

アクティブインピーダンス制御に関する基礎研究*

垣内章宏, 鈴木久晴, 尾本章 (九大芸工)

1 はじめに

音響問題に関する能動制御はこれまで数多く研究されてきており [1, 2], それらの多くは主に音圧を制御対象としたものであった。本研究では制御対象をインピーダンスとし, エラーセンサー位置でのインピーダンスを能動的に変化させることで, 吸音や音場等化といった様々な効果を得ようと試みている。その制御原理と理論的裏づけ, シミュレーション結果について言及する。

また, さらに任意方向のインピーダンスを制御できるような制御器を提案し, その可能性についても検証を行う。

2 制御原理

ある閉空間に一次音源が存在するとして, 制御したい点にセンサーを, 任意の位置に二次音源を配置する。センサー位置での比音響インピーダンスが空気特性インピーダンス $Z_0 = \rho_0 c_0$ になるよう制御すれば, その点で音波が平面進行伝搬し, 吸音と同等の効果が得られることが期待される。しかし, 直接インピーダンスを制御することは難しいので, 音圧と制御方向の粒子速度が比例関係になる度合いを評価関数とし, 制御器を設計することで等価的にインピーダンスを制御する。

いま, x_1 方向のインピーダンスを制御するとすると, センサー位置 x_1 における音圧 $p(x_1)$ と x_1 方向粒子速度 $u_{x1}(x_1)$ は固有モード展開の形で以下のように書ける。

$$p = \Psi^T (a_p + Bq_s), \quad u_{x1} = \Psi'_{x1}{}^T (a_p + Bq_s)$$

それぞれの変数については Table 1 に示す。誤差関数を $e = p - Z_0 u$ とし, 評価関数 J をその絶対値の 2 乗とすると ($J = |e|^2 = e^H e$),

$$J = q_s^H [B^H D^H D B] q_s + q_s^H [B^H D^H D a_p] + [a_p^H D^H D B] q_s + a_p^H D^H D a_p$$

となり, J は二次音源の強さ q_s に関するエルミート二次形式になる。ここで, $D = \Psi^T -$

Table 1 Variables used in this report.

Ψ, Ψ'_{x1}	固有モード関数とその x_1 方向微分
a_p	一次音源による N 次モード複素振幅
B	M 個の二次音源の N 次モード係数
q_s	M 個の二次音源の複素強さ

$Z_0 \Psi'_{x1}{}^T$ である。 J を最小にする最適な二次音源の強さは $q_{so} = -[B^H D^H D B]^{-1} [B^H D^H D a_p]$ であり, このとき, p/u が最も $\rho_0 c_0$ に近づくという原理である。

3 一次元閉空間音場での解析解

提案するインピーダンス制御によって吸音効果が得られることを, 簡単な一次元閉空間音場で確かめる。長さ L , 境界の反射率が R の閉管の $x = y$ の位置に音源の強さ q の単極音源があるとき, その上流・下流の音圧は次のように書ける (u : 上流方向, l : 下流方向)。

$$p_u = q(y) \frac{Z_0 e^{jk(L-y)} + R e^{-jk(L-y)}}{S 2(e^{jkL} - R^2 e^{-jkL})} (R e^{-jky} + e^{jky})$$

$$p_l = q(y) \frac{Z_0 R e^{-jky} + e^{jky}}{S 2(e^{jkL} - R^2 e^{-jkL})} \{e^{jk(L-x)} + R e^{-jk(L-x)}\}$$

いま, $x = y_1$ に強さ q_p の一次音源, $x = y_2$ に強さ q_s の二次音源があるとする (Fig.1)。

音源どうしに挟まれた領域において完全吸音が成立するとして, 逆行波が生じないためには, その領域における音圧 $p(x) = p_{pl}(x, y_1) + p_{su}(x, y_2)$ が進行波のみの式であればよい。ここで下付文字 p は一次音源を, s は二次音源を表す。つまり, p_{pl} は一次音源の下流の音圧を, p_{su} は二次音源の上流の音

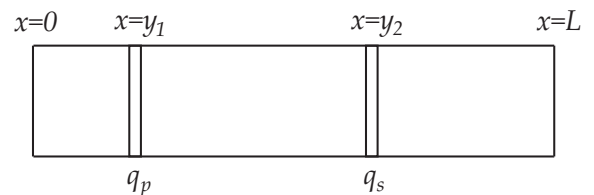


Fig. 1 Primary and secondary plane monopole sources in a finite rigid duct.

* Fundamental Study of Active Impedance Control by Akihiro KAKIUCHI, Hisaharu SUZUKI, and Akira OMOTO (Kyushu University).

圧を意味する。 e^{-jkx} と e^{jkx} の項に整理すると、後者の係数を 0 にする q_s は

$$q_s = -q_p \frac{Re^{-jky_1} + e^{jky_1}}{e^{jk(L-y_2)} + Re^{-jk(L-y_2)}} Re^{-jkL}$$

であり、このとき正方向のみの進行波になる。

また、同じ音源配置で提案するインピーダンス制御を行うとする。音源間の粒子速度は同様に $u(x) = u_{pl}(x, y_1) + u_{su}(x, y_2)$ であり、誤差関数 $e = p(x) - Z_0 u(x)$ は q_s の関数となる。そして、評価関数 $J = |e|^2$ を最小にするような q_s を求めると、逆行波が存在しないための q_s と全く同じ式になる。このことから、提案するインピーダンス制御によって進行波だけにする、つまり吸音効果が期待できることが確認された。

また、音源に挟まれた領域以外を制御すると音圧が 0 になってしまうことから、音源に挟まれた領域においてのみ進行波を除去できることも確認できた。

さらに、負の向きの進行波のみにする制御と誤差関数を $e = p(x) + Z_0 u(x)$ とした場合の制御が等しいことも分かった。

4 シミュレーション結果

4.1 一次元音場

$8 \times 0.2 \times 0.2$ の閉空間において、音源・センサーを Fig.2 のように配置した時の、シミュレーション結果を Fig.3 に示す。モード加算の上限を 800[Hz] とすることで、一次元音場を模擬している。解析周波数は (a)21[Hz] と (b)30[Hz] であり、左が制御前で右が制御後となっている。

どちらの周波数においても制御後は相対音圧レベルが均一になっており、定在波の影響が少なくなっていることが分かる。これは吸音と同等の効果が生じていることの表れだと考えられる。また、共鳴や非共鳴に関係なく同等の制御効果が得られることにも注目したい。さらに、これらの周波数より高い周波数においても、同様に有意な結果が見られた。

4.2 三次元音場

$4 \times 3 \times 2.5$ の閉空間における、音源・センサーの配置と制御結果を Fig.4 に示す。モード加算の上限は 800[Hz] とし、解析周波数は

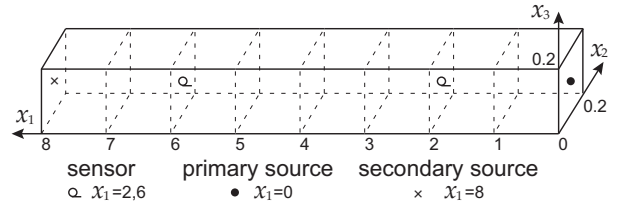


Fig. 2 Source & sensor arrangement.

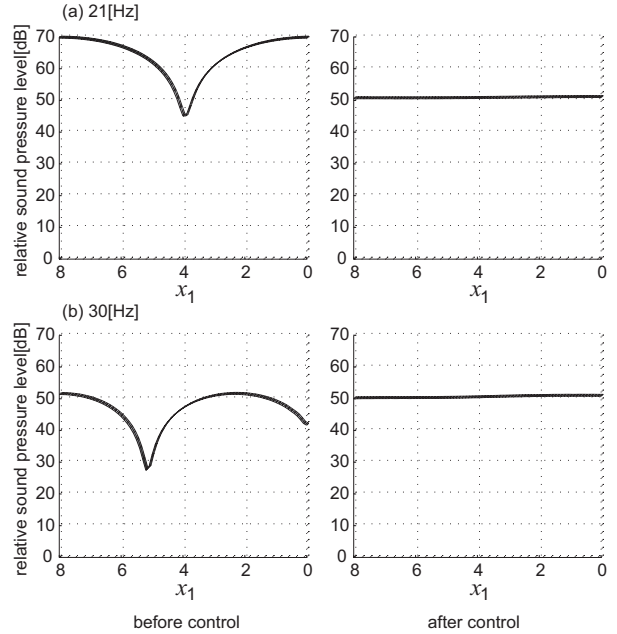


Fig. 3 The sound pressure distributions with a driving frequency of (a)21[Hz] and (b)30[Hz] are shown : before equalization (left) and after equalization (right).

42.5[Hz] で x_1 方向に一次モードが生じる周波数である。制御後は x_1 方向の定在波の影響が減少していることが分かる。しかし、制御方向以外のモードが生じ始める 57[Hz] より高い周波数では制御効果が大きく減少する傾向が見られた。

4.3 音場等化

矩形室での大域的な音場等化についてはこれまでも研究がなされてきた。Santillan らによって提案されている音源設定 [3] を採用して、三次元音場においてインピーダンス制御を用いた音場等化を行った。

いま、 x_1 軸に垂直な対抗する二つの壁それぞれに $N_{x_2} \times N_{x_3}$ の音源を次の条件で設置する。 $x_2[\alpha] = \alpha L_{x_2} / (N_{x_2} - 1)$, $x_3[\delta] = \delta L_{x_3} / (N_{x_3} - 1)$, ($\alpha = 0, 1, \dots, N_{x_2} - 1$, $\delta = 0, 1, \dots, N_{x_3} - 1$) にそれぞれの壁について音源を設置し、一次音源 ($x_1 = 0$) の強さは $q_{\alpha\delta} = q_0 / (\kappa_\alpha \kappa_\delta)$, $\kappa_\gamma = 2$ ($\gamma = 0$ or $N - 1$), 1 (other)

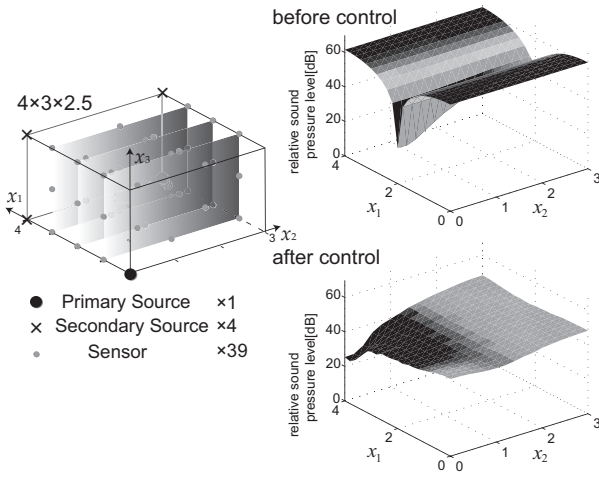


Fig. 4 Source & sensor arrangement (left) and impedance control with a driving frequency of 42.5[Hz](right). The sound pressure level in the plain $x_3=1.2$ [m] is shown : before control (upper) and after control (lower).

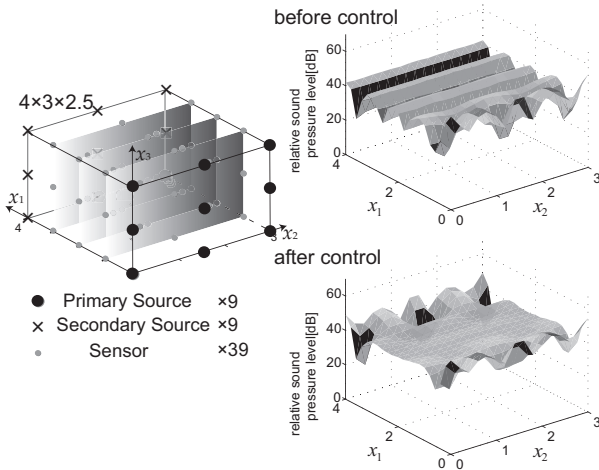


Fig. 5 Source & sensor arrangement (left) and sound equalization with a driving frequency of 190[Hz](right). The sound pressure level in the plain $x_3=1.2$ [m] is shown : before equalization (upper) and after equalization (lower).

とする。これは立体角の比と同じ比の強さで重み付けを与えることに相当している。

この重み付けを一次音源にした場合の、音源・センサーの配置と制御結果を Fig.5 に示す。解析周波数は 190[Hz] で、各方向にモードが生じている状況であり、これによって制御方向以外のモードが生じる周波数においても制御が可能であることが分かった。制御前を見ると分かるように x_1 方向にのみ定在波が生じており、一次元音場のように振る舞うからであると考えられる。ただし、(音源間の最大距離) < (制御したい周波数の波長) を満たす場合のみ制御が有効であるため、この場合は $3/2 < \lambda = c/f \therefore f = 226$ [Hz] まで

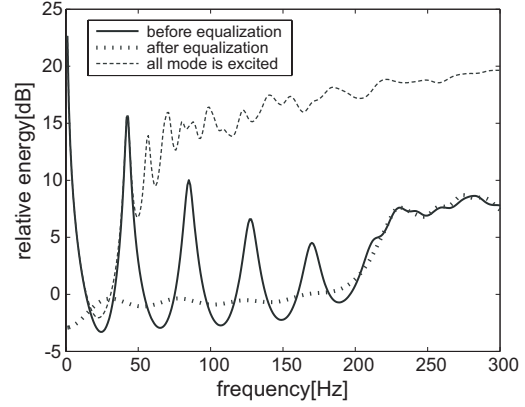


Fig. 6 Time averaged acoustic potential energy.

制御が有効となる。

また、Fig.6 に Fig.5 の音源配置の場合の時間平均音響ポテンシャルエネルギーの周波数応答を示す。制御前を見ると 200[Hz] 付近まで x_1 方向のモードのみが励起されていることが分かる。制御後は平坦な特性になっており、このことから、位置による音量差がなく、平坦な特性を持ったリスニングゾーンを提供できる可能性が示唆される。また、比較のため (0,0,0) の位置に一次音源を設置し、室のモードを全て励起した場合の周波数特性も示してある。

5 任意方向のインピーダンス制御

これまでの制御器では一方向のインピーダンスを制御することしかできない。本節では、任意方向のインピーダンスを制御するための制御器の設計と、その精度の簡単な検証について述べる。そこで、新たに誤差関数を以下のように定める。

$$e = [p \ p \ p]^T - Z_0[w_{x1}u_{x1} \ w_{x2}u_{x2} \ w_{x3}u_{x3}]^T$$

$$|w_{x1}|^2 + |w_{x2}|^2 + |w_{x3}|^2 = 1$$

すると、評価関数 $J = |e|^2 = e^H e$ は

$$J = q_s^H [B^H E B] q_s + q_s^H [B^H E a_p] + [a_p^H E B] q_s + [a_p^H E a_p]$$

となり、これを最小にする二次音源の強さは

$$q_{so} = -[B^H E B]^{-1} [B^H E a_p]$$

となる。

ここで、 $E = D_{x1}^H D_{x1} + D_{x2}^H D_{x2} + D_{x3}^H D_{x3}$ 、 $D_r = \Psi^T - Z_0 w_r \Psi_r^T$ である。

さて、この制御器の制御効果を確認するために二次元音場を仮定し、制御の方向重みと

して $w_{x_1} = \cos \theta$, $w_{x_2} = \sin \theta$ のように設定する。 θ は x_1 から x_2 に向かう角度とし, このためその方向にエネルギーが流れることが期待される。

1.5×1×0.1 の閉空間に Fig.7 のような音源とセンサーの配置でシミュレーションを行った結果を Fig.8 に示す。モード加算周波数の上限は 1600[Hz] で, 解析周波数は 125[Hz] であり, 制御前と制御後の相対音圧レベル分布とアクティブインテンシティ分布が示してある。ただし, 制御後の相対音圧レベル分布についてはいずれも似たような分布であったので (b) の場合のみ示してある。

センサ位置でのアクティブインテンシティを見ると, それぞれの θ におおむね対応した方向にエネルギーが流れていることが分かる。ただし, $\theta=0$ や, $\pi/2$ などどちらかの軸に直角の場合はこのような傾向は見られなかった。これは例えば, $\theta=0$ のとき, $w_{x_1} = 1, w_{x_2} = 0 \therefore J = |p - Z_0 u_{x_1}|^2 + |p|^2$ となり, 単純な一方向制御と同じ式にならないためであると考えられる。また, θ を変化させていくと, 例えば $0 < \theta < \pi/2$ では主に $\theta = \pi/4$ と同じ傾向になるということも分かったので, この制御器では任意方向にエネルギーを流すことはまだ難しいと考えられる。今後これらの課題を克服するために, w が小さければ $p - Z_0 w u$ も小さくなるような重み付けや, 制御戦略を考案する必要がある。

6 まとめ・今後の展望

インピーダンス制御の一手法を提案し, 理想的な一次元音場で解析することでその効果を確認した。シミュレーションにおいては, 一次元音場では制御効果が顕著に表れたが, 三次元音場では音源の配置と個数を工夫することで, 充分制御が可能であることが分かった。また, 任意方向のインピーダンス制御によるエネルギー進行方向制御の可能性について簡単な検討を行った。

今後は, 大局的な音場等化だけでなく, 任意方向のインピーダンス制御の評価関数について更に検討し, 局所的な定位制御などへの応用を検討していきたい。

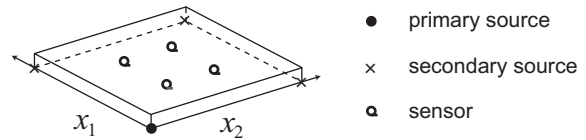


Fig. 7 Source & sensor arrangement.

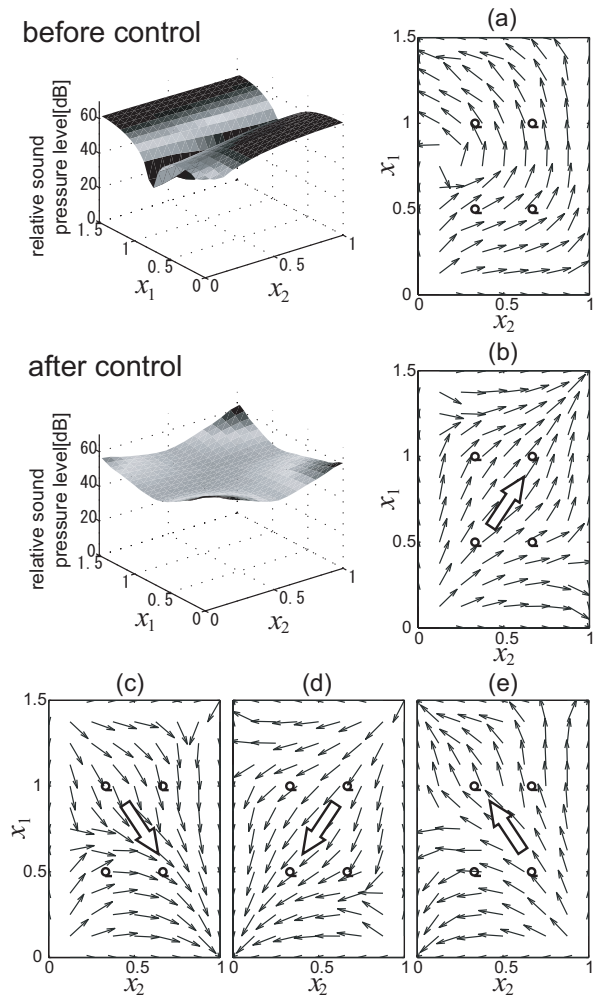


Fig. 8 Relative sound pressure level and active intensity with a driving frequency of 125[Hz]: (a)before control, (b) $\theta = \pi/4$, (c) $\theta = 3\pi/4$, (d) $\theta = 5\pi/4$, (e) $\theta = 7\pi/4$. Circles indicate sensor locations.

参考文献

- [1] P. A. Nelson and S. J. Elliott, "Active Control of Sound", Academic Press, (1995)
- [2] S. J. Elliott. *et al.*, " The Active Minimization of Harmonic Enclosed Sound Fields, Part 2 : A Computer Simulation ", *Journal of Sound and Vibration* 117(1), pp15-33(1987)
- [3] Santillan, A.O. *et al.*, " Experimental implementation of a low-frequency global sound equalization method based on free field propagation " *Applied Acoustics*, pp1-23, (2007)