

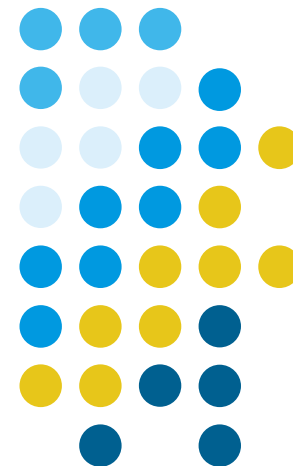
都市防災論

第七回

ー構造物の応答：構造物はなぜ揺れるかー

Date:2011/5/30

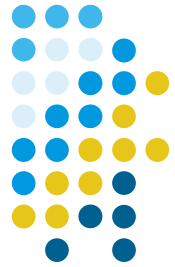
東京海上日動リスクコンサルティング
自然災害リスクグループ
大峯 秀人





本日の講義内容

- A. 地震における構造物の挙動
 - 外力、入力、応答、損傷
 - 地震の伝播と地震入力
- B. 1質点系の応答
 - 1質点系振動モデルと振動方程式
 - 慣性力、復元力、減衰力
- C. 構造物の固有周期
 - 固有周期と質量、剛性の関係
 - 様々な構造物の固有周期
- D. 地震応答の特徴
 - 固有周期と地震動の卓越周期との関係
 - 数値解析による構造物の地震応答
- E. 応答スペクトル
 - 応答に注目した地震動の表現



A.地震における構造物の挙動

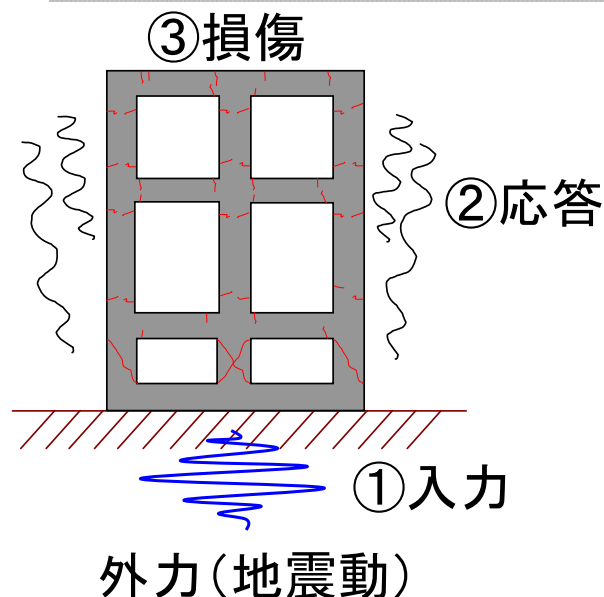


構造物の挙動

地震動と構造物の関係

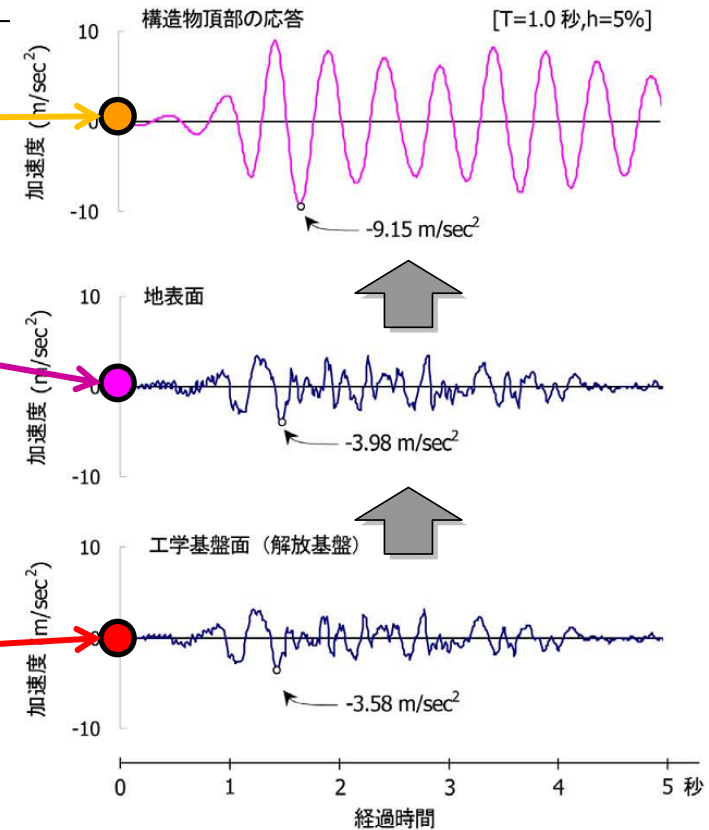
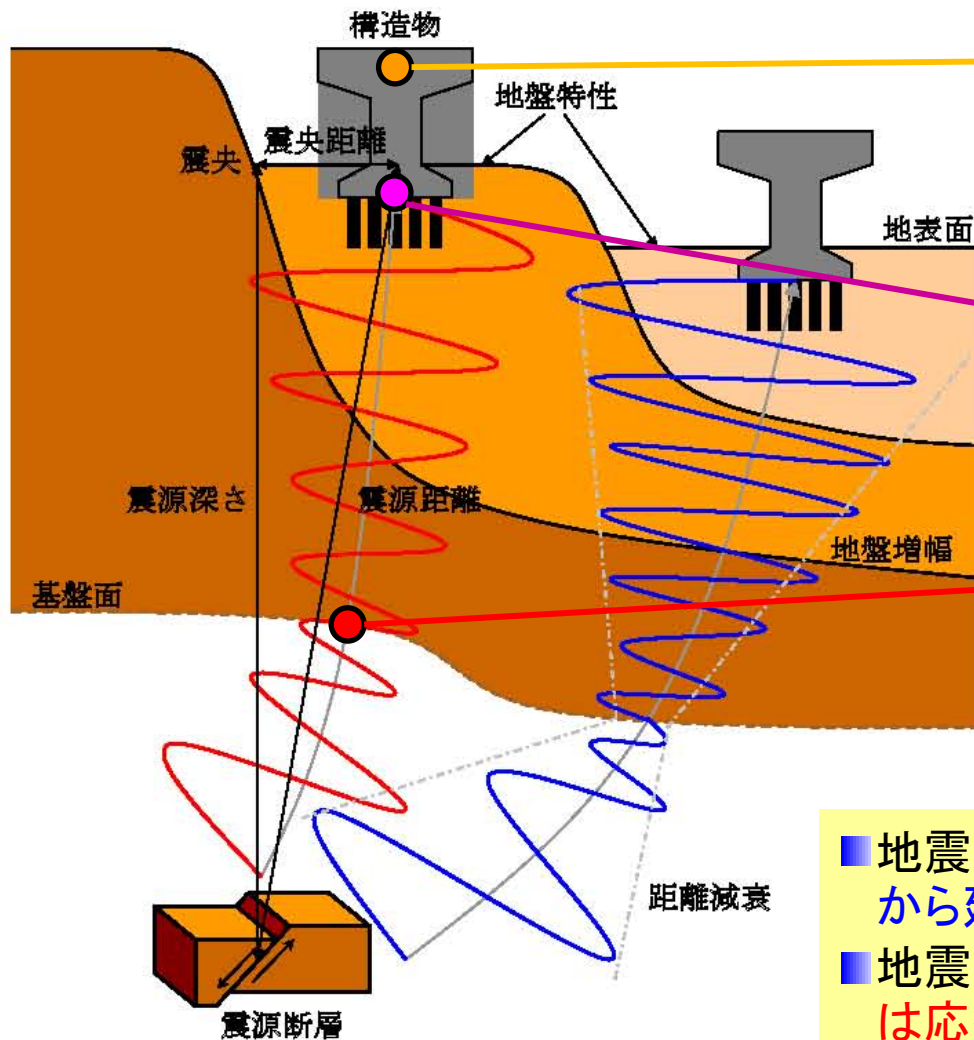
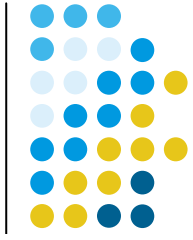
構造物に**外力(地震動)**が入力されると、
構造物は**応答**し、変形や応力が発生する。

応答が大きくなり、構成する部材の限界(強度、耐力、変形能力など)を超えると構造物は**損傷**(ひび割れ、破断、倒壊など)する。



鉄道ラーメン高架橋の被害
土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告会より

基盤／地盤／構造物



- 地震動は、震源断層から基盤を伝播し、基盤から建設地点の地盤にて変化/増幅する
- 地震動が基礎より入力することにより、構造物は応答/振動する

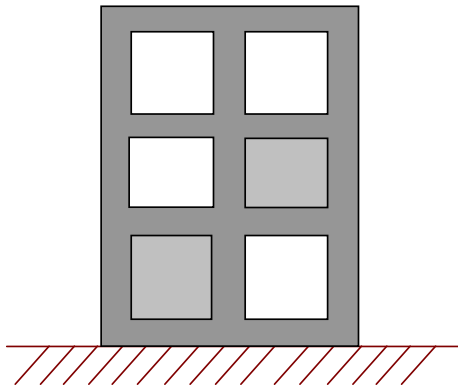
構造物と地震動

構造物

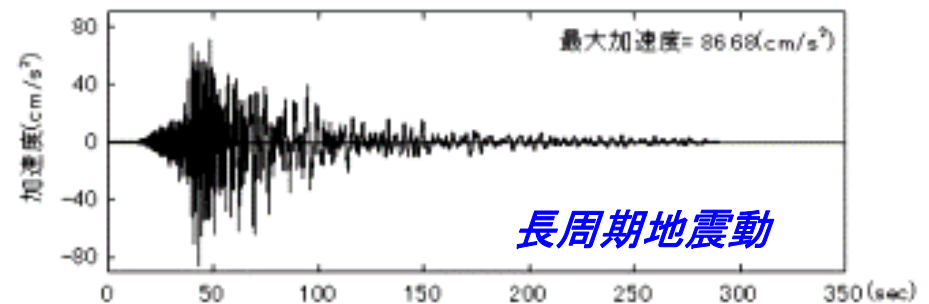
■形: 形状・高さ・架構

■材料: 硬軟・強弱

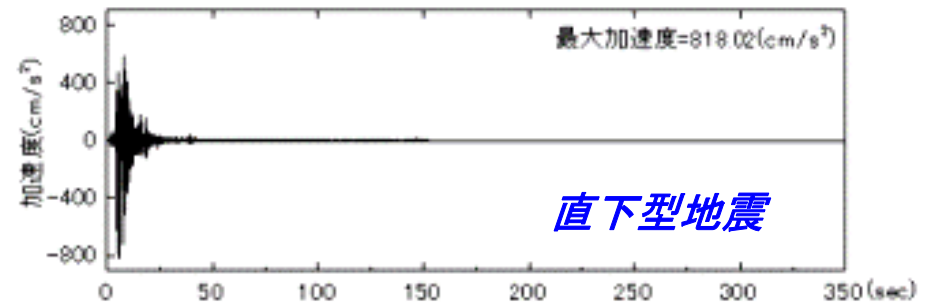
■重さ: 重・軽 等



地震動



(a) 2003年十勝沖地震 苫小牧記録NS成分



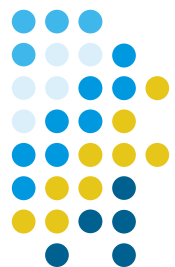
(b) 1995年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台記録NS成分

構造物と地震動の関係から どのような応答になるのか？



「A.地震における構造物の挙動」のまとめ

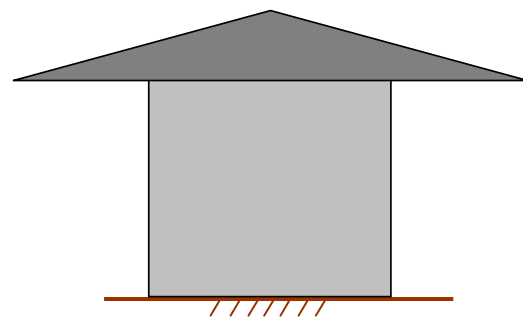
- 地震動により構造物は応答する
- 応答は、地震動と構造物の特徴により決まる？



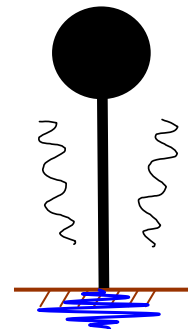
B. 1 質点系の応答

1質点系 振動モデル

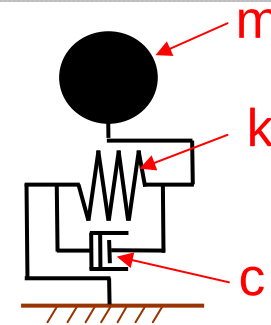
構造物の最も簡易な振動モデル「1質点系振動モデル」



構造物



1質点へ置換



1質点系振動モデル

1質点系の振動運動方程式

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x + c \cdot \dot{x} = p(t)$$

慣性力 復元力 減衰力

<構造物の特性>

m : 質点の質量

k : 弾性定数

c : 減衰係数

<外力>

$p(t)$: 地震動による入力

<応答値>

x : 変位

$\dot{x}$: 速度

$\ddot{x}$: 加速度

構造物は、地震入力に対して、**慣性力・復元力・減衰力**の3種類の力が作用し、応答する



慣性力とは？

$$\boxed{m \cdot \ddot{x}} + k \cdot x + c \cdot \dot{x} = p(t)$$

↓
慣性力

m : 質点の質量
 $\ddot{x}$: 加速度

ニュートン(1642~1727)の運動の法則(著書:プリンキピア)

運動の第一法則

物体に外から力が働かないか、または2つ以上の力が働いても、それらが釣り合っている時には、**物体は静止あるいは等速度運動の状態**を続ける

運動の第二法則

物体に力が働いているとき生じる加速度の方向・向きは力の方向・向きと同じで、**加速度の大きさは、力の大きさに比例し、物体の質量に反比例**する

運動の第三法則

物体Aが物体Bに力を作用する時は、物体Bもまた物体Aに、同じ直線上にあって、**大きさが等しく向きが反対な力を作用**する



慣性力とは？

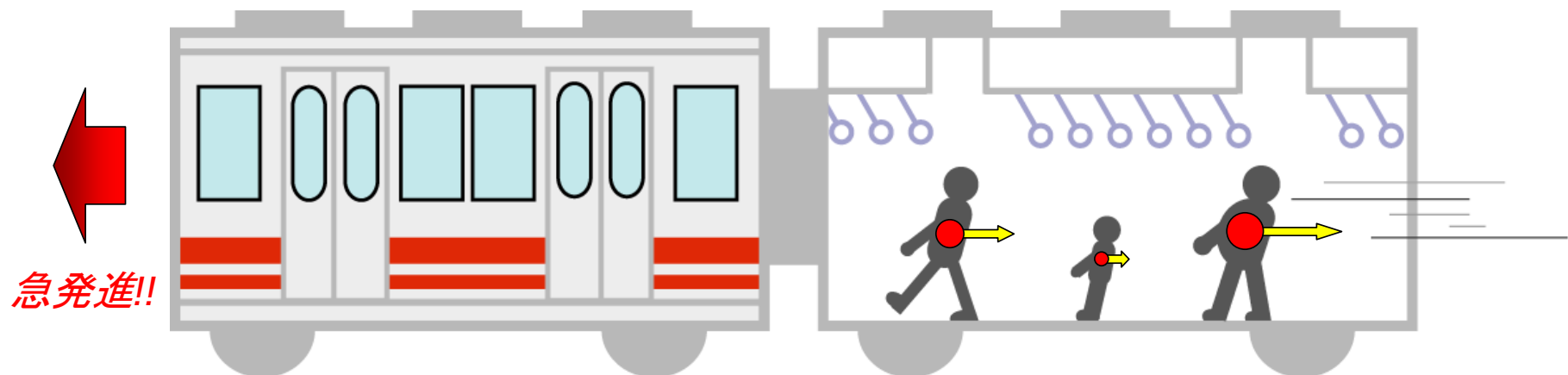
ニュートン運動の第二法則

物体に力 F が働いているとき生じる加速度 $\ddot{x}$ の方向・向きは力の方向・向きと同じで、**加速度の大きさは、力の大きさに比例し、物体の質量に反比例する**

$$\ddot{x} = F / m \quad \Rightarrow \quad F = m \cdot \ddot{x} \quad \Rightarrow \quad F - m \cdot \ddot{x} = 0$$

ダランベールの原理

力が釣り合わずに運動している物体でも $-m \cdot \ddot{x}$ という**仮想の力(慣性力)**が加わっていると考え、力の釣り合い問題(動的⇒静的)を取り扱える



復元力とは？

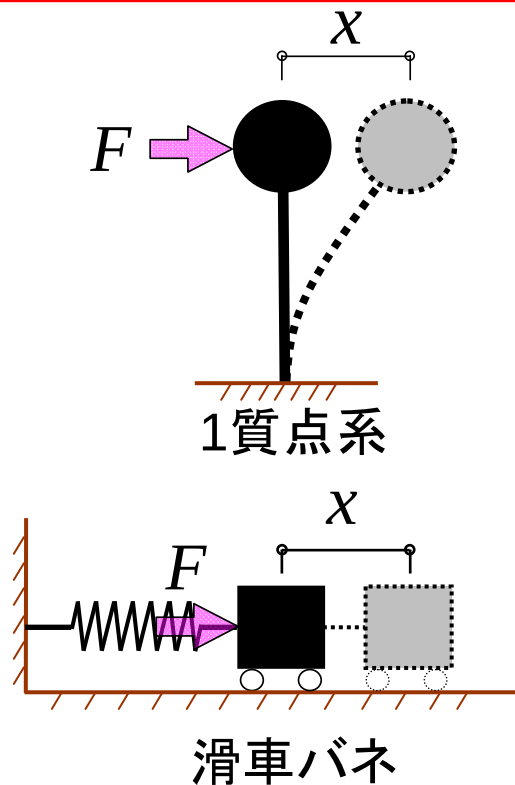
$$m \cdot \ddot{x} + \underbrace{k \cdot x}_{\text{復元力}} + c \cdot \dot{x} = p(t)$$

k : 弾性定数

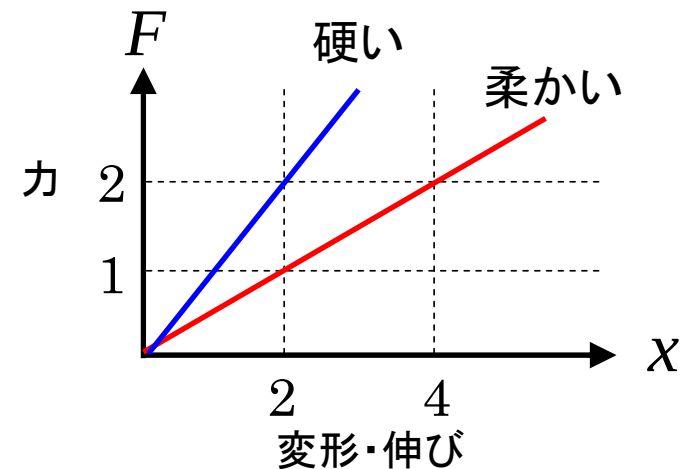
x : 変位

フックの法則

弾性物体では加えた力 F と物体に生じた変形 x は比例する



$$k = \frac{F}{x}$$



弾性物体の力-変形関係図
(線形物体)

減衰力とは？



$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x + \underbrace{c \cdot \dot{x}}_{\text{減衰力}} = p(t)$$

c : 減衰係数
 $\dot{x}$: 速度

減衰の無い場合

自由振動させた場合、系の固有周期により振動し続ける

減衰のある場合

自由振動させた場合、系の振動は時間とともに振幅が小さくなり、やがて静止する

構造物における減衰の源泉は？

- 材料特性（コンクリート、鉄）による減衰
- 熱や音へのエネルギー置換による減衰
- 空気抵抗・摩擦による減衰 など

非常に複雑な現象であり、構造振動学において解明されていない問題の一つ

実務における例)

コンクリート構造 : 減衰定数 $h=5 \sim 7\%$

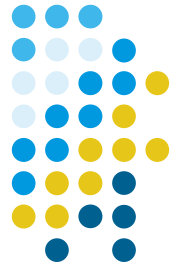
鉄骨構造 : 減衰定数 $h=2 \sim 3\%$

減衰定数 $h \Rightarrow$ 減衰係数 c



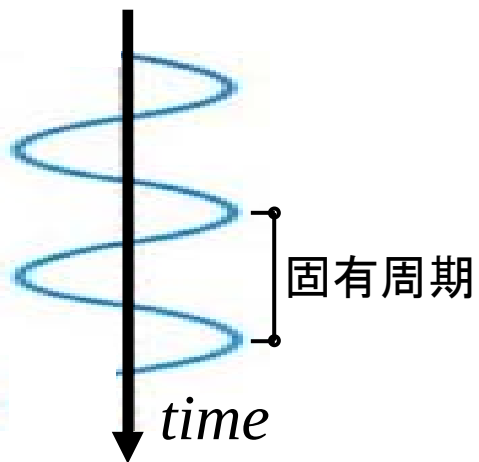
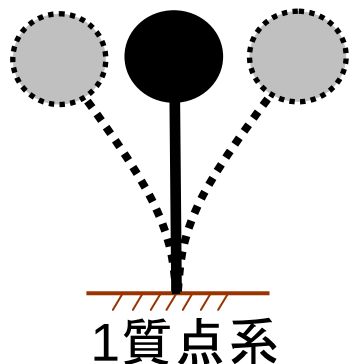
「B. 1 質点系の応答」のまとめ

- 最も簡易な振動モデル「1質点系振動モデル」
- 地震動入力に対し、構造物の系には、**慣性力・復元力・減衰力**の3種類の力が作用し応答する



C.構造物の固有周期

固有周期と質量、剛性の関係



- ある系を自由振動させた場合、**一定の周期**で系は振動する。
- 1質点系の場合、一つの**決まった周期**でしか振動しない。⇒ **1次固有周期**

1質点系の固有周期

系の固有周期は、
質量と剛性により決まる

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

<構造物の特性>

m : 質点の質量

k : 弾性定数(剛性)

①長②周期③短
←→

④重⑤質量⑥軽

⑦柔⑧剛性⑨硬

様々な構造物の固有周期

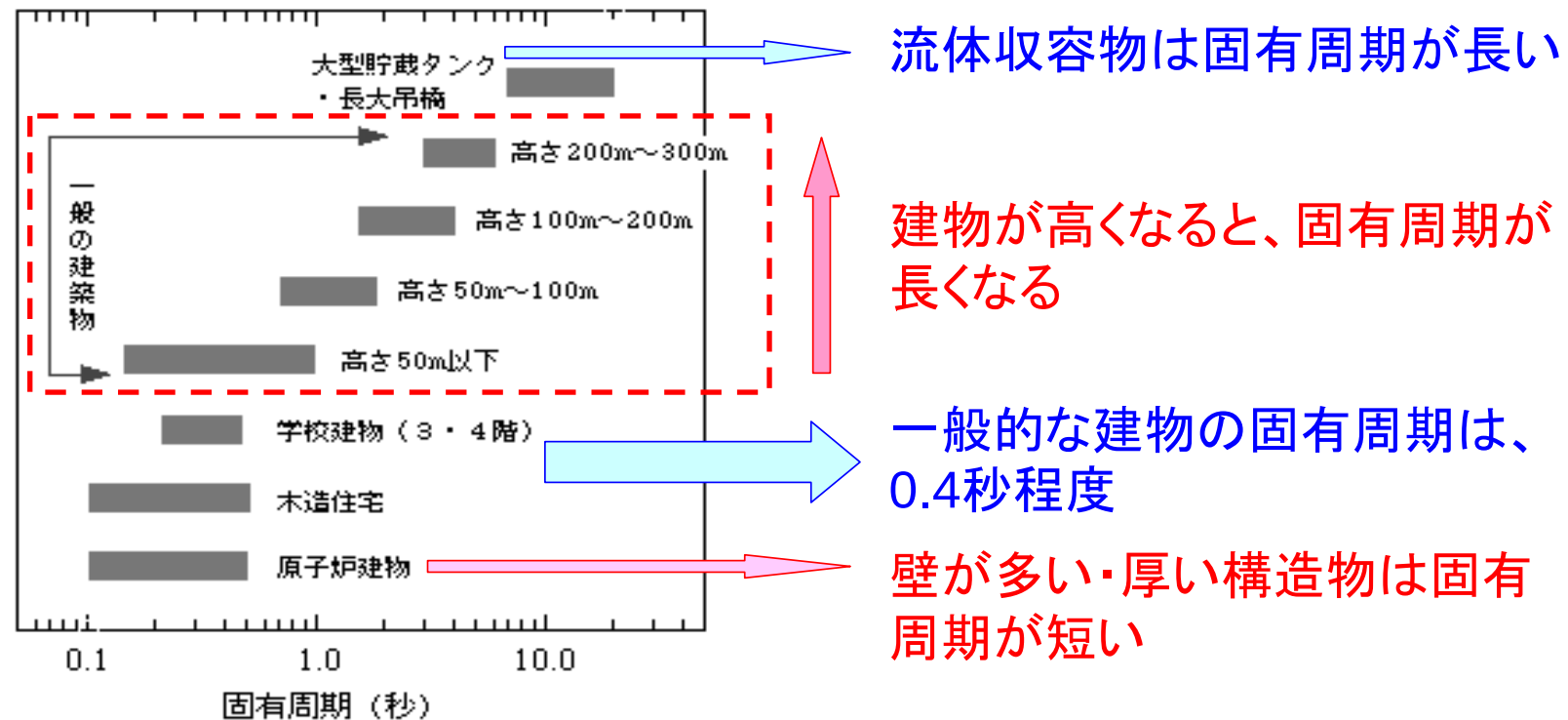
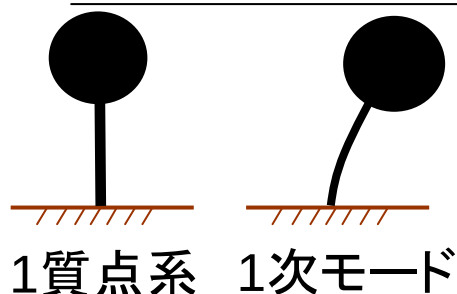


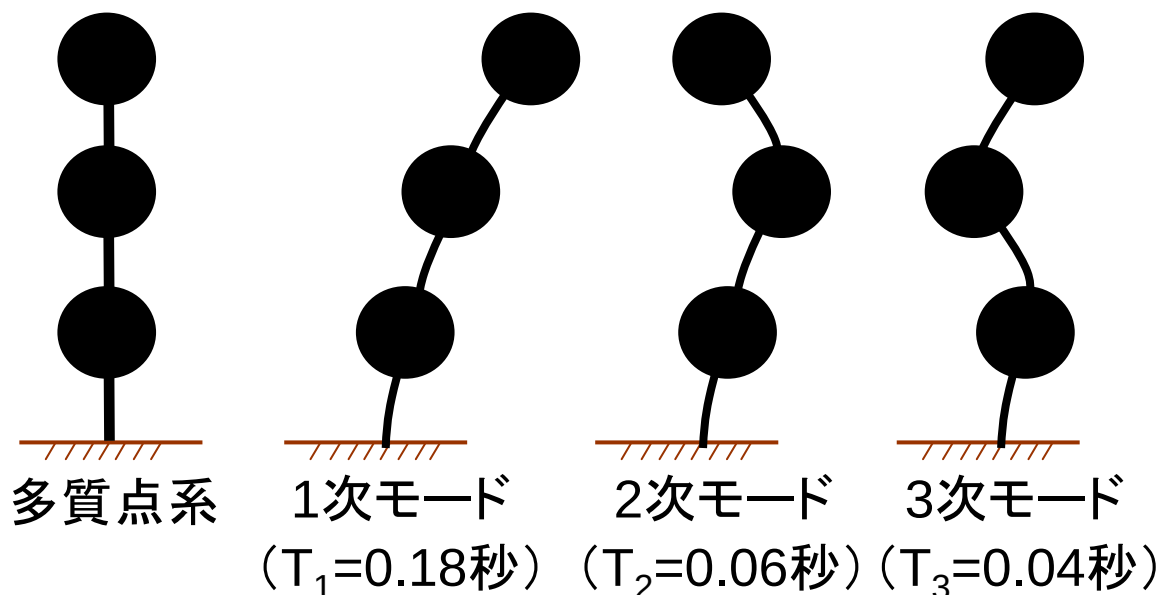
図1 構造物の固有周期の分布
日本地震学会 資料より



振動モードと各固有周期

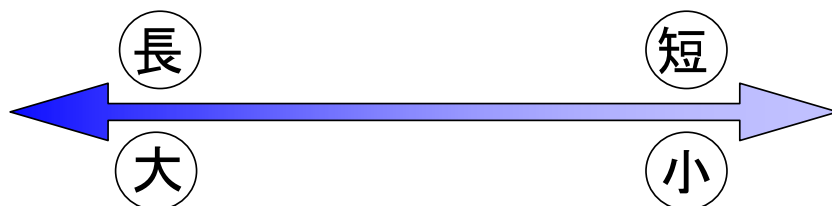


■ 1質点系の場合、一つの**決まった周期**でしか振動しない。⇒ 1次固有周期



■ 多質点系の場合、自由度の数だけ振動モードがある
■ それぞれに**固有周期**が存在する。

周期
影響

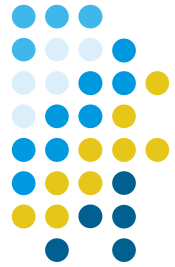


建築基準法における
一次固有周期 T_1 の略算式
➤ RC造: $0.02H$ (秒)
➤ S造: $0.03H$ (秒)
(H =建物高さm)
例) RC造3階建て $H=9$ m
 $T_1=0.02H=0.18$ 秒
一般的に
2次固有周期 $T_2=1/3T_1$
3次固有周期 $T_3=1/5T_1$



「C. 構造物の固有周期」のまとめ

- 構造物には**固有の振動周期**（固有周期）がある
- 簡易に捉えれば、系の**質量と剛性により決定**される
- 系の自由度（多質点系など）により各振動モードと固有周期が存在する



D.地震応答の特徴

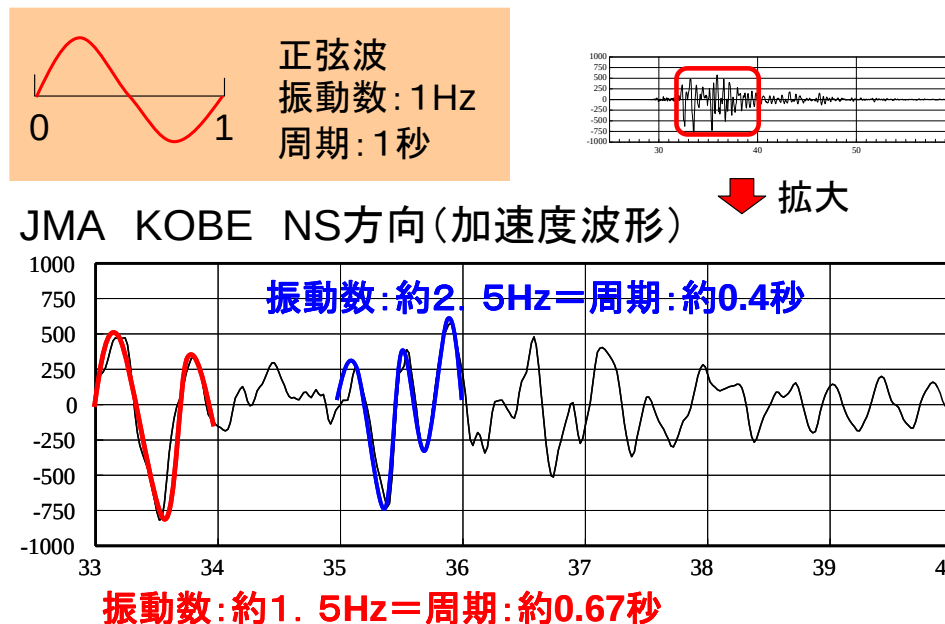


地震動との共振

■ 建造物の固有周期と地震動の卓越周期が一致すると、建造物は共振し、大きな応答が生じる。

■ 地震動の卓越周期（復習）

地震動波形は様々な振動数（周期）の正弦波に分解され、各振動数の中で影響が大きいのが、「地震動の卓越周期」



振動模型による共振実験



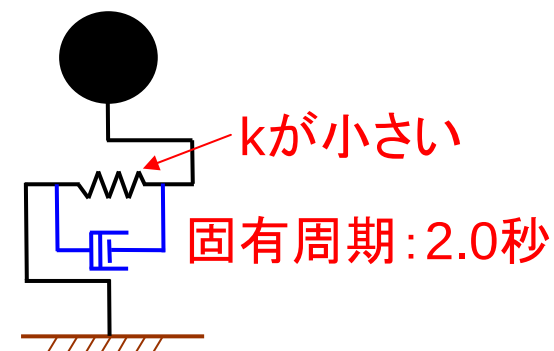
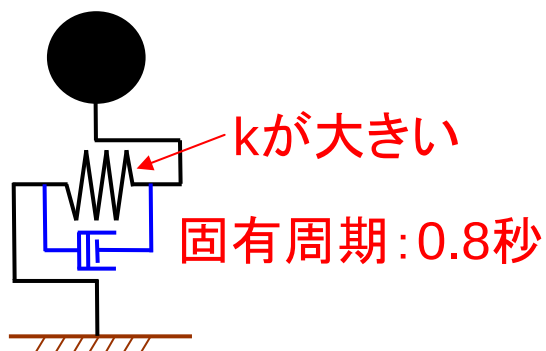
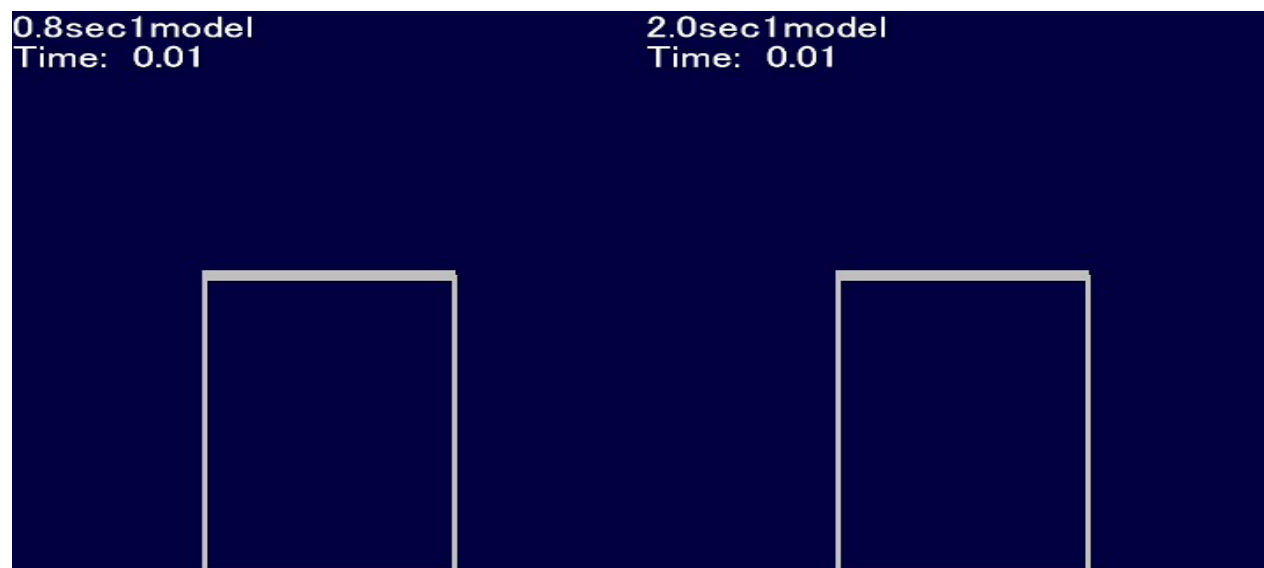
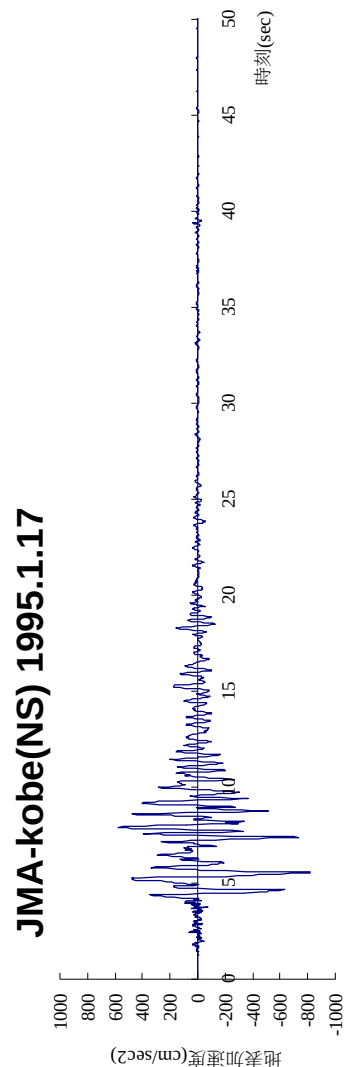
3つの異なる固有周期の構造物に対し、
自らが地震動となり、共振させてみましょう

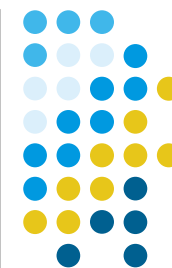
各系を共振させるために、どうしたか？



数値解析による構造物の地震応答

固有周期による応答の違い

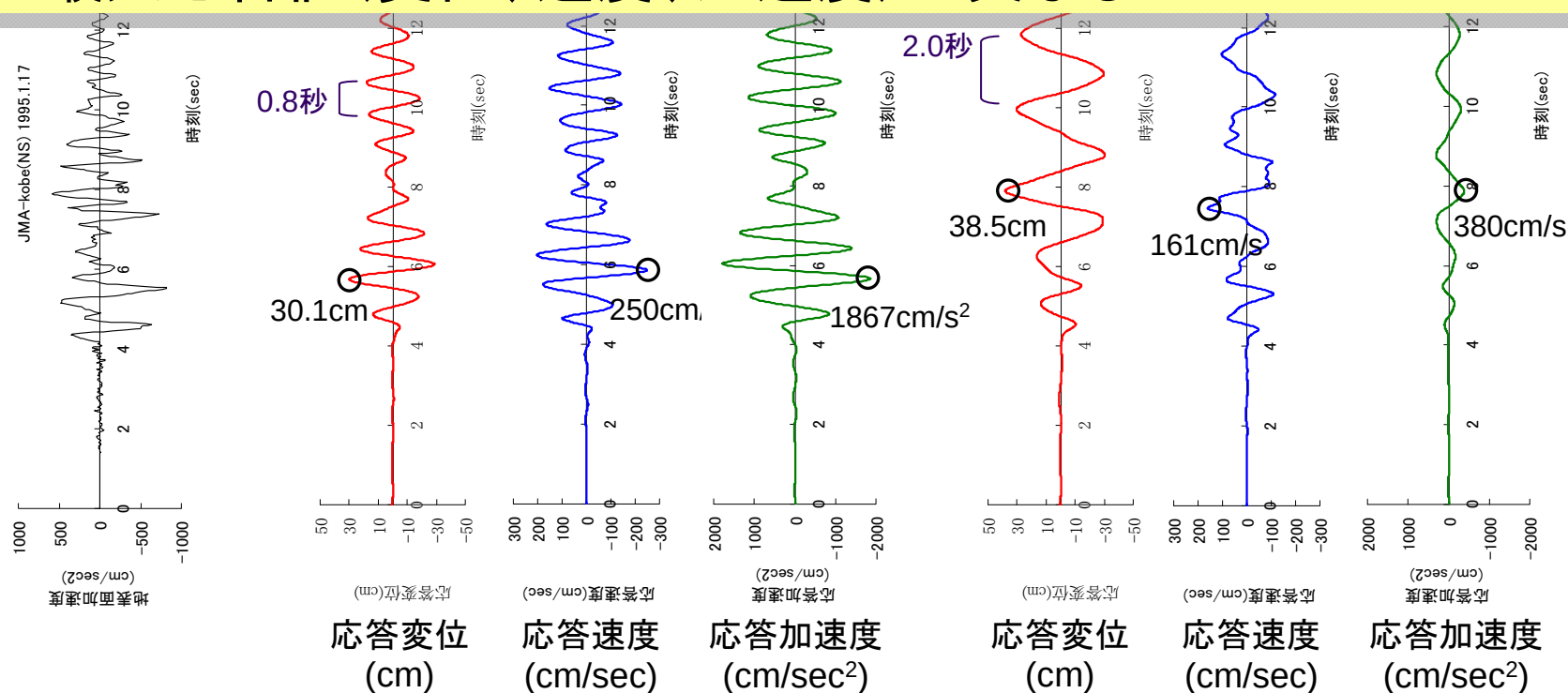




数値解析による構造物の地震応答

固有周期が異なる二つの系に地震波を入力すると、

- 異なる周期で応答する
- 異なるタイミングで最大応答を迎える
- 最大応答値(変位、速度、加速度)が異なる



地震波

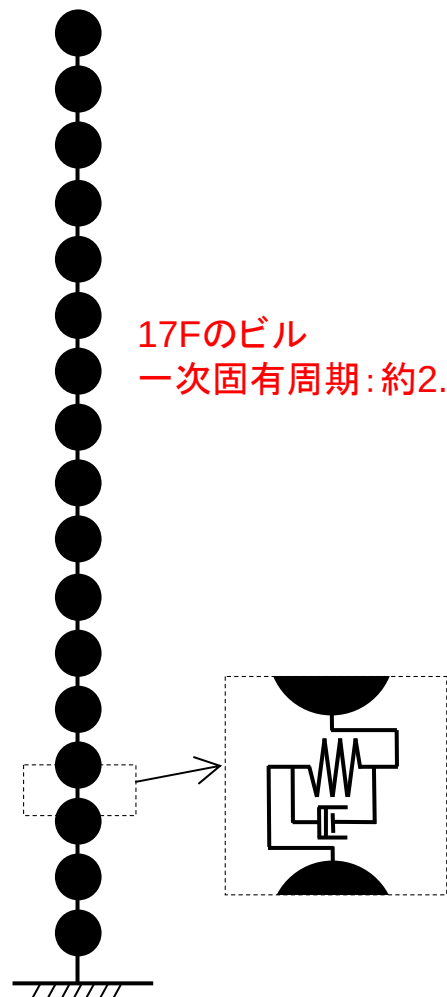
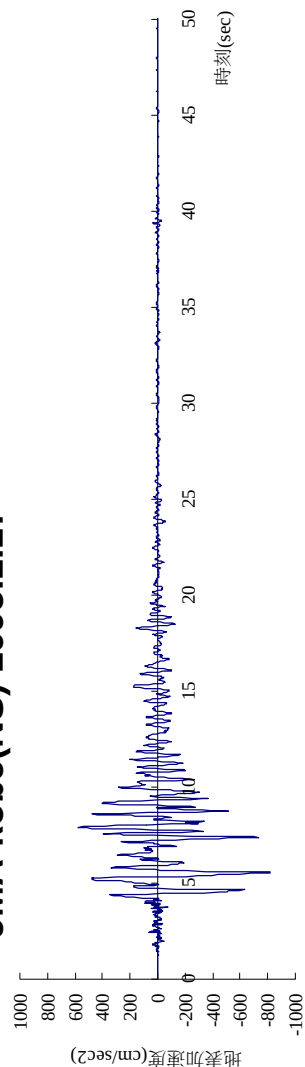
固有周期: 0.8秒

固有周期: 2.0秒



多質点系の構造物の地震応答

JMA-kobe(NS) 1995.1.17



17Fのビル
一次固有周期: 約2.0秒

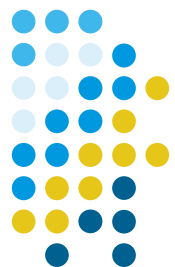
SH_17_Emodel
Time: 0.01



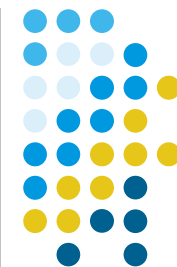


「D. 地震応答の特徴」のまとめ

- 地震動には様々な振動（周期）の正弦波に分解される。
- 地震動の卓越周期と、構造物の固有周期が一致すると大きな応答が生じる
- 同じ地震動でも、構造物の特性により応答は異なる

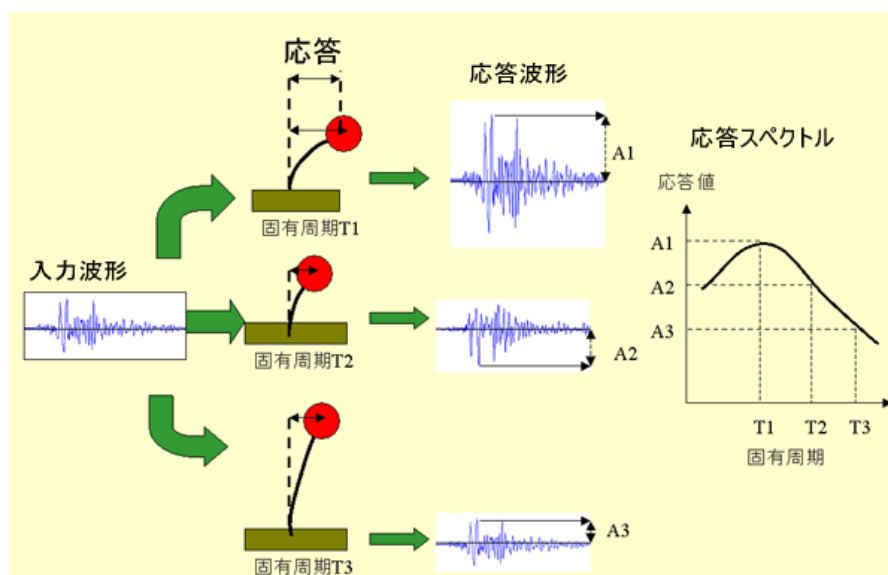


E. 応答スペクトル



応答スペクトルとは

応答スペクトル: 構造物がさまざまな固有周期、減衰定数を持つ1質点(1自由度)系と考えたとき、構造物がある地震動を受けたときの**最大応答値をスペクトルで表したもの**の(周波数・周期領域で表現したもの)



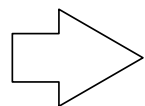
気象庁HP:「フーリエスペクトルと加速度応答スペクトル」
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/outou.htm>

$$F = m \cdot a$$

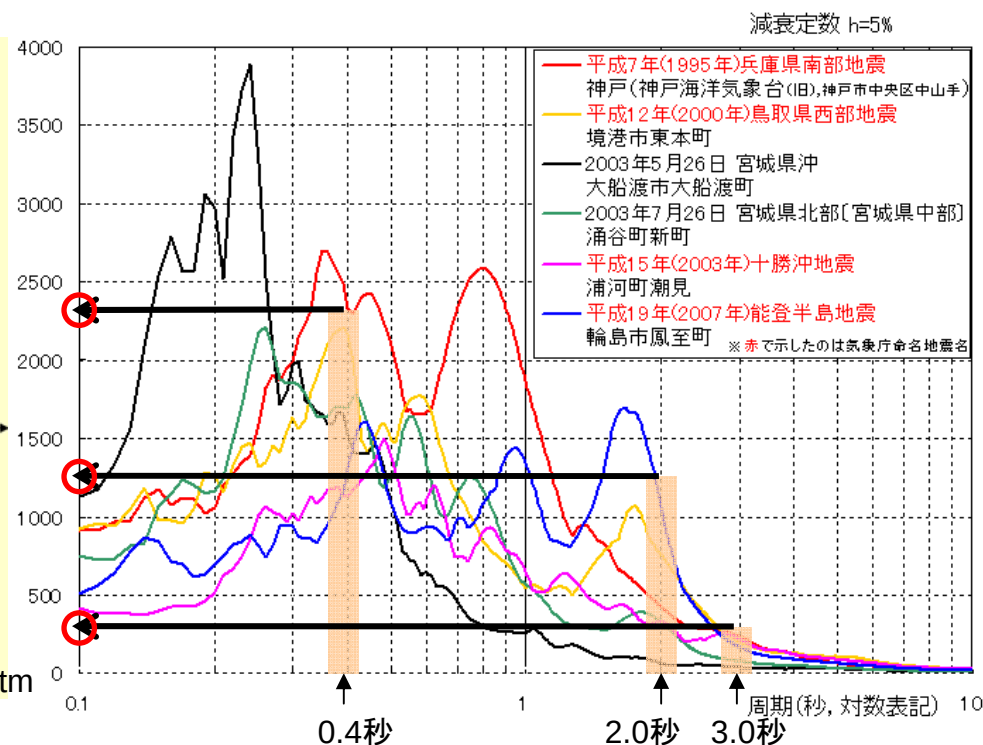
F : 作用力

m : 構造物の質量

a : 応答加速度



建物に作用する力が分かる
⇒ 耐震設計への繋がり



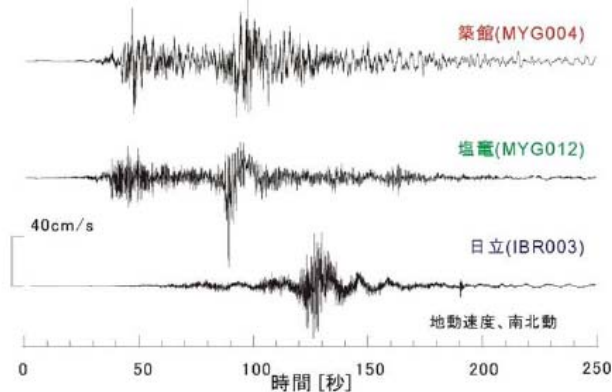
東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の応答スペクトルの比較



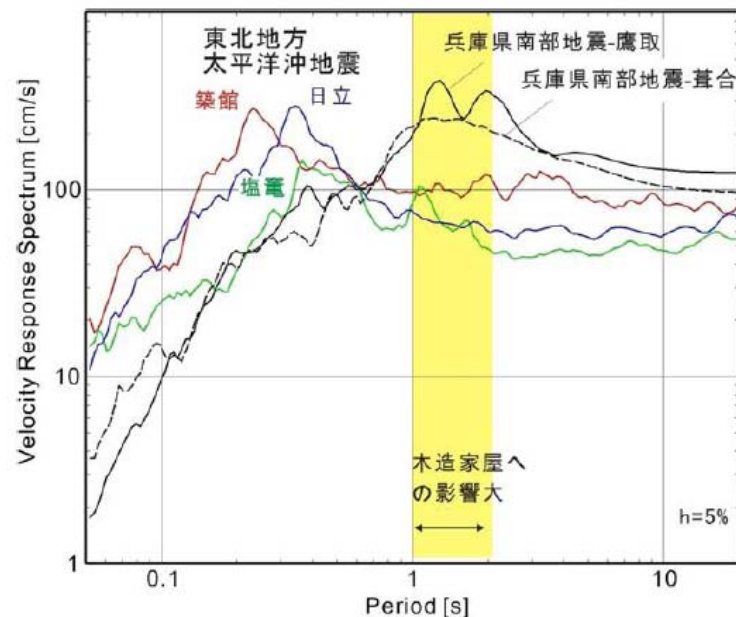
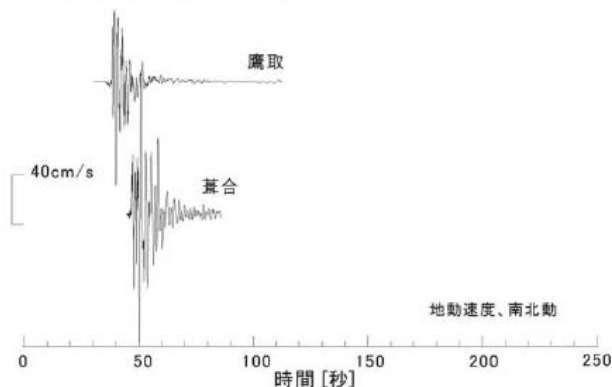
速度波形と速度応答スペクトル

Ground Velocity and Velocity Response Spectra

2011年 東北地方太平洋沖地震(M9.0)



1995年 兵庫県南部地震(M7.3)



古村 (2011)

今回の地震では、木造家屋の被害に直結する周期1～2秒前後の応答が100cm/s程度以下と小さく、兵庫県南部地震の鷹取や葦合地点(200～300cm/s)の半分以下であった。

東京大学地震研究所資料より

http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/#velresp



「E. 応答スペクトル」のまとめ

- 地震動について、「時刻歴波形」や、応答に注目した「**応答スペクトル**」の表現方法がある
- 「応答スペクトル」は、**1質点系の最大応答値**（変位・速度・加速度）をプロットしたもの
- 横軸は構造物の固有周期を示し、縦軸は最大応答値



構造物の挙動イメージ

実大模型による振動実験

装置名 : E-Defence

所属 : 独立行政法人防災科学技術研究所

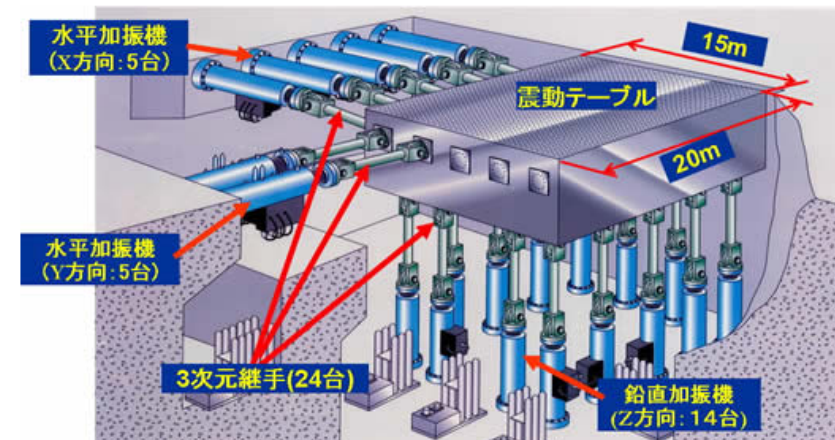
兵庫耐震工学研究センター

特徴 : 実大三次元震動破壊実験施設

2005年4月～



【実大三次元震動台の基本仕様】



三次元震動台加振機概念図



イメージ動画①

入力 : 兵庫県南部地震 JR鷹取波形 100%
構造物 : 構造形式 木造軸組構法
階数 2階建て
建築年 左:耐震補強済、右:築25～50年



NIED

独立行政法人

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention



E-Defense

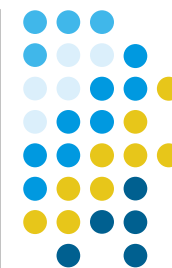
兵庫耐震工学研究センター

実大三次元震動破壊実験施設

E-ディフェンス

Hyogo Earthquake Engineering Research Center

動画



イメージ動画①補足

JR鷹取波形：兵庫県南部地震 (1995年)の観測記録

表5 JR 鷹取波の各成分の最大値

	加速度(gal)	速度(kine)	変位(cm)
NS	641.7	149.2	86.33
EW	666.2	117.0	37.78
UD	289.5	16.50	11.15

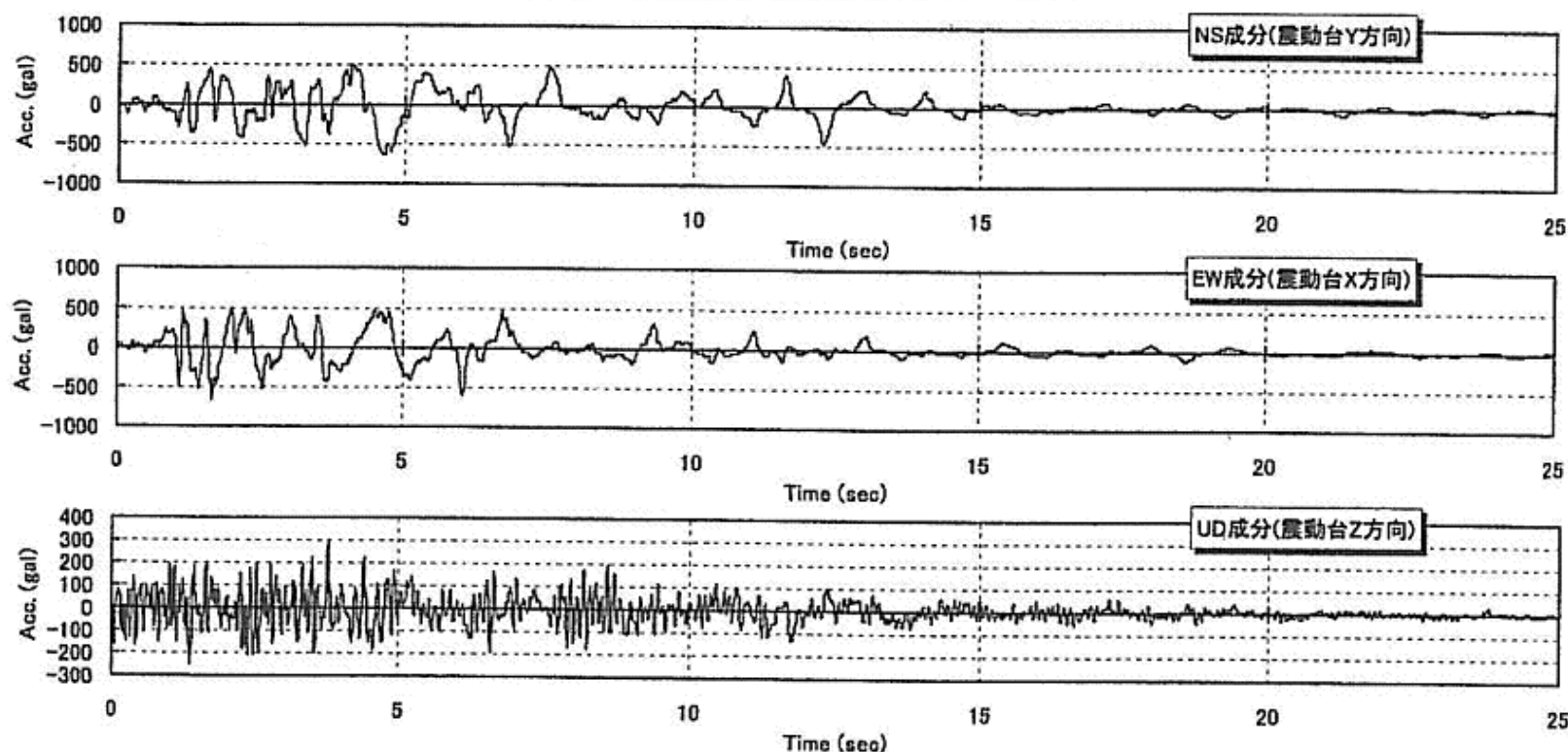


図5 入力波形 (JR 鷹取原波形)



イメージ動画②

入力 : 兵庫県南部地震 JMA Kobe波 100%
構造物 : 構造形式 鉄筋コンクリート造 壁付ラーメン構造
階数 6階建て
建築年 1970年代建設を想定



動画

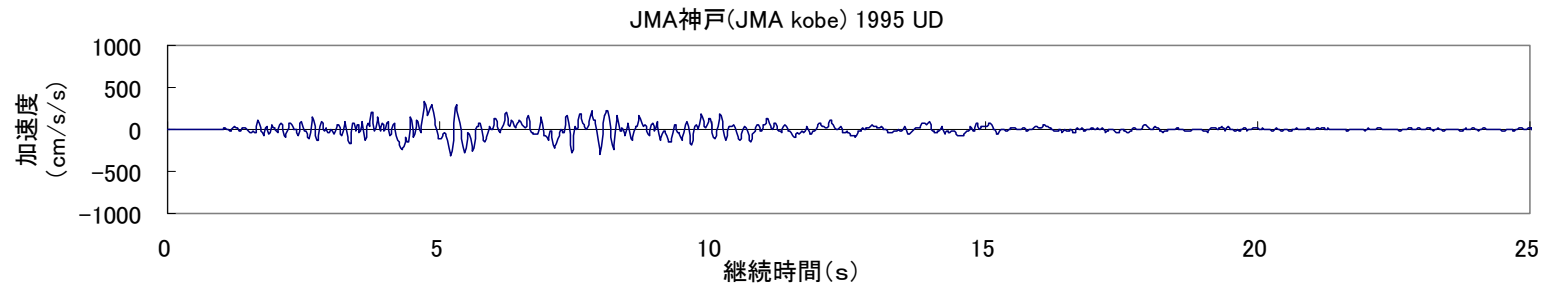
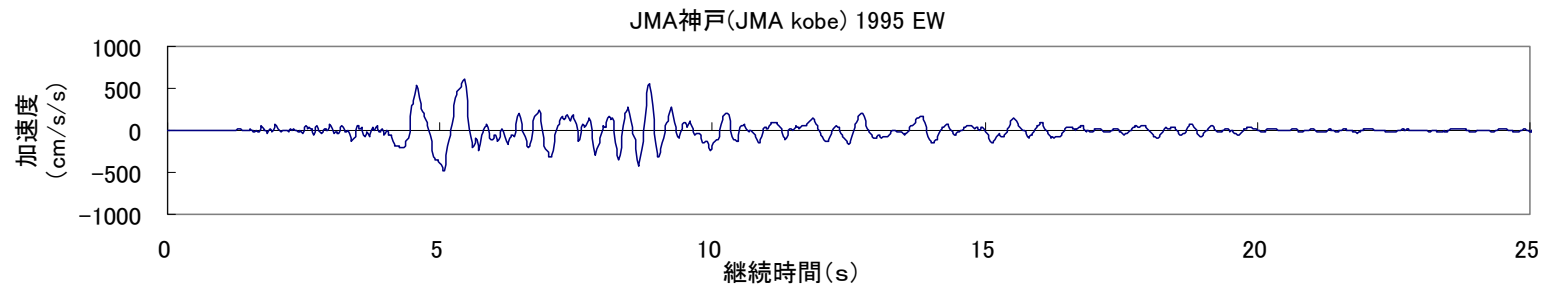
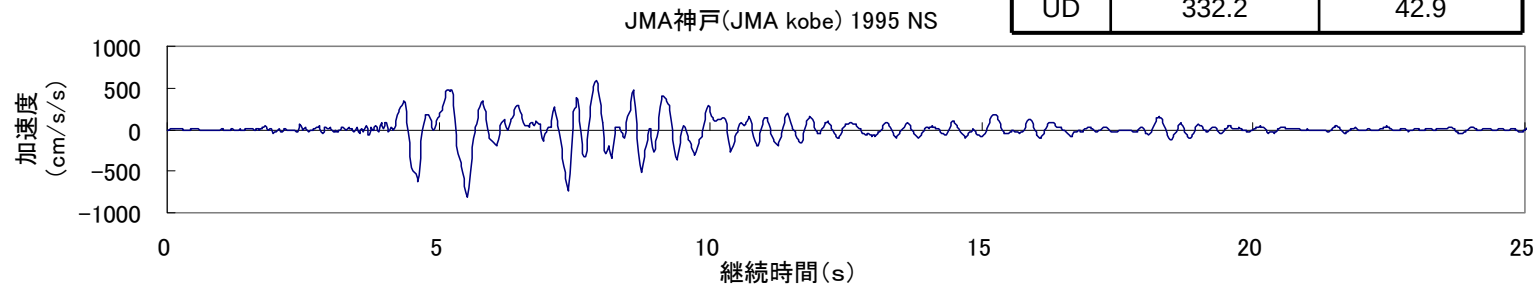
イメージ動画②補足



JMA kobe波形: 兵庫県南部 地震(1995年)の観測記録

JMA kobe の各成分の最大値

	加速度(gal)	速度(kine)
NS	818.0	96.5
EW	617.3	80.3
UD	332.2	42.9





イメージ動画③

入力 : 兵庫県南部地震 JR鷹取波形 100%
構造物 : 構造形式 鉄骨造 ラーメン構造
階数 3階建て
建築年 現行の耐震基準で設計を想定



動画