

○寺尾道仁 関根秀久 △大端健治 (神奈川大)

1. はじめに 複雑な要素から成る物体の音響特性を単純形状のホログラム面(検査面)で囲み, その面素間インピーダンスで評価する. そこで必要となるホログラム面素の音圧・粒子速度を補助領域音圧観測とヘルムホルツ積分公式から求める新たな手法を試みる.

2. 音響インピーダンスホログラム

ホログラム面と音場の境界面を一定要素として多面体近似し, Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式を適用すると音場内音圧 P_i に関して式 (1a), P_i が境界上のとき式 (1b) のような離散表現を得る.

$$P_i = \sum_{K=I}^{IV} \sum_{j=1}^{N_K} (G_{ij} u_j - H_{ij} p_j) + f_i \quad (1a)$$

$$0 = \sum_{K=I}^{IV} \sum_{j=1}^{N_K} (G_{ij} u_j - H_{ij} p_j) + f_i \quad (1b)$$

ここで, K は境界条件のクラス $K=I, II, III, IV$ で, 各々 (I) 粒子速度, (II) 音圧, (III) インピーダンスが規定される面素および (IV) いずれも規定されないホログラム面素で, 各々その数は N_K である. p_j と u_j は各々第 j 境界面素上の音圧と外向法線方向の粒子速度, また, 点 i と点 j 間の非有界グリーン関数を g_{ij} (三次元のとき $g_{ij} = \exp\{-jk|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|\}/4\pi|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$, k : 伝搬定数, \mathbf{r}_i : 点 i の座標, \mathbf{r}_j : 点 j の座標), s_s を第 S 音源の強さとして,

$$G_{ij} = - \int_{\alpha_j} jk \rho g_{ij} d\Omega, \quad H'_{ij} = \int_{\alpha_j} \{\partial g_{ij} / \partial n\} d\Omega,$$

$$f_i = \sum_{j=1}^{N_S} s_s g_{ij}, \quad H_{ij} \text{ は点 } i \text{ が第 } j \text{ 面素上のとき } H_{ij} = H'_{ij} + 0.5, \text{ そうでないとき } H_{ij} = H'_{ij} \text{ とする. 式 (1b) の行列表現は,}$$

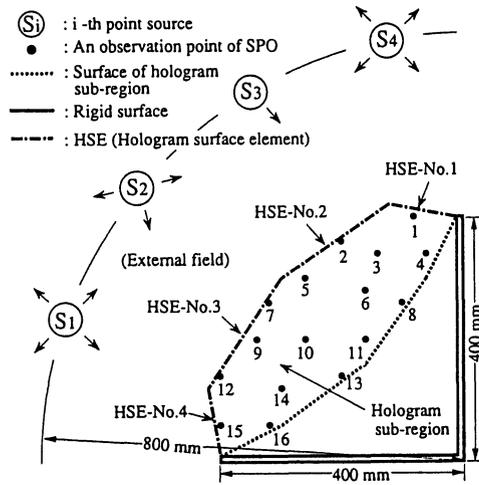


Fig.1 Determination of impedance hologram Z^H by SPO (Sub-region pressure observation).

$$\begin{bmatrix} A_{RR} & A_{RH} \\ A_{HR} & A_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_R \\ \mathbf{w}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_R \\ \mathbf{F}_H \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし, $\mathbf{w}_H = [\{ \mathbf{p}^{IV} \}^T \{ \mathbf{u}^{IV} \}^T]^T$,

$\mathbf{w}_R = [\{ \mathbf{p}^I \}^T \{ \mathbf{u}^{II} \}^T \{ \mathbf{u}^{III} \}^T]^T$,

$A_{RR} = [\mathbf{H}_R^I \mathbf{G}_R^I (\mathbf{H}_R^{III} \mathbf{z}^{III} + \mathbf{G}_R^{III})]$,

$A_{HR} = [\mathbf{H}_H^I \mathbf{G}_H^I (\mathbf{H}_H^{III} \mathbf{z}^{III} + \mathbf{G}_H^{III})]$,

$A_{RH} = [\mathbf{H}_R^{IV} \mathbf{G}_R^{IV}]$, $A_{HH} = [\mathbf{H}_H^{IV} \mathbf{G}_H^{IV}]$,

$\mathbf{F}_R = [\mathbf{F}_R^I - \{ \mathbf{G}_R^I \hat{\mathbf{u}}^I + \mathbf{H}_R^I \hat{\mathbf{p}}^I \}]$,

$\mathbf{F}_H = [\mathbf{F}_H^I - \{ \mathbf{G}_H^I \hat{\mathbf{u}}^I + \mathbf{H}_H^I \hat{\mathbf{p}}^I \}]$,

ここで \mathbf{H}_R^K , \mathbf{G}_R^K および \mathbf{H}_H^K , \mathbf{G}_H^K は

H_{ij} , G_{ij} を要素とし, 列方向に各々

$i=1_I, \dots, N_I, 1_{II}, \dots, N_{II}, 1_{III}, \dots, N_{III}$ および

$i=1_{IV}, \dots, N_{IV}$ をこの順に並べ, 行方向に

$j=1_{IV}, \dots, N_{IV}$ の順に並べた行列である.

\mathbf{p}^K , \mathbf{u}^K は p_j , u_j を要素とし, 列方向に

$j=1_K, \dots, N_K$ の順に並べた列ベクトル,

\mathbf{F}_R^K , \mathbf{F}_H^K は f_i を要素とし, 列方向に各々

$i=1_I, \dots, N_I, 1_{II}, \dots, N_{II}, 1_{III}, \dots, N_{III}$ および

$i=1_{IV}, \dots, N_{IV}$ をこの順に並べた列ベクトル

で, \mathbf{z}^{III} は要素 z_{jm} を $j=1, \dots, N_{III}$ の順に並べた対角行列, 記号 $(\hat{\quad})$ および $\{ \quad \}^T$ は各々

* A method to determine acoustic impedance hologram of an object with complex shape and elements. By M.Terao, H.Sekine and K.Ohata (Kanagawa university)

既定値およびベクトルの転置を表す。式(2)は式(3a)と(3b)に分離でき、

$$\mathbf{w}_R = \mathbf{A}_{RR}^{-1} (\mathbf{F}_R - \mathbf{A}_{RH} \mathbf{w}_H) \quad (3a)$$

$$[\mathbf{B}_P \quad \mathbf{B}_U] \mathbf{w}_H = \mathbf{F}_H - \mathbf{A}_{HR} \mathbf{A}_{RR}^{-1} \mathbf{F}_R \quad (3b)$$

ただし、 $\mathbf{B}_P = \mathbf{H}_H^{IV} - \mathbf{A}_{HR} \mathbf{A}_{RR}^{-1} \mathbf{H}_R^{IV}$ 、

$\mathbf{B}_U = \mathbf{G}_H^{IV} - \mathbf{A}_{HR} \mathbf{A}_{RR}^{-1} \mathbf{G}_R^{IV}$ とする。式(3b)は

さらに $\mathbf{F}^E = \mathbf{B}_P^{-1} (\mathbf{F}_H - \mathbf{A}_{HR} \mathbf{A}_{RR}^{-1} \mathbf{F}_R)$ 、

$\mathbf{Z}^E = \mathbf{B}_P^{-1} \mathbf{B}_H$ と書き換えれば、

$$\mathbf{p}^{IV} = -\mathbf{Z}^E \mathbf{u}^{IV} + \mathbf{F}^E \quad (4)$$

これをホログラム面の外界音場に関するものとするればホログラム面に囲まれる対象音響要素側の音場について同様に、

$$\mathbf{p}^{IV} = \mathbf{Z}^H \mathbf{u}^{IV} + \mathbf{F}^H \quad (5)$$

この \mathbf{Z}^H がここで音響インピーダンスホログラムと呼ぶものである。

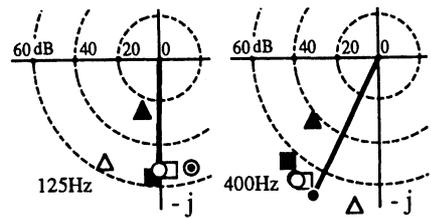
一般に \mathbf{F}^H と \mathbf{F}^E は独立であり、その一方の寄与は他方を無視して求め得る。

\mathbf{F}^H 、 \mathbf{F}^E および \mathbf{Z}^H が与えられれば、式(4)と(5)により \mathbf{w}_H が、次に式(3)により \mathbf{w}_R が、さらに式(1a)により任意点音圧 P_i が求められる。そこで Fig.1 に示すようにホログラム面を含む仮想的補助領域を設けて音場を N 通り変化させ、それぞれこの補助領域内の多点音圧観測を行い、式(1a)を用いて \mathbf{p}^H と \mathbf{u}^H を解き次に式(5)により \mathbf{Z}^H を解く新たな手法を試みる。

3. 数値および物理実験結果

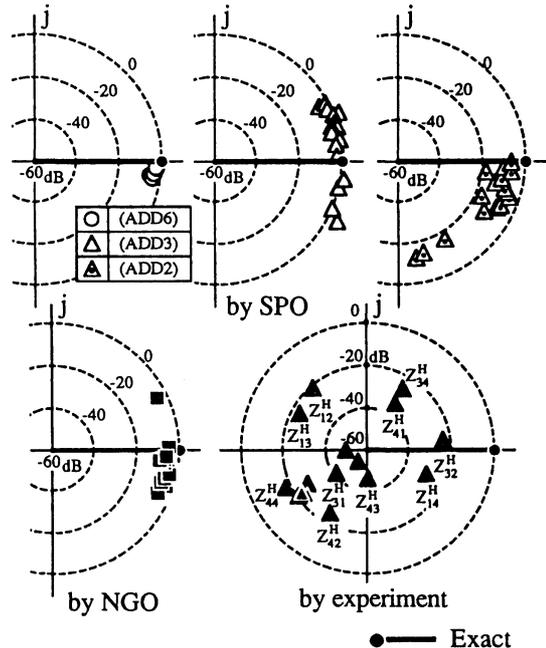
Fig.1 に示す二次元の座席要素 (ホログラム面素数4) について本手法による \mathbf{Z}^H の観測精度を調べた。Fig.2 に示すように音圧観測精度は \mathbf{Z}^H の観測精度に大きな影響を及ぼす。今回の物理測定は使用したマイクロホンの精度不足もあり \mathbf{Z}^H の測定精度が低い。Fig.3 は以上の \mathbf{Z}^H に式(1a)を適用して得られる音圧予測例である。ホログラム面素寸法が粗いにも拘わらず、音圧観測精度3桁による \mathbf{Z}^H を用いても最大誤差3 dB程度である。

4. まとめ 音響要素のインピーダンスホログラムの新たな観測法を示し数値実験により有効性を確認した。



- Exact
- SPO (ADD 4)
- SPO (ADD 6)
- ⊙ SPO (ADD 6) whose points are sifted to inside
- NGO (ADD 6)
- ▲ Experiment (ADD 6)
- ADD : Accurate decimal digits
- NGO : Normal gradient observation of each hologram surface

(a) Z_{14}^H as an example



(b) Elements of \mathbf{Z}^H , $Z_{11}^H - Z_{44}^H$, at 400 Hz. Each exact one was taken as unity.

Fig.2 Comparison of \mathbf{Z}^H between the methods on complex plane.

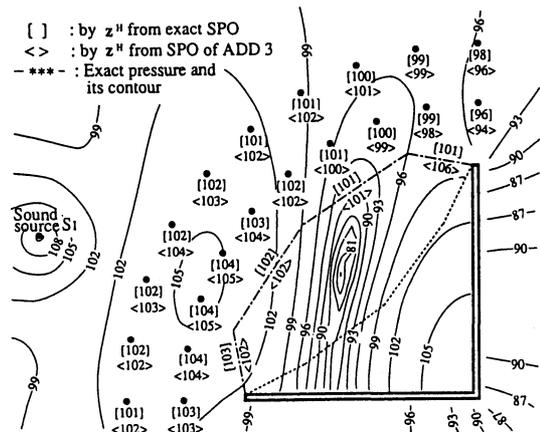


Fig.3 Prediction of sound pressure [dB] by \mathbf{Z}^H .