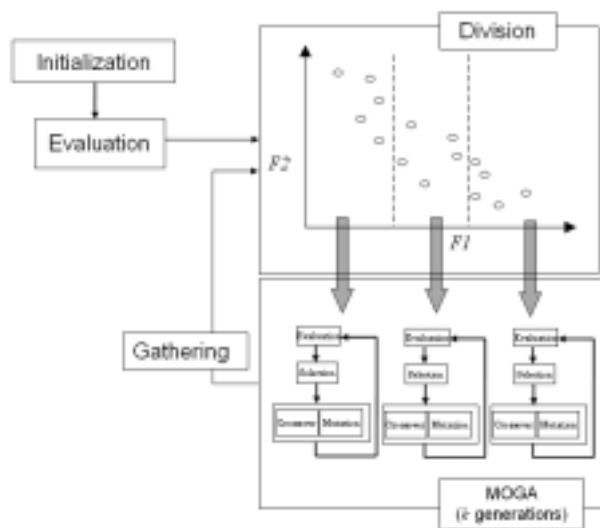


Fig. 2 Procedure of DRMOGA.

## 3. 排気マニホールドの形状定義手法

本研究では、最適化のプロセスで複雑な分岐管形状を自動的に定義する必要がある。ここで、あるパイプの経路に集合位置を決定し、もう一本のパイプが取り付けられることを考える。まず、パイプの経路は曲線を表す点列として表現することとし、各点を遺伝子として遺伝的操作により経路上に分岐位置を決定する。次に、この分岐位置からもう一本のパイプの経路も決定し(図 3(a))、これらのパイプに半径を与えて、図 3(b)に示すように各パイプの形状を三角形要素で分割する。そして各要素上の点からパイプ同士が重なっている部分を特定し、分岐部干渉線を抽出する。その後、図 3(c)に示すように、前進先端法[4]により干渉情報を含む管を生成する。最後にその干渉線を共有させる形で表面要素をつなぎ、図 3(d)に示すような分岐形状が生成される。

本設計手法では、管同士の接合部分は自動的に抽出されるため、実際に設計するのは管の集合位置と半径のみでよい。管の半径については経路中で変化を加えることも可能とした。

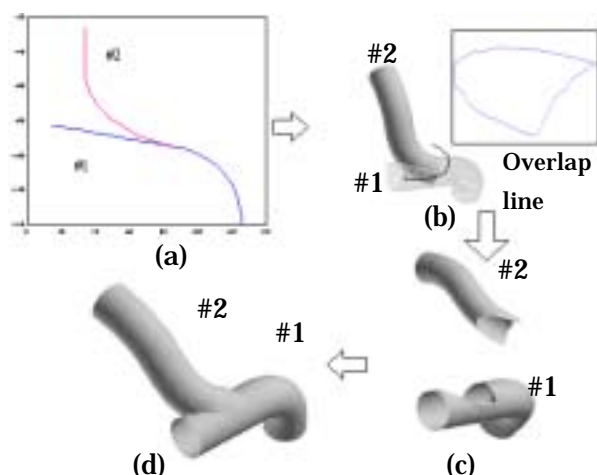


Fig. 3 Surface definition with arbitrary pipe junction.

#### 4. 自動車エンジンサイクルシミュレーション

一般に自動車用エンジンの吸排気サイクルは管と容器で構成されているが、系の中にはバルブや燃焼室などの機械部分も含まれ、流れは非定常で複雑なものである。そこで、本研究では空力評価を効率的に行うため、吸気から排気までの流れを、基本的に一次元モデルを用いた既存の非定常コード[5]を用いて計算し、三次元的な効果进行评估したい排気マニホールド部について非構造圧縮性三次元オイラーコード[6]をカップリングさせることによって空力評価を行った[1, 2]。

本研究で用いた一次元コードは、設計・開発現場ですでに活用されているもので、実用上十分な精度で性能予測ができる。一次元コードにおける管や容器部分モデル化には、一次元非定常圧縮性流体の基礎式が適用されており、壁面摩擦及び曲がり損失、壁面での熱交換を考慮した保存式になっている。摩擦損失係数や曲がり損失係数は定常流試験から得た値が用いられている。

#### 5. 排気マニホールドの多目的最適化

##### 5.1 問題設定

本章の最適化では次のような多目的最適化問題を考える。それぞれの設計変数が排気性能に及ぼす影響を調べるため、下記に示す 3 ケースの設計を行い、得られた形状の比較を行

った。

目的関数：

- 1500RPM の排気マニホールド出口での排気温度の最大化
- 6000RPM のシリンダ充填効率の最大化

設計変数：

- (Case1)分岐管における 3 つの分岐位置
- (Case2)分岐管における 3 つの分岐位置及び一律な管の径
- (Case3)分岐管における 3 つの分岐位置, 入り口での管の径及び分岐位置毎の径の増分係数

半径についての定義を図 4 に示す。Case1 については  $r_0=17.5$ [cm] で固定, Case2 では  $16.5 \leq r_0 \leq 21.5$ [cm] と変化させ, 入り口から出口まで一定とした。Case3 については図 4 の領域 1 について  $16.5 \leq r_0 \leq 21.5$ [cm] と変化させ, 領域 2 の半径の増分係数  $a$  は  $0.9 \leq a \leq 1.18$ , 領域 3 の半径の増分係数  $b$  は  $0.9 \leq b \leq 1.23$  とした。

DRMOGA において, 集団サイズを 64 (Case1 のみ 32), 領域分割数を 4 とし, 再分割を 4 世代ごとに行う。交叉には BLX-0.5 を用い, 突然変異率を 0.1 とし計算を行った。

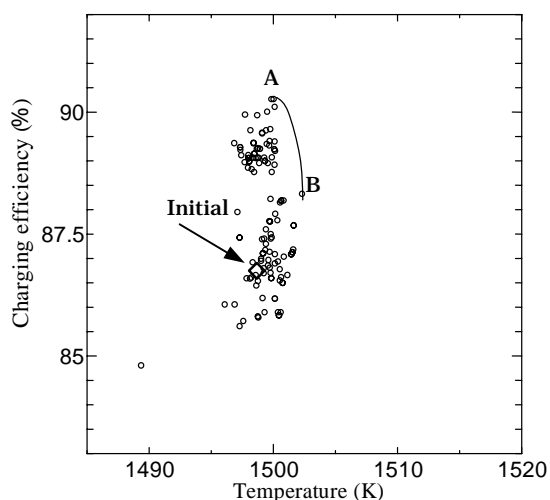
##### 5.2 最適化結果

DRMOGA による 20 世代後のパレート解を図 4 にそれぞれ示す。Case1 では充填効率について良い改善が見られたが, 排気温度に関しては有意な向上は見られなかった。一方で, 管の径を変化させた Case2 では充填効率だけではなく, 排気温度の大幅な改善が見られた。これらことは, 分岐形態は充填効率の改善に大きく寄与し, 径の設計は排気温度の改善に大きく寄与する設計諸元であることを示している。さらに, Case3 では両目的についてさらなるパレート面の前進が見られる。これは流れが合流するごとに径を増加させることで, スムーズな排気を実現しているものと考えられる。

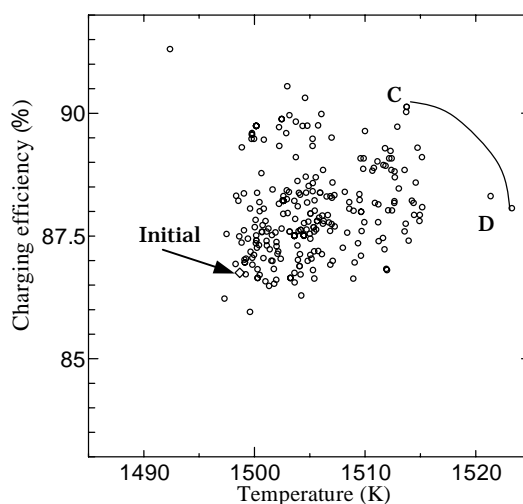
図 6-8 に Case1 から Case3 で得られたパレート解の形状を示す。Case1 において充填効率について著しい向上が見られた形状 A の領域 2 の距離が排気温度最大形状 B に比べて長くなっている (図 6)。これは各分岐の位置を遠くす

ることで排気の干渉を弱め、充填効率の向上につながっているものと考えられる。Case2においても充填効率の向上に関して同様の傾向が見られる(図7)。さらに、形状C、Dともに排気温度についても有意な向上が見られるが、これは管の径が初期形状のものより大きく設計されていることによると考えられ、径の大きな管は排気温度の向上に有効であるといえる。また、管の径を領域ごとに変化させたCase3において、高い排気温度を示した形状F、Gでは顕著な径の変化は見られなかった。これはCase2で得られた結果と同様にマニホールド全体の径が大きくなり、排気温度が向上しているものと考えられる。一方で、すべてのケースの中で最も充填効率の高い形状Eにおいては各分岐位置で径が増加している。これは、分岐位置ごとに径が増加することにより、ひとつのポートからの排気が他のポートからの排気に干渉を受けにくくなり、スムーズな排気を実現しているものと考えられる。

図9にCase3において、最適化アルゴリズムにDRMOGAを適用した場合と従来までのMOGAを適用した場合の最適化結果の比較を示す。図9から、DRMOGAを適用した設計のほうのパレート面がMOGAを適用したものよりもより最適な方向へ前進していることが分かる。また、パレート解以外の解もDRMOGAのほうが偏り無く、広範囲に探索されている。以上のことから、本最適化問題においてもDRMOGAによって解の多様性が改善されていると言える。



(a)Case1



(b)Case2

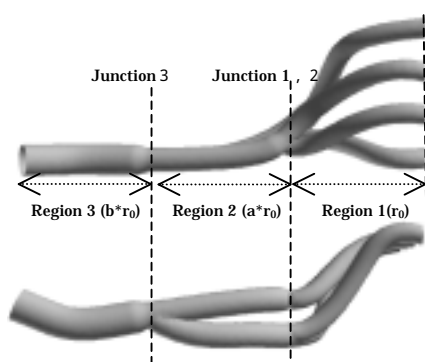
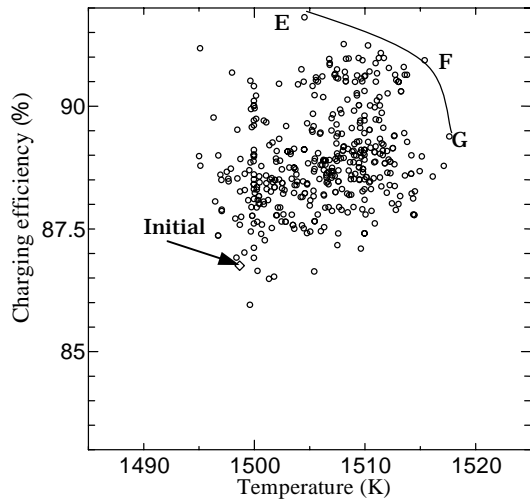


Fig.4 Radius definition for tapered pipe.



(c)Case3

Fig. 5 All solutions produced by DRMOGA plotted in the objective function space; (a) Case 1, (b) Case 2 and (c) Case3.

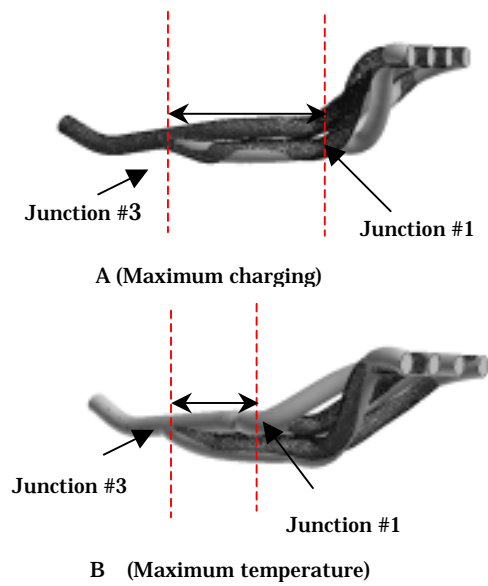


Fig. 6 Manifold shapes of selected from Pareto solutions in Case 1.

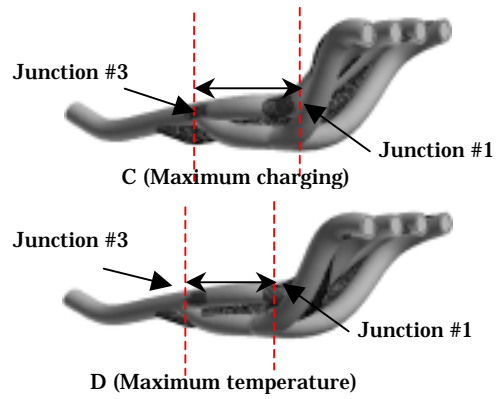


Fig. 7 Manifold shapes of selected from Pareto solutions in Case 2.

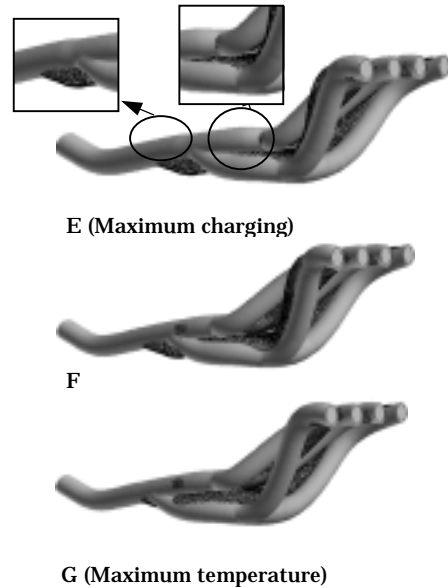


Fig. 8 Manifold shapes of selected from Pareto solutions in Case3.

計変数の定義は妥当であると考えられる。

また、最適化アルゴリズムに新たに DRMOGA を採用したが、MOGA による結果との比較により探索効率の改善を確認できた。

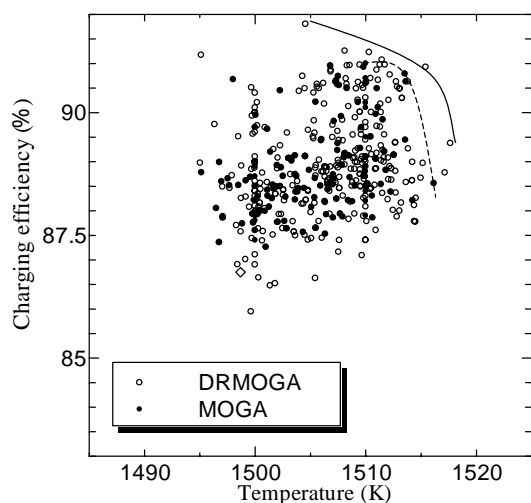


Fig. 9 Comparison of solutions obtained by DRMOGA and MOGA

## 6. まとめ

本研究では、領域分割型 MOGA を用いて自動車エンジン用排気マニホールドの最適設計システムを構築し、高出力型エンジンをターゲットとして空力形状最適化を試みた。また、実用上必要と考えられる設計変数をケースごとに追加し、トレードオフの違いを確認しながら、排気マニホールドの設計指針を以下のように明らかにした。

- 分岐形態の最適化は排気干渉を最適化し、充填効率上昇に効果的であるが、分岐形態のみで排気温度の上昇を見ることは出来なかった。
- 径の最適化により排気温度も上昇させることができ、両目的について同時に改善をすることができる。ただし、パレート解の径の大きさは設計空間の上限とはならなかったことから、単純に管の径を大きくしても排気性能の向上につながるとは限らない。
- 径を分岐位置ごとに大きくしていくことにより、さらに大幅な改善を見ることができ、設

## 参考文献

- [1] Kanazaki, M., Obayashi, S. and Nakahashi, K., "The Design Optimization of Intake/Exhaust Performance of a Car Engine Using MOGA," *Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control, Proceedings of EUROGEN 2001*, (2001), pp. 423-428.
- [2] 金崎 雅博, 大林 茂, 中橋 和博, "自動車エンジン排気系形状の多目的最適化", 第9回 MPS シンポジウム講演論文集, (2001), p.p. 295-298.
- [3] Hiroyasu, T., Miki, M. and Watanabe, S., "The New Model of Parallel Genetic Algorithm in Multi-Objective Optimization Problems (Divided Range Multi-Objective Genetic Algorithm)," *IEEE Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation 2000*, Vol. 1, (2000), pp.333-340.
- [4] Y. Ito and K. Nakahashi, "Direct Surface Triangulation Using Stereolithography (STL) Data," *AIAA Paper 2000-0924*, (2000).
- [5] 大西晃二, 他: コンピュータシミュレーションによる吸排気性能予測技術の開発, マツダ技報, No. 6, (1988), pp. 84-93.
- [6] D. Sharov, and K. Nakahashi, "Reordering of 3-D Hybrid Unstructured Grids for Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel Computations," *AIAA J.*, Vol. 36, No. 3, (1998), pp. 484-486.
- [7] M. Kanazaki, M. Morikawa, S. Obayashi and K. Nakahashi, "Multiobjective Design Optimization of Merging Configuration for an Exhaust Manifold of a Car Engine", *Proceedings of PPSN, the 7th international conference on parallel problem solving from nature*, (2002), p. p 281-287.