

Multi-objective design optimization of high-speed train nose

Masahiro SUZUKI, Meijo Univ. 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya-shi

Koji NAKADE, Railway Technical Research Institute

This paper shows a new design technique for high-speed trains using a multi-objective optimization method to balance plural aerodynamic properties. The technique is composed of an evolutionary algorithm, a shape parameterization technique using B-spline curves and Coons patches, and a computational simulation using Message Passing Interface. In order to demonstrate the capability of the method, the train nose shape is designed to optimize the aerodynamic drag and aerodynamic forces affecting the other trains. After the evolutionary calculation of 10th generation with 512 individuals, physically reasonable Pareto solutions are successfully obtained.

Keywords : high-speed train, shape optimization, multi-objective optimization, evolutionary algorithm, aerodynamic property

1. はじめに

車両先頭形状は、機構や強度、空力特性、運転席からの視野、製造コスト、メンテナンス性など様々な観点から検討され決定される。その中でも、空力特性は高速列車の設計時に重要となる。高速列車の空力特性として考慮すべき事項として、トンネル微気圧波、空気抵抗、トンネル内車両動揺、横風、列車通過時に対向列車や地上設備に加わる圧力変動などがあげられる。この中でも特に考慮すべきものとしてトンネル微気圧波があり、飯田らが流体シミュレーションと非線形計画法を組わせて先頭部の最適断面積分¹⁾を求めて以来、いくつかの研究が行われてきている。現在の高速列車の先頭部形状はこれらの研究成果を基に設計されている。

トンネル微気圧波以外の車両の空力特性を改善する研究も行われてきているが、すべての空力特性を同時に満足するような形状を求めることは容易ではない。航空宇宙分野では、複数の空力性能を最適にする多目的最適化の手法が盛んに研究され、実際の航空機の設計に使用された例も出てきているが、鉄道分野では多目的最適化の研究はまだほとんど行われていない。Tyll らが、磁気浮上列車を対象に多目的最適化手法の概念を提案している²⁾が、例題として先頭部の2次元形状の最適化を実施しただけで、3次元形状の最適化は行っていない。そこで本研究では、実際の設計支援を念頭に、3次元列車形状の多目的最適化手法を開発した。

2. 方法

2.1 車両形状の表現方法

最適化においては、車両形状をどのように定義するかが重要となる。最適化を成功させるためには、少ない設計変数で自由度の高い形状表現ができる必要がある。そこで、B-Spline 曲線を用いて、車両のまくらぎ方向の断面を表し、各断面間を Coons の双一次パッチで補間することとした(図1)。

制約条件として、最大車両幅、最大車両高さを課すと

ともに、軸対称モデルを対象に飯田らが求めた最適断面積分¹⁾を用いて断面積分がトンネル微気圧波対策に最適なものとなるようにした。

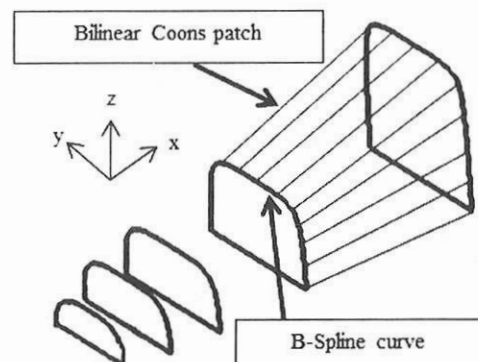


Fig. 1 Representation of the train nose shape

2.2 多目的進化アルゴリズム

最適化問題とは、ある制約条件を満たすものの中で、目的関数を最大あるいは最小にするような設計変数の値を求めるものである。ここで目的関数がひとつではなく複数個ある場合(多目的最適化問題)は、単一の最適解を求めるのではなく、パレート解と呼ばれる集合を求めることになる。パレート解とは、ある目的関数の値を改善するためには、他の目的関数の値が悪化してしまう状態の解である。パレート解の集合により形成される面をパレート面と呼ぶ。多目的最適化問題では、設計者にパレート面を示すことで設計空間のトレードオフ情報を理解させ、設計候補の選択を支援することになる。

最適化手法として生物進化を模した進化アルゴリズムを用いた。進化アルゴリズムでは、初めに一定の個体群からなる集団をランダムに作り、それぞれの個体(本研究の場合、車両形状)に目的関数(空力特性)に応じ

た適応度を与える。高い適応度を持つ個体を親として「選択」し、その遺伝情報（設計変数）に「交叉」や「突然変異」を施して子をつくり、次の世代の個体群を作成する（「世代交代」）。さらに、再び適応度を与え、親を選択し子を作ることで世代交代を進めていく。このようにして、世代交代を進めていくことで、よりよい目的関数の値をもつ個体が出現することが期待できる。進化アルゴリズムは、世代を進める度に集団の個体数に応じたサンプリングができ、パレート解の集合を求めるのに適している。さらに各個体の目的関数評価を並列計算により行うことで、効率よくパレート解を求めることができる。

2.3 流体シミュレーションと目的関数

本研究では、例題として、二つの空力特性、すなわち先頭部に加わる空気抵抗と列車通過時の圧力変動を目的関数として用いる。これらの空力特性を評価するためには、列車先頭部まわりの流れを精度良く解析する必要がある。高速列車の先頭形状は流線形であり、大きな剥離は発生しないが、境界層の影響は考慮する必要があるため、3次元定常非圧縮性粘性流計算を行う。乱流モデルは、航空機分野で用いられている Baldwin-Lomax モデルを使用する。計算法は MAC 法に基づいた方法を用いる。レイノルズ数は列車高さを代表長さとして 10^5 とした。

最適化計算において最も計算負荷の高い部分が、空力特性を評価する流体シミュレーションである。そこで、この計算時間を低減するため、流体シミュレーションは MPI (Message Passing Interface) 規格を用いて超並列化に対応できるようにした。進化アルゴリズムにおける各個体（車両形状）の適応度（空力特性）の評価を行う際に、一つの個体にひとつの計算プロセッサを割り当てることで、一世代分の個体の評価を同時に行うことができるようになる。

3. 最適化例

一世代の個体数を 512 個として、10 世代まで計算を進めた。図 2 に得られたパレート解と車両形状の例を示す。横軸が空気抵抗係数、縦軸が列車通過時の圧力変動の大きさを圧力係数で示したものである。今回の計算では、全部で 109 個のパレート解を得ることができた。その中で空気抵抗が最小の車両形状と列車通過時の圧力変動が最小の車両形状を示している。列車通過時の圧力変動が最小の形状は、2 次元的なくさび型をしており、系統的に変化させた 16 種類の先頭部形状を用いて比較した風洞試験による研究結果³⁾とも傾向が一致している。このような形状では、側面での流線の曲がり角が小さくなり圧力変動が小さくなると考えられる。一方、空気抵抗が最小の車両形状は、側面、上面ともに中間車両に向かって徐々に拡大していく 3 次元的な形状をしていることが分かる。

4. まとめ

流体シミュレーションと多目的進化アルゴリズムを組み合わせて、複数の空力特性を同時に満足する 3 次元車両形状を求める最適化手法を開発した。また、開発したプログラムを用いて、トンネル微気圧波に対する最適な列車断面積分分布について、空気抵抗と列車通過時の圧力変動を最小化する車両形状を求め、その有効性を示した。

参考文献

- 1) 飯田雅宣、松村豪、福田傑、中谷浩二、前田達夫：トンネル微気圧波低減のための列車先頭部形状の最適化、日本機械学会論文集 B 編、Vol. 62, No. 596, pp.1428-1435, 1996.
- 2) Tyll, J. S. and Schetz, J. A.: Concurrent aerodynamic shape/cost design of magnetic levitation vehicles using MDO techniques, AIAA paper, No. 98-4935, 1998.
- 3) 井門敦志、飯田雅宣、前田達夫：列車先頭部・後尾部形状最適化のための風洞試験、鉄道総研報告、Vol.7, No.7, 1993.

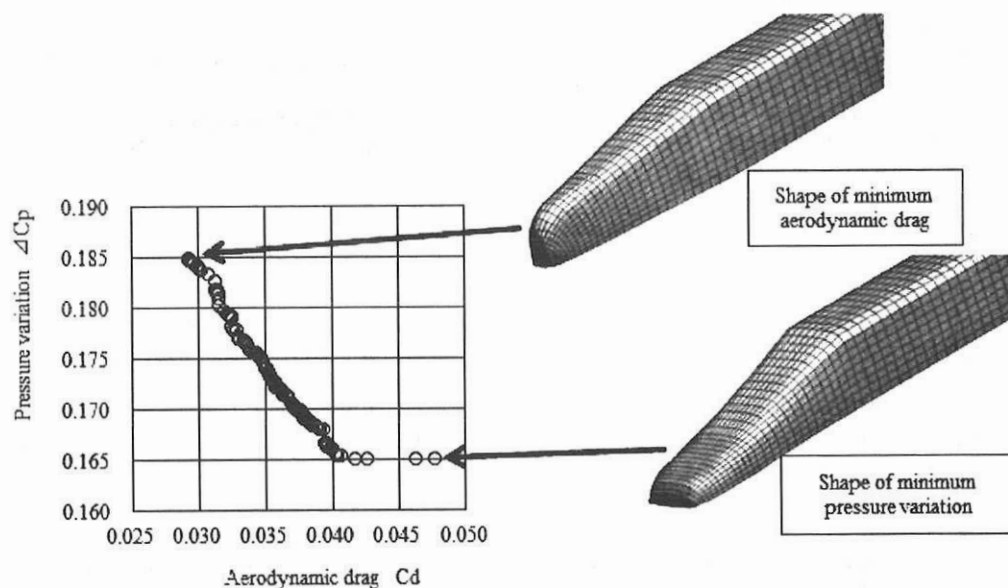


Fig.2 Pareto solutions and examples of nose shapes