

建設系構造物の振動

—風による橋の振動を中心にして—

講義の内容

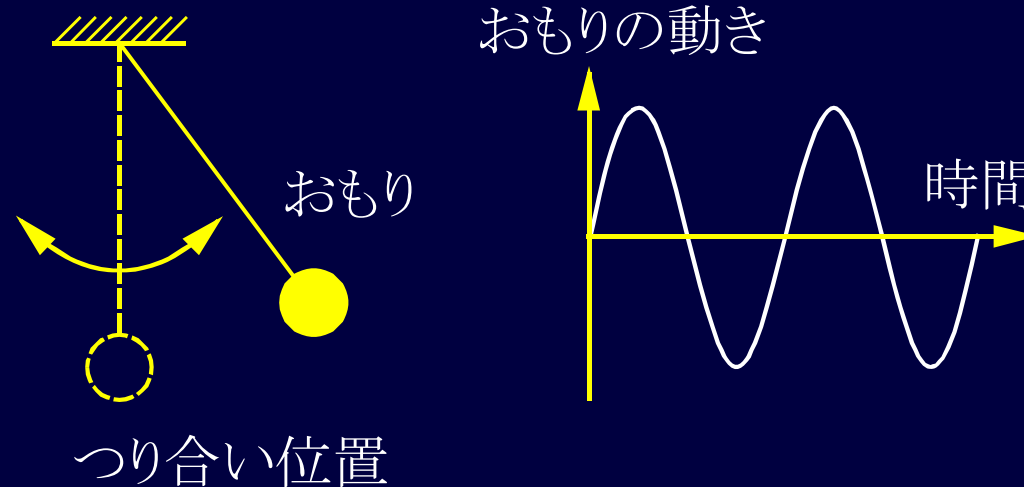
- 建設系構造物の振動
- 振動事例
- 振動制御

● 構造物の振動あれこれ



● 振動とは

◆ 例：ふり子の運動



- 振動：状態のつり合い位置まわりの往復運動
 - ・ 振動の形状は加わる力により決まる
- 波動：媒介をある状態（波）が伝わる現象
 - ・ 例： 水面の波紋（津波），地震動，音，電波

● 振動が問題となる背景

◆ 構造物の長大化(より長く, より高く)

- 例: 吊橋(明石海峡大橋: 4kmの長さ)

吊橋のタワー, 高層ビル



- 柔構造化:
 - ・ 変形しやすい
 - ・ 長周期化
(固有振動数の低下)
→ 振動しやすい



● 吊橋

◆ 明石海峡大橋(中央スパン:1991m, 1998年)



● 斜張橋

◆ 蘇通長江公路大橋(中央スパン:1088m, 2008年)



● 斜張橋

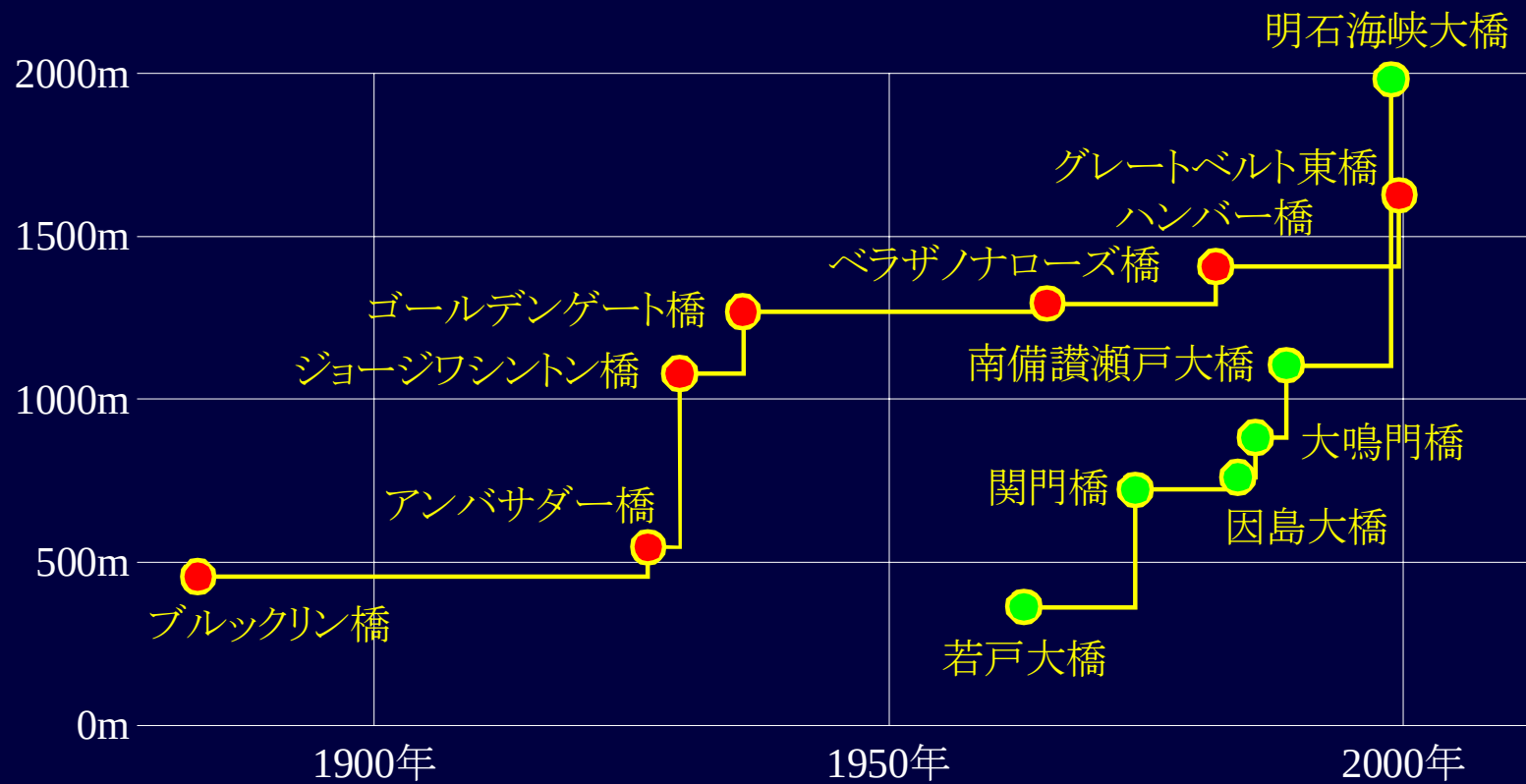
◆ 多々羅大橋(中央スパン:890m, 1999年)





長大橋のスパン変遷

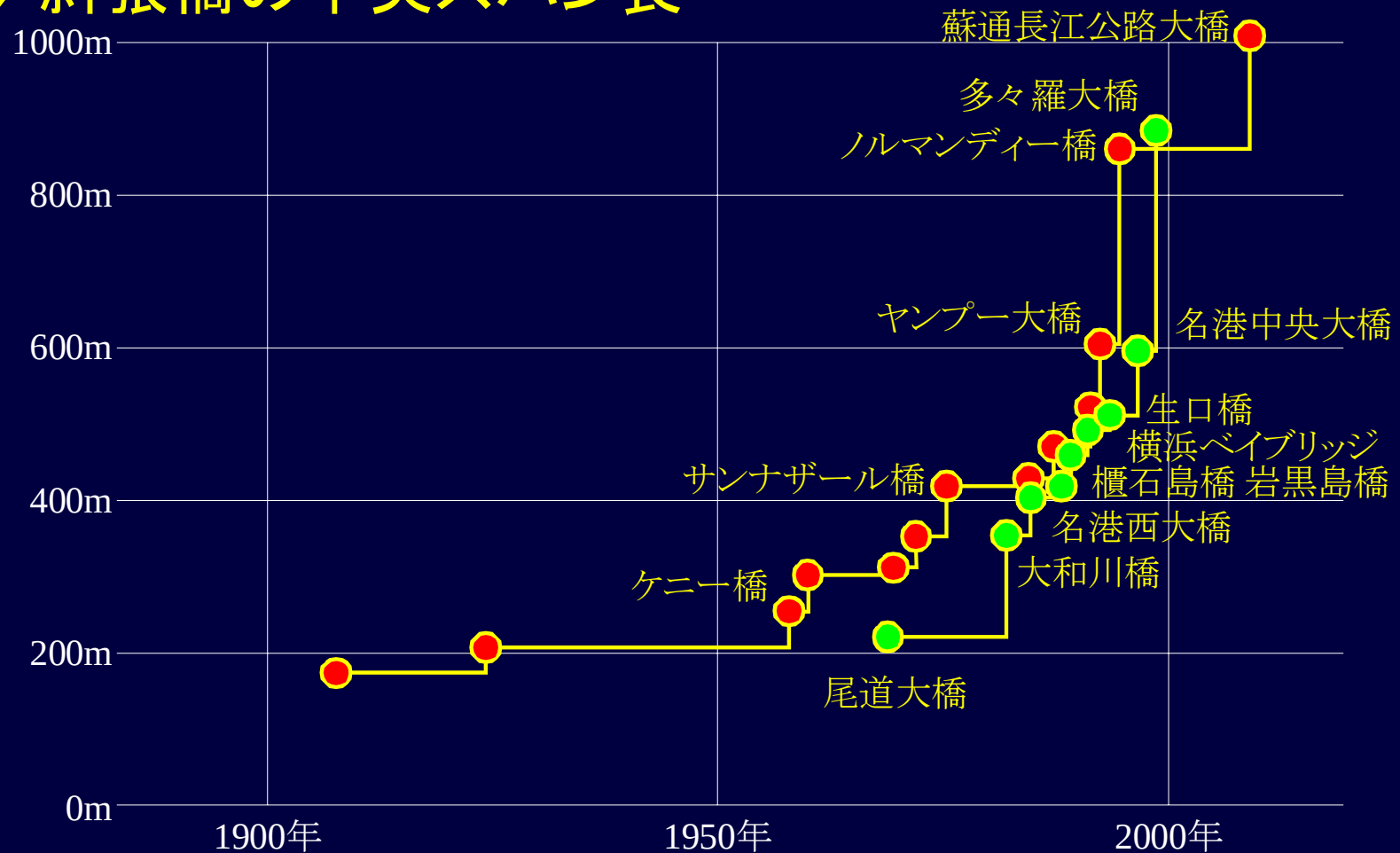
◆ 吊橋の中央スパン長





長大橋のスパン変遷

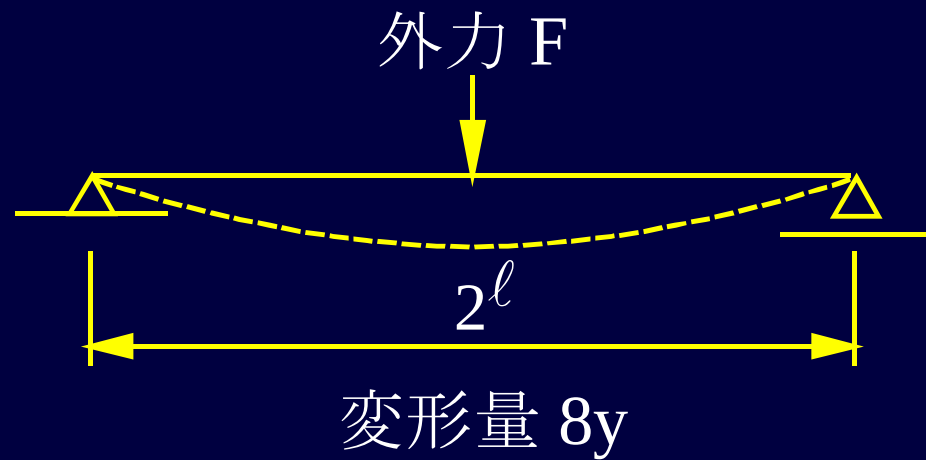
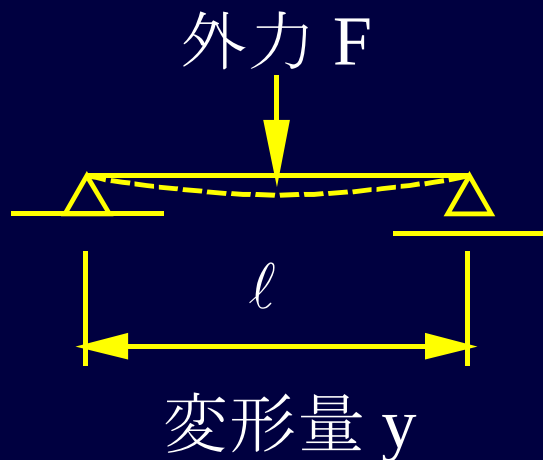
◆ 斜張橋の中央スパン長



● 振動が問題となる背景

◆ 単純な例：はり（橋桁のモデル）

- 変形量：長さの3乗に比例
- 固有周期：長さの2乗に比例





振動が問題となる背景

◆ 橋や建物の基本固有周期(概算)

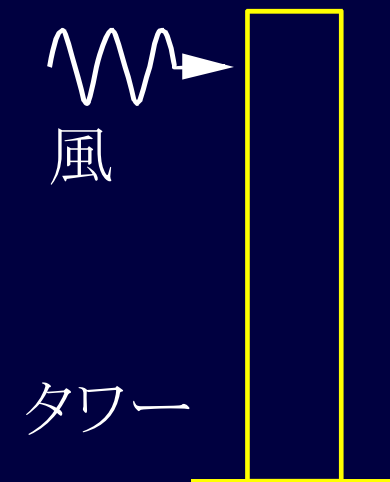
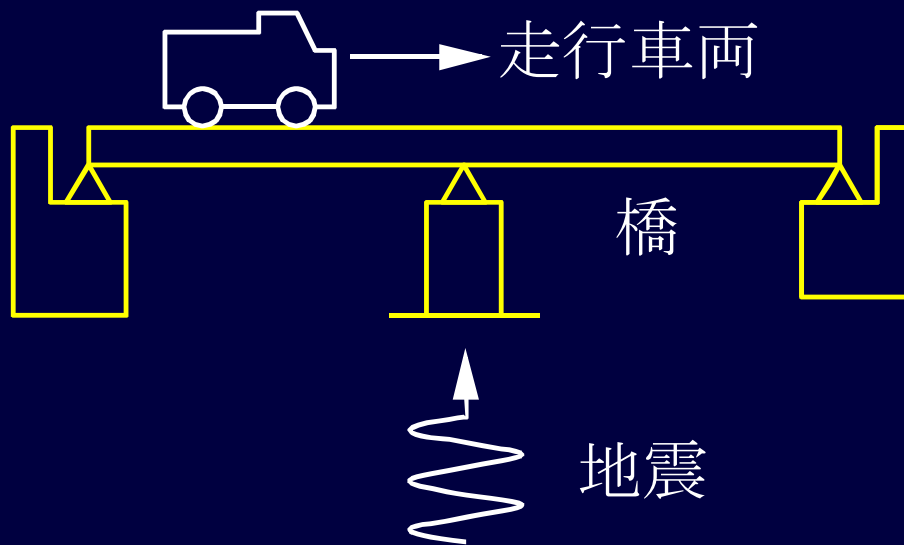
- L: 橋の長さ, 建物の高さ(単位:m)
- T: 固有周期(単位:秒)
- 橋の固有周期: $T = 0.01 \times L$
- 鉄骨コンクリート建物: $T = 0.02 \times L$
- 鉄骨建物: $T = 0.03 \times L$

※長さに比例して, ゆっくり揺れるようになる

● 構造物に加わる外力：振動の原因

◆ 問題となる外力(橋の場合)

- 風
- 地震
- 走行車両



● 振動による弊害

◆ 橋梁全体あるいは部分的な損傷

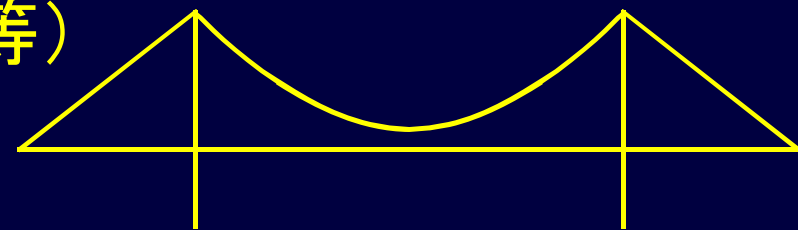
- 直接的な損傷
- 疲労損傷(小さな外力の繰り返し)

◆ 建設中の構造物(吊橋等)

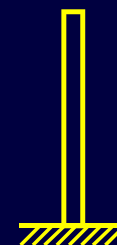
- 構造系の変化
- 作業性

◆ 使用性、環境への影響

- 不快感(歩道橋)
- 騒音
- 環境振動(まわりの建物等を揺らす)



吊橋 完成系



吊橋 建設中
(タワー単独)

● 名港中央大橋 (中央スパン: 590m)

◆ 完成系

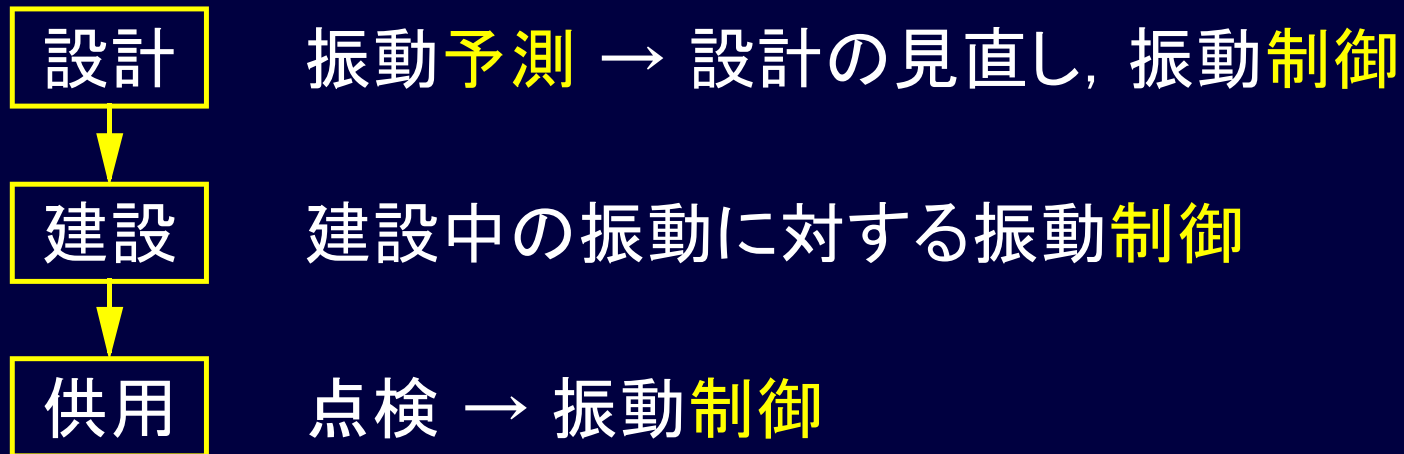


● 名港中央大橋(中央スパン:590m)

◆ 架設系(タワー単独)



● 構造物の建設と振動への対処



◆ 振動の予測

- 解析: 構造物を数学的モデルに置換して計算
- 実験: 構造物の模型を用いて計測

◆ 振動の制御

- パッシブ(受動的)制御: 従来型
- アクティブ(能動的)制御: 新しい手法

● 構造物のモデル化

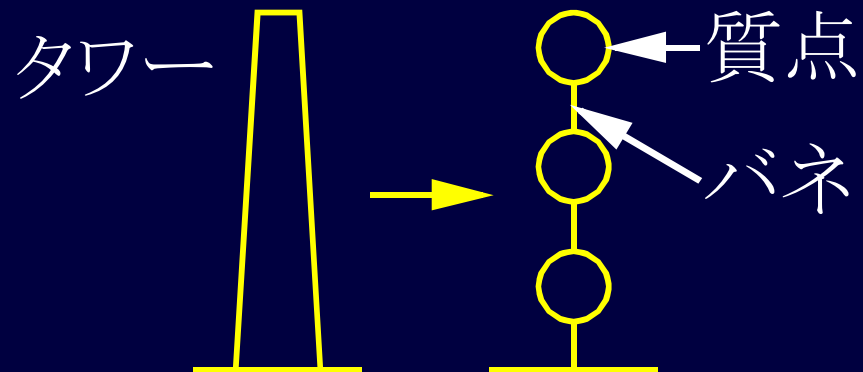
◆ 複雑な構造物

例：吊橋＝タワー＋桁＋ケーブル



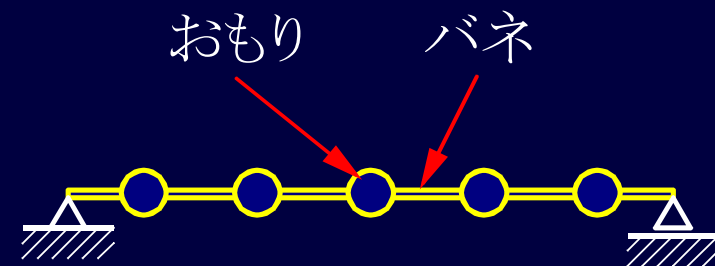
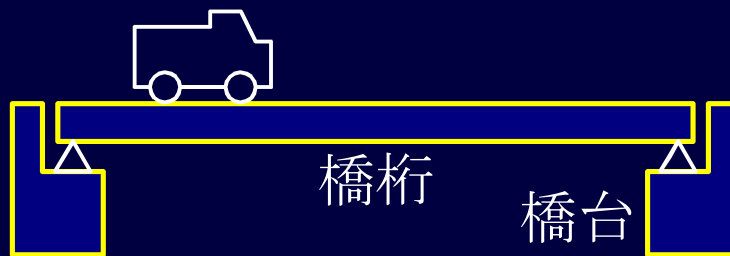
- 比較的単純な数学モデル

◆ 分布質量系 → 離散質量系



● 構造物の振動モデル

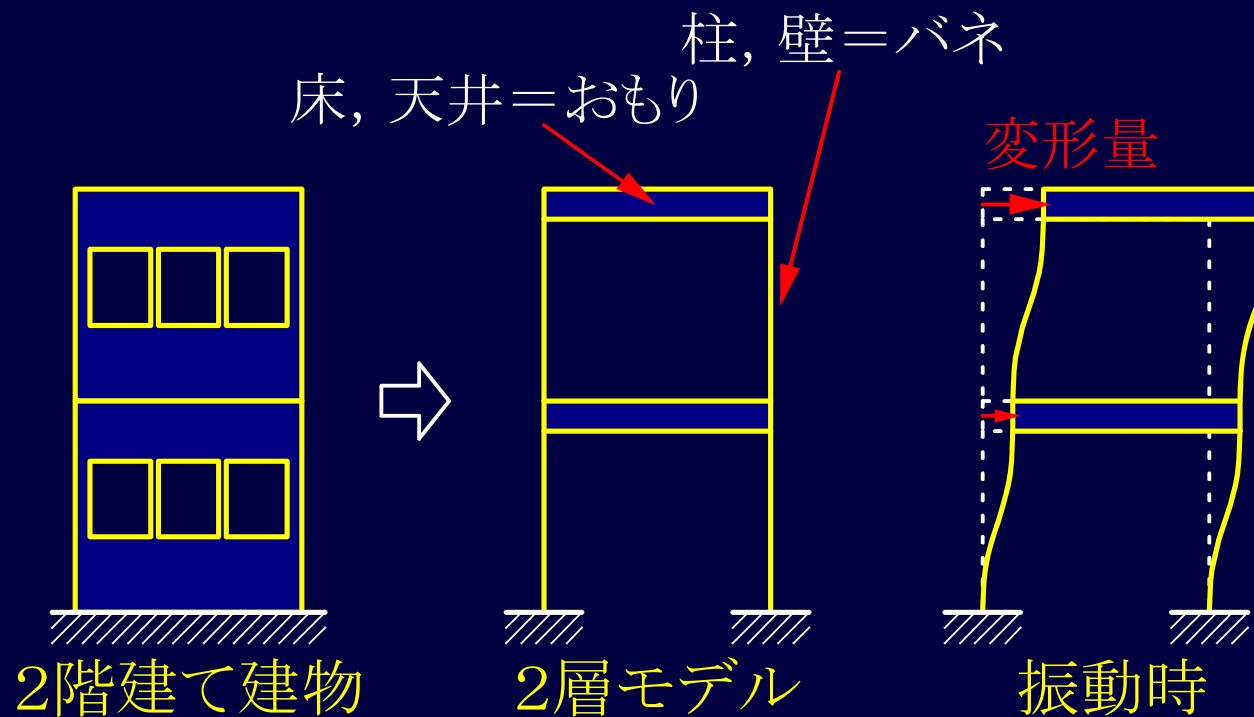
◆ 橋のモデル: はり＝細長い棒状の構造物





建造物の振動モデル

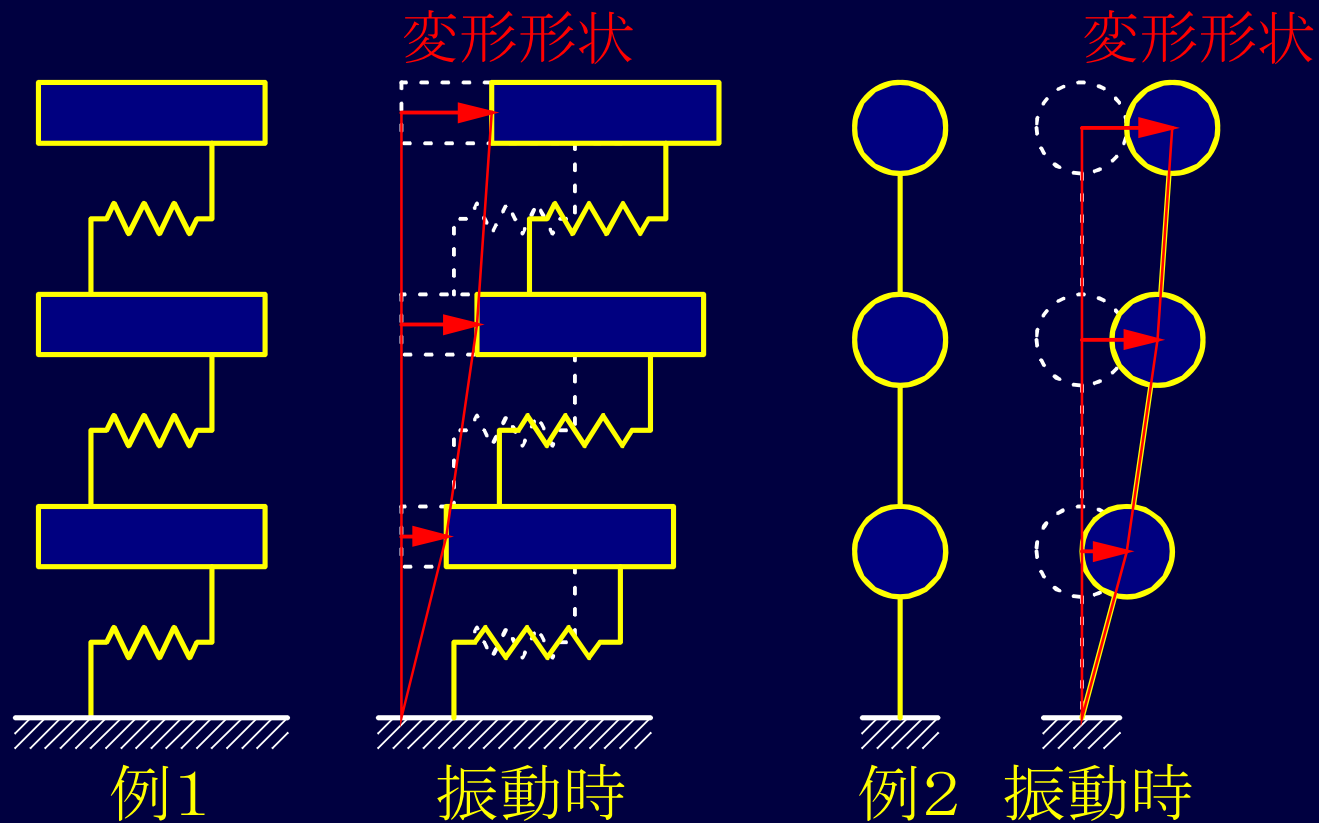
◆ 建物のモデル: 層モデル





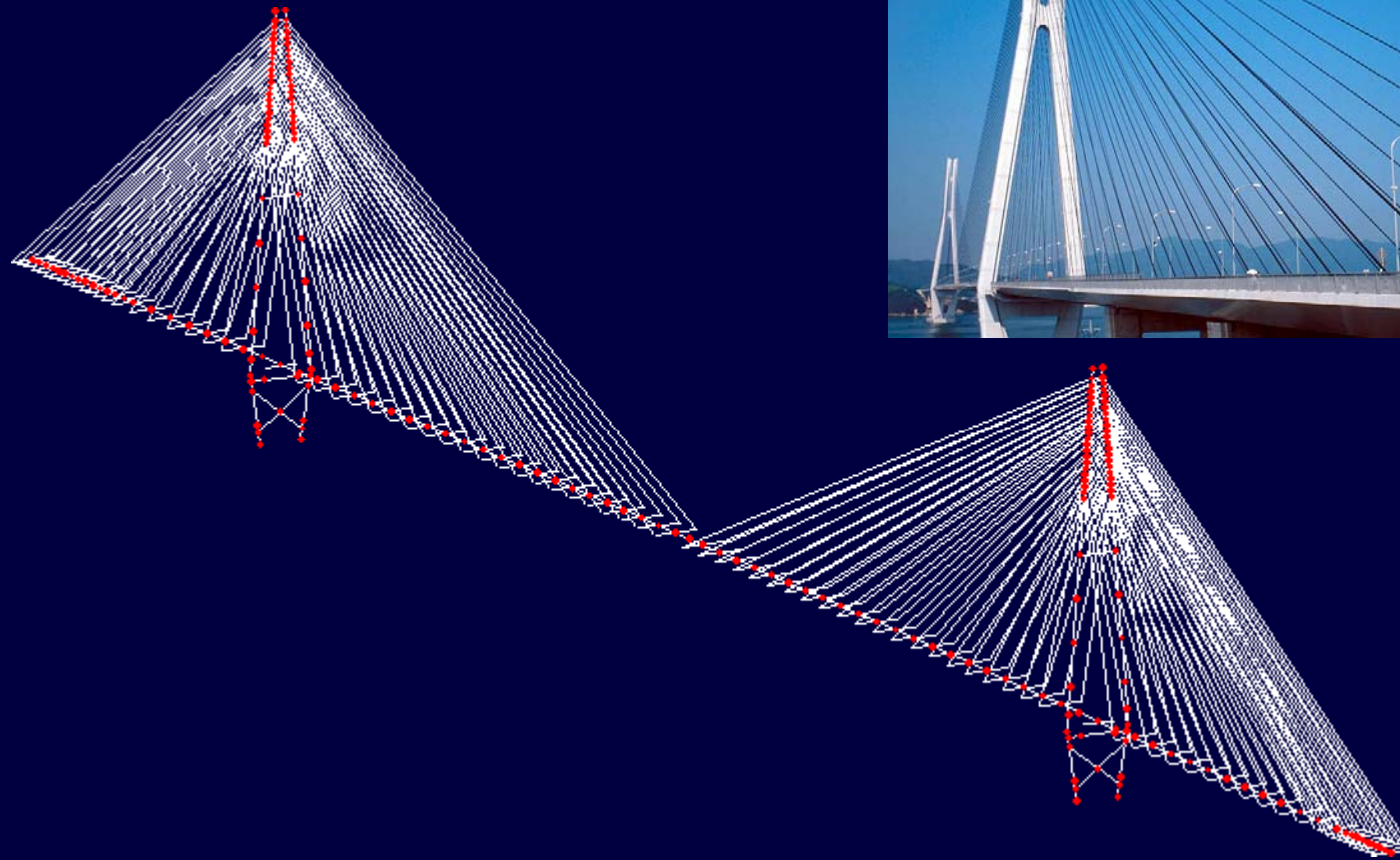
構造物の振動モデル

◆ 層モデルのバリエーション(3階建ての建物)



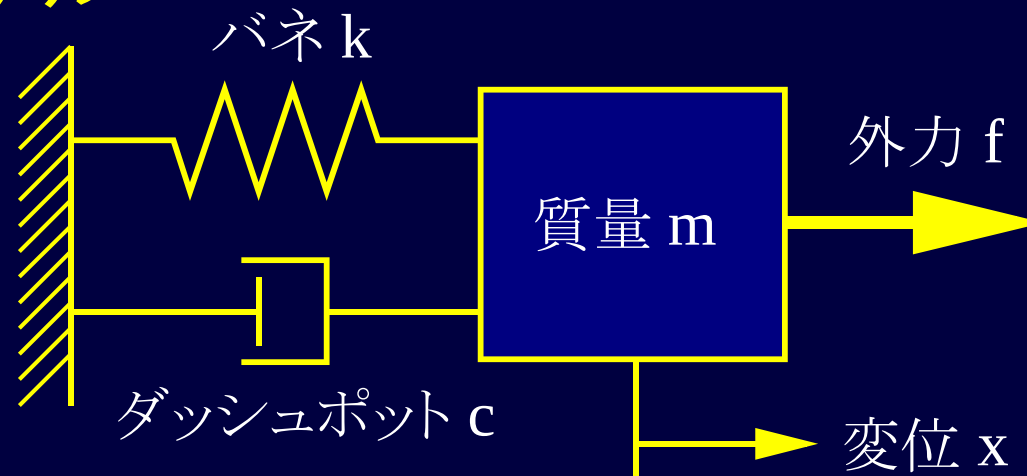
● 構造物の振動モデル

◆ 複雑な橋のモデル例



● 振動モデルを構成するもの

◆ 標準的なモデル



◆ 構成要素

- 慣性力: 運動状態を維持 (加速度に比例)
- 復元力: 物体を平衡状態に戻す (変位に比例)
- 減衰力: 運動を妨げる (速度に比例)

◆ 力のつり合い → 運動方程式

振動のタイプ

1. 自由振動

- 外力がないときの振動

2. 強制振動

- 時間の関数で表される外力による振動

3. 自励振動

- 振動そのものに起因するフィードバック現象

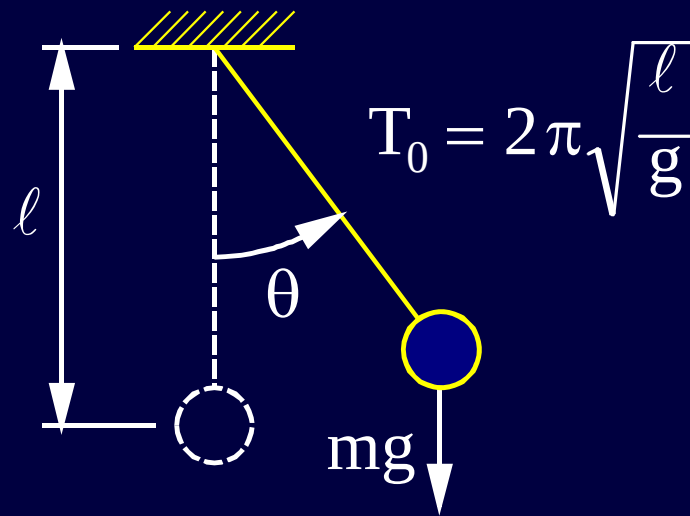
4. その他

- 非線形振動, パラメトリック励振等

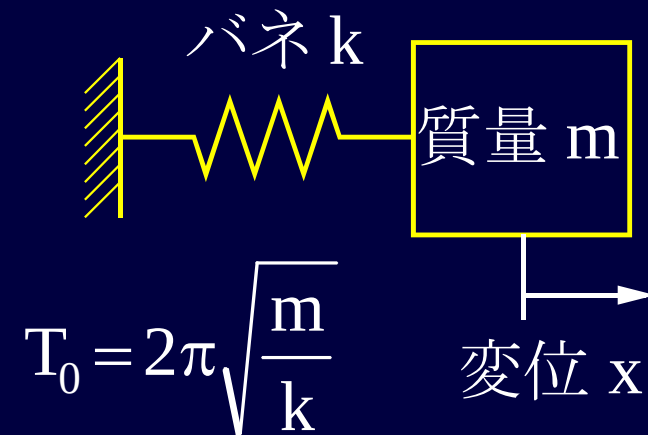
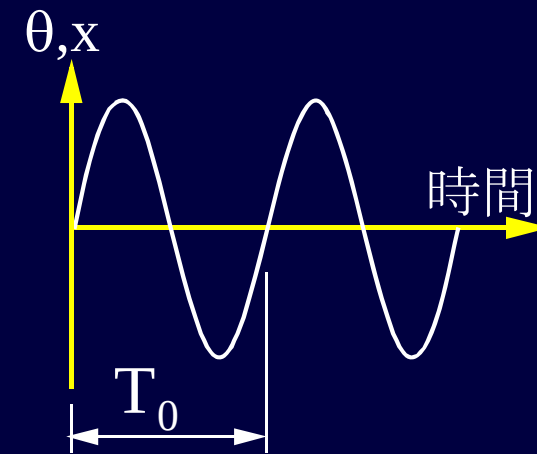
1. 自由振動

◆ 外力がないときの振動

- 一定の周期(振動数)で振動



- 複雑な構造物の場合

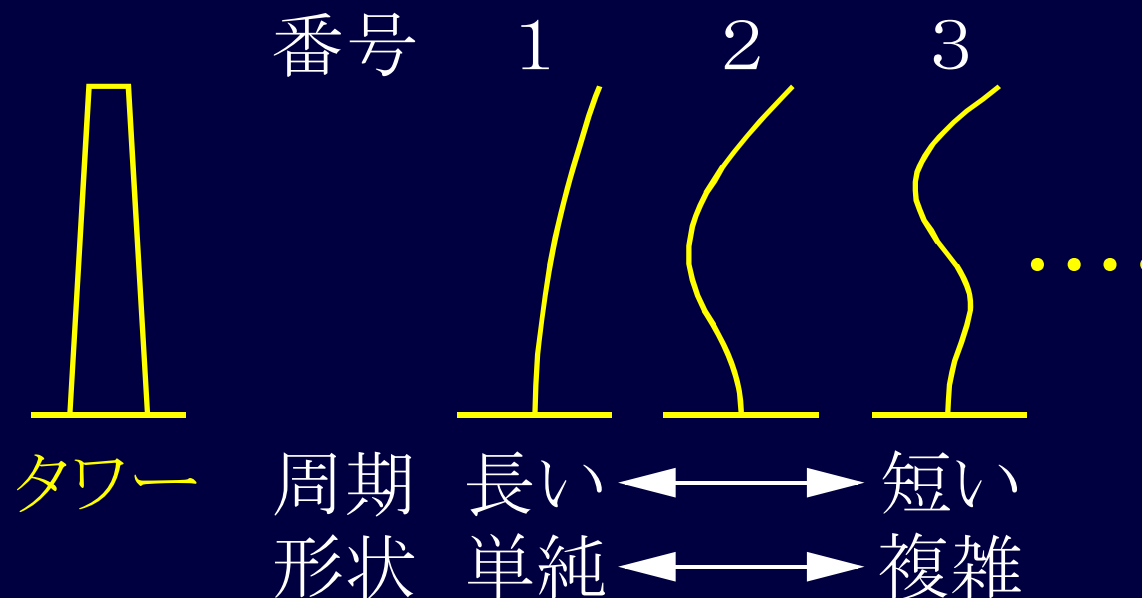




複雑な構造物の自由振動

◆ 固有振動モードが多く存在

- 一定周期，一定形状の振動パターン



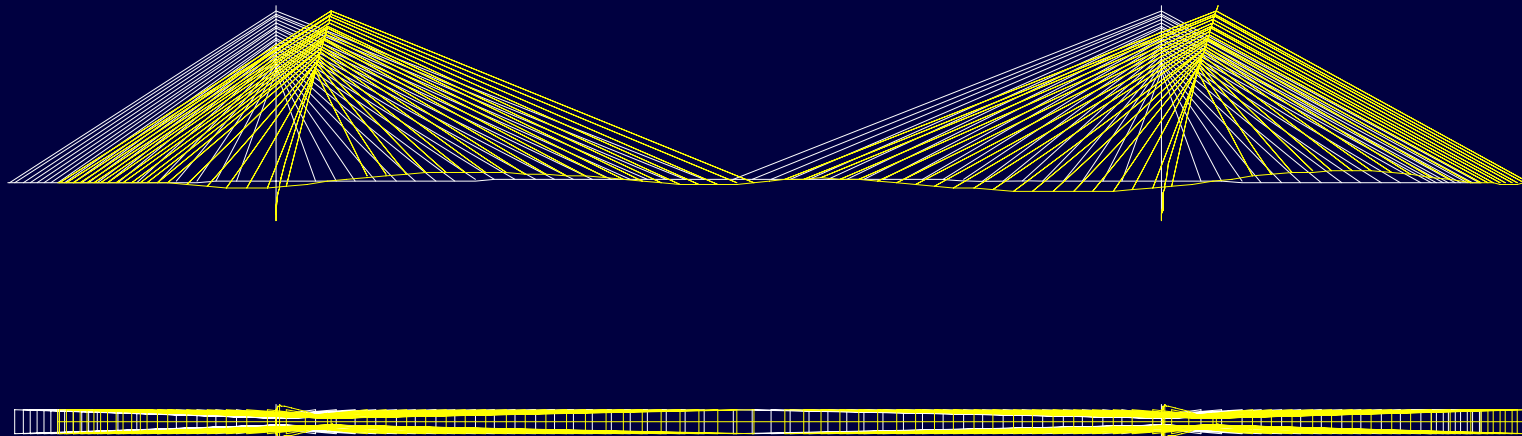
- 実際の振動＝振動モードの組み合わせ



多々羅大橋の振動モード

◆ モード番号 1

- 振動数 0.0316 Hz
- 周期 31.61 s
- モード形状 遊動円木1次

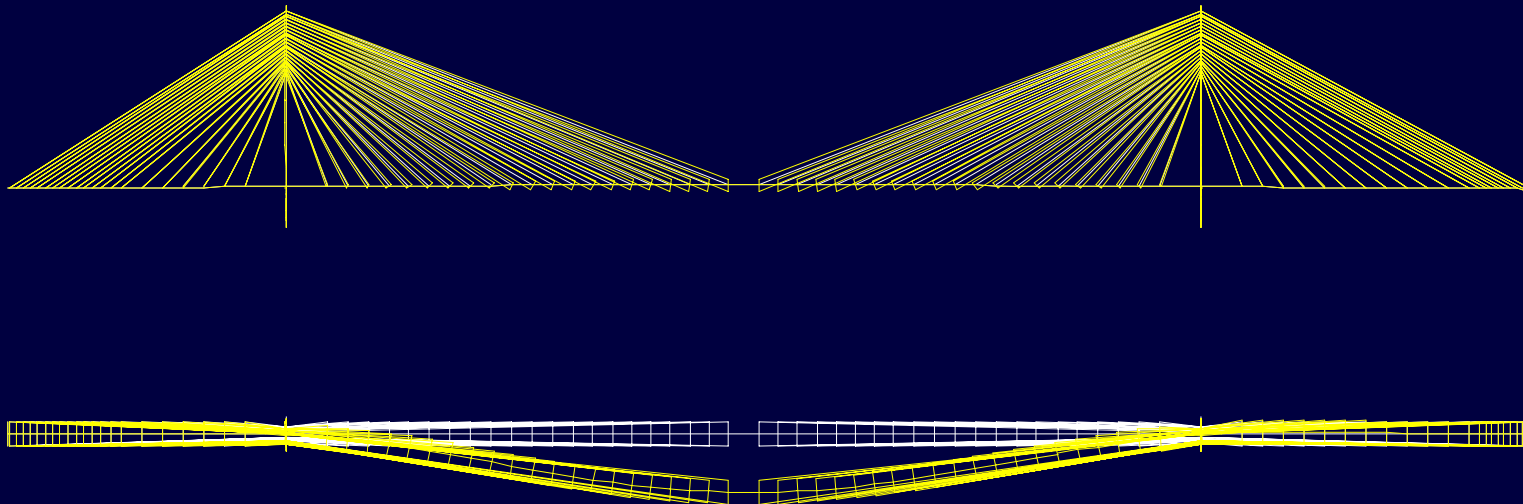




多々羅大橋の振動モード

◆ モード番号 2

- 振動数 0.0890 Hz
- 周期 11.24 s
- モード形状 水平対称1次

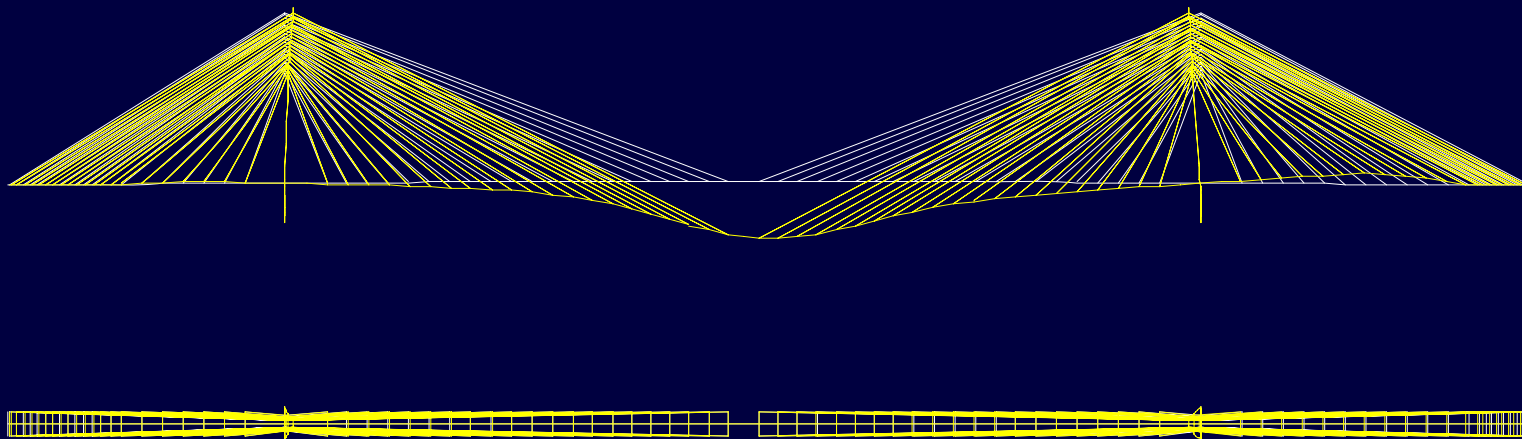




多々羅大橋の振動モード

◆ モード番号 3

- 振動数 0.2276 Hz
- 周期 4.393 s
- モード形状 鉛直対称1次

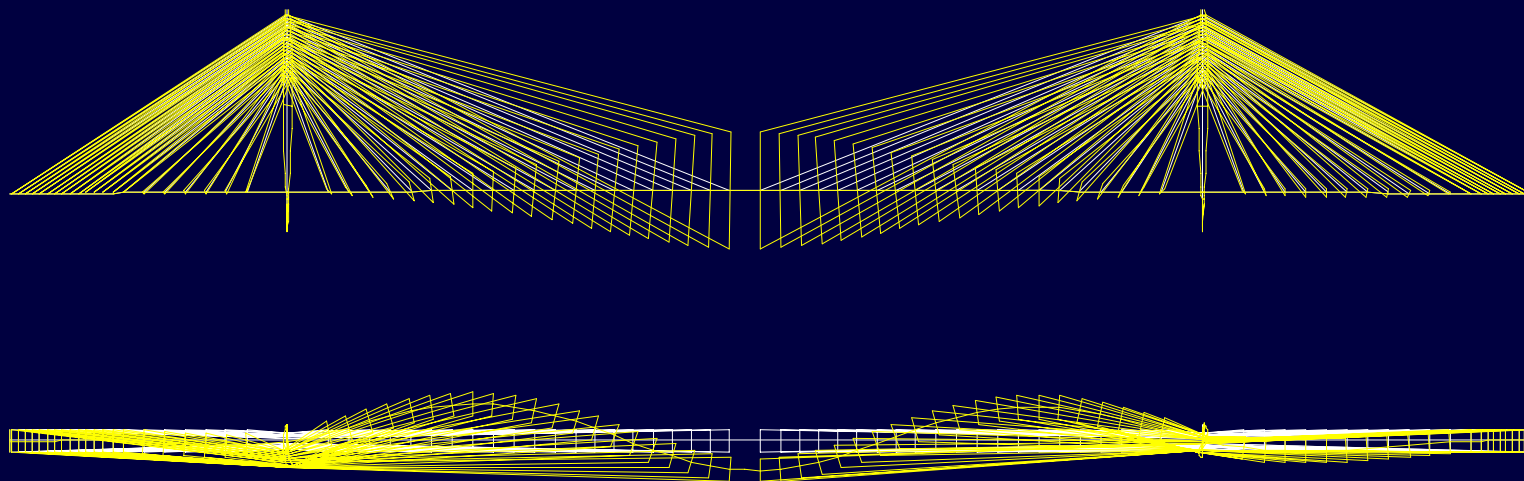




多々羅大橋の振動モード

◆ モード番号 10

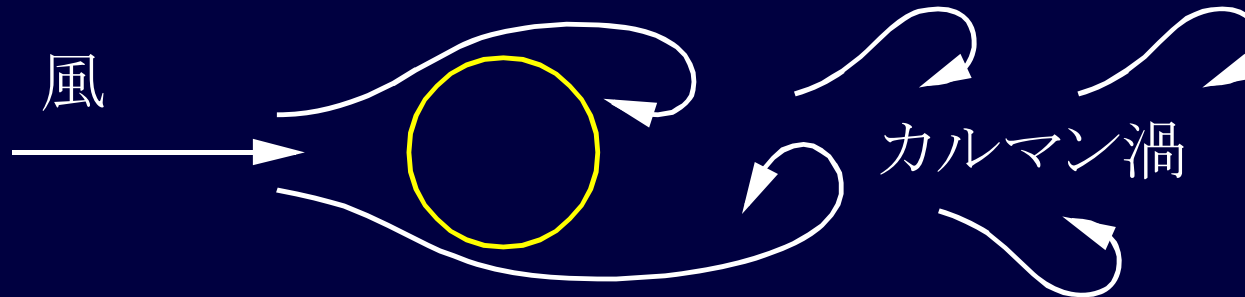
- 振動数 0.4586 Hz
- 周期 2.181 s
- モード形状 ねじれ対称1次



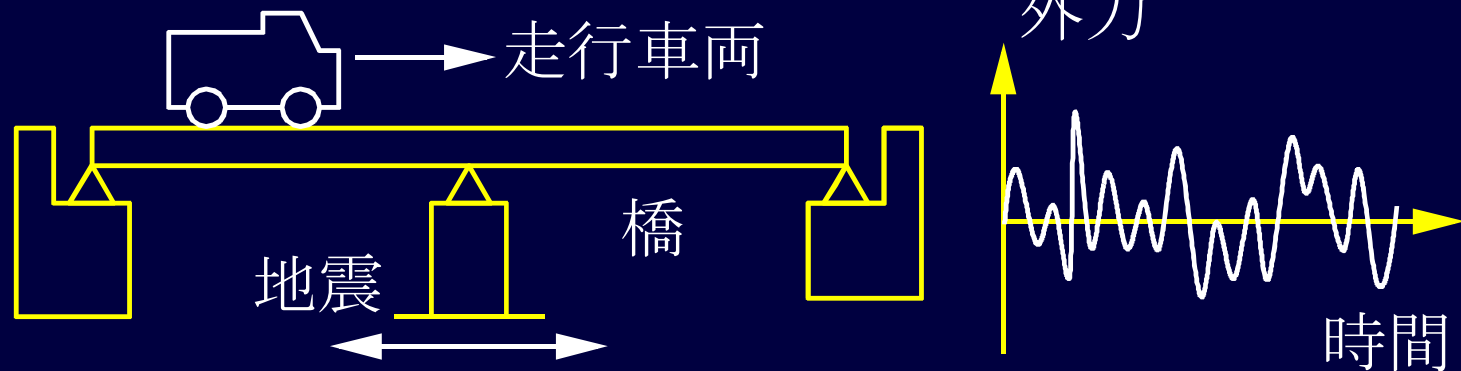
2. 強制振動

◆ 時間のみにより変化する外力: $F = F(t)$

- 調和的(周期的)外力: 波, カルマン渦

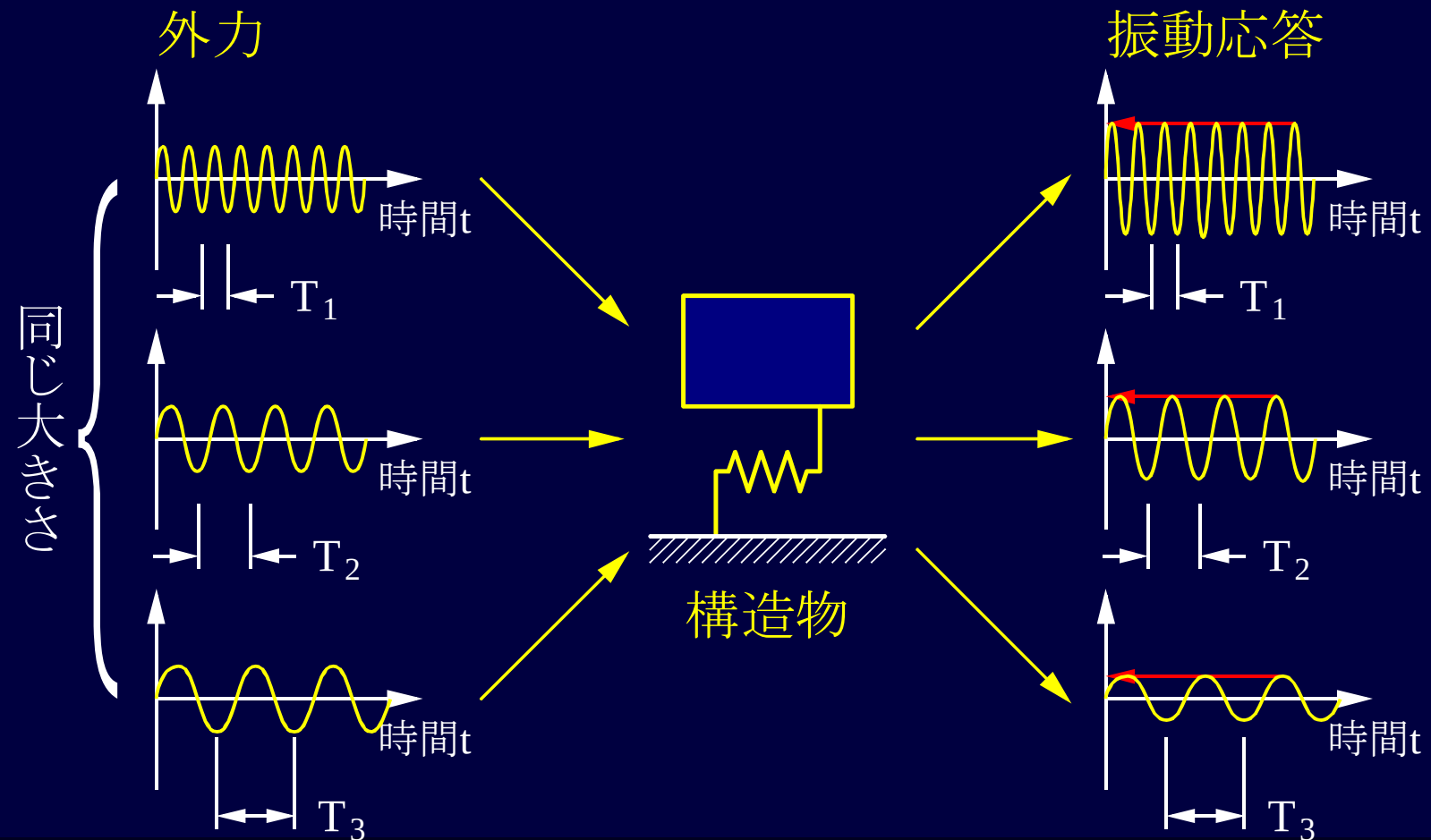


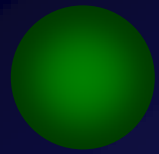
- 不規則外力: 地震, 風の乱れ, 車両や人の交通



共振現象

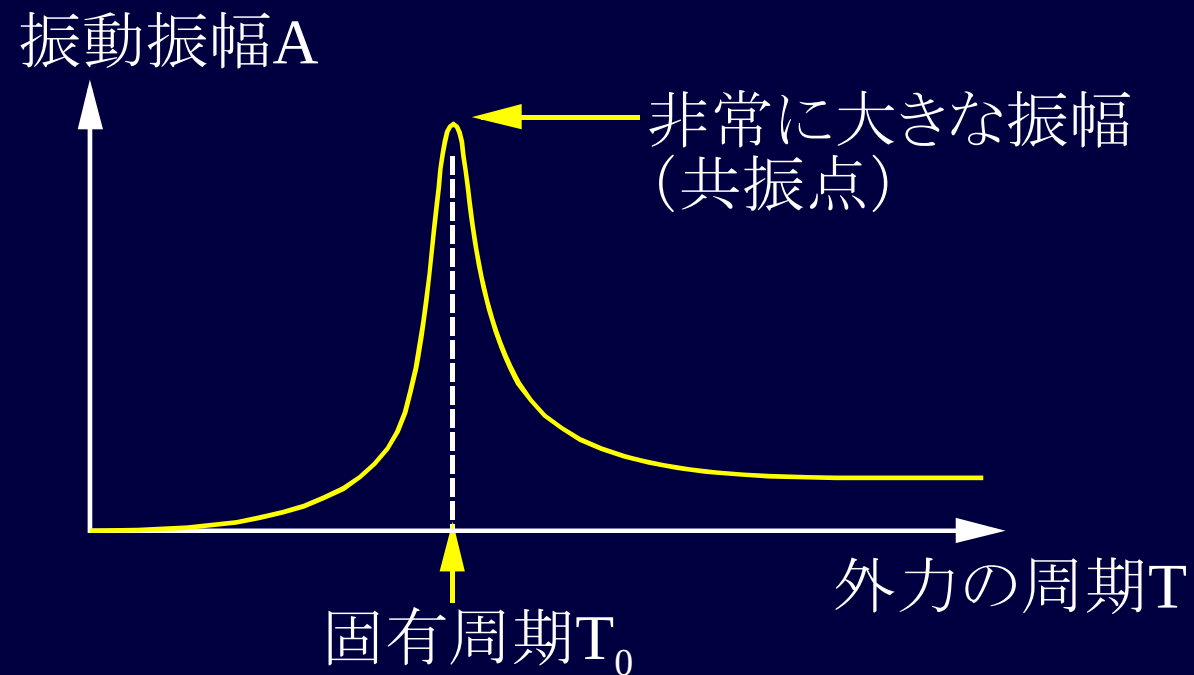
◆ 外力の周期によって振動はどう変化するか？





共振現象

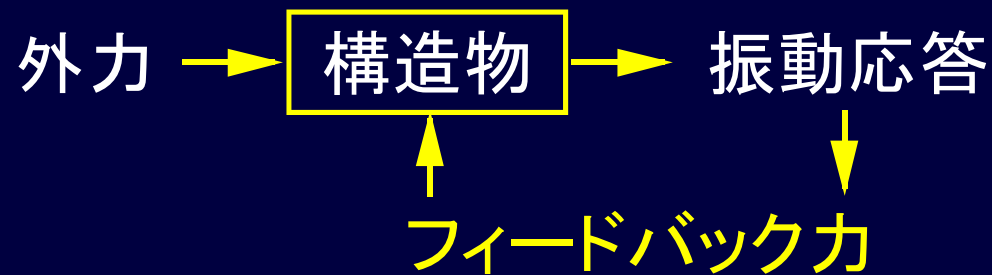
◆ 1自由度系の共振曲線



- 外力の周期 $\div$ 構造物の固有周期
→ 共振: 構造物に非常に大きな振動

3. 自励振動

◆ フィードバック振動: $F = F(x)$



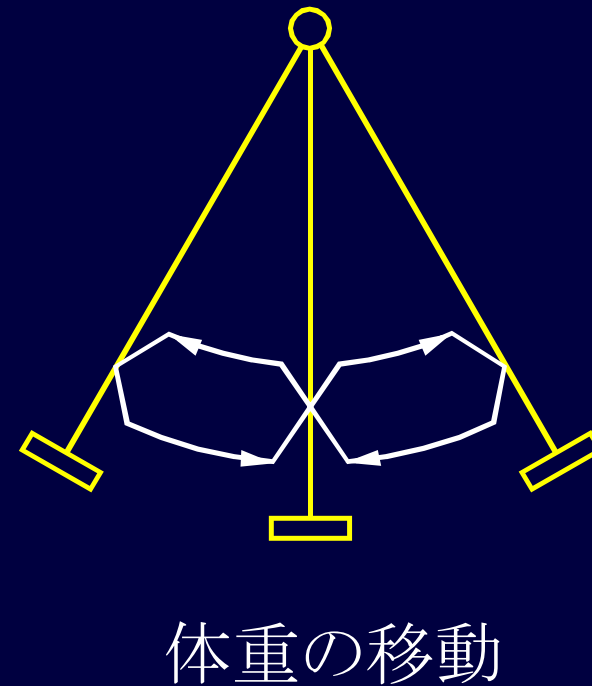
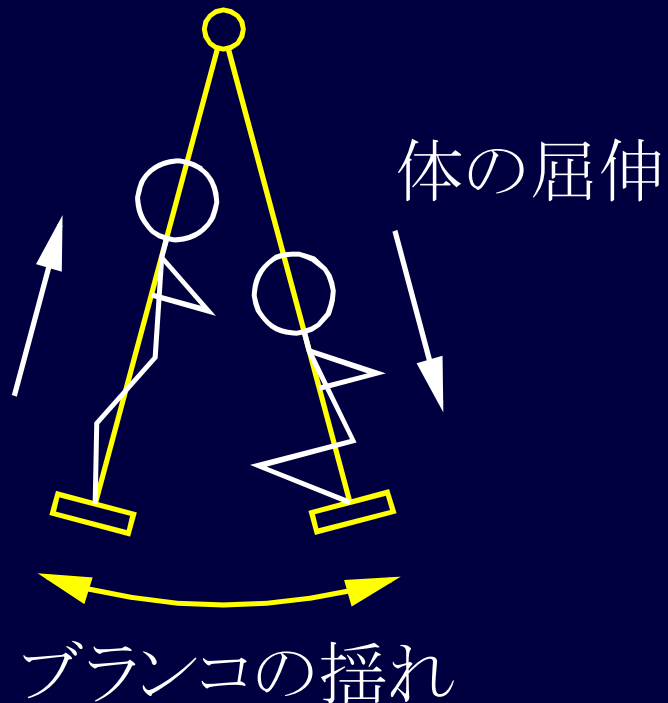
- 長大橋, 翼のフラッター
 - ・ 振動による流れパターンの変化
→ 新たな空気力が作用し, 振動が増幅
- アクティブ制御された構造物
 - ・ 振動に応じて, 人工的な外力を付加
→ 構造物の振動の抑制



4. その他(非線形振動)

◆ パラメトリック励振: ブランコの振動

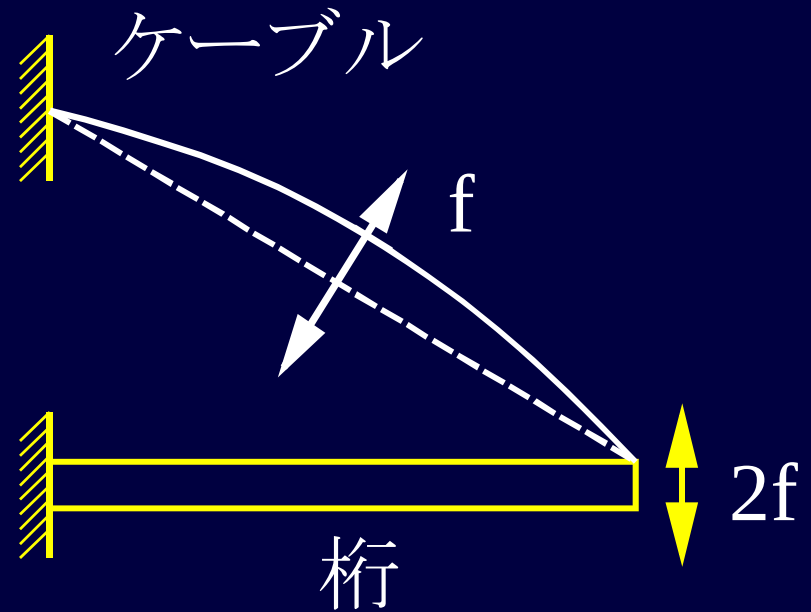
- 体重の移動(ブランコ1往復につき, 2往復)
→ 実質的な振り子長の変化



パラメトリック励振

◆ 斜張橋の桁－ケーブル系の振動

- 桁の振動
↓
- ケーブル張力の変動
(バネ定数の変化)
↓
- ケーブル振動の励起
(桁の半分の振動数)

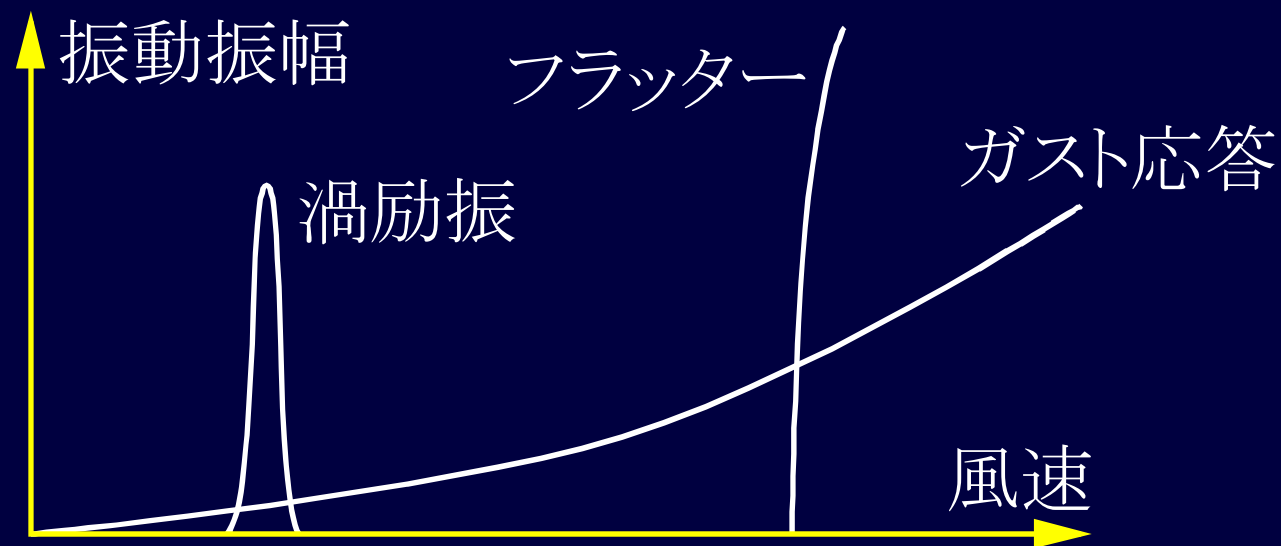




橋梁の風による振動

◆ 風による振動の主なタイプ

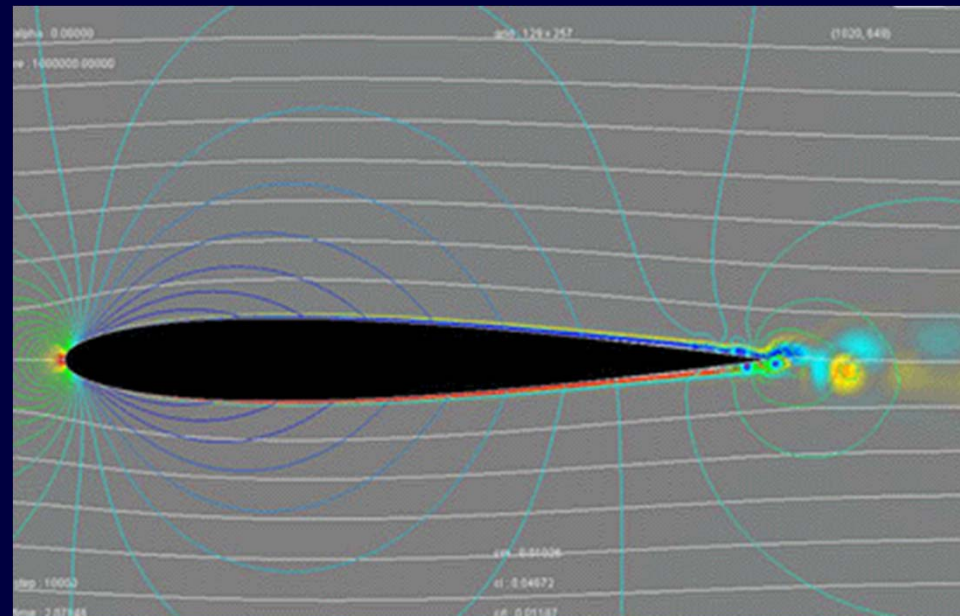
1. フラッター：自励振動
2. ガスト応答（バフェッティング）：強制振動
3. 渦励振：自励，強制振動 ← カルマン渦



1. フラッター

◆ 2次元翼の気流シミュレーション

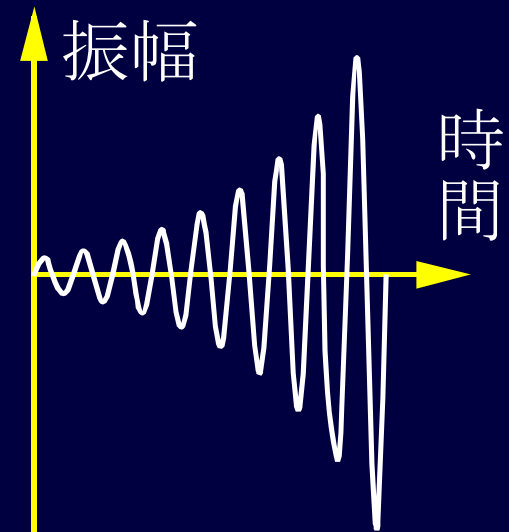
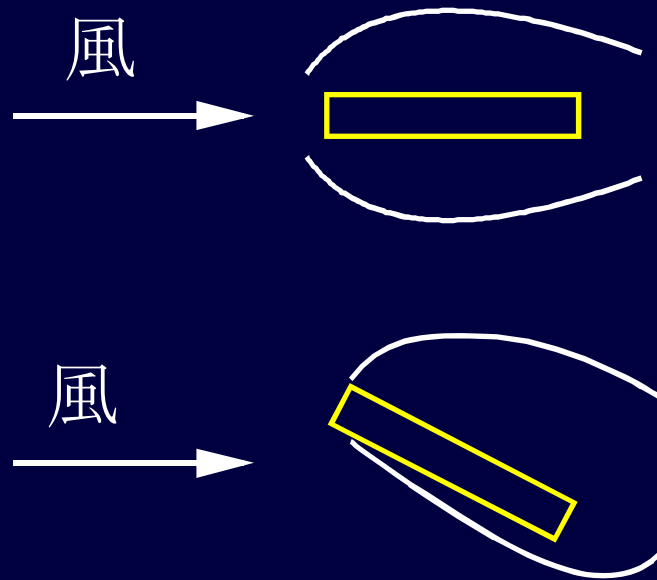
- 翼の角度によって流れのパターンが変化
⇒ 翼に作用する空気力も変化



1. フラッター

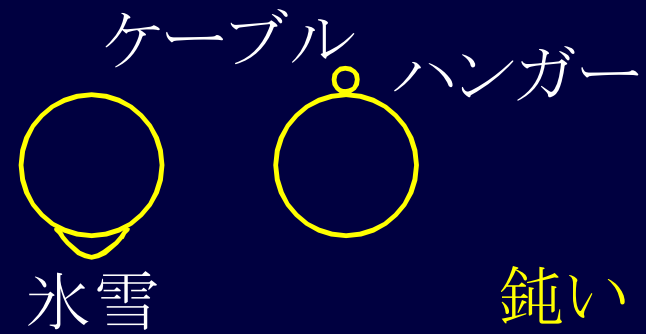
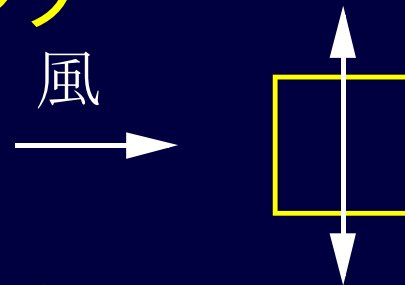
◆ 気流中で振動している構造物, 翼

- 変形によって流れのパターンが変化
 - 新たな空気力(非定常空気力)が断面に付加
 - 断面形状や風速によっては振動を増幅

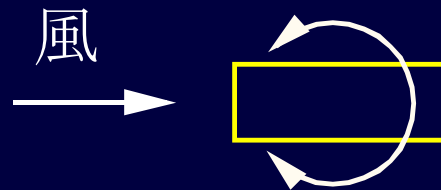


フラッターのタイプ

◆ ギャロッピング



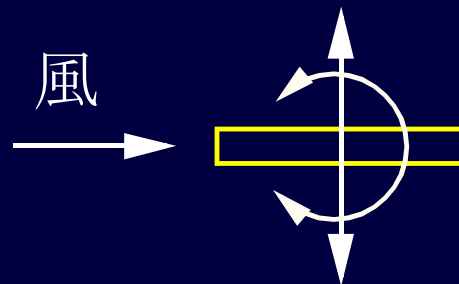
◆ ねじれフラッター



鈍い

平たい

◆ 連成フラッター



● ねじれフラッター

◆ タコマ橋の落橋(853m, 1940年): 風速19m/s





2. ガスト応答

◆ 自然風：不規則な風速変動を持つ乱流



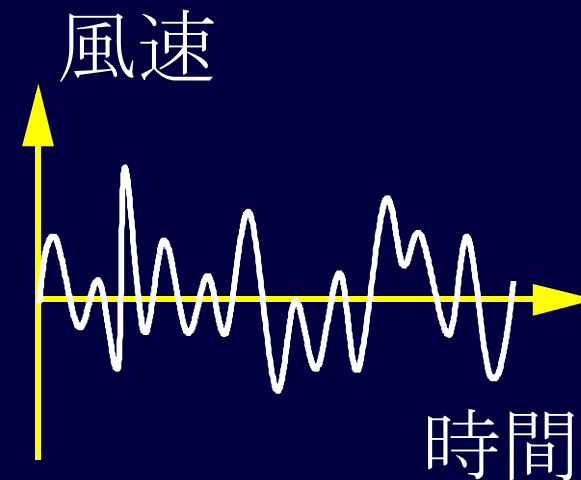
◆ 変動空気力

- 不規則に変化する外力



◆ 強制振動：ガスト応答

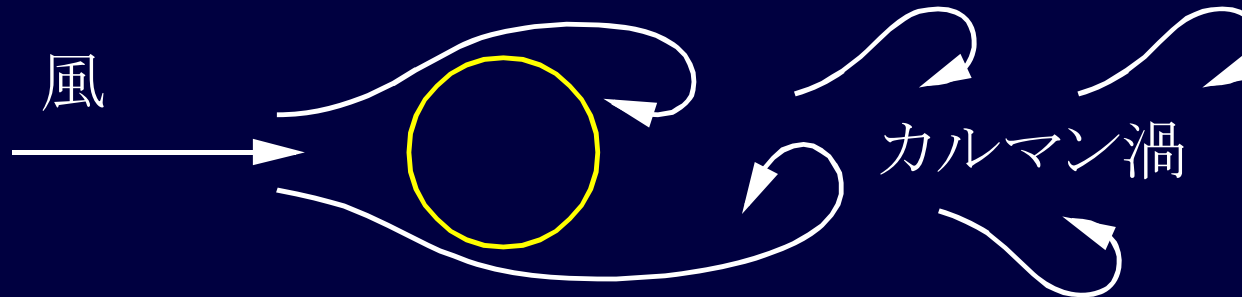
- 振幅は風速とともに緩やかに上昇



3. 渦励振

◆ 気流中の鈍い断面を持つ構造物

- 後流側に周期的な渦(カルマン渦)が交互に発生



- カルマン渦の
シミュレーション例



3. 渦励振

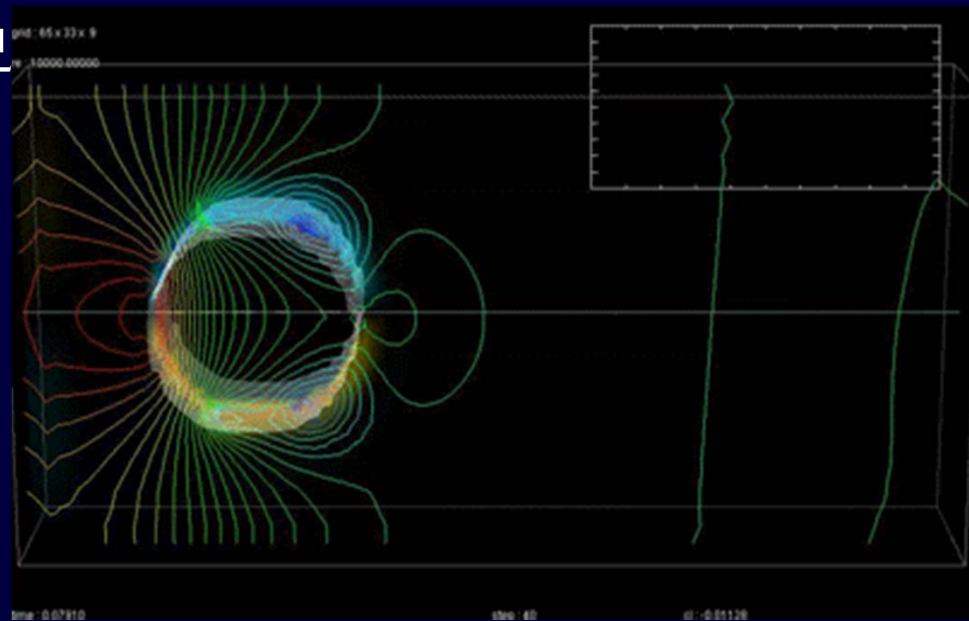
◆ 気流中の鈍い断面を持つ構造物

- 後流側に周期的な渦(カルマン渦)が交互に発生
⇒ 構造物に周期的な外力が働く

- 渦発生周波数:
風速とともに上昇



構造物の
固有振動数
と接近(共振)



● ケーブルの風による振動

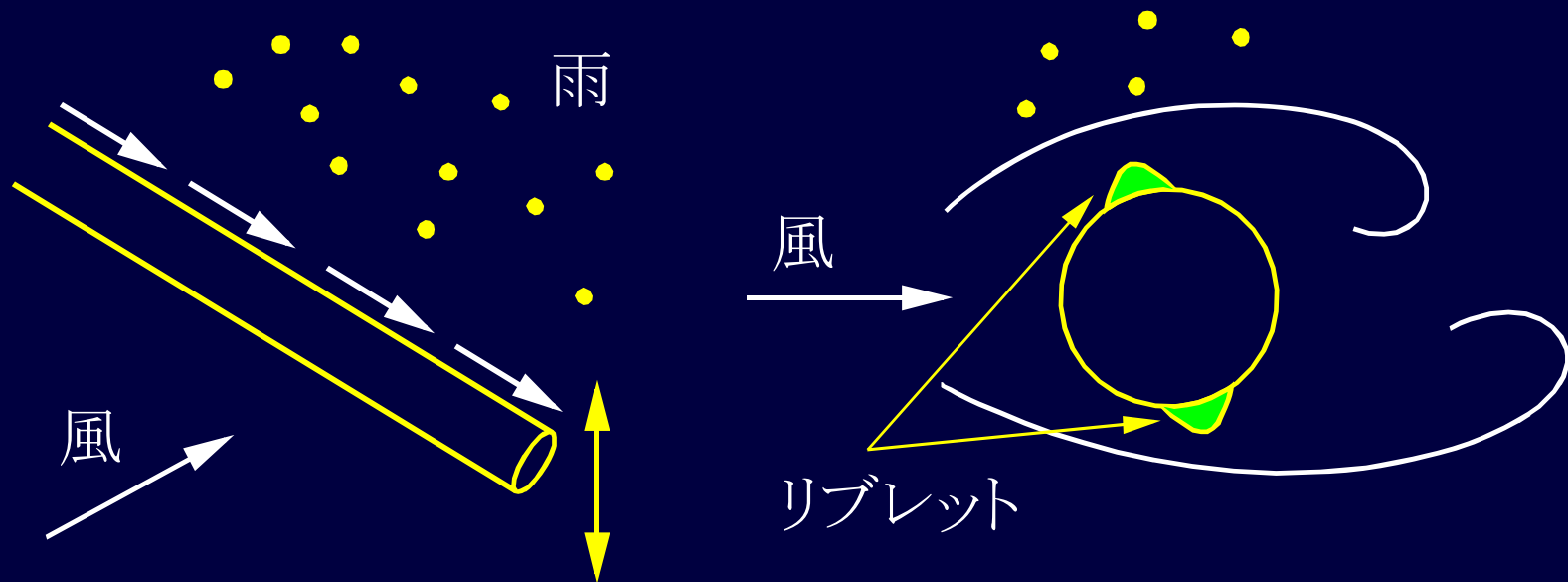
◆ レインバイブレーション: 斜張橋のケーブル



● ケーブルの風による振動

◆ レインバイブレーション: 斜張橋のケーブル

- 比較的低風速(10~15m/s) + 雨
- 風圧と重力の釣り合いで生じる水道(リブレット)
→ 空気力学的に不安定な断面形状





橋梁の耐風設計(本四耐風設計基準)

◆ 静的設計

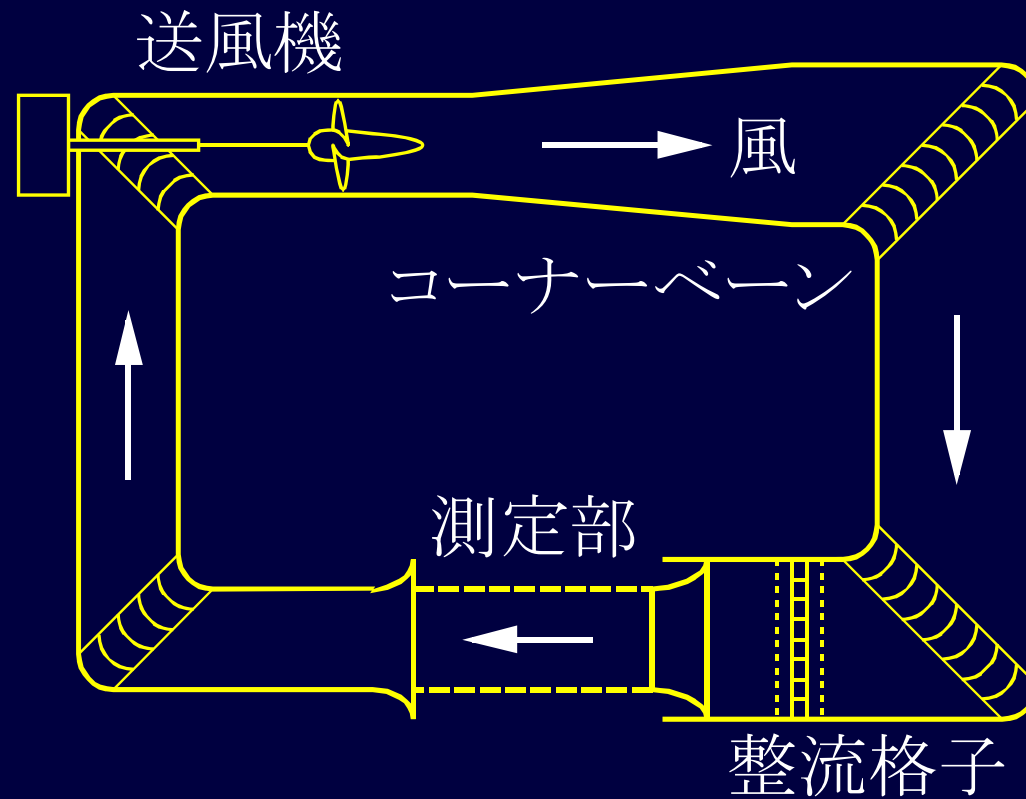
- 設計風速の設定 ← 現地の風速観測記録等
- 設計風荷重による設計 → 断面決定

◆ 動的照査

- 風洞実験による耐風安定性の照査
- ↓↑
- 制振対策
 - ・フラッター(構造物を破壊): 発生風速を高める
 - ・渦励振等(低風速でも発生): 振幅を抑える

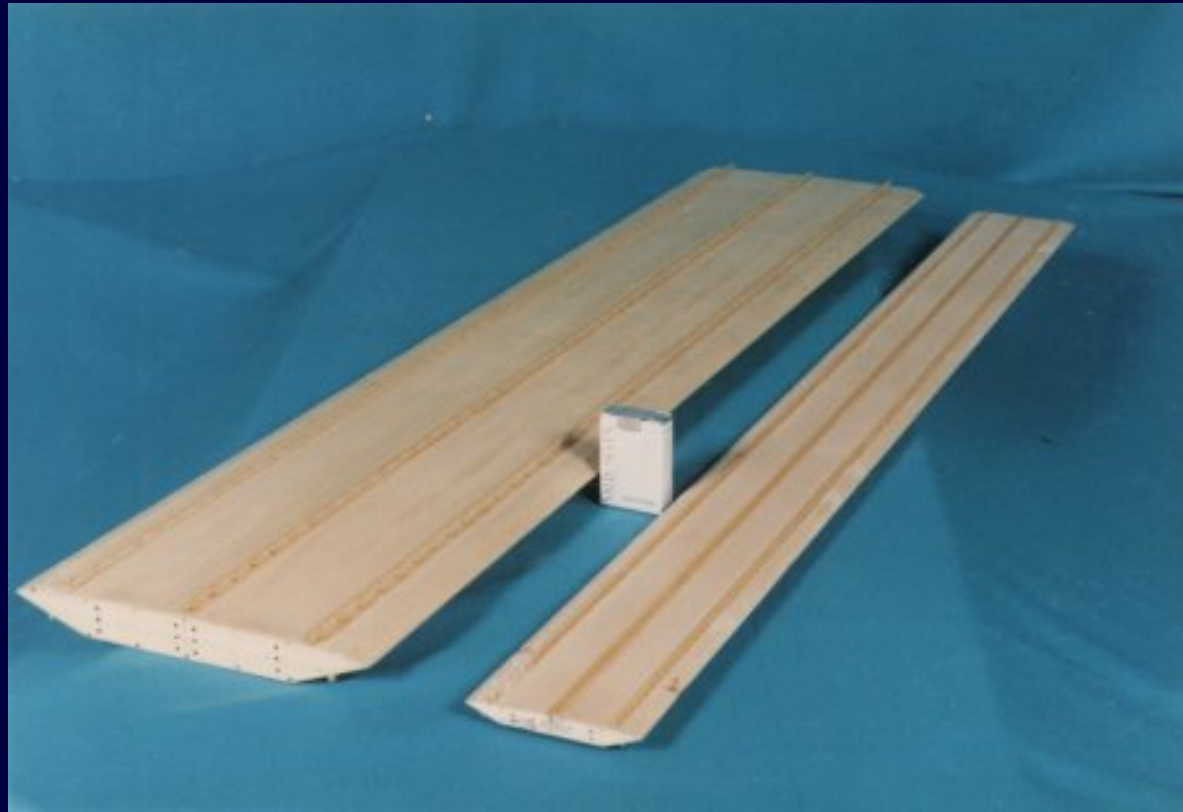
風洞実験

- ◆ 風洞：人工的に気流を作り出す施設
 - 構造物模型に作用する空気力，振動応答を測定



● 部分模型実験

- ◆ 橋桁等，構造物基本断面の模型による実験
 - 断面の基本的な空力特性の照査



● 部分模型実験

長所：実験が容易．パラメトリックな検討が可能

短所：振動モード等，3次元的な検討はできない



● 全橋模型実験

◆ 吊橋等，構造物全体の 模型による実験

→ 全橋の総合的な
空力特性の照査



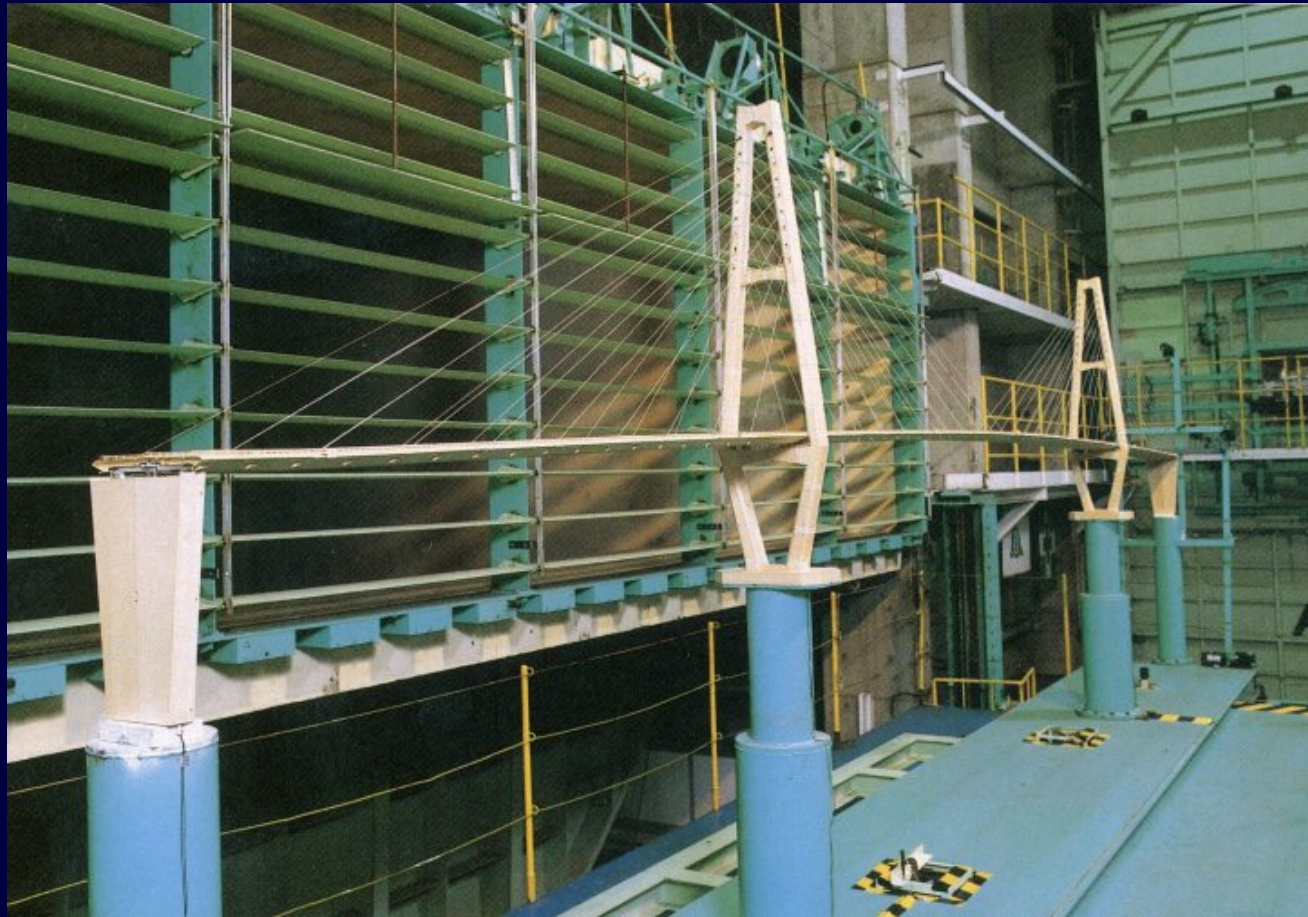
● 全橋模型実験

長所: 静的変形, 振動モード等, 3次元的な検討可
短所: 大型の模型と風洞施設が必要. 莫大な費用



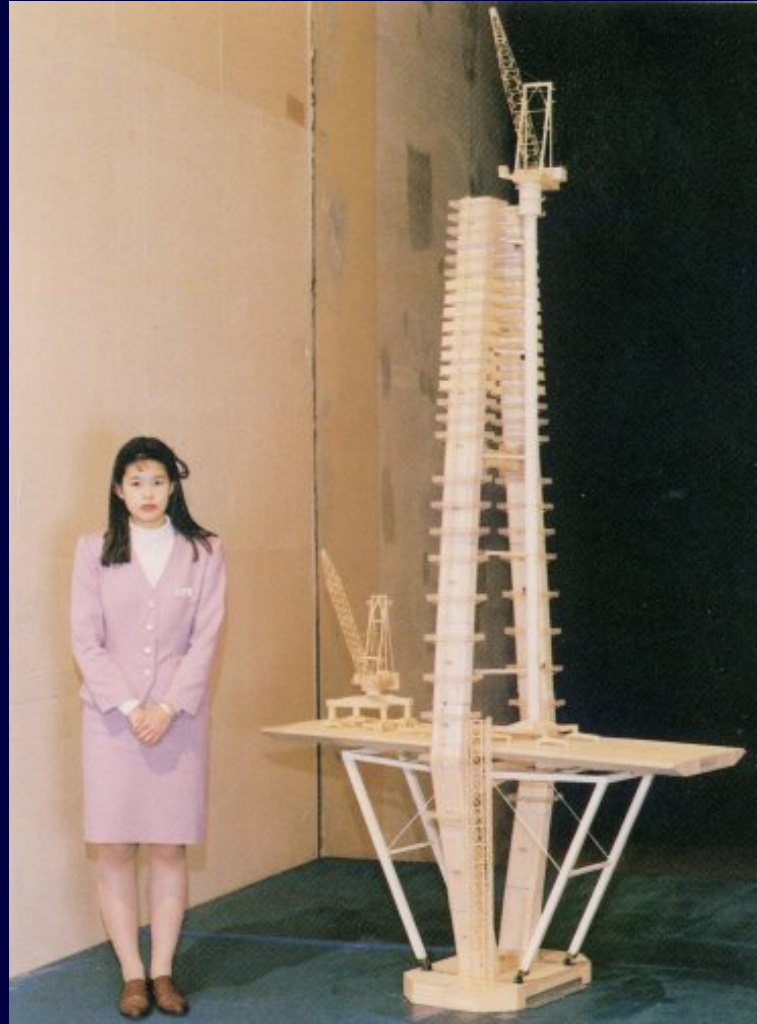
● 名港中央大橋の風洞実験

◆ 完成系



● 名港中央大橋の風洞実験

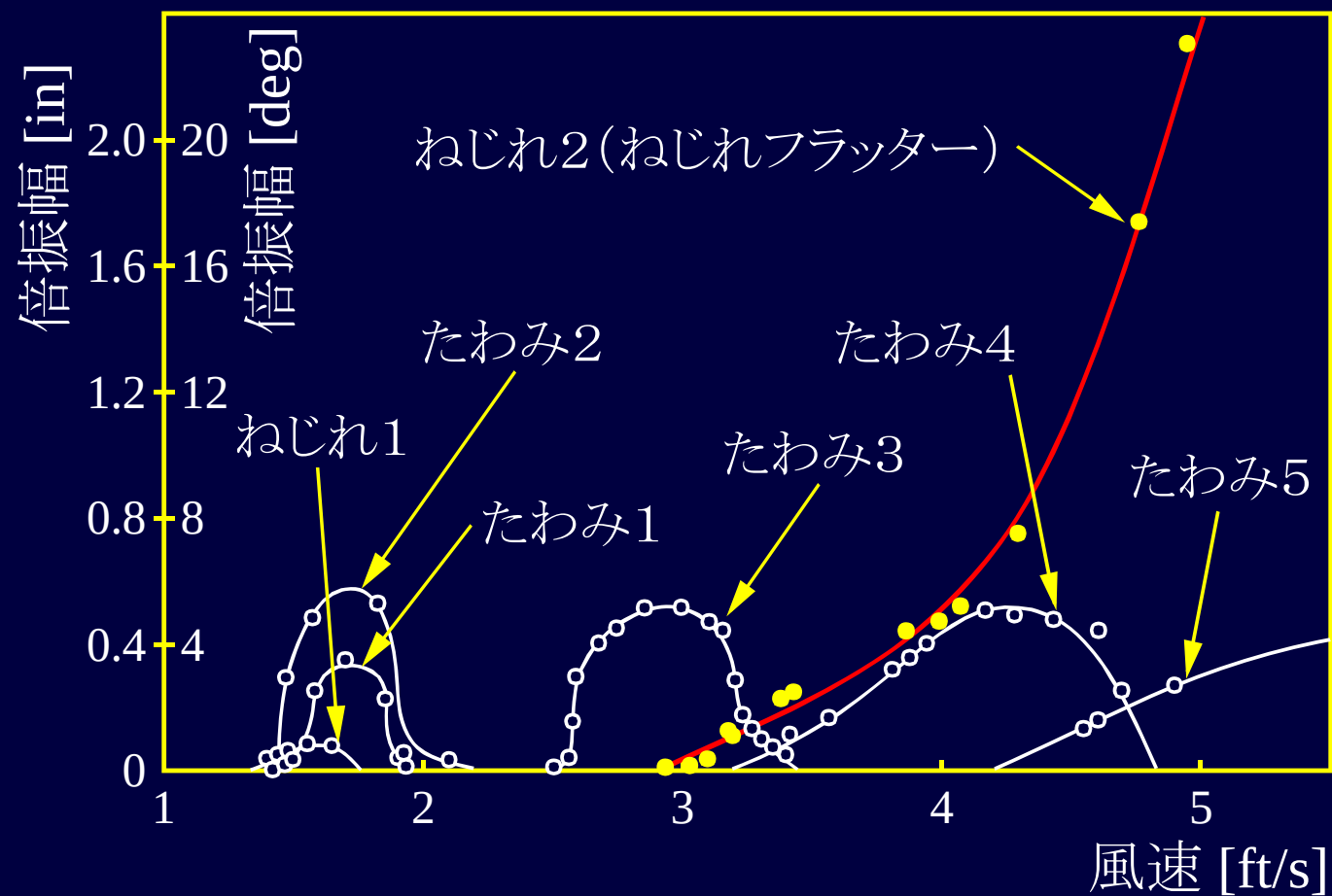
◆ 架設系





風洞実験結果例

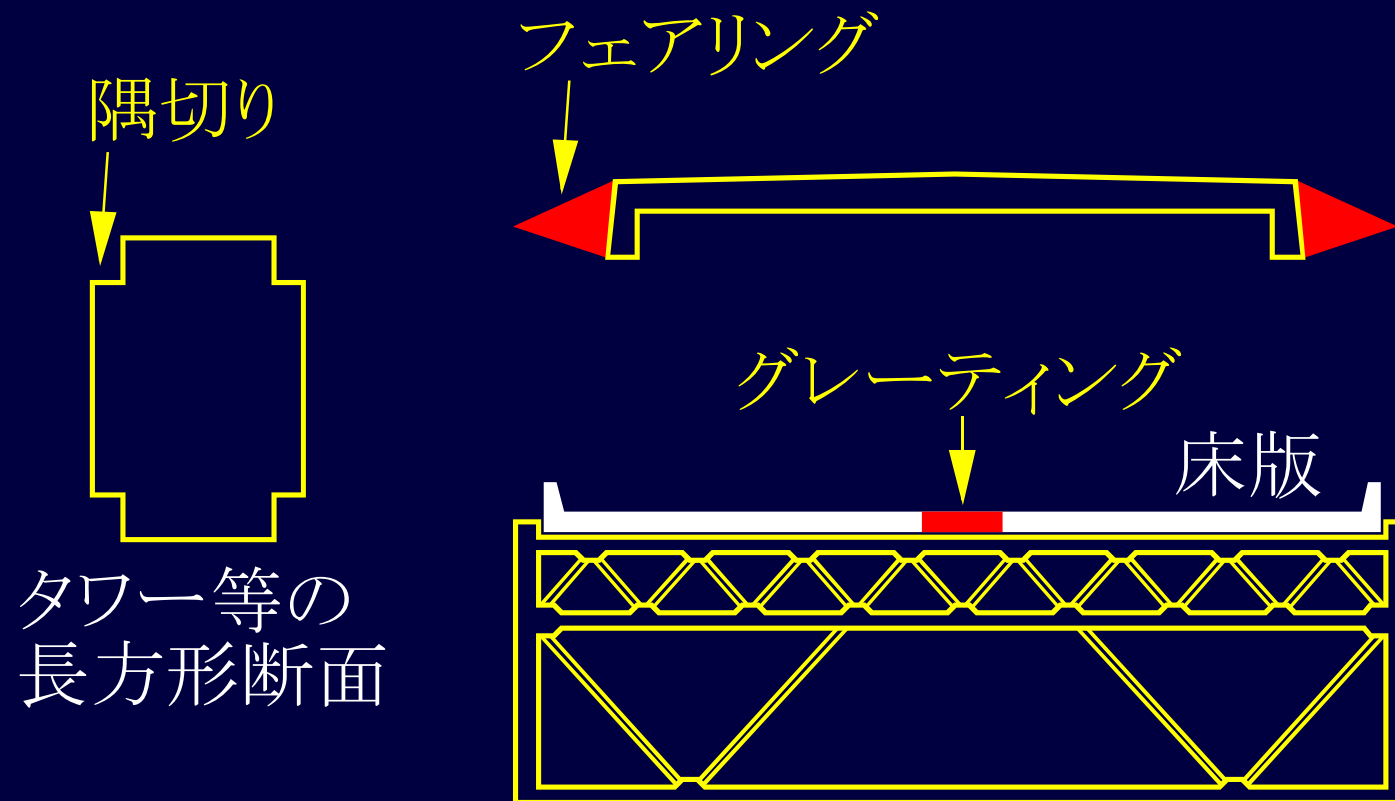
◆ タコマ橋の風速—振幅曲線





橋の空力安定化対策

◆ 断面形状を変化させて空気を制御

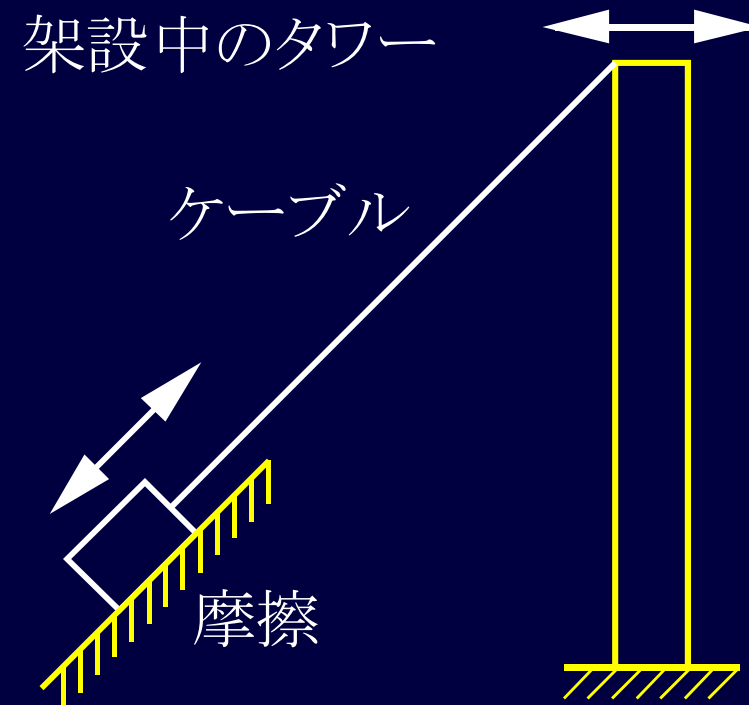
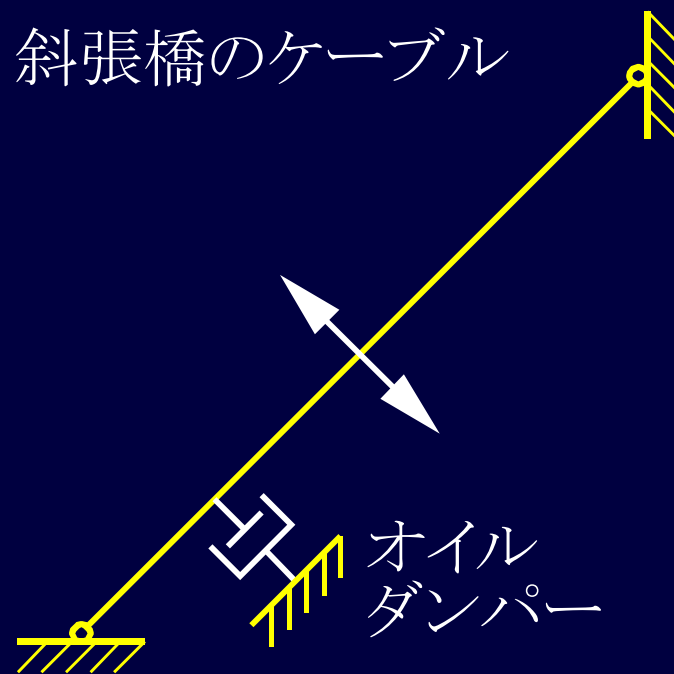




制振装置(受動的制御)

◆ 非同調型ダンパー

- 機械的に減衰力を付加

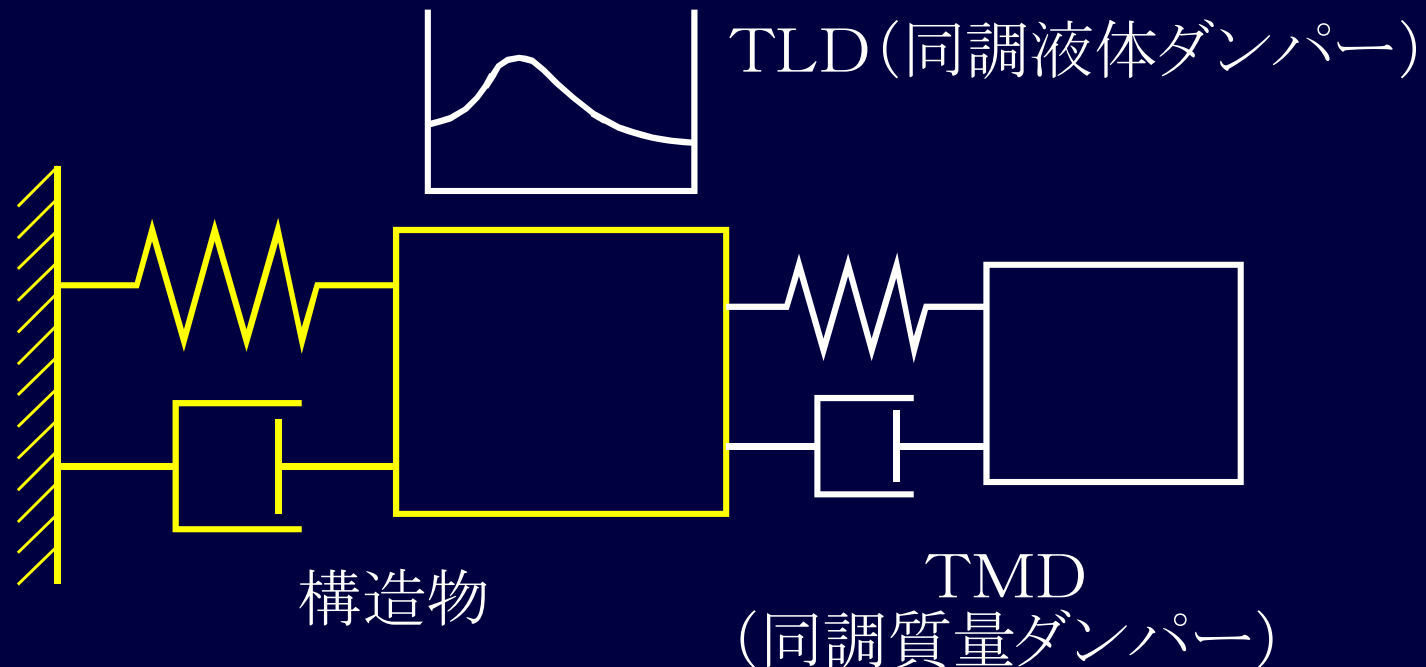




制振装置(受動的制御)

◆ 同調型ダンパー

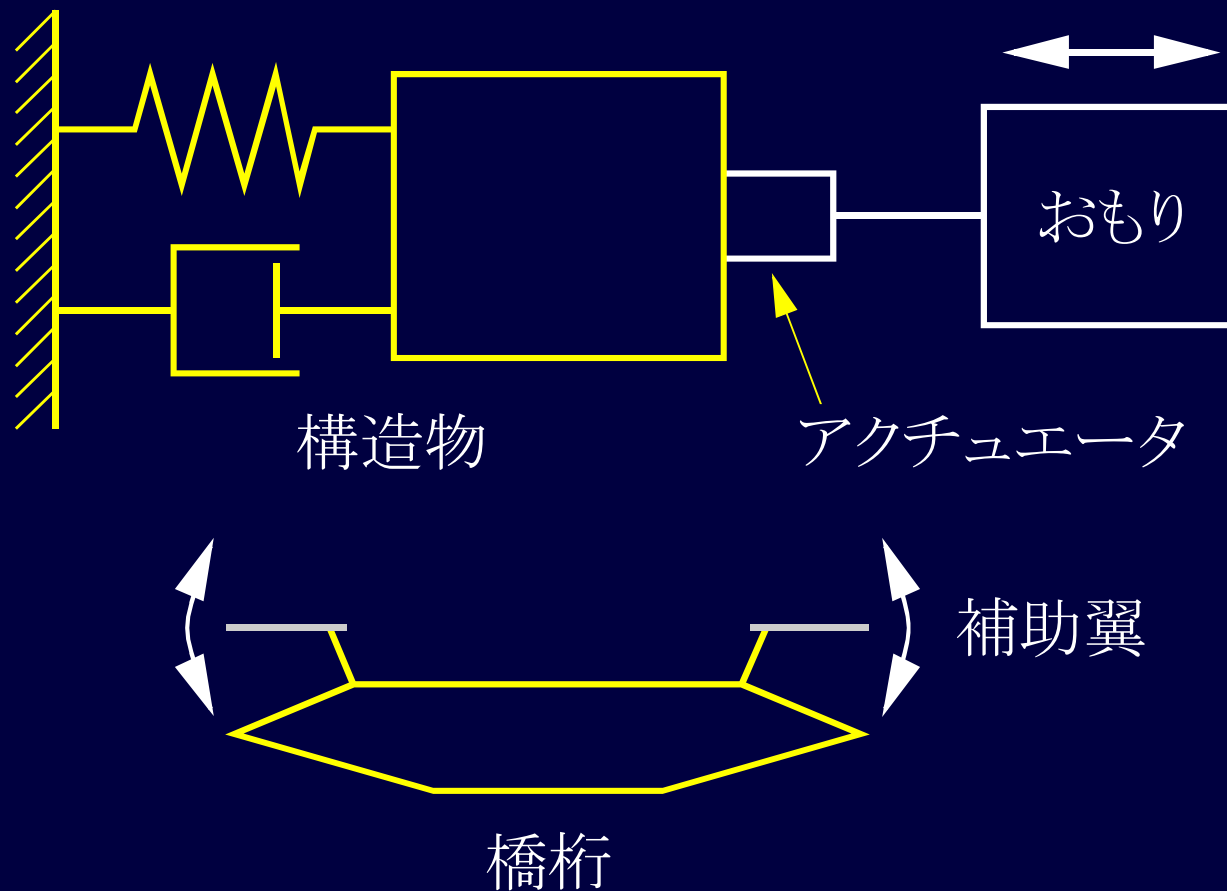
- 振動数を同調させた付加構造: 共振を利用
→ 構造系全体の減衰(モード減衰)を増加





制振装置(能動的制御)

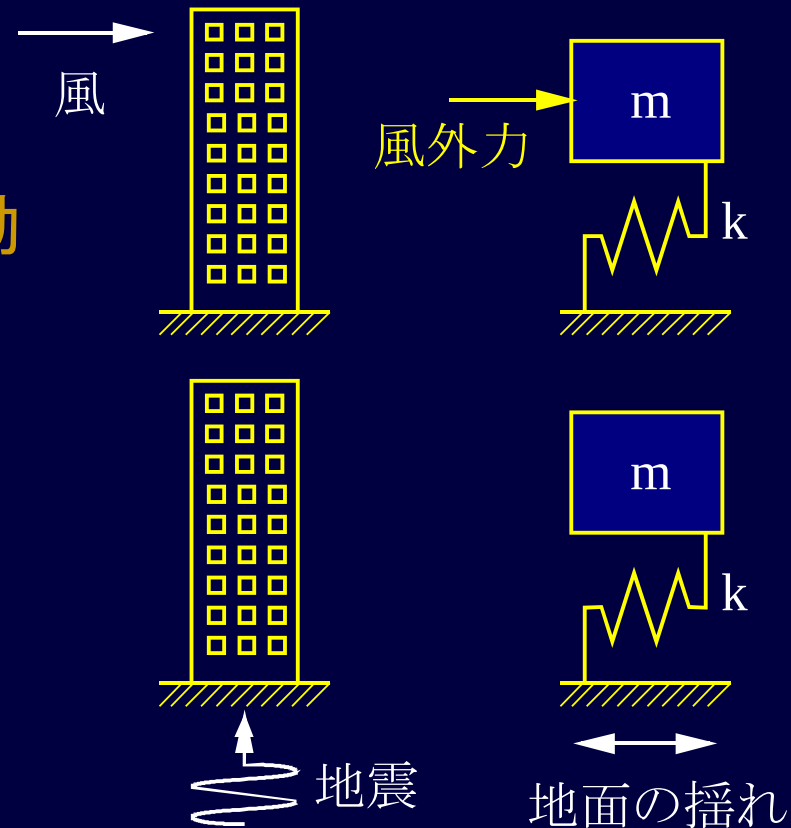
◆ アクティブ制御: 振動に応じた制御力を付加



● 建造物の地震による振動

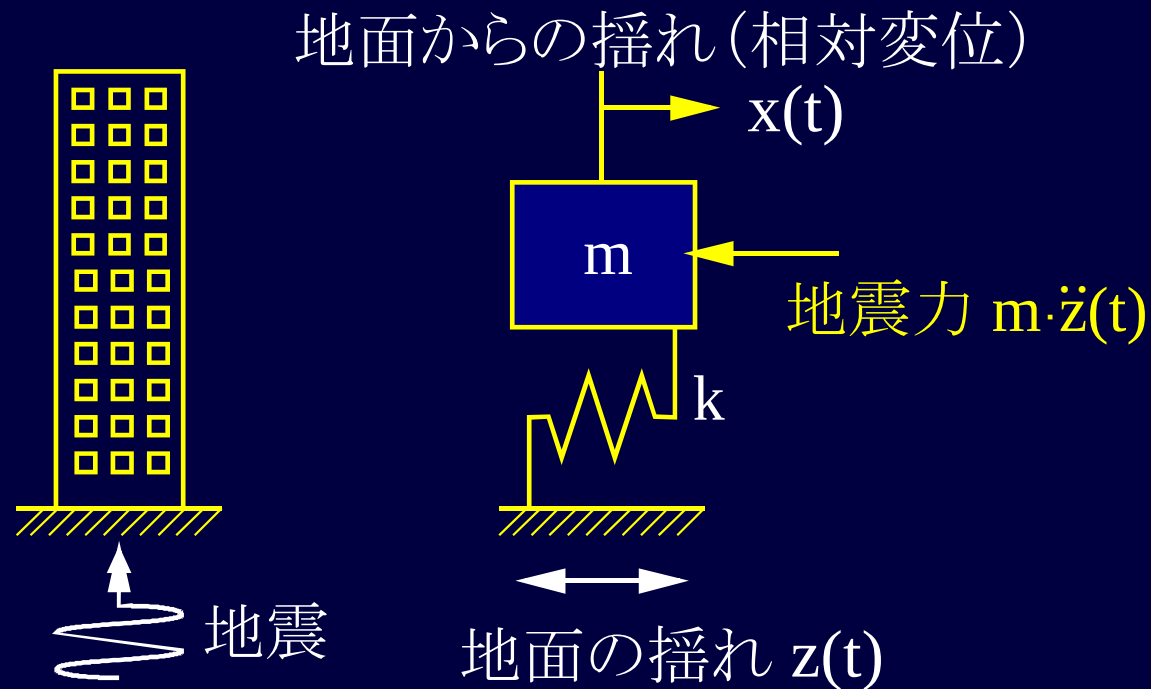
◆ 地震による振動＝強制振動の一種

- 通常の強制振動
 - 例) 風による振動
 - : 直接, 力が作用
- 地震による振動
 - : 直接, 作用しない
 - 支点の振動





地震力:地震による見かけ上の力



◆ 地震力 = 質量 × 地震加速度

- 重いもの(かつ弱いもの)に不利

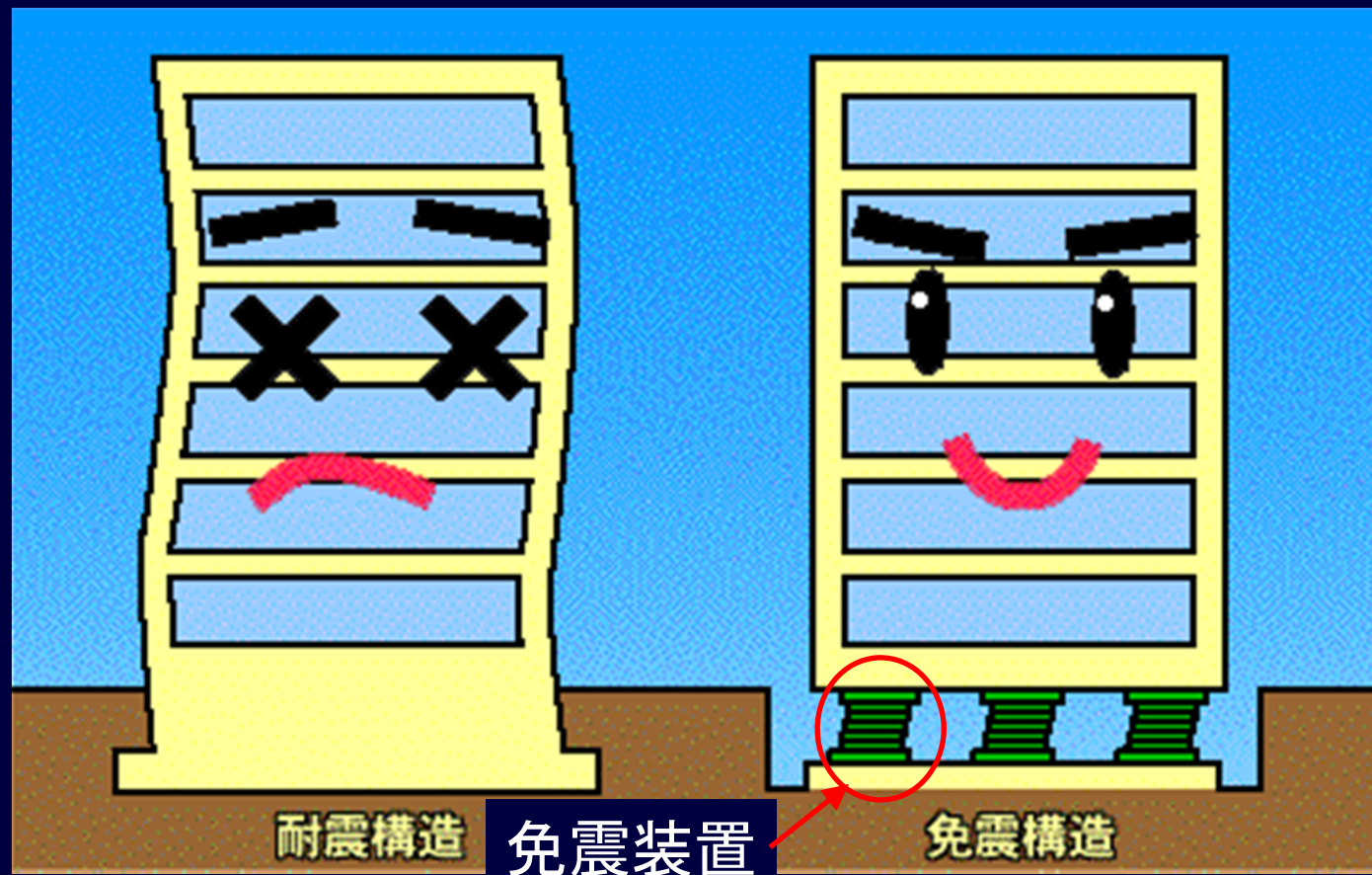


地震対策の考え方

- ◆ **耐震**: 地震に強い構造にする
- ◆ **制振**: 揺れ(振動)を抑える
 - ※地震以外でも使われる
- ◆ **免震**: 地震を受け流す構造にする
 - 一種の制振. ただし, 地震専用
 - 耐震とは逆の発想
 - : 地震を受け流すために部分的に**弱い**構造
 - 外力制御 + 振動数制御 (+ 減衰)

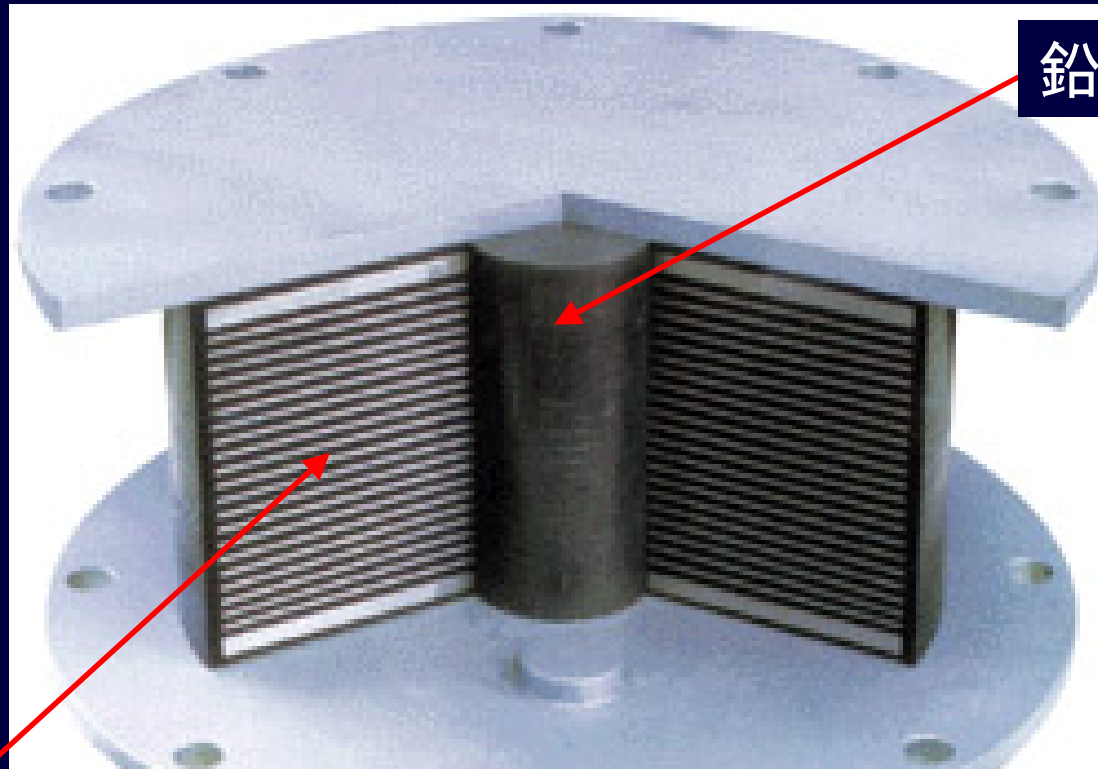
● 免震構造

◆「構造物は地面に固定」という発想からの脱皮



● 免震装置:アイソレータ

◆ 鉛プラグ入り積層ゴム (LRB)

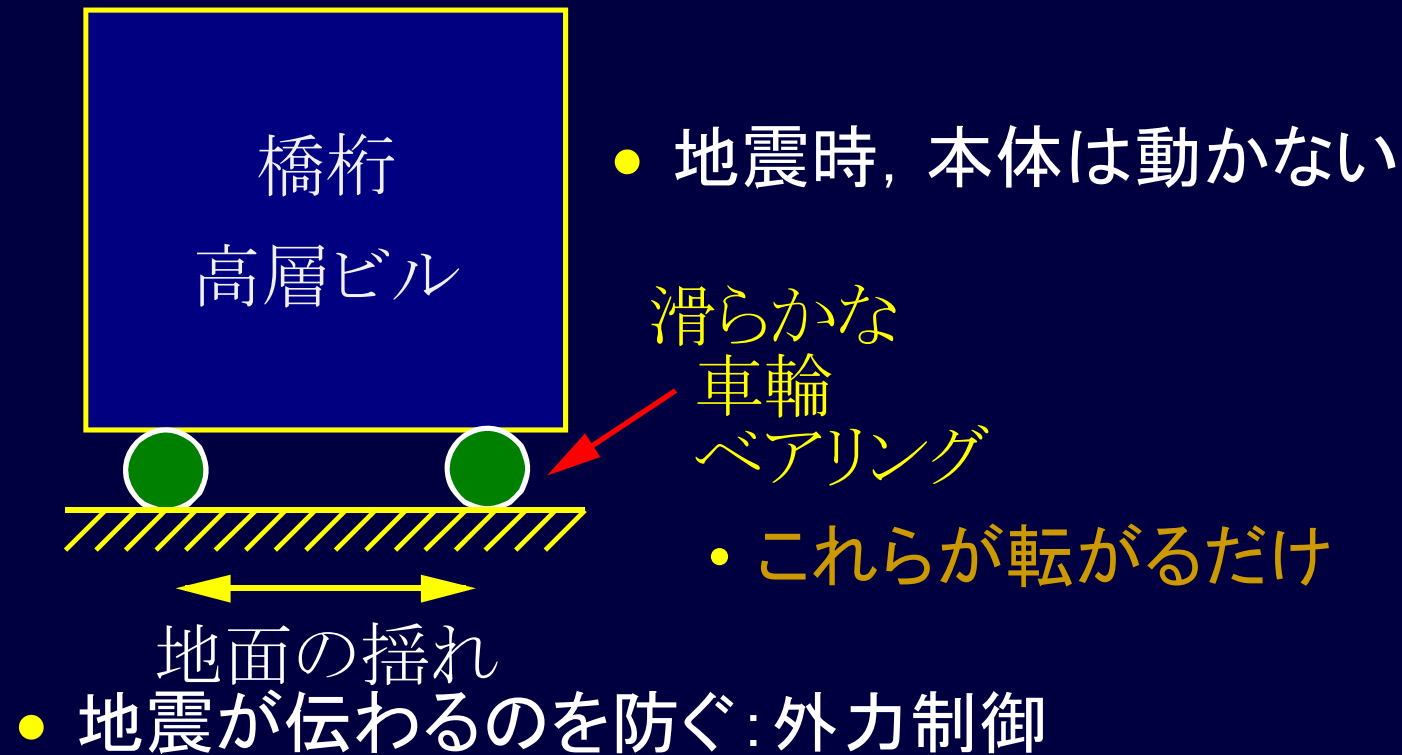


鉛プラグ

積層ゴム＝ゴム(黒)と鉄板(白)のサンドイッチ構造

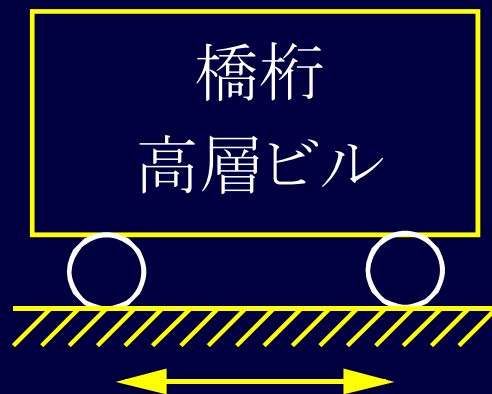
● 免震構造の基本コンセプト

◆ 地盤から切り離し,地震力を受けないようにする



● 免震構造

◆ 「構造物は地面に固定」という発想からの脱皮



絶縁型

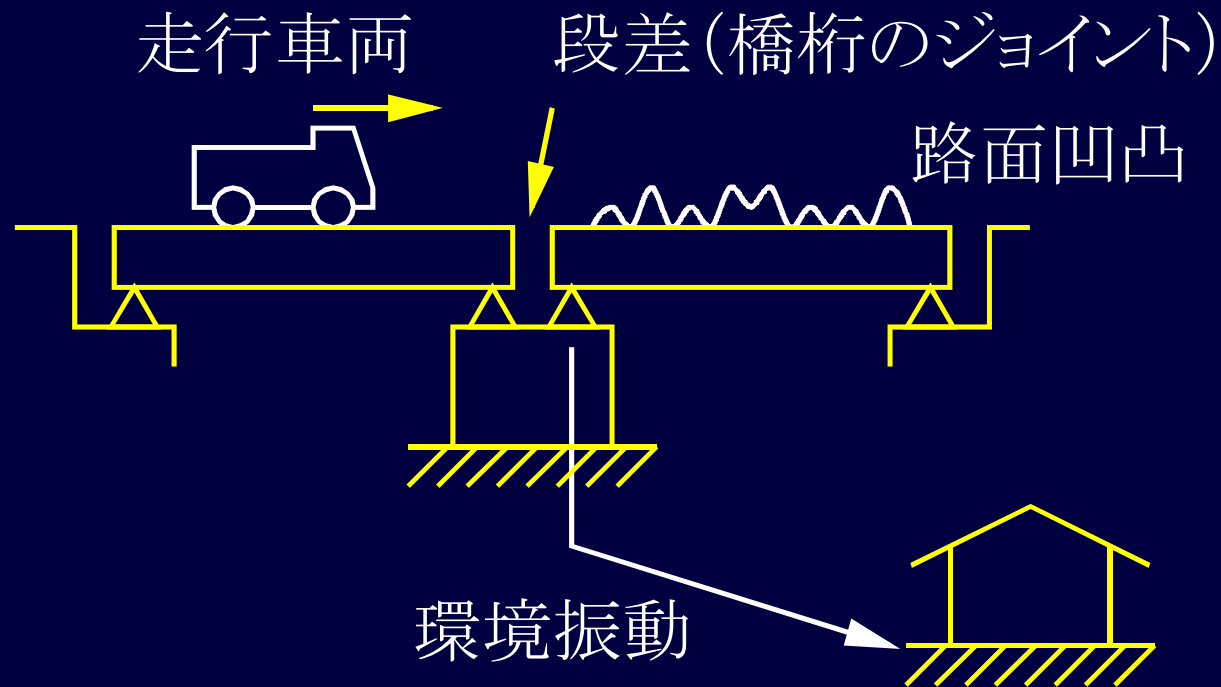


周期伸長型

◆ 周期伸長型: 剛性の低い積層ゴムを使用

- 構造物全体の振動数を下げる(長周期化)
- 地震との共振を避ける(振動数制御)
- さらにダンパー(鉛棒)を付加: 減衰をあげる

● 橋の走行車両による振動（交通振動）

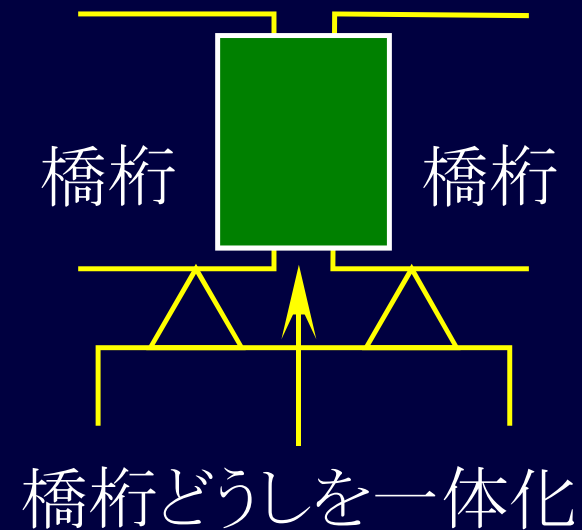


- ◆ 問題点：橋の疲労損傷（小さい変形の繰り返し）
騒音，車両の乗り心地
環境振動（周辺の建物を揺らす）

● 交通振動の制御

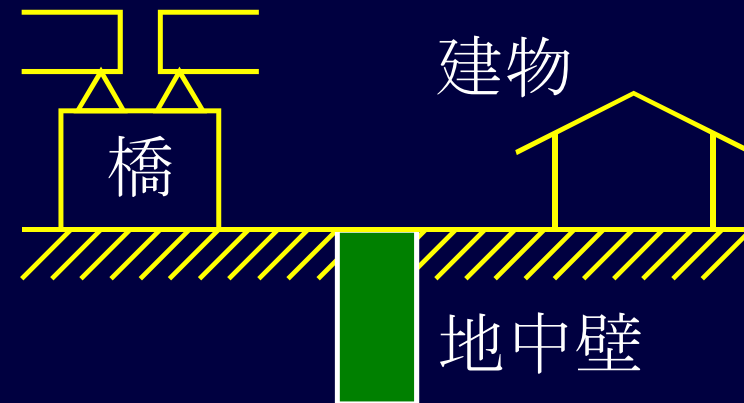
1) 橋梁振動の抑制

- 各種ダンパーの設置
- 橋桁のノージョイント化
(桁間の段差をなくす)



2) 振動伝搬の抑制

- 防音壁の設置(騒音)
- 地中壁による振動遮断
(環境振動)





環境都市セミナー レポート課題

- ◆ 建設構造物の「振動」事例について調べ、
考えるところをA4レポート用紙2枚にまとめよ.
- レポートには必ず具体的なタイトルをつける
例) 「タコマ橋の落橋について」
→ 配布された表紙の「課題」欄に記入
→ 「教員」欄は:岩本
- レポートはホチキス止めしてまとめる
- 提出期限: 来週金曜日午後6時



社会開発工学概論 レポート課題

- ◆ 建設構造物の「振動」事例について調べ、
考えるところをA4レポート用紙2枚にまとめよ.
- レポートには必ず具体的なタイトルをつける
例) 「タコマ橋の落橋について」
→ 配布された表紙の「課題」欄に記入
→ 「教員」欄は: 岩本
- レポートはホチキス止めしてまとめる
- 提出期限: 来週月曜日午後6時