

日本建築材料協会・建材情報交流会

建築物の震災軽減への 取り組みについて

大阪大学名誉教授 井上 豊

2015.2.20

概 要

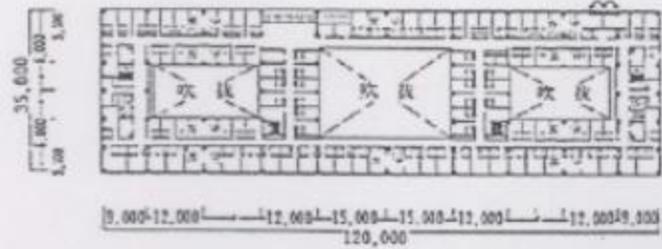
- 阪神淡路大震災・建物被害状況
- 観測地震記録
- 地震と地震動
- 地震荷重の変遷
- 耐震・免震・制震技術の発展
- 耐震診断と耐震改修
- 最近の耐震に関する話題



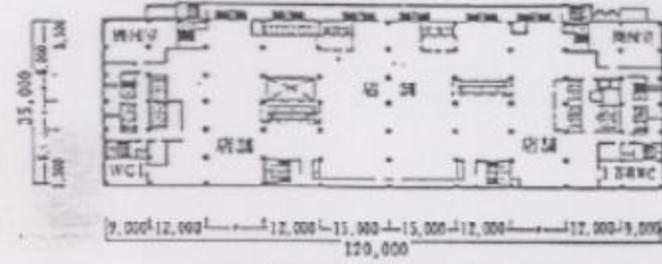




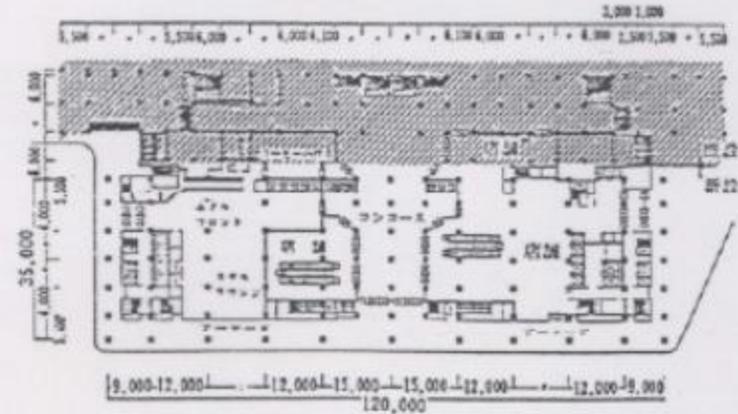




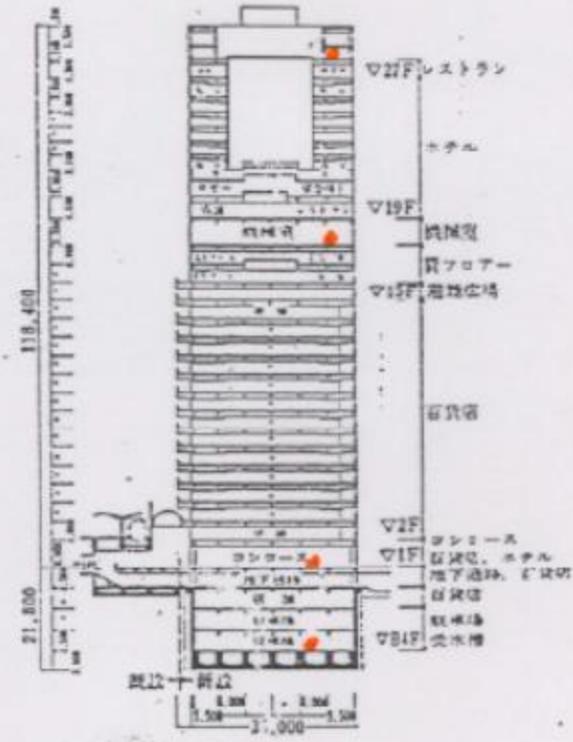
ホテル基準階平面図 (21階-26階)



百貨店基準階平面図 (3階-14階)

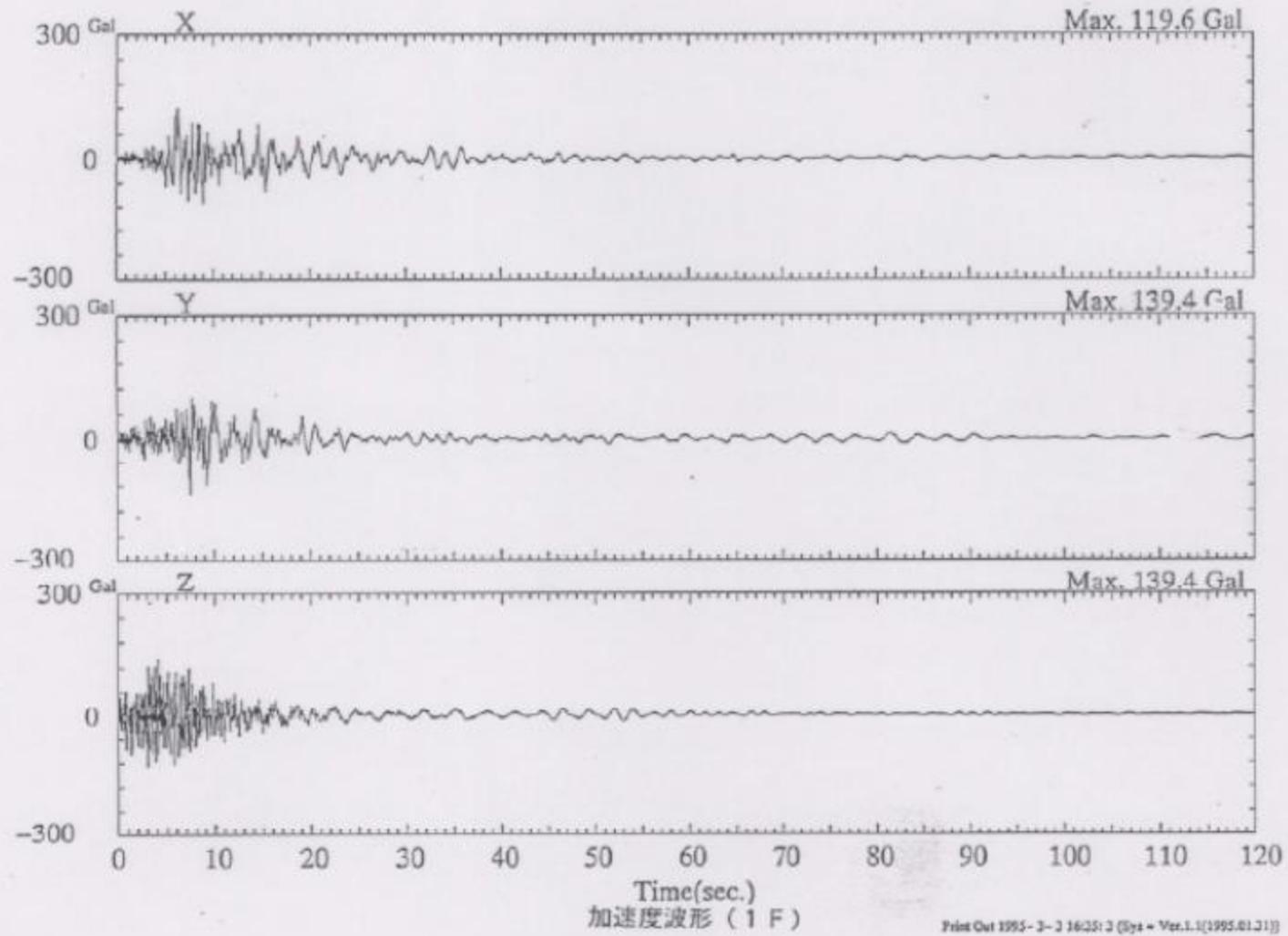


1階平面図

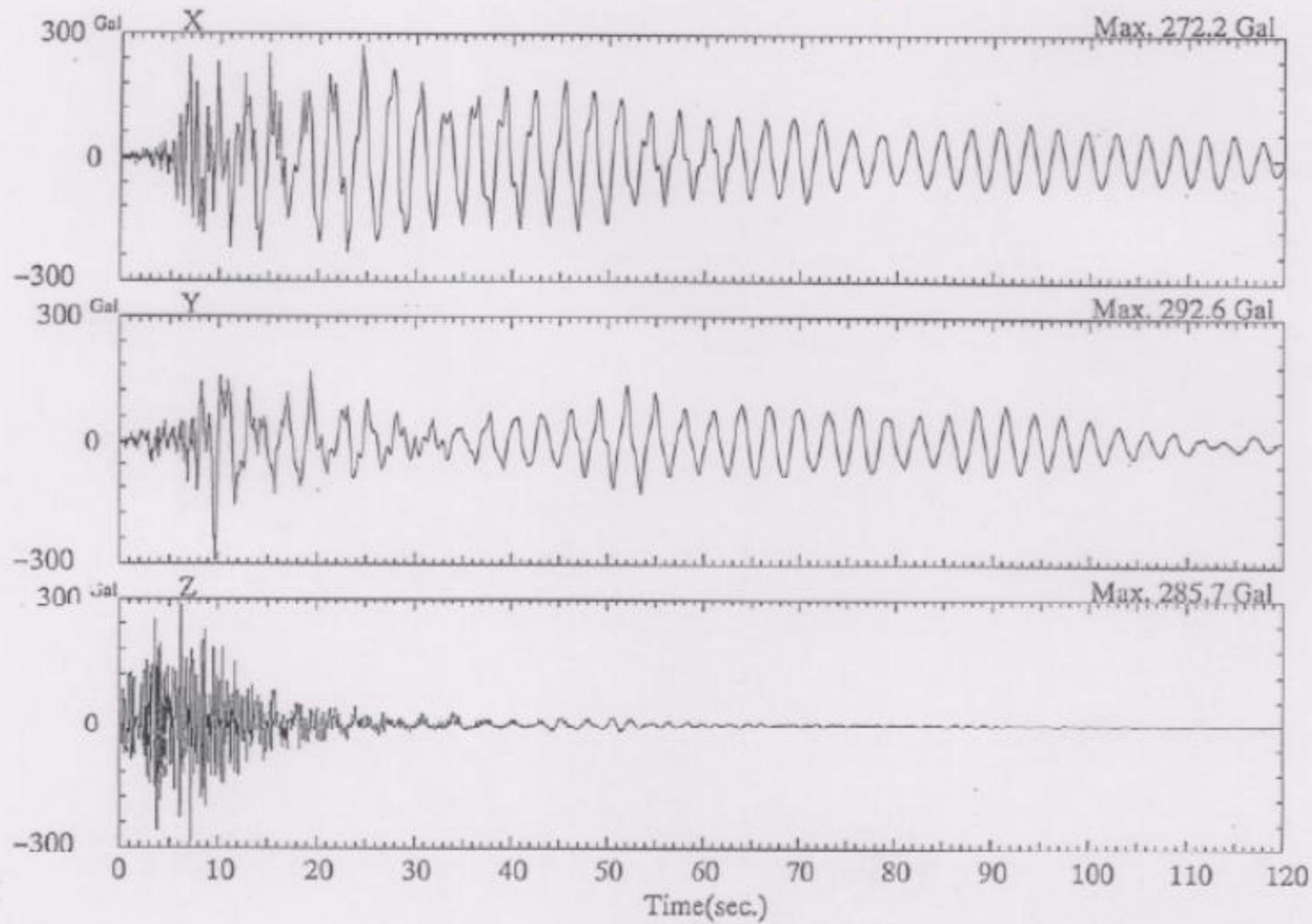


断面図

'95 01.17 05.46 34.36 135.00 20.0 7.2 47.1 ACT OSAKA-1F

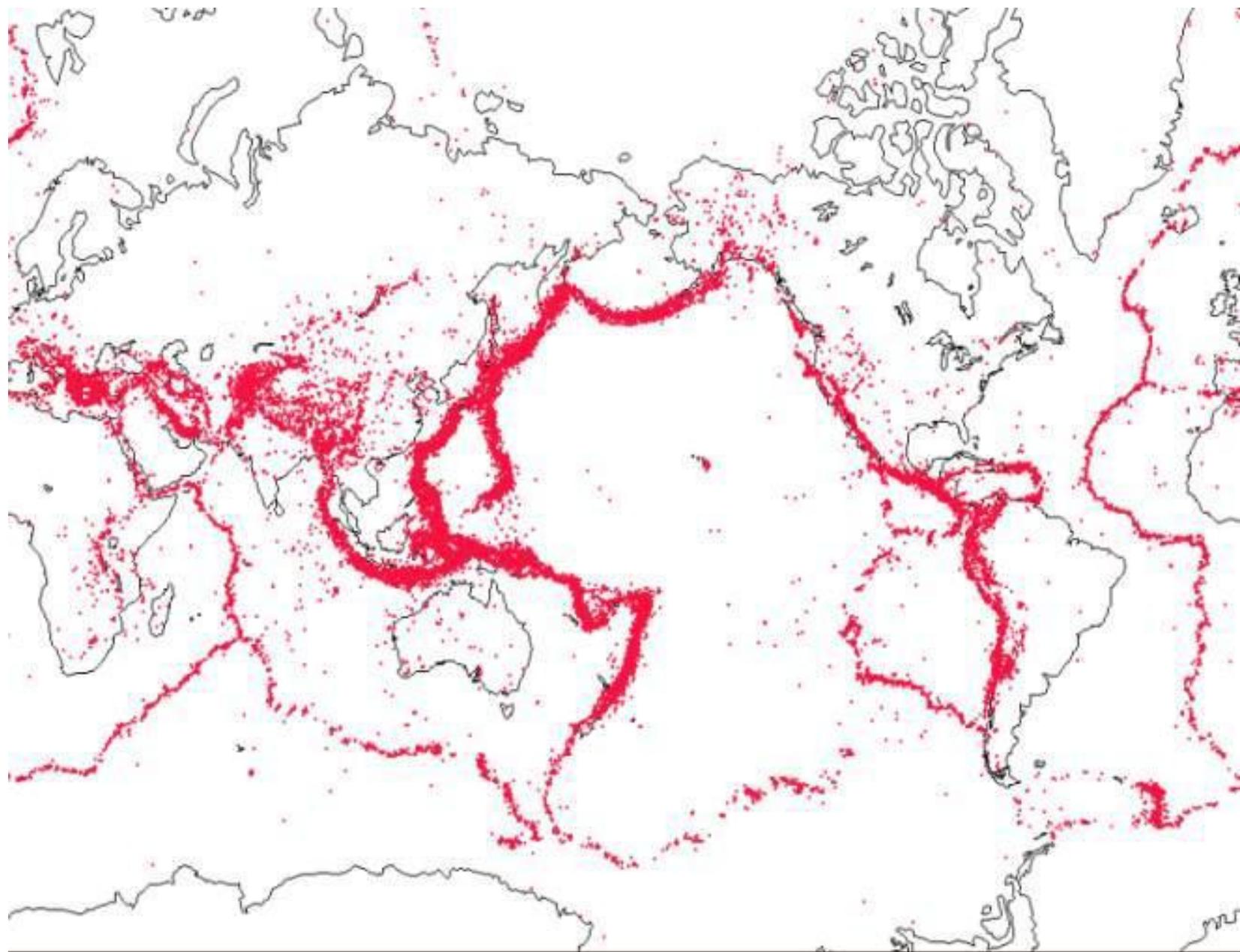


'95 01.17 05.46 34.36 135.00 20.0 7.2 47.1 ACT OSAKA-28F

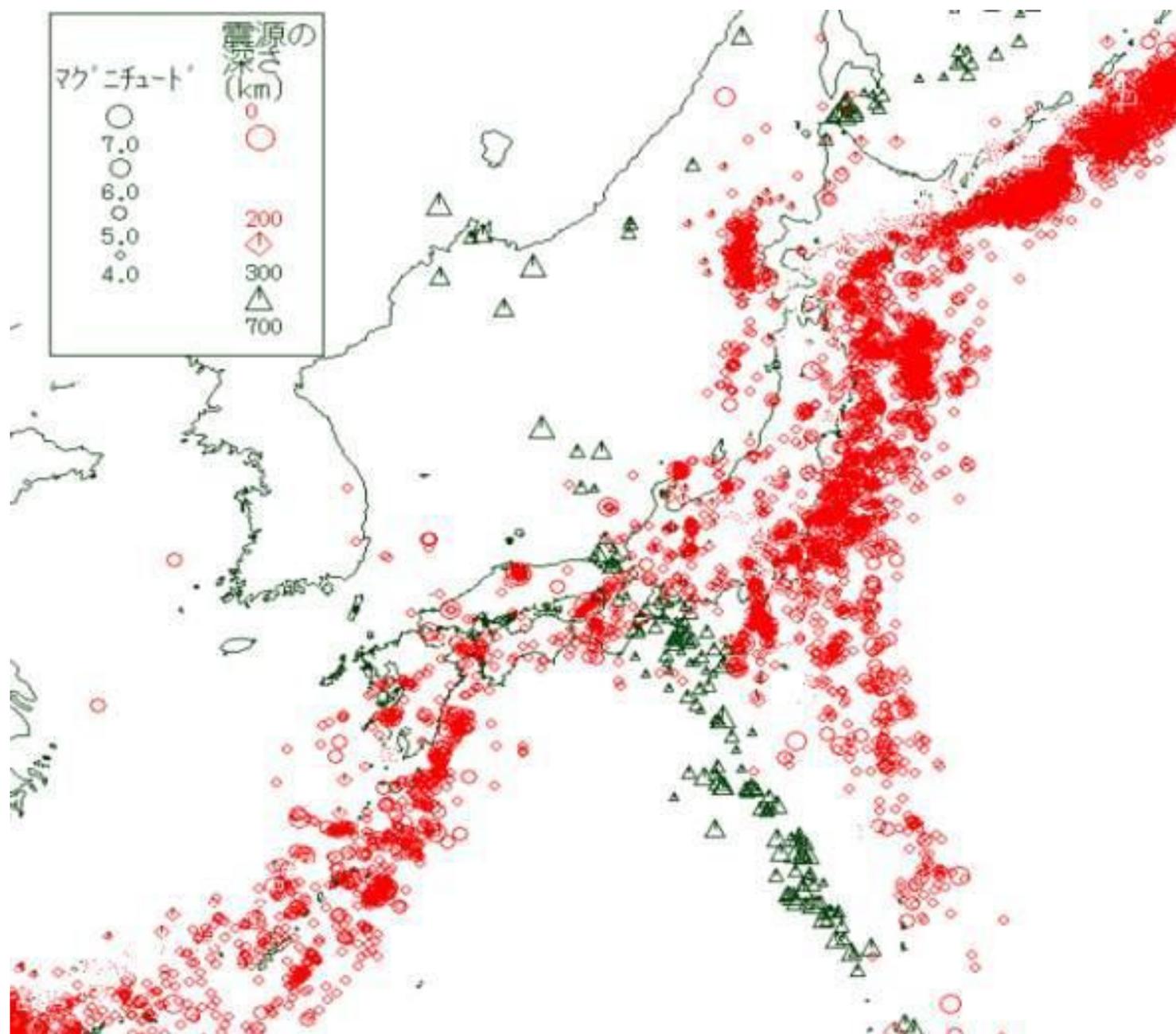


加速度波形 (2 8 F)

Print Out 1995-3-3 16:36:14 (Sys = Ver.1.1(1995.01.31))







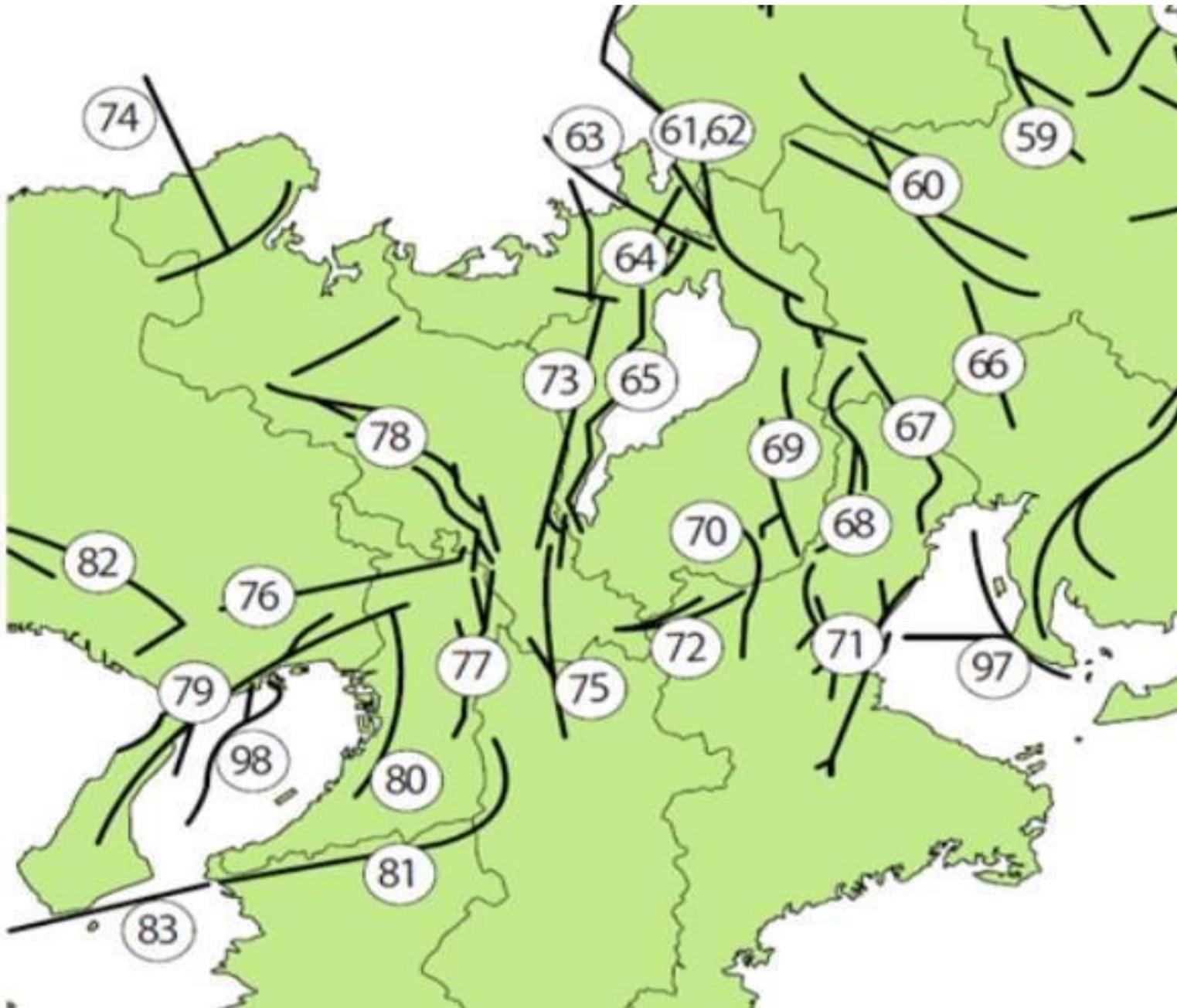
過去の地震との比較

地震		マグニ チュード	死者 (名)	行方不明者 (名)	負傷者 (名)	家屋被害数 ^{※2}
海溝型地震	明治29年6月15日 (1896年) 明治三陸地震	8・1/4	21,920		3,899	7,957(戸)
	大正12年9月1日 (1923年) 関東大震災	7.9	105,385		103,733	372,659(棟)
	昭和8年3月3日 (1933年) 昭和三陸地震	8.1	1,522	1,542	1,092	6,067(棟)
	平成23年3月11日 東北地方太平洋沖 (2011年) 地震	9.0 ^{※1}	15,234	8,616	5,339	161,665(戸)
内陸直下型地震	明治24年10月28日 (1891年) 濃尾地震	8.0	7,273		17,175	222,501(棟)
	昭和23年6月28日 (1948年) 福井地震	7.1	3,769		22,203	51,851(棟)
	平成7年1月17日 (1995年) 阪神・淡路大震災	7.3	6,434	3	43,792	256,312(棟)

(出典) ・マグニチュード:東北地方太平洋沖地震は気象庁「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第15報)より、他は理科年表
 ・死者、行方不明者、負傷者、家屋被害数:東北地方太平洋沖地震:警察庁広報資料(平成23年5月26日)、関東大震災:日本地震工学会『『日本地震工学会論文集Vol. 4, No. 4, September 2004』、関東地震(1923年9月1日)による被害要因別死者数の推定、諸井孝文・武村雅之』、昭和三陸地震:『1896(明治29)年『岩手県統計書』』、昭和三陸地震・濃尾地震・福井地震:東京大学出版社「日本被害地震総覧2003年初版、宇佐見龍夫」、阪神大震災:消防庁『阪神「淡路大震災」について(確定報)平成18年5月19日』

※1:東北地方太平洋沖地震はモーメントマグニチュードを記載、※2数値は各資料に記載されている家屋被害の全壊、半壊、流失家屋数、全焼、半焼の被害数の合計値を記載。





- 64 湖北山地断層帯
- 65 琵琶湖西岸断層帯
- 73 三方・花折断層帯
- 74 山田断層帯
- 75 京都盆地一奈良盆地断層帯
- 76 有馬一高槻断層帯
- 77 生駒断層帯
- 78 三峠・京都西山断層帯
- 79 六甲・淡路島断層帯
- 80 上町断層帯
- 81・83 中央構造線断層帯
- 82 山崎断層帯
- 98 大阪港断層帯

地震の規模 と 地震動の強さ

マグニチュード と 震度(階級)

magnitude and intensity scale

- ・表面波マグニチュード
- ・モーメントマグニチュード
- ・気象庁震度階
- ・修正メルカリ震度階

地震のマグニチュード

気象庁が近年まで用いてきた算式

$$M = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83$$

$$\log E = 1.5 M + 11.8$$

ここに

M: マグニチュード ……その地震の規模

A: 振幅 (μm) ……その場所の地面の最大の揺れ

Δ : 震央距離 (km) ……その場所から地震発生場所までの距離

E: エネルギー (erg) ……その地震によって解放されたエネルギー

M = 7, Δ = 50 km とすると

A = 7 cm、 $E \approx 2 \times 10^{22}$ erg

M = 8, Δ = 50 km とすると

A = 70 cm、 $E \approx 10^{\nu(10)} \times 2 \times 10^{22}$ erg \approx **32** $\times 2 \times 10^{22}$ erg

M = 9, Δ = 50 km とすると

A = 7 m、 $E \approx 10^3 \times 2 \times 10^{22}$ erg = **1000** $\times 2 \times 10^{22}$ erg

M8 の地震 : M7 の地震の **10** 倍の振幅、
32 個分のエネルギーに相当

M9 の地震 : M7 の地震の **100** 倍の振幅、
1000 個分のエネルギーに相当

今回の地震 : 当初 **M8.8** と発表

後に **M9** に訂正

エネルギーは約 2 倍

破壊面積 (震源域) の南側への 2 倍の拡大

以上は、
表面波を対象(表面波マグニチュード: Ms)

最近では、地震モーメントを対象
(モーメントマグニチュード: Mw)

地震モーメント(Nm) = 応力降下量(MPa)
x 破壊面積(km²) x 平均すべり量(m)

マグニチュードは、その対数によって表記

震度階級と名称の変遷

1884 - 1898	1898 - 1908	1908 - 1936	1936 - 1949	1949 - 1996	1996 - 現在
	微震(感ナシ)	震度0 / 微震(感ナシ)	震度0 / 無感	震度0 / 無感	震度0
微震	微震	震度1 / 微震	震度1 / 微震	震度1 / 微震	震度1
弱震	弱震(弱キ方)	震度2 / 弱震(弱キ方)	震度2 / 軽震	震度2 / 軽震	震度2
	弱震	震度3 / 弱震	震度3 / 弱震	震度3 / 弱震	震度3
強震	強震(弱キ方)	震度4 / 強震(弱キ方)	震度4 / 中震	震度4 / 中震	震度4
	強震				震度5弱
					震度5強
烈震	烈震	震度6 / 烈震	震度6 / 烈震	震度6 / 烈震	震度6弱
					震度6強
				震度7 / 激震	震度7

計測震度の求め方

- 3成分 (NS, EW, UD) の加速度記録
- フーリエ変換 (0 ~ 50 Hz)
- フィルター (low pass, high pass, $1/\sqrt{f}$)
- 逆フーリエ変換
- 合成3次元ベクトルの時間軸表示
- 0.3 秒間超過となる閾値 a の設定
- 算定式 $I = 2 \log a + 0.94$ により I の算定

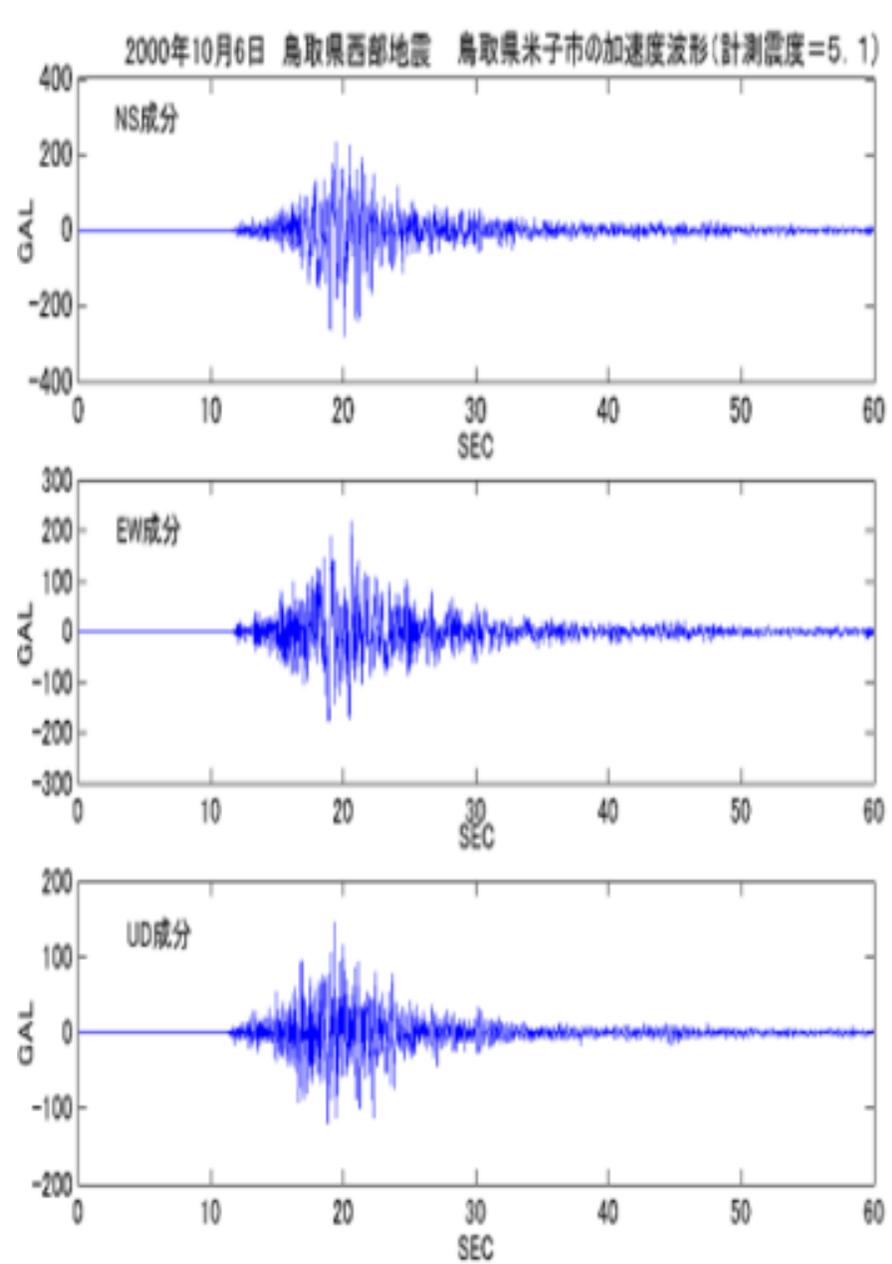


図1 オリジナルの加速度波形

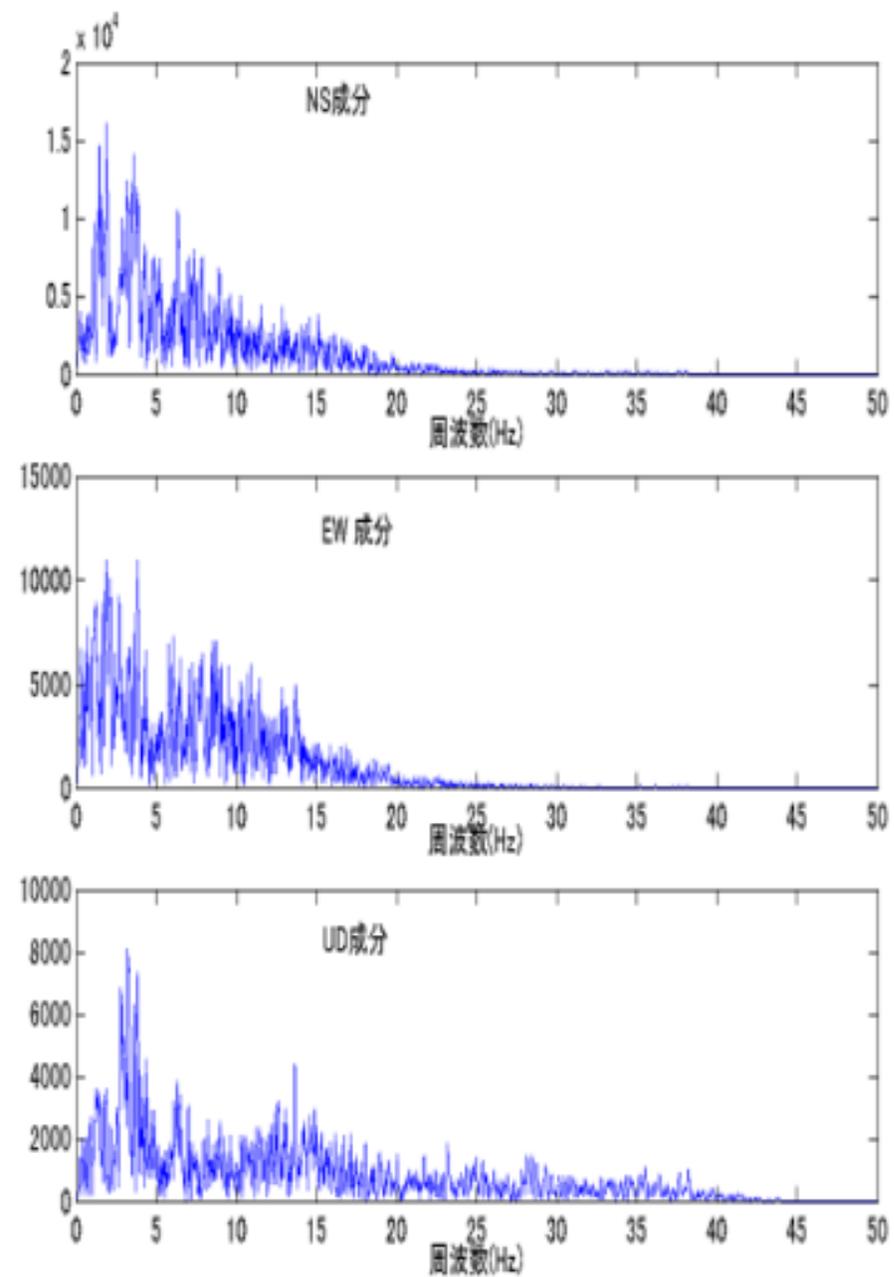


図2 オリジナル加速度波形の周波数スペクトル

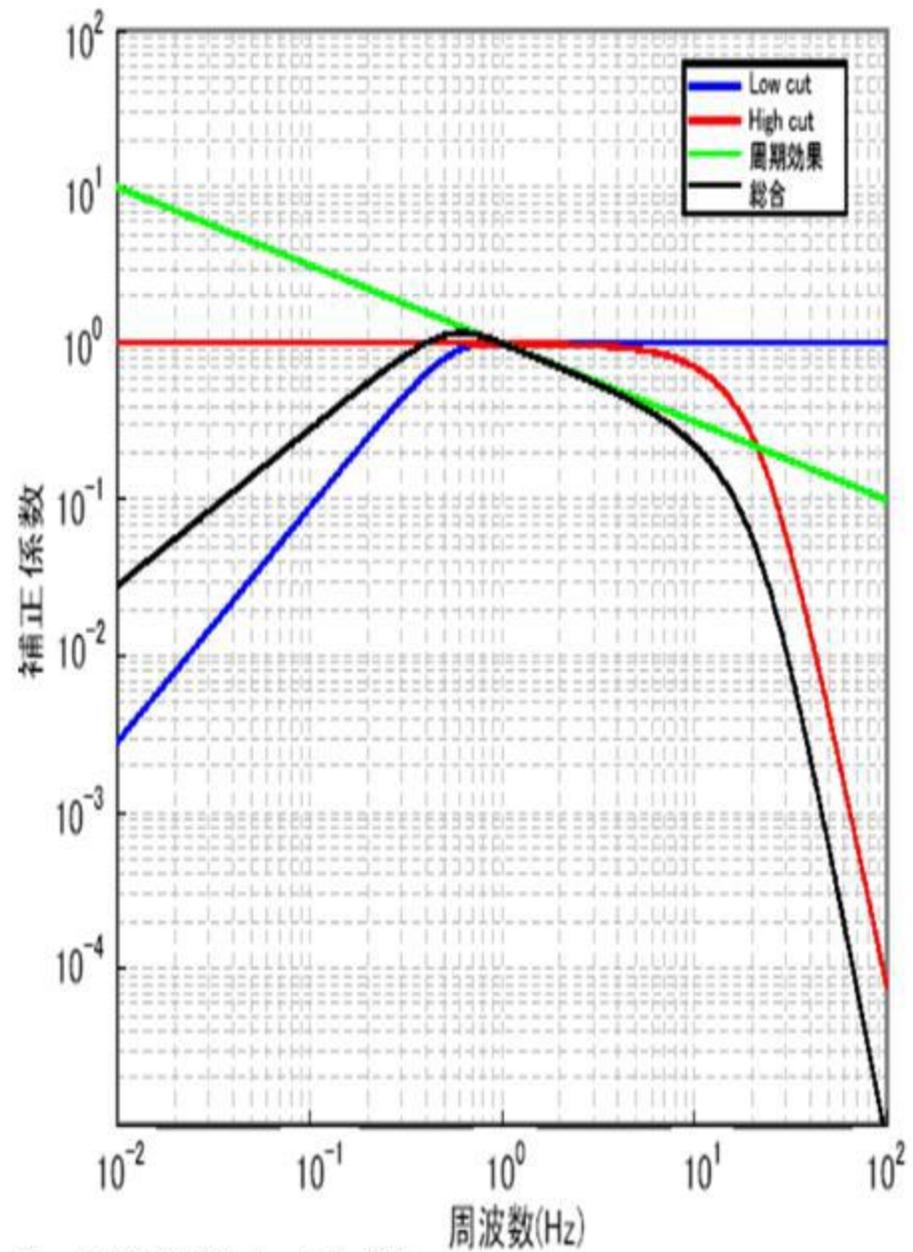


図3 震度計算のためのフィルター特性

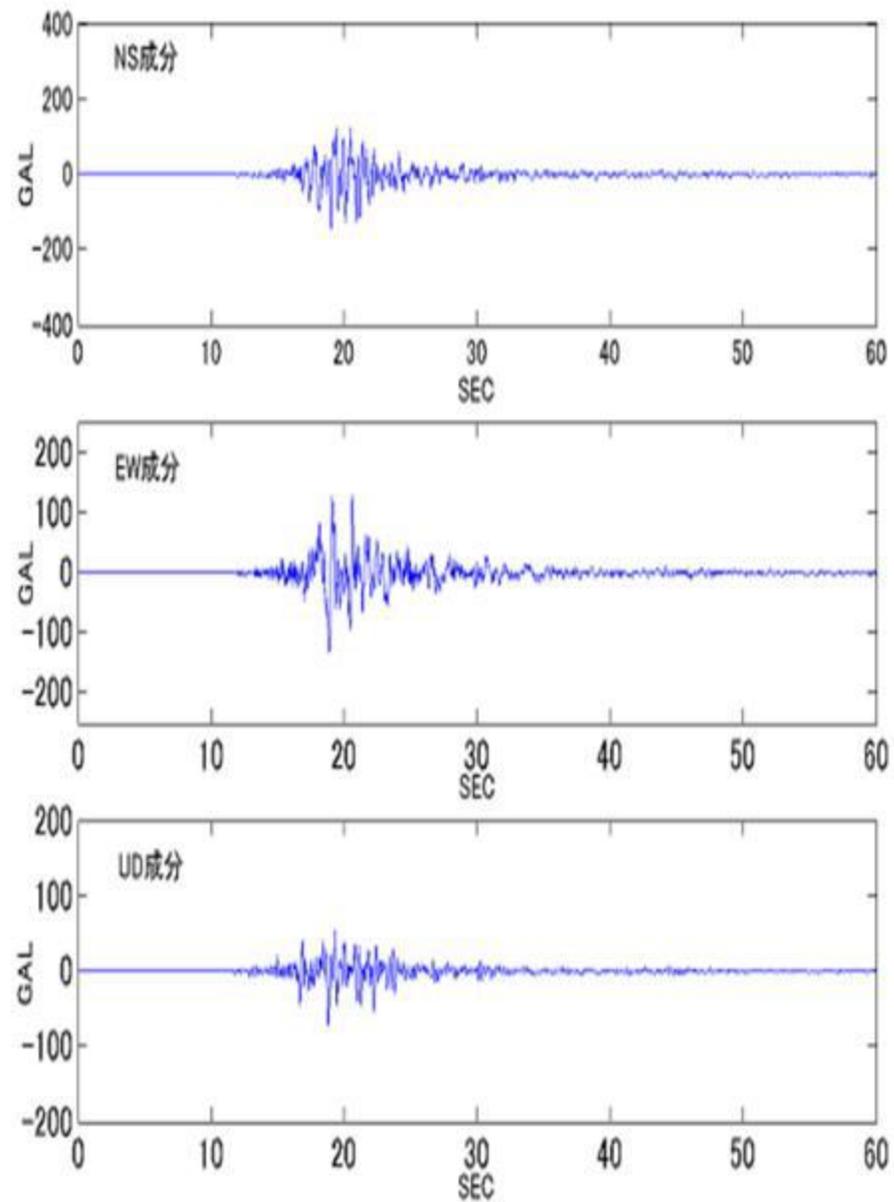


図4 フィルター補正後の加速度波形

$$I = 2 \log a + 0.94$$

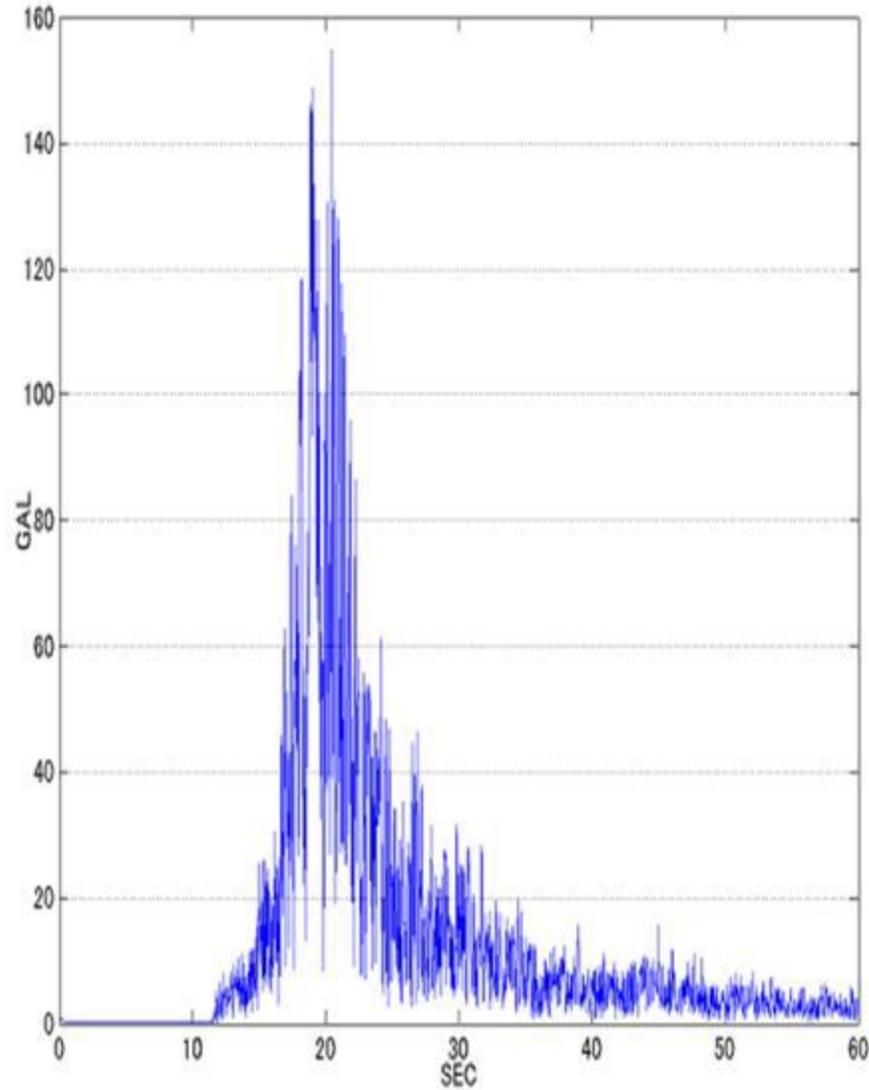


図5 フィルター後の3成分合成加速度

表1 気象庁震度階級表

震度階級	計測震度	震度階級	計測震度
0	0.5未満	5弱	4.5以上5.0未満
1	0.5以上1.5未満	5強	5.0以上5.5未満
2	1.5以上2.5未満	6弱	5.5以上6.0未満
3	2.5以上3.5未満	6強	6.0以上6.5未満
4	3.5以上4.5未満	7	6.5以上

地震荷重の変遷(1)

- 1916 (T 5) 佐野「家屋耐震構造論」
震度の定義
- 1922 (T11) 内藤「架構建築耐震構造論」
日本興業銀行建物耐震壁に適用
- 1924 (T13) 市街地建築物法改正
震度 0.1 を規定
- 1927 (S2)~ 剛構造・柔構造論争
- 1935 (S10) 棚橋「速度・ポテンシャル論」
地動速度・破壊までのエネルギー
- 1943 (S18) 日本学術振興会
「建築物耐震構造要項」編纂

之ヲ水平震動ノミニ適用スルトキハ k ハ辛ジテ転覆セル
柱状体ノ底ト高サトノ比 (第三図) ヲ示スモノナリ, 即

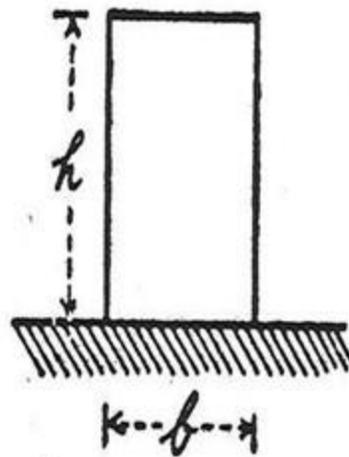
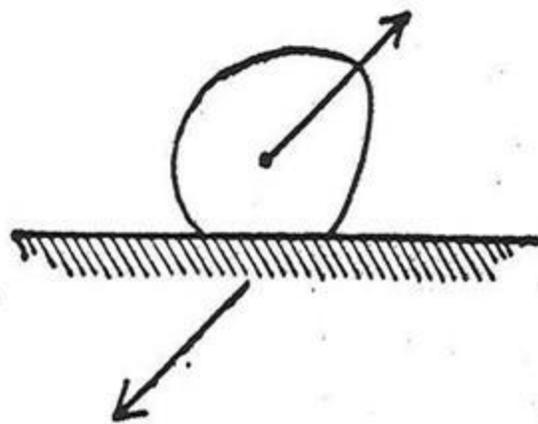
第三図

チ下ノ如シ。

$$\text{水平震度 } k = \frac{b}{h}$$

$k = \frac{a}{g}$ ニシテ g 即チ重力ノ加速度
ハ $10,000$ 耗/(秒)²ニ近キガ故ニ地震
ノ加速度ヲモ耗/(秒)²ヲ以テ表ハス
トキハ其レト k トハ凡ソ數位ヲ変ズ

第一図



第三章 日本興業銀行構造設計に就て(大正十二年五月完成)

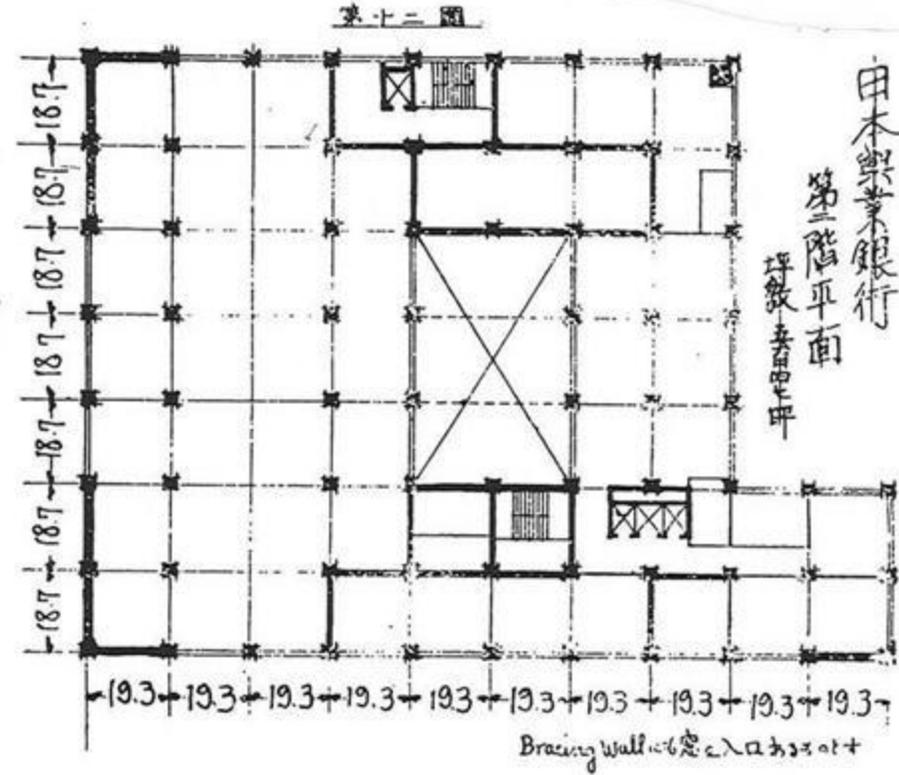
竝に其他の例

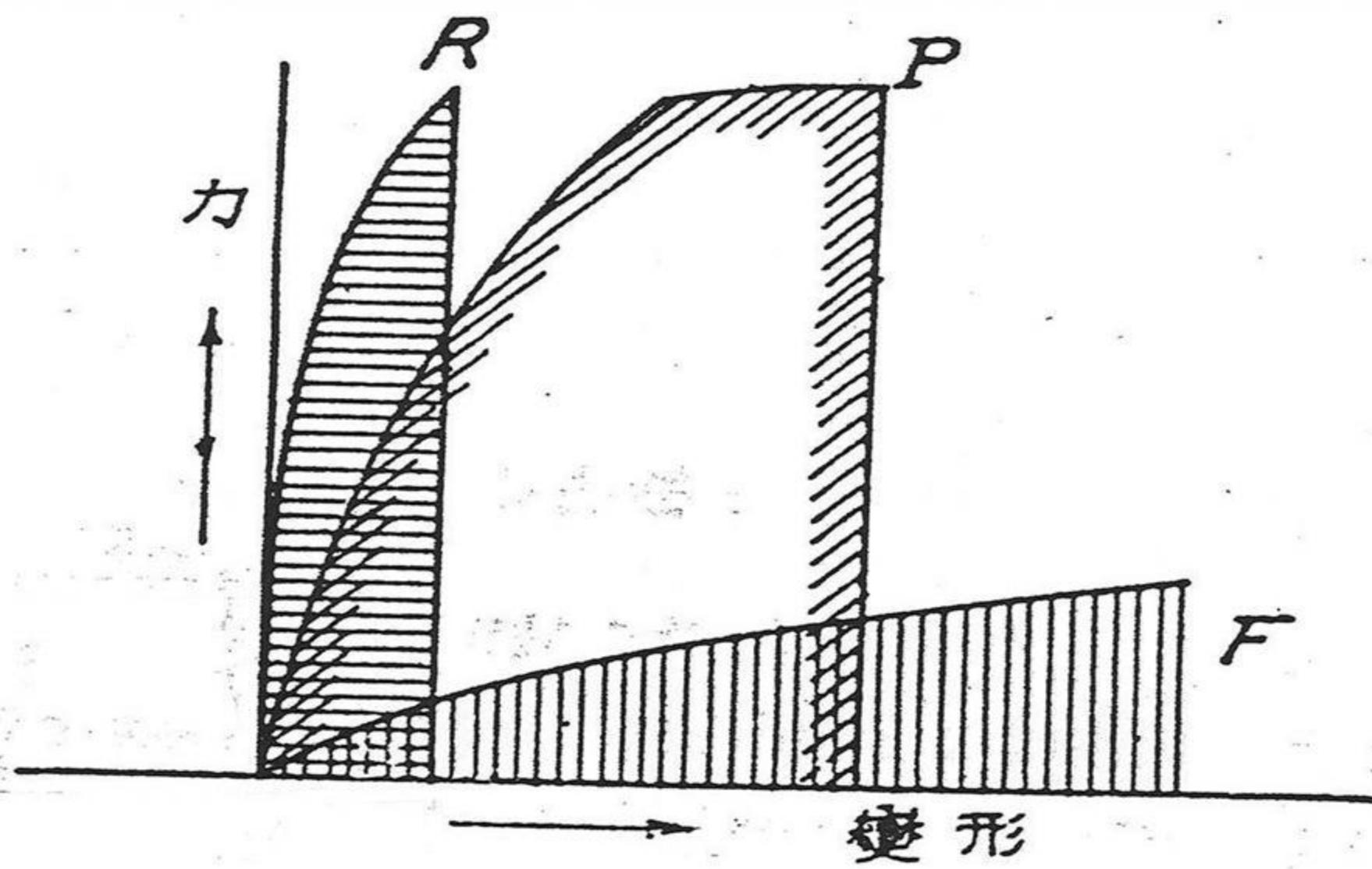
第一節 建築の概要

本建築は外邊 131'×193' 建坪約 562 坪、延坪約 4.22) 地下室共八階建にして第一階銀行營業室は高さを二階分とし中央の柱を一行除き span 約 40' とし上階の荷重は三階の Trussed girder をして支へしむ、(第十六圖)地下室及一、二階に大なる金庫及書類庫を有す。

第三節 地震又は風壓に依る横力の算定

震度を $\frac{1}{15}$ とすれば一つのベ- (格間) に對する横力は (床の荷重を 150 ㌔/㎡ 屋根の分を 90 ㌔/㎡ とす) 各階 $\frac{150 \times 19.3 \times 18.7}{15}$
 $= 3.620 \text{ ㌔/屋根} \times \frac{90 \times 19.3 \times 18.7}{15} = 2.20 \text{ ㌔}$ 即一つの階、例へば六階に於てこの階だけに働く震力はベ- の數 51 ある故 $3.620 \times 51 = 184.000 \text{ ㌔}$ となる。





第 3 圖

地震荷重の変遷(2)

- 1947 (S22) 日本建築規格3001号公表
短期許容応力度の設定, 震度 0.2
- 1950 (S25) 建築基準法制定
震度 0.2 を規定
- 1952 (S27) 建築基準法改正
地域係数, 地盤・構造種別係数導入
- 1963 (S38) 建築基準法改正
建物高さ制限撤廃, 容積率導入
地震応答解析による高層建築物構造評定
- 1964 (S39) 日本建築学会「高層建築技術指針」公表
 $C_B = 0.18/T \sim 0.36/T$ (後に $0.15/T \sim 0.30/T$)

旧基準(静的震度法)

設計用水平震度

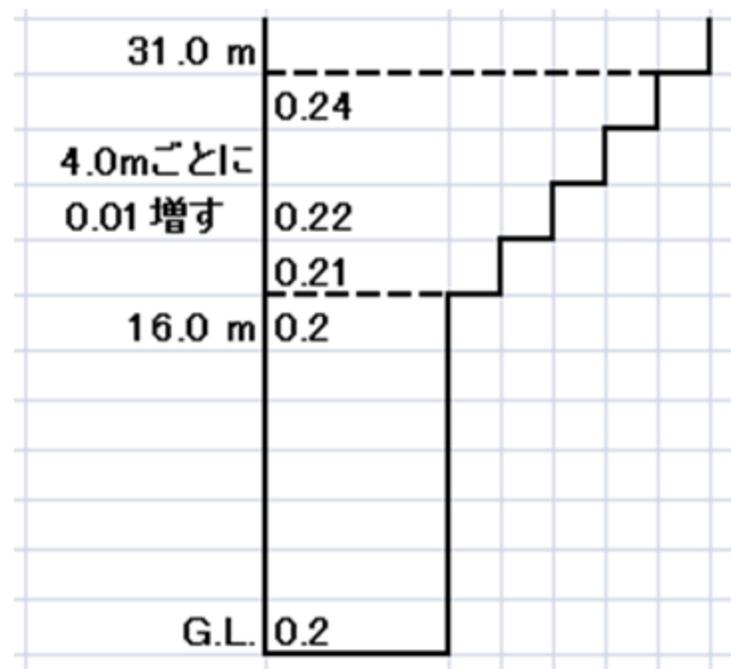
$$k_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_0$$

地域係数 $k_1 = 0.8 \sim 1.0$ (沖縄 0.7)

基準震度 (k_0) の
高さ方向分布

地盤・構造種別係数 k_2

地盤・構造種別係数 k_2	木構造	鋼構造	鉄筋コンクリート構造	組積造
第1種地盤 (岩盤)	0.6	0.6	0.8	1
第2種地盤 (洪積地盤)	0.8	0.8	0.9	1
第3種地盤 (沖積地盤)	1	1	1	1
第4種地盤 (埋立・軟弱地盤)	1.5	1	1	1



地震荷重の変遷(3)

- ・ 1981 (S56) 建築基準法施行令改正
「新耐震設計法」施行
一次設計、二次設計の導入
- ・ 1982 (S57) 免震建築物の構造評定
- ・ 2000 (H12) 建築基準法及び同施行令改正
性能規定の概念の導入
限界耐力計算法の導入
時刻歴応答解析法(国交省告示第1461号)
免震建築物設計法の導入(告示第2009号)
- ・ 2005 (H17) エネルギー法の導入(告示第631号)

新耐震設計法

一次設計（短期許容応力度以下）

- $C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$

C_i : i 層せん断力係数、 Z : 地域係数、 R_t : 振動特性係数

A_i : 質量分布に基づく係数、 C_0 : 基準せん断力係数 (= 0.2)

二次設計（保有水平耐力以下）

- $C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot D_s \cdot F_{es} \cdot C_0$

D_s : 構造特性係数、 F_{es} : 形状係数 (= $F_e \cdot F_s$)

F_e : 偏心率に基づく係数、 F_s : 剛性率に基づく係数

C_0 : 基準せん断力係数 (= 1.0)

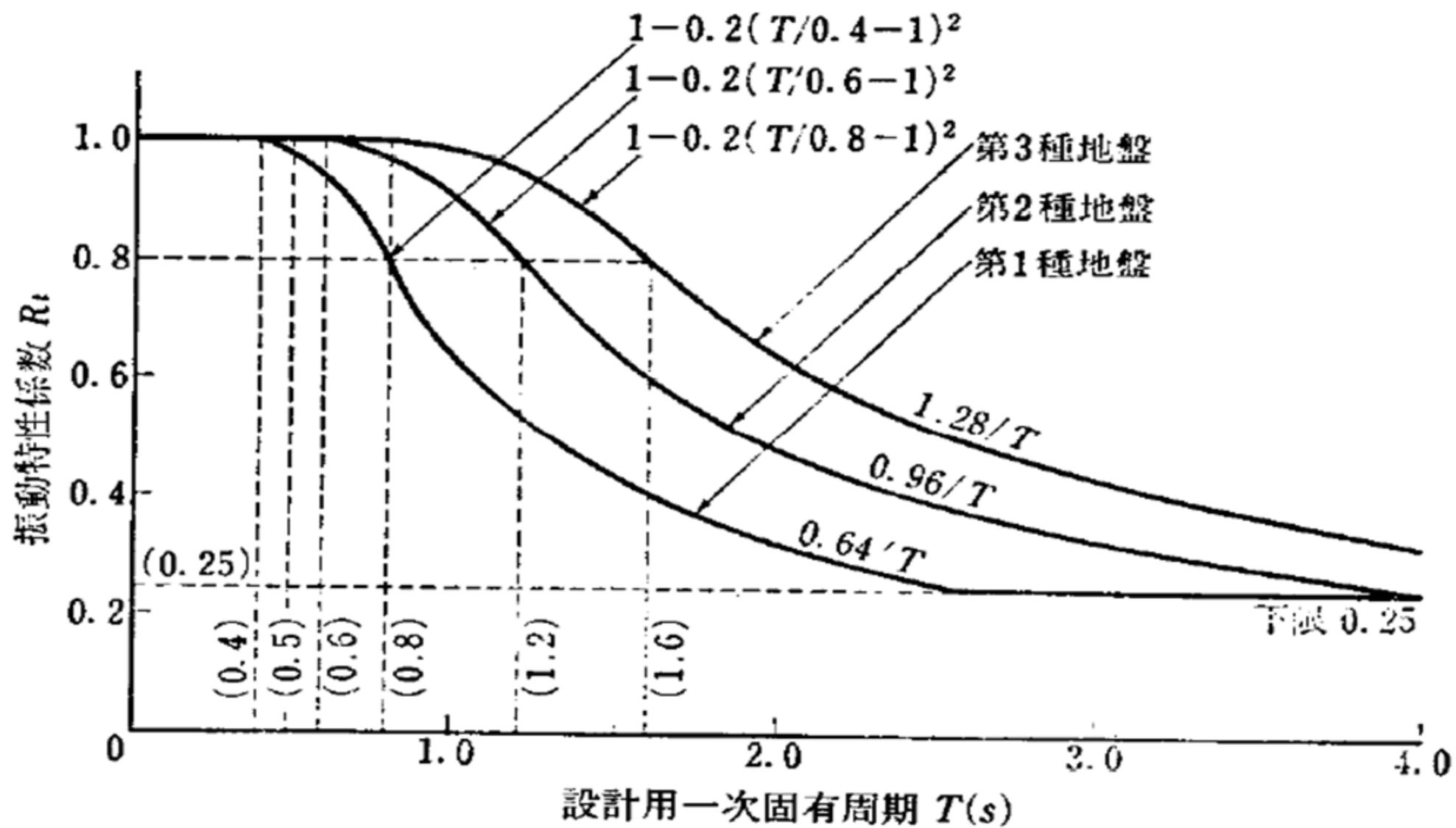


図 2.3.3 振動特性係数 [4]

超高層建築物の地震応答解析 (平成12国交省告示1461号)

1. 水平方向地震動

- ・告示波:解放工学的基盤における加速度応答スペクトル、表層地盤増幅継続時間 30 秒、位相分布、3波以上
- ・サイト波:活断層分布、断層破壊モデルによる模擬地震波
- ・観測地震波:過去における代表的な地震波
稀に発生する地震動 最大速度振幅 250 mm/s
極めて稀に発生する地震動 同 500 mm/s

2. 振動系モデル 復元力特性、減衰特性、地盤動的相互作用

3. 応答計算 平面主軸 2 方向、両方向・上下動などの同時性

4. 判定クライテリア

- ・損傷限界:稀に発生する地震動によって損傷が生じないこと
短期許容応力度以内、有害なひび割れ、ひずみが残留しないこと
- ・倒壊・崩壊限界:極めて稀に発生する地震動によって倒壊・崩壊等しないこと
部分的に塑性域に入っても保有水平耐力以内であること

表-1.2.2 水平入力地震動波形の最大速度振幅・加速度振幅

種類	地震動波形	稀に発生する地震動のレベル (レベル1)			極めて稀に発生する地震動のレベル (レベル2)		
		速度 cm/s	加速度 cm/s ²	解析時間 sec	速度 cm/s	加速度 cm/s ²	解析時間 sec
告示 スペクトル 適合波	告示波 A	16	86	60.0	54	261	120.0
	告示波 B	14	88	60.0	69	319	120.0
	告示波 C	13	94	60.0	63	306	120.0
標準3波	EL CENTRO 1940 NS	25	255	53.8	50	511	53.8
	T A F T 1952 EW	25	248	54.4	50	497	54.4
	HACHINOHE 1968 NS	25	165	36.0	50	330	36.0

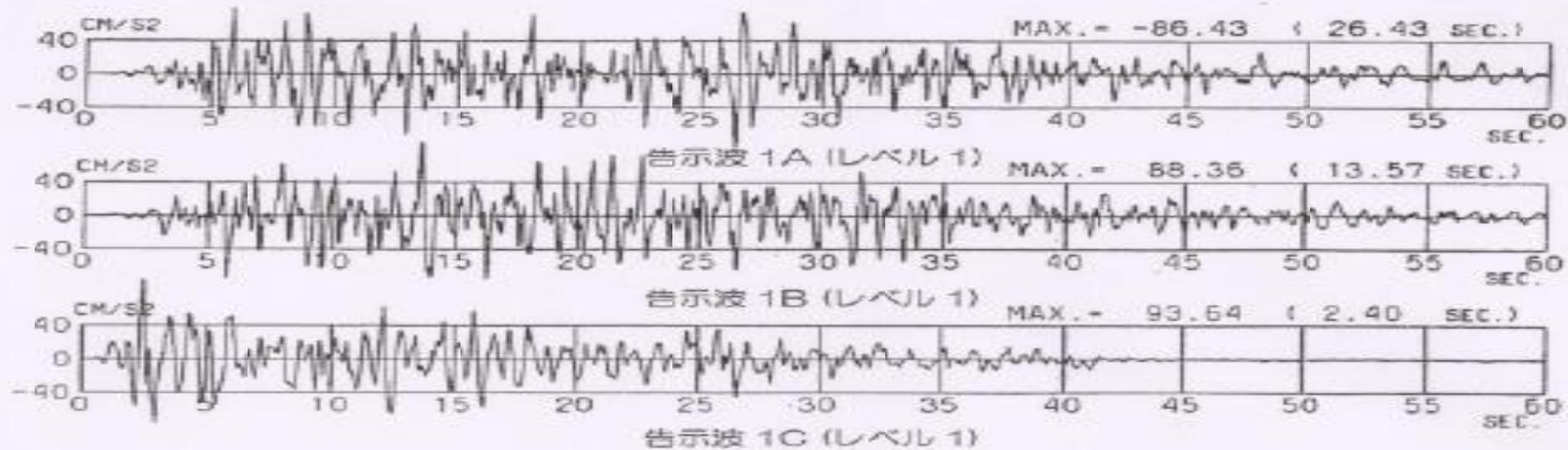


図-1.2.5 レベル1入力地震動波形

パッシブ制振

- エネルギー吸収型ダンパー
- 同調型ダンパー（振子式、TMD）
- 免震構造（支承、復元材、減衰材）

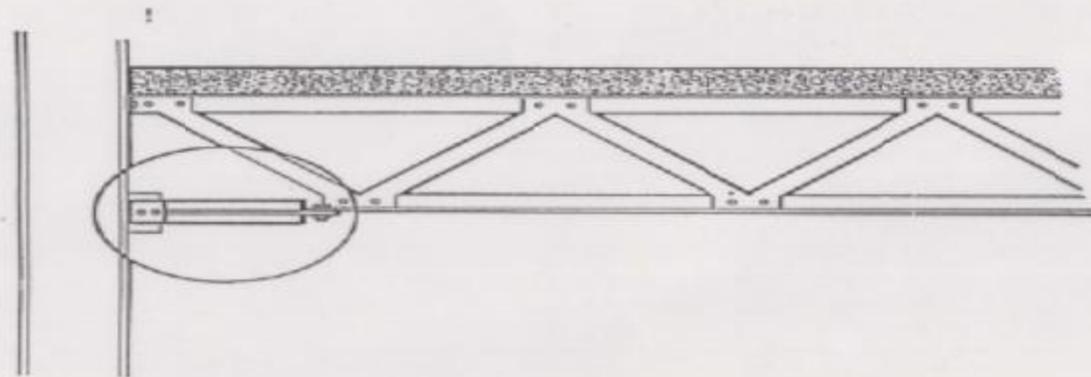


Fig. 3 World Trade Center Damper in Place

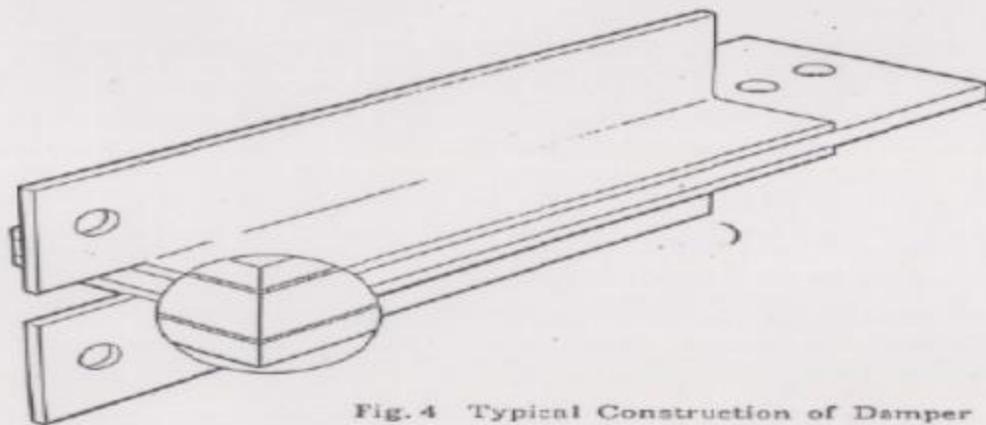


Fig. 4 Typical Construction of Damper



写真-1 建物全景

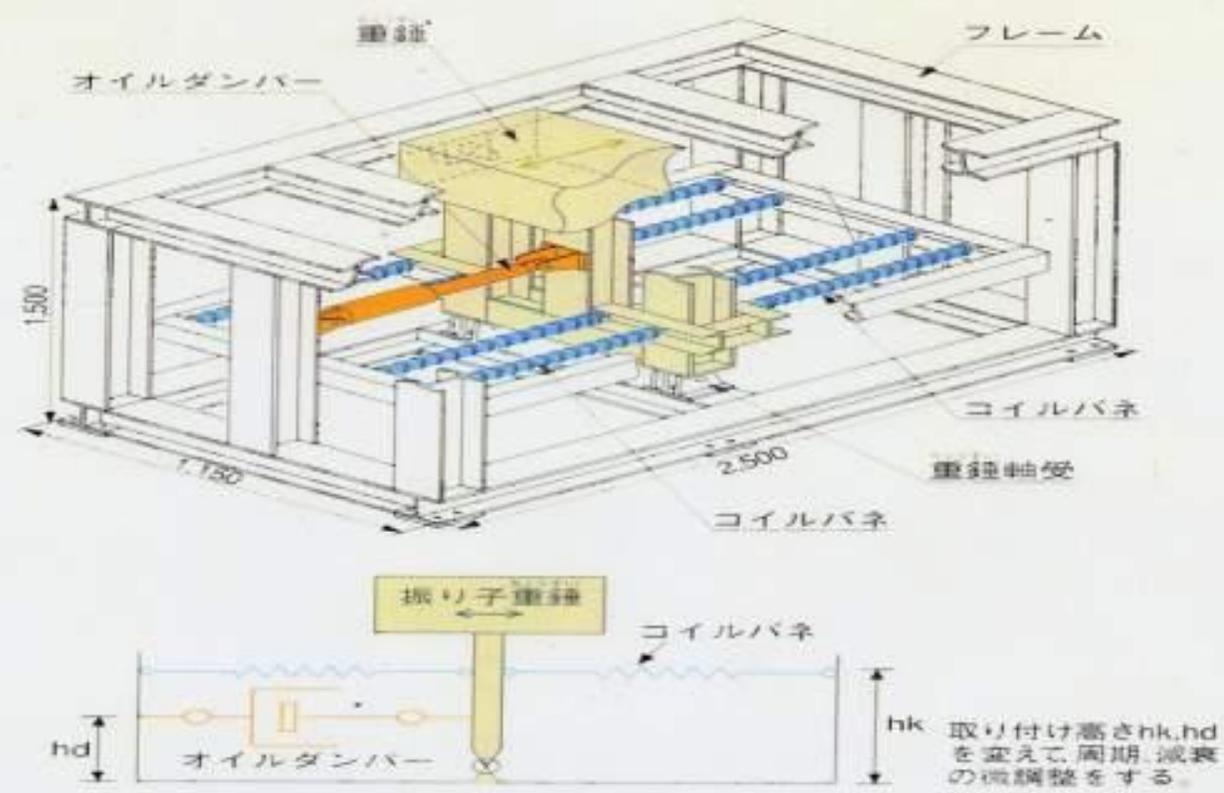


図-1 倒立振り子型制御装置 (TMD)

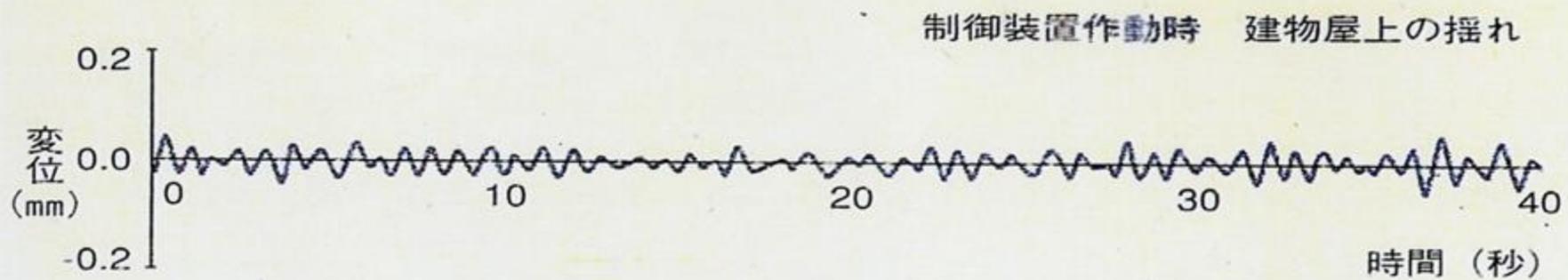
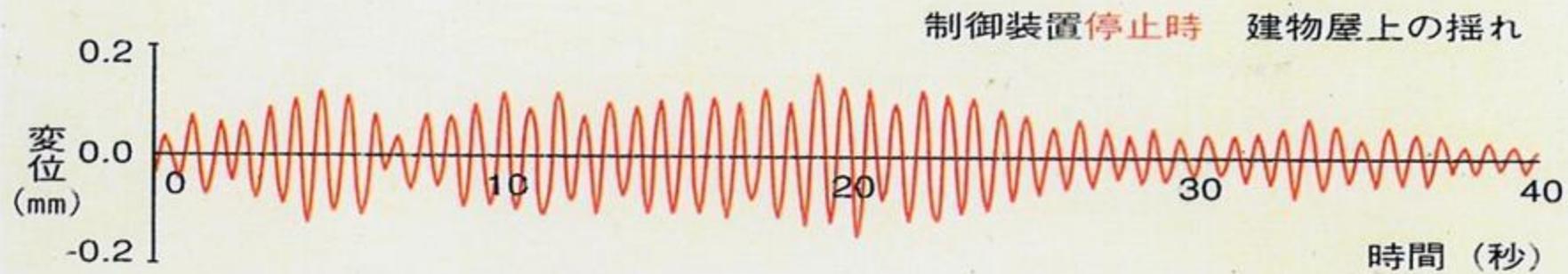


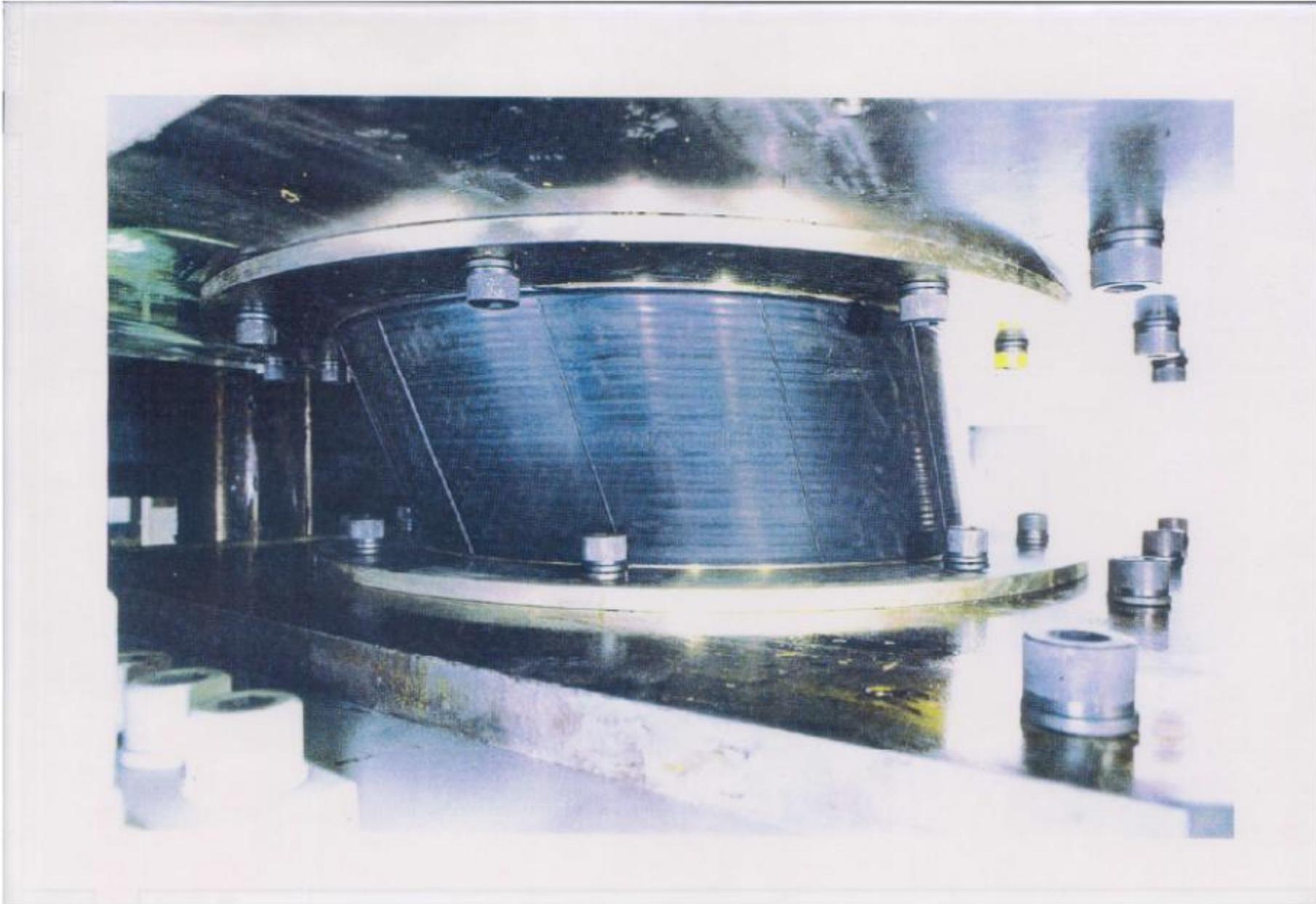
図-3 常時微動変位波形

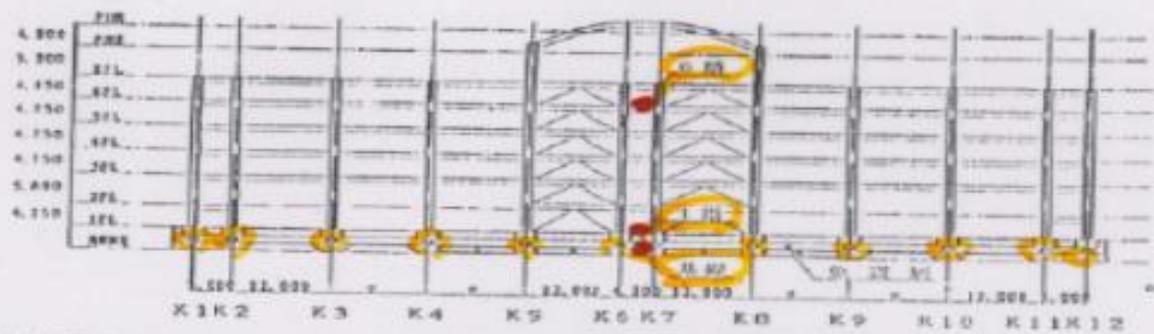
免震装置

	支持性能
支 承	{ 変形性能
ダンパー	減衰性能

免震材料

}	支承材
	復元材
	減衰材





●印地震計設置位置

建物と真北とのずれ 約3度



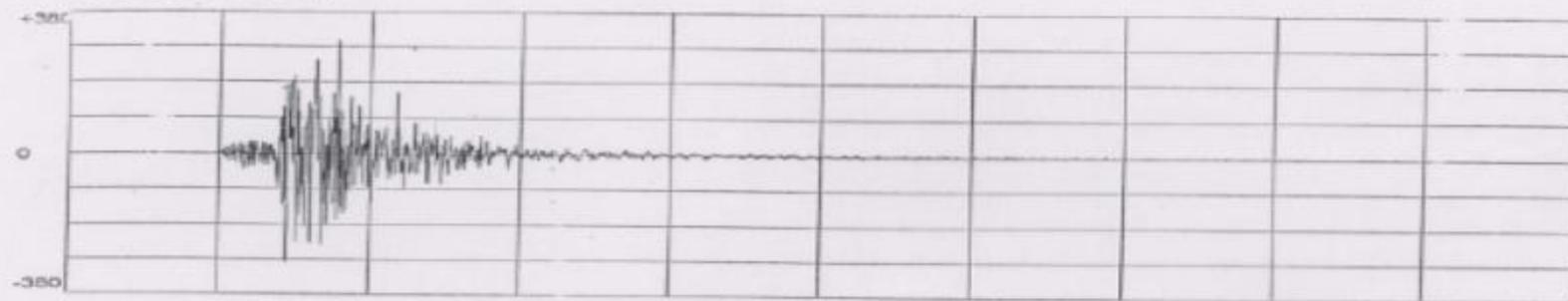
免震装置の配置

地点番号: 0001, 日付: '95/01/17, 時刻: 05:45:42.198, L^k: 05.0Gal

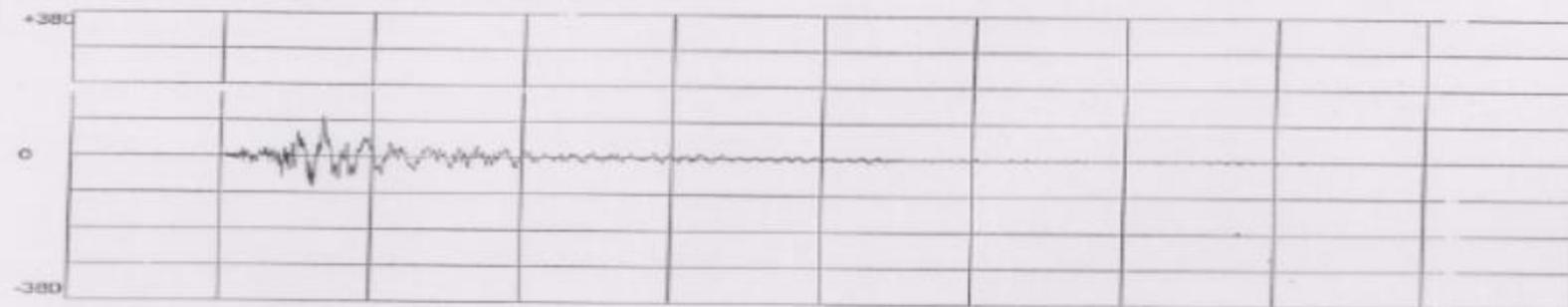
X軸: Sec, Y軸: Gal

(EW)

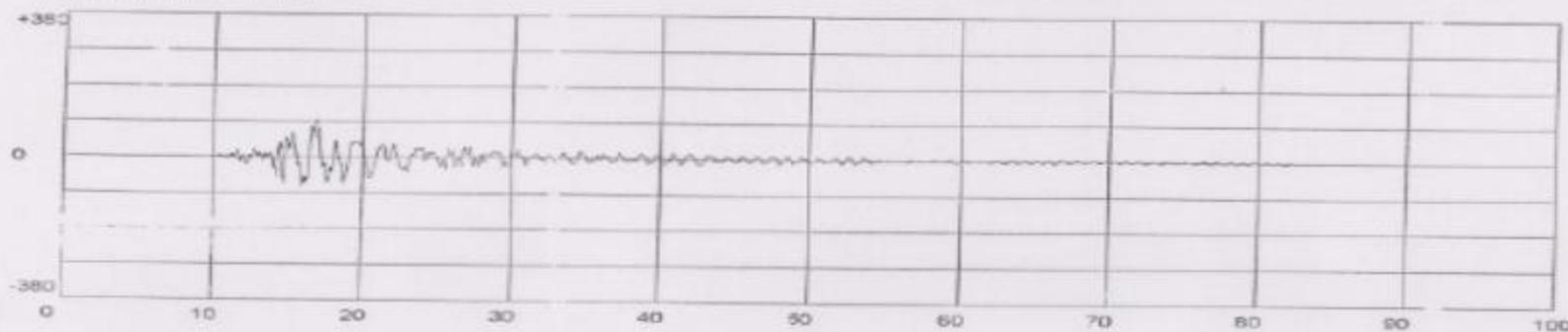
Channel 1 : + 300Gal



Channel 4 : + 166Gal



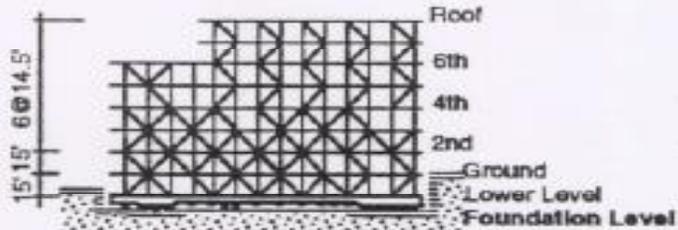
Channel 7 : + 103Gal



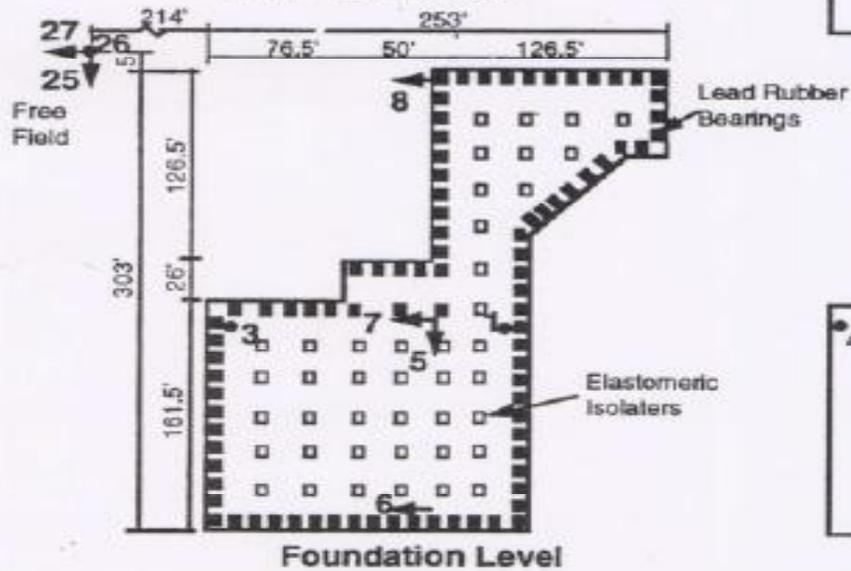


**Los Angeles - 7-story University Hospital
(CSMIP Station No.24605)**

Braced perimeter steel frames isolated by lead-rubber bearings.
Design date : 1988

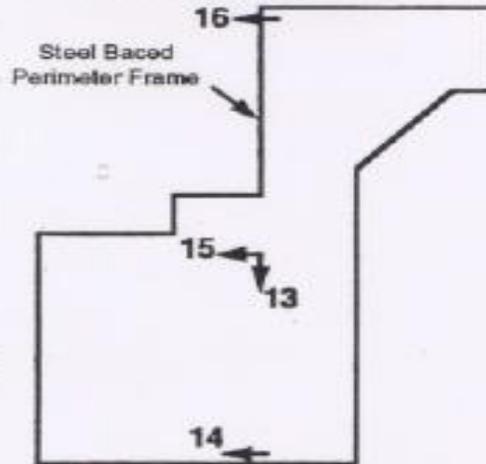


North Elevation

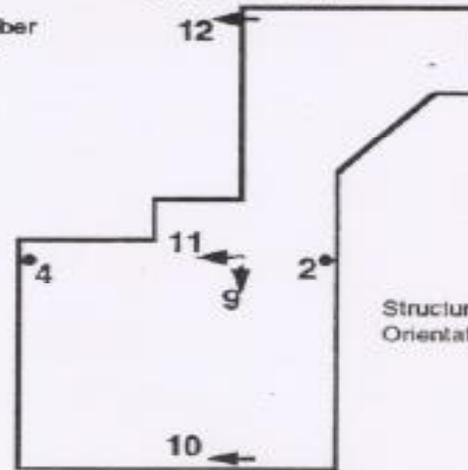


Foundation Level

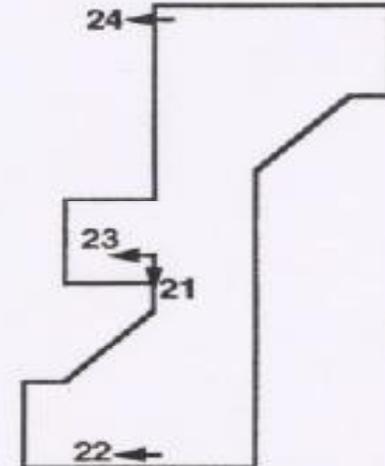
SENSOR LOCATIONS



4th Floor Plan



**Lower Level
(Above Isolators)**

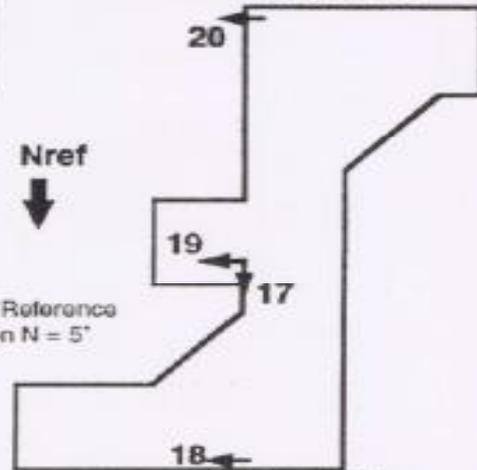


Roof Plan

Nref



Structure Reference
Orientation N = 5'

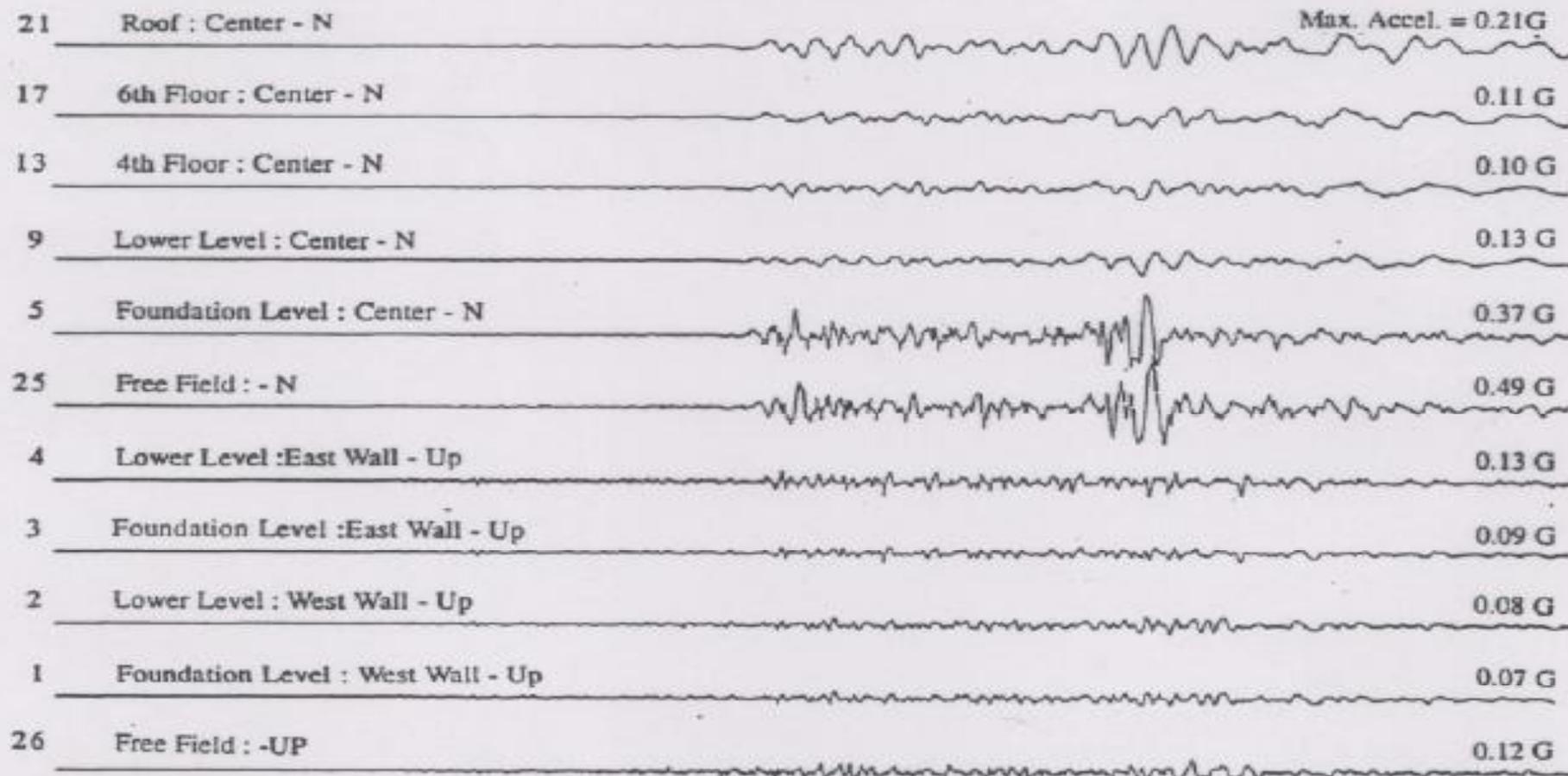


6th Floor Plan

Los Angeles - 7 - story University Hospital

(CSMIP Station 24605)

RECORD 24605-CO115-94017



Structure Reference Orientation : N = 5°

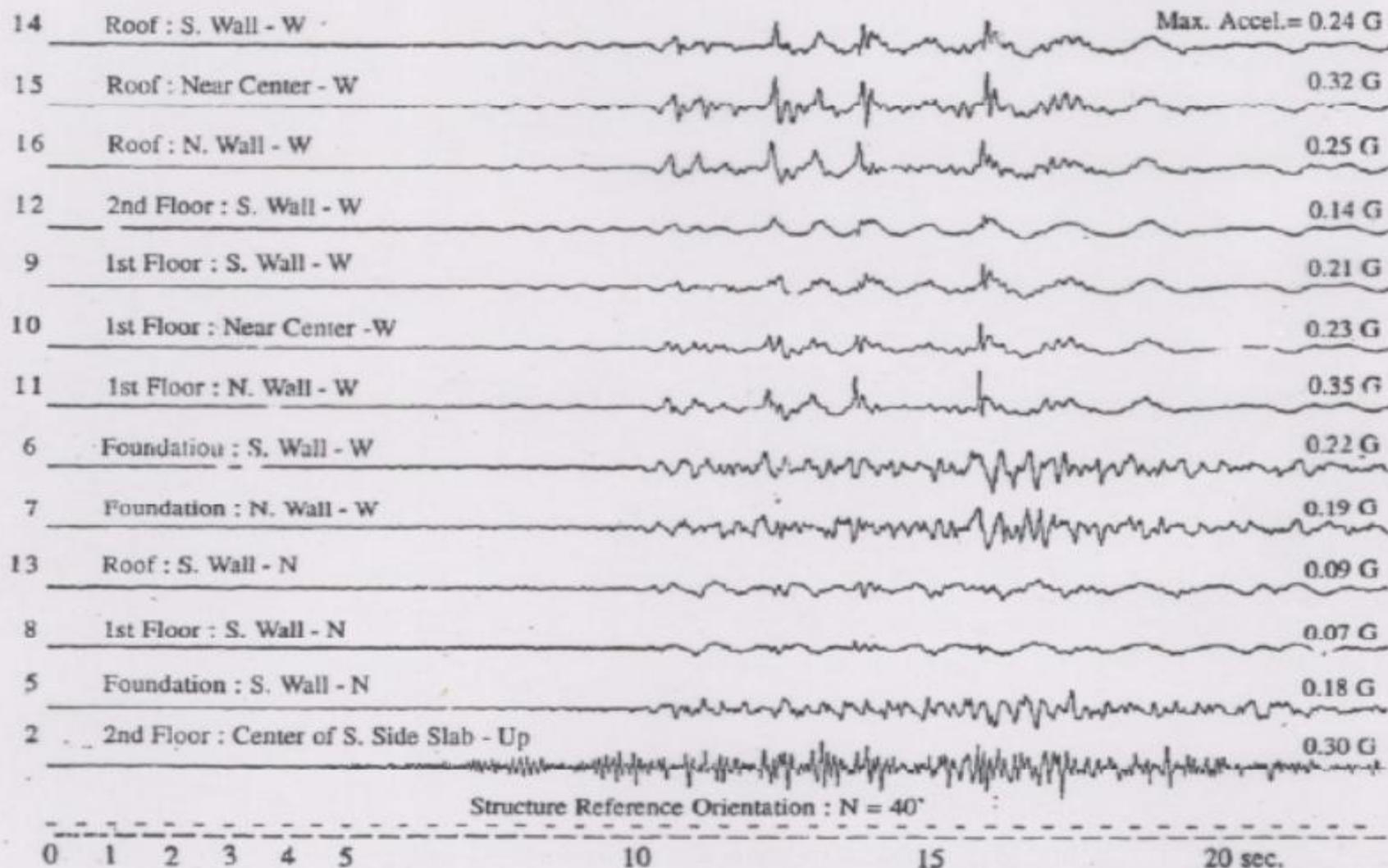
0 1 2 3 4 5 10 15 20 sec.

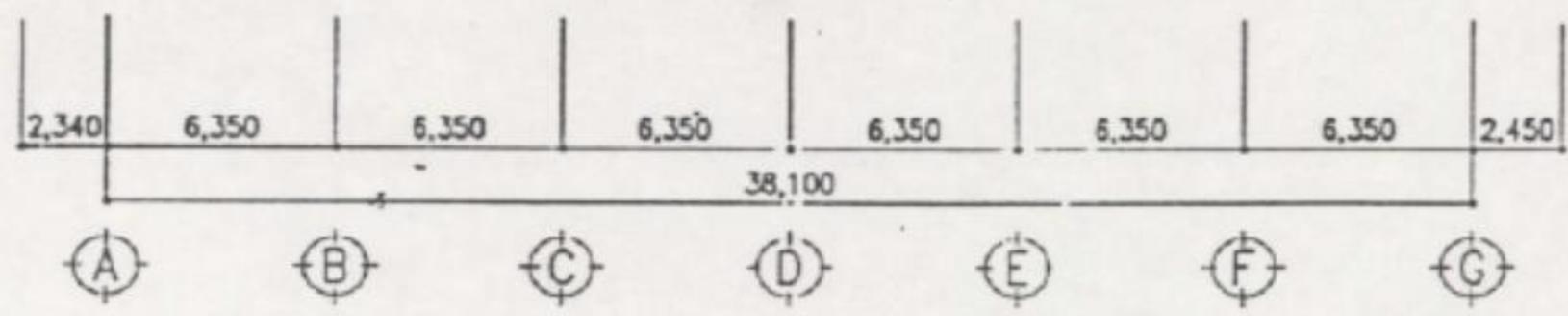
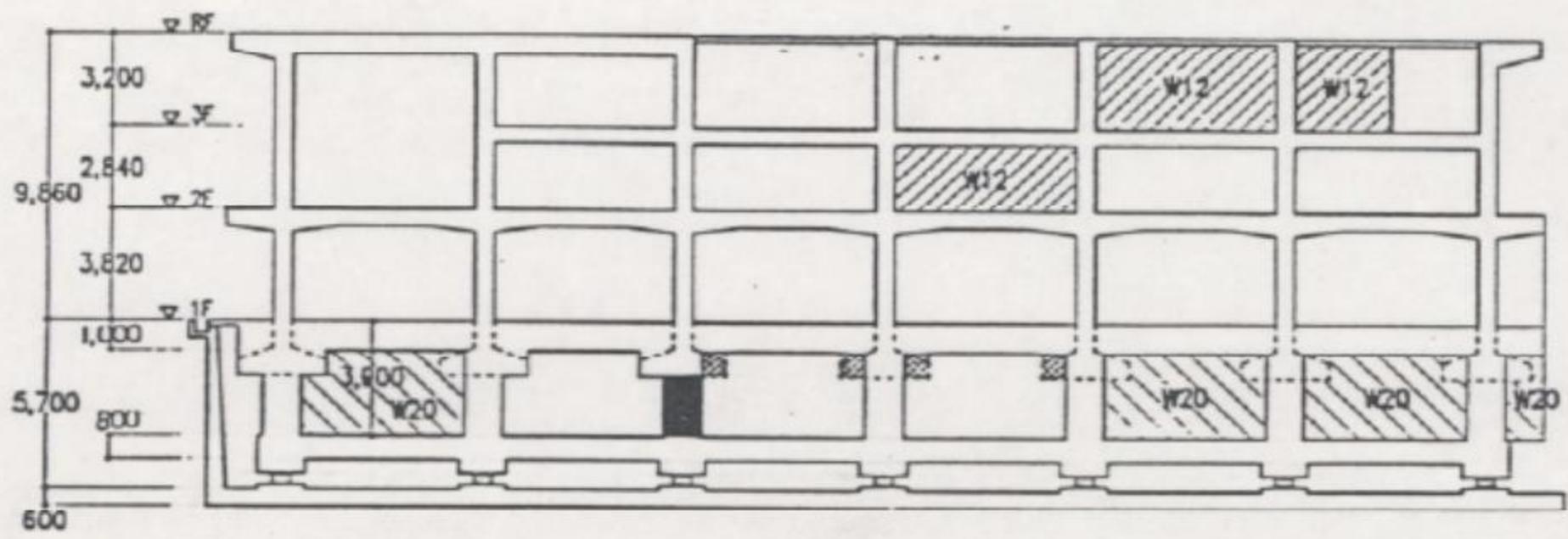


Los Angeles - 2 - story Fire Command Control Bldg .

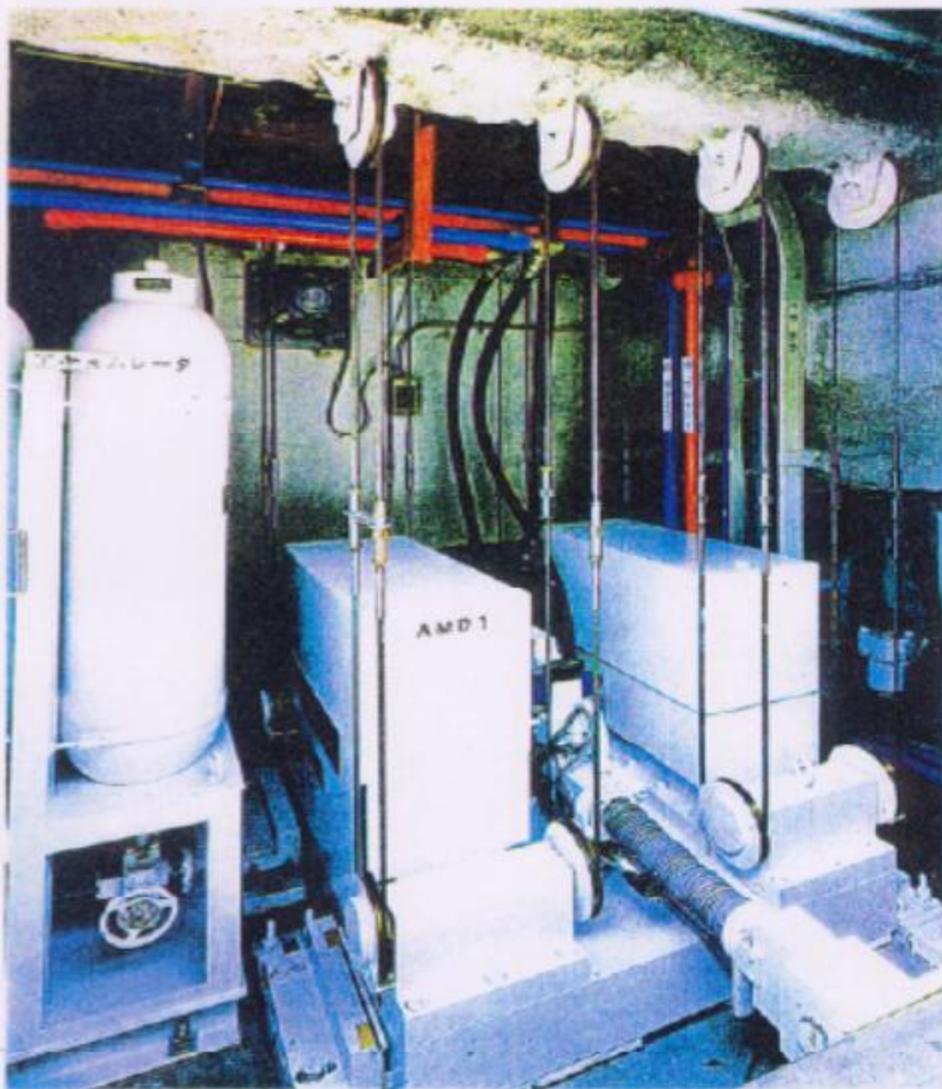
(CSMIP Station 24580)

RECORD 24580-CS104-94017





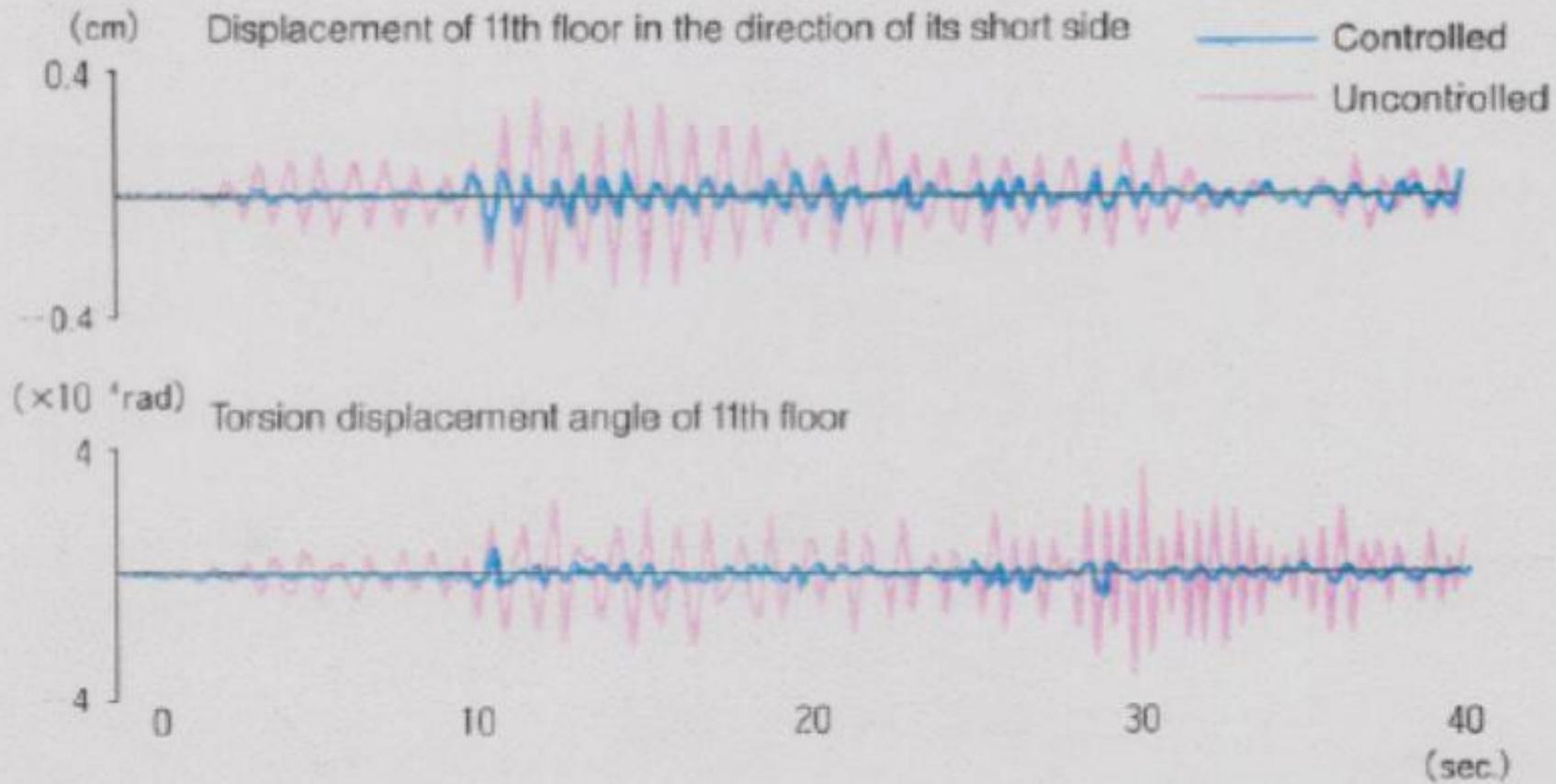




▲AMD-1(Added mass 4ton)

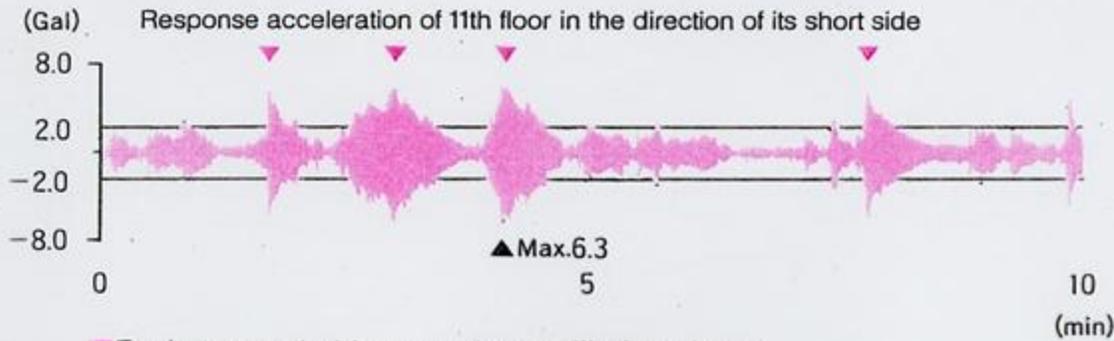
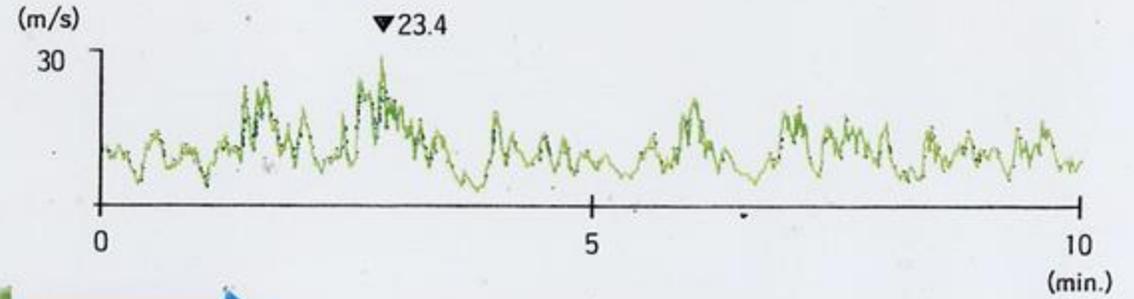
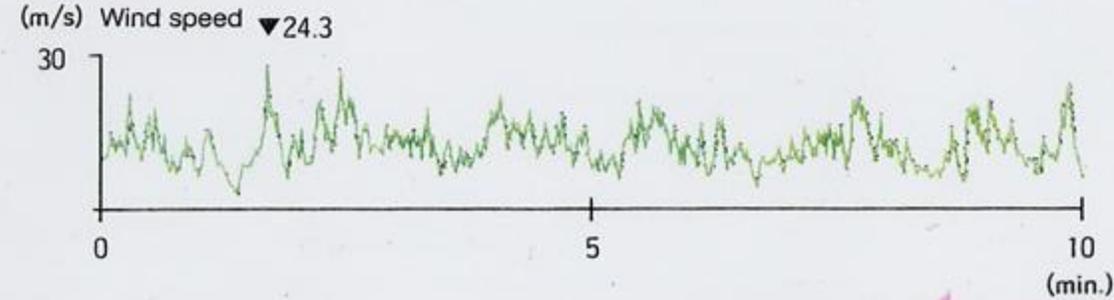
■ SEISMIC RESPONSE CONTROL EFFECT

- Earthquake with its epicenter under the ocean near the east coast of Oshima Island (seismic intensity of 3 in Tokyo) on October 14, 1989.

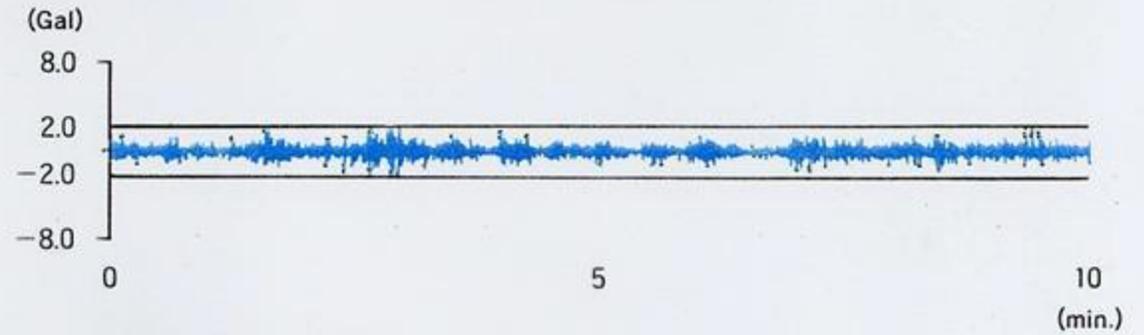


■ WIND-CONTROL EFFECT

- Typhoon No. 11 on August 10, 1990 (Tokyo: maximum instantaneous wind speed = 30.8m/s)



▼ Feel strong shakings as the oscillation shows.



• Hardly feel shakings

耐震診断と耐震改修(1)

- 耐震診断

- 一次診断 各階の柱・壁の断面積とその階以上の建物重量で評価

- 二次診断 各階の柱・壁の終局強度を用いて評価

- 三次診断 各階の柱・梁・壁による保有水平耐力を用いて評価

- 耐震指標 $I_s = E_o \times SD \times T$ (必要条件 $I_s \geq 0.6$)

- 保有性能基本指標 $E_o = C$ (強度) \times F (靱性)

- 形状指標 SD (平面・立面の非整形性)

- 経年指標 T

耐震診断と耐震改修(2)

- 耐震改修

強度増強型と**変形能力**増大型

柱・壁増設補強、X型・V型・K型補強架構、バットレス式架構
鋼板・炭素繊維シート巻き、スリット入り垂れ壁・腰壁

偏心率・剛性率の改善

上層部撤去による質量低減

制震デバイス設置

免震レトロフィット

学校校舎、官公庁建物、大阪城天守閣

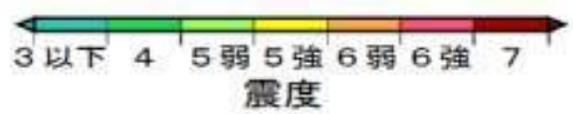
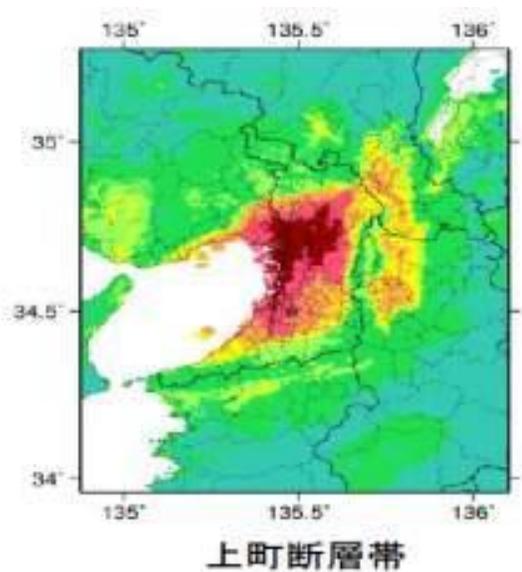
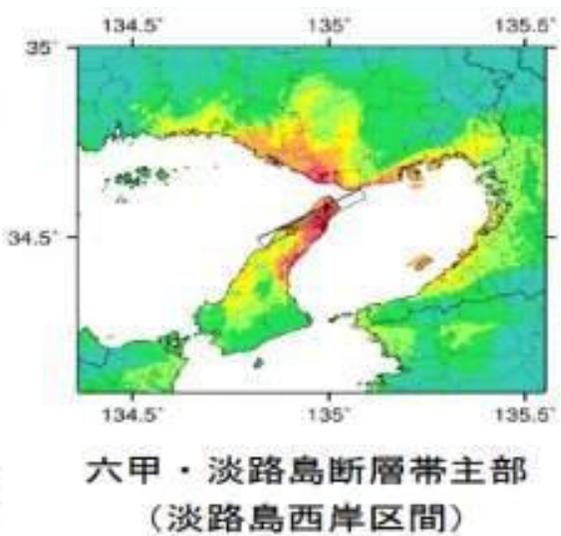
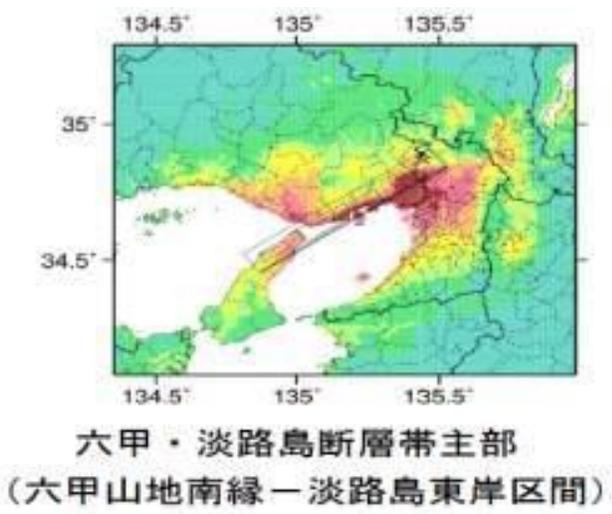
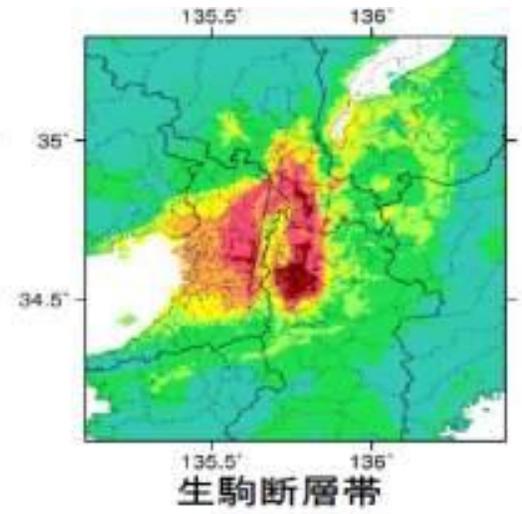
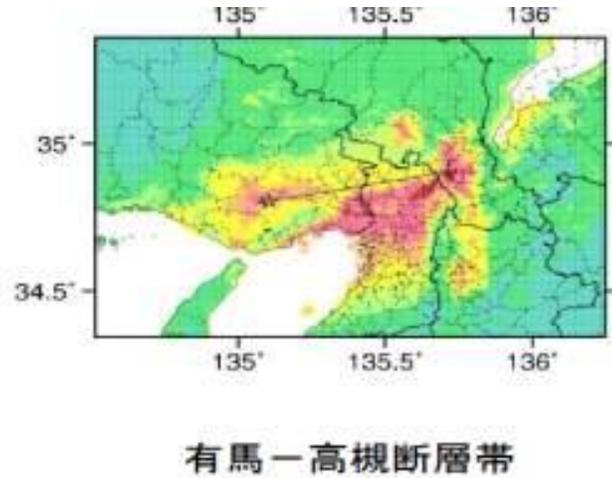
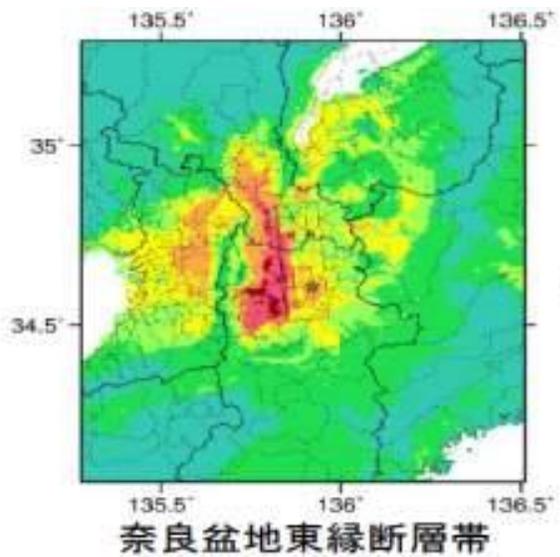
国立西洋美術館、大阪市中央公会堂、京大本部時計台棟

平城京第一次大極殿、中ノ島フェスティバルタワー

耐震偽装に関わる問題－2005(H17)・11・16 発覚

- ・ **構造計算書**偽装により耐震安全性に疑義
- ・ 偽装 **102** 件中 **14** 件の建築物の**耐震性不足**

- ・ **構造設計一級**建築士の誕生
- ・ **構造計算**適合性判定制度の発足
- ・ **建築確認**審査および中間検査・完了検査の厳格化
- ・ 建築設計**図書保存**の義務付けと期間延長
- ・ 住宅等の**瑕疵担保**責任の強化

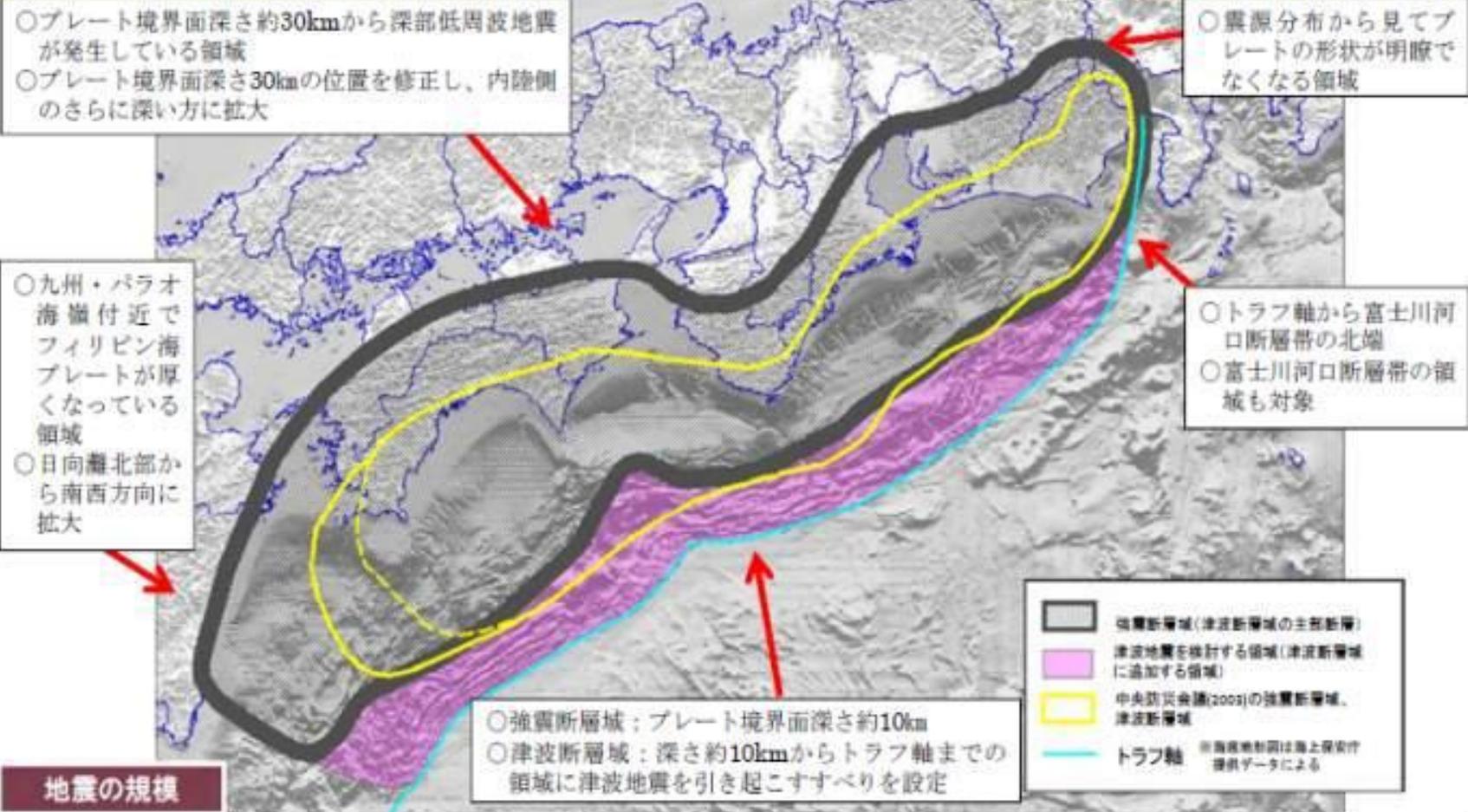


震源断層を特定した地震動予測地図
各断層帯のケース1の震度

県庁所在地 及び北海道の 総合振興局・ 振興局の名称	30年以内震度6弱 以上確率（％）		
	2012年	2010年	2012年と 2010年の差
新潟	7.1	7.2	-0.1
富山	5.7	5.7	0.0
金沢	2.8	2.8	0.0
福井	11.4	11.2	0.2
甲府	55.4	55.3	0.1
長野	12.1	12.1	0.0
岐阜	17.7	17.2	0.5
静岡	89.7	89.8	-0.1
名古屋	46.4	45.3	1.1
津	87.4	85.9	1.5
大津	11.1	10.7	0.4
京都	13.6	13.1	0.5
大阪	62.8	60.3	2.5
神戸	19.2	17.8	1.4
奈良	70.2	67.7	2.5
和歌山	51.0	48.2	2.8
鳥取	4.1	4.1	0.0

南海トラフの巨大地震の想定震源断層域

資料1-1

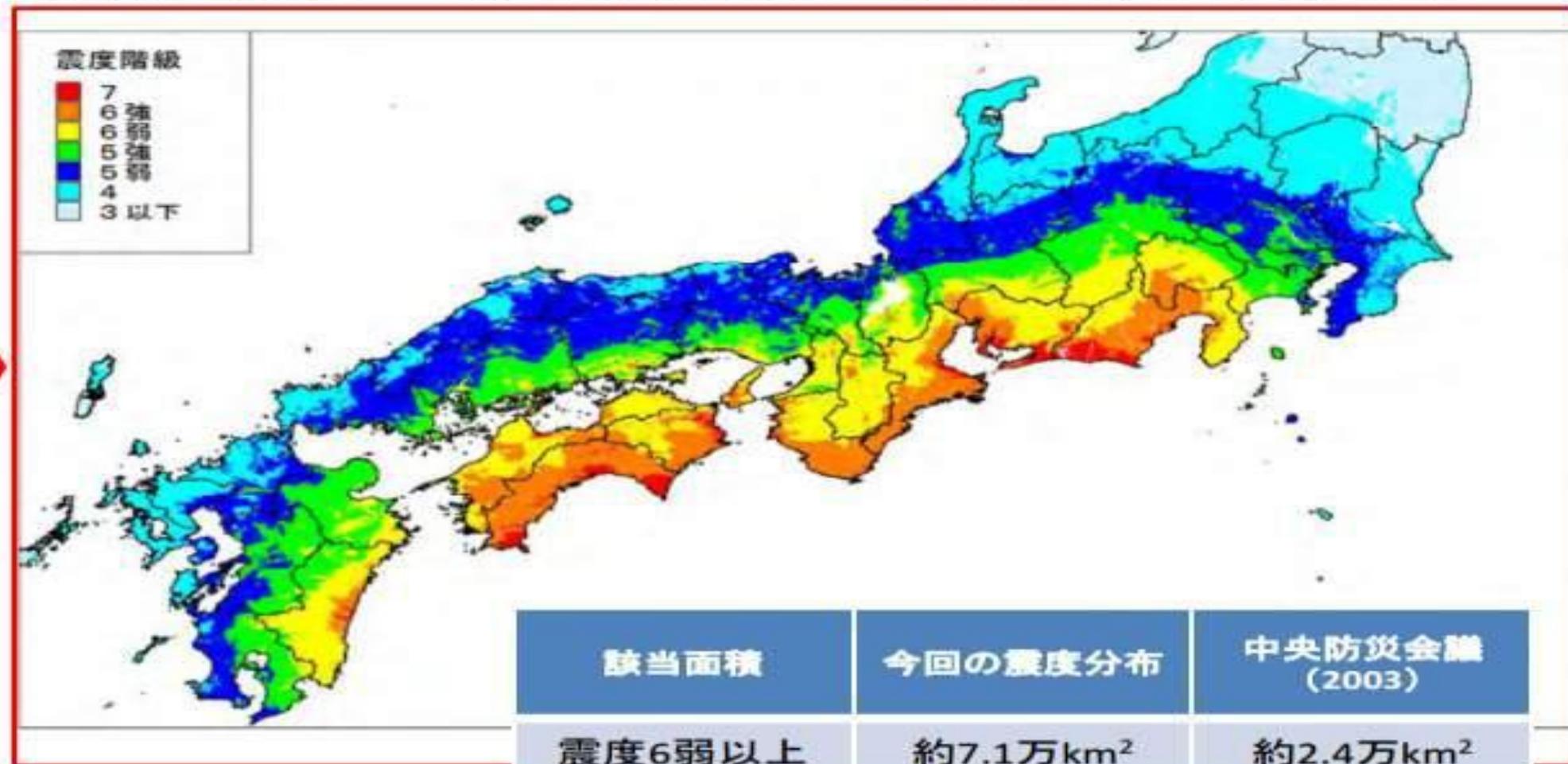


地震の規模

	南海トラフの巨大地震		参考			
	(津波断層モデル)	(強震断層モデル)	2011年 東北地方太平洋沖地震	2004年 スマトラ島沖地震	2010年 チリ中部地震	中央防災会議(2003) 強震断層域
面積	約14万km ²	約11万km ²	約10万km ² (約500km×約200km)	約18万km ² (約1200km×約150km)	約6万km ² (約400km×約140km)	約6.1万km ²
モーメント マグニチュード Mw	9.1	9.0	9.0 (気象庁)	9.1(Ammon et al., 2005) [9.0(理科年表)]	8.7(Pulido et al., in press) [8.8(理科年表)]	8.7

【震度の最大値の分布図】

強震波形4ケースと経験的手法の震度の最大値の分布



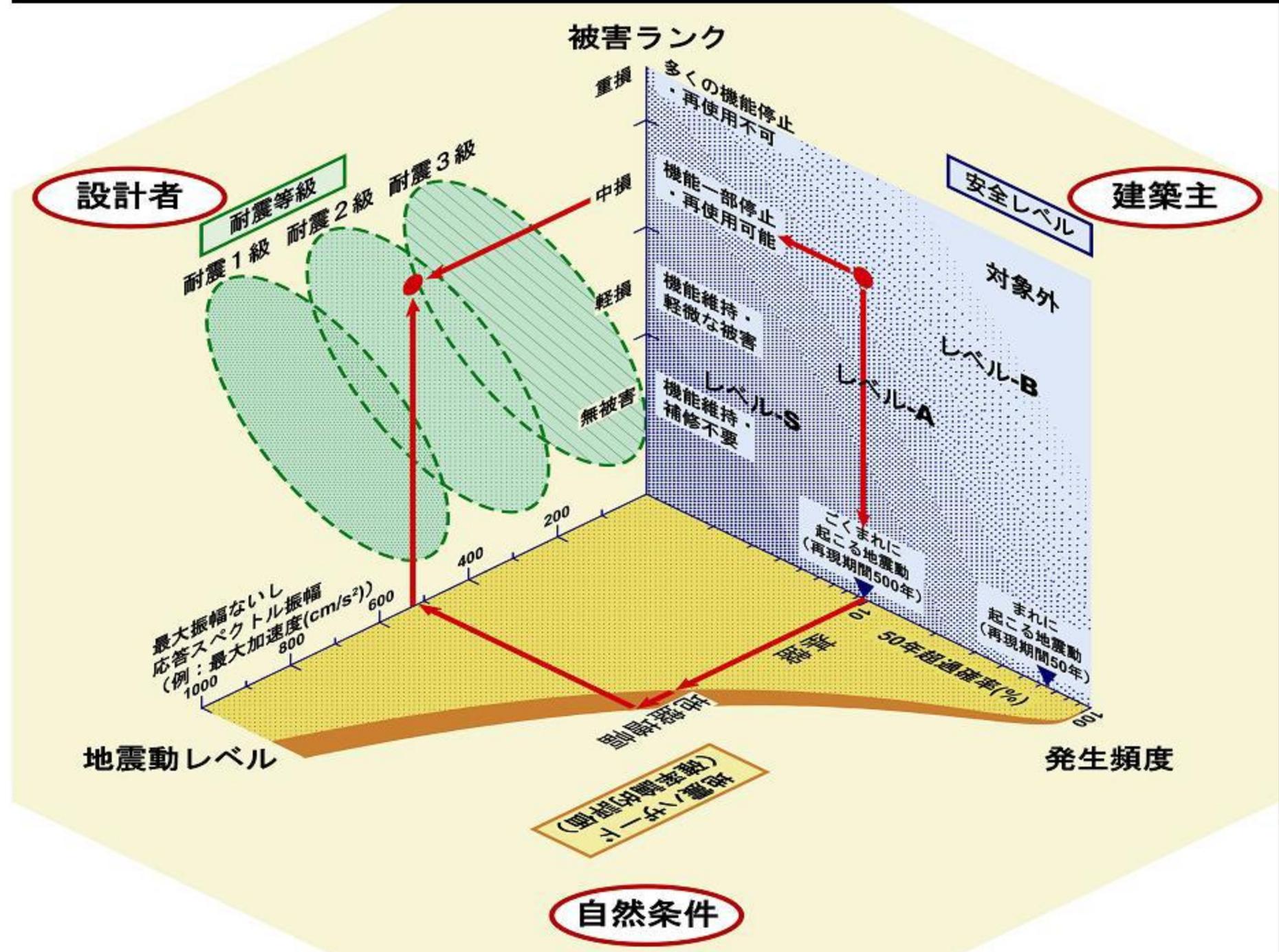
該当面積	今回の震度分布	中央防災会議 (2003)
震度6弱以上	約7.1万km ²	約2.4万km ²
震度6強以上	約2.9万km ²	約0.6万km ²
震度7	約0.4万km ²	約0.04万km ²

長周期地震動

- 大規模地震・広域震源
- 深部発震機構・長距離伝播
- 軟弱表層地盤
- 広く厚い堆積層・盆地地形(大阪平野、関東平野、濃尾平野)

- 遠地実体波、表面波、地震波コーダ部分
- 長周期成分の卓越
- 長い継続時間

- 超高層建築物・長周期構造物・免震建築物
- 非構造部材、内外壁、機器配管系、天井・建具類、懸垂物
- 長大橋、超高煙突、高架構造物
- 大型貯槽・タンク(スロッシング)



被害ランク

安全レベル

多くの機能停止
・再使用不可

対象外

機能一部停止
・再使用可能

レベル-B

機能維持・
軽微な被害

レベル-A

レベル-S

機能維持・
補修不要

ごくまれに
起こる地震動
(再現期間500年)

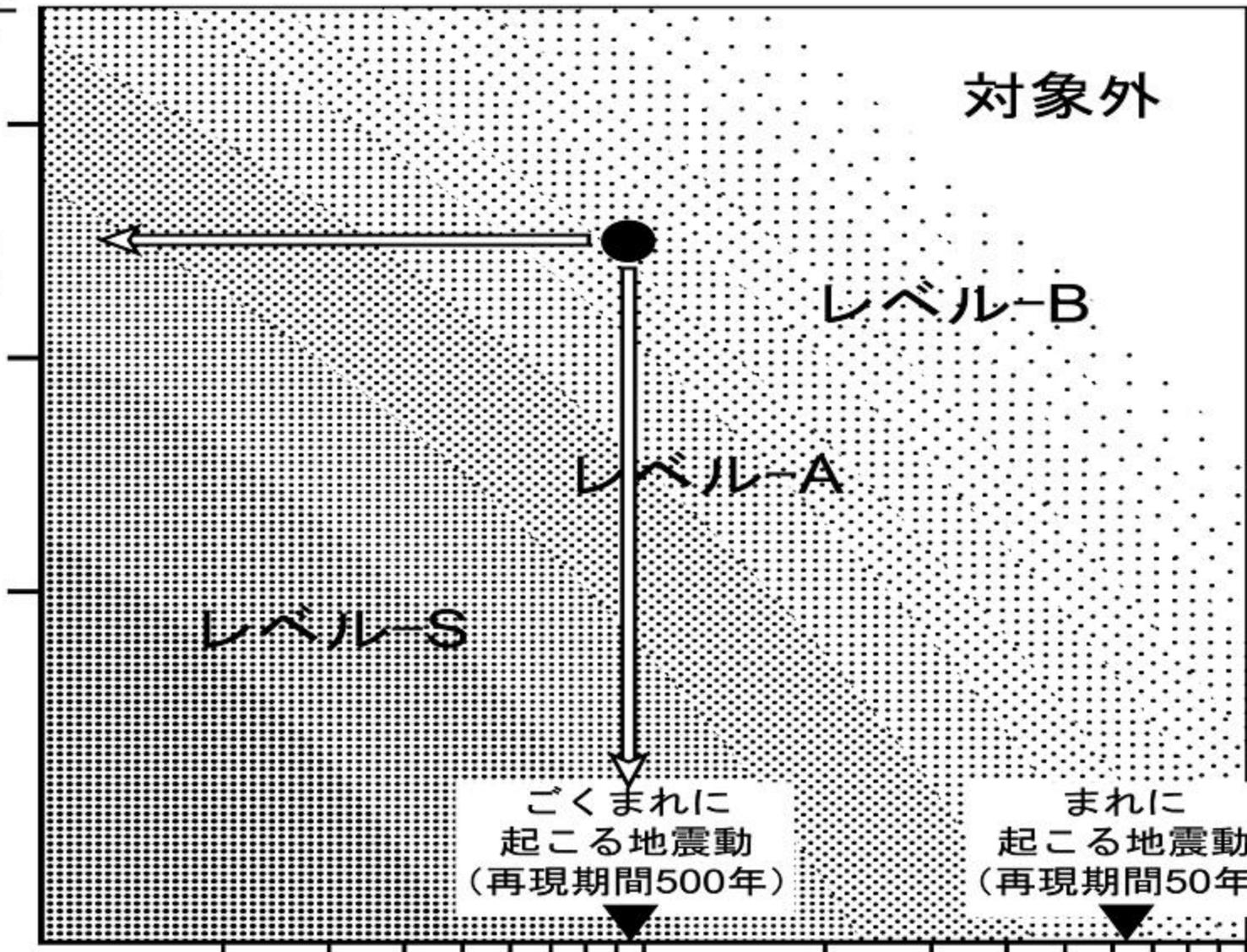
まれに
起こる地震動
(再現期間50年)

発生頻度

10

50年超過確率(%)

100



被害ランク

重損

中損

軽損

無被害

耐震3級 耐震2級 耐震1級

基準法
二次

超高層
レベル2

免震
余裕度
レベル

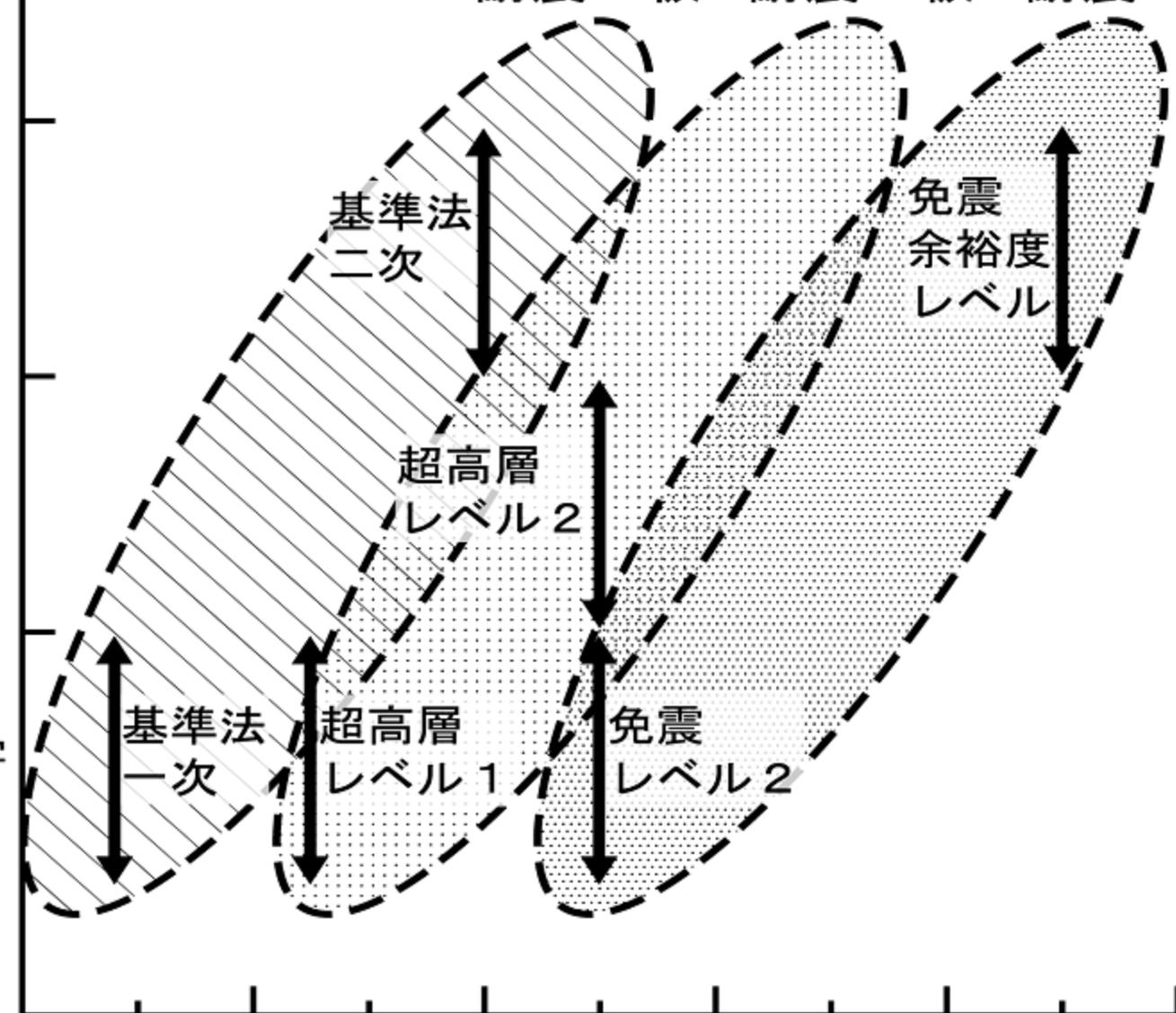
基準法
一次

超高層
レベル1

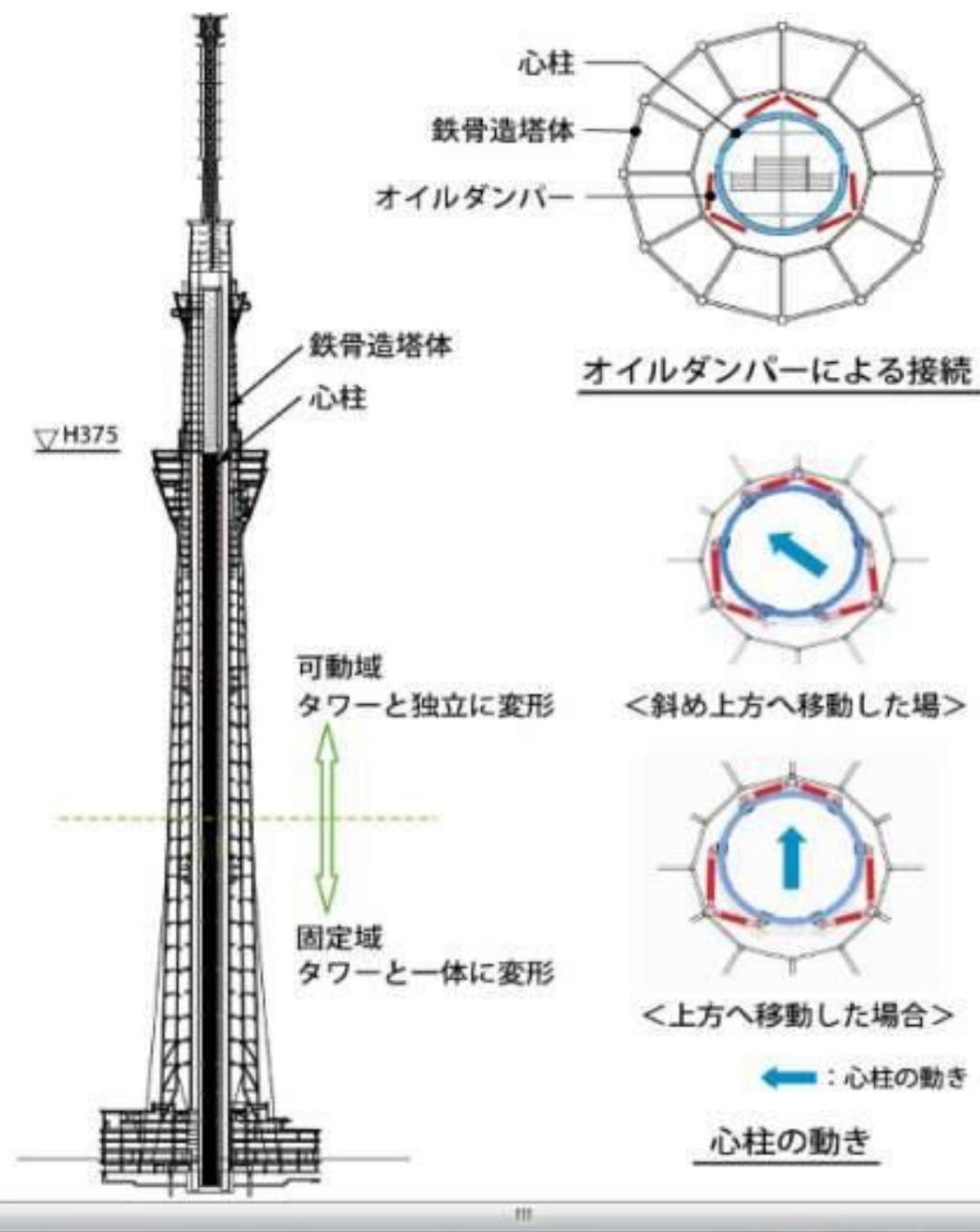
免震
レベル2

0 200 400 600 800 1000

地震動レベル(例:最大加速度(cm/s^2))



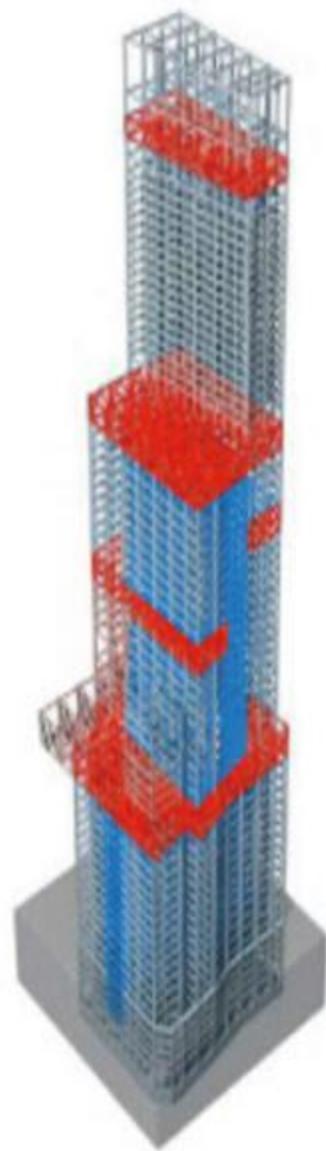








揺れを
約 3/4 に軽減

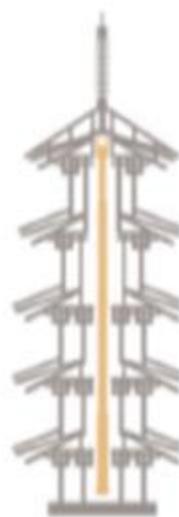


アウトリガー効果

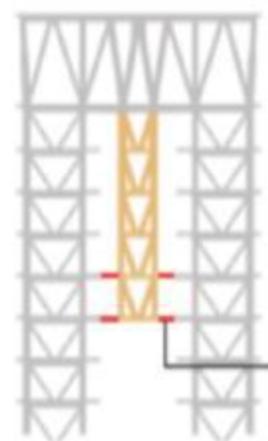


心棒ダンパー（エネルギー吸収装置）※特許申請中

高層部には、世界最古の五重の塔で用いられている心柱と現代の科学技術である制振ダンパーを組み合わせた心棒ダンパーが設置されています。地震時には心棒と周辺フレームとの間に設置されたダンパーにより建物の揺れを低減します。

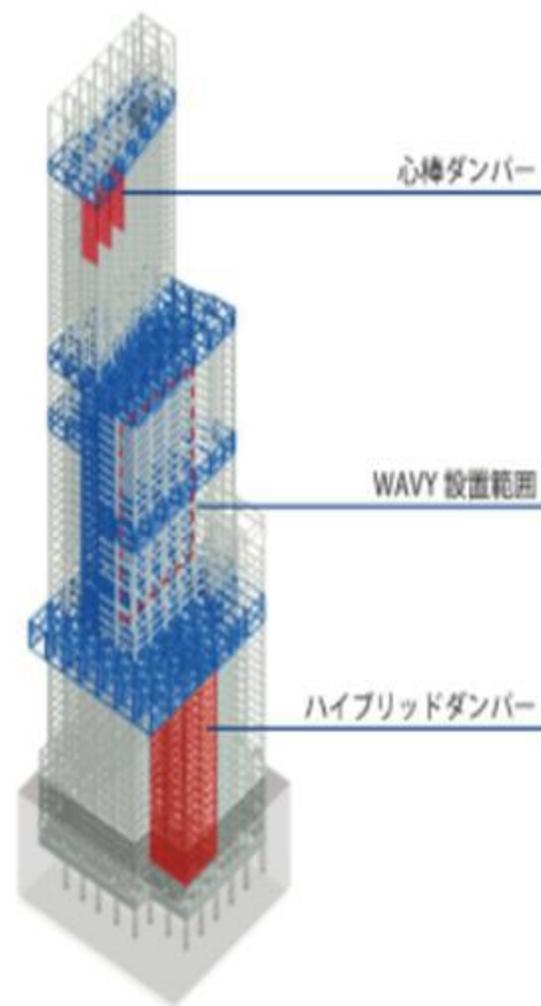


五重塔心柱



心棒ダンパー

ハルカス心棒ダンパー



？ 「心棒ダンパー」とは？