三次元空間における能動消音に関する研究*

(音響パワー低減の推定における近似誤差)

林 卓 郎^{*1}, 江波戸 明彦^{*1}, 鈴木 成一郎^{*1}

A study on Active Noise Control in 3-Dimensional Space (Approximation Error in the Estimation of Acoustic Power Reduction)

Takuro HAYASHI, Akihiko ENAMITO and Seiichiro SUZUKI

In the previous report, the authors proposed a method for arranging noise sources and an error microphone for active acoustic power control systems. The theoretical estimations and experimental results of the acoustic power reduction were also presented. Two assumptions were made in the estimations; one was that the error signal becomes zero and the other was that the sources are small enough to be regarded as point sources. In actual cases, however, it often occurs that those assumptions are not sufficiently satisfied. The assumptions are examined in this paper, and more precise estimations are presented. In addition, the experimental results obtained using the duct opening are discussed and compared with the theoretical estimations.

Key Words: Acoustic, Noise, Active Noise Control, Acoustic Power, Microphone Location, Approximation Error, Duct Noise

1. 結 論

従来の能動消音技術は、主として一次元的に伝ばする音に対する制御が中心となってきた。そして制御手法としては、誤差マイクにおける音圧信号を零に近づけるような制御を行う、LMS アルゴリズムを用いた適応制御が主流となっている⁽¹⁾。一方、三次元空間内で機器の騒音制御を行う方法の研究も近年活発になってはいるが、指向性をつけることや受音点側にサイレントゾーンを作るものが多く^{(2)~(4)}、機器の音響パワーを低減する観点からの研究はまだ少ないようである。著者らは先に単純なモノポール音源の場合に、付加音源と誤差マイクを適切な配置にした場合、低周波域で付加音源の音の強さを元の音源と逆相で振幅が等しい状態に近づけることができることを報告した⁽⁵⁾。この方法は逆に考えると、二次音源の音の強さが一次音源と逆相で振幅が等しくなるように設定したとき、それらの音源の近傍に音圧の節ができるように二次音源を配置し、その節の位置に誤差マイクを置いて音圧零の点をつくることと等価である。その意味から、著者らはこの方法を音響の節を利用した配置法(音響ノード

ルポイント法)と名付けた。一次音源と二次音源がともに1個の場合には、2個の音源の音の強さが等しく逆相の二重音源となり、一次音源と二次音源から等しい距離の所に音圧が零の節が出来ることはよく知られている。著者らが提案している方法は、二次音源を複数に分散させたときにも音源近傍に節ができるように音源の配置を工夫したものである。文献(5)ではまた、点音源近似を用いた音響パワー低減効果の予測式も示した。しかしこの予測式においては次の二つの点で仮定を用いていた。その一つは誤差マイクにおける音圧信号が十分零に近いとしたことであり、他の一つは各音源の大きさが波長に比べて十分小さいとし、点音源近似を用いたことである。しかし実際の制御系ではそれらが無視できないことも多い。特に誤差マイクでの音圧信号は、低周波域で暗騒音や風雑音、スピーカの音響放射性能の低さなどの影響を受け、十分な収束性が得られないのが普通である。そこで本報ではこれらの2点について、それらが音響パワーの低下量にもたらす影響を考察した。また、一次音源がダクト開口部から放射される音の場合の実験結果も示し、理論的検討結果と比較して傾向的によく一致することを述べる。

* 原稿受付 1995年2月24日。

^{*1} 正員、(株)東芝 (〒230 川崎市川崎区浮島町4-1)。

2. 誤差マイク音圧と 音響パワー低下量の関係

今、図1に示す系について考える。 P_1 は一次音源、 $S_i(i=1, 2, \dots, N)$ は二次音源で、各音源はモノポール音源とし、二次音源は一次音源と同一平面上にあって一次音源から等距離に配置されているとする。また、二次音源の音源の強さはすべて等しいとする。このようなモデルを想定しているのは、二次音源をできるだけ一次音源に近接させ、全体としてコンパクトな構成にするためである。例えば一次音源が壁や天井面にあるダクト出口などの場合、二次音源が同一平面上にあると邪魔になることもなく、デザイン上もすっきりした構成とすることができる。この系の場合、文献(5)で述べたように、一次音源、二次音源とも鳴らしたときの全音響パワー W と、一次音源だけを鳴らしたときの音響パワー W_1 との比 γ は次のように表される。

$$\gamma = \frac{W}{W_1} = 1 + B^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \text{sinc}(kd_{s_i s_j}) + 2NB \text{sinc}(kd_{p_1 s_1}) \cos(\theta_{s_1} - \theta_{p_1}) \dots (1)$$

ここで B は、一次音源と一個の二次音源の音源の強さの比の絶対値、 k は波数、 d は音源間の距離である。すなわち、一次音源の強さを q_{p_1} 、二次音源の強さを $q_{s_i}(i=1, 2, \dots, N)$ とし、二次音源はすべて音の強さが等しいとして $q_{s_i} = q_{s_1}$ としたとき、 $B = |q_{s_1}/q_{p_1}|$ である。また θ_{p_1} 、 θ_{s_1} は一次音源と二次音源の位相、 $\text{sinc}(\)$ は $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ と定義されている。次に、誤差マイクでの音圧 p_e は制御を行っている場合、

$$p_e = \{Z_{p_1}, Z_{s_1}, \dots, Z_{s_N}\} \begin{Bmatrix} q_{p_1} \\ q_{s_1} \\ \vdots \\ q_{s_N} \end{Bmatrix} \dots (2)$$

と表される。ここで、 Z_{p_1} 、 Z_{s_i} はそれぞれ一次音源、二次音源から誤差マイクまでの音の伝ぱを表すインピーダンスである。今、一次音源だけを鳴らしたとし、そのときの誤差マイクでの音圧を p_0 とすると、式(2)で $q_{s_i} = 0(i=1, \dots, N)$ として

$$p_0 = Z_{p_1} q_{p_1} \dots (3)$$

である。また、二次音源も鳴らしたときは二次音源の音の強さはすべて等しいとして式(2)から

$$p_e = Z_{p_1} q_{p_1} + \left(\sum_{i=1}^N Z_{s_i} \right) q_{s_1} \dots (4)$$

となる。式(3)、(4)から次の式を得る。

$$\frac{q_{s_1}}{q_{p_1}} = - \left\{ 1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right) \right\} \frac{Z_{p_1}}{\sum_{i=1}^N Z_{s_i}} \dots (5)$$

ここで式(5)中で $p_e/p_0 = \beta e^{j\alpha}$ とおくことにする。 β は誤差マイクでの制御前後の音圧の振幅比、 α は位相差を示す項である。 β を対数で表すと、誤差マイクにおける制御後の音圧の低下量を dB で表したものに一致する。文献(5)では一次音源、二次音源、誤差マイクの配置について、図2で示す配置を提案した。これらの配置は、図2(a)では周波数によらず、また図2(b)、(c)では波数 k と各音源とマイク間距離の積が1に比べ十分小さいとき

$$\frac{Z_{p_1}}{\sum_{i=1}^N Z_{s_i}} \approx \frac{1}{N} \dots (6)$$

が成立するように配置を決めたものである。これは、誤差マイクの音圧 $p_e = 0$ となる理想的な状態では、式(5)、(6)からわかるように、二次音源一個の音の強さは一次音源と逆相で振幅が $1/N$ になるということを示している。式(6)を式(5)に代入すると

$$\frac{q_{s_1}}{q_{p_1}} \approx - \frac{1}{N} \{ (1 - \beta \cos \alpha) - j\beta \sin \alpha \} \dots (7)$$

となる。式(7)から次の2式が導かれる。

$$B = \frac{1}{N} \sqrt{1 + \beta^2 - 2\beta \cos \alpha} \dots (8)$$

$$\cos(\theta_{s_1} - \theta_{p_1}) = - \frac{1 - \beta \cos \alpha}{\sqrt{1 + \beta^2 - 2\beta \cos \alpha}} \dots (9)$$

今、式(1)において、一次音源と二次音源の間の距離 $d_{p_1 s_1} = d$ とし、これと波数 k との積の無次元周波数 kd が十分小さい場合を考える。このとき、 $\text{sinc}(kd) \approx 1$ 、 $\text{sinc}(kd_{s_i s_j}) \approx 1$ と近似できるから、式(8)、(9)を

Fig.1 Arrangement of an error microphone and a single primary and multiple secondary sources

Fig.2 Examples of the arrangement of an error microphone and sound point sources determined by the acoustic nodal point method

Fig. 3 Acoustic power reduction when the error signal does not tend to zero (1)

Fig. 4 Acoustic power reduction when the error signal does not tend to zero (2)

式(1)に代入すると結局

$$\gamma \approx \beta^2 \quad \dots \dots \dots (10)$$

が得られる。したがって $kd \rightarrow 0$ の低周波域では、音響パワーの低減効果を対数で表すと

$$10 \log_{10} \gamma = 10 \log_{10} \beta^2 = 20 \log_{10} \left| \frac{p_e}{p_0} \right| \quad \dots \dots \dots (11)$$

となる。この式から、 $kd \rightarrow 0$ のとき音響パワーの変化量は誤差マイクでの変化量と等しいことがわかる。このことは、制御前後で誤差信号が増加すれば音響パワーも増加し、誤差信号が低下すれば音響パワーも低下することを意味する。

実際に図2の(a)～(c)について式(1)、(5)から音響パワーの低下量を計算した例を図3、4に示す。図3は(a)～(c)について、位相差 α を零とし、 $\beta=0$ (破線)と $\beta=0.1$ (実線)について示したものである。 $\beta=0$ は誤差マイクの音圧 p_e が零となる場合で、音響パワーレベルの低減効果は $kd \rightarrow 0$ で $-\infty$ となるが、 $\beta=0.1$ のときは誤差マイクでの低下量 -20 dB に漸近することがわかる。次に、図4は図2の配置(a)の場合で $\beta=0.31$ とし、 $0, \pi/2, \pi$ と位相差の値を変えたものである。前と同様に、 $kd \rightarrow 0$ では誤差マイクでの低下量 -10 dB に漸近する。また、位相差による変化については、 α の値により若干の変化はあるが、振幅

Fig. 5 Coordinate system when considering the area of sources

β による違いに比べればその影響は小さいことがわかる。

3. 音源の大きさによる影響

これまでの考察では、各音源は点音源とみなしてきた。しかし実際には各音源は点ではなく、ある大きさをもつ。したがって、音響パワー低減効果に音源の大きさがどのように影響するか調べておく必要がある。今、図5のように有限の大きさの一次音源、二次音源と誤差マイクが無限大バツフル板上にある場合について考える。ここで、音源はすべてピストン運動をしているとし、音源以外の部分は静止しているとする。なお、ここで考えているのは半空間でのモデルであるが、これは自由空間で一次音源、二次音源が同一平面上にあるモデルと本質的に等価である。

以下に、一次音源、二次音源のみの音響パワー W_1, W_2 とそれらの干渉による音響パワー W_3 、および誤差マイクの音圧を零としたときに得られる二次音源の音の強さの振幅と位相について考察することにする。なお、2章では誤差マイクの音圧が零とならない場合について考察したが、本章では簡単のため、零に収束するとしている。今、一次音源と二次音源の面積、振動速度、音源の強さ、音源上の音圧を $S_n, u_n(\mathbf{x}_n), q_n, p(\mathbf{x}_n)$ で表すことにする。ここで添字 n は、 $n=p$ のときが一次音源、 $n=s_i (i=1, 2, \dots, N)$ のときが二次音源で、 $\mathbf{x}_n$ は音源上の位置を表す。一次音源、二次音源および誤差マイクでの音圧はそれぞれ次のように表される⁽⁶⁾。

$$p(\mathbf{x}_p) = \int_{S_p} u(\mathbf{x}_p) Z(\mathbf{x}_p | \mathbf{x}_p) ds + \sum_{i=1}^N \int_{S_{s_i}} u(\mathbf{x}_{s_i}) Z(\mathbf{x}_{s_i} | \mathbf{x}_p) ds \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$p(\mathbf{x}_{s_i}) = \int_{S_p} u(\mathbf{x}_p) Z(\mathbf{x}_p | \mathbf{x}_{s_i}) ds + \sum_{j=1}^N \int_{S_{s_j}} u(\mathbf{x}_{s_j}) Z(\mathbf{x}_{s_j} | \mathbf{x}_{s_i}) ds \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$p_e(\mathbf{x}) = \int_{S_p} u(\mathbf{x}_p) Z(\mathbf{x}_p | \mathbf{x}) ds$$

$$+ \sum_{i=1}^N \int_{S_{si}} u(\mathbf{x}_{si}) Z(\mathbf{x}_{si}|\mathbf{x}) ds \dots\dots\dots (14)$$

ここで $Z(\mathbf{x}_i|\mathbf{x}_j)$ は $\mathbf{x}_i$ から $\mathbf{x}_j$ までの音の伝ばを示すインピーダンスで

$$Z(\mathbf{x}_i|\mathbf{x}_j) = \frac{j\omega\rho}{2\pi r} e^{-jkr} = \tilde{Z}_0 \left\{ \frac{\sin kr}{kr} + j \frac{\cos kr}{kr} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

となる。ただし $\tilde{Z}_0 = \rho\omega^2/2\pi c$ である。また音源の強さ q_p, q_{si} は、 $u(\mathbf{x}_p), u(\mathbf{x}_{si})$ が一定だからそれらを u_p, u_{si} とすると $q_p = u_p S_p, q_{si} = u_{si} S_{si}$ となる。これから、例えば一次音源のみを鳴らしたときの音響パワー W_1 は

$$W_1 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \int_{S_p} P(\mathbf{x}_p) u(\mathbf{x}_p)^* ds \right\} = \frac{1}{2} \tilde{Z}_0 a_1 |q_p|^2 \dots\dots\dots (16)$$

$$a_1 = \frac{1}{S_p^2} \int_{S_p} \int_{S_p} \operatorname{sinc}(kr) ds ds' \dots\dots\dots (17)$$

となる。ただし、 r は音源内の2点間の距離である。ここで式(16)の $\tilde{Z}_0 a_1$ は自己音響放射抵抗を表す。点音源のときは $\tilde{Z}_0$ のみとなるので、 a_1 は面積を考慮したときの影響を表す。同様に、二次音源のみの音響パワー W_2 と一次音源と二次音源の干渉による音響パワー W_3 は

$$W_2 = \frac{1}{2} \tilde{Z}_0 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |q_{si} q_{sj}| a_2 \cos(\theta_{si} - \theta_{sj}) \dots\dots (18)$$

$$W_3 = \tilde{Z}_0 \sum_{i=1}^N |q_p q_{si}| a_3 \cos(\theta_{si} - \theta_p) \dots\dots\dots (19)$$

ただし

$$a_2 = \frac{1}{S_{si} S_{sj}} \int_{S_{si}} \int_{S_{sj}} \operatorname{sinc}(kr) ds ds' \dots\dots\dots (20)$$

$$a_3 = \frac{1}{S_p S_{si}} \int_{S_p} \int_{S_{si}} \operatorname{sinc}(kr) ds ds' \dots\dots\dots (21)$$

となる。 $\tilde{Z}_0 a_2, \tilde{Z}_0 a_3$ はそれぞれ二次音源間および一次音源と二次音源の間の相互音響放射抵抗である。ここで、二次音源は一次音源から等距離にあり、それらの面積は同一で、音の強さは振幅と位相がすべて等しいとすると、 $S_{si} = S_{sj}, q_{si} = q_{sj}, \theta_{si} = \theta_{sj}$ となり、制御前後の音響パワーの比 γ は

$$\gamma = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{W_1} = 1 + B^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{a_2}{a_1} \right) + 2NB \left(\frac{a_3}{a_1} \right) \cos(\theta_{si} - \theta_p) \dots\dots\dots (22)$$

となる。なお、点音源近似では

$a_1 \cong 1, a_2 \cong \operatorname{sinc}(kd_{sissj}), a_3 \cong \operatorname{sinc}(kd_{pisi})$ としている。次に、式(14)の $p_e(\mathbf{x})$ は次のように表すことができる。

Fig. 6 Acoustic power reduction when the error microphone is close proximity to the primary source (.....: point source approximation)

$$p_e(\mathbf{x}) = \{ Z_p(\mathbf{x}), Z_{s1}(\mathbf{x}), \dots, Z_{sN}(\mathbf{x}) \} \begin{Bmatrix} q_p \\ q_{s1} \\ \vdots \\ q_{sN} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

ただし

$$Z_p(\mathbf{x}) = \frac{1}{S_p} \int_{S_p} \tilde{Z}_0 \left\{ \frac{\sin(kh_p)}{kh_p} + j \frac{\cos(kh_p)}{kh_p} \right\} ds \dots\dots\dots (24)$$

$$Z_{si}(\mathbf{x}) = \frac{1}{S_{si}} \int_{S_{si}} \tilde{Z}_0 \left\{ \frac{\sin(kh_{si})}{kh_{si}} + j \frac{\cos(kh_{si})}{kh_{si}} \right\} ds \dots\dots\dots (25)$$

で、 $h_p = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_p|, h_{si} = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_{si}|$ である。 $p_e(\mathbf{x})$ が零になると仮定すると、音源の強さの比は式(23)で $q_{si} = q_{si} (i=1, \dots, N)$ として

$$\frac{q_{si}}{q_p} = - \frac{Z_p(\mathbf{x})}{\sum_{i=1}^N Z_{si}(\mathbf{x})} \dots\dots\dots (26)$$

となる。この式から点音源近似の場合と同様、音の強さの比の絶対値 B と位相差 $\theta_{s1} - \theta_p$ を求め、式(22)から音響パワーの低減効果を計算することができる。

音源の大きさを考慮した場合の計算例を図6に示す。図6は図2(a)の配置において、一次音源と二次音源および誤差マイク間の距離 d を一定とし、一次音源の半径 R_1 との比 R_1/d の値を変えて音響パワーの低減効果を計算している。積分計算には台形公式を用いた。図6で破線は点音源近似のときの値で、これは $R_1/d=0.5$ の曲線とほとんど重なっている。この図から、 R_1/d が1に近づくと点音源近似からのずれが大きくなり、特に $R_1/d=0.99$ の場合には音響パワーの低減効果もかなり劣化することがわかる。したがって、誤差マイクが一次音源に近接し過ぎると音響パワー低減効果の性能低下を招くことになる。ただし、実際には $R_1/d=0.9$ の場合でも、低周波域を除いて点音源の

場合とそれ程変わらないので、 R_1/d がそれ以下の値であれば実用上は十分であると考えられる。

Fig. 7 Test equipment for acoustic power control of the fan noise radiated from the duct opening

Fig. 8 Estimation of the acoustic power reduction in the experiment shown in Fig. 7 (—: source area considered,: point source approximation)

4. 実験

前報⁽⁵⁾では二次音源を増やしたときの配置について考察し、図2に示す配置を提案した。本報では径20 cm、肉厚2 cmの亚克力製の円形断面ダクトと径15 cmの二次音源用スピーカを用い、図7に示す構成で図2(a)~(c)の配置についての音響パワーの制御実験を行った。ここで制御系にはLMSアルゴリズムを用い、誤差マイクの音圧が零となるように制御を行っている。ダクト中心と制御スピーカ中心の距離は30

Fig. 10 Error signal (upper figure) and spatially averaged sound pressure level (lower figure) with and without control in the case of $N=3$

Fig. 9 Error signal (upper figure) and spatially averaged sound pressure level (lower figure) with and without control in the case of $N=2$

Fig. 11 Error signal (upper figure) and spatially averaged sound pressure level (lower figure) with and without control in the case of $N=4$

cm で、スピーカはすべて等しいものを使い、一つの制御系で駆動しているので二次音源の強さは同じである。騒音源には径 18 cm の軸流ファンを用いており、ファンからの騒音はダクト出口から放射される。したがって、一次音源はダクト出口とみなせる。音響パワーの低減効果の推定には、ダクト外部で開口部の中心から 30 cm 離れた 5 点の音圧レベル平均値を用いた。本実験ではスピーカ径の関係から、一次音源と二次音源を余り近接させることができず、したがって 3 章の計算結果で示したように誤差マイクが音源に極端に近接した構成とはなっていない。本実験における構成で音源の大きさを考慮した場合と点音源近似の場合の計算結果を示すと、図 8 のようになる。図 8 は図 2 (a) ~ (c) の配置に関し音響パワーの低減効果を比較したものである。500 Hz までの範囲では $kd < \pi$, $R_1/d \cong 0.3$ となり、誤差マイクが音源に近接していないので、音響パワーの低減効果は音源の大きさを考慮しても点音源近似とほとんど同じである。次に、図 9 ~ 11 は実際の実験結果で、図 2 (a) ~ (c) の場合について、誤差マイクでの音圧(上段)とダクト周囲での音圧平均値(下段)を A 特性の周波数分析結果で示している。これらの図をみると、いずれも 300 Hz くらいまでの低周波域で、誤差信号が増加しているところでは周囲音圧も上昇し、誤差信号が低下しているところでは周囲音圧も低減している。そして、周囲平均音圧変化量は誤差マイク音圧変化量とほぼ等しくなっていることがわかる。したがって、2 章で述べた誤差マイク音圧と音響パワー変化量の関係についての考察が実験的にも裏付けられている。これらの図からまた、図 8 の計算結果で示したように、二次音源を増やすと音響パワーの低下量が増すこともわかる。なお、今回の実験では、低

周波で誤差マイクの音圧低減効果が十分には得られなかった。その原因としては、風雑音によるコヒーレンスの低下やスピーカ特性で低周波域で音が十分には出ないことなどが考えられ、これらが改善されれば音響パワー低減性能がさらに向上すると思われる。

5. 結 言

音圧の節を利用した音響パワーの低減法において、実際の制御を行う場合に考慮する必要のある誤差信号の収束状態の影響と音源の大きさの影響について考察した。誤差信号の収束状態は音響パワーの低減効果に大きな影響を与え、特に $kd \rightarrow 0$ の極限では音響パワーの変化は誤差信号の変化量と一致することを示した。また、音源の大きさを考慮した計算を行い、誤差マイクが音源に近接しすぎると点音源近似からずれ、音響パワー低減効果が劣化することがわかった。さらに、ダクトでの消音試験において、低周波では誤差信号がほぼ音響パワーの制御効果になっていること、提案した配置のように二次音源の個数を増やすと消音性能も向上することが確認された。

文 献

- (1) Haykin, S., *Adaptive Filter Theory*, (1986), 216, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (2) Nelson, P. A. and Elliott, S. J., *Active Control of Sound*, (1993), 356, Academic Press.
- (3) Miyoshi, M., Shimizu, J. and Koizumi, N., *Inter Noise '94*, (1994), 1299.
- (4) Omoto, A., ほか 4 名, *Inter Noise '94*, (1994), 1357.
- (5) 林卓郎, 江波戸明彦・鈴木成一郎, 機論, **61**-586, C (1995), 2402.
- (6) 田中信雄・ほか 3 名, 機論, **59** 569, C (1994), 86.