

128 リニアモーターカーの走行によりトンネル内に発生する 衝撃波の消音に関する検討

A study on suppression of shock formation generated from
liner motor trains in a tunnel

○ 藤本和宏 渡辺好章(同志社大・工)

Kazuhiro FUJIMOTO, Yoshiaki WATANABE, Doshisha University,
1-3 Tataramiyakodani Kyoutanabe, Kyoto

As a suppression tool for the noise due to micro pressure wave induced by linear motor trains, the array of Helmholtz resonators set inside a tunnel wall is discussed. The experimental study is carried out using a 1/200 scale model of the tunnel, where a PA driver is employed as a source for finite amplitude sounds of micro pressure waves. It is found that the shock formation distance is longer when the resonator array is provided. The impulse response of a single pair of Helmholtz resonator is taken into account for the numerical simulation based on the weak shock theory. The calculated result agrees well with the experimental result. We also show the way of estimation in absorption effect of Helmholtz resonator.

KEYWORDS: Helmholtz resonator, Micro pressure wave, Weak shock theory, linear motor trains, Scale model

1. はじめに

将来、リニアモーターカーの建設が予定されているが、その運行に際して解決しなければならない問題がいくつかある。その一つがトンネル微気圧波による環境騒音問題である。列車が高速でトンネルに突入すると、反対側の出口から破裂音や低周波振動が生じ、これが騒音問題となったり、付近の家屋の窓や家具をがたつかせる原因となっている。これは、列車がトンネルに突入する際、前面に生じた圧力波がトンネル内を音速で伝搬し、やがて衝撃波面を形成するためであると考えられる。実際、リニアモーターカーのように500km/hもの高速で列車がトンネルに突入すると振幅5000Paの圧力波が生じるという報告¹⁾もされている。トンネルの外に放出される音波はトンネル内での音波波形の微分波形になることから、トンネル内で衝撃波面のような立ち上がりの鋭い音波が形成されると、トンネル外には立ち上がりの鋭い大振幅のパルス性の音波が放出されることとなる。よって、トンネル内で衝撃波面の形成を抑制することが騒音問題を解決するために必要となる。本報では、ヘルムホルツ共鳴子(以下、共鳴子)という吸音機構をトンネル内壁に設置する方法²⁾³⁾を用い

て衝撃波面形成の抑制について実験および数値シミュレーションにより検討する。

2. 衝撃波形成の過程と抑制方法

列車前面に生じる圧力波を正弦波とみなしたとき、それがトンネル内をどのように伝搬していくのが重要となる。Fig.1(a)に1/200スケールモデル内の正弦波の伝搬を計算したものを示す。最初、正弦波であったものが、音圧に依存して音波の伝搬速度が異なるため、伝搬と共に歪んでゆき、やがて立ち上がりの急な衝撃波面を形成していることが分かる。その後は、空気や管壁等の吸収により減衰している。また、それぞれの距離での振幅スペクトルを示したものがFig.1(b)である。伝搬と共に高調波が増幅してゆき、N波が形成されたところでこれらはピークを迎える。これらより、衝撃波面の形成を抑制するためには、基本波成分を減衰させ、高調波の増幅を防ぐ方法や、高調波成分自体を減衰させる方法が考えられる。

3. 実験

実験には、1/200スケールモデルを用いた。内径50mm、肉厚3.00mmの亚克力性の音響管の片端に音響管内径と同等の開口径を持つPA用ドライバを設置し、送波器から2.03mの位置に設けた観測

穴に 1/8inch マイクロホンを挿入し、音響管壁から深さ 5mm の位置に設置した。共鳴子の有無によるパイプ内の伝搬波形の変化を観測するため、送波器から 67cm の位置から対向させた 2 つの共鳴子を 3cm 間隔で 24 ヲ所、計 48 個の共鳴子を設置した、実験系を Fig.2 に示す。

Fig.3 に共鳴子を設置した場合としない場合の音圧波形の例を示す。共鳴子を設置しない場合、音圧波形には衝撃波面が形成されているが、共鳴子が設置された場合には、初期音圧が同じにもかかわらず、衝撃波面が形成されていないことがわかる。この結果から、共鳴子は衝撃波面の形成抑制に対して有効に機能することがわかる。

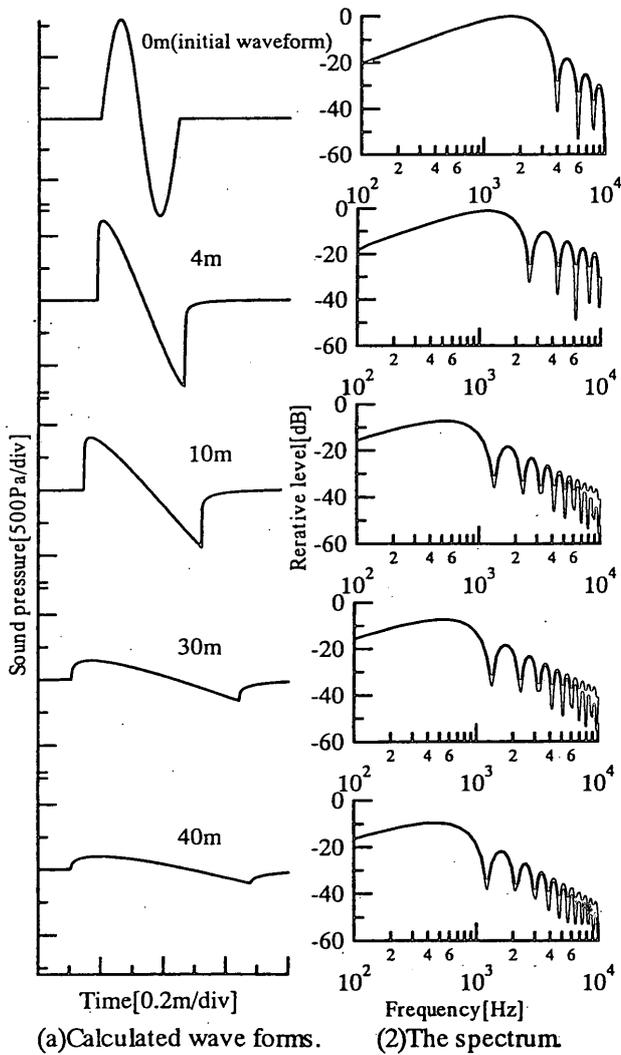


Fig.1 Propagation of finite amplitude wave and spectra.

4. 数値シミュレーション

共鳴子の設置条件を効率的に検討していくために数値シミュレーションを用いた。波形歪みの計算には 1 次元有限振幅音波の伝搬波形の計算に有効であるペストリアス(Pestorius)の計算方法を用いた⁴⁾。この手法は伝搬距離 Δx ごとの波形を計算していき、最終的には目的の伝搬距離の波形を計算する逐次型の計算方法である。有限振幅音波の伝搬を考える際にはその伝搬速度を知る必要があり、それは次式で与えられる。

$$c_f \equiv c_0 + \beta u = c_0 \left(1 + a_f \frac{p}{P_0} \right) \quad (1)$$

ここで、 $a_f = (\gamma + 1)/2\gamma$ 、 $\beta = (\gamma + 1)/2$ (非線形パラメータ)、 P_0 は大気圧、 c_0 は微小振幅音波の音速、 γ は気体の比熱比、 p は音圧、 u は粒子速度を表す。

(1)式は、音圧波形上の各点はその音圧値に応じた速度で伝搬することを示しており、音圧の大きい部分は小さい部分に比べて速く伝搬する。このため音圧波形は伝搬にともなって波形歪みを生じる。

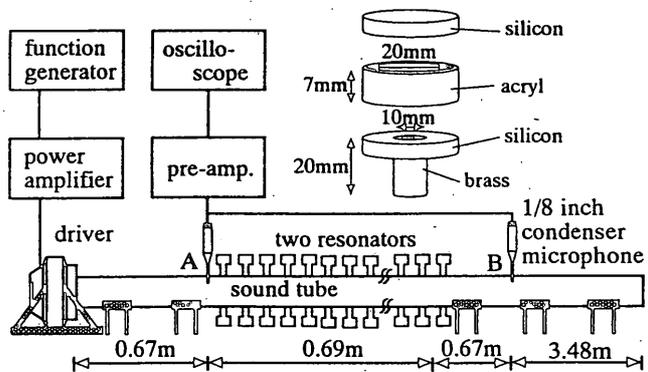


Fig.2 Structure of resonator and experimental setup.

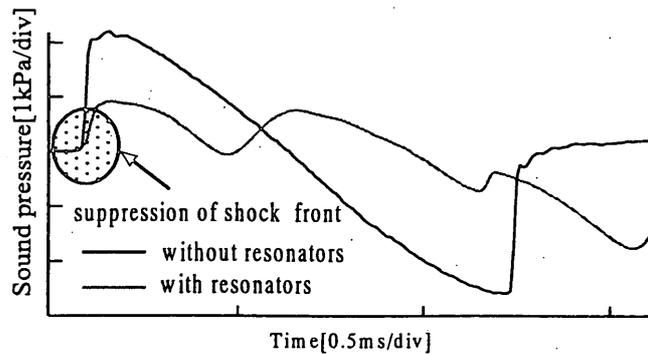


Fig.3 Observed waveforms.

衝撃波面が形成されると、その点はもはや有限振幅音波の速度 c_f では伝搬することができなくなり、この場合次式の衝撃波面の速度 c_s が適用される。

$$c_s = c_0 + \beta \left(\frac{u_1 + u_2}{2} \right) = c_0 \left\{ 1 + a_f \frac{1}{P_0} \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) \right\} = \frac{c_{f1} + c_{f2}}{2} \quad (2)$$

ただし、 c_{f1} 、 c_{f2} は音圧 p_1 、 p_2 に対する有限振幅音波の伝搬速度を示す。

(2)式から、衝撃波面の伝搬速度は、その波面前後の音圧の平均値に対応する有限振幅音波の伝搬速度に等しいことがわかる。

本計算方法は、これらを用いて、まず、共鳴子設置位置まで計算する。そして、共鳴子設置位置に音波が到達したときに、共鳴子を集中常数的な音響素子として考え共鳴子のインパルス応答を畳み込み、再びベストリアスの方法で次の共鳴子までの波形歪みを計算することを繰り返す。

以上が、計算の大まかな流れであるが Fig.4 にこの方法についてのフローチャートを、Fig.5 に共鳴子のインパルス応答を示す。

この方法を用いて計算した波形と実測で得た波形を比較したものを Fig.6 に示す。これを見ると、本研究を行う上で問題となる立ち上がりの部分に関してよい一致が見られることがわかる。このことから、共鳴子の配置等に関する種々の検討をこの数値シミュレーションを用いることにより簡単に行うことができると考えられる。

5. 共鳴子の効果の評価方法

共鳴子の設置方法による、吸音効果の差異について検討を行うために、その評価方法について検討した。

1 つめにトンネル外微気圧波のピーク値について評価する方法がある。衝撃波面が形成されるような音波がトンネル外に放出されると、大振幅のパルス性音波となる。これは、トンネル外での音波はトンネル内の音波が微分された形となるためである。このパルスの振幅のピーク値によって騒音や低周波振動の大きさが決まるため、その振幅

を減少させることが重要となってくる。そこで共鳴子列を設置した場合、比設置時に比べどれだけトンネル外微気圧波のピーク値を減少させることができるのかということについて検討を行った。

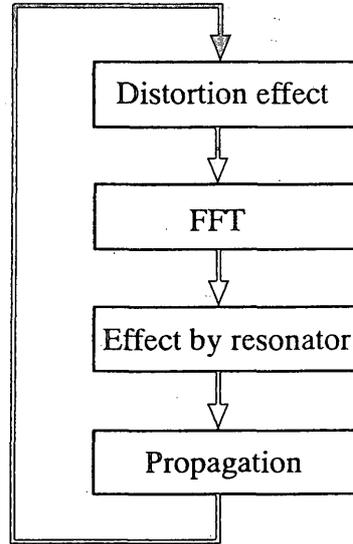


Fig.4 The flow chart of simulation that propagation waveform with resonators on pipe wall.

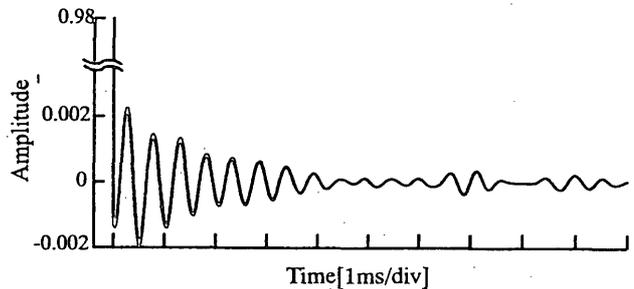


Fig.5 Impulse response of a pair of resonators.

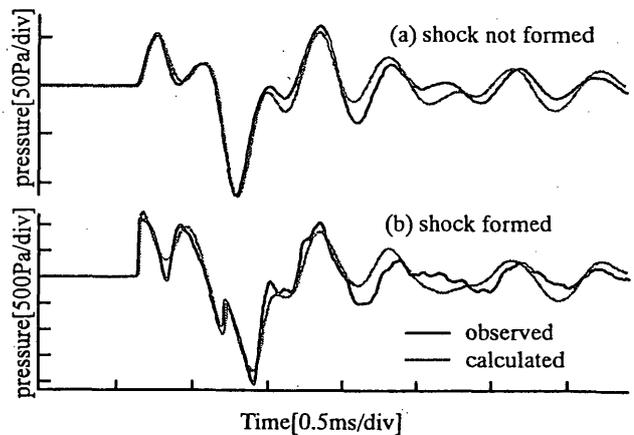


Fig. 6 Observed and calculated waveforms.

その結果を Fig.7 に示す。これより、共鳴子を設置することによってトンネル外微気圧波のピーク値を半分以上に減衰させていることがわかる。また、初期音圧が大きいほど短い距離で非線形歪みが進行し、それに伴い高調波成分も増加する。その一方で管壁や空気による線形吸収も周波数が高いほど大きくなる。高い周波数成分は立ち上がりの部分に多く含まれているため、初期音圧が大きいほど、トンネル外微気圧波のピーク値の減衰率が大きいのだと考えられる。しかし、パルス性の音波のピーク値をみているため、誤差の範囲が大きく、また、騒音の大きさだけが人に与える不快感を決定するものではないので、この方法のみで共鳴子の吸音効果を評価することは難しい。

そこで 2 つ目に、音波のエネルギーに着目し、評価する方法がある。人が受ける騒音に対する不快感はその音のエネルギーに関係してくるため、共鳴子列を通過することによってどれだけ音波のエネルギーを減少させることができるのかについて検討した。共鳴子列を通過する前後のエネルギーの変化を示したものが Fig.8 である。これを見ると、共鳴子が設置されていない場合は、音波は伝搬してもほとんどエネルギーに変化はないが、共鳴子列が設置されていると、音波のエネルギーは半以下になっていることがわかる。これらの結果からも、共鳴子はトンネル外微気圧波問題に対して有効であることがわかる。また、初期音圧が大きくなっていくと、徐々にエネルギーの減衰率が低下している様子も伺える。前述したように初期音圧が大きいほど短い距離で非線形歪みが起こり、高調波成分も増加する。しかし、今回用いた共鳴子の共振周波数が基本周波数付近であったため、高調波成分の増加を押さえきれず、このような結果になったものと考えられる。リニアモーターカーのような高速列車では初期音圧が高いため、高調波成分に共振周波数を持つような共鳴子をも合わせて設置することによって早い段階での高調波の増幅を押さえる必要がある。

6. まとめ

共鳴子列を設置することによって衝撃波面形成を抑制できることがわかった。また、これらの適

切な配置は数値シミュレーションによって予測できることもわかった。さらに、トンネル外微気圧波のピーク値や音波のエネルギーに着目することによって、共鳴子の吸音効果を数値的に検討できることがわかった。

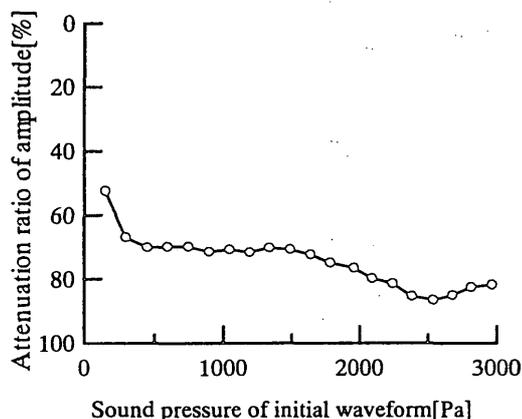


Fig.7 Attenuation of micro pressure wave (comparison with no resonator).

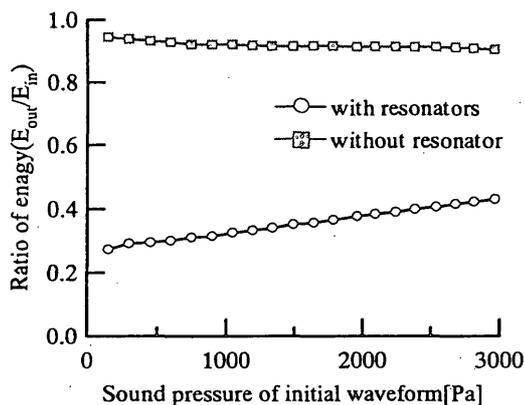


Fig.8 Attenuation of acoustic energy.

参考文献

- 1) 福田傑 他, 高速鉄道のスラブ軌道トンネル内を伝ばする圧縮波の解析, 機論 65-630, B(1999)598-604.
- 2) S.Teshima and Y.Watanabe, A study on suppression of the shock wave induced by a high-speed train in a tunnel, WESTPRAC VII, (2000), pp767-770
- 3) 手嶋真哉・渡辺好章, 高速列車走行により発生するトンネル微気圧波の消音に関する研究, 音講論集 2000.3pp.5-6
- 4) 渡辺好章・ト部泰正, 音波の非線形伝搬と計算機シミュレーション, 月刊フィジックス 1985-3,46 号, pp135-140
- 5) N.Sugimoto, Propagation of nonlinear acoustic waves in a tunnel with an array of Helmholtz resonators, J.Fluid Mech. (1992), vol.244, pp.55-78
- 6) 鎌倉友男, 非線形音響工学の基礎