

VII-4

能動騒音制御の戸外の騒音源への適用

北海道大学工学部環境工学科

○学 三輪剛士

正 長谷部正基

1. はじめに

近年、道路交通量の増大により都市の騒音問題がますます深刻なものとなってきている。従来より、道路交通騒音の防止策として、遮音壁を設置し騒音の回折現象によって騒音を低減するという比較的容易な方法が用いられている¹⁾。この遮音壁を用いる方法は、受動的な騒音制御の代表的な技術であるが、一方最近では、能動的に騒音を低減しようとする方法、すなわち能動騒音制御 (ACTIVE NOISE CONTROL)の技術が注目され、急速に発展しつつある。能動騒音制御の技術は、古くから知られた基礎的な物理現象である、音波にその位相と 180° 反転した逆位相の音波を重ね合わせると、各々の音波が相殺して消滅することを利用するという方法である。

米国の Lueg²⁾ は、騒音源 (主音源; primary source) から放射された、消去したい音にスピーカー (二次音源; secondary source) から出した音を重ね合わせてキャンセルしてしまうアイデアを世界で最初に特許 (Process of silencing oscillation; 1936) として取得した。このアイデアがダクト内のような一次元的空間に対してその応用が始まった。その後、三次元的空間のなかでも自動車内のような閉空間の能動騒音制御に関する研究は Nelson, Elliot³⁾ などにより活発に行われている。しかし、道路交通騒音のような、半自由空間内に三次元的に伝搬する騒音に対しては比較的研究が進んでいない。本研究は tripole (三極子) と呼ばれる二次音源を使用し、半自由空間内の三次元的空間における能動騒音制御の基礎的考察を行う。

2. JMC 理論

ダクト内騒音のように管内低周波音に対する能動騒音制御は、一次元的な単純な音場であるため比較的容易であるが、道路交通騒音のような本質的に三次元的な音場を能動騒音制御によって制御すること、すなわち現実的な三次元音場に対してその逆位相の音場を再現し、それを重ね合わせることはその音場の複雑性から非常に困難な問題である。

しかし、Jessel ら⁴⁾ によってホイヘンスの原理の新しい形式として与えられた JMC 理論により、この問題の解決に近づくことができる。JMC 理論では、主音源による音場が二次音源 (騒音源から伝搬してきた音波をキャンセルするための音波を放射する音源) の配列から放射される Kirchhoff による積分形式で与えられる音場によって完全に再現されることを述べている。また本論文では、Kirchhoff の積分形式による音場の表現に元の音場を重ね合わせた表現である、

$$F_T(r) = \frac{e^{-ikr}}{r} - \int_{\Sigma} \left[G(r, r_0) \frac{\partial F_P(r_0)}{\partial n_0} - F_P(r_0) \frac{\partial G(r, r_0)}{\partial n_0} \right] d\Sigma_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

という式を使用する。ここで r_0 は積分面上の位置ベクトル、 n_0 は積分面上の単位垂直ベクトルである。この式では積分内の第一項は単極子 (monopole) 音源、第二項は双極子 (dipole) 音源からの寄与であり、総体的には三極子 (tripole) 音源からの寄与として解釈できる。本論文ではこの表現を三次元空間における数値

Study on Application of Active Noise Control to Noise Problems Outdoor

by Takeshi Miwa and Masaki Hasebe

シミュレーションの基礎式として使用する。

3. 1次元空間での能動騒音制御の有効性

複雑な現実の三次元的空間での数値シミュレーションを行う前に、比較的容易なダクト内のような一次元的空間での tripole 音源の有効性を確かめた。以下に JMC 理論による数式を用いた計算結果を示す。

騒音源の音圧 $P(x,t)$ 、粒子速度 $V(x,t)$ はそれぞれ、

$$\begin{aligned} P(x,t) &= 2Pf(x-ct), & \dots\dots\dots (2) \\ V(x,t) &= 2Vf(x-ct) \end{aligned}$$

と書くことができ、ここで $P = \rho cV$ である。ここで波を正弦波であると仮定すると、伝搬関数 f は次式のように書くことができる。

$$f(x-ct) = e^{-i\omega x + ikx} \quad \text{or} \quad e^{j\omega x - jkx}$$

また二次音源を構成する tripole 音源の内、monopole 音源の音圧 $P1(x,t)$ 、粒子速度 $V1(x,t)$ はそれぞれ

$$P1(x,t) = \begin{cases} -Pf(-x,t) & x \leq 0 \\ -Pf(x,t) & x > 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

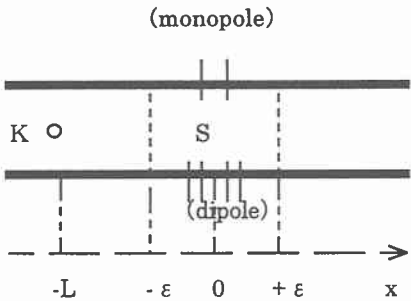
$$V1(x,t) = \begin{cases} Vf(-x,t) & x \leq 0 \\ -Vf(x,t) & x > 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

dipole 音源の音圧 $P2(x,t)$ 、粒子速度 $V2(x,t)$ はそれぞれ

$$P2(x,t) = \begin{cases} -Pf(x,t) & x \leq 0 \\ Pf(-x,t) & x > 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$V2(x,t) = \begin{cases} -Vf(-x,t) & x \leq 0 \\ -Vf(x,t) & x > 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と書くことができる。ここで図 1 のように、二次音源は x 座標の $x=0$ に monopole 音源を、 $x=-\epsilon$ 、 $+\epsilon$ に dipole 音源を設置するものとする。これらの数式を使用した一次元空間における数値シミュレーションの結果は図 2 のようになる。このように一次元空間においては tripole 音源を使用することによって完全に騒音を打ち消すことができる。



K : primary source, S : secondary source (tripole)

図 1. ダクト内の tripole 音源

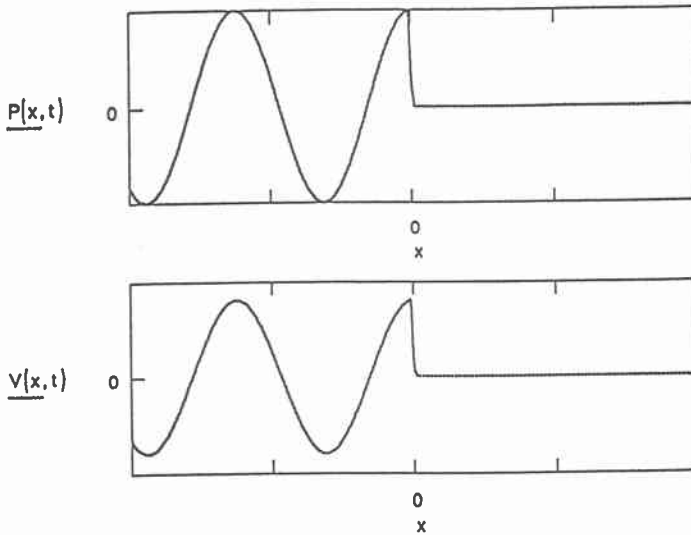


図2. 一次元空間における音圧と粒子速度

4. 3次元空間における数値シミュレーション

戸外のような三次元空間での一つの例として、本論文では道路交通騒音の能動騒音制御のシミュレーションを行った。

自動車が行く道路に沿って、図3に示されるような地表面に垂直な長方形の格子面を考え、その格子の交点上に二次音源が配置されていることを想定し、JMC理論を適用するとどの程度の騒音減衰効果が得られるのかを数値シミュレーションによって推定した。ここでは最も単純な条件として、点音源とみなしうる一台の自動車騒音が発生していると考え、また、二次音源が配置されている面の中央部正面に自動車が行った時刻について計算を行うことにする。

二次音源である tripole (三極子) は、実際には連続的に分布させることは出来ない。その近似として離散的に二次音源を分布させることを想定する。そのために (1) 式を離散的な表現に改めた式を使用した。なお、地表面を音響的完全反射面としている。

多数の二次音源相互の間隔は格子を構成するため必要な二次音源の個数と関係するので、実際上重要な問題である。減衰値の二次音源の間隔への依存性を調べるため、格子面の背後の受信点での能動騒音制御を行うことによって起こる音圧レベルの低減値、すなわち減衰値を計算した。ここでは図4に、対象とした音の周波数が 1000Hz の場合を示す。その結果としては図に示すように、二次音源の間隔が 0.2 m 程度以下では大きな減衰値が得られているが、それ以上では急激に減衰値が低下することがわかる。これは Nelson ら²⁾によって明らかにされた、平面上に分布する二次音源の間隔は、音の波長の約 1/2 以下でなければ減衰が期待できないということと一致している。

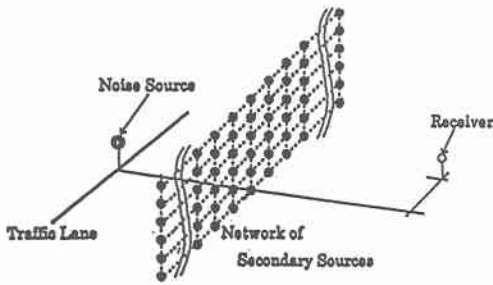


図3. 音源,二次音源及び受信点の配置図

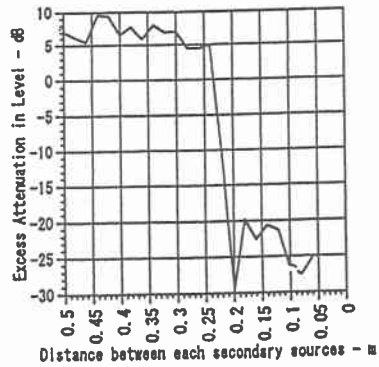


図4. 格子上の二次音源の間隔と騒音減衰値の関係

次に、二次音源の間隔を0.2m以下とした場合についての数値シミュレーションの結果を示す。125Hz から2kHzまでの1オクターブ間隔での各周波数での結果をみると、1kHzまで周波数では二次音源格子の背後で大きな減衰がみられるが、2kHzでは二次音源の間隔が波長の1/2を大きく越えることになるため、全く減衰がみられない。また、音の周波数が高くなるほど減衰する範囲がわずかに指向性を持つ傾向がみられる。

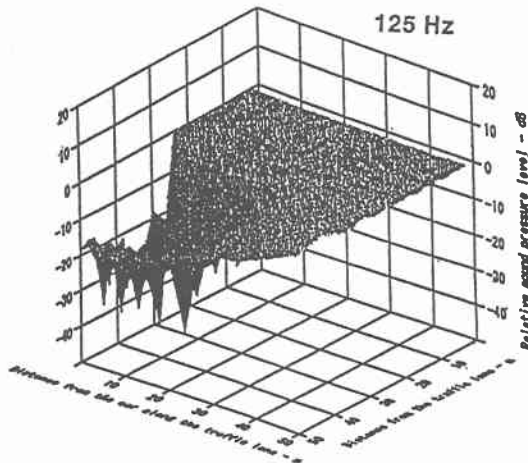


図5-1. 能動騒音制御による音圧レベル減衰値の分布 (125Hz) (単位 dB)

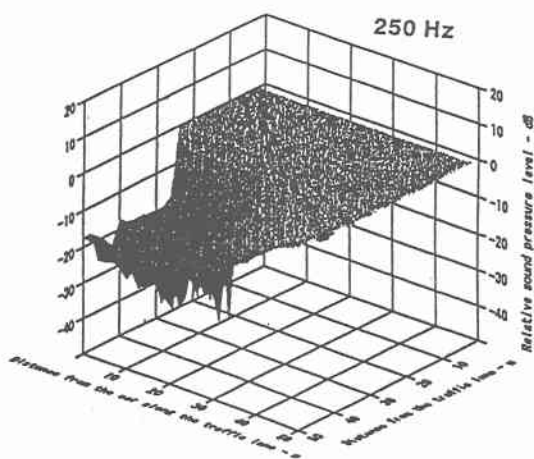


図 5-2. 能動騒音制御による音圧レベル減衰値の分布 (250Hz) (単位 dB)

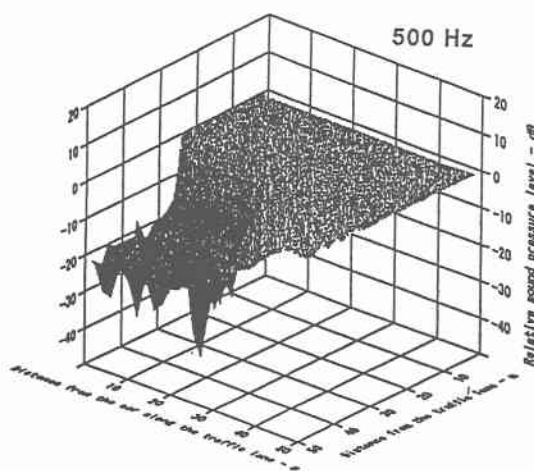


図 5-3 能動騒音制御による音圧レベル減衰値の分布 (500Hz) (単位 dB)

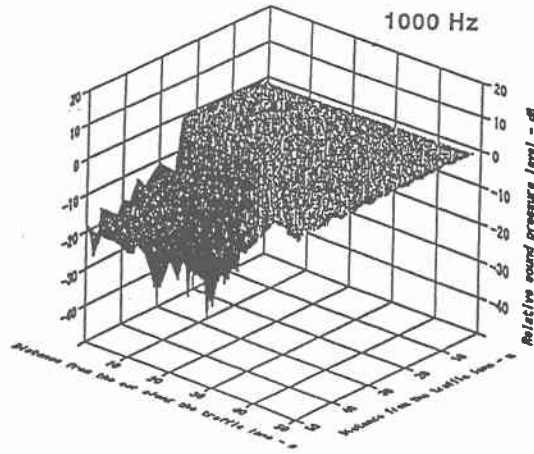


図 5-4 能動騒音制御による音圧レベル減衰値の分布 (1000Hz) (単位 dB)

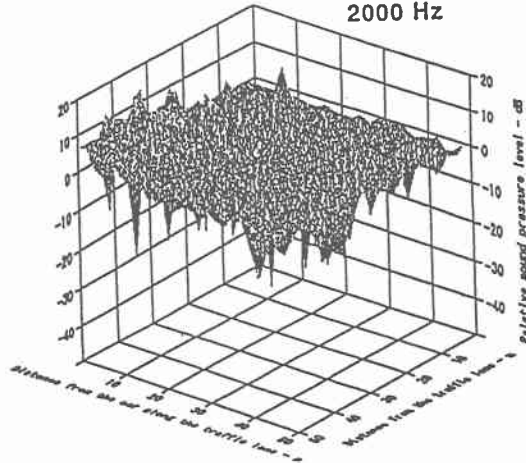


図 5-5 能動騒音制御による音圧レベル減衰値の分布 (2000Hz) (単位 dB)

5. 考察

以上の結果からわかるように、能動騒音制御ではある程度高い周波数成分を制御するためには非常に多くの二次音源が必要になり、実用上は困難である。しかし、遮音壁のような音の回折減衰の現象を利用した受動的な方法との併用を行い、先ず受動的な方法によって高い周波数を減衰させ、その後、能動騒音制御を適用するといった方法が有効になってくると考えられる。

REFERENCE

- 1) L.L.BeraneK, "Noise and vibration control", Institute of Noise Control Engineering (1988) .
- 2) P.Lueg, U.S.Patent No.2043416 (1936) .
- 3) P.A.Nelson & S.J.Elliott, "Active Control of Sound", Academic Press (1992) .
- 4) J.M.Jessel & G.A.Mangiante, "Active sound absorbers in air duct", Journal of Sound and Vibration, 23(3),383-390 (1972)