

「低周波音に関わる苦情への対応」

編集 公害等調整委員会事務局

この資料は、一般財団法人小林理学研究所 落合博明工学博士（シリーズ責任編者）と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き、公害等調整委員会が発行している機関誌「ちょうせい」の第 87 号（平成 28 年 11 月）から第 91 号（平成 29 年 11 月）に掲載したシリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」全 5 回を 1 冊にまとめたものです（特集号として内容の一部を見直しの上、掲載しています）。

記事を引用される場合には執筆者の許可を得ていただくようお願いいたします。

また、掲載した論文等のうち、意見にわたる部分は、それぞれ執筆者の個人的見解であることをお断りしておきます。

シリーズ「低周波音被害に関わる苦情への対応」

— 目 次 —

第1回	低周波音の基礎	1
	一般財団法人小林理学研究所 工学博士 落合 博明	
第2回	低周波音苦情対応の進め方	10
	一般財団法人小林理学研究所 工学博士 落合 博明	
第3回	低周波音の苦情対応事例（その1）	20
	一般財団法人小林理学研究所 工学博士 落合 博明	
第4回	低周波音の苦情対応事例（その2）	33
	一般財団法人小林理学研究所 工学博士 落合 博明	
第5回	低周波音の診断と防止対策	44
	公益社団法人日本騒音制御工学会 会長 井上 保雄	

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 低周波音の診断と防止対策

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、虫や蟬の鳴き声はおよそ 3,000 Hz から 5,000 Hz、NHKの時報は予報音；440 Hz と正報音；880 Hz (Hz：ヘルツ)、変圧器の音は 100 Hz または 120 Hz、ピアノで最も低い音は 27.5 Hz 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 20 Hz から 20,000 Hz と言われています。この周波数より高い 20,000 Hz 以上の音を超音波、1 Hz から 20 Hz 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 100 Hz 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 340 m/s なので、音の周波数が 1,000 Hz であれば波長は $340 / 1,000 = 0.34$ m となります。同様に、100 Hz では 3.4 m、10 Hz では 34 m 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銃砲と同じです。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。空気銃砲の場合は「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20 Hz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、心身に係る苦情（心理的苦情、生理的苦情）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、20 Hz～100 Hz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、20 Hz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 3,000 Hz 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 20 Hz 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、1,000 Hz の閾値は 2 dB なのに対して、100 Hz では 27 dB、20 Hz では 78 dB、10 Hz では 93~97 dB 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 100 Hz 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。

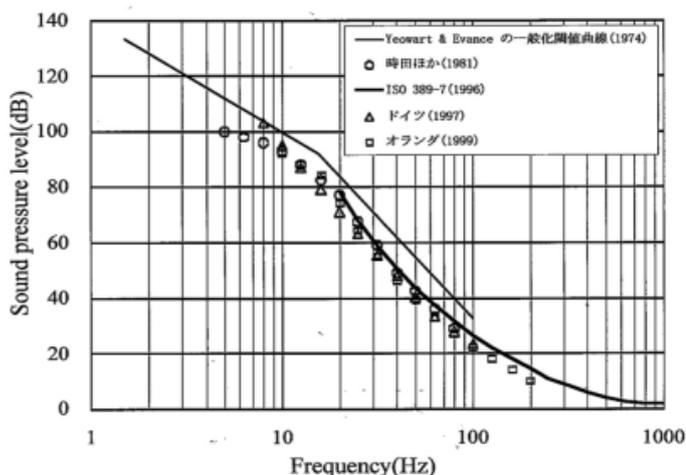


図-1 低周波音の感覚閾値および可聴音の閾値

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30 dB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⁾(第4回、6.2参照)。

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5~15 dB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。

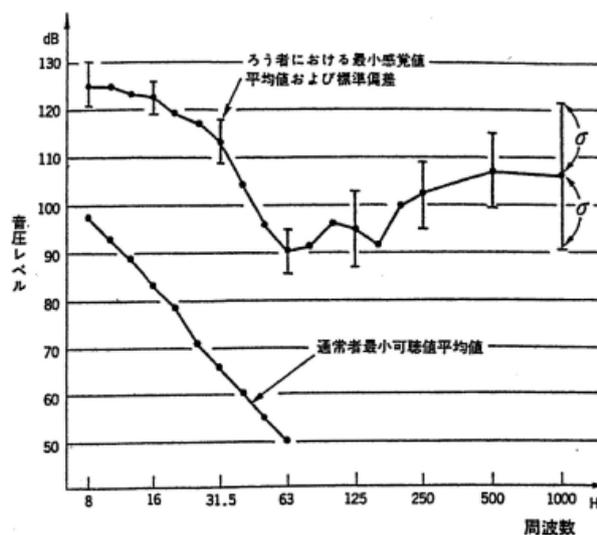


図-2 聾者と健聴者の低周波音の閾値比較

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、眼振等に着目して実験が行われています。

実験条件は、周波数は2~100 Hz程度、音圧レベルは感覚閾値を中心に50~120 dB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、110~120 dB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、一

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

般住空間に存在する程度（およそ 100 dB 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 10 Hz : 100 dB、20

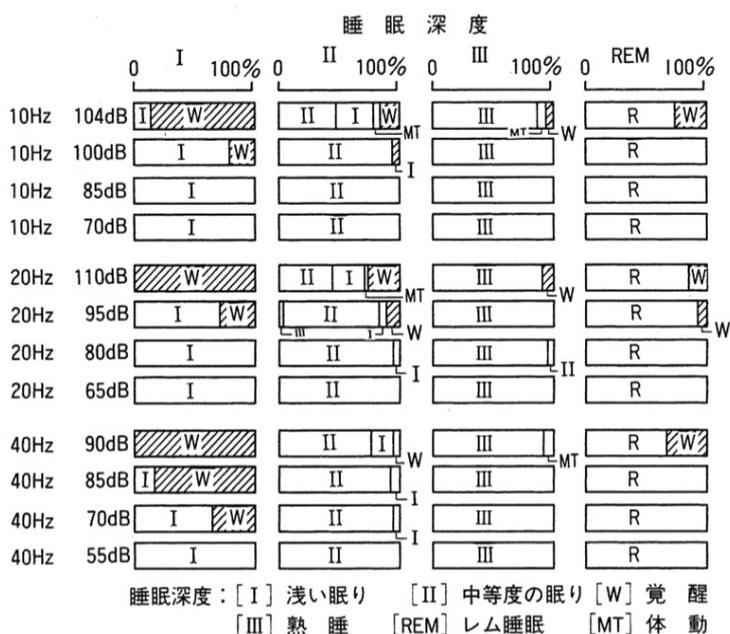


図-3 低周波音による睡眠実験結果

Hz : 95 dB) 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感について、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感に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 ~ 20 dB 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、40 Hz 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、5 Hz でおおよそ 70 dB、20 Hz でおおよそ 80 dB、40 Hz でおおよそ 90 dB 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、建具の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 30~40 dB 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⁾。

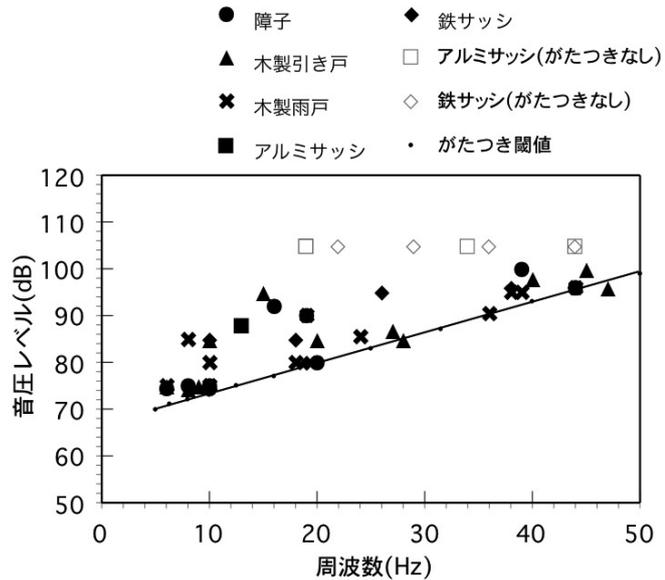


図-4 低周波音による建具のがたつき閾値(1977)

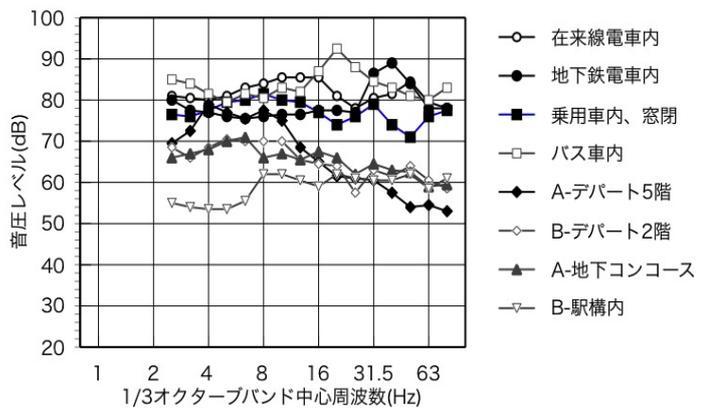


図-5 駅・デパート・乗物内における低周波音の測定例

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

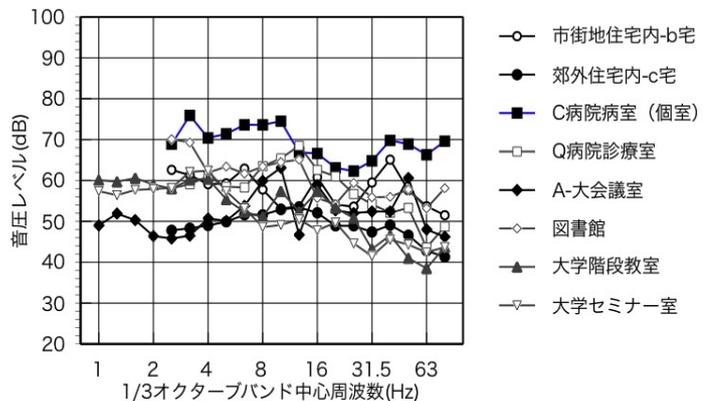


図-6 住宅内・建物内における低周波音の測定例

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 50 dB 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 20~30 dB 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、6.3 Hz 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。

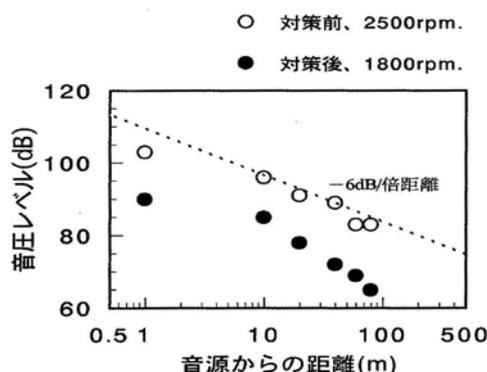


図-7 低周波音の距離減衰の測定例
(振動ふるい; ○31.5Hz, ●16Hz)

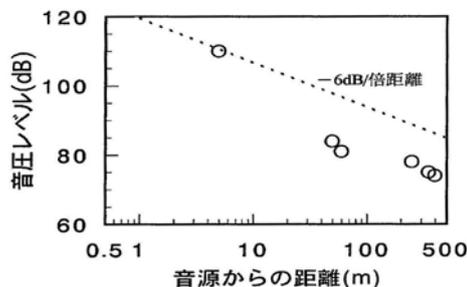


図-8 低周波音の距離減衰の測定例
(ディーゼルエンジン吸気口) 12.5Hz)

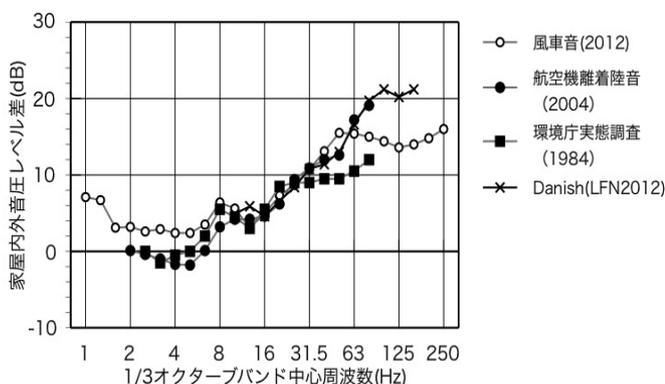


図-9 木造家屋、アルミサッシ窓の家屋内外音圧レベル測定

[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)

シリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」

－第2回 低周波音苦情対応の進め方－

一般財団法人小林理学研究所
工学博士 落合博明

1. はじめに

低周波音というと特殊な音のように思われる方も多いと思います。低周波音による心理的・生理的な苦情の例として、頭痛・耳鳴り・吐き気・気分のいらいら・腹や胸の圧迫感・睡眠妨害等が挙げられていますが、これらはかなり音圧の大きい低周波音に関する苦情です。また、低周波音は耳に聞こえない（耳に聞こえないのは 20 Hz 以下の超低周波音）として、音も聞こえないのにこれらの症状があると低周波音が原因ではないかと思われる方もいらっしゃいます。最近では、苦情を申立てられる方自身の問題が苦情原因である場合や、200 Hz 以下程度の騒音を低周波音の苦情として寄せられる場合も増えてきています。

低周波音に規制基準や環境基準はなく、低周波音の苦情は騒音や振動の苦情に比べて少ない状況です。低周波音の苦情対応は、騒音の苦情対応と基本的には違いはありませんが、騒音苦情では問題となる音が聞き取れるのに対して、低周波音苦情の場合には問題となる音が聞き取れなかったり、測定されなかったりする場合も生じます。

本稿では、近年苦情の多い近隣の住戸、店舗、施設等に設置された機器等からの低周波音苦情を想定して、苦情対応の進め方について解説します。

2. 申立て内容の確認

低周波音に関する苦情が寄せられた場合、申立て内容を詳しく聞き取ることが重要です。聞き取る項目とポイント、判断等を以下に記します。

(1) 苦情内容の把握

低周波音による苦情には、建具のがたつき等の物的苦情と、圧迫感・振動感、違和感や不快感等の心身苦情があります。低周波音による苦情が寄せられた場合には、はじめに、苦情内容の確認を行います。

(2) 苦情内容による大まかな周波数の推定

低周波音苦情内容をもとに、問題となる周波数について大まかな推定をすることができます。図-1 は第1回解説で示した低周波音の閾値と低周波音による建具のがたつき閾値を重ね描きし、低周波音による人と建具の反応領域を音圧レベルと周波数軸上で4つ

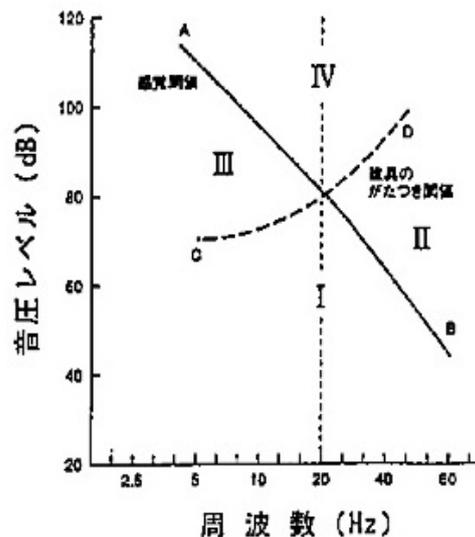


図-1 低周波音による人と建具の反応領域

の領域に分けて示したものです。これによると、20 Hz 以下では人が感知するよりも小さい音圧レベルで建具等のがたつきが発生する可能性があり、20 Hz 以上では建具が振動するよりも小さい音圧レベルで低周波音を感知する可能性があります。すなわち、物的苦情がある場合、音が聞こえない・感じなければ 20 Hz 以下の低周波音か地盤振動の可能性が、心身苦情で低い音が聞こえる（あるいは、感じる）場合には、20 Hz 以上の低周波音か 100 Hz 以上の騒音、または申立者自身の耳鳴の可能性が考えられます。

(3) 建具等のがたつき発生状況の確認

低周波音の主要な周波数と建具の揺れやすい周波数が一致するとある音圧レベル以上で建具が振動します。建具の揺れやすい周波数は個々の建具によって異なるので、同じ室内でも周波数の一致した建具のみが振動します。一方、地盤振動の場合には家全体が揺すられますので、ほとんどの建具が振動します。

物的苦情の場合、特定の建具ががたつくか、家中の建具ががたつくかを確認します。特定の建具ががたつく場合には低周波音の可能性が、家中の建具ががたつく場合には地盤振動の可能性が高いと考えられます。

(4) 不快感や圧迫感を生じる音の特徴の確認

心身苦情の場合、音が聞こえる音はどんな音かを尋ねてみてください。例えば、ブンブン、ウーンなどは低域～中域に主要な成分のある音、キーン、ビーなどは高域に主要な成分のある音の可能性が考えられます。苦情申立者による音の表現で、問題としている音のおおまかな周波数を推定できる場合があります。低周波音の苦情といっても中には「キーンという低周波音」という訴えもありますので、「100 Hz 未満程度の音だ」という先入観を持たないことが肝心です。

(5) 苦情が生じるときの窓の開閉状況の確認

心身苦情では、窓を開けた方が楽になるか苦しくなるか、あるいは窓を閉めた方が楽になるか苦しくなるかを尋ねてみましょう。

一般に窓を開けると、屋外からの環境騒音により低周波音がマスクされて聞こえにくく（感じにくく）なります。一方、窓を閉めると、騒音のうち中高周波数成分が低減され低周波音が際立って聞こえる（感じる）ようになります。音の発生源が屋外にあるときには、中高周波数成分を多く含む音の場合は窓を閉めた方が楽になり、低周波音成分が多いと窓を開けた方が楽になることがあります。窓を閉めた方が不快という場合には、低周波音または申立者の問題が原因である可能性があり、窓を開けた方が不快という場合には、63 Hz 程度以上の低周波音あるいは 100 Hz 以上の騒音が原因である可能性が考えられます。

(6) 家屋内の部屋毎の感じ方の差の確認

心身苦情の場合、音を感じる部屋と感じない部屋があるかを確認しましょう。音の大小や感じ方の違いは、発生源との位置関係や部屋の大きさ等によって異なる場合があります。

(7) 部屋の中の強く感じる場所の確認

室内に侵入した音が壁や天井で反射し、反射音同士が干渉することにより、部屋の寸法で決まる特定の周波数において部屋の中で音の大きい場所と小さい場所が生ずることがあります。このような現象を定在波と呼んでいます。

心身苦情の場合、室内で定在波が発生し同じ部屋の中であっても場所によって感じ方が異なることがあります。そのため、問題となる部屋の中で強く感じる場所があるかどうかを聞き取ることは重要です。

(8) 問題が生じる時間帯の確認

問題が生ずる時間帯を把握できれば、発生源が機械や施設の場合には稼働時間との関連性を調べることにより、発生源を推定できる場合があります。

(9) 問題が生じる気象条件の確認

例えば、強風によるアンテナ等の共鳴現象や梅雨時における堰の放流のように、特定の気象条件で苦情が発生する場合には、発生源を特定する手掛かりになる場合があります。

(10) 発生音の時間変動特性等の確認

連続的か、短時間の現象か、音の大きさが常に変化しているか等、発生状況がわかれば発生源の可能性があるとされる施設等の稼働状況を調べることで、発生源を特定する手掛かりになる場合があります。音の大きさが間欠的に変化する場合には、何分間隔で変化するといった情報が発生源特定の際に役立つこともあります。

(11) 問題が生じた時期等の確認

いつ頃から問題が生じたのかを知ることで、機械や施設が導入された時期や不具合が発生した時期等との対応から、発生源を推定できる場合があります。

(12) 本人の訴える発生源の確認

もし、申立者の訴える発生源があれば確認します。発生源の特定にあたっては申立者の申立てる発生源を第一に確認しますが、それ以外に発生源となりうるものがないかも含めて周囲を十分確認します。

3. 現場の確認

電話等で申立て内容を確認しても机の上ではわからないことも多いので、必ず現場に赴いて申立者が申立てるような低周波音が発生しているか否かを自身の目と耳で確認します。現場調査のチェック項目を以下に記します。

(1) 申立者宅周辺の状況の確認

申立者宅周辺および申立者宅内に発生源となるものがないかを確認します。想定される発生源がある場合には、申立者宅と発生源との位置関係を確認します。物的苦情では問題となる周波数が低い場合が多いので、影響範囲が比較的広くなります。申立者宅以外でも同じような訴えがある可能性があります。

(2) 住居の状況、間取り等の確認

住居の構造、窓の構造、部屋の間取り等を確認します。想定される発生源がある場合には、問題となる部屋から発生源が見えるかどうか確認します。

(3) 発生源と推定される施設と施設の稼働状況等の確認

発生源と推定される施設がある場合には、施設の稼働時間帯、稼働状況、季節による変動、1日での変動等を確認します。また、施設の導入時期、移設時期、増設時期やメンテナンスを行った時期等を確認します。

(4) 周辺地域における過去の苦情発生状況と行政指導の有無等の確認

苦情のきっかけとなるような事項がなかったかを確認します。あった場合にはこれまでの経過を把握します。

(5) 調査員の感覚と申立者の訴えとの照合

物的苦情の場合は、申立のとおり建具のがたつき等が発生しているかを調査員が確認します。確認にあたっては、特定の建具が振動するか、部屋中全ての建具が振動するかにも注目します。

心身苦情の場合は、不快感等の申立者が訴える音を調査員が感じるかが重要なポイントとなります。産総研で行われた低周波音閾値の実験によると、申立者の閾値は一般成人よりも高く、申立者は低周波音の感度が一般成人よりも良いという結果は得られませんでした。調査員の聴力が正常であれば、申立者が感じられる時間帯に申立者が感じる場所において、申立者が訴える音を調査員も感じられる可能性は高いはずですが、申立者が夜間に苦情を申立てている場合、昼間に申立者宅を訪れても暗騒音や施設の稼働状況の違い等によりわからないこともあるので、申立者が申立てる時期、時間帯に確認します。

また、苦情が生じる部屋では場所によって音圧の大きい場所があるかどうか室内を歩き回って確認します。必要に応じて窓の開閉を行います。

(6) 発生源の絞り込み

発生源の推定・確認が出来た場合、発生源と推定される施設の仕様や稼働状況を確認します。工場等で施設がたくさんある場合には、施設毎の稼働状況や導入時期など詳細を把握することにより、発生源を絞り込める場合もあります。

(7) 発生源不明の場合の対応

近年、発生源不明の苦情も増えています。申立者宅の周辺に発生源と推定される施設が見当たらない場合には、申立者宅に特有な現象か、申立者の思い違い、あるいは申立者自身の問題の可能性も考えられます。再度苦情内容の確認を行います。

4. 測定計画の立案

4.1 測定点の選定

原則として発生源側と申立者側に測定点を設けます。測定点の取り方の例を図-2に示します。想定される発生源がある場合、発生源側の測定点は可能であれば施設の近傍に設けます。難しい場合には、施設の設置してある場所に近い敷地境界などに設けます。

申立者側の測定点は、苦情内容によって異なります。

(1) 物的苦情の場合

物的苦情の場合には、がたつきが発生している建具の屋外で建物から1～2m程度離れた

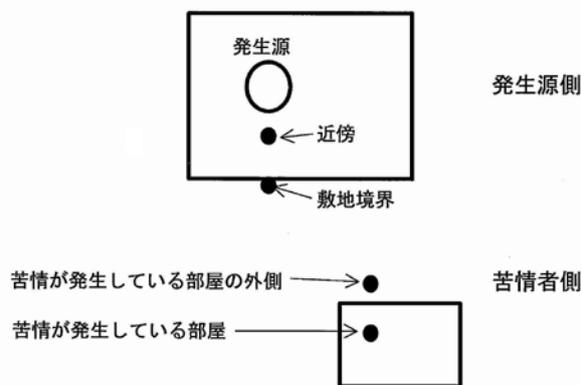


図-2 測定点の取り方の例

位置に設けます。測定点を屋外に設けるのは、建具のがたつき始める音圧レベルの実験結果が建具に入射する音圧レベルで整理されているためです。

(2) 心身に係る苦情の場合

心身苦情の場合には屋内の苦情が発生する場所に設けます。可能であれば、これに加えて問題が生じない場所や問題が生じない部屋でも測定して、両者の違いを比較すると問題となる周波数や音圧レベルが明確になることもあります。また、屋内だけでなく屋外にも測定点を設けると、申立者宅までの音の伝搬特性が把握できます。なお、心身苦情で発生源が不明な場合には、屋内の測定点に加えて、問題が生ずる部屋の屋外にも測定点を設けます。

4.2 調査時期、時間帯

原則として、問題が生ずる時期、時間帯に測定します。

4.3 測定量と測定項目

低周波音については、G 特性音圧レベルと 1～80 Hz の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定します。G 特性音圧レベルはなじみがない方も多いと思いますが、騒音の測定・評価の際に用いられる周波数重み付け特性（A 特性）の超低周波音版と考えるとよいでしょう。

G 特性の周波数レスポンスを図-3 に示します。G 特性は 1～20 Hz の超低周波音の感覚閾値に基づく ISO 7196 で規定された周波数重み付け特性で、基準は 10 Hz、1～20 Hz の傾きは 12 dB/oct.（周波数が倍で 12 dB 大きくなること、oct. はオクターブの略号）となっています。1 Hz 未満及び 20 Hz 以上はそれぞれ ±24 dB/oct. の傾きになっていますが、特に意味はありません。

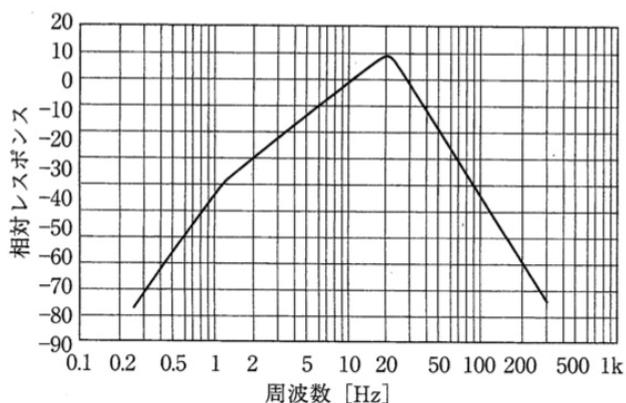


図-3 G 特性の周波数レスポンス

1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定するという事は、周波数別の音圧レベルを求めるということです。低周波音の周波数範囲や評価方法が国によってまちまちでまだ統一された評価重み付け特性がないこと、低周波音は特定の周波数成分が卓越している場合が多いこと等の理由によります。

(1) 物的苦情の場合

物的苦情では 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定します。音が聞こえなくて建具が揺れていたり、がたついている場合には 20 Hz 以下の超低周波音の可能性が考えられます。ただし、物的苦情の中には低周波音が原因ではなく地盤振動だった事例も報告されているので、地盤振動も測定するとよいでしょう。

(2) 心身に係る苦情の場合

心身苦情では1/3オクターブバンド音圧レベルとG特性音圧レベルを測定します。しかし、心身苦情の場合、20 Hz以下の超低周波音による可能性は非常に低いと考えられます。20 Hz以下の周波数域では、人が感じるような音圧レベルが発生していれば、窓や戸が揺れたりがついていたりする可能性が高いことから、低周波音の心身に係る苦情のほとんどは20 Hz以上の可聴音によるものと考えてよいでしょう。また、最近の苦情は100 Hz以上の騒音が原因である場合も多いので、騒音測定も必須です。

これに加えて、心身苦情では音の測定と併せて申立者の体感調査を行います。体感調査は施設の稼動状況と申立者の体感との関連性を調べるもので、申立者に時々刻々の感覚・症状を記載してもらいます。

4.4 測定器

低周波音の測定では、低周波音レベル計とレベルレコーダ、周波数分析器等を使用します。騒音計では低い周波数側は20 Hz程度までしか測れないので、低周波音の測定には専用の測定器（低周波音計）を用います。近年、1 Hzから測定できる騒音計も販売されているので、この測定器を用いれば低周波音と騒音の両方が1台で測定できます。問題となるような大きさの超低周波音が発生していないことが明らかであれば、周波数分析機能付の騒音計でも測定は可能です。騒音計によっては10 Hz程度から測定可能な機種もあるので、苦情内容によっては選定されるとよいでしょう。

低周波音の測定では風の影響を受けやすいので、測定に際してはレベルレコーダの音圧レベル波形の変化により絶えず風の影響の有無を確認します。

このほか、低周波音計だけでなく騒音計（サウンドレベルメータ）や3軸の振動レベル計も持参されるとよいでしょう。

詳細な解析が必要な場合や、多点同時測定を行なう場合、低周波音に加えて騒音・振動も同時計測する場合等には、測定器の出力信号をデータレコーダ等に録音して持ち帰り解析を行います。

5. 測定方法

5.1 想定される発生源がある場合

5.1.1 低周波音等の測定

問題となる施設を稼動・停止させて、発生源側と申立者側で同時測定を行います。施設の稼動・停止が難しい場合でも稼動状況が変化する場合には、稼動状況を詳細に記録します。

測定にあたっては、各測定点における騒音・振動・低周波音の測定器またはこれらを録音する場合にはデータレコーダ等の時刻を合わせておきます。測定器のメモリー機能を用いて、例えば10秒から1分間程度の測定結果（例えば*Leq*）を連続的に算出してもよいでしょう。

5.1.2 発生状況調査

物的苦情では、施設の稼動・停止と建具のがたつき発生の有無を確認します。

5.1.3 体感調査

心身苦情では、騒音・振動・低周波音の測定と併せて申立者の体感調査を行います。測定が長時間に渡る場合には、申立者の負担にならない範囲で体感調査を行います。申立者の体感調査を行う際には、申立者が問題とする場所で、申立者には施設の稼働状況を知らせずに、時々刻々に感じたままを用紙に記載してもらいます。その際、測定器側の時刻と体感調査の時刻も合わせてきます。施設の稼働・停止にあたっては、申立者の信頼できる人に発生源側で施設の稼働状況を確認してもらおうとよいでしょう。

体感記録用紙の作成にあたり、事前の聞き取りや現場確認の折りに、どんな音が気になるか不快かなど、申立者にヒアリングを行い、聞き取り結果を元に記録用紙を作成します。備考欄には、項目以外の感覚や症状や暗騒音の情報などを適宜記載してもらおうとよいでしょう。体感記録表の例を表-1に示します。

表-1 体感記録表の例

体感記録表 (年 月 日 時間帯 : ~ :)
記入者: _____ 場所: _____

	感覚、症状					備考、暗騒音など
	不快感	圧迫感	頭重い	肩の張り	苦しい	
00						
01						
02						
03						
04						
05						
06						
07						
08						
09						
10						
11						
12						

体感記録表 (年 月 日 時間帯 : ~ :)
記入者: _____ 場所: _____

	音の種類					備考、暗騒音など
	唸り音	ウンウン	ゴーゴー	ジー	キーン	
00						
01						
02						
03						
04						
05						
06						
07						
08						
09						
10						
11						
12						
13						

5.2 発生源が不明の場合

発生源がたくさんあって問題となる発生源側がわからない場合には、発生源の近傍と申立者宅の屋外で同時に測定し、周波数的な特徴や稼働状況を元に、発生源を絞り込んでいきます。

周囲に発生源が見当たらず、発生源不明の場合には、申立者が低周波音を感じる場合と感じない場合が含まれるような時間帯に何回か測定します。

5.3 測定時の注意事項

低周波音の測定において最も注意すべきは風による影響です。風が吹くと風により雑音が発生して正確な値が測定できません。通常測定に使用される直径9cmφのウレタン製防風スクリーンでは風雑音を十分に低減できません。最低でも直径20cmφのウレタン製防風スクリーンをマイクロホンに装着します。この防風スクリーンでも風が強い場合には風雑音を大幅に低減できないので、風が強いときは原則として測定をすることはできません。

風による影響はレベルレコーダの音圧レベル波形や実時間分析器で確認できます。風が吹くとレベルレコーダのレベル波形が不規則に変動します。周波数特性上では風が吹くと低い低周波数成分が不規則に上昇します。

家屋内でも風による影響を受ける場合があります。風により戸や窓が振動し、振動による低周波音が屋内で観測されることもあるので注意が必要です。

6. 測定結果の算出方法

(1) 変動幅の少ない低周波音

音圧レベルの変動幅が一定または変動幅の少ない場合は、10 秒間から 1 分間程度のパワー平均値を求めます。風などにより音圧レベルが変動する場合には、風の影響が少なく変動幅の少ない箇所のパワー平均値を求めます。

(2) 変動する低周波音

音圧レベルが（5 dB を越えて）変動する場合は、指示値が大きくなる時に注目して、それらの最大値を適当な回数（5 回から 10 回程度）測定し、それらのパワー平均値を求めます。

7. 測定結果の評価方法

環境省では 2004 年に近隣の住戸、店舗、施設等に設置された機器等の固定された機器から発生する音圧レベル変動の少ない低周波音に対する苦情が寄せられた場合の対処方法をまとめた「低周波音問題対応の手引書」を公表しています。ここでは、「手引書」に示された評価方法をベースに解説します。

7.1 低周波音の評価手順

測定結果の評価は以下のように行います。

■STEP1；はじめに、発生源側と申立者側の対応関係（関連性）を確認します。

対応関係がなければ、問題としている発生源以外が原因か、あるいは騒音・低周波音・振動以外（自身の問題も含む）が苦情の原因である可能性が高いと考えられます。対応関係については、7.2 で詳しく述べます。

■STEP2；対応関係があれば、「参照値」と比較します。

「手引書」では、対応関係があった場合に「苦情の原因が低周波音によるものか否か」の判断をするための目安として、「参照値」を提案しています。「参照値」には苦情内容別に「物的苦情に係る参照値」と「心身苦情に係る参照値」があります。

7.2 対応関係の確認

施設の稼働・停止（あるいは稼働状況の変化）と建具のがたつきの有無、あるいは不快感等の申立者の反応との対応関係（関連性）の有無を確認します。

併せて、発生源側と申立者側における物理的な対応関係についても確認します。すなわち、対象とする施設の稼働・停止に伴って各々の音圧レベルが同様に変化しているかどうか、施設の稼働時に発生源側で観測された特徴的な周波数成分が申立者側でも観測されるかどうかを確認します。

なお、施設を稼働・停止できない場合は、稼働状況の変化と建具のがたつき発生あるいは

不快感の有無との対応関係、及び音圧レベルの変化、特徴的な周波数成分の対応関係について確認します。

対応関係がなければ、対象と想定した発生源による可能性は低いと考えられます。そのような場合は、他の発生源の可能性や、騒音・振動・低周波音以外の可能性を検討します。心身苦情で、測定結果が仮に「参照値」を上回っていても、体感調査を行わなければ、申立者が問題とする音による影響かどうかの判断ができないことに注意が必要です。

7.3 評価値との比較

対応関係があれば測定結果を参照値と比較します。

(1) 物的苦情の場合

物的苦情に係る苦情に関する参照値を表-2に示します。申立者宅屋外で測定された1/3オクターブバンド音圧レベルが、いずれかの周波数で物的苦情参照値を上回っていれば、苦情の原因が低周波音である可能性が考えられます。測定結果が参照値を下回る場合には、低周波音の可能性について再度確認をするとともに、地盤振動の可能性についても検討します。

なお、G特性は人の超低周波音に対する閾値に基づく評価重み付け特性であり、建具等の低周波音に対する応答特性とは全く異なります。したがって、物的苦情の評価にはG特性音圧レベルは用いません。

表-2 低周波音による物的苦情に関する参照値

1/3オクターブバンド 中心周波数(Hz)	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
1/3オクターブバンド 音圧レベル(dB)	70	71	72	73	75	77	80	83	87	93	99

表-3 低周波音による心身に係る苦情に関する参照値

1/3オクターブバンド 中心周波数(Hz)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80
1/3オクターブバンド 音圧レベル(dB)	92	88	83	76	70	64	57	52	47	41

(2) 心身に係る苦情の場合

申立者宅屋内で測定されたG特性音圧レベルが心身苦情参照値（G特性音圧レベルで92dB）以下であれば、超低周波音が原因である可能性は低いと考えられます。実際には、一般の住宅ではG特性音圧レベルで92dBを上回るようなところはほとんどありません。なお、G特性音圧レベルを用いて20Hz以上の低周波音の評価をしている例をみかけますが、これは誤りです。

心身苦情に係る苦情に関する参照値を表-3に示します。申立者宅屋内で測定された1/3オ

クターブバンド音圧レベルがいずれかの周波数で心身苦情参照値を上回っている場合は、苦情の原因が低周波音である可能性が考えられます。測定結果が参照値を下回っている場合には、苦情の原因が低周波音である可能性は低いと考えられます。そのような場合には、100 Hz以上の騒音の可能性についても検討します。近年は100～300 Hz程度の騒音を低周波音と勘違いされる方も多くなっています。

低周波音の評価と称してG特性音圧レベルしか測定しない例も見受けられますが、これは誤りです。1/3オクターブバンド音圧レベルも測定します。

測定結果を参照値と比較する際、屋外の測定結果を心身苦情参照値と比較している例をみかけることがありますが誤りです。心身苦情に係る参照値は屋内の測定結果と比較します。

また、測定結果を参照値と比較する際、G特性で補正した1/3オクターブバンド音圧レベルを用いている例が稀にありますが、これも誤りです。1/3オクターブバンド音圧レベルは周波数補正しない測定結果を用います。

7.4 発生源不明の場合の対応

周囲に発生源が見当たらず、発生源不明の場合には、申立者が低周波音を感じる時間帯と感じない時間帯、あるいは感じる部屋と感じない部屋で測定された複数の1/3オクターブバンド音圧レベルの測定結果を比較します。申立者が低周波音を感じる際の測定結果に何らかの共通した特徴があり、参照値を上回っている場合は、その周波数の低周波音が問題である可能性があります。両者の結果に差がない場合や、特徴がなければ、それ以上の判断はできません。問題の原因が低周波音ではなく100 Hz以上の騒音の場合もありますから、念のため申立者に苦情の状況を再度確認してみてください。問題の糸口が見出せない場合には、その旨を説明して納得していただくしかないでしょう。

8. おわりに

申立て内容の確認から測定結果の評価方法まで、低周波音苦情が寄せられた場合の対処方法について解説しました。低周波音の苦情対応で特に苦勞するのは心身に係る苦情の場合です。問題となるような大きさの低周波音が発生していれば、調査員も現場でその音を感じられるはずですし、建具のがたつき現象も確認できるはずで、自信を持って対処して下さい。

低周波音の測定方法等については、環境省「低周波音の測定方法に関するマニュアル」や「低周波音問題対応の手引書」も併せてご参照下さい。

なお、具体的な事例については、次回に紹介させていただきます。

シリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」 －第3回 低周波音の苦情対応事例(その1)－

一般財団法人小林理学研究所
工学博士 落合博明

1. はじめに

今回は、近年苦情の多い近隣の住戸、店舗、施設等に設置された機器等からの低周波音苦情を想定して、苦情対応の進め方について解説しました。

低周波音の苦情対応においては、申立て内容をいかに上手く聞き出すか、現場へ赴いて現場とその周辺の状況や低周波音の発生状況をいかに的確に把握するかが重要です。測定に際しては、的確なデータを得ることができるよう測定計画を立案することが大切です。低周波音の評価では、とかく参照値との比較が取り上げられますが、評価にあたっては、発生源の稼働・停止と申請人の体感の対応の有無が最も重要です。

低周波音の苦情は多種多様であり、皆さんが抱えていらっしゃる案件にぴったりの事例はなかなかないと思われます。なお、新しい事例がないかとおっしゃられる方がおられますが、時代によって発生源の種類は変わりますが、苦情に対する基本的な取組み方や考え方に大きな違いはありません。本稿では、具体的な低周波音苦情の事例を紹介し、苦情対応のポイントや注目すべき点等について解説します。

2. 低周波音による物的苦情の事例

2.1 送風機から発生する低周波音による物的苦情¹⁾

ビル駐車場の出入口に面した家屋の住民や商店の数軒から、ウィンドウガラスの揺れ、室内建具のがたつき等の苦情が続出しました。調査の結果、発生源は同ビル地下2階駐車場の4台の空調機で、そのうちの1台が最も大きいことがわかりました。

低周波音発生 の 要因として、空調機の能力と送風量のアンバランス、フィルターの目詰り等により、送風機の吸

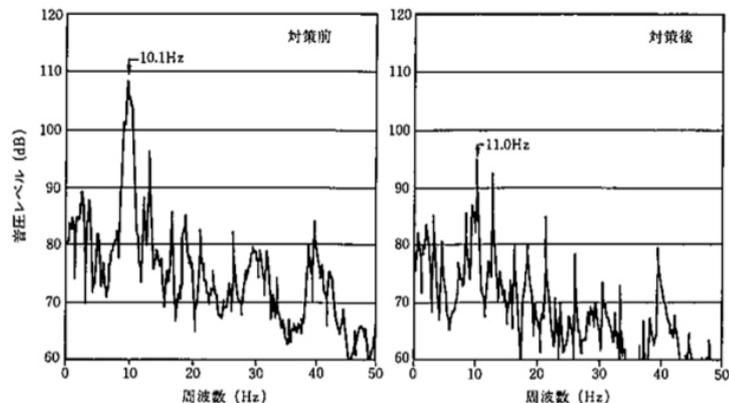


図-1 発生源近傍における低周波音のスペクトル

(左：対策前、右：対策後)

い込み状態の不均一が起り、旋回失速等を起こしていたものと判断されました。そこでファン前後にバイパスダクトを設置しました。対策後効果を測定したところ、図-1に示すように、卓越していた10 Hz成分（発生源近傍で108 dB程度）が低減し、苦情も収まりました。

超低周波音の場合、音の波長が長いので、影響を及ぼす範囲が広いことに注目する必要があります。発生源を特定するのに、各々の発生源の近くでの測定や、施設を1台ずつ稼働させて測定することも有効です。

2.2 真空ポンプによる扉のがたつき、不眠の苦情事例²⁾

「隣に工場ができてから、家全体が振動するが特に2階和室（寝室）で扉のがたつきが発生する。がたつきは間欠的で一日中発生するが、特に睡眠時に扉がガタガタ鳴るため、気になって眠れない」との苦情が寄せられました。以前は倉庫として使われていた建物が工場になってからこのような現象が発生したため、隣接する工場が発生源ではないかと思われるとのことでした。なお、苦情者宅周辺では、他にも苦情を申し立てる家があるとのことでした。

苦情者宅に出向き、再度聞き取りを行うとともに、発生源との位置関係・周辺の状況、苦情者宅の状況を確認しました。また、調査員自ら苦情者が申し立てる被害感を感じるかを確認しました。それによると、建具等のがたつきはあるが、地盤振動はありませんでした。音は聞こえない（感じない）が、圧迫感や振動感や違和感などの不快感はあり、苦情者の申し立て内容と調査員の把握した内容の対応がとれていることがわかりました。当初は振動苦情として扱いましたが、調査を進めるうちに低周波音による被害であることが判明しました。

発生源側の施設の種類が多かったことから、調査は3段階に分けて実施しました。工場に協力してもらい、工場内の全施設を停止させ、施設を1台ずつ立ち上げていき、工場内と家屋内でそれぞれ低周波音を同時に測定しました。その結果、双方に対応関係があり、発生源は真空ポンプ施設およびその配管と判明しました。測定結果は10 Hzが突出しており、全施設稼働時に苦情者宅内で観測された低周波音の音圧レベルは72.7 dBでした。工場側に結果を伝えたところ、工場と親会社で協議し工場を移転することになりました。工場移転が完了したことにより解決しました。

調査員も現場に赴いて状況を確認するとともに、自身で実際に体感してみることが重要です。苦情者宅内で観測された10 Hzの音圧レベルは72.7 dBなので、第1回、図-9より10 Hzの家屋内外音圧レベル差約5 dBを加えると、屋外では物的苦情参照値を超えていると考えられます。

2.3 空気圧縮機からの低周波音による襖のがたつき事例²⁾

居間の襖が音を立ててゆれるという訴えがありました。苦情者によると、がたつきが発生するのは全ての建具ではなく襖や軽い引き戸とのこと。がたつきは間欠的に発生し、特定の時間ではなくランダムに発生します。このような現象が発生したのは1年前からです。発生源は不明ですが付近にある工業団地からではないかと苦情者は推定しています。苦情者宅以外に周辺で苦情を申し立てる家はありません。

苦情者宅における低周波音の測定結果より、16 Hz 帯域が卓越することを確認しました。発生源周辺および苦情者宅周辺で140点の測定を行い、発生源の絞り込みを行いました。その結果、低周波音の発生源は近くの工場に設置された10台の空気圧縮機の中の1台と判断されました。

次に、発生源側と苦情者側の同時測定を実施し、発生源を稼働停止させて測定を行い、建具のがたつきについて確認を行いました(図-2参照)。併せて、発生源側と苦情者側の対応関係も確認しました(図-3参照)。苦情者宅室内の測定値は16 Hzでおよそ60 dBであり、家屋の内外音圧レベル差(0~10 dB程度)を考慮しても「物的苦情に関する参照値」³⁾は超えていない可能性が高いと考えられましたが(注;「物的苦情に関する参照値」は屋外の測定値と比較する)、発生源の稼働・停止との対応関係が認められました。そこで、工場側と対策方法を協議した結果、問題となった機器の使用を控えることで解決しました。

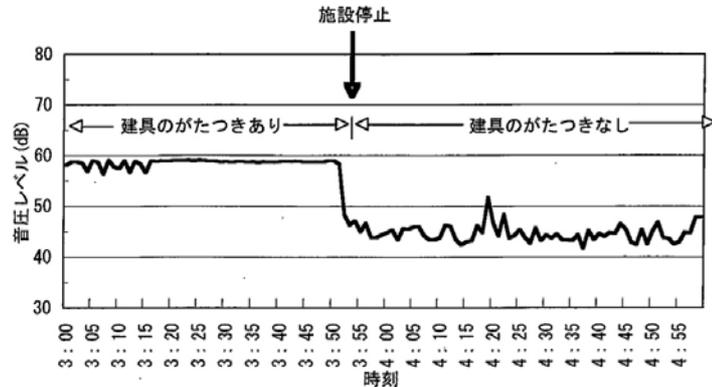


図-2 施設の稼働・停止に伴う苦情者宅内における16Hz帯域の音圧レベル変化と建具のがたつきの発生状況

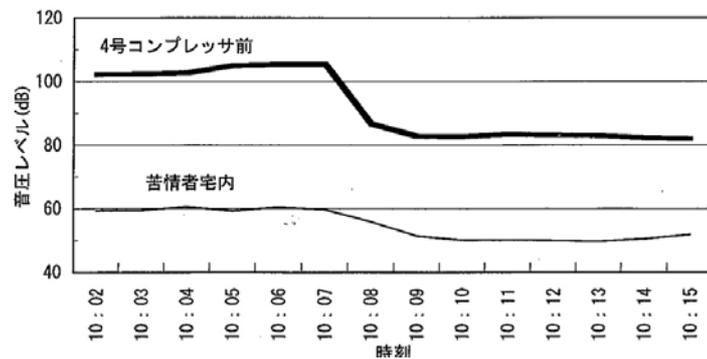


図-3 施設の稼働・停止に伴う発生源近傍と苦情者宅内における16Hz帯域の音圧レベルの対応

苦情者側で観測された低周波音の卓越周波数を手がかりに、発生源の絞り込みを行っています。このとき、苦情者側の測定点は固定しておき、発生源側のみ移動して測定を行い、低周波音の卓越周波数が一致するエリアを探し、しだいに範囲を狭めてゆき問題となる施設を特定しています。発生源の特定後、発生源を稼動・停止させて発生源側と苦情者側で同時測定を行い、対応関係を調べて解決に至ったよい事例といえます。

2.4 早朝決まって発生するがたつきの事例⁴⁾

港の近くの民家から、襖や人形ケースがガタカタと揺れ、気持ちが悪いという苦情が寄せられました。このような現象は、早朝の決まった時間帯に発生するとのことでした。

庭先と建屋内で振動と低周波音の測定が行われました。その結果、庭先における振動の測定結果では特に際立った周波数が見られませんでした。低周波音では 12.5 Hz の周波数帯域に大きな成分が観測されました。測定結果が「低周波音による物的苦情に関する参照値」³⁾ を大きく上回っていることなどから低周波音が原因であると判断されました。

さらに、低周波音の特徴がディーゼルエンジンの音によく似ていることなどから、船が発生源であると推定されました。港で低周波音の計測が行われた結果、ちょうどこの時間帯に 1 万トン級のフェリーボートが入港しており、主機関のディーゼルエンジンが原因であることが確認されました。

対策として、ディーゼルエンジンの排気煙突に超低周波音用消音器を挿入したところ、問題は解決しました。

問題の発生する時刻や、発生状況をチェックしておく、発生源を特定する手がかりになることがあります。

3. 低周波音ではなく振動が原因と思われる物的苦情事例^{3), 5)}

新築家屋の住人から、低周波音により家全体が揺れており、特に 2 階では揺れがひどく睡眠に支障をきたすとの苦情が寄せられました。苦情者へのヒアリングによると、建築中から家が揺れていたとのことでした。2 階では、窓だけでなく、床もカーテンも揺れているのが確認されました。振動と低周波音の測定結果を図-4 に示します。

図より、苦情者宅 2 階寝室では 4 Hz に卓越成分をもつ低周波音 (4 Hz ; 78 dB) が観測されましたが、苦情者庭では顕著なレベルの低周波音は観測されませんでした。併せて振動も測定したところ、人体にはっきりと感じられる大きさの 4 Hz に卓越成分のある水平方向の振動を観測しました。水平方向の振動レベルは 1 階屋外で 50 dB、2 階寝室で 65 dB でした。

揺れの原因は低周波音ではなく地面振動であり、周囲を調べたところ、発生源は道路を隔てて 100 m ほど離れた製缶工場のプレス機と推定されました。また、建築中にも家が揺れていたこと、振動レベルの鉛直方向・水平方向の測定結果等から、家屋構造にも問題があると考えられました。

その後、工場の複数台ある

機械を制御することにより振動が低減し、苦情者も納得したため問題は解決しました。

特定の窓や戸だけでなく、家中、部屋中のものが揺れている場合には、地盤振動の可能性が考えられます。屋外で問題となる周波数の低周波音が観測されなかったことも注目すべきポイントです。地盤振動は鉛直方向しか測らない場合が多いですが、この事例のように、水平方向も測定するとよいでしょう。

4. 低周波音による心身に係る苦情事例

4.1 低周波音が原因と思われる事例^{5), 6)}

旅館の自家発電用ディーゼルエンジン稼働に起因する低周波音により、道を隔てた山荘から不快感がするとの苦情が寄せられました。山荘の1階食堂ではディーゼルエンジンが稼働した際、31.5 Hz に卓越成分を持つ低周波音が観測され、調査員にも圧迫感が感じられました。測定結果を図-5に示します。観測された 31.5 Hz 帯域の音圧レベルはおよそ 70 dB であり、心身に係る苦情に関する参照値を 6 dB ほど上回っていることがわかりました。調査の結果、ディーゼルエンジンの振動が建物の壁面に伝わり、壁面が振動することにより低周波音が発生していると推定されました。

施設の稼働と不快感の発生に対応関係があり、測定値が参照値を上回ったことから、苦情の原因が低周波音であると判断された事例です。苦情者が訴える低周波音に起因する症状を、調査員も実際に体感できたことも対応関係把握の決め手となりました。

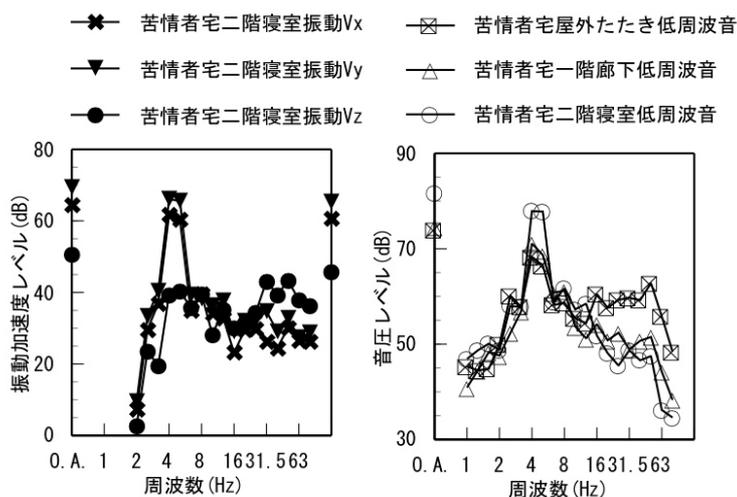


図-4 苦情者宅で測定された振動（左）と低周波音（右）

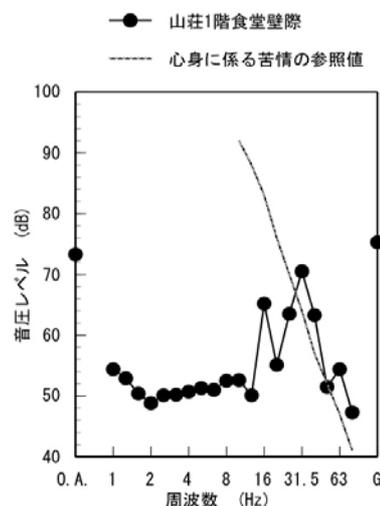


図-5 低周波音の測定結果

4.2 バイブレータから発生する低周波音による心理的苦情⁵⁾

コンクリート製造工場から低周波音が発生し、腹や胸に圧迫感を感じるとの苦情が寄せられました。測定を行ったところ、図-6に示すように、工場から50 mほど離れた苦情者宅の庭において40~50 Hzで90 dBを超える音圧レベルの低周波音が観測されました。測定結果と低周波音の優先感覚実験結果⁷⁾を比較したところ、「半数の人が圧迫感・振動感を感じられる音圧レベル(40 Hzで78 dB)」を10 dB以上も上回っていました。

発生源はコンクリート製造工場のバイブレータで、バイブレータの周波数と建屋が共振し、工場の壁面から低周波音が発生したと考えられました。そこで、バイブレータの周波数を上げ、コンクリートの材料を一部変更することにより、40~50 Hzにあった卓越成分が80 Hzに移動しました。苦情者によると、音は多少うるさいが対策前に比べて許容できる範囲であるということで、苦情は収まりました。

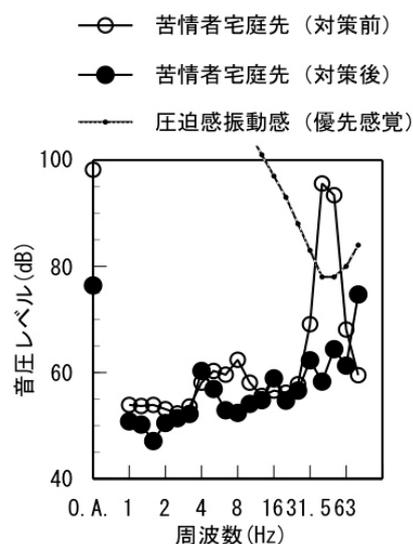


図-6 低周波音の測定結果

工場の壁面がスピーカの役割をして大きな低周波音が発生した事例です。それにしても、40~50 Hzで90 dBを超える低周波音はかなり不快な感じがします。

なお、屋外での測定結果を「手引書」の「心身苦情に係る参照値」と比較している事例を見かけることがありますが、誤りです。本事例は屋外での測定だったので、測定結果を「心身苦情に係る参照値」との比較は行っていません。

4.3 振動ふるいによる定在波の発生による心身に係る苦情⁸⁾

砂のふるい分け作業を行う工場に隣接した自動車整備工場から、工場の作業が始まると事務所に「唸り現象」が生じて気分が悪くなり、業務に差し支えらるるの苦情が寄せられま

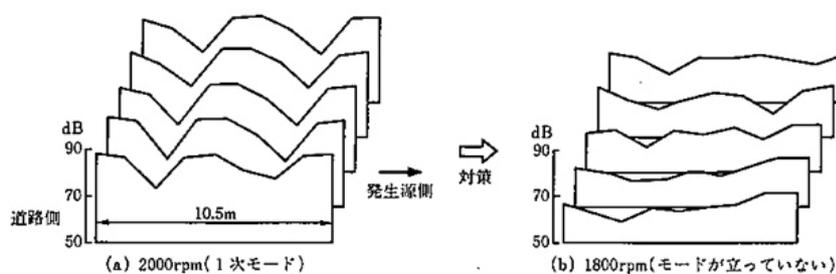


図-7 事務所内における低周波音の音圧レベルの分布

(左: 対策前, 回転数 2000rpm, 右: 対策後, 回転数 1800rpm)

した。県および町で調査した結果、隣接した工場内の振動ふるい機から発生する低周波音

の卓越周波数が、整備工場の事務室内の共鳴周波数と一致したため、図-7の左側に示すように、定在波により特定の場所で大きな音圧レベルが生じていることがわかりました。問題となった振動ふるいは2000 rpmで駆動されており、31.5 Hzの低周波音が発生していました。31.5 Hzの音波の波長は10.2 mで、苦情が発生した事務室の長手方向の室内長が10.5 mであったことから、室内に定在波が形成されたものと推定されました。

そこで、振動ふるいの回転数を2500 rpmに変更したところ、発生源側工場の工場内および反対方向で音圧レベルが上昇したことから、モータープーリーを交換し回転数を定格外の1800 rpmに変更しました。これにより、当初事務所室内において31.5 Hzで90 dB程度あった音圧レベルが55 dB程度に減少し、反対方向の音圧レベルも対策前に比べて5～10 dBの低減効果がみられました。

室内で定在波が発生すると、定在波の腹の位置では局所的に音圧レベルが大きくなり、不快感を感じる場合があります。この事例では、低周波音の波長と部屋の寸法との関係に注目することにより、原因の究明に至りました。

4.4 クルマのアイドリングに伴う室内における定在波発生による苦情⁹⁾

ある都心のマンションで、マンションの近くで車がアイドリングをすると室内で低い音が気になるという苦情が発生しました。室内で発生音の周波数特性を調べたところ、1/3オクターブバンドで25 Hz帯域の音圧レベルが卓越しており、73～78 dBの音圧レベルが観測されました。4気筒エンジンのアイドリング時(750 rpmと想定)における排気音の基本周波数を計算すると25 Hzとなり、部屋の長手方向(約7.0 m)の基本固有振動数24.7 Hzとほぼ一致することから、アイドリングにより室内で定在波が発生しており、心身苦情に係る苦情に関する参照値を25 Hzで3～8 dB上回っていることがわかりました。そこで、間仕切り壁を新たに設置して部屋を区切ったところ、25 Hz帯域の音圧レベルは低減され、問題は解決しました。

本事例では25 Hzの定在波が問題になりましたが、日本家屋によく見られる8畳程度の大きさの部屋では50 Hzと100 Hz程度の周波数で、4.5畳程度の大きさの部屋では63 Hzと125 Hz程度の周波数で定在波が生じることがあります。空調室外機などからの発生音ではこれらの周波数が卓越することがあるので、注意が必要です。

5. 騒音および低周波音が原因と思われる心身に係る苦情事例

5.1 大型空調室外機等からの騒音・低周波音による不快感・睡眠妨害¹⁰⁾

老人医療施設周辺の数軒の住民から、施設屋上に設置された大型空調室外機、変電設備等から発生する騒音・低周波音による不快感、睡眠妨害等の苦情が寄せられました。そこ

で、個々に機器を稼働・停止させて、発生源側と苦情者側で同時に低周波音・騒音の測定と苦情者の体感調査を行いました。測定結果と体感記録の一例を図-8～9、表-1に示します。

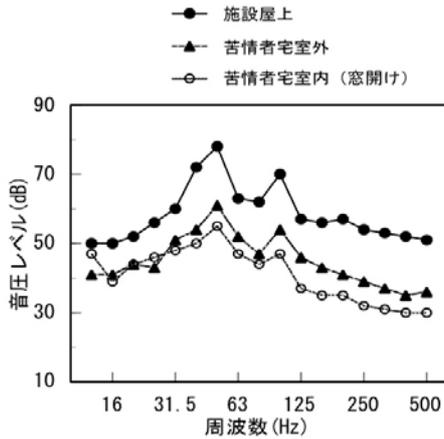


図-8 発生源側と苦情者宅側における騒音・低周波音の卓越周波数の比較

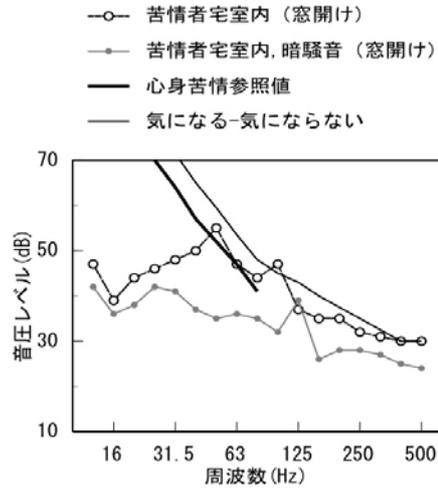


図-9 苦情者宅室内における測定結果と参照値及び評価値の比較

表-1 ある苦情者における体感記録表の記載例

分	機器の稼働状況等		音の種類					その他
	機器	窓の開閉	ウォンウォン	ウーン	ゴーツ	シャウーン	キーン	
0	停止	あけ						
1	↓	あけ						
2	↓	あけ						
3	↓	あけ						
4	↓	あけ						
5	↓	あけ						
6	↓	あけ						
7	↓	あけ						
8	↓	あけ		■				
9	↓	あけ						
10	稼働	あけ						
11	↓	あけ						
12	↓	あけ			■			
13	↓	あけ						
14	↓	あけ						
15	↓	あけ						
16	↓	あけ						
17	↓	あけ						
18	↓	あけ						
19	↓	あけ						
20	稼働	閉め						
21	↓	閉め						
22	↓	閉め						
23	↓	閉め						
24	↓	閉め						
25	↓	閉め						
26	↓	閉め						
27	↓	閉め						
28	↓	閉め						
29	↓	閉め						
30	↓	閉め						
31	↓	閉め						音が低くなる
32	↓	閉め						音が低くなる
33	↓	閉め						音が低くなる
34	↓	閉め						音が低くなる
35	↓	閉め						音が低くなる
36	↓	閉め						音が低くなる
37	↓	閉め						音が高くなる
38	↓	閉め						音が高くなる
39	↓	閉め						テンポが速くなる

その結果、空調室外機の稼働状況と苦情者の反応の間には対応が有り（表-1）、室外機稼働時における発生源側で観測された低周波音・騒音の卓越周波数と苦情者宅で観測された低周波音・騒音の卓越周波数も対応していました（図-8）。また、室内で空調室外機稼働時に 50 Hz と 100 Hz の音圧が大きい低周波音・騒音が観測され、50 Hz で「心身に係る苦情に関する参照値」³⁾を上回ったから、低周波音が苦情の原因の一つであることが確認さ

れました(図-9)。さらに100 Hzについても最小可聴値を15 dB程度上回っており、100 Hzの騒音も苦情の原因と判断されました。対策方法について検討した結果、日照の関係で屋上に高い防音壁を設置できなかったことから、施設の周囲に干渉型の壁を設置することにより低周波音・騒音は低減されました。他の機器については、稼働状況と苦情者の感覚が対応しなかったことから、苦情者に結果を説明し、苦情者も納得して問題は解決しました。

本件は公調委への申請があった事例です。事件の解決に向けて、発生源側の施設、設計事務所、建設会社、建設設備会社、設備機器会社の参加・協力の下、音響分野および対策分野の専門家を含めた検討委員会を立ち上げ、住民協力の下で調査を実施しました。さらに、調査結果を丁寧に住民に説明して住民の理解を得た上で、対策の検討を進めることで解決に至りました。

5.2 家庭用灯油ボイラーから発生する騒音・低周波音による心理的苦情¹¹⁾

10 mほど離れた隣地のボイラーの音が深夜までおよび、耳について不快感で眠れないという苦情がありました。測定の結果、50 Hzと100 Hzが卓越していることがわかりました。ボイラーの移設は難しかったことから、ボイラーを白灯油を燃料とするものからガスを燃料とするものに取替え、ボイラー周囲にコンクリートブロックを設置、内側に吸音材の貼付、煙突に消音器を設置、防音壁の設置等の対策を行うことにより苦情は収まりました。

5.3 ガス焚き冷温水器から発生する騒音・低周波音による心理的苦情¹²⁾

大手企業の独身寮に設置されたガス焚き冷水温水器から低周波音が発生し、20 m離れた民家より騒音の苦情が寄せられました。敷地境界で騒音レベルが50 dBを超えていたため、煙突に消音器を設置しましたが、対策後も52~53 dBと規制基準はクリアしませんでした。苦情者からは「騒音は減ったが、圧迫感がして気持ちが悪い」との訴えがありました。対策を検討した結果、燃料噴射量を少なくすることで、圧迫感の原因と考えられる卓越周波数31.5 Hzにおける音圧レベルを80 dBから71 dBに低減することができ、苦情は解決しました。

この事例は「手引書」が公表される以前のもので、測定は屋外で行われたものです。31.5 Hzにおける家屋の内外音圧レベル差(実測結果で5~15 dB程度)を考えると、屋内では31.5 Hzの音圧レベルは65~75 dB程度以下と推定され、屋内で31.5 Hzの心身苦情参照値64 dBを上回っていた可能性が考えられます。

5.4 家庭用ヒートポンプ給湯機からの騒音・低周波音苦情事例¹³⁾

隣家に設置してある家庭用ヒートポンプ給湯機の音で困っているとの苦情が市に寄せられました。特に早朝3時頃が最も強く感じるとのことでした。市では、発生源近傍と苦情

者が騒音を大きく感じるという居間において、深夜から朝5時頃まで測定を行いました。

測定結果によると、発生源の稼働状況と苦情者の感覚には対応関係があり、室内の測定結果は63 Hz、80 Hzにおいて「心身に係る苦情の参照値」³⁾を上回りました。

そこで、製造業者が現地で点検を行ったところ、通常より大きな音がしているとのことでした。ヒートポンプを新品に取替え、設置場所の変更を実施したところ、低周波音は低減し問題は解決しました。

近年、家庭用ヒートポンプ給湯機（エコキュート）からの騒音・低周波音苦情が寄せられることが多くなっています。日本冷凍空調工業会では、給湯機の設置に関するガイドブック¹⁴⁾を作成し、設置業者への注意喚起を行っています。

この事例では、苦情者が苦情を訴える時間に測定をしています。深夜などの場合、地方公共団体ではなかなか対応しにくいですが、苦情が発生する時間帯に測定することは大変重要です。また、この事例では「手引書」の方法に従って機器の稼働状況と苦情者の反応を調べるとともに、発生源側と苦情者側での同時測定を実施しています。その結果、ヒートポンプからの低周波音が苦情の原因であることが判明し、製造業者に来てもらい確認してもらうとともに、機器の交換、移設により問題の解決に至っています。苦情が寄せられてからすぐに対応したことも、早期の解決に至った一因と考えられます。

この事例のように、家庭用ヒートポンプ給湯機からの苦情も「手引書」で対応できます。

5.5 焼却炉から発生する500 Hzの騒音による心理的苦情⁵⁾

製紙工場から200 mほど離れた家屋の住人から低周波音の苦情が寄せられました。そのような現象が起こったのは、新工場ができてからとのこと。唸るような音が気になるが、一日中ではないとのことでした。しかし、工場は連続的に稼働していて苦情者の苦情を訴える時間と合致しません。

調査員は苦情者宅内で低周波音を感じられず、低周波音の測定結果からも苦情が発生するような音圧レベルは観測されませんでした。そこで苦情者にどんな音が気になるのか詳細に尋ねたところ、「ブーン」という音とのこと。

そこで、工場および周辺を再度調査したところ、工場の小型焼却炉付近で図-10に示すような500 Hzで65 dBの

騒音が観測されました。苦情者が気になっていたのは低周波音ではなく、微かに聞こえる工場の小型焼却炉煙突から発生する騒音であることが判明しました。

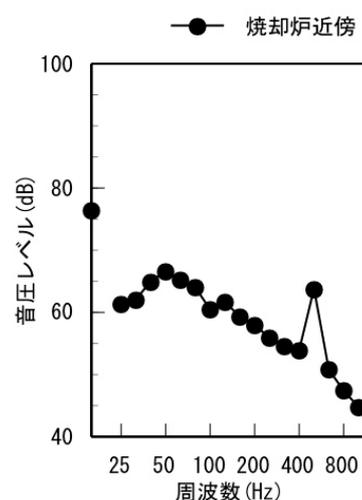


図-10 騒音の測定結果

「低周波音の苦情」というと低周波音の測定器しか持って行かない人もいます。しかし、一般の人は低周波音そのものを聞いたことがないので、200 Hz 以下程度の比較的低い周波数の騒音を低周波音だと思っている場合もけっこうあります。また、苦情者の訴えを聞く中で、「キーンという低周波音」などと訳のわからないことを言う人もいます。したがって、「低周波音の苦情」だからといって 80 Hz 以下の音だけに注目するのではなく、100 Hz 以上の騒音の可能性も考えて測定に臨むことが肝心です。

6. 低周波音・騒音以外が原因と思われる事例

6.1 パン屋のクーリングタワーからの低周波音苦情事例¹⁵⁾

町工場（製紡業）経営者の母親（お婆さん）より、約 30 m 離れたパン屋のクーリングタワーからの低周波音の苦情が寄せられました。工場経営者も調査員もお婆さんが訴える音は聞こえず、測定でも問題となるような音圧レベルは観測されませんでした。そこでお婆さんと一緒に日常の導線に沿って動いてみました。お婆さんによれば、動力ミシンを使用した後に例の音が聞こえるといいます。最近では長男の仕事が忙しく、次男も結婚して誰もかまってくれないとのこと。「耳鳴りだな」と直感し、パン屋が原因でなく耳鳴りであること、家族を呼んでお婆さんをもっと気遣ってあげようということで解決しました。

6.2 ある老人が感じる原因不明の騒音苦情事例¹⁶⁾

一人暮らしの老人から「ボーン、ボーン」という低周波音と振動が一日中聞こえるため、ストレスが生じているとの苦情が市に寄せられました。市では県の研究所と合同で調査を行ったが苦情者が申し立てるような低周波音を計測でも調査員の耳でも確認できませんでした。そこで苦情者に対し、他市へ行ってもその音が聞こえるか進言したところ、他市に行っても同じ音が聞こえるとの連絡があったことから、健康チェックを強く勧めたところ、苦情者は納得して解決しました。

6.1 の事例も 6.2 の事例も耳鳴りが原因と考えられます。音の原因が苦情者の耳の中にある場合、周りの騒音が大きければ「問題の音」は聞こえませんが、周りが静かになると耳の中の「問題の音」が聞こえてきます。耳鳴りは「キーン」という高い音だと思われがちですが、中には低い周波数の耳鳴りもあるとのこと。

6.3 低周波電磁波との取違え³⁾

苦情者は 40 才代後半の男性で、頭痛、不眠、不快感、耳鳴り等を訴えた。低周波音が原因ではないかということで、調査を行いました。問題となるような大きさの低周波音を観測できませんでした。また、調査員の耳でも低周波音を確認できなかったとのこと。

本人は医師より低周波電磁波による影響との診断をもらっており、低周波音と低周波電磁波の違いについて説明したところ、低周波音による影響はないことを了解しました。

50 Hz 程度の周波数の電磁波を低周波電磁波と言うそうです。マスコミなどでも「低周波」と言うので、相談に来られた男性は低周波音と勘違いしてしまったのかもしれませんが。このほかにもよく出てくる言葉として、低周波地震や低周波マッサージ器などがあります。

7. 低周波音苦情対応の進め方

低周波音苦情対応の進め方のおさらいとして、図-11 に「低周波音問題対応の手引書」³⁾ に基づく低周波音問題の評価手順のフローチャートを示します。

測定をすると、測定結果と参照値の比較をしたくなりますが、対応関係があるか否かが重要です。発生源の稼働状況と苦情者の反応との間に対応関係がなければ、発生源と想定される施設からの低周波音あるいは騒音を聞き取れない（あるいは感じとれない）こととなりますから、対策しても効果がありません。以下のフローチャートと前回の苦情対応の進め方を参考に対応して下さい。

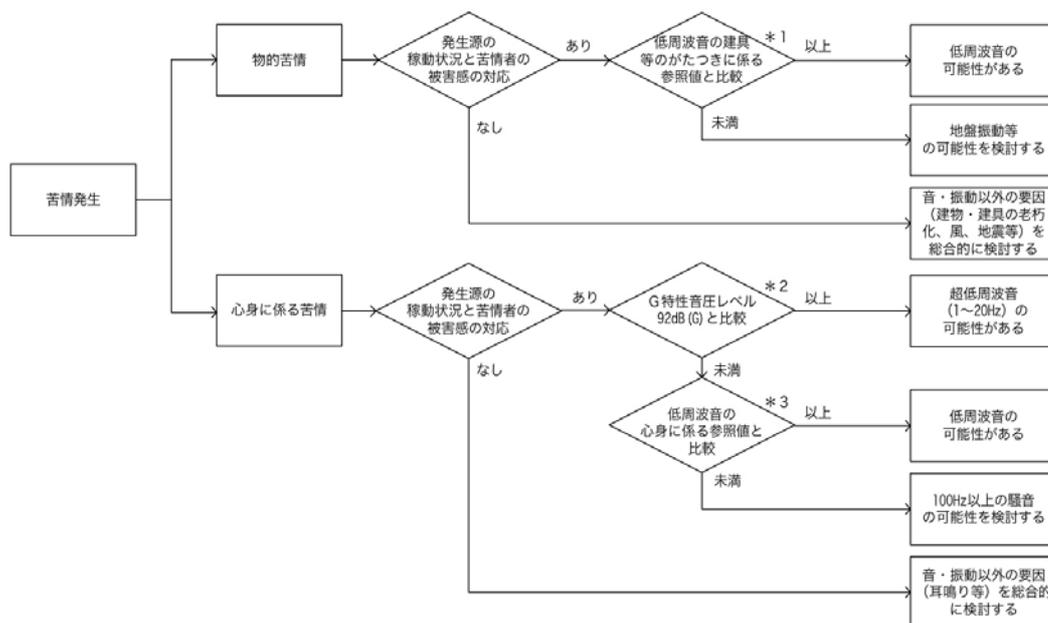


図 11 「低周波音問題対応の手引書」に基づく低周波音問題の評価手順

8. おわりに

今回は、物的苦情の事例を 5 例、心身苦情の事例を 12 例ご紹介しました。次回は、判断の難しい苦情の事例や間違った評価の事例などを中心にご紹介したいと思います。

【第3回 参考文献】

- 1) 萩原:低周波空気振動防止対策事例集, 日本騒音制御工学会技術レポート, (1986), No.6, pp.31-32
- 2) 環境省水・大気環境局大気生活環境室:低周波音対応事例集, 平成 20 年 12 月, pp.26-33
- 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) 環境省水・大気環境局大気生活環境室:よくわかる低周波音,平成 19 年2月
- 5) 落合:最近の低周波音苦情の傾向と測定方法, 日本音響学会講演論文集, 2003 年 3 月, pp.895～896.
- 6) 音響技術, No.123(Vol.32, No.3) 2003.9, pp.49-50
- 7) 中村, 時田, 織田: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
- 8) 山崎,谷中,富永:振動ふるいから発生する低周波空気振動による定在波の発生とその対策, 騒音制御, Vol.7, No.2, (1983), pp.37-40
- 9) 音響技術, No.136(Vol.35, No.4) 2006.12, pp.42
- 10) 塩田, 落合:空調室外機等から発生する騒音・低周波音問題の対応事例, 騒音制御, Vol.32,
- 11) 沖山:生活騒音の苦情処理, 音響技術, Vol.13, No.2, (1984), pp.73.
- 12) 川崎市公害研究所:ガス焚冷温水器より発生する超低周波騒音について, 川崎市公害研究所年報, 4, (1976), pp.62～72.
- 13) 桑原:松戸市における家庭用ヒートポンプ給湯機の騒音・低周波音・振動測定事例について, 総務省 公害等調整委員会. 機関誌「ちょうせい」第 67 号(平成 23 年 11 月)
- 14) 一般社団法人日本冷凍空調工業会;家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブックについて (https://www.jraia.or.jp/product/heatpump/t_guide.html)
- 15) Q&A, 騒音制御, Vol.25, No.4, (2001), pp.245.
- 16) 環境省環境管理局大気生活環境室:低周波音防止対策事例集,平成 14 年3月

シリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」

－第4回 低周波音の苦情対応事例(その2)－

一般財団法人小林理学研究所
工学博士 落合博明

1. はじめに

前回は、低周波音の物的苦情事例を5例、心身苦情事例を12例ご紹介しました。低周波音の苦情の中には、対応が難しい場合があります。例えば、問題となる低周波音がいつ発生するかわからない場合や、大きな工場などのように発生源の数が多すぎて問題となるのはどの発生源なのかかわからない場合などです。また、近年の苦情で多いのが、苦情者宅周辺に発生源となるようなものが見当たらない「発生源が不明」の苦情です。本稿では、判断の難しい苦情の事例や間違った評価の事例などを中心にご紹介します。

2. いつ発生するかわからない低周波音苦情の事例

2.1 1年のうちいつ発生するかわからない苦情事例(1)¹⁾

秋田県でガラス戸や窓ガラスがガタガタと音をたてて振動するといった現象が発生しました。この地区は、奥羽山脈の登山道の入口の溪谷沿いの静かな山村で6世帯が暮らしています。現象は常時発生するのではなく、ある日突然発生するとのことでした。はじめは亡くなった人の魂が訪ねてきたのかと思われていましたが、あまりにも回数が多すぎることから、その後、この怪現象は必ず大雨が降ったあとに発生することに気づいたそうです。集中豪雨のあとには特に振動が大きくなり、地滑りの予兆ではないかと地区の住民に避難勧告まで出たこともあったそうです。

怪奇現象の原因がわからずにいましたが、1年余りして、5年前に完成した砂防ダムの水膜が発生源であることがわかりました。ダムから水が落下する際、水膜が前後に振動し背後の空洞と共鳴することにより10 Hzに卓越成分を持つ超低周波音が発生し、民家の建具を振動させていたのです。10 Hzの超低周波音は、よほど大きな音圧レベルでない限り人の耳には感じられないことから、怪奇現象のように思われたのでしょう。土木事務所では現地調査を行って現象を確認し、堰堤にコンクリートブロックを設置して水膜を分断することにより、問題は解決しました。

同様の事例は、長野県、岐阜県、滋賀県、石川県²⁾など全国各地で報告されています。

2.2 1年のうちいつ発生するかわからない苦情事例(2)

施設の屋上に設置された空調室外機からの騒音・低周波音苦情を申立てられた数軒のお宅

のうちの1軒で、2階の天井から低い音がするとの苦情がありました。音が発生する時期は不規則であり、踏査を行った日も室外機の騒音・低周波音測定を行った日も天井からの音は発生しませんでした。踏査時にこのお宅の内外を確認したところ、音が聞こえるという部屋の屋根上にアンテナが設置されていました。他に発生源と思われるものが見つからなかったことから、可能性の一つとして、屋根上に設置されたアンテナやワイヤーが強風時に共振し、その振動が天井から室内に伝わって音が発生していることが考えられました。そこで、音が発生する日の気象状況（風向、風速等）をチェックするようお願いしました。

テレビアンテナの風による励振の事例³⁾、⁴⁾が報告されていますので、併せてご参照下さい。

事例 2.1 や 2.2 のように、ある特定の条件のときに低周波音や騒音が発生することがあります。問題が発生する季節や気象条件（降雨、風向、風速等）をメモしておくとい良いでしょう。また、問題が発生したときの周囲の状況等にも注目しましょう。

2.3 1日のうちいつ発生するかわからない事例⁵⁾

低周波音による物的苦情が県に寄せられました。しかし、問題となる低周波音の発生は不規則で、1日のうちいつ発生するかわかりません。県では苦情者宅屋内に測定器を設置し、1分間の等価音圧レベルを連続的に測定しました。図-1 に音圧レベルの変化が見られた 31.5 Hz と 63 Hz の 1/3 オクターブバンドの 1 分間 Leq の測定結果を示します。

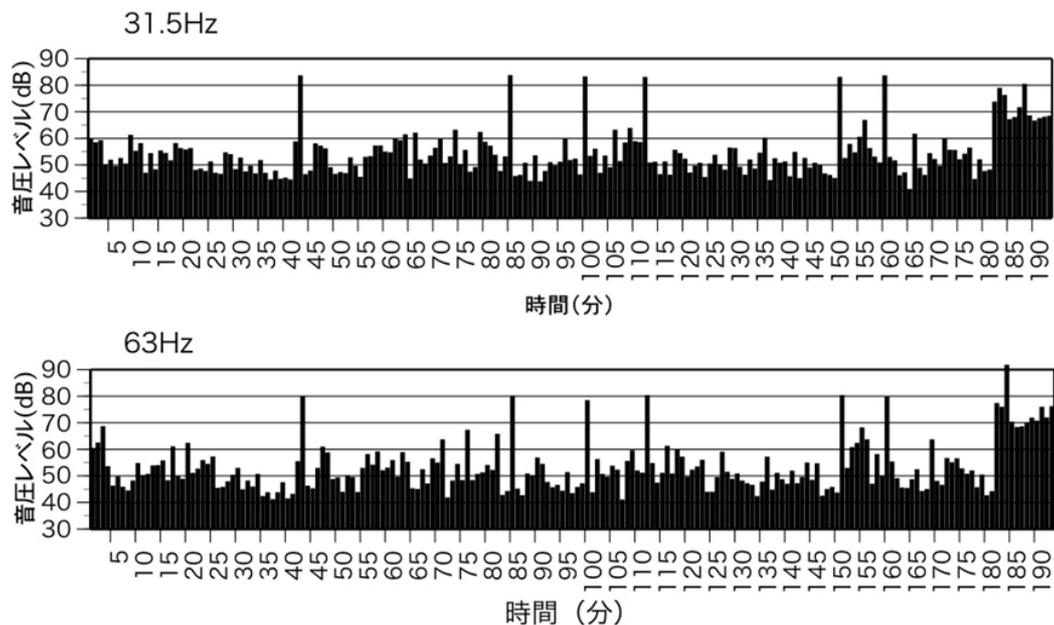


図-1 低周波音の周波数別音圧レベル変動の測定結果（苦情者宅屋内，Leq, 1m）

図より、測定開始からおよそ3時間後に音圧レベルの上昇が見られます。音圧レベルの変化は、問題となる建具の振動発生状況と対応していることが確認されました。発生源は施設の稼働状況から近くの店舗に設置された業務用ドラム式脱水機と推定されました。低周波音の測定は屋内でしか行われていませんが、家屋内外音圧レベル差を考えると、屋外で観測される低周波音は物的苦情参照値を上回る可能性もあると考えられました。

問題が1日のうちのいつ発生するかわからないときには、低周波音や騒音の連続測定が有効な場合があります。この事例では物的苦情でしたが、心身苦情の場合には「不快感を感じる」あるいは「低周波音で目が醒める」といった問題となる症状の発生する時刻と周波数別の音圧レベルの関係を調べるとよいでしょう。症状が発生する時刻と特定の周波数の音圧レベルの間に相関があれば、その周波数の音が苦情の原因である可能性も考えられます。

3. 発生源の特定が難しい低周波音苦情の事例

3.1 たくさんの発生源があることにより特定が難しい苦情事例⁶⁾

たくさんの発生源がある場合、問題となる発生源をどのように特定したらよいでしょうか。第3回の2.2に記載された事例が参考になります。

苦情は、隣に工場ができてから扉ががたつくなど振動が止まらないというもので、市では当初振動苦情として扱いましたが、調査を進めるうちに低周波音が原因であることが判明したとのことです。

この事例では、工場内の全施設を停止させ、施設を1台ずつ立ち上げていき、工場内と苦情者宅内で低周波音の同時測定を行いました。測定にあたっては、家屋側で観測された低周波音の卓越周波数である10 Hzに注目するとともに、建具のがたつき発生の有無にも注目しました。その結果、ポンプを立ち上げたときに建具のがたつきが発生しており、低周波音の発生源はポンプ施設およびその配管であると特定されました。

大きな工場や大型施設のように、発生源がたくさんあり個々の発生源を稼働・停止できる場合には、1つずつ発生源を稼働・停止させて測定する方法と、この事例のように発生源を順番に稼働させてゆく方法があります。場合によっては、複数の発生源が稼働したときに低周波音の音圧レベルが大きくなり、問題が発生することもあります。いずれにしろ、発生源を稼働・停止しなければならないので、発生源側の協力が必要となります。

3.2 発生源が不明の苦情事例(1)⁷⁾

「集合住宅の2階に居住しているが、2ヶ月ほど前から低周波音が聞こえるようになった。調査を行ったが、原因はわからなかった。発生源と考えられる機器の電源を切ったり、

メンテナンスも行ったが状況に変化はなかった。」という苦情が市に寄せられました。苦情者が居住する集合住宅の周辺は住宅地となっており、騒音や低周波音が発生するような施設等は設置されていません。また、集合住宅には事業場等は入居していません。

申し立てを受け、苦情者が入居している部屋で2回の調査を行いました。1回目は浴室を除く全室で、2回目は寝室で測定を行いました。2回目の調査では低周波音の測定と併せて苦情者の反応調査も実施しました。

低周波音の測定結果は部屋の違いや測定日によらず、全てのデータが心身苦情に係る参照値を下回りました。また、発生源が不明のため発生源のオン・オフ調査は行えませんでした。苦情者が反応したときとしないときの低周波音の測定結果を比較した結果、両者の間に相関関係は認められませんでした。なお、苦情者宅内で測定された騒音レベルは L_{95} で 39～51 dB でした。

以上の調査結果から、苦情の原因は微かに聞こえる程度の低レベルの騒音か、あるいは苦情者の体調の問題であると判断されました。そこで、苦情者の話をできるだけよく聞き、部屋にいるときにはテレビやステレオをつけて気分を紛らわすことや、外出するなどのソフト的な対策を提案しました。

3.3 発生源が不明の苦情事例(2)⁸⁾

苦情者は集合住宅の3階に住む住民で、屋内でブーン、ゴロー、パワー、ポーといった連続音による不快感を訴えました。周辺には苦情者以外に苦情を申し立てる者はいません。苦情者が最も感じるというトイレで低周波音の測定を行いました。発生源不明のため、発生源の稼働・停止は行えませんでした。

測定結果は心身苦情に係る参照値を下回っており、問題となるような大きさの低周波音を観測できませんでした。また、測定時、調査員も苦情者が申し立てる低周波音を確認できなかったことから、苦情者の体調不良は、低周波音によるものではないと判断しました。苦情者が体調の不調を訴えていたことから、調査に向かう際、保健師に同行を依頼しました。苦情者に体調を悪くするような低周波音は出ていないことを説明し、調査に同行した保健師から、体調に不安があるときは相談に乗る旨を伝えました。その後、苦情の訴えはないとのことでした。

低周波音の心身に係る苦情はほとんどが室内で発生しています。心身苦情の多くは周波数が 20 Hz 以上の低周波音あるいは騒音によると考えられます。20 Hz 以上の周波数であれば家屋の内外音圧レベル差は 5 ～ 10 dB 程度以上はあるので、問題となる音が屋外から到来していれば、屋外では室内よりも大きな音が観測されなければなりません。発生源が不明の場合、家屋内外で同時に測定を行い、苦情者の反応と家屋の内外における測定結果との間に関連例があるか確

認みましょう。関連性が認められなければ、苦情の原因が低周波音や騒音ではない可能性も考えられます。

3.4 近隣から発生する低周波音の事例³⁾

戸建住宅の住民から、低周波音苦情が寄せられました。周囲は住宅街であり、静かな環境です。問題の音は「ウンウン」という音で、発生時期には周期性があるとのことでした。

周囲の騒音が低下する夜間に測定を行ったところ、苦情者宅1階寝室の窓の前(屋外)で40 dBAの騒音レベルが観測されました。当初は発生源がわかりませんでした。

住民に聞き取りを行ったところ、問題となる音は近隣の集合住宅竣工後に発生したとのこと。近隣の集合住宅ではディスポーザフロア室の臭気換気を屋上まで設置されたダクトにより行っており、屋上の排気口が発生源であることが判明しました。発生原因はディスポーザフロア室から屋上までのダクト経路の共鳴と考えられました。

そこで、ダクト経路内に消音チャンバーを設けることを検討しましたが、設置が困難であったため、建物屋上の排気口近傍に消音チャンバーを設置することにより問題を解決しました。

図-2の注釈：ハト小屋とは、配管類が屋根スラブを貫通するとき、防水層を保護するために設ける小さな箱形状のもの。臭突とは、臭気を高い位置で換気し外に拡散させるための煙突、ダクト等のこと。

問題の発生した時期と集合住宅の竣工時期が一致したことが、発生源特定の手がかりとなりました。長いダクトが笛のように共鳴すると低い音が発生することがあります。この事例のように、単一の周波数の音が不規則に変動すると、不快に感じる場合があります。

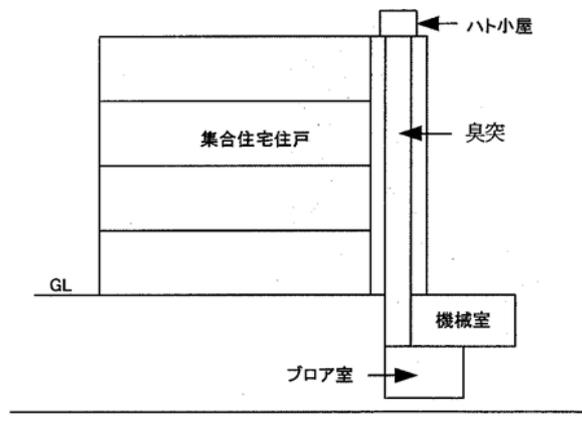


図-2 低い音が発生した集合住宅の断面図

4. 防音対策をしたのに、症状が改善しなかった事例⁹⁾

寝室等でゴォーという音がするとの苦情が寄せられました。苦情者は高齢の女性で、インターネットの知識からゴォーという音を低周波音と考えています。苦情者によれば、隣に家が建ってから感じるようになったとのこと。発生源は不明ですが、苦情者本人は隣家のボイラー等の室外に設置された機器ではないかと考えています。

このお宅では、寝室の窓を3重にする、3層のボードを天井・床・壁に貼るなど、かなりのお金をかけて、防音対策をしたそうです。対策後に低周波音の測定をしたところ、対

策をした寝室ではレベルが低く、特に 50 Hz 以上の周波数ではレベルが低すぎて、低周波音レベル計の周波数分析画面表示もされませんでした (30 dB 以下)。しかし、室内の音圧レベルは下がりましたが、苦情者の感じ方は変わりませんでした。

測定結果に基づいて説明をしたところ、苦情者の息子さんは低周波音が苦情の原因ではないことを納得されましたが、苦情者本人は納得しませんでした。苦情者本人とは、時々電話で話をして不安を取り除くようにしています。外に出て楽しいことをするように依頼しています。

問題となる低周波音が屋外から来るのであれば、家屋の防音性能を高めれば室内の音圧レベルは低減します。この事例では、遮音対策を施したことによって室内における低周波音の音圧レベルが全体的に大きく低減しました。遮音効果は周波数が高いほど大きいので、100 Hz 以上の周波数域でも大きな効果が得られているものと思われます。それにもかかわらず、苦情者の感じ方が変わらないのは何故でしょうか。苦情者が申立てる苦情の原因が室内にあるか、あるいは苦情者自身の問題の可能性が考えられます。

5. 低周波音苦情における対応関係による判断に関する事例

5.1 発生源の稼働・停止との対応関係がみられない苦情事例

近隣の施設に設置されたボイラー、空調室外機等からの低周波音、騒音、振動による健康被害に関する苦情が寄せられました。苦情者宅は戸建て住宅街の一角にあり、周囲には対象とする施設の他に、工場、農地などが存在しています。

苦情を受けて、苦情者が最も音や振動を感じやすく、周囲の暗騒音が小さくなる夜間に測定を行いました。測定にあたっては、施設の協力を得て、苦情者が申立てる発生源を稼働・停止させ、発生源側と苦情者宅内外で低周波音、騒音、振動の同時測定を行いました。また、これと併せて、苦情者が最も感じるとされる寝室で体感調査を行いました。

測定の結果、寝室で測定された低周波音、騒音の音圧レベル・周波数特性は一部の周波数で最小可聴値 (ISO 226-2003) を上回っているものがあり、何らかの音は聞こえる可能性があると考えられます。しかし、低周波音、騒音の音圧レベル・周波数特性は、全停止の条件も含めて機器の稼働条件によらずほとんど変わりませんでした。施設の敷地境界と寝室で観測された低周波音、騒音について詳細な周波数分析 (FFT 分析) を行い、両者の卓越する周波数を比較したところ、両者に対応はみられませんでした。このことから、施設側からの低周波音、騒音は寝室までは届いていないか、暗騒音未満であると考えられます。寝室で観測された振動レベルは X、Y、Z 方向ともいずれの条件においても 30 dB 以下であり、稼働条件による変化は見られませんでした。

発生源の稼働条件と体感調査結果の関係を調べたところ、苦情者は発生源を全て停止し

た条件でも問題となる音が聞こえると答えており、身体的な症状を訴えました。さらに、苦情者は、全停止の条件で一部の発生源が稼動した条件よりも強い症状を訴えました。

以上の結果から、発生源の稼動条件と低周波音、騒音、振動の測定結果、並びに体感調査結果との対応関係は認められず、苦情の原因は近隣の施設に設置された機器からの低周波音、騒音、振動である可能性は極めて低いという結論に至りました。

この事例では発生源とされる機器を稼動・停止させて、低周波音、騒音、振動の測定および苦情者の体感調査を行いました。機器を稼動すれば発生源側で観測される音圧レベルや振動レベルは増加します。低周波音、騒音、振動が苦情者側まで伝搬していれば機器の稼働に伴い苦情者側のレベルも増加するはずですが、また、機器を稼働させると観測された低周波音、騒音にその機器に特有な周波数の卓越や増加がみられます。これらが苦情者側へ伝搬していれば苦情者側でも同じ卓越成分や特徴的な周波数特性が観測されるはずですが、また、苦情者が申立てる発生源が健康被害の原因であれば、発生源が稼動したときにその音や振動を感知して症状が現れるはずですが。

この事例では、これらの物理的な対応関係、体感上の対応関係が認められなかったことから、参照値との比較は行いませんでした。低周波音の測定をするとすぐ参照値と比較したくなりますが、参照値との比較は対応関係がある場合に限られることに注意が必要です。

5.2 発生源の稼動・停止との対応関係はあるが測定値が参照値を下回った事例

隣接する会社建物に設置された空調室外機等から発生する騒音、低周波音等による強い不快感、不眠等により、日常生活に支障をきたすとの苦情が寄せられました。この会社の苦情者宅側に面した2階と3階のベランダには大小合計8台の室外機と1台の小型ボイラーが設置されていました。苦情者宅周辺は住宅地であり、やや離れたところに鉄道があるものの、大きな騒音や低周波音の発生源は見当たりませんでした。

苦情を受けて、苦情者が最も音や振動を感じやすく、周囲の暗騒音が小さくなる夜間に測定を行いました。測定にあたっては、会社側の協力を得て、複数の発生源を稼動・停止させ、発生源側と苦情者宅内外で騒音と低周波音の同時測定を行いました。また、これと併せて、苦情者が最も感じるとされる和室で体感調査を行いました。

測定の結果、発生源側の騒音・低周波音が苦情者宅内まで伝搬してきていることを確認しました。また、体感調査結果から、いくつかの稼動条件において、発生源の稼動と苦情者の感覚の間には関連性があることがわかりました。

苦情者宅屋内で観測された低周波音の測定結果は、心身苦情に係る参照値を下回っていたことから、苦情の原因は低周波音ではなく、100 Hz以上の騒音の可能性が高いと考えられました。そこで、発生源側敷地境界で測定された騒音レベルを環境基準値と比較したと

ころ、一部の稼働条件で環境基準（昼間 55 dB、夜間 45 dB）を上回りました。また、騒音・低周波音の周波数分析結果より、機器側で観測された 50 Hz、100 Hz、160 Hz、200 Hz の卓越成分が苦情者宅内でも観測されました。さらに、苦情者宅内における測定結果について、低周波音による心身苦情に係る参照値の元になった寝室の許容値の 10% 値の実験方法と同様の方法で 100 Hz～200 Hz について行われた実験結果¹⁰⁾、^{注)}と比較したところ、一部の稼働条件で、測定値がこの実験結果を上回ることがわかりました。

測定結果を苦情者および会社側に説明し、会社側と協議を行った結果、寄与の大きい機器を移設することで問題は解決しました。

注) 100 Hz 以上の実験結果：100 Hz；37 dB, 125 Hz；33 dB, 160 Hz；28 dB, 200 Hz；25 dB

低周波音の測定結果が参照値を下回ると「切り捨てられる」とおっしゃられる苦情者の方がおられますが、発生源の稼働・停止との対応関係があればそのようなことはありません。参照値以下ということは、苦情の原因が低周波音である可能性は低いということなので、100 Hz 以上の騒音の可能性が考えられます。苦情の対応をされる方も、低周波音ではないからといって、そこで止めてしまっただけではいけません。一般の方の中には、「低い音が低周波音である」と思われている方も多いので、苦情の原因が実は騒音であったという場合も多いのです。低周波音の苦情が寄せられた場合には、低周波音の測定器に加えて 100 Hz 以上の周波数も測定できる測定器も携行されることが肝心です。

6. 苦情者へのヒアリングに基づく苦情原因の推定

6.1 擬音語による発生源の推定

低周波音や騒音の苦情で問題となる音の表現から、苦情者が訴える音のおおよその周波数や性状を推定する際の助けになる場合があります。表-1 は耳鳴りの検査に関連して、耳鳴音の擬声語表現から音響的な特徴を捉えるためにまとめられた対応表です¹¹⁾。

例えば、「ウーン」とか「ワーン」と表現される音は 125 Hz、250 Hz 程度の周波数の純音性の音、「ジー」と表現される音は 4,000 Hz、8,000 Hz 程度の周波数の雑音性の音と推定されます。前回ご紹介した事例の中の

表-1 擬声語の代表語とその周波数対応

代表語	Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1. ワーン		○	○					
2. ウーン		○	○					
3. ブーン		○	○	○				
4. ツーン				○	○	○	○	○
5. ピー					○	○	○	○
6. キーン						○	○	○
7. ガー		●	●	●				
8. ザー		●	●	●	●	●	●	●
9. ジャー		●	●	●	●	●	●	●
10. ジー							●	●
11. ゴー		○	○	●				
12. ミーン						○●	○●	○●
13. チー						○●	○●	○●
14. シーン								○●
15. ビー		○					○●	○●

○ Pure tone
● Band noise

「大型空調室外機等からの騒音・低周波音による不快感・睡眠妨害の事例」における体感記録表の記載例の中にも苦情者が申立てる擬音語が記載されています。記載例はある一人の方の表現ですが、同じ音でも人によって擬音語の表現は異なりますので注意が必要です。この表は残念ながら低い周波数側は 125 Hz までしかありませんが、昨今の低周波音苦情はエコキュート音の苦情も含めて 100 Hz 以上の周波数が本当の原因である場合も多いので、結構使えるのではないのでしょうか。

6.2 耳栓をした場合の低周波音低減効果

低周波音の苦情者の方へのヒアリングの中で、耳栓をすると問題とする音が小さくなりますかという質問をすることがあります。回答はさまざまで、音が小さくなるという方もいれば、変わらない、かえって大きくなったという方もいらっしゃいます。

大学病院の耳鼻科の専門医に伺ったところ、「外部からの音が問題になっているかどうかは耳栓をすればわかる。耳栓をしても音が小さくならない場合は、外部の音ではなく別の原因によると考えられる。」との回答をいただきました。

耳栓は防音保護具として大きな騒音を発生する産業職場で働く作業者の聴力保護のために使用されます。耳栓の遮音性能は 4,000 Hz が最も大きく 40 dB 程度ありますが、63 Hz では 20 数 dB 程度となっています¹²⁾。通常はこれより低い周波数域での性能は測定されませんが、低周波数域における耳栓をした場合としない場合の閾値に関する実験結果によると、10～20 Hz の低周波数域においても 20 dB から 20 数 dB の遮音効果が確認されています¹³⁾。

発生源不明の苦情や、発生源の稼動・停止と体感の対応がみられない場合など、苦情者の方に耳栓をして音が小さくなるかどうか試していただくとよいでしょう。耳栓をしても問題とする音が低減しない場合は、外部の音が原因ではないと考えられます。4. でご紹介した家屋の防音対策をしたのに効果がなかった事例も、耳栓をした場合に類似した事例のように思われます。

7. 不適切な参照値の適用を行った事例

インターネットで不適切な参照値の適用を行った事例を見つけました。発生源は学校に設置された空調室外機で、隣接する住宅から騒音・低周波音の苦情が寄せられているとのこと。聞き取り調査から、低周波音の影響が考えられたため、低周波音の測定を行ったとのこと。測定は敷地境界線上（屋外）で、室外機稼動の状態ですべて3回、停止の状態ですべて1回行われています。測定結果は心身苦情に係る参照値との比較が行われ、室外機稼働時の低周波音が 40 Hz～80 Hz の帯域で測定値が参照値を上回っているため、低周波音によ

る影響があると結論付けています。

しかし、心身苦情に係る参照値は「低周波音問題対応の手引書」¹⁴⁾にも書かれているとおり、屋内の測定結果と比較すべきものであり、不適切な適用がなされています。家屋内外レベル差を考えると、室内の測定値はおそらく心身苦情参照値を下回るのではないかと推定されます。このホームページでは低周波音の測定結果しか公表されていませんが、実際に苦情が発生していることを考えると、100 Hz以上の騒音が原因である可能性も考えられます。

地方公共団体による低周波音の測定結果において、屋外で測定された低周波音の測定値と心身苦情に係る参照値を比較している事例を思いのほか多く見かけました。このような適用は誤りですので、参照値との比較にあたっては特に注意が必要です。

8. おわりに

今回はいつ発生するかわからない事例を3例、発生源の特定が難しい事例を4例、対策をしたのに効果が得られなかった事例を1例、対応関係の有無による判断に関する事例を2例紹介しました。また、苦情者の訴えに基づく問題となる周波数の推定や原因の推定、参照値の誤った適用事例についても紹介しました。

騒音の苦情と異なり、低周波音の苦情への対処は厄介です。騒音苦情の場合は現場に行くと音を聞けば問題となっている音がたいていわかりますが、低周波音苦情の場合は必ずしもそうはいきません。「低周波音」を正確に理解している人は非常に少なく、「低周波音」という言葉の捉え方が人によって異なるからです。ある人は低い音(数百 Hz 程度の騒音)を低周波音と考えているでしょうし、ある人は耳に聞こえずに体調を悪化させるのが低周波音と考えています。

現場調査で特に注意しなければならないのが、調査員が現場で問題とする音を確認できない場合や、測定できない場合です。このような場合には、発生源と想定される施設を稼働・停止させて苦情者の体感との対応関係を確認しましょう。対応関係が認められない場合や発生源不明の場合には、耳栓をして問題とする音が小さくなるか確認しましょう。耳栓をしても問題とする音が小さくならない場合は、自身の問題である可能性が考えられます。このような場合は、騒音や低周波音の対策をしても効果が得られないでしょう。

前回も申し上げたとおり、現在読者の方が抱えていらっしゃる苦情と全く同じ事例はなかなかないと思います。今回ご紹介した事例や環境省の事例集等を参考に、個々の苦情に対処していただければ幸いです。

次回は、公益社団法人日本騒音制御工学会会長 井上保雄氏に低周波音の対策方法についてご紹介いただく予定です。

【第4回 参考文献】

- 1) 読売新聞, 1998年12月6日(日)版
- 2) 辰橋他: 頭首工部における低周波音対策について, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2010-41, 平成22年8月20日
- 3) 中澤: 不思議音事例シートの紹介, 騒音制御, 33巻5号, (2009.10), pp.375-389
- 4) 日本騒音制御工学会ホームページ, 不思議音分科会のページ, 不思議音事例
<http://www.ince-j.or.jp/subcommittee/fushigion>
- 5) 平成16年度環境省請負業務結果報告書, 低周波音測定調査結果解析業務, 平成17年2月, pp.132
- 6) 環境省環境管理局大気生活環境室; 低周波音対応事例集, 平成20年12月, pp.26-33
- 7) 環境省環境管理局大気生活環境室: 低周波音対応事例集, 平成20年12月, pp.123-129
- 8) 環境省環境管理局大気生活環境室; 低周波音対応事例集, 平成20年12月, pp.130-133
- 9) 環境省, 平成26年度低周波音測定評価方法講習会 中級編 講習会資料
- 10) 犬飼他; 低周波音の聴覚閾値及び許容値に関する心理物理的実験, 騒音制御, Vol.30, No.1, 2006.2, pp.61-70.
- 11) 白石,坂田; 耳鳴の科学, 日本音響学会誌, 61巻12号,(2005), pp.708~713
- 12) 富永: 防音保護具の性能と問題点, 騒音制御, 15巻5号,(1991), pp.11~15
- 13) 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, (1986), pp.135-148,
- 14) 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

シリーズ「低周波音に関わる苦情への対応」

－第5回 低周波音の診断と防止対策－

公益社団法人日本騒音制御工学会
会長 井上保雄

1. はじめに

低周波音を発生する機械、装置、施設は私たちの身のまわりに多くあります。ここでは、その発生源と発生機構、診断、防止対策の基本的な考え方、防止技術について解説します。なお、超低周波音はISOでは1～20 Hzの音と定義され、低周波音は一般に1～100 Hz程度の音とされています。一方、低周波音苦情の実態は数百 Hzの周波数域に及ぶこともあり、ここでは、この周波数域の音も含めて低周波音として扱います。また、最近、家庭用ヒートポンプ給湯機、家庭用コージェネレーションシステムなどの普及に伴い低周波音に係る苦情が散見されるため、その発生機構について解説します。

2. 低周波音の発生

音波は空気の微小な圧力変動が音速で伝わる現象です。大気圧（1気圧）より多少、大きい圧力、小さい圧力が大気中を伝わり外耳道を通り鼓膜を振動させ、聴神経等を介して脳に伝わり、音として知覚します。1秒間に変化する圧力変動の回数を周波数といい、周波数が小さければ低周波音になります。大気中の空気に圧力変化を生じさせる何らかの要因があれば音波が発生します。超低周波音（1～20 Hz）を発生する機械・施設はある程度、限られますが、低い周波数域（20 Hz～数百 Hz）の音波は身の廻りにある多くの機械、施設から発生します。

ここでは音波の発生機構と、主として超低周波数域の音波を発生する可能性のある機械・施設を整理して示します。

用語の説明、音波と音：通常、音波は空気中を伝わる縦波（疎密波／圧力変化）で、この波が鼓膜を揺らし聴神経等を介して脳に伝わると、我々は音として感知します。ここでは、音波と音の厳密な用語の使い分けはしておりません。

(1) 平板の振動

板や膜などの振動により、その表面に微小な空気の圧力変動が生じ、面の振動数に相当する音波が発生します。これは、ウーハースピーカーから音波が放射される機構と同じで、放射効率は放射面の寸法（面積）と振動の振幅に関係します。放射面、振幅が大きいと効率的に低周波音が放射されます。

この発生機構に該当し、低周波音を発生する可能性のある機械・施設は、大型振動ふるい（類似の振動乾燥機、振動コンベアなど）、橋梁などがあります。

振動ふるいは加振機、ふるい本体（ふるい網含む）、防振装置からなり、ふるい網上の石塊

などを、網面を振動させることによりふるい分けの機械で、採石場、土木工事現場、製鉄所などで広く用いられています。

橋梁は床板を繋ぐ櫛の歯状の鋼製フィンガージョイントなどの段差、遊隙などを自動車が行き交うとき、衝撃によって橋が加振され、床板の振動により低周波音が発生することがあります。

(2) 気流の振動

気体の容積変化を伴う機械は、原理的・機構的に圧力脈動を発生します。この場合、容積変化の周期が基本周波数になり、機械の型式、シリンダ数などで卓越の度合いが決まります。

この発生機構に該当し、低周波音を発生する可能性のある機械・施設は、往復式圧縮機、ディーゼル機関（機関使用の発電装置、船舶、トラック）などがあります。

往復式圧縮機は、シリンダ内のピストンの往復運動によって、空気など気体の圧力を高める装置で、圧力変化（パルス）がシリンダから発生し、各シリンダから集合配管までの時間遅れが無視できる場合は往復運動の周期（等間隔）で、無視できない場合は不等間隔のパルスになり、一連の周期の音波が発生することがあります。

ディーゼル機関は、シリンダ内の空気をピストンによって圧縮し、高温高压の状態にして、重油や軽油などの液体燃料を霧状に吹き込んで自然着火爆発させ、動力を得る内燃機関で、その発生機構は往復式圧縮機と同じです。

(3) 燃焼に関連

燃焼率の時間的変動に起因する自励振動、あるいは空気や燃料など、供給系の脈動に起因して低周波音が発生することがあります。

この発生機構に該当し、低周波音を発生する可能性のある機械・施設は、燃焼装置（ボイラー、加熱炉、熱風炉、焼結炉など）、グラウンドフレア（余剰 LNG を煙突内で燃焼させて廃却する設備）などがあります。

ボイラーは燃料の燃焼熱を水に伝えて蒸気を発生する装置で、燃料の燃焼装置であるバーナと火炉、管路（水を蒸気に変える）、空気を供給する送風機などから構成されています。熱あるいは気流（渦）に起因して発生することがあります。

用語の説明。自励振動：外部から周期的入力を与えられることなしに成長、持続する振動で、バイオリンは弓で弦を一方方向にこすることにより弦の振動を起こします。

(4) 気流の流れに起因

ジェット流などの高速流が周囲の静止空気と混合するときに発生する渦に起因して音波が発生します。排気口の近くでは高い周波数の音波が、排気口から後方へ遠ざかるに従って大きな渦になり、周波数は低くなります。また、流れの中に物体がある場合、物体の後ろ側で発生するカルマン渦、あるいは流れに起因する構造物の振動等により低周波音が発生することがあります。

この発生機構に該当し、低周波音を発生する可能性のある機械・施設は、ジェットエンジン（搭載の航空機）、ガスタービン（搭載の発電装置、船舶）、大型ボイラーの再熱器などがあります。

現在、民間航空機の主力はターボファン型とよばれるジェットエンジンを搭載しており、エンジンの推進力は、高温・高速のジェット排気流とファン部分で加速されたファン空気流から得ています。音波はこれらが外部の静止空気と混合するときに発生する渦に起因して発生します。

用語の説明. カルマン渦：柱状の物体を、流体中で適当な速さで動かしたとき（静止した柱状物体の周りを流体が流れる時も同じです。）、この物体の両側に交互に生じる、反対向きの渦の列のことをいいます。

(5) 空気の急激な圧縮・解放

火薬の爆発などは直接的に空気の圧力変動を生じます。

この発生機構に該当し、低周波音を発生する可能性のある機械・施設は、砲撃、発破、トンネルに高速で列車が突入する場合などがあります。

高速で列車がトンネルに突入すると、トンネル内の空気は圧縮され、圧縮波が生じます。この圧縮波は、トンネル内を出口に向かって伝搬しますが、圧縮度の大きい波頭は伝搬速度が速いため、トンネル内を進行するにつれ波の前面が切り立った形になり、出口で衝撃的な音波（低周波数域の音波を含んでいます）が放射されます。

列車突入側の坑口に開口部のあるフードを設置し、突入時にトンネル内空気の圧力上昇を緩やかにするなどの対応がなされています。

(6) 回転翼が空気に与える衝撃

回転機械の場合、回転翼が空気に与える衝撃によって生ずる音波と翼からの渦の流れによって生ずる音波があります。前者は一定の周波数成分をもち通常、回転数×翼枚数の周波数成分が卓越します。回転数が小さく、翼枚数も少ない場合は発生音が低周波数域になることがあります。なお、後者は広帯域の周波数成分をもつ音波になります。

この発生機構に該当し、低周波音を発生する可能性のある機械・施設は、大型冷却塔、大型復水器、ルーツブローなどです。なお、最近、普及してきている大型風力発電装置もこの範疇に入りますが、20 Hz 程度以下の発生音は感覚閾値と比べて十分小さいため、発生しないとされています。

注釈. 発電量2MW風車（3枚翼×20 rpm）の場合、1 Hzの周波数が基本になりその高次周波数の音圧レベルが卓越します。風車近傍（風下側基準点）の音圧レベルは、例えば、10 Hzの1/3オクターブバンド音圧レベルで概ね60～70 dB程度です¹⁾。これに比べ10 Hzの感覚閾値は約100 dBです。

(7) その他

・送風機の低風量域運転、大きな吸気抵抗等により低風量になった場合、回転翼に失速領域

ができ低周波音発生の原因になることがあります（旋回失速といいます）。集じん装置の吸気フィルタの目詰まりなどが該当します。この場合、フィルタ交換で解決します。

- ・送風機を風量－圧力曲線の小風量域（サージング域）で運転する場合、低周波音が発生することがあります（サージングといいます）。空気溜めから吐出側のタンクに送風機で空気を供給している場合などが該当し、低周波音の周波数は、管路系（配管とタンク）の固有振動数になります。
- ・吸気口の吸込み状態が極端に不均一、あるいはダクト内に大きな偏流があるような場合、失速セル（空回りのような状態）ができ低周波音の発生原因になることがあります。また、ダクト内の偏流による振動に起因して低周波音が発生することがあります。
- ・機械のアンバランス、構造物の支持方法が不適切な場合など、振動に起因して低周波音が発生することがあります。
- ・堰堤・ダムなどの放流による水膜振動と膜後部空洞の共鳴で低周波音が発生することがあります。ブロックなどで水膜を小さくカットするなどの対策がとられます。

3. 低周波音の診断と目標値

3.1 低減目標値検討のための指標

低周波音に係る苦情が発生した場合の低減目標は状況が具体的であり、事業計画における環境影響評価時の一般的な目標とは異なるものです。

苦情が発生した場合は、低周波音の発生状況と受音者側の現象に対応（心身苦情の場合は機器の稼働状況と苦情者の不快感等の感覚的な対応、物的苦情の場合は建具等のがたつき発生との対応）が見られること、発生源と受音者側で測定・分析を行い、両者に物理的な対応（発生源近傍と受音者側に同じ卓越成分がある、あるいは同じタイミングで音圧レベルが変動するなど）があることを確認すると、次の段階に移ります。

防止技術の検討には低減目標、すなわち現状の低周波音をどのくらいまで低減すれば良いか目安（低減目標値）をつけることとなります。現場の状況と下記に示すような種々の評価指標を参考に検討することとなります。

- ・超低周波音の感覚閾値（1-20 Hz）
- ・G特性音圧レベル（1-20 Hz）
- ・最少可聴値（20Hz-12.5 kHz）
- ・最少可聴値の個人差分布
- ・若齢者と高齢者の最小可聴値の傾向
- ・女性と男性の最小可聴値の傾向
- ・参照値（物的：5-50 Hz、心身：10-80 Hz）
- ・優先感覚（圧迫感・振動感）
- ・純音成分の有無（ISO1996-2 では、0-6 dB 補正）
- ・騒音の環境基準・規制基準値など

(1) 建具のがたつき苦情が発生した場合の低減目標

風も無く、地面あるいは建屋の床等が揺れていないにもかかわらず、窓ガラス、障子などの建具、人形のショーケースなどがたつき、造花の揺れなどが観察される場合は低周波音に起因している可能性があります。低周波音に起因するがたつきは、固有振動数に近い周波数の音波の力により発生（共振）することが多いため、特定の建具にがたつきが生じる傾向があります。木造建具、アルミサッシなど多くの建具の固有振動数は5～20 Hz の範囲にあるといわれています。

苦情発生時と防止対策後のデータ例を図-1に示します²⁾。建具のがたつきの閾値（実験値／＝参照値）より10 dB程度小さい値でもがたつきが発生している例が散見されます。がたつきは低周波音と建具等の相互作用で発生します。がたつき苦情が発生した時は、建屋側の状況も勘案して目標値を設定するのが望ましいと考えています。なお、20 Hzより高い周波数域の苦情は建具のがたつき苦情よりも、不快感などの心理的・生理的苦情が多い傾向が見られます。

(2) 心身に係る苦情が発生した場合の低減目標

人の音に対する感度、あるいは耐えられる限度には個人差があります。低周波音の感じ方には個人差が大きいと良くいわれます（実際には中・高周波数域においても個人差はあります）。聴覚閾値の個人差分布を図-2に示します。この中で P_{50} の線が一般にISOの聴覚閾値といわれているもので、50%の人が聞くことのできる周波数毎の音圧レベルです。 P_5 は5%の人が聞くことのできる値で、例えば100 Hzの音はISOの聴覚閾値よりも6～7 dB、小さくても20人に1人（5%）は聞くことができることを意味しています。

ここで、①聴覚閾値（音を聞くことができる、あるいは音が存在することを知覚できる最小の音圧レベル）と、②受認限度（存在する音を許容できる限度）は異なるものです。この中で、①については苦情を訴える人もそうでない人も大差はなく、被害を訴える人は低周波音を知覚すると直ちに許容できなと感じる傾向（感受性が強い）があるとの報告もあります³⁾。

最近、増えている家庭用ヒートポンプ給湯機、家庭用コージェネレーションシステムのように音圧レベルの小さい卓越成分を含む低周波音の場合、どの程度の音圧レベルまで低減すれば問題が解決するか、目標値の設定が難しいことが多々あります。このような場合、対象機器の稼働・停止時の音圧スペクトルを比較して音圧レベルの変化が大きくなる（運転により大きくなる）周波数（域）に着目、この周波数の音圧レベルと聴覚閾値曲線を比較して、この曲線を超えている、あるいは曲線に近い卓越周波数を主に低減目標を設定することを推奨しています。この場合、聴覚閾値曲線は幅を持つ（個人差分布）ことを意識しておくことが大切です。なお、苦情者が不快を感じない部屋があるならば、その部屋の音圧レベルを目標の参考にするのも良いと思います。

用語の説明。閾値：現象（ここでは、がたつきの発生、音の知覚）が表れる限界（最小）の値（ここでは最小の音圧レベル）を閾値といいます。

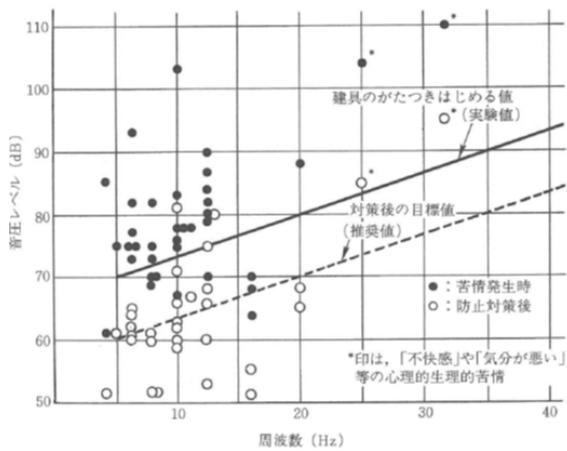


図-1 低周波音による建具のがたつき閾値 (実験値) と対策の目標値 (推奨)

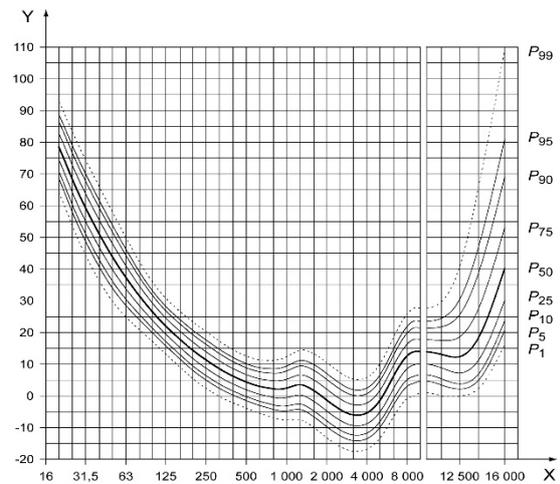


図-2 聴覚閾値の個人差分布

出典. (一社)日本音響学会英文誌 AST_34(1)_42-47_2013_Fig7

3.2 低周波音発生源のを見つけ方

低周波音が問題になっていて、発生源が不明の場合、発生源を見つける一般的な手順を示します。

(1) 事前の調査

- ・ 不快感あるいはがたつきの発生する時間帯は何時頃か、どちらの方向が強く感じるか、聞き取りを行います。

例えば、月曜日から金曜日に毎朝、早朝5時ころ、玄関の前で低周波音を大きく感じるなどです。

- ・ 周辺地域に低周波音発生の可能性のある工場、施設等 (各種プラント、発電所、ごみ焼却場、工事現場、空港、港など) はないか地域の地図等で調べます。

例えば、玄関の正面方向、500 m くらい離れたところにごみ焼却場 (ボイラー、コンプレッサー、送風機などの設備機器があります) があるなどです。

(2) 測定と調査

- ・ 問題になっている民家 (心身苦情は室内、がたつき苦情は屋外) で低周波音のデータを採取、周波数分析を行います。例えば、80 Hz に卓越成分があるなどです。

- ・ 民家の周辺で格子状 (民家周辺の道路交点、工場構内の道路交点など) に低周波音のデータを採取し、周波数分析を行います。

- ・ 各点の周波数特性を比較し、発生源の方向を少しずつ絞りこんでいきます。

例えば、玄関前の道路上のデータに 80 Hz の卓越成分があり、他の地点より音圧レベルが大きいなどです。この場合、玄関の前方向に発生源が存在する可能性が大きいと推定されます。

・ 絞り込まれた発生源機器近傍と民家の周波数特性を比較、可能な場合は機器の稼動・停止を行い、両地点の対応関係（卓越周波数の一致、影響の割合など）を確認します。

なお、専門的になりますが、卓越周波数が明確な場合は2本のマイクロホンを用いて位相差（後述）により音源を探索する方法もあります。また、希ですが、低周波音の音圧レベルが小さく、卓越成分が見られない場合など、発生源の特定が難しいこともあります。

4. 防止対策の基本的考え方

通常、騒音の対策には、(1) 発生源側の対策、(2) 伝搬経路上の対策、(3) 受信点側の対策があります。低周波音は騒音に比べて波長が長く、(2)、(3)の対策については、防音壁、二重窓などの方法は、大きな効果は期待できないため、(1)の発生源側対策が基本になります。

低周波音の対策を考える場合、大切なことは音の発生あるいは増幅のメカニズムを正しく把握することです。そのためには、音響、流体、熱、振動、構造、機械要素など幅広い見地からの検討が必要になることもあります。低周波音の低減技術は下記に大別されます。

(1) 機械の使用法の不適切さ、調整あるいは設計の不具合に起因する場合

通常、低周波音の問題が発生しないような機器等から発生したような場合、例えば、第2項(7)で紹介したようなケースは、原因を明らかにして改善することで低減出来ます。

(2) 機構的、原理的に発生する場合

往復式圧縮機や振動ふるいのように機構的、原理的に低周波音を発生、あるいは正常な運転状態で低周波音を発生する機械などは、二次的な対策により低減することになります。

例えば、低周波音が、管内を伝搬して開口部から放射されているような場合は、管の途中あるいは吐出口、吸気口に消音器の挿入、機械本体から発生している場合は防音エンクロージャ（防音建屋、防音カバー）、機械の振動が伝搬して壁等が揺れることにより放射されているような場合（固体伝搬音といいます。）は機械と基礎の振動絶縁等の対策を講じることになります。

5. 低周波音の防止技術

上述の(1)の対応については主としてユーザー側における使用上の配慮、メーカー、あるいは設計者の範疇になります。ここでは主として(2)の機構的・原理的に発生している機械の低減方法について説明します。二次的な防止技術の一覧を表-1に示し、個々の防止技術について後述します。

表-1 二次的な低周波音防止技術

防止技術	内 容
消音器	配管・ダクト内を伝わる騒音を低減させる。流体の流れに支障をきたさないように設計する。 注記. 低周波域になると多孔質吸音材料の吸音率が小さくなるので干渉、共鳴などの音響原理を用いた消音器が主になる。
防音塀（防音壁）	伝搬経路を遮蔽することによる対策。 注記. 壁の回折損失、遮音量も低周波域になるにつれ小さくなる。
防音エンクロージャ （防音建屋、防音カバー）	遮音、吸音材で音源を囲んで外部への放散を減少させる対策。 注記. 吸音は音響原理を利用、遮音は質量則（騒音領域）と剛性則（低周波音領域）を使い分ける。
防音ラギング	配管・ダクト系から発生する音の低減に良く用いられる。吸音材・遮音材（薄板鋼板など）を管路壁に接触させることが多い。 注記. 低周波域になるにつれ効果は小さくなる。
防振、吸振、制振 （固体伝搬音の低減技術）	基礎・床に伝わる振動を低減（防振）／動吸振器による振動低減（吸振）／制振材料（ダンピング材料）の貼付けにより板の振動を抑制（制振／注記. 低周波数域の効果は小さい）。

5.1 遮音と吸音

低周波音の遮音と吸音は防止技術の基本になるものです。

(1) 遮 音

遮音とは隔壁により音を遮ることで、音源側の音を受音側へ通さないことです。防音エンクロージャ、防音壁の設計などに用います。性能は透過損失 TL (dB) で表します。透過率と透過損失について説明します。

透過率 τ は入射音の強さ I_i (W/m^2) と透過音の強さ I_t の比で表します。

$$\tau = I_t / I_i \quad \text{注記. } \tau \text{ は } 0 \sim 1 \text{ の間で } 0 \text{ に近いほど遮音性能は良くなります。}$$

透過損失 TL は入射側の音圧レベル P_i (dB) と透過側の音圧レベル P_t の差で表します。

$$TL = P_i - P_t \quad (\text{dB})$$

透過損失 TL と透過率 τ は次式の関係にあります。

$$TL = 10 \text{ Log } 1 / \tau$$

これより、透過率 0.01 (音響エネルギーの 1% 透過) の場合、透過損失は 20 dB になります。このことは仮に、壁に全体の 1% の隙間があれば、コンクリート壁の厚みをいくら厚くしても 20 dB 以上の総合透過損失 (平均的な透過損失) は得られないことを意味し、防音対策では極力、隙間を無くすことが求められます。

低周波音の遮音は、質量則 (部材の固有値よりも十分に大きい周波数域、通常、数十 Hz 以上) と剛性則 (部材の固有値より小さい周波数域) の考え方があります。

【質量則】

板状材料の音響透過損失 TL (dB) は、音の周波数を一定とすれば板の面密度 (単位面積当た

りの質量) が大きいほど大きくなり、この関係を遮音に関する質量則とといいます。

ランダム入射音の場合、透過損失 TL は、

$$TL = 18 \log m \cdot f - 44 \quad (\text{dB})$$

ここで、 m : 面密度 (kg/m^2)

f : 周波数 (Hz)

例えば、4.5mm 厚の鋼板 (面密度 = 単位面積の質量 $35.3 \text{kg}/\text{m}^2$) で防音カバーをつくと、10Hz の透過損失は、

$$TL = 18 \log (35 \times 10) - 44 = 2 \text{ dB}$$

で、計算上、2 dB しか遮音せず、より大きい TL を得るには更に厚い鋼板が必要になります。実際には次項に示す剛性則に基づき遮音量は、より大きくなるのが普通です。

注釈. 透過損失は音波の平板への入射の仕方によって多少異なり、入射方向により垂直入射 (平板に垂直に入射)、ランダム入射 (各方向から均一に入射)、フィールド入射 (入射角が $0 \sim 78^\circ$ で入射) があります。

また、二重壁構造の場合、共鳴透過現象と呼ばれる周波数 f_0 で遮音性能は悪くなりますが、 f_0 以下に透過損失の上昇があり、この周波数域を利用することもあります。このような構造は $30 \sim 50$ Hz の周波数範囲で特に有効であるといわれています。

$$f_0 = 600 \times \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \frac{1}{d}} \quad (\text{Hz})$$

ここで d : 中間空気層の厚さ (m)

$m_1 \cdot m_2$: 板の面密度 (kg/m^2)

尚、吸排気口から低周波音を放射する機械が多数ある場合など、ダクトで1か所に集めて、コンクリートなどの重構造で密閉した室を作り、この室に吸排気用の消音器を付加する対策もあります。

【剛性則】

平板の1次固有振動数以下の周波数域になると質量則は適用できず、平板の剛性が支配的になります。この剛性により透過損失の値が決まることを剛性則とといいます。

実際には f_0 は 20 Hz 付近にあることが多く、超低周波数域の遮音を検討する場合は、まず遮音構造として、できるだけ減衰の大きい、軽量の高剛性構造を使用することが効果的です。また、既に使用されている遮音構造においては、リブ等で補強するなどの剛性を高める工夫をすることによって効果を増すことができます。質量則と剛性則の透過損失の傾向を図-3に示します。

剛性則の計算式は割愛しますが、参考文献4)に計算過程と予実の比較を示しているので参

照してください。

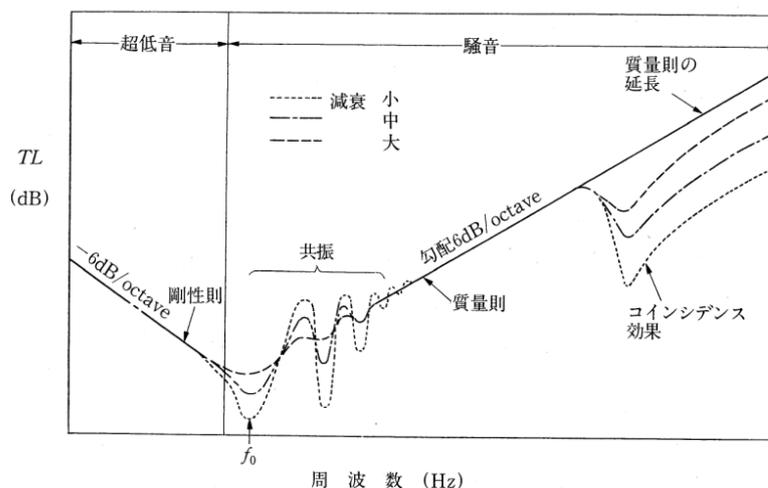


図-3 質量則と剛性則⁵⁾

(2) 吸音

通常、吸音とは音のエネルギーを熱エネルギーに変換して吸収させることです。グラスウールなどの多孔質材料が多く用いられ、空気の振動が細かい隙間に入り込み、摩擦抵抗のために音響エネルギーが熱エネルギーに変換されます。

しかしながら、低周波音に対しては、多孔質吸音材料の吸音効果が小さいため、音波の干渉・共鳴などの音響原理を利用した吸音機構が良く用いられます。トンネル発破時の低周波音を吸音した事例を図-4、5に示します。

注釈. 一般に、多孔質吸音材料は 200 Hz くらいから吸音率が低下しはじめ、100 Hz 以下では急に小さくなります。吸音率 1 は完全吸音（反射なし）、0 は全反射を意味します。



図-4 音響管を利用したトンネル発破時の低周波音低減（主に 16~20 Hz 帯域の発破音を吸音、低減）⁶⁾



図-5 空間の共鳴を利用したトンネル発破時の低周波音低減（主に 16~63 Hz の発破音を吸音、低減）⁷⁾

5.2 消音器

消音器は吸排気管やダクトに挿入し、流体の流動に支障なく、音波を通過させにくいものです。

主な型式は以下の通りで、音の特性に応じて適切な型式を選定します。また、異なる型式の消音器を組合わせて使用することもあります。

- ・吸音ダクト型（中・高周波音用）
- ・膨張型（中・低周波音用）
- ・共鳴型（中・低周波数域の卓越周波数成分に効果的）
- ・サイドブランチ型（中・低周波数域の卓越周波数成分に効果的）
- ・アクティブ型（中・低周波音用、どちらかといえば卓越周波数成分に効果的）

消音器は音響検討（透過損失）と空力検討（圧力損失）を行い、両方の仕様を満たすように設計します。音響検討に当たっては、音の低減量に加え、気流による2次発生音、吹き出し音等も考慮します。なお、圧力損失の推定にあたっては、管内壁摩擦損失、断面積変化（急拡大・急縮小など）、曲りによる損失などを考慮します。

例えば、ディーゼルエンジンの排気口、レシプロコンプレッサの吸気口など管路系を介して低周波音が放射されている場合は管路に消音器を挿入することにより低減できます。

ここでは、一般的に良く用いられる膨張型、サイドブランチ型、最近、実用されるようになってきたアクティブ型消音器について説明します。

なお、実際に消音器を設計する場合は、上記の他に、使用材料（流体の成分に起因する劣化など）、温度、圧力、設置位置等に配慮が必要です。

(1) 膨張型消音器（拡張型消音器）

膨張型消音器（拡張型消音器ともいいます）は管路系の一部を拡張することにより、断面の不連続部における音波のエネルギーの反射を利用して、音波の伝搬を防ぐもので、最も単純な型式の消音器を図-6に示します。

この型式の消音器は、低・中音部の減衰に有効です。更に、吸音材料を併用（膨張部に吸音材料内貼り）することにより、高音部の減衰も得られます。

透過損失 TL (dB) は下式で求められます。

$$TL = 10 \log \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl \right\} \quad (\text{dB})$$

ここで、 $m = S_2 / S_1 = (D_2 / D_1)^2$: 膨張比

S_1, S_2 : 断面積 (m^2)

D_1, D_2 : 直径 (m)

$K = 2\pi f / c, c$: 音速 (m/s)

l : 空洞の長さ (m)

減衰最大の周波数は膨張部の長さ l で決まり、周波数 f (Hz) の成分を最も有効に減衰させるには、波長を λ とすると $l = \lambda/4$ になります。こうすると $f, 3f, 5f \dots$ (Hz) で透過損失は最大になります。但し、 $2f, 4f, 6f \dots$ (Hz) では TL はゼロになります。

低周波音用として考えると、例えば 10Hz の場合、 $\lambda = 340/10 = 34\text{m}$ 、 $l = \lambda/4 = 8.5\text{m}$ と非常に長いものになります。

透過損失は $(D_2/D_1)^2$ (直径比の二乗=断面積比) で決まり最大透過損失は、ほぼ $D_2/D_1 \times 4$ になります。なお、この式は、 $f < fc = 1.22c / D_2$ (Hz) の周波数範囲で成り立ちます。

上述の通り、単純膨張型消音器は透過損失がゼロの周波数域が存在しますが、内部に入口管、あるいは出口管を挿入するなどの工夫により減衰特性は改善されます。

この型式の消音器はプロワ、圧縮機、ディーゼル機関などの吸排気用消音器として用いられることが多く、自動車のマフラーなどにも応用されています。また、地下鉄の換気ファン用として長い換気通路途中に挿入し、特定の低周波音を低減することもあります。

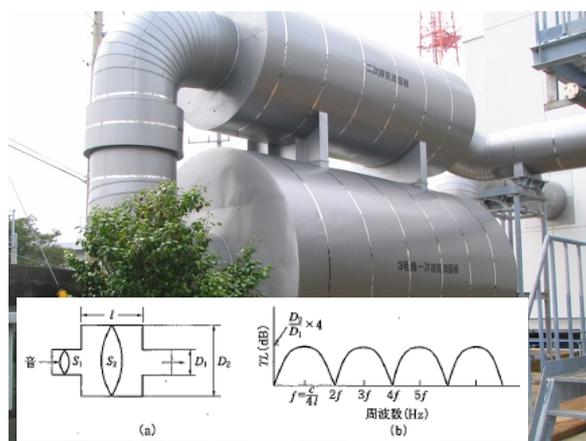


図-6 膨張型消音器 (上下2段)

(1段目と2段目で異なる周波数域の音を低減)

注釈. 波長 λ (Hz)、音速 C (Hz)、周波数 f (Hz) の関係は $\lambda = C / f$ になります。

(2) サイドブランチ型消音器

サイドブランチ型消音器 (図-7 参照) は、主管に枝管 (ブランチ管) を取り付け、減衰させるもので、機構がシンプルで卓越成分を持つ低周波音に有効な消音器です。

透過損失 TL (dB) は下式で求められます。

$$TL = 10 \log \left(1 + \frac{1}{4} \tan^2 kl \right) \quad (\text{dB})$$

ここで、 $k = 2\pi f / c$

l : 管の長さ(管端補正した長さ)

$$l = l_0 + l_e \text{ (m)}$$

l_0 : 管の長さ

l_e : 管端補正の長さ (厳密には管端の形状により異なります。)

$$l_e \approx 0.6r \text{ (} r \text{: 管の半径 (m))}$$

上式で与えられる周波数 f_0 で共鳴状態になり、 TL は無限大になります。実際には管内に抵抗があるので、有限の大きな値になります。

$$f_0 = \frac{(2n-1)c}{4l} \text{ (Hz) (} n=1, 2, \dots \text{)}$$

例えば $n=1$ 、 $f_0=10$ Hz とすると、 $10=340/(4 \times l)$ から $l \approx 8.5$ m になります。この場合、ブランチ管は直線である必要は無く曲がっていても効果は同じです。

ブランチ管の長さは、波長 λ の $1/4$ の時、最大の透過損失を示し、母管とブランチ管の断面積比は 1 の時に最大になります。ブランチ管の設置位置は管内の音圧最大(音圧の腹)の位置が最適(効果最大)です。通常、母管出口から $\lambda/4$ 付近に設置します。

また、サイドブランチを多段にするとより複数の周波数、あるいは大きな低減効果が得られます。実用上、ブランチ管の端部は微調整できるように可動式にします。

この型式の消音器は往復式圧縮機、ルーツブロア等の吸排気管に多く用いられます。

この他にも共鳴型消音器などが用いられることがあります。

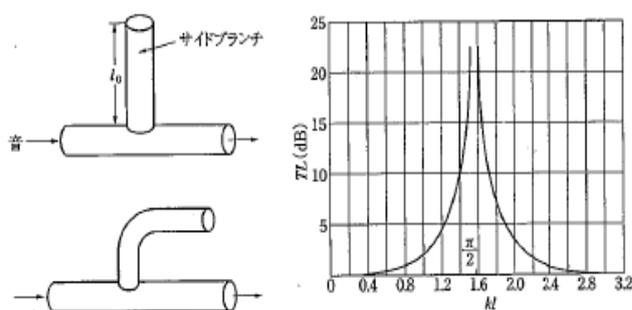


図-7 サイドブランチ型消音器と透過損失



往復式空気圧縮機吸気管の手前配管からブランチ管を分岐



室内空間に必要な長さのブランチ管を配置



端部には長さ微調整機構 (ピストンのハンドルが見えている)



長さ微調整機構
空気圧縮機吸気配管に設置、16 Hz の卓越成分を 15 dB 程度低減

(3) アクティブ消音器（アクティブ・ノイズ・コントロール：ANC）⁸⁾⁹⁾

アクティブ消音器は、機器の出す音波と逆位相の音波を人工的に発生させて、干渉現象により消音するものです。すなわち、大気圧からわずかに圧力の大きい波に圧力の小さい波を重ね合わせるにより大気圧になり音が無くなるというものです（図8参照）。

この型式の消音器は、① 圧力損失がない、② 低周波音をコンパクトな装置で効果的に低減出来るなどの利点があります。最も単純な通常のシステムはマイクロホン（信号検出用、モニタ用の2個）、コントローラ、パワーアンプ、スピーカーから構成されます。

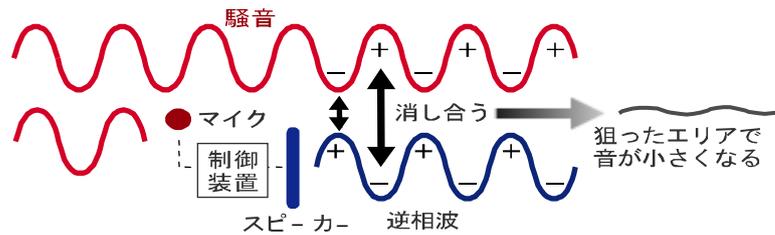


図-8 ANCの基本原理

ANC技術はプラント系においては周波数範囲30～200 Hz付近に卓越成分を持つ低周波音に対してより効果的です。なお、下限周波数30 Hzは通常スピーカーの出力周波数特性で決まっており、特殊なスピーカーを用いれば、より低周波域の音波を消すことも可能になります。

通常、消音効果は10 dB程度で、より大きな効果が必要な場合は多段にする等の工夫が必要になります（但し、ダクト内のみ）。中・高周波域のランダム音を得意とするパッシブ型消音器（吸音型消音器など）と棲み分けして使用します。また、アクティブ消音器はスピーカー交換等のメンテナンスを要し、わずかながら電力を消費します。

最近少しずつ、建設現場の大型ディーゼル発電機あるいは建設機械の低周波音の低減にアクティブ防音壁やアクティブ消音器が用いられるようになってきています。

アクティブ消音技術の技術レベルと実用化の状況を表-2に示します。

また、工場内ボイラー煙突から放射される低周波音にANCを適用し問題を解決した事例、船のディーゼルエンジン排気煙突にANCを適用し実際に運用している事例、建設機械ディーゼルエンジン排気管へのANC適用実証試験の事例を示します（図-9～11参照）。

用語の説明．位相：音波は圧力の疎な部分（大気圧より小さい圧力）と密な部分（大気圧より大きい圧力）が音速で伝搬する縦波です。位相はこの波の中の位置情報を示す用語です。例えば、逆位相（180°の位相差）とは、波の山（圧力高）と谷（圧力低）が反対になっていることを意味します。

表-2 アクティブ消音技術（ANC）の技術レベルと実用化の状況¹⁰⁾

技術レベル	やさしい	～	中くらい	～	難しい
音の種類	周期音		ランダム音		移動音 衝撃音
音の周波数	低音域		中音域		高音域
消音空間	一次元ダクト内 狭い閉空間		開口部 閉空間(定在波)		領域限定自由空間 任意の閉空間 自由空間
消音方式	1音源/1マイク, 1スピーカー		1音源/複数マイク, スピーカー		複数音源/複数マイク, スピーカー
環境条件 (温度、流体、流速、 圧力、音響出力、 音圧レベル変動、 装置の規模)			常温、常湿、空気、通常音響出力 遅い流速、通常圧力、 音圧レベル変動小、小型		高温、多湿、腐食性ガス、高速流、 高圧力、大音響出力、 音圧レベル変動大、大型
実用化 (※1は実用又は実用 レベル、※2は研究、実 験段階、但し道路用は 限定的実用)	空調ダクト※1 送風機吸排気口※1 換気ダクト※1 大型冷蔵庫※1 (コンプレッサ)	ディーゼルエンジン排気※1 コンプレッサ吸気※1 エアロキタ※1 建設機械排気※1	自動車の室内※1 航空機のキャビン※1 新幹線座席※1 自動車のマフラー※1	変圧器※1	道路用ANC防音壁※2 領域限定自由空間※2 ANC防音壁※1



40t/hボイラー



図-9 所内ボイラー煙突のANC

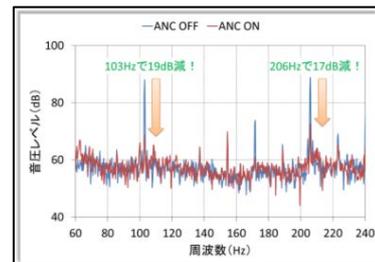


図-10 建設機械排気音のANC

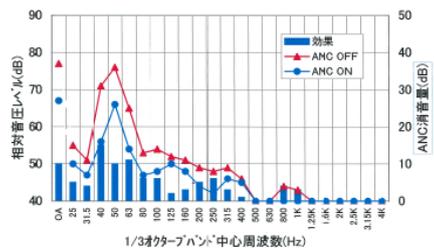
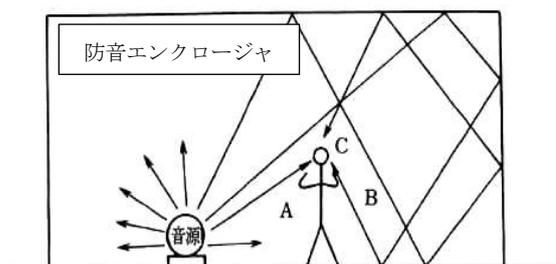


図-11 浚渫船（ディーゼルエンジン）排気煙突のANC

5.3 防音エンクロージャ（防音建屋、防音囲い、防音カバー）

防音エンクロージャは、音源から発生する音を低減するために、機械・設備を囲い込むことをいいます（図-12、13 参照）。音響的な検討の他に、内部空間の温度、振動（固体伝搬音、後述）等の防止に係る検討が必要になります。流体あるいは空気の吸排気口は消音構造にし、メンテナンス性、安全性等にも配慮が必要です¹¹⁾。

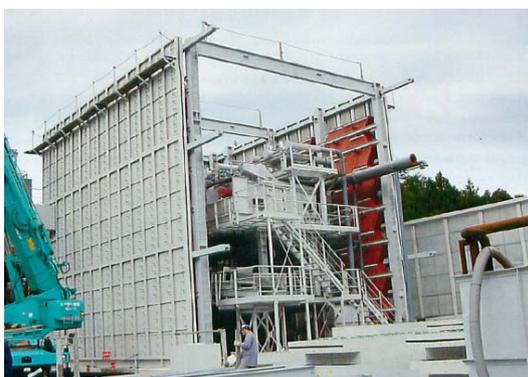
また、囲い内で反射による音圧上昇があると遮音材料の透過損失は、見掛け上小さくなります。そのため、エンクロージャ内の吸音力を大きくすることが大切です。



注釈 1. エンクロージャ内側に吸音材料を貼り、反射による音圧上昇を小さくしている。

注釈 2. ガスタービンの吸排気口、エンクロージャの換気吸排気口には消音器を設置している。

図-12 ガスタービン発電装置用防音エンクロージャ



遮音パネルの仕様
 ・鋼板 3.2mm+補強リブ
 ・内部へセメント充填
 ・総厚 300mm



吸音装置の仕様
 ・ヘルムホルツ型
 （音響原理を利用）
 ・1800mm、厚さ 400mm

出典：大丸防音㈱ カタログ

図-13 土木工事 振動ふるい用防音エンクロージャ

5.4 振動絶縁（固体伝搬音の防止）

機械などの加振力が床に伝搬し、床あるいは側壁が振動して音波を発生しているような場合、機械を防振するなどし、加振力が床に伝わりにくくします（振動絶縁といいます）。振動

絶縁に用いられる防振材料は金属バネ、防振ゴム、空気ばね、あるいは組合せ型など種々の材料が用いられます。固体伝搬音の対策としては使い易さもあり防振ゴム（ゴム自身に減衰要素がありダンパーな（減衰器）は不要）が多用されています。

(1) 固体伝搬音

透過音とは空気の圧力変動により壁が振動し発生する音波のことをいいます。これに対して固体伝搬音とは振動の伝搬により壁が振動し発生する音波のことをいいます（図-14）。

いずれも壁が振動し壁面から音波が放射される現象は同じですが、壁を振動させるメカニズムが異なります。

これは低減対策の方法選定に大きく影響します。透過音の低減対策は遮音強化、すなわち、壁の厚みを増して重たくする、あるいはリブ等を付加し剛性を上げるなどの対策になります。これに対し、固体伝搬音の低減対策は壁に振動を伝えない、すなわち振動絶縁の対策になります（図-15）。特に機械プレスのように大きな振動を発生する機械は注意が必要です。

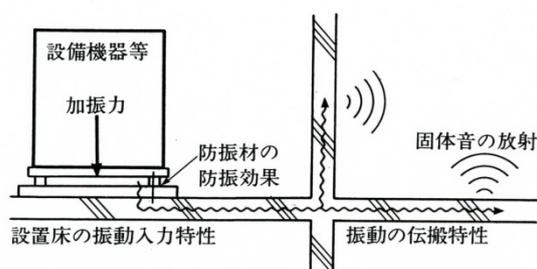


図-14 透過音と固体伝搬音

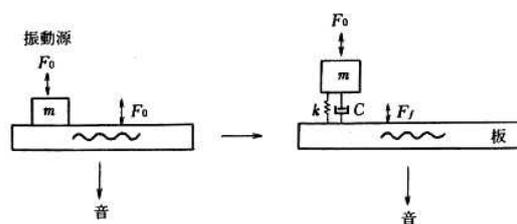


図-15 固体伝搬音の防止（振動絶縁）
（機械と基礎の間に防振材料を挿入）

(2) 固体伝搬音の防止

固有振動数 f_0 (Hz) は、 m : 質量 (kg)、 k : バネ定数 (N/m) から下式で表されます。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Hz})$$

周波数比 f/f_0 が、例えば3になるように固有振動数 f_0 (バネ定数 k) を決め、防振材料を選定すると振動伝達率 τ は 0.2~0.3、振動減衰量は約 10~15dB になります（減衰比 τ が 0.2 の場合）。

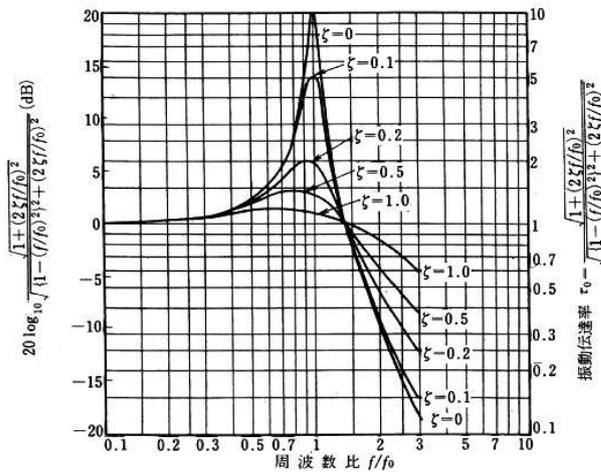


図-16 振動伝達率¹²⁾¹³⁾

注釈 1. 横軸に強制振動数と固有振動数の比、縦軸に振動伝達率(右)、振動減衰量(左)を示している。
 注釈 2. 強制振動数は毎分 900 rpm の回転機械の場合 15 Hz (900/60)、固有振動数は M(機械質量)と K(バネ定数)で決まる。振動伝達率 0.1 とは機械の加振力の 10%が基礎 (床) に伝わることを意味する。



図-17 縦型ポンプの固体伝搬音低減
 注釈. 防振ゴムの挿入により建屋壁から放射されていた低周波音を低減した。



図-18 振動節の固体伝搬音低減
 注釈 1. 動吸振器の設置により建屋壁、屋根から放射されていた低周波音を低減した。
 注釈 2. 動吸振器は橋梁の振動低減などにも応用されている。

用語の説明. 動吸振器: 振動する対象物に補助的な質量をバネを介して付加することにより、対象物の固有振動数付近の振動を抑制する装置のことをいいます。

6. 最近の話題

(1) 家庭用ヒートポンプ給湯機 (以下、エコキュートという)¹⁴⁾

【発生機構】

水を温めて湯をつくるヒートポンプユニットと、この湯を蓄える貯湯ユニットで構成され、下記のサイクルでお湯をつくります (図-19 参照)。

- ① 冷媒(CO₂)を膨張弁で膨張させて、低温(低圧)の冷媒にする。
- ② 低温になった冷媒と空気との熱交換を空気熱交換器で行う。この結果、冷媒の温度が上がる。
- ③ 冷媒をコンプレッサー(圧縮機)で圧縮して、高温(高圧)の冷媒にする。
- ④ 高温になった冷媒の熱と給水した水との熱交換を水熱交換器で行い、水の温度を上げる。

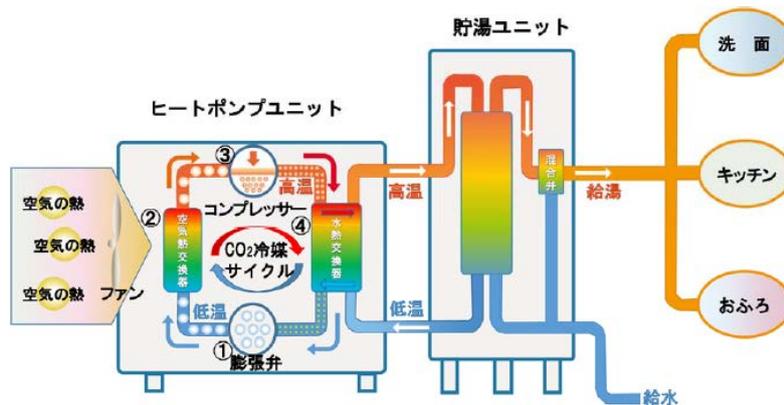


図-19 家庭用ヒートポンプ給湯機（エコキュート）

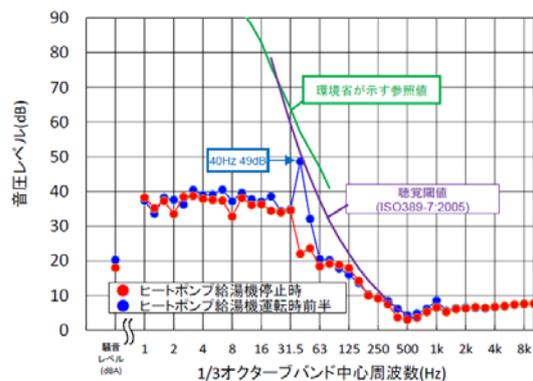
運転音は、主としてヒートポンプユニットのコンプレッサー（圧縮機）及び送風機から発生します。なお、貯湯ユニットからは音はしません。騒音レベルはユニット正面 1 m で 40 dB 程度です（某社のカタログ値）。

通常、回転機械（コンプレッサーとファン）の基本周波数は 50 Hz 以下の卓越した低周波音になります（基本周波数と高次の周波数が卓越します）。

図-20 室内におけるエコキュート運転音の分析

注釈. 40Hz 付近の卓越成分はコンプレッサーの基本周波数に相当しています。

出典. 消費者安全調査委員会『消費者安全法第 23 条 1 項に基づく事故等原因調査報告書—家庭用ヒートポンプ給湯機から生じる運転音・振動により不眠等の健康症状が発生したとの申出事案—』



(2) 家庭用燃料電池コージェネレーションシステム（以下、エネファームという）

【発生機構】

燃料処理装置で天然ガス等から水素を取り出し、スタックで水素と空気中の酸素から直流電気と熱を発生します。インバータで直流電気を交流に変換し、熱回収装置で、熱を回収し温水を作り貯湯槽に貯めます。温水が少ない場合、補助熱源（バーナ）でお湯を沸かします（図-21 参照）。

発電は化学反応で音は発生しませんが、付帯のガス供給や冷却に使用されるポンプ類、空気を供給するブロワ類、換気ファン、インバータ、補助熱源（通常のガス給湯器）、などから音を発生します。

エコキュートと比べると大きな回転機械類が無いいため、運転音の音圧レベルは小さく、低周波数域の卓越成分も少ない傾向があります。

近傍の騒音レベルは 38 dB 程度（某社カタログ値）で、低周波数域に卓越成分が観測されます。なお、補助熱源の騒音レベルは 48 dB 程度（某社カタログ値）です。

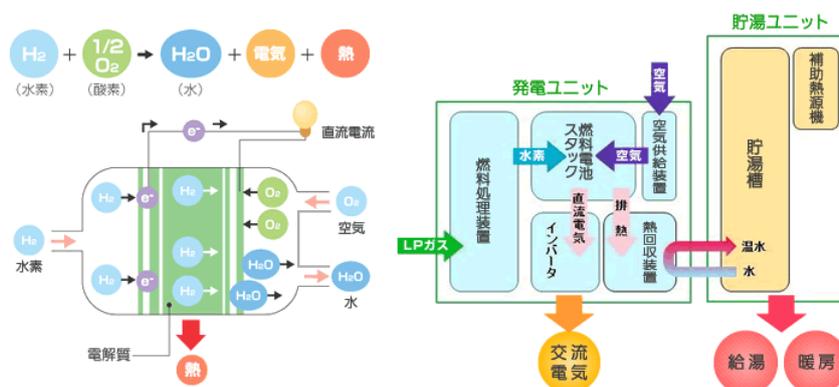


図-21 家庭用コージェネレーションシステム（エネファーム）

7. おわりに

低周波音の問題が発生した場合、まず発生源を特定し、対象地点に及ぼす影響度合いを確認、あるいは予測し、必要な低減量を種々の評価指標を基に検討します。次に機能あるいは機構上、低周波音を発生する機械の場合は、消音器あるいは防音エンクロージャなどの二次的な防止技術を駆使して対策を実施することになります。これに対して通常、低周波音が問題にならない機械あるいは現象により低周波音が発生した場合は、そのメカニズムを解明するために音響技術はもとより、流体、熱、振動、構造、機械要素など広範囲な見地から計測、解析、検討することになります。

苦情の対応で検討しなければならないのは、どの周波数域（卓越成分）の音をどの程度まで低減するかです。工場の計画時等と異なり、目標値は平均値ではなく苦情の状況に配慮（心身苦情の場合ですと、個人差分布等も考慮して閾値に近い卓越成分の低減を目標にするなど、がたつき苦情の場合、がたつきの実績資料、建物の状況等も勘案するなど）することが大切と考えています。

地方公共団体における環境関連部門の皆様は、防音効果、防音材料、構造など具体的に検討・指導することは難しい面があるかと推察しますが、改善方法等を事業者に指導・助言することにより、事業者自らの判断による具体的改善策の策定、実行を促すことにつながるものと考えています。本稿が多少なりともお役に立てれば幸いです。

【第5回 参考文献】

- 1) 井上保雄, 他: 風力発電の動向と騒音問題, 騒音制御, Vol. 36, No. 1, pp. 21-28, 2012
- 2) 井上保雄: 低周波音防止対策の目標値について, 日本騒音制御工学会技術レポート, No. 6, pp. 101, 1985
- 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) 楠田真也, 他: 低周波音の剛性則による遮音性能について, (社) 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp. 309-312, 2004. 9
- 5) 中野有朋: 入門超低周波音工学, (株) 技術書院, 1984. 6
- 6) 角田晋相, 他: 両端開口管による低周波音低減装置の現場実証試験, 第 71 回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-412, pp. 823-824, 2016
- 7) 岩本 毅, 他: スリット型吸音機構によるトンネル発破音の低減手法, 三井住友建設(株), 技術研究開発報告, 第 13 号, 2015
- 8) 井上保雄: 騒音は音で消せ, I H I 技報, Vol. 51, No. 1, pp. 16-19, 2011. 3
- 9) 井上保雄: ANC の産業機械への応用 (製品の動向など), (一社) 日本機械学会 講習会資料, NO. 15-103, 2015. 10
- 10) 井上保雄: アクティブ騒音制御技術のプラント騒音への適用, 環境管理, Vol. 74, No. 5, pp. 22-27, 1998
- 11) 井上保雄: 騒音・低周波音問題防止の基礎と対応, 紙パ技協誌, 第 66 巻、第 12 号, pp. 13-28, 2012. 12
- 12) (一社) 産業環境管理協会, 新・公害防止の技術と法規, 騒音・振動編, 2017
- 13) 中野有朋: 入門公害振動工学, (株) 技術書院, 1981. 9
- 14) (一社) 日本冷凍空調工業会, 騒音等防止を考えた 家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック, 2012. 2 改訂

【編集後記】

地方公共団体に低周波音に係る苦情が寄せられた場合、公害苦情相談を担当する職員向け資料として、低周波音に関する基礎知識や苦情対応事例などを1年間にわたって掲載してきました。ご愛読いただいた皆様、ならびにシリーズ最終号をご執筆いただいた井上会長にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

なお、本シリーズとあわせて特集号「騒音に関わる苦情とその解決方法」（掲載サイト：<http://www.soumu.go.jp/kouchoi/substance/chosei/main.html>）についても参照いただき、騒音や低周波音に関わる苦情対応の参考資料として活用いただければ幸いです。

責任編者：一般財団法人小林理学研究所 工学博士 落合博明