

## 振動ふるい機から発生する低周波音の予測と対策

縄岡 好人

服部 瑞穂  
(JR八王子工事事務所)

平野 滋

## Prediction and Control of Infra-sound generated from Vibrating Screen

Yoshihito Nawaoka Mizuho Hattori  
Shigeru Hirano

## Abstract

A vibrating screen is used to separate sandy soil from water in a shield tunnel or an OWS construction site. The infra-sound is generated by the vibrating screen, and it causes doors, windows etc. in neighboring houses to shake.

The numerical method (BEM) has been applied to the prediction of infra-sound propagation properties and a study on ways to control the infra-sound radiation efficiency of a vibrating screen with an insulation box. Development of the infra-sound insulation box was based on the results of numerical studies.

## 概 要

シールド工事やOWS工事では、泥水の1次処理装置として、振動ふるい機が使用される。振動ふるい機から発生する超低周波音は、工事現場周辺民家の建具にガタツキ音を発生させ問題となることがある。これまでその予測・対策技術はほとんど構築されていない。そこで、振動ふるい機から発生する超低周波音に関して、境界要素法(BEM)を用いた伝搬予測手法の適用性について検討した。また、防音ハウスにより音源の放射効率を直接制御する方法について検討し、有効な制御効果を得るためには、音源の半波長より十分小さい寸法で高遮音性能を有するハウスが必要であることを示した。さらに、その結果に基づいて超低周波音用防音ハウスの開発を行った。

## 1. はじめに

シールド工事やOWS工事では、泥水の1次処理装置として、振動ふるい機が使用される。振動ふるい機は、土砂が堆積したスクリーン面が音源となり、その駆動周波数に対応する超低周波音を発生する。この振動ふるい機から発生する超低周波音によって、工事現場周辺民家の建具が振動して二次的に発生するガタツキ音が問題となったり、また、特に敏感な人に対しては睡眠妨害などの心理的影響、頭痛や圧迫感などの生理的影響が問題となることもある。超低周波音に対する法的規制値は、現在のところ定められておらず、また、可聴域の騒音に対する対策技術は低周波音に対してはそのままでは適用が難しいことから、これまで超低周波音に対する対策技術はほとんど構築されていない。

そこで、振動ふるい機から発生する低周波音について、伝搬予測手法と制御手法の検討を行った。

## 2. 低周波音とその特徴

超低周波音は、Fig.1に示すように、可聴周波数以下(20Hz以下)の音を言い、低周波空気振動とも呼ばれる。超低周波音は、物的影響、心理的影響、生理的影響があると言われている<sup>1)</sup>。物的影響とは、窓ガラスや建具が揺れる、ガタツキ音を発生するなどの影響であり、振動ふるい機に対する苦情の大部分がこの種の苦情である。心理的影響とは、気分がいらいらする、睡眠が妨害されるなどの影響であり、生理的影響とは、頭痛、圧迫感、吐き気などの影響であるが、振動ふるい機に対しては特に低周波音に敏感な人からの苦情となる。

また、超低周波音の特性は、可聴域の騒音(一般騒音)と以下の点で大きく異なる。

- 1) 波長が長いために音の波動性による現象が顕著に現れる。
- 2) 一般的な材料で、十分な吸音・遮音性能を得るこ

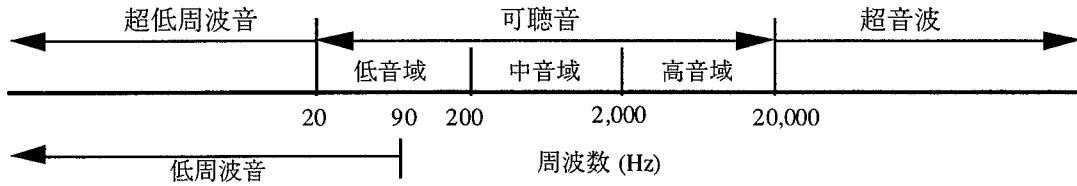


Fig. 1 超低周波音の周波数範囲  
Outline of Infra-sound, Audible Sound and Ultrasonic

とが困難である。

したがって、超低周波音に対して、一般騒音の解析手法（音を単純にエネルギー的に扱う幾何音響解析）は適用できず、音の波動性を考慮した解析手法（波動音響解析）が必要である。また、一般騒音が、吸音、遮音により制御可能であるのに対して、超低周波音では、これとは別の概念により制御方法を検討する必要がある。

### 3. 振動ふるい機から発生する超低周波音

Fig.2は、土砂と泥水が振動ふるい機によって分離されるフロー図である。泥水と掘削された土砂は振動ふるい機の下段スクリーンに入り礫と固結粘土分などが1次処理される。下段スクリーンを透過した泥水と微粒子は脱水受槽に入りスラリーポンプによってサイクロンに圧送される。サイクロンで分離後通過した水と砂分は上段スクリーンによって脱水され排出される。上段および下段のスクリーンに分離された固形物が堆積すると、スクリーンは振動板となって、スクリーンの回転数に一致した周波数の音波の発生面となる。一般に、振動ふるい機は、関東エリアでは16Hz前後、関西エリアでは20Hz前後の超低周波音を発生する。

Fig. 3は、関東エリアの現場における振動ふるい機の発生音測定例である。16.7Hzの低周波音が発生している。

### 4. 数値シミュレーションによる伝搬予測

第2章で述べたように、超低周波音は一般騒音と異なる特性を有するので、解析および制御方法はTable 1のような違いがある。ここでは、シールド工事現場を対象として、振動ふるい機から発生する超低周波音の伝搬予測解析について述べる。

#### 4. 1 解析手法

解析手法は、境界要素法(BEM)による数値シミュレーション手法を用いる。BEMは、波動方程式を定式化した解析手法であり、音の波動性を完全に表現できる。また、同種の手法である有限要素法と比べて、開空間問題を容易に扱うことができる利点がある。BEMには、未知数の扱いが異なる「直接法」と「間接法」があるが、本研究では「間接法」を用いた。「間接法」は、式1に示

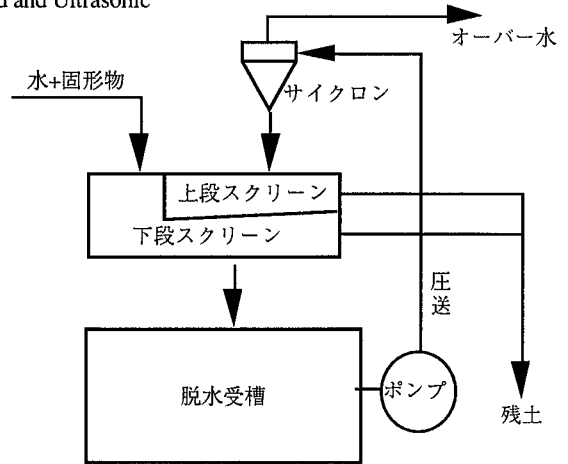


Fig. 2 振動ふるい機のフロー図  
Outline of Vibrating Screen

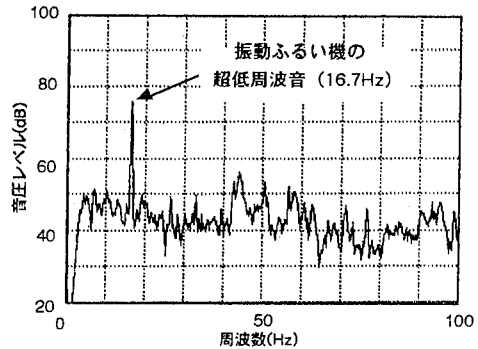


Fig. 3 振動ふるい機の発生音  
Frequency Characteristics of Infra-sound from a Vibrating Screen

Table 1 一般騒音と超低周波音の比較  
Comparison of Infra-sound and Audible Noise

		超低周波音	一般騒音
解析方法	幾何音響解析	×	○
	波動音響解析	○	×
制御方法	吸音	×	○
	遮音	×	○
	放射効率制御	○	×

すように、境界両面の音圧差  $\mu(y)$  と粒子速度差  $\sigma(y)$  を未知数とする。また、式2に示す境界両面の伝達関係式を境界条件とすることにより、境界面に任意の透過性を与えることができる。式2において、 $\alpha$  は伝達アドミッタンスを表す。

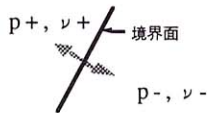
なお、本研究では、境界要素は1次元要素（四節点四角要素、三節点三角要素）とし、要素節点間の最大距離は対象波長の8分の1以下とした。

$$p(x) = \oint_S \left( \mu(y) \frac{\partial G(x,y)}{\partial n} - \sigma(y) \partial G(x,y) \right) dS$$

$$\sigma(y) = v^+(y) - v^-(y) = \frac{\partial p^+(y)}{\partial n} - \frac{\partial p^-(y)}{\partial n}$$

$$\mu(y) = p^+(y) - p^-(y)$$

式1 BEM（間接法）の基礎方程式



$$v^+ = -v^- = \alpha(p^+ - p^-)$$

式2 境界両面の伝達関係式

#### 4.2 実現場における解析手法の適用性検討

解析手法の適用性を確かめる目的で、解析結果と実測結果の比較を行った。

4.2.1 解析対象と解析モデル 数値解析の対象は、シールド工事現場を対象とした。この工事現場では振動ふるい機（1基）を直接囲う防音ハウス（1次防音ハウス）と、工事現場敷地全体を囲う防音ハウス（2次防音ハウス）が設置されている。2次防音ハウスの壁と1次防音ハウスは、既製のユニット型の防音壁、2次防音ハウスの屋根は鋼板折版により構築されている。

解析モデルは、Fig. 4, 5 に示す形状を作成した。モデル化した部位は、振動ふるい機、1次防音ハウス、2次防音ハウス、1次防音ハウス付近の工事設備機械（タンク、ホッパー）およびステージである。工事現場内部の他の工事設備機械、建屋、地下部は省略した。また、ほ

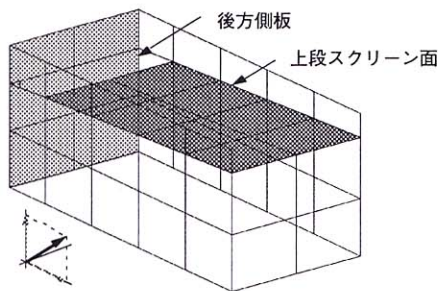


Fig. 4 解析モデル（振動ふるい機）  
Models for BEM (Vibrating Screen)

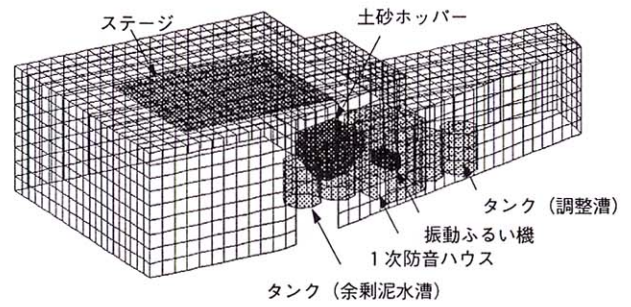


Fig. 5 解析モデル（全体モデル）  
Models for BEM (Sound Insulation House)

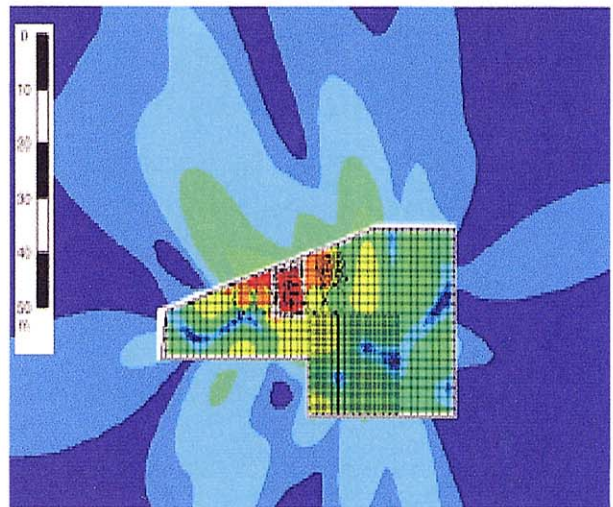


Fig. 6 解析結果  
Contour of Infra-sound (Estimations)

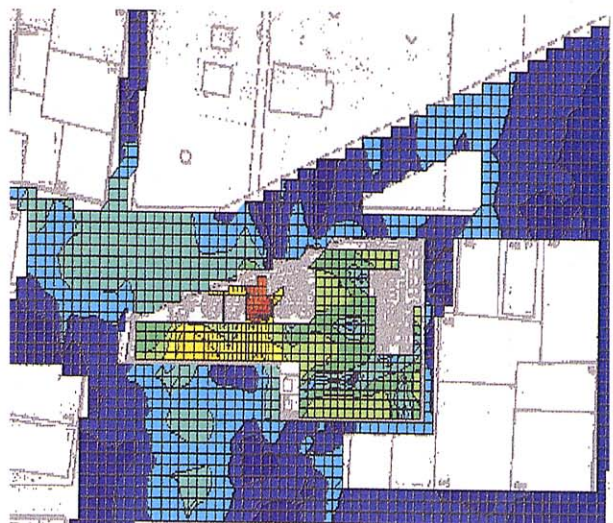


Fig. 7 実測結果  
Contour of Infra-sound (Measurements)

とんどが低層である現場周辺の建物も省略した。振動ふるい機は、Fig.4に示すように音源であるふるい本体のみをモデル化し、音の放射に有効な上段スクリーン面と後方側板に振動速度の実測値を与え、1次防音ハウスの垂直入射透過損失は15dB、2次防音ハウスの垂直入射透過損失は10dBとし、防音ハウス内部のエネルギー損失は0とした。

4.2.2 解析結果と実測結果の比較 音圧分布の解析結果をFig.6に示す。また、音圧分布の実測結果をFig.7に示す。解析結果は、実測結果と比較して、図中右側の音圧レベルが全体に大きく表れているなどの相違も見られるが、全体的な伝搬性状は比較的よく表現されているが、全体的な伝搬性状は比較的よく表現されており、実用上の精度は得られていると思われる。

### 5. 防音ハウスによる制御手法の検討

超低周波音の制御手法として、防音ハウスによる音源の放射効率の制御について検討した。ここでは、まず振動ふるい機を直接囲う防音ハウス（1次防音ハウス）の寸法の影響を検討し、その設計指針を導出する。次にシールド工事で一般的に設置される現場敷地全体を囲う防音ハウス（2次防音ハウス）の影響について検討する。

#### 5.1 1次防音ハウスによる制御

5.1.1 解析モデル 1次防音ハウスの寸法と制御効果の関係を数値シミュレーションにより検討した。Fig.8に示した防音ハウスの解析モデルで、高さと垂直入射透過損失値をパラメータとして、各条件での放射音響パワーを算出した。一般的な振動ふるい機の大きさから1次防音ハウスの高さは6m程度が下限であるので、防音ハウスの高さは最小を6.3mとした。音源の周波数は16.7Hzと20Hzについて解析を行った。なお、防音ハウス内部のエネルギー損失は0とした。

5.1.2 解析結果 音源周波数が16.7Hz（半波長10.4m）の解析結果をFig.9に示す。図中の基準放射音響パワーとは、防音ハウスのない条件の放射音響パワーである。高さが8.7mの場合には、ハウスの垂直入射透過損失を5dBから20dBに増大しても制御効果は3dBしか改善されない。高さが6.3mの場合には、12dB改善される。一方、高さを9.9mとした場合には、逆に放射音響パワーレベルはわずかに大きくなっている。

Fig.10は、音源周波数が20Hz（半波長8.5m）の場合の解析結果である。高さが6.3mの場合には、垂直入射透過損失を5dBから20dBに増大することにより制御効果は8dB改善される。この値は周波数が16.7Hzの場合に比べて4dB小さい。高さが8.7mの場合には、逆に放射音響パワーレベルが7dB大きくなっている。高さが9.9m場合には透過損失と放射音響パワーは一意的関係にない。

以上のことから1次防音ハウスの制御効果には、その

寸法が大きく関係することがわかる。これは、1次防音ハウスの寸法が音源の放射効率に大きく影響するためである。1次防音ハウスの寸法が半波長に近い場合

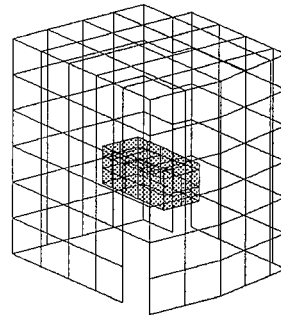


Fig.8 解析モデル (高さ8.7m)  
Models for BEM

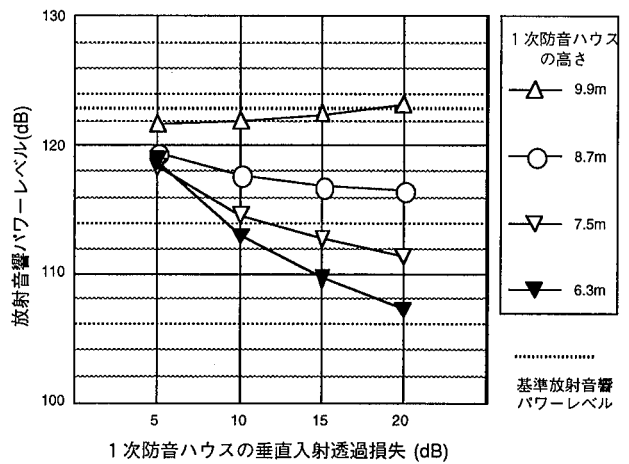


Fig.9 防音ハウスの高さで放射音響パワーレベル (16.7Hz)  
Relation between Height of Sound Insulation House and Radiation Sound Power Level (16.7Hz)

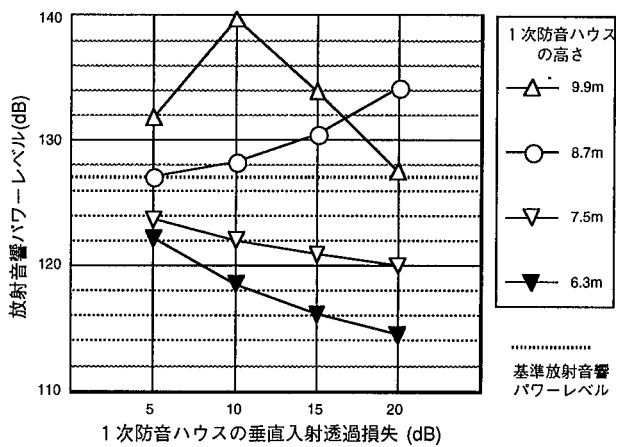


Fig.10 防音ハウスの高さで放射音響パワーレベル (20Hz)  
Relation between Height of Sound Insulation House and Radiation Sound Power Level (20Hz)

に共鳴現象によって音源の放射効率が大きくなり、遮音構造の透過損失を増大しても有効な制御効果は得られない。また、半波長より十分大きな寸法の場合には、遮音構造の透過損失の変化によってハウス内部の音圧分布が大きく変化するため、透過損失と放射音響パワーは一意とならない。半波長より十分小さな寸法の場合には、音源の放射効率は単純に小さくなり（反共鳴）、透過損失を増大することにより有効な効果を得ることができる。解析結果では、1次防音ハウスの寸法を小さくするほど大きな制御効果が得られている。また、その効果は音源周波数が低いほど大きい。

したがって、振動ふるい機から発生する超低周波音の対策に有効な1次防音ハウスは、音源の半波長より十分小さい寸法で、大きな透過損失を有する遮音構造とすることにより実現できる。また、音源周波数が低いほど大きな制御効果が得られるため、振動ふるい機の振動周波数は、土砂分離効率に影響しない範囲で低くすることが望ましい。

### 5.2 2次防音ハウスの影響

ここでは、1次防音ハウスの制御効果に対する2次防音ハウスの影響を数値シミュレーションにより検討する。

**5.2.1 解析モデル** 解析モデルをFig.11に示す。1次防音ハウスの寸法は7.2m×5.6m×6.1m(H)、2次防音ハウスの寸法は42m×13m×8.5m(H)である。防音ハウスそれぞれの透過損失と音源位置をパラメータとして、各条件での放射音響パワーを算出した。音源周波数は16.7Hzであり、防音ハウス内部のエネルギー損失は0とした。

**5.2.2 解析結果** 各条件の放射音響パワーレベルの解析結果をFig.12に示す。図中の基準放射音響パワーとは、防音ハウスのない条件の放射音響パワーである。

解析結果を2次防音ハウスの透過損失に着目すると、垂直入射透過損失が10dBの場合は、いずれの音源位置

でも、1次防音ハウスの透過損失の増大により放射音響パワーが小さくなっている。しかし、2次防音ハウスの垂直入射透過損失が22.5と30dBの場合には、AおよびBでは1次防音ハウスの透過損失の増大により放射音響パワーが小さくならない場合がある。Cでは、1次防音ハウスの透過損失増大すると放射音響パワーは小さくなっているが、その低減量は、2次防音ハウスの垂直入射透過損失が10dBの場合に比べて小さい。

音源位置に着目すると、Cの場合に最も効果が大きく、1次防音ハウスの垂直入射透過損失が20dBの場合には、基準音響放射パワーレベルとの差は約15dBである。

以上のように、2次防音ハウスの透過損失がある程度以上大きな場合には、その影響により、1次防音ハウスに対する対策が、そのまま全体の効果とならない場合がある。また、音源位置によってその影響は異なる。これは、1次防音ハウスと2次防音ハウスのカップリングした形状が音源の放射効率に関係するためである。防音ハウスを設計する際には、この影響を数値シミュレーションなどの実験的な方法により予測し、音源位置と2次防音ハウスの遮音構造を適切に選択する必要がある。

なお、2次防音ハウス内部で共鳴現象が起りにくいように、その寸法が半波長の整数倍に近い寸法とならないこと、また、開口部の位置が低周波音が問題となる可

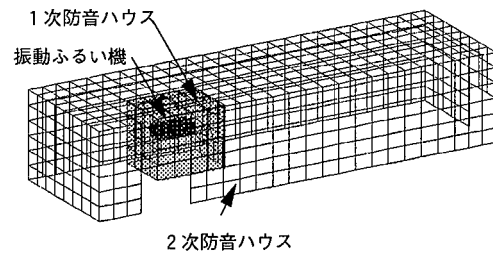


Fig.11 解析モデル Models for BEM

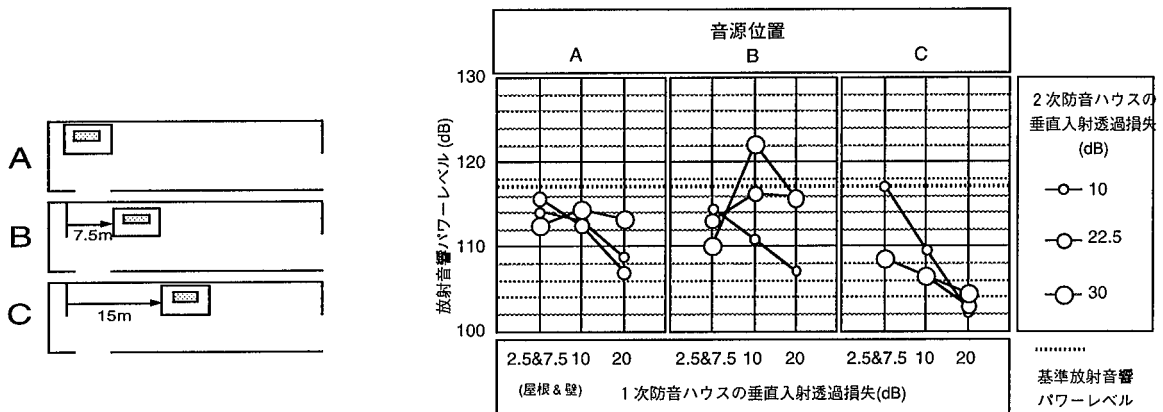


Fig.12 防音ハウスの透過損失と放射音響パワーレベル Relation between Transmission Loss of Sound Insulation House and Radiation Sound Power Level



能性のある方向とならないことは、基本計画の段階から配慮する必要がある。

## 6. 超低周波音用防音ハウスの開発

前章で述べた検討結果に基づいて超低周波音用1次防音ハウスの開発を行った。単層遮音構造の透過損失は、Fig.13に示すように、可聴周波数領域では質量則に従うが、超低周波音領域では共振もしくは剛性制御される<sup>2)</sup>。防音ハウスは、平板と比較して高剛性であり比較的軽量でもある中空鋼管で製作した。また、鋼管には小開口と一部に尾管を設けて、ハウス内部の音圧分布制御と鋼管の空洞を利用したレゾネータによるハウス内の吸音を図った。ハウス内部をPhoto1に示す。この防音ハウスを実現場に適用し、ハウス内外音圧レベル差を測定した結果は、16.125Hzで約30dBであった。

## 7. むすび

本研究では、振動ふるい機発生する超低周波音に対する対策技術を、音源の放射効率と言う既存の騒音対策技術とは異なる新たな視点から検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 低周波音伝搬予測手法として、境界要素法による数値シミュレーション手法の適用性を示した。今後、この手法は工事計画時の検討に有効であると考えられる。

2) 制御手法として、防音ハウスにより音源の放射効率を直接制御をする手法を示した。有効な制御効果を得るためには、音源の半波長より十分小さな寸法で、高遮音性能を有する防音ハウスで振動ふるい機を直接囲うことが必要である。

3) 工事現場敷地全体を囲う2次防音ハウスを設置する現場では、2次防音ハウスが1次防音ハウスの効果に影響するので、数値シミュレーションによりこの影響を確認し、適切な設計を行う必要がある。

4) 開発した超低周波音用防音ハウスは、ハウス内外音圧レベル差が約30dB(16.125Hz)得られており、従来の防音ハウスに比べて10~15dB程度大きな遮音特性が期待できる。

今後、以上の対策技術は、実際の工事に適用しながらさらに改良を加えていく予定である。

最後に、末筆ながら、振動ふるい機から発生する超低

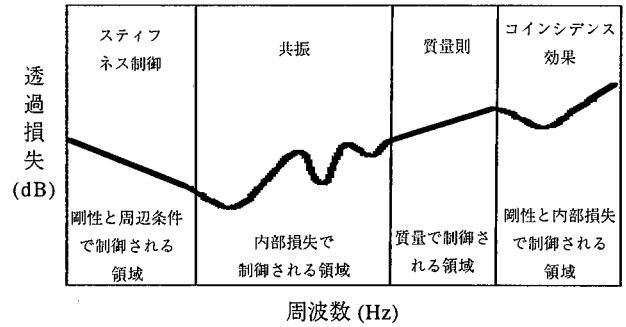


Fig.13 単層壁の透過損失  
Frequency Characteristics of Transmission Loss

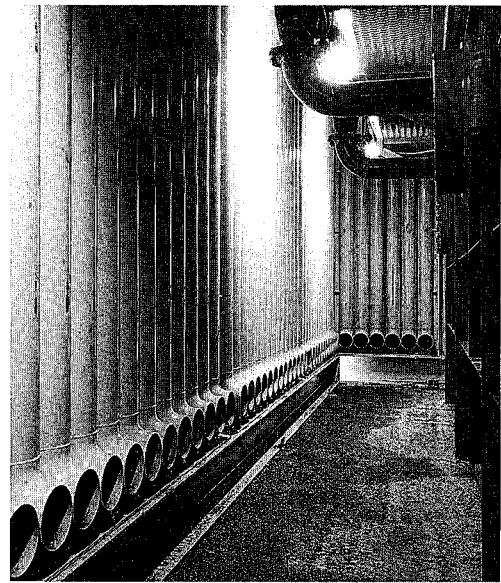


Photo 1 防音ハウス内部  
Inside of Sound Insulation House

周波音の測定にご協力いただいた工事関係者の方々に感謝いたします。なお、超低周波音用防音ハウスは、大林組「高効率土砂分離装置の研究開発グループ」による開発である。

### 参考文献

- 1) 通産省立地公害局低周波音調査委員会編；低周波音防止技術解説書，産業公害防止協会，p.1~12, 1981
- 2) 前川純一：建築・環境音響学，共立出版，p.111, 1990