415 管開口端からの膨張波の放出によるパルス波の強さ (パルス波の強さに及ぼす膨張波の最大圧力こう配の影響)

Strength of impulsive wave caused by emission of expansion wave from open-end of tube (Effect on pressure gradient of expansion wave for strength of impulsive wave)

○正 安信 強 (北九州高専)
正 瀬戸口 俊明 (佐賀大)

正 檜村 秀男 (北九州高専)

Tsuyoshi Yasunobu and Hideo Kashimura, Kitakyushu College of Technology,
Sii, Kokuraminami-ku, Kitakyushu.
Toshiaki Setoguchi, Saga University.

Key Words : Unsteady Flow, Expansion Wave, Impulsive Wave, Open-End Correction

1. はじめに

列車のトンネル突入によるトンネル出口での騒音⁽¹⁾については、これまでに多くの研究がなされているが、近年の高速化にともない、トンネル入口における騒音も重要になりつつある。これは、入口からの膨張波の放射によるパルス波が原因であるが、膨張波の放射については、ほとんど研究がなされていない。そこで本研究では、形成されるパルス波の強さに及ぼす膨張波の波面こう配の影響について数値解析と実験を行ない、考察することを目的とする。

2. 解析方法

図1は膨張波とパルス波との定性的な関係を示しており、膨張波の場合、波頭で圧力こう配が最大となることが特徴である。本研究では、波頭が開口端に達したときの膨張波の圧力波形を次式で与える。

$$p_i = p_1 - \Delta p^* \sin\left(-\frac{x}{L}\right) \quad (x < 0, \Delta p^* > 0) \quad \cdots (1)$$

ここで、 Δp^* は膨張波の強さ、 L は膨張波の最大圧力こう配と強さにより定義される長さである。

空力音響理論によれば、遠距離場におけるパルス波の強さは次式で与えられる⁽²⁾。

$$\Delta p_m(r) = \frac{D^2}{4\pi r_1} \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial t} \right)_{\max} \quad \cdots \cdots (2)$$

式(1)で表される膨張波に対して式(2)を適用し、さらに波頭が最大こう配となることを考慮すれば、遠距離場におけるパルス波の強さは次式で与えられる。

$$\frac{\Delta p_m(r)}{\Delta p^*} = \frac{D^2}{8rL} \quad \cdots \cdots (3)$$

式(1)で表される膨張波に対して開口端補正⁽²⁾を適用し、さらに波頭が最大こう配となることを考慮すれば、遠距離場におけるパルス波の強さは、式(4)で与えられる。

$$\frac{\Delta p_m(r)}{\Delta p^*} = \frac{D^2}{8r\Delta l} \sin\left(\frac{\Delta l}{L}\right) \quad \cdots \cdots (4)$$

また、波頭が開口端に達したときの膨張波の圧力波形を式(1)ではなく、arc tan曲線で与えたとき、開口端補正を考慮した遠距離場におけるパルス波の強さは次式で与えられる。

$$\frac{\Delta p_m(r)}{\Delta p^*} = \frac{D^2}{4\pi r\Delta l} \tan^{-1}\left(\frac{\pi \Delta l}{2L}\right) \quad \cdots \cdots (5)$$

次に、数値解析では、圧縮性の軸対称非定常方程式にTVD差分法⁽³⁾と演算子分割法⁽⁴⁾を適用して行なっ

Fig.1 Schematic explanation of expansion wave emitted from open-end of tube

Fig.2 Typical wave form of expansion wave

た。初期条件として与えた膨張波の圧力波形の一例を図2に示す。また、この膨張波が放射されたときのパルス波の圧力波形を図3に示す。本研究では、パルス波による最大圧力降下をパルス波の強さと定義し、記号 $\Delta p_m(r)$ で表わす。図より、膨張波の長さの減少により $\Delta p_m(r)$ が増加し、その波形は急峻となることがわかる。

最後に実験では、高圧室の管端を大気開放した衝撃波管を使用し、管内と管外部で圧力の計測を行なった。

3. 結果と考察

実験で得られた、中心軸上の $r/D=2$ の位置におけるパルス波の強さ Δp_m と膨張波の最大圧こう配 $(\partial \Delta p / \partial t)_{\max}$ との関係を図4に示す。図より Δp_m は $(\partial \Delta p / \partial t)_{\max}$ に比例して増加するが、その増加割合は $(\partial \Delta p / \partial t)_{\max}$ の上昇とともに減少し、一定値に漸近する傾向を示す。また、実線で示す式(2)との比較では、 $(\partial \Delta p / \partial t)_{\max}$ が低い領域では比較的良好に一致するが、増加とともに Δp_m を過大評価する。

中心軸上の $r/D=2$ の位置におけるパルス波の強さ $\Delta p_m / \Delta p^*$ と、膨張波の長さ L/D との関係を図5に示す。図より、数値解析結果と実験結果がよく一致することがわかる。また、数値解析結果において、 $L/D < 1$ の領域では明らかに $\theta=45^\circ$ よりも中心軸上における $\Delta p_m / \Delta p^*$ が高くなり、さらに L/D の減少にともない、いずれの点においても $\Delta p_m / \Delta p^*$ は一定値に漸近する傾向を示すことがわかる。このうち、 $\Delta p_m / \Delta p^*$ の相違はパルス波の指向性によるものであり、このこと

から、 $L/D < 1$ の領域で指向性の影響が顕著に表われるといえる。次に、実線および破線で示す式(3)～(5)による結果については、 $L/D > 2$ の領域ではいずれの結果もよく一致しており、数値解析および実験結果との一致も良好である。よって、 $L/D > 2$ の領域では、空力音響解析のみでパルス波の強さの予測が可能である。しかし、 $L/D < 2$ の領域では数値解析結果が示すパルス波の強さの傾向を式(3)では予測できず、式(3)はパルス波の強さを過大評価する。また、式(4)もその関数の性質から $L/D < 0.25$ の領域ではパルス波の強さの計算が不可能となる。これに対して、arc tan曲線を元にした式(5)による結果は、パルス波の強さの傾向と表わすとともに、 $\theta=45^\circ$ における $\Delta p_m / \Delta p^*$ と非常によく一致している。前述したように、 L/D の減少によって中心軸方向に対する指向性が強くなるので、中心軸上よりも $\theta=45^\circ$ における結果との比較が妥当であり、開口端補正を考慮した式(5)によりパルス波の強さを予測できることがわかる。

4. 結論

本研究では、形成されるパルス波の強さに及ぼす膨張波の波面こう配の影響について考察した。得られた結論を以下に要約する。

- (1) 数値解析結果によれば、膨張波の無次元長さ L/D の減少にともない、パルス波の強さの無次元値 $\Delta p_m / \Delta p^*$ は、一定値に漸近する傾向を示す。
- (2) 理論解析においては、空力音響理論に開口端補正を適用した式(5)による解析が有効であり、 L/D の減少によるパルス波の強さの変化も予測できる。一方で、 $L/D > 2$ の領域においては、本報で示したいずれの方法でもパルス波の強さの予測が可能である。
- (3) $L/D < 1$ の領域では指向性の影響が顕著が表われ、距離が同一でもパルス波の強さは角度により異なり、中心軸上の値が最も高くなる。

参考文献

- (1) 小澤, 鉄道技術研究報告, No.1121, (1979), 1-21.
- (2) 松尾・ほか3名, 管内を伝ばする圧縮波の開口端からの放射 (第1報 解析的研究), 機論, 58-546, B(1992), 331-337.
- (3) Yee, H. C., Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes, NASA TM 89464, (1987), 1-127.
- (4) Sod, G. A., A numerical study of a converging cylindrical shock, J. Fluid Mech., Vol.83, Part 4, (1977), 785-794.

Fig.3 Typical wave form of impulsive wave

Fig.4 Relation between strength of impulsive wave and pressure gradient of expansion wave

Fig.5 Relation between strength of impulsive wave and length of expansion wave