

# 長周期・長時間地震動と長周期パルスに 対する超高層ビルの対策



久田嘉章  
(工学院大学建築学部)



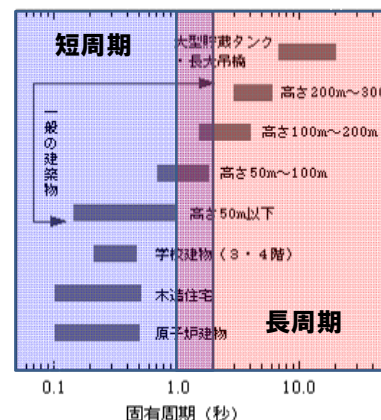
# 概要

- **長周期地震動とは？**  
長周期・長時間地震動と長周期パルス？  
耐震基準と超高層建築
- **長周期・長時間地震動**  
1923年関東大震災から2011年東日本大震災まで
- **長周期パルス**  
指向性パルス(1995年阪神淡路大震災など)  
フリングパルス/ステップ(2016年熊本地震など)
- **超高層建築とレジリエント対策**  
地震被害想定と想定外の被害  
万が一の大災害に備える

# 長周期地震動と長周期パルス？ NHKスペシャル MEGA CRISIS 巨大危機II 第1集「都市直下地震」(2017年9月2日放送)



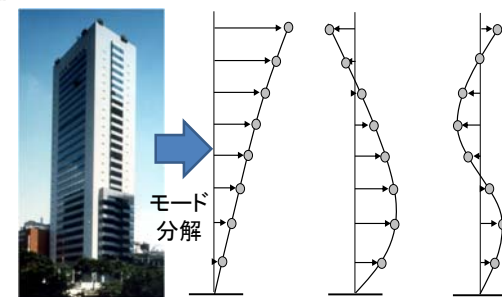
# 短周期・長周期地震動と建物の固有周期



建物・構造物の固有周期の分布  
⇒短周期と長周期の境は周期  
1~2秒程度

日本地震学会「強震動地震学基礎講座」  
第3回 強震動予測で対象となる周期範囲」

・建物のモード(揺れやすい形)  
と固有周期

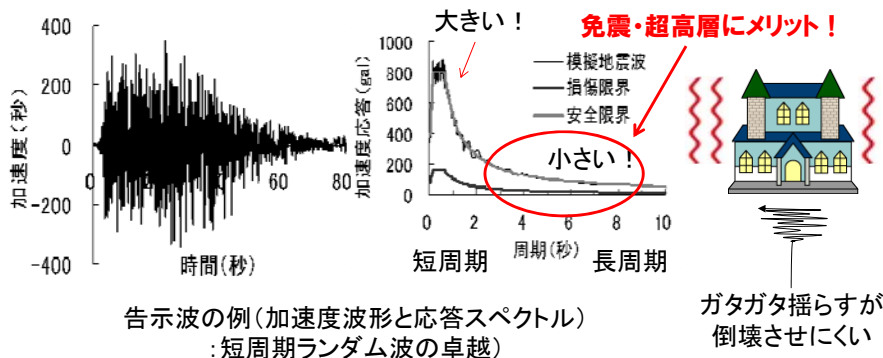


モード分解  
1次モード 2次モード 3次モード  
1次固有周期 2次固有周期 3次固有周期  
工学院大学新宿校舎の場合  
約3秒 約1秒 約0.5秒

⇒「建物の周期」とは通常、最も揺れやすい  
「1次固有周期」を指す。

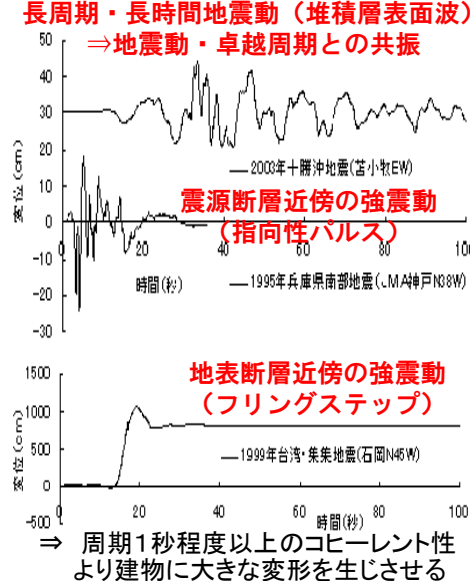
# 超高層建築の一般的な設計用地震動短周期 (成分が卓越する標準的な地震動)

- 短周期地震動の時空間のランダム特性(短周期側)
- 標準的入力地震動(エルセントロ波、タフト波、告示波・・・)
- 耐震設計建物を大変形させ、倒壊させる破壊力は大きくない



# 活断層や海溝型巨大地震による長周期地震動 (長周期・長時間地震動、断層近傍強震動)

長周期・長時間地震動(堆積層表面波)  
⇒地震動・卓越周期との共振



2003年十勝沖地震の苫小牧市におけるナフサタンクの全面火災  
→卓越周期・長い継続時間



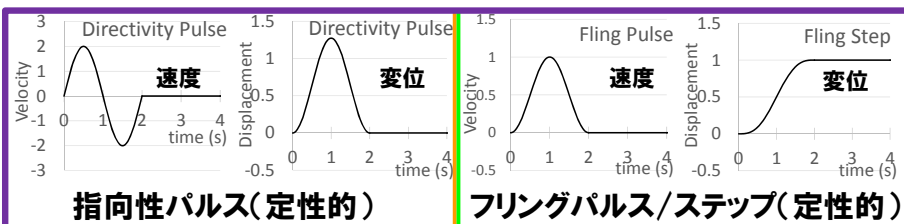
1995年兵庫県南部地震における神戸市の木造家屋の倒壊  
→震度7、なぎ倒す



1999年台湾・集集地震による地表断層上のRC建物の傾斜  
→移動・傾斜

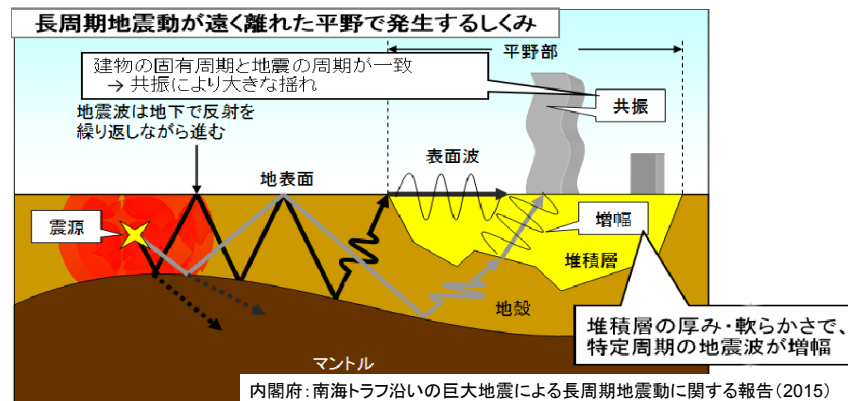
# 特徴的な長周期地震動の分類例・主な特徴

名称	代表例	成分・成因
長周期・長時間地震動(やや長周期地震動)	・1923年関東大震災の東京本郷波など	堆積層表面波(堆積盆地・平野)
長周期パルス(震源断層近傍の地震動)	指向性パルス(キラーパルス)	・1995年兵庫県南部地震の神戸波など 実体波(S波)(SMGA/破壊伝播)
	フリングパルス(フリングステップ)	・1999年台湾集集地震の石岡波など 断層すべり(地表地震断層など)
	複合型パルス(指向性+フリング)	・2016年熊本地震の益城町・西原村波など



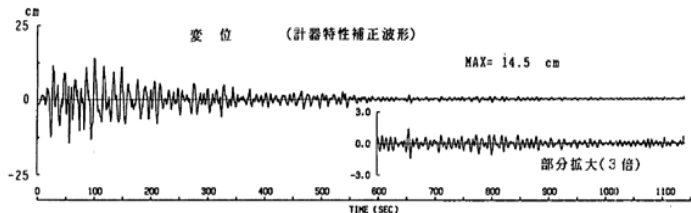
# 長周期・長時間地震動とは?

- 海溝型巨大地震など大規模な浅い震源で効率的に発生する地震波(主に表面波)が、関東・大阪平野などの厚い堆積層を持つ盆地内で大きく増幅する地震動
- 通常地震動と異なり、周期は2~3秒程度以上と非常にゆっくりとした揺れであり、継続時間が非常に長い(数分~10分以上)。地盤特性により卓越周期が存在
- 低層建物には殆んど影響しないが、超高層建築・免震建築・大規模タンクなど長周期構造物と共振した場合、大きな揺れとなる。

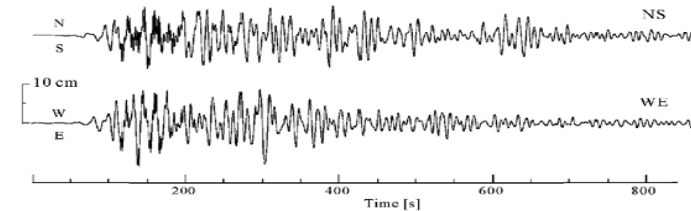


# 過去の巨大地震による東京の長周期地震動

## 1923年関東地震 (M7.9)、1944年南海地震 (M7.9)



1923年関東地震による東京市・本郷における変位記録(横田ほか)



1944年南海地震による東京市大手町における復元変位記録(古村・中村)

⇒海溝型巨大地震による10分以上も継続する長周期・長時間地震動が確認されている



浅草寺の五重塔 (942年創建、1648年再建、高さ33m、関東大震災に耐えたが、戦災で焼失。現在はRC造で1973年再建)

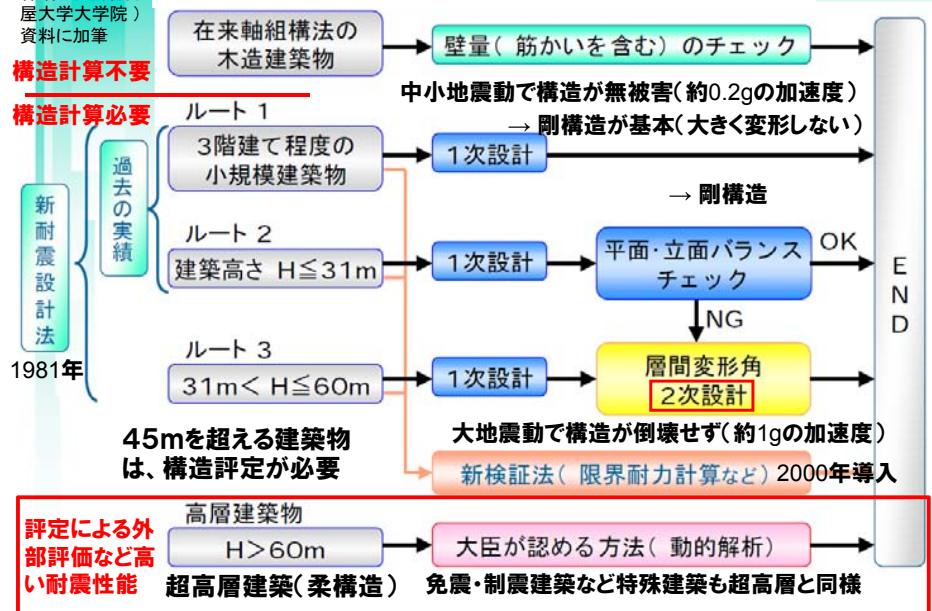
森保宏氏(名古屋大学大学院)資料に加筆

構造計算不要

構造計算必要

新耐震設計法  
過去の実績  
1981年

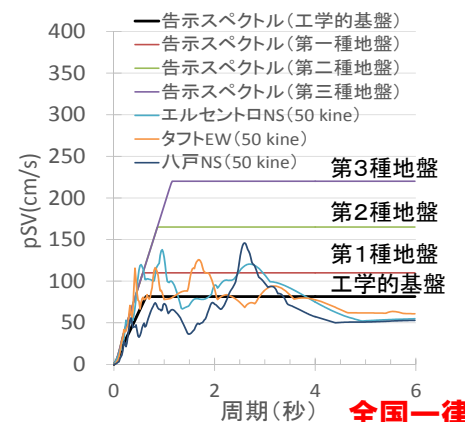
# 構造計算のルート(現在の耐震規定)



# 1985年メキシコ地震とメキシコ市における中高層建築の倒壊

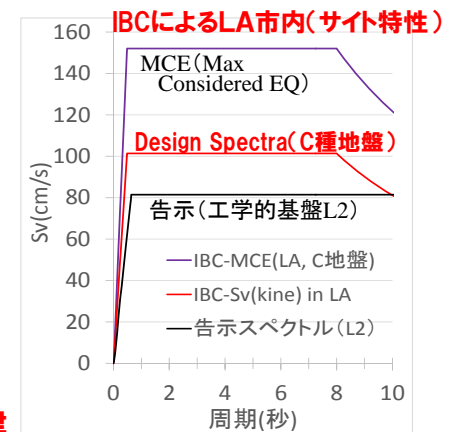


# 標準観測3波から2000年告示スペクトルへ



告示波(告示スペクトル+60秒程度の継続時間)  
⇒長周期地震動はある程度考慮されている(八戸波等の包絡など)

⇒長周期地震動は一応考慮されている



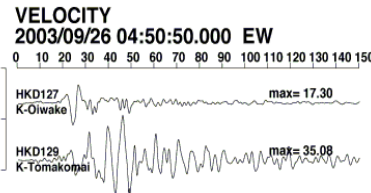
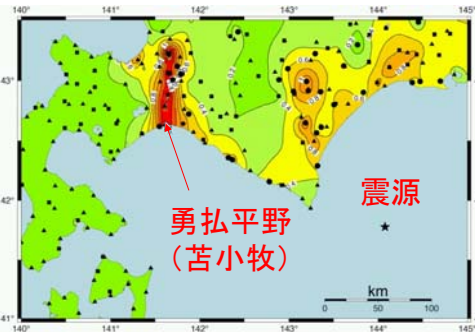
## IBC設計用応答スペクトル例

ASCE7(2010)による試算  
LA市内(C種地盤):  $V_s = 366 \sim 762$  m/s  
MCE(最大級地震: 約2500年に1度程度の地震)  
設計用基準スペクトル(MCEの2/3倍)  
注: 米国では重要度係数(1, 超高層で1.25)があるが、R(response modification coefficient, Dsの逆数)はS造では最大で8と大きい

# 2003年十勝沖地震による石油タンク被害

## 2004年NHKスペシャル「地震波が巨大構造物を襲う」で取り上げられ、「長周期地震動」として全国的に注目

### 2003年十勝沖地震



速度応答スペクトル (h=1%, 7秒EW成分)  
(畑山・座間, 2004)

[http://www.fri.go.jp/bosai/tokachi\\_lpgm.html](http://www.fri.go.jp/bosai/tokachi_lpgm.html)

⇒国として長周期・長時間地震動対策を推進(2016年国交省の対策へ)

# 2011年東日本大震災

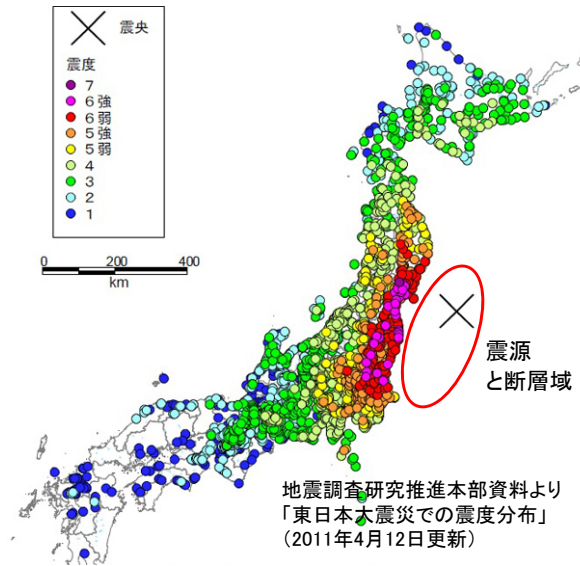
## 震度分布と建物・人的被害

消防庁発表(2014/9/10)

**人的被害**  
死者: 19,074  
(約9割は溺死)  
行方不明: 2,633  
負傷: 6,219、重傷: 697  
避難者: 70,077

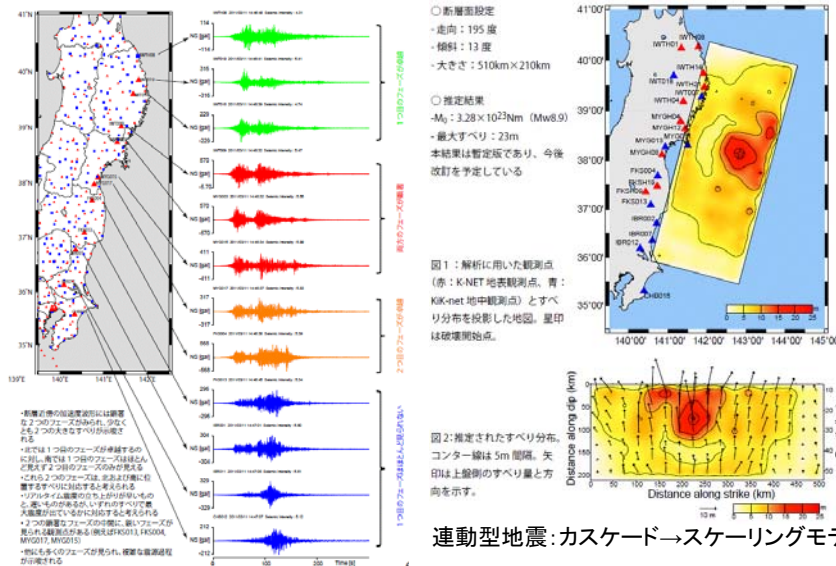
**建物被害**  
全壊: 127,361  
半壊: 272,277  
一部破損: 762,277  
火災: 330

**建物被害と死者数(内閣府)**  
約1万9千人の死者・行方不明者のうち、内陸での死者・行方不明者は、125人  
(総務省消防庁発表被害報平成24年3月11日現在、死者・行方不明者の0.6%)  
([http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2\\_2.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2_2.pdf))



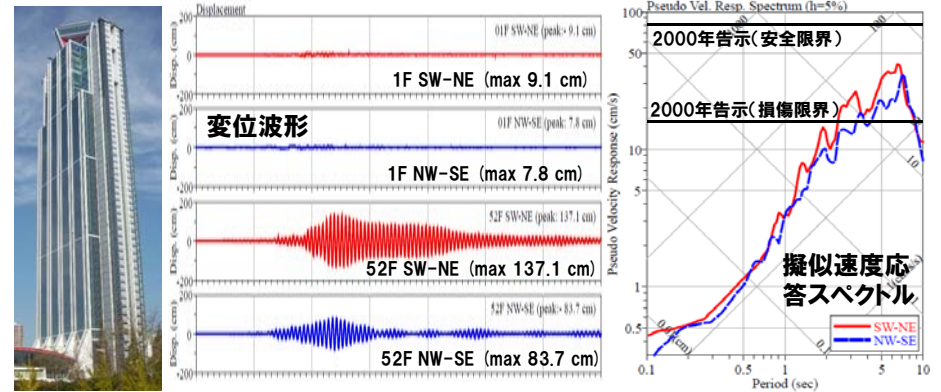
地震調査研究推進本部資料より  
「東日本大震災での震度分布」  
(2011年4月12日更新)

# 東北地方太平洋沖地震(M9.0):震源強震記録と断層震源モデル(防災科学技術研究所)



# 大阪府咲洲庁舎(55階 高さ256 m)と長周期地震動

- 建物の固有周期と地盤の卓越周期が一致(約7秒で共振)
- スプリンクラー破損による漏水、階段壁面のパネル落下、100カ所以上のひび割れ、エレベータによる閉じ込めなど多数の被害
- 震災直後、上層階の被害を防災センターで全く理解できなかった



小山(2011): 第39回地盤震動シンポジウム資料(2011/11/15(火))

# 1995年阪神・淡路大震災:活断層と指向性パルス

## 1995年兵庫県南部地震

(M7.3, 1月17日 5時46分)

死者:6,434名 負傷者: 43,792名

直接死 5,520名

約8割:建物倒壊による圧死

約1割:家具類等の転倒による圧死

約1割:焼死

関連死 914名

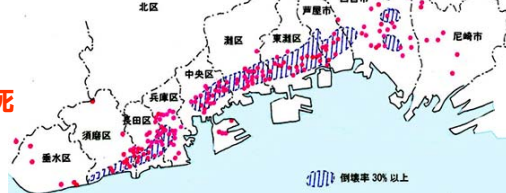
仮設住宅孤独死者数:233名

災害復興住宅孤独死者数:396名

活断層地震, 震度7

約20秒の揺れ

周期約1秒のキラパルス



建物倒壊と火災発生が震災の帯の集中

[http://dil.bosai.go.jp/workshop/01kouza\\_kiso/kasai/f5.htm](http://dil.bosai.go.jp/workshop/01kouza_kiso/kasai/f5.htm)

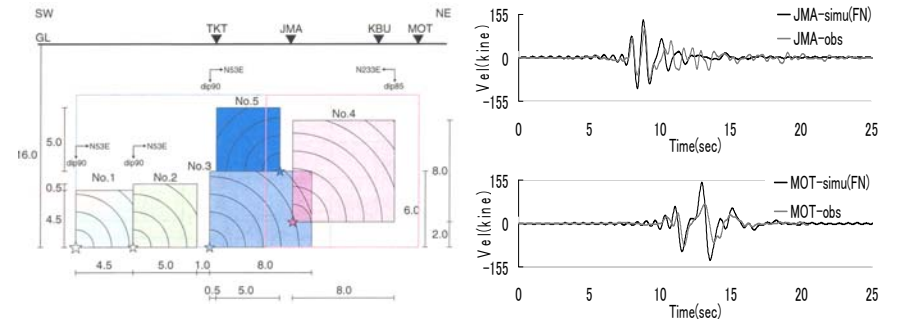


阪神高速道路の倒壊

建物被害:512,882棟

同時多発火災(285件)

# 1995年兵庫県南部地震 アスペリティー・強震動生成域(SMGA)と 指向性パルス(キラパルス)



- ・震源からの強い地震動(周期1秒程度の指向性パルス)と地盤増幅特性、「震災の帯」の旧基準の中層建物に被害が集中
- ・超高層建物・免震建物には大被害は生じなかった

松島・川瀬(AIJ, 2000)

## 指向性パルス:要素地震波の重ね合わせ 表現定理 (面震源による強震動の計算式)

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} T_{ik}(X, Y; \omega) [D_i(X; \omega)] d\Sigma$$

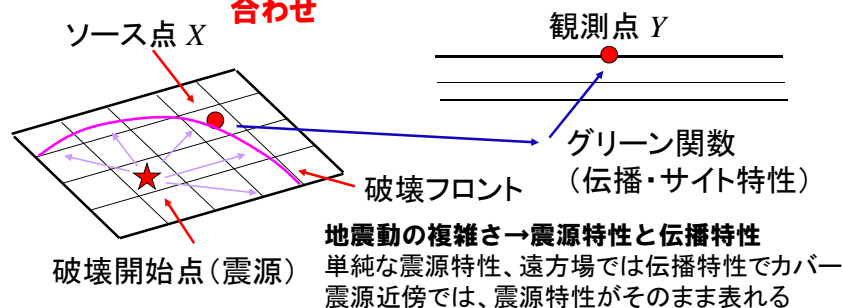
観測点Yの変位解

グリーン関数 (伝播・サイト特性)

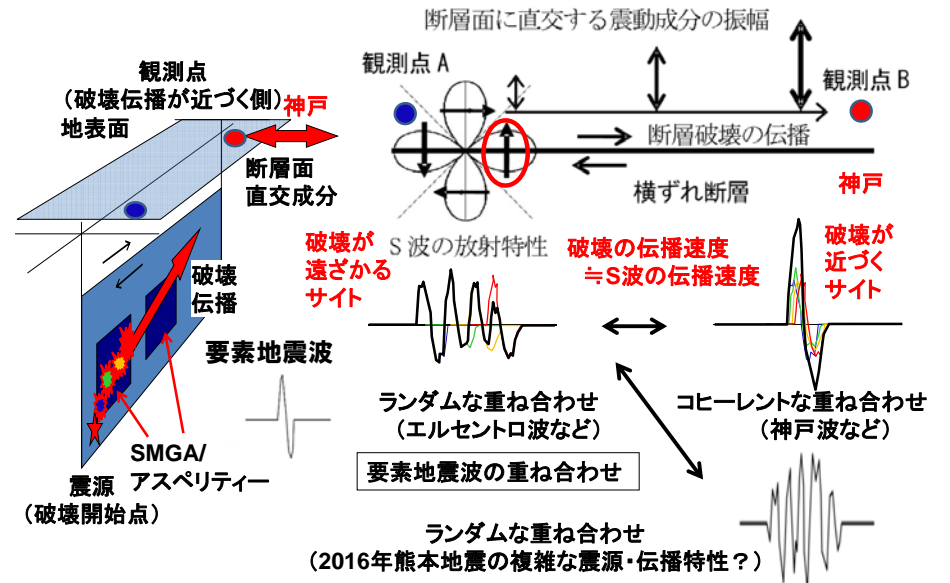
すべり関数・破壊伝播 (震源特性)

重ね合わせ

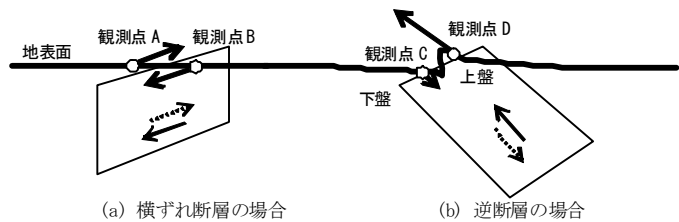
震源断層近傍で支配的!



## 震源特性の基礎:破壊伝播効果と指向性 ランダム波と指向性パルスの成因



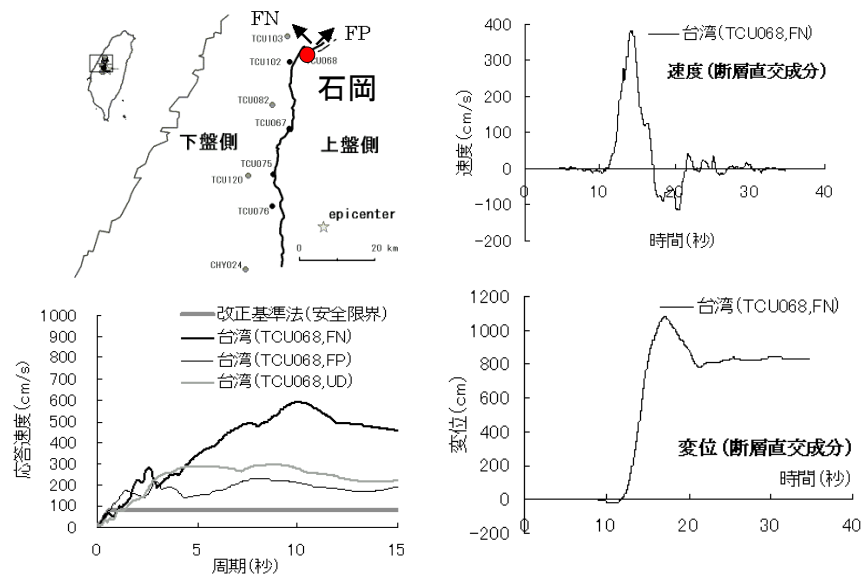
# 地表地震断層とフリングパルス/ステップ



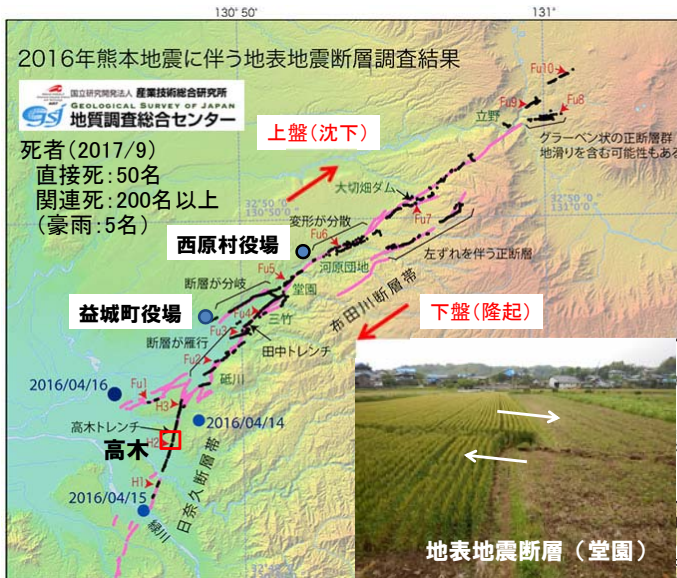
1999年台湾・集集地震における地表断層直上の建物の被害例(逆断層)

⇒M7程度以上で、震源断層より浅い厚さ数kmの表層を切断する地表地震断層が出現。地表地震断層の近傍では短周期地震動は大きくないが、大速度・変位や地盤傾斜が生じ、超高層・免震建築は要注意

# 地表断層出現とフリングステップ 1999 台湾・集集地震(逆断層・上盤側)



# 2016年熊本地震の地表地震断層と建物被害調査



参加機関(延べ17名):  
工学院大・安藤ハザマ  
東京電機大・土木研  
罫沢工学研究所  
減災アトリエ

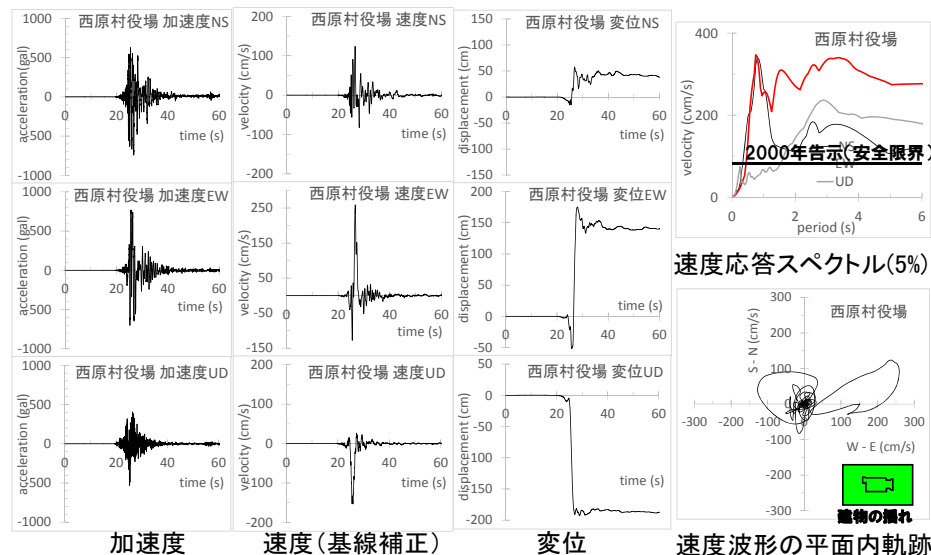
期間:  
2016年5月7~8日  
2016年5月25日

調査法:  
外観目視(岡田・高井  
チェックシートなど)  
一部、ヒアリング

調査建物(全224棟)  
地表断層近傍  
うち、断層直上36棟  
木造・82%  
1・2階・95%  
非常に古い・50%  
倒壊・14%(殆どが  
非常に古い倉庫)  
全壊・11%

活断層と地表地震断層(地質調査総合センター)

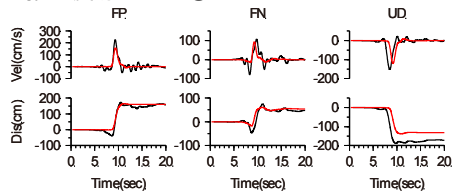
# 西原村役場の加速度・速度・変位波形



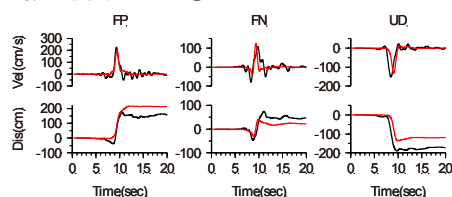
・指向性パルスよりもフリングステップが明瞭(NHKスペシャルでは長周期パルス)  
⇒破壊過程・グリーン関数の複雑さ? 免震・超高層建築には非常に厳しい

## 二つの修正震源モデルによる西原村役場の強震記録の再現

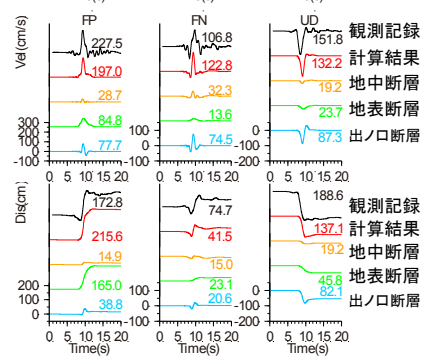
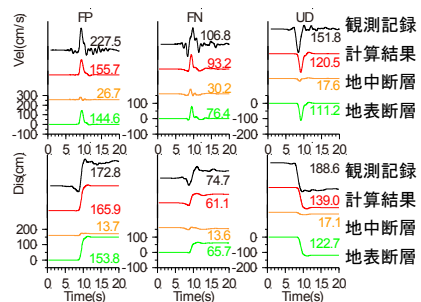
### 修正震源モデル①



### 修正震源モデル②

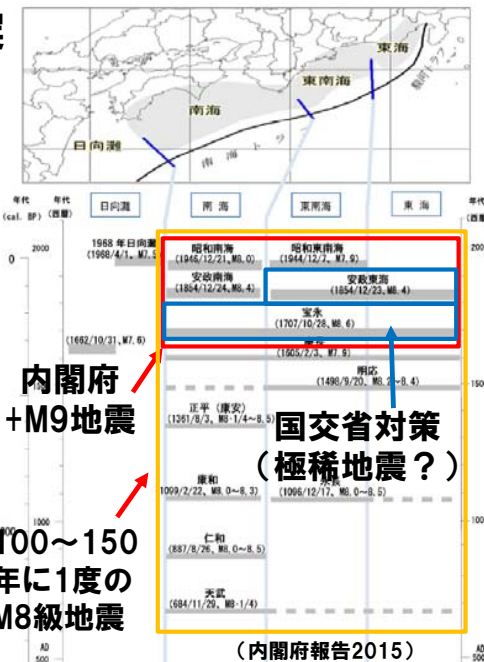


→ どちらのモデルでも強震動の再現性が向上  
 ・修正モデル①：地表地震断層に地中断層の2倍近いすべりが必要  
 ・修正モデル②：布田川断層+出ノ口断層の指向性パルスとフリングパルス/ステップ



## 南海トラフの歴史地震と対策用の地震

- ・南海地震が最も活動的
- ・東海地震は単独では起きず、東南海地震と連動
- ・1854年安政東海地震は東海・東南海連動の超巨大地震(M8.4)。歴史上明確には1度しか知られていない
- ・1498年明応地震の震源域は諸説あり(銭州断層?)
- ・東海・東南海・南海地震が全て同時発生した1707年宝永地震(M8.6)も歴史上明確には1度しか知られていない
- ・1605年慶長地震は津波地震



内閣府 +M9地震  
 100~150年に1度のM8級地震

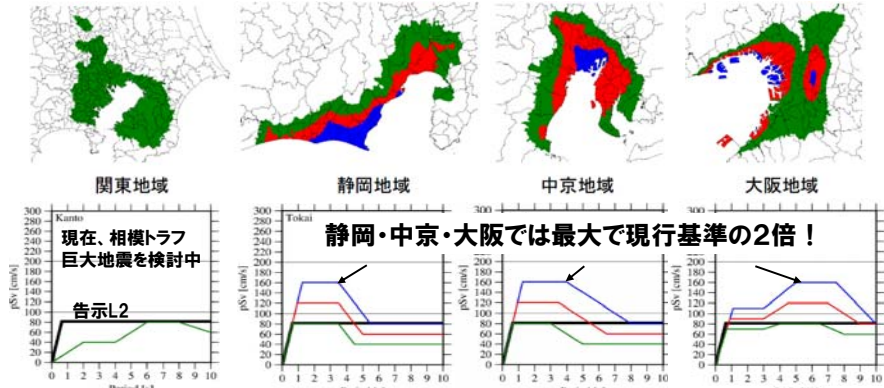
国交省対策 (極稀地震?)

(内閣府報告2015)

## 国土交通省：超高层建築等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策(平成28年6月24日)

(建設省通知)

- ・対象地震：南海トラフ沿いで約100~150年間隔で発生しているM8~9クラスの地震 (実際には、千年に1度の1854年安政東海M8.4と1707年宝永地震M8.6を使用)
- ・対象地域：静岡・中京・大阪・関東の各地域
- ・対象建物：平成29年4月1日以降、大臣認定による新築の超高层建築・免震建築など
- ・主な対策：耐震設計、家具の転倒・移動防止、長時間繰返し累積変形の影響(500秒以上)



3大都市圏と静岡地域のゾーン別の設計用疑似速度応答スペクトル(黒線は告示レベル2)

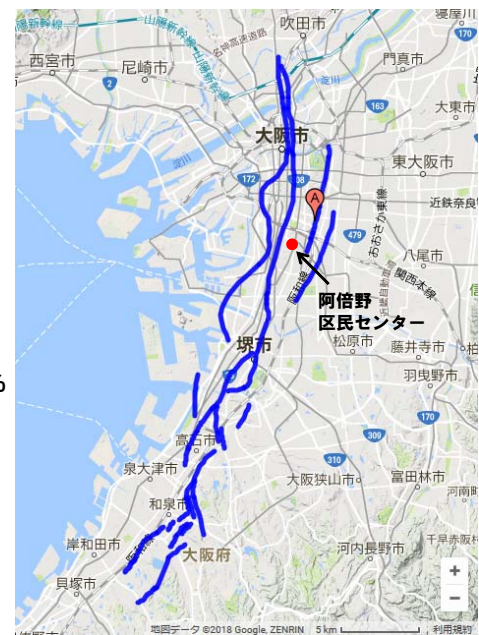
## 上町断層帯地震

【地震調査研究推進本部】より  
 全長は約42km、ほぼ南北方向に延びており、断層帯の東側が西側に乗り上げる逆断層

### ○将来の地震発生の可能性

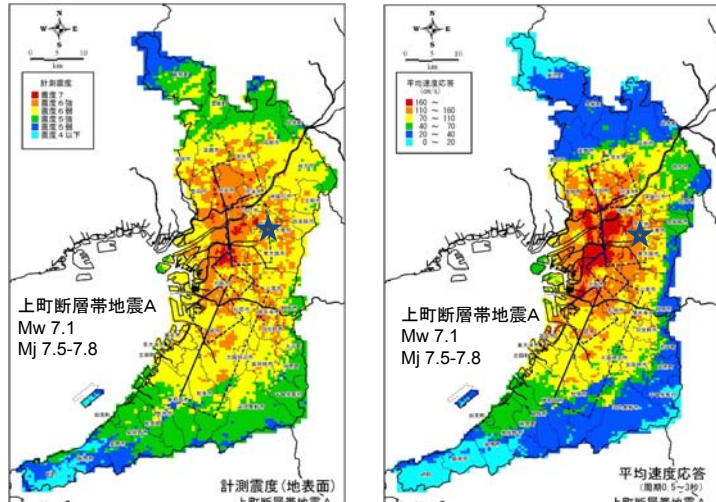
地震の規模：M7.5程度(最大)  
 平均活動間隔：8,000年程度  
 最新活動時期：  
 約28,000年前-9,000年前  
 地震発生確率：30年以内に2~3%

⇒ 様々な地震被害想定結果が公表、破壊的な長周期パルスの可能性あり。但し、防災・減災対策の推進が主な目的。「いつ・どこで・どの程度の規模の地震、どう揺れるのか」を正確に予測することは不可能。  
 ⇒ 最悪の事態も想定し、「決して諦めない」ことが最も重要



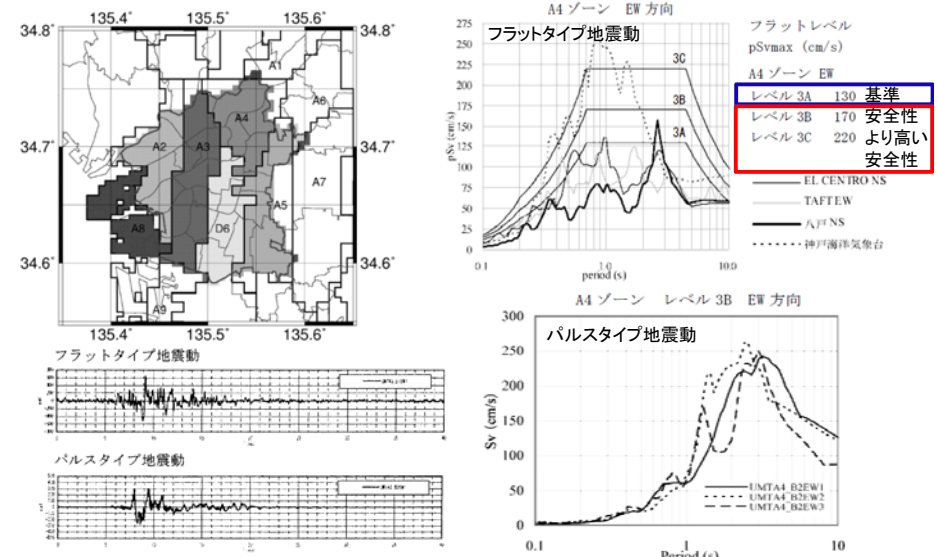
活断層データベース(産業総合研究所)

# 上町断層帯地震の推定強震動・震度分布(大阪府)



⇒上町断層帯の地震：平均活動間隔は8千年程度(30年 2~3%の確率)  
 最新活動時期は約2万8千年前以後、約9千年前以前(地震調査研究推進本部)  
 防災対策の推進が目的であり、設計用地震動の策定が目的ではない。

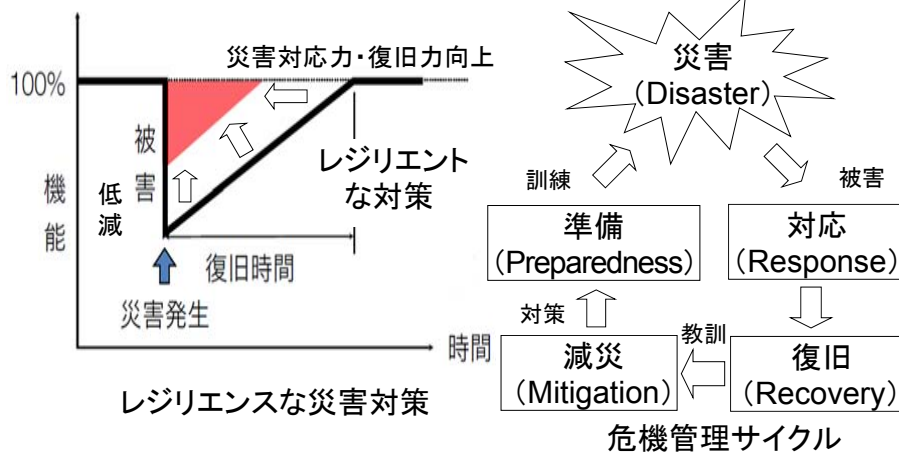
# 推定地震動を基にした設計用地震動【JSCA関西支部】



日本建築構造技術者協会関西支部「大阪府域内直下型地震に対する建築設計用地震動および研究法に関する研究会」(日本建築学会梗概、2011ほか)

# レジリエンスな災害対策

被害を出さない対策+被害が出た時の対応・復旧対策

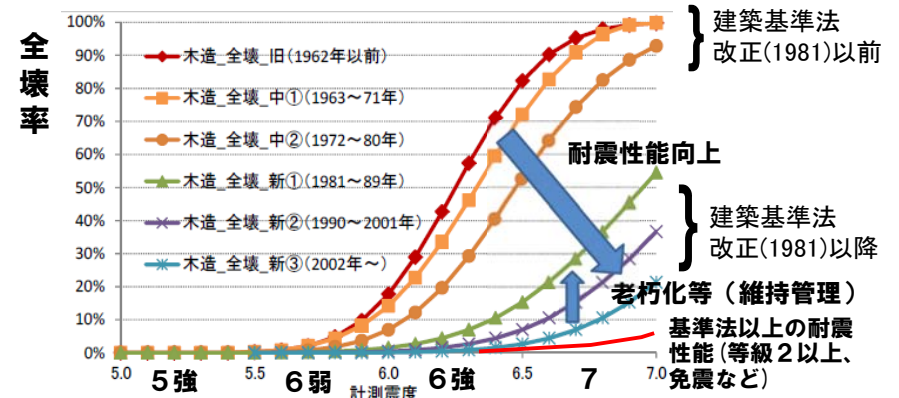


⇒ 災害は想定外の連続: 事前の減災・準備+事後の柔軟な対応・復旧策  
 ⇒ 得られた事故・災害の教訓を次の対策に反映(強靭化サイクル)

参考: 林春男「都市災害における災害対応能力の向上方策に関する調査・研究」

# 中小~巨大地震対策:レジリエントな震災対策の概念

レジリエントな対策: 事前の減災対策+事後の柔軟な対応力向上



木造建物の被害関数(内閣府被害想定2013)  
 事前の抵抗力向上 ⇒ 建物・まちの耐震性能向上・維持管理  
 (構造の耐震設計⇒人の生活のための機能維持・早期復旧設計へ)



# 東京湾岸の超高層建築等を対象としたレベル1～3地震動と設計用クライテリア:加藤他(2016年日本建築学会大会)、東京都・構造設計指針(2016)に反映

	入力地震動	構造物の性能	設計クライテリア		想定する地震動の発生頻度	備考
			構造体	層間変形角		
中地震 (レベル1)	既往波 (25cm/s) 告示波(稀地震) (Level 1)	無被害【機能維持】	短期許容応力度以内	1/200以内	数十年に一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波 実地震位相2波, ランダム位相
大地震 (レベル2)	既往波 (50cm/s)	軽微な補修により事業継続可能【指定機能維持】	部材塑性率 < 4.0	1/100以内	数百年に一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波
	告示波(極稀地震) (Level 2)					実地震位相2波, ランダム位相1波
	サイト波 (個別)					南海トラフ地震, 大正関東地震, 東京湾北部地震, の計3地震
	サイト波 (個別波をほぼ包絡)					断層モデルに基づく地震動の位相を反映して作成
極大地震 (レベル3)	告示波(極まれ)の1.5倍(Level 3-s)	崩壊・倒壊しないことを確認【余裕度の検証】			数十年に一度発生	サイト波の+αレベルや, 他機関から公開された地震動予測スペクトル等に基づき設定
	告示スペクトル(極まれ)の4秒以上をかさ上げ(Level 3-L)				-	最新の知見を反映し, 十分に長い継続時間を設定する

# 建物の地震防災・耐震設計:耐震・免震



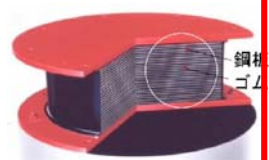
**耐震構造**  
(耐震壁・筋交いなどで抵抗)



**耐震補強の例**  
[http://bousai.kke.co.jp/management/2005/08/post\\_1.html](http://bousai.kke.co.jp/management/2005/08/post_1.html)



**免震構造**  
(免震層で揺れを逃がす)



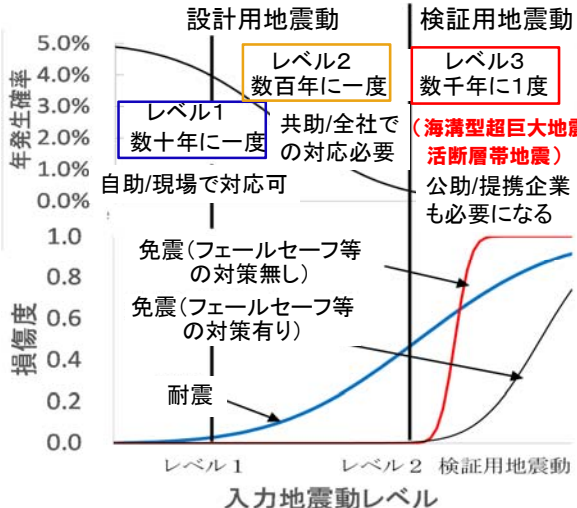
**免震積層ゴムの例**  
<http://www.jssi.or.jp/gaiyou/shoshin/cutmodel.jpg>

**超高層建築に有効**

**制振構造**  
(制振装置で揺れを吸収)

**制震補強の例**  
[https://www.kyb-ksm.co.jp/products/vibration\\_control/vibration\\_control-0013.html](https://www.kyb-ksm.co.jp/products/vibration_control/vibration_control-0013.html)

## 設計用・検証用地震動:地震動レベルと発生確率、耐震・免震の損傷度と対策・対応の概念(例)



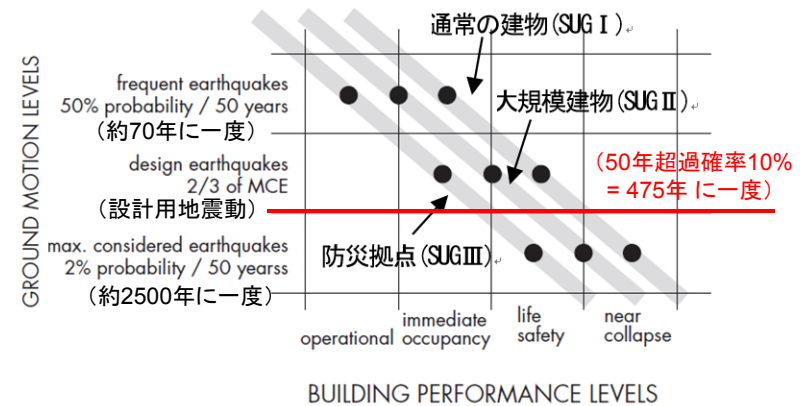
**設計用地震動 (長期間安定)**  
構造特性・耐震性能を決定(固有周期) →被害の抑制対策 継続性・安全性の検討

**検証用地震動 (最新知見等)**  
上記建物の万が一の場合の耐震対策を検討 →被害の低減対策 耐震余裕度・倒壊性能、修復・復旧性能、過酷事象時の対応策の検討  
例:・耐震性余裕度の検討  
・フェールセーフの追加  
・擁壁への衝突緩和対策

**被害時の対応・復旧力向上**  
・レジリエントな対策  
・リスクマネジメントの検討 (シビアアクシデントマネジメント、代替施設など)

⇒ 災害時の危機対応・修復性を考慮した設計が重要 (損傷の制御、モニター・点検・修復しやすい施設等)

## 数千年に1度の地震:米国の耐震性能マトリックス (2003 NEHRP Recommended Provisions)



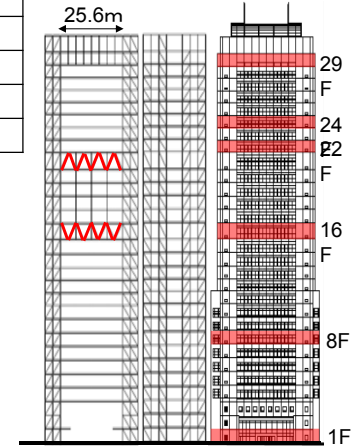
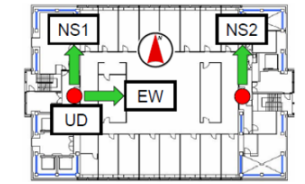
・MCE (Max. Considered Earthquake)は約2500年に一度の地震(50年超過確率2%)  
 ・2015年 ProvisionではMCEから建物の被害率関数を用いたリスク評価(倒壊率)であるMCE<sub>R</sub> (Risk-Targeted MCE)へ(倒壊の50年超過確率が1%、約5000年に一度)  
 ⇒ ハザードからリスク表示へ、他のリスクとの比較検討が可能

# 東京湾岸の超高層建築等を対象としたレベル1～3地震動と設計用クライテリア:加藤他(2016年日本建築学会大会)、東京都・構造設計指針(2016)に反映

	入力地震動	構造物の性能	設計クライテリア		想定する地震動の発生頻度	備考
			構造体	層間変形角		
中地震 (レベル1)	既往波 (25cm/s)	無被害【機能維持】	短期許容応力度以内	1/200以内	数十年に一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波
	告示波(稀地震) (Level 1)					実地震位相2波, ランダム位相
大地震 (レベル2)	既往波 (50cm/s)	軽微な補修により事業継続可能【指定機能維持】	部材塑性率 < 4.0	1/100以内	数百年に一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波
	告示波(極稀地震) (Level 2)					実地震位相2波, ランダム位相1波
	サイト波 (個別)					南海トラフ地震, 大正関東地震, 東京湾北部地震, の計3地震
極大地震 (レベル3)	告示波(極まれ)の1.5倍(Level 3-s)	崩壊・倒壊しないことを確認【余裕度の検証】			数千年に一度発生	断層モデルに基づく地震動の位相を反映して作成
	告示スペクトル(極まれ)の4秒以上をかき上げ(Level 3-L)					最新の知見を反映し, 十分に長い継続時間を設定する

## 対象建物概要

建物名称	工学院大学高層棟 (新宿校舎)
建物場所	東京都新宿区西新宿
施工年	1989年
基準階面積	1,170㎡
階数	地上29階、地下6階、塔屋1階
構造種別	地上：鉄骨造 (ブレース付ラーメン構造)
	地下1～2階：鉄骨鉄筋コンクリート造
	地下3～6階：鉄筋コンクリート造



### 固有周期と減衰定数

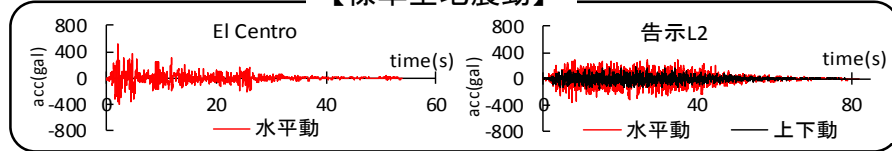
	次数	立体モデル	311地震観測	減衰定数
NS	1	3.038 s	3.080 s	0.019
	2	0.966 s	0.950 s	0.012
	3	0.496 s	0.470 s	0.030
EW	1	2.936 s	2.960 s	0.012
	2	1.015 s	0.990 s	0.012
	3	0.543 s	0.502 s	0.030

※ダンパーなしモデルの固有周期と減衰は3.11地震の計測記録より同定

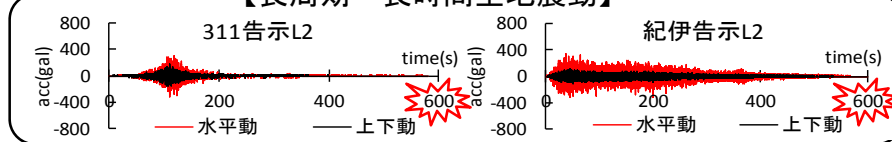
構造概要と加速度計設置箇所

## 入力地震動

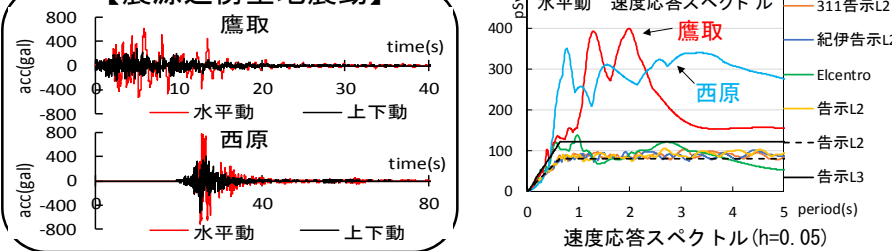
### 【標準型地震動】



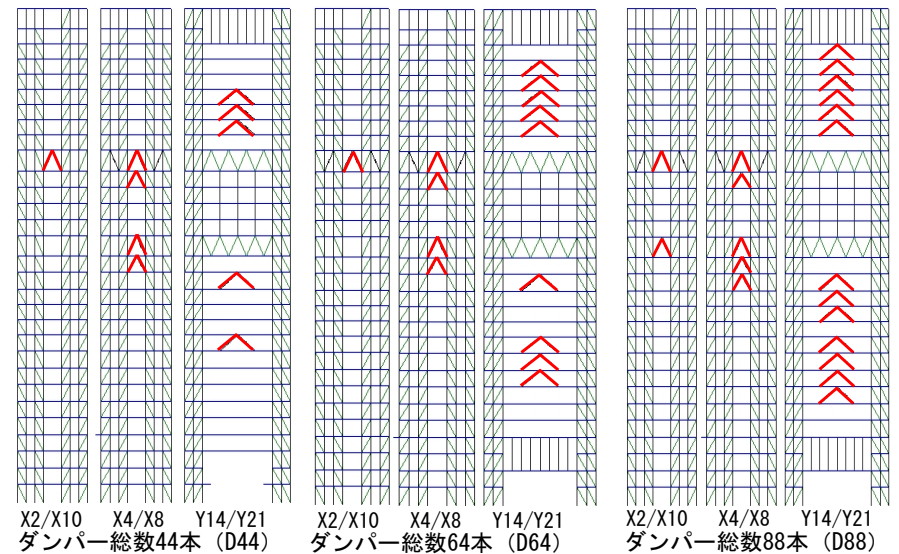
### 【長周期・長時間型地震動】



### 【震源近傍型地震動】



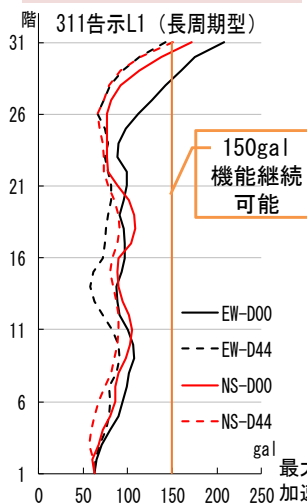
## ダンパー設置モデル(Ai分布荷重等から最適配置)



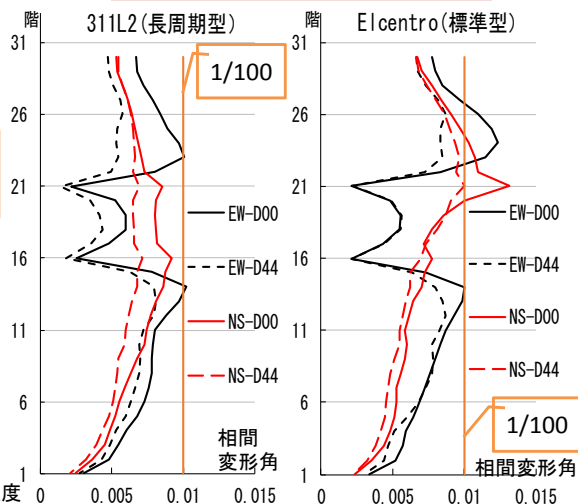
※BDH型制振オイルダンパー(最大減衰荷重が2000kN、カヤバシステムマシナリー社を仮定)

## 応答解析結果

### L1地震動\_加速度

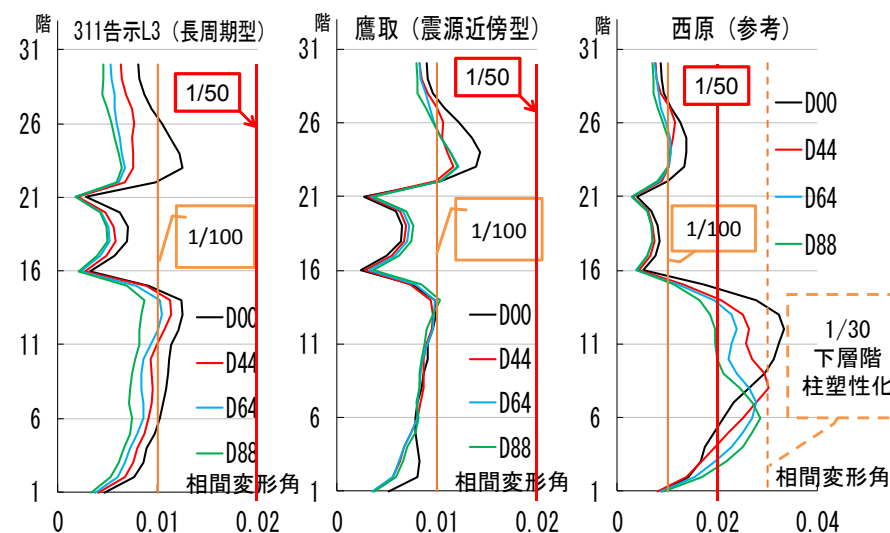


### L2地震動\_層間変形角



⇒ 44本の比較的少ない本数でL1・L2設計クライテリアを満足

## 応答解析結果 L3地震動 最大層間変形角 (EW)



⇒ 地表断層近傍の西原EW波(参考)を除き、倒壊限界(1/100程度)を満足  
 今後は梁端部の破壊(疲労など)、ブレース座屈など詳細検討の必要有

## 超高層建築物の構造躯体への影響に関する実証的研究

文部科学省「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」  
 ～ 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化～



最終崩壊形(試験体は倒壊して防護フレームに寄りかかっている)



梁端フランジの破断



1階柱脚の局部座屈(四角い柱がへこんでいる)

18階建てS造の1/3縮尺  
 モデル対象とした長周期地  
 震動による振動台実験  
 (1×3スパン、平面5×6m、  
 高さ25.3m、重量約420トン)

南海トラフ3連動地  
 震(M8.7)による3大  
 都市圏の平均的特  
 性の計算波形を入力  
 ・入力レベル(pSv)  
 420 cm/s(告示5倍)の  
 3回目、層間変形角  
 1/28で倒壊

鉄骨造高層建物のE-ディフェンス振動台実験結果について(京都大学、2014年2月25日)

→単純な縮尺モデルではあるが、倒壊に至るまで想定よりも高い余裕度を確認  
 低層階の梁端部の破断+柱脚座屈⇒長柱化による座屈から倒壊へ

## Resilience-Based Design Approach

○ 近年の大規模な自然災害を経験し、Code-Based and Performance-Based Designから回復力を基準とするResilience-Based Designへ

○ Resiliencyの判断基準にするRating Systemが実用化  
 The U.S. Resiliency CouncilのCoRE Ratings  
 Arup者のREDi™ Rating System(2013)、など

○ REDi™ Rating Systemの事例

・The 181 Fremont Tower in SF(56階・244mのS造、2017年竣工)  
 ・ビルオーナーの高い環境・防災への要望(LEED "Platinum" rating)

・REDi™ Rating "Gold" :  
 ・設計基準(475年に1度)の地震で構造  
 躯体が弾性範囲内  
 ・Maximum Considered Earthquake(  
 MCE;2500年に1度の地震)には変形制  
 御・荷重制御(PEER-TBI(2010)に準拠)  
 ・非構造部材が設計基準(加速度・変位)  
 より厳しい条件をクリア  
 ・危機管理体制の追加要求も満足

"The Resilience-Based Design of the  
 181 Fremont Tower" by I. Almufti et al.,  
 STRUCTURE magazine, June 2016



BRB(Buckling-restrained brace)  
 とdamperを導入したmega-brace



mega-braceによるエネルギー吸収  
 型の外郭構造