

微気圧波を軽減する列車先頭形状の特性

Characteristics of a train shape for alleviating the booming noise at tunnel exit

- 小澤雄太, 東理大, 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1, ozawa@flab.isas.jaxa.jp
- 浅野兼人, 東大, 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1, asano@flab.isas.jaxa.jp
- 野々村拓, ISAS/JAXA, 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1, nonomura@flab.isas.jaxa.jp
- 大山聖, ISAS/JAXA, 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1, oyama@flab.isas.jaxa.jp
- 藤井孝藏, 東理大, 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3, fujii@ms.kagu.tus.ac.jp
- 山本誠, 東理大, 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1, yamamoto@rs.kagu.tus.ac.jp
- 守裕也, 東理大, 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1, mamori@rs.tus.ac.jp
- Yuta Ozawa, Tokyo University of Science, Nijuku 6-3-1, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585
- Kento Asano, The University of Tokyo, Yoshinodai3-1-1, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa 252-5210
- Taku Nonomura, ISAS/JAXA, Yoshinodai3-1-1, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa 252-5210
- Akira Oyama, ISAS/JAXA, Yoshinodai3-1-1, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa 252-5210
- Kozo Fujii, Tokyo University of Science, Kagurazaka 1-3, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601
- Makoto Yamamoto, Tokyo University of Science, Nijuku 6-3-1, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585
- Hiroya Mamori, Tokyo University of Science, Nijuku 6-3-1, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585

In this study, the theoretical algorithm based on the Ogawa's research is developed to optimize the nose shape of a high speed train which can reduced the micro-pressure wave which is generated when the high speed train enters the tunnel. The variable gradient method is used for the optimization algorithm. The Mach number effect and the tunnel height effect is investigated for the optimized nose shape. A train with the optimum nose shape is calculated for both viscous and inviscid flow and the results are compared with the initial parabolic shape. By comparing with the initial shape, optimum shape reduced the micro-pressure wave.

1. 緒言

高速で走行する列車がトンネルに突入するとき、列車前方で圧縮波が形成される。この圧縮波はトンネル出口を通過後、図1に示すように微気圧波となって周囲に広がり、騒音となることが知られる。微気圧波の強さは列車トンネル突入速度の3乗に比例するため、微気圧波の軽減は列車の高速化において不可欠である。微気圧波は列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の圧力勾配で評価されるため、トンネル突入時の圧力勾配を緩やかにする試みが行われてきた。その中で、列車先頭部の形状や長さが微気圧波に与える影響を調べた研究が実験と数値計算ともに多く行われてきた⁽¹⁾⁽⁴⁾。さらに近年では、遺伝的アルゴリズム等の最適化手法を用いた先頭形状の最適化に関する研究も行われている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また、列車先頭形状ではなく地上側の設備を工夫することで微気圧波を軽減する試みも行われてきた。トンネル入り口に緩衝工を有するフードを取り付けることでトンネル内の圧力を逃がす方法が代表的なものである⁽⁷⁾⁽⁹⁾。

小川らは、この微気圧波に対し、列車トンネル突入時の流れ場を単純な一次元流れとしてモデル化を行ない、トンネル壁面位置でのトンネル壁面に垂直な速度成分の断面内積分値 V_{wall} を定義し、この V_{wall} が圧縮波の波面勾配に比例することを示した⁽¹⁰⁾。さらに小川らはこの結果に基づいて、現実的な列車突入速度、列車トンネル断面積比を想定した軸対称流れにおいて、 V_{wall} の最大値が最小となる列車先頭形状を理論的に求めている⁽¹¹⁾。しかしながら、先頭形状の最適化に用いられたパラメータは1つのみであり、形状の自由度が低い限定的なケースの議論に留まっている。また、実際のトンネル内の流れ場は粘性流であるが、非粘性流に基づいた小川らの設計法に対する粘性の影響については明らかにされていない。

そこで本研究では、小川らの理論を用いてパラメータを増やした、より自由度の高い場合の最適化形状の特性について調査する。さらに、得られた最適化形状に対して非粘性計算、粘性計算を行

い、比較することで実際の列車先頭形状設計に対する小川らの理論の妥当性を検証する。

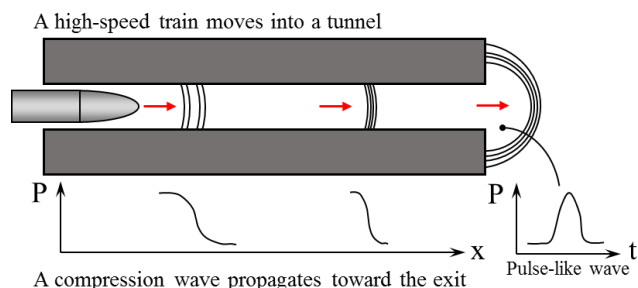


Fig. 1 The mechanism of generation of the booming noise

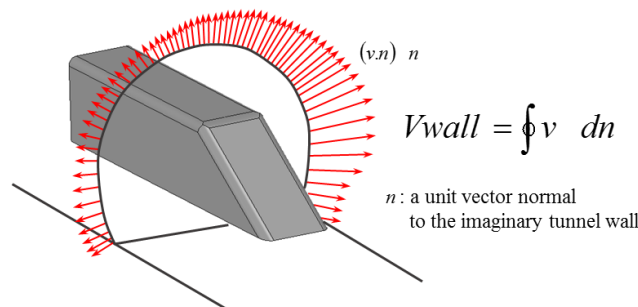


Fig. 2 The definition of V_{wall}

2. 数値計算方法

本章では、はじめに小川らの手法を応用した高速列車の先頭形状設計法について述べる。その後、得られた先頭形状を有する列車のトンネル突入問題で用いた計算手法について述べる。

2. 1 先頭形状設計法

2. 1. 1 先頭形状の導出

本解析では、小川らの理論に基づき、非粘性軸対称定常流を仮定した。軸対称の流れ場では、トンネル壁面に垂直な速度成分は周方向に一樣であるため、 V_{wall} の値はトンネル壁面高さ H における、壁面に垂直な速度成分とすることができる。図3のように列車形状 $R(x)$ を、列車が流体に与える影響と等価な湧き出し密度 $f(x)$ で表すと、 V_{wall} の最大値は次のようになる。

$$V_{wall}(x_{max}) = m^2 H \int_0^a \frac{f(\xi)}{\{(x_{max} - \xi)^2 + m^2 H^2\}^{3/2}} d\xi \quad (1)$$

ここで $m^2 = 1 - M^2$, M は一様流マッハ数である。また、 a および b は、それぞれ先頭部長さと列車軸対称半径を示す。上式において m および H は定数であるため、目的関数 $E(f)$ は次のようになる。

$$E(f) = \int_0^a \frac{f(\xi)}{\{(x_{max} - \xi)^2 + m^2 H^2\}^{3/2}} d\xi \quad (2)$$

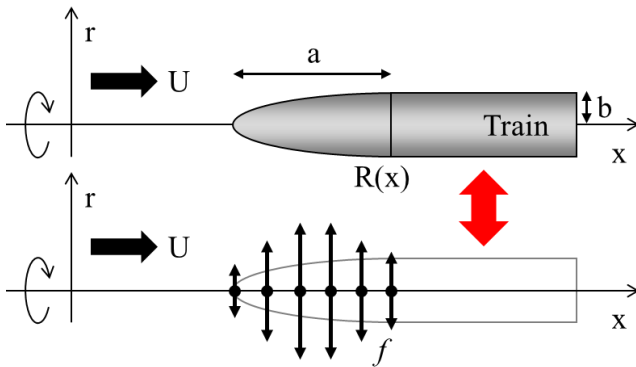


Fig. 3 Schematic of the train shape and the source distribution f

したがって、目的関数 $E(f)$ が最小となるように最適化を行う。湧き出し密度関数 f は、任意パラメータ c_i を含む適当な関数の和として表し、任意パラメータに関する目的関数 $E(f)$ の勾配が 0 になる方程式を解くことによって、最適パラメータを求める。以下に小川らが用いた湧き出し密度関数 f を示す。小川らは、式(3)の c_i の最適化をニュートン法を用いて行った。このとき、式(2)~(5)に示される a , b , および H はそれぞれ 1, 0.2, 0.59 であり、本研究でも同じ値を使用している。

$$f = f_0 + c_1 f_1(x) \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{Ub^2}{2a} (= const.) \quad (4)$$

$$f_1(x) = \cos\left\{\frac{2\pi}{a}\left(x - \frac{a}{2}\right)\right\} \quad (5)$$

このとき、最適化した任意パラメータは 1 個である。本研究では、湧き出し密度関数 f に対してより自由度を与えるため、ルジャンドル多項式を導入した。以下に使用した湧き出し密度関数とルジャンドル多項式を示す。

$$f = f_0 + c_1 f_1(x) + c_2 f_2(x) + \dots + c_n f_n(x) \quad (6)$$

$$f_0 = \frac{Ub^2}{2a} (= const.) \quad f_n(x) = f_0 \times P_n(x) \quad (7)$$

$$(n+1)P_{n+1}(x) = (2n+1)xP_n(x) - nP_{n-1}(x) \quad (8)$$

$$P_0(x) = 1 \quad P_1(x) = x$$

2. 1. 2 最適化アルゴリズム

小川らはニュートン法を用いて最適化を行ったが、初期値依存が激しく解が発散しやすいため、局所解であっても解に到達する勾配法を用いる。図4に目的関数 $E(f)$ を最小にする任意パラメータを、可変ステップ勾配法を用いて求めるアルゴリズムを示す。まず任意パラメータに対し、適当な初期値 $c_i^{(0)}$ を設定し、パラメータに対する目的関数 $E(f)$ の勾配を計算する。勾配法は以下の式であらわされる。

$$c_i^{(n+1)} = c_i^{(n)} - \eta \frac{\partial E}{\partial c_i} \quad (9)$$

ここで、 η は勾配法の 1 回に更新する数値の重みを表している。そこで、計算された $E(f)$ の勾配を利用して、目的関数を最小とする η を黄金分割法によって求める。こうすることで、 η を固定する場合に比べて繰り返し計算の回数を少なくすることができる。なお、本アルゴリズムは、小川らと同様のパラメータで過去の最適解を再現できることを確認している。

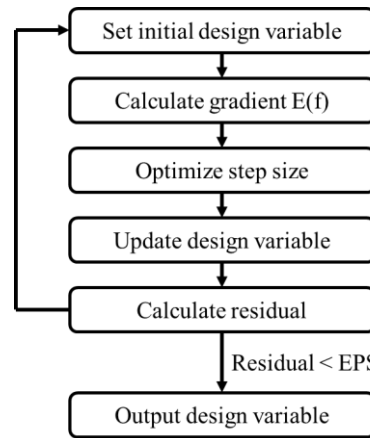


Fig. 4 Schematic of the optimization algorithm

2. 2 トンネル突入問題

2. 2. 1 計算手法

本研究では、ISAS/JAXA で開発された流体解析ソルバー LANS3D を用いて 2 次元軸対称計算を行った。また本研究では、非粘性計算と粘性計算の 2 種類の解析を行うため、各々で用いた数値計算手法について示す。まず非粘性計算では、支配方程式として無次元化された 2 次元 Euler 方程式を用いた。対流項の離散化には SHUS+3 次制度 MUSCL を使い、時間積分には ADI-SGS 陰解法を用いた。次に粘性計算では、支配方程式として無次元化された 2 次元圧縮性 Favre 平均 Navier-Stokes 方程式を用いた。対流項の離散化には SHUS+3 次制度 MUSCL、粘性項の離散化には 2 時精度中心差分を用いた。乱流解析には、Baldwin-Lomax モデルを適応した。また、時間積分には ADI-SGS 陰解法を用いている。計算手順は、まず明かり区間において定常解析を行った後、その流れ場を初期解としてトンネル突入の非定常解析を行った。

2. 2. 2 解析対象

本計算では、全長 25[m]の車両を計算対象とした。このとき、先頭部長さは 5[m]、車体とトンネルの軸対称半径はそれぞれ 1[m]、2.933[m]としており、これは小川らの論文と一致している。また、初期状態において、車体先頭部とトンネル入口の距離は 13[m]ほど離れている。車両の移動速度は $M_\infty=0.4$ とした。レイノルズ数は車両の移動速度 U_∞ を代表速度、1[m]を代表長さとして $Re=4.75 \times 10^7$ である。

2. 2. 3 計算格子

計算格子を図 5 に示す。本解析では、車体を動かして計算を行うが、計算時間短縮のため、重合格子法を用いて計算格子を複数の Zone で構成した。Zone1 は赤色で示す格子であり、車体形状を決め、車体周辺の流れ場を計算する。Zone2 は青色で示す格子であり、Zone1 との間で物理量を内挿しながら計算を行う。Zone1 と Zone2 は共に動かして計算を行うようにし、車体位置が変化しても常に一定の内挿係数を使えるようにした。Zone3 は黒色で示す格子であり、トンネル形状を決め、トンネル内の流れ場を計算する。時間ステップ毎に Zone2 で Zone3 の間で動的に変化する内挿の計算を行い、物理量の受け渡しを行った。一方で Zone1 と Zone2 は一緒に動くため、予め内挿係数を計算しておき、それにより物理量の受け渡しを行った。各 zone の格子点数はそれぞれ、 401×61 、 200×33 、 1361×124 である。なお、図 5 の格子は 2 点おきに表示させている。また、車体およびトンネル壁面には、粘性計算では滑りなし境界条件を、非粘性計算では滑り境界条件を与えている。

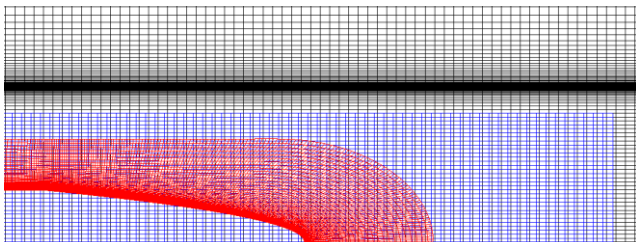


Fig. 5 Computational grids

2. 2. 4 トンネル微気圧波の計測

高速車両がトンネルに突入する際に発生する圧縮波がトンネル出口を通過する際に発生する微気圧波は、トンネル内圧縮波の波面勾配に比例することが知られている。そこで本研究では、各条件において発生する微気圧波の強さを比較するために、トンネル入り口から 300[m]位置での圧縮波の波面勾配を比較する。

3. 最適化結果

3. 1 パラメータ数の影響

ルジャンドル多項式の項数を増やしていった場合の最適化形状を図 6 に示す。パラメータ数 2 で得られた最適化形状は、過去に小川らが示した三角関数を用いた最適化形状と非常に近いものとなった。これは、ルジャンドル多項式が二次式で表されるため、比較的三角関数に近い効果が現れたためであると考えられる。パラメータ数 4 以上では、2 つの山をもつ形状となり、パラメータ数による依存性はあまり見られない。また、図 7 に最適化後の V_{wall} 値を初期形状の V_{wall} 値で除した結果を載せる。パラメータ数を増やすほど V_{wall} は軽減されていくが、パラメータ数が 4 以上では大きく変化しないことがわかる。

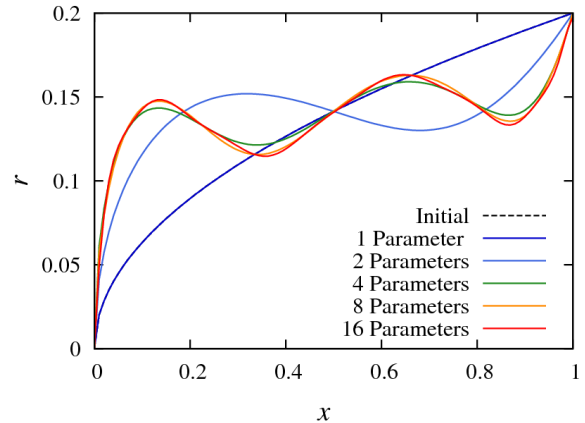


Fig. 6 Optimized shape for each parameters

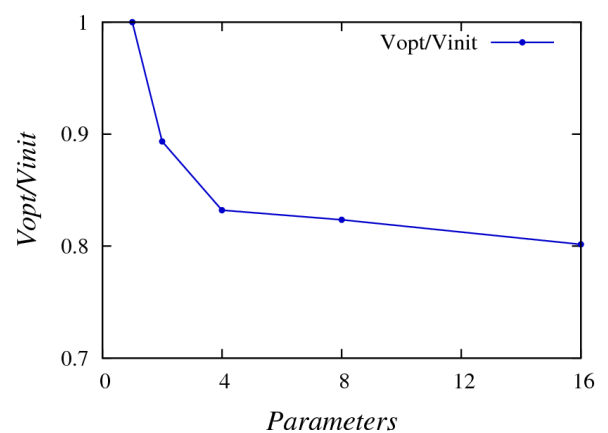


Fig. 7 Alleviating effects of V_{wall} for each parameters

3. 2 最適化形状のマッハ数効果

前節より、パラメータ数 4 以降では最適化形状に大きな変化が現れないため、マッハ数効果の検証はパラメータ数を 4 に固定して行った。図 8 に各マッハ数の最適化形状を示す。マッハ数が高くなるほど、最適化形状は前傾していくが、大きな変化は見られない。図 9 に V_{wall} の軽減効果を示す。図 8, 9 より、最適化形状に若干の差は見られるが、それぞれの V_{wall} 軽減効果に違いがないことから、マッハ数効果がないことがわかる。

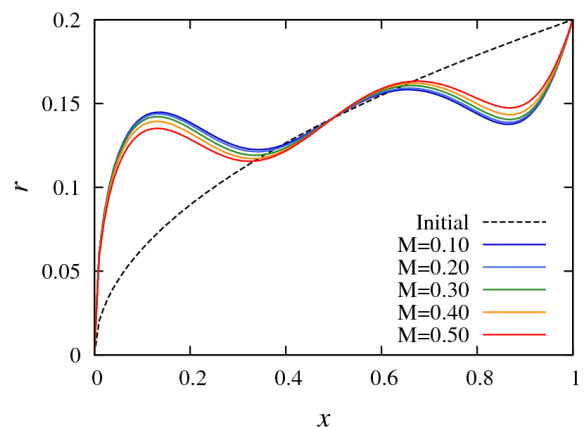


Fig. 8 Optimized shape for each mach number

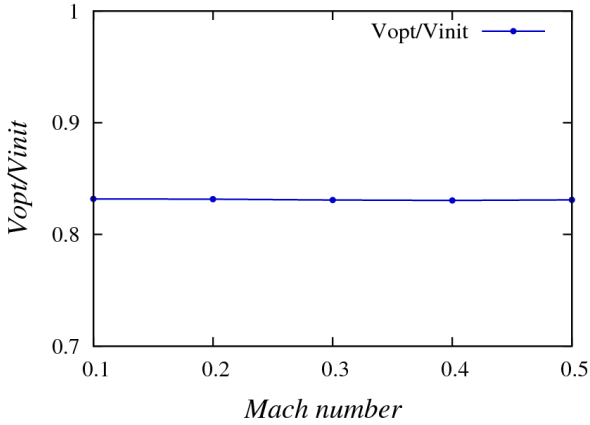


Fig. 9 Alleviating effects of Vwall for each mach number

3. 3 トンネル高さの影響

前節と同様にパラメータ数4で最適化を行った。図10にトンネル壁面高さを変化させたときの最適化形状を、図11にVwallの軽減効果を示す。トンネル壁面高さが高いほど、最適化形状は図6に示すようなパラメータ数が少ない、低次の項数での結果に近づいた。この原因として、トンネル壁面が高いほど壁までの距離が長くなるために高周波成分である高次の項の影響が小さくなることが考えられる。

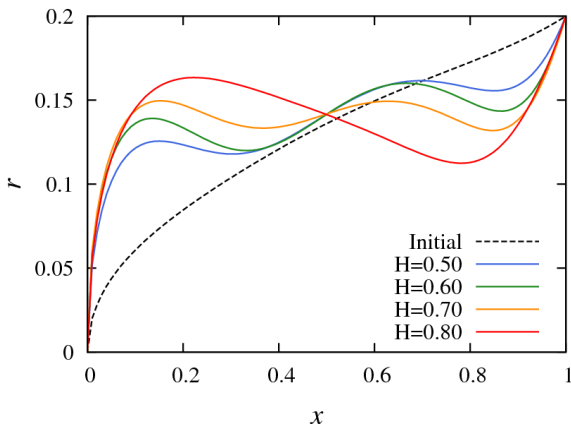


Fig. 10 Optimized shape for each tunnel height

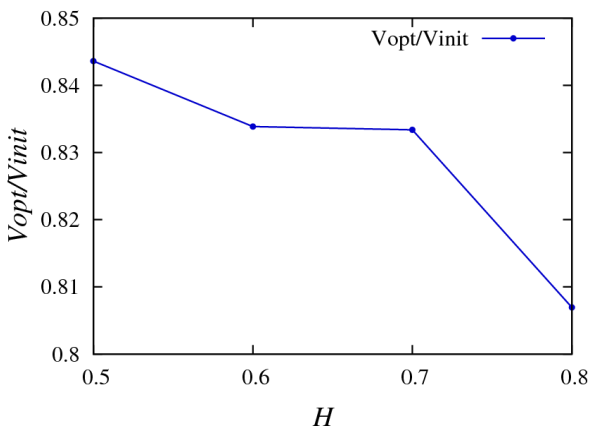


Fig. 11 Alleviating effects of Vwall for each tunnel height

4. CFDによる結果

最適化の効果を調査するため、パラメータ数4、マッハ数0.4の時の最適化形状と放物線である初期形状において、非粘性計算および粘性計算を行った。

図12に、初期形状におけるトンネル内壁面の圧力時間履歴を示す。非粘性計算、粘性計算の双方ともまったく同じ圧力となった。これは、レイノルズ数が非常に大きい計算であるため、粘性計算においても粘性の影響が小さいことが原因である。従って、実際の列車を模擬する場合であっても、非粘性計算で十分な予測が可能と思われる。

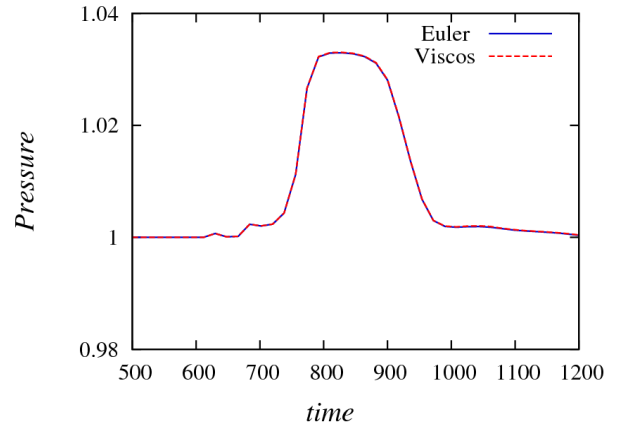


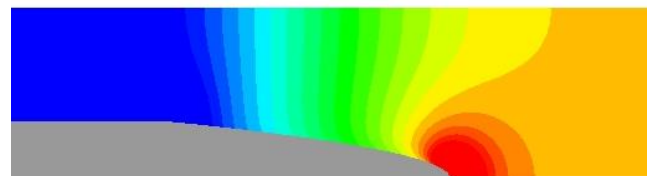
Fig. 12 Pressure distribution



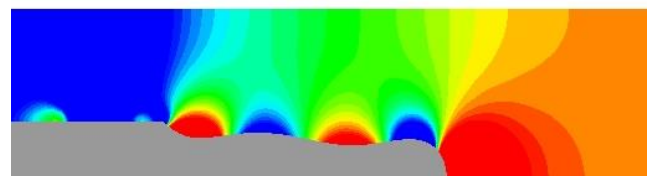
(a) Initial shape



(b) Optimized shape



(c) Initial shape enlarge view



(d) Optimized shape enlarge view



Fig. 13 Pressure distribution

以上から、初期形状と、本最適化プログラムで得られた最適化形状を比較には非粘性計算の結果を用いる。各形状における、トンネル突入時における列車先頭部付近の圧力分布を図 13 に示す。最適化形状では列車先頭部で断面積変化が大きいいため、圧力が初期形状に比べて大きい。また、最適化形状では二つの山に応じて圧力が増減しており、急激な圧力上昇を避けている。図 14 にトンネル内圧縮波の圧力勾配を示す。最適化形状の方が圧力勾配が小さい。したがって、最適化形状では先頭部の圧力の絶対値は大きいものの、微気圧波と比例関係にある圧力勾配が小さいため、微気圧波を軽減する効果を示した。

次に、壁面に垂直な速度成分である V_{wall} の空間分布をプロットしたものを図 15 に示す。最適化形状の方が V_{wall} の最大値が小さく、初期形状のような急激な変化を避けるような形状になる。以上より、最適化形状では V_{wall} が軽減され、圧力勾配もそれに伴い緩やかになる。

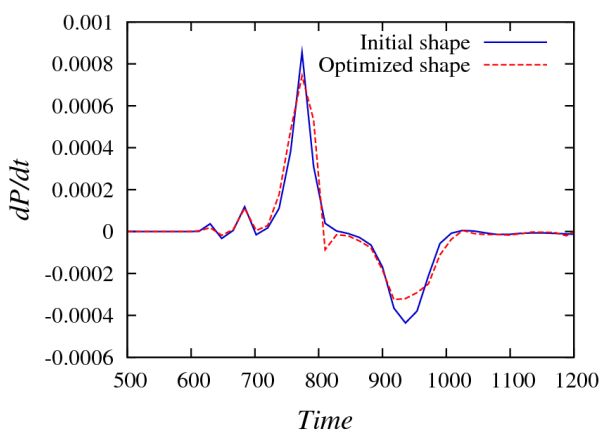


Fig. 14 Pressure gradient

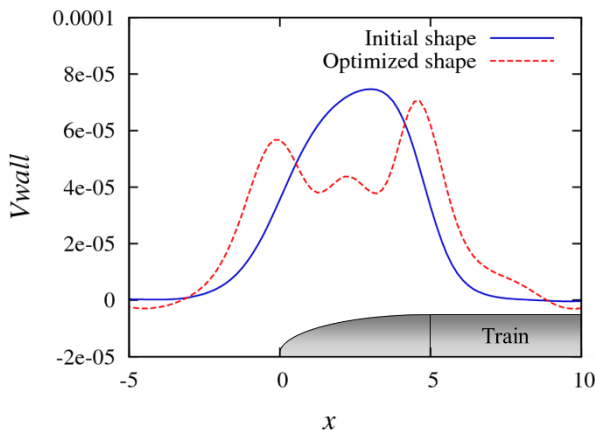


Fig. 15 V_{wall} distribution

5. 結言

小川らの理論をもとに、可変ステップ勾配法を用いた最適化アルゴリズムを作成し、列車先頭形状の最適化を行った。最適化結果の考察および、得られた最適化形状に対して粘性、非粘性計算を実行することで、以下の知見を得た。

- ・湧き出し密度関数 f のパラメータ依存性を調べ、収束値が 4 であることを確認した
- ・最適化形状にマッハ数効果は現れない
- ・トンネル高さが高いほど低周波の影響が強くなり、パラメータ数が少ない場合の最適化形状に近づく
- ・実際の列車トンネル突入問題はレイノルズ数が高く粘性の影響が小さいため、非粘性計算で十分な予測が可能と考えられる
- ・最適化形状が V_{wall} 、圧力勾配を軽減することを確認した

参考文献

- (1) 鹿毛一之・奥林豊保・今田克孝・川越茂敏, 高速列車によって発生するトンネル入口波の数値解析(第 1 報, 列車の鼻部長さおよび列車断面積の影響, 機論, 58-547, B(1992), 91-0959
- (2) 鹿毛一之・奥林豊保・今田克孝・川越茂敏, 高速列車によって発生するトンネル入口波の数値解析(列車鼻部形状の影響, 機論, 62-598, B(1996), 94-1958
- (3) 福田傑・宮地徳蔵・斉藤実俊・飯田雅宣・栗田健・菊池嬉基, 列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の三次元・軸対称列車モデルを用いた実験, 機論, 78-7933, B(2012), 2012-JBR-0380
- (4) Howe, M. S., "The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel," Proc. R. Soc. Lond. A, 454, (1998), pp. 1523-1534
- (5) Ku, Yo-Cheon., Kwak, Min-Ho., Park, Hoon-Li. And Lee, Dong-Ho., "Multi-Objective Optimization of High-Speed Train Nose Shape Using the Vehicle Modeling Function," AIAA 2010-1501, (2010).
- (6) Munoz-Paniagua, J., Garcia, J. and Crespo, A., "Genetically aerodynamic optimization of the nose shape of a high-speed train entering a tunnel," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 130, (2014), pp. 48-61
- (7) 鹿毛一之・奥林豊保・今田克孝・川越茂敏, 高速列車によって発生するトンネル入口波の数値解析(第 3 報, 等断面積多孔壁フードの影響), 機論, 59-560, B(1993), 92-1038
- (8) 鹿毛一之・奥林豊保・今田克孝・川越茂敏, 高速列車によって発生するトンネル入口波の数値解析(多孔壁フードの影響), 機論, 60-578, B(1994), 93-1492
- (9) Xiang, Xin-tao. and Xue, Lei-ping., "Tunnel hood effects on high speed train-tunnel compression wave," 9th International Conference on Hydrodynamics, (2010)
- (10) 小川隆申・藤井孝藏, 定常流れを用いた列車トンネル突入時の圧縮波波面勾配予測法, 機論, 61-586, B(1995), 2136-2142
- (11) 小川隆申・藤井孝藏, 微気圧波軽減のための理論的列車先頭形状設計法, 機論, 62-599, B(1996), 2679-2686