

列車後尾部の突入に伴って生じるトンネル内の圧力変動

眞下, 伸也
西日本旅客鉄道 (株)

仲津, 英治
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

青木, 俊之
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

樫村, 秀男
北九州工業高等専門学校

他

<https://doi.org/10.15017/17339>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 16 (2), pp.207-215, 1994-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン :
権利関係 :

列車後尾部の突入に伴って生じるトンネル内の圧力変動

真下 伸也* · 仲津 英治* · 青木 俊之**
檜村 秀男*** · 安信 強*** · 松尾 一泰**
(平成6年5月31日 受理)

Pressure Variation in Tunnel Generated by Tail of Train Entering Tunnel

Shinya MASHIMO*, Eiji NAKATSU*, Toshiyuki AOKI**,
Hideo KASHIMURA***, Tsuyoshi YASUNOBU*** and Kazuyasu MATSUO**

When the head of a high-speed train enters a tunnel, it generates a compression wave ahead of it. And, the expansion wave is generated by the tail of train entering a tunnel. These waves are propagated through the tunnel and reflect at the outlet of tunnel. In this report, a formula for predicting the strengths of these compression and expansion waves generated by a train entering a tunnel has been derived. This formula was developed on the assumption that the flows around train head and tail are isentropic and the waves generated by train are infinitesimal-amplitude waves. Theoretical results have been compared with the experimental pressure variation and it was found the good agreement with these values.

1. ま え が き

高速鉄道列車がトンネル入口に突入する時には、**Fig. 1**に示すように、まず先頭部の突入によって圧力増加量 Δp_1 の圧縮波が列車の進行方向に発生し、列車の前方を伝播する。この Δp_1 の特性については前報で詳細に報告した¹⁾。列車長は有限なので、続いて列車の後尾部がトンネル入口に突入し、流路断面積が急に拡大する。このため圧力減少量 Δp_2 の膨張波が列車の進行方向に発生し、列車側面の空間を前方へ伝播する。その後これらの波はトンネル出口にて反射し、トンネル内を逆方向へ伝播する。これらの波動は列車とも干渉してトンネル内の空気に複雑な圧力変動を起こし、また、トンネル出口で反射する際、微気圧波と呼ばれるパルス状の圧力波を、坑口より外部に放射することなどが知られている。列車の通過に伴うこのようなトンネル内の波動については、過去にも解析がなされてきたが²⁾³⁾、いまだ多くの問題が残っている。本研究では、列車が後尾部まで突入した後のトンネル内の波動について、より詳細に解明するため、トンネ

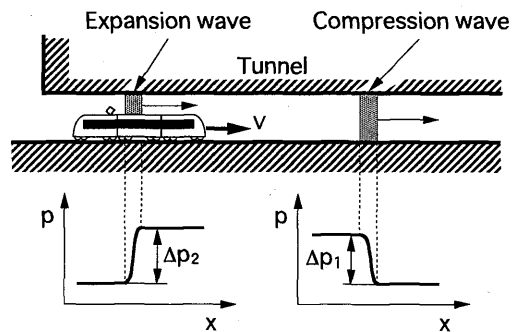


Fig. 1 Schematic sketch of compression wave and expansion wave generated by train entering a tunnel

ル内の空気の流体力学的状態を、列車の後尾部の突入によって発生する膨張波まで含めてモデル化し、圧力変動を中心に解析した。その結果得られる圧力変動の解析解について、実際に新幹線トンネル内で測定された圧力変動の結果を用いて検証した。

2. 解 析 方 法

鉄道列車がトンネルに突入した後のトンネル内の波動は、トンネル断面において一様であり一次的に取り扱えるので、**Fig. 2**に示すように、時間と距離に対

*西日本旅客鉄道株式会社
**エネルギー変換工学専攻
***北九州工業高等専門学校制御情報工学科

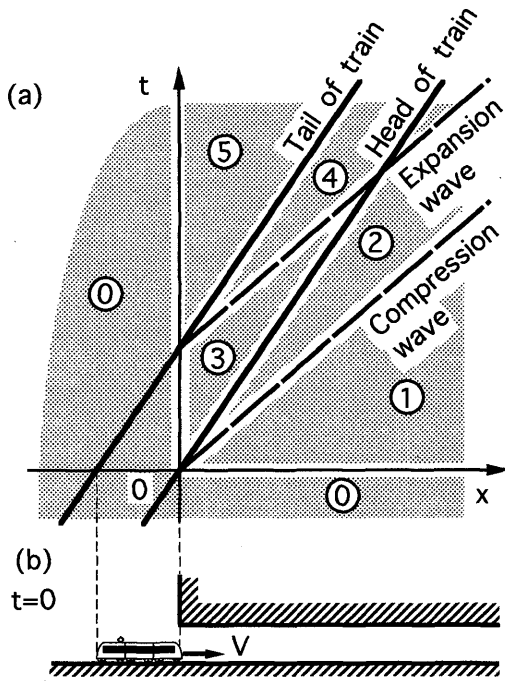


Fig. 2 Wave diagram by compression wave and expansion wave generated by train entering tunnel

し、いくつかの領域に分けることができる。図 (a) はトンネル入口に列車の先端が突入した瞬間を原点とする $(x-t)$ 線図で、横軸はトンネル入口からの距離 x を示し、縦軸は列車の先端が突入してから時間 t を示す。また図 (b) は $t=0$ 、すなわち列車の先端がトンネル入口に突入した瞬間の様子を表す。図 (a) において、列車の先端と後部の軌跡を、列車速度 V を一定としてそれぞれ実線で示す。また、列車の先頭部がトンネルへ突入する際には、列車前方へ伝わる前進波と、トンネル入口から後ろ向きに伝播する後進波が発生し、前進波は圧縮波でトンネル内を伝播するが、後進波は大気中を伝わっていくので急速に減衰する。列車の後尾部がトンネルへ突入する際にも同様の波が発生し、膨張波である前進波のみが列車側面の空間を伝播する。これら前進圧縮波と前進膨張波のトンネル内の伝播を、伝播速度を一定としてそれぞれ破線で示す。ここで、列車の先頭部と後尾部における列車断面積の変化は無視し、圧縮波と膨張波は、列車の先端および後端がトンネル入口に突入した時点で、それぞれ

瞬間的に発生するとしている。 $(x-t)$ 線図の $t > 0$ かつ $x > 0$ の領域における波動は、これら 4 本の線を境界として、状態が異なる 6 つの領域に分けることができ、そのうち 5 つを図に示すように領域①～⑤とする。また大気圧状態である $t < 0$ 、および $x < 0$ の領域を、領域⑥とする。

列車長 L の列車がトンネル入口から突入し、トンネル内を走行している時の、トンネル内における圧力変動の様子を Fig. 3 に示す。図 (a) は Fig. 2 と同様に、列車がトンネルに突入した後の $(x-t)$ 線図とトンネル内を走行中の列車の様子を示す。また $t=0$ の時点で $x=x_2$ の位置にあった空気中の流体粒子の、想定される軌跡を点線にて示してあるが、これについては後に述べる。図 (b) は図 (a) の Line-A に沿った、すなわち $t=t_1$ の時点におけるトンネル内の圧力分布と、波動の領域を示す。また、図 (c) は図 (a) の Line-B に沿った、すなわちトンネル内の $x=x_1$ の位置における圧力変動と、波動の領域を示す。

図 (b) において、領域①、すなわち列車から十分離れた位置では、列車の突入による影響が全くないので圧力 p_1 は大気圧状態 $p_1=p_0$ ($\Delta p=0$) である。領域①

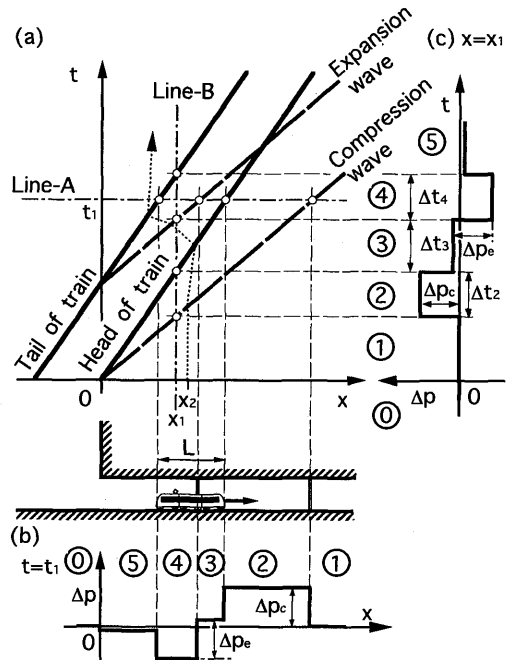
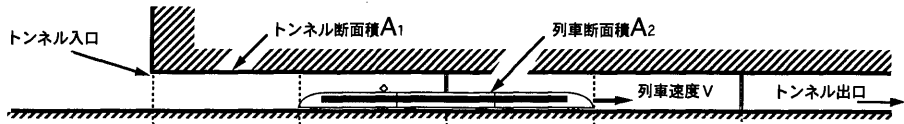


Fig. 3 Wave diagram of compression wave and expansion wave, and pressure variation in tunnel

Table 1 Definitions and assumptions of parameters of waves



領域	①	②	③	④	⑤	⑥
A_0	∞	A_1	$A_1 - A_2$	$A_1 - A_2$	A_1	A_1
パラメータ	ρ_0, ρ_0, u_0, a_0	ρ_5, ρ_5, u_5, a_5	ρ_4, ρ_4, u_4, a_4	ρ_3, ρ_3, u_3, a_3	ρ_2, ρ_2, u_2, a_2	ρ_1, ρ_1, u_1, a_1
p		$p_5 = p_0$	$(\Delta p_e = p_4 - p_0)$	$p_3 = p_0$	$(\Delta p_c = p_2 - p_0)$	$p_1 = p_0$
u	$u_0 = 0$	u_5 →	u_4 ←	u_3 ←	u_2 →	$u_1 = 0$
a		$a_5 = a_0$	$a_4 = a_0$	$a_3 = a_0$	$a_2 = a_0$	$a_1 = a_0$
v		$v_5 = V - u_5$	$v_4 = V + u_4$	$v_3 = V + u_3$	$v_2 = V - u_2$	
M		$M_5 = \frac{v_5}{a_5}$	$M_4 = \frac{v_4}{a_4}$	$M_3 = \frac{v_3}{a_3}$	$M_2 = \frac{v_2}{a_2}$	
Φ, R			$\phi = \frac{A_1 - A_2}{A_1}, R = 1 - \phi$			

と領域②の間には圧縮波があるので、領域②の圧力 p_2 は p_1 より増加し、ここで $\Delta p_c = p_2 - p_1$ とする。領域②と③の間に列車の先端があり、領域③においては、列車の存在によってトンネル内の流路断面積が減少し、列車からみた流れの相対速度が速くなるため、列車側面の空間の圧力 p_3 は $p_3 < p_2$ となる。領域③と領域④の間には膨張波があるので、領域④の圧力 p_4 は p_3 から減少し、ここで $\Delta p_e = p_4 - p_3$ とする。領域④と⑤の間には列車の後端があり、領域⑤の圧力 p_5 は流路断面積の増加により $p_4 < p_5$ となる。領域⑤と①の間のトンネル入口での境界条件は流出の時は圧力が大気圧に等しく、流入の時には動圧分だけ低下するという条件になる⁴⁾。

図(c)において、 $x = x_1$ の地点における圧力は、列車がトンネル入口に突入しても、圧縮波が到達するまでは大気圧状態 $p_1 = p_0$ だが(領域①)、圧縮波の到達によって圧力が Δp_c だけ増加して p_2 となり(領域②)、その後列車の先端が通過して p_3 となり(領域③)、続いて膨張波の到達により圧力が Δp_e だけ減少して p_4 まで減少し(領域④)、列車の後端の通過により圧力は p_5 まで増加する(領域⑤)。

本研究では、Fig. 3の図(a)に示すような波動を解析モデルとし、図(b)に示す $t = t_1$ の時点におけるトンネル内の圧力分布について理論解析した。その

解析方法を以下に示す。

最初に、解析に必要なパラメータについて、その定義や仮定を、Table 1に示すように行う。表中の各領域はFig. 3(b)と同じ意味である。表中においてまず列車速度 V は一定とする。また、トンネル断面積 A_1 と列車断面積 A_2 もそれぞれ一定とし、列車の先頭部と後尾部における断面積変化は無視する。よってトンネル内の流路断面積 A_0 は、表中の A_0 の項に示すように、領域①, ②, ⑤では A_1 、領域③, ④では $A_1 - A_2$ となる。次にトンネル内外の流体の密度を ρ 、流体粒子の速度を u 、音速を a とし、各領域ごとに領域の番号を添字につけて、パラメータの項に示す。ただし、領域①の状態は大気圧状態(領域①)に等しい。圧力 p については p の項に示すように、領域③, ⑤における圧力 p_3, p_5 が大気圧 p_0 に等しいと仮定し、Fig. 3(b)に示す Δp_c と Δp_e は次のようになる。

$$\Delta p_c = p_2 - p_1 = p_2 - p_0 \tag{1}$$

$$\Delta p_e = p_4 - p_3 = p_4 - p_0 \tag{2}$$

また速度 u については u の項に示すように、各領域ごとに方向を定め、その方向を正とする。ただし領域①と①では $u_0 = 0, u_1 = 0$ である。そして音速 a につい

ては a の項に示すように、各領域において波動による変化量が小さいとして、それぞれ大気圧状態の音速 a_0 に等しいと仮定する⁵⁾。このほか、列車からみた流体粒子の相対速度 v 、相対マッハ数 M 、断面積比 ϕ と R を、それぞれの項に示すように定義する。

以上のパラメータの定義や仮定に加え、各隣り合う領域間での流体の状態変化について、以下のように仮定する。すなわち、

仮定 (a) 領域①と領域②の間の圧縮波は微小振幅波とみなせる

仮定 (b) 領域②から領域③への流れは、等エントロピー流れとみなせる

仮定 (c) 領域③と領域④との間の膨張波は微小振幅波とみなせる。

仮定 (d) 領域④から領域⑤への流れは、等エントロピー流れとみなせる。

以上の仮定 (a) ~ (d) を柱に解析を進めると、まず仮定 (a) より、圧縮波による圧力変動量 Δp_c と、領域②における速度 u_2 との間には以下の関係が成り立つ⁶⁾。

$$\Delta p_c = \rho_{1a_1} u_2 = \rho_{0a_0} u_2 \quad (3)$$

これに音速の式

$$a_0 = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \quad (\gamma \text{ は比熱比}) \quad (4)$$

を代入して得られる式から、領域②における相対マッハ数 M_2 は次のように表せる

$$M_2 = \frac{V - u_2}{a_0} = M_t - \frac{\Delta p_c}{\gamma p_0} \quad (5)$$

ただし上式において M_t は以下の式で定義される列車マッハ数である

$$M_t \equiv \frac{V}{a_0} \quad (6)$$

次に仮定 (b) より、領域②の全圧と領域③の全圧は等しく、それぞれ p_{02}, p_{03} とすると

$$p_{02} = p_{03} \quad (7)$$

となる。また p_{02}/p_2 と p_{03}/p_3 はそれぞれ M_2 と M_3

を用いて次のように表される

$$\frac{p_{02}}{p_2} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \approx 1 + \frac{\gamma}{2} M_2^2 \quad (8)$$

$$\frac{p_{03}}{p_3} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \approx 1 + \frac{\gamma}{2} M_3^2 \quad (9)$$

式(7)~(9)と仮定 $p_3 = p_0$ より

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{\Delta p_c}{p_0} + 1 = \frac{2 + \gamma M_2^2}{2 + \gamma M_2^2} \quad (10)$$

上式の M_2 に式(5)を代入して M_3 の式に直すと

$$M_3^2 = \frac{1}{\gamma} \left[\gamma M_t^2 + (2 + \gamma M_t^2 - 2M_t) \left(\frac{\Delta p_c}{p_0} \right) \right] \quad (11)$$

(ただし $\frac{\Delta p_c}{p_0}$ の 2 次以上は無視)

さらに領域②と領域③の間の連続の式は以下で表せる。

$$\rho_{2v_2} A_1 = \rho_3 (A_1 - A_2) v_3 \quad (12)$$

これに

$$\frac{\rho_2}{\rho_3} = \frac{p_2}{p_3} \left(\frac{a_3}{a_2} \right)^2 \approx \frac{p_2}{p_0} = 1 + \frac{\Delta p_c}{p_0} \quad (13)$$

の関係をを用い、相対速度を相対マッハ数に置き換えると

$$\frac{\Delta p_c}{p_0} = \frac{M_3}{M_2} \phi - 1 \quad (14)$$

が成立する。上式の M_2 に式(5)を代入して M_3 の式に直すと

$$M_3 = \frac{1}{\phi} \left[M_t + \left(M_t - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\Delta p_c}{p_0} \right] \quad (15)$$

(ただし $\frac{\Delta p_c}{p_0}$ の 2 次以上は無視)

式(11), (15)から M_3 を消去し

$$\Delta p_c = \frac{1}{2} \gamma p_0 M_t^2 \left[\frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2) M_t - \gamma M_t^2 \left(1 - \frac{1}{2} \phi^2 \right)} \right] \quad (16)$$

(ただし $\frac{\Delta p_c}{p_0}$ の 2 次以上は無視)

が得られる。

以上、仮定 (a) と (b) より解析を進めてきたが、仮定 (c) と (d) から同様な解析が進められる。すなわち、まず仮定 (c) より式 (3) に相当する

$$\Delta p_e \approx a_3 \rho_3 (-u_4 + u_3) \quad (17)$$

が得られ、これに、領域③における音速の式

$$a_3 = \sqrt{\left(\frac{\gamma p_3}{\rho_3}\right)} \quad (18)$$

を代入して得られる式から、領域④における相対マッハ数 M_4 は次のように表せる

$$M_4 = -\frac{1}{\gamma} \frac{\Delta p_e}{p_0} + M_3 \quad (19)$$

次に仮定 (d) から、領域④の全圧と領域⑤の全圧は等しく、これらをそれぞれ p_{04} と p_{05} とすると

$$p_{04} = p_{05} \quad (20)$$

また、式 (8), (9) に相当する

$$\frac{p_{04}}{p_4} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_4^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \approx 1 + \frac{\gamma}{2} M_4^2 \quad (21)$$

$$\frac{p_{05}}{p_5} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_5^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \approx 1 + \frac{\gamma}{2} M_5^2 \quad (22)$$

が成り立ち、式 (20) ~ (22) より

$$\frac{p_4}{p_5} = \frac{\Delta p_e}{p_0} + 1 = \frac{2 + \gamma M_5^2}{2 + \gamma M_4^2} \quad (23)$$

が成立する。さらに領域④と領域⑤の間の連続の式は

$$\rho_5 v_5 A_1 = \rho_4 (A_1 - A_2) v_4 \quad (24)$$

で、これと

$$\frac{\rho_4}{\rho_5} = \frac{p_4}{p_0} \left(\frac{a_5}{a_4}\right)^2 \approx \frac{p_4}{p_0} = 1 + \frac{\Delta p_e}{p_0} \quad (25)$$

より、式 (14) に相当する

$$\frac{\Delta p_e}{p_0} = \frac{M_5}{M_4} \frac{1}{\phi} - 1 \quad (26)$$

が成立する。以上の式 (19), (23), (26) から下式が得られる。

$$\Delta p_e = -\frac{1}{2} \gamma p_0 M_3^2 \left[\frac{(1 - \phi^2)}{-1 + (1 - \phi^2) M_3 + \gamma \left(\phi^2 - \frac{1}{2}\right) M_3^2} \right] \quad (27)$$

解析における計算手順は以下の通りとなる。与えられた R と V に対し、式 (6) より M_1 を計算し、式 (16) より圧縮波による圧力変動量 Δp_c が求められる。式 (15) より領域③の相対マッハ数 M_3 が計算でき、これを式 (27) に代入することにより、膨張波による圧力変動量 Δp_e を計算することができる。各領域のその他のパラメータは **Table 1** と仮定 (a) ~ (d) を使って計算する。

3. 解析結果

以上の式より算出される Δp_c と Δp_e の値を、計算パラメータを R として **Fig. 4** と **Fig. 5** に示す。ただし、大気中の音速 $a_0 = 340 \text{ m/s}$ 、大気圧 $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$ とし、比熱比 $\gamma = 1.4$ として計算した。これらの図は、ともに横軸は列車速度 V で、縦軸は **Fig. 4** においては Δp_c を、**Fig. 5** においては Δp_e をそれぞれ示し、 $R = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.9$ のそれぞれの場合における、列車速度 V に対する理論値を実線にて示す。**Fig. 4** より、 V の増加に対して Δp_c の値も次第に増加していき、その増加割合は V の値が増加するほど、また R の値が増加するほど大きくなることがわかる。また、

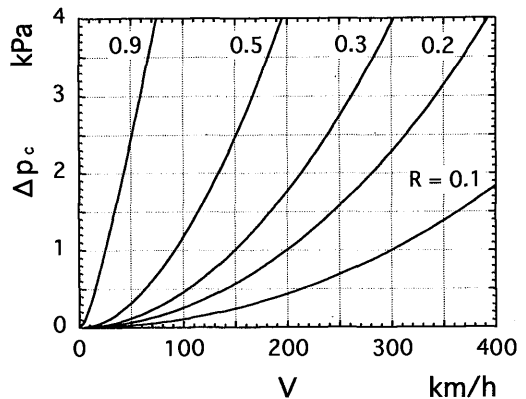


Fig. 4 Relation between Δp_c and train velocity

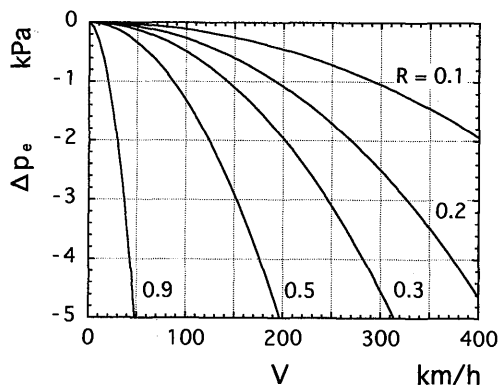


Fig. 5 Relation between Δp_e and train velocity

実際の新幹線列車とトンネルにおいては、 R の値はおおよそ0.2であり、 $R=0.2$ で $V=200\text{km/h}$ および 270km/h の場合における Δp_e の理論値は、同図によればおおよそ 1.00kPa 、および 1.85kPa となる。一方、Fig. 5より、 V の増加に対して Δp_e の絶対値も次第に増加していき、その増加割合は V が増加するほど、また R の値が増加するほど大きくなることがわかる。また、 $R=0.2$ で $V=200\text{km/h}$ および 270km/h の場合における Δp_e の理論値は、同図によればおおよそ -1.1kPa 、および -2.0kPa であり、これらの絶対値は上の Δp_e の理論値よりもわずかながら大きい。Fig. 4とFig. 5を比較すると、 Δp_e の絶対値が、同じ R および V の値に対する Δp_e の値よりも全体的に大きいことがわかる。

Δp_e の値が求めれば、式(5)より M_2 、すなわち u_2

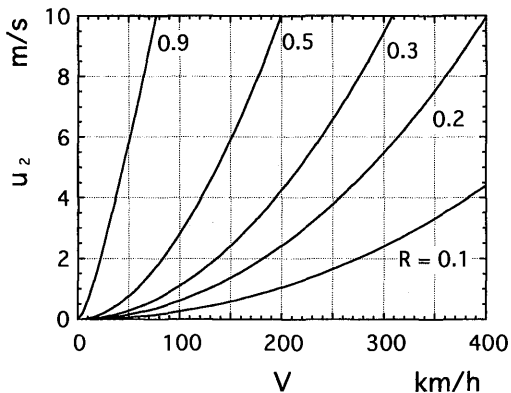


Fig. 6 Relation between u_2 and train velocity

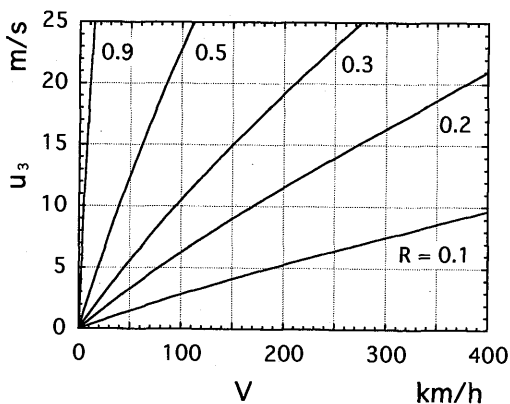


Fig. 7 Relation between u_3 and train velocity

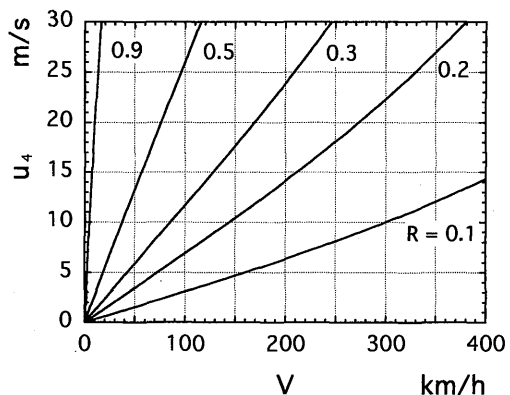


Fig. 8 Relation between u_4 and train velocity

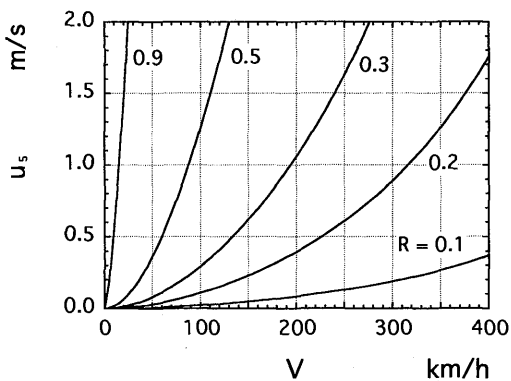


Fig. 9 Relation between u_5 and train velocity

の値が求められ、式(15)より M_3, u_3 の値が求められる。また Δp_c の値が求めれば、これと M_3 の値から、式(19)より M_4, u_4 の値が求められ、さらに式(26)より M_5, u_5 の値が求められる。このようにして得られる $u_2 \sim u_5$ の理論値を Fig. 6~9 に示す。これらの図も Fig. 4, 5 と同様、横軸は列車速度 V を、縦軸はそれぞれ $u_2 \sim u_5$ の理論値を示し、いずれも $R=0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.9$ のそれぞれの場合における、列車速度 V に対する $u_2 \sim u_5$ の理論値を実線にて示す。Fig. 6 によると、 V の増加に対して u_2 の値も次第に増加していき、その増加割合は V が増加するほど、また R の値が増加するほど大きくなる。また、 $R=0.2$ で $V=200\text{km/h}$ および 270km/h の場合における u_2 の理論値は、同図によれば、およそ 2.5m/s 、および 4.5m/s である。Fig. 7 によると、 V の増加に対して u_3 の値も次第に増加していき、その増加割合は V の増加に対してそれほど変わらないが、理論曲線はわずかに上側に凸形状をなしていることがわかる。また、 R の値が増加するほど増加割合は大きくなる。 $R=0.2$ で $V=200\text{km/h}$ および 270km/h の場合における u_3 の理論値は、同図によれば、およそ 11.5m/s 、および 15.0m/s である。Fig. 8 によると、 V の増加に対して u_4 の値も次第に増加していき、その増加割合は V の増加に対してそれほど変わらないが、理論曲線は u_3 の場合とは逆に、わずかに下側に凸形状をなしていることがわかる。また、 R の値が増加するほど増加割合は大きくなる。曲線の傾向が領域③と④の間で異なるのは、膨張波による流速の増加量が、 V が増加するほど大きくなるためである。また、 $R=0.2$ で $V=200\text{km/h}$ および 270km/h の場合における u_4 の理論値は、同図によれば、およそ 14.0m/s 、及び 19.5m/s である。Fig. 9 より、 u_5 の値は $u_2 \sim u_4$ より、値としてはかなり小さいものの、 V の増加に対して u_5 の値も次第に増加していき、その増加割合は V が増加するほど、また R の値が増加するほど大きくなる。また、 $R=0.2$ で $V=200\text{km/h}$ および 270km/h の場合における u_5 の理論値は、同図によれば、およそ 0.4m/s 、および 0.7m/s である。

以上より、 $u_2 \sim u_5$ の理論値は、いずれも列車速度 V と R の値とともに増加する傾向にあり、また同じ V 、および R の値に対しては、およそ $u_4 > u_3 > u_2 > u_5$ の大小関係にありいずれも正の値なので、Table 1 で定めた方向に流体粒子が移動することとなる。

ここで、各波動により速度変化を受ける流体粒子の運動を考えてみる。Fig. 3 (a) の点線に示すように、列車の突入前にトンネル内の $x=x_2$ の位置で静止していた流体粒子は、列車が突入してからもしくは静止している(領域①)。前進圧縮波の通過により、流体粒子は圧縮波の伝播方向に加速され ($u_2 > 0$)、トンネル出口方向へ流れる(領域②)。次に列車の先頭部の通過により流路断面積が減少するので、流体粒子は相対的に x の負の方向に加速され ($v_3 > v_2$)、逆にトンネル入口方向に流される(領域③)。続いて前進膨張波の通過により、膨張波の伝播方向と逆向きに加速されるために、流体粒子はさらに入口方向へ加速 ($u_4 > u_3$) される(領域④)。最後に列車の後尾部の通過により相対的に減速され ($u_4 > u_5$)、結果的に領域⑤の流体粒子はわずかながらトンネル出口方向への流れとなる ($u_5 > 0$)

以上の理論解析結果は、圧縮波と膨張波を有限振幅波と仮定して厳密に求めた数値解と比べ、殆どその差はなかった。

4. 実測値との比較

過去に、実際の新幹線トンネル(山陽新幹線)の内部において、新幹線列車の突入により発生するトンネル内の圧力変動の測定が行われた。その時の測定結果の一例を Fig. 10 に示す。横軸が時間 t 、縦軸が測定された圧力(ゲージ圧) Δp を示す。このトンネルの長さは 16250m 、断面積 A_1 は約 63m^2 、軌道構造はバラスト軌道である。測定地点はトンネルの東坑口から 80m の位置で、ここのレール面高さのトンネル壁面

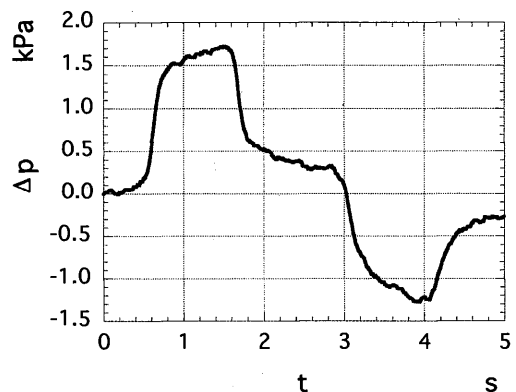


Fig. 10 Typical waveform of compression wave and expansion wave measured in tunnel

に圧力計 (ST 研究所製 PD80HA 絶対圧計) を設置して測定を行った. 測定の対象とした列車の車両形式は新幹線電車の 0 系で, 断面積 A_2 は 12.2m^2 である.

Fig. 10 によると, トンネル内の圧力は圧縮波によりいったん急激に増加した後, 緩やかな増加をつけ, それから急激に減少するが, これは列車の先頭部の通過によるものと思われる. 続いてしばらくゆるやかに減少するが, その間も圧力勾配はわずかながら変化し, いったんはほぼ 0 になる. それから膨張波によって再び急激に減少した後, ゆるやかな減少を続け, 最後に急激に増加するが, これは列車の後尾部の通過によると思われる.

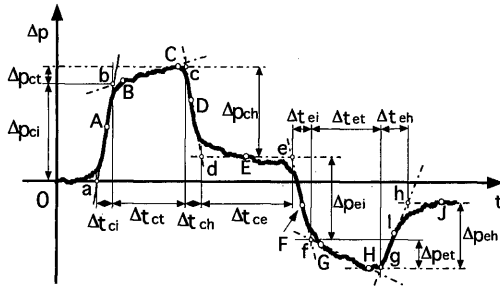


Fig. 11 Model waveform of measured compression wave and expansion wave

次に, 測定された圧力変動において, 圧力と時間に関するパラメータを Fig. 11 に示すように定めた. すなわち, 圧縮波による急激な圧力の増加において, 時間に対する勾配が最大となる点を A, その増加が終了する点を B, 続いて急激な圧力の減少を開始する点を C, その減少において勾配が負に最大となる点を D, それから膨張波が到達するまでの間に勾配が 0 となる点を E, その後, 膨張波による急激な圧力の減少において, 勾配が負に最大となる点を F, その減少が終了する点を G, 続いて急激な圧力の増加を開始する点を H, その増加において勾配が最大となる点を I, その増加を終了する点を J とおく. 次に点 A, B, D, F, G, I における波形曲線の接線を引き, さらに点 C, E, H, J を通り, かつ縦軸に垂直な線を引いて, これらの線同士の交点をそれぞれ点 a ~ h とする. そして点 a から点 b までの時間を Δt_{ci} , 圧力変動量の絶対値を Δp_{ci} とする. 以下同様に点 b から点 h まで, 時間的に隣り合う点ごとに, 時間のパラメータ Δt_{ci} , Δt_{ct} , Δt_{ch} , Δt_{ce} , Δt_{ei} , Δt_{et} , Δt_{eh} , および圧力のパラメータ Δp_{ct} , Δp_{ch} , Δp_{ei} , Δp_{et} , Δp_{eh} を定めた.

Table 2 Experimental values and estimated values of pressure parameters of waves

列車	A	B	C	D	E
編成両数	6	6	6	12	16
列車速度 (km/h)	214	218	222	211	221
Δt_{ci} (s)	0.174	0.185	0.170	0.170	0.198
Δt_{ct} (s)	0.891	0.909	0.859	0.961	0.876
Δt_{ch} (s)	0.242	0.168	0.187	0.170	0.160
Δt_{ce} (s)	1.158	1.154	1.120	3.803	5.180
Δt_{ei} (s)	0.235	0.279	0.290	0.132	0.320
Δt_{et} (s)	0.880	0.869	0.831	0.970	0.823
Δt_{eh} (s)	0.464	0.318	0.373	0.430	0.353
$\Delta t_{ci} + \Delta t_{ct}$ 実測値 (s)	1.065	1.094	1.029	1.131	1.074
Δt_2 計算値 (s)	1.111	1.086	1.062	1.130	1.068
$\Delta t_{ch} + \Delta t_{ce}$ 実測値 (s)	1.400	1.322	1.307	3.973	5.340
Δt_3 計算値 (s)	1.413	1.391	1.370	3.989	5.448
$\Delta t_{ei} + \Delta t_{et}$ 実測値 (s)	1.115	1.48	1.121	1.102	1.143
Δt_4 計算値 (s)	1.111	1.086	1.062	1.130	1.068

Δp_{ct} , Δp_{ch} , Δp_{ei} , Δp_{et} , Δp_{eh} を定めた.

5 本の列車による圧力変動の測定結果から, 上で定めた時間に関するパラメータの値を読みとり, Table 2 に示す. さらに, Fig. 3 (c) にて示す解析のモデル図を, Fig. 11 の実測波形のモデル図と比較すると, Fig. 11 の $\Delta t_{ci} + \Delta t_{ct}$ に対して Fig. 3 (c) の Δt_2 が, $\Delta t_{ch} + \Delta t_{ce}$ に対し Δt_3 が, $\Delta t_{ei} + \Delta t_{et}$ に対し Δt_4 が, それぞれ相当すると考えられる. そこで実測波形から求められる $\Delta t_{ci} + \Delta t_{ct}$, $\Delta t_{ch} + \Delta t_{ce}$, $\Delta t_{ei} + \Delta t_{et}$ の値と, 列車速度 V , 波の伝播速度 (音速) a_0 , 測定地点 x_1 および列車長 L のそれぞれの値を用いて, Fig. 3 より求められる Δt_2 , Δt_3 , Δt_4 の計算値も Table 2 に示す. 同表によれば相当すると考えられるそれぞれの値はよく近似しており, これは Fig. 11 において, 点 a の時点で圧縮波が測定地点に到達し, 次に点 c の時点で列車の先端が通過し, 続いて点 e の時点で膨張波が到達し, 最後に点 g の時点で列車の後端が通過したという推測が妥当であることを意味する. ただし, 解析モデルにおいては, 圧力変動は瞬時に起こるとみなし, したがって, 実測値 Δt_{ci} , Δt_{ch} , Δt_{ei} , Δt_{eh} に相当する時

Table 3 Experimental values and estimated values of time parameters of waves

列車		A	B	C	D	E
編成両数		6	6	6	12	16
列車速度 (km/h)		214	218	222	211	221
Δp_{ei}	実測値 kPa	1.50	1.47	1.73	1.47	1.57
Δp_{eh}	実測値 kPa	1.42	1.34	1.48	1.38	1.53
Δp_e	計算値 kPa	1.10	1.14	1.19	1.07	1.18
Δp_{ei}	実測値 kPa	1.25	1.33	1.53	0.94	1.27
Δp_{eh}	実測値 kPa	1.08	1.03	1.27	1.02	1.15
Δp_e	計算値 kPa	1.18	1.22	1.27	1.14	1.26
Δp_{et}	実測値 kPa	0.34	0.29	0.31	0.30	0.34
Δp_{et}	実測値 kPa	0.40	0.31	0.39	0.56	0.37

間は考慮されていない。

実測波形から圧力に関するパラメータを読みとり、式(16)、および式(27)から得られる Δp_c と Δp_e の理論値とともに**Table 3**に示す。ただし理論値の計算においては、大気中の音速 $a_0=340\text{m/s}$ 、大気圧 $p_0=101.3\text{kPa}$ 、比熱比 $\gamma=1.4$ とし、 $R=0.19$ とした。時間のパラメータの計算値と実測値との比較から、計算値 Δp_c に対しては実測値 Δp_{ei} が、計算値 Δp_e に対しては実測値 Δp_{eh} がそれぞれ相当すると考えられる。そこで、同表において計算値 Δp_c を実測値 Δp_{ei} と比較すると、値が2～3割ほど小さいが、オーダーとしては近似している。同様に計算値 Δp_e を実測値 Δp_{eh} と比較すると、値としては小さいがかなり近い値となっている。また実測波形における圧力パラメータ Δp_{et}

と Δp_{et} は、解析モデルにおいては考慮されていなかったが、実測された値は相当量ある。

5. あとがき

鉄道列車がトンネル内に突入する際に生じるトンネル内の波動について解析モデルを提案し、圧力変動を中心に解析した。さらに、その解析結果について、実測のデータを用いて検証した。その結果を要約すると次の通りである。

(1) **Table 1**に示すような仮定に基づき、列車後尾部の突入に伴って生じるトンネル内の膨張波の理論解析式(27)を導出した。この式を用いて、与えられたトンネル断面積、列車断面積、列車速度に対して、トンネル内の圧力変動が解析的に求められることを示した。各領域におけるパラメータを計算し、それらの関係が解明した。

(2) 時間に関するパラメータについて、実測値と計算値がよく一致していることにより、列車のトンネル突入時のトンネル内の状態変化が、**Fig. 3**の(x-t)線図で示したようなものであることが確認できた。

(3) 圧縮波および膨張波による圧力変動量 Δp_c 、 Δp_e は、理論値が実測値にある程度近似しており、解析において定めた仮定、および解析法が妥当であることを示す結果となった。

参考文献

- 1) 眞下, 総理工報告, 15-4, 351-357 (1994).
- 2) 原, 鉄道技術研究報告, 153, 1 (1960).
- 3) 山本, 鉄道技術研究報告, 1230, 1 (1983).
- 4) 飯田, 前田, 鉄道総研報告, 4-7, 1 (1990).
- 5) 松尾, 機械の研究, 45-6, 656 (1993).
- 6) 松尾, 圧縮性流体の力学, 理工学社.