

ミキシングコンソールがスタジオの音響特性に与える影響

中原, 雅考

<https://doi.org/10.15017/458907>

出版情報 : Kyushu University, 2004, 博士（芸術工学）, 課程博士
バージョン :
権利関係 :

第8章 100Hz近傍に生じるディップの改善

Chapter 8. Improvement of the dip at around 100Hz

第7章までの検証により、床からの低域反射音 $H_2(f)$ が 100Hz 近傍に生じるディップに対して寄与していることが分かった。従って、 $H_2(f)$ の寄与を小さくすることで、100Hz 近傍のディップの改善が期待できる。 $H_2(f)$ を構成する要素は、反射面である床と低域成分の濾波に寄与するミキシングコンソールの 2 つである。

本章では、床及びミキシングコンソールの一部を吸音することにより 100Hz 近傍に生じるディップの改善を試みる。改善手法に関しては、以下の流れに沿って検証を行っている。

- 1) 検証モデルの定義
- 2) 一部の床面の吸音による効果の検証
- 3) ミキシングコンソールの吸音による効果の検証
- 4) 床面の吸音とミキシングコンソール底面の吸音による効果の比較
- 5) 音響管を用いたソフト境界の適用
- 6) 実モデルへの適用例

8-1. 検証モデル

Examined field

Fig. 8-1 に示す音場を検証モデルとして、100Hz 近傍に生じるディップの改善を検証する。Fig. 8-1 に示す解析モデルは、これまでの検証から様々なミキシングルームの環境を代表する特性を有することが確認されている。検証モデルでは、音源距離 3.0m(仰角 10°)，ミキシングコンソール Type A (Fig. 2-4) が仮定されている。

前章までの検証により、床からの低域反射音 $H_2(f)$ が 100Hz 近傍に生じるディップに対して大きく寄与していることが分かっている。Fig. 8-1 に示すように、 $H_2(f)$ を構成する要素は、反射面である床と低域成分の濾波を行っているミキシングコンソールの 2 つである。本章では、それら 2 つの要素の軽減により、100Hz 近傍に生じるディップの改善を試みる。

尚、ミキシングコンソールの表面反射による寄与 $H_1(f)$ もディップ形成に寄与していることが前章より検証されているが、ディップの発生原因は、直接音 $H_d(f)$ と床からの低域反射音 $H_2(f)$ との干渉であり、 $H_1(f)$ はそれによって生じたディップに対して最終的な色づけを行っているといった役割での寄与である。従って、 $H_1(f)$ への対処によりディップの特徴に影響を与えることは可能であるが、大きな改善効果は期待できないと考える。また、 $H_1(f)$ 減少のためにミキシングコンソールの表面に対して吸音等の音響処置を行うことは、非現実的な対処である。

8

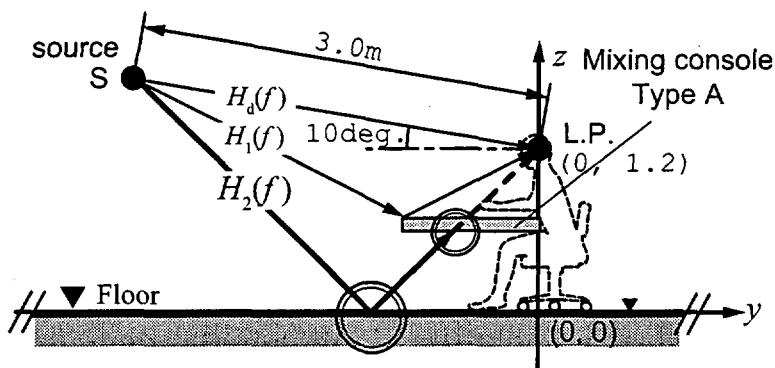


Fig. 8-1 The calculated field for the examination into the improvement of the dip at around 100Hz.

8-2. 一部の床面の吸音による効果

Effect of the sound absorbing of a part of a floor

本節では、床の吸音による100Hz近傍のディップの改善効果に関する検証を行う。

実環境に配慮すると、全ての床面を吸音することは非現実的な処置と考えられる。従って、ここでは、反射点を含む床面として、音源からミキシングコンソールの背面までに対応する床面に対して吸音処理を施し、それによる100Hzのディップへの効果を検証する(Fig. 8-2)。尚、第6章の検証結果からミキシングコンソールの虚像がリスニングポイントにおける特性に与える影響の少ないことが確認されているため、ミキシングコンソール下部の床面に関しては吸音処置は施していない。

吸音面に対して、ノーマルアドミッタンス $\beta_0 = 0, 0.06/\rho c, 0.17/\rho c, 1.0/\rho c$ を与えた場合の計算結果をFig. 8-4～Fig. 8-6に示す。因みに、上記のアドミッタンスは、エネルギー吸音率に換算して、それぞれ $\alpha = 0, 0.2, 0.5, 1.0$ に相当する(式(8.1), Note 3 式(8.10)参照)。

$$\alpha = 1 - \left| \frac{1 - \rho c \beta_0}{1 + \rho c \beta_0} \right|^2 \quad (8.1)$$

where, $\begin{cases} \alpha & ; \text{sound absorption coefficient} \\ \beta_0 & ; \text{normal admittance } [\text{m}/\text{Pa} \cdot \text{s}] \\ \rho & ; \text{air density } [\text{kg}/\text{m}^3] \\ c & ; \text{sound speed } [\text{m}/\text{s}] \end{cases}$

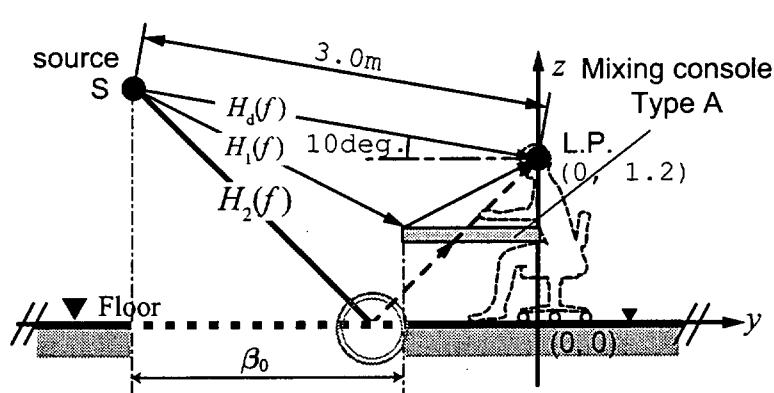
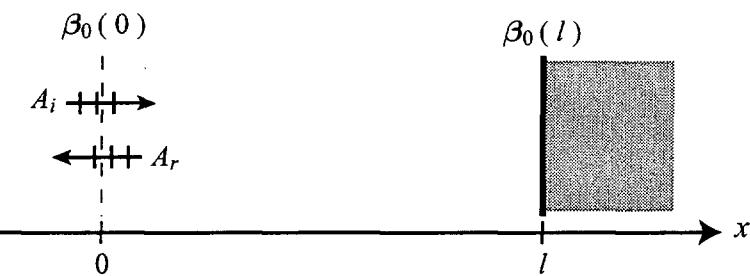


Fig. 8-2 Absorbing a front part of the floor to reduce the reflection sound from the floor.

Note 3Fig. 8-3 The hypothetical one-dimensional sound field. A_i ; incident wave. A_r ; reflection wave.

入射波 (A_i) 及び、 $x = l$ におけるアドミッタンス $\beta_0(l)$ の反射境界による反射波 (A_r) が、 x 方向に一様に伝搬する 1 次元音場を仮定する (Fig. 8-3)。このとき、入射波及び反射波は、式(8.2)～式(8.4)のように表すことができる (式(8.2); 速度ポテンシャル、式(8.3); 音圧、式(8.4); 粒子速度)。

$$\left\{ \Phi_i(x, t) = A_i e^{j(\omega t - kx)} , \Phi_r(x, t) = A_r e^{j(\omega t + kx)} \right. \quad (8.2)$$

$$\left\{ p_i(x, t) = \rho \frac{\partial \Phi_i(x, t)}{\partial t} = j\omega \rho A_i e^{j(\omega t - kx)}, p_r(x, t) = \rho \frac{\partial \Phi_r(x, t)}{\partial t} = j\omega \rho A_r e^{j(\omega t + kx)} \right. \quad (8.3)$$

$$\left\{ u_i(x, t) = -\frac{\partial \Phi_i(x, t)}{\partial x} = jk A_i e^{j(\omega t - kx)}, u_r(x, t) = -\frac{\partial \Phi_r(x, t)}{\partial x} = -jk A_r e^{j(\omega t + kx)} \right. \quad (8.4)$$

where, $\left. \begin{array}{l} A_i; \text{amplitude of an incident wave (velocity potential)} \\ A_r; \text{amplitude of a reflection wave (velocity potential)} \\ \Phi_i, \Phi_r, \hat{\Phi}; \text{velocity potential [m}^2/\text{s]} \\ p_i, p_r, \hat{p}; \text{sound pressure [Pa]} \\ u_i, u_r, \hat{u}; \text{particle velocity [m/s]} \\ \beta_0; \text{normal admittance [m/Pa} \cdot \text{s]} \\ \alpha; \text{sound absorption coefficient} \\ \gamma; \text{reflection coefficient} \\ \rho; \text{air density [kg/m}^3] \\ c; \text{sound speed [m/s]} \\ k = \omega/c; \text{wave number [rad/s}^2] \\ \omega; \text{angular frequency [rad/s]} \end{array} \right\}$

この時、音場内における速度ポテンシャル、音圧、粒子速度は、それぞれ式(8.5)～式(8.7)のように表すことができる。但し、ここでは時間項 $e^{j\omega t}$ に関しては省略している。

$$\hat{\Phi}(x) = A_i e^{-jkx} + A_r e^{jkx} \quad (8.5)$$

$$\hat{p}(x) = j\omega \rho (A_i e^{-jkx} + A_r e^{jkx}) \quad (8.6)$$

$$\hat{u}(x) = jk (A_i e^{-jkx} - A_r e^{jkx}) \quad (8.7)$$

$x = 0, x = l$ における境界条件を式(8.6)及び式(8.7)に適用することにより、音圧反射率 γ 及び $x = 0$ におけるアドミッタンス $\beta_0(0)$ は、以下のように表すことができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} x = l ; \frac{\hat{u}(l)}{\hat{p}(l)} = \beta_0(l) \\ \Rightarrow \gamma = \frac{A_r}{A_i} = \frac{1 - \rho c \beta_0(l)}{1 + \rho c \beta_0(l)} e^{-2jkl} \end{array} \right. \quad (8.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 0 ; \frac{\hat{u}(0)}{\hat{p}(0)} = \beta_0(0) \\ \Rightarrow \rho c \beta_0(0) = \frac{A_i - A_r}{A_i + A_r} \end{array} \right. \quad (8.9)$$

1. 吸音率とアドミッタンスの関係

式(8.8)より、エネルギー吸音率 α は、境界面のアドミッタンス $\beta_0(l)$ を用いて以下のように表すことができる。

$$\alpha = 1 - |\gamma|^2 = 1 - \left| \frac{1 - \rho c \beta_0(l)}{1 + \rho c \beta_0(l)} \right|^2 \quad (8.10)$$

2. $x = 0$ におけるアドミッタンス

式(8.8)を式(8.9)に代入し整理すると、 $x = 0$ におけるアドミッタンス $\beta_0(0)$ は、反射境界までの距離 l 及び反射境界のアドミッタンス $\beta_0(l)$ を用いて以下のように表すことができる。ここで、反射境界のアドミッタンスが $\beta_0(l) = 0$ 、すなわち剛な境界である場合、アドミッタンス $\beta_0(0)$ は、式(8.12)で表すことができる。

$$\begin{aligned} \beta_0(0) &= \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{\{e^{jkl} - e^{-jkl}\} + \rho c \beta_0(l) \cdot \{e^{jkl} + e^{-jkl}\}}{\{e^{jkl} + e^{-jkl}\} + \rho c \beta_0(l) \cdot \{e^{jkl} - e^{-jkl}\}} \\ &= \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{j \sin(kl) + \rho c \beta_0(l) \cdot \cos(kl)}{\cos(kl) + j \rho c \beta_0(l) \cdot \sin(kl)} \\ &= \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{j \tan(kl) + \rho c \beta_0(l)}{1 + j \rho c \beta_0(l) \cdot \tan(kl)} \end{aligned} \quad (8.11)$$

例) 反射面が剛 ($\beta_0(l) = 0$) の場合

$$\beta_0(0) = j \tan(kl) / \rho c \quad (8.12)$$

ここで、 $x = 0$ でのアドミッタンス $\beta_0(0)$ が最大となる周波数は、以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \tan(kl) &= \infty \Rightarrow kl = \frac{\pi}{2}(2n-1) \\ \therefore f &= \frac{c}{4l} \cdot (2n-1) \quad [\text{Hz}] \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (8.13)$$

尚、式(8.11)は、長さ l の音響管の開口部におけるアドミッタンスに相当し、式(8.13)は、同開口部がソフトな音響境界 ($\beta_0 \gg 1/\rho c$) として実現される周波数を表している（後述、8-5. 節）。

Fig. 8-4 が最終特性 $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-5 及び Fig. 8-6 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_i(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、灰色線が吸音処置を施さない場合の結果を表しており、黒破線、一点鎖線、実線はそれぞれ、吸音率 $\alpha = 0.2, 0.5, 1.0$ ($\text{アドミッタンス } \beta_0 = 0.06/\rho c, 0.17/\rho c, 1.0/\rho c$) の場合の結果を示している。

Fig. 8-4 によると、吸音率 $\alpha = 0.2, 0.5$ の場合で、それぞれ約 3dB、約 5dB の回復効果が 100Hz のディップに対して観測できる。また、吸音率の上昇とともにディップの周波数が僅かに低域に推移してゆく様子が観測される。吸音率 $\alpha = 1$ の場合は、100Hz のディップだけではなく周波数特性全体に大きな変化が現れており、吸音しない場合の特性とは別の特性に変化している様子が観測される。

Fig. 8-6 によると、吸音率の変化に応じ、床からの低域反射音 $H_2(f)$ が全体的に減少してゆく様子が伺える。また Fig. 8-5 によると、床面の吸音は、床反射音 $H_2(f)$ に対してだけではなく実音源からの寄与 $H_d(f) + H_i(f)$ に対しても影響を与えることが把握できる。オーディオの受聴環境では、直接音 $H_d(f)$ が支配的である必要があるため、実音源からの寄与 $H_d(f) + H_i(f)$ が 0dB 以上、すなわち実音源からの寄与が直接音よりも大きいことが重要であると考えられ、 $H_d(f) + H_i(f)$ の大幅な減少は好ましくない。

ディップ改善の効果を期待すると、吸音率 $\alpha = 0.5$ 以上での吸音が望まれるが、吸音率 $\alpha = 1$ といった過度な吸音処置は、最終特性に対する大きな変化だけではなく、実音源の低域成分を直接音レベル (0dB) 以下に減少させてしまう結果となるため注意が必要と思われる。

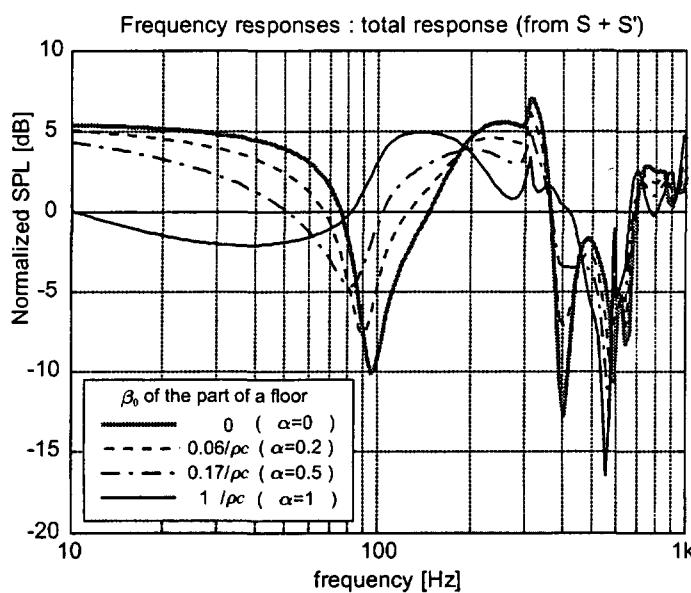


Fig. 8-4 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-2. The front part of a floor is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0=0.06/\rho c$ ($\alpha=0.2$) is given. Black dash-dotted line; $\beta_0=0.17/\rho c$ ($\alpha=0.5$) is given. Black line; $\beta_0=1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

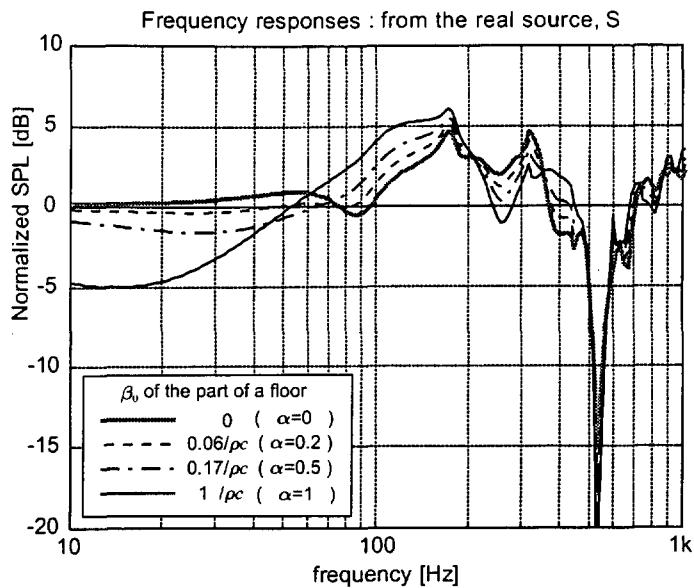


Fig. 8-5 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-2. The front part of a floor is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0 = 0.06/\rho c$ ($\alpha = 0.2$) is given. Black dash-dotted line; $\beta_0 = 0.17/\rho c$ ($\alpha = 0.5$) is given. Black line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha = 1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

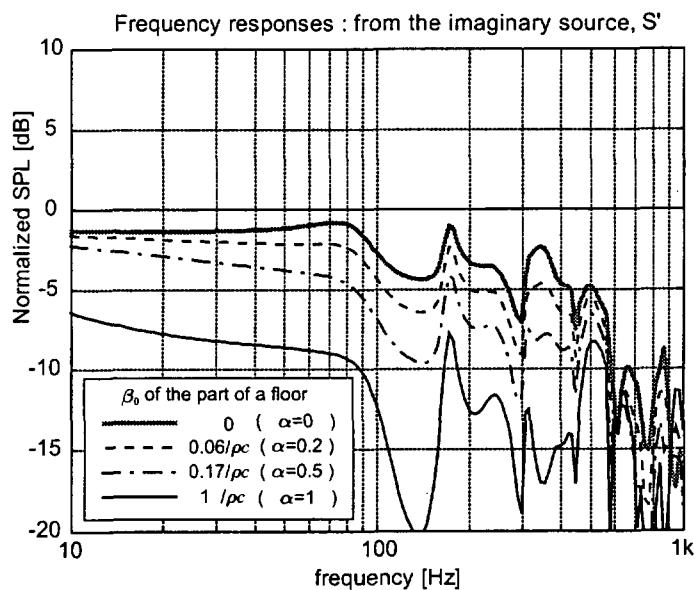


Fig. 8-6 Calculated results of the response from a imaginary source $H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-2. The front part of a floor is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0 = 0.06/\rho c$ ($\alpha = 0.2$) is given. Black dash-dotted line; $\beta_0 = 0.17/\rho c$ ($\alpha = 0.5$) is given. Black line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha = 1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

8-3. ミキシングコンソールの吸音による効果

Effect of the sound absorbing of a part of a mixing console

本節では、ミキシングコンソールの吸音による100Hz近傍のディップの改善効果について検証を行う。

現実的な処置を考えると、ミキシングコンソールの上表面の吸音は不可能である。また、ミキシングコンソールに対する床からの反射音の入射条件を考えると、ミキシングコンソールの底面への吸音が最も効果的だと考えられる(Fig. 8-7)。本節では、まず、上表面(top surface)を除くミキシングコンソールの部位、すなわち底面(bottom)、背面(rear edge)、手前(front edge)に対する吸音効果の確認を行い、次に最も効果の高い部位に対して吸音率の変化によるディップの改善効果を検証する。

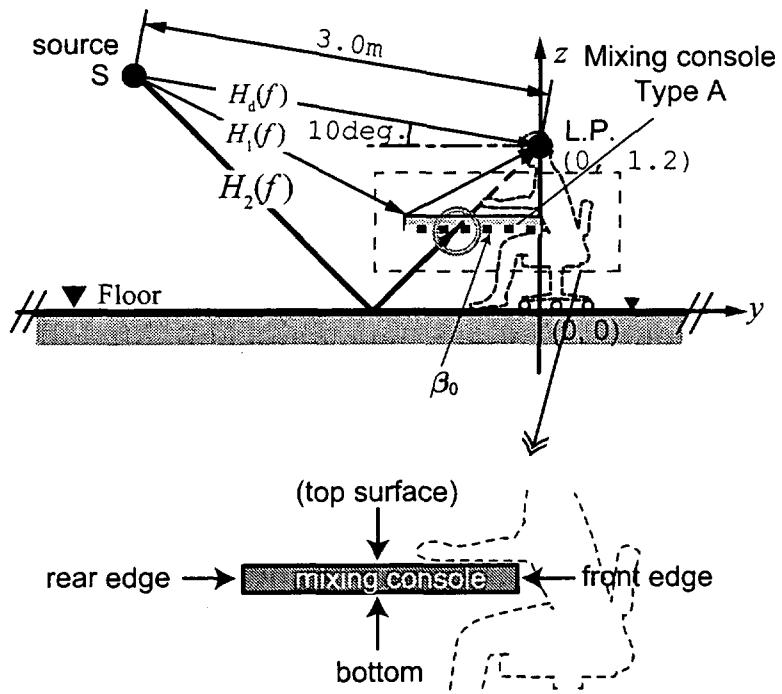


Fig. 8-7 Absorbing a part of the mixing console to reduce the reflection sound from the floor.

8-3-1. 吸音部位の検討

Examination of the console's part to be absorbed

上表面 (top surface) を除くミキシングコンソールの部位、すなわち手前 (front edge), 背面 (rear edge), 底面 (bottom) に対して、それぞれ吸音率 $\alpha = 1.0$ (アドミッタンス $\beta_0 = 1.0/\rho c$) を与えた場合の計算結果を Fig. 8-8 ~ Fig. 8-10 に示す。

Fig. 8-8 が最終特性 $H_d(f) + H_l(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-9 及び Fig. 8-10 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_l(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、灰色線が吸音処置を施さない場合の結果を表しており、黒破線、一点鎖線、実線はそれぞれ、手前 (front edge), 背面 (rear edge), 底面 (bottom) に対して吸音率 $\alpha = 1.0$ を与えた場合の結果を示している。

Fig. 8-8 ~ Fig. 8-10 によると、手前 (front edge) 及び背面 (rear edge) の吸音による特性の変化はほとんど観測されず、それらの部位の吸音によるディップの改善効果は期待できないことが分かる。一方、底面 (bottom) の吸音による特性への変化は、低域において観測でき、ディップの改善効果が確認できる。

以上の結果は、ミキシングコンソールの底面 (bottom) が、床からの反射音に対する入射面となっていること及び、ミキシングコンソールの構成面としての割合が大きいことによるものだと思われる。従って、Type A 以外の形状のミキシングコンソールにおいては、必ずしも底面が最も効果的な吸音箇所に相当するとは限らず、その場合には、床からの反射音に対する入射面としての部位を優先して検討すると良いと思われる。

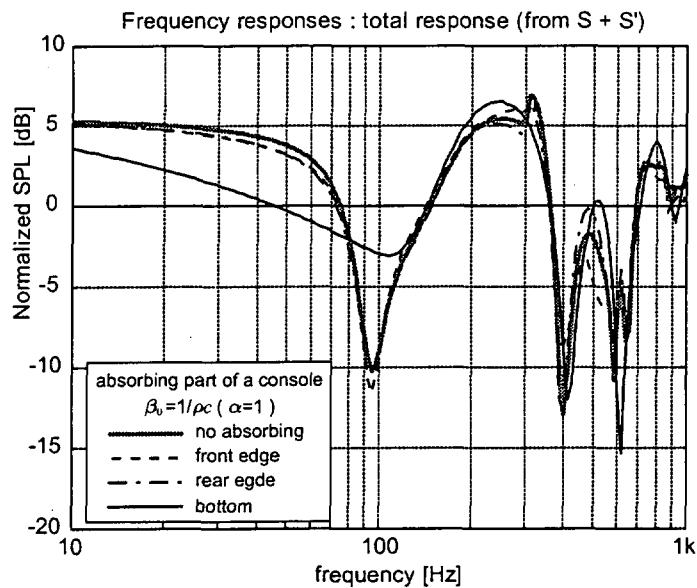


Fig. 8-8 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. A part of the console's surface is absorbed. $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha = 1$) is given to the absorbed boundary. Gray line; no absorbing. Black dashed line; front edge is absorbed. Black dash-dotted line; rear edge is absorbed. Black line; bottom is absorbed. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

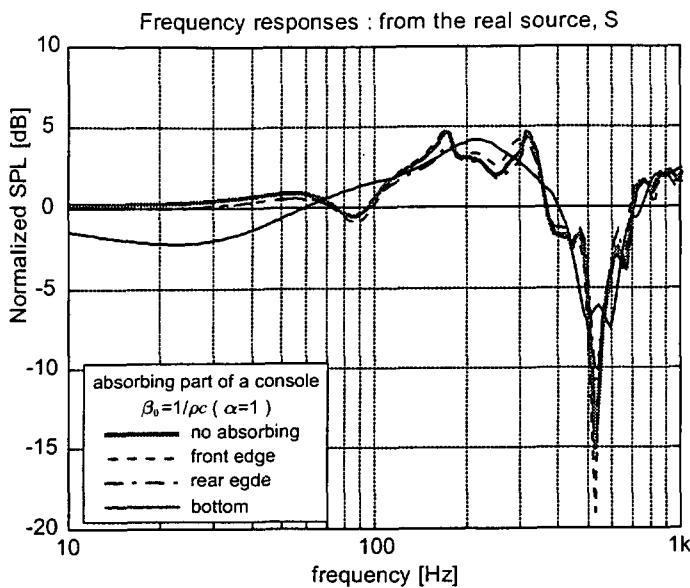


Fig. 8-9 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. A part of the console's surface is absorbed. $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha = 1$) is given to the absorbed boundary. Gray line; no absorbing. Black dashed line; front edge is absorbed. Black dash-dotted line; rear edge is absorbed. Black line; bottom is absorbed. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

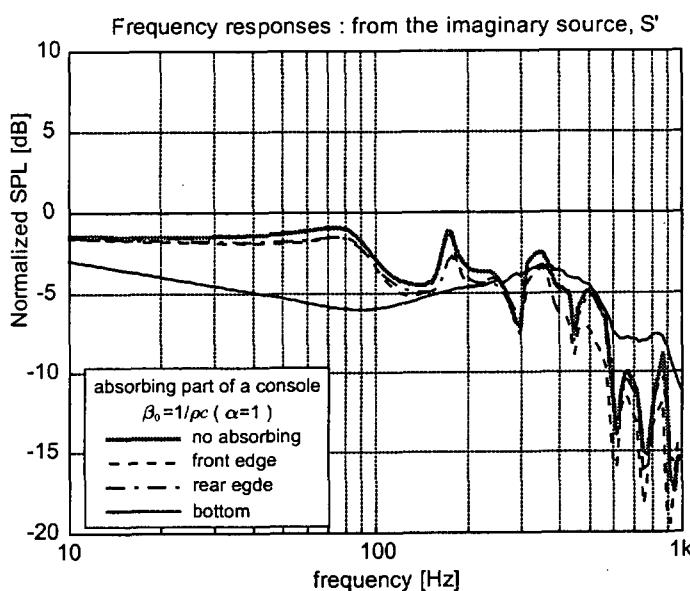


Fig. 8-10 Calculated results of the response from an imaginary source $H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. A part of the console's surface is absorbed. $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha = 1$) is given to the absorbed boundary. Gray line; no absorbing. Black dashed line; front edge is absorbed. Black dash-dotted line; rear edge is absorbed. Black line; bottom is absorbed. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

8-3-2. 吸音率による変化

Effect of the sound absorption coefficient

前項の検証により、Type A のミキシングコンソールの吸音に関しては、底面の吸音が最も効果的であることが分かった。以下、底面に対する吸音率を変化させた場合のディップの改善効果に関して検証を行う。

吸音面に対して、吸音率 $\alpha = 0, 0.2, 0.5, 1.0$ (アドミッタンス $\beta_0 = 0, 0.06/\rho c, 0.17/\rho c, 1.0/\rho c$) を与えた場合の計算結果を Fig. 8-11 ~ Fig. 8-13 に示す。

Fig. 8-11 が最終特性 $H_d(f) + H_l(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-12 及び Fig. 8-13 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_l(f)$ 及び虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、灰色線が吸音処置を施さない場合の結果を表しており、黒破線、一点鎖線、実線はそれぞれ、吸音率 $\alpha = 0.2, 0.5, 1$ の場合の結果を示している。

Fig. 8-11 によると、吸音率 $\alpha = 0.5$ の場合で約 3dB の音圧レベルの回復効果が 100Hz のディップに対して観測できるが、床面の吸音に比べると吸音率に対する特性の変化は少ない。従って、ミキシングコンソールの底面には、高い吸音率による吸音処置が望まれる。また、Fig. 8-11 ~ Fig. 8-13 によると、ミキシングコンソールの底面の吸音処置は、床面の吸音の場合とは異なり、高い吸音率においても特性全体を変形してしまうような影響はなく、ディップの改善帯域に集中して効果が得られている。

以上より、ミキシングコンソールの底面の吸音による改善処置は、低域に限定して有効な手法であり、高い吸音率での適用が効果的であることが分かる。

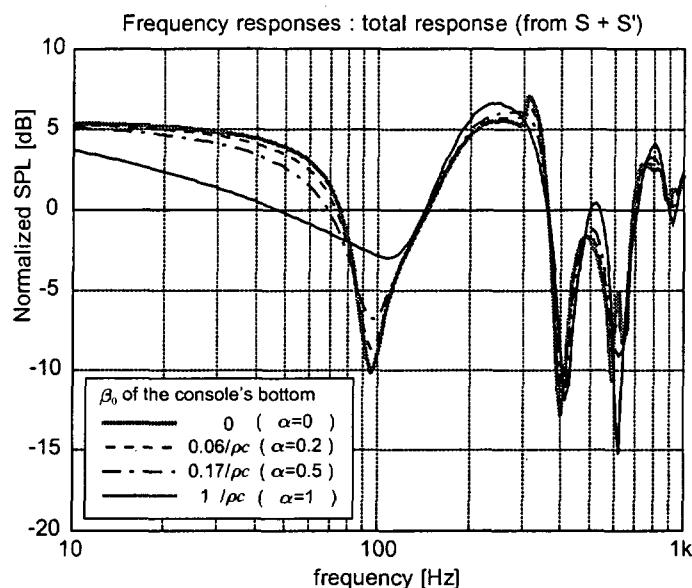


Fig. 8-11 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. The bottom of a mixing console is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0 = 0.06/\rho c$ ($\alpha=0.2$) is given. Black dash-dotted line; $\beta_0 = 0.17/\rho c$ ($\alpha=0.5$) is given. Black line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

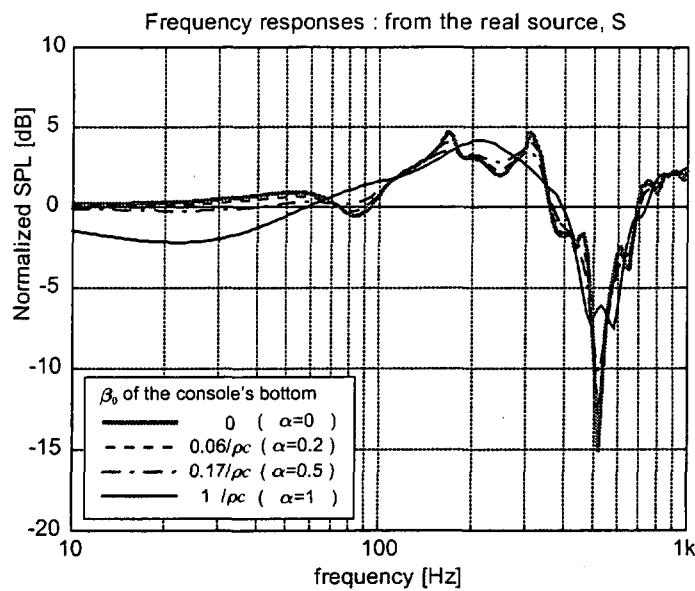


Fig. 8-12 Calculated results of the response from a real source $H_d(f)+H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. The bottom of a mixing console is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta=0.06/\rho c$ ($\alpha=0.2$) is given. Black dash-dotted line; $\beta=0.17/\rho c$ ($\alpha=0.5$) is given. Black line; $\beta=1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

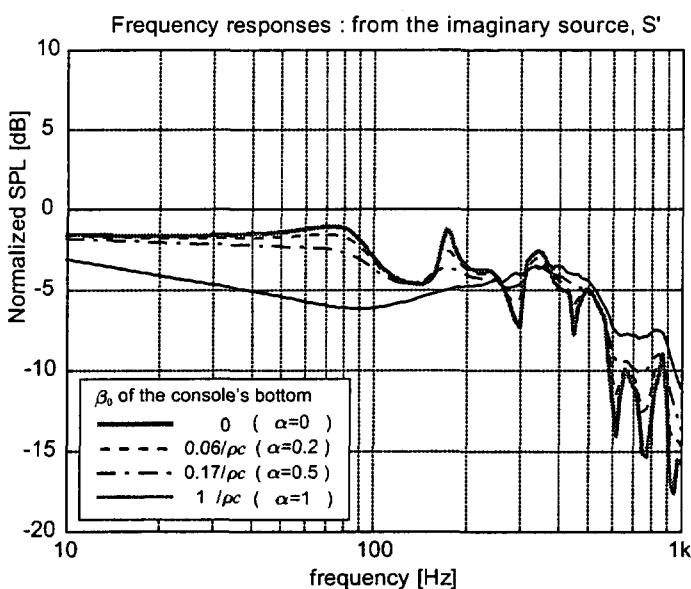


Fig. 8-13 Calculated results of the response from an imaginary source $H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. The bottom of a mixing console is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0=0.06/\rho c$ ($\alpha=0.2$) is given. Black dash-dotted line; $\beta_0=0.17/\rho c$ ($\alpha=0.5$) is given. Black line; $\beta_0=1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

8-3-3. ソフトな境界による効果

Effect of the acoustical soft boundary

前項により、ミキシングコンソールの底面の吸音処置に対しては、高い吸音率での処置が有効であることが確認された。そこで、ミキシングコンソールの底面に対してアドミッタンス $\beta_0 > 1.0/\rho c$ となるような音響処置を施した場合の効果に関して検証を行う。ここでは、音圧反射率 $\gamma = -1$ となるような音響境界をミキシングコンソールの底面に対して仮定し、アドミッタンス $\beta_0 = \infty$ 、すなわち音響的にソフトな境界を底面に適用する。

ミキシングコンソールの底面をソフトな境界とした場合の計算結果を Fig. 8-14 ~ Fig. 8-16 に示す。

Fig. 8-14 が最終特性 $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-15 及び Fig. 8-16 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_i(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、黒実線がソフトな境界による計算結果である。計算上では、 $\beta_0 = 10^6/\rho c \gg 1.0/\rho c$ をアドミッタンス ∞ の代わりに与えている。尚、図中、灰色線及び黒破線は、それぞれアドミッタンス $\beta_0 = 0, 1.0/\rho c$ (吸音率 $\alpha = 0, 1$) の場合の結果を示している。

Fig. 8-14 によると、ソフトな境界の場合においても、その改善効果は低域に限定して得られており、100Hz のディップ改善に対して効果的であることが確認できる。また、ディップに対する音圧レベルの改善効果は、アドミッタンス $\beta_0 = 1.0/\rho c$ (吸音率 $\alpha = 1.0$) の場合よりソフトな境界の方が大きいことが分かる。但し、ソフトな境界を適用した場合、 $H_d(f) + H_i(f)$ の低域成分が 0dB を下回っており、オーディオの受聴環境としては望ましくないと思われるが (Fig. 8-15)，この点に関しては、周波数依存性のあるソフトな音響境界の適用により回避可能と思われる (8-5. 節にて詳述)。

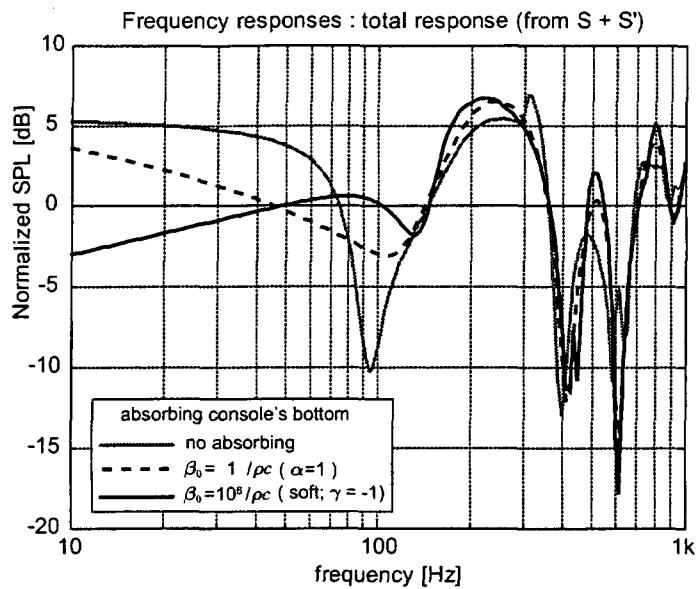


Fig. 8-14 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. The bottom of a mixing console is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0=1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given. Black line; $\beta_0=10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

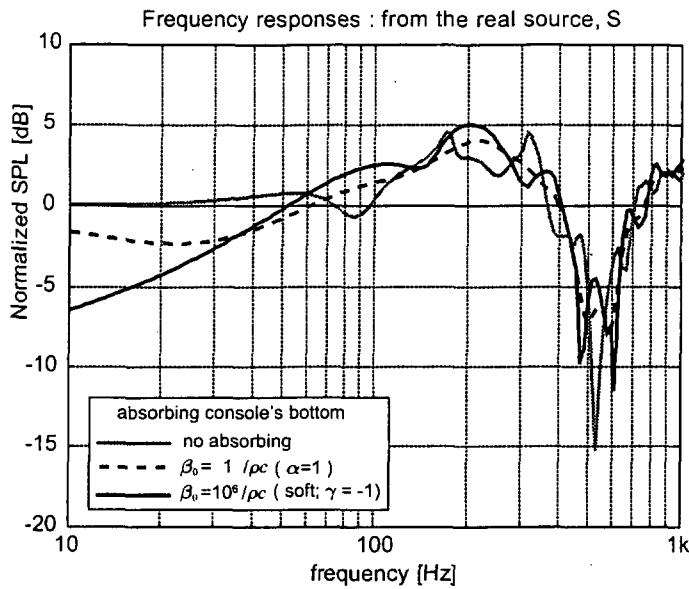


Fig. 8-15 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. The bottom of a mixing console is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given. Black line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

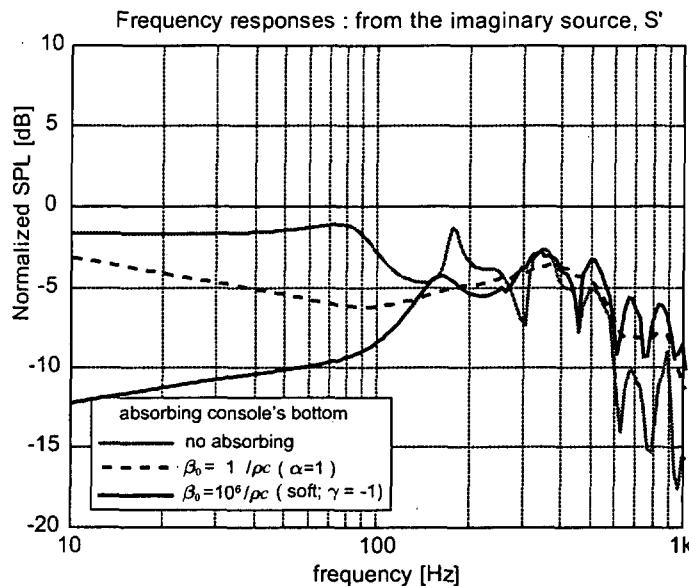


Fig. 8-16 Calculated results of the response from an imaginary source $H_i(f)$. The modeled field is shown in Fig. 8-6. The bottom of a mixing console is absorbed. Gray line; no absorbing. Black dashed line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given. Black line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

8-4. 床面の吸音とミキシングコンソール底面の吸音による効果の比較

Comparison of a sound absorptive floor and a sound absorptive console

本節では、前節までに検討を行った2種類の改善方法、すなわち床面及びミキシングコンソールの吸音による効果を比較する。比較対象は、以下の3種類の条件とする。

- ・ 音源からミキシングコンソール背面までの床の吸音 $\beta_0 = 1.0/\rho c$ ($\alpha = 1.0$)
- ・ ミキシングコンソール底面の吸音 $\beta_0 = 1.0/\rho c$ ($\alpha = 1.0$)
- ・ ミキシングコンソール底面のソフトな境界 $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma = -1$)

Fig. 8-17～Fig. 8-19に、それぞれの特性の比較を示す。

Fig. 8-17が最終特性 $H_d(f) + H_l(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-18及びFig. 8-19はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_l(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、灰色線が吸音処置を施さない場合、黒実線が床面の一部を吸音した場合 ($\beta_0 = 1.0/\rho c$)、黒一点鎖線がミキシングコンソール底面を吸音した場合 ($\beta_0 = 1.0/\rho c$)、黒破線がミキシングコンソール底面にソフトな境界を適用した場合 ($\beta_0 = 10^6/\rho c$) の特性を表している。

Fig. 8-19によると、床からの反射音 $H_2(f)$ に対して最も減少効果が高い手法は、床の吸音処置である。但し、床に対する吸音効果は $H_2(f)$ だけではなく、実音源からの寄与 $H_d(f) + H_l(f)$ に対しても影響を与えており、結果としてディップ特性だけではなく総合特性 $H_d(f) + H_l(f) + H_2(f)$ 全体を大きく変化させている。従って、床の吸音による処置は、100Hz近傍のディップの改善のみならず、他の新たなピークやディップを発生させる可能性があり、適用には注意を要する。

一方、ミキシングコンソールの底面に対する処置は、低域に対して重点的に作用しており、ディップの改善に対しても有効である。また、実音源からの寄与 $H_d(f) + H_l(f)$ に関しても、低域以外はほぼ元の特性、すなわち吸音処置を施さない場合の特性を維持しており、オーディオの受聴イメージに対して大幅な聴感上の変化を与える可能性が少ないとと思われる。

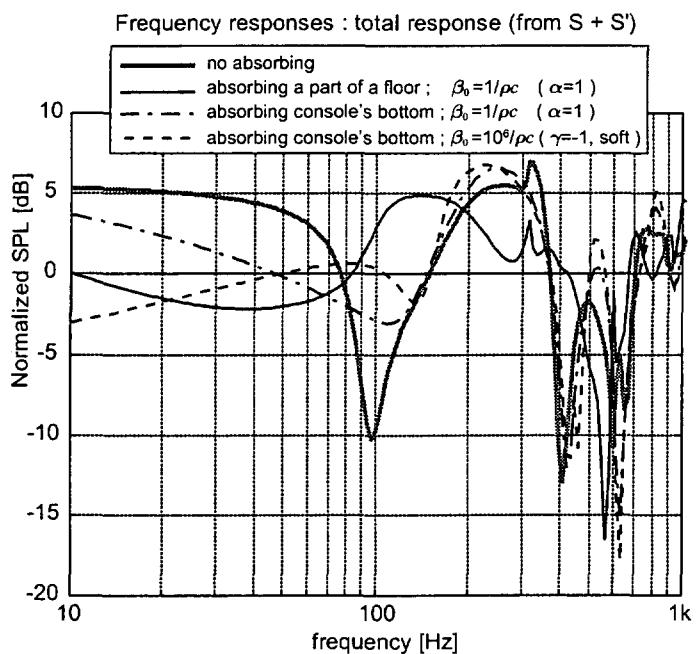


Fig. 8-17 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$. Gray line; no absorbing. Black line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given to the front part of a floor. Black dash-dotted line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given to the bottom of a mixing console. Black dashed line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given to the bottom of a mixing console. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

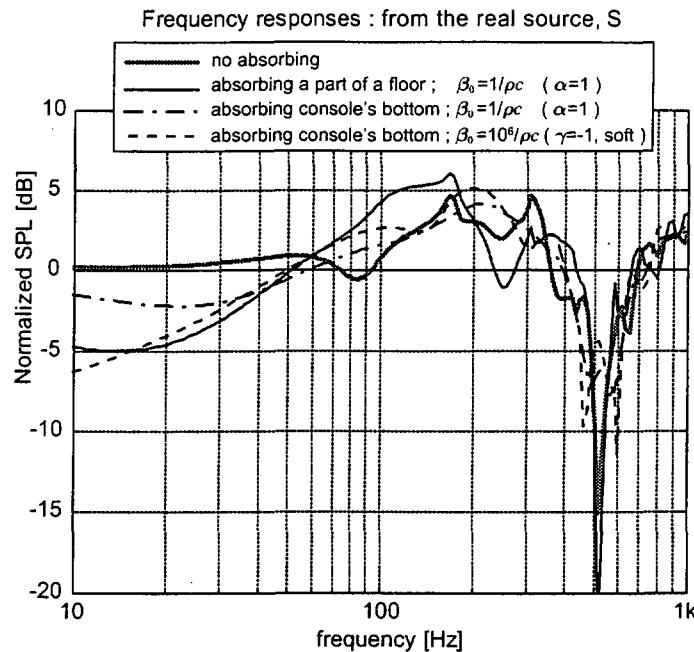


Fig. 8-18 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_i(f)$. Gray line; no absorbing. Black line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma = -1$) is given to the front part of a floor. Black dash-dotted line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha = 1$) is given to the bottom of a mixing console. Black dashed line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma = -1$) is given to the bottom of a mixing console. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

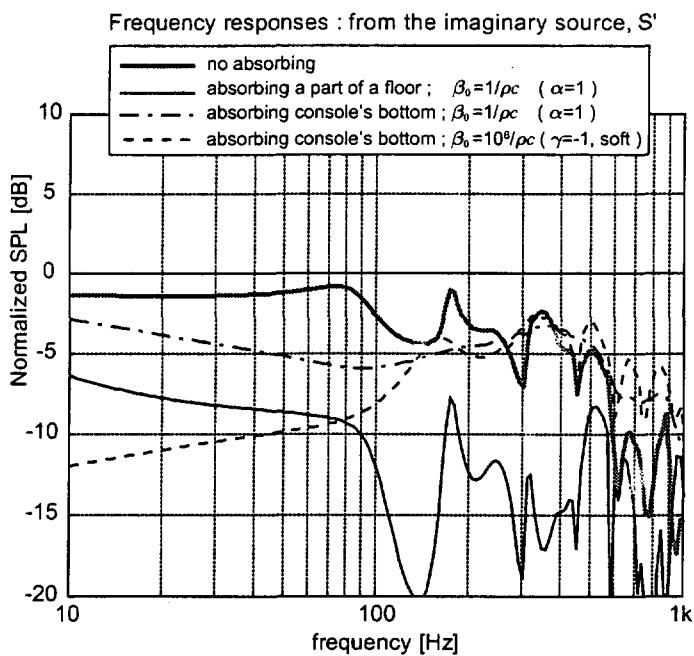


Fig. 8-19 Calculated results of the response from an imaginary source $H_i(f)$. Gray line; no absorbing. Black line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma = -1$) is given to the front part of a floor. Black dash-dotted line; $\beta_0 = 1/\rho c$ ($\alpha = 1$) is given to the bottom of a mixing console. Black dashed line; $\beta_0 = 10^6/\rho c$ ($\gamma = -1$) is given to the bottom of a mixing console. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

Fig. 8-20 及び Fig. 8-21 は、それぞれ 3 種類の改善処置による音圧レベル分布及び、音響インテンシティの変化を表している。図中 a) が吸音処置を施さない場合、b) が床面の一部を吸音した場合 ($\beta_0 = 1.0/\rho c$)、c) がミキシングコンソール底面を吸音した場合 ($\beta_0 = 1.0/\rho c$)、d) がミキシングコンソール底面にソフトな境界を適用した場合 ($\beta_0 = 10^6/\rho c$) の計算結果を表している。

音圧レベル分布の様子は、周波数特性における変化の様子を反映したものとなっている (Fig. 8-20)。床面を吸音した場合の音場 b) は、吸音処置を施さない場合の音場 a) とは異なった場が形成されている。一方、ミキシングコンソールの底面を吸音した場合の音圧レベル分布 c) 及び d) は、音場 a) の様相を残しながらも、受音点上に位置する音圧の節線が軽減された場が形成されている。一方、音源近くに生じているもう一つの節線は、ミキシングコンソールの底面を吸音することにより、更に深い音圧の谷へと変化している。また、それと同時に、床の反射点と思われる場所の音圧レベルが増大しており、受音点上の節線以外に関しては、音場 a) をデフォルメしたような音場が形成されている。

音響インテンシティに関しては、全ての手法において、同様な改善効果が確認できる (Fig. 8-21)。吸音処置を施さない場合、リスニングポイント近傍の音響インテンシティは、そのレベルも小さく、向きも上方から下方へと向かっていたのに対し (Fig. 8-21, a)，吸音もしくはソフト境界による処置を施した場合は、レベルも大きくなり、向きも前方から後方へと修正されている (Fig. 8-21, b, c, d)。すなわち、吸音もしくはソフト境界による処置により、十分な音響エネルギーが本来の伝搬方向である前方から後方へと伝搬されていることが分かる。

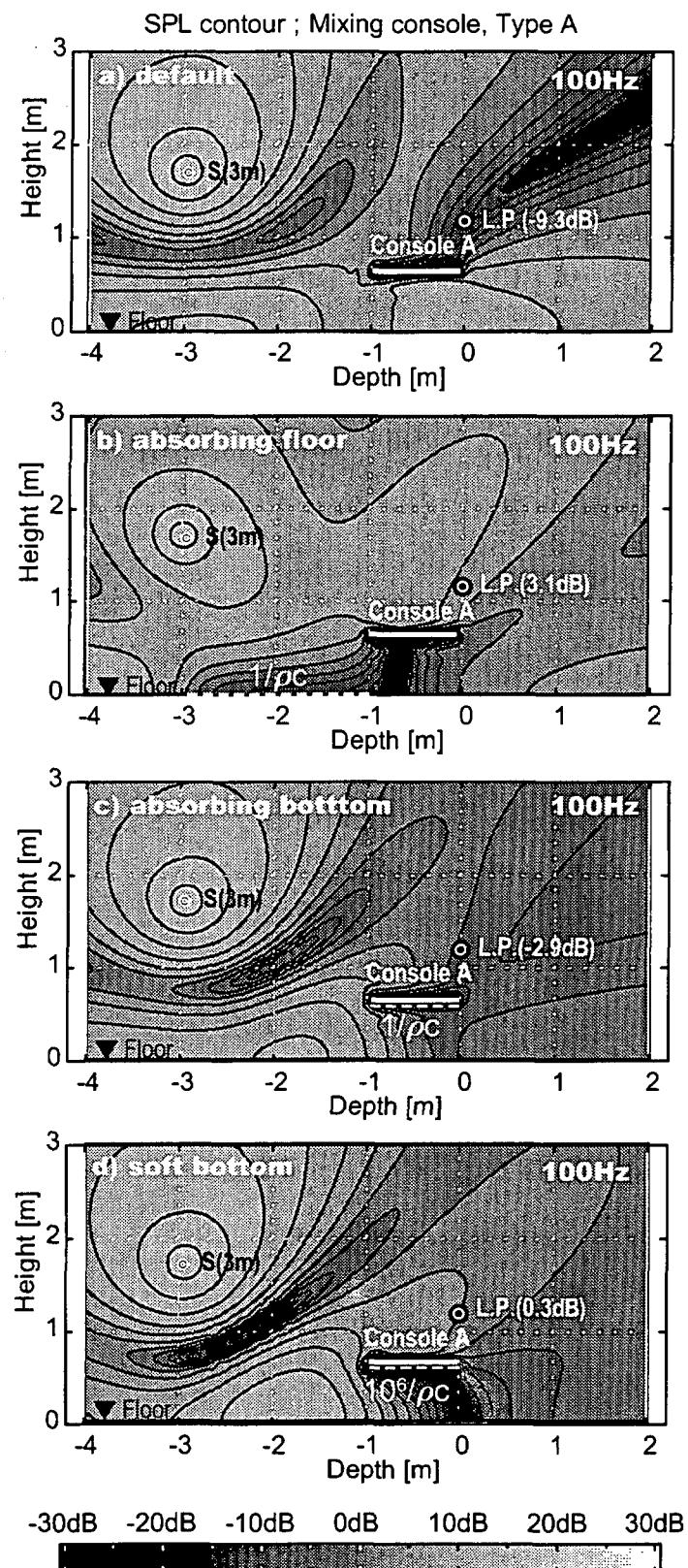


Fig. 8-20 Spatial distributions of the sound pressure level at 100Hz. a) no absorbing. b) $\beta_0=10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given to the front part of a floor. c) $\beta_0=1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given to the bottom of a mixing console. d) $\beta_0=10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given to the bottom of a mixing console. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

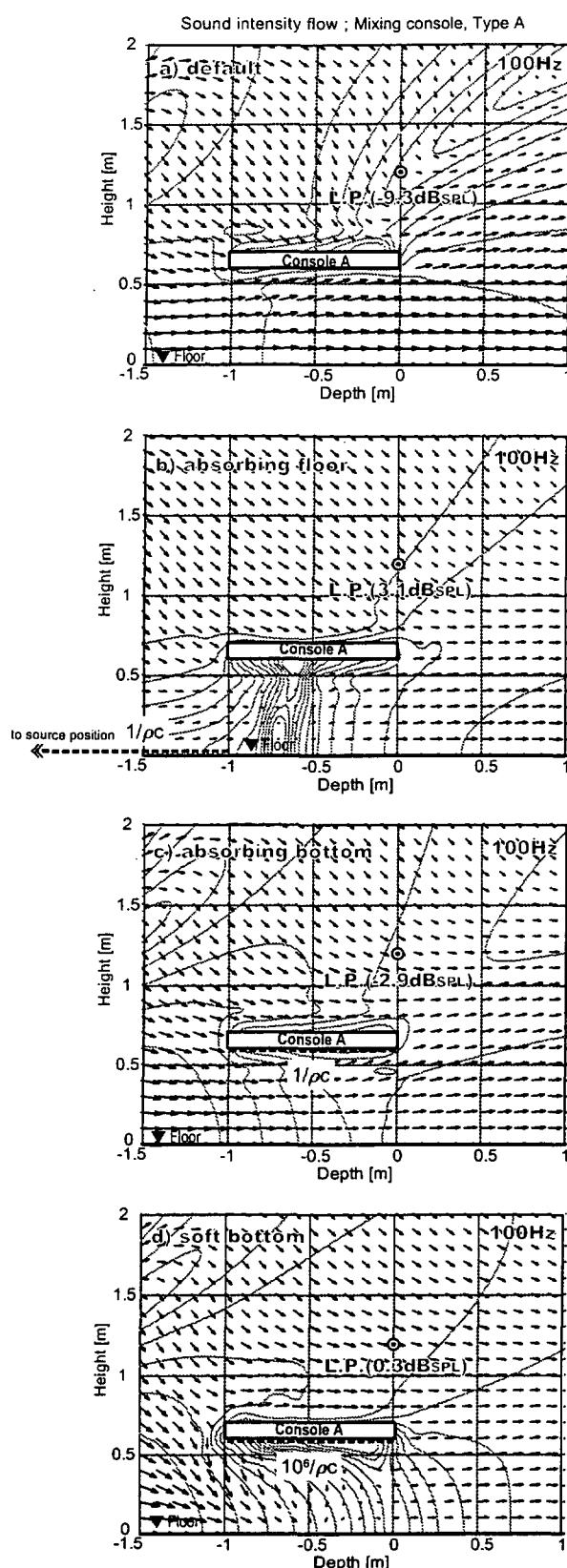


Fig. 8-21 Sound intensity flows of the sound pressure level at 100Hz. a) no absorbing. b) $\beta_0=10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given to the front part of a floor. c) $\beta_0=1/\rho c$ ($\alpha=1$) is given to the bottom of a mixing console. d) $\beta_0=10^6/\rho c$ ($\gamma=-1$) is given to the bottom of a mixing console.

8-5. 音響管を用いたソフトな音響境界

Acoustical soft boundary using acoustical tubes

前節 8-4.までの検証により、床面の吸音及びミキシングコンソール底面の吸音処置が、100Hz近傍のディップの改善に有効であることが確認された。

建築的な条件を考えると、床面の吸音処置は困難であることが多い。要求される吸音率が0.1程度であれば、カーペット等の仕上げ材により対処可能と思われるが、そのような低い吸音率では十分な改善効果が望めないことが、8-2.節の検証結果で示されている。また、床に対する吸音処置は、意図しない特性の変化を引き起こす恐れがあり、適用の安定性の観点からも現実的ではないと考える。

従って、本節では、現実に即した範囲での改善手法といった観点から、床に対する吸音の検証は割愛し、ミキシングコンソールによる改善処置に関して検討を行う。前節までの検証により、ミキシングコンソールの底面に対しての音響処理は、ソフトな音響境界による手法が効果的であることが確認されている。一方、ソフトな境界による処理は、意図しない低域成分に関しても音圧レベルを減少させてしまうため、ディップ帯域である100Hz近傍の周波数に限定したソフトな音響境界の適用が理想とされる。

周波数依存性を有するソフトな境界は、音響管を用いることで実現可能であることが一般に知られている[18]。Fig. 8-22は、長さ l の音響管により構築されたソフトな音響境界の例である。この時、音響管の開口部におけるアドミタンス β は、式(8.14)で表すことができる(式(8.11)参照)。この場合、管長 l が1/4波長の奇数倍で表現される周波数 $f = \frac{c}{4l} \cdot (2n-1)$ [Hz], $n = 1, 2, \dots$ の近傍においてソフトな音響境界が音響管の開口部で実現される(但し、入射波が音響管内を平面波伝搬する周波数帯域に限る、式(8.13))。従って、ディップの周波数である100Hzにおいてソフトな音響境界を実現する場合、約86cmの長さの音響管が必要となる。

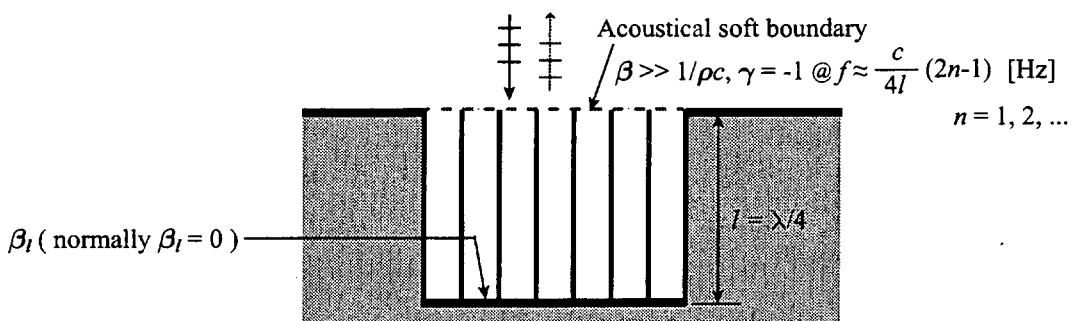


Fig. 8-22 Acoustical soft boundary using the acoustical tubes.

$$\beta = \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{j \tan(kl) + \rho c \beta_l}{1 + j \rho c \beta_l \cdot \tan(kl)} \quad (8.14)$$

where, $\left\{ \begin{array}{l} l ; \text{depth of the tube [m]} \\ \beta_l ; \text{normal admittance of the tube's bottom [m/Pa} \cdot \text{s}] \\ \rho ; \text{air density [kg/m}^3] \\ c ; \text{sound speed [m/s]} \\ k = \omega/c ; \text{wave number [rad/s}^2] \end{array} \right.$

Fig. 8-23 及び Fig. 8-24 は、長さ $l = 0.86\text{m}$ (設計周波数 $f = 100[\text{Hz}]$) の音響管における開口部のアドミッタンスを計算した結果である。

Fig. 8-23 は、音響管底面のアドミッタンス $\beta_l = 0$ (剛) の場合の計算結果であり、Fig. 8-24 は、音響管底面のアドミッタンス $\beta_l = 0.17$ (吸音率 $\alpha = 0.5$) の場合の計算結果を示している。アドミッタンスの振幅値 (Fig. 8-23-a, Fig. 8-24-a) に関しては、 $1/\rho c$ で基準化した値 $\rho c \beta$ として表している。

いずれの結果も、100Hz の奇数倍の周波数において大きなアドミッタンス値 ($>>1/\rho c$) が得られており、周波数依存性を有するソフトな音響境界が実現されていると解釈できる。

100Hz 以下では、50Hz において完全吸音と等価なアドミッタンスの大きさ ($1/\rho c$) が得られており、それより周波数が低くなるにつれて剛の境界条件へと近づいている。但し、音響管を用いた音響境界のアドミッタンスは、共振周波数以外の帯域では、常に $+90^\circ$ もしくは -90° の位相反転が生じるため (Fig. 8-23-b, Fig. 8-24-b)，絶対値としては完全吸音であっても、位相特性の観点からは完全吸音と等価にはならない (Fig. 8-23, 100Hz 以下の帯域では $+90^\circ$)。Fig. 8-24 によると、このような急峻な位相特性の変化は、音響管の底面を吸音することで、ある程度穏やかな特性となることが分かる。

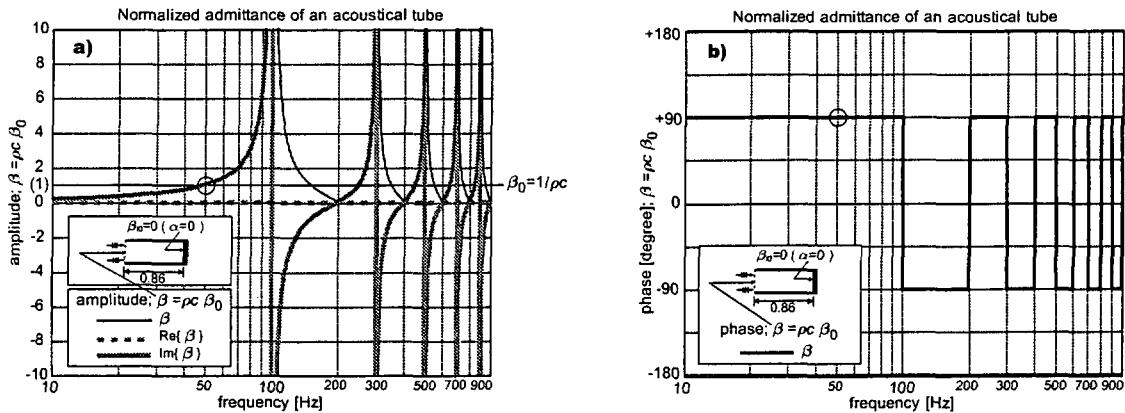


Fig. 8-23 Frequency characteristics of the admittance on a cut end of an acoustical tube. The admittance of the tube's bottom $\beta_l = 0$. a) amplitude: black solid line; Re + Im, gray dashed line; Re, gray solid line; Im. b) phase.

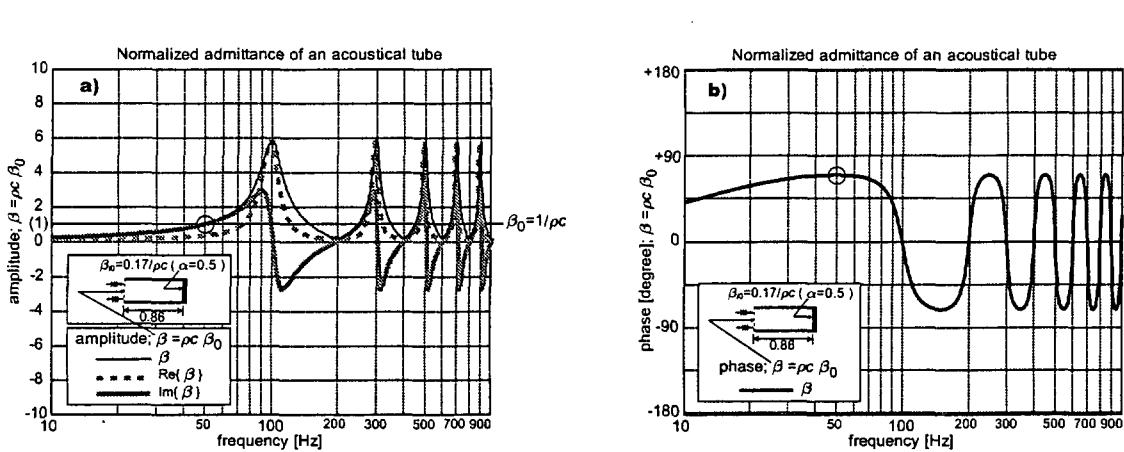


Fig. 8-24 Frequency characteristics of the admittance on a cut end of an acoustical tube. The admittance of the tube's bottom $\beta_l = 0.17/\rho c$ ($\alpha=0.5$). a) amplitude: black solid line; Re + Im, gray dashed line; Re, gray solid line; Im. b) phase.

8-5-1. ミキシングコンソール底面への適用

Application for the bottom of a mixing console

音響管を用いた音響境界を周波数依存性のあるソフト境界として想定し、式(8.14)で表されるアドミッタンスをミキシングコンソールの側面に適用した場合の効果を検証する。

検証に用いる音場モデルを Fig. 8-25 に示す。ここでは、Type A のミキシングコンソールを仮定し、その底面のアドミッタンスにソフトな音響境界を適用する(式(8.14))。

尚、ここで適用したソフトな音響境界の実現のためには、実際には音響管の使用が必要となる。そのためには、音響管を装着するためのスペースが必要となるが、ここでは現実的な適用に対する配慮は割愛し、厚さ 0 で実現できる理想的なソフト境界が実現されているものと仮定する(現実的な適用に関しては、後述)。

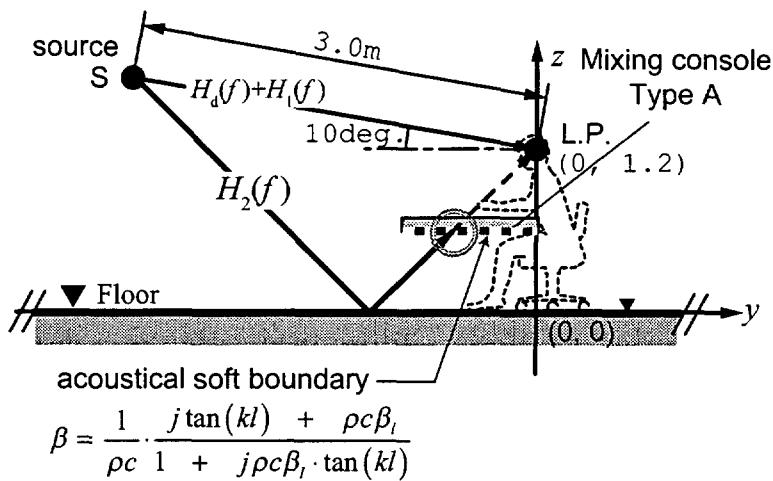


Fig. 8-25 The examined field with the admittance of an acoustical tube on the bottom of a mixing console, Type A.

リスニングポイントにおける振幅周波数特性の計算結果を Fig. 8-26 ~ Fig. 8-28 に示す。

Fig. 8-26 は最終特性 $H_d(f)+H_l(f)+H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-27 及び Fig. 8-28 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f)+H_l(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。計算に用いた音響管の底面のアドミッタンスは $\beta_l = 0$ (剛)である。図中、灰色線がミキシングコンソールの底面のアドミッタンスが $\beta = 0$ (剛)、すなわち何も処理しない場合の結果、黒色実線が長さ $l = 0.86m$ (適用最低周波数 100Hz)の音響管によるソフト境界をミキシングコンソールの底面に与えた場合、黒色一点鎖線が $l = 0.43m$ (適用最低周波数 200Hz)の音響管の場合、黒色破線が $l = 0.22m$ (適用最低周波数 400Hz)の音響管の場合の計算結果を表している。

Fig. 8-26 によると、音響管の長さを長くするほど 100Hz のディップが低域にシフトすることが分かる。例えば $l = 0.86\text{m}$ の場合、100Hz 近傍での音圧レベルは回復しているものの、新たに 50Hz 近傍にディップが生じている。50Hz における $l = 0.86\text{m}$ の音響管の開口部のアドミッタンスの大きさは、完全吸音の状態と同一 ($1/\rho c$) であるが (Fig. 8-23-a)，底面を完全吸音した場合にはこのような 50Hz 近傍のディップは生じていない (Fig. 8-17)。従って、このような 100Hz 以下に生じるディップは、音響管によるアドミッタンスの位相特性 (+90°, Fig. 8-23-b) による影響だと思われる。

Fig. 8-28 によると、音響管の長さが長くなるほど急峻な特性の減衰を示すディップが低域に推移していく様子が観測される。但し、それらの減衰が生じる周波数は、それぞれの音響管の長さに対応した周波数、 $l = 0.86\text{m} \Leftrightarrow 100\text{Hz}$, $l = 0.43\text{m} \Leftrightarrow 200\text{Hz}$, $l = 0.22\text{m} \Leftrightarrow 400\text{Hz}$ とは対応していない。

Fig. 8-27 によると、実音源からの寄与に対して 50Hz 近傍に新たなディップが生じていることが分かる。このことから、音響管によるソフト境界の適用は、床からの反射音だけではなく実音源からの寄与に対しても影響を与えると思われる。

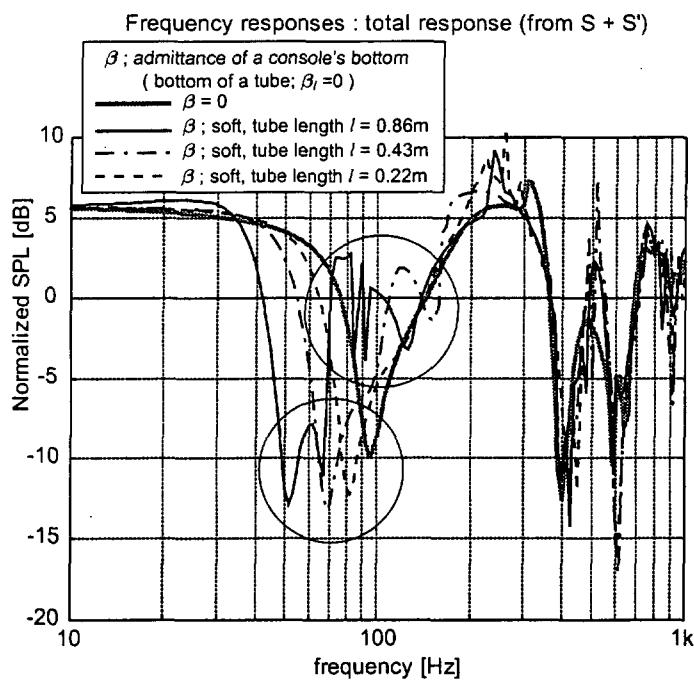


Fig. 8-26 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$. Gray line; $\beta=0$. Black line; soft β (tube length 0.86m). Black dash-dotted line; soft β (tube length 0.43m). Black dashed line; soft β (tube length 0.22m). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

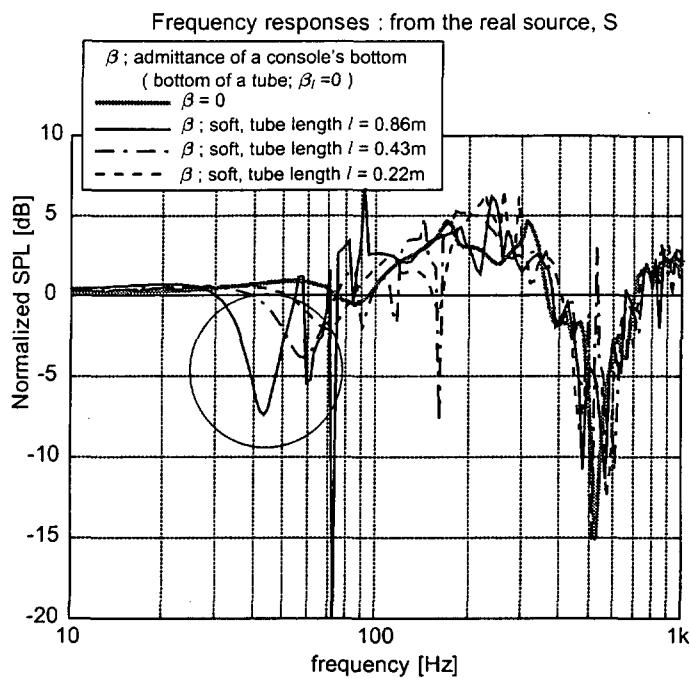


Fig. 8-27 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_l(f)$. Gray line; $\beta=0$. Black line; soft β (tube length 0.86m). Black dash-dotted line; soft β (tube length 0.43m). Black dashed line; soft β (tube length 0.22m). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

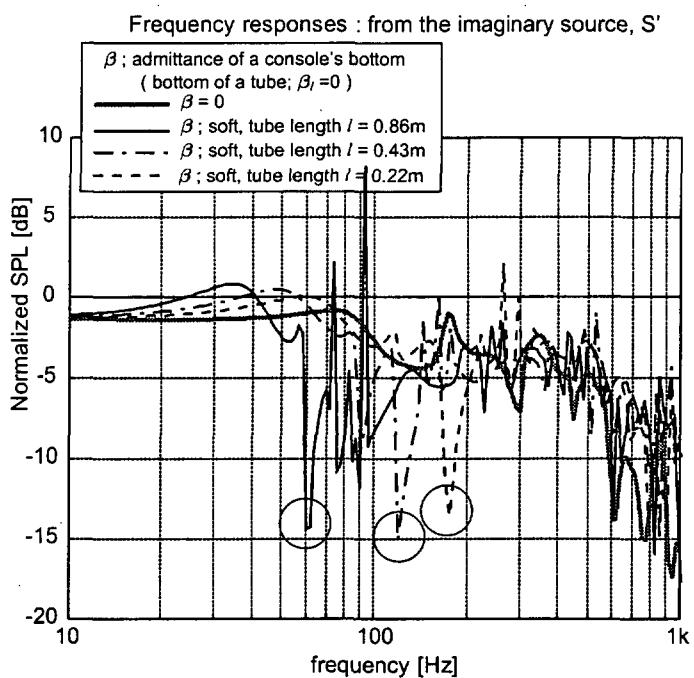


Fig. 8-28 Calculated results of the response from an imaginary source $H_2(f)$. Gray line; $\beta=0$. Black line; soft β (tube length 0.86m). Black dash-dotted line; soft β (tube length 0.43m). Black dashed line; soft β (tube length 0.22m). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

Fig. 8-26～Fig. 8-27 の結果により、周波数依存性を有するソフト境界を音響管を用いて実現し、それをミキシングコンソールの底面に適用した場合、最終特性に対して予期しない新たなディップが観測された。また、そのような新たなディップの発生には、音響管によるソフト境界のアドミッタンスの位相特性 (+90° もしくは -90°, Fig. 8-23-b) が寄与していると考えられる。音響管開口部のアドミッタンスの位相変化は、音響管の底面を吸音することである程度抑制することができる(Fig. 8-24-b)。以下、音響管の底面を吸音した場合の影響に関して検証を行う。

Fig. 8-29～Fig. 8-31 に、音響管の底面を吸音した場合の特性を示す。Fig. 8-29 は最終特性 $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-30 及び Fig. 8-31 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_1(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。計算に用いた音響管の長さは、 $l = 0.86\text{m}$ である。図中、灰色線がミキシングコンソール底面のアドミッタンスが $\beta = 0$ (剛)、すなわち何も処理しない場合の結果、黒色実線が底面のアドミッタンス $\beta_l = 0$ (剛) の音響管によるソフト境界をミキシングコンソールの底面に与えた場合、黒色一点鎖線が音響管の底面のアドミッタンスが $\beta_l = 0.03$ (吸音率 $\alpha = 0.1$) の場合、黒色破線が音響管の底面のアドミッタンスが $\beta_l = 0.17$ (吸音率 $\alpha = 0.5$) の場合の計算結果を表している。

Fig. 8-29 によると、音響管の底面を吸音することにより 50Hz 近傍のディップが改善されることが分かる。また、50Hz 近傍のディップ帯域以外の特性に対しては、音響管底面の吸音による影響は少ない。音響管底面の吸音によるこのような傾向は、実音源からの寄与 (Fig. 8-30) 及び虚音源からの寄与 (Fig. 8-31) に対しても同様に観測される。従って、音響管の底面に吸音性能を与えることは、ディップ改善に対して有効な手段の 1 つであると考えられる。但し、Fig. 8-29～Fig. 8-31 によると、吸音率 $\alpha = 0.1$ 程度の吸音では十分な改善効果は期待できず、3dB 以上の改善効果を得るために吸音率 0.5 以上の吸音が望まれることが分かる。

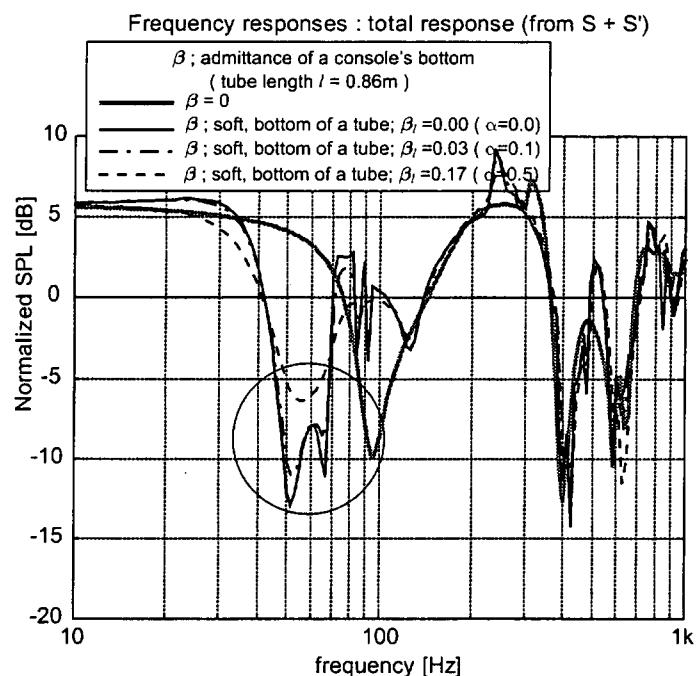


Fig. 8-29 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$. Gray line; $\beta=0$. Black line; soft β (tube bottom $\alpha=0$). Black dash-dotted line; soft β (tube bottom $\alpha=0.1$). Black dashed line; soft β (tube bottom $\alpha=0.5$). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

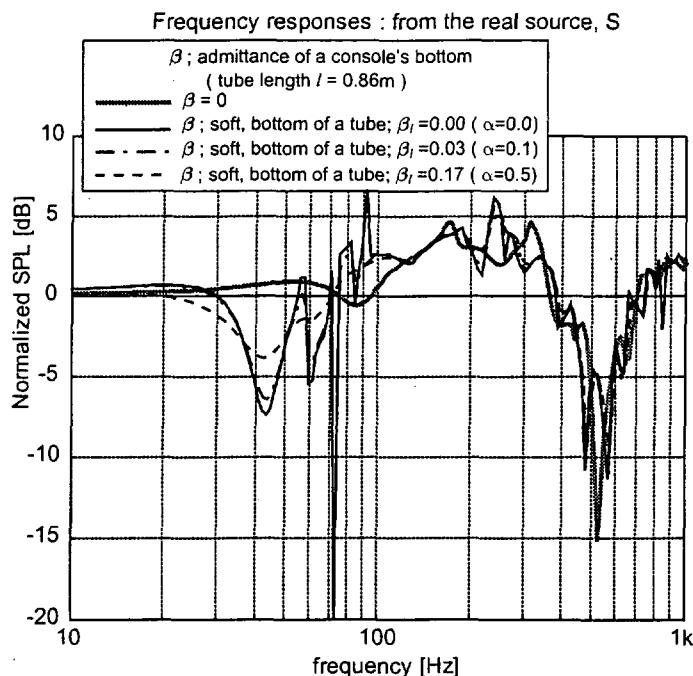


Fig. 8-30 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_1(f)$. Gray line; $\beta=0$. Black line; soft β (tube bottom $\alpha=0$). Black dash-dotted line; soft β (tube bottom $\alpha=0.1$). Black dashed line; soft β (tube bottom $\alpha=0.5$). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

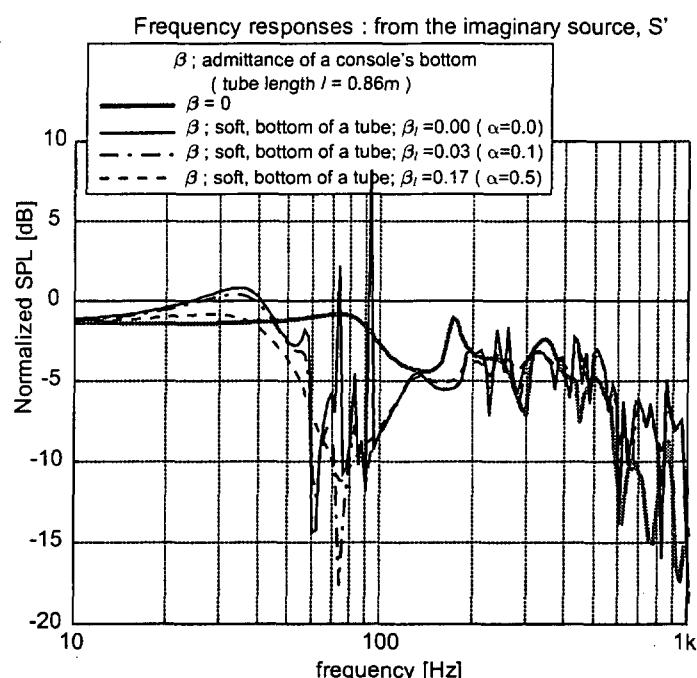


Fig. 8-31 Calculated results of the response from an imaginary source $H_2(f)$. Gray line; $\beta=0$. Black line; soft β (tube bottom $\alpha=0$). Black dash-dotted line; soft β (tube bottom $\alpha=0.1$). Black dashed line; soft β (tube bottom $\alpha=0.5$). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

8-5-2. 音響管の適用

Implementation of the acoustical tubes for a mixing console

前項8-5-1.では、音響管により表現されるソフト境界と等価なアドミッタンスをミキシングコンソールの底面に与えることにより、100Hz近傍に生じるディップの改善に関して検証を行った。結果は、100Hz近傍のディップは改善されるが、新たに50Hz近傍にディップが生じることが分かった。換言すると、100Hz近傍のディップが音響管により50Hz近傍に移動したと解釈できる。

本節では、実際の音響管の大きさを加味したモデルを仮定し、100Hz近傍に生じるディップの改善効果に関して検証を行う。100Hz近傍の周波数に対してソフト境界を実現するためには、約0.86mの長さの音響管が必要になる。そのような長い音響管の開口部をミキシングコンソール底面上に配置することは、物理的に不可能である。そこで、ここでは、音響管の開口部が床からの反射音に対する入射面となるように、複数の音響管をミキシングコンソールの下部に設置する(Fig. 8-32)。

リスニングポイントにおける周波数特性に関しては、ミキシングコンソールの下部に設置された長さ0.86mの音響管配列(Fig. 8-32-a)の他に、それと同じ外形を有する剛な物体(Fig. 8-32-b, 以下「剛な箱」), 音響管の開口部に相当する面を完全吸音したもの(Fig. 8-32-c, 以下「吸音箱」), 同じく音響管と等価なアドミッタンスを与えたもの(Fig. 8-32-d)に関しても数値解析を行う。

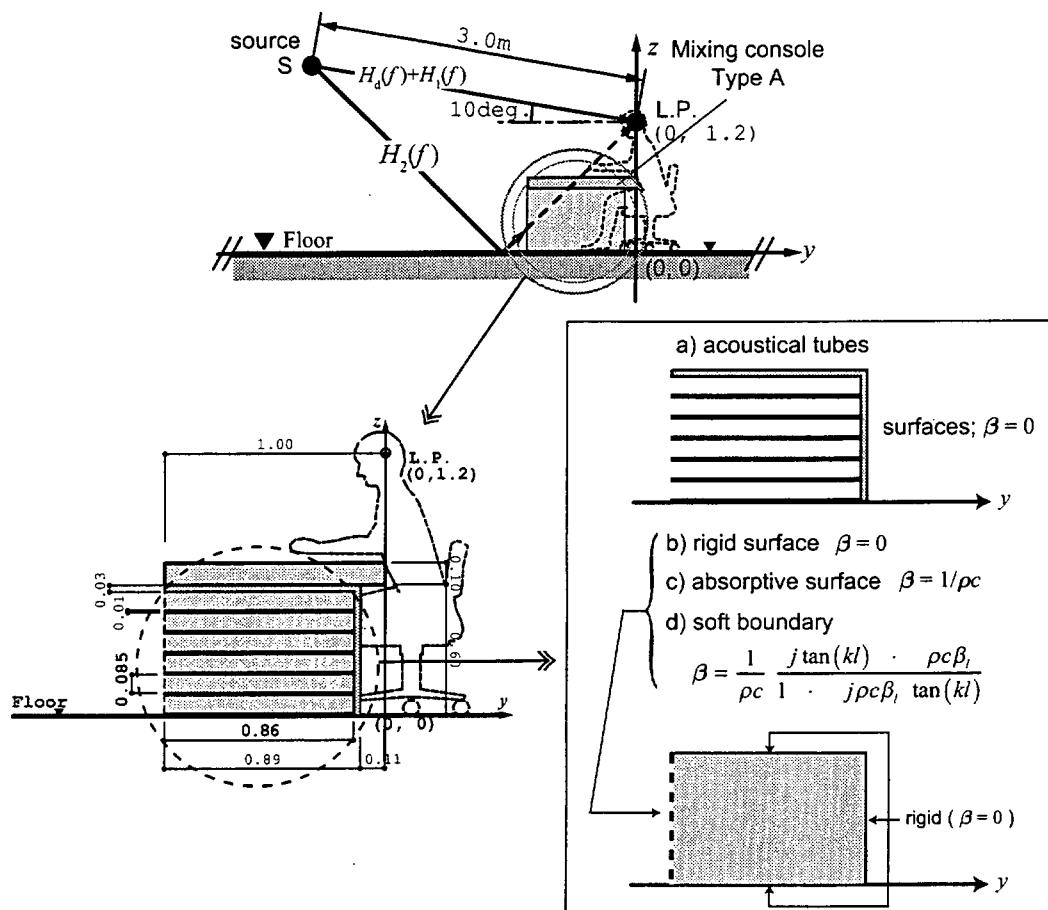
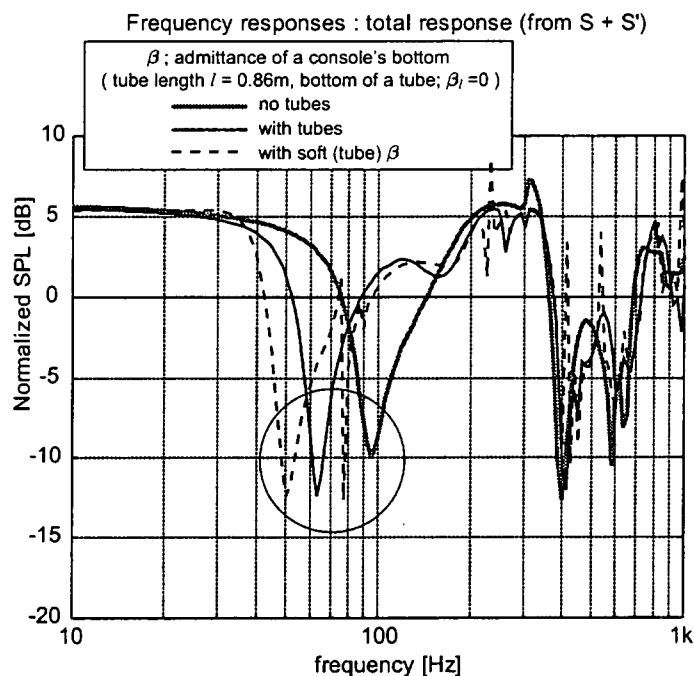


Fig. 8-32 The examined field with the acoustical tubes under the mixing console, Type A.
 a) acoustical tubes. b) to d) comparative object; b) with rigid surface, c) with absorptive surface, d) with soft (tube) admittance.

Fig. 8-33～Fig. 8-35に、実際の音響管の形状を音響境界として与えた場合 (Fig. 8-32-a) の計算結果と、式(8.14)で与えられる音響管のアドミッタンスを入射面に与えた場合 (Fig. 8-32-d) の計算結果との比較を示す。Fig. 8-33は最終特性 $H_d(f)+H_1(f)+H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-34及びFig. 8-35はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f)+H_1(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。計算に用いた音響管の長さは、 $l = 0.86\text{m}$ である。図中、灰色線が音響管の無い場合、黒色実線が音響管の形状を音響境界として与えた場合、黒色破線が音響管のアドミッタンスを与えた場合の計算結果を表している。

Fig. 8-33によると、音響管のアドミッタンスを与えた場合の計算結果において観測される50Hz近傍のディップが、音響管の形状を音響境界として与えた場合の計算結果では、60Hz近傍に周波数へと移動していることが分かる。その他に関しては、細かなピーク及びディップの違いは観測されるものの、両者とも同様な特性を示している。以上の傾向は、実音源からの寄与 (Fig. 8-34) 及び虚音源からの寄与 (Fig. 8-35) に対しても同様に観測できる。

以上より、音響管による効果の概略を検証する際には、式(8.14)のアドミッタンスを用いた近似解析も有用であるが、低域特性を詳細に検討するためには、音響管の形状を再現した解析が必要になると思われる。



8

Fig. 8-33 Calculated results of the total response $H_d(f)+H_1(f)+H_2(f)$. Gray line; no tubes. Black line; with tubes. Black dashed line; equivalent β . The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

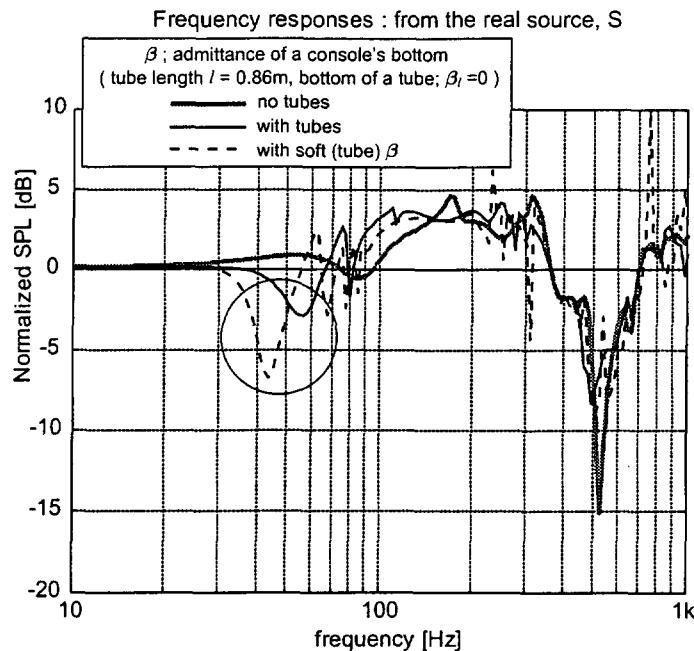


Fig. 8-34 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_l(f)$. Gray line; no tubes. Black line; with tubes. Black dashed line; equivalent β . The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

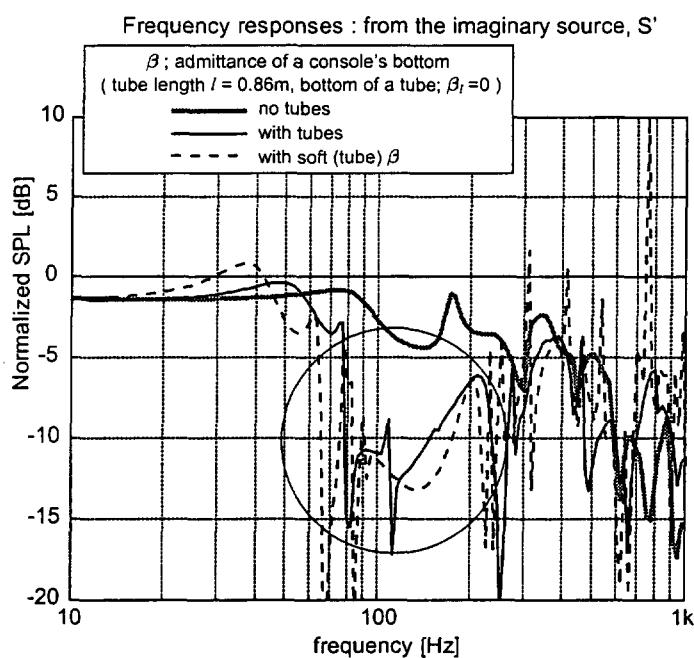


Fig. 8-35 Calculated results of the response from an imaginary source $H_2(f)$. Gray line; no tubes. Black line; with tubes. Black dashed line; equivalent β . The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

Fig. 8-36～Fig. 8-38 に、音響管を用いたソフト境界による特性の変化を示す。Fig. 8-36 は最終特性 $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-37 及び Fig. 8-38 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_1(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、灰色線が音響管の無い場合、黒色実線が音響管を設置した場合(Fig. 8-32-a)，黒色一点鎖線が音響管と同様の外形を有する剛な箱を設置した場合(Fig. 8-32-b, 「剛な箱」)，黒色破線が箱の一面を吸音した場合(Fig. 8-32-b, 「吸音箱」)の計算結果を表している。音響管を設置した場合の特性には、実際の音響管の形状を音響境界として与えた場合の計算結果を用いている。

Fig. 8-36 によると、音響管を設置することで 100Hz 近傍のディップは改善されているものの新たに生じた 60Hz 近傍のディップにより、周波数特性全体の平坦化という観点では、それと等価な外形を有する剛な箱もしくは吸音箱の方が効果的であると解釈できる。以下、実音源及び虚音源からの寄与に対して音響管による影響を考察する。

Fig. 8-37 によると、吸音箱では実音源からの低域成分に対して減少効果をもたらしてしまうが、音響管では、60Hz 近傍に多少のピーク及びディップが生じるもの、実音源からの寄与に対して大きな影響を与えていないことが分かる。また、このようなピーク及びディップは音響管の底面を吸音することで改善が期待できる(Fig. 8-30)。従って、実音源からの寄与に関しては、音響管の方が吸音箱よりも優れた特性を与えることが予測される。

Fig. 8-38 によると、音響管を設置した場合、床からの反射音成分が 100Hz 近傍の帯域に集中して減衰することが分かる。また、剛な箱では床からの反射音成分に対して大きな減衰量を与えることができないが、音響管では目的とする周波数帯域に対して大きな減衰量が得られている。従って、床からの反射音に関しては、音響管の方が剛な箱よりも優れた特性を与えていることが予測される。

以上より、音響管の設置は、実音源及び虚音源からの個別の寄与に関しては優れた対処法だと解釈できるが、それらの合成特性に関しては十分な改善効果が期待できないことが示唆される。音響管の設置が、個別の寄与に対しては良い改善効果を与えながら、それらの合成特性が意図しない結果となる原因としては、音響管開口部における位相特性の影響であると考えられる。Fig. 8-23-b に示したように、音響管開口部のアドミッタンスの位相成分は、共振周波数を除き、常に $+90^\circ$ もしくは -90° となる。このような位相特性の変化は、音響管の底面を吸音することによりある程度軽減することができるが (Fig. 8-24-b)，そのためには高

い吸音率の適用が必要となり、現実的な処置としては課題が残る。一方、音響管を適用した際に問題となる 50Hz 近傍に生じるディップは、音響管の長さやその配置方法により異なった特性を示しており (Fig. 8-26, Fig. 8-33), それらの調整により改善できる可能性がある。また、本節における音響管の適用モデルは、コンソールの下部に対してミキシングエンジニア (聴取者) の脚に入るスペースを無視しているなど、現実的な配慮が割愛されている。

以上を踏まえ、次節では、より現実的な方法に関して検証を行う。

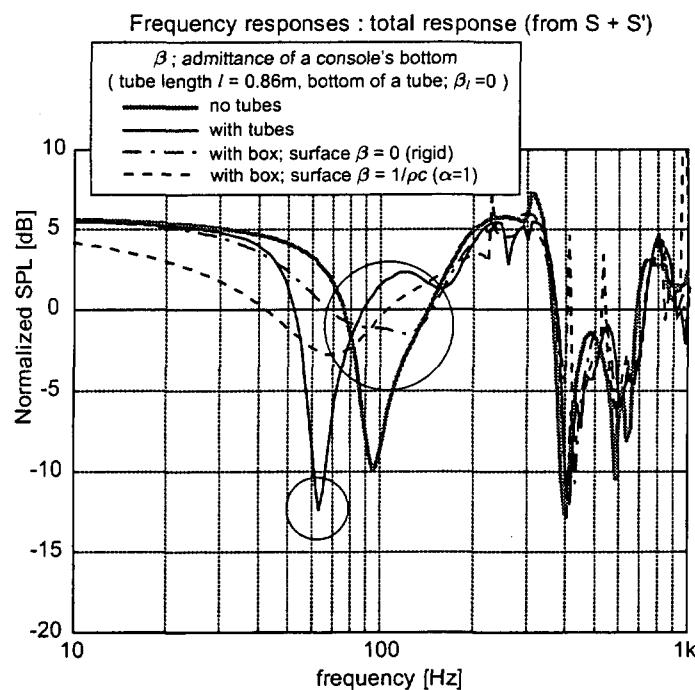


Fig. 8-36 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$. Gray line; no tubes. Black line; with tubes. Black dash-dotted line; with comparative box (surface $\beta=0$, rigid). Black dashed line; with comparative box (surface $\beta=1/\rho c$, absorptive). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

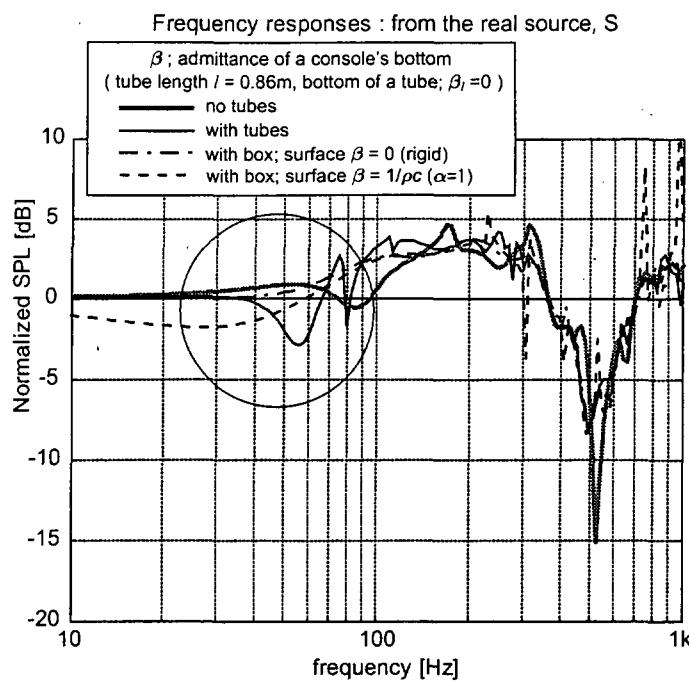


Fig. 8-37 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_i(f)$. Gray line; no tubes. Black line; with tubes. Black dash-dotted line; with comparative box (surface $\beta=0$, rigid). Black dashed line; with comparative box (surface $\beta=1/\rho c$, absorptive). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

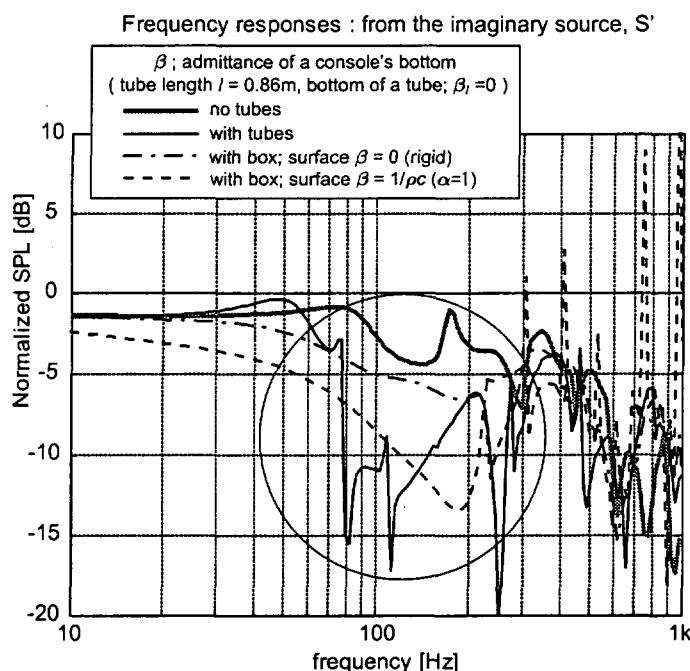


Fig. 8-38 Calculated results of the response from an imaginary source $H_i(f)$. Gray line; no tubes. Black line; with tubes. Black dash-dotted line; with comparative box (surface $\beta=0$, rigid). Black dashed line; with comparative box (surface $\beta=1/\rho c$, absorptive). The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

8-6. 実モデルでの適用例の検証

Example of a practical application of an improving method

前節 8-5. では、実環境への適用に対する配慮を無視したモデルを想定し、音響管設置による改善効果に対して基礎的な振る舞いを検証した。その結果、音響管を配置する手法は、実音源及び虚音源からの個別の寄与に関しては所望の効果を得ることができたが、総合特性に関しては新たな 50Hz 近傍のディップの発生等のデメリットが生じることが確認された。但し、50Hz のディップに関しては、音響管の設置条件によりその特性が変化することから、現実的な環境に設置された音響管の効果に関しても検証を行う必要があると思われる。

本節では、現実的なミキシングルーム環境を想定し、再度音響管による 100Hz のディップの改善手法に関して検証を行う。

8-6-1. 音響管の管長による効果

Effect of a length of the acoustical tube

Fig. 8-39 は、ミキシングコンソール Type S の底面に対して音響管の配置を検討した図である。ここでは、床からの反射波 $H_2(f)$ の入射面に対して、ソフトな音響境界が対面する向きに音響管が配置されている。Fig. 8-40 は、設置された音響管の寸法を示した図であるが、目的とする帯域である 100Hz に対応する管長 86cm に対して、最大でその約半分の 40cm の管長の設置が現実的であることが分かる (Fig. 8-40-a)。従って、ソフトな音響境界は 215Hz 近傍の周波数に対して形成されることが予測され、理想とされる 100Hz には及ばない。本節では、音響管の長さが低域特性に与える影響に関して、現実的に設置可能な長さを想定し、その効果を検証する。

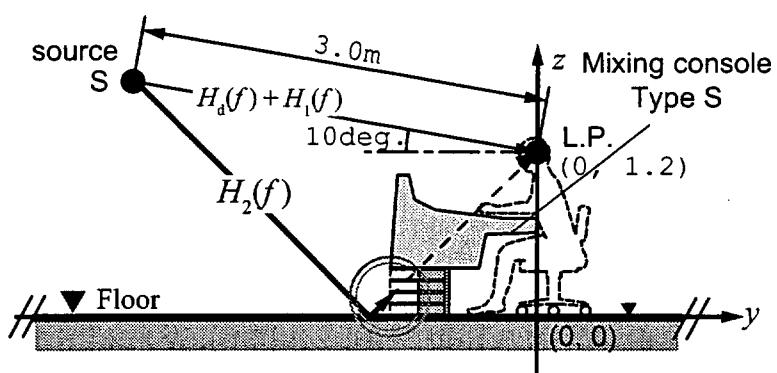


Fig. 8-39 The examined field with a mixing console Type S on the acoustical tube stand. All admittances of the boundaries are assumed to be zeros for numerical calculation.

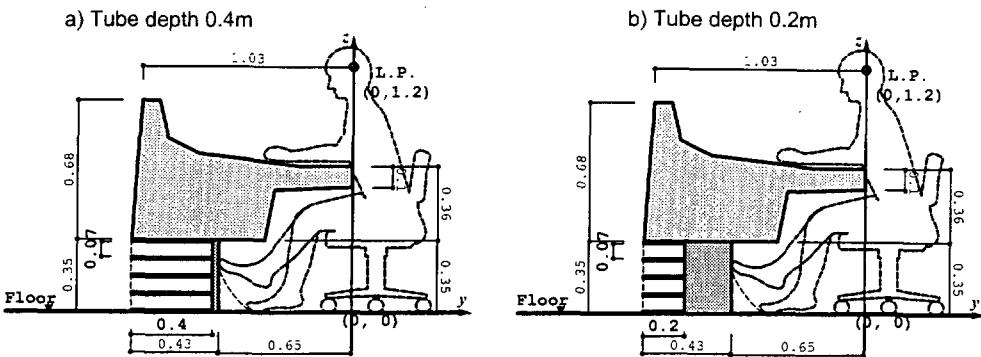


Fig. 8-40 Two types of the tube stand for the mixing console Type S. a) depth of the tube is 0.4m. b) depth of the tube is 0.2m.

Fig. 8-41 ~ Fig. 8-43 は、音響管の設置の有無による特性の違いを計算した結果である。

Fig. 8-24 が最終特性 $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-42 及び Fig. 8-43 はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_i(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、灰色線が音響管の無い状態での特性を示しており、黒実線が管長 40cm の音響管を設置した場合の結果を示している。また、参考として、音響管の管長を 20cm とした場合 (Fig. 8-23-b) の計算結果を黒破線で示している。

Fig. 8-43 によると、管長 40cm の音響管を設置した場合及び管長 20cm の場合のそれに対して、床からの反射音 $H_2(f)$ の急激な減少が約 150Hz 及び約 220Hz において観測される。この結果は、管長 40cm 及び 20cm の音響管により、それぞれ約 150Hz 及び約 220Hz にてソフトな音響境界が実現されているためであると考えられる。このことは、実際の設置環境では、管長の 1/4 波長よりも長い波長の周波数にてソフトな音響境界が実現される可能性があることを示唆している。また、音響管の設置による効果は、特定の周波数だけではなく、約 40Hz までの広い範囲に亘って $H_2(f)$ に影響を与えていることが分かる。

最終特性 $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$ に対しても、 $H_2(f)$ と同様に低域全体に対して音響管による効果が確認できる (Fig. 8-41)。音響管の設置により、100Hz 近傍のディップ周波数が低域に移動しているが、前節で観測された同様のディップ (Fig. 8-36) ほど深いディップではない。その結果、音響管を設置しない場合に比べディップの深さが浅くなり、低域特性全体の平坦化が図られている。また、音響管の管長による影響は小さく、管長 40cm 及び 20cm の音響管の双方ともに同様な効果が得られていることが分かる。

実音源からの寄与 $H_d(f)$ に関しては、音響管設置による影響が少ないとから、オーディオの受聴環境用の処置としては好ましいと考えられる (Fig. 8-42)。

以上より、ここで仮定した環境においては、100Hz の 1/4 波長よりも短い音響管を用いた場合でも、100Hz 近傍のディップに対する改善効果が期待できると考えられる。

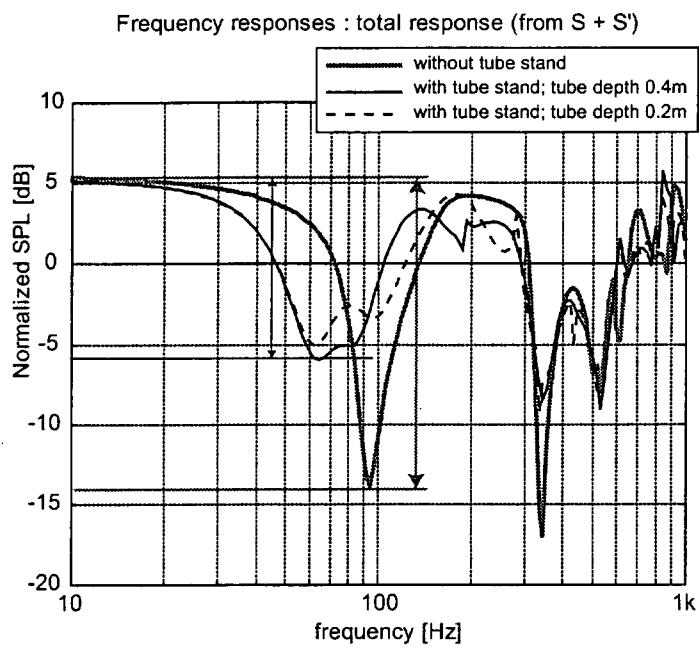


Fig. 8-41 Calculated results of the total response $H_d(f)+H_1(f)+H_2(f)$. Gray line; without the tube stand. Black line; with the tube stand of 0.4m depth. Black dashed line; with the tube stand of 0.2m depth. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

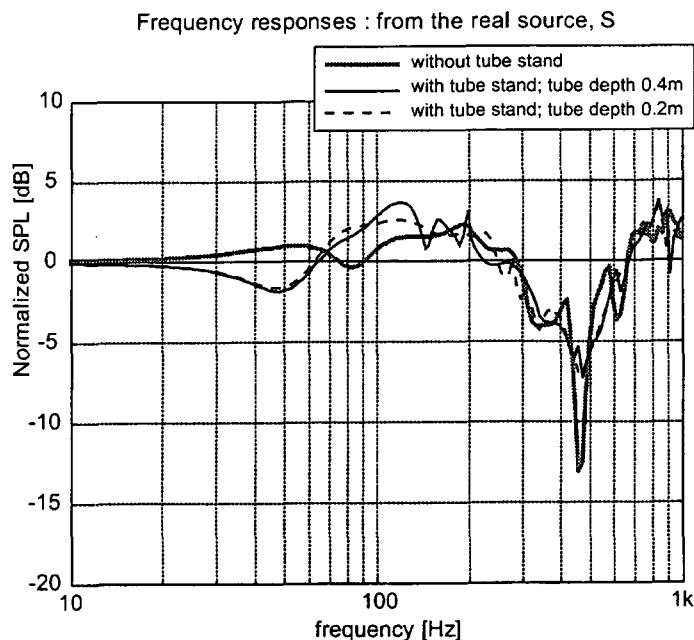
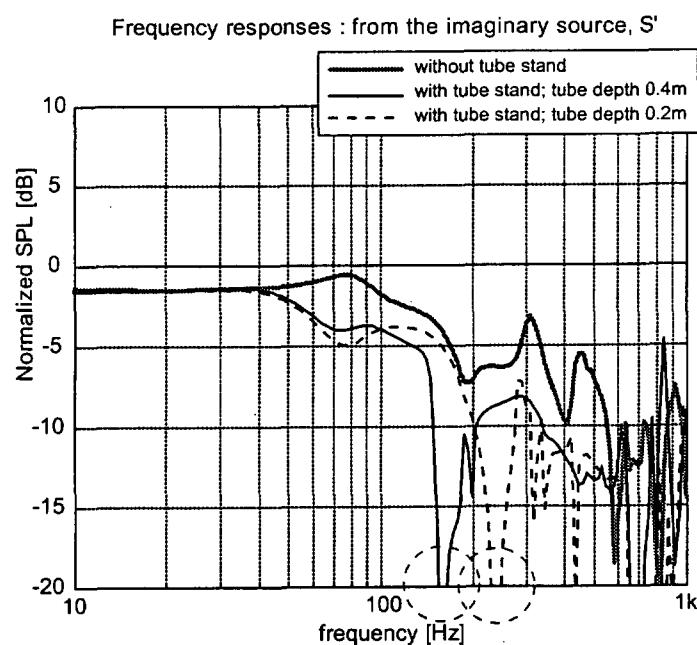


Fig. 8-42 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_i(f)$. Gray line; without the tube stand. Black line; with the tube stand of 0.4m depth. Black dashed line; with the tube stand of 0.2m depth. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.



8

Fig. 8-43 Calculated results of the response from an imaginary source $H_i(f)$. Gray line; without the tube stand. Black line; with the tube stand of 0.4m depth. Black dashed line; with the tube stand of 0.2m depth. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

8-6-2. ソフトな音響境界の適用例

Example of the application of the acoustical soft boundary

前節 8-6-2. の検証結果から、現実的な適用を考慮した環境では、ミキシングコンソール下部に音響管を設置することにより、低域特性の改善効果が期待できることが示された。

本節では、Type S のミキシングコンソールに対して、Fig. 8-44-a に示す音響管(以下、「音響管スタンド」)を設置をした場合の改善効果を検証する。ここで、音響管は、45cm, 40cm, 35cm, 25cm の 4 種類の管長により構成されており、エンジニア(聴取者)の足下のスペース確保といった実用的な観点から、床に近いものほど短く配置されている。また、このような管長の不揃いな音響管配列は、特定の周波数に対する過度な音響的作用を軽減するためにも有効であると考える。尚、ここでは、ソフトな音響境界による効果を確認するために、同様な外形を有し音響管の開口部に相当する面に対して吸音性の境界($\beta_0 = 1.0/\rho c$)を与えたモデル(以下、「吸音スタンド」)及び、反射性の境界($\beta_0 = 0$)を与えたモデル(以下、「反射スタンド」)に関しても解析を行う(Fig. 8-44-b)。

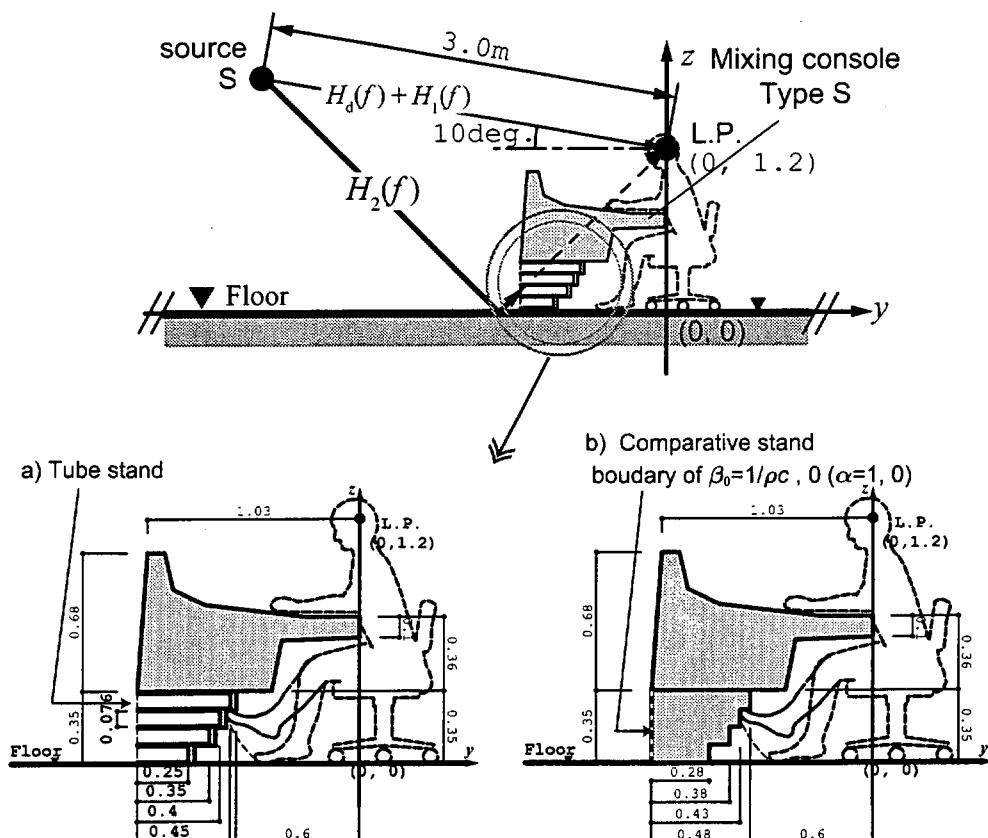


Fig. 8-44 The practical model of the tube stand and the comparative stands with the absorption boundary instead of the tubes.

Fig. 8-45～Fig. 8-47に、それぞれの条件における計算結果を示す。Fig. 8-45が最終特性 $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$ を表しており、Fig. 8-46及びFig. 8-47はそれぞれ実音源からの寄与 $H_d(f) + H_i(f)$ 及び、虚音源からの寄与 $H_2(f)$ を表している。図中、灰色線が音響管スタンドの無い状態での特性を示しており、黒実線が音響管スタンドを設置した場合の結果を示している。また、黒一点鎖線及び黒破線は、それぞれ反射スタンド及び吸音スタンドを設置した場合の計算結果を示している。

Fig. 8-47によると、音響管スタンドによる $H_2(f)$ の減少効果は、反射スタンドや吸音スタンドでは得られない300Hzに関しても大きく作用しており、その結果、総合特性 $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$ における300Hzのディップ改善に対して有効に作用している (Fig. 8-28)。一方、100Hzのディップ帯域に対する $H_2(f)$ の減少効果は、反射スタンド及び吸音スタンドよりも音響管スタンドによる効果の方が少ない。その結果、総合特性 $H_d(f) + H_i(f) + H_2(f)$ における100Hzのディップ改善効果に関しても、反射スタンド及び吸音スタンドよりも音響管スタンドの方が小さい。この点に関しては、管長の調整等、更に詳細な検討が必要と思われる。但し、急峻なピークやディップの少ない平坦特性として総合特性 (Fig. 8-45)を解釈した場合、音響管スタンドによる総合特性(黒実線)は、反射スタンド及び吸音スタンドによる特性(黒一点鎖線及び黒破線)よりも良い結果を与えると解釈することができる、また、いずれのスタンドによる結果も、実音源からの寄与 $H_d(f) + H_i(f)$ に対しては大きな影響を与えておらず、オーディオの受聴環境に対する音響処置としては好ましいと考えられる。

以上のように、現実的な環境を想定したモデルでは、音響管の設置により生じる50Hz近傍のディップは、前節8-5.における検証結果のように顕著には発生せず、音響管スタンドが低域特性の改善手法として有効な手段の一つであることが確認された。また、音響管の管長の組み合わせによる効果と思われる300Hz近傍のディップの改善等、音響管スタンドによる改善手法は、その管長の調整により更に性能の最適化を図ることができる可能性が残されており、そのような観点からも実用的であると考えられる。尚、吸音スタンドにおいては、実際の製作を考えた場合に、奥行き25cm～45cmの筐体に対して100Hz近傍で吸音率 $\alpha = 1.0$ となるような吸音面を与えることが困難であると思われ、そのような点においては実現化が困難であると思われる。

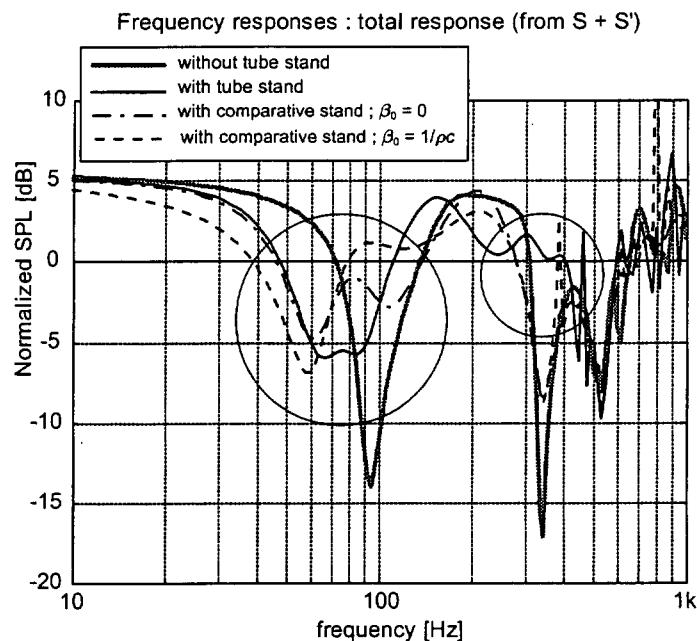


Fig. 8-45 Calculated results of the total response $H_d(f) + H_1(f) + H_2(f)$. Gray line; without the tube stand. Black line; with the tube stand. Black dash-dotted line; with the stand which has the same rigid shell. Black dashed line; with the stand which has the absorption boundary instead of the tubes. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

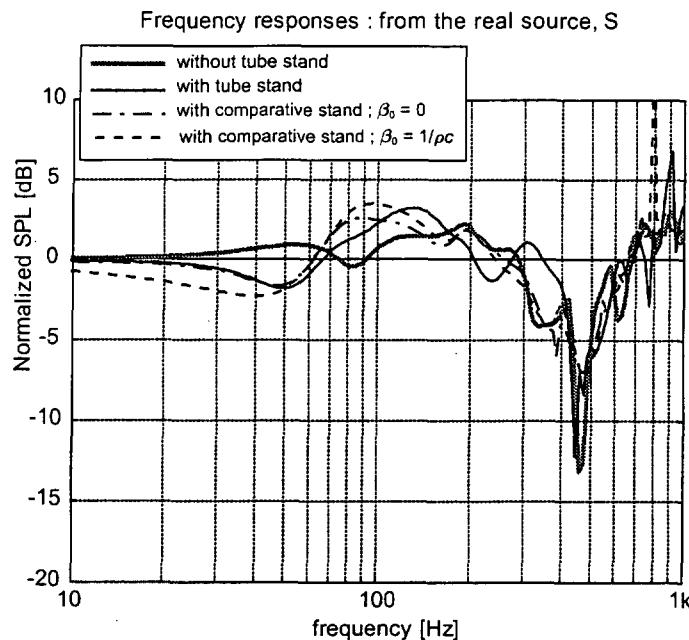


Fig. 8-46 Calculated results of the response from a real source $H_d(f) + H_l(f)$. Gray line; without the tube stand. Black line; with the tube stand. Black dash-dotted line; with the stand which has the same rigid shell. Black dashed line; with the stand which has the absorption boundary instead of the tubes. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

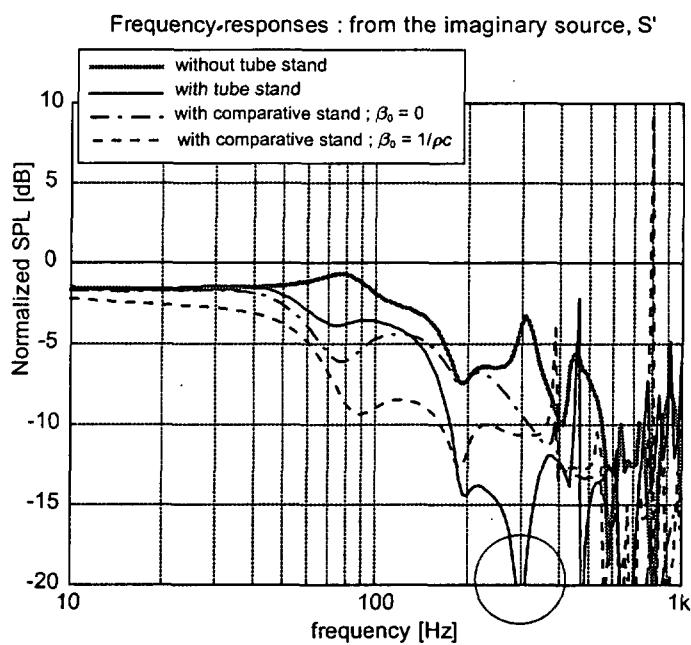


Fig. 8-47 Calculated results of the response from an imaginary source $H_l(f)$. Gray line; without the tube stand. Black line; with the tube stand. Black dash-dotted line; with the stand which has the same rigid shell. Black dashed line; with the stand which has the absorption boundary instead of the tubes. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.

Fig. 8-48 及び Fig. 8-49 は、音響管スタンドの有無による音圧レベル分布及び音響インテンシティの計算結果を示したものである。それぞれ、a) が音響管スタンドの無い場合、b) が音響管スタンドを設置した場合の計算結果を示している。

Fig. 8-48 によると、リスニングポイント上に位置していた音圧の節線が、音響管スタンドを設置することにより、リスニングポイントから外れ、ミキシングコンソールの右端に移動していくことが分かる。ミキシングコンソール周りにおけるこのような音圧の干渉縞は、音響管スタンドが無い場合では、約 200Hz の帯域にて観測される現象である(Fig. 5-27-e)。従って、音響管スタンドの設置により、直接音と干渉する反射音の行路(音路)がほぼ倍の長さに拡張されているのではないかと推測される。そのような観点から音響管スタンドの効果を解釈すると、音響管の設置により 100Hz 近傍のディップがオクターブ低い 50Hz 近傍へと推移する事象に対して説明が可能である。

音響インテンシティに関しては、音圧レベル分布などの改善の効果は得られていない(Fig. 8-49)。音響管スタンドの設置により、ミキシングコンソール下部における大きな音響エネルギーの流れは解消されているが、リスニングポイント周辺の音響インテンシティは、上方から下方に向かう流れから改善されておらず、理想とされる前方から後方への流れとはなっていない。この点に関しては、更に詳細な検証が必要になると思われる。

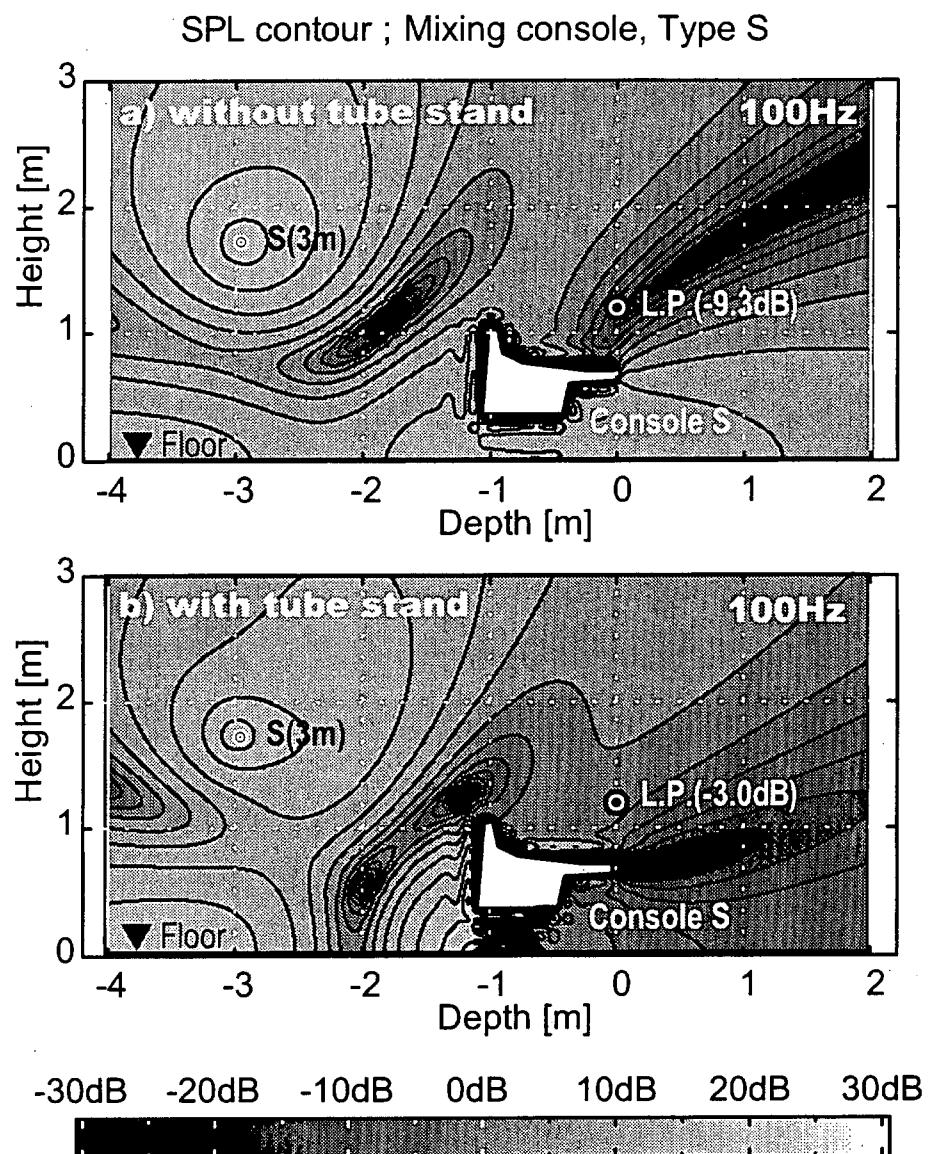
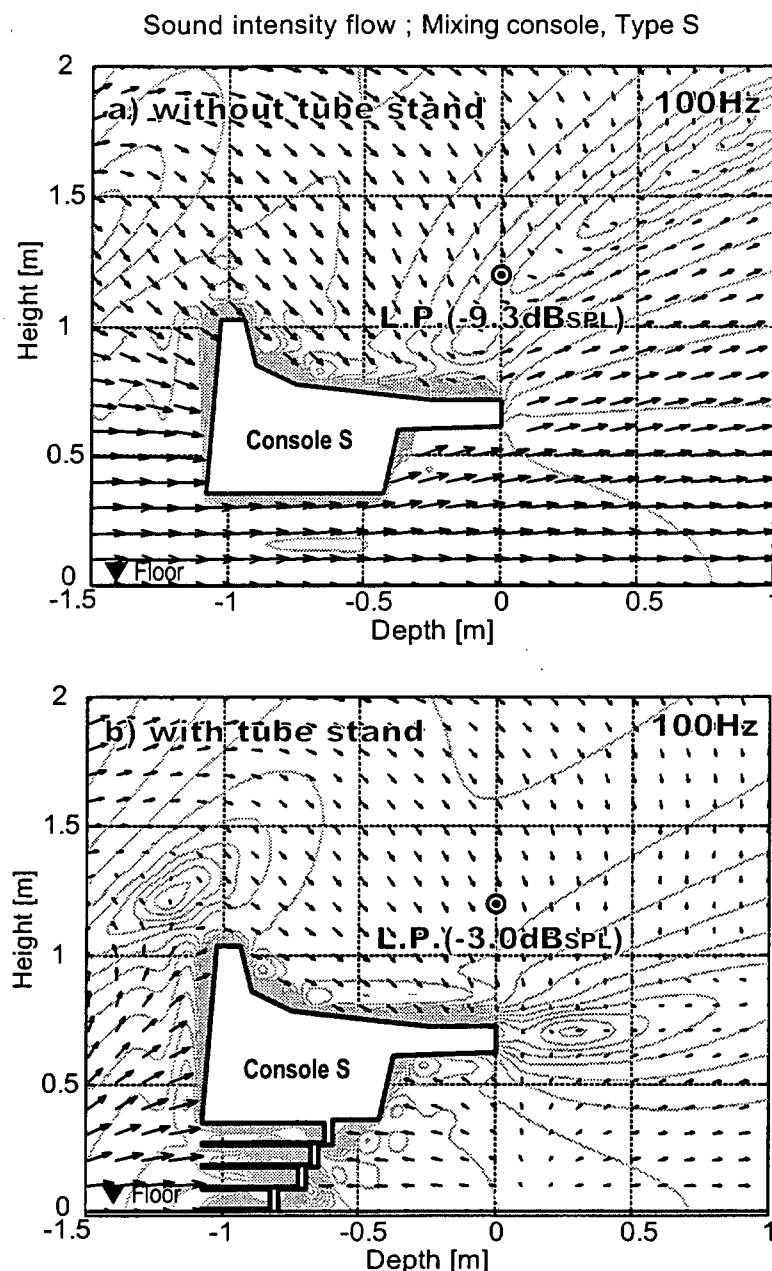


Fig. 8-48 Spatial distributions of the sound pressure level at 100Hz. a) without the tube stand. b) with the tube stand. The 0dB indicates the level of a direct sound $H_d(f)$.



8

Fig. 8-49 Sound intensity flows at 100Hz. a) without the tube stand. b) with the tube stand. The source is located at the 3.0m distance from the L.P. with the elevation angle of a 10degree. The background's gray lines indicate the contour lines of sound pressure levels at 3dB intervals.

以上の検証は、ディップの改善効果をディップ周波数における音圧レベル、すなわち「ディップの深さ」に着目して評価を行ったものである。一方、オーディオの再生性能としてディップを評価した場合、ディップの深さに加えその幅、すなわちディップのQ値に関しても考慮することが重要である。オーディオの受聴環境においては、深いディップが生じていても、その幅が十分に狭く急峻なディップである場合には、聴感上検知されず問題にならないことが多い。また、幅が広く浅いディップの場合には、再生音の品質を大きく損なわない範囲でグラフィックイコライザー等の電気音響的な処置により最終的に所望の再生特性を得ることができるために良い特性と解釈されることが多い。オーディオの受聴環境として問題になるディップは、上記の中間的な特性を有するもの、すなわち適度に広い幅を有する深いディップである。現業的な観点からは、1/3オクターブバンドレベルで特性を表示した場合に、理想的には±3dB以内、許容的には±6dB以内の範囲にほぼ全てのバンドレベルが納まっていることが一般的には良いとされ、その範囲を逸脱するディップが問題となることが多い。

Fig. 8-50 は、音響管スタンドの有無による特性を1/3オクターブバンドごとに平均した特性である。図中、白が音響管スタンドの無い場合、灰色が音響スタンドのある場合を示している。

Fig. 8-50 によると、音響管スタンドの無い場合に観測される99.2Hzの急峻なディップが、音響管スタンドの設置により、約7dB改善されていることが分かる。また、音響管スタンドがある場合は、全ての帯域において±6dB内にバンドレベルが納まっているが、音響管スタンドがない場合は、99.2Hzにおけるバンドレベルの落ち込みが激しいため±6dBの範囲には納まっていないことが分かる。このような急峻なディップは、グラフィックイコライザー等の電気音響的な処置を用いたとしても改善が不可能な厄介なディップとされることが多い。

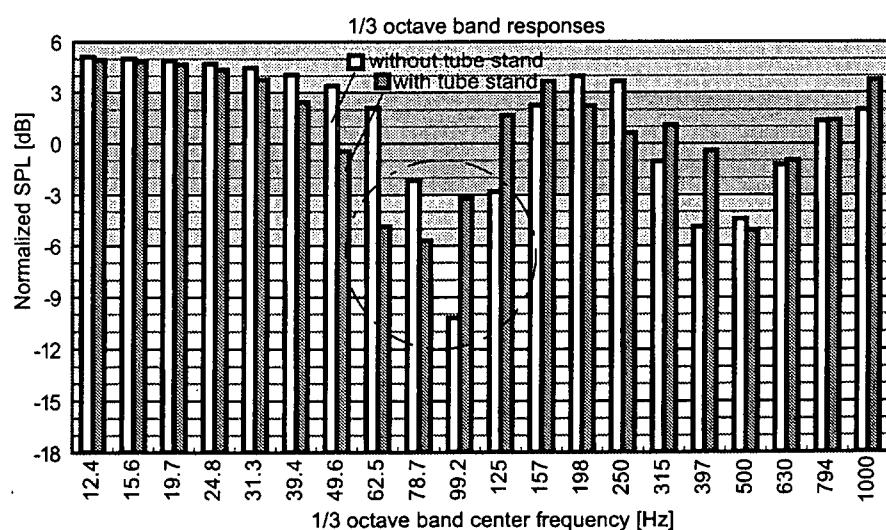


Fig. 8-50 1/3 octave band responses. White bar; without the tube stand. Gray bar; with the tube stand.

一方、音響管スタンドがある場合に生じている 78.7Hz 近傍のなだらかなディップは、音質を大きく損なわない範囲でのグラフィックイコライザーの適用が可能と判断されることが多く、その結果、±3dB 以内の最終特性を再生特性として得られる場合が多い。

オーディオの再生の観点から、ディップの改善に関して次に重要とされるのは、位相特性である。大幅な位相遅れを持った音響処理によって回復された振幅特性では、過渡特性が重要となるオーディオの再生特性としてはふさわしくない。従って、定常状態における振幅特性だけではなく、直接音に対する位相差等、過渡特性を反映する物理量に関しても評価を行う必要がある。

Fig. 8-51 は、音響スタンドの有無による位相特性を表したものである。それぞれの位相特性は、直接音 $H_d(f)$ で基準化してあるため、図示された位相特性は、直接音に対する位相差を表す。従って、位相差が小さいほど、音源から再生された音に対してリニアリティの高い特性が得られていることを意味する。図中、破線が音響管スタンドの無い場合、実線が音響管スタンドのある場合である。

Fig. 8-51 によると、音響管スタンドのある場合の方が位相差が少なくなっていること、音源から再生された音に対してリニアリティの高い特性となっていることが予測される。また、周波数に対する位相変化も穏やかであることから、再生音の品質が向上していることも期待できる。

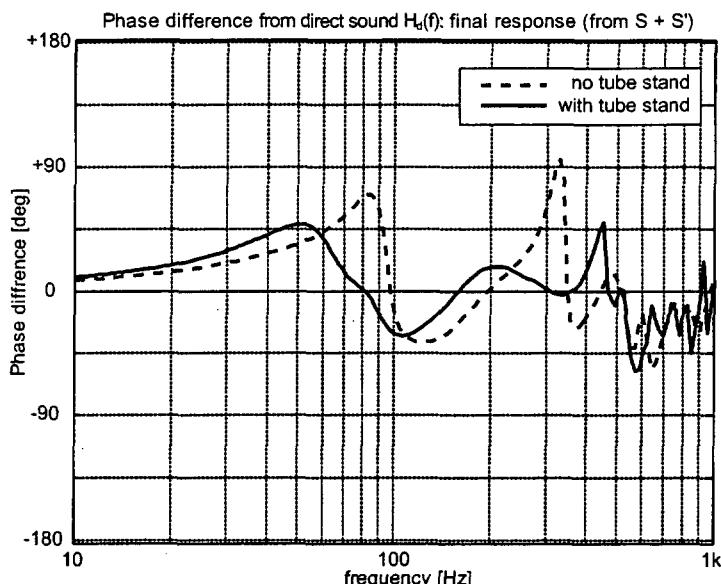


Fig. 8-51 Phase differences from the direct sound $H_d(f)$.
The dashed line; without tube stand. The solid line; with tube stand.

以上、Type S のミキシングコンソール形状を例として、現実的な音響管配置を検討し、100Hz 近傍のディップの改善効果に関して検証を行った。実用的な性能といった観点からは、細部の仕様に関して更に詳細な検討が必要であると思われるが、音響管スタンドにより、100Hz 近傍のディップ改善に対して現実的な改善手法の可能性が示唆された。