

「振動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、独立行政法人産業技術総合研究所 国松直先生（シリーズ執筆責任者）、一般社団法人日本建設機械施工協会施工技術総合研究所 佐野昌伴先生、神奈川県環境科学センター 横島潤紀先生、東京工業大学大学院理工学研究科 横山裕先生に執筆いただき、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 73 号（平成 25 年 5 月）から第 80 号（平成 27 年 2 月）に掲載したシリーズ「振動に関する苦情への対応」全 8 回を 1 冊にまとめたものです。

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。

シリーズ「振動に関わる苦情への対応」

目次

第1回	振動苦情処理と必要な振動に関する知識	1
	独立行政法人 産業技術総合研究所 国松 直	
第2回	振動の基礎：振動の発生と伝搬	10
	独立行政法人 産業技術総合研究所 国松 直	
第3回	振動の基礎：振動の影響と評価・規制方法	21
	独立行政法人 産業技術総合研究所 国松 直	
第4回	振動の基礎：振動の測定方法と対策方法	33
	独立行政法人 産業技術総合研究所 国松 直	
第5回	建設作業振動	46
	一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 佐野 昌伴	
第6回	鉄道、道路、工場・事業場	59
	神奈川県環境科学センター 横島 潤紀	
第7回	歩行振動（内部振動源）	71
	東京工業大学大学院 理工学研究科 横山 裕	
第8回	環境振動問題に対する取り組みの現状	83
	独立行政法人 産業技術総合研究所 国松 直	

— 第1回 振動苦情処理と必要な振動に関する知識 —

独立行政法人 産業技術総合研究所 国 松 直

シリーズの連載にあたって

シリーズ「騒音に関わる苦情とその解決方法」が、全8回にわたって連載されました。本シリーズはその続きという位置づけで、振動について、解説を行います。

振動は騒音よりも難しいとよく耳にしますが、物理的なメカニズムは別として行政的な対応としては、騒音とほとんど変わらないように思います。その意味で、本解説でも騒音シリーズの連載内容を参照しながら解説していきたいと考えています。

早速、騒音シリーズの「シリーズの連載にあたって」を参照していきます。

市町村へ寄せられる公害苦情の中で、具体的数値は後で示すとして、大雑把には振動は騒音よりは少なく低周波音より多いという割合のようです。これらの比較において、振動発生源からの影響範囲は低周波音や騒音の発生源からの影響範囲より狭いという特徴があります。しかし、ある地点とある地点の地盤構造が全く同じということはありません。地盤の構造によって、地盤を伝わる波の伝搬状況が変化するため、その影響範囲を一義的に決めることは難しく、ときには振動源から数 100m 離れていても苦情の申し立てがある事例もあります。また、地盤を伝わる波は、地盤構造中を伝搬するので、音のように空気を媒質とする場合よりも、複雑な挙動を示します。そのため、振動に関わる苦情の場合、地盤の情報を知ることも重要なポイントになります。

市町村において騒音・振動を担当する方は、2～3年で部署異動があると聞いています。それ自体苦情対応における経験知の重要性から大きな問題と思いますが、そのような状況で、市町村の担当者が騒音・振動苦情にうまく対応していくために、騒音シリーズ、振動シリーズの解説が役に立てば幸いと考えています。

各回の内容としては、まだ確定したものではありませんが、騒音シリーズと対応したものとして、

- # 1 : 振動苦情処理と必要な振動の知識
- # 2 : 振動現象の基礎知識
- # 3 : 振動の影響と評価・規制方法
- # 4 : 振動の測定方法・対策方法

は、解説したいと思います。その際、騒音シリーズと重複した表現も多数含まれると思いますが、振動シリーズとして再掲したいと思います。その後に、内容は未定ですが、事例や研究の最前線の話題などを紹介したいと考えています。

本シリーズで、公害振動や環境振動という言葉を使用すると思いますが、主に振動規制法で対象となる振動に対して「公害振動」を、一方、日本建築学会環境振動運営委員会で扱う「地盤・建物等、ある広がりをもって我々を取り巻く境界の日常的な振動問題」[1]

を対象とする場合に「環境振動」として使い分けることにします。

第1回 振動苦情処理と必要な振動に関する知識

1 はじめに

振動を感じる事が全て悪いということはありません。マッサージなどは振動の快適性要素として例示できます。また、ロッキングチェアの揺れを心地よいと感じる人も多いと思います[2]。別の観点からは、振動による発電というニュースも見聞きされたこともあるのではないのでしょうか[3]。

一方で、電車、自動車など乗物では人は振動を感じる感じないレベル（知覚閾値）よりはるかに大きな振動の大きさに暴露されていますが、それらの振動に対する苦情はあまり聴かれません。その理由としては、乗物による移動という利便性が優勢に作用しているからと思われる。もちろん、乗り心地については、日々の改善により電車も自動車も昔よりは格段に良くなっています[4]。

上記のような点は、音／騒音と共通していると思います。他方、思わぬ状況で振動を感じ、何かが、例えば睡眠状態やくつろいだ状態が妨害される場合に、その振動を不快に感じたり、わずらわしく思ったりします。また、振動の大きさが大きい場合に、騒音と異なり、壁、タイル等のひび割れ、建て付けの狂い等の物的被害が生じることもありますが、振動苦情の多くは騒音苦情と同様に、主観的な問題として発生します。

騒音シリーズ（第1回）を参照すれば、そのような不快な印象が蓄積され、ついには耐え難いと感じる人が出て、そのような我慢の限界を超えた人がとる行動として、騒音苦情と同じく、

- 振動を出している相手（振動発生者）に直接苦情を言う
- 役所や警察に相談する
- 自治会を通じて働きかける
- 防振工事あるいは引っ越しをする

などを挙げることができます。人がどの程度の振動の大きさ、発生状況で、上記のような行動に出るのかは人（性格や過去の振動に関する体験など）や状況（例えば、建築現場などでは事前の説明など）により大きく異なります。このようなことから考えれば、ある一つの値で苦情発生レベル（指標のようなもの）を決めることは、非常に困難な問題と言えます。

上記の行動の中の「役所に相談する」という行動が市町村に寄せられる振動苦情の申し立てになります。このような申し立てが寄せられた場合、市町村は振動規制法（補遺(1)）や公害紛争処理法（補遺(2)）に基づいて、対応しなければならないことになります。

振動規制法では、道路交通振動の場合、「指定地域について、振動の大きさを測定」（第19条）し、「測定結果が要請限度を超えていることにより道路の周辺的生活環境が著しく損なわれていると認めるときは、道路管理者又は都道府県公安委員会に対して所要の措置を要請する」（第16条）こととされており、同法の目的を達成するために必要があると認めるときは、都道府県知事又は市長は「関係行政機関の長又は関係地方公共団体

の長に対し、資料の送付その他の協力を求め、又は振動の防止に関し意見を述べるができる」（第20条）とされています。

また、振動規制法の定める限度値以下であっても、苦情の申し立てがあった場合は、公害紛争処理法の「地方公共団体は、関係行政機関と協力して公害に関する苦情の適切な処理に努めるものとする」（第49条）や各地方公共団体の条例等に従い、苦情の適切な処理に努めなければならない、法律等で規定されている規制基準（要請限度）等の超過の有無に関わらず、公害に関する苦情対応は地方公共団体の努力規定[5]と言えるでしょう。

問い合わせる役所の窓口としては、道路管理部署と環境管理部署があり、部署により若干対応が異なるようです。具体的には、関連する箇所です。

その際の対応としては、基本的に騒音シリーズ（第1回）に記載された内容と同様に、

- ① 申立者からの聞き取り
- ② 振動発生者からの聞き取り
- ③ 現地調査（必要と判断した場合）
- ④ 関係者への働きかけ

の4段階に大別されます。

2 申立者からの聞き取り

市町村に寄せられる振動苦情の申立者も騒音の場合と同じく「何々の振動が不快で我慢できないので何とかしてほしい」という内容だと思います。今後の苦情対応を適切に進めていくためには、その中に確認すべき点がいくつかあります。

(1) 何々

振動の場合、「何々」は振動の発生源（振動源とも呼ぶ）を指していますが、聞き取りの段階において発生源をできるだけ特定することが肝要です。建設や解体工事によって発生する振動（建設作業振動）も工事の進展によって、作業工程毎に使用する重機が異なり発生する振動の特性や時間帯が変わることがあります。

申立者が指摘する振動を発生する機械もしくは作業、さらには問題となる時間帯などを知ることができれば、以後の現地調査の計画を的確に立てることができます。

(2) 振動

何々の「振動」が不快という申し立ての場合には、振動発生源からの振動が申立者に不快感を与えていることが多いようですが、窓の振動（ビビリ音）などでは、希に低周波音が原因ということもあります。現地調査により、注意深く原因を突き止めることが重要です。後々対策を考えるときにも大きく影響をします。

(3) 不快

暴露されている振動をどのように言葉で表現するのか、非常に難しい問題です。地震のように大きな震動の場合には不安感、恐怖感を生じることがありますが、通常の振動

苦情のレベルでは多くは不快感を覚える程度で、申立者によってその表現が異なることがあります。

例えば、振動の大きさが含まれていますが、振動の振動数（1秒間に繰り返される振動の回数で、単位は Hz，周波数と同義語）によって、次のような言葉が挙げられます。

振動数：0.1～0.63Hz

全く感じない／感じない／ほとんど感じない／気持ちよい／とても気持ち悪い／酔いそう／不快／激しい／怖い／気持ち悪い／大きい

振動数：1.0～4.0Hz

全く感じない／感じない／ほとんど感じない／小さい／不安／不快／強い／非常に強い／つらい／激しい／怖い

振動数：6.3～40.0Hz

全く感じない／感じない／ほとんど感じない／かすか／速い／不安／不快

これらの言葉からどのような振動を感じているのかを想定した上で現地調査に入ると対象振動を特定しやすいと思われまます。

また、騒音同様、妨害された行動の内容によって不快感やそれに伴う被害の程度が変わるので、聞き取りの段階では、振動によって妨害を受けた行動が何であるかを明らかにすることが肝要です。影響の内容が分かれば、その影響を取り除くための最も効果的な対策方法を導き出すことが可能になります。

(4) 我慢できない

振動に対する「わずらわしさ」などの印象は人の主観的な判断に基づくものであり、影響や被害の程度は個人の性格や感受性などによって大きく異なります。また、振動を出す側と受け取る側の人間関係によって、被害の程度が変わることもあります。

申立者は振動が我慢できないから苦情を申し入れたわけですが、上記したような個人の属性や人付き合いなどの振動以外の要因が関与していることも考えられます。

聞き取りの際は、今回の相手を含めてこれまでに振動苦情を申し入れたことはないか、同じような振動の被害を受けている人が近所にいないか、などを尋ねることによって、できるだけ振動以外の要因についての情報を入手することが望まれます。この件については多分に心理学的な知識が要求されるかも知れません。（騒音シリーズ第1回内容再掲）

(5) 何とかしてほしい

「何とかしてほしい」という申立者の要望については、概ね「振動を小さくしてほしい」と「振動をなくしてほしい」のいずれかに大別されます。

前者については、我慢できる程度まで振動を下げれば、一応解決のめどは立ちます。後者については、人間関係の絡む場合によく見られる事例で、振動そのものがなくならない限り問題解決にはならないことが多く、行政的な対応の難しい問題です。

申立者の要望を受けて、行政としての対応方針を決めるとともに、現地調査の必要性

や調査の主眼をどこにおくかを判断します。

(6) その他

公害問題では、加害者と被害者のどちらが先にその地に住んでいたか、いわゆる「先住・後住」が被害の妥当性を判断する材料に使われることがあります。それとともに、申立者の指摘する振動が何時頃から発生し、何時頃から不快感を覚えるようになったということも聞き取りの際に忘れてはならない項目です。

また、申立者の振動被害の実態を調査し、適切な解決策を講じるためには、申立者の位置情報が必要です。周辺環境の情報を得ることも重要になります。

なお、申立者の中には、自分のことが振動発生者側に知られることを嫌がる人もいます。特に、振動発生者が、個人やそれに類する事業所のとときにその傾向が強くなるようです。このような場合、苦情対応を進めるに当たって個人情報漏洩に細心の注意が必要です。

3 振動発生者からの聞き取り

苦情申立者からの聞き取りの後の次のステップは、申し立て内容が事実かどうかの確認です。その方法として、次に述べる「現地調査」が挙げられますが、その前に、振動発生者に対して振動苦情の申し立てがあったことを伝え、併せて申立者の指摘する内容等についていくつか確認することが必要です。確認しておくことが望ましい事項は以下の3点です。

(1) 振動発生状況

申立者の指摘するような振動が発生しているか、および振動の発生時間帯や発生場所などに違いが無いか、などを確認します。また、苦情の対象が工場・事業場や建設工事の場合は、振動を発生する機械等が法令の規制対象に該当するものであるかを確認しておくことも重要です。

(2) 過去における振動苦情の有無

これまでに振動苦情が寄せられたことが無かったか、仮にあった場合は、苦情申立者、苦情対象の振動発生源、苦情に対する具体的な対応内容、最終的な問題解決の行方、などを尋ねることによって今回の苦情処理を進める上で参考となる有用な情報を得ることができます。

(3) 現地調査の了解

振動発生者に対して事前に現地調査の実施を知らせるかどうかは、次節で述べるように振動の発生状況等を考慮して判断します。ただし、法令の規制対象となる振動発生源に関しては、事業場の敷地境界線上で規制値が決められており、仮に敷地境界線上で測定を行う場合は、事前に振動発生者の了解が必要です。

4 現地調査

振動発生源が法令の規制対象のときや、申立者や振動発生者の聞き取りでは状況の把握が不十分と判断された場合に、現地調査を実施します。調査では、振動測定が主な作業ですが、発生源から申立者の住宅に至るまでの振動の伝搬状況など、実現場でなければ得られない情報の入手を心がける必要があります。何よりも、実際に担当者が問題となっている振動を自分の体感で確認することができるという点が、現地調査の有意義な点といえます。

一般に、現地調査は苦情申立者や振動発生者の立ち会いのもとに行われますが、いずれか一方、もしくは単独、というケースもあります。苦情対象の振動の種別、申立者と振動発生者の人間関係、さらには調査内容などを勘案して立ち会い者を決めることが肝要です。共同住宅内の苦情問題では、第三者機関としての管理組合等の役員の立ち会いも考えられます。

振動の具体的な測定方法等については、後で解説しますが、ここでは現地調査における留意点を、調査の流れに沿って述べることにします。

(1) 調査日時

現地調査の日時は、申立者の指摘する振動の発生状況に対応して決めることとなります。作業内容によって振動の発生量が大きく変動する建設工事などについては、調査日時の決定には十分な注意が必要です。調査当日に問題の振動が発生しなかったということが無いように、基本的には申立者の希望する日時に調査を行うのが最善かもしれません。

(2) 測定場所

申立者の被害の程度を把握するために、原則として振動の測定は申立者の住宅近傍の屋外で行います。仮に振動発生者が申立者と同じ共同住宅内の店舗や住戸である場合は、申立者の住宅内で振動測定を行うこともあります。

いずれの場合も、最終的な振動の測定場所については、申立者の意向や振動発生源の位置などをよく考慮して決めることが肝要です。

なお、鍛造機やくい打機のような法令の規制対象となる振動発生源については、振動レベルが法令に定められた規制値を遵守しているかどうかを確認するため、敷地境界線上での振動測定が必要です。一般に、敷地境界線上には塀等が立てられていますが、このような状況下での測定点の決め方については後述します。

(3) 測定器

振動の測定器では、振動レベル計と呼ばれる測定器を用いて対象とする振動の大きさを測定します。振動の物理量としては、変位、速度、加速度がありますが、振動レベル計では、振動の測定には加速度計が使用されます。

また、振動は、チェーンソーやグラインダー等による工具・機械・装置などの振動が主として手・腕を通して身体に伝達される局所振動と身体全体が揺れる全身振動に大別され、環境振動分野では後者が対象となります。

身体全体が揺れる全身振動において、振動数によって振動に対する感度が異なり、姿勢（立位、座位、臥位）や姿勢に対する振動方向によっても異なります。振動レベル計には振動数に対する感度を補正する回路が組み込まれており、測定された値は人の感じる「わずらわしさ」に対応した「振動レベル」として評価されます。

振動レベル計の周波数範囲は、1/3 オクターブバンド中心周波数で1～80Hzです。

なお、現地調査では振動レベル計とレベルレコーダやデータレコーダを併用して、振動レベルや加速度の時間的変化（時刻歴）の記録を行うますが、その目的や接続方法などは後で解説します。

(4) その他

振動にも送風機から発生する振動などのような定常的な振動と鍛造機などのように間欠的な振動があり、後者については暗振動と発生頻度についての調査が必要です。

暗振動は対象の振動が発生していないときのその場の振動ですが、一般に、暗振動の低い環境ほど、間欠振動が際立つことによって「わずらわしさ」の印象が増大する傾向がみられます。また、発生頻度も間欠振動から受ける印象に少なからず影響するため、被害の程度を判定する際に考慮することが望ましい要因といえます。

現地調査において振動以外に調査を行うことが望ましいものとして、振動発生源から申立者の住宅に至るまでの振動の伝搬状況を挙げるができます。特に、地盤振動の場合、周辺地盤、3次元的な地形、地下埋設物の有無などの状況を調査しておくことが、今後の対策方法を検討する際に必要で、しかも現地でなければ得ることのできない情報です。

5 関係者への働きかけ

振動苦情の申し立てを受け、申立者や振動発生者に対する聞き取り、さらには現地調査などを行い、それらの結果を踏まえて問題解決のための道筋を構築します。そこでは、「スジ(論理)：法律の規範的論理のみならず、経済的効率性、科学的知見を含めた、法律外の多様な紛争解決規範の考慮」の通った「スワリ(結論の妥当性の程度)：紛争当事者のみならず、社会構成員全体に対する納得・説得という社会的観点」のよい解決を目指すことが大切です[6]。騒音シリーズには、「鉄道による騒音に悩まされている人がいるからといって鉄道事業者に列車の減速を求めることは、「スワリ」の悪い解決策」という記述があります。

なお、申立者の被害を軽減するための努力は必要ですが、同時に行政としてどこまで対処できるかをよく理解した上で関係者への働きかけを行うことが肝要です。

(1) 被害の認定

申立者が受けている振動被害の程度の認定、言い換えれば振動苦情の妥当性の判定においては、①振動暴露、②規制基準、③先住・後住、④地域の振動環境、⑤単独・集団、⑥申立者の属性、⑦発生源の公共性、⑧人間関係など多くの要因を考慮する必要があります。ここで、①の振動暴露は、申立者が受ける振動レベル、発生時間、頻度等を総合するものです。

これらの要因の中で、唯一②の規制基準を超えている場合のみ、法や条例の違反案件として、振動苦情は妥当であると客観的に評価できます。換言すれば、規制基準を満たしている振動、法令の規制を受けない振動などについては、担当者独自の判断に委ねられます。

先に挙げた要因の中のいくつかが絡む場合、要因間のバランスをとることは難しい課題ですが、一つ一つの要因を総合的に評価することで評価の方向性が決まってきます。また、実際の振動苦情では、申立者と振動発生者の双方に「理」や「非」があって、評価の難しいケースが多いと思われます。過去に発生した類似事例や他の自治体での対応例は、関係者への働きかけを行う際の有力な根拠になります。

(2) 関係者への働きかけ

1) 振動発生者への働きかけ

仮に、振動発生源法令の定める対象で、しかも敷地境界線上で規制値を超える値が測定されたときは、規制値を満足するように改善勧告を行います。

振動が規制値を満足しているとき、あるいは発生源が法令の対象とならないときは、振動発生者に対して行政としての強制力は無く、あくまでも要望としての位置づけになります。

肝心なのは、振動被害は人の主観的印象に依存するため、振動の大小だけでなく個人の属性も関わるということを、振動発生者に理解してもらうことです。それにより、振動発生者も周囲への配慮を意識し、苦情の予防に繋がるのが期待できます。

2) 申立者への働きかけ

振動発生源側での振動低減が望めないときは、申立者自身の努力で被害の低減を図ることになります。

多少の費用がかかってもよい場合には、基礎地盤を含めた対策を検討します。他方、費用負担が難しい場合には、生活パターンの見直しなどが考えられますが、その効果は発生源の振動性状によっても大きく異なります。

【参考文献】

[1] http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s17/AIJ_EVindex.html

[2] 川島 豪：心地よい振動に関する研究と開発、日本建築学会第 30 回環境振動シンポジウム資料、pp.3-8、(2012)。

[3] 例えば、ウィキペディア：振動発電

[4] 鈴木浩明：鉄道車両の乗り心地評価、日本建築学会第 30 回環境振動シンポジウム資料、pp.9-14、(2012)。

[5] 横島潤紀：Q&A コーナ、騒音制御、37 巻、1 号、p.45、(2013)。

[6] 河村浩：公害苦情相談における「スジ」と「スワリ」－騒音・低周波音の事例を素材として－、ちょうせい、第 55 号、pp.2-13、(2008)。

【補遺】

(1) 振動規制法（昭和五十一年六月十日法律第六十四号）

第一章 総則

（目的）

第一条 この法律は、工場及び事業場における事業活動並びに建設工事に伴って発生する相当範囲にわたる振動について必要な規制を行うとともに、道路交通振動に係る要請の措置を定めること等により、生活環境を保全し、国民の健康の保護に資することを目的とする。

第五章 雑則

（振動の測定）

第十九条 市町村長は、指定地域について、振動の大きさを測定するものとする。

（関係行政機関の協力）

第二十条 都道府県知事又は市長は、この法律の目的を達成するため必要があると認めるときは、関係行政機関の長又は関係地方公共団体の長に対し、特定施設、特定建設業者若しくは道路交通振動の状況に関する資料の送付その他の協力を求め、又は振動の防止に関し意見を述べることができる。

(2) 公害紛争処理法（昭和四十五年六月一日法律第百八号）

第四章 雑則

（苦情の処理）

第四十九条 地方公共団体は、関係行政機関と協力して公害に関する苦情の適切な処理に努めるものとする。

— 第2回 振動の基礎：振動の発生と伝搬 —

独立行政法人 産業技術総合研究所 国 松 直

1 はじめに

今回は、振動の本質、すなわち振動の基本的な性質に主眼を置き、振動が発生して周囲へ伝搬していく過程で起こる様々な物理現象や、振動を物理量として表示する際の約束事などについて解説します。

振動という言葉の定義は、Wikipedia(<http://ja.wikipedia.org/wiki/振動>)では、「振動（しんどう、英語：vibration）とは、状態が一意に定まらず揺れ動く事象をいう。」と記載されています。また、「JIS B 0153 ”機械振動・衝撃用語”」では、「ある座標系に関する量の大きさが、その平均値又は基準値よりも大きい状態と小さい状態とを交互に繰り返す変化。通常時間に対する変化である」とあります。

一方、類似の言葉の波動は、Wikipedia (<http://ja.wikipedia.org/wiki/波動>) では、「波動（はどう、英語：wave）とは、単に波とも呼ばれ、（海や湖などの）波のような動き全般のことであり、物理学においては波動と言うと、何らかの物理量の周期的変化が空間方向に伝播する現象を指している。」と記載されています。2次元座標では、ある瞬間の媒体の静止位置からの振動量（縦軸）に対して、振動の場合、横軸は時間、波動の場合、横軸は距離で表されます。

振動・波動現象は力学、電気回路、音・光・電波の性質など、私たちの身のまわりの身近な問題として関連しています。音も空気の振動です。

2 振動の発生と物理的表示

(1) 振動現象

単純な例として、ばねに吊したおもりの上下振動のように、物体に働いている力が力の方向を繰り返し変えるとき振動が起こります。逆に言えばそのような力が働いていないときには振動は起こりません。この場合、ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーがその形態を互いに継続して変換し合っています。

一般に、物体(媒質)に力が作用すると、元に戻ろうとする力が働くことにより、振動が生じます。地盤を加振する力には、大きく分けて建設作業、平面道路交通などの場合のように直接地盤を加振するものと、工場機械、鉄道交通、さらには高架道路交通のように何らかの構造体を介して地盤を加振するものに分けられます。

(2) 振動の振動数、振幅、周期、波長

ばねに吊したおもりの上下振動を観察すれば、一定の間隔で繰り返していることが分かります。

初期の静止状態からの位置（距離）を変位と呼び、変位 y が時間 t の関数として次式で表される振動は、正弦波と総称されます。

$$y = A \cos(\omega t + \phi) \quad A, \omega, \phi : \text{定数}$$

または、

$$y = A \sin(\omega t + \phi) \quad A, \omega, \phi : \text{定数}$$

ここに、 y は時間 t とともに変化する量、 A は振幅、 ω は角振動数(円振動数)、 ϕ は初期位相角 ($t=0$ における y の値)、 $(\omega t + \phi)$ は位相と呼ばれます。

これを図示すれば、図 2-1 のようになります。この図は、ばねに吊したおもりを静止状態（おもりの重さ分だけばねが伸びた状態）から $y = -A$ だけ引いて手を離したときを $t=0$ として、描いたものです。手を離すと、おもりはばねの力によって上昇し、最上点 $y=A$ に達し、その後下降に転じて再び最下点に戻るといふ運動の繰り返し、正弦振動を行います。これは正弦関数で表されることから、1周期 (T) は 2π (rad(ラジアン))、 $2\pi=360^\circ$) であり、 $\omega T = 2\pi$ という関係が成立します。周期の単位を秒 (s) とすれば、振動数 (f) は 1 秒間の振動の繰り返し回数であることから、 $f=1/T$ であるので、上記の関係を変形すれば、 $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ となります。これは時間 2π の間に運動が繰り返される回数を示します。

正弦振動が媒質中を伝搬する波動の場合には、図 2-1 の横軸が距離で表されます。この場合は、周期 (T) の代わりに距離 (x) に対して、波長 (λ (m)) ごとに同じ状態が繰り返されることとなります。

(3) 変位、速度、加速度

図 2-1 は、おもりの静止位置からの変位を表した図ですが、単純に速度は変位の時間的変化です。数学的には速度は変位の時間 t による1階微分として求められます。同様に、加速度は速度の時間 t による1階微分または、変位の時間 t による2階微分として求められます。逆に言えば、速度は加速度の1階積分、変位は速度の1階積分、加速度の2階積分で求められます。

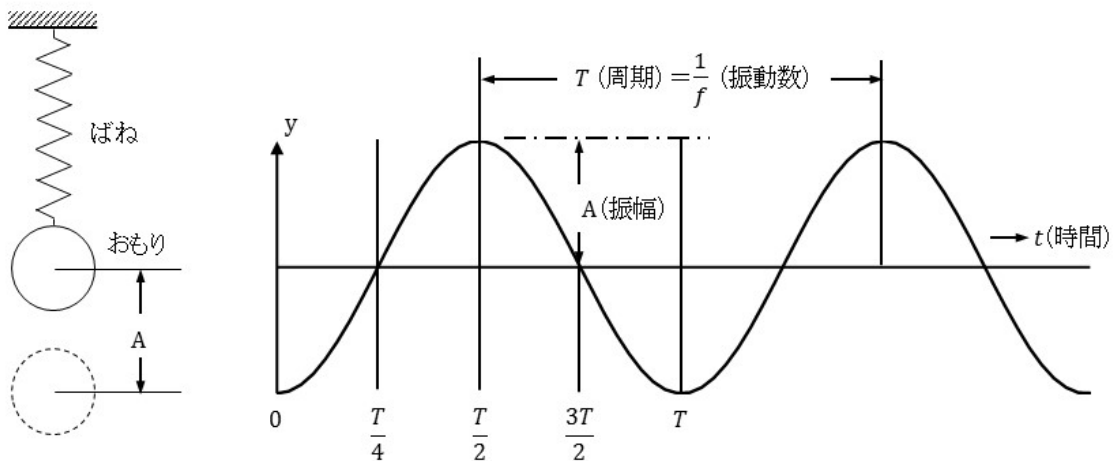


図 2-1 正弦振動の時間変化（変位）。

振動の変位を、

$$y = A \sin(\omega t)$$

で表せば、速度は、

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega A \cos(\omega t) = v_0 \cos(\omega t)$$

加速度は、

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} = \omega v_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\ &= a_0 \sin(\omega t + \pi) \end{aligned}$$

で表されます。

ここに、

$$\omega^2 A = \omega v_0 = a_0, \quad A = v_0 / \omega = a_0 / \omega^2$$

これらの関係から、速度は変位と位相が $\pi/2$ 、加速度は速度と位相が $\pi/2$ 異なること、また加速度は変位と π (逆位相)だけ異なることが分かります。正弦振動の場合には、変位、速度、加速度のいずれかの振幅と振動数が分かれば、相互に変換することができます。言い換えれば、正弦振動でない振動については、変位、速度、加速度の間に簡単な関係は成立しないので、1つの量から他の量への変換は微分または積分によるしかありません。

(4) 一般的な振動

以上、正弦振動を例に説明をしてきましたが、現実には、無限に振動する現象は存在せず、振動する物体に運動を妨げようとする抵抗力が働きます。例えば図 2-1 では、空気の抵抗やばねなどの弾性体の内部に作用する固体の内部摩擦などがあります。そのため、振動の振幅は徐々に小さく、減衰していきます。このような振動を減衰振動(減衰自由振動)、図 2-1 のような減衰のない振動を、単振動(無減衰自由振動)と呼びます。一方、鍛造機のように周期的な力が加わる場合は、外力の作用の仕方などにより、振動のようすが異なります。このような振動は、強制振動(無減衰強制振動、減衰強制振動)と呼ばれます。

通常身近な振動現象の時間変化(時刻歴波形)は正弦波形ではなく、不規則なランダム波形であり、数学的に正弦波形の重ね合わせで表すことができます。後で、周波数分析として説明します。

ランダム波形の大きさを表す量として、図 1 のように横軸を時間軸とした場合、以下が挙げられます。

- ・ピーク値：振幅がゼロの軸を横切りながら上下を繰り返すとき、その1波の中で一番大きな振幅を、正のピーク値、負のピーク値といいます。また、正のピーク値から負のピーク値、または負のピーク値から正のピーク値までの値を、「Peak to Peak, (p-p),

(pp)」といいます。

- ・最大値：ランダム波形では、振幅は時間とともに変化し、ある瞬間の値を「瞬時値」といい、その瞬時値が対象時間内において一番大きい値を正の最大値、負の最大値といいます。したがって、符号を考慮せず絶対値としていけば、ピーク値の中で最も大きな振幅が最大値になります。正弦波形では、ピーク値と最大値は同じになります。ランダム波形の場合、最大値は、波形が時間とともに変化しますので、対象とする時間区間の中で変化します。
- ・実効値 (root mean square, rms, RMS)：瞬時値の2乗したものを時間平均し、その平方根で表される値です。式で表現すれば以下のようになります。

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt}$$

ここに、 $a(t)$ は振幅時刻歴関数または時間 t での瞬時値、 T は対象とする時間区間(sec)です。この式は、対象時間区間において、大きさの変化する振幅量をこれと等しいエネルギーをもつ一定の大きさの振幅量で表した量を意味しています。正弦振動では、実効値は最大値の $1/\sqrt{2}$ (約 0.71)倍となります。

(5) 振動のデシベル表示

音の測定では、空気中の音圧が測定されますが、振動の場合、音と異なり変位、速度、加速度の物理量があり、何を測定するかは目的により異なります。また、音と大きく異なる点ですが、振動には方向と大きさがあります。そのため、振動の測定では方向を特定しておく必要があり、その方向は通常水平面上での測定を原則として、直交座標をもとに上下方向、水平面上の直交2方向の3方向になります。

公害振動の場合は、決めごととして、加速度を使用します。加速度の時間変化に対して人がどのように感じるのかという心理的反応が問題になります。このような心理量は物理量の対数に比例することが知られています(ウェーバー・フェヒナー(Weber-Fechner)の法則)。そのため、公害振動では、振動加速度の大きさではなく、ある基準値に対する振動加速度実効値の比(相対値)としてデシベル表示(単位：dB)された値が一般的に用いられています。式で表示すれば、以下のようになります。

$$L_{Va} = 20 \log(a/a_0) \quad (\text{dB})$$

ここに、基準値 a_0 は、振動規制法では、 $10^{-5}m/s^2$ を用います。この値を振動加速度レベルと呼びます。デシベルは「二つのパワーの比の常用対数の10倍」で定義されるので、エネルギー比(a^2/a_0^2)の対数($\log(a^2/a_0^2)$)の10倍($10 \log(a^2/a_0^2) = 20 \log(a/a_0)$)として上式が誘導されます。ここで、振動加速度実効値が重力加速度($9.8m/s^2$)に等しいときには、振動加速度レベルは約120dBと計算されます。

デシベルは数値の単純な加減算ができないなど馴染みにくいところがあり、70dBの振動源が2台あるとき、その振動加速度レベルは70dB+70dB=140dBではありません。定義に戻って、同一振動源の数が n 台になった場合、レベルの増加量は、 $10 \log(n)$ となります。表2-1は n に対するレベルの増加量の一例です。

レベルが 70dB の同一振動源が 2 台 ($n = 2$) ある場合、レベルの増加は 3dB であるので、レベルは 73dB になります。同様に、5 台ある場合には、77dB になります。

表 2-1 n に対するレベルの増加量

n	2	3	5	10	100
増加量 (dB)	3	5	7	10	20

(6) 振動レベル

人の振動に対する受感反応を振動に関係する物理量である加速度、速度、変位と関連づけるために、古くから正弦振動を用いて、振動数と振動の振幅に関する被験者試験が実施され、その結果を踏まえて、周波数毎に同一加速度に暴露された被験者が、その大きさを相対的にどの程度の大きさを感じるのかという感度特性（音に対する等ラウドネス曲線に相当）が決められています。その感度特性の逆特性で補正（周波数補正）した特性で加速度を補正すれば、人の振動感覚を表すことができることとなります。JIS C 1510：振動レベル計では、基準レスポンスとして、次表が示されています。

表 2-2 振動感覚補正值

周波数 (Hz)	1	2	4	6.3	8	16	31.5	63	80
補正值 (鉛直)	-6	-3	0	0	0.9	-6	-12	-18	-20
補正值 (水平)	3	2	-3	-7	-9	-15	-21	-27	-29

この表では、補正值を離散的な周波数（具体的には、1/3 オクターブバンド中心周波数）で示しています。この補正值の逆特性がおおよそ人の感覚特性に相当します。このことから、人の振動感覚について次のようなことが分かります[1]。

- 1) 鉛直振動と水平振動では感じ方に差がある。
- 2) 鉛直振動では 4～8Hz の周波数範囲の振動が最も感じやすい。
- 3) 水平振動では、1～2Hz の周波数範囲の振動が最も感じやすい。
- 4) 約 3Hz 以下の周波数では水平振動の方が感じやすく、それより高い周波数では鉛直振動の方がよく感じる。

3 波動と伝搬

波動または波（以下、波と呼ぶ）は、空間のある場所に生じた物理状態の振動的変化が次々に相隣る部分に影響を与えて他の場所に移動し伝わっていく現象といえます[2]。

公害振動の場合には、機械の運転や自動車走行、くい打ち機械の稼働などにより、地盤に力が作用して、変形が生じ、その変形が波動として拡がることとなります。波を伝えるものを媒質といいます。公害振動では、媒質として地盤を伝わることとなります。

弦や棒の波の伝搬は 1 次元の波動方程式で表されますが、地盤を伝わる波は 3 次元での現象となります。無限大の媒質を考える場合は、無限弾性体、3 次元でも地盤のように地

盤の上が空気層のような場合には、半無限弾性体という言い方をします。地盤も固体材料として弾性体(変形しても元に戻る性質(弾性)を有する物質)です。地盤中を伝わる波には、いくつか性質の異なる波の種類があります。

無限弾性体内：

実体波	縦波(疎密波, 1次波, P波, 圧縮波, 非回転波, 体積変化の波)
	横波(ねじり波, 2次波, S波, せん断波, 等体積波, 変形の波)

- ・縦波：媒質の変位の方向が波の伝わる方向と一致するもの。体積変化に対する抵抗が縦波の原因。
- ・横波：媒質の変位の方向が波の伝わる方向と互いに垂直なもの。変形に対する抵抗が横波の原因。詳しくは、伝搬方向の鉛直面内で振動する SV 波と水平面内で振動する SH 波が存在。

半無限弾性体内：

表面波	レイリー (Rayleigh) 波 (R 波)
	ラブ (Love) 波

- ・レイリー波：半無限の境界付近に限って運動する波。深さとともに急激に減少。
- ・ラブ波：媒質が層状構造であるとき、多数の反射波から合成される波。水平面で偏向したせん断波から構成。「水平面で偏向したせん断波が表層面に現れ、多重反射によって伝播する波」[3]。

これらの波の伝搬する速度(伝搬速度)が分かれば、ある点で発生した波が、他の任意点に達するまでの時間が予想されます。すでに、地震波でご存知のように、半無限弾性体の場合には、伝搬速度は、縦波>横波>レイリー波(横波速度より 0.9~0.95 倍とわずかに遅い)、という順番です。また、その波の進み方のイメージとしては、文献[4]にイメージ図が示されています。

図 2-2 は、等方均質半無限弾性体上の円形フーチング基礎(上下動加振)から発生する波の地中変位分布を示した図です。この図から実体波(縦波・横波)は振源(基礎部分)から球面状に、レイリー波は円筒状に広がっていくことが分かります。この幾何学的な伝搬により、各波の単位面積を通過する振動エネルギーは振動源からの距離とともに減少していき、このエネルギー密度の減少、すなわち変位振幅の減少は幾何減衰と呼ばれています。

図にも描かれているように、実体波の振幅は $1/r$ (r は入力源からの距離)に比例して(ただし、半無限弾性体の表面付近では、 $1/r^2$ に比例して)減衰していきます。レイリー波の振幅は $1/\sqrt{r}$ に比例して減少していきます。

図中のせん断窓は、横波において大きい振幅が起こる範囲を表します。

また、これら3種類の波のエネルギーの割合は、レイリー波が 67%、横波が 26%、縦波が 7%と計算され、フーチング基礎から発生する波のエネルギーの 2/3 はレイリー波によって伝搬されます。さらに、レイリー波は実体波に比べて距離による減衰が小さいことが分かります。以上のことを勘案すれば、地表面上あるいはそれに近い所にある基礎の振動問題に対しては、レイリー波が最も重要であるということがいえます。

媒質中(地盤など)を伝搬する波でも固体の内部摩擦など、常にエネルギーを逸散させ

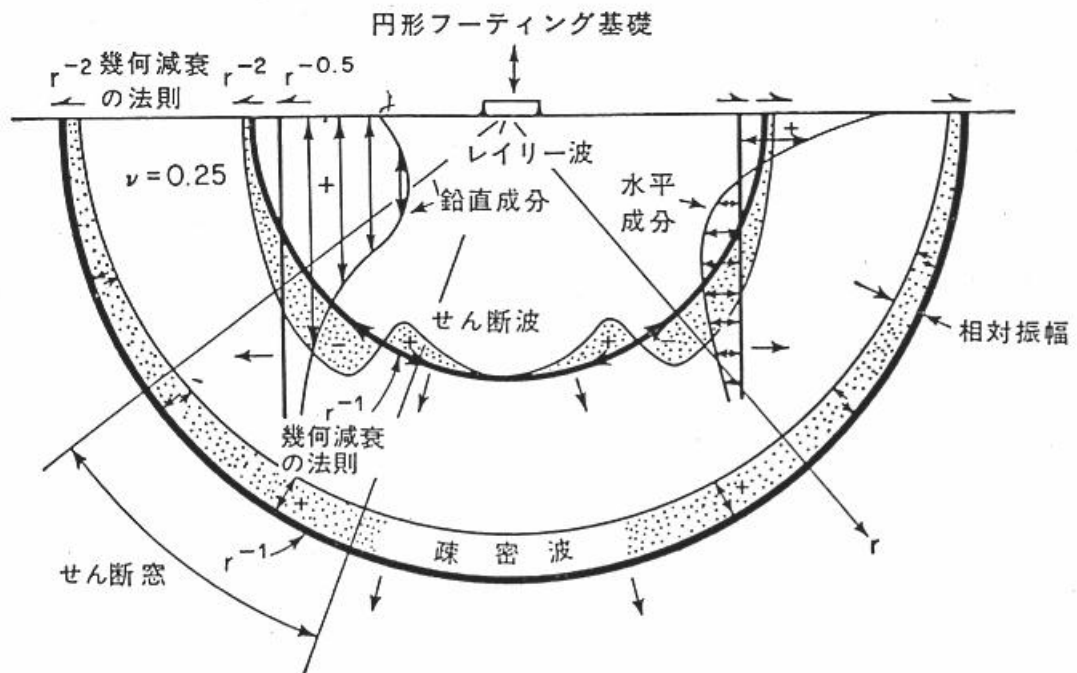


図 2-2 等方均質半無限弾性体上の円形フーチング基礎から発生する波動の変位分布[5].

るような作用、すなわち波動に伴う力学的エネルギーを熱に変えて消失させるような作用が現象の中に含まれ、波はしだいに減衰していきます。このような減衰を幾何減衰に対して内部減衰と呼びます。

4 地盤振動の伝搬特性

地盤は媒質材料としては弾性体ですが、等方均質的な材料ではなく、このような材料内を伝搬する波は複雑な挙動を示します。しかし、一般には地盤を大きく沖積層や洪積層というような地層の分類、砂質土や粘性土といった土質分類などで区分して考えることが行われています。これらの区分はボーリング調査や物理探査手法をもとに行われ、3次元的に複雑な構造として地盤構造は表されます。地盤の波動伝搬の場合、区分された各層の縦波速度、横波速度などが重要なパラメータとして、影響します。これらのパラメータを実地盤の特性を忠実に再現するように求めることはいくら費用をかけてもできません。そのため、地盤振動について数値解析的に現象を把握する場合や予測する場合でも、地盤の数値解析モデルとして、簡略化が行われます。例えば、3次元構造のある断面を切り出して2次元構造として解析するとか、不規則な層構造の境界を水平すなわち成層構造と仮定することなどが行われています。もちろん、結果に差は生じますが、だいたいの傾向を知るためには、簡便で有効な方法として用いられています。

(1) 距離減衰の経験式

先にも説明したように、振動源から伝わる地盤振動は、振動エネルギーが無限の領域へ

広がっていくことによる幾何減衰（地下逸散減衰）と土粒子の摩擦等による内部減衰により距離とともに減衰していきます。

いま、内部減衰のない一様地盤（半無限弾性体）の表面を鉛直方向に正弦波加振したとき、地表面振動の距離減衰は図2-3に示すようになります[6]。計算条件は図中に記されているように、地盤の横波速度は200m/s、加振力は9.8kNで、振動数は20Hzの結果です（P：加振力、f：加振振動数、Vs：横波の伝搬速度）。同図において、実線は厳密に求めた加速度レベルであり、内部減衰のない一様地盤（半無限弾性体）でも鉛直成分、水平成分ともに単調な減衰を示さないことが分かります。しかし、距離減衰の状況は点線で示したレイリー波の減衰でほぼ表せるとみることもできます。同図のレイリー波の減衰は幾何減衰のみであるので、距離の平方根に反比例して減衰し、 -3 dB/倍距離 の減衰（図中の点線）で表すことができます。

現場実務では、加振源からの距離xに対する振動レベルの減衰に、減衰係数 α の内部減衰を表す指数項 $\exp(-\alpha x)$ を付加した経験式が用いられており、ボルニッツ（Bornitz）式と呼ばれています。実測された距離に対する振動レベルの値を用いて、幾何減衰項と内部減衰項の係数を回帰し、予測に使用することが行われています。

(2) 伝搬経路

以下では、地盤中を伝搬する波が伝搬経路において影響を受ける主な要因をいくつか示します。

a) 地質

図 2-4 は軟弱粘土地盤と砂礫地盤で試験車を用いた振動測定結果[7]で、軟弱粘土地盤の距離減衰の方が小さいことが分かります。原因として、砂より粘土の減衰定数が小さい、砂礫地盤の方が軟弱粘土地盤より卓越振動数が高いことなどが指摘されています

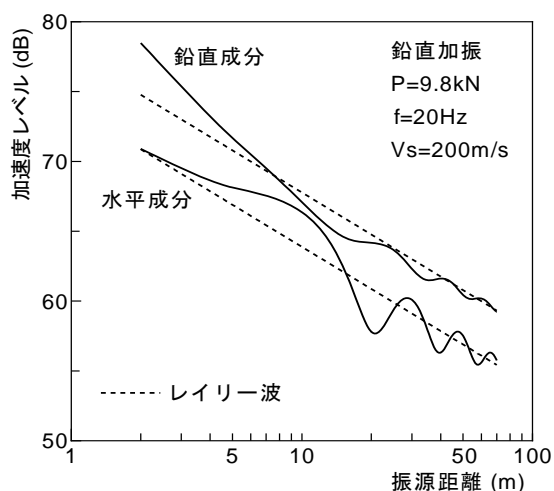


図 2-3 表面波の距離減衰.

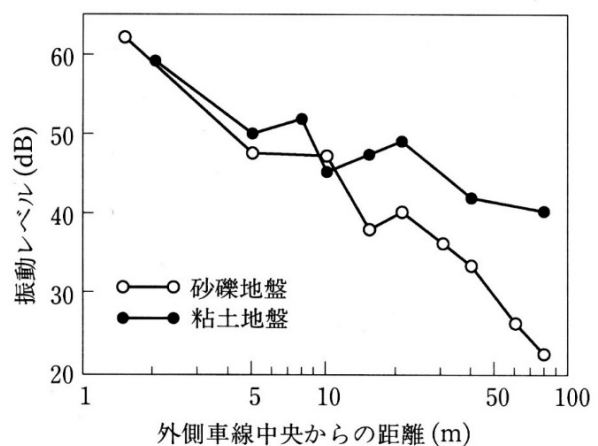


図 2-4 地質条件と距離減衰.

b) 地層

図2-5は、3種類の地盤における道路交通振動の周波数特性を比較したものです[8]。地盤の横波速度 (V_s) を地盤の固さとみなすことができるので、同図から判断して地表近くの横波速度が小さく（軟弱に）なれば、低い振動数成分が卓越していることがわかります。これより、地層構成(地盤構造)は地盤振動の振動数に大きく関わりを持つことが理解できます。

図2-6は地層構成が地盤振動の距離減衰に及ぼす影響を数値シミュレーションにより調べた結果です[9]。計算条件は図中に示してあるとおりです。また、砂質土には粘土よりも大きな内部減衰が設定されています。この図から、Case 1とCase 3の差は小さく、Case 2の振動が大きくなっていることから、表層の固さが

地表面の振動に大きく影響することがわかります。なお、距離減衰曲線に波打ち現象が見られますが、成層地盤のため複数のモードの表面波が重なり合っているものと考えられます。

c) 地形

崖のような地形では、波動の反射と回折が生じ、崖近傍では地盤振動が増幅する可能性があると言われていています。図2-7は、段違いの地形が地盤振動の距離減衰に及ぼす影響を知るために、2次元波動場の数値シミュレーションにより、段違いの無い場合（半無限地盤）と比較した結果です。図より、加振振動数が高くなるとともに、段違いの影響範囲が小さくなる傾向が見られます。これは、振動数が高くなれば表面波の波長が短くなり、

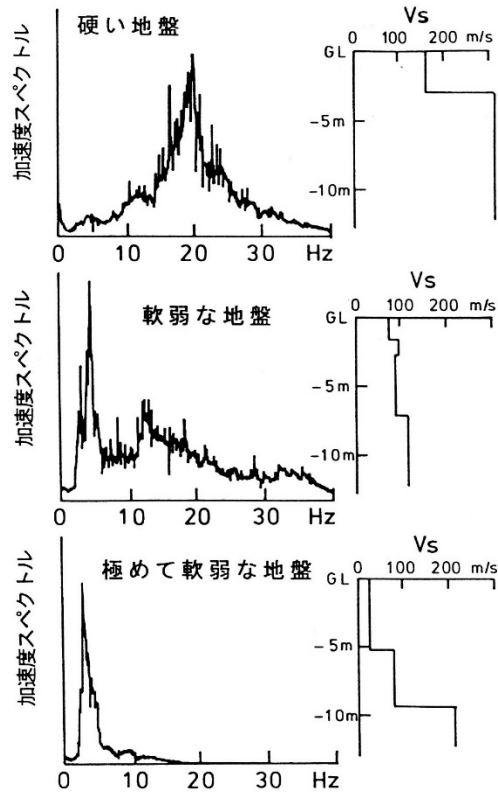


図 2-5 地層条件と地盤振動の周波数特性.

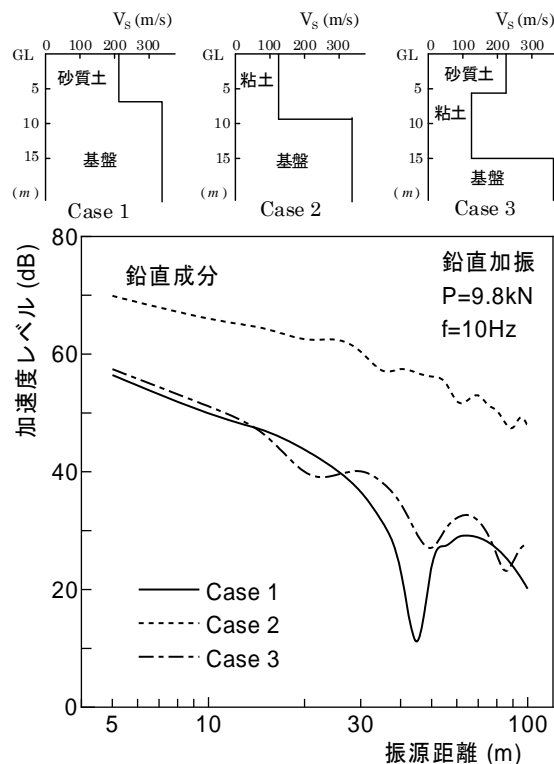


図 2-6 距離減衰に及ぼす地層の影響 (数値シミュレーション).

半無限弾性地盤の表面のように斜面に沿って、右方の無限領域へ伝搬して行くものと考えられます。

掘割道路構造も段違いの地形に近いものと考えられますが、掘割は構造体としての取扱いが入ってくるので、現象はより複雑になります。

d) 障害物

① 建物

地盤振動の測点が鉄筋コンクリート造等の規模の大きな建物の近くにある場合、地盤振動は建物の影響を受ける可能性があります。図 2-8 は、10 階建ての RC 建物の横に、建物からの離隔距離が 2m と 10m の位置に測線を設けたとき、鉛直加速度の距離減衰が建物からどのような影響を受けるか調べたものです[10]。図は、1/3 オクターブバンドレベルについて、道路端の加速度レベル (VAL) に対する相対加速度レベルで表してあります。

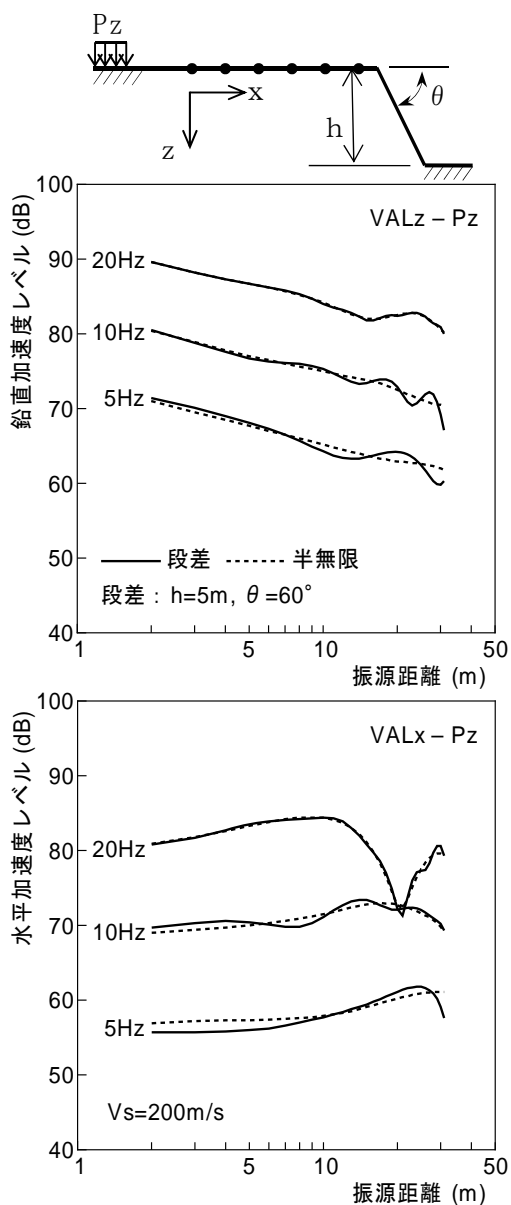


図 2-7 段違い地形近傍での距離減衰特性 (数値シミュレーション)。

道路端の加速度レベル (VAL) に対する相対加速度レベルで表してあります。

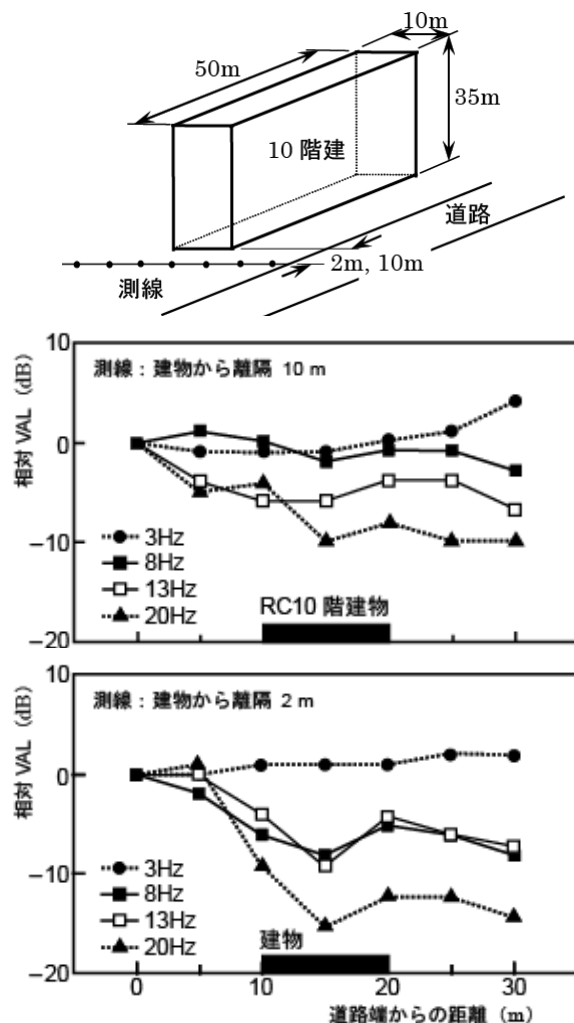


図 2-8 10 階建の建物横に設けた測線における距離減衰特性。

3Hz 成分は暗振動レベルであるため、8Hz 以上の成分の距離減衰特性に注目すれば、建物からの離隔距離が 2m の測線の距離減衰は、建物位置で 10m 測線の距離減衰より影響を受けていることが分かります。これは、建物底面のサイズによって入射波動の自由な運動が拘束されること（入力損失効果）と、建物と地盤の動的相互作用によって生じる現象であると考えられます。

地盤中を伝搬する波は、以上に示した要因以外、例えば、埋設管や暗渠の存在、地下水の水位の変化などでも影響を受け複雑な結果になるので、注意深い考察が必要になります。

【参考文献】

- [1] 公害防止の技術と法規編集委員会編：新・公害防止の技術と法規 2013〔騒音・振動編〕、p.189、(2013).
- [2] 有山正孝：振動・波動、裳華房、p.157、(1974).
- [3] F.E.リチャード jr 他（岩崎敏男他訳）：土と基礎の振動、鹿島出版会、p.105、(1986).
- [4] 後藤剛史、濱本卓司：わかりやすい環境振動の知識、鹿島出版会、p.82、(2013).
- [5] F.E.リチャード jr 他（岩崎敏男他訳）：土と基礎の振動、鹿島出版会、p.95、(1986).
- [6] 日本騒音制御工学会編：騒音制御工学ハンドブック、基礎編、技報堂出版、p.327、(2001).
- [7] 日本騒音制御工学会編：騒音制御工学ハンドブック、基礎編、技報堂出版、p.104、(2001).
- [8] 松岡達郎：地盤の特性と道路交通振動について、騒音制御、Vol.3, No.2, pp.20～23, (1979).
- [9] 日本騒音制御工学会編：騒音制御工学ハンドブック、基礎編、技報堂出版、p.330、(2001).
- [10] 住友聡一・辻本三郎丸・北村泰寿：地盤振動の伝搬に及ぼす近接構造物の影響、日本音響学会秋季研究発表会、2-3-15, (1998).

— 第3回 振動の基礎：振動の影響と評価・規制方法 —

独立行政法人 産業技術総合研究所 国 松 直

1 はじめに

今回は、最初に振動規制法制定の経緯や評価量として振動レベルが使用されるようになった経緯を示します。次に、振動に対する人の感じ方、振動による様々な影響、そのような影響を評価する方法や、煩わしい振動を規制し、防止する仕組みなどを説明した後、振動規制法制定後の苦情件数の推移について解説します。

2 振動規制法制定の経緯

戦後の高度経済成長政策による経済発展の急成長のひずみが 1950 年代頃から顕在化し、日本の 4 大公害病[1]である水俣病、第二水俣病（新潟水俣病）、四日市ぜんそく、イタイイタイ病の発生を受け、公害対策に関する日本の基本法である公害対策基本法(1967)[2]が施行されました。

公害といっても様々な種類のものがありますが、この法律では大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下、悪臭の 7 つを公害と規定していました。

表 3-1 には、振動に関して、振動規制法が制定される以前までの主な項目を西暦とともに示しています。

表 3-1 振動規制法が制定される以前までの主な項目

1911	工場法	1965	大阪府が規制基準を設定
1919	都市計画法	1967	公害対策基本法 典型 7 公害
1929	警視庁「工場取締規則」	1968	守田：ICA で振動レベル計提案
1936	Reiher & Meister の研究※	1968	騒音規制法 施行
1949	東京都「工場鉱害防止条例」	1971	環境庁設置
1963	工場振動に対する指導基準	1972	環境庁が公害振動の検討に着手
1964	ISO/TC108/SC4 開始	1976	振動規制法 施行

※Reiher & Meister：乗り物の乗り心地を中心とした振動評価研究

環境庁(当時)は公害振動を規制するために振動規制検討委員会を設置し、1973 年 10 月に以下の概要を報告としてまとめています[3]。

振動規制の目的	居住の快適な生活と夜間の安眠確保
対象とする振動公害	地面伝播振動によるもの
規制の対象	工場事業場，建設工事，道路交通とし，鉄道は除く
規制方式	騒音，悪臭規制に準ずる
立法形式	単独立法

今後検討すべき事項	工場団地での複合現象，集团的建設工事の検討，家屋等の財産被害の保障措置
-----------	-------------------------------------

1968年の騒音規制法の施行を受け、1972年に振動に関する調査研究「振動発生源からの地表伝搬に関する研究」として、「振動と感覚，苦情との対応」、「地表振動と建屋振動の対応」、「振動公害における振動計測法」、「その他振動公害を法制化するうえで必要とする調査」等の研究を実施し、「振動公害に関する調査研究報告書」（1973.9）をまとめています。以下が、調査研究結果の概要です[3]。

地表振動伝搬	現場の実態調査の結果、振動源からの距離減衰はほぼ3～6dB/倍距離であるが異常値も出る。しかしここでは異常の原因についての検討はなされていない。
振動源	振動発生源は大きい順に、建設工事＞工場衝撃源＞軌道交通＞自動車交通＞工場連続振動源である。
振動の人体感覚	ISO 2631を主体に、文献から実験結果の紹介が纏められた。
生活影響に及ぼす影響	アンケート調査を行い、屋内の振動測定値と振動感覚との対応は良かったが、地面振動と居住者の感じ方との対応は良くない。室内振動と地面振動は一致しない。影響は主に心理的影響で生理的影響を訴えるのは非常に少なかった。
振動の構造物に及ぼす影響	物的被害と振動量との対応は系統的には出てこなかった。
地表振動と建屋内振動	調査家屋のほぼ半数で増幅が見られた。
測定器と測定法	振動公害に対する振動レベル計の実用性が立証され、測定法は日本音響学会案で矛盾が無いことが分かった。
振動規制値	地域ごとよりも全国的な統一が必要とされた。
今後の課題	土地利用による地域規制をより具体的にして、振動排出側と受振側との相互利益を考えるようにすべきである。振動源対策技術開発をもっと発展させなければならない。

それ以外でも、環境庁において、「工場振動(1973)」、「道路交通振動(1974)」、「新幹線鉄道振動(1974)」に関して社会調査が実施されています。その後、中央公害対策審議会騒音振動部会振動専門委員会において議論され、振動規制法が1976年11月に施行されました。

振動規制法制定に関して、以下が指摘されています[3]。

鉛直振動レベルの採用	計量法が後押しした。
測定点の問題	振動規制法は排出規制。同じ振動源の地表の振動と居住者の居る場所の振動との差が大きな問題。
地面振動と家屋振動の増幅度	日本家屋対象。現場調査の結果、構造、測定する個所、鉛直・水平の方向による違い。鉛直方向の振動レベルによる平均的な増幅を5dBとした。
規制値の決め方	非定常振動に対して、80%レンジ上端値を使うことにした。
規制値	いくらのレベルを規制値として出すかは大きな問題。振動を感じないというだけで決めてしまうのは社会活動に大きな影響。一般環境での振動レベルに対する生理影響実験では短期暴露に対応する反応は

	認められない。睡眠深度に影響の現れる 60dB が振動規制法の規制値を決める上で重要な役割をした。
財政的課題	施策実現のための財政負担。各省庁はゆるい規制値を望む。

振動規制法の施行に当たり、振動の計測器、評価、規制の考え方について、当時の研究成果の参照や調査が実施され、議論されました。振動に対するいろいろな苦情を的確に評価できる指標（評価量）があれば、非常に助かるのですが、苦情にはシリーズ第 1 回で少し記述したように非常に複雑な要因が絡むため、一つの指標で評価することは難しいのが現状です。しかし、評価及び規制のためには何らかの評価量が必要であることから振動規制法では、振動レベル（単位：デシベル，表記：dB）が用いられることになりました[3]。ただし、繰り返しになりますが、この値だけで苦情を的確に評価することは難しいということを忘れてはいけません。

3 振動規制法の体系と評価量

昭和 51 年(1976 年)に制定された振動規制法の体系は概略以下のように示され、工場振動、建設作業振動、道路交通振動を規制の対象としています。

地域 指定 (3)	工場振動 (特定施設) (2.1)	届出義務 (6)(7)(8)(10)(11)	規制基準 (2.2)(4)	罰則(25)～(29) 計画変更勧告(9) 改善勧告(12.1) 改善命令(12.2)
		規制基準遵守義務 (5)		
		報告検査/測定 (17)/(19)		
	建設作業振動 (特定建設作業) (2.3)	届出義務(14)	規制基準 (15.1)	罰則(26)～(29) 改善勧告(15.1) 改善命令(15.2)
		報告検査/測定 (17)/(19)		
	道路交通振動 (道路交通) (2.4)	測定(19)	要請限度 (16.1)	道路の舗装、修繕等の 要請/交通規制の要請 (16.1) 執行(16.3)

ここで、図中の()内は条文を示し、例えば、(2.1)は法第 2 条第 1 項を示しています。

(1) 振動計測

シリーズ第 2 回で説明したように、振動を表す物理量としては、変位、速度、加速度があります。またこれらの量について、波形を特徴付ける値として、全振幅、片振幅のピーク値、実効値などがあります。単位についても、変位に対して、ミクロン（現在は、マイクロメータ， $\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ）、速度に対して、カイン（kine, cm/s ）、加速度に対して、ガル（gal, cm/s^2 ）などがあります。これらの物理量の計測をもとに、苦情や感覚との対応がよい指標について現在も研究が進められています。過去に行われた人体の振動の感覚

実験から、人体が感じる振動の大きさに関する感覚が、だいたい振動速度に対応しているということから、振動規制法施行以前には、振動速度による規制も行われていました。その後、ISO（国際標準化機構）の流れを受け、騒音レベルや騒音計を参考に、振動レベルが定義され、振動規制法施行規則において振動レベルを測定する評価量とすることが明記されました。従って、振動規制法という規制基準に関する測定を行う場合は、計量法第71条に規定する振動レベル計を用い、鉛直方向の感覚補正を行った振動加速度レベル（振動レベル）を計測することになります[4]。

計測器としては振動レベル計の JIS 規格(JIS C 1510)が 1976 年に制定され、1995 年に改定されています。振動レベル計では、振動レベルの表示にあたって、連続正弦振動による実験結果から振動感覚補正や衝撃正弦振動による結果から時定数が考慮されています。

(2) 振動感覚

図 3-1 はいくつかの振動感覚補正特性を示しています。1976 年制定時の補正特性は鉛直方向振動感覚補正特性(V)，(黒線)と水平方向振動感覚補正特性(H)，(赤線)です。現在は、JIS C 1510:1995 の鉛直方向振動感覚補正特性(V)と水平方向振動感覚補正特性(H)が

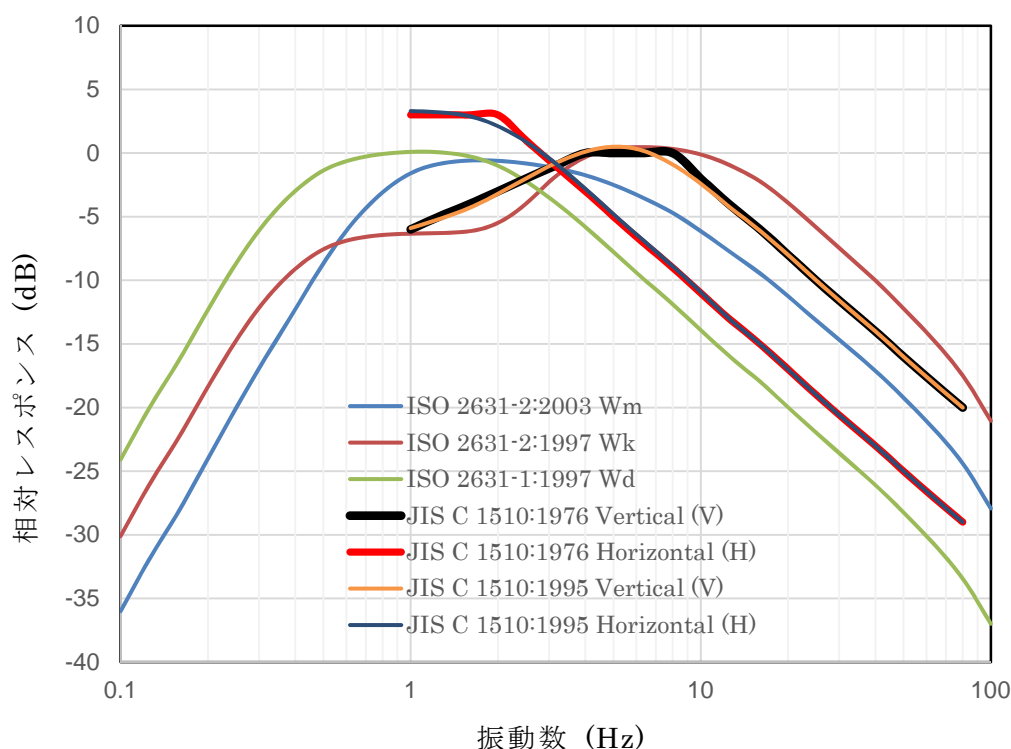


図 3-1 感覚補正特性

規定されています。その他は、ISO で規格化された建物内での全身振動（全方向）用の補正特性(Wm)、鉛直全身振動（Z 軸、座位、立位、仰臥位）用の補正特性(Wk)、水平全身振動（X 軸または Y 軸、座位、立位、仰臥位）用の補正特性(Wd)が示されています。これらのいくつかの曲線から人体の振動の感じ方は振動の方向によって異なることが分かります。また人体の姿勢（座位、立位、仰臥位）によっても異なることが指摘されていま

す。これらの曲線は連続正弦振動を用いて振動数と加速度振幅を変化させた結果から規格化された特性ですが、振動感覚は振動感覚補正特性の逆特性と見ることもできますので、これらの特性から、水平振動に対しては 1～2Hz、鉛直振動に対しては 4～8Hz の振動に対して人体は敏感といえるようです。

さらに、連続正弦振動ではなく継続時間の短い正弦振動を用いた実験結果では、継続時間が短くなると振動を小さく感じる事が報告[5]されており、この結果を評価量に反映させるために、JIS 規格において振動レベル計の指示計の動特性(時定数, 時間重み特性)として時定数 0.63 秒が規定されています。

4 振動の影響

耳を通して刺激が脳に伝わる音と異なり、人体には外部からの振動刺激を受け取る知覚神経の終末が受容器となって全身に分布しています[5]。

振動受容器で発生した信号は下表のような経路により、いろいろな応答を示します[5]。

このような生体内反応系は振動刺激時にだけ働くものではなく、騒音などの環境因子でも生じるので、環境因子が多数存在する場合に、振動刺激のみに限定してその関係を議論することは大変難しいことです。振動による人体への影響は、生理的影響、睡眠影響、心理的影響に大きく分けられます。

生体内反応系の経路	刺激個所	応答作用
脳幹網様体賦活系	脳幹網様体	
視床下部－大脳辺縁系	旧皮質, 古皮質	本能, 情動: 不快感や快感, 怒り, 恐れなどの種々の感情を生じる原因
視床下部による自律神経系制御	自律神経系	内臓の筋肉の運動と腺の分泌を支配, 交感神経緊張型の反応
視床下部－下垂体系	下垂体	全身の内分泌器官の中樞

(1) 生理的影響

振動刺激による生理的影響としては、以下のような例が挙げられ、人体に 90dB 以上の振動を暴露した場合に血圧上昇、血管収縮、心拍数増加、血糖値上昇、体温上昇、胃腸機能低下など交感神経系の興奮による生理的影響が生じるといわれています[5]。

損傷	脳, 肺, 心臓, 消化管, 肝臓, 腎臓, 脊髄, 関節など
循環器系	血圧上昇, 心拍数増加, 心拍出量減少など
呼吸器系	呼吸数増加
代謝	酸素消費量増加, エネルギー代謝率の増加など

ただし、90dB 以上の振動レベルの大きさは、日常生活において体感することは希な大きさです。

(2) 睡眠影響

生理的影響がかなり高い振動レベルで生じるのに対し、睡眠影響はそれより低い振動レベルで影響を及ぼすので苦情の原因となりやすいようです。

30年以上前に、振動台上の寝具の上で、鍛造機の振動を30秒間振動暴露させたときの睡眠妨害度の実験結果として、以下の結果が得られています[5]。

睡眠深度	振動レベル (覚醒率(%))
1度	60dB(0%), 65dB(71%), 69dB以上(100%)
2度	60dB(0%), 65dB(4%), 69dB(24%), 74dB(74%), 79dB(100%)
3度, 4度	74dB以下(0%), 79dB以上(50%以下)
レム睡眠	深度2度と3度の中間程度の影響

(3) 心理的影響

人は振動感覚のみだけでなく、視覚、聴覚による振動の感知などによって、不快、煩わしい、耐え難いといったいろいろな感情が生じます。

しかし、一般的には、視覚や聴覚の影響が無い環境で、振動台を用いた被験者試験によって振動刺激に対する感覚実験が行われます。以下は振動数や振幅を変化させた振動台による振動刺激後に行われるアンケート内容の一例です。

Q1	まったく不快でない	あまり不快でない	不快である	かなり不快である	非常に不快である
Q2	とても小さい	小さい	どちらでもない	大きい	とても大きい
Q3	まったく不安を感じない	あまり不安を感じない	不安を感じる	かなり不安を感じる	非常に強く不安を感じる
Q4	まったく感じない	あまり感じない	感じる	強く感じる	耐えられない

この表のように、この実験方法では知覚以外の振動感覚についてもデータを得ることができます。Q4の結果に着目すれば、知覚閾値を検討することができます。また、被験者試験による上下法では、振動刺激後ではなく、知覚時に被験者からの合図をもとに振幅を変化させて、知覚閾値を求める方法も行われています。

一方で、実際に日常的に振動に暴露されている居住者を対象としたアンケート調査と、回答者宅における振動測定を組み合わせた「社会調査」と呼ばれる方法を用いて影響を検討する方法もあります。振動規制法制定前には、工場、道路交通、新幹線鉄道を対象に社会調査が行われ、規制基準が検討されています。

振動についての感覚と振動レベルとの関係は、社会調査による結果から、住民が振動をよく感じるという訴え率が50%になるのは、振動レベルでほぼ70dBを超えたあたりといわれていますが、その人の生活する地域や性、年齢、利害関係なども人間の心理に影響するといわれており、数値だけで判断することは難しく、ひとつの目安と考える方がよいといえます。

例えば、乗り物では70~90dBぐらいの振動が生じていますが、乗り物には当然振動が伴うという心理的背景と乗り心地という観点から車両振動をとらえているので、かなり大きな振動であるにも関わらず、苦情は発生しにくいということがあります。自動車の車内でも同様のことが言えるのではないのでしょうか。

図3-2に振動レベルとその影響の概要を示します。

2 振動レベルと振動の影響との比較

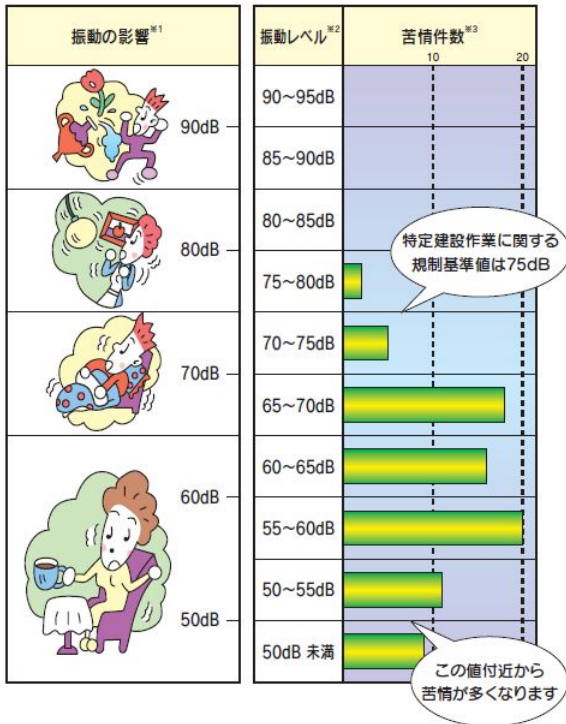


図 3-2 振動レベルとその影響の概要

出典：よくわかる建設作業振動防止の手引き
(環境省 環境管理局 大気生活環境室)

※1：振動の影響

東京都が公表している資料を引用

※2：振動レベル

振動レベルは敷地境界付近での実測値

※3：苦情件数

平成 15 年度に実施した振動苦情に関する全国自治体アンケート結果

5 振動規制法による規制基準

以上のような経緯を経て、振動規制法（1976 年制定）の中に、特定工場等に関する規制(法第 2 条第 1 項)、特定建設作業に関する規制(法第 2 条第 3 項)、道路交通振動に係わる要請(法第 2 条第 4 項)などが示されています。

以下の表に振動源毎の規制基準、要請限度の値を示します。

対象振動	規制基準／ 要請限度	区域	昼間	夜間
特定工場等	規制基準	第 1 種区域	60 デシベル以上 65 デシベル以下	55 デシベル以上 60 デシベル以下
		第 2 種区域	65 デシベル以上 70 デシベル以下	60 デシベル以上 65 デシベル以下
特定建設作業	規制基準		75 デシベル	
道路交通振動	要請限度	第 1 種区域	65 デシベル	60 デシベル
		第 2 種区域	70 デシベル	65 デシベル

規制基準（特定工場等）：特定施設を設置する工場又は事業場において発生する振動の
特定工場等の敷地の境界線における大きさの許容限度

規制基準（特定建設作業）：特定建設作業の振動が、特定建設作業の場所の敷地の境界
線において、75 デシベルを超える大きさのものでないこと

要請限度（道路交通振動）：法第 16 条第 1 項の環境省令で定める限度

第 1 種区域：良好な住居の環境を保全するため、特に静穏の保持を必要とする区域及
び住居の用に供されているため、静穏の保持を必要とする区域

第 2 種区域：住居の用に併せて商業、工業等の用に供されている区域であって、その
区域内の住民の生活環境を保全するため、振動の発生を防止する必要がある区域及び

主として工業等の用に供されている区域であって、その区域内の住民の生活環境を悪化させないため、著しい振動の発生を防止する必要がある区域

昼間：午前 5 時、6 時、7 時又は 8 時から午後 7 時、8 時、9 時又は 10 時まで

夜間：午後 7 時、8 時、9 時又は 10 時から翌日の午前 5 時、6 時、7 時又は 8 時まで

デシベル：計量法別表第 2 に定める振動加速度レベルの計量単位

(1) 振動レベルの決定

条例に記載されている振動レベルの決定の仕方の記述を以下に示します。

a) 特定工場等

特定工場等の振動に対する振動レベルの決定は、

- 1)測定器の指示値が変動せず、又は変動が少ない場合は、その指示値とする。
 - 2)測定器の指示値が周期的又は間欠的に変動する場合は、その変動ごとの指示値の最大値の平均値とする。
 - 3)測定値の指示値が不規則かつ大幅に変動する場合は、5 秒間隔、100 個又はこれに準ずる間隔、個数の測定値の 80 パーセントレンジの上端の数値とする。
- ことが法第 4 条及び「特定工場等において発生する振動の規制に関する基準」に記載されています。

b) 特定建設作業振動

特定建設作業の振動に対する振動レベルの決定は、

- 1)測定器の指示値が変動せず、又は変動が少ない場合は、その指示値とする。
 - 2)測定器の指示値が周期的又は間欠的に変動する場合は、その変動ごとの指示値の最大値の平均値とする。
 - 3)測定値の指示値が不規則かつ大幅に変動する場合は、5 秒間隔、100 個又はこれに準ずる間隔、個数の測定値の 80 パーセントレンジの上端の数値とする。
- ことが、法第 15 条及び振動規制法施行規則第 11 条別表第 1 に記載されています。

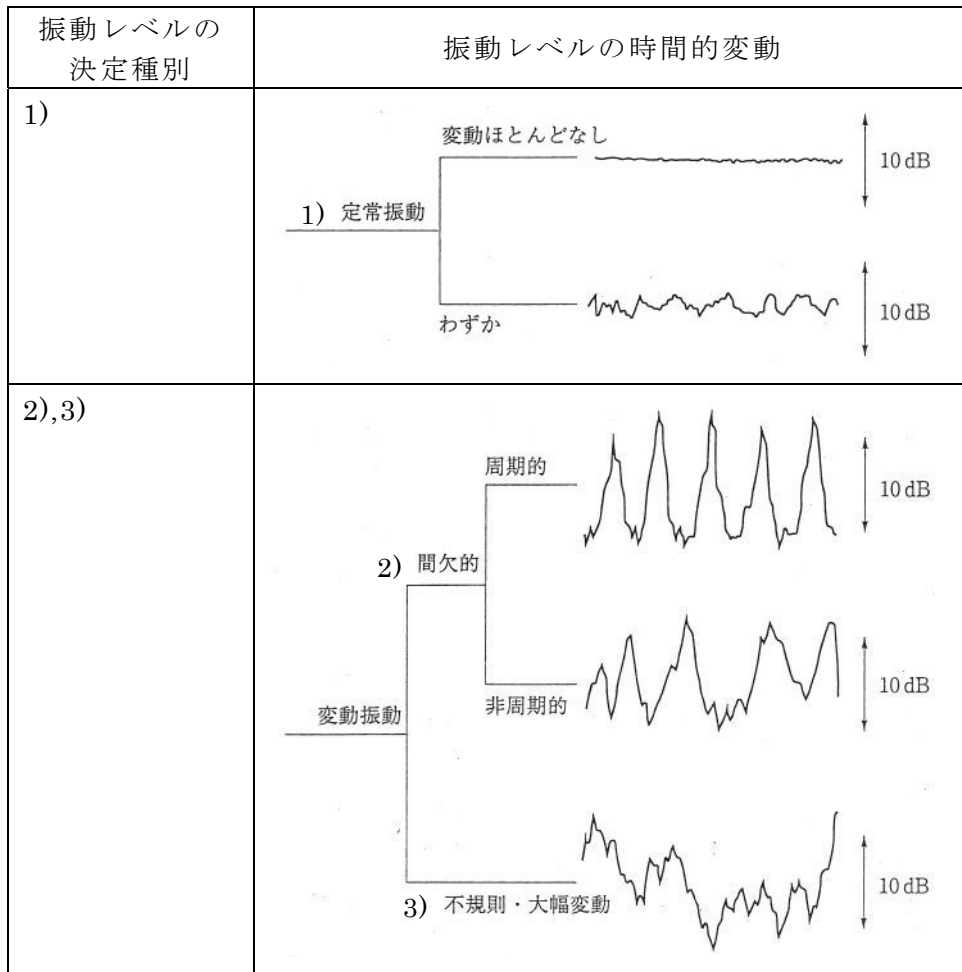
c) 道路交通振動

道路交通振動に対する要請限度である振動レベルは、5 秒間隔、100 個又はこれに準ずる間隔、個数の測定値の 80 パーセントレンジの上端の数値を、昼間及び夜間の区分ごとにすべてについて平均した数値とする。

また、学校、病院等特に静穏を必要とする施設の周辺の道路における限度は、上表に定める値以下当該値から 5 デシベル減じた値以上とする。

ことが、法第 16 条及び振動規制法施行規則第 12 条別表第 2 に記載されています。

上記に記載の振動レベルの時間的変動と振動レベルの決定の仕方については、下図のような例が文献[6]に示されています。



6 振動苦情の推移

振動規制法が制定されてから既に35年以上が経過しています。その間の公害苦情件数調査等の主な変遷は総務省ホームページに詳しく掲載されています。それによると、1994年と2004年に以下のように大きな変更が行われているので、公害苦情件数の連続性は保たれていないようですが、大まかな推移は理解できると思います。

1994	<ul style="list-style-type: none"> ・「公害苦情件数調査」と「地方公共団体における公害苦情処理状況」を一本化し、「公害苦情調査」として開始 ・「公害苦情件数調査」について、調査の方法を都道府県・市町村ごとに集計した集計表を回収する「集計表回収方式」から、苦情1件につき1枚の調査票を作成し回収する「個票集計方式」へ変更 ・典型7公害以外の苦情について整理し、分類項目等を変更 ・「地方公共団体における公害苦情処理状況」について、抽出調査から全数調査に変更 ・前年度以前に受け付け、当該年度に処理された苦情についても調査の対象に含めるなど調査方法等を変更
2004	<ul style="list-style-type: none"> ・環境省所管の「騒音規制法施行状況調査」「振動規制法施行状況調査」及び「悪臭防止法施行状況調査」のそれぞれ苦情に係る部分について、同時調査を開始 ・同時調査実施に伴い、調査事項等を見直し、分類項目を変更

図3-3は年度毎の典型7公害とそれ以外の苦情件数です。苦情件数の総数で見れば、2009年以降は横ばいの傾向で8万件程度になっています。図中の赤破線は大きな変更があった年度の前後を示しています。

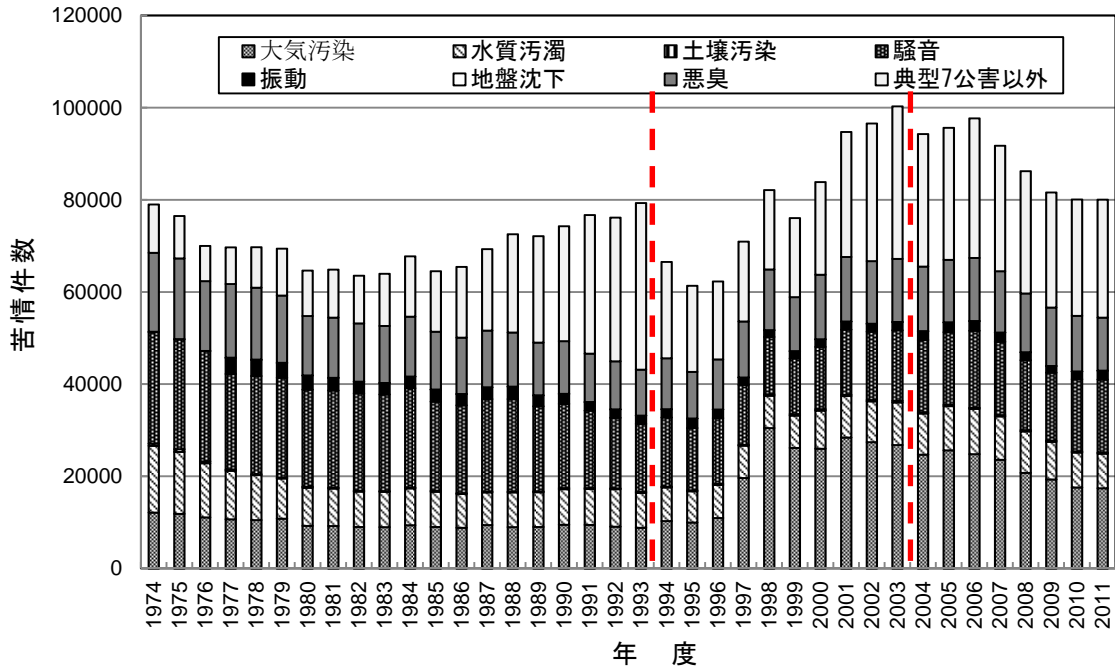


図 3-3 年度毎の典型7公害とそれ以外の苦情件数の推移

図3-4は典型7公害とそれ以外の苦情件数を内訳で見た図です。1993年度と1994年度では典型7公害以外の苦情件数の減少が目立ちます。これは調査方法の変更が影響していると思われます。また1996年度と1997年度では大気汚染の件数が3倍程度増加しています。

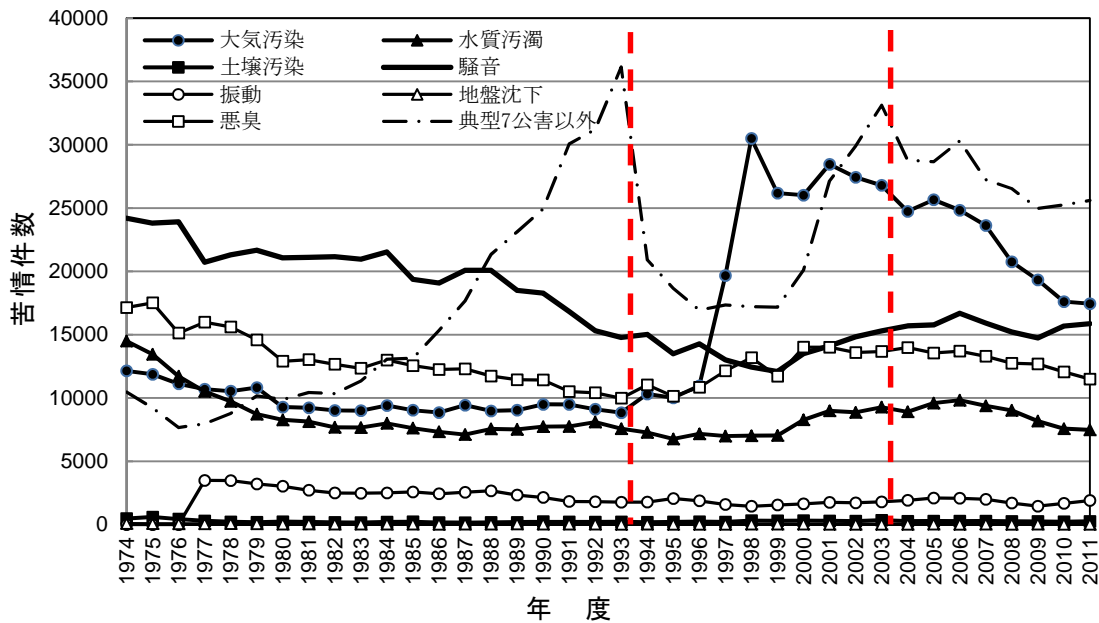


図 3-4 年度毎の公害種別ごとの苦情件数の推移

これらの図から、1994年度前後で連続性が保たれていないように見えます。1994年度以前、典型7公害の苦情件数は着実に減少し、一方典型7公害以外の苦情件数が増加してきています。1994年度以降は、典型7公害以外及び大気汚染の苦情件数に大きな変動が見られることが分かります。

また、図3-5は、1991年度～2011年度の振動公害を対象とした振動源ごとの苦情件数[7]を示しています。振動による苦情は、大まかに2000件程度で推移しており、だいたい、騒音の苦情件数の1/10程度です。

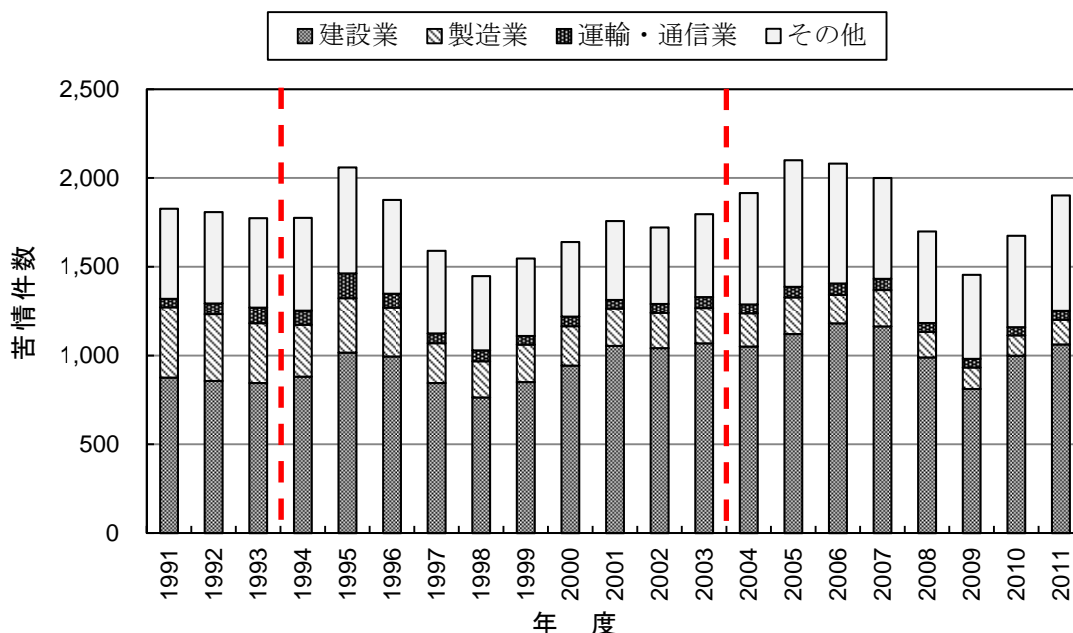


図 3-5 振動源別苦情件数の推移

この図から、建設業による苦情件数が1000件程度と最も多いことが分かります。振動源ごとの苦情件数の割合を示した図3-6から製造業は減少傾向、運輸・通信業は横ばい傾

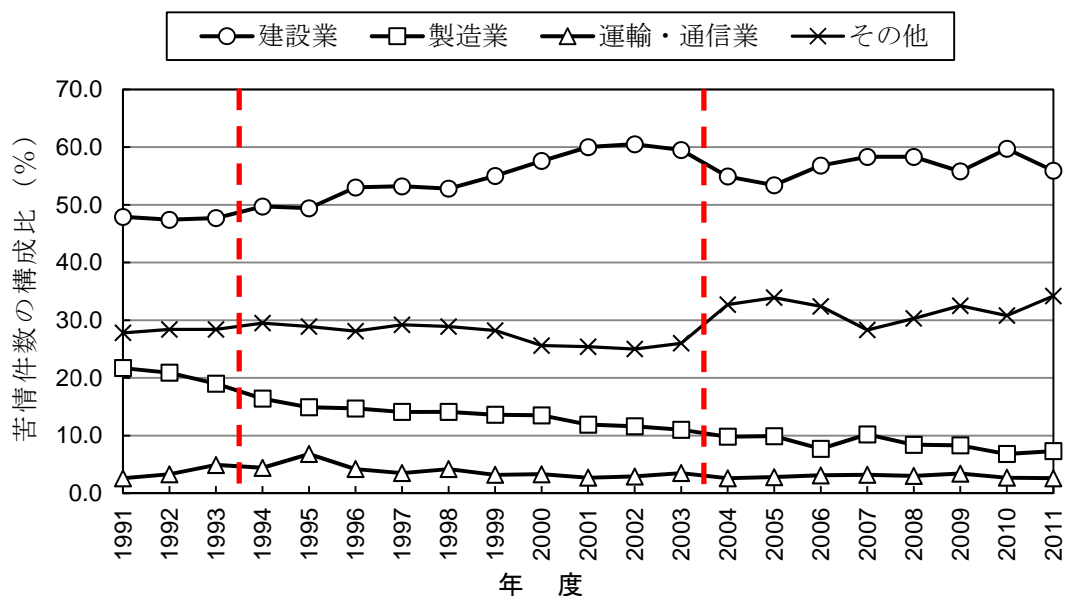


図 3-6 振動源ごとの苦情件数の構成比の推移

向であり、約60%と一番割合の多い「建設業」や「その他」に変動があることが分かります。

以上のような推移だけからは分かりませんが、振動規制法制定時から現在までに、苦情の質が変わってきたことが推察されます。すなわち、法規制以前の規制対象の振動源から発生する振動は規制基準以上の振動を発生させていたと考えられますが、現在では振動源の低振動化や対策技術の進歩により規制基準を超えるような振動は少なくなっているようです。このことは、当初の振動源の振動を規制するという法の目的に沿った規制のあり方は有効に機能したと思われれます。しかし、図3-7の適合率が示すように、近年の規制基準は満足しているが苦情が生じるという実態を考慮すれば、環境振動問題の新たな側面が顕在化し、現行法での対応が難しくなっているのではないかと考えられます[8]。

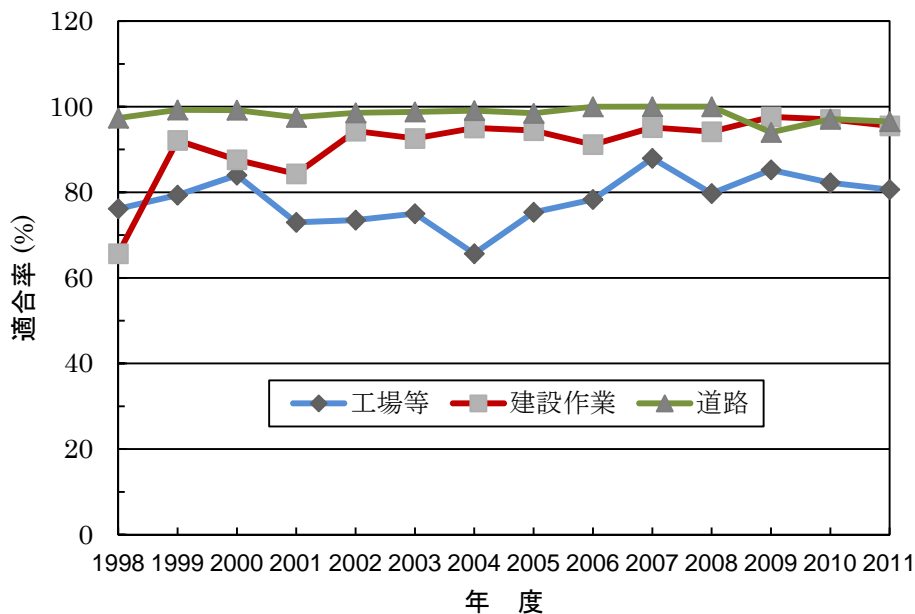


図 3-7 振動源ごとの基準適合率の推移

【参考文献】

- [1] 例えば：<http://ja.wikipedia.org/wiki/公害病>
- [2] 例えば：<http://ja.wikipedia.org/wiki/公害対策基本法>
- [3] 時田保夫：振動規制法－あの頃とこれから－、騒音制御、34 巻、2 号、p.151－156、(2010)。
- [4] 日本騒音制御工学会編振動法令研究会：振動規制の手引き、p.151。(2003)。
- [5] 公害防止の技術と法規編集委員会編：新・公害防止の技術と法規 2013〔騒音・振動編〕、pp.186,187,191,196,197～198,202、(2013)。
- [6] 公害防止の技術と法規編集委員会編：新・公害防止の技術と法規 2013〔騒音・振動編〕、p.382、(2013)。
- [7] 振動規制法施行状況調査、環境省
- [8] 国松直・平尾善裕・松本泰尚・北村泰寿：公害振動評価に関わる諸問題と今後の対応、騒音制御、35 巻、3 号、pp.271～278、(2011)。

－第4回 振動の基礎：振動の測定方法と対策方法－

独立行政法人 産業技術総合研究所 国 松 直

1 はじめに

振動の測定には、①振動規制法に基づいて規制基準との適合状況を調べるために工場・事業場、建設作業及び道路沿道での測定と②振動の実態把握、対策検討のための測定などがあります。今回はこれらの測定方法について述べるとともに、振動苦情が発生した場合の対応、対策等についても解説します。

騒音シリーズに記載されていた「環境基準に基づく測定方法」については、振動に対する環境基準が設定されていませんので、それに対応する記述はありません。

2 振動の測定方法

2.1 振動規制法に基づく測定方法

この測定方法は、振動規制法及び振動規制法施行規則や JIS Z 8735:1981（振動レベル測定方法）に従って行われます。

(1) 測定器

振動規制法施行規則において、振動の測定は、計量法第 71 条の条件に合格した振動レベル計を用いることと記述されており、計量法における特定計量器である振動レベル計は、特定計量器検定検査規則第 21 章振動レベル計において、検定され、性能保証されています。

規則内第一節検定、第一款構造に係る技術上の基準、第二目性能（第八百五十一条—第八百六十四条）に記載の性能の項目として、表示機構／ピックアップ／出力端子／環境に対する安定性／周波数特性／横感度／動特性／実効値特性／過大入力特性／目盛標識誤差／レンジ切換器／自己雑音など示されています。

また、上記の JIS 規格においても、「JIS C 1510 : 1995（振動レベル計）に定める振動レベル計を用いて、公害に関連する地面などの振動レベルを測定する方法について規定する」と記述されていますので、測定器としては振動レベル計を用いなければいけません。

(2) 振動の測定

振動規制法及び振動規制法施行規則において、振動の測定に関しては、

- ・工場・事業場：計量法第 71 条の条件に合格した振動レベル計を用い、鉛直方向について行うものとする。この場合において、振動感覚補正回路は鉛直振動特性を用いることとする。
- ・建設作業：同上

・道路：同上及び当該道路に係る道路交通振動を対象とし、当該道路交通振動の状況を代表すると認められる1日について、昼間及び夜間の区分ごとに1時間当たり1回以上の測定を4時間以上行うものとする。

と記載されています。

(3) 測定方法

また、上記の JIS 規格には、適用範囲／測定条件（外圍条件、暗振動）／測定点の選定／測定器の使い方（振動ピックアップの設置方法、測定方向、振動感覚補正回路の使い方、測定レンジの選び方、記録機器の選定）／指示の読み方、整理及び表示方法が記載されています。

a) 測定点の選定

上記 JIS 規格では、「測定の目的に応じて、測定点の位置及び数を選定する。」と記載されていますが、振動規制法及び振動規制法施行規則において、測定場所は、

- ・工場・事業場：特定施設を設置する工場及び事業場の敷地の境界線
- ・建設作業：特定建設作業の場所の敷地の境界線
- ・道路：道路の敷地の境界線

と、具体的に記載されています。

実際の現地では敷地の境界線で測定ができない状況もあると思われます。その場合には、敷地の境界線を挟んで工場・事業場の中から敷地外へ側線を定め、その側線上で測定し、敷地境界での振動レベルを推定することも行われています。

測定点の選定に当たっては、現地の状況を調査し、臨機応変に対応することが重要で、それらの状況及び対応内容は調査結果に記載しておくことが必要です。

b) 測定方向

上記 JIS 規格では、「測定時における振動ピックアップの受感軸方向を、原則として鉛直（Z）及び互いに直角な水平2方向（X，Y）の3方向に合わせ、明示する。」とあります。振動の規制に関する測定では鉛直 Z 方向の測定のみですが、振動が騒音と異なり大きさと向きを持つことから、振動ピックアップは直交3成分に分解して、それぞれの軸毎に振動を計測する構造になっています。直交3成分のうち、1成分は鉛直方向（Z 方向）になりますが、直角な水平2方向についての取り方については特に定められていません。振動源を対象とした測定では、水平の1方向を振動源方向とすることが多いようです。その他、方位方向、建築物の方向、振動源の主運動方向に合わせる取り方もありますので、水平方向をどの方向に取ったか、結果の表示の際にその方向を明示しておく、考察時に有用な情報として使用できることもあります。

振動レベルの測定時には、測定方向に対して、Z 方向は振動感覚補正回路の鉛直特性を、X，Y 方向は振動感覚補正回路の水平特性を使うことに注意が必要です。

2.2 振動影響実態把握のための測定方法

振動規制法では、上記のように振動発生源の敷地境界線上の地盤における鉛直方向の振

動を測定し、その大きさを規制基準と比較しています。しかし、振動影響を受ける側は通常家屋のような建築物内で対象となる振動を感じることであり、敷地境界線上とは異なる大きさの振動に暴露されています。また、家屋内を伝搬する振動は、同じ公害であっても騒音などとは異なり、家屋構造上の共振現象すなわち家屋固有の振動増幅特性の影響によって、家屋外（地盤面）よりも家屋内（床面）での振動が大きくなる場合があることが知られています[1]。また、その場合に鉛直方向の振動レベルよりも水平方向の振動レベルが大きくなることもあります。

したがって、地盤面での鉛直方向振動のみを測定しても、家屋内での振動暴露実態を把握することは困難であり、現在の振動規制法による規制と振動感覚との間の乖離を生じさせている一因とも考えられます。

そのため、今まで振動の実態調査のための測定が数多く行われてきていますが、その測定方法は実施者毎にばらばらで相互比較、検討が難しいデータが事例的に蓄積されてきたように思います。そこで、日本騒音制御工学会、平成 20 年度環境省請負業務で作成された振動測定マニュアル(案)をもとに、家屋内部で苦情者が暴露されている振動特性などのデータを統一的に収集、蓄積するため、工場・事業場、建設作業（解体工事を含む）、道路交通（トンネル構造区間を除く）及び鉄道（トンネル構造区間を除く）を対象として振動源別に振動測定マニュアル（案）が整備されており、以下の URL からダウンロードできます。

http://www.ince-j.or.jp/04/04_page/04_3.html

以下では、上記振動測定マニュアル（案）について、概説します[2]。なお、測定は、JIS C 1510：1995（振動レベル計）及び JIS Z 8735:1981（振動レベル測定方法）に準拠して行うことを前提としています。

a) 振動源における測定点

(1) 工場・事業場

固定振動源では、振動源の数に係らず、家屋への影響が明確な振動源の中心から 1 m 以上 5 m 未満、移動振動源や家屋への影響が不明確な振動源では、敷地の家屋側の境界線に設置する。

(2) 建設作業（解体工事を含む）

固定振動源、移動振動源に係らず、敷地の家屋側の境界線に設置する。

(3) 道路交通（トンネル構造区間を除く）

家屋側の車道端（車道と歩道の境界）に設置する。高架橋、盛土、掘割などで車道端に設置できない場合には、道路境界に設置する。

(4) 鉄道（トンネル構造区間を除く）

新幹線では、家屋側の線路中心線から 12.5 m、在来線では、6.25 m に設置する。

b) 地盤伝搬における測定点

(1) 工場・事業場

振動源中心又は敷地境界から受振家屋方向へ 40 m 程度の範囲（例えば、5 m, 10 m,

20 m, 40 m など) に配置する。

(2) 建設作業 (解体工事を含む)

敷地境界から受振家屋方向へ 40 m 程度の範囲 (例えば、5 m, 10 m, 20 m, 40 m など) に配置する。

(3) 道路交通 (トンネル構造区間を除く)

道路と直交方向に、家屋側の車道端又は道路境界から 40 m 程度の範囲 (例えば、5 m, 10 m, 20 m, 40 m など) に配置する。

(4) 鉄道 (トンネル構造区間を除く)

新幹線では、家屋側の線路中心線から線路直交方向に 100 m 程度の範囲 (例えば、25 m, 37.5 m, 50 m, 100 m など)、在来線では、50 m 程度の範囲 (例えば、12.5 m, 25 m, 37.5 m, 50 m など) に配置する。

c) 受振部 (家屋) における測定点

各振動源共通とし、家屋の床面、基礎、近傍地盤及び敷地境界に配置する。

(1) 家屋内 (床面) の測定点

居住空間 (居間、食堂、寝室等) を対象として、2 点以上の測定点を設ける。まず、居住者が日常生活を営む上で、振動によって最も迷惑を受けているところ、あるいは振動を最も不快に感じているところに測定点 A を設ける。

次に、測定点 A に次いで迷惑を受けている、あるいは振動を不快に感じているところに測定点 B を設ける。また、2 階建て以上の家屋では、測定点 A と異なる階において最も迷惑を受けている、あるいは振動を最も不快に感じているところに測定点 B を設置する。

(2) 家屋基礎の測定点

家屋中心から振動源方向にある基礎上に設ける。戸建住宅では、1 階にある玄関のたたきや土間打ちコンクリートのベランダ部分など、集合住宅では、1 階のエントランスなど、構造的に基礎と一体化していると考えられるコンクリート部分に測定点を設ける。

(3) 家屋近傍地盤の測定点

家屋中心から振動源方向にある地盤上で、家屋基礎から 1 m に設ける。基礎による地盤拘束の影響を受ける可能性はあるが、家屋に対して入力される振動を測定する基準点とする。

(4) 敷地境界の測定点

工場・事業場及び建設作業では敷地境界、道路交通では、道路境界に設ける。鉄道では、敷地境界ではなく「a) 振動源における測定点」と同じ測定点とする。

d) 振動ピックアップの設置条件

(1) 地盤における設置条件

コンクリート又はアスファルト上とする。止むを得ず表面が軟弱な土の上や草地に設置する場合には、ピックアップ支持具の利用を推奨する。

(2) 家屋内 (床面) における設置条件

フローリングなどの硬い床面に設置する。畳や絨毯がある場合には、一時的に取り除き、

座板面に設置する。不可能な場合には、同階において測定可能なところを選択する。

e) 測定方向

(1) 振動源及び地盤伝搬における測定方向

振動源方向（道路及び鉄道では、それらと直交方向）を Y とし、Y 方向に直交する方向を X とする。また、鉛直方向を Z とする。

(2) 受振部（家屋）における測定方向

家屋と振動源方向が直交関係にない場合を想定し、振動源方向に近似している家屋の軸方向を Y とし、Y 方向と直交する方向を X とする。敷地境界及び近傍地盤においても家屋の軸方向に合わせる。また、鉛直方向を Z とする。

f) 振動データの収録方法

(1) 測定器と測定量

振動レベル計とデータレコーダを使用し、振動源と地盤伝搬の測定点を同時測定する。受振部（家屋）においても、敷地境界、近傍地盤を含めて同時測定する。測定量は、3 方向の振動加速度とし、時系列波形をデータレコーダに記録する。

(2) 測定時間（測定本数）

工場・事業場では、1 時間以上の連続測定を行う。周期的な振動では 3 周期を測定する。

建設作業では、最も大きな振動を発生すると考えられる作業を 30 分以上測定する。

道路交通では、近接車線を走行する重量車を 10 車両以上記録できるまでとする。

鉄道では、単線の場合には 10 列車以上、複線の場合には各 10 列車以上、複々線の場合には各 5 列車以上を記録できるまでとする。

g) 測定状況の記録

測定中は、工場・事業場の稼働状況、建設機械等の作業状況、道路を走行する大型・中型車両、通過列車の情報等をビデオ記録する。また、振動源と測定点間の平面上の位置関係（道路では道路構造図、鉄道では軌道構造図を含む）を詳細に記録する。

家屋内では、測定点の位置関係を示す平面図と立面図を詳細に記録する。その他、家屋構造、築年数、地域の土質柱状図や表層地質図等の詳細な情報を収集する。

図 4-1 は、道路交通を例とした測定点の配置を示しています。

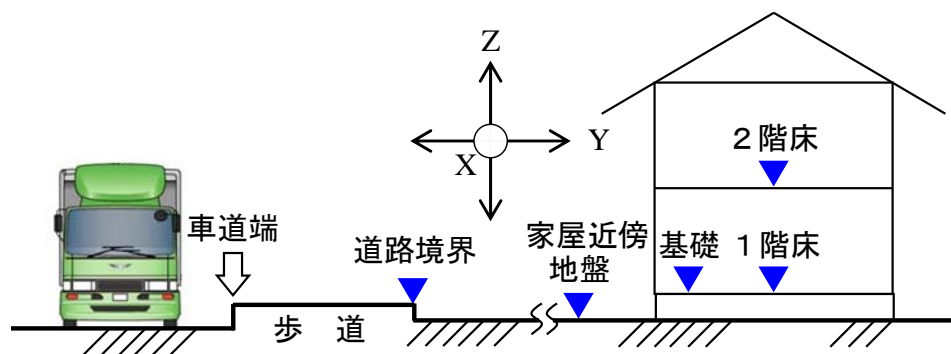


図 4-1 道路交通を例とした測定点の配置

2.3 振動ピックアップの設置に関する注意

振動ピックアップの設置条件については、JIS 規格（振動レベル測定方法）では、「原則として平坦なかたい地面など（例えば、踏み固められた土、コンクリート、アスファルトなど）に設置する。」と記載されています。また、振動測定マニュアル（案）でも、「d) 振動ピックアップの設置条件」で、地盤と家屋内（床面）に分けて設置条件を記載しています。

この理由として、やわらかい地面の上や畳や絨毯のような緩衝物の上に振動ピックアップを設置した場合、実際の振動より大きく測定されることによります。これは設置共振と呼ばれ、このような現象が生じる場所での測定では振動の正しい大きさを測定することができないので避けるようにしないとはいけません。

図 4-2 に実験データ[3]ではありますが、種々の設置状態での振動ピックアップの鉛直方向のレスポンスを示しています。

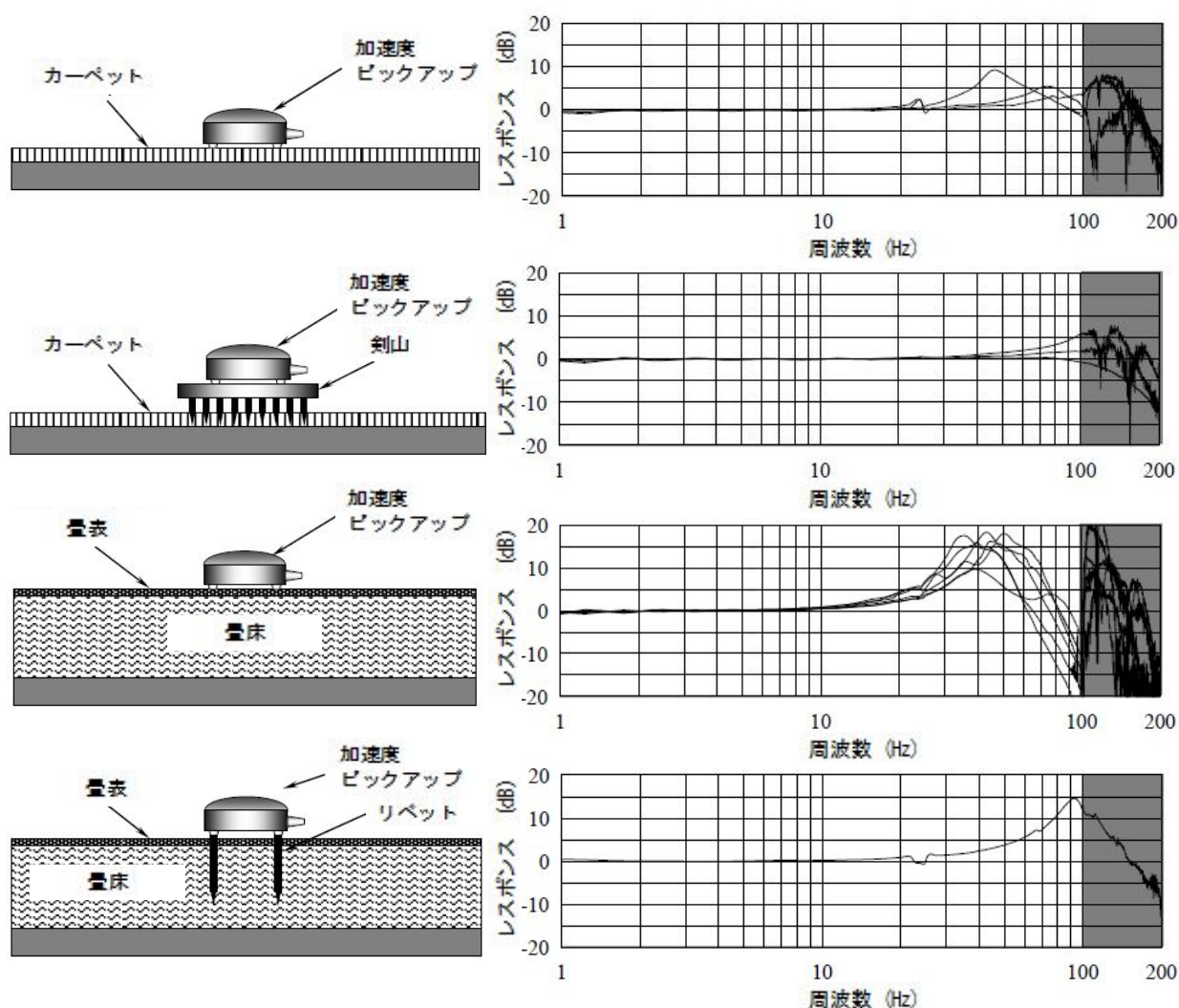


図 4-2 緩衝物が振動ピックアップの出力に及ぼす影響
(カーペット ; 3 種類, 畳 : 6 種類)

図 4.2 の右図のレスポンスは入力振動の大きさ（入力信号）に対する出力信号の比を表したもので、その比が 1 であれば、レスポンスは 0 dB となり、入力信号と出力信号は等しいことを意味しています。従って、測定対象の周波数範囲（1~80 Hz）において、0

dB が望ましいわけですが、振動ピックアップの設置状況がその出力結果に影響を及ぼすことが分かります。図ではレスポンスがプラス側にピークを持つように表示されているので、入力信号より出力信号が大きいことを示しています。

参考文献[2]、[4]に測定事例が紹介されており、結果の整理方法も含めて参考になります。

3 振動の分析方法

振動レベルに変換される前の物理現象としての振動は、加速度計を振動ピックアップとして使用しています。この振動ピックアップの出力は、振動感覚補正を行わないときには加速度の時刻歴（加速度波形）であり、時間に伴い変動し、その変動は加速度振幅を意味します。この不規則な振動波形は正弦波形を加え合わせるにより再現されます。逆に不規則な振動波形に演算処理を施すことにより、横軸振動数～縦軸振動の強さとして表現することができ、その特性は周波数特性（スペクトル）と呼ばれています。ある正弦波形の場合には、特定の振動数のみに振動の強さを持つので、線スペクトルと呼ばれますが、不規則な振動波形の場合には、振動数が広く分布するので連続スペクトルと呼ばれます。演算処理によりこのような周波数毎のスペクトルを求めることがスペクトル分析（解析）、周波数分析（解析）です。

分析方法には大きく定比帯域幅分析器と定周波数幅分析器の2つに分かれ、目的により使い分けられています。定比帯域幅分析器は、主に振動の感覚量評価に対して使用され、定周波数幅分析器は、主に物理的な原因の究明と対策を目的として使用されます。

3.1 定比帯域幅分析器

振動波形の分析の場合、対象とする振動数範囲が狭いので、通常 1/3 オクターブバンド分析が行われ、主に感覚量評価に用いられています。分析器の性能は、JIS C 1513:2002（音響・振動用オクターブ及び 1/3 オクターブバンド分析器）で規定されています。また、その中のフィルタ特性については、JIS C 1514:2002（オクターブ及び 1/N オクターブバンドフィルタ）で規定されています。ちなみに、オクターブとは、周波数比が 2 倍のことを意味し、オクターブバンドとは、ある周波数を中心にして上限と下限の周波数比が 1 オクターブとなる周波数の帯域（バンド）のことで、その中心の周波数をオクターブバンド中心周波数と呼んでいます。公害振動では、中心周波数 80Hz までを対象としています。表 4.1 にバンドパスフィルタの中心周波数を 160Hz まで示します。

ちなみに、振動レベル計の鉛直特性、水平特性の基準レスポンスは 1/3 オクターブバンドパスフィルタの中心周波数に対して規定されています。

JIS 規格において、基準周波数は 1000Hz と規定されています。1000Hz を中心周波数としたとき、帯域幅は 710Hz～1.4kHz、500Hz の中心周波数では、355Hz～710Hz であり、この種類の分析器では、中心周波数に比例してフィルタ幅が変動します。具体的には、JIS C 1514:2002 で規定されたバンドパスフィルタを通して、各々の帯域毎の振動の強さを求めます。

表 4.1 1/1 オクターブと 1/3 オクターブバンドパスフィルタの中心周波数

中心周波数(Hz)	1/1 オクターブ	1/3 オクターブ	中心周波数(Hz)	1/1 オクターブ	1/3 オクターブ	中心周波数(Hz)	1/1 オクターブ	1/3 オクターブ
0.8		○	5		○	31.5	○	○
1	○	○	6.3		○	40		○
1.25		○	8	○	○	50		○
1.6		○	10		○	63	○	○
2	○	○	12.5		○	80		○
2.5		○	16	○	○	100		○
3.15		○	20		○	125	○	○
4	○	○	25		○	160		○

定比帯域幅分析器では、分析するバンド幅の上限と下限の周波数の比が、帯域によらず一定であるので、低周波帯域ではバンド幅が狭く、高周波帯域ではバンド幅が広くなります。周波数軸を対数目盛で表示すると、バンド幅が等間隔になります。

3.2 定周波数幅分析器

FFT（高速フーリエ変換）分析器に代表される定周波数幅分析器では、ある時間間隔（サンプリング間隔）で離散化された加速度波形を演算処理（高速フーリエ変換）で定幅分析し、ある周波数の幅の間にその成分がどれだけあるかを示す分析方法のもので、どの周波数帯域においてもバンド幅は同じになります。加速度波形をある時間間隔の数値データとしてサンプリングするサンプリング間隔は、知りたい周波数の周期に対して十分な数が得られるように設定する必要があります。

この分析方法は、一般に $1/N$ オクターブバンド分析より周波数成分を細かく分析することができるので、主に振動現象を物理的に把握し、対策を主目的として使用されます。分析結果から振動の卓越振動数を知ることができ、その振動数から振動源の特定に有効に活用され、どの振動数を対象に対策を行えば効果的か検討することが可能となります。

$1/N$ オクターブバンド分析結果を用いて対策について検討することも可能ですが、中心周波数が決められているので、回転機械などの回転数に対応するような周波数を細かく求めることはできません。

4 振動の対策方法

公害振動は、基本的には振動源としての加振力が地盤振動を発生させ、地盤を伝搬した後、家屋基礎から入力し、家屋が振動することにより知覚され、人体反応が生じるという過程を経て、苦情の有無に至ります。

すなわち、苦情を発生させないためには、振動源から受感した振動に対する人体反応までの流れの中で、主に以下のような項目を検討する必要があります。

振動源の加振力／加振力から地盤振動が発生するメカニズム／地盤の振動伝搬／
家屋近傍地盤から家屋基礎への入力メカニズム／家屋の振動特性／

構造部材の振動特性／人体知覚特性／人体反応

上記「人体反応」には、以下の影響要因も挙げられます。

表 4.2 人体反応に及ぼす影響要因

生活環境特性	個人履歴	マンション等から戸建て住宅への転居など
	生活状況	労働、勉強、休養、睡眠、買い物
	時間	朝、昼、夕、夜、深夜、早朝
	地域	住居専用、住居、商業、準工業、工業、文教

上記の流れから、振動対策としては、振動源対策、伝搬経路対策、受振部対策があり、それぞれにハード的、ソフト的な視点での対策が考えられます。機械から発生する振動を対象に、表 4.3 のような振動防止技術の概要[5]が示されています。

表 4.3 機械振動を対象とした振動防止技術の概要

	大分類	主対策方法	対策方法	手段
ハード的な対策	振動源対策	機械そのものでの対策	加振力の低減	機械選定(加振力の小さい機械への変更)
			加振力の低減	釣り合いをとる
		振動絶縁	弾性支持	緩衝材
				ばね
		その他の振動源対策(付加質量等)	基礎対策	重(軽)量化
				架台
	動吸振			制振
	伝搬対策	距離減衰	距離を離す	配置の変更
		地中堀(溝)		空・緩衝材
	受振部対策	構造改良・絶縁等	共振を外す(質量付加等)	構造の補強等
ソフト的な対策	その他	作業時間・作業方法等の変更	稼働の変更	
		挨拶	説明	話し合い

振動源毎の個別の対策については、次回以降で解説して頂くこととして、ここでは全体的な内容について概説したいと思います。

4.1 ハード的な振動対策方法の基本

a) 振動源対策

公害振動では、地盤の加振に対して、

- 1) 直接加振力を地盤に伝達する場合
建設作業、平面道路交通、(鉄道)
- 2) 構造物を介して加振力を地盤に伝達する場合
建設作業、高架道路交通、工場機械、(鉄道)

に分けられます。

地盤を加振する力は公害振動を発生させる原因であり、公害振動対策としては、この加振力を低減させることが重要です。表 4.3 は機械振動を対象とした振動防止技術の紹介ですが、対策方法がかなり専門的であることが分かります。振動源対策では加振力低減等に対して振動源毎にいろいろな方法が検討されています。

b) 伝搬対策

地盤内の波動の伝搬に関しては、発生させられた波動の特性を考慮して低減対策を検討する必要があります。波動は一般的に距離によりエネルギーが幾何的に減衰するので、振動源と受振部との距離を可能な限り離すことが、安価で有効な方法です。その他、地盤振動を遮断するという考えによる対策（防振壁(溝)）も行われており、効果は確認されていますが、正確な対策効果を見積もることは難しいようです。

また、地盤振動の特性は地盤伝搬中に振幅のみならず振動数なども変化することが知られており、地盤振動の振動数は家屋の振動特性に大きく影響を与えるとともに、人体の知覚特性にも大きく関係することから、伝搬対策の有り無しに関わらず、注意しておく必要があります。

c) 受振部対策

地盤振動が構造物に入力されれば、構造物は構造物の特性を持って応答（振動）します。構造物には構造物毎に固有振動数という揺れやすい振動数を有しているので、入力振動の卓越振動数と共振しないように気をつけることが重要です。単純には構造物の重量や剛性を変化させることにより固有振動数を変化させることができますが、実際には簡単に対応できるものではありません。

また、受振部（構造物周辺や基礎）における対策により、入力振動を低減、遮断するという考えもあります。

4.2 振動源別の振動対策方法の概説

工場機械については、すでに表 4.3 に示したので、以下では道路交通振動対策、建設作業振動対策の概要を示します[6]。

a) 道路交通振動対策

道路交通振動の場合、自動車（移動荷重）が凹凸のある路面を走行することにより生じる力が加振力になります。表 4.3 との対比では表 4.4 のように整理されます。

表 4.4 道路交通振動対策の概要

対策項目		対策内容	対策意図	
発生源	高架	凹凸、段差の解消	路面の平滑化，ノージョイント化	加振力の低減
		TMD	桁への動吸振器(TMD)の設置	反力による桁の振動低減
		地盤改良	基礎の有効質量の増大	加振力の低減

			基礎から地盤への振動伝搬の低減	振動伝達率の低減
	一般	凹凸、段差の解消	路面の平滑化	加振力の低減
		地盤改良	路盤構造の改変	加振力・振動伝達率の低減
			支持地盤の改良	振動伝達率の低減
伝搬経路	全般	遮断壁	空溝・弾性体壁の設置 剛体・複合壁の設置	振動伝達率の低減
受振部	高架	TMD	構造物への動吸振器（TMD）の設置	反力による構造物の振動低減
		剛性補強	構造物への筋交い等の設置	固有周期変更による応答倍率の低減
	一般	基礎改良	防振・免振基礎、布基礎など	振動伝達率の低減
		地業	WIB、土のうの利用など	

b) 建設作業振動対策

建設作業振動対策の概要は、表 4.5 のように整理されます。

表 4.5 建設作業振動対策（ハード的な対策）の概要

対策方法		対策内容
振動源対策	加振力の低減	現場条件に合った工法、機械の選定（最適な工事進捗の実現） 低振動型機械の採用（発生振動の低減） 適切な機械操作（適切な運転、走行速度の実現） 機械の制振、防振（不要な機械振動の低減）
	地盤への振動伝達の低減	機械の防振支持（廃タイヤ、防振ゴムなど） 路面、地盤面の平滑化（不陸発生防止、走行振動の低減）
伝搬経路対策	振動伝達率の低減	空溝（防振溝） 弾性体壁（ガスクッション、廃タイヤ、EPS など） 剛体壁（コンクリート、鋼矢板など） 複合壁（剛体と弾性体の複層構造）
受振部対策	建物への振動伝達の低減	建物周辺の地盤改良（土のう、WIB など） 建物基礎の剛性増加など 建物の制振（家屋の補強など）

また、ソフト面における対策として、表 4.6 のような内容が挙げられます。

表 4.6 建設作業振動対策（ソフト的な対策）の概要

対策方法	対策内容
振動源対策	<ul style="list-style-type: none"> 建設機械の過度な出力の制限 建設機械オペレーターの教育 建設現場内の平坦化 建設機械の稼働時間の抑制 夜間作業の中止など
伝搬経路対策	<ul style="list-style-type: none"> 建設機械の稼働範囲の徹底 運搬車両の往来通路の制限 振動発生源と受振部の位置関係

受振部対策	<ul style="list-style-type: none"> ・継続的な管理測定データの公表 ・工法変更スケジュールの周知徹底 ・一時移転（短期間で問題となる戸数が少ない場合など）
周辺住民との対話	<ul style="list-style-type: none"> ・掲示板やチラシなどによる施工内容の周知 ・挨拶、訪問、巡回等による直接対話 ・現場責任者等による工事説明会や見学会の実施

建設作業振動対策に関しては、環境省が平成 16 年度に全国の地方自治体に配布した、「よくわかる建設作業の振動防止の手引き ～振動低減へのアプローチ～」[7]も参考になると思います。

4.3 日本建築学会 戸建て住宅における環境振動対策事例

日本建築学会において戸建て住宅を対象に環境振動対策事例が 25 事例ほど収集され、以下の URL で公表されています。

http://news-sv.aij.or.jp/kankyos17/WG4_house/AIJ_EVWG4index.html

また、この URL ページにおいて、各事例をもとに、振動問題に対して居住者と合意形成に至るまでの経緯がわかるように、作成された合意形成フローも掲載されています。

対策には事前対策と事後対策がありますが、苦情が生じないためには事前対策においては、戸建て住宅建築前に家屋内振動を精度良く予測し、その結果を建て主との合意形成（ソフト的な対策に位置づけ）のもとに設計に反映（ハード的な対策に位置づけ）することが求められています。しっかりとした合意形成のもとに、事前対策を行うことによって、苦情を未然に防止することも可能と思われます。もちろん、苦情発生後の事後対策においても建て主との十分な対話（リスクコミュニケーション）が、合意形成(苦情解決)に至る早道であると思われます。

5 次回以降について

今まで、

第 1 回 振動苦情処理と必要な振動に関する知識

第 2 回 振動の基礎：振動の発生と伝搬

第 3 回 振動の基礎：振動の影響と評価・規制方法

第 4 回（今回） 振動の基礎：振動の測定方法と対策方法

を掲載致しました。

次回以降（第 5 回～第 7 回）は、振動源を分けて以下の方々に執筆をして頂きます。

第 5 回 建設作業振動

佐野昌伴、一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所

第 6 回 交通振動（新幹線、鉄道、道路）

横島潤紀、神奈川県環境科学センター

第 7 回 歩行振動（内部振動源）

横山 裕、東京工業大学 大学院理工学研究科 建築学専攻

振動シリーズの今までの内容は、主に振動規制法に関連して、振動源が家屋を含む建築物の外部に位置する外部振動源を対象にしていました。その流れで、第5回、第6回は各振動源を対象に、全体的な内容、事例的な内容を解説して頂きます。また、第7回では建築物内部に振動源がある場合について、集合住宅において苦情の原因となることの多い歩行振動を主体に解説して頂きます。

第8回は、振動シリーズの最後として、環境振動問題に対する取り組みの現状について紹介したいと思います。

【参考文献】

- [1] 大竹康宏、上林 正：新幹線軌道近傍に建設された住宅の振動対策、日本建築学会大会学術講概集、pp.319-320、(2001).
- [2] 平尾善裕、横島潤紀、国松 直：地盤振動に起因する家屋振動増幅特性の測定法および事例について、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、pp.49-52、(2009).
- [3] Yasunao Matsumoto, Sunao Kunimatsu, Yoshihiro Hirao, Akinori Yokota : Vibration measurement in residential building for evaluation of ground-borne vibration in living environment, INTER-NOISE 2006, pp.1-8, (2006).
- [4] 平尾善裕、横島潤紀、国松 直：振動測定マニュアル（案）に基づいた測定・分析事例、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、pp.95-98、(2012).
- [5] 公害防止の技術と法規編集委員会編：新・公害防止の技術と法規 2013〔騒音・振動編〕、p.322、(2013).
- [6] (一財)災害科学研究所地盤環境振動研究会：地盤環境振動対策技術マニュアル、(2013).
- [7] 環境省環境管理局大気生活環境室：よくわかる建設作業振動防止の手引き http://www.env.go.jp/air/sindo/const_guide/full.pdf、(2004).
- [8] 大竹康宏・川本聖一・村上剛志・国松 直：戸建て住宅における環境振動対策事例の収集、日本建築学会大会学術講概集、pp.389-390、(2012).

— 第5回 建設作業振動 —

一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 佐野昌伴

1 はじめに

公害振動には、工場、建設作業、道路交通、鉄道等から発生する振動がありますが、建設作業振動は、建設機械の稼働状況、施工・使用方法、土質条件等の諸条件の違いから、他の公害振動に比べて、振動の発生や伝搬のメカニズムが非常に複雑です。

このため、建設作業における振動対策は、騒音対策に比べて技術的対応が難しく、苦情件数も多い傾向にあります。建設作業が始まると、近隣住民は通常的生活では感じない振動を感じるがありますが、この振動が大きくなると「恐怖感」に繋がり、騒音のような「不快感」とは異なった苦情原因となります。

この現状を踏まえ、建設作業振動の特性をご理解いただき、今後の振動対策への活用や、建設工事への理解を少しでも深めていただければ幸いです。

2 建設作業振動の一般的特徴

(1) 公害振動

一般論として、公害振動には以下のような特徴があります[1]。

- 1) 公害振動は、例外を除くと多くは振動源から 10～20m 程度の距離で発生しています。
- 2) 公害振動の主な被害は、地域住民の心理的・感覚的な被害であり、物的影響や振動自体が直接人体に影響を及ぼす事例は少ないです。
- 3) 多くの場合は、公害振動単体ではなく、騒音を伴います。
- 4) 地表面における振動レベルは、水平振動よりも鉛直振動の方が大きく、周波数範囲は 1～90Hz の範囲にあります。

(2) 建設作業振動

上記の公害振動の特徴に加えて、建設作業振動には以下の特徴が見られます。

- 1) 多くは短期的で一過性なものですが、場所の代替性がなく、エネルギーが大きく、集中的かつ衝撃的です。
- 2) 心理的・感覚的影響が主であり、一部に物的被害を生じる事例があります。
- 3) 建設作業振動は、施工方法や建設機械の種類によって大きさが異なるだけでなく、その作業状況や施工条件等によっても大きく変動します。

3 建設作業振動の苦情

3.1 苦情件数の推移

環境省が毎年実施している振動規制法施行状況調査結果をもとに、建設作業振動に着目した過去 10 年間の苦情件数と全苦情件数に占める建設作業振動の割合を図 3-1 に示します。

苦情件数は、平成 18 年度までは増加傾向でしたが、それ以降は 3 年連続で減少に転じ、平成 21 年度は平成 15 年度以前の件数と同程度になっています。しかし、近年は 3 年連続で増加傾向にあり、建設作業振動の苦情割合も 60% 前後の横這いから右肩上昇の傾向が見られ、公害振動の中で最重要視すべき項目となっています。

なお建設投資額は、平成 8 年度以降、右肩下がりの減少傾向が続いており、平成 23 年度の建設投資はピークだった平成 4 年度の 84 兆円に対して約 50% に落ち込んでいますが、建設作業振動の苦情件数は、その傾向とは一致していません。

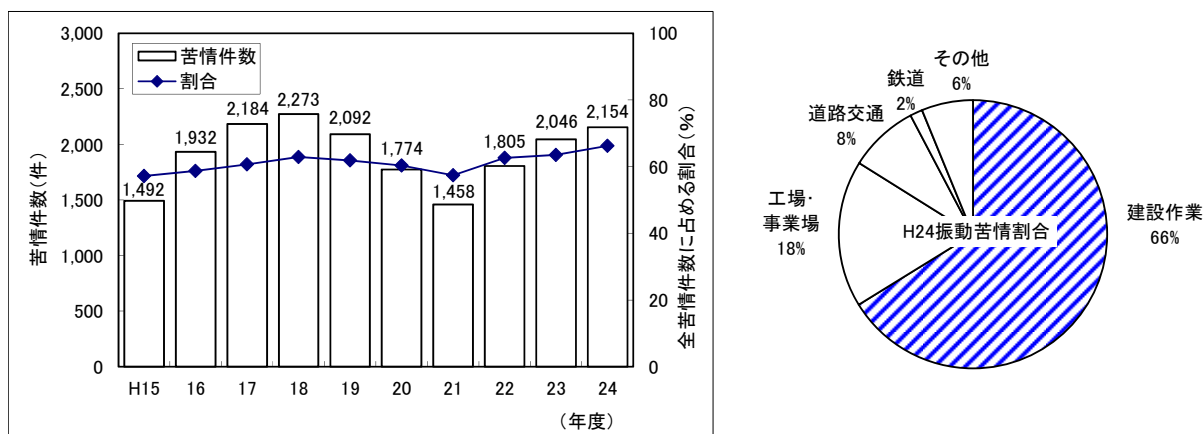


図 3-1 建設作業振動に係る苦情件数の推移と全苦情件数に占める建設作業振動の割合

3.2 振動苦情の実態

環境省水・大気環境局大気生活環境室では、今後の建設作業振動の低減に役立てることを目的に、平成 15 年度及び平成 21 年度を対象に、建設作業振動の苦情の具体的内容を調査し、その成果を「よくわかる建設作業振動防止の手引き[2]」「地方公共団体担当者のための建設作業振動対策の手引き[3]」として公表しています。以下は、この調査結果をもとに建設作業振動の特徴的な事項を説明したものです[4][5]。

(1) 振動苦情の主な要因

苦情の主な要因は、図 3-2 のように振動源の「作業方法、機械運転操作上の問題」及び人体が受ける「心理的・生理的影響」によるものが多く、建物や機械等の物的被害によるものは少ないです。

(2) 振動苦情の対象となる工種・機種

振動苦情の工種は、図 3-3 のように約 65% は解体工事によるもので、中でも建築解体工が圧倒的に多いです。また苦情対象機種は、図 3-4 のように建築解体工に関わるバックホウ（小型バックホウを含む）、ブレーカ、圧砕機が上位を占めています。ただし、アタッチメントの違いだけでベースマシンは油圧ショベル（バックホウ）です。

(3) 発生源から受振点までの距離

振動源位置から振動苦情を訴える場所（受振点）までの距離は、図 3-5 のように 50m 未満の範囲に集中していますが、100m を超える場合もあります。

敷地境界付近での振動レベル実測値は、図 3-6 のように 50dB から 70dB に集中していますが、40dB の振動を感じないレベルでも苦情を訴える場合があります。

(4) 工事敷地境界での振動の大きさ

振動レベルの実測値は、図 3-7 のように 75dB を越えるものは僅かに 2 件（約 2.5%）で、振動規制法の特定制建設作業に関する規制基準値 75dB 以下の振動レベルでも苦情を訴える場合が非常に多いことを示しています。また、人体の振動感覚閾値は 10% の人が感じる振動レベル値で約 55dB とされており、この値の前後から苦情件数も増加しています。

(5) 振動被害の種類

具体的な建物被害は、図 3-8 のように「内外壁等のひび割れ」「建物・柱の傾き」の訴えがあり、これらは敷地境界付近での振動レベルが 50dB 以上です。

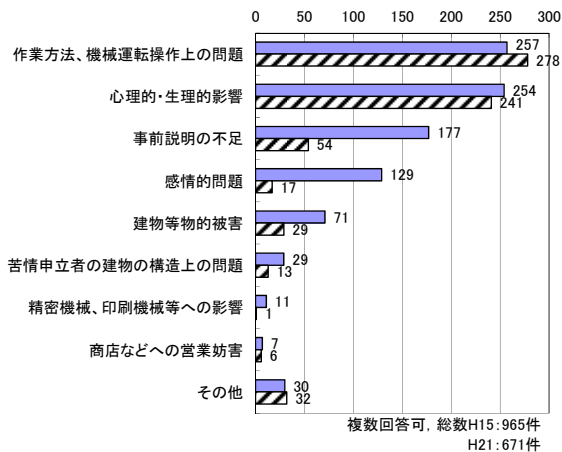


図 3-2 振動苦情の主な要因

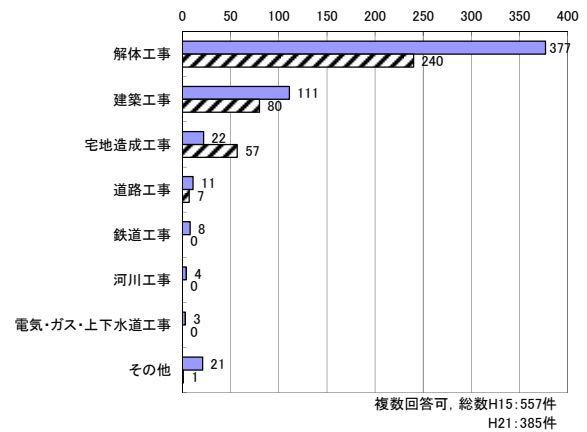


図 3-3 苦情対象工種

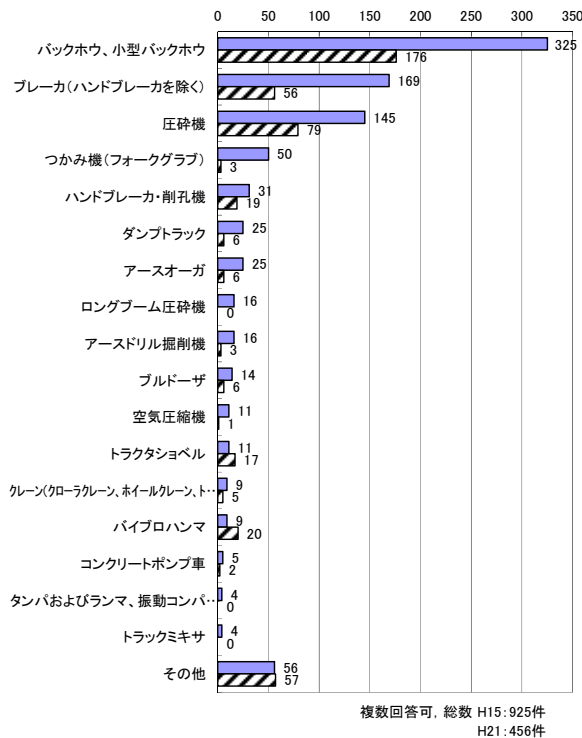


図 3-4 苦情対象機種

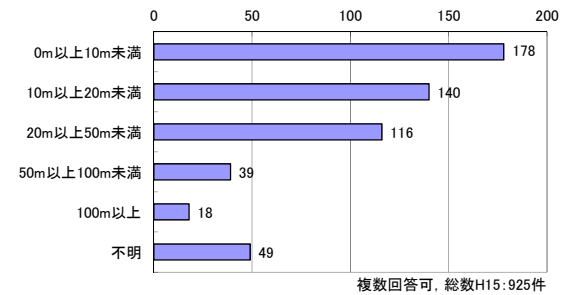


図 3-5 振動源から受振点までの距離

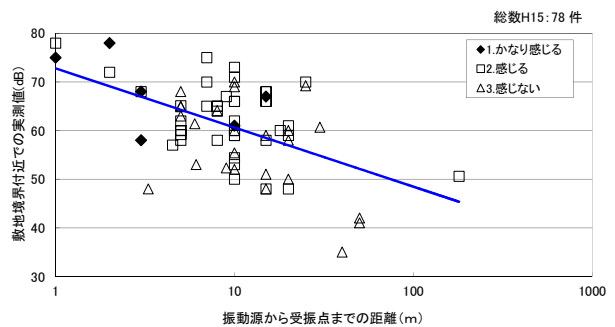


図 3-6 振動源から受振点までの距離と実測値

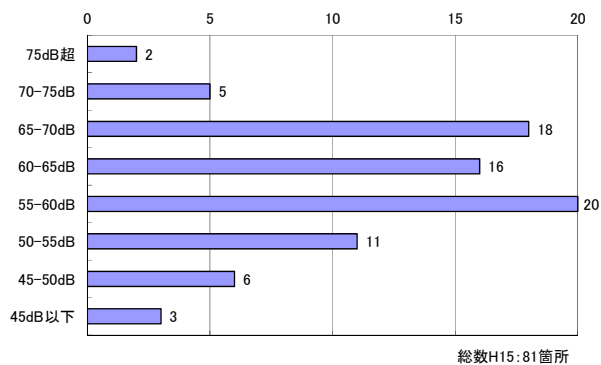


図 3-7 敷地境界付近での実測値

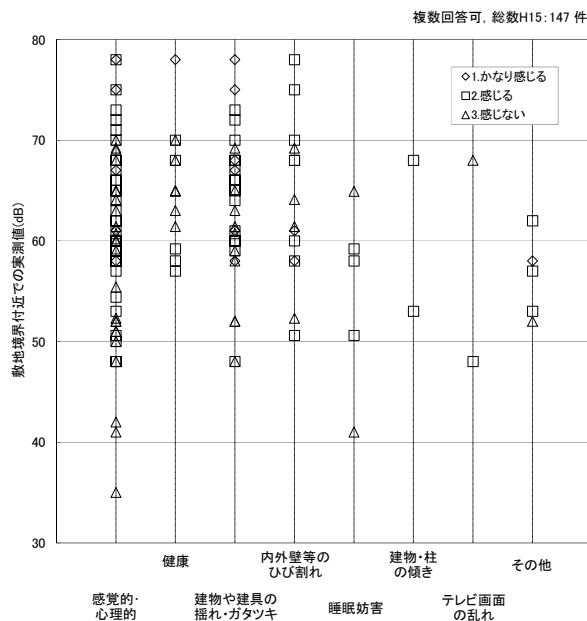


図 3-8 振動の感じ方と実測値

4 建設作業振動の評価

4.1 振動評価に関わる各種要因

受振点における振動影響の評価は、表 4-1 のように振動源、伝搬経路、受振点における各種要因を総合的に考慮した上で判断する必要があります[1][6]。個人や工事の属性など、現実的には把握できにくい要因も含まれます。

また、振動ピックアップの設置方法や、データの整理方法によっても評価が異なることがあります。例えば、草地や柔らかい地面の場合は、振動ピックアップの重量と接地の間に一つの振動系が構成されて設置共振を起こし、本来の振動以上に増幅されることがあります。

建設作業振動の予測や対策が難しいのは、このような多くの要因をすべて考慮する必要があります。さらに、地盤振動が家屋の壁や窓を揺らし、固体伝搬音を発生させる事例があり、騒音苦情の原因が地盤振動である事例もあります。

表 4-1 振動評価に関わる各種要因

振動源の要因	伝搬経路の要因	受振点の要因
<ul style="list-style-type: none"> 建設機械(機種, 質量, 台数, 組合せ等) 作業内容(定置・移動, 速度等) 作業時間(発生頻度) スペクトル特性 作業場所の剛性, 地盤の状態(不陸等) 	<ul style="list-style-type: none"> 距離(幾何減衰) 地盤条件(内部減衰) 土質の層構造 溝や埋設物等 	<ul style="list-style-type: none"> 家屋(住宅構造, 築年数, 居住階)等の振動増幅量 個人の属性(年齢, 性別, 性格等) 工事の属性(公共性, 利害関係) 暗振動(他の振動源の影響)

4.2 振動の発生形態

(1) 振動の時間変動特性

建設工事の振動測定要領(案)では、JIS Z 8735-1981（振動レベル測定方法）等を踏まえ、建設作業振動を以下のように分類しています[7][8]。

- ① 定常振動：レベル変化が小さく、ほぼ一定とみなされる振動
- ② 変動振動：時間的にレベルが不規則かつ大幅に変動する振動
- ③ 間欠的振動：間欠的に発生し、継続時間が数秒以上の振動

図 4-1 は、バックホウの履帯端部から 5 m 離れた地点において、数種類の運転条件のもとで発生する振動レベルを測定した結果です[1]。振動レベル波形のうち、「定常振動」はアイドリングの状態（定置型・静的運転状態）、「変動振動」は掘削－右 90° 旋回－排土－左 90° 旋回の繰り返し作業（定置型・動的運転状態）、「間欠的振動」は前進－後進の繰り返し作業（移動型・動的運転状態）、「衝撃振動」（間欠的振動に含まれる。）はバケットによる地盤の打撃作業（定置型・動的運転状態）です。

同じ使用機械でも、作業内容により振動の種類が異なるように、同じ工種でも施工サイクル（作業内容）が変わると振動の時間変動特性は異なります。

測定した振動の大きさを、振動規制法の特定建設作業に関する規制基準値と対比して評価するような場合は、観測した振動が前掲のどの種類に該当するかを判断して読み取る必要があります。

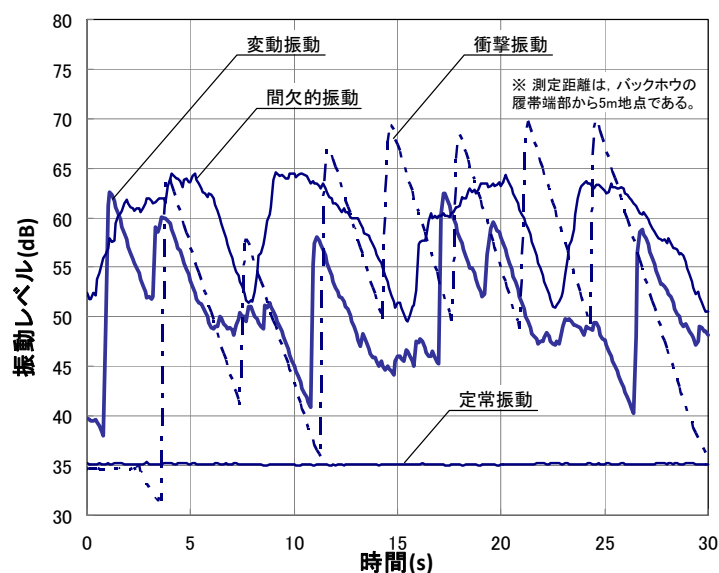


図 4-1 建設作業振動の種類(振動レベル変動例)

(2) 主たる工種と使用機械

建設作業振動は、表 4-2 のように施工方法（工種）、使用機械（機種）、ユニット（作業単位を考慮した建設機械の組合せ）によって発生状況が変わります。ゴシック体は一般的に振動発生量が多い機種又は作業内容を示しています[1]。

建設工事は、さまざまな工種から構成され、その工種では複数の機械が使用されます。建設機械は、周辺の環境条件等を考慮して、現場に適合したものを選定しますが、その振動の種類や大きさなどの特性が変わるので、選定には留意が必要です。

なお、表 4-2 は道路環境影響評価の技術手法[9]のユニット別基準点振動レベル（原単位）を参考に作成していますが、基準点振動レベル等を算出した実際の測定内容とは異なる点があるので注意が必要です。ここでは数値を示しませんが、基準点振動レベルはユニットの稼働位置から 5 m 離れた地点を基準点として振動レベルを設定したものです。

表 4-2 主たる工種と使用機械の一覧

工 種	細 別	主な使用機械名 (機種名)	主たる作業
土工	掘削工事	ブルドーザ	掘削押土
		バックホウ(ブレーカ含)	打撃、掘削、積込
		クラムシエル	
		クローラドリル	削孔
土工	盛土工事(路体、路床)	ブルドーザ	掘削押土
		タイヤローラ、振動ローラ	締固め
土工	路床安定処理工事	モータグレーダ、ブルドーザ	敷均し
		スタビライザ、バックホウ	混合
		トラッククレーン	固化材散布
		タイヤローラ	締固め
共通工	サンドマット工事	ブルドーザ[湿地]	敷均し
共通工	パーチカルドレーン工事、締固改良工事	クローラ式サンドパイル打機	打設
		トラクタショベル	砂投入、運搬
		空気圧縮機	
		発動発電機	
共通工	固結工事	ボーリングマシン	削孔
		粉体噴射攪拌機	打設
		超高压・薬液注入ポンプ	噴射
		空気圧縮機	
		発動発電機	
共通工	法面吹付工事	吹き付け機	吹付
		空気圧縮機	
基礎工	既製杭工事	クローラ式杭打機	打撃(打込み)
		アースオーガ中堀機	掘削・打撃
		ホイールクレーン、クローラクレーン	吊込み、吊上げ
		空気圧縮機	
		発動発電機	
		電気溶接機	
基礎工	鋼管矢板基礎工事	クローラ式杭打機	矢板打込み
		クローラクレーン	吊上げ
基礎工	場所打杭工事	オールケーシング掘削機	掘削、土砂搬出
		リバースサーキュレーションドリル	
		クローラ式アースオーガ	
		ダウンザホールハンマ	掘削・打撃

工種	細別	主な使用機械名（機種名）	主たる作業
		クローラクレーン	吊込み
		バックホウ	掘削土処理
土留・仮締切工	土留・仮締切工事	バイブロハンマ	矢板打込み
		クローラクレーン、ホイールクレーン	吊上げ
		油圧式杭圧入引抜機	圧入、引抜き
		ウォータージェット	
基礎工	オープンケーソン工事	クラムシェル	掘削、積込
		クローラクレーン	吊上げ
共通工	地中連続壁工事	掘削機（壁式、柱列式）	掘削
		クローラクレーン	吊上げ
		土砂分離機	
橋梁	架設工事	クローラクレーン	吊上げ
構造物取り壊し工	構造物取り壊し工事・旧橋撤去工事	バックホウ(ブレーカ 、碎機含)、 自走式破砕機	打撃 、掘削、積込
舗装工	舗装工事	モータグレーダ、ブルドーザ	敷均し(路盤材)
		アスファルト・ コンクリートフィニッシャ	敷均し(舗設)
		コンクリートスプレッダ	
		タイヤローラ、ロードローラ、振動ローラ	締固め
運搬工	現場内運搬作業	ダンプトラック	運搬
建築工	建築解体工事	バックホウ、 ブレーカ 、圧砕機、つかみ機(フォークグラブ)、ハンドブレーカ、 削孔機 、ダンプトラック、ブルドーザ、トラクタショベル、空気圧縮機、発動発電機、ホイールクレーン	解体 、 コンクリート構造物撤去 、整地

※ ゴシック体は一般的に振動発生量が大きい機種又は作業を示しています。

5 市街地で問題となりやすい工種・機種

前掲の図 3-3、図 3-4 の件数が上位にある工種・機種を中心に説明します[3][5]。

5.1 建築解体工事

建築解体工事は、建築物の基礎、柱、壁、床板、屋根等を解体する作業です。

一般的に使用される機種には、バックホウ、ブレーカ、圧砕機、つかみ機（フォークグラブ）、ハンドブレーカ、削孔機、ダンプトラック、ブルドーザ、トラクタショベル、空気圧縮機、発動発電機、ホイールクレーンが挙げられます。

このうち、バックホウ、ブレーカ、圧砕機、つかみ機（フォークグラブ）は、図 5-1 のようにすべてバックホウをベースマシンとし、アタッチメントの違いにより機種名が変わりません。建設作業に係る苦情は、工種では建築解体工が圧倒的に多く、機種ではバックホウ、ブレーカ、圧砕機が上位を占めているので、最も振動対策に重点を置く必要があります。

特に油圧ブレーカは、ロッド（チゼル、ノミ）をピストン（ハンマ）で打撃し、その打撃エネルギーを利用してコンクリート構造物などを破砕するので、一般的には大きな地盤振動を発生します。ブレーカ工法の地盤振動対策には、圧砕工法、ワイヤソーイング工法、カッター工法、油圧孔拡大工法などの工法を用いることがあります。

木造住宅の施工では、準備作業として、作業スペース・搬入路確保、足場設置・養生シート掛け・仮囲いを行った後に、解体作業として、住宅設備類撤去、内装材撤去、内・外部建具撤去、ベランダ等撤去、屋根材撤去、外装材・建物本体解体、足場・仮囲い・養生シート撤去、基礎・土間コンクリート撤去、地中構造物・基礎ぐい撤去、整地、清掃作業の順に作業を行います。

この作業では、外装材・建築物本体解体、基礎・土間コンクリート撤去、地中構造物・基礎ぐい撤去、整地の際に大きな振動を発生します。特に、解体廃棄物を高所から落下させると極めて大きな振動を発生します。近隣に住宅がある事例が多く、振動源と受振点との伝搬距離が短いため、振動の発生量が小さくても振動苦情の原因になる場合があります。このため、工事現場では周辺環境を十分に考慮して、適切な工法を選定する必要があります。



図 5-1 ベースマシンとアタッチメントの違い



図 5-2 施工状況の全景

5.2 構造物取り壊し工事(ハンドブレーカ)

構造物取り壊し工事（ハンドブレーカ）は、ハンドブレーカなどを使用して外部からの機械的打撃で破砕を行う工法です。一般的に使用される機種には、ハンドブレーカ、削岩機（エアードリル）、エアーカッター、コンプレッサー、ダンプトラック、バックホウが挙げられます。ハンドブレーカは、一般に本体質量が 40kg 前後までの手作業で扱うことができる小型のものが対象となります。

施工は、取り壊し作業、コンクリート殻の整理、コンクリート殻の積込みを1サイクルとして、位置を変えて繰り返し作業を行います。この作業は、取り壊し作業の際にハンドブレーカや削岩機等の機械的打撃により破砕するため振動が発生します。建築解体工事と同様に、近隣に住宅がある事例が多いため、振動苦情の原因になることがあります。



図 5-3 構造物の取り壊し作業

5.3 構造物取り壊し工事(圧砕機)

構造物取り壊し工事(圧砕機)は、コンクリート圧砕機を使用して土木構造物を取り壊す作業する工法です。一般的に使用される機種には、コンクリート圧砕機、ダンプトラック、バックホウが挙げられます。

施工は、取り壊し作業、コンクリート殻の整理、コンクリート殻の積込みを1サイクルとして、位置を変えて繰り返し作業を行います。この作業では、取り壊し作業の際にコンクリート圧砕機が油圧で作動する爪形の刃先で鉄筋コンクリート等の土木構造物を噛み砕くため、破碎されたコンクリート殻が落下した時に振動を発生します。現場周辺住宅への環境影響が予想される場合は、現場で排出されたコンクリート塊等を、住宅等への振動影響のない場所に運搬して破碎する方法も考えられます。



図 5-4 コンクリート圧砕機による桁破碎作業

5.4 土留・仮締切工事(超高周波バイブロハンマ工)

土留・仮締切工事(バイブロハンマ工)は、矢板を通して矢板に接する地盤に振動を加え、地盤に流動化または鋭敏化現象を起こさせて鋼矢板やH形鋼の貫入を容易にする工法です。また、超高周波による作業をすることで振動伝搬経路での減衰を大きくするという特徴があります。一般的に使用される機種には、ホイールクレーン、バイブロハンマ(振動式杭打機)、発動発電機が挙げられます。

打込みは、鋼矢板・H形鋼の吊上げ・建込み、鋼矢板・H形鋼の打込みを1サイクルとして、位置を変えて繰り返し作業を行います。引抜きは、鋼矢板・H形鋼の引抜き、鋼矢板・H形鋼の抜倒を1サイクルとします。

この作業では、鋼矢板・H形鋼の打込み・引抜きの際に、バイブロハンマの強制振動が鋼矢板・H形鋼に伝達されるため大きな振動が発生します。ただし、超高周波数で杭を振動させることにより、地盤振動の内部減衰効果が期待でき、打込み・引抜き位置から10数m以上離れた地点で減衰効果を得ることができます。



図 5-5 バイブロハンマによる鋼矢板吊り上げと打込み作業

5.5 場所打ち杭工事(アースオーガ工)

アースオーガ工は、アースオーガにより掘削し、モルタル注入する場所打ち杭工です。一般的に使用される機種には、クローラ式アースオーガ（直結三点支持式）、クローラクレーン、バックホウが挙げられます。

施工は、機械据付、掘削・排土、モルタル注入・オーガ引き、鉄筋またはH形鋼建込みを1サイクルとして、位置を変えて繰り返し作業を行います。

この作業では、掘削及び排土、クローラクレーンの移動（走行）の際に振動を発生します。近年開発された低振動・低騒音工法の場所打ち杭工の一つには、鋼管杭の高いねじり強度を活かすために、先端に羽根を取り付けた鋼管を回転させて地中に貫入させる先端翼付き回転圧入工法があります。



図 5-6 アースオーガ施工状況

5.6 現場内運搬作業(未舗装)

現場内運搬作業（未舗装）は、ダンプトラック等による土砂、砂利、岩石等の運搬の他、材料や建設機械等を現場に搬入出する資機材運搬等があります。機種には、ダンプトラック、トレーラが挙げられます。

施工は、ダンプトラックやトレーラ等の資機材運搬車による材料や建設機械等の積込み・積卸し（排土）、現場内走行の作業を行います。

この作業では、ダンプトラックやトレーラ等の資機材運搬車の走行時に、走行路に凹凸やひび割れなどがあるとダンプトラック走行時に振動が発生しやすくなります。

走行振動は、同じ路面状態において、車両重量の増加や走行速度の上昇によって大きくなる傾向にあります。そのため、現場内運搬作業による走行振動を低減するには、走行速度を制限し、走行路の剛性を高め、走行路面をできるだけ平坦に整えることが重要です。



図 5-7 運搬作業

6 地盤振動の防止・軽減対策

地盤振動の防止・軽減対策の基本は、低振動工法等の「ハード対策」と住民への伝達等の「ソフト対策」に大きく区分され、振動源、伝搬経路、受振点の振動が伝搬する過程の各段階に分類することができます。各段階における対策の具体例を、以下に説明します[5]。

ただし受振点対策は、受振建物の防振補強や受振対象者の一時避難など実現性が低いため省略しています。

6.1 振動源対策【ハード対策】

ハード対策は低振動工法など適応可能技術がある場合は有効ですが、騒音対策に比べて適応可能技術が少ないことや、コストと効果のバランスを考慮して検討する必要があります。

(1) 工事用道路(現場内)の鉄板下部に発泡スチロールを設置

鉄板の下部に発泡スチロール（10cm厚）を設置した事例では、10t ダンプトラック（土砂積載状態）が8 km/h で走行した場合に振動源から40m 地点で5 dB の低減効果が見られています。ただし、軟弱地盤のために発泡スチロール下部の地盤が不等沈下して凸凹ができるため、耐久性に欠ける課題が残っています。

(2) 工用道路(現場内)の舗装、工用車両の進入路(現場外)の修繕

工用車両の走行に伴う振動を低減するために、工用道路では仮舗装（簡易舗装）、工用車両の進入路では切削・オーバーレイを実施する事例があります。

(3) 住宅付近での小型の建設機械の採用

通常は0.7m³のバックホウで掘削を行う場合に、近隣住宅等に近い箇所では0.45m³、または0.25m³の小型のバックホウを用いる事例があります。

(4) 施工方法の変更

掘削時に排出したコンクリート塊等を、住宅等への振動の影響がない場所へ運搬して粉砕する事例や、振動を低減するために油圧ブレーカから圧砕機を用いて粉砕するなど低振動工法を用いる事例があります。

6.2 伝搬経路対策【ハード対策】

(1) 地中連続壁・鋼矢板等の設置

地中連続壁や鋼矢板の設置は、鉛直方向の振動対策にも効果があります。地中連続壁の施工後に、振動レベルの80%レンジ上端値（L_{V10}）が6～8dB程度低減した事例があります。

また、比較的入手が容易で現場への適用性が高いと考えられる鋼矢板（Ⅲ型、深さ10m）とEPS（発泡スチロール）を用いた比較検証試験では、鋼矢板のみの振動低減量が鋼矢板から3～6m離れた位置で3～5dBの事例があります[10]。さらに、鋼矢板にEPSを付加することで、鋼矢板の結果に比べて5dBの振動低減効果の向上が見られています。ただし、鋼矢板からの距離が約10mを超えると振動低減効果が減少するなど、限定された範囲に有効な方法であることに注意する必要があります。

6.3 振動源対策【ソフト対策】

建設工事を円滑に進めるために、多くの現場で行われている振動対策はソフト対策になります。このソフト対策を徹底することが、近隣住民の理解を得ることに繋がります。

(1) 看板や速度警報装置による制限速度の周知

工用車両が制限速度を超えて走行した場合に、速度警報装置により画面表示と音声でオペレータに知らせる事例があります。一般道における工用車両の走行に当たっては、沿道住宅への振動影響を低減するため、交通誘導員の先導により時速5 km/h程度に走行速度を抑制する、沿道住宅への影響が予想される主要な場所に、走行速度を調査する監視員を配置して、工用車両の速度データを管理する事例もあります。

(2) 建設機械オペレータへの教育徹底

建設機械のオペレータに対する教育を徹底することで、建設機械の急発進、急停止、不要な動作、及び過度の負荷を掛けることが回避され振動低減に繋がります。

(3) 振動モニタリングによる建設機械オペレータへのリアルタイムでの警告

工事内容に応じて振動モニタリングを行い、管理目標値を超える振動が発生した時には、振動測定者が建設機械オペレータに注意を促す事例があります。

振動実験により管理目標値を、官民境界から 50m 地点の L_{V10} が 60dB、官民境界で L_{V10} が 65～68dB を設定している事例や、更に管理目標値より厳しい自主目標値（官民境界で L_{V10} が 60～63dB）を設定している事例もあります。

6.4 工事内容の調整【ソフト対策】

(1) 建設機械の稼働時間の抑制

工事の開始時刻の午前 8 時に対して建設機械の稼働時間帯を遅くする、昼休み・昼食の時間帯（12～13 時）に建設機械の稼働を自粛する、休日には振動を伴う作業を自粛する、などの事例があります。

(2) コンクリート打設日の工区間の日程調整

ミキサ車を 200～250 台/日を使用するコンクリート打設では、隣接する工区のコンクリート打設日が重ならないようにするため、業者間で日程調整を実施する事例があります。

6.5 住民とのコミュニケーション【ソフト対策】

(1) 掲示板及びチラシによる工事内容の周知、挨拶・見回り・訪問等による周辺住民との直接対話

比較的大きな振動の発生が見込まれる建設作業では、事前に近隣住民に工事内容と振動発生の可能性を直接説明することで、後で「あの作業では振動を感じた。」と住民から指摘されても、苦情ではなく日常のコミュニケーションの範囲内で解決した事例があります。

(2) 工事説明会や工事見学会の実施

工事見学会、音楽会の開催、建設機械試乗体験などのイベントを通じて工事現場をオープンにすることで、住民との良好なコミュニケーションを築くことも重要です。

【参考文献】

- [1] 佐野昌伴：建設作業振動の特性，騒音制御，Vol. 35，No. 2，pp. 128-133(2011).
- [2] 環境省環境管理局大気生活環境室：よくわかる建設作業振動防止の手引き，
http://www.env.go.jp/air/sindo/const_guide/，(2004).
- [3] 環境省水・大気環境局大気生活環境室：地方公共団体担当者のための建設作業振動対策の手引き，http://www.env.go.jp/air/sindo/const_guide/lg.html，(2012).
- [4] 飯盛洋，佐野昌伴：建設作業振動の苦情実態，(社)日本音響学会騒音・振動研究会資料，N-2005-11(2005).
- [5] (公社)日本騒音制御工学会：平成 23 年度建設作業振動対策に関する検討調査業務報告書，pp. 6-8，pp. 42-44，pp. 144-148(2012).
- [6] (一社)日本建設機械施工協会：建設作業振動対策マニュアル，pp. 71(1994).
- [7] (独)土木研究所：建設工事の振動測定要領(案)，pp. 1-2(2007).

- [8] (社)日本騒音制御工学会 : 振動規制の手引き, pp. 172-177(2003).
- [9] 国土交通省国土技術政策総合研究所 : 道路環境影響評価の技術手法(平成24年度版), 国土技術政策総合研究所資料, No. 714, pp. 6-2-20(2013).
- [10] 設楽和久, 佐野昌伴, 谷倉泉 : 軟弱地盤上の空溝と鋼矢板による地中防振壁の振動低減効果に関する研究, 土木学会第67回年次学術講演会, pp. 189-190(2012).

—第6回 鉄道、道路、工場・事業場—

神奈川県環境科学センター 横 島 潤 紀

1 はじめに

鉄道や道路に代表される地上交通機関の発達は大に人々の利便性を向上させる反面、走行する列車や車（特に大型車）から発生する振動が建物内部に伝搬し、沿線住民の方々の生活や健康に影響を及ぼしています。また、生産及び事業活動に伴い発生する工場・事業場の振動についても、多くの地方公共団体で条例による規制も行われているところですが、依然として相当数の苦情が申し立てられています。今回は、鉄道、道路及び工場・事業場から発生する振動それぞれについて、振動に係る法令等（測定方法も含む）、苦情の発生状況、苦情に対応して測定を行う場合の留意事項などについて概説します。さらに、苦情問題に対応する上で、住民の振動感覚について理解を深めておくことは非常に有益なことであり考えています。筆者らは過去に神奈川県内で振動に関する社会調査を実施したことがありその結果から、住民の振動感覚（特に被害感）に影響を及ぼす要因を検討しました。今回はこの研究成果についても説明します。

2 振動に係る法令等

「振動規制法」（昭和51年法律第64号）は特定工場等、特定建設作業及び道路交通振動を対象としています。特定工場等の振動については「特定工場等において発生する振動の規制に関する基準」（昭和51年環境庁告示90号）に、道路交通振動については「振動規制法施行規則」（昭和51年総理府令第58号）別表第2に、それぞれ測定・評価方法が規定されています。一方、鉄道振動は振動規制法の対象外で、1976年に環境庁長官が運輸大臣あてに出した「環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について(勧告)」（昭和51年環大特32号）の中に、測定及び評価の方法、指針値等が規定されています。振動の測定では、「計量法」（昭和26年法律第51号）第71の条件に合格した振動レベル計を用い、鉛直方向の振動を対象に、人間の振動感覚補正を行った振動レベルで測定を行います。本章では、鉄道振動、道路交通振動及び工場振動について、測定・評価方法を中心に解説します[1]。

2.1 鉄道振動

新幹線鉄道振動については、列車の走行に伴い発生する振動が沿線の一部地域において看過しがたい被害が生じていることに対処するため、1976年に環境庁長官が運輸大臣あてに、「環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について(勧告)」を出しました。この中に指針、測定方法等、指針達成のための方策が規定されています。

- 1) 上下合わせて連続して通過する20本の列車について、当該通過列車ごとの鉛直方向の振動レベルの最大値を測定します。なお、この勧告の中に記載されている測定方法では、

「指示計器の動特性は緩(Slow)とすること」が規定されています。これは騒音計の時間重み付け特性Sのことではなく、JIS C 15101-1995“振動レベル計”に規定されている動特性（実効値回路の時定数0.63秒）のことになります。

- 2) 測定地点については、鉄道の敷地の境界線といった規定はありませんので、問題となっている地点（例えば苦情を申し立てている方の住居付近）で測定することが可能です。
- 3) 振動の評価は、読み取った20個の振動レベルのうち、その大きさが上位10個のものを算術平均して行います。騒音と異なりエネルギー平均ではなく、算術平均です。評価値が指針値の70dBを超える地域については、振動源及び障害防止対策等を講ずることが勧告の中で規定されています。この指針値は、時間帯や用途地域に関係なく適用されるものです。しかし、あくまでも運輸大臣あての勧告であるために、後述する振動規制法とは異なり、鉄道事業者に対して対策等の措置を命じるものではありません。
- 4) 在来鉄道振動については、現在のところ法令等による規制は行われていません。ただし、いくつかの地方公共団体（例えば、川崎市、名古屋市など）は、在来鉄道振動の実態を把握するために、新幹線鉄道振動に準じた測定・評価を行っています。

2.2 道路交通振動

「地域の自主性及び自立性を高めるための改革の推進を図るための関係法律の整備に関する法律」（平成23年法律第37号）が成立し、平成24年4月より、市長が振動規制法に係る規制基準等を設定する事務を行うことになりました。例えば、神奈川県の場合には、振動規制法を施行している葉山町及び寒川町について神奈川県知事が区域及び時間の区分を定めていますが、その他の市については各市長が行っています。

続いて振動規制法で規定されている測定・評価方法について説明します。

- 1) 道路の敷地の境界線において、当該道路に係る鉛直方向の振動レベルを、昼間及び夜間の区分ごとに1時間当たり1回以上の測定を4時間以上行います。
- 2) 1回の測定では、5秒間隔、100個（またはこれに準ずる間隔、個数）の測定値から80%レンジの上端値（一般的に L_{10} といいます）を算出します。振動規制法施行当時は、5秒間隔、100個の振動レベルから L_{10} を算出していましたが、近年は測定機器の発達もあり、短い間隔・多数のサンプリングから、 L_{10} を算出することが多いです。例えば、1時間の測定でも、以前は500秒間隔・100個の測定データから L_{10} を算出することが一般的でしたが、現在は0.1秒間隔・36,000個の測定データから L_{10} を算出するところもあります。
- 3) 振動の評価は、得られた L_{10} を昼間及び夜間の区分ごとにすべてについて平均した数値で行います。
- 4) 振動の大きさが環境省令で定める限度（表-1）を超えていることにより、道路の周辺の生活環境が著しく損なわれていると認める場合に、道路管理者に対し道路交通振動の防止のための舗装、維持または修繕の措置を執るべきことを要請します。また、都道府県公安委員会に対しては、道路交通法の規定による措置を執るべきことを要請します。
- 5) 例えば、振動規制法を施行していない町村において、苦情等の申し立てにより測定・評価の必要がある場合には、振動規制法で規定する道路管理者または都道府県公安委員会

への要請はできません。しかし、道路管理者等に対して行政指導を行うことを念頭に、上記の方法に則って測定・評価を行うことが多いです。

表－1 道路交通振動の要請限度

区域の区分	昼間	夜間
第1種区域	65dB	60dB
第2種区域	70dB	65dB

2.3 工場振動

工場・事業場の振動については、振動規制法では著しい振動を発生する施設を「特定施設」として政令で定め、この特定施設を設置している工場・事業場（以下「特定工場等」と記す）単位で規制を行っています。すなわち、特定工場等については、特定施設以外から発生する振動も測定・評価の対象になります。また前項（2.2）でも述べたとおり、平成24年度から、特定工場等において発生する振動の規制基準等についても、市区域については各市長が、町村部については都道府県知事がそれぞれ設定しています。このうち規制基準については、区域及び時間の区分ごとに環境大臣が定めた範囲内において、各市長または県知事が定めることになっています。下記に測定・評価方法を説明します。

- 1) 特定工場等の敷地の境界線において、当該特定工場等に係る鉛直方向の振動レベルを測定します。
- 2) 振動の評価（振動レベルの決定）については、下記に示す振動レベルの時間変動パターンごとに規定されています。なお、測定の時間及び読み取り個数については、「特定工場等において発生する振動の規制に関する基準」の中には具体的に規定されていません。
 - ① 指示値が変動しないまたは変動が少ない場合には、その指示値で評価します。
 - ② 指示値が周期的または間欠的に変動する場合には、その変動ごとの指示値の最大値を読み取り、その平均値で評価します。
 - ③ 指示値が不規則かつ大幅に変動する場合には、5秒間隔、100個（またはこれに準ずる間隔、個数）の測定値から、80パーセントレンジの上端値(L_{10})で評価します。
- 3) 市町村長は、指定地域内に設置されている特定工場等において発生する振動が規制基準に適合しないことによりその特定工場等の周辺的生活環境が損なわれていると認めるときには、当該特定工場等を設置している者に対し、振動の防止方法の改善または特定施設の使用の方法や配置の変更を勧告することができます。
- 4) 指定地域内に特定工場等を設置している者は、当該特定工場等に係る規制基準を遵守しなければいけません。振動規制法では、大気汚染防止法の場合と異なり、特定工場等に測定義務を課していません。これは、測定義務を課さなくても、地方公共団体の監視等によって振動の発生状況を十分に監視できることも一因となっています。
- 5) 多くの地方公共団体は、条例による規制も行っています。条例と振動規制法では、規制の対象となる施設や地域の区分が異なる場合があります。すなわち振動規制法の特定施設に指定されていない施設でも条例の規制対象となる場合があります。

3 振動に係る苦情への対応

振動規制法施行状況調査（環境省）[2]の結果から、鉄道振動、道路交通振動及び工場振動それぞれに係る苦情の状況を概観するとともに、それぞれの苦情に対応した測定を行う場合の留意点などについて解説します。

平成24年度の発生源別の苦情件数について、建設作業が2,154件（苦情件数全体の66.2%）で最も多く、続いて工場・事業場が577件（同17.7%）、道路交通274件（同8.4%）、鉄道が48件（同1.5%）の順でした。続いて、平成22年度から平成24年度における発生源別の苦情件数の内訳を図-1に示します。建設作業に係る苦情件数は3年間で増加しましたが、工場・事業場に係る苦情件数は、平成22年度から平成24年度の各年度でそれぞれ580件、589件、577件とほぼ横ばいの状況でした。道路交通に係る苦情は平成23年度に227件から293件と前年度に比べて29.1%増えましたが、平成24年度は274件と6.5%減りました。鉄道に係る苦情件数については、平成22年度から平成24年度の各年度でそれぞれ59件、62件、48件でした。鉄道振動については、新幹線鉄道よりも在来鉄道に係る苦情が多くなっていました。鉄道振動に係る苦情の件数が少ないことについては、法律による規制がないために、地方公共団体よりも鉄道事業者に直接苦情を言う人が多いことが原因の一つと考えられます。

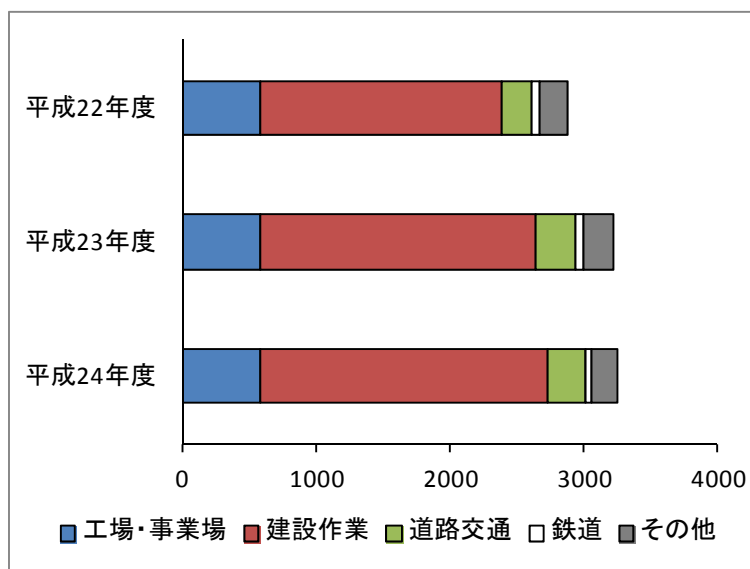


図-1 平成22年度から平成24年度の苦情件数

3.1 鉄道振動に係る苦情への対応

鉄道振動は、列車が通過しているときに振動が継続する間欠振動で、列車速度と車両重量が振動の大きさに影響を及ぼします。すなわち列車速度の上昇は振動レベルの増加をもたらしますが、車体の軽量化は振動レベルの低減につながります。以前、東海道新幹線で「のぞみ」が導入されたときに、「のぞみ」として運行された300系車両は、従来の0系・100系車両に比べて、最高速度は時速220kmから270kmに上昇しましたが、車体重量は約25%軽減されました。このため、低速で走行する地域では軽量化の効果により発生する振動レベルは小さくなりましたが、最高速度に近い速度で走行する地域では軽量化の効果を上回り、振動レベルが増加するとともに、多くの苦情が申し立てられたことがありました[3]。このように車両速度は非常に重要な影響要因です。苦情に対応して測定を行う場合にも、列車速度が通常時と変わっていないか確認することが大事なので、当該地点における列車速度の情報を事前に得ておくことが必要になります。

苦情では、特定の列車から発生する振動がその原因となっている場合もあります。前述の通り、列車の走行速度や車体重量はもちろん、通過する線路等によっても発生する振動の大きさは変わります。これらの情報を関連付けて測定を行うことにより、対策そして最終的な目標である苦情の解決に向けた有用なデータを得ることができます。

最後に、新幹線・在来鉄道ともに、列車の走行が終了した深夜の時間帯に保線工事を行っています。例えば、新幹線鉄道の場合に、道床更換工事での砕石の突き固めにより大きな振動が発生することがあります。深夜の寝ている時間帯に行われる作業のため、保線作業の回数は年間数日以下ですが苦情が申し立てられることがあります。

3.2 道路交通振動に係る苦情への対応

表－2に平成23年度の道路交通振動に係る苦情対応の状況を示します[2]。平成23年度における苦情件数は、指定地域内で255件、指定地域外で38件でした。なお、測定件数は平成23年度に実施したものですから、苦情件数とは一致していません。その内訳は、指定地域内が284件（苦情件数全体の87.3%）、指定地域外が41件（同12.7%）でした。このうち、苦情に対応して実施した測定の件数は、指定地域内で86件（測定件数の30.3%）、指定地域外でも5件（測定件数の12.2%）で、多くの苦情対応においては測定が実施されていなかったことが分かります。指定地域内において、道路交通振動の要請限度を超過した件数は3件でしたが、道路管理者または公安委員会への要請は行われませんでした。未測定の対応については、現地確認の際に市町村の担当者が測定の必要なしと判断した案件が多く含まれているとすると、苦情の大多数は道路交通振動の要請限度以下であったと考えられます。以前から、要請限度と沿線住民の振動感覚との乖離が指摘されています[4-6]。このことを確認するために、筆者は、1998年～2011年に幹線道路沿道で実施した道路交通振動に関する社会調査の結果を用いて、要請限度の数値を検証したことがあります[7]。振動規制法に規定されている要請限度のベースとなったデータと比較したところ、評定尺度が異なることを考慮せずに比較すると、反応率30%の L_{v10} は10dB低くなっていました。この10dBという数値から判断すると、住民が道路交通振動を以前より厳しく評価している可能性は高いです。以上のことから、要請限度が道路交通振動に対する被害感のクライテリアとして機能していとすれば、この判断だけで被害の有無を判断することは危険だと思います。

表－2 平成23年度の道路交通振動に係る苦情対応状況

地域の区分	測定件数		道路管理者に対する要請	公安委員会に対する要請	道路管理者に対する措置 (要請以外)	公安委員会に対する措置 (要請以外)
	測定(適合)	未測定				
指定地域内	測定(適合)	71			26	0
	測定(不適合)	3	0	0	3	0
	測定(判定不能)	12			3	1
	未測定	198			71	6
指定地域外	測定	5			2	0
	未測定	36			7	0

道路交通振動の特徴としては、道路交通騒音の場合と比べて、大型車からの寄与がより支分的となっていることが挙げられます。特に、幹線道路では、深夜から早朝にかけて全体の交通量が減少する半面、昼間よりも高速で走行する大型車が増えることにより振動が大きくなる場合があります。道路交通振動の予測で一般的に使用されている「土研式」では、大型車の換算係数は小型車の13倍となっています[8]。このような時間帯の振動が問題となっている場合に、昼間の時間帯だけ測定を行ったとしても、苦情の申し立て人が受けている被害の状況を把握することは難しくなります。近年の振動レベル計の発達により、夜間の振動レベルを無人で計測することが容易になっておりますので、このような対応が望まれます。

また、道路交通振動の大きさは、道路の路面状態に大きく依存しています。すなわち、縦断凹凸、段差（コンクリート舗装の目地、マンホールを含む）及びわだち掘れがある場合には、発生する振動が大きくなります。苦情に対応した測定を行う場合に、当該道路の平坦性を確認することが第一歩となります。このような道路の不陸がある場合には、その個所を大型車が通過するときに発生する振動レベルを把握することが重要で、このようなデータを蓄積することが対策に向けて有効と考えられます。

3.3 工場振動に係る苦情への対応

平成23年度の振動規制法施行状況調査[2]から、工場・事業場の振動の苦情件数を表-3に示します。同表から特定工場等では164件（苦情件数全体の27.8）、それ以外では425件（同72.2%）でした。すなわち、特定工場等に指定されていない工場・事業場からの苦情が多く、条例による規制対象となっていない工場・事業場からの苦情はそれ以上に多かったことがわかります。ここで特定工場等に注目すると、金属加工機械（液圧プレス、機械プレス、せん断機、ワイヤーフォーミングマシン）に係る苦情が最も多く101件（特定工場等に係る苦情件数の69.2%）で、続いて破碎機等が23件（同14.0%）、圧縮機が22件（同13.4%）でした。測定件数は、特定工場等については62件（苦情件数の37.8%）、特定工場等以外については48件（同11.3%）で、そのうち規制基準を超過していた件数はそれぞれ12件、5件となっていました。道路交通振動の場合と同様に、苦情が申し立てられているにもかかわらず、振動規制法あるいは条例の規制基準を超過するものは少なかったことがわかります。

工場・事業場に係る苦情に対応して測定を行う場合に、苦情の原因となっている機器を特定させることが不可欠です。特に、多数の同種の機器を使用している場合には、その中のどの機器が原因となっているのか、それとも同時に使用していることにより複数の機器が原因となっているのか、対策を指導する上でも重要になります。しかし苦情の申し立て人はもちろん、事業者もどれが原因であるのか特定できない場合があります。申し立て人に振動を体感する時間帯をきちんと申告してもらい、その時間帯に稼働している施設を絞り込み、場合によっては発生源と受振側における振動特性（振動レベルの変動パターンや周波数特性）を比較して、発生源を特定することが必要です。

その他に、長期間の暴露により構造物への影響、いわゆる物的被害を懸念する苦情が申し立てられることがあります。例えば地震のように短時間に一過性の振動が暴露される場合には、物理量と物的被害の状況との関係についてのデータが集積されていますが、工場振動の

ように長期間に渡り振動が暴露される場合にはそのデータを適用することはできません。物的被害の問題に対処する際にはその点を留意してください。

表－3 平成23年度の道路交通振動に係る苦情対応の状況

工場・事業場の種別		苦情件数	測定件数 (基準超過件数)
指定地域内における 特定工場等	金属加工機械	101	43 (9)
	圧縮機	22	8 (1)
	破砕機、磨砕機、ふるい及び分級機	23	2 (0)
	織機	0	0 (0)
	コンクリートブロックマシン等	1	2 (2)
	木材加工機械	4	1 (0)
	印刷機械	5	3 (0)
	ゴム錬用または合成樹脂錬用のロール機	0	0 (0)
	合成樹脂用射出成形機	4	2 (0)
	鋳造型機	4	1 (0)
上記以外	条例により規制対象となるもの	196	33 (5)
	その他の工場等	229	15 (-)

3.4 苦情対応での全般的な留意事項

地方公共団体職員の公害に関する苦情の処理に関しては、公害紛争処理法の第49条に、「地方公共団体は、関係行政機関と協力して公害に関する苦情の適切な処理に努めるものとする。」と規定されています。法律等で規定されている規制基準等の超過の有無に関わらず、公害に関する苦情への対応は地方公共団体の努力規定となっております。努力規定であるため罰則等はありませんが、申し立て人が訴えている被害の状況を把握し、申し立て内容の整合性を確認することが、苦情対応への第一歩となります。特に振動の問題に関しては、住民は地盤上ではなく、家屋内部において振動を体感し、活動妨害や睡眠妨害を受けていることから、家屋内部での体感調査や振動測定が必要になる場合もあります。一般的に木造家屋内部での振動レベルは、地表面に比べて5dB増幅（中央値）しているといわれています。特に、水平振動は振動規制法の対象ではありませんが、家屋内部では建築物の共振周波数の関係もあり、水平振動の増幅事例が多く報告されています。例えば平尾ら[9]は、並進3方向の振動について、1/3オクターブバンド中心周波数が5Hzまたは6.3Hzの帯域で、家屋内部での水平方向の振動加速度レベルが、地表面に比べて20dB程度大きくなることを報告しています。すなわち、地盤面で鉛直振動を計測するだけでは、苦情の申し立て内容の確認、被害状況の確認ができない恐れがあることが示唆されます。

しかし、家屋内部での測定は地盤上での測定に比べて難しい点が多々あります。特に測定位置の選定については、同一の家屋内部でも、測定位置が床面の中央あるいは柱脚の付近なのかにより、振動の測定結果は大きく異なります[10]。もちろん家屋内部での測定では、公定

法は規定されていないため、担当者個々の経験等に基づく独自の手法で行われてきましたので、測定経験が少ない地方公共団体では対応できないこともあります。このような場合でも、振動規制法の主旨等、すなわち生活環境の保全及び国民の健康保護のために、都道府県や学会から技術支援などを受けて対応することも必要になると考えます。このような現状を踏まえ、家屋内部での統一的な測定手法を構築するため、(公社)日本騒音制御工学会の環境振動評価分科会が、平成20年度の環境省請負業務での検討結果を基に、振動測定マニュアル(案)(以下「マニュアル案」と記す)を整備しました。マニュアル案は、すべての外部振動源を対象としており、環境振動評価分科会のホームページからダウンロード可能です。なお、マニュアル案には「評価」の項目がなく、生活や健康への影響の有無を判断する基準も記載されていません。これについては、現状での知見の集積状況を踏まえると、人間の振動に対する知覚閾値(概ね55dBといわれています)が有用な判断基準の一つであると考えています。しかし近年の判例では、受忍限度の超過が判断基準となっていることから、振動の大きさだけでなく様々な要因を含めた総合的な判断が必要になります。

家屋内部での測定を行わなくても、家屋内部の問題となっている位置において振動を体感することは不可欠です。深夜に発生する振動が主原因の場合に、その時間帯に体感することは難しいところですが、今後の対応に向けた方策を考える上でも、昼間の時間帯でもかまいませんので、振動の大きさや継続時間、発生頻度などのかを体感、確認してください。

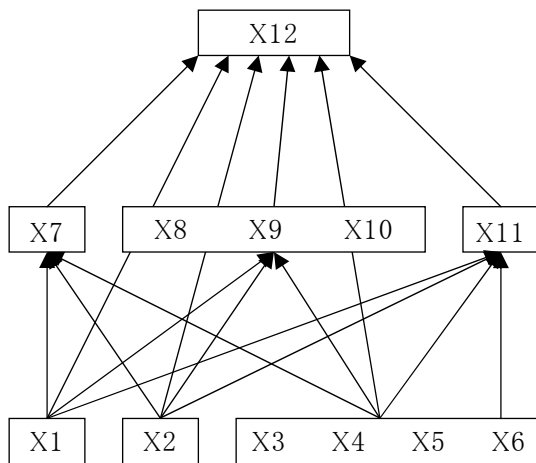
最後に、様々な調査の結果から、規制基準や要請限度は超過していないものの、振動により住民の生活環境などが損なわれていると判断される場合もあります。この場合には事業者の任意の協力によって実現できる行政指導を中心に対応することが考えられますが、費用面及び時間的な問題から、事業者の負担が大きいハード面での対策より、作業時間の短縮や変更などのソフト面での対策が有用な場合もあります。

4 住民の振動感覚についての調査研究

筆者らは、神奈川県内の東海道新幹線沿線の住宅地において社会調査を実施したことがあります。この調査により得られたデータを用いて、沿線住民の振動感覚(ここでは振動被害感に着目します)の評価構造を検討した結果[11]について解説します。

この研究では、評価構造を考える上で、住民が暴露されている振動は、振動被害感を引き起こす直接的な要因であるとともに、戸や窓のがたつき、建具等の揺れ、睡眠妨害なども引き起こすことにより振動被害感を増幅させる間接的な要因でもありと仮定しました。すなわち、暴露されている振動の大きさ、個人属性、振動による生活妨害など様々な要因が階層的な関係を構成して、振動被害感が形成されていると考えています。このような階層的な関係について、各要因の影響度及び影響過程を明らかにするために、説明変数から目的変数への直接的な影響(直接効果)と間接的な影響(間接効果)を推定できる古典的パス解析の手法[12, 13]を用いて検討を行いました。

最初に、既往研究から得られている知見などに基づき、**図-2**に示す振動被害感の因果モデル(初期モデル)を作成しました。このモデルは、暴露されている騒音・振動の大きさ(X1:騒音暴露量、X2:振動暴露量)及び個人属性(X3:築年数、X4:性別、X5:年齢、



図－２ 振動被害感の因果モデル

X6：在宅時間）が、直接に振動被害感へ影響を及ぼすとともに、騒音による生活妨害（X7：聴取妨害）、振動による生活妨害（X8：イライラ、X9：がたつき、X10：ものゆれ）及び振動環境変化（X11：振動環境変化）を介して間接的に振動被害感に影響を及ぼすとしています。ここで、X1～X6は外生変数、X7～X11は内生変数、X12は本モデルの目的変数と定義されます。

次に各変数について説明します。騒音・振動暴露量（X1及びX2）は、それぞれ当時の新型車両の最大値を推定して用いました。その他の外生変数（X3～

X6）についてはアンケート調査により得られた個人属性のデータを用いました。これらの変数については、アンケート調査で得られたデータは順序尺度（カテゴリデータ）ですが、その中間値あるいは上限値等を代表値として、近似的に間隔尺度とみなして分析に用いました。内生変数（X7～X11）及び目的変数（X12）については、アンケート調査で得られた回答結果で、新幹線に特定した項目になります。**表－４**には本分析で用いた変数の尺度を示します。識別性の問題[14]を避けるために、下位レベルにある変数はそれより上位レベルにある全ての変数に対してパスを設定しました。例えば、振動暴露量（X2）は、それより上位レベルにある変数（X7～X12）すべてにパスを設定しました。また多重共線形性の影響をできるだけ避けるために、外生変数はなるべく相関の低い変数を中心に選びました。

表－４ パス解析で用いた変数の尺度

X1:騒音暴露量 X2:振動暴露量	距離減衰式により算出した推定値
X3:築年数	(1995年度) 1年, 3年, 8年, 15年, 25年 (1996年度) 2年, 7年, 12年, 17年, 25年
X4:性別	0: 男性 1: 女性
X5:年齢	15, 25, 35, 45, 55, 65, 75歳
X6:在宅時間	8, 12, 16, 20, 24時間
X7:聴取妨害 X8:イライラ X9: がたつき X10: ものゆれ	(電話の声、テレビの音が聞き取りにくい) 0: 影響なし, 1: 影響あり (気分がイライラしたり、腹が立つ) 0: 影響なし, 1: 影響あり (戸や障子がガタガタする) 0: 影響なし, 1: 影響あり (ものがゆれて気になる) 0: 影響なし, 1: 影響あり
X11:振動環境変化	(4～5年前に比べて最近はどうですか) 0: 良くなった・変わらなかった・わからない, 1: 悪くなった
X12:振動被害感	(振動は我慢できますか、それとも我慢できませんか) 1: 気にならない, 2: 我慢できる, 3: どちらかといえば我慢できる, 4: どちらかといえば我慢できない, 5: 我慢できない

目的変数への影響度に関しては、図に示す因果モデルから決定される構造方程式（重回帰方程式）を解くことにより得られる標準偏回帰係数（パス係数）をベースにして推定できます。各要因から効果の大きさについては、直接効果はパス係数そのもの、間接効果はパスで結ばれる変数間のパス係数の積、総合効果は直接効果と間接効果の和でそれぞれ推定できます。パス係数が有意なもの（t 検定で5% 水準）だけを取り出した評価構造モデルを図-3 に示すとともに、各要因の効果の大きさを図-4 に示します。なお、本分析における目的変数の寄与率は0.48でした。

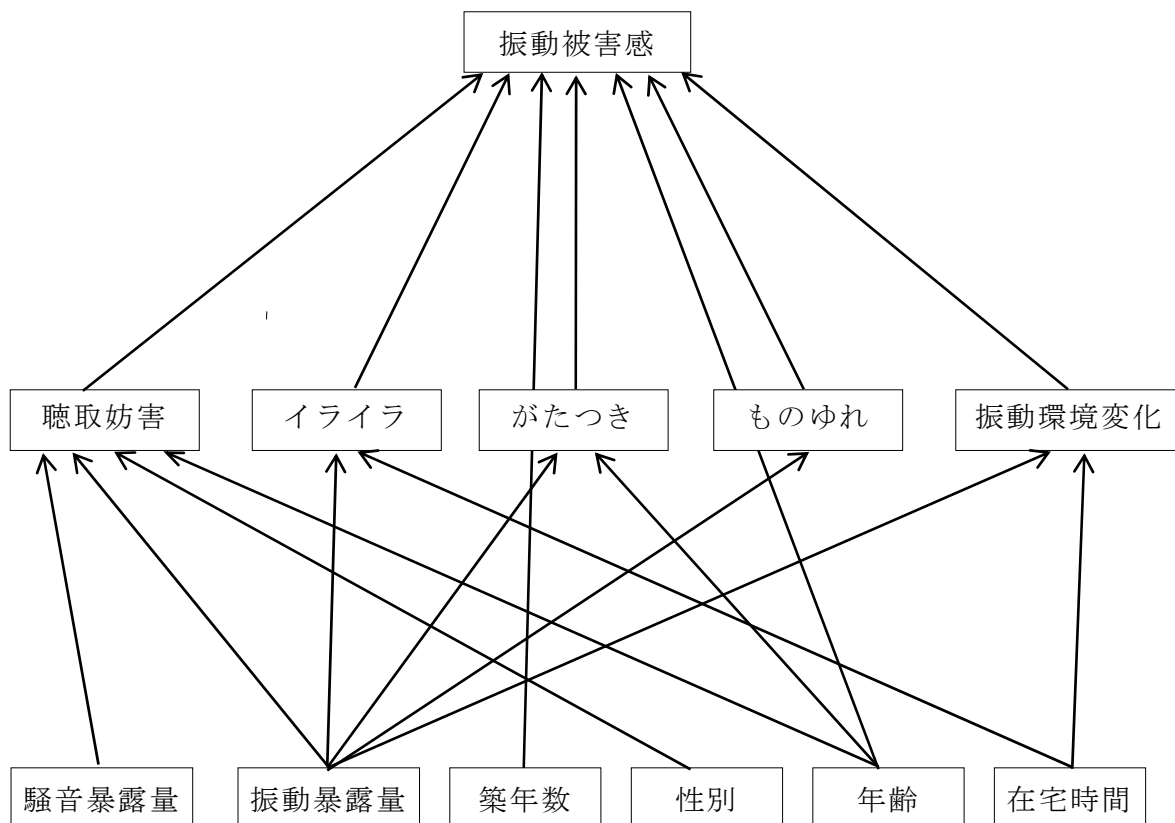


図-3 振動被害感の評価構造モデル

直接効果については、イライラ（0.31）、がたつき（0.26）、振動環境変化（0.26）が大きい数値を示していました。一方、騒音暴露量及び振動暴露量については有意ではありませんでした。間接効果については、振動暴露量（0.25）が大きく、すべての内生変数（X7～X11）を経由して5%水準で有意な効果を及ぼしていました。総合効果については、直接効果での結果と同様にイライラ（0.31）、がたつき（0.26）、振動環境変化（0.26）が大きく、その次に振動暴露量（0.24）が大きくなっていました。騒音

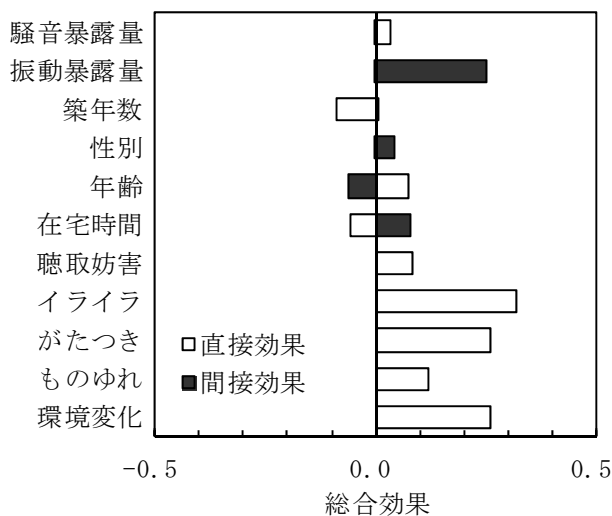


図-4 振動被害感への効果の大きさ

暴露量及び個人属性（築年数、性別、年齢及び在宅時間）の総合効果は小さくなっていましたが、これら5変数ともに、振動被害感に対して、直接効果または間接効果のどちらかが有意となっていました。以上のことから、新幹線の振動被害感の評価構造は、図-3で示したモデルで説明できていると考えています。

続いて、各変数の効果の大きさ及び影響過程から、振動被害感（X12）を形成している要因について検討を行いました。振動暴露量（X2）は、聴取妨害（X7）、イライラ（X8）、がたつき（X9）、ものゆれ（X10）及び振動環境変化（X11）を経由し、振動被害感（X12）に影響を及ぼす間接効果のみが有意でした。ここで、がたつき（X9）を振動による聴覚的影響、ものゆれ（X10）を振動による視覚的影響として捉えると、がたつきやものゆれを経由した間接効果が5%水準で有意であったことから、住民が振動を直接的に体感していない場合でも、聴覚的または視覚的影響を知覚することにより、振動被害感が生じる可能性を示唆しています。一方、騒音暴露量（X1）についても直接効果は有意ではありませんでしたが、聴取妨害（X7）を経由した間接効果が5%水準で有意でした。このことは、騒音も振動被害感を構成する要因の一つであることを示唆しています。特に、そのパス係数が正の値を示していたことから、騒音レベルが大きくなるほど振動被害感も強くなると解釈できますので、騒音による振動被害感への相乗効果の可能性が示唆されます。振動環境変化の項目については、直接効果（総合効果）が正の値を示していました。振動暴露量からの影響過程を考えると、新型車両から発生する振動レベルが大きいほど振動環境の悪化を感じやすくなりますので、振動被害感も厳しくなります。先に述べたとおり、この調査では高速で走行する車両による振動の増加という環境の劇的な変化が発生しており、このような変化が生じた場合には、変化の履歴も考慮に入れた振動感覚の評価が必要になることがわかります。

最後に個人属性について考察を行います。築年数については、負の間接効果が有意となっていました。すなわち古い家屋ほど、振動被害感が軽減されたことを意味します。これは、築年数と居住年数との間に正の高い相関がみられたことから、振動に対する慣れやあきらめなどによる振動被害感の抑制が、老朽化による家屋内部での振動増大に伴う振動被害感の増大を上回ったためと考えることができます。年齢については、正の直接効果が有意であった反面、聴取妨害及びがたつきを介した負の間接効果が有意でした。若年・中年層と比べると高齢の住民は騒音や振動による生活妨害を感じにくくなり、そのことにより振動被害感も緩和されました。一方、このような間接的な効果とは別に、年齢の高い人ほど振動被害感そのものが厳しくなっていたことが示唆されます。在宅時間については、聴取妨害及び振動環境変化を介した間接効果が有意でした。在宅時間の長い住民ほど、騒音による聴取妨害や振動環境の悪化を感じやすくなり、その結果として振動被害感も厳しくなったと考えています。

この研究結果は、あくまでも新幹線沿線の住宅地における解析結果の一例ですが、同様の解析を道路交通振動についても行いました[15]。道路交通の場合には、振動暴露量から振動被害感への直接効果が有意であったこと、睡眠妨害（覚醒）の項目を内生変数として導入したモデルがより適切に振動被害感を説明できることなど、新幹線振動のモデルとは異なる傾向も示していました。しかし、振動暴露量からがたつきを介した間接効果や騒音暴露量から聴取妨害を介した間接効果も有意であったことなど、共通の影響過程も確認できました。こ

のように影響過程やその影響度は異なるものの、体感以外の振動知覚や騒音は、振動源種別に関係なく、住民の振動被害感に影響を及ぼす共通要因であるといえます。

参考文献

- [1] 日本騒音制御工学会編：振動規制の手引き，技報堂出版，(2003).
- [2] 環境省：振動規制法施行状況調査（平成22年度～平成24年度）
- [3] 横島潤紀ほか：新幹線鉄道から発生する地盤振動について－新型車両300系の場合，日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，pp.81-84，(1993).
- [4] 大野嘉章：道路交通振動評価にL10は適切か”，日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集，pp.41-44，(2005).
- [5] 松島 貢ほか：千葉市における道路交通振動の苦情実態とL10評価について，日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集，pp.253-256，(2006).
- [6] 上田浩之：振動防止行政の現状と課題，日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集，pp.77-80，(2011).
- [7] 横島潤紀ほか：道路交通振動に係る要請限度の検証，日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集，pp.191-194，(2013).
- [8] 日本道路協会：道路環境整備マニュアル，(1999).
- [9] 平尾善裕ほか；振動測定マニュアル（案）に基づいた測定・分析事例，日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集，pp. 91-94，(2012).
- [10] 横島潤紀ほか：木造家屋内における鉄道走行時の振動実測結果について，日本建築学会技術報告集，vol. 24，pp. 203-206，(2006).
- [11] 横島潤紀ほか：新幹線沿線住民の振動被害感を構成する要因に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No. 526，pp. 1-7，(1999).
- [12] 佐藤哲身：道路交通騒音のうるささに及ぼす振動の影響のパス解析，日本建築学会計画系論文報告集，No. 439，pp. 13-18，(1992).
- [13] 山下敏夫ほか：北海道と九州における道路交通騒音に対する社会反応の多変量解析（Ⅱ），日本建築学会計画系論文集，No. 451，pp. 9-18，(1993).
- [14] H. B. Asher（広瀬弘忠訳）：因果分析法，朝倉書店，(1980).
- [15] 横島潤紀：新幹線鉄道騒音・振動に対する被害感の評価構造に関する研究，横浜国立大学博士論文，(2006).

—第7回 歩行振動(内部振動源)—

東京工業大学大学院 理工学研究科 横山 裕

1 はじめに

建築物床は、歩行など床上での人間の動作により振動しています。この振動は、従来一般的な材料、構法の床では非常に小さく、居住者に感じられることはありませんでした。しかし、近年、床の軽量化や長スパン構造の採用による低剛性化の影響で、人間の動作時に従来の床より大きな振動が発生し、居住性の観点から問題となる事例が増加してきました。筆者らは、この問題について約 30 年前から取り組み、妥当な評価方法を確立するための研究を積み重ねてきました。本稿では、人間の動作により発生する床振動の概要を述べたうえで、筆者らの研究成果のうち代表的なもの^{[1]-[18]}について解説します。

なお、人間の動作により発生する振動が苦情につながる例としては、歩行などの日常的な動作による振動の他に、エアロビックダンスやコンサートでの“たてのり”など、多くの人間が一定のリズムに合わせて連続的に行う動作により発生する振動が問題となる例が挙げられますが、この問題については別の機会に報告することとします。

2 歩行振動の概要

建築物内で行われる人間の動作は様々ですが、床振動評価の観点から最も重要と位置付けられる加振動作は、歩行です。歩行は、住宅における子供の飛び跳ねなどと異なり、人間が生活するうえで必要不可欠な動作です。したがって、歩行により気になる、通常的生活、業務に差し障りが生じる、あるいは不安感を感じるような振動が発生すると、それは床に問題があるとみなされ、苦情につながってしまいます。

歩行は、もちろん個人差は存在するものの、おそらく人間の日常的な動作の中で最も安定した動作とみなすことができます。例えば、歩行実験の際、ほとんどの被験者は、ただ単に「ここを歩いて下さい」と指示しただけで、何の質問もなしに歩き始めることができます。これは、“歩く”といったら通常どれくらいの速さ、激しさ(すなわち歩幅、歩調など)で動作するのかが、被験者各人の中に無意識のうちに確立されていることを意味しています。おそらく、最も効率のいい速さ、激しさに収束しているのでしょう。そのため、動作の安定性は非常に高くなります。この点は、標準の速さ、激しさなどが存在せず、その時々目的や緊急度に応じて速さ、激しさを変化させる他の動作と、大きく異なっています。

ちなみに、歩行とともによく取りあげられる加振動作に、小走りがあります。小走りによる加振力は、当然のことながら歩行より一般に大きくなります^[8]。しかし、動作の頻度が低い(特に住宅など十分な広さのない空間では行われにくい)こと、日常において必然性のある避けられない動作ではないこと、及び動作自体の安定性が低く 1 歩ごとの歩調の微妙な変化

が歩行より大きいいため後述の倍調波共振が比較的発生しにくいことから、実際には歩行による振動が問題となることの方が多ようです。

では、歩行により発生する振動(以降“歩行振動”と記します)は、どのような性状を有しているのでしょうか。図-1は、筆者らがこれまで機会あるごとに紹介してきた、人間が歩行時に床に与える荷重の時間変化の代表例と足の接地状況との関係、及びその荷重により発生する歩行振動の例[1]-[7]です。図は、周囲から縁の切れた床に1歩着地して歩き抜けた場合のものです。図に示すように、歩行振動は、着地→体重の移動→踏み出しの一連の動作にともなう二峰形の荷重に応じた動的変形(変形・時間曲線参照)と、着地開始時のかかと先端と床との衝突により励起される床の固有振動数での減衰振動(加速度・時間曲線参照)が複合された、複雑な性状を示します。

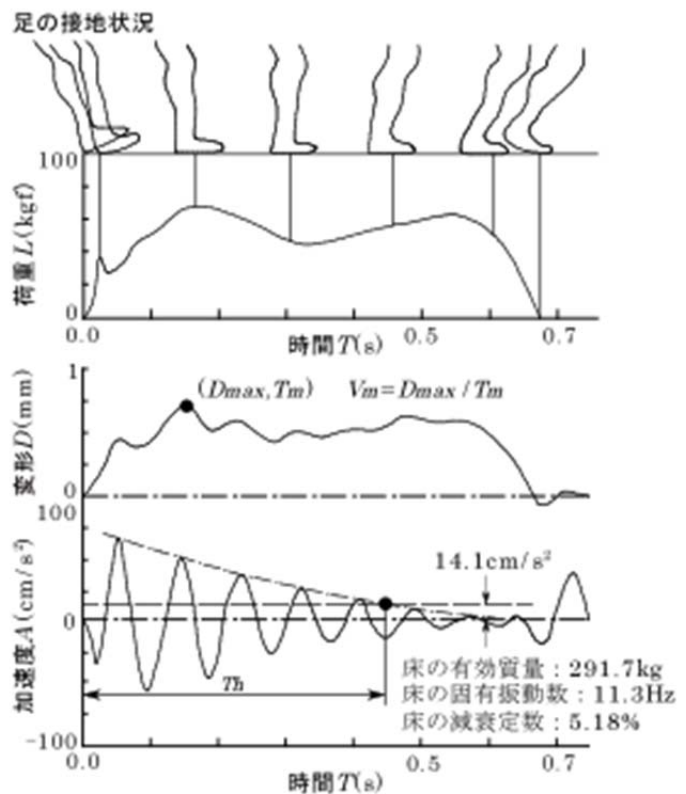


図-1 人間が歩行時に床に与える荷重と歩行振動の例^{[1]-[7]}

つぎに、実際の床での複数歩連続した歩行により発生する振動について述べます。図-2に、一般的な木造住宅の8畳間程度の大きさの床における歩行振動の実測例^[9]を、(1)数歩歩行した場合と(2)1歩のみの場合を比較して示します。連続した歩行の場合、1歩1歩の間にわずかではありますが両足が着地している時間(両脚支持期、通常0.1s程度)があります。図の(1)と(2)の比較から、(2)の変形・時間曲線の振幅を、歩行者が測定点に接近したり遠ざかったりするのにあわせて1歩ごとに増減させながら両脚支持期を重ね合わせると、(1)の変形・時間曲線のようになるのがわかります。また、加速度・時

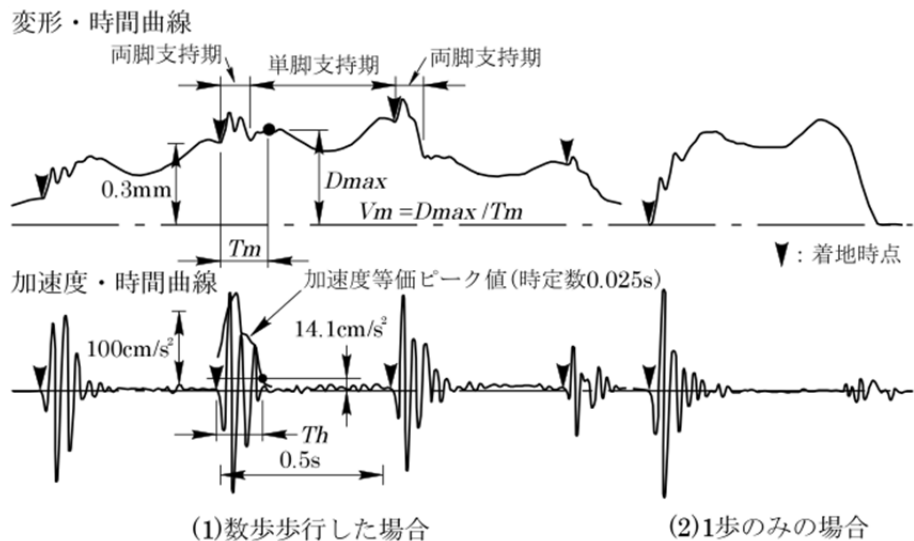


図-2 木造建築物床における歩行振動の例^[9]

また、加速度・時

間曲線からは、着地衝撃により非常に大きな床の固有振動数での振動が励起されているものの、減衰が大きいとため次の1歩までに十分減衰していることがわかります。木造や軽量鉄骨造(以降まとめて“木造”と記します)建築物における歩行振動は通常このような性状を示しますが、この加速度振幅の最大値を床の固有振動数とともに日本建築学会の居住性能評価指針と照合すると、実際にはなんら問題が発生していない床でも著しく悪い評価となってしまいます。

一方、S造、RC造建築物の床、すなわちコンクリートスラブでは、木造建築物の床と比較して、剛性が高いため動的変形は小さく、質量が大きいため着地衝撃により励起される床の固有振動数での振動も小さくなります。しかし、この種の床では一般に振動が伝搬しやすいとため、遠方に着地した際の振動も伝搬してきます。そのため、比較的振幅は小さいものの着地衝撃により励起される床の固有振動数での振動が何歩分も繰り返される、周期的な振動が発生します。

図-3 に、S造建築物における歩行振動の実測例^[12]を示します。図は、固有振動数が6.5Hzの床での測定結果です。上段に示した歩調1.75Hzでの歩行時の加速度・時間曲線から、上述の周期的な振動が発生していることがわかります。また、下段には、固有振動数6.5Hzの1/3の歩調2.16Hzでの歩行時の加速度・時間曲線を示します。減衰の

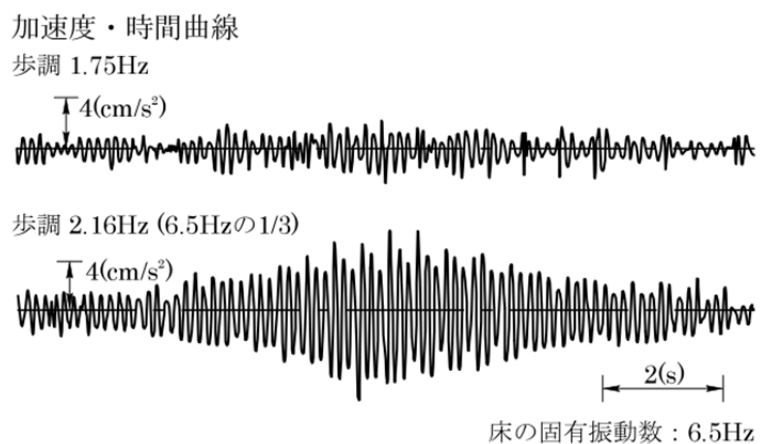


図-3 S造建築物床における歩行振動の例^[12]

小さいコンクリートスラブでは、このように歩調の整数倍の振動数が床の固有振動数と一致すると、歩数を重ねるごとに振幅が増幅してゆく共振現象が発生し、振幅の変動が比較的少ない連続的な振動が数歩～十数歩分続くこととなります。このようないわゆる倍調波共振は、一般に歩行の4倍調波成分まで発生する可能性があるといわれています。通常の歩行の歩調の範囲が1.6～2.3Hz程度であることを考慮すると、床の固有振動数を10Hz以上とすれば、倍調波共振は避けられる可能性が高いとみなすことができます。

なお、倍調波共振に関しては、6で述べる木造大スパン床でも注意する必要があります。筆者らの実験^[15]では、1wayでかつ周囲に壁などが設けられていない極端に減衰の小さいステージ状の試料床ではありますが、固有振動数10.5Hzの試料床を2.1Hzで歩行した場合に倍調波共振が発生したこと、すなわち5倍調波成分でも共振が発生したことを付記します。

3 1歩の歩行振動に対する性能値

2で述べたように複雑な性状を示す歩行振動は、どのようにして評価すればよいのでしょうか。筆者らが研究を始めた当初は、マイスター曲線など、振動数・振幅平面上に等評価曲線を描いた形式の評価指標がよく用いられていました。現在の日本建築学会居住性能評価指

針も、その延長上に位置付けられます。しかし、これらは、もともと単純な正弦波を対象とした研究成果を基本に策定されたものです。複雑な歩行振動をこれらの指標で評価しようとすると、測定結果からどのようにして指標と照合する振動数と振幅を抽出するのが問題となります。様々な方法が提案されましたが、いずれの方法も何らかの矛盾を内包しており、根本的な解決には至りませんでした。筆者らは、これらの評価指標で評価するのは無理があると考え、一度原点に戻り、歩行振動の何がどのように人間の感覚、評価(以降“振動感覚、評価”と記します)に影響しているのかを再検討しました。

実際に、様々な歩行振動を自分達で感じるなどして種々検討した結果、振動感覚、評価には、着地時の動的変形の大きさ及び速さと、その後の床の固有振動数での振動の続き具合が大きく影響していることがわかりました。具体的には、着地時の動的変形の大きさ及び速さは図-1の変形・時間曲線に示す変形の最大値 D_{max} 及び変形速度 V_m 、床の固有振動数での振動の続き具合は加速度・時間曲線に示す振動の振幅がマイスター曲線の“やや気になる”程度に相当する 14.1cm/s^2 まで減衰するのに要する時間 Th で、それぞれ表せることが明らかとなりました。さらに、これらを複合した下式で得られる $VI(2)$ で、歩行振動に対する感覚、評価を表示できることが明らかとなりました^{[1]・[4]}。

$$VI(2) = 0.2 \cdot \log(D_{max}) + 0.5 \cdot \log(V_m) + \log(Th)$$

ここで、単位は $D_{max} : \text{cm}$, $V_m : \text{cm/s}$, $Th : \text{s}$

図-4に、種々性状の異なる28種の歩行振動を検査試料とし、官能検査を実施して構成した振動の気になり具合に関する心理学的尺度(気になり具合評価尺度)と、これらの歩行振動から算出した $VI(2)$ の関係^[11]を示します。図の①～⑦の破線は、官能検査に用いた判断範ちゅうの心理学的尺度上の位置を表します。図から、両者はよい対応を示しており、例えば $VI(2) = -0.3$ 程度の歩行振動は“⑤やや気になる”程度、 $VI(2) = 0.2$ 程度の歩行振動は

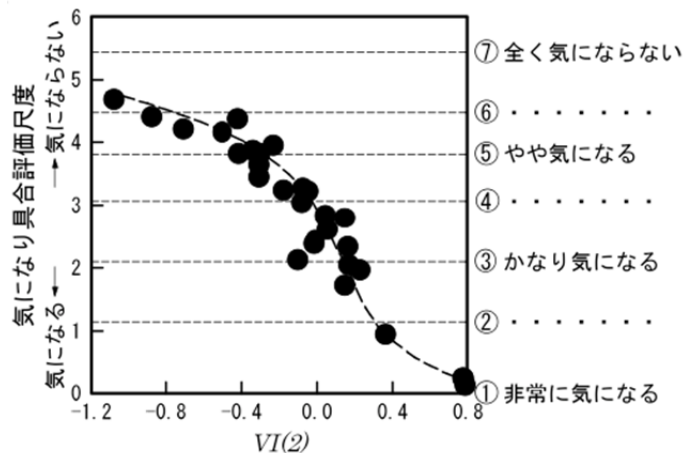


図-4 気になり具合評価尺度と $VI(2)$ の関係^[11]

“③かなり気になる”程度と評価できることがわかります。この $VI(2)$ のように、人間の感覚、評価と対応する物理的指標を、筆者らは“性能値”と呼んでいます。

4 苦情発生の有無からみた木造建築物床の評価方法

3で述べた成果は、1歩のみの歩行振動に対する評価です。では、実際の床で発生する複数歩連続した歩行による振動は、どのようにして評価すればよいのでしょうか。筆者らは、2で述べた通り、木造建築物床とS造、RC造建築物床で振動性状が大きく異なることから、これらについて別々に検討することとしました。

木造建築物床では、図-2 に示した通り、動的変形も床の固有振動数での振動も、一般に測定点直近の1歩によるものが最も大きくなります。そこで、何歩も歩くことができない8畳間程度の大きさまでの床であれば、その床の評価は、無限にある歩行者の着地位置と受振者の位置の組合せのうち、最も大きい振動が発生する組合せでの評価で代表できるものと想定しました。この想定に基づき、実在する50棟以上の木造住宅の床を対象に、それぞれの床ごとに最も大きな振動が発生すると思われる位置に1歩分の加振力を入力し、その位置で測定される変形・時間曲線と加速度・時間曲線から $VI(2)$ を算出したところ、それぞれの床での苦情発生の有無とよい対応を示すことが明らかとなりました。なお、1歩分の加振力の入力と $VI(2)$ の測定には、筆者らが開発した“床振動測定装置^{[5]・[8]}”を使用しました。

図-5 に、苦情発生の有無と上記の条件で測定した $VI(2)$ の関係^[9]を示します。図より、 $-0.8 \leq VI(2)$ の床では苦情が発生しているのに対し $VI(2) < -0.9$ の床では一部を除いて苦情は発生していないこと、 $-0.9 \leq VI(2) < -0.8$ の床はボーダーライン上にあることがわかります。このように、8畳間程度の大きさまでの木造建築物床では、その床の中で最も大きな振動が発生する位置に1歩分の加振力を入力して測定される $VI(2)$ を、その床の居住後評価を代表する性能値として適用できることが明らかとなりました。

なお、 $VI(2) < -0.9$ でも苦情が発生している床がいくつかありますが、これらについて詳しく調べた結果、振動自体はそれほど大きくはないものの、家具、食器などがたつき音やテレビ、観葉植物の揺れなどにより床が振動していることが認知され、苦情につながったことが推察されました。また、その後の筆者らの研究^{[10],[11]}の結果、これら聴覚、視覚的要因は、比較的大きい振動の評価には大きくは影響しないものの、わずかに感じる程度の小さい振動の認知などに影響することが、明らかとなりました。すなわち、聴覚、

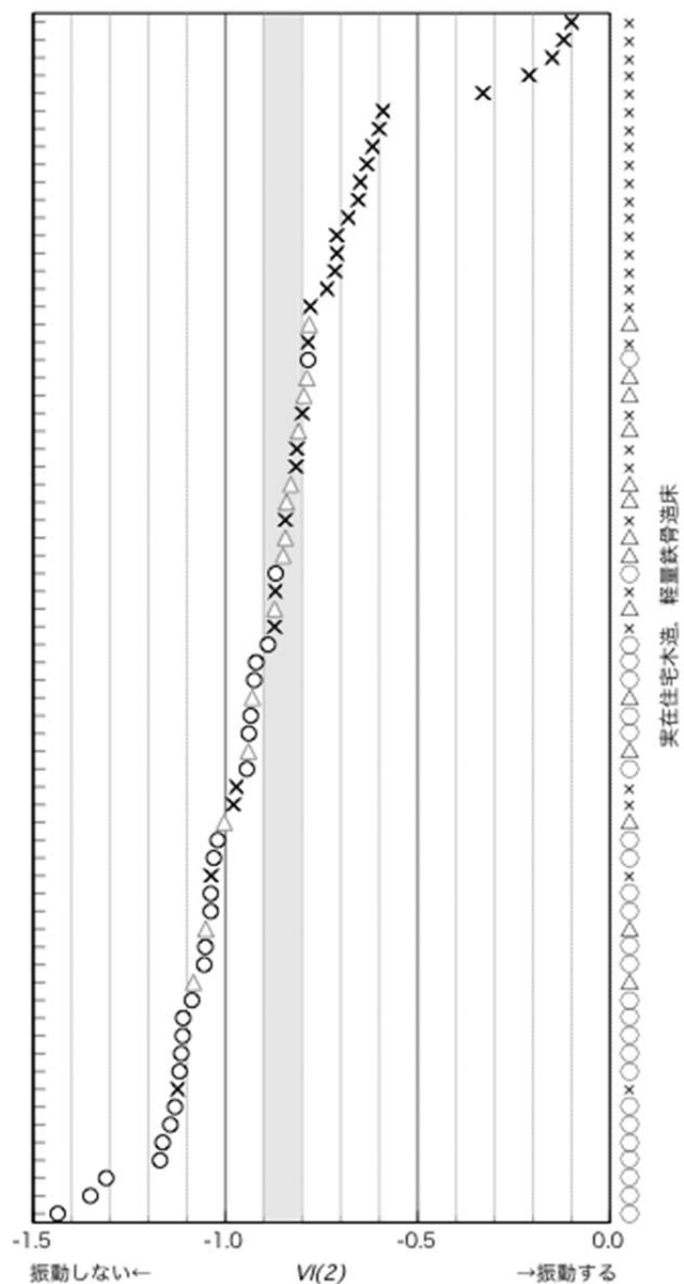


図-5 苦情発生の有無と $VI(2)$ の関係^[9]

視覚的要因が引き金となって苦情につながるメカニズムを、確認することができました。

5 S造, RC造建築物床における歩

行振動の評価方法

つぎに、S造, RC造建築物床で発生する周期的な振動や、倍調波共振時の連続的な振動の評価方法について検討しました。この検討では、振動台を用いて新たに官能検査を実施しました。

図-6に、検査試料とした歩行振動の例^[13]を示します。ここで、図の縦軸は、人間の感覚特性に応じて振動数補正した振幅となっています。図に示した3種の周期的振動は、いずれも振幅の最大値はほぼ近似していますが、官能検査の結果、

1)と2)に対する振動感覚、評価は同程度であるのに対し、3)は1), 2)より振動が小さく感じられ、気にならないと評価されることがわかりました。このような例を含め種々検討した結果、周期的な振動に対する感覚、評価には、着地した瞬間を含むある一定の時間内(図の網掛けの範囲内)の振動が支配的に寄与していることが明らかとなりました。これは、周期的振動では、人間はある程度以上の歩数分振動を感じると無意識のうちに次の1歩のタイミングを計り、そのタイミングで発生する振動の大きさで全体としての振動の大きさを判断しているためと推察できます。そこで、周期的振動の歩数や図の t の長さを種々変化させて検討した結果、5歩程度以上あれば人間は着地のタイミングを計れること、及び $t=0.15\text{s}$ とした場合の網掛けの範囲内の平均振幅(以降“振動数補正着地振幅”と記します)が振動感覚、評価とよい対応を示すことが明らかとなりました。図-7に、周期的振動の気になり具合に関する心理学的尺度(気になり具合評価尺度)と振動数補正着地振幅の関係^[13]を示します。

なお、倍調波共振時の連続的な振動については、同様の検討の結果、振動感覚は振動数補正を施した振幅の最大値とよい対応を示すのに対し、振動評価には振動の継続時間も影響しており、振幅の最大値に継続時間を加味した性能値がよい対応を示すことが、明らかとなりました。

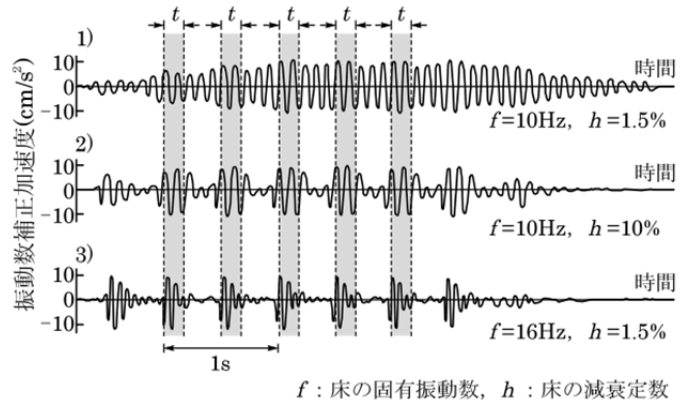


図-6 周期的振動と人間の感覚、評価との関係の検討例^[13]

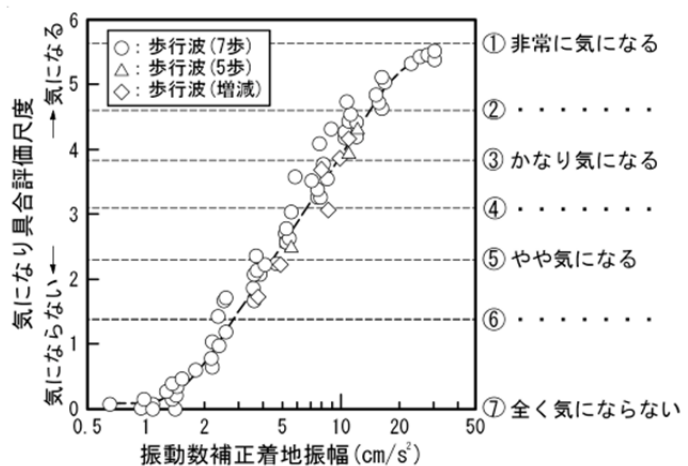


図-7 気になり具合評価尺度と振動数補正着地振幅の関係^[13]

6 木造大スパン床における歩行振動の評価方法

近年、日本の林業の復興や環境問題対策として、学校や官公庁の事務所など公共の中、低層大規模建築物に木造を採用しようとする方向性が、国によって示されました。これらの建築物では、大スパン床が採用される例が多くなると考えられます。ここで、歩行振動の観点か

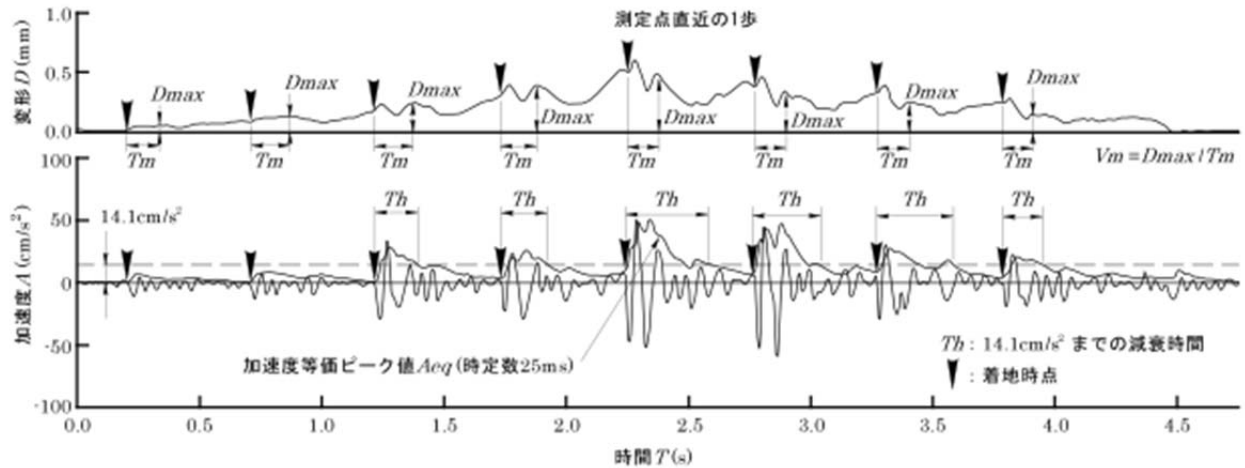


図-8 比較的剛性の低い木造大スパン床における歩行振動の例^[14]

ら木造大スパン床を評価する場合、多くても5歩程度しか歩行できない8畳間程度の大きさまでの床と異なり、歩数や歩行方向などの影響が無視できず、4で述べたように、当該床の中で最も大きな振動が発生する位置に1歩分の加振力を入力して測定される $VI(2)$ を、その床の居住後評価を代表する性能値として用いるのは困難と予想されます。

そこで、筆者らは、第一段階として、木造大スパンの中でも比較的剛性が低いと思われる、スパン 5460mm、梁幅 105×梁成 240mm、梁間隔 910mm の架構からなる床を試料床として用い、複数歩連続した歩行による振動と振動感覚、評価との関係を検討しました。図-8に、試料床での歩行振動の例^[14]を示します。図から、歩数は異なるものの、図-2に示した8畳間程度の大きさの床で発生する歩行振動と、性状が比較的近似していることがわかります。種々検討の結果、連続した歩行振動に対する感覚、評価には1歩ごとの振動が加算的に影響しており、1歩ごとの振動に対する性能値を全歩数分加算することにより連続した歩行振動の性能値を提示できることが、明らかとなりました。すなわち、図に示す要領で1歩ごとに D_{max} 、 V_m 、 T_h を求め、これらを3で述べた式に代入して求まる1歩ごとの $VI(2)$ を、さらに下式にしたがって全歩数分加算して算出される $SVI(2)$ が、連続した歩行振動に対する感覚、評価とよい対応を示すことを明らかとなりました。ここで、 $VI(2)_{ref}$ は、振動感覚、評価に影響しないほど小さい $VI(2)$ を加算対象から除外するために設定した、 $VI(2)$ の下限値です。

$$SVI(2) = \sum_{n=1}^{全歩数} (VI(2)_n - VI(2)_{ref})$$

ここで、 $VI(2)_n$ は n 歩目の $VI(2)$

$$VI(2)_{ref} = -1.2$$

ただし、 $VI(2)_n < VI(2)_{ref}$ の場合、

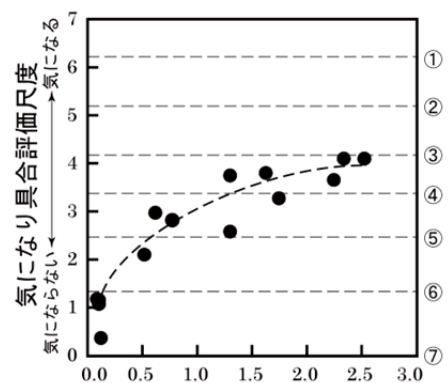


図-9 気になり $SVI(2)$ 評価尺度と $SVI(2)$ の関係^[14]

$$VI(2)_h = VI(2)_{ref} \text{とします}$$

図-9 に、官能検査結果に基づいて構成した心理学的尺度(気になり具合評価尺度)と $SVI(2)$ の関係^[14]を示します。両者はよい対応を示しており、比較的剛性の低い床を対象とした場合、連続した歩行振動に対する性能値として $SVI(2)$ が妥当であることがわかります。

続いて、今後施工例がより多くなると思われる、比較的剛性の高い木造大スパン床に適用する性能値について検討しました。この検討では、スパン、梁断面、小梁もしくはパネル受材の種類及び間隔、床板の質量及び剛性などが種々異なる、31種の試料床を用いました。試料床のスパンの範囲は4550～8190mm、梁成の範囲は330～600mm、1次固有振動数の範囲は10.5～27.0Hzです。また、梁上のスパン中央に980Nの集中荷重を静的に載荷した場合の剛性の範囲は、1521～13032N/mmです。ちなみに、上述の比較的剛性の低い木造大スパン床の1次固有振動数は15.5Hz、剛性は653N/mmです。

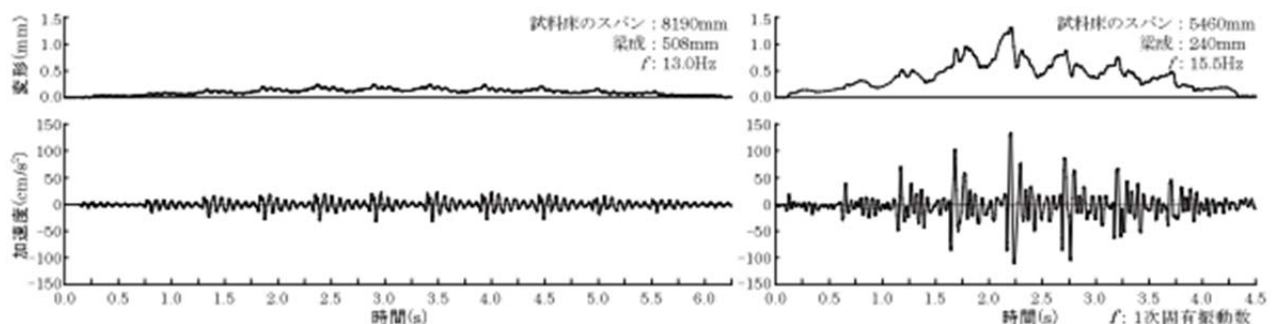
図-10に、比較的剛性の高い床で発生する歩行振動の例^{[16],[17]}を示します。図には、上述の比較的剛性の低い床での歩行振動も、同じスケールで比較して示しました。図から、(1)の比較的剛性の高い床で発生する歩行振動は、大きさ、性状ともに(2)の剛性が低い床とは大きく異なり、どちらかというとき造、RC造建築物床で発生する周期的な振動と近似していることがわかります。この変形・時間曲線及び加速度・時間曲線から上記の要領で $SVI(2)$ を算出しても、大部分の試料床で0となり、官能検査結果と対応しないことが明らかとなりました。すなわち、図の(1)に示すような歩行振動に対する感覚、評価は、1歩ごとの感覚、評価の積み重ねでは記述できないことがわかりました。では、(1)のような振動は、どのように感じられているのでしょうか。筆者らは、(1)と(2)の比較から、(2)では着地時の変形にマスクされて1歩ごとに分断されていた床の固有振動数での振動が、(1)では連続的に感じられるようになるため、歩き始めから終わりまでの床の固有振動数での振動を、振幅は小さいものの、継続時間の長い1つの連続した振動として感じているものと推察しました。

そこで、比較的剛性の高い床に適用する性能値を新たに設定するべく、各試料床で測定された加速度・時間曲線から、以下の1)～3)の3種のレベル波形を算出しました。

- 1) $wVAL$ (T.C. : 25ms)
- 2) $wVAL$ (T.C. : 10ms)
- 3) V_L (T.C. : 10ms)

ここで、 $wVAL$ は、振動加速度レベル VAL (基準値： $10^{-5}m/s^2$)を下式にしたがって補正した“補正振動加速度レベル”です。この補正式は、日本建築学会居住性能評価指針のV曲線に基づいて、卓越振動数 f の振動の VAL を、卓越振動数8Hzの場合の VAL に換算するものです。

- ・卓越振動数 $f \leq 8\text{Hz}$ の場合： $wVAL = VAL$
- ・卓越振動数 $8\text{Hz} < f$ の場合： $wVAL = VAL + 20 \cdot \log(8/f)$



(1) 比較的剛性の高い床における歩行振動の例

(2) 比較的剛性の低い床における歩行振動の例

図-10 木造大スパン床における歩行振動の例^{[16],[17]}

表-1 比較的剛性の高い木造大スパン床の歩行振動の性能候補値^{[16], [17]}

性能候補値の概念	補正振動加速度レベル		振動レベル
	1)wVAL(T.C.:25ms)	2)wVAL(T.C.:10ms)	3)VZ(T.C.:10ms)
A)レベルの最大値	$wVAL_{max}$	$wVAL_{max}$	VL_{max}
B)1歩ごとのレベルの最大値の和	$\sum_{n=1}^{60} (wVAL_n - wVAL_{ref})$ wVAL _n : n歩目のwVALの最大値 ただし、wVAL _{ref} =67dBとし wVAL _n <wVAL _{ref} の場合 wVAL _n =wVAL _{ref} とする	$\sum_{n=1}^{60} (wVAL_n - wVAL_{ref})$ wVAL _n : n歩目のwVALの最大値 ただし、wVAL _{ref} =67dBとし wVAL _n <wVAL _{ref} の場合 wVAL _n =wVAL _{ref} とする	$\sum_{n=1}^{60} (VL_n - VL_{ref})$ VL _n : n歩目のVLの最大値 ただし、VL _{ref} =67dBとし VL _n <VL _{ref} の場合 VL _n =VL _{ref} とする
C)レベルの積分値	$\int (wVAL - wVAL_{ref}) dt$ ただし、wVAL _{ref} =67dBとし wVAL<wVAL _{ref} の場合 wVAL=wVAL _{ref} とする	$\int (wVAL - wVAL_{ref}) dt$ ただし、wVAL _{ref} =67dBとし wVAL<wVAL _{ref} の場合 wVAL=wVAL _{ref} とする	$\int (VL - VL_{ref}) dt$ ただし、VL _{ref} =67dBとし VL<VL _{ref} の場合 VL=VL _{ref} とする
D)レベルの最大値+継続時間	$wVAL_{max} + 20 \cdot \log(T^{1/4})$ T: wVALがwVAL _{ref} 以上となっている時間 ただし、wVAL _{ref} =67dB、T _{cr} =1sとし T<T _{cr} の場合T=T _{cr} とする	$wVAL_{max} + 20 \cdot \log(T^{1/4})$ T: wVALがwVAL _{ref} 以上となっている時間 ただし、wVAL _{ref} =67dB、T _{cr} =1sとし T<T _{cr} の場合T=T _{cr} とする	$VL_{max} + 20 \cdot \log(T^{1/4})$ T: VLがVL _{ref} 以上となっている時間 ただし、VL _{ref} =67dB、T _{cr} =1sとし T<T _{cr} の場合T=T _{cr} とする

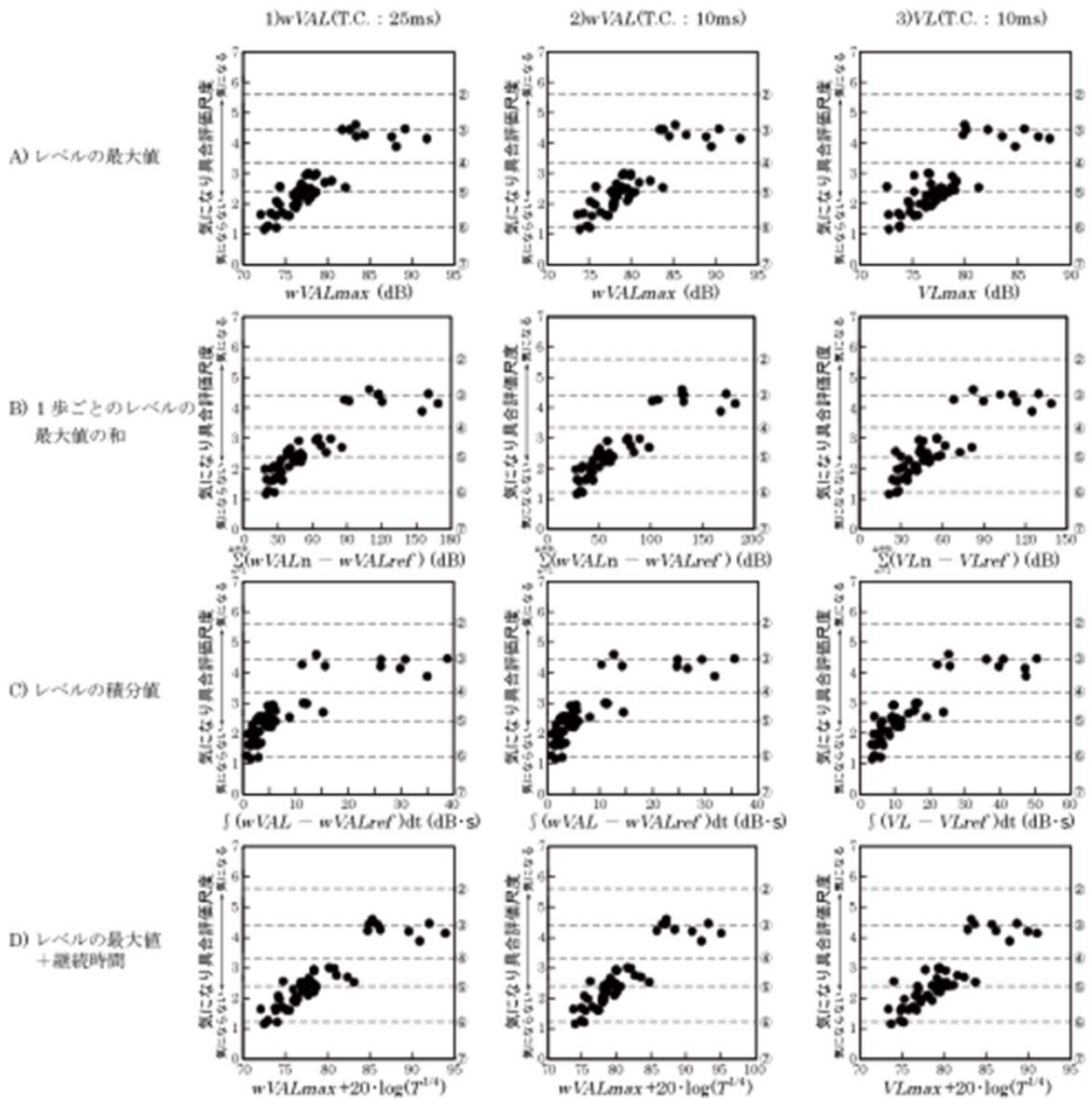


図-11 気になり具合評価尺度と性能候補値の関係^{[16], [17]}

また、VLは、JIS C 1510に規定された基準レスポンスにしたがって振動数補正を施した“振動レベル”です。なお、T.C.は、時定数を表します。

つぎに、それぞれのレベル波形から、表-1に示すA)~D)の4種の値を、性能値の候補として算出しました。表の“性能候補値の概念”の欄に示すように、A)はレベルの最大値、B)~D)はレベルの最大値に時間変化の要因を加味した性能候補値です。このうち、B)は、5で述べたS造、RC造建築物床で発生する歩行振動の性能値^[13]との整合性を考慮して設定したものです。また、C)は、受振者に暴露された振動の総和量と位置付けられるものです。さらに、D)は、井上と筆者らが提示した、レベルの時間変化の要因を比較的簡便な方法で加味した性能値^[18]との整合性を考慮して設定したものです。

図-11に、官能検査結果に基づいて構成した心理学的尺度(気になり具合評価尺度)と、表-1に示した12種の性能候補値の関係^{[16],[17]}を示します。図より、12種の性能候補値の中では、A)のレベルの最大値が心理学的尺度とよい対応を示し、さらにB)~D)のレベルの時間変化の要因を加味した性能候補値がよりよい対応を示していることがわかります。ここで、これらの性能候補値は、それぞれ以下のような長所、短所を有しています。

- ・時定数については、25ms とすると VI(2)や SVI(2)と整合しますが、一般的に普及している分析機で簡便に算出することはできません
- ・wVAL と VL では、VLの方が解析が簡便ですが、振動数情報が欠落しがちという問題点を含んでいます
- ・レベルの最大値のみでなく、その時間変化の要因を加味した方が性能値としての精度は高くなりますが、解析は煩雑になります

今後、これらの長所、短所に加え、S造、RC造建築物床で発生する歩行振動や、歩行以外の振動(設備や交通による振動など)への適用性なども考慮しながら、どの候補値を性能値として採用するか検討してゆく予定です。

7 おわりに

本稿では、居住性の観点から歩行振動を評価するうえで基本となる1歩の歩行振動に対する性能値について述べたうえで、苦情発生の有無からみた木造建築物床の評価方法、S造、RC造建築物床における歩行振動の評価方法、及び木造大スパン床における歩行振動の評価方法について解説しました。8畳間程度の大きさまでの木造建築物床や比較的剛性の低い木造大スパン床では、着地時の動的変形の大きさ及び速さと、その後の床の固有振動数での振動の続き具合を複合した性能値で、歩行振動を評価できることがわかりました。一方、S造、RC造建築物床や比較的剛性の高い木造大スパン床では、床の固有振動数での振動から算出されるレベルの最大値が振動感覚、評価とよい対応を示し、さらにレベルの時間変化の要因を加味するとよりよい対応が得られることが示唆されました。

現在、日本建築学会の環境振動運営委員会では、居住性能評価指針の改定に向けた検討を行っていますが、そこでの主要な検討課題の1つに、振幅の時間変化をともなう振動に対す

る性能値の設定が挙げられています。本稿の 5, 6 で述べた性能値に関する検討結果は、その議論の際の有効な知見となると考えています。

参考文献

- [1] 小野英哲, 横山 裕: 人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究, ー振動発生者と受振者が同じ場合ー, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 381 号, pp.1-9, 1987.11
- [2] 横山 裕, 小野英哲: 人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究, ー振動発生者と受振者が異なる場合ー, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 390 号, pp.1-9, 1988.8
- [3] 小野英哲, 横山 裕: 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究, ー振動発生者と受振者が同じ場合(動作した人間自身が床振動を感じる場合)ー, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 394 号, pp.8-16, 1988.12
- [4] 横山 裕, 小野英哲: 振動発生者と受振者が異なる場合の床振動の評価方法の提示, 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究(第 2 報), 日本建築学会構造系論文集, 第 418 号, pp.1-8, 1990.12
- [5] 横山 裕: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究, 動的加振器, 受振器の設定および妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 466 号, pp.21-29, 1994.12
- [6] 横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究, 衝撃的加振器の開発および振動減衰時間算出方法の妥当性の確認, 日本建築学会構造系論文集, 第 476 号, pp.21-30, 1995.10
- [7] 横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究, 仕上げ材が施された床に対する加振, 受振装置の適用方法の設定, 日本建築学会構造系論文集, 第 490 号, pp.17-26, 1996.12
- [8] 横山 裕, 松長健一郎: 小走り時の床振動測定用加振装置および振動減衰時間算出方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 519 号, pp.13-20, 1999.5
- [9] 横山 裕: 苦情発生の有無からみた実在住宅床振動の測定条件, 境界値の提示, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, pp.17-24, 2001.8
- [10] 横山 裕, 井上竜太: がたつき音の影響を含む床振動の評価方法の提示 振動発生者と受振, 受音者が同じ場合, 日本建築学会構造系論文集, 第 550 号, pp.15-22, 2001.12
- [11] 横山 裕, 井上竜太: がたつき音の影響を含む床振動の評価方法の提示 振動発生者と受振, 受音者が異なる場合, 日本建築学会構造系論文集, 第 564 号, pp.15-22, 2003.2
- [12] 横山 裕, 井上竜太, 西谷伸介, 松下仁士, 柴田昭彦, 塚田幸一, 小林裕明: 共振を考慮した人間の動作による床振動の測定, 評価ならびに対策に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第 24 号, pp.197-202, 2006.12

- [13] 横山 裕, 井上竜太, 池田文乃, 八木 豊: 歩行により発生する周期的および連続的な床振動の評価指標, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp.125-132, 2009.2
- [14] 横山 裕: 複数歩連続した歩行振動の性能値に関する基礎的検討, 木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法(その 1), 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 691 号, pp.689-695, 2013.9
- [15] 横山 裕, 盧 曼: 居住性からみた木造大スパン床の歩行振動の評価方法に関する基礎的研究, その3 評価指標の提示, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.399-400, 2013.8
- [16] 黒田瑛一, 横山 裕: 居住性からみた木造大スパン床の歩行振動の評価方法に関する基礎的研究, その4 心理学的尺度との関係を検討する物理量の導出, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.379-380, 2014.9
- [17] 横山 裕, 黒田瑛一: 居住性からみた木造大スパン床の歩行振動の評価方法に関する基礎的研究, その4 心理学的尺度と物理量の関係の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.381-382, 2014.9
- [18] 井上竜太, 横山 裕, 松下仁士: 振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.377-378, 2014.9

－第8回 環境振動問題に対する取り組みの現状－

独立行政法人 産業技術総合研究所 国 松 直

1 はじめに

今回で本シリーズ「振動に関わる苦情への対応」も最後となります。いままで、以下を解説してきました。

- ちょうせい 73号 ー 第1回 振動苦情処理と必要な振動に関する知識ー
- ちょうせい 74号 ー 第2回 振動の基礎：振動の発生と伝搬ー
- ちょうせい 75号 ー 第3回 振動の基礎：振動の影響と評価・規制方法ー
- ちょうせい 76号 ー 第4回 振動の基礎：振動の測定方法と対策方法ー
- ちょうせい 77号 ー 第5回 建設作業振動ー
- ちょうせい 78号 ー 第6回 鉄道、道路、工場・事業場ー
- ちょうせい 79号 ー 第7回 歩行振動（内部振動源）ー

第1回から第4回までは振動の基礎知識として、振動の発生と伝搬、振動の影響と評価・規制方法、振動の測定方法と対策方法を記載しました。

第5回から第7回までの3回は、外部振動源として建設作業振動、鉄道、道路、工場・事業場、内部振動源として歩行振動について、各個別の振動源ごとにそれらの特徴と対応等を解説して頂きました。

今回は、環境振動問題に対する環境省や学会での現状の取り組みについて記述します。

2 環境振動問題に対する環境省の最近の取り組み

環境省トップページ→ <http://www.env.go.jp/>

環境省における環境振動に関連する情報としては、上記画面内 [政策分野一覧] の

[大気環境・自動車対策] → <http://www.env.go.jp/air/>

[騒音・振動・臭気対策] → <http://www.env.go.jp/seisaku/list/noise.html>

[振動対策] → <http://www.env.go.jp/air/sindo/sindo.html>

にいくつか掲載されています。関連する部署としては環境省水・大気環境局において振動規制法を所掌している大気生活環境室と自動車に関わる環境を扱う自動車環境対策課の2つがあります。

環境影響評価に関しては、[政策分野一覧] の [総合環境政策] の下に

[環境アセスメント] → <http://www.env.go.jp/seisaku/list/assessment.html> があります。

振動規制法による規制において、規制値は満足しているが苦情が発生するという現状を、苦情件数と基準適合率(=振動規制法の基準適合件数/測定数×100(%))の不一致(基準適合率が上昇しているにもかかわらず苦情件数も増加していること。基準適合率の推移は第3回、

図 3-7 参照)として、環境省も把握[1]しており、改善に向けた取り組みを行っています[2]。また道路交通振動については、短期目標(道路交通振動対応の標準化)、中期目標(道路交通振動対応の高度化)、長期目標(道路交通による振動環境下における快適な生活環境の実現)のためのロードマップを作成しています[3]。ただし、法改正に至るまでには、まだ多くの検討・解明すべき課題があります。また規制基準(要請限度)値を見直しするにしても、規制基準(要請限度)値を決める際には、社会調査も必要になります。

文献[2]では、この苦情件数と基準適合率の不一致の主な原因として、評価地点と評価軸を指摘しています。(以下原文引用)

①評価地点：日本の振動規制法は、排出規制を主眼としており、発生源側の敷地境界を評価地点としている。同法の制定に当たっては、受振点での振動の大きさを推定するための家屋増幅を一律 5 dB としていたが、調査結果によると、10dB の家屋増幅が見られるケースも見られ、家屋増幅についてより詳細に把握する必要性が示唆された。

②評価軸：日本の振動規制法では、鉛直(Z)方向の振動レベルのみを評価している。そこで、環境省では、水平方向の振動の状況を確認するための調査を行った。その結果、家屋側敷地境界の振動レベルは鉛直(Z)方向の方が水平(X,Y)方向よりも 5 dB 程度大きいものの、家屋内の増幅量は水平方向の方が平均で 5～7 dB 大きいことが分かった。なお、これらの増幅は木造家屋に関するものであり、RC 造での増幅は認められなかった。

これらの指摘から、環境省自動車環境対策課では、まだ公表されていませんが基本的な実態を把握することが可能な道路交通振動測定ガイド(案)について検討を行っています[4]。人が暴露されている振動環境と苦情に繋がる感覚(アノイアンス、不快感など)との関係を検討するためには、建物内での 3 成分加速度記録の測定・分析・評価が望まれます。

2.1 国内外の主な環境振動評価法

一方で、国際的な動向も把握しておく必要があります。環境省の調査において、今後検討すべき振動評価量として各国の基準値、評価量等が整理されています[2]。また、松本[5]は、目的／対象振動源／測定(予測)位置／測定(予測)方向／物理量／周波数／評価量／評価基準の項目に分けて、表 8-1 を整理しています。

諸外国では、大きく次の 4 つの規格に基づく評価が行われているようです。

- 1) ISO 2631-2 (2003) (デンマーク, オーストリアなど 8 カ国)
- 2) ISO 2631-2 (1989) (アメリカ, ニュージーランドなど 7 カ国)
- 3) DIN 4150-2 (1999) (ドイツ, スイス(予定))
- 4) BS 6472-1 (2008) (イギリス, オーストラリア(予定))

また、ノルウェーでは独自に道路交通や鉄道による振動に限定した評価方法を規定した規格[6]を発行しています。

表 8-1 のように、日本では、どれかに準拠した評価法を用いているわけではありません。今後、このような諸外国の評価方法の現状も踏まえて、評価方法の改良や規制のあり方などを検討していく必要があると考えています。

表 8-1 主な環境振動評価法の比較

	振動規制法 (1976)	居住性能評価 指針(2004)	ISO 2631-2 (2003)	ISO 2631-2 (1989)	DIN 4150-2 (1999)	BS 6472-1 (2008)
目的	生活環境を保全し、国民の健康の保護に資すること	居住環境としての性能を維持	快適性やアノイアンスに基づく建物振動への人の暴露の評価	ISO 2631-1 の建物振動評価への適用	建築物の振動への暴露の評価	建築物の振動に対する人の応答の予測
対象振動源	・工場、事業場 ・建設工事 ・道路交通	・人の動作、設備 ・交通 ・風	振動源は問わない	振動源は問わないが、連続振動と間欠振動のみ(衝撃的な振動の評価は付録)	振動源は問わない(道路交通、鉄道、建設工事に対する評価法の規定あり)	振動源は問わない(定期的な発破による振動についてはBS6472-2に規定)
測定(予測)位置	建物外 (敷地境界)	建物内 (問題となる位置、評価値が最大になると想定される位置)	建物内 (部屋の使用状況を考慮、評価値が最大になると想定される位置)	建物内 (人体に振動が伝達する位置の構造床面上)	建物内 (対象となる部屋の床、評価値が最大になると想定される位置)	建物内 (人体に振動が伝達する位置、評価値が最大になると想定される位置)
測定(予測)方向	鉛直	・鉛直(動作、設備) ・鉛直・水平(交通) ・水平(風)・	並進直交3方向(建物を基準)	並進直交3方向(人体の私事面座標系)	並進直交3方向(建物を基準)	並進直交3方向(建物を基準、振動源の方向)
物理量	加速度	加速度	加速度	加速度(速度)	速度	加速度
周波数	1~80Hz	・3~30Hz (動作、設備) ・1, 3~30Hz (交通) ・0.1~5Hz (風)	1(0.5)~80Hz	1~80Hz	1~80Hz	0.5~80Hz
評価量	振動レベル (統計処理含む)	1/3 オクターブバンドごとの加速度最大値(ピーク値)	<基本> ・補正加速度実効値(3方向のうち最大値) <捕捉> ・移動加速度実効値最大値(MTVV) ・四乗則暴露量値(VDV)	・加速度実効値 ・補正加速度実効値	補正加速度実効値(KB 値, 3方向のうち最大値, 統計処理等を含む)	四乗則暴露量値(VDV, 3方向のうち最大値)
評価基準	規制基準, 要請限度	「性能評価曲線」(知覚確率)	なし	<付録> 「base curve」あるいは基準値とそれに対する倍率(建物の用途, 時間帯を考慮)	住居類における人の振動暴露に対する指針値(加振源ごとの評価方法, 区域, 時間帯を考慮)	四乗則暴露量値(VDV)に対する居住者の応答に関する基準(時間帯を考慮)

2.2 振動レベル測定に関する現状の問題点と改善方法

振動規制法に基づいた振動レベル測定方法は、振動規制法が制定された当時の技術水準に基づいて規定されており、近年のデジタル機器として高度化した測定機器の活用について、明確な適用方法が示されていないようです。環境省におけるこのような問題意識から、測定方法、データ処理方法の統一のために、現状の問題点と望ましい測定方法が振動規制

法の枠組みの中で検討されています[4][7]。

振動レベル測定方法に関して、現在使用されている測定器の技術水準を踏まえて、抽出された現状の問題点と検討内容を表 8-2 に示します。

表 8-2 振動レベル測定方法に関する問題点と対応

項目	問題点	検討概要
測定間隔とサンプリング数	振動規制法施行規則では「五秒間隔、百個又はこれに準ずる間隔、個数」となっている1)が、振動測定機器の進歩により、振動測定間隔は0.1秒や1秒間隔で行うことが多い。	施行規則等に基づき振動の測定時間を500秒間(5秒×100個)に固定し、測定間隔を変化(0.1秒、1秒、5秒)させデータサンプルを抽出した。また、1時間内に得られる L_{v10} の個数を変化(1個、2個、3個、6個)させ、評価値(L_{v10})への影響を検討した。
測定時間	振動規制法施行規則では「昼間及び夜間の区分ごとに4時間以上行う」となっているが、4時間の考え方にばらつきがあった。	昼間及び夜間の4時間の集計方法を変える(ランダム4時間の平均値、上位4時間の平均値、時間区分の平均)ことによる評価値(L_{v10})への影響を検討した。
暗振動の補正	振動規制法施行規則では「道路交通振動レベル暗振動の補正」を行う1)ことになっているが、ほとんどの地方公共団体で暗振動補正は行っていない。	暗振動が「定常的(工場等から発生する定常的な振動を暗振動に設定)」な場合と、「非定常的(地下鉄通過時に発生する振動を暗振動に設定)」な場合に分け、暗振動補正の有無による評価値(L_{v10})への影響を検討した。
交通量が少ない場合の補正	振動規制法の施行について(環大特154号)では、「自動車が当該測定点を通過した時点の前後5秒以内において測定して得た値以外の値を除く」1)とされているが、ほとんどの地方公共団体では交通量が少ない場合の補正は行われていない。	交通量の少ない地点又は時間帯を選定した振動測定を実施し、補正の有無による評価値(L_{v10})への影響を検証した。 環大特154号に準じた補正方法と車両非通過のレベル値を設定(L_{v95} や測定下限値等)し、得られたデータから一律除外する補正方法についてその影響を検討した。

上記の検討の結果が、報告書[7]の中で表 8-3 のように提案としてまとめられています。

表 8-3 道路交通振動レベルの測定に関する提案

項目	提案内容
測定間隔とサンプリング数	測定間隔が選択できる機器を使用する場合、0.1秒間隔、10分測定を目安とする。 連続測定が可能な場合には、10分間のデータを6回取得し、その平均値を当該時間帯の計測値としてもよい。
測定時間	交通量の状況を考慮し、効果的な測定計画(交通量が多い時間帯、大型車混入率が高い時間等)を立てることが望ましい。 24時間連続測定の場合、時間区分ごとにすべて算術平均した数値を振動レベルとすることが望ましい。
暗振動の補正	道路交通振動に比して暗振動のレベルが十分に低い(レベル差が10dB以上あると判断できる)場合は、暗振動補正を行わなくてよいと考えられる。
交通量が少ない場合の補正	測定対象の道路を通過する交通量が少ない場合、そのまま測定を行うと振動レベルを低く評価する可能性があるため、車両非通過時のデータを除外する等の配慮が必要である。

これらの提案内容は、近いうちに公表される道路交通振動に対する振動測定マニュアルに反映される予定です。

3. 環境振動問題に関連した日本騒音制御工学会の最近の取り組み

日本騒音制御工学会は日本音響学会に比してより多くの地方公共団体職員が会員になっているという特色を有しています。そのため、直接的に一般の人からの苦情申立の窓口として対応した経験のある会員が日本騒音制御工学会には多くおられるようです。

日本騒音制御工学会内の学会活動の中で振動に関係する研究分科会は以下の2つがあります。

- ・環境振動評価分科会
- ・道路交通振動予測式作成分科会

ここでは、これらの分科会活動を短く紹介致します。

(1) 環境振動評価分科会

http://www.ince-j.or.jp/04/04_page/04_3.html

上記 URL ページには、「2013 年度報告」と「振動測定マニュアルについて」が記載され、(1)振動測定マニュアル(案)の改定、(2)振動評価方法の提案が主に検討されています。分科会推奨の測定法として、2012 年 8 月に「案」が公表され、いくつか記載内容を見直した「ver.1」が 2014 年 8 月に再度公表されています。「ver.1」では、「外部振動源による建物振動の評価に係る参考資料」として、振動評価に資する資料も掲載されています。この振動測定マニュアルは、「工場・事業場、建設作業、道路交通、及び鉄道から発生する振動により苦情が発生し、かつ振動規制法による対応では苦情の解消が困難な場合に、問題解決に向けた振動対策に資する技術資料を作成することを目的」としていますが、振動評価方法の提案に向けて、評価指標に関する将来的な改善に備えるための詳細データの蓄積が望まれています。振動測定マニュアル「ver.1」は上記 URL からダウンロード可能となっていますので、多くの方に活用して頂き、分科会へデータ提供して頂ければよりよい振動評価方法の提案が早期に可能になるのではないかと思います。

なお、今年 4 月 21 日に開催される平成 27(2015)年春季研究発表会において、当該分科会が「振動測定マニュアルと建物振動の評価」と題したセッションを担当します。

(2) 道路交通振動予測式作成分科会

http://www.ince-j.or.jp/04/04_page/04_3.html

上記 URL ページには、分科会の設置目的、分科会活動が紹介されています。当該分科会では、主に環境アセスメントで使用可能な、 L_{V10} を算出することができる、国際的な動向を加味した「物理的なモデル」に基づく、新たな道路交通振動予測方法を提案し、公表することを目指しています。2003 年に平面道路を対象とした予測式 (RTV_Model 2003) を公表していますが、その後盛土・切土道路への適用拡大、2011 年度から高架道路を対象とした予測式作成に取り組んでいます。

官民境界での鉛直方向の L_{V10} の評価に対して、いろいろな問題があるとの指摘もありますが、環境アセスメントの評価指標が、振動規制法と連動していることから、この分科会で、この評価指標を議論することは視点が異なります。

4. 環境振動問題に関連した日本建築学会の最近の取り組み

http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s17/AIJ_EVindex.html

上記 URL は、日本建築学会環境工学委員会環境振動運営委員会のトップページです。環境振動運営委員会には以下の5つの小委員会と運営委員会直属の4つのWGがあります。

- ・環境振動測定分析小委員会
- ・環境振動評価小委員会
- ・環境振動予測解析小委員会
- ・環境振動設計小委員会
- ・居住性能評価指針改定小委員会

ここでは、以下の3つの小委員会の活動を短く紹介します。

(1) 環境振動測定分析小委員会

http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s17/subcommitteel_measurement/AIJ_EVSC1index.html

上記 URL ページには、「設置目的、各年度活動計画」、「これまでの具体的成果」などが掲載されています。当該小委員会では環境振動に関する測定手法について多くの測定事例を収集し、測定分析方法の体系化を目指しています。官民境界とは異なるより振動暴露環境に近い建築物内の測定点における測定方法から分析方法までを検討しており、これらの体系化が評価体系と結びつくことが期待されています。

本年度の活動として、現在以下の大きく2種類の測定を想定したアンケートを実施しています。

- (1) 内部又は外部加振源によって生じる建築物内部のある点の振動現象を測定する方法
〈振動絶対値の測定：現在の居住性能評価指針と同様な考え方であり、例えばある場所で、ある加振源により発生する振動現象そのものを測定する〉
- (2) 人の動作によって生じる床の揺れにくさを測定する方法
〈床の振動に対する部位性能の測定〉

苦情等への対応として、建築物内で振動測定を行う際に測定者が悩む「測定位置・点数」等に関する問題が、当該小委員会の活動結果から、解決されることが期待されます。

現在、上記に関連したアンケートへの協力依頼が環境振動運営委員会のホームページに掲載されています。アンケート提出締切が2015年2月13日ですので、本稿 Web 掲載までに締め切られてしまいますが、どのようなアンケートが行われているか、目を通して頂くことも今後の役に立つかも知れません。締切後でも回答頂ければご意見を伺うことはできるとお思いますので、お時間のあるときに対応をお願い致します。

日本建築学会環境工学委員会環境振動運営委員会のトップページ内

・環境振動測定手法小委員会(2015年2月13日まで実施)

「環境振動測定に関するアンケート調査へのご協力をお願い_2014HP」をお読み頂き、調査へのご協力をお願い致します。

- 1)環境振動測定に関するアンケート調査へのご協力をお願い_2014HP (pdf ファイル, 88KB)
- 2)環境振動測定に関するアンケート_2014 (Word ファイル, 504KB)

(2) 環境振動評価小委員会

http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s17/subcommittee2_performance/AIJ_EVSC2index.html

上記 URL ページには、「設置目的、各年度活動計画」、「これまでの具体的成果」などが掲載されています。今後の環境振動評価のあり方については、当該委員会で検討されています。建築物を対象とした性能評価の現状や問題点の把握と課題抽出、今後の性能評価のあり方の模索に関連し、居住性能評価指針の改訂に資する評価体系について議論が行われています。評価体系化の試みについては、第 32 回環境振動シンポジウム(2014年1月)、第 33 回環境振動シンポジウム(2015年1月)の資料に現状が記載されています。

(3) 環境振動予測解析小委員会

http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s17/subcommittee3_control/AIJ_EVSC3index.html

上記 URL ページには、「設置目的、各年度活動計画」、「これまでの具体的成果」などが掲載されています。当該委員会では新しい環境振動問題に対する予測技術、解析技術を整理・分析し、それらのブラインド解析による精度評価などを検討しています。現在は、主に 1996 年～2010 年度分の文献について要約シートを用いた整理が実施されています。

また、運営委員会トップページには過去の環境振動運営委員会の活動内容をまとめた、「あゆみ」「あゆみ(Ⅱ)」が【刊行物, その他】の中に掲載されています。その下の方には、過去の環境振動シンポジウムに関して、そのタイトルリストがまとめられています。過去 10 年間のタイトルは以下になります。

2004.1	第 22 回	環境振動研究の将来展開 —他学協会とのコラボレーションを通して—
2005.1	第 23 回	訴訟問題から見た環境振動研究の方向性
2006.1	第 24 回	都市型環境振動対策 —実務からのアプローチ—
2007.1	第 25 回	環境振動の性能設計はどこまで可能か
2008.1	第 26 回	環境振動の現状と新たな視点 —対策検討事例と社会ニーズを通して—
2009.1	第 27 回	設計フローと性能ランクの構築にむけて
2010.1	第 28 回	環境振動における予測・シミュレーション技術の最前線
2011.1	第 29 回	群としての環境振動
2012.1	第 30 回	新しい視点で今後の環境振動を考える

2013.1	第31回	住まいに入り込む環境振動
2014.1	第32回	居住性能評価指針の新たな方向性－評価と設計の分離－
2015.1	第33回	居住性能評価指針を用いた設計の枠組み

第33回環境振動シンポジウムは2015年1月30日に開催予定ですので、本稿 Web 掲載時点で終了していますが、資料は日本建築学会から入手可能です。

5. 将来目指すべき振動環境

先にも記載したように環境省自動車環境対策課において、道路交通振動を対象としたロードマップを作成し、短期目標(道路交通振動対応の標準化)、中期目標(道路交通振動対応の高度化)、長期目標(道路交通による振動環境下における快適な生活環境の実現)を掲げています。これらの目標に対して、明確な実現可能な期日の設定は難しいけれども、大きな視点に立って目標設定し、目標に近づく努力をすることは好ましいことと思われま。ただし、作成時点では現状の問題点の列挙とそれらへの対応しか検討できませんが、近い将来においては、社会情勢の変化、生活スタイルの変化などにより、新たな環境振動問題が生起することが想定されますので、絶えず問題の洗い出しをして、ロードマップやマイルストーンの見直しを心がける必要があります。

環境振動問題に対する紛争案件の件数を極力ゼロに近づけるためには、苦情段階での対応が重要になります。そのためには、直接実際の苦情に接している地方公共団体職員の方と学会等との役割分担を考慮した密な連携が必要と考えています。公害等調整委員会でも紛争事例を紹介・公表していますが、苦情事例についても現在の件数主体の整理から苦情実態が分かるような内容の苦情シートによる整理、集計が必要と思います。そのようなデータアーカイブを用いて、学会等において苦情分類を行い、分類に適した対応対策マニュアル、対策の提案メニュー等の資料が整備、公表され、そのような資料を用いて地方公共団体職員の方による苦情申立者が納得するような対応(リスクコミュニケーション)が容易に可能となることが期待されます。

日本建築学会環境工学委員会環境振動運営委員会トップページには戸建て住宅の三成分振動特性測定・分析・評価 WG の成果として、以下が掲載されています。上記の参考となる内容ではないかと思ひます。

日本建築学会環境工学委員会環境振動運営委員会のトップページ内

- ・戸建て住宅の三成分振動特性測定・分析・評価 WG
- 環境振動測定結果記録シートをご活用下さい
- 1)戸建て住宅における 環境振動対策事例報告書 (pdf ファイル,610KB)
- 2)付録 1_合意形成フロー (pdf ファイル,179KB)
- 3)付録 2_環境振動測定結果記録シートの事例 (pdf ファイル,77KB)
- 4)付録 3_環境振動に関する Q & A 事例 (Excel ファイル,47KB)
- 環境振動測定結果記録シート(format) (Excel,165KB)
- 環境振動測定結果記録シート(記入例) (Excel,128KB)

6. まとめ

苦情対応には、専門的な知識だけでなく、苦情申立者への分かりやすい説明（リスクコミュニケーション能力）など幅広いスキルが必要です。にもかかわらず、最近では騒音振動部署を専門として知識を蓄積できる環境ではなく、2～3年ごとに専門性と関係なく異動するという状況と聞いています。このような環境では、地方公共団体職員の方が一般人を対象とした心理的影響が絡む難しい騒音振動苦情に十分対応してことは難しいのではないかと危惧しています。

今回の振動シリーズもそのような地方公共団体の職員の方を念頭に種々の参考となる事柄を記載させて頂きました。限られた紙面での解説で分かりにくかった部分もあったかと思えます。参考文献として挙げた文献等を参考にこれからも基礎及び周辺知識を修得するとともに経験知を養って頂いて、少しでも紛争案件が減少することを願っています。

振動規制法の問題点も種々指摘されていますが、短時間のうちに見直し、改正にまでは至りません。また、見直し、改正が行われたとしても、苦情件数がゼロになることはないかも知れません。紛争案件を減少させるためには、苦情申立者の立場に立ち、常に問題点を明らかにして、種々の改善に取り組んでいく姿勢が求め続けられるのではないかと思います。

最後になりますが、日ごとのルーチンの業務に追われることなく、環境省や学会等の活動による最新の知見、動向にも関心を持って頂きたいと思えます。種々の問題解決のためには地方公共団体職員の方と研究者等との連携が不可欠です。目的意識を共有して住民の方が不快な振動環境に持続的に晒されないような生活環境の実現、保全を目指していきたいと思えます。

【参考文献】

- [1] 永森一暢：振動防止行政の現状と課題、日本騒音制御工学会研究発表会論文集、p. 33～36、(2009. 4).
- [2] 例えば、平成 20 年度環境省請負業務、平成 20 年度振動評価手法及び規制手法等検討調査業務報告書、日本騒音制御工学会、(2009).
- [3] 例えば、平成 21 年度環境省委託業務、平成 21 年度道路交通振動対策検討調査委託業務報告書、(株)エイト日本技術開発、(2010).
- [4] 例えば、平成 25 年度環境省委託業務、平成 25 年度道路交通振動対策検討調査委託業務報告書、(株)エイト日本技術開発、(2014).
- [5] 松本泰尚：環境振動の評価方法、騒音制御、35 巻、2 号、p. 171～177、(2011).
- [6] Norwegian Standards Association : Vibration and shock –Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of effects on human beings, NS 8176(2005)(英語版 NS 8176E(2006)).
- [7] 築場則昭・岩田克司・西岡 樹・国松 直：現在の振動レベル測定に関する技術水準を考慮した道路交通振動の測定事例に対する評価、日本騒音制御工学会研究発表会論文

集、p. 241－244、(2014. 9).

【編集後記】

振動シリーズ、2年間（8回）にわたってご愛読頂き、有り難うございました。

内容について、如何だったでしょうか？読者の方の関心に応えられる内容であったか、記述内容のレベルが適切であったか等、不安な気もしています。また前回騒音シリーズにあった「番外編」のような、親しみやすいコラム的なものがなかったことも反省しています。

内容についての疑問、質問をお受けし、お答えする機会がありませんでしたので、ご意見、質問等がありましたら、事務局へ問い合わせ頂ければ、筆者一同から回答を差し上げたいと思います。

