

# 真に強い木造住宅の 実現に向けて

1. 図で理解する分り易い振動、エネルギーの概念と基本理解
2. 木造住宅の耐震、制震の振動解析による検証



# 1. 図で理解する分り易い振動、エネルギーの概念と基本理解

# ニュートンとフックの関係式

ニュートンの力の定義

$$F = mA$$

フックのバネの法則

$$F = kD$$

A : 加速度

m : 質量

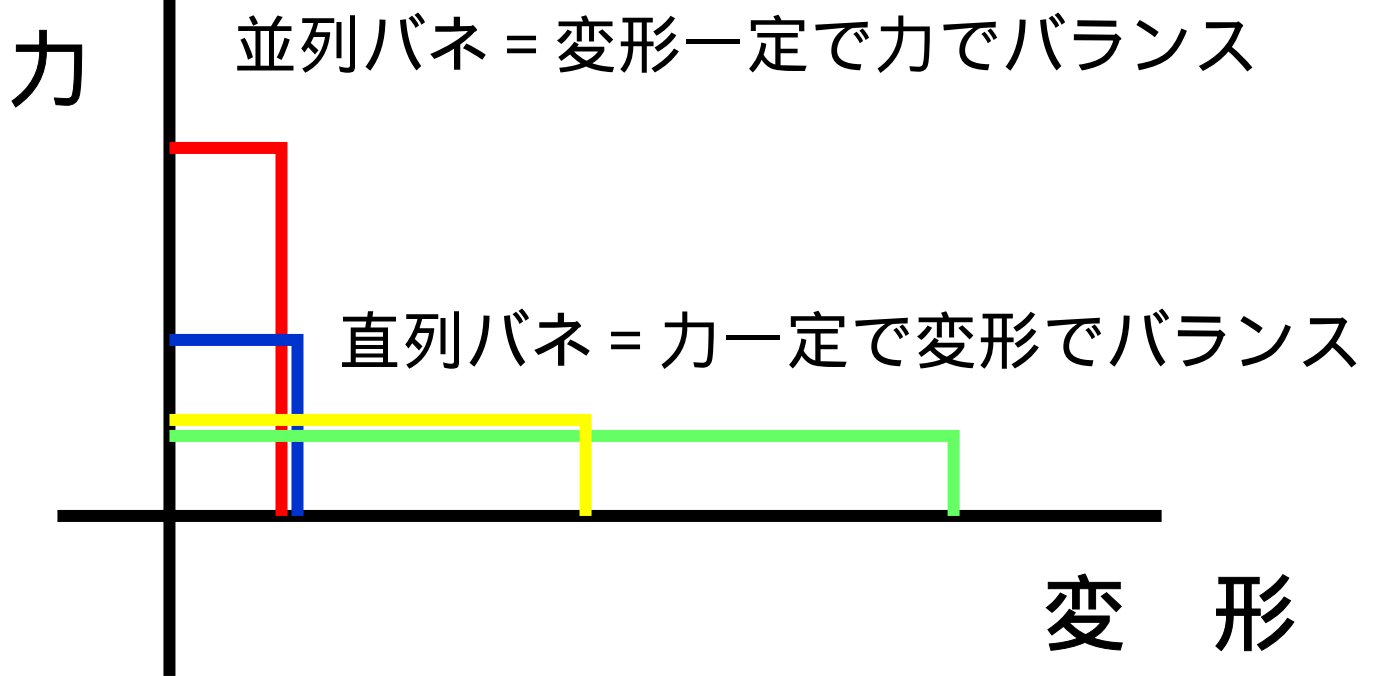
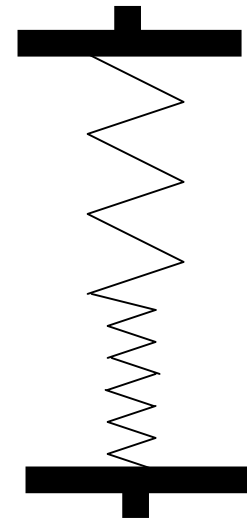
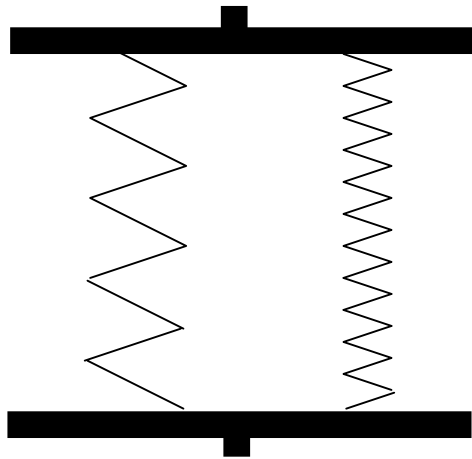
k : バネ定数

D : 変形

F : 力

ニュートンとフックの運動方程式

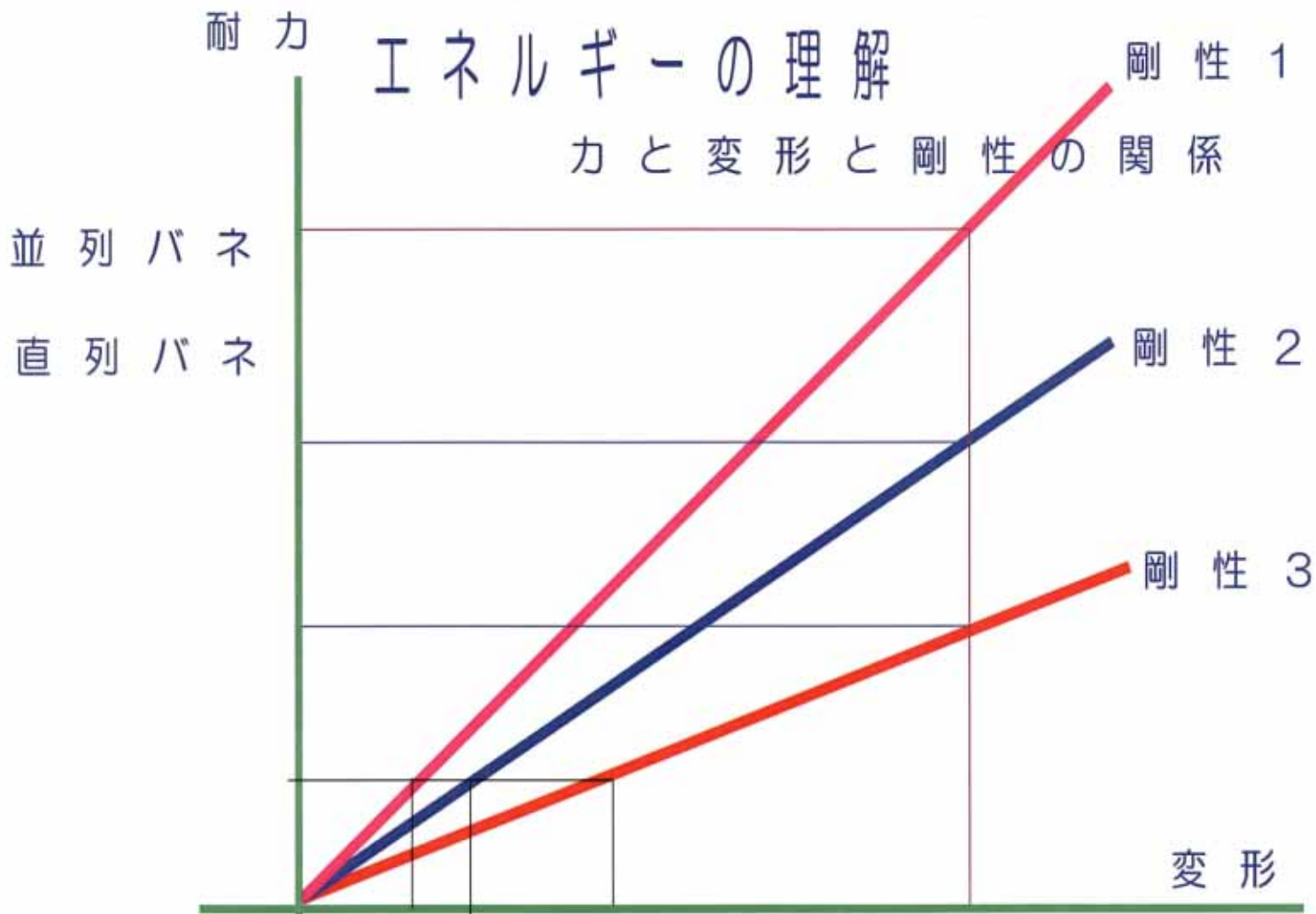
$$mA = kD$$



エネルギー = 力 × 変形 (面積)

# エネルギーの理解

力と変形と剛性の関係

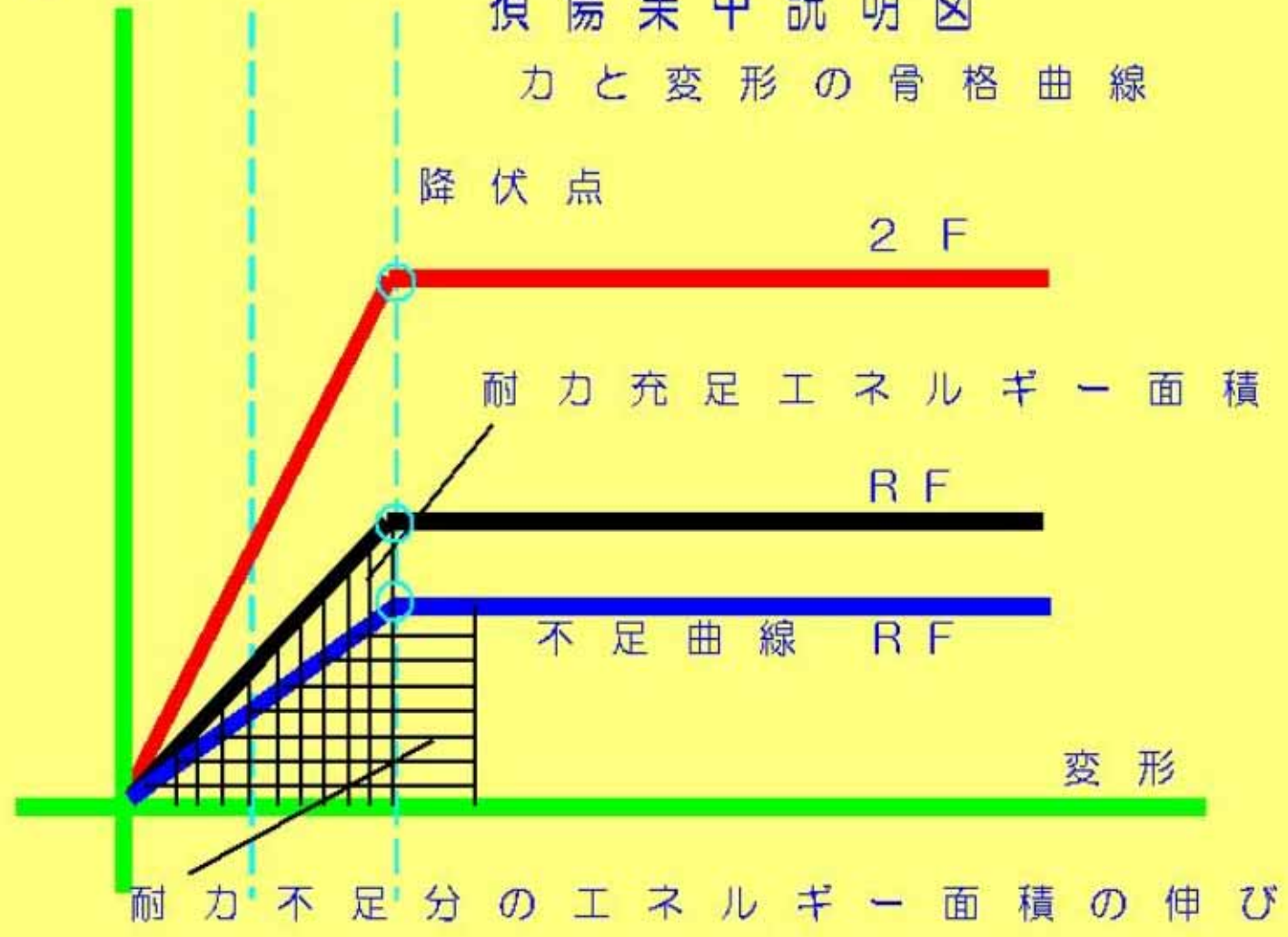


力を一定にすると変形でバランスをとる。  
変形を一定にすると力でバランスをとる。

耐力

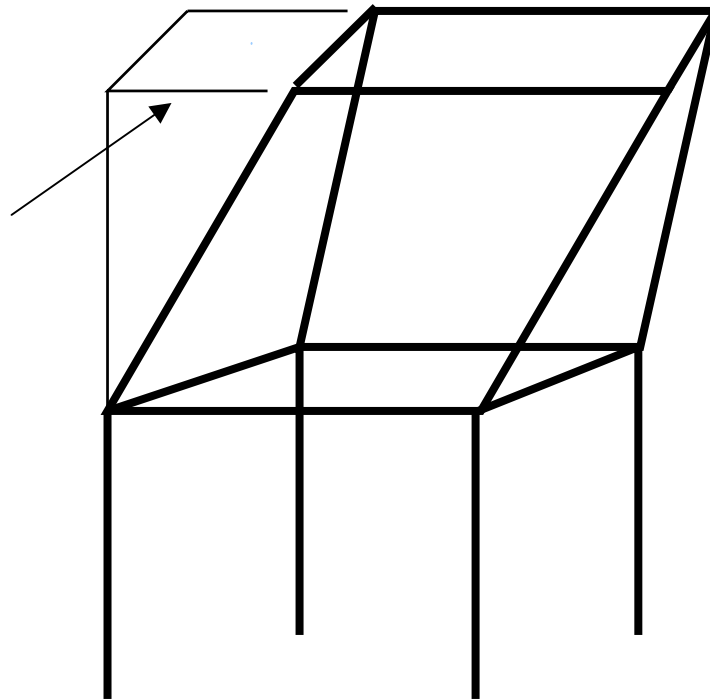
# 損傷集中説明図

力と変形の骨格曲線

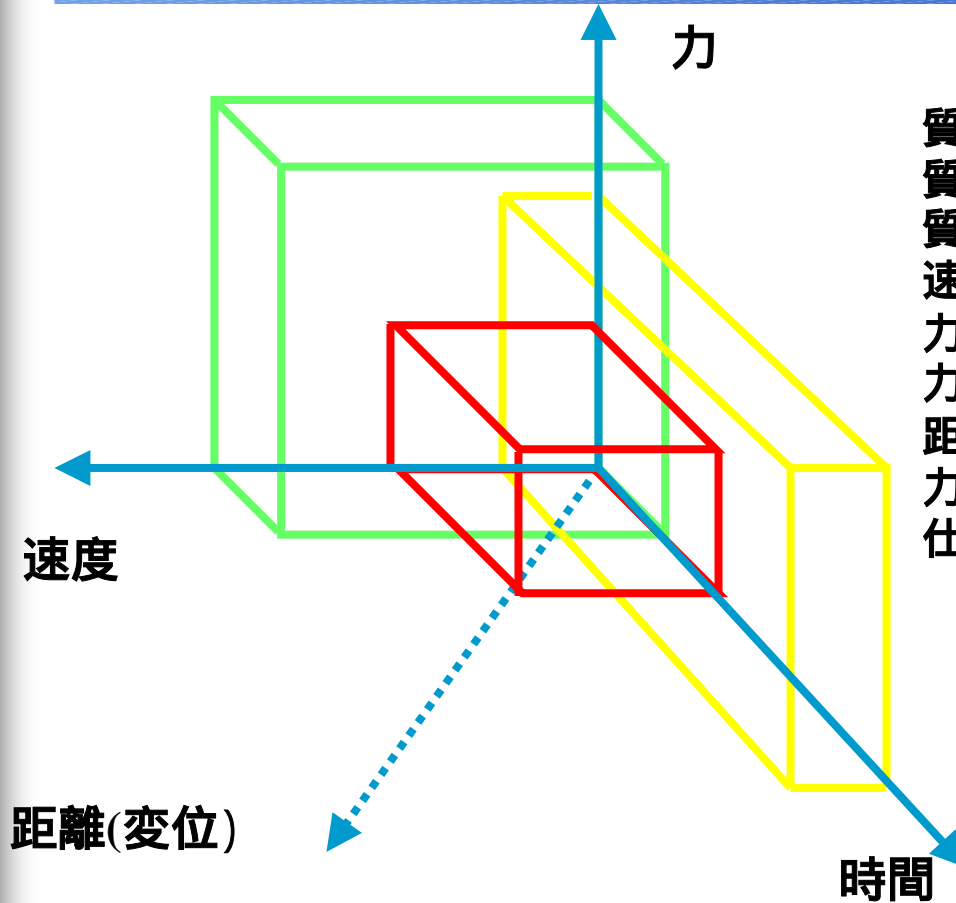


# 各層直列バネ + 層内直列バネ

変形集中



# 立方体の体積量を用いたエネルギー概念



質量 × 加速度 = 力  
質量 × 速度 = 運動量  
質量 × 速度の変化 = 運動量の変化  
速度 × 時間 = 距離(変位) (空間)  
力 × 時間 = 力積 運動量の変化  
力積 (運動量の変化) × 速度 = エネルギー  
距離 × 力 = エネルギー  
力 × 速度 = 仕事率  
仕事率 × 時間 = エネルギー

## エネルギー一定とすると

速度が無限に小さく力(重さ)が一定でもエネルギーの消費の時間が長い = クリープ  
作用時間が非常に短いと速度と力(仕事率)が大きくなる = 衝撃力  
力が小さくとも時間を短くすると速度が速くなり衝撃力は大きくなる。



# 運動量・力の変換図

速度最大

加速度最大(変位)

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{m\alpha}{2} \times X$$

運動量 = 質量 × 速度

力 = 質量 × 加速度

$$mv$$

$$m$$

$$v$$

$$V^2 = | \alpha \times X |$$

質量

X

慣性速度エネルギー

$$E_v = \frac{mV^2}{2}$$

速度の2乗 = 力 × 変形

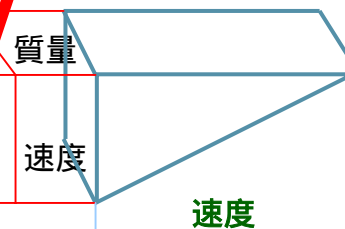
速度

復元力(弾性力)エネルギー

$$E_r = \frac{kX^2}{2}$$

運動エネルギーの大別

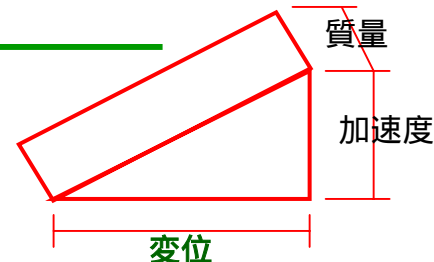
- 慣性速度エネルギー
- 慣性力エネルギー (復元力エネルギー)



速度を時間で積分すると変位 (速度 × 時間 = 変位)

振動数

$$f = \frac{V}{2\pi X}$$

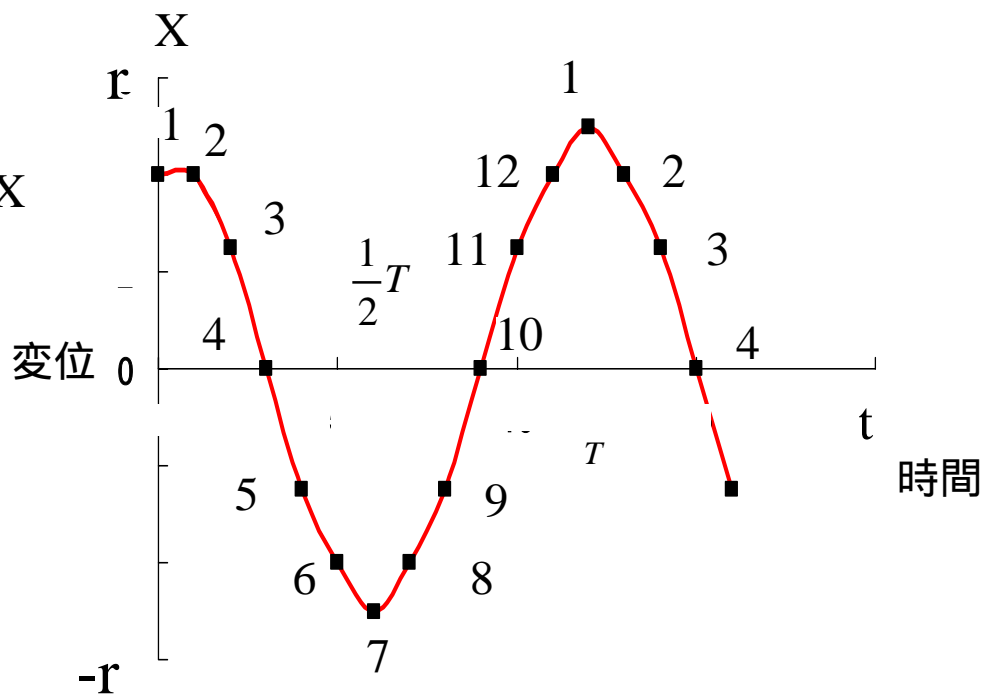
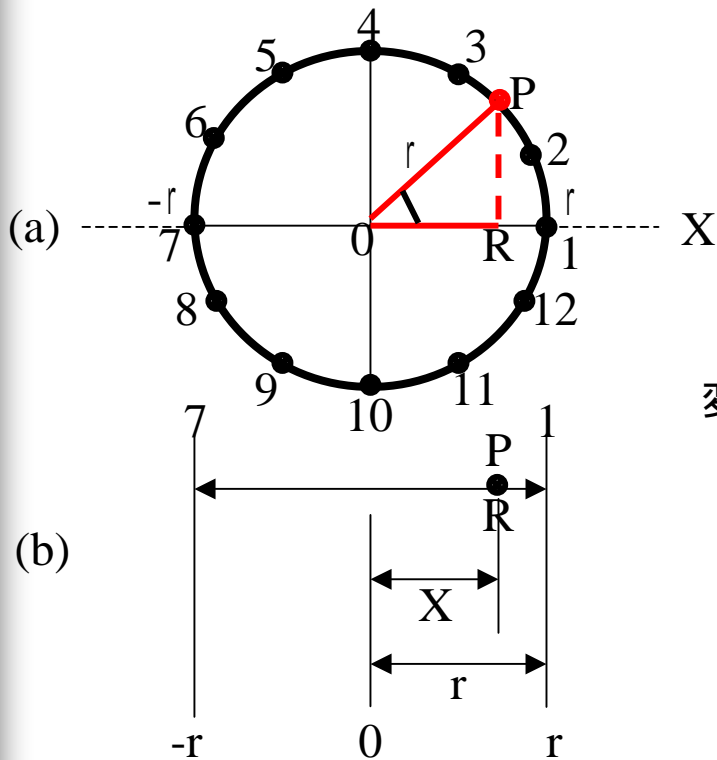


慣性力エネルギー

$$E_f = \frac{m\alpha}{2} \times X$$

変位を時間で微分すると速度

# 等速円運動と単振動



$$X(\theta) = OR = r \cos \theta$$

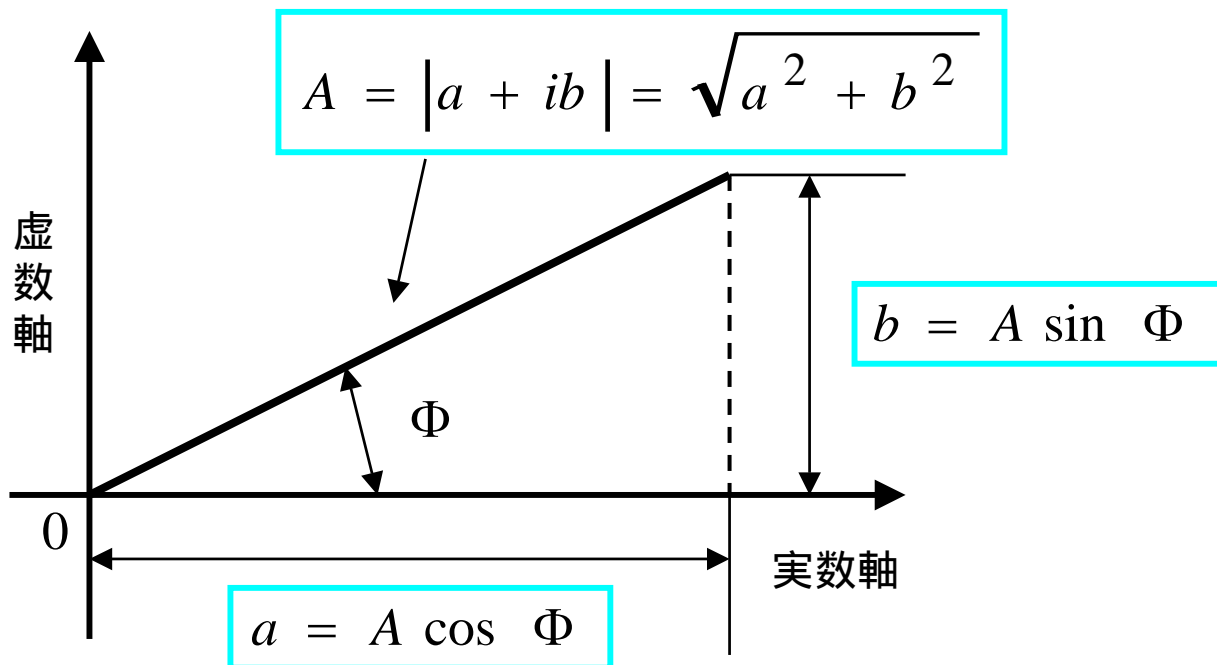
$$\theta = \omega t$$

$$X(t) = r \cos \omega t$$

$$X(t) = r \cos \frac{2\pi}{T} t$$

# 複素振幅とは..

## 複素座標(ガウス平面)



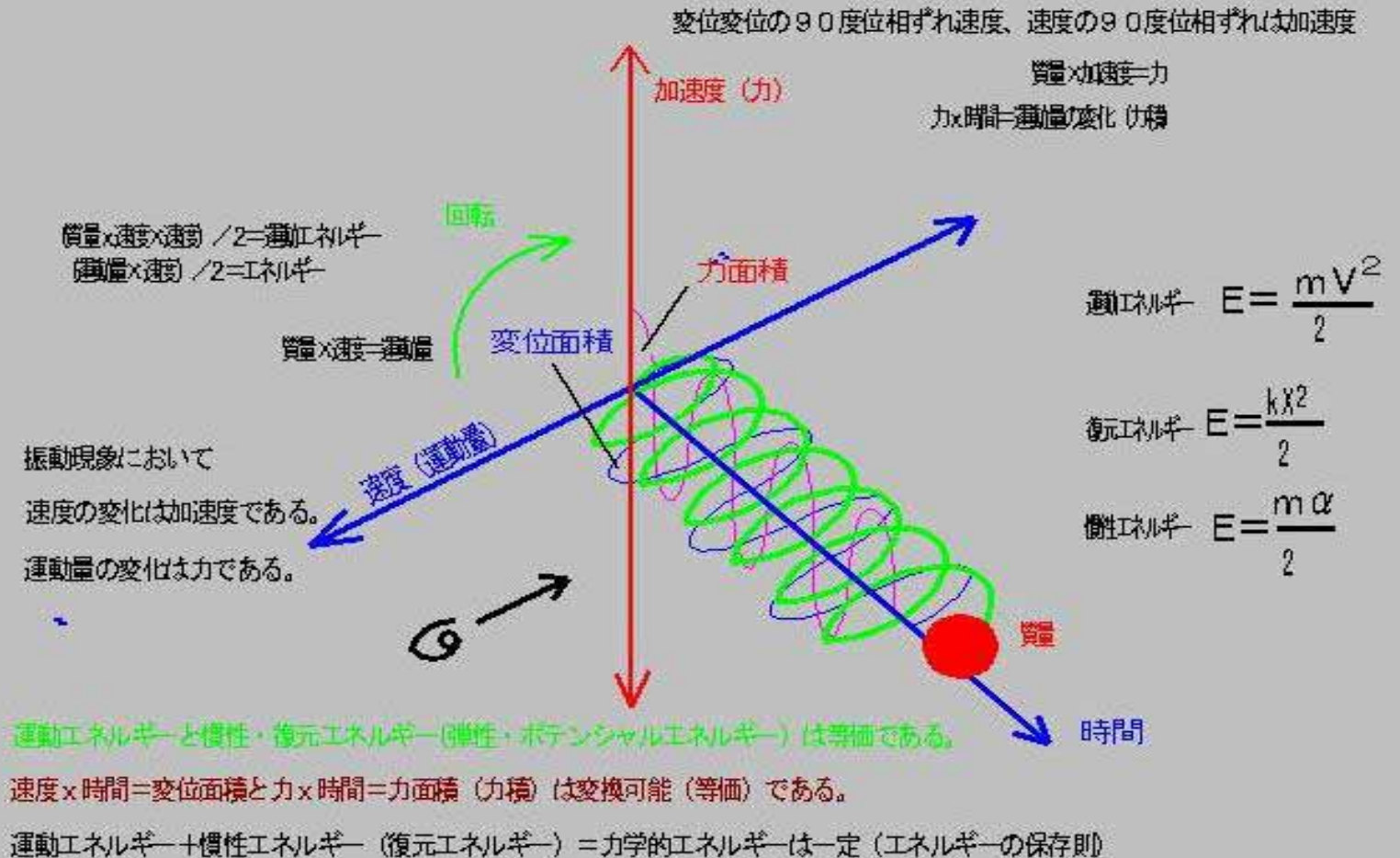
$$A = |a + ib| = \sqrt{a^2 + b^2} ; \text{振幅}$$

(複素振幅) (実数) (虚数)

# 螺旋による振動エネルギー概念図

## 振動エネルギーのスパイラル変換図

質点の運動エネルギーの変化は運動量変化と速度のスカラ積に等しい。



# 振動方程式

$A$  : 加速度

$\omega$  : 円振動数

$V$  : 速度

$D$  : 変形

$T$  : 固有周期

$$\frac{A}{\omega} = V = \omega D$$

$$\frac{T}{2\pi} A = V = \frac{2\pi}{T} D$$

# 演 習

長さ2cmの棒が一定の回転速度で1秒間に5回転する時、棒の先端のX軸への投影点の移動速度、加速度の振幅を求めよ

速 度

カイン

$$V = a\omega = a \cdot 2\pi f = 2 \cdot 2\pi \cdot 5 = 20\pi \quad 62[\text{cm/sec}]$$

加 速 度

$$A = a\omega^2 = a \cdot (2\pi f)^2 = 2 \cdot (2\pi)^2 \cdot 5^2 = 200\pi^2$$

$$1974[\text{cm/sec}^2] \quad 2[g]$$

ガル (gは重力加速度)

# 弾性定常振動における変形・速度・加速度 固有周期相関図

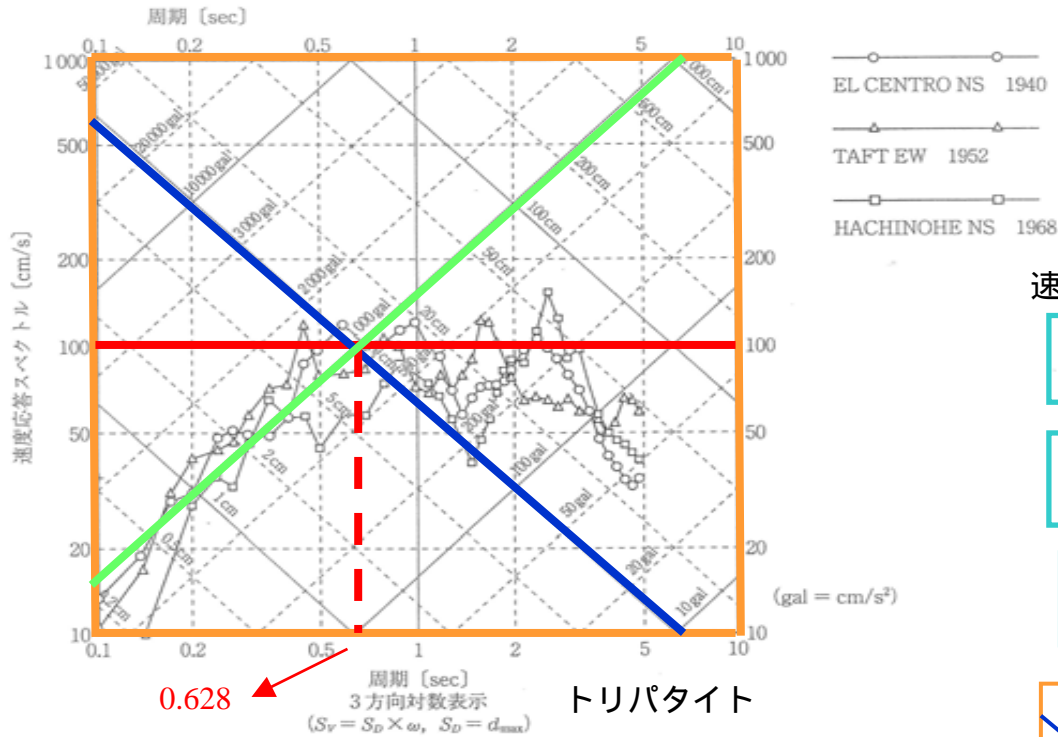


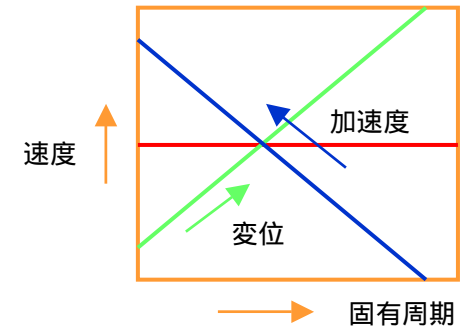
図4・6 観測地震動の応答スペクトル (レベル2 減衰:  $h=5\%$ )

固有周期

$$T = \frac{2\pi X}{V}$$

$$T = \frac{2 \times 3.14 \times 0.1}{1}$$

$$= 0.628$$



# 振動方程式

$y$  : 建物変位

$M$  : 質量

$C$  : 減衰係数

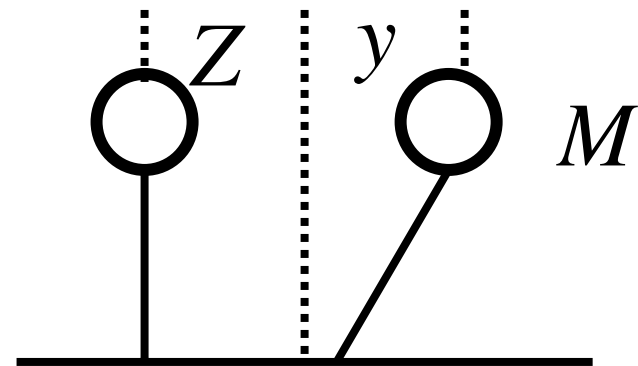
$F$  : 建物ばね定数

$Z$  : 地面の変位

$\dot{y}$  : 建物速度

$\ddot{y}$  : 建物加速度

$\ddot{Z}$  : 地面の加速度



$$M \ddot{y} + C \dot{y} + Fy = M \ddot{Z}$$



# 剛性・固有周期の関係式

$$K = \frac{Q}{\delta}$$

$K$  : 剛性

$Q$  : せん断力

$\delta$  : 変形

$T$  : 固有周期

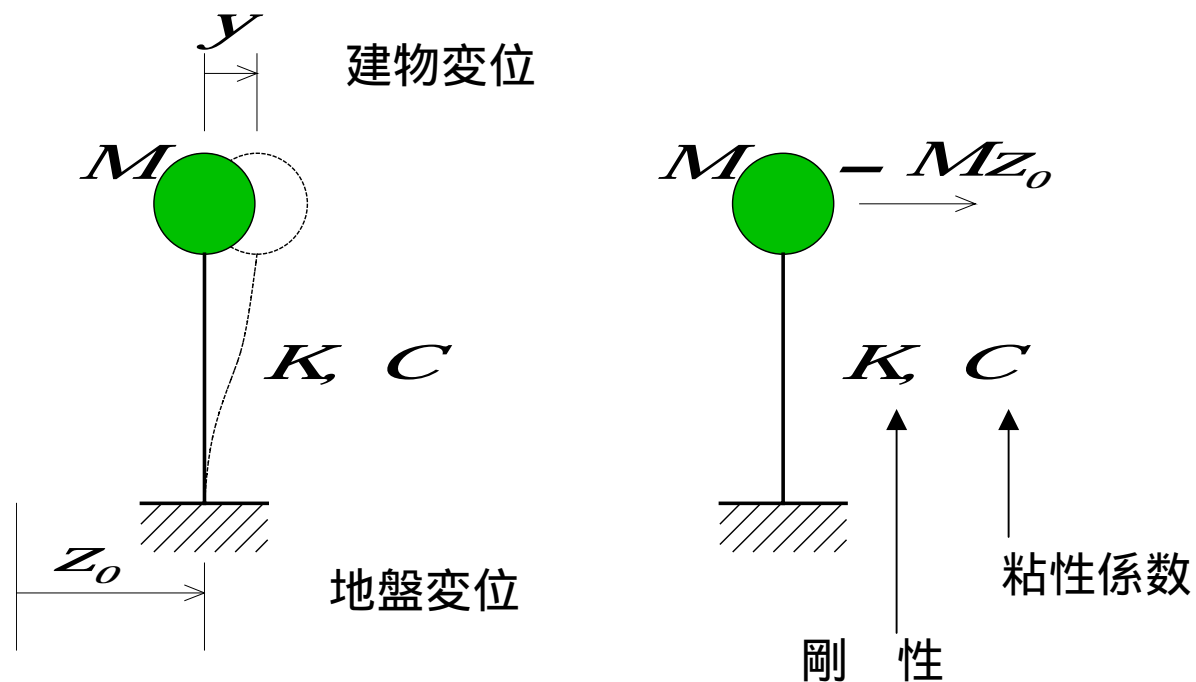
$M$  : 質量

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

# エネルギーの釣り合い式1 弾性状態

$$M \int_0^t \ddot{y} y dt + C \int_0^t \dot{y}^2 dt + \int_0^t K y \dot{y} dt = -M \int_0^t \ddot{z}_0 \dot{y} dt$$

運動エネルギー      減衰エネルギー      復元エネルギー      入力エネルギー  
 (弾性歪エネルギー)      (力×変形)



運動エネルギー + 復元エネルギー = 弾性振動エネルギー

## エネルギーの釣合い式2 弾塑性状態

$$E_e + E_{nd} + E_{add} + E_p = E_{ext}$$

$E_e$  : 弾性振動エネルギー（運動エネルギー + 弾性歪エネルギー）

$E_{nd}$  : 自然減衰（構造減衰）による消費するエネルギー

$E_{add}$  : ダンパーにより消費するエネルギー

$E_p$  : 構造物内部の累積塑性ひずみエネルギー

$E_{ext}$  : 地震入力エネルギー

# 地震エネルギーの入力

$$E_{ext} = \frac{MV_E^2 (T)}{2}$$

$M$  : 構造物の全質量

$T$  : 構造物の1次固有周期

$V_E = \dot{y}_{max}$  : 等価速度

# 構造物内部の累積塑性ひずみエネルギー

「秋山の提案式」

$$E_p = \frac{MV_E^2}{2} \times \frac{1}{(1 + 3h + 1.2\sqrt{h})^2}$$

$h$  : 減衰定数

$M$  : 建物質質量

$V_E$  : 等価速度

損傷係数  $D_f$

$h = 5\%$  ( $D_f = 0.5$ ) と  $h = 15\%$  ( $D_f = 0.273$ ) は  
損傷が  $\frac{1}{1.83}$  になると言える。

# 減衰定数算定式

$$heg = \frac{1}{4\pi} \bullet \frac{\Delta W}{W}$$

$heg$  : 減衰定数

$\Delta W$  : 1サイクルの消費エネルギー  
(三角形 O A B 面積)

$W$  : ポテンシャルエネルギー

$$\frac{1}{2} \bullet \Delta \bullet Q$$

# 減衰係数は減衰定数に剛性を乗じたものに比例する

$$2h\omega_0 = \frac{C}{m}$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$C = m \cdot 2h \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$C = \frac{2k}{\omega_0} \cdot h = 2\sqrt{mk} \cdot h$$

$$h = \frac{C\omega_0}{2k} = \frac{C}{2\sqrt{mk}}$$

$$\omega_0 = 2\pi f$$

$$h = \frac{C \cdot \pi \cdot f}{K}$$

$$C = \frac{2k \cdot h}{2\pi f} = \frac{k \cdot h}{\pi f}$$

$$C = \frac{T \cdot k \cdot h}{\pi}$$

$$h = \frac{C \cdot \pi}{T \cdot k}$$

# 減衰定数を用いない等価粘性減衰係数式

$$C_{eq} = \frac{W}{\omega X^2}$$

$\Delta W = 1$ サイクルの消費エネルギー

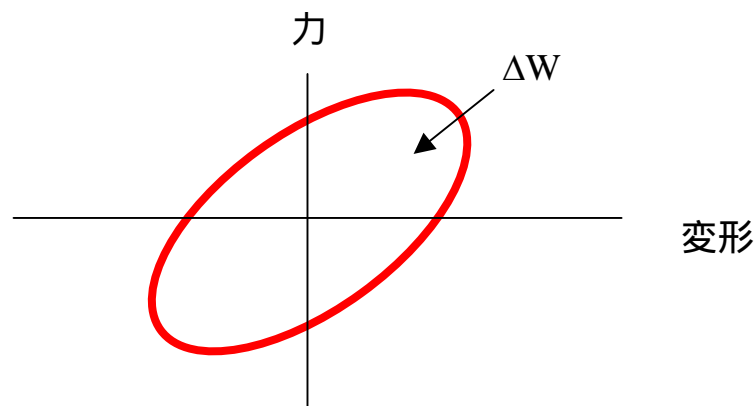
$C_{eq}$  = 等価粘性減衰

$$\omega = 2\pi f$$

$X$  = 振動振幅       $\omega$  = 入力波円振動数

$$C_{eq} = \frac{W}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X^2} = \frac{W}{2^2 \cdot f \cdot X^2}$$

振動数と振幅に依存する





# 摩擦履歴による等価粘性減衰係数式

$$\pi C \omega D^2 = 4FD$$

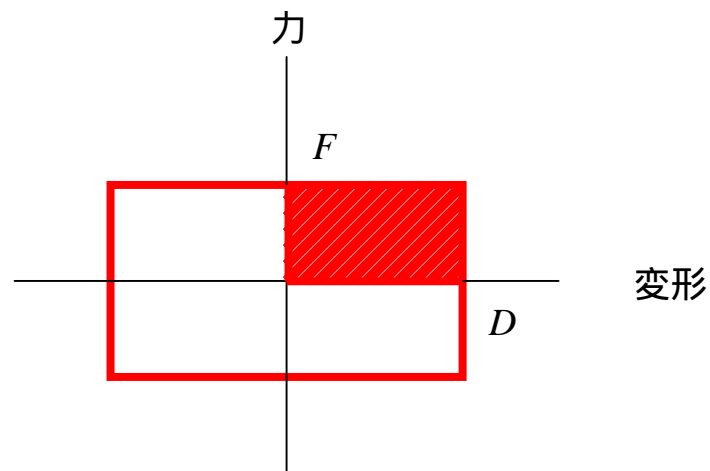
$\pi C \omega D^2 =$  粘性抵抗により1サイクル中に失うエネルギー

$4FD =$  摩擦抵抗により1サイクル中に失うエネルギー

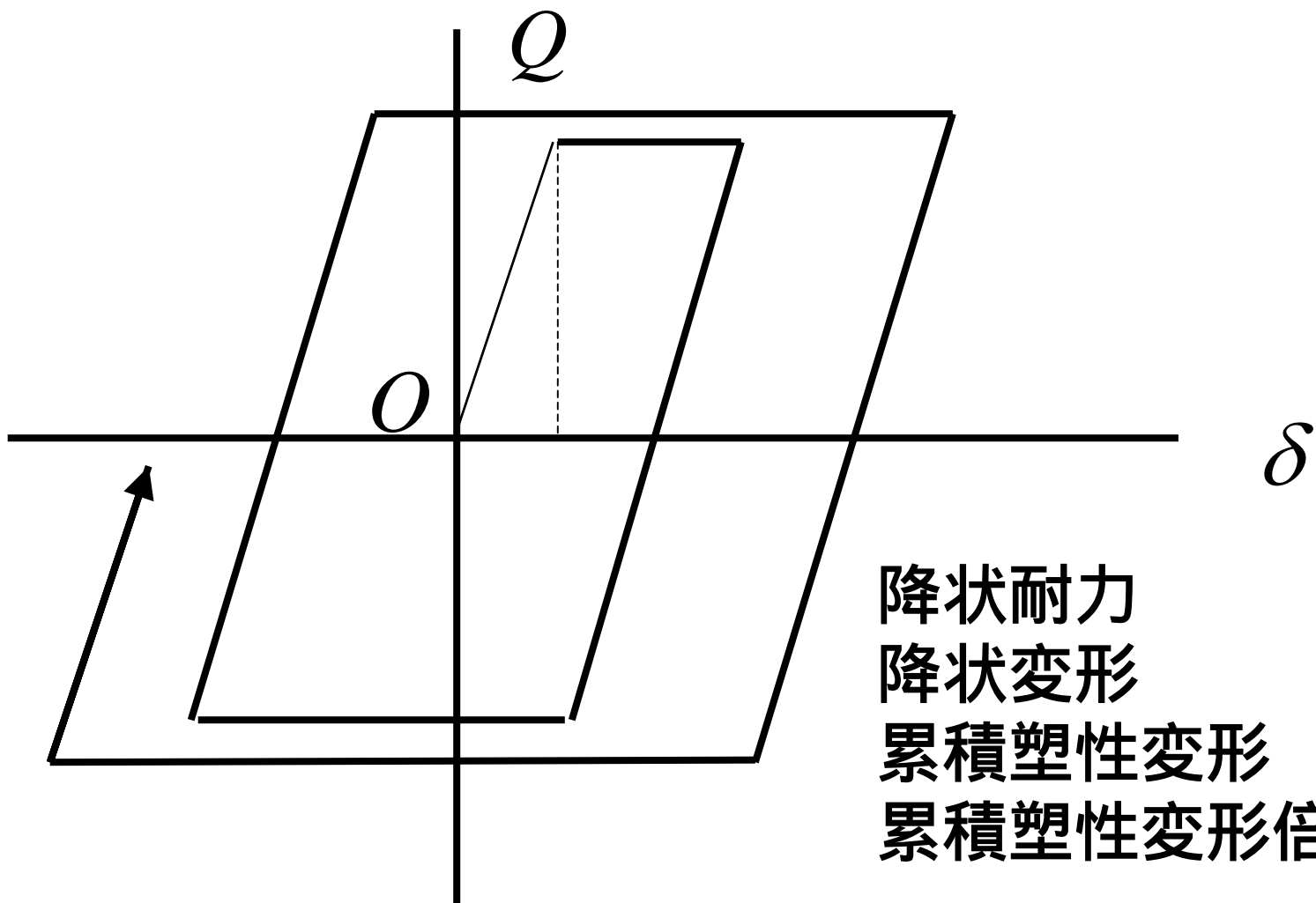
$$C = \frac{4F}{\omega \cdot D}$$

$D =$  振動振幅

$\omega =$  円振動数



# 完全弾塑性復元力特性図



降状耐力  
降状変形  
累積塑性変形  
累積塑性変形倍率

# 等価粘性減衰式の変換

式

$$C = \frac{2K \cdot h}{2\pi f}$$

$$= \frac{2K \cdot h}{\omega}$$

式 ( 式に 式を代入 )

$$C = \frac{2K \cdot \frac{\Delta W}{2\pi K X^2}}{\omega}$$

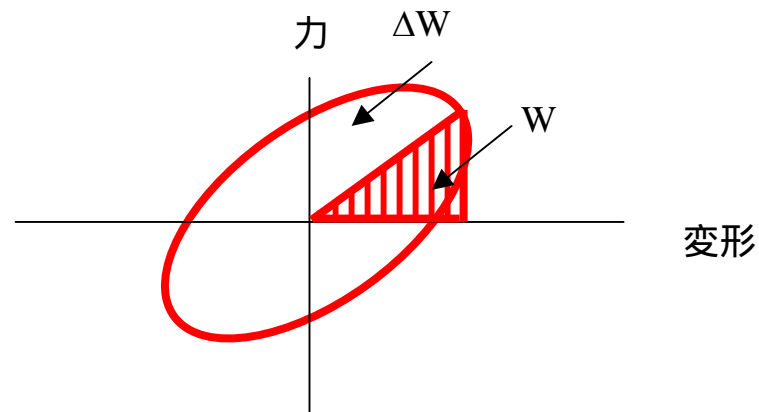
$$= \frac{\Delta W}{\omega \pi X^2}$$

式

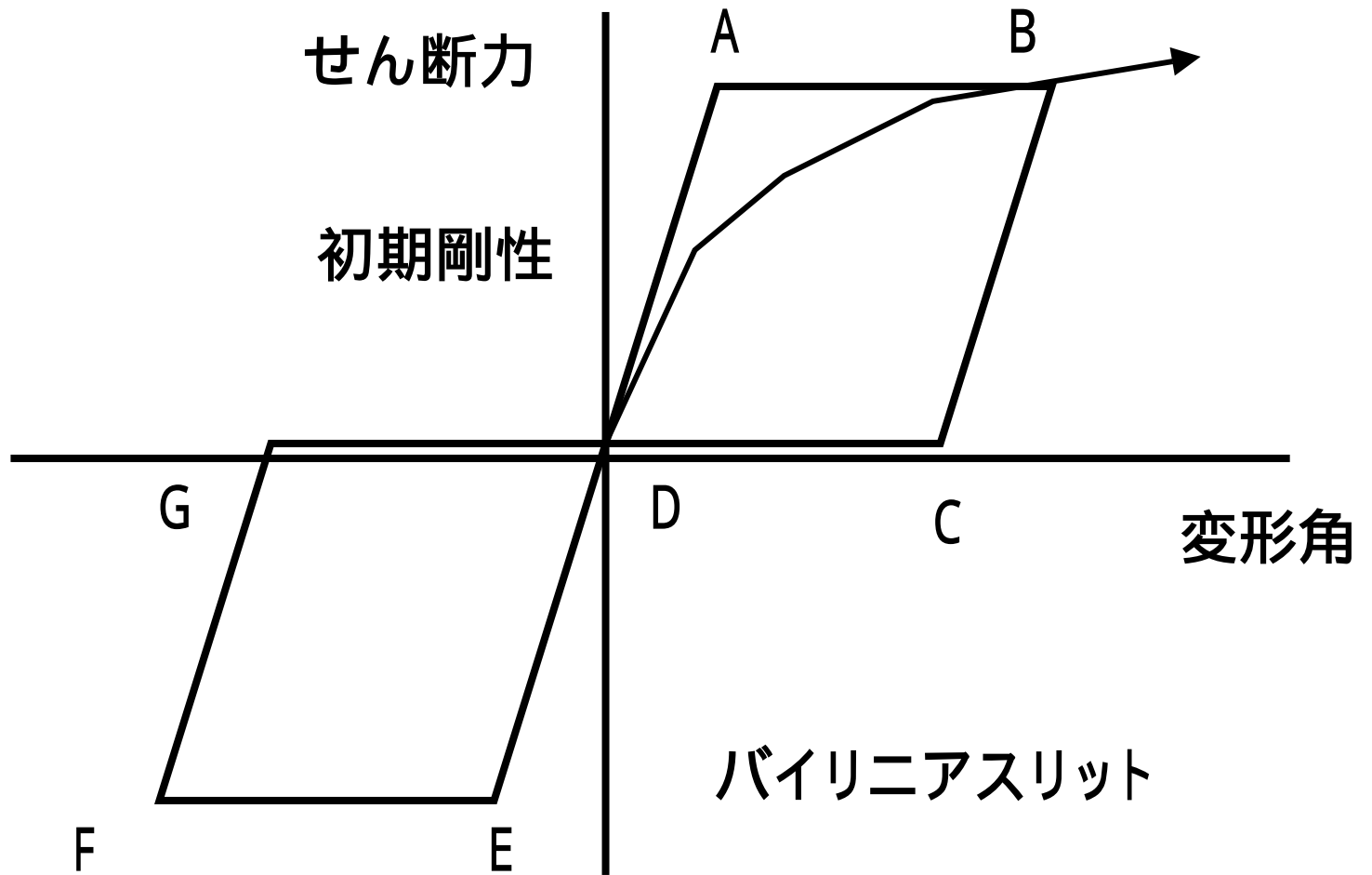
$$h = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$$

$$= \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{\frac{1}{2} K X^2}$$

$$= \frac{\Delta W}{2\pi K X^2}$$



# 木造軸組みの履歴特性



# エネルギー消費デバイス

## 粘性(オイル)ダンパー

液体状の粘性力を減衰力とするものでオイルダンパーが代表的である。速度・振動数に比例して減衰抵抗が増すのが特徴である。

## 粘弾性ダンパー

弾性と粘性の性質を持つ材料の力学特性を利用する粘弾性材料を使用したダンパー。ジェン系ゴム・アクリルゴム・シリコンゴムが良く使用される。小変形から大地震まで履歴特性を発揮する。速度と変形と温度条件に依存する特質を持つ。

## 履歴(金属)ダンパー

鋼材ダンパーとも呼ばれ極軟鋼・鉛が使われる。変形に依存し耐力を発揮する。

## 摩擦ダンパー

摩擦減衰を利用するもので金属・石材・セラミックス等があるがステンレスが安定した履歴形状を示す。

制震システム

1

## テコの原理を応用した制震パネル MGEO (ミサワホーム)

**特徴** 地盤や敷地、プランの制約を受けずに取り付け可能で、地震の規模を問わず性能を発揮する。基本的にはミサワホームの新築住宅向けで、既存住宅の耐震改修向けに販売するかどうかは現在検討中

**性能 (メーカー発表)** 建物の変形を最大2分の1程度に軽減する

**工期** 新築の場合は工期に影響しない

**仕組み** 木質パネルの中の独自の複合テコ原理を応用した変位拡大機構と、制震ダンパーを組み込んだ「制震パネル」が、地震のエネルギーを熱に変換して揺れを吸収する

**価格** 50万円/棟 (床面積100m<sup>2</sup>の場合)

**URL** <http://www.misawa.co.jp/mgeo/>

テコの原理を応用

高減衰ゴムのダンパー

制震パネルモジュール



## 鉛の流動抵抗でエネルギーを吸収 鉛制振ダンパー（住友金属鉱山）

**特徴** 鉛の流動抵抗によって振動エネルギーを吸収する。小変位から大変位まで安定した性能を得られる。独自のシール構造によって少部品化、小型化を実現した。現在商品開発中で、発売時期は未定

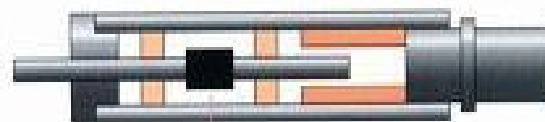
**性能（メーカー発表）** 実大実験では建物の揺れが3分の1になった

**工期** 未定

**仕組み** 鉛の塑性流動抵抗を利用したシリンダー型制震ダンパーを建物のブレースに組み込む

**価格** 未定

直径40mmとコンパクト



鉛の流動抵抗

制震システム

### 3

## 日本家屋も補強可能 仕口ダンパー (鴻池組)

**特徴** 梁と柱の接合部に取り付ける方式なので、壁が少ない日本家屋なども補強可能。床下や天井裏に取り付けても効果がある

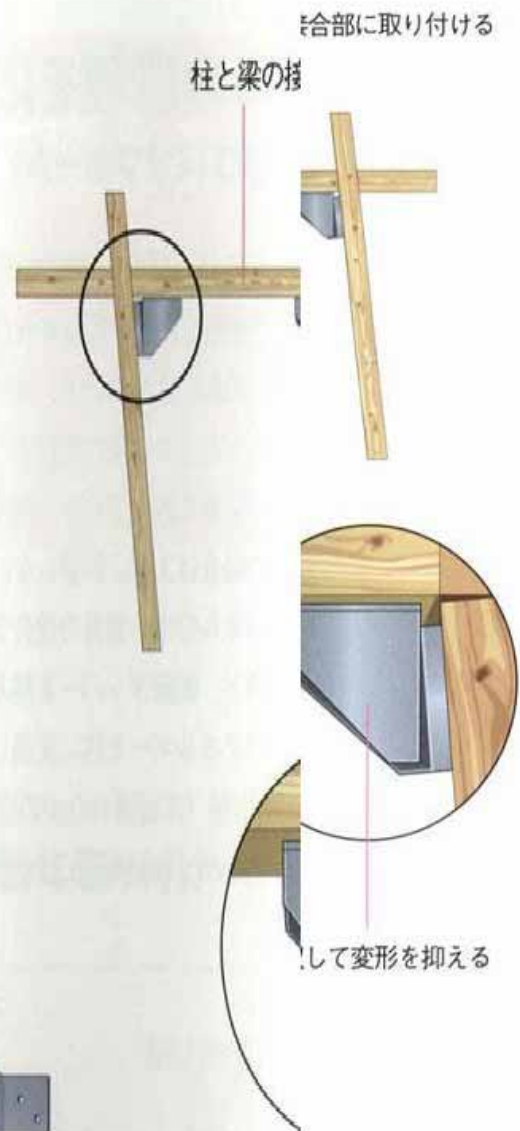
**性能 (メーカー発表)** 大地震による軸組の変形を2~5割小さくできる

**工期** 2日から4日程度

**仕組み** 高分子材料のエネルギー吸収材を特殊接着で挟み込んだステンレス製ダンパーを、柱と梁の接合部などに取り付ける。このダンパーが変形して揺れのエネルギーを吸収する

**価格** 90万円/1棟 (床面積132m<sup>2</sup>の場合)

**URL** <http://www.konoike.co.jp/tec/gk-shiguchi.html>





制震  
システム

4

## 既築住宅にも簡単に設置できる GHハイブリッド制震工法(江戸川木材)

**特徴** 新築だけでなく、既築住宅にも簡単に設置できる高性能な耐震補強システム。高層ビルなどで使用されているオイルダンパーを初めて戸建て住宅に適用した

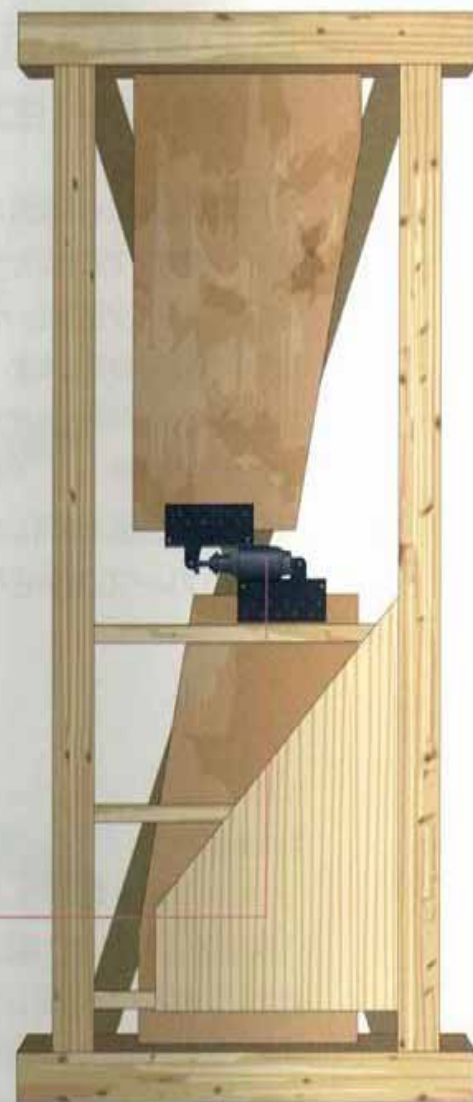
**性能 (メーカー発表)** 実験で阪神大震災クラスの揺れを約70%抑制した

**工期** 2日から5日程度

**仕組み** 揺れを吸収するオイルダンパーを特殊パネルの中に組み込んだ

**価格** 外壁用12万円、内壁用15万円 (パネル1枚当たりの価格)

**URL** <http://www.edogawamokuzai.co.jp/>



オイルダンパー

パネル構造

制震システム

5

## 筋かいとダンパーで二枚腰の粘り強さ GVA工法 (GVA工法友の会)

**特徴** 木造筋かい制振構造。粘弾性体ダンパーで地震の衝撃を吸収・減衰し、筋かいの高い剛性で揺れに耐える「二枚腰の粘り強さ」を持つ工法

**性能 (メーカー発表)** 筋かいにGVA制振ダンパーを取り付けて、地震の揺れを3分の2に低減した

**工期** 1日から2日

**仕組み** 強い粘りを持つ粘弾性体を二重にサンドイッチした制振金具が、地震による振動エネルギーを吸収。建物が揺れると梁と土台のダンパーが左右にずれるように動き、粘弾性体が振動エネルギーを熱エネルギーに転換する

**価格** 40万円/1棟 (床面積132m<sup>2</sup>の場合)

**URL** <http://www.gva-tomo.com/>



筋かいパネル

GVA制振ダンパー

制震システム

## 6

# 柱と梁の結合部で揺れを吸収

## ガルコンV (安全保障システム)

**特徴** 既存・新築の木造住宅に使用可能。柱と梁を弾力性のある特殊な金物で結合して揺れを軽減させる。特殊な接合剤を表面に塗った専用ねじで金物を取り付けるのがポイントだ

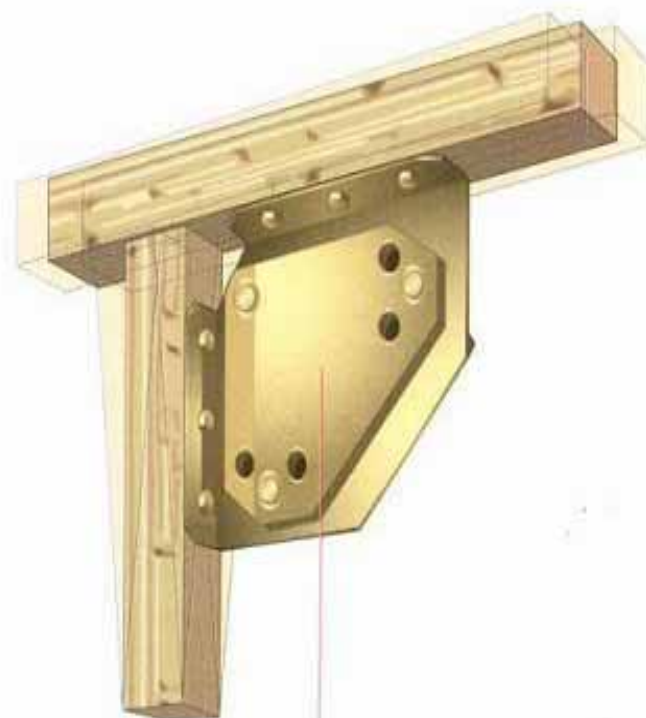
**性能 (メーカー発表)** 地震の揺れを2分の1から3分の1に軽減

**工期** リフォームの場合で2～4日、新築の場合は約半日

**仕組み** 特殊粘弾性体を挟み込んだ制震金具で地震の揺れを吸収させ、揺れを抑える。金具は床面積3.3㎡当たり1個の割合で取り付ける

**価格** リフォームの場合70万～100万円、新築の場合約50万円 (床面積100㎡の場合)

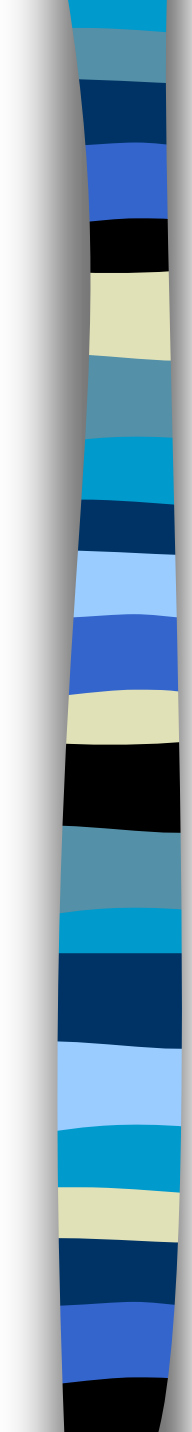
**URL** <http://www.anzen-sys.com/>



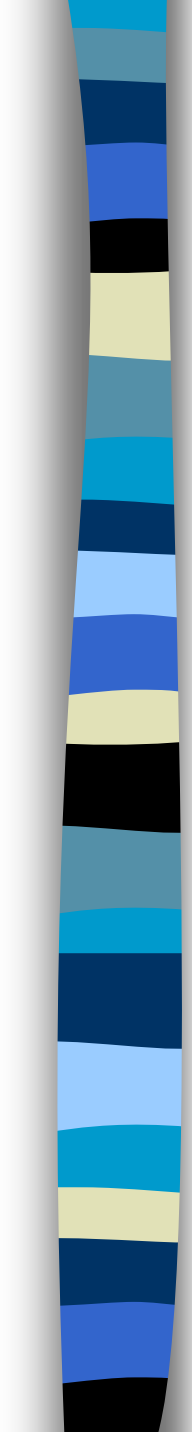
特殊粘弾性体で揺れを吸収

# 解析法の種類

1. 簡易静的慣性解析 (令46条)
2. 静的弾性解析 (許容応力度法)
3. 静的弾塑性解析 (保有耐力設計法)
4. 動的等価弾塑性解析 (限界耐力法)
5. 動的弾塑性解析 (エネルギー法)
6. 動的弾性振動解析 (時刻歴応答)
7. 動的弾塑性振動解析 (時刻歴応答)
8. 損傷制御設計法 (制振・免震工法)



## 2. 木造住宅の耐震、 制震の振動解析 による検証



ダンパー比較計算書 2006.11.2ポリテク講習資料

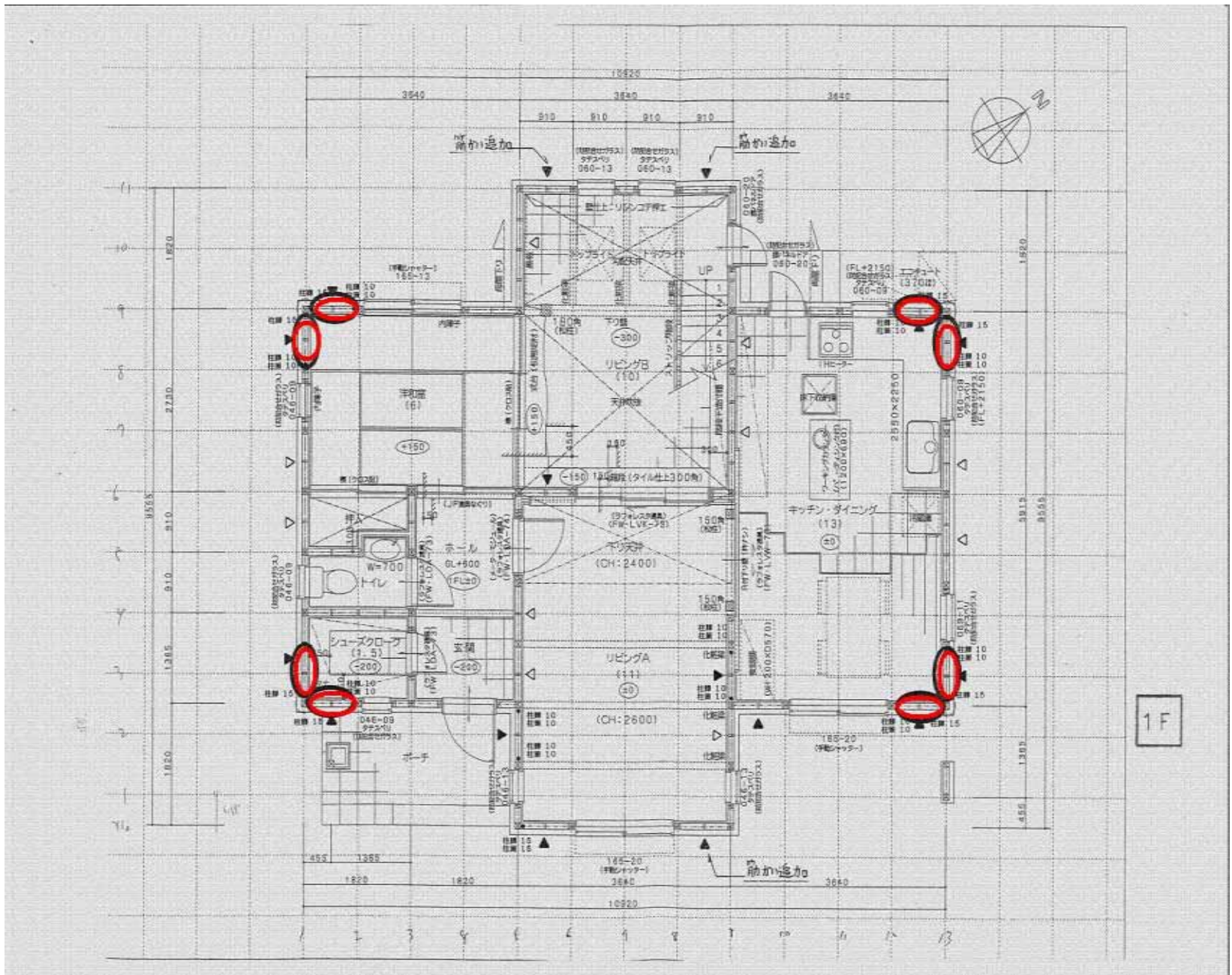
地震時振動応答解析書  
ダンパー性能比較  
2階建て在来軸組み工法

○邸新築工事

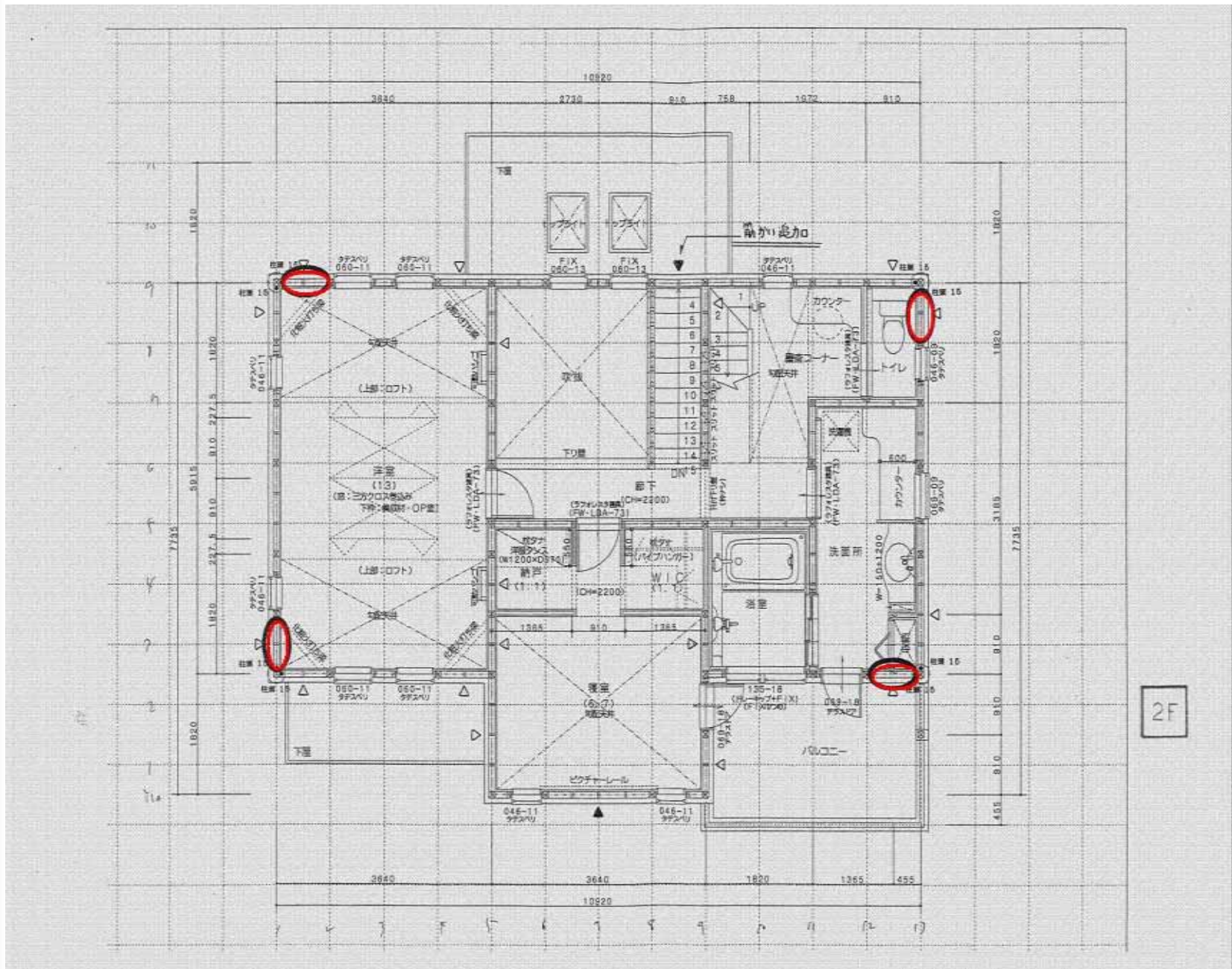
依頼者 (株)グレイプ  
作成日 2006.10.31

作成者 有)M A S A 建築構造設計室





1F



2F



# 解析条件

(株)グレイプよりの設計図書に基づき壁量、重量を使用する。

地震力の方向はX方向とする。現状の耐力要素は筋かい45x90 とする。

其の1：現状は令46条壁量（地震力）の1階1.2倍、2階1.5倍として解析する。

其の2：現状補強は令46条壁量（地震力）の1階1.8倍（現状1.5倍）、2階2.25倍(現状1.5倍)として解析する

其の3：制振ダンパー補強は現状壁量に対してGVA-45RD2を全数12Pの内1階片側4P・2階片側2Pとして解析する。

# 解析方法

解析方法は多質点系弾塑性地震応答解析（ソフト名構造システムDAP v1）

入力地震波はJMAkobe-NSとする。

地震のレベルは25カイン、50カインとする。  
（約 250ガル、500ガル）

復元力特性は標準バイリニア型（BL2）+バイリニアスリップ型（SL2）を使用する。

標準の減衰定数は  $h = 0.10$  とする

# 弾塑性地震応答解析

## 50カイン 最大層間変位比較表 安全限界1/30以内とする

階	現状	現状1.5倍	現状 + ダンパー
2階	1/21 NG	1/37 OK	1/39 OK
1階	1/18 NG	1/22 NG	1/30 OK

## 残留変位(cm)

階	現状	現状1.5倍	現状 + ダンパー
2階	1	6	6
1階	15	12	8.5

# 制震学キーワード集

- 1:建物の速度を抑える自動車のブレーキの役割が減衰である。
- 2:粘弾性体制震工法は自動車の構造のサスペンションである。
- 3:柔剛論争にけりをつけた棚橋論文
- 4:エネルギーに着目した耐震設計法の秋山宏教授
- 5:弾性歪みエネルギーはエネルギーを吸収するが消散、消費はしない
- 6:揺れを制する 小堀鐸二 著 (鹿島出版会) 抜粋
- 7:共振、位相、同相、逆相、
- 8:等価粘性減衰の概念 チョプラ 構造物の動的解析(第2版) Anil. Chopra 著
- 9:スリップ型履歴の弾塑性挙動の特性
- 10:選択共振
- 11:構造減衰
- 12:地震動の破壊力
- 13:地震動の破壊力
- 14:力の尺度をめぐる論争
- 15:力のキーワード
- 16:層内並列バネ・層内直列バネ・各層直列バネ・各層並列バネ
- 17:地震力はパワーをもつ振動エネルギーです。
- 18:建物は弾性範囲を超えると塑性状態に移行する。
- 19:木造建物は一部の階だけ面材(合板、筋かい)を増やすと逆に危険になる。
- 20:構造専門用語の定義は重要