

長周期地震動の予測と建築物応答

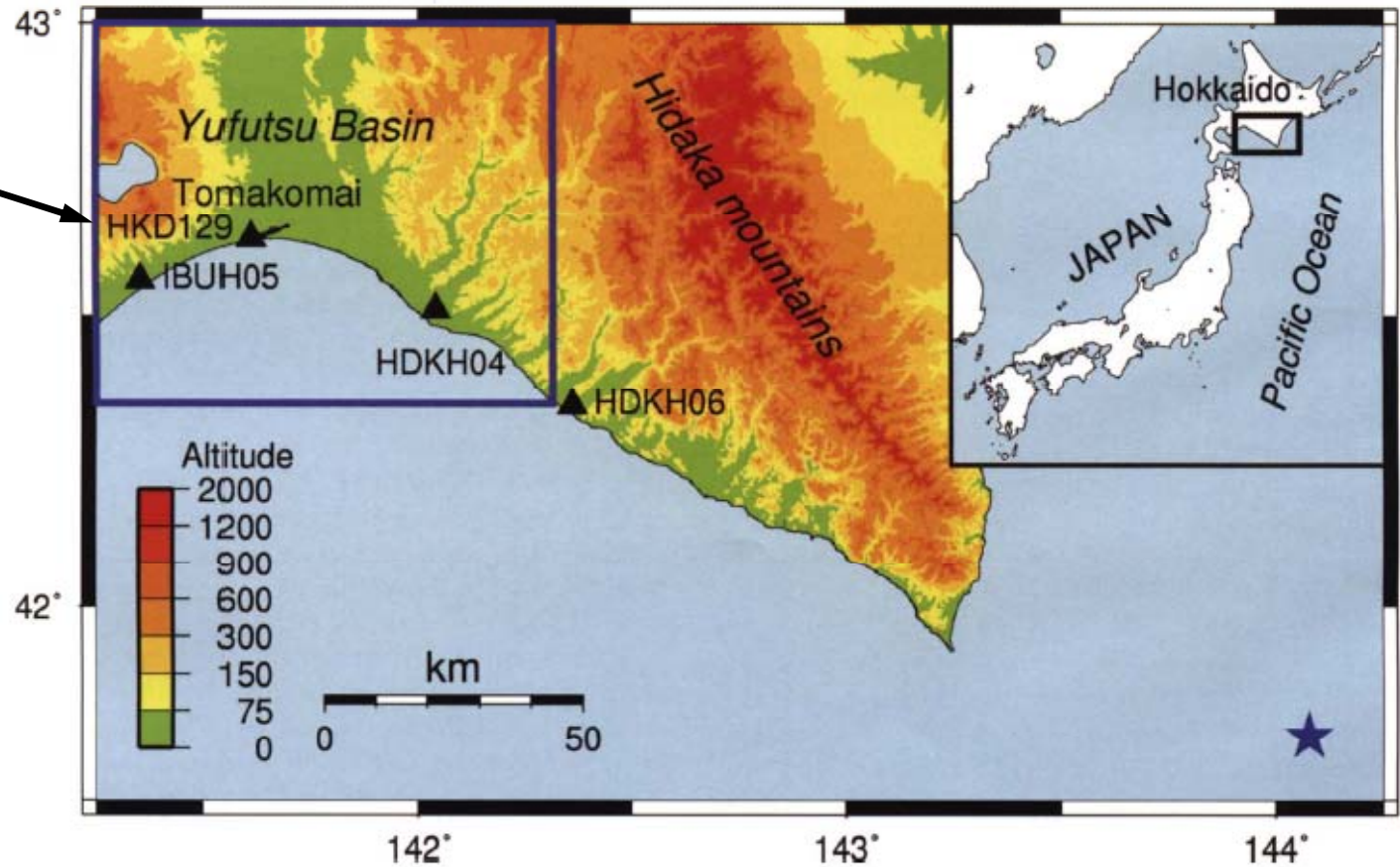
独立行政法人建築研究所
構造研究グループ 大川 出

十勝沖地震(2003.9.26)での石油タンク火災 長周期地震動による石油のスロッシング

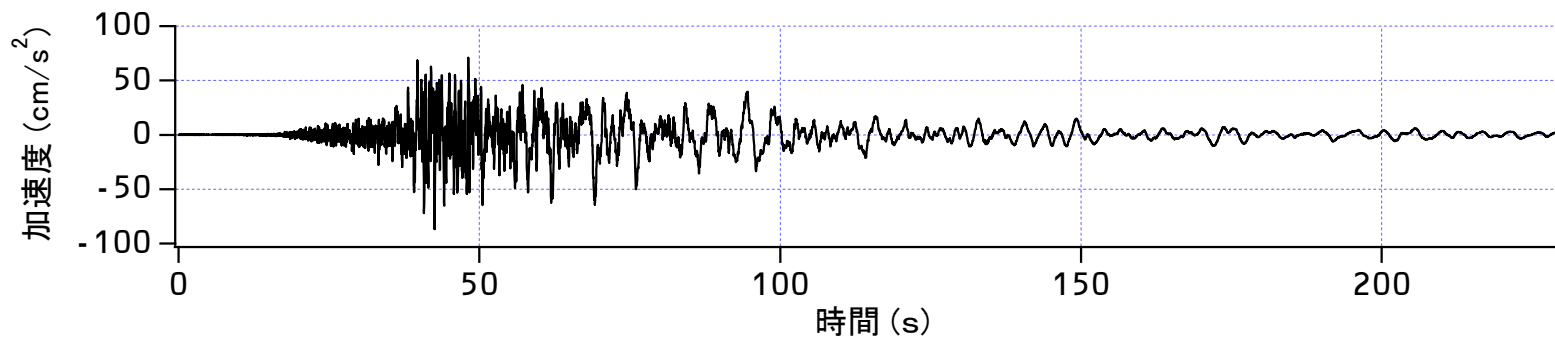


日本地震学会「なみふる60号、2007.3」より

K-NET 苫小牧



Koketsu, etal (2005), SRL Vol.76, pp.67-73



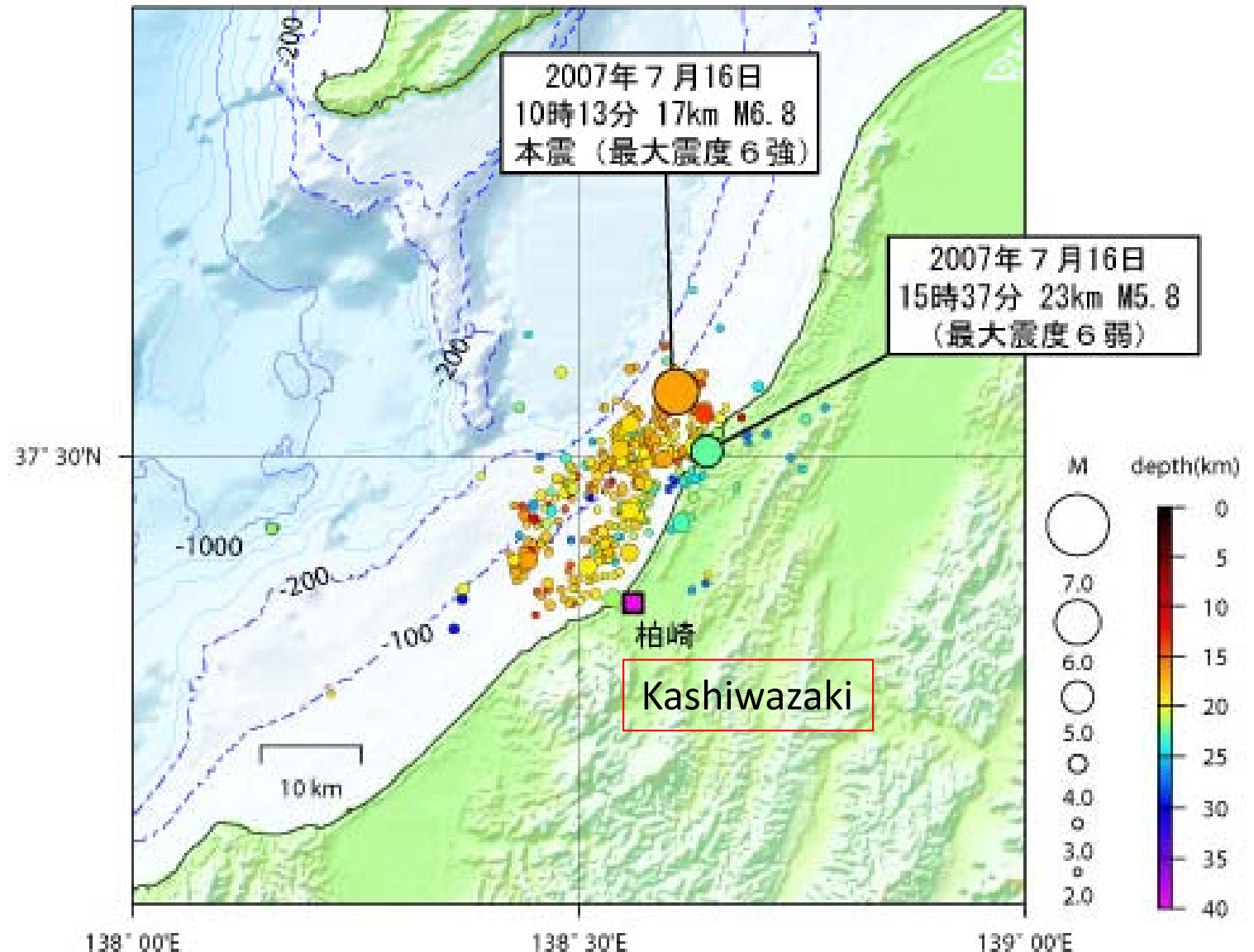
K-NET 苫小牧 (HKD129) の加速度波形

新潟県中越沖地震(2007.7.16)

2007年7月24日7時現在

震央分布図 (2007年7月16日以降、深さ40km以浅、 $M \geq 2.0$)

本震及び余震の
分布(気象庁)

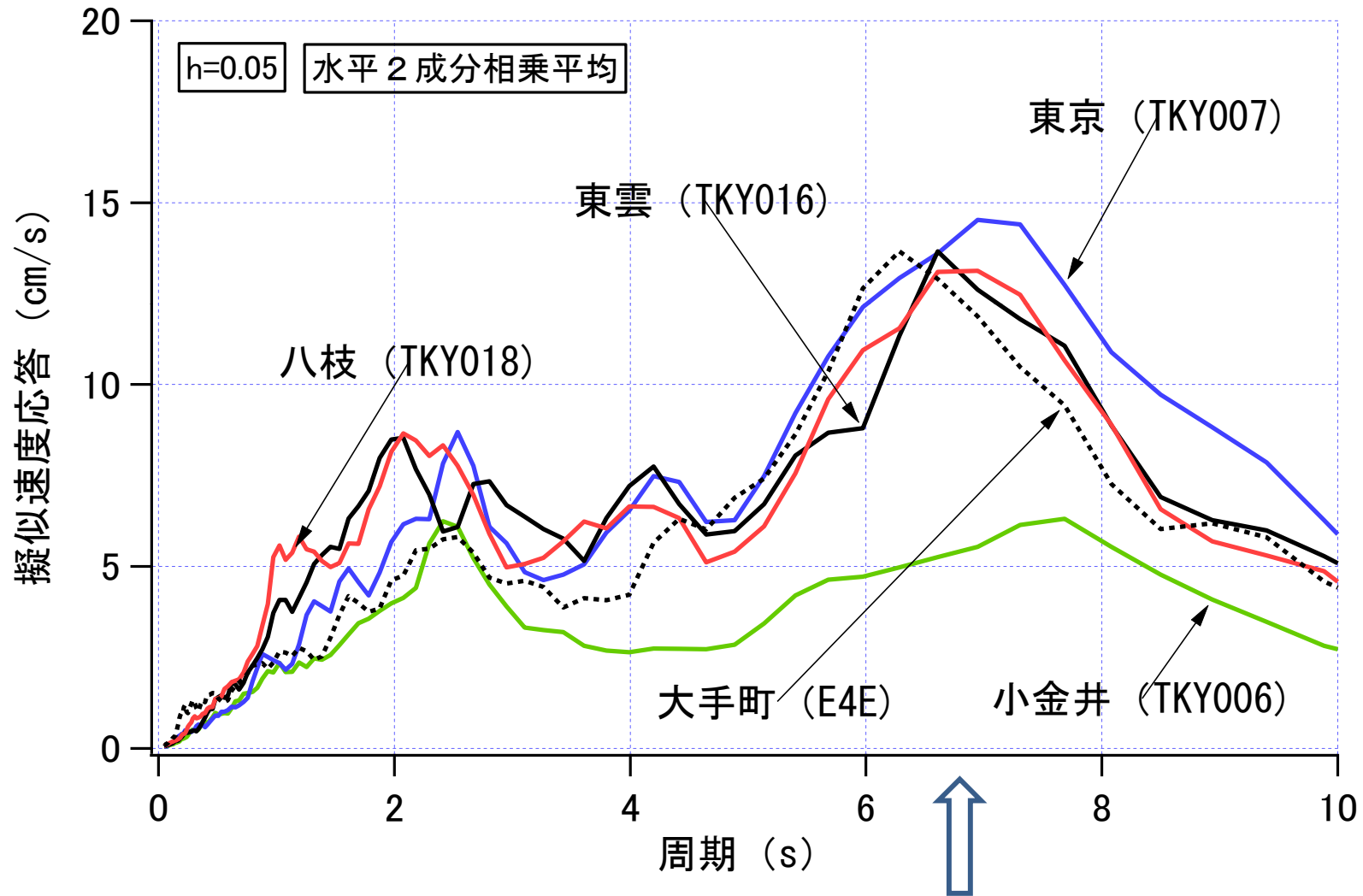


丸の大きさはマグニチュードの大きさを、色は震源の深さを表す。

地形データには国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)および日本海洋データセンターのJ-EGG500を使用。

新潟県中越沖地震(2007.7.16)

首都圏の揺れ→エレベータなどの異常



長周期地震動に対する超高層建築物・免震建築物の耐震対策

長周期地震動対策の必要性(2003年十勝沖地震等)

<応答に関する研究開発>
限界値の検討など

<入力に関する研究開発>
長周期地震動予測方法の提案など

「超高層建築物等の長周期地震動の対策試案」の発表
(国土交通省によるパブリックコメントの募集 2010.12)

2011東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)の発生 (2011.3.11)

地震による超高層・免震建築物の
安全性・機能性等への影響調査

観測データによる長周期地震動
予測方法の検証

設計クライテリアの整理・提案

長周期地震動作成手法の改良

これらを踏まえ、長周期地震動に対する超高層建築物・免震建築物の対策を検討

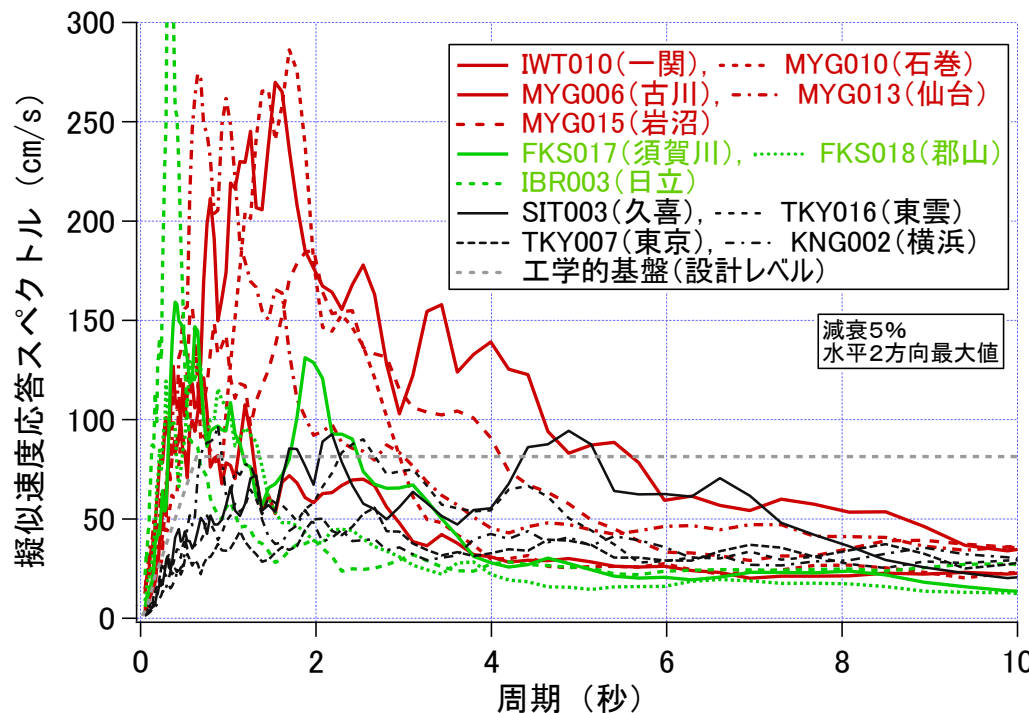
東北地方太平洋沖地震での長周期地震動の特徴

東北～北関東: 周期約2秒以下では地震動レベルが大きい地点がある。周期3～4秒より長い周期ではそのレベルは小さい。

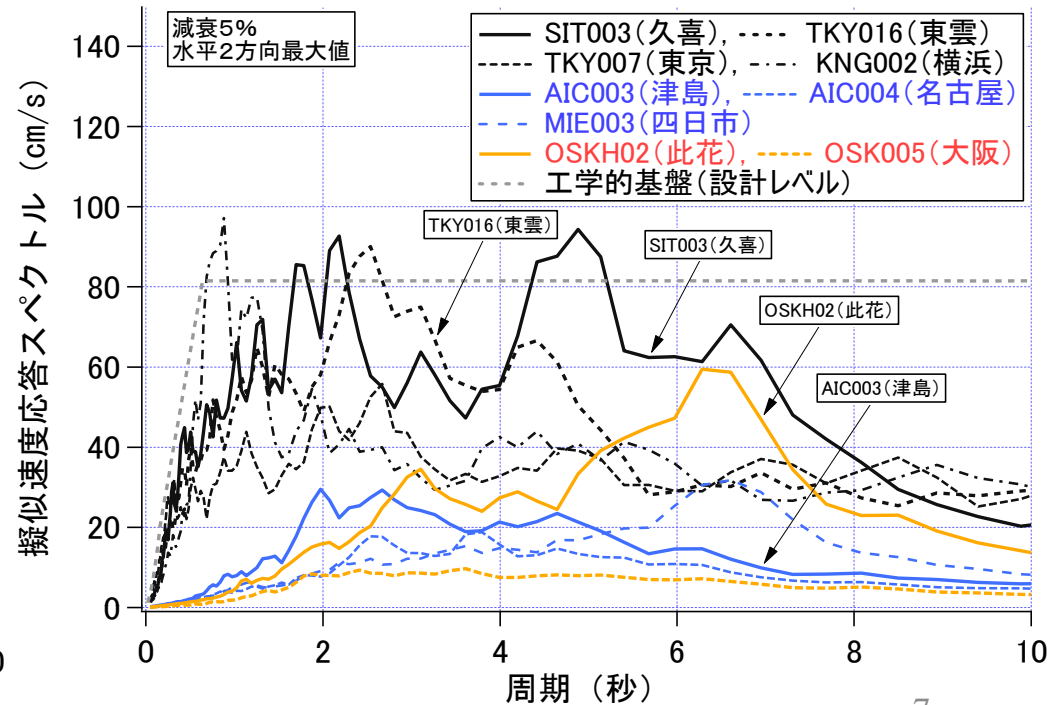
首都圏: 大きい場合でも、一部周期で建築基準法の工学的基盤での設計地震動レベル(ごく稀)程度である。

東海～大阪湾岸: 震源から遠く、地震動レベルはそれほど大きくなり、設計地震動レベルには達していない。また、継続時間が長く、観測地点によっては、地盤増幅により特定の長周期成分が卓越し、繰り返し回数の多い地震動が生じた。

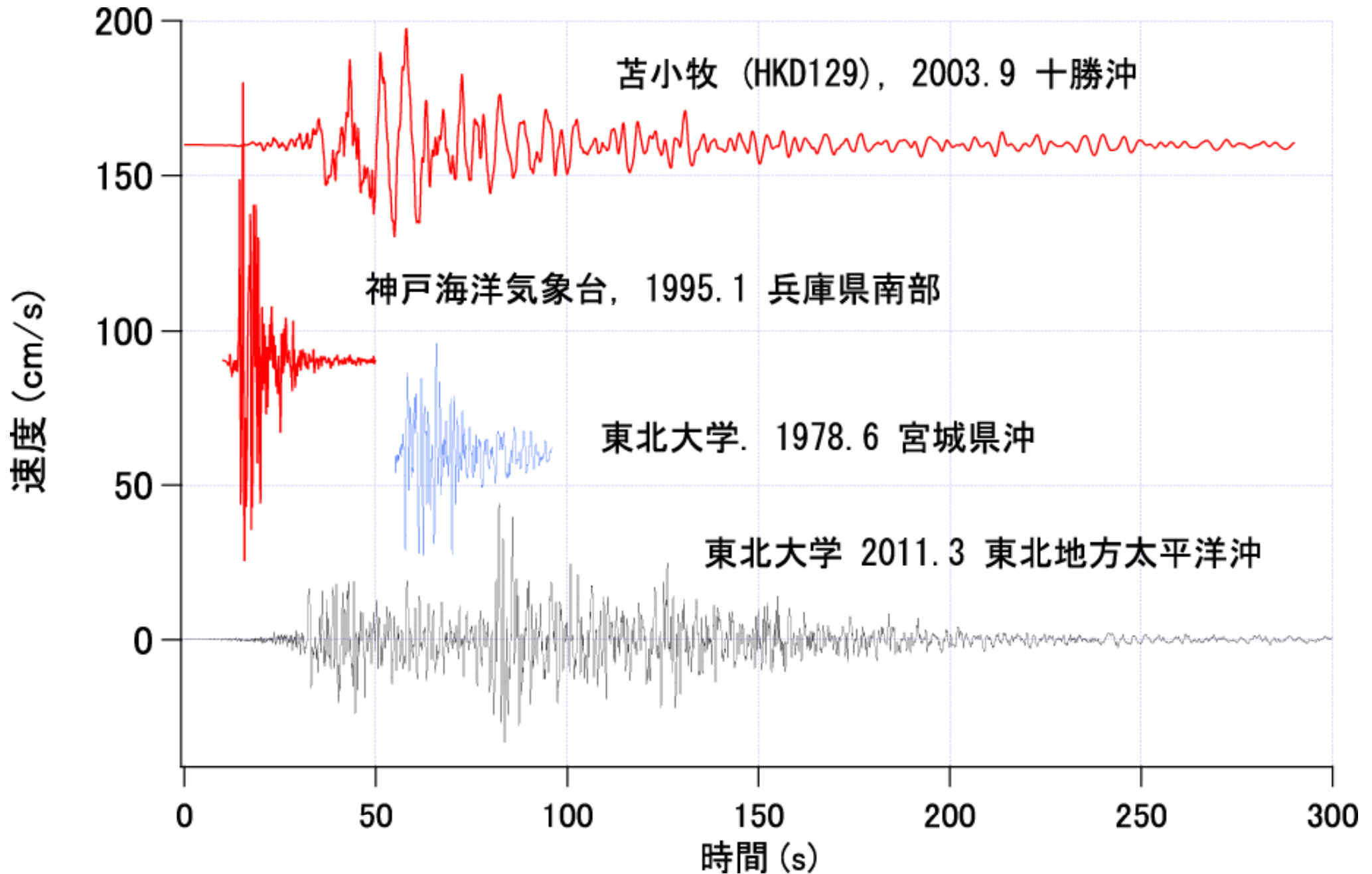
東北から首都圏



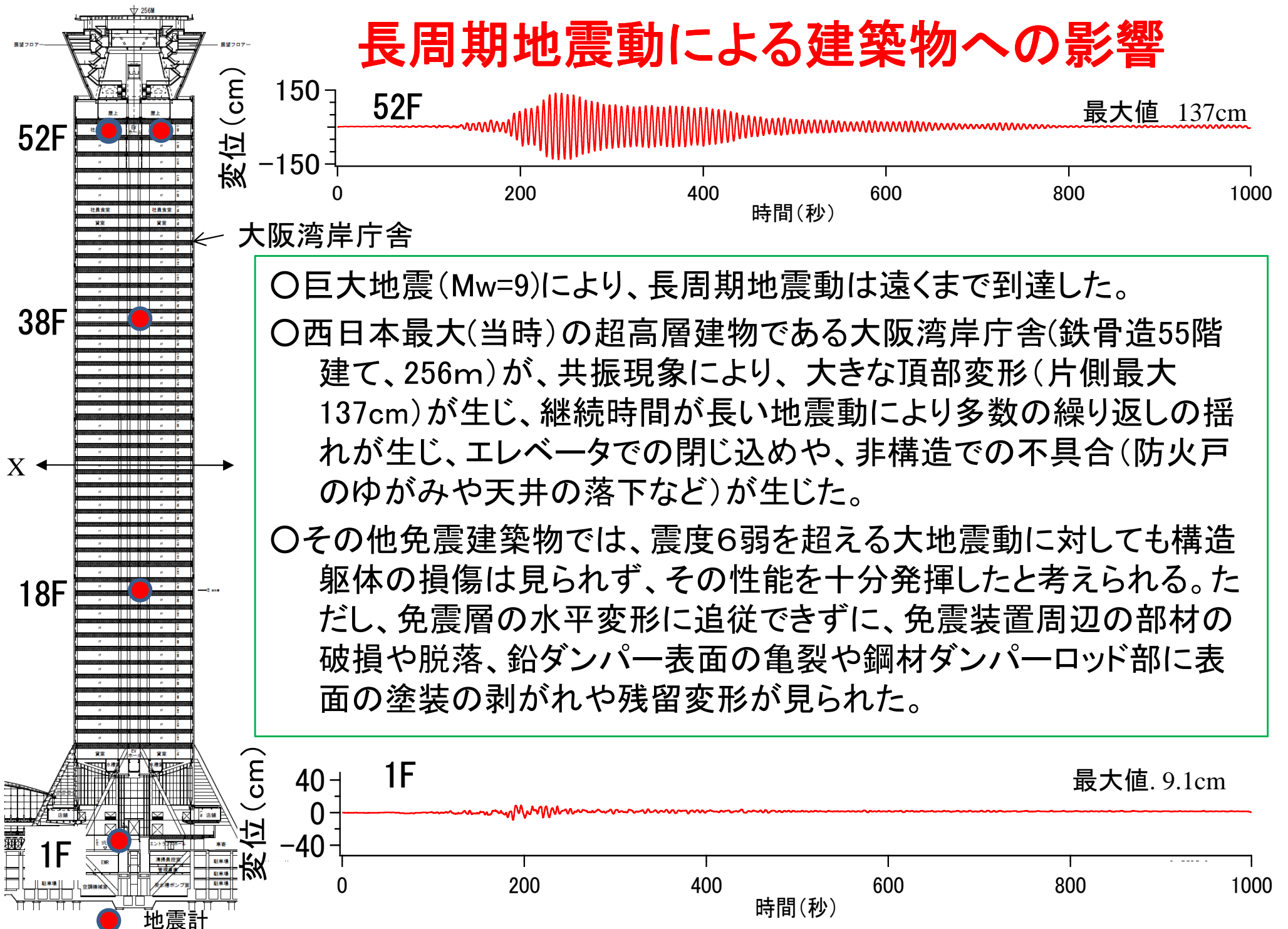
首都圏から大阪湾岸



長い継続時間



長周期地震動による建築物への影響



- 巨大地震 ($M_w=9$) により、長周期地震動は遠くまで到達した。
- 西日本最大(当時)の超高層建物である大阪湾岸庁舎(鉄骨造55階建て、256m)が、共振現象により、大きな頂部変形(片側最大137cm)が生じ、継続時間が長い地震動により多数の繰り返しの揺れが生じ、エレベータでの閉じ込めや、非構造での不具合(防火戸のゆがみや天井の落下など)が生じた。
- その他免震建築物では、震度6弱を超える大地震動に対しても構造躯体の損傷は見られず、その性能を十分発揮したと考えられる。ただし、免震層の水平変形に追従できずに、免震装置周辺の部材の破損や脱落、鉛ダンパー表面の亀裂や鋼材ダンパーロッド部に表面の塗装の剥がれや残留変形が見られた。

耐震解析における設計用地震動

超高層、免震建築物における時刻歴を用いた応答解析

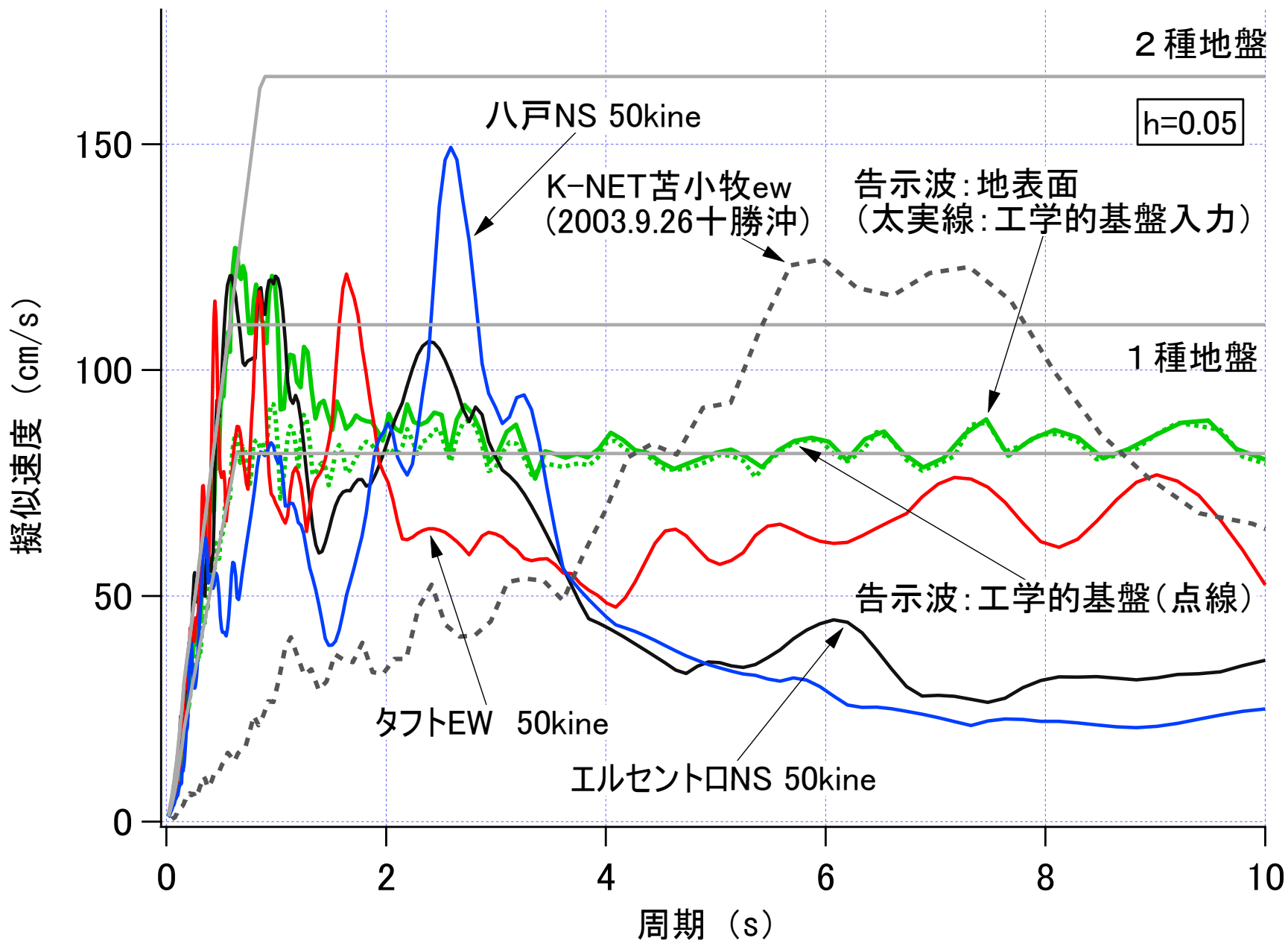
- ・観測波形の利用(適切な観測記録が不足)と速度振幅によるスケージング(25, 50cm/s)
- ・長周期で振幅レベルを確保した2000年告示スペクトル継続時間(60秒以上)
- ・**サイト波**の作成(妥当性の評価方法が課題)内陸直下地震記録は増加、長周期地震動サイト波が検討課題
- ・層間変形角、塑性率など建物応答の制限

→サイトと震源に応じて長周期地震動時刻歴を評価・作成する手法の開発と提案(後述)

→「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」への適用とパブリックコメントの実施

→東北地方太平洋沖地震の発生 →再検証、再提案

設計用地震動スペクトル



長周期地震動の予測式の作成

(国交省基準整備促進事業 事業体・大崎総合研究所との共同研究として実施)

先に提案した長周期地震動の予測式を、今回の地震に適用

首都圏での予測値が観測値よりも大きくなる傾向

震源位置、伝播経路の影響を含む予測式の作成を試みた。

長周期地震動特性

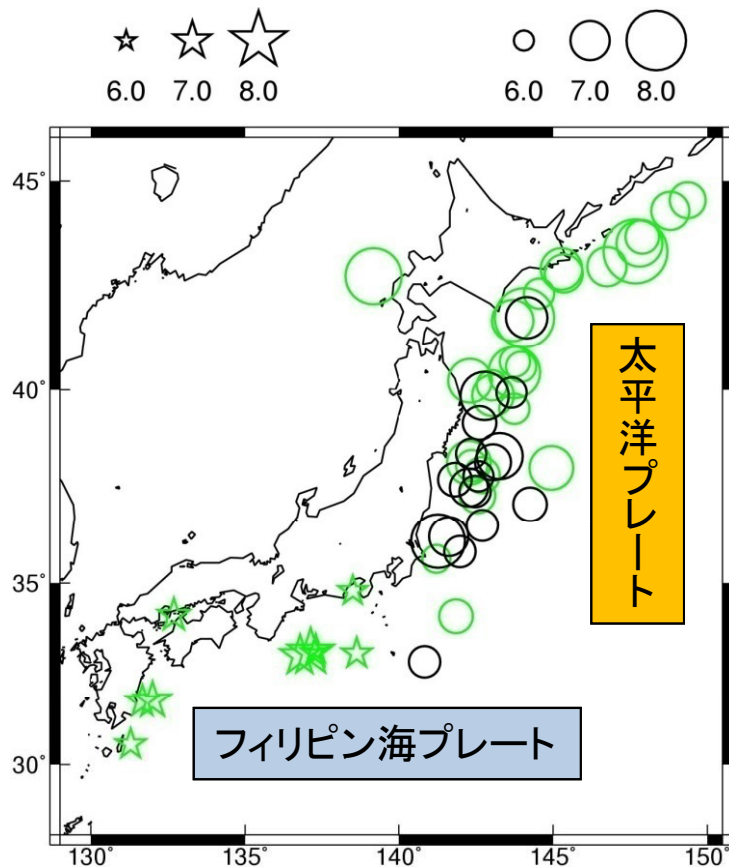
- ・地震動に含まれる強い周期成分とその大きさ
- ・周期毎の揺れの時間長さ(継続時間)

- ・地震規模(マグニチュード)
- ・距離
- ・サイト係数

(要因の追加)

震源位置
伝播経路

改良予測式の提案



検討に用いた地震

改良経験式

★ $S_A(T)$: 周期 T の $h=5\%$ の加速度応答スペクトル

$$\log_{10} S_A(T) = a_1(T) M_w + a_2(T) M_w^2 + be(T)R + bw(T)R \\ - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) + c_0(T) + c_j(T) + cw_j(T)$$

ここで、 M_w : モーメントマグニチュード、 R : 断層最短距離(km)

★ $Z(f)$: 周波数 f の群遅延時間の平均値 μ_{tgr} と分散 σ_{tgr}^2

$$Z(f) = A_{tgr}(f) M_0^{1/3} + Be(f)X + Bw(f)X + C_j(f) + Cw_j(f)$$

ここで、 M_0 : 地震モーメント、 X : 震源距離(km)

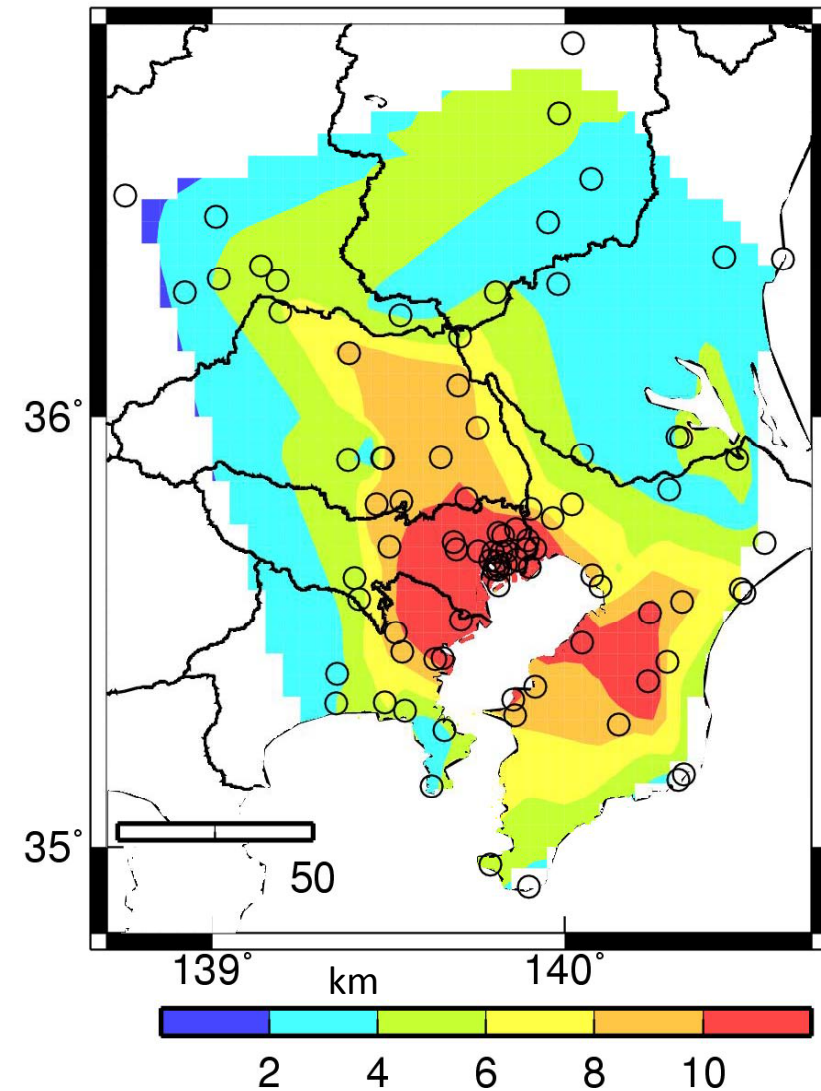
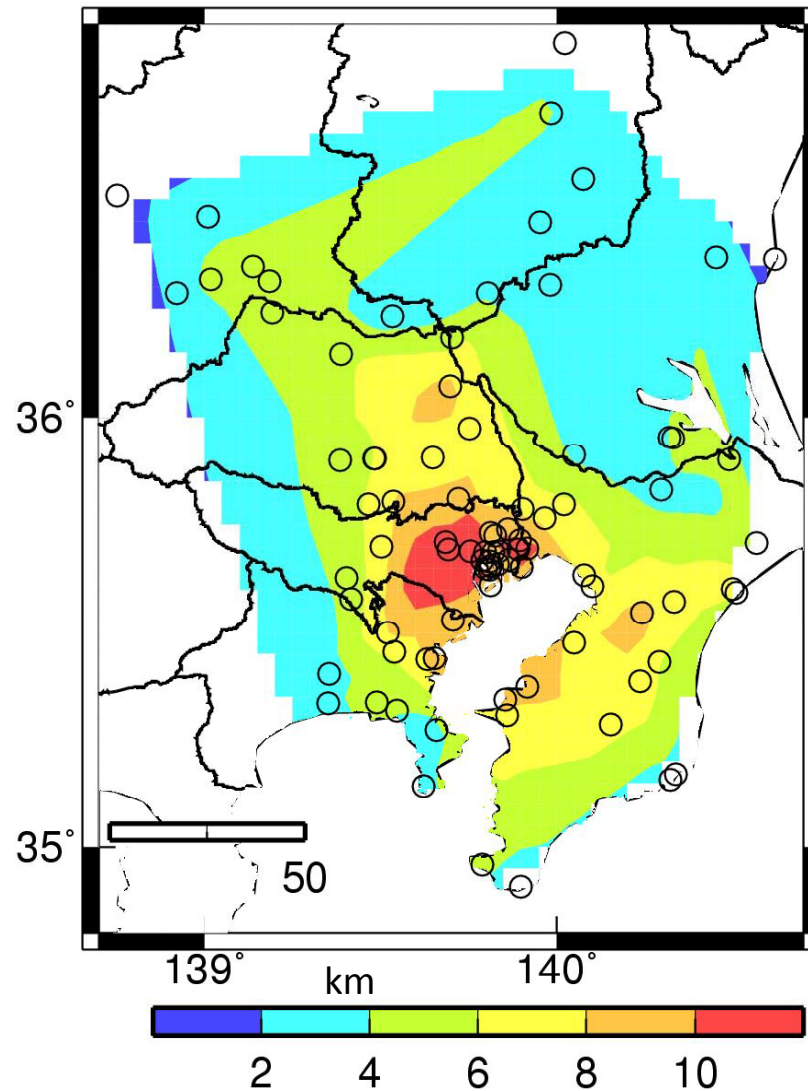
- ・ 応答スペクトルの式に M_w^2 項を導入
- ・ 太平洋プレート of 地震の距離減衰特性 be 、 Be とフィリピン海プレート of 地震の距離減衰特性 bw 、 Bw を考慮
- ・ 関東平野で地盤の固有周期の長い (>4 秒) 地点では、フィリピン海プレート of 地震の地盤増幅率 cw 、サイト係数 Cw を別途考慮
- ・ $M_w 8.4$ で頭打ち (東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションに基づく)

太平洋プレートとフィリピン海プレートの

地震による地盤増幅率(周期8秒)の違い

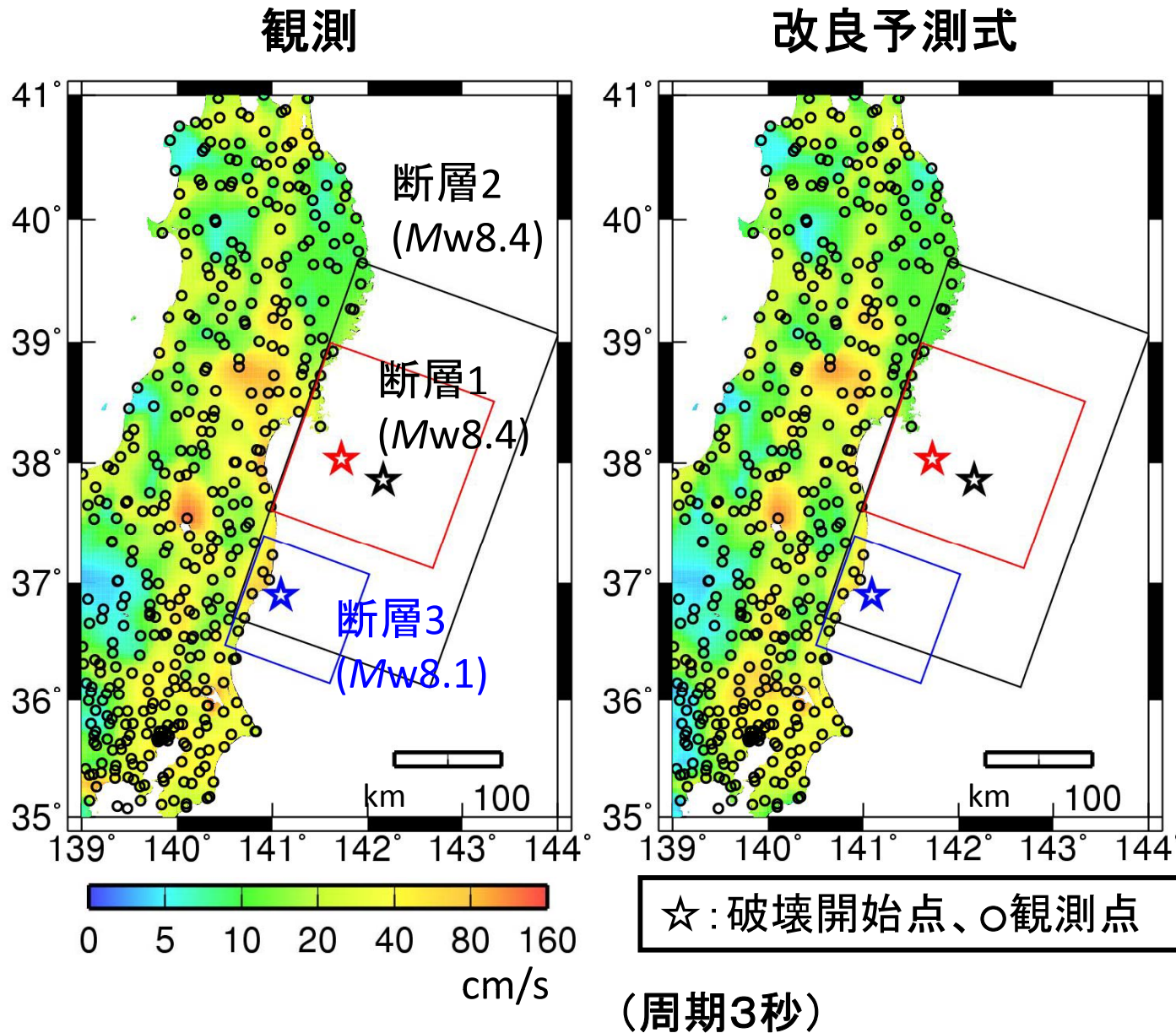
太平洋プレート

フィリピン海プレート



○ S波速度3.2km/sの地震基盤上面から1.0km/sの層上面までの地盤の固有周期が4秒以上の地点

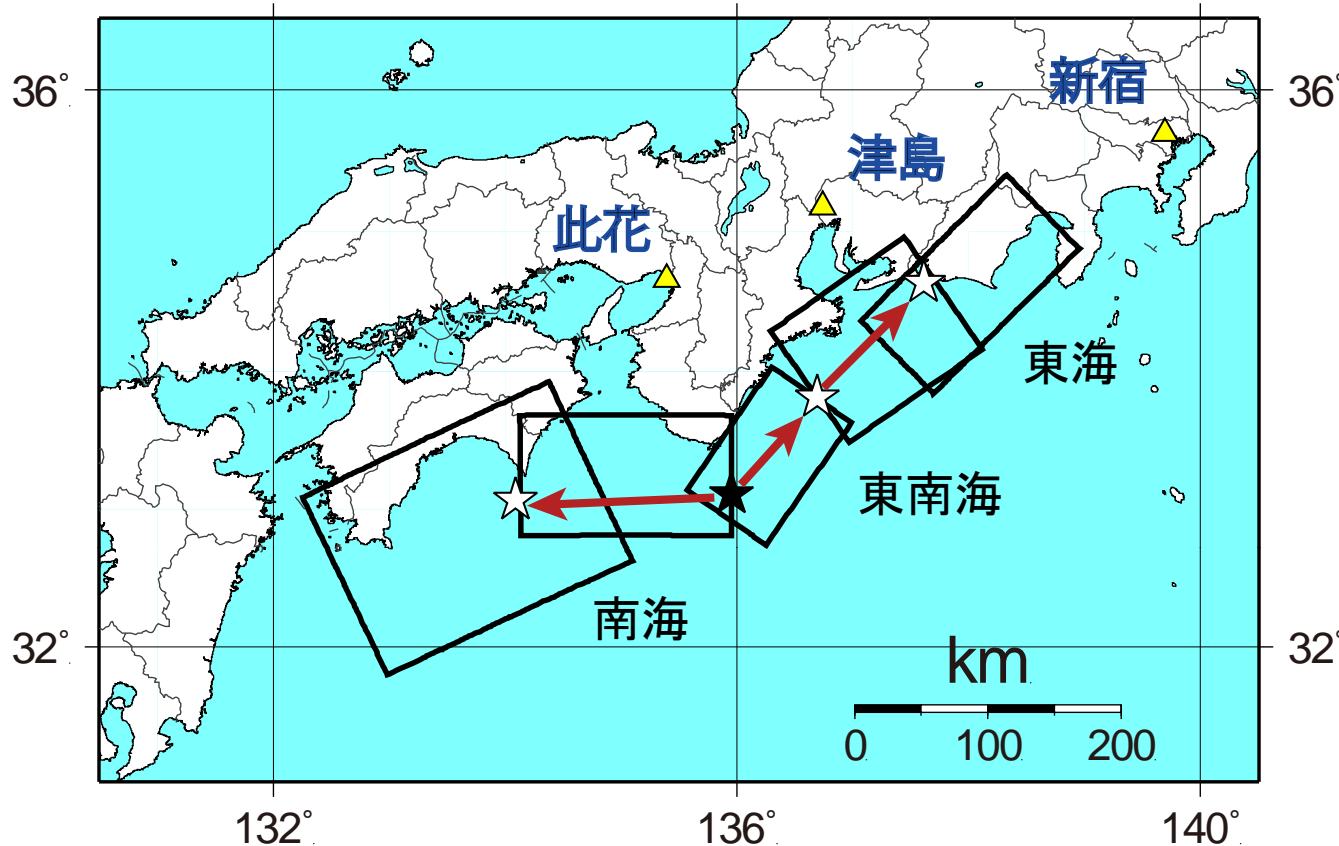
改良評価式による東北地方太平洋沖地震の観測値の再現(周期3秒)



本震を、左図断層1～3による3連動の震源モデルとして表現し、改良予測式による各地点の地震動算定結果が、観測結果を良く再現していることを確認した。

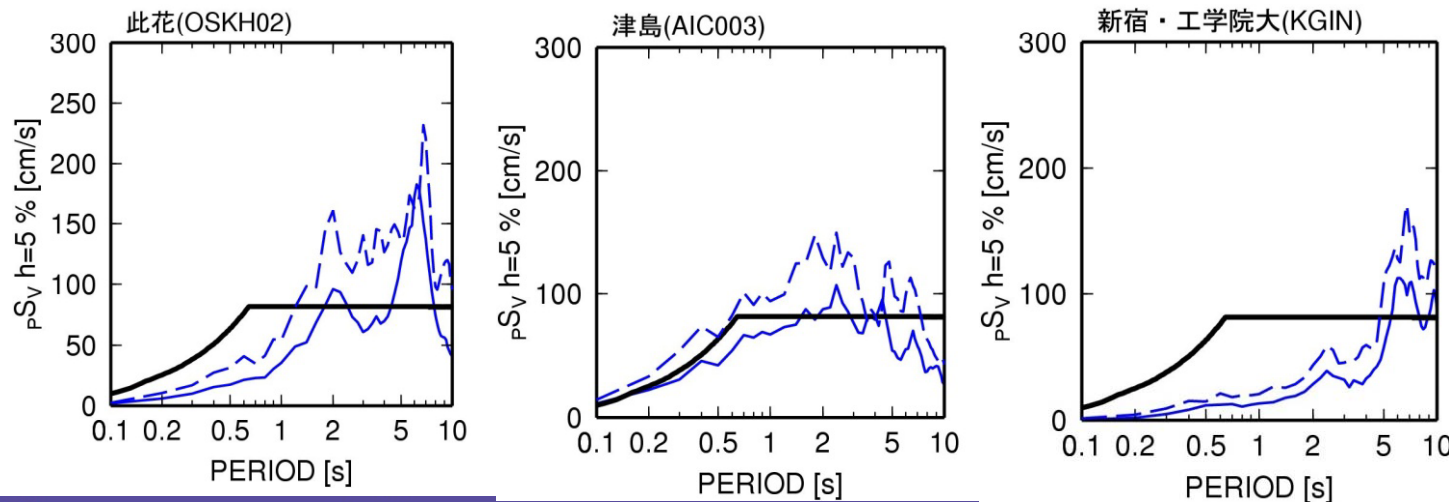
改良予測式は、単独震源の地震動のみならず連動型の多重震源についても各震源破壊の時間差を考慮することによって、その時刻歴の作成が可能であり、将来の超巨大地震に対しても利用可能である。

改良評価式による3連動地震のシミュレーション



- 矩形: 断層面
- ★: 第1破壊開始点
- ☆: 第2~4破壊開始点
- : 破壊伝播方向
- △: 計算地点

大阪平野、濃尾平野、関東平野における主要観測地点での地表における長周期地震動を、改良評価式を用いて試作



→平均的な波と、観測データのばらつきを上乗せした波形を用いて応答解析を実施

- 告示スペクトル
- - - 平均+標準偏差に近い予測波
- 平均に近い予測波

鉄骨造超高層の層間変形角の試算

鉄骨	方向	周期 (秒)	3連動 平均				3連動 平均+標準偏差			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
100m	X	2.3	1/137	1/125	1/120	1/276	1/121	1/96	1/82	1/249
	Y	2.8	1/159	1/115	1/106	1/333	1/87	1/87	1/69	1/186
120m	X	2.6	1/247	1/220	1/153	1/475	1/147	1/138	1/93	1/318
	Y	2.9	1/264	1/220	1/147	1/414	1/132	1/147	1/114	1/311
140m	X	3.7	1/135	1/125	1/119	1/341	1/73	1/118	1/75	1/171
	Y	3.8	1/136	1/113	1/104	1/291	1/68	1/101	1/75	1/176
200m	X	5.7	1/81	1/155	1/156	1/115	1/78	1/111	1/100	1/97
	Y	5.1	1/92	1/155	1/148	1/170	1/56	1/88	1/104	1/122
230m	X	6.5	1/69	1/185	1/144	1/135	1/69	1/104	1/122	1/72
	Y	5.5	1/66	1/123	1/141	1/97	1/62	1/101	1/83	1/74
250m	X	5.8	1/65	1/148	1/180	1/84	1/52	1/100	1/104	1/69
	Y	5.3	1/70	1/127	1/127	1/122	1/64	1/79	1/81	1/83

(平成23年度建築基準整備促進事業)

(網掛け：1/100以下)

鉄骨造超高層の層塑性率の試算

鉄骨	方向	周期 (秒)	3連動 平均				3連動 平均+標準偏差			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
100m	X	2.3	1.1	1.3	1.4	0.6	1.4	1.7	2.1	0.7
	Y	2.8	1.0	1.3	1.4	0.5	1.8	1.8	2.3	0.8
120m	X	2.6	0.9	1.0	1.5	0.5	1.6	1.6	2.6	0.7
	Y	2.9	0.7	0.8	1.3	0.4	1.4	1.5	1.8	0.6
140m	X	3.7	1.6	1.7	1.8	0.6	3.0	1.8	3.0	1.2
	Y	3.8	1.4	1.7	1.9	0.6	3.1	2.0	2.8	1.0
200m	X	5.7	2.2	1.1	1.1	1.7	2.4	1.6	1.8	2.0
	Y	5.1	2.5	1.1	1.2	1.2	4.1	2.0	1.6	1.8
230m	X	6.5	3.1	1.1	1.5	1.5	3.0	2.1	1.8	2.8
	Y	5.5	2.7	1.3	1.3	1.7	2.9	1.7	2.4	2.4
250m	X	5.8	2.5	0.9	0.7	1.9	3.2	1.6	1.2	2.4
	Y	5.3	1.6	0.9	1.0	0.8	1.8	1.5	1.4	1.3

(平成23年度建築基準整備促進備事業)

(網掛け：2.0以上)

地震による超高層・免震建築物の安全性・機能性等への影響調査(超高層建物の応答に関して)

さまざまな構造特性の超高層建築物を対象として、3連動地震等による主要観測地点の長周期地震動による地震応答値レベルを試算した。

検討超高層建築物モデル

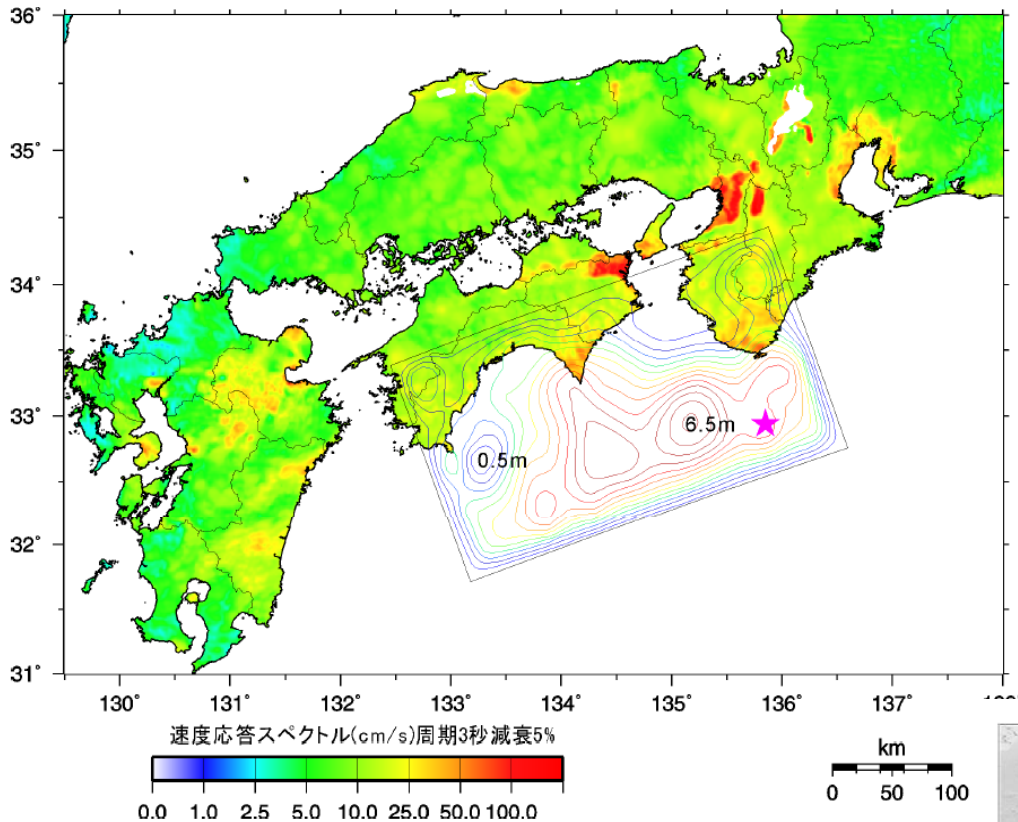
S造6棟:高さ80~250m, 固有周期:1.8~6.5秒

RC造7棟:高さ90~240m, 固有周期:1.9~5.4秒

超高層建築物のレベル2(ごく稀)地震動に対する現行設計クライテリアは、層間変形角(層間変形/層高さ)1/100以下、層塑性率2.0以下

超高層建物モデルの応答値は、各地点の地震動レベルと継続時間や地盤特性を反映した地震動の卓越周期, さらに各モデル建物の固有周期などによりさまざまであるが、上記現行設計クライテリアを超える場合があることがわかった。

設計クライテリアについては、現在、建築基準整備促進事業における限界値や応答制御に関する検討において技術資料の整理が行われている。その結果と、長周期地震動予測式を使った検証用長周期地震動作成手法の提案に加え、内閣府や文部科学省地震調査研究推進本部における南海トラフの巨大地震の検討結果も踏まえて、国交省において長周期地震動対策を検討する。

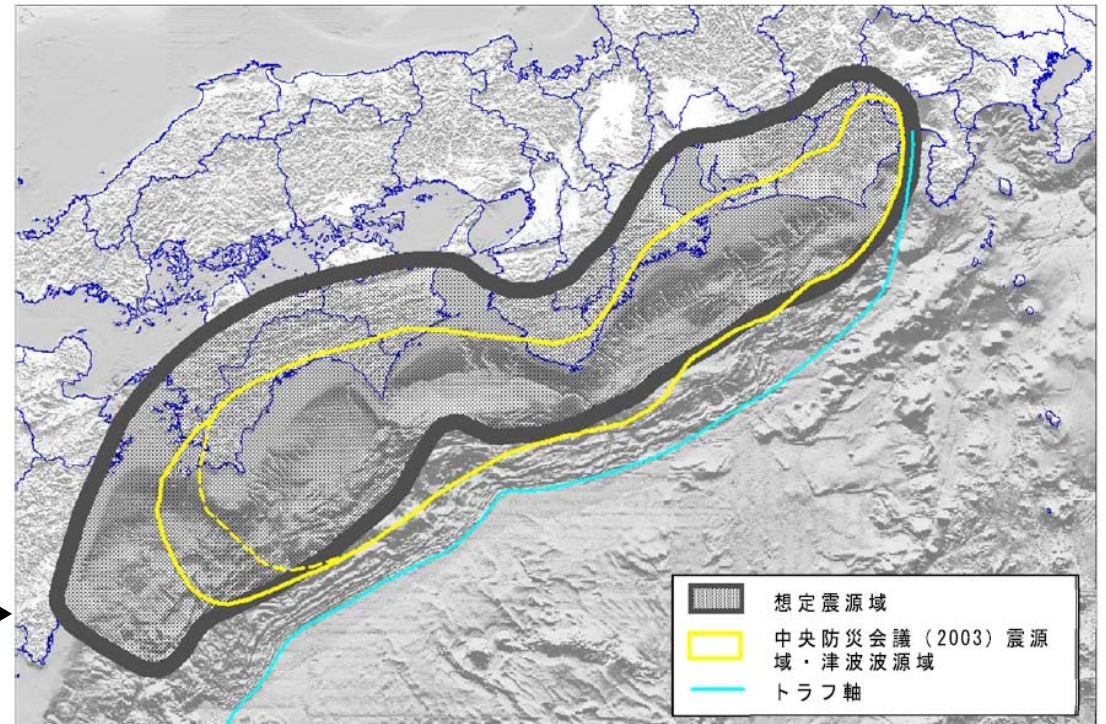


今後の課題：巨大地震による 長周期地震動への対応

- ・地震の起こり方
- ・地震動のばらつき
- ・建物の実力(性能)

昭和南海地震の長周期地震動予測地図
(地震調査研究推進本部、2012.1)

南海トラフの巨大地震モデル検討会
(内閣府中間とりまとめ案、2011.12)



※海底地形図は海上保安庁提供データによる