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2報, 入口フード形状の影響)

鹿毛 一之^{*1}, 三宅 寿生^{*2}, 川越 茂敏^{*3}

Numerical Study of Compression Waves Produced by High-Speed Trains Entering a Tunnel (2nd Report, Effects of Shape of Hood)

Kazuyuki KAGE, Hisao MIYAKE and Shigetoshi KAWAGOE

In this paper, compression waves produced by hooded trains which enter a tunnel at high speed were numerically investigated. The equations of the one-dimensional, unsteady and compressible flow in which the area of a tube is dependent on the time and the distance were numerically solved by the method of characteristics. The calculations were performed for tunnels with various hoods of different shapes in cases in which the speed of the train was 200 km/h or 300 km/h, and the effects of the shape of the hood on the shape and the strength of compression waves were quantitatively clarified. The results show that the pressure gradient of compression waves is greatly affected by the shape of the hood.

Key Words: High Speed Train, Tunnel, Compression Waves, Compressible Flow, Characteristic Method, Hood, Pressure Gradient with Time

1. ま え が き

近年における鉄道車両の目ざましい高速化は、トンネル出口からの微気圧波放出による騒音発生などの新たな問題を生みだしており⁽¹⁾⁽²⁾, それに対応する騒音低減策として、列車がトンネル内に進入する際に発生するトンネル入口波の制御, 圧縮波が長いトンネル内を伝播する際の非線形効果の制御, トンネル出口から放出される微気圧波の制御などの方法が模索されるとともに⁽¹⁾, いろいろな角度からの研究がなされている^{(3)~(10)}. 入口波対策の一つとして, トンネル入口に設けたフードによって入口波の圧力こう配がかなり減少することが, 模型実験および列車速度 200 km/h 程度の実機試験の結果で明らかにされている⁽¹⁾ が, 入口フードの影響については, 列車速度がさらに増加した場合や種々のフード形状について, 入口波の圧力波形, 強さ, 圧力こう配の最大値および平均値を理論的に予測することが, 今後さらに重要になると思われる.

トンネル入口波に関して, 著者らは第1報⁽³⁾で, ト

ンネル入口波の形成過程における列車速度, 列車鼻部の長さおよび列車断面積の影響を, 数値解析によって明らかにしたが, 本報では, トンネル入口波に対するフード形状の影響を, 列車速度が 200 km/h と 300 km/h について, フード断面積がフード入口からトンネル本体まで, 距離に関して線形的に変化する場合, 二次関数的に変化する場合およびフードとトンネルの接続部でほぼ不連続的に変化する場合に, フードの入口断面積とフード長さをパラメータとして特性曲線法によって数値解析し, 入口で形成される圧縮波の圧力波形, 強さ, 時間的 maximum および平均圧力こう配などの特性量を評価して, フードの付いたトンネル入口波の形成メカニズムを明らかにし, 騒音低減により効果的なフード形状を考察した結果を報告する.

2. 数 値 計 算 法

2・1 基礎方程式 トンネル入口波に対する二次元, 三次元の影響は, 管軸に垂直方向に, 波面上を音速程度の速さで伝わり, 波面の一次元性からのずれは, きわめて短時間で小さくなることから, 解析には一次元の特性曲線法を適用する. 流れ場の概要を図1に示す. 図1(a)は初期状態($t=0$)で, 列車の先端がフード入口直前に位置している. A_{T0} , および A_T は列車の

* 原稿受付 平成4年4月1日.

*¹ 正員, 大分大学工学部 (☎870-11 大分市旦野原 700).

*² 学生員, 大分大学大学院.

*³ 正員, 久留米工業高等専門学校 (☎830 久留米市小森野町 1232).

断面積, 列車の鼻部断面積で, L_N は列車鼻部の長さ, L は計算に供した流れ場の長さである. 図1(b)は流れ場の格子点で, ΔX の等間隔微小区間に分割し, フード入口および流れ場末端が $i=1$ と $i=i_{\max}$ に対応する. 列車進入によって誘起されるトンネル内流れの方程式は, トンネルの有効断面積を時間と距離に関する変数とした一次元の非定常圧縮性流れの式として次のように表される.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial t} - a^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{(x-1)p}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 u \frac{\partial \rho}{\partial x} &= 0 \\ \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで, u, p, ρ, a, x, A, t および x は, それぞれ流速, 圧力, 密度, 音速, 比熱比, トンネル有効断面積, 時間およびトンネルに沿った距離を示す.

2.2 特性方程式 流れの基礎方程式(1)は, 流れ場における C^+ 特性線, C^- 特性線および粒子軌跡の方向に沿っての状態量変化を示す特性方程式に変換され, $C = a/a_0$, $U = u/a_0$, $C_a = a_a/a_0$, $X = x/L$, $\tau = a_0 t/L$ のように無次元化すると次のような無次元特性方程式が得られる.

C^+ 特性線: $dX/d\tau = U + C$ に沿って

$$\begin{aligned} dC + \frac{x-1}{2} dU &= \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(x-1)C}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau \\ &\quad - \frac{(x-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} dX \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

C^- 特性線: $dX/d\tau = U - C$ に沿って

$$\begin{aligned} dC - \frac{x-1}{2} dU &= \frac{C}{C_a} dC_a - \frac{(x-1)C}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau \\ &\quad - \frac{(x-1)CU}{2A} \frac{dA}{dX} dX \end{aligned}$$

粒子軌跡: $dX/d\tau = U$ に沿って

(a) 初期状態 ($t=0$)

(b) 格子点

図1 流れ場の概要

$$dC_a = \frac{(x-1)C_a}{2xA} \frac{dA}{d\tau} d\tau$$

ここで, a_0 はトンネル内気体の初期状態の音速, a_a は a, p の状態にある気体を等エントロピー的にトンネル内初期圧力 p_0 まで変化させたときの音速で, $a_a/a = (p_0/p)^{(x-1)/2x}$ で与えられる. 式(2)において, $(dA/d\tau)/A$ および $(dA/dX)/A$ の値が列車の進行に対応して与えられると, まず(2)の第3式より dC_a が求まり, 第1式と第2式より dU と dC が計算され, 各格子点の流れの諸量が次々に求められる. フード入口 ($i=1$) では, 圧力が常に大気圧に等しいという境界条件を用い, 流れ場末端 ($i=i_{\max}$) では流れの諸量が不変とした.

2.3 計算条件

計算に供したフード形状の概要を図2に示す. 図2の L_H, L_C, A_{H0}, A_H および A_0 はフード長さ, 接合部長さ, フード入口断面積, フード断面積およびトンネル断面積を示している. 図2(a)は A_H が x に関して線形的に変化する場合(線形フード), 図2(b)は A_H が二次関数的に変化する場合(二次関数形フード), 図2(c)は A_H が接合部ではほぼ不連続的に変化する場合(不連続形フード)である. 計算では, トンネル内初期圧力 p_0 が大気圧 p_{at} に等しく

(a) 線形フード

(b) 二次関数形フード

(c) 不連続形フード

図2 フード形状

$p_0 = p_{at} = 0.101 \text{ MPa}$ とし、トンネルの断面寸法は文献(1)を参照して、トンネル等価直径 $D=9 \text{ m}$ 、トンネル断面積 $A_0=63.4 \text{ m}^2$ とした。計算は $L=100 \text{ m}$ 、トンネル断面積に対する列車断面積の比 $R=0.216$ 、列車鼻部長さ $L_N=5 \text{ m}$ 、接合部長さ $L_c=2.0 \text{ m}$ とし、列車速度 $U_T=200 \text{ km/h}$ と 300 km/h について、フード面積比 $A_{H0}/A_0=1.0 \sim 2.0$ 、フード長さ比 $L_H/D=0.5 \sim 1.5$ について行った。計算における距離の格子点は 801 点とし、時間間隔 $\Delta t=0.9 \Delta X$ とした。

3. 計算結果と考察

図3は列車速度 $U_T=300 \text{ km/h}$ 、フード長さ L_H/D

$=1.0$ 、フード断面積 $A_{H0}/A_0=1.6$ の線形フードについての計算結果を示したものである。図3(a)は列車進入後の各時点におけるトンネル有効断面積の距離変化を示し、 $x/D=0$ がフード入口、 $x/D=1.0$ がフードとトンネルの接合部、点 FH が列車鼻部先頭、点 FT が鼻部後端に対応する。図3(b)は各時点のトンネル内圧力分布を示したもので、点 CH が列車の進入によって発生する圧縮波の先端で、急こう配の圧力上昇および緩やかなこう配の圧力上昇がそれに続く。鼻部後端 FT では大気圧以下にまで減少し、フードがディフューザの役目をしてフード入口で大気圧になる。図3(c)はトンネル内に生じる気流の速度分布を示したもので、流速 V の符号は列車進行方向を正にとっている。圧縮波によって誘起された流れは、列車鼻部の通過で流れ方向が逆転し、フードで減速されて大気中に流出する。図3(d)はトンネル各点における圧力の時間変化を示したもので、 t は列車進入後の経過時間である。圧力こう配の大きい圧縮波の後にこう配の緩やかな圧縮波が続き、点 CH から点 CT までをトンネル入口波とみなすことができ、その時間幅をトンネル入口波の幅と定義する。入口波の形成メカニズムについて

(a) 流路面積の変化

(b) トンネル内の圧力分布

(c) トンネル内の流速分布

(d) 圧力の時間的変化

(e) 入口波の時間的圧力こう配

図3 トンネル入口波および流れの様相 (線形フード)
 $(U_T=300 \text{ km/h}, L_H/D=1.0, A_{H0}/A_0=1.6)$

ては後述する。図3(e)は入口波の時間的圧力こう配の分布を示したものである。入口波は圧力こう配の大きい前半部と小さい圧力こう配の後半部から成っている。図4は図3と同じ条件での不連続形フードにおける入口波を示したものである。図4(a)はトンネル各点での圧力の時間変化を示したもので、こう配の大きな圧縮波の後に、膨張波と圧縮波、さらにその後に、ややこう配の小さい圧縮波と弱い膨張波が続き、これらが入口波を構成する。形成メカニズムの詳細については後述する。図4(b)は入口波の時間的圧力こう配の分布を示したもので、大きい圧力こう配の前半部、

(a) 圧力の時間的変化 ($A_{H0}/A_0=1.6$)

(b) 入口波の時間的圧力こう配 ($A_{H0}/A_0=1.6$)

(c) 入口波の時間的圧力こう配 ($A_{H0}/A_0=2.0$)

図4 不連続形フードにおけるトンネル入口波 ($U_T=300$ km/h, $L_H/D=1.0$)

それよりこう配の小さい中間部とさらに小さい圧力こう配の後半部から成っている。図4(c)はフード断面積を $A_{H0}/A_0=2.0$ と大きくした場合の圧力こう配分布を示したもので、前半部の圧力こう配より中間部の圧力こう配のほうがわずかに大きくなっている。すなわち、 A_{H0}/A_0 が大きくなると、前半部圧縮波の圧力こう配は小さくなり、それとは逆に中間部圧縮波の圧

(a) フード形状による比較

($U_T=300$ km/h, $L_H/D=1.0$, $A_{H0}/A_0=1.6$)

(b) フード入口面積による比較 (線形フード)

($U_T=300$ km/h, $L_H/D=1.0$)

(c) フード長さによる比較 (線形フード)

($U_T=300$ km/h, $A_{H0}/A_0=1.6$)

図5 トンネル入口波の波形

力こう配は大きくなって、中間部の圧力こう配が最大となる。

異なる形状の入口フードにおける入口波の $x/D=3.33$ での波形を図5で比較することによって、入口波の形成メカニズムを考察する。図5(a)はフードなしと各種形状フードを比較したもので、フードなしの入口波は、列車進行によるトンネル有効断面積の時間的減少によって発生する圧縮波によってのみ構成されている。二次関数形では、前記の圧縮波に対応する、フード有効断面積の時間的減少による圧縮波が弱くなるとともに、圧力こう配も小さくなり、その後にはフード壁からの反射圧縮波がフード入口および列車鼻部から再反射された圧縮波が続いて入口波を構成する。線形形では二次関数形より断面積変化が一樣なため、前記の前部圧縮波の強さ、圧力こう配が小さく、後続の圧縮波

の幅が大きい。不連続形では前部圧縮波の強さ、圧力こう配がさらに小さく、後続するフード入口および列車鼻部からの再反射膨張波と圧縮波の後に、フードとトンネル接合部の有効断面積の時間的減少によって発生する圧縮波とその再反射膨張波が続いて幅の大きい入口波を構成する。図5(b)は線形フードでのフード入口断面積の比較をしたもので、入口断面積が増すにつれ、フード有効断面積の時間的減少によって発生する圧縮波の強さと圧力こう配が小さくなっている様子が明らかである。図5(c)は線形フードでのフード長さの比較をしたもので、前部圧縮波の強さ、圧力こう配とも、 $L_H/D=1.0$ まではフード長さの増加によって減少し、フード入口および列車鼻部からの再反射圧縮波の幅がフード長さとともに増加して幅の大きい入口波を形成する。

トンネル入口で発生した圧縮波が長いトンネル内に伝ばして、大気中に微気圧波として放出される際に発生する音の強さは、トンネル出口における圧縮波の時

図6 フード長さおよび入口面積の影響（線形フード）

図7 フード長さと入口面積の影響（二次関数形フード）

間的圧力こう配に比例して大きくなる。圧縮波は伝ばとともに急峻になる非線形特性を有するため、入口波の特性評価として、出口における圧縮波のこう配を左右する入口波の強さ、時間的圧力こう配の最大値および幅の大きさが重要な尺度となる。すなわち、入口波の強さおよび最大こう配が小さく幅が大きいほど、長い距離を伝ばした後の、トンネル出口における圧縮波の圧力こう配は小さいと予測できる。そこで、 $x/D=3.33$ における入口波から求めたこれらの特性量と各パラメータとの定量的関係を図6～9に示す。図6は線形フードについて、フード入口断面積とフード長さの影響を示したものである。図6(a)は入口波の強さ p_{cw} に対する影響を示したもので、 p_{cw} は $U_T=200, 300 \text{ km/h}$ のいずれかについても、 L_H によらず A_{H0} が大きいとわずかに小さくなる。図6(b)は入口波の時間的圧力こう配の最大値 $(dp/dt)_{\max}$ について示したもので、 L_H が大きく A_{H0} が大きいほど $(dp/dt)_{\max}$ の値は小さくなり、 $L_H/D=1.5, A_{H0}/A_0=2.0$ の入口フー

ドではフードがない場合 ($A_{H0}/A_0=1.0$) に比べて 0.55 程度の割合になるが、 L_H/D が 1.0 以上ではフード長さの増加による効果は非常に小さい。図7は二次関数形フードについて示したものである。図7(a)は

(a) 入口波の強さ

(a) 入口波の強さ

(b) 入口波の最大時間的圧力こう配

(b) 入口波の最大時間的圧力こう配

(c) 入口波の平均時間的圧力こう配

図8 フード長さと入口面積の影響 (不連続形フード)

図9 フード形状の影響

入口波の強さに対する L_H および A_{H0} の影響を示したもので、線形フードの場合とほとんど同じである。図7(b)は入口波の時間的圧力こう配の最大値について示したもので、 L_H が大きく A_{H0} が大きいほど、 $(dp/dt)_{\max}$ の値は小さくなり、 $L_H/D=1.5$, $A_{H0}/A_0=2.0$ の入口フードでは、フードがない場合に比べて0.60程度の割合になる。

図8は不連続形フードについて示したものである。図8(a)は入口波の強さに対する影響を示したもので p_{cw} は L_H および A_{H0} によってほとんど変わらない。図8(b)は入口波の時間的圧力こう配の最大値について示したもので、 L_H が大きく A_{H0} が増加するほど $(dp/dt)_{\max}$ は減少するが、 $L_H/D=1.0$ 以上ではフード長さの増加による効果はほとんどない。 $L_H/D=1.0$, $A_{H0}/A_0=2.0$ の入口フードでは、フードがない場合に比べて0.53程度の割合になる。

図9は三つのフード形状による効果の程度を、フード長さ $L_H/D=1.0$ について比較したものである。図9(a)は入口波の強さ p_{cw} について示したもので、三つのフード形状による差異はきわめて小さい。

図9(b)は入口波の時間的圧力こう配の最大値 $(dp/dt)_{\max}$ の比較を示したもので、少しずつではあるが不連続形フードが最も小さく、次いで線形フードの順で二次関数形フードが最も大きくなっている。この結果から、接合部の長さ L_c を2m程度の大きさにとれば、フード前部での断面積縮小割合が大きいフード形状より、フード後部での断面積縮小割合が大きいフード形状のほうが $(dp/dt)_{\max}$ が小さくなるということができる。しかしながら、不連続形フードでフード入口断面積がさらに大きい場合や接合部長さが小さい場合には、前述したように、接合部からの反射圧縮波がフード入口や列車鼻部で再反射されて生じる圧縮波の圧力こう配がさらに増加して $(dp/dt)_{\max}$ が大きくなることが予想される。図9(c)は入口波の幅の尺度として、入口波の時間的圧力こう配の平均値 $(dp/dt)_{av}$ [$(dp/dt)_{av} \equiv p_{cw}/\Delta t$ とし、 Δt は入口波の時間幅である] をとって比較したもので、二次関数形、線形、不連続形の順に $(dp/dt)_{av}$ は小さくなり、入口波の幅はこれらの順に大きくなると考えることができる。

4. 結 論

高速列車が、形状の異なるフードの付いたトンネルに進入する際に生じるトンネル入口波について、特性

曲線法によって数値解析し、次の結論が得られた。

(1) 入口波によって誘起された列車進行方向の流れが、列車先端に追いつかれて鼻部に繰り込まれ、流れの方向をトンネル入口方向に逆転させて、フード内で減速しながら大気中に流出する様子など、入口フード付近における流れの詳細が明らかにされた。

(2) フードなしでのトンネル入口波が、トンネル有効断面積の時間的減少によって発生する圧縮波のみで構成されるのに対し、線形および二次関数形のように、断面積が比較的なめらかに変化するフードでの入口波は、前記の圧縮波と、フード壁から反射された圧縮波が、フード入口および列車鼻部で再反射された圧縮波で構成され、不連続形のように、断面積がフード後部で急激に変化するフードでの入口波は、前記二つの圧縮波と、列車鼻部が接合部に進入する際の、有効断面積の時間的減少によって発生する圧縮波およびその再反射膨張波で構成される。

(3) 入口波の特性評価として、トンネル出口における圧縮波の圧力こう配を決める尺度となる入口波の強さ、時間的圧力こう配の最大値および幅について調べた結果、入口波の強さは、三つのフード形状ともフードなしとの差異はきわめて小さい。時間的圧力こう配の最大値は、二次関数形、線形、不連続形の順に小さくなり、いずれの形状でもフードが長いほど、入口断面積が大きいほど小さくなるが、フード長さがトンネル等価直径以上では、長さによる差はほとんど見られない。入口波の幅はフードの長さが大きいほど増加し、二次関数形、線形、不連続形の順に大きくなる。

(4) 入口波についてのフード特性は、接合部の長さがトンネル等価直径の2割程度以上であれば、フード後部で断面積の縮小割合が大きいフード形状が優れていると考えることができる。

文 献

- (1) 小沢, 鉄道技術研究所報告書, No. 1121(1971).
- (2) 小沢・ほか3名, 鉄道技術研究所報告書, No. 1023(1976).
- (3) 鹿毛・ほか2名, 機論, 58-547, B(1992), 815.
- (4) Barrows, T. M., *J. Sound Vib.*, 50-4(1977), 571.
- (5) Pope, C. W., *Tech. Mem. Aero.*, 12(1976).
- (6) 鹿毛・川越, 機論, 57-542, B(1991), 3345.
- (7) 松尾・ほか3名, 機論, 58-546, B(1992), 331.
- (8) 鹿毛・川越, 機論, 57-546, B(1992), 338.
- (9) 青木・ほか3名, *Proc. Symp. Shock Waves, Jpn.* '92(1992), 43.
- (10) 中野・ほか2名, 可視化情報学会誌, 11 Suppl. 2(1991), 183.