

線形音響理論に基づく微気圧波低減のための 列車先頭部形状最適化

宮地 徳蔵* 大久保 秀彦* 菊地 勝浩**

Train Nose Optimization Based on Linear Acoustic Theory for Reducing Micro-pressure Waves

Tokuzo MIYACHI Hidehiko OKUBO Katsuhiro KIKUCHI

Shapes of train noses have been optimized for reducing the peak value of a micro-pressure wave radiating from tunnel portals of high-speed railways. In this study, the shapes of multistep noses were optimized using three transfer functions based on the linear acoustic theory (W_T), experimental results (W_E), and their average (W_M). Model experiments were undertaken to measure values of the maximum pressure gradients of compression waves generated by each train nose entering a tunnel for an offset running. For optimized train noses based on W_T or W_E , the values of the maximum pressure gradient were not sufficiently reduced, and the pressure gradient waveforms were not trapezoidal shapes. Although optimized noses based on W_M well reduced the maximum pressure gradients, the values of the maximum pressure gradient were larger than those for optimized noses based on the computational fluid dynamics.

キーワード：最適化, 先頭部形状, 音響理論, コンパクトグリーン関数, 模型発射装置

1. はじめに

高速列車がトンネルに突入する際、トンネル入口付近の空気が列車先頭部に圧縮されることでトンネル内に圧縮波が生じる。この圧縮波がトンネル出口に到達したとき、トンネル外部に微気圧波¹⁾とよばれる圧力波が放射される。微気圧波はトンネル坑口周りでの環境問題の原因となることがあるため、高速鉄道では、微気圧波対策が重要となる。

微気圧波の大きさ（ピーク値）は、トンネル出口に到達した圧縮波の圧力勾配最大値にほぼ比例する。このため、微気圧波対策ではトンネル内圧縮波の圧力勾配最大値を低減することが効果的である。現在の新幹線において積極的に実用化されている対策は、トンネル入口において圧力勾配最大値を低減する“列車先頭部”と“トンネル緩衝工¹⁾”の最適化である。

鉄道総研では、微気圧波対策に有効な列車先頭部形状について、梶山ら²⁾が1990年以前より研究を始めており、1990年初頭頃からMaedaら³⁾、飯田ら⁴⁾によるまとまった成果が報告されている。現在の新幹線車両の先頭部はこれらの成果をもとにして設計されている。

従来の微気圧波対策に有効な列車先頭部形状は、「先端と後端を除き、列車先頭部の断面積変化率を一定とする」というものである³⁾⁴⁾。このため、高速列車の先頭

部では、運転席による断面積変化率の変化を緩和するため、側方の膨らみ方を抑える工夫がなされている。

Maedaら³⁾、飯田ら⁴⁾の研究のほかにも、先頭部の最適化に関する研究成果^{5)~12)}が多数報告されており、極端に断面積変化率が変化する形状も提案されている⁶⁾⁸⁾¹³⁾。近年、Miyachiら¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾は、列車先頭部形状を多段型とすることで、微気圧波を有効に低減できることを示した。Miyachiら¹⁴⁾¹⁵⁾の研究では、線形音響理論の伝達関数（コンパクトグリーン関数¹⁷⁾¹⁸⁾）の半波長程度を周期とした多段型先頭部では、各段から生じた微気圧波が重畳しないように形状を最適化することで、微気圧波が効果的に低減されることが示されている。ただし、線形音響理論では流れの剥離の影響を考慮していないため、線形音響理論のみを用いて得られる最適先頭部は各段において断面積が不連続に変化する形状で、このような先頭部では剥離渦のため微気圧波が増大してしまう¹⁹⁾。このため、多段型先頭部の最適化においては、数値流体解析（以下CFD）を用いて流れの剥離および非線形性を考慮した先頭部の性能評価を行う必要がある。Miyachiら¹⁵⁾の研究では、CFDの計算時間を節約するため、軸対称流れ場を仮定し、トンネルの中心を走行する列車の条件について最適化が行われている。

実際の新幹線の場合、列車は複線トンネル内を偏心して走行する。偏心条件を考慮するためには、CFDにおいて三次元流れを考慮する必要があるため、先頭部評価に要する時間が増大する。また、多段型先頭部では最適化パラメータが多くなるため、最適化の収束に必要な先頭部

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

** 環境工学研究部 車両空力特性研究室

評価回数（試行回数）が増加する。例えば、長さ15m程度の列車先頭部の場合、従来の形状³⁾⁴⁾では設計パラメータが2個であるが、多段型先頭部の場合には設計パラメータが7個以上必要となる。列車先頭部が高速化に対応してさらに長くなれば、多段型先頭部の必要段数が増えるため、必要な設計パラメータはさらに増加する。

したがって、偏心条件を考慮した多段型先頭部の最適化においては、最適化に膨大な計算時間（＝（先頭部の評価時間）×（先頭部の評価回数））を要することが予想されるため、先頭部の評価時間あるいは先頭部の評価回数のいずれかを低減する必要がある。

線形音響理論では、先頭部の断面積変化率と伝達関数の畳み込み積分で先頭部の性能を評価することができ、評価に要する時間は1秒以下である。列車偏心走行の影響も考慮することができる。線形音響理論では、流れの剥離を考慮できないことが問題となるが、剥離の影響が問題となるような形状をあらかじめ排除した最適化を行うことで、線形音響理論を用いて偏心走行の影響を考慮した微気圧波低減効果の高い先頭部形状を短時間で開発することができる可能性がある。

本研究では、線形音響理論の伝達関数、実験結果に基づく伝達関数、両者の平均をとった伝達関数の三種類の伝達関数を用いて偏心走行する列車の先頭部形状を最適化し、得られた先頭部の微気圧波低減性能を模型実験で評価した。

2. 線形音響理論

2.1 Howeの音響理論

列車がトンネルに突入すると、トンネル内に圧縮波が形成される。微気圧波のピーク値はトンネル内に形成された圧縮波の圧力勾配最大値に比例するため、列車先頭部の微気圧波低減性能は、その先頭部による圧縮波の圧力勾配最大値によって評価することができる。Howeの音響理論¹⁷⁾¹⁸⁾に非線形効果の補正を適用すると、低マッハ数・線形近似の圧縮波の圧力勾配波形は以下のように表される²⁰⁾²¹⁾。

$$\frac{\partial p}{\partial t}(x, t) = \frac{\Delta p_H}{r_0/U} \int_0^{L_n} \frac{dA^*}{dX}(\theta) W_T([T] - \theta) d\theta \quad (1)$$

$$\Delta p_H = \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{1 - (1-R)^2}{(1-M)(M + (1-R)^2)} \quad (2)$$

ここで、 U は列車突入速度、 $X=x/r_0$ 、 $T=t/(r_0/U)$ 、 $[T]=T-M(X-\ell/r_0)$ 、 $\ell \sim 0.61r_0$ は開口端補正量、 $M=U/c$ は列車突入マッハ数、 c は静止大気の音速、 $L_n=\ell_n/r_0$ 、 ℓ_n は列車先頭部長さ、 $A^*=A/A_1$ 、 A は列車の断面積分布、 A_1 は列車最大断面積、 W_T は伝達関数、 R はブロックage比($R=A_1/A_0$)、 ρ は大気密度、である。馬蹄形状トン

ネルの半径 r_0 は、トンネルの鏡像を考慮した等価半径であり、 $r_0=\sqrt{2A_0/\pi}$ で定義される(A_0 はトンネルの断面積)。 Δp_H は空気力学的解析から得られるトンネル内圧縮波の圧力上昇量²²⁾である。

式(2)で表されるように、流れの剥離がない場合、圧力上昇量は先頭部形状に依存しないため、最適先頭部形状による圧力勾配波形はほぼ左右対称な台形型（横軸時間、縦軸圧力勾配）になることが知られている⁴⁾。

2.2 多段型先頭部

伝達関数 W_T は、矩形先頭部（通勤型車両のような先頭部）がトンネルに突入した際に生じるトンネル内圧縮波の圧力勾配波形であり、図1に示されるようなガウス関数型の単一ピークの波形となる（単位入力 $dA^*/dX=\delta(X)$ に対する応答を意味する）。列車の中心走行、偏心走行の影響は W_T に含まれ、 W_T は偏心量の関数でもある。

Miyachiら¹⁴⁾は、伝達関数 W_T を三角パルス波（幅 2λ ）で近似した場合について、圧力勾配最大値を最小化する先頭部形状を以下のように求めた。

$$\ell_n/\lambda = k \quad (3)$$

$$\frac{dA^*}{dX} = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k \delta(X - i\lambda/r_0) \quad (4)$$

$$A^* = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k H(X - i\lambda/r_0) \quad (5)$$

ここで、 k :自然数である。すなわち、最適先頭部形状は幅 λ ごとに断面積が $A_1/(k+1)$ ずつ不連続に変化する $(k+1)$ 段の多段型先頭部である。

上記の理想的な条件（伝達関数 W_T を三角パルス波で近似、 $\ell_n/\lambda=k$ 自然数）を満たす場合、多段型先頭部による圧力勾配波形は台形型になる。 $\ell_n/\lambda=k=3$ の場合について、多段型先頭部による圧力勾配波形を図2に示す。各段から生じる三角パルス波型の単位応答の

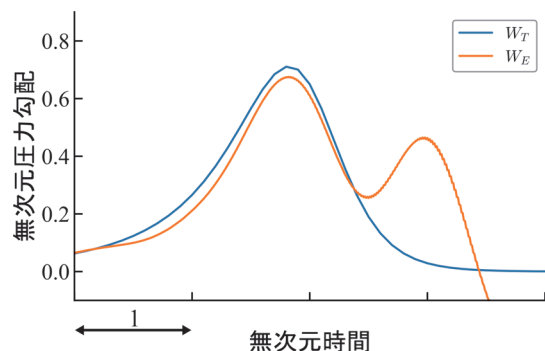


図1 伝達関数

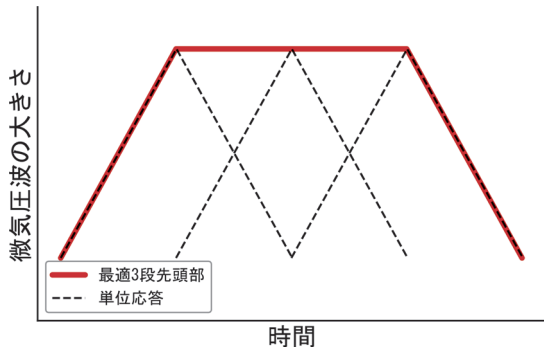


図2 最適3段型先頭部による微気圧波概念図

ピークが重なり合わずかつ隙間なく並ぶようになるため、これらを足し合わせた圧力勾配波形は台形型となる。

2.3 最適化問題

2.2節の結果¹⁴⁾をもとに、Miyachiら¹⁵⁾は、流れの剥離（粘性）および非線形の影響を考慮した軸対称CFDを用いて列車先頭部形状を最適化し、中心走行の条件に関して、得られた多段型先頭部の微気圧波低減効果が従来の先頭部形状のものよりも高いことを示している。

本研究では、偏心走行の条件に関して、三次元CFDに比べて解析時間の大幅な削減が可能な線形音響理論に基づいて最適化された先頭部を実験的に評価する。断面積変化率分布 dA^*/dX を複数の設計パラメータで表し、目的関数 $(\partial p/\partial t)_{\max}^*$ （無次元圧力勾配波形の最大値）を最小化するようパラメータを最適化する問題を考える。制約条件として、 $dA^*/dX > 0$, $0 \leq \int_0^X dA^* = A^*(X) \leq 1$ を与える。すなわち、列車断面積は常に増加するが、断面積の一部が最大断面積 A_t を超えることはない。解くべき問題は以下のようにまとめられる。

Min:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max}^* = \int_0^{L_n} \frac{dA^*}{dX}(\theta) W([T] - \theta) d\theta \quad (6)$$

Subject to:

$$\frac{dA^*}{dX}(\theta) > 0 \quad (7)$$

$$0 \leq \int_0^X dA^* = A^*(X) \leq 1 \quad (8)$$

ここで $(\partial p/\partial t)_{\max}^*$ は、 Δp_H と $2r_0/U$ で正規化されており、列車速度やブロッケージ比は最適化の結果に影響しない。

本研究では、滑らかな先頭部形状として、Miyachiら¹⁵⁾と同様、断面積変化率 dA^*/dX がガウス関数型分布の組み合わせで表わされる三段型先頭部形状を考える。先頭部の断面積変化率分布として以下を与える。

$$\frac{dA^*}{dX} = \sum_{i=0}^{m-1} f \frac{c_i}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(X-b_i)^2}{\sigma_i^2}\right] \quad (9)$$

$$\frac{L_n-d}{m} ((i-1) + 0.001) \leq b_i < \frac{L_n-d}{m} \times i \quad (10)$$

$$0 \leq i < m-1 \quad (11)$$

ここで、 b_i はガウス分布の中心（断面積変化の中心）、 c_i は局所的な断面積変化率のピークの大きさを表す。 σ_i はガウス分布の幅であり、列車先頭部形状の断面積変化の滑らかさを表す。 σ_i が小さいほど鋭い変化を意味し、 $\sigma_i \rightarrow 0$ のときはデルタ関数に対応する。 m は断面積変化の点数（段数）を表し、ここでは $m=3$ である。 d は最終段の断面積変化率の中心の先頭部後端からのずれを表し、後端部と断面積一定部の断面積変化率の不連続を緩和する効果を与える。 f は重み関数である。

式(9)-(11)において、設計パラメータの総数は $3m-2$ になる。本研究では、これらのパラメータの最適化に基本的な遺伝的アルゴリズムである単純GA (Simple Genetic Algorithm) を用いた。

Miyachiら¹⁵⁾が示しているように、線形音響理論では σ_i の最適値は0であるが、実際には不連続な断面積変化部では流れが剥離し、圧力勾配は増大する¹⁹⁾。本研究の目的は有限の滑らかさをもつ列車先頭部形状を考えることであるから、 σ_i の探索範囲を以下のように制限した。

$$\sigma_{\min} < \sigma_i < \sigma_{\min} + 0.4 \quad (12)$$

本研究では、以下の5つのタイプ先頭部形状、N02, W02, W02B, S02, W01について検討した。各先頭部の特徴を表1に示す。

表1 先頭部諸元

番号	タイプ	f	d	σ_{\min}
1	N02	1	0	0.2
2	W02	式(13)(14)	σ_{\min}	0.2
3	W02B	式(13)(14)	$2\sigma_{\min}$	0.2
4	S02	1	σ_{\min}	0.2
5	W01	式(13)(14)	σ_{\min}	0.1

ここで、W02, W02B, およびW01では、先頭部終端部の実スケール2m分の区間において、以下の重み関数に乗じて断面積変化率が先頭部終端で0となるようにしている。

$$X > L_n - \frac{2}{r_0} \text{ のとき}$$

$$f = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{X - \left(L_n - \frac{2}{r_0} \right)}{\frac{2}{r_0}} \pi \right) \right] \quad (13)$$

$X \leq L_n - \frac{2}{r_0}$ のとき

$$f = 1 \quad (14)$$

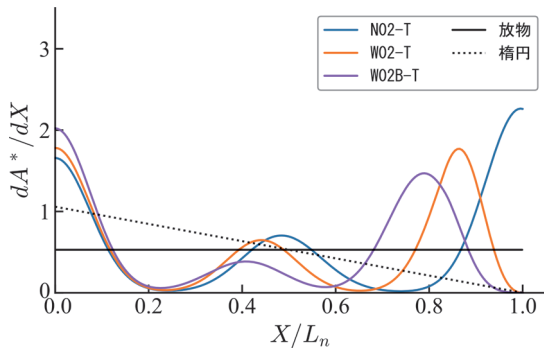


図3 W_T を用いて最適化した先頭部形状の断面積変化率分布 (実スケール 12m 先頭部)

伝達関数 W_T を用いて最適化した先頭部のタイプを末尾に“-T”を付けて表す。実スケールトンネル断面積 63.4m^2 、実スケール先頭部長さ 12m 、実スケール偏心量 2.2m を想定して、先頭部 1~3 に関して得られた最適先頭部形状の断面積変化率を図3に示す。これらの先頭部の形状は、先頭部先端と終端のピークが大きく、中央部のピークは裾野が広い。

3. 模型実験

3.1 模型実験概要

2.3 節で得られた列車先頭部の性能を調べるため、模型発射装置²³⁾を用いた模型実験を実施した。模型実験の概要を図4および図5、諸元を表2に示す。実スケール 63.4m^2 の新幹線トンネルを想定し、 $1/127$ スケール、列車速度 360km/h 、ブロックage比 (列車・トンネル断面積比) 0.17 とした。直径 100mm の円形トンネル模型坑口から 1m の位置に設置した2台の圧力計 (Kulite XCS-190-5G) によりトンネル内圧縮波の波形を計測した。 4m 間隔で設置したコイルを列車模型に内蔵した磁石が通過する時間差から列車速度を算出した。得られた

圧力変換器 P

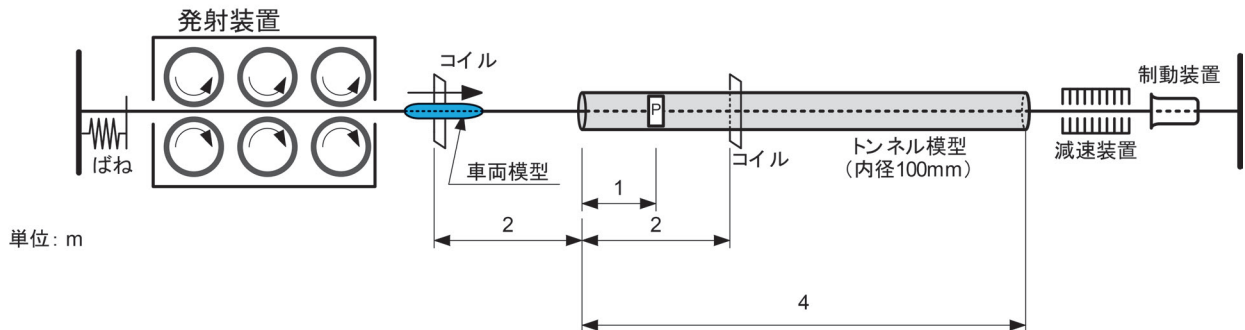


図4 模型実験概要



図5 模型実験の様子

表2 模型実験 諸元

ブロック比 R	0.17
速度 U (km/h)	360
トンネル内径 (mm)	100
先頭部長さ (mm)	94.5
列車全長 (mm)	1190
スケール	1/127
後尾部形状	回転楕円
先頭部実スケール長さ (m)	12
偏心量 (mm)	17

圧力波形から中心差分で圧力勾配波形を求めた。先頭部形状は N02-T, W02-T, W02B-T, 回転楕円体, 回転放物体の5種類である。回転楕円体は先頭部周りでの剥離の可能性が低いため、剥離の有無を判断する指標となる。回転放物体は単純形状ながら性能が良いため、最適先頭部の性能評価では圧力勾配最大値の比較指標となる。

3.2 実験結果

模型実験で得られた圧力波形を図6、圧力勾配波形を図7に示す。これらの図において、圧力は Δp_H で、時間スケールは $2r_0/U$ で無次元化している。列車先頭部先端は無次元時間0にトンネル坑口を通過する。線形音響

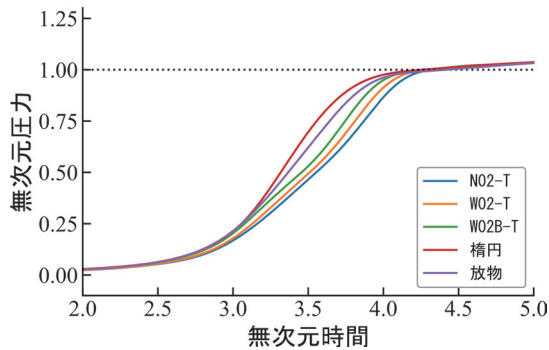


図6 W_T を用いて最適化した先頭部形状の無次元圧力波形 (実験結果：速度 360km/h)

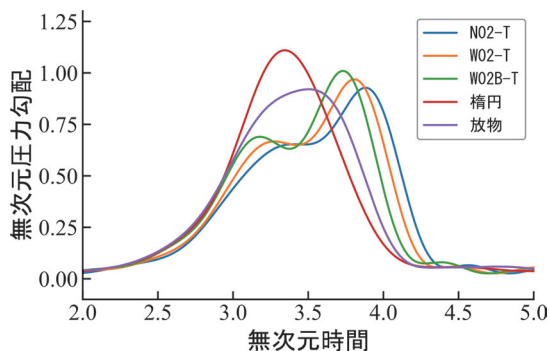


図7 W_T を用いて最適化した先頭部形状の無次元圧力勾配波形 (実験結果：速度 360km/h)

理論で最適化した3種類の先頭部 (N02-T, W02-T, W02B-T) による無次元圧力上昇量は、剥離のない回転楕円体先頭部によるものと等しく、ほぼ1となる。したがって、これらの先頭部周りの流れに大規模な剥離は無いといえ、角の丸みに制約を与えて剥離抑制を試みた式(12)の目的は達せられている。図7より、N02-T, W02-T, W02B-T および回転放物体先頭部の圧力勾配波形は右上がりとなっており、左右対称な台形型とはいえない。N02-T, W02-T, W02B-Tの圧力勾配最大値は比較指標である回転放物体の圧力勾配最大値よりも大きく、最適化は不十分である。

4. ウィナー・フィルタを用いた最適化

4.1 実験結果に基づく伝達関数 W_E

線形音響理論において非線形の効果をも補正するため、圧力勾配波形の実験結果 (出力) と先頭部断面面積分布 (入力) からウィナー・フィルタを求め、実験結果に基づく伝達関数を算出した。ここでは、最も性能の悪い先頭部形状 W02B-T について得られた実験結果を用いた。得られた伝達関数 (以下 W_E) を図1に示す。

W_E はピークを2つ持つ波形となっており、第1ピークのほうが第2ピークよりも大きい。 W_T と W_E を用いた回転放物体先頭部による圧力勾配波形の計算例を図8に示す。 W_T を用いた場合、 $L_n = \ell_n/r_0 \leq 2$ では圧力勾配波形は単一ピークであり、 $L_n=3$ では、やや左上がりの波形となっている。一方、 W_E を用いた計算例では、 $L_n \leq 1$ では第1ピークのほうが第2ピークより大きい左上がりの波形となるが、 $L_n \geq 2$ では右上がりとなっている。図7より、 $L_n=1.89$ (12m先頭部相当) の回転放物体の波形は、右上がりとなっており、 W_E を用いた $L_n=2$ の計算結果の傾向と一致する。

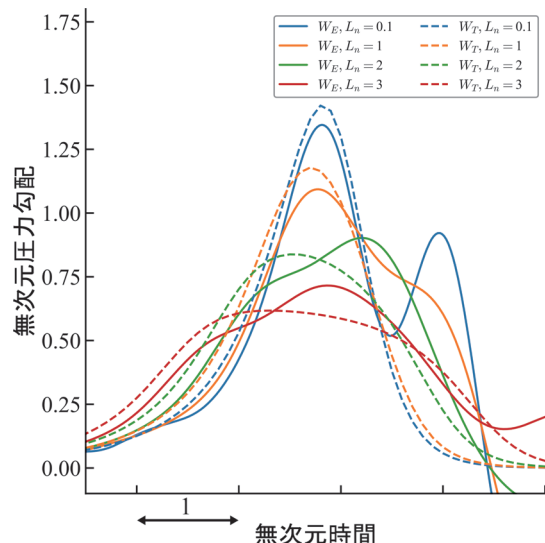


図8 回転放物体先頭部による圧力勾配波形計算例

4.2 W_E に基づく最適化

伝達関数 W_E に基づいて先頭部形状を最適化することを考える。本来、非線形の効果は線形の畳み込み積分で表すことはできないため、実験的に得られた伝達関数を用いても、あらゆる入力に対して非線形の影響を完全に表現することはできない。ここでは、最適化に使用する伝達関数を次のように定義する。

$$W(a) = (1 - a)W_T + aW_E \quad (15)$$

ここで、 a は伝達関数の修正係数で、

$$W_T = W(0) \quad (16)$$

$$W_E = W(1) \quad (17)$$

であり、両者の「中間」となる伝達関数を以下のように定義する。

$$W_M = W\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}(W_T + W_E) \quad (18)$$

W_E , W_M を用いて最適化を行った先頭部を末尾に“-E”および“-M”を付けて表す。N02-T, N02-E, N02-M の比較を図9に示す。N02-Tに比べてN02-Eは先頭部終端部の断面積変化率が小さくなっており、また先頭部中央部のピークの位置が列車前方（図9では左側）にシフトしている。これは、N02-Tによる圧力勾配波形が右上がりであることを修正するよう W_E がウィナー・フィルタにより更新されているためであり、N02-Eでは、N02-Tより断面積変化率分布が左上がりになるよう最適化されている。

表1の先頭部N02, W02, S02, W01の4種類のタイプについて、同様の最適化を行った。得られた先頭部形状一覧を表3に、断面積変化率分布を図10に示す。先頭部W01-Mの模型を図11に示す。模型実験でこれら7種類の最適先頭部の性能評価を行った。

表3 先頭部形状一覧

タイプ	W_M	W_E
N02	N02-M	N02-E
W02	-	W02-E
S02	S02-M	S02-E
W01	W01-M	W01-E

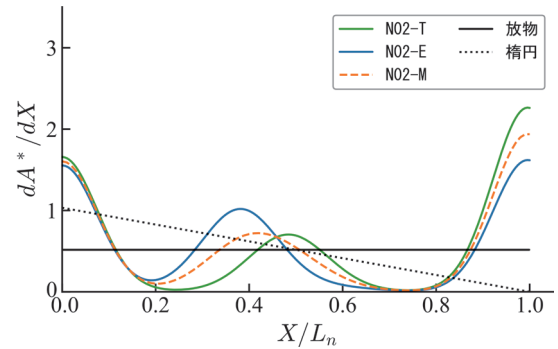


図9 異なる伝達関数に基づいて最適化された先頭部形状の比較 (N02)

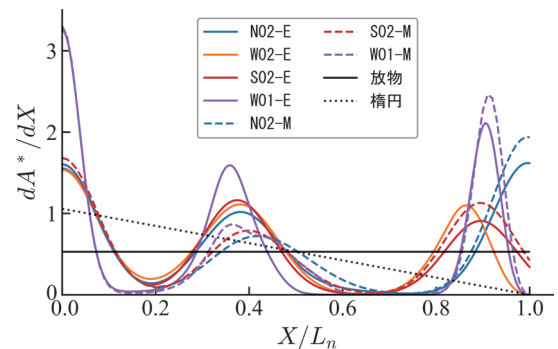


図10 W_E , W_M を用いて最適化した先頭部形状の断面積変化率分布 (実スケール 12m 先頭部)



図11 先頭部W01-Mの模型

4.3 実験結果

得られた圧力波形を図12、圧力勾配波形を図13に示す。先頭部末尾“-E”は、圧力勾配波形が“左上がり”となっており、修正が「行き過ぎ」になっている。これらの実験結果では無次元圧力上昇量が1となっているので、流れの剥離の影響がないことから、最適化が不十分である理由是非線形性の影響であるといえる。ウィナー・フィルタによる補正は線形性を仮定しており、非線形性の影響を完全に除去できない。先頭部“-M”による圧力勾配波形は2つのピークがそろっており、また、回転放物体より圧力勾配最大値が小さくなっていることから、最適化が進んでいることがわかる。

実験を行った全先頭部の性能を図14に示す。実験を行った先頭部の中で最も性能が良い先頭部はW01-Mであり、回転放物体との圧力勾配最大値比は0.87である。一方、中心走行の条件ではあるが、CFDを用いて最適化したMiyachiら¹⁵⁾の最適先頭部に関する実験結果では、3段先頭部と回転放物体による圧力勾配最大値比は0.78、従来型先頭部では0.82の程度である。したがって、本研究で得られた最適先頭部は、改良の余地を残している。

今後は剥離しない条件を精査し、式(12)のような剥離回避のための人為的な制約を緩和する必要がある。また、本研究では伝達関数の更新は1回のみであるが、同様の操作を繰り返せば、最適化の精度が向上すると考えられる。さらに、伝達関数の更新にはCFDの結果を利用することも考えられる。Miyachiら¹⁵⁾はCFDによる評価回数低減のため、応答曲面法を用いた最適化を行っている。グローバルな探索には応答曲面法などを用い、局所的な探索には本研究を適用して、試行回数の低減を試みる応用例も考えられる。

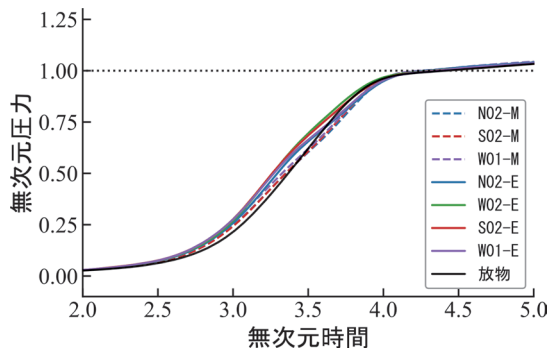


図12 W_E , W_M を用いて最適化した先頭部形状の無次元圧力波形 (実験結果：速度 360km/h)

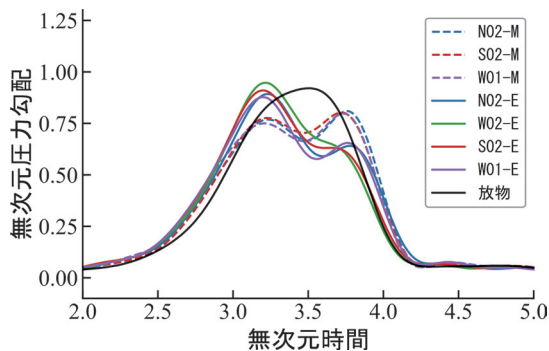


図13 W_E , W_M を用いて最適化した先頭部形状の無次元圧力勾配波形 (実験結果：速度 360km/h)

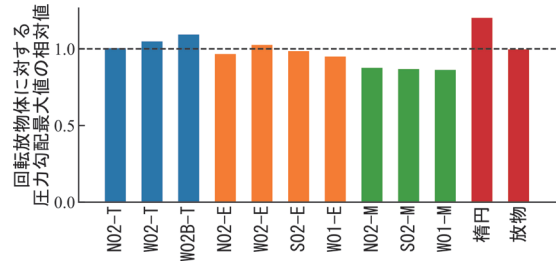


図14 全先頭部性能比較

5. まとめ

本研究では、複線トンネル内での列車の偏心走行を考慮した微気圧波低減のための先頭部形状最適化に関して、線形音響理論に基づく多段型先頭部の形状最適化を行った。線形音響理論の伝達関数、実験結果に基づく伝達関数、両者の平均をとった伝達関数の三種類の伝達関数を用いて得られる最適先頭部形状の性能を模型実験で比較した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 線形音響理論の理論的な W_T に基づく最適先頭部形状による圧力勾配波形は非線形効果のため右上がりであり、圧力勾配最大値は回転放物体のものよりも大きかった。伝達関数 W_T による先頭部形状最適化は誤差が大きいため、定量的な予測には補正が必要である。
- (2) 模型実験結果にウィナー・フィルタを適用して得られる伝達関数 W_E を用いた最適先頭部形状による圧力勾配波形は左上がりになり、修正が過大になった。
- (3) W_T と W_E を算術平均して得られる伝達関数 W_M を用いた最適先頭部形状による圧力勾配波形は2つのピークの高さがそろった台形型になった。得られた最適先頭部形状と回転放物体の圧力勾配最大値比は0.87の程度になった。中心走行の場合、CFDに基づいて得られた最適先頭部の回転放物体の圧力勾配最大値比は0.78であると報告されており、さらなる最適化の余地がある。

文献

- 1) 小沢智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No.1121, 1979
- 2) 梶山博司，木下真夫，前田達夫，種本勝二：列車先頭部形状の延長によるトンネル微気圧波低減効果に関する模型実験，鉄道技術研究所速報，No.A-87-119, 1987
- 3) Maeda, T., Matsumura, T., Iida, M., Nakatani, K., Uchida, K., "Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave

- Generated by Train Entering Tunnel,” Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, pp.315-319, 1993.
- 4) 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
 - 5) Ogawa, T., Fujii, K., “Numerical Simulation of Compressible Flow Induced by a Train Moving in a Tunnel,” Computational Fluid Dynamics Journal, Vol.3, pp.63-82, 1994.
 - 6) 小川隆申, 藤井孝蔵: 微気圧波軽減のための理論的列車先頭形状設計法, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.62, No.599, pp.2679-2686, 1996
 - 7) Kwon, H., Jang, K., Kim, Y., Yee, K., Lee, D., “Nose Shape Optimization of High-speed Train for Minimization of Tunnel Sonic Boom,” JSME International Journal Series C, Vol.44, pp.890-899, 2001.
 - 8) Lee, J., Kim, J., “Kriging-based Approximate Optimization of High-speed train Nose Shape for Reducing Micropressure Wave,” Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.221, pp.263-270, 2007.
 - 9) Lee, J., Kim, J., “Approximate Optimization of High-speed Train Nose Shape for Reducing Micropressure Wave,” Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.35, pp.79-87, 2008.
 - 10) Ku, Y.-C., Rho, J.-H., Yun, S.-H., Kwak, M.-H., Kim, K.-H., Kwon, H.-B., Lee, D.-H., “Optimal Cross-sectional Area Distribution of a High-speed Train Nose to Minimize the Tunnel Micro-pressure Wave,” Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.42, pp.965-976, 2010.
 - 11) Kikuchi, K., Iida, M., Fukuda, T., “Optimization of Train Nose Shape for Reducing Micro-pressure Wave Radiated from Tunnel Exit,” Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol.30, pp.1-19, 2011.
 - 12) Muñoz-Paniagua, J., García, J., 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, pp.48-61, 2014.
 - 13) 小澤雄太, 浅野兼人, 野々村拓, 大山聖, 藤井孝蔵, 山本誠, 守裕也: 微気圧波を軽減する列車先頭形状の特性, 第 29 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, D09-4, 2015
 - 14) Miyachi, T., Iida, M., Fukuda, T., Arai, T., “Nondimensional Maximum Pressure Gradient of Tunnel Compression Waves Generated by Offset Running Axisymmetric Trains,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.157, pp.23-35, 2016.
 - 15) Miyachi, T., Kikuchi K., Hieke M., “Multistep Train Nose for Reducing Micro-pressure Waves,” Journal of Sound and Vibration Vol.520, 116665, 2022.
 - 16) 宮地徳蔵, 菊地勝浩, 大久保秀彦: 高速列車の先頭形状を多段化してトンネル微気圧波を低減する, RRR, Vol.78, No.11, pp.4-7, 2021
 - 17) Howe, M.S., “The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel,” Proceedings of The Royal Society of London A, Vol.454, pp.1523-1534, 1998.
 - 18) Howe, M.S., Iida, M., Fukuda, T., Maeda, T., “Theoretical and Experimental Investigation of the Compression Wave Generated by a Train Entering a Tunnel with a Flared Portal,” Journal of Fluid Mechanics, Vol.425, pp.111-132, 2000.
 - 19) 佐久間豊, 宮地徳蔵, 福田傑, 鷹崎徹: 切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波 (第 1 報, 圧縮波の性状と地上側低減対策法), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.770, pp.2472-2479, 2010
 - 20) 宮地徳蔵, 小澤智, 新井隆景: 列車のトンネル突入により生じる圧縮波の波形予測に関する理論解析: 高プロジェクタ比問題への音響理論の適用, ながれ, 31, pp.45-59, 2012.
 - 21) Miyachi T., “Non-linear Acoustic Analysis of the Pressure Rise of the Compression Wave Generated by a Train Entering a Tunnel,” Journal of Sound and Vibration, Vol.458, pp.365-375, 2019.
 - 22) 原朝茂: 高速でトンネルに突入する場合に列車に作用する空気力, 日本機械学会論文集, Vol.26, No.171, pp.1581-1586, 1960
 - 23) 福田傑, 飯田雅宣: 列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験, 日本音響学会誌, Vol.63, No.9, pp.543-548, 2007