微気圧波軽減のための理論的列車先頭形状設計法*

小川 隆 申^{*1}, 藤井 孝 藏^{*2}

Theoretical Algorithm to Design a Train Shape for Alleviating the Booming Noise at a Tunnel Exit

Takanobu OGAWA and Kozo FUJII

In this work, we developed a theoretical algorithm to design a train shape for alleviating the booming noise caused by a train moving into a tunnel. In past studies, the authors clarified that the strength of the booming noise is proportional to u_{wall} which is defined as a lateral velocity component at the height of a tunnel wall in a steady flow field around a train. u_{wall} is theoretically obtained as a function of a train shape with the small perturbation theory. With these relations, a train shape is theoretically designed so as to minimize u_{wall} . This algorithm is applied to an axisymmetric flow under practical high speed conditions. The optimized train shape is obtained in a very short CPU time and the strength of the booming noise is reduced by about 20%. The efficiency of the optimized shape is verified by an unsteady numerical simulation of the flow field of the train moving into the tunnel. The results indicate that this algorithm can be an efficient method for designing a train shape that alleviate the booming noise.

Key Words: Fluid Dynamics, Compressible Flow, Compression Wave, High-Speed Train

1. 緒 言

列車が高速でトンネルに突入するとその前面で圧力が上昇して圧縮波が形成される。その圧縮波がトンネル出口を通過後、微気圧波と呼ばれるパルス状の圧力波となって周囲に広がり、場合によっては騒音となることが知られている⁽¹⁾(図1)。微気圧波の強さは列車トンネル突入速度のほぼ三乗に比例して強くなるため⁽²⁾、列車の高速化のためには微気圧波を軽減するための対策が不可欠である。微気圧波は列車トンネル突入時に形成される圧縮波の波面こう配に比例することが過去の研究から明らかになっている⁽¹⁾。したがって、微気圧波を軽減するには圧縮波の波面こう配を緩やかにすればよい。特に、列車やトンネルの形状を工夫することにより列車突入時のトンネル内圧力上昇を緩やかにし、トンネル入口において圧縮波波面こう配を緩和することが効果的であるとされている⁽¹⁾。

過去において、列車先頭形状を変形させることによって圧縮波波面こう配を緩やかにするための試みがいくつかなされている。Maeda ら⁽³⁾は列車先頭形状の変

化による圧縮波波面こう配への影響を実験的に調べている。回転だ円形、回転放物形、円すい形の発射体をダクトに打ち込み、それぞれの圧縮波波面こう配を比較した結果、回転放物形の場合の波面こう配が最も小さくなり、その理由を発射体断面積の空間こう配の最大値が回転放物形の場合に最小になるからであるとしている。しかしながら、発射体断面積の空間こう配が圧縮波波面こう配を決定づけるということに対する物理的な根拠は示されていないため、回転放物形が微気圧波軽減に対して最も有効であるとは断定できない。飯田ら⁽⁴⁾は、列車先頭部形状をいくつかの任意パラメータを含む関数によって表し、非線形計画法の一つである Rosenbrock 法⁽⁵⁾によって圧縮波波面こう配が最小になるような列車形状を求めている。Rosenbrock

Fig.1 The mechanism of generation of the booming noise

* 原稿受付 1995年8月28日。

^{*1} 正員、清水建設(株) (〒135 東京都江東区越中島3-4-17)。

^{*2} 正員、宇宙科学研究所 (〒227 相模原市由野台3-1-1)。

法は目的関数のこう配が未知である場合にパラメータを適当に変化させて目的関数の増減を調べ、その増減に応じてさらにパラメータを変化させるという手続きを繰返すことによって目的関数が極値をとるときのパラメータの値を求める手法である。飯田らの場合、パラメータは列車先頭形状に、目的関数は圧縮波波面こう配に相当し、列車形状を変化させたときの圧縮波波面こう配の増減を調べるには列車トンネル突入時の流れ場を調べなければならない。飯田らは列車トンネル突入時の流れ場を数値的に解くことによって求めているが、最適なパラメータを求めるために非定常で、しかも移動境界を有する流れ場を繰返し数値的に解かなければならず、少なからぬ演算時間が必要になると考えられる。しかも、列車トンネル突入時の流れは基本的に非線形現象であり、得られた最適値はパラメータの初期値や変化のさせ方に依存するため、実際に圧縮波波面こう配を最小にする値であるかどうかの保証はない。このように、列車先頭部形状を変形させることによって圧縮波波面こう配を緩和させる研究はなされているものの、依然として実用的な列車形状設計法は確立させていない。そのおもな理由の一つは、列車形状と圧縮波波面こう配との関係が明確でなく、列車形状設計指針が明らかにされていなかったためである。

本研究の目的は微気圧波を軽減させるべく圧縮波波面こう配を緩和させるための理論的列車先頭形状設計法を確立することである。著者らは過去の研究⁽⁶⁾において、列車トンネル突入時の流れ場を簡単な一次元流れとしてモデル化することにより、圧縮波波面こう配が一樣流中に置かれた列車まわりの定常流において定義されるパラメータ v_{wall} に比例することを明らかにし、圧縮波波面こう配を緩和させるには v_{wall} の最大値を小さくするように列車先頭形状を決定するばよいという指針を示した。この結果に基づき、ここでは軸対称流れの場合について列車先頭形状と v_{wall} とを微小変動理論によって解析的に関係づけ、 v_{wall} の最大値が最小になるよう最適化された列車形状を理論的に求める方法について述べる。そして、この方法を実用的な列車突入速度、列車トンネル断面積比の流れ場について適用して最適列車形状を求め、得られた列車形状によって実際に設計上の効果を得られるかどうかを非定常数値解析によって検証した結果について示す。また、列車形状と v_{wall} との関係を明らかにすることにより、一般的にどのような形状が微気圧波軽減に効果的であるか議論する。

2. 記 号

- v_{wall} : 一樣流中に置かれた列車まわりの定常流における、想定されるトンネル壁面の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
 x : 列車の進行方向
 r : 半径方向
 u, v : x, r 方向の変動速度成分
 U : 列車トンネル突入速度
 M : 一樣流マッハ数, または列車トンネル突入マッハ数
 $R(x)$: 列車半径
 a : 列車先頭部長さ
 b : 列車最大半径
 a/b : 列車先頭部アスペクト比
 R_t : 列車トンネル断面積比
 ϕ : 変動速度ポテンシャル
 H : トンネル壁面高さ
 $f(x)$: わき出し密度

3. 微小変動理論による 列車先頭形状設計法

3・1 問題の定式化 前述のように、微気圧波は列車トンネル突入時に形成されるトンネル内圧縮波の波面こう配に比例し、さらに圧縮波波面こう配は v_{wall} に比例する。したがって、微気圧波軽減のためには

Fig. 2 The definition of v_{wall}

Fig. 3 v_{wall} in an axisymmetric flow

Fig. 4 A steady inviscid axisymmetric flow around a train

v_{wall} を小さくするように列車先頭形状を設計すればよい。ここで、 v_{wall} とは図2に示すように、列車トンネル突入速度と同じ速さの一樣流中に置かれた列車まわりの定常流において、想定されるトンネル壁面の位置でのトンネル壁面に垂直な速度成分の周方向の積分値である。したがって、 v_{wall} は列車の長さ方向に分布をもつ関数であるが、圧縮波がその波形を維持しながら伝ばする範囲内では、ある点における圧縮波の $\partial p / \partial t$ の時間履歴は v_{wall} の空間分布を時間履歴に変換することによって求めることができる。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から、図3に示すように想定するトンネル壁面高さ H におけるトンネル壁面に垂直な速度成分、つまり $v_{r=H}$ を v_{wall} とすることができる。

図4に示すような一樣流 U の列車まわりの非粘性軸対称定常流について考える。列車半径を $R(x)$ とし、列車先頭部長さ、つまり列車先端から列車半径の変化がなくなる位置までの長さを a 、列車最大半径を b とする。すなわち $R(x) = b(x \geq a)$ 。また、列車トンネル断面積比 R_t の定義より、 $b = \sqrt{R_t} H$ と表すことができる。

列車断面積は微小であり、かつ列車断面積の変化もいたる所で小さいとする。そして、列車の存在による速度変動もまた微小であるとし、変動速度ポテンシャルが存在すると仮定する。ここで、微小量に関する高次項を無視すると、次のような線形化された変動速度ポテンシャル ϕ の式が得られる。

$$(1 - M^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

この方程式の一般解は次式で与えられる⁽⁷⁾。

$$\phi(x, r) = - \int_0^a \frac{f(\xi)}{\{(x - \xi)^2 + m^2 r^2\}^{1/2}} d\xi \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $m^2 = 1 - M^2$ 、 M は一樣流マッハ数、また、 f は列車が流体に与える影響と等価なわき出し密度で、概念的に図5のように表すことができる。

変動速度成分は定義から、

Fig. 5 The source distribution f equivalent to the train

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \int_0^a \frac{f(\xi)(x - \xi)}{\{(x - \xi)^2 + m^2 r^2\}^{3/2}} d\xi \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial r} = m^2 \int_0^a \frac{f(\xi)r}{\{(x - \xi)^2 + m^2 r^2\}^{3/2}} d\xi \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。軸対称流の場合、物体面の傾斜が流線の傾斜に等しいという境界条件は次式のように書ける⁽⁷⁾。

$$R \frac{dR}{dx} = R \left(\frac{v}{U + u} \right)_{r=R} \simeq \frac{(vr)_{r=0}}{U} \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式右辺に式(4)を代入して、 $r \rightarrow 0$ の極限に移行させると次のように変形することができる。

$$\begin{aligned} R \frac{dR}{dx} &= \frac{m^2}{U} \int_0^a \frac{f(\xi)r^2}{\{(x - \xi)^2 + m^2 r^2\}^{3/2}} d\xi \\ &= \frac{m^2 f(x)}{U} \int_0^a \frac{r^2}{\{(x - \xi)^2 + m^2 r^2\}^{3/2}} d\xi \\ &= \frac{m^2 f(x)}{U} \left[- \frac{(x - \xi)}{\{(x - \xi)^2 + m^2 r^2\}^{1/2}} \right]_0^a \\ &\simeq \frac{f(x)}{U} \quad (r \rightarrow 0) \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

この式は、列車形状とそれに対応するわき出し分布との関係を与える。上式の両辺を列車先頭部である $0 \leq x \leq a$ の範囲で積分すると、

$$\begin{aligned} \int_0^a f(x) dx &= U \int_0^a R(x) \frac{dR(x)}{dx} dx \\ &= U \int_0^b R dR [b = R(a)] = U \left(\frac{1}{2} R^2 \right)_0^b = \frac{Ub^2}{2} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

となり、 f の積分値は $Ub^2/2$ に等しくなければならない。この条件は $x \geq a$ での列車半径が b であるという制約に相当する。

トンネル壁面の高さを H とすると、 v_{wall} は次のように書くことができる。

$$v_{\text{wall}} \equiv v_{\text{wall}}(x) = m^2 H \int_0^a \frac{f(\xi)}{\{(x - \xi)^2 + m^2 H^2\}^{3/2}} d\xi \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、その最大値を v_{max} とすると、

$$v_{\text{max}} = v_{\text{wall}}(x_{\text{max}})$$

$$= m^2 H \int_0^a \frac{f(\xi)}{\{(x_{\max} - \xi)^2 + m^2 H^2\}^{3/2}} d\xi \quad \dots (9)$$

となる。ここで、 $x_{\max}$ とは $v_{\max}$ が最大となる x の値である。微気圧波を軽減する、つまり圧縮波波面こう配を緩和するための列車先頭形状を求めることは $v_{\max}$ を小さくするような f の分布を求めることに帰着される。すなわち、目的関数となる汎関数 $E(f)$

$$E(f) = \int_0^a \frac{f(\xi)}{\{(x_{\max} - \xi)^2 + m^2 H^2\}^{3/2}} d\xi \quad \dots (10)$$

を最小にするような f を求め、得られた f から式(6)の関係を用いて列車形状 R を求めれば、微気圧波の最大値を最小にする最適列車形状が得られる。

3.2 最適化アルゴリズム 次に $E(f)$ を最小にするための最適化アルゴリズムについて説明する。汎関数を最小にするような関数を求める問題は変分法などによって解析的に解くことが可能である場合もあるが、式(10)の場合には $x_{\max}$ が f の関数であるためこれを解析的に解くことは困難である。そこで、本法では f を任意パラメータを含む適当な関数の和で表し、任意パラメータに関する目的関数 E のこう配が零であるという方程式を解くことによって、 E を最小にするような最適パラメータを求めるという方法を用いた。

まず、 f を次のようにいくつかの関数の和として表す。

$$f(x) = f_0(x) + c_1 f_1(x) + c_2 f_2(x) + \dots \quad \dots (11)$$

ここで、 $c_i (i=1, 2, \dots)$ は任意のパラメータである。このとき、 f は条件、式(7)を満足しなければならない。 E が最小になるとき、 c_i は次の式を満足する。

$$E_i = \frac{\partial E}{\partial c_i} = 0 \quad \dots (12)$$

ここで、

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = \int_0^a \left[\frac{f_i(\xi) H}{\{(x_{\max} - \xi)^2 + m^2 H^2\}^{3/2}} - \frac{3f(\xi)(x_{\max} - \xi)}{\{(x_{\max} - \xi)^2 + m^2 H^2\}^{5/2}} \frac{\partial x_{\max}}{\partial c_i} \right] d\xi \quad \dots (13)$$

Fig. 6 The convergence history of $v_{\max}$

上式を c_i について解けば最適なパラメータを得ることができる。ここではこの方程式を解くのに Newton 法を用いた。つまり、適当な初期値 $c_{i(0)}$ から始めて、次の反復公式を繰返すことにより、 $E_i=0$ となるような c_i を近似的に求める。

$$c_{i(n+1)} = c_{i(n)} + \sum_j \bar{E}_{ij(n)} E_{j(n)} \quad \dots (14)$$

ここで、 $\bar{E}_{ij}$ は行列 E_{ij} の逆行列で、 E_{ij} は次のように定義できる。

$$E_{ij} = \frac{\partial E_i}{\partial c_j} = \frac{\partial^2 E}{\partial c_i \partial c_j} \quad \dots (15)$$

4. 適用例、および考察

次に f をただ一つのパラメータだけで表した場合に本設計法を適用した結果について説明する。任意パラメータが一つの場合、 f は次のようになる。

$$f(x) = f_0(x) + c_1 f_1(x) \quad \dots (16)$$

ここで、 f_0, f_1 は次のように定義した。

$$f_0(x) = \frac{U b^2}{2a} (= \text{const.})$$

$$f_1(x) = \cos \left\{ \frac{2\pi}{a} \left(x - \frac{a}{2} \right) \right\} \quad \dots (17)$$

この場合明らかに $f(x)$ は式(7)を満足する。 c_1 の初期値は零として列車形状の最適化を行った。すなわち、初期状態では、

$$R(x) = \left\{ 2 \int_0^x \frac{f(\xi)}{U} d\xi \right\}^{1/2} = \left\{ 2 \int_0^x \frac{f_0}{U} d\xi \right\}^{1/2} = \sqrt{2 \frac{f_0}{U} x} \quad \dots (18)$$

であるから、初期において列車先頭部は回転放物形となっている。流れ場の条件は列車トンネル突入マッハ数 0.188 (230 km/h)、列車先頭部アスペクト比 $a/b = 5.0$ 、列車トンネル断面積比 0.156 ($b/H = 0.395$) で、実用的な高速車両にほぼ近い条件とした。なお、代表速度を基準状態における音速 c 、代表長さをトンネル壁面高さ H とし、圧力は ρc^2 (ρ は基準状態における密度) によって無次元化した。このような条件のもとで任意パラメータが一つの場合の最適列車形状を求める。

最適値に至るまでの $v_{\max}$ の履歴を図 6 に示す。最適

Fig. 7 The initial and optimized source distribution f

Fig. 8 The initial and optimized train shapes (the cross sections)

Fig. 9 The initial and optimized train shape (perspective view)

Fig. 10 The initial and optimized v_{wall} distribution

値に収束するまでの繰返し計算がたかだか6回、計算時間はPC (i 486 DX 2 / 66 MHz) でわずか2分程度であり、必要とされる演算量は極めて小さい。 v_{max} は初期において0.0442であったものが最終的に0.0351となり、圧縮波波面こう配の最大値は設計上約21%軽減されることになる。ただし、ここでいう最適形状とは任意パラメータが一つの場合についてであり、任意パラメータを増やして列車形状に自由度をもたせることによって波面こう配の最大値をより小さくすることができる可能性がある。図7は f の初期分布と最適化

(a) The initial shape

(b) The optimised shape

Fig. 11 The schematic figures that illustrate the relation between the source distribution f and v_{wall}

Fig. 12 The pressure gradient histories obtained by the unsteady computation ($M=0.188$, $R_t=0.156$)

された分布の比較である。始め一定値であった f が、最終的に両側が強く中心で小さい値となるような分布になっている。これらの f の分布から式(6)の関係を用いて求めた列車の初期形状と最適化形状を図8に示す。また、図9にはこれらの形状を三次元的に表示した。 f の分布から予想されるように、最適化された形状は先端付近と列車先頭部の後端付近において大きな

こう配をもった形状となっている。

図 10 はそれぞれの形状での v_{wall} の分布である。 f の分布の変化に対応して、最適化された形状では v_{wall} は中心 ($x=a/2$) 付近で小さく、その両脇で大きな値となっている。線形微小変動理論によれば、 v_{wall} はある点 ξ での強さ $f(\xi)$ のわき出しによって誘起される速度 $v(\xi)$ を $0 \leq \xi \leq a$ の範囲で足しあわせることによって得られる [図 11(a)]。初期状態のように f が均一である場合、 v_{wall} は列車先頭部の中心 $x=a/2$ では近傍のわき出しの影響を受けるため大きくなり、逆に中心から離れるにつれ、 $x < 0$, $x > a$ では $f=0$ であるから v_{wall} は小さくなる。したがって、 v_{max} を小さくするためには図 11(b) に示すように f を列車先頭部の中心で小さく、両端で大きくすればよいことがわかる。このことは、圧縮波波面こう配を小さくするには列車先頭部における先端と後端で大きなこう配をもつ列車形状が有効であることを意味しており、最適化された列車先頭形状が図 8 のようになることの物理的説明を与える。

最適化された列車形状の圧縮波波面こう配緩和効果を検証するために、初期形状と最適化形状について列車トンネル突入時の非定常非粘性流を数値的にシミュレートし、それぞれの圧縮波波面こう配の強さを比較した。使用したプログラムは実験結果とよく一致した結果が得られることが過去の研究で確認されている⁽⁸⁾。図 12 はトンネル入口からトンネル径の 6.8 倍離れたところでの圧力の時間微分値、つまり圧縮波波面こう配の時間履歴である。 v_{wall} の場合と同様に圧縮波波面こう配についても、最適化形状では初期形状で最大となるところで小さく、その両脇で大きな値となっている。数値計算で得られた圧縮波波面こう配の最大値は初期形状で 1.14×10^{-3} 、最適化形状で 0.91×10^{-3} と設計値どおり約 21% 軽減している。ただし、理論によって得られた v_{wall} の分布は $x=a/2$ を中心に左右対称であるのに対し、非定常数値計算で得られた dp/dt の履歴は左右対称にはなっていない。これは、線形微小変動理論において無視した変動量の高次項の影

Fig. 13 The optimized f distribution for each blockage R_t

響が列車断面積が有限であるために現れたためである。しかし、ここで問題となる dp/dt の最大値については、理論値と計算値がほぼ一致することから高次項

Fig. 14 The effect of the blockage R_t on the parameter $c_1/(Ub^2)$

Fig. 15 The effect of the blockage R_t on the reduction of v_{max}

Fig. 16 The effect of the tunnel entry Mach number M on the parameter $c_1/(Ub^2)$

Fig. 17 The effect of the tunnel entry Mach number M on the reduction of v_{max}

の影響は小さいと考えられる。

次に、列車トンネル断面積比と列車トンネル突入速度がそれぞれ変化した場合に、最適形状がどのように変化するかを調べる。

まず、列車突入マッハ数を 0.2 として列車トンネル断面積比 R_t を 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 と変化させた場合について調べる。ただし、列車先頭部長さ a は列車トンネル断面積比が 0.15 のときに列車先頭部アスペクト比 a/b が 5 となるような長さに固定した。すなわち、 $a=5b=5\sqrt{0.15}H$ 。それぞれの断面積比について最適化を行った結果得られたわき出し密度分布 f を図 13 に示す。それぞれの f の分布は列車トンネル断面積比 R_t の大きさに比例した分布となっている。

式(6)から列車最大半径で正規化した列車形状 R/b は次のように表すことができる。

$$R/b = \left[\frac{1}{a}x - \frac{c_1}{Ub^2} \frac{a}{\pi} \sin \left\{ \frac{2\pi}{a} \left(x - \frac{a}{2} \right) \right\} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

上式から、アスペクト比 a/b が同じであれば最適列車形状はパラメータ $c_1/(Ub^2)$ で決定づけられることがわかる。それぞれの列車トンネル断面積比 R_t に対するパラメータ $c_1/(Ub^2)$ を図 14 にプロットした。図 14 からパラメータ $c_1/(Ub^2)$ は R_t に対して変化せず、最適列車形状 R/b は列車トンネル断面積比に依存しないことがわかる。また、 $v_{\max}$ の軽減効果の変化を見るために、それぞれの R_t に対して $v_{\max}$ の初期値 v_{init} と最適値 v_{opt} の比 $v_{\text{opt}}/v_{\text{init}}$ をプロットしたのが図 15 である。図 15 から列車トンネル断面積比 R_t は最適列車形状の $v_{\max}$ 、つまり微気圧波の軽減効果にも影響を与えないことがわかる。

次に、列車トンネル断面積比 R_t を 0.20、列車先頭部アスペクト比 a/b を 5 に固定して、列車トンネル突入マッハ数を 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 と変化させた場合の最適列車形状の変化について調べる。列車トンネル突入マッハ数が $M \rightarrow 0$ の極限においては、 $m^2=1$ ($=\text{const.}$) となるので、目的関数、式(10)の形から、先の列車トンネル断面積比の場合と同様に最適列車形状は列車トンネル突入速度に依存しない。しかし、列車トンネル突入マッハ数が有限値の場合には状況は異なる。

列車トンネル突入速度 U を変化させた場合に求められた最適列車形状のパラメータ $c_1/(Ub^2)$ をプロットすると図 16 のようになり、 U の増加とともにパラメータ c_1/U は増加する。つまり、列車突入速度が増加すると、最適列車形状を求めるためには列車形状をより大きく変形させる必要がある。これは、式(10)中の

m^2H の項の影響による。図 17 に、それぞれの列車突入マッハ数 M について $v_{\max}$ の初期値 v_{init} と最適値 v_{opt} の比 $v_{\text{opt}}/v_{\text{init}}$ をプロットした。列車トンネル突入マッハ数 M の増加とともに、 $v_{\text{opt}}/v_{\text{init}}$ は大きくなり、 $v_{\max}$ の軽減効果はわずかではあるが小さくなっていることがわかる。

5. 結 論

v_{wall} と圧縮波波面こう配との比例関係を利用して、微小変動理論を用いた圧縮波波面こう配緩和、つまり微気圧波軽減のための理論的列車先頭形状設計法を開発した。実用的な高速列車に近い条件での軸対称流れの場合に適用した結果、非常に短い計算時間で最適形状を求めることができた。また、非定常非粘性数値解析による検証の結果、設計値どおり約 20% の圧縮波波面こう配緩和の効果が得られることが確かめられた。これらの結果から、本設計法は微気圧波軽減のための列車形状設計法として極めて有効な手法であることが示された。また、列車形状と v_{wall} との関係を解析的に調べることにより、微気圧波を軽減するためには列車先頭部での先端と後端において列車半径のこう配を大きくすればよいことを明らかにした。

さらに、列車トンネル断面積比と列車トンネル突入マッハ数をそれぞれ変化させ、最適列車形状がどのように変化するかを調べた。その結果、列車先頭部長さを固定し、列車トンネル断面積比を変化させても、列車最大半径で無次元化した列車形状は変化せず、微気圧波軽減効果も変わらないことが明らかになった。列車突入マッハ数を増加させた場合、最適列車形状は初期形状からより大きく変形させる必要があり、また、微気圧波軽減効果は小さくなることが明らかになった。

本論文では軸対称の流れ場で単純な列車形状についてのみ適用したが、本設計法は線形の微小変動理論を利用しているので、実用的な列車形状への拡張は容易に行うことができる。

本設計法は非粘性流の理論に基づいているので、結果の検証も非粘性流について行った。実際には粘性の影響により列車先頭部で流れがはく離する可能性があり、その場合には本設計法で期待したトンネル出口騒音軽減効果を得ることはできない。しかし、このような理論的方法によってトンネル出口騒音軽減に効果的な列車形状の物理的な意味とともに基本的な列車形状設計指針を明らかにすることができた。

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) 山本彬也, トンネル出口からの微気圧波, 日本物理学会春の分科会講論集, (1977).
- (3) Maeda, T., Matsumura, T., Iida, M., Nakatani, K. and Uchida, K., Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel., *STECH*, (1993).
- (4) 飯田雅宣・吉田康夫・前田達夫・小川哲・和田安弘, 高速鉄道に関わる空力問題の数値シミュレーション(その2), 航空宇宙技術研究所特別資料, SP-27(1995).
- (5) 杉江日出澄, FORTRAN 77 による数値計算法, (1986), 169-173, 培風館.
- (6) 小川隆申・藤井孝蔵, 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.
- (7) Liepmann, H.W. and Roshko, A., *Elements of Gas-dynamics*, (1960), John Wiley&Sons.
- (8) Ogawa, T. and Fujii, K., Effect of Train Shape on a Compression Wave Generated by a Train Moving into a Tunnel, *Proc. Shock Wave Symp.*, (1994).
-