

機械・設備の振動



振り子時計とフーコーの振り子

振動の世界

振動:ものが振り子のように往復運動する事象。温度、配管の中の流体など各種の物理量の往復変動を指すこともある。音も空気中あるいは液体・固体中の振動

単振動:等速円運動に光を当てると影ができ、この影の運動が単振動

1. 単振り子
2. 電気回路の電圧振動
3. サイクロイド振り子(振幅によらずに周期が一定)

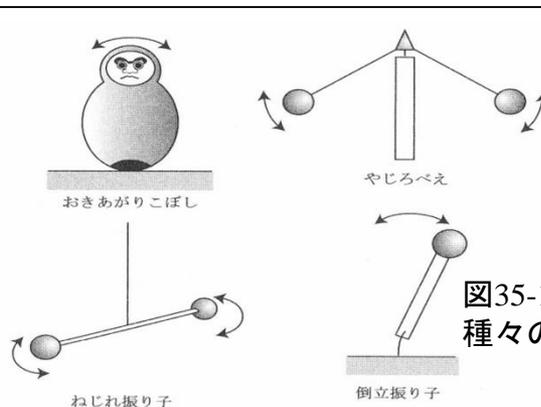


図35-1 種々の単振動 ②

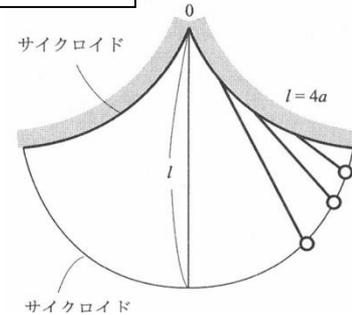


図35-2 サイクロイド振り子 ②

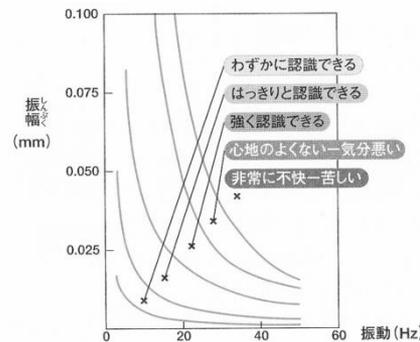
表35-1 振動するものの例

乗り物	自動車、船、航空機など乗り物酔いは多くの場合振動が問題
建物、道路、橋など	通過する自動車、風、波、地震などが原因
家庭用器具	洗濯機、音響機器など騒音、がたなどが問題
スポーツ関連	トランポリン、モーグル、バンジージャンプなど振動を利用
ロボット、作業機械	アーム、フックの振れが障害(制振装置による精度の向上)
遊具、健康維持	ブランコ、マッサージチェア、バイブレータ、ゆりかごなど快適性、スリル

往復動と回転運動:
レシプロエンジンとターボ
団扇と扇風機
和船とモータボート
魚と魚雷
鳥の翼とプロペラ機

一般に回転運動は高速、大容量化、往復動は高効率化に適応

振動と人間の感性 一周波数と振幅により快適、不快の領域がある(個人差あり)



出典: R.E.D. Bishop, Vibration, 1979, Cambridge University Press

図35-4 振動と受ける気分の関係 ④

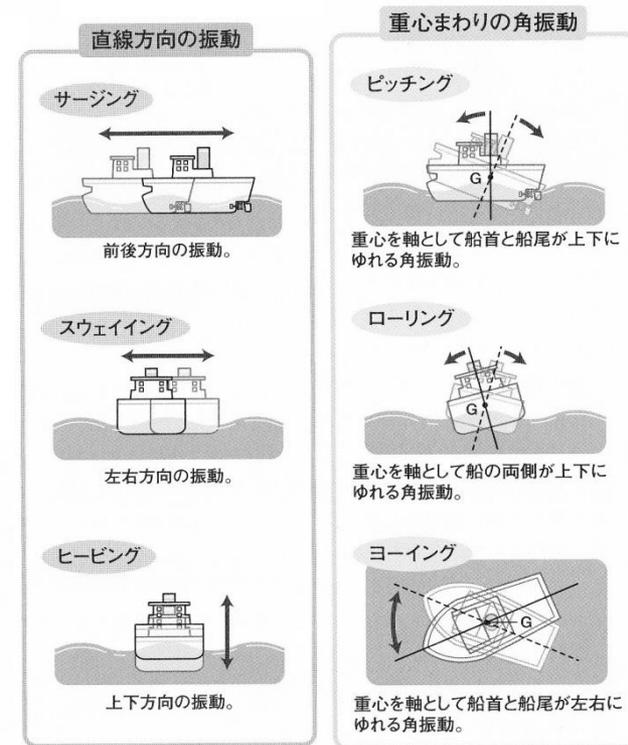


図35-3 航行中の船の振動 ④

振動の特性

振動の基本(正弦波):

周期 — 振動のくり返し時間

振動数 — 1/周期、1秒間のくり返し回数

振幅 — 振動のくり返し幅

振動現象の3要素:

1. 原因 — 入力、振動源がある。例、地震、道路の凹凸、楽器のキューウ
2. 系(システム) — 地震に対する建物、走る自動車、楽器の演奏
3. 結果 — 破壊、変形、乗り心地、音の発生

固有振動数 — 振動を起こすための初期作用(初期変位、初期速度)以外の周期的作用がないとき、その振動体は固有の周期・振動数(単位はHz)で振動する

自由振動 — 振り子のように強制的な外力が作用していない物体に初期変位か初期速度を与えたときに生じる振動。物体の持っている固有振動数で振れる(例、錘をつけたばね)

強制振動 — 機械や構造物に継続的に振動外力が作用したときに生じる振動(例、地震、波浪による構造物の振動、自動車のエンジン振動、洗濯機の振動など日常生活に頻繁にみられる)

自励振動 — 振動源が不明確で成長することが多い。振動的でない入力やエネルギーが物体自身の中で振動的な入力やエネルギーに変換されて発生する(例、鉄道車両の蛇行動。事故・破壊の原因となることがある)

振動モード — 1つの振動体で各種の形状で振動する。単純なものから1次、2次、……という

音叉 — 特定の高さの音を発する二又に別れた金属製の道具。音叉の発する音はほぼ**純音**。叩いた直後にはさまざまな**上音**を含んでいるが、持続せずに、純音が得られる。調律用具の一つ

(**純音**: 単一の周波数の正弦波からなる純粋の音、

上音: 音を正弦波の要素に分解したときに、一番低い周波数を基音といい、それ以外を上音という。上音には倍音でないものも含まれる)



図35-8 音叉

携帯電話機のマナーモード — 一般的にはバイブレータで振動を発生する。小型モーター軸に半月形の重りが取り付けられている

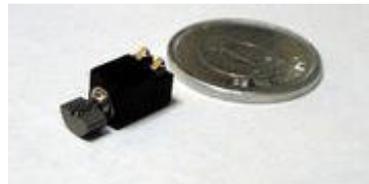


図35-9 携帯電話機のマナーモード部品 (Wikipedia)

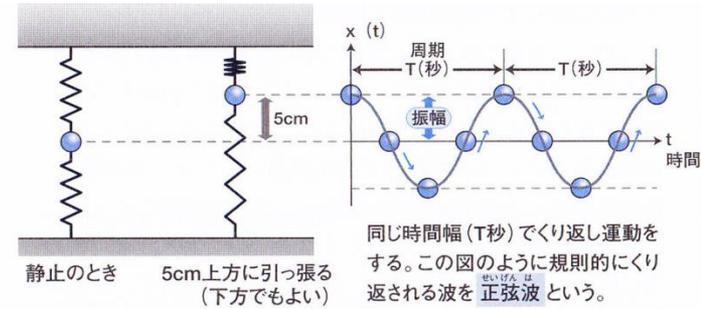


図35-5 基本的な振動 ④



$$\text{固有円振動数 } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s)}$$

$$\text{固有振動数 } f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Hz)}$$

質量mが等しい振動体の固有振動数 f_0 は、ばね定数 k で決まる。 f_0 は k の平方根に比例して増加する。

図35-6 固有振動数の値 ④

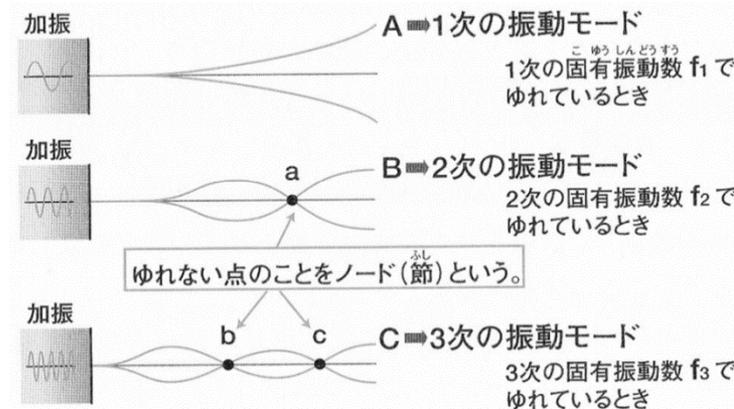


図35-7 振動モードと固有振動数 ($f_1 < f_2 < f_3$) ④

共振

共振 -エネルギーを有する系が外部から与えられた刺激により固有振動を起こすこと。共振による現象の例として Tacoma 橋崩壊の事故が有名

1. 加振周波数 f を 0 から増加するに従って振幅 x は増大する
2. 加振周波数 f が固有振動数 f_0 とほぼ等しくなると x は最大となる = 共振
3. 加振周波数 f をさらに増加させる x は減少し、 f が f_0 よりはるかに大きくなると x は 0 に近づく

多くの楽器は音を出すとき共振現象を利用 (音の場合は「**共鳴**」という)

共振回路: 電気では、コイル (L)、コンデンサ (C)、抵抗 (R) を直列または並列に配置し、交流電源に接続する回路で L、C の値を適切に選ぶと接続周波数のインピーダンス (交流抵抗) が小さくなり電流が極大となる。ラジオ周波数選局に利用

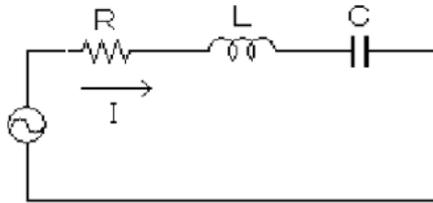
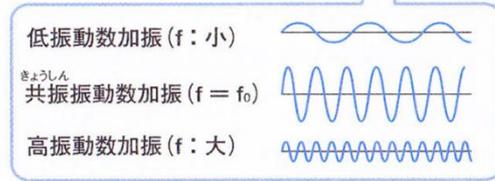
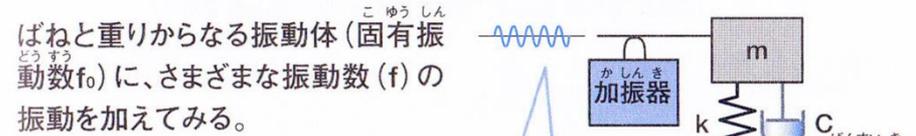


図35-11 共振回路の例 (Wikipedia)

うなり - バネや振り子のような正弦波形の2つの振動で周期が互いにわずかに異なるとき、これが重なると「うなり」を生ずる - 弦楽器の調弦、AMラジオ (振幅変調) の選局などに活用



グラフのような **共振曲線** ($f_0=5\text{Hz}$ のとき) が描かれる。

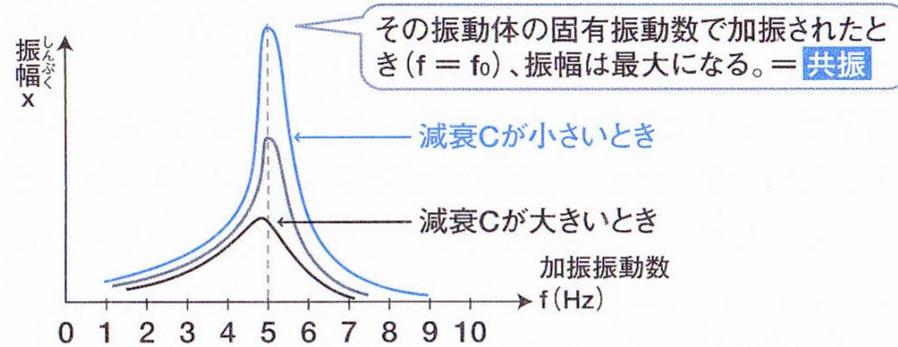


図35-10 共振曲線 ④

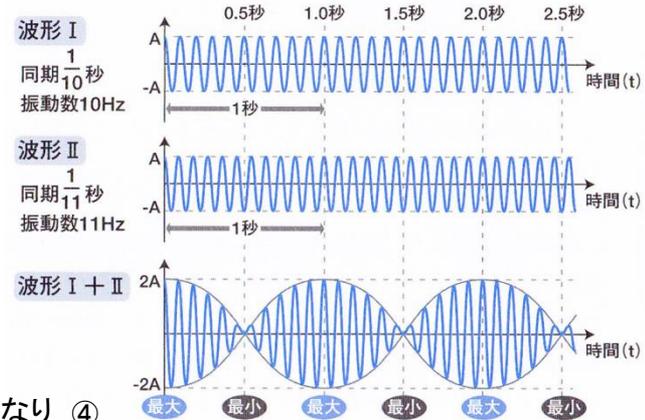


図35-12 うなり ④

ロータ・翼の振動

回転ロータの振動

横振動—アンバランスの遠心力により軸の重心が回転軸中心よりずれて半径方向に振動する

ねじり振動—回転に伴って発生。駆動部、回転部の回転変動、歯車、ベルト、チェーン等が組み合わされた系の回転変動、伝達部の加工精度や変形などによる伝達誤差により引き起こされる

振動の結果 —1.振動・騒音の増大、2.位置決め精度の悪化、3.送り精度の悪化、4.疲労破壊

危険速度: 回転体のロータが固有振動数と一致した速度で回転すると大振幅で振動し、破損する危険がある。この回転速度を危険速度という。原則として回転機械はこの危険速度以下の回転速度で使用する。危険速度以上で使用する必要があるときは、危険速度での回転(運転)を短時間にして、急いで回転速度を高め、共振点での振幅の成長を避ける

この危険速度を1次の危険速度といい、さらにロータの構造により、より高い回転速度の2次、3次、・・・の危険速度が存在

振動の計測—回転体の振動をモニターすることは過大な振動による破損防止のために不可欠。軸受部に付ける**接触型加速度計**、ケーシングに付けてロータとの間隙を計る**非接触型変位計**などがある

翼の振動

蒸気タービン、ガスタービン、軸流圧縮機など軸流機械では、高効率、大容量化のための薄翼、長大翼、高温化が進み、翼の振動強度の点で過酷な条件となっている。翼振動問題は重大な2次被害を発生する場合もあり、振動特性の正確な予測が不可欠

軸流翼の振動防止:

1. **シュラウド**—翼列先端を隣の翼と連結させて、翼の固有振動数を高める
2. **レーシングワイヤ**—翼列の中間高さに円周方向をワイヤで連結して振動モードを変える
3. **翼枚数**—翼列前・後段の翼枚数を変えて流れのウェークによる共振を避ける
4. **翼固定の固さ**—固さを調節して、固有振動数を変える

$$\text{振動数方程式 } \sin kl=0, \omega^* = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

n	固有角振動数 ω_n	固有振動モード $Y_n(x)$
1	$\omega_1 = \omega^*$	
2	$\omega_2 = 4\omega^*$	
3	$\omega_3 = 9\omega^*$	
4	$\omega_4 = 16\omega^*$	

図35-13 両端軸受支持の軸の振動モード(振動工学の基礎)

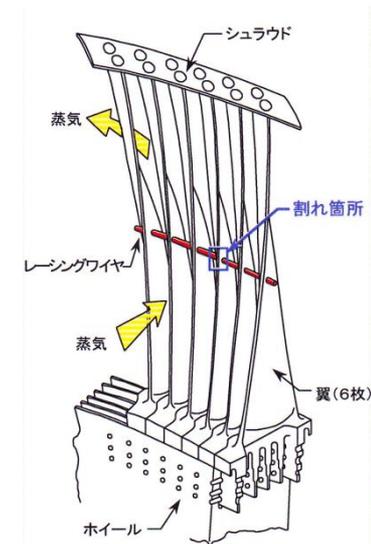


図35-14 シュラウドとレーシングワイヤ(敦賀発電所)

流体の振動

固体、弾性体のほか、気体、液体も振動する

管楽器—管内空気の共振現象を利用。管の一方が閉じた楽器と両端が開放された楽器がある

波—水面を波が伝わる時、運動するのは水面近くの水だけではなく、水の各微小部分は楕円運動をして、水深とともに小さくなり偏平になっていく。水面上の枯葉などは波の進行とともに移動するが、水の粒子は円・楕円運動をしており、流れていかない

波消しブロック(テトラポッド—商標登録):外海に面して水深が浅くなる海岸近くに於いて波の影響により海岸線が著しく浸食される。このため、海岸沿いに波のエネルギーを減衰・消散させる目的で大型波消しブロックが設置される。単体重量は0.5t~80t

振動のフーリエ解析—周期的に波として捉えられる現象はすべて単純な正弦波の重ね合わせとして表すことができる

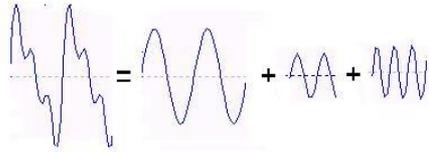


図35-18 フーリエ解析

ドップラー効果—波源や観測者が動くと、振動数が変化して見られる現象

スロッシング(液面揺動)—大容量のタンクの中の液体が地震などによって大きく揺れる現象

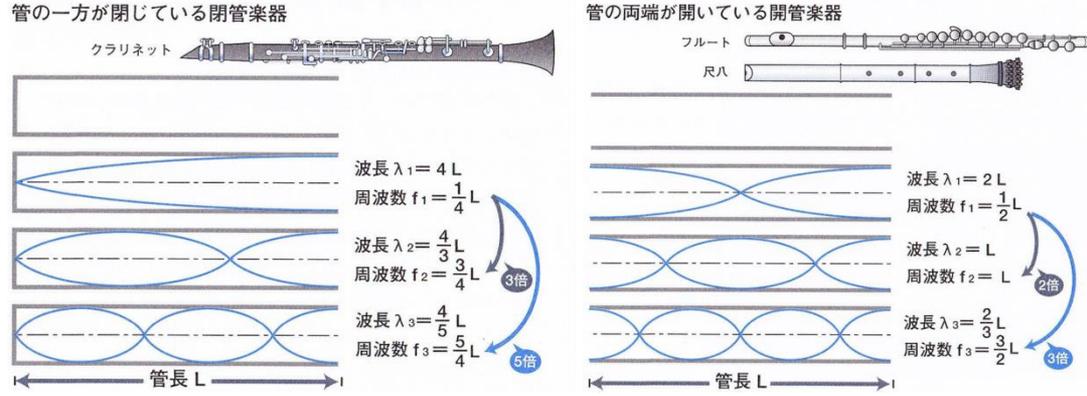


図35-15 管楽器内の空気の振動 ④

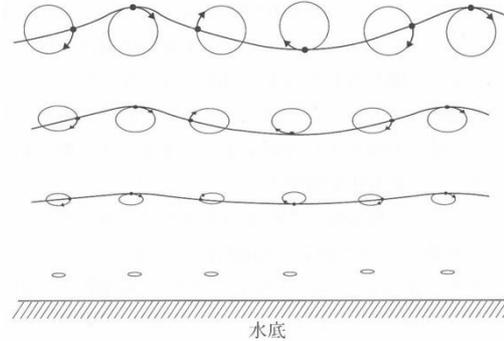


図35-16 波の粒子運動 ③



図35-17 波消しブロック (Wikipedia)

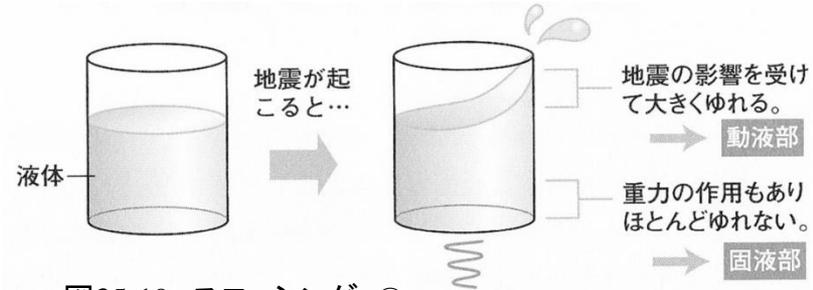


図35-19 スロッシング ④

バラシング

(湘南島津株式会社)

回転機械の構成部品・材料は回転中に遠心力を受ける。すべての遠心力の総和がゼロでなければ(アンバランス)、回ることにより振動、騒音を発生させる。(例;工場生産ラインの各種回転機械、発電所のタービン・発電機、自動車のタイヤ・シャフト・フライホイール・ギア・クランクシャフト、家電の扇風機・掃除機・冷蔵庫のコンプレッサ、DVD/CDドライブ、パソコンのハードディスクなど)

振動・騒音の発生は、無駄なエネルギーを消費し、軸受部の磨耗、劣化を促進し、製品寿命を短くする。

不釣り合い(アンバランス) 一回転体の重心が回転中心からズレていることに起因する。この修正には、不釣り合いの重さmを取り去ったり、反対側に質量mのウェイトを取り付ける必要がある。ロータの質量M、偏芯量e、修正半径Rには次の関係が成立する

$$M \times e = m \times R$$

(kg) (μm) (g) (mm)

バラシング—その回転体のアンバランスを少なくさせる行為
それを計測、修正する装置が**釣り合い試験機(バランサ)**

バラシングには、1.静バランス(1面アンバランス)、2.動バランス(2面アンバランス)がある

静不釣り合(Static Unbalance) —ロータを滑らかなレールの上に載せると重い部分が下に向く。これが静不釣り合。不釣り合の修正は1箇所で行なう(1面修正、1面不釣り合)

動不釣り合(Dynamic Unbalance) —一般的に不釣り合は左右で好き勝手な方向に好き勝手な大きさに現れる。これは静不釣り合と偶不釣り合の複合された不釣り合で、これを動不釣り合と呼ぶ。偶不釣り合成分は回転することで初めて現れる不釣り合であり、その測定には、回転する以外に方法がない。この不釣り合は左右の2箇所で行なう必要がある(2面修正、2面不釣り合)

動不釣り合の原因は種々の要素の誤差の積み重ね:

成型・加工品の場合 —素材比重の不均一、中心に対して非対称な形、加工誤差 など

組立て品の場合 —組み立て誤差、個々の部品の質量誤差、配置誤差 など

組立て品の場合、個々の構成部品の静バランスをとった後(単バラ)、組立て品で総合的に動バランスをとることが多い

釣り合い試験機: 各種供試体の釣り合い(バランス)を測定する装置。測定対象はフライホイール、クラッチ、モータ、クランクシャフト、圧延ローラ、ターボ・圧縮機のロータなどで、供試体の使用回転速度、大きさによって種々の釣り合い試験機を使い分ける

フィールドバランス —1.機械装置として実用の軸受、支持台などに組み付けられた状態で行う釣り合せ。 2.実使用条件での現場釣り合せ

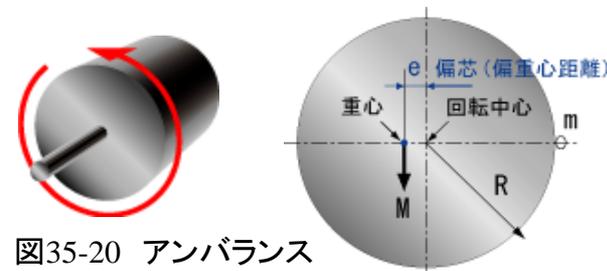


図35-20 アンバランス
(湘南島津)

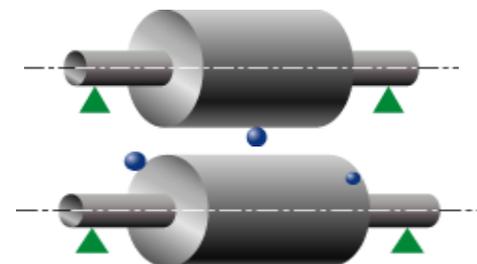


図35-21 静不釣り合(上)と動不釣り合(下)
(湘南島津)



図35-22 立形1面釣り合い試験機
(シグマ電子工業)

ダンピング

ダンピング(減衰): 振動している系が抵抗・摩擦などで振動のエネルギーを失って、振動の振幅が減少すること。過大な振幅による機械・装置の破壊を防止するための重要な技術

振動を減衰させるためには、振動系にダンパーを組み込む。特に共振周波数ではダンパーが振幅過大になることを防止する

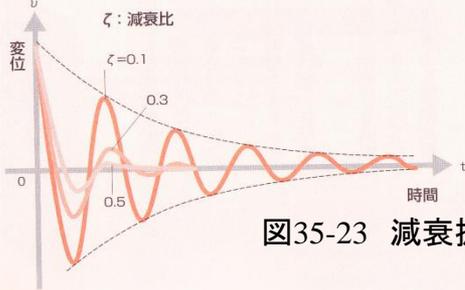
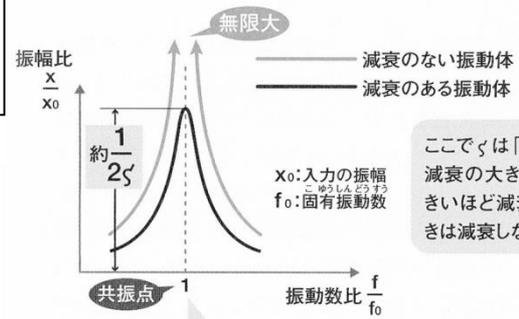
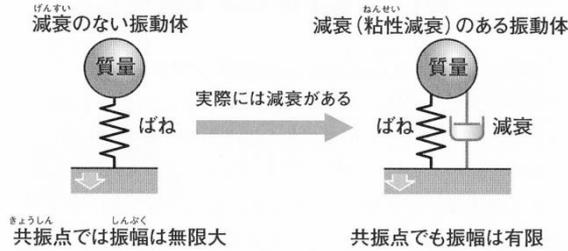


図35-23 減衰振動の波形 ①



ここで ζ は「減衰比」と呼ばれ、減衰の大きさを表す。 ζ が大きいほど減衰しやすく、0のときは減衰しない。

共振点では振幅比が大きくなる。たとえば建物の減衰比を $\zeta = 0.05$ とすると約20倍。

図35-24 共振点での減衰 ④

材料の特性を利用したダンパー

磁気ダンパー

振動エネルギーを永久磁石と導体に生じる過電流に変換し、その結果、生じた抵抗力が減衰力となる。

油圧ダンパー (オイルダンパー) (オイルスナッパー)

シリンダー内の弁を油が通過するときに生じる流体抵抗によって減衰力を発生させる。流体の粘性を利用した粘性ダンパーの代表格。

ヒステリシスダンパー (履歴ダンパー)

鋼材や鉛などの金属の弾塑性変形(力を受けると変形し、それが元に戻らず残る)によって振動エネルギーを消費して減衰力を得る。鋼材ダンパーや鉛ダンパーなど。

粘弾性体ダンパー

高分子材料の持つ粘弾性を利用したダンパー。

動力学的な運動メカニズムを利用したダンパー

メカニカルダンパー (メカニカルスナッパー)

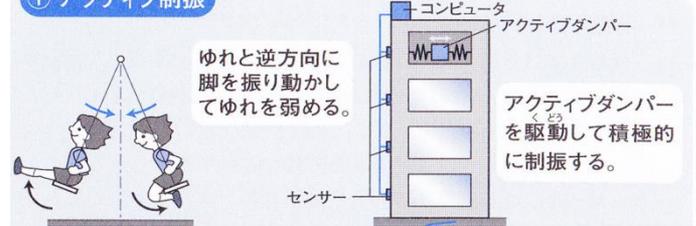
往復運動を回転運動に変えて、回転体とブレーキシューとの摩擦抵抗力によって振動エネルギーを吸収。

メカトロダンパー

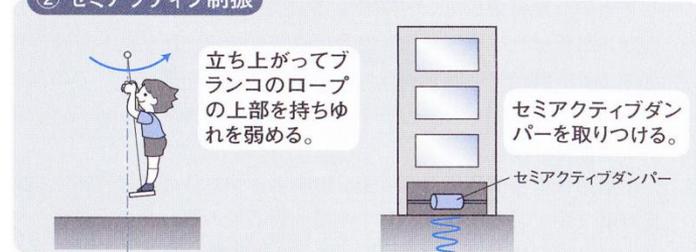
往復運動を回転運動に変えて、その回転により発電モーターで発生させた起電力によって減衰力を得る。

図35-25 ダンパーの種類 ④

① アクティブ制御



② セミアクティブ制御



③ ダンピング(パッシブ制御)

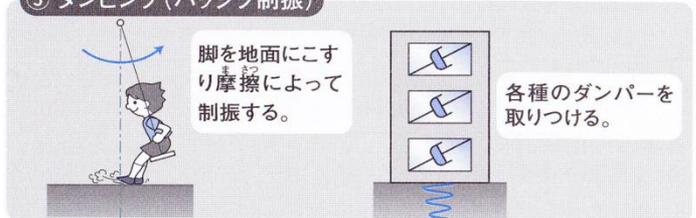


図35-26 ダンピングの方式 ④

機械の防振

自動車のサスペンション

- 1.ばね—車輪の上下動を吸収
- 2.ショックアブソーバ(ダンパ)—適度な減衰

- ・リジッドアクスル—左右両輪を一本の車軸で連結
- ・独立懸架—左右両輪が独立して運動

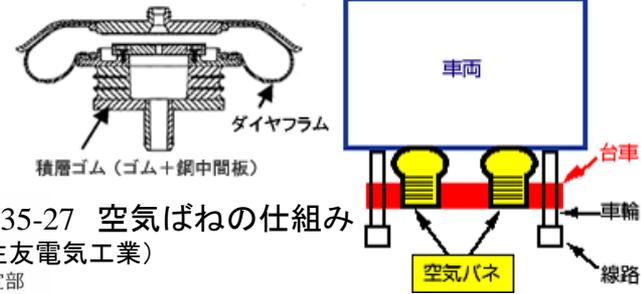


図35-27 空気ばねの仕組み (住友電気工業)

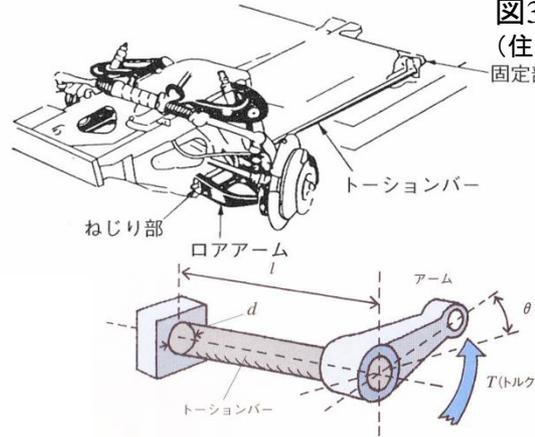


図35-29 トーションバー式フロントサスペンション ⑧



図35-28 新幹線N700系用の空気ばね (カットモデル) (エーエス)

空気ばね—電車・自動車の乗り心地を良くするため車両と台車部(台車+車輪)の間に装着され、車輪から車両に伝わる振動を空気の容積変動で大幅に軽減する役目を果たす(住友電気工業)

トーションバー—真直な棒状の springs で、ねじられた棒が元に戻ろうとする弾性を利用。サスペンションに使われる場合は、棒の片側をボディフレームに固定して、逆側をサスペンションアームに固定する。蓄えられる弾性エネルギーが大きく、軽量でスペースをとらない

サスペンションユニット(クッションユニット)—オートバイに使われるサスペンション。スプリングとショックアブソーバ(ダンパー)が一体の防振支持装置

防振台—床からの振動伝達を防ぐ作業台の三次元空気ばね式防振台は、“垂直方向の防振を担う空気ばね”と“水平方向の防振を担う水平防振機構”とが一体化し、あらゆる方向から伝わる振動に対応



図35-30 オートバイのサスペンション

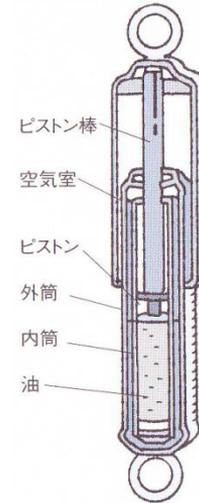


図35-31 ショックアブソーバ ⑧



図35-32 防振台 (ヘルツ株式会社)

地震・免震

地震動は弾性波である縦波(P波)と横波(S波)、表面波の3つに大別される。地震の予知とは、地震の起こる時、場所、大きさの三つの要素を精度よく限定して予測すること

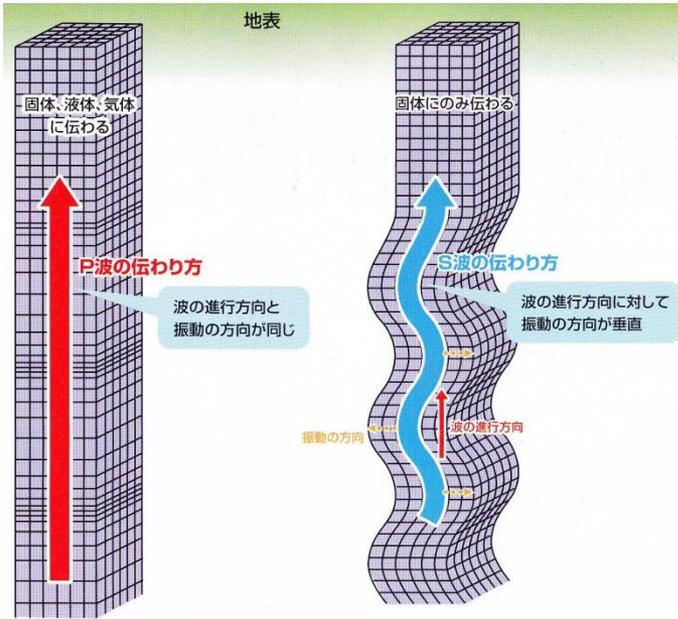
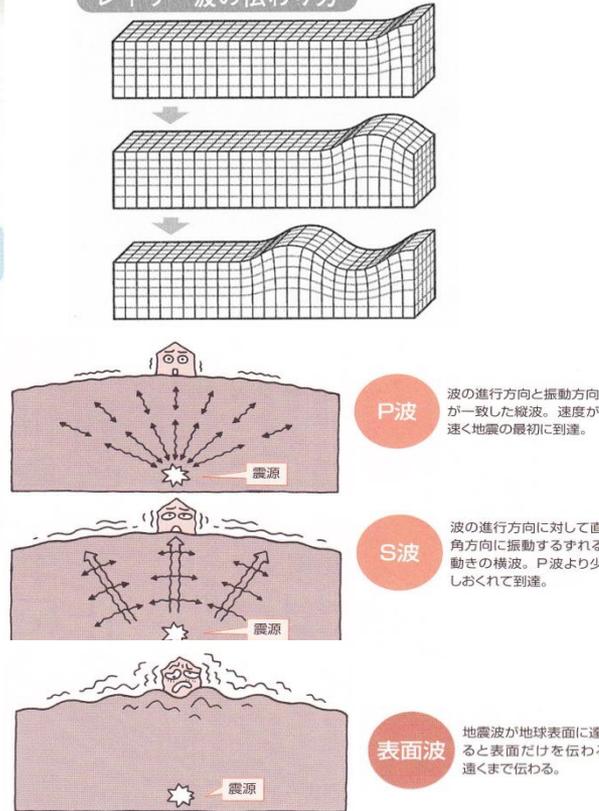


図35-33 地震のP波、S波、表面波 ④

表面波の伝わり方

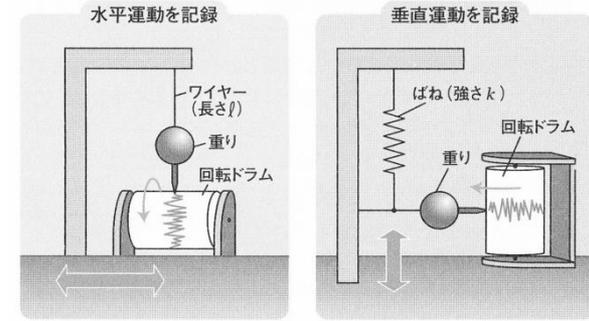
レイリー波の伝わり方



P波 波の進行方向と振動方向が一致した縦波。速度が速く地震の最初に到達。

S波 波の進行方向に対して直角方向に振動するすれる動きの横波。P波より少しおくれで到達。

表面波 地震波が地球表面に達すると表面だけを伝わる。速くまで伝わる。



l を長く(k を小さく)すると、ワイヤーまたはばねは地震の速いゆれに共振しないので止まっている。

図35-34 地震計(模式図) ④

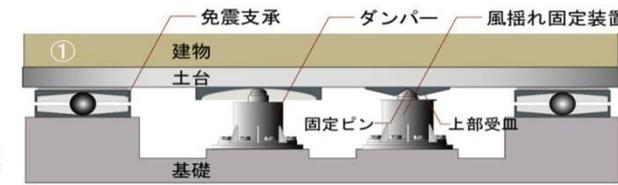


図35-35 免震システム(IAU社)

表35-2 地震に対する建物の構造対策

耐震構造	建物の構造を地震に耐えるよう工夫したもの	ラーメン構造、ブレース構造、壁・パネル
免震構造	建物を基礎を切り離して建物にかかる地震の振動を低減する	アイソレータ(免震支承)とダンパー(減衰装置)
制震構造	建物の地震による揺れを特別な装置で制御する	付加質量、可変剛性(ブレースのON-OFF)、建物変形エネルギー吸収

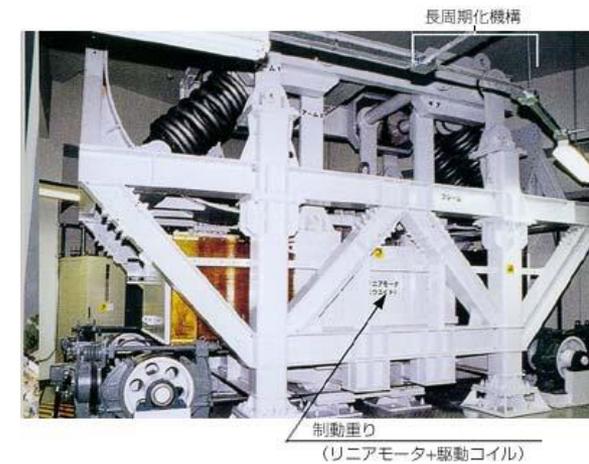


図35-36 横浜ランドマークタワーなど超高層ビル用の制振装置(三菱重工)

事故例

振動、地震により交通機関、機械設備、建築構造物はしばしば大事故を発生させている

タコマ橋の落壊—1740年アメリカワシントン州のタコマ橋は横風により橋桁に発生したカルマン渦により橋全体の曲げとうねりを伴った**フラッター**振動に**共振**してで落壊

高速増殖原型炉「もんじゅ」の2次系ナトリウム漏えい事故—1995年2次主冷却系配管に挿入した温度計がナトリウムの**カルマン渦**による流体力により振動し、そのさや細管部に**高サイクル疲労**を生じ、亀裂が発生・進展し破損

地震による落橋—1964年新潟市の信濃川にかかる鉄筋コンクリート製昭和橋が震度5弱の地震で**橋脚の振れ**で落橋

和歌山県関西電力海南火力発電所のタービン破損事故—1972年60万kW蒸気タービンの試運転中、タービン軸および発電機軸が破損。タービン、発電機、励磁機の各部が損壊し飛散するとともに、発電機から火災が発生。バランス調整不良に起因した**振れ回り**による共振が原因

JR西日本尼崎市の脱線事故—2005年4月快速電車の脱線大事故は先頭部分がカーブによる遠心力だけではなく、転倒する直前に車体に激しい**横方向の振動**が断続的に起こり、脱線につながった可能性があることが判明

英ミッドランド航空92便(ボーイング737-400型)の機体振動、墜落—1983年離陸後高度8500mで爆発音と共に機体振動を始め、高速道路の土手に激突。47名が死亡。CFM56-3エンジンに設計上の欠陥があり空気の薄い高度7600m以上で推力を最大にすると**ファンブレードに異常振動**が発生することが判明

副振動による船舶や沿岸の建造物などの被害—1979年に発生した**副振動**では長崎検潮所での観測で振幅278cmを記録し、湾奥では470cmに達していたと推測されている。繫留ロープが切断された船が流出し、三菱長崎造船所ドックのゲートが転倒するなどの被害(**副振動**—湾や海峡においてはごく一般的に見られる現象で、数分から数十分程度の周期で海面の水位が数cmから数十cmほど変動する。外洋で発生した津波や気圧変動、風の影響などによって発生した波が湾内に入り反射して共鳴を引き起こすことが要因として考えられている)

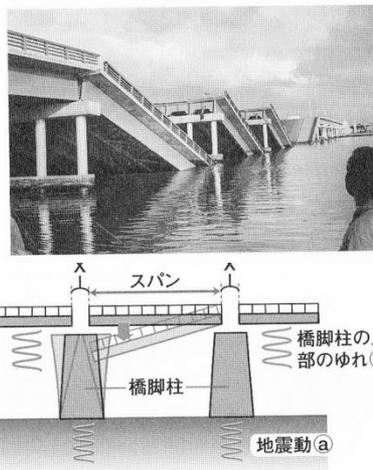


図35-39 新潟地震で落橋した昭和橋 ④

カルマン渦は流体の乱れのようなす(レイノルズ数=Reで表す)によって変動する。

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

V: 流体の速度
ν: 流体の粘性(粘り強さ)
D: 物体の直径

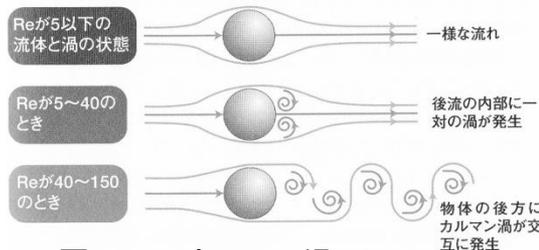


図35-37 カルマン渦 ④

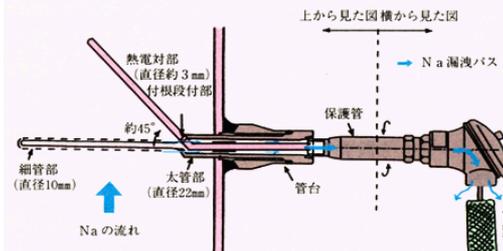


図35-38 「もんじゅ」破損したNa温度計(「もんじゅ」事故)



図35-40 CFM56-3エンジン

課題

低周波振動	低周波音は人間の可聴音の周波数20～2万Hzより低い20Hz以下の音波。一般的には「音」として人間には知覚されないが、建具等をガタつかせる「物理影響」、眠りを妨げる「睡眠影響」、「圧迫感」、頭痛・吐き気などの「心理的・生理的影響」などがある。発生源としては、大型振動ふるい、空気圧縮機・送風機の旋回失速、トンネルへの列車高速突入、風車、橋梁振動など多様。発生源、伝搬径路、受音側の対策などがある
燃焼振動	ガスタービンやボイラで燃焼室の音響波と燃焼プロセスの相互作用によって大きな圧力の変動と熱発生率の変動が起きる現象で、特にNO _x の排出が少ない予混合燃焼で起こりやすい
振動規制法	工場・事業場における事業活動や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して1976年に制定された法律。環境省所管
衝撃波	おもに空気中を超音速で伝播する圧力などの不連続な変化で、急速に減速して最終的には音波となる。エネルギーが蓄積して瞬間的に解放されたときに現れる。人為的には、火薬の爆発、放電、レーザ光の収束、高圧の開放、高速衝突、高速流れ、超音速飛行などに現れる

キーワード

連成振動	ばね－錘－ばね－錘の連りなど2つ以上の振動系が互いに影響を及ぼしあって振れる振動。具体的な例として、基礎構造物の剛性の影響を考慮したポンプなどの回転機械の振動解析、回転機械とその駆動モータの電気系統の振動の相互影響など種々のケースが考えられる
クォーツ	水晶振動子。水晶は交流電圧をかけると、一定の周期で規則的に振動する。クォーツ時計は、32,768(=2 ¹⁵)Hzで振動する水晶振動子を用いたもの
周波数分析	騒音・振動は多くの周波数の集まりであり、その成分を分析し、騒音・振動対策、騒音源の究明、振動評価、低周波音の苦情の対応などに活用。分析器にはFFT(Fast Fourier Transform)アナライザなどがある
びびり振動	工具と被切削物の間で継続的に発生する振動。原因は工作機械内部の駆動源の振動、外部から受ける振動などがある。びびり振動により加工面粗度の低下などの加工不良や工具の早期磨耗を起こす。工具刃先の表面処理、刃先のエッジ角、高速加工などでびびり振動の共振を回避する