

SPEA2+によるディーゼルエンジンの燃料噴射スケジューリング問題の多目的最適化

Multi-Objective Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Economy Using SPEA2+

中山 靖一

Seiichi NAKAYAMA

Abstract: In this paper, parameters of diesel engine that has the minimum amount of SFC, NO_x, and Soot are determined by multi objective genetic algorithm. Several types of effective multi objective genetic algorithms have been proposed; those are NSGA-II, SPEA2, and SPEA2+. Here, SPEA2+ is applied for designing diesel engines and the results are compared with those of other methods. The results of numerical experiments show that SPEA2+ has high searching ability for designing diesel engines, since SPEA2+ can derive the solutions that have high diversity not only in the objective space but also in the design variable space.

1 はじめに

近年、進化的計算を多目的最適化へ応用した進化的多目的最適化が非常に注目されている。進化的多目的最適化の中にも様々なアルゴリズムが存在するが、特に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を多目的最適化問題に適用した多目的遺伝的アルゴリズムが最も数多く研究されている。これまでに数多くの多目的遺伝的アルゴリズムが提案されてきたが、Zitzler らの SPEA2¹⁾、Deb らの NSGA-II²⁾ はこれまでに提案されてきた多目的遺伝的アルゴリズムと比較して、良好な結果を示している。筆者らは、SPEA2 を拡張した SPEA2+³⁾ を提案している。SPEA2+では解探索を効率良く行うための SPEA2 のメカニズムに加えて、精度の良い解を得るための近傍交叉や設計変数空間でも多様な解を求めるためのアーカイブなどのメカニズムを加えている。

本研究では、ディーゼルエンジンの燃料噴射スケジューリング問題に SPEA2+ を適用させ、その結果を SPEA2 および NSGA-II と比較する。対象としている目的関数は燃費、NO_x 値、Soot 値である。この結果により、SPEA2+はディーゼルエンジンの燃料噴射スケジューリング最適化に適していることだけでなく、多目的最適化がディーゼルエンジンの設計において非常に有効なツールであることを議論する。

2 多目的遺伝的アルゴリズム

2.1 SPEA2+

現在、様々な多目的遺伝的アルゴリズムに関するアルゴリズムやその適用事例が盛んに報告されているが、それらの研究の中でも Zitzler らの SPEA2、Deb らの NSGA-II はこれまでに提案されてきた多目的遺伝的ア

ルゴリズムと比較して良好な結果を示している。これらのアルゴリズムでは、探索途中で発見した優良解の保存、適切なパレート最適解候補の削減など探索において重要なメカニズムが提案されている。

しかしながら、これらのアルゴリズムでは GA オペレータの 1 つである交叉方法に関する議論は行われていない。また、設計変数空間における多様性を保持するためのメカニズムは考えられていない。

SPEA2+はこれらの問題点を考慮しつつ、SPEA2 の探索性能を改善した新しい多目的遺伝的アルゴリズムのモデルである。具体的には、SPEA2+は SPEA2 に以下に示すようなメカニズムを加えたものである。

- 目的関数空間において近くにある個体同士を交叉させる近傍交叉
- アーカイブに保存している優良解を全て探索へ反映する mating 選択
- 目的関数空間および設計変数空間において多様な解を保持するための 2 つのアーカイブの適用

2.1.1 近傍交叉

近傍交叉とは、目的関数空間において近くにある個体同士を交叉させる交叉手法である。大域的な探索を行う多目的遺伝的アルゴリズムでは、目的関数空間上において離れた親個体同士が交叉する可能性があるため、効率的な解探索が行われなかった問題がある。そのため、近傍交叉では探索方向が同じ個体同士を交叉させることによって、親個体の近くに子個体を生成する。Watanabe らはこの近傍交叉が多目的遺伝的アルゴリズムの解探索において非常に有効であることを示している⁴⁾。

2.1.2 mating 選択

アーカイブ個体群から次世代の探索個体群を選択することを mating 選択という。SPEA2 ではバイナリトーナメント選択を用いて 2 個体を選択し、適合度の高い個体を次世代の探索個体群に加える。しかしながら、SPEA2 では探索途中で発見された優良解はアーカイブに保存されていくため、探索の後半ではアーカイブに保存されている個体は全て非劣解となる場合が多くある。そのため、バイナリトーナメント選択を用いると、重複した個体が探索個体群として選択され、探索に無駄が生じる場合がある。SPEA2+ ではアーカイブに保存している優良解を無駄なく探索へ反映させるために、アーカイブに保存している優良解を全てコピーして次世代の探索個体群として用いる。

2.1.3 2 つのアーカイブの適用

多くの多目的遺伝的アルゴリズムでは設計変数空間における多様性を保持するためのメカニズムは考えられていない。しかしながら、意思決定者が得られた解集合の中から解を選択する際には、目的関数値だけでなく、その解を形成する設計変数値も重要となる。異なる設計変数値で同等の目的関数値を形成できるならば、設計変数空間における解集合の多様性は意思決定者にとって非常に有用なものとなる。

SPEA2+ では目的関数空間において多様な優良解を保存するためのアーカイブ (目的関数アーカイブ) に加えて、設計変数空間において多様である優良解を保存するために新たなアーカイブ (設計変数アーカイブ) が用いられる。設計変数アーカイブの更新方法としては SPEA2 の環境選択が用いられる。ただし、非劣解の数が設計変数アーカイブの保存できる数を越えた場合、設計変数の値を基準に個体の近接度合いをユークリッド距離で求め、そのユークリッド距離に基づいた SPEA2 における端切り法を実行し個体の削減を行う。

2.2 Pareto 解の評価方法

得られた解集合に対する評価は、適用した最適化手法の性能を評価する上で不可欠である。特に、多目的最適化では一意的に解の評価を行うことができない。一般に、得られた解集合はパレート最適フロントに対する近接度合い (精度)、パレート最適フロント全体に対する幅広さ、パレート最適フロント全体に対する隙間のなさが求められる。本研究では、得られた解集合の精度を評価するために優越個体割合 (Ratio of Non-dominated Individuals: RNI) を用いる。また、得られた解集合の幅広さと隙間のなさを評価するために被覆率 (Cover Rate) を用いる。

3 ディーゼルエンジンの燃料噴射スケジュールリング問題

ディーゼル燃焼は複雑な工程、機構において燃焼を行っている。しかしながら、ディーゼル燃焼現象の全てを数学的に記述することは不可能であるため、なんらかのモデルの利用が必要となる。本研究では、ディーゼルエンジンの燃焼シミュレータとして、現象論モデルを採用し、その実装モデルの 1 つである HIDECS⁵⁾ を使用する。HIDECS の最大の特徴は、シミュレーションの高い精度と必要とする計算負荷が非常に小さいことが挙げられる。

4 数値実験

4.1 燃料の噴射形状

本研究では、目的関数を Soot, NO_x, SFC としてこれらを同時に最小化することを試みる。燃料の噴射形状は、Fig. 1 に示すように 2 回に分けて燃料噴射を行う 2 段階噴射とする。また、最初の燃料噴射時間と 2 回目の燃料噴射時間は同一で、総燃料の量は一定とする。

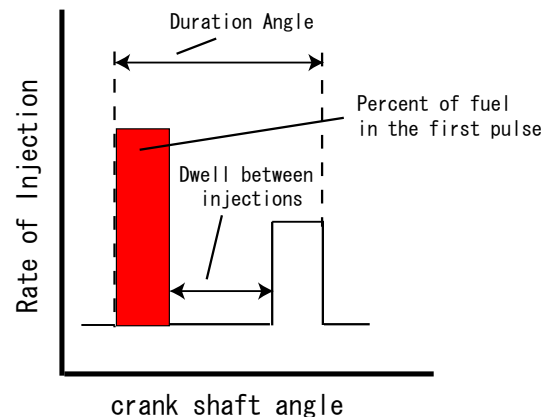


Fig. 1 Description of two-pulse injection shape

本研究における 2 段階噴射を実現するためには、最初の燃料噴射量 (Percent of fuel in the first pulse)、燃料噴射を行わない期間 (Dwell between injections)、総噴射期間 (Duration Angle) が必要である。そのため、本研究ではこれらを設計変数として取り扱うことで 2 段階噴射を実現する。また、これらに加えて、噴射開始時期 (Start Angle)、再循環率 (Exhaust Gas Recirculation: EGR)、過給圧 (Boost Pressure)、スワール比 (Swirl Ratio) を設計変数とする。各設計変数の制約条件を Table 1 に示す。本実験で使用した GA パラメータを Table 2 に示す。

Table 1 Range of design variables

item	Min	Max	bit for GA
Percentage of first pulse	50	84	7
Dwell between injections	3.0	15.0	7
Start Angle	-10.0	10.0	8
Duration Angle	25.0	40.0	5
Boost Pressure	3.45	3.65	5
EGR Rate	0.0	0.30	5
Swirl Ratio	0.0	6.0	5

Table 2 GA Parameter

Population Size	200
Terminal Generation	200
Crossover Rate	1.0
Mutation Rate	1/42
Runs	5

5 実験結果

5.1 SPEA2+, SPEA2, NSGA-II との比較

SPEA2+, SPEA2, NSGA-II によって得られた解集合を Fig. 2 に示す。得られた解集合に対して優越個体割合を用いて評価した結果を Fig. 3 に示す。また、得られた解集合に対して被覆率を用いて評価した結果を Fig. 4 に示す。

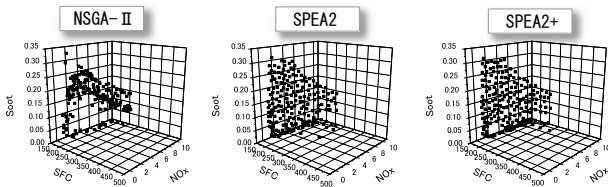


Fig. 2 Pareto Optimum Solutions

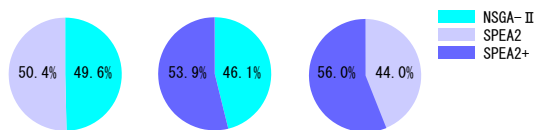


Fig. 3 The result of RNI

Fig. 3 より、SPEA2+ が SPEA2, NSGA-II よりもわずかではあるが、得られた解集合の精度が高いことが確認できる。また、SPEA2 と NSGA-II では、ほぼ同等の

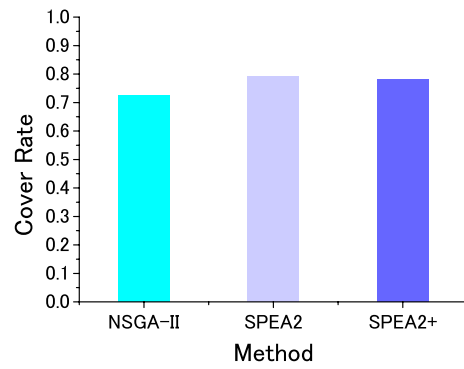


Fig. 4 The result of Cover Rate

精度の解集合が得られていることが確認できる。Fig. 4 より、得られた解集合の幅広さと隙間のなさといった点では、NSGA-II がわずかではあるが、SPEA2, SPEA2+ に劣っていることが確認できる。また、SPEA2+, SPEA2 に関してはほぼ同等の幅広さと隙間のなさを持つ解集合が得られていることが確認できる。

SPEA2+, SPEA2, NSGA-II によって得られた解集合の NOx と Duration Angle の関係を Fig. 5 に示す。

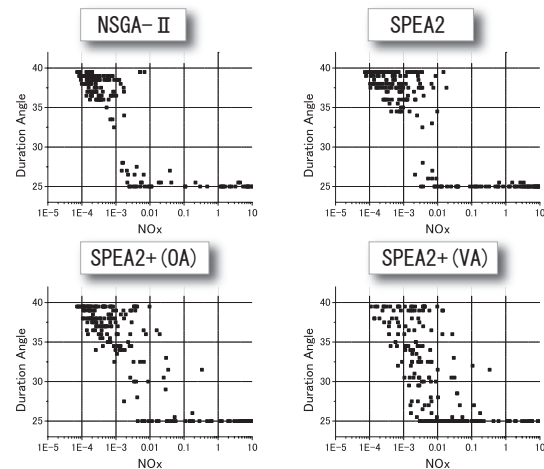


Fig. 5 Relation of NOx and Duration Angle

Fig. 5 より、SPEA2+ の設計変数アーカイブに、最も多様な設計変数値が得られていることが確認できる。SPEA2+, SPEA2, NSGA-II によって得られた解集合の設計変数空間における多様性について評価するために一般化分散値を用いる。SPEA2+, SPEA2, NSGA-II によって得られた解集合の一般化分散値を Fig. 6 に示す。なお、Fig. 6 における一般化分散値は、5 試行における世代ごとの一般化分散値の平均である。

Fig. 6 より、SPEA2+ の設計変数アーカイブにおける一般化分散値は 20 世代前後から徐々に上昇し、最終的には SPEA2, NSGA-II と比較して明らかに高くなって

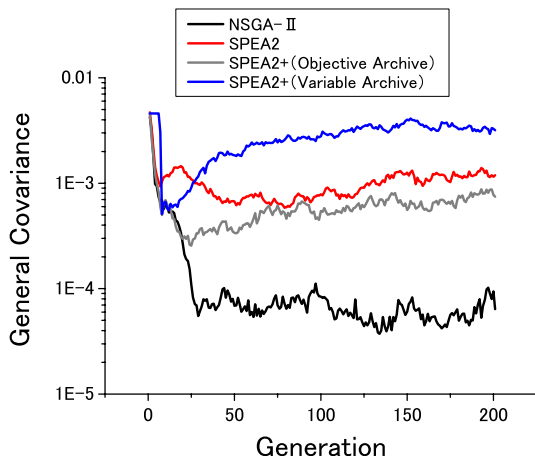


Fig. 6 The result of General covariance

いることが確認できる。すなわち、SPEA2+は設計変数空間においてSPEA2, NSGA-IIよりも多様な解が得られたといえる。

実験の結果、SPEA2+はSPEA2, NSGA-IIよりもわずかではあるが優れた解探索能力を示した。また、SPEA2+は、2つのアーカイブを用いることでSPEA2, NSGA-IIよりも設計変数空間において多様な解集合を得ることができた。以上のことから、SPEA2+はディーゼルエンジンの燃料噴射スケジューリング問題に対して非常に有効な手法であるといえる。

5.2 ディーゼルエンジンの設計における Pareto 解の有効性

SPEA2+, SPEA2, NSGA-IIによって得られた解集合のNO_xとSootの関係をFig. 7に示す。

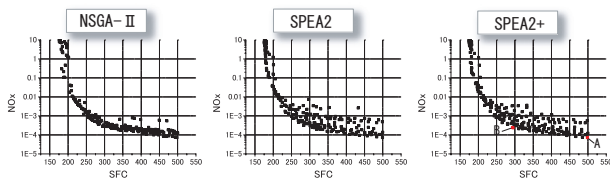


Fig. 7 Pareto Optimum Solutions (SFC , NO_x)

Fig. 7における解Aは、NO_x値の最小値が得られている一方で、SFC値は498.543 (g/kW*h)と非常に高くなっており、現実的な解とは言いがたい。それに対して、意思決定者はFig. 7のパレートフロントの形状を参考にしながら、その代替案として、約300 (g/kW*h)の解が欲しい場合、解Bが得られる。このように、多目的遺伝的アルゴリズムでは多くの代替の解をパレート解集合として得ることができるため、ディーゼルエンジンの設計を行う際には非常に有効である。

SPEA2+の利用のもう1つの利点が、設計変数空間で

の解の多様性である。Fig. 5において、SPEA2によって得られたパレート解を見てみると、Duration Angleが30付近のパレート解は存在しない、もしくは選択できないことになっている。それに対して、SPEA2+では設計変数の多様性も考慮されるので、Duration Angleが30付近の解も選択が可能となっている。これは、意思決定者にとっては、選択枝の幅が広がり大きなメリットとなる。

6 まとめ

本論では、ディーゼルエンジンの燃料噴射スケジューリング問題を対象問題として、SPEA2+, SPEA2, NSGA-IIを適用し、SPEA2+の有効性の検証を行った。実験の結果、SPEA2+はSPEA2, NSGA-IIと比較して同等の解探索能力を示した。SPEA2+は、設計変数空間においてもアーカイブを有することで、多様な解集合を得ることができる。そのため、SPEA2+はディーゼルエンジンの燃料噴射スケジューリング問題に対して非常に有効な手法であるといえる。

参考文献

- 1) E. Zitzler and M. Laumanns and L. Thiele, "SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm", Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TLK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich (2001)
- 2) Kalyanmoy Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratab, and T. Meyarivan, "A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II", KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India (2000)
- 3) M. Kim, T. Hiroyasu, M. Miki, "SPEA2+: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm2", Parallel Problem Solving from Nature - PPSN, 742-751, 2004
- 4) Shinya Watanabe, Tomoyuki Hiroyasu and Mitsunori Miki, "Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization Problems", Proceeding of the 4th Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution And Learning(SEAL-2002), pp198-202, 2002
- 5) Hiroyasu, H. and Kadota, T., "Models for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engines", SAE Paper 760129, 1976.