

シリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」

－第1回 低周波音の基礎－

シリーズの連載にあたって

地方公共団体に寄せられる公害苦情相談に対応する担当者向け資料として、本誌第 65 号から第 72 号まで全 8 回にわたりシリーズ「騒音に関わる苦情とその解決方法」を、第 73 号から第 80 号まで全 8 回にわたり「振動に関わる苦情への対応」を、第 83 号から第 85 号まで全 3 回にわたり「悪臭に関わる苦情への対応」を掲載しました。

今回は、低周波音に関する資料として、一般財団法人小林理学研究所 落合博明工学博士にシリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」として全 5 回にわたり、執筆・監修いただきます（第 5 回については、公益社団法人日本騒音制御工学会 井上保雄会長に執筆いただく予定です）。

○シリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」

－第 1 回 低周波音の基礎－

一般財団法人小林理学研究所
工学博士 落合博明

連載にあたって

近年、音や振動に関する苦情は多様化しており、市町村へも様々な苦情が寄せられるようになりましたが、低周波音に係る苦情も増加しています。しかし、大部分の方は低周波音とはどんな音なのかを正確に理解されていないのではないかと思います。一方、マスコミで低周波音をオカルト現象のように取り上げるなどして恐怖心をあおる場合があり、視聴者や読者に誤解を与えています。これに加えて、インターネットにより誤った情報が拡散し、人々にあらぬ不安や更なる誤解を与えています。

公害等調整委員会機関誌「ちょうせい」では、シリーズ「騒音に関わる苦情とその解決方法」が連載され、その後、シリーズ「振動に関わる苦情への対応」が連載されました。本シリーズはその続きという位置付けで、低周波音に関わる苦情への対応について、以下の項目で 5 回にわたり解説を行います。

- ・ 第 1 回 低周波音の基礎
- ・ 第 2 回 低周波音苦情対応の進め方
- ・ 第 3 回 低周波音の苦情対応事例（その 1）
- ・ 第 4 回 低周波音の苦情対応事例（その 2）
- ・ 第 5 回 低周波音の防止対策方法

第 1 回では、低周波音苦情の変遷、低周波音の閾値、低周波音の影響など、低周波音に関する基礎的な事項について解説します。

第 2 回では、申立内容の把握、苦情現場の確認、測定方法、結果の整理方法、発生源側と申立者側の関連性の確認など、苦情対応のポイントとなる点に注目して、低周波音苦情への

対応方法について解説します。

第3回及び第4回では、実際の苦情対応事例を紹介し、低周波音苦情への対応で問題となる苦情原因が低周波音か否かの判定の仕方などについて解説する予定です。

第5回では、低周波音の発生源、発生メカニズム、防止対策方法の考え方などについて解説する予定です。このなかで、近年苦情の多い室外機やヒートポンプ給湯機、風力発電施設などにも触れる予定です。

なお、騒音と重複するところもありますので、「騒音に関わる苦情とその解決方法」を併せて参照されることをお勧めします。

第1回 低周波音の基礎

1. はじめに

私たちの身の回りには様々な音があります。大きい音、小さい音、高い音、低い音…。このうち、音の周波数に着目すると、虫や蝉の鳴き声はおよそ 3,000Hz から 5,000Hz、NHK の時報は予報音；440Hz と正報音；880Hz (Hz：ヘルツ)、変圧器の音は 100Hz または 120 Hz、ピアノで最も低い音は 27.5Hz に主な周波数成分を持っています。

人が普通の音の大きさで耳に聞こえる音の周波数は、成人ではおよそ 20Hz から 20,000Hz と言われています。この周波数より高い 20,000Hz 以上の音を超音波、1Hz から 20Hz の音を超低周波音と呼んでいます。また、可聴周波数を一部含む 1 Hz から 100Hz 未満程度の音を低周波音と呼んでいます [注1]。

ここで音の周波数と波長の関係について考えてみましょう。音の波長は、1秒間に音が進んだ距離（音速）を1秒間に繰り返される空気の圧縮・膨張の回数（周波数）で割った値として与えられます。音速は常温ではおよそ 340m/s なので、音の周波数が 1,000Hz であれば波長は $340 / 1,000 = 0.34\text{m}$ となります。同様に、100Hz では 3.4m、10Hz では 34m となり、音の周波数が低くなれば音の波長は長くなります。

例えば、高速列車がトンネルに突入する際に反対側の出口から発生する超低周波音について考えてみましょう。音の発生するメカニズムはおもちゃの空気鉄砲と同じです。ピストンを押し込むことにより筒の中の空気が圧縮され、反対側の孔から急に解放されることにより音が発生します。空気鉄砲の場合は「ポン」というかわいい音ですが、高速列車のトンネル突入では、スケールが大きくなったぶん周波数が低い方へ移行して、耳で聞き取れないような低い周波数の音（超低周波音）が発生します。

低い周波数の音はどんな機械や施設からでも発生するのではないかと思われている方もいらっしゃるかもしれませんが、低い周波数の音が発生するためには音の波長も長くなければなりませんから、それなりの大きさが必要です。

注1：超低周波音は国際規格 ISO 7196 で規定されているが、低周波音は国により周波数範囲がまちまちで、国際的に統一されていない。

2. 低周波音問題の変遷

我が国で低周波音問題が発生したのは1960年代後半のことです。主な発生源は工場・事業場に設置された大型の施設、道路高架橋、新幹線トンネル出口、ダムや堰の放流などです。主な苦情は20Hz以下の超低周波音による建具のがたつき等の物的苦情が苦情の多くを占めていましたが、その後1980年頃までに工場・事業場における超低周波音の対策が進み、苦情件数は減少しました。

環境庁では1976年から低周波音（当時は低周波空気振動と呼ばれました）の実態調査を開始するとともに、併せて実験室での実験なども行い、1984年12月に調査結果を公表しています¹⁾。

1993年、新幹線の高速化に伴い高速列車のトンネル突入時に発生する衝撃性の低周波音（圧縮波）による物的苦情が増加し、環境庁では1994年から低周波音に関する調査を再開しました。さらに、低周波音の測定方法・評価方法に関する検討を行い、2000年12月に「低周波音の測定方法に関するマニュアル」を公表し、全国で低周波音の実態調査を行いました²⁾。

測定マニュアルの公表や全国実態調査の実施により、低周波音がマスコミに取り上げられる機会も増え、低周波音に対する関心が高まり、それに伴い、2000年度以降低周波音に関する苦情が増加しました。1984年の調査では、物的苦情だけで苦情全体の2/3、心身苦情も併発しているものも含めると全体の9割以上を占めていました。2000年の調査によると、心身苦情だけでは苦情全体のほぼ半数を、物的苦情も併発しているものも含めると全体の7割以上を占めており、苦情内容も物的苦情から心身に係る苦情へと移行していることがわかりました。

ヨーロッパにおいては、1990年頃から家庭の集中暖房システムから発生する可聴域の低周波音が問題となりましたが、我が国においても、近年、可聴域の低周波音苦情が増加しています。苦情発生源の多くは近隣の工場・店舗等に設置された空調室外機、冷凍機、ボイラー、ヒートポンプ給湯器等の機器（固定された発生源）です。これら苦情発生個所の室内で観測される低周波音は、20Hz～100Hz程度の周波数域に主要成分を持つものが多いです。これらの苦情は室内で問題が発生しており、苦情発生個所で観測される低周波音は音圧レベルの変動が小さく、20Hzより高い周波数域に主要成分をもつのが特徴です。家屋の遮音性能向上等により、室内の暗騒音レベルが低下しています。室内においては家屋外部からの騒音のうち中高周波数域の成分が大きく低減し、観測される外部騒音の主要な周波数が低い周波数域に移行していることから、これまで中・高周波数域の騒音により目立たなかった低い周波数の音が目立つようになったと考えられます。

環境省では、このような苦情に対処するため、「低周波音問題対応の手引書」を2004年6月に公表しました³⁾。手引書における低周波音苦情への対応方法には、公害等調整委員会での苦情対処における経験が反映されています。

3. 超低周波音の発生機構と発生源

超低周波音の発生機構別の発生源の例を表-1²⁾に示します。例えば、道路橋の場合には、

大型車がジョイント部（橋の継ぎ目）を通過する際に橋の床版が加振され、橋の床版の上面側と下面側から、数 Hz 程度の超低周波音が発生します。表に示すように、いずれも大型の施設や構築物が発生源となっています。但し、多くの発生源では低減対策がなされており、これらの発生源から必ず問題となるような低周波音が発生するわけではないことに注意が必要です。

表-1 超低周波音の発生機構と発生機構別の発生源

平板の振動によるもの	板や膜の振動を伴うもの等	大型の振動ふるい、道路橋、溢水ダムの水流等
気流の脈動によるもの	気体の容積変動を伴うもの等	空気圧縮機、真空ポンプ等の圧縮膨張による容積変動
気体の非定常励振によるもの		大型送風機の翼の旋回失速やシステムのサージング、振動燃焼等
空気の急激な圧縮、開放によるもの		発破、鉄道トンネルの高速での列車突入等

4. 低周波音の影響

4.1 低周波音の閾値

人の音に対する感度は 3,000Hz あたりが最もよく、周波数が低くなるにつれて悪くなる傾向にあります [注 2]。音を聞き取れる最小の音圧レベルを聴覚閾値または最小可聴値と言います。低周波音については、周波数が低くなると「聞こえる」という感覚よりは「感じる」という感覚なので、感覚閾値と呼んでいます。

注 2：「騒音に関わる苦情とその解決方法」、第 3 回、2. 音の聞こえ方と騒音レベルの「等ラウドネス曲線」を参照。

図-1 に騒音と低周波音の閾値に関する実験結果の一例を示します。

低周波音の感覚閾値⁴⁾は多くの研究者によって検討がなされていますが、図に示すように大部分の結果は 20Hz 以上について求められている最小可聴値(国際規格 ISO 389-7)の延長線上にあります。図より、1,000Hz の閾値は 2 dB なのに対して、100Hz では 27dB、20Hz では 78dB、10 Hz では 93~97dB となっており、人は周波数が低くなるほど大きな音でないと聞き取れませんし感じません。特に 100Hz 以下の周波数では音に対する感度が極端に悪くなっていることがわかります。

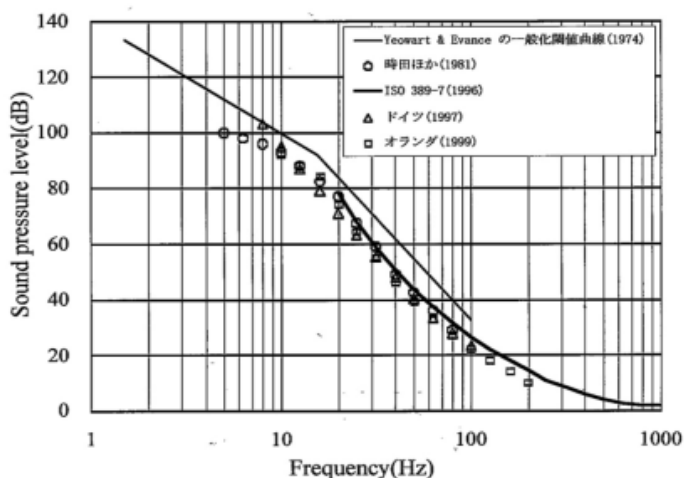


図-1 低周波音の感覚閾値および可聴音の閾値

4.2 聾者の閾値

低周波音の苦情を申立てる方の中には、低周波音を耳ではなく頭蓋骨で感じるとか、身体で感じるとかと言われる方がいらっしゃいます。本当に、頭や身体で感じるのでしょうか。

聾者と健聴者(一般人)それぞれに対して低周波音の閾値を調べる実験が行われました。実験結果を図-2に示します⁵⁾。図より、聾者の低周波音の閾値は健聴者の閾値より約30dBほど高くなっています。

また、これとは別に、一般人を対象とした耳栓をした場合としない場合における低周波音の閾値実験でも同様な結果が得られています⁶⁾。

また、低周波音の音圧レベルを上げてゆき、身体で振動感覚を感じられるのはどの程度の音圧レベルなのか(低周波音による振動感覚の閾値)を求める実験が行われました。実験によると、振動感覚の閾値は聴覚閾値よりも5~15dB高いという結果が得られています⁷⁾。海外における研究でも、低周波音による振動感覚の閾値は音による閾値よりも数十 dB 高いという報告がされています。

これらの結果から、人は低周波音を皮膚や頭蓋骨ではなく、感度は鈍いものの耳で感じていること、振動感覚として感じるのは低周波音の音圧レベルが聴覚閾値よりもかなり高い場合であることがわかります。

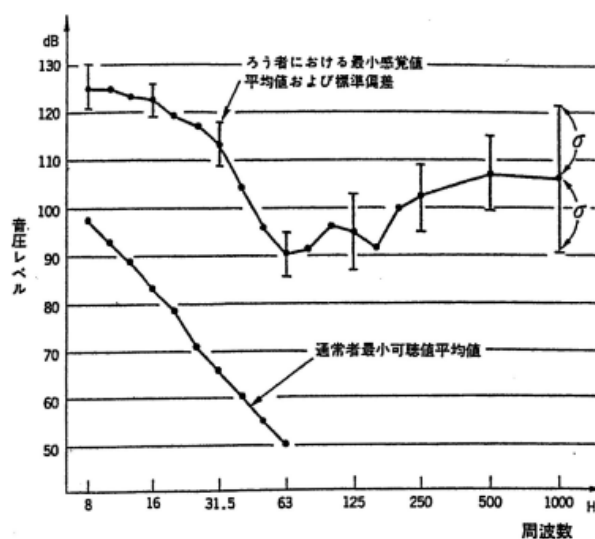


図-2 聾者と健聴者の低周波音の閾値比較

4.3 低周波音の生理的影響

生理的影響に関する研究は、心拍数・呼吸数、脳波、血圧、尿中ホルモン、眼振等に着眼して実験が行われています。

実験条件は、周波数は2~100Hz程度、音圧レベルは感覚閾値を中心に50~120dB程度、試験音の提示時間は数分から1時間程度です。

実験結果によると、110~120dB程度の高い音圧レベルにおいて表-2に示すような生理反応が一部にみられたものの、

表-2 低周波音の生理的影響実験結果

循環器系	心拍数減少または増加 収縮期血圧減少(血圧低下)
呼吸器系	呼吸数の軽度の減少または増加 呼吸数変化(呼吸の深さ、基線動揺)
神経系	脳波: α 波、 β 波、 θ 波の振幅増加や閾値レベルで α 波減少
内分泌系(ストレス反応)	定常純音: 尿中アドレナリン、ノルアドレナリン、ドーパミン、17-OHコルチノイド、有意な変化なし 2-20Hz変動模擬音(L50=95dB,変動幅16dB,90分暴露): アドレナリン/クレアチニン、ドーパミン/クレアチニンの有意な増加
その他 (電気生理学的反応)	眼振の出現や消失 まばたき数の増加
動物実験	循環器系、呼吸器系(8時間暴露): ラットの心拍数、呼吸数の増加 消化器系(4週間暴露): 家兔の胃運動抑制

一般住空間に存在する程度（およそ 100dB 以下程度）の大きさの音圧レベルでは、低周波音による影響は確認されませんでした⁴⁾。

海外の多くの低周波音研究者の間でも、「少なくとも感覚閾値以上でないと生理的な影響は生じない」という点で意見が一致しています。

4.4 低周波音による睡眠影響

就寝している被験者に 1 条件につき 30 秒間低周波音を発生させて、低周波音による睡眠影響を調べました。

図-3 に実験の結果を示します¹⁾。図の縦方向には発生音の条件（周波数と音圧レベル）を、横方向には睡眠深度を示しています。表中の睡眠深度は数字が高いほど眠りが深く、REM とは眠っているはずなのに眼球が動いているという夢うつつの状態を表しています。また、図中の斜線部”W”は覚醒した(目が覚めた)ことを表しています。実験結果によると、感覚閾値を下回る程度の低周波音の暴露では、睡眠への影響は現れませんでした。したが、これより高いレベル（例えば 10Hz : 100dB、20Hz :

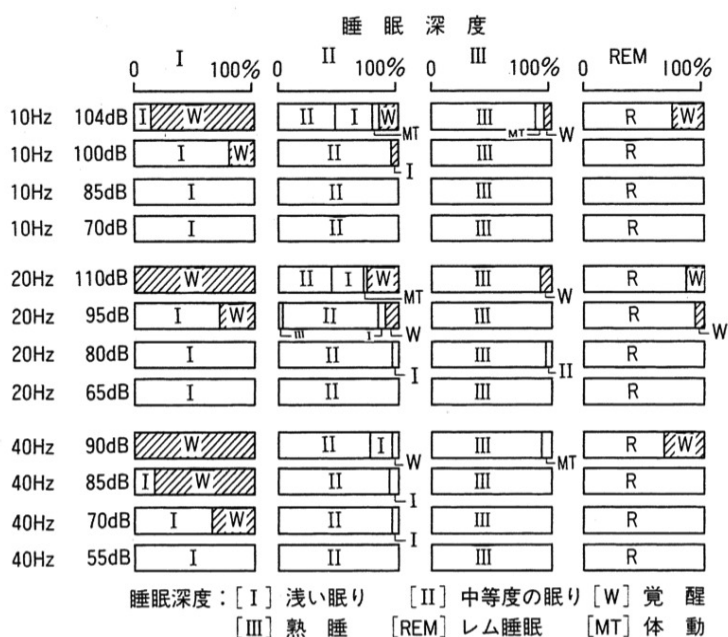


図-3 低周波音による睡眠実験結果

95dB) の低周波音暴露では、浅い睡眠時に影響が表れ始めるという結果が得られています。

4.5 低周波音による心理的反応

低周波音によって生ずる不快度について、周波数による違いを実験的に求めたところ、周波数が低くなるとより大きな音でないと同じ不快度を感じないという結果が得られました。

さらに、①入眠時の寝室、②静かに新聞を読んでいるときの居間、③事務作業中のオフィス、④肉体労働をしているときの工場、の4つの場面を想定し、低周波音に曝されたときに、低周波音を許容できる最低の音圧レベルを実験的に求めたところ、入眠時の寝室では許容できる音圧レベルが4つの場面の中で最も低く、閾値よりおよそ 5~20dB 大きい程度で低周波音を許容できない傾向がみられました⁸⁾。

周波数と音圧レベルを変えて低周波音・騒音を順次被験者に提示し、あらかじめ用意した用語の中から提示された音の感覚に最も相応しいと思われる用語を選択させる実験が行われました。その結果、低周波音に特有の感覚「圧迫感、振動感」がみられ、40Hz 付近を中心と

して特に強く感じられることがわかりました⁹⁾。

4.6 低周波音の物的影響

実験室の開口部に建具を設置し、建具に低周波音を照射して音圧レベルを徐々に増加させて、建具のがたつき始める（音を発生し始める）最低音圧レベルを求めました。実験結果を図-4に示します¹⁰⁾。実験で得られた結果の下限に沿うように引いた直線を「建具のがたつきの閾値(1977)」と呼んでいます。これによると、「建具のがたつきの閾値」は、5Hzでおよそ70dB、20Hzでおよそ80dB、40Hzでおよそ90dBとなっています。その後、建具の数や種類を増やして行った実験結果によると、建具ががたつき始める最低音圧レベルは、建具の種類、大きさ、重さ、取付け条件等により異なり、周波数別にみると30~40dBものばらつきがあり、「建具のがたつきの閾値(1977)」は周波数別に求めた建具のがたつき始める音圧レベルの平均-標準偏差に相当することがわかりました¹¹⁾。

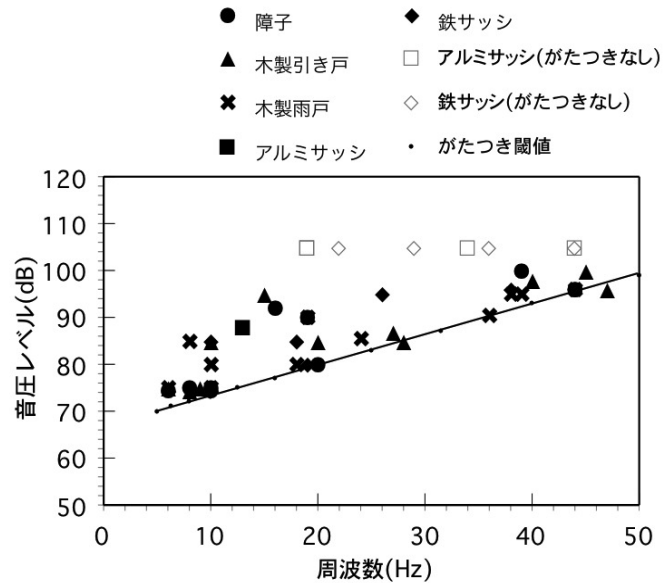


図-4 低周波音による建具のがたつき閾値(1977)

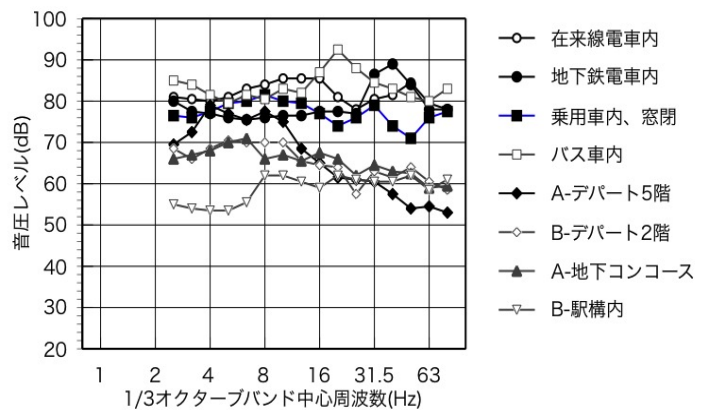


図-5 駅・デパート・乗物内における低周波音の測定例

5. 一般住環境における低周波音

低周波音は私たちが暮らしている一般住環境ではどの程度発生しているのでしょうか。一般住環境における低周波音の周波数特性の測定例を図-5及び図-6に示します¹²⁾。

図は横軸を音の周波数（単位：Hz）、縦軸を周波数別の音圧レベル（単位：dB）をとって示したもの

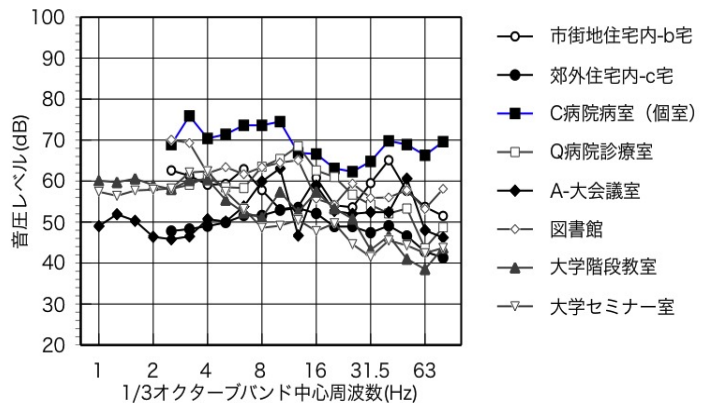


図-6 住宅内・建物内における低周波音の測定例

です。図に示した周波数別の音圧レベルは、人の周波数別の音に対する感度補正を加えていない値を示しています。

音がどこにでもあるように、低周波音もどこにでも存在していることがわかります。我々が日常生活している環境中に 50dB を上回るような音圧レベルの低周波音が存在するにもかかわらず、低周波音を感じないのは、人の音に対する感度が低い周波数ほど鈍いからに他なりません。

6. 低周波音の特性

6.1 低周波音の距離減衰

「低周波音は距離が離れても減衰しない」と言われることがあるそうです。本当にそうなのでしょうか。

低周波音の距離減衰測定例を図-7、図-8に示します^{13), 14)}。低周波音も、点音源であれば騒音の場合と同様に-6 dB/倍距離の割合で減衰します。但し地表面吸収による音の減衰は騒音に比べて極めて小さいです。

発破、爆発のような大音圧の低周波音では、遠方まで伝搬する際に気象の影響や地形の影響を受けます。気象の影響では、特に音源から 1 km 以上離れると、風向きや風の強さによって音圧レベルが 20~30dB 近くも変化します。地形の影響では、例えば起伏のある地形の場合、音源からの距離が同じでも、音源が見通せない場合には見通せる場合に比べて音源の遮蔽効果により減衰量は大きくなります。

6.2 低周波音の家屋内外レベル差

木造家屋、アルミサッシ窓を対象として、低周波音の家屋内外音圧レベル差の測定結果（平均値）を図-9に示します^{12), 13)}。これによると、6.3Hz 以下では内外レベル差はほとんどなく、8 Hz以上では周波数が高くなるにつれて内外レベル差が増加する傾向がみられることがわかりました。

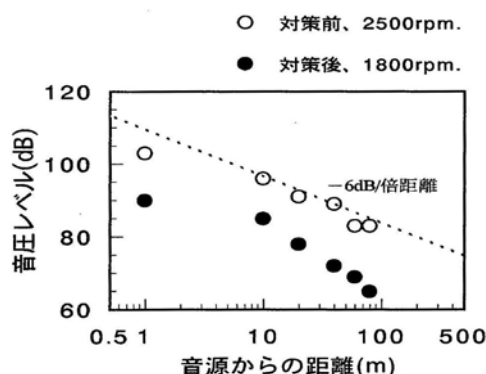


図-7 低周波音の距離減衰の測定例
(振動ふるい; ○31.5Hz, ●16Hz)

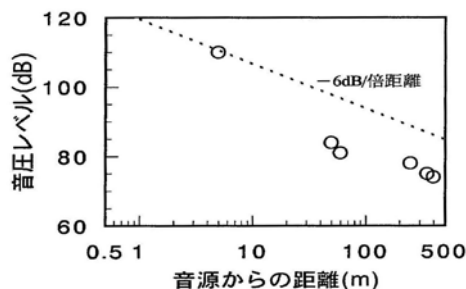


図-8 低周波音の距離減衰の測定例
(ディーゼルエンジン吸気口) 12.5Hz)

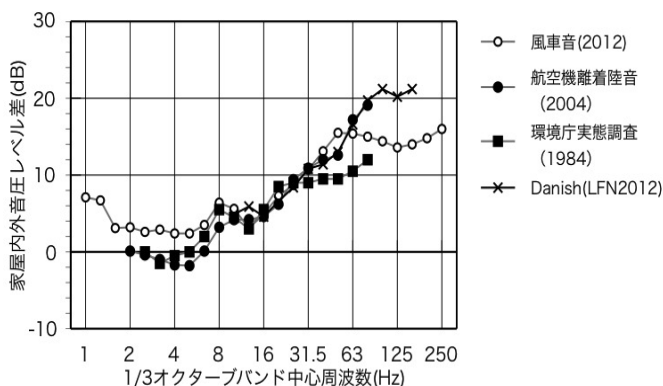


図-9 木造家屋、アルミサッシ窓の家屋内外音圧レベル測定結果

[第1回 参考文献]

- 1) 環境庁大気保全局：低周波音空気振動調査報告書，昭和 59 年 12 月
- 2) 環境庁大気保全局：低周波音の測定方法に関するマニュアル，平成 12 年 10 月
- 3) 環境省環境管理局大気生活環境室：低周波音問題対応の手引書，平成 16 年 6 月
- 4) 環境省：低周波音対策検討調査（中間とりまとめ），平成 15 年 3 月
- 5) 山田他：低周波音の感覚受容器，騒音制御，Vol. 7, No. 5, pp. 36-38, (1983)
- 6) 岡本他：超低周波音の人体に及ぼす影響，J. UOEH「産業医科大学雑誌」特集号，pp. 135～148, (1986)
- 7) 高橋：低周波音によって生じる振動感覚の閾値について、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、pp. 185-188, (2007. 9)
- 8) Inukai et al. : Unpleasantness and acceptable limits of low frequency sound, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Noise Control, 17(3), pp135-140, (2000)
- 9) 中村他：低周波音に対する感覚と評価に関する基礎研究，昭和 55 年度文部省科学研究費「環境科学」特別研究，(1979)
- 10) 環境庁委託業務結果報告書，昭和 52 年低周波空気振動等実態調査「低周波空気振動の家屋等に及ぼす影響の研究」，(1978. 3)
- 11) 落合他：低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルについて，騒音制御，Vol. 26, No. 2, pp. 120-128, (2002. 4)
- 12) 落合他：風車音の実測調査結果について—一般住環境における騒音・低周波音の測定結果との比較—，日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，pp. 181-184, (2012. 9)
- 13) 山崎-他：振動ふるいからの低周波空気振動による定在波の発生とその対策，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，pp. 205～208, (1982)
- 14) 西脇他：内燃機関の吸気口、排気口より発生する超低周波騒音および同用消音器，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，pp. 113～115. (1976)
- 15) 落合他：風車音の家屋内外音圧レベル差の測定事例、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、pp. 35-38, (2012. 4)
- 16) C. S. Pedersen et al. ; Low-frequency noise from large wind turbines - additional data and assessment of new Danish regulations, 15th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control, (2012. 5)