

自動車エンジン排気系形状の多目的最適化¹

金崎 雅博², 大林 茂³, 中橋 和博⁴

Design Optimization of Exhaust Manifold for a Car Engine Using MOGA

Masahiro Kanazaki, Shigeru Obayashi and Kazuhiro Nakahashi

摘 要

より高い性能を持つ乗用車用エンジンの開発には要求される性能が多目的にわたるため、最適な設計因子を見出すためには、多くの実験と解析を繰り返さなくてはならず、自動的な多目的最適設計システムが望まれている。本研究では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。こうした問題に対し多目的最適化(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)を用いた最適設計ツールを構築し、それを用いた最適化により排気温度を約20度増加する形状を見出すことができた。また、出力については大幅な増加は認められなかったが、排気温度を増大させる形状変化により減少することの無い形状を同時に探索することができた。

1. 緒 言

近年、乗用車の利用者数が増加し、乗用車の用途が幅広くなってきている。このように自動車社会が成熟していく中で、開発メーカーには技術面のほかにも、環境対策やコストの低減、技術開発のサイクルの短縮と行ったことが要求されている。しかし、それらのことは実現が困難であったり、実現する上で相反するものが含まれていたりする。

設計者はこのような多様化したニーズに対応できるエンジンを開発する必要がある。そのためにはエンジン性能に影響を及ぼす多大な設計因子に対する効率的な設計手法と、それによるエンジン開発コストの低減が求められる。技術開発サイクルの短縮化を図り、市場の動向に対して敏感及び柔軟に対応しながら設計・開発を行うためには、設計システムの自動化が非常に重要になってくる。

このようなシステムを構築する際に一般に用いられる

のが、さまざまな最適化手法である。既存の設計、解析システムに適切な最適化手法を組み合わせることで、設計者による試行錯誤の回数や形状の決定に要する工数を削減し、開発にかかるコスト、時間を抑えることが出来、開発メーカーは競争において優位に立てることが期待できる。

従来の自動車用エンジンの開発現場では、燃焼室や吸排気系等を数値計算による解析などにより設計者が形状特性を把握することで、性能向上を図ろうとしてきた。しかしながら、吸気から排気までの複雑な流れを見て、目的とする流動状態を実現する形状のコンセプトを確立するために多大な解析工数および再計算作業が必要となる。そこで、吸排気管内流れのコンピュータシミュレーションと最適化アルゴリズムにより自動的な形状最適化を行うことでより低コストで効率の良い設計を行うことができると考えられる。

本研究では、このように非定常で複雑な流れとなる自動車エンジン吸排気系形状の設計コンセプトを低コストで確立することのできる設計システムについて、その構築を試みる。

さらに、このシステムを用いて、吸排気系の中で排気マニホールドと呼ばれる部分の三次元形状最適化を試みる。排気マニホールドに求められる性能として、充填効

1. 原稿受付 平成 13 年 3 月 日.

2. 東北大学大学院工学研究科

3. 東北大学流体研 助教授

4. 東北大学工学研究科 教授

率（出力）向上と触媒までの排気温度の維持（有害物質の除去能力）があげられるが、これらは実現する上で相反する設計諸元と考えられている。本研究ではこれらのトレードオフを探索し、従来よりも高い性能を見込むことのできる排気マニホールド形状を得ることを目指す。

2. 自動車エンジン吸排気系について

エンジンに流入した空気は、吸気系、燃焼系、排気系を通り、再び系の外に排出される(図 1)。エンジンの性能の向上を図るためには、このサイクルでのスムーズなガス交換が必要である。また、多気筒エンジンにおいては、それぞれのシリンダからの排気が時間差を持った間欠的なものになる。このときの圧力波を利用した動的過給システム[1]により高い新気充填効率、すなわちエンジンの高出力化が期待できる。そういったことが必要とされる一方で、吸気マニホールドと排気マニホールドはポートを介してシリンダと直接ガスを交換し、その内部では複雑な分岐流となる。したがって、この部分の設計はエンジン性能に大きく影響するが、最適な設計諸元を把握することが難しい。

本研究で最適化を試みる排気マニホールドではシリンダからの排気が引き込まれるが、多気筒エンジンではシリンダ同士の排気が圧力波となって、他のシリンダポートに伝播し、干渉しあふ。前述のように、この圧力波が排気が行われるシリンダの出口で負圧となるようになれば排気をよりスムーズに行うことができ、高充填効率を実現される。

また、排気マニホールドの出口には窒素酸化物等の有害物質を取り除くための触媒が搭載されている。排気系の性能の1つとして、エンジンを冷えた状態から始動する冷間始動時での有害物質の除去能力の高さが挙げられる。この触媒反応はシリンダからの排気を高温のまま維持し、高温で触媒反応を行うことにより促進される。すなわち、この能力は低回転時(始動時)の排気マニホールド出口（触媒の接続口）での排気温度で見積もることができる。

以上に述べた、充填効率向上と排気温度の維持は、経験的に、実現する上で相反する設計諸元と考えられている。冷間始動時での排気温度を維持するように最適化された排気マニホールド形状を、高回転運転に用いると、各シリンダからの排気干渉の様子が変化し、充填効率が悪化する恐れがあることがその要因と考えられる。

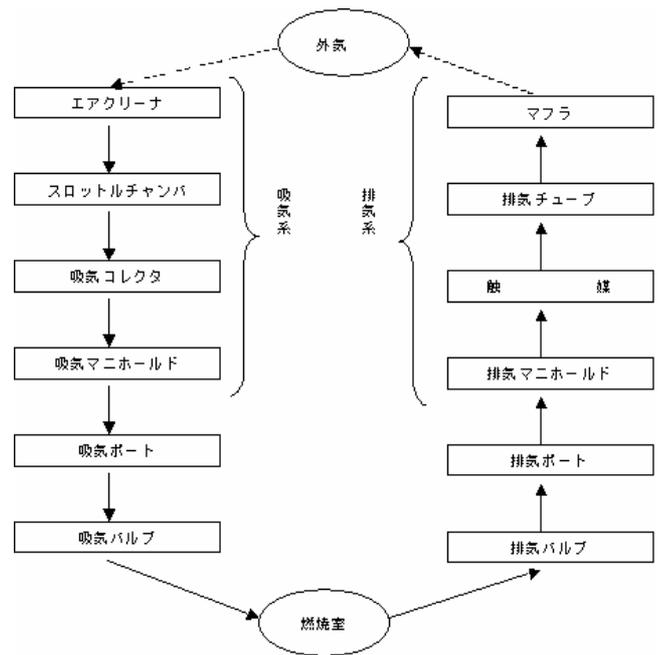


図1 吸気から排気までの流れ

3. 最適化手法

3.1. 遺伝的アルゴリズム

最適化手法として近年注目されているのが遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, GAs) である[2-4]。これは、1970年代始めに J. Holland により提案されたアルゴリズムで、遺伝子情報の子孫への伝達による生物の進化の過程に着想を得ている。GA では、最適化対象は遺伝子 (設計変数) を持った個体として扱われ、その遺伝子を、探索空間内での生活環境に対する適応度がより高い個体間に入れ替えしたり、突然変異により変化させたりして、世代を構成する個体群を進化させてゆく(図2)。これらの世代更新の操作により、適応度の高い個体の遺伝子情報は新しい個体に引き継がれ、最終的に最適解を得ることになる。最適化アルゴリズムとしてのGAの主な特徴としては、第一に個体の集合を用いて最適解を探索するという多点同時探索を行うという点が挙げられる。通常の勾配法などでは、一点の初期値から出発して最適解を探索していくのに対して、GA ではあらかじめ複数の解候補を生成し、それらの全体を進化させながら最適化が進められるため、局所解への収束を回避することが出来、大域解の探索能力を持つ。また、もう一つの特徴として、目的関数空間の勾配や分布の様子や制約条件などという対象問題に対する詳細な情報が必ずしも必要としないということも挙げられる。こう言ったことから、GA は非常

にロバストな最適化法であるということが出来る。実際、空力最適化に応用された例[5-6]も最近になり多く見受けられるようになってきている。

3.2. 多目的最適化

次に本研究で扱う最適設計問題について考えてみる。自動車エンジンの設計の過程では、工作、実験と数値計算を繰り返し行うことにより、吸排気マニホールドなどの吸排気系の形状を設計している。この過程ではそれぞれの専門家が工作、実験と数値計算を繰り返し行うので、設計工数の増大が問題となる。また、このような設計においては、一般に設計目標が空力、構造、経済性、製作コストの面など多分野にわたって存在するため、多分野複合問題となる。そのため、設計効率の面から見ると設計者はそのそれぞれの分野間に存在するトレードオフの情報を知ることが非常に重要である。

本研究では、排気系の設計を空力面に関してのみ行うが、前節で述べたように、吸排気系の性能は、排気温度とシリンダにおける充填効率により評価される。したがって、低回転運転時の排気温度と高回転運転時の充填効率が実際の設計目的となり、設計問題は2つの目的関数を持つ多目的問題となる。また、エンジンルームの広さや部品の配置などの空間的な制約条件、強度や振動などの構造的な制約条件などが存在する。そのため、設計対象となる分野が空力に関するものだけであったとしても、設計問題は複数の目的関数を持つ多目的問題となる。

このように一般の工学問題は多目的問題となるケースが多い。一般に複数の目的を同時に最適化するような解はないので、多目的問題の本質は複数の目的関数間のバランスをいかにうまく取るかという点にある。このため、多目的問題には「パレート最適解」という概念があり、多目的問題における最適解は単一ではなく複数の解の集合によって構成されている。勾配法ではこれら多数の解をすべて求めるわけにはいかないの、いかに望ましい解を効率的に探索するかが工夫されてきた。

遺伝的アルゴリズムを用いる場合、個体の集団により最適化を進めるため、一般には評価回数が増えるという欠点が存在するが、これを多目的問題に適用した場合にはこの多点同時探索という特徴が非常に有効となる。すなわち、一度の最適化でパレート最適解という解の集合の要素を多数同時に求めることが出来るのである。さらに、同時にパレート解が多数求められることで、設計者は目的関数間の具体的なトレードオフの様子を視覚的にとらえることが出来るため、その中から設計方針に見合った解を自由に抽出することが出来る。Goldberg は

この特徴を利用して、多目的遺伝的アルゴリズム (Multiobjective Genetic Algorithms, MOGA) を提案した[2]。これにより、GA が持つ本来の特徴であるロバストで大域解の探索性能があることに加え、多目的問題において効率よく同時にパレート最適解を求められるという利点が増えたことになり、その実用問題に対する応用性が更に広がったといえる。

前述の通り、本研究で取り扱う最適設計問題は多目的の最適化問題となるため、最適化手法として MOGA を用いることとする。

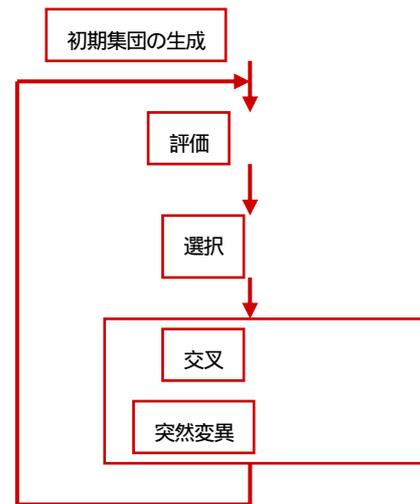


図2 遺伝的アルゴリズムの流れ

4. 自動車エンジンサイクルシミュレーション

4.1. 一次元モデルを用いた吸排気性能予測

一般に自動車用エンジンの吸排気系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、流れは非定常となり、その形状も複雑である。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[1]を用いて計算し、三次元的な効果を評価した部分(分岐部分など)について圧縮性三次元オイラーコード[7]をカップリングさせることによって空力評価を行った。

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。

燃焼室、エアクリーナなどは容器モデルとしてあらわされ、容器内の状態は一様で、流入したガスは瞬時に混合すると仮定されている。燃焼による発熱量は実験により得た熱発生率が用いられている。

また、吸排気バルブのような燃焼室(容器)と吸排気管との接合部(図 3-a)、管と管の分岐接合部(図 3-b)については特性曲線法だけでは時間ごとの状態を決めることができないため、次のような仮定に基づく境界条件式と組み合わせられている。

- ・ 管から容器への流入

エネルギー及び質量保存が成り立つとし、管端から接合部の絞りへは断熱変化が仮定される。絞りの速度が亜音速の場合、

$$p_t = p_c$$

が成り立ち、音速の場合、

$$u_t = \sqrt{\chi \frac{p_t}{\rho_t}}$$

が成り立つ。

- ・ 容器から管への流出

エネルギー及び質量保存が成り立つとし、管端から接合部の絞りへは断熱変化が仮定される。絞りの速度が亜音速の場合、

$$p_t = p_n$$

が成り立ち、音速の場合、

$$u_n = \sqrt{\chi \frac{p_n}{\rho_n}}$$

が成り立つ。

- ・ 分岐接合部

エネルギー及び質量保存が成り立つとし、集合部に流入したガスは均一に混合、また集合部から流出管端は断熱変化を仮定する。

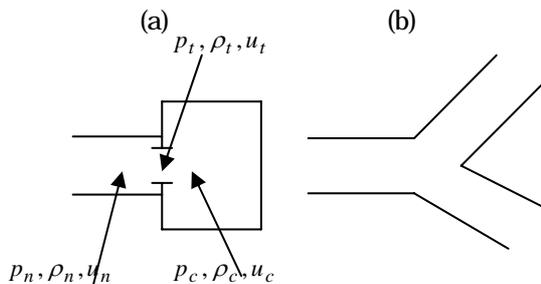


図 3 (a) パイプと容器の接合モデル。(b)分岐モデル

4.2. 部分的な三次元計算コードの導入

本研究では、排気マニホールドの三次元形状についての最適化を行うために、サイクルシミュレーションを部分的に三次元非構造 CFD 計算に拡張する。この手法により、目的的部分に対して三次元形状を考慮した評価を行う。特に、一次元モデルでは管の長さしか考慮されないのに対して、三次元コードでは管の曲率や分岐部での交わり角度などが評価できる。

三次元部分は非構造格子法により、三次元圧縮性オイラー方程式を解く。支配方程式は積分表示により次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

ここで、 \mathbf{Q} は変数ベクトル、 \mathbf{F} は非粘性数値流束ベクトルである。支配方程式はセル節点有限体積法によって離散化される。流束の計算には流束差分法を用いる。時間積分には非構造格子法のために拡張された LU-SGS 陰解法[7]を適用する。

また、このカップリングを行う際の境界条件として、一次元計算で得たメッシュでの物理量を三次元計算での流入境界条件として与え、三次元形状の境界の物理量を一次元計算で対応するメッシュに与える。

5. 形状定義方法

本研究では排気マニホールドの形状最適化を MOGA により行うが、その際に排気マニホールドの形状を自動的に計算に適合するように変形させなくてはならない。また、極力広い設計空間をカバーするためにはこの形状の大変形を行う必要がある。本研究ではマニホールドの軸線を元に、オリジナルの形状(図 4)を再定義することによりマニホールドの設計を行った。

形状の定義では、はじめにマニホールドの存在する空間の任意の位置に制御点を設ける。その制御点を B-スプライン[8]を用いて、空間上の軸線を表す曲線の点列とする。この軸線をあらかず各点を、オリジナルの軸線をあらかず各点と対応させ、その移動量を求める。さらに、その移動量をその点に最も近いオリジナル形状の表面要素点に対応させ、それぞれの表面要素点の移動をもって形状の定義とする。

本研究では、それぞれのシリンダポートからのパイプごとに軸線の定義を行い、形状の変形を行った。また、排気マ

ニホルドの管端はシリンダや触媒の位置関係から固定する必要があり、不適切な表面要素やパイプの重なりが起こらないよう、制御点の動く範囲を制約し、分岐形態は固定とした。

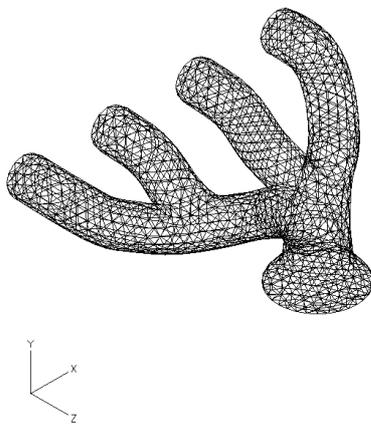


図4 形状変形の元とするオリジナル形状

5. 排気マニホルドの多目的最適化

5.1. 問題設定

前述の通り、充填効率向上と排気温度の維持は、実現する上で相反する設計諸元と考えられている。本研究でモデルとしたエンジンに搭載される排気マニホルドはサイクルシミュレーションを用いて計算したところ、5000RPMの運転条件のもとで、約91.6%の充填効率を示すが、排気温度を大きくすることにより、各ポートからの排気同士の干渉が変わってしまい、この値が減少することも考えられる。

こういったことを防ぐために、排気温度と充填効率のトレードオフを見出し、排気温度が上昇しても、充填効率を損なわない、あるいはさらに上昇をする排気マニホルド形状を探索することとする。

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。

目的関数 :

低回転時(1000RPM)の排気マニホルド出口での排気温度の最大化。

高回転時(5000RPM)のシリンダ充填効率の最大化。

設計変数 : パイプ軸線中B-スプライン制御点のx,

y座標。

制約条件 : 各ポートの管端面の位置が一定。

設計変数は、表1のように設定した。各個体の評価には、表2に示すエンジンを仮定し、サイクルシミュレーションを用いて行う。集団サイズは64としたが、低回転運転時と高回転運転時でそれぞれ条件を変えて行うために、実際の評価は $2 \times$ (個体数)行う必要がある。本研究での多目的最適化では実際の評価回数は1世代あたり $2 \times 64 = 128$ 回となるので、東北大学流体科学研究所ORIGIN2000の128PEを用いて並列に処理を行った。

5.2. 最適化結果

図5に25世代まで進めた結果、得られたパレート最適解を示す。本最適計算により実線のようなトレードオフ面が捕らえられている。このことから、MOGAでの大域的探索により、トレードオフ面上に初期設計より優れたパレート最適解が得られていることがわかる。

トレードオフ面を見ると、充填効率については頭打ちになっている。充填効率に顕著な上昇が見られなかった原因としては分岐形態が固定されており、管の長さあまり変化がなかったため干渉点に大きな変化がなかったことが挙げられる。

このように充填効率に大きな上昇が見られなかったが、オリジナルの排気マニホルドでもすでに92%近い数字が計算結果として得られている。したがって、2つの目的関数を同時に上昇させる形状が得られなくとも、充填効率についてはオリジナル形状の性能を損なわずに、排気温度について上昇させる形状が得られたと考えられる。図6を見ると、形状Cは排気温度を15度近く上昇させ、なおかつ充填効率についてはオリジナルのものからまったく損なわれていないことがわかる。

次に、図5で見られる極限パレート解について述べる。極限パレート解とは、各目的関数に対する単一目的最適解に相当するものである。図5の個体Aは充填効率についての極限パレート解といえるが、前述の通りオリジナルからの上昇はあまり大きくなく、運転時の誤差の範囲といえる。しかし、排気温度に関しては約10度弱の減少が見られる。一方で、排気温度の極限パレート解である個体Bであるが、これはオリジナル形状と比較して約18度の上昇が達成されている。しかしながら、充填効率については0.4%減少している。減少幅は小さいものの、個体Aと比較して考えると、実験で予想されていた排気温度と充填効率がトレードオフの関係にあるといったことが

計算によっても明らかにされたといえる。

また、MOGA とは別に行った SOGA(単目的 GA)での排気温度最大化結果 D は約 21 度の上昇を見た。MOGA による結果よりも上昇が約 3 度大きい。進化的最適化の場合、確率論的最適化であることと、最適化の停止条件が明確でないことから、必ずしも同一の解が求まるとは限らないが、これは MOGA によってもさらに計算を進めれば温度上昇が期待できることを示している。

図 7 は本章での最適化によって得た形状と、SOGA で得た排気温度最大形状について形状の比較をしたものである。排気温度が上昇した個体 B、C、D では y 軸方向(出口方向)に流路が向くような傾向が見られたが、これは流路をできるだけ管出口に向けることにより、他のポートへの熱量の散逸を抑え、また他ポートからの流入も少なくすることができる形状となっている。特に、パレート中央に存在する形状 C が極限パレート解である形状 B や SOGA による単目的最適解 D と似ていることは、本最適化による充填効率の変化の幅があまり大きくなく、最適化により得た形状の変化は充填効率には著しい影響を与えない程度のものであったことを裏付けている。

これらのことから、最適化計算の結果、高回転時の充填効率を損なわずに低回転時の排気温度を高める形状を得ることができた。一方で、高回転時の充填効率については、現状の維持だけではなく、更なる改善が望まれる。このためには流路の長さを大きく変えることが必要であり、そのためには分岐形状の変更を考慮した最適設計が必要である。

表 1 エンジン諸元

ボア径	8.30mm	
ストローク長	9.20cm	
圧縮比	10.5	
吸気弁開 / 閉時期 (1番ポート)	0.0deg. / 45.0deg.	
運転条件	1000RPM	5000RPM
平均レイノルズ数	3887.8	18685.8

表 2 各管のオリジナル形状からの変位可能範囲

パイプ番号	オリジナル形状からの変位
# 1	$-25 \leq \Delta x \leq 25$, $-20 \leq \Delta y \leq 40$
# 2	$-25 \leq \Delta x \leq 25$, $-20 \leq \Delta y \leq 40$
# 3	$-22 \leq \Delta x \leq 23$, $-20 \leq \Delta y \leq 20$
# 4	$-25 \leq \Delta x \leq 50$, $-20 \leq \Delta y \leq 40$

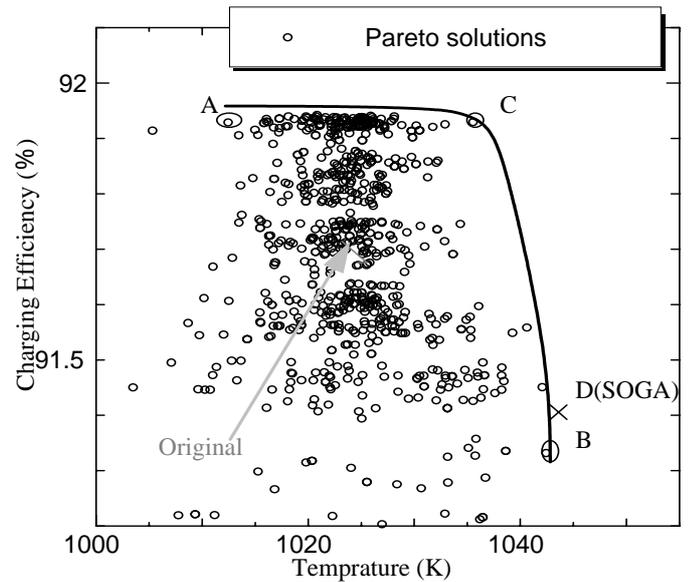


図 5 パレート解とトレードオフ面

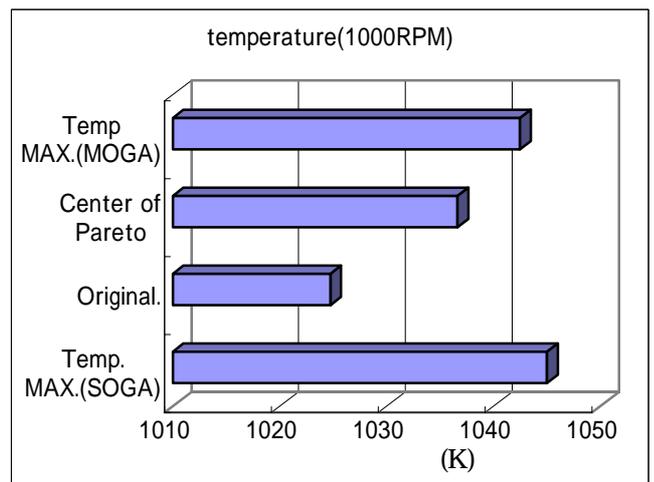


図 6 オリジナル個体とパレート最適個体の排気温度比較

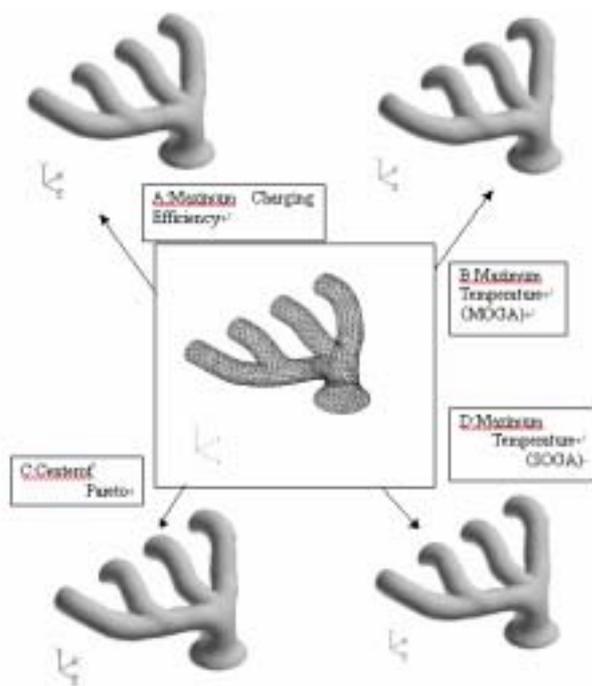


図7 得られた形状の様子(A~Dは図5に対応)

6. 結論

本研究では、多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA) を用いて吸排気系の最適設計システムを構築した。本システムでは、排気マニホールドの流路に着目して MOGA による最適化が施された。以下に本システムの特徴を示す。

- ・ 排気マニホールド形状の MOGA を利用した大域的な探索により、従来よりも少ない設計工数で性能の向上が可能である。また、非定常で複雑な分岐を持つ流れであるためにその特徴を把握することが容易ではないが、そういった対象について GA による大域的な探索は有効である。
- ・ 目的関数の1つである排気温度を最大化する形状を、MOGA だけではなく SOGA についても行い、両者について排気温度を最大化する排気マニホールド形状を得た。両者の形状の傾向はよく似ており、排気温度を最大にするための排気マニホールドの設計指針を見出すことができた。また、MOGA により、オリジナルの形状の充填効率を損なうことなく排気温度を上昇する形状を探索することができた。
- ・ 排気温度を上昇させることができる形状はオリジナル形状に比べ、それぞれ極力出口に向けて流路をま

っすぐにとるように変化した。

今後の課題として、さらに探索空間を広げるために分岐形態を含む設計方法を開発中である。排気温度を上昇させることができる形状だけではなく、充填効率をも上昇させる形状が探索されることが期待される。

謝辞

エンジンの吸排気シミュレーションと排気マニホールドの設計に関する共同研究におきまして、データの提供や様々なご助言をいただきましたマツダ株式会社の技術研究所 パワートレイン研究グループ 矢野 康英氏、中川 正氏、本研究に必要な計算環境を提供していただいた東北大学流体科学研究所未来流体情報創造センター関係各位の皆様にご心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 大西晃二: 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), 84-93 頁.
- [2] D. E. Goldberg, : Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, 1989.
- [3] 坂和 正敏, 田中 雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
- [4] Gregory, J. E. Rawlins, editor. : Foundations of Genetic Algorithms, Vol. 1-4, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 1991.
- [5] K. Yamamoto, and O. Inoue, : Applications of Genetic Algorithm to Aerodynamic Shape Optimization, AIAA Paper, 1995, pp.95-165.
- [6] I. De Falco, Del Balio, R., Della Cippola, A. and Tarantino, E., Breder : Genetic Algorithms for Airfoil Design Optimization, Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Nagoya, 1996, pp. 71-75.
- [7] Sharov. D. and Nakahashi K., : Reordering Hybrid Unstructured Grid for Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel Computations, AIAA Journal., Vol. 36, No. 3 (1998), pp. 484-486.
- [8] 穂坂 衛: CAD/CAM における曲線曲面のモデリング, 東京電気大学出版局, 1996.
- [9] 金崎 雅博: エンジンサイクルシミュレーションと排気系形状の最適化, 東北大学大学院修士論文, 2001.