

第1章 環境振動の現状

1.1 振動公害の推移と現状

1.1.1 振動公害の概要

戦後の復興、高度経済成長を経て、急激な工業化に伴い環境問題が顕在化してきた。これらの深刻化する環境問題に対処するために、1967年公害対策基本法（昭和42年法律第132号）が制定された。この法律では典型7公害として、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た。その後、公害問題の複雑化や地球規模化する環境問題に対応するため1993年に環境基本法（平成5年法律第91号）が制定され、公害対策基本法は廃止された。環境基本法の第21条では、環境の保全上の支障を防止するための規制の措置が規定されている。すなわち、「国は、環境の保全上の支障を防止するため、次に掲げる規制の措置を講じなければならない。」とあり、その中に、「大気汚染、水質汚濁、土壌汚染又は悪臭の原因となる物質の排出、騒音又は振動の発生、地盤沈下の原因となる地下水の採取その他の行為に関し、事業者等の遵守すべき基準を定めること等により行う公害を防止するために必要な規制の措置」との記載がある。

振動規制法（昭和51年法律第64号）は公害対策基本法のもとに1976年6月10日に公布され、12月1日に施行されたものであるが、環境基本法においても上記条文のもとに振動規制法により公害振動の規制が行われている。振動規制法の制定経緯については文献1)が参考となる。

振動規制法が対象とする振動の種類は、工場または事業場振動（特定施設を有する工場および事業場から発生する振動）、建設作業振動（特定建設作業により発生する振動）、道路交通振動（自動車が道路を通行することに伴い発生する振動）であり、第2章において「特定工場等に関する規制」、第3章において「特定建設作業に関する規制」、第4章において「道路交通振動に係る要請」を定めている。文献2)によれば、測定等のほとんどの事務は市町村が行うことになる。

公害紛争処理法（昭和45年法律第108号）に基づき設置された総務省公害等調整委員会では、毎年度、全国の地方公共団体の「公害苦情相談窓口」に住民から寄せられた公害苦情の実態を把握しており、この相談窓口で扱われた公害苦情の受付及び処理状況について、公害苦情調査結果報告書として取りまとめて公表³⁾している。また、環境

省においても同データをもとに振動規制法に基づく各種措置の施行状況等を振動規制法施行状況調査として整理し、公表⁴⁾している。ただし、環境省では個々の苦情に対して、複数の公害による被害を訴えている場合には、すべて集計することから、環境省の苦情件数が公害苦情調査結果の件数より多くなる。図1.1は環境省が公表している1976年度から2020年度までの苦情件数の推移を示している。

環境省の公表データによれば、

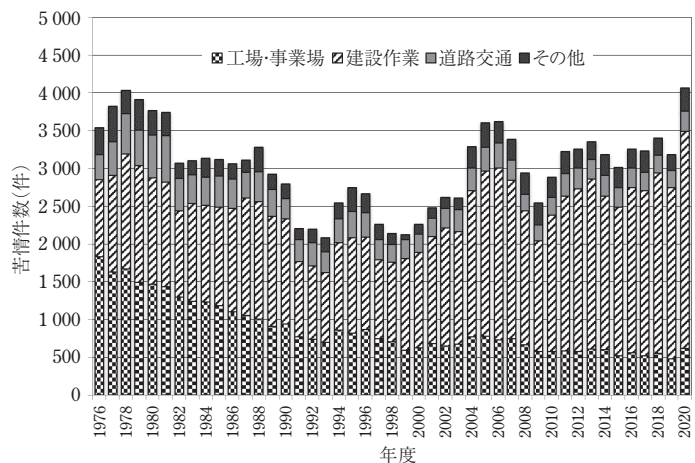


図 1.1 振動源別振動苦情件数の推移

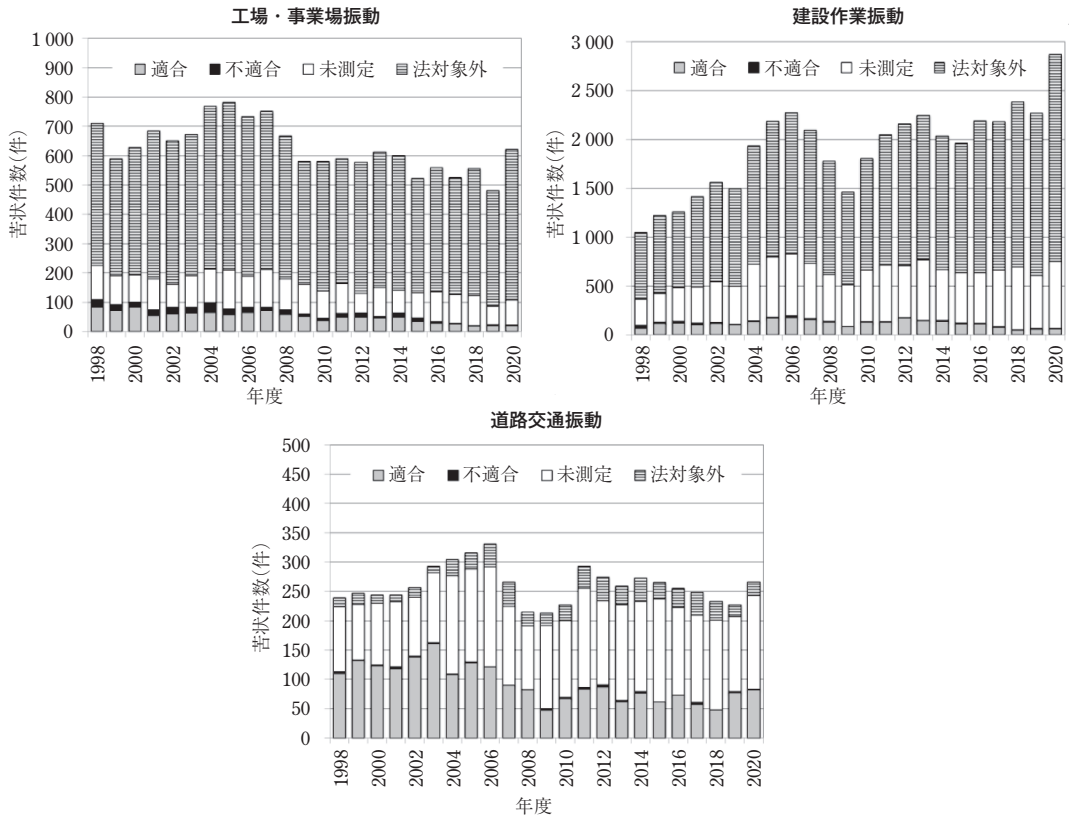


図 1.2 振動源ごとの法の適用状況

2020年度の苦情件数は4,061件で工場・事業場622件（15.3%）、建設作業振動2,867件（70.6%）、道路交通振動266件（6.6%）である。法では、工場・事業場については、指定地域内における特定工場等、建設作業振動については、指定地域内における特定建設作業、道路交通振動については、指定地域内を対象としている。法対象の件数は、工場・事業場622件のうち108件（17.4%）、建設作業振動2,867件のうち749件（26.1%）、道路交通振動266件のうち243件（91.4%）である。苦情受付後の処理において、実際に測定された数は、工場・事業場108件のうち22件（20.4%）、建設作業振動749件のうち84件（11.2%）、道路交通振動266件のうち83件（31.2%）であり、苦情処理においてすべての案件について振動測定が行われるわけではなく測定される割合が少ないことがわかる。図 1.2 は上記の内訳について1998年度から2020年度までを示したものである。工場・事業場や建設作業振動に対して、法対象外の件数の割合が多いことがわかる。

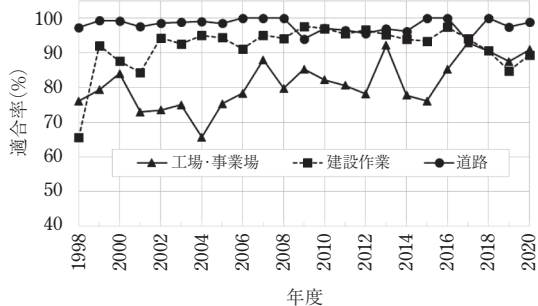


図 1.3 振動源ごとの適合率

図 1.3 は1998年度から2020年度までの測定数に対して、測定した結果の値が規制基準または要請限度に適合していた測定数の割合（適合率）を表した図であり、適合率100%の数値は、測定した結果、すべての測定点で規制基準および要請限度の値をこえていなかったことを意味する。すべての振動源において適合率が80%以上と見なすことができる。とくに、道路交通振動の適合率は100%に近く、振動苦情を訴えてもほとんど要請限度の値以下であり、道路管理者へ道路の舗装、

維持、修繕の要請が行われなくなる。

この適合率の高さから、規制基準および要請限度の値および評価法が苦情実態を適切に表しているのかどうかについて検討が必要と考えられる。

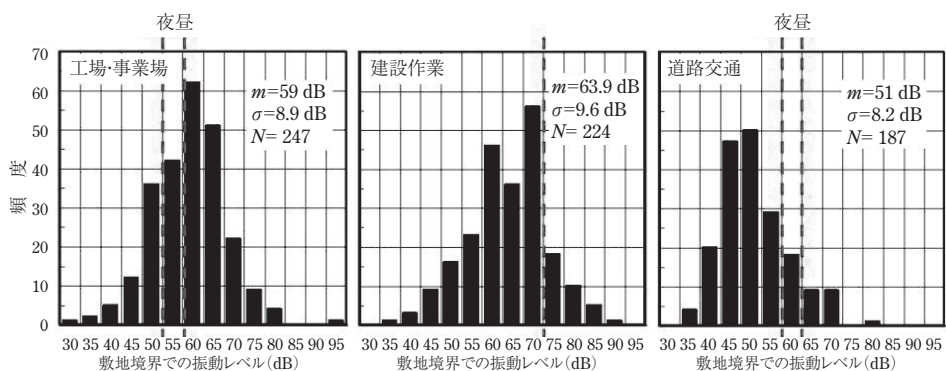
1.1.2 振動公害と苦情の関係

振動苦情の多くは、人が振動を身体で知覚して初めて発生する。ある大きさの振動があってもそれが振動として人が感じる大きさでなければほとんど苦情とはならない。人は実生活の中で屋外の地面上で大きな振動を体感することはまれであり、振動を感じても苦情を訴えることは比較的少ない。振動苦情の多くは、屋内に居る人が生活を営んでいる中で振動を知覚し苦情を訴えることから始まる。家屋（建築物）の中の振動と屋外地盤振動の関係は、それぞれの家屋の状況によって大きく異なり、地盤振動に対して大きく増幅する場合もあればほとんど増幅しない場合もある。一般的にその増減量は、家屋に入力する振動の特性と家屋の振動特性との動的相互作用により大きく異なる。

振動規制法による工場・事業場振動および建設作業振動に対する規制基準、道路交通振動に対する要請限度の値には後述する振動レベルが用いられ、振動源側の敷地の境界線で測定を行うこととしている。文献5)に記載されている図1.4は、1995年の調査資料をもとに作成された苦情を生じた振動規制法の対象となる各振動源に対して、振動源側の敷地境界における振動レベルの分布を示した図である。

図のヒストグラムが5 dB 間隔で描かれているので、規制基準、要請限度の振動レベルの値を区分する線として図中に破線が挿入されている。規制基準、要請限度の値以下であっても多くの苦情があることがわかる。苦情者は苦情原因である各振動源からの振動を屋内で感じており、敷地境界における振動レベルによる規制の値と苦情実態との間には乖離があると考えられる。ただし、文献5)において振動レベルの決定の仕方については調査されておらず不明であることについては留意が必要である。

3つの振動源のうち、建設作業は、工場・事業場、道路交通に比べて大きな振動を発生する杭打ち機、バックホウ、ブレーカーなどを使用することから苦情件数はもっとも多い⁴⁾。また、建設作業に対する事業種別苦情数では建築工事より解体工事に対する苦情が多い⁶⁾。振動の大きさが大きい場合には、壁、タイル等のひび割れ、建て付けの狂い等の物的な被害が生じることもあるが、振動苦情の多くは主観的な問題として発生する。



規制基準 工場・事業場：第1種区域、夜間 55 dB / 昼間 60 dB (一例)

規制基準 建設作業：75 dB

要請限度 道路交通：第1種区域、夜間 60 dB / 昼間 65 dB

注1) 地方公共団体により夜間/昼間の時間の区分は異なる

注2) 地方公共団体により規制基準の値も異なるが、上記数値は一例である。

各地方公共団体の時間の区分、規制基準については振動規制法施行状況調査(環境省)、文献5)を参照

図 1.4 振動源ごとの振動源側の敷地境界における振動レベルの分布

第2章 振動の基礎

本章では、環境振動で取り扱う振動の基本的な諸量について説明する。

2.1 振動

JIS B 0153：機械振動・衝撃用語（2001）において「ある座標系に関する量の大きさが平均値より交互に大きくなったり小さくなったりするような変動。通常は時間的な変動である。」と定義されている。また、ブリタニカ国際大百科事典 小項目事典では「振り子のふれ、おもりをつるしたゴム紐の伸縮運動のように、安定な平衡点をはさんで周期的に位置が変化する運動」との説明がある。

2.1.1 振動現象

物理的にもっとも単純な振動は単振動と呼ばれる。単純な例として、図 2.1 (a) (左図) のような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の振動である。このような振動は正弦振動の時間的な変化として図 2.1 (a) (右図) のように表すことができる。また、図 2.1 (b) のように回転ベクトルにより表すこともできる。

図 2.1 のように正弦関数で表される振動を正弦振動あるいは調和振動と呼ぶ。またこのような振動はある一定時間間隔で繰り返されることから周期振動とも呼ばれる。

振動現象は、振動波形により、周期振動（規則振動）と非周期振動（不規則振動）に分けられる。また定常振動と非定常振動（過渡振動）という用語も用いられる。

2.1.2 調和振動

調和振動は、振動量 y と時間 t を用いて、

$$y(t) = Y \sin(\omega t + \phi) \quad Y, \omega, \phi : \text{定数} \quad (2.1)$$

と表すことができる。初期の静止状態からのばねの長さの変化量が振動量で変位 (y) と呼ぶ。

ここに、 Y は変位振幅、 ω は円振動数（角振動数）、 ϕ は初期位相角（ $t=0$ における位相角）、 $(\omega t + \phi)$ は位相角あるいは位相と呼ばれる。

図 2.1 (a) 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、釣り合っている状態）から $y = -Y$ だけ引いた状態（ $t=0$ から手を離したときのおもりの変位を示した図である。手を離すと、おもりはばねの力によって上昇し、最上点 $y = Y$ に達し、その後下降に転じてふたたび最下点に戻るといった運動を繰り返

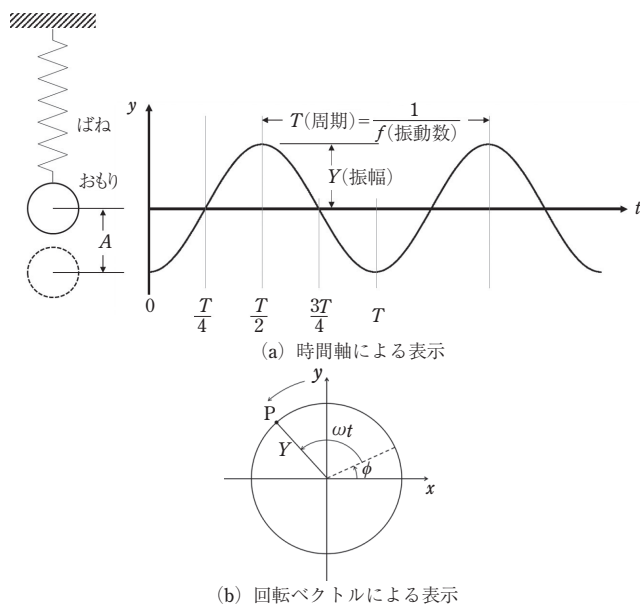


図 2.1 正弦振動の時間変化（変位）

す。振幅 (Y) は片振幅 (0-P, zero to peak), $2Y$ を両振幅 (P-P, peak to peak) と呼ぶこともある。図は, $\phi = -\pi/2$ から振動が始まり, 余弦波を表している。図 2.1 (b) では, 初期位相角 (ϕ) から振動が開始することを表している。

ωt は t 秒間に進む回転角であることから, ω は単位時間に進む角度を表す。正弦振動の繰り返し時間は, 周期 (T) と呼ばれ, 式 (2.1) において, ωT が 2π (rad (ラジアン), $2\pi = 360^\circ$) に等しいとき, すなわち $\omega T = 2\pi$ のときに変位は同じ値となる。一周期に要する時間は $T = 2\pi/\omega$ で表される。周期の単位を秒 (s) とすれば, 振動数 (周波数) (f) は 1 秒間の振動の繰り返し回数であることから, $f = 1/T$ (Hz) であるので, 上記の関係を変形すれば, $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ となる。また, $\phi > 0$ のとき位相進み, $\phi < 0$ のとき位相遅れという。

2.2 振動の表示

2.2.1 変位, 速度, 加速度

調和振動において, 変位振幅 Y , 初期位相角 $\phi = 0$ としたとき, 変位は,

$$y(t) = Y \sin(\omega t) \tag{2.2}$$

と表される。

速度は, 単位時間あたりの変位の変化量で,

$$v(t) = \frac{dy}{dt} = \omega Y \cos(\omega t) = V \cos(\omega t) = V \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{2.3}$$

ここに, V は速度振幅であり, $V = \omega Y$ である。

加速度は, 単位時間当りの速度の変化量で,

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \omega V \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = A \sin(\omega t + \pi) \tag{2.4}$$

ここに, A は加速度振幅であり, $A = \omega V = \omega^2 Y$ である。

変位と速度とでは, 位相角が $\pi/2 = 90^\circ$ だけ異なること, また, 加速度は速度と $\pi/2$, 変位と π (逆位相) だけ位相がずれていることがわかる。

上記のように, 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わかれば, 相互に変換することができる。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ない。

図 2.2 は, 式 (2.2) ~ (2.4) において, $Y = 1$ cm, $\omega = 2$ rad/s, $\phi = 0$ として変位を表した場合, 横軸時間に対する変位, 速度, 加速度の位相関係を示したものである。

一方, 回転運動をするような機械を扱う場合には, 角度, 角速度, 角加速度を使用することが多い。

角度は, 角を表す量であり記号 θ で表されることが多く, 単位としては, 一周を 360 等分した度 ($^\circ$) やラジアン (rad) が一般的である。ラジアンは半径 r と円弧の長さ l の比として,

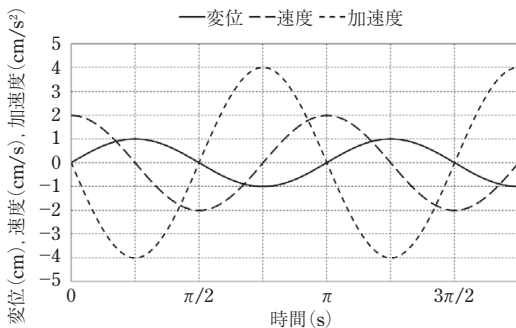


図 2.2 調和振動に対する変位, 速度, 加速度の一例

$$\theta = \frac{l}{r} \quad (\text{rad}) \quad (2.5)$$

で表され、 $360^\circ = 2\pi$ である。

角速度は、単位時間当りの角度の変化であり、量記号は ω が使用される。単位は rad/s である。

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.6)$$

である。ここに、 T は周期 (s)、 f は振動数 (1/s) である。円運動の角速度に対応する量が単振動の円振動数であり、角速度は円振動数と同義である。

1 秒間に n 回転する機械に対しては、以下の関係がある。

$$\omega = 2\pi n, \quad T = \frac{1}{n} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.7)$$

2.2.2 一般的な振動¹⁾

実現象において調和振動（正弦振動）を観測することはほとんどなく、実際に観測される振動は不規則振動であることが多い。

(1) フーリエ級数

ここで、任意の時間関数 $y(t)$ が三角関数の無限の和、すなわちフーリエ級数で表されることが知られている。有限フーリエ近似は以下の式で表される。

$$\tilde{y}(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[A_k \cos \frac{2\pi kt}{N\Delta t} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{N\Delta t} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi \left(\frac{N}{2}\right)t}{N\Delta t} \quad (2.8)$$

ここに、 $\tilde{y}(t)$ は時間関数 $y(t)$ の近似値、 N は時間関数 $y(t)$ の等間隔なサンプリングの個数（偶数）、 Δt はサンプリング間隔（時間）である。 A_k 、 B_k は有限フーリエ係数と呼ばれる。また、第 1 項はサンプリングされた値の平均値を示し、波形のゼロ線からのずれであり、直流成分ともいわれる。

上式の有限フーリエ係数 A_k 、 B_k を求めることをフーリエ変換という。また、有限フーリエ係数から上式の近似値を求めることをフーリエ逆変換という。

(2) フーリエ・スペクトル

式 (2.8) は、もとの時系列波形を $f_1, f_2, \dots, f_{N/2-1}, f_{N/2}$ の振動数をもつ $N/2$ 種類の波に分解していることからフーリエ・スペクトルと呼ばれる。これらの振動数には、 $f_k = k/N\Delta t$ の関係があり、 $f_1 < f_2 < \dots < f_{N/2-1} < f_{N/2}$ である。

$$f_1 = 1/N\Delta t \quad (2.9)$$

は基本振動数と呼ばれる。また、各振動数の差は $\Delta f = 1/N\Delta t$ であり、 Δf は N と Δt によって決り、離散的である。

もっとも高次の振動数は、

$$f_{N/2} = (N/2)/N\Delta t = 1/(2\Delta t) \quad (2.10)$$

であり、ナイキスト振動数と呼ばれ、この振動数以上の振動数成分を検出することはできない。

各次の振動数成分は次式で表される。

第4章 環境振動の測定機器

環境振動を含むさまざまな振動測定で使用される振動計，振動ピックアップについて4.1，4.2節で広く述べた後，4.3節以降では環境振動で主に使用される振動レベル計とそれに関連する周辺機器について紹介する。

4.1 振動計の構成

振動の測定では，振動する面に対して不動点が得られればその点を基準として測定対象の動きの大きさを測ればよい。非接触による光学式や渦電流を用いた方式の振動計はこの原理による。一方，地盤振動，移動する車両内の振動，建物内振動を扱う環境系振動の測定では，多くの場合サイズモ系の応答を利用した接触型の振動ピックアップが用いられる。

サイズモ系 (seismic system) とは，「基礎枠とそれに対して1個またはそれ以上のばね要素を介して取り付けられている一つの質量要素からなる系」¹⁾であり，通常は図4.1に示す粘性減衰をもつ1自由度の理想化された機械系として取り扱われる。基礎枠とは，ばねの一端を固定している部分で，これに振動が加わったとき，ばねの他端に取り付けられた質量とこの部分との間に相対変位が生じる。これを振動入力に対する出力として取り出すものがサイズモ系を利用した振動測定である。サイズモ系は機械系であり，その出力である相対変位をそのまま，あるいは機械的に拡大して検出または記録することができる。

一方，電気的に振動を測定する方法として，相対変位を電気量に変換して振動量として表示するものがあり，現在の主流となっている。相対変位を電気量に変換する装置を振動ピックアップと呼び，圧電型，動電型あるいはサーボ型などがある。環境振動をはじめとするさまざまな測定では，小型軽量かつ測定周波数範囲が広い圧電型が主に使用される。図4.2に一般的な振動計の構成要素を示す。

圧電型の振動ピックアップには，アンプ回路が組み込まれたタイプ（アンプ内蔵型ピックアップ）と電荷出力タイプ

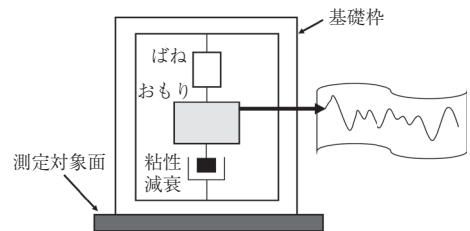


図4.1 ばねとおもりおよび粘性減衰系からなる振動測定

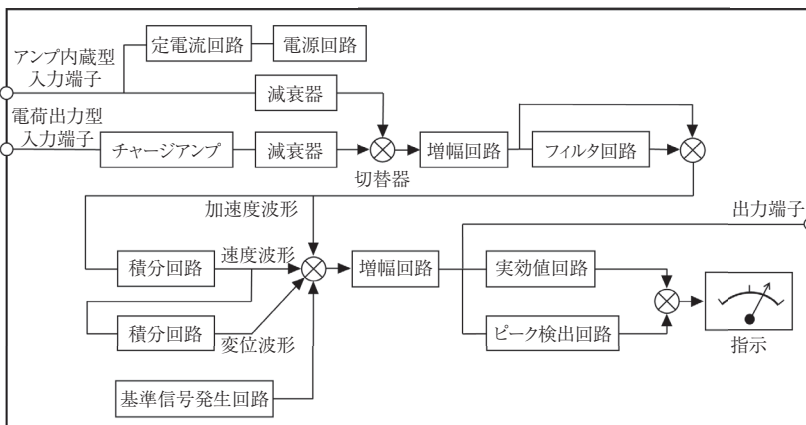


図4.2 振動計の構成要素例

プのピックアップがあり、振動計本体への接続には注意が必要である。前者はアンプを駆動するための定電流回路、後者は電荷を電圧に変換するチャージアンプの入力端子に接続する。その後段には減衰器、増幅回路、積分回路、フィルタ回路、振動量のピーク値、実効値を求める検波回路などが搭載される。このような構成要素から、たとえば、積分回路の通過回数を切り替えることで検出した加速度を速度や変位に変換することも容易である。その他、操作部や測定値を表示する指示部を備える。また、電圧信号出力をもつ振動計では、記録計（レベルレコーダ、データレコーダ）や周波数分析器への接続が可能である。

振動計は種々の構成要素からなるが、デジタル信号処理技術を用いて内部の処理が行われるものが多い。デジタル信号処理により、回路素子の温度変化等の影響を受けにくく、より安定性に優れた高精度な測定が可能である。また、近年では処理能力の向上により、加速度、速度、変位などの複数の振動量や、振動レベル、振動加速度レベルなど周波数重み付け特性が異なる値の同時計測が可能な機種も登場している。

4.2 振動ピックアップ

4.2.1 振動測定の原理

4.1で示した図4.1のサイズモ系（接触型）は、上下方向の1自由度のみを考えた振動系であり、振動ピックアップのケースおよびベースが測定対象物と一体となって振動するとき、ばね定数 k のばねと減衰定数 c のダンパで支えられた質量 m のおもりには、その振動加速度に比例した外力が働く。振動によるばねの変位（すなわち、おもりとケースの相対変位）を x 、測定対象物の振動加速度を α とすると、運動方程式は式(4.1)で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\alpha \quad (4.1)$$

この1自由度系の固有振動数 f_0 は式(4.2)となる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.2)$$

このおもりの相対変位 x が振動加速度に比例した応答を示すものが加速度型ピックアップであり、同様に振動速度に比例した応答を示す速度型、絶対変位と相対変位の振幅が等しい応答をする変位型がある。ここでは、環境振動の測定においてもっとも多く使われている圧電型加速度ピックアップと、静電容量型加速度ピックアップ、サーボ型加速度ピックアップについて説明する。

4.2.2 圧電型加速度ピックアップ

水晶やチタン酸ジルコン酸鉛 $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ の結晶構造に応力を加えたときにひずみに比例した電荷が生じる現象を圧電効果という。その圧電効果をもった材料（圧電素子）をセンシングデバイスとして使用した加速度ピックアップが圧電型加速度ピックアップである。圧電型加速度ピックアップの構造として、圧電定数が大きく同一条件下では感度が高くとれるせん断型構造（図4.3(a)）と、構造が単純で機械的強度が高い圧縮型構造（図4.3(b)）に分けることができる。

圧電素子は電荷源に並列なコンデンサ（図4.4(a)）、もしくは電圧源に直列なコンデンサ（図4.4(b)）として等価回路を考えることができる。電荷源として考えた場合、ひずみにより生じた電荷を取り出すために電荷増幅器（チャージアンプ）を使用する。電荷増幅器の出力電圧 V は式(4.3)となる。

$$V = -(q_s/C_F) \times (G/(1+G)) \doteq -(q_s/C_F) \quad (4.3)$$