

# 防災工学

## 第5回

千葉大学 工学部 都市環境システムコース

丸山 喜久

<http://ares.tu.chiba-u.jp/marulab/index.html>

[ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp](mailto:yमारuyam@tu.chiba-u.ac.jp)

# 震度と物理量の関係

## 震度と加速度

■気象庁震度階(I)と最大加速度PGA(cm/s<sup>2</sup>)の関係の中央値

河角式:  $I =$

旧東大地震研地下2階(地表面でない)の石本式加速度計による(河角,1943)

### 震度と加速度の関係の問題点

- 同じ加速度でも周期が長い方が揺れを感じる
- 最大(瞬間)加速度より継続時間が問題
- 加速度計の感度向上により、従来の関係式が合わなくなる

震度は直接測れないため、15年前までは河角式の関係が都市基盤施設の地震時制御に使われていた。

- 高速道路の通行止め基準(旧):  $I = 4.5$  を代入し  
JRの運転中止基準(旧) (震度4と5の境)
- 都市ガスの供給停止基準(旧):  $I = 5.5$  を代入し  
(震度5と6の境)

## 計測震度

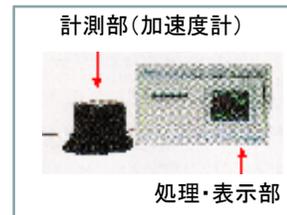
地震計(震度計)で観測された加速度波形から計算して求める。  
世界初の機械計測による震度決定

### 計測化の主な利点

- ① (結果からの推定から入力へ)
- ② 無人観測で, (約100点から約4000点へ)
- ③ データ収集の自動化による  
(兵庫県南部地震における震度7決定の遅れ:3日後)

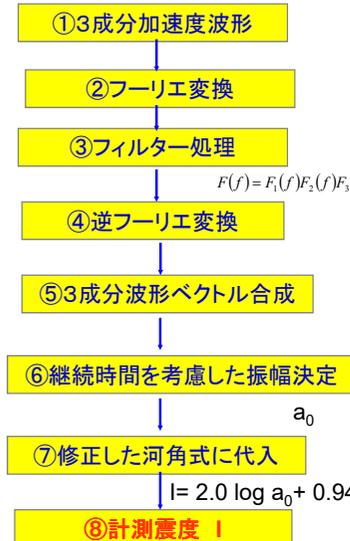
### 計測震度計の全国配備

- 小数点以下1桁の精度、四捨五入で震度表示
- 従来震度との整合性に配慮
- 気象庁約600地点、自治体約3300地点で観測(1999年)



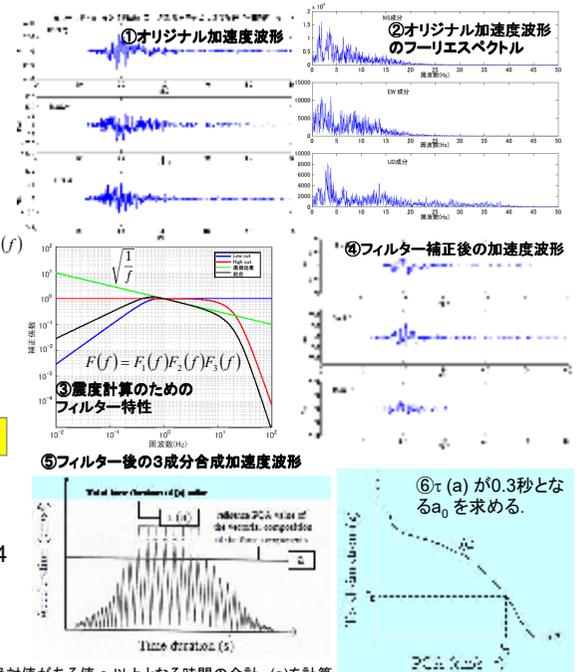
計測震度計

## 計測震度の計算法

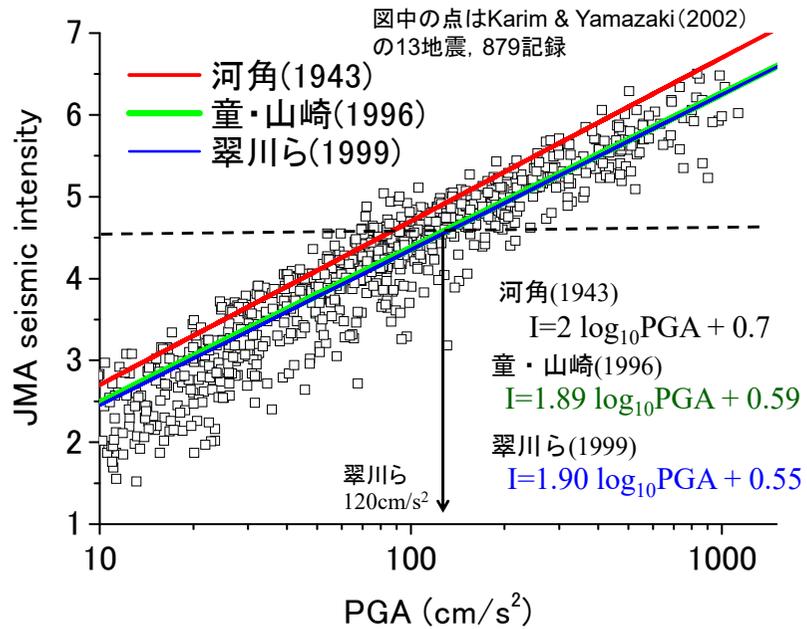


計算されたIの小数第3位を四捨五入し、小数第2位を切り捨てたものを計測震度とする

<http://www.seisvol.kishou.go.jp/cq/kyoshin/kaisetsu/> 絶対値がある値 a 以上となる時間の合計τ (a)を計算 calc\_sindo.htm#orig\_wave

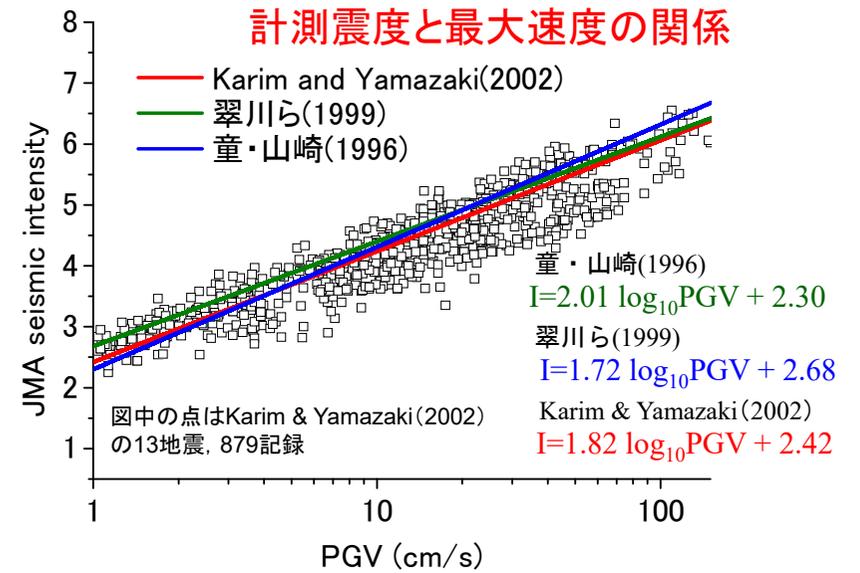


## 計測震度と最大加速度の関係



5

## 計測震度と最大速度の関係



最大加速度と最大速度を両方使うとより高い計測震度の推定精度が得られる。

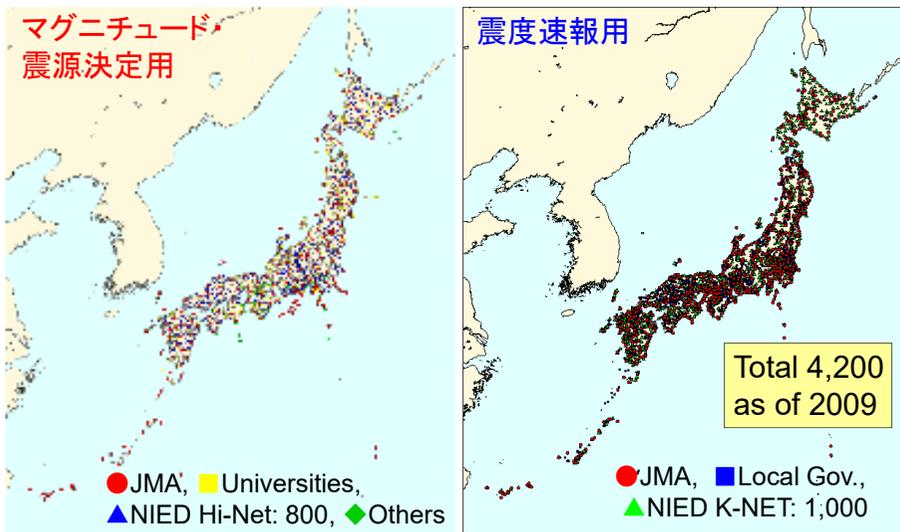
K & Y (2002)  $I=1.00 \log_{10}PGA + 0.95 \log_{10}PGV + 1.31$

翠川ら(1999)  $I=1.02 \log_{10}(PGA * PGV) + 1.25$

6

## 日本における気象庁他の地震計

1995年兵庫県南部地震の時は気象庁地震計は約100箇所



[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/intens\\_st/index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/intens_st/index.html)

7

## 世界の震度

:アメリカ等の海外で最も広く使用される。

Modified Mercalli intensity (MMI) scale:

I(無感)から XII(完全に近い破壊、巨岩が移動、物が飛ぶ、地面が変形する)まで

→ 日本の動きも参考に計測化・速報へ (ShakeMap)

:旧共産圏を中心に広く使用される。I-XIIの12段階

建物の耐震性をクラス別に定義し、それぞれの耐震クラスの被害程度で各地の震度を判定する震度階級。(考案者のロシアのMedvedev、ポーランドのSponheuer、チェコスロバキアのKárníkの頭文字)



(European Macroseismic Scale: EMS-98):

チャート図を見ながら被害程度を判定できるなどMSK震度階を改良したもの。EU諸国を中心に広く用いられている(最新版は1998年版)

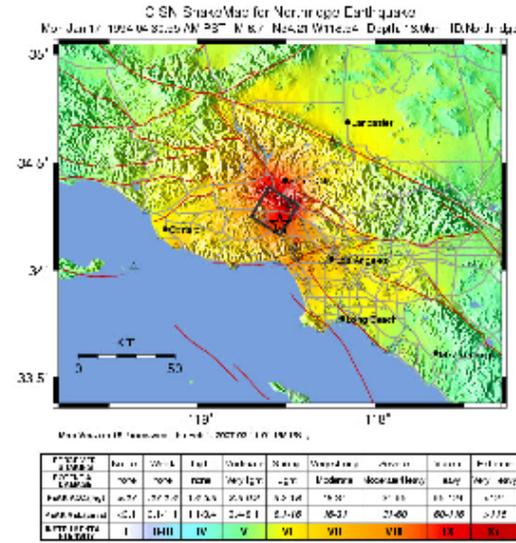
8

# MMIの解説

<http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mercalli.php>

- I. Not felt except by a very few under especially favorable conditions. 大体の目安: 気象庁震度 0
- II. Felt only by a few persons at rest, especially on upper floors of buildings. 気象庁震度 1
- III. Felt quite noticeably by persons indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated. 気象庁震度 2-
- IV. Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably. 気象庁震度 2+
- V. Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop. 気象庁震度 3
- VI. Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight. 気象庁震度 4-
- VII. Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken. 気象庁震度 4+
- VIII. Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned. 震度 5弱 震度 5強
- IX. Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations. 震度 6弱-
- X. Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent. 震度 6強
- XI. Few, if any (masonry) structures remain standing. Bridges destroyed. Rails bent greatly. 震度 7
- XII. Damage total. Lines of sight and level are distorted. Objects thrown into the air. 震度 7++

# USGSの計測MMIとShakeMap



USGS: US Geological Survey  
米国地質調査所

- 米国でも最近、災害緊急対応を目的とした震度速報を開始した。
- 最大加速度(低震度域)または最大速度(高震度域)からMMIを推定し、ShakeMapを作成して速報する。

Wald ら(1999)  
For the limited range of Modified Mercalli intensities  
 $V \leq I_{mm} \leq VIII$  for PGA,  
 $I_{mm} = 3.66 \log (PGA) - 1.66$   
 and within  $V \leq I_{mm} \leq IX$  for PGV,  
 $I_{mm} = 3.47 \log (PGV) + 2.35$

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/>

## IX. Destructive

## ヨーロッパ震度階 (EMS-98)

- a) General panic. People may be forcibly thrown to the ground.
- b) Many monuments and columns fall or are twisted. Waves are seen on soft ground.
- c) Many buildings of vulnerability class A sustain damage of grade 5. Many buildings of vulnerability class B suffer damage of grade 4; a few of grade 5. Many buildings of vulnerability class C suffer damage of grade 3; a few of grade 4. Many buildings of vulnerability class D suffer damage of grade 2; a few of grade 3. A few buildings of vulnerability class E sustain damage of grade 2.

I-XIIの12段階  
建物の脆弱性クラスと被災度の組合せで判定

構造物ごとの被災度判定表(例:RC造)

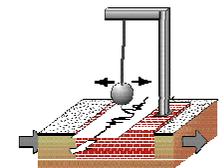
Grade	Structure Type	Damage Description
G1	RC造	軽微な損傷
G2	RC造	軽微な損傷
G3	RC造	軽微な損傷
G4	RC造	軽微な損傷
G5	RC造	軽微な損傷

構造物ごとの脆弱性クラス

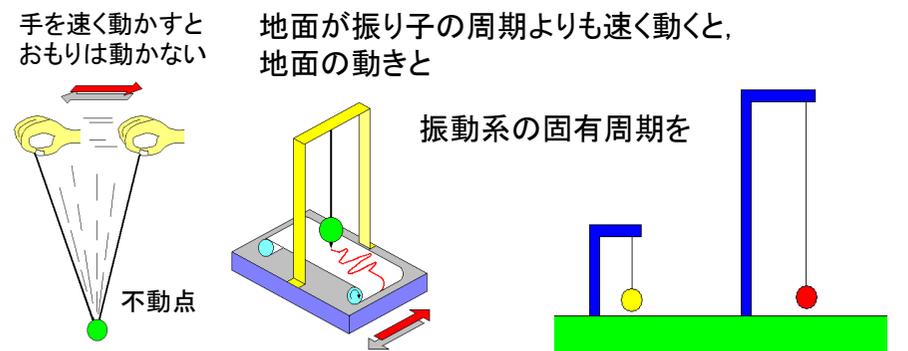
Structure Type	Grade	Damage Description
組積造	0	軽微な損傷
	1	軽微な損傷
	2	軽微な損傷
	3	軽微な損傷
	4	軽微な損傷
RC造	0	軽微な損傷
	1	軽微な損傷
	2	軽微な損傷
	3	軽微な損傷
	4	軽微な損傷
木造	0	軽微な損傷
	1	軽微な損傷
	2	軽微な損傷
	3	軽微な損傷
	4	軽微な損傷
S造	0	軽微な損傷
	1	軽微な損傷
	2	軽微な損傷
	3	軽微な損傷
	4	軽微な損傷

## 地震計の原理

地震計: 地震による揺れを観測記録する計器  
seismograph (主として変位計), seismometer (広く地震計)



地震計の原理: 地面の動きを測るには基準点( )が必要  
振り子の原理に基づき揺れを観測する。  
紙にペン書き, または電気信号に変換して電子媒体に記録。



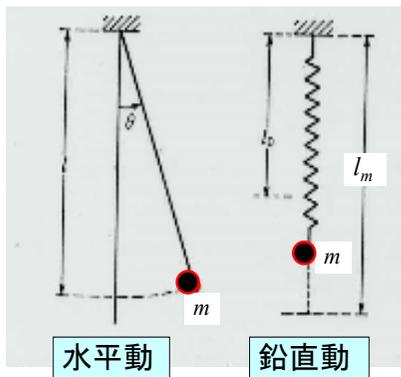
[http://www.hinet.bosai.go.jp/about\\_earthquake/sec9.1.htm](http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec9.1.htm)

<http://www.uwgb.edu/dutchs/2020vhds/quakes.htm>

## 質点の運動方程式

単振り子の固有周期

$$T_0 = \quad T_0 =$$



質点(おもり)の運動方程式

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = -m\ddot{u}(t) \quad (1)$$

$y(t)$  = 地面に対する質点の動き

$u(t)$  = 地面の動き

$c$  = 粘性減衰係数

$k$  = バネ定数.

系の固有円振動数

$$\frac{c}{m} = 2h\omega_0 \quad \text{減衰比} \\ \text{(減衰定数)}$$

これらを式(1)に代入すると

(2)

13

## 地震計の応答(1)

$$\ddot{y}(t) + 2h\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = -\ddot{u}(t) \quad (2)$$

地動加速度  $\ddot{u}(t)$  が、質点の変位  $y(t)$ 、速度  $\dot{y}(t)$ 、加速度  $\ddot{y}(t)$  から求められる。

地動変位が調和振動と仮定すると

$$(3) \quad \text{注} \quad e^{i\omega t} = \cos\omega t + i\sin\omega t$$

ここで  $\omega = 2\pi f$  は地動の固有円振動数、 $U(\omega)$  はその複素変位振幅。

地震計(質点)の変位応答も同様に表現できる。 (4)

したがって同様に、

$$\text{地動の加速度:} \quad \ddot{u}(t) = -\omega^2 U(\omega) e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$\text{地震計の変位応答:} \quad \dot{y}(t) = i\omega Y(\omega) e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\text{地震計の加速度応答:} \quad \ddot{y}(t) = -\omega^2 Y(\omega) e^{i\omega t} \quad (7)$$

14

## 地震計の応答(2)

式(3)-(7)を式(2)に代入し、共通項  $e^{i\omega t}$  で割れば

$$-\omega^2 Y(\omega) + 2hi\omega\omega_0 Y(\omega) + \omega_0^2 Y(\omega) = \omega^2 U(\omega) \quad (8)$$

または

$$Y(\omega) = \frac{\omega^2}{-\omega^2 + 2hi\omega\omega_0 + \omega_0^2} U(\omega) \\ = \frac{(\omega/\omega_0)^2}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + 2h(\omega/\omega_0)i} U(\omega) \quad (9)$$

ここで  $H(\omega)$  は地震計(センサー)の周波数応答関数。この関数は複素数であり、以下の極形式で表すことができる。

$$H(\omega) = \quad (10)$$

$$\text{ここで振幅} A(\omega) : A(\omega) = \quad (11)$$

$$\text{位相遅れ} \theta : \theta = \quad (12)$$

## 地震計の応答(3)

振り子の周期が長く  
減衰比  $h$  が小さいなら

質点の動きは単に地面の動きの逆となる。

⇒ (seismograph)

振り子の周期が短いとき

$U(\omega) = -\ddot{U}(\omega)/\omega^2$  を式(9)に代入すると

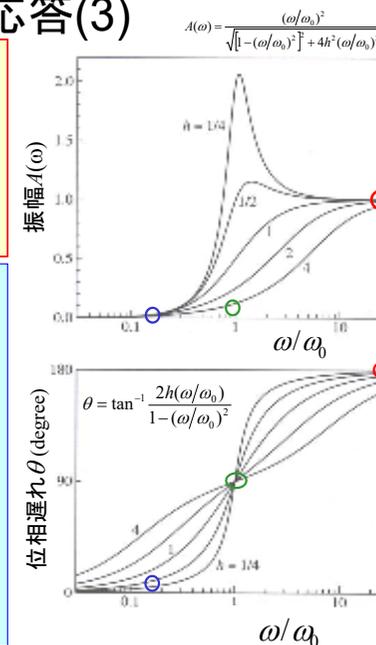
$$Y(\omega) = \frac{-1}{-\omega^2 + 2hi\omega\omega_0 + \omega_0^2} \ddot{U}(\omega) \quad (13)$$

低振動数の限界において式(13)は

$$\omega_0 \gg \omega \text{ において} \quad (14)$$

減衰比  $h$  が小さいなら位相遅れ

⇒ (accelerometer)



16

## 地震計の応答(4)

振り子の周期が地動周期に近いとき

$U(\omega) = -i\dot{U}(\omega)/\omega$  を式(9)に代入すると

$$Y(\omega) = \frac{-i\omega}{-\omega^2 + 2hi\omega\omega_0 + \omega_0^2} \dot{U}(\omega) \quad (15)$$

$$\omega_0 \approx \omega \quad (16)$$

減衰比  $h$  が大きいなら位相遅れ

⇒ (velocity-type seismometer)

地震計の基本特性: 固有周期, 減衰比,

基本倍率 (増幅させて記録)

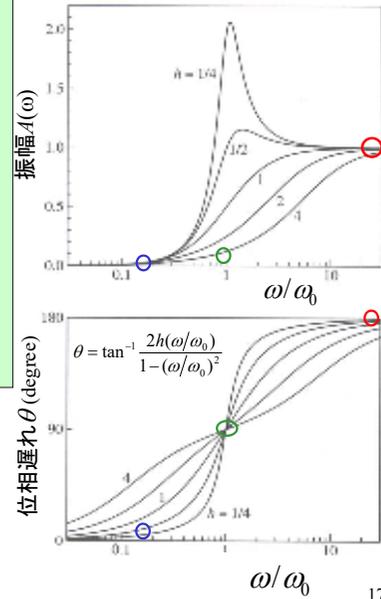
測定方法

変位: 長周期, 理学

速度: 中周期, 理学・工学

加速度: 短周期, 工学

$$A(\omega) = \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}}$$



## 地震計の変遷(1) 機械式変位地震計

初期のころの地震計: 強震時に壊れるか振り切れた。

→ の開発 (現在は, 主として加速度計)

例) 1923年関東地震の今村式強震計

今村明恒(東京帝国大学)が開発。固有周期は10秒(水平動用)、5秒(上下動用)。倍率は低感度(2倍)。記録方式は煤書式。関東地震の東京の揺れなどを記録。

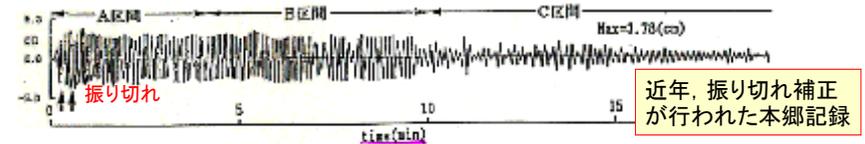


図6 今村式2倍強震計による1923年関東地震の東京本郷に於ける震害波形 (横川 益徳式, 今村式2倍強震計による関東地震本郷記録の復元, 1948)

### 気象庁一倍強震計

- 機械式変位計, ペン書き, 固有周期5~6秒
- 1950年より配備, 1990年代半ばまで気象庁の地震観測の主力
- 気象庁87型強震計(加速度計)配備時に運用廃止になったものが多い。



18

## 地震計の変遷(2) 加速度型強震計

### アメリカの強震計

USGSスタンダード型(1932):

- 最初の加速度型強震計
- El Centro(1940)波形を記録

### 日本の強震計

(1953-): Strong Motion Accelerometer Committee

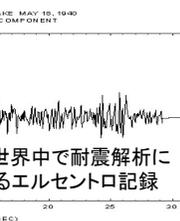
- 1948年福井地震を契機に強震測定委員会が開発。
- 最大1G程度まで計測可能。
- 次々に改良され, 永らく日本の代表的強震計だった。

(記録紙→カセットテープ)

記録紙上の波形に含まれる誤差: ⇩

- 地震計の振動特性 (高振動領域で感度が低下)
- 記録紙の伸縮や蛇行
- 記録ペンの片寄りや記録紙との摩擦
- 記録の読み取り (数値化) に伴うもの

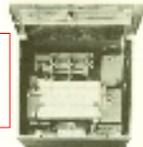
現在は, 各種の記録媒体の変遷を経て, 内部メモリやHDに電子的に記録



現在も世界中で耐震解析に使われるエルセントロ記録



1964年新潟地震の液状化波形を記録



SMAC-B2強震計の内部 19

## 地震計の変遷(3) 最近の地震計

### 強震計 1995年兵庫県南部地震後, 飛躍的に増加

- 防災科学技術研究所(NIED)によるK-NET(1000カ所), KiK-net(700カ所)
- 気象庁: 95型震度計を設置(全国約600カ所)
- 消防庁: 全国市町村に震度計を設置(全国3,300カ所), 自治体独自: 横浜市
- 国土交通省: 河川, ダム, 道路などの公共土木施設, 旧運輸省: 港湾施設
- ライフイン事業者: 鉄道, 高速道路, 都市ガス, 電力

### 高感度地震計:

- 震源決定やマグニチュード算出のため, 気象庁が全国に設置
- ほか, 防災科学技術研究所のHi-net, 国立大学の微小地震観測ネットワーク
- 微小地震の情報を蓄積し, 地殻構造の解析や, 地震の中長期的な予測に利用

### 広帯域地震計

- 大地震や遠い震源の長周期地震動まで検知
- 地球深部構造や震源メカニズムの解析に用いられる
- 防災科学技術研究所のF-net
- IRISが全世界的な広帯域地震計の観測ネットワークを運用