

円管開口端からの圧力波の放出による衝撃音のパッシブコントロール

仲尾, 晋一郎

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

吉田, 敬

九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

小西, 孝徳

九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

近藤, 信昭

九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/16551>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 21 (1), pp.25-29, 1999-06. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン：

権利関係：

円管開口端からの圧力波の放出による 衝撃音のパッシブコントロール

仲尾 晋一郎*・吉田 敬**・小西 孝徳**
近藤 信昭***・青木 俊之***・松尾 一泰***

(平成11年2月26日 受理)

Passive Controlling a Blast Sound of a Pressure Wave Emitting from an Open-end Circular Tube

Shinichiro NAKAO*, Takashi YOSHIDA**, Takanori KONISHI**
Nobuaki KONDOH***, Toshiyuki AOKI***, Kazuyasu MATSUO***

When a high-speed train enters a tunnel, a compression wave is generated ahead of the train and propagates to the tunnel exit. This pressure wave emits from the exit of the tunnel as an impulsive wave which makes a blast sound. The object of this paper is to show a passive way to reduce the level of the blast sound. The effects of annular boxes at the exit of a circular tube were investigated experimentally and numerically. As a result, relations between the size of the passive silencer and noise reduction rate have been clarified which suggests a suitable design factor for an exit annular box.

1. ま え が き

トンネルに突入した高速列車により形成される圧縮波は、トンネル出口へとトンネル内を伝ばし、出口に達すると衝撃音を伴うパルス状の圧力波（微気圧波¹⁾）となって放出される。この衝撃音の強さはトンネル出口に伝ばしてきた圧縮波の最大圧力勾配に比例する¹⁾。近年の列車の著しい高速化により、トンネル入口に緩衝工の設置、トンネル内に枝坑を設ける、列車の先端形状の最適化を行うなどの衝撃音を低減する従来の方法²⁾だけでは不十分になってきた。本研究の目的は、トンネル出口にボックスを設けるといったパッシブな低減対策法の効果を確認することである。ここでは円管を用いたモデル実験により、さまざまなボックス形状をもつ管開口端から放出される衝撃音を測定するとともに流れ場を数値解析した。これらの結果を用いることにより円管開口端の最適形状を明らかにした。

2. 実験装置および方法

実験装置は Fig. 1 に示すように、通常の衝撃波管の隔膜を急速開口弁に置き換えたもので、高圧室（長さ12m、内径76mmの円管）、急速開口弁、低圧室（長さ22.5m、内径 $D=40$ mmの円管）、ボックス部、パッ

フル板、測定部より構成されている。低圧室の右端は大気に開放されている。急速開口弁は高圧空気によって仕切り板を開口するもので、高圧室の圧力と弁の開口速度を任意に設定することにより、所定の圧縮波を形成させる。高圧室の空気は、弁の開口により低圧室に流入し、その前方に圧縮波を形成する。圧縮波が管内を伝ばし、右端の開口端に達すると衝撃音すなわちパルス波が放射される。

開口端に向かう圧縮波の測定は、圧縮波の開口端での反射によって生じる膨張波の影響を受けないように開口端より上流 $x=4.5$ mの位置で行った。以下、この点で測定した圧縮波を初期圧縮波と呼ぶことにする。パルス波の測定は管の中心軸を含む水平面状において行った。パルス波の測定は Fig. 1 の右側に示すように、開口端出口中心を原点とし、原点から80mmの位置で、管中心軸からの角度0、45、90°で圧力を測定した。測定には圧力変換器を用いた。圧力変換器からの出力信号はアンプで増幅され、コンピュータシステムにより記録される。

Fig. 2 に Fig. 1 の右開口端に設置した円柱状ボックスの円管中心軸を含む水平面での断面図を示す。すべてのボックスは円管と同心形状である。Fig. 2 (d) はボックスを設置してない場合、Fig. 2 (a) - (c) はボックスの内径（高さ $h=(d-D)/2=42.5$ とする）を $d=125$ mmで固定して、ボックスの長さをそれぞれ $l=20, 40, 60$ mmと変化させたもの、Fig. 2 (e) は Fig.

*エネルギー変換工学専攻博士後期課程

**環境エネルギー工学専攻修士課程

***環境エネルギー工学専攻

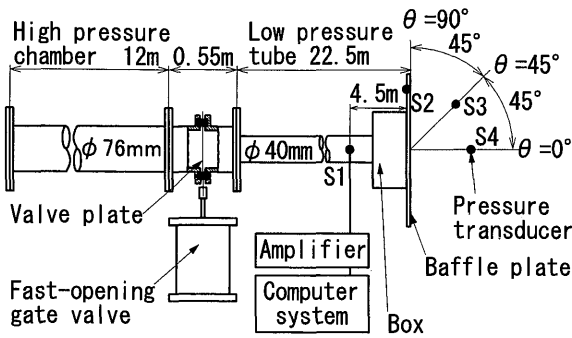


Fig. 1 Experimental apparatus

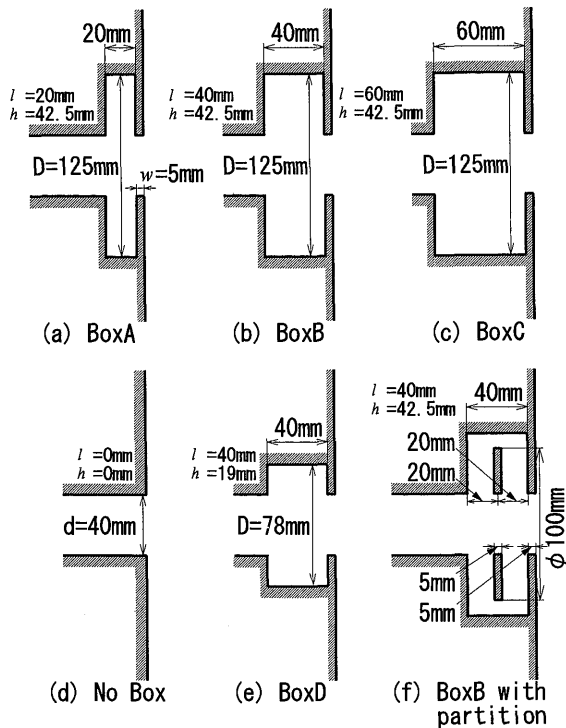


Fig. 2 Details of exit box

2(b)と同じ長さであるが、内径が $d = 78\text{mm}$ となっている。また Fig. 2(f) は Fig. 2(b) のボックスの内部に $\phi 100\text{mm}$ 、厚さ 5mm のドーナツ状の仕切り板を挿入してある。実験は以上の6種類の出口形状について行われた。また、実験は $3\text{kPa} < \Delta p^* < 9\text{kPa}$ 、 $0.1 < L/D < 5$ の範囲で行われた (Δp^* と L/D は Fig. 4 を参照)。

3. 数値解析方法

数値計算では Fig. 1 の開口端と同様に直径 D の円管開口端に、衝撃音低減のためのパッシブコントロール用の出口ボックスが設置されていると考え、圧力波が管内を左から右へ伝ばし、開口端で大気に放出されるとする。流れは管軸に対し軸対称で、円管の管軸方向すなわち管内を圧力波が伝ばする方向に出口ボックスの開口端を原点として x 軸、半径方向を y 軸、任

意の点までの距離を r 軸、管軸からの角度を θ 軸とする平面を考える。

流れの基礎方程式は質量保存、 x 及び y 方向の運動両保存、エネルギー保存の式であり、保存系で次式のようにかける。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + W = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (e+p)u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho + \rho v^2 \\ (e+p)v \end{bmatrix},$$

$$W = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e+p)v \end{bmatrix}$$

ここに t は時間、 ρ は密度、 u と v は軸及び半径方向の速度、 p は圧力である。また、 e は単位体積当たりの全エネルギーである。これらの式を TVD 法³⁾と演算子分割法⁴⁾を用いて数値解析する。実験と同じように出口ボックスは同心形状しておりその内径を D 、高さを h ($= (d-D)/2$)、長さを l 、出口の壁の厚さを w とする。計算の初期条件、すなわち $t = 0$ における圧力波の初期波形として、列車が突入することによりトンネル内に形成される圧縮波の半経験式(1)を参考にして、次式で示す圧力波を出口ボックスの入り口に仮定する。

$$\frac{\Delta p_i}{p_1} = \frac{\Delta p^*_i}{p_1} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi}{L} \left(x + \frac{10}{3} D \right) \right\} \right] \quad (2)$$

上式の Δp_i と Δp^* はゲージ圧、 p_1 は圧力波前方の静止気体の圧力である。 Δp^* は圧力波による圧力上昇値、 L は圧力波の波面の長さを表す。 $L = 0$ の場合、式(2)は衝撃波の波形を、 $L > 0$ の場合、圧縮波の波形を表す。

4. 結果および考察

4.1 波形について

Fig. 3 に得られた測定圧力波形の一例を示す。Fig. 3(a) は $x = 4.5\text{m}$ の初期圧縮波であり、Fig. 3(b) - (d) はそれぞれ、ボックスなし、BoxB、BoxB+仕切り板の場合の測定された衝撃音すなわちパルス波の波形である。縦軸はゲージ圧、横軸は時間である。図中には各波形の測定された位置を示している。Fig. 3(b) のボックスがないときは圧力波形のピークが1つしか見られないが、Fig. 3(c)、(d) のボックスがある場合だと、圧力波形上にピークが2つ見られる。これは管端で反射した圧力波がボックス内の上部や左側

面で反射したものだと考えられる. ここで Fig. 3(c) において, 第1ピークと第2ピークの時間差を計算すると, 約0.25ms (波の伝ば速度約340mm/ms×0.25ms = 約85mm)となり, ボックス内の上部または側面から (40mmの往復) の反射であるといえる. Fig. 3(d) において, 第2ピークは(c)の場合と同じ原因で生じているが $t = 14.1\text{ms}$ 付近における小さな圧力上昇は, 第1ピークからの時間差約0.11ms (340mm/ms×0.11ms = 37.4mm) からこれが仕切り板から (20mmの往復) の反射だといえる. また, いずれの場合においても $\theta = 90, 45, 0^\circ$ の順に圧力のピークが大きくなっており, 指向性が見られる. また $90, 45, 0^\circ$ の順で圧力の上昇に遅れが見られるが, 例えば $\theta = 90^\circ$ と $\theta = 0^\circ$ の第1ピークの時間差0.06ms (340mm/ms×0.06ms = 20.4mm) から考えると管端の淵から S2 ($\theta = 90^\circ$) の圧力変換器までの距離のほうが, 管端の中心から S4 ($\theta = 0^\circ$) の圧力変換器までの距離よりも管の半径分 (20mm) 近いからだと考えられる.

実験波形からは Fig. 4 に示すように初期圧縮波の幅 L や強さ Δp^* を求め, またパルス波の強さ Δp_{\max} は Fig. 5 に示すように, 2つピークがあるときは両方を測定した.

4.2 ボックスの長さの効果

実験によって得られたボックス長さとおパルス波の各圧力ピーク値の関係を Fig. 6 に, また, Fig. 7 に数値計算結果を示す. 両図において測定場所は S3 ($\theta =$

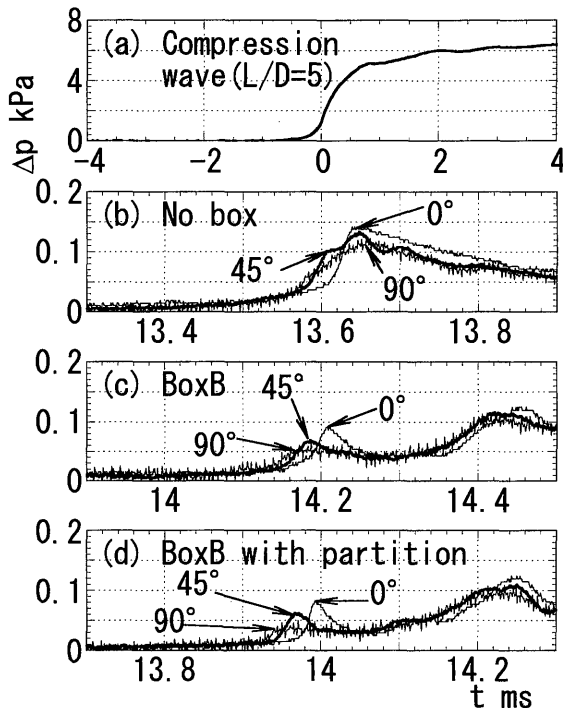


Fig. 3 Typical experimental wave form ($L/D=5.0$, $\Delta p^*=5.15\text{kPa}$)

45°) であり, 縦軸はパルス波の各圧力ピーク値 Δp_{\max} を初期圧縮波の強さ Δp_i^* で無次元化した値, 横軸は初期圧縮波の幅 L を管の等価直径 D で無次元化したものである. またボックスの高さは $h = 42.5\text{mm}$ と同じで, ボックス長さがそれぞれ $l = 20\text{mm}$ (BoxA), 40mm (BoxB), 60mm (BoxC) である. 式(3)はボックスが無いときの開口端から距離 r の点におけるパルス波の強さ $\Delta p_{i\max}$ を圧縮波による圧力上昇値 Δp^* と長さ L , および管の直径を結び付ける理論

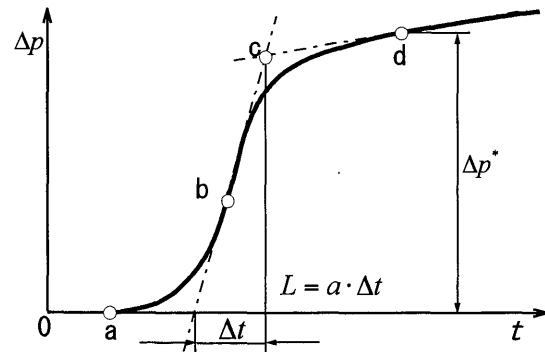


Fig. 4 Definition of pressure wave

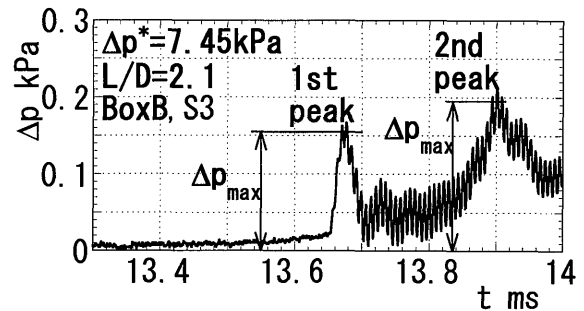


Fig. 5 Defining strength of micro-pressure wave ($\theta=45^\circ$)

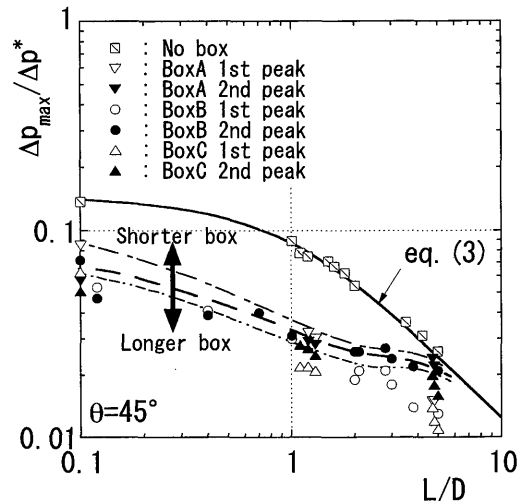


Fig. 6 Box length effect on the relation between the magnitude of the impulsive wave and wave length (experiment)

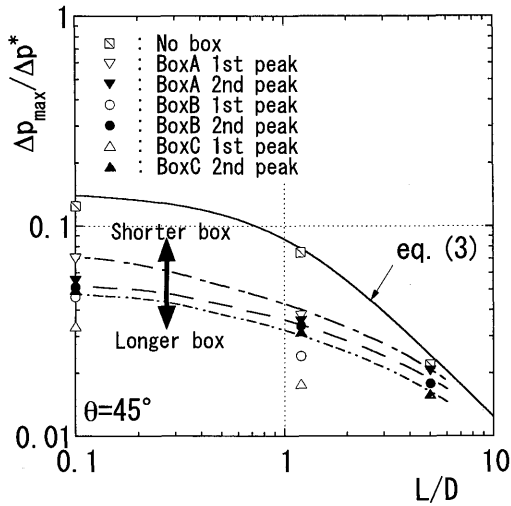


Fig. 7 Box length effect on the relation between the magnitude of the impulsive wave and wave length (calculation)

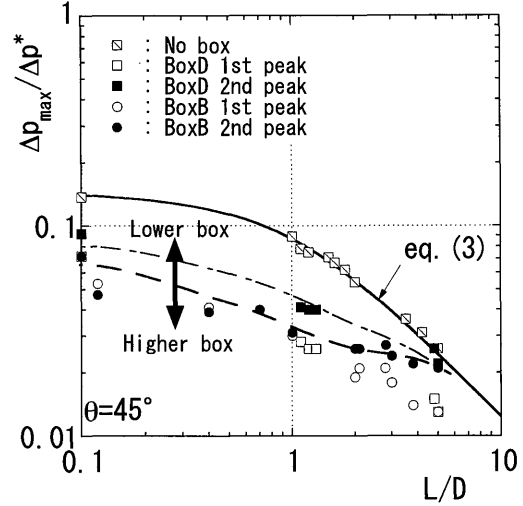


Fig. 8 Box height effect on the relation between the magnitude of the impulsive wave and wave length (experiment)

式で次式で与えられる⁵⁾。

$$\frac{\Delta p_{\max}}{\Delta p^*} = \frac{D}{4\pi r \cdot 0.425} \tan^{-1}\left(\frac{\pi \cdot 0.425 D}{L}\right) \quad (3)$$

図からわかるとおり、ボックスが無いときの実験結果は式(3)と非常に一致している。数値計算結果もほぼ一致している。Fig. 6, 7中の一点鎖線、破線、二点鎖線はそれぞれ、Box A~Cの各ボックスにおいて第1ピークおよび第2ピークのより大きいほうを結んだ線である。Fig. 6ではすべてのBoxにおいて、 $L/D < 1$ の範囲では第1ピークが大きいもしくは第2ピークとほぼ同じくらいであるが、 $L/D > 1$ においては第2ピークのほうが第1ピークよりも大きくなっている。よって $L/D < 1$ の範囲でより効果的な抑制を行うには第1ピークが小さくなるように、 $L/D > 1$ の範囲でより効果的な抑制を行うには第2ピークが小さくなるように最適化を行う必要がある。この場合の幾何学的実験条件下では、ボックスの長さを $l=20\text{mm}$ から40, 60mmへと長さを100および200%ほど拡大すると $L/D < 2$ の範囲においてそれぞれ約10%および20%ほど、パルス波の強さを抑制しているが、 $L/D > 2$ の範囲では幅が大きくなるにつれ抑制効果が弱くなる。

実験結果からボックスが長いほうがパルス波を抑制することができることがわかった。また、 $L/D = 1$ 近辺での抑制割合が少々異なるが、数値計算結果からも同様なことがいえる。

4.3 ボックスの高さの効果

Fig. 8に、実験によって得られたボックス高さ h とパルス波の各圧力ピーク値の関係を示す。Fig. 9は、それらの数値計算結果である。両図において測定場所は S3 ($\theta=45^\circ$) であり、縦軸、横軸は Fig. 6, 7と

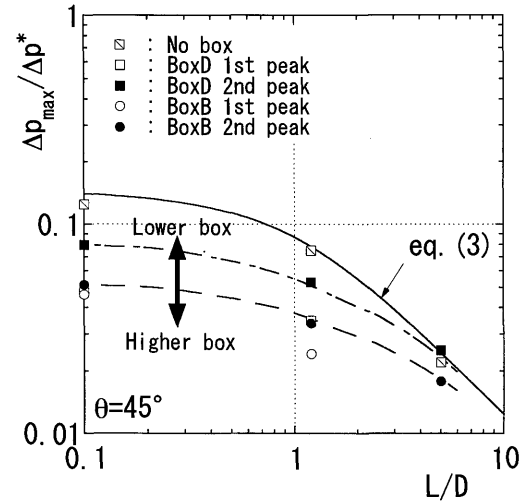


Fig. 9 Box height effect on the relation between the magnitude of the impulsive wave and wave length (calculation)

同じである。またボックスの長さは40mmと統一しており、ボックス高さがそれぞれ $h = 19\text{mm}$ (BoxD), $h = 42.5\text{mm}$ (Box B) である。Fig. 8, 9中の一点鎖線、破線はそれぞれ、Box D, Bの各ボックスにおいて第1ピークおよび第2ピークのより大きいほうを結んだ線である。Fig. 8において高さの小さいBox Dではすべての L/D の範囲で第2ピークのほうが第1ピークよりも大きくなっている。この場合の幾何学的実験条件下では、ボックスの高さを $h = 19\text{mm}$ から $h = 42.5\text{mm}$ (Box B) へと100%ほど拡大すると $L/D < 2$ の範囲において約20%ほど、パルス波の強さを抑制しているが、 $L/D > 2$ の範囲では幅が大きくなるにつれ抑制効果が弱くなる。実験結果からボックスが高いほうがパルス波を抑制することができることがわかった。

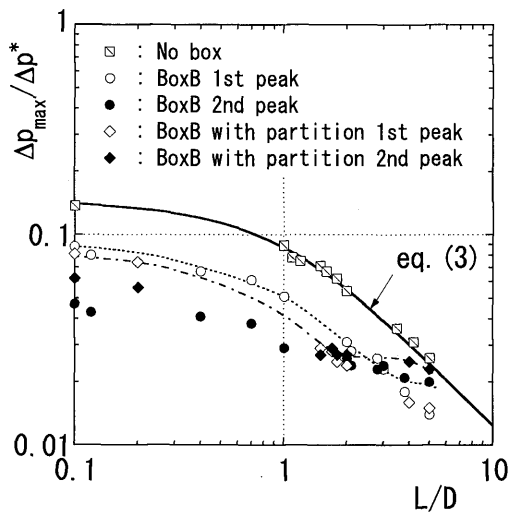


Fig. 10 Partition effect on the relation between the magnitude of the impulsive wave and wave length ($\theta = 0^\circ$)

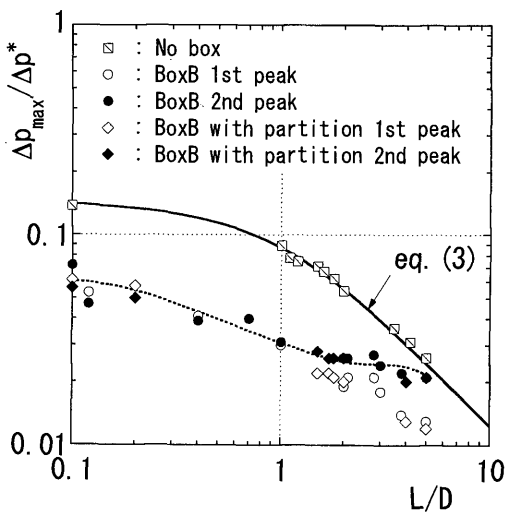


Fig. 11 Partition effect on the relation between the magnitude of the impulsive wave and wave length ($\theta = 45^\circ$)

また数値計算結果も同様な傾向を示している。

4.4 仕切り板の効果

Fig. 10, 11 に実験によって得られた仕切り板がパルス波の強さに及ぼす影響を示す。Fig. 10 は S4 ($\theta = 40^\circ$) で、Fig. 11 は S3 ($\theta = 45^\circ$) ある。Fig. 10,

11 中の一点鎖線、破線はそれぞれ、BoxB, BoxB + 仕切り板において第 1 ピークおよび第 2 ピークのより大きいほうを結んだ線である。Fig. 10 から 0° 方向は仕切り板を入れるとパルス波を抑制する効果があるが、比較的初期圧縮波の幅 L/D が大きいときは逆効果になることがわかる。

また Fig. 11 から 45° 方向ではこの幾何学的実験条件下ではまったく抑制効果が無く、仕切り板を入れても効果が全く無い場合があり得る。

5. 結 論

さまざまな出口ボックス形状をもつ管開口端の圧縮波の放出により形成される衝撃音すなわちパルス波を実験するとともに数値解析した。その結果を要約すると以下のとおりである。

(1) ボックスの長さを大きくするとパルス波は抑制されるが、初期圧縮波の幅が大きいときには第 2 ピークが小さくなるように最適化を行えばより効果的な抑制が可能である。

(2) ボックスの高さを大きくすると、パルス波は抑制され、ボックスの長さを変えるよりも抑制効果が高いと考えられる。

(3) 0° 方向は仕切り板を入れるとパルス波を抑制する効果がある。しかし、比較的初期圧縮波の幅 L/D が大きいときは逆効果になることがある。また 45° 方向ではまったく抑制効果が無い場合があり得る。

(4) 効果的な抑制を得るためには、パルス波を抑制する必要がある初期圧縮波の幅 L/D に合わせてボックスの高さ、長さ、仕切りの有無および場所を最適する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 小沢智, 鉄道技術研究報告書, No. 1121, (1974), 1-92.
- 2) Zeutzius ほか 4 名, Proc. 9th Int. Symp. Transport Phenomena in Thermal-Fluids Engineering, (1996), 303-308.
- 3) Yee, H.C., NACA TM-89464, (1987), 1-127.
- 4) Sod, G.A., J. Fluids Mechanics, 83-4, (1977), 785-794.
- 5) 櫻村秀男ほか 3 名, 機論, 60-569, B(1994), 71-77.