

土木研究所資料

低周波空気振動の実態

昭和58年 3 月

建設省土木研究所

道路部交通環境研究室

序

航空機、工場、空調機など種々な原因から低周波空気振動が発生しており、この現象について土木研究所においては、道路橋を対象として調査を実施しつつある。橋梁の動的挙動、距離減衰、風の影響、回折など非常に多くの要因が関係してくる複雑な現象であり、未解明な部分が多い。

本報告書は、低周波空気振動という現象をより正確に理解してもらうために、これまでの調査をもとに、主としてこの現象の実態面から簡潔に取りまとめたものである。

昭和 58 年 3 月

交通環境研究室 足 立 義 雄
石 田 稔
日名子 信 広

目 次

1. 一般的事項	1
2. 種々の発生源と発生レベル	3
3. 道路橋と低周波空気振動	9
4. 測定方法	16

1. 一般事項

人間の可聴周波数範囲はおおよそ 20 Hz から 20 KHz までとされており、その 20 Hz から 20 KHz までの周波数範囲の音を可聴音、 20 KHz 以上の周波数範囲の音を超音波といっている。低周波空気振動の周波数範囲は、国内ではまだ定義されていない。1973年のパリにおける Infrasound に関するシンポジウムでは $0.1\text{ Hz} \sim 20\text{ Hz}$ とされているが、もっと高い 100 Hz 程度の周波数範囲を含めたものを、低周波空気振動として取扱うこともある。この場合、可聴域 20 Hz 以下のものを超低周波音、可聴範囲のものを低周波騒音と呼ぶこともある。このようにわが国において低周波空気振動の範囲は明確にされていないが、この資料ではとりあえず 125 Hz 程度までの周波数範囲を含めて取扱った。

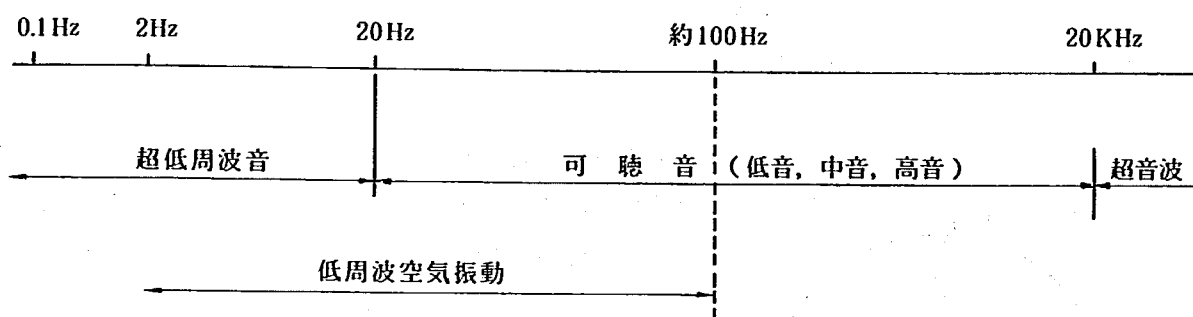


図 1 - 1 低周波空気振動の範囲

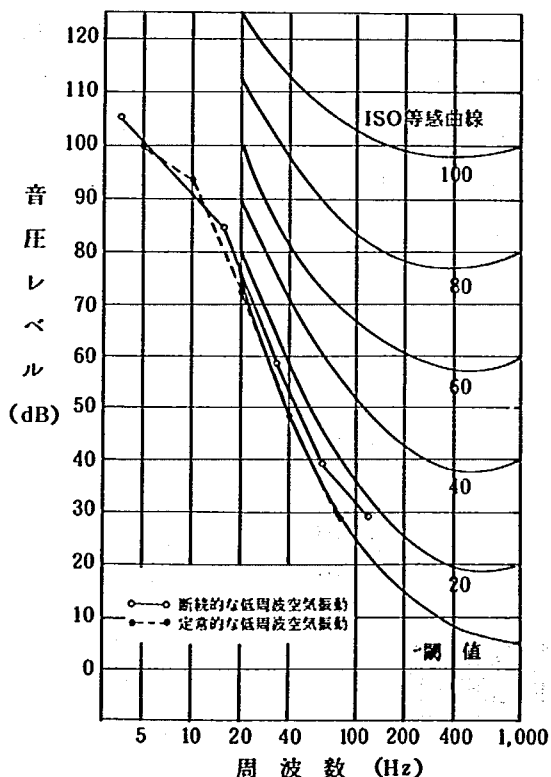


図 1 - 2 低周波空気振動の感覚閾値

低周波空気振動の人体への影響については、あきらかにされていないが、被験者曝露実験による感覚閾値の測定結果は、図 1 - 2 のようになっている。感覚閾値とは、人間が感じることでできる最低の値である。周波数が低くなるにつれて、感知できる最低の音圧レベルが急激に増加する。

20 Hz 以下の超低周波音域においては、 $80 \sim 100\text{ dB}$ 位の音圧でなければ人体には感じなく、低周波空気振動への感知がにぶくなるといえよう。

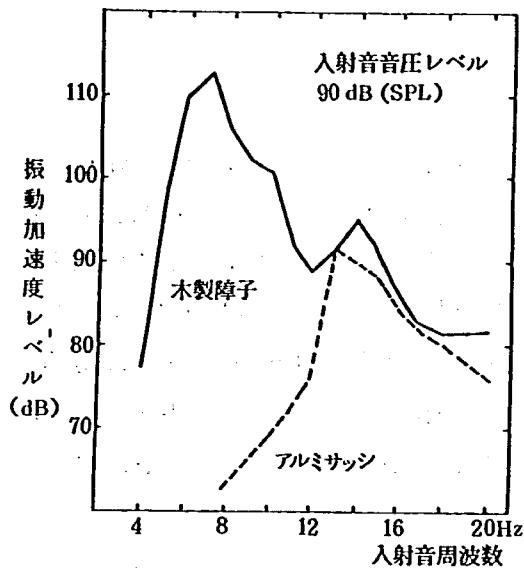
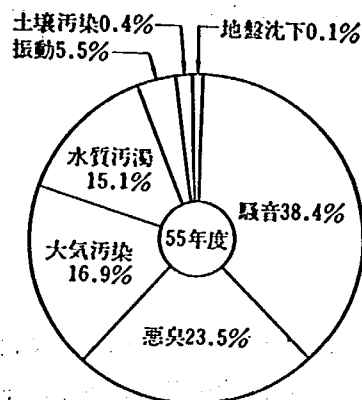


図1-3 建具のがたつき測定例

低周波空気振動は広範囲に存在するが、これが公害として認識されるのは、低周波空気振動そのものだけではなく、家屋の戸・障子のがたつきなどによるものが多い。戸・障子のがたつきの調査の一例として超低周波音域の空気振動を音圧レベル90dBで入射させたときの木製障子、アルミサッシの振動加速度レベルを図1-3に示す²⁾。

この測定に用いた木製障子では7Hz、アルミサッシでは13Hz前後とある特定の周波数の空気振動を与えられたとき、がたつきが大きくなる。



(備考) 公害等調整委員会調べ

図1-4 公害苦情の種類別件数構成 (典型7公害)

図1-4に公害苦情の種類別件数構成を示す³⁾。この図は典型的な7公害(騒音、悪臭、大気汚染、水質汚濁、振動、土壌汚染、地盤沈下)についての苦情件数の占める割合を示したものである。この図にさらに低周波空気振動への苦情を加えてみると、低周波空気振動への苦情の割合は全体の0.1%程度にすぎない。低周波空気振動への苦情件数の内訳(図1-5)をみると、数年前は航空機と工場・事業場に対しての苦情が大部分を占めていたのに対して最近では工場・事業場に対しての苦情が大部分を占めるようになってきている。道路交通に対する苦情は、全体の数%程度(55年では3件)である。

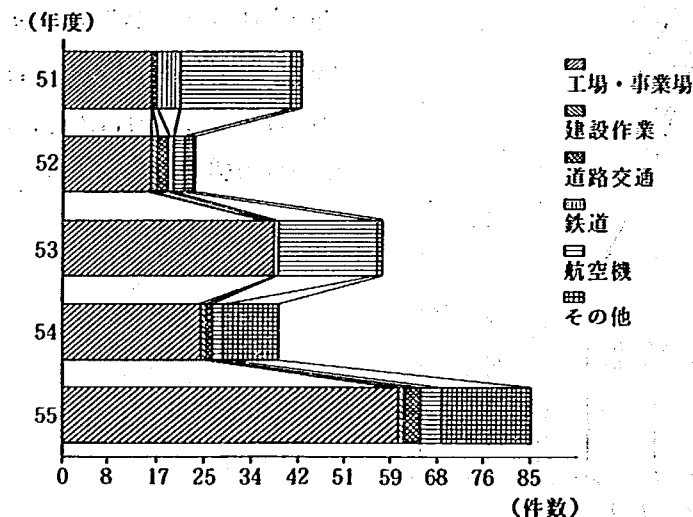


図1-5 低周波空気振動の苦情件数

2. 種々の発生源と発生レベル

低周波空気振動は、物体の運動に起因する現象であるので、物体を運動させる条件さえあれば発生し、実際に大きさの違いこそあれ我々の身の回りに存在する。

低周波空気振動はいろいろな原因により発生しており、たとえば自然現象では、海の波・風・雷・地震など、人工的なものとしては航空機・船舶・自動車・鉄道・工場機械などである。また特別なものとしては、爆発・ダムの放流・橋梁などもある。

以下にその主たる発生源を、発生条件の違いによって列記する。

自然現象から発生するもの……………波・風・雷・噴火・地震・磁気嵐

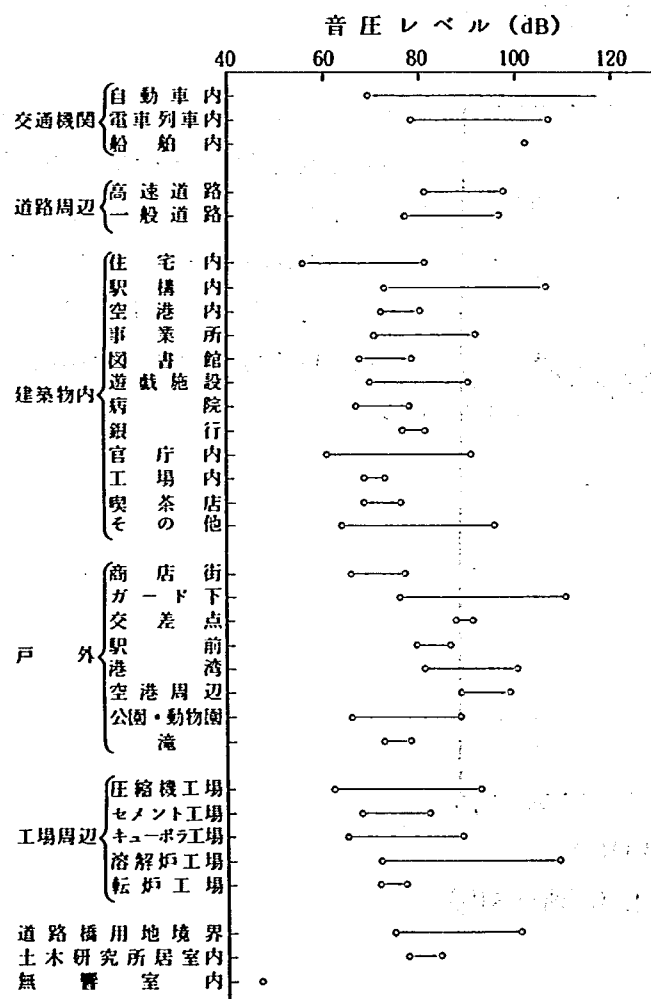
人工物から発生するもの

物体の振動によるもの……………振動コンベア・振動ふるい

流体の運動によるもの……………航空機・送風機

圧縮波によるもの……………発破・鉄道トンネル

燃焼によるもの……………ボイラ・バーナ



低周波空気振動の実態を把握するために、いろいろな場所でどの程度の音圧レベルが発生するのかを4で示した方法にもとづいて実測した結果が、図2-1である。

以下若干の例をあげて、さまざまな場所の低周波空気振動についてみる。

図2-1 低周波空気振動の音圧レベル一覧

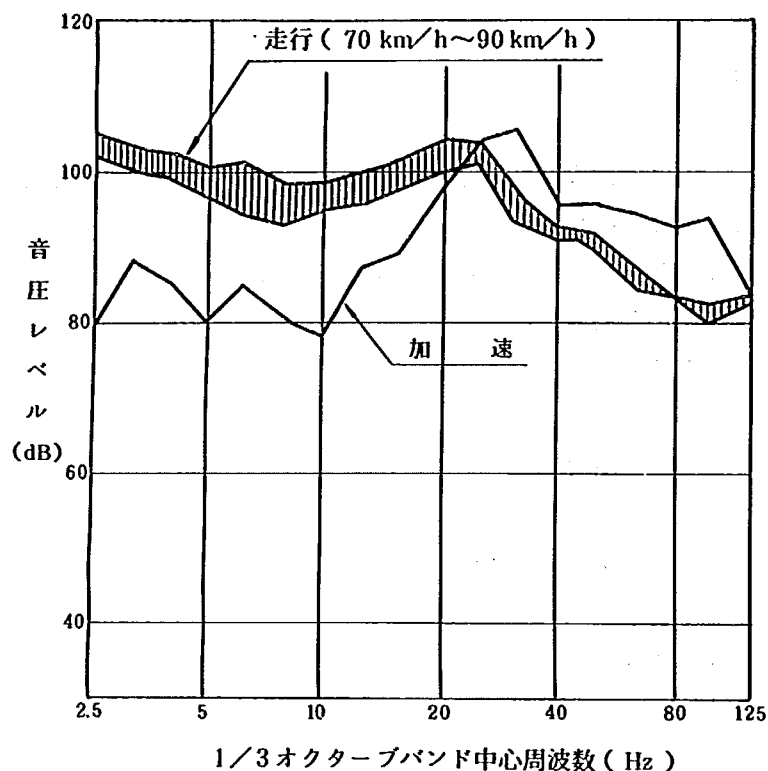


図 2 - 2 低周波空気振動の周波数分析結果 (乗用車内)

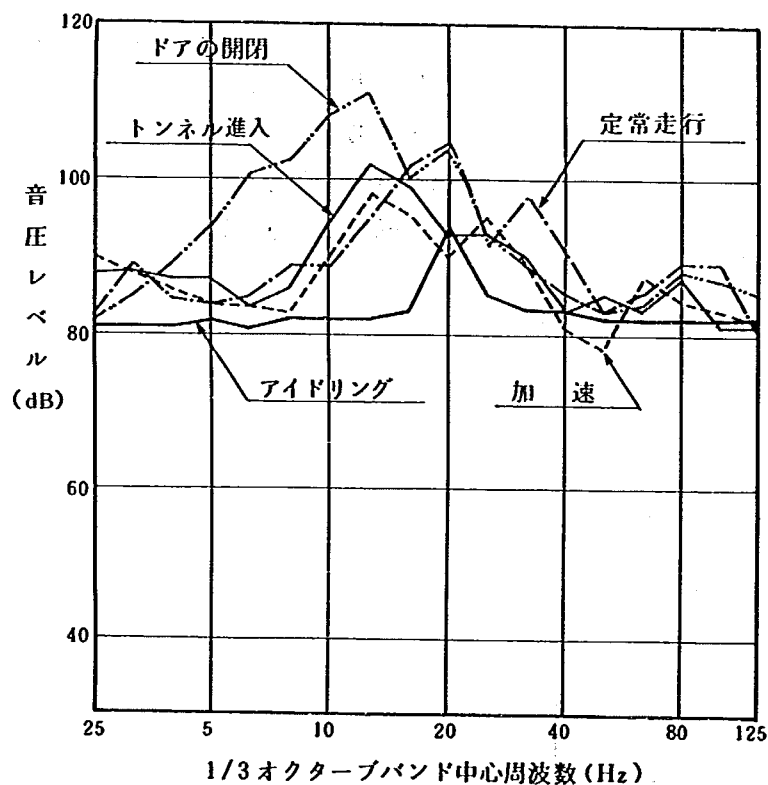


図 2 - 3 低周波空気振動の周波数分析結果 (高速バス内)

図 2 - 2 は、窓が開いた状態で高速走行している乗用車内で発生する低周波空気振動の周波数別音圧レベルを、助手席で測定したものである。

70 ~ 90 km/h で走行した時の低周波空気振動を斜線で示したが、約 40 Hz 以下の周波数で高い音圧レベルとなっている。

窓を閉じた状態においては、窓が開いた状態での低周波空気振動の音圧レベルより、10 数 dB 程小さい値となっている。

図 2 - 3 は、高速バス内後部窓付近において低周波空気振動をドアの開閉時、アイドリング時、加速時、走行時、トンネル進入時について測定したものである。特にドアの開閉時において、超低周波域で高い音圧レベルが生じている。

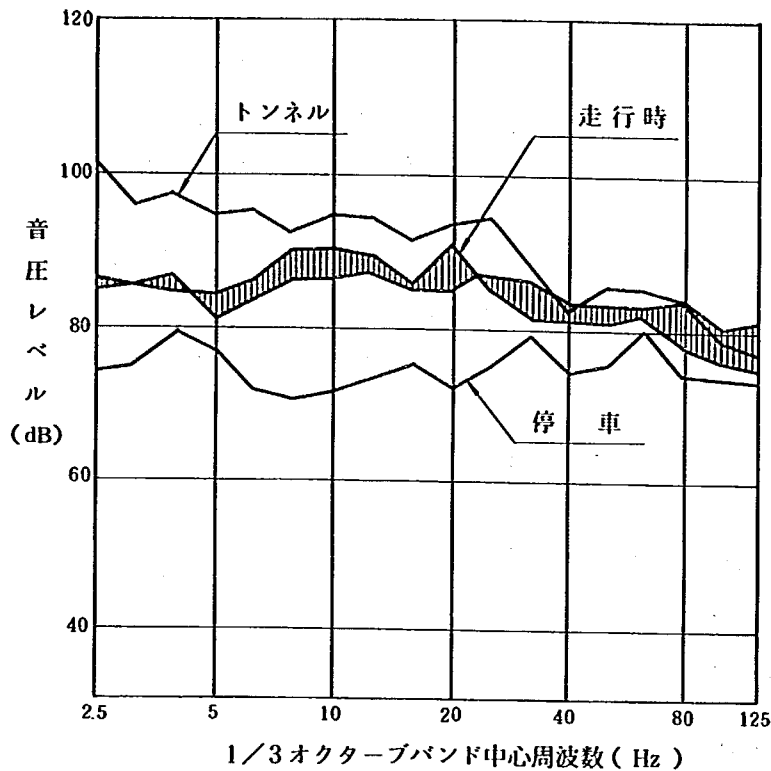


図 2-4 低周波空気振動の周波数分析結果 (新幹線内)

図 2-4 は、新幹線車両内の中央で窓側において、低周波空気振動を測定したものである。走行時の斜線は、走行時に測定された値の上下限値を範囲として示した。

トンネル内に進入すると圧縮波による影響がでて、音圧レベルが特に低い周波域において上昇する。

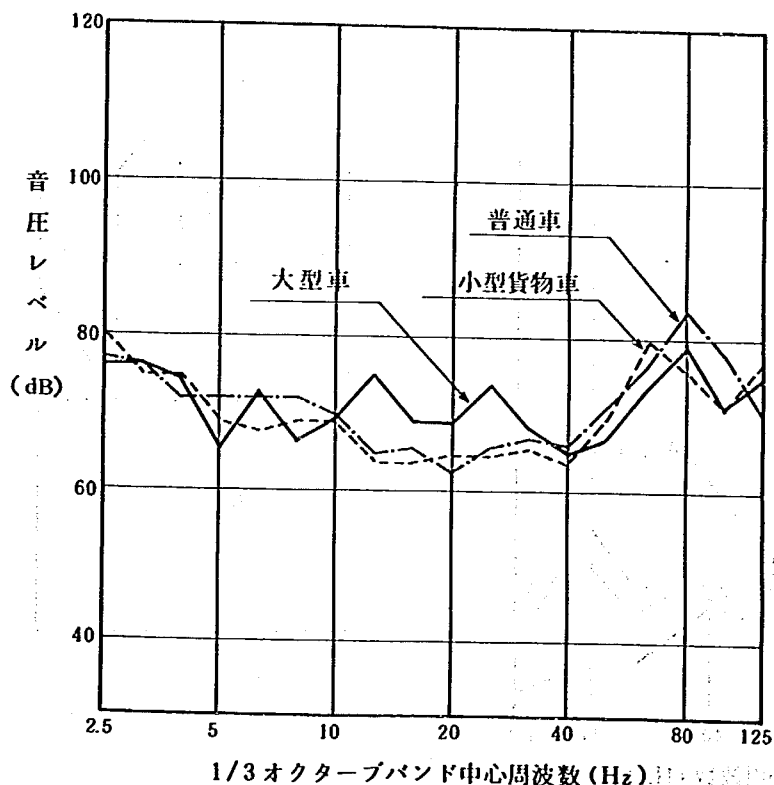


図 2-5 低周波空気振動の周波数分析結果 (一般道路)

図 2-5 は、2 車線道路の道路端から 2.2 m 離れた地点で、大型車、普通車、小型貨物車が通過した際に発生する低周波空気振動を測定したものである。

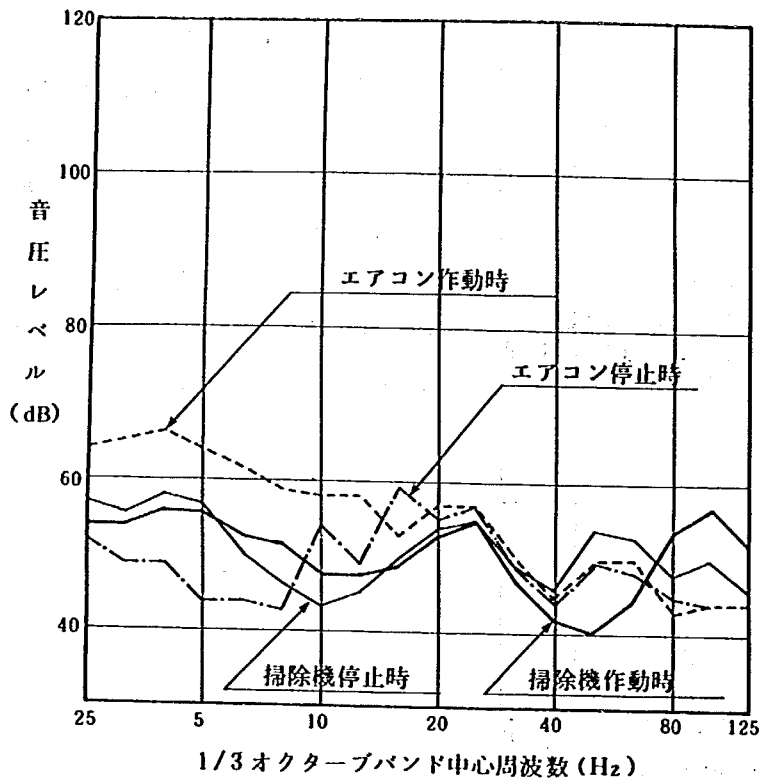


図 2-6 低周波空気振動の周波数分析結果 (住宅内)

図 2-6 は、鉄筋コンクリート造の 8 階において、エアコン、掃除機から発生する低周波空気振動を、それぞれの機械より数 10 cm 離れた地点で測定したものである。

エアコン、掃除機の両方とも、空気の移動を伴うものであるが、エアコンの方が高い音圧レベルを示している。

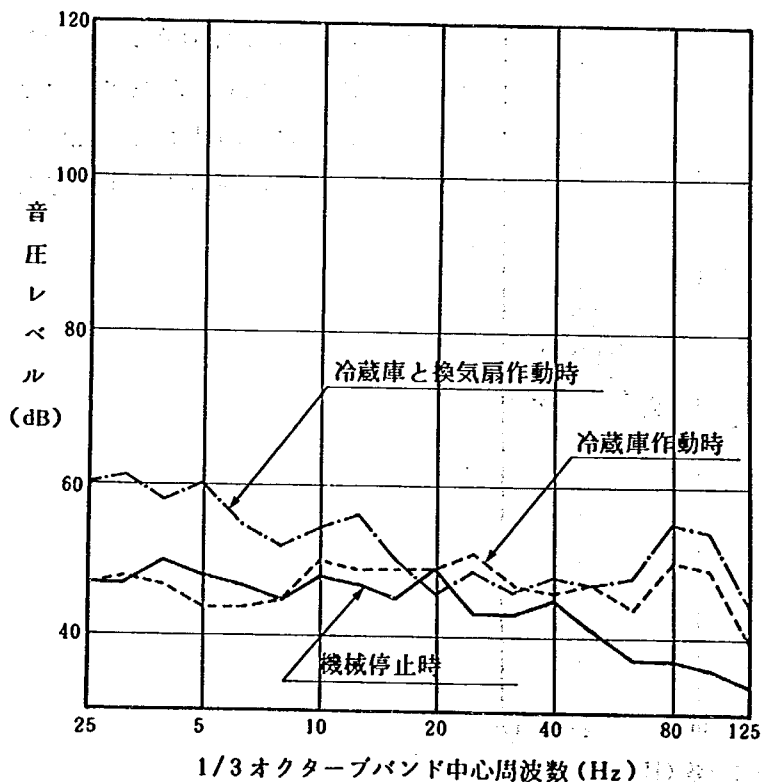
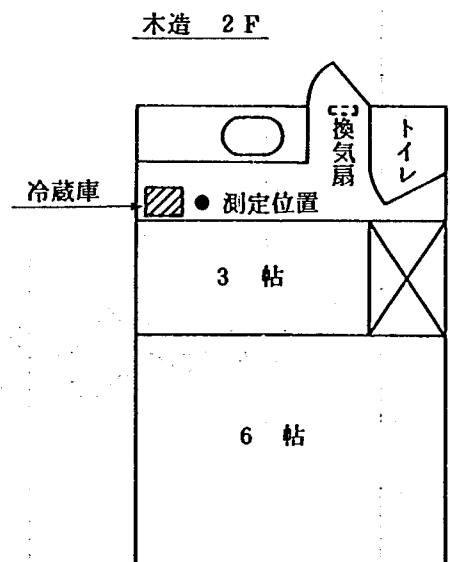


図 2-7 低周波空気振動の周波数分析結果 (住宅内)

図 2-7 は、木造 2 階において冷蔵庫、換気扇から発生する低周波空気振動を測定したものである。冷蔵庫は物体振動によるもので、換気扇は空気の移動に伴うものである。



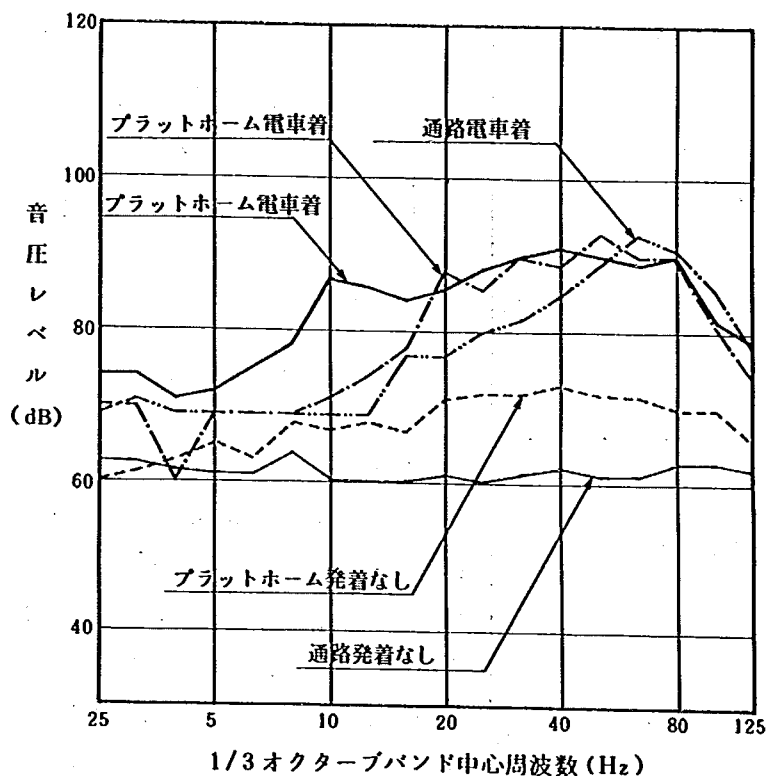


図 2-8 低周波空気振動の周波数分析結果 (駅構内)

図 2-8 は、駅構内で電車の発着による低周波空気振動を、プラットフォームや通路で測定したものである。電車が着くと音圧レベルがかなり上昇している。

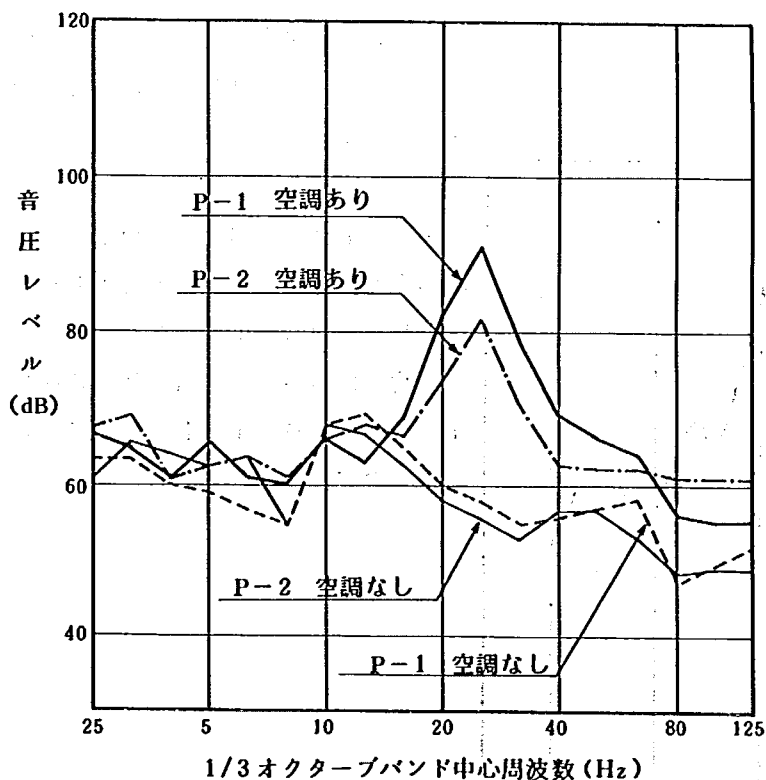
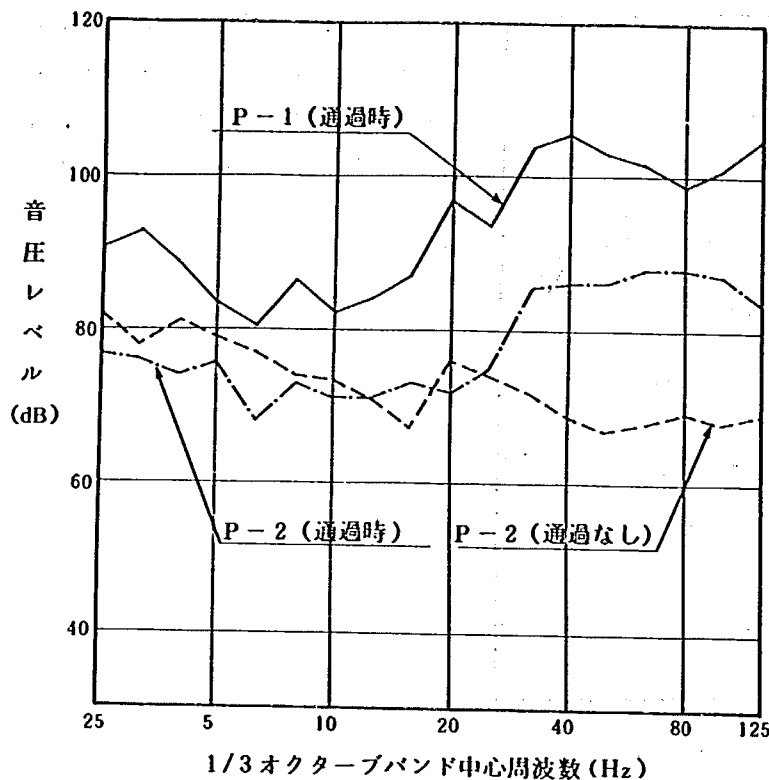


図 2-9 低周波空気振動の周波数分析結果 (事業所内)

図 2-9 は、一般建築物 (事業所) 内で空調を作動したとき、しない時の低周波空気振動の音圧レベルを測定したものである。なお P-2 は換気ダクトのすぐそばで、P-1 は P-2 より 30 cm 離れた地点で測定した。

空調の有無による低周波空気振動の音圧レベルの違いが 20 数 Hz において顕著にあらわれている。



1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)
図 2 - 10(a) 低周波空気振動の周波数
分析結果 (鉄道橋下)

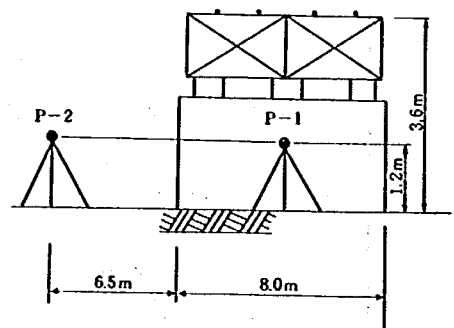
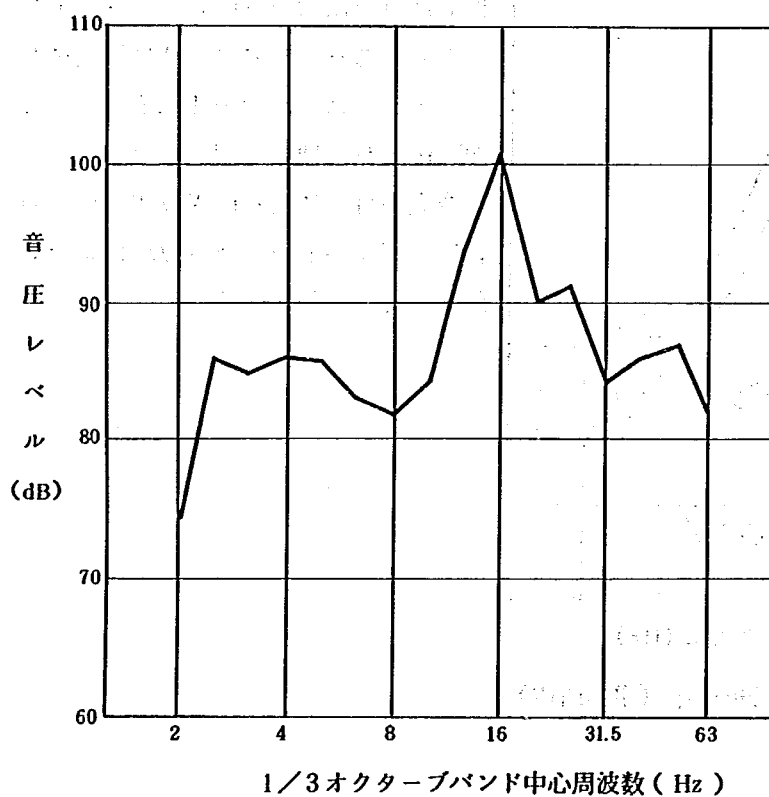


図 2 - 10(b) 測定位置

図 2 - 10(a)は、鉄道橋下で測定した低周波空気振動の一例である。

P - 1 は図 2 - 10(b)のように鉄道橋真下において地上から 1.2 m の高さの点で測定したものであり、P - 2 は鉄道橋端より 6.5 m 離れた地上から 1.2 m の高さの点で測定したものである。鉄道橋真下の点においては、電車通過時にかなり高い音圧レベルが記録されている。鉄道橋より 6.5 m 離れた点(P - 2)で電車通過時と通過なしとを比べると、20 数 Hz 以上において音圧レベルが相違する。



1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)
図 2 - 11 低周波空気振動の周波数分析結果 (工場内)

図 2 - 11 は、工場の一例として溶解炉をもつ工場から発生する低周波空気振動の周波数帯別音圧レベルである。

溶解炉は電気炉で溶解炉に通電中に、工場内で炉より 5 m 離れた地点で測定したものである。

3. 道路橋と低周波空気振動

これまで低周波空気振動の実態についていろいろな場所での低周波空気振動レベルについてみてきた。以下では道路橋から発生する低周波空気振動について説明する。

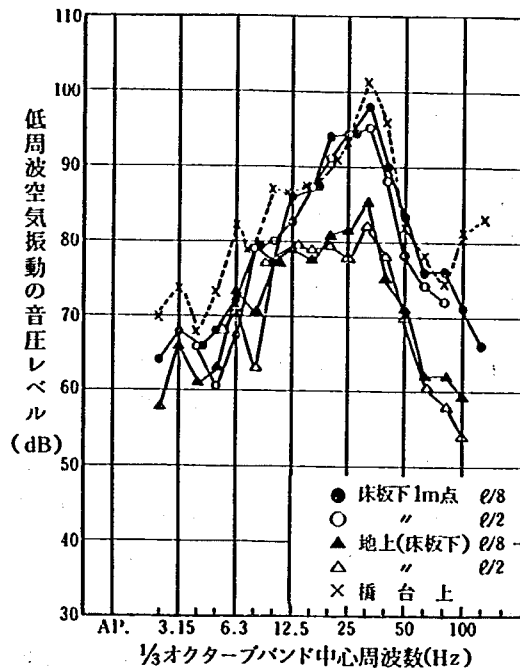


図3-1 測定点による周波数特性の違い(25t, 50km/h)

低周波空気振動の周波数特性について、測定点で比較したものを図3-1に示す。これは、車両重量25t、車両速度50km/hの条件で走行した時の測定結果である。床版下1m点の周波数特性は、橋梁振動が31.5Hzにおいて卓越する周波数特性を持っているため、その影響を受けて31.5Hzバンドの周波数成分に卓越がみられる。地上の測定点においてはその影響が薄れ、12.5Hz～40Hzバンドで広帯域な周波数特性となる。

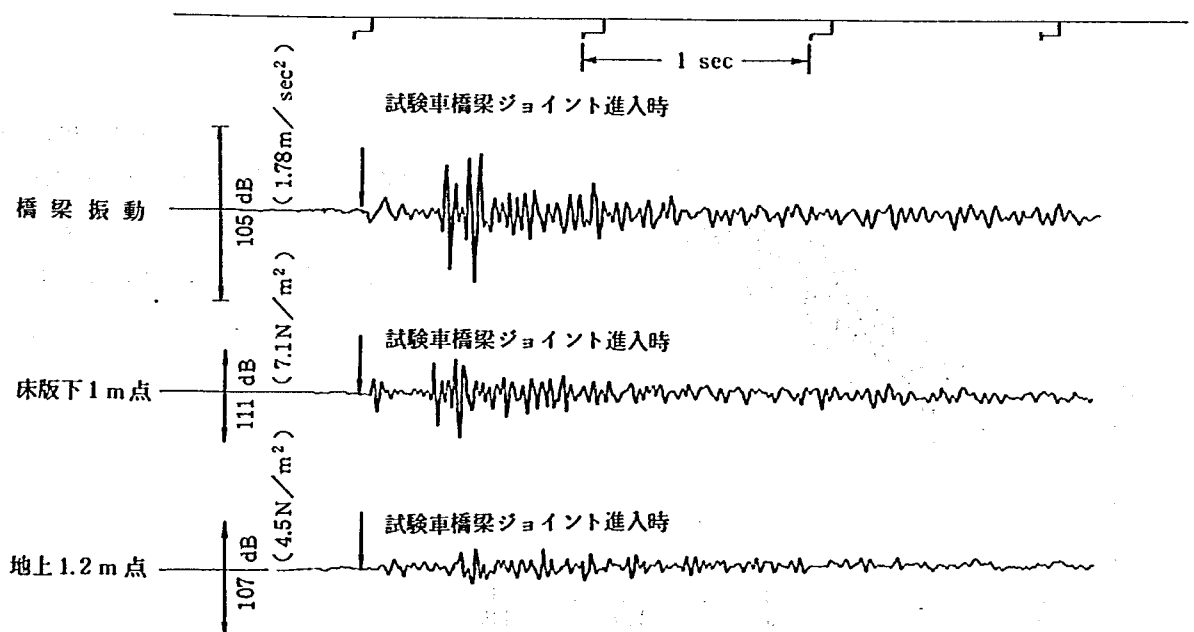


図3-2 低周波空気振動の音圧波形

図3-2は、橋梁振動と低周波空気振動の音圧波形を橋梁の床版下1m点と地上1.2m点で測定したものである。床版下1m点の音圧波形は、橋梁振動によく対応して発生している。それに対して地上1.2m点では床版下1m点に比べ衝撃性は緩和され、音圧波形の継続時間は長くなる。

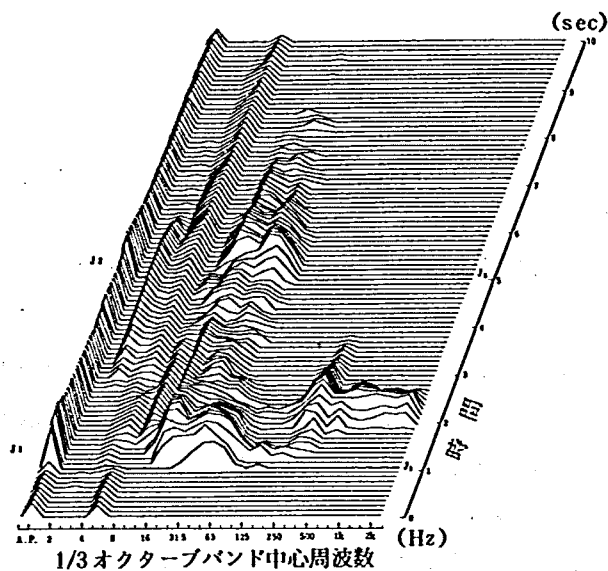


図 3-3 車両走行による橋梁振動の
時間的変動

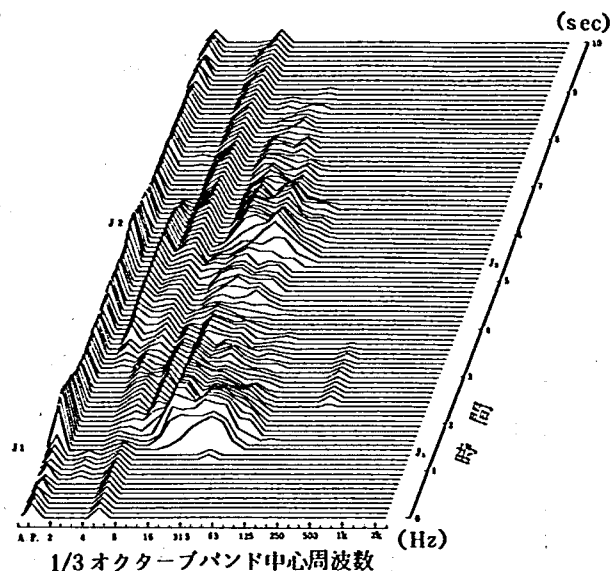


図 3-4 車両走行による低周波
空気振動の時間的変動

橋梁振動と低周波空気振動との対応をみるために、車両重量 25.2 t で 70 km/h 走行時において橋梁の 1/4 の位置点における橋梁振動とその直下の低周波空気振動の時間的変化を、ジョイント J_1 進入前からジョイント J_2 通過後までにわたって記録した結果が、図 3-3、図 3-4 である。図 3-3 は、 $\ell/4$ 測定点 (ℓ : 橋長) における橋梁振動の周波数特性であり、図 3-4 は同測定点の 1 m 直下の測定点における低周波空気振動の周波数特性で、図 3-3 に対応するものである。両図を比較すると、低周波空気振動の発生およびそのスペクトルは橋梁振動と非常によく対応している。ただし、125 Hz 以上の高い周波数領域においては橋梁振動は発生しているが、それは低周波空気振動に変換していない。

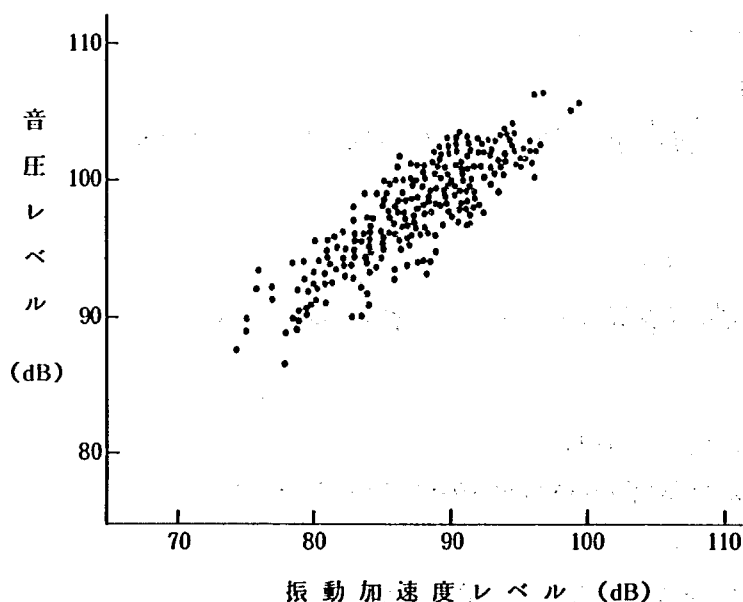


図 3-5 は、橋梁の床版下 1 m 点の低周波空気振動とその真上の橋梁振動とのレベル関係を対応させたものである。その対応は一定の関係のようにみえるが、かなりのばらつきが生じている。

図 3-5 橋梁振動と低周波空気振動とのレベル関係

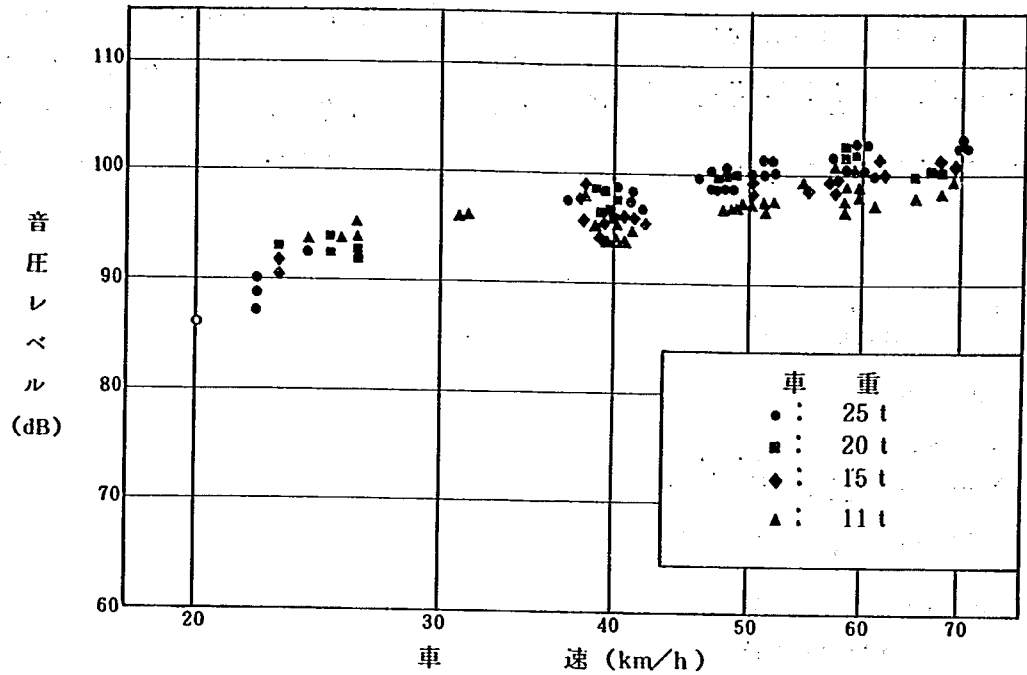


図3-6 車両速度と音圧レベルとの関係

図3-6は、橋梁から発生する低周波空気振動と車両との関係を、車両速度からみたものである。車両速度が増加すると、低周波空気振動の音圧レベルは若干増加する傾向がみられる。

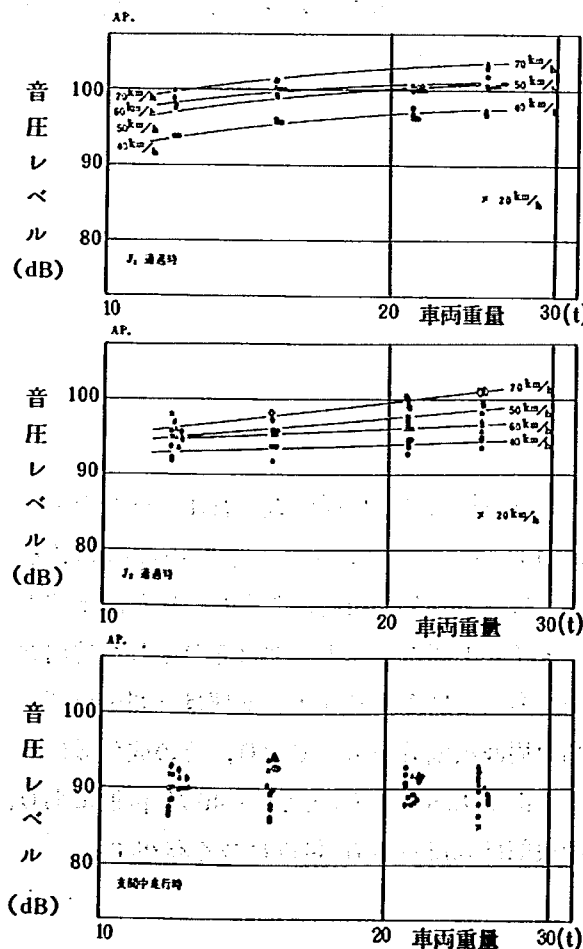


図3-7に通過車両重量と、低周波空気振動の音圧レベルの関係を示す。測定地点は支間中央点である。ジョイント (J_1) 通過時、ジョイント (J_2) 通過時においては、車両重量が増加すると低周波空気振動の音圧レベルは若干増加している。しかし、車両の支間中走行時においては、その傾向はほとんどない。

図3-7 車量重量と低周波空気振動の関係 ($\ell/2$ 点)

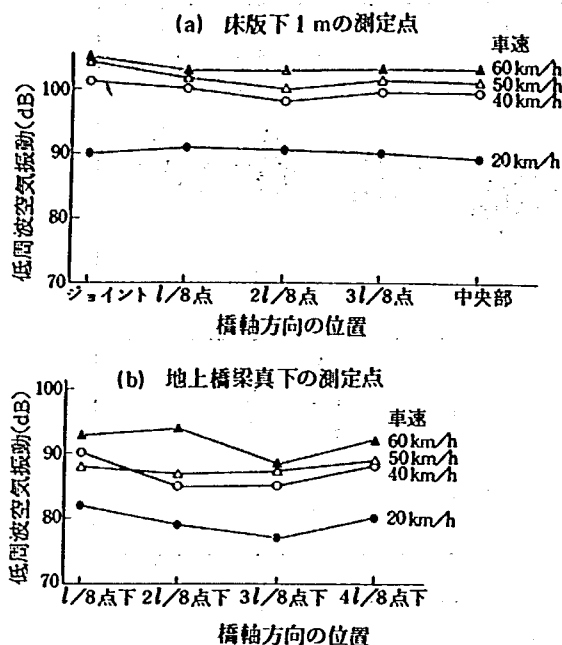


図3-8 低周波空気振動レベルの橋軸方向の分布 (車重 25 t, オールパスレベル)

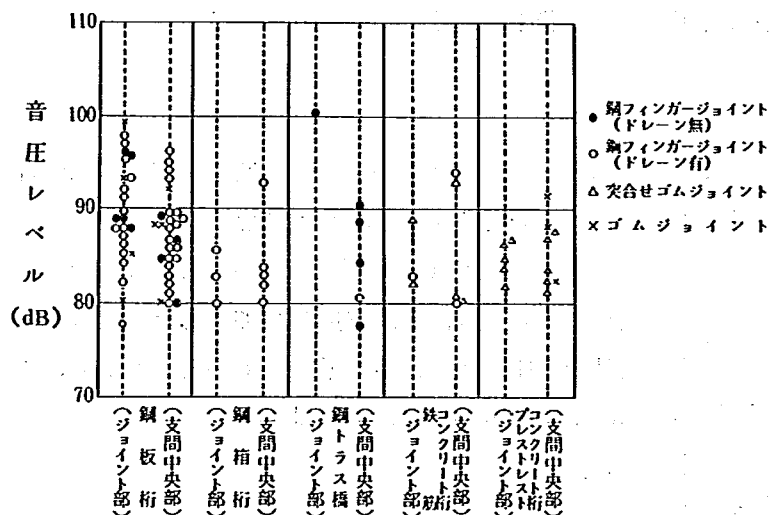


図3-9 橋種と音圧レベルの関係

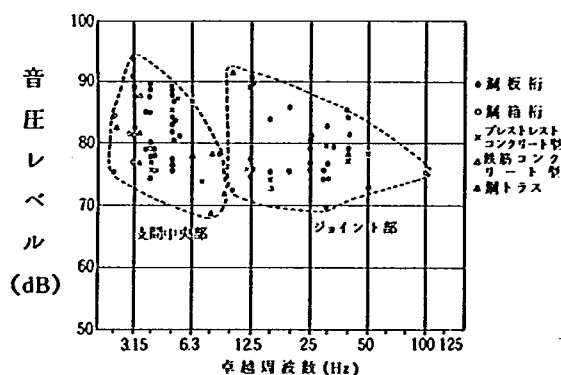


図3-10 卓越周波数と音圧レベルの関係 (橋種別)

低周波空気振動レベルの橋軸方向の分布 (図3-8) をみると、床版下1mの各測定点においては、ほとんどレベル変化がみられないが、その直下の地上測定点では、中間付近のレベル低下がみられる。

図3-9に橋種と音圧レベルの関係を示す。いずれの橋種が高い音圧レベルを示すということは判断できない。

低周波空気振動の卓越周波数と音圧レベルの関係を、橋種別に図3-10に示す。卓越周波数は橋種別には、はっきりした傾向はみられないが、全体としてジョイント部と支間中央部はそれぞれ卓越周波数の中をもっている。ジョイント部は支間中央部に比べ高い周波数成分を示しており、その成分域はジョイント部で $12.5 \sim 6 H_z$ と $25 \sim 40 H_z$ 付近にあり、支間中央部は $3.15 \sim 5 H_z$ 付近に多く存在する。

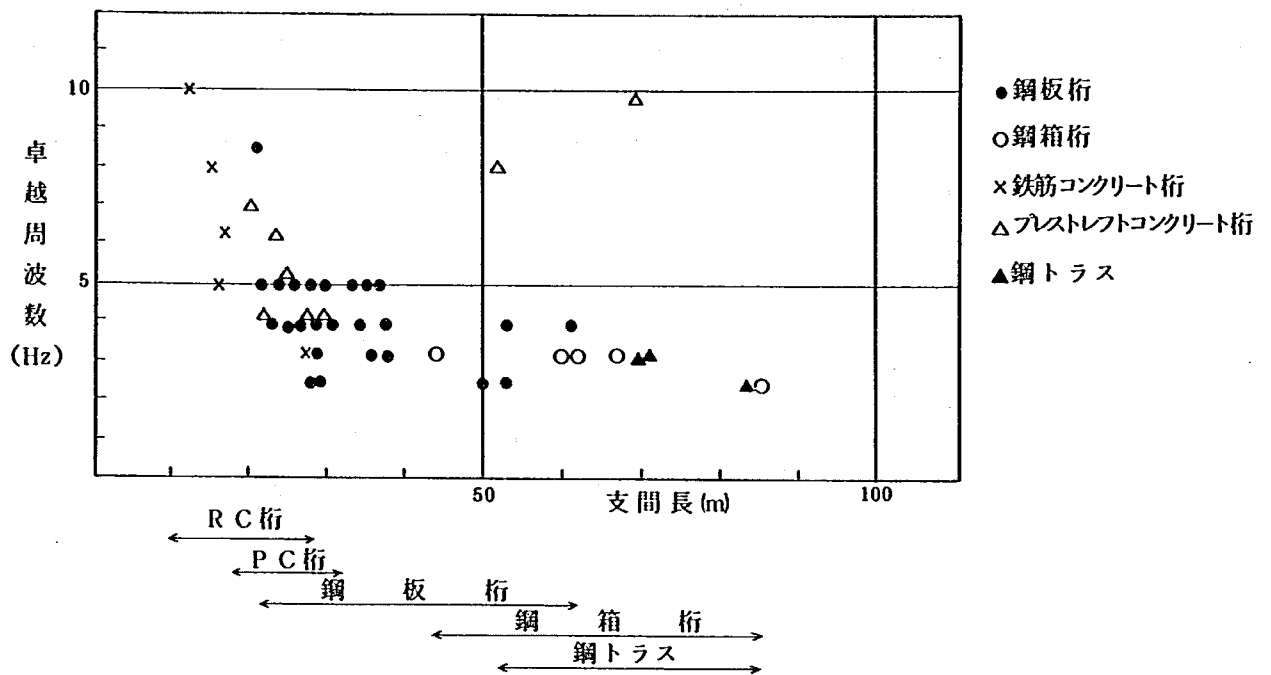


図3-11 支間長と卓越周波数の関係 (支間中央部)

橋梁の支間長と低周波空気振動の卓越周波数の関係の支間中央部の場合を、図3-11に示す。卓越周波数は橋種ごとに、鉄筋コンクリート桁で $3.15 \sim 10 \text{ Hz}$ 、プレストレストコンクリート桁で $4 \sim 7 \text{ Hz}$ 、鋼板桁で $3.15 \sim 5 \text{ Hz}$ 、鋼箱桁で $3.15 \sim 4 \text{ Hz}$ 、鋼トラス橋で $2.5 \sim 3.15 \text{ Hz}$ 程度となっている。

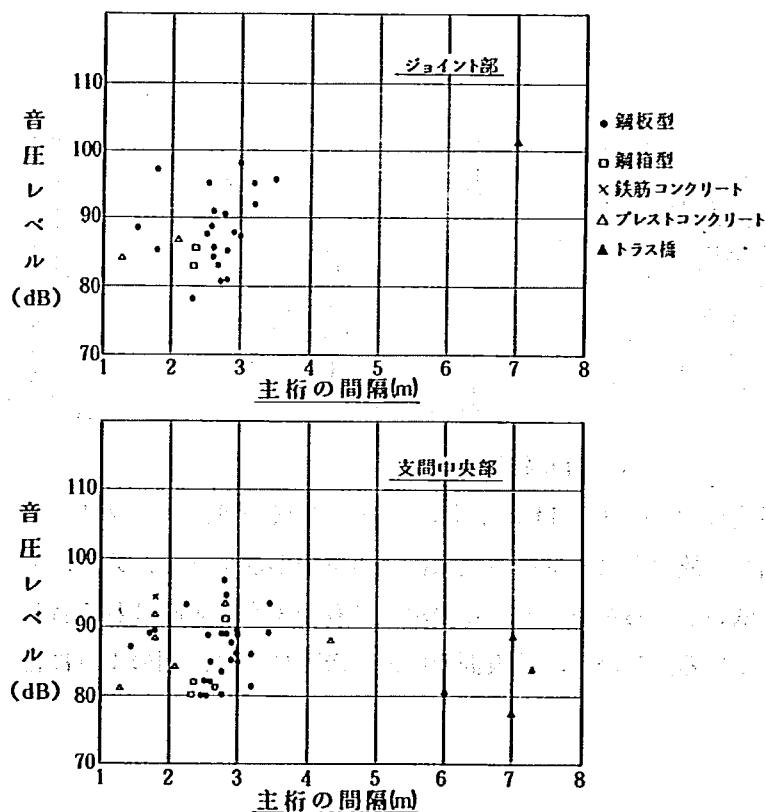
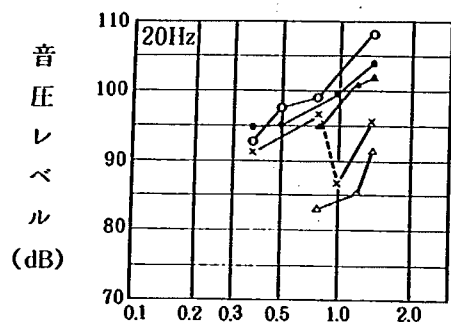


図3-12 主桁間隔と音圧レベルの関係

図3-12は、主桁間隔と音圧レベルとの関係について調査したものである。主桁間隔は $2 \sim 3 \text{ m}$ 程度で主桁間隔が変化してもその影響はみられない。なお、トラス橋では主構間隔を示している。

実橋から放射される低周波空気振動を測定しても周辺状況により制約を受け、その伝播状態を図示することはむずかしい上、多数の測定点を必要とするので費用や努力の面で容易ではない。そこで基礎的な模型実験により、低周波空気振動の伝播に関する性質について説明する。

実験は、橋梁に相当する部分を単純な板に置き換えたモデルで、橋梁の振動形態を単純な振動とみなした場合について検討を行っている。



板の放射面積 (m²)

注) マイクロホン直上
(直下)の点の振動
加速度レベルを116
dBとして基準化し
ている。

- 上下振動
- 両端固定1次モード
- × 両端固定2次モード
- △ 短辺固定1次モード
- ▲ 回転振動

図3-13は、模型実験において、放射面積と模型直下10 cm点における音圧レベルとの関係をあらわしたものである。

両端固定2次モードを除くと、放射面積が増加するに従い音圧レベルも高くなる傾向にある。

図3-13 放射面積と音圧レベルの関係

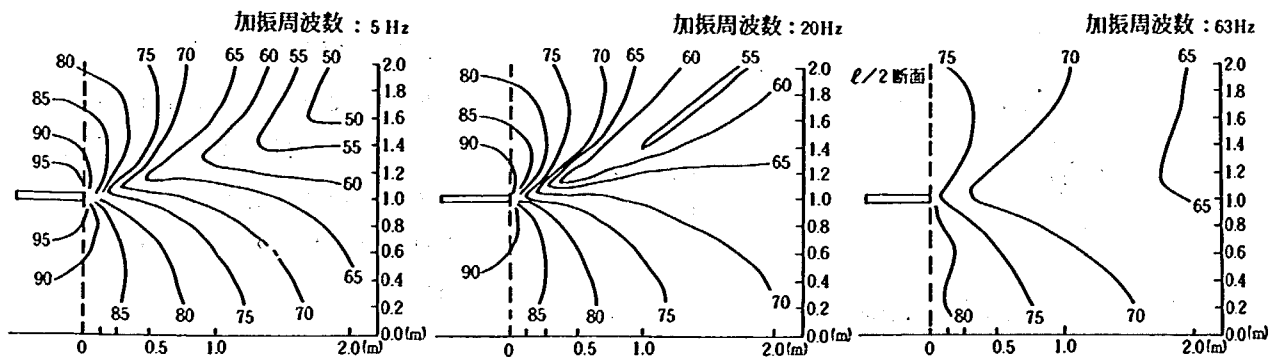


図3-14 音圧分布特性

低周波空気振動の音圧分布を、加振周波数別に図3-14に示す。地表面の状態は、コンクリートである。音圧分布は板模型の上側と下側から放射される低周波空気振動の位相が逆になるために、それらの干渉によって音圧レベルの非常に低いところができる。この現象は双極子音源と呼ばれる音源から放射されたときの音圧分布と類似している。しかし、地表面の反射の影響により、図のように音圧レベルの谷間は上向きとなってくる。

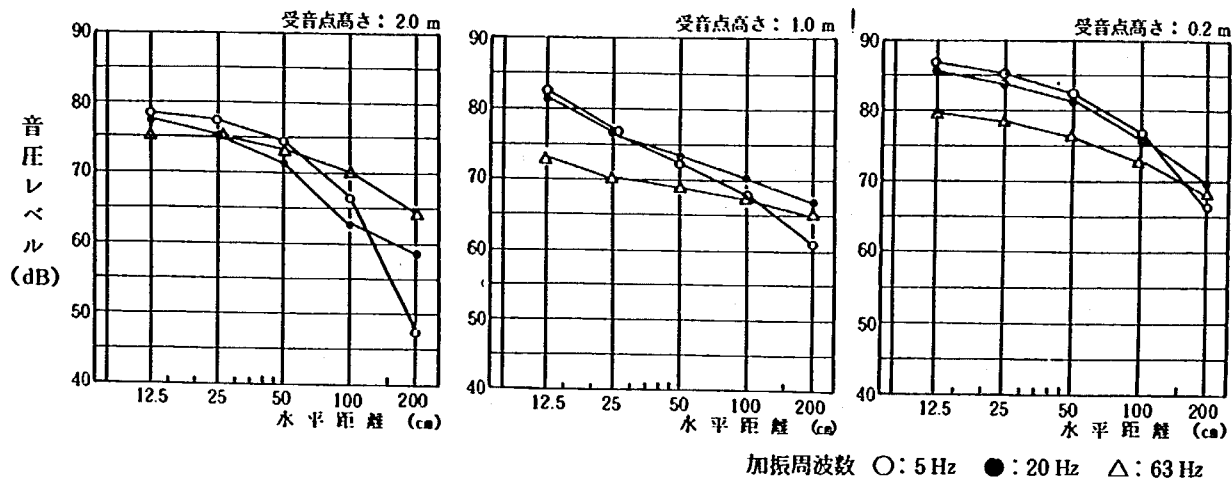


図 3 - 15 距離減衰性状

低周波空気振動の距離減衰性状を、図 3 - 15 に示す。地表面の状態はコンクリートで、模型の加振周波数を 5, 20, 63 Hz に変化させたときに 0.2, 1.0, 2.0 m の高さで測定している。

低周波空気振動の音圧レベルは、距離が増加するにつれて減衰していくが、その減衰の傾向は加振周波数が低い程、減衰する率が大きくなっている。

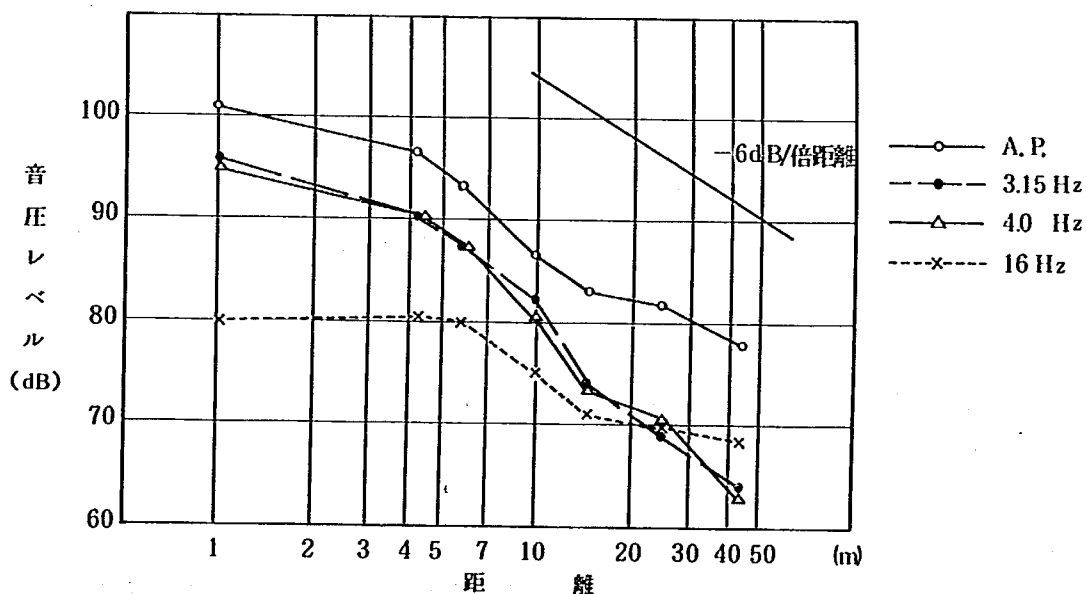


図 3 - 16 低周波空気振動の距離減衰

図 3 - 16 は実際の橋梁から発生する低周波空気振動の橋梁直角方向への距離減衰の一例である。橋梁はプレストレストコンクリート床版桁橋で、地面から床版までの高さが 5 m ある。測定点は地上 1.2 m 点で、地表は比較的平坦な河川敷である。図にはオールパスの周波数とこの橋梁のもつ卓越周波数のそれぞれについて、距離減衰を示してある。

4. 測定方法

低周波空気振動の測定法は現在のところ定まったものがない。ここでは参考までに本資料に用いた測定の中で行なわれた最も簡単な方法を紹介する。

低周波空気振動の測定は、騒音の測定とほとんど同様である。しかし、対象とする周波数範囲が低周波空気振動と騒音とでは違っているために、測定解析機器が騒音の測定と異なっている。

例えば、低周波空気振動を測定するセンサーとしてのマイクロホンは、低周波領域まで平坦となるようなマイクロホンを使用しなければならない。参考のために低周波用のマイクロホンの周波数特性の一例を図4-1に示す。

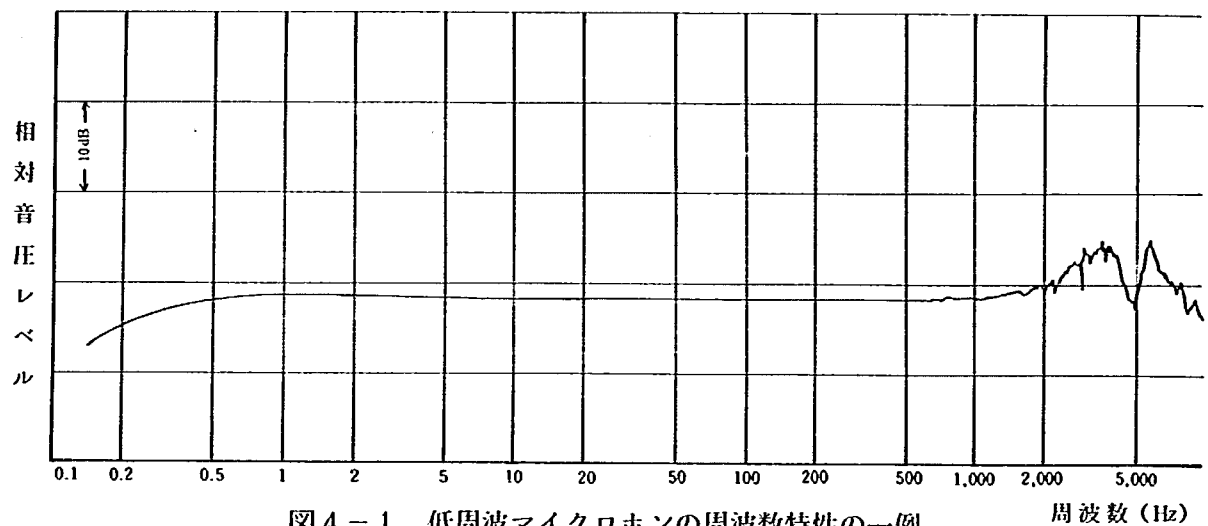


図4-1 低周波マイクロホンの周波数特性の一例

a) 暗騒音の影響

低周波空気振動の場合は、可聴周波数の暗騒音は無視できるため、一般的な工場騒音や自動車騒音などが干渉することは少ない。

b) 風の影響

低周波空気振動は、自然現象（特に風）でも発生するので、風の影響はかなり大きなものであり、そのため、風があるとまったく異った音圧レベルになってしまう場合が生じてくる。一般に風があるときは防風スクリーンを使用するが、できるだけ風が弱い時に測定するようにしている。

c) 計測

低周波空気振動の計測といっても、ただ単に低周波空気振動の音圧レベルを知りたい場合、またはそれを記録しておきたい場合、さらに発生している低周波空気振動を解析まで行いたい場合と目的に段階がある。低周波空気振動がどのくらいの音圧レベルで発生しているのかを知りたい場合には、低周波空気振動が発生しているある点に測定器をセットし、測定する。測定の時に、その周囲の数点を測定して、大きな差が生じるかどうかを確認している。

低周波空気振動を記録しておきたい場合は、レベルレコーダーを用いるが、再現性にかけるので、データレコーダーを使用する。その場合には、レベルレコーダーをモニター用として用いれば、データレコーダーにきちんと入力しているということが確認できる。レベルレコーダー記録するとき、1/3 オクターブバンドフィルタを使用すれば 1/3 オクターブバンド毎の音圧レベルも記録できる。低周波空気振動を解析まで行う場合は、低周波空気振動の録音が必要となってくるので、データレコーダーを使用する。この時には、上記のようにレベルレコーダーをモニター用として用いている。

d) 測定例

低周波空気振動の測定法についての概要を説明してきたが、測定例をあげてその測定状況、及び解析の方法などについて説明する。

低周波空気振動の測定器としては、低周波マイクロホンに入力増幅器、帯域増幅器を接続する方法と低周波マイクロホンに振動レベル計を接続して用いる方法がある。

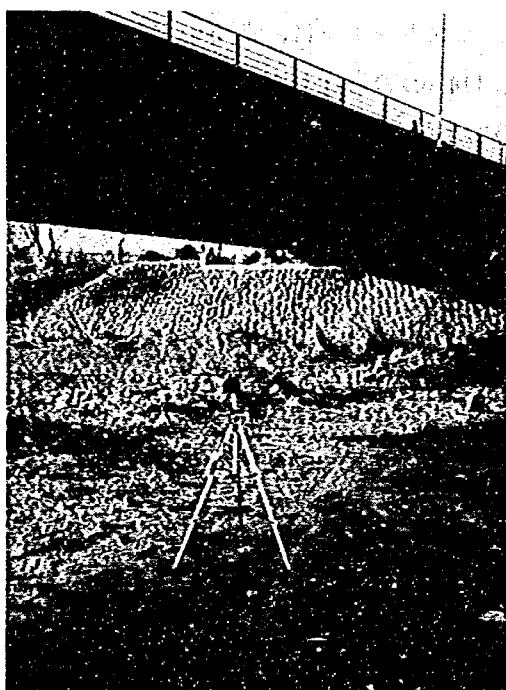


写真 4 - 1 測定状況

またその他に、精密騒音計も使用できるが、下限周波数が 10Hz 程度であるので制約を受ける。

ある物体から発生する低周波空気振動の音圧レベルを求める時には、写真 4 - 1 のように求めたい物体の近くに低周波マイクロホンをセットして、電荷増幅器および帯域増幅器（又は振動レベル計）に接続し、データレコーダによりデータを記録する。

その測定系列を、図 4 - 2 に、測定器を写真 4 - 2、3 に示す。

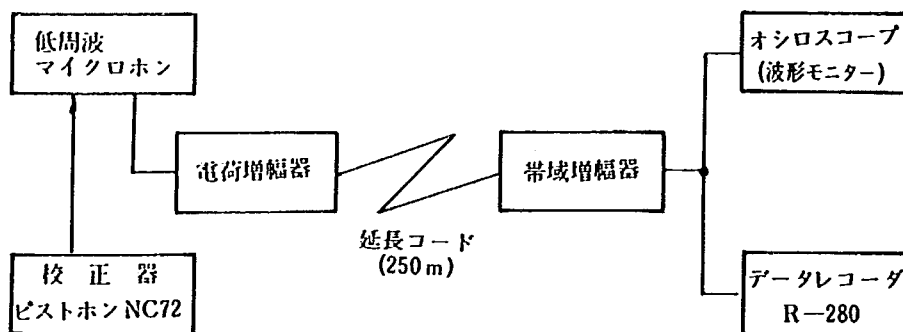


図 4 - 2 低周波空気振動の測定系列

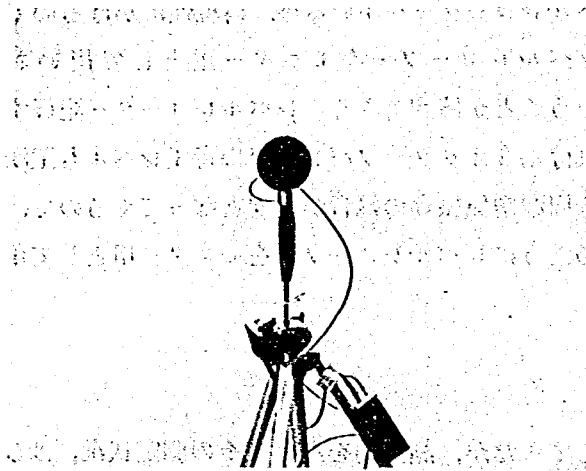


写真4-2 測定器
(低周波マイクロホン、電荷増幅器)

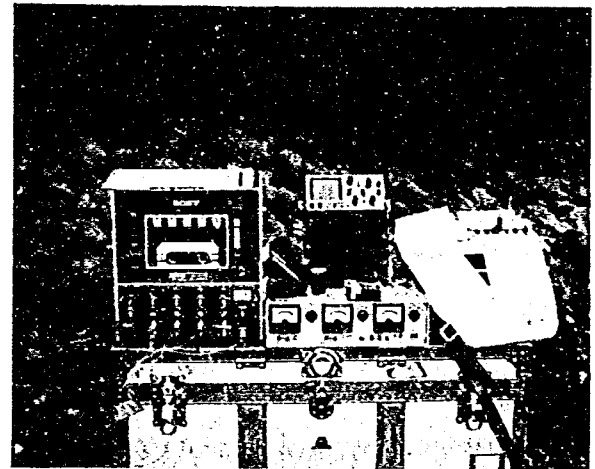


写真4-3 測定器
(レベルレコーダー・データレコーダー・帯域増幅器・オシロスコープ)

低周波マイクロホンの校正には、ピストンホンを用いる。ピストンホンは、ある一定の周波数で一定の音圧レベルを発生させるものである。例えば 250 Hz で 114 dB の音圧レベルを発生するものがあるが、この場合、図4-1のようにマイクロホンの特性が数 Hz から 500 Hz 位までが平坦であるから、ピストンホンを用いることができる。校正の方法は、マイクロホンにピストンホンを取り付け、マイクロホンに接続したレベル計でチェックする。このピストンホンによる校正は、ピストンホンの周波数における感度補正をしたということで、測定全周波数帯が校正されたことではないことに注意する必要がある。

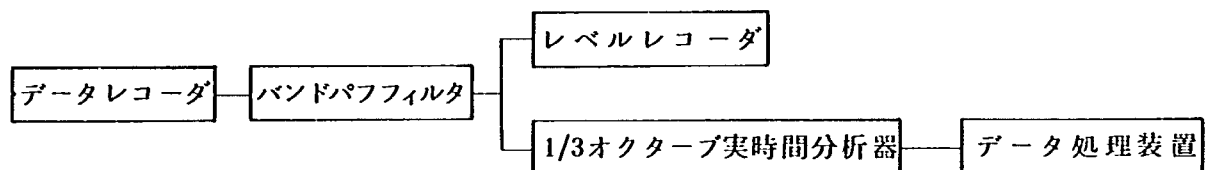


図4-3 解析系列

低周波空気振動の解析も騒音のそれと同様である。低周波空気振動の解析系列を図4-3に示す。この例では、データレコーダからの信号を $2.5\text{ Hz} \sim 125\text{ Hz}$ の間において $1/3$ オクターブバンドパスフィルタにより周波数分析を行い $1/3$ オクターブ実時間分析器により分析を行う。このときに、各周波数の分析が同時に行なわれ、連続してできる。

周波数分析した後レベルレコーダーに記録し、分析の後データ処理装置にかける。

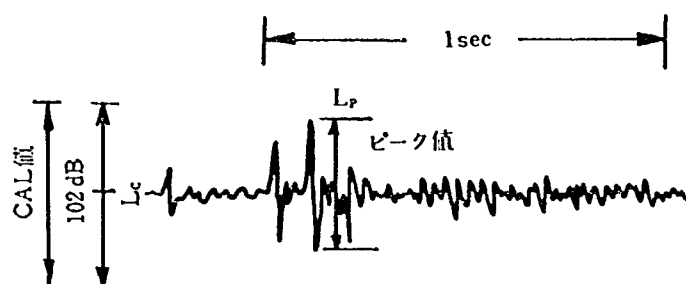


図4-4 測定波形例

測定波形のピーク値を dB 表示するときには、 $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ を基準にして対数表示する。

レベルレコーダー記録の場合、図4-4のような測定波形では、波形のピークのレベル値は次のように求められる。

$$L_p = 20 \log \frac{L_s}{L_c} + CAL \text{ (dB)}$$

L_p : 波形ピークのレベル値 (dB)

L_c : 校正值の長さ (mm)

L_s : 波形ピーク間の長さ (mm)

CAL : 校正のレベル値 (dB)

参考文献

- 1) 豊田栄次：低周波空気振動公害の現状と今後の課題，公害と対策（'78. 2）
- 2) 山下，金沢，小見：室の低周波音に対する建具の影響，日本騒音制御工学会技術発表会論文集（昭52. 11）
- 3) 昭和57年版 環境白書：環境庁編

低周波空気振動の実態

I S S N 0386-5878

土木研究所資料第1928号

昭和58年3月(1983)

足立義雄, 石田稔, 日名子信広

キーワード 環境, 実態

要旨 日常生活環境における低周波空気振動発生レベルの実態, 及び道路橋からの低周波空気振動について, 橋梁振動, 走行車両などの関係, 周波数特性, 音圧レベル分布などを簡潔にとりまとめている。

郵便はがき

いは40
つ門切
て下手
下さを

305-□□

建設省土木研究所
道路部交通環境研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一

No. 016

土木研究所資料第1928号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印