

(技術資料)

騒音対策

Antipollution Measures against Undesired Noise

吉村登志雄*
Toshio Yoshimura藤波 玄*
Gen Fujinami林 信輝**
Nobuteru Hayashi田中俊光*** (工博)
Dr. Toshimitsu Tanaka木下伸一***
Shinichi Kinoshita山田隆博***
Takahiro Yamada

This paper gives an overview of noise pollution problems and basic measures to overcome such pollution. It also introduces Kobe Steel's sound experiment equipment and the analysis programs, as well as the various noise prevention and suppression measures developed.

まえがき = 鉄道・道路分野の環境保全技術は、その社会的ニーズの高まりにともない、今後ますます発展を期待されている技術のひとつである。なかでも騒音は沿線住民から対策の要望が最も多い問題として取上げられ、特に幹線新設時の住民との事前協議では、厳密な予測及び完全な対策を求められることが多い。

当社は、四半世紀前に制振鋼板を利用した新幹線鉄道橋騒音対策を実施したのをはじめ、最近では、風荷重を低減しつつ透光性を確保できる山形消音装置を開発するなど、これまで多くの鉄道・道路に関する防音技術を開発してきた。一方、苦情件数は減少傾向にあるものの、依然として、工場・建設騒音に対する対策ニーズは途絶えることがない。これらについても、当社は長年にわたり対策工事を実施してきている。

これらに対する当社の解決手法は、一貫して現場での騒音データの採集から始まり、独自のコンピュータシミュレーション及び当社設備を用いた音響実験を通じて合理的かつ有効な構造を見出し、最終的には試験施工でその妥当性を確認するものである。

騒音に関する技術は、その重要性が認識されつつあるにもかかわらず一般的には馴染みが薄いものであり、建設工学を専門とする技術者ですら敬遠しているのが実情であろう。

本稿は、騒音に関する基礎的事項、音響実験設備、解析シミュレーション技術、対策実施例を順次紹介し、騒音対策に関与される方々のお役に立てていただくとするものである。

1. 騒音¹⁾

1.1 音と騒音

騒音とは「好ましくない音」の総称であり、無い方が良くとされる音である。騒音として扱われる主要な音源には、工場騒音、建設騒音、道路交通騒音、鉄道騒音、

航空機騒音、近隣騒音がある。

「音」と「音波」という用語は混同して使用されることが多いが、「音」は音波により起こされる聴覚的感覚であり、「音波」は媒質(固体、液体、気体など)を伝わる波動である。音は鼓膜が振動することにより知覚され、人間の可聴範囲は周波数で大略 20 ~ 20 000Hz、音圧レベルでほぼ 0 ~ 120dB である。20Hz 以下の音は超低周波音と呼ばれ、音として聞かれているのか、気圧の周期的変動として身体的に感じているのか区別されにくい。

空気中を伝播する音波は、空気疎密の連続として縦波を形成し、密の部分では圧力が上昇し、疎の部分では圧力が下降することが繰り返される。この圧力変化を音圧と呼ぶが、人間の「音の感じ方」は音圧の対数とほぼ比例する。そのため、式(1)で示すような値 L_p (単位: dB) を定義し、音圧レベルと呼んでいる。

$$L_p = 20 \log (p/p_0) \dots\dots\dots (1)$$

p は音圧、 p_0 は基準の音圧 ($2 \times 10^{-5} \text{Pa}$) で、人間が聞くことができる最も小さい値である。

また、人間が感じる音の大きさは周波数によっても影響を受ける。これを補正するものが等感曲線であり、等感曲線に基づいて周波数補正を行った音圧レベルを騒音レベル L_A (A 特性音圧レベル)と呼んでいる。要するに、音圧レベルは純粋な物理量であり、騒音レベルは人間の感覚に合わせて補正した感覚量ともいうべきものである。騒音レベルの表示は音圧レベルとの混同をさけるため、dB(A) あるいは dBA と表される。

一方、騒音の多くは時間的に変動することが一般的である。変動する騒音レベルを人間の生理的・心理的反応に対応させるための指標として、等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ が利用される。これは、一定の時間ごとに騒音レベル L_{Ai} を測定し、式(2)によってエネルギー的な平均値として表した量である。

$$L_{Aeq,T} = 10 \log [1/n (10^{L_{A1}/10} + \dots + 10^{L_{An}/10})] \dots\dots\dots (2)$$

*都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部 **都市環境・エンジニアリングカンパニー 鉄構橋梁営業部 ***技術開発本部 機械研究所

1.2 吸音と遮音

騒音対策を検討する際、重要なのは吸音と遮音である。音波の吸収（吸音）とは、音波のエネルギーがほかの形のエネルギーに変換されることである。例えば、グラスウールのような多孔質の吸音材では、主として繊維間空気の振動が空気の粘性摩擦によって熱エネルギーに変換されるのである。吸音率を α 、反射率を r とすれば、

$$\alpha = 1 - r \dots\dots\dots(3)$$

である。

一方、遮音とは透過音を少なくすることで、その程度は透過率 τ や透過損失 TL で表す。透過率は、入射音のエネルギー I_i に対する透過音のエネルギー I_t の比で、式(4)により表現する。

$$\tau = I_t / I_i \dots\dots\dots(4)$$

透過損失は、この程度を dB で表そうとするものであり、式(5)のようになる。

$$TL = 10 \log (1 / \tau) \dots\dots\dots(5)$$

例えば、エネルギーが 1% だけ透過するとすれば、

$$\tau = 0.01, TL = 20 \text{dB} \text{ ということになる。}$$

2. 音響実験設備

騒音対策を検討する際、騒音源、伝搬経路、対策に使用する吸音材や遮音材の性能を的確に把握することが、まずは重要である。これらの音響特性を測定するのに必要なのが、無響室と残響室である。無響室は音の反射が無く、残響室は音の反射が非常に大きい空間を実現した室である。身近な例で説明すると、無響室は布団の中、残響室は風呂の中というイメージである。無響室のうち、床面をコンクリート製のような反射面にしたものを半無響室と呼んでいる。

また、最近では騒音レベルの低減だけでなく、「音質」に対する要望も強くなってきている。音質を評価するために必要とされる音響実験室が感応評価室である。

当社では、3つの音響実験室（半無響室・残響室・感応評価室）を使用して、多種多様な案件の騒音防止対策や音質改善に取り組んでいる。

2.1 半無響室²⁾

音波の進行を妨げる障害物の存在しない空間、または音波の進行にあたって境界からの反射がない空間を自由空間という。したがって自由空間では音源から受音点に到達する音は直接音のみであって、反射音は存在しない。

半無響室は壁・天井の反射を極力小さくした室で、半自由空間としての測定を行うことができる。写真1が半無響室である。壁・天井に吸音くさびが設置されており、幅広い周波数帯域で吸音率 0.99 を有する。この設備の主な使用目的は騒音源の音響パワーレベルの測定や模型実験による音響性能の検証・音源の探査などである。

2.2 残響室²⁾

拡散音場では、音のエネルギーの分布が室内すべての場所で一様である、室内の入射する音のエネルギーはあらゆる方向について等しい、という2つの条件をほぼ満足する。

残響室は、壁面での反射率をできるだけ大きくして、

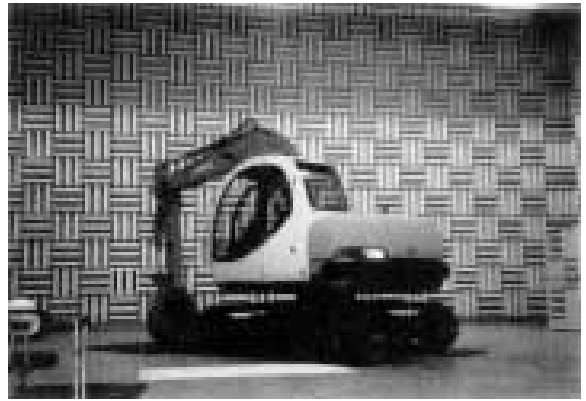


写真1 半無響室
Photo 1 Hemi-Anechoic room

拡散音場が得られるようにつくられた室で、吸音率の測定などの音響実験に使用する目的の室である。また、残響室を2つ並べてその仕切り壁に開口部をつくり、そこに吸音部材や遮音部材をセットして、透過損失の測定を行うことができる。写真2が残響室である。室の形を不整形にし、反射率を上げるために壁はモルタル仕上げのコンクリートにしてある。

2.3 感応評価室³⁾

感応評価を目的とする室が感応評価室である。写真3が感応評価室である。壁の吸音率を自由に变化でき、かつ、デジタルサウンドプロセッサを用いた音創生（音加工）システムにより、自由に音色を变化させることができる。

3. 音場解析シミュレーション技術

騒音問題の原因解明、対策検討の期間短縮化に活用するため、当社では解析シミュレーション技術の自社開発に取り組み、すでに20年以上が経過した。実設計への適用を通して多くの実績を積むとともに、計算精度の向上と同技術の多様化を進めてきた。

音場解析シミュレーション技術が広く普及した背景には、実験と比べ事前評価や音場の可視化、可聴化、音場



写真2 残響室
Photo 2 Reverberation room



写真3 感応評価室
Photo 3 Test room for sound psychological evaluation

の基本特性の抽出が容易に行える点などがある。加えて、理論に基づく思考実験を、研究者や設計者に代わって厳密で確実に実行してくれる点が挙げられる。

本章では、当社で開発してきた音場解析シミュレーション技術について紹介する。

3.1 NOICON (環境騒音予測プログラム)

NOICON は、音響エネルギーに着目した幾何音響理論に基づく騒音予測ソフトウェアである。計画段階のプラント、工場などの複数音源を対象とした環境予測において、各音源の寄与度及び必要減音量まで、きめ細かに定量的予測ができることを特徴とする。図1は、発電所の騒音レベルコンタ例である。同図において、四角で囲んだ線が音源の建物であり、音の伝搬を等圧線で示している。全境界線に対して騒音レベルが満足しているか、このコンタ図により一目でわかるようになっている。

3.2 ACOUSIS (音場解析CAEプログラム)⁴⁾

ACOUSIS は、2～3次元の音場を境界要素法により効率良く解析するソフトウェアである。これは一種の波動解析法であり、位相情報を考慮して計算する。そのため、位相情報を無視しては計算することができない超低周波問題に対しても使用できる。

図2は、建設現場で発生する超低周波音の音場解析例である。音の大きさを色で示し、赤色から青色に変化し

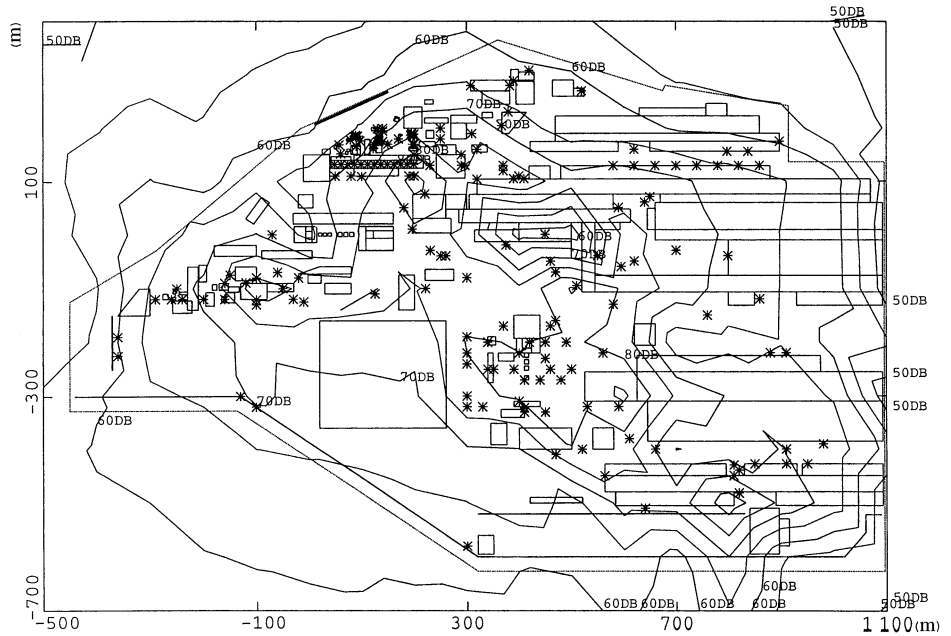


図1 発電所の騒音レベルコンタ図
Fig. 1 Contour map of sound pressure level in power station

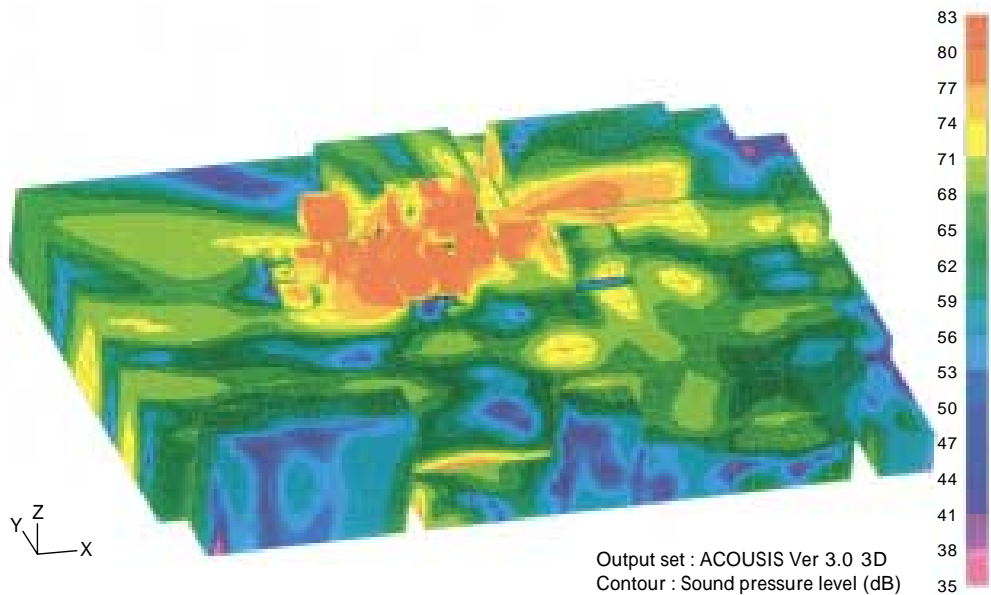


図2 超低周波の音場解析例
Fig. 2 Sound field analysis of ultralow frequency noise

ていくほど音が小さくなる。音源は赤くなっている建物で、加振周波数は16Hzである。超低周波音の音の伝搬は、この図からもわかるように必ずしも球面的な距離減衰をせず、ある方向で音波が干渉し、騒音レベルが大きくなったり小さくなったりしている。超低周波音における特徴的な現象である。

4. 防音対策事例

4.1 工場騒音

4.1.1 消音器

消音器の代表例としてよく知られているのが、自動車やバイクのマフラー（消音器）である。消音器とは、通常給排気管（またはダクト）の途中に設けてガス体の流動には支障のないようにしながら、そこを通過する騒音はなるべく低減させるように工夫されたものをいう。これを音響的にみると、一種のフィルタとなり直流に対しては流動抵抗が小さく、広い周波数範囲にわたって騒音の通過を阻止する。消音器はその構造面から、空洞型、共鳴器型、吸音型、それらの組合わせ型に分類できる。

消音器の減音量とは、管またはダクト系に取付けられた消音器の前後における騒音の減少量をいい、厳密に言えば、管路を消音器入口まで伝搬してきた音のエネルギー（入射音のエネルギー）に対する消音器出口より放射する音のエネルギー（透過音のエネルギー）のレベル差（dB）で表したものが消音器のエネルギー減衰量（transmission loss (TL)）である。また簡略化して、入口と出口における音圧レベル差で特性を表すことがあるが、この場合の特性は上述のエネルギー減衰量とは厳密には異なり、これを区別して騒音減衰量（noise reduction (NR)）と呼ぶことがある。

挿入損失とは、管またはダクト系において、その途中を切離してその間に消音器を挿入した場合に、これを挿入する前と後での管（ダクト）開口端より放射される騒音の減少量をdBで表わしたものである。これは最も実際的な特性を与えるものであるが、同型の消音器でも挿入する箇所によって特性は変化する。しかし、吸音型の場合には挿入損失とエネルギー減衰量とは等しくなることが多い。



写真4 ユニット消音器の実験状況
Photo 4 Experiment of unit silencer

写真4は、吸音ダクト型のユニット消音器の性能を半無響室内で実験検証している状況である。

4.1.2 防音パッケージ

騒音源から発生する空気音に対しては、遮音構造を音源側、伝搬経路、受音側のいずれか、あるいはそれぞれに設けるのが原則である。防音パッケージ対策とは音源を遮音構造物で包み込み、外部に音が漏れないようにするものである。

騒音対策としては有効な手段であるが、以下の点に別途注意する必要がある。

1) 騒音伝搬経路

騒音が空気伝搬ではなく、機械基礎などから生じる固体伝搬の場合には防音パッケージをすることで放射面積が増え、逆に騒音レベルが増大する場合がある。

2) 隙間の問題

遮音性能が大きくなるほど、隙間からの音漏れによる遮音性能の低下が顕著に現われてくる。しかし、実際の施工において完全に隙間をなくすことは不可能である。コーキング材、目地テープなどによる隙間の充填、遮音パネルをずらして目地を隠すなどの工法を採用する必要がある。

当社では、防音設計に加えて機械メーカーとしての経験を生かし、これまでに様々な用途の防音パッケージを製作してきた。その実施例を写真5に示す。押込送風機から発生する騒音を低減するために、設備全体を防音カバーで覆った例である。

4.1.3 防音ラギング

配管、ダクト類の細長い設備や発電用ボイラのプロアのように大容量広面積の設備の場合、防音パッケージで包み込むことは困難である。そのような場合は設備自体に直接、吸音材、遮音材を巻付けたり、または貼付けて騒音源を包み込み、騒音を低減する防音工法である。

写真6は、プロア本体から放射させる音を放射面全体に防音ラギング対策を行い、騒音を低減させた実施例である。

4.2 建設騒音

シールド工事における振動ふるい機は、20Hz以下の周波数で加振され、超低周波問題を引起こす場合が多い。超低周波音対策は非常に難しく、近年、超低周波音の問題は道路橋、鉄道橋、工場などで多種多様な形で大きな問題になっている。当社では、独自技術でこの超低周波

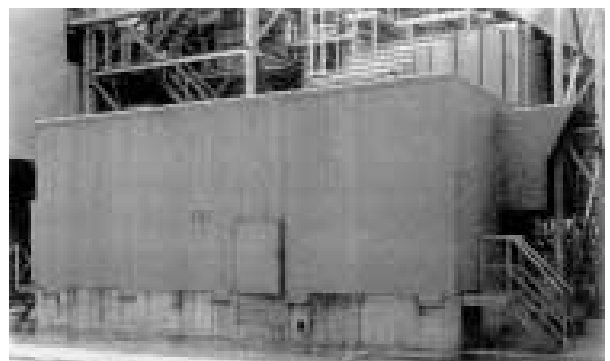


写真5 防音カバー
Photo 5 Soundproof covering

音の騒音対策にも積極的に取り組んでいる。

写真7は振動ふるい機用の防音カバーで、カバーの内面には超低周波領域において効果のある吸音構造体を採用している。

4.3 鉄道・道路騒音⁵⁾

新幹線の速度向上や高速道路の交通量増大に見られる近年の交通システムの発展にともない、騒音の発生量も増加している。このような状況の中で、音源の側（鉄道車両や自動車）と地上設備の側（防音壁、軌道、路面など）とで騒音低減が精力的に取り組まれてきている。

ここでは、これまでに開発し実用化した主要な案件とその際に活用した自社開発の要素技術の概要について、車外の沿線や沿道を対象とした住環境での低減技術を紹介する。



写真6 防音ラギング
Photo 6 Soundproof lagging

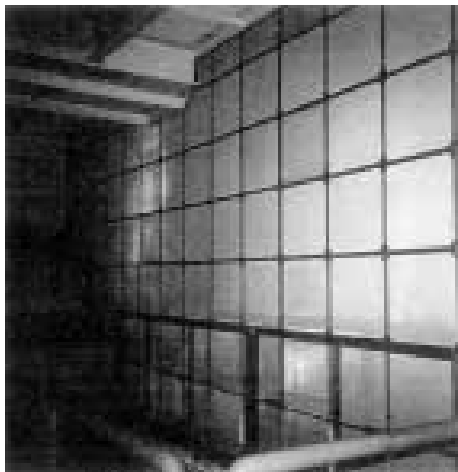


写真7 超低周波用防音カバー
Photo 7 Soundproof covering for ultralow frequency noise

4.3.1 張出し型防音壁

写真8に張出し型防音壁の全景を示す。この防音壁は、新幹線の騒音対策に対して開発した防音壁である。張出し部を設けることにより、転動音（車輪部からの音）と集電系音（パンタグラフからの音）の低減とを同時に狙ったものである。車窓から景色を見る際に妨げにならない範囲で張出し部の長さや角度を調整して最適形状を定めている。その検討には音場数値シミュレーション技術を活用し、最適化をはかった。図3に集電系音源の代表位置を架線とパンタグラフとの接点としたときの音圧分布の計算結果例を示す。

4.3.2 山形消音装置

車内から見る景色像の明るさの改善と消音装置自体の風荷重の低減とを狙い、開口率50%の消音装置を開発した。開口による遮音性能の低下を山形形状による音波干渉作用と吸音面の効果的な配置とにより補い、透明板と同等以上の防音性能を確保した。また、残像効果により透明板と遜色無い透視性がえられている。

開口部と消音壁との開口比率や吸音付加部位と防音量との関係を、2次元音場シミュレーション結果に基づき定量化し、実設計に反映した。図4に音圧分布の計算結



写真8 張出し型防音壁
Photo 8 Double sound barrier with extended plate and directivity plate

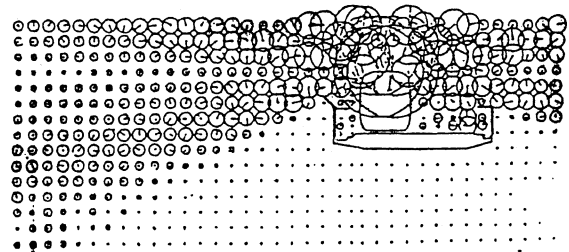
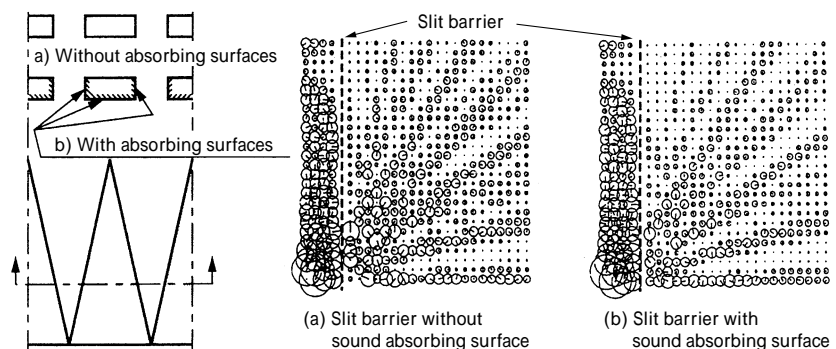


図3 音圧分布の例（張出し型防音壁）
Fig. 3 Sound pressure distribution in case of double sound barrier with extended plate and directivity plate

図4 音圧分布の例（山形消音装置）

Fig. 4 Sound pressure distribution in case of mountain shaped noise barrier



果の一例を示す。同図では、左下位置に音源を配置し、消音壁（破線部）の外側空間の2次元音場が同図破線の右部分になる。干渉効果のみの場合にくらべ、同右図に示すように個々の消音壁の3面に吸音性を与えることにより、より低騒音化が可能なことがわかる。

写真9は新幹線で適用された代表例、写真10は道路防音で適用された代表例である。また、最近では写真11に示すような歩車道分離用の低層山形消音装置の実用化に向けて取り組んでいる。

4.3.3 裏面吸音板

大都市やその周辺の道路では多層構造の道路が多く、下層の道路を走行する自動車騒音が上層の高架橋道路の裏面で反射され、沿道の騒音を増加させている。

当社ではこのような騒音に対して、吸音板を用いた騒音低減技術の開発を進めてきた。図5に示すように、鋼桁や床版裏面からの固体音を取囲んで遮蔽するとともに、下層の道路からの自動車騒音を遮蔽体下面で吸音する。図6は、一般道路と高架橋とが並んでいる道路騒音の音場解析例である。一般道路を走行する自動車を音源とし、その音が高架橋裏面に反射してどのように音が伝播するかを解析している。

写真12に裏面吸音板の施工例を示す。

4.3.4 桁カバー

図5において下層の道路がない場合、高架橋裏面での反射音は存在せず、鋼桁や床版裏面からの構造物音のみが騒音源となる。このような場合は、鋼桁や床版裏面を

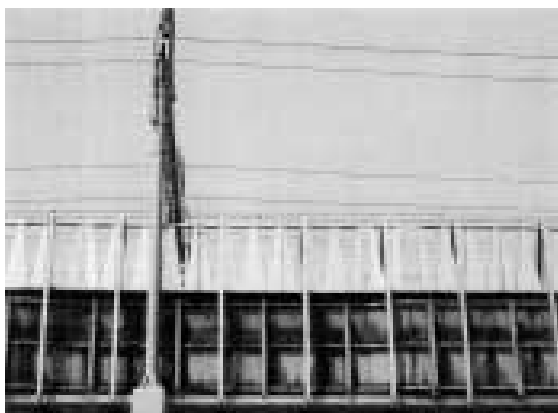


写真9 山形消音装置（新幹線）
Photo 9 Mountain shaped noise barrier for Shinkansen

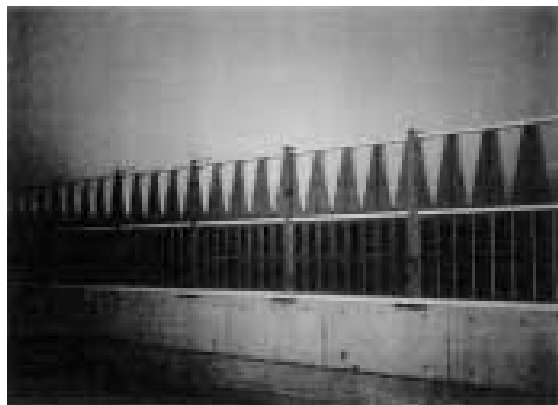


写真10 山形消音装置（高架道路）
Photo 10 Mountain shaped noise barrier for viaduct

遮音体で取囲んで音を遮蔽することが、一般的な騒音対策ある。

この構造物音対策において、当社では前項の裏面吸音板技術を生かし、桁カバーの製品開発に取り組んできた。桁カバーによる構造物音の遮音性能を評価するために、当社大型半響室内に実物大の高架道路模型を設置して確認実験を行った（写真13）。その結果、構造物音に対して11～14dBの遮音性能があり、桁カバーが有効である。



写真11 低層山形消音装置（歩車道分離）
Photo 11 Low mountain shaped noise barrier to separate sidewalk

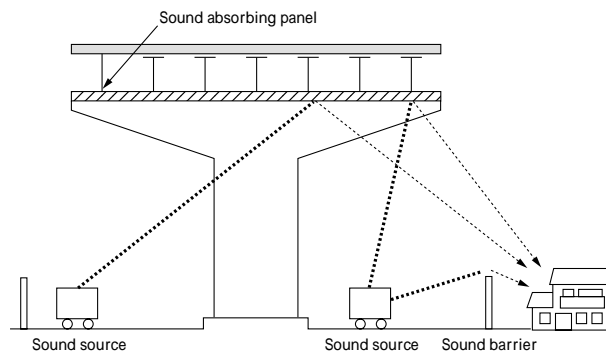


図5 裏面吸音板の概念図
Fig. 5 Schematic model of sound absorbing panel under viaduct

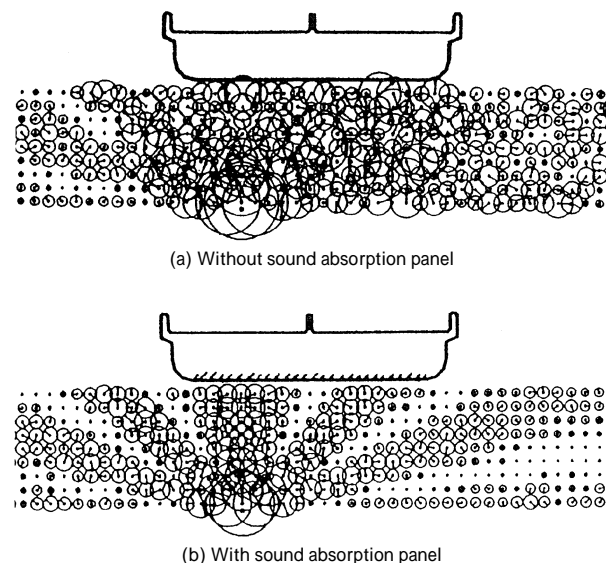


図6 音圧分布（裏面吸音板）
Fig. 6 Sound pressure distribution in case of sound absorbing panel under viaduct



写真12 裏面吸音板
Photo 12 Sound absorbing panel under viaduct



写真14 桁カバー（鉄道橋）
Photo 14 Soundproof covering for railroad bridge

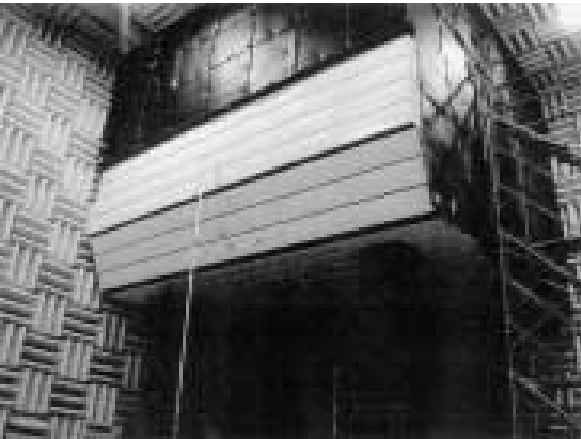


写真13 桁カバー実験状況
Photo 13 Experiment of soundproof covering for bridge

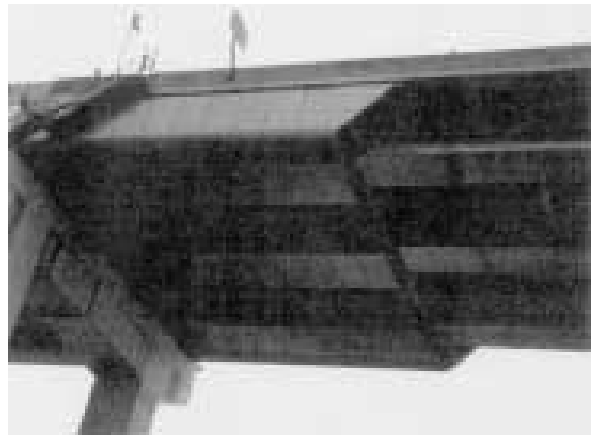


写真15 桁カバー（高架道路）
Photo 15 Soundproof covering for viaduct

ることを確認した。写真 14（鉄道橋梁）と写真 15（高速道路高架橋）に現在までに手掛けてきた桁カバーの施工例を示す。

むすび=以上紹介したように、隙間がある防音壁，アスファルト（瀝青）を内部塗布した遮音材など，当社はユニークかつ独自の製品開発を行ってきたが，この背景にはコアとなる音響技術の周辺に，構造解析，橋梁設計，素材製造・加工の技術を集合させた総合力に担うことが多い。例えば，近年よく話題となる超低周波音（空気振動）問題の解決は，音響技術と構造解析技術の両者を自由に行き来できる環境でなければ進捗しないものと思われる。

最近の多種多様な要求に応じた防音関連の製品開発には，幅広い異種技術の集団で取組むことが今後ますます肝要であろうと考えている。当社は今後もこの考えを押し

し広め新製品の開発を進めていく所存である。

最後に各製品の試験施工などに多大なる協力とご指導を頂いた各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)産業環境管理協会：三訂・公害防止の技術と法規（騒音編），1995年。
- 2) (社)日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック，1982年。
- 3) 樽山健児ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol 41，No.2（1991）p.36。
- 4) 田中俊光ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol 51，No.3（2001）p.58。
- 5) 田中俊光ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol 51，No.2（2001）p.46。