

振動公害の評価法について

野 坂 弥 蔵

Yazo Nozaka

On the Method of Evaluating Vibration Nuisance

Abstract: Various methods of measuring and evaluating a vibration nuisance have been published and used. None of them can be considered applicable in all situations and consequently at present there is no standardized method in our country as well as in the world.

In this paper a little more reasonable method of evaluation is proposed together with an experimental result obtained by this method.

1. 結 言

公害振動の測定法、評価法については従来いくつかの提案がなされ実施されているが、いずれの方法にも一長一短があり、国内的にも国際的にも未だ統一された方法はない。本報告はやや合理的と思われる評価法と、その適用例について述べたものである。

2. 公害振動評価法の問題点

図1に工場振動の伝播経路を示す。振動源の加振力が基礎に伝わり、地盤を伝播して建物を振動させる。それが床の上に立ったり、椅子に坐ったりしている人間に伝わり、心理的、生理的感覚 C を生ずる。甚だしい時には家具が振れたり時計が止ったりするし、振動源から空気を伝ってくる騒音も加わり苦情 D を生ずる。

(1) 苦情の客観的評価が難しい。

家具の振動、時計の止り、建物の損傷などは客観的評価が容易のように考えられるが、その振動源に基因するか否かの判定は難しい。況や心理的、生理的感覚 C の評価は一層困難である。

(2) 建物の振動 B や、建物にごく近い地盤の振動 A' は測定し難い。

人間への振動入力は近似的に建物の振動 B であるとしても、場所によって B の値は異なるし、測定も難しい。また建物を振動させる地盤の振動も、事情によっては測定できない場合がある。比較的容易に測定できるのは建物から相当離れた地盤振動 A である。 A から A' を推定することも容易ではない。

(3) 換振器の設置法が適切でないと正しい測定値は得られない。

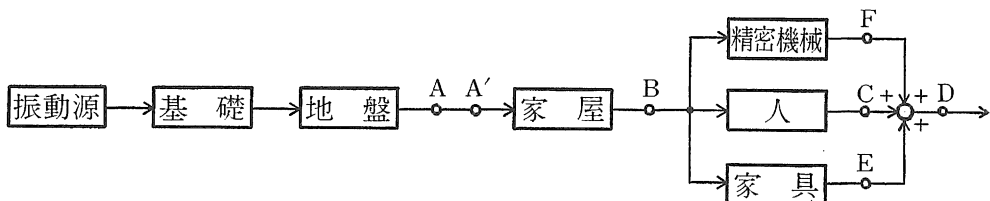


図1. 振動の伝達経路

A: 地盤振動 A': 家屋近傍の地盤振動 B: 家屋の振動 C: 人の振動感覚

E: 家具の振動 F: 精密機械の狂い D: 苦情

この他に振動源から空气中を伝播して人に伝達される騒音がある。

3. 人間の振動感覚

ISO (国際標準化機構) が1972年に発表したDIS 2631には (1~80) Hz の上下方向または水平方向の振動を受ける人間の等感覚曲線を、暴露時間 (振動を連続して受ける時間) をパラメータとし、横軸に振動数、縦軸に加速度の実効値をとって示しているが、主として乗物に乗っている人間の感覚を対象としているため、建物内で日常生活を営む人間に関するよりも大きな加速度が取扱われている。従って、これを公害振動の判定基準に利用するには、与えられている加速度の値を 3.15 で除す必要がある。図2はISOの等感覚曲線の縦軸の値を 3.15 分の1倍したもので暴露時間が8時間の場合の曲線だけが記してある。

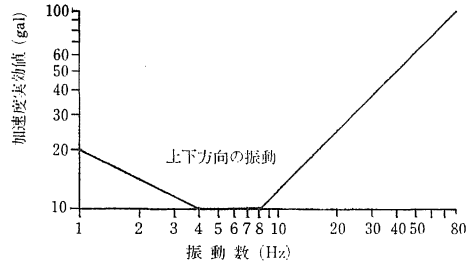


図2. ISOの等感覚曲線 (暴露時間は8時間) この値以上の加速度を受けると不快になる。

4. 振動に対する建物の応答

建物には木造二階建とか鉄筋コンクリート三階建とか色々あるが、簡単のためこれらをすべて図3のような一質点系とみて考察しよう。

地盤が x だけ変位した時、質量 m が地盤に相対的に y だけ変位したとすると m についての運動方程式は、

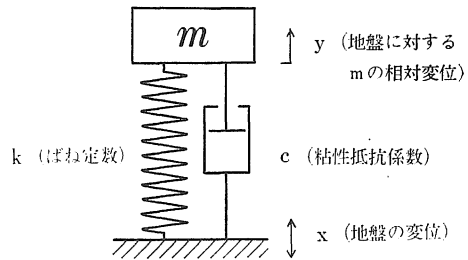


図3. 一質量系

$$\ddot{y} + 2h\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = -\ddot{x} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで $\omega_0^2 = k/m$, $2h\omega_0 = c/m$ である。式(1)を解くと、

$$y = -\frac{1}{\omega_0\sqrt{1-h^2}} \int_0^t \ddot{x} e^{-h\omega_0(t-\tau)} \sin \omega_0\sqrt{1-h^2}(t-\tau) d\tau \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{\omega_0\sqrt{1-h^2}} \int_0^t \dot{x} e^{-h\omega_0(t-\tau)} \sin \left[\omega_0\sqrt{1-h^2}(t-\tau) - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-h^2}}{h} \right] d\tau \dots\dots\dots (3)$$

を得る。 m の絶対加速度は $\dot{y} + \ddot{x}$ で、式(1)より

$$\dot{y} + \ddot{x} = -\omega_0^2 y - 2h\omega_0\dot{y} \dots\dots\dots (4)$$

であるから、右辺の y と \dot{y} へ式(2), (3)を代入すれば絶対加速度を求めることができるが、ここでは式(2), (3), (4)を直接計算する代りに、線形加速度法を使って次式から計算することにする。

$$A_j = \frac{-1}{1 + h\omega_0\Delta t + \frac{\omega_0^2\Delta t^2}{6}} \left[\left(h\omega_0\Delta t + \frac{\omega_0^2\Delta t^2}{3} \right) A_{j-1} + (2h\omega_0 + \omega_0^2\Delta t) V_{j-1} + \omega_0^2 D_{j-1} + \ddot{x}_j \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここで地盤加速度 \ddot{x} は時間刻み Δt 秒ごとの N 個のサンプル値として与えられるものとし、 \ddot{x}_j はその j 番目の値を表わす。 A_j は m の相対加速度 \ddot{y} の j 番目の値であり、 A_{j-1} , V_{j-1} , D_{j-1} はそれぞれ \ddot{y} , \dot{y} , y の $(j-1)$ 番目の値である。これらの値が与えられると式(5)より A_j が計算され、更に、式(6), (7), (8)から \dot{y} , y

$$\ddot{y} = A_j \dots\dots\dots (6)$$

$$\dot{y} = V_{j-1} + (A_{j-1} + A_j) \cdot \Delta t / 2 \dots\dots\dots (7)$$

$$y = D_{j-1} + V_{j-1} \Delta t + (A_{j-1} / 3 + A_j / 6) \cdot (\Delta t)^2 \dots\dots\dots (8)$$

の j 番目の値が求まる。 j を1から始めて N まで、次々にこの計算を繰返せば N 個のサンプル値 \ddot{x} に対応してそれぞれ N 個ずつ \dot{y} , \dot{z} , y の値が求まる。

さて、このようにして求めた絶対加速度が図1のBであって、それが人間に作用して反応 C を生ずるのであるが、図2から分るように振動感覚 C は暴露時間が一定ならば加速度と振動数だけに関係し、加速度の符号 (+, -) や位相には無関係であるから、 N 個の $|\ddot{y} + \ddot{x}|$ の中の最大値 $|\dot{y} + \dot{x}|_m$ だけを考えればよい。($|\dot{y} + \dot{x}|$ の実効値を考えるのも一法であるが、ここでは最大値を考えることにした) ところで、一般の建物では減衰係数 $h = 0.03 \sim 0.07$ で、0.05 位が普通であるから、式(4)の右辺第二項は小さいので省略すると $\dot{y} + \dot{x} = -\omega_0^2 y$ となる。また式(2), (3)で、 $\sqrt{1-h^2} \doteq 1$ とし、更に式(3)の $\tan^{-1} \frac{\sqrt{1-h^2}}{h}$ を無視すると、式(9), (10), (11)を得る。
これらの式から次のことが分る。

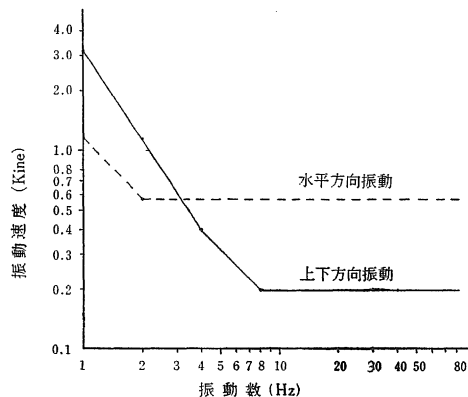


図4. ISOの等感度曲線を速度で表わしたもの

(a) \dot{y} , y は相対速度, 相対変位であるが、 $|\dot{y}|_m$, $|y|_m$ は近似的に、時間区間 ($N \cdot \Delta t$) 秒における絶対速度, 絶対変位の最大値に等しい。(b) ω_0 の影響が最も少ないのが $|\dot{y}|_m$ であるから、振動の評価値としては $|\dot{y}|_m$ を使うのがよいだろう。

$$|\dot{y} + \dot{x}|_m = \omega_0^2 |y|_m = \omega_0 \left| \int_0^t \ddot{x} e^{-h\omega_0(t-\tau)} \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \right|_m \dots\dots\dots (9)$$

$$|\dot{y}|_m = \omega_0 |y|_m = \left| \int_0^t \ddot{x} e^{-h\omega_0(t-\tau)} \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \right|_m \dots\dots\dots (10)$$

$$|y|_m = \frac{1}{\omega_0} \left| \int_0^t \ddot{x} e^{-h\omega_0(t-\tau)} \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \right|_m \dots\dots\dots (11)$$

5. 公害振動の評価値と基準値

以上の考察では、家屋の固有角振動数 ω_0 は一定のものと考え、時間 ($N \cdot \Delta t$) 秒内の絶対速度の最大値 $|\dot{y}|_m$ を地盤振動 \ddot{x} の評価値とするのがよいだろうということが分ったが、実は家屋によって ω_0 の値は異なるので、同じ \ddot{x} に対してもより大きな $|\dot{y}|_m$ を生ずる家屋もあるかも知れない。従って予想されるすべての ω_0 に対して $|\dot{y}|_m$ を計算し、それらの $|\dot{y}|_m$ の中で最

も大きい値を評価値とすべきである。この時 ω_0 は、 2π から 40π まで 2π とびに計算すれば十分である。そうすれば固有振動数 (1~20)Hz の家屋の $|y|_m$ を計算することになるが、実在の家屋では固有振動数 (0.9~5) Hz が普通であるから、これで十分な訳である。

このようにして求めた評価値 $|\dot{y}|_m$ が、基準値を越えるか否かによって振動 \ddot{x} の公害性を判定するのであるが、基準値としては図2を速度に換算して描いた図4

表1 大阪府振動許容基準

区域の区分	時間の区分	午前6時から	午前8時から	午後6時から	午後9時から
	朝	午前8時まで	屋間	夕	夜間
		Kine	午前6時まで	午後9時まで	午前6時まで
			Kine	Kine	Kine
第一種区域		0.03	0.03	0.03	0.01
第二種区域		0.03	0.05	0.03	0.03
第三種区域		0.10	0.10	0.10	0.05
第四種区域		0.15	0.15	0.15	0.07

が参考になるだろう。しかし大阪府では、これよりもっときびしい基準値を規定している。(表1)

6. 適 用 例

Y製作所は横型のクランク式ハンマーで直径約10mmの鋼丸棒の一端をたたきつぶし、次にこれを一定寸法に切断するという作業を冷間で行っており、水平方向の衝撃的振動を周期的に発生し騒音も大きい。ハンマーより5m位の所に隣家の鉄筋コンクリート二階建がある。その一階土間は地盤と同じ振動をすると考えられるので、そこに水平、上下各方向に1個ずつ換振器を石膏で接着し、それぞれの方向の加速度 \ddot{x} , \ddot{z} をデータレコーダに収録した。後日、実験室でこの内容を電磁オシロへ掃出し、それを高速記録読取装置で読取って紙テープを作り電子計算機へ入力し、各方向につき $|y|_m$, $|\dot{y}|_m$, $|\ddot{y} + \ddot{x}|_m$ と振動数との関係をプロッタに描かせた。(図5)

以下、使用した測定器類の特性と、公害性判定の結果を述べる。

(1) 換 振 器

X方向(振動源に向う水平方向)は新興通信工業製非接着型抵抗線加速度ピックアップで最大 $2g$ ($g = 980 \text{ cm/s}^2$)まで測定可能。1g当りの歪は 1842×10^{-6} 。固有振動数130Hz, 感度一様な周波数80Hz, 減衰係数0.7

Z方向(上下方向)は共和電業製非接着型抵抗線加速度ピックアップで最大 $2g$ まで測定可能。1g当りの歪は 1291×10^{-6} 。固有振動数100Hz, 感度一様な振動数40Hz, 減衰係数0.7

(2) 増幅器とデータレコーダ

増幅器は新興通信工業製DS6-MTY型。データレコーダはTEAC製R210型。第一チャンネルはX方向, 第三チャンネルはZ方向の振動を, 第四チャンネルは騒音を収録した。

(3) 電磁オシロ

三栄測器製FR-301。使用したガルバは各チャンネルともG-100Cで, 固有振動数は100Hz, 感度一様な振動数は70Hzである。

(4) 高速記録読取り装置

オートプロセス製。時間軸方向のサンプリング間隔は0.5mmに設定した。電磁オシロの時間軸は2mmが0.01秒にしたので, サンプリング刻みは0.0025秒となった。現象軸方向の読取り精度は0.1mm。X方向ではこ

の0.1mmが加速度0.02031galに, Z方向では0.03036galに相当する。(校正値から求めた)

(5) 実測した評価値による公害性の判定

地盤変位 x に対する家屋の相対変位 y を与える式(1)において $h = 0.05$ に固定し, 先ず $\omega_0 = 2\pi$ として式(5), (6), (7), (8)を N 回繰返し使って $|y|_m$ を求め, それを ω_0 倍して $|\dot{y}|_m$ を, 更に ω_0 倍して $|\ddot{y} + \ddot{x}|_m$ を求める。次に $\omega_0 = 4\pi$ として同様の計算を行い $|y|_m$ などを求める。これを $\omega_0 = 200\pi$ になるまで繰返し, 横軸に $\omega_0/2\pi$ Hz をとり, 縦軸に $|y|_m$, $|\dot{y}|_m$, $|\ddot{y} + \ddot{x}|_m$ をとって描いたのが図5である。この図から(1~20)Hzの区間内の $|\dot{y}|_m$ の最大値を読み取ると0.04 Kine (1 Kine = 1 cm/s) を得る。これが評価値である。次に, 大阪府の基準(表1)を見ると, 昼間では0.03 Kine が基準値になっているが, 0.04 はそれより大きいから, 建物二階の人からは苦情が出るものと予想されるが, 実際に, 振動, 騒音に対し強い苦情が出た。

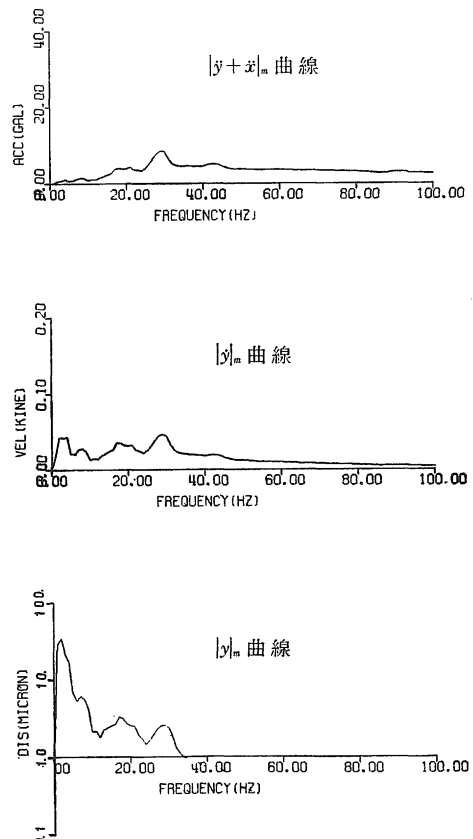


図5. X方向の地盤加速度 \ddot{x} に対する家屋の応答スペクトル(計算値)
家屋の減衰係数 $h = 0.05$

(6) 二階の振動

苦情の出ている二階ベランダのコンクリート床の上の加速度を実測し、これを台形公式によって積分して速度と

変位を求めたのが図6である。この図から速度のピーク値を求めると 0.025 Kine を得る。当然のことながら、前項で求めた評価値 0.04 はこれより大きい。

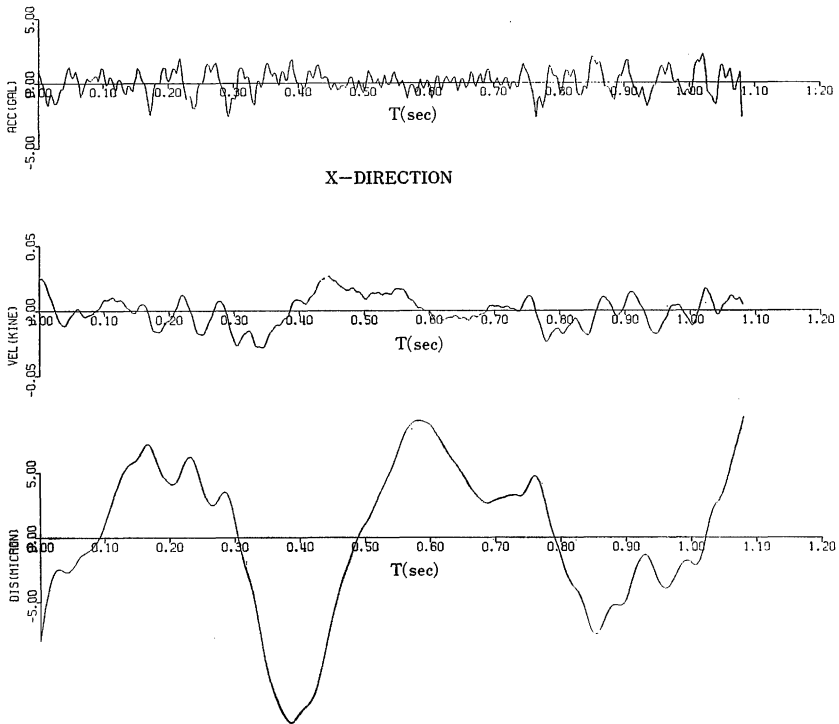


図6. 二階ベランダの振動加速度 \ddot{y} , 速度 \dot{y} , 変位 y (実測値)

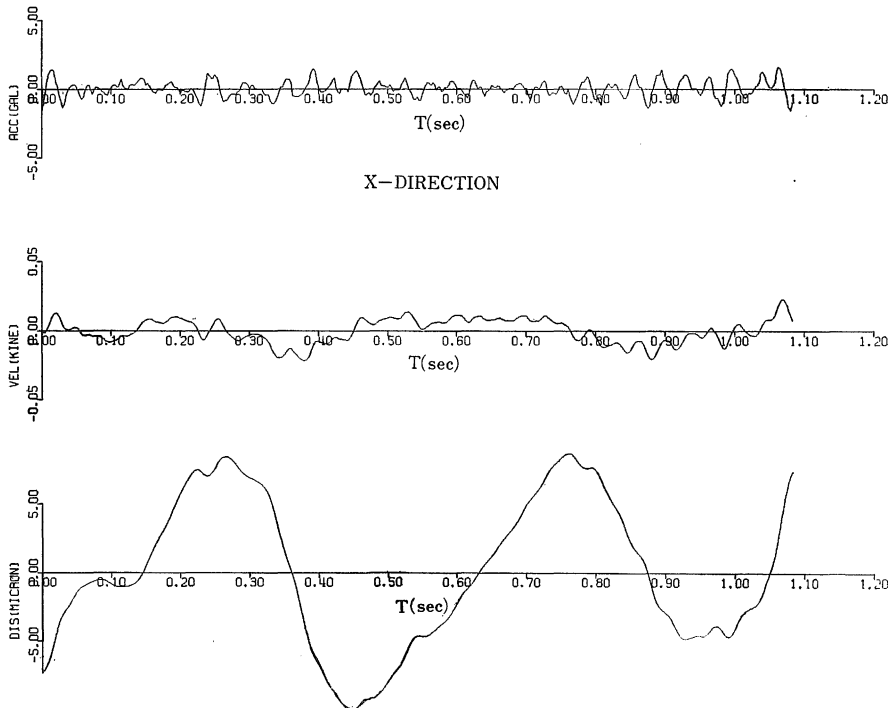


図7. 一階コンクリート土間の振動加速度 \ddot{x} , 速度 \dot{x} , 変位 x (実測値)

(7) 一階の振動

同家の一階土間のコンクリート床上の振動も測定し、前項と同じ方法で処理して図7に示す結果を得た。これは一階の振動であると同時に近似的には家屋直下の地盤の振動とも考えられる。図7より速度のピーク値を求めると0.02 Kineを得る。これは大阪府の基準値0.03以下であるから苦情は出ないだろうと思われるが、実際にも一階事務室では振動は殆んど感じないとのことであった。

[註] 台形公式による積分の他に、band-pass filter $\frac{S}{S^2+2\zeta\omega_n S+\omega_n^2}$ による近似積分を、Runge-Kutter-Gill 法または線形加速度法でも行ったところ、 $\zeta=0.5$, $\omega_n=\pi/5$ とすると、台形公式の場合とほぼ同じ結果を得た。しかし $\omega_n=2\pi$ とするとくは同じでも結果はかなり違ってくる。いずれにしても、積分するごとに3次曲線 $a_1t^3+a_2t^2+a_3t+a_4$ によってゼロ線の修正を行った。ここで、 $a_1\sim a_4$ は最小二乗法で決定される係数である。

7. 結 論

振動公害の評価法として、測定された地盤加速度を入力とした家屋の速度応答スペクトルを計算して、(1~20)Hz 間のその最大値を評価値とし、別に定められた基準値と比較することによって公害性の判定をする方法を提案し、実際に工場振動に適用して一応妥当であることを確めた。基準値については全く検討していないが、大阪府の基準値で十分と思われる。この方法の欠点は

(a) 問題の家屋になるべく近い地点の振動を測定する必要があること。

(b) 少なくとも(1~100)Hzの加速度に対し、感度一様な換振器を必要とすること。

(c) 加速度測定値を電子計算機へ入力するための機器を必要とすること。

(d) 電算機処理のため、現場で直ちに判定を下すことはできないこと。

であろう。(a)と(b)はどの評価法にも共通なことで、(a)については地盤の距離減衰特性を明らかにする必要がある。また(c)と(d)に対しては、地盤加速度を入力すると直ちに前記の評価値をメータ指示するようなアナログ計器を作る必要がある。これらはすべて今後の課題である。

最後に、本方法の特徴を明らかにするため、大阪府と東京都の方法を簡単に記す。

•大阪府の方法

工場又は事業場の敷地境界線の地表で測定した振動速度のピーク値を評価値とし、基準値と比較する。

•東京都の方法

振動加速度を測定し、その値に図2の等感覚曲線による補正をアナログ回路で施して得られる加速度実効値を、5 Hz 0.001 gal の実効値を基準にしてデシベル化した値(これを振動レベルとよぶ)を評価値とし、基準値と比較する。

測定の機会を提供し協力していただいた鳥取県工業試験場米子分場の金田所長、足森氏、西本氏ならびに八木製作所とその隣家の方々に、貴重な文献とご教示を賜った東京都公害研究所の宮本氏、大阪府公害監視センターの中村課長、袋谷氏、福井大学工学部の鳥海教授、中部電力総合技術研究所の山室氏に、また島大電算センターの堀江氏、小笹氏に深く感謝します。

参 考 文 献

機械学会第399回講習会テキスト「最近の振動・騒音公害とその防止技術」(昭49.6)

山室 誠：FFTを用いた応答計算(第1, 2報)日本機械学会講演論文集 No.730-14(昭48.10)その他、同著者による未発表論文

東京都公害研究所：建設工事における振動に関する調査報告書(昭48.12)くい打機の振動に関する調査報告書(昭46.6)

鳥海 勲：振動測定器と測定法、土木学会関西支部昭和46年度講習会テキスト

鳥海 勲他：土木公害、土木学会誌 Vol. 54, No.4 (1968)

新潟県企画部公害課：新潟県内における振動の実態調査および調査測定結果の解析(昭44.3)

ISO: GUIDE FOR THE EVALUATION OF HUMAN EXPOSURE TO WHOLBODY VIBRATION (1972. 4)

田治見 清：建築振動学(昭45.コロナ社)

金井 清 他：地震工学(昭43.彰国社)