

東京音楽大学リポジトリ

Tokyo College of Music Repository

環境における低周波空気振動

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 1982-01-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://tokyo-ondai.repo.nii.ac.jp/records/651

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



環境における低周波空気振動

山下 充 康

序論

環境の保全是今日の大きな社会的課題となっている。文明の発達とともに自然環境が損われてきているのは事実である。このためわが国では大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、悪臭、土壌汚染、地盤沈下などを対象に昭和42年に公害対策基本法が制定され、これらの公害を防ぐための法的措置がとられている。

これらの公害と呼ばれる生活妨害要素のうち、騒音は苦情件数の上で、苦情対象の第一位をしめている。われわれの生活空間には様々な音が存在しており、音は情報伝達信号として不可欠のものである一方、無い方が好ましい音も少なくない。音が人間にとって必要な信号である一方において無い方が好ましい音、即ち騒音という形で存在していることが多くの苦情を生む要因であり、また苦情内容を複雑にしている理由にもなっている。

音に対する人間の感度は犬、猫等の動物に比べれば鈍いとは言え、かなり敏感な部分がある。人間が音として聴くことのできる周波数範囲は 20 Hz～20,000 Hz と一般に言われており、この範囲をはずれた周波数の音についてはそれが存在していたとしても音として聴くことはできない。20,000Hz を越える周波数の音を超音波と呼び、医学や工学の分野で様々な利用がはかられているのは周知のとおりである。

20 Hz に満たない周波数の音はこれまであまり関心の対象にはされていなかった。このように低い周波数の音については人間はそれを全く聴くことができないし、ましてやそのために騒々しさややかましさを感じることは無いものと信じられていた。

最近になって 20 Hz 未満の音に関する苦情が提起されている。いわゆる低周波音あるいは超低周波音と呼ばれる空気振動であって、新しい種類の公害要素として注目されている。空気中を伝わる粗密波という点では騒音などの一般の音と何ら異なるものではないが、最近になって論議の対象とされてきたためにその実態、影響、測定方法、評価方法などについて多くの部分が未知であるのが現状である。用語すら統一されておらず、低周波音、超低周波音、低周波空気振動などが不統一に使われ、国際的にも Low frequency sound, Infra-sound などの用語が混用されている。

ここでは低周波空気振動がわれわれの生活環境の中でどのような形態で存在しているかを究

明し、その実態を身近な事例についてとりまとめた。

1. 苦情対象となった低周波空気振動

第二次世界大戦中、潜水艦や戦闘機の乗組員の間で高いレベルの低周波空気振動による聴力損失等の障害が生じる危険性があることが、一部の関係者間で話題にされた事例がある。最近になって、一般の居住空間において低周波空気振動についての苦情がいくつかの地域住民から提起されている。

苦情の内容は物理的苦情と非物理的苦情との2つに大別される。前者は「戸や障子など建具の微振動」で物理的に建具が励振されて二次的にガタ鳴りによる音を放射する現象に関する苦情、後者は「気分がイライラする」とか「頭痛がする」といった心理的、生理的な苦情である。

これらの苦情が提起された地域は工場等の事業場、空港、道路橋、新幹線鉄道などの周辺地域が多い。これらの地域において提起された苦情の内容はきわめて多様であって、とくに心理的、生理的苦情に関してはその実状の正確な把握が困難な場合が多い。振動は体感によってその存在を認めることができるし、騒音はだれもが耳によって感知してうるさいとか喧しいと判断し得る。これに対して低周波空気振動は音も聴えず、振動も感じずといった状況下で戸や建具がガタガタと揺れるので、無気味この上ないと想像される。

昭和44年8月5日付の毎日新聞の記事に次のような報道があった。

「愛知県海部郡十四山村では、村内10km²にわたり5、6月頃から微振動が続き、特に深夜静かなときが多い。同郡飛島村では昨年秋から一部で感じ、今や全村にわたる。知多郡大府町では、1、2か月前から感じはじめ東海市寄りが多い。常滑市でも南部地区の一部で振動している。知多郡知多町は全域。始まった時期は、5、6年前の名古屋南部臨海工業地帯造成期から。東海市では市内全域で風速、風向に関係なく微振動が続いている。

現在、名古屋地方気象台にある1倍、100倍、500倍の3台の地震計には、どれも振動が記録されていない。地盤や地殻変動によるものでなく、空気振動ではないか。伊勢湾周辺で地震が起きる前兆ということは全く考えられない。――」

この記事に示されるような現象はその後しばしば新聞報道にも登場し、昭和52年になって環境庁が「低周波空気振動対策」という用語を環境白書に記述した。この年から環境庁が低周波空気振動の実態調査に対して予算を計上している。(環境庁は昭和51年度に低周波空気振動公害調査委員会を設置して調査を開始した。)

海外では1973年(昭和48年)パリで超低周波音に関する検討会が開かれている。ここでは0.1Hz~20Hzの周波数範囲の音波をInfrasoundと定義し、いくつかの研究発表が行われた。しかしこれらの研究の多くは工場や遠距離大型トラック車室内などの労働環境における高レベルの低周波空気振動を取り扱ったもので、日本で論議されているような一般生活環境を対象としたものではない。

環境論議としての低周波空気振動が社会問題化した個別のきっかけはケースによってさまざ

までであるが、昭和51年あたりから国会でもとり上げられるようになり、公害問題として性格づけられた。昭和51年8月6日の衆議院地方行政委員会において長野県の下伊那郡、阿智川で問題となった道路橋周辺の低周波空気振動がとり上げられたのを始め、昭和52年11月1日の衆議院公害対策並びに環境保全特別委員会では奈良県香芝町の高架道路が議題にのぼっている。なお香芝町に関しては昭和55年10月6日「超低周波公害訴訟」のかたちで奈良地方裁判所に持ち込まれるに至っている。

2. 低周波空気振動とは何か

音は空気を媒体とする粗密波で、空気振動現象である。空気振動は周波数によって3つに分けられている。20Hzから20,000Hzの空気振動は人間にとって聴覚としてとらえることのできる音、即ち可聴音である。20,000Hz以上の周波数の音や20Hz以下の周波数の音は人間には聴くことができない。前者を超音波 (Ultra-sound)、後者を超低周波 (Infra-sound) と呼んでいる。ただし、前にものべたように、Infra-sound については超低周波音とか、低周波音とか、その他の呼び方があるが統一されていない。(ここでは低周波空気振動という用語を用いるが、広く一般的に認可された用語というわけではない。)

人間の聴覚は図1に示すように1,000Hz~2,000Hz前後の周波数で最も感度が良く、低周波数領域では極端に感度が低下することがわかっている。この特性はRobinsonの等ラウドネス曲線と呼ばれ音響研究の広い分野で基準的な曲線として利用されている。(註1)

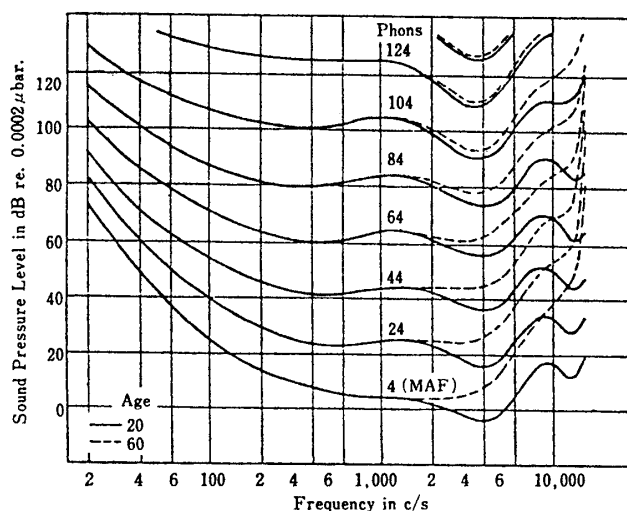


図1 Robinsonの等ラウドネス曲線

20Hzよりも低い周波数の音に対してはラウドネス曲線は示されていない。最近になって20Hz以下の周波数領域の聴感に関する実験が多方面で行われ、図2に示すような特性がそのひとつとして報告されている。(註2)

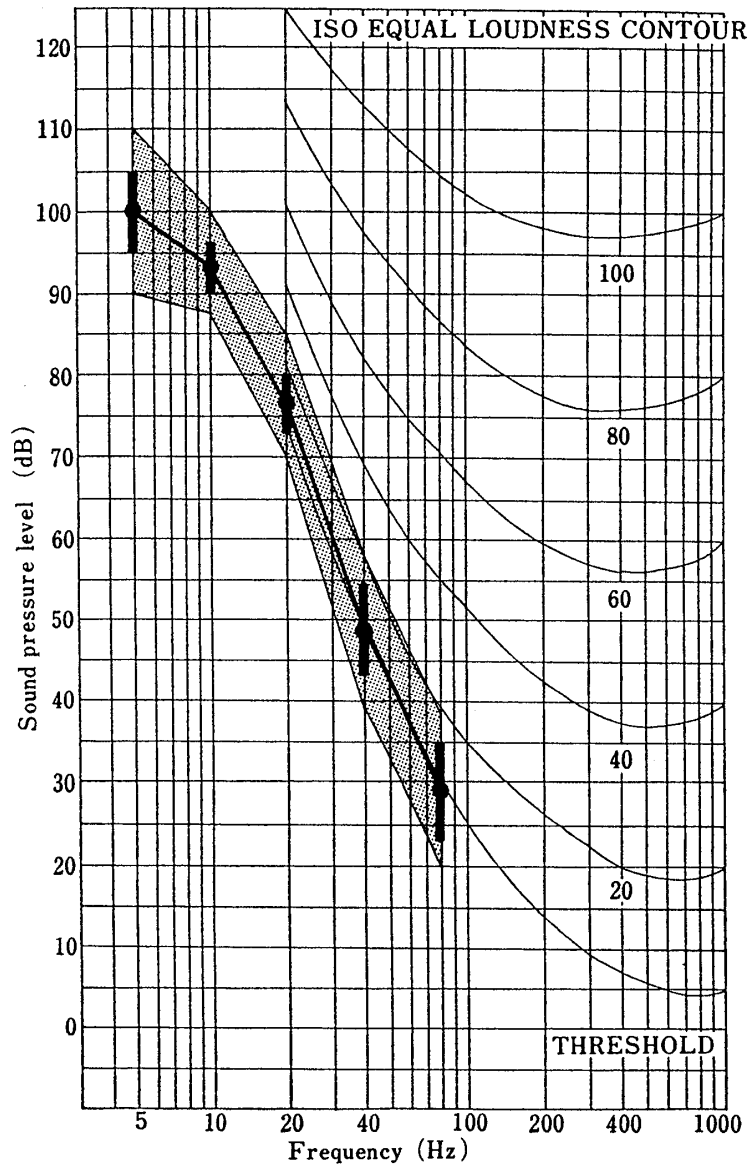


図 2 低周波数領域における感覚閾値

- は平均値
- は標準偏差

この結果に見られるように低周波数領域における感覚はきわめて鈍く、例えば 5Hz の音に対しては 100dB 前後に Threshold (閾値) が上昇している。

元来、空気振動として低周波数の振動がさまざまな形で存在することは古くから知られていた。インドネシアの Krakatoa 火山の爆発による低周波空気振動は世界中で検知されたと言われる。(註³) またわが国では中国大陸内で行われた核実験を微気圧変動によって感知、推測したこともあった。自然、天然の現象に伴って発生する低周波空気振動は少なからず普通に存在している。これらがもしも人間に可聴音と同じように聴えていたとすれば世の中は大変やかましいことになる。幸いにして人間の聴覚はそのような低周波数の波動に対する感度が鈍いので、これにわずらわされることは無くすまされる。

大きな平面が振動して空気中に波動を励起するもの、急激な熱膨張等の体積変化によるもの、気流や水流に伴う波動など低周波空気振動の発生機序は多種多様である。一般的に発生メカニズムとして考えられているものを表1に示した。

表1 低周波空気振動の発生源

1. 自然現象によるもの	波浪, 地震, 雷, 噴火, 風
2. 圧縮波によるもの	ダイナマイトの爆発, エンジンの吸排気, 高速走行車輛, 航空機
3. 燃焼によるもの	ボイラーのバーナー
4. 面の振動によるもの	道路橋梁, 大型送風機, 工場建物の壁面
5. 流体の運動によるもの	ダム of 放流, 滝の落水, 防波堤の波

表1に整理した発生源から放射される空気振動は、爆発のように単発のインパルス的なものと時間的にある長さで継続するものがあるが、いずれも非常に低い周波数の成分を含んでいる。

音のエネルギーを測定する際にはマイクロホンによって音圧を検知し、音圧レベルによってエネルギーの大小を表示する。低周波空気振動も一般的な音と物理的な基本特性は何ら異なるものではないので、周波数特性の保証されたマイクロホンを使用して音圧レベルによる強弱の表示がなされる。

自然環境、生活環境において観測された低周波空気振動の実例を図3にとりまとめて示した。^(註4)これによればわれわれが平常、問題意識を全く持たずにすごしている空間にきわめて高い音圧レベルの低周波空気振動が存在していることになる。もちろん、これらの例の多くは20Hz以上の可聴音領域の成分を含んでいるので、いわゆる低周波空気振動のみに限定された音圧レベルを示したものではない。

3. 住宅内における低周波空気振動

大きな社会問題として注目された低周波空気振動は道路橋や大規模工場、空港などの周辺で観測されるものが主であるが、前述のようにわれわれの住環境のいたるところに存在が予想される。ここでは東京都内の一般的な住宅をとり上げ、そこで観測された低周波空気振動についてその実態をとりまとめた。

(1) 低周波空気振動の測定方法

低周波空気振動の測定にあたっては、一般の騒音のように国際的、国内的に統一された計測方法や測定に使用する機器の規格化は行われていない。また騒音の評価指標である騒音レベル

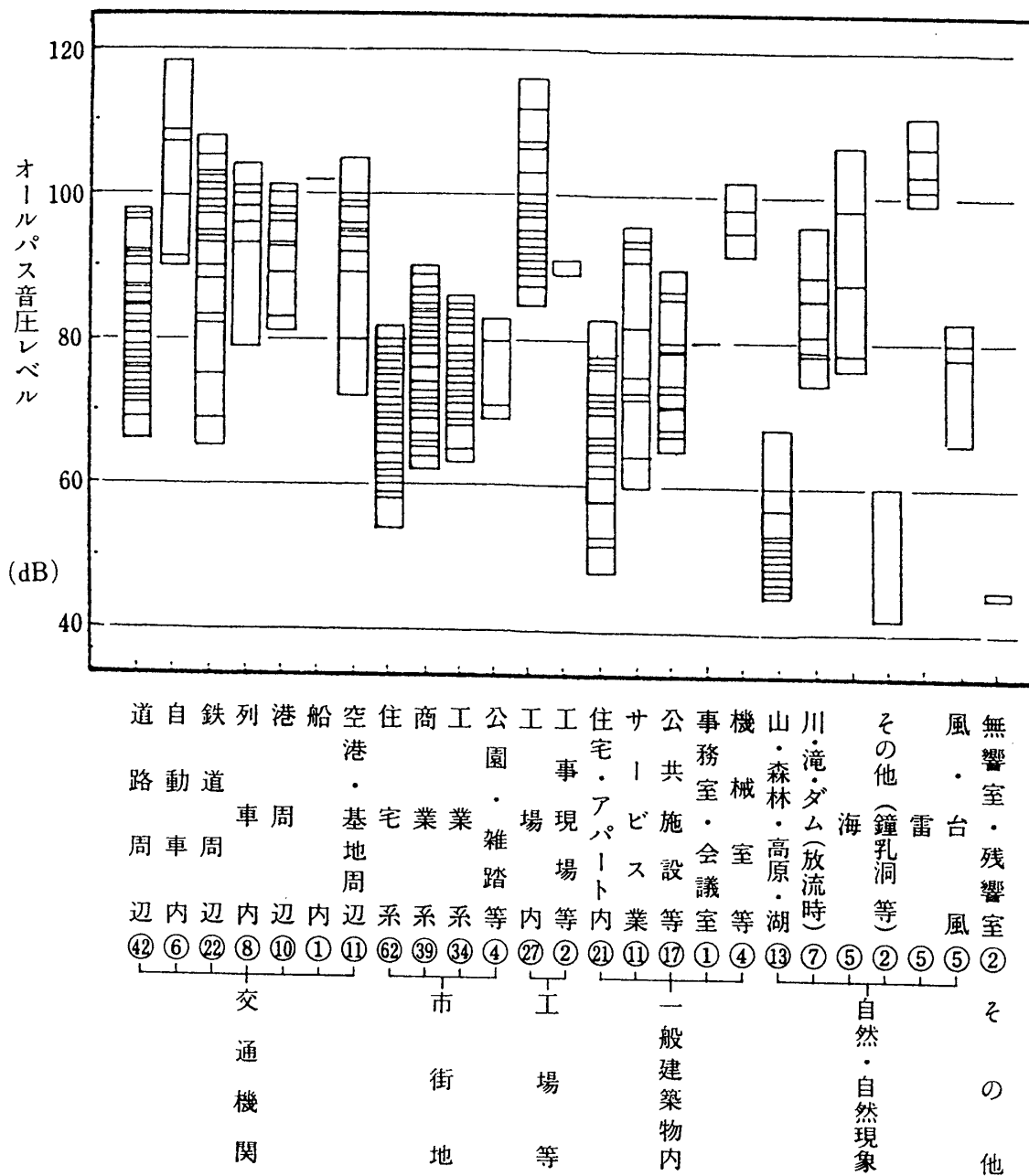


図 3 住空間における低周波空気振動のレベル (2~90Hz)
 (○内の数字は計測事例数)

に対応する低周波空気振動の指標は確立されていない。低周波数領域における人間の感覚と音圧レベルとの関係が解明されれば、低周波空気振動指標 (例えば低周波音レベル) を計測するためのメータの周波数レスポンスを決定することができるが、現在ではいくつかの提案にとどまっている段階である。(例えば ISO 案 1980-02-15) (註5)

この研究では、人間の感覚評価レスポンスなどの補正を行わず、純粋に物理的な音圧レベルを計測し、日常生活において家屋内で発生している低周波空気振動の実態を解明することとした。

調査対象とした家屋は鉄筋コンクリート7階造のビルの最上階に位置する住宅である。住宅内の各機器の位置を平面図に記入して図4に示した。これらの機器を個々に通常の使用状態で

動作させ、居住者の耳の位置（室中央の床から1.2mの高さに代表させたが、台所に関しては調理台前に立った姿勢での耳の位置を想定し、床からの高さを1.5mとした）にマイクロホンを固定した。

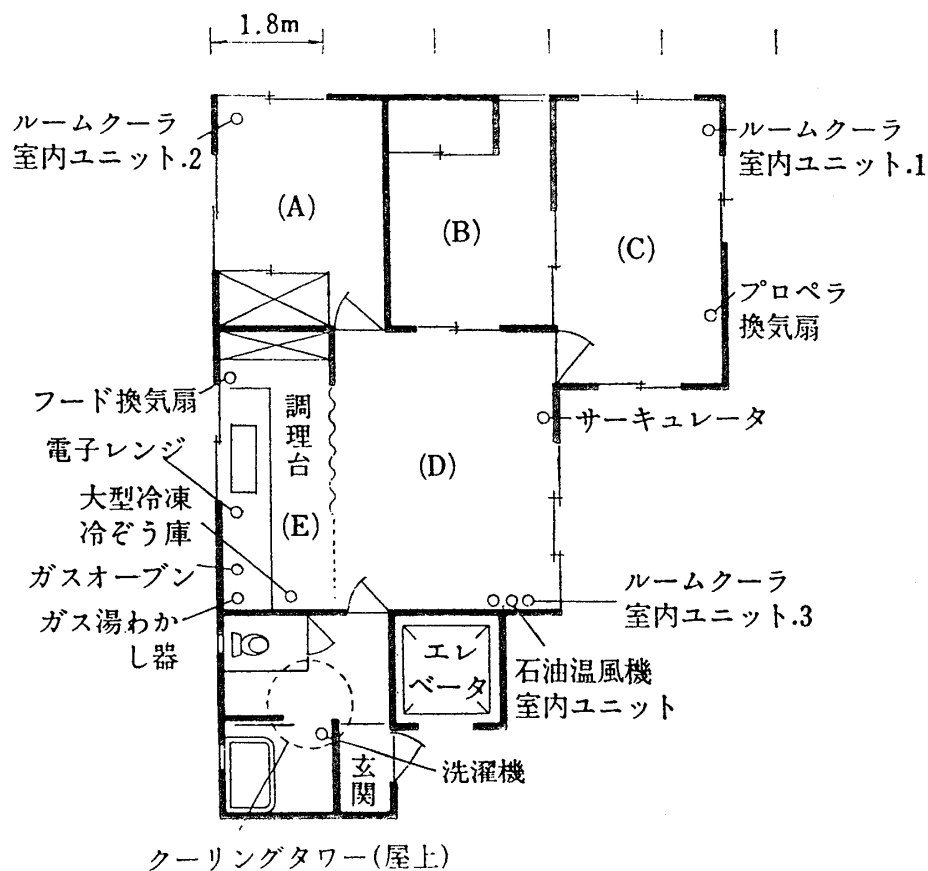


図4 調査を実施した家屋の平面図と各種機器配置

室は全室とも洋間、壁はプラスターボード布貼り仕上げ（A, B, C, D室）、台所（E）はタイル壁、天井は布貼り、浴室は床・壁がタイル仕上げ、天井は塗装鋼板である。

測定にあたって窓、扉はすべて閉じた状態とした。

現場ではマイクロホンからの信号をデータレコーダに収録し、後で研究室において各種の分析作業を行った。使用した計測器および分析システムを図5に示した。

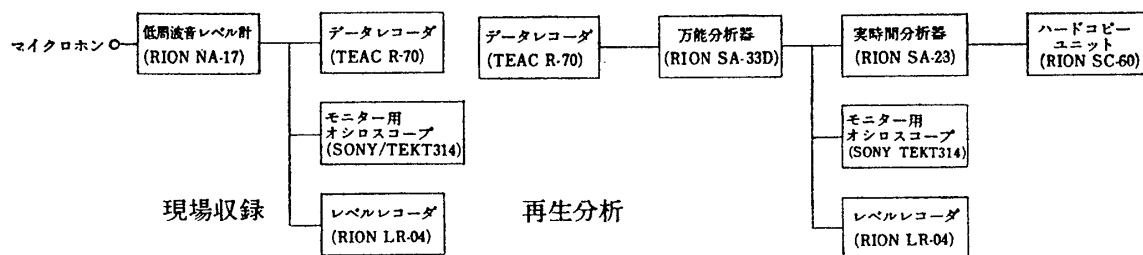


図5 測定に使用した低周波音の計測・分析システム

全システムを通して保証される周波数特性の平坦性は2Hzから500Hzの領域である。室内における低周波空気振動の観測を目的としたので気象上の風による直接の影響は無いと考えられるが、風による建具のたわみ振動に起因する空気振動の発生も無視することはできないので、風の殆んど無い日時を選定して測定を実施した。

(2) 台所における低周波空気振動

家庭電化製品の普及に伴って台所の調理台周辺には多数の空気振動発生源となり得る機器が存在し、主婦は日常それらの機器に囲まれて過す時間が多いことになる。いずれの機器も、騒音の低減に対する配慮は十分になされており、騒音レベルが極端に高いということはない。

各種機器の作動に伴う騒音レベルと低周波空気振動の音圧レベル(2~500Hzの範囲でFlatな周波数特性)とを表2に一覧表記した。

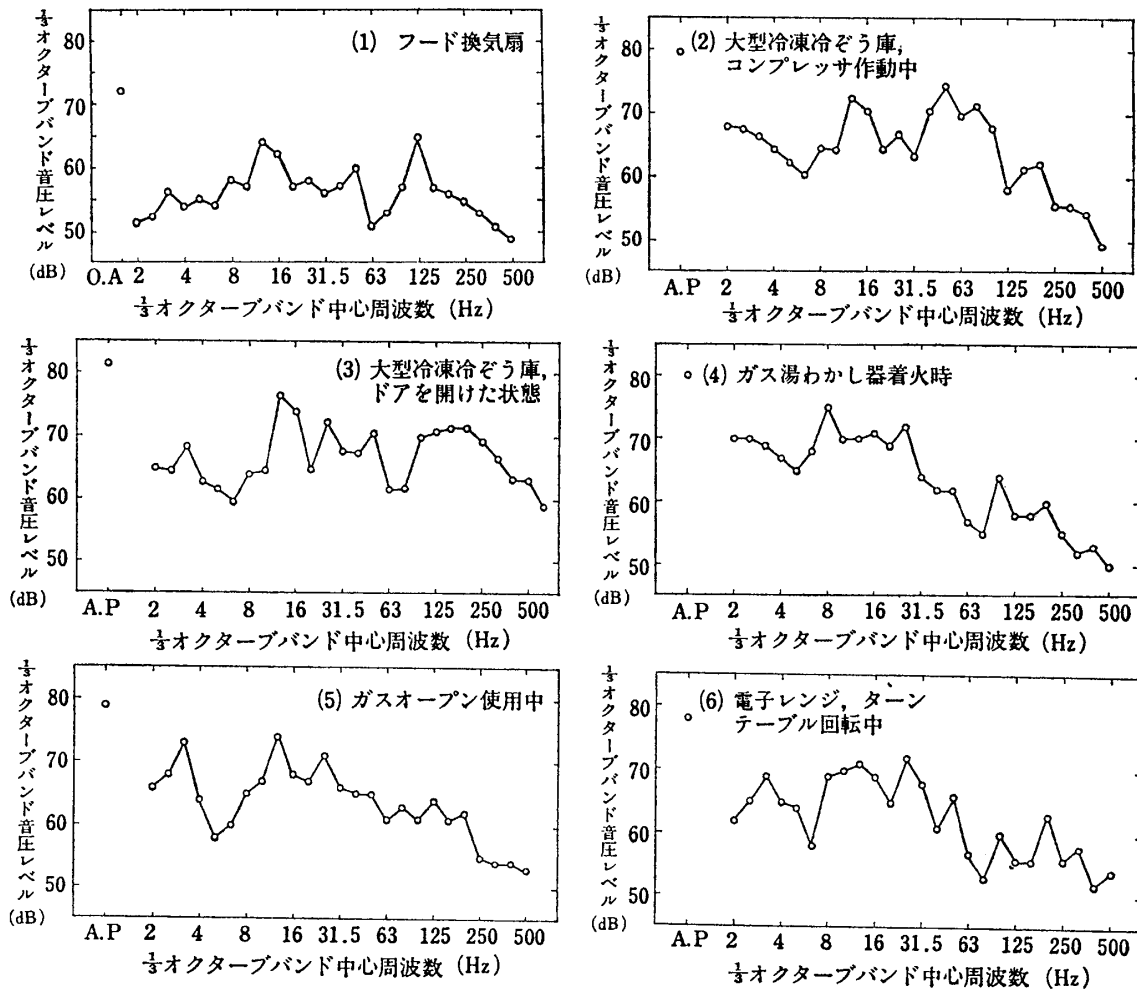


図 6 台所における低周波空気振動の周波数分析結果

表 2 調理台前の立位姿勢の耳の位置における騒音レベルと低周波空気振動の音圧レベル

機 器 名	騒音レベル (dBA)	低周波空気振動の音圧レベル (dB)	備 考
フ ー ド 換 気 扇	55	72	
大 型 冷 凍 冷 ぞ う 庫	{ 42 45	{ 80 81	コンプレッサ作動中, ドア開放状態
ガ ス 湯 わ か し 器	58	80	着火時
ガ ス オ ー プ ン	48	79	
電 子 レ ン ジ	53	78	ターンテーブル回転中

騒音レベルの数値に比べて低周波空気振動の音圧レベルはきわめて高いことが示された。図 6 にこれらの低周波空気振動の 1/3 オクターブバンド周波数分析結果を示した。20Hz 以下の周波数成分がかなり含まれていることが判明する。

(3) 冷暖房設備に関する低周波空気振動

住宅内の冷暖房設備であるルームクーラの室内ユニット、温風ヒータ、サーキュレータ、換気扇などは回転翼やモータを装備しているため、回転に伴う比較的純音成分の強い運転音が耳につくことが多い。一般に騒音レベルは低くおさえられているが、低周波空気振動は意外に高い音圧レベルであることが示された。(表 3 参照)

表 3 冷暖房機器の騒音レベルと低周波空気振動の音圧レベル

機 器 名	騒音レベル (dBA)	低周波空気振動の音圧レベル (dB)	備 考
ルームクーラ室内ユニット No.1	43	69	室 中 央, 高 さ 1.2m
” No.2	38	69	” ”
” No.3	43	74	室中央方向 2 m, 高 さ 1.2m
サーキュレータ	37	70	” ”
石油温風機室内ユニット	38	88	” ”
プロペラ換気扇	48	74	室 中 央, 高 さ 1.2m

これらの周波数分析結果を図 7 に示した。

石油温風機では騒音レベルが 38dBA であるのに対して、低周波空気振動の音圧レベルが 88dB、中心周波数 5Hz の 1/3 オクターブバンド音圧レベルは 80dB であった。バーナを停めた状態では低周波数成分は 20dB 程度減少する。

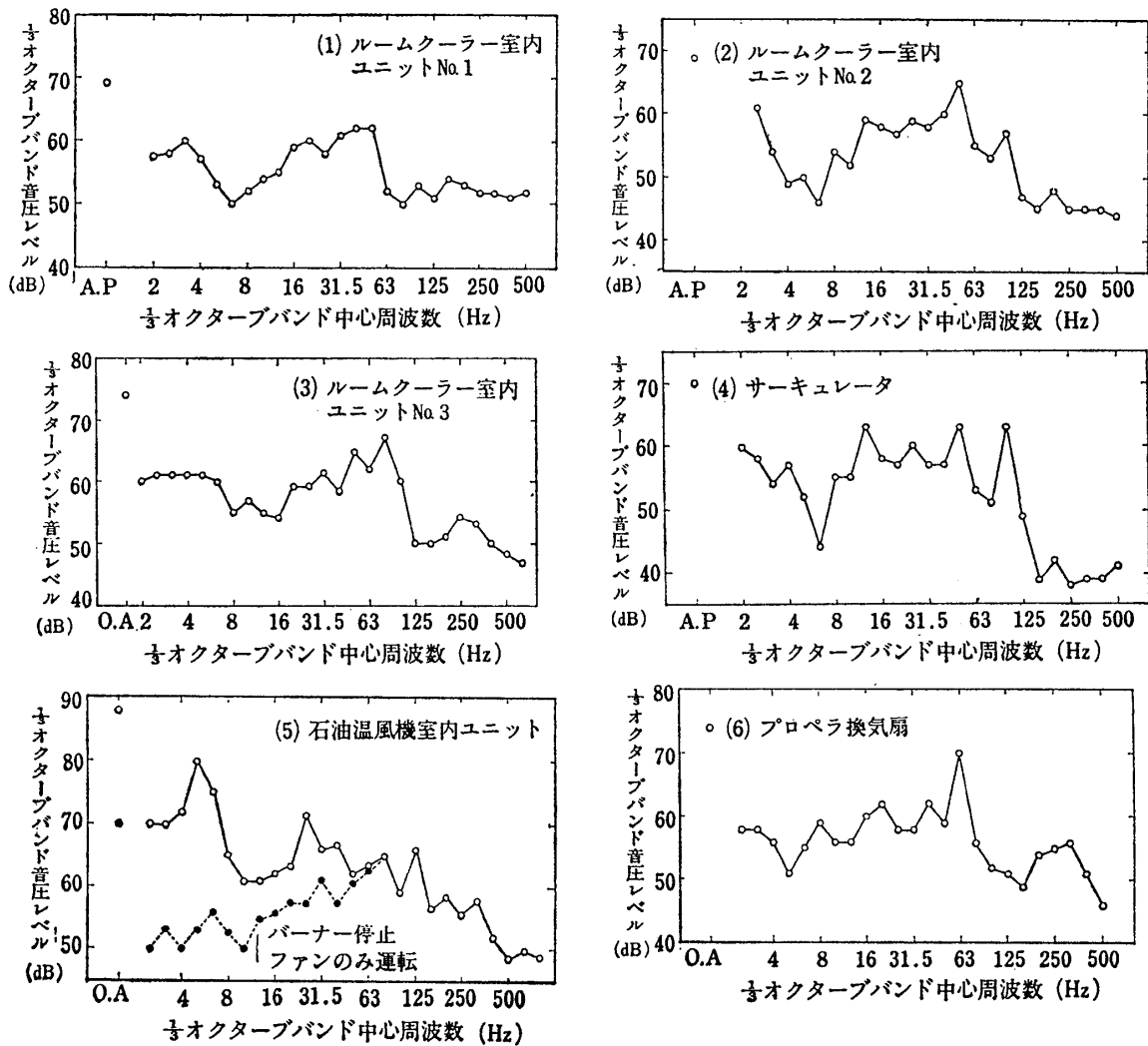


図 7 冷暖房機器の作動に伴う低周波空気振動の周波数分析結果

(4) その他の家屋内低周波空気振動

これまでのにのべた機器の他にも日常生活ではさまざまな空気振動発生源が考えられる。手当たりしだいに音圧レベルの計測をこころみた結果、極端に高いレベルを示したのは脱水作動中の洗濯機、ドアの開閉、上層階（屋上）での子供のとびはねなどであった。これらの測定値を表 4 および図 8 に示した。

表 4 室内で得られた騒音レベルと低周波空気振動の音圧レベル

	騒音レベル (dBA)	低周波空気振動の音圧レベル (dB)	備 考
脱水作動中 洗濯機	72	94	本体 横 0.5m, 高さ 1.5m
玄関 ドア 開閉	約70	106~108	居間 D で観測 (居間の窓閉)
〃	約70	83~ 85	〃 (居間の窓開)
トイレのドア開閉	約65	101~112	〃 (居間の窓閉)
上層階のとびはね (上層階一屋上テラス)	約45	84~ 89	居間中央で観測

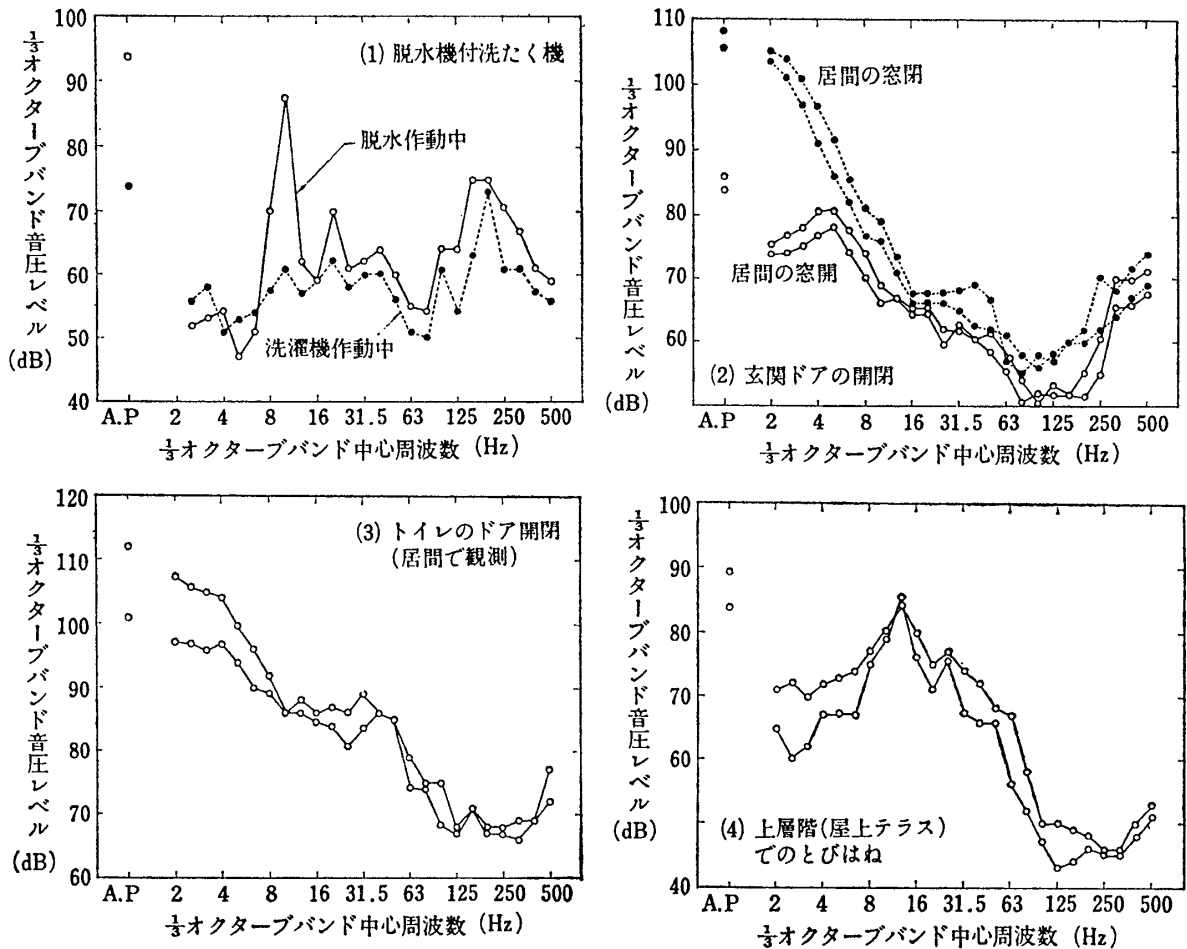


図 8 家屋内のその他の低周波空気振動の音圧レベル

脱水作動中の洗濯機は脱水槽の回転に起因する本体の振動が見られ、10Hzと20Hzの高い音圧レベルは本体振動によるものと考えられる。

居間において観測された玄関ドアの開閉に伴う低周波空気振動は100dBを越える高い音圧レベルであった。居間では玄関のドアの音をパターンと聴くことはできても騒音レベルは70dBA程度で、居間の窓の開閉によらず一定の値である。これに対して低周波空気振動は窓の開閉状態によって大きく異なり、室が密閉条件である場合には非常に高い音圧レベルが観測される。

(5) 住宅内における低周波空気振動の実態

以上のべたように、可聴音よりも低い周波数領域に成分を持つ低周波空気振動がきわめて多様なかたちでわれわれの身近な生活空間に存在している。それらが直接的に苦情の対象にはならないとはいえ、比較的高い音圧レベルで存在していることは今日の機械化された生活様式から見ても容易に推測されよう。各機器とも騒音レベルは十分に低くおさえられており、生活の快適性は年々向上してきたことは周知のとおりである。騒音に対する苦情は騒音の低減をうながし、その成果はわれわれの身近に接することのできる諸事例に見ることができる。低周波空

気振動についてはここに示したように、計測すればたしかに高いレベルで存在することが判明することは事実であろうが、日常それに気付くことは殆んど無い。自然、天然現象の中にも古来から低周波空気振動が存在していたことを考えれば、今日提起されている公害問題としての課題にはきわめて複雑な要素が介入して来るものと考えられる。

低周波空気振動の生理的、心理的な影響についての研究が医学界の一部を中心に進められているが、現在のところ未知とされる部分が多い。

4. 道路周辺における低周波空気振動

序論でもふれたように、低周波空気振動が社会問題化している事例の一つに道路の沿道における環境問題がある。現在、論点となっているのは高架道路および道路橋の周辺における低周波空気振動である。

道路用地の取得が困難な国情から在来の道路の上に高架構造の道路が建設されたり、山間部の都市間自動車道路では谷間を橋梁で横断するなどの方策がとられている。高架道路や橋梁の床版は構造上の要求からたわみが生じるように設計されている。したがって重量車が走行した場合、床版にたわみが生じるとともに振動も発生する。振動の性状は橋梁のスパン長や構造、橋種あるいは走行車輛の速度、積載荷重、車種などによって複雑に異なるが、床版が何らかのかたちで振動すれば空気中に波動を生じせしめる結果となることが十分考えられる。

橋梁のたわみ振動の他にジョイント部分をタイヤが通過するさいに励起する衝撃も加わって高架道路や橋梁からは低周波空気振動が放射されるといった論議がしばしば行われてきた。^(註6)ここではその実態を解明するために行った道路橋周辺における低周波空気振動の調査結果をのべるとともに、一般道路についても調査を実施し、橋梁以外の道路の周辺であっても低周波空気振動が存在することを明らかにするものである。ここで注目すべきことは、一般道路においてもかなり高いレベルの低周波空気振動が観測されるにもかかわらず、そこから低周波空気振動についての苦情等の公害問題が提言されていないことである。逆に言えば低周波空気振動の苦情には物理的に低周波空気振動が存在するか否かとは直接に関係しない要素が介入しているのではなかろうか。

(1) 橋梁周辺で観測される低周波空気振動

橋梁の振動が励起するであろう低周波空気振動に関する実態の解明は未だなされていない。それというのも現場における橋梁の挙動がきわめて複雑であること、橋梁ごとに構造と挙動および立地条件が個別的であることなどの理由によって、一般的な共通論議を進めにくいからであろう。橋梁周辺の低周波空気振動の性状を論議する場合に周辺地形の影響を無視することはできない。^(註7)低周波空気振動が反射したり遮蔽されたりすることによって凹凸、起伏の多い単純でない地形が音圧レベルの複雑な空間分布状況を形成する。したがって現場において音圧レベルの分布状況を正しく把握するには、多数のマイクロホンを広大な空間に設置して音圧レ

ベルを同時計測することが要求される。実際にはそのような調査を実現することは困難である。

ここで報告する調査は次の条件を満足する橋梁に限定して実施した。

- 1 幅員10m程度の2車線道路
- 2 鋼鈹桁型式の構造
- 3 防音のための遮音壁がない道路
- 4 周辺が平坦な単純地形であること
- 5 近くに他の幹線道路が存在しないこと

これらの条件を前提として表5に示す5つの梁橋を選定した。

表5 調査橋梁の型式および上部構造

	橋梁型式	橋高	支間長	幅員	伸縮継手
A 橋	3径間連続鋼鈹桁	8.1m	66.3m	10.6 m	鋼フィンガー
B 橋	3径間連続鋼鈹桁	22.0m	36.0m	10.5 m	鋼フィンガー
C 橋	単純鋼鈹桁	10.8m	36.4m	10.75m	鋼フィンガー
D 橋	2径間連続鋼鈹桁	6.6m	37.7m	10.0 m	鋼フィンガー
E 橋	4径間連続鋼鈹桁	7.8m	42.5m	10.6 m	鋼フィンガー

これら5つの橋梁はいずれも供用中の道路橋であって交通量はきわめて多い。

マイクロホンの設置位置は図9に示すように橋梁長軸に対して横断方向とし、多チャンネル同時計測の方式でマイクロホン出力をデータレコーダに収録した。分析は研究室においてテープを再生解析する方法で行った。現場における低周波空気振動の収録系列を図10に示した。

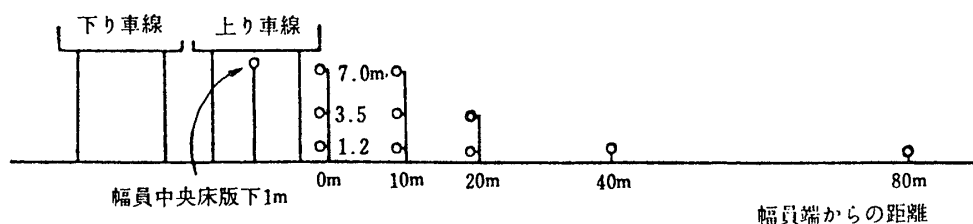


図9 マイクロホンの設置位置

これらの橋梁のうち、最も構造が単純なのはCの単純鋼鈹桁橋梁である。ここではC橋で得られた結果を中心に、道路橋から放射される低周波空気振動の伝搬特性についてとりまとめた。

道路橋の中央橋軸の横断方向で得られた低周波空気振動を1/3オクターブバンド音圧レベルによって図11に示した。自動車の走行によって励起される空気振動は一定現象ではなく、時間

的に変動する。図11に示したデータは測定時間中に大型車が通過したさいの最大ピーク値に注目したものである。

低周波空気振動の音圧レベルは橋梁に近い位置ほど音圧レベルが高いという点についてはき

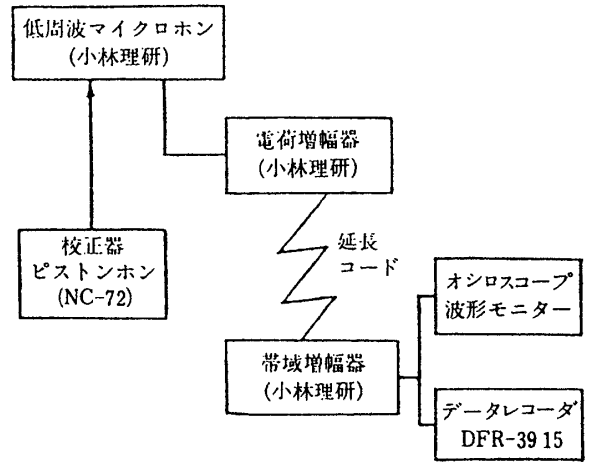


図 10 低周波空気振動の収録系列

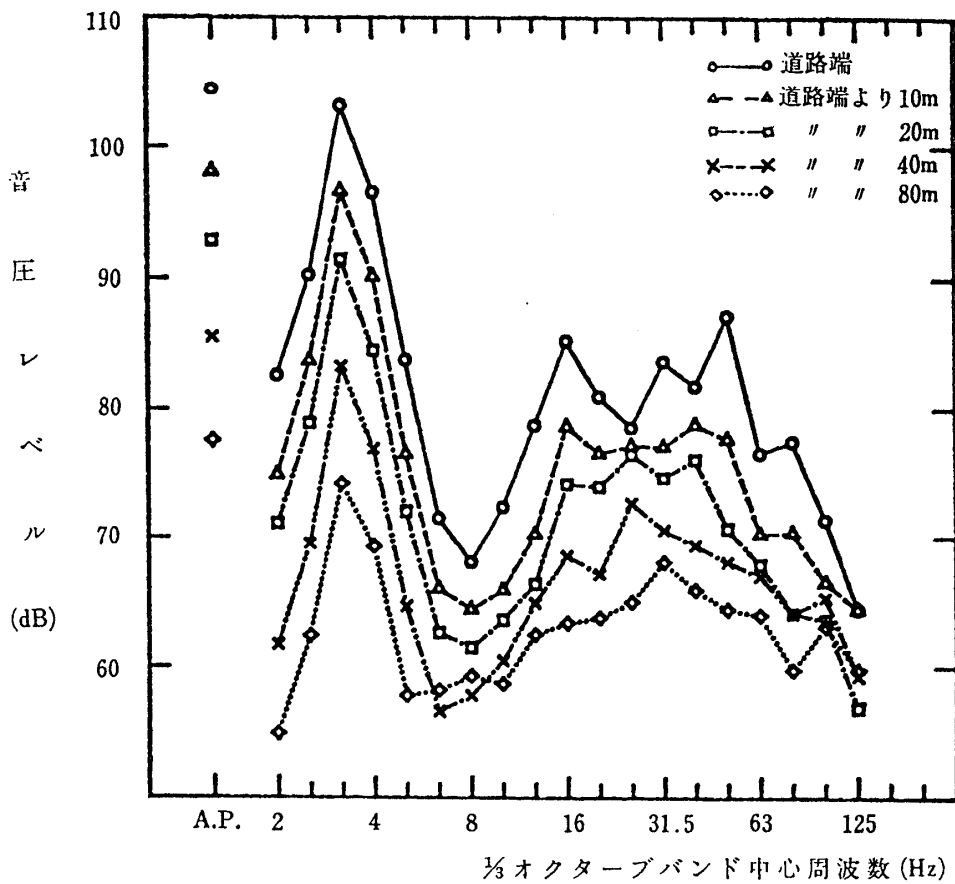


図 11 周波数分析結果 (ピーク値)

わめて常識的な結果が示されていることになるが、ここで注目されるのは低周波数領域の音圧レベルの減衰が高周波数領域のそれに比べて顕著に大きいことである。3.15Hzの道路端の音圧レベルは103dBであるのに対して80m地点では74dBとなり、減衰量は29dBであるが、例えば8Hzでは10dB程度の減衰、16Hzでは20dB程度の減衰というように低周波数領域の減衰が大きい。図12は同じデータを横軸に道路端からの距離をとり、周波数をパラメータとしてプロットしたものである。各周波数の道路端における音圧レベルを0dBとして整理した。低い周波数ほど音圧レベルの距離による減衰が大きい傾向を明確に見ることができる。

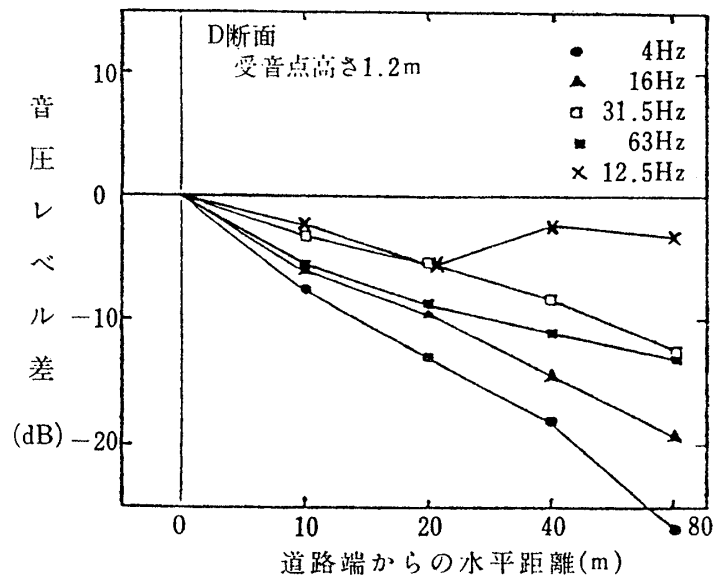


図 12 周波数別の距離減衰傾向

低周波空気振動といえども物理的には伝搬特性が一般の音と異なるものではない。音の音圧レベルは音源からの距離とともに低減し、その減衰傾向は音源が点音源の場合には(6dB/倍距離)、線状音源の場合には(3dB/倍距離)が原理的に与えられている。ただし、この減衰傾向は音源に指向性が無く、周辺に反射物や遮蔽物のない自由音場を前提として理論的に求められたものである。

道路橋を音源と考えた場合、橋梁を構成する部材の振動が寄与するので、この音源は複雑な形状であるとともに音波の放射メカニズムも単純ではない。また周辺は地表面その他が存在しており自由音場ではない。

このような条件では音源からの距離と音圧レベルとの関係は一義的にはならない。図13に1/3オクターブバンド音圧レベルの空間的分布を実測値にもとづいて等音圧レベル分布範囲を用いて図示した。周波数による分布性状の特徴が見られている。すなわち4Hzに見られるように低い周波数では等音圧レベルを示すコンタが鉛直に立ち上った状態で、これが63Hzのように高い周波数になると彎曲した形状になっている。

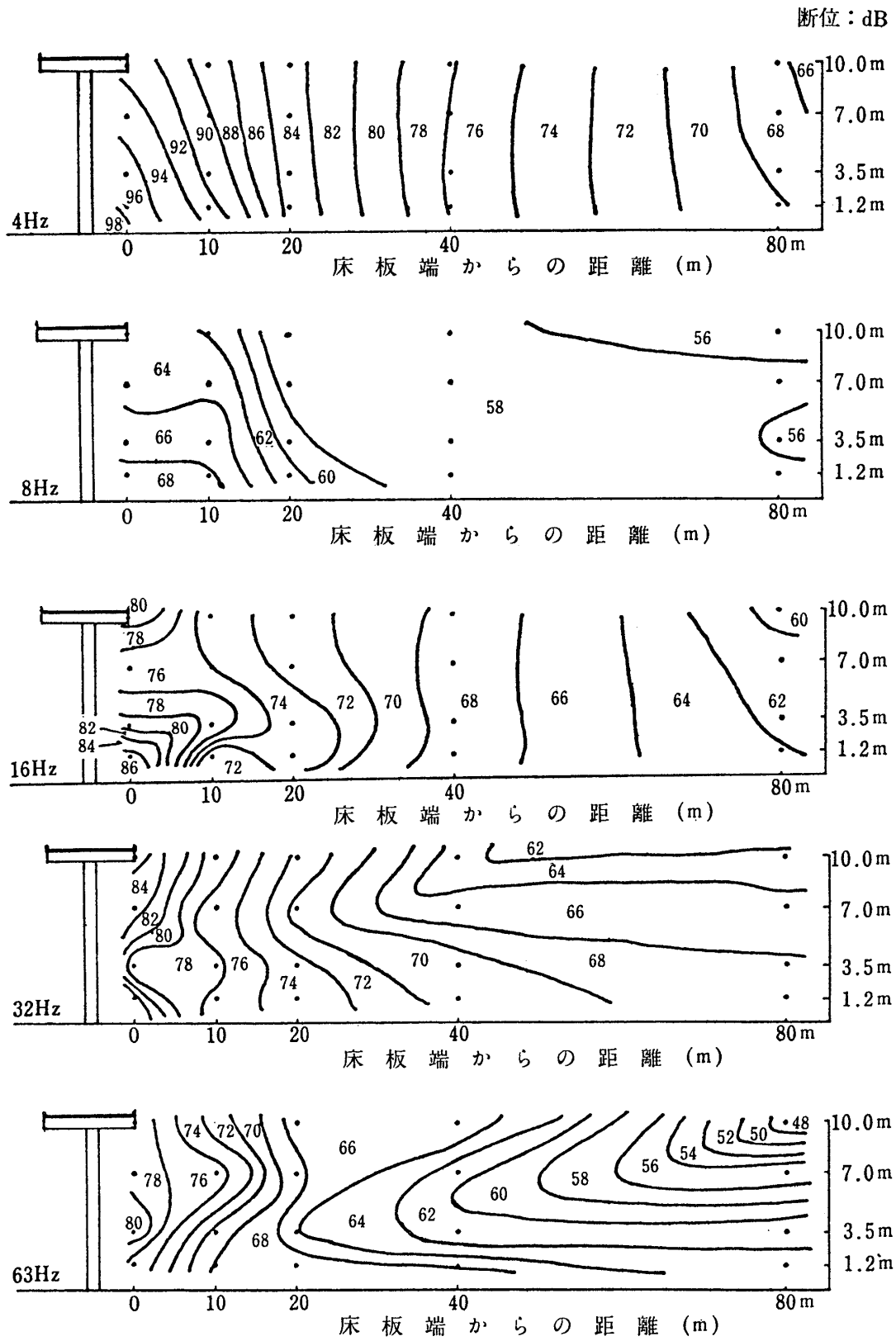
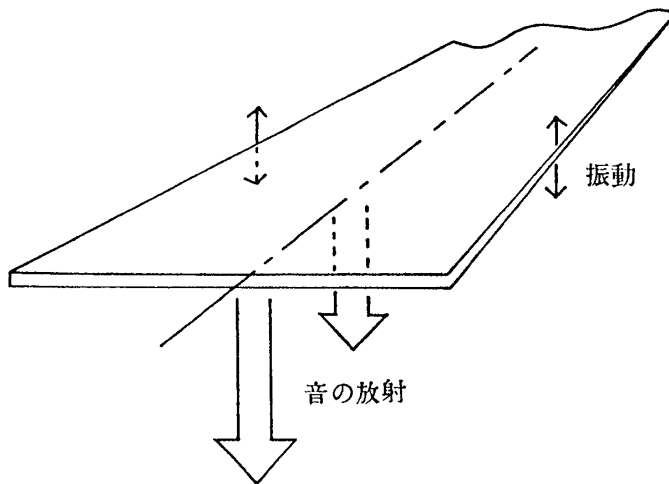


図 13 周波数バンド別の横断面音圧レベル分布 (ピーク)

これらのデータの示す内容から下記の事項を推論した。

- (イ) 数 Hz の低い周波数の橋梁横断方向への空気振動の伝搬について——横断方向では音圧レベルの減衰が顕著である。床版のたわみ振動が空気振動を励起しているとするれば、低い周波数が主であり、この種の板振動に起因する音の放射は板の面に垂直な方向に強い指向性を持つ。このために横断方向では音圧レベルの減衰が急激な傾向に観測されたものと考ええる。(図14参照)

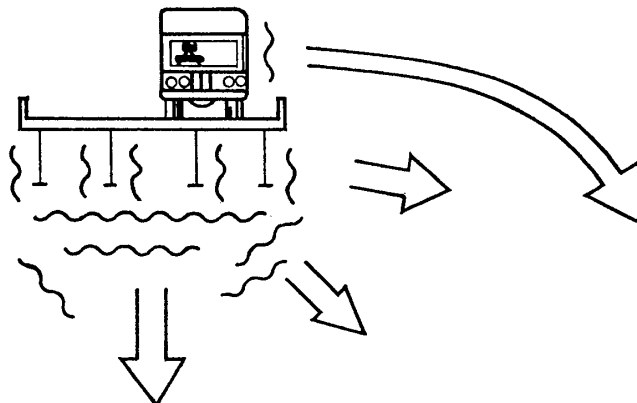


板の垂直方向に空気振動の放射が強い。この方向では音圧レベルの減衰は少なく、これに垂直方向（板の横断方向）では減衰が大きい。

図 14 (イ) の説明図

- (ロ) 数 10Hz の比較的高い周波数の橋梁横断方向への空気振動の伝搬について——音圧レベルの減衰が低い周波数の場合よりもゆるやかである。床版振動に起因するものよりも橋梁部材および走行車輛の放射する音が優位となるために(イ)でのべたような指向性が生じにくい。また、走行車輛の音は橋梁からある程度離れた距離の場所の方が強く寄与する。このために距離による減衰が低周波数領域の場合よりも少なめとなっているものと考ええる。

(図15参照)



空気振動(音)が特定の方向ではなく全方向に放射される。走行車輛からの音は直下よりもやや離れたところに伝わりやすい。(直下は床版に遮蔽される。)

図 15 (ロ) の説明図

い) 63Hzに見られるような彎曲したコンタについて——橋梁から放射された空気振動は地表面によって反射される。空間的には直接波と反射波が混在するかたちとなる。その結果2つの波が干渉して音圧レベルの高い部分 (Loop) と低い部分 (Node) が生じて、複雑な分布性状を示す。模式的に図16に説明図を付した。

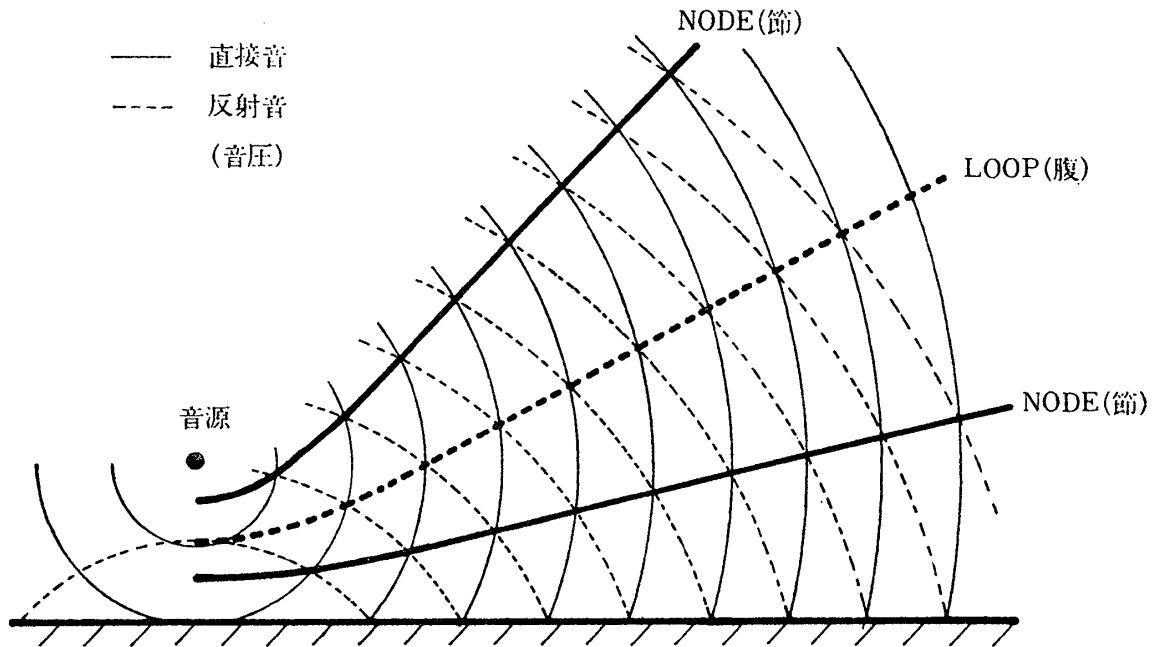


図 16 干渉による音圧レベル分布の複雑化

以上に道路橋周辺で観測される低周波空気振動の実態をとりまとめたのべた。低周波空気振動の発生機序については未解明の部分を残しており、ここに述べたのはそのごく一部でしかない。一般的には道路橋が放射する低周波空気振動は図17に示すような概念で説明されている。

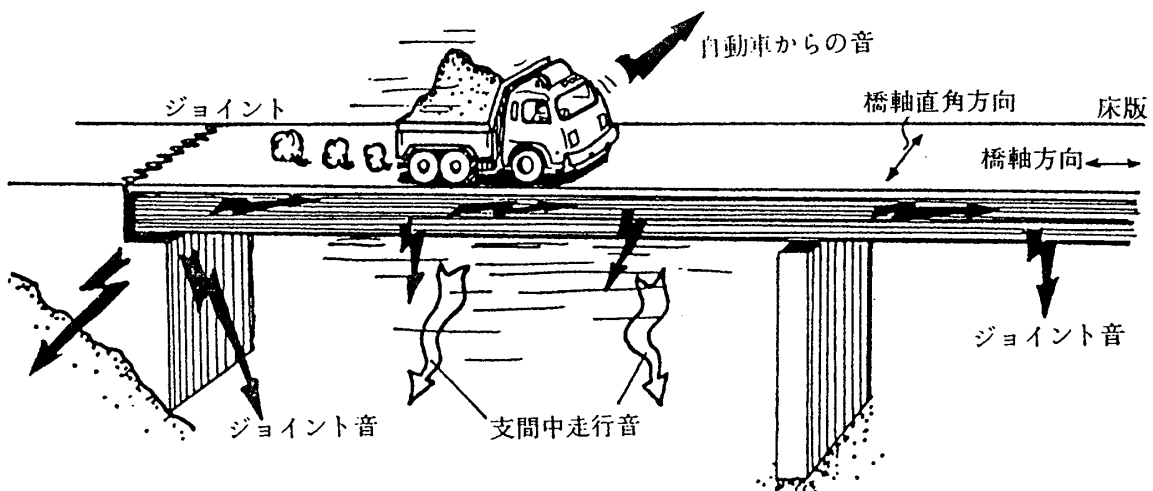


図 17 橋梁から発生する低周波空気振動 (概念図)

低周波空気振動は橋梁の近傍地域で論議されることが多いが、自動車自体が放射する空気振動も少なくない。例えば盛土区間で得られたデータを図18に示したが、橋梁の無い区間においてもかなり高い音圧レベルの低周波空気振動が観測されることが確認された。

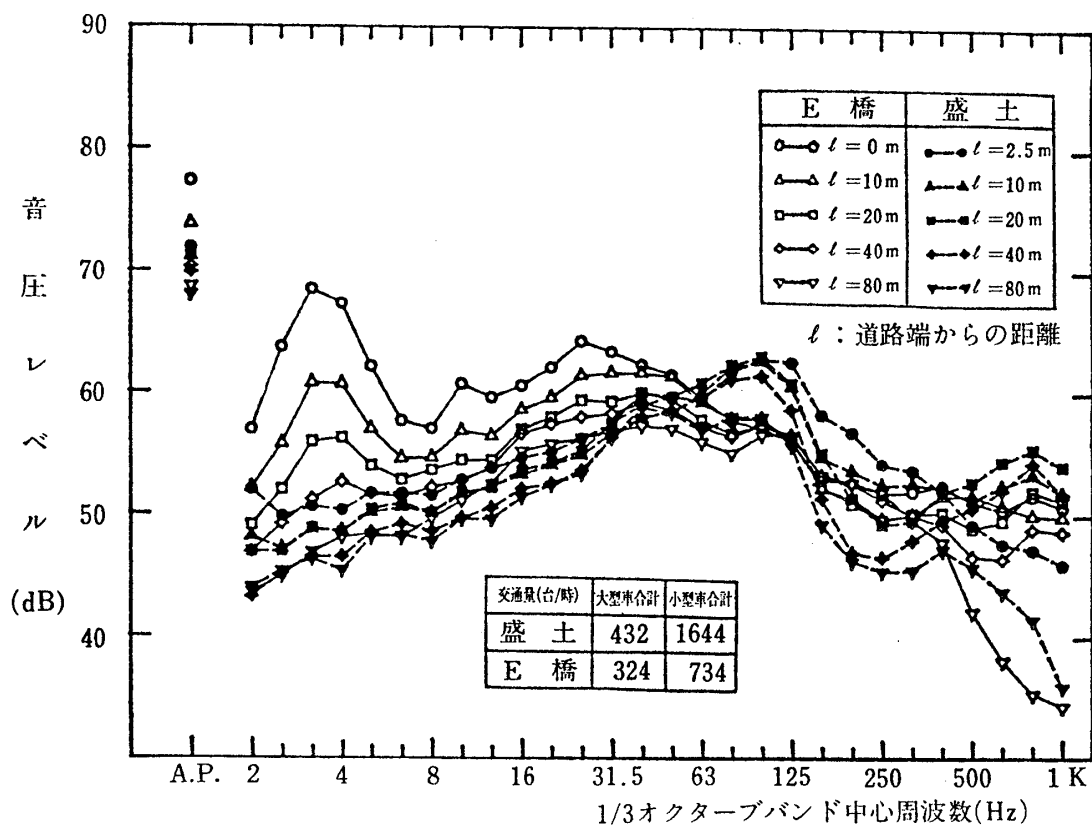


図 18 橋梁と盛土区間における低周波空気振動の比較（中央値）
（40Hz 以上の周波数では両者の差は認められない。）

(2) 都市内主要道路における低周波空気振動

前項で述べた道路橋における低周波空気振動は床版の振動によって励起されると考えられる数 Hz の周波数成分に特徴づけられるが、一般にわれわれが生活している空間で遭遇する低周波空気振動は可聴領域の騒音と同時に存在していることが多く、低周波数成分だけが独立して低周波空気振動を構成している例はほとんどない。

騒音の評価指標の騒音レベルはさきにのべた図 1 の等ラウドネスをもとに規定されている周波数レスポンス(註8)を付加した指標である。したがって低い周波数の空気振動に対しては騒音レベルの数値が小さくなる。

ここでは東京都内の主要幹線道路に面した中高層建物に低周波空気振動計測用のマイクロホンを取りつけて、低周波数成分の存在を把握する実験を行ったので、その結果について述べる。調査対象とした建物は表 6 に示す 2 つのビルで、面接する道路の条件と周辺建物条件が異なる。

表 6 測定対象とした建物と周辺条件

事例	建物高さ	面する道路	周辺状況
1	7階造	4車線, 平坦	中高層ビル連立
2	14階造	6車線, 平坦+4車線高架	中低層ビルの中で当該ビルのみ高層ビルとして独立

事例1は幅員40mの4車線道路に面し、事例2は幅員45mの6車線道路とこの上に平行に4車線の高架道路が設けられている複合道路に面している。測定実施時の交通条件は、事例1では乗用車のみ1,650台/時、事例2では高架上に4,170台/時（内552台が大型車）、一般道路に3,846台/時（内2,466台が大型車）で、事例2の方が交通量および大型車の走行の点で事例1に比べて利用度の高い道路である。事例1と2の周辺配置図を図19に示した。図中数字は建物の階層数である。

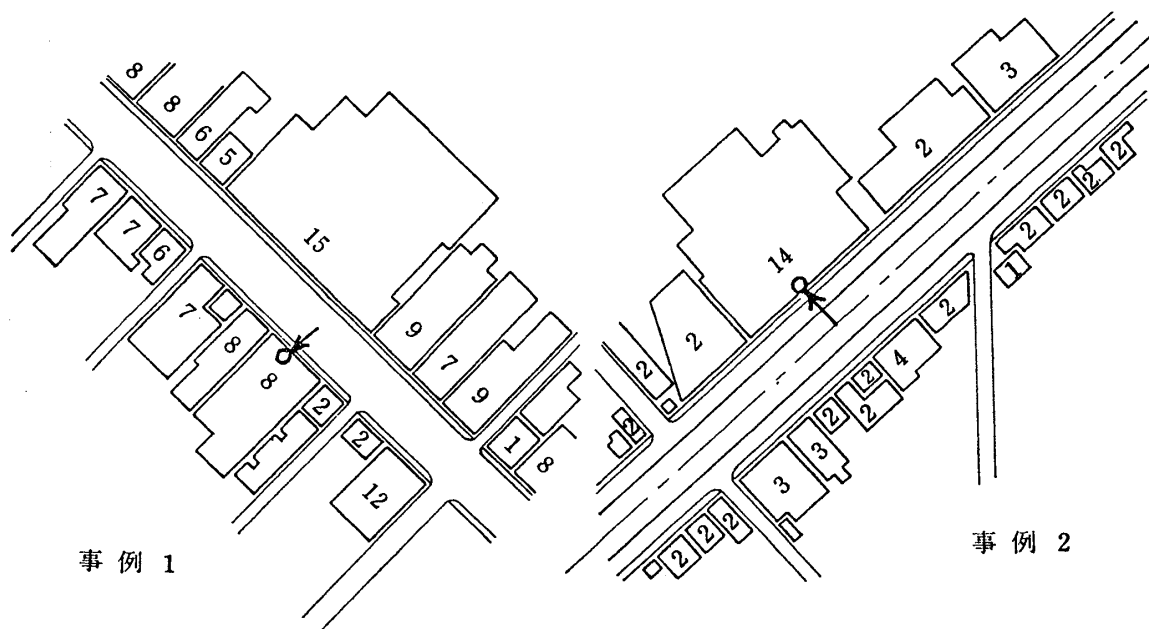


図 19 測定実施対象の建物配置図

現場ではデータレコーダに信号を録音し、これを研究室で再生分析するこれまでに述べたと同様な方法を適用した。事例1、2ともに建物外壁にマイクロホンを取りつけ、多チャンネル同時計測とした。

測定結果を表7(1)、(2)に示した。ここで低周波空気振動の音圧レベルは2~90Hzの周波数範囲でオールパスの音圧レベル、LSLは「低周波音レベル計の周波数レスポンス」として提言^(註9)されている補正を加えた音圧レベルである。LSLレベルは50Hzを中心に、これより低周波数については-12dB/oct、高周波数については-18dB/octの傾斜でウェイトづけされたレスポンスで、感覚閾値の特性をもとに提言されたものである。

表7の数値は中央値L50、90%レンジの上下端値L5、L95である。

表 7 (1) 事例一 1 の測定結果

測定地点	特 性	低周波空気振動音圧レベル (2~90Hz) (dB)	L S L (dB)	騒音レベル (dBA)
		L ₅₀ (L ₅ , L ₉₅)	L ₅₀ (L ₅ , L ₉₅)	L ₅₀ (L ₅ , L ₉₅)
1 階 室 外		84 (86, 82)	81 (86, 78)	—
4 階 室 外		82 (86, 79)	79 (85, 74)	—
5 階 室 外		82 (86, 79)	79 (85, 74)	—
6 階 室 外		82 (87, 79)	78 (83, 73)	—
7 階 室 外		82 (85, 80)	76 (80, 73)	63 (66, 61)
8 階 屋 上		83 (86, 79)	75 (80, 71)	—
4 階 室 内 (窓閉時)		72 (74, 70)	68 (73, 64)	—
5 階 室 内 (窓閉時)		71 (74, 69)	66 (71, 63)	—

(2) 事例一 2 の測定結果

測定地点	特 性	低周波空気振動音圧レベル (2~90Hz) (dB)	L S L (dB)	騒音レベル (dBA)
		L ₅₀ (L ₅ , L ₉₅)	L ₅₀ (L ₅ , L ₉₅)	L ₅₀ (L ₅ , L ₉₅)
2 階 室 外		81 (90, 76)	70 (77, 63)	68 (71, 64)
4 階 室 外		83 (94, 77)	70 (79, 63)	71 (75, 67)
6 階 室 外		88 (100, 79)	74 (87, 65)	76 (80, 71)
8 階 室 外		88 (100, 79)	74 (85, 66)	78 (82, 73)
10 階 室 外		89 (99, 81)	76 (87, 67)	78 (82, 73)

表中に騒音レベルの測定値を一部に併記した。

事例 1 の低周波空気振動音圧レベルは、低層階から上層階まで 82~84dB とほぼ一定値であるのに対して、事例 2 では上層階ほど高いレベルとなっている。上下端値の差は事例 2 の方が事例 1 よりも大きく、上端値の音圧レベルは事例 2 では 100dB を上層階で記録している。LSL レベルでは事例 1 の値の方が高い結果となった。交通量が格段に多く、多数の大型車輛が走行する事例 2 の方が LSL レベルが低いことは興味深い。騒音レベルは明らかに事例 2 の方が高く、交通条件によく対応している。

事例 1 は図19の配置図に見られるように道路に沿って高層ビルが立ち並んでいる状況で、道路を走行する自動車の放射する騒音および低周波空気振動はビルの谷間で反射をくり返し、道路の周辺が拡散音場的になっていることが推測される。事例 2 では道路の両側に立ち並ぶ高いビルは少なく、道路の近傍に空気振動がこもり易い条件ではない。

図20に事例 1 の 4 階で得られた周波数分析の結果を上下端値、中央値で示した。50Hz 付近に高い音圧レベルが見られる。

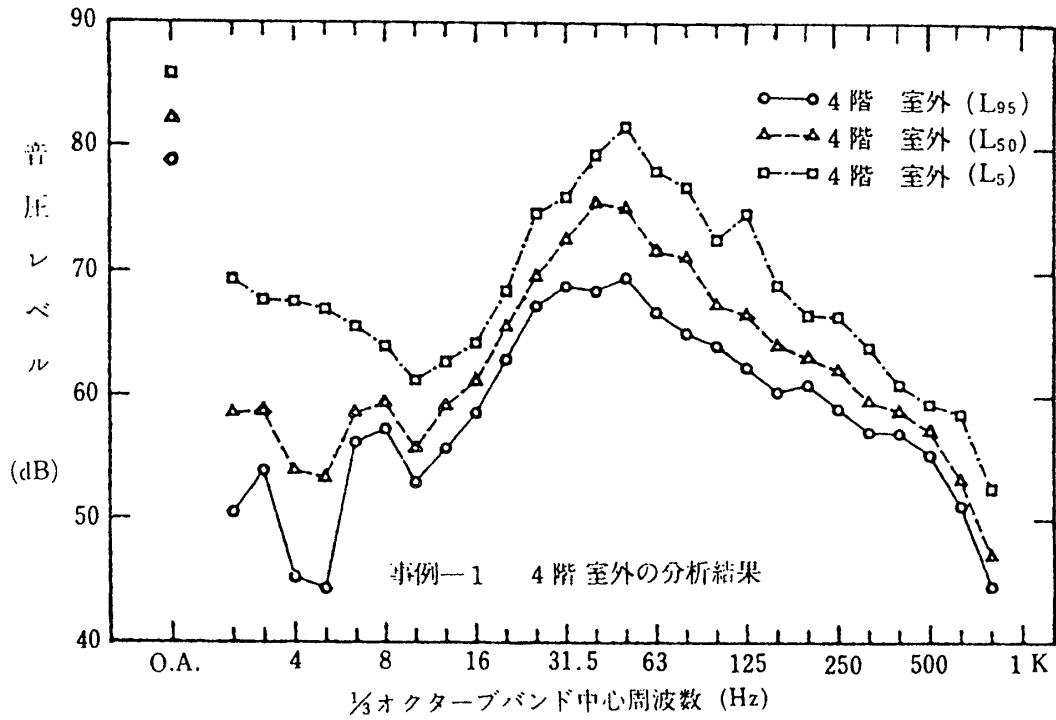


図 20 事例一の4階室外で得られた周波数分析結果

図21は都市内の一般道路の道路端で得られた低周波空気振動の周波数分析結果の3例である。いずれも周辺が開放の条件である。ばらつきはあるが50Hz前後の音圧レベルが高い点では事例1の結果と類似の傾向である。このことから、事例1で見られた低周波空気振動は自動車の走行によって励起されるものと考えられる。すなわち、内燃機関の吸排気、冷却ファン、車体の振動、風切り音などいくつかの空気振動の発生源としての候補を挙げる事ができる。

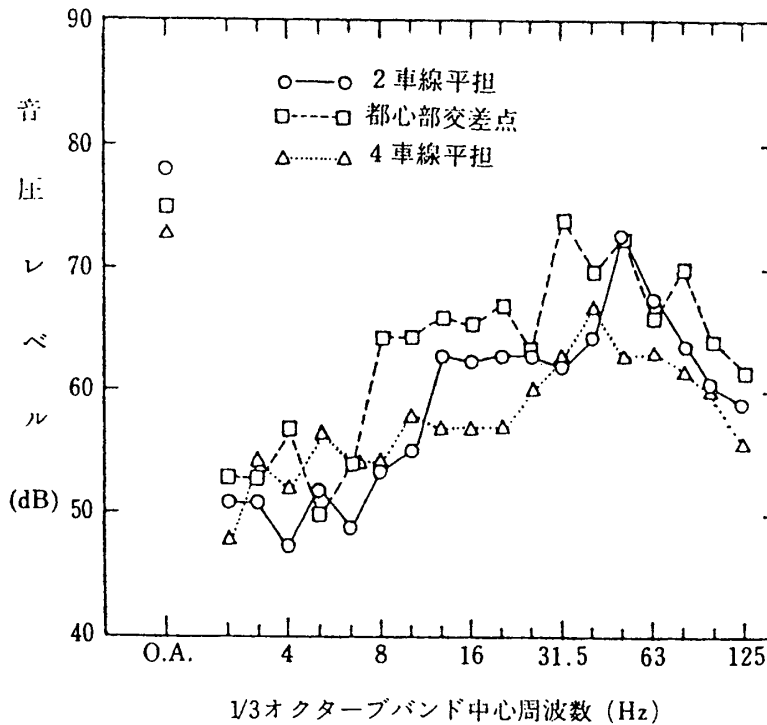


図 21 一般道路の道路端で観測された低周波空気振動のスペクトル例

事例1の各階で得られた低周波空気振動の周波数分析結果は図22に示すように、すべてのデータがほぼ等しいレベルにまとまっている。しいて言えば1階の音圧レベルが最も高く、上層階ほど音圧レベルが低くなる傾向である。

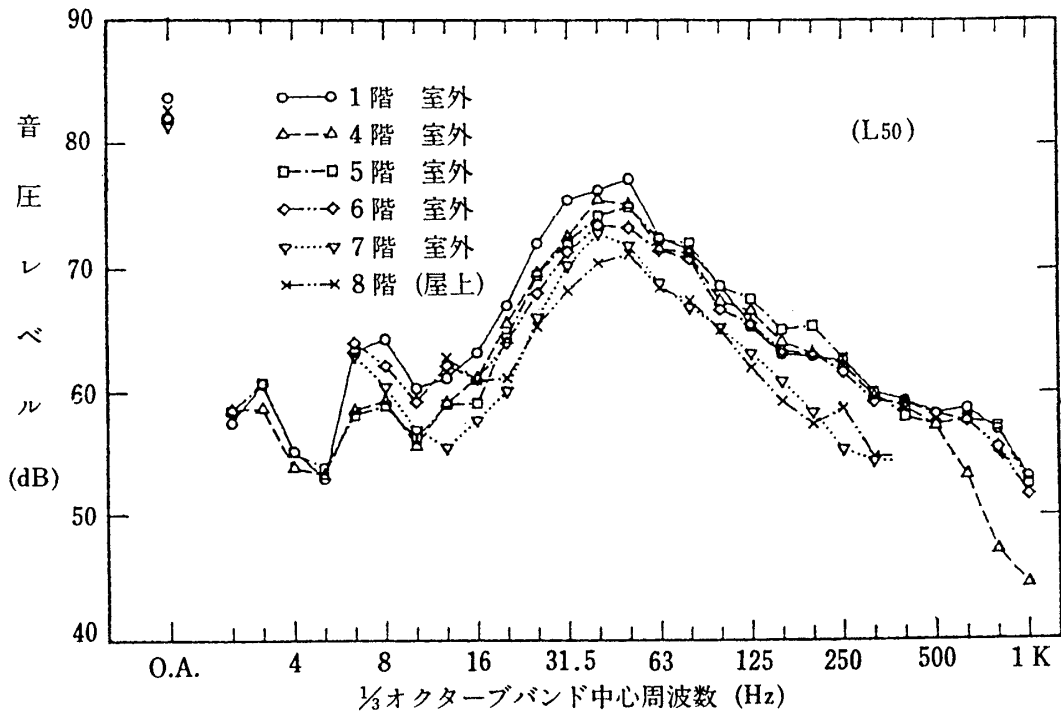


図 22 事例一1の周波数分析結果

事例2ではその傾向が逆で、図23に示すように上層階の音圧レベルが高い。

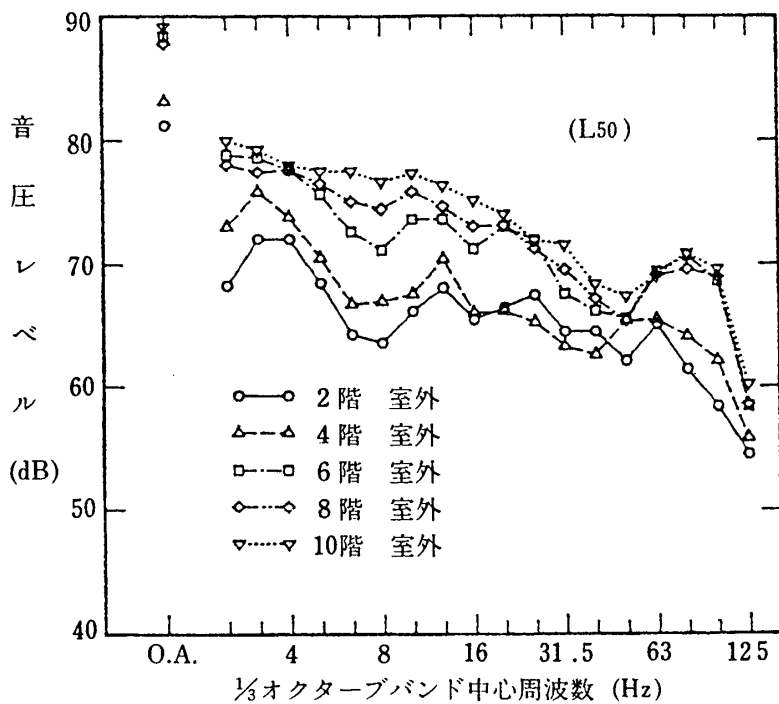


図 23 事例一2の周波数分析結果

一方、図24は大型車の通過時およびアイドリング時に観測された音圧レベルである。低周波数領域の成分が通過時には比較的多いとは言え、40Hz前後の周波数帯域にピークを持つ山形となっており、この傾向は事例1の特性に近い。事例1は乗用車のみで走行する条件であったことにてらして、事例2の左上りの周波数分析結果が大型車による要素とは考えにくい。

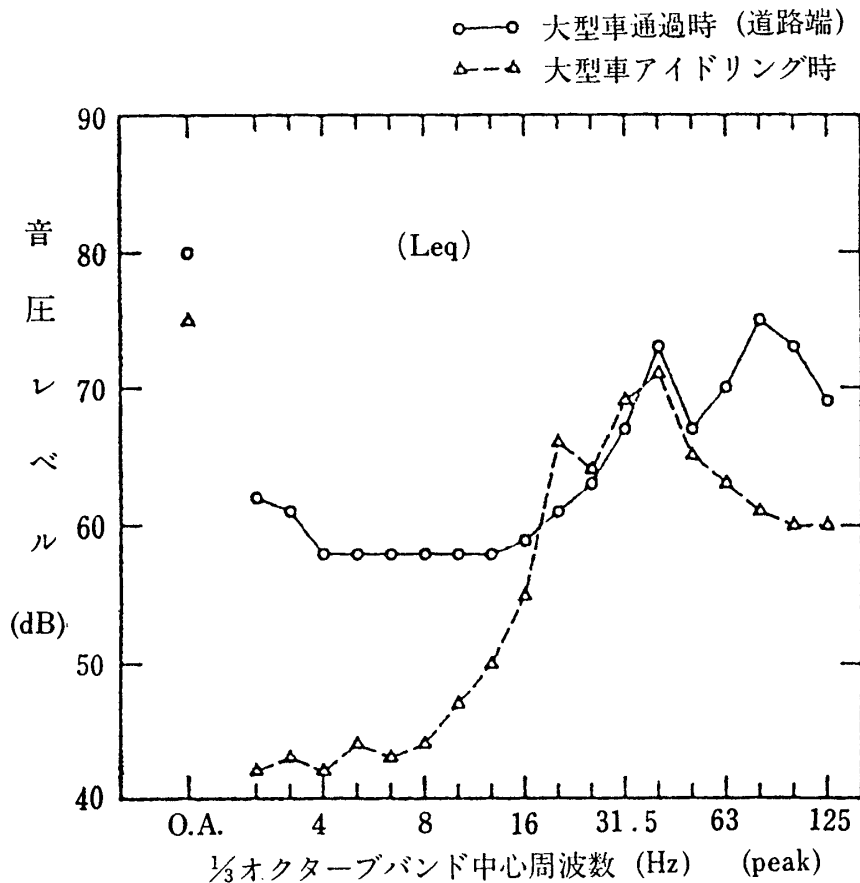


図 24 大型車の通過時およびアイドリング時の分析結果

事例1, 2間の最も大きな違いは高架道路の有無である。一般道路の上に高架道路が設けられていることによって、一般道路を走行する車輛のひき起こす空気振動がとじこめられたかたちとなってエネルギー上昇が生じること、また高架道路の床版が振動することによって空気振動放射があることなどの特徴を挙げるができる。事例2では図23に見られるように、高架道路の路面よりも下側に位置する2階と4階、高架路面よりも高い位置の6階以上とがデータの上で2つのグループにわかれ、レベル的には下側よりも上側の方が高めの傾向であった。上層階に対しては高架道路上を走行する車輛からの放射音が直接影響するために上層階で高めの音圧レベルになったものと考えられる。

以上の述べたように都市内の一般道路においても40Hz~50Hzの比較的低い周波数成分が高い音圧レベルで観測されることが明示された。これが直接苦情につながるものとは考えにくく、普通、一般の騒音に関心が向けられ、低周波空気振動に対してはその存在すら気付かずに

すごされているのが実情である。低周波空気振動が公害要素として非常に複雑な部分を有していることを示す事例であろう。

この節の終わりに事例1の4階と5階の窓を閉じた室内で得られた音圧レベルを図25に示した。生活の場が室内であることを考えると、室内の音圧レベルの論議を欠くことはできない。低周波空気振動の波長がきわめて長く、室寸法と同程度あるいはそれを上まわる場合も少なくないために室の遮音性能、室内の音圧レベル分布などは一般の騒音の場合と異なった特性を示すものと考えられる。^(註10) 事例1のビルは鉄筋コンクリート造で窓はアルミサッシ、3mmのガラスを使用しているが、室内と室外の音圧レベル差は平均的に11~13dB程度で、10Hz付近の周波数帯では数dBの差しか見られていない。ここでは低周波空気振動に対する室の遮音性能を示す参考データとして一例をあげるにとどめた。

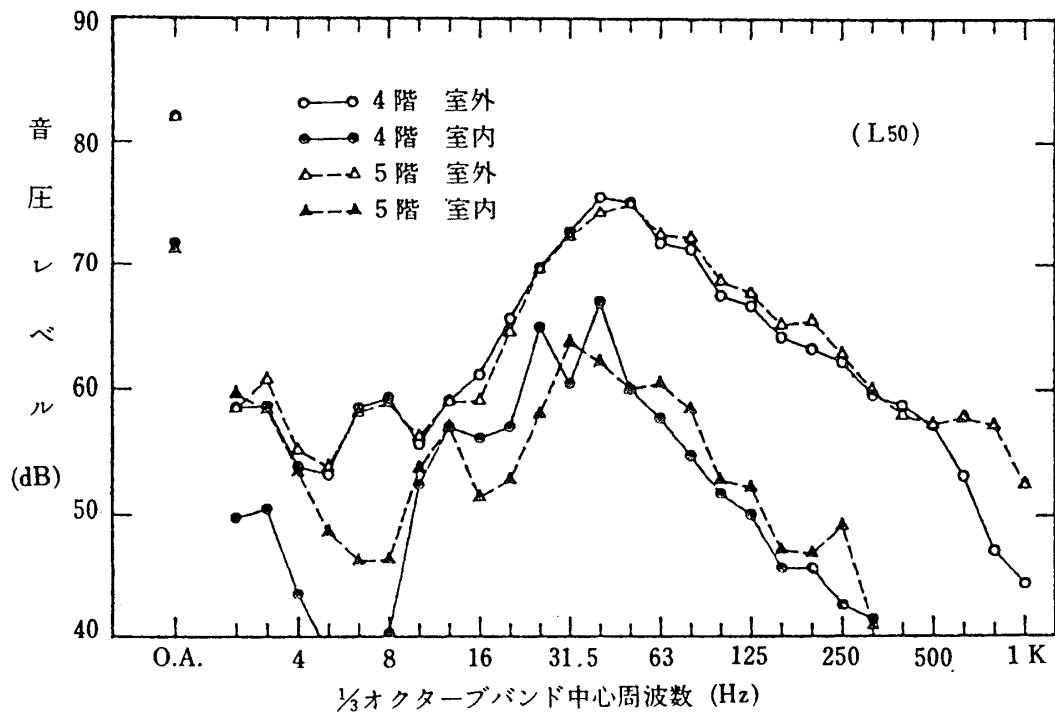


図 25 事例一1の4階および5階の室内外の分析結果（窓閉時）

5. 新幹線トンネル坑口における低周波空気振動

山陽新幹線の開通当時、トンネルの坑口付近でドカーンという音とともに建具がガタガタ震えるといった苦情が寄せられたことがあった。計測した結果、新幹線列車が高速でトンネル入口に進入すると反対側の出口付近で高い音圧レベルの低周波空気振動が存在することが明らかになった。図26にトンネル坑口から70mの距離で得られた音圧波形の例を示した。^(註11)

ここではトンネル坑口から放射される低周波空気振動についてその発生メカニズムを解明するために行った実験的研究の結果をとりまとめた。

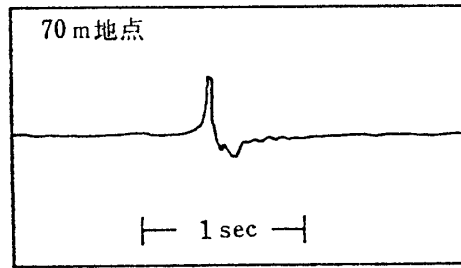


図 26 新幹線トンネル付近の低周波空気振動の音圧の波形

トンネルに新幹線が高速で進入する事象を現場で詳しく解析することは困難であるために、次に述べるような単純モデルに置き換えて実験的な検討を進めた。すなわち、内径 50mmφ の硬質ビニールパイプに円筒状の突入物をたたき込む装置によって空気振動の発生状況を把握する方法である。

図27に実験装置の概要を示した。突入物はゴムばねによってガイドラインとして張りわたしたピアノ線に沿ってパイプ内に突入する。突入物の速度は2つのフォトトランジスタによって検出される。マイクロホン M_1 と M_2 はそれぞれパイプ内と出口における音圧レベルの観測用である。空気振動は衝撃的なインパルスであるために、シンクロスコープ(メモリースコープ)に波形を記録することとした。波形記録のためのトリガー信号はフォトトランジスタの出力電圧を利用した。

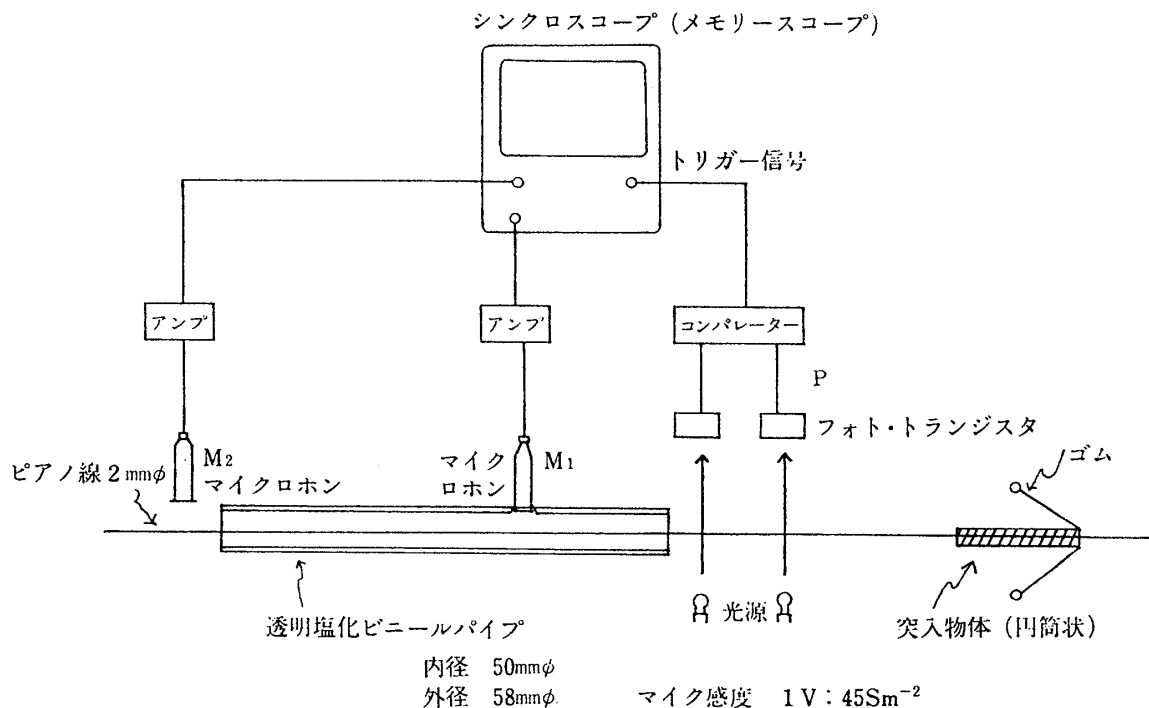


図 27 トンネル坑口からの空気振動に関する実験装置

実験によって音の放射性状と次の4つの要素との関係を検討した。

- (1) パイプの長さ
- (2) 突入物の先端形状
- (3) 突入物とパイプの太さの関係
- (4) 突入物の速度

実験結果とその検討を以下に列記する。

(1) 放射音とパイプの長さとの関係——パイプの長さを105cm, 315cmの2通りとして、パイプの出口側のマイクロホンで観測した音圧波形を図28に示した。両波形とも始めの立ち上りに続いて小さいが比較的規則性のある波が見られる。始めの波に続く小さな波の間隔から周波数を読みとると、105cmのパイプでは約160Hz, 315cmのパイプでは約55Hzである。

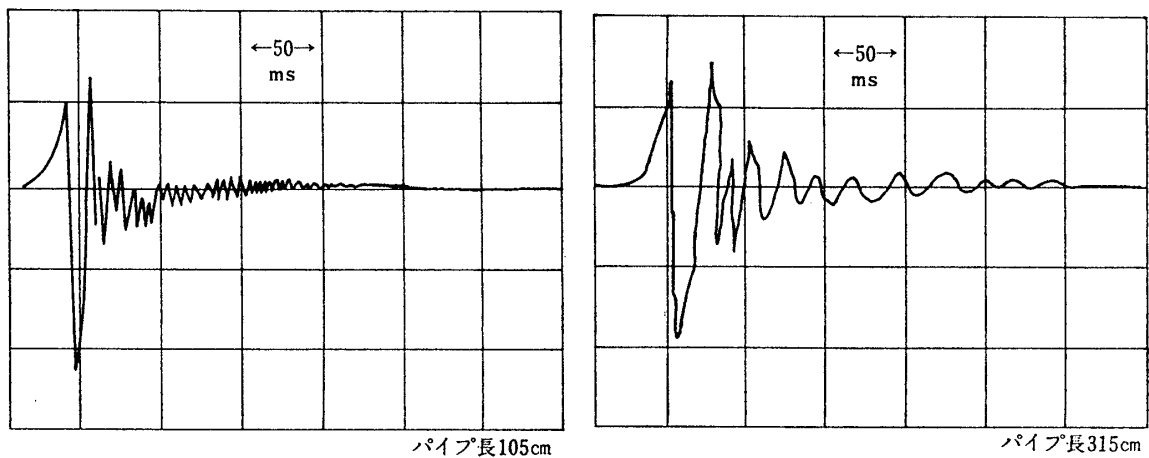


図 28 パイプ出口のマイクロホンで得られたの波形

パイプの共振周波数を開管とみなして計算すると 105cm のパイプでは

$$\nu = \frac{340}{1.05 \times 2} \doteq 162(\text{Hz})$$

315cm のパイプでは

$$\nu = \frac{340}{3.15 \times 2} \doteq 54(\text{Hz})$$

となって実験で得られた周波数に一致する。突入物の速度を変えた場合には波形の始めの立ち上りの形や振幅は変化するが、後に続く周期的な小山の間隔は変わらない。耳ではポンと聞こえ、この音の周波数はパイプの長さによってきめられるものと判断することができる。鉄道のトンネルであれば寸法的にパイプの長さが増すことになる。例えば 500m のトンネルの場合には坑口で観測される音の周波数 ν は上に示した式と同様に

$$\nu = \frac{340}{500 \times 2} \doteq 0.3(\text{Hz})$$

となる。ただしこれは共振周波数の第1次のもので実際には高次の周波数が存在することが考えられる。パイプによる実験では高次の共振周波数までを含めた検討はしなかった。

(2) 放射音と突入物の先端形状の関係——パイプ内音圧をマイクロホン M_1 によって観測し、図29に音圧波形を示した。円筒形の突入物を用いた場合が上図、先端を切り落した砲弾形にした場合が下図である。音圧波形の立ち上りかたに差が見られ、円筒形の方が波形に細かい凹凸がある。突入物がパイプ内に発生する圧縮波動に対して先端の形状が関与することが示された。

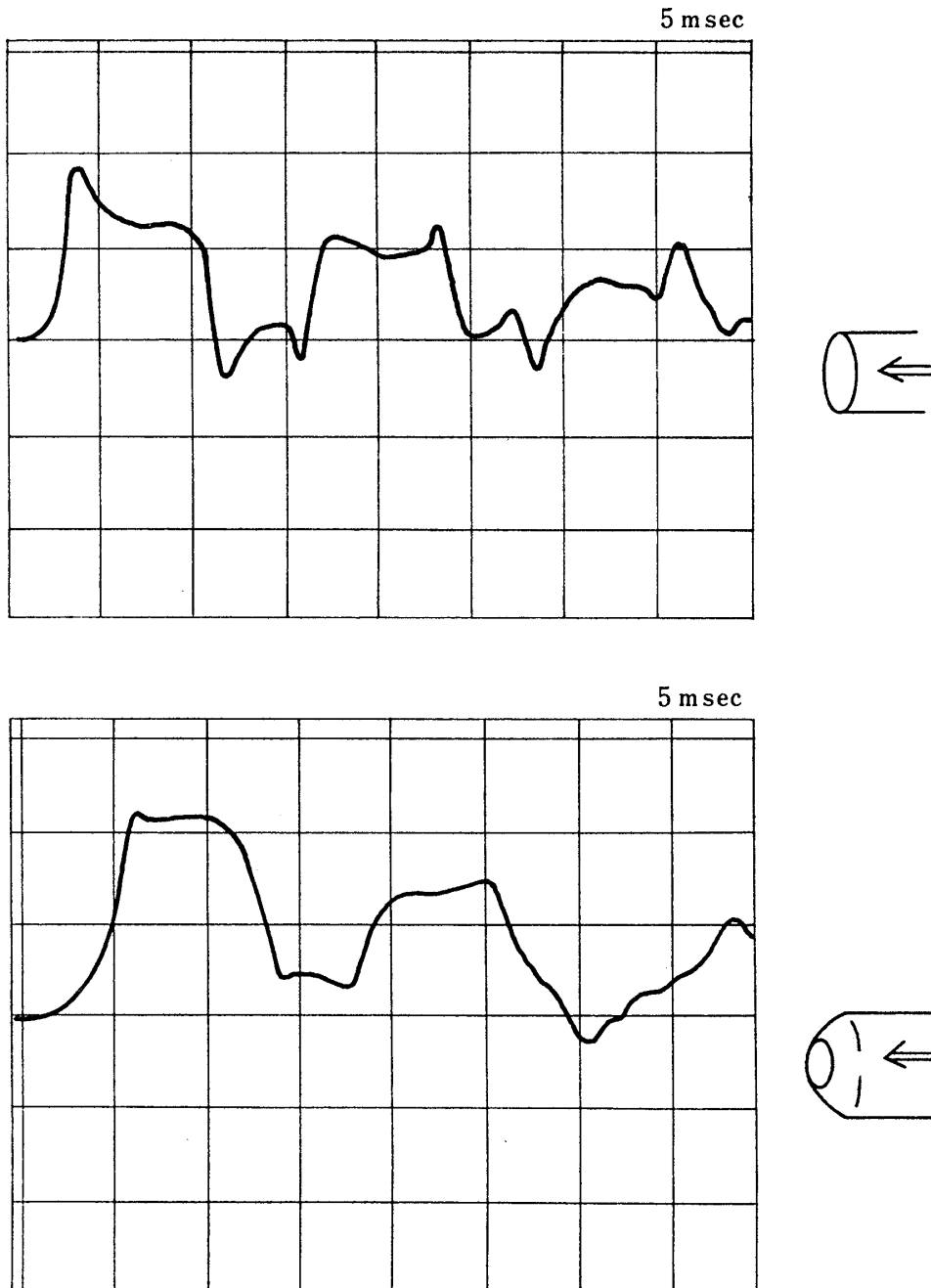


図 29 突入物の先端形状のちがいによるパイプ内音圧波形の差

パイプ内の圧縮波動の発生に関してさらに究明するために突入物の直径を変えて次の実験を行った。

(3) 突入物とパイプの太さの関係が放射音に与える影響——直径 50mm のパイプに対して突入する円筒の直径を 40mm, 37mm, 25mm の 3 通りに変えてパイプ内音圧波形の変化の状況を観測した。図30に音圧波形の立ち上りの部分を時間軸拡大して示した。突入速度は15m/s である。波形の第 1 ピークとその後に一旦安定する部分の音圧の比 (図中の b/a) を各波形に付記した。

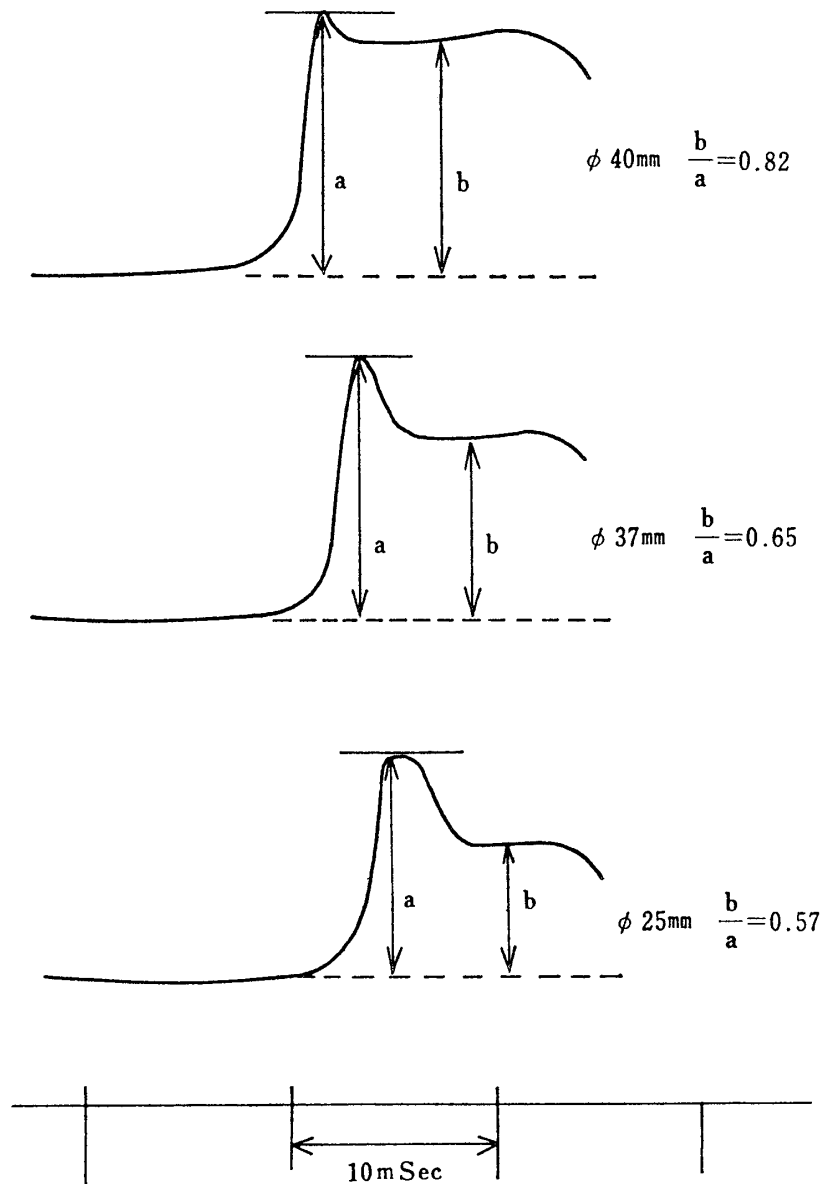


図 30 突入物の直径と音圧波形の関係

突入物の先端が砲弾形になったり、直径が小さくなることによってパイプ内に圧縮波を作り出しにくくなる傾向が明示された。

(4) 放射音と突入物速度との関係

突入物の速度がパイプ内に作り出される圧縮波に関係することが推測される。パイプ内の音

圧波形をさまざまな速度条件で測定し、マイクロホンの出力電圧と突入物速度との相関を図31にとりまとめた。直径の小さい突入物の場合にはパイプ内音圧が速度の増加に追従しない。直径が40mmの突入物の場合には速度の増加と音圧の関係が一義的に対応している。

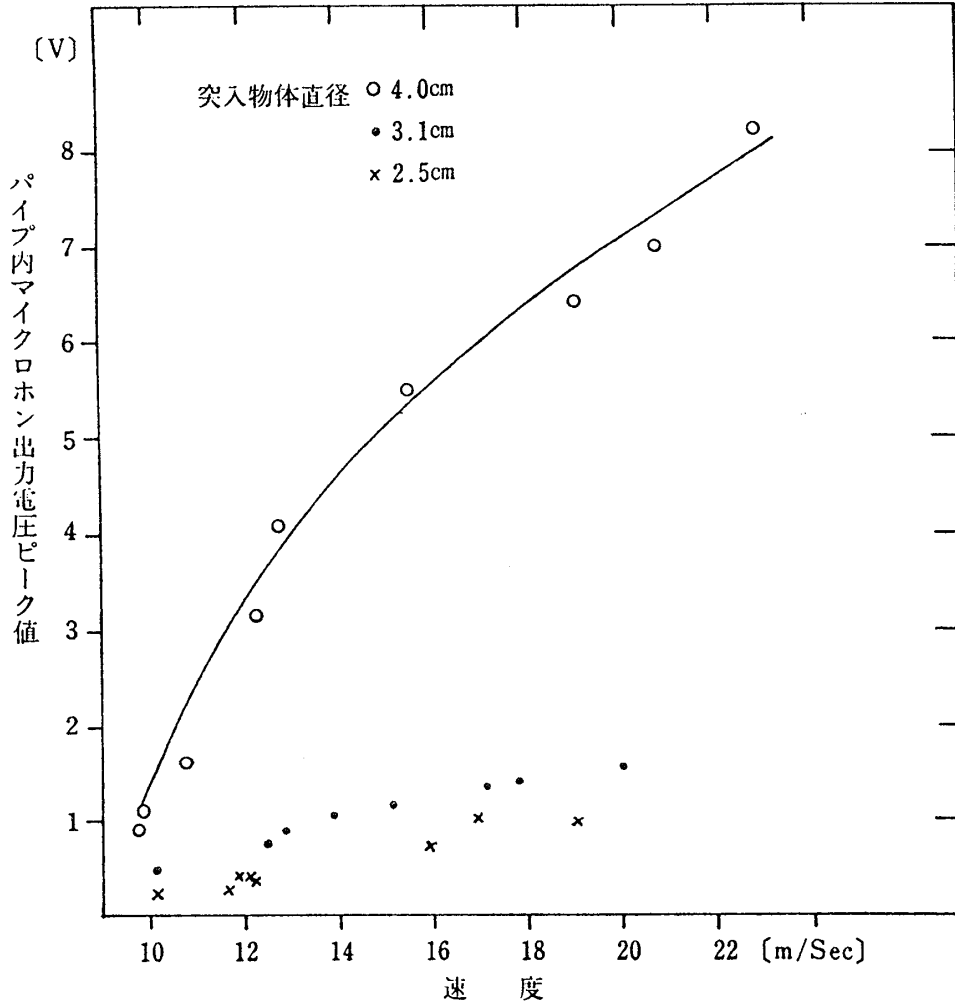


図 31 パイプ内マイクロホン出力と突入物速度の関係

この実験ではパイプ内音圧レベルを観測した。図32にパイプの出口に設置したマイクロホンとパイプ内のマイクロホンについて各々の出力電圧の関係を示した。両者が一義的な関係であることが明らかになった。

以上のべた実験成果をとりまとめると

- ① パイプ内に突入物が圧縮波を作り出す。
- ② 圧縮波は突入物の先端の形状や直径に関係し、パイプ内壁との間に間隙の少ない方が強い圧縮波を作り出す。
- ③ 突入物の速度が増すに従って圧縮波は強くなる。
- ④ パイプ出口の音圧は圧縮波の強さと一義的な関係である。
- ⑤ パイプの長さが音の周波数に関与する。

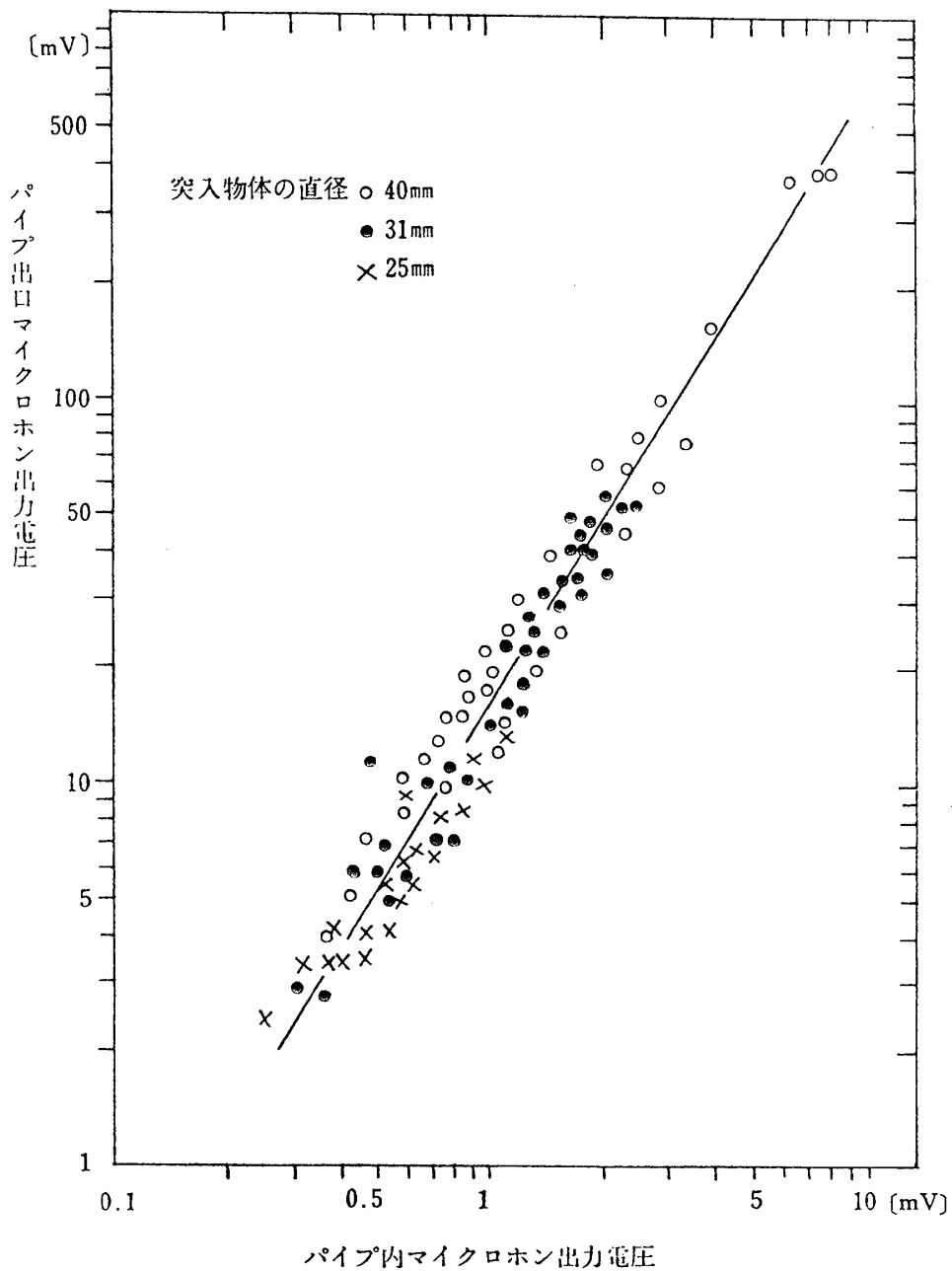


図 32 パイプ出口とパイプ内の音圧の関係

などの特性が示された。

これらの内容が直接、新幹線トンネル坑口から放射される低周波空気振動を説明するまでには至らないが、放射メカニズムを検討するさいの基礎的資料として参考になるものとする。

6. むすび

近年、新しい公害要素として注目され始めた低周波空気振動をとり上げていくつかの物理的な実態の究明を試みた。低周波空気振動は基本的に一般の音と何ら異なるものではない。赤外線が存在を目で感知できないのと似て、低周波空気振動に対する人間の聴覚は鈍く、音として

感じることはできない。ただし空気振動のエネルギーが極端に高い場合には、低周波空気振動といえども知覚することができる。また実際にわれわれの周辺に存在する低周波空気振動は可聴周波数領域の成分を含んでいる場合が多く、可聴音の範囲で非常に低い周波数の音を問題としているケースが多いようである。

ここでは一般の生活環境に存在する低周波空気振動の実測、道路橋周辺の低周波空気振動の特性の把握、また一般の道路の周辺にも存在している低周波空気振動の確認および新幹線トンネル坑口から放射される空気振動の発生メカニズム解明のためのモデル実験などについてとりまとめた。

耳に聞こえない騒音という表現で社会的に注目されているが、音と本質的に変わるものではなく、苦情の提言されていない地域においても様々な低周波空気振動が存在していることなどを考えると、今日公害要素となっている低周波空気振動の問題は、複雑な社会的背景を含めて検討する必要があるものと考えられる。

低周波空気振動の定義、計測方法、生理的・心理的影響の解明と評価方法などの研究が進められてはいるが、未だ確立された理念を示すには至っていない。実態を十分に把握した上での確かな結論を導くことが重要課題であるが、ややもすると苦情の要素に目が向けられて、誤った判断におちいることになりやすいので注意が必要である。おそらく今後数ケ年に低周波空気振動に関する研究は多方面で進められて、いくつかの成果が報告されることが予想される。騒音問題がそうであったように、長い期間の多角的な研究蓄積があった上で体系づけられるわけで、低周波空気振動についても、今日の苦情に対応することを急いで本質を誤るようなことがあってはならない。

(本学講師 = 音響学担当)

註

- (註1) I. S. O/TC-43 (Secretariat-32) 1955.
- (註2) Y, Tokita, and S, Nakamura. (1981) "Frequency weighting characteristics for evaluation of low frequency sound," Proceedings, Inter Noise 81, Amsterdam, The Netherlands, Vol. 2, pp. 739-742.
- (註3) Harris C. S. Aviat Space Enoiroment. Med. 47, 430 (1976)
- (註4) M. Yamashita, and M. Koyasu; "INFRASOUND IN DAILY LIVES". 10th International Congress On Acoustics, Sydney (1980).
- (註5) Second draft proposal ISO/DP 7196 for, Acoustics-Method of describing sound at infrasonic frequencies with respect to its effects on human beings.
- (註6) 足立 橋梁と低周波空気振動
騒音制御 Vol. 4-4 (1980)
- (註7) 山下他 「道路橋周辺地形と低周波音——縮尺模型実験技法の開発——」
日本音響学会講演論文集 昭和52年10月
- (註8) JIS-Z-8731 "騒音レベルの測定方法"
- (註9) 時田他 低周波音評価に関する一考察, INCE JAP. 昭和53年11月
- (註10) 山下他 室の低周波音応答に対する建具の影響 INCE JAP. 昭和52年11月
- (註11) 清水他 超低周波音公害の実態 音響技術 Vol. 6 (1)