

地震観測記録と要素地震の選定
Seismic ground motion records and
selection of element ground motion

2016年9月24日
電力中央研究所 7階会議室

(株) 大崎総合研究所
Ohsaki Research Institute, Inc.
宮腰 淳一
Jun`ichi Miyakoshi

目 的

- 伊方地点における地震観測記録と要素地震の採用事例

内 容

Contents

- 伊方地点における地震観測記録
 - 伊方地点近傍で発生した地震
- 要素地震の事例
 - 中央構造線断層帯による地震動評価に用いた事例
(経験的グリーン関数)

地震観測記録

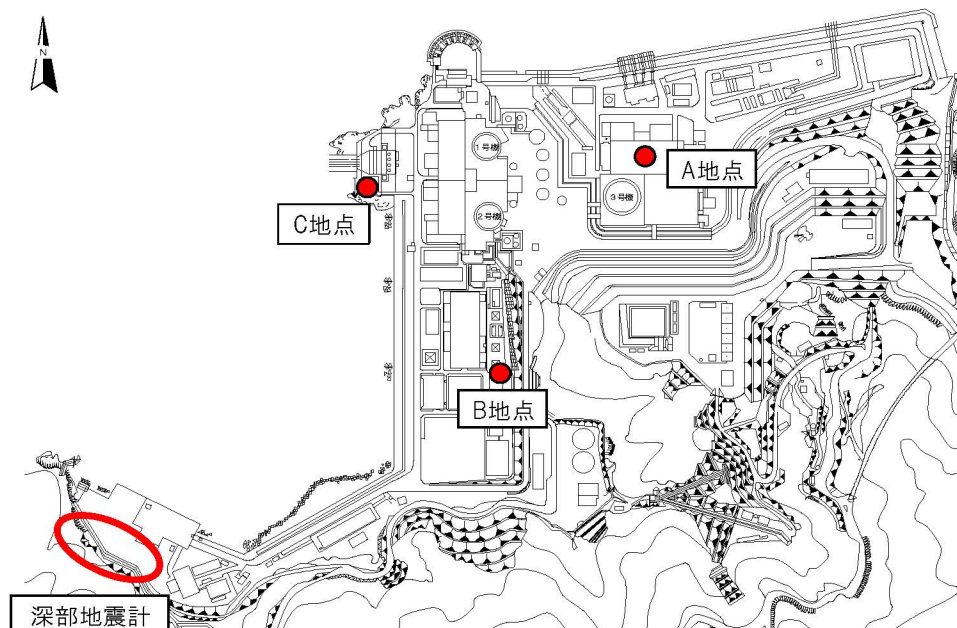
Seismic ground motion records

【地震計設置位置】

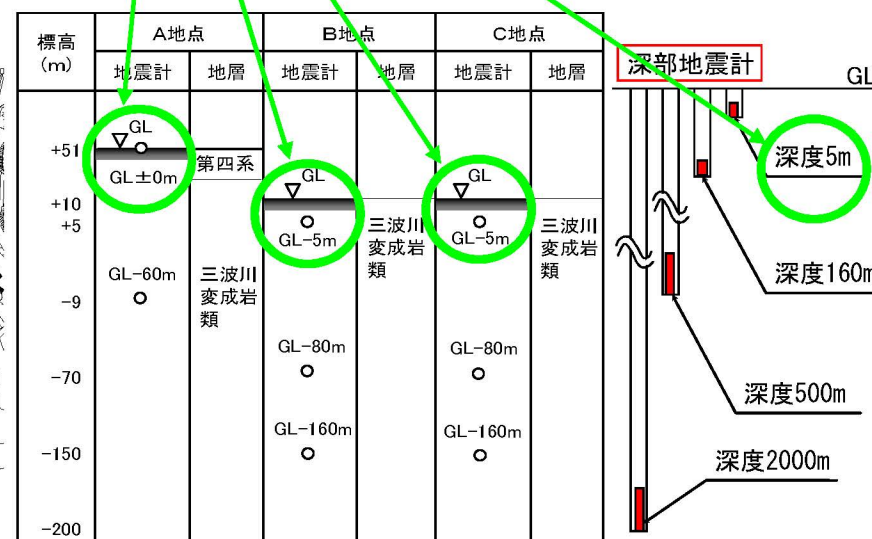
GL-5mまたはGL±0mの観測記録を
経験的グリーン関数法の要素地震の候補として検討

(解放基盤表面は標高+10m)

観測点	観測期間
A地点	1975～1982
B地点	1982～1994
C地点	1999～
深部地震計	2012～



地震計設置位置図（配置図）

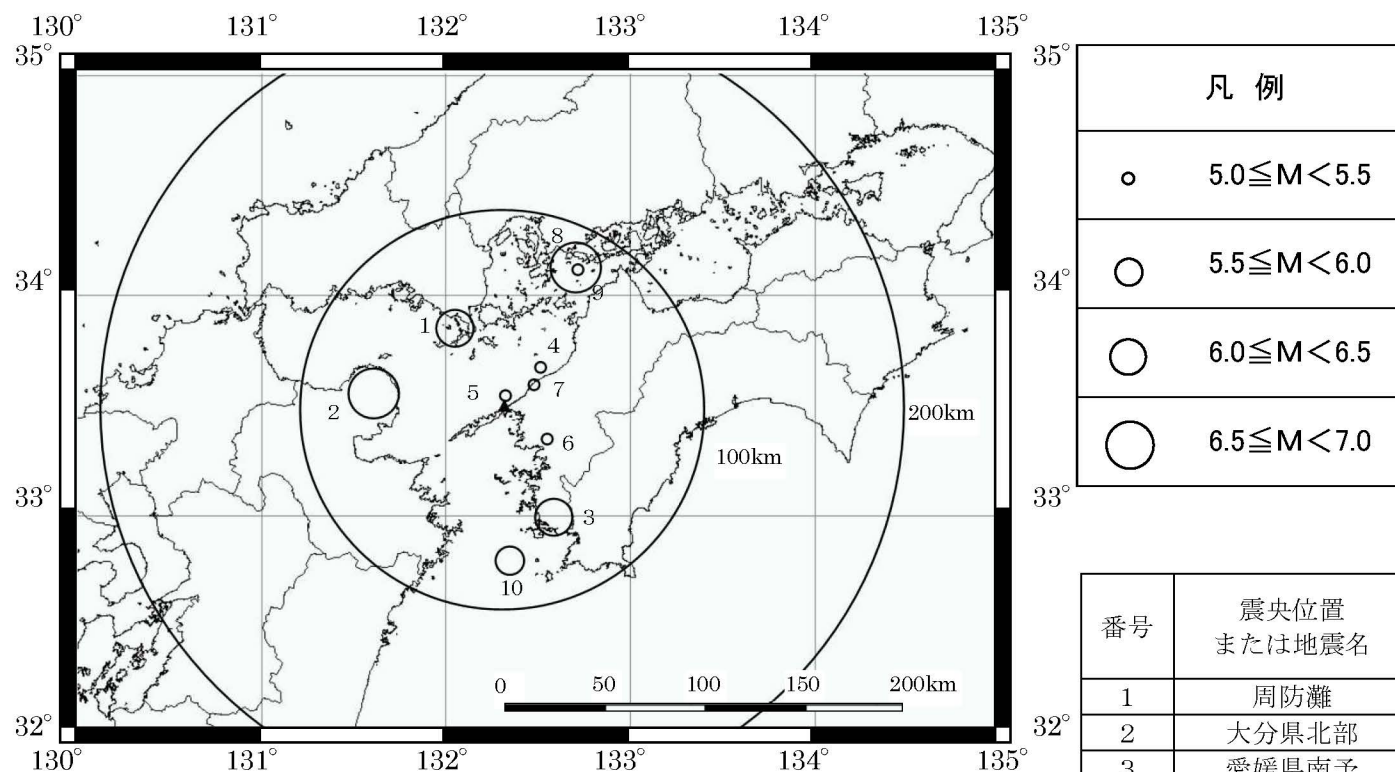


地震計設置位置図（柱状図）

地震観測記録

Seismic ground motion records

【主な観測記録】



主な観測地震の震央分布

○主な観測記録のほとんどが海洋プレート内の地震と考えられる
○大きな内陸地殻内地震の記録はない

番号	震央位置 または地震名	発生日時	M	深さ (km)	震央 距離 (km)
1	周防灘	1979年 7 月 13 日	6.0	70	47
2	大分県北部	1983年 8 月 26 日	6.6	116	66
3	愛媛県南予	1985年 5 月 13 日	6.0	39	61
4	伊予灘	1988年 7 月 29 日	5.1	53	28
5	伊予灘	1991年 1 月 4 日	5.3	58	6
6	愛媛県南予	1993年 8 月 14 日	5.3	47	27
7	伊予灘	1993年 8 月 31 日	5.1	62	19
8	2001年芸予地震	2001年 3 月 24 日	6.7	46	80
9	安芸灘	2001年 3 月 26 日	5.2	46	78
10	豊後水道	2001年 4 月 25 日	5.7	39	77

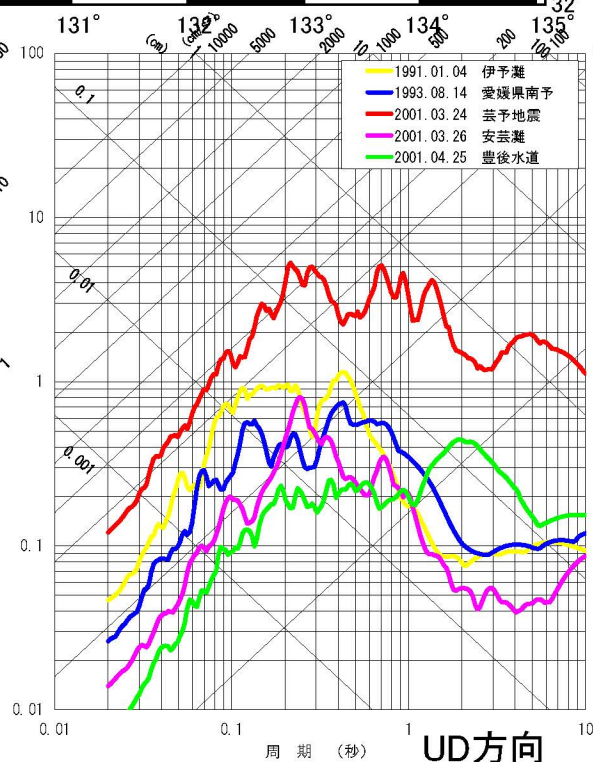
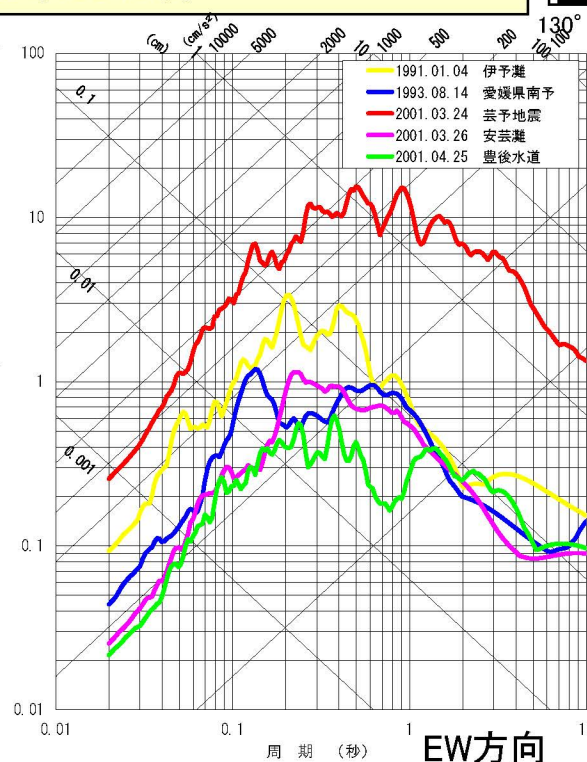
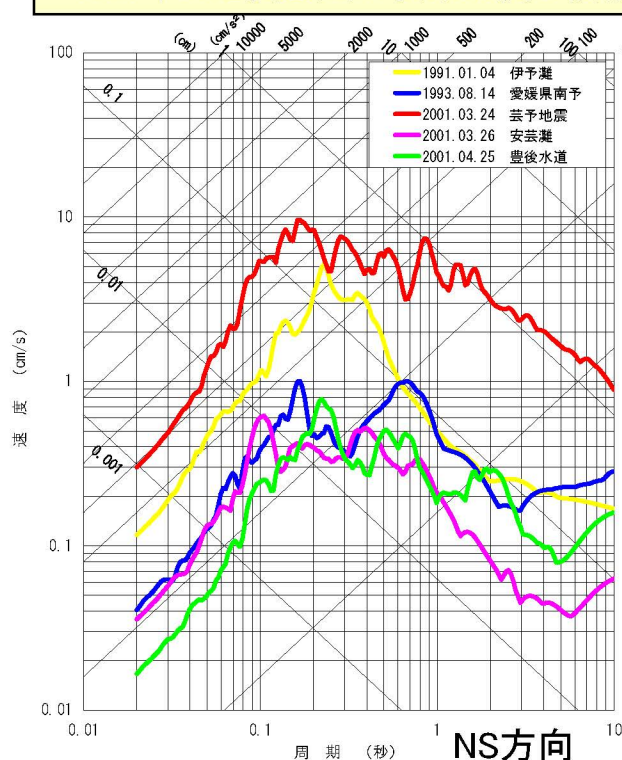
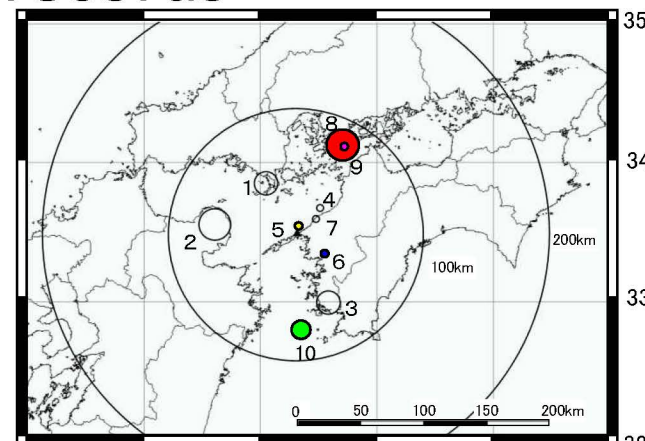
地震観測記録

5

Seismic ground motion records

【主な観測記録の応答スペクトル】

- 内陸地殻内地震の記録はないものの、海洋プレート内地震の記録は得られており、観測記録にはサイト特性が含まれる利点がある。
- 地震動に影響を与える要因としては、震源特性・伝播特性・サイト特性があるが、サイト特性を既知として評価できる経験的グリーン関数法は有用であると考えられる。
- 経験的グリーン関数法の要素地震としては、芸予地震の本震は規模が大きく適切ではないため、到来方向も勘案すると、2001年の地震●(9)および1991年の地震●(5)が要素地震の候補と考えられる。



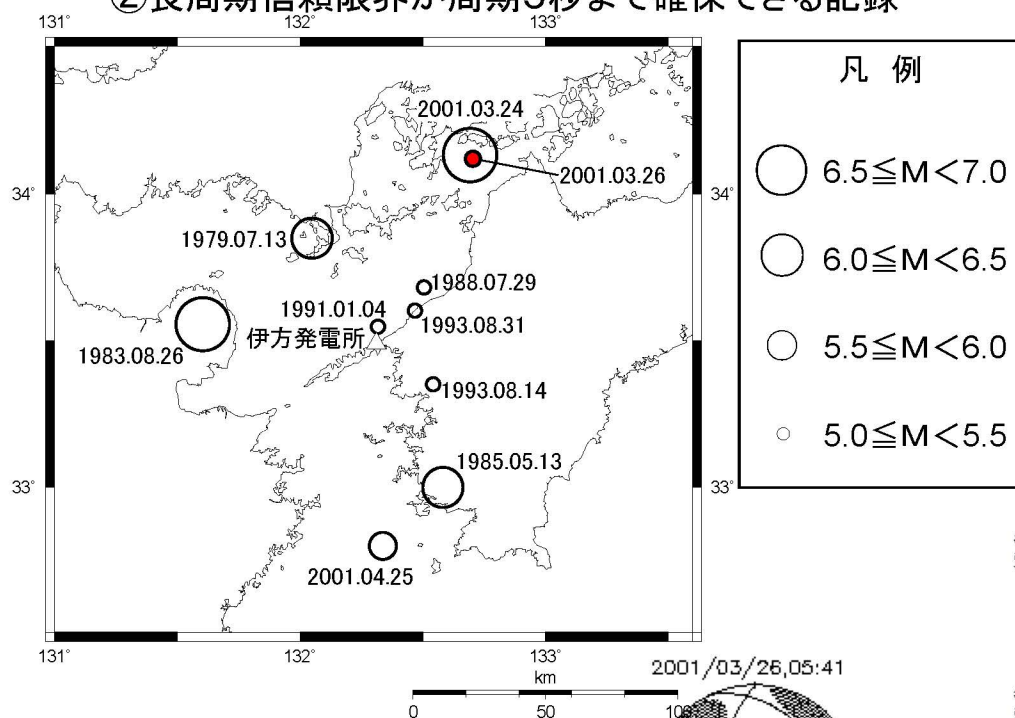
要素地震(経験的グリーン関数)

6

Element ground motion (empirical Green's function)

要素地震の選定および選定基準

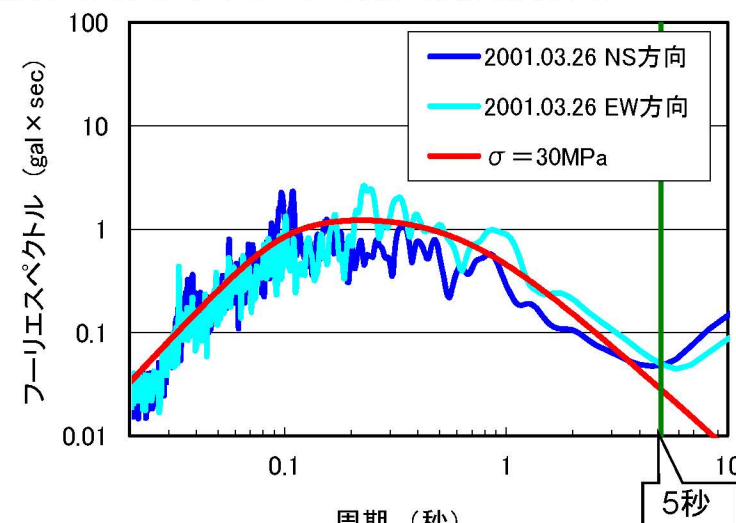
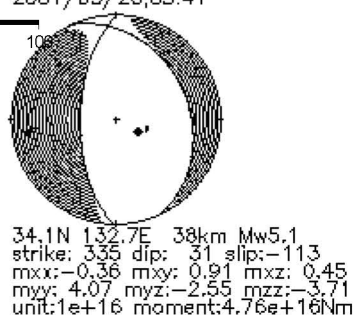
- ①伝播特性を勘案し、伊予灘側に震源がある地震
- ②長周期信頼限界が周期5秒まで確保できる記録



※1991年の地震

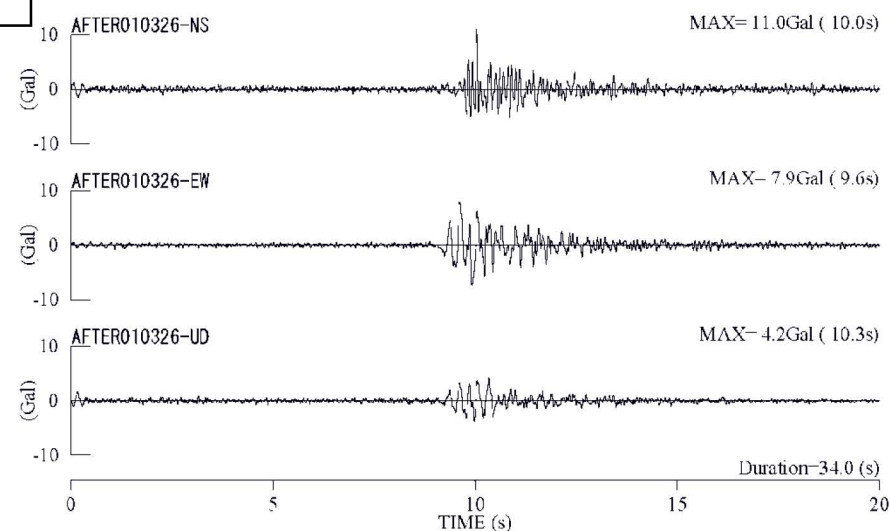
- ・公的機関から地震モーメントが定められていない
- ・長周期信頼限界が周期5秒まで確保できない

要素地震として選定せず



2001年3月26日の地震

要素地震の時刻歴波形



要素地震(経験的グリーン関数)

7

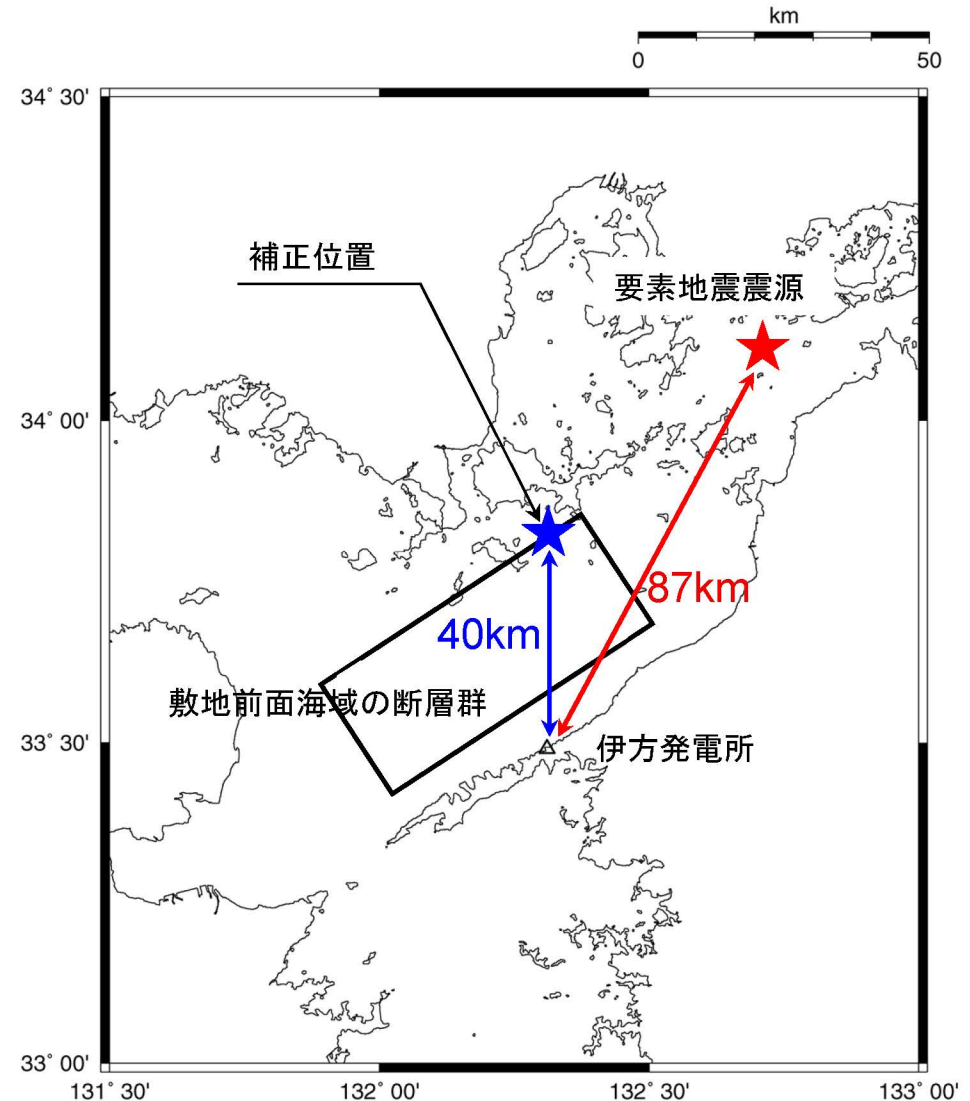
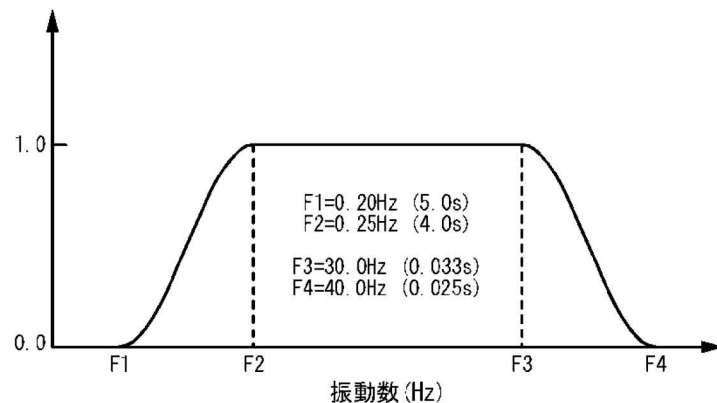
Element ground motion (empirical Green's function)

➤ 要素地震の補正(発生位置の補正)

本来の震源位置から想定する断層面内に幾何減衰と内部減衰を考慮して距離補正する。

Q値はサイトにおける海洋プレート内地震の観測記録から同定したものを使用する。

➤ 要素地震の補正 (観測記録に対するフィルター処理)



要素地震(経験的グリーン関数)

8

Element ground motion (empirical Green`s function)

➤ 要素地震の補正(媒質の補正)

観測地震は、対象地震とは媒質の異なるスラブ内で発生した地震であるため、密度やせん断波速度を考慮して、壇・佐藤(1998)によりスラブ内から内陸地殻内の媒質へ補正する

	スラブ内	内陸地殻内
せん断波速度	4.0km/s	3.5km/s
剛性率	$4.80 \times 10^{10} \text{N/m}^2$	$3.31 \times 10^{10} \text{N/m}^2$
密度	3.0g/cm^3	2.7g/cm^3
応力降下量	30MPa	20.7MPa
地震モーメント	$4.76 \times 10^{16} \text{Nm}$	$3.28 \times 10^{16} \text{Nm}$
断層面	$1.569 \text{km} \times 1.569 \text{km}$	同左
平均すべり量	40.3cm	同左

$$\sigma_d = \sigma_s \times \frac{\rho_d \cdot \beta_d^2}{\rho_s \cdot \beta_s^2} = \sigma_s \times \frac{\mu_d}{\mu_s}$$

$$M_{od} = M_{os} \times \frac{\rho_d \cdot \beta_d^2}{\rho_s \cdot \beta_s^2} = M_{os} \times \frac{\mu_d}{\mu_s}$$

σ_s : 応力降下量(スラブ内地震)

σ_d : 応力降下量(内陸地殻内地震)

ρ_s : 密度(スラブ内地震)

ρ_d : 密度(内陸地殻内地震)

β_s : せん断波速度(スラブ内地震)

β_d : せん断波速度(内陸地殻内地震)

μ_s : 剛性率(スラブ内地震)

μ_d : 剛性率(内陸地殻内地震)

M_{os} : 地震モーメント(スラブ内地震)

M_{od} : 地震モーメント(内陸地殻内地震)

当該課題に係る情報・データの多寡・質など ⁹

Quantity and quality etc. of information and data
related to HSI

- 地震観測は十分に行われており、要素地震として選定可能な地震観測記録が得られている。
- 要素地震の選定事例では、海洋プレート内地震であり、内陸地殻内地震に適用する場合は、媒質補正などを行っている。
- 内陸地殻内地震の要素地震も選定できることが望ましい。

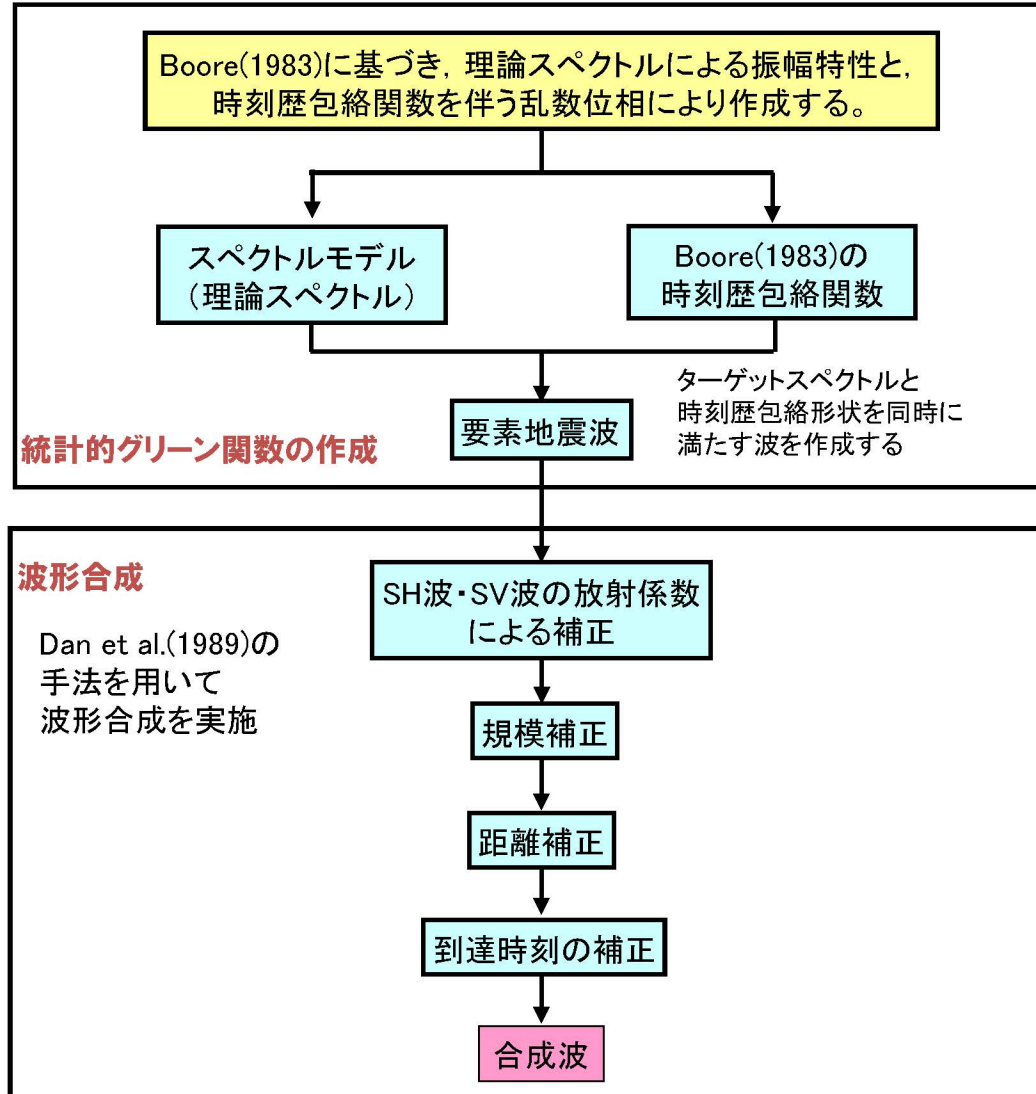
【別添資料】

要素地震(統計的グリーン関数)

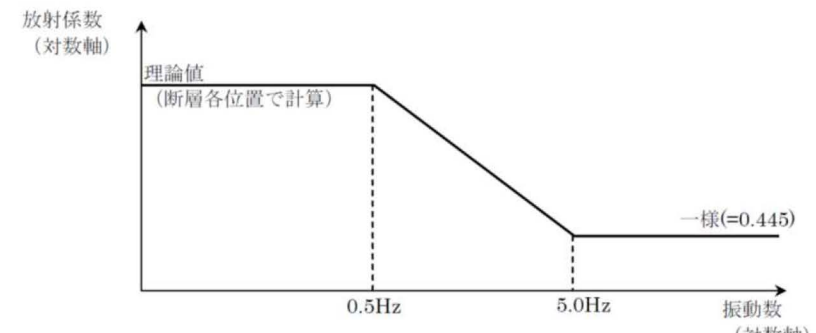
12

Element ground motion (stochastic Green's function)

統計的グリーン関数(要素地震波)の作成と波形合成



統計的グリーン関数は、敷地解放基盤表面の V_s が 2.6km/s と地震基盤相当であることから、解放基盤表面で作成する。
(地盤モデルと一次元波動論による解析は行わない)



放射係数の周波数依存特性の概要図

要素地震(統計的グリーン関数)

13

Element ground motion (stochastic Green's function)

○スペクトルモデル(水平)

下式に基づく点震源の理論スペクトルにより、敷地の解放基盤表面(せん断波速度2600m/s, 密度3.0g/cm³)で作成する。

$$A(f) = \frac{F}{4\pi\rho\beta^3} \times \frac{M_0(2\pi f)^2}{1+(f/f_c)^2} \times \frac{1}{r} \times 2 \times \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_{\max})^m}} \times e^{-\frac{\pi f r}{Q(f)\beta}} \times \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_s\beta_s}}$$
$$2\pi f_c = 2\beta \sqrt{\frac{\pi\lambda\sigma}{M_0}}$$

○パラメータ(敷地前面海域セグメントの場合)

F: S波の放射特性係数=1.0

(後段で、断層各位置と敷地との位置関係より算出した理論値を乗じて補正する)

ρ : 震源における地盤密度=2.7g/cm³

β : 震源におけるS波速度=3.5km/s

M_0 : 地震モーメント=4.0e+16Nm

f_c : コーナー周波数

r : 震源距離=40km

λ : 円形断層の半径=1.58km(断層モデルのメッシュサイズから決定)

σ : 応力降下量=7/16 × M_0 / λ^3 = 4.473MPa(円形クラック式)

$f_{\max}$: 高周波遮断振動数=6Hz

m : 高周波遮断後の勾配=4

$Q(f)$: Q値=150 $f^{0.75}$ 中村・植竹(2002)

ρ_s : 観測点における地盤密度=3.0g/cm³

β_s : 観測点におけるS波速度=2.6km/s

要素地震(統計的グリーン関数)

14

Element ground motion (stochastic Green's function)

○時刻歴包絡関数[Boore (1983)]

$$BENV(t) = C \cdot t^b \cdot \exp(-ct) \cdot H(t)$$

t: 時間

BENV(t): 包絡関数

H(t): ステップ関数

C: 基準化係数, $C = [e / (p \cdot T_w)]^b$, e: 自然対数

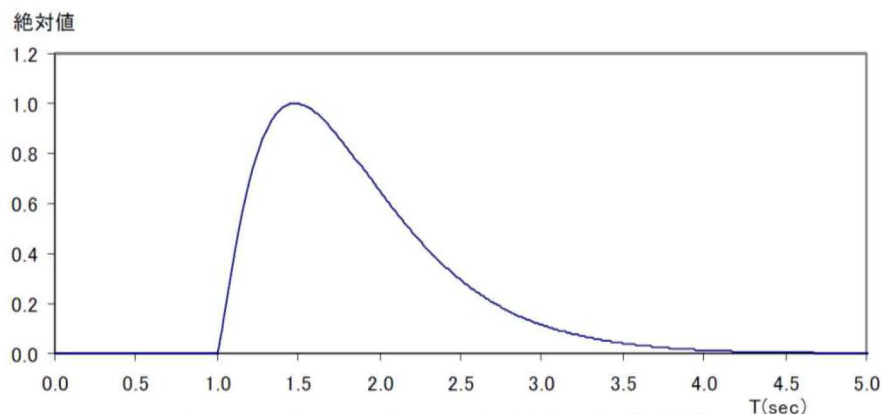
$T_w = 2T_d$

$T_d = f_c^{-1}$, f_c : コーナ一周波数

$b = -p \cdot \ln q / [1 + p(\ln p - 1)]$

$p = 0.2$, $q = 0.05$

$c = b / (p \cdot T_w)$

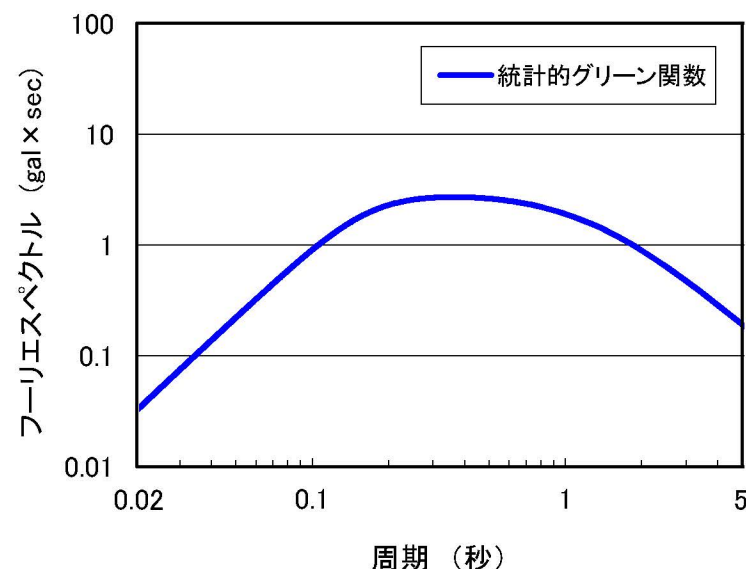


今回のパラメータによる時刻歴包絡関数
(先頭に1秒間の無信号時間を追加)

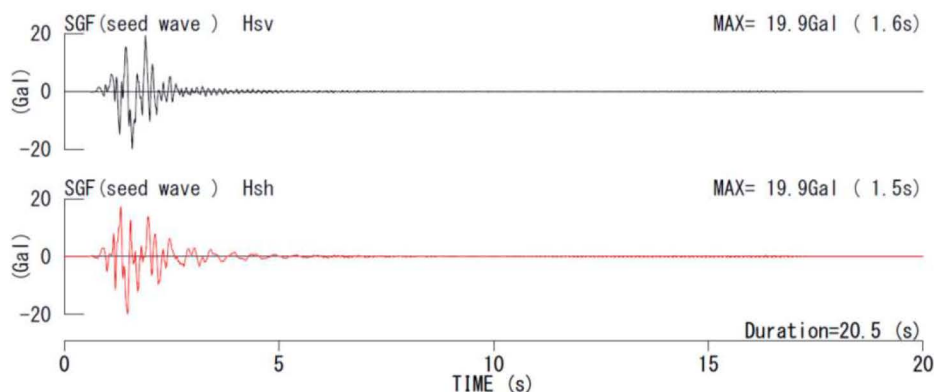
地震動の位相は乱数を採用するものの、変位波形がベル型となる位相を選択し、さらに変位の最大値発生時刻が平均的なものを採用した。(次ページに詳述)

○作成した統計的グリーン関数

フーリエスペクトル



時刻歴波形



要素地震(統計的グリーン関数)

15

Element ground motion (stochastic Green's function)

○統計的グリーン関数選定における判定基準

以下に示す香川(2004)の手法を参考にして、統計的グリーン関数の選定を行っている。

【香川(2004)の作成手順】

- ①ターゲット・スペクトルへの適合度と時刻歴包絡関数への適合度を同時に満たすよう繰り返し計算を行う。
- ②コーナー周波数 f_c よりも高周波数成分をハイカット・フィルターで落とし、積分して変位波形を作成する。
- ③そして、この変位波形の最大値発生時刻 T_{max} が、設定値から期待される時刻から大きくはずれるものを棄却する。ここでは、設定値の前後0.2秒を閾値とした。
「設定値から期待される時刻」としては、例えばBooreの包絡関数から算定される最大値発生時刻 T_p が用いられ、以下の条件を満たさないものを棄却する。

$$T_p - 0.2 < T_{max} < T_p + 0.2$$

- ④さらに、変位波形の最大値(D_{max} : 正の値)と最小値(D_{min} : 負の値)について、以下の条件を満たさないものを棄却する。

$$1 - \varepsilon < D_{max} / (D_{max} - D_{min}) < 1 + \varepsilon \quad (\text{ここで } \varepsilon = 0.2)$$

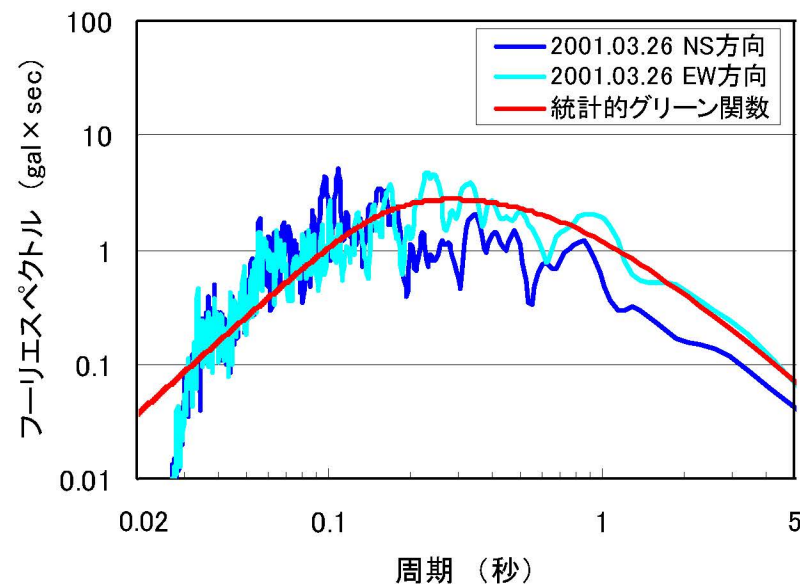
これにより、正の方向にベル型の形状を持つ変位波形のみが採用される。

要素地震の比較

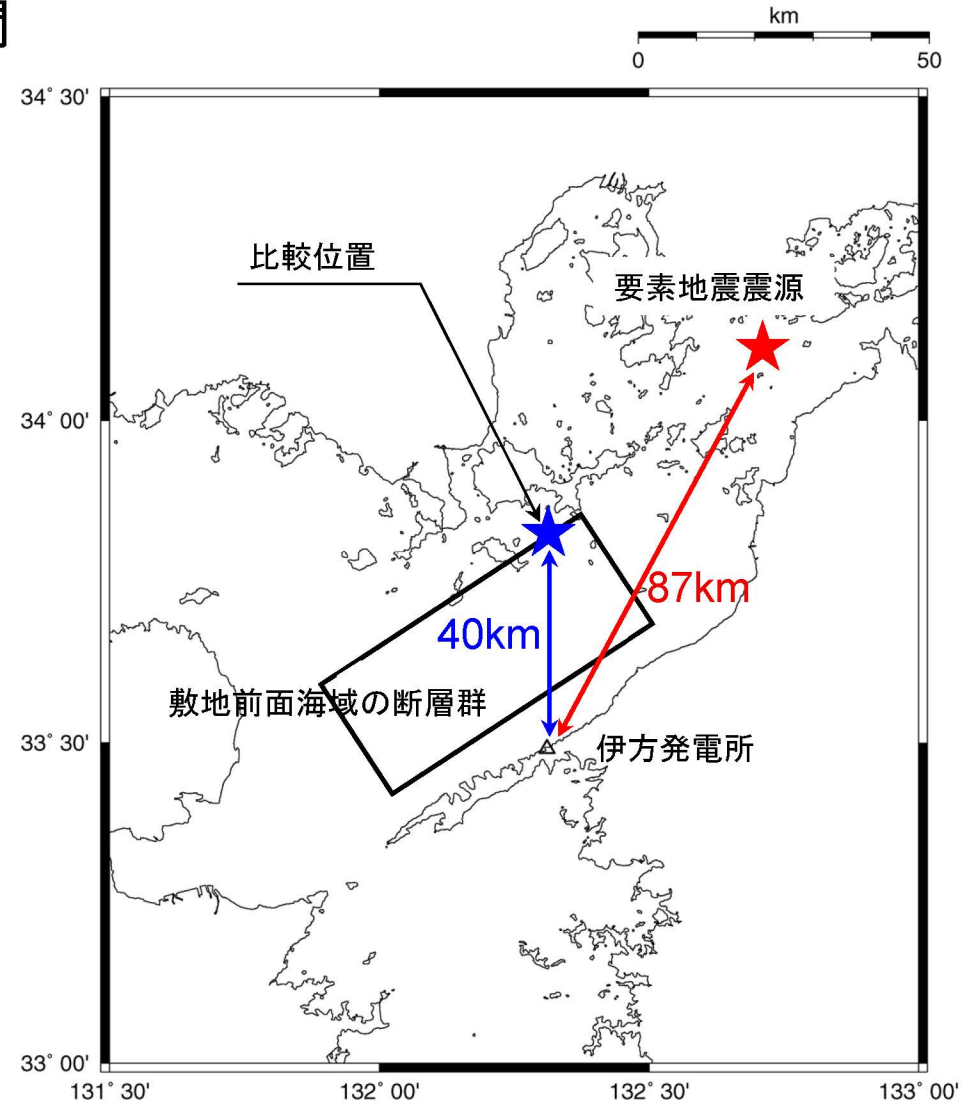
16

Comparison of element ground motions

要素地震に対して、経験的グリーン関数(2001年地震記録を補正)と統計的グリーン関数とを比較する。



NS成分の周期0.2秒以上を除けば、観測記録と統計的グリーン関数は整合的。



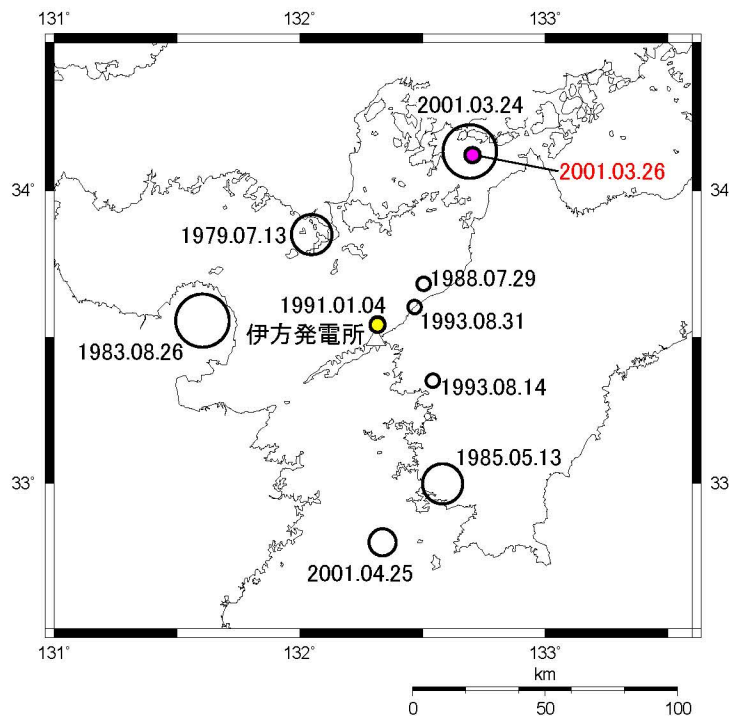
要素地震の検討

Element ground motions

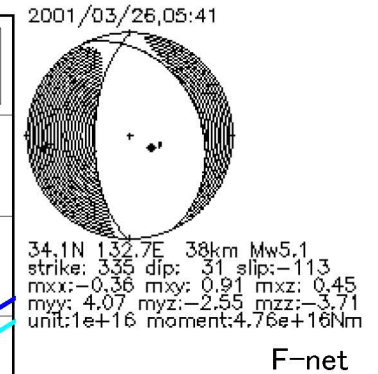
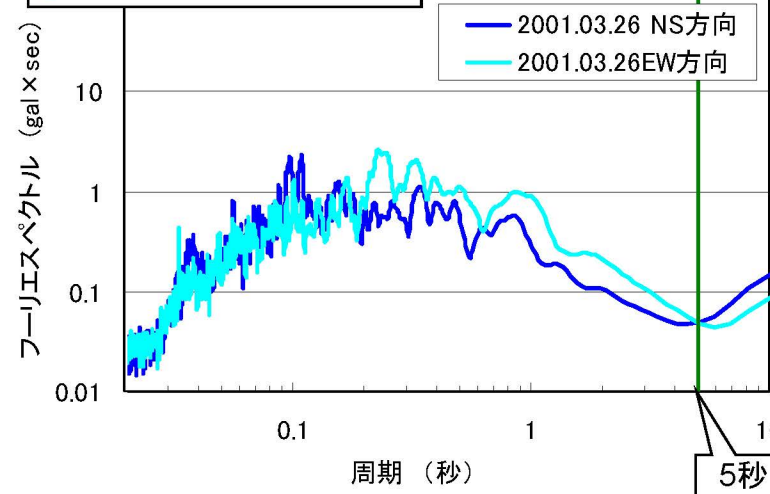
17

2001年と1991年の地震のスペクトルを比較して要素地震の検討を行う

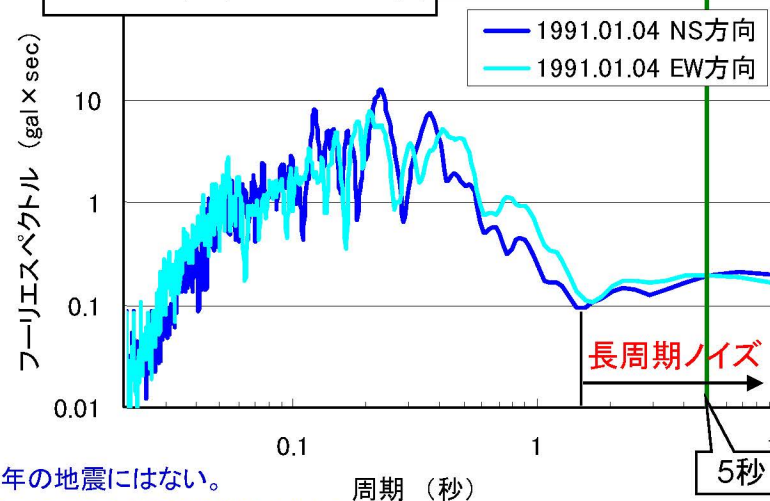
発生日時	深さ (km)	マグニチュード
2001年3月26日 ●	46	5.2
1991年1月 4日 ●	58	5.3



● 2001年3月26日の地震



● 1991年1月4日の地震



震源位置と深さから正断層タイプの地震と考えられる。
地震モーメントは公的機関から公表されていない。

どちらの地震も正断層タイプの地震と考えられる。

2001年の地震は公的機関で定められた地震モーメントがあるが、1991年の地震にはない。

また、2001年の地震は、長周期信頼限界が周期5秒まで確保できるが、1991年の地震は確保できない。

参考文献

18

References

- Boore, D.M. (1983): Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiation spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, No.6, 1865-1894.
- Dan, K., T. Watanabe and T. Tanaka (1989): A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of the Architectural Institute of Japan), No.396, 27-36.
- 壇一男・佐藤俊明 (1998): 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第509号, 49-60.
- 香川敬生 (2004): ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第2号, 21-32.
- 中村亮一・植竹富一 (2002): 加速度強震計記録を用いた日本列島下の三次元減衰構造トモグラフィー, 地震2, 54, 475-488.
- 四国電力 (2014): 審査会合資料, 平成26年11月7日.