

# 耐専スペクトルの概要

(1999年時点の内容)

平成21年5月22日  
東京電力株式会社

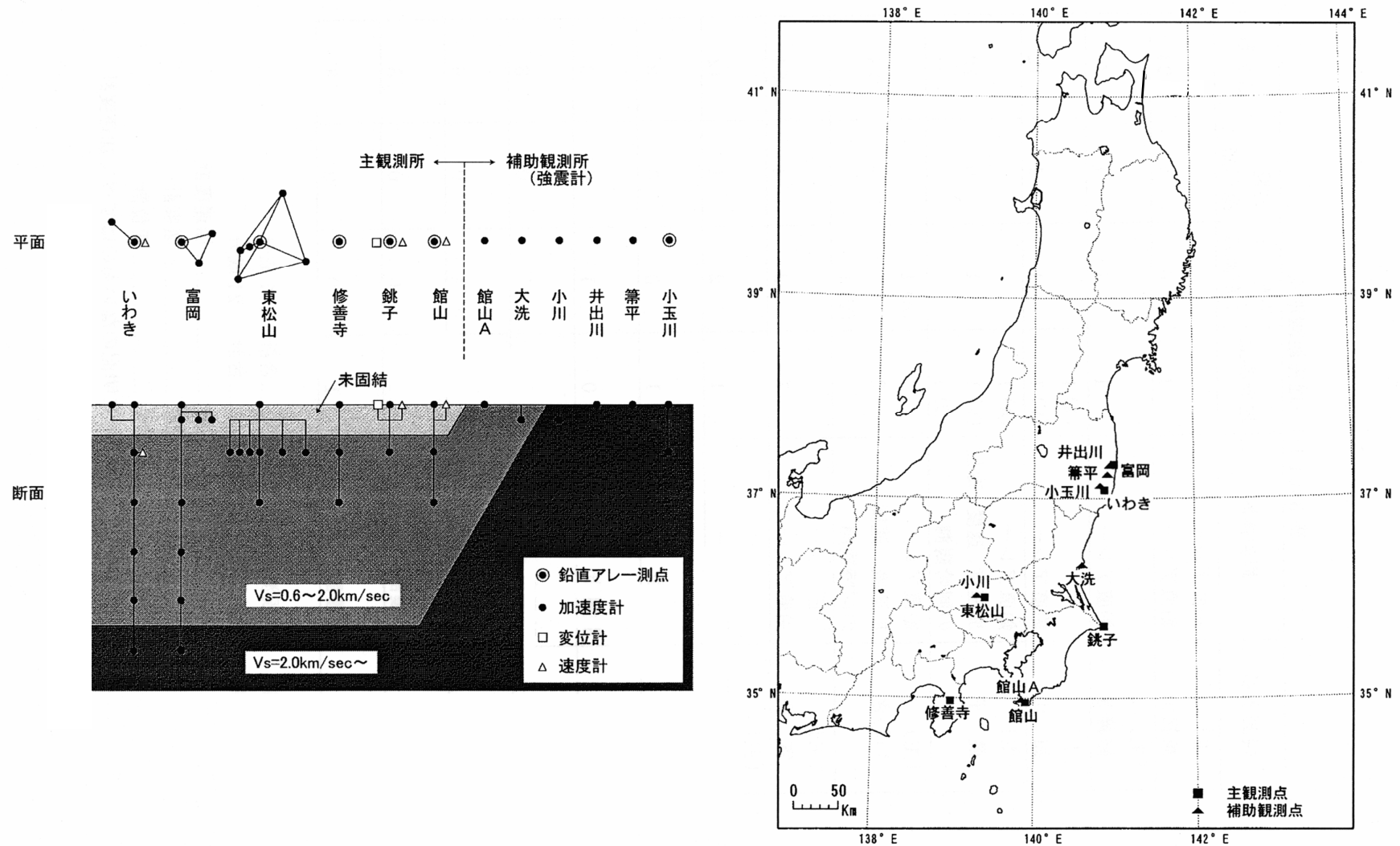


東京電力

---

# 1 地震動データベース ①

## 1) 世界に先がけた鉛直アレー観測の実施 (1977~)



電力共通研究：地震観測にもとづく基準地震動評価手法の研究

# 1 地震動データベース ②

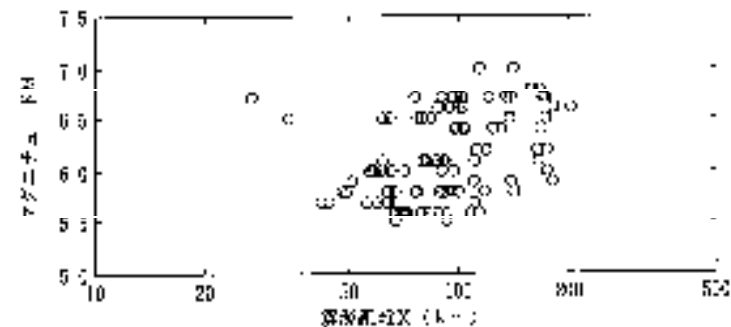
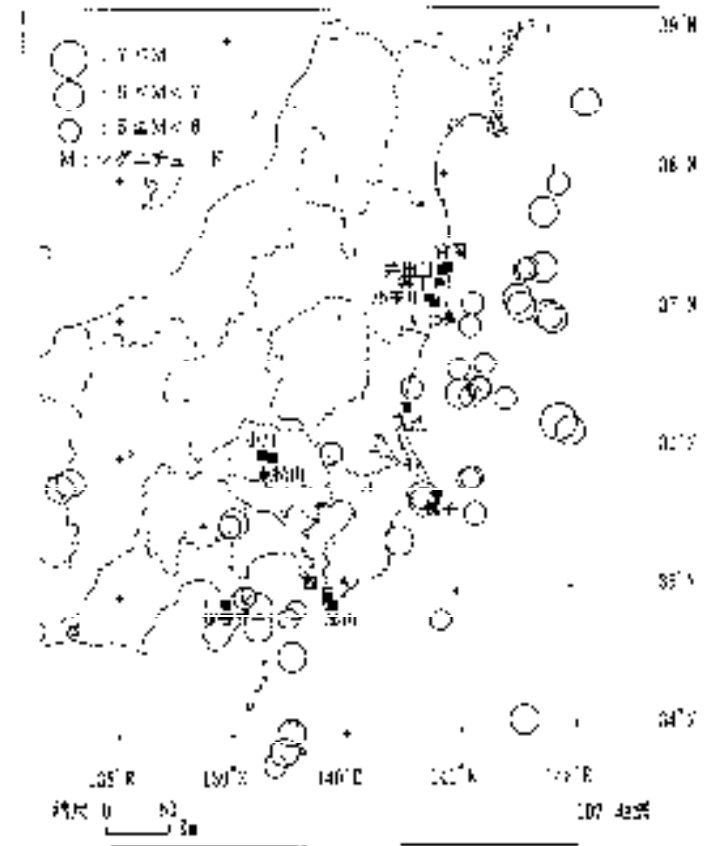
## 2) 高精度の地震観測記録によるデータベースの構築

### ■ 選定条件

- 地震規模  $M_j \geq 5.5$
- 震源深さ  $D \leq 60\text{km}$
- 震源距離  $X \leq 200\text{km}$
- 信頼周期  $T_c \geq 5\text{s}$

### ■ 結果

- 107 地震観測記録
- 水平214 波
- 上下107 波



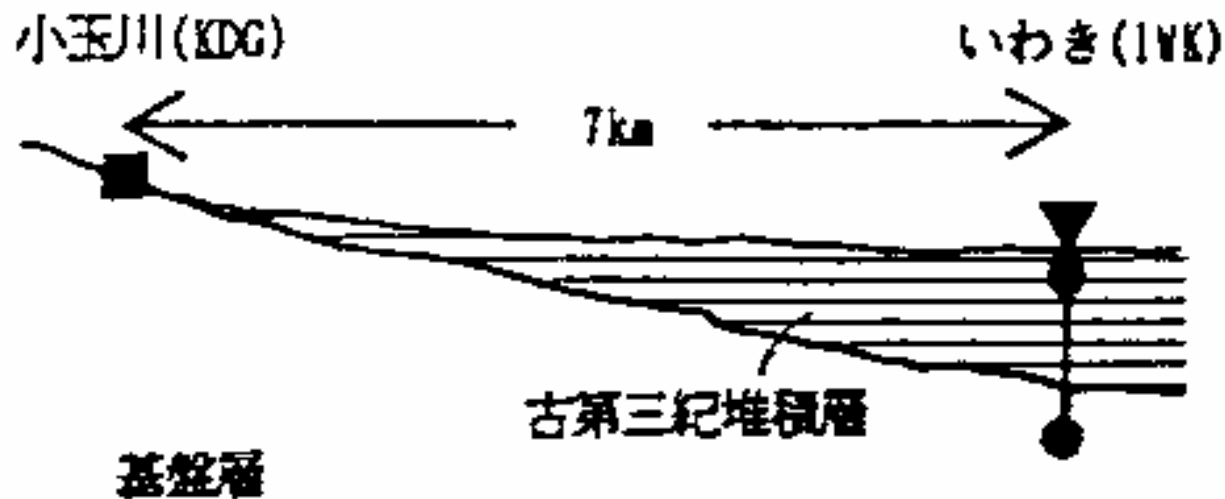
資料提供先: 東京電力株式会社

# 1 地震動データベース ③

## 3) 地震基盤サイトの選定

### ■KDG(小玉川観測点)

- ◆ 地震基盤が露頭
- ◆ 観測記録が多い





# 1 地震動データベース ④

## 4) 観測点の地盤条件

●  $V_s = 0.5 \sim 2.7 \text{ km/s}$  :  $V_p = 1.7 \sim 5.5 \text{ km/s}$

地点名	略号	観測位置	地盤速度( $V_s$ )	記録成分数	データの補正
高岡	TMK	GL-100m	0.70km/s	30	はぎとり
井出川	IDG	GL	2.00km/s	6	無(被り厚2.0m)
帯平	HKD	GL	2.70km/s	4	無(被り厚6.9m)
小玉川	KDG	GL-10m	2.20km/s	20	地盤特性の補正
いわき	IWK	GL-21m	1.18km/s	38	はぎとり
大洗	OAR	GL-14m	1.00km/s	16	無
京松山	HMY	GL-58m	0.75km/s	18	はぎとり
小川	OGW	GL-10m	2.1km/s	6	無
銃子	CHS	GL-18m	1.4km/s	32	はぎとり
館山	TTY	GL-43m	0.6km/s	12	無
館山A	TTA	GL	0.5km/s	10	無(被り厚1.5m)
修善寺	SZJ	GL-36m	0.65km/s	22	はぎとり
合計				214	

## 2 物理的意味が明解な経験式の採用 ①

### 1) 経験式の設定

- 無限媒質の遠方近似解

$$F(f) = \frac{R_{\theta\phi} \omega^2}{4\pi\rho V_s^3} M_0(f) \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{V_s Q(f)}\right) G(f) \quad (1)$$

- 経験的距離減衰式

$$\log F(f) = a(f)M - (\log X + b(f)X) + c(f) \quad (2)$$

- (1)式と(2)式の比較:  $M_0(f) = P_0(f) 10^{a(f)M}$ と仮定

$$a(f) = (\log M_0(f) - \log P_0(f)) / M$$

$$b(f) = (\log e)\pi f / V_s Q_s(f)$$

$$c(f) = \log(\omega^2 R_{\theta\phi} P_0(f) G(f) / 4\pi\rho V_s^3)$$

## 2 物理的意味が明解な経験式の採用 ②

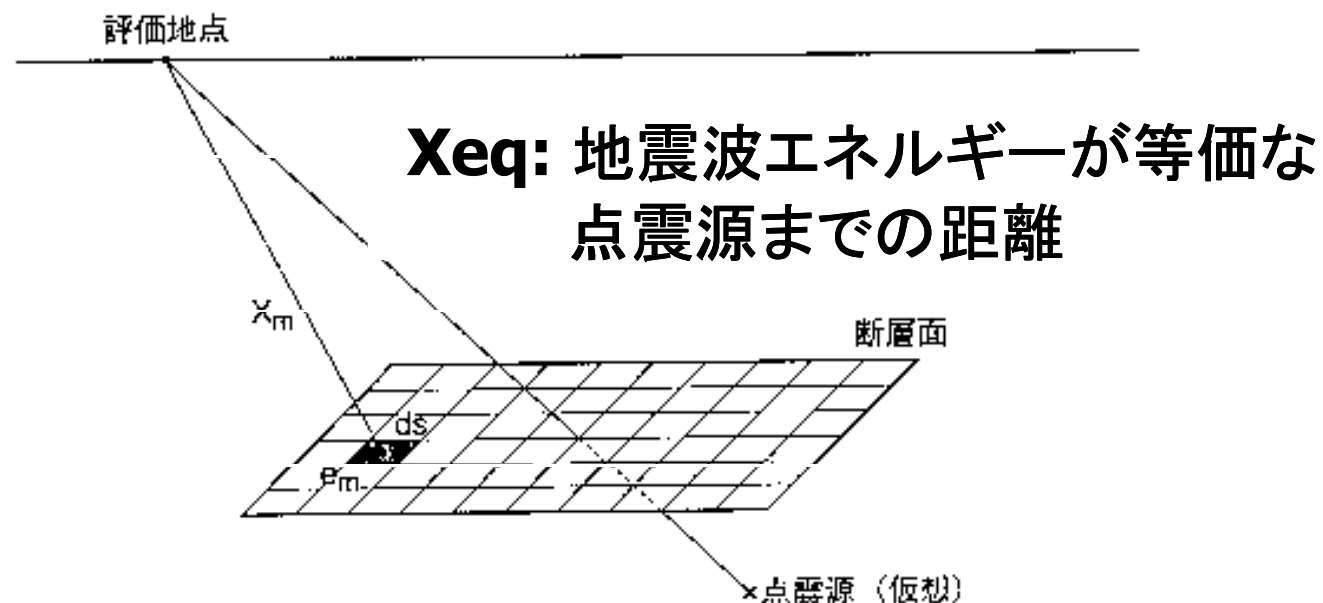
### 2) 断層面の面的な拡がりの効果を等価震源距離で考慮

$$X_{eq}^{-2} = \int e_m X_m^{-2} ds / \int e_m ds \quad (1)$$

$X_m$  : 観測点から断層面の各微小領域 $m$ への距離 (km)

$e_m$  : 断層面上の各微小領域 $m$ からの地震波エネルギーの相対的放出分布

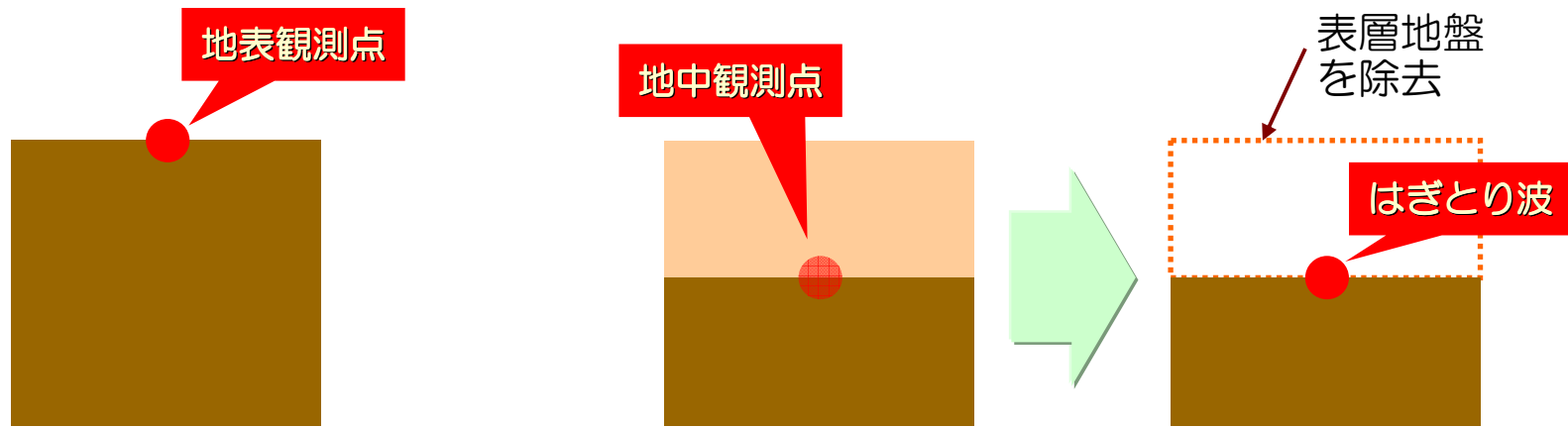
$ds$  : 断層面の微小領域 $m$ の面積 ( $km^2$ )



### 3 解放基盤における地震動評価 ①

#### 1) 解析に用いる地震観測データベース

1. 地表観測記録
2. 地中観測記録より計算した解放基盤相当のはぎとり波



1. 地表観測記録

2. はぎとり波

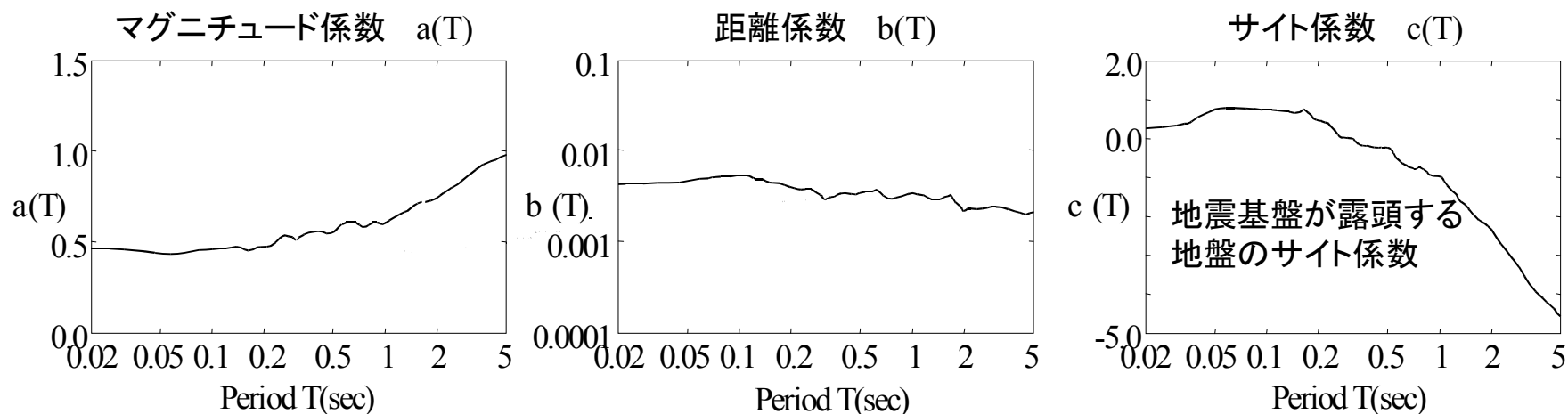
### 3 解放基盤における地震動評価 ②

#### 2) スペクトル特性の回帰分析

##### ■ スペクトルの回帰分析

$$\log S(T) = a(T)M - \{b(T)X_{eq} + \log X_{eq}\} + c_i(T), \quad c_i(T) = c(T) + d_i(T)$$

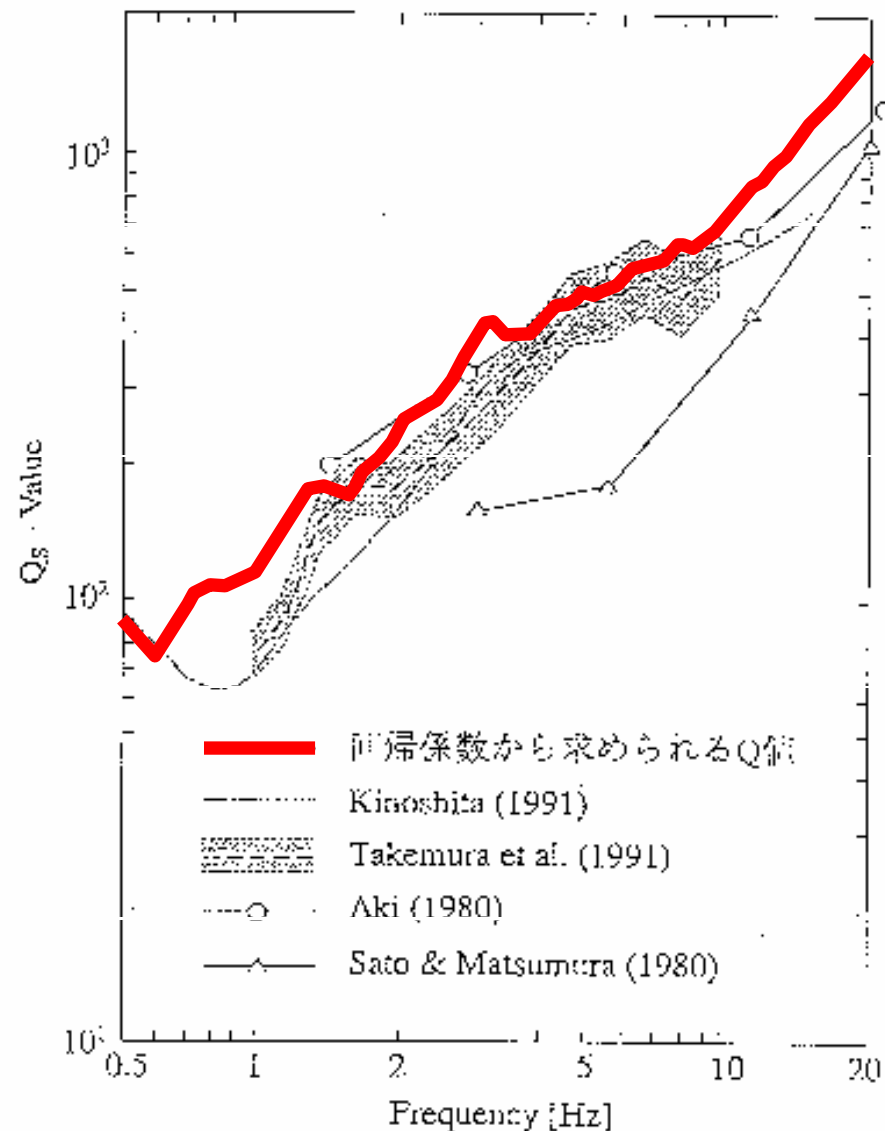
S(T) : 観測地震動の応答スペクトル



### 3 解放基盤における地震動評価 ③

#### 3) 経験式のb(f)から評価したQ値と既往研究の比較

- 既往の検討結果と概ね調和している



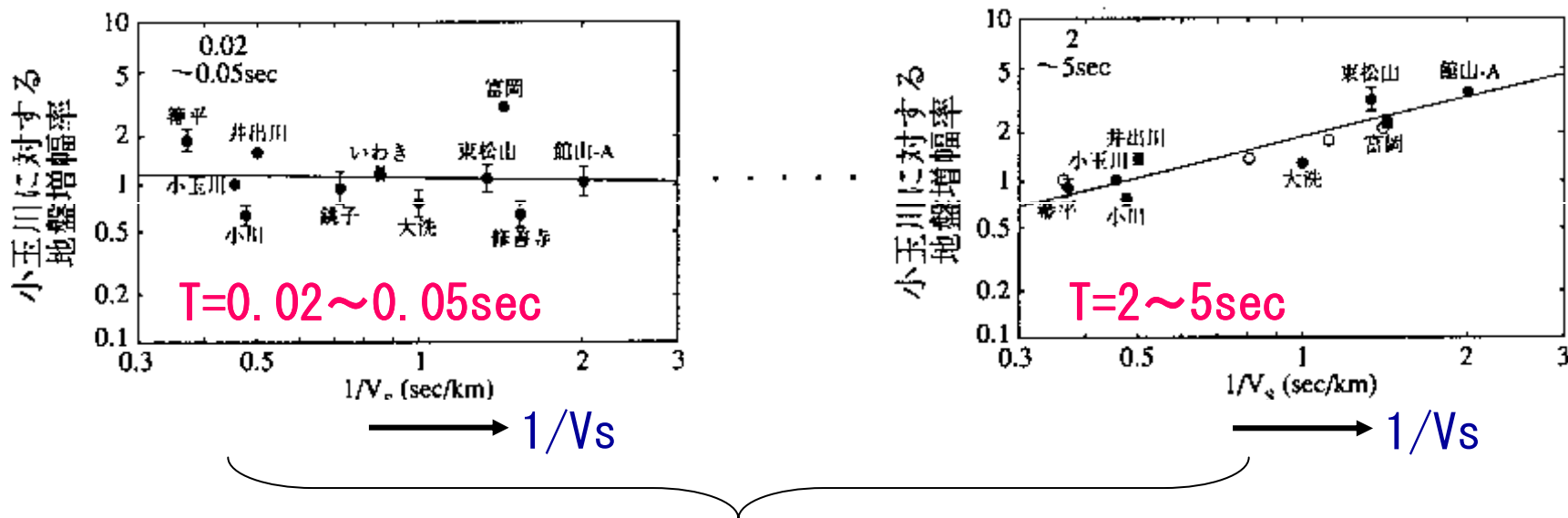
### 3 解放基盤における地震動評価 ④

#### 4) 地震基盤からの地盤増幅率

$$\log pSv(T) = a(T)M - (\log X + b(T)X) + \underline{\underline{c_i(T)}}$$

サイト係数

#### 地盤増幅率のVs依存性

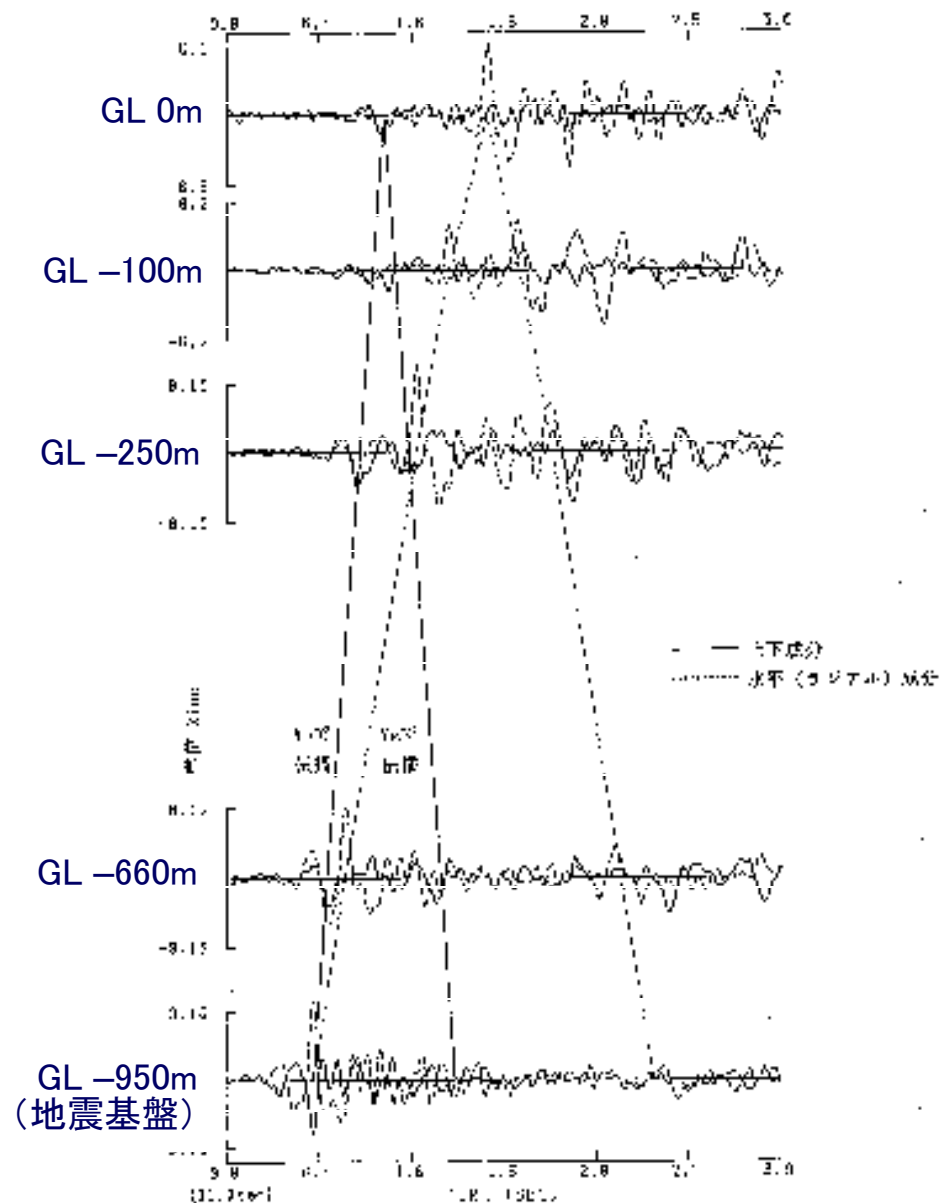


地盤のVsに応じた地震基盤からの増幅率の評価

### 3 解放基盤における地震動評価 ⑤

#### 5) 上下動の考え方

- S波到達以降を対象
- 地震基盤まではS波
- 地震基盤でSV-P変換
- 表層地盤はP波で伝播
- 表層地盤の $V_p$ で増幅率を整理



【富岡観測点の例】



### 3 解放基盤における地震動評価 ⑥

#### 6) $V_s$ 、 $V_p$ ごとの 地盤増幅率の例

水平動の例

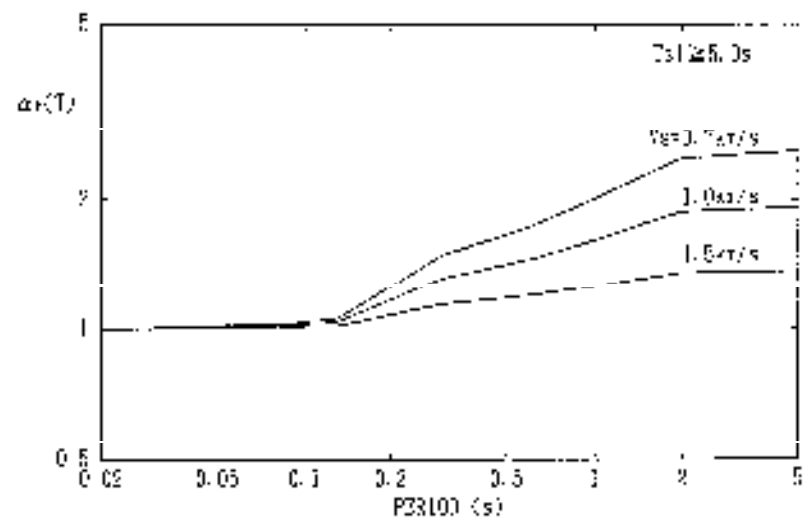


図 6-4 地盤増幅率を示す係数  $\alpha_s(T)$  の  $V_s$  速度による長期依存性

上下動の例

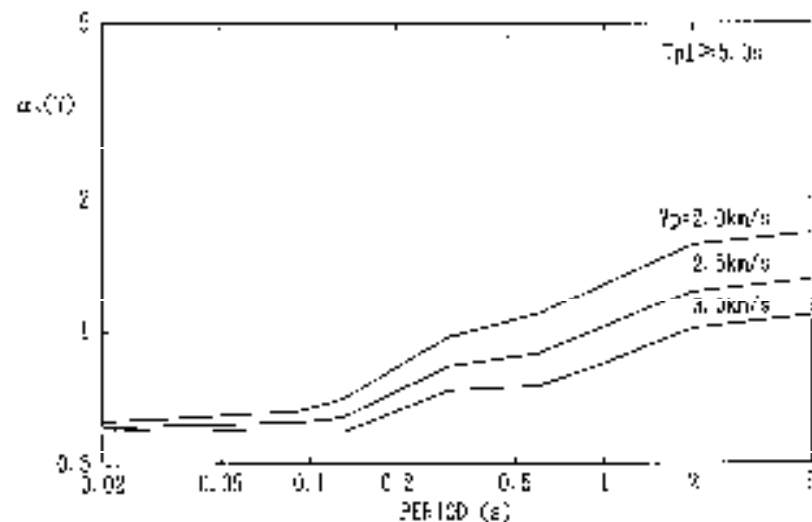
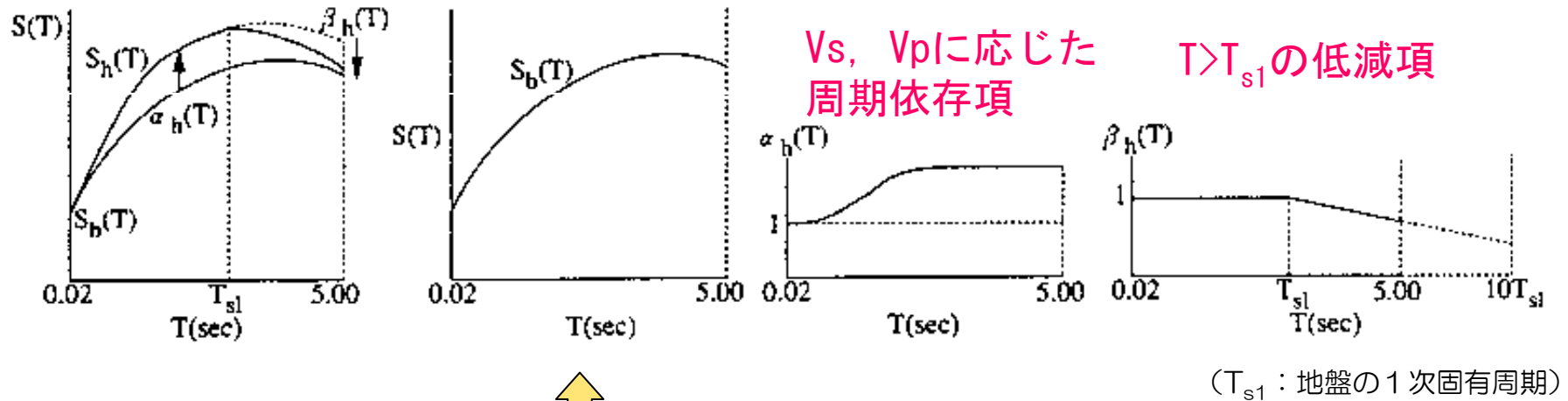


図 6-5 地盤増幅率を示す係数  $\alpha_v(T)$  の  $V_p$  速度による長期依存性

### 3 解放基盤における地震動評価 ⑦

#### 7) 解放基盤の地震動評価

解放基盤表面における平均応答スペクトル = 地震基盤における平均応答スペクトル × 地盤増幅の補正項  
 地盤増幅率の補正 × 地盤の卓越周期の補正



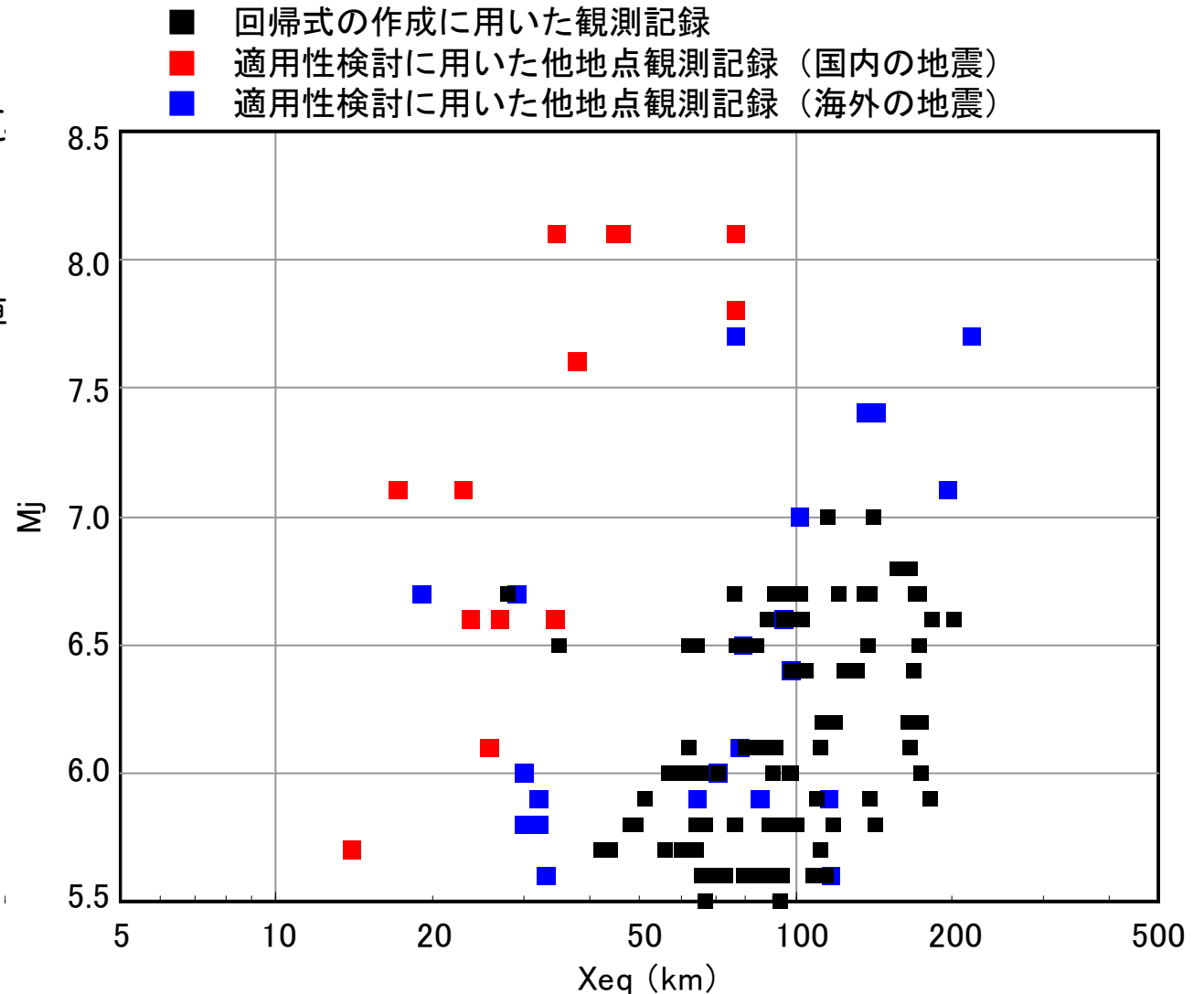
$$\log pSv(T) = a(T)M - (\log X + b(T)X) + c(T)$$

(当初は回帰分析結果に基づきスペクトルを設定していた)

## 4 適用性の検討 ①

### 1) 他地点の大振幅記録への適用性

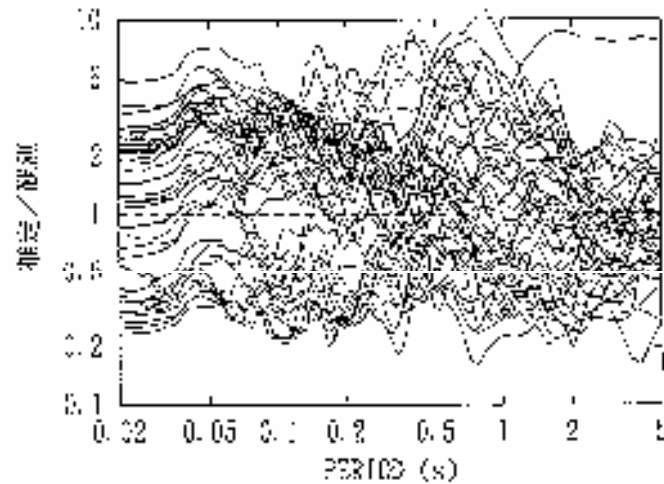
- 耐専スペクトルは、  
■の観測記録の回帰に基づき設定している
- ■ ■の観測記録を耐専スペクトルで評価し、観測記録との対応を確認している



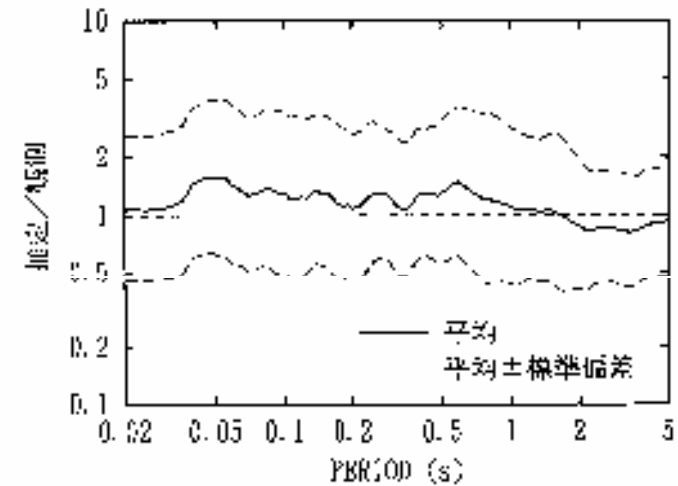
## 4 適用性の検討 ②

### 他地点記録と耐専スペクトルの比較

国内の地震

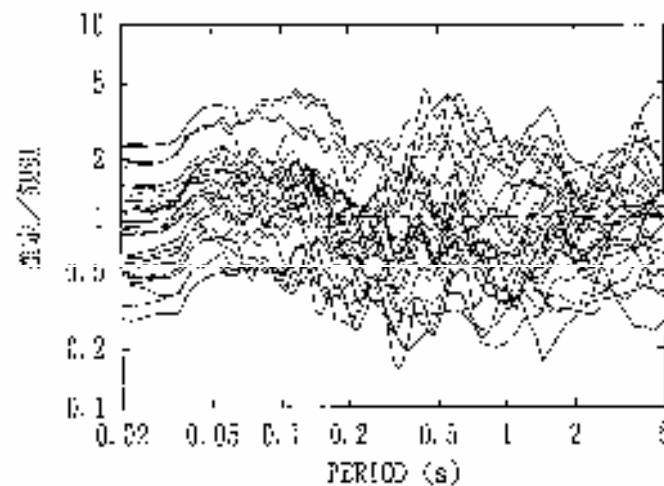


(a) 国内全記録

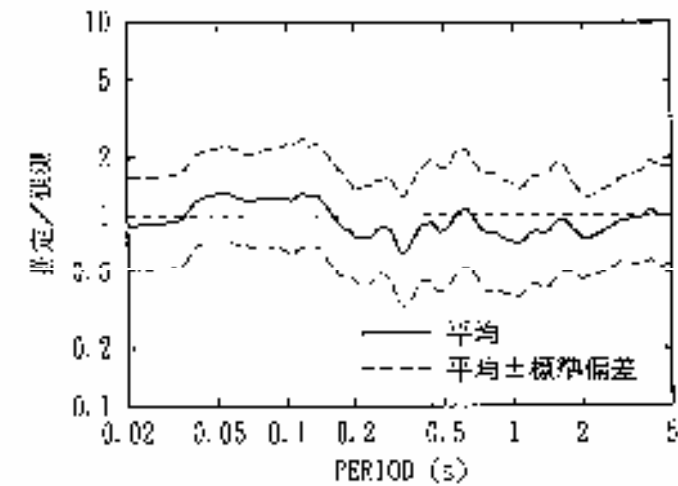


(a) 国内全記録

海外の地震



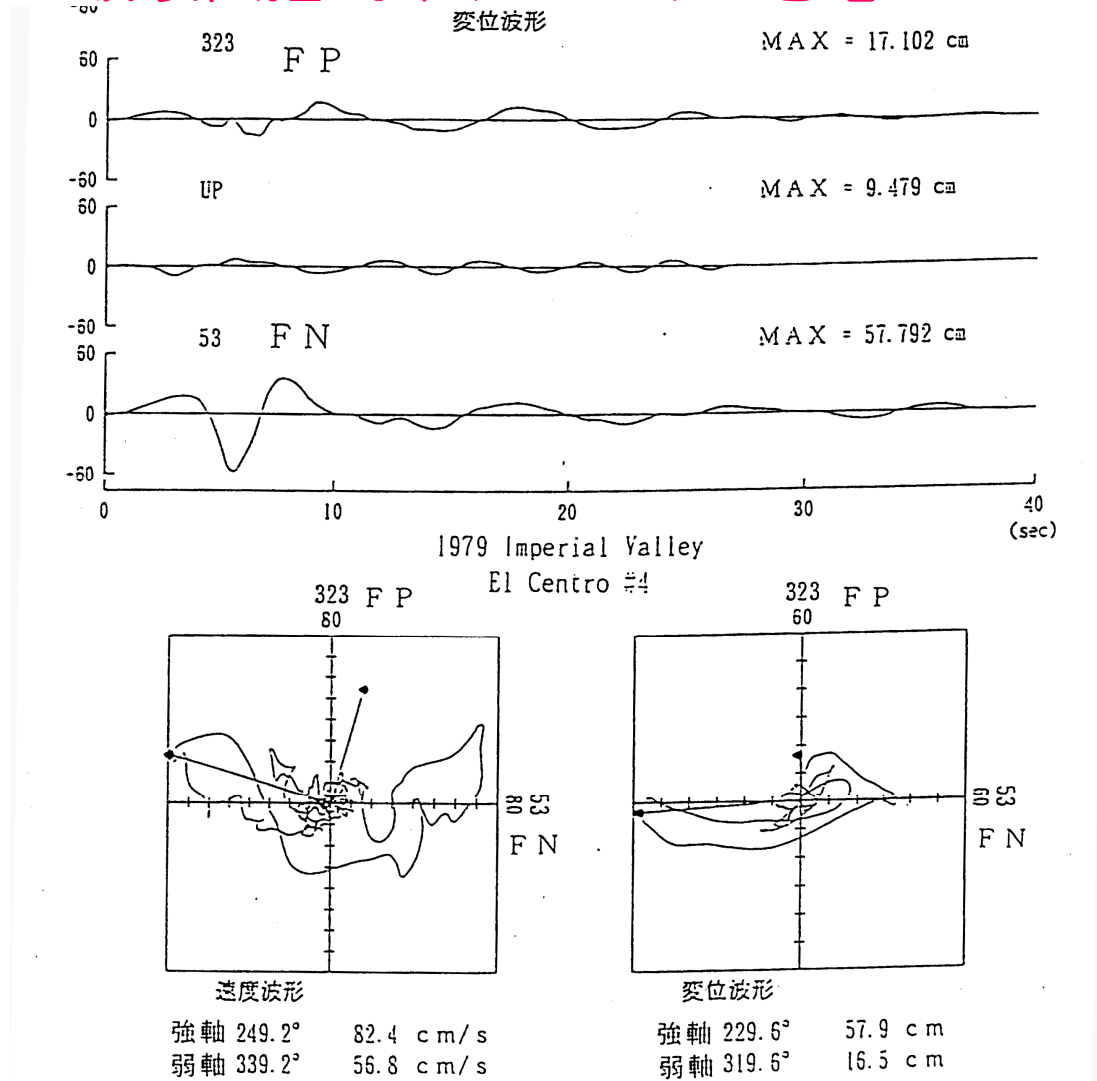
(b) 海外全記録



(b) 海外全記録

# 4 適用性の検討 ③

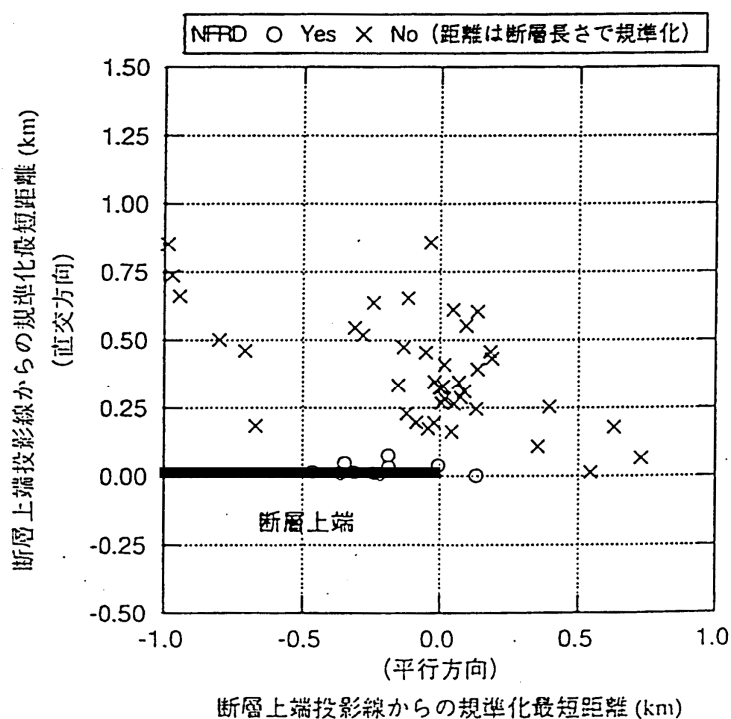
## 2) 震源近傍の破壊伝播効果(NFRD)の考慮



震源近傍の観測記録はFN(断層直交方向)が卓越

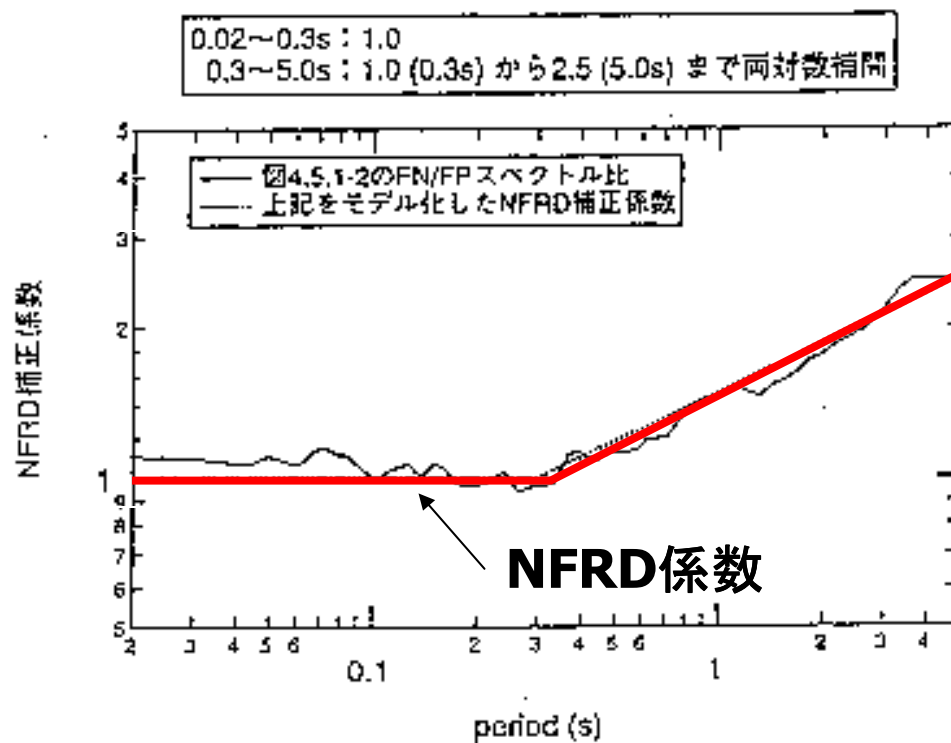
# 4 適用性の検討 ④

FN/FPが卓越する範囲  
(横ずれ断層の例)



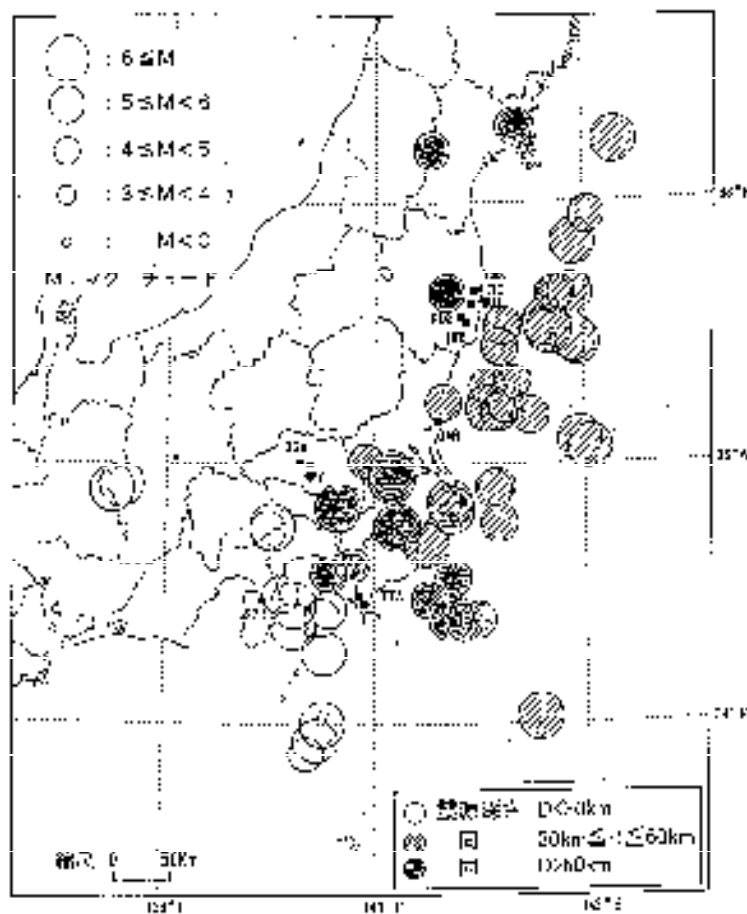
(2) 断層長さで規準化した場合

震源近傍の観測記録から定めた  
FN/FPの平均 (NFRD係数) とモデル化



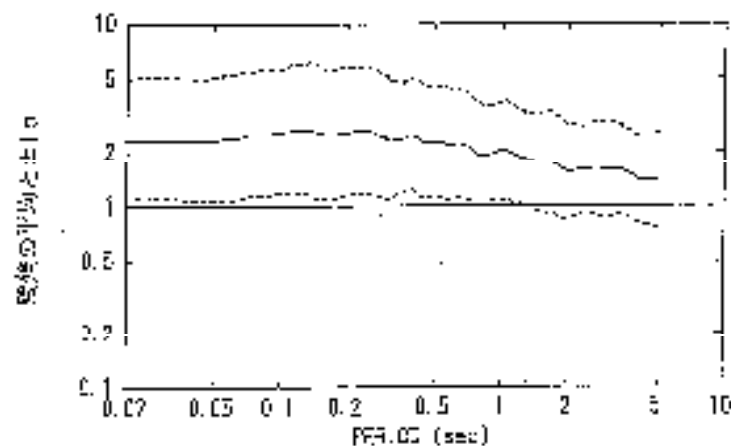
## 4 適用性の検討 ⑤

### 3) スラブ内地震への適用性



電共研観測点の配置と震央位置

60km以深の地震の  
残差(観測/推定)



短周期の励起が大きい

- ・サイトの記録を用いて残差を評価
- ・耐専スペクトルに残差を上乗せ
- ・地域性を考慮した評価をサイト毎に実施

# 5 コントロールポイントの設定 ①

## 1) 地震基盤のコントロールポイント化について

回帰係数を用いるスペクトルをコントロールポイントで示すスペクトルへ変更した。

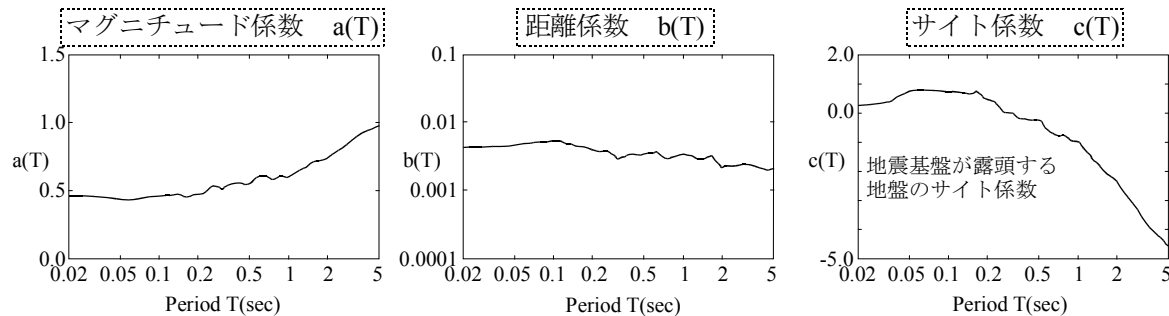
コントロールポイント化する理由は以下の通りである。

- ①従来の経験的方法（例えば大崎の方法等）との連続性を保つ。
- ②設計上運用が容易である。

回帰係数

$$\log S(T) = a(T)M - \{b(T)X_{eq} + \log X_{eq}\} + c_i(T), c_i(T) = c(T) + d_i(T)$$

S(T) : 観測地震動の応答スペクトル



コントロールポイント

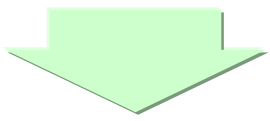
		震動係数 (1/2400) (S, 100%)									
		4	7	10	12	14	16	18	20	22	24
全震動	M=7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	M=8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	M=9	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
上層部	M=7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	M=8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	M=9	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
中層部	M=7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	M=8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	M=9	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
基礎部	M=7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	M=8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	M=9	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004



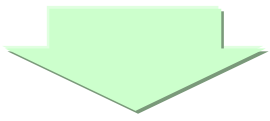
# 5 コントロールポイントの設定 ②

## 2) コントロールポイントの種類

● コントロールポイントは当初、「遠距離」「中距離」「近距離」の3種類の設定を考えていた

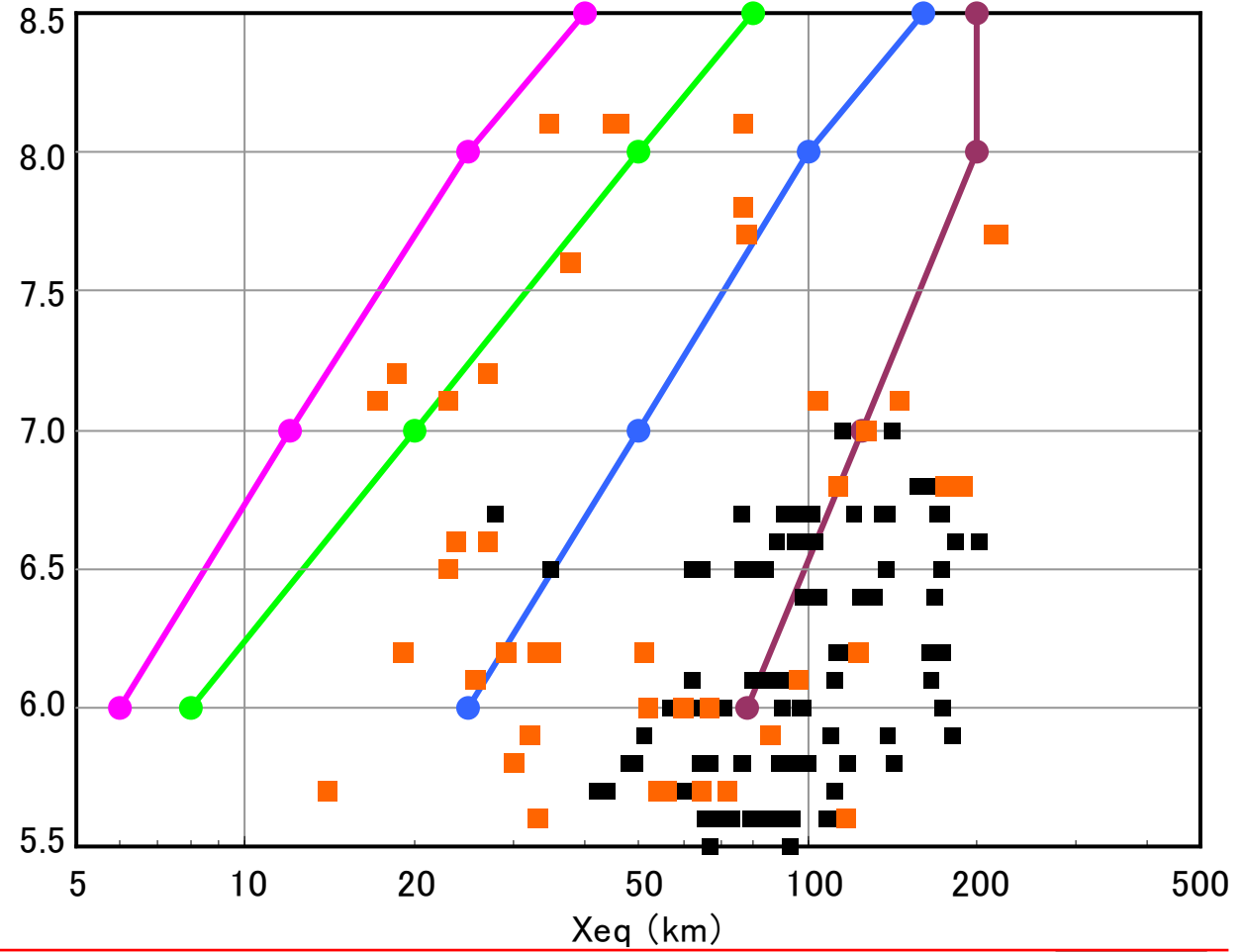


● 近距離より更に近い地点の地震動評価を外挿により求めると、振幅値が過大となる



● 「近距離」の約1/2の距離を目安として、新たに「極近距離」のコントロールポイントを設定した

- 回帰式の作成用いた観測記録
- コントロールポイントにおけるスペクトルの妥当性検証に用いた観測記録
- 耐専スペクトルの極近距離
- 耐専スペクトルの中距離
- 耐専スペクトルの近距離
- 耐専スペクトルの遠距離



## 5 コントロールポイントの設定 ③

### 3) コントロールポイントの基本的考え方

- Mは、6、7、8の3つを基に、外挿を避けるため8.5を加える。
- 各Mについて地震基盤の最大加速度が概ね等しくなるように、極近距離、近距離、中距離、遠距離の4種類の $X_{eq}$ を設定する。
- $X_{eq}$ 設定に用いる地震基盤での最大加速度の具体的な値は、中距離が60～100Gal、近距離が200～250Galとする。（ $X_{eq}$ を整数とするため幅が生じる。最大加速度は既往サイトで考慮する地震の最大加速度値を考慮して定めている。）
- 中距離は、遠距離と近距離の中間的な距離とする。
- 極近距離のスペクトルレベルは、回帰スペクトルを参考に設定（330～530Gal）。

## 5 コントロールポイントの設定 ④

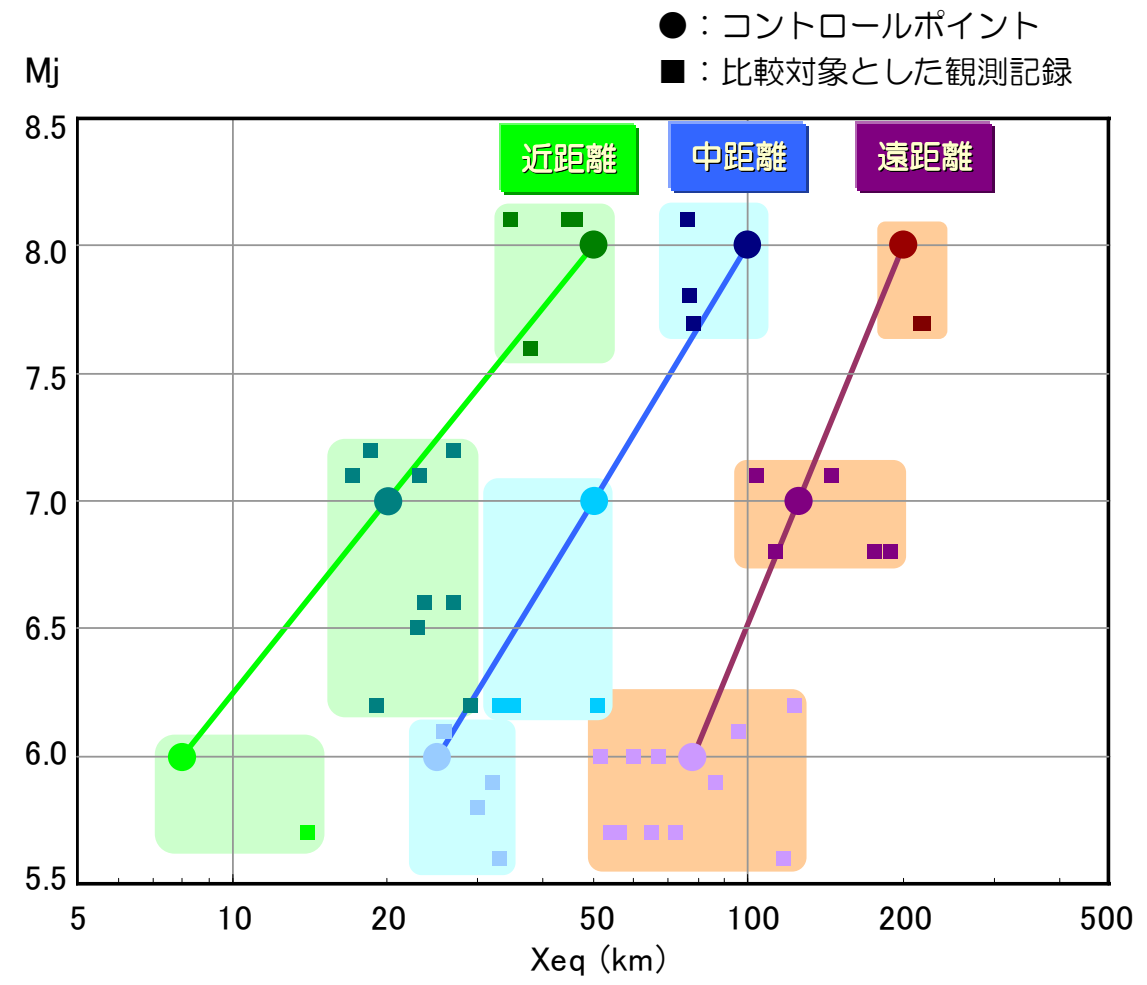
### 4) 地震基盤のコントロールポイントの値

M	$\Delta_{ep}$ (km)	コントロールポイントの座標 pS <sub>0</sub> (cm/s)								
		A	B	C	D	E	F	G	H	
		TA(s) (1.02)	TB(s) (0.09)	TC(s) (0.13)	TD(s) (0.30)	TE(s) (0.60)	TF(s) (1.00)	TG(s) (2.00)	TH(s) (5.00)	
極近距離	8.5	40	1.62	18.44	27.32	47.87	68.05	64.66	53.52	40.06
	8	20	1.09	20.05	28.96	48.22	67.86	65.27	52.51	38.55
	7	12	1.40	17.20	24.84	33.86	43.42	36.42	25.15	17.85
	6	6	1.04	12.82	18.51	21.84	23.17	17.41	9.64	3.88
近距離	8.5	80	0.73	7.56	11.45	22.92	34.79	32.58	27.60	21.96
	8	50	0.67	7.45	11.17	20.05	28.65	27.06	22.70	17.19
	7	20	0.78	9.44	13.64	19.10	24.83	20.69	14.46	10.37
	6	8	0.77	9.45	13.65	16.25	17.18	12.75	7.16	2.89
中距離	8.5	160	0.26	2.22	3.67	9.45	15.17	14.83	13.64	12.26
	8	100	0.32	3.08	4.86	10.27	16.04	14.96	12.73	10.37
	7	50	0.23	2.65	4.01	6.02	7.64	6.68	4.87	3.64
	6	25	0.21	2.49	3.60	4.54	4.84	3.98	2.07	0.86
遠距離	8.5	200	0.18	1.44	2.43	6.87	11.17	11.17	10.67	10.04
	8	200	0.10	0.80	1.35	3.82	6.21	6.21	5.93	5.58
	7	125	0.046	0.43	0.70	1.34	1.81	1.59	1.26	1.05
	6	78	0.041	0.45	0.65	0.95	1.03	0.80	0.49	0.22

# 5 コントロールポイントの設定 ⑤

## 5) コントロールポイントにおける耐専スペクトルの妥当性検証

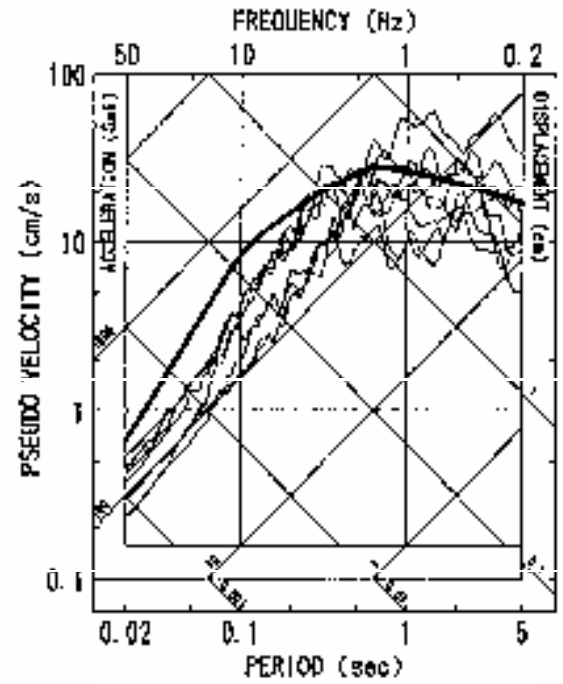
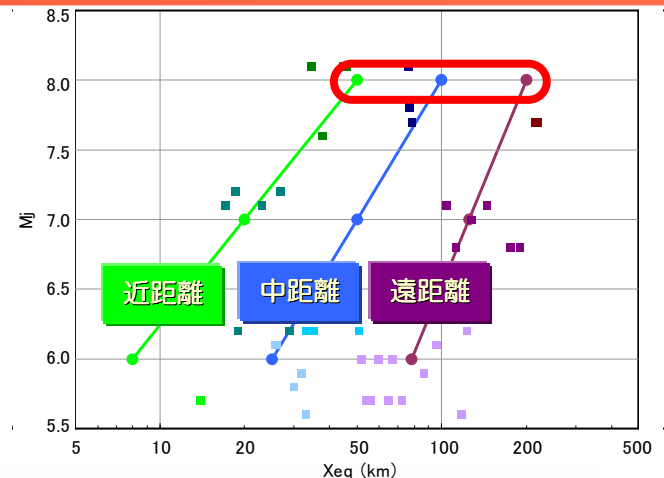
- コントロールポイントとほぼ同様の $M_j$ 及び $X_{eq}$ における観測記録を選定
- コントロールポイントにおける耐専スペクトルと観測記録のスペクトルを比較
- 観測記録は、コントロールポイントの $(M_j, X_{eq})$ と対応するように、スペクトルを補正



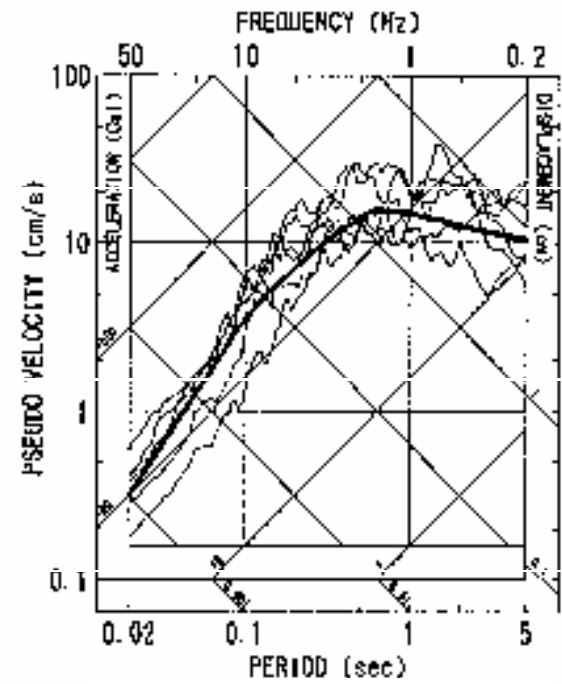
# 5 コントロールポイントの設定 ⑥

【M8.0：近・中・遠距離コントロールポイント】

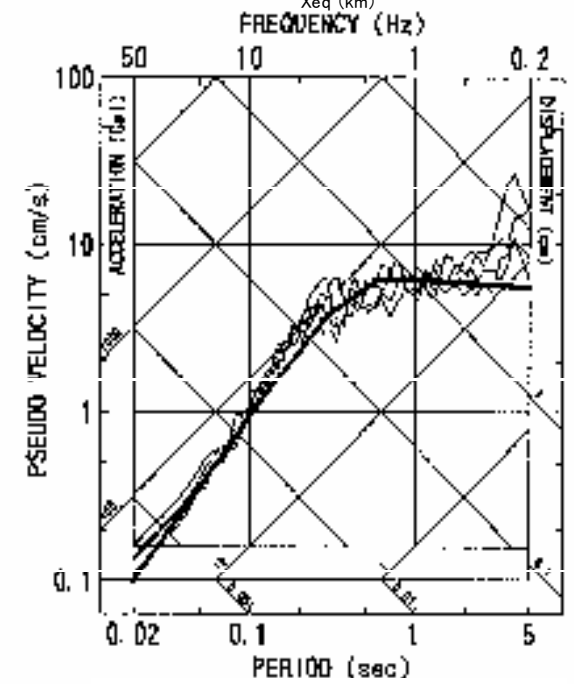
水平動の耐専スペクトル(地震基盤相当)  
 他地点観測記録(各コントロールポイントのMと $X_{eq}$ 相当に変換)



【Mj 8.0 Xeq 50km】



【Mj 8.0 Xeq 100km】

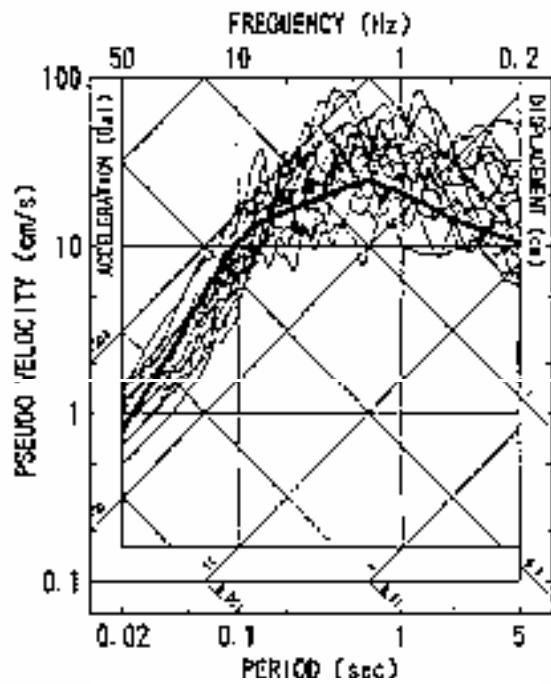
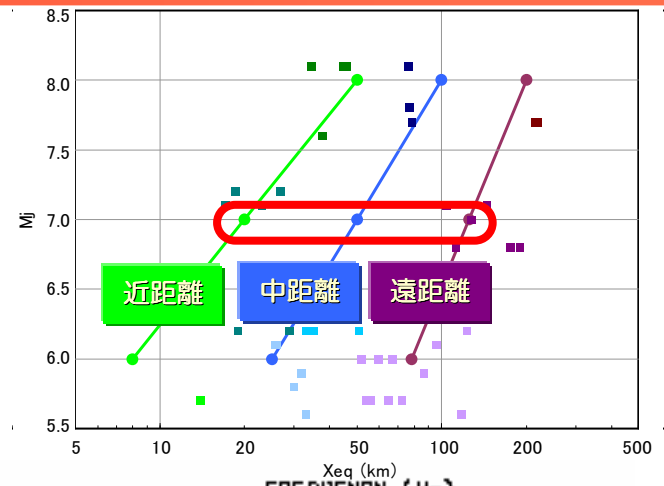


【Mj 8.0 Xeq 200km】

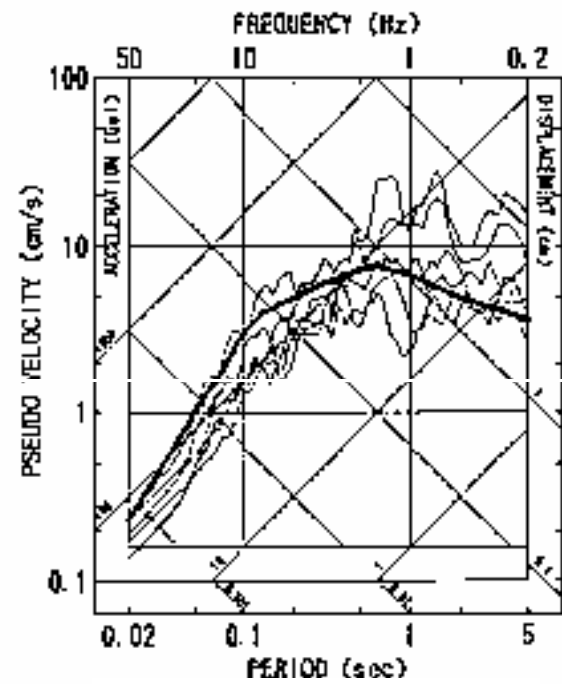
# 5 コントロールポイントの設定 ⑦

【M7.0：近・中・遠距離コントロールポイント】

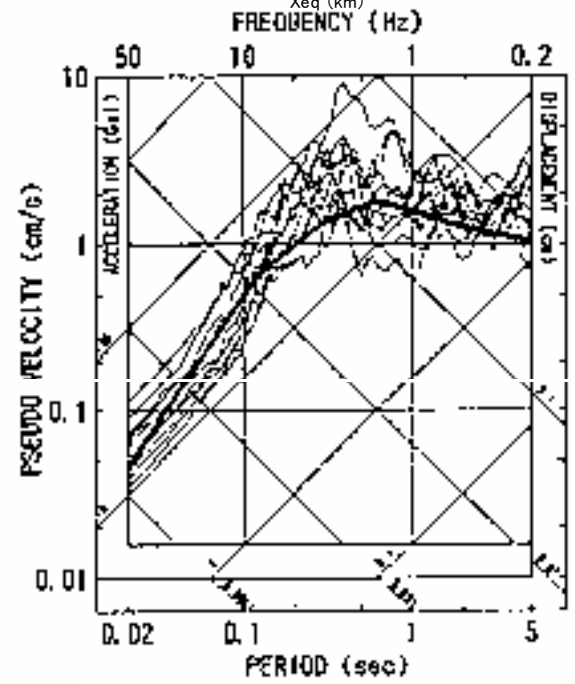
水平動の耐専スペクトル(地震基盤相当)  
 他地点観測記録(各コントロールポイントのMとXeq相当に変換)



【Mj 7.0 Xeq 20km】



【Mj 7.0 Xeq 50km】

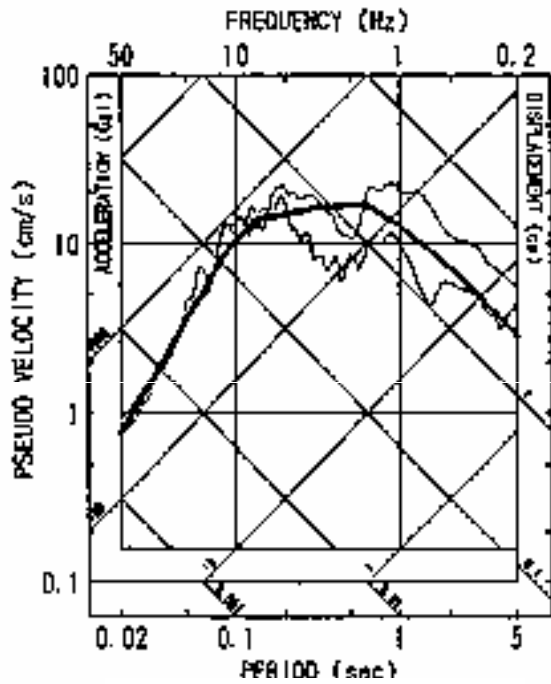
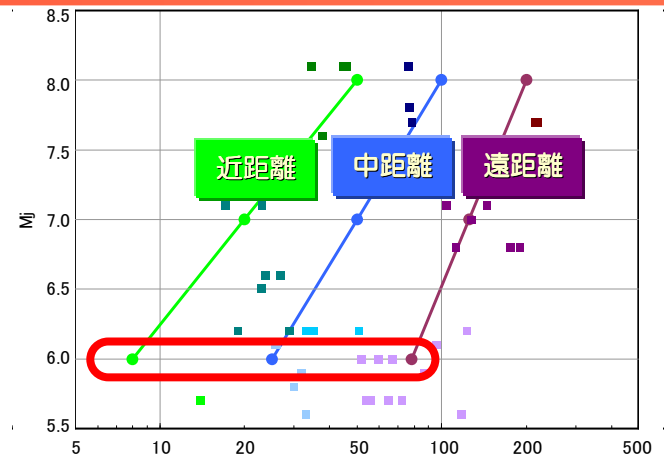


【Mj 7.0 Xeq 125km】

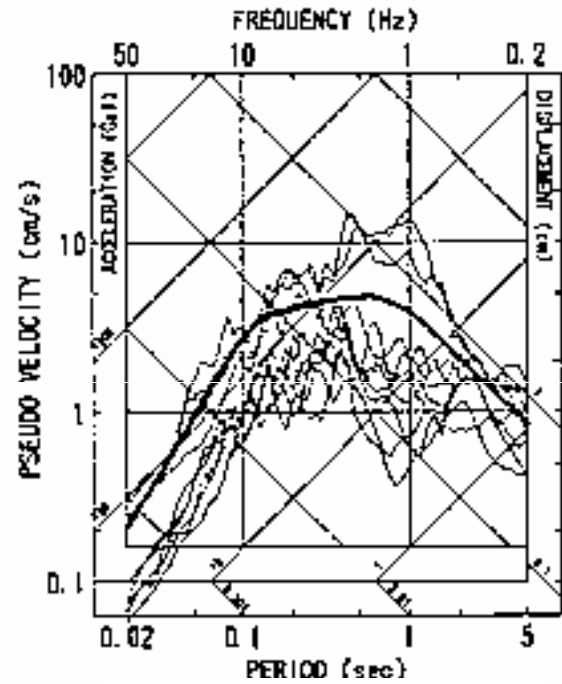
# 5 コントロールポイントの設定 ⑧

【M6.0：近・中・遠距離コントロールポイント】

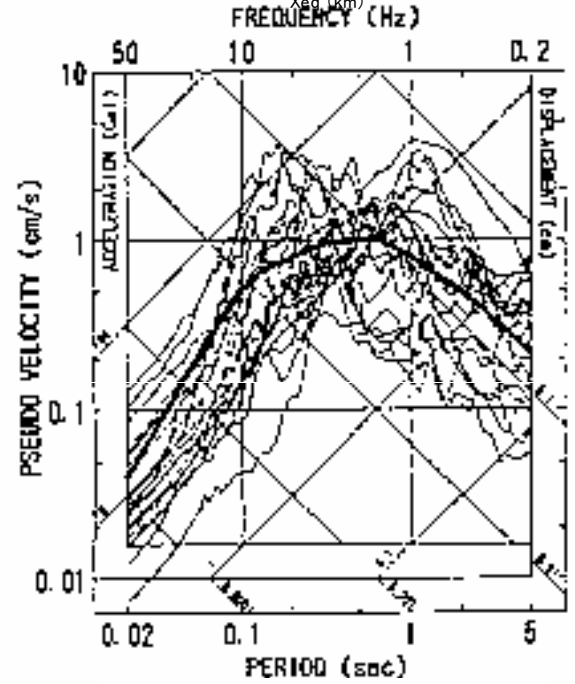
水平動の耐専スペクトル(地震基盤相当)  
 他地点観測記録(各コントロールポイントのMとXeq相当に変換)



【Mj 6.0 Xeq 8km】



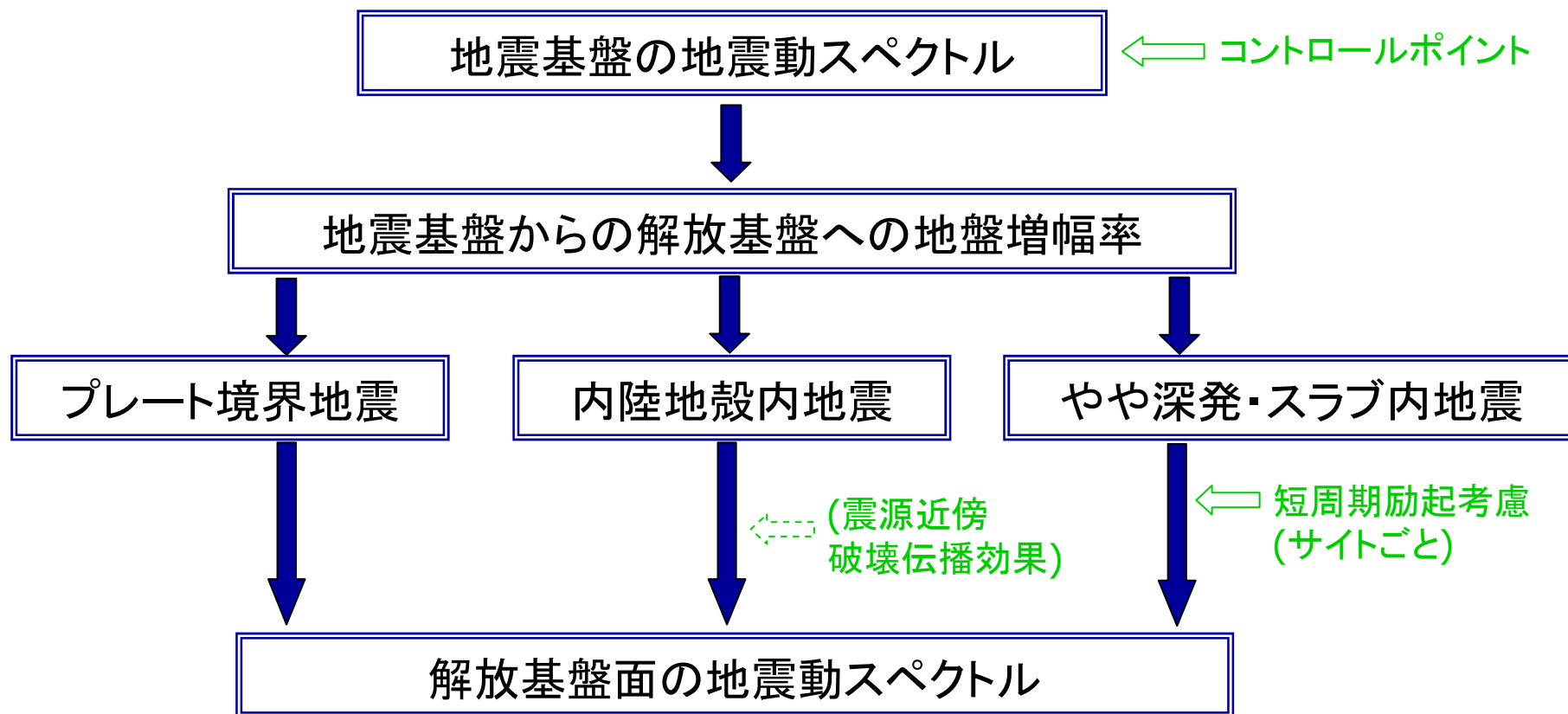
【Mj 6.0 Xeq 25km】



【Mj 6.0 Xeq 78km】

## 6 耐専スペクトルの骨子

解放基盤表面における水平および上下地震動は、地震基盤における水平地震動を共通として、これに水平動の地盤増幅率および上下動の地盤増幅率を乗じて求められる。





## 7. 耐専スペクトルの策定時点(1999年)の主な検討課題

---

- 主にプレート境界地震のデータセットに基づいて策定
  - 内陸地殻内地震への適用性の確認が必要である。
  
- 震源近傍のデータが少ない
  - 国内外の震源近傍記録の収集
  - 極近距離を含む適用性の確認
  - M8クラスの巨大地震への適用性の確認