

ステージ上の雑壇の音響効果に関する研究

70114 安田 洋介

1. 研究背景と目的

ホールの聴感的印象において、低音域の音響特性は Warmness に大きな影響を及ぼす重要な要素である。舞台上の雑壇に関しては、Resonant support^[1]と呼ばれる特殊な効果が報告されており、雑壇の使用によって低音弦楽器の音が大きくなるとされている。この効果は雑壇の板振動に伴う音響放射に起因するものと言われているが、板振動は音源からの入射波による音響的加振ならびに楽器のエンドピンによる機械的加振により生じる複雑な現象となるため、そのメカニズムは明らかではない。

本研究では、ステージ上の雑壇による音響効果に関して、独奏チェロと雑壇を想定し、機械的加振を受ける雑壇と音場との音響振動連成数値解析を行うことにより、その性状を解明することを目的とする。

2. 数値解析手法

本研究では、無限大剛床(z=0)上の薄板(1.2×0.9×H)とそれにかかる点加振力(0, 0, H)、点音源(0, 0, 0.7)による Fig.1 のようなモデルにより検討を行う。

ここでは音場解析に境界要素法、板振動解析にモード展開法を用い、これらの連成により音響振動連成場を解く。

受音点をPとすると、音場を記述する法線方向微分型積分方程式は次のようになる。

$$\alpha \frac{\partial p(r_p)}{\partial n_p} = \frac{\partial p_d(r_p)}{\partial n_p} + \iint_{\Gamma} \left(p(r_q) \frac{\partial^2 G}{\partial n_p \partial n_q} - \frac{\partial p(r_q)}{\partial n_q} \frac{\partial G}{\partial n_p} \right) dS \quad (1)$$

但し、 p : 受音点の音圧、 p_d : 直接音の音圧、 α : 点Pが領域を見込む角度の全方位に対する割合、 G : 基本解、 n : 境界面法線方向ベクトル

式(1)を板のような薄い物体に適用することにより、境界上の音圧を板両面音圧差で表すことができる。

$$-\frac{1}{2} j \omega \rho_p v_n(r_p) = \frac{\partial p_d(r_p)}{\partial n_p} + \iint_{\Gamma} \bar{p}(r_q) \frac{\partial^2 G}{\partial n_p \partial n_q} dS \quad (2)$$

但し、 \bar{p} : 板両面音圧差、 v_n : 境界面法線方向速度

これを境界要素により離散化すると最終的に次のような代数方程式が得られる。

$$\{v\} = [A] \{\bar{p}\} + \{d\} \quad (3)$$

但し、 $[A]$: 係数マトリックス、 $\{\bar{p}\}$: 音圧差ベクトル、 $\{v\}$: 粒子速度ベクトル、 $\{d\}$: 既知ベクトル

一方、板振動に関しては、弾性板の振動方程式が以下のように表される。

$$D \nabla^4 w + \rho_p h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q \quad (4)$$

但し、 w : 振動変位、 q : 外力項、 ρ_p : 板密度、 h : 板厚、 $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$: 曲げ剛性、 E : ヤング率、 ν : ポアソン比

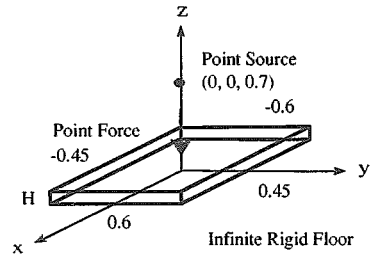


Fig.1 雑壇の解析モデル

(4)において固有関数 $\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$ を用いたモード展開を行うことにより、次式を得る。

$$\left[D \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right)^2 - \rho_p h \omega^2 \right] W_{mn} = Q_{mn} \quad (5)$$

但し、 W_{mn} 、 Q_{mn} : w 、 q の展開係数

外力項として板両面音圧差 \bar{p} と加振力 f を考えると、最終的に以下の方程式が得られる。

$$\{W_{mn}\} = [B] \{\bar{p}\} + \{f_{mn}\} \quad (6)$$

但し、 $\{W_{mn}\}$ 、 $\{f_{mn}\}$: w 、 f の展開係数ベクトル、 $[B]$: 係数マトリックス
また、変位のモード展開から、次式を得る。

$$\{v\} = j\omega [C] \{W_{mn}\} \quad (7)$$

但し、 $[C]$: 係数マトリックス

式(3)、(6)、(7)により要素上の両面音圧差が求められ、積分方程式に代入することにより領域内の任意の点の音圧が求められる。

3. ケーススタディ

音源と加振力の入力に関しては、楽器の振動性状の把握がきわめて困難であるため、点音源の体積速度と点加振力を同位相と仮定し、既往文献^[2]を参照して両者の振幅比を $0.2\omega\rho_0$ とする。

解析モデルはFig.2に示す3 Typeを設定する。Type0は剛床のみ、Type1は剛床上に雑壇上板のみを配置した場

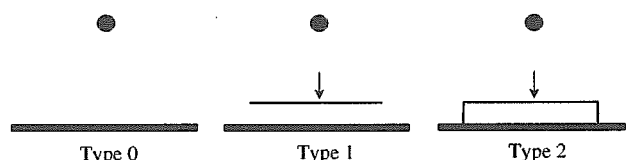


Fig.2 解析モデルの種類

合、Type2は剛床上に雑壇上板及び側板を配置した場合である。ケーススタディとしては、雑壇上板の剛性、加振力の有無、雑壇の高さを変化させるものとし、側板に関しては剛壁とする。雑壇の各種設定条件は以下を基準とする。
 雑壇上板： $E = 10^{10} \text{N/m}^2$, $\rho_p = 600 \text{kg/m}^3$, $h = 0.03 \text{m}$, $\nu = 0.2$,
 高さ： $H = 0.1 \text{m}$

4. 計算結果と考察

Fig.3及びFig.4にzx平面上の受音点3カ所での周波数応答関数の計算結果を示す。受音点を $(x, 0, 1.2)$, $x = 0, 3, 10$ とし、Type 0での受音点の音圧レベルを0dBとして表した。またFig.5に200Hzの音圧分布をコンターで示した。以下に雑壇各種条件の影響に関する考察結果を示す。

○剛性の影響 (Fig.3)

上板の剛性による影響は、板振動の固有周波数付近におけるピーク、ディップとして現れ、他の周波数域においては影響が微小であることがわかる。

○加振力による影響 (Fig.3)

加振力が加わることにより、板振動の固有周波数付近におけるピーク、ディップがより顕著となることがわかる。

上記の傾向はType 1ならびに他の受音点においても同様であった。

○Type による影響 (Fig.4, 5)

Fig.4により距離の比較を行うと、音源から遠方になるにつれてType 1では0dBに近づくのに対し、Type 2では広い周波数域において安定したgainとなっており、これは前記考察から、板振動によるものではなく雑壇の形状によるものと考えられる。またFig.5により比較を行うと、Type 1では明らかに他と異なる性状がみられ、これには雑壇下部の開いた空気層が影響していると考えられる。

○雑壇高さによる影響 (Fig.4, 5)

測定周波数全般にわたって $H = 0.2$ の方がgainが大きく、空間領域では音源遠方に及んで影響のあることがわかる。

5. まとめ

舞台上の雑壇の音響効果について、数値解析によるケーススタディを通して考察を行った。雑壇上板の剛性ならびに楽器の機械的加振による影響は、固有周波数付近のみで現れるのに対して、雑壇の高さ、側板の有無は広い周波数領域及び空間領域に影響を及ぼすことが確認された。

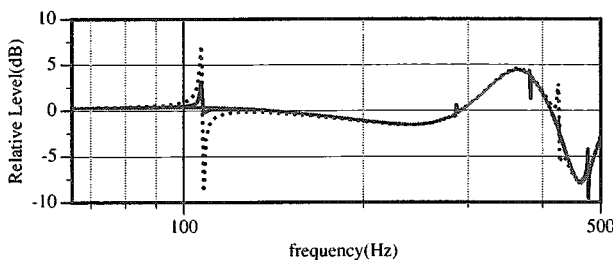


Fig.3 剛性、加振による影響 (Type 2, $x = 0$)

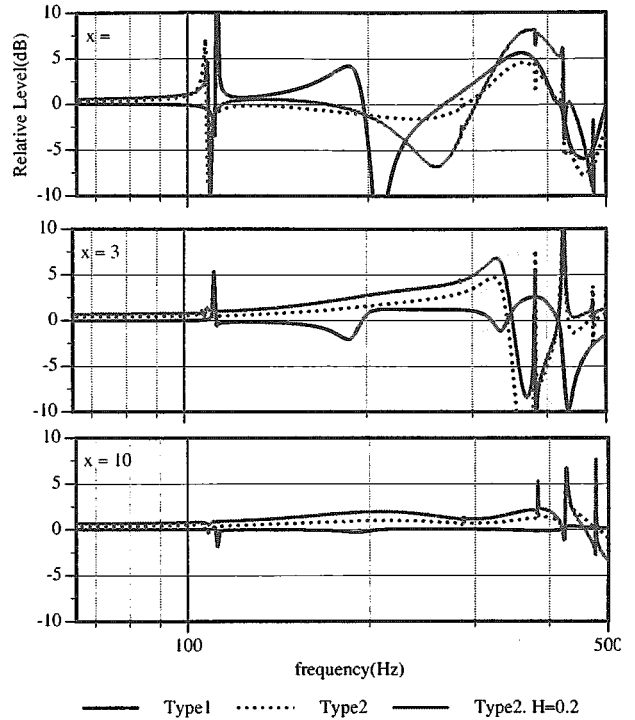


Fig.4 Typeによる影響 (加振がある場合)

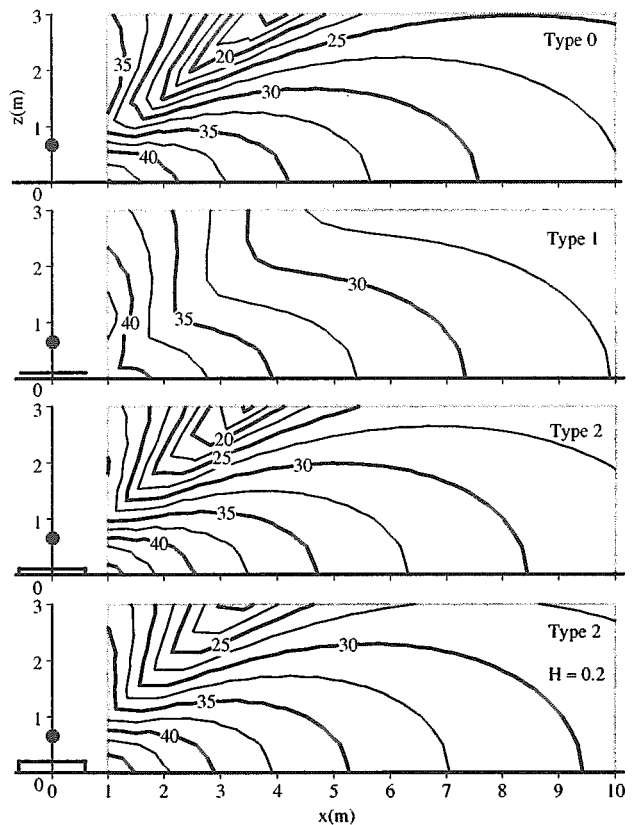


Fig.5 Typeによる影響 (加振がある場合)

参考文献：[1] 中西他、音響学会建築音響研究会 AA95-29(1995)
 [2] 中西他、音響学会建築音響研究会 AA96-(1996)
 [3] 佐久間、学位論文(東京大学、1995)
 [4] 阪上、学位論文(神戸大学、1993)
 [5] Terai, Journal of Sound Vibration(1980) 69(1), 71-100