振動の制御，　制振

基本的戦略

- 振動を抑える
  - 原因を絶つ
    - 振動源の解消
    - 風振動に対する空力的対策
  - 伝播経路を経つ
    - 免震
      - 緩い支承
      - 珍しいものでは空溝対策工
  - 振動自体を押さえ込む，押しやる
    - 制振
      - 減衰制御
      - 振動モード変更
- 振動を許す
  - 閾値（しきい値）
    - 振動の知覚限界（振動を感じる、許す）
  - 騒音の例
    - 騒音の強さ、暴露時間
      - 環境省の基準　**環境基準**
        - 「**騒音に係る環境基準について**」
          - http://www.env.go.jp/kijun/oto1-1.html
        - 「**航空機騒音に係る環境基準について**」
          - http://www.env.go.jp/kijun/oto2.html
    - 加重等価平均感覚騒音レベル　WECPNL

振動の知覚限界　perception level

- 恕限度（じょげんど）
  - 閾値、恕（おもいやること、ゆるすこと）
    - 怒限度（怒り出す限度）ではない
- 振動の基準
  - 橋梁
    - ドライバーベースの100galが目安で用いられることがおおい
  - 管制塔
    - 長時間集中して凝視する作業
  - ISOの基準(ISO2631)
    - 機械振動が対象で主として作業者
  - 建築学会、国土交通省
    - ホテル、病院、集合住宅など
    - 歩行者、運転者
- 航空機騒音
  - 加重等価平均感覚騒音レベルWECPNL（Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level）うるささ指数
  - 航空機による騒音の評価指標の1つである。
    - 音圧レベルとしてのdbは単なる物理量の尺度であり、瞬間的な音の強さを表す
    - 発生回数を加算するなどの形で時間的な積み重ねを反映。
  - 知覚騒音レベル(PNL,Perceived Noise Level)が基本評価量
    - 日本国内ではA特性音圧レベルで簡易化
    - 世界は、EPNL（1機が飛行したときの騒音暴露レベル。基準時間を10秒）を、ECPNL：EPNLを使用し24時間に飛行した全航空機による騒音を総計等価PNL。

いわゆる制振

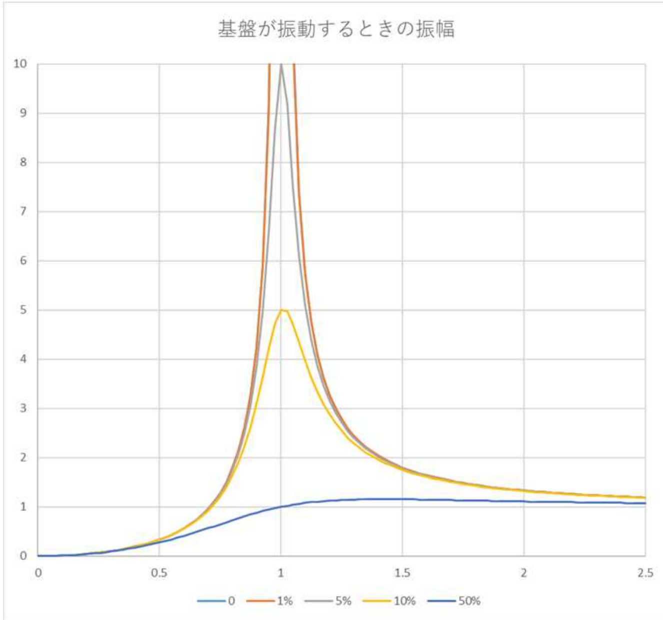
- 機械的な制振
  - 外部とつなぐ
    - 応急対策としては有効
  - 意識的に振動の節をつくるようなつなぎ材を加える
- 受動（的）制御　パッシブ制御 passive control
  - 構造が動くことで制御力が発生する
  - 減衰器を取り付ける
  - TMD
- 能動（的）制御　アクティブ制御 active control
  - センサーで振動を検知して振動を抑える力を加える
  - 変位制御
  - 減衰制御

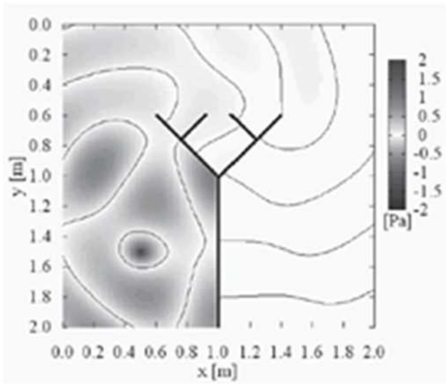
まず、振動源を押さえる

- 風誘起振動
  - 断面形状の調整で風力を調整
  - 自律的に対応できるほぼ唯一の例
- 風誘起振動以外の例
  - 低振動（＊＊＊）装置
    - 振動低減装置を組み込んだ機械類
    - バイブロハンマー
      - 鋼矢板の圧入

伝達経路を（で）絶つ

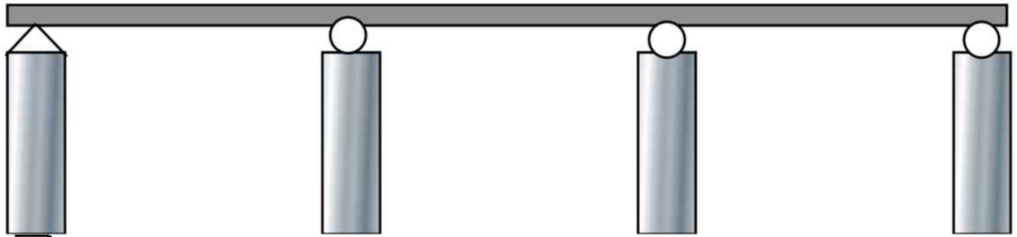
- 免震
  - 接合部の剛性を落とし低固有振動数化することで振動を防ぐ
    - 浮かせるイメージ
  - 住宅の場合
    - 動いてしまう戻りの保証,
    - 地下とつながる管線の柔軟化
- 経路での干渉
  - トナカイ型防音壁
    - 右の例は長岡科技大宮木先生
    - 廃れつつありますが．．
  - 空堀対策工
    - 空堀も，水堀も，鋼矢板の堀も





具体事例、対応は弾性支承、免震支承

- ゴム支承



NETIS登録No,CB-110020-A

- 反力分散支承
  - 多くの橋脚で分散、免震支承ではない
  - 稼働、固定支承のうち、固定支承で受けていた水平力を分散

- 免震支承
  - 水平方向の固有振動数を下げる
  - イメージとして浮かせれば良い

振動を力ずくで抑える

- 力で押させるとすると
  - 加速度と同オーダのエネルギーが必要→大きな力、エネルギー
  - 大規模なものとすると固定具が損傷しやすい
- 減衰力とすると
  - オーダとして**2オーダ小さい力**で済む
- 斜張橋のステイケーブル（斜張ケーブル）の例（次のスライド）
  - 結合材　振動モード形を変更
    - 一時的対策に限らず，恒久的対策も事例は少なくない
    - 破損が多い
  - ダンパーを組み合わせる例も多い
- 固定、結合だけに頼る制振は、要するに、得策ではない

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{f}{m}$$

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0{}^2 x = \frac{f}{k}\frac{k}{m}$$

$$O(\ddot{x}) \sim \omega_0{}^2$$

$$O(\omega_0{}^2 x) \sim \omega_0{}^2$$

$$O(2h\omega_0\dot{x}) \sim h\omega_0{}^2$$

$$O\left(\frac{f}{k}\frac{k}{m}\right) \sim \omega_0{}^2 \frac{F_0}{k}$$

呼子大橋のケーブルダンパー

ケーブルのダンパーの例

- 左はフランスセーヌ川にかかるブロトンヌ橋
- 右は中央環状の幸魂橋


ＴＭＤの事例　2自由度系の振動

表 6.1　各種振動に対する最適 TMD と制振効果（付加減衰）

	調和外力振動	調和地盤振動	自由振動	自励振動	定常不規則強制振動
最適化基準	応答曲線の固定点を等しく最大点にする	増幅率曲線の固定点を等しく最大点にする	2つのモード減衰を等しく最大にする	2つのモードがともに安定でありうる負減衰を最大にする	構造物の2乗平均応答を最小にする
γ_{opt}	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$	$\frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu}$
$(\xi_T)_{\mathrm{opt}}$	$\sqrt{\frac{3}{8}\frac{\mu}{1+\mu}}$	$\sqrt{\frac{3}{8}\frac{\mu}{1+\mu/2}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{1+3\mu/2}}$
ξ_{eff}	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{2}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{1-\mu/4}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+\mu/2}}$	$\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+3\mu/4}}$

- γ：チューニング振動数比　ξ：減衰比
- 等価減衰　モード形の合成
- 調和外力　固定点の大きさをそろえる→ロバスト性
- 調和地盤振動　　同上
- 自由振動　両モード減衰を等しく
- 自励振動　両モードが安定である負減衰作用を最大
- 不規則振動 振動エネルギーを最小

ＴＭＤの得失

- 利点
  - 固定点が不要
  - 理論的に明確
  - 必要減衰が分かれば振動理論で片がつく
  - 後施工でも挿入ができないことはない
- 欠点
  - 従構造の振動が大きいので収納スペースの確保が課題
  - 調律が厳しい
    - 外すと効果が薄れる
  - 機械ものでメンテナンスが必須
    - 振動すると減衰器の冷却装置が必要
    - 可動部寿命は構造本体より短い
- 番外
  - 十分な制振条件では（振動しないとか）ＴＭＤの振動も少なく劣化はすくない
    - 主構造の振動を極めて小さくするとすれば、従構造の振動も小さく出来る
- 採用例はきわめて多い
  - ビル、橋。。。
  - 最近ではTMDにアクティブ制御を組み込んだものの効率が勝る

振動制御に状態方程式としての表現

- （振動）制御の世界では一般的
- 例えば，伝達関数としては分かりやすい

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=f$$

$$\dot{x}=v$$

$$m\dot{v}+cv+kx=f$$

$$\{x\}=\begin{Bmatrix} v \\ x \end{Bmatrix}$$ 状態変数

$$\{\dot{x}\}=\begin{bmatrix} 2h\omega_0 & {\omega_0}^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\{x\}+\begin{Bmatrix} \frac{1}{m} \\ 0 \end{Bmatrix} f$$ 状態方程式

$$\{y\}=\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}\{x\}$$ 観測方程式

一般的には

$$\{\dot{x}\}=[A]\{x\}+\{b\}f$$

$$\{y\}=\{c\}^T\{x\}$$

$$\{\dot{x}\}=[A]\{x\}+\{b\}f$$

$$\{y\}=\{c\}^T\{x\}$$

*laplace*変換

$$\omega X(\omega)=[A]X(\omega)+\{b\}F(\omega)$$

$$Y(\omega)=\{c\}^T X(\omega)$$

$$Y(\omega)=\{c\}^T(\omega-[A])^{-1}\{b\}F(\omega)$$

$$G(\omega)=\frac{Y(\omega)}{F(\omega)}=\{c\}^T(\omega-[A])^{-1}\{b\}$$

状態方程式の使い方

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + \{b\} f$$

$$\{y\} = \{c\}^T \{x\}$$

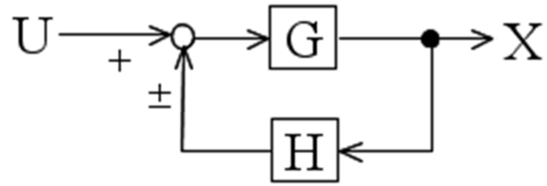
$$\{\dot{x}\} = \frac{x(t+\vartriangle t) - x(t)}{\vartriangle t} = \frac{x(t) - x(t-\vartriangle t)}{\vartriangle t}$$

- 線形システム
- 一階微分で使いやすい
- 複素固有値解析
  - 変位と速度が独立変数になるので，得られた固有値の整理が必要
- 移動平均モデルとか自己回帰モデルとか時系列推定モデルにもなじみが良い
  - 自己回帰モデル
    - φは係数，εは誤差項

$$x_t = \sum_i \varphi_i x_{t-i} + \varepsilon$$

  - 逆解析への展開

能動（アクティブ）制御への拡張



- 伝達関数のブロック線図を用いて
  - フィードバック制御
  - フィードフォワード制御
- 評価関数J　例えばひずみエネルギーとか運動エネルギーとかと制御エネルギーJ最小→最適制御

$$J = \lim_{t\to\infty}\int_0^t \left(x^2 + ru^2\right)dt$$

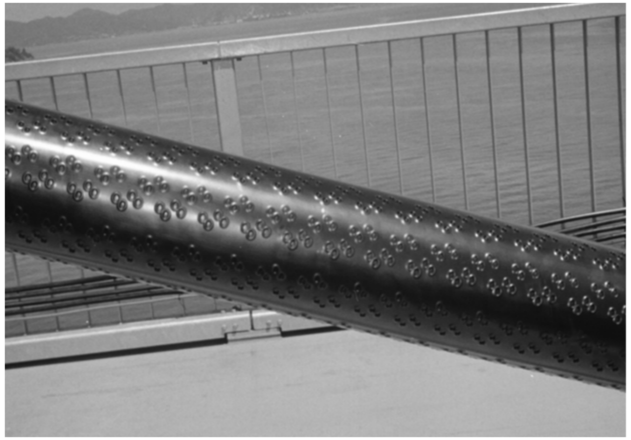
- 対象とする状態が限られれば効率化ができそう　→システムが明確でないと制御は難しい→システム同定と表裏一体
- 効率化しすぎると制御範囲外の振動モードを起振する→スピルオーバ
- 多くの制御理論が機械航空電気の分野で提案され実現している
  - H∞制御理論　特定モード系を対象にして巨大なエネルギーを節約
  - ファジー制御　制御の厳密化を緩める。一方向の開放制御に向く
  - ニューラルネット制御　システムを作るのに魅力的

明石海峡大橋架設時の主塔の制振対策

- 多段振り子を用いて，調律と制振
  - 架設ステップ毎に変化する柔軟な制振
  - 振り子振動を同調，調律し（アクティブなTMD），制振を効率化

風による振動への対応

- 断面形状を調整することで空気力を調整できることが多い



- タイで結合し振動数を高める　→破損する例もある

課題

- 振動制御の例を調べてみてください。ひとつあげて、特性を説明してください。
- ブランコまで行けませんでした。ごめんなさい。非線形振動は将来の楽しみですね。